

# 第 43 屆海洋工程研討會

## 論文集

桃園市 國立中央大學

2021 年 11 月 18 日、19 日

台灣海洋工程學會



# 第 43 屆海洋工程研討會

## 主辦單位

社團法人台灣海洋工程學會

## 執行單位

國立中央大學

國立中央大學地球科學學院

水文與海洋科學研究所

## 共同主辦

海洋委員會

經濟部水利署

科技部工程科技推展中心

桃園市政府海岸管理工程處



## 第 43 屆海洋工程研討會籌備委員會

榮譽主任委員：	蔡清標	社團法人台灣海洋工程會	理事長
	周景揚	國立中央大學	校長
主任委員：	吳瑞賢	國立中央大學	副校長
副主任委員：	許樹坤	國立中央大學(地球科學院)	院長
籌備會委員：	李明旭	國立中央大學(水文與海洋科學研究所)	教授
	錢樺	國立中央大學(水文與海洋科學研究所)	教授
	吳祚任	國立中央大學(水文與海洋科學研究所)	教授
	潘任飛	國立中央大學(水文與海洋科學研究所)	助理教授
	陳沛芫	國立中央大學(水文與海洋科學研究所)	助理教授
總幹事：	黃志誠	國立中央大學(水文與海洋科學研究所)	所長



# 海洋工程研討會論文集

Proceedings of Ocean Engineering Conference in Taiwan

## 學術出版委員會

### 主編(Editor)

林 呈 (C. Lin)  
國立中興大學土木工程學系  
[chenglin@nchu.edu.tw](mailto:chenglin@nchu.edu.tw)

### 委員(Editorial Board)

黃 國 書 (K.-S. Huang)  
國立成功大學水工試驗所  
[kshwung@thl.ncku.edu.tw](mailto:kshwung@thl.ncku.edu.tw)

吳 昫 達 (Y.-T. Wu)  
國立成功大學水利及海洋工程學系  
[yuntawu@gmail.tw](mailto:yuntawu@gmail.tw)

董 東 璟 (D.-J. Doong)  
國立成功大學水利及海洋工程學系  
[doong@mail.ncku.edu.tw](mailto:doong@mail.ncku.edu.tw)

黃 偉 柏 (W.-P. Huang)  
國立臺灣海洋大學河海工程學系  
[A0301@mail.ntou.edu.tw](mailto:A0301@mail.ntou.edu.tw)

黃 志 誠 (Z.-C. Huang)  
國立中央大學水文與海洋科學研究所  
[zchuang@ncu.edu.tw](mailto:zchuang@ncu.edu.tw)

張 志 華 (C.-H. Chang)  
私立嶺東科技大學資訊管理系  
[changbox@teemail.ltu.edu.tw](mailto:changbox@teemail.ltu.edu.tw)

謝 志 敏 (C.-M. Hsieh)  
國立高雄科技大學海事資訊科技系  
[chihmin\\_623@yahoo.com.tw](mailto:chihmin_623@yahoo.com.tw)

出版者：財團法人台灣海洋工程學  
會  
發行人：蔡清標  
地址：  
高雄市前鎮區中山二路2號13-5樓  
電話：07-5367317  
網址：<http://www.tsoe.org.tw>

學術出版委員會  
主編：林 呈  
地址：台中市南區興大路145號  
電話：04-22840437 轉 263

海洋工程研討會論文集每年出版一  
集。  
定價：\$1,000 元整。  
郵政劃撥：財團法人台灣海洋工程學  
會  
帳號：31455954





# 目錄

## A.水動力、潮波流及漂沙研究發展

- 1.以數值模式探討颱風期間淡水河流量對水位影響.....1  
顏辰宇、于嘉順、滕春慈
- 2.Observation of wind influences on near-surface turbulence in the coastal area .....5  
Nguyen、Thi To Van、Zhi-Cheng Huang
- 3.以 PIV 技術探討浮式翼板結構物引起的渦流能量特性之研究 ..... 10  
程皓、石瑞祥、翁文凱、李基毓、林志鴻、吳佳承
- 4.平滑底床上受潰壩作用下之擬海嘯石運移 ..... 16  
林敬樺、張義偉、陳冠宇
- 5.波浪通過固定型乾式人工植生浮島之波減衰效應試驗研究.....22  
藍元志、王柏鈞、林大為、李翌德、翁文凱
- 6.圓柱底床瞬間抬升之遠場波研究.....28  
張志華
- 7.以平滑粒子水動力法模擬潰壩式湧波於光滑斜坡之溯升.....32  
張鈞程、吳昀達
- 8.潰壩式湧波於粗糙斜坡溯升之試驗研究.....38  
黃郁哲、吳昀達
- 9.孤立波於泥質海床上過直立式圓柱之數值研究.....44  
李崧璋、郭榮煉、羅弘岳
- 10.臺北港資料浮標監測剖面流場特徵之初探.....50  
吳立中、饒國清、羅冠顯
- 11.波束成型演算法應用於流場解析之研究.....55  
程嘉彥、黃郁軒、陳少華、余昭明、徐堂家
- 12.數值模式應用於峽谷異重流之探討.....61  
蔡聖德、陳佳琳
- 13.孤立波於 1:3 斜坡上溯升過程之自由表面運動特性探討.....67  
林呈、莊博宇、高明哲、羅立芳、徐瑋崙
- 14.南沙水文浮標觀測系統建置.....73  
傅科憲、林昆毅、王博賢、李孟學、卓訓杰、李宜芳、楊文昌、鮑俊宏
- 15.異常波浪與群波現象關聯性之研究.....77  
李堉辰、陳盈智、董東璟
- 16.海灘沖刷帶的波浪溯升與溯降之 UAV 影像分析.....83  
莊士賢、周嘉銘、陳禹儒

17.應用深度學習自動識別光學影片中離岸流.....	89
莊士賢、徐新綸、陳美慧、劉正千、鍾曉緯	
18.太平島海域波浪模擬與分析.....	95
李孟學、傅科憲、楊文昌、江朕榮、卓訓杰	
19.GNSS 浮標應用於離岸與近岸觀測之最新發展.....	101
林演斌、施孟憲、黃清哲	
20.相位陣列海洋雷達合成海流之初步探討.....	107
陳少華、程嘉彥、徐堂家、黃郁軒、陳世明	
21.近岸海域水質連續監測與異常警報設計.....	113
陳觀印、鄭安、錢樺、林源煜	
22.以波流耦合數值模式探討臺灣的異常巨浪案例.....	119
王啟竑、于嘉順、林芳如、朱啟豪	
23.應用數據插值經驗正交函數重構臺灣周圍海域向日葵衛星海溫資料.....	125
楊一中、盧靖元、鄭嘉豪、曾鈺皓、黃世任、李永翔、楊傳琮、張育承、何宗儒	
24.大堀溪及觀音溪之感潮河段特性研究.....	131
魏世聰、錢樺、張煥盟、林立昌	
25.MUSIC 與 BF 演算法應用於高頻陣列雷達之比較.....	137
陶瑞全、錢樺、魏世聰、鄭安、李政達、蔡立宏、李俊穎、林受勳	
26.異常海象引致船難事件之研究.....	142
陳盈智、董東璟、蔡政翰	
27.東吉嶼海域海表溫度驟降成因探討.....	148
范揚洺、陳聖學、傅科憲、王博賢、楊文昌	
28.應用改良型參數化颱風及倒傳遞類神經網路系統進行長前置時間暴潮預測.....	154
趙偉廷、楊智傑	
29. 離岸風場季風及颱風下之極端 風速條件分析研究.....	160
趙偉廷、楊智傑、許泰文	
30.以 Telemac-Mascaret 數值模式 模擬南澳漁港漂砂問題改善研究.....	166
林于凱、李基毓、石瑞祥、翁文凱、張友力	
31.Variability of Suspended Sediment in the Intertidal Zone with the Presence of Bottom Algal Reef.....	172
Ly Trung Nguyen、Zhi-Cheng Huang	
32.三條崙沙洲海域地形受人工迂迴供砂之短期影響.....	177
張志強、錢樺	
33.離岸風機建置之臺中港鄰近海域地形變化分析.....	184
洪維屏	
34.寬幅潮間帶內與港口毗鄰海灘之沖淤.....	189
莊文傑	

35.近景攝影測量於實驗室地形量測之應用 .....	195
施博泰、何宗浚、黃國書、蕭冠宇	
36.雲嘉海域長期海岸變遷趨勢探討 .....	201
陳盈圻、盧韋勳、江文山、楊文昌、卓訓杰	
37.外傘頂洲長期變遷趨勢模擬之水動力影響機制分析 .....	207
盧韋勳、江文山、蕭士俊、卓訓杰、陳盈圻、楊文昌	
38.林口電廠鄰近海岸侵淤成因探討 .....	213
吳芬華、許國強、陳榮華、方聖茶、何家榮、江文山、許泰文	
39.以漂沙潛勢變化探討臺北港興建對鄰近海域之影響 .....	219
洪維屏、黃瑋華、郭少谷、賴彥廷、朱志誠、陳蔚瑋	
40.海上船舶事故風險評估及分析 .....	225
陳蔚瑋、張憲國、黃茂信、李俊穎、劉勁成、曹勝傑	
41.微波雷達觀測海流資料分析流程 .....	231
陳銘誼、錢樺、鄭皓元	
42.潮汐作用下高美濕地水質變化特性研究 .....	237
溫志中、葉秀貞、蔡涵任、謝智文	
43.以臺灣海域三維海流作業化預報模式探討表層通量對表層溫鹽之影響 ...	242
周姿吟、于嘉順、陳維翔、林芳如、滕春慈	

## B. 海岸帶永續治理

44.應用模糊層級分析法確立臺灣智慧港發展評估因素 .....	247
林聖哲、張憲國	
45.海域遊憩環境風險評估 .....	253
何雅惠、李敏豐、陳沛宏、廖建明、董東璟	
46.近體校正法應用於空拍熱顯像精度之初探 .....	257
王星宇、方惠民、蘇育弘	
47.臺灣船舶事故與油污染管制策略探討 .....	262
曾柏興	
48.應用衛星與航空偵測油污技術滾動式預測海域油污擴散 .....	268
邱啓敏、莊士賢、董東璟、吳立中、范揚沼、黃清哲	
49.港區船舶能源使用及空氣污染排放偵測技術評估之研究 .....	274
李俊穎、許義宏、林啟燦、葉金課、翁健二	
50.海岸廢棄物快篩技術與應用 .....	280
胡介申、顏寧、徐季玄	
51.UAV 攝影測量應用於表面水質辨識之初探 .....	284
方惠民、王星宇、楊一中、陳育鋒、呂晏欣	
52.智慧港口之海氣象及應變即時系統 .....	290
林騰威、蔣敏玲、林雅雯、賴志炫	

53.七股瀉湖內牡蠣礁成長研究 .....	296
	黃翔瑜、劉景毅、張引
54.海難漂流搜索之海流數據選用指南芻議 .....	301
	賴堅戌、呂宜潔、陳奕光
55.Detection of bottle marine debris on Dayuan beaches using unmanned aerial vehicles and machine learning techniques .....	307
	陳氏玲慈、黃志誠
56.微生物誘導碳酸鈣沉澱(MICP)技術應用於抑制海岸侵蝕試驗研究 .....	313
	柯鈞瀚、蔡清標、林佑任、葉錦華
57.對稱及非對稱參數化風場模式評估 .....	319
	張憲國、陳蔚璋、劉勁成、王順寬
58.無人飛行載具於近岸觀測應用初步探討 .....	325
	王星宇、楊一中、方惠民、張崑宗
59.人工智慧演算法在瘋狗浪機率預警系統建置之研究 .....	331
	陳威成、陳盈智、陳憲宗、董東璟
60.氣候變遷下之海岸地區複合型災害風險評估與調適管策略研究 .....	337
	簡連貴、徐浩然、李昱錡
61.以單位海嘯法建置屏東外海機率式海嘯波高之研究 .....	343
	陳彥龍、沈煜修、吳漢倫、蕭士俊
62.裂流模擬與影響因子之評析 .....	349
	王敘民、邱啟敏、董東璟、蔡政翰
63.臺灣海域作業化水質模式建置 .....	355
	江朕榮、許弘莒、陳陽益、楊文昌、林昆毅、李孟學

## C. 港灣、海域及海岸工程實務

64.運用視覺化電子地圖整合港灣環境資訊之輔助決策模式(II) .....	361
	林騰威、劉清松、林珂如、林雅雯
65.應用自動化無人機巡檢繪技術於海港環境監測評估 .....	367
	洪維屏、甘翊萱、林彥廷、黃春嘉、李政軒、韓仁毓
66.可調式張力腿浮動平台之運動分析 .....	373
	張博維、梁乃匡、陳吉紀、胡聰明、楊瑞源
67.台灣港區海氣象資料品管檢核之研究 .....	379
	黃義傑、羅冠顯、許文陽
68.海洋大數據之整合加值-全國海域風波潮流統計年報製作(以 2019 年為例) .....	385
	呂宜潔、楊文昌、邱永芳
69.應用無人機檢測海堤消波塊之研究 .....	391
	方惠民、江宗翰、蕭松山、劉乃慈、蔡秉杰

70.花蓮港颱風波浪之數值模擬.....	397
	周立翔、夏武成、蘇仕峯
71.以水工模型試驗暨數值模式探討臺中港外港區擴建變化研究.....	402
	李政達、林受勳、張君名
72.以 By-passing 港型改善漁港淤沙案例初探.....	408
	陳柏旭、陳昌生、許永城、陳仕元
73.氣候變遷條件下海岸結構物防護標準檢討之初探.....	413
	王星宇、蕭松山、林鼎傑、張博涵
74.轉爐石及氣冷高爐石應用為填料時對混凝土工程性質比較研究.....	418
	李賢華、陳冠甫、黃煒智、李育成、徐泓璋、郭馨、甄亮潔、詹鎮鋒
75.層析成像分析法於水下單側震測法資料之可行性評估.....	423
	林俊宏、洪湘詒
76.離岸基礎在互層非均質黏性土壤之極限承载力.....	428
	紀昭銘、黃普源、林正山、許盈松、劉建榮
77.海域救助人員職能之發展與探討.....	434
	張珮綺、謝馥蔓、陳思樺
78.離岸風電水上支撐結構檢修人員之職能分析.....	440
	張珮綺、謝馥蔓、黃千綺
79.基於 CDIO 之教育框架在新工程教育方法實驗與建構計畫來建立海洋工程教育.....	446
	紀昭銘、蕭兆昇、林正山、廖為忠
80.應用有限元素法分析矩形聲納陣列效能與結構.....	452
	蔡明廷、邱永盛
81.三模式無人海洋載具之系統架構概念設計.....	458
	陳家昊、陳信宏、周佑誠
82.可加壓充水阻抗管的開發與運用.....	464
	沈宗佑、鐘冠閔、黃清哲
83.衛星影像灘線 AI 辨識技術研發.....	470
	陳蔚瑋、張憲國、張家義、楊文昌、卓訓杰、李孟學
84.投放式溫深儀-XBT 終端速度之模擬探討.....	476
	林世哲、李芳承、曾以帆
85.基於視覺智能感知架構應用於自主水下載具之實現與驗證.....	482
	余昭明、林宇銜
86.運用多角度反射係數進行實海域海底沉積物性質分析初探.....	488
	黃滄介、邱永盛
87.離岸風電場生態保育環境之水下噪音分析.....	494
	鄭凱文、邱永盛、張元櫻
88.自製水下電聲換能器陣列特性探討及合成孔徑法之應用.....	499

	鄒宇杭、邱永盛	
89.水下聲學偵測浮標設計與建置.....	503	陳琪芳、洪靖唐、洪徐永、張祐誠、吳昭蓉
90.超短基線輔助之感測資料融合於 AUV 定位估算.....	508	鄭鈺翰、陳信宏、周佑誠、王朝欽
91.應用基於深度學習與顏色特徵之潛水員偵測於 AUV 潛水員追隨控制 ....	514	何鎮守、周佑誠、陳信宏、謝孟璋
92.自主巡航水下滑翔機實海域實驗.....	520	張家溥、宋雨霖、陳柏棋、張旭光、蕭毓宏、王兆璋
93.以數值模式探討感潮河段半鹹水淡化.....	524	東佳穎、于嘉順、楊宗翰
94.應用聲牆法反向導引誤入港區鯨豚出海之方案探討.....	530	張引、任一凡
95.高雄港船舶進出港機率探討.....	534	蔡立宏、羅冠顯、陳子健
96.臺北港港區航線波浪展示系統建立.....	540	胡凱程、羅冠顯、顏厥正、李芝瑩、許文陽、楊瑞源
97.台灣湧升流預報系統發展建置與系統較驗.....	546	徐誌壕、于嘉順、陳琬婷
98.提升海岸地區工程結構耐久性的策略與技術-以許厝港自行車景觀大橋為例.....	551	陳彥睿、陳建中、巫秀堅、林庭輝、江正宏
99.海域金屬材料腐蝕因子調查研究.....	556	溫志中、謝智文、葉秀貞、蔡涵任、羅建明

## D. 海洋能與離岸風力

100.離岸風電機在地震下的動態反應.....	563	黃勝翊
101.生物附著於海上箱網繫纜及網袋之 繫纜疲勞分析.....	568	唐宏結、江文山、冉繁華
102.模型箱網斷纜試驗.....	574	唐宏結、姚皓晟、楊瑞源
103.海上通訊浮筒研發.....	580	李治廣、許文陽、黃子鴻、張碩軒、徐仕昇
104.駁船式浮動平台於波流作用下繫纜失效後運動行為響應.....	586	姚皓晟、陳俐妤、楊瑞源
105.The Influence of Breaking Wave Locations to The Slamming Wave Load on The Offshore Wind Turbine Foundation in Shallow Water.....	592	

Ahmad Darori Hasan、Yu-Hsien Lin

106. The Simulation of a DeepCwind Semi-Submersible Floating Offshore Wind Turbine with Mooring Systems in a Dynamic Wind Condition..... 598  
黃彥儒、林宇銜
107. 非線性波浪作用下洋流發電機組受力之試驗分析..... 604  
陳陽益、湯智誠、陳信宏、賴明松、許弘莒
108. 震盪水柱波能轉換系統結合離岸風機套筒式基礎發電效益評估試驗研究..... 610  
李賢華、溫辰諺、陳冠甫
109. 波流作用下海洋結構物保護工之試驗研究..... 616  
陳信宏、楊瑞源、萬竣翔、賴明松、吳恩綺
110. 大水深海域離岸風場開發優先次序空間分析..... 622  
簡連貴、卓可威、廖嘉宏、劉為朋
111. Lidar observation of the wind speed profiles for the northeast monsoon ..... 628  
Yuan-Shiang Tsai、Chih-Min Hsieh、Wen-Chang Yang
112. 基隆海檻測試場址潮流能資源調查..... 634  
陳勇隆、臧效義、羅耀財、王昱善、陳煥儒、陳建宏
113. 以 AI 技術輔助進行水下地貌辨識與潛在危害分析之可行性研究..... 640  
曹士亮、林俊宏、田文敏、葉昌鑫、許哲彰
114. Aerodynamic Modeling of the NREL 5MW Wind Turbine Using CFD Simulation ..... 646  
陳璿光、林宇銜、蔡原祥
115. 風洞實驗量測紊流邊界層流作用下前後排列之風力機群尾跡流特性..... 652  
蕭葆義、呂宣翰、曹柏暉、許泰文

## E. 桃園海岸特輯

116. 桃園市河川出海口之生態調查及環境教育推廣..... 659  
陳柏蓀、王彙喬、陳奕榮、葉翰揚、冉繁華、李孟洲
117. 草漯沙丘季節性地形變化監測與分析..... 665  
呂紹平、林宗儀、王雅慧
118. 桃園海岸跨域平台運作機制..... 671  
巫思佩、蕭瓊茹、王雅慧、林立昌
119. 海岸治理策略及經驗分享..... 675  
林立昌、林錫聰、王雅慧、蕭瓊茹、巫思佩
120. 海岸巡護隊志工制度提升海岸清理工作績效之探討..... 680  
林智明、陳政蓉、江佩儒
121. 新屋濱海自然生態環境 APP 推廣之經驗分享..... 684

	戴妤臻、江佩儒、張語珊、張哲岳	
122.許厝港濕地復育成效之探討.....	林志融、李培芬、曾威捷、江佩儒、張哲岳、林哲宇	686
123.開放性模式預報與現場觀測資料之比較—新竹風浪特性的探討.....	林峻宇、黃志誠、林伯謙	690
124.桃園海岸垃圾密度調查之探討.....	林伯謙、黃志誠、沈彥豪、鄧鑄源	694
125.桃園新屋石滬無人空拍機調查分析.....	劉孟樵、黃志誠、王雅慧	700
126.以非結構性網格模式探討三接港於桃園海岸之影響.....	藍亦汝、黃志誠	705
127.海域水質監測網建構之探討.....	方天熹、戴仕彥、林立昌、許嘉麟	711
128.桃園海岸地區水域微塑膠調查之探討.....	邱申富、洪以柔、許嘉麟、林立昌	716
129.應用無人機空拍技術於桃園海岸帶的調查.....	林立昌、黃志誠、葉正陽、許嘉麟	722
130.桃園海岸潮間帶礁體棲地的監測:無人機影像的應用.....	黃志誠、葉正陽、周船舶、鄧鑄源、劉孟樵	728
131.應用全潮測量於感潮濕地管理之探討-以許厝港濕地為例.....	黃國文、李豐佐、賴進松、楊欣樺、林立昌	734
132.應用生態工法於濕地復育營造之探討-以許厝港濕地為例.....	林立昌、巫秀堅、林庭輝、李冠頡、江正宏	738
133.桃園市海岸場館活化轉型為里海環境教育設施場所之地方實踐-以桃園海岸五大環境教育場域為例.....	林獻祥、江佩儒、徐榮崇、簡雯潔	741
134.探討海洋文化景觀傳承與永續經營之策略-以新屋石滬為例.....	李悅瑞、林立昌、王雅慧、吳亭、呂蘋恩、呂儼展	746
135.近十年來桃園河川與海岸水體品質探討.....	陳平、周瑋珊、康兆凱	752

## F. 劉院士榮譽特輯

136.長衝程造波機應用於連續孤立波生成、演化及溯升之試驗研究.....	吳昫達、劉立方	759
137.山崩海嘯之半解析解及其於 1998 年巴布亞紐幾內亞海嘯之應用.....	羅弘岳	765
138.Generation and propagation of non-uniform bores and their flooding characteristics.....		771



	Ignacio Barranco
139.Comparison between two- and three-dimensional Navier-Stokes modelling for swash flows .....	774
	Pablo Higuera
140.A Comparative Study of Coastal Inundation by Typhoon Hato (2017) and Typhoon Mangkhut (2018) .....	777
	Jie Yang、Linlin Li、Kai Meng Mok、Philip Li-Fan Liu
141.A semi-analytical model for water waves through suspended canopies .....	780
	Jie HU、Xiaochun TANG、Pengzhi Lin、Philip Li-Fan Liu
142.内孤立波作用下海床土体动力响应与剪切破坏研究 .....	783
	童林龙
143.Turbulence structure during uprush-downwash interaction of consecutive solitary waves .....	786
	In Mei Sou
144.ISPH simulation of wave breaking with k-e turbulence model .....	789
	Dong Wang、Philip Li-Fan Liu
145.Depth-integrated wave-current models .....	790
	Zhengtong Yang
146.The horizontal velocity component of finite amplitude solitary wave: comparison of theoretical solutions and HSPIV experimental results .....	795
	Yufei Wang
147.以波潮耦合模式探討輻射應力對臺灣東北岸風暴潮之影響：以 2015 年蘇迪勒和杜鵑颱風為例 .....	798
	蔡育霖、吳祚任、劉立方
148.Modification of Mw 9 Tsunami Wave Impacts due to Dongsha Atoll in South China Sea.....	804
	Jinghua Wang、Philip Li-Fan Liu
149.A Machine Learning Approach for Geometrical Volume of Fluid Methods: Application to Water Waves .....	810
	Asim Önder、Philip Li-Fan Liu
150.Recent investigation on the protective function of mangroves against coastal waves.....	816
	Che-Wei Chang

151. An Update for Le Mehaute's Diagram .....	819
Kuifeng Zhao、Philip Li-Fan Liu	
152. 滨海断裂带历史大地震海啸影响及警示 .....	822
李琳琳、邱强	
153. 以影响强度法分析重建 1845 雲林口湖風暴潮事件 .....	825
范子軒、許家鈞、吳祚任、林君蔚	
154. Developing a Three-Dimensional Discontinuous Bi-viscous model to study Landslide Tsunamis.....	831
Tso-Ren Wu、Thi-Hong-Nhi Vuon、Chun-Wei Lin、Chun-Yue Wang、Chia-Ren Chu	
155. Numerical Simulation of Landslide Tsunamis using Bingham Model .....	837
Thi-Hong-Nhi Vuong、Tso-Ren Wu、Chun-Yue Wang、Chia-Ren Chu	
156. 三維流固耦合模式開發：空拋浮標入水及隨波模擬 .....	843
黃逸軒、吳祚任、錢樺、王仲宇、朱佳仁、張煥盟	
<b>作者索引</b> .....	849
<b>關鍵詞索引</b> .....	855

## A. 水動力、潮波流及漂沙研究發展



# 以數值模式探討颱風期間淡水河流量對 水位影響

顏辰宇<sup>1</sup> 于嘉順<sup>1</sup> 滕春慈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立中山大學海洋環境及工程學系

<sup>2</sup>中央氣象局海象測報中心

## 摘要

臺灣因為位處西太平洋颱風易生成區域，颱風的風場變化會對沿海區域產生暴潮影響，沿海區域水位增長，加上上游流量增加，使大量的水堆積於河口地區。為探討淡水河流域在颱風期間潮汐及河道流量之間的關係，本研究將使用 SCHISM 水動力模式來做淡水河感潮河段以及河口區域水動力模擬，並透過 2016 年梅姬颱風做為案例，耦合風場模組來模擬颱風期間風場所帶來的影響。根據結果顯示，潮汐訊號越往上游處振幅越小，且基隆河潮汐訊號僅到汐止為止，這與先前研究結果一致。在上游流量甚大的情況下，流向在河口不會改變，表示潮汐訊號止於河口無法進入河道內部，並且在河口地區呈現水位堆高現象，河道與河口潮汐訊號相比延遲更加明顯。

關鍵字：淡水河、颱風、SCHISM、流量

## A Numerical Study on the interaction between the tides and the flood flows during typhoons

Chen-Yu Yan Jason C.S.\* Chuen-Teyr Terng

\* Assistant Professor, Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-Sen University

## ABSTRACT

Taiwan is often threatened with the high frequency of typhoon events. During the typhoons, the large amount of water from upstream and river catchment areas caused by heavy rainfalls and water levels raises as consequence. This study aims to study the interactions between tides and flood flows during typhoons in the Tamsui River. The research used SCHISM to simulate hydrodynamics of the Tamsui River and the effects of typhoons coupled with wind field model. According to the results, the tidal effects gradually decrease from downstream to upstream and finally end up at Xizhi. The modeled flows and water levels matched with observation data as well. Results indicate while the large water flows happened, the flow directions were off coastal thought tides still kept pushing and accumulating at estuary, which means flood flow dominated the flow direction.

Keywords : Tamsui River, Typhoon, SCHISM, Rate of discharge

## 一、研究目的

臺灣位處於環太平洋西岸，正是颱風生成熱區，一到颱風季節，伴隨而來的是暴風及暴雨，造成國家經濟以及人民極大的危害。颱風發源於熱帶海面，由

於海水表面溫度提高，導致大量海水蒸發至大氣之中，在周圍形成低氣壓中心，隨著氣壓的改變及科氏力的影響，湧入低氣壓中心的風開始轉動，在北半球形成一個以逆時針旋轉的風場，即是熱帶氣旋，在經過長時間吸收水氣後，最終形成颱風，颱風所帶來的

強降雨會使河道水流暴增，而強風則會使外海產生湧浪，研究指出兩者在河口區域交會造成河水無法排出，進而形成溢淹現象(Carine et al. (2015))。

台灣河川因季節降雨關係而有明顯枯水期、豐水期之分，北臺灣因四季皆有雨，使淡水河有著穩定的流量，又因淡水河坡度平緩，受到海洋潮汐影響頗大，經台灣水利環境科技研究發展教育基金會 (2005) 監測得出感潮河段一路延伸至基隆河上游汐止為止，為臺灣最長感潮河段。

本研究將透過 SCHISM(Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model)數值模式(Zhang et al., 2016)計算淡水河流域感潮河段以及淡水河口變化，並透過資料分析，探討各因子間的相關性。

## 二、模式介紹及設定

本研究水位及流量實測資料使用歷年經濟部水利署《水文年報》的日平均流量資料，再透過 SCHISM 數值模式進行模擬，模式使用非結構往個計算模擬區域，並以半隱式有限元素法來解析水動力方程式，其中使用布式近似(Boussinesq approximation)以及靜水壓近似(hydrostatic approximation)來計算三維淺水方程式，再以傳輸方程式(transport equations)來計算溫度及鹽度，SCHISM 的計算主要變數包括三維流場、水體自由液面高度、溫度以及鹽度，在卡氏座標中，方程式以下列表示：

連續方程式，用以求得水位高度：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} u \, dz = 0$$

動量方程式，用以求得流速關係：

$$\frac{Du}{Dt} = F - g\nabla\eta + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

F 可以下式求得

$$F = -fk \cdot u + ag\nabla\hat{\psi} - \frac{1}{\rho_0} \nabla\rho_A - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \nabla\rho \, d\xi + \nabla \cdot (\mu\nabla u)$$

SCHISM 模式使用非結構網格計算模擬區域，使網格更貼近沿岸地形，更容易解析海洋與河道交界之河口、港灣及潟湖等不規則地形，並以半隱式有限

元素法來解析水動力方程式，此法可同時計算連續方程式以及動量方程式，並且擺脫 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy Condition)條件的限制。

研究區域網格範圍為北緯 24.5 度至 26 度，東經 120.5 度至 121.75 度，研究區域總節點數約 8.6 萬點，網格數約 16 萬格，如圖 1 所示，河道區域設定三個入流點(藍色箭頭)、四個斷面觀測點(紅色矩形區域)、五個水位觀測點(黃色點)以便後續分析，如圖 2 所示。

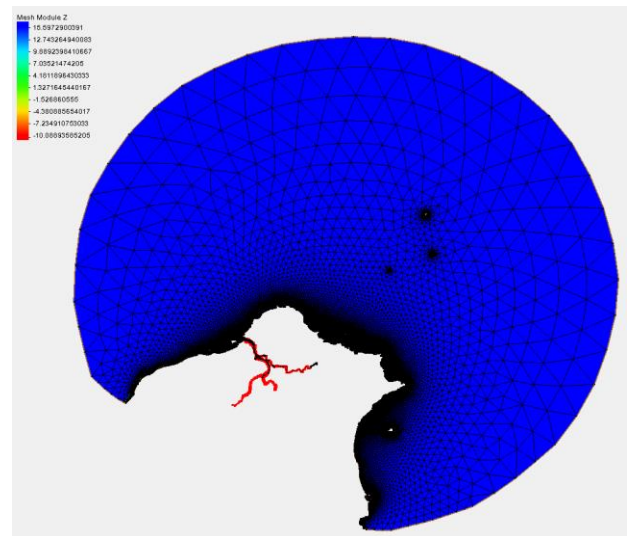


圖 1 研究區域網格分布圖

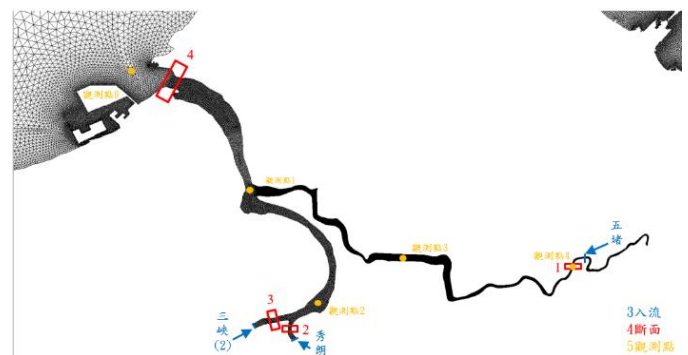


圖 2 模式參考點位置

### 三、案例模擬結果

梅姬颱風侵台路徑為貫穿臺灣中部的颱風，梅姬颱風接續在馬勒卡颱風之後，故在模擬期間有馬勒卡颱風外圍環流所帶來降雨從斷面流量時序圖(圖3)分析，在馬勒卡颱風過境及梅姬颱風登陸之間，三斷面流量極小，在梅姬颱風登陸後9月26日起流量激增，基隆河在一日之內流量暴增至800CMS，新店溪則增加至1200CMS，斷面3則因上游石門水庫限制流量，流量峰值較前兩斷面流量小。降雨期間9月26日至9月29日之間，與馬勒卡颱風外圍環流影響相比，於新店溪峰值流量達兩倍，相較於其他颱風梅姬颱風降雨強度強且時間較長，致使總降雨量驚人。

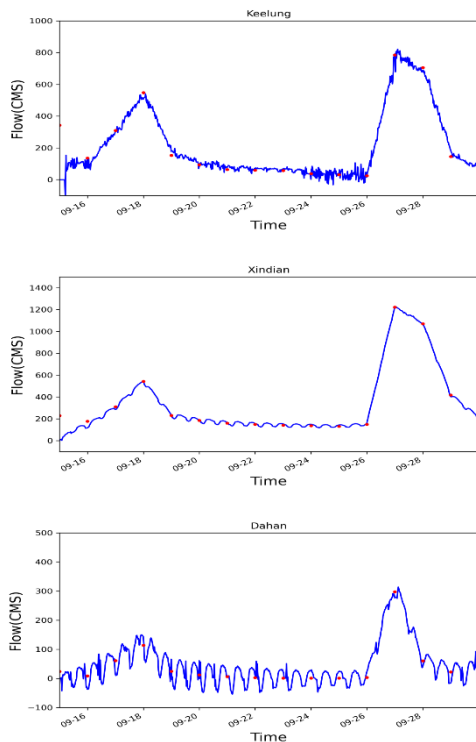


圖3 基隆河、新店溪、大漢溪斷面流量變化時序圖

以全斷面疊合圖(圖4)來看，因基隆河及新店溪上游集水區降雨量龐大，在颱風期間9月26日至9月29日間有明顯流量峰值，並且在河口區域潮汐所帶來的水量與上游河水所帶來水量堆積於河口區域，河口流量在小潮時期增加至近4000CMS，此流量與大潮期間潮汐流量相當，並且潮汐在河口區域往復的現象由於流量增加的影響，近乎沒有流向河道內部的流量。

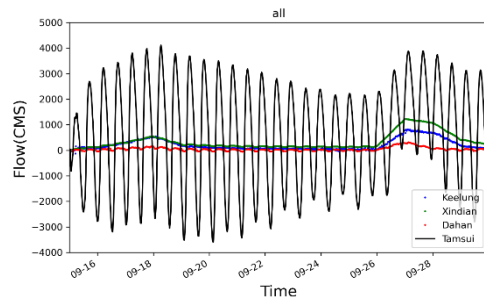


圖4 全斷面疊合流量變化時序圖

根據水位時序圖(圖5)來看，在颱風期間因三個支流流量都有明顯增加，故在編號1支流交界處即有受到流量影響的跡象，颱風期將水位相較河口上升約0.5公尺；編號2因位於新店溪及大漢溪交界處，流量上升更加明顯，上升幅度約為編號1的2倍，與河口水位差距至1.2公尺；編號3因基隆河流量大增，整體水位抬升，潮汐訊號最低潮亦超過平時最大水位；編號4於9月26日颱風外圍環流接近後至9月28日晚間，水位維持始終超過5公尺，使水位上升峰值呈現一直線，此為颱風長時間滯留增加降雨時長所導致。

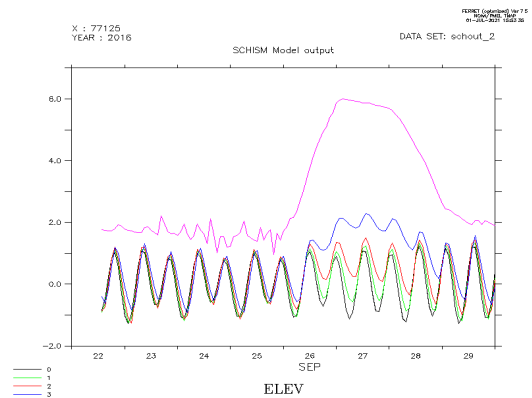


圖5 觀測點疊合水位時序圖

由於梅姬颱風水氣充足，登陸台灣後即造成河道水位急遽上升(圖6)，且因滯留時間長使水位上升時間拉長，隨著上游水位上升期間拉長，河道中段水位與河口差距會拉大，此現象於基隆河中段最為明顯，判斷是河道較窄使潮汐與上游水位堆積所致。

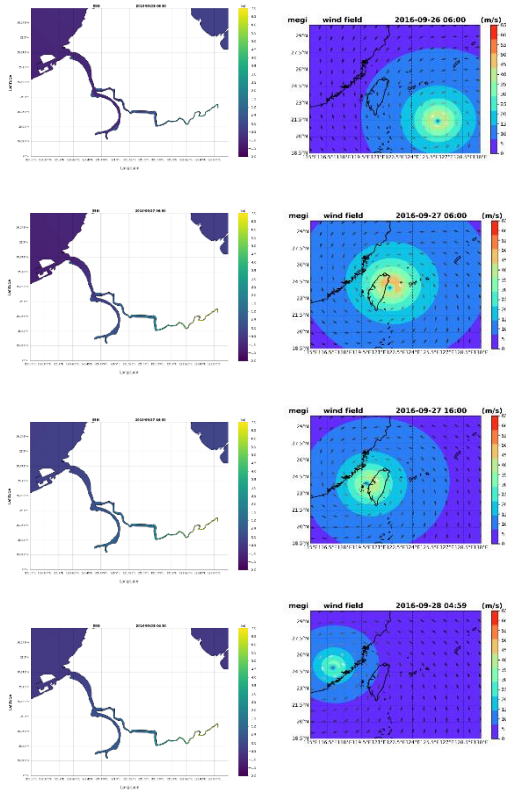


圖 6 二維平面水位變化圖及風場變化

#### 四、結論

根據模擬結果，得到河口斷面流量變化，河口流量主要受到潮汐影響，但在極端氣候所導致瞬間大流量的情況下，河水流量大於潮汐所帶來流量，使海水無法進入河道之中。淡水河主流因河寬不同，造成在較窄河道中，水位將被推升至更高的水位，並且在流量大增期間上升幅度更高。在上游有攔河設施(例:水庫)情況下，河道水位受到其主導，在水庫未洩洪時，下游河道主要受到潮汐作用影響。未來可針對河口模擬結果加入溫度及鹽度變化量，能更加表現出感潮河段中淡水與鹽水之間相關性。

#### 參考文獻

1. Carine, J. Y., Suppasri, A., Kure, S., Bricker, J. D., Mas, E., Quimpo, M., & Yasuda, M. (2015). Storm surge mapping of typhoon Haiyan and its impact in Tanauan, Leyte, Philippines.

International Journal of Disaster Risk Reduction, 13, 207-214.

2. Zhang, Y. J., Ye, F., Stanev, E. V., & Grashorn, S. (2016). Seamless cross-scale modeling with SCHISM. Ocean Modelling, 102, 64-81.



# Observation of wind influences on near-surface turbulence in the coastal area

Nguyen, Thi To Van<sup>1</sup>, Zhi-Cheng Huang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University, Taiwan

## ABSTRACT

The interaction between winds and near-surface turbulences have been observed in a shallow water located in Matsu island (Taiwan). This study using velocity profiles measured from an upward looking ADCP Signature 1000 with 4Hz sampling rate. The tidal currents in this site was found really small ( $\bar{u} < 0.1$  m/s) compared to the currents in the surface layer which hereby be assumed that relate to the seasonal local wind whose wind speed sometime could reach to 14 m/s. Besides, to observe the turbulence, the varriance methods developed by (Dewey and Stringer 2007) which helped to estimate the turbulent parameters as Reynolds stress, TKE from beams velocity of ADCP were also applied. The study has been doing to obtain more results and find the correlation of winds and currents in this study site.

Keywords: Wind-driven currents, near-surface turbulence, ADCP, varriance methods

## 1. Motivation

Near-surface turbulence is important for transport, mixing processes, and air-water interactions but has rarely been studied in detail (Orton, Zappa et al. 2010). Turbulence in the surface layer is a complicated process which could be caused by multiple quantities as wave breaking, wind-driven current or tidal current in shallow areas. Here, we analyze acoustic measurements from an ADCP to observe the wind effects on the near surface layer. The deployment was located at a small bay of Matsu island (Taiwan) with the averaged depth is 5m. The velocity profiles which were extracted from the ADCP showed that there are weak tidal currents and small waves in this region and left only the strong currents near the surface are driven by the along-channel wind. This is a good site to study the interaction between winds and surface layer as the near-surface turbulence, the energy transfers with the small affection from other hydrodynamic processes as tides and waves.

## 2. Methodologies

The study was deployed in a small bay of Matsu island (Taiwan) named after Mabiwan in this research that has a depth in average is about 5m. This bay is separated from the large east ocean by a long airstrip which made the currents direction in this site become consistent such as a tidal channel. Besides, the seasonal wind also blows in the same direction of the channel currents made it such as a real tank in nature for the research of wind – current interactions and comparing to previous laboratory studies.

An upward looking ADCP Signature 1000 was deployed to measure the velocity profile at 4 Hz for bursts lasting 17 min in duration. The data was collected for each seasons (summer and winter) with a periof of one month. About the measured profile, the velocity was measured in whole water column with 0.2m spacing for a four-beam and the fifth-beam only taken data for 2m of water depth count from the bottom with 0.05m spacing. The velocity measured from the ADCP in the Earth coordinate was rotated into cross shore (u) and long shore (v) components. Those data showed that the cross shore velocity is dominant in comparison with the

long shore component. Therefore, most of the results was focused in the cross shore direction.

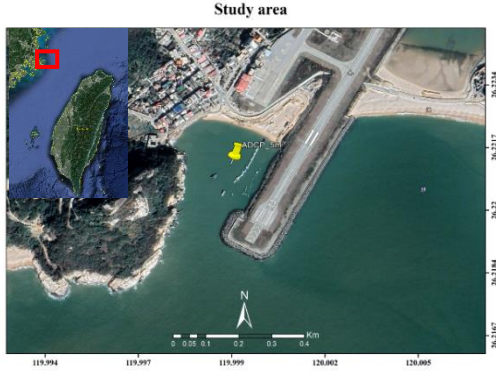


Figure 1. Location of the ADCP deployment (Mabiwan)

The wind data was extracted at the Matsu buoy near by the bay used for computing. Firstly, to find out how the wind that impact on the current structure, the wind data was divided into three group of wind speeds (Weak winds: 0-5 m/s; Moderate winds: 5-10 m/s; Strong winds: 10-15 m/s). Similarly, the cross shore velocity from the ADCP was also averaged by tidal phases (flooding and ebbing phases) which was previously transformed by the Hilbert transforms. Then, the averaged velocity profiles of the currents were computed following the combination of wind and tide condition.

To support for the purpose of this study which is to find the relation of wind and surface layer, the variance method (VM) was applied for beams velocity data of ADCP to compute some hydrodynamic quantities as the Reynolds stresses, TKE (Dewey and Stringer 2007, Orton, Zappa et al. 2010, Guerra and Thomson 2017). The Reynolds stress was estimated following methods developed by (Dewey and Stringer 2007) for a four-beam Janus ADCP.

$$\begin{aligned} \overline{u'w'} &\approx \frac{1}{2 \sin 2\theta} (\overline{b_2'^2} - \overline{b_1'^2}) + \frac{\phi_3}{\sin^2 \theta} \left[ \frac{1}{2} (\overline{b_2'^2} + \overline{b_1'^2}) - \overline{w'^2} \right] \\ \overline{v'w'} &\approx \frac{1}{2 \sin 2\theta} (\overline{b_4'^2} - \overline{b_3'^2}) + \frac{\phi_3}{\sin^2 \theta} \left[ \frac{1}{2} (\overline{b_4'^2} + \overline{b_3'^2}) - \overline{w'^2} \right] \end{aligned}$$

Moreover, for low water moments (water depth smaller than 2m), the five-beam method was used for exact expressions for five of the Reynolds stresses, total

TKE, and anisotropy (Guerra and Thomson 2017).

### 3. Preliminary results

In this study site, there are the south-west winds during summer and north-east winds during winter which align with the direction of the main currents. However, the wind direction is more consistent and is larger in speed in the winter. Besides, the wave height presented in *Figure 3* showed that the waves in this area were small which cannot transfer the energy to turbulent processes.

Generally, the wind generate energy to water surface layer mostly by wave breaking as many studies has been done before. However, the wave steepness in this region are 0.005 and 0.004 for summer and winter, respectively. Then, these steepness parameters are so small ( $< 0.142$ ) for the wave breaking. Therefore, the wave will be assumed that is not dominant in generating turbulence or driving currents in this study.

The averaged velocity structure during flooding/ ebbing tidal phases showed the small velocity in almost water column except of the near surface region (*Figure 4*). Moreover, the current directions (defined as positive in the flooding tide and negative in the ebbing tide) near the surface matched with the wind direction in each season. These results showed that even during the flooding or ebbing tide phases when the current velocity should be largest, the current velocity in this site is still very small ( $< 0.05$  m/s) even the mean tidal range is about 2m and only the currents on the surface layer driven by wind is dominant.

The Reynolds stress  $\overline{u'w'}$ ,  $\overline{v'w'}$  estimated from 4-beam method for whole process is larger in the surface layer compared to lower one was showed in figure 5. Besides, figure 6 represented vertical profile of Reynolds stress using five-beam method for low water times to be able to observe the winds impact to water layer. The horizontal Reynolds stress ( $\overline{u'^2}$ ,  $\overline{v'^2}$ ) reach values that are an order of magnitude higher than those vertical one. However, this is only the characteristic of the water, the wind data need to be analyzed and compared to make the understanding of winds-currents-turbulence to be more convinced.

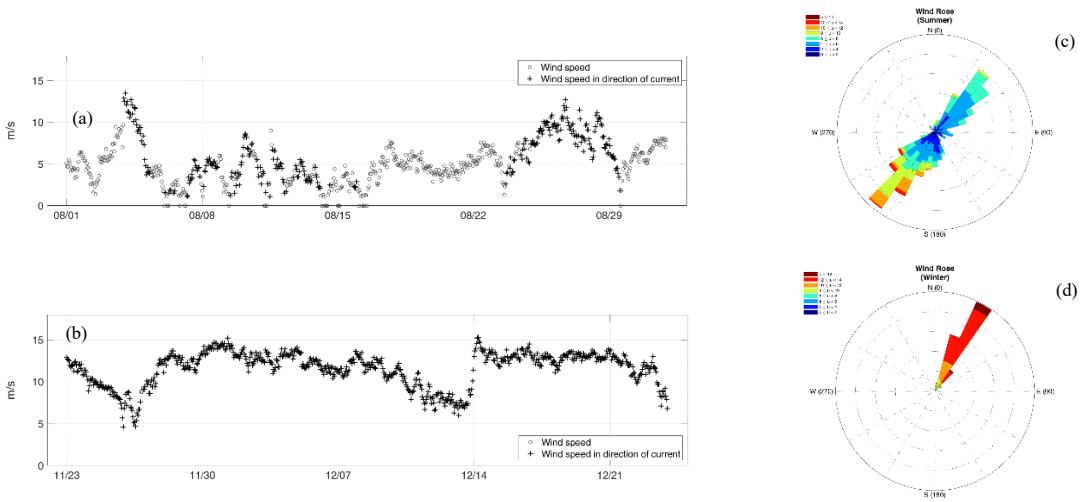


Figure 2. Hourly wind speed during two season (a) summer and (b) winter and the rose plot of the wind direction in (c) summer and (d) winter

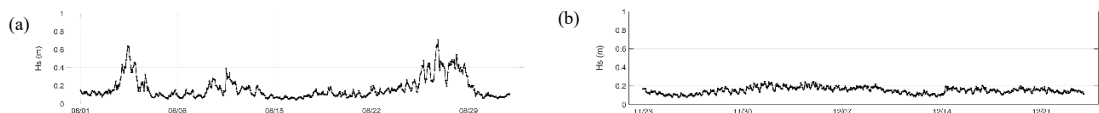


Figure 3. Significant wave height  $H_s$  in (a) summer and (b) winter

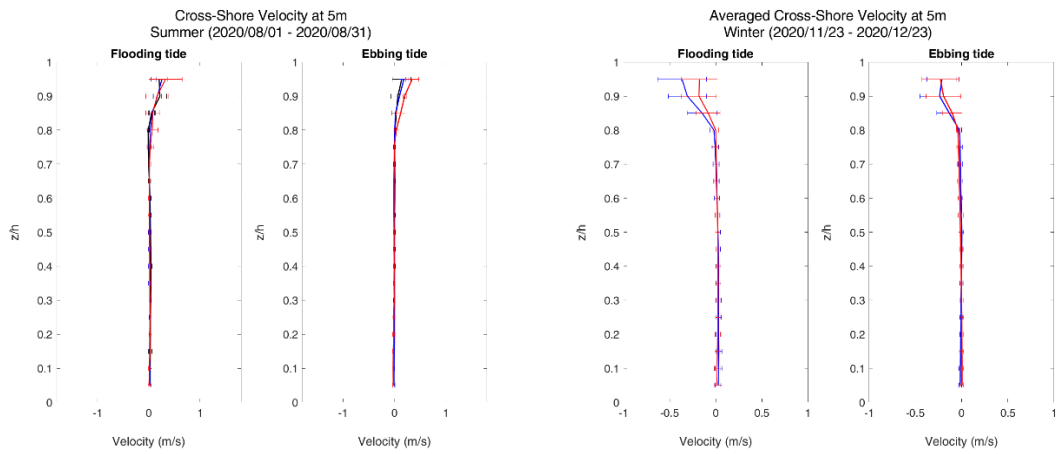


Figure 4. The velocity profiles of currents under influence of both wind – tidal current in two season where the color indicated the strength of wind (black: weak wind; blue: moderate wind; red: strong wind) and the error bars represented the standard deviation at each vertical measurement.

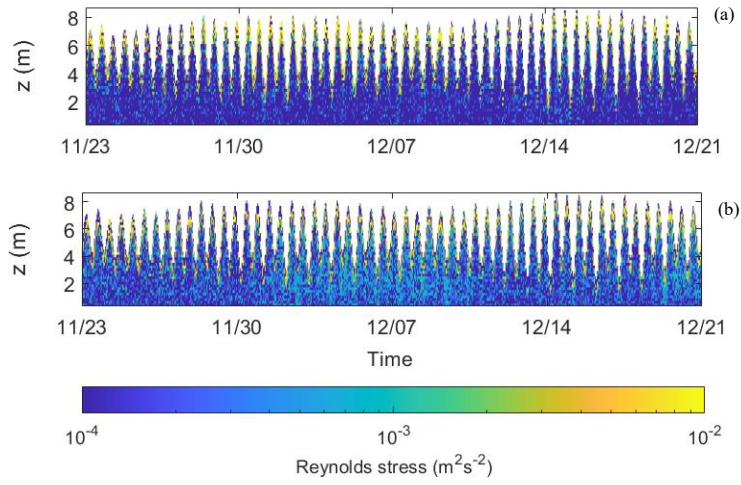


Figure 5. The vertical profiles of Reynolds stresses in time estimated using four-beam method: (a)  $\overline{u'w'}$ , (b)  $\overline{v'w'}$  for winter season.

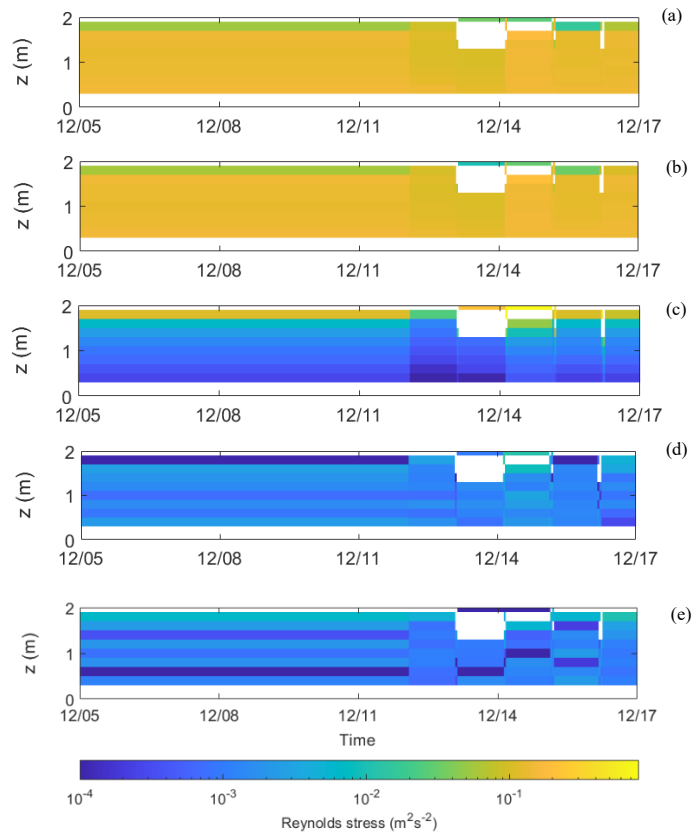


Figure 6. The vertical profiles of Reynolds stresses in time estimated using five-beam method: (a)  $\overline{u'^2}$ , (b)  $\overline{v'^2}$ , (c)  $\overline{w'^2}$ , (d)  $\overline{u'w'}$ , (e)  $\overline{v'w'}$  for winter season.

## References

Dewey, R. and S. J. J. o. P. O. Stringer (2007). "Reynolds stresses and turbulent kinetic energy estimates from various ADCP beam configurations: Theory." 1-35.

Guerra, M. and J. Thomson (2017). "Turbulence Measurements from Five-Beam Acoustic Doppler Current Profilers." Journal of Atmospheric and Oceanic Technology **34**(6): 1267-1284.

Orton, P., et al. (2010). "Tidal and atmospheric influences on near-surface turbulence in an estuary." J. Geophys. Res **115**.

# 以 PIV 技術探討浮式翼板結構物引起的渦流能量特性之研究

程皓<sup>1</sup> 石瑞祥<sup>2\*</sup> 翁文凱<sup>2</sup> 李基毓<sup>3</sup> 林志鴻<sup>1</sup> 吳佳承<sup>1</sup>

<sup>1</sup>國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士生

<sup>2</sup>國立臺灣海洋大學河海工程學系教授

<sup>3</sup>國立臺灣海洋大學海洋工程科技學士學位學程(系)助理教授

## 摘要

本研究以 Particle Image Velocimetry 進行水工模型試驗，探討週期波通過浮式翼板結構物所產生的渦流能量特性。試驗以 5 種不同週期的波浪配合 4 種不同長度的翼板，計算出渦流所產生的能量，將計算結果與各能量係數(反射係數 KR、透射係數 KT、能量損失係數 KL)與入射波能量 EI 進行比較與討論。結果顯示波浪週期、翼板長度以及翼板位置皆會影響其渦流能量，尤其當波浪通過有翼板的浮式結構物後，會明顯影響渦流能量的大小。同時發現在 4 種翼板長度中，出現最大的渦流能量皆在週期  $T = 0.85$  秒時發生，而在透射端的渦流能量則會隨著週期變大而增加。若增加試驗波高，則渦流能量特性不變，但會增加其渦流能量。

關鍵詞：浮式翼板結構物、垂直翼板、粒子圖像測速技術、渦流能量、能量衰減

## The Characteristics of Vortex Energy Caused by Floating Structure with Double Slotted Barriers Using PIV Technology

Hao Cheng<sup>1</sup> Ruey-Syan Shih<sup>2\*</sup> Chi-Yu Li<sup>3</sup> Wen-Kai Weng<sup>2</sup> Zhi-Hong Lin<sup>1</sup>  
Chia-Chen Wu<sup>1</sup>

\* Associate Professor, Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

The characteristics of vortex energy induced by a floating structure with double slotted barriers waves investigated using the Particle Image Velocimetry. The hydraulic model test was constructed in a wave flume with 5 different periods of waves and 4 different lengths of barriers to calculate the energy generated by the vortex, and compares the calculation results with respect to the incident wave energy EI, and discuss over the related parameters, such as the reflection coefficient KR, transmission coefficient KT, and the energy loss coefficient KL. The results show that wave period, length of the barriers, and the position of the barrier affect significantly the vortex energy, especially when the wave passes through a floating structure with barriers, and it will obviously affect the magnitude of the vortex energy. The maximum eddy current energy appears at the period  $T=0.85$  seconds in all four wing plate lengths after reflection, and the eddy current energy at the transmission end increases with the increasing of the wave period.

Keywords: Floating structure with double slotted barriers, Vertical plate, Particle Image Velocimetry, Vortices energy, Energy dissipation.

## 一、前言

近年來受氣候變遷的影響，海洋災害發生的頻率也隨之增加。為抵禦海洋災害所造成的損失，人們開始設置結構物來阻擋波浪侵襲，然而傳統的剛性工法不僅施工不易、造價昂貴，且往往會破壞海中生態與海岸景觀。因此隨著大眾對環保的重視程度增加與相關產業技術的進步，原有的剛性結構物逐漸轉為許多的浮式結構物，除了能降低昂貴的經費外，對於環境的衝擊也能有效的減少並拉近大家與海洋間的距離。

其中於浮體下方設置翼板之結構物稱為  $\pi$  型浮式結構物，增加之翼板可以有效增加反射並減少透過結構物之能量。然而前人之研究多著重於翼板位置、長度與材質對於波浪反射與透射之影響，或是研究浮體本身的運動行為。較少人將焦點放在翼板所引發的渦流現象，針對這些渦流的特性進行研究。

近年來拜科技進步所賜，學者能利用粒子圖像測速技術 PIV (Particle Image Velocimetry)，來觀察波浪特性與整體流場的變化。該技術的優點為非接觸式的測量，能夠將測量儀器對於實驗的影響降至最低，使結果更接近實際情況。

綜合上述內容，本研究利用水工模型的試驗方法並搭配簡易的粒子圖像測速技術 (PIV)，探討不同週期波通過不同長度的浮式翼板結構物所產生的渦流能量變化與入射波能量或能量係數之關係。

## 二、實驗設置

### 2.1 試驗佈置

試驗於國立臺灣海洋大學海洋工程綜合實驗研究中心之可視化試驗水槽進行試驗，整體模型配置圖如圖 1 所示，水槽總長為 15 公尺，寬 0.4 公尺，深 0.6 公尺，水槽左側為造波機與造波板之位置，同時在造波板後方放置人工植被，用來減少造波板左側的反射波影響其造波結果，造波方向由左至右。在試驗水槽右側有裝置消能斜坡 (20 度) 與人工草皮，並允許越波以降低其反射率。兩側採用透明的強化玻璃，方便拍攝記錄與觀察整體試驗過程。水槽底部則為不鏽鋼不透水作為底床。造波板後面與消能斜坡下方皆有迴流水孔，以保持整體試驗水槽的水

位，越波後的水將透過下方的迴流水管流回水槽內部。

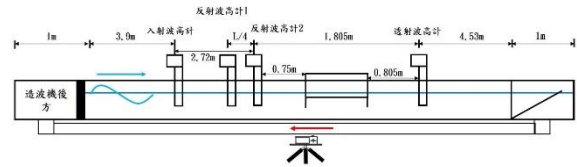


圖 1 試驗模型配置示意圖

### 2.2 試驗波浪條件

本文的試驗水深皆為 0.25 公尺。週期分別為 0.51、0.56、0.70、0.85 及 1.0 (sec) 共 5 組，每次試驗均分別重複 4 次，以確保試驗的精準以及精確性。其他波浪條件如下表所示。

表 1 試驗波浪條件

T (s)	L (m)	H (m)	C (m/s)	h/L	相對水深	H/L
0.51	0.4	0.02	0.78	0.63	深水	0.05
0.56	0.494	0.021	0.88	0.51	深水	0.043
0.7	0.756	0.023	1.08	0.33	中間性	0.03
0.85	1.024	0.022	1.21	0.24	中間性	0.021
1.0	1.284	0.022	1.28	0.19	中間性	0.017

### 2.3 模型尺寸

本試驗所使用固定的浮式結構物如下表所示，尺寸為長 0.4 公尺、寬 0.25 公尺及高 0.155 公尺。而翼板 3 種不同的長度，分別為以下四種配置，Case1 為無翼板結構物、Case2 為翼板長度為 2 公分之結構物、Case3 為翼板長度為 3.5 公分之結構物、Case4 為翼板長度為 7 公分之結構物。整體結構物皆由厚度 0.005 公尺，且皆為透明不透水壓克力所製成。

表 2 結構物尺寸

浮箱高(m)	0.155
浮箱長(m)	0.25
浮箱寬(m)	0.4
浮箱吃水深(m)	0.04
翼板長度(m)	3 種長度 (0.02/0.035/0.07)
翼板厚度(m)	0.005

## 2.4 分析方法

本文是以 Thielicke, William 於 2014 年利用 Matlab 程式語言所撰寫的 PIVLab 程式來進行計算以及分析渦流的。計算圓周速度  $q$ 、循環量  $\Gamma$  以及渦流能量  $E_v$  皆參考自日野幹雄、山崎丈夫(1970)所推導出來的計算公式。圖 2 及圖 3 為 PIVLab 操作過程

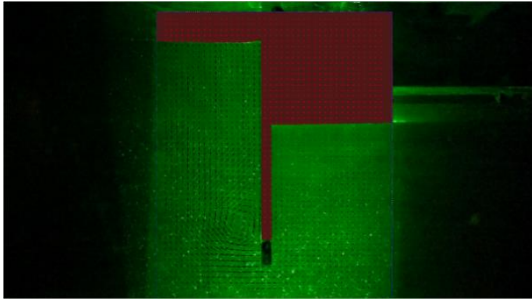


圖 2 PIVLab 操作示意圖

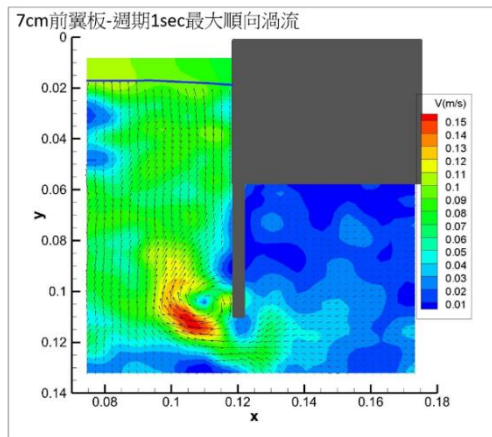


圖 3 PIVLab 計算之結果圖

## 三、結論

### 3.1 渦流能量分析

#### 3.1.1 前翼板順向渦流

4 種不同翼板長度下，前翼板最大順向渦流能量與週期之關係。從圖 4 可以看出 Case1 到 Case3 中，在週期條件為 0.51 秒到 0.85 秒之間，渦流能量都是隨週期變大而增大。但在週期為 1.0 秒時都會出現下降的情形，3 個 Case 出現最大的渦流能量皆出現在週期為 0.85 秒時。5 個週期條件下，Case3 的前翼板最大順向渦流的能量最大，第二為 Case2，而 Case1 與 Case4 不管在長週期條件或是短週期條件下兩者之間的差距皆不明顯。

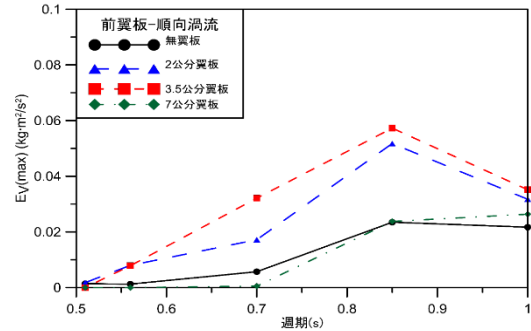


圖 4 前翼板最大順向渦流能量結果圖

#### 3.1.2 前翼板逆向渦流

4 種不同翼板長度下，前翼板最大逆向渦流能量與週期之關係。從圖 5 可看出相較於前翼板最大順向渦流，逆向渦流的能量整體都是小於順向的，此結果符合前人研究中兩側皆會出現渦流且近海測會大於近岸測之結論。在前翼板最大逆向渦流能量中，Case2 與 Case3 在週期 0.51 秒到 0.85 秒是隨週期變大而增加，但在週期 1.0 秒時會出現下降的趨勢，週期 0.85 秒的波浪條件下會出現最大的渦流能量。

5 個週期條件下，Case3 的前翼板最大逆向渦流的能量皆是 4 種不同 Case 中最大的，第二為 Case2，再來是 Case1 與 Case4。

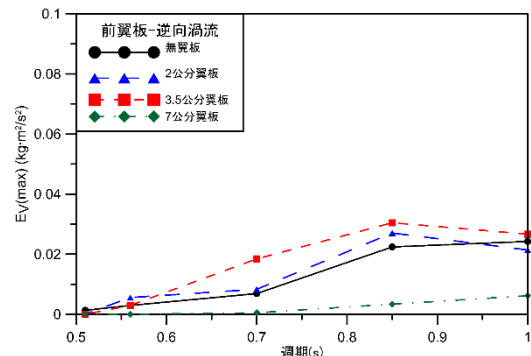


圖 5 前翼板最大逆向渦流能量結果圖

#### 3.1.3 後翼板順向渦流

4 種不同翼板長度下，後翼板最大順向渦流能量與週期之間的關係圖。從圖 6 可以看出，後翼板順向渦流的能量整體都是小於前翼板的，此結果符合前人研究中兩側皆會出現渦流且近海測會大於近岸測之結論。



相較於前翼板，後翼板整體渦流能量變化是較為一致的，4 個不同的 Case 皆是隨著週期的變大渦流能量也隨之增加。在 Case2、Case3 以及 Case4 中，在長週期波浪條件下，都會出現明顯的能量上升。

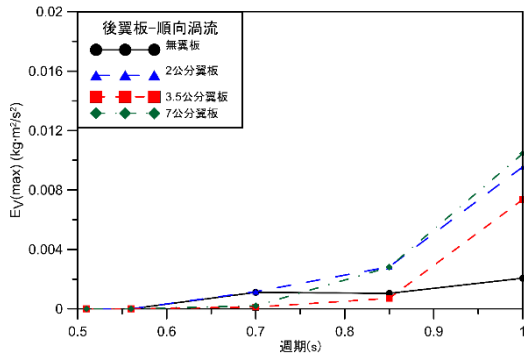


圖 6 後翼板最大順向渦流能量結果圖

### 3.1.4 後翼板逆向渦流

4 種不同翼板長度下，後翼板最大逆向渦流能量與週期之間的關係圖。從圖 7 可以看出後翼板逆向渦流的能量整體是略小於後翼板的順向渦流的。此結果同樣符合前人研究中兩側皆會出現渦流且近海測會大於近岸測之結論。

在整體的渦流能量變化趨勢是與後翼板順向渦流一致的，在 Case2 到 Case4 這三個 Case 中整體的渦流能量皆是隨著週期變大而增加。其中在波浪週期為 0.85 秒到 1.0 秒之間整體的渦流能量都有明顯的上升

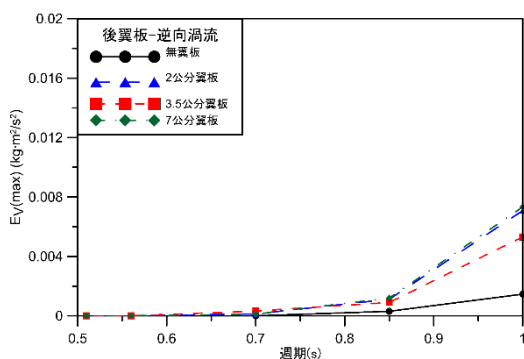


圖 7 後翼板最大逆向渦流能量結果圖

## 3.2 渦流能量與入射波能量之比

### 3.2.1 前翼板最大順向渦流與入射波能量

由圖 8 可以看出 4 種 Case 中，渦流能量與入射波能量之比為 Case3 為最大，且出現最大能量比的週期皆為 0.85 秒，與前述討論前翼板最大順向渦流的趨勢是一致的。

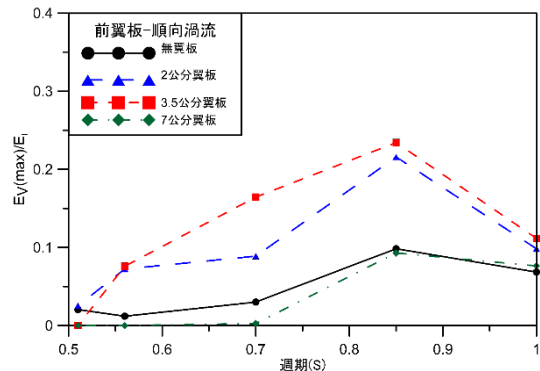


圖 8 前翼板最大順向渦流能量與入射波能量之比結果圖

### 3.2.2 前翼板最大逆向渦流與入射波能量

圖 9 可看出相較於圖 8，順向渦流能量與入射波能之比整體都是較逆向渦流來的大的。此結果亦符合前人研究中兩側皆會出現渦流且近海測會大於近岸測之結論。週期上的變化則與順向渦流的變化十分相近，在週期條件為 0.51 秒至 0.85 秒時都是隨著週期變大而增加，而都在週期為 1.0 秒時出現下降的情形。整體來說，最大的渦流能量與入射波能之比都會出現在波浪週期為 0.85 秒時的條件下。

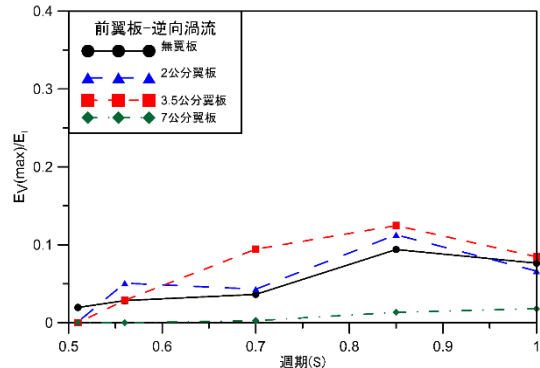


圖 9 前翼板最大逆向渦流能量與入射波能量之比結果圖

### 3.2.3 後翼板最大順向渦流與入射波能量

從圖 10 可以看出相較圖 9 整體與入射波能量之比皆是小於前翼板的。4 個 Case 中，渦流能量與入射波能量之比皆隨著週期變大而增加，最大能量占比皆出現在週期 1.0 秒時。其中除了 Case1 以外，在週期條件為 1.0 秒的變化是較其他週期條件大的。由此可知渦流能量與入射波能量之比在長週期條件下會比短週期條件下來的大，與前述中的結論是相同的。

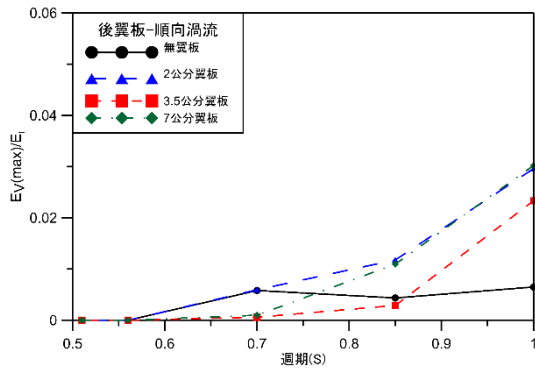


圖 10 後翼板最大順向渦流能量與入射波能量之比結果圖

### 3.2.4 後翼板最大逆向渦流與入射波能量

圖 11 為 4 種不同翼板長度下，後翼板最大逆向渦流能量與入射波能量之比隨週期變化的結果圖。從圖 11 與圖 10 可看出相較於順向渦流，逆向渦流能量與入射波能之比是略小於順向渦流的，與前面結果吻合。在這 4 個 Case 中，渦流能量與入射波能量之比皆隨著週期變大而增加，最大能量占比皆出現在週期 1.0 秒時。但相比於順向渦流，在週期為 0.51 秒至 0.85 秒之間，順向渦流的變化是比逆向渦流來的大的。由此可知渦流能量與入射波能量之比在長週期條件下會比短週期條件下來的大，且順向渦流會比逆向渦流來的大。

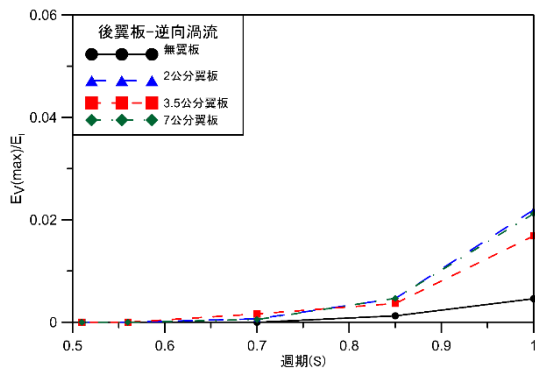


圖 11 後翼板最大逆向渦流能量與入射波能量之比結果圖

### 3.3 總渦流能量與能量損失係數之關係

從圖 12 到圖 15 可知，在這四種翼板長度下且波浪條件為深水波時(週期小於 0.57 秒)，無因次化的渦流能量總和與能量損失係數呈現正向的關係。從圖 15 中，當波浪條件為深水波時，水粒子的運動範圍多集中在水深較淺的地方，底床沒有產生渦流，所以此時的能量損失可歸為水粒子與結構物表面摩

擦而產生的能量損失。這也是 7 公分翼板在短週期條件下的能量損失較小的原因。圖 12 至圖 14 中可以明顯看出在深水波的條件下，當渦流能量變大時所產生的能量損失也會隨之增加。

而在圖 12 至圖 15 的中間性水深條件下(週期大於 0.57 秒)，可以觀察到整體的能量損失是與無因次化的總渦流能量呈現一個反向的關係。本研究推測，當渦流能量要消散時，只有部分的能量以熱量的型式消散於水體之中，形成能量損失；其餘的渦流能量會以能量轉換的方式轉變回成整體波浪的勢能。但這其中轉換成熱量形式及因摩擦所造成的能量損失，在實驗中無法一一拆解並進行有效的分析所有能量損失的變因。因此只能基於本次試驗所觀察到的結果，提出能量損失係數與無因次化的總渦流能量呈現反向的關係。

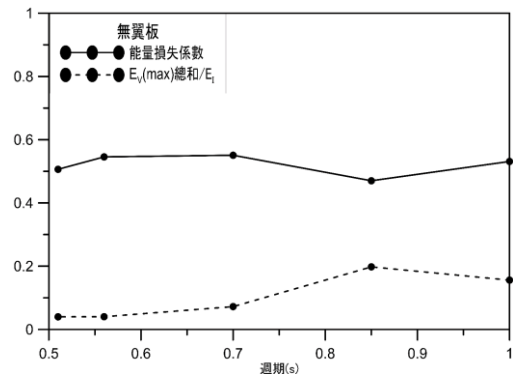


圖 12 Case1 無因次化渦流能量總和與能量損失係數之結果圖

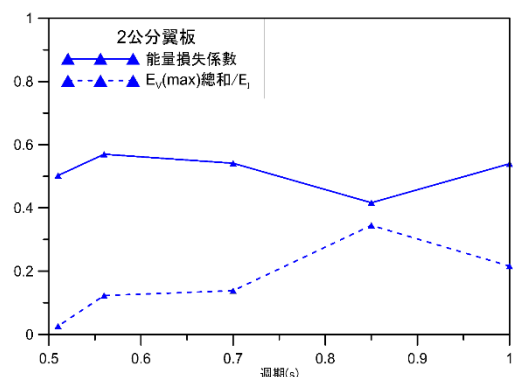


圖 13 Case2 無因次化渦流能量總和與能量損失係數之結果圖

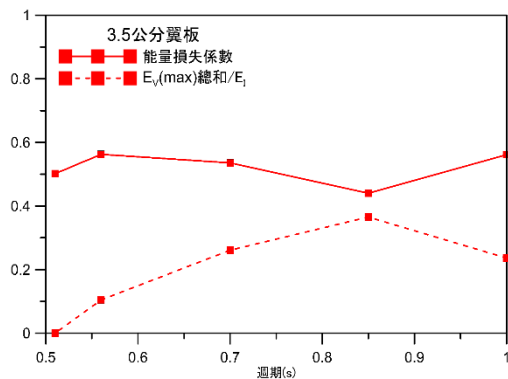


圖 14 Case3 無因次化渦流能量總和與能量損失係數之結果圖

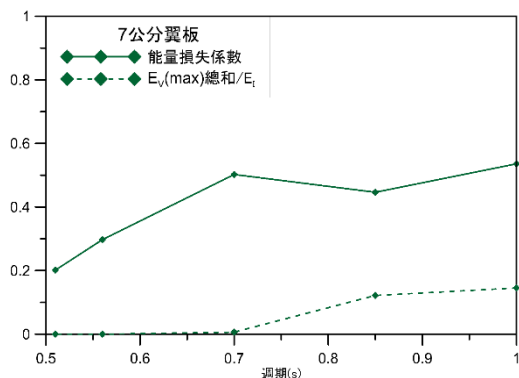


圖 15 Case4 無因次化渦流能量總和與能量損失係數之結果圖

### 3.4 綜合結論

1. 本試驗結果顯示，翼板長度以及波浪週期皆會影響浮式翼板結構物的反射率以及透射率。當翼板越長或是週期越短，會使反射率增加、透射率減少；反之，當翼板長度越短或是週期越長，其反射率會減少、透射率上升。此外週期越長會越容易形成渦流。

2. 以渦流能量做為比較，在同一翼板長度與週期下，會發現在前翼板的渦流能量皆大於後翼板的渦流。而在同翼板中，順向渦流的能量又會大於逆向渦流。

3. 在 4 個不同長度的前翼板中，皆在週期為 0.85 秒時出現最大的渦流能量，且順向會比逆向下降的多。而在相同週期下皆是 3.5 公分翼板所產生的渦流能量最大；而 7 公分翼板所產生的渦流能量都是最小的。

4. 在 4 個不同長度的後翼板中，皆在週期為

1.0 秒時出現最大的渦流能量，其能量皆是隨週期變大而增加。在相同週期下是 2 公分翼板與 7 公分翼板所產生的渦流能量最大；而無翼板結構物所產生的渦流能量都是最小的。從上述可知是否裝設後翼板會明顯影響到渦流能量的大小，且在長週期條件下，渦流的能量變化是較長週期明顯的。

5. 無因次化後的渦流能量與能量損失係數在深水波的條件下呈現正向關係，而在中間性水深的條件呈現反向關係。

## 參考文獻

- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Coastal Engineering*, 1(15), 828-845.
- Gesraha, M. R. (2006). Analysis of  $\Pi$  Shaped Floating Breakwater in Oblique Waves: I. Impervious Rigid Wave Boards. *Applied Ocean Research*, 28(5), 327-338.
- Thielicke, W., and Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2(1), p.e30.
- 日野幹雄, & 山崎丈夫. (1971). 波による鉛直板よりの渦の形成とエネルギー逸散. *海岸工学講演会論文集*, 18, 61-65.
- 日野幹雄, 小林智尚, & 村本龍夫. (1987). SLV と可視化法を併用した模型実験手法. *水理講演会論文集*, 31, 771-775.
- 石瑞祥、李基毓、翁文凱、廖庭葳 (2020). 以 PIV 技術探討類孤立波通過沒水結構物之渦流形成與能量衰減特性研究，國立海洋大學河海工程學研究所碩士論文。
- 石瑞祥、徐霽翔 (2021). 以 PIV 技術探討波浪通過繫留浮式翼板結構物後渦流與能量衰減特性之研究，國立海洋大學河海工程學研究所碩士論文。
- 翁文凱、王昱璵 (2016). 翼板結構物引起之渦流的消能特性研究，國立海洋大學河海工程學研究所碩士論文。
- 翁文凱、陳正廷、江銘洋 (2003). 波浪通過雙胴型浮體之研究，第 25 屆海洋工程研討會論文集。

## 平滑底床上受潰壩作用下之擬海嘯石運移

林敬樺<sup>1</sup> 張義偉<sup>2</sup> 陳冠宇<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水工試驗所副研究員

<sup>2</sup> 國立中山大學資訊管理學系(所)博士候選人

<sup>3</sup> 國立中山大學海洋科學系教授

### 摘要

本研究利用潰壩(Dam break)方式仿製海嘯在光滑平坦底床上衝擊一個內裝微型感測器之擬海嘯石，藉由高速攝影機及自主感測，觀察擬海嘯石在起動初期與傳輸之動態行為，以獲取運動期間內之三維剛體運動資訊。仿真塊體之球度以及扁平度確定其形狀與型態是屬於扁平的扁球體，試驗條件之設計分別為部分潛沒(partially submerged)、半潛沒(half-submerged)以及完全潛沒(full-submerged)。試驗是採固定上游水位，改變下游水位以水位差及氣動閘門方式生成潰壩、潮湧及水躍；因此，潛沒條件對於潰壩衝擊之生成有關。試驗結果顯示，每個潛沒條件下均有對應之臨界上下游水深比；在平均傳輸速度以及傳輸距離上，以部分潛沒條件為最大，推測這應與殘餘動量較高有關；而在初始運動方面，則是與塊體重量、形狀與來流速度有關，在本試驗中，在受衝擊過程中均為二維平面運動與偏擺。

關鍵詞：潰壩、潛沒條件、擬海嘯石

## Dam Break Induced the Boulder Transportation On the Flat Bottom

Jing-Hua Lin\* Yi-Wei Chang Guan-Yu Chen

\* Associate Researcher, Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

In this laboratory experiment, the 3D-dynamic process of a suspected tsunami boulder during the transportation and incipient motion are measured by using MEMS and high-speed camera on the flat bottom. The tsunami induced bore-impacting is generated by the dam break. Based on the determination on the sphericity and flatness index of the suspected tsunami boulder, the physical model belongs to the oblate (discoidal, tabular). Three submerged conditions including partially-submerged, half-submerged and fully-submerged are applied in the present experiment. The types of bore-impacting is related to the submerged conditions. According to the experimental results, the incipient motion of boulder depends on the critical conditions related to the upstream and downstream water depth. Each submerged condition is corresponding to a critical condition. The maximum non-dimensional transported velocities and displacements(distances) are occurred in the partially submerged conditions. Its reason could be related to the transformation between the potential energy and kinetic energy as well as residual momentum. The types of the incipient motion depend on the shape, weight of physical model and current velocity. In the present experiment, most results belong to the 2D-plane motion (sliding) and the sway around z axis.

Keywords: Dam break, Submerged conditions, Suspected tsunami boulder

## 一、前言

在熱帶與亞熱帶之島嶼或是海岸地區(如日本、印尼、南太平洋島嶼及澳洲等地)在海嘯或是強烈之颱風過後常會見到獨立存在之巨石(Boulders)。海嘯與颱風兩者都屬於高能量之波浪現象，都會造成海岸地區之溢淹；由這兩者所造成之溢淹事件稱為高能量海洋溢淹事件(High-Energy Marine Inundation Events；HEMI)(Terry et al.,2013)，而這正是海岸巨石所形成之原因。由強烈颱風所攜帶上岸的稱為風暴石(Storm boulders)，而海嘯侵襲陸地時自海中攜帶上岸之巨石則稱為海嘯石(Tsunami boulders)；海嘯週期及波長較一般風浪大，因此能量大，可以搬運重達數噸到數百噸之海中巨石或是其他物體，入侵陸地區域之後可由強大的水流帶到陸地內部。而到陸地之後堆積於岸邊，珊瑚礁石化形成珊瑚灰岩，受到潮汐侵蝕，有很多變成蘑菇狀的珊瑚礁或散落在海中的岩石群。

因此，在本研究中，採用接近現場實體之仿真模型、微型感應器以及高速攝影機搭配來獲得仿真模型在光滑水平底床上之初始運動與參考流場(0-1秒內)以及整體傳輸過程之姿態變化。

## 二、研究方法

### 2.1 水工模型試驗

水工模型試驗則是在國立成功大學水工試驗所小型玻璃水槽(長 25m、寬 0.3m 及高 0.76m)以水工模型試驗進行，基本配置如圖 1 所示。塊體佈放在氣壓式擋水閘門下游處 2 公尺，上面標註長軸及短軸方向，長軸方向與水流方向平行，並靠近玻璃面板；在閘門前方架設一搭配 2000 萬畫素感光元件之無人機，鏡頭焦點對準塊體，以塊體後方之角度錄下塊體在受流體作用之運動狀態；在運動路徑之終點則是擺放一智慧型手機，以塊體前方之角度錄下塊體運動路徑與姿態。另一方面，在塊體所在之區域左右兩側均擺放高強度之鹵素燈，同時使用高速攝影機拍攝塊體在受力初期之二維運動狀態及流場，以便後續使用 BIV 方法計算對應之流場。

一般來說在試驗室製造出類似海嘯波的方式共有三種：(1)活塞式造波機(2)水位差(3)高瓦數之流量

發生器(平石哲也等, 2015)。本研究式採用第二種，在氣動閘門上下游處製造水位差，以潰壩(Dam-break)方式製造海嘯及潮湧(bore)。藉由微型感測器的自主量測與姿態擬合方式(Posture fitting)推算塊體在不同水深比條件下之平均位移與平均速度。

配合感測器之方向，在本試驗中，定義 y 軸為水槽長軸方向，向下游為正；水槽寬度方向為 x 方向；試驗之前，先將感測器開啟植入仿真塊體內，並放置於水槽內起始位置；達到預定水位差時，以氣動方式 0.2m/s 速度向上抽取，所形成之潮湧會直接作用於仿真塊體上，如有成功驅動，則仿真塊體會隨著水流往前進行剛體運動直到靜止；塊體靜止時以人工方式量測塊體中心到起始位置之距離，並拍照量取靜止時之姿態。感測器以取樣頻率 5Hz(0.2 秒/筆)紀錄數據，而前後兩台錄影設備則是可以錄影傳輸行為以驗證原位旋轉及軌跡。

塊體受衝擊後自開始運動至停止之整體運動過程，定義試驗時間為閘門開啟至塊體靜止時( $t_0$ )，而自水體撞擊塊體至塊體靜止時( $t_s$ )為運動時間，前者可以用人工以碼表方式計時，後者則可以自感測器之角速度讀數紀錄得知；而每一時間的擬速度及水平方向位移可由時域積分法求出(Niu et al.,2019)：

$$V_i = V_i + \frac{(a_{y1} + a_{yn}) \times \Delta t}{2} + \left( \sum_1^{i-1} a_{yi} - a_{y1} \right) \times \Delta t \quad (1)$$

$$S_{yi} = 0.5 \times (V_{y1} + V_{yi}) \times \Delta t + \left( \sum_{i=1}^{i-1} V_{yi} - V_{y1} \right) \times \Delta t \quad (2)$$

利用(1)(2)式決定擬速度及位移時，須配合最後之姿態調整閾值，直到位移近似於靜止位置為止。

以下游水深固定(H<sub>2</sub>)之方式，調整上游水位(H<sub>1</sub>)，所以在潛沒條件上共設定完全潛沒(full-submerged)、半潛沒(half-submerged)以及部分潛沒(partially submerged)等三種條件。

### 2.2 仿真塊體形狀特性

在沉積學中，常用球度(Sphericity)以及 Cailleux 扁度指數(Cailleux Flatness Index)來代表塊體的型態與形狀；球度可以定義為(Wadell,1932；Krumbein, 1941)：

$$\bar{\psi} = \sqrt[3]{bc/a^2} \quad (3)$$

越接近 1，表示形狀越接近球狀。另根據 Zingg (1935) 所建議的形狀分類標準，採用(b/a, c/b)之比例定義扁球體(oblate)、圓球體(equiaxial)、扁長體(triaxial)及橢球體(prolate)，如表 1。

Cailleux 扁度指數可定義為：

$$F = \left( \frac{a+b}{2c} \right) \quad (4)$$

此值越大表示該物體越平。在上述各項定義中，a、b、c 分別代表物體三個主軸，以本研究而言，a 為長度(或長軸)，b 為寬度(或短軸)，c 為高度。故上述仿真塊體三軸長度分別為 a=19cm、b=15.7cm 及 c=6cm，依上述參數之定義分別為球度  $\bar{\psi}$  為 0.64，(b/a=0.826>0.667，c/b=0.382<0.667)，F 為 2.89；故仿真塊體(或現場實際樣品)應屬於較為扁平的扁球體。



圖 1 水工模型試驗之配置圖

表 1 Zingg 形狀分類

種類	b/a	c/b	形狀
I	>2/3	<2/3	扁球體 Oblate (discoidal, tabular)
II	>2/3	>2/3	圓球體 Equiaxial (spherical, equant)
III	<2/3	<2/3	扁長體 Triaxial (bladed)
IV	<2/3	>2/3	橢球體 Prolate (rods)

### 三、結果與討論

#### 3.1 塊體運移時之平均傳輸速度與平均絕對位移

根據仿真塊體之高度( $h_b$ )與下游水位之關係，定義完全潛沒( $H_2 \geq h_b$ )、半潛沒( $H_2 = 0.5h_b$ )及部分潛沒( $0.5h_b > H_2 \geq 0$ )條件；圖 2 及圖 3 為上述

三種條件下，不同水深比(即是水位差與上游水深之比值)對應的無因次平均傳輸速度與平均絕對位移；前者定義為理論波速(Theoretical celerity； $C_g = \sqrt{g(H_1 - H_2)}$ )與塊體水平速度(Block horizontal velocity； $u_b$ )之比值；後者則是定義為塊體絕對位移(Block absolute displacement)與特徵長度(Characteristic length)之比值。在本研究中，特徵長度為氣壓閘門到塊體內感測器中心之距離，絕對位移則是定義為  $S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$ ， $S_x$  與  $S_y$  分別如前所定義之兩方向位移。

分析顯示，無因次平均傳輸速度與絕對位移水深比( $H_2/H_1$ )呈現負相關之趨勢，意即上下游水頭差越大，其無因次平均傳輸速度越大，無因次平均絕對位移也越長。而在固定下游水深情況下，變動上游水深藉以調整水頭差；在滿足所設定三項測試條件下，各項條件都會產生對應的臨界條件(critical condition)，意即高於該條件時，所產生的潮湧無法使塊體產生顯著的移動或是運動。

在水體撞擊塊體之瞬間簡單地說可以當成位能轉換為動能的過程，所以較高的水頭差在轉換為動能時雖有碎波或是捲氣所產生的能量損失，但仍有足夠大的動能及動量驅動塊體。因此，水深比較大之情境也就容易產生較快的傳輸速度。同樣地，在水深比越大的情況下，表示上游水深越小，水頭差越小，所蓄積的位能就越少，殘餘的動能及動量可能不足以驅動塊體，故每種試驗條件只有在水深比低於臨界條件下方能啟動，這也暗示小型海嘯可能無法驅動現場實際擬海嘯石。

若不考慮各項試驗條件所對應之臨界條件，則整體傳輸速度、絕對位移與水深比之關係如圖 4 及圖 5 所示，最佳近似均是以指數型態衰減。

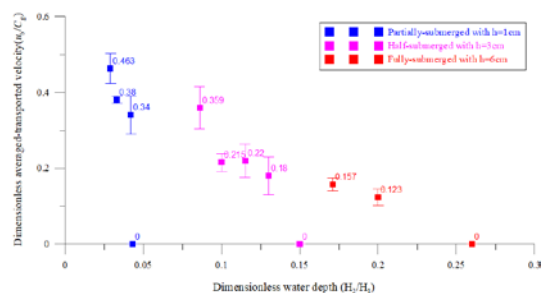


圖 2 不同水深比下之無因次平均傳輸速度

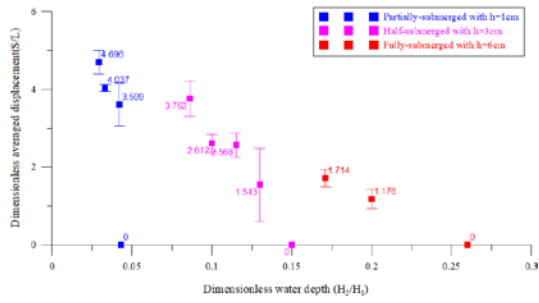


圖 3 不同水深比下之無因次平均絕對位移

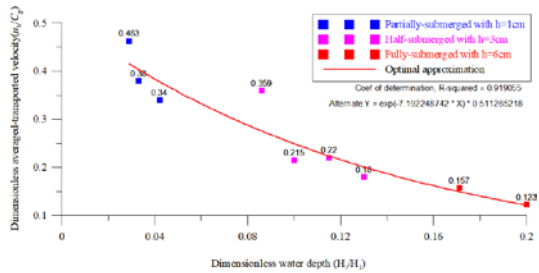


圖 4 無因次平均傳輸速度與水深比之近似(無考慮臨界條件)

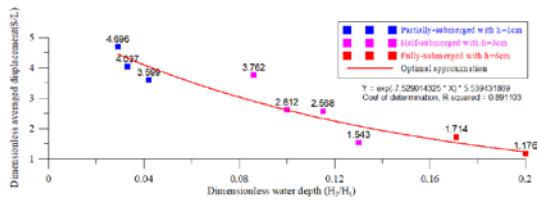


圖 5 無因次平均傳輸速度與水深比之近似(無考慮臨界條件)

### 3.2 靜止時之偏擺角

觀察塊體自受潮湧衝擊啟動塊體後，塊體運動到再度靜止時之過程，大抵可以用加速度合力方向表示運動方向，而三軸之尤拉角則是可以代表物體之旋轉運動。其中由於塊體在受衝擊過程中之運動特性，使得偏擺角(Yaw；繞 z 軸旋轉)較為重要；俯仰角(Pitch)及翻滾角(Roll)相對於偏擺角甚小，可予以忽略。

在自主量測過程中，Yaw 角若為正值則是代表長軸相對於水槽長度方向做順時針旋轉，如圖 6；反之則否。表 2~表 4 為各試驗條件下每測回之偏擺角(Yaw)之結果。從平面影像擷取角度(以下稱為實測值)與自主量測之結果顯示，實測值在部分潛沒條件相對於其它兩個條件最為穩定，每次之偏擺角均在 10 度範圍內偏移，但與感測器相較之下，兩者物

差也較為顯著。猜測原因應是部分潛沒條件下水頭差較高，其傳輸運動型態以平面運動為主，傳輸過程之中較不受流況影響。而在完全潛沒條件下，偶有出現偏擺角為逆時針旋轉之情況；推測這應該是下游水位高而使得傳輸過程中仍會受到浮力等作用力合成結果。量測結果顯示試驗塊體在相同條件最後靜止的旋轉情況應該會趨於相同之方向(順時針或是逆時針)，但是角度值頗為分散較無集中的情況發生。

另一方面，此一結果推測也是受到室內試驗設備之限制；所製造出之潮湧在試驗水槽中仍受到寬度方向尺寸之限制，以及無考慮實際地形之影響，使得塊體受寬度方向之擾動與作用力較小。

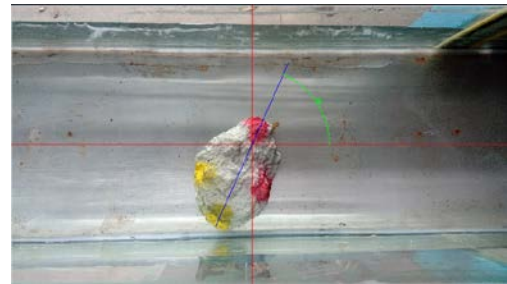


圖 6 塊體靜止時之偏擺角

表 2 半潛沒條件下靜止時之偏擺角量測結果

上游水深 (H1 ; cm)	下游水深 (H2 ; cm)	水位差 (cm)	實測靜止之偏擺角	感測器計算結果
35	3	32	66	62.01
			52	22.18
			52	58.01
			40	13.85
			69	53.2

表 3 完全潛沒條件下靜止時之偏擺角量測結果

上游水深 (H1 ; cm)	下游水深 (H2 ; cm)	水位差 (cm)	實測靜止之偏擺角	感測器計算結果
35	6	29	99	98.72
			73	---
			-110	-89.1
			60	51.27
			-116	-110

表 4 部分潛沒條件下靜止時之偏擺角度量測結果

上游水深 ( $H_1$ ; cm)	下游水深 ( $H_2$ ; cm)	水位差 (cm)	實測靜止之偏擺角	感測器計算結果
35	1	34	---	---
			51	67.9
			54	48.11
			60	77.31
			51	42.24

### 3.2 塊體初始運動

由於潮湧在撞擊塊體之需時甚短(約小於 1 秒),內裝在塊體內之感測器受限於取樣頻率以及寫入速度不足以量測高速動態行為,故分析撞擊初始之特性則是採用高速攝影機以每秒 1000 張的速率拍攝之後擷取影像後進行分析。

物體運動之基本要件即是外力必須克服摩擦力方能達到啟動。Imamura et al.(2008)指出規則塊體在潮湧作用下有可能產生純平移(sliding)及合併旋轉(rolling)與跳躍(saltation)兩種運動模式,如圖 7 所示;其成因與形狀、物體重量與來流流速有關。圖 8~圖 9 分別為部分潛沒及半潛沒條件下,塊體受潮湧衝擊之瞬間系列圖;擷取的時間為水體前緣接觸塊體(此時塊體尚未啟動)至塊體離開拍攝視窗為止。

在本試驗中,在這前二種條件下(上游水位保持固定),並沒有產生上浮、繞長軸的旋轉以及繞短軸的旋轉,這推測是因為塊體外觀較扁,重心甚低且浮力也不足,並不容易有繞短軸之翻滾以及跳躍;但在完全潛沒之狀態下,經由高速攝影機可觀察到在前導波通過塊體時,水平方向之作用力以及波形通過塊體時所產生的壓力差,使得塊體有些微上浮且跳躍之趨勢(但幅度不大)。另一方面,從高速攝影機之影像也可發現,完全潛沒狀況下之塊體是水躍所產生之捲氣區通過塊體時才達到完全移動之狀態。

三種條件之初始運動型態仍是以純平移及繞 z 軸之旋轉為主。發生純平移不難理解,是因潮湧發生水躍直(間)接作用於塊體之上,殘餘動量或動能產生水平方向作用力,克服摩擦力後使塊體產生平移運動;至於繞 z 軸的旋轉,可能的原因是塊體外型是不規則的,潮湧作用於塊體上的作用力在投影

方向上並未平均,速度差或是水平作用力之差異使得塊體產生繞 z 軸的偏擺,最後形成如前節之偏擺角。另一個可能之原因,則是與塊體擺設位置有關,由於水躍衝擊於塊體上實際上是一個複雜的三維流場,甚難取得與運動方向平行之二維平面流場。因此為使用 BIV 法取得塊體附近之代表性流場,刻意地將塊體擺設靠近玻璃壁上(因為可以拍到氣泡也可以拍到塊體),雖然可以取得塊體附近之二維近似流場,但另一方面也就使得潮湧作用的方式是唯一的;即是當流通過塊體時,因為投影方向上通水斷面積不同而形成速度差,使得塊體產生繞 z 軸之偏擺。

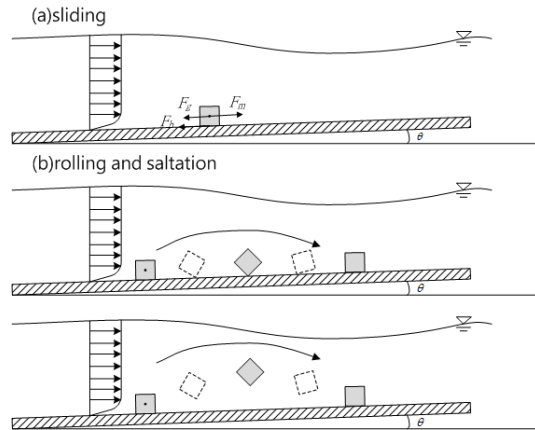


圖 7 規則塊體在潮湧作用下有可能產生之運動模式(a)純平移(sliding)及合併旋轉(rolling)與跳躍(saltation)( Imamura et al.,2008)

透過高速攝影機之影像擷取,可以從影像上定義塊體上某一個代表點,並取水躍前緣接觸到塊體(此時塊體尚未啟動)做為時間之零點,以作為計算初始運動中之位移、速度及加速度變化。圖 10~圖 12 分別為半潛沒條件下(上游水深 35 公分,下游水深 3 公分)沿水槽方向之累積水平位移、瞬時水平速度以及瞬時水平加速度。由累積水平位移結果顯示,塊體在時間零點開始到脫離拍攝視窗大概為 0.5~0.7s,三個測回都在 0.5s 內就脫離拍攝視窗。行進方向皆為往右行進。而由速度曲線顯示,在初始運動期間內都為加速度運動,四個測回在 0.5s 內之平均加速度均介於 0.7~1cm/s,而自衝擊接觸開始之後均會產生最大速度,但發生時間較不一定,約介於第 0.2 秒~第 0.6 秒之間。在達到最大速度後,會有一個減速之現象,對照圖??推測應該是塊體此時正在進行偏擺運動,使得瞬時水平方向位移較



小。而在加速度方面，前三個測回均顯示，在接觸後 0.2 秒內均會達到最大瞬時加速度而後出現減速現象；第四測回雖然稍晚達到最大瞬時值，但是瞬時加速度趨勢與其它測回一致。

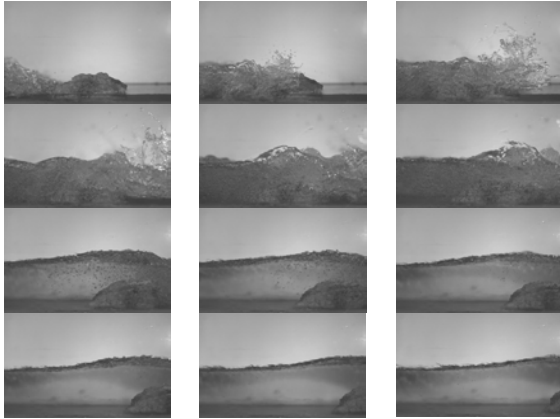


圖 8 部分潛沒條件下，塊體受潮湧衝擊之瞬間系列圖(下游水位 3 公分，水位差 34 公分， $\Delta t = 0.05s$ )

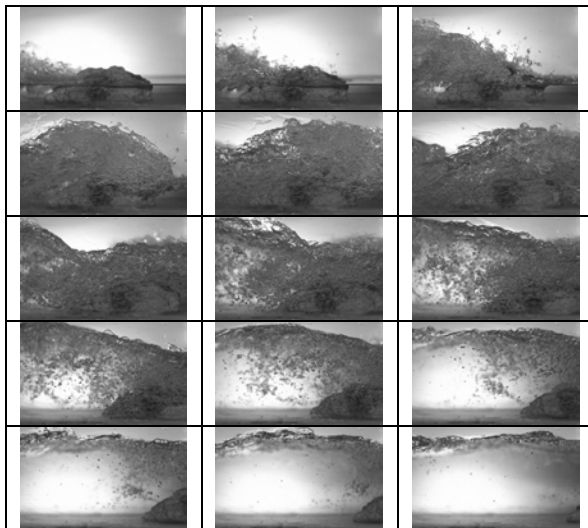


圖 9 半潛沒條件下，塊體受潮湧衝擊之瞬間系列圖(下游水位 3 公分，水位差 32 公分， $\Delta t = 0.05s$ )

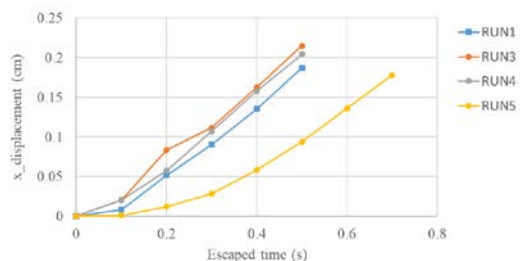


圖 10 半潛沒條件下，塊體受潮湧衝擊下之累積位移

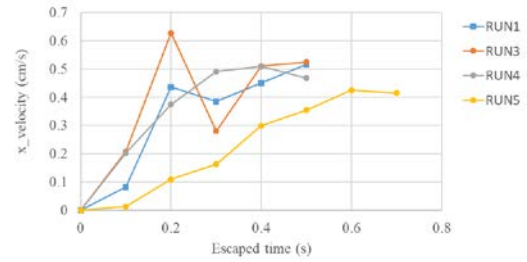


圖 11 半潛沒條件下，塊體受潮湧衝擊下之水平速度

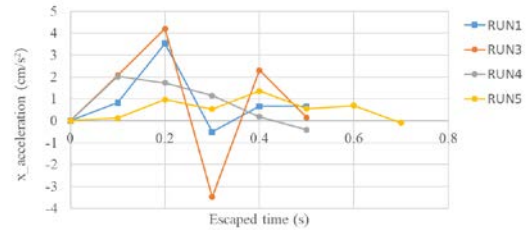


圖 12 半潛沒條件下，塊體受潮湧衝擊下之水平加速度

#### 四、結論

經由高速攝影機與微型感測器量測塊體受潮湧衝擊之傳輸行為顯示，塊體在同一條件下大部分均為二維平面運動(2D plane motion)，有部分測回發生不明顯之跳躍，但整體來看仍是以平移運動為主要運動型態，這應該與塊體屬於較為扁平的扁球體有關。同時，可能因為物體質量不均勻與外觀不規則之故，使得在衝擊初期即有發生繞 z 軸之偏擺。而在衝擊發生初期，塊體瞬時加速度會達到最大值後，隨即進行減速運動。

#### 謝誌

本研究係科技部專題研究計畫「綠島及蘭嶼海岸海嘯引致之巨石之潛勢波源區及情境探討(2/2)」(編號 MOST 108-2221-E-006-085-)之部分研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. Imamura F., Goto K. and Ohkubo S. (2008) "A Numerical Model for the Transport of a Boulder by Tsunami," *Journal of Geophysical Research*, Vol.113, C01008, doi:10.1029/2007JC004170.

# 波浪通過固定型乾式人工植生浮島之波減 衰效應試驗研究

藍元志<sup>1\*</sup> 王柏鈞<sup>2</sup> 林大為<sup>2</sup> 李翌德<sup>3</sup> 翁文凱<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>國立臺灣海洋大學海洋工程科技中心助理研究員

<sup>2</sup>國立臺灣海洋大學河海工程學系博士班研究生

<sup>3</sup>國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士班研究生

<sup>4</sup>國立臺灣海洋大學河海工程學系教授

## 摘要

科技部計畫：109-2221-E-019-040-

本試驗研究探討波浪經過方箱類型乾式人工植生浮島時波浪之減衰，改變不同根植區透水特性、沒水深度及植生浮島不同寬度，對波浪反射係數、透射係數及能量損失係數的影響。試驗結果發現，以椰纖維作為根植區材料組成的植生浮島對波浪消能的效果優於顆粒狀發泡煉石材料。增加浮島寬度或是增加根植區沒水深度均能使波浪在浮島內部消滅更多的波浪能量，致使波浪透過率降低。波能損失係數隨根植區沒水深度增加呈現上下變化但整體趨勢增加的情況。

關鍵詞：人工植生浮島、波浪減衰

## The Experimental Study on Wave Damping by an Immobile Dry Type of Artificial Vegetation Floating Island

Yuan-Jyh Lan<sup>\*</sup>, Bo-Jun Wang, Ta-Wei Lin, Yi-Te Li, Wen-Kai Weng

<sup>\*</sup> Assistant Researcher, Center of Excellence for Ocean Engineering, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

This experimental study investigates the wave damping on the wave passing through an immobile dry type of artificial box vegetation floating island. Effects of the permeability and submerged depth of matrix medium and the width of vegetation floating island on the reflection coefficient, transmission coefficient and energy loss coefficient are studied. The experimental results show that the vegetation floating island with coconut filaments as the material of the matrix medium has better effect on wave energy dissipation than that with the material of granular foamed stones. Increasing the width of the vegetation floating island or the submerged depth of matrix medium can reduce more wave energy, resulting in a smaller wave transmittance. The wave energy loss coefficient shows an increasing trend of vibration with the increase of the submerged depth of matrix medium.

Keywords: Artificial vegetation floating island; Wave damping

## 一、前言

人工植生浮島包含下列四項主要機能(李, 2013):(1).生物棲息及多樣性:可提供昆蟲、兩棲類、

鳥類及魚類等生物的棲息處;(2).水質淨化機制:可吸收水中氮、磷等營養鹽,淨化水質;(3).景觀綠化改善:具有綠色水生或陸生植物植栽之景觀美化;

(4)消波及護岸效果：具有直接消滅波浪能量的功能。在過去的十幾年中，許多歐洲國家和美國已經廣泛認可人工浮島作為棲息地恢復的有效工具(Winston et al., 2013)，並已在許多國家的水環境中進行商業應用。透過有效管理的自然/人工植生浮島，亦可控制水生植物長時間自然擴展可能衍生的潟湖、湖泊、濕地的陸化問題；台灣亦有不少人工浮島應用於潟湖、溼地、湖泊及水庫的案例。

人工植生浮島擁有多樣性的生態及環境復育功能，因此在生態及景觀工程領域中被廣泛運用，大部分的相關研究著重於生態環境、水質改善、景觀維護等議題，對於消滅波浪能量保護水岸機能的研究較少著墨，一般僅出現在個案研究中，缺乏足夠的系統性基礎研究資料。在少數探討人工植生浮島消波率的研究，提到消波浮島的消波率與風向有很大的關係，消波率一般在 5%~40%之間，若將反射波影響考慮進去設計消波率可達 53% (陳，2006)；一些個案研究則強調消波率可達 80% 以上(陳，2019)。由於人工植生浮島具多樣化設計，需要有更多較具全面性、系統性的基礎研究探討波浪減衰的效應。波浪和植被之間相互作用的波減衰機制需要予以量化(Asano et al., 1992)。近年因全球氣候變遷引致極端氣候事件和海平面上升影響，使得更多專家學者對於沿海植被造成的波、流減衰等課題的興趣和研究，植生浮島對波浪減衰影響即為其中一項重要議題。本研究計畫即針對波浪通過方箱型乾式人工植生浮島後，波浪與植生浮島之間相互作用之波高減衰問題進行研究，以瞭解人工植生浮島的波浪減衰機制。

## 二、實驗設置

本試驗於國立臺灣海洋大學海洋工程綜合實驗研究中心之小斷面造波水槽進行，水槽總長為 50m，寬 1.0m，深 0.8m，下游側為坡度為 1:5 的消能斜坡設施，並以人工草皮覆蓋消能斜坡使水槽水面較快

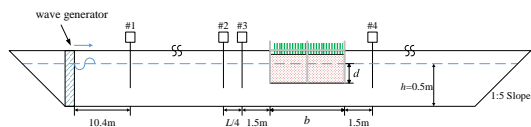


圖 1 波浪通過固定型方箱型乾式人工植生浮島波減衰試驗佈置示意圖

達到靜穩。造波機為活塞推拉式造波機。試驗配置如圖 1 所示。

試驗水深  $h = 50\text{cm}$ 。試驗模型幾何條件設定 5 種根植區沒水深度( $d = 5\text{cm}$ 、 $10\text{cm}$ 、 $15\text{cm}$ 、 $20\text{cm}$ 、 $25\text{cm}$ )以及 2 種寬度( $b = 60\text{cm}$ 、 $120\text{cm}$ )。試驗所使用之人工植生浮島試驗模型條件，根據已實際應用之方箱型乾式人工植生浮島設計特性，設定 3 種根植區透水特性，分別以(a)球形顆粒發泡煉石+側邊不透水板、(b)球形顆粒發泡煉石、以及(c)細長形狀之椰纖維等材料作為根植區與填縫。經由率定試驗，以發泡煉石為材料構成之根植區的孔隙率為 0.4175，滲透係數  $k_p = 1.8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ ，紊流阻力係數  $C_f = 0.1407$ ；以椰纖維為材料構成之根植區的孔隙率為 0.9279，滲透係數  $k_p = 3.24 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ ，紊流阻力係數  $C_f = 0.2019$ 。

試驗之波浪條件如表 1 所示為週期性規則波，其波形尖銳度介於 0.017 至 0.040 間，而相對水深  $kh$  則介於 0.775 至 3.154 間 ( $k = 2\pi/L$  為波浪週波數)，除了週期為 0.8 秒條件接近深海波臨界範圍外，其於試驗的波浪條件都在中間性水深之區域；根據 Keller (1948) 和 Littman (1957) 提出的橢圓函數理論，Ursell number 皆在 105 以下，表示本試驗的試驗波浪條件皆在線性波範圍內。

表 1 試驗波浪條件

週期 $T(\text{sec})$	波高 $H(\text{cm})$	波長 $L(\text{m})$	$kh$
0.8	4.0	0.996	3.154
0.9	4.0	1.248	2.517
1.0	4.0	1.513	2.076
1.1	4.0	1.781	1.764
1.2	5.0	2.048	1.534
1.3	5.0	2.312	1.359
1.4	5.0	2.571	1.222
1.5	6.0	2.826	1.112
1.6	6.0	3.078	1.021
1.7	6.0	3.327	0.944
1.8	7.0	3.572	0.880
1.9	7.0	3.815	0.823
2.0	7.0	4.056	0.775

## 三、結果與討論

### 3.1 根植區材料透水特性影響

圖 2、圖 3 與圖 4 分別為以 3 種不同根植區材料透水特性(球形顆粒發泡煉石+側邊不透水板、球形顆粒發泡煉石、細長形狀椰纖維)、根植區相對沒水深度  $d/h = 0.5$ 、浮島相對寬度  $b/h = 1.2$  之乾式人

工植生浮島於表 1 波浪條件之反射係數  $K_R$ 、透過係數  $K_T$  與波能損失係數  $E_L (= 1 - K_R^2 - K_T^2)$  比較圖，圖中橫軸為波浪相對水深  $kh$ 。圖中基本上可以看到，反射係數方面，以球形顆粒發泡煉石+側邊不透水板組成以及以發泡煉石組成根植區之植生浮島的反射係數  $K_R$  隨  $kh$  增加而增加，再逐漸趨於一定值(分別為  $K_R \approx 0.89$  與  $K_R \approx 0.78$ )的趨勢；不過，以細長形狀之椰纖維組成根植區之植生浮島的反射係數  $K_R$  並不隨  $kh$  改變有明顯的變化趨勢， $K_R$  值在 0.45~0.55 範圍，顯示根植區材料基本組成形狀的不同對於波浪反射的影響會有不同。透過係數  $K_T$  在  $kh = 0.75 \sim 3.25$  範圍基本上隨  $kh$  增加由  $K_T = 0.6$  降低至 0.1 左右，根植區基本材料組成的不同對於波浪透過率的影響較小。根植區材料組成對波浪消能效果方面，整體而言以椰纖維組成根植區之植生浮島的波能損失係數  $E_L$  值最大， $E_L$  值隨  $kh$  增加而逐漸增加至趨於一定值( $E_L \approx 0.8$ )的趨勢；其次為發泡煉

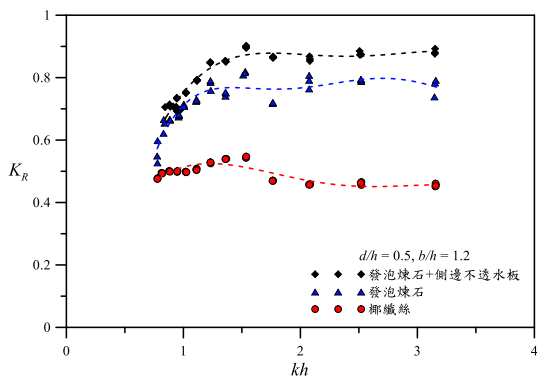


圖 2 波浪通過乾式人工植生浮島反射係數  $K_R$  與波浪相對水深  $kh$  之變化分佈( $d/h = 0.5$ 、 $b/h = 1.2$ )

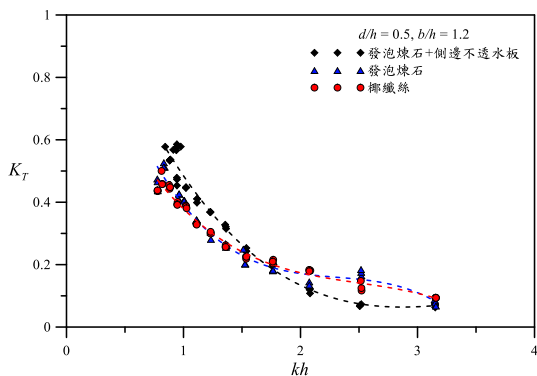


圖 3 波浪通過乾式人工植生浮島透過係數  $K_T$  與波浪相對水深  $kh$  變化分佈( $d/h = 0.5$ 、 $b/h = 1.2$ )

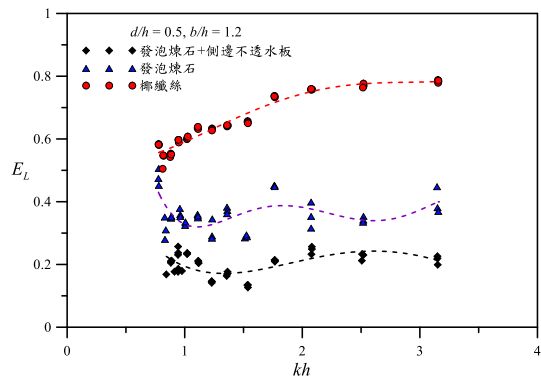


圖 4 波浪通過乾式人工植生浮島波能損失係數  $E_L$  與波浪相對水深  $kh$  變化分佈( $d/h = 0.5$ 、 $b/h = 1.2$ )

石組成根植區之植生浮島， $E_L$  值隨  $kh$  增加在 0.3~0.5 範圍間變化；根植區為發泡煉石+側邊不透水板組成之植生浮島的波能損失係數  $E_L$  值最小， $E_L$  值隨  $kh$  增加在 0.1~0.3 範圍間變化。上述結果顯示，以椰纖維作為根植區的植生浮島對波浪消能效果優於另外兩種根植區材料組成。

## 3.2 植生浮島寬度的影響

### 3.2.1 以發泡煉石為根植區條件

圖 5、圖 6 與圖 7 為以球形顆粒發泡煉石組成之根植區的乾式人工植生浮島，於根植區相對沒水深度  $d/h = 0.5$ ，浮島相對寬度  $b/h$  改變的情形下，於表 1 波浪條件之反射係數  $K_R$ 、透過係數  $K_T$  與波能損失係數  $E_L$  比較圖。結果可以看到，以發泡煉石組成根植區之植生浮島於波浪相對水深  $kh$  值較小時(靠近淺水波條件)，反射係數  $K_R$  隨浮島寬度  $b/h$

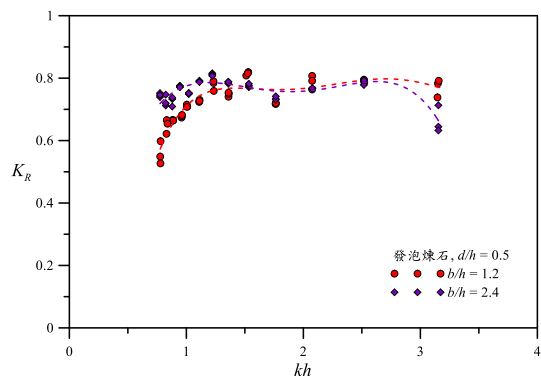


圖 5 波浪通過以發泡煉石組成之根植區的乾式人工植生浮島在不同浮島寬度  $b/h$  條件下反射係數  $K_R$  與波浪相對水深  $kh$  之變化分佈比較( $d/h = 0.5$ )

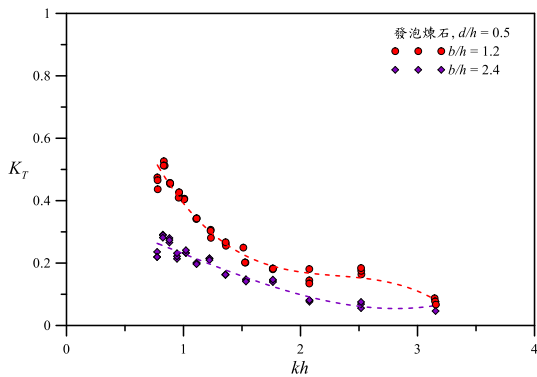


圖 6 波浪通過以發泡煉石組成之根植區之乾式人工植生浮島在不同浮島寬度  $b/h$  條件下透過係數  $K_T$  與波浪相對水深  $kh$  變化分佈比較( $d/h = 0.5$ )

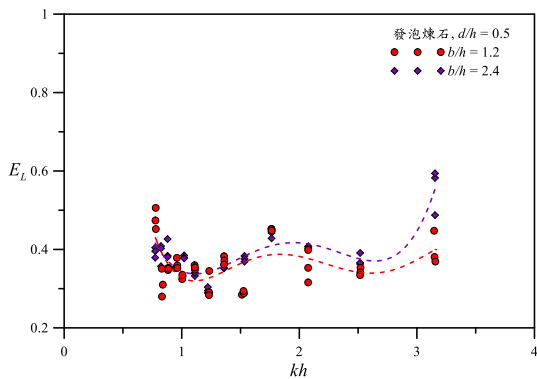


圖 7 波浪通過以發泡煉石組成之根植區之乾式人工植生浮島在不同浮島寬度  $b/h$  條件下波能損失係數  $E_L$  與波浪相對水深  $kh$  變化分佈比較( $d/h = 0.5$ )

增加為 2 倍時略為增加；於  $kh$  值較大時(靠近深水波條件)，反射係數  $K_R$  則隨浮島相對寬度  $b/h$  增加為 2 倍時略為減少(圖 5 的案例其分界點大約在  $kh = 1.5 \sim 2.5$  之間)。至於透過係數  $K_T$  隨浮島相對寬度  $b/h$  增加為 2 倍時有明顯降低，波能損失係數  $E_L$  則隨浮島相對寬度  $b/h$  增加而增加。

### 3.2.2 以椰纖絲為根植區條件

圖 8、圖 9 與圖 10 為以細長形狀椰纖絲組成之根植區之乾式人工植生浮島，於根植區相對沒水深  $d/h = 0.5$ ，浮島相對寬度  $b/h$  改變的情形下，於表 1 波浪條件之反射係數  $K_R$ 、透過係數  $K_T$  與波能損失係數  $E_L$  比較圖。結果可以看到，以椰纖絲組成根植區之植生浮島於波浪相對水深  $kh$  值較小時(靠近淺水波條件)，反射係數  $K_R$  隨浮島相對寬度  $b/h$  增

加為 2 倍時略為增加；於  $kh$  值較大時(靠近深水波條件)，反射係數  $K_R$  則隨浮島相對寬度  $b/h$  增加為

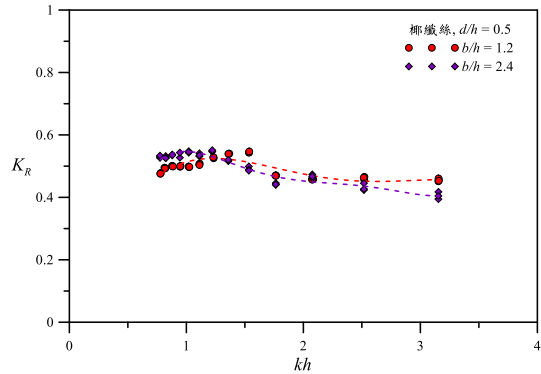


圖 8 波浪通過以椰纖絲組成之根植區之乾式人工植生浮島在不同浮島寬度  $b/h$  條件下反射係數  $K_R$  與波浪相對水深  $kh$  之變化分佈比較( $d/h = 0.5$ )

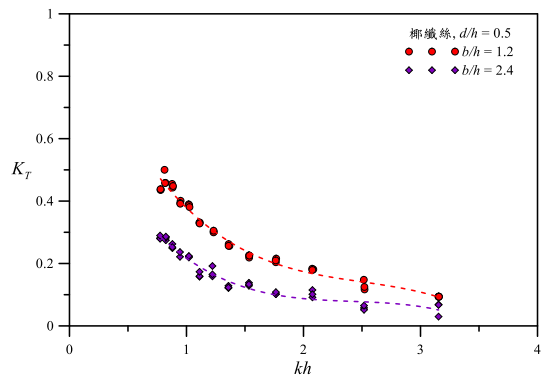


圖 9 波浪通過以椰纖絲組成之根植區之乾式人工植生浮島在不同浮島寬度  $b/h$  條件下透過係數  $K_T$  與波浪相對水深  $kh$  變化分佈比較( $d/h = 0.5$ )

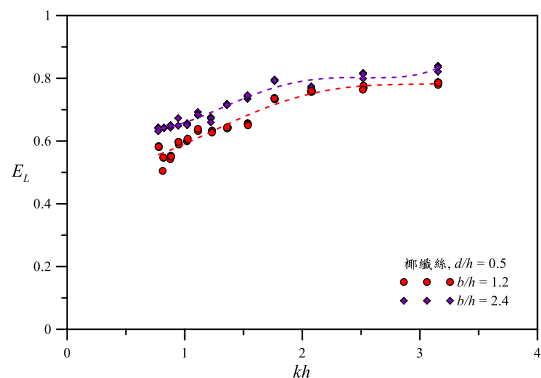


圖 10 波浪通過以椰纖絲組成之根植區之乾式人工植生浮島在不同浮島寬度  $b/h$  條件下波能損失係數  $E_L$  與波浪相對水深  $kh$  變化分佈比較( $d/h = 0.5$ )

2 倍時略為減少(圖 8 的案例其分界點大約在  $kh = 1.3\sim 2.0$  之間)。至於透過係數  $K_T$  隨浮島相對寬度  $b/h$  增加為 2 倍時有明顯降低, 波能損失係數  $E_L$  則隨浮島相對寬度  $b/h$  增加而增加。

綜合上述, 乾式人工植生浮島寬度改變, 對於波浪反射的影響較不明顯; 浮島寬度增加則波能損失增加致使波浪透過率降低。

### 3.3 根植區沒水深度的影響

#### 3.3.1 以發泡煉石為根植區條件

圖 11、圖 12 與圖 13 為以球形顆粒發泡煉石組成之根植區的乾式人工植生浮島, 於浮島相對寬度  $b/h = 1.2$ , 根植區相對沒水深度  $d/h$  改變的情形下, 於表 1 波浪條件之反射係數  $K_R$ 、透過係數  $K_T$  與波能損失係數  $E_L$  比較圖。結果可以看到, 以發泡煉石組成根植區之植生浮島的反射係數  $K_R$  基本上隨根

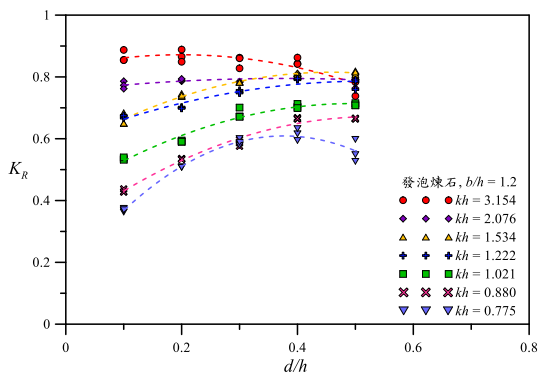


圖 11 波浪通過以發泡煉石組成之根植區的乾式人工植生浮島在不同波浪條件其反射係數  $K_R$  與根植區相對沒水深度  $d/h$  之變化分佈比較( $b/h = 1.2$ )

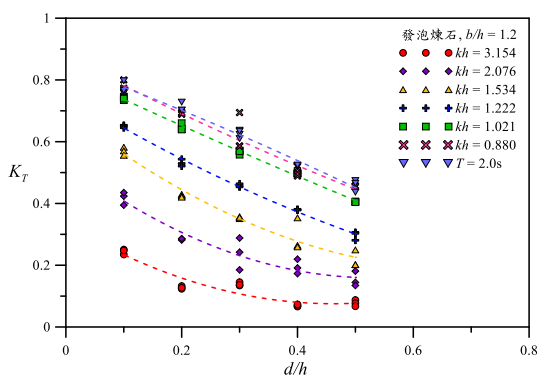


圖 12 波浪通過以發泡煉石組成之根植區的乾式人工植生浮島在不同波浪條件其透過係數  $K_T$  與根植區相對沒水深度  $d/h$  變化分佈比較( $b/h = 1.2$ )

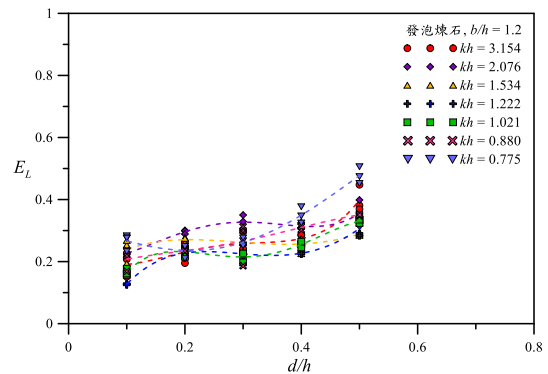


圖 13 波浪通過以發泡煉石組成之根植區的乾式人工植生浮島在不同波浪條件其波能損失係數  $E_L$  與根植區相對沒水深度  $d/h$  變化分佈比較( $b/h = 1.2$ )

植區相對沒水深度  $d/h$  增加以及波浪相對水深  $kh$  增加而增加, 不過在  $kh > 2$  (靠近深水波條件)、 $d/h \geq 0.4$  時除外; 透過係數  $K_T$  值基本上則維持隨根植區相對沒水深度  $d/h$  增加以及  $kh$  增加而減少; 波能損失方面, 整體而言, 波能損失係數  $E_L$  隨根植區相對沒水深度  $d/h$  增加呈現整體上下振盪增加的趨勢。

#### 3.3.2 以椰纖維為根植區條件

圖 14、圖 15 與圖 16 為以細長形狀椰纖維組成之根植區的乾式人工植生浮島, 於寬度  $b/h = 1.2$ , 沒水深度  $d/h$  改變的情形下, 於表 1 波浪條件之反射係數  $K_R$ 、透過係數  $K_T$  與波能損失係數  $E_L$  比較圖。結果可以看到, 以椰纖維組成根植區之植生浮島的反射係數  $K_R$  在波浪相對水深  $kh < 1.54$  時(靠近淺水波條件)基本上  $K_R$  隨根植區沒水深度  $d/h$  增加而增加, 但是在  $kh > 2$  時(靠近深水波條件) $K_R$  則呈現隨

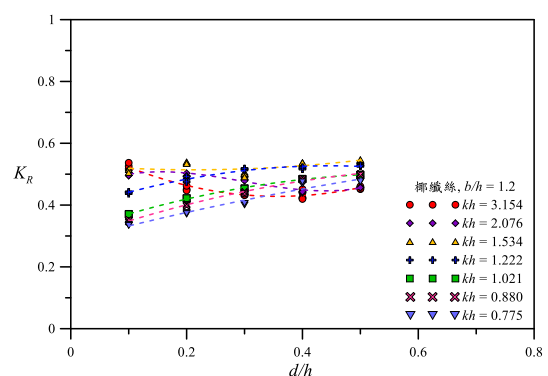


圖 14 波浪通過以椰纖維組成之根植區的乾式人工植生浮島在不同波浪條件其反射係數  $K_R$  與根植區相對沒水深度  $d/h$  之變化分佈比較( $b/h = 1.2$ )

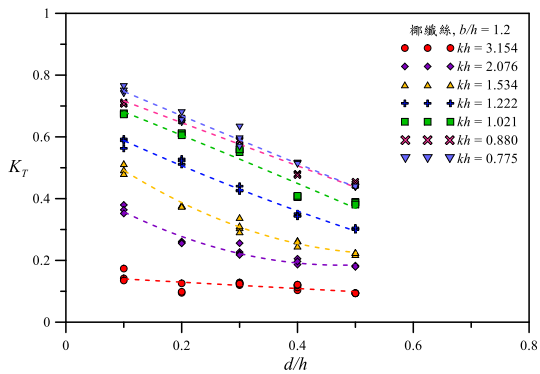


圖 15 波浪通過以椰纖維組成之根植區的乾式人工植生浮島在不同波浪條件其透過係數  $K_T$  與根植區相對沒水深度  $d/h$  變化分佈比較( $b/h = 1.2$ )

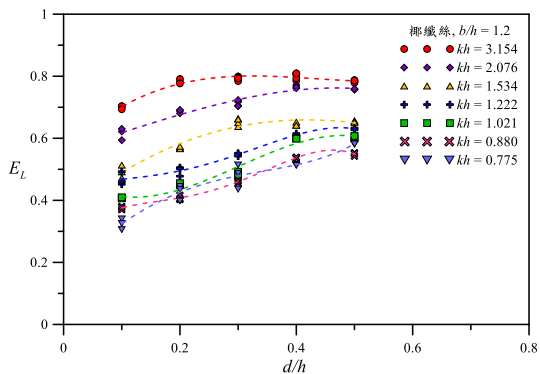


圖 16 波浪通過以椰纖維組成之根植區的乾式人工植生浮島在不同波浪條件其波能損失係數  $E_L$  與根植區相對沒水深度  $d/h$  變化分佈比較( $b/h = 1.2$ )

根植區相對沒水深度  $d/h$  增加而減少的情況；透過係數  $K_T$  基本上則維持隨根植區相對沒水深度  $d/h$  增加以及  $kh$  增加而減少；波能損失方面，整體而言，波能損失係數  $E_L$  隨根植區相對沒水深度  $d/h$  增加呈現上下變化但整體趨勢增加的情況。

#### 四、結論

本研究應用水工模型試驗，探討波浪通過方箱類型乾式人工植生浮島時之波浪減衰，在不同根植區材料透水特性、植生浮島寬度及根植區沒水深度改變與波浪反射、透射、波能損失係數的關係。試驗結果之綜合結論如下：(1)根植區材料基本組成形狀的不同，對於波浪反射與波能減衰的影響會有明顯影響，不過對於波浪透過的影響較小。以椰纖維組成根植區的乾式人工植生浮島對於波能減衰有較

明顯的效果，並使得波浪反射較低。(2)浮島寬度改變對波浪反射的影響較不明顯，在靠近淺水波條件時反射係數隨浮島寬度增加而增加，在接近深水波條件時反射係數隨浮島寬度增加而減少。浮島寬度增加使得波浪在浮島內部消滅更多的波浪能量致使波浪透過率降低。(3)根植區沒水深度改變對波浪反射係數的影響，在靠近淺水波條件時反射係數隨沒水深度增加而增加，在靠近深水波條件時反射係數隨沒水深度增加而減少。透過係數隨根植區沒水深度增加以及波浪相對水深增加而減少。波能損失係數隨根植區沒水深度增加呈現上下振盪增加的趨勢。

#### 謝誌

本論文係科技部專題研究計畫（編號 MOST 109-2221-E-019-040）之部分研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

- Asano, T., Deguchi, H. and Kobayashi, N. (1992) Interaction between water waves and vegetation, *Proc. 23rd Intern. Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 2710-2723.
- Keller, J.B. (1948) The solitary wave and periodic waves in shallow water. *Comm. Pure Appl. Math.*, 1, 323-339. doi:10.1002/cpa.3160010402.
- Littman, W. (1957) On the existence of periodic waves near critical speed, *Comm. Pure Appl. Math.*, 10, 241-269. doi:10.1002/cpa.3160100203.
- Winston, R.J., Hunt, W.F., Kennedy, S.G., Merriman, L.S., Chandler, J. and Brown, D. (2013) Evaluation of floating treatment wetlands as retrofits to existing stormwater retention ponds, *Ecological Eng.* 54, 254-265.
- 李至軒(2013) 生態景觀浮島結合活動浮台設計之應用，碩士論文，國立臺灣科技大學設計學院建築研究所。
- 陳玉妹(2006) 生態池之水生植物篩選及應用，計畫口試論文，明道大學環境規劃暨設計研究所。
- 陳彥羽(2019) 浮式柔性孔隙結構物對波浪減衰之試驗研究，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程學系。

# 圓柱底床瞬間抬升之遠場波研究

張志華<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>嶺東科技大學副教授

## 摘要

科技部計畫：MOST 110-2221-E-275-001

地震造成地殼斷層錯動是引起海嘯波的主因。本文應用三維數值模式計算地床圓柱體瞬間上升所造成的遠場波動。數學模式以靜水深無因次化後，影響參數可簡化為圓柱半徑及抬升高度。結果發現圓柱半徑對波浪型態會有大的影響。小的圓柱(e.g.半徑=2)在遠場產生簡諧的包落群波且前首波非最大波;大的圓柱(e.g.半徑=10)在遠場的首波會產生孤立波型態且為最大波。然而，圓柱抬升高度主要影響波浪幅度對形態影響不大。

關鍵詞：圓柱底床、海嘯、孤立波、遠場波。

## Study on Far-Field Waves Produced by Instantaneous Uplift of Circular Cylinder on Bottom

Chih-Hua, Chang<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Associate Professor, Ling-Tung University

### ABSTRACT

Dislocation of faults caused by earthquakes is the main cause of tsunami waves. In this article, a three-dimensional numerical model is applied to calculate the far-field waves produced by the instantaneous rise of the circular cylinder bottom. After the mathematical model is normalized by the still-water depth and linear-long-wave celerity, the influencing parameters can be simplified to the radius of the cylinder and its lifting height. It was found that the radius of the cylinder has a great influence on the wave patterns. A small cylinder (e.g. radius = 2) produces a harmonic envelope group wave in the far field and its front wave is not the largest wave; a large cylinder (e.g. radius = 10) produces a largest leading solitary-type wave in the far field. However, the uplift height of the cylinder mainly affects the wave amplitude and has little effect on the shape.

Keywords: Circular-cylindrical bottom; Tsunami; Solitary wave.

### 一、前言

地震引發的海底地殼錯動是造成海嘯波最主要的因素之一。地殼的錯動一般可分為正斷層、逆斷層及平移斷層。海底地殼移動產生的波動是個三維非線性的波動行為。以往有些研究者以二維的方法研究此現象，並無法確切分析此問題，例如 Hammack (1973)以線性波理論及實驗及數值方法探

討二維的底床上升及下降產生的波動。在 Hammack 的研究裡，可以知道底床抬升會在遠方形成孤立波的波傳現象。但是我們可以想像在三維的水域裡，波浪會往平面擴散傳遞，是否會形成孤立波形狀的波浪?是值得探討的問題。Fuhrman et al. (2009)及 Jamin et al. (2015)有進行三維的實驗。Jamin et al. (2015)以近似圓形底床抬升函數的變化，分析近場



(初始)造波的演變。目前尚未看到有文獻探討實驗室中底床造波觀察的遠場波動，這在實驗室的尺度上有其難度。

在理論或數值方面的相關研究，基於圓形底床在三維空間的垂直運動，可以簡化為軸對稱的模式，並進一步以線性理論分析，以求得解析解。Okal et al. (2016)分析線性解析解在遠場的波動會產生最大波並非在前首波的現象。本研究亦即用完全非線性的模式來分析這個現象。本文以數值求解三維的數值模式，用以分析底床變動波傳於遠場的特性。數值結果與 Jamin et al. (2015)的實驗結果吻合。本文數值的模式以靜水深無因次化後，圓形底床瞬間造波的形狀因子僅有半徑( $r$ )及高度( $b_m$ )。若忽略底床變動時間因素，因此，可給定參數  $r$  與  $b_m$  分析其對波動的影響。特別是遠場的波形變化，由初步結果發現  $b_m$  所扮演的角色主要是波動的幅度，因此本文固定  $b_m = 0.25$  的情況下，分析不同  $r$  的遠場波形。初步結果發現  $r$  較小時(例如  $r = 2$ )會形成波長較短的包絡形的東波;而  $r$  較大時(例如  $r = 10$ ) 則產生首波具有孤立波形的型態。

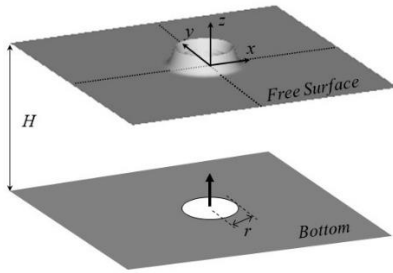


圖 1 探討問題之示意圖

## 二、數值方法

本研究之物理問題考慮卡氏座標系統之  $xy$ -平面在靜水面， $z$  軸垂直向上(見圖 1)。文中選擇無因次化之參考長度為靜水深  $H^*$ 、參考速度為線性長波波速  $\sqrt{gH^*}$ ，參考時間為  $\sqrt{H^*/g}$ 。在此， $g$  是重力加速度。之後的符號若無特別說明，則均為無因次量。自由水面定義為  $z = \zeta(x, y, t)$ ；變動底床定義為  $z = \zeta_b(x, y, t)$ 。

本文考慮流體無黏性的非旋性流，定義其在  $(x, y, z)$  方向的水粒子速度為純量勢能函數  $\phi$  的梯度，亦即  $(u, v, w) = (\phi_x, \phi_y, \phi_z)$ 。本文對於座標寫為下標符號，代表偏微分的意思。自由水面決定於運動及動

力邊界條件，可表示為：

$$\zeta_t = -\nabla\zeta \cdot \nabla\hat{\phi} + \hat{w} \quad (1)$$

$$\hat{\phi}_t = -\zeta - \frac{1}{2}(\nabla\hat{\phi} \cdot \nabla\hat{\phi} + \hat{w}^2) \quad (2)$$

此處  $\nabla = (\partial_x, \partial_y)$ ，符號 " $\hat{\phantom{x}}$ " 表示自由水面的物理量。

考慮整體計算水域範圍在  $x_{min} \leq x \leq x_{max}$  且  $y_{min} \leq y \leq y_{max}$ 。要求得到解，除了要滿足自由水面之條件，還得求解流場的 Laplace 方程式及滿足底床( $\zeta_b$ )的邊界條件：

$$\phi_{xx} + \phi_{yy} + \phi_{zz} = 0, \quad \zeta_b \leq z \leq \zeta, \quad (3)$$

$$(\zeta_b)_t = -\nabla(\zeta_b) \cdot \nabla\check{\phi} + \check{\phi}_z, \quad z = \zeta_b \quad (4)$$

此處符號 " $\check{\phantom{x}}$ " 表示在底床的該物理量。假設非碎波，則自由水面是隨時間變化的連續曲面。因此本文使用曲線座標方式進行座標轉換，亦即將  $(x, y, z; t)$  轉換為  $(\xi, \eta, \gamma; \tau)$ 。格網建立後，即可將流場利用數值方法進行離散化求解並滿足邊界條件。本文數值方法採用中央差分法求解 Laplace 流場；以顯隱混和法處理自由水面條件以及在底床及側邊使用一階往流場內部的差分法。

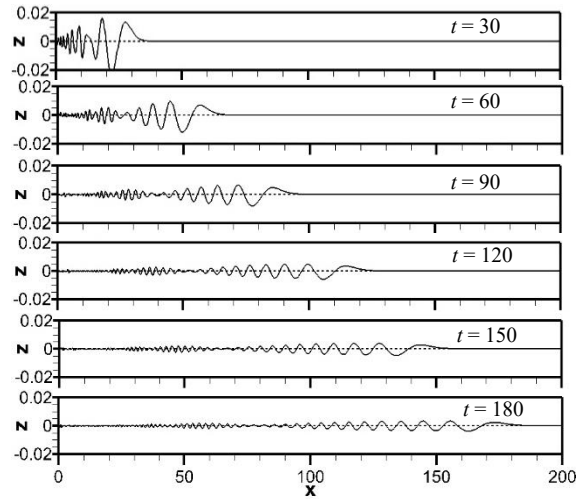


圖 2 地形以  $b_m = 0.25, r = 2$  突升產生在不同時間的波形變化。

## 三、結果與討論

文中主要考慮底床變動之範圍係以半徑等於  $r$  的圓盤瞬間垂直上升至最大值  $b_m$  所引致的波動。底床運動為：

$$\zeta_b(x, y; t = 0^+) = \begin{cases} -1 + b_m, & \text{if } \sqrt{x^2 + y^2} \leq r, \\ -1, & \text{else.} \end{cases}$$

這樣的假設讓此波動物理問題的影響參數僅與  $r$  及  $b_m$  相關。圖 2 與圖 3 分別為  $b_m=0.25$  之  $r=2$  與  $r=10$  所造成波動的剖面。由於是軸對稱的情況，此處僅切出  $y=0$  且  $x \geq 0$  的部分來呈現。主要想了解  $r$  的大小(板塊大小)對波動的影響差異。注意兩圖的垂直軸的值範圍並不同。由圖 2 可看出  $r=2$  的情況剛開始( $t=30$ )產生相對最大的前首波，這個前首波高於靜水面且其後跟著振盪波。這不同於 Hammack(1973)探討二維造波的情形，由他們的實驗可知二維的底床瞬間突起物在首波會形成完全幾乎是高於靜水面上的波動。圖 2 之  $t=60$  就可看出兩個不同速度的群波發展出來，之後隨著傳播的時間及距離愈遠( $t=180$ )，波高越來越小但群波的特性仍在，前首波並非最大波且沒有形成孤立波的状态。三維的現象確實不同於二維的表現。觀察圖 3 之  $r=10$  的情況，比起圖 2，這底床變動的範圍變大許多，比較之，可發現開始的前首波就有三個高於靜水位的波峰，再隨後跟著一個大的低陷波及後面的振盪波。所以當  $r$  較大的情況所以產生的波動沒有明顯的群波現象，當  $t=180$  發展至遠場時，可發現前首波有形成孤立波的趨勢。由以上討論可知，當  $r$  較小的上凸地形時，容易形成群波的特性，而  $r$  足夠大就會產生前首波發展為孤立波的特性。

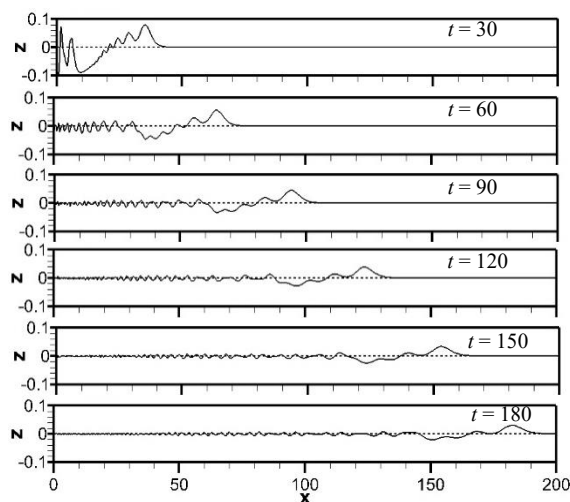


圖 3 地形以  $b_m=0.25$ ,  $r=10$  突升產生在不同時間的波形變化。

前面的例子都是以  $b_m=0.25$  為討論對象。那麼地形上升的高度會對波的影響如何?於是我們考慮  $b_m=0.15$  及  $0.25$  來比較，探討它們產生波現象的差異性。圖 4a 與圖 4b 分別  $r=2$  及  $10$  的地形。這兩者的群波包絡情形迥異。當考慮  $r=2$  在  $t=180$  的波形，圖 4a 顯示上升地形產生 3~4 個可辨識的群波，且比較  $b_m=0.15$  及  $0.25$  顯示  $b_m$  的大小似乎只有影響波的幅度，對波的相位沒有特別影響。進一步比對圖 4a 與圖 4b 之不同  $r$  的情況。發現上升地形  $b_m$  的影響指出當  $r=2$  所產生的波僅是振幅的差異，對相位似乎沒有影響；若  $r=10$  就對波型態及相位都有顯著的影響。

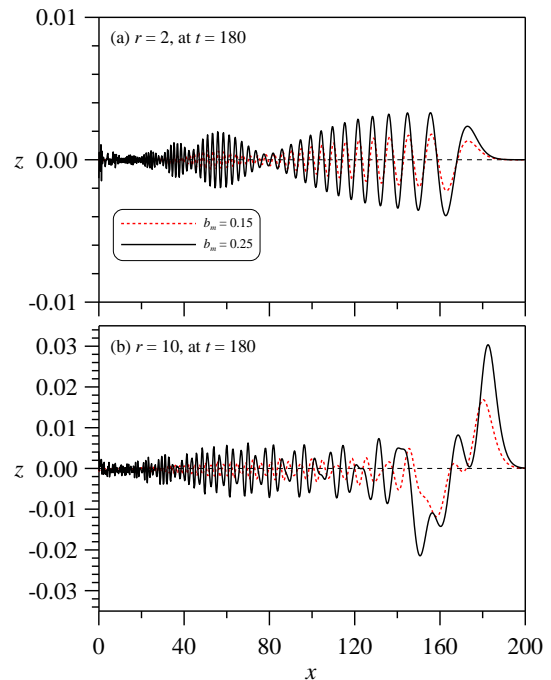


圖 4 地形以不同  $b_m$  不同  $r$  產生之遠場波形比較。

### 三、結論

本文分析底床圓盤地形(半徑 =  $r$ )瞬間上升高度( $b_m$ )產生的波現象及差異。我們關注遠場的波傳情況，結果發現當瞬間抬升地形在  $r=2$  的情況，波會呈現數個規律的簡諧波束且首波的波峰高會低於隨後的第二個波峰； $r=10$  的前首波有形成接續孤立波的現象。 $b_m$  會明顯影響波幅，但對波型態影響不大，且隨著  $r$  越大， $b_m$  對波型態的影響會增加。

### 謝誌

本文係科技部專題研究計畫 (編號 MOST 110-2221-E-275-001)之相關研究成果,承蒙科技部經費支持此研究之進行。

### 參考文獻

1. Chang, C.H. and Wang, K.H. (2011) Generation of Three-Dimensional Fully Nonlinear Water Waves by a Submerged Moving Object, *J. of Eng. Mech.*, 137(2), 101-112.
2. Fuhrman, D. R. and Madsen, P. A. (2009) Tsunami Generation, Propagation, and Run-up with a High-Order Boussinesq Model, *Coastal Eng.*, 56(7), 747-758.
3. Hammack, J.L. (1973) A Note on Tsunamis: Their Generation and Propagation in an Ocean of Uniform Depth, *J. Fluid Mech.*, 60, 769-799.
4. Jamin, T., Gordillo, L., Ruiz-Chavarria, G., Berhanu M. and Falcon, E. (2015) Experiments on Generation of Surface Waves by an Underwater Moving Bottom, *Proc. R. Soc. A.*, 471: 20150069.
5. Okal, E.A. and C.E. Synolakis (2016) Sequencing of Tsunami Waves: Why the First Wave is Not Always the Largest, *Geo. J. Int.*, 204, 719-735.

# 以平滑粒子水動力法模擬潰壩式湧波於 光滑斜坡之溯升

張鈞程<sup>1</sup> 吳昀達<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生

<sup>2\*</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系 助理教授

## 摘要

科技部計畫：MOST 108-2218-E-006-053-MY3

因與安全息息相關，海嘯長波於近岸之傳播以及水動力特性乃海岸工程之重要研究範疇之一。另因配置簡易且物理現象貼近現實，常有研究使用潰壩式湧波以模擬海嘯於近岸區之特性，惟過去研究鮮少以粒子法數值模擬探討湧波推進至近岸斜坡的溯升變化。本研究將以平滑粒子水動力法探討湧波溯升過程，以開源軟體 DualSPHysics 模擬潰壩式湧波通過一斜坡斜率為 1/10 之光滑斜坡，模擬水面變化及溯升特性，並與實驗量測之波高及溯升結果比較，評估該數值模式針對湧波溯升問題之準確性及可行性。另本研究將進一步評析此數值模式下潰壩式湧波之速度分布，透過分析湧波通過底床之時序流速剖面，並與實驗之量測值進行比較，冀期可確認此數值模式對潰壩波之湧波溯升模擬能力，並歸納出該數值模式下之水動力行為與實驗可能之差異，以供未來使用參考。

關鍵詞：平滑粒子水動力法(Smooth Particle Hydrodynamic)、潰壩、湧波、溯升、流速剖面

## SPH Modeling on the Runup of Dambreak-Generated Bore on a Smooth Slope

Chun-Cheng Chang, Yun-Ta Wu<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Assistant Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

For safety reason, studying tsunami propagation and hydrodynamics in the nearshore are one of the important aspects in coastal engineering communities. With a simple setup feature, the dam-break mechanism has been frequently adopted in the laboratory to generate bores and model long-wave dynamics, kinematics and runup process in the coastal waters. Numerical simulations have been also considered to replicate those dam-break experiments with various assumptions to the model equations and algorithms used. However, the particle-based model has been seldom used to model bores runup on slopes, revealing that challenges remains for resolving wet-dry interfaces. In this study, we aim to simulate the evolution and runup of dambreak-generated bores on a uniform slope of 1/10 using an open-source particle-based model DualSPHysics, which is based on the smooth particle hydrodynamic (SPH) method. Model-data comparisons are performed to confirm the accuracy of the time histories of the free surface elevation, the runup process and the velocity profiles at selected sections. The differences between present simulations and experimental results will be quantitatively evaluated, aiming to provide a estimation of variation level for using DualSPHysics.

Keywords: Smooth Particle Hydrodynamic; dam-break; bore; runup; velocity profile

## 一、前言

海嘯波若衝擊沿海區域，如何分析其對各地區之影響程度及範圍，乃為防災應變時之重要課題。因此，模擬海嘯長波於近岸之傳播以及水動力特性，實屬海岸工程領域中相當重要的研究範疇。過去文獻中，有以孤立波方式模擬海嘯長波(Liu et al., 1991)，惟孤立波淺化至近岸時波高變大，然根據理論之特徵波長下降，較不符合實際海嘯物理特性。研究諸如 Yeh et al. (1989)與 Chanson (2006)等，提出潰壩機制可造出近似海嘯特性之湧波，做為模擬近岸長波之選擇。若閘門運動控制得當，亦可產生具再現性且單一週期之長波。過去更有以造流機制搭配閘門控制模擬海嘯波衝擊之成果(Nouri et al., 2010)，幾可確立潰壩機制用於海嘯模擬之實益。

為此，本研究欲探討數值模式在此種潰壩機制的可行性及準確性。在前人文獻中，諸多研究專注在以不同種類 CFD 軟體模擬潰壩行為之研究，例如 Khoshkonesh et al. (2019)以 Flow-3D 配合 VOF 法模擬三種不同蓄水段下，潰壩式湧波之傳動特性；Moris et al. (2021)以 OpenFOAM 模擬海嘯於建物模型列中之傳動，並探討海嘯引致之衝擊力衰減程度，其研究亦利用水工模型試驗驗證模式；Wei et al. (2015)則是以基於平滑粒子水動力法(Smooth Particle Hydrodynamics, SPH)之開源模式 GPUSPH，分析受潰壩波衝擊之圓柱受力情形等。數值模擬之潰壩式湧波，於既有研究中，多用於探討潰壩波之衝擊力，如後二列舉之文獻即是著重於建物之受力等。海嘯波本身之溯升情形則較少論及。故本研究將以潰壩湧波之變化為主要研究目標，深究潰壩波於光滑斜坡底床之溯升程度以及影響範圍，並討論數值模擬結果與水槽試驗結果相較之準確程度。

本研究將聚焦於潰壩波傳播至光滑斜坡時，其水位、流速以及溯升之變化。研究將以 SPH 法進行模擬，蓋粒子法乃代入核心函數(Kernel function)於控制方程式中，使其轉換為無網格(gridless)、拉格朗日式(Lagrangian)之形式，分割連體以視為由若干粒子所組成。粒子法相較於網格法，更易模擬物體運動，其具備無網格特性，使底床及物體毋須受制於網格，且模擬不規則底床或結構物時，粒子法不需轉換計算座標，以計算近壁流場。另若未來研究探討海嘯推移物體之情境，粒子法亦不需考慮物體所

在之網格位置及邊界條件等，部分情境下還可延伸模擬物體運動對水體所造成之反饋等，其較於一般網格法稍具優勢。因此本研究將使用此法模擬，並與水槽試驗結果進行比較(吳與黃，2020)，確認該方法可模擬合乎物理現象之湧波特性。

## 二、研究方法

本研究使用開源軟體 DualSPHysics(Crespo et al., 2015)，建立與吳與黃(2020)實驗相同之數值水槽，其光滑斜坡坡度為 1/10，閘門前蓄水段為長 8 m、水深 0.24 m；閘門後至斜坡坡趾之水平距離為 6.01 m、水深 0.10 m，配置如圖 1(或參閱吳與黃，2020)。

SPH 方法下之控制方程式，如前所述，需透過核心函數展開，其展開運作如下。對任意函數而言，函數於某位置向量之值，可用褶合積結合核心函數，表示如下式(1)，而積分式可再進行離散並以式(2)表示：

$$F(\mathbf{r}) = \int F(\mathbf{r}')W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h)d\mathbf{r}' \quad (1)$$

$$F(\mathbf{r}_a) \approx \sum_b F(\mathbf{r}_b)W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h)\frac{m_b}{\rho_b} \quad (2)$$

其中  $F$  為任意函數， $\mathbf{r}$  為函數中之位置向量， $W$  為平滑核心函數， $h$  為平滑長度(Smoothing length)，式 2 中之下標代表一獨立粒子，而  $\frac{m_b}{\rho_b} = \Delta v_b$  則為粒子  $b$  之體積。該核心函數透過核心函數之平滑長度控制，用以給定該粒子各參數之參考範圍。

流體運動可由求解連續方程式及動量方程式模擬，在 SPH 模式下，連續方程式可以由連體形態之式(3)展開如離散之式(5)；動量方程式則可由連體形態之式(4)展開成式(6)：

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \mathbf{g} + \mathbf{\Gamma} \quad (4)$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \rho_a \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} \mathbf{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (5)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = -\sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \cdot \nabla_a W_{ab} + \mathbf{g} \quad (6)$$

其中  $W_{ab} = W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h)$ ， $\mathbf{v}_a$  為  $a$  粒子的速度， $\mathbf{v}_{ab}$  為  $\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b$ ， $\Pi_{ab}$  為動量方程式中之黏滯項，於

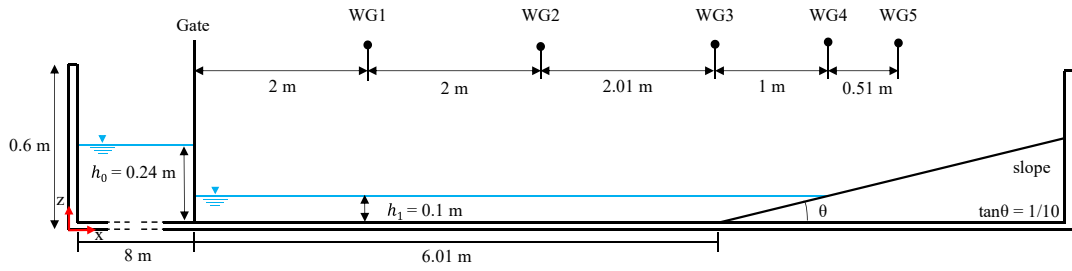


圖 2 實驗及數值水槽配置示意圖

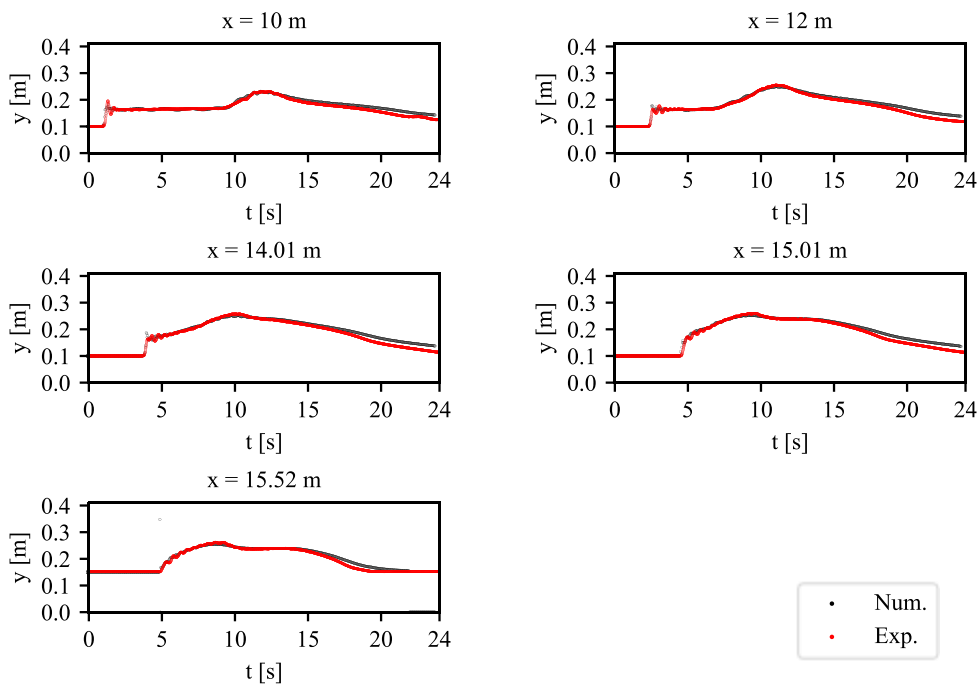


圖 1 實驗及數值模擬於不同位置之自由液面時序比較

DualSPHysics 模式中，可選用人工黏滯度(Artificial viscosity)或以層流黏滯度加上亞粒子尺度紊流(Laminar viscosity and Sub-Particle Scale Turbulence)處理黏滯項所產生的效應。

由於潰壩式湧波在閘門開啟後將產生一連串之破碎及摻氣過程，屬高度紊亂之時變流場，本研究因此依據 Altomare et al. (2015)對於波浪傳輸以及波浪作用力模擬之建議，採用人工黏滯度之方法給定黏滯項，並將人工黏滯度之控制參數 $\alpha$ ，設定為 0.01，以符合水工模型實驗之境。

SPH 模式之邊界條件則是利用 Crespo et al.

(2007)所提出之動力 (dynamic)邊界條件，其將邊界粒子視為無法移動，但滿足控制方程式之粒子，使其邊界得以反饋於流體粒子，進而製造出有效之邊界。此模式亦可以改變邊界為可移動之粒子，並使之直接作為固體粒子，以模擬如動床運移或固液交互作用等情境，而較不受邊界網格之影響。

### 三、結果與討論

研究首先進行二維數值模擬，嘗試複製潰壩式湧波於光滑底床傳動及光滑不透水斜坡溯升之實驗(吳與黃，2020)。閘門開啟時間設為  $t = 0$ ，進行時

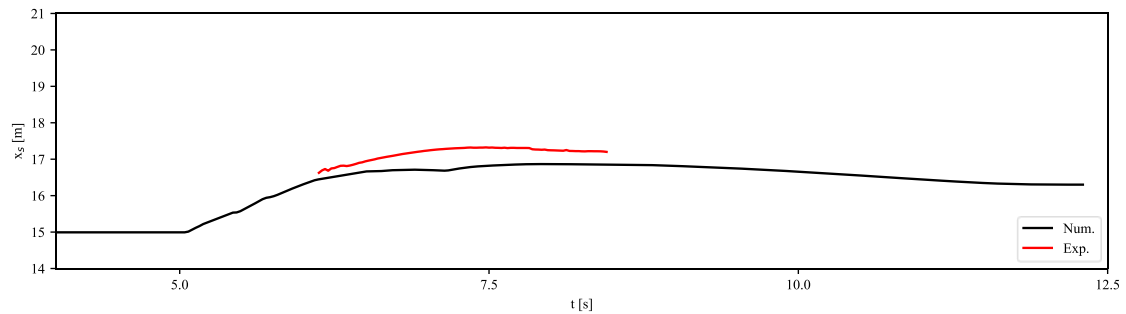


圖 3 實驗及 SPH 數值模擬岸線變化時序比較

長 24 秒之模擬。實際上，數值模式並無設置閘門，為僅考慮受重力影響之潰壩式湧波，意即假設閘門為瞬間開啟，並將數值模擬之初始時間視為閘門開啟時間。蓋數值模擬之固液交界面不易控制，黏滯效應必須透過假設或學理公式實現，而當閘門向上運動時，固體運動之黏滯效應將會干擾水體，影響湧波生成以及後續傳動，成為數值模式中難以控制之變因，因此本研究為簡化數值，以無閘門之方式模擬僅受重力影響之潰壩式湧波傳動。

模擬結果與實驗量測之比較，如圖 2 及圖 3 所示。圖 2 為水槽不同位置之湧波數值模擬與實驗量測之自由液面時序列結果比較，其中  $x = 14 \text{ m}$  為斜坡堤趾與水平底床之交界。圖 2 中之數值成果，乃是將所有位置之自由液面，整體平移 0.3 秒之結果。蓋水槽試驗之閘門運動雖快，水體仍會在閘門開啟瞬間自底部快速竄出，其傳播稍微早於無閘門者，從而使整體相位快於數值模擬結果 0.3 秒，然由圖可見，SPH 模式下之潰壩波自由液面仍與實驗有相當程度相似。

圖 3 則為數值模擬與水工實驗於光滑斜坡之時序列之最大溯升距離比較結果，其中  $x_s$  為溯升可達之水平距離。由比較圖可看出，數值模擬下之溯升距離低於實驗觀測值，其中數值模擬之最大溯升值為 16.866 m，實驗之最大溯升距離則是 17.32 m，其二者之水平溯升距離間距差約 0.45 m，等於垂直溯升高差約 0.045 m。在過去以 SPH 應用於溯升之研究中，有提及此模式於規則波溯升模擬之落差，Roselli et al. (2019) 與本研究使用相同 CFD 軟體 DualSPHysics，以計算不同碎波型態之規則波最大溯升值，計算結果之溯升高，低於所有其引用之溯升經驗公式；而 Shadloo et al. (2015) 則研究孤立波

之溯升值，其利用軟體 GPHSPH 進行模擬，並提出貼近實驗之模擬成果，但研究亦顯示以人工黏滯度方式將得出較小的溯升值。綜合上述文獻及本研究結果，應可推測此軟體對於乾溼交界之溯升模擬可能稍有落差，再加上潰壩式湧波不同於一般規則波以及孤立波，於受影響前已然碎波，具複雜紊流特性，綜合各因素使模式無法精準地模擬與實驗相同之溯升高。

另外，本研究亦比較實驗及數值模擬之湧波於光滑斜坡溯升時之流速，其中實驗是以質點影像測速儀 (Particle Image Velocimetry, PIV)，量測水體流速，比較結果如圖 4 及圖 5 所示。圖 4 乃為  $x = 15.01 \text{ m}$  (岸線) 之自由液面時序列比較圖，即與圖 2 所示相同，僅為更清楚地標示各重要之時間點位，並對應至圖 5 中速度剖面比較圖之各時間點位。

由圖 5 之速度剖面圖中可看出，實驗量測之流速剖面，相對於數值模擬結果，其速度隨深度之分布較為平均，且沒有明顯邊界層流，蓋其通過光滑斜坡時，真實物理現象之邊界層厚度非常小，加上其紊流效應顯著，故於量測結果中幾無邊界層效應；數值模擬則是因其使用理論式詮述邊界效應，且模式受限本研究採用之解析度，使接近邊界之流速剖面，呈現如對數分佈律之形式。

參考 Higuera et al. (2018) 進行孤立波於陡坡溯升之實驗與數值模擬比較，由於兩種結果之最大溯升高及其發生的時間點不同，本研究亦另取數值與實驗湧波各自開始溯降之時間點，視為湧波之下一個相位之起始點。其中溯降之發生定義為湧波溯升達到最高點並開始下降之時間。比較結果指出，數值模擬與實驗發生之時間點幾乎重疊，意即相位一致，其二者之溯降皆發生在  $t = 7.44 \text{ s}$ ，故可認為二

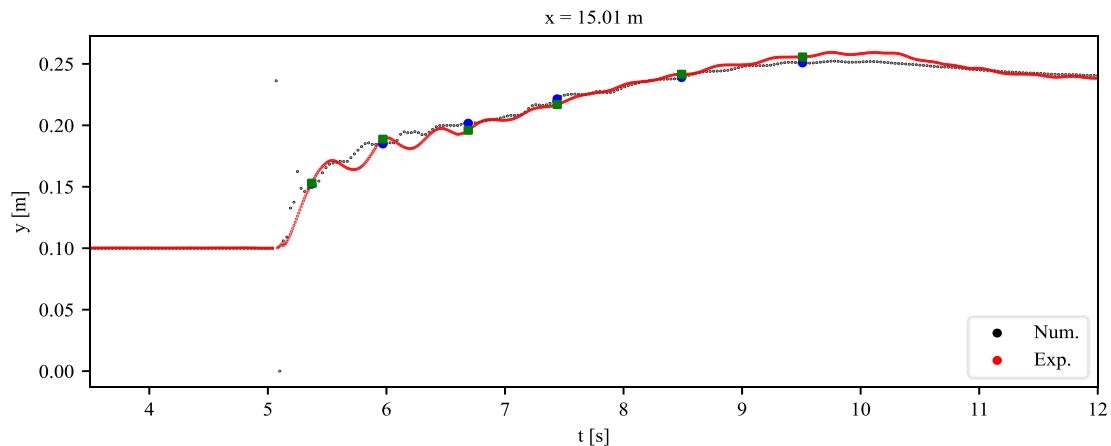


圖 5 實驗及數值模擬岸線位置之時序自由液面比較圖，圖中各點分別代表不同時間下之速度剖面取點

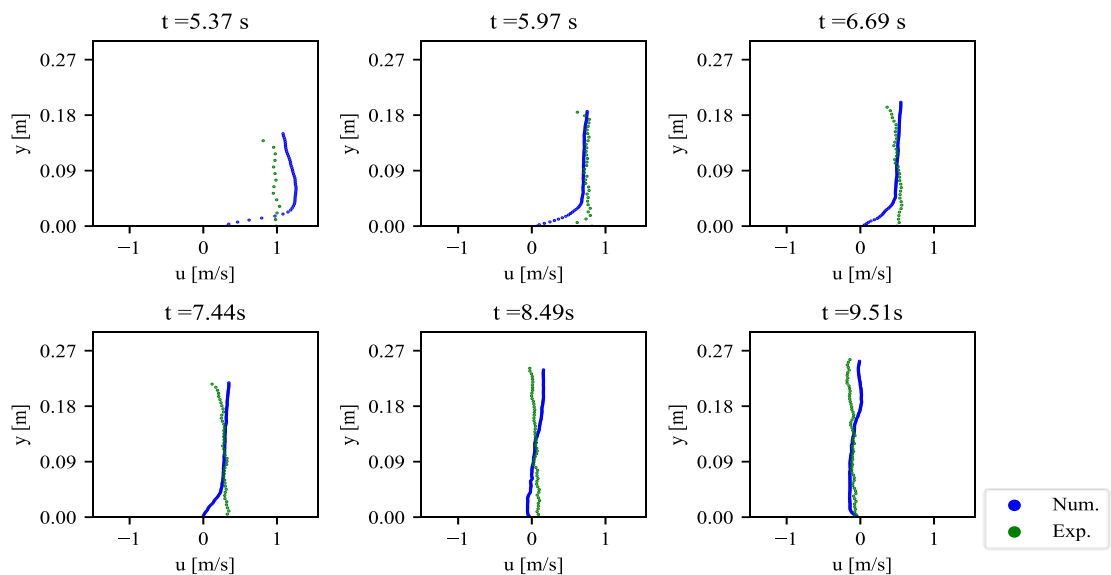


圖 4 實驗及數值模擬岸線位置於不同時間點下之速度剖面比較圖

者之湧波發展並無相位差距。然而由圖 5 中  $t = 8.49$  s 之流速可見，二者溯降發生時間雖一致，其溯降後之流速分布不盡相同，其中實驗量測之流速較為平整，乃因實驗湧波會有部分水體殘留於斜坡，影響下半部水體消退速度，導致水體上半部溯降較快，速度較早變化為負值；反觀數值湧波於溯降退水時，其水體下半部因較貼近斜坡，且殘留之水粒子分離時而不影響整體速度，而使其因受重力而退水之速度快於上半部，導致由公式計算而得之上半部流速略大於零，並以捲入下部之方式溯降。

除上述二者之差異外，數值湧波溯升之流速整

體貼近實驗結果，且溯降趨勢亦與實驗結果相近，可認為此模式在潰壩式湧波之流速模擬上具有一定之適用性。

#### 四、結論

本研究探討平滑粒子水動力法於潰壩波之模擬應用，設計一潰壩波通過光滑不透水底床，並與前人實驗結果進行比較，以確認該模式於潰壩波之模擬能力。模式配置是以閘門前後水深比 24:10 之潰壩湧波，通過一斜坡斜率為 1/10 之光滑斜坡底床，



並對潰壩波發展至近岸時之水面變化及流速進行時序分析，以釐清模擬之湧波水動力特性及溯升距離。

數值模擬與實驗量測之湧波傳動特性呈高度相似。雖因閘門配置因素，整體數值結果需平移 0.3 s，惟平移後之自由液面，仍貼合實驗溯升及溯降趨勢，尤其溯升時自由液面變化與實驗相比之吻合度極高。

本研究亦分析湧波於岸線，即  $x = 15.01$  m，之流速變化，剖析該數值模式下之湧波水動力特性，以及與實驗之差異。本研究對比不同時點之流速，並認為流速除因部分數值模式限制外，其整體模擬成果接近於實驗量測值，能適切地反映潰壩湧波運動特性。

於末，實驗與數值結果比較結果顯示數值模擬溯升高略小於實驗量測。雖模擬溯升之變化實驗結果趨勢相近，然未來使用此數值模式模擬潰壩波，仍需仔細評估溯升過程差及水動力特性之量化差異。

### 謝誌

本論文係科技部專題研究計畫「潰壩式湧波通過光滑、粗糙及動床斜坡之試驗研究」(編號 MOST 108-2218-E-006-053-MY3)之相關研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利進行，謹致謝忱。

### 參考文獻

1. 吳昀達、黃郁哲 (2020) 「潰壩式湧波於光滑斜坡溯升之研究」，*第四十二屆海洋工程研討會論文集*，第 209-214 頁。
2. Altomare, C. et al., (2015) Applicability of smoothed particle hydrodynamics for estimation of sea wave impact on coastal structures. *Coastal Engineering*, 96: 1-12.
3. Chanson, H., (2006) Tsunami surges on dry coastal plains: Application of dam break wave equations. *Coastal Engineering Journal*, 48(4): 355-370.
4. Crespo, A.J.C. et al., (2015) Dualsphysics: Open-source parallel cfd solver based on smoothed particle hydrodynamics (sph). *Computer Physics Communications*, 187: 204-216.
5. Crespo, A.J.C., Gomez-Gesteira, M. and Dalrymple, R.A., (2007) Boundary conditions generated by dynamic particles in sph methods. *Cmc-Computers Materials & Continua*, 5(3): 173-184.
6. Higuera, P., Liu, P.L.F., Lin, C., Wong, W.Y. and Kao, M.J., (2018) Laboratory-scale swash flows generated by a non-breaking solitary wave on a steep slope. *Journal of Fluid Mechanics*, 847: 186-227.
7. Khoshkonesh, A., Nsom, B., Gohari, S. and Banejad, H., (2019) A comprehensive study on dam-break flow over dry and wet beds. *Ocean Engineering*, 188: 106279.
8. Liu, P.L.F., Synolakis, C.E. and Yeh, H.H., (1991) Report on the international workshop on long-wave run-up. *Journal of Fluid Mechanics*, 229: 675-688.
9. Moris, J.P., Kennedy, A.B. and Westerink, J.J., (2021) Tsunami wave run-up load reduction inside a building array. *Coastal Engineering*, 169: 103910.
10. Nouri, Y., Nistor, I., Palermo, D. and Cornett, A., (2010) Experimental investigation of tsunami impact on free standing structures. *Coastal Engineering Journal*, 52(1): 43-70.
11. Roselli, R.A.R., Vernengo, G., Brizzolara, S. and Guercio, R., (2019) Sph simulation of periodic wave breaking in the surf zone - a detailed fluid dynamic validation. *Ocean Engineering*, 176: 20-30.
12. Shadloo, M.S., Weiss, R., Yildiz, M. and Dalrymple, R.A., (2015) Numerical simulation of long wave runup for breaking and nonbreaking waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 25(01): 1-7.
13. Wei, Z. et al., (2015) Sph modeling of dynamic impact of tsunami bore on bridge piers. *Coastal Engineering*, 104: 26-42.
14. Yeh, H.H., Ghazali, A. and Marton, I., (1989) Experimental study of bore run-up. *Journal of Fluid Mechanics*, 206: 563-578.

# 潰壩式湧波於粗糙斜坡溯升之試驗研究

黃郁哲<sup>1</sup> 吳昀達<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生

<sup>2</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系 助理教授

## 摘要

科技部計畫：MOST108-2218-E-006-053-MY3

海嘯長波於近岸的災害深受沿岸地形特性影響，使得沿岸底床粗糙度與近岸結構物造成溯升與溢淹等之變化，成為海岸工程學者專家關注的焦點。在既有文獻中，以潰壩式湧波探討者，多著重於微觀粗糙度(如砂石鋪面底床)的冲刷帶特性及宏觀粗糙度(如近岸層層排列的結構物)受力變化，然尚未考量宏觀粗糙度對溯升與溢淹的影響。於此，本研究以潰壩機制產生不同強度之湧波，探討其於光滑及粗糙斜坡之溯升及溢淹。實驗的潰壩蓄水長度及水平發展段均設為定值，而斜坡坡度為 1/10。粗糙斜坡則透過於光滑斜坡上鋪設等尺寸之方塊，用以代表近岸區排列之結構物。實驗全程採非侵入式量測以降低任何侵入式儀器對待測流體可能造成之影響。潰壩湧波的實驗再現性透過自由液面量測結果進行比較，並與既有文獻結果相較以展示本實驗結果之準確程度。本研究考慮三種不同初始水深，以模擬實際海岸漲退潮抑或海平面上升等影響結構物與岸線之相對距離，用予探討不同強度之湧波於光滑及粗糙斜坡溯升及溢淹水深的變化，冀期歸納出一簡易判斷法則，供後續工程設計之參考。

關鍵詞：潰壩、湧波、溯升、水工模型試驗、粗糙底床

## Runup of Dambreak-Generated Bore on a Rough Slope

Yu-Che Huang, Yun-Ta Wu \*

\* Assistant Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

Nearshore geometry characteristics in terms of slope roughness and building array are one of the possibilities to affect tsunami-induced hazards such as runup and inundation. In the literature, the dam-break system has been used to model bore over micro-roughness slope, e.g., covered with a layer of sand/gravel, for studying swash hydrodynamics and macro-roughness slope, e.g., building array, for investigating impact pressure of each structure. However, the effect of building array on the runup and inundation has not been clarified yet. We thus aim to experimentally fill this knowledge gap herein. In the experiment, the same size of cubes is installed onto the 1/10 smooth slope to model the slope roughness. Non-intrusive measuring devices are used to avoid any disturbance affecting the fluid flow. The repeatability of experiment is confirmed by comparing the free surface time series of repeated runs. Available experimental data for dambreak-generated bore on a smooth slope is used to compare with present measurements to show the accuracy and reliability. Three different initial water depths are considered to account for tidal effect and sea level rise which affect the relative distance between the shoreline and the building array. The resulting runup heights and inundation depths against different strengths of bores are measured, aiming to provide a simple estimation for design purpose.

Keywords: dam-break; bore; runup; laboratory experiment; rough slope

## 一、研究目的

長波對沿岸建築結構衝擊的影響長久以來為海岸工程學界所關注，而若欲探討海嘯造成的影響在 1990 年代常以孤立波進行相關實驗及數值模擬研究(e.g., Liu et al., 1991)。然孤立波的溢淹延時因其波動特性並不能有效地代表海嘯在近岸的溢淹，主要係當孤立波之非線性增高，特徵波長反而縮短，或導致溢淹延時的低估。常見的另種長波產生機制為潰壩式湧波，在閘門速度控制得宜的情況下並調整閘門前後水深比，其能產生出重複性高的湧波，且通過蓄水體積的調整能有效地產生出非衰減(non-decay)湧波，用以近似海嘯於近岸區之特性，並進一步探討其溯升及溢淹等與災害息息相關之水動力過程(e.g., Wu and Huang, 2020)。

在既有文獻中，湧波於近岸水動力的探討十分熱絡。Yeh et al. (1989)改變上下游水頭高的比值(i.e.,  $h_1/h_0$ )將湧波進行分類，以波浪破碎與否分為弱湧波(undular bore)或完全發展湧波(fully developed bore)。Miller (1968)則使用造波機產生湧波探討其於斜坡溯上過程，但受限於實驗設置，無法探討溢淹的影響。此外，斜坡地形粗糙度的影響實則為左右湧波溯升及溢淹之重要因子，而粗糙度可以微觀粗糙度(如表面披覆砂石及礫石等)或以宏觀粗糙度(如近岸建築結構物等)探討對於溯升的影響。O'Donoghue et al. (2010)及 Kikkert et al. (2012)探討少數潰壩條件對粗糙斜坡溯升之影響，但並未探討不同湧波強度之效應。Simamora et al. (2007)及 Moris et al. (2021)以等尺寸的方塊模擬近岸結構物，即宏觀粗糙度，並探討結構物表面的受力情形與方塊表面的垂直溯升，但並未著重在受結構物影響下湧波於斜坡溯升變化。

根據上述，溯升與溢淹相關研究今仍停留在微觀粗糙度的影響，而在宏觀粗糙度相關研究多著重於探討湧波衝擊時所造成結構物的受力，卻忽略結構物與湧波互制後，排列的結構物阻擋湧波深入內陸的作用過程，因而造成溯升的變動。是以結構物排列對於海嘯湧波的溯升及溢淹水深之影響仍未清晰。本研究意欲探討非衰減之潰壩式湧波通過均勻排列之結構物，並研討不同湧波條件對溯升與溢淹水深的影響。同時，將此結果與光滑底床實驗比對，目的係釐清宏觀粗糙度對於溯升與溢淹衰減之未解疑義，擬供後續工程設計之參考。

## 二、研究方法

本研究以水工模型試驗為主要研究方法。實驗於成功大學水利系玻璃水槽進行，該水槽長 25.0 m、寬 0.5 m、高 0.6 m，水槽兩側覆以強力透明玻璃以利流場觀測。水槽一端設有潰壩式湧波產生系統，其特點可沿水槽移動調整位置及控制閘門移動速度。實驗設置主要以潰壩閘門為界，將之分為潰壩蓄水段 8m 及水平湧波發展段 6.01m 與光滑斜坡。潰壩閘門兩側邊壁與底部設有橡皮軟墊防止滲水，頂部連接伺服馬達，驅動閘門開啟速度。水槽另一端為透明壓克力鋪設而成之光滑斜坡，斜坡坡度為 1/10，且堤趾貼合水平湧波發展段，水槽配置如圖 1 所示。宏觀粗糙底床之設置，則使用 5×5×5 立方公分方塊黏貼於光滑斜坡上，方塊位置則以初始水深 0.1m 為基準，以距岸線 5 公分的距離開始擺放第一行方塊，方塊距兩側水槽邊壁 2.5 公分，方塊與方塊間距 5 公分，方塊垂直於斜坡坡面，以理想且直覺的排列方式進行實驗粗糙底床鋪設。

實驗的數據取得係以非侵入式量測為主，湧波的自由液面變化則通過架設六組超聲波波高計進行量測，其中五組架設於閘門下游，一組架設於閘門上游。實驗座標原點設置於堤趾處，向岸為正。波高計之相關位置如圖 1 所示，WG01 及 WG02 主要用予量測湧波於水平發展段的波高變化，以確認湧波的重複性；WG03 及 WG04 用來探討湧波受斜坡地形影響之波高變化；WG05 設置於沖刷帶位置；另組波高計則架設於閘門上游蓄水段，可提供初始水位及儀器收錄觸發的參考依據。

實驗溯升高的量測以 1080p/30fps 的視訊鏡頭架設於斜坡上方，以記錄溯升位置與時間的變化，其架設優點可隨不同溯升條件進行位置調整。影像拍攝後，則使用自行編譯的 Matlab 程式進行分析最大溯升高及平均溯升高與潰壩湧波強度之關係。

## 三、結果與討論

為確保本研究之量測結果可與既有文獻結果比擬，於此先將光滑底床的實驗數據與 Barranco and Liu (2021)之湧波通過光滑斜坡實驗進行比較，其中所擇取之潰壩上下游水深及斜坡坡度一致，惟潰壩蓄水長度不同。Barranco and Liu (2021)使用蓄水長

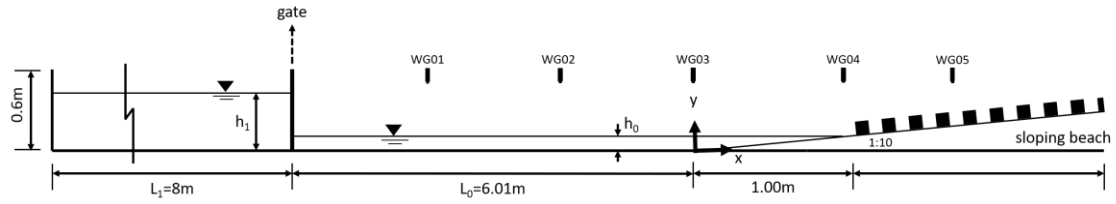


圖 1 實驗水槽、粗糙斜坡及實驗儀器相關位置之示意圖

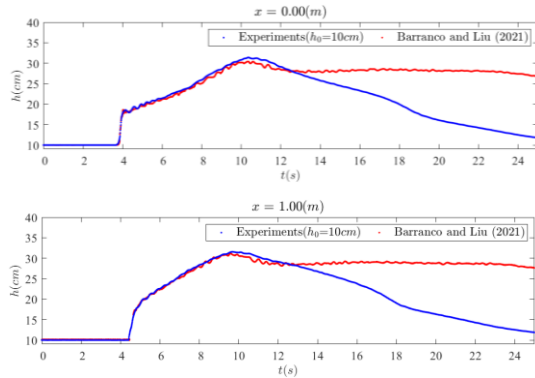


圖 2 本研究之實驗數據與 Barranco and Liu (2021) 量測之自由液面時序變化比較

度為 17.6m，而本實驗蓄水長度為 8m，可預期地溢淹延時將有差異。兩者實驗結果在坡趾與岸線位置的波高時序比較如圖 2，結果顯示在溯降與退水過程相似度較低，主要係蓄水長度的不同，但在湧波波形與相位及溯升階段相似性極高。雖此兩組實驗於不同尺度水槽進行，主要即蓄水長度及水平發展段長度不同，但湧波傳遞速度、波高及溢淹高程均可準確地重現，此足以證明本研究所使用之水槽可提供與前人研究相比擬之結果。圖 3 呈現溯升高與福祿數之關係，並與 Barranco and Liu (2021) 實驗數據及經驗公式進行比對，其經驗公式如下式：

$$R/h_0 = -4.71 + 4.49Fr + 1.94s \quad (1)$$

其中  $R$  為溯升高、 $h_0$  為初始水深、 $Fr$  為福祿數(即湧波強度)及  $s$  為斜坡坡度。本實驗量測最大溯升高與式(1)的相關係數  $R^2=0.9720$ 。此外，本實驗水深條件均達到最大溢淹水深條件，溢淹水深的比較如圖 4，其相關係數  $R^2=0.9813$ 。綜合上述，本研究與既有文獻結果相當一致，將以此延伸至粗糙底床試驗。

粗糙底床的實驗考慮三種不同初始水深  $h_0$ ，以模擬實際海岸浪退潮抑或海平面上升等影響結構物與岸線的距離。為適切地與光滑底床之實驗結果進行比較，粗糙底床實驗的波高計位置與光滑底床一

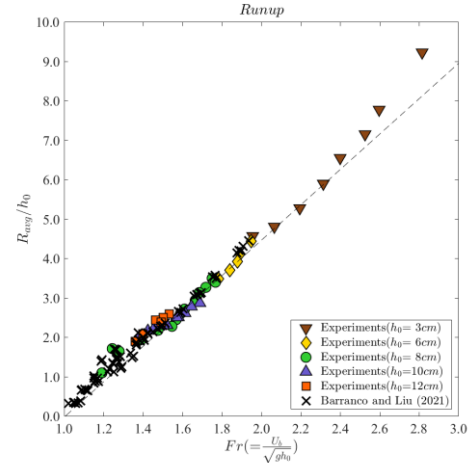


圖 3 湧波強度(福祿數)與無因次溯升高之關係

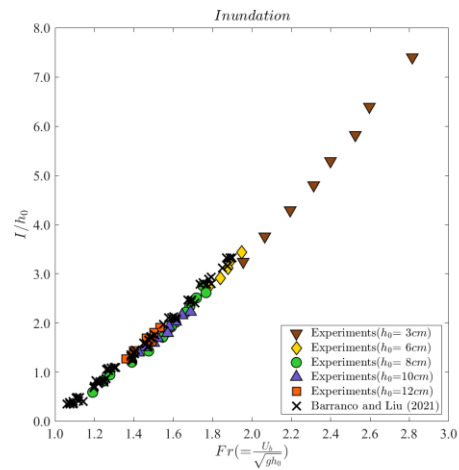


圖 4 湧波強度(福祿數)與無因次溢淹水深之關係

致。而光滑與粗糙底床引致之湧波自由液面時序變化於 WG01 至 WG04 的波高計位置如圖 5 所示，其中潰壩實驗條件為  $h_0=10\text{cm}$  及  $h_1=24\text{cm}$ 。於圖 5 中，紅點及藍點分別為光滑底床及粗糙底床量測之結果。自結果比較可看出在湧波發展階段，即水平底床段未受粗糙度影響，且實驗量測之重現性極高。然於

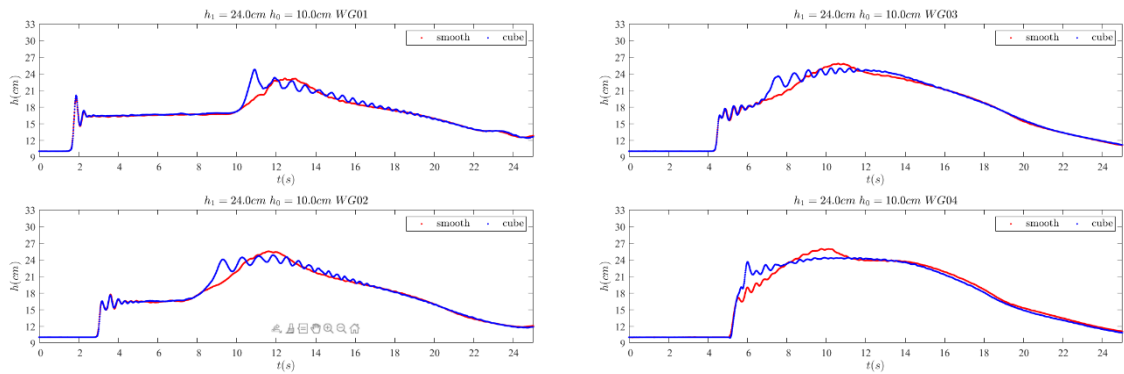


圖 5 湧波通過光滑與粗糙斜坡之自由液面時序變化 (潰壩條件為  $h_0=10\text{cm}$  及  $h_1=24\text{cm}$ )

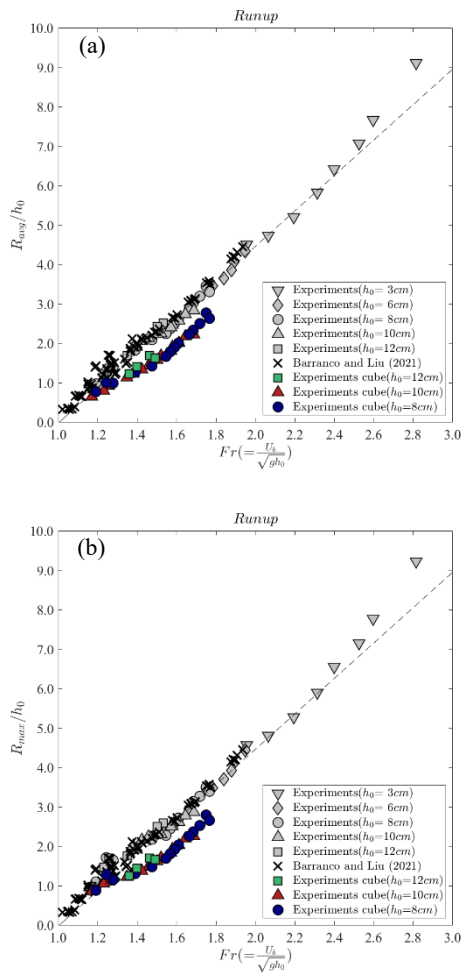


圖 6 湧波強度(福祿數)與無因次溯升高之關係。(a) 平均溯升高、(b)最大溯升高

WG04 之位置，湧波衝擊結構物產生水體噴濺及反射影響使其水位稍為壅高 ( $t = 5 \sim 6 \text{ s}$ )，然爾後影響其實有限。值得注意的是，針對湧波波高較小的條

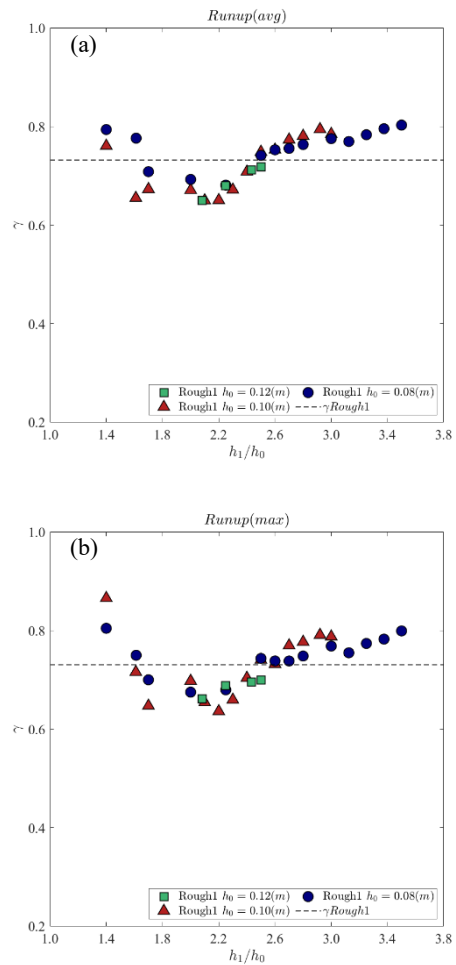


圖 7 潰壩前後水深比與粗糙斜坡衰減係數之關係。(a)平均溯升高、(b)最大溯升高

件(未呈現於本文)，至岸線時(WG04)波高若小於結構物高度，其波浪反射造成的效應將頗為顯著。溯升的量測以最大溯升高與平均溯升高分別進行分析，

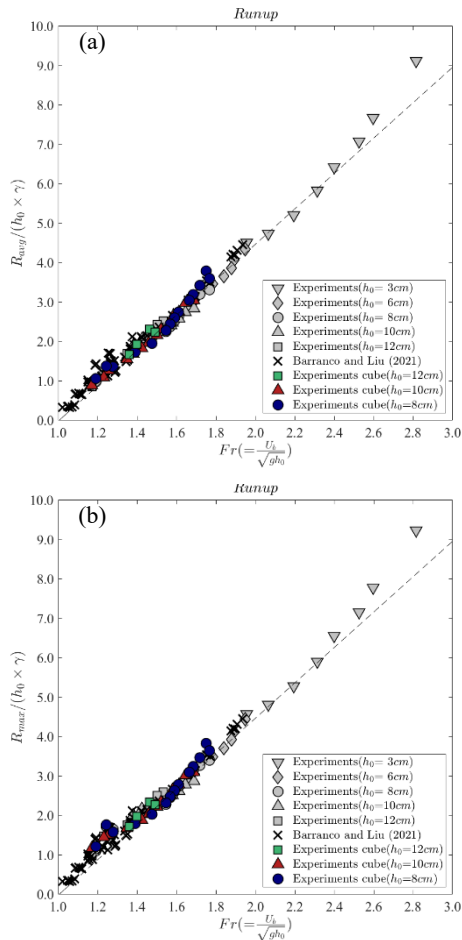


圖 8 湧波強度(福祿數)與透過粗糙係數修正後無因次溯升高之關係。(a)平均溯升高、(b)最大溯升高

最大溯升高的定義為湧波於斜坡上爬升的最高點，平均溯升高則以該最大值發生的時間點，將側向所有點位進行平均。兩種分析結果如圖 6 所示，一致地顯示粗糙底床之溯升高低於光滑斜坡之溯升高。

粗糙斜坡對溯升的影響可透過粗糙底床量測之溯升高與光滑底床溯升高之比值  $R_{rough}/R_{smooth}$  量化之，即粗糙係數  $\gamma$ 。圖 7 呈現所有試驗條件之  $R_{rough}/R_{smooth}$  計算結果，平均溯升高及最大溯升高之粗糙係數為 0.7321 及 0.7306，而標準差為 0.051 及 0.054。若將粗糙斜坡溯升高除以粗糙衰減係數，理論上可得到與光滑斜坡等值之溯升高，相關分析如圖 8 所示。若進一步與 Barranco and Liu (2021) 經驗公式進行比對，結果顯示最大溯升的相關係數  $R^2=0.8747$ ，平均溯升的相關係數  $R^2=0.9620$ ，如圖 8。此外，當福祿數小於 1.3 時，湧波屬於弱湧波，

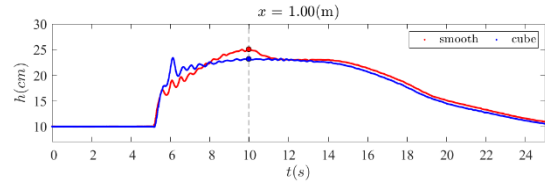


圖 9 透過光滑斜坡試驗結果決定粗糙斜坡溢淹水深之示意圖

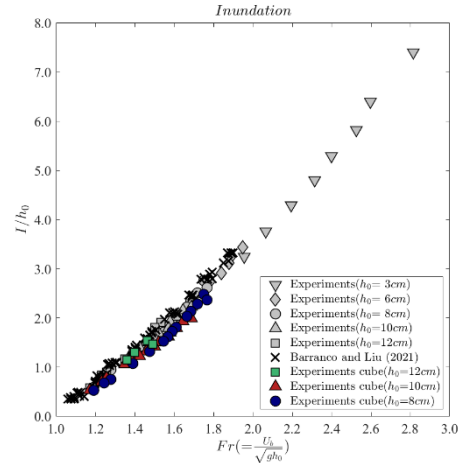


圖 10 湧波強度(福祿數)與無因次溢淹水深之關係(光滑與粗糙斜坡)

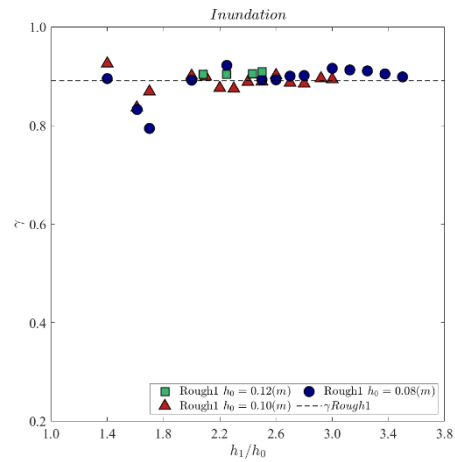


圖 11 潰壩前後水深比與溢淹水深粗糙斜坡衰減係數之關係

此與完全發展湧波不同，至斜坡才碎波，因此在最大溯升高與平均溯升高差異較其他湧波條件明顯。

溢淹水深以岸線位置所量測最大水位進行定義，然在粗糙底床由於水體受方塊的影響並無明顯最大值，因此在本文計算粗糙斜坡最大溢淹水深以光滑底床量測之岸線位置溢淹最大水深發生時間為基準，以此對應粗糙底床相同時間位置以求取其溢淹水深，

## 謝誌

本論文係科技部專題研究計畫「潰壩式湧波通過光滑、粗糙及動床斜坡之試驗研究(MOST108-2218-E-006-053-MY3)」之研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利進行，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. Barranco, I. and Liu, P.L.-F., 2021. Runup and inundation generated by non-decaying dam-break bores on a planar beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 915, A81.
2. Kikkert, G.A., O'Donoghue, T., Pokrajac, D. and Dodd, N., 2012. Experimental study of bore-driven swash hydrodynamics on impermeable rough slopes. *Coastal Engineering*, 60, 149-166.
3. Liu, P.L.F., Synolakis, C.E. and Yeh, H.H., 1991. Report on the international workshop on long-wave run-up. *Journal of Fluid Mechanics*, 229, 675-688.
4. Miller, R.L., 1968. Experimental determination of run-up of undular and fully developed bores. *Journal of Geophysical Research*, 73(14), 4497-4510.
5. Moris, J.P., Kennedy, A.B. and Westerink, J.J., 2021. Tsunami wave run-up load reduction inside a building array. *Coastal Engineering*, 169, 103910.
6. O'Donoghue, T., Pokrajac, D. and Hondebrink, L.J., 2010. Laboratory and numerical study of dam-break-generated swash on impermeable slopes. *Coastal Engineering*, 57(5), 513-530.
7. Simamora, Yoshinori Shighara and Fujima, K., 2007. Experimental study on tsunami forces acting on structures. *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, 831-835.
8. Wu, Y.-T. and Huang, Y.-C., 2020. Runup of dam-break-generated bore on a smooth slope. *Proceeding of the 42<sup>nd</sup> Ocean Engineering Conference in Taiwan*, 209-214.
9. Yeh, H.H., Ghazali, A. and Marton, I., 1989. Experimental study of bore run-up. *Journal of Fluid Mechanics*, 206, 563-578.

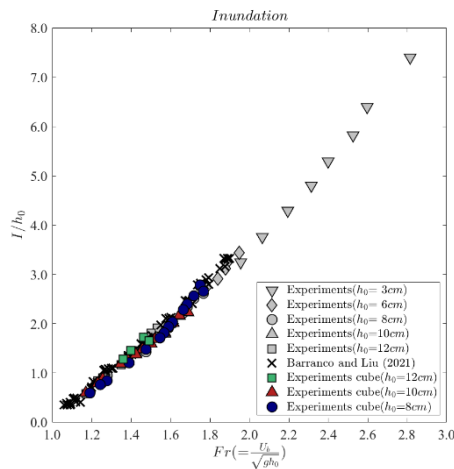


圖 12 湧波強度(福祿數)與修正後無因次溢淹水深之關係 (光滑與粗糙斜坡)

擇取原則如圖 9 所示。粗糙斜坡無因次溢淹水深與其衰減係數呈現如圖 10 及圖 11，其中溢淹水深衰減係數為 0.8910、標準差為 0.0267。同樣地將所有條件無因次溢淹水深除以溢淹粗糙係數，可將之視為與光滑斜坡相同溢淹高程，如圖 12 可見光滑與粗糙斜坡溢淹水深幾乎貼合。如此以粗糙衰減係數概念可適切地詮釋粗糙斜坡對溯升及溢淹水深之影響。

## 四、結論

本研究以水工模型試驗，探討潰壩式湧波於坡度 1/10 之光滑不透水斜坡及以方型結構物構成之粗糙斜坡傳動與溯升。實驗以非侵入式量測為主，將湧波於水平發展段波形的變化與沖刷帶受粗糙地形影響導致溯升高及溢淹水深的衰減進行深入探討。

本文首先將光滑底床試驗結果與 Barranco and Liu (2021) 實驗量測進行比對，結果顯示湧波波形時序列與溯升高比對上具良好的相似性，意即本實驗量測結果可適切地用以探討湧波於斜坡溯升與溢淹之水動力特性。

湧波通過粗糙斜坡之實驗結果顯示，不同強度湧波於粗糙底床的溯升與溢淹高程，相對於同湧波條件於光滑底床之結果，可藉由計算粗糙衰減因子進行詮釋。透過將粗糙底床之溯升高及溢淹水深除以粗糙衰減因子，可合理地參數化光滑及粗糙斜坡之量測結果。未來將進一步地以不同粗糙及透水程度之斜坡底床探討潰壩式湧波溯升與溢淹水深之關係，冀期提供未來工程設計之參考。

# 孤立波於泥質海床上過直立式圓柱之數值研究

李崧璋<sup>1</sup> 郭榮煉<sup>2</sup> 羅弘岳<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>國立台灣大學工程科學及海洋工程學系研究生

<sup>2</sup>國立台灣大學工程科學及海洋工程學系碩士生

<sup>3</sup>國立台灣大學工程科學及海洋工程學系助理教授

## 摘要

本文進行孤立波於高黏性流體海床上過直立式圓柱的水動力特性研究。基於開源數值軟體 OpenFOAM，建立三維數值波浪水槽，水槽中同時存在空氣、水、高黏性牛頓泥流三種流體及圓柱結構物，討論流體與結構物互動之關係。研究發現孤立波通過圓柱過程中，高黏性牛頓泥床的泥面由於波浪反射、波浪溯生，產生與水面不同的變化，此雙相流的動力機制為影響圓柱受力的主要因素。展示使用三維網格產生器的可靠性，其能夠良好地捕捉波浪傳播的情形。最後以半解析解驗證賓漢泥流數值模型，建立研究賓漢泥流的基礎。這些研究在一定程度上，能為離岸風力發電及其他海洋工程的規劃設計提供參考。

關鍵詞：OpenFOAM、孤立波、直立圓柱、泥床、波浪力

## Numerical Study of a Solitary Wave Passing Through a Vertical Cylinder Over a Muddy Seabed

Sung-Wei Li Rong-Lian Kuo Peter Hong-Yueh Lo\*

\*Assistant Professor, Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

## ABSTRACT

This paper studies the hydrodynamic characteristics of a solitary wave passing through a vertical cylinder over a highly viscous seabed. Based on the open source numerical software OpenFOAM. A three-dimensional numerical wave tank was established, in which there are three kinds of viscous fluids including air, water, and highly viscous Newtonian mud flow and a cylindrical structure. The interaction between fluid and structure are discussed. The study found that the elevation of the highly viscous Newtonian mud surface is different from the elevation of the water surface due to wave reflection and wave run-up when a solitary wave passes through a cylinder. The dynamic mechanism of this two-phase flow is the main factor affecting the force on the cylinder. The reliability of using a three-dimensional mesh generator are demonstrated. It can well capture the phenomenon of wave propagation. Finally, a semi-analytical solution is used to verify the numerical results of the Bingham mud model to establish the basis for future study of Bingham mud flow. To a certain extent, these results can provide references for the planning and design of offshore wind farms and other offshore structures.

Keywords: OpenFOAM; Solitary wave; Vertical cylinder; Mud bed; Wave force

## 一、前言

近幾年台灣熱絡發展離岸風力發電，目標為

2025 年累計設置 5.5GW。離岸風力發電基座形式大致可分為套筒式基礎、單樁式基礎等。單樁式基礎具有設計簡單、施工容易的特性，基礎結構除了要



乘載上方結構物和機組，在複雜的海洋環境中，易受到風、浪、流、泥沙等影響，造成基礎附近的土壤液化、淘刷，致基礎不穩定的現象，結合上述原因，需考量自然因素影響風機基礎安全性問題。

相關的研究多為垂直圓柱形結構物座於固體底床、沙質海床，或波浪作用於泥質海床的研究，根據 Healy et al. (2002)，世界上存在著許多淤泥土質的海床，許多樁柱橋墩建立的海域是以淤泥海床為主，且台灣電力公司(2018)量測台灣海峽具有淤泥土質的海床，故此研究亦與台灣息息相關。Sumer et al. (2001)提出淤泥海床的黏性泥沙的礦物組合、顆粒大小、傳輸行為與非黏性砂質沉積物存在較大的區別，若海洋結構物處於淤泥海床上，黏性泥沙的流變行為值得被我們關注。孤立波在淤泥海床遭遇圓柱結構物的研究是一個複雜的流體力學問題，許多動力學過程與物理現象尚未被認識，針對此問題深入研究具有應用實際工程與分析基礎流體力學的重要意義。

本研究先建立了一個數值水槽，並以實驗數據驗證數值模擬之準確性，再以 Park et al. (2008)的高黏性牛頓泥流參數進行數值模擬，使用控制變量法，討論圓柱的有無、凹槽的有無與凹槽的填充物質的不同，將四種不同的數值模型對比與分析，此階段之成果已由郭榮煥(2021)紀錄。目前仍在進行中的研究是將郭榮煥(2021)所使用之高黏性牛頓流體泥床延伸至賓漢流體泥床，探討更複雜、更能貼近實際情況的泥床流變問題，並使用 Gmsh 三維網格產生器(Geuzaine & Remacle, 2009)，降低劃分複雜網格的困難度。未發現其他研究使用 Gmsh 建立的網格模擬波浪動力學，故此研究亦可供其他學者一個網格產生器選擇參考。

## 二、研究方法

### 2.1 控制方程

本研究涉及孤立波、空氣、高黏性牛頓泥流與賓漢泥流，皆屬於流體中的不可壓縮流，在不考慮溫度場的情況下，描述其基本定律的控制方程為連續方程式和 Navier-Stokes 方程式，表達式為：

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \nabla \cdot \mu \nabla \vec{u} + (-\nabla p + \rho \vec{g} - \vec{f}_\sigma) \quad (2)$$

式中 $\vec{u}$ 為速度向量， $\rho$ 為流體密度， $p$ 為壓力。 $\vec{f}_\sigma$ 為表面張力沿界面法線向量的的一個分量，只存在界面處，非界面處為零， $\sigma$ 為張力係數。

### 2.2 模型介紹

本研究建立的數值模型基於開源計算流體力學軟體-OpenFOAM，此研究使用 OpenFOAM 中的多相流求解器(multiphaseInterFoam)，並使用 olaFlow 插件模擬水動力學，IHFOAM 是 olaFlow 的前身(Higuera, 2015)，具有一系列的造波和消波邊界條件與求解器，包括兩種理論模擬孤立波(Boussinesq 孤立波理論和 Grimshaw 孤立波理論)。

OpenFOAM 採用有限體積法離散框架(Greenshields, 2015)，空間域離散是將所有物理量離散分佈在各單元體中心之上，時間域離散使用 Euler implicit 方法，統合各節點的離散方程式可得到一組代數方程，從而進行求解。本研究的數值模型採用 PIMPLE 算法求解離散後的方程式，流體交界面的捕捉是採用 Hirt & Nichols (1981)提出的 Volume of Fluid (VOF)方法。

### 2.3 計算區域設置

本文建立三維數值水槽，由於此問題的複雜性具有多個變量，所以設立三組數值實驗，如表 1 所示，本研究主題為 test1，將與兩組數值實驗對照，其中高黏性牛頓流體密度為 $1050 \text{ kg/m}^3$ ，運動黏度為 $5.24 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。

表 1 三組數值實驗情況

實驗名稱	圓柱	凹槽	凹槽內物質
test1	有	有	高黏性牛頓流體
test2	有	有	水
test3	有	無	/

此研究主題 test1 示意圖如圖 1，水槽圓柱半徑為 0.0635m，中間凹槽將放入泥床並存在圓柱，劃分的網格沿邊界往流體交界處加密。

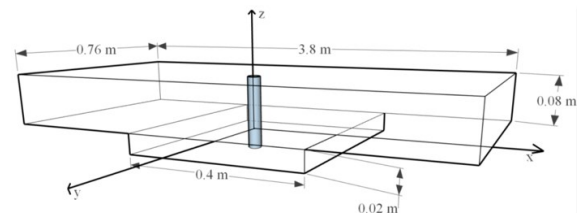


圖 1 數值模擬水槽重點模型示意圖

## 2.4 網格配置優化

本研究嘗試利用 Gmsh 三維網格產生器劃分網格，相比 OpenFOAM 內建 BlockMesh 網格產生器，Gmsh 可視化介面與友善的參數輸入機制，降低了劃分網格的複雜性。test1 經過 Gmsh 劃分網格後的分佈情形如圖 2 所示，靠近圓柱的區域採用環狀網格包覆，為了節省運算成本既能捕捉本研究感興趣的物理現象發生之處，z 方向採用漸進式網格沿空氣-水交界處與水-泥交界處加密。

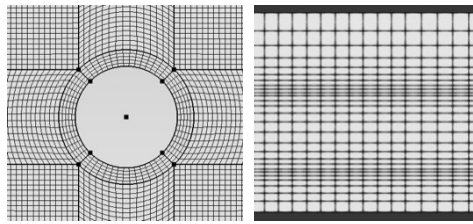


圖 2 網格劃分示意圖分佈：(左)圓柱周圍區域，(右)z 方向區域

## 三、結果與討論

### 3.1 模型驗證

本研究先建立一個二維水槽驗證孤立波過一高黏性牛頓泥床的數值模型準確性，以 Park et al. (2008) 實驗結果驗證，一切設定與 Park et al. (2008) 相同。由圖 3 可以看到數值結果、實驗結果與解析解的高黏性牛頓泥流之流體質點水平速度歷時曲線吻合良好，具有良好的收斂性。

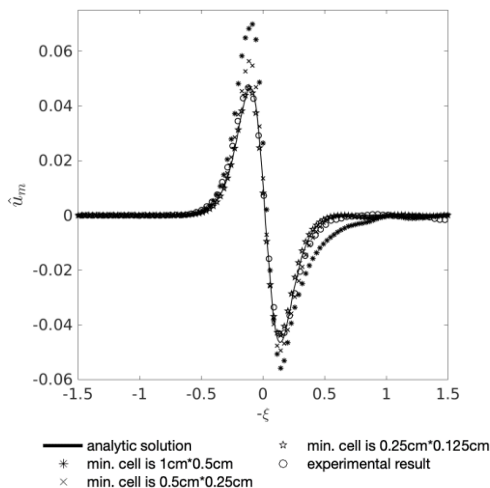


圖 3 二維水槽無因次高黏性牛頓泥流之流體質點水平速度歷時變化

為了確保模擬孤立波通過圓柱結構物時的準確性，另外建立三維數值水槽驗證 Yates & Wang (1994) 的物理實驗結果，一切設定與 Yates & Wang (1994) 相同。驗證結果為圖 4，觀察出數值模型能夠準確模擬作用於圓柱上的水平波浪力，說明此研究的三維數值水槽也具有良好的空間收斂性。

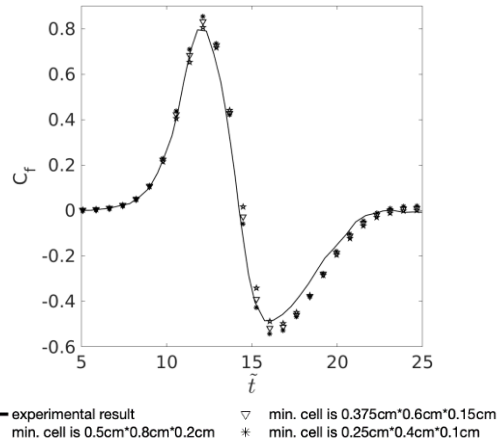


圖 4 三維水槽無因次水平波浪力歷時變化

### 3.2 自由液面的變化與高黏性牛頓泥床的泥面變化

孤立波於高黏性牛頓泥質海床上過直立式圓柱的過程中(test1)，水面與泥面於不同位置發生起伏變化，其起伏變化的程度也不盡相同。為了便於描述，說明圓柱周圍方位角度的定義如圖 5 所示，並且將“90° → 180° → 270°”的範圍稱為迎流側(upwind side)，而“270° → 0° → 90°”的範圍稱為背流側(downwind side)。

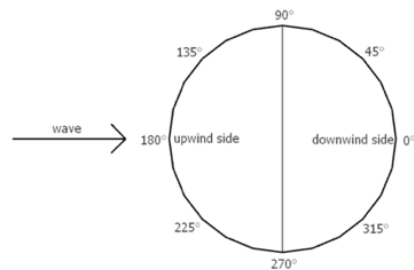


圖 5 圓柱周圍方位示意圖

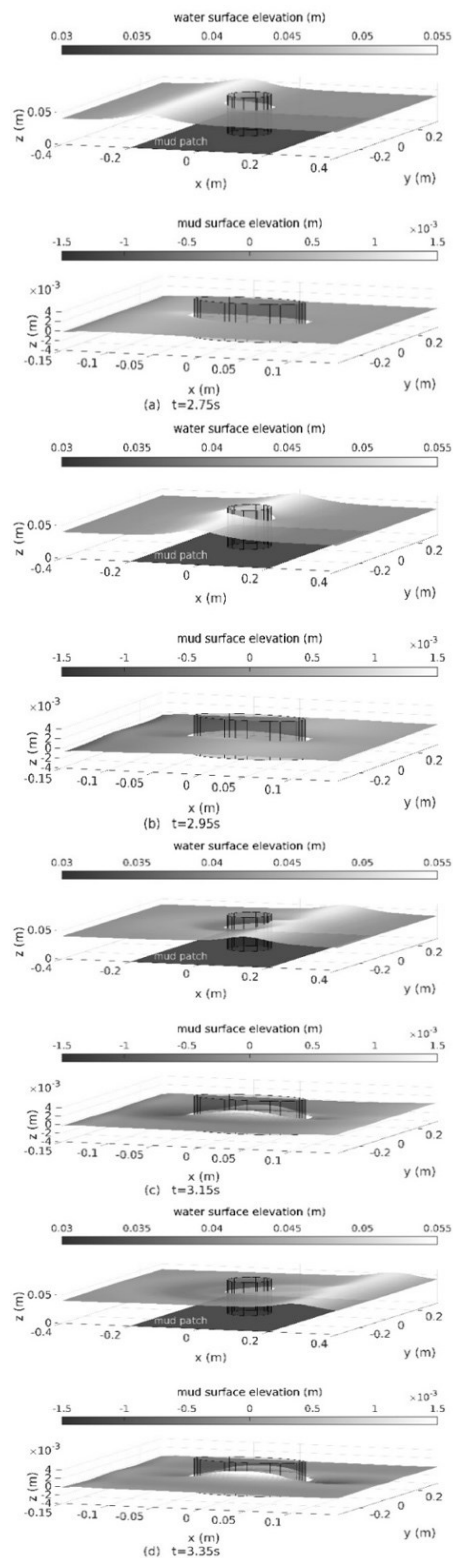


圖 6 水面歷時變化圖與高黏性牛頓泥床之泥面歷時變化圖

圖 6 展示 test1(時間從  $t=2.75s$  至  $t=3.35s$ )，水面的瞬時變化與高黏性牛頓泥床之泥面的瞬時變化。從圖 6(a)可以看到，在  $t=2.75s$  時，圓柱迎流側的水面有些許溯升，且迎流側的泥面也有微小幅度的爬升。從圖 6(b)可以看到，在  $t=2.9$  秒時，孤立波到達圓柱中間，迎流側與兩側水面均有壅高，泥面兩側繼續爬升但迎流側泥面出現些許下沉。從圖 6(c)可以看到，在  $t=3.15s$  時，波鋒到達圓柱背流側，背流側發生較大的溯升，迎流側因為波浪反射出現一個圓弧狀低谷區，同時泥面迎流側也出現圓弧狀低谷區，圓柱兩側的泥面繼續爬升。從圖 6(d)可以看到，在  $t=3.35s$ ，孤立波離開圓柱，水面圓弧狀低谷區逐漸向外擴散，泥面爬升至最大程度，泥面迎流側還存在凹陷區，背流側泥面凹陷至最大程度。

由此可見，可知高黏性牛頓泥床之泥面的變化與水面的變化是不太相同，一開始泥面先於圓柱迎流側爬升，之後下降形成圓弧狀低谷區，同時圓柱兩側泥面開始爬升。當波峰離開圓柱時，泥面兩側爬升至最大程度，較深的凹陷區出現於圓柱背流側。高黏性牛頓泥床的變化改變了圓柱基礎的埋置深度，高黏性牛頓泥流與水的內部動力機制是後續小節中圓柱的最大正向力大於其他組實驗的重要因素。

### 3.3 直立圓柱受力

此部分比較三組數值實驗中圓柱的受力情形 (test1、test2 和 test3)，圓柱受力隨時間的變化如圖 7 所示，本文中計算孤立波對於圓柱的作用力，採用離圓柱表面最近的網格內的流體壓力與其對應的受力面積乘積。

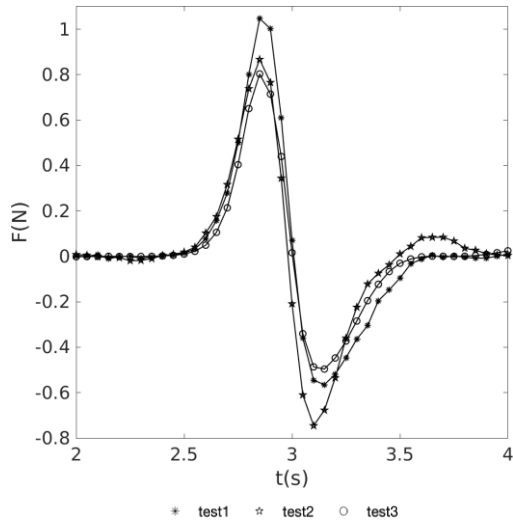


圖 7 圓柱受力隨時間的變化

第一方面，對比 test2 與 test3，test2 受力的最大正向力和最大反向力都大於 test3。test2 的模型相比 test3 模型，test2 底部增加凹槽水域，故增加受力面積，圓柱所受的總波浪力越大。

第二方面，對比 test1 與 test3，test1 受力的最大正向力和最大反向力都大於 test3。和上述一樣，增加了凹槽，圓柱所受的總波浪力越大。相比 test2 與 test3，同樣是有凹槽的實驗對比無凹槽的實驗，test1 與 test3 的最大正向力相差幅度比 test2 與 test3 大；test1 與 test3 的最大反向力相差幅度比 test2 與 test3 小。

第三方面，對比 test1 與 test2，test1 受的最大正向力比 test2 大，最大反向力比 test2 小。可知凹槽內若是填充高黏性牛頓泥床，其動力現象大幅度地影響圓柱所受的總波浪力。

總和各方面，凹槽存在使圓柱的受力變大，且凹槽填充高黏性牛頓泥床，將大幅度增加圓柱的最大正向力。

### 3.4 網格優化

test1 利用 Gmsh 網格產生器劃分網格，與郭榮煉(2021)使用 OpenFOAM 內建網格產生器 BlockMesh 的結果比較收斂性，模型設置與郭榮煉(2021)相同，無因次處理  $\eta^* = \eta/H$ ，其中  $\eta$  為波高， $H$  為水深，結果為圖 8。可以看出 Gmsh 產生的網格能夠正確模擬理想的孤立波且良好捕捉自由液面變化。

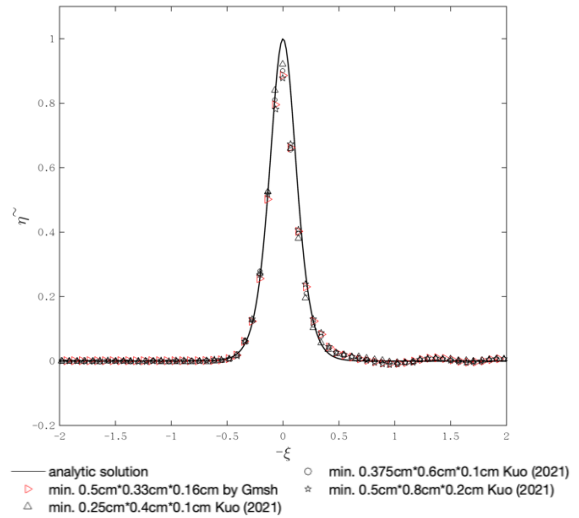


圖 8 test1 無因次水面位移歷時變化

### 3.5 賓漢泥流模型驗證

上述節中泥床還是屬於高黏性牛頓流體，為日後進行高黏性牛頓流體泥床延伸為賓漢流體泥床的研究，此進行孤立波過賓漢泥床模型驗證，透過 Chan & Liu (2008) 半解析解驗證數值模型，其中賓漢流體運動黏度為  $3 \times 10^{-3} m^2 s^{-1}$ ，降伏應力為  $8.67 N/m^2$ ，其餘參數與 Chan & Liu (2008) 設定相同。圖 9 列出賓漢泥流的水平流速與無因次降伏面於不同時刻的比較圖，其中  $\zeta$  為降伏面 (yield surface)， $d$  為泥床深度， $\theta = (x - x_0 - Ct)$  用於表示孤立波的相位， $x$  為  $x$  方向欲觀測位置， $x_0$  為孤立波初始波高位置， $C$  為波速， $t$  為時間。觀察出同一相位下數值模擬中賓漢泥流的流速與解析解相差不大，說明本研究模擬賓漢流體的模型，具有一定的可信度。

圖 9 闡明孤立波過賓漢泥床的流變行為，當壓力梯度造成的底部摩擦力克服降伏應力，剪力流 (shear-flow) 從底部固態底床發展，栓狀流 (plug flow) 區域於剪力流之上，如圖 9 ( $\theta = -0.032$ )。孤立波下的水粒子經過賓漢泥床時開始減速時，底部相反的壓力梯度持續增大，形成一栓狀流的區域為反向流動，如圖 9 ( $\theta = 1.511$ )。底部相反的壓力於垂直方向增加到一定的程度，上層的剪力流消失

，只存在一層剪力流、栓狀流，整個降伏面的流速都為負值，如圖 9( $\theta = 4.284$ )所示。

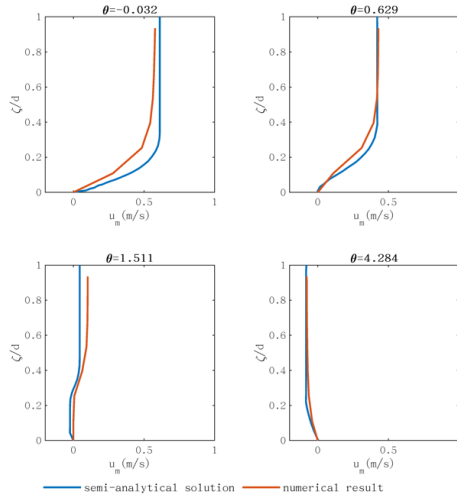


圖 9 賓漢泥流之水平流速與無因次降伏面的歷時變化比較圖

#### 四、結論與展望

本文基於 OpenFOAM 數值模型，建立三維水槽，同時存在水、高黏性牛頓泥流、空氣。先是透過相關文獻的驗證數值模型，後續分析自由液面的變化、高黏性牛頓泥床的泥面變化和直立圓柱的受力情形，最後討論網格優化的結果與驗證賓漢泥流模型。

以物理實驗驗證高黏性牛頓泥床的流體質點水平速度與作用於圓柱上的縱向水平波浪力，確保數值模型的準確性，並提供了網格尺寸的參考。討論 test1 結果中，高黏性牛頓泥床的泥面變化與水面的變化不太相同，其高黏性牛頓泥流與水的特殊動力現象是影響圓柱受力的重要因素。透過三個實驗相互比較，得知增加凹槽區域使直立圓柱總受力增大，而凹槽內填充高黏性牛頓泥床會使得水平正向力更大。日後將於凹槽內填充賓漢泥床，探討更實際的圓柱受力情形。

後續透過 Gmsh 劃分網格的結果進行網格收斂性測試，確定網格產生器的可靠性，未來為了節省人力與時間成本，可廣泛運用此網格產生器。另外，以半解析解驗證孤立波過賓漢流體泥床的數值模型，數值結果與解析解的速度降伏面相似，為日後的建立基礎，其賓漢泥流的壓力場、速度場、剪

應力等其他流場特性，是將來研究可延伸的部分。

#### 謝誌

本文係科技部專題研究計畫 (編號 MOST 109-2221-E-002-094-)之相關研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. 台灣電力公司(2018)，「離岸風電第二期計畫可行性研究」。
2. 郭榮煉(2021)，「孤立波對泥質海床上直立圓柱作用的數值研究」，國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系碩士論文。
3. Chan, I., & Liu, P. L. (2008) Response of Bingham-plastic muddy seabed to a surface solitary wave. *J. Fluid Mech.*, 618, 155-180.
4. Grennshields, C. J. (2015) OpenFOAM Programmers Guide. OpenFOAM Foundation Ltd. Version 3.0.
5. Geuzaine, C., & Remavle, J. (2009) Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 79(11), 1309-1331.
6. Hirt, C. W., and Nichols, B. D (1981) Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.*, 39(1), 201-225.
7. Higuera Caubilla, P. (2017) olaFlow: CFD for waves. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.1297013>.
8. Healy, T., Wang, Y., & Healy, J. A. (Eds.). (2002) Muddy coasts of the world: processes, deposits and function. Elsevier.
9. Park, Y. S., Liu, P. L., & Clark, S. J. (2008) Viscous flows in a muddy seabed induced by a solitary wave. *J. Fluid Mech.*, 598, 383-392.
10. Sumer, B. M., Whitehouse, R. J., & Tørum, A. (2001) Scour around coastal structures: a summary of recent research. *Coast. Eng.*, 44(2), 153-190.
11. Yates, G. T., & Wang, K. H. (1994) Solitary wave scattering by a vertical cylinder: experimental study. *In The Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference*.

# 臺北港資料浮標監測剖面流場特徵之初探

吳立中<sup>1\*</sup> 饒國清<sup>2</sup> 羅冠顯<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>國立成功大學近海水文中心 副研究員

<sup>2</sup>國立成功大學近海水文中心 計畫經理

<sup>3</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副研究員

## 摘要

受到潮汐、海溫、風與波浪等不同環境條件外力之驅動，都會造成不同程度的海水流動現象。海流的速度與流向是港灣營運管理與引水操船之關鍵。往昔已有相關研究針對港區的海流特徵進行數值模擬與實測近表層流資料的分析。有鑑於不同深度流場會對不同吃水深度的船艦造成影響，本文將研究重點聚焦於剖面流場特徵之探討。交通部運輸研究所港灣技術研究中心於 2021 年 1 月下旬在臺北港海域建置有作業化之海氣象資料浮標，逐時取得並回傳風、波浪與剖面流的觀測數據。本研究針對臺北港資料浮標 2~3 月份觀測所得之海流剖面資料，搭配臺北港岸邊潮位站的同步潮位觀測數據進行初步之分析與探討。確認不同深度的分潮流速強度並不相同，但潮流橢圓長軸流向大致維持東北西南走向，此一方向與當地海岸線方向大致平行。

關鍵詞：資料浮標、海流剖面

## Preliminary Study on the Ocean Current Profile near Taipei Port

Li-Chung Wu<sup>\*</sup>, Kuo-Ching Jao, Guan-Sian Luo

<sup>\*</sup> Associate Research Fellow, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

Ocean current is one of the most important factors that affect ship safety. To fully understand the current's effect on navigational issues, the Harbor and Marine Technology Center established a data buoy station near the Taipei Port in January 2021. This data buoy equipped with a down-looking ADCP which is capable of measuring real-time current profile. This study focused on the features of ocean current profile near the Taipei Port.

Keywords: Data Buoy; Current Profile

## 一、前言

臺灣位處全球最大洋以及最大陸域的交界處，是東亞島弧的重要樞紐。本島四面環海，東部濱臨太平洋；西部面向臺灣海峽；北部海域與中國大陸的東海相接；南部則與巴士海峽相鄰。此一特殊的海洋環境，再加上大氣、地形以及天候等條件之影響，致使臺灣周圍海域的流場特徵相當複雜多變。海流資訊不僅為海洋物理研究的重要依據，同時在

實務應用上，對海上救難支援、海洋污染事件處理以及政府海洋政策之制定等均有相當之貢獻。海流的速度與流向也是港灣營運管理與引水操船之關鍵。過往國內就曾發生過因海流影響，船艦不慎撞上港口防坡堤之意外。

往昔已有相關研究針對港區附近海域的海流特徵進行數值模擬與實測近表層流資料的分析(曾，1990；蘇等，1996；蘇等，2003)，並取得豐碩之研究成果。根據力學理論，不同深度之流場會對不同

吃水深度的船艦造成影響。然而不同深度的流場特徵可能會有顯著之差異，進而造成港灣附近船艦操作之挑戰。有鑑於此，本研究聚焦於剖面流場特徵之探討，嘗試透過實測海流剖面的資料分析，從中檢討海流在不同深度之特徵。資料取得說明與分析結果依序說明如下。

## 二、觀測系統簡介

### 2.1 觀測平臺說明

過去海流觀測方法一般常使用底碇式量測或船碇式觀測。底碇式量測是將剖面流速儀固定於海底床，感測探頭朝上量測流速剖面。其所必須克服的挑戰包括有：1.水下儀器的電池電力有限，無法長時間作業，若使用海底電纜傳輸電力與資料，雖然可以延長觀測時間，但布放費用較高且容易損壞；2.布放於底床的儀器設備容易遭受漁船底拖網破壞及底床砂石掩埋或傾斜，造成無法量測、儀器損壞或遺失，3.水深超過 40 m 以上潛水員無法長時間進行水下布放回收作業。船碇式觀測則是在研究船下方加裝剖面流速儀，向下量測，其使用上通常並不會在同一地點進行長時間觀測，須配合船期以及海象條件。

國際間皆有大量利用資料浮標加掛海流儀作為海流剖面作業化監測之案例與研究(Locke, L.K. and R. Crout, 2009)。交通部運輸研究所港灣技術研究中心於 2021 年 1 月下旬在臺北港海域建置有作業化之海氣象資料浮標，設置之位置如圖 1 所示。逐時取得並回傳風、波浪與剖面流的觀測數據。

本研究透過資料浮標所搭載的海流儀進行剖面之觀測。如圖 2 所示，資料浮標是用來進行海氣象觀測的設備，具有記錄如風向風速、水溫、波高、週期、水質等數據之功能，又稱「海上無人監測站」。資料浮標觀測系統的組成包括下列六子系統：

1. 浮標本體；
2. 錨繫系統；
3. 電力系統；
4. 儀器設備；
5. 數據擷取與控制系統；
6. 資料傳輸與接收系統。

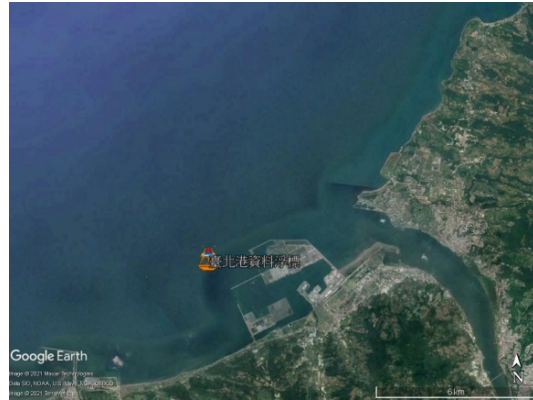


圖 1 臺北港資料浮標之設置位置  
(底圖來源：GoogleEarth)

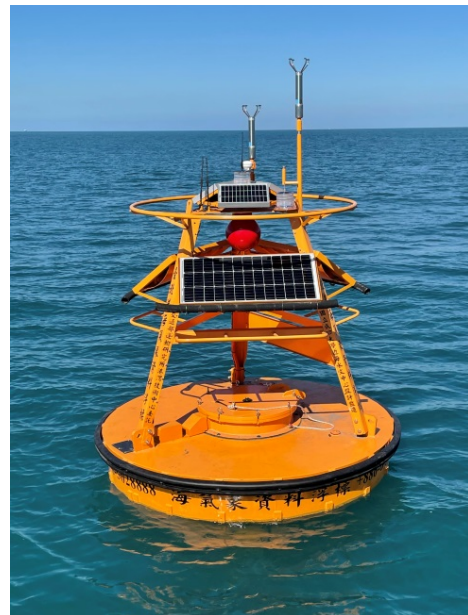


圖 2 臺北港資料浮標實體外觀

### 2.2 流速觀測說明

本研究運用海氣象資料浮標作為載臺，資料浮標下方支架加裝聲波式都卜勒剖面流速儀(圖 3)，利用水下訊號傳輸線將資料浮標電力傳送至流速儀，並且將資料傳輸至資料擷取系統，經由系統整合作業，配合流速儀資料格式及資料收發，獲得即時流速剖面資料。經由此種海流觀測方式，可獲得即時且長時間的流速剖面資料。觀測的流速剖面資料為每 6 分鐘 1 筆觀測結果，每小時共獲得 10 筆資料。其中每 6 分鐘所獲得的資料為這段時間中，自 0 秒開始每 2 秒 1 筆，直到 358 秒時平均為此 6 分鐘內

平均之資料。每筆流速剖面資料為每 1m 一層，流速資料標準偏差為 0.5 cm/s。資料浮標下方流速儀音鼓至水面之距離為 1.5m，而音鼓到第一層流速量測的空白距離為 2m，第一層流速資料距離海面約為 3.5m(圖 4)。

資料浮標在海面上受到波浪之影響雖為持續晃動之狀態，但引起的海流量測誤差極小，能確保資料品質。說明如下：

- A. 聲波在海水中的傳遞速度約為 1,500 m/s，而臺北港海氣象資料浮標觀測之深度範圍約為 25 m。由剖面流速儀探頭發射聲波反射至探頭接收回波之時間約為 0.02 sec，相對於最短週期波浪(3 sec)為 1%以下。剖面流速儀理論上可以量測到瞬間流速流向資料，而不受資料浮標隨波晃動的影響。
- B. 剖面流速儀量測容許擺動角度為 15°。資料浮標實際觀測時剖面流速儀傾角為 10° 以下，而以每 1 m 量測一層計算。當剖面流速儀傾斜 10° 時，垂直位置誤差為 3 cm，相當於 3%，於此水深下，傾角對流速觀測代表位置之影響極小。
- C. 選用之剖面流速儀有加裝 Bottom Tracking 功能，可以追蹤浮標相對於底床的運動速度，藉由此功能可以將浮標速度對於流速觀測的影響部分去除，求得正確海流之流速。
- D. 海流資料品管程序將傾角過大時之資料標記，可確保海流資料品質不受傾角的影響。當剖面流速儀傾角於容許擺動角度之內時，其影響極小，不需修正。

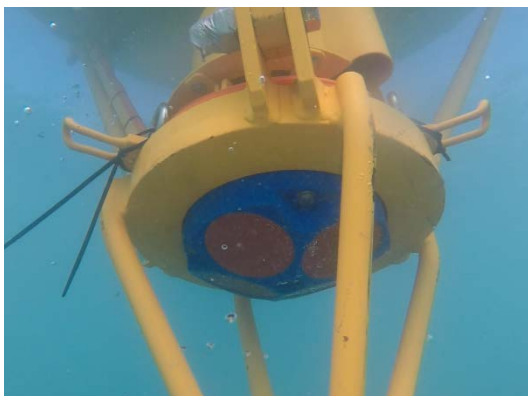


圖 3 臺北港資料浮標水下流速儀實景

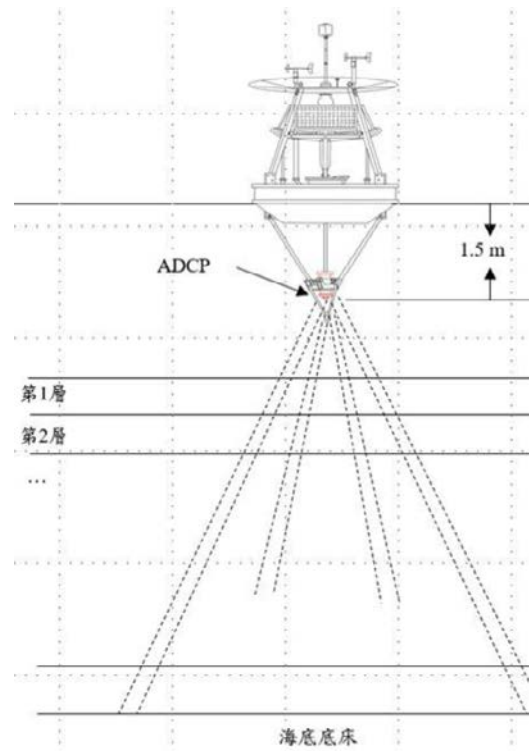


圖 4 資料浮標水下流速儀位置

### 三、海流剖面分析結果

本研究針對臺北港資料浮標 2021 年 2~3 月份觀測所得之海象資料，搭配臺北港岸邊潮位站的同步潮位觀測數據進行分析與探討。潮汐現象的主要機制為天體引力。潮汐變化所產生之海水面波動同時也會引發海水流動(潮流)。也因此，潮流週期基本上是與潮汐週期一致的，但潮汐與潮流波動之間通常會存在有一定程度之相位延遲(Boon, 2004)，也就是滿潮時並非是發生最強流速之時刻，反而通常會是流速最微弱的時刻。如圖 5 所示，為臺北港海流剖面與同步潮位資料之時間延遲分析結果。結果顯示，靠近海表面之海流與潮位之間的相位延遲為 3.2 小時，然而隨著觀測海流深度的改變，海流與潮位之間的相位延遲也隨之改變。就整體趨勢而言，近海表面之海流與潮位之間的相位延遲最明顯，但隨著海流觀測深度變大，相位延遲則有隨之遞減之趨勢。

本文進一步透過調和分析技術計算海流觀測數據中的潮流成份。如圖 6 所示，不同深度潮流之最強分潮皆為  $M_2$  分潮，第二強之分潮則皆為  $S_2$ 。然



而，從第三排序強的分潮流在不同深度會有所差異。從圖 6 之分析結果亦顯示，流速強度會隨海流觀測深度變大而減小。

考慮到潮流為具有時變性之二維向量，除了流速強度之外，還需考慮流向特徵，藉此解析出潮流的旋轉特性。潮流橢圓是解析二維潮流特徵的重要工具。本研究透過調和分析搭配潮流橢圓解析臺北港  $M_2$  分潮流剖面如圖 7 所示。針對特定分潮週期內，二維分潮流的向量箭頭終點會隨時間持續變化，並形成一橢圓。橢圓之長半軸和短半軸則分別代表該分潮流的最大流速和最小流速。

除了長軸與短軸之外，一般分潮流橢圓之主要構成，包括有：橢圓的軌跡、旋轉運動之起始點、長軸傾斜度、扁平度、及旋轉方向等要素(莊與張，2012)。為了簡化相關議題，本研究現階段僅針對潮流橢圓之長短軸特徵與方向進行檢討。如圖 8 所示，為  $M_2$  分潮流(最強分潮流)橢圓剖面之長軸流速特徵。分析結果顯示，長軸之流速強度會隨海流觀測深度變大而減小。從長軸的方向(圖 9)可判斷出該分潮流最強流速對應的方向雖然會隨著流剖面的深度有所變化，但不同深度的  $M_2$  分潮流最大流速時的方向基本上還是維持著  $40^\circ \sim 50^\circ$  之間，也就是與鄰近岸線的走向大致相同。

潮流橢圓之長短軸比例則可辨斷出該分潮流橢圓的扁平程度。從圖 10 的分析結果顯示，不同深度的  $M_2$  分潮流橢圓短軸與長軸之間的比值都小於 0.2。換言之， $M_2$  分潮流所發生最小流速與最大流速之間的差異頗明顯。值得注意的是，在不同深度  $M_2$  分潮流橢圓仍有所差異。

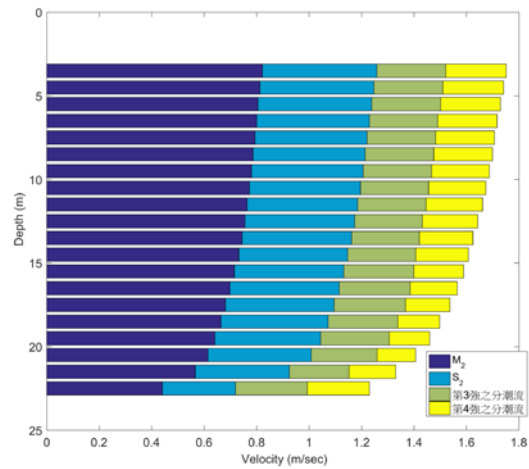


圖 6 前 4 強之分潮流剖面之流速特徵

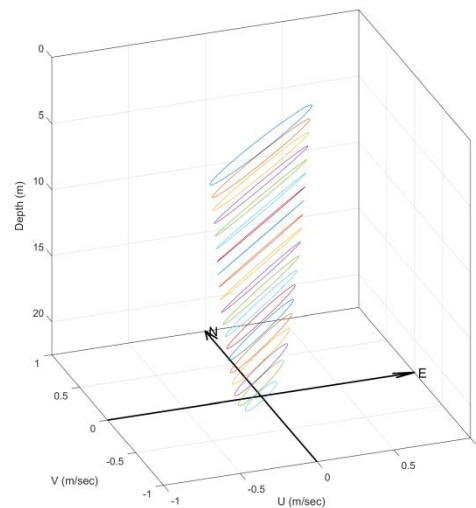


圖 7 臺北港測得最強分潮( $M_2$ )之潮流橢圓剖面

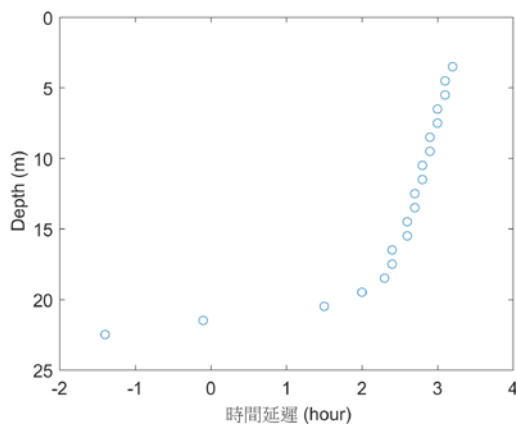


圖 5 海流剖面與潮位之時間延遲

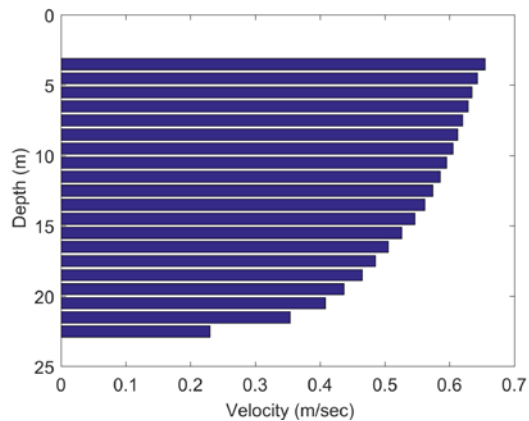


圖 8  $M_2$  潮流橢圓之長軸流速

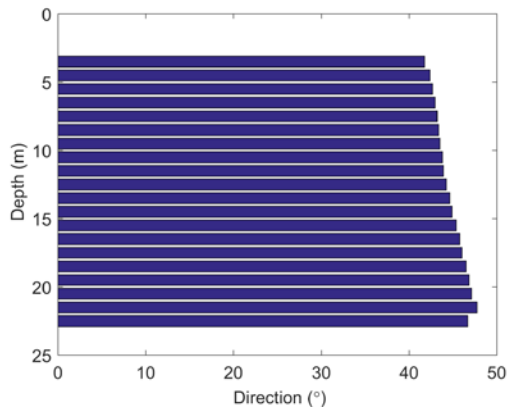


圖 9 M<sub>2</sub> 潮流橢圓之長軸方向

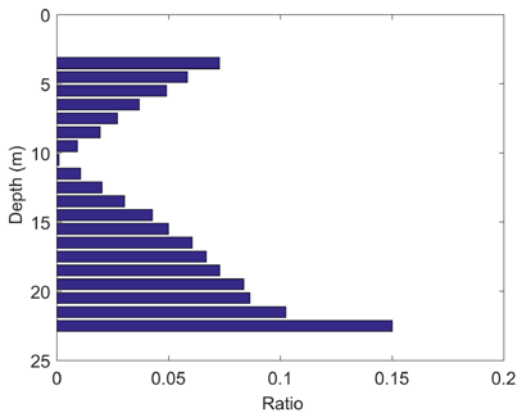


圖 10 M<sub>2</sub> 潮流橢圓之短長軸比例

#### 四、結論

交通部運輸研究所港灣技術研究中心於 2021 年 1 月下旬在臺北港海域建置有作業化之海氣象資料浮標，逐時取得並回傳剖面海流的觀測數據。本研究針對臺北港資料浮標 2~3 月份觀測所得之海象資料，搭配臺北港岸邊潮位站的同步潮位觀測數據進行分析與探討。分析結果顯示，近海表面之海流與潮位之間的相位延遲約為半日潮週期的 1/4 (3.2 小時)，然而隨著觀測海流深度的改變，海流與潮位之間的相位延遲也隨之改變。

針對海流中的潮流成份，經調和分析後確認，潮流之成份以 M<sub>2</sub> 分潮最為明顯，第二強之分潮則皆為 S<sub>2</sub>，在不同深度皆是如此。雖然不同深度的分潮流速強度並不相同，但潮流橢圓長軸流向大致維持東北西南走向，此一方向與當地海岸線方向大致平行。

本研究先階段僅針對 2 個月時間內觀測所得的海流剖面相關特徵進行初步之分析與探討，未來待相關資料蒐集更為多元與完整之後，規劃將進一步針對不同海氣象條件與非潮流成份海流特徵之間的關聯性進行檢討。

#### 謝誌

本研究承蒙交通部運輸研究所港灣技術研究中心提供海流剖面資料以及同步潮位觀測資料，使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. 曾相茂(1990) 「花蓮港附近海域波浪與海流之特性」，第十二屆海洋及海岸工程研討會論文集，彙編頁碼：828 頁-848 頁。
2. 蘇青和、莊文傑、陳明宗(1996) 「臺中港港口海流數值推算」，第十八屆海洋及海岸工程研討會論文集，彙編頁碼：389 頁-400 頁。
3. 蘇青和、吳基、廖慶堂、徐如娟(2003) 「臺北港港口區域潮汐及海流特性研究」，第二十五屆海洋及海岸工程研討會論文集，彙編頁碼：23 頁-30 頁。
4. 莊文傑、張憲國(2012) 「潮流橢圓所對應展現流速時變特性之探釋」，第三十四屆海洋及海岸工程研討會論文集，彙編頁碼：137 頁-142 頁。
5. Boon, J. (2004) *Secrets Of The Tide: Tide And Tidal Current Analysis And Applications, Storm Surges And Sea Level Trends*, Marine Science: Horwood Publishing Limited.
6. Locke, L.K. and R. Crout (2009) A study on the validity of buoy mounted Acoustic Doppler profilers: A comparison of upward and downward looking systems in Onslow Bay, NC, *OCEANS* 2009, 1-6.

# 波束成型演算法應用於流場解析之研究

程嘉彥<sup>1\*</sup> 黃郁軒<sup>1</sup> 陳少華<sup>1</sup> 余昭明<sup>1</sup> 徐堂家<sup>1</sup>

<sup>1</sup>財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心

## 摘要

以高頻雷達觀測海面流場具觀測範圍廣且時間連續之優點，為經濟的觀測方式，其關鍵技術乃在於如何由回波訊號，進一步求得平面流場資訊。財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心與夏威夷大學合作，於墾丁貓鼻頭架設相位陣列雷達觀測平面流場，其系統具有四支發射天線及八支以矩陣方式排列之接收天線。相較於集成式雷達測流系統，相位陣列雷達具方向解析度較佳之優點，資料解析方式則需搭配波束成型演算法方能展現陣列雷達於方向辨識上之優勢。本研究處理及分析陣列雷達之回波訊號，由波束成型演算法解算回波資訊，獲得各方向之回波頻譜，並透過頻譜計算都普勒頻移(Doppler shift)，最後獲得觀測範圍內之平面流速資訊。資料分析結果利用鄰近測站進行驗證，所得相關係數約為 0.7，顯示本文解析方式與鄰近測站觀測成果具高度相關性，此外，解析結果亦與方向辨識演算法解析結果具合理的一致性。

關鍵詞：相位陣列雷達、波束成型、回波訊號

## Application of Phased Array Radar in Observing Ocean Surface Currents

Chia-Yan Cheng,<sup>\*</sup> Yu-Hsuan Huang, Shao-Hua Chen, Chao-Ming Yu, Tang-Chia Hsu

<sup>\*</sup> Associate Researcher, Taiwan Ocean Research Institute, National Applied Research Laboratories.

## ABSTRACT

Using high-frequency radar to observe sea surface flow field has the advantages of wide coverage range and continuous in time. Thus, it is an economical method in remotely measuring the ocean surface current. The essential technique is how to obtain the entire flow field information from the backscattering echo signal. Taiwan Ocean Research Institute, National Applied Research Laboratories, was in cooperation with the University of Hawaii, to build a phased array radar system to observe the plane flow field in Maobitou, Kenting. The system has four transmitting antennas and eight receiving antennas arranged in a matrix pattern. Compared with the compact radar current measurement system, the phased array radar has the advantage of better directional resolution. The data analysis method needs to combine with the beamforming algorithm to show the advantages of the ability in direction recognition. In this study, we process and analyze the echo signal of the phased array radar and then calculate the echo information by the beamforming algorithm to obtain the echo spectrum in each direction. The plane velocity in the coverage region could be obtained through the calculation of Doppler frequency shift observed from the range-energy spectra. The results were compared with the CODAR station near phased array radar and reasonable agreements could be concluded.

Keywords: Phased-array radar; Beamforming; Echo signals

## 一、前言

由於海水對高頻率無線電波具有導電性，即使地球表面為曲面形狀，但電波仍可沿海面傳播到視

線以外的距離，此特性已被廣泛應用於測繪表面海流。以雷達測繪海洋表面流場具有長距離、大範圍和低成本的優點，且雷達測站位於陸地，方便維護及檢修作業，對於大範圍海面海流即時監測為最經濟且有效的方法。故以雷達進行海面資訊遙測，有觀測資料空間涵蓋區域大(理想狀況下其觀測半徑範圍可達 100 海浬)、時間解析度高(可由每 10 分鐘密集觀測至 1 小時或數小時平均後輸出)以及時間上連續性較佳之特點，當累積一定數量之觀測資料，可進一步運用到統計分析及預報。

雷達波(電磁波)由測站發射，並沿海面向前傳遞，海面上物體可造成雷達波的散射，而當海面波浪的波長(wavelength)恰為傳遞於其上雷達波的一半時，此時恰滿足 Bragg 共振(Bragg resonance)的條件，因共振效應造成雷達波反射強度增加，此強反射能量可明顯見於回波頻譜圖上。以 25 MHz 雷達波為例，雷達波的波長約為 12 m，故海面上可產生 Bragg 共振的波浪波長約為 6 m，再利用波浪的分散關係式(dispersion relation)，於深海波條件近似下，可得其對應的週期約為 2.0 s，頻率則為 0.5 Hz。當海面上有流速不為零，回波頻譜圖將如圖 1 所示，圖中虛線為以前述方式估算的 Bragg 共振理論值，圖中理論值約為 0.5 Hz，由圖中可見，回波頻譜的峰值位置並未位於由理論推算處，而是產生了  $\Delta f$  的偏移，此偏移量稱為 Doppler 頻移(Doppler shift)，為因為兩物體間具相對速度(流速)所產生的效應。Doppler 頻移之計算方式為  $\Delta f = V_{cr}/\lambda_r$ ， $V_{cr}$  為流速， $\lambda_r$  為雷達波波長。

財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心自 2008 年起引進美國 CODAR 公司之 SeaSonde 高頻雷達測流系統，針對台灣周邊海域的表面海流進行監測，至今已完成環島 18 座及離島澎湖 1 座高頻雷達站之建置，持續蒐集海面回波資訊，以提供學術研究所需。2019 年起與夏威夷大學(University of Hawaii)合作，引進非商用之相位陣列雷達，目前已於貓鼻頭完成發射天線、接收天線及機房設備之架設。相位陣列雷達之觀測範圍更廣，且其回波資訊的處理可依需求自主開發處理程序，不若 CODAR 系統需使用其自身之商用軟體，除無法取得其原始碼外之缺點外，軟體升級後需每年額外支付維護費用。

CODAR 系統使用的方向辨識方法為多重信號分類演算法(Multiple Signal Classification, MUSIC)其分析方式為透過三組共位天線同步接收來自不同方向的回波能量，每一組天線可求出自譜(self spectra)以及與另外兩組天線之間的交錯譜(cross spectra)，此一技術的原理在於自譜與交錯譜搭配雷達站周圍區域所測得之天線場型，進而界定出不同方向所接收到的速度資訊(吳等，2015)。相位陣列雷達信號之解析可透過波束成型演算法(Beam-forming)進行，因組成陣列雷達之天線間距離不同，同一信號源之海面回波抵達各天線的時間不同，即其間有相位差產生，逐一針對不同方向回波進行都普勒頻移(Doppler shift)的計算，則可獲得整個觀測平面之流場分布。本研究利用貓鼻頭相位陣列雷達站觀測資料進行分析解算，此系統具有八支接收訊號之天線，配置則採用矩形陣列方式，有別於較普遍之直線排列方式，演算法採用波束成型以分析回波資料，並就解算結果進行探討。

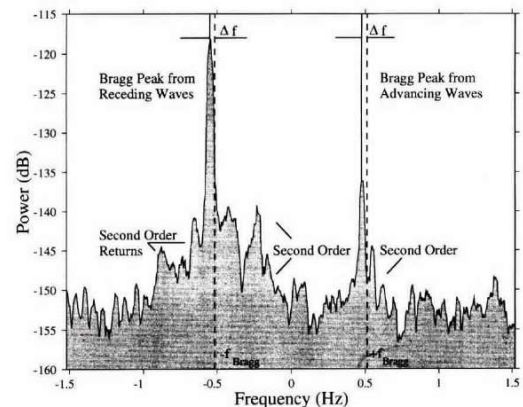


圖 1. 雷達回波頻譜(引自 Paduan, J. D., & Graber, H. C. (1997). Introduction to high-frequency radar: reality and myth. *oceanography*, 10(2), 36-39.)

## 二、研究方法

### 2.1 雷達訊號

雷達波使用連續調變之波形(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)的技巧，可獲得高解析度之量測，故廣泛被應用至雷達發送之訊號(Barriok, 1973; Stove, 1992)，而 FMCW 原始資料的分析主要以快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)進行，且位相(phase)相關資訊可由 FMCW 資料

中擷取。FMCW 系統之架構如圖 1 所示，主要包含訊號發射器(transmitter)、接收器(receiver)、混合器(mixer)、濾波器(filter)及類比—數位轉換器(analog-to-digital converter)。

假設頻率之調變於一脈衝重複區間  $T_r$  (Pulse Repetition Interval) 為線性遞增，令發射訊號之振幅大小為一單位，則發射訊號可表示為：

$$S_T = \cos[\omega_c t + \pi B f_r t^2] \equiv \cos[\phi_T(t)] \quad (1)$$

其中  $T_r = 1/f_r$ ,  $f_r$  為脈衝重複頻率， $B$  為頻寬 (bandwidth)， $\omega_c = 2\pi f_c$ ， $f_c$  為載波頻率 (carrier frequency)， $\omega_c$  為載波角頻率 (carrier angular frequency)， $t$  為時間。

瞬時頻率  $f_T$  為位相之導數(derivative)，故有：

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_T(t)}{dt} = f_c + Bf_r t \quad (2)$$

雷達波經物體反射，其移動速度為  $V$  (假設以遠離雷達之徑向方向前進)，原始位置為  $R_0$ ，於時間  $t$  時之位置  $R_t$  如下：

$$R(t) = R_0 + Vt \quad (3)$$

由接收器所接收到的訊號，同時具有時間上之延遲及都普勒頻移，其波形為發射之波形乘上一振幅係數  $A$ ，而時間上延遲為  $t_d$ ，其中  $t_d = 2R(t)/c$ ， $c$  為光速，故接收訊號可表示為：

$$S_R(t) = AS_T(t - t_d) = A \cos[\omega_c(t - t_d) + \pi B f_r(t - t_d)^2] \quad (4)$$

前述發射訊號與接收訊號頻率隨時間之變化如圖 2 所示，圖中實線為發射訊號，虛線則為接收訊號。發射訊號與接收訊號藉由於時域上相乘方式混合，利用由餘弦合的三角恆等式關係，混合訊號之位相，可以接收訊號位相， $\phi_T(t - t_d)$ ，與發射訊號位相  $\phi_T(t)$  之差與合之三角曲線分量分別表示，因為接收訊號位相與發射訊號位相相加之分量，恰為載波頻率之兩倍，此分量將於低通濾波器所濾除。

檢視單一線性調變波之發射訊號及經時間延遲  $t_{d_1}$  及  $t_{d_2}$  後的反射訊號，其頻率對時間變化圖如圖 3 所示，圖中實線為發射訊號  $f_T(t)$ ，虛線分別為兩不同距離之反射物體所產生的反射訊號， $f_{R_1}(t)$  及  $f_{R_2}(t)$ ，其頻率隨時間之變化與發射訊號同，反射訊號與發射訊號之差別在於時間上有一延遲，而於頻率—時間圖上之斜率一致，發射訊號與反射訊號兩者間的頻率差稱中頻(intermediate)訊號，如圖 3 下圖所示。

FMCW 雷達利用發射訊號與某一距離之反射訊號，兩者之頻率差為固定之特性，方便運至反射物距離之計算。以圖 3 為例，兩不同距離所產生的反射訊號，將產生兩不同之中頻訊號，此頻率可進一步求得反射物體距離。因發射之線性調變波訊號，其頻寬  $B$  與調變之延時  $T_r$  已知，故於頻率—時間圖上之斜率可得，而因反射訊與入射訊於頻率—時間圖斜率不變，與入射訊號皆等於  $B/T_r$ ，對於反射訊號而言有  $\delta f_1/t_{d_1} = \delta f_2/t_{d_2}$ ，因此，若解得中頻訊號，即可進一步得知反射訊號之延遲時間，反射物體之距離亦可得知。於 FMCW 系統下，所接收的回波訊號先經混合器處理，再經低通濾波器與類比—數位轉換器後以供後續資料分析使用。

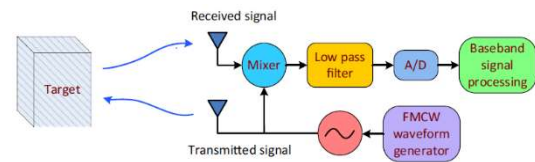


圖 1. FMCW 系統示意圖(引自 Lin et al., 2016)

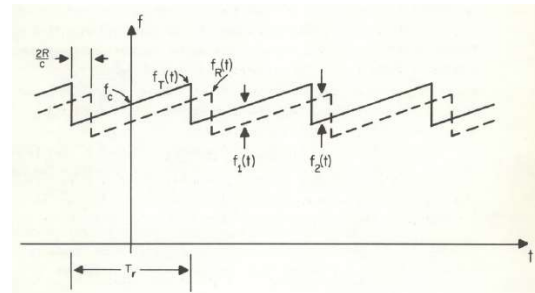


圖 2. 發射訊號與接收訊號之頻率隨時間變化圖(引自 Barrick, 1973)

雷達波之回波訊號，由接收系統接收回波 I(In phase)-Q(Quadrature phase)訊號，原始 I-Q 訊號如圖 4 至 6 所示，經第一次傅立葉轉換之結果如圖 7 所示，再經第二次傅立葉轉換後可得 Doppler 頻譜，如圖 8 所示，Doppler 頻譜含有反射波之距離、海面流速及角度等資訊，透過後續資料處理可分別求得。回波資料的處理，主要以方向辨識(Direction Finding)演算法及波束成型(Beamforming)演算法，兩種演算方式皆須先將所有接收天線之回波訊號予以疊加，因接收天線位置不一，同一反射波到達各構成天線之時間不同，故疊加的方式需考慮其間幾何關係，以消除其間的時間差。

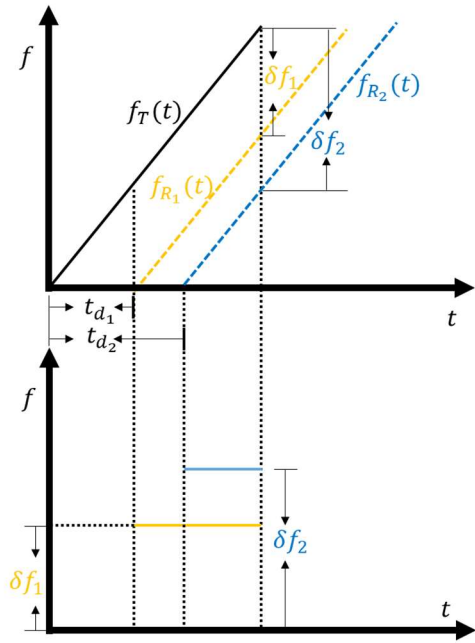


圖 3. IF 訊號示意圖

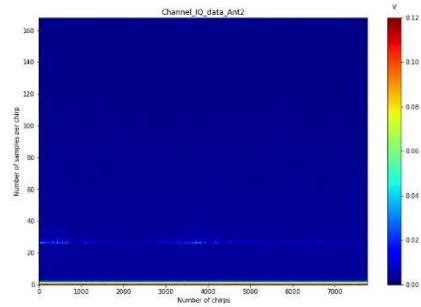


圖 6 I+iQ 訊號

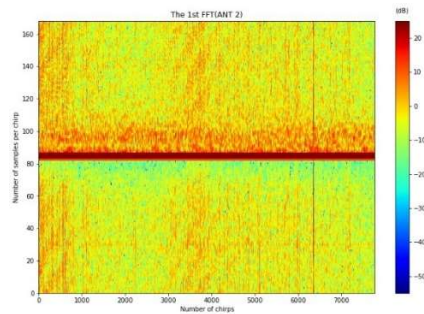


圖 7 I+iQ 訊號經第一次 FFT 轉換結果

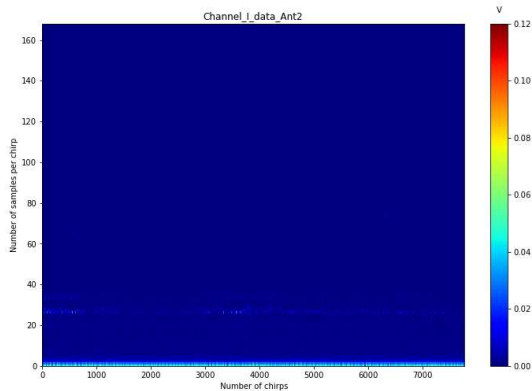


圖 4 I 訊號

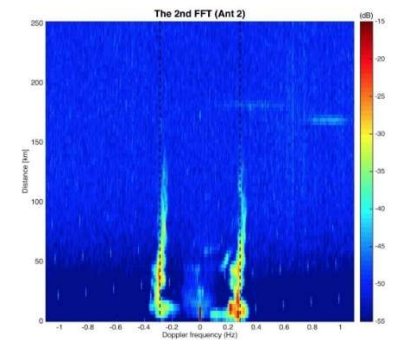


圖 8 I+iQ 訊號經進行第二次 FFT 轉換結果

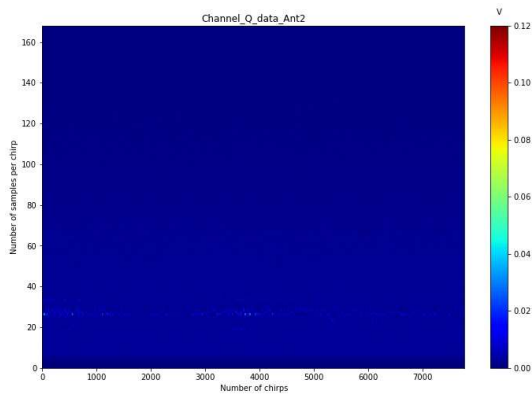


圖 5 Q 訊號

## 2.2 資料分析

本研究利用財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心於屏東縣恆春鎮貓鼻頭所架設之相位陣列雷達站觀測資料進行分析，相位陣列雷達含 4 支發射天線，位置如圖 9 所示，發射場型為指向性，指向方位角 155 度方向，另有 8 支接收天線及機房設備相關元件，接收天線以等間距矩形陣列之方式排列，系統參數如表 1 所示。由接收系統所接收之回波 I(I phase)-Q(Quadrature phase)訊號，原始 I-Q 訊號如圖 10 所示，系統設定每次接收 7600 個線性調頻(chirp signal)波，每個調頻波時間長度為 0.455

秒，故以 3458 秒時間長度進行資料處理，每個調頻波有 168 個取樣點。分析處理步驟將針對上述 I-Q 資料進行，經兩次傅立葉轉換，將所得之頻譜資料，參考 Van Trees (2002)之方式，於頻率域上進行波束成型之計算，令波束模型(Beam Pattern)之形式為：

$$B(\psi_x, \psi_y) = e^{-i(\frac{N-1}{2}\psi_x + \frac{M-1}{2}\psi_y)} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \omega_{nm}^* e^{-i(n\psi_x + m\psi_y)} \quad (5)$$

其中，

$$\psi_x = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin \theta \cos \phi \quad (6)$$

$$\psi_y = \frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin \theta \sin \phi \quad (7)$$

(5)~(7)式中， $N, M$  分別為  $x$  軸及  $y$  軸方向上之天線個數， $\omega_{nm}^*$  為權重因子， $\lambda$  為波長， $d_x, d_y$  為天線於  $x$  軸及  $y$  軸方向之間距， $\theta$  為位置向量與  $z$  軸之夾角， $\phi$  為位置向量投影至  $x-y$  平面之分量與  $x$  軸之夾角，各陣列天線元件位置定義如圖 11 所示。



圖 9. 陣列天線位置及指向

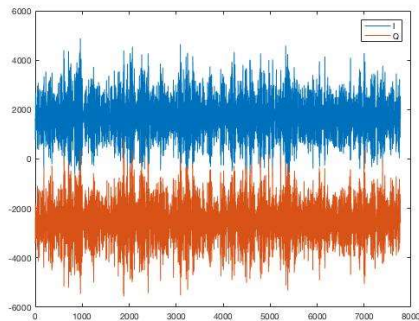


圖 10. 陣列接收天線 I-Q 訊號圖

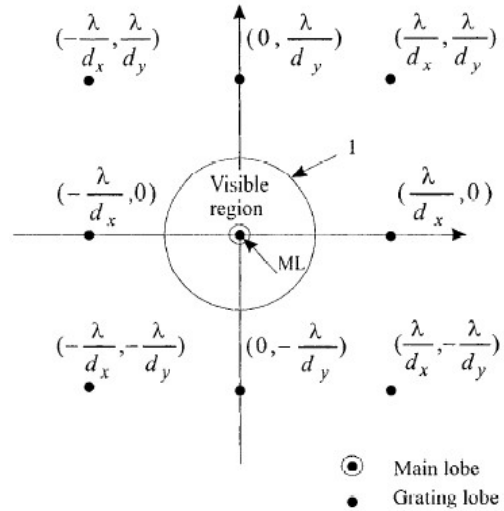


圖 11. 陣列天線元件平面位置圖(引自 Van Trees, 2002)

表 1 相位陣列雷達系統參數

中心頻率	7.8125 MHz
調變頻寬	50KHz
發射功率	50 W
測流距離	200-250 km
測波距離	80-100 km
距離解析度	約 750-3750 m

### 三、結果與討論

相位陣列座標之定義如圖 12 所示，圖上座標軸距離為二度分帶座標，以編號 5 號天線為中心，定義 5 號天線朝向 6 號天線之方向為陣列天線之主軸，主軸方向為 156 度，角度之表示方式同方位角之定義，觀測範圍選定為 89 度至 279 度間，即主軸方向逆時針方向轉 67 度至順時針方向轉 129 度間之範圍。相位陣列雷達回波資料經處理後，利用前章所述進行波束成型計算，可分別求得各方向之頻譜，因布拉格反射之理論值為已知，由都普勒頻移之關係，進一步求得各距離單元之流速，同一時間下，沿觀測方向逐一計算對測站之徑向流速，最後套疊各方向流速以獲得整個觀測範圍內之徑向平面流場。

相位陣列雷達回波資料以前述方式進行波束成型演算法之分析，為驗證演算法解析結果，分別取陣列雷達鄰近測站資料及兩演法結果之徑向流速進

行比對交互驗證，以確認演算結果之正確性，其中，以方向辨識演算法進行之相關解析，採用黃，程 (2021)之結果進行。

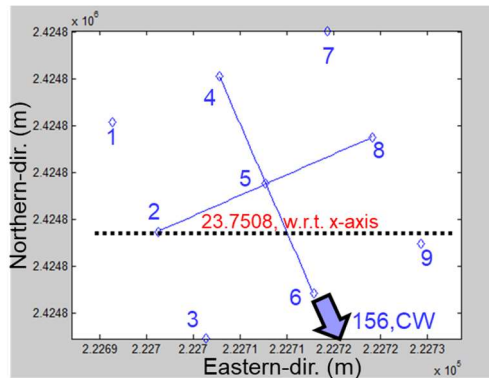


圖 12. 接收陣列天線座標示意圖

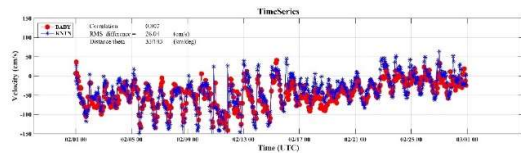


圖 13. 香蕉灣站觀測資料與墾丁站方向辨識演算法解析徑向流速比對結果

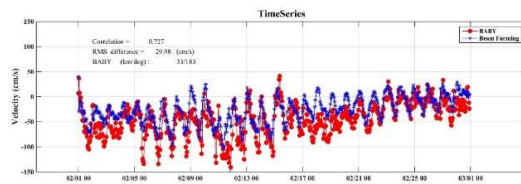


圖 14. 香蕉灣站觀測資料與墾丁站波束成型演算法解析徑向流速比對結果

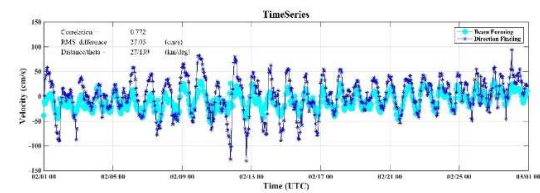


圖 15. 方向辨識及波束成型演算法相互比較圖

將解析資料分別與鄰近測站比對，其結果呈現合理之一致性，分別如圖 13 至圖 14 所示，其中，圖 13 為方向辨識演算法解析結果與香蕉灣站測得流速之比較，圖 14 則為利用波束成型演算法解析結果與香蕉灣站測得流速之比較，其間之相關係數分別可達為 0.8 及 0.7，顯示兩種解析方式皆與鄰近測站觀測成果具高度相關性，由圖中可見，兩不同演

算法皆可掌握流速大小的變化趨勢，而波束成型演算法於較大的流速時可發現有較大的誤差，推測可能與流速最大門檻值大小的設定有關。再進一步將方向辨識演算法及波束成型演算法相互比較，結果如圖 15 所示，圖中顯示兩不同演算法針對流速大小的解析結果，所得的趨勢呈現一致性的變化，而兩演算法結果與鄰近測站觀測結果呈現一致性，可透過兩者比較的結果，間接對兩不同演算進行交互驗證。

#### 四、結論

本研究由相位陣列雷達之回波訊號進行解算分析，以波束成型演算法計算各方向上都普勒及距離能譜，最後由都普勒頻移求得徑向流速。資料分析結果利用鄰近測站進行驗證，與波束成型演算法解析結果比較之相關係數約為 0.7，顯示本文解析方式與鄰近測站觀測成果具高度相關性，解析結果亦與方向辨識演算法解析結果具合理的一致性。

#### 參考文獻

1. 吳立中、莊士賢、黃清哲、邱永芳 (2015) 「從高頻雷達陣列天線訊號解算流場之研究」，104 年天氣分析與預報研討會，第 1-4 頁。
2. 黃郁軒、程嘉彥 (2021) 「多重訊號分類演算法應用於相位陣列雷達之徑向速度解析之研究」，110 年天氣分析與預報研討會論文集。(出版中)
3. Barrick, D. E. (1973) *FM/CW radar signals and digital processing*, (No. NOAA-TR-ERL-283-WPL-26). National oceanic and atmospheric administration boulder co wave propagation lab.
4. Lin, J. J., Li, Y. P., Hsu, W. C., and Lee, T. S. (2016) Design of an FMCW radar baseband signal processing system for automotive application, *SpringerPlus*, 5(1), 42.
5. Paduan, J. D., & Graber, H. C. (1997) Introduction to high-frequency radar: reality and myth, *oceanography*, 10(2), 36-39.
6. Stove, A.G. (1992) Linear FMCW radar techniques, *IEE Proc F Radar Signal Process* 139(5):343-350.
7. Van Trees, H. L. (2002) Detection, estimation, and modulation theory. Part 4, Optimum array processing, Wiley-Interscience.



## 數值模式應用於峽谷異重流之探討

蔡聖德<sup>1</sup> 陳佳琳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系碩士生

<sup>2</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系助理教授

### 摘要

隨著台灣經濟社會的發展及網路通訊需求日益增加，一但海底電纜的斷裂將造成難以估計的損失。Liu et al.(2012)在高屏峽谷的觀測中發現異重流可發生於懸沙濃度小於 40g/l 的情形，這與以往的觀念不符合，Mulder and Syvitski(1995)根據世界 150 條河川歷年輸沙量、年逕流量與海水密度進行統計後指出，當河流中的懸浮沉積物濃度達到 40-45g/l 時，會使挾帶沉積物的河水密度高於海水，因此在河口附近河水與海水交界處，河水會下沉沿著底床斜坡向海的方向流動，形成異重流。因此本研究利用中尺度海洋數值模式 ROMS 以及河川數值模式 hec-ras，基於現地觀測之河川斷面地形、流量歷線、懸沙濃度、海域底質、潮汐、及垂向溫鹽分佈，進行模式架設，並根據觀測之水位進行模式率定，以增加模式之真實性。並藉由三維數值模式深入探討定點觀測數據無法捕獲的現象，了解異重流在高屏峽谷內發生的臨界條件以及相關物理參數，以提供相關領域之學者參考以及相關之決策使用。

關鍵字: 異重流、高屏溪、臨界條件

## A Numerical Investigation on the Occurrence of Low Concentration Hyperpycnal River Plumes in a Submarine Canyon

Sheng-De Tsai<sup>1</sup>, Jia-Lin Chen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan

### Abstract

Network communication has recently become an important issue along with the rapid Taiwan economic growth. The most obvious challenge is the potential of submarine cable disruptions causing unpredictable losses of social and economy. Two suspected factors inducing submarine cable breaks are (1) submarine collapse related to random earthquake events and (2) hyperpycnal river plumes related to high suspended sediment concentration (SSC) carried by high river discharge during extreme conditions. Hyperpycnal flow event has obtained more attention for direct field observation due to its extreme occurrence and catastrophic damage. Previous investigations in the Gaoping Canyon found that hyperpycnal flow occurs when  $SSC < 40 \text{ g/L}$  less than the threshold of 40–45 g/L (Mulder and Syvitski, 1995). The sediment-laden river discharge accumulated adjacent to the river mouth will undergo less dense seawater and sink toward the sea along the bottom slope forming a hyperpycnal flow. A combining numerical model using Regional Ocean Modeling System (ROMS) and Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) is used to observe the mechanism of hyperpycnal flow in the Gaoping Canyon under different SSC during extreme conditions. The model results show the SSC carried by low river discharge accumulates at the river mouth and transports

southward by tidal currents. During the peak flood event, the hyperpycnal river plume further descends to the seabed of submarine and cause a submarine cable disruption.

**Keywords:** submarine cable break, hyperpycnal flow, Gaoping River, critical conditions for hyperpycnal flow, damage during typhoon

## 一、研究目的

隨著國際經濟社會的發展，通訊技術成了熱門的議題，當中最常使用的通訊裝置為海底電纜，根據 Gavey et al.(2017)的文獻，台灣在 2006 年~2015 年之間仍發生了四次海底電纜斷裂的事件，當中 2015 年的斷裂事件，被認為與高屏流域產生的異重流(hyperpycnal flow)有關，但此事件的泥沙濃度，卻未達到異重流(hyperpycnal flow)發生條件 40g/l(Mulder and Syvitski, 1995)。此外 Liu et al.(2012)在 2008 年高屏海底峽谷的單點溫度觀測，發現峽谷中有異重流(hyperpycnal flow)造成高溫水層，此觀測時段的高屏泥沙濃度也未達到臨界濃度 40g/l。因此，本研究想了解高屏流域發生異重流(hyperpycnal flow)的真正的臨界濃度以及其物理機制。本研究的時間點，主要以 2008 年卡玫基及鳳凰颱風時的觀測時間為主，因此設置 2008/07/15 至 2008/08/01 為模式模擬的時間。

## 二、研究區域

高屏溪全長 171 公里，流域面積 3257 平方公里，為全台流域面積最大之河川。其地勢落差大，坡度落在 0.008~0.0006。河道底質粒徑介於 0.1~1.5 公厘，屬於砂質河川，而下游地區多為較寬廣的瓣狀河道，上游集水區則因土質脆弱易受雨水沖刷，使得此地區最高之泥沙濃度可達到 60g/l。高屏溪平均流量為 281.54cms，最大流量可達到 27,445.91cm<sup>3</sup>。河口外兩公里處，有一長達數十公里之海底峽谷，連接了高屏溪以及馬尼拉海溝，因此峽谷可視為泥沙通道將高山之泥沙帶離河口抵達深海，如同一源到匯系統(source to sink)將陸地上的泥沙帶入海洋之中。

## 三、研究方法

因異重流通常發生的時間為颱風時期，此時不

適合現地觀測，因此本研究採用數值模式進行研究，當中河川使用 Hec-Ras，而海域使用 ROMS 進行模擬。

### 3.1 Hec-Ras 1D 模式設定

為了更準確的模擬河道上游的水動力過程，本研究另外使 Hec-Ras 1D 以及內政部 20m 解析度開放資料進行河道模擬。上游邊界取里嶺大橋，下游邊界取高屏河口，其中上游輸入的流量資料參考水利署 2008 年水文報輸入。摩擦坡降(friction slope)以及曼寧係數(manning coefficient)參考經濟部水利署水利規劃試驗所(2007)分別設置 0.0008 以及 0.03。計算斷面取 38 斷面(各斷面約相距 1km)以及 3 個矩形堰，當中矩形堰分別代表高屏攔河堰、曹公堰以及萬丹攔河堰，其中矩形堰的尺寸則是參考巨廷工程顧問(2006)內的數據。

### 3.2 ROMS 模式設定

ROMS(Regional oceanographic modeling system)為三維數值模式，其控制方程式為 RANS Navier-Stokes 方程式，並基於靜水壓假設以及布厄尼假設進行計算。紊流閉合模式使用 k-ε 模式，以模擬泥沙垂直分層的現象(Winterwerp, 2001)。

模式泥沙的運算，懸浮載是基於擴散方程式，如式 (1a)，而底床載則是基於 meyer-peter and Muller(1948)的公式進行計算，最後本研究因研究尺度大因此暫不考慮絮凝作用(flocculation)之影響。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} = -\frac{\partial w_s C}{\partial z} + E_s - \frac{\partial}{\partial z} \left( c'w' - v_f \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1a)$$

$$E_s = E_0(1 - \phi_s) \frac{\tau_b - \tau_{ce}}{\tau_{ce}} \quad (1b)$$

C 為泥沙濃度， $w_s$  為沉降速度， $E_s$  為侵蝕速度 (Erosion rate)， $\phi_s$  為表層孔隙率， $E_0$  為侵蝕速度常數(Erosion rate constant)， $\tau_{ce}$  為臨界剪切應力， $\tau_b$

為流體剪應力， $\nu_f$ 為運動黏制係數。當中 $W_s$ 根據 U.S. Inter-Agency Committee on water resource (1957) 的經驗式計算； $E_0$ 以及 $\phi_s$ 是根據 Hagy et al.(2000) 的經驗公式； $\tau_{ce}$ 粗顆粒( $D_* \geq 10$ )利用 shield 圖的簡化式(Yalin, 1976)，細顆粒則是利用 Miller 的簡化式(Miller et al., 1977)。當中 $D_*$ 為粒徑參數(particle parameter) $[= (1.65g/\nu^2)^{\frac{1}{3}}d_{50}]$ 。

底床剪應力則是利用對數流速剖面以及數值網格底層流速進行計算，當中為速度為零的高程( $z_0$ )，則假設整體流況之邊壁雷諾數 $Re_* (= \rho u_* k_s / \mu_f)$ 大於 70 的條件下，另 $z_0 = k_s / 29.7$ ，當中 $k_s$ 平滑底床之表面粗糙度， $\mu_f$ 動力黏滯係數。此外因本研究著重在高濃度的條件研究，因此 $k_s$ 之定義如式(2a): (Van Rijn, 1993)

$$k_s = 30d_{90} \quad \theta \geq 1 \quad (2a)$$

$$\theta = u_*^2 / (1.65gd_{50}) \quad (2b)$$

式中 $d_{90}$ 為土壤含量百分之 90 之粒徑，參考 Liu et al.(2002)高雄外海現地量測資料，設定 0.1 mm； $\theta$ 為流動參數(mobility parameter)； $g$ 為重力加速度； $d_{50}$ 為中值粒徑，參考 Liu et al.(2002)高雄外海現地量測資料，設定 0.03 mm

### 3.2.1 模式地形及網格設定

地形資料則使用科技部 200m\*200m 的地形資料，模擬範圍:經度從 119.630~120.740，緯度從 21.550~23.010，當中緯度每 383 公尺為一間距，而經度則以 362m 為一間距。時間步長則等於 0.5sec，以達到庫倫數(Courant-Friedrichs-Lewy condition)穩定。數值網格的排列，水平網格採用均勻網格，而垂直座標則利用地形座標分 20 層，並以表層加密而底層均勻為主。

### 3.2.2 泥沙場域設定

泥沙粒徑的選用則是參考成大水利海洋研究發展文教基金會(2009)、林之詠(2016)、Liu et al.(2002)以及 Liu et al.(2016)底質粒徑之觀測資料進行模式的設置，比對此數據將場域劃分成四個代表粒徑:0.3mm、0.03mm 以及 0.015mm，而各個粒徑所代表的區域依序為:大陸棚(或河床底質載)、海底峽谷以及沖刷仔。

### 3.2.3 溫鹽場設定

模式使用的溫鹽場則根據 NOAA 在 2009/07/03~2009/08/08 高雄外海的觀測數據以及楊仁凱(2010)在 2005~2009 年高雄河口量測之資料，

推測現地隨水深的溫鹽場曲線，而統計律定的結果可獲得溫度場之  $R^2$  等於 0.85，而鹽度場之  $R^2$  等於 0.6，而密度則是使用線性狀態函數，並且只考慮溫度場、鹽度場以及泥沙密度之影響，壓力之影響則忽略。

## 3.3 ROMS 河道源頭設定:

### 3.3.1 源頭溫度與鹽度

河道源頭水溫根據全國環境水質監測資訊網 2008/07/17 萬大大橋的溫度資料(=26.4 度)，設定為 ROMS 河川模式的源頭溫度。源頭的鹽度則是參考 Liu et al.(2016)內流量為 240cms 時河口鹽度觀測，設定為 20psu。

### 3.3.2 源頭泥沙設定:

根據經濟部水利署水利規劃試驗所(2007)內的資料，高屏攔河至高屏河口之平中值粒徑等於 0.3mm，而  $d_{10}$  等於 0.12mm；懸浮載粒徑則為林鈺淇(2019)在高屏攔河堰三個月的觀測以及國立交通大學(2008)在高屏攔河堰的現場觀測資料，兩者觀測的中值粒徑分別為 0.015mm 以及 0.01mm 均低於高屏溪百分之十的底值粒徑( $d_{10}$ )，因此根據 Einstein(1950)可定義為沖刷載(wash load)。此外國立交通大學(2008)也提到他們在高屏攔河堰所量測的懸浮濃度與官方所公布的泥沙律定曲線式(3)近似，因此推測官方所公布的泥沙率定曲線代表泥沙來源為上游的沖刷載，因此利用式(3)代表沖刷載的濃度，並以林鈺淇(2019)所測量的中值粒徑 0.015mm 代表沖刷載。式(3)在 2008/07/19 時尖峰濃度與當時刻水文年報的觀測值接近(=20g/l)，因此採用此式子。

$$Q_s = 0.756Q^{1.986} \quad (3)$$

其中 $Q$ 為流量(cms)； $Q_s$ 為總輸砂量 (MT/d)，當中流量則是利用 hec-ras 計算之結果來計算懸浮之濃度。

為了補上的底值粒徑所造成的泥沙濃度，本研究的採用輸沙公式 Van Raijn(1993)來計算河床底值之泥沙濃度，河床代表粒徑則是根據成大水利海洋研究發展文教基金會(2009)內的資料使用 0.03mm。

## 3.4 ROMS 邊界條件

本研究加入 OSU 調和分析之結果 TPXO9\_atlas\_v9，進入 ROMS 模式邊界。高雄主要的分潮由高到低依序為 M2 O1 K1 S2，此四個代表分潮均包含在 TPXO9\_atlas\_v9 資料內(賴進松，1999)。模式的邊界條件水位是採用查普門邊界條件

式(Chapman, 1985), 二維動量邊界條件則是採用 Flather 邊界條件(Flather and RA, 1976)。

## 四、模式率定

### 4.1 Hec-Ras 1D 模式率定

水位率定則是利用萬大水位作為模式律定的位置點其律定結果 $R^2$ 等於 0.613、skill number 等於 0.832 以及 RMES 等於 0.45(m)。此外, HEC-RAS 下游斷面所計算的流量以及水面寬, 則當成 ROMS 模式內河流輸出的依據。

### 4.2 ROMS 模式率定

本次模式水位率定採用東港溪以及小琉球之潮位站。統計參數定義則遵循 Olabarrieta et al (2011) 內文之定義, 分別有  $R^2$ 、RMSE 以及 S(skill number)[其式子如(4)所示]。

$$S = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N |C_n - M_n|^2}{\sum_{n=1}^N (|C_n + \bar{M}_n|^2 + |M_n + \bar{M}_n|^2)} \quad (4)$$

當中 N 為樣本個數;  $M_n$  為觀測資料;  $C_n$  為模式資料; 上橫線則表示平均。小琉球水位率定結果如圖八所示, 而統計指標則如表一所示, 由數據可知水位的模式表現還不錯, 因此模擬結果還尚可。

表一 水位之率定參數

	$R^2$	RMSE(m)	S
東港潮位站	0.8957	0.155	0.8828
小琉球潮位站	0.8063	0.1713	0.8326

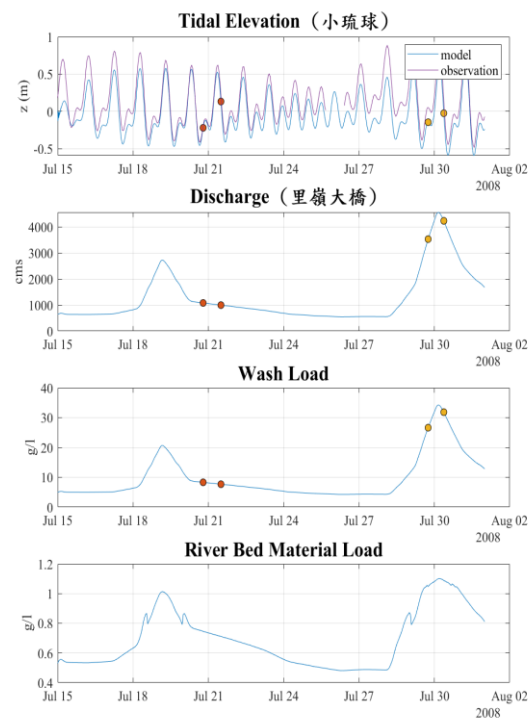
## 五、初步結果

為了解不同濃度下異重流的生成的過程, 本次分析將分兩洪峰分析, 各自代表:(1) 卡梅姬颱風: 洪峰流量為 2800cms (2008/07/19-2008/07/22); (2) 鳳凰颱風: 洪峰流量為 4500cms (2008/07/19-2008/07/22) (圖一)。

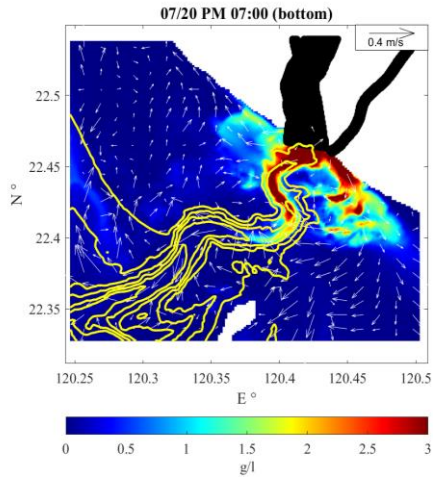
第一個洪峰分析(07/15-07/22), 當中取漲潮的時間分析(07/20 7PM), 其結果如圖二所示, 而退潮(07/21 PM 12:00)則可參閱圖三之結果; 第二個洪峰分析(2008/07/29-2008/07/31), 當中取漲潮的時間為(07/29 PM 6:00), 其結果如圖四所示, 而退潮(07/30 PM 9:00)則可參閱圖五結果

由結果可獲得此結論: (1)在高濃度時期, 異重流的流速結構容易受潮汐之流速影響, 使部份的泥沙漂離峽谷, 如圖二靠近河口處, 懸浮泥沙受到局部向南的流速影響向南漂移, 而圖三懸浮泥則是受

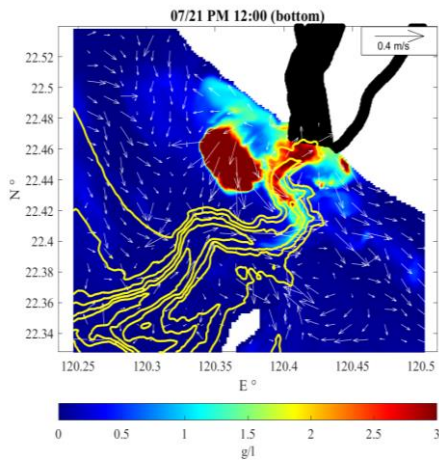
到向北的流速向北移動。但是在高濃度時期, 異重流受到潮汐的影響較小, 僅在峽谷中出現高濃度泥沙, 如圖四以及圖五所示 (2)小洪峰時潮汐對異重流有減弱效應, 但對大洪峰時影響不明顯, 異重流進入峽谷後主要受到峽谷地形束縮之影響, 維持異重流的結構以及厚度(=H), 並受到峽谷坡度(S)影響, 增加整體的重力(=g'HS, g'為減重力), 進一步將高濃度之泥沙水團傳遞至峽谷深處[Wright et al, 1990]。如圖三(卡梅姬颱風)泥沙水團行進的距離與圖五(鳳凰颱風)相比行進的距離較遠許多, 意味著在高流量及高濃度的情況下異重流可以流得比較遠。



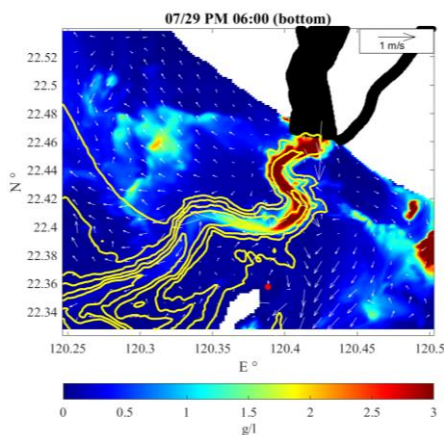
圖一 場域資料, 由上而下分別代表:潮汐水位、河川流量、沖刷載以及河床底值載



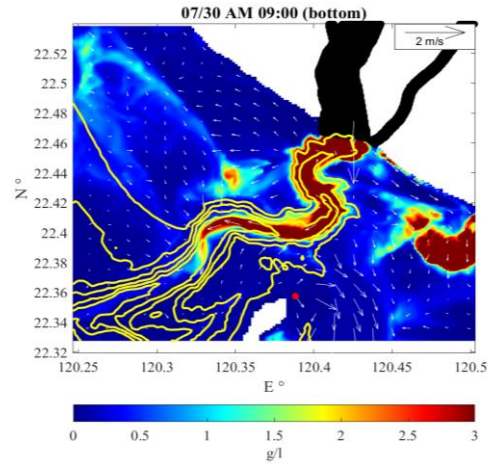
圖二 底層之泥沙濃度 (07/20 PM 7:00)



圖三 底層泥沙濃度 (07/21 PM 12:00)



圖四 底層之泥沙濃度 (07/29 PM 6:00)



圖五 底層之泥沙濃度 (07/30 PM 9:00)

## 六、參考文獻

1. 賴進松(1999)高屏溪河口感潮水理及鹽分入侵之研究, 曹公農業水利研究發展基金會
2. 巨廷工程顧問(2006)高屏溪(里港大橋至海口)整體河性檢討之研究委託技術服務測量成果報告書, 經濟部水利署第七河川局
3. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2007)高屏溪治理規劃檢討, 450 pp., 經濟部水利署水利規劃試驗所
4. 國立交通大學 (2008), 高屏堰整體加高對其上下游河段沖淤影響之研究, 經濟部水利署南區水資源局
5. 成大水利海洋研究發展文教基金會(2009), 高雄海岸基本資料監測調查(鳳鼻頭至高屏溪口及興達港至二仁溪口), 520 pp., 經濟部水利署第六河川局
6. 楊仁凱(2010)沖淡水中粒徑結構之時空變化, 國立中山大學
7. 逢甲大學(2015), 高屏溪河口輸砂對臨近海岸之影響評估(2/2), 經濟部水利署第七河川
8. 林之詠(2016), 臺灣海峽表層沉積物物理及地球化學特性的空間分布探討, 中山大學海洋科學系研究所學位論文
9. 林鈺淇(2019), 高屏溪懸沙濃度觀測與高屏海底峽谷異重流數值模擬研究, 國立成功大學水利及海洋工程研究所
10. Chapman, D. C. (1985), Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal

- ocean model, *Journal of Physical oceanography*, 15(8), 1060-1075.
11. Cheng, N.-S. (1997), Simplified settling velocity formula for sediment particle, *Journal of hydraulic engineering*, 123(2), 149-152.
  12. Committee, U. I. (1957), Some fundamentals of particle size analysis, a study of methods used in measurement and analysis of sediment loads in stream. Subcommittee on Sedimentation. Interagency Committee on Water Resources, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory Minneapolis, Report(12).
  13. Egbert, G. D., and S. Y. Erofeeva (2002), Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 19(2), 183-204.
  14. Einstein, H. A. (1950), The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, US Government Printing Office.
  15. Flather, R., and F. RA (1976), A tidal model of the north-west European continental shelf.
  16. Gavey, R., L. Carter, J. T. Liu, P. J. Talling, R. Hsu, E. Pope, and G. Evans (2017), Frequent sediment density flows during 2006 to 2015, triggered by competing seismic and weather events: Observations from subsea cable breaks off southern Taiwan, *Marine Geology*, 384, 147-158.
  17. Hagy, J. D., W. R. Boynton, and L. P. Sanford (2000), Estimation of net physical transport and hydraulic residence times for a coastal plain estuary using box models, *Estuaries*, 23(3), 328-340.
  18. Liu, J. T., R. T. Hsu, J.-J. Hung, Y.-P. Chang, Y.-H. Wang, R. H. Rendle-Bühring, C.-L. Lee, C.-A. Huh, and R. J. Yang (2016), From the highest to the deepest: The Gaoping River–Gaoping Submarine Canyon dispersal system, *Earth-Science Reviews*, 153, 274-300.
  19. Liu, J. T., K.-j. Liu, and J. C. Huang (2002), The effect of a submarine canyon on the river sediment dispersal and inner shelf sediment movements in southern Taiwan, *Marine Geology*, 181(4), 357-386.
  20. Liu, J. T., Y. H. Wang, R. J. Yang, R. T. Hsu, S. J. Kao, H. L. Lin, and F. H. Kuo (2012), Cyclone-induced hyperpycnal turbidity currents in a submarine canyon, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C4).
  21. Meyer-Peter, E., and R. Müller (1948), Formulas for bed-load transport, paper presented at IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2, IAHR.
  22. Miller, M., I. McCave, and P. D. Komar (1977), Threshold of sediment motion under unidirectional currents, *Sedimentology*, 24(4), 507-527.
  23. Mulder, T., and J. P. Syvitski (1995), Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans, *The Journal of Geology*, 103(3), 285-299.
  24. Olabarrieta, M., J. C. Warner, and N. Kumar (2011), Wave-current interaction in Willapa Bay, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C12).
  25. Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams (2005), The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean modelling*, 9(4), 347-404..
  26. Van Rijn, L. C. (1993), Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.
  27. Winterwerp, J. (2001), Stratification effects by cohesive and noncohesive sediment, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C10), 22559-22574.
  28. Wu, W., S. S. Wang, and Y. Jia (2000), Nonuniform sediment transport in alluvial rivers, *Journal of hydraulic research*, 38(6), 427-434.
  29. Yalin, M. S. (1976), Mechanics of sediment transport [by] M. Selim Yalin.
  30. Wright, L. D., W. J. Wiseman Jr., Z. S. Yang, B. D. Bornhold, G. H. Keller, D. B. Prior, and J. N. Suhayda (1990), Processes of marine dispersal and deposition of suspended silts off the modern mouth of the Huanghe (Yellow River), *Cont. Shelf Res.*, 10, 1–40.

# 孤立波於 1:3 斜坡上溯升過程 之自由表面運動特性探討

林呈<sup>1</sup> 莊博宇<sup>2</sup> 高明哲<sup>3</sup> 羅立芳<sup>4\*</sup> 徐瑋崙<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 國立中興大學土木工程學系教授

<sup>2</sup> 國立中興大學土木工程學系碩士生

<sup>3</sup> 國立中興大學土木工程學系博士後研究員

<sup>4</sup> 國立中興大學土木工程學系博士生

<sup>5</sup> 國立中興大學土木工程學系碩士生

## 摘要

科技部計畫：MOST 108-2221-E-005-015-MY3

本文以不同實驗條件之波高水深比( $H_0/h_0 = 0.363$  及  $0.050$ )進行流場特性分析。實驗前，首先針對入射之孤立波進行其波形、波形再現性、波速以及 HSPIV 量測系統之檢測，以確保實驗之正確性。孤立波於斜坡之運動過程中之流場變化分為：溯升運動、停留於最高溯升高度及溯降運動。於墨汁染黑水體之可視化法與 HSPIV 量測結果發現，孤立波於溯升過程中，其沖刷波前緣端之位移速度於特定實驗條件水深比具有相似性，並以質點軌跡可視化法，測得於溯升運動期間，自由表面水粒子之運動變化具連續性。

關鍵詞：孤立波、HSPIV、溯升運動、沖刷波前緣端

## Study on Characteristics of Flow Field during Run-up Motion of Solitary Wave over 1:3 Slope

Chang Lin, Ming-Jer Kao, Po-Yu Chuang, Li-Fang Lo\*, Wei-Lun Hsu

\* Senior Graduate Student, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

### ABSTRACT

This study investigates experimentally the flow characteristics induced by the run-up motions of four solitary waves traveling on a 1:3 sloping beach. Used High-speed particle image velocimetry (HSPIV) was employed to obtain the free surface profiles and velocity fields/profiles. Particle trajectory photograph and the ink-blackened water visualization method were used to observe the flow fields.

Variations in the flow field of solitary wave propagating over the slope are divided into run-up and run-down motions. When the swash tip of a solitary wave reaches the maximum run-up height (MRH), the contact point becomes almost standstill for a short time interval, with the contact angle changing from obtuse, via right, to acute angle. These fact highlights that the swash tip and contact point are subject to complex interaction among gravity force, viscous friction, and surface tension of the fluid.

Keywords: Solitary wave; Run-up; Maximum run-up height; Swash front; HSPIV

### 一、前言

本文利用墨汁染黑水體之可視化法、質點軌跡可視化法與高時間解析度 HSPIV 量測系統，針對孤

立波行進於 1:3 斜坡之溯升過程，以不同實驗條件之波高水深比( $H_0/h_0 = 0.363$  及  $0.050$ )進行流場特性分析。

孤立波大多為非線性波(於波高水深比大約超過 0.1 時), 僅有單一波峰, 且只出現於淺水區, 故有長波及淺水波之稱。於一般實驗室內模擬之長波分別為孤立波與潰壩流, 有鑑於海嘯發生時, 兩個相鄰之波浪距離可達 500 km 以上, 並於溯升運動時, 對乾床區造成衝擊破壞。爰此, 本文藉由孤立波模擬海嘯於水工試驗量測分析, 以瞭解海嘯於溯升與最高溯升高度過程中, 觀察冲刷波前緣端之變化情形。探討不同實驗水深之流場相似性、自由表面輪廓及最大溯升高度時冲刷波前緣端接觸點角度變化。

## 二、實驗設置

本實驗於中興大學雷射實驗室的精密造波水槽中進行。水槽總長度為 14.0 m, 寬度為 0.25 m, 高度為 0.5 m, 水槽底部及兩側均安裝透明強化玻璃, 水槽示意如圖 1 所示, 以利觀察實驗之流場運動特性以及高時間解析度 HSPIV 系統進行量測。於水槽左側安裝伺服馬達造波機, 安裝之伺服馬達可根據實驗所需輸入特定位移函數, 馬達接收訊號後乃驅動造波機, 進而推動流體, 以達實驗設定之孤立波波浪條件。其造波理論採用 Goring (1979) 所提出之造波理論函數, 可經由不同之造波函數控制波浪條件。

本實驗中設有兩種不同之座標系統, 兩種座標系統皆以 1:3 斜坡模型坡趾處與水槽底部交接處設為原點( $x = 0$  cm、 $X = 0$  cm), 其中順著孤立波於水槽水平底床行進方向為正  $x$  軸, 垂直於水平底床向上為正  $y$  軸; 而順著孤立波平行斜坡斜面方向為正  $X$  軸, 垂直於斜面向上為正  $Y$  軸。定義時間  $t = 0$  sec ( $T = t \times \sqrt{g/h_0} = 0$ ) 為時間系原點, 為孤立波波峰通過靜水面線之瞬間, 以實驗設計水深 8 cm 為例當波峰通過靜水面線( $x = 24$  cm、 $X = 25.3$  cm) 為時間系統零點。其它相關參數說明如下:  $h_0$  (cm) 為水平底床下之均等水深、 $H_0$  (cm) 為水平底床下之波高、 $\eta$  (cm) 為水面波形水面高、 $u$  (cm/s) 為平行底床之水平速度、 $v$  (cm/s) 為平行底床之垂直速度、 $U$  (cm/s) 為平行斜坡之水平速度、 $V$  (cm/s) 為平行斜坡之垂直速度、 $t$  (sec) 為有因次時間及  $T$  為無因次時間, 其有因次時間  $t$  與無因次時間  $T$  之轉換式為  $T = t \times \sqrt{g/h_0}$ 。

本實驗主要使用墨汁染黑水體之可視化法、質點軌跡可視化法(FV)以及謝(2008)所建置之高時間解析度質點影像速度(HSPIV)量測系統, 針對孤立波行經於 1:3 斜坡上, 並在不同波高水深比條件下之流體溯升與溯降過程, 進行流場量測與分析。

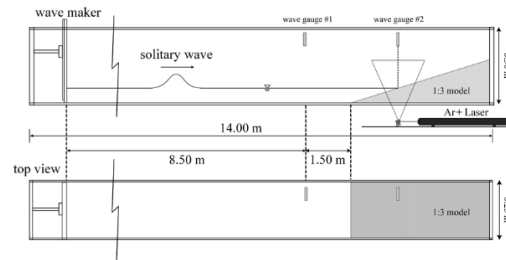


圖 1 實驗水槽示意圖

## 三、結論

利用質點軌跡可視化法與高時間解析度 HSPIV 量測系統進行量測拍攝, 捕捉自由表面運動及表面水粒子速度變化, 首先使用質點軌跡可視化法, 拍攝畫面中之質點軌跡拖痕, 即為質點於短暫曝光時間內所移動之距離, 將其除以經過之時間間距, 可求得自由表面水粒子之速度變化, 並以高時間解析度 HSPIV 進行重複驗證, 確保研究結果之正確性。

如圖 2 (a) ~ 圖 6 (a) 所示, 為  $H_0/h_0 = 0.050$  之質點軌跡可視化影像, 畫面皆經過泛光處理, 移除水面外之雷射泛光, 以便辨識自由表面位置, 其無因次時間  $T$  分別為  $-2.436$ 、 $-1.993$ 、 $-1.550$ 、 $-1.107$  及  $-0.442$ , 可明顯看出各可視化影像中, 孤立波於斜坡上之溯升過程期間內, 位於流體自由表面存在一層質點軌跡方向異於流體內部質點軌跡, 乃為流體自由表面水粒子於拍攝曝光時間內之位移軌跡, 並將可視化影像進行人工描繪與速度分析。將自由表面水粒子之瞬時速度分析結果對應可視化影像, 如圖 2 ~ 圖 6 所示。



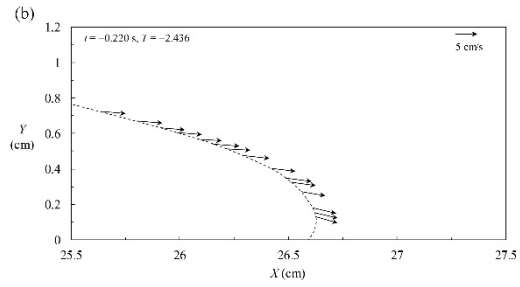
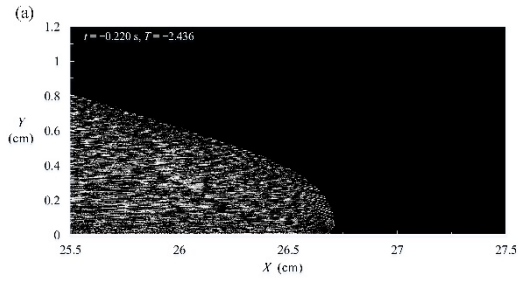


圖 2 於  $T = -2.436$  時， $H_0/h_0 = 0.050$  之(a)質點軌跡可視化影像；(b)表面水粒子運動變化圖

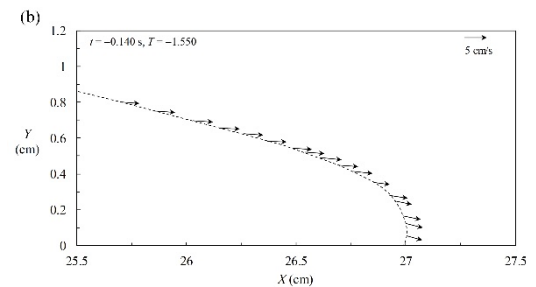
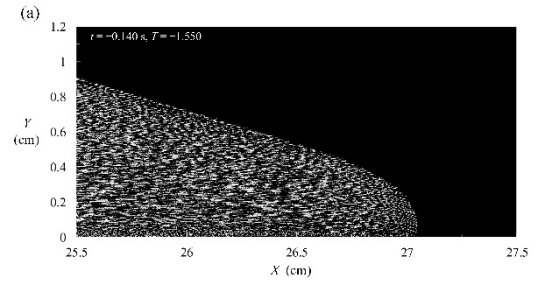


圖 4 於  $T = -1.550$  時， $H_0/h_0 = 0.050$  之(a)質點軌跡可視化影像；(b)表面水粒子運動變化圖

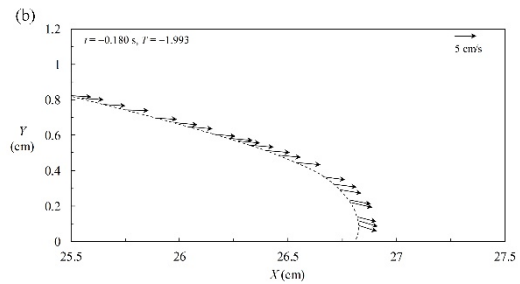
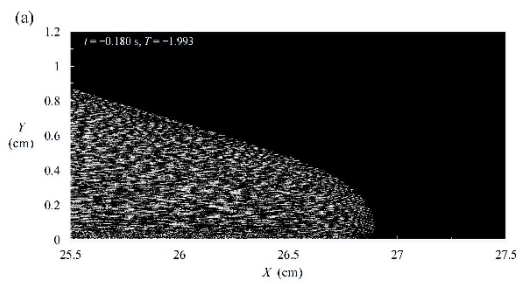


圖 3 於  $T = -1.993$  時， $H_0/h_0 = 0.050$  之(a)質點軌跡可視化影像；(b)表面水粒子運動變化圖

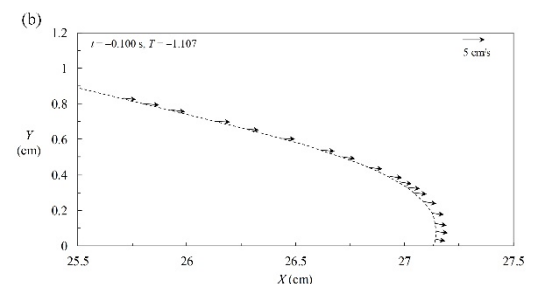
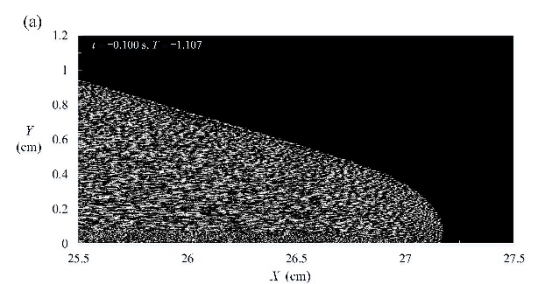


圖 5 於  $T = -1.107$  時， $H_0/h_0 = 0.050$  之(a)質點軌跡可視化影像；(b)表面水粒子運動變化圖

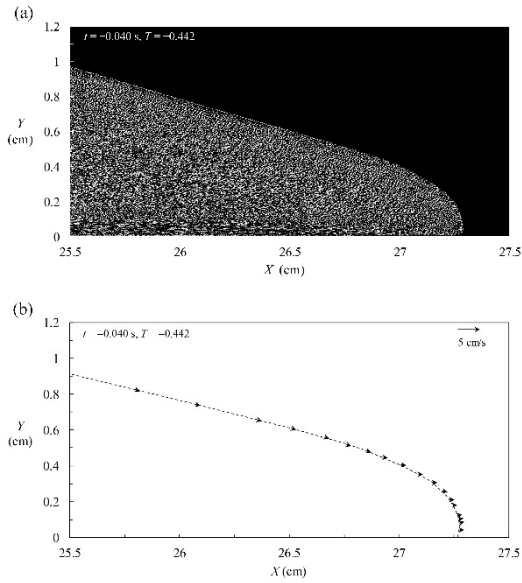


圖 6 於  $T = -0.442$  時,  $H_0/h_0 = 0.050$  之(a)質點軌跡可視化影像；(b)表面水粒子運動變化圖

當孤立波通過 SWS，孤立波進入溯升過程，直到沖刷波前緣端停留於 MRH，首先以  $H_0/h_0 = 0.050$  為例，將溯升過程中自由水面與表面水粒子之速度隨著時間變化，如圖 7 所示。孤立波於斜坡上進行溯升運動期間，並於無因次時間  $T = -5.094 \sim -0.442$  所測得之自由表面變化與表面水粒子速度進行探討，流體由靜止開始向斜坡上方正向加速，當孤立波由 SWS 溯升至  $X = 25.54$  cm 處時( $T = -5.094$ )，測得表面水粒子平行於斜坡底床之平均速度分量為  $U = 4.331$  cm/s 和  $V = -1.188$  cm/s，表面水粒子之速度隨著孤立波沿著斜坡溯升而增加，直到沖刷波前緣端溯升至  $X = 26.21$  cm 處時( $T = -3.322$ )，測得水表面水粒子之最大速度，其平行於斜坡底床之平均速度分量為  $U = 5.868$  cm/s 和  $V = -1.844$  cm/s。

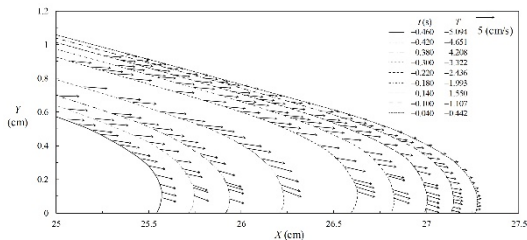


圖 7 於  $H_0/h_0 = 0.050$  於無因次時間  $T = -5.094 \sim -0.442$  之水面線與自由表面水粒子速度變化

由於孤立波進入溯升過程時，其動能受重力與底床黏滯力影響逐漸降低，於  $X = 26.21$  cm 處時( $T = -3.322$ )到達速度最大值，隨後沖刷波前緣端之表面水粒子開始減速，於  $X = 27.13$  cm 處時( $T = -1.107$ )，平行於斜坡底床之平均速度分量降低至  $U = 2.525$  cm/s 和  $V = -0.619$  cm/s，量測結果發現，當沖刷波前緣端接近 MRH ( $X_{MRH} = 27.30$  cm)時，於  $X = 27.26$  cm 處( $T = -0.442$ )，測得平均速度分量降至  $U = 1.048$  cm/s，表面水粒子之垂直速度分量則由  $T < -0.442$  期間，朝著斜坡底板向下運動( $V < 0$  cm/s)，轉為正值  $V = 0.249$  cm/s 遠離斜坡底床向上運動。

為了解沖刷波於即將到達 MRH 前，自由表面水粒子速度之詳細轉向變化過程以及是否具有與不同實驗條件下之相似性結果，因此以微觀拍攝畫面，對  $H_0/h_0 = 0.363$  進行沖刷波前緣端之自由表面與表面水粒子捕捉，以便觀察沖刷波前緣端於接近 MRH 時，自由表面水粒子之運動特性，利用質點軌跡可視化法之質點拖痕進行分析，其分析結果如圖 8 所示。當沖刷波前緣端即將到達 MRH ( $X_{MRH} = 51.90$  cm)時，沖刷波前緣端之自由表面水粒子持續受到重力影響，並於拍攝畫面中測得沖刷波前緣端傳遞至  $X = 51.24$  cm  $\sim$  51.90 cm 區間時( $T = 3.887 \sim 4.717$ )，平行於斜坡底床之平均速度分量  $U$ ，隨著距離 MRH 之距離減少而降低。如圖 8 所示，當沖刷波前緣端傳遞至  $X = 51.24$  cm 時，其測得之速度分量  $U = 16.69$  cm/s，並於溯升至  $X = 51.86$  cm 時，速度分量降至  $U = 3.81$  cm/s；平行於斜坡底床之平均垂直速度分量  $V$ ，於  $X = 51.24$  cm  $\sim$  51.90 cm 區間時產生運動方向轉向變化，從溯升階段初期，垂直速度分量為負，沖刷波前緣端之自由表面水粒子朝底床斜坡衝擊，於  $X = 51.24$  cm 處時，垂直速度分量近乎為零，平行於斜坡底床，最後於溯升階段末段，垂直速度分量為正，自由表面水粒子遠離斜坡底床運動。當孤立波傳達至 MRH ( $X_{MRH} = 51.90$  cm)瞬間時，自由表面水粒子開始受到表面張力影響，沖刷波前緣端之接觸點不再進行位移，此時表面水粒子沿著自由表面運動。

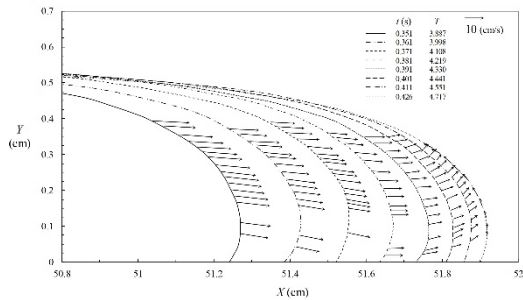


圖 8 於  $H_0/h_0 = 0.363$  於無因次時間  $T = 3.887 \sim 4.717$  之水面線與自由表面水粒子速度變化。

經過以上分析結果歸納與比較過後，可得孤立波行進於 1:3 斜坡上之沖刷波溯升運動期間，因受到重力加速度與底床黏滯力影響，其影響自由表面水粒子之運動速度變化，且於溯升過程具有明顯之連續性運動變化，以及在不同實驗條件觀測下，自由表面水粒子運動特性具有相似性之結果。

當孤立波到達 MRH 時，沖刷波前緣端停止向斜坡上方進行位移，於沖刷波前緣端與斜坡底床交界之接觸點停留，其自由表面隨時間變化過程，以微觀拍攝畫面，對  $H_0/h_0 = 0.363$  進行沖刷波前緣端於 MRH 時之自由表面變化進行觀測，如圖 9 所示。分析結果顯示，於無因次時間  $T = 4.717$  時，孤立波傳達至 MRH ( $X_{MRH} = 51.90$  cm)，此時沖刷波於斜坡底床上停留一段時間後，隨後受重力加速度影響，孤立波進入溯降運動。

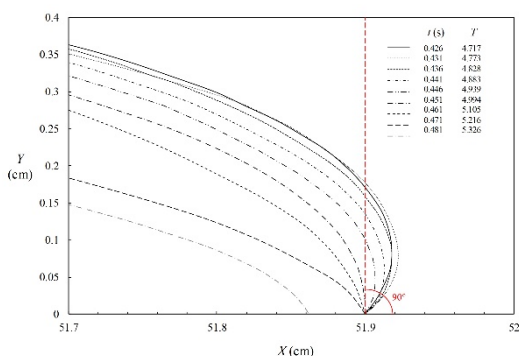


圖 9 於  $H_0/h_0 = 0.363$  無因次時間  $T = 4.717 \sim 5.326$  沖刷波前緣端自由表面變化。

沖刷波停留於斜坡上之接觸點時，沖刷波自由

表面與接觸點之間產生角度變化，此時影響其角度改變之主要因為流體之表面張力以及斜坡底床之黏滯力，當孤立波傳達至 MRH 瞬間，於表面張力作用下，使的內部流體受其影響無法繼續向斜坡上運動，且於接近 MRH 期間，孤立波之溯升速度降低，使其受黏滯力作為影響加劇，故沖刷波接觸點固定不變。由於孤立波之慣性力、重力、黏滯力與表面張力作用下，導致沖刷波接觸點與斜坡底床於 MRH 階段產生角度變化。如圖 10 所示，為沖刷波前緣端接觸角(contact angle)示意圖，講述當孤立波傳達至 MRH 時，沖刷波與斜坡底床之接觸角由圖 10(a)鈍角，經過圖 10(b)直角到圖 10(c)銳角之演變過程。

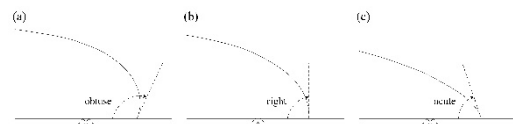


圖 10 接觸角示意圖，顯示(a)鈍角，經過(b)直角到(c)銳角之變化過程。

## 謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「孤立波行進於非常陡坡時在沖刷波前緣及退水波尾端之廊道狀邊界層流與剪切渦漩結構之特性研究」(編號 MOST 108-2221-E-005-015-MY3)之研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. Boussinesq, J. (1872) " Theorie des ondes et remous qui se propagent le long d, un canal rectangularire horizontal, en communiquant au liquide contenu dansce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au," Journal de Mathématiques Pures et Appliquées 2nd Series, 17, 55-108.
2. Carrier, G. F. and Greenspan, H. P. (1958) "Water waves of finite amplitude on a sloping beach," Journal of Fluid Mechanics, 15, 97-110.
3. Goring, D. G. (1979). "Tsunami: the Propagation of Long Waves onto a Shelf" Report No. KH-R-38, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water

Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA.

4. Grilli, S. T., Gilbert, R. W., Lubin, P., Vincent, S., Astruc, D., Legendre, D., Duval, M., Kimmoun, O., Branger, H., Devrard, D., Fraunie, P., and Abadie, S. (2004). "Numerical modeling and experimental for solitary wave shoaling and breaking over a sloping beach. " Proceedings of the Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, 306-312.
5. Grilli, S. T., Subramanya, R., Svendsen, I. A., and Veeramony, J. (1994). "Shoaling of solitary waves on plane beaches. " Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 120(6), 609-628.
6. Grilli, S. T., Svendsen, I. A., and Subramanya, R. (1997). "Breaking criterion and characteristics for solitary waves on slopes. " Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 123(3), 102-112.
7. Lin, C., Kao, M.-J., Raikar, R. V., Yuan, J.-M., Yang, J., Chuang, P.-Y., Syu, J.-M., and Pan, W.-C. (2020). "Novel similarities in the free-surface profiles and velocities of solitary waves traveling over a very steep beach. " Physics of Fluids, 32, 083601.
8. 謝世圳 (2008):「建置具高時間解析度之 PIV 系統並應用於圓柱近域尾流特性之探討」, 國立中興大學土木工程研究所博士論文, 台中。
9. 莊博宇 (2021):「孤立波於 1:3 斜坡上進行溯升運動之流場特性探討」, 國立中興大學土木工程研究所碩士論文, 台中。

## 南沙水文浮標觀測系統建置

傅科憲<sup>1\*</sup> 林昆毅<sup>1</sup> 王博賢<sup>1</sup> 李孟學<sup>1</sup>

卓訓杰<sup>1</sup> 李宜芳<sup>1</sup> 楊文昌<sup>1</sup> 鮑俊宏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國家海洋研究院 海洋科學及資訊研究中心

<sup>2</sup>海洋委員會 科技文教處

### 摘要

本研究為建置太平島南側水文浮標觀測系統，目標為進行長時間風、波、流、水下溫度及鹽度等海洋基礎環境調查，冬季吹拂東北季風，波浪主要波向為東北東方，浪高超過 2m；夏季吹西南風，波向以南方為主，浪高約 1-2 米。在 2020 年 12 月下旬至 2021 年 3 月水下 5 米與 35 米溫度及鹽度觀測，底層 35 米水團的溫鹽特性受到東北-西南走向之全日週期潮流影響。在東北潮流最強時，伴隨著帶來每日一次的低溫、高鹽水。

關鍵詞：太平島、資料浮標、海洋觀測

## Surface data buoy observation in Nansha Taiping island

Ke-Hsien Fu<sup>1</sup>, Kun-I Lin<sup>1</sup>, Bo-Shian Wang<sup>1</sup>, Meng-Syue Li<sup>1</sup>,

Hsun-Chieh Cho<sup>1</sup>, Yi-Fang Lee<sup>1</sup>, Wen-Chang Yang<sup>1</sup>, Chun-Hung Pao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Marine Science and Information Research Center, National Academy of Marine Research

<sup>2</sup> Department of Science and Technology Education, Ocean Affairs Council

### ABSTRACT

National Academy of Marine Research (NAMR) deployed an operational surface data buoy system to monitor long-term wave, wind, current, temperature and salinity in the southern of Taiping Island. The wind data shows that the winds blow northeastern in winter and southwestern in summer. The wave could exceed 2 meters height and major wave direction is northwestern (southern) in winter (summer). The underwater observations of temperature and salinity at 35 meters during mid-December 2020 to March 2021 reveal that the water properties at 35 meters occurred low temperature and high salinity (compared to temperature and salinity at 5 meters) once a day. We found that this water masses with low temperature and high salinity were associate with the maximum northeastern diurnal tidal flow.

Keywords: Taiping Island ; Data buoy ; Ocean observations

### 一、前言

南沙太平島為我國國境之南，距離臺灣約 800 海浬，從臺灣到太平島上的交通及補給主要以海上運輸為主。近年，行政院推動「經略南海 永保太平」政策，以我國捍衛南海諸島主權，積極捍衛漁權及推動生態保育、人道救援及科學研究等重要工作，以期將太平島打造成南海國際科學研究重鎮，以及

人道救援中心及運補基地。因此，多年來政府陸續投注經費在太平島上興建及改善當地基礎設施，包含已建設海巡署東南南沙分署南沙指揮部綜合大樓、南沙醫院、機場跑道、港口、太陽能發電設備、燈塔，以及中央氣象局建置陸上氣象觀測站、衛星及 4G 通訊基地台、雷達監控設備等多樣基礎設施。然而，國內在太平島有關周邊海域海洋水文調查相對稀少，研究人員在太平島執行長期海洋觀測研究相

較台灣周邊海域需要消耗更多研究經費、船費及人力時間成本。過去 TORI 在 2013 年海研五號首航至南沙太平島海域進行水文觀測任務，佈建一組錨碇式氣象資料浮標(張等人, 2015)，至今國內在太平島海域尚未有長期且即時性的海洋水文浮標觀測。內政部營建署也分別在 2009 年與 2014 年評估成立國家公園可行性與進行太平島生物多樣性之調查。

本研究由海洋委員會及國家海洋研究院於 109 年規劃執行太平島水文浮標觀測系統建置及監測，監測項目包含風、波浪、海流、水下溫度、鹽度，希望能了解及掌握南沙太平島海域長期海氣象環境特性。以補充該海域水文觀測資料之空缺，相關資訊後續可應用於太平島海龜與珊瑚礁生態研究、海底地下水研究、太平島周邊海域海洋數值建置。確保船舶航行安全，減少發生海難事件，善盡國際義務，提升我國之國際形象。進而影響太平島周邊海域海洋數值預警及救援等應用之發展。希望未來能強化並確保我國在南海地區海洋科學長期觀測研究之優勢，增加跨國際合作機會、提高國際間的能見度。

## 二、研究方法

本研究於南沙太平島南側海域水深約 50 米建置主單元海氣象觀測及副單元水下溫鹽觀測浮標系統(圖 1)。浮標系統係委由財團法人成大研究發展基金會近海水文中心協助建置，主單元水文浮標觀測系統為參考美國 NDBC 的資料浮標設計，外觀採用碟型浮標體設計與鬆弛式錨繫設計。碟型浮標體外型在海面受波浪帶動隨波性動態反應良好，適合觀測方向波譜。鬆弛式錨繫之原因為錨繫長度較水深大，使浮標具有一定的自由活動範圍，利於觀測波浪。碟型浮標體搭配鬆弛式錨繫之組合，已被國際上之研究成果證明能夠正確地觀測海洋波浪。副單元水下溫鹽浮標觀測系統為進行水下溫度、鹽度觀測，透過磁感應傳輸方式將水下觀測資訊回傳至資料監控中心。

為確保水文浮標在海上觀測品質及系統穩定性，本研究在浮標布放前須進行系統組裝測試，依據 ISO 9001 作業程序，包括三個階段作業：儀器檢測、系統組裝及系統測試。水文浮標系統觀測海氣象資訊包括氣溫、氣壓、風、海表溫度、波浪、海流、

水下溫度與鹽度(Seabird 37-IMP CTD)。這些蒐集資料之統計值每小時透過衛星將資料回傳資料監控中心。

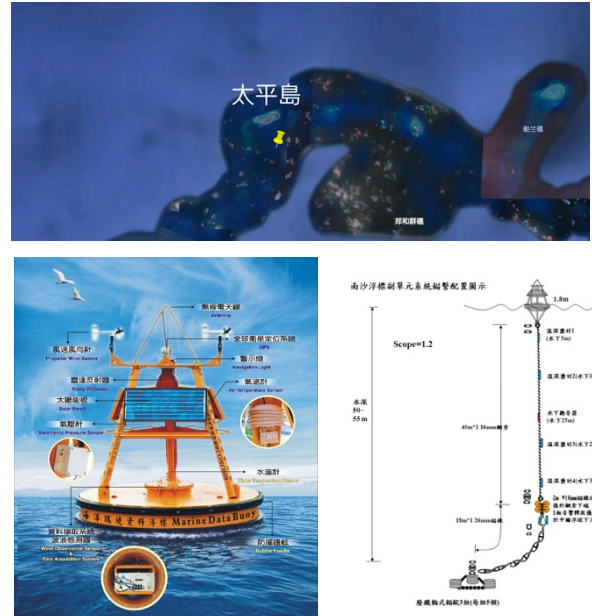


圖 1 (上)黃點為浮標位置(左下)主單元海氣象觀測浮標及(右下)副單元水下溫鹽觀測浮標。

## 三、結果與討論

### 3.1 波浪觀測

本研究從近一年的觀測結果，分析風跟波浪觀測初步成果顯示(圖 2)，2020 年 10-11 月受到多次颱風侵襲，風速可強達 13m/s；量測到波高最大可達 3m，發生於莫拉菲颱風期間(表 1)。12 月冬季東北季風時期風速最強，同時期波高受風的影響也出現超過 2m 的浪。到隔年 3-4 月風速隨著季節轉換逐漸變弱(低於 5m/s)，波高大多小於 1m。直到隔年 6 月份西南季風開始增強，風速超過 10m/s 長達 2 週；此時，從波高上也反映出波高超過 2 米的西南湧浪。從波浪玫瑰圖分析(圖 3)結果顯示，秋冬季節波浪以東北東方為主，春夏季節波浪以南方為主。

### 3.2 海流觀測

就表面海流觀測(圖 4)結果顯示，太平島海域海流在東西向流速，西南季風時期可超過 0.2 m/s 流速；南北向流速分布範圍大多落在-0.2-0.2 m/s。表面海流進行 4 個分潮(S2, M2, K1, O1)調和分析及潮

流橢圓分析結果顯示，該海域潮流(圖 5)以全日週期為主，半日週期較弱。其中又以 O1 週期分潮為主，流速最強可達近每秒 0.1 公尺，流向主軸為東北-西南向。

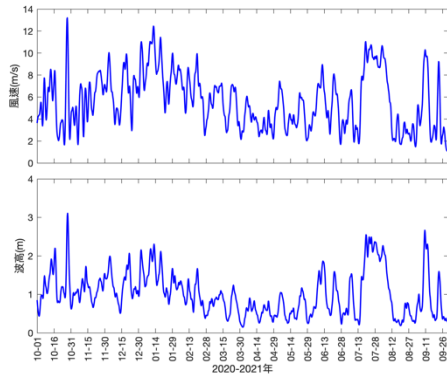


圖 2 2020 年 10 月至 2021 年 9 月風速及波高觀測。

表 1 南沙太平島 2020 年 9 月-12 月颱風統計

颱風	發生時間	颱風	發生時間
紅霞	2020/09/18	天鵝	2020/11/03
蓮花	2020/10/1-	艾陶	2020/11/09
南卡	2020/10/13	梵高	2020/11/13
沙德羅	2020/10/22	科羅望	2020/12/21
莫拉菲	2020/10/27		

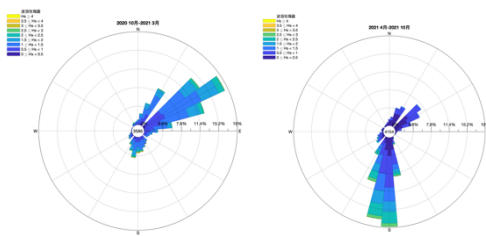


圖 3 波浪玫瑰圖(左)秋冬(2020 年 10 月到 2021 年 3 月)，(右)春夏(2020 年 10 月到 2021 年 3 月)。

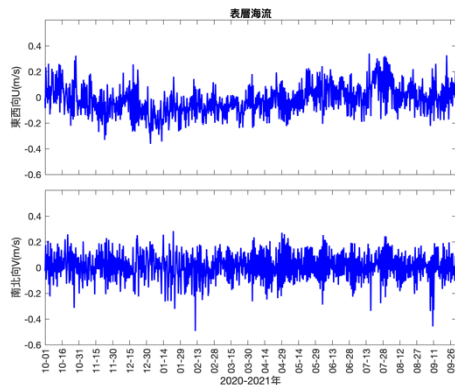


圖 4 2020 年 10 月至 2021 年 9 月表層海流觀測。

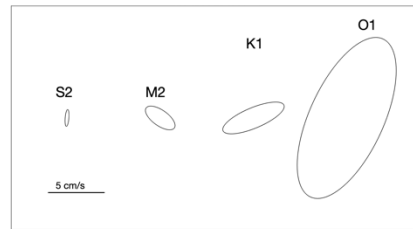


圖 5 表層海流半日潮(S2, M2)及全日潮(K1, O1)潮流橢圓。

### 3.3 水下溫度與鹽度觀測

從 5 米與 35 米的溫度及鹽度觀測結果發現(圖 5)，太平島海域在 10-12 月中旬上、下層溫度相當接近，表示此時較強東北季風吹拂及多次颱風入侵使得水體混合均勻，沒有明顯水體分層。然而，從 12 月中旬過後開始從溫度及鹽度可以明顯發現底層溫度有明顯溫降且鹽度升高的現象。上下層溫度差異達攝氏 2 度，底層鹽度出現高鹽度的現象，鹽度變化範圍可差異 1 psu。從溫鹽分布圖(圖 6)分析水團變化結果顯示，從 2020 年 12 月 19 日開始到隔年 3 月 35 米溫鹽變化經常性出現低溫、高鹽的水團。從水團特性而言 2021 年 4 月到 6 月的鹽度變化無明顯差異，但資料顯示溫度觀測仍有約 1-2 度的變化，此段時間溫度變化可能為上層海水容易受到季節變暖而升高造成的上下層溫度差異。

因此，特別針對 2020 年 12 月 19 日至 2021 年 3 月 15 日 35 米與 5 米鹽度變化較大時間範圍，進行每日(x 軸)-24 小時(y 軸)的溫度差異與鹽度差異分析(圖 7)顯示，35 米低溫、高鹽的水團每日發生一次且時間逐漸延遲(圖 7 中黑色線)，推測與當地的潮流有關。圖 8 為將 35 米海流觀測資料進行調和分析，解析全日週期(K1 分潮 23.94 小時與 O1 分潮 25.82 小時)之東西及南北潮流分量。進一步與鹽度差異比對，比對結果顯示底部出現高鹽度變化最大時間與全日潮流最大值時間接近，但有時發生在全日潮流最大值後 3-4 小時(如 1/28-1/31)。此低溫、高鹽水團伴隨著東北方向全日潮流增強出現。反之，當潮流逐漸由東北轉為西南方向時，該水團則消失。

## 四、結論建議

本研究初步成果顯示太平島南側海域冬季時期受東北季風吹拂，波浪可達 2 米。在 12 月中旬到隔年

3 月底層低溫、高鹽的水團隨著東北方向全日週期潮流出現，後續將進一步了解此水團在太平島海域流動之特性及對於珊瑚礁生態之影響。

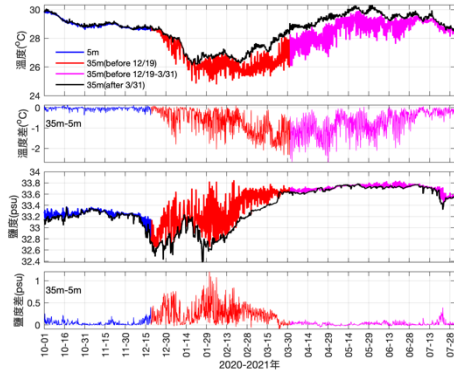


圖 5 2020 年 10 月至 2021 年 7 月 5 米及 35 米溫度及鹽度觀測，由上到下分別為溫度、5 米減 35 米溫度差異、鹽度、5 米減 35 米鹽度差異。

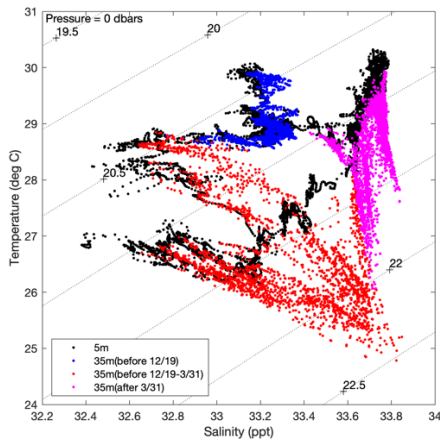


圖 6 5 米及 35 米溫度及鹽度分布圖。

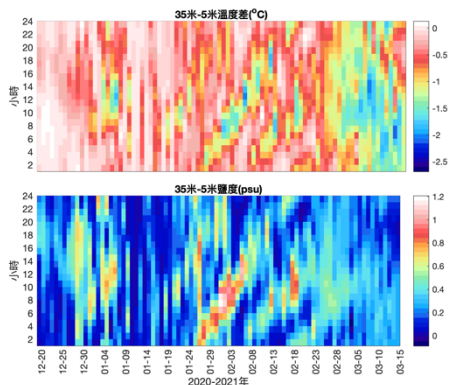
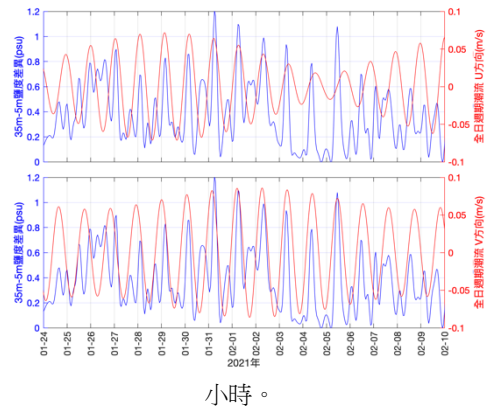


圖 7 擷取 35 米鹽度變化較大區間(2020 年 12 月 19 日至 2021 年 3 月 15 日)，35 米與 5 米溫度(上圖)及鹽度差異(下圖)。以 x 軸為日，y 軸為 0-24



小時。

圖 8 35 米海流調和分析東西方向、南北方向全日週期潮流與 2021 年 1 月 24 日至 2 月 10 日與表層鹽度差異比較圖。

## 謝誌

本文係 110 年政府科技發展計畫「臺灣及南海海域資料收集調查與資料庫精進」(審議編號:110-4901-02-22-03)之相關研究成果，承蒙中央政府經費補助，使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. 張宛婷、許友貞、賴國榮、詹瑞文、楊文昌 (2015) 海洋觀測資料品質管理系統之建置-浮標資料品管流程之研究，第 37 屆海洋工程研討會，593-597。



# 異常波浪與群波現象關聯性之研究

李堉辰<sup>1</sup> 陳盈智<sup>2</sup> 董東璟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>荷蘭台夫特理工大學機械、海事和材料工程學院台夫特系統與控制中心博士生

<sup>2</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系博士生

<sup>3</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系教授

## 摘要

異常波浪為近期熱門的研究議題，在許多非線性系統中可發現它的存在，例如在光纖及深水波的波傳遞。在海洋工程領域，異常波浪的形成機制眾說紛紜，部分研究發現異常波浪與非線性波群的演化有關，因此本文從群波現象的特性出發，希望獲得異常波浪與群波現象之間之關聯性，未來可應用於防災預警上。本研究使用了成大近海水文中心研發之連續且長期觀測的台東外洋浮標，使用零下切法來進行異常波浪的資料挑選，另外選取正常海況資料以作為對照，結果發現從基本的波浪參數並無法明顯區分出異常波浪與非異常波浪資料。然而從包絡線計算的群波參數，包含最大包絡線振幅、平均包絡線週期、包絡線尖銳度、包絡線峰度、包絡線偏態，發現從所有的包絡線統計參數都皆能看出異常波浪與非異常波浪資料之間的差別，顯示群波效應對於異常波浪的發生有極大的關聯性。

關鍵詞：異常波浪、群波現象、實測資料分析

## Rogue Waves Study: The relation of Ocean Wave Groups

Yu-Chen Lee<sup>1</sup>, Ying-Chih Chen<sup>2</sup>, Dong-Jiing Doong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Delft Center for Systems and Control, Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology, the Netherlands

<sup>2</sup> Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan

## ABSTRACT

Rogue wave is one of popular research topics in recent years, which existed in many nonlinear systems such as optics fibres and water waves in deep ocean. In hydrodynamics, the formation mechanisms of rogue waves are still uncertain. Some studies found that rogue waves propagated within nonlinear wave groups. Our study starts from the viewpoint of wave groups and aims to find a relation between occurrence of rogue waves and the effect of wave groups, hoping further applications on rogue wave forecasting and hazard prevention. The long-term monitoring data used in this study measured from Taitung Open Ocean Buoy from Coastal Ocean Monitoring Center (COMC). We use zero-crossing down method to select rogue waves data. On the other hand, we also select non-rogue wave data for comparison. We found that the wave parameters calculated from wave elevation cannot distinguish the rogue and non-rogue data. However, the results of wave groups analysis tell a different story. We calculate the wave group parameters including maximum amplitude of envelope, mean period of envelope, steepness of envelope, kurtosis of envelope and skewness of envelope, where the time series of envelope are calculated by Hilbert transform. We found that the above parameters have big potentials to distinguish the rogue and non-rogue data, indicating the highly relevant relation between rogue waves and wave groups

Keywords: Rogue waves, Wave group, Data analysis

## 一、研究目的

台灣四面環海，海域上有許多船舶通行之航道或相關漁業活動，多年來台灣周遭海域因異常波浪所發生的船難事件頻繁，船難事件常導致船員或漁民傷亡、並造成財產之損失，吳(2020)蒐集台灣海域 2004 年至 2019 年間因海氣象因素造成之船難事件共計 120 起，凸顯了解極端海況及異常波浪發生機制之重要性。異常波浪(rogue wave)是海洋中突然出現的大浪，定義為異常波浪波高大於示性波高的兩倍，而異常指數(Abnormal index, AI) 為最大波高跟示性波高的比值，當  $AI > 2$ ，該波浪被判定為異常波浪(Sand et al. 1990)。

異常波浪發生機制綜說紛紜，包含波浪線性疊加、波浪非線性聚集、波流交互作用、波浪折射及繞射等，但主要的形成機制為波浪非線性效應所演化產生的調制不穩定現象(Modulation instability)，調制不穩定現象在非線性光學及海洋深水波中已證實，此現象描述一個初始的規則波列，由於受調變攝動影響而變得不穩定，隨著時間或空間上的傳遞，最後形成高度非線性的波浪，此過程也被稱之為 Benjamin-Feir 不穩定性，Janssen(2003)提出 BFI 參數(Benjamin-Feir Index)用來量化此調制不穩定現象的程度，並廣泛被應用在異常波浪之預測等相關研究上。

此外，部分文獻提及異常波浪的形成原因與波群的非線性演化有關(陳，2001)，且發現異常波浪發生當群波現象明顯時。張(2012)的研究指出約有 10% 的資料在異常波浪發生時具有群波特性，本研究延續相關文獻，從長期的波浪監測資料進行異常波浪探勘，進一步計算波浪包絡線，並對此波浪包絡線進行統計分析，希望透過從波浪包絡線角度獲得異常波浪與群波現象之間之關聯性。此外若從群波效應與異常波浪的發生找到關聯性，可以進一步推斷異常波浪發生之原因，有助於相關科學研究並應用於防災預警上。

## 二、研究方法

### 2.1 異常波浪資料分析

本研究使用國立成功大學近海水文中心所提供之浮標資料，所選取的測站為台東外洋浮標，台東外

洋浮標位於台灣東南方距離岸邊約 300 公里處，該區域水深約為 5600 公尺，所挑選的資料觀測時間從 2006 年至 2017 年，浮標觀測時間為準點時開始觀測，並觀測十分鐘，觀測頻率為 2 Hz。

為從所有波浪資料裡挑選出異常波浪資料，參考過去傳統波浪分析方法，本研究使用零下切法(zero-crossing down method)進行波浪切割，零下切法需先計算平均水位，並以此平均水位作為基準線，零下切即為下向尋找出波谷，接著在平均水位向上尋找波峰，再向下回到平均水位，經此過程得到一個個別波浪，並計算此波浪之波高及週期，如圖 1 所示。在使用零下切法後進行異常波浪的判定，若最大波高為示性波高的兩倍，將此筆資料定義為異常波浪。接著計算異常波浪時序列之波浪參數，如波高、週期，由零下切法所計算的示性波高及平均週期又稱為三分之一波高、三分之一週期，為前三分之一大的個別波高或週期平均。

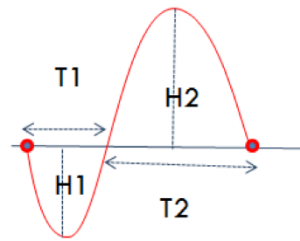


圖 1 零下切法示意圖

### 2.2 異常波浪群波分析

為獲得群波特性及包絡線之相關統計參數，本文依照圖 2 所示之流程圖進行研究。首先，使用希爾伯特變換(Hilbert transform)進行分析(Hudspeth and Medina, 1988; Medina and Hudspeth, 1990)，在數學與信號處理(signal processing)的領域中，希爾伯特變換可將信號做摺積(Convolution)，摺積是藉由兩個不同函數去產生第三個函數，在摺積之後得到複數包絡線(complex envelope)，包絡線時序列(紅色線)如圖 3 所示，此包絡線振幅為其實數及虛數的絕對值，其數學式為

$$A(t) = \sqrt{\eta(t)^2 + \hat{\eta}(t)^2} \quad (1)$$

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M R_m \cos(2\pi f_m t + \theta_m) \quad (2)$$

$$\hat{\eta}(t) = \sum_{m=1}^M R_m \sin(2\pi f_m t + \theta_m) \quad (3)$$

其中 $R_m$ 為  $m$  階的振幅、 $f_m$ 為  $m$  階頻率、 $\theta_m$ 為  $m$  階的相位角度。

為有效分割群波並濾除雜訊，本研究使用穩健線性回歸(Robust linear regression)來平滑包絡線時序列，穩健線性回歸在計算時是將平均絕對誤差最小化，有別於在線性迴歸中將均方誤差最小化，其優點在於數據樣本點在回歸時較不受異常值存在的影響。經穩健線性回歸後所得到的平滑包絡線時序列如圖 3 橘色線所示。

平滑包絡線為濾除高頻能量及雜訊後的時序列，接著進行群波個別波的判定，計算平滑包絡線的局部最小值，亦即其波谷位置，以波谷位置當作不同群波波長間的分割點，其分割線段如圖 3 黃色虛線所示，最後可以得到個別的群波，平滑包絡線經分割後總共有 13 個群波。最後將利用分割線切割紅色包絡線，可以獲得個別的包絡線振幅及週期，扣掉頭尾兩個可能會受信號邊界影響的群波，共有 11 個群波。最後，我們根據這 11 個別群波的波高及週期計算群波特性參數，包含最大群波振幅、平均群波振幅、平均群波週期，並以上述進行數據統計分析。

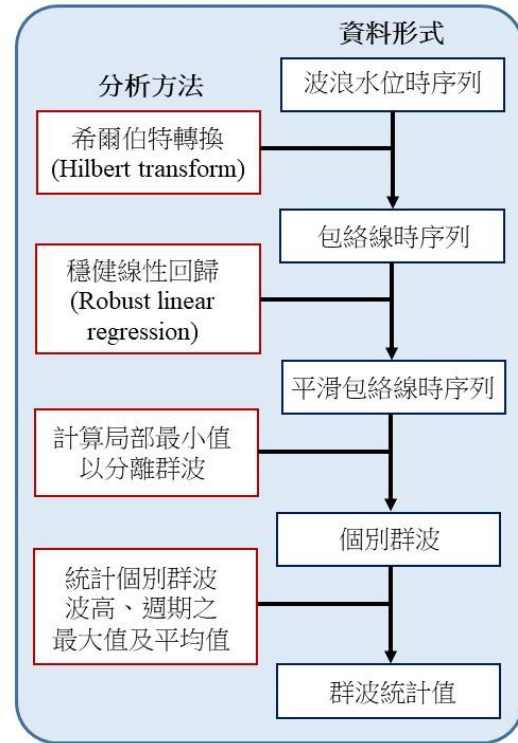


圖 2 研究流程圖

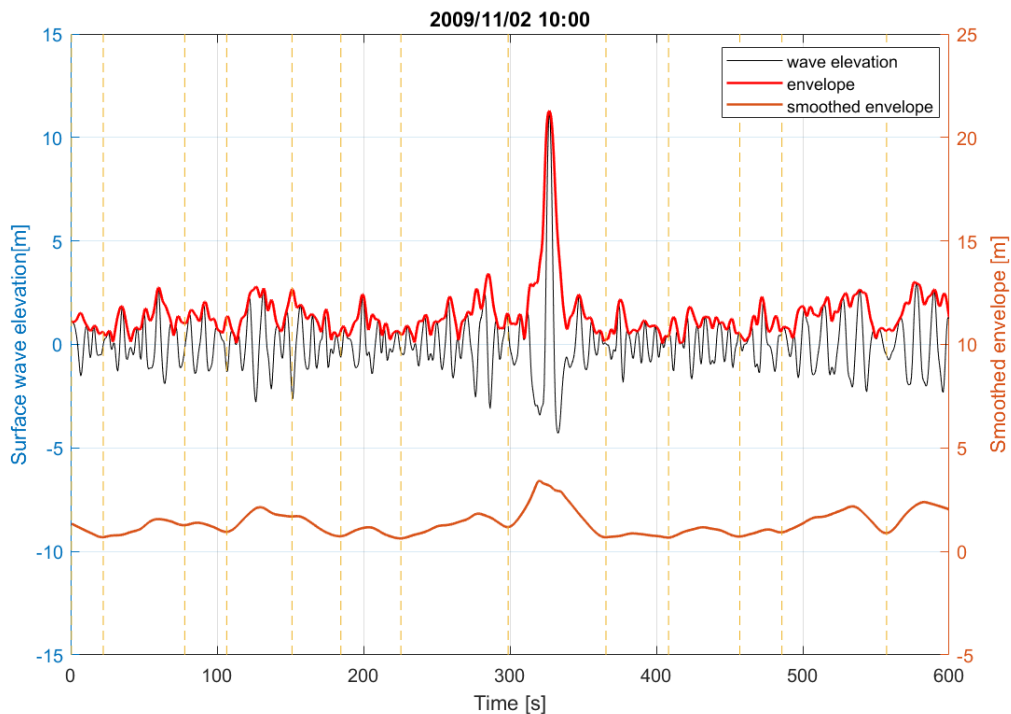


圖 3 異常波浪時序列，其中黑色線為波浪水位，紅色線為包絡線，橘色線為平滑包絡線。平滑包絡線用以切割各群波，計算局部最小值可獲得切割之位置，如黃色虛線所示。

### 三、結果與討論

#### 3.1 水位時序列統計分析

經零下切法判斷，在台東外洋浮標中符合異常波浪的資料總共有 662 筆，本文另外選取 2012 年台東外洋浮標的正常海況資料共 7981 筆，正常海況的資料中已移除所有異常波浪資料，以作為對照。所得到的基本波浪特性分析如圖 4，圖 4 為異常波浪波高與平均週期的散佈圖，藍色點為異常波浪水位資料計算而得的波浪參數，黑色點為正常海況資料，從圖 2 可以看出波高與週期並無法明顯區別出異常波浪。本研究參考過去相關文獻與異常波浪發生可能有關連性之參數進行分析，其中包含波浪尖銳度 Steepness  $\varepsilon$  (如圖 5)、峰度 Kurtosis  $\mu_4$  (如圖 6)與偏態 Skewness  $\mu_3$  (如圖 7)，以上參數可以根據下列式計算而得

$$\varepsilon = k\sqrt{m_0} \quad (4)$$

$$\mu_4 = \eta^4/m_0^2 \quad (5)$$

$$\mu_3 = \langle \eta^3 \rangle / \langle \eta^2 \rangle^{3/2} \quad (6)$$

其中， $m_0$ 為波譜的零階動差， $k$ 為波數， $\eta$ 為水位。波浪尖銳度為波高與波長之比值，從圖 5 中可以發現正常波浪與異常波浪在波浪尖銳度散佈圖中並無明顯區別。峰度定義為四階累積量除以二階累積量的平方，統計上指的是分佈曲線的尖峰程度，過去研究認為異常波浪的發生機率和水位峰度有關，如圖 6 所示，異常波浪的散佈點有明顯較大的峰度。偏態為衡量實數隨機變數機率分布的對稱與不對稱性，偏態值可以為正，正值表示右偏態，其機率密度函數的主體集中在左側；若偏態的值為負，負值表示左偏態其機率密度函數的主體集中在右側。從圖 7 可發現，從波浪的偏態分佈比較異常波浪與非異常波浪的散佈點可以看出偏態和異常波浪發生並無顯著關聯性。

上文研究主要在討論不同波浪參數對於異常波浪發生的物理機制是否有決定性因素，總結以上結果，本研究發現從最基本的波高週期資料並無法明顯區分出異常波浪與非異常波浪發生時之時序列資料，此外，異常波浪的發生與波浪尖銳度和偏態並無明顯關係，但從峰度散佈圖可發現，異常波浪資料會有較高的峰度值。

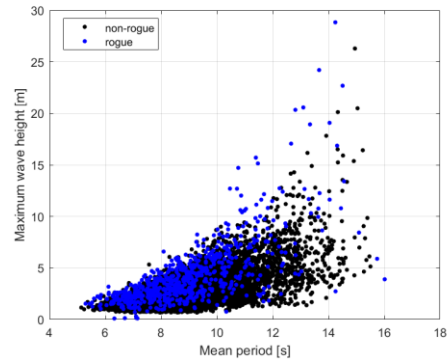


圖 4 異常波浪波高與平均週期散佈圖

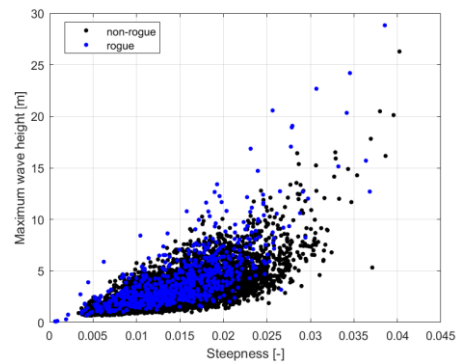


圖 5 異常波浪波高與波浪尖銳度散佈圖

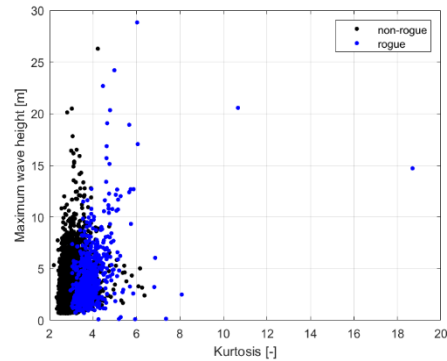


圖 6 異常波浪波高與峰度散佈圖

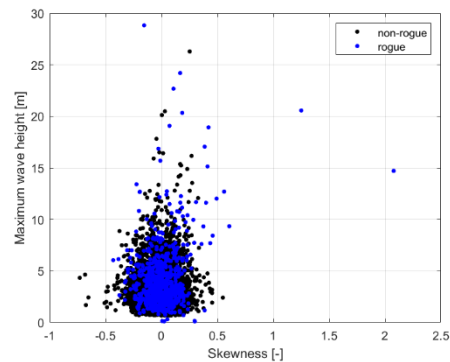


圖 7 異常波浪波高與偏態散佈圖

### 3.2 包絡線時序列統計分析

本研究之目的想探討異常波浪與群波現象的關聯性，透過希爾伯特變換得到波浪包絡線，並進一步使用波浪包絡線進行包絡線參數計算，計算包含最大群波振幅、平均群波週期、群波尖銳度等。後續會分析不同群波參數在正常海況與異常波浪發生的情況，並進一步探討其關聯性。

本文使用經計算後所得的包絡線參數進行統計分析，首先先分析基本參數如圖 8 所示，圖 8 顯示最大包絡線振幅與平均包絡線週期的散佈圖，紅色點為異常波浪包絡線統計資料，黑色為一般海況包絡線統計資料，從黑色散佈點可看出一般海況的波高週期呈現偏態分布，但異常波浪包絡線的紅色散佈點集中在低週期的區域，其平均週期範圍介於 25 秒至 50 秒之間，此結果顯示異常波浪發生只在群波週期較小的情況。本研究計算包絡線尖銳度為最大包絡線振幅與週期平方的比值，從圖 8 中可以發現一般海況波浪與異常波浪在包絡線尖銳度散佈圖中並無明顯區別，但還是可以看出異常波浪的發生伴隨著較高的包絡線尖銳度。接著本研究計算包絡線時序列的峰度，如圖 7 所示，可發現異常波浪包絡線的散佈點有明顯較大的峰度，因此峰度與異常波浪的發生呈現正相關。圖 10 為最大包絡線振幅與包絡線偏態的散佈圖，其結果顯示異常波浪的偏態比起非異常波浪的偏態來的大，此結果與波浪水位的偏態統計結果有明顯不同。

上文研究主要在討論不同包絡線參數對於異常波浪發生的物理機制是否有決定性因素，總結以上結果，本研究發現從最基本的波高週期資料可以明顯區分出異常波浪與非異常波浪發生時之時序列資料，結果顯示異常波浪伴隨著較小的群波週期。此外，異常波浪的發生與包絡線尖銳度有部分關聯性，異常波浪的發生伴隨著較高的包絡線尖銳度，而峰度和偏態的統計顯示這兩個參數亦可以被作為異常波浪發生的指標。上述結果指出異常波浪的包絡線統計參數與異常波浪的水位統計參數有所不同，總而言之，群波效應對於異常波浪的發生有極大的關聯性。

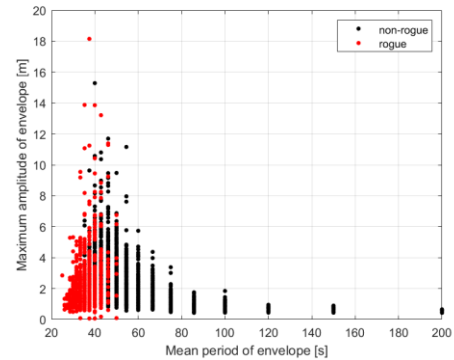


圖 8 最大包絡線振幅與平均包絡線週期散佈圖

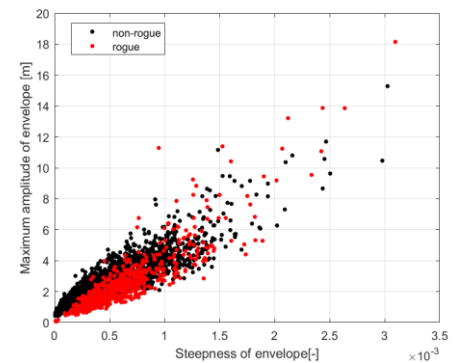


圖 9 最大包絡線振幅與包絡線尖銳度散佈圖

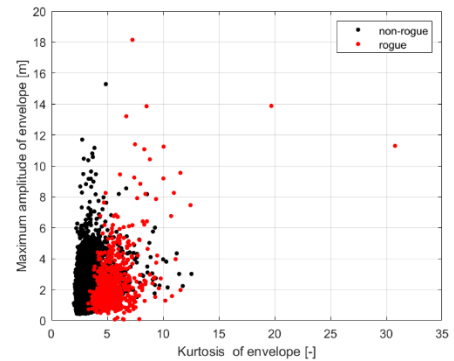


圖 10 最大包絡線振幅與包絡線峰度散佈圖

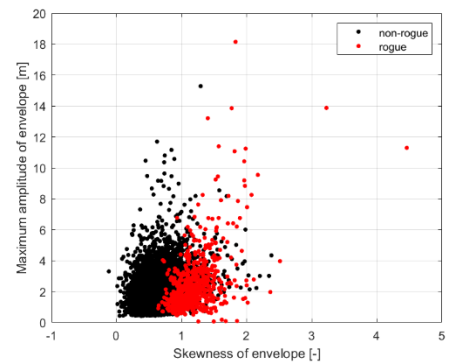


圖 11 最大包絡線振幅與包絡線偏態散佈圖

#### 四、結論

異常波浪對於海上航行及船員或海上工作者性命帶來很大的威脅，本文從實測資料中試圖找出異常波浪之特性，其結果有助於對異常波浪的了解甚至未來對於異常波浪的預測。本文主要探討異常波浪與群波現象關聯性，以群波理論分析異常波浪資料，所選擇的浮標為台東外洋的深水浮標，水深 5600 公尺，所挑選的資料觀測時間從 2006 年至 2017 年，經零下切法判斷，在台東外洋浮標中符合異常波浪的資料總共有 662 筆，本文另外選取 2012 年台東外洋浮標的正常海況資料共 7981 筆，正常海況的資料中已移除所有異常波浪資料，以作為對照。使用從水位資料進行統計分析，發現從基本的波浪參數並無法明顯區分出異常波浪與非異常波浪發生時之時序列資料，只有峰度在異常波浪與非異常波浪發生時有所差異，異常波浪資料通常會有較高的峰度值，此結果和 Christou and Ewans (2014) 所得的分析結果相同。

本研究為獲得群波特性及包絡線之相關統計參數，使用希爾伯特變換(Hilbert transform)進行分析，並得到包絡線時序列，接著進行平滑以及時序列分割，以獲得個別群波並計算群波統計參數。本研究發現從所有的包絡線統計參數都皆能看出異常波浪與非異常波浪資料之間的差別，顯示群波效應對於異常波浪的發生有極大的關聯性，而其中最重要的發現在於異常波浪發生只存在在平均包絡線週期較小的海況下。本研究只分析異常波浪的基本包絡線參數，並未探討與異常波浪發生機率的關聯性，如曾(2013)討論異常波浪發生機率預測，未來可以做進一步的分析，獲得較可能發生異常波浪的海況，並實際應用在相關防災預警上。

#### 五、參考文獻

1. 吳柏緯，「船難事件發生時之海象分析」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，2020。
2. 陳冠宇、蘇青和、曾相茂，「瘋狗浪的可能機制與特性」，海洋工程學刊，第1卷，第1期，第71-82頁，2001。

3. 張富翔、陳盈智、董東璟、蔡政翰、蔡仁智、滕春慈，「現場海洋異常波浪波形分析」，第34屆海洋工程研討會，2012。
4. 曾稜璇、董東璟、高家俊、蔡政翰，「異常波浪發生機率預測研究」，第35屆海洋工程研討會，2013。
5. Janssen, P., 2003: Nonlinear four-wave interactions and freak waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 2001–2018.
6. Sand, S.E., Hansen, N.E.O., Klinting, P., Gudmestad, .T. and Sterndor, M.J. (1990) “Freak wave kinematics. in water wave kinematics,” NATO ASI Series E, Vol. 178, Kluwer Academic, pp. 535-550.
7. Hudspeth, R.T. and Medina, J.R., 1988. Wave groups analyses by the Hilbert transform. *Proc. 21st ICCE*, pp. 884-898.
8. Medina, J., and Hudspeth, R., 1990, “A Review of the Analyses of Ocean Wave Groups,” *Coast Eng.*, 14, pp. 515–542.
9. Christou, M., Ewans, K., 2014. Field measurements of rogue water waves. *J. Phys. Oceanogr.* 9, 2317–2335.

# 海灘沖刷帶的波浪溯升與溯降之 UAV 影像分析

莊士賢<sup>1</sup> 周嘉銘<sup>2\*</sup> 陳禹儒

<sup>1</sup> 國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授

<sup>2\*</sup> 國立成功大學海洋科技與事務所碩士生

<sup>3</sup> 國立成功大學海洋科技與事務研究所博士候選人

## 摘要

近岸沿海帶(nearshore littoral zone)是沿岸漂砂與海岸地形變遷主要影響之區域，包含碎波帶(surf zone)與沖刷帶(swash zone)。沖刷帶的流體和地形間存在著密切相關的動力機制，實有必要進行觀測與監控，但礙於此區域時空變異程度劇烈，且相關研究文獻甚少。本研究以莊等(2020)研發的水線偵測演算法為基礎，對沖刷帶的波浪溯升與溯降特性進行研究，除了優化該技術並證實演算法之適用性，進而發展適當的資料品管程序以確保資料正確與品質，最後利用統計方法分析波浪溯升與溯降之時序列與其波譜，以推估波浪在海灘斷面上的特性。

關鍵詞：波浪溯升與溯降、水(灘)線偵測、無人飛行載具、海灘沖刷帶

## UAV Video Analysis of Wave Runup and Rundown in the Swash Zone

Laurence Z.H. Chuang Jia-Ming Zhou\* Yu-Ru Chen

\* Postgraduate, Institute of Ocean Technology and Marine Affairs, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

The nearshore littoral zone is a coastal area that contains both a swash zone and a surf zone. It is not only the most frequently used space for marine recreational activities, but also the main area where the impacts of beach erosion and climate change occur. The swash zone connects the land and marine environment and has a large temporal and spatial change. Swash zone processes are a fundamental component of the beach system dynamics, but the field observation is difficult and expensive, which makes the related research literature very little. This research is based on waterline detecting algorithm which was developed from Chung (2019), but it has disadvantages such as insufficient mobility, and the conversion of side-view perspective images into spatial coordinates will produce slightly larger errors. In order to realize characteristics of swash zone, developing quality control program is then used ensure the continuity and rationality of runup height sequence of each section. The last step is to use statistics and spectral analysis methods to obtain the characteristics of incident wave period and the amplitude on the section.

Keywords: wave runup and rundown, waterline detection, UAV, swash zone

## 一、前言

鄰海區域大多為全球主要經濟活動的聚集地，然而在全球氣候變遷的持續威脅下，大浪、暴潮對海岸的淘刷持續加劇，未來勢必將對海岸地區的永續經營管理帶來嚴重的衝擊。人類隨著經濟發展而過度使用與不當開發海岸(例如：海埔地開發、築港、及各種海岸構造物等)，會改變沿岸漂砂移動條件，造成其相鄰海岸的失衡，更甚者導致該段海岸侵蝕。許多研究顯示我國海岸線不斷地向內陸退縮，沙灘縱深逐漸縮減，導致颱風波浪與暴潮直接侵襲內陸，此一普遍且頻繁發生在臺灣及各離島的海岸變遷現象已成為海岸開發、國土保護、與海岸環境防治的最核心議題。

依據 Elfrink and Baldock (2002)的定義，近岸沿海帶是包含碎波帶(surf zone)與沖刷帶(swash zone)的海岸地區，碎波帶從碎波點(break point，波浪開始碎波的位置)開始，延伸至溯降終點(run-down limit)；而沖刷帶則是從溯降終點至溯升終點(run-up limit)，且位於碎波帶的陸側區域，形成海陸的邊界。近岸沿海帶的空間與海象條件影響了海陸間的沉積物之交換，而形成了海岸線(coastline)；而沿岸(longshore)及向離岸(cross-shore)的沉積物傳輸則會導致海灘型態(beach morphology)的改變，特別是在颱風期間與過後的海岸侵蝕和復原。

海灘的沖刷帶將陸地和海洋環境聯繫起來，是碎波帶和海底沙灘之間交換沉積物的重要來源(Masselink & Puleo, 2006)，此區域同時也是海灘系統動力學的基本組成部分(Masselink & Hughes, 1998; Puleo & Holland, 2001)。沖刷帶的流體和地形間存在著密切相關的動力機制，實有必要針對此區域進行監控，此區域時空變異程度較劇烈，相關研究文獻甚少(Almar et al., 2019)，因此建立一個能夠監測該區域的觀測系統至為重要。本研究團隊過去執行的科技部補助專題研究計畫「以 UAV 航測影像序列偵測海岸灘線之變化」(MOST 108-2221-E-006-086)已初步建立無人飛行載具(unmanned aerial vehicle, UAV)應用於水線辨識與量測的現場調查與光學影像分析技術，而隨著潮汐與波浪不斷地變動的瞬時水線(instantaneous shoreline)所在的區域即為沖刷帶，故可以上述技術為基礎，針對沖刷帶的特性進行研究。然而水線偵測演算法(莊等, 2020)雖已

能針對 UAV 航測影像序列進行每幀影像內的瞬時灘線之推估，但存在運算速度欠佳、及易受沙灘上的非砂質異物與垃圾之影響等缺點，故尚須進一步改善與優化整套演算法。

水線偵測演算法針對每幀海灘影像所推估的瞬時灘線代表每一瞬間的沖刷帶之波浪溯升與溯降位置，即使在完成前述的演算法優化後，仍會存在歧異值與缺失，因此資料品管是必要且重要的環節，故本研究亦針對海岸灘線的特性，發展適當的資料品管方法與程序。

將 UAV 航測影像序列中的每一幀影像逐一辨識出瞬時灘線的位置，並經過資料品管後，可沿著海岸任意選取一條垂直於岸線的斷面，取得該斷面的瞬時灘線位置之變化曲線，也就是該斷面在觀測期間的波浪溯升與溯降位置時序列(以下簡稱斷面的溯升序列)。每條斷面的溯升序列再透過統計分析與波譜分析，即可得到入射波浪在該海灘斷面的溯升與溯降之週期與升降振幅等特性。

## 二、研究方法

為從 UAV 影像中分析海灘沖刷帶之波浪特性，本研究有三大流程，第一步驟為分幀影像預處理(圖 1 左側綠色方框)，主要擷取影片之分幀並修正影像錯位問題，用於產出時序列分幀影像供後續演算法使用；第二步驟為水線偵測流程(圖 1 右側藍色方框)，主要透過發展之水線偵測演算法辨識時序列分幀影像之瞬時水線位置；最後步驟為波浪特性分析(圖 1 下方紅色方框)，利用統計法與波譜法分析溯升時序列資料進而估算波浪之週期與振幅。

### 2.1 水線偵測技術

本文是以莊等(2020)參考(Turner & Leyden, 2000)提出的「彩色波段分離方法(color channel divergence)」所研發之灘線偵測演算法為基礎，進而改善該演算法之辨識準則、執行速度、及精確性，以利於後續資料品管與統計分析等工作。

首先對無人飛行載具航拍之錄像以 3Hz 擷取影像分幀，並進行分幀影像處理及套合過程(見圖 1 之「分幀影像預處理」，並詳見莊等(2020))，然後針對影像時序列之各分幀進行單幀影像內的瞬時灘線擷取(見圖 1 之「水線偵測流程」)。其原理是基於陽



光入水後，海水會吸收光譜中各波段能量，但紅光波段的能量消減較大，造成藍光與紅光在含水區域的能量差異會隨水深而改變之物理特性。據此原理找出各斷面定位點(紅光等於藍光處)，再從每個斷面的定位點位置至向海一側框定出含水區域並取得光波段能量的平均值，將此值定義為初步門檻值。若斷面內含水區域之能量峰值大於初步門檻值，則定義該能量峰值的像素位置為臨時水線預選位置，則可將各分幀影像內每一斷面的定位點至臨時水線預選位置間定義為濕沙區域(如圖 2 橘色框定區域)。

進而將所有分幀影像之濕沙區域的光波段能量取平均，再加上三倍標準差以獲得兼具時空間之變異性的新門檻值。然後重新將各分幀影像的濕沙區域內每一斷面的光波段能量局部峰值與新門檻值進行比較，如果峰值較大則峰值對應的像素位置即為該斷面之臨時灘線位置，再將各斷面的臨時灘線位置連接即是該分幀影像的臨時灘線。上述以光波段能量的平均值加三倍標準差做為新的門檻值可同時考量到波浪溯升期間的時空變異性，能夠非常有效地減少莊等(2020)方法的誤判情況，因此明顯提高水線偵測之精確度。此外，本研究亦對偵測演算法的程式開發進行優化，顯著地提升水線偵測的執行速度。

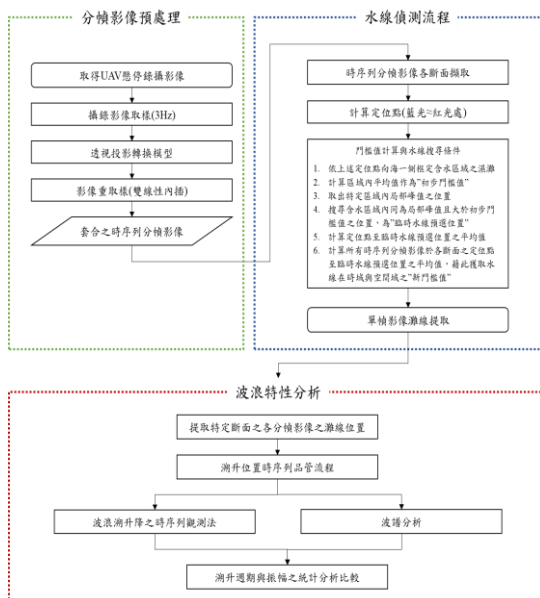


圖 1 航拍影像辨識海岸灘線與波浪特性之分析流程

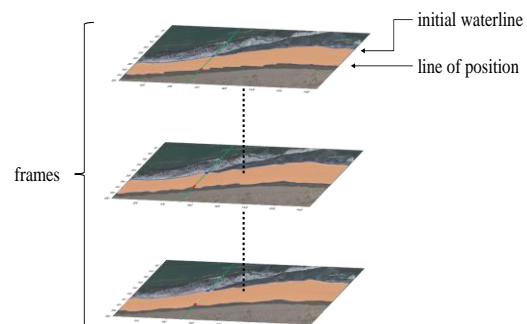


圖 2 統計濕沙區域門檻值示意圖

## 2.2 波浪溯升序列

為了後續進行波浪溯升特性之研究，可將 UAV 航測影像序列透過上述水線偵測技術，辨識出各分幀影像之臨時灘線(圖 3 上方各分幀影像內的藍色實線)的位置，接著沿著海岸任意選取一條垂直於岸線的斷面(圖 3 上方紅色實線)，再擷取每一分幀影像中之臨時灘線與斷面的交點位置，再依照影像序列的時間序列將每一交點位置連接成一條針對該斷面的臨時灘線位置之變化曲線，即為該斷面在觀測期間的波浪溯升序列(如圖 3 下方藍色實線)，橫軸為各分幀之時間順序，縱軸為溯升位置)，後續將以此溯升序列進行一系列品管機制與波浪特性探討。

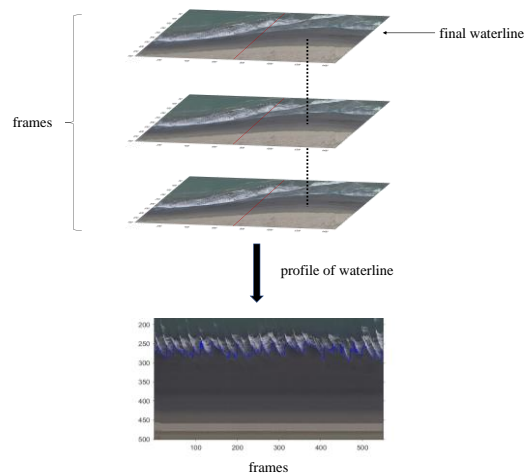


圖 3 冲刷帶之波浪溯升序列

## 2.3 資料品管

任何觀測資料都可能存在因儀器設備、人為疏忽或不明原因造成的錯誤或資料缺失而誤導研究的結果，因此資料品管是必要且重要的環節。就本研究而言，溯升序列會因為沙灘上出現歧異點(如沙灘

上有白色保麗龍與海灘垃圾等)而導致偵測之溯升高度異常。本研究因此基於資料的合理性及連續性原則，發展適當的資料品管之檢驗方法與程序。

資料品管一般有三原則：合理性檢驗是觀測數據是否超過儀器可觀測範圍與環境限制；連續性檢驗是假設時間與空間的變化是連續的；關聯性檢驗則是檢查所量測之資料與其他相關物理量之關係是否有異常現象。本研究的資料品管流程如圖4所示，在合理性檢驗中，先以常態檢定檢驗時空間堆疊的溯升序列是否呈現常態分佈，顯著性檢定的P值設定為0.05。然後檢查序列中是否存在不合理值，是將溯升序列的平均值加三倍標準差來定義合理的變化區間，也就是溯升序列值若超出99.7%信賴區間檢驗範圍則視為離群值(outlier)並給予標記，再由人工判別是否濾除離群值，然後採線性內插補遺缺值。

在連續性檢驗中，假設斷面溯升序列在時間和空間的變化必須是連續的且應落在合理的範圍內，本文採移動平均法對溯升序列進行檢驗，若超出合理的變動範圍則須標記，再由人工判別是否濾除，然後採線性內插補遺缺值。

本文因篇幅限制，未納入關聯性檢驗之說明。經資料品管後的溯升序列才進行後續的波浪溯升週期、振幅等特性分析。

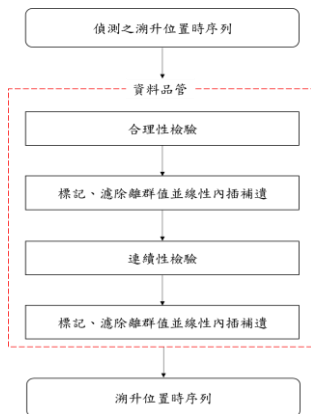


圖4 溯升序列的資料品管流程

## 2.4 波浪溯升特性分析

經過上述兩項品管機制處理後之資料將進入後續波浪溯升特性分析，波浪溯升序列受到不同成分波組合成的入射波浪影響，為能與外海資料浮標之觀測資料進行比對，本研究參考浮標之作法，對溯升序列先進行帶通濾波，保留0.05至0.4之頻率段

資料，後續分析透過零上切法(zero-up crossing)求得溯升序列的零上切平均週期( $T_{mean}$ )與三分之一溯升高( $H_{1/3}$ )，並比較波譜法(wave spectrum)求得之平均週期( $T_{m02}$ )與示性(significant)溯升高( $H_{m0}$ )。

### (一) 零上切法

零上切法是從時間域上來描述波浪，首先計算出溯升序列的平均溯升位置，並扣除溯升平均值，將此溯升序列正規化成為正負值變化的序列。當溯升曲線從平均值為0以下的波谷位置向平均值為0以上的溯升位置上昇時，通過平均值為0之位置時為第一個波的開始；然後溯升曲線呈不規則型態上昇至最高點，再下降至波谷後，會再逐漸上升至平均值為0的溯升位置，此即為一個波的終點(如圖5中紅色線段所示)，橫軸為分幀數，縱軸為波浪溯升高，紅色線段為零上切法所得之小波，該小波週期為小波的橫軸起始點和終點的差，平均週期為各個小波的週期平均。圖5中紅色線段在縱軸的最高點至最低點的差值是為該小波的溯升高，將各小波之溯升高由大到小序排列，並取前三分之一的溯升高之平均值，定義為零上切法的三分之一溯升高。

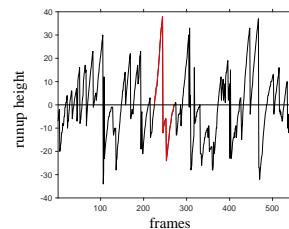


圖5 波浪溯升序列之零上切法的單一小波示意圖

### (二) 波譜法

波譜法(wave spectrum)是從頻率域上來描述波浪，將已濾波且扣除溯升平均之溯升序列透過快速傅立葉轉換轉換為頻譜，並採用 hanning window function 進行平滑處理及避免 spectral leakage。然後採用以下公式計算溯升序列之週期與溯升高，式(1)表示一維溯升頻譜 $S(f)$ 之第  $i$  階矩能量，式(2)是平均溯升週期 $T_{m02}$ ，式(3)是示性溯升高 $H_{m0}$ 。

$$m_i = \int f^i S(f) df \quad (1)$$

$$T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2)$$

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (3)$$

### 三、結果與討論

圖 7a、圖 7b 為第 500 斷面之溯升序列經過合理性檢驗之結果，圖 7a 之目的在於檢驗該斷面的溯升序列是否呈現常態分佈，此圖橫軸為序列中各小波的溯升高度，縱軸為次數，其檢驗結果如圖 7a 右上角所示，本研究顯著性檢定的 P 值設定為 0.05，經過 KS 檢定後顯著性為 0.183，表示此斷面溯升時序列呈現常態分佈，且偏態為 0.1088，峰態 2.39，表示此常態分佈是幾乎沒有偏移的低闊峰。圖 7b 為信賴區間檢驗，圖中橫軸為溯升序列的分幀數，縱軸為溯升高度，紅色實線為溯升序列之平均值，上下黃色實線為 99.7% 信賴區間範圍，若有離群值則標記並人工確認後移除，缺值採現性插值補遺，從圖中可知此溯升時序列的合理性檢驗是沒有離群值。

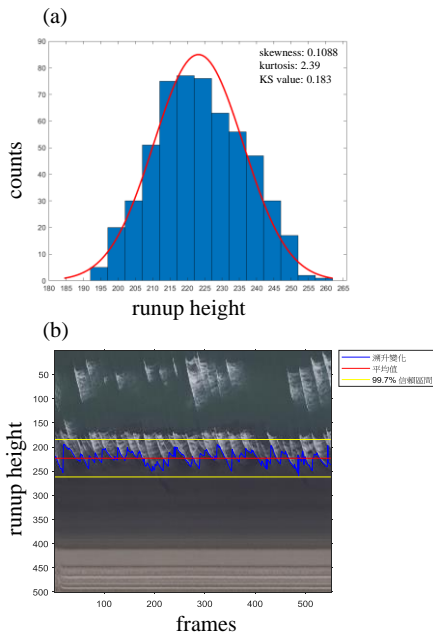


圖 7 波浪溯升序列的合理性檢驗：  
(a)常態檢驗；(b)信賴區間檢驗

連續性檢驗目的在於判斷溯升序列在時間與空間的變化是否是連續的，檢驗方法利用 20 點移動平均值來檢驗溯升序列是否在時空間上是連續的。圖 8(a)為合理性檢驗後進行連續性檢驗之結果，紅色實線為 20 點移動平均線，上下黃色實線為 99.7% 信賴區間，經過連續檢驗判定在圖中最右側偵測到一筆離群值，故採紅色星號標記。圖 8(b)為移除離群值後並線性補遺之結果，圖 9 呈現了原始溯升序列

與經過品管程序後溯升序列的相關性，橫軸為補遺後溯升序列，縱軸為原始溯升序列，將兩時序列進行相關性分析，結果顯示相關性高達 0.983。

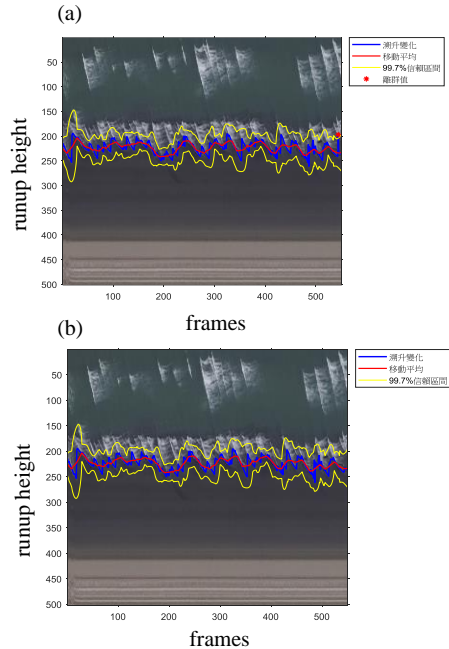


圖 8 波浪溯升序列的連續性檢驗：  
(a) 找到離群值並標記 (b) 濾除離群值並補遺

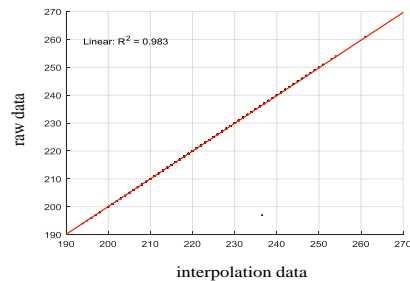


圖 9 原始溯升序列與品管後序列之相關性

溯升序列包含風浪與湧浪，一般認為波浪週期小於 10 秒為風浪、大於 10 秒為湧浪；中央氣象局則定義波高超過 1.5 米，平均週期(Mean wave period)超過 8 秒者為湧浪。本研究參考外海資料浮標之作法，利用 Butterworth 帶通濾波器移除 0.05Hz 至 0.4Hz 以外週期的波浪影響，然後利用零上切法求得平均週期( $T_{mean}$ )與三分之一溯升高( $H_{1/3}$ )，並比較波譜法求得之平均週期( $T_{m02}$ )與示性溯升高( $H_{m0}$ )。

圖 10(a)為各斷面經過零上切法求得之溯升平均週期( $T_{mean}$ )(紅色線段)與波譜法求得之溯升平均週期( $T_{m02}$ )(綠色線段)，橫軸為斷面數，縱軸為平均

週期，由分析結果得到每個斷面的小波溯升週期約落在 6 至 8 秒；圖 10(b)利用 20 點移動平均處理觀察兩序列之趨勢，發現各斷面間不同方法求得之溯升週期之變化趨勢相當一致。圖 11(a)為各斷面經過零上切法求得之三分之一溯升高( $H_{1/3}$ )(紅色線段)與波譜法求得之示性溯升高( $H_{m0}$ )(綠色線段)，可發現兩者之溯升高相當吻合，均於溯升高 40 至 60(像素點)間震盪；圖 11(b)為利用 20 點移動平均處理觀察兩序列之趨勢，可以看出零上切法(紅色線段)與波譜法(綠色線段)計算出的溯升高曲線之變化趨勢一致。

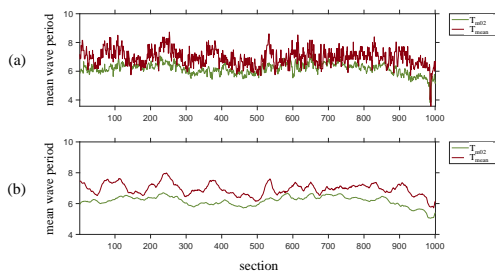


圖 10 各斷面之零上切法求得之平均週期  $T_{mean}$  與波譜法求得之平均週期  $T_{m02}$  比較圖: (a) 原始數據; (b) 20 點移動平均之結果

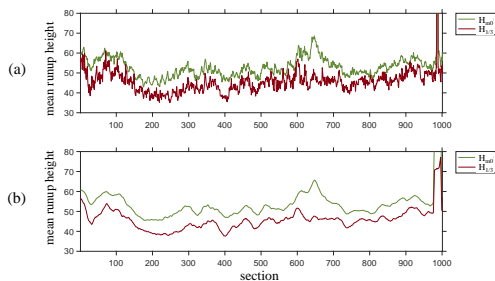


圖 11 各斷面之零上切法求得之零上切三分之一溯升高( $H_{1/3}$ )與波譜法求得之示性溯升高( $H_{m0}$ )比較圖: (a) 原始數據; (b) 20 點移動平均之結果

本研究有三項成果，首先優化水線偵測技術，啟用平行運算，除了改善水線偵測演算法易受沙灘上歧異點干擾而影響水線偵測精準度之問題，更大幅提升演算速度，使得灘線的作業化觀測得以落實，並能有效處理波浪對灘線識別的影響。第二點為溯升序列之品質機制建立，得以透過合理性與連續性檢驗自動判別溯升序列中離群值與錯誤值，並做資料補遺。最後一點為波浪的溯升與溯降之特性探討，透過波浪溯升序列及其對應波譜的相關統計特性分

析及比較，可發現上述兩種方式求得之波浪平均週期與溯升高度之變化趨勢相當一致，週期落在 6 至 8 秒，溯升高度均落在 40 至 60 像素點(0.065 m/pixel)間震盪。

本系列研究發展出之航拍觀測流程、水線偵測技術、及與波浪特性探討已初步證明透過 UAV 取得沖刷帶影像後，再經本文提出的分析流程，可對波浪的溯升與溯降進行系統化的觀測與研究；如能再取得近岸沿海帶的地形相關資料，及外海入射波浪資料，將可對碎波帶與沖刷帶的時空變異進行更深入分析。

## 謝誌

本研究感謝科技部計畫編號 MOST 109-2221-E-006-101 之經費提供，使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

- Almar, R., Blenkinsopp, C., Almeida, L. P., Catalán, P. A., Bergsma, E., Cienfuegos, R., & Viet, N. T. (2019). A new remote predictor of wave reflection based on runup asymmetry. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 217, 1-8.
- Elfrink, B., & Baldock, T. (2002). Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives. *Coastal Engineering*, 45(3-4), 149-167.
- Masselink, G., & Hughes, M. (1998). Field investigation of sediment transport in the swash zone. *Continental Shelf Research*, 18(10), 1179-1199.
- Puleo, J. A., & Holland, K. T. (2001). Estimating swash zone friction coefficients on a sandy beach. *Coastal engineering*, 43(1), 25-40.
- Turner, I., & Leyden, V. (2000). System Description and Analysis of Shoreline Change: August 1999–February 2000. *Report 1. Northern Gold Coast Coastal Imaging System*, 12.
- 莊士賢, 陳禹儒, 鍾育仁, & 周嘉銘. (2020). 以 UAV 航測影像序列偵測海岸灘線之變化. 第 42 屆海洋工程研討會論文集。

# 應用深度學習自動識別光學影片中離岸流

莊士賢<sup>1</sup> 徐新綸<sup>2\*</sup> 陳美慧<sup>3</sup> 劉正千<sup>4</sup> 鍾曉緯<sup>5</sup>

<sup>1</sup>國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授

<sup>2\*</sup>國立成功大學海洋科技與事務研究所研究生

<sup>3</sup>國立成功大學海洋科技與事務研究所博士生

<sup>4</sup>國立成功大學地球科學系/全球觀測與資料分析中心特聘教授

<sup>5</sup>鉅網資訊股份有限公司

## 摘要

離岸流是由岸向海快速移動的海流，美國海岸救生協會及各國研究顯示，大多數海灘溺水事故的肇因來自於離岸流。對海域遊憩安全而言，離岸流是潛在危險因子，然而一般未經教育或訓練的戲水者常不具備辨別離岸流的能力。本研究以 YOLOv4 深度學習模型為架構，以海灘區常見的兩大類型—通道狀(channel)與沉積物雲羽狀(sediment plume)離岸流為辨識目標，開發可從影片中自動識別離岸流的模式。人工智慧的深度學習需要大量資料進行模型的訓練，離岸流影像資料是從網路上下載影像及影片，再利用人工篩選並對原始影像做離岸流特徵框定，然後經影像擴充來增加樣本數量。模型最佳化後的辨識精度達 80% 以上，且辨識速率高於一般攝影幀率 60 FPS，因此可從海岸視訊站的動態影像中即時辨識出離岸流。此初步成果未來可應用於自動監控及預警系統，來降低海岸遊憩風險，例如：從海岸視訊站影像中同時偵測離岸流及遊客位置，自動播報警訊要求位於危險區內的遊客遠離；救生或應變人員也可依據警訊，在離岸流的岸邊範圍插紅旗示警。

關鍵詞：離岸流、深度學習、影像辨識、海域遊憩安全

## Deep Learning Approach for Rip Current Detection in Videos

Laurence Zsu-Hsin Chuang, Hsin-Lun Hsu\*, Mei-Huei Chen, Cheng-Chien Liu, Hsiao-Wei Chung

\*Postgraduate, Institute of Ocean Technology and Marine Affairs, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

This paper presents a deep learning approach for automatically detecting rip currents from videos. Rip currents are fast-moving currents that move from shore to sea. Studies from the US Lifesaving Association and many countries have shown that the leading cause of beach drowning is rip currents. Even rip currents are the principal threats to beachgoers, most beachgoers are unable to identify them. In this research, a deep learning model based on YOLOv4 architecture is developed for detecting two common types of rips (channel rips, the rips contain sediment plumes) from videos. The accuracy of this model is over 80%. By means of recognizing the rips in real time through live beach cam, our research result can be a potential safety application for alerting the people in close proximity to these hazardous currents. Meanwhile, this real-time monitoring method can provide rip current notification for beach lifeguards to inform the public of rip current threats.

Keywords: rip current; deep learning; image recognition; beach safety

## 一、前言

臺灣海域終年光照充足，溫度適中，外有強海流，近岸岬灣內則潮汐海流平緩穩定，波浪、湧浪複雜，水中溶氧充足，外海水質佳，不僅有重要的漁場，沿岸也發展許多觀光遊憩產業(邵廣昭 2020)。臺灣東部是斷崖沿岸，海底地形落差大，是衝浪客的首選地；西部是沙岸型態，地形平坦，發展許多海水浴場、遊憩平台；南部是珊瑚礁地形，發展許多浮潛、潛水的觀光產業，短短狹長 394 公里，卻擁有豐富的資源；但在發展海岸遊憩觀光同時，其中最容易忽略也最不容易察覺的危害之一就是離岸流(或稱裂流，rip current)。

離岸流為向外海快速移動的海流，流速最快可高達 2 m/s，美國救生協會(USLA)統計每年海灘救援案例中，約有 82%的意外起因是離岸流(Silva et al., 2021)。一般民眾在從事海域遊憩活動時，因不具離岸流的識別能力，常在不知情的情況下進入離岸流區域，一旦被快速地帶往外海水深較深處，即有可能因恐慌或體力耗竭而導致溺水。

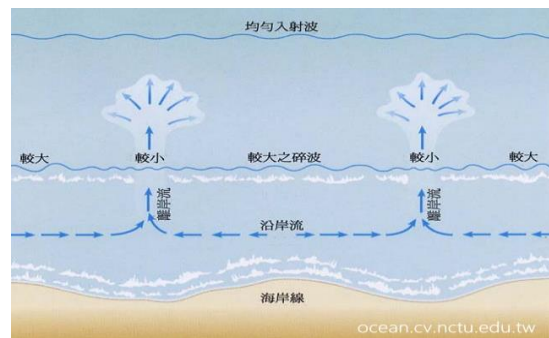
離岸流主要是當海浪向海岸前進時，因為遇到阻礙(陸地)而潰散，而大量的海水必須尋找回到海裡的路徑，但由於受到後續海浪的推擠，這些海水初期會沿著與沙灘平行的方向移動，最後匯集成一道或數道的強大水流退回海中，以上的過程循環發生形成離岸流(圖 1)。

離岸流通常會在沿岸海底的低處、灘尖與灘尖處、河口逕流處、沙灘嘴或人造物如防波堤或碼頭附近形成(圖 2)，寬度、長度與方向因地形而不相同，離岸越遠，離岸流力道越弱。離岸流除了可搬運海底沉積物如砂、石、貝殼等，也會造成沿海地型的改變。

往昔離岸流觀測的研究包括 Haller et. Al. (2013) 透過 X-band 雷達回波影像的平均，分析近岸與波浪區的離岸流發生位置與持續時間；Turner et. Al. (2007)使用近岸攝影機拍攝長時曝光影像，配合實測的波浪資料探討離岸流時空變異與成因；林等(2009)應用高解析度航照分析海灘類型與離岸流位置分布之關係。

對於海域環境休憩活動而言，離岸流是高風險程度的環境威脅，為提供國人一個安全的海域遊憩環境，除了在海域遊憩熱區安排救生員等作為，本

研究嘗試應用人工智慧(Artificial Intelligence，一般縮寫 AI)的深度學習，針對光學影片開發人工智慧偵測離岸流的識別模組，以探討後續實務應用的可行性。然而要訓練 AI 辨識離岸流，須有大量的離岸流影像資訊，本研究先從網路上蒐集大量離岸流影像，來進行 AI 模組之訓練。進而利用已成功訓練的 AI 模組，透過海岸視訊站所攝影片自動偵測出離岸流發生的地點與時間。未來期盼可以透過此模組，進而提供現地遊憩民眾或應變人員警訊，以減少海邊溺水等意外事故發生。



資料來源：<https://www.masters.tw/40011/%E9%9B%A2%E5%B2%B8%E6%B5%81>

圖 1 離岸流形成機制示意圖

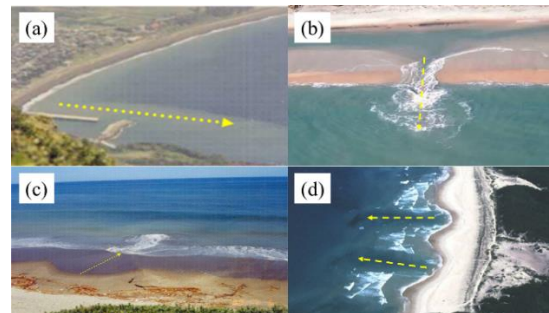


圖 2 網路蒐集的各種離岸流海面影像範例：(a)岸邊凸堤造成的離岸流會順著凸堤的方向向外海流去(Nishi, 2005)；(b)沙灘嘴地形(beach cusp)使海水只能從單一出入口離去而形成離岸流(The Editors of Encyclopaedia Britannica)；(c)離岸流可透過海水表面懸浮物質分布狀況觀察到(Nishi, 2005)；(d)灘尖與灘尖之間因地形所造成斷開泡沫帶的離岸流(Nishi, 2005)。

## 二、研究方法

### 2-1 數據收集及資料前處理

圖 3 為本研究流程，本文著重於離岸流影像資料庫建立(圖 3 紅框)及深度學習模型訓練與測試(圖

3綠框)。起初從網路上下載 31 張影像及 9 部影片，這 9 部影片以每秒 3 張的頻率做裁切，再利用人工篩選把沒有離岸流的影像刪除，最後得到的影像總數是 1197 張。後續對原始影像做離岸流特徵框定時，所使用的工具是 LabelImg，參見圖 4 說明。

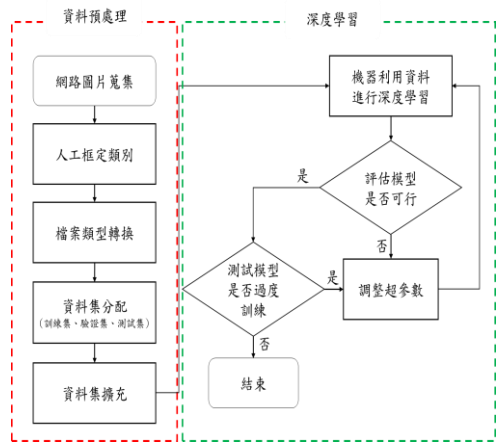


圖 3 研究流程

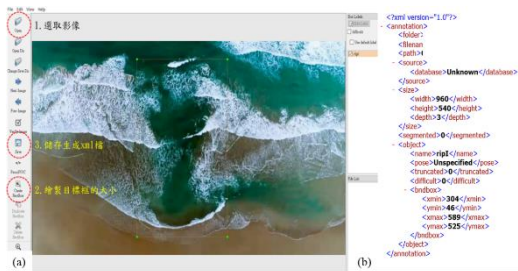


圖 4 LabelImg 軟體：(a)使用介面操作說明；(b)儲存後生成的 xml 檔。

離岸流隨著海岸條件而呈現不同的形式，為探討人工智慧識別模組是否能從監測影像中偵測到離岸流的存在，本研究以海域遊憩安全的角度，先挑選出在海灘的潮間帶最常見的兩類離岸流(圖 5)進行研究。第一類(ripI，圖 5 (a))是在充滿白色泡沫的碎波帶中，因離岸流存在而抑制碎波後大量泡沫，所形成通道狀(channel)的離岸流。為訓練 AI 去認識此類離岸流，我們必須在大量影像中逐一框定出離岸流範圍，因此在圖 5 (a)中的綠色方框須包含離岸流二側的白色泡沫；但因沿岸流也會造成類似效果，為避免混淆，因此綠色方框還會包含與離岸流約略垂直的陸地。第二類離岸流(ripII，圖 5 (b))會從白色泡沫的碎波帶下方，沿著底床流至碎波帶外面，其挾帶的細沙等懸浮物因流速已緩，會在碎波

帶外側浮出水面，再經擴散而常形成濁度由高到低的沉積物雲雨狀(sediment plume)離岸流。

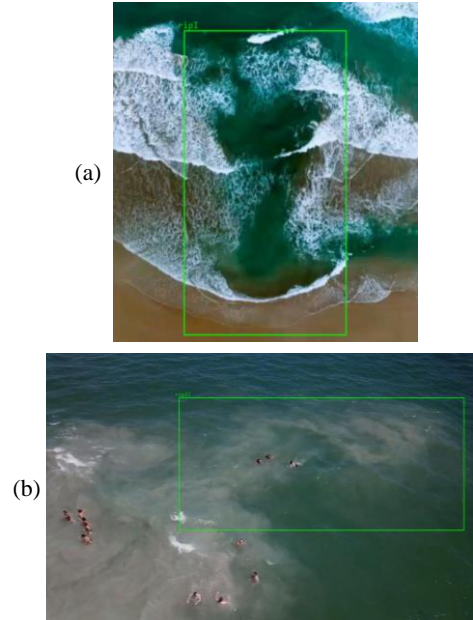


圖 5 海灘區常見的二類離岸流：(a)為第一類離岸流 ripI，(b)為第二類離岸流 ripII。

現行電腦視覺物件偵測任務的主流檔案格式主要有兩種：PascalVOC 格式和 YOLO 格式，透過 LabelImg 工具所得到的註記檔案為 PascalVOC 格式；本計畫使用的 YOLOv4 所預期的註記檔案為 YOLO 格式，所以訓練 YOLOv4 網路前，須先經過格式的轉換，表 1 展示其差異。檔案類型轉換可參考圖 6 之流程圖說明，其左圖中之原始影像畫面的框選區域有明顯曇狀雲結構，屬於 ripII 的類別；中間的圖顯示 PascalVOC 格式檔案的部分內容；而右邊的圖顯示 YOLO 格式的檔案。

人工智慧的深度學習需要大量資料進行模型的訓練，為擴充離岸流影像資料之樣本數量，以強化深度學習模型，人工標註完的影像會經影像擴充(旋轉、鏡射、平移、放大、縮小、改變光源...)處理(圖 7)，讓資料庫的影像數達到 9576 筆。而所有 1,197 張原始影像內的離岸流區域都會以人工框定並以 txt 檔註記後，訓練時會將影像搭配 txt 檔分成訓練集(train)、驗證集(valid)、測試集(test)，透過程式隨機選取將原始的 1,197 張影像以 8:1:1 分配到各群集以進行訓練。

表 1 檔案格式分類表

格式	副檔名	坐標資訊	標註類別
PascalVOC	.xml	絕對坐標 (xmin, ymin, xmax, ymax)	字串 (ripI, ripII)
YOLOv4	.txt	相對坐標 (cx, cy, bw, bh)	數字 (0, 1)

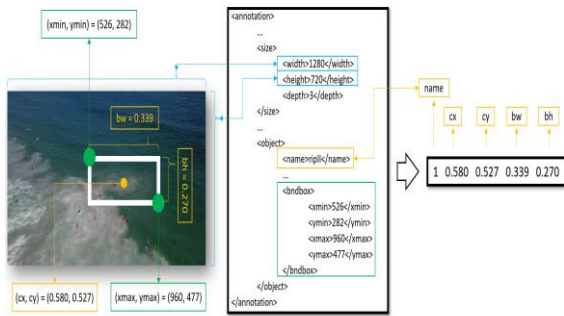


圖 6 檔案類型轉換說明 (左：原始影像、中：PascalVOC 格式註記檔案、右：YOLO 格式註記檔案)。



圖 7 離岸流原始影像之影像擴增技術，左上：原始影像、中上：隨機等比縮放、右上：隨機位移、左下：隨機旋轉、中下：隨機色調轉換、右下：隨機套用。

## 2-2 模型選用與介紹

因本研究為了能即時識別海岸視訊站所攝影片中出現的離岸流，故 AI 模型的選用標準是其物件辨識速率需高於一般攝影幀率 60 FPS，且精度需優於同級模型精度平均值。根據圖 8 MS COCO 數據集即時目標偵測指標，最終選定以 YOLOv4 作為本研究所使用之模型。

YOLOv4 是在 2020 年 4 月發布的，由 Bochkovskiy, Wang and Liao (2020)繼承了 YOLO 系列的理念，並得到原作者 Joseph Redmon 的認可。與其他最先進的目標檢測模型相比能夠得到高精度、即時的檢測結果，與前一代 YOLOv3 相比平均精度

和每秒辨識的分幀數分別提高了 10% 和 12%。圖 9 為 YOLOv4 的架構圖，主要分成 Input、Backbone、Neck、及 Prediction 四大部分，其中有許多提高檢測精度的結構，會在後面做說明。

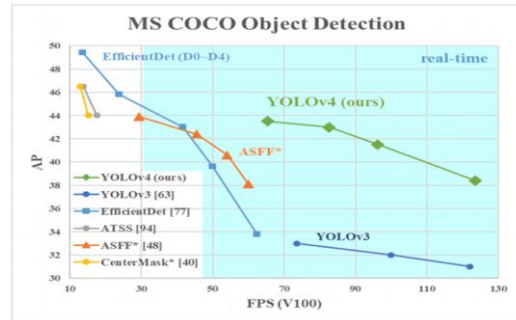
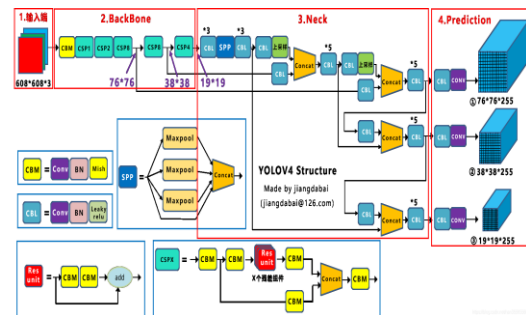


圖 8 不同人工智慧模型的平均精確度及每秒可以辨識影像張數，越右上方表示辨識速度越快、效果也愈好。



資料來源：江大白 (2020)

圖 9 YOLOv4 架構

架構是選用 CSP Darknet53(Cross Stage Partial Darknet53)來提取特徵，CSP 的用意是將基礎層分成兩部分，透過不同結構路徑再將他們合併，在減少計算量的同時仍然可以保有良好的準確率。利用 CSP 連接有幾個優勢，第一提高卷積神經網路 (CNN)的學習，在減少計算量同時仍有良好的準確度；第二減少複雜計算流程；第三減少訓練過程的儲存空間。Darknet53 在與其他模型相比之下具有較好的檢測精度，同時搭配使用 Mish 激活函數來提高分類的準確性，因此選用 Darknet53 當作此模型的主幹架構。

YOLOv4 模型訓練時會調整超參數以達到最佳化，過程中採用 Mosaic 數據增強方法，將四張訓練中的照片合成一張進行模型訓練，讓模型訓練時可以辨識在不同環境下可能出現的目標物。YOLOv4 超參數調整包括影像長寬(height & width)、



模型訓練批次數(batch, subdivisions)、學習率變化比例(steps, scales)、Yolo 層數(Yolo layer)等，以增強模型對於目標物件辨識精度。

### 2-3 驗證指標

針對 AI 模型的訓練，最後是以驗證集內的影像進行測試，我們利用混淆矩陣(confusion matrix, 表 2) 中的 TP、FP、FN、及 TN 之數值來評估訓練結果的好壞，一般利用的評估指標是準確率(accuracy, 式 1)：指識別出有離岸流的影像中，正確判斷出有離岸流的機率；召回率(recall, 式 2)：指在所有原先有離岸流的影像中，能正確找出有離岸流的機率。調和平均數(F1-score, 式 3)：指 precision 和 recall 的調和平均數，可看作是該二指標的綜合指標，以下是各指標的公式。

$$\text{recall} = TP / (TP+FN) \quad (1)$$

$$\text{precision} = TP / (TP+FP) \quad (2)$$

$$\text{F1-score} = 2 * \text{precision} * \text{recall} / (\text{precision} + \text{recall}) \quad (3)$$

表 2 混淆矩陣

		Actual Class	
		Positive (P)	Negative (N)
Predicted Class	Positive (P)	True Positive (TP)	False Positive (FP)
	Negative (N)	False Negative (FN)	True Negative (TN)

資料來源: <https://www.ml-science.com/confusion-matrix>

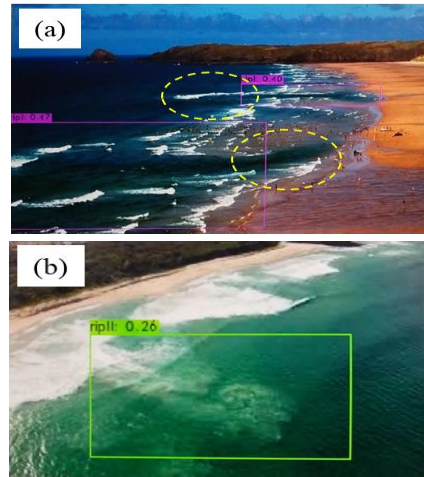
## 三、結果與討論

最終模型的最佳化指標是：第一類離岸流有 86.76% 的精確度；第二類離岸流有 82.37%。各驗證指標分別是 precision = 0.91, recall = 0.83, F1-score = 0.87, average IoU = 74.70 %

我們隨機選用在網路上的影像對訓練好的 AI 模式進行識別，結果舉例說明如下：圖 10 (a)是第一類型的離岸流的辨識結果，但因為當初我們給機器定義第一類型離岸流是兩邊都要有白泡沫且靠近岸邊，圖中二處黃色圈框起來的區域只有單一邊有白泡沫，因此 AI 的辨識結果並沒有將其納入離岸流範圍；圖 10 (b)雖然信心指數並不高，但仍然可以有效地辨識出第二類型的離岸流。

圖 11 (a)是中共遼寧艦航母的空拍新聞照片，

船側有數道疑似第一類離岸流，但 AI 模式並不認為是，故並沒標示出任何類型的離岸流存在，故這是一個正確(TP)辨識結果。圖 11 (b)則是來自中央氣象局的侵台颱風衛星照，從研究方法 2-1 中對第一類離岸流的定義：離岸流二側有白色泡沫，而 AI 模式辨識結果也認為是第一類離岸流的可能性是 52%，很顯然這是一個誤判(FP)結果。



資料來源: Austin (2016) ; Dronkers (2017)

圖 10 疑似第一類與第二類離岸流的 AI 辨識結果

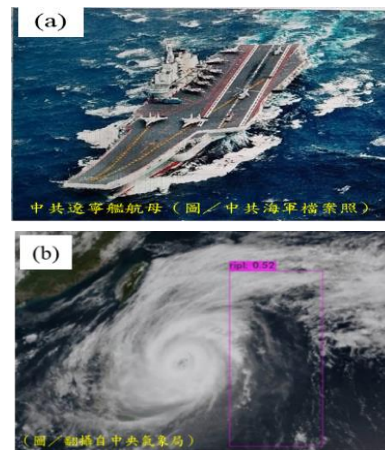
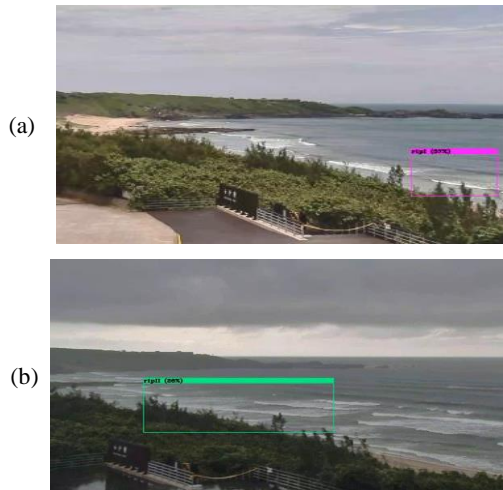


圖 11 離岸流的 AI 模式辨識結果

經濟部水利署與觀光局分別於影音平台 Youtube 上設有海岸地區視訊站的直播影片，可供民眾隨時上網查看。本研究透過自行下載花蓮七星潭與新北白沙灣等地區影片，使用已深度學習訓練完成的 YOLOv4 模式進行離岸流偵測，確實可從影片中逐幀框定出前述兩類離岸流發生位置。圖 12 為白沙灣地區在彩雲颱風登陸前的影片分幀攝

取，桃紅色框 ripI(a)與綠色框 ripII(b)分別為模型所偵測到的離岸流。圖 13 為花蓮南濱地區在彩雲颱風登陸前的影片分幀擷取。本研究利用 YOLOv4 模型，經過深度學習，已初步研發出自動偵測離岸流的 AI 模式，具有辨識速度快，可從動態影像中即時辨識出離岸流。



影片來源：<https://tw.live/live/?id=bswj>

圖 12 白沙灣海岸影片離岸流之偵測結果的分幀擷取：(a)為第一類離岸流，(b)為第二類離岸流。



影片來源：<https://www.youtube.com/watch?v=ww8s-erahaU>

圖 13 花蓮南濱忘憂亭影片之離岸流偵測結果的分幀擷取

未來此一離岸流偵測模式可以結合海域遊憩警報系統，一旦偵測到離岸流發生，可即時發布警報。離岸流的發生會延續一段時間，為避免錯誤警報頻生造成遊客的不信任，建議在同一地點偵測到離岸流連續出現一段時間後，才發出警訊。未來可從海岸視訊站影像中同時偵測離岸流及遊客位置，自動播報警訊，要求位於危險區內的遊客遠離，或由岸邊救生員驅離受險民眾。此外，救生或應變人員也可依據警訊，在離岸流的岸邊範圍插紅旗示警，提醒遊憩民眾勿接近該海域。由於離岸流會因地理環

境、潮汐、波浪、氣候...造成大小型態上的變化，未來可以繼續使用同時有框定也有遮罩的網路模型來進行訓練，或是在識別到離岸流的視訊站旁架設 X-Band 雷達，以訓練 AI 模型亦能找出離岸流特徵，使得天候或光照不佳的情況下，仍然透過警報系統偵測更大範圍內離岸流的位置及範圍。

## 謝誌

本研究感謝科技部計畫編號 MOST 109-2221-E-006-101 及國家海洋研究院計畫案號 NAMR110023 之經費提供，使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. 江大白 (2020) Yolov3&Yolov4&Yolov5 模型权重及网络结构图资源下载，<https://blog.csdn.net/nan355655600/article/details/107852288>.
2. 周威 YOLO V4 — 损失函数解析，<https://zhuanlan.zhihu.com/p/159209199>
3. 邵廣昭 (2020) (2020 修訂，2015/3/26 刊登)，台灣是海洋生物多樣之島，*國家地理雜誌-地理新聞*
4. Austin, M. (2016) Rip currents are a natural hazard along English coasts – here's how to spot them. *The Conversation*.  
<https://theconversation.com/rip-currents-are-a-natural-hazard-along-coasts-heres-how-to-spot-them-63081>.
5. Bochkovskiy, A., C.-Y. Wang & H.-Y. M. Liao (2020) Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection. *arXiv preprint arXiv:2004.10934*.
6. De Silva, A., I. Mori, G. Dusek, J. Davis & A. Pang (2021) Automated rip current detection with region based convolutional neural networks. *Coastal Engineering*, 166, 103859
7. Dronkers, J. (2017) Rip current, [http://www.coastalwiki.org/wiki/Rip\\_current#cite\\_ref-1](http://www.coastalwiki.org/wiki/Rip_current#cite_ref-1)
8. Haller, M. C., D. Honegger & P. A. Catalan (2014) Rip Current Observations via Marine Radar. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 140, 115-124.
9. Nishi, R. (2005) Rip Current Project- A Project Undertaken to Reduce Drowning Accidents.
10. Redmon, J. & A. Farhadi (2018) Yolov3: An incremental improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*

## 太平島海域波浪模擬與分析

李孟學<sup>1\*</sup> 傅科憲<sup>1</sup> 楊文昌<sup>2</sup> 江朕榮<sup>3</sup> 卓訓杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 國家海洋研究院海洋科學及資訊研究中心副研究員

<sup>2</sup> 國家海洋研究院海洋科學及資訊研究中心主任

<sup>3</sup> 國立成功大學水工試驗所研究助理

### 摘要

國家海洋研究院於南沙太平島建置水文浮標觀測系統，即時量測南沙太平島水文資料，本研究利用太平島水文浮標所蒐集之風與波浪資料，進行三種風場之波浪模擬驗證，並針對太平島海域進行巢狀網格加密。再進行 2020 年 9、10 月太平島波浪模擬，進行分析颱風期間波高分析，可提供船舶航行安全、救援、軍事等應用。

關鍵詞：太平島、SWAN 模式

## Waves Simulation and Analysis in Taiping Island

Meng-Syue Li\*, Ke-Hsien Fu, Wen-Chang Yang, Chen-Jung Chiang, Hsun-Chieh Cho

\* Associate Researcher, Marine Science and Information Research Center, National Academy of Marine Research

### ABSTRACT

National Academy of Marine Research has established a buoy observation system on Taiping Island to measure the real time marine data. In this study, the wind and wave data collected by the buoys on Taiping Island were used to perform wave simulation verification of three kind of wind data. The nested grid was encrypted for the sea area of Taiping Island. Then carry out the Taiping Island wave simulation in September and October 2020 to analyze the wave height during the typhoon, which can provide ship navigation safety, rescue, military and other applications.

Keywords: Taiping Island; SWAN model;

### 一、前言

南沙群島範圍介於北緯 4 度~12 度，東經 110 度至 117 度間，亦即位於越南東方，菲律賓巴拉望島西方及馬來西亞婆羅洲北方，水深最深可達千米以上之南海海域。南沙群島是我國最南之疆土，政府為了宣示主權，除了派遣海洋委員會海巡署東南沙分署南沙指揮部之海巡人員、空軍航管及氣象人員駐守太平島。太平島距離臺灣 1600 公里以上，地處偏遠，若以航行船速 20 節估計，航行時間至少 2 天以上方能抵達，各項設備維護、人員及資源運補相當不易。因此，太平島之波浪模擬分析，對於評估船舶航行之安全性相當重要。

海面受風場作用產生的波浪稱為風浪

(wind sea)，風浪生成後隨風力作用歷時(duration)和風力作用距離(fetch)增加而逐漸飽和，風浪達到飽和的狀態就是在一定的風速下，波浪的波高和週期不再增加。當吹風歷時較短時，風浪達到飽和所需的時間較短，反之則需較長的時間，風浪一方面受風力作用而朝飽和的狀態成長；另一方面因為風浪本身的波動特性而向遠離風場的方向傳遞；組成風浪的成份波因為不同頻率和角度會以不同波速和方向逐漸成為獨立的波浪系統稱為湧浪(swell)。

一般而言湧浪可視為一脫離風場風力作用的完全發展波(fully developed sea state)，週期較長，波浪的特性較規則，在頻譜上大致分佈在低頻範圍，其

頻率範圍較窄；風浪則視為仍受風場影響的發展波 (developing sea state)，週期較短，波浪的特性甚為不規則，頻譜上其頻率範圍較廣，至於風浪轉變為湧浪的過程稱為過渡發展波 (mixing sea state)，其波浪的特性介於風浪和湧浪之間。

Pierson & Moskowitz (1964)之頻譜劃分方法以深水波分散關係式和完全發展波之波齡條件，即波速和風速相當，推導出以現場風速資料代入之劃分頻率公式，此方法最為簡單但是可靠性容易受當地海況的影響。Komen et al.(1984) 參考風場資料提出以波齡比對波向與風向資料來判斷湧浪；Earle(1984) 提出 PM 頻譜尖峰頻率的 0.8 倍為劃分頻率 (separation frequency)。美國海洋大氣總署(NOAA)之國家資料浮標中心(NDBC)從 1997 年開始發展波浪尖銳度法，波浪尖銳度定義為波高和波長之比值，其方法立基於風浪之波浪尖銳度大於湧浪，且最大波浪尖銳度發生之頻率接近風浪系統波峰頻率。Wang & Hwang(2001)提出以波浪尖銳度法配合實測資料的回歸參數來推算其劃分頻率。由於波浪尖銳度法的缺點在於風浪能量不顯著或風浪能量減弱時容易高估風浪能量，因此 Gilhousen & Hervey(2001)則利用 PM 頻譜之完全發展波定義劃分頻率之下限，提出修正波浪尖銳度法，目前 NDBC 仍使用修正波浪尖銳度法作為風浪和湧浪劃分方法。Portilla et al.(2009)將頻譜劃分方法分成分割 (partitoning)和鑑識(identification)兩步驟，首先將頻譜分割成數個獨立的波浪系統，然後透過分割步驟將不顯著的浪系統標記為波浪系統(spurious wave systems)，並合併到適當有義的波浪系統中，再透過鑑識步驟判斷每個合併後的有義的波浪系統是風浪系統抑或湧浪系統，並比較發現 Wang and Hwang(2001)方法整體上高估湧浪系統，而 Pierson and Moskowitz (1964)方法則稍微低估湧浪系統。由於前述之問題，Hwang et al.(2012)進一步提出波譜積分法來計算劃分頻率，改善尖銳度法中低估湧浪之情況。許等人(2011)有鑑於過去學者提出之頻譜劃分方法僅考慮深水波條件，因此以 TMA 頻譜發展有限水深頻譜劃分方法，並應用於台灣颱風期間近岸浮標的觀測資料。

本研究利用 SWAN 模式，以不同風場資料進行太平島海域波浪模擬，並利用太平島實測資料進行

驗證，並討論不同颱風期間之風湧浪特性。不進行 CFSV2、ERA5 及 WRF 風場資料進太平島海域波浪模擬，並與實測資料驗證比對。

## 二、研究方法

SWAN 是由荷蘭 Delft 大學統合以往學者之研究並加以改良而成的風浪模式(Booij et al. 1996)，模式具有第三代風浪模式的特徵，且在能量成長與消散項的參數選擇上，比其它模式更具彈性；同時也提供第一代、第二代與第三代的相關波浪成長與消散參數，可供使用者應用。因此，模式具有可預報近岸海域風浪之功能。此模式也經過學者 Holthuijsen et al.(1997)和 Booij et al.(1998)應用實測風浪資料加以驗證。而歐善惠等人(1999)、方介群(2000)及廖建明(2001)也曾利用 SWAN 對侵襲台灣之颱風風浪做過一系列之研究與模擬。

SWAN 模式之波浪是利用二維的波浪作用力頻譜密度函數來描述。因在高度非線性的情形下，可比較合理且正確地預測波浪的二階頻譜矩的分布。SWAN 模式中所適用的頻譜是波浪作用力頻譜密度函數  $N(\sigma, \theta)$  (其中， $\sigma$  為相對頻率； $\theta$  為波浪方向角)，而不是能量頻譜密度函數  $E(\sigma, \theta)$ ，主要是因為當有流的作用時，作用力密度可以守恆，但能量密度則否 (如 Whitham, 1974)。 $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$ 。其理論簡述如下：

### (1)作用力平衡方程式(wave action balance equation)

波譜的發展過程可以用頻譜作用力平衡方程式來描述(Hasselmann et al., 1973)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}$$

其中，左式第一項表示作用力密度隨時間的變化率；第二及第三項為作用力在空間中分別以  $c_x$  及  $c_y$  的速度在  $x$  及  $y$  軸方向傳遞；第四項為受到水深及流的變化所導致相對頻率在  $\sigma$ -軸上以  $c_\sigma$  的速度位移；第五項係表示因為水深或流所引起的折射(在  $\theta$ -軸上以  $c_\theta$  的速度傳遞)；這些速度可依線性波理論計算而得(如，Whitham, 1974；Mei, 1983；Dingemans, 1997)。右式的  $S(=S(\sigma, \theta))$  是以能量密度表示的來源項，包含能量的生成、衰減、及非線性的波浪交互作用。

### (2)風的能量輸入

風的能量傳入波的理論是以 Phillips(1957)的共振機制(resonance mechanism)以及 Miles(1957)的回饋機制(feed-back mechanism)來描述，其關係式如下：

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta)$$

其中，A 及 B 的係數值受到波浪頻率及方向，以及風速及風向的影響。流的影響也是以區域性的風速及風向來表示。

### (3) 能量消散

SWAN 考慮的波浪能量的消散項包含了三個部分：飛沫  $S_{ds,w}(\sigma, \theta)$ 、底床摩擦  $S_{ds,b}(\sigma, \theta)$ 、及水深引起碎波  $S_{ds,br}(\sigma, \theta)$ 。

飛沫主要是由波形尖銳度(wave steepness)所控制，依據 Hasselmann(1974)所推導的 Pulse-based 模式，此一消散項可表為

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{k} E(\sigma, \theta)$$

其中， $\Gamma$  是與波形尖銳度有關的係數； $k=2\pi/L$  是波數； $L$  是波長； $\tilde{\sigma}$  及  $\tilde{k}$  分別為平均相對頻率及平均波數。

因為水深引致的能量消散的原因包含了底床摩擦、底床運動、底部滲漏、及因為底床不規則性所產生的逆向散射。對於屬砂質底床的大陸棚海域，其主要的消散機制應該是底床摩擦

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta)$$

其中， $C_{bottom}$  為底床摩擦係數。由於底床摩擦所引致的平均水流對能量消散的影響並不在考慮範圍內，其原因是在於該項因子的影響程度尚無法掌握。

有關因為水深引致的碎波過程，至今我們的了解仍然有限，更遑論它的頻譜變化。目前可以掌握的是因為碎波所引致的總能量消散

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta)$$

其中， $E_{tot}$  是總波浪能量； $D_{tot}$  (負值) 是依據 Battjes、Janssen(1978)所提有關因為碎波導致的總能量消散。 $D_{tot}$  的值與碎波參數  $\gamma=H_{max}/d$  有明顯關係，其中  $H_{max}$  為最大可能個別波高； $d$  為當地水深。

本文利用 SWAN 模式建置西北太平洋海域波浪模式，其範圍包含南海海域範圍，使用巢狀網格提高，太平島海域地區之解析度。西北太平洋海域模式範圍(第一層)為東經 105 度至 130 度，北緯 2

度至 35 度，模式解析度為 1 分，水平網格為 1501 x 1921 個，地形資料採用美國 NOAA 之 ETOP1 資料，其範圍如圖 1a 所示。太平島海域範圍為東經 113.5 度至 115.5 度，北緯 9.5 度至 11.5 度，模式解析度 1/4 分，水平網格數為 481 x 481 個，地形資料採用 GEBCO 2020 資料其範圍如圖 1b 所示。本研究採用三種風場資料進行模擬比較，分別為 1. 中央氣象局 WRF 風場之每小時平面風速資料其解析度為 15 公里。2. 美國 NCEP 之 Climate Forecast System Version 2 (CFSV2) 風場之每小時平面風速資料。3. 歐洲 ECWMF 之 ERA5 風場之每小時平面風速資料其解析度為 1/4 度。

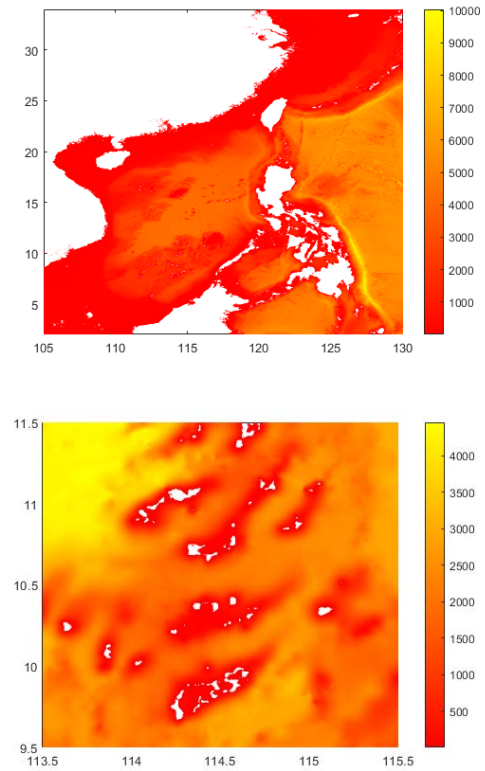


圖 1 座標系統及相關參數示意圖

## 三、討論

本文應用 2021 年 3 月 CFSV2、ERA5 及 WRF 風場資料進行太平島海域波浪模擬。首先應用中央氣象局新竹、龍洞、蘭嶼及彭佳嶼四個波浪浮標資料進行臺灣周邊海域波浪驗證，表 1 為西北太平洋模式與浮標資料比對之統計表，包含平均值、標準偏差及均方根誤差。圖 2 為四個浮標波浪時序列圖為三種風場 2021 年 3 月太平島海域波高與實測資

料時序列資料。依據 Taylor, K. E. (2001)分別繪制四個浮標之泰勒圖比對三種風場差異如圖 3 所示。結果顯示以氣象局 WRF 風場進行波浪模擬與實測值最相近。再針對太平洋島海域波浪特性分析，圖 4 為太平洋測站之波浪時序列圖及繪制泰勒圖，其結果亦為 WRF 風場最佳，然模式結果顯示波高皆為低估。

為進行太平洋島波浪模擬，利用本院於 2021 年 3、4 月太平洋島觀測之風速資料與 WRF 風場進行分析比較，其結果顯示 WRF 風場於太平洋島海域略為低估。因此，本研究以加權內差法進行太平洋島地區之風場內差，進行加權 WRF 風場、原始 WRF 風場模擬結果與實測資料繪制波高散布圖，如圖 6 所示，圖中  $H_o$  代表實測波高， $H_{mo}$  代表模式波高，結果顯示加權 WRF 風場模擬結果更接近實測值。

2020 年 9 月~10 月影響南海之颱風分別為 9 月之紅霞颱風、10 月之蓮花颱風、南卡颱風、沙德羅颱風及莫拉菲颱風。利用 TMA 法分析颱風期間太平洋島觀測最大浪高之風湧浪，各颱風影響時間與風湧浪波高如表 2 所示。進行 2020 年 9、10 月之波浪模擬，如圖 7 波高時序列圖所示。結果顯示加權風場可更加貼近實測颱風浪高，圖 8 為 9、10 月之波高散布圖，顯示加權風場整體波浪模擬結果接近實測波高。

表 1 模式與實測波浪資料比對表

		Mean (m)	Standard Deviation(m)	RMSE (m)
新竹浮標	WRF	0.86	0.56	0.27
	ERA5	0.62	0.48	0.35
	CFSV2	0.5	0.29	0.17
龍洞浮標	WRF	1.21	0.6	0.32
	ERA5	0.98	0.37	0.33
	CFSV2	1.06	0.4	0.35
蘭嶼浮標	WRF	1.34	0.7	0.43
	ERA5	1.29	0.34	0.23
	CFSV2	1.25	0.35	0.26
澎佳嶼浮標	WRF	1.36	0.63	0.32
	ERA5	1.08	0.37	0.34
	CFSV2	1.12	0.41	0.38

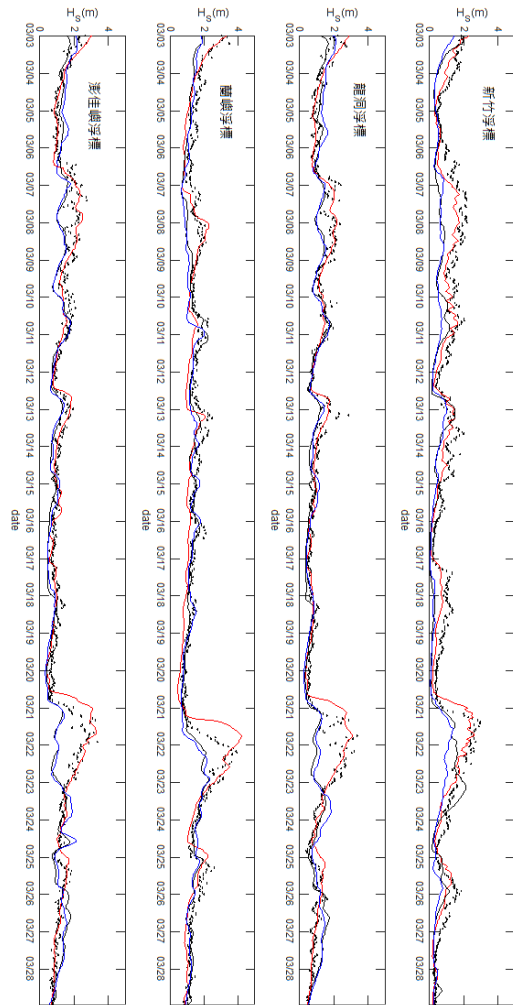


圖 2 不同風場之臺灣周邊波高時序列圖(黑點:實測值、紅線:WRF、藍線:CFSV2 黑線:ERA5)。

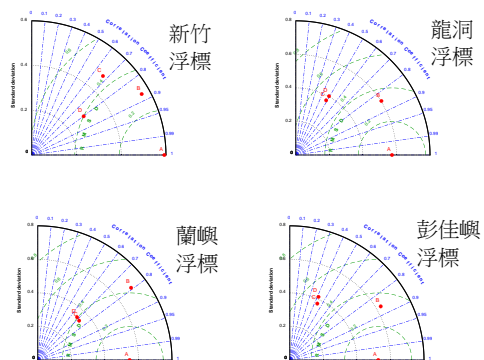


圖 3 臺灣周邊測站泰勒圖(A:實測值, B:WRF,C:ERA5, D: CFSV2)。

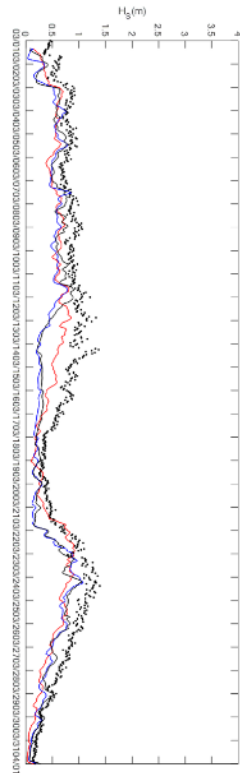


圖 4 不同風場之太平島波高比較(黑點:實測值、紅線:WRF、藍線:CFSV2 黑線:ERA5)。

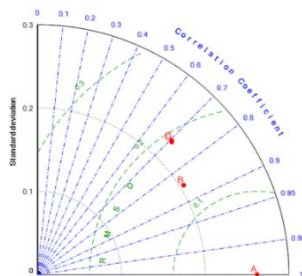


圖 5 太平島泰勒圖(A:實測值,B:WRF,C:ERA5, D: CFSV2)。

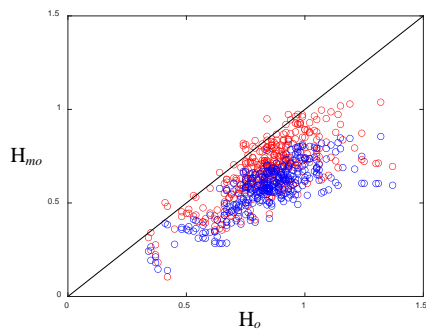


圖 6 波高散布圖(WRF:藍圈,加權 WRF:紅圈)。

表 2 最大波高之風湧浪統計表

	最大示性波高(m)	發生時間	湧浪高(m)	風浪高(m)
紅霞	2.81	2020/09/18 03:00:00	2.47	1.32
蓮花	2.02	2020/10/1-21:00:00	1.48	1.37
南卡	2.37	2020/10/13 10:00:00	2.00	1.27
沙德羅	1.53	2020/10/22 03:00:00	1.46	0.44
莫拉菲	3.58	2020/10/27 16:00:00	3.09	1.82

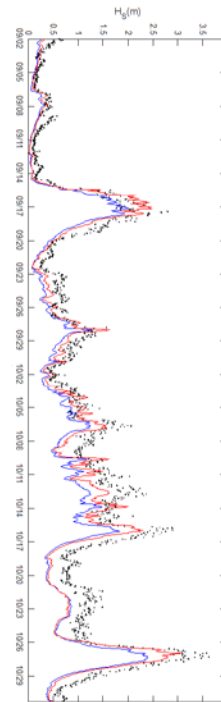


圖 7 太平島颱風波浪模擬(黑點:實測值、紅線:加權風場、藍線:WRF 風場)。

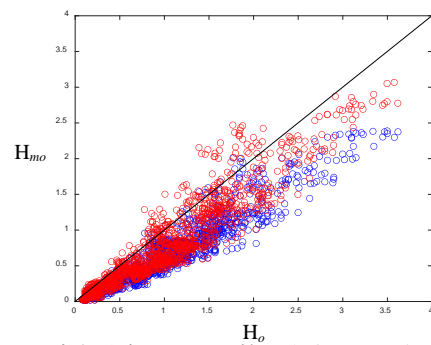


圖 8 波高散布圖(WRF:藍圈,加權 WRF:紅圈)。

#### 四、結論

本研究利用 SWAN 模式進行太平島海域波浪

模擬，以三種風場擬模結果分析比較，其中以 WRF 風場結果最佳。利用太平島實測風場資料，進行模式調整，再進行 2020 年 9、10 月太平島颱風波浪模擬，並與實測資料進行驗證，結果顯示加權風場整體波浪模擬結果接近實測波高。後續將持續進行更長期資料驗證比對。

## 謝誌

本文係 110 年政府科技發展計畫-臺灣及南海海域資料收集調查與資料庫精進(審議編號：110-4901-02-22-03)之相關研究成果。

## 參考文獻

1. 歐善惠、許泰文、臧政義、方介群、廖建明 (1999) 「應用 SWAN 波浪模式推算台灣附近海域颱風波浪之研究」,第 21 屆海洋工程研討會論文集,第 87-95 頁。
2. 方介群 (2000) 「應用 SWAN 風浪模式推算台灣附近海域颱風波浪」,國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
3. 廖建明 (2001) 「近岸風浪推算之研究」,國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
4. 許城榕、陳炫杉、陳陽益(2011) 「有限水深波譜風浪及湧浪劃分」,第 33 屆海洋工程研討會論文集,第 133-138 頁。
5. Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M. (1978) "Energy loss and set-up due to breaking of random waves." Proc. of the 16th International Conference on Coastal Engineering, pp. 569-587.
6. Booij, N., Holthuijsen, L.H., Haagama, I.J.G., (1998) "Comparision the second-Generation HISWA Wave Model with Third-Generation SWAN Wave Model." Proceedings of 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, Melbourne, Florida, pp. 215-222.
7. Earle, M.D. (1984) "Development of algorithms for separation of sea and swell." National Data Buoy Centre Tech. Rep. MEC-87-1, 53.
8. Gilhousen, D. B. and R. Hervey (2001). "Improved Estimates of Swell from Moored Buoys," Proceedings of the Fourth International Symposium WAVES 2001, ASCE: Alexandria, VA, pp. 387-393.
9. Holthuijsen, L.H., N. Booij, R. Ris, J.H. Andorka Gal and J.C.M. de Jong (1997) "An Verification of the Third-Generation Wave Model SWAN along the southern North Sea coast." Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, Wave'97, ASCE,pp. 49-63.
10. Hwang, P. A., F. J. Ocampo-Torres, and H. García-Nava (2012) Wind sea and swell separation of 1D wave spectrum by a spectrum integration method. J. Atmos. Oceanic Technol., 29, 116-128.
11. Komen, G.J., Hasselmann, S., and Hasselmann, K.(1984) On the existence of a fully developed wind-sea spectrum J. Phys. Oceanogr., 14, 1271-1285.
12. Mei, C.C. (1983), "The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves," John Wiley.
13. Miles, J.W. (1957) "On the generation of surface waves by shear flows." J. Fluid Mech., Vol. 3, pp. 185-204.
14. Phillips, O.M. (1957) "On the generation of waves by turbulent wind." J. Fluid Mech., Vol. 2, pp. 417-445.
15. Pierson, J. W., and Moskowitz, L.(1964) "A proposed spectral form for fully eveloped wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii.," J.Geophys.Res., Vol.69, pp.5181-5190
16. Portilla J., Ocampo-Torres F. J., and Monbaliu, J.(2009) "Spectral Partitioning and Identification of Wind Sea and Swell," J. Atmos. Oceanic Technol., 26, 107-122.
17. Taylor KE. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of Geophysical Research 106: 7183-7192.
18. Wang, D. W. and Hwang, P. A.(2001)"An operational method for separating wind sea and swell from ocean wave spectra,"J. Atmos. Oceanic Technol., 18, 2052-2062.



# GNSS 浮標應用於離岸與近岸觀測之最新發展

林演斌<sup>1\*</sup> 施孟憲<sup>2</sup> 黃清哲<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>國立成功大學近海水文中心研發組長

<sup>2</sup>國立成功大學近海水文中心研發工程師

<sup>3</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系教授兼近海水文中心顧問

## 摘要

本團隊已開發全球衛星導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)浮標能夠即時觀測潮位與波浪，為突破布放位置限制，故測試即時精密單點定位(real-time precise point positioning, RT-PPP)定位效果，以發展離岸 GNSS 浮標，實驗結果顯示 RT-PPP 定位成果能量測波浪。同時，為強化海岸保護所需基礎資料，本研究亦開發並布設小型近岸 GNSS 浮標，於 2021 年 7 月下旬烟花颱風與西南風期間在西南部近岸測得碎波與其引起的流速變化，效果良好。

關鍵詞：全球衛星導航系統浮標、潮位、波浪、碎波

## Up to date development of the GNSS buoy for monitoring in offshore and nearshore areas

Yen-Pin Lin<sup>\*</sup>, Mon-Shen Shi, Ching-Jer Huang

<sup>\*</sup> Head, R&D department, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

We have developed the Global Navigation Satellite System (GNSS) for monitoring real-time tides and ocean waves in coastal areas. However, the range from land of a GNSS buoy is limited because of lack of network signals. To enlarge this range, we are developing the offshore GNSS buoy and the experimental results are illustrated. Meanwhile, we also developed the small-size nearshore GNSS buoy in order to enhance the database for coastal protection. The breakers and currents induced by breakers were identified by using the data observed by the small-size nearshore GNSS buoy in July 2021 and the south-west coast of Taiwan, R.O.C.. The results demonstrate that the performances of the small-size nearshore GNSS buoy for measuring nearshore ocean waves are excellent.

Keywords: GNSS buoy; Tide; Wave; Breaker

## 一、前言

外海實測潮位資料是海洋工程設計之重要依據，也能驗證潮位模式，提高預測準確度。此外，海平面上升威脅日益增高，在外海觀測能直接獲得平均海水面資料，亦能作為驗證衛星高度計遙測的資料。然而，外海缺乏構造物，不易設置觀測站，而資料浮標已被國內外廣泛採用作為長期觀測平台，為合

適的發展方向。另一方面，近岸碎波帶實測資料相當重要，因為潮位與波浪是影響漂砂濃度之重要因子，而漂砂活動造成海岸變遷，對於海岸保護很重要。然而，在碎波帶長期間觀測，儀器非常不易生存，例如底碇式常常在大浪後遺失而失掉觀測資料。由於以上原因，使得碎波帶的實測資料極度缺乏，而資料浮標具即時傳輸優勢，能減少資料遺失，為合適的發展方向。

在觀測外海潮位方面，Dawidowicz (2014)指出衛星高度計(satellite altimetry)在近岸海域觀測海水水位之誤差較深海大，因此，GNSS (Global Navigation Satellite System)浮標能彌補此海域海水水位量測之不足。Lin et al. (2017)利用 VBS-RTK (virtual base station real-time kinematics)定位技術開發 GNSS 浮標，獲得公分等級之定位成果，並據以分析潮位與波浪；但由於定位過程需透過電信廠商基地台上網連線，使得該技術無法適用在電信廠商網路訊號涵蓋範圍以外。為突破布放位置限制，需利用其他不同種類的解算方法以及衛星傳輸無遠弗屆的特性。Kuo et al. (2012)以精密單點定位 (precise point positioning, PPP)方法分析 GPS 浮標記錄資料，發現使用 PPP 定位的 GPS 浮標具有觀測海面變化精度達數公分之潛力，惟其為非即時觀測。Choy et al. (2017)指出在導入基於衛星的增強系統 (satellite-based augmentation systems, SBAS)下，PPP 精度已可達公分等級。有些商業型 SBAS 服務，例如 Novatel TerraStar-C 服務 (https://www.novatel.com/products/terrastar-gnss-corrections/#contentTab1)即可達到，不論該服務的使用者是在陸地或空中。然而，使用該 RT-PPP 服務實際的定位成果精度以及利用定位成果分析潮位與波浪之效果，均有待實證。

碎波現象極為複雜，近岸處的碎波造成沿岸流與裂流，是海岸水上遊憩活動的危險因子。另外，碎波造成的流速變化也影響近岸漂砂，與海岸變遷息息相關，可見觀測碎波的重要性。有關觀測碎波方法，在深海有 Longuet-Higgins and Smith (1983)使用柱型浮標安裝電容線量測水位躍起以觀測現場碎波，然而浮標起伏 (heave) 運動會影響量測。Gemrich and Farmer (1999)使用導電度計在漂流式浮標偵測碎波引起的水位空缺(void fraction)的快速變化，但當浮標漂至氣泡區時，此方法可能偵測錯誤。Thomson (2012)以 SWIFT (Surface wave instrumentation floats with tracking)柱型漂流浮標量測碎波引起的亂流，該浮標量測流速，並以 200 Hz 頻率量測加速度與姿態，量測結果用來計算能量消散。Brown et al. (2018)指出雖然能量傳遞至波峰的機制隨水深變化，但能量消散與水深無關，所以在碎波帶更適合發展碎波觀測技術，因為能在短期間

內量到很多碎波。Sinclair (2014)在碎波帶內以直徑 8.75 cm 漂流式浮體上的慣性量測單元 (inertial measurement unit, IMU)量測碎波，該技術能成功辨識捲浪(plunging)型碎波。Brown et al. (2018)並指出，碎波的衝擊特性為短期間內造成高頻運動，因此高頻的取樣對於偵測碎波至為關鍵。綜合而言，前人使用於觀測碎波的平台以資料浮標佔多數，僅極少數採用固定的平台，而使用觀測儀器包含電容線、導電度計、IMU、電位計、海流儀，取樣頻率較一般觀測波浪更高。

基於前述動機與前人研究，本研究延伸 GNSS 浮標開發至離岸與近岸碎波帶兩處，一方面擴展其功能，以期未來在離岸海域即時觀測水位時，能不受陸地網路訊號與衛星參考站限制。本研究分析即時精密單點定位(real-time PPP, RT-PPP)成果用於評估量測波浪運動之效果。另一方面，開發小型近岸 GNSS 浮標並評估其在碎波帶觀測波浪之效能，加上它具有掛載漂砂濃度觀測儀器能力，期待未來能提供更多在近岸碎波帶內的潮、波、流與漂砂濃度資料，應用於海岸變遷趨勢分析。

## 二、研究方法

GNSS 浮標研發係整合多個技術而成，主要為浮標體、高精度的 GNSS 定位與量測技術、波浪與流速分析方法等，並安裝於現場實地觀測，以下說明相關原理、方法與現場觀測布置：

### 2.1 現場試驗布置

本研究在離岸 GNSS 浮標部分，尚待進行現場試驗。而小型近岸 GNSS 浮標體係由本團隊根據近岸碎波帶觀測與作業需求所設計，其直徑為 0.8 m，裝載 540 AH 容量的電池後重量約 90 kg，能持續運作數月，確切運作期間則視裝載儀器而定。該浮標觀測處距離陸地約 80 m，水深約為 3 m，外觀與位置如圖 1。取樣 GNSS 觀測的高度與速度資料之頻率為 2 Hz，期間為每小時的 50 min 起，共 10 min。本研究資料期間為 2021 年 7 月 5 至 30 日，期間內主要天氣系統有烟花颱風與西南風。而流速則以掛載在錨繫的聲波式都卜勒流速儀觀測，每 2 秒發射聲波量測一次，每 6 分鐘獲得 1 筆平均流速。本研究引用彌陀浮標觀測之波浪資料與小型近岸 GNSS 浮標作比對，彌陀浮標水深為 23 m，約位於小型近

岸 GNSS 浮標南方 17 km 處。



圖 1 小型近岸 GNSS 浮標外觀與位置圖

## 2.2 RT-PPP

由於 VBS-RTK GNSS 浮標需上網始能傳輸即時修正訊號，使得其布設位置受限於基地台網路訊號涵蓋範圍。而在範圍外的即時觀測，可利用 RT-PPP 技術。

TerraStar-C Pro 為全球的多星系定位服務，包含 GPS, GLONASS, Galileo 與 BeiDou，修正訊號的產出是基於布建在全球超過 100 座的 GNSS 參考站網，並能在全世界透過地球靜止軌道衛星直接對使用者的 GNSS 接收器發送。在水平與垂直向的定位精度，以均方根而言，分別可達 2.5 cm 與 5 cm，與 VBS-RTK 服務相同。惟相較於 VBS-RTK 收斂時間較久，優勢為不需陸地行動網路，亦即使用的位置不受陸地行動網路訊號涵蓋範圍的限制。本研究 PPP 定位解算係由浮標上的 GNSS 接收器執行。

## 2.3 以 GNSS 觀測數據分析波浪方法

本研究將 GNSS 量測之水位時序列，先經處理雜訊以及低頻雜訊，再以快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)計算一維波譜，最後再平滑之，並據以計算示性波高(significant wave height)、平均週期(zero-crossing period)。本文以平均週期與水深代入分散關係式(dispersion relation)求得觀測處波浪的波長，再進一步計算波浪相速(wave celerity)。另外，2.1 小節所述 GNSS 觀測的速度資料為浮標體在水平向的運動速度，可代表水平向的水粒子運動速度，此速度大於波浪相速時，代表發生碎波。本文計算於每小時觀測 10 min 的 1,200 點速度大於波浪相速的點數，並進一步計算比例，以此作為發生碎波多寡的指標。

本研究參照 Lin et al. (2020)研究，以垂直向位移、東西向水粒子運動速度與南北向水粒子運動速

度組合分析方向波譜，以式(1), (2)計算：

$$S(f, \theta) = D(f, \theta)C_{\eta\eta}(f) \quad (1)$$

$$D(f, \theta) = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a'_n(f) \cos n\theta + b'_n(f) \sin n\theta] \right\} \quad (2)$$

式中  $f$  為頻率， $\theta$  為波浪前進方向角，係以平面上數學 xy 座標系統之正 x 軸起算，逆時針遞增， $D(f, \theta)$  為方向分布函數(directional spreading function)， $C_{\eta\eta}(f)$  為一維波譜， $a'_n(f)$  和  $b'_n(f)$  為傅立葉(Fourier)係數， $n$  為傅立葉級數之階次。

依據 Lin et al. (2017)之重新整理，上述方向分布函數中之傅立葉係數以式(3) - (6)計算：

$$a'_1(f) = \frac{C_{\eta u}(f)}{\sqrt{C_{\eta\eta}(f)[C_{uu}(f)+C_{vv}(f)]}} \quad (3)$$

$$b'_1(f) = \frac{C_{\eta v}(f)}{\sqrt{C_{\eta\eta}(f)[C_{uu}(f)+C_{vv}(f)]}} \quad (4)$$

$$a'_2(f) = \frac{C_{uu}(f)-C_{vv}(f)}{C_{uu}(f)+C_{vv}(f)} \quad (5)$$

$$b'_2(f) = \frac{2C_{uv}(f)}{C_{uu}(f)+C_{vv}(f)} \quad (6)$$

式中  $C_{mn}(f)$  為波浪觀測量  $m$  與  $n$  之交錯譜(cross-power spectrum)， $m$  與  $n$  分別代表  $\eta$ ， $u$ ，或  $v$  其中之一， $\eta$ ， $u$ ，與  $v$  分別代表水位(亦即垂直向位移)、東西向及南北向水粒子運動速度。

最後再從所計算的各類率與方向的方向波譜資料中，選取數值最大者即為主波向(dominant wave direction)，本文中主波向為波浪的來向。

## 2.4 Doppler 量測速度原理

GNSS 浮標以 Doppler 原理量測自身的運動速度，精度能達數個 cm/s 等級。He (2015)指出以都普勒偏移(Doppler shift)方程式計算衛星 S 與 GNSS R 速度的基本原理，如式(7)所示：

$$D_{R_j}^S = \frac{V_r}{c} f_j^S \quad (7)$$

式中  $D_{R_j}^S$  為 S 與 R 在第  $j$  個頻道之頻率偏移， $f$  為 GNSS 載波相位(carrier phase)觀測的頻率， $V_r$  為 S 相對於 R 的軸向速度(radial velocity)， $c$  為真空光速。當 R 與 S 相互接近時， $D_{R_j}^S$  為正值，反之則為負值。本研究採用之小型近岸 GNSS 浮標能接收衛星載波相位訊號，根據儀器規格，其量測水平運動速度精度以一倍準偏差計算最佳可達 0.7 cm/s，惟海上現場量測可能受當時的大氣條件影響。

## 2.5 ButterWorth 低通濾波

本研究採用巴特沃斯濾波器(Butterworth filter)濾除流速資料中的潮流成分，它也被稱作最大平坦

濾波器。其特點是通頻帶(passband)內的頻率響應曲線最大限度平坦，沒有漣波，而在阻頻帶(stopband)則逐漸下降為零。Hollos and Hollos (2014)指出巴特沃斯濾波器的頻率響應如式(8)：

$$|G_n(j\omega)|^2 = \frac{1}{1+\epsilon^2\omega^{2n}} \quad (8)$$

式中  $n$  為階數， $\epsilon$  為最大通頻帶漣波(maximum pass band ripple)， $j$  為虛數單位， $\omega$  為角頻率。此濾波器的截止頻率(cut off frequency)意義為於該頻率處能量被濾除一半。

### 三、結果與討論

#### 3.1 離岸型 GNSS 實驗

圖 2 為離岸 GNSS 靜態高度時序列圖，圖中資料期間為一天，取樣頻率為 2 Hz，標準偏差為 2.9 cm，小於 5 cm，顯示離岸型 GNSS 結合 RT-PPP 服務所量測高度之精度符合規格。此外，本研究為檢測離岸型 GNSS 感測波浪運動性能，由工作人員伸直手臂並手持離岸型 GNSS 方式，使離岸型 GNSS 進行垂直面的圓周運動，在旋轉前以尺丈量離岸型 GNSS 在最高點與最低點兩位置之高度差約為 1.14 m，以碼表計算多圈旋轉總時間並計算平均值約 8 秒，圖 3 為離岸 GNSS 動態高度時序列圖，圖中資料點之取樣頻率為 10 Hz，可看出波形近似正弦波。再者，取圖中 5 個波的平均波高為 1.18 m，與以尺丈量結果相差僅 0.04 m。此外，計算圖中 5 個波的平均週期約為 8.6 s，與用碼表計算之平均值相差 0.6 s。綜而言之，以上試驗數據可說明離岸型 GNSS 量測波浪運動波形、波高與週期之效果良好。

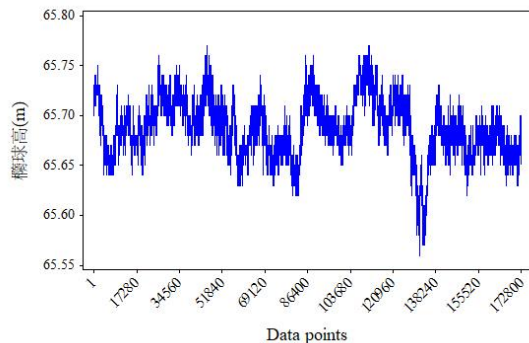


圖 2 離岸 GNSS 靜態高度時序列圖

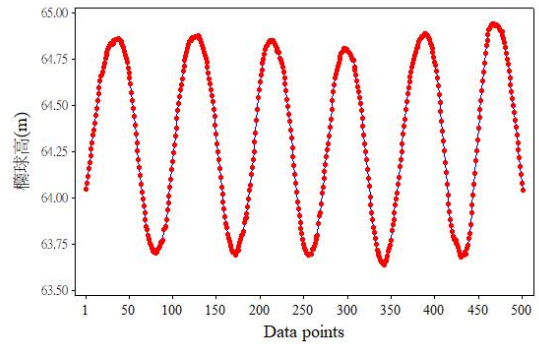


圖 3 離岸 GNSS 動態高度時序列圖

#### 3.2 小型近岸 GNSS 浮標波浪觀測

為查證小型近岸 GNSS 浮標觀測波浪資料的正確性，本研究將其與鄰近在外海的彌陀浮標波浪資料比較，示性波高、尖峰週期與主波向(dominant wave direction, DWD)比較圖分別如圖 4 ~ 6 所示。觀察圖 4，發現於 7 月 24 日以前，兩站示性波高均小，其中近岸較外海示性波高小，而之後烟花颱風與西南風期間，兩站示性波高均較大，且近岸與外海示性波高相互一致。由於兩站位置與水深不同，波浪受近岸地形影響，使得兩站示性波高不完全相等，尚為合理。而從圖 5 可知，兩站之尖峰週期在大部分時候為一致但少數時候不同。此外，從圖 6 可知，兩站之主波向絕大部分為西南來向，其中彌陀浮標於 7 月 22 日 4 時~23 日 22 時有許多西北來向的主波向，原因是受烟花颱風影響，較強的西北風引起波浪所致，而同期間小型近岸 GNSS 浮標的主波向轉向較不明顯，應是受近岸地形影響所致。綜上所述，可知小型近岸 GNSS 浮標觀測之波浪統計資料皆為正確。

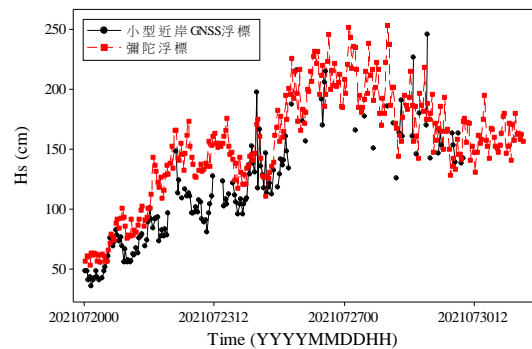


圖 4 小型近岸 GNSS 浮標示性波高比較圖

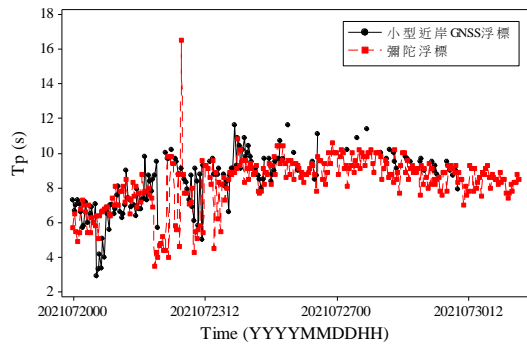


圖 5 小型近岸 GNSS 浮標尖峰週期比較圖

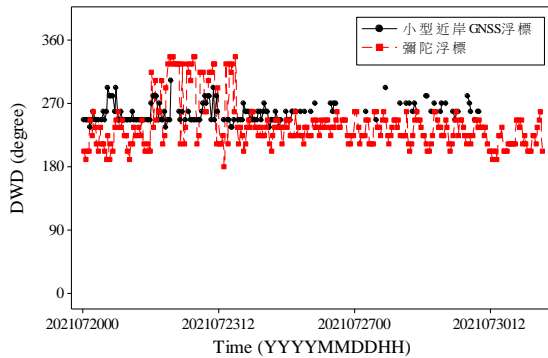


圖 6 小型近岸 GNSS 浮標主波向比較圖

### 3.3 近岸碎波觀測

在近岸的碎波影響流速變化，對於遊憩安全與漂砂運移均有影響，本研究開發小型近岸 GNSS 浮標之隨波性良好，且能觀測瞬時的運動速度，其運動速度可視為水粒子運動速度。本研究先以每小時觀測的平均週期與水深計算波長，並計算波浪相速，再從每小時觀測 10 min 的 1,200 點數據中，計算最大運動速度，結果顯示於圖 7 上圖。另外，又將該 1,200 點之數據逐一與波浪相速比較，找出運動速度大於波浪相速的點數，並計算比例，結果顯示於圖 7 下圖。從圖 7 上圖發現，從 7 月 22 起的逐時資料中，水粒子最大運動速度偶有大於波浪相速，而於 7 月 25 日下午至 30 日上午期間，水粒子最大運動速度幾乎皆大於波浪相速。此外，從圖 7 下圖亦可看出，於 7 月 25 日下午至 30 日期間，運動速度大於波浪相速的比例較高，顯示發生碎波較頻繁，其原因應是該期間與海域受烟花颱風影響，先是吹拂較強的西北風，待颱風遠離後又引起西南風與西南

氣流，使得觀測處波浪發生變化。上述討論顯示出小型近岸 GNSS 浮標除能觀測一般的波浪統計值之外，亦能觀測碎波。

為觀察近岸碎波引起流速變化現象，分析 7 月 5 日至 30 日期間的流速資料如圖 8，圖 8 上與下圖分別為小型近岸 GNSS 浮標觀測與濾除潮流成分之流速。圖 8 上圖為海面下方約 1.5 m 處的流矢圖，從該圖發現，7 月 24 日以前的流速多為北北東向與南南西向，整體有明顯半日潮流的特徵，但偏南南西向的海流較明顯，漲退潮流速大多在 20 cm/s 左右，但 7 月 25 日之後，流速明顯增加達約 70 cm/s，流向多為北北西向、北向及北北東向，可能原因為當時浪高變大，於量測位置處形成碎波，造成較強的往北沿岸流。

為探討其原因，使用 Ren-Chieh Lien 所撰寫 LPASS 程式(Lien et al., 2014)，將 1 小時 1 筆的海流資料運用 Butterworth filter 低通濾波的方法過濾，截止頻率為 1/36，結果如圖 8 下圖所示。可以發現平時 7 月 5 ~ 24 日浪高較小時，除了潮流外，還有流速約 15 cm/s 左右、流向為南南西向的沿岸流。但是當 7 月 25 日以後，有一股流速最高接近 40 cm/s 的流速，流向往北的沿岸流。對照圖 7 下圖，於 7 月 24 日以前幾乎無碎波發生，而 7 月 25 日以後碎波發生較頻繁，可知沿岸流的變化與碎波明顯有相關。

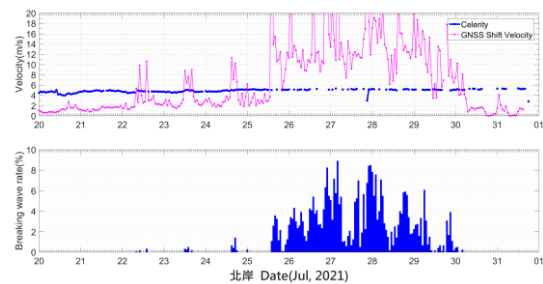


圖 7 小型近岸 GNSS 浮標速度(上)與碎波點數比例(下)圖

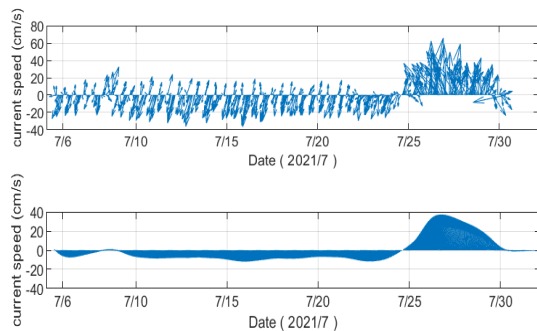


圖 8 小型近岸 GNSS 浮標觀測(上)與濾除潮流成分(下)之流速變化圖

#### 四、結論

本研究同步呈現本團隊研發離岸 GNSS 浮標與小型近岸 GNSS 浮標成果，並分析兩者的實驗與現場觀測資料，獲得下述結論：

1. 離岸型 GNSS 量測波浪運動波形、波高與週期之效果良好。
2. 小型近岸 GNSS 浮標觀測之波浪統計資料皆為正確，且能觀測碎波。
3. 小型近岸 GNSS 浮標觀測到沿岸流的變化與碎波明顯有相關。

#### 謝誌

本論文採用之小型近岸 GNSS 浮標資料係 2021 年經濟部水利署第六河川局「黃金海岸漂砂自動化觀測」計畫之部分觀測成果，而經濟部水利署彌陀浮標觀測資料係從交通部中央氣象局網頁取得，謹向上述單位致謝。

#### 參考文獻

1. Brown, A., et al. (2018) Kinematics and statistics of breaking waves observed using SWIFT buoys, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 44(4), 1011-1023.
2. Choy, S., Kuckartz, J., Dempster, A.G., Rizo, C. (2017) GNSS satellite-based augmentation systems for Australia, *GPS Solut*, 21, 835-848. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0569-2>.
3. Dawidowicz, K. (2014) Sea level changes monitoring using GNSS technology – a review of recent efforts, *Acta Adriatica*, 55(2), 145-161.
4. Gemrich, J.R., Farmer, D.M. (1999) Observations

- of the scale and occurrence of breaking surface waves, *J. Phys. Oceanogr*, 29, 2595-2606.
5. He, K. (2015) *GNSS kinematic position and velocity determination for airborne gravimetry*, Technische Universitaet Berlin (Germany), Potsdam, Germany, ISSN 2190-7110.
  6. Hollos, S. and Hollos, J.R. (2014) *Recursive digital filters: A concise guide*, Abrazol Publishing.
  7. Kuo, C.Y., Chiu, K.W., Chiang, K.W., Cheng, K.C., Lin, L.C., Tseng, H.Z., Chu, F.Y., Lan, W.H., and Lin, H.T. (2012) High-frequency sea level variations observed by gps buoys using precise point positioning technique, *Terr. Atmos. Ocean. Sci*, 23, 209-218.
  8. Lien, R.-C., Ma, B., Cheng, Y.-H., Ho, C.-R., Qiu, B., Lee, C.M., and Chang, M.-H. (2014) Modulation of Kuroshio transport by mesoscale eddies at the Luzon Strait entrance, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, 2129-2142.
  9. Lin, Y.-P., Huang, C.-J., Chen, S.-H., Doong, D.-J., and Kao, C.C. (2017) Development of a GNSS buoy for monitoring water surface elevations in estuaries and coastal areas, *Sensors*, 17, 172, doi:10.3390/s17010172.
  10. Lin, Y.-P., Huang, C.-J., and Chen, S.-H. (2020) Variations in directional wave parameters obtained from data measured using a GNSS buoy, *Ocean Engineering*, 209, 107513.
  11. Longuet-Higgins, M.S. and Smith, N.D. (1983) Measurement of breaking waves by a surface jump meter, *J. Geophys. Res.*, vol. 88, no. C14, 9823-9831.
  12. Sinclair, A. (2014) FlowRider: A lagrangian float to measure 3-D dynamics of plunging breakers in the surf zone, *J. Coastal Res.*, vol. 293, 205-209.
  13. Thomson, J. (2012) Wave breaking dissipation observed with “SWIFT” drifters, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 29, no. 12, 1866-1882.

# 相位陣列海洋雷達合成海流之初步探討

陳少華<sup>1</sup> 程嘉彥<sup>2</sup> 徐堂家<sup>3</sup> 黃郁軒<sup>1</sup> 陳世明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心助理研究員

<sup>2</sup>財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心副研究員

<sup>3</sup>財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心助理工程師

## 摘要

本研究使用台灣海洋科技研究中心建置於台灣南部屏東墾丁站陣列海洋雷達與附近鄰近 CODAR 長距離後灣(HOWN)及旭海站(SUHI)，標準型香蕉灣(BABY)、貓鼻頭(MABT)、及南灣站(NAWN)，以兩種不同型式雷達同時使用方向辨識法求得徑向海流資料，以最小平方方法(Least-Squares methods)進行初步海流合成測試作業，並與中央氣象局表面海流預報模式(OCM3)進行比對，平均相關係數不論有否加入陣列資料進入合成，都呈中高度相關(0.485-0.624)，加入陣列雷達資料後的合成海流與模式的相關係數除 C2 及 D2 南北向海流較低之外，其餘全都高於未加入陣列站的合成海流資料。

關鍵詞：高頻雷達、最小平方方法、陣列雷達、方向辨識法

## Preliminary results of Phased Array Radar-Derived Surface Currents Using Least-Square Method

Shao-Hua Chen\* Chia-Yan Cheng Tony Hsu Yu-Hsuan Huang Chen Shih Ming

\* Assistant Researcher, Taiwan Ocean Research Institute

## ABSTRACT

This study try to different types of radars use the same direction finding method to obtain radial data, and mapping surface currents from Phased Array Radar(KNTN) and CODAR (HOWN, SUHI, BABY, MABT, NAWN) radial velocity using Least-square Method. The preliminary result present the average correlation coefficient of east-west velocity between model's and radar's data (combine site include KNTN) are all higher than between model's data and radar (not combine with KNTN site). The correlation coefficient of east-west and north-south velocity between model's and radar data is between 0.485-0.624.

Keywords: HF; Least-Squares methods; Phased Array Radar; Direction Finding

## 一、前言

為了解台灣周遭海域表面海流時空變化，國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心(下稱海洋中心)於 2009 起建置台灣周遭海域岸基海洋雷達系統(楊

等人, 2010)，此系統採用美國 CODAR 公司所研發的海洋雷達系統，系統天線配置簡單，通常為單支接收天線及單支發射天線組成，兩天線間隔需至少一個雷達波長，所需用地小，但因此系統為私人公司建置，硬體組成及海面參數演算部分礙於商業機密，無

法完整了解海洋雷達海面參數演算過程。

為建置呂宋海峽海洋雷達觀測網，海洋中心與夏威夷大學進行雷達硬體架設技術合作，在 2019 年於恆春貓鼻頭建置完成第一組相位陣列海洋雷達系統（賴等人，2019），此系統天線配置方式為 4 支發射天線排列成矩形陣，發射陣間距長為雷達波長的一半，寬為雷達波長的 1/4，接收天線配置根據 Gurgal et al.(1999)及 Kirincich et al.(2019)採用修正過的 3\*3 矩形天線陣，其中角落一支天線不使用，矩形之對角線長度略小於 1/2 雷達波長，接收天線及發射天線距離需距 10 個雷達波長以上以減低直接波干擾(Kirincich et al.,2019)。

陣列海洋雷達海面參數演算部分和美國伍茲霍爾海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution)合作，使用 Kirincich (2017a,b)圖像處理技術方法分辨頻譜中的一階峰能量(Barrick,1972)，藉由流體運動產生的都卜勒頻移（Doppler Shift）獲取表面海流徑向速度(Crombie, 1955 及 Barrick et al.,1977)，並使用 Kirincich (2019)以 MATLAB 撰寫之開源程式以方向辨識法(Direction Finding, DF)取得海面目標物徑向海流訊號來向方位（Barrick and Lipa,1999）。

並為獲取此海域真實海流狀態，使用已架設完成之陣列海洋雷達與其鄰近之 codar 雷達系統，以兩種不同型式雷達同時使用方向辨識法求得徑向海流資料，以最小平方方法(Least-Squares methods)進行初步海流合成測試作業(Lipa and Barrick,1983 及 Kim et al.,2007)。

## 二、研究方法

### 2.1 海流合成方法

本文資料分析方法為使用已知觀測徑向海流資料利用最小平方方法估算未知的合成海流。假設合成海流網格點位置 $(x_k, y_k)$ ，在其搜索半徑 $(d_0)$ 內所有的徑向海流資料和合成海流分量線性關係式如下：

$$r = G_a u + n_a \quad (1)$$

$$G_a = \begin{bmatrix} g_1^T \\ g_2^T \\ \vdots \\ g_L^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ \cos \theta_L & \sin \theta_L \end{bmatrix}, r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_L \end{bmatrix}$$

其中  $u$  為 $(2 \times 1)$ 的合成海流矩陣， $r$  為一維的徑向速度 $(r, L \times 1)$ ， $L$ 為搜索半徑內所有徑向海流的數量， $G_a$ 為合成海流投射在徑向海流分量的角度矩陣 $(G_a, L \times 2)$ ， $\theta_i$ 表徑向雷達第  $i$  個網格點位 $(x_i, y_i)$ 由東起逆時針轉的角度(如圖 1 示意圖)， $n_a$ 為合成海流擬和時的殘差。

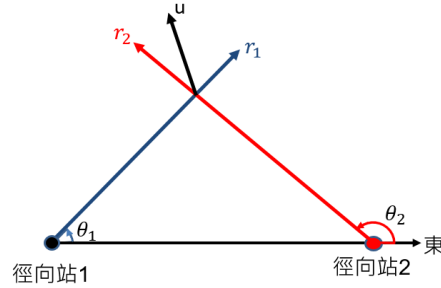


圖 1、示意圖

未知的合成海流  $u$  和雷達觀測出的徑向海流  $r$ ，最小平方方法(殘差 $n_a$ 為最小)，估算出合成海流的方程式如下：

$$u = (G_a^T G_a)^{-1} G_a^T r \quad (2)$$

本區域使用 4 公里格網(圖 2 黑點)進行合成海流作業，搜索合成網格點為圓心(如圖 2 黑粗點)半徑 6 公里範圍內(圖 2 橘圈)的徑向海流資料納入此格點計算合成海流，紅點和藍點表 codar 標準型站香蕉灣(BABY)站及貓鼻頭(MABT)站點的徑向海流資料網格點，並將各站徑向交角設定於 30-150 度內，最大流速閥值設定為 280cm/s。

初步以 2020 年 6 月 30 日-7 月 1 日 3 天資料，站點使用 CODAR 長距離站後灣(HOWN)及旭海(SUHI)，CODAR 標準型站香蕉灣(BABY)、貓鼻頭(MABT)、南灣(NAWN)及陣列墾丁站(KNTN)合成平面海流，合成海流資料如圖 3，詳細合成使用雷達站點資料如表 1。



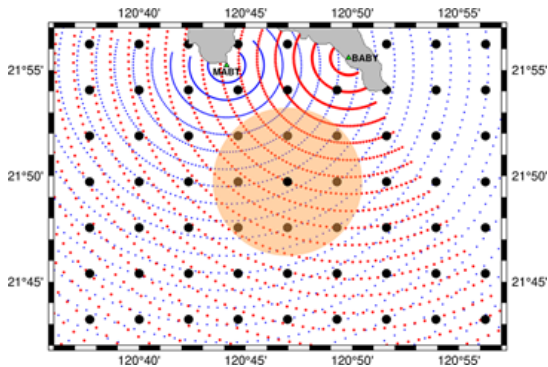


圖 2、合成海流示意圖，徑向網格點(紅及藍)、合成海流(黑)網格點及搜索半徑範圍圓(橘)

表 1 合成海流使用之海洋雷達站點資訊

合成站點	長距離		標準型			陣列
	後灣	旭海	貓鼻頭	南灣	香蕉灣	墾丁
	HOWN	SUHI	MABT	NAWN	BABY	
頻率 (MHz)	4.58		13.46	24.3	13.425	7.8125
頻寬 (kHz)	40		100	200	100	50
距離解析度 (km)	3.707		1.5	0.745	1.483	3
掃描率 (Hz)	1		2	4	2	2.198
徑向資料收集時間	94.13 分鐘		95 分鐘			59 分鐘

## 2.2 CODAR 雷達系統

海洋中心於台灣沿海架設 CODAR 長距離型雷達系統，為涵蓋台灣南端岬角，在 2010 年於墾丁貓鼻頭(MABT)及香蕉灣站(BABY)架設兩座標準型 codar 雷達系統（接收發射整合於一隻天線），並於 2014 年為提供更完整區域遊憩安全海表面參數資訊，遂於南灣汙水處理站增加了南灣(NAWN)標準型站，對於南灣區域海域提供更細膩的海流觀測資料。

CODAR 雷達系統訊號處理過程為原始電壓資料(Time Series Data, TS)，長距離型雷達資料收集時間為 1024 秒，每秒 1 次啁啾波 (chirp)，經過一次快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)，藉由變頻頻率差值轉換成距離單元資料(Rnge Series Data, RS)，在經過第二次快速傅立葉轉換產出相關能譜資料(Cross Spectrum File, CSQ)，藉由平均兩個頻譜濾

除雜訊及船艦訊號，產出平均頻譜資料(Short Time Cross Spectrum, CSS)，再由整點前後時間共 3 筆頻譜資料平均，每小時產出一筆資料收集時間約為 95 分鐘平均的徑向海流資料，由一階峰判別出海流參數，藉由流體運動都普勒頻偏計算出徑向流速大小；訊號來向以多重訊號解析法(Multiple Signal Classification, MUSIC) (Lipa and Barick et al., 1983, Lipa et al., 2006, de Paolo et al., 2007)，此演算法藉由各天線接收到的電壓值經過二次傅立葉計算能譜，建構出共變異矩陣(covariance matrix)，經由特徵值分解，透過特徵向量定義訊號子空間及雜訊子空間，兩者呈正交關係，而獲得目標物的方位資訊。

以 CODAR 雷達系統而言，頂端鞭形天線偵測全方位，半圓形天線內部設置兩相互垂直的天線，3 共位天線接收每個方位角（可設置為 1 度、2 度及 5 度）的相位與振幅資料，並採用實際量測的場型資料判別訊號來向方位，最後產出以測站為圓心，根據頻寬大小決定距離單元（如表 1），產出每一距離單元(圓半徑)往外擴散的同心圓資料，也就是徑向海流資料(Radial Velocity Data, RUV)，如圖 2 紅點及藍點，圓弧觀測範圍會因當地海岸線限制及磁環境干擾而縮小。

## 2.3 相位陣列海洋雷達系統

相位陣列海洋雷達採用夏威夷大學 Pierre Flament 教授所研發之陣列式海洋雷達(Flament et al., 2016)，可依照接收天線陣列排列的改變，變更方位辨別演算法，一般線性陣接收天線群排列使用波束成形演算法(Beam Forming, BF)，此方法為藉由不同天線接收訊號時間不同的相位差異，求得海流方位資訊，優點為提供更準確的目標方位及波浪資訊。而若天線排列成方陣則可使用方向辨識演算法(DF)，海洋中心墾丁站接收天線使用方陣排列(25\*25 公尺)，演算法採用方向辨識法(DF)中的多重訊號分類(MUSIC)套用理想場型資料 (Ideal Pattern) 分辨雷達波到達方位。

相位陣列海洋雷達資料處理程序為原始電壓資料收集 3540 秒，單一啁啾波持續時間為 0.455 秒，每秒 2.198 次，同樣經過第 1 次快速傅立葉轉換求得距離單元資料，每個資料收集時間 (3540 秒)，皆為獨立並未與相鄰時間進行平均或圓滑作業 (Kirincich et al., 2019)。並在此收集區間，分割成 6 組

Doppler Bins 為 2048，重複時間 50%的資料，進行第 2 次快速傅立葉轉換成平均互能譜及自能譜，藉此建構出共變異矩陣，以多重訊號分類法(MUSIC)解算出速度及方位角，並使用 Kirincich et al. (2012) 所提出的徑向品管方法，最後產出空間平均的徑向海流資料。

## 2.4 中央氣象局表面海流模式

中央氣象局表面海流預報模式 OCM([https://ocean.cwb.gov.tw/V2/data\\_interface/datasets](https://ocean.cwb.gov.tw/V2/data_interface/datasets))，(于等人, 2011)，使用 SCHISM(Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model) (Zhang et al., 2016) 進行架構，空間解析度為 0.025 度  $\times$  0.025 度，每日進行 97 小時預報作業，每小時產出包含流速、流向、海表溫度、潮位及鹽度資料。

本研究使用此模式資料，擷取北緯 21.5-21.875 度及東經 120.5-121.05 度流速及流向資料，如圖 3 範圍所示。

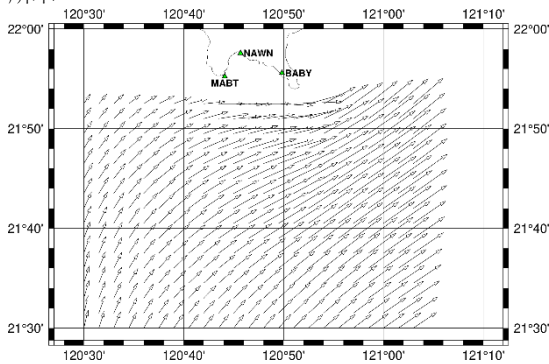


圖 3 本研究採用之中央氣象局 OCM 模式範圍

## 三、結果與討論

本研究以 2020 年 6 月 30 日-7 月 1 日 3 天徑向海流資料(使用站點如表 1)以最小平方方法進行合成海流作業，並分別產出加入與未加入陣列墾丁站的合成海流資料(如圖 4，紅、藍色箭矢表納入及未納入 KNTN 合成結果)，選取 8 個合成格點位置(如圖 5 黑點，A1-D1，A2-D2)與最靠近合成格點位置(圖 5 綠點)的中央氣象局表面海流預測模式格點資料比對。

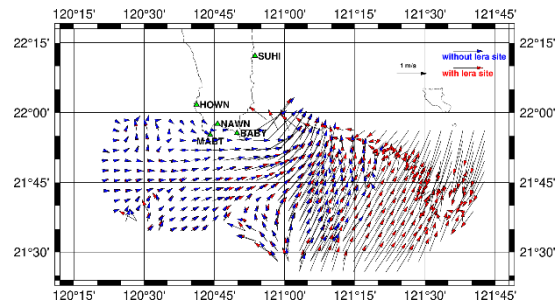


圖 4-2020 年 6 月 30 日-7 月 1 日 3 天平均合成海流圖，陣列雷達站位置與標準型貓鼻頭站(MABT)相同，其中藍色箭頭表示未加入陣列雷達合成結果，紅色箭頭表有加入陣列雷達合成結果

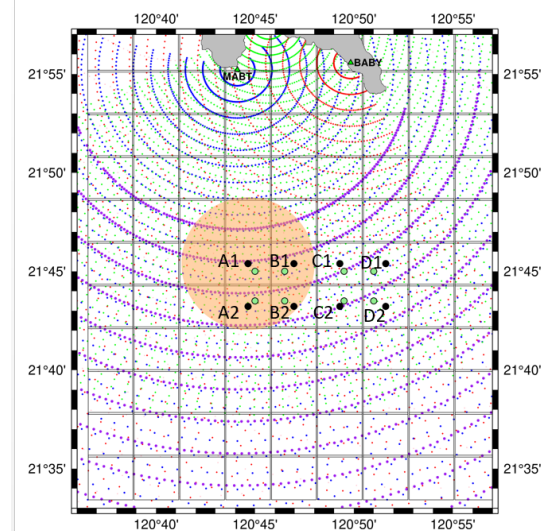


圖 5、合成海流 4 公里網格選取 8 點(黑點)與模式格點(綠)，橘圈表合成網格 A1 搜索半徑(6 公里)範圍。

圖 5 紫、綠、紅、藍點分別表示陣列雷達(KNTN)、CODAR 南灣(NAWN)、香蕉灣(BABY)及貓鼻頭(MABT)徑向資料產出格點，由圖 5 合成網格點 A1 其搜索半徑範圍(6km)內徑向海流速度進行合成，如圖 5 橘圈所示，分別合成鄰近 CODAR 雷達點與納入及未納入陣列(圖 5 紫點)的海流資料，與最靠近合成格網點的模式海流資料(圖 5 綠點)進行相關係數計算，計算方程式如式(3)，其中  $x$  為合成海流資料， $\bar{x}$  為此時間區間平均合成海流資料， $y$  為模式資料， $\bar{y}$  為此時間區間平均模式海流資料。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

A1 及 D1 點位比對結果如圖 6 左與右，陣列雷達加入合成後，東西向海流流速增加，與模式相關性也增加，A1 東西向相關係數由 0.764 增加至 0.806，A1 南北向相關係數由 0.343 增至 0.370；D1 東西向相關係數由 0.204 增加至 0.409，D1 南北向相關係數由 0.512 增至 0.559。

合成海流與模式資料相關係數整理如表 2，整體而言墾丁陣列雷達站加入合成行列後與模式對比的相關係數除了 C2 及 D2 南北向海流之外，不論南北向及東西向皆為增加的趨勢，東西向海流與模式比對由西向東相關係數漸漸遞減，但南北向海流越往東移其相關係數慢慢增加。東西向平均相關係數為 0.624(有陣列)、0.488(無陣列)，南北向平均相關係數為 0.529(有陣列)、0.473(無陣列)，雷達合成海流資料與模式資料呈現中高度相關關係。

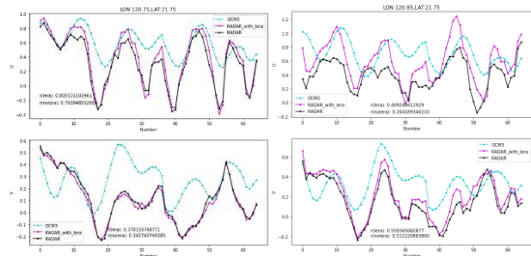


圖 6、(左)A1 點、(右)D1 點無陣列之合成海流(黑)、有陣列合成海流(紫)與模式時序資料(藍)東西向(左右上)及南北向(左右下)時間序列圖，縱軸為速度(m/s)，橫軸為時間

表 2、合成海流格點與模式比對相關係數表

合成海流與模式比對之相關係數				
點位	陣列加入		無陣列加入	
	東西向	南北向	東西向	南北向
A1	0.806	0.370	0.764	0.343
B1	0.666	0.386	0.605	0.369
C1	0.495	0.438	0.380	0.436
D1	0.409	0.559	0.204	0.512
A2	0.814	0.506	0.762	0.477
B2	0.778	0.542	0.697	0.541
C2	0.402	0.613	0.290	0.630

D2	0.190	0.696	0.090	0.679
平均	<b>0.624</b>	<b>0.485</b>	<b>0.529</b>	<b>0.473</b>

本文所選取分析的合成網格點位僅為貓鼻頭、香蕉灣及南灣 3 站標準型 CODAR 雷達徑向資料，納入或不納入陣列墾丁站所計算合成，陣列墾丁站位置緊鄰 CODAR 標準型貓鼻站點，陣列墾丁站使用 7.8125MHz 頻段，距離解析度為 3 公里，貓鼻站使用 13.46MHz 頻段，距離解析度為 1.5 公里，兩者產出的徑向海流資料格點近乎一致，如圖 5 藍點貓鼻頭站，紫點陣列墾丁站，但分別代表不同深度及不同波長的波浪，海流有效深度根據 Stewart and Joy(1974)，以式(4)計算， $\lambda$ 表雷達波長，貓鼻頭雷達波長為 22.29 米，所量測布拉格波長為 11.14 米，深度為 0.89 米，墾丁陣列雷達波長為 38.4 米，所量測布拉格波長為 19.2 米，深度為 1.53 米，合成海流計算加入陣列墾丁站，增加不同波長的波浪回波，這可能為東西向及南北向海流加入陣列站合成後流速增加的原因。

$$d = \frac{\lambda}{8\pi} \quad (4)$$

#### 四、結論

海洋中心初步使用墾丁陣列雷達站及鄰近 CODAR 站點以最小平方方法進行合成海流作業，並與氣象局海流預測模式進行比對，平均相關係數不論有否加入陣列資料進入合成，都呈中高度相關(0.485-0.624)，加入陣列雷達資料後的合成海流與模式的相關係數除 C2 及 D2 南北向海流較低之外，其餘全都高於未加入陣列站的合成海流資料。

後續將收集長期資料進行此區域海流合成探討，並加入實測資料如定點錨定都普勒流剖儀及漂流浮標資料進行比對，分析此區域加入相位陣列海洋雷達進行合成後對海流觀測的影響。

#### 謝誌

本研究在科技部資助財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心之「海洋科技發展計畫」下推展，特此感謝。另感謝國家海洋研究院楊文昌主任及賴堅戌博士為海洋中心海洋雷達奠定基礎，並感謝夏威夷大學 Pierre Flament 教授、中央大學錢樺老師實驗室及博士生陶瑞全提供陣列雷達資料相關

程式及技術合作與支援。

## 參考文獻

1. 楊文昌、梁恩昱、王雅真、陳少華、胡建驊、李俊賢(2010) 「利用高頻雷達監測台灣四周海域表層海流」,第32屆海洋工程研討會論文集,彙編頁碼:683-688。
2. 賴堅戊、林昆毅、蕭毓宏、黃郁軒、徐堂家、楊文榮、呂宜潔(2019) 「北側呂宋海峽遙測實驗平台建置」,108年天氣分析與預報研討會,彙編頁碼:A5-131。
3. 于嘉順、尤皓正、江朕榮、陳琬婷、朱啟豪、滕春慈(2011) 「台灣海峽及鄰近海域高解析度潮流與海流模式之發展」,中央氣象局建國百年天氣分析預報與地震研討會,彙編頁碼:519-524。
4. Barrick, D. E.,(1972)First-order theory and analysis of MF/HF/ VHF scatter from the sea.,*IEEE Trans. Antennas Propag.*, 20, pp. 2-10.
5. —, Evans, M.W. and Weber, B.L. (1977) Ocean surface currents mapped by radar,” *Science*, 198, pp. 138-144.
6. —, and B. J. Lipa,(1999)Radar angle determination with MUSIC direction finding. *U.S. Patent 5 990 834*, 12 pp.
7. Crombie, D. (1955) Doppler spectrum of the sea echo at 13.56 Mc/s, *Nature*, Vol. 175, pp. 681-682.
8. de Paolo, T., and E. Terrill,(2007) Skill assessment of resolving ocean surface current structure using compact-antenna-style HF radar and the MUSIC direction-finding algorithm. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 24, 1277-1300
9. Flament, P., Harris, D., Flament, M., Fernandez, I. Q., Hlivak, M., Flores, X., et al. (2016). A Compact High Frequency Doppler Radio Scatterometer for Coastal Oceanography. Washington, DC: *American Geophysical Union*.
10. Gurgel, K.-W., G. Antonischki, H.-H. Essen, and T. Schlick, (1999)Wellen Radar (WERA): A new ground-wave HF radar for ocean remote sensing. *Coastal Eng.*, 37, 219-234
11. Kim, S. Y., E. J. Terrill, and B. D. Cornuelle, (2008) Mapping surface currents from HF radar radial velocity measurements using optimal interpolation., *J. Geophys. Res.*, 113, C10023
12. Kirincich, A.,(2017a) HFR\_DP developer package. Woods Hole Oceanographic Institution, *WoodsHole*, <https://github.com/akirincich/imageFOLs>
13. —, (2017b)Improved detection of the first-order region for direction-finding HF radars using image processing techniques. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 34, 1679-1691
14. —, (2019) LERA HF radar developer package. *Woods Hole Oceanographic Institution*, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3353662>.
15. —, T. de Paolo, and E. Terrill, (2012) Improving HF radar estimates of surface currents using signal quality metrics, with application to the MVCO high-resolution radar system. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 29, 1377-1390.
16. Lipa, B., Barrick, D.E.,(1983)Least-Square methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: Application at ARSLOE, *IEEE J. Oceanic Engineering*, Vol. OE-8, pp. 226-253.
17. —, B. Nyden, D. S. Ullman, and E. Terrill, (2006) SeaSonde radial velocities: Derivation and internal consistency. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 31, 850-861
18. Stewart, R.H. and Joy, J.W. (1974) HF radar measurement of surface current, *Deep-Sea Res.*, 21, pp. 1039-1049.
19. Zhang, Y., Ye, F., Stanev, E.V., Grashorn, S. (2016) Seamless cross-scale modeling with SCHISM, *Ocean Modelling*, 102, 64-81.

# 近岸海域水質連續監測與異常警報設計

陳觀印<sup>1</sup> 鄭安<sup>1</sup> 錢樺<sup>2\*</sup> 林源煜<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立中央大學水文與海洋科學研究所研究生

<sup>2</sup> 國立中央大學水文與海洋科學研究所教授

<sup>3</sup> 國立中央大學大氣科學學系大專生

## 摘要

本研究使用自計式水質連續監測儀，在單一測定參數精度(如酸鹼值)有限的情況下，透過參數間相關性分析取得環境背景值特性，並討論對近岸水體環境進行環境水質即時監測之可行性。本研究使用兩個地點(大鵬灣：潟湖、大潭藻礁：近岸海域)的水質資料進行分析，根據不同的水域環境，釐清區域水質受到影響的機制。通過 Hovmöller 圖、自相關分析以及傅立葉變換等數學統計方法，發現封閉式水域的水質主要受到日照週期的影響，而開放水域除日照週期外還會受到潮汐的影響。此外，本研究建立水質事件的異常指數，此指數提供連續監測站判斷事件的依據，透過連續監測的特性，不以單純的數值標準判斷，而是從時序變化中找出異常的變化並給予分數，從而判斷水體的狀況，對於未來河川口或者近岸海域的連續性監測提供參考的指標。

關鍵詞: 水質連續監測、潮汐、異常指標

## Continuous Water Quality Monitoring and Abnormal Alert Design for Nearshore Waters

Kuan-Yin Chen An Cheng Hwa Chien\* Yuan Yu Lim

\*Professor, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

## ABSTRACT

The purpose of this study is to use a self-calculating water quality monitor to obtain the characteristics of environmental background values through inter-parameter correlation analysis. We discuss the possibility of real-time monitoring of environmental water quality in near-shore waters. To consider the limited accuracy of a single measurement parameter (e.g., pH value). This study analyzed water quality data from two sites (Dapeng Bay: lagoon and Daitan Algae Reef: near-shore waters) to understand the mechanisms that influence water quality in the region according to different water environments. By using Hovmöller diagrams, autocorrelation analysis, and Fourier transformations, it was found that water quality in closed waters is mainly influenced by the insolation cycle, while in open waters it is influenced by tides in addition to the insolation cycle. Moreover, this study establishes an abnormal alert index for water quality events, which provides a basis for judging events at continuous monitoring stations. Through the characteristics of continuous monitoring, instead of determining by simple numerical criteria, abnormal changes are identified and scored from time-series changes to assess the condition of water bodies and provide a reference indicator for continuous monitoring of river mouths or near-shore waters in the future.

Keywords: Continuous water quality monitoring ; tides ; anomaly indicators

## 一、前言

水質，影響著人民的健康、生態環境的永續發展與海洋的環境保護，環境水質監測成為目前重要的議題之一。然而，近岸水質受到環境影響的機制和河川不同，接近出海口的地區除受到河川匯流的人為活動影響，亦會受到潮汐、波浪等作用影響其水質參數，這些影響先前鮮少有研究對其進行長期量化以及參數之間的關係，所以累積觀測數據並分析不同地區的水質週期特性為重要的前置作業。在科技高速的發展下，各式的採樣儀器已被廣泛運用在不同領域，水質監測也有自動連續採樣儀，透過連續性的水質監測協助釐清各水質參數的特性，並在不同時間尺度上進行水質參數分析，使得短時間尺度的日循環變化、長時間尺度的季節性變化均可被量化。國外先前已經有過相關的研究，根據 Fortune, J. and Muraud, N. (2015) 在達爾文港灣內針對潮汐對該區域水質的影響進行研究顯示，所測量的水質參數在大潮(Spring Tide)及小潮(Neap Tide)期間，pH 值、導電度(electrical conductivity, EC)、渾濁度(Turbidity)，有顯著相關；光學溶氧量(dissolved oxygen, DO)，在潮汐轉換時較顯著；葉綠素  $\alpha$ ，部分受到潮汐影響，同時受日照週期震盪；而潮汐對溫度之影響較不明顯。

本研究目的在於釐清各水質參數的特性，瞭解短時間尺度的日循環變化，並即時監測區域是否遭受突發的環境事件或人為汙染。然而，本研究使用之連續觀測水質儀的最大限制，除在硬體上面有限的測量項目，也無法像傳統水質監測採取人力檢驗的大腸桿菌、重金屬等項目，其中電極測量參數的解析度、敏感度、以及隨時間的氧化、生物附著等問題造成測量數據的偏移。為排除這些可能的誤差，分析資料前須經過一系列的品管程序，才能將其視作可供分析、比對的資料。

## 二、實驗設置

### 2.1 實驗站點

本研究區域有兩處(圖 1)，一處位於桃園市新屋區，主要為桃園海域的出海口，屬於開放海域，附近並有大堀溪、新屋溪入海，受到潮汐、波浪、潮流及河川等影響其水質。另一半封閉式海域站，大

鵬灣測站，位於屏東縣東港鎮，為一單口囊狀潟湖，面積達 532 公頃，由於此潟湖僅有一對外出口連接外海，並且無河川流入，造成其中水體交換率偏低。桃園海域水質監測透過 YSI EXO2 Sonde 安裝於錨定式浮標上(25° 1'32.58"N, 121° 1'32.70"E)，觀測期間於(2020/7/17-2020/8/3)觀測項目包含水溫、PH 值、溶氧量、鹽度、氧化還原電位、濁度、葉綠素、藻紅蛋白等水質參數，而大鵬灣(2004/7/19-2004/7/27)觀測項目僅水溫、PH 值、溶氧及濁度，觀測數據每半小時自動記錄一筆。

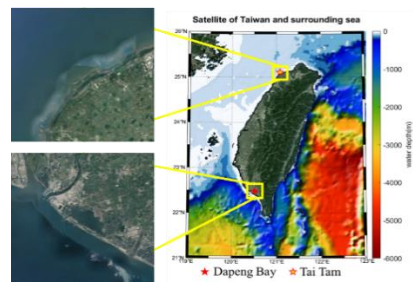


圖 1(左上)桃園海域的出海口水質測站地圖(左下)大鵬灣水質測站地圖(右)測站於台灣相對位置

### 2.2 數據 Qc/Qa

在大鵬灣的觀測數據中，因儀器於下水前與結束時的收回期間皆有持續觀測，其資料量測到空氣中的數據，故將此期間的觀測數據移除，剩餘數據納入分析(圖 2)；在桃園海域測站的觀測數據中，同樣有下水前的數據需移除，儀器另有紀錄異常欄位，將異常欄位剔除後剩餘數據納入分析(圖 3)，大鵬灣因早期設備限制採用電瓶供電，使得觀測數據僅持續一個禮拜，而在大潭藻礁觀測站部分加入太陽能供電系統，電壓穩定並可獲得整個月的觀測數據。

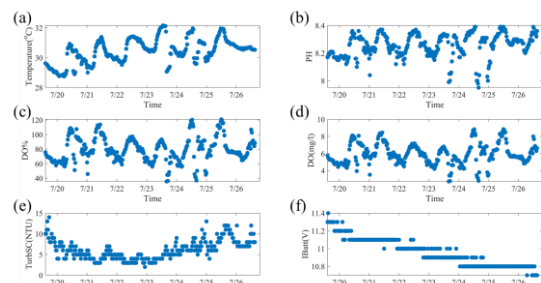


圖 2 大鵬灣各項水質參數，(a)水溫、(b)PH 值、(c)溶氧量飽和度 DO(%)、(d)溶氧量 DO、(e)濁度及(f)儀器電壓

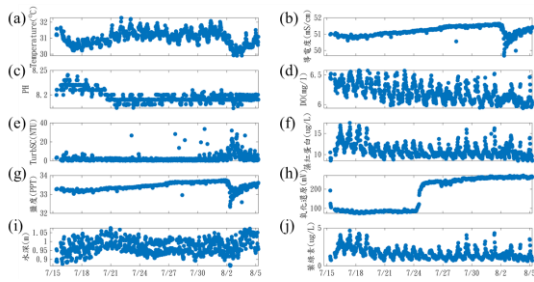


圖 3 大潭電廠(2020)各項水質參數，從圖左上至下分別為(a)水溫、(b)導電度、(c)PH、(d)DO、(e)濁度、(f)藻紅蛋白、(g)鹽度、(h)氧化還原電位、(i)水深資料以及(j)葉綠素

### 2.3 分析方法

本次研究應用自相關函數，將時序參數進行自相關分析，得到參數對時間遞延的自相關性，以此判斷參數受到何種自然機制影響；除此之外我們運用 Hovmöller 圖的繪圖技巧，將單一參數時間序列繪製成 y 軸小時序列並將 x 軸作為日期序列，我們還將各水質參數每日的最高值訂為 1，最低值訂為 0，以二維圖的方式找出水質參數隨時間的特性，觀察時間上資料的週期變化情形；最後應用單一參數時間序列進行快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT)，得到 x 軸頻率及 y 軸能量強度，以此方式找出參數能量最高之震盪頻率。

## 三、結果

### 3.1 半封閉式水域(大鵬灣)

本研究將經過資料品管後的水質參數進行標準化，標準化方法為將各參數的數值減去總體平均值後除上標準差，使其不會受到單位的限制，溶氧量 (DO) 與 PH 值有很高的相關性 ( $R^2=0.76$ )，表明此兩參數之間有著顯著的關聯，而 PH 和 DO 與水溫之間並沒有特別顯著的關聯性 ( $R^2=0.57$ 、 $R^2=0.43$ )，但是在溫度驟降的同時 (7/20 下午、7/23 下午、7/24 下午) (圖 2)，DO 和 PH 值也跟下降而濁度隨之上升，根據當地的氣象資料推測是受到台灣夏季最常發生的午後雷陣雨影響，此外，檢視 DO 和 PH 散點圖時，會發現有些點落在趨勢外，將這些溫度驟降的事件標出後 (圖 4)，發現這些點都是因為午後雷陣雨的影響所造成，這些離散點會造成我們對 DO 和 PH 建立回歸的關係造成很大的錯誤，如圖 4 中 PH 和 DO 的關係像線性回歸方程式，若排除溫度驟降事

件會發現 DO 和 PH 的關係是成曲線的關係。從以上的水質相關性分析，我們發現在封閉式水域較容易量化各參數之間的關係，其受到的自然機制影響的成分較少 (與海岸比較)，只有發生午後雷陣雨的時候會有離群點。

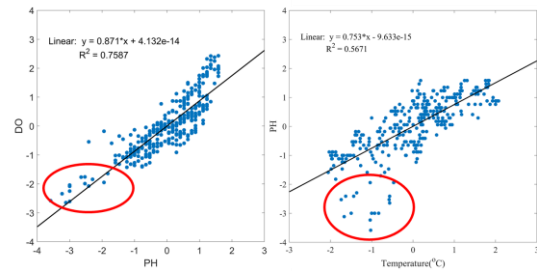


圖 4 大鵬灣測站 DO 與 PH 及溫度和 PH 的關係圖，紅色圈起來的部分代表午後雷陣雨事件

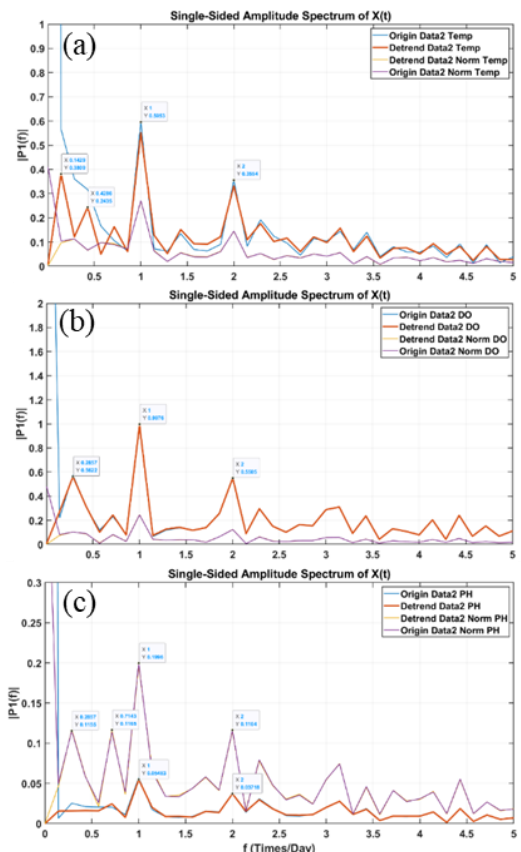


圖 5 大鵬灣測站 FFT 強度頻譜圖，(a)水溫、(b)溶氧量、(c)PH 值，x 軸為強度，y 軸為日頻率，圖中線條顏色：藍-原始數據、橘-原始數據經過 detrend、黃-日正歸化數據經過 detrend、紫-日正歸化數據

我們對各項水質參數進行 FFT(圖 5)，在圖中發現原始(藍)與正歸化(紫)在有明顯低頻訊號，故再 detrend 進行濾波。對於資料差異大的水溫與 DO，原始數據經過 detrend 的強度較為顯著(橘)；資料差異小的 PH，則是正歸化數據經過 detrend 的強度較為顯著(黃)，即便如此日頻率顯示各項結果於 1，即變化週期為一天的強度最強，表明此水體受到日週期的變化影響為主。

### 3.2 開放式水域-大潭電廠

根據 Hovmöller 圖發現桃園海域的開放式水域受到較多自然因素的干擾(如潮汐、日照等)(圖 6 左)，此圖是將小時時間作為 y 軸並將日數作為 x 軸，圖中的顏色是變量的大小，越紅表示數值越大，由於標準化 0-1 的關係，此圖的最大值為 1，受到潮汐作用的影響，海中暖水，一天中的最高溫度甚至會在半夜出現。大鵬灣海域因其屬於封閉式潟湖，溫度變化隨著太陽輻射改變而有所變化，其他水質參數也與水溫的結果雷同，在桃園海域受到多種自然機制的影響，使其水質參數之間的關係較為複雜。

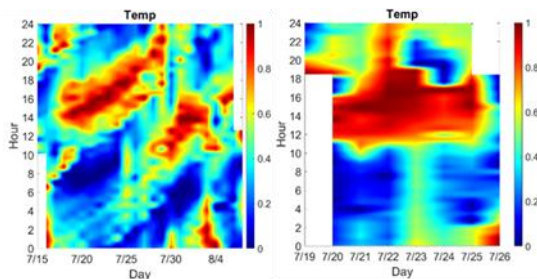


圖 6 水溫 Hovmöller 圖，桃園(左)，大鵬灣(右)

本研究同樣將經過資料品管後的水質參數進行標準化，與大鵬灣的結果相同，溶氧量(DO)與 PH 值較其他參數有好的相關性( $R^2=0.48$ )，而在大潭電廠比起大鵬灣有多幾項觀測項目(葉綠素、藻紅蛋白和鹽度)。其中，葉綠素與藻紅蛋白透過光譜波段量測，因為兩者是表現藻類進行光合作用的參數，使兩者相關性非常高( $R^2=0.95$ )。值得注意的是葉綠素與藻紅蛋白皆和溶氧量與 PH 有一定的關聯性( $R^2=0.48$  左右)，這也間接說明近岸水體的運作機制；隨著溶氧量增加幫助藻類行光合作用，使得葉綠素與藻紅蛋白升高，最後因水中二氧化碳的減少，PH 值升高。而其他水體參數之間的相關性並不高。

圖 6 左顯示每天的最高水溫皆在不同的時間點出現，甚至會出現在半夜，這是由於開放式水體受

到潮汐的影響，潮汐將暖水帶上來導致水溫升高，其影響比太陽輻射的影響還大，然而除了水溫之外，溶氧、PH、葉綠素、藻紅蛋白皆有受到潮汐作用的影響(圖 7)，圖 7 中為不同水質參數的 Hovmöller 圖，明顯看出每日的最高值有一個斜率，且藍色部分也有呈現明顯的斜線，即表明這些水質參數皆受到潮汐的影響，但與水溫又有些微的不同。

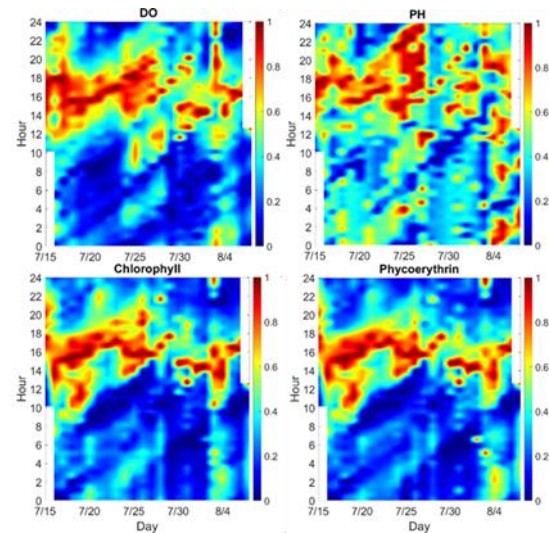


圖 7 桃園開放式海域各水質參數的 Hovmöller 圖，分別為 DO(左上)、PH 值(右上)、葉綠素(左下)、藻紅蛋白(右下)，x 軸為日，y 軸為小時，顏色越紅代表數值越高

為更進一步確認大潭電廠的水體受到潮汐影響的機制，對各項水質參數進行的自相關分析，而在進行自相關分析前，首先提升資料的時間解析度，本研究使用立方雲規的方法，將每 30 分鐘的資料內插成每 3 分鐘一筆的資料，此目的為協助釐清水體參數受到影響的時間週期，如潮汐周期約為 12 小時 25 分鐘，兩個潮汐週期即為 24 小時 50 分鐘，若使用原本的時間解析度(30 分鐘)，可能會導致誤差，經立方雲規(Cspline)的水體參數進行自相關性分析(圖 8)，水溫在 12 小時 15 分鐘跟 24 小時 39 分鐘的時間遞延有著較高的相關性，代表水溫有受到潮汐的影響，沒有剛好是潮汐周期的原因是還受到其他自然機制在影響水體，如太陽的影響(24 小時週期)等，在 DO 和葉綠素我們發現在 24 小時 30 分鐘的時間遞延有著最高的相關性，而 PH 是 24 小時 42 分鐘，此結果皆顯示開放式水域的水體受到潮汐影響的作用很大。



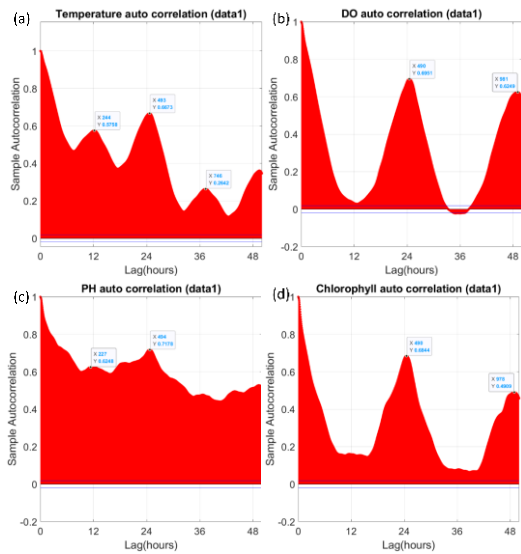


圖 8 大潭藻礁水質參數的自相關性分析，(a)水溫、(b)DO、(c)PH 及(d)葉綠素

自相關性分析發現潮汐影響大潭電廠的水體，但究竟影響多少尚不清楚，本研究透過 FFT 將各水質參數從時間域轉到頻率域，從傅立葉分析的結果(圖 9)，所有的參數皆在 24 小時 3 分的時候有個較強頻率的週期，水溫則在 12 小時 34 分有個很較強的頻率，這與其他水質參數不相同(12 小時 1 分鐘)，可以推斷在此水體水溫受到一個潮汐周期的影響為主，然而在 PH、葉綠素、藻紅蛋白及溶氧量則在 6 小時 12 分鐘有一個很明顯的頻率週期，這個時間點剛好是潮汐周期的一半，具本研究現有數據推測，一個漲退潮的週期會影響水體兩次，而產生明顯的週期，而 24 小時週期即為日週期(日照)的影響。

### 3.3 即時異常警報系統

大潭電廠附近水域以現有的資料顯示(圖 3)，根據地面水體分類及水質標準(民 106)符合甲乙類海域海洋環境品質標準(PH 介於 7.5-8.5、DO 大於 5mg/L)，本研究因觀測項目不同，也不適用河川污染指數(RPI)的計算方式(缺乏生化需氧量、氨氮等變量)，且大潭電廠位處於出海口的沿岸，與河川的機制也不同，再加上河川污染指數所使用的數據是人工測量的單點位單時間的結果，與本研究連續監測方式不同，於是本研究提出新的異常指標。

首先，不同季節及不同地區皆會影響著水體的狀態，故無法使用單一數值或範圍區間來界定異常狀況，有可能此區域變量範圍本就不同，若採取相

同的範圍可能會有錯誤的警報資訊，過去因為受到資料的限制只能設定範圍來界定汙染程度，本研究的連續性資料可以提供各參數的特性，我們提出將每個時段減去上一個時段的差值進行第一階段的警報機制，為避免季節的影響，標準差的計算範圍為該量測時段的前 1 星期，若此時量測到的數值差值超過前七天 3 個標準差會給予 1 分數，超過 5 個標準差會給予 3 分(表 1)，最後將所有參數的分數加總平均後(式 1)，根據總分評估該區域的水體是否有狀

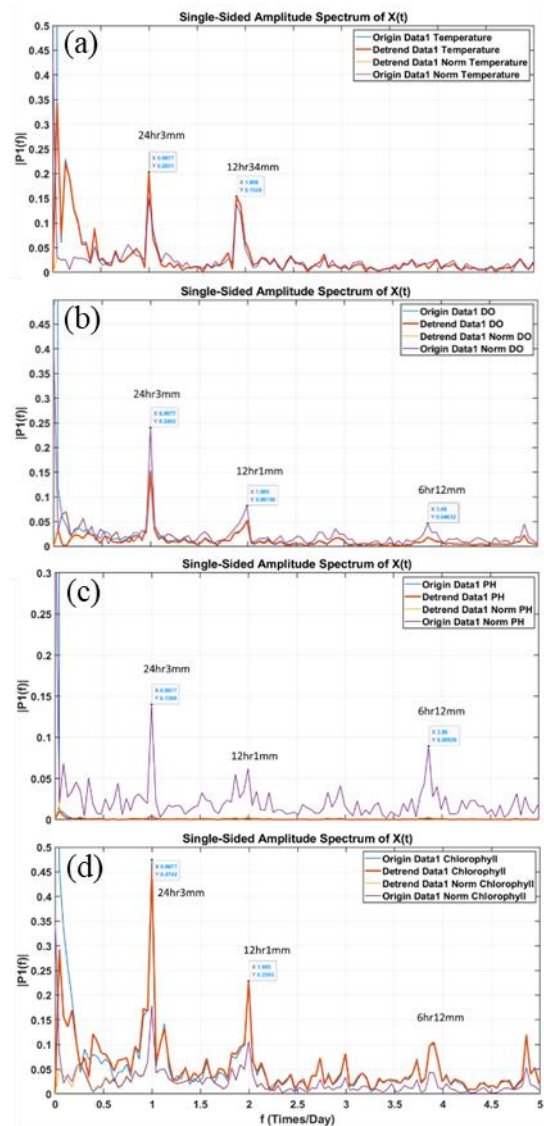


圖 9 大潭藻礁水質站(a)水溫、(b)DO、(c)PH、(d)葉綠素及，x 軸為強度，y 軸為日頻率，圖中線條顏色: 藍-原始數據、橘-原始數據經過 detrend、黃-日正歸化數據經過 detrend、紫-日正歸化數據

況，若總體平均超過 2 分則發出異常警報，表 2 為桃園海域七天的標準差，以溫度為例，若在下一個時刻量測到的溫度差超過 0.42 度就會被記 1 分，若超過 0.7 度則會被記 3 分，而 DO 若超過 0.189mg/L 也會被記 1 分，此外為避免連續性事件導致水質參數呈趨勢下降，或者僅單一數值的變化過大導致低估異常情況，提供第二階段的警報機制，此階段依據海域環境分類及海洋環境品質標準為主，若 PH 值與 DO 值下降一類且持續長達 1 天(如乙類水體 PH 介於 7.5 到 8.5、丙類為 7.0 至 8.5)，便發出異常警報，除此之外，從大鵬灣瀉湖的數據表明，降雨事件也會導致異常現象發生，故目前的警報機制須排除降雨的情況。

$$\text{Water Pollution Index} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 S_i \quad (1)$$

水質/項目	良好	一般	異常
溶氧量 mg/L	小於 3.0σ	介於 3-5σ	大於 5.0σ
PH	小於 3.0σ	介於 3-5σ	大於 5.0σ
水溫	小於 3.0σ	介於 3-5σ	大於 5.0σ
葉綠素	小於 3.0σ	介於 3-5σ	大於 5.0σ
藻紅蛋白	小於 3.0σ	介於 3-5σ	大於 5.0σ
點數	0	1	3
異常指數積分值 (S)	$S \leq 0.5$	$0.5 < S \leq 2$	$S > 2$

表 1 第一階段異常指數篩選條件

表 2 桃園海域水體參數變化之標準差

項目	Temp	DO	PH	Phy	Chl
標準差	0.14	0.063	0.005	0.57	0.24

本研究將異常指數方法套用至桃園海域(圖 10)，因需要前一個禮拜的數值作為平均，僅剩下 7/23-8/3 這段期間可以分析，從圖 10 發現這三個禮拜中有 7 天輕度異常，但都是較低的異常指數，其中 7/29 下午五點、8/2 下午兩點以及 8/6 下午四點指數稍高，檢視這些天的數值發現藻紅蛋白、溶氧量以及葉綠素異常提高，然而並沒有持續很久，此期間有可能是水體受到汙染，但是也有可能是受到潮汐現象較大的擾動影響，從圖 6 和圖 7 顯示這三個期間都在潮汐的高點，仍需配合當日有無獲得非

法排放的舉報的情況，總體來說，本研究所提供的異常指標需要長期的連續觀測資料以及現地取樣的資料便能更好的完善此指標。

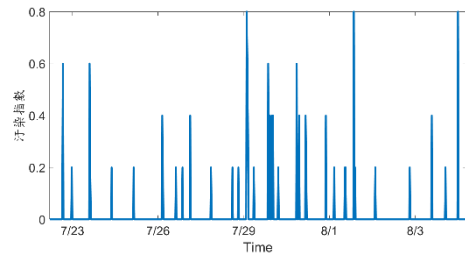


圖 10 桃園海域套用異常指數的結果

#### 四、結論

在這次的研究中對兩組來自不同水域的水質資料進行分析，發現封閉式水域的水質參數主要受到日照週期的影響，而開放水域除了日照週期以外還受到潮汐的影響，這些特性通過自相關分析、傅立葉變換等數學統計方法得以印證，並發現水溫受到全日潮的影響為主，而水質參數如 DO、PH、藻紅蛋白、葉綠素均受到半日潮的影響為主。最後提出了一個基於統計特性的水質污染標準，以每個參數的差值之標準差作為標準，劃分出良好、一般和異常三個層級，此指標仍需更多的觀測資料以及事件完善此指標的功能，並期望在未來有進行連續監測的站點能夠通過此指標即時發現異常事件。

#### 參考文獻

- 曹家寧 (2019)。有限項目的連續水質監測 應用於探討觀新藻礁區水體環境即時變化。國立中央大學水文與海洋科學研究所碩士論文。取自 <https://hdl.handle.net/11296/5464gb>
- 行政院環境保護署 (2021) 2020 年環境水質監測年報。
- Fortune, J. and Muraud, N. (2015) Effect of tide on water quality of Jones Creek, Darwin Harbour, Northern Territory Government - *Department of Land Resource Management*.
- Zhang, F., Ruan, W. -Q., Huang, B. -Q. (2000) A study of multi-diel variation of chlorophyll a in southern part of Taiwan shoal. *Journal of Oceanography In Taiwan Strait*, 19(3):322-328.

# 以波流耦合數值模式探討臺灣的異常巨浪 案例

王啟竝<sup>1\*</sup> 于嘉順<sup>1</sup> 林芳如<sup>2</sup> 朱啟豪<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立中山大學海洋環境及工程學系

<sup>2</sup>中央氣象局海象測報中心

## 摘要

異常巨浪對海上船隻、鑽油平台與沿岸地區結構物等造成破壞，根據氣象局的紀錄在邊海域有三百多人過去十幾年因異常巨浪事件而傷亡。臺灣周邊海域每年都有數個颱風經過，颱風帶來的氣壓差及強烈陣風吹拂，除對臺灣周遭產生風暴潮，對波浪產生影響更甚，當太平洋湧浪推移至近岸時，受到地形變化影響形成淺化效應而引發巨浪，若波浪推移的過程中遇到強勁的海流，在波與流的交互作用影響下，可能會形成異常巨浪。本研究採用 SCHISM 海流數值模式與 WWM 第三代波浪數值模式耦合，以非結構式高解析度網格進行臺灣海域波浪與海流的耦合計算，模擬颱風期間的海面現象。2016 年九月強烈颱風莫蘭蒂經過臺灣南端鵝鑾鼻海域時，氣象局的鵝鑾鼻浮標紀錄到一個異常的巨浪，為探討臺灣周邊海域波流耦合之交互影響，本研究採用中央氣象局預報風場資料(WRF)作為海面驅動力配合洋流及潮汐的影響進行計算，以莫蘭蒂颱風案例模擬計算結果討論颱風波浪受到地形及流場影響。本文將呈現耦合模式計算結果與氣象局鵝鑾鼻浮標波浪紀錄比對，並透過模擬探討流場的影響。

關鍵詞：中央氣象局、異常巨浪、波流交互作用、波流耦合模式

## ABSTRACT

Extreme waves often threaten navigation, offshore platforms and coastal structures. There are more than 300 death reported along the coastal area of Taiwan due to extreme waves in the past decades, according to CWB report. Taiwan is situated on the western Pacific where typhoons are passing frequently. Waves generated by the strong winds of typhoon and associated low pressure fields may cause storm surges along coast. The Pacific typhoons generate often low frequency swells approaching the east coast of Taiwan. Extreme waves may formed due to wave-current interactions when the progressing waves meet with strong ocean currents, which may due to geographical variation, tides and typhoon itself. We applied a fully coupled wave-current model (SCHISM-WWM) that based on unstructured high-resolution grids to study the surface waves under typhoon. September 2016 was an unstable month visited with three consecutive typhoons, i.e. Meranti, Malakas and Megi. Particularly Meranti was a category 5 typhoon passing through south end of Taiwan, and a huge wave was recorded at the Eluanbi Buoy. In order to study the wave-current interactions we have used the weather forecast data from the CWB (WRF) to drive the ocean surface together with the ocean currents and tides. Sea state of September 2016 has been simulated with the wave-current model. The extreme wave condition in the south end of Taiwan can be observed from the results of the coupled simulation. A giant wave during the period of typhoon Meranti passing through the area was captured by the model and compared with the waves recorded at the Eluanbi wave buoy. More detailed discussions on the geography interact with currents and waves will be presented.

Keywords: Extreme Wave; Wave-current interaction; wave-current coupled model

## 一、前言

異常巨浪對海上船隻、鑽油平台與沿岸地區結構物等造成破壞，根據氣象局的紀錄在邊海域有三百多人過去十幾年因異常巨浪事件而傷亡。臺灣周邊海域每年都有數個颱風經過，颱風帶來的氣壓差及強烈陣風吹拂，除對臺灣周遭產生風暴潮，對波浪產生影響更甚，當太平洋湧浪推移至近岸時，受到地形變化影響形成淺化效應而引發巨浪，若波浪推移的過程中遇到強勁的海流，在波與流的交互作用影響下，可能會形成異常巨浪。本文採用 SCHISM 海流數值模式與 WWM 第三代波浪數值模式耦合，以非結構式高解析度網格進行臺灣海域波浪與海流的耦合計算，模擬颱風期間的海面現象。2016 年莫蘭蒂、馬勒卡及梅姬等三個颱風接續侵襲台灣，尤其是強烈颱風莫蘭蒂經過臺灣南端鵝鑾鼻海域時，氣象局的鵝鑾鼻浮標紀錄到接近 18 公尺異常的巨浪，而 2017 年尼莎颱風則為北部帶來豐沛雨量，且在龜山島與龍洞浮標站也觀測到大於 10 公尺之波高，為探討臺灣周邊海域波流耦合之交互影響，本研究採用中央氣象局預報風場資料(WRF)作為海面驅動力配合洋流及潮汐的影響進行計算，以莫蘭蒂颱風案例模擬計算結果討論颱風波浪受到地形及流場影響。本文將呈現耦合模式計算結果與氣象局鵝鑾鼻浮標波浪紀錄比對，並透過模擬探討流場的影響。

## 二、研究方法

近年半導體科技發展迅速，超級電腦運算速度迅速提升，海洋數值模式的研究因而發展迅速且多元，可進行跨尺度整合性模擬，大尺度模擬如整個太平洋區域，小尺度模擬如河川、湖泊區域皆為可模擬之區域。各個海洋數值模式皆有其特性，以數值方法區分可分成有限體積法、有限差分法與有限元素法，若以網格型態區分則可分為結構性網格與非結構性網格。

本研究採用模式採用非結構網格的 SCHISM 三維海流模式探討臺灣周遭海域流況，SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydrosience Integrated System Model) 模式 (Zhang et al., 2016)，是原 SELFE 模式 (Zhang & Baptista, 2008) 主要發展分支，包含

原有模式特性外，亦增加了許多新的功能與特點。模式以水動力模式作為核心，可耦合其他模組進行計算，如：風浪計算、水質生態模組、沉積物模組及油污擴散等等 (圖 1)，目前已廣泛運用在不同尺度的循環系統。

而波浪數值模式推算實際波浪場，需要考慮隨時間及空間變化的風場及不規則的水深地形與陸地邊界等環境因素，然而許多波浪數值模式只針對特別狀況的波浪計算應用而設計，唯使用能夠完整描述波浪傳遞過程中經歷的各種物理演變機制的波浪數值模式才能推算出環境因素影響所發生的波浪行為。目前波浪數值模式已發展至第三代波浪模式，且廣泛運用，例如：WAM 模式、WAVEWATCH 模式、SWAN 模式及 WWM 模式。以波浪作用力平衡方程式(Wave Action Balance Equation)為基礎，描述波浪傳遞機制及風與波之間的能量傳遞機制，包括波浪成長、消散、對流及因海流與地形變化造成的折射現象。

大部分波浪模式使用結構性網格計算，然而在臺灣周邊近岸水深地形較複雜，需要高解析度解析空間及時間尺度，本研究選用第三代 WWM 波浪模式(WWMIII, Wind Wave Model, Roland et al., 2009)，此模式為非結構性網格，不僅可以配合研究區域解析小尺度或大尺度、網格疏密調整可提高計算效率，還能配合海流模式研究探討，依據兩者耦合機制進行案例模擬及探討，其耦合機制圖如圖 2。

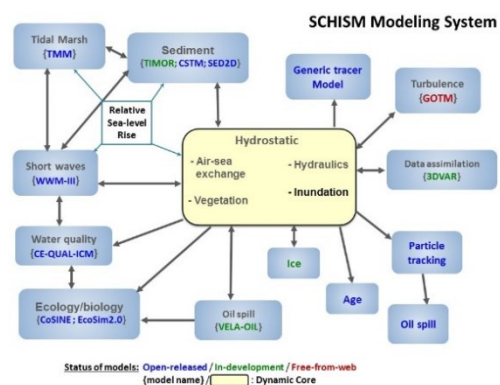


圖 1 SCHISM 模式應用模組圖(Zhang et al., 2016)

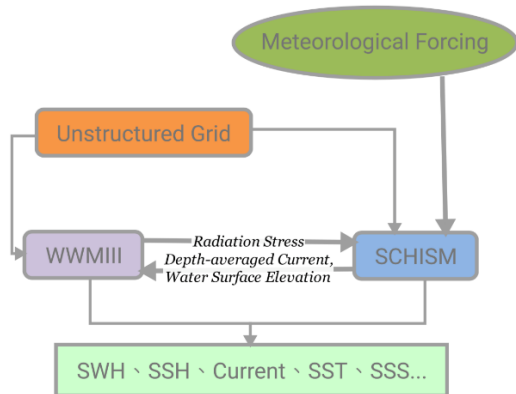


圖 2 波流模式耦合架構圖

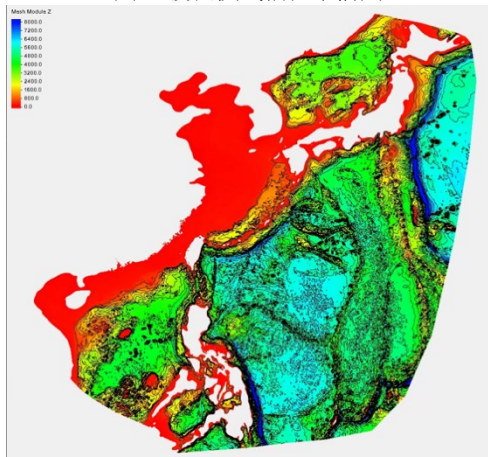


圖 3 模式範圍及地形

### 三、案例與分析

根據中央氣象局在 2016 年 9 月 12 日至 15 日為強烈颱風莫蘭蒂警報期間，強颱風莫蘭蒂為 2016 年太平洋颱風季的最強颱風，由臺灣南部經南灣海域往臺灣海峽前進(如圖 4 所示)，從遠洋逐漸接近時所帶來的湧浪，或接近臺灣時所造成的風浪，皆對近岸波浪變化產生很大影響，因此本研究將以模式模擬 2016 年 9 月之波浪場，並與鵝鑾鼻的浮標資料驗證波浪數值模式結果，鵝鑾鼻的浮標位置如圖 5 所示，位於東經 120.8314 度，北緯 21.9006 度，墾丁鵝鑾鼻香蕉灣南方外海約 3 公里，水深約 40 公尺。

模式設定將分為無潮汐驅動的波浪模式及引入潮汐驅動力的波流耦合模式，兩個模式的波浪初始場與邊界條件皆相同。而引入潮汐驅動力的波流耦

合模式先與後壁湖潮位站資料進行資料驗證，後壁湖潮位站位置位於東經 120.7453 度 北緯 21.9458 度，如圖 5 所示，本研究之潮汐比對結果如圖 6 所示，紅色為實測資料，藍色為模式結果。結果顯示模式在大潮時期之較低高潮略高估於實測資料，大潮時期潮差約為 160cm，小潮時期潮差約為 80cm，整體結果大致上相當吻合，模式計算結果與實測資料之均方根誤差為 5.8 公分，模式之水位與實際狀況接近。

圖 7 為南灣海域大潮期間，水位由較低的低潮(LLW)至較低的高潮(LHW)時之表層流場圖，可明顯看到流向為由台灣海峽往太平洋移動，且受到地形影響，在南灣海域西部靠近貓鼻頭的地方開始形成一個逆時針的渦旋，並隨著時間逐漸移動至外海。在靠近貓鼻頭及鵝鑾鼻附近的流速則可達到 2m/s。

圖 8 為南灣海域大潮期間，水位由較低的高潮(LHW)至較高的高潮(HHW)時之表層流場圖，此時流向為由太平洋往台灣海峽移動，且同樣受到地形影響，在南灣海域東部靠近鵝鑾鼻的地方形成一個順時針的渦旋，隨時間移動至外海。

模式中潮流特性與文獻中描述相同，南灣海域漲退潮的過程中，會產生逆時鐘流動的氣旋渦旋與順時鐘流動的反氣旋渦旋。大潮時期，在潮汐較低的乾潮(LLW)至較低的滿潮(LHW)期間，在南灣海域西側會發生氣旋渦旋，反氣旋渦旋則是在潮汐的較低的滿潮(LHW)至較高的滿潮(HHW)期間，且發生在南灣海域的東側 (Lee et al., 1999b)。

首先，波浪模式在示性波高(Hs)結果，整體趨勢與實測資料相近(如圖 9)，但在 9 月 14 日時極值發生低估的情形，實測極值接近 18 公尺，但波浪模式結果約 12 公尺，均方根誤差約為 0.63 公尺，相關係數約為 0.90。

波流耦合模式在示性波高(Hs)結果，整體趨勢也與實測資料相近(如圖 10)，但在 9 月 14 日時極值發生低估的情形，實測極值接近 18 公尺，但波浪模式結果約 12 公尺，此外波高受潮汐影響而有起伏，誤差(rms)約為 0.65 公尺，相關係數約為 0.91，雖然極值部分與波浪模式結果都為 12 公尺，但可由時序圖上發現在 9/14 颱風最為接近的時間，極值區間變化有所差異，在波浪模式中只有數筆資料有接近 12 公尺，但波流耦合模式在颱風接近浮標測站時都維

持接近 12 公尺左右。

若將波流耦合模式與波浪模式結果波高差異進行二維平面的繪製，由圖 8 可發現，兩者在鵝鑾鼻區域差異最大時可達到 6 公尺左右，但發生位置卻非在鵝鑾鼻浮標站位置，由此可知在加入潮流影響的波流耦合模式波高更接近實測資料，圖 11 為耦合模式的流場分布圖，圖 12 為耦合模式的波高分布圖，由以上兩圖能發現在波高差異最大的地方，剛好是流速最強與波高最高區域，且此區域的海流流向與波浪方向剛好呈現相對的方向(180 度)，因此推論是逆向流作用下，會縮短波長，使波數增加，波高越高，並影響波浪尖銳度。

圖 14 為模式波高時序圖，紅線為波流耦合模式結果，藍線為波浪模式結果，由時序圖可發現在莫蘭蒂颱風期間，耦合模式的波高會受到潮流影響，且越靠近鵝鑾鼻岬頭下方東側的波高差異越大，波高差異可以接近 5 公尺。

圖 15 為波浪與潮流時序圖，可以發現潮汐對波高的影響主要集中在 14 日初期颱風接近時，平時流速不大因此影響較小。由流速圖可知流速與流向在 14 日 0 時開始轉變，流速變快至 2.5m/s，流向逐漸由 0° 轉為 180°，同時波向也有改變，且在颱風靠近期間波向與流向保持互相逆向的狀態，故由 14 日 0 時開始，波長受潮流影響而變短，使波高增加。此現象在颱風遠離後潮汐趨於穩定，流速逐漸回歸正常，故對波長與波高的影響也逐漸降低。由此可知波與流之間的交互作用確實會導致異常巨浪或瘋狗浪的發生。

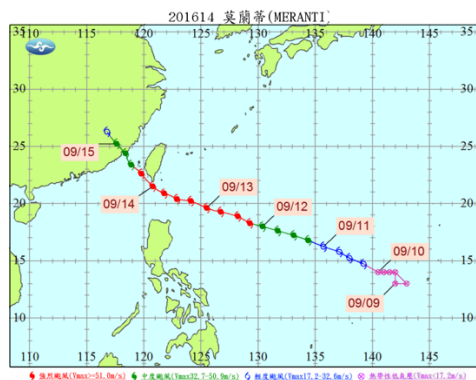


圖 4 莫蘭蒂颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局)



圖 5 鵝鑾鼻浮標位置圖

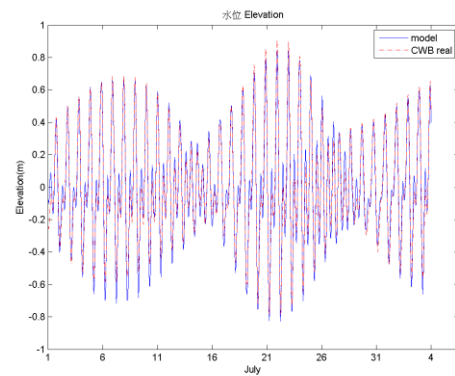


圖 6 後壁湖潮位時序變化比對圖

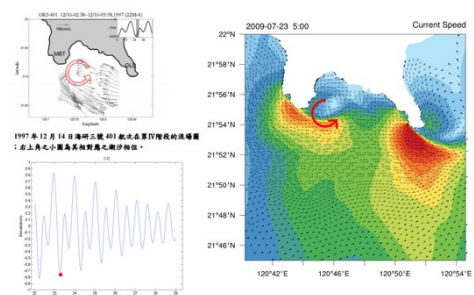


圖 7 南灣海域大潮期間，較低低潮(LLW)時之水位及表層流場圖

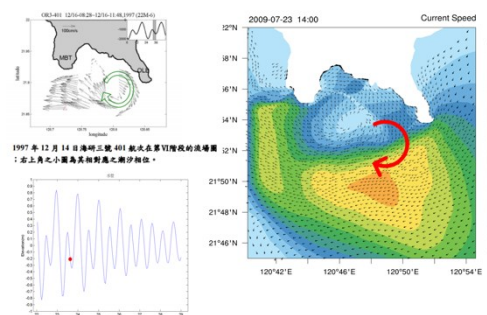


圖 8 南灣海域大潮期間，較低的高潮(LHW)時之水位及表層流場圖

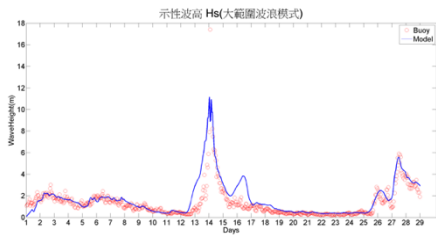


圖 9 波浪模式示性波高與實測資料比對圖

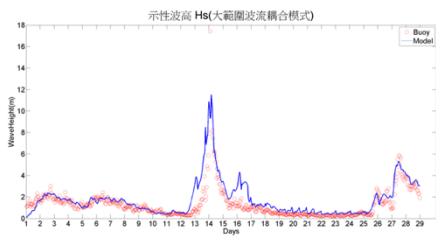


圖 10 波流耦合模式示性波高與實測資料比對圖

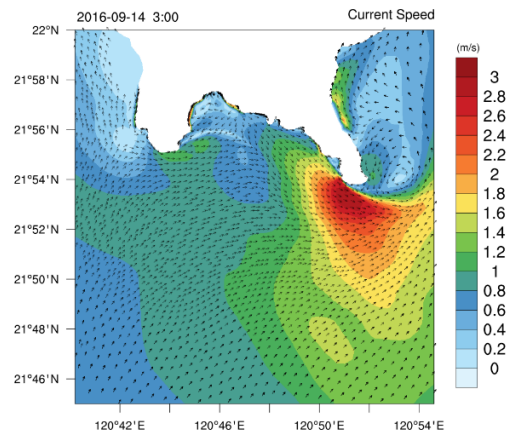


圖 12 波流耦合模式流場分布圖

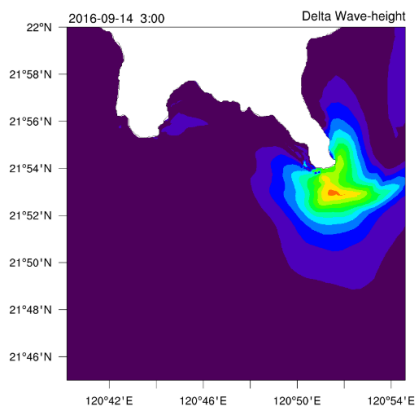


圖 11 波流耦合與波浪模式示性波高差異分布圖

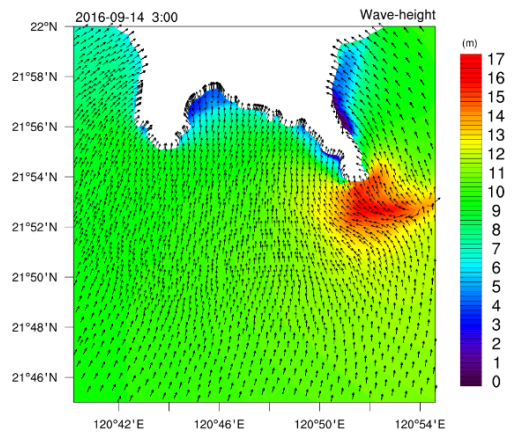


圖 13 波流耦合模式示性波高分布圖

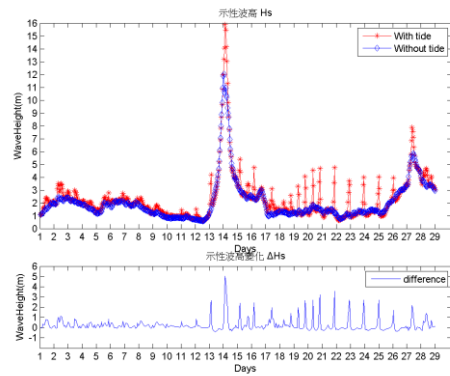


圖 14 波浪與波流耦合模式波高時序圖

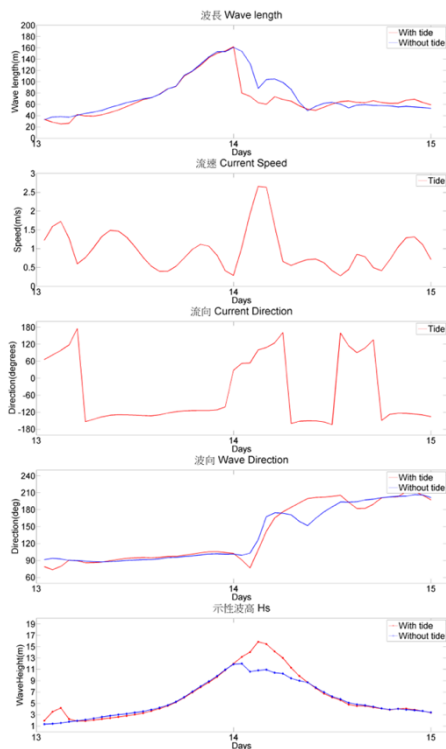


圖 15 模式輸出波浪與潮流時序圖

#### 四、結論

本研究利用 SCHISM 海流數值模式與 WWM 第三代波浪數值模式耦合，計算臺灣海域波浪與海流，以颱風事件進行波浪海流數值模式模擬，分析臺灣海域發生異常巨浪之可能性。

貓鼻頭與鵝鑾鼻岬頭附近受潮流與海岸地形影響會產生渦旋，並逐漸擴散到整個南灣海域，在岬頭的流速特別快，流速可達每秒 2 公尺以上，因此當流向與波向對向時，會產生異常波高，與文獻中描述流向與波向對向時波數增加，波長變短，波高變高的物理現象一致。

波流耦合模式在颱風事件發生時，流速變強，在波流夾角最小且流速最快的地點，其受潮流影響的波高差異也最大。在莫蘭蒂颱風期間，越靠近鵝鑾鼻岬頭下方的波高差異越大，差異接近 5 公尺。

而潮汐對波高的影響主要集中在颱風接近時，颱風遠離後潮汐趨於穩定，流速逐漸回歸正常，故對波長與波高的影響也逐漸降低。

因此由本研究可知波與流之間的交互作用確實會導致異常巨浪的發生。

#### 參考文獻

1. 氣象局(2014)氣象百科\_海象問答\_波浪.中央氣象局編印，(<https://www.cwb.gov.tw/V7/knowledge/marine/wave001.htm>)
2. 莊文傑、曾相茂(2014)「淺談瘋狗浪之預警」，第 36 屆海洋工程研討會論文集，第 95-100 頁
3. 陳陽益, & 莊文傑.(1991)，流作用對波高特性變化之研究，第 13 屆海洋工程研討會論文集，第 352-364 頁
4. Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., ... & Meerburg, A. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft 8-12*.
5. Lavrenov, I.,(1998) The Wave Energy Concentration at the Agulhas Current off South Africa, *Natural Hazard*, Vol.17, pp. 117–127.
6. Lee, H.-J., S.-Y., Chao, K.-L., Fan, Y.-H., Wang, and N. K., Liang (1997) Tidally induced upwelling in a semi-enclosed basin: Nan Wanbay. *Journal of Oceanography*, 53, 467-480.
7. Lee, H.-J., S.-Y., Chao, and K.-L., Fan (1999a) Flood-Ebb disparity of tidally Induced recirculation eddies in a semi-enclosed basin: Nan Wan Bay. *Continental Shelf Research*, 19, 871-890.
8. Lee, H.-J., S.-Y., Chao, K.-L., Fan and T.-Y. Kuo (1999b) Tide-Induced Eddies and Upwelling in a Semi-enclosed Basin: Nan Wan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, in press.
9. Peregrine, D. H. (1976). Interaction of water waves and currents. In *Advances in applied mechanics* (Vol. 16, pp. 9-117). Elsevier.
10. Roland, A., Cucco, A., Ferrarin, C., ... & Zanke, U. (2009). On the development and verification of a 2-D coupled wave-current model on unstructured meshes. *Journal of Marine Systems*, 78, S244-S254.
11. White, B. S., & Fornberg, B. (1998). On the chance of freak waves at sea. *Journal of fluid mechanics*, 355, 113-138.
12. Zhang, Y. J., Ye, F., Stanev, E. V., & Grashorn, S. (2016). Seamless cross-scale modeling with SCHISM. *Ocean Modelling*, 102, 64-81.



## 應用數據插值經驗正交函數重構臺灣周圍 海域向日葵衛星海溫資料

楊一中<sup>1</sup> 盧靖元<sup>1</sup> 鄭嘉豪<sup>1</sup> 曾鈺皓<sup>1</sup> 黃世任<sup>1</sup>  
李永翔<sup>2</sup> 楊傳琮<sup>3</sup> 張育承<sup>3</sup> 何宗儒<sup>1</sup>

<sup>1</sup>國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系

<sup>2</sup>醒吾科技大學行銷與流通管理系

<sup>3</sup>中央氣象局氣象衛星中心

### 摘要

在海洋研究中海面溫度是一重要的物理量，除了可以應用於海氣交互作用的探討外，也可以應用於海面流場的估算。衛星遙測因可快速且廣泛獲得海面溫度數據，已被廣為應用於海洋與大氣相關的研究上。但衛星遙測海面溫度常會受雲層遮蔽而造成資料缺值，故本研究使用數據插值經驗正交函數法(DINEOF)進行資料缺值的重建，並以向日葵衛星 8 號臺灣周圍海域海面溫度進行研究，將海面溫度資料部分刪除後，再使用 DINEOF 進行補值，然後再比較填補數據與原始數據的差異。研究結果顯示台灣北部海域海面溫度方均根誤差為 0.14°C，決定係數為 0.98；蘭嶼綠島海域方均根誤差為 0.19°C，決定係數為 0.91。此結果顯示應用 DINEOF 方法進行臺灣周圍海面溫度的補值，是有其可靠性。

關鍵詞：數據插值經驗正交函數法、衛星遙測、向日葵 8 號衛星、海面溫度

## Reconstruction of Himawari Satellite Sea Surface Temperature Data around Taiwan Using Interpolating Empirical Orthogonal Function

Yi-Chung Yang Ching-Yuan Lu Jia-Hao Cheng Yu-Hao Tseng Shih-Jen Huang  
Yung-Hsiang Lee Thwong Zong Yang Yu-Cheng Chang Chung-Ru Ho\*

Distinguished Professor, Department of Marine Environmental Informatics, National Taiwan Ocean University

### ABSTRACT

Sea surface temperature (SST) is an important physical parameter in ocean research. It can be used not only for the exploration of air-sea interactions, but also for estimating sea surface currents. Satellite remote sensing has been widely used in ocean and atmosphere research because of its rapid and extensive acquisition of SST data. However, the SST data from satellite remote sensing is often obscured by clouds, resulting in missing data. Therefore, this study uses the data interpolation empirical orthogonal function (DINEOF) method to reconstruct the missing data to obtain complete SST data. The SST data derived from the Himawari-8 satellite was partially deleted, and then DINEOF was used to fill in the missing values. After comparison, it was found that the use of DINEOF can successfully restore the SST deficit in this area. The results show that the root mean square error (RMSE) of sea surface temperature in the northern waters of Taiwan is 0.14°C, and the coefficient of determination ( $R^2$ ) is 0.98, and the RMSE of the waters near Lanyu and Green islands is 0.19°C, and  $R^2$  is 0.91. This implies that using the DINEOF method to reconstruct the SST data around Taiwan is reliable.

Keywords: DINEOF; satellite remote; Himawari-8; sea surface temperature

## 一、前言

海面溫度是了解、監測和預報熱量、動量和氣體通量的基礎，也是提供有關全球氣候系統的基本信息，是天氣預報和大氣模型模擬的重要參數，對海洋生態系統的研究也很重要。衛星遙測因可快速且廣泛獲得海面溫度數據，已被廣為應用於海洋與大氣相關的研究上。但衛星紅外遙測的海面溫度常會受雲層遮蔽而造成資料缺值，如何填補這些缺值以便獲得完整的海面溫度數據，以利後續的應用，例如海面流場的推估，也是相當重要。為獲得完整的海面數據，本研究應用數據插值經驗正交函數法(Data Interpolating Empirical Orthogonal Function, DINEOF)重建缺值的海面溫度數據，以利後續的應用。

## 二、研究方法

### 2.1 衛星海溫資料

本研究使用向日葵(Himawari) 8 號衛星海面溫度資料進行測試，向日葵 8 號是日本氣象廳開發的地球同步衛星，其主要作用為提供西太平洋之週邊的氣候變化的觀察使用，衛星上搭載可感應 16 種波段的高像素紅外線成像儀(Advanced Himawari Imager)。本研究使用 2018 全年的影像數據進行分析，該資料空間解析度約 2 km × 2 km，時間解析度為每小時一筆。

### 2.2 DINEOF 理論

DINEOF 是一個基於經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)，對不完整的資料進行補值並且分析其特徵的統計方法，常用於填補在地球物理領域上的遺失資料，例如衛星的紅外海溫影像受雲層遮蔽造成的缺值。DINEOF 是透過 EOF 分析求取特徵值和特徵向量後，藉由交叉驗證的程序決定完整資料集或非完整資料集最佳的 EOFs 重構階數，推測出缺值點的數據再加以補齊。此方法由 Beckers and Rixen (2003)提出，經一系列的修正與改善(Alvera-Azcárate et al., 2005; Beckers et al., 2006; Alvera-Azcárate et al., 2009)，並由 Geo-Hydrodynamics and Environment Research (GHER)團隊建立提供 DINEOF 演算法與範例的網站，而本研究以該網站提供的程式為基礎加以修改使用。其原

理簡單介紹如下：

在進行 DINEOF 運算之前，先將海溫數據排列為一個二維的矩陣，形成一個列數為  $M$  (空間網格點資料數)而行數為  $N$  (時間資料數)的二維陣列  $X$

$$X = \begin{bmatrix} Data_{11} & Data_{12} & \cdots & Data_{1n} \\ Data_{21} & Data_{22} & \cdots & Data_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Data_{m1} & Data_{m2} & \cdots & Data_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $M=1,2,\dots,m$ ， $N=1,2,\dots,n$ ，為了進行補值的動作，會先將資料找出缺值離散點的集合作為標記，集合的形式以  $I$  表示，假設  $(i,j)$  對應到  $X$  的缺值點，當原始資料  $X$  裡的元素  $(i,j) \in I$  時，則代表此元素是缺值，而缺值資料點的數目以  $n_o$  表示，接著再將原始資料的缺值點設為 0，無缺值的點則維持原來數值，形成一個新的矩陣  $X_o$ ，並且再將  $X_o$  以奇異值分解法(Singular Value Decomposition, SVD)求得矩陣  $X_o$  的特徵值(Thomson and Emery, 2014)，初步估計空間的 EOFs(矩陣  $U$ )與時間的 EOFs(矩陣  $V$ )，以及空間與時間的振幅：

$$X_o = USV^T \quad (2)$$

其中  $S$  為奇異值組成的對角矩陣，矩陣大小為  $r \times r$ ； $U$  為原始資料矩陣的空間分解量，矩陣大小為  $m \times r$ ； $V$  為原始資料矩陣的時間主成分(Principal component, PC)，矩陣大小為  $n \times r$ 。 $m$  代表數據點的大小， $n$  代表資料筆數， $r$  則是矩陣  $X$  的秩(rank)，代表矩陣  $X_o$  的線性獨立列數目，而  $r$  的值必定不會超過  $m$  與  $n$  的值。

在重構數據的過程中，只將最顯著的空間與時間模態(significant mode)留下即可，進一步能獲得最佳的重構結果  $X_{rec}$ ：

$$(X_{rec})_{ij} = (U_k S_k V_k^T)_{ij} = (X_o^e)_{ij} = \sum_{p=1}^k \rho_p (u_p)_i (v_p^T)_j \quad (3)$$

其中  $k$  是保留的  $k$  階最佳模態數， $X_o^e$  則代表前  $k$  階 EOFs 所對應的重構矩陣。得到缺值點的重構數據  $(X_{rec})_{ij}$  後，將其加入原資料矩陣  $X_o$ ：

$$X_{rec} = X_o + (X_{rec})_{ij} \quad (4)$$

$(X_{rec})_{ij}$  表示除了在缺值點  $(i,j)$  有重構的數據外，其他資料點均為 0。由於時空的 EOFs 與奇異值會在每次重構後被調整，當第一次的重構完成後，再重

復同樣的程序，如同以下兩式，直到收斂為止：

$$\mathbf{X}_{rec} = \mathbf{USV}^T \quad (5)$$

$$(\mathbf{X}_{rec})_{ij} = (\mathbf{U}_k \mathbf{S}_k \mathbf{V}_k^T)_{ij} = (\mathbf{X}_{rec}^e)_{ij} = \sum_{p=1}^k \rho_p (\mathbf{u}_p)_i (\mathbf{v}_p^T)_j \quad (6)$$

其中  $\mathbf{U}_k$  是一個涵蓋前  $k$  個空間 EOFs 的  $m \times k$  矩陣， $\mathbf{V}_k$  是一個涵蓋前  $k$  個時間 EOFs 的  $n \times k$  矩陣， $\mathbf{S}_k$  是一個涵蓋前  $k$  個奇異值的  $k \times k$  對角矩陣。在每次迭代過程中，新的重構矩陣產生時，最佳模態數也隨之替換(Ping et al. 2016)，也就是說， $k$  的大小會隨著奇異值對角矩陣改變並調整；而  $\rho_p$  是  $\mathbf{X}$  的第  $p$  個奇異值 ( $p=1, 2, \dots, k$ )； $\mathbf{u}_p$  表示第  $p$  個模態的空間 EOFs； $\mathbf{v}_p$  表示第  $p$  個模態的時間 EOFs。收斂的準則為缺失資料的方均根誤差與無缺失資料的標準差兩者比率達到  $10^{-3}$  (Huynh et al. 2016)，在此稱其為重構精度。

### 2.3 利用已知海溫驗證 DINEOF 補值的表現

為驗證 DINEOF 方法以 25 小時連續資料之補值在不同海域下的表現，本研究在滿足條件地特定位置挖空  $21 \times 21$  已知原始海溫數據的網格點，使其成為缺值狀態，再以 DINEOF 方法做補值計算，並驗證經 DINEOF 方法補值的溫度塊與原始已知海溫的差異。

進行 DINEOF 補值的驗證步驟及海溫挖空條件如下：一、為了排除完全沒有海溫(全雲)或該時間沒有資料的影響，選取的資料必須滿足連續 25 張(每小時一張)的影像中，每一張影像的缺值率必須低於 90%。二、為了排除雲的影響，所刪除空間在其影像本身及前後 6 個小時內的溫度影像中不能有雲。三、為了排除時間及空間邊界的影響，所刪除空間的位置，距離地圖邊界 20 網格點以上，距離時間邊界 6 小時以上。需滿足以上三點條件才會選為海溫驗證的刪除位置，並進行 DINEOF 補值方法以進行後續討論。

除挖空海溫資料比較對照，本研究另對照不同海溫資料缺值之比例進行 DINEOF 補值測試，比較不同缺值率進行補值後統計分布型態，進而推估 DINEOF 所適用的缺值率範圍。

## 三、分析結果

為了解 DINEOF 補值的結果與原始數據的差異，以 2018 年 4 月 1 日 10 時台灣北部海域的向日葵衛星原始溫度影像為例。圖 1 是原始海溫影像，將圖中方框  $21 \times 21$  網格點挖空，再以 DINEOF 方法補值，比較兩者的差異。圖 2 左圖為將此挖空位置溫度放大顯示，圖 2 右圖為經由 DINEOF 方法補值完的結果。對照原始海溫可以發現方框內西側由高到低的溫度梯度清楚的重現，將挖空後補值前與補值後的溫度資料相減得到影像的差值如圖 3，結果也顯示整體溫度數值差異非常接近，圖 4 為挖空位置補值前後的散佈圖及截距為 0 的迴歸線結果，其斜率 0.9995，決定係數達到 0.98，方均根誤差為  $0.14^\circ\text{C}$ ，顯示使用 DINEOF 補值後的結果有一定的可信度。

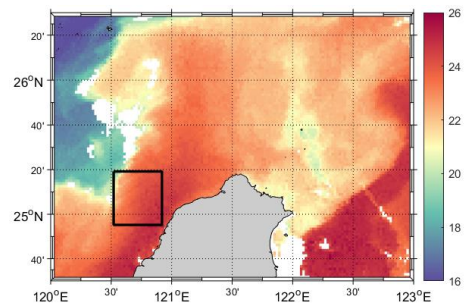


圖 1 北部海域溫度影像(2018/04/01 10:00)

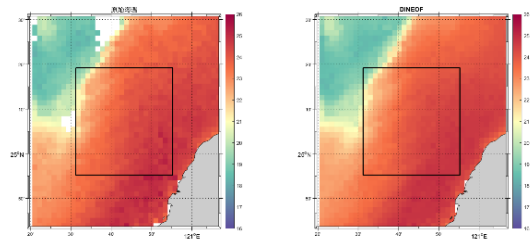


圖 2 北部海域原始溫度與 DINEOF 補值後溫度

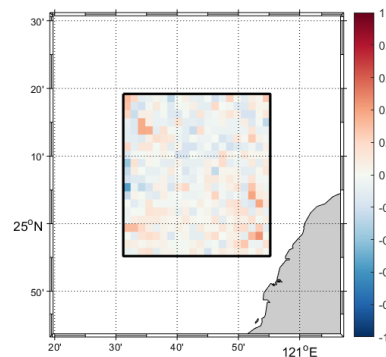


圖 3 原始溫度影像與 DINEOF 補值的差值

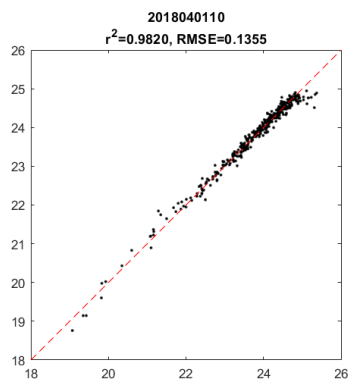


圖 4 原始溫度影像與 DINEOF 補值溫度散佈圖

而圖 5 為 2018 年 5 月 27 日 15 時在蘭嶼綠島海域的向日葵衛星原始溫度影像，此案例的挖空位置剛好出現一個明顯冷水團，與外圍高溫黑潮海水約有 2°C 以上的溫度差異，而圖 6 右圖為經 DINEOF 補值後的溫度結果，可看出使用 DINEOF 補值後可成功還原西北側的低溫水團，同時範圍內東南側的高溫區域也成功還原，由圖 7 也可看出補值前後的差值結果，顯示補植後與原始溫度差異不大。圖 8 為方框內海溫在補值前與補值後的散佈圖及無截距回歸線結果，其斜率 0.9995，決定係數達到 0.91，方均根誤差為 0.19°C。

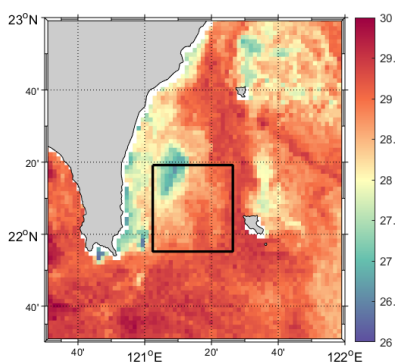


圖 5 蘭嶼綠島海域溫度影像(2018/05/27 15:00)

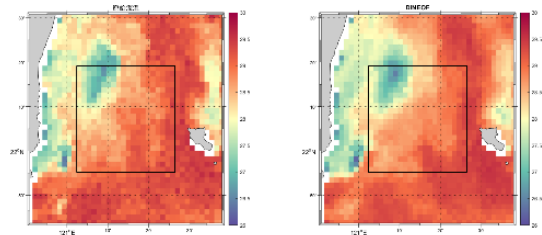


圖 6 蘭嶼綠島海域原始溫度與 DINEOF 補值後溫度

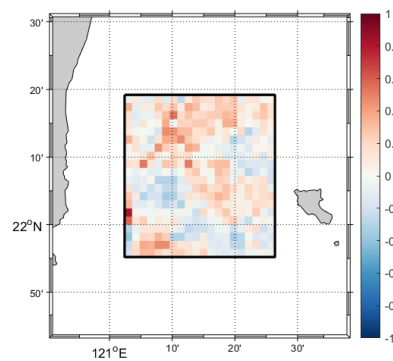


圖 7 原始溫度影像與 DINEOF 補值的差值

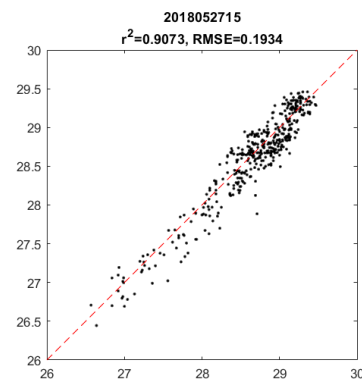


圖 8 原始溫度影像與 DINEOF 補值溫度散佈圖

DINEOF 補植結果除受到原始數據在該時段內溫度鋒面的變動性影響之外，目標範圍的缺值率也是影響因素之一，若該時段內有效數據越少，則 DINEOF 方法越難還原接近真實的數據結果。因此為探討 DINEOF 方法在不同影像缺值率時的補植結果，以 25 小時連續溫度資料為基礎，分別以連續 25 小時內，缺值佔總有效溫度格點的 0 ~ 10%、10 ~ 20%、20 ~ 30%、30 ~ 50% 及 50 ~ 80% 等五組缺值範圍來探討缺值率對 DINEOF 補植前與補植後的溫

度分布變化。

圖 9 分別是五組不同缺值率時，向日葵衛星原始海溫與 DINEOF 補值後海溫之直方圖分布結果，其中黑色為原始海溫的直方圖結果，紅色部分為 DINEOF 補值後新增的溫度結果。整體來說不論在哪个缺值率範圍，海溫分布多集中在 20~30°C，大致上都呈現左偏態的分布結果。

由圖 9 的溫度分布結果可以發現，在缺值率為 10~20% 的溫度分布型態非常接近 0~10% 缺值率的溫度分布，都呈現高峰的資料分布。而缺值率為 20~30% 時，其整體溫度分布雖有稍微平緩，但還是有呈現高峰的資料分布。然而當缺值率大於 30% 時，資料分布型態明顯有所改變，整體分布呈現較為平緩的左偏態分布結果，當缺值率高達 50~80% 時，溫度分布甚至沒有明顯的峰值出現，在 23~28°C 的資料數量都很接近，與缺值率為 0~10% 時的分布型態差異相當明顯。綜上所敘，在使用 DINEOF 方法做溫度補值時，建議若整體溫度缺值率達 30% 以上時，則補值後的溫度資料僅供參考使用，若溫度缺值率高達 50% 以上時，則不建議使用該溫度補值結果。

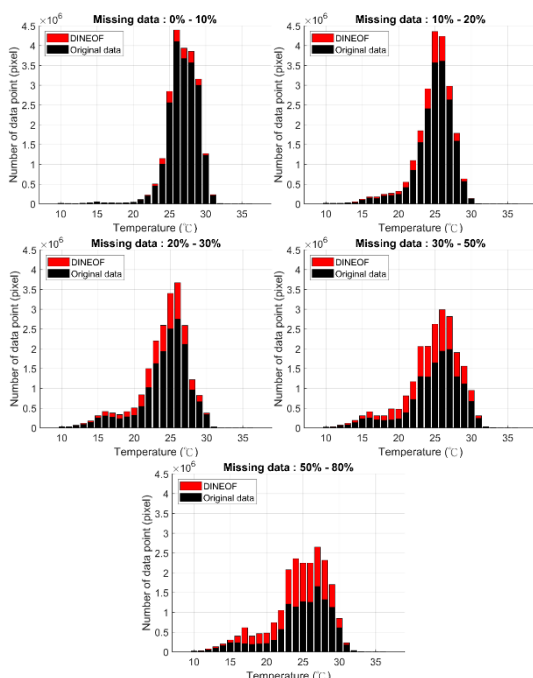


圖 9 於不同缺值率時原始溫度及 DINEOF 補值後溫度數據統計直方圖

此結果原因是 DINEOF 方法是從影像中找出其特徵向量，若影像海溫特徵受雲遮蔽而缺值，DINEOF 就無法獲得其特徵。雲遮蔽越多，缺值率越高，無法獲得海溫特徵機率也就越高。故缺值越多的溫度分布型態與缺值少或無缺值的溫度分布型態相近的機率也就越低。

## 四、結論

本研究目的為利用 DINEOF 理論重建有缺值的衛星海表面溫度數據，以供後續計算臺灣周圍海域的海流場利用；初步歸納出以下幾點：

一、以 DINEOF 方法套用於 25 小時連續海表面溫度資料時，可成功重建該區域所缺漏的海溫資料。

二、以台灣北部海域海表面溫度進行挖空後以 DINEOF 理論補值對照，結果顯示整體數值方均根誤差為 0.14°C，決定係數高達 0.98；若以蘭嶼綠島海域的海表面溫度進行挖空後補值對照，也成功的還原該區域的低溫水團及高溫區域，且整體數值方均根誤差為 0.19°C，決定係數也達到 0.91，顯示若使用 DINEOF 理論來進行海面溫度的補值結果有其可靠性。

三、以資料 0~10%、10~20%、20~30%、30~50% 及 50~80% 五組缺值範圍來探討缺值率對 DINEOF 補值前與補值後的溫度分布變化。若缺值率達 30% 以上時，則補值後的溫度資料僅供參考使用；而在缺值率高達 50% 以上時其分布型態差異較大，不建議使用該溫度補值結果進行後續研究。

## 謝誌

承蒙中央氣象局經費補助使本研究得以順利完成，在此特申謝忱。本研究為中央氣象局研究計畫編號 1102084A 的部分成果。

## 參考文獻

1. Alvera-Azcárate, A., Barth, A., Rixen, M. and Beckers, J. M. (2005). Reconstruction of incomplete oceanographic data sets using empirical orthogonal functions: application to the Adriatic Sea surface temperature, *Ocean Model.*, 9, 325-346.
2. Alvera-Azcarate, A., Barth, A., Sirjacobs, D. and

- Beckers, J. M. (2009) Enhancing temporal correlations in EOF expansions for the reconstruction of missing data using DINEOF, *Ocean Sci.*, 5, 475-485.
3. Beckers, J. M., and Rixen, M. (2003) EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 20, 1839-1856.
  4. Beckers, J.M., Barth, A. and Alvera-Azcarate, A. (2006) DINEOF reconstruction of clouded images including error maps-application to the Sea-Surface Temperature around Corsican Island, *Ocean Sci.*, 2, 183-199.
  5. Huynh, H. N. T., Alvera-Azcárate, A., Barth, A. and Beckers, J. M. (2016) Reconstruction and analysis of long-term satellite-derived sea surface temperature for the South China Sea, *J. Oceanogr.*, 72, 707-726.
  6. Ping, B., Su, F. and Meng, Y. (2016). An improved DINEOF algorithm for filling missing values in spatio-temporal sea surface temperature data, *PLoS ONE*, 11: e0155928.
  7. Thomson, R. E. and Emery, W. J. (2014). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, Third Edition, Elsevier Science.

# 大堀溪及觀音溪之感潮河段特性研究

魏世聰<sup>1\*</sup> 錢樺<sup>2</sup> 張煥盟<sup>1</sup> 林立昌<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立中央大學地球科學前瞻應用研究中心專任助理

<sup>2</sup> 國立中央大學教授/國立中央大學地球科學前瞻應用研究中心主任

<sup>3</sup> 桃園市政府海岸管理工程處處長

## 摘要

為了解感潮河段之水理特性對汙染物質傳輸之影響，本研究針對桃園市白玉藻礁旁之大堀溪與觀音溪監測其河川鹽度、水位及流速的變化，研究其感潮河段之特性與範圍，並探討潮汐對河流出流的影響。

本研究使用溫深鹽度計(CTD)與自主研製之微型化漂流資料浮球進行河川水位、鹽度與表面流速調查，以了解感潮影響狀況。從 CTD 觀測可發現，河流水位受潮汐之變化相較於鹽度較容易向上游延伸，另於監測期間 7 月出現烟花颱風，因低氣壓影響出現感潮河段範圍往上游延伸的現象。大堀溪與觀音溪漂流浮球實驗發現，感潮河段之河流流速會受到潮汐影響而改變，有流速降低、停滯或旋轉及向上游流動等現象產生，流速實驗判斷感潮河段範圍結果與 CTD 觀測結果一致。大堀溪感潮河段範圍大約介於距離出海口 230-670 公尺之間，觀音溪感潮河段範圍大約介於距離出海口 130-360 公尺之間。

關鍵詞：感潮河段、河流表面流速

## Study of the tidal reach of Daku and Guanyin river

Shih-Tsung Wei<sup>1\*</sup>, Hwa Chien<sup>2</sup>, Huan-Meng Chang<sup>1</sup>, Li-Chang Lin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Research Assistant, Advanced Research Center for Earth Sciences, National Central University

<sup>2</sup> Professor/Director, Advanced Research Center for Earth Sciences, National Central University

<sup>3</sup> Director, Office of Coast Administration Construction, Taoyuan

## ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the characteristics and extent of the tidal reach of Daku and Guanyin River along Baiyu algal reef in Taoyuan City. We monitored the changes in salinity, water level, and river surface velocity to investigate the influence of tides on river.

In this study, Conductivity Temperature Depth (CTD) and self-developed miniature drifter used to investigate the water level, salinity, and surface velocity of the rivers to understand the tidal influence. From the CTD observations, it was found that river water level is more likely to extend upper reaches due to tidal changes than salinity. Because of typhoon In-fa in July, the tidal reach extended upper reach due to low air pressure. The drifter experiments in Daku and Guanyin River showed that the river surface velocity in tidal reach was affected. The results of the velocity experiments were consistent with the CTD observation results. The tidal reach of the Daku River is approximately 230-670 m from the river mouth. And the tidal reach of the Guanyin River is approximately 130-360 m from the river mouth.

Keywords: tidal reach; river surface velocity

## 一、研究背景與目的

桃園觀音與新屋的海岸環境與生態是目前台灣海岸帶敏感及具研究價值的區域，其具有獨特的藻礁生態環境，當前正面臨保護與開發的議題。藻礁海域周邊存在工業放流水以及海漂垃圾問題，這些近岸陸源物質輸送與水動力特性與附近河川息息相關，尤其受潮汐影響之感潮河段水理特性對汙染物質傳輸之影響尚待釐清。

河川受海洋潮汐變化影響，河川內鹽份、水位及流速等隨潮汐變化有顯著的週期性變化的河段，稱為感潮河段。感潮河段受到潮汐往復運動，河口環流、鹽淡水混合與鹽水入侵等情形(Julien, 2002)，潮流不僅與床岸產生摩擦引起紊流擴散，而床岸之剪力作用也造成主流在橫向與水深方向之速度差，使得感潮河段之水理變得極具複雜性(蔡, 2001)。河口鹽度與水位同相位變化，流速與水位呈 90° 相位差(柳等, 1998、2000)。在台灣關於感潮河段的研究大部分為大型河川如淡水河，桃園市屬丘陵台地地形，河川大多偏短且河道坡度較陡，相關感潮河段之研究非常少。

本研究針對桃園市白玉藻礁旁之大堀溪與觀音溪進行感潮河段之特性研究。大堀溪主流全長 14.5 公里，流域面積 48.35 平方公里，由東南往西北流入臺灣海峽，因河道受攔河堰控制，故河道坡降較實際地形坡降為緩。大堀溪整體環境的自然度低，人為干擾較為頻繁，根據 102 年經濟部水利署「大堀溪水系規劃檢討報告」，檢測結果除了第一季為中度污染外，其他三季皆為嚴重污染，近年亦有工業廢水排放遭到稽查之案例。觀音溪主流全長約 7.8 公里，流域面積 14.9 平方公里，中下游河段流經都市計畫區因污廢水排放或垃圾堆積導致水質不佳；另河道內既設攔水設施易造成淤積而雜草叢生，影響水體流動致使水質不佳。

本研究為了解感潮河段之水理特性對汙染物質傳輸之影響，對桃園市白玉藻礁旁之大堀溪與觀音溪監測其河川鹽度、水位及流速的變化，研究其感潮河段之特性與範圍，並探討潮汐對河流出流的影響。

## 二、研究方法

本研究利用 KELLER Series 36XiW-CTD 溫深鹽度計 (CTD) 進行河川水位、鹽度調查，以確認感潮範圍。建立 CTD 站之依據是先透過桃園市水務局之河川水系治理規劃檢討報告書(經濟部水利署, 2012、2013)，了解河川之河床高程變化，再搭配桃園海域潮汐水位變化，推估可能之感潮河段範圍，再經過多次的現場調查，根據地形、水利設施(如攔河堰)、河堤水位痕跡加以判斷可能之感潮河段範圍。經評估後大堀溪與觀音溪架設之 CTD 站點位置圖如圖 1、圖 2 所示，CTD 站位置資訊表如表 1 所示。



圖 1 大堀溪 CTD 站點位置圖

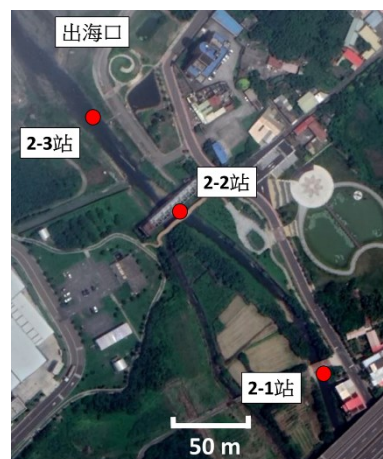


圖 2 觀音溪 CTD 站點位置圖



表 1 CTD 站位置資訊表

	站名	離出海口 距離(m)	上下游站 距離(m)
大堀溪	1-1 站(上游)	690	-
	1-2 站	670	440
	1-3 站	450	
	1-4 站(下游)	230	
觀音溪	2-1 站(上游)	360	230
	2-2 站	200	
	2-3 站(下游)	130	

本研究之鹽度是根據 CTD 量測之導電度推算而得的，導電度轉換為鹽度所使用的方法為鹽度測定法中的間接法(郭等人，1990)，首先算出導電度比(Conductivity Ratio)Rt，Rt 為現場量測之導電度 C 與相同溫度下之 32.4356 克/公斤的 KCl 溶液導電度的比值，本研究使用之 CTD 量測之導電度是經過 25°C 校正後之數據，故此 Rt 便是現場量測之導電度 C 與 25°C 條件下之 32.4356 克/公斤的 KCl 溶液導電度的比值，經計算後者導電度為一定值 53064.98 $\mu$ S/cm，故 Rt 如下所示：

$$Rt = \frac{C}{53064.98} \quad (1)$$

所求之鹽度為 S：

$$S = a_0 + a_1Rt^{\frac{1}{2}} + a_2Rt + a_3Rt^{\frac{3}{2}} + a_4Rt^2 + a_5Rt^{\frac{5}{2}} + \Delta S \quad (2)$$

其中 t 為溫度 25°C 計算， $a_0 \sim a_5$ 、 $b_0 \sim b_5$  皆為常數：

$$\Delta S = \left[ \frac{t-15}{1+0.0162(t-15)} \right] \left( b_0 + b_1Rt^{\frac{1}{2}} + b_2Rt + b_3Rt^{\frac{3}{2}} + b_4Rt^2 + b_5Rt^{\frac{5}{2}} \right) \quad (3)$$

為調查河川受潮汐影響之表面流速變化，本研究使用自主研製之微型化漂流資料浮球做為觀測工具(如圖 3 所示)，其觀測河流表面流場的方式屬現場接觸式觀測，屬於 Lagrangian 式空間上的觀測，以漂流式浮標 (SVP Drifter) 自記其隨河流漂送的路徑軌跡及其對應的時間，定時由衛星將資料回傳岸上用以計算流速，此一方式已沿用數十年，長期以來都是海洋科學研究中，海流觀測的主要研究工具。質點追

蹤是沿襲理論力學的方法，把流體看作是若干質點所組成的質點系，以研究個別流體質點的運動為基礎，通過對每個流體質點運動的研究來確定整個流場特徵。



圖 3 本研究自主研製之微型化漂流資料浮標

### 三、觀測結果與討論

#### 3.1 大堀溪觀測結果：

本研究之 CTD 監測從 2021 年 6 月至 8 月，大堀溪上游 1-2 站幾乎不會出現水位受到潮汐影響而變化，3 個月的觀測中只出現 2 次較大潮時(7 月 23 日 22:30 與 24 日 23:30)有大約 30 公分左右的水位抬升的現象，但無觀測到鹽度上升的情形出現，如圖 4 所示，水位上升原因除了 7 月 23~25 日有顯著之大潮出現外，期間亦有烟花颱風經過，受低氣壓影響河流水位上升現象較為明顯，24 日則是受降雨引致水位上升，於 25 日之後該測站就無水位和鹽度受潮汐影響而上升的情形出現。

大堀溪 1-1 站位於相對 1-2 站大約 1 公尺高的攔河堰之上，並從 1-1 站的觀測數據同樣顯示水位與鹽度沒有受到潮汐影響的現象發生。從 CTD 結果顯示大堀溪感潮河段於大潮時最遠延伸至大約距離出海口 670 公尺處(1-2 站位置)，非大潮時感潮河段範圍一般介於 1-2 與 1-3 之間，小潮時則介於 1-3 與 1-4 之間，如圖 5 所示，8 月 29 日之後的小潮期間，潮汐對大堀溪水位與鹽度的影響逐漸無法延伸至 1-3 站之上游處，並且可以發現，河流水位受潮汐之變化相較於鹽度較容易向上游延伸。

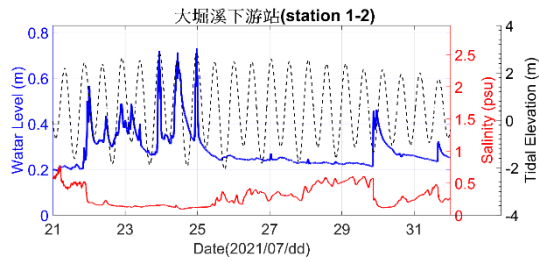


圖 4 大堀溪 1-2 水位與鹽度監測結果

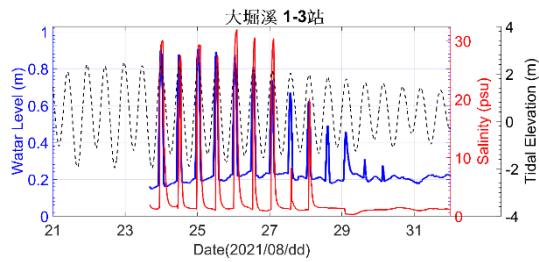


圖 5 大堀溪 1-3 水位與鹽度監測結果

於 2021 年 8 月 26 日，本團隊進行大堀溪漂流浮球觀測實驗，當日約 13:00 為大潮時之最高潮位，永安潮位站顯示潮位高度達 2.17 公尺，於最高潮位的前後 2~2.5 小時為實驗的執行時間，觀測期間大堀溪受海水影響之流速變化。從最高潮位前 1.5 小時的圖 6 可以看出，橫跨大堀溪的 61 快速道路位置(原 1-2 站下游 100 公尺處)，流場是明確往下游移動，流速大約 0.8-1 m/s，於 1-3 站與 1-4 站附近，流場則呈顯打轉和緩慢停留等現象，意味著海水入侵範圍可能接近 1-3 站附近；於最高潮位時如圖 7 所示，流場有明顯往上游移動的現象，此現象至 61 快速道路下方即停止繼續往上游移動；於開始退潮時如圖 8 所示，發現下游處有較上游處提早一些往下游方向流動的現象；經過最高潮位 1 小時後，整條大堀溪流場皆明確往下游流動，表示潮位下降，大堀溪內之河水與海水逐漸往出海口方向離開，部分流速可達 1 m/s 左右，如圖 9 所示。

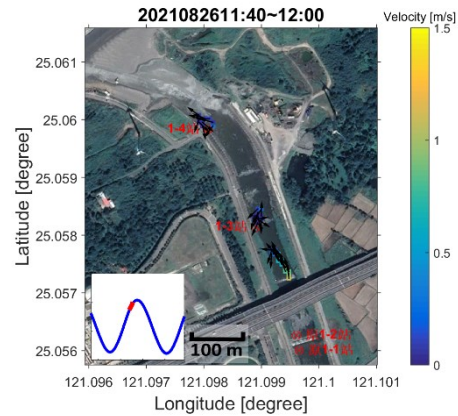


圖 6 大堀溪漂流浮球漲潮時觀測結果

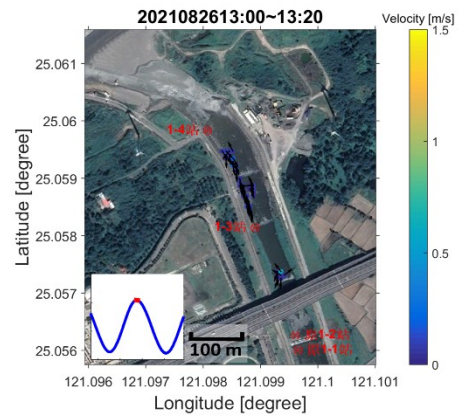


圖 7 大堀溪漂流浮球最高潮位觀測結果

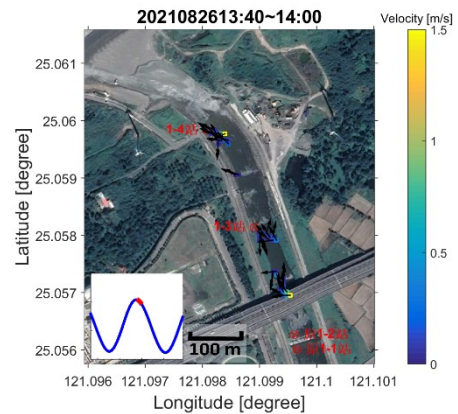


圖 8 大堀溪漂流浮球退潮觀測結果 1

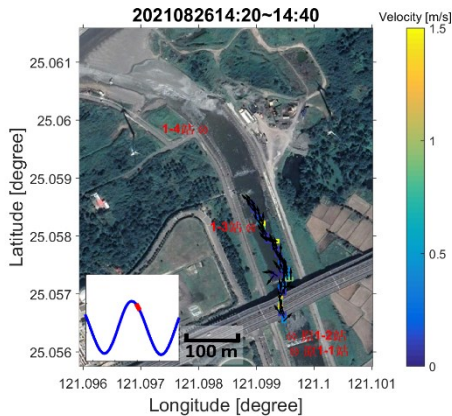


圖 9 大堀溪漂流浮球退潮觀測結果 2

### 3.2 觀音溪觀測結果：

觀音溪上游 2-1 站幾乎不會出現水位受到潮汐影響而變化，3 個月的觀測中也只出現 2 次較大潮時 (7 月 23 日 22:30 與 24 日 23:30) 有大約 10 公分左右的水位抬升的現象，並無觀測到鹽度上升的情形出現，如圖 10 所示，水位上升原因除了 7 月 23~25 日有顯著之大潮出現外，期間亦有烟花颱風經過，受低氣壓影響河流水位上升現象較為明顯，24 日則是受降雨引致水位上升，於 25 日之後該測站就無水位和鹽度受潮汐影響而上升的情形出現。

從 CTD 結果顯示觀音溪感潮河段於大潮時最遠延伸至大約距離出海口 360 公尺處(2-1 站位置)，小潮時感潮河段甚至不會延伸超過 2-2 站，只能延伸至 2-3 站附近，感潮河段範圍距離出海口不到 150 公尺。

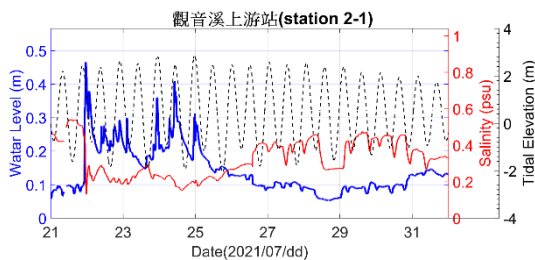


圖 10 觀音溪水位與鹽度監測結果

7 月 27 日於觀音溪執行漂流浮球觀測實驗，最高潮位時，接近觀音溪 CTD 上游站附近流速最快可達約 1~1.4 m/s 之間，往下游移動 50 公尺後，流速

降至 0.05~0.1 m/s，在出海口附近有出現流場往上游移動的現象，如圖 11；於退潮時，CTD 上游站附近流速與最高潮位時相同，而上游站往下游移動 50 公尺流速則提升為 0.1~0.2 m/s，根據蔡(2004)漲潮時感潮河段流速會出現表層底層或左右兩邊流速流向相異的現象，說明觀音溪感潮河段於最高潮位時，有受潮汐影響而流速下降的現象發生，如圖 12 所示。由此結果得知，當日高潮位時感潮河段範圍大約延伸至 2-1 站下游 50 公尺處附近，此結果與當天 CTD 觀測結果一致。

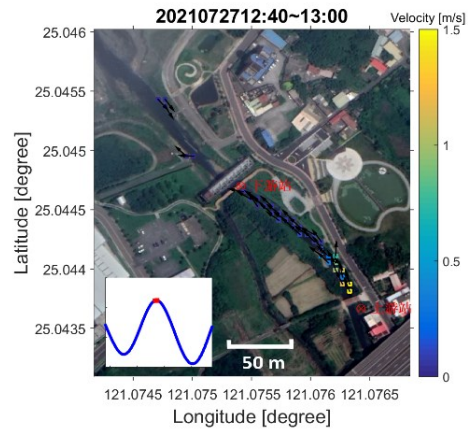


圖 11 觀音溪漂流浮球最高潮位流速結果

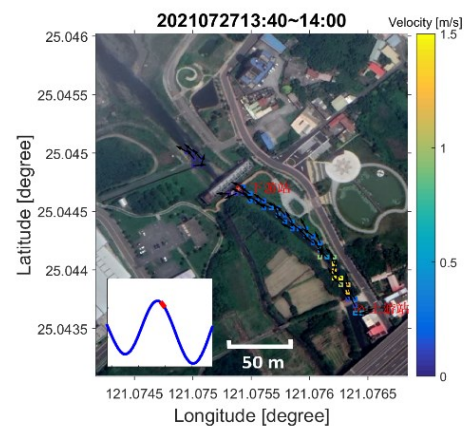


圖 12 觀音溪漂流浮球退潮時流速結果

#### 四、結論

大堀溪感潮河段範圍大約介於距離出海口 230-670 公尺之間，觀音溪感潮河段範圍大約介於距離出海口 130-360 公尺之間。從 CTD 觀測可發現，河流水位受潮汐之變化相較於鹽度較容易向上游延伸。颱風經過時，潮汐水位受低氣壓影響上升幅度較高，引致感潮河段範圍向上延伸。另外，感潮河段之河水流速會受到潮汐影響而改變，有流速降低、停滯或旋轉及向上游流動等現象產生。

#### 參考文獻

1. 郭廷瑜、劉康克、白書禎(1990)，使用 Autosal 鹽度儀測定鹽度之經驗與實務( I )，國科會海研一號貴重儀器使用中心技術手冊第 004 號。
2. 柳文成、許銘熙、郭義雄、郭振泰(1998)，淡水河河口環流特性之研究。台灣水利，第 46 卷，第 1 期。
3. 柳文成、許銘熙、郭義雄(2000)，河口潮汐入侵峰之討論。台灣水利，第 48 卷，第 2 期。
4. 蔡丁貴(2001)，感潮河段水位流量關係之建立，國立臺灣大學水工試驗所。
5. 蔡致維 (2004)，愛河之水文研究，國立中山大學海洋資源學系研究所碩士論文。
6. 經濟部水利署(2012)，易淹水地區水患治理計畫，第 2 階段實施計畫縣管河川觀音溪水系檢討規劃-治理規劃報告。
7. 經濟部水利署(2013)，易淹水地區水患治理計畫第 2 階段實施計畫，桃園縣縣管河川大堀溪水系治理規劃檢討報告。
8. Julien P.Y.(2002)，River Mechanics.

# MUSIC 與 BF 演算法應用於高頻陣列雷達 之比較

陶瑞全<sup>1\*</sup> 錢樺<sup>2</sup> 魏世聰<sup>3</sup> 鄭安<sup>4</sup> 李政達<sup>5</sup> 蔡立宏<sup>6</sup> 李俊穎<sup>7</sup>  
林受勳<sup>8</sup>

<sup>1\*</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所博士生  
<sup>2</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所教授  
<sup>3</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所助理  
<sup>4</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所碩士生  
<sup>5</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員  
<sup>6</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任  
<sup>7</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員/科長  
<sup>8</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員

## 摘要

本研究探討使用多重訊號分類演算法(Multiple Signal Classification, MUSIC)，應用於陣列式高頻雷達(LERA MK III)系統取得之都卜勒距離譜(Doppler-Range Spectrum, DR Spectrum)，計算海表流速的可行性，並與波束合成演算法(Beam Forming, BF)解算之海表流速產品進行比較。

從比較結果發現在海表流速解算上，MUSIC 演算法可以較完整解析各方向之訊號能量；相對地 BF 演算法則呈現有限方位角的網格內平均訊號。而利用兩種方法來計算海流徑向速度，MUSIC 演算法則需要較長時間的資料累積來計算，方能得到完整的覆蓋面積計算結果。研究成果在時序列與散點圖中可發現，MUSIC 與 BF 演算法計算結果與實測資料 AWAC 有一定的相關性。雖 MUSIC 流速分析表現尚不及 BF 演算法，但 MUSIC 演算法在實際應用仍有不錯表現。

關鍵字：陣列式高頻雷達，多重訊號分類演算法，波束合成演算法

## Comparison of MUSIC and BF Algorithms for High Frequency Array Radar

Duy-Toan Dao<sup>\*</sup>, Hwa Chien, Shih-Tsung Wei, An Cheng, Cheng-Da Lee,

Li-Hung Tsai, Chun-Ying Lee, Shou-Shiun Lin

<sup>\*</sup>Doctoral student, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

## ABSTRACT

This study investigates the feasibility of using the Multiple Signal Classification (MUSIC) algorithm to calculate the sea surface current velocity by applying the Doppler-Range Spectrum (DR Spectrum) obtained from High-Frequency Radar (LERA MK III system). The results were compared with those of the Beam Forming (BF) algorithm.

From the comparison results, it is found that MUSIC algorithm can resolve the signal energy in all directions more completely in the sea surface velocity calculation, while BF algorithm presents the average signal within the grid with limited azimuth. In contrast, the BF algorithm presents the average signal within the grid with limited azimuth. The time series and scatter plots show that the results of MUSIC and BF algorithms are correlated with the measured AWAC data. Although the performance of

MUSIC flow analysis is not as good as that of BF algorithm, MUSIC algorithm still has good performance in practical applications.

Keywords: High-Frequency Radar; Multiple Signal Classification; Beam Forming (BF) algorithm

## 一、研究目的

2018 年 11 月下旬，交通部運輸研究所於臺中港北部建立一套由 16 個接收天線組成的陣列式高頻雷達(LERA MK-III)系統，用於長期監測臺灣海峽中部的海況，如欲從高頻雷達的都卜勒頻譜中獲取海流、波浪、風等參數資訊，解算出良好的海氣象量值，精進雷達訊號分析技術是重要的課題，因此本研究使用 MUSIC 與 BF 兩種演算法應用於此雷達系統進行分析應用之比較。

都卜勒距離譜(Doppler-Range Spectrum, DR Spectrum)是高頻線性調變雷達最主要的觀測結果，每一個接收天線的都卜勒距離譜都是全向性的，若要能探測方位，必須進行訊號方向定位(Direction of Arrival, DOA)技術，估計不同方位角方向的海況參數。目前 DOA 兩種主要方式分別是參考 Schmidt(1986)的多重訊號演算法(Multiple Signal Classification, MUSIC)以及參考 Bhuiya et al.(2012)的波束合成(Beam forming)演算法。

根據 BF 演算法的理論，海氣象量值之方向角解析度受到天線數量的限制(Bhuiya et al., 2012)，因此於天線數量不變的情況之下，尋求更精確解析的方位，本研究以 MUSIC 演算法之可行性，與 BF 兩種演算法探討海表流速的方向，並將計算結果進行比較。

## 二、研究方法

### 2.1 波束合成演算法(Conventional Beamforming)

陣列雷達訊號接收示意如圖 1 所示，其中  $M$  為接收天線數量， $\theta_i$  為自訊號  $i$  之入射角， $\Delta$  為接收天線間距，根據天線接收到相同訊號時間與距離關係，以推算訊號來源位置。入射信號將首先到達最右邊的第一支天線(圖 1)，假設  $d$  個信號源產生的信號  $S_i(t)$ ，且  $1 \leq i \leq d$ ，第  $M$  個元素在時間  $t$  收到的所有訊號和雜訊可以表示為(Bhuiya, Islam et al. 2012)：

$$x_m(t) = S_i(t) \sum_{i=1}^d e^{j(M-1)\mu_i} + n_M(t), \text{ for } M = 1 \quad (1)$$

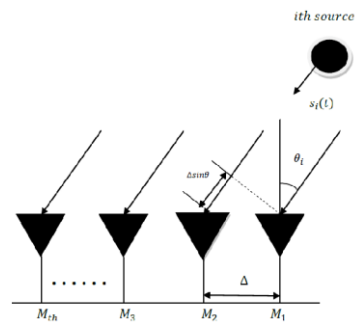


圖 1 M 組接收天線之陣列雷達示意圖(Bhuiya et al., 2012)

式(1) 亦可寫為：

$$x = AS(t) + n(t) \quad (2)$$

其中， $x$  是所有訊號總合， $S$  是由  $M$  組天線接收的資料列向量， $n$  是天線雜訊， $A$  是導引矩陣(Steering Matrix)，其包括天線陣列於特定方位的導引向量(Steering Vector)。

其想法是在一觀測期間內將陣列轉向，並測量特定方位的能量。當轉向的方位與後向散射信號(backscattered signals)方位一致時，將測量到最大能量，並得以估計 DOA。假設一權向量  $w$ ，將接收天線接收到的訊號進行線性組合(Linear combination)，組成一輸出信號  $Y(t)$ 。

$$Y(t) = \sum_{i=1}^M w_i^* x_i(t) = w^H X(t) \quad (3)$$

雷達陣列經過  $K$  次快照(snapshot)的平均總能量可表示為：

$$\begin{aligned}
P(w) &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |Y(t_k)|^2 \\
&= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K w^H X(t_k) X(t_k)^H w
\end{aligned} \quad (4)$$

or

$$P(w) = w^H R_{xx} w$$

其中， $w_i$  是第  $i^{th}$  個反射訊號源的權重，\* 是複數共軛 (complex conjugate)， $H$  是共軛轉置矩陣 (conjugate transpose)， $R$  是輸入訊號的共變異數矩陣 (Covariance matrix)。而權重  $w_i$  在不同波束合成法會有所不同。

對於常規波束合成演算法 (conventional or Bartlett or Delay & Sum beamformer method)，則以具掃描方位 (scanning angle)  $\theta$  的導引向量  $A(\theta)$ ，做為權重向量 (weight vector)。

$$w = A(\theta) \quad (5)$$

將式(5)帶入式(4)，使能量譜成為 DOA 的函數，表示為：

$$P(\theta)_{BA} = A(\theta) R_{xx} A(\theta)^H \quad (6)$$

最終找出最大能量的方位，即為目標方位 (Teague 1986, Helzel et al. 2006, Bhuiya et al., 2012)。

## 2.2 多重訊號演算法(MUSIC)

Schmidt(1986)提出 MUSIC 演算法，為一訊號方向定位(DOA)技術，促進了特徵結構類演算法的興起和發展，成為空間譜估計理論體系中的標誌性演算法。過去計算方向波譜的方法，包括：傅立葉級數、最大概似法(Capon MLM)、最大熵法(MEP)等演算法都是針對陣列雷達接收資料共變異數矩陣進行直接處理，而 MUSIC 演算法的基本概念則是對任意陣列輸出資料的共變異數矩陣 (Covariance matrix) 進行特徵分解，從而得到與訊號分類相對應的訊號子空間(signal subspace)和與其正交的雜訊子空間(noise subspace)，然後利用這兩個子空間的正交性建立空間譜函式，通過譜峰搜尋，檢測訊號來源位置。MUSIC 演算法特性對於接收天線位置、增益(gain)、訊號相位誤差非常敏感(Schmidt, 1986)。

於 Schmidt(1986)中  $X$  是陣列雷達接收之訊號可分解為：

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_M \end{bmatrix} = [a(\theta_1) \ a(\theta_2) \ \dots \ a(\theta_D)] \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_M \end{bmatrix} \quad (6)$$

或

$$X = AF + W \quad (7)$$

式(6)·(7) (Schmidt, 1986)， $D$  是訊號來源數量， $W$  是雜訊(noise)為儀器內部產生或外部環境接收， $a$  是  $M \times D$  大小之導引矩陣為一範德蒙矩陣 (Vandermonde Matrix)， $F$  是發射訊號源。

透過計算出各天線 DR Spectrum 之自相關矩陣 (Auto-correlation Matrix) 及交互相關矩陣 (Cross-correlation Matrix) 可取得共變異數矩陣  $R_s$ ：

$$R_s = \begin{bmatrix} \langle R_{X_1 X_1}(n) \rangle & \dots & \langle R_{X_1 X_{16}}(n) \rangle \\ \langle R_{X_2 X_1}(n) \rangle & \dots & \langle R_{X_2 X_{16}}(n) \rangle \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle R_{X_{16} X_1}(n) \rangle & \dots & \langle R_{X_{16} X_{16}}(n) \rangle \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中  $R_{X_M X_M}$  表第  $M$  天線之自相關矩陣， $R_{X_M X_N}$  表第  $M$  天線與第  $N$  天線之交互相關矩陣。

並將共變異數矩陣解算特徵向量  $P$ ：

$$R_s = APA^H \quad (9)$$

式(4)中  $H$  表共軛轉置矩陣。

而特徵向量  $P$  在 Schmidt(1986)中 MUSIC 演算法可得 DOA 之擬函數(Pseudo-spectrum)  $P_{MU}$ ：

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{A(\theta)^H Q_n Q_n^H A(\theta)} \quad (10)$$

式(10)中  $A(\theta)$  是導引向量， $Q_n$  是雜訊子空間的特徵向量，若  $\theta$  與實際訊號之入射角一致，讓  $Q_n$  與  $A(\theta)$  正交的特性使分母部分為 0，在  $P_{MU}(\theta)$  中形成峰值，解算出訊號來源。

## 三、結果與討論

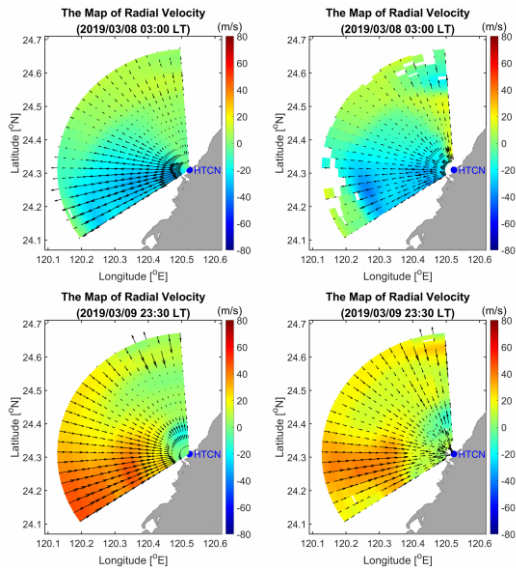


圖 2 不同演算法在空間上的逕向海表流分布。(左)BF 演算法、(右)MS(MUSIC)演算法，觀測時間(上)2019/03/08 03:00、(下) 2019/03/09 23:30。

本研究分析自交通部運輸研究所於臺中港北部陣列式高頻雷達於 20190116 至 20190311 所接收的資料，並以 MUSIC 演算法與 BF 演算法解析逕向海表流流速、流向，最後討論 MUSIC 演算法在應用層面上的可行性。

首先比較在空間上逕向海表流分布，由圖 2 所示，圖中逕向流場紅為流向雷達站、藍為流出雷達站。於 2019/03/08 03:00 以 BF 演算法(左上)與 MUSIC(MS)演算法(右上)，均解析在西南側、觀測範圍約 60°的區域有海流流出的雷達站現象；於 2019/03/09 23:30 以 BF 演算法(左下)與 MUSIC(MS)演算法(右下)，均解析在西南側、觀測範圍約 60°的區域有海流流向的雷達站現象。此二案例中顯示，兩演算法對於流速、流向在空間網格分布上有不錯的相似度。

再針對兩演算法與固定實測點海表流速的分析。固定實測點使用的是 AWAC 之聲學都卜勒流速剖面儀(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)的近海表流向流速資料，放置於 120.4819333°E, 24.30331667°N。

兩演算法於固定點隨時間的逕向海表流時序圖如下，圖中可以發現 MUSIC(MS)演算法(紅三角)解算出的逕向流速，在低流速時較為貼近 AWAC 的

數值，但在高流速時數值差異有來回跳動的現象；相較之下 BF 演算法(藍菱形)之連續逕向流速較為平滑，與 AWAC 所測數值整體差異較小，趨勢相對一致。

在研究期間兩演算法與 AWAC 比較的散點圖中(圖 4)，BF 演算法結果較好地擬合了 AWAC 測得之數值( $R=0.88$ )；而 MUSIC 演算法( $R=0.6$ )雖不及 BF 演算法與 AWAC 的相關性，仍有一定的可信度。

進一步對於兩演算法在空間上的逕向海表流相關性分布進行分析，可以看到兩演算法在南側海域的海表流相關性要優於北側，原因來自於北側海表流相對較弱，造成解析過程中產生誤差，進而導致兩演算法在北側不佳的相關性。需要更多的觀測時間，進一步驗證兩演算法對於北側海域的相關性分析。

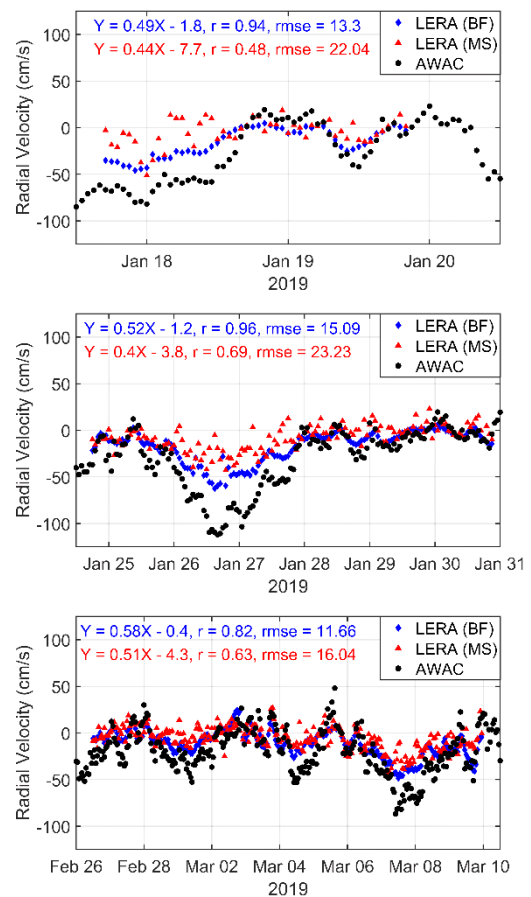


圖 3 不同演算法於固定點隨時間的逕向海表流時序圖。BF 演算法(藍菱形)、MS(MUSIC)演算法(紅三角)、AWAC(黑點)，觀測時間：(上) 2019/01/17 12:00 至 2019/01/20 12:00 (中) 2019/01/24 12:00



至 2019/01/31 00:00 (下)2019/02/26 00:00 至  
2019/03/10 12:00。

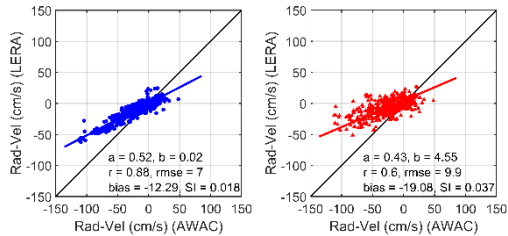


圖 4 不同演算法於固定點隨時間的海流逕向流速散點圖。橫軸為(左)BF 演算法、(右)MS(MUSIC)演算法與縱軸 AWAC 測得。觀測時間由 20190116 至 20190311。

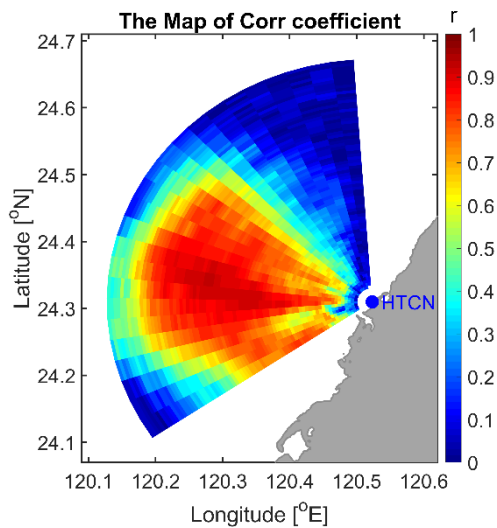


圖 5 兩演算法在空間上的逕向海表流相關性分布。

透過上述結果我們可以看出 MUSIC 演算法相較於 BF 演算法在網格化解析海表流方面仍有不足，但已初步獲得 MUSIC 演算法在海表流解析的成果，且在與 AWAC 有一定相關性。期望未來 MUSIC 演算法在海表流解析的精進，對於其他海表參數如：波浪、風、方向波譜等參數資訊也能進一步的進行分析。

### 參考文獻

1. 吳立中，莊士賢，邱永芳，陳禹儒 (2016) MUSIC 演算法應用於高頻雷達線性陣列天線訊號解算之研究，105 年天氣分析與預報研討會，5-13.

2. Bhuiya, S. N., Islam F. and Matin M. (2012) Analysis of Direction of Arrival Techniques Using Uniform Linear Array. *International Journal of Computer Theory and Engineering* 4: 931-934.
3. Helzel, T., Kniephoff, M. and Petersen, L. (2006) WERA: Remote ocean sensing for current, wave and wind direction, *IEEE US/EU Baltic International Symposium, 2006*, pp. 1-8, doi: 10.1109/BALTIC.2006.7266143.
4. Schmidt, R.O. (1986) Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 34(3), 276-280.
5. Teague, C.C. (1986) Multifrequency HF radar observations of currents and current shears. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 0E-11, 258-269.

## 異常海象引致船難事件之研究

陳盈智<sup>1</sup> 董東璟<sup>2</sup> 蔡政翰<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系博士生

<sup>2</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

<sup>3</sup> 國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系名譽教授

### 摘要

海洋中異常海象是引致船難事件發生的主要原因。本研究參考前人研究，歸納因海象造成之船難可能原因有二，其一與波浪能量集中有關，波浪能量集中情形可以從波譜參數進行討論，包含譜尖參數( $Q_p$ )與方向分散參數( $\sigma_\theta$ )，它們分別代表波譜在頻率域以及方向域上能量的集中程度， $Q_p$  愈大或  $\sigma_\theta$  愈小都代表波浪能量愈集中；其二是交錯海況，可從方向波譜中波浪的能量分布探討。本研究從過去 20 年間挑選數件典型的船難事件搭配波浪模式輸出波譜，分析船難事件發生前後波譜參數，結果顯示在船難事件發生時，波浪能量有相對集中的情形，但事件發生後數小時，波浪能量又再回復船難前的海象特徵；同時也發現部分船難事件發生前後，持續有兩個波浪系統存在，也符合前述交錯海況的情形。此結果顯示從波能集中的趨勢或分布情況，可用於探討船難之發生。

關鍵詞：船難、異常海象、波譜、譜尖參數、方向分散參數

## A Study on Ship Accidents Caused by Freakish Sea State

Ying-Chih Chen<sup>\*</sup>, Dong-Jiing Doong, Cheng-Han Tsai

<sup>\*</sup> Ph.D. student, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

Shipwreck usually cause huge economic losses, human casualties and environmental pollution. However, the conditions of typical sea states that trigger shipping accidents are not well understood. Therefore, the main purpose of this study is to understand the cause of shipwreck by analyzed the wave data, and to find feature of spectrum for sea state warning in future which is helpful for safety. Using the trajectory in the  $Q_p$ - $\sigma_\theta$  diagram to graphically represent the temporal change of the directional spectrum during ship accidents. The higher  $Q_p$  and lower  $\sigma_\theta$  represent the more concentrated wave energy in frequency fetch and direction fetch, respectively. During ship accident, the diagram scatter plot between  $Q_p$  and  $\sigma_\theta$  move from upper left to lower right. This results showed the positive correlation between the shipwreck and seas with more concentrated wave energy. To conclude, occurring shipwrecks may link with freak wave, because the wave energy concentrated trend is similar to freak wave generation

Keywords: Rip current; wave-current coupling; numerical simulation; wavelet transform; Image detection

### 一、前言

全世界船隻活動頻繁，船難的發生也時有所聞。發生船難事件的原因有很多，經調查發現，超過 30%

的事故是由於天候不佳造成的(Faulkner et al., 2003)。船難的發生往往會造成人員傷亡以及鉅額的經濟損失，甚至引發海洋生態汙染等問題。因此研究船難

事件發生原因對於船隻航行安全及海洋生態是很重要的。

前人研究中，Waseda et al. (2014)分析發生於西北太平洋的船難事件，以波浪分散參數與譜尖參數畫二維平面圖分析船難前後波譜變化，發現船難大多發生在 $\sigma$ 。較前後小且 $Q_p$ 較前後大的位置，代表當時波能相較前後集中可能與異常波浪有關；Trulsen et al. (2015)以不同的分布模擬分析西班牙西北外海貨輪船難當時的最大波峰高，結果顯示交錯海況下的非線性作用，對於峰度與最大波峰高影響較小。Cavaleri et al. (2012)分析地中海巡航艦遭大浪襲擊之船難事件，發現此事件發生時為交錯海況，當兩成分波頻率與振幅相近且均有極窄的譜寬，交錯角與波峰振幅會呈正相關性。Fedele et al. (2017)綜合波浪模式、高階譜法(Higher Order Spectral, HOS)以及海況分布模式(Tayfun-Fedele model)分析巴哈馬外海在颱風期間發生的船難，以小範圍高解析度分析船難附近空間及時間上波峰高的變化。

前人研究中大多以個案進行分析，由水槽實驗或數值模擬的方式來還原船難當時之海況，探討船難事件時之海況是否為異常波浪或其他原因所引致。本研究則將從波浪能譜的角度著手，探討過去船難事件在發生前後的波浪能量變化(含方向)進行分析，嘗試還原船難發生時的海況，期望此研究成果有利於瞭解船難事件成因，對未來船難海況預警帶來助益。

## 二、研究資料

臺灣附近海域於16年間(2004年至2019年)因海象造成之船難事件合計有120件，這些案例來自於國際海事組織(IMO)14起，以及新聞報導之船難事件106起。本節將以統計方式分析船難發生空間與時間上之特性。並再介紹本研究模擬船難之波浪模式及模式驗證。

### 2.1 船難事件統計

因海象造成之船難位置散布於台灣周遭海域，從近岸幾百公尺到離岸幾公里的海域均有，水深自幾公尺到幾千公尺的地方均會發生，圖1顯示這些船難事件發生位置與其水深概況，圖中紅點代表國際海事組織(IMO)所記錄之14起船難，其餘為台

灣本地所紀錄者。值得注意的是，東北角沿海發生船難事件密度最高。遠洋漁業活動海域如東海、南海及菲律賓海亦皆有因海象造成之船難紀錄，其中以南海及巴士海峽發生案例較多。綜觀所蒐集的資料，以漁船占比最高，達42%，主要發生於近岸，而噸位較大的貨輪和遠洋漁船主要發生於外海。

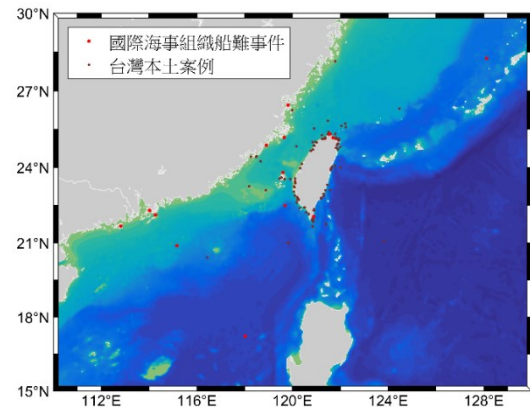


圖1 臺灣鄰近海域因海象造成之船難事件位置圖

### 2.2 波浪資料

現場測站分布稀疏，船難附近較難有現場測站，加上船難本身的資料亦具有不確定性，因此，本文使用WAVEWATCH III數值模式來模擬船難海況，期望透過模式模擬，對於船難發生時之海象特徵有更進一步的瞭解。

波浪模式計算域之空間離散採用單向式巢狀網格，網格解析度分別為0.25及0.15度，內層網格範圍為東經110度~130度，北緯10度~30度。模式輸入風場採用中央氣象局WRF大氣模式。模式頻率域解析度由0.04~0.4Hz共分40個頻帶、方向解析度以10度為一單位，分36個方向傳遞。本文主要以模式輸出之示性波高、尖峰週期、方向波譜等參數進行船難海況分析。

本研究透過模擬驗證結果良好，選用台灣各海域的代表性測站來進行驗證，分別是北方海域的富貴角浮標、東部外海的台東外洋浮標、西南外海的東沙浮標、台灣海峽南端的七美浮標、以及台灣海峽北端的馬祖浮標，絕對誤差0.3公尺、相關係數達0.92、無因次方均根誤差為23.9%，但在波高較大的海況時，WW3略有高估的趨勢，更多結果可參考吳(2020)。

### 三、研究方法

本研究以波譜參數來分析船難事件發生期間波浪能量的變化趨勢，採用之波譜參數分別為 Goda (1970)提出以譜尖參數(peakedness parameter,  $Q_p$ )來代表波譜頻率域的特徵參數，Forristall and Ewans (1998)提出方向分散參數(directional spreading,  $\sigma_\theta$ )作為波譜在方向上的特徵參數。本章說明上述兩參數代表之物理意義以及不同海況下的參數特徵。

#### 3.1 譜尖參數

譜尖參數代表頻譜峰值銳度以及能量集中程度，是一無因次參數且數值大於 1。 $Q_p$  在計算上使用較穩定的 0 次矩( $m_0$ )及一維頻譜( $S(f)$ )，與頻譜截斷頻率大小無關，且較不會受到高頻能量之影響(Prasada et al., 1988; Serio et al., 2005)。

$$Q_p = \frac{2}{m_0} \int df f S^2 S(f) \quad (1)$$

前人研究中對於譜尖參數與代表波浪非線性參數做了些探討，如 Serio et al. (2005)將  $Q_p$  應用於計算 BFI 值取代了原本的譜寬參數，使 BFI 值能更準確表示波浪非線性的程度。Waseda et al. (2009)依水槽實驗發現  $Q_p$  與水位峰度值正呈相關性，以水槽實驗角度驗證  $Q_p$  是能代表波浪非線性程度之參數。Prasada et al. (1988)分析海洋中不同海況下對  $Q_p$  值的影響，發現  $Q_p$  的變化不取決於窄譜(單峰)或寬譜(多峰)的海況，顯示  $Q_p$  對頻譜譜形的依賴性較小。

本研究以一年模式模擬結果分析  $Q_p$  在長時間下單峰與雙峰海況分布差異(圖 4)，在單雙峰海況下  $Q_p$  四分位數  $Q_1$ 、 $Q_3$  約為於 1.8 與 2.2，顯示在單雙峰海況下對於  $Q_p$  數值上影響小，是適合代表波譜峰值能量集中程度之參數。

#### 3.2 方向分散參數

方向分散參數在波譜上代表波浪在空間中傳遞的寬度(式 2)，其數值介於 0 至  $\pi/2$  之間，單位為弧度，在本研究中則轉換為度表示。

$$\sigma_\theta = \left\{ 2 \left( 1 - \left( \frac{p^2 + q^2}{m_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中

$$p = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \cos(\theta) S(f, \theta) df d\theta \quad (3)$$

$$q = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \sin(\theta) S(f, \theta) df d\theta \quad (4)$$

Waseda et al. (2009)從實驗發現，方向分散參數愈大，水位峰度愈小，顯示波浪在空間中能量傳遞寬度越廣，則波浪非線性的程度越低。Luxmoore et al. (2019)比較交錯角與方向分散參數對於水位峰度及波高超越機率的相關性，結果發現方向分散參數比交錯角更適合代表交錯海況下非線性的程度。Mori et al. (2011)提出方向分散參數與水位峰度在交錯海況下的經驗關係式，量化了波浪方向分散程度與水位峰度之關聯性。

方向分散參數在不同海況或譜形下計算出的數值會有所差異，因此本研究分析在單峰及雙峰譜下方向分散參數的分布差異性，以長時間波浪模式結果進行分析，方向分散參數分布結果如(圖 5)，波浪模式在單峰及雙峰計算方向分散參數結果有明顯的差異性，在單峰海況下介於 28 度( $Q_1$ )至 35 度( $Q_4$ )間，而雙峰海況下  $\sigma_\theta$  則介於 34 度( $Q_1$ )至 47 度( $Q_4$ )間。以四分位數分析結果發現，在波浪模式中 35 度可以視為一單雙峰海況的閾值。

前人研究波浪在方向上能量分布大部分是以方向分散參數為主，因為此參數相較於交錯角更能表達在交錯海況下波浪非線性的程度。在波浪模式模擬結果在單雙峰海況下是有數值上差異，對於分析船難事件前後波譜在方向上能量變化是有很明確量值的差異性。

### 四、案例討論

本研究挑選三件較典型的漁船船難事件進行案例說明，並以波浪模式模擬結果分析船難事件前後波高與波譜能量變化情形，對海氣象條件所造成之船難事件進行特性之歸納。船難當時模式模擬波浪參數龜裂於表 1。

#### 案例一：龍進興 26 號事件，東北季風期間

宜蘭頭城籍漁船龍進興 26 號於 2005 年 1 月 5 日 5 時許，在大溪漁港外約 500 公尺(圖 2)遭強風大浪襲擊翻覆沉沒。事件發生時台灣周遭海域正受強烈大陸冷氣團影響，東北部海面平均風力 7 至 8 級，最大陣風 10 級。模擬事件前後臺灣附近海域波高變化發現(圖 3)，在事件發生前波高明顯由北往南逐漸升高，在船難事件發生時，台灣海峽北部與

宜蘭外海波高達到 1 公尺以上。從船難地點的波譜演變(圖 4)也可發現,事件發生前 12 小時為兩個波浪成分從 30 度與 120 度傳來;在事件發時,可發現原本兩個成分波逐漸演化成單一波浪成分,波浪主要波向為 0 度,隨著東北季風逐漸影響,在船難發生前六小時,主要波浪能量也逐漸集中於低頻區域。波高及週期在船難事件發生前有略微下降的趨勢,在船難發生前六小時波高從 0.3 米到事件後 12 小時增長至 2 米成長幅度達六倍,船難發生時位於波高及風速快速成長的海況。 $Q_p$ - $\sigma$   $\theta$  能譜參數二維變化圖(圖 5)結果顯示,船難發生時位於圖中右下角,顯示船難發生於能量最為集中的時刻。

表 1 船難資料與事件當時之波浪參數表

	Case1	Case2	Case3
船種	漁船	漁船	貨輪
船噸位	34	44	3600
時間	2006/1/5 05:00	2007/3/11 08:00	2010/10/19 01:00
$H_{m0}$	1.18	0.98	5.1
$T_p$	5.4	5.6	9.4
$Q_p$	2.44	2.64	1.86
$\sigma_\theta$	29.1	27.9	37.2

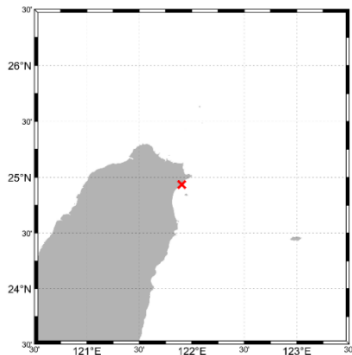


圖 2 龍進興 26 號船難發生位置圖

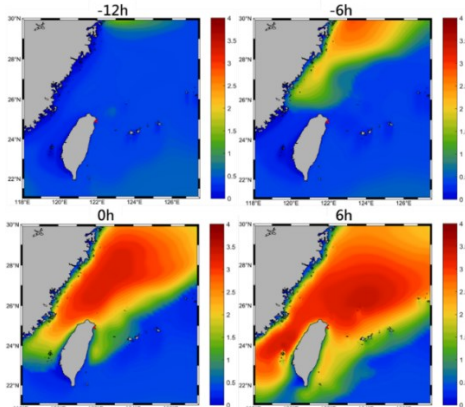


圖 3 龍進興 26 號船難發生前後之波高變化圖

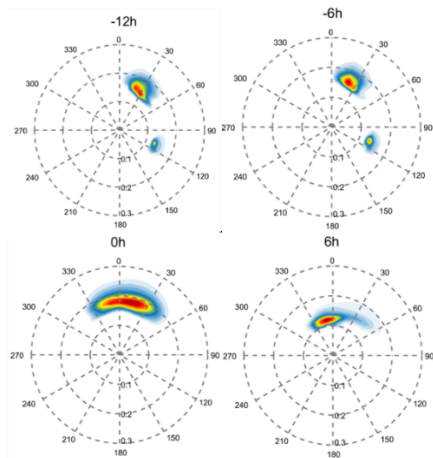


圖 4 龍進興 26 號發生船難前後方向波譜變化圖

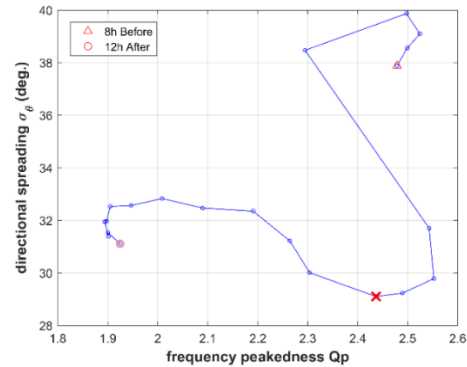


圖 5 龍進興 26 號船難在事件發生前後的  $Q_p$ - $\sigma_\theta$  變化(X 表示船難發生時)

### 案例二：大順興號事件，東北季風期間

宜蘭頭城籍漁船大順興號於 2007 年 3 月 11 號 8 時,行經蘭陽溪外海 4 海里處翻覆(圖 6),受鋒面通過及東北季風增強影響,東北部海面風力達 6 級,最大陣風 8 級。模擬事件前後臺灣附近海域波高變化發現,在事件發生前臺灣附近海域受鋒面及東北季風影響波高明顯由北往南逐漸升高。事件發生前 12 小時開始波浪能量逐漸集中,在事件發生時,波譜由前 6 小時的兩個成分波變為單成分波的海況(圖 7)。波高及週期在船難事件發生前有略微下降的趨勢,在船難發生前六小時波高從 0.2 米到事件後 6 小時增長至 1.2 米成長幅度達六倍,船難發生時位於波高及風速快速成長的海況。 $Q_p$ - $\sigma_\theta$  能譜參數二維變化圖(圖 8)結果顯示,在船難事件發生前 8 小時海況為  $Q_p$  小、 $\sigma_\theta$  大,此海況代表波能在頻率及方向上分散,然而隨著船難即將發生, $Q_p$  逐漸變大、 $\sigma_\theta$  逐漸變小,代表波能慢慢地集中。

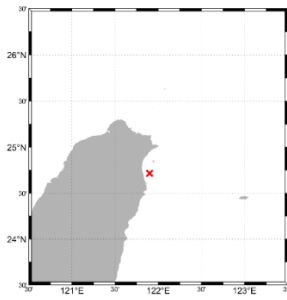


圖 6 大順興號船難發生位置圖

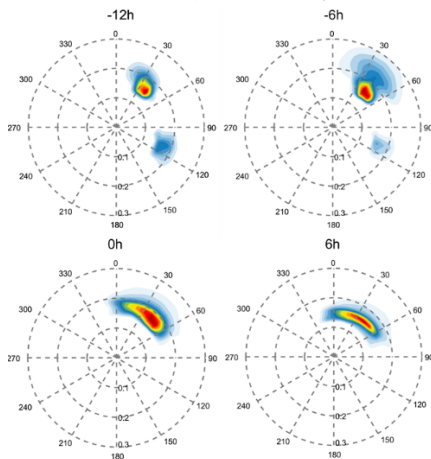


圖 7 大順興號發生船難前後方向波譜變化圖

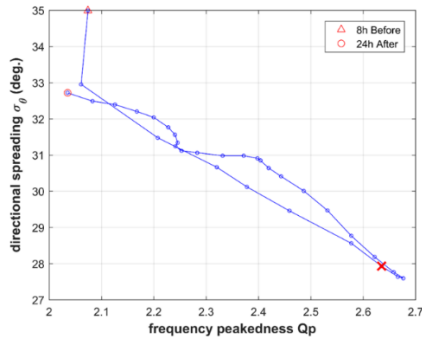


圖 8 大順興號船難事件在事件發生前後的  $Q_p$ - $\sigma_\theta$  變化圖 (X 表示船難發生時)

**案例三：DILI STAR，颱風與東北季風共存**

巴拿馬籍貨輪 DILI STAR 於 2010 年 10 月 19 號 1 時，於台南西南方 67 海里處發出遇險信號(圖 9)，受梅姬颱風及東北季風影響，台灣海峽南部平均風力將增強至 7 到 8 級，最大陣風 10 級。波浪模擬結果也顯現了兩大天氣系統的影響，方向波譜(圖 10)上顯示了該事件發生時，海面存在兩個波浪系統，一波浪系統來自東北季風；另一波浪系統來自梅姬颱風。波浪模擬結果顯示在事件發生前後，在船難處之波高均在 3.5 米以上、尖峰週期達 8 秒、風速 12 公尺/秒以上，如圖 3-56。  $Q_p$ - $\sigma_\theta$  能譜參數二維變

化圖(圖 11)結果顯示，船難發生前 6 小時開始  $Q_p$  持續約為 1.85； $\sigma_\theta$  約為  $37^\circ$ ，直到事件發生後能量慢慢分散，圖形開始往左上角(波能在方向域及頻率域較為分散)發展，顯示船難事件發生於波浪能量開始變換的海況。

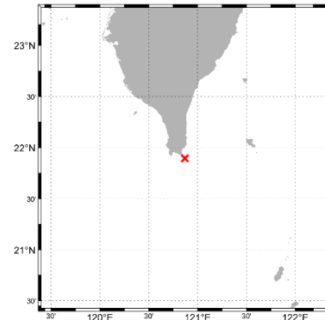


圖 9 嘉勝興號船難發生位置圖

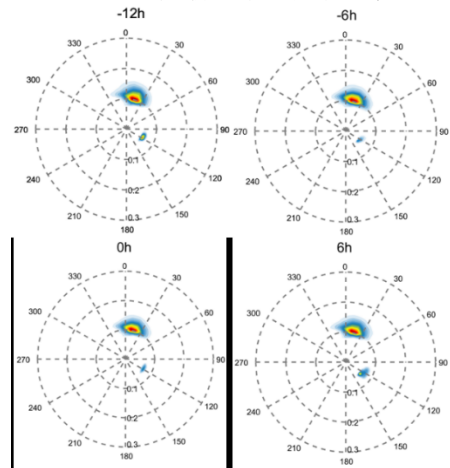


圖 10 嘉勝興號發生船難前後方向波譜變化圖

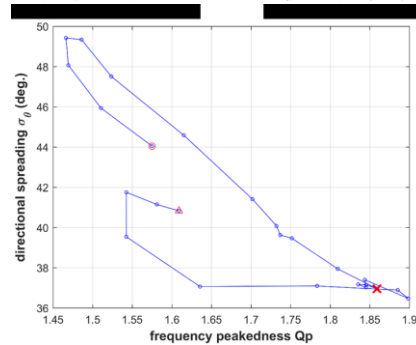


圖 11 嘉勝興號船難事件在事件發生前後的  $Q_p$ - $\sigma_\theta$  變化圖 (X 表示船難發生時)

**五、結論與建議**

船難的發生與大型天氣系統影響有關，天氣系統的影響也反映在波浪模式波浪的模擬上，分析船

難事件前後海況變化能瞭解天氣系統移動趨勢。由方向波譜觀察發現這些案例的特性，部分案例在事發前為雙峰譜，隨著能量逐漸集中，事件發生時能量集中並演化為單峰譜；其中一例從開始至結束皆為雙峰譜，但兩波浪系統夾角約 70 度，此波譜與其變化特性皆異常波浪發生的機制相似，顯示這些案例發生原因可能與異常波浪有關。由波譜能量參數  $Q_p$ 、 $\sigma_\theta$  進行分析，都可以發現有顯著的趨勢存在，這些案例在圖中有左上右下之分布，在船難事件前後位於圖中左上角，表示波浪能量在方向域及頻率域較為分散，船難事件發生時波浪能量在方向域及頻率域較為集中，而逐漸往右下角變化，顯示能量集中的海況下對於海面上行駛之船隻安全影響是顯著的。

### 謝誌

本論文係中央氣象局研究計畫「異常海象指標建立之研究」(編號 MOTC-CWB-109-O-02)之研究成果，承蒙中央氣象局經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱

### 參考文獻

1. Cavaleri, L., Bertotti, L., Torrisi, L., Bitner-Gregersen, E., Serio, M., & Onorato, M. (2012). Rogue waves in crossing seas: The Louis Majesty accident. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C11).
2. Fedele, F., Lugni, C., & Chawla, A. (2017). The sinking of the El Faro: predicting real world rogue waves during Hurricane Joaquin. *Scientific reports*, 7(1), 1-15.
3. Faulkner, D. (2003). Shipping safety: a matter of concern. In *Proceedings-Institute of Marine Engineering Science and Technology Part B Journal of Marine Design and Operations* (pp. 37-56). IMAREST PUBLICATIONS.
4. Forristall, G. Z., & Ewans, K. C. (1998). Worldwide measurements of directional wave spreading. *Journal of Atmospheric and oceanic technology*, 15(2), 440-469.
5. Goda, Y. (1970). Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation. *Report Port Harbour Res. Inst.*, 9, 3-57.
6. Luxmoore, J. F., Ilic, S., & Mori, N. (2019). On kurtosis and extreme waves in crossing directional seas: a laboratory experiment. *Journal of Fluid Mechanics*, 876, 792-817.
7. Mori, N., Onorato, M., & Janssen, P. A. (2011). On the estimation of the kurtosis in directional sea states for freak wave forecasting. *Journal of Physical Oceanography*, 41(8), 1484-1497.
8. Prasada Rao, C. X. K. (1988). Spectral width parameter for wind-generated ocean waves. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Earth and Planetary Sciences*, 97, 173-181.
9. Serio, M., Onorato, M., Osborne, A. R., & Janssen, P. A. E. M. (2005). On the computation of the Benjamin-Feir Index.
10. Trulsen, K., Nieto Borge, J. C., Gramstad, O., Aouf, L., & Lefèvre, J. M. (2015). Crossing sea state and rogue wave probability during the P restige accident. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(10), 7113-7136.
11. Waseda, T., Kinoshita, T., & Tamura, H. (2009). Evolution of a random directional wave and freak wave occurrence. *Journal of Physical Oceanography*, 39(3), 621-639.
12. Waseda, T., Tamura, H., & Kinoshita, T. (2012). Freakish sea index and sea states during ship accidents. *Journal of marine science and technology*, 17(3), 305-314.

## 東吉嶼海域海表溫度驟降成因探討

范揚洺<sup>1\*</sup> 陳聖學<sup>2</sup> 傅科憲<sup>3</sup> 王博賢<sup>4</sup> 楊文昌<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup>國立成功大學近海水文中心計畫經理

<sup>2</sup>國立成功大學近海水文中心品保工程師

<sup>3</sup>國家海洋研究院海洋科學及資訊研究中心副研究員

<sup>4</sup>國家海洋研究院海洋科學及資訊研究中心副研究員

<sup>5</sup>國家海洋研究院海洋科學及資訊研究中心主任

### 摘要

國家海洋研究院在澎湖海域、北海岸海域、東北角海域及恆春半島等 4 個示範海域建置作業化海氣象資料浮標，用以自動化觀測海洋環境觀測資料。檢視每天的資料發現東吉嶼資料浮標的海表溫度有每天驟降 2 次的現象，變化幅度超過 4°C，與其他海域的海表溫度緩慢變化明顯不同。本研究目的為探討東吉嶼海域海表溫度驟降成因，由內波、海流、潮汐，以及風速等因素進行探討。分析歸納得知海流與潮汐皆與海表溫度驟降有顯著的相關性。海表溫度驟降與回升期間，海流流向以往南為主，反之，當海表溫度回升後，海流流向以往北為主，海表溫度驟降至最低溫度時的海流流速大於 0.5 m/s，流向介於 154 度~223 度之間。又海表溫度驟降發生在退潮期間，且海表溫度驟降的現象發生於小潮後的第 3 天~6 天，直至下一次小潮結束當日或隔日，持續天數高達 10 天以上。

關鍵詞：海表溫度、驟降、東吉嶼、潛水

## Study on the Causes of the Abrupt Drop of Sea Surface Temperature in Dongjiyu Waters

Yang-Ming Fan\*, Sheng-Hsueh Chen, Ke-Hsien Fu, Bo-Shian Wang, Wen-Chang Yang

\* Project Manager, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

The National Academy of Marine Research has deployed operational data buoys to monitor marine environmental data in 4 demonstration waters, including the Penghu waters, the north coast waters, the northeast corner waters and the coastal waters of Hengchun Peninsula. Watch the real-time data daily and found that the sea surface temperature drops twice a day in the Dongjiyu data buoy of the Penghu waters, with a range of more than 4°C, which is obviously different from the sea surface temperature in others data buoys. Therefore, the purpose of this study is to explore the cause of the abrupt drop of sea surface temperature around Dongjiyu waters. Discussed by factors such as internal waves, currents, tides, and wind speed, the results show that both currents and tides have a significant correlation with the drop of sea surface temperature. During the drop and recovery of sea surface temperature, the main current direction is to the south, on the contrary, the main current direction to the north when the sea surface temperature change slowly. And the current speed is large than 0.5 m/s and the current direction is between 154 degrees and 223 degrees when the sea surface temperature drops to the lowest temperature. Furthermore, the drop of sea surface temperature occurs during ebb, and the length of phenomenon start from the 3rd to 6th days after the neap tide until the end or the next day of neap tide, and lasts for more than 10 days.

Keywords: sea surface temperature; abrupt drop; Dongjiyu; diving



## 一、前言

近年來國人日益重視各式戶外休閒活動，休閒活動區域也由陸地擴及濱海地區及海洋，雖然受到季節影響，臺灣可從事水域遊憩活動的區域仍有多樣選擇，從相關的活動協會亦相繼成立，顯示愈來愈多民眾從事水域遊憩活動的項目與人口有越來越普及之趨勢。為了讓民眾安全地「近海」(親近海洋)和「進海」(進入海洋)，有必要即時提供遊憩海域的海洋環境觀測資料。

本研究由東吉嶼資料浮標的即時海表溫度觀測資料發現每天幾乎都有 2 次海表溫度驟降的現象。又東吉嶼海域喜愛浮潛與潛水者的海底天堂，一般正常人在水溫 25°C 以下潛水便需要穿著 3mm 潛水衣，穿著不合時宜的潛水衣將引致低溫症的發生，因此即時的水溫資料與特性可作為潛水衣穿著厚度的參考依據，因此本研究對此海域資料進行分析探討。

## 二、海表溫度觀測

### 2.1 資料浮標系統

國際上資料浮標已被廣泛使用於作業化觀測，因其布放不受水深限制，是海上觀測樁、船測及底碇式儀器觀測技術所不能及。國家海洋研究院配合政府「向海致敬」重要政策，期望即時提供海洋環境觀測資料供水域遊憩活動使用，因此採用國立成功大學近海水文中心自行研發的作業化海氣象資料浮標自動化觀測海洋環境資料，如圖 1 所示。

本文以東吉嶼資料浮標的海表溫度觀測資料為研究對象，東吉嶼資料浮標位於澎湖縣東吉嶼與西吉嶼之間，水深約 40 公尺處，位置如圖 2 標示橘黃的資料浮標圖示處。海表溫度觀測資料來源有 2 處，一為安裝位置在水面下方 0.5 公尺處的水溫計，二為安裝在水面下 1.5 公尺處的海流儀，如圖 3 所示。



圖 1 東吉嶼資料浮標



圖 2 東吉嶼資料浮標系統位置示意圖

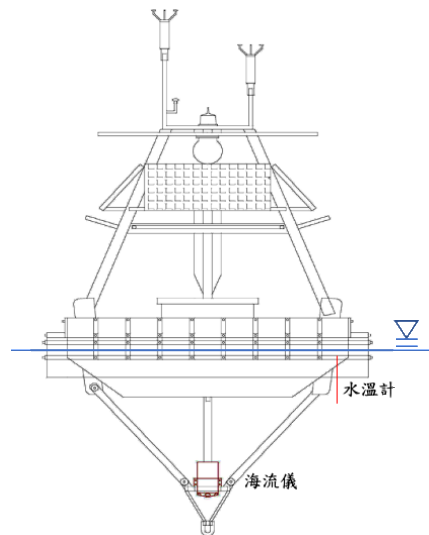


圖 3 水溫計與海流儀安裝位置

## 2.2 海表溫度品管

資料品管的消極意義在找出並標記可疑的資料，積極面上則是進一步對資料作驗證。由於資料品管與整個資料處理流程的每一步驟息息相關，故對量測儀器的特性、設計及校正、量測方法的理論及限制、通訊儀器的維護與核定、資料處理的方法、環境背景資料的相關性、及資料保管方法都必須深入研究，如此方能對資料在不同時空上的特性作長期而完整的分析探討，進而有效管制資料的品質。

海表溫度資料之品管程序，主要係進行檔案格式檢驗及資料統計性品管分析。除了判斷檔案欄位及格式之正確性外，主要利用以下二類品管分析方法進行分析。

### 一、合理性資料品管

合理性的檢驗考量三類因素，一是「儀器限制」，指海氣象觀測數據不應超過量測儀器的測量範圍；另一則是「物理限制」，指觀測量不應超過量測地點的海氣象臨界條件；第三類則參考「歷年觀測極值」，以訂定更合乎實際狀況之物理標準。觀測數據由品管程式執行合理性品管作業，由程式自動檢驗各觀測量「儀器限制」與「物理限制」之上、下限，並判斷是否超過「歷史極值」品管標準，若原始觀測數據超過合理性品管之上、下限而未通過合理性檢驗，則予以標記。

### 二、連續性資料品管

由於自然現象的變化都是漸進且連續的，所以連續性的檢驗認為各種觀測物理量在時間上及空間上都必須存在連續的變化，也就是說其時空的變化量應落在合理的範圍內，如果在時間上的改變量超過某一限度，或是在空間上相鄰測點的資料無法以物理觀點解釋，都可視為可疑資料。

時間連續性品管分析的首要步驟為彙整分析資料，再進一步計算資料的  $t=1$  單位間距差值，若有  $N$  個分析數據，則將會有  $N-1$  個連續時間之差值，將上述差值樣本經分組排序後，計算各組樣本所對應的發生機率，然後以統計理論之密合度試驗 (goodness-of-fit) 決定樣本資料最適合之機率分佈函數。

此外，尚有第三類的關聯性資料品管，此乃檢驗所量測之資料與其他相關物理量之關係是否有異常現象，海氣象特性往往受到外在環境的影響而改

變 (例如風與浪之關係)，利用不同物理量間之關連性，可互相檢驗資料的品質。而經與資料浮標上其他觀測項目比對，海溫與其他物理量相關性不高，此項目站不列入品管程序。

品管的目的係為篩除不合理、不正確的觀測值，因為東吉嶼資料浮標於今年 7 月底布放開始運作，觀測資料的累積量尚不夠完整，故各項品管標準係參考鄰近的七美資料浮標，其合理性與連續性品管標準如表 1 與表 2。資料品管架構係參考美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)，規劃其資料品管流程架構如圖 4，依序確認資料格式、合理性、連續性、(關聯性)後，即可得通過品管之可靠資訊。

表 1 海表溫度合理性品管標準

儀器範圍限制	物理上的限制	歷年極值標準 (極值±20%)
0~50 (°C)	>0 (°C)	17.2~34.6(°C)

表 2 海表溫度連續性品管標準

	90%	95%	99%
1 小時	0.3	0.3	0.5
2 小時	0.3	0.4	0.7
3 小時	0.4	0.5	0.8
4 小時	0.5	0.6	0.9
5 小時	0.5	0.7	1.1
6 小時	0.6	0.7	1.1

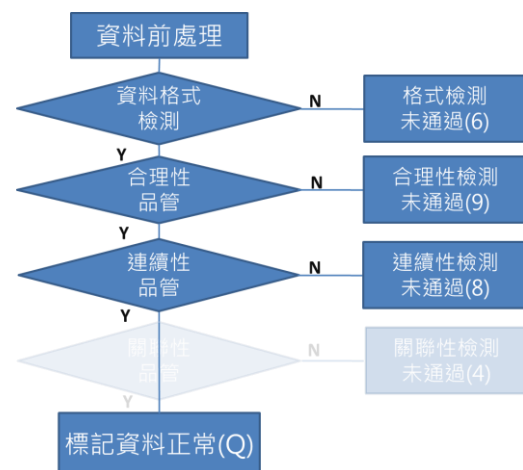


圖 4 資料品管流程圖

## 2.3 海表溫度觀測結果

水溫計於每小時 59 分至整點共 1 分鐘期間取樣，取樣頻率為 2 Hz，完成取樣後求得平均值；流速儀連續取樣，每 2 秒取樣一次流速、流向，以及水溫資料，共取樣 6 分鐘後計算平均值。經過前述品管程序與人工品管來確保資料正確性。東吉嶼資料浮標 2021 年 8 月與 9 月的海表溫度如圖 5 與圖 6，圖中明顯看出每個月海表溫度變化至少有 25 天會出現一天 2 次的驟降，每次間隔約 12 小時，變化幅度超過 4°C，接著驟升回到驟降前的溫度。

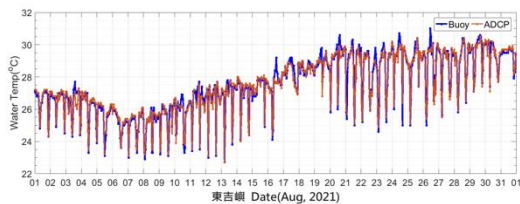


圖 5 110 年 8 月海表溫度觀測時序列圖

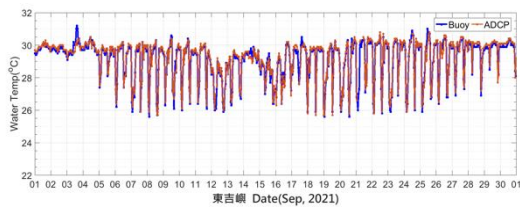


圖 6 110 年 9 月海表溫度觀測時序列圖

## 三、海表溫度驟降可能原因

回顧海表溫度驟降的相關研究，可能的原因包括內波、海流、潮汐，以及風速等，本研究首先將 110 年 8 月與 9 月海表溫度沒有驟降的國曆與農曆日期列出，包括 8 月 17 日 (農曆 7 月 10 日)、8 月 18 日 (農曆 7 月 11 日)、9 月 1 日 (農曆 7 月 25 日)、9 月 2 日 (農曆 7 月 26 日)、9 月 3 日 (農曆 7 月 27 日)、9 月 4 日 (農曆 7 月 28 日)，其餘日期中，有 4 天是 1 次的驟降，其餘每天有 2 次驟降。以下對上述可能原因進行探討。

### 3.1 內波的影響

臺灣西南海域是內波活躍的海域 (Hsu et al., 2000)，經由實測與數值模擬分析顯示此海域的內波特性屬於內潮波 (Wang and Chen, 1996; Niwa and Hibiya, 2004)。王玉懷 (2009) 研究東沙環礁，發現外

環礁水溫因受到內波的影響，日溫差變化劇烈，水溫陡降 2°C 到 7°C，內環礁日溫差則小於 1°C，又在冷水入侵 2 天後葉綠素含量顯著增加 (Wang et al., 2007)，增加量約 5  $\mu\text{g/L}$ 。

本研究比對東吉嶼資料浮標的海表溫度與螢光換算的葉綠素值觀測資料，圖 7 的上圖為海表溫度，下圖為葉綠素，上圖顯示 8 月 18 日沒有海表溫度驟降，隔日 19 日開始海表溫度每天有 2 次驟降，而此期間的葉綠素變化不大，反而是 8 月 18 日 12 時至 17 時葉綠素值有增加，增加量為 0.57  $\mu\text{g/L}$ ，但海表溫度沒有明顯變化。又圖 8 的上圖為海表溫度，下圖為葉綠素，上圖顯示 9 月 5 日開始有海表溫度驟降的現象，2 天後葉綠素的增加量小於 1  $\mu\text{g/L}$ 。因此東吉嶼海域在海表溫度驟降時，葉綠素的增加量遠小於東沙外環礁。

此外，內潮波的波長可達數十公里以上，而東吉嶼附近海域其他的海表溫度觀測資料沒有驟降現象，因此東吉嶼資料浮標觀測的海表溫度驟降現象目前無法證實是內潮波引起。

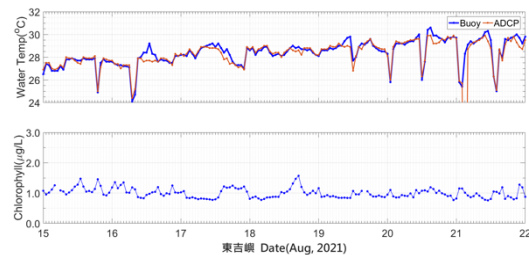


圖 7 110 年 8 月 15 日至 21 日海表溫度與葉綠素觀測時序列圖

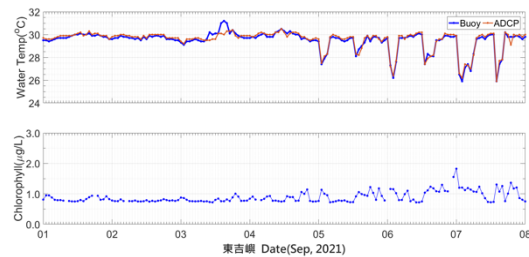


圖 8 110 年 9 月 1 日至 7 日海表溫度與葉綠素觀測時序列圖

### 3.2 海流(含黑潮支流)的影響

Wang (2006; 2012) 用海洋數值模式重建臺灣南部海域內波發生的機制發現黑潮海水入侵是造成海

水層化的主因，但黑潮海水動力不足以推動海水以產生內波，真正造成南海內波的動力是潮流。余俊宏 (2018)分析澎湖水道北邊接近海底的溫度，發現因夏季平行水道方向的湧升流，夏季的溫度隨著潮汐有週期性降溫的波動，開始降溫的時間在流速最強的時候（漲潮），最大的降溫幅度可達  $2.5^{\circ}\text{C}$ ，而在流速最弱的时候開始升溫（退潮）。

東吉嶼資料浮標有海流儀監測即時海流，設置位置如圖 3 所示。因此本研究繪製海流流矢圖，如圖 9 的下圖所示，線的長度表示流速大小，線的傾斜角度表示流向，由圖 9 的海表溫度與海流觀測時序列圖可以看出海表溫度驟降與回升期間，海流流向以往南為主，反之，當海表溫度回升後，海流流向以往北為主。圖 10 為 110 年 8 月~9 月期間海表溫度驟降時的流速流向關係圖，顯示流速大於  $0.5\text{ m/s}$ ，且流向介於  $154^{\circ}$ ~ $223^{\circ}$  度之間。

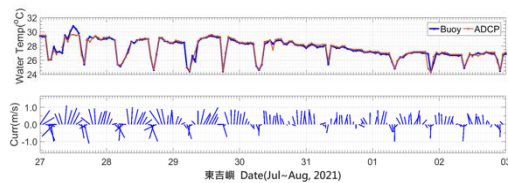


圖 9 110 年 8 月海表溫度與海流觀測時序列圖

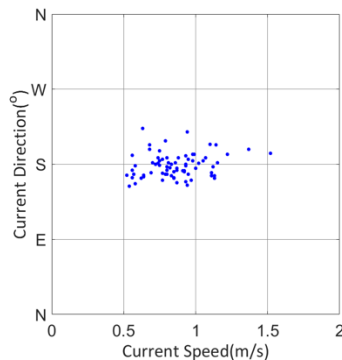


圖 10 110 年 8 月~9 月期間海表溫度驟降時的流速流向關係圖

### 3.3 潮汐的影響

施孟憲等人 (2012)經長期實測資料發現臺南七股頂頭額沙洲附近的海表溫度隨潮汐漲退有突然劇烈變化現象；黃莉婷 (2015)在澎湖南方四島進行 3 天的觀測發現滿潮時上下溫差大，研判是漲潮時南方較暖的水流舉升使表層水較暖。

因此本研究比對海表溫度與潮汐觀測資料，發現海表溫度驟降發生在退潮期間，又因為海表溫度驟降的現象持續 10 天以上，因此試著比對大潮(農曆的初一、初二、十五、十六)與小潮(農曆的初七、初八、二十二、二十三)發生的時段，圖 10 與圖 11 的紅色虛線方框表示小潮，經過交互比對後發現海表溫度沒有驟降的現象發生在小潮後的第 1~2 天，並維持 2~4 天的緩慢變化，如圖上的黑色圓圈實線。推測小潮後至大潮前，因太陽、月球對地球的潮汐引力部分抵銷，因潮汐運動/潮差變小，因而未出現海表溫度驟降的情況。綜合上述，海表溫度驟降的現象開始出現在小潮後的第 3~6 天，直至下一次小潮結束當日或隔日。

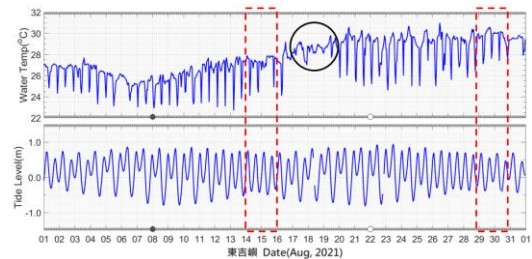


圖 10 110 年 8 月海表溫度與潮汐觀測時序列圖

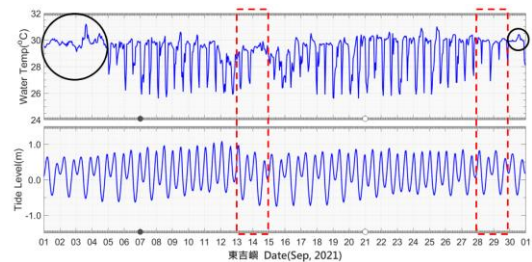


圖 11 110 年 9 月海表溫度與潮汐觀測時序列圖

### 3.4 風速的影響

除了上述造成水溫變化的可能原因外，Farrar et al. (2007) 研究指出海表溫度變化隨著風速的降低而增加。然而比對東吉嶼資料浮標的風速觀測資料，如圖 10 所示，顯示海表溫度變化驟降時風速會隨著減弱，但並非風速減弱，海表溫度就一定驟降。因此東吉嶼海域的海表溫度驟降與風速之間沒有明顯的關聯存在。

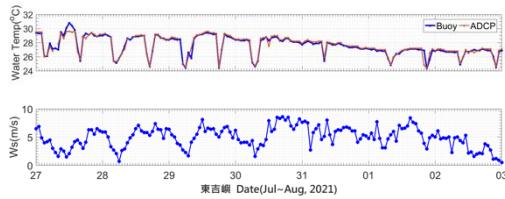


圖 5 海表溫度與風速觀測時序列圖

#### 四、結果與建議

本研究由內波、海流、潮汐，以及風速等因素探討影響海表溫度驟降的原因，分析歸納得知海流與潮汐在海表溫度驟降時有顯著的相關性。

海表溫度驟降與回升期間，海流流向以往南為主，反之，當海表溫度回升後，海流流向以往北為主。統計海表溫度驟降至最低溫度時海流分佈，結果顯示海流流速大於 0.5 m/s，且流向介於 154 度~223 度。又海表溫度驟降總是發生在退潮期間，且海表溫度驟降的現象發生小潮後的第 3 天~6 天，直至下一次小潮結束當日或隔日，持續天數高達 10 天以上。

目前東吉嶼資料浮標僅有數個月的觀測資料，又海表溫度驟降的現象並非每個海域都會發生，因此後續將蒐集更多資料以了解此海域的海表溫度特性，並透過高解析的衛星海表溫度資料進一步分析水團運動。

#### 謝誌

本文係 110 年政府科技發展計畫「臺灣及南海海域資料收集調查與資料庫精進」(審議編號：110-4901-02-22-03)之相關研究成果，承蒙中央政府經費補助，使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. Farrar, J. T., Zappa, C. J., Weller, R. A. and Jessup, A. T. (2007) Sea surface temperature signatures of oceanic internal waves in low winds, *J. Geophys. Res.*, 112, C06014.
2. Hsu, M.-K., Liu, A. K., and Liu, C. (2000) A study of internal wave in the China Seas and Yellow Sea using SAR, *Cont. Shelf Res.*, 20, 389-340.
3. Niwa, Y. and Hibiya, T. (2004) Three-dimensional numerical simulation of the M2 internal tides in

- the East China Sea, *J. Geophys. Res.*, 109, C04027.
4. Wang, J., and Chen, C.S. (1996) Preliminary observations of internal surges in Tung-Kang, *Acta Oceanogr. Taiwan*, 35, 17-40.
5. Wang, Y.-H., Dai, C.-F., and Chen, Y.-Y. (2007) Physical and ecological processes of internal waves on an isolated reef ecosystem in the South China Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L18609.
6. Wang, D.-P. (2006) Tidally generated internal waves in partially mixed estuaries, *Cont. Shelf Res.*, 26 (12), 1469-1480.
7. Wang, D.-P., (2012) Diurnal modulation of semidiurnal internal tides in Luzon Strait, *Ocean Modelling*, 59-60, 1-10.
8. 余俊宏 (2018) 斜坡上底邊界層的對流溫降與湧升機制 - 以澎湖水道為例，碩士論文，國立中山大學海洋科學系。
9. 黃莉婷 (2015) 澎湖南方四島海洋物理環境與底質對珊瑚覆蓋率的影響，碩士論文，國立中山大學海下科技研究所。
10. 施孟憲、饒國清、滕春慈、黃清哲 (2012) 「從資料浮標觀測資料探討七股澎湖海域水溫特殊變化」，101 年天氣分析與預報研討會，第 448-449 頁。
11. 王玉懷 (2009)，東沙環礁國家公園海洋環境長期調查研究(一)成果報告，海洋國家公園管理處委託研究。

# 應用改良型參數化颱風及倒傳遞類神經 網路系統進行長前置時間暴潮預測

趙偉廷<sup>1</sup> 楊智傑<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立台灣海洋大學海洋工程科技中心

<sup>2</sup>國立台灣海洋大學海洋環境資訊系

## 摘要

科技部計畫：107-2221-E-019-010-MY3

本研究利用改良型參數化颱風及類神經網路所購艦之模式預測颱風暴潮。位於台灣東北角之龍洞測站被選為研究之區域，2005 至 2014 年共計 14 場颱風事件之海氣象資料被用來作為模式訓練以及驗證之用。此外，颱風與測站相對位置的物理資訊藉由參數化颱風模型融合成具物理特性之風場速度( $V_p$ )。不只可以增加模式的準確性，同時也減少類神經模式結構的複雜度增加其穩定性。最後，我們將比較不同參數化颱風模型與傳統資料驅動模式之間的改善程度。

關鍵詞：颱風暴潮、颱風因子、參數化颱風模型、倒傳遞類神經網路

## Using Modify Parametric Typhoon Model with Back Propagation Neural Network for Long-Lead-Time Storm Surge Forecasting

Wei-Ting Chao Chih-Chieh Young\*

\* Associate Professor, Department of Marine Environment Informatics, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

In this paper, a hybrid model was combined with a modify parametric typhoon models and artificial neural network for storm surge prediction. The northeastern region of Taiwan was chosen as the study area, and 14 historical typhoon events from 2005 to 2014 were collected for model training and validation. In addition, the typhoon location information can be merged into the physical-based wind speed ( $V_p$ ) by applying the parametric typhoon model, which not only increases the accuracy of the driving force but also reduces the complexity of the neural network structure. Moreover, the difference and improved capability of surge prediction between classical data-driven models and physical-based models were discussed in depth.

Keywords: Storm Surge, Factors of Typhoon, Parametric Typhoon Model, Back Propagation Neural Network

## 一、前言

颱風所導致的暴潮是世界上最嚴重的海岸災害之一，由於強風的吹襲以及大氣壓力的擾動，使得海平面異常的抬升(You and Seo, 2009)。導致颱風暴潮形成的驅動力主要有二種 (參考 Flather, 2001)：

(1)強大的風剪力(如颱風瞬間風速)作用於水體表面所造成的水位抬升，意即風揚。除了風剪力本身所造成的水位抬升，向岸風有助於風剪力在陸地邊界時，可以產生更明顯的水位抬升。(2)巨大的氣壓差(如颱風中心低壓)導致近岸水域產生向上吸引的水位抬升，即為倒轉氣壓計效應。此一嚴重的極端天

氣災害常常威脅居住在沿海區域居民的生命財產安全，例如：2005 年侵襲美國紐奧良的卡崔娜颶風(造成 1836 人死亡及 1250 億美金經濟損失)。隨著氣候變遷及全球暖化影響，此地區的居民所遭遇的威脅隨之提高(Webster et al., 2005)。因此，如何準確預測暴潮的變化就變得相當重要。

常見的暴潮預測方法可分為三種：(1)經驗公式(如 Conner et al., 1957)；(2)水動力模式(如 Welander, 1961)以及(3)人工智慧方法(如 Lee, 2006)。上述三種方法優缺點及相關文獻回顧可參考作者先前的文章(Chao et al., 2020)，在此不再贅述。過去的研究指出，大氣驅動力對於水動力模式下的暴潮預測結果相當敏感(Murty et al., 2020)，在颱風路徑以及強度描述良好的情況下，水位模擬的誤差可降至 10%。否則，最大誤差可能超過 50%以上(Torres et al., 2019)。人工智慧方法也有類似的結果(Tseng et al., 2007; Tsai et al., 2013)，所以筆者過去審慎選擇適合之颱風參數作為類神經網路之輸入因子，大幅增加預測前置時間及改善預測準確度(Chao et al., 2020)。但是所選擇的輸入因子增加後，導致類神經網路結構的維度增加，可能會影響其穩定性。因此，如何尋找合適的因子(大氣驅動力)藉此減少輸入之颱風參數，對於類神經網路後續研究相當重要。

為進行颱風暴潮評估，即時颶風分析系統、全球大氣數值模式及參數化颱風模型是提供模式驅動力的主要方法(Wang et al., 2021)。 $H^*Wind$  其資料由飛機、地面/海面測站以及衛星系統觀測資訊所構成。雖然其所提供空間高解析度的風場資訊作為模式預測之用。但是，其適用範圍僅有北大西洋海域，且對於長期的颱風研究而言，時間解析度不夠精細。在全球大氣數值模式方面，各國的氣象單位利用其模擬風場變化，如：台灣氣象局的全球模式、美國大氣研究中心第五代中尺度模式、美國國家環境預報中心及歐洲中期天氣預報中心。由於其風場的可及性及可靠性，被廣泛應用於海象模擬分析及海事活動安全評估(Murty et al., 2020)。此類模式需要有完整初始條件、實際的地理及地形條件與大氣參數，透用大量的計算以得到各高程下的氣壓、溫度及風速等結果。此種模式雖能獲得較為全面的大氣資訊，但是在颱風眼內部較實際值低估(Cavaleri et al.,

2006)。在不同區域預報的應用上亦需經過嚴謹的驗證(參數調整)，且龐大的計算量需耗費相當大的電腦資源(Kim et al., 2019)。

另一方面，參數化颱風風場模式(如：Rankine Vortex Model、SLOSH model 及 Holland model 也被廣泛運用在颱風暴潮研究上(Jelesnianski, 1965; Houston et al., 1999; Knaff et al., 2007; Murty et al., 2020)。較常被人所使用的模型如袁金渦動方程式即是藉由颱風最大風速以及放射狀位置與最大風速距離間的比例，得到相對的風速函數  $V(x,y)$ 。另一個 Holland 模式則是推導 Myers(1957)的方程式並納入形狀參數(B)，氣壓的部分從颱風眼的位置向外呈現大氣壓力與中心氣壓差值自然對數遞增的情形。在風速部分，則是壓力差自然對數遞減的關係納入，能更為真實的呈現風場變化。然而，此類模式的使用上受到一些限制，如：風場的準確度會隨著離颱風中心越遠，差異越明顯。主因為離颱風中心越遠的位置，風速與風向會受到其週遭天氣系統的影響(Murty et al., 2020)。

本研究結合改良型參數化颱風模型搭配倒傳遞類神經網路，建立長時間颱風暴潮預測模式。希望透過兩種方法的優勢，改善過去所面臨的問題：(1)藉由參數化颱風模型，可以將整合颱風位置之物理資訊映射至潮位站，可提供暴潮準確地外部驅動力，並降低類神經網路結構複雜度；(2)藉由類神經網路的容錯能力，可以降低參數化颱風模型在遠離颱風眼牆所可能造成的誤差；(3)透過類神經網路具計算效率以及處理高非線性問題的優勢，解決線性回歸方法準確度不足的情況，並改善物理模式所造成大量計算資源耗費的情形。在後續的內容中，將探討不同參數化颱風模型風場對於暴潮預測結果的影響，並比較相對於傳統資料驅動模式預測結果之差異性與改善程度。

## 二、研究區域描述及資料選取

在本研究中，選定位於台灣東北角的龍洞潮位站作為研究區域。該測站發生多起嚴重暴潮事件(水位上升超過 1 m)，歷史最大暴潮發生於 2007 年科羅莎颱風期間，其水位超過 1.8 m。圖 1(呈現的是中央氣象局紀錄 2005 年至 2014 年主要影響龍洞測站(紅色三角形)之颱風 2 號及 3 號路徑。藉由調和分

析法，可以將天文潮與氣象潮分離。同時，本研究一共蒐集了 14 場路徑 2 號與 3 號的颱風事件。表一所呈現的是颱風中心氣壓、最大風速、暴風半徑及最大暴潮位水位之結果。

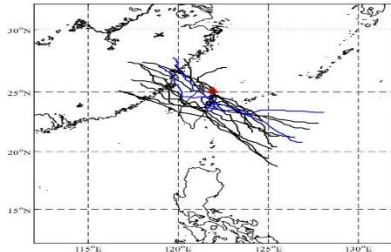


圖 1 2005 年至 2014 年侵襲龍洞測站之颱風路徑

表 1 颱風事件之颱風中心氣壓 ( $P_c$ ), 最大風速 ( $V$ ), 暴風半徑 ( $R_7$ )

Name	Year	Track	$P_c$ (hPa)	$V$ (m/s)	$R_7$ (km)
Haitang (Validation)	2005	3	912	55	280
Talim		3	920	53	250
Longwang		3	925	51	200
Bilis	2006	2	978	25	300
Kaemi		3	960	38	200
Sepat	2007	3	920	53	250
Krosa		2	925	51	300
Kalmaegi	2008	2	970	33	120
Fungwong		3	948	43	220
Sinlaku		2	925	51	250
Morakot (Validation)	2009	3	955	40	250
Soala	2012	2	960	38	220
Soulik	2013	2	925	51	280
Matmo	2014	3	960	38	200

### 三、倒傳遞類神經網路及參數化颱風模型

#### 3.1 倒傳遞類神經模式

倒傳遞類神經網路系統主要由三部分所組成，分別為輸入層、隱藏層及輸出層，圖 2 為倒傳遞類神經之架構。首先，在相鄰的兩層結構之間，每一個神經元接收來自輸入因子權重相乘加總之結果，透過活化函數將其轉換為臨時或最後的訊號，即

$$H_n = f(w_{I_m, n} I_m) \text{ OR } O_l = f(w_{H_n, l} H_n), \quad (1)$$

其中， $H_n$  是第  $n$  個隱藏層神經元的臨時訊號； $O_l$  是第  $l$  個神經元最後之輸出； $I_m$  是第  $m$  個神經元之正

規化輸入； $w_{I_m, n}$  及  $w_{H_n, l}$  分別為輸入因子與隱藏層神經元之連結權重以及隱藏層神經元與輸出層間之連接權重；在隱藏層及輸出層分別以雙曲線 S 型函數及線性函數進行轉換，即分別為  $f(x) = 2/[1+e^{-(2x)}-1]$  及  $f(x) = x$ 。在類神經網路的訓練過程中，需要透過成本函數(cost function)得到一組合適的權重及偏權值。成本函數表示如下

$$C_{NN} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L e_l^2(p), \quad (2)$$

透過上述訓練(校正)颱風事件的過程，可用來預測下一時刻(最長可預測 12 小時)颱風暴潮之倒傳遞類神經網路即被建立。

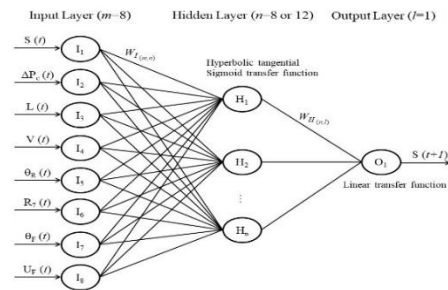


圖 2 倒傳遞類神經系統之網路架構

#### 3.2 參數化颱風模型

本研究應用六種較多人使用的參數化颱風模型，各模型共同使用的參數分別為最大風速( $V_{max}$ )以及最大暴風半徑( $R_{max}$ )，各個模型也有各自所需的參數，以下將分別說明其所對應的方程式：

##### (1) Rankine Vortex Model (RM)

Depperman(1947)利用傳統的袁金渦旋近似熱帶氣旋的風場(意即中心部分如同固體旋轉速度一致或是渦度為常數)，此方程式以颱風中心與目標點的距離  $r$  及最大暴風半徑  $R_{max}$  比值與最大風速的乘積來描述梯度風速分布，如式(3)所示：

$$V(r) = \begin{cases} V_{max}(\frac{r}{R_{max}}), & 0 \leq r < R_{max} \\ V_{max}(\frac{r}{R_{max}})^X, & r > R_{max} \end{cases} \quad (3)$$

其中， $X$  是形狀參數，用來調整徑向的速度分布，這裡依照過去文獻的建議使用 0.5 (Hughes, 1952)。

##### (2) Model of Holland (MH)

Holland(1980)由前人研究中推導出壓力與風速剖面的分布(Myers, 1957)，藉由將矩形雙曲線函數的形狀參數引入，進一步修正



Schloemer(1952)所提出之表面壓力剖面。壓力和風速分布呈現於式(4)及式(5)中：

$$P(r) = P_c + (P_0 - P_c) e^{-\left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^b} \quad (4)$$

$$V(r) = \left\{ \left( \frac{R_{\max}}{r} \right) \left[ (P_0 - P_c) \frac{B \cdot e^{-\left[\left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^b\right]}}{\rho} + \frac{r^2 f^2}{4} \right] - \frac{fr}{2} \right\}^{0.5} \quad (5)$$

其中， $\rho$ 是空氣密度， $f$ 是柯氏力參數( $f = 2\Omega \sin\phi$ ， $\Omega$ 是地球轉動速率  $7.292 \times 10^5$  rad/s， $\phi$ 則是格點緯度)， $e$ 是自然對數而  $B$  則是形狀參數。不同的模式中參數  $B$  形式可參考學者研究之成果(Levinson et al., 2010)。本研究之參數  $B$  可以利用式(6)在最大暴風半徑時推得(即  $r=R_{\max}$  且  $V=V_{\max}$ )，如下式所示：

$$B = \frac{V_{\max}^2 e \rho + f V_{\max} R_{\max} e \rho}{(P_0 - P_c)} \quad (6)$$

### (3) SLOSH model

學者所發展適用於由颶風造成在海、湖及陸地的暴潮模式應用參數化颱風的概念，後續再經由  $H^*Wind$  分析驗證(Houston and Powell, 1994)，風速分布呈現如下：

$$V(r) = V_{\max} \frac{2R_{\max} r}{R_{\max}^2 + r^2} \quad (7)$$

### (4) Young and Sobey model (YSB)

Young and Sobey(1989)將前人(Schlomer, 1952)改善大於最大風速半徑的風場分布(即  $r > R_{\max}$ )，方程式改寫如下：

$$V(r) = \begin{cases} V_{\max} \left( \frac{r}{R_{\max}} \right)^7 e^{(7(1-\frac{r}{R_{\max}}))} & , r < R_{\max} \\ V_{\max} e^{(0.0025R_{\max} + 0.05)(1-\frac{r}{R_{\max}})} & , r > R_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

### (5) Emanuel model (E4)

前面所提的颱風模型都是經由部分經驗公式所得，學者建立 1 個經由理論解而得的物理颱風模型，其中利用物理環境因子控制颱風的結構(Emanuel, 2004)。E4 風場如下所示：

$$V(r) = V_{\max} \frac{R_0 - r}{R_0 - R_{\max}} \left( \frac{r}{R_{\max}} \right)^m \left[ \frac{(1-b)(n+m)}{n+m \left( \frac{r}{R_{\max}} \right)^{2(n+m)}} + \frac{b(1+2m)}{1+2m \left( \frac{r}{R_{\max}} \right)^{2m+1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

其中， $b$ 、 $n$  及  $m$  為經驗參數，用以控制風場的形狀，此模式透過飛行高度觀測進行驗證，其值分別為 0.25、0.9 及 1.6 (Emanuel et al., 2006)。 $R_0$  定義為風場中的暴風無法與周圍氣流分離的距離，在不同區域會有不同的定義

值，呈現大小可以為 400 km、10 倍的  $R_{\max}$ (Chavas and Emanuel, 2010)以及 1200 km。本研究使用比較合乎現實暴風半徑影響距離的 400 km。

### (6) Emanuel and Rutunno model (E11)

Emanuel and Rotunno (2011)在暴潮出流處假設 1 個常數，藉此改善 EM04 模式在內部對流區的風場分布。由於暴潮外部區域有可能不符合 Richardson 常數的假設，梯度風場在  $V \geq 0$  時的解析方程式呈現如下：

$$V(r) = \frac{2r \left( R_{\max} V_{\max} + \frac{1}{2} f R_{\max}^2 \right)}{R_{\max}^2 + r^2} - \frac{fr}{2} \quad (10)$$

## 四、結果與討論

本章節將呈現台灣東北部龍洞潮位站暴潮偏差之預測結果，包含 BPNN 及參數化颱風模擬風場之結果。以下 4.1 節呈現的是傳統資料驅動模式預測結果；4.2 節則是呈現結合物理維基礎模式的預測結果；4.3 節則說明以物理基礎模式整體預測的改善程度。受限於篇幅，本研究以海棠颱風為例呈現驗證的結果。

### 4.1 傳統資料驅動模式預測結果

圖 3 為海棠颱風時序列變化，上方子圖(a)-(d)呈現颱風之詳細資訊(說明如後)，最下面的子圖(e)則呈現暴潮偏差的時序列變化。圖 3(a)的藍色線及綠色線分別為颱風的相對角度及前進角度。圖 3(b)的藍色線、綠色線及黑色線分別代表颱風中心至測站的實際距離以及假設颱風在直線前進下，中心與測站之距離以及暴風半徑。圖 3(c)中的藍色線為颱風的最大風速，紅色、黃色、紫色、綠色、淺藍色以及暗紅色分別表示為 MH、MR、SLOSH、EM04、EM11 及 YSB 各颱風模型於龍洞測站之風速。從圖中可以發現，當颱風距離測站相當遠的時候，參數化颱風模型之風速與最大風速之間相差甚多。隨著颱風接近測站，參數化颱風的風速與實測之最大風速漸趨一致。圖 3(d)的藍線代表颱風中心的壓力差，綠色線則是以式(5)所計算而得之參數化颱風壓力差分布。其壓力分布趨勢與距離呈現指數遞減，所以

趨勢與圖 3(c)風速的分布相似。圖 3(e)中黑色圓點代表觀測之暴潮偏差。整體而言，SPV 模式(灰線)以及 SPVLRF 模式(藍線)在 1 小時前置時間的預測表現與觀測值(黑圈)相當接近。

圖 4 顯示的是海棠颱風長前置時間的時序序列暴潮預測結果。由於海棠颱風沒有快速抬升的現象產生，所以 SPV 模式在前置時間 4 小時仍能得到合理的預測結果，其 RMSE 為 16.47 cm、CC 為 0.852 及 CE 為 690(見表 2)。但隨著預測前置時間增加至 8 小時，SPV 模式的預測能力與訓練事件一樣快速下降(RMSE 為 19.74 cm、CC 為 0.847 及 CE 為 0.570)。反觀 SLPVRF 模式(藍線)，即使前置時間增加至 8 小時，其對於暴潮尖峰值的預測仍表顯得相當不錯，其預測表現分別為 RMSE 為 15.81 cm、CC 為 0.850 以及 CE 為 0.725。

#### 4.2 物理基礎暴潮預測模式

在風速變化的部分(圖 3c)，MH 模式有高估的趨勢。風速及氣壓差發生的位置一樣在颱風距離測站最近(56 km)的時間點(7月18日 15:00)，但此時風吹的方向為離岸風(相對角度  $180^\circ$ )，水位抬升的現象並不明顯(43 cm)。前置時間 1 小時的預測結果在驗證事件皆有不錯的預測結果。在長前置時間的部分，由於水位沒有明顯抬升，E4 在前置時間 t+8 小時的預測結果表現也能達到與 SLPVRF 相近的預測結果(RMSE 為 15.50 cm、CC 為 0.863 以及 CE 為 0.734)，E11 模式則能將描述暴潮極值的變化(RMSE 為 16.12 cm、CC 為 0.847 以及 CE 為 0.714)；其他模式在前置時間 t+8 小時尖峰值的預測結果發生延遲的現象，主因可能是參數化颱風假設以直線方式前進，所以隨著預測時間增加，路徑與原始路徑差異性越大，相對於以理論解建構的 E4 及 E11 模式，其他以最大風速與測站位置及最大風速半徑比值之乘積關係的風場，對於長時間預測的變化可能無法有效描述颱風與測站的相關性。

表 2 海棠颱風於不同模式及預測時間下之結果

Lead Time	Model					
	1			8		
Training	RMSE	CC	CE	RMSE	CC	CE
SPV	8.07	0.96	0.92	19.74	0.85	0.57
SLPVRF	8.30	0.96	0.92	15.81	0.85	0.73
MH	8.42	0.96	0.92	16.35	0.85	0.71
MR	8.30	0.96	0.92	16.40	0.85	0.70
SH	8.67	0.96	0.91	16.64	0.85	0.70
E4	8.35	0.96	0.92	15.50	0.85	0.73
E11	8.47	0.96	0.92	16.12	0.85	0.71
YSB	8.03	0.96	0.92	17.25	0.86	0.67

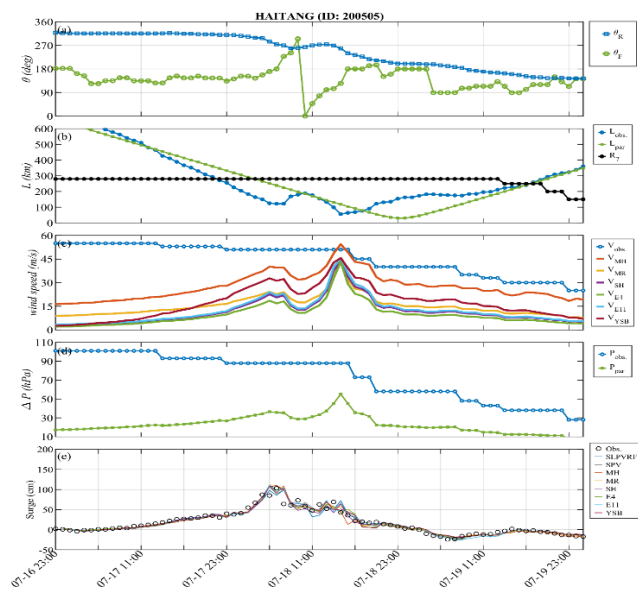


圖 3 海棠颱風事件於龍洞測站控制參數之時序序列變化

#### 4.3 應用參數化颱風模型映射物理關係之改善程度

由於海棠颱風沒有水位快速變化的現象，所以參數化颱風對於相關係數在預測時間增加的情況下，其改善幅度較不明顯(CC 介於 2%-6%，見圖 5)。在預測時間最長的條件下(t+8 小時)，暴潮尖峰值的預測表現達到一定程度的改善以及提升，其 RMSE 介於 13%-21%，CE 則介於 18%至 29%。

整體而言，當颱風距離測站距離較遠時，參數化颱風風場能將颱風與測站間所隱含的物理關係描述出來，所以在類神經網路結構一樣的狀態下，一定程度改善 SPV 模式的預測結果。但是因為類神經網路優越的容錯能力，使得 SPV 模式的預測結果並不至於太差，所以改善程度並未呈現倍數提升的結

果。

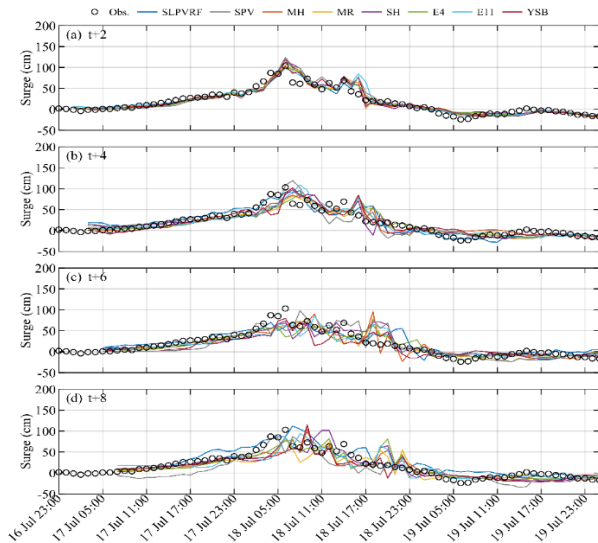


圖 4 海棠颱風事件於龍洞測站控制參數之時序變化

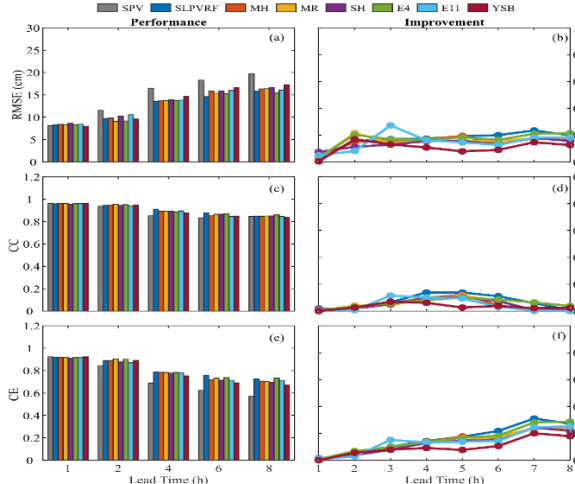


圖 5 海棠颱風(驗證事件)下之模式預測能力及改善幅度(a)、(b) RMSE(c)、(d) CC (e)、(f) CE。

## 五、結論

本研究工作利用參數化颱風模式搭配倒傳遞類神經網路系統(BPNN)建置長前置時間(8 小時)之暴潮預測模式。在參數化颱風模式的比較上，發現隨著預測前置時間的增加，在風場高估的 MH 模式之預測結果略遜於其他 5 種模式。進一步針對參數化颱風對於預測結果之幫助進行探討，本研究發現，使用颱風模式之預測結果，隨著前置時間增加，明顯優於資料驅動之 SPV 模，且與 SLPVRF 模式具有伯仲之間的預測結果，成功達到降低類神經網路結

構複雜度的優點。

## 謝誌

本論文係科技部專題研究計畫 (編號 MOST107-2221-E-019-010-MY3)之研究成果，承蒙科技部經費補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. Chao, W.T., Young, C.C., Hsu, T.W., Liu, C.C., Liu, C.Y. (2020) Long-Lead-Time Prediction of Storm Surge Using Artificial Neural Networks and Effective Typhoon Parameters: Revisit and Deeper Insight. *Water* 12(9), 2394.
2. Conner, W.C., Kraft, K.H., Harris, D.L. (1957) Empirical methods for forecasting the maximum storm tide due to hurricanes and other tropical storms. *Monthly Weather Review* 85 (4), 113-116.
3. Emanuel, K., Ravela, S., Vivant, E., Risi, C. (2006) A statistical deterministic approach to hurricane risk assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87, 299-314.
4. Emanuel, K., Rotunno, R. (2011) Self-Stratification of tropical cyclone outflow. Part I: Implications for storm structure. *Journal of the Atmospheric Sciences* 68, 2236-2249.
5. Flather, R.A. (2001) Storm surges. In: J.H. Steele, S.A. Thorpe, and K.K. Turekian (Editors), *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Academic Press, San Diego, 2882-2892.
6. Holland, G. J. (1980) An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Monthly Weather Review* 108(8), 1212-1218.
7. Houston, S.H., Shaffer, W.A., Powell, M.D., Chen, J. (1999) Comparisons of HRD and SLOSH surface wind fields in hurricanes: implications for storm surge modeling. *Weather Forecast* 14(5), 671-686.
8. Jelesnianski, C. P. (1965) A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf. *Monthly Weather Review* 93 (6), 343-358.
9. Kim, S., Pan, S., Mase H. (2019) Artificial neural network-based storm surge forecast model: Practical application to Sakai Minato, Japan, *Applied Ocean Research* 91, 101871.
10. Lee, T.L. (2006) Neural network prediction of a storm surge. *Ocean Eng* 33:483-494.
11. Myers, V.A. (1957) Maximum hurricane winds. *Bulletin of the American Meteorological Society* 38, 227-228.
12. Murty, P.L.N., Srinivas, K., Pattabhi Rama Rao, E., Bhaskaran, P.K., Sheno, S.S.C., Padmanabham, J. (2020) Improved cyclonic wind fields over the Bay of Bengal and their applications in storm surge and wave computation, *Applied Ocean Research* 95, 102048.
13. Torres, M.J., Hashemi, M.R., Hayward, S., Spaulding, M., Ginis, I., Grilli, S. (2019) Role of hurricane wind models in accurate simulation of storm surge and waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 145(1), 04018039.
14. Tseng, C.M., Jan, C.D., Wang, J.S., Wang, C.M. (2007) Application of artificial neural networks in typhoon surge forecasting. *Ocean Eng* 34, 1757-1768.
15. You S.H., Seo, J.W. (2009) Storm surge prediction using an artificial neural network model and cluster analysis. *Nat Hazards* 51, 97-114.

# 離岸風場季風及颱風下之極端 風速條件分析研究

趙偉廷<sup>1</sup> 楊智傑<sup>1,2</sup> 許泰文<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 國立台灣海洋大學海洋工程科技中心

<sup>2</sup> 國立台灣海洋大學海洋環境資訊系

<sup>3</sup> 國立台灣海洋大學河海工程學系

## 摘要

科技部計畫：108-2218-E-019-001-MY2

台灣海峽擁有極佳的風場分布，然而每年夏秋之際侵襲台灣的颱風，其瞬間強風將對風機運維造成危害。其伴隨極端的海象條件(海流、波浪)也是影響離岸風機運維的外在因素。本年度計畫將持續蒐集彰濱外海 29 號風場鄰近海域風場與波浪實測資料，除了分析其變化趨勢，進一步建置類神經網路搭配參數化颱風模型之風場及波浪推算模式，提供 29 號離岸風場海、氣象預報另一種可行的方法。透過一系列完整的研究，所得之結果將有助於 29 號風場未來營運與維護之依據。

關鍵詞：颱風波浪、季風波浪、規劃設計、施工運維、極端值分析、人工智慧方法、超越機率

## Analysis on Extreme Wind Speed Conditions under Monsoon and Typhoon Events for Offshore Wind Farm

Wei-Ting Chao Chih-Chieh Young\* Tai-Wen Hsu

\* Associate Professor, Department of Marine Environmental Informatics, National Taiwan Ocean University

### ABSTRACT

There is abundant potential wind energy in Taiwan strait. However, averaged 3 to 4 typhoons invaded Taiwan every summer and autumn season that its strong wind shear stress would destroy the wind turbine. Also, operations and maintenance of offshore wind turbines would be affected by extreme ocean conditions (e.g. ocean currents, waves). We keep still collecting the wind and wave data of the No. 29 offshore wind farm in Changhua coastal. In this year, the hybrid model of BPNN and parametric typhoon model were constructed for wind and wave prediction. This model provided an alternative way for the ocean and meteorological prediction. The helpful references could provide for the future management and maintenance in Changhua offshore wind farm.

Keywords: Typhoon waves, Monsoon Waves, Arrangements and design, Construction and maintenance, Extreme value analysis, Artificial Intelligence, Probability of excess

### 一、前言

台灣為一四面環海之國家，90%以上能源需仰賴進口。目前，台灣仰賴的發電方式以火力及核能

為主。此兩種能源帶來便利性的同時，也衍生不少的問題。首先，1970 至 1980 年代受到中東戰亂波及所導致的兩次石油危機。近年來則是全世界過度開採石油，使得全球石化蘊藏量逐漸的枯竭(蘇和

鐘, 2004)。其次, 當我們廣泛使用以石化燃料為主的火力發電, 其燃燒所產生之硫氧化物 SO<sub>x</sub>、細懸浮微粒 PM 2.5 等, 對於地球環境甚至人體健康造成極大的威脅。再者, 火力發電所伴隨生成之二氧化碳、甲烷、氟氯碳化物等溫室氣體, 導致全球暖化及氣候變遷, 對於環境及生態造成相當大的衝擊。核能發電雖然相對於火力發電更為環保(發電時僅會產生高溫冷卻水), 但發電後核廢料的處理及安全問題, 在歷經多次核電廠災害後(烏克蘭車諾比核電廠事故、美國三哩島核洩漏事故、福島核電廠事故等), 成為最主要的隱憂。

近年來, 由於全球氣候變遷與暖化的影響, 海表面溫度逐漸增加, 提供颱風更多的能量, 每年形成的颱風數量以及強度每每超越過去的紀錄(Webster et al., 2005; Emanuel, 2005)。我們整理了中央氣象局歷史颱風事件, 發現颱風強度自西元 2000 年迄今確實有增強的趨勢(即中心氣壓更低、近中心最大風速更強)。學者們相信未來超級颱風將會更頻繁地出現, 極端海象的現象(颱風期間最大示性波高)也會較過去明顯。極端天氣狀態會導致能源轉換器超過其功率所能承受之極限, 嚴重的話, 更可能破壞離岸風機基礎甚至是風機本身。因此, 在積極開發離岸風能的同時, 必須正視氣候變遷所引發的問題, 並重新評估以及建立離岸風機能量轉換設備施工、佈置及運維管理在此衝擊下之因應方法。

評估離岸風機施工規劃與運維設計最重要的因子為周遭海氣象條件(風速、波浪)。如何利用長期歷史資料搭配統計分析方法, 以推估海氣象條件之重現期特性(極值分析), 將有助於後續施工與運維之評估。根據過往的研究結果發現, 本區域設置之海氣象觀測塔面臨幾個問題: (1) 觀測長度不足, 有限資料下可能無法提供高重現期推估(Lin et al., 2010); (2) 設計條件與海氣象物理因子之間的關聯性長存在不確定性, 以一對依關係的頻率分析風險反應時, 有可能無法有效呈現設計條件之變動; (3) 由於全球暖化以及氣候變遷的影響, 全球海均溫增加, 導致大氣環流變化更加快速劇烈, 使得風速及波浪極端條件每每超過歷史紀錄, 甚至超出 10-20% 以上。此外, 前人研究顯示大氣驅動力對於準確的暴潮預測相當敏感, 在颱風路徑及強度描述良好的情況下, 暴潮位模擬的誤差可降至 10%。否則, 最

大誤差可能超過 50% 以上(Dietrich et al., 2018; Torres et al., 2019)。

本研究將進一步針對**風速**資料進行分析探討。焦點主要包含: (1)妥善分析**極端氣候**條件下風速條件的可能變化, 作為海事工作船出海施工運維之參考。(2)透過**人工智慧方法**(如機器學習或類神經網路), 研發一套適用於本區域風速及波浪之推算模式, 用以預測不同路徑及強度下所造成之極端海氣象條件。透過參數化颱風模型以人工智慧推算模式的結合, 有助於更深入認識與掌握彰濱海域離岸風場。

## 二、研究區域描述及資料選取

### 2.1 研究區域

本研究場址為彰濱外海 29 號風場, 蒐集鄰近海域由永傳能源所設置之福海海氣象塔之實測資料(示性波高、示性週期、風速及風向)。資料蒐集時間長度則依測站設置時間而定(2015/10-2016/02)。利用統計科學理論(如: 資料之條件選取、極值分佈及參數推定方法)分析波浪及風場變化趨勢(如: 逐年或季節性變化)、不同重現期之極端波浪、風速與信賴區間。由於台灣離岸風電產業剛剛起步, 觀測資料相對不足的情況下, 本研究延續上年度之作法, 透過確認與鄰近新竹波浪浮標及氣象站之長期觀測資料(示性波高及特徵週期、逐時波浪、海上逐時風速、風向等)是否具有的一致性, 用以提升資料的完整性及適用區域。所得之分析結果, 可以作為佈設離岸風機前設計分析及運維作業評估之依據。

圖 1 為永傳能源於彰濱海域所設置之福海觀測塔之 ADCP 觀測值(藍色點)及氣象局新竹浮標站(紅色線)之示性波高之分布結果。圖 1 (a)2015 年 11 月示性波高分布結果顯示, 在 11 月平時之示性波高有超過 1/2 的時間會高於不適合出航標準的 1.5 m 以上。從圖中可以發現彰化和新竹浮標站的資料分布具有不錯的一致性, 其相關係數可達到將近 0.9(0.896)。從 2016 年 1 月之示性波高(圖 1b)結果亦能看出其一致性相當良好, 尤其在 1 月 23 日最大示性波高發生時, 兩個測站皆測得超過 5 m 以上的大浪發生。其不適合出航的時間更超過整月的 2/3 時間, 圖中兩浮標站之示性波高之相關係數同樣可達 0.898。因此, 我們可以利用新竹浮標站的長時間

資料作為後續頻率分析之用，用以評估離岸風力發電施工條件及運維規劃之用。

本研究所蒐集之中央氣象局新竹浮標站自 1998 至 2018 年間海上逐時風速及波浪資料共約 13 萬餘筆。前一年度已分析過不適合出航之特徵波浪分布，由於離岸風機施工時常有吊掛工程，所以風速的分布趨勢也很重要(如圖 2 所示)。圖中紅色區塊為不適合海事工程船出航之浪高( $V_s > 8.54$  m/s)，黃色區塊為中小浪( $3.8 \text{ m/s} < V_s < 8.54$  m/s)，綠色區塊則是小波( $V_s < 3.8$  m/s)。與特徵波高結果相似，在東北季風盛行的月份，不適合出航的平均風速達到可達當月份 50% 甚至超過。在 4-9 月份，示性波高具有 95% 以上的適航性，但以平均風速觀點其適航性大幅下滑至 78%。

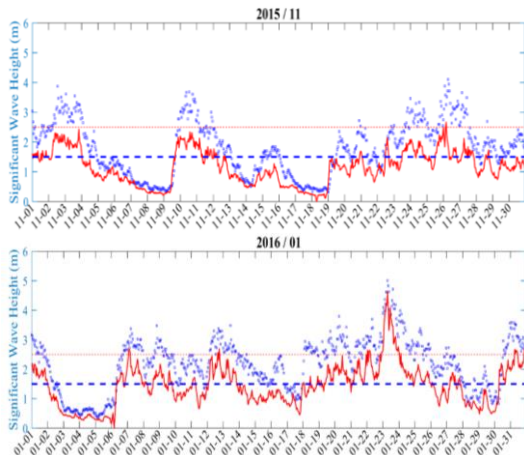


圖 1 彰化與新竹測站實測資料比較(a)風速 (b)特徵波高

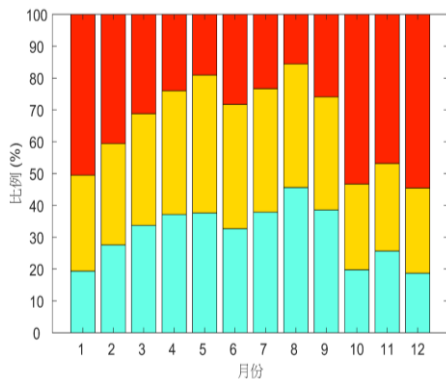


圖 2 新竹海域(1998-2018)各月份風速比例分布

## 2.2 颱風事件資料蒐集及分析

本研究彙整中央氣象局所提供 1975-2018 對研究區域有影響之歷史颱風基本資料。其參數包括颱風路徑經緯度、最低中心氣壓、最大風速、暴風半徑等，用以作為極值分析研究資料。自 1998 年起至 2018 年止，影響本區域之颱風事件共 46 場，各種類型之颱風其路徑如圖 3 所示。由路徑分布圖可知，威脅此處的颱風類型主要以第 2、3、4、7 及 9 號路徑。其中又以 3 號路徑為主要影響研究區域之颱風(14 場，31%)，主要因為彰濱海域位於台灣中部，故通過台灣中心的 3 號路徑所占比例才會如此顯著。7 號路徑最少(4 場，9%)，此路徑由巴士海峽以南沿台灣海峽往北前進。此類路徑之颱風結構並未受到中央山脈破壞，理論上風速更大可能對離岸風機造成更大的威脅。然而此 4 場颱風事件皆為輕度或中度颱風，所以影響較不顯著。其餘颱風路徑(3、4 及 9 號)則分別各占 20% 的比例。在颱風強度部分，本區域主要以輕度颱風的比例最高(18 場，40%)，中度颱風以及強烈颱風事件發生次數幾乎相等，分別為 14 場(31.1%)及 13 場(28.9%)。

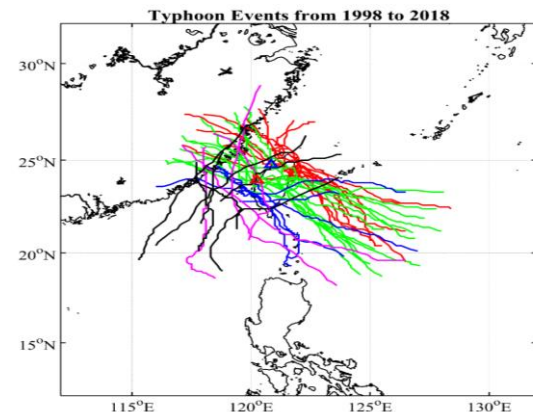


圖 3 1998-2018 侵襲新竹浮標站之颱風路徑(紅色線：2 號；綠色線：3 號；藍色線：4 號；粉色線：7 號；黑色線：9 號)

## 三、風速極端條件頻率分析

### 3.1 常見的統計模式

本研究在重現期分析的統計模式部分，延續前一年度的研究，選定甘保分布、韋伯分布、常態分布、二參數對數常態分布及皮爾遜第三類分布。每個函數分別包含機率密度函數和累積分布函數。其中，機率密度函數是用來描述隨機變量的機率分布，而累積分布函數則表示機率密度函數積分後之

結果。後續，為了瞭解設計規劃與施工運維下的特徵風速分布函數，以下將分別選取年以及月之風速極值，進行頻率分析。表 2 統計模式中所使用之函數

### 3.2 離岸風機設計規劃與運維規劃 風速極端條件頻率分析

離岸風力發電機設置於海上，需要考慮包括風、海浪、潮流等自然環境因素，相關規範中亦有詳細明訂須考慮環境荷載之設計。其中，風速值也是環境荷載中一主要影響因子，本研究擬探討在不同函數擬合分布對於極端風速推估之影響。

由新竹浮標站 21 年之觀測資料分析發現，風速峰值大致與歷史颱風事件相關，整理所得之極端風速值如表 3 所示。本研究使用獨立事件法進行極值分析，同時以 Peaks-Over-Threshold 法將風速最低門檻設定為 15.8 m/s。為確保每組極值的獨立性，尖峰值最少間隔 48 小時，兩個尖峰值的中間數值需為尖峰值本身的 50% 以下。綜合以上條件，在過去 21 年實測資料選出 60 組極值樣本分析，其結果如圖 4 所示。其結果顯示，季風所造成的極端事件(50 筆)所佔的場次遠遠超過颱風事件(10 筆)。但是，前 8 大的極端風速皆由颱風所引致的。

表 3 颱風引致的極端風速

	颱風	發生時間	平均風速 (示性波高)
1	蘇迪勒	20150808	28.6 (6.79 m)
2	梅姬	20160927	28.3 (10.02 m)
3	杜鵑	20150928	26.7 (8.94 m)
4	蘇力	20130713	22.9 (5.78 m)
5	薔蜜	20080928	22.7 (12.45 m)
6	妮莎	20170729	21.7 (2.61 m)
7	海棠	20050718	21.1 (3.00 m)
8	聖帕	20070818	20.9 (1.87 m)

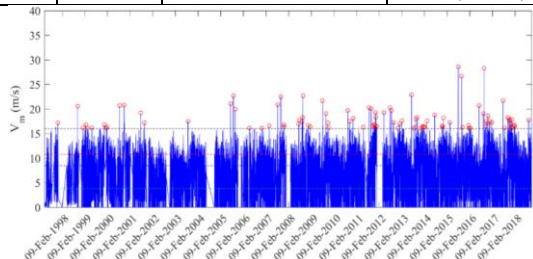


圖 4 新竹海域 20 年(1998-2018)平均風速分布

由於所取得之風速極值包含颱風事件以及季風事件，為了能求得模式最佳擬合度，特別將樣本區

分為兩部分，利用不同權重係數的雙函數進行計算。首先，第一部分是風速由颱風所造成的風速，總共有 10 次；接著，第二部分是由季風所造成的風速，在 60 個樣本中占了 50 次。將各部分所占比例之權重係數配合雙函數進行計算可以得到下式：

$$f(x|\mu, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2) = \mu f(x|\alpha_1, \beta_1, \gamma_1) + (1-\mu)f(x|\alpha_2, \beta_2, \gamma_2) \quad (1)$$

各函式之參數估計式利用動差法，為統計學中常見的一種計算機率模型的參數方法。將資料數列 X 視為常態分布，而欲估計的參數視為資料 X 幾次方的期望值，用對應 X 之次方的樣本平均來估計，稱為動差法。累積分布函數分布結果如圖 5 所示，各模式之分布結果如表 4 所示。由結果發現皮爾遜第三類與韋伯分布最適於描述年極端頻率分析。

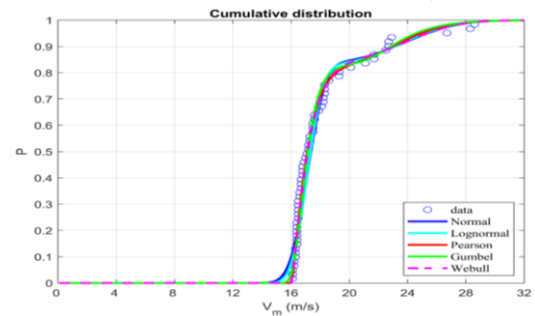


圖 5 離岸風機規劃設計風速極端條件頻率分析之累積分布函數

表 4 各函數之表現結果

	均方根誤差(m)	相關係數
甘保分布	0.130	0.988
韋伯分布	0.340	0.807
常態分布	0.067	0.979
二參數對數常態分布	0.053	0.981
皮爾遜第三類分布	0.087	0.988

在百年回歸平均風速結果的部分，將回歸週期設定自 2 至 100 年，其回歸風速結果如圖 6 所示，在 2 年回歸週期的時候，結果較為一致；隨回歸週期增加後，平均風速值的差異性變得更加明顯。各回歸週期之詳細風速如表 5 所示。

表 5 特定回歸週期之風速結果

Return period	Averaged Wind Speed (m/s)				
	2 yr	5 yr	10 yr	50 yr	100 yr
甘保分布	20.2	23.9	25.4	28.5	29.8
韋伯分布	19.8	24.6	26.3	28.9	29.7
常態分布	19.3	24.6	26.3	28.9	29.7
對數常態分布	19.4	24.5	26.1	28.9	29.8
皮爾遜第三類分布	20.2	24.2	25.9	28.8	29.8

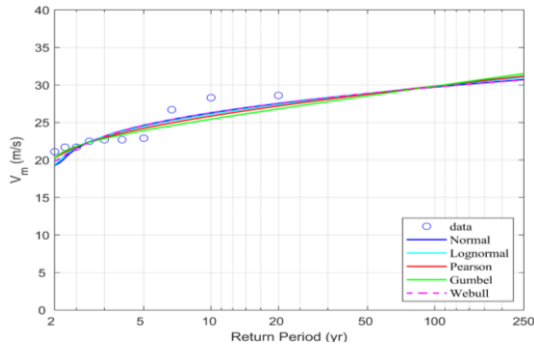


圖 6 百年回歸平均風速

台灣冬季(10月至隔年3月)受中國吹拂強烈東北季風影響，浪高及風速條件並不適合海事工程船出航。4至9月份風浪較小，但台灣地區平均每年受到3-4個颱風侵襲。依過去建議，離岸風機海事工程船的適航標準為中小浪的條件( $V_m < 8.54$  m/s)。因此，掌握4月至9月實際能施工的天數，對於離岸風場開發實屬重要。由挪威 DNV 規範的海事操作回歸期建議，其月的獨立極端值以10年回歸期為主。因此，我們將分析新竹測站1998-2018年的資料，針對其可能發生之極端風速事件的月頻率、次數及趨勢進行探討。受限於文章長度，將以9月份進行說明。

圖7為歷年(1998-2018)9月份平均風速統計分布，此月份不能出海的機率不管是前10年或近10年皆高於其他月份。9月份歷年各統計模式的累積密度函數結果如圖8及表6所示。除了甘保分布的相關係數可以達到0.855外，其他統計模式相關係數皆低於0.80，甘保分布較適用於描述其分布趨勢。20年平均風速回歸期結果呈現於圖9及表7。相較於甘保分布，其它統計模式在回歸期的部分有略微高估的趨勢，甘保分布10年回歸期可達20.66 m/s。

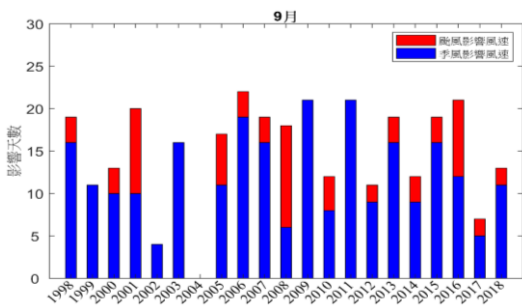


圖 7 20年間9月份歷年平均風速統計分布影響天數

表 6 各函數之表現結果(9月)

	均方根誤差(m)	相關係數
甘保分布	0.215	0.855
韋伯分布	0.229	0.718
常態分布	0	0.778
對數常態分布	0.028	0.791
皮爾遜第三類分布	0.013	0.781

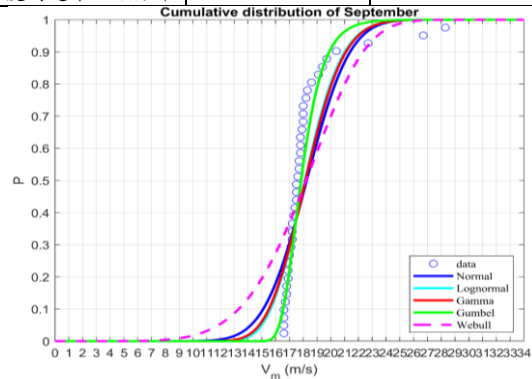


圖 8 離岸風機規劃設計風速極端條件頻率分析之累積分布函數(9月)

表 7 特定回歸週期之風速結果(9月)

Return period	Averaged Wind Speed (m/s)			
	1 yr	5 yr	10 yr	20 yr
甘保分布	17.84	19.07	20.66	21.43
韋伯分布	18.21	21.01	23.38	24.23
常態分布	18.25	20.32	22.29	23.07
二參數對數常態分布	18.12	19.97	21.90	22.71
皮爾遜第三類分布	18.16	20.06	21.98	22.77

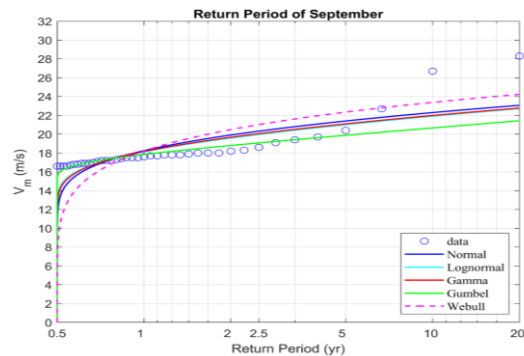


圖 9 20年回歸平均風速(9月)

### 3.3 參數化颱風模式

由於計畫區域設置的測風塔觀測年限不足，僅有4年的數據，資料完整性不足。但是類神經網路訓練需要有足夠的資料筆數，才足以訓練出好的模式。本節利用新竹測站資料相似性高特性(相關係數達0.90)，搭配參數化颱風模型及類神經網路進行颱風波浪模擬。以韋帕與山竹韋驗證事件，其餘11場颱風為訓練事件。



由於山竹颱風侵台路徑較遠，所以示性波高(圖 e)變化並不明顯。圖 10 為驗證颱風事件的預測結果，在前置時間 1 小時的預測結果(圖 a)，LSTM(綠色線)及 BPNN(藍色線)預測結果可達到 0.83 且結果相近。前置時間拓展至 3 小時，LSTM 的預測結果會略低於 BPNN，相關係數分別為 0.60 及 0.65。此處預測的結果較差的原因可能是因為颱風距離太遠，所以影響參數化颱風的風場結果，後續蒐集更多風海觀測塔颱風波浪資料後，再做更進一步的比較。整體而言，參數化颱風模型在其他颱風事件具有良好預測結果，也能達到類神經網路結構簡化的效果。

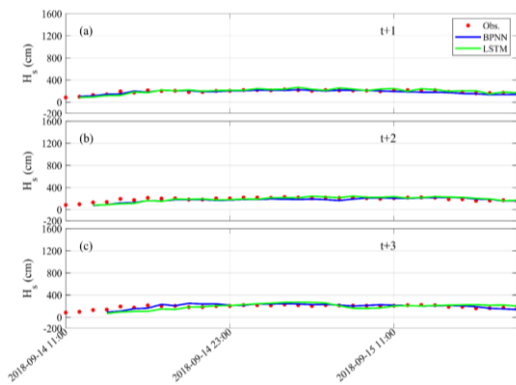


圖 10 山竹颱風預測結果

#### 四、結論

本計畫分析平時(4 至 9 月)及極端氣候條件(如：颱風及東北季風)之風速及波浪特性，並將觀測資料、風浪模式以及人工智慧方法結合，藉此建立離岸風場之海氣象預測模式。

在離岸風電規劃設計部分，挑選的極端示性波高事件同時由颱風或東北季風組成，利用雙函數權重計算。經由分析結果發現，甘保分布及皮爾遜第三型較適用年極端值變化的描述，其相關係數可達 0.988，50 年回歸期則為 11.9 m。在平均風速部分，則以韋伯分布及皮爾遜第三型較適用，其相關係數可達 0.991，50 年回歸期則為 28.5 及 28.9 m/s。

由於計畫區域側風塔觀測年限不足，所以利用參數化颱風結合神經網路的方式進行波高預測。在訓練的部分，LSTM 與 BPNN 都有不錯的預測能力；但是在驗證部分，預測效果並不如預期，推測可能是颱風距離測站過遠，測站當地的大氣變化影響大於颱風的影響，所以參數化颱風的效果不好。

後續蒐集更多風海觀測塔颱風波浪資料後，再做更進一步的比較。

整體而言，本計畫分析結果之氣象條件極值與不適合出航的比例，可供台灣離岸風機設計團隊未來在施工及運維上參考，並作即早之規畫。

#### 謝誌

本論文係科技部專題研究計畫「利用機器學習理論發展離岸風場之颱風波浪預測模式與極值分析」(編號 MOST 108-2218-E-019-001-MY2)之研究成果，承蒙國科會經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. Dietrich, J.C., Bunya, S., Westerink, J.J., Ebersole, B., Smith, J.M., Atkinson, J.H., Jensen, R.E., Resio, D.T., Luettich, Jr., R.A., Dawson, C., Cardone, V.J., Cox, A.T., 2010. A high-resolution coupled riverine flow, tide, wind, wave, and storm surge model for southern Louisiana and Mississippi. Part II – synoptic description and analysis of Hurricane Katrina and Rita. *Monthly Weather Review* 138, 378-404.
2. DNV, 2011. Marine Operation, General. DNV-OS-H101.
3. DNV, 2013. Offshore Installation Operations (VMO Standard Part 2-4). DNV-OS-H204.
4. Emanuel, K. A., 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* 436, 686-688.
5. GL Nobel Denton, 2013. Concrete Offshore Gravity Structure Construction and Installation. 0015/ND.
6. Webster, P. J., Holland, G.J., Curry, J.A., Chang, H.R., 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science* 309, 1844-1846.
7. 蘇達貞、鍾珍，2004，海洋能源的魅力，科學發展，第 383 期，第 28-33 頁。
8. 陳家銘，2007，「應用波浪數值推算台灣海域波浪特性」，國立中山大學海洋環境及工程學系研究所碩士論文。
9. 許泰文，2014，離岸風機支承結構在極端條件環境載重作用下之反應及設計(I)，科技部補助專題研究計畫成果報告。
10. 周顯光，2016，離岸風場作業安全評估技術開發計畫，研究機構能源科技專案 105 年度執行報告。
11. 邱方伶、曾郁安、林宗岳、范秉天、辛敬業，2018，應用不同計算方法評估離岸風機基礎之波浪負荷，2018 台灣風能學術研討會暨科技部成果發表會，台南台灣。

# 以 Telemac-Mascaret 數值模式 模擬南澳漁港漂砂問題改善研究

林于凱<sup>1</sup> 李基毓<sup>2</sup> 石瑞祥<sup>3</sup> 翁文凱<sup>3</sup> 張友力<sup>1</sup>

1 國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士生  
2 國立臺灣海洋大學海洋工程技術學士學位學程(系)助理教授  
3 國立臺灣海洋大學河海工程學系教授

## 摘要

南澳漁港位於宜蘭蘇澳鎮沿海，建成二十餘年來因東北季風和颱風交互影響，造成航道嚴重淤積，本試驗中設計三種改善方案預改善此現況，以數值模擬預測成效，並配合水工模型試驗結果比對，找出最適合的改善方案。本研究採用 OPEN TELEMAC-MASCARET 系統中 TOMAWAC、TELEMAC-2D 和 SISYPHE 三個模組進行耦合，模擬南澳漁港現地在季風及颱風作用下的侵淤狀況，再針對三種改善方案進行模擬試驗，以侵淤變化量為重點進行評估。經過結果分析，在改善配置 B 中，將原北消波塊攔砂堤改建為混凝土堤，可以改善在東北季風波浪條件下北邊沿岸流夾帶漂沙流入漁港外岬灣，減少岬灣內淤積現象；把南澳漁港的南防波堤延長 120 m 也可以有效抵抗颱風條件下外海波浪繞射，將沙帶入岬內。綜合上述，改善配置 B 為此次設計改善方案中，最能減少南澳漁港淤積問題。

關鍵詞：南澳漁港、底床傳輸、侵蝕、淤積、TELEMAC-MASCARET

## Numerical Study on Countermeasures to Sedimentation at the Nan-Ao fishing Harbor Using the Telemac- Mascaret System

Yu-Kai Lin Chi-Yu Li\* Ruey-Syan Shin Wen-Kai Weng Yu-Li Zhang

\* Assistant Professor, Bachelor Degree Program in Ocean Engineering and Technology, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

Nan-Ao Fishing Harbor is located along the coast of Suao Town, Yilan. Its waterway has been seriously silted due to the interaction of the northeast monsoon and typhoon over the past 20 years since its establishment. In this study, three improvement plans were proposed to improve this situation, and investigated numerically, which had calibrated first with and hydraulic model tests. The open-source software TELEMAC-MASCARET, coupled with TELEMAC-2D, TOMAWAC, and SISYPHE modules, was selected for numerical simulation of different scenarios of monsoon and typhoon wave conditions. After analysis of different results, it is found that the conversion of the northern sediment barrier into a concrete groin can prevent bedload sediments from moving into the bay caused by the north coastal current under the winter monsoon wave condition, and effectively reduce the siltation. Moreover, extending the south breakwater of the Nan-Ao Fishing Harbor by 120 m can effectively resist the offshore current from the open sea under typhoon wave conditions and flow into the harbor, resulting in fewer sediments moving in the bay. Based on the observations, Plan B can most reduce the siltation problem in the Nan-Ao Fishing Harbor.

Keywords: Nan-Ao Fishing Harbor, bedload transport, erosion, deposition, TELEMAC-MASCARET

## 一、前言

台灣海岸線綿延約 1500 公里長，受季風、颱風、河口侵淤，甚至是人工構造物等影響，可以說一年 365 天都在變化，全台各地亦有不少漁港深受影響。

南澳漁港位於蘇澳鎮朝陽里，為民國 87 年建成之第二類漁港，北為烏石鼻自然保留區做為天然的屏障，加上附近海域資源豐富，成為附近漁民及釣客停泊休憩基地。建成二十餘年來因東北季風和颱風交互影響，造成航道嚴重淤積問題，必須定期清理淤沙，地方反應希望能以擴建港口的方式，增加抵抗颱風波浪及港口水深防淤之能力，以確保漁船進出及避風安全，以此為出發點研擬此試驗作為港口改善參考。

一般研究海岸地形變遷的方法有三種，分別為水工模型試驗、數值模式推算及現場實測資料分析。本研究利用數值模式推算並配合水工模型試驗，針對所研擬之三組改善配置進行預測及評估改善成果，找出最合適的漁港改善方案。

## 二、研究方法

### 2.1 模式簡介

本研究採用之數值模式為開源式模式 OPEN TELEMAC-MASCARET，其模式原為由法國電力公司(Électricité de France R&D)集團旗下國家水文與環境實驗室(Laboratoire National d'Hydraulique and Environnement)所開發之有限元素為主計算模式，目前由包含法國 Artelia 工程顧問公司、風險、環境、交通和城市規劃研究中心(Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, France)、德國聯邦水利工程學院(Bundesanstalt für Wasserbau, Germany)、英國 HR Wallingford 工程顧問公司、達斯伯里實驗室(Daresbury Laboratory, UK)等所組成的協會共同維護及管理。該模式結合了許多不同的模組工具，可計算水動力運動、港池內波浪運動及波浪通過結構物之傳輸及折繞射現象、近岸波浪傳輸、底床泥沙運移，已經過許多實際案例驗證(Janin and Galland, 1992; Asaro and Paris, 2000; Malcherek, 2000; Horritt and Bates, 2002; Guillou and Chapalain, 2011; Aldridge and Dolphin, 2018)。

本試驗使用其中 TOMAWAC、TELEMAC-2D 和 SISYPHE 三個模組進行耦合(如圖 1 所示)，先以 TOMAWAC 模組計算該沿海地區的波浪傳遞，接著透過 TELEMAC-2D 模組用於計算平面二維空間中水動力特性，再用 SISYPHE 模組計算底床泥沙遷移造成一個  $\Delta t$  內之侵蝕與淤積變化。經上述過程得出一個  $\Delta t$  內作用後底床地形高度，最後將新的底床地形高度代入 TOMAWAC 模組計算下一個時間的波浪運動，以此作迭代計算。

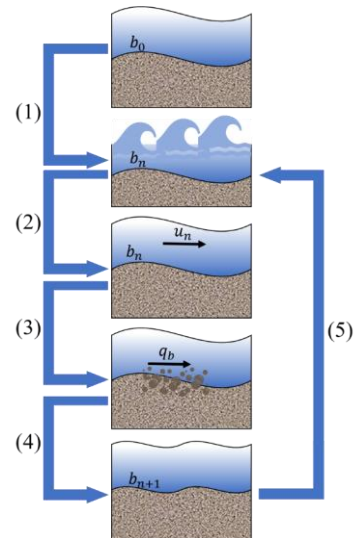


圖 1 數值模式耦合示意圖

### 2.2 TELEMAC-2D 模組

#### 2.2.1 TELEMAC-2D 控制方程式

TELEMAC-2D 求解之控制方程式為 1871 年法國科學家聖-維南(Saint-Venant)所建立淺水波方程式又叫做聖維南方程式，其方程式在數學上是由三維那維爾史托克方程式(Navier-Stokes equations)對於垂直方向的積分得來，屬於非線性的雙曲線型偏微分方程式。聖維南方程式係描述不恆定水流的運動，是一種淺水中的長波傳播現象，通常稱為動力波，其由反映質量守恆律的連續方程和動量守恆律的運動方程組成。在直角座標系統上二維連續方程式(式 1)及動量方程式(式 2 及式 3)分別為：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial x} + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial y} + F_y \quad (3)$$

其中 $u$ 、 $v$ 為 $x$ 、 $y$ 方向上的流速， $g$ 為重力加速度， $F_x$ 、 $F_y$ 為 $x$ 、 $y$ 方向上之額外力項如紊流計算、摩擦力、科氏力或風力等等。

### 2.2.2 TELEMAC-2D邊界條件

TELEMAC-2D的邊界條件如圖 2 示意圖所示，分為上游邊界、底床邊界、側邊不透水邊界、自由水面邊界、以及下游邊界，流場初始條件為靜止狀態。

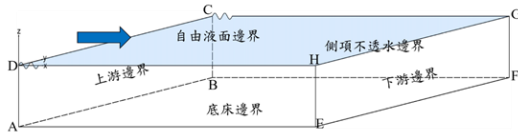


圖 2 邊界條件示意圖

在上游邊界上，如圖 2 中 ABCD 面，流場初始條件為靜止狀態，經由 TOMAWAC 模組計算水面波高換算出來的水深值做為 TELEMAC-2D 在上游邊界上的邊界條件。自由液面邊界上，如圖 2 中 CDHG 面，水粒子沿著液面波形方程式運動，不脫離波形，因此自由液面表面方程式 $\eta = \eta(x, y, t)$ 須滿足 $D\eta / Dt = 0$ 。在底床邊界及側項邊界條件上，如圖 2 中 ABFE 面為底床邊界；ADHE 面及 BCGF 面為側項邊界，水粒子在水槽中運動不能穿透邊界，因此假設底床表面方程式 $b = b(x, y, t)$ 情況下，須滿足 $Db / Dt = 0$ 。最後，在下游邊界上，如圖 2 中 EFGH 面，為了讓水粒子流出數值模型，因此在下流邊界上忽略邊界上切向量之速度分量，僅考慮法向量之速度分量，讓水粒子流出數值模型。

### 2.2.3 $k - \varepsilon$ 紊流計算

為了能夠有效模擬流體運動情形，本研究選用 $k - \varepsilon$ 紊流模塊來進行模擬紊流的計算，其紊流動能 $k$ 傳輸方程寫作：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + G - \varepsilon \quad (4)$$

紊流消散 $\varepsilon$ 傳輸方程寫作：

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + \frac{\varepsilon}{k} (GC_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (5)$$

其中 $\nu$ 為運動黏滯係數， $\nu_t$ 為渦動滯度 (eddy viscosity)， $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ 、 $C_{\varepsilon 1}$ 及 $C_{\varepsilon 2}$ 為經驗常數， $G$ 為紊流動能之生成項 (production of turbulent energy)。

### 2.2.4 底床剪應力計算

為要進行底床粒徑掏刷計算，需要能帶動底床粒徑讓粒徑開始運動。所以當求出流速及水深後，需要額外計算底床位置流體作用在底床上的剪應力，其作用方向與流體流速方向相反，將底床剪應力寫作：

$$\bar{\tau} = -\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial n} = -\frac{1}{2} \rho c_f \sqrt{U^2 + V^2} \bar{U} \quad (6)$$

其中 $\bar{\tau}$ 為底床剪應力、 $\mu$ 為動力黏滯係數， $U$ 、 $V$ 分別為 $x$ 、 $y$ 方向上的平均水深速度， $c_f$ 為摩擦係數。

## 2.3 TOMAWAC 模組

### 2.3.1 TOMAWAC控制方程式

Bretherton & Garrett (1968) 利用荷米頓法 (Hamilton equation) 推導出波浪作用力守恆方程式，表示當波浪作用在非均勻不穩定(有海流或是底床隨時間空間改變)的環境下，波浪作用的能量與波浪源項 (source terms) 及消散項 (sink terms) 總和 $Q(x, y, k_x, k_y, t)$ 相等， $Q$ 項包含風吹所產生的能量、白帽現象產生能量消散、底床摩擦造成能量損失、碎波造成能量消散等。該連續形式波浪作用力平衡方程式其式寫作：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial N}{\partial x} + \dot{y} \frac{\partial N}{\partial y} + k_x \frac{\partial N}{\partial k_x} + k_y \frac{\partial N}{\partial k_y} = Q(x, y, k_x, k_y, t) \quad (7)$$

其中 $N$ 為波浪作用力密度譜，其與方向能量密度譜 $F(f, \theta)$ 間之關係為 $N = F/\sigma$ ， $\sigma$ 為相對頻率， $k_x$ 、 $k_y$ 分別為 $x$ 、 $y$ 方向上的波數。

### 2.3.2 TOMAWAC起始及邊界條件

當波浪傳遞至陸地(堤線)邊界及外海邊界時，假設無波浪反射的情況下，波浪能量會被邊界完全吸收。起始條件及上游邊界條件則是給定一方向頻譜，可寫作一頻譜與一方向譜之乘積：

$$F(f, \theta) = E(f) \cdot D(\theta) \quad (8)$$

本研究選定於假設無風狀態下不會產生風吹生成波時的 JONSWAP 頻譜作為起時邊界給定的條件。

### 2.3.4 碎波能量消散經驗公式

關於碎波能量消散採用 Battjes & Janssen (1978) 所提出之基於分析水躍的方式所推導出，碎波引起之能量消散項總能為 $D_{br}$ 可表示為：

$$D_{br} = -\frac{\alpha Q_b f_c H_m}{4} \quad (9)$$

其中 $\alpha$ 為一數值常數， $f_c$ 為特徵波頻率， $Q_b$ 為碎波為小量(fraction of breaking wave)， $H_m$ 為碎波發生時的最大波高：

$$H_m = \gamma_b d \quad (10)$$

其中 $\gamma_b$ 為碎波參數， $d$ 為碎波發生時之水深。

## 2.4 SISYPHE 模組

在 SISYPHE 模組中，泥沙輸送過程分為底床載、懸浮載及底床載與懸浮載總和並同時適用均勻（單一大小）或不均勻（級配分佈）的非黏性沉積物、黏性沉積物或沙泥混合物。本研究泥沙輸送過程僅考慮底床載並且令沉積物為非黏性的沉積物。

計算流程中，在 TELEMAC-2D 計算底床剪應力後，將該底床剪應力代入 SISYPHE 計算底床沉積物運動。SISYPHE 模組利用徐爾茲參數(Shields number,  $\theta$ )作為了判別底床粒徑是否開始運動。

$$\theta = \frac{\tau_{cw}}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} \quad (11)$$

其中 $\tau_{cr}$ 為臨界剪應力、 $\rho_s$ 為粒徑密度、 $\rho$ 為水密度、 $d_{50}$ 為中值粒徑大小。

再利用艾克納方程式(Exner equation)底床粒徑質量守恆方程式計算底床高程變化，其式寫作：

$$(1 - \lambda) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \nabla \cdot Q_b = 0 \quad (12)$$

其中 $\lambda$ 為底床孔隙率、 $Z_b$ 為底床高度、 $Q_b$ 為底床單寬粒徑傳輸流量。依 Soulsby (1998)提出的經驗公式可表示為：

$$Q_b = \frac{0.005h \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{1.2}}{\left( (s - 1)gd_{50} \right)^{1.2}} U_c \left[ \left( U_c^2 + \frac{0.018}{c_D} U_w^2 \right)^{0.5} - U_{cr} \right]^{2.4} \quad (13)$$

其中 $U_c$ 為平均流流速， $c_D$ 為受到流體作用時的拖曳力係數， $U_w$ 為波浪軌道速度， $U_{cr}$ 為臨界夾帶速度，其與粒徑大小有關。

## 三、試驗結果

### 3.1 數值模式與水工模型對比

圖 3 為水工模型試驗與數值模擬結果比較，圖中水工模型試驗結果水深地形模擬至+5 m，在 0 m 至+5 m 受到溯上作用影響因此會出現明顯淤積現象；數值模擬試驗中受到邊界條件的影響因此在水深 0 m 至+5 m 的侵淤變化無法進行模擬。岬灣中水深 0 m 至-3 m 水工模型試驗結果及數值模擬結果皆出現帶狀侵蝕現象(紅框)；漁港出口出現淤積現象(藍框)；南防波堤外側也皆出現侵蝕現象(綠框)。除了在水深 0 m 至+5 m 數值模擬無法進行模擬外，水工模型試驗與數值模擬各處皆有相似的特徵。

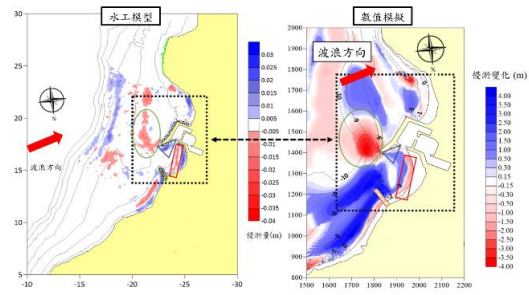


圖 3 水工模型試驗與數值模擬結果比較

### 3.2 試驗條件

圖 4 呈現以現地漁港在冬季季風條件下進行流場模擬結果。由圖中可觀察到一股由北向南之沿岸流，經過北攔沙堤後雖有趨緩，仍無法阻止其流進岬灣中，在岬內形成環流，並於此處造成侵淤現象。基於此一機制，本研究研擬三種不同改善配置以改善南澳漁港淤積問題。並分別以冬季季風和颱風條件進行模擬，對岬內侵淤變化進行比較，以期找出最有效改善現況之配置。以下針對三種改善配置進行說明：

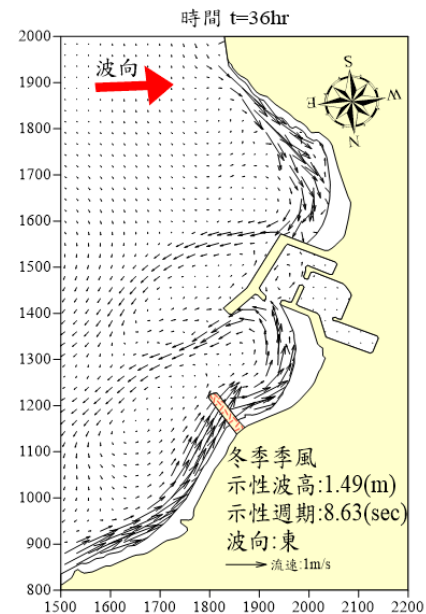


圖 4 冬季季風條件南澳漁港流場模擬結果

改善配置 A：於岬灣中間加入一突堤，其長度由水深 0 米處延伸至-5 米，約 80 公尺長，以破壞岬內環流減少其侵淤現象。

改善配置 B：將原南防坡堤延長 120 公尺，並將原北消波塊攔沙堤替換為混凝土堤，增加堤防防

波能力，藉此減少岬內淤積。

改善配置 C：與改善配置 B 相同將南防坡堤延長 120 公尺，但因工程經費考量保留原北攔砂堤設計，測試成本較少狀況下工程效果。

原漁港設計及各配置示意圖如圖 5 所示，其中紅色框線內為後續侵淤量比較選取範圍。

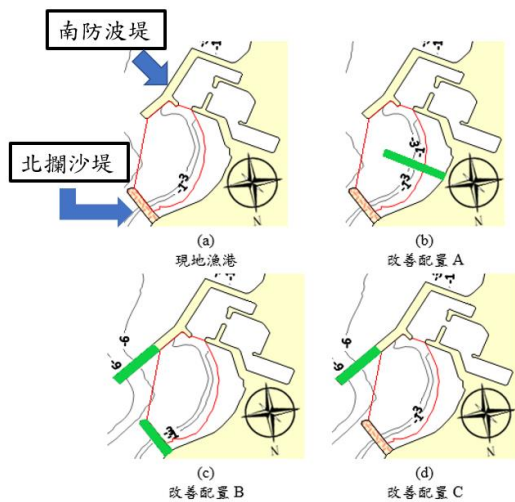


圖 5 各配置與侵淤量計算範圍示意圖

### 3.3 冬季季風條件

現地漁港及三種改善方案在經過冬季波浪條件(正東，示性波高 1.49 公尺及示性週期 8.63 秒)，其模擬結果之侵淤變化如圖 6 所示。在此波浪條件下三種改善設施中，配置 A 加設之凸堤雖然能有效阻擋沙源，但對減少岬灣整體淤積量沒有幫助，而配置 C 之延長堤也無法有效降低岬灣內淤積量，結果顯示改善配置 A 和改善配置 C 在岬灣內淤積量皆為現地漁港的 1.3 倍。而改善配置 B 可明顯觀察到岬灣內侵淤現象明顯趨緩，其淤積量甚至縮減至現地漁港之 0.1 倍，為三種改善配置中效果最好。

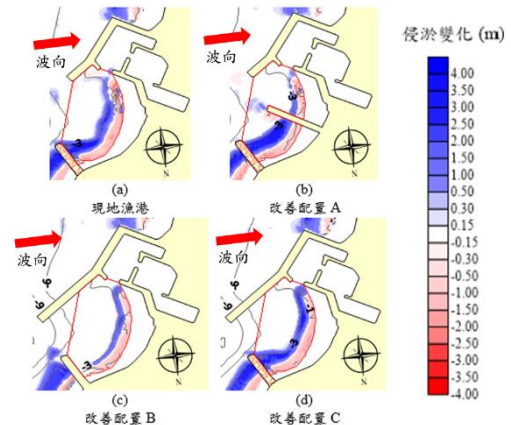


圖 6 冬季季風條件造波後侵淤圖

如此巨大之差異可推測在冬季季風條件下，其造成岬灣內的侵淤變化主要因為由北邊往南流得沿岸流所造成，而改善配置 B 中將攔砂堤改為垂直堤可有效減少波浪通過，進而降低岬內的淤積量。

### 3.4 颱風條件

本試驗為能更加瞭解此漁港沿岸漂砂現象，設計兩種颱風波向，分別為東偏北 12 度和東偏南 12 度，示性波高及示性週期為 10.11 公尺及 12.1 秒。因為颱風為短期極端條件，所以將不討論其淤積量，以觀察其侵淤趨勢為主。其造波成果如下圖 7 及圖 8 所示：

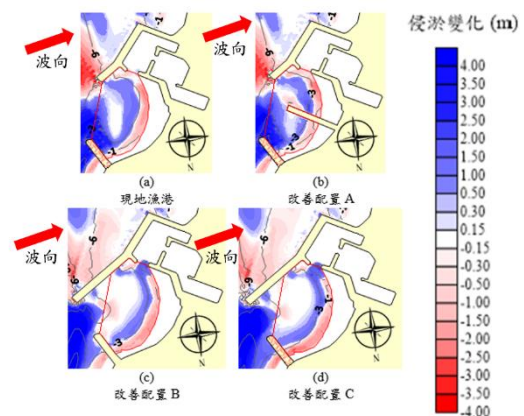


圖 7 颱風東偏北條件造波後侵淤圖

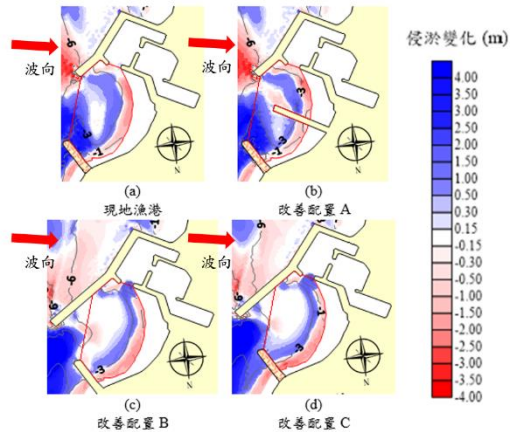


圖 8 颶風東偏南條件造波後侵淤圖

颶風條件下，各條件中南方波堤外皆有明顯侵蝕並經繞射推向岬內，而南防坡堤延長之配置(B與C)岬內侵淤現象明顯趨緩，可推測將南防坡堤延長可有效阻擋颶風波浪繞射影進岬內，進而減少岬內侵淤現象。

#### 四、結論

本研究透過 TELEMAC-MASCARET 數值模式中三種模組耦合，探討以真實水槽的邊界條件下南澳漁港之侵淤情況，將結果與水工模型試驗進行驗證，並研擬三種改善方案，觀察侵淤量變化，期望找出最能有效緩解南澳漁港淤積問題的方法。試驗結果可得到以下結論：

1. 冬季風條件下，現地漁港出口外岬灣淤積主要是北側沿岸流將大量淤沙帶到岬內造成。在改善配置 B 中，將原消波塊防砂堤改成混凝土堤，降低孔隙率，將沿岸流阻擋後，能觀察到岬內淤積量明顯變小。而改善配置 A 和 C 未改善沿岸流問題，其岬內淤積依舊嚴重。
2. 現地漁港在兩種颶風條件作用下，南防波堤頭皆出現大量侵蝕，隨後經繞射進入岬內。在改善配置 B 和改善配置 C 中，延長南防坡堤長度能有效防止波浪繞射問題，減緩岬內淤積現象。
3. 東偏北颶風條件下，比較數值模式與水工模型的結果，最大的差別在於水深 0~+5 米區域，TELEMAC 數值模式中無法計算無水陸域的水動力計算，導致無法呈現出侵淤情況；而水

工模型試驗將此區域設計為動床，能有效反映波浪崩上後掏刷及堆積現象。其餘 0 米下趨勢相近，具有一定參考價值。

4. 綜合上述實驗內容，在本次設計三種改善配置中，改善配置 B 將南旁坡堤延長 120 公尺，並將原北攔沙堤消波塊替換成混凝土堤，最能有效減緩南澳漁港的淤沙問題。

#### 參考文獻

1. Aldridge, B., & Dolphin, F. (2018). Sediment dynamics of a nearshore sandbank: Results from TELEMAC-2D, TOMAWAC and SISYPHE modelling. 9.
2. Asaro, G., & Paris, E.(2000). The effects induced by a new embankment at the confluence between two rivers: TELEMAC results compared with a physical model. Hydrological Processes, 14(13),2345–2353.
3. Battjes, J. A., & Janssen, J. P. F. M. (1978). ENERGY LOSS AND SET-UP DUE TO BREAKING OF RANDOM WAVES. Coastal Engineering Proceedings, 16, 32–32.
4. Bretherton, F. P., & Garrett, C. J. R. (1968). Wavetrains in Inhomogeneous Moving Media. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 302(1471), 529–554.
5. Guillou, N., & Chapalain, G. (2011). Effects of the coupling between TELEMAC 2D and TOMAWAC on SISYPHE modelling in the outer Seine estuary. 9.
6. Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. Journal of Hydrology, 268(1–4), 87–99.
7. Janin, J.-M., & Galland, J.-C. (1992). Numerical modelling of tidal currents along the west European continental shelf. Hydroécologie Appliquée, 4, 21–36.
8. Malcherek, A. (2000). Application of TELEMAC-2D in a narrow estuarine tributary. Hydrological Processes, 14(13), 2293–2300.
9. Soulsby, R. L. (1998). Dynamics of marine sands [Monograph]. Thomas Telford.

# Variability of Suspended Sediment in the Intertidal Zone with the Presence of Bottom Algal Reef

Ly Trung Nguyen<sup>1,2</sup>, and Zhi-Cheng Huang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University, Taiwan;

<sup>2</sup> College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Viet Nam;

## ABSTRACT

Recent findings proved that suspended sediment concentration (SSC) is an important factor affecting the ecological system in an intertidal algal reef. However, the variability of the SSC over the algal reef is still not clearly. Therefore, a monitoring system was used to measure waves and SSC. Moreover, LISST was deployed to survey the sediment particle size during two seasons. The SSC over the algal reef is quite high with seasonal variation; it was higher during the winter and lower during the summer. This study also found that during the high wave condition, there is a good relationship of SSC with the near-bottom horizontal orbital velocity and wave bed stress. Moreover, the sediment particle sizes were seasonal variation, in which  $D_{10}$  was higher during the summer;  $D_{50}$  was almost similar between two seasons while  $D_{90}$  was higher during the winter. The sediment particle sizes has stronger variation during the winter compared to the summer due to the higher wave condition. The estimation of inverse Rouse number based on the ratio of shear stress and settling velocity help to explain the sediment suspension in the water column.

Keywords: Suspended Sediment concentration, sediment particle size, algal reef, settling velocity, inverse Rouse number.

## 1. Introduction

Wave energy dissipation, bottom roughness, and sediment transport are all important factors influencing the coastal environment (Huang et al. 2012; Lu et al. 2017; Pang et al. 2020). The spatial and temporal variability of the suspended sediment (SS) significantly affect the distribution of species in the reef (Kuo et al. 2020). In which, the Taoyuan algal reef ecosystem is important because it is a one-of-a-kind endemic species population, and topography (Liou et al. 2017). Noticeably, a liquefied natural gas receiving port project is currently launched since 2019 in Taiwan near that reef systems. Sediment dynamics should then be considered in an enlarged perspective aiming at ecosystem recovery and restoration (Duarte et al. 2015). Especially in the

reef area, the waves encounter abrupt structure that causes wave breaking. The mechanisms of wave energy dissipation across an intertidal reef zone, as well as their connection with SSC, were investigated using long-term field observation. Yet, the statistics of SS particle size and waves in long-time scales are not clear. This deployment, therefore, is conducted to: Surveying the variation of sediment concentration and particle size between two seasons (summer and winter). Addition, the hydrodynamic characteristics were measured to address the relationship between the wave properties and particle size. The sediment particle sizes were assessed by using an LISST instrument. Then, the inverse Rouse number was computed to explain the SSC and sediment particle size variation in the water column.



## 2. Methodologies

### 2.1 Study location

Two monitoring sites have been planned for the long-term monitoring of SSC and wave properties over the reef from 2019 up to now. Study sites of G2-S and G2-L are located in Datan reef, designed to be separated in cross-shore direction with a distance of 180 m (Figure 1). The water depths are about 3.5 m and 1.6 m at two monitoring system G2-S and G2-L, respectively.

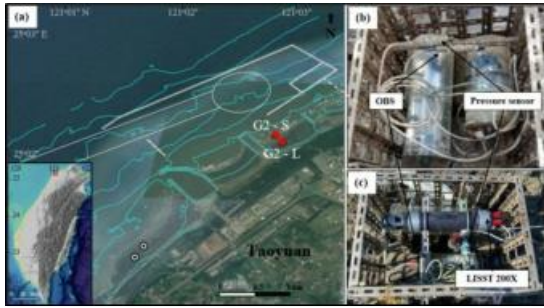


Figure 1 (a) Location of Taoyuan Coastal area, with the red dots are indicated for two locations: G2-S, and G2-L. The white lines indicated for the construction of the third LNG receiving station for port construction. (b) Picture of the deployed instrument at site G2-S. (c) An down-looking image of the instrument at G2-S with an LISST instrument.

### 2. Data analysis

Linear wave theory and spectral analysis of wave data were used to calculate root mean square (RMS) near-bottom velocity ( $u_{b,r}$ ) (Ole Secher et al. 1988; Ole Secher 1994) as:  $u_{b,r} = \sqrt{\sum_{n=1}^N u_{2b,n}^2}$ , where  $u_{b,n}$  is the near-bottom horizontal orbital velocity of the  $n$ th component:  $u_{b,n} = \frac{a_n \omega_n}{\sinh k_n h}$ , where  $\omega_n$ ,  $a_n$  is the  $n$ th are the radian wave frequency and the amplitude of the  $n$ th component, respectively. The  $a_n$  is determined by  $a_n = \sqrt{2S_{ndf}}$ .

The bottom stress ( $\tau$ ) for the wave-current is combined with the current shear stress ( $\tau_c$ ) and the wave bed stress ( $\tau_w$ ) (Jia et al. 2014). However, the effect of wave motion-induced shear stress on SSC should be dominated in the shallow – water algal reef (P. Wiberg and Sherwood 2008; Pomeroy et al. 2017). For this reason, the bed stress of current could be neglected. Then, the wave bed stress ( $\tau_w$ ) is computed by:

$$\tau_w = \rho u_{*w}^2 = \frac{1}{2} \rho f_{w,r} u_{b,r}^2$$

Where  $\rho$  is the water density; the wave bed stress based on wave-induced  $u_{*w}$  (shear velocity).

The SSC were inferred from two OBS and were compared with sample analysis. Moreover, the sediment particle sizes are also surveyed by LISST 200X with the range of about 1 – 500  $\mu\text{m}$ .

To relate the suspended sediment grain size distribution to the shear stresses above and within the canopy, we determined the equivalent grain size that could be suspended by a given shear velocity based on the downward particle fall velocity ( $w_s$ ):  $\frac{u_*}{w_s} = \alpha$

where  $\alpha$  represents the different stages of suspension and ranges from bursts of sediment in suspension when  $\alpha \leq 1$  to fully developed suspension when  $\alpha \gg 1$  (A. W. M. Pomeroy et al. 2017). Note that this ratio is related to the inverse of the Rouse number. Here we use the (Soulsby 1997) formulation to estimate  $w_s$  as:

$$w_s = \frac{v}{D} (\sqrt{10.362 + 1.049D_*^3} - 10.36)$$

where  $m$  is the kinematic viscosity of the water ( $9.35 \times 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ),  $D$  is the particle size of interest, and  $D_*$  is the dimensionless grain size ( $D_* = ((\frac{g(s-1)}{v^2})^{1/3}) D$ ) with  $g$  the gravitational acceleration constant and  $s$  is the ratio of the carbonate sediment grain

density ( $\rho_s = 2600 \text{ kg.m}^{-3}$ ) estimated by gravitational displacement (Cutler et al. 2017) to water density ( $\rho_w = 1026 \text{ kg.m}^{-3}$ ) from sediment samples obtained.

### 3. Results

#### 3.1 Suspended sediment concentration

Generally, the SSC over the algal reef system has a significant seasonal variation which is averagely higher during the winter time (Figure 2b) compare to summer (Figure 2a). However, there are two periods when the SSC suddenly increased in the summer season consisted with large wind period due to the typhoon periods near study site during the summer season.

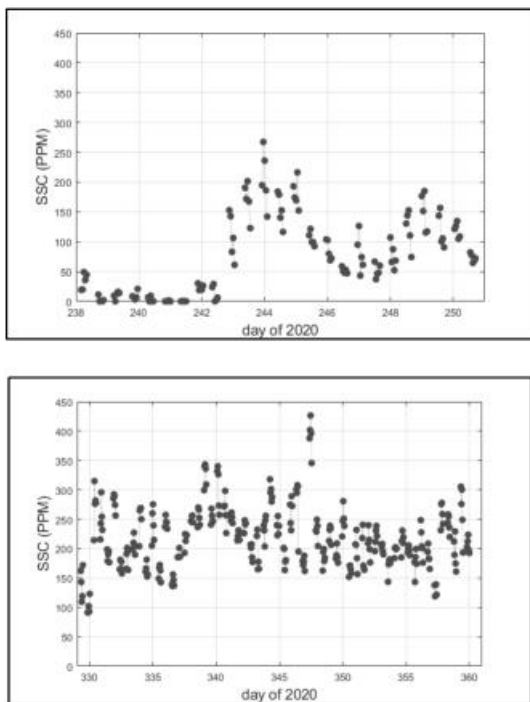


Figure 2 The time series of suspended sediment concentration at the Taoyuan coastal. Top panel represents for SSC during summer; Bottom panel indicates for SSC during winter.

#### 3.2 Grain size distribution

Not only the SSC was computed, but also the statistic parameters of particle size as  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  were calculated and showed in Figure 3a and 3b for period of two weeks for each summer and winter season, respectively. The  $D_{90}$  which including 90% of total volume of sample has a much larger variation compare to  $D_{10}$  or  $D_{50}$ . This means there is large variation of big size sediments, especially for winter season. Therefore, there must be a force helping large particles to be re-suspended in the water column. Besides, the peaks of  $D_{90}$  in the summer is consistent with the peak time of SSC in section 3.1. To find out, the correlation of the hydrodynamic quantities hereby is waves and the SSC will be discussed in section 3.3.

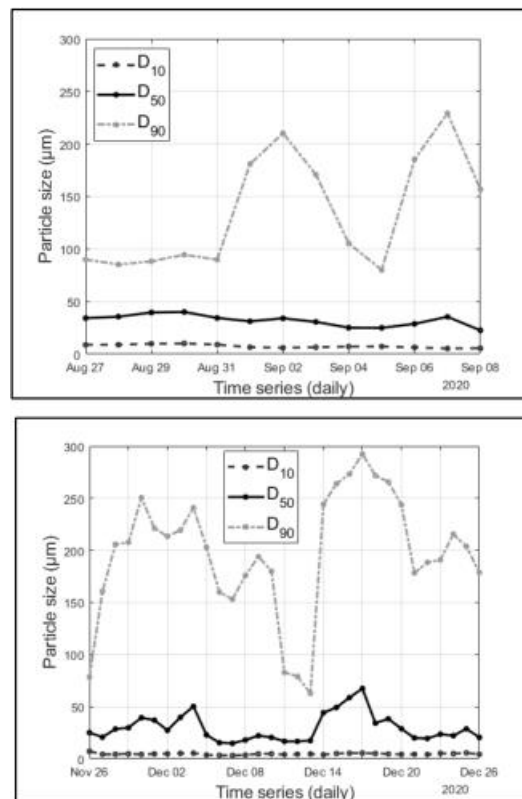


Figure 3 The time series of sediment particle size at the Taoyuan coastal. Top panel represents for summer time; Bottom panel indicates for winter time.

### 3.3 Discussion the relationship between hydrodynamic and sediment

#### 3.3.1 Estimating settling velocity

The settling velocity of suspended sediment are presented in Figure 4. The settling velocity of sediment during the summer is smaller compare to those during the winter season. That is due to the particle size of sediment during the winter lager than summer season. The process of settling down and re-suspended of sediments is very complicated during the winter when the settling velocity  $w_s$  and shear velocity  $u_*$  were both large. Hence, the inverse Rouse number is computed and made correlation with SSC in the next section.

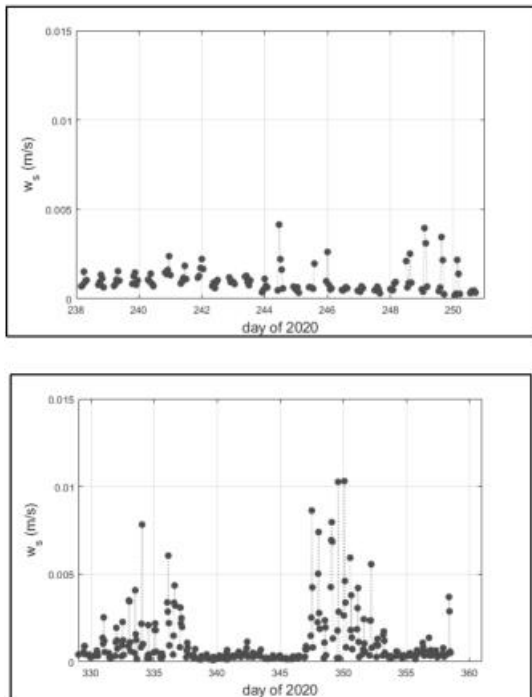


Figure 4 The time series of settling velocity at the Taoyuan coastal. Top panel represents for during the summer; Bottom panel indicates for during the winter.

#### 3.3.2 Relationship between hydrodynamic and suspended sediment

The inverse Rouse number representing the correlation of settling velocity ( $w_s$ ) which makes low SSC and shear velocity which present for waves making high SSC. Then, the relationship of SSC with the inverse Rouse number in Figure 5 showed good relation of hydrodynamic processes and SSC based on the inverse Rouse number. Whenever there is higher inverse Rouse number, the SSC is higher which consolidated for the assumption of the role of waves causing high SSC in this study site.

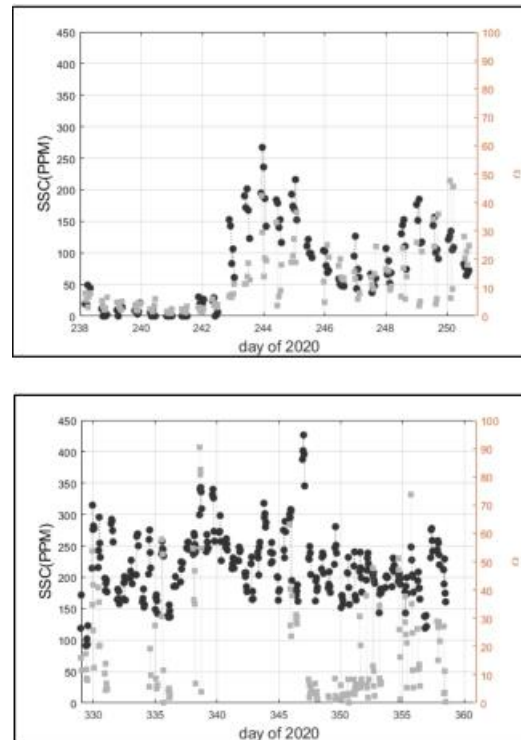


Figure 5 The time series of SSC and inverse Rouse number ( $\alpha$ ) at the Taoyuan coastal. Top panel represents for summer; Bottom panel indicates for winter.

Apart from that, due to the existence of the high roughness bottom barrier of algal reefs, wave energy dissipation in the intertidal zone might be tidally regulated and significantly corresponds with frictional

dissipation. From that, the variation of the SSC and sediment particle size should be also affected by wave dissipation in the soft zone where the presence of algal reef ecosystem. Therefore, the long-term measurements of waves and sediment also in this site can provide new insight into the dynamics of wave-supported turbidity flows.

## 4. Conclusions

In summary, the SSC and sediment particle size were variation among two seasons. We also found that during the high wave condition, there is a good relationship of SSC with the wave bed stress. Moreover, the sediment particle sizes were seasonal variation, in which  $D_{10}$  was higher during the summer;  $D_{50}$  was almost similar between two seasons while  $D_{90}$  was higher during the winter.

A simple estimation of wave bed shear stress and settling velocity of the sediments helped to understand the significant drivers of turbidity on this reef environment during construction of new coastal infrastructure is waves. The computation of the inverse Rouse number gave evidence about the link between wave conditions and SSC. This finding is promising and should be explored with future researches on the SSC.

## REFERENCES

- Duarte, C. M., Borja, A., Carstensen, J., Elliott, M., Krause-Jensen, D., & Marbà, N. (2015). Paradigms in the Recovery of Estuarine and Coastal Ecosystems. *Estuaries and Coasts*, 38(4), 1202-1212, doi:10.1007/s12237-013-9750-9.
- Huang, Z.-C., Lenain, L., Melville, W. K., Middleton, J. H., Reineman, B., Statom, N., et al. (2012). Dissipation of wave energy and turbulence in a shallow coral reef lagoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C3), doi:10.1029/2011JC007202.
- Kuo, C.-y., Keshavmurthy, S., Chung, A., Huang, Y.-Y., Yang, S.-Y., Chen, Y.-C., et al. (2020). Demographic census confirms a stable population of the critically-endangered caryophyllid coral *Polycyathus chaishanensis* (Scleractinia; Caryophyllidae) in the Datan Algal Reef, Taiwan. *Scientific reports*, 10, doi:10.1038/s41598-020-67653-8.
- Liou, C.-Y., Yang, S.-Y., & Chen, C. A. (2017). Unprecedented calcareous algal reefs in northern Taiwan merit high conservation priority. *Coral Reefs*, 36(4), 1253-1253, doi:10.1007/s00338-017-1619-0.
- Lu, J., Wang, X. H., Babanin, A. V., Aijaz, S., Sun, Y., Teng, Y., et al. (2017). Modeling of suspended sediment concentrations under combined wave-current flow over rippled bed. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 199, 59-73, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.09.020>.
- Ole Secher, M. (1994). SPECTRAL WAVE-CURRENT BOTTOM BOUNDARY LAYER FLOWS. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(24), doi:10.9753/icce.v24.%p.
- Ole Secher, M., Ying-Keung, P., & Hans, C. G. (1988). SPECTRAL WAVE ATTENUATION BY BOTTOM FRICTION: THEORY. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(21), doi:10.9753/icce.v21.34.
- Pang, W., Dai, Z., Ma, B., Wang, J., Huang, H., & Li, S. (2020). Linkage between turbulent kinetic energy, waves and suspended sediment concentrations in the nearshore zone. *Marine Geology*, 425, 106190, doi:<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.10.6190>.

# 三條崙沙洲海域地形受人工迂迴供砂之 短期影響

張志強<sup>1\*</sup> 錢樺<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>國立中央大學地球科學前瞻應用研究中心研究助理

<sup>2</sup>國立中央大學地球科學前瞻應用研究中心主任

## 摘要

三條崙沙洲為海豐沙洲受長期環境影響逐漸向岸靠攏形成之離岸沙洲，其範圍北起新興填海區，南至三條崙漁港。三條崙沙洲與內陸形成潟湖環境，為全台灣養殖蚵苗最重要的地區。但台灣西部離岸沙洲變遷的調查研究上，絕大多數聚焦在面積較大的外傘頂洲，對於相對面積較小、即將抵達演化終點的三條崙沙洲，迄今相關研究與文獻非常有限。

本研究探討台塑企業之人工迂迴供砂作業，該事件屬於短期事件，拋沙位置距三條崙沙洲約 4 公里。為解人工迂迴供砂對當地地貌之影響，本研究透過數值模式探討人工迂迴供砂在短期間內對三條崙沙洲地形變化之影響。數值模式針對短期一個月間蒐集之實測資料，包含風、波浪、底床粒徑與地形水深等條件進行各項參數設定，試圖還原該事件時之波浪水流條件，以求得到更為接近實際情況的成果。

本研究之數值模式結果顯示，該短期事件除拋砂區外其餘地區幾乎沒有差異，由此推測影響沙洲變遷的主要因素可能來自於其他如：濁水溪的輸沙與長期沿岸漂沙優勢方向所主導。

關鍵詞：三條崙沙洲、濁水溪、人工迂迴供砂

## The topography of the San-Tiau-Luen sandbar area affected by the artificially circuitous sand supply in Short-term impact

Chih-Chiang Chang<sup>1</sup>, Hwa Chien<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Assistant, Advanced Research Center for Earth Sciences, National Central University

<sup>2</sup> Professor/Director, Advanced Research Center for Earth Sciences, National Central University

## Abstract

The San-Tiau-Luen sandbar is an offshore sandbar formed by the long-term environmental impact of the Haifeng Sandbar, which extends from the newly reclaimed area in the north to the San-Tiau-Luen Fishing Port in the south. The San-Tiau-Luen sandbar and the inland lagoon environment are the most important areas for oyster cultivation in Taiwan. However, most of the research studies on offshore sandbar changes in western Taiwan have focused on the larger outer umbrella topped continents, and there is limited research and literature on the relatively small San-Tiau-Luen sandbar, which is reaching its evolutionary end.

In this study, we investigate the artificial sand supply detour by Formosa Plastics Corporation (FPC), which is a short-term event, and the sand disposal location is about 4 km from San-Tiau-Luen sandbar. In order to understand the impact of artificially circuitous sand supply on the local landscape, this study investigated the impact of artificial sand supply on the topography of San-Tiau-Luen

sandbar in the short term through numerical modeling. The numerical model was set up to investigate the effect of the sand supply on the topography of San-Tiau-Luen sandbar in a short period of time. The numerical model was designed to recover the wave and current conditions during the event by setting the parameters of wind, wave, bed size and topographic depth.

The numerical model results of this study showed that there was almost no difference between the short-term event and the sand disposal area. So it is assumed that the main factors influencing the change of the sandbar may be dominated by other factors such as the transport of sand from the Choshui River and the long-term longshore sediment transport.

Keywords: San-Tiau-Luen sandbar; Choshui River; artificially circuitous sand supply

## 一、前言

三條崙沙洲為早期海豐沙洲向岸移動的遺跡。五十年前(1970年)雲林海岸只有海豐沙洲及外傘頂洲兩大沙洲。海豐沙洲北起濁水溪口，沿西南往新虎尾溪口延伸。海豐沙洲因受到侵蝕作用而後退、南移、分裂，最終崩潰，殘餘沙洲部份靠陸形成潮埔地，再被開發為海埔地(吳啟南等人, 1996)。海豐沙洲於 1995-1999 年間於變遷過程在中段產生破口而斷裂為北南兩部分，北段萎縮並向三條崙海岸靠近，南段加速南移。此兩段沙洲目前尚未有通用名稱，本研究中暫稱北段沙洲為三條崙沙洲，南段沙洲則為金湖沙洲。

三條崙沙洲目前(2021年)位置北起台西西側外海新生地之南，南至三條崙漁港，長度約 6 公里。三條崙沙洲與台西漁港有一狹窄的水道相隔，再往北為新興填海區，若再加計連接其南側的金湖沙洲，總長度約為 20 公里。台灣西部雲嘉海岸由北至南分別有三條崙沙洲、金湖沙洲、統汕洲、箔子寮汕與外傘頂洲，其中統汕洲與箔子寮汕已經逐漸與外傘頂洲北側合併，形成雲嘉海岸的屏障(蘇榮昌等人, 2006)。在台灣離岸沙洲變遷的調查研究上，絕大多數聚焦在面積較大的外傘頂洲，對於相對面積較小、即將抵達演化終點的三條崙沙洲，迄今相關研究文獻非常有限。

黃煌輝(1993)認為雲林濱海地區形成的沙洲主要是因為濁水溪輸砂受到經年自北向南之優勢波浪與沿岸海流輸運所致。依據「雲林縣一級海岸防護計畫」(2020)統計結果顯示，雲林沿岸地區波浪主要受季風波浪影響，夏季(5~8月)平均示性波高 0.48~0.58 公尺，平均週期 4.9~5.5 秒，主要波

向為西南西向(WSW)；冬季(10月~隔年3月)平均波高 0.84~1.43 公尺，平均週期 5.3~5.8 秒，主要波向為西北向(NW)。海流之流速無明顯之季節性變化，主要受潮汐漲退影響，平均流速約 0.2~0.6 公尺/秒。

探究其原因，本地區主要入射波浪方向受冬季東北季風影響，該波浪折射後進入近岸區域時，其產生之沿岸流加上潮流、風吹流等作用，造成沿岸淨輸砂方向為北往南，因此雲林地區海岸沿岸沙洲均有向南遷徙特徵。

一般海岸地形變化對於所要探討之議題可分為平面侵淤探討、岸線變遷探討以及海岸斷面變化探討。而對於上述議題之探討可分為時間及空間尺度來進行適用數值模式之評估。海岸漂砂依移動方向可分為向、離岸漂砂及沿岸漂砂，其中向、離岸漂砂的影響，屬於海岸地形較短期的變化，如季節性變化或颱風來襲時之海域地形變化。二維模式適用於描述局部性海岸地形變化情形，一般海岸結構物附近所造成之流態十分複雜，此時向、離岸及沿岸漂砂對地形變化影響均為重要。

平面侵淤計算一般適用之數值模式以準三維(Quasi-3D)模式為主，其適用之空間尺度大致為十公里以內，時間尺度則以季為單位。因此對於平面侵淤之計算領域不宜太大，時間無法太長，否則對於計算時間可謂曠日廢時，尤以 Quasi-3D 之耦合模式對於要準確計算波-流耦合之效應以及近岸流系統之準三維效應。本文所用之水動力模式、波譜模式以及漂砂模式採耦合計算，並於垂向採 Quasi-3D，完整考慮近岸處之水流空間之變化，以準確推估未來的海岸侵淤變化。

此外，由於人工迂迴供砂事件屬於短期事件，

對於重現過去事件則必先掌握過去某段時間之海氣象條件。潮流屬週期性事件，只須當地調和參數即可根據所要模擬之時間去預報或者後報海域某點之水位，提供模式做為潮位邊界條件。對於波浪則有不同之作法，由於波浪屬於風所造成之事件，因此對於波浪模式而言，最重要之輸入為風力場，如 ERA5 或者 NECP 等。如此，波浪可透過 MIKE-21 SW 模式進行計算，獲得不同時間段之波浪場，作為泥砂模式驅動力之一。

本文先透過往昔文獻回顧三條崙沙洲之變遷歷史趨勢，界定雲林地區海岸沿岸沙洲之遷徙特徵，後續則是採二維數值模式模擬 2015 年 7 月在麥寮海域所實施人工迂迴供砂之短期事件，通過模式進行數值試驗，釐清人工迂迴供砂短期事件對於該海域之影響範圍以及影響程度。

## 二、海岸數值模式

二維海岸數值模擬主要考量包含潮流以及波浪為造成沿岸流場之驅動力。海岸地形、流場與漂砂三者間存在一種互動之關係，即當流場起變化時，漂砂在量和方向上亦將隨之改變，而漂砂之改變，則將造成海岸地形之沖淤變化，而地形之沖淤變化亦將反饋於流場，此三者間互相作用之結果為造成海岸地形變化之主要機制。因此二維海岸地形變化模式將包括波場模式、流場模式與漂砂模式三個子模式。

### 2.1 水動力模式

MIKE-21 HD 建立在 Boussinesq 和流體靜壓力假設的不可壓縮 Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) 方程式的基礎之上，其由連續方程式和動量方程式組成。對一般含時間變化之空間上三維的水動力系統方程式，水深方向積分處理後，簡化為如下含時間變化之二維淺水長波方程組：

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} &= hS \\ \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} &= f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} \\ &- \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} &= -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} \\ &- \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\eta$  為自由液面， $d$  為靜止水深， $h = d + \eta$  為總水深， $f$  為柯氏 (Coriolis) 力參數， $g$  為重力加速度， $p_a$  為大氣壓力， $S_{xx}$ 、 $S_{xy}$ 、 $S_{yx}$ 、 $S_{yy}$  為輻射應力張量 (radiation stress tensor)， $\tau_{sx}$  和  $\tau_{sy}$  為表面風應力， $\tau_{bx}$  和  $\tau_{by}$  為底部應力， $T_{xx}$ 、 $T_{xy}$ 、 $T_{yy}$  為側向應力， $S$  為點源的排出量， $\bar{u}$  和  $\bar{v}$  為水深平均速度，可定義如下式：

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (4)$$

側向應力  $T_{ij}$  包括黏性摩擦和紊流摩擦，可透過紊流渦度黏滯 (eddy viscosity) 係數  $A$  估計：

$$\begin{aligned} T_{xx} &= 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{yy} = A \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \\ T_{xy} &= 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2 波譜數值模式

MIKE-21 SW 模式之控制方程式為波浪守恆方程式 (wave action conservation equation)：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (6)$$

式(6)中  $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t) = E(\sigma, \theta) / \sigma$

$E(\sigma, \theta)$  為波能密度函數 (energy density)， $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$  為波浪作用密度函數 (action density)， $t$  為時間， $\vec{x} = (x, y)$  為卡氏座標系統， $\vec{v} = (C_x, C_y, C_\sigma, C_\theta)$  為波速之各分量， $S$  為各源項 (source)， $\sigma$  為相對角頻率須滿足以下之波-流交互作用下之分散關係式：

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (7)$$

其中  $g$  為重力加速度， $k$  為周波數， $\vec{U}$  則為流速。源項  $S$  為：

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (8)$$

$S_{in}$  表示由風力所輸入之能量， $S_{nl}$  為波-波非線性交互作用之能量傳輸， $S_{ds}$  為白浪作用 (whitecapping) 所產生之波能損失， $S_{bot}$  為底床摩擦效應所產生之波能損失， $S_{surf}$  則為碎波所產生之

波能損失。

### 2.3 泥砂傳輸模式

泥砂傳輸 ST 模組 (Sand Transport Module)，即根據前述水動力模擬結果，可計算出每一瞬時計算域中各位置之流場，再加上水中沉積物質特性與波浪運動之影響，即為 ST 模組 (Sediment Transport) 計算輸砂率之原理。其理論係屬於準三維之計算方式，根據該計算範圍之水流、波浪、水深與底床坡度計算得輸砂率，將不同計算條件下之輸砂率預先儲存在一輸砂表中，待模式開始計算後，再根據當時之水動力場及波浪場，於輸砂表中內插求取相對應條件下之輸砂率，最後將每一點沿水深方向上積分即可得斷面輸砂率。

輸砂率為輸砂量在一波浪週期內之平均值，底質傳輸之總輸砂載  $q_t$  為：

$$q_t = q_b + q_s \quad (9)$$

其中， $q_b$  為底床載， $q_s$  為懸浮載。每單位時間單位寬度之底床載  $q_b$  係參考 Engelund 與 Fredsøe (1976)，根據一個波週期內之瞬時剪應力可得相關之無因次化底床載及無因次化 Shields 參數：

$$\Phi = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad ,$$

$$\theta = \frac{\tau_0}{(s-1)\rho gd} = \frac{U_f^2}{(s-1)gd} \quad (10)$$

其中， $s$  為底質相對密度、 $d$  為底質粒徑、 $\tau_0$  為底床剪應力、 $U_f$  為摩擦速度 ( $U_f = \sqrt{\tau_0/\rho}$ )。懸浮載  $q_s$  係參考 Fredsøe 等人 (1985)，根據一個波週期內之瞬時速度和濃度分布積分而得：

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{z_d}^D (uc) dz dt \quad (11)$$

MIKE 21 ST 之地形地貌演變計算主要透過網格中心點之地形變化率  $\partial z/\partial t$  來決定地形變化，其控制方程式可表示為：

$$-(1-n) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} - \Delta S \quad (12)$$

其中  $n$  為底床孔隙率， $z$  為地形高程， $S_x$  為  $x$  方向底床載輸砂量或總輸砂量， $S_y$  為  $y$  方向底床載輸砂量或總輸砂量， $\Delta S$  為源項。地形的更新主要基於地形變化率，因此新的地形高程可表示為：

$$z_{new} = z_{old} + \frac{1}{1-n} \frac{\partial z}{\partial t} \Delta t_{HD} \quad (13)$$

### 2.4 彰雲海域數值模式

本研究之數值模擬採用非結構網格。模擬的範圍、網格的分布及形狀如圖 1 所示，為有效解析海岸變遷，避免使用過度粗糙之網格無法對海岸變遷進行詳細解析。針對計畫區附近的海域，須使用較小的網格對泥砂運移可能影響範圍進行網格加密。

MIKE-21 HD 邊界條件以潮位邊界進行設置，潮位邊界之獲得可以藉由 DHI MIKE-21 所提供之高解析度 (0.125 度) 全球潮汐預報工具箱，進行邊界上各節點之潮位預報，並生成對應位置的時間序列的線文件，作為邊界水位條件之輸入檔案。

彰雲海域波浪模式之邊界條件則是透過擷取西太平洋大尺度模式之計算結果。以 DHI 內建工具箱取下計算結果之彰雲海域模式邊界上波高、譜峰週期以及平均波向角等波浪參數之時間序列，作為模式之邊界條件輸入。在此之前本文先對西太平洋大尺度波浪模式進行模式說明以及模式驗證。

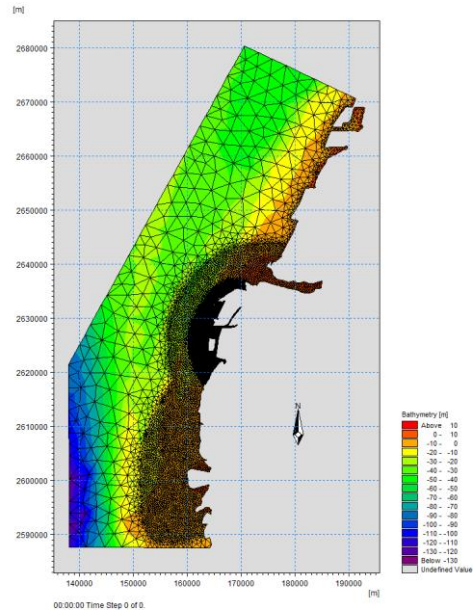


圖 1 彰雲海域數值模擬計算域與網格圖

MIKE 21 SW 數值模式模擬大域波浪場，在地形方面採用 ETOPO1 之地形水深資料進行網格之製作，整個西太平洋大尺度模擬之水深網格圖如圖 2 所示。為驗證大域模式之準確性，本文選用新竹浮標之實測季風波浪資料與模式結果進行比對，圖 3-圖 4 顯示新竹浮標季風波浪示性波高 ( $H_s$ ) 的一致性十分良好，其一致性指數 (Index of Agreement)



達 0.8472 (表 1)，顯示模擬值與實測值十分吻合，建立的西太平洋大尺度季風波浪模型有較佳可信度。

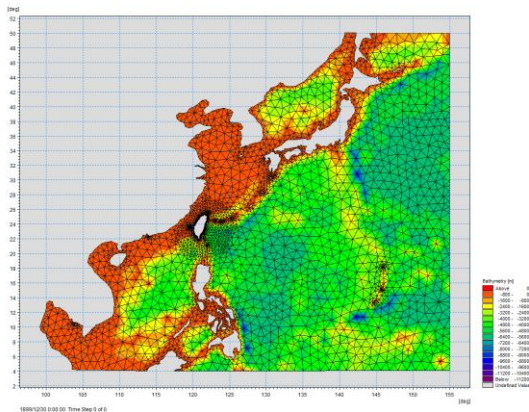


圖 2 西太平洋之水深網格圖

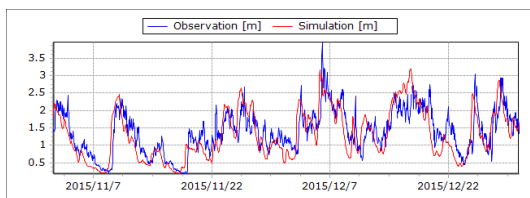


圖 3 2015 年 11-12 月新竹浮標季風波浪示性波高 (Hs) 比對圖

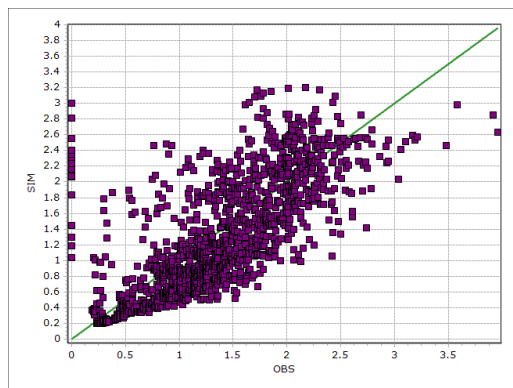


圖 4 2015 年 11-12 月新竹浮標季風波浪示性波高 (Hs) 相關性圖

表 1 2015 年 11-12 月新竹浮標季風波浪示性波高 (Hs) 誤差表

Mean Error	0.0641	[m]
Mean Absolute Error	0.3779	[m]
Root Mean Square Error	0.5069	[m]
Std. dev of Residuals	0.5028	[m]
Index of Agreement	0.8472	[-]

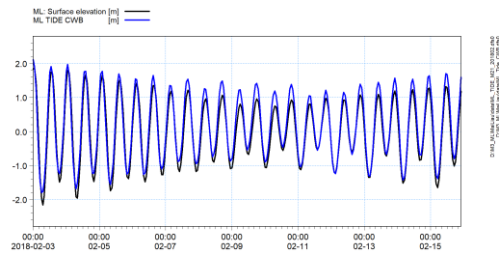


圖 5 數值模式與麥寮潮位站之時間序列驗證

MIKE-21 HD 水動力模式之計算結果，亦需要進行模式驗證，本文蒐集麥寮潮位站實測潮位資料與模式進行潮位驗證。比對結果如圖 5-圖 6 所示，顯示模式之水位結果與實測結果有良好之一致性。此外，表 2 亦顯示潮位比對之一致性指數 (Index of Agreement) 達 0.9814，表示水動力模式之準確性十分良好。

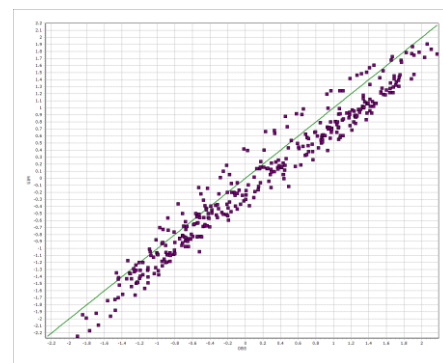


圖 6 數值模式與麥寮潮位站之散點圖

表 2 數值模式與麥寮潮位站誤差統計分析表

Mean Error	0.1719	[m]
Mean Absolute Error	0.2346	[m]
Root Mean Square Error	0.2694	[m]
Std. dev of Residuals	0.2074	[m]
Index of Agreement	0.9814	[-]

## 2.5 人工迂迴供砂事件

透過在麥寮海域之人工迂迴供砂記錄，選擇 2015 年 7 月拋砂事件作為本次數值模擬的時段，並將該次所拋置之泥砂粒徑平面分佈圖輸入於模式之中，表現出泥砂在空間分佈變異性。圖 6 為拋砂之位置圖，本次所拋置之土方依據台塑企業於環評之承諾為 61.2 萬方。在數值模式設置時，將拋置之泥砂在拋置位置上設置為泥砂源項，並通過外在水動

力條件之作用將拋置之泥砂進行空間上之重新分佈。



圖 6 麥寮港海域拋砂位置圖

### 三、結果與討論

本文採用相同波浪條件以及水動力條件進行無人工迂迴供砂以及人工迂迴供砂條件（加入砂源）之計算，計算 30 天之後地貌演變之結果分別圖 7 及圖 8 所示。圖 7 為不加入人工迂迴供砂 30 天之後之地形侵淤平面分佈圖，顯示在近岸區的整體地貌演變，在經過 30 天的潮流與波浪作用之後，整體呈現外側淤積內側侵蝕。圖 8 為加入人工迂迴供砂 30 天之後之地形侵淤平面分佈圖，顯示在近岸區的整體地貌演變，在經過 30 天的潮流與波浪作用之後，整體與不加入砂源幾乎一致，僅在拋砂區有淤積出現。

為對比量化二者之差異，本文對於 30 天後之地形改變量進行對應網格量值相減（加砂源-無砂源）。結果如圖 9 所示，整體及果除拋砂區外，其餘地區幾乎沒有差異。

另針對拋置區進行斷面之地貌演變進行分析，斷面位置如圖 10 所示，水平與垂直方向分別為黑線與藍線，水平與垂直距離均為 10 公里。圖 11 顯示在無人工迂迴供砂之條件（藍）與人工迂迴供砂之條件（黑）經 30 天後之斷面比對。圖 11 上圖為水平斷面之比對圖，顯示除在拋置區有顯著淤積出現，地貌改變高度為 1.3 公尺，其餘位置二者並無

差異。圖 11 下圖則為垂直斷面之比對圖，顯示在拋置區也是呈現淤積，其餘位置並無差異。

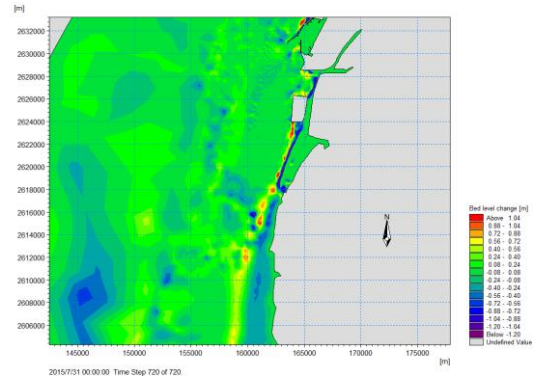


圖 7 無人工迂迴供砂 30 天後之地貌變化

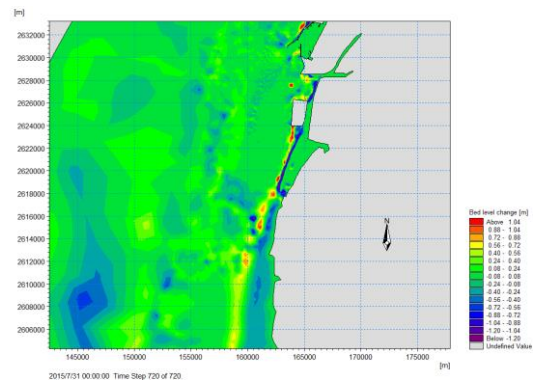


圖 8 人工迂迴供砂 30 天後之地貌變化

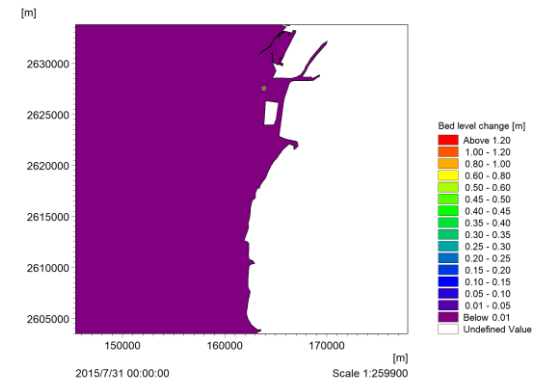


圖 9 有無砂源 30 天後之地貌演變差值

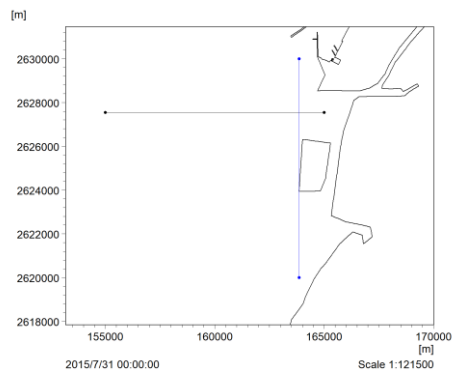


圖 10 經過砂源之垂直與水平剖面線位置

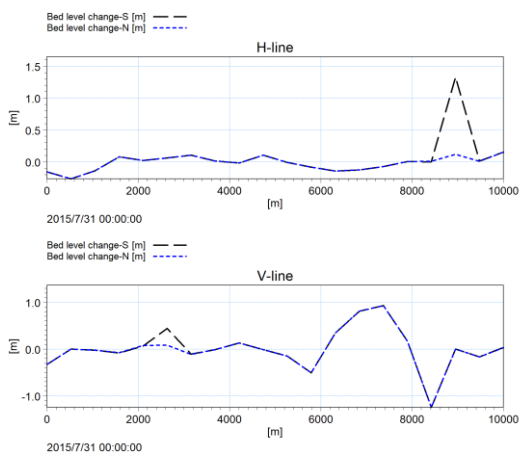


圖 11 有無砂源剖面地貌變化圖（上：水平，下：垂直）

#### 四、結論

本文首先回顧往昔文獻回顧三條崙沙洲之變遷歷史趨勢，界定雲林地區海岸沿岸沙洲之遷徙特徵。後續透過數值模式對於 2015 年 7 月人工迂迴供砂之短期地貌演變事件進行模擬。

波浪數值模式分別進行西太平洋大尺度以及彰雲海域局部尺度進行計算。泥砂模式則針對人工迂迴供砂（加入砂源）以及無人工迂迴供砂（無砂源）分別進行計算，計算結果可以總結出以下結論：

1. 以 2015 年 7 月之實際條件計算泥砂運移所造成之地貌改變，整體呈現沿岸沙洲地貌外側淤積內側侵蝕。
2. 在加入砂源之條件與無砂源條件，整體結果除拋砂區外，其餘地區幾乎沒有差異。

3. 進行水平斷面比對，拋置區有顯著淤積出現，地貌改變高度為 1.3 公尺，其餘位置二者並無差異。
4. 對於人工迂迴供砂之影響區域，大致水平距離約為 1,400 公尺。

從目前許多探討雲林沿海的海岸線及沙洲之文獻可知，多數討論長期變化的影響，但許多實測資料如地形資料為一年一次或兩次觀測，海氣象資料也多斷斷續續，或是每年觀測時間不一定，彼此間也沒有規律，故在分析上存在許多限制。因此本研究選擇不同面向，從短期事件去討論沙洲之地形變化，希望能更明確地找出保護的辦法

#### 參考文獻

1. Jorgen Fredsoe; Ole H. Andersen; and Steen Silberg. 1985. Distribution of Suspended Sediment in Large Waves. Leatherman SP (ed) Barrier Islands. Academic Press, New York, 1, 27.
2. 吳啟南、吳哲榮、李元炎、蕭國鑫，1996。雲林海岸遙測變遷分析研究，農委會委託，共 72 頁
3. 蘇榮昌、劉進義、王冠斐、游振偉、潘素禎、郭宗雄（2006）「雲林海岸沿岸沙洲地形變遷探討」，第 28 屆水利工程研討會，第 587~591 頁
4. 黃煌輝. 1993. 雲林海域開發相關調查研究. 雲嘉海岸保育及開發研討會
5. 經濟部水利署. 2020. 雲林縣一級海岸防護計畫.

# 離岸風機建置之臺中港鄰近海域地形變化 分析

洪維屏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

## 摘要

離岸風電為臺灣近年發展之綠能產業，其距離離岸風電區最近的國際商港-臺中港，因定位為提供風機組裝碼頭及工作船靠泊母港，故扮演不可或缺的角色。本研究針對離岸風機建置之時程將臺中港歷年水深測量資料進行長時間水深變化分析，並以無人飛行載具(UAV) 影像拍攝探討苗栗龍鳳漁港附近海岸離岸風機建置前、後之變化。相關成果可提供交通部航港局、臺灣港務股份有限公司等單位，做為規劃、設計、施工維護、航行安全等之參考。

關鍵詞: 地形侵淤變化

## Analysis of terrain changes in the sea area adjacent to Taichung Port for offshore wind turbine construction

Wei-Ping Hung\*

\*Associate Researcher, Institute of Transportation, Ministry of Transportation and Communications.

## ABSTRACT

Offshore wind power is a green energy industry developed in Taiwan in recent years. The Taichung Harbor, the nearest international commercial port to the offshore wind farm, plays an indispensable role because it is positioned to be the wind turbine assembly wharf and home port for workboats berthing. In this study, based on the time course of offshore wind turbine construction, the long-term changes of water depth in the past years were analyzed, and unmanned aerial vehicle (UAV) image shooting was used to explore the before and after offshore wind turbine construction near Miaoli Longfeng Fishing Port. The results of this study can be used as a reference for the planning, design, construction and maintenance, and navigation safety by the Maritime and Port Bureau of the Ministry of Transportation and Communications and units such as the Taiwan International Ports Corporation.

Keywords: terrain changes

## 一、前言

為順應全球氣候變遷與節能減碳趨勢，政府於 2011 年 11 月 3 日公布「確保核安、穩定漸減核、打造綠能低碳環境、逐步邁向非核家園」之能源發展願景，全力推廣再生能源。而因臺灣西部海域被國

際工程顧問公司 4C Offshore 評定為全世界最優良海上風場，為追求更穩定的再生能源來源，「離岸式風力發電」遂成為積極開發之重點。

然因離岸風電開發初期具技術難度高及造價昂貴等特點，再加上國內過往並無離岸風電開發案例，亦缺乏相關海事工程經驗，因此經濟部參酌國

際離岸風力發電推動經驗，擬定「先示範後區塊」之推動策略原則，並於 2012 年 7 月公告「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」，2013 年 1 月公布由「海洋風力發電股份有限公司籌備處」、「福海風力發電股份有限公司籌備處」及台灣電力股份有限公司等三單位取得「示範風場」受獎勵人資格，其選定之示範風場位置分別位於苗栗縣外海(海洋)及彰化縣外海(福海、台電)，然而此示範風場是否對臺中港鄰近海域地形造成影響值得分析探討。

## 二、研究目的

臺中港為距離離岸風電最近的一個國際商港，十大建設的重要項目之一，距離北部基隆港和南部高雄港各約 110 海里。港區總面積為 4,438 公頃，水域面積 958 公頃，陸地面積 3,480 公頃，由於臺中港距離離岸風場最近，其未來定位為提供風機組裝碼頭及工作船靠泊母港，因此，必須了解臺中港之地形侵淤變化趨勢，以因應未來之所需。

本所港灣技術研究中心主要任務為研究發展港灣工程技術，培育訓練有關人才，並協助解決我國港灣建設與海岸開發所遭遇的問題。配合政府綠能政策於苗栗龍鳳漁港外海興建離岸風機，風機之建置是否對臺中港鄰近海域地形造成影響，為本研究之主要探討目的。

## 三、離岸風機建置前、後臺中港鄰近海域變化趨勢分析

### 3.1 歷年水深測量資料及離岸風機建置時程海象資料分析

截至 109 年 2 月底止，我國已建置完工之離岸風機(含測風塔)包括：彰化福海測風塔及苗栗海洋測風塔(104 年完工)、苗栗海洋示範機組(第一階段，2 座)與彰化台電測風塔(105 年完工)、苗栗海洋示範風場(第二階段，20 座)(108 年完工)等，上述構造物與臺中港之相對位置如圖 3.1。故為分析臺中港歷年水深侵淤特性，茲蒐集得臺中港歷年(民國 101~108 年)之水深測量資料，歷年地形水深監測時間彙整詳表 3.1 所示。



圖 3.1 臺中港相對位置圖

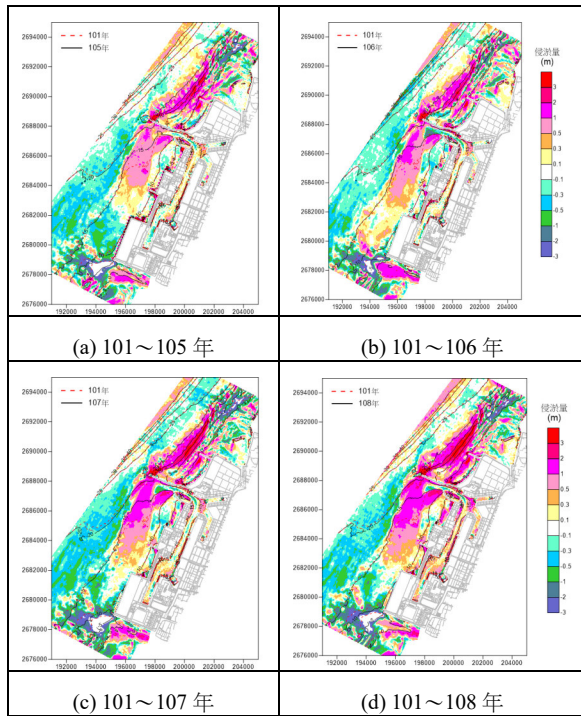
表 3.1 臺中港歷年地形水深監測時間彙整表

項次	民國	測量日期	備	註
1	101	9/1~9/12		-
2	102	-		-
3	103	-		-
4	104	-	1. 彰化福海測風塔於104年7月完工 2. 苗栗海洋測風塔於104年8月完工	
5	105	7/20~8/10	彰化氣象觀測塔(台電)於105年1月完工	
6	106	8~9月	海洋示範機組(2座)於106年4月完工	
7	107	7~8月		-
8	108	5~8月	海洋示範風場(20座)於108年12月完工	

資料來源：臺中港務分公司、交通部交通年鑑、本研究彙整

### 3.2 歷年平面水深變化分析

由於我國離岸風電相關建設於 104 年後陸續建置完成，故為瞭解離岸風機建置前後對臺中港鄰近海岸地形之影響，本研究初步蒐集 101、105~108 年共五筆水深資料，並綜合先前研究分析得臺中港北防波堤於 101 年後對鄰近地形變遷影響趨於平緩下，以 101 年為基期繪製臺中港海岸地形侵淤分布圖，如圖 3.2 所示，由 101 至 105~108 年(a)~(d)比較，臺中港北側淤積仍大於南側，且北側遠岸淤積範圍有逐漸向南側遠岸擴散趨勢，顯示整體泥沙優勢方向仍維持由北往南趨勢。另近年(105 年以後)南側近岸(-10m)如南堤路南段海岸淤積明顯增加，可能與遠岸(-10m 以外)累積淤積逐漸擴散至近岸有關，係屬自然地形變遷現象，應與鄰近彰化離岸風機建置影響無關。



資料來源：本研究繪製

圖 3.2 臺中港歷年地形侵淤分布圖

### 3.3 分區侵淤量分析

依據蒐集歷年(民國 101、105~108 年)之水深測量資料，為比較離岸風機對臺中港漂沙所帶來之影響，茲參考臺中港之分區示意圖(圖 3.3)，分析得歷年海岸分區地形侵淤統計詳圖 3.4 及表 3.2 所示。另先前研究成果，烏溪口及大甲溪口之地形侵淤分布可能受到河川輸砂之影響，各年度間之年淨侵淤量變化較大，因此暫不列入該區域進行侵淤特性評估。

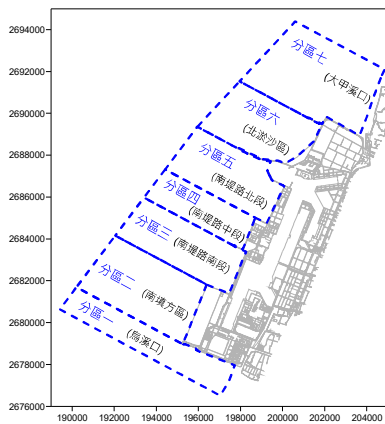
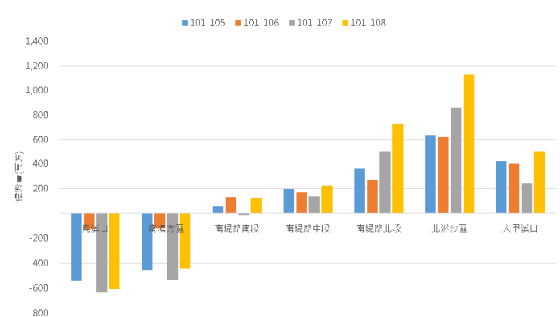


圖 3.3 臺中港分區示意圖

表 3.2 歷年海岸分區之侵淤量統計表

年 度	烏溪口	南填方區	南堤路南段	南堤路中段	南堤路北段	北淤沙區	大甲溪口	合計	
101-105	淤積量	2,248,973	1,075,737	2,354,750	2,851,619	4,876,753	7,024,628	6,853,949	27,286,410
	侵蝕量	7,649,009	5,605,827	1,773,421	900,012	1,321,971	656,685	2,710,676	20,617,602
	侵淤量	-5,400,036	-4,530,090	581,329	1,951,607	3,554,781	6,367,944	4,143,273	6,668,808
101-106	淤積量	3,960,410	1,455,914	2,497,812	2,664,768	4,668,025	7,357,032	6,710,395	29,314,357
	侵蝕量	5,225,803	2,638,485	1,221,820	1,022,100	2,014,381	1,119,061	2,721,227	15,962,877
	侵淤量	-1,265,393	-1,182,571	1,275,992	1,642,668	2,653,643	6,237,972	3,989,168	13,351,480
101-107	淤積量	2,653,060	304,730	2,243,448	2,843,259	6,520,536	9,479,974	6,863,524	30,908,531
	侵蝕量	8,947,731	5,625,203	2,375,060	1,499,816	1,502,053	865,060	4,489,820	25,304,744
	侵淤量	-6,294,672	-5,320,473	-131,613	1,343,442	5,018,483	8,614,914	2,373,705	5,603,787
101-108	淤積量	2,372,208	564,668	3,078,084	3,490,583	8,385,954	11,828,055	8,486,411	38,205,963
	侵蝕量	8,454,800	4,967,181	1,854,790	1,294,324	1,140,775	540,478	3,485,639	21,737,987
	侵淤量	-6,082,592	-4,402,512	1,223,294	2,196,258	7,245,179	11,287,578	5,000,772	16,467,976

資料來源：本研究彙整



資料來源：本研究繪製

圖 3.4 歷年地形侵淤分布之分區示意圖

### 3.4 沿岸漂沙量分析

本研究利用本所港灣技術研究中心 2003~2019 年觀測資料，經統計分析可知，全年平均波高在 0.8m~1.9m 間，平均週期約 5.6sec~6.8sec，其中以冬季平均波高 1.6m 較高，夏季平均波高則約 0.82m。冬季累積機率達 95% 之示性波高為 3.34m，尖峰週期為 8.88s，主要波向為 N 及 NNE；夏季累積機率達 95% 之示性波高  $H_{1/3}$  為 1.92 m，尖峰週期  $T_p$  為 8.63s，主要波向為 W。

臺中港附近之海岸法線方向約為 293°~329°，其夏季期間波向與海岸夾角約 -23°~-59°，夾角小於 0°，海岸漂沙方向則由南往北；冬季期間波向與海

岸夾角約 $+33^{\circ}\sim+45^{\circ}$ ，波向與海岸法線夾角大於 $0^{\circ}$ ，其海岸漂沙方向皆由北往南，整年漂沙趨勢為北向南。

為進一步依據波浪統計資料，探討研究區域沿岸輸沙能量之數字比例關係，特將逐筆資料對海岸輸沙能量加以計算，臺中港沿岸漂沙輸沙量估計表如表 3.3 所示，由表中可得知，臺中港北側向南輸沙最大約 3.94 萬方/年，臺中港港區向南輸沙量最大約 4.59 萬方/年，臺中港南側向南輸沙量最大約 2.53 萬方/年。另相對於風機建置前臺中港現況之沿岸漂沙量分析而言，整體沿岸漂沙優勢仍維持由北往南，且北側及南側淨輸沙量僅微幅變化(-0.03 萬方/年~+0.05 萬方/年)，應屬自然變動現象而與離岸風機建置無關，各海岸區域之輸沙量比較圖 3.5 所示。

表 3.3 臺中港海岸地區輸沙量估計表(2003~2019)

海岸法線角度	輸沙能量	由北往南輸沙量 (萬方/年)	由南往北輸沙量 (萬方/年)	淨輸沙量 (萬方/年)
臺中港北側 - $323^{\circ}$		+2.91	-1.38	1.53(-0.02)
臺中港北側 - $329^{\circ}$		+2.45	-1.47	0.98(-0.03)
臺中港北側 - $307^{\circ}$		+3.94	-1.05	2.89(+0.02)
臺中港港區 - $293^{\circ}$		+4.59	-0.76	3.83(+0.05)
臺中港港區 - $295^{\circ}$		+4.51	-0.79	3.72(+0.03)
臺中港南側 - $328^{\circ}$		+2.53	-1.45	1.08(-0.02)

註1：淨輸沙量正值表示由北往南，負值則表示由南往北

註2：淨輸沙量(0)內表示與2.3.4小節2003~2016年資料比對，+：增加，-：減少

#### 四、以無人飛行載具(UAV)調查周邊海岸

以無人飛行載具(UAV)於苗栗縣竹南鎮龍鳳漁港南側海纜上岸處，拍攝影像製成正射圖，本海岸區空曠且海風強勁，因此無人飛行載具需具備高抗風性及高穩定度，避免於近岸區域執行空拍任務時，受到瞬間強勁側風的干擾，使無人飛行載具定位精確並維持在相同高度下進行拍照，同時拍照攝影設備需具備高畫質影像與廣角拍攝。

航拍任務規劃考量的因素眾多，從無人機飛行參數設定、飛行時的氣候條件及地理環境、搭載相機的影像解析度，航拍範圍的劃定、設定飛航高度及速度、起飛及降落點的路線設置及地面解析度等。本研究之航拍任務規劃透過高精度之 MOI 潮位模式估算潮位、氣候條件及風速預報、飛行高度、影像重疊率、無人機電池使用量與起降點位置及民航法遙控無人機專章之相關規定作為航拍規劃之參考依據。

本次拍攝高度為 60 公尺，拍攝獲取照片共計 770 張，所產出的正射影像如圖 4.1，影像地面解析度為 1.87cm/pix。拍攝範圍涵蓋龍鳳漁港南堤以南 1km 以上的灘線與灘地。

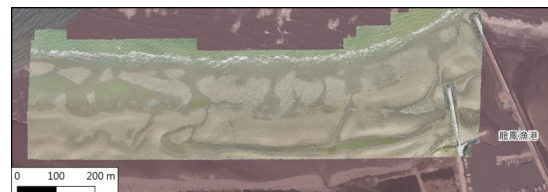


圖 4.1 空拍後產出之正射影像

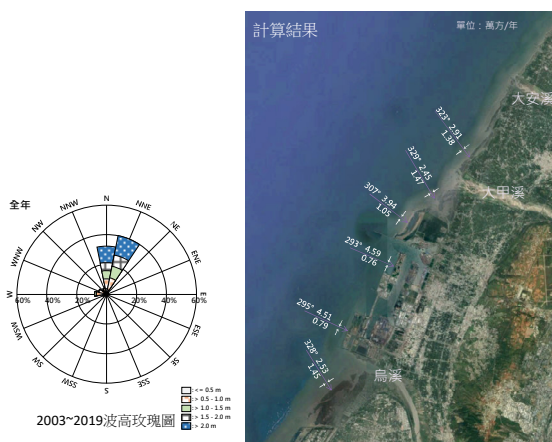


圖 3.5 海岸輸沙量特性圖

收集往昔離岸風機電纜埋設之歷史照片如圖 4.2，並於現場進行現勘(如圖 4.3)，確認海纜埋設位置。在現況照片的比較中可發現在離岸堤前的灘地並無明顯埋設痕跡，為能評估該處近岸地形是否受到海底纜線埋設的影響，將本研究產出的低潮位正射影像放大如圖 4.4，圖中以紅色虛線標明 105 年海纜埋設工程的施作位置，圖中顯示在低潮位的正射影像中灘地與灘線並未受海底纜線埋設造成影響。

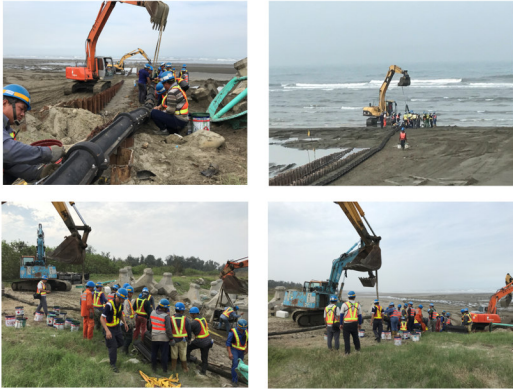


圖 4.2 105 年 10 月 19 日電纜埋設工程照片

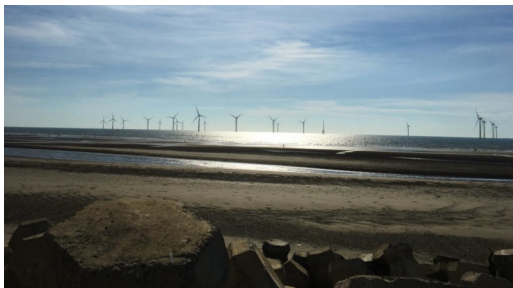


圖 4.3 電纜上岸處現勘照片



圖 4.4 正射影像中海纜上岸處

## 五、結果與結論

本研究將 101 年與 105 年後離岸風機建置完成之地形水深資料進行分析，藉以研判離岸風機對臺中港之海岸地形變化之影響。由分析結果可知，105 年彰化及苗栗離岸風機陸續完成後，地形變遷整體趨勢不變，仍舊呈現漂沙優勢方向為由北往南，且

北側淤積大於南側現象，另近年(105 年以後)南側近岸(-10m)如南堤路南段海岸淤積明顯增加，可能與遠岸(-10m 以外)累積淤積逐漸擴散至近岸有關，係屬自然地形變遷現象，應與鄰近彰化離岸風機建置影響無關。基此，離岸風機苗栗風場大規模建置主要在 108 年年中，惟考量該風場區位距臺中港甚遠(100km)以上，對臺中港地形變遷影響應屬甚微。

## 謝誌

本研究由台灣世曦工程顧問股份有限公司及詮華國土測繪有限公司團隊協助完成，在此對參與人員深表謝意。

## 參考文獻

1. 陳蔚璋、張憲國(2008)「台灣沿岸潮位推算之資料溶合法」，第三十屆海洋工程研討會論文集，新竹，325-330。
2. 鄒芳諭(2009)「以非量測型數位相機進行近景攝影測量探討」，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
3. 王天佑、蕭振洋(2013)「應用無人載具航拍及非常規攝影量測進行土石流三為地形重建」，中興工程，第 120 期，2013 年 7 月，3-12。
4. 內政部國土測繪中心 (2014) 100~103 年度「發展無人飛行載具航拍技術作業」，202 頁。
5. 楊明德、陳韋廷、黃凱翔 (2016)，「應用 UAV 影像建置現地堰塞壩三維模型」，中華水土保持學報，46(2)，88-95。
6. 陳靜茹、盧韋勳、李孟學、江文山、吳永基 (2016)「應用無人機於三維地形量測與正射影像精度之探討-以綠島為例」，第 38 屆海洋工程研討會暨科技部計畫成果發表會，503-508。



# 寬幅潮間帶內與港口毗鄰海灘之沖淤

莊文傑

交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

## 摘要

針對海灘坡度平緩、潮差偏大、東北季風波浪強盛之臺灣西部海岸，本研究考量潮位的高、低變化，透過 Google Earth 歷史圖像之廣泛檢視，可確認臺灣西部海岸的海灘沖淤變遷，密切與潮位高低相關聯，而與漁港毗鄰海灘的沖淤，應用岬灣海灘之擬合，可研判港口之卓越波浪，近岸波向均以由北轉西北之偏正向入射為主，加以港口離岸距離小，普遍位在碎波帶內，致使因碎波直接衝擊所造成卓越方向由北而南的近岸輸沙，均可跨越港口阻隔而沿岸平衡運移，並於低潮位期間形成平直或對稱沙舌型之淺灘淤積，因此，可據以研判位在寬幅潮間帶內之港口，儘管外廓配置具有突堤型式，但衍生的「突堤效應」並不顯著，對毗鄰海灘沖淤之影響亦甚輕微。此外，透過本研究尚可認知，進行漁港港口淤塞特性分析與造成機制研判，應專注確定低潮位期間之卓越波向與碎波作用；而檢視海灘的侵淤特性，宜高、低潮位並重；至於從事海岸保護工程之規劃與設計，則應特別講究高潮位期間卓越波浪碎波之直接沖擊。

關鍵詞：碎波衝擊、潮間帶、海灘侵淤變遷、岬灣海灘、突堤效應

## The Transformation of Beachs adjacent Fishing Ports on Wide Tidal Zone at the West Coasts of Taiwan

Wen-Jye Juang \*

\* Researcher, Center of Harbour and Marine Technology, Institute of Transportations, M.O.T.C.

### ABSTRACT

Aiming at the western coast of Taiwan with gentle beach slopes, large tidal range, and strong northeast monsoon waves, the erosion and deposition characteristics of beaches adjacent to a fishing ports are investigated by extensively inspecting the historical Google Earth images. It is found that the beach transformations are closely related to the tide levels. The main causes that confirmed with fitting the headland-bay beach are due to the small scale fishing ports generally located in the wave breaking zone, so that the nearshore sediment transports induced by direct impact of the breaking wave can smoothly cross the barrier of the port and move in a balanced manner along the shore, and form a flat beach or symmetrical salient during the low tide period. Therefore, we further confirmed that the naturally speculation of the "groin effect" that derived by fishing ports with jetty layouts located inside the wide tidal zone is not significant, and the impact on the erosion and deposition of adjacent beaches is also very weak. In addition, through this research, it can be recognized that the analysis of the characteristics of siltation on fishing port entrance and the study of its mechanism should focus on determining the prevailing wave direction and breaking wave impacts during the low tide period; and the inspection of the beach's silting characteristics should pay equal attention to high and low tides; As for the planning and design of coastal protection projects, special attention should be paid to the direct impact of wave breaking during high tide.

Keywords: Wave Breaking Impacts; Tidal Zone; Beach Transformation; Headland-Bay Beach; Groin Effect.

## 一、前言

近岸波浪折、繞射以及因淺化碎波衍生的強勁沖擊流(washing currents)，是近岸輸沙的主要動力，而潮汐、海灘坡度、港口外廓配置及海岸保護設施型態，則是影響近岸淺灘侵淤的關鍵因素。

臺灣西部海岸，北自桃園、新竹，南至苗栗、台中，海岸線約呈西南—東北走向，總長度約 160 公里。近海的波浪，以冬季季風波浪為主，示性波高一般小於 2 公尺，較大的波浪，波高可達 3~5 公尺，主要入射波向，集中於北北西至北北東之間，如圖 1 所示。沿岸淺灘，受中央山脈天然地勢導引，有多條主要及次要河川匯入，以往在河川上游施行整治前，每於颱風期間常有豐沛地河川輸沙補注，海灘坡度平緩，一般介在 1/60~1/100 間。近海的潮汐，由於臺灣海峽陸架地形對半日型潮波產生「協振盪」共振效應(莊、江，2006)，以致大潮期間，潮差可達 3 公尺以上，如圖 2 所示，因此，高低潮期間之灘線距離，通常可達 200 公尺以上，潮間帶甚寬廣，如圖 3 所示。

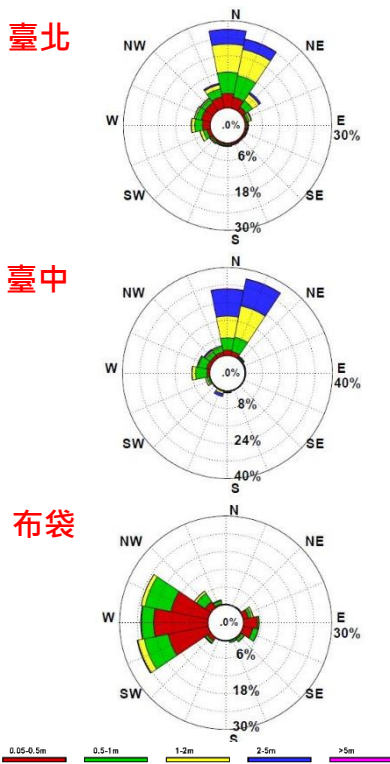


圖 1 臺灣西部近海經長年海象監測分析所得之波浪統計特性(圖資來源：運研所，2017)

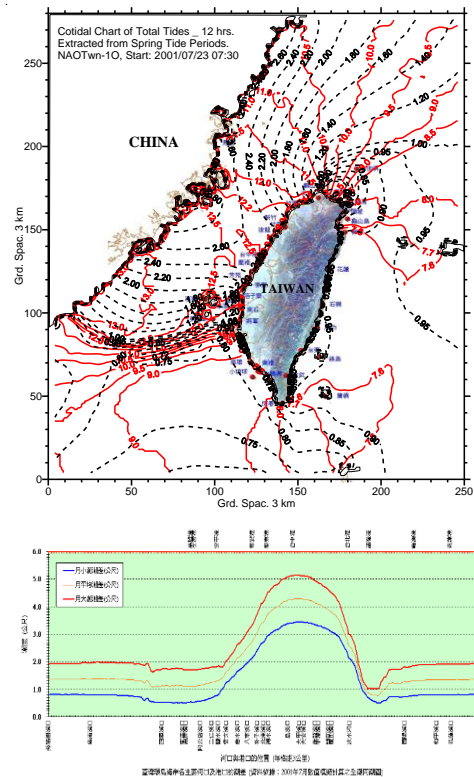


圖 2 臺灣環島海域擬真潮波同潮圖(上)及各主要河口大小潮期間的潮差(下)(圖資來源：莊，2010)

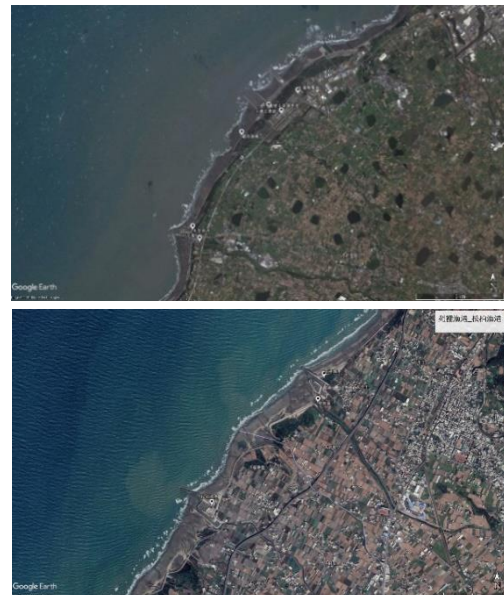


圖 2 桃園觀塘工業港至新屋永安漁港(上)以及苗栗苑裡漁港至臺中松柏漁港(下)海岸段低潮期間之寬幅潮間帶淺灘(圖資來源：Google Earth，2015/12)

另外，鑑於鄰海社區民生經濟發展所需，臺灣西部海岸線上漁港密佈，平均每 8.9 公里，即有一處港口水深小於 5 米之小型港口(農委會，2009)，惟在總體建設經費限制下，面對漲、退潮超過 3 公尺之偏大潮差，港口航道之配置，遂經常處於近岸漂沙最活躍的碎波帶內，以致現況的港口航道，大多存在有淤塞問題(農委會，2009；洪等，2003)；又為防範近海波高普遍大於 1~2 公尺、波向集中於北向至北北西向之颱風與季風波浪侵襲，強化港域靜穩度，港口外廓防波堤配置通常具有阻隔近岸輸沙平衡移運之雙突堤型式，因而常被歸咎是造成與港口毗鄰海灘侵蝕之主要原因，且長久以來皆背負著「突堤效應」的原罪。

針對海灘坡度平緩、潮差偏大、冬季季風波浪強盛之臺灣西部海岸，本研究目的主要在考量潮位的高、低變化，透過 Google 地圖，檢視寬幅潮間帶內之淺灘變動特性，再綜合與漁港毗鄰海灘的沖淤型態，應用岬灣海灘(Hsu and Evans, 1989)的灘線擬合(fitting)，探討近岸波浪碎波的直接衝擊作用，釐清小規模漁港所造成「突堤效應」的顯著性，並評估說明高、低潮位以及港口外廓配置對毗鄰海灘沖淤之影響。

## 二、突堤效應與離岸堤效應

突堤與離岸堤，是構成港口外廓配置的基本設施，主要的功能在消滅入射波浪能量，降低波浪對堤後港域之直接衝擊，因而也經常被應用於海岸地形變遷控制及海灘侵蝕防護。

突堤(groin)，係為突出於海岸灘線之防浪或阻沙結構物，平面型式包括 I 型、T 型與倒 L 型等，基於波浪折射效應，近岸波向通常約以正向入射，所以其配置一般與灘線垂直。當在近岸海灘設置突堤後，由於其防浪阻沙效能之差異，因此，會自然伴隨產生所謂的「突堤效應」，亦即在迎向波浪之上游側，漂沙通常會淤積，灘線會外移；而在下游側，則常會發生沖蝕，灘線會內縮，如圖 3 所示。

同理，基於波浪—近岸流—輸沙—地形變遷之因果循環關係，若位在近岸海灘上之漁港，當其外廓配置具有突堤型態，則亦可藉「突堤效應」，依據港口毗鄰海灘之侵淤特性，研判近岸波浪侵襲之卓越波向及優勢之沿岸輸沙方向(莊，2020)！

離岸堤(detached breakwater)，係為座落在內灘中的離岸防波堤，型式可分為透水、不透水、潛沒及出水等四種，主要功能在消滅波浪對海灘之直接衝擊，促使漂沙在堤後堆積，藉以達成安定海灘之功能。面對具時、空變動性之近岸波浪，當近岸海灘設置離岸堤後，由於碎波帶內波浪之直接衝擊作用，因而會衍生「離岸堤效應」，亦即在兩堤端後側(下游側)之淺灘沖刷帶上，由於波浪傳播之折、繞射效應，導致堤後波浪上沖、下刷之衝擊流速、流向變化，並於堤後自然衍生旋轉方向相互對應之強勁近岸環流，並促使堤後輸沙特性改變，進而造成兩堤端後側(下游側)之灘線發生沖蝕變遷，同時於堤後形成沙舌或繫岸沙洲型態之淤積，如圖 4 所示。

同理，再基於波浪—近岸環流—輸沙—地形變遷之因果循環關係，位在近岸海灘上的漁港，若沿岸輸沙在港口處具有可類比透水型潛沒離岸堤功能之潛沒河口三角洲型態淤積，並在與港口毗鄰海灘造成沙舌或繫岸沙洲型態之淺灘，則除了可藉「離岸堤效應」，研判近岸波浪侵襲之卓越波向及優勢之沿岸輸沙方向外，尚可確認輸沙及灘線變遷的主要營造力，係直接來自於近岸波浪碎波所衍生的強勁上沖、下刷衝擊作用，以及伴隨產生的近岸環流(莊，2020)，如圖 5 所示。



圖 3 突堤效應導致之海灘沖淤(圖資來源：西班牙 Platja de Nules, Castelló, 2015/10)

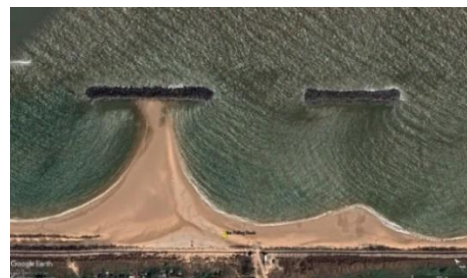


圖 4 離岸堤效應導致之海灘沖淤(圖資來源：英國 the Sea Palling on the Norfolk coast, 2019/05)



圖 5 日本 Jinkoji 海岸之單 T 型突堤與碎波帶內之卓越入射波浪(上)及因離岸堤效應導致毗鄰突堤淤積之繫岸沙洲型態淺灘(下)(圖資來源：Google Earth，上\_2017/01；下\_2018/05)

### 三、漁港配置與淺灘淤積型態

臺灣西部的漁港，為防禦東北季風及颱風波浪(參見圖 1)的侵襲，港口配置大多具有突堤型態，如圖 6 所示，又受鄰海民生經濟發展需求及總體建設經費限制，規模普遍偏小，加以近岸海灘坡度平緩、潮差大(參見圖 2)，致使港口離岸距離偏短，如表 1 所示，大多位處於漂沙最活躍的碎波帶內，因而經常衍生港口淤塞。

表 1 臺灣西部海岸漁港港口離岸距離

縣市	漁港	港口離岸距離 (公尺)
桃園	永安	843
新竹	新竹	1592
苗栗	白沙屯	242
苗栗	新埔	220
苗栗	苑裡	505
臺中	松柏	630

至於與港口毗鄰海灘之侵淤型態，自圖 6 中觀察可見，除了偏北部的桃園永安漁港與新竹漁港兩側，毗鄰海灘約略陳現對稱的沙舌型態淤積外，其他偏中部的苗栗新埔與苑裡漁港及台中松柏漁港兩側，毗鄰海灘皆陳現平直型態淤積。這現象說明，具有突堤型態的小型漁港，實際伴隨產生的「突堤效應」甚不顯著，且應用自然安定岬灣海灘經驗式

(Hsu and Evans,1989)及 MepBay 陳繪軟體(Klein et al., 2003)，再透過岬灣灘線擬合(莊，2020)，如圖 7 所示，可確認主要原因，係由於波浪受折射效應影響，近岸卓越波向大多已自北向轉換為西北，並以偏正向入射海灘，以致碎波帶約略平行於海岸線，進而促使近岸漂沙，在碎波之直接沖擊作用下，可不受港口阻隔，並可平順跨越港口而沿岸運移，終致在港口兩側，陳現平直型態之淺灘淤積；而對於桃園永安與新竹等離岸距較大之漁港，由於沿岸輸沙可於港口淤積而形成類如河口三角洲之潛沒淺灘，因此，具有突堤型態的漁港，反而會因「離岸堤效應」，而在毗鄰港口兩側，形成沙舌型態之淺灘淤積。



圖 6 臺灣西部桃園永安、新竹、苗栗新埔與苑裡及台中松柏等漁港之配置與毗鄰海灘之沖淤型態 (圖資來源：GoogleEarth，2015/12、2018/10、2021/02、2018/11、2018/11)



圖 7 應用岬灣海灘之灘線擬合檢視桃園永安漁港(上, 2015/12)及新竹漁港(下, 2018/10)毗鄰海灘形成沙舌型態淤積之卓越入射波向(白色箭矢)與波浪繞射點(白色圓點)(圖資來源: Google Earth)

所修正。此外, 受高、低潮位變動之影響, 對於單一安定靜態岬灣海灘之存在性, 亦應有所調整。



圖 8 新竹漁港高潮位(上, 2018/07)及低潮位(下, 2018/04)期間沙舌型淤積之近岸淺灘(圖資來源: Google Earth)

#### 四、潮位對海灘沖淤之影響

臺灣西部的海灘, 受近海波浪(參見如圖 1)及大潮差的影響, 在高、低潮期間, 與漁港毗鄰海灘的沖淤型態, 以新竹漁港、苗栗新埔漁港及苗栗苑裡漁港為例, 分別可綜整如圖 8、圖 9 及圖 10 所示。

綜合觀察圖 8、圖 9 及圖 10 可見, 在高、低潮期間, 與漁港毗鄰海灘的沖淤型態, 明顯具有差異。其中, 在高潮位期間, 不僅近岸淺灘完全潛沒, 而且面對由北轉西北之偏正向入射波浪之沖蝕, 終致促成裸露且平直的海岸; 而在中、低潮位期間, 受突堤型港口外廓配置影響, 原先在高潮位期間沉積在沿岸之漂沙, 再次因碎波之直接沖擊作用而可於港口淤積, 進而形成類如河口三角洲之潛沒淺灘, 或可促使近岸漂沙不受港口阻隔, 進而可平順跨越港口沿岸運移, 因此, 終會因港口潛沒淺灘造成之「離岸堤效應」而在毗鄰港口兩側, 形成沙舌型態之淺灘淤積, 或因持續面對由北轉西北之偏正向入射波浪之沖蝕, 而造成平直型態之淺灘淤積。

至於, 具突堤型小型漁港所可能造成上游淤積、下游侵蝕之「突堤效應」, 由於港口離岸距離偏小, 且受寬幅潮間帶與碎波帶內漂沙沿岸平衡輸運影響, 不論在高、低潮位期間, 均不顯著, 所以, 對於漁港建置通常會導致毗鄰海灘侵蝕之固執印象, 應有

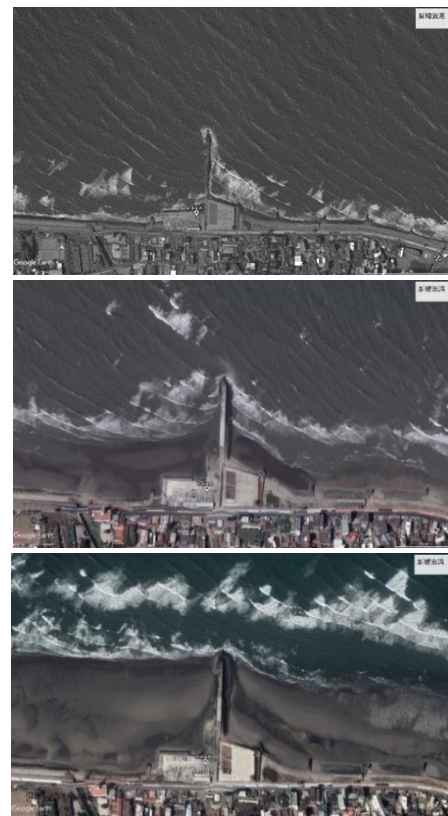


圖 9 苗栗新埔漁港高潮位(上, 2015/02)、中潮位(中, 2018/01)及低潮位(下, 2021/02)期間平直型淤積之近岸淺灘(圖資來源: Google Earth)



圖 10 苗栗苑裡漁港高潮位(上, 2016/09)及低潮位(下, 2018/11)期間平直型淤積之近岸淺灘(圖資來源: Google Earth)

## 五、結論

針對海灘坡度平緩、潮差偏大、東北季風波浪強盛之臺灣西部海岸，本研究考量潮位的高、低變化，透過 Google Earth 歷史圖像之廣泛檢視，可確認臺灣西部海岸的海灘沖淤變遷，密切與潮位高、低相關聯，而與漁港毗鄰海灘的沖淤，應用岬灣海灘之擬合，可研判港口之卓越波浪，近岸波向均以由北轉西北之偏正向入射為主，加以港口離岸距離小，普遍位在碎波帶內，致使因碎波直接衝擊所造成卓越方向由北而南的近岸輸沙，均可跨越港口阻隔而沿岸平衡運移，並於低潮位期間形成平直或對稱沙舌型之淺灘淤積型態，因此，可據以研判位在寬幅潮間帶內之港口，僅管外廓配置具有突堤型式，但衍生的「突堤效應」並不顯著，對毗鄰海灘沖淤之影響亦甚輕微。此外，透過本研究尚可認知，進行漁港港口淤塞特性分析與造成機制研判，應專注確定低潮位期間之卓越波向與碎波作用；而檢視海灘的侵淤特性，宜高、低潮位並重；至於從事海岸保護工程之規劃與設計，則應特別講究高潮位期間卓越波浪碎波之直接沖擊。

## 參考文獻

1. 洪開燁、蕭松山、林永德 (2003)「臺灣漁港淤沙問題之研究」，第 25 屆海洋工程研討會論文集，第 743-748 頁。
2. 莊文傑、江中權(2006)「臺灣四周海域旋轉潮波系統之同潮圖」，第 28 屆海洋工程研討會論文集，第 325-330 頁。
3. 朱志誠、陳建中(2006)「人工岬灣應用－離岸堤群後側平衡灘線分析」，港灣報導，交通處港灣技術研究所，第 74 期，第 41-50 頁。
4. 農委會(2009)《海岸新生之漁港疏濬及多功能漁港開發規劃》，行政院農業委員會漁業署，浩海工程顧問股份有限公司，共 227 頁。
5. 莊文傑(2010)「臺灣環島海岸各主要河口與港口之潮差」，第 19 屆水利工程研討會論文集，第 K 1-7 頁。
6. 運研所(2017)《2016 年港灣海氣象觀測資料統計年報》，MOTC-IOT-105-H2DA001e，交通部運輸研究所，共 218 頁。
7. 莊文傑(2020)「岬灣海灘在研判海岸地形侵淤變遷之應用」，第 42 屆海洋工程研討會論文集，第 165-170 頁。
8. 莊文傑(2020)「離岸堤效應導致臺東近岸港口航道之淤塞」，第 42 屆海洋工程研討會論文集，第 171-176 頁。
9. 莊文傑(2020)《臺灣東部近岸港口外廓配置對毗鄰海灘沖淤之影響評估》，MOTC-IOT-108-H3DA001c 研究報告，交通部運輸研究所，共 321 頁。
10. Environment Agency (2010) *Modelling the Effect of Nearshore Detached Breakwaters on Sandy Macro-Tidal Coasts*, Environment Agency, SC0600026/R2, Bristol, UK. Author(s): Hakeem Johnson, Jort Wilkens, Andy Parsons and Tim Chesher. pp.161.
11. Hsu, J.R.C. and Evans, C. (1989) *Parabolic Bay Shapes and Applications*, Proceedings, Institution of Civil Engineers, Part 2, London: Thomas Telford, Vol. 87, pp. 557-570.
12. Hsu, J.R.C., Benedet, L., Klein, A.H.F., Raabe, A.L.A., Tsai, C.P. and Hsu, T.W. (2008) *Appreciation of Static Bay Beach Concept for Coastal Management and Protection*, Journal of Coastal Research, 24 (1), 198-215.
13. Klein, A.H.F., Vargas, A., Raabe, A.L.A. and Hsu, J.R.C. (2003) *Visual Assessment of Bayed Beach Stability with Computer Software*, *Computers & Geosciences*, 29, 1249 - 1257.

## 近景攝影測量於實驗室地形量測之應用

施博泰<sup>1</sup> 何宗浚<sup>2</sup> 黃國書<sup>3</sup> 蕭冠宇<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水工試驗所研究助理 <sup>2</sup> 副研究員 <sup>3</sup> 研究員

### 摘要

動床水工模型試驗地形量測的需求很頻繁：通常每個測試例至少須要進行試驗前、後兩次地形測量，而實驗室測深對象通常是原型的 1/100 或甚至更小的縮小模型，因此測量的效率與精度就顯得格外重要。本文以 3 個動床水工模型試驗地形量測案例回顧作者等人自 2010 年開始利用近景攝影測量做實驗室模型地形量測以來的經驗，並綜整相關技術之演進，顯示在過去 10 年間受惠於 3 維重建技術的普及應用，相關的技術雖有長足進展，惟這些技術應用在動床水工模型試驗地形量測仍有一些挑戰須要克服：首先是如何在目標物被辨識程度很差的情況下重建 3 維地形影像；其次是在參考點十分有限或是無法按一般作法在待測場域中均勻布設參考點的情況下進一步計算 3 維地形，這些都將於本文中深入剖析。

關鍵詞：近景攝影測量、動床水工模型試驗、地形量測

## Applications of Close-Range Photogrammetry in Laboratory Bathymetry Measurements

Bo Tai Shih\* Tsong Chun Ho Kao Shu Hwang Kuan Yu Hsiao

\*Research assistant, Tainan Hydraulic Laboratory, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

Movable-bed hydraulic model tests require frequent topographic measurements. Moreover, a laboratory bathymetry is usually a 1/100 or even smaller scaled-down model to the prototype geometry. The efficiency and accuracy of topographic surveys thus play an important role in conducting geomorphological experiments. The authors review the recent 10 years' development on the applications of photogrammetry in topographic measurements by three case studies. It shows that benefited from the popularization and application of 3D reconstruction technology, related technologies have made great progress. However, the application of these technologies in movable bed hydraulic model also has some challenges. First, how to obtain 3D water depth from poorly recognizable objects? Second, how to calculate the water depth geometry with very limited reference points or uneven distribution of reference points in the domain? These will be explored in this article.

Keywords: movable-bed hydraulic model test; topographic measurements, close-range photogrammetry

### 一、前言

攝影測量 (photogrammetry) 是一種利用影像來重建目標物體空間座標或三維形狀的技術。為了研究河川或海岸地形的變化，動床水工模型試驗地形量測的需求很高：通常每個測試例至少須要進行

試驗前、後兩次地形測量，如果必須記錄中間的演化過程，則須要更多的測量；由於實驗室測深對象通常是原型的 1/100 或甚至更小的縮小模型，因此測量的效率與精度就顯得格外重要。圖 1 為一個受到波浪和水流作用的港口附近的地形案例，由於地形變化是要調查的關鍵問題，精確的高程測量尤其

重要。傳統的測量方法主要基於單點或多點聲波或光波探測器，一般其垂直方向精確度為 $\pm 10^0\text{mm}$ ；在另一方面，水平坐標的解析度取決於量測網格的密度，這是可以由施測者自行掌控的，惟基本上如果須要更高的空間解析度，就須要花更長的時間。

Frostick 等人(2011)推薦攝影測量應用於實驗室的地形量測 [1]。此外，Westoby 等 (2012) 將攝影測量描述為“用於地球科學測量應用的低成本、有效的工具” [2]。在攝影測量法當中，“航空攝影測量”，是最具歷史、最廣為人知的應用[3]，通常測量  $10^0 \sim 10^4\text{km}$  之空間尺度，惟所謂“近景攝影測量”，通常處理  $10^{-1} \sim 10^1\text{m}$  的空間或物體。隨著高畫素數位相機和完善的軟體的出現，近景攝影測量已經廣泛應用於建築數位模型，地理資訊系統，3-D 製造甚至溫室中冠層葉面積指數的估計等不同領域。不過，應用近景攝影測量來測量實驗室地形水深有一項比前述應用更具挑戰性的部分：在被測量場域中幾乎沒有清楚的參考物體。例如，建築數位模型中很容易可從照片中識別門或窗戶，然而對於大多數實驗室地形水深測量，所面對者通常是一大片毫無特徵的泥沙(或煤灰)所構成的 3 維幾何表面(圖 1，圖 2，圖 6，圖 9)。

Chandler (1999) 利用近景攝影測量來監測室外玉米田模型(0.8 m × 0.4 m)的土壤表面演變，此為本文目前所收集到最早應用近景攝影測量於實驗室尺度地形變化的文獻。Brasington and Smart (2003) 使用近景攝影測量法量測了流域盆地模型(2.1 m × 1.0 m) 演變，與直接觀察結果相比，即使他們使用平價軟體和相對低解析度的非測量用相機(non-metric camera)，近景攝影測量結果可迅速提供足夠的地形數位資訊[5]。Heng 等 (2010) 利用近景攝影測量法探討一個 3.9 m × 1.4 m 實驗室盆地的土壤侵蝕，結果雖然不如從雷射掃描儀獲得的那樣精確，但他們指出近景攝影測量可為土壤侵蝕研究提供有用的數位地形數據，同時與其他表面測量技術比較，近景攝影測量法具有快速、簡單、更具成本效益等優點 [6]。以上大約在 2010 年以前的近景攝影測量(包括下文的案例一)，一般須要在待測場域中布設經率定過的標靶(calibrated rigs)。而隨著 3 維重建技術的不斷精進，例如運動回復結構(Structure from Motion, SfM)演算法的發展，相關於

實驗室的地形量測應用乃進入無需在待測場域中布設經率定過的標靶的階段，如下文的案例二。此外，邱永芳等人(2017) 也以非量測型數位相機，進行橋墩沖刷模型多視點拍攝，並藉由 SfM 軟體獲取三維表面點雲模型以及 DEM [10]。

本文將以 3 個動床水工模型試驗地形量測案例回顧作者等人自 2010 年開始利用此一技術做實驗室模型地形量測以來的經驗，並綜整相關技術之演進。3 個案例各自使用不同的影像擷取設備、方法與軟體，模型地理特徵也不同，其中第 1 個案例為港口附近的地形；第 2 個案例為河口附近的橋墩局部沖刷地形；第 3 個案例為海岸結構附近的地形。

## 二、案例 1:港口附近地形

第 1 個案例為港口附近的地形測量(2010 年)，量測範圍大約 6.5 m X 8.0 m，使用率定後之單眼相機(Nikon D5000)，固定焦距，設定光圈於 f11 以獲得較大景深，並將相機固定於三腳架上，利用臺車(圖 1)環繞量測區擷取影像；3D 影像重建使用軟體 A，這款軟體有其配套的方塊標靶作為座標控制點，必須放置在待測場域內(圖 2)，並在標靶間撒布自製白點(參考點)，以標靶及白點反推相機的距離與姿態，重建整個 3D 地形。



圖 1. 動床試驗的地形幾何表面幾無可辨識特徵



圖 2. 在待測場域中布設經率定過的標靶



本次案例測試了照片數量(同一目標不同角度數量)和基線高度比(base line ratio)。首先,要重建 3D 幾何,至少須要從 2 處不同位置(角度)拍攝同一物體。在時程考量下,本案例測試由 L 和 R 兩角度與所有 6 角度拍攝的情況(圖 3)。此外,當 CMOS 一樣(也就是用同一部相機)時,視場 (FOV) 越大,圖像所代表的空間解析度就越差。FOV 是相機高度  $H$ 、相機焦距  $f$  和相機 CMOS 感測器尺寸  $S$  的函數:

$$FOV=S \cdot H/f \quad (1)$$

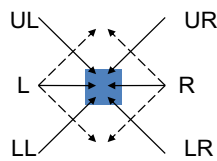


圖 3 不同角度拍攝同一目標

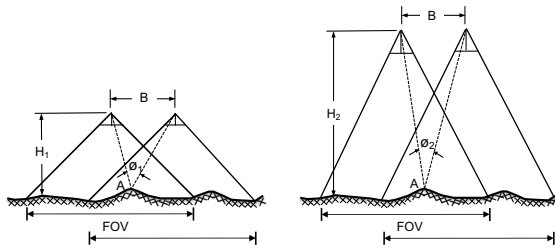


圖 4 基線高度比示意圖

經過與全站儀測量結果比較,本案例中同一目標不同角度數量(2 角度與 6 角度)的影響比基線高度比顯著。圖 5 顯示全站儀和近景攝影測量獲得的地形看起來很相似,只是在右上與左下角因為在近景攝影測量標靶有效範圍之外,因此與全站儀結果明顯不同。不過,與全站儀相比,近景攝影測量所需的時間僅約 1/4。

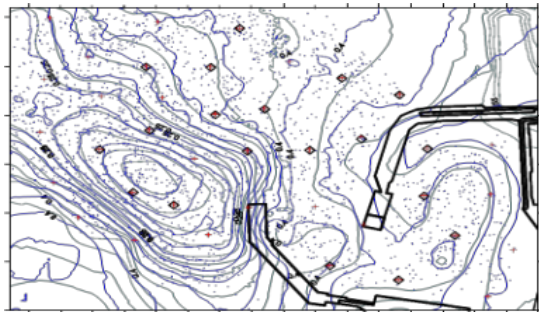


圖 5 全站儀(綠線)與近景攝影測量(藍線)比較

### 三、案例 2:橋墩局部沖刷地形

第 2 個案例為河口附近的橋墩局部沖刷地形測量(2016 年),量測範圍大約 1.5 m X 2.4 m,使用相機(CANON SX50HS) 環繞量測區擷取影像,使用軟體 B,以 SfM 演算法進行 3D 重建。此一軟體對影像的要求較寬鬆:不須要率定相機,無須特製標靶,也不須撒佈自製參考點,只須在測區周邊標記已知座標的控制點,可免於碰觸待測區域表面。結果顯示傳統方法(獲得的地形和 SfM 看起來很相似(圖 7、圖 8),只是圖 8 中的輪廓比圖 7 中的輪廓顯得更不規則:這是合理的,因為傳統方法(單點式超音波量測儀)中的測量網格彼此相距 5.0 cm,其水平解析度遠比 SfM 差。本案例 SfM 法解析度在水平方向為 0.1 mm,垂直方向為 0.13 mm。與傳統方法相比,SfM 所需的時間約為 1/6。

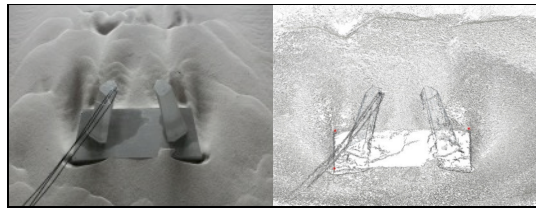


圖 6 橋墩局部沖刷地形(左)與 3D 重建點雲(右)

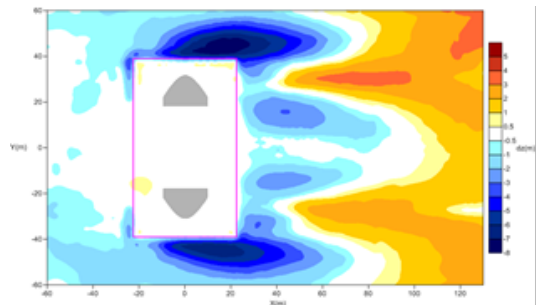


圖 7 單點式超音波量測儀結果

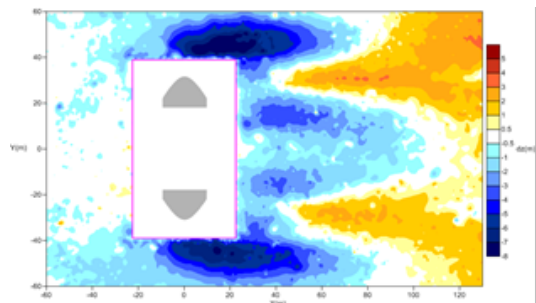


圖 8 近景攝影測量(SfM)結果

#### 四、案例 3:海岸結構附近地形

案例 3 為海岸結構附近的地形測量(2021 年) , 量測範圍大約 7.0 m X 7.3 m , 使用單眼相機(SONY A850, 搭配 28-75mm F2.8 SAM 鏡頭)與手機(iPhone X )擷取影像, 使用軟體 C。軟體 C 亦是應用 SfM 演算法, 與軟體 B 最大不同在於軟體 C 有建議特別圖案的標靶, 並且能在軟體中自動找尋標靶中心點, 相對提升控制點座標之精準度。

##### 4.1 測量效率比較

以全站儀(SOKKIA IX 1001)程式設定自動測量 7.0 m X 7.3 m 之範圍, 當網格點間距設定 25 cm 時, 須時 41 min (818 測點), 不過, 這樣的測量精度在地形變化較大的結構物附近時就顯相當不足。假設網格變成 5 cm, 則須時 17 小時 (20,440 測點), 量測所需時間陡增 25 倍。在另一方面, 近景攝影測量法面對相同測區, 拍攝時間約 1 小時(143 張照片), 以 28 核心電腦搭配軟體建成 3D 等深線圖模型須時 35 分鐘, 以 4 核心電腦建模則須時 187 分鐘。全站儀及近景攝影測量建模所需總時間比較如表 1。可觀察到用在大面積快速量測的全站儀 25 cm 網格, 利用疏散的測量密度空間以換取時間, 能比攝影測量更加快速獲得地形資料。而在攝影測量使用 28 核心電腦運算案例下, 與特別用於觀測局部小範圍地形的全站儀 5 cm 網格相比, 攝影測量僅須全站儀 5 cm 網格不到 1/10 工作時間, 而在 4 核心電腦運算案例下, 也僅須其將近 1/4 工作時間。顯示以攝影測量獲取動床等深線地形資料在高密度且全區域測量狀況下比全站儀更有效率。

表 1 不同方法測量所需時間比較表

測量設置	測量/拍照 (min)	運算 (min)	總時間 (min)	總時間換算
全站儀 網格 25cm	41	-	41	0.67 hr
全站儀 網格 5cm	1,022	-	1,022	17.0 hr
單眼相機 28 核電腦	55	35	90	1.5 hr
單眼相機 4 核電腦	55	187	242	4.0 hr

##### 4.2 空間解析度比較

圖 9 為案例 3 之海岸結構附近地形。先比較全站儀 5 cm、25 cm 網格結果(圖 10), 顯示 5 cm 網格描繪海岸結構及周邊地形變化的能力較佳。再比較全站儀 5 cm 網格與近景攝影測量(單眼相機@台車)結果, 顯示在圖面上方靠近結構物附近全站儀結果產生比較大誤差, 如圖 11 所示。原因除與全站儀在平面上之解析度遠低於近景攝影測量者之外, 由於全站儀是架設在陸側, 其向海側發送信號時受結構物阻擋, 因此在結構物附近產生一個遮蔽帶。

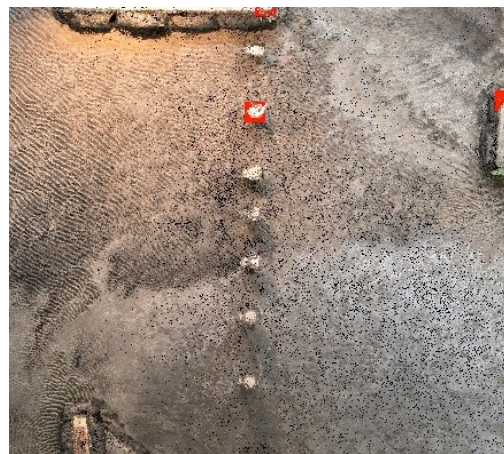


圖 9 海岸結構附近的地形

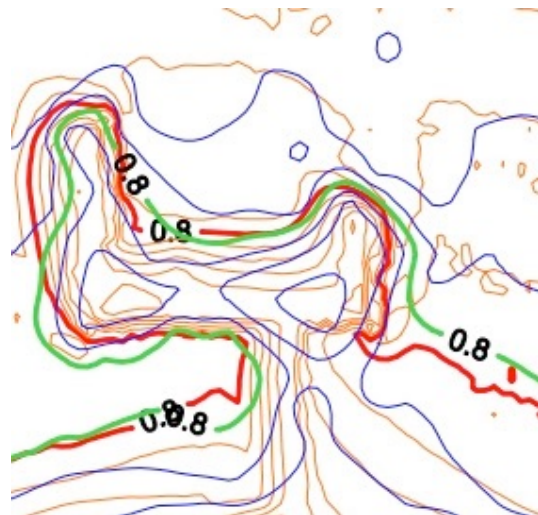


圖 10 全站儀 5 cm 網格等深線(橘、紅線), 全站儀 25 cm 網格等深線(藍、綠線)

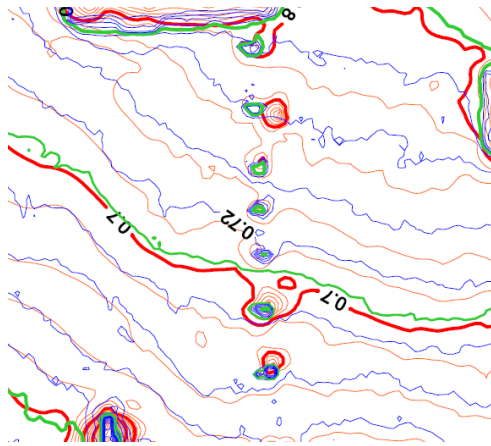


圖 11 全站儀 5 cm 網格等深線(橘、紅線)與單眼相機於台車近景攝影測量結果(藍、綠線)比較

全站儀 Z 軸精度於免稜鏡模式(程式自動測量)時約為 2 mm，本案例攝影測量 Z 軸 RMSE (Root-Mean-Square Error) 則為 1.92 mm 皆在本縮尺模型試驗可接受範圍內，如表 2 所示。然而單眼相機於台車(與測區控制點高差約 3 米)之攝影測量於 XY 平面有效測點密度為 6.06 points/cm<sup>2</sup>，為全站儀 5 cm 網格測點密度 0.04 points/cm<sup>2</sup> 的 151.5 倍，若為單眼相機於廠棚鋼結構貓道(以下簡稱貓道，與測區控制點高差約 11 米)拍攝則為 43.5 倍，此種測點密度優勢可見圖 11 較為鋸齒的線條形狀，顯示高密度測點對地形變化更為敏感。

表 2 測點密度及 Z 軸測量精度比較表

量測器材設置	相片總數 (pictures)	測點密度 (points/cm <sup>2</sup> )	Z 軸精度 RMSE (mm)
全站儀(網格 25cm)	-	0.0016	2
全站儀(網格 5cm)	-	0.04	2
手機相機(3 米台車)	143	2.79	1.32
單眼相機(3 米台車)	143	6.06	1.92
單眼相機(11 米貓道)	141	1.74	1.52

### 4.3 手機與單眼相機比較

圖 12 顯示以手機之相機於台車近景攝影測量等深線與單眼相機於台車攝影測量結果比較，持手機與持單眼相機為不同人，惟均於台車上並盡量以相同角度進行拍攝。可觀察到兩種測量方法所得之等

深線十分吻合，單眼相機之測點密度 6.06 points/cm<sup>2</sup>，手機之測點密度 2.79 points/cm<sup>2</sup> (表 2)。單眼相機與手機原始畫素比為 2.05 (2460/1200)，與 SfM 軟體運算後之 3D 等深線模型點雲密度 6.06/2.79=2.17 有正比關係。手機攝影測量 Z 軸 RMSE 1.32 mm 甚至比單眼攝影測量者 1.92mm 更小。亦即在本例實驗條件裡，以手機相機作所獲得之照片品質，在 SfM 軟體運算中，足以匹配專業單眼相機所得之照片。

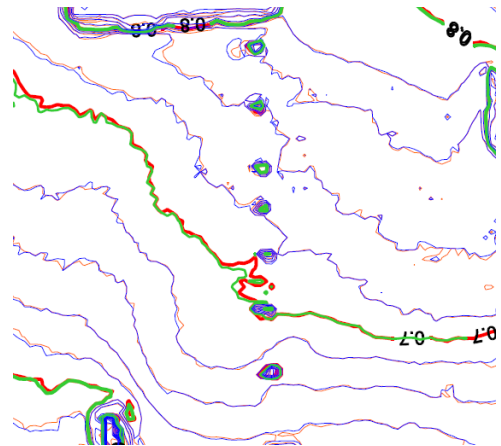


圖 12 手機於台車近景攝影測量結果(橘、紅線)與單眼相機於台車近景攝影測量結果(藍、綠線)比較

### 4.4 相機與待測區距離的影響

圖 13 為單眼相機使用近景攝影測量於貓道所得結果與同一部相機於台車所得結果之比較。兩種測量方法所得之等深線十分一致，3 米高程(台車)所得之測點密度 6.06 points/cm<sup>2</sup>，11 米高程(貓道)者則為 1.74 points/cm<sup>2</sup>。3 米高程攝影測量之 Z 軸 RMSE 1.92 mm，與 11 米高程攝影測量者 1.52 mm 皆在本縮尺模型試驗可接受範圍內。

進行本項比較之出發點在於實驗水槽一般未必有台車或高空貓道，而較佳之動床模型之 3D 重建又必須要環繞測區一圈，因此若未來能有室內型 UAV 航拍機系統時，在相同精度條件下已證實至少有 11 米高程的拍攝自由度，可藉由上升高度直接飛掠試驗場內障礙物，並脫離既有台車、天橋之拍攝角度限制，同時能擴大 XY 平面攝影測量面積，並以自動化拍攝方式取得照片。

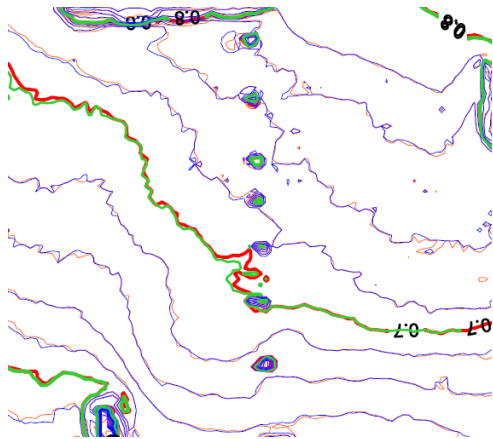


圖 13 單眼相機於貓道近景攝影測量結果(橘、紅線)與單眼於台車近景攝影測量結果(藍、綠線)比較

## 五、結論

拜近 10 年產業於 3D 影像重建高度需求之賜，相關技術日進千里，惟試驗模型地形基本上特徵點很少，且表面顏色單調灰暗，如要運用既有 3D 影像重建軟體技術，關鍵在如何有效成像。本文回顧作者等近 10 年利用近景攝影測量做試驗模型地形量測的經驗，並綜整相關技術之演進。結論如後：

1. 與實驗室傳統地形量測工具相比，近景攝影測量可以較有效率獲得垂直精度相近甚至略佳且平面解析度遠大於一般傳統測量方法的結果。尤其在鄰近結構物地形變動較劇的區域，近景攝影測量為較優工具。
2. 在適當參考點布置情況下，以 1,200 萬畫素之手機擷取影像所獲得之結果可與 2,460 萬畫素之單眼相機結果匹配。
3. 在實驗室尺度下，影像擷取設備與待測區參考點高差 11 米時仍可與高差 3 米之結果相近，確定未來應可朝室內 UAV 擷取影像之方向精進。
4. 近景攝影測量從 2010 年之前必需在測區內布置經率定之特製標靶，到現今只需於測區外圍布置可供辨識之參考點，對動床模型試驗地形測量是一大進步。未來如何以非接觸方法提升測區可辨識程度是值得努力的方向。

## 謝誌

本文第一個研究案例承本校測量系饒見有教授

軟硬體支援，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. 邱永芳，賴瑞應，胡啟文 (2017)，近景攝影測量應用於渠槽試驗底床量測之探討，*土木水利* 第四十四卷，第六期，pp. 59-69.
2. Brasington and Smart (2003) Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3): 231-247.
3. Brown J., Dold J. (1995) VSTARS - a system for digital industrial photogrammetry, In: Gruen A., Kahmen H.(Eds.), *Optical 3D Measurement Techniques III*, WichmannVerlag, Heidelberg, pp.12-21.
4. Colomina I. and P. Molina (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92, 79-97
5. Chandler J. (1999) Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research, *Earth Surface, Processes and Landforms* 24: 51-63.
6. Ganci, G. and Handley. H.B. (1998) Automation in Videogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, *Hakodate*, 32(5): 53-58.
7. Heng B.C.P., J.H. Chandler, A. Armstrong (2010) Applying close-range digital photogrammetry and soil erosion studies, *The Photogrammetric Record*, 25, pp. 240-265
8. L.E. Frostick, S.J. McLelland, T.G. Mercer (2011) *Users Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the of the HYDRALAB network*, CRC press.
9. Marzan G. T. and H. M. Karara (1976) Rational design for close-range photogrammetry, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
10. Westoby M.J., J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey, J.M. Reynolds (2012) Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology* 179, 300-314.

# 雲嘉海域長期海岸變遷趨勢探討

陳盈圻<sup>1</sup> 盧韋勳<sup>2</sup> 江文山<sup>3</sup> 楊文昌<sup>4</sup> 卓訓杰<sup>5</sup>

<sup>1</sup>國家海洋研究院 海洋科學及資訊研究中心 助理研究員

<sup>2</sup>國立成功大學水工試驗所 助理研究員

<sup>3</sup>國立成功大學水工試驗所 副所長

<sup>4</sup>國家海洋研究院 海洋科學及資訊研究中心 主任

<sup>5</sup>國家海洋研究院 海洋科學及資訊研究中心 副研究員

## 摘要

雲嘉海岸受自然環境條件以及人為設施等交錯複雜因素，造成沙源短缺及輸砂型態改變，致使雲嘉海岸沙洲產生嚴重侵退現象，沿岸系列沙洲高程日漸降低並向陸側後退，不僅產生國土流失問題，更連帶影響產業現況、環境生態、災防等問題。本研究蒐整歷年來(1991年~2020年)雲嘉海岸地形水深監測資料，計算分析雲嘉海岸地形變遷趨勢與縮減移動速率。結果顯示雲嘉海域整體地形變遷趨勢為麥寮港北側區域以淤積現象主導；麥寮港南側至北港溪口區域呈大幅度侵蝕趨勢，惟麥寮港南側端、近岸箔子寮沙洲呈淤積現象；外傘頂洲區域為近岸侵蝕現象、遠域淤積趨勢。外傘頂洲整體呈現向陸側移動並呈現逆時針旋轉趨勢，其中1984年至2021年沙洲北側端點大約縮短約3.5公里，年平均向南移動速率為95公尺/年；沙洲南側端向東移動約6公里，年平均向東移動速率為162公尺/年。

關鍵詞：地形變遷、雲嘉海岸、灘線變遷

## A Study on the Long-term Coastal Evolution on the Yunjia Coast

Ying-Chi Chen<sup>1</sup> Wei-Shu Lu<sup>2</sup> Wei-Son Chiang<sup>3</sup> Wen-Chang Yang<sup>4</sup> Hsun-Chieh Cho<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Assistant Researcher, National Academy of Marine Research

<sup>2</sup> Assistant Researcher, Taiwan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

<sup>3</sup> Researcher, Taiwan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

<sup>4</sup> Associate Researcher, National Academy of Marine Research

<sup>5</sup> Researcher, National Academy of Marine Research

## ABSTRACT

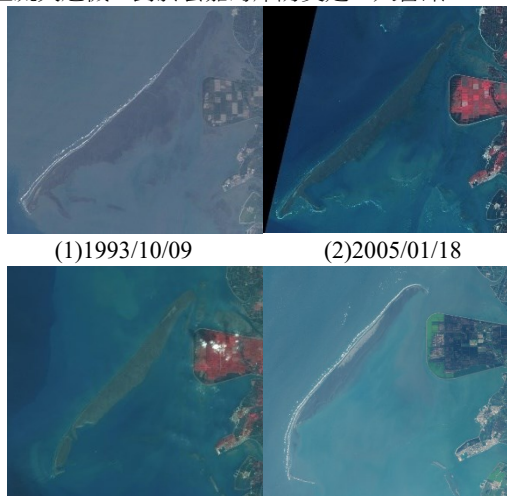
The Yunjia Coast is affected by the natural environmental conditions and man-made facilities, which have caused the shortage of sand sources and the change of the sand transport pattern. Thus, Waisanding Sand Bar has presented serious erosion phenomena, e.g., the decreasing of elevations of sandbanks and evolving toward to the land side. The problems of land loss, impact of the fishing industry, environmental ecology, and disaster prevention have been also generated. The topographic of investigating data from 1991 to 2020 has been collected and organized in this study to analyze the trend of the topography change of the Yunjia Coast. The results show that deposition occurs in the northern zone of Mailiao harbor. The erosion phenomenon happens the coast zone from Mailiao harbor to Beigang river, but the areas of the southern of Mailiao harbor and the Boziliao sandbar show siltation. The coastal change around Waisanding Sand Bar presents the trendacy of counterclockwise rotation phenomenon and moving toward land side. From 1984 to 2021, the northern part of the sandbar is shortened approximately 3.5 km with an averaged southward movement velocity of 95 m/year, and the southern part of the sandbar is moving eastward about 6 km with an averaged eastward movement velocity of 162 m/year.

Keywords: Topography change; Yunjia Coast; Shoreline evolution

## 一、研究目的

外傘頂洲為台灣最大之離岸砂洲，主要來自於濁水溪和北港溪所帶出的大量泥沙長期堆積而成，其位處西岸雲嘉海岸之外側，可禦擋波浪對海岸之直接衝擊，減少災害之發生，故形成雲嘉海岸天然屏障。因受其屏障之保護，沿海一帶濕地可供生物棲息，顯見外傘頂洲具有對海岸安全與生態保育之雙重功效。然雲林、嘉義海岸與沿海系列砂洲因河川整治、沿岸海埔地、漁港與工業區開發等因素，造成南移漂砂短缺而使沙洲內移縮減，加上長期波浪作用自然環境變遷等複雜因素，致外傘頂洲周邊海岸長期以來存在侵蝕及海岸線退縮問題。

過去國內相關學者也不同解析方式，如衛星影像辨識與數值模式，探討外傘頂洲變遷特性與未來趨勢，林與柯(1981)、吳(1991)、林與莊(1995)、顏與張(1999)、黃(1999)、林等(2003)、張與陳(2005)、張等(2017)、彭等(2019)。圖 1 為 1993 年至 2021 年近 30 年外傘頂洲衛星影像比較圖，由 1993 年衛星影像可見，早期外傘頂洲最北端位於台子村外側，其北端緊鄰陸地，爾後外傘頂洲逐年往南移，沙洲北側端逐漸往鰲鼓溼地演進；而於沙洲南側處，其形狀與位置易有明顯差異。另一方面，衛星影像圖比較亦可顯示，自 2013 年起外傘頂洲已呈現細狹長型，且沙洲已有裂口發生現象並逐漸縮減，亦可說明近年來外傘頂洲侵蝕現象與縮減速率呈現加速現象，不僅造成國土流失危機，對於雲嘉海岸防災是一大警訊。



(3)2013/2/18

(4)2021/3/16

圖 1 外傘頂洲海岸變化之衛星影像比較

鑒於外傘頂洲變遷位處地理敏感性，海岸地形影響因素機制複雜性，應以雲嘉海岸整體海岸保護為研究發想進行分析，以瞭解外傘頂洲長期時空下海岸漂沙特性與岸線演進趨勢。

## 二、監測資料蒐整與分析

本研究首先盤點近三十年(1991 年~2021 年)各機關於雲嘉海域進行地形水深監測計畫，包含海域水深地形、陸域地形量測作業及航拍及衛星影像量測，共計蒐整 6 個監測機關、53 筆監測資料成果，詳如表 1，其中以經濟部工業局資料成果為最大宗，經濟部工業局因應辦理雲林離島基礎工業區整體開發需要以及行政院列管 13 處侵淤熱點責成任務，辦理地形水深量測作業，其地形水深量測起點位址以濁水溪口往南施測，終點位址於各年度有所差異，其餘各機關則因應研究目的或業務職掌進行區塊性海域地形監測，如下：

- (1) 經濟部第五河川局：因應嘉義縣海岸及臺南雙春海岸歸類為一級海岸防護區與防止外傘頂洲沙灘整體防護計畫分工，分年辦理北港溪至急水溪間海岸段水深地形測量。
  - (2) 經濟部水利規劃試驗所：為了解海岸開發後對地形變遷影響機制問題與提供後續整理海岸環境與防護改善需求，分年辦理鰲鼓至曾文溪口間之地形水深量測作業。
  - (3) 交通部臺灣港務公司：履行環境影響評估相關規定與行政院列管 13 處侵淤熱點責成任務，以及了解港區航道侵淤特性，辦理外傘頂洲至八掌溪周邊海岸地形水深量測。
  - (4) 雲林縣政府：因應箔子寮漁港外沙洲南移且陸化造成漁民出海航行不便，為了解其沙洲飄移原因，辦理箔子寮漁港周邊海域水深調查作業。
  - (5) 內政部：依「國土測繪法」辦理全國性海域基礎圖資測繪及國土基本資料建置工作。
  - (6) 國家海洋研究院：依國土變遷與水理特性研究，辦理三條崙至外傘頂洲間地形水深量測作業
- 鑒於上述各機關計畫目的、業務職掌及著重範圍有所差異，本研究依據上述監測資料成果進行彙

整與空間分布分析，其中於 1990 年~2003 年間以經濟部工業局監測範圍為主，為濁水溪口至外傘頂洲南側間海域，其中 1999 年~2003 年另有經濟部水規所與交通部臺灣港務公司進行外傘頂洲以南至布袋港區間之量測作業；2004 年~2010 年則為濁水溪口至三條崙區域，其為經濟部工業局施測，其中交通部臺灣港務公司於 2005 年於布袋商港周邊海域進行監測計畫；2011 年~2015 年間各機關於雲嘉海岸進行分散區塊性量測作業，加以整合範圍可得濁水溪口至布袋商港間海域，惟缺外傘頂洲陸側潟湖區域地形監測資料；2016 年~2019 年間主要著重於濁水溪口至三條崙與外傘頂洲以南至布袋商港兩大區塊；2020 年至 2021 年各機關監測範圍經整合後可涵蓋濁水溪口至布袋商港之整體海域。

各機關量測頻率因應計畫目的及責成任務要求，平均為 1 年 1 次~2 次，而測量深度多以涵蓋水深 25 米處，其量測間距亦因水深與近遠域而有所差異，其中水深 10 米以內量測間距約 100~200 米；水深 10 公尺以外海域則於 400~800 米間不等，其高程基準統一採用 2001 臺灣高程基準 (Taiwan Vertical Datum 2001, 簡稱 TWVD2001)，其為在 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境下，採用基隆潮位站 1957 年至 1991 年之潮汐資料化算而得。本研究經上述資料成果整合後，透過資料統一網格化並加以計算，以探討長期雲嘉海岸地形變遷與演進趨勢。

表 1 各機關歷年(1990-2020)於雲嘉海域監測年度彙整表

監測機關	年度
經濟部工業局	1990~至今
經濟部第五河川局	2012~2015、2018~2019
經濟部水利規劃試驗所	2002~2005、2014
雲林縣政府	2018-2020
內政部	2015
臺灣港務有限公司	1999、2019~2021
國家海洋研究院	2020

### 三、結果與討論

本研究已蒐整 1990 年~2020 年各機關地形水深監測成果，目前雲嘉海域整體地形水深成果呈現於圖 2，其彙整了經濟部工業局、雲林縣政府及國家海洋研究院三個機關資料成果。為了解雲嘉海域長期海岸地形變化特性，本研究盡可能找尋監測範圍空間完整性與時間連續性之監測年度，據以分析時空下雲嘉海域海岸地形變遷特性，本研究以 1996 年地形水深資料為起始年度，選取 2001 年、2011 年、2015 年及 2020 年等各年度地形水深資料，逐步進行 5 年、10 年以及 25 年之「雲嘉海岸整體趨勢演進」、「外傘頂洲陸側潟湖地形侵淤分布」以及「斷面地形分布」比較。

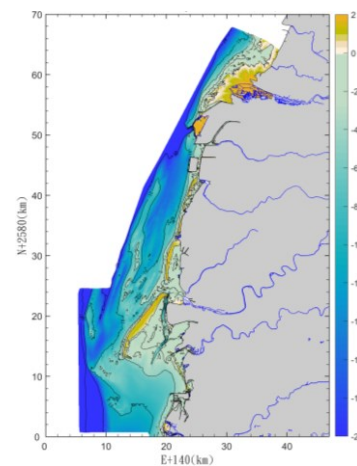


圖 2 2020 年各機關地形水深監測範圍示意圖

#### 3.1 雲嘉海岸整體趨勢演進

圖 2 為 1991 年至 2020 年雲嘉海域地形變遷演進圖，圖 3 為過去 25 年雲嘉海域地形變遷分布，本研究將其分成四大區域，並進行地形變遷特性說明，如下：

- (1) 麥寮港北側海岸、濁水溪口位置：地形變遷特性明顯發生於水深 10 公尺海域，各年度比較成果均顯示以淤積現象主導，於過去 25 年間淤積程度約達 10 公尺。
- (2) 麥寮港南側至三條崙漁港間海岸段：於過去 25 年間整體變動趨勢呈現大範圍侵蝕現象，最大侵蝕深度可達 10 公尺，僅於麥寮港南側端(水深 15 公尺處)局部區域呈現淤積現象，並於 2001 年~2011 年間顯著，初步研判可能是防波堤北側淤積量最大沙源後受波潮流作用傳輸

- 至防波堤下游處所造成，其淤積厚度約 8 公尺。
- (3) 三條崙漁港至北港溪北側海岸：於 1996 年北港溪口離岸約 6 公里處原有一小範圍沙洲地形，推估受波潮流作用往下游移動並逐漸侵蝕潛沒水下，於 2001 年已侵蝕潛沒水下。整體而言過去近 25 年間，於等深線 5 公尺以外呈現大幅度侵蝕趨勢，侵蝕深度達 10 公尺以上；近岸靠近箔子寮沙洲區域與外海水深 10 公尺兩處皆呈現淤積現象，淤積高程達 4~6 公尺。
- (4) 外傘頂洲區域：整體而言外傘頂洲近岸(水深 10 公尺至岸線區域)呈現明顯侵蝕現象，侵蝕最大量發生於沙洲南側，侵蝕深度達 10 公尺以上；遠域(水深 10~20 公尺海域)呈現淤積趨勢，最大淤積高程約達 8~10 公尺。

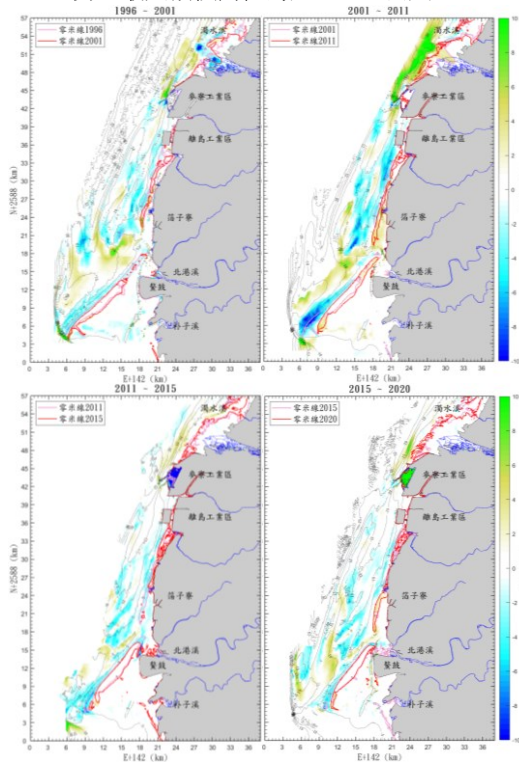


圖 3 1991 年至 2020 年雲嘉海域地形變遷演進圖

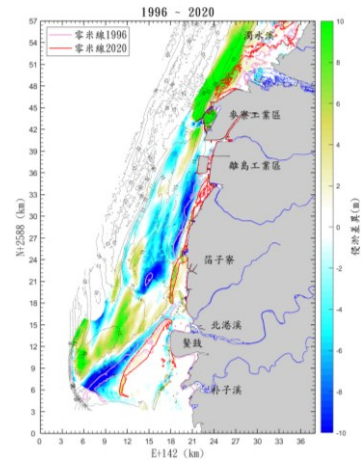


圖 4 1996 年~2020 年雲嘉海域地形變遷分布

### 3.2 陸側潟湖侵淤分布

雲嘉海岸沿岸養殖產業盛行，每年帶來可觀的經濟產能，而外傘頂洲歷年的消長與其陸側潟湖地形水深變化均為養殖產業所關注議題，而本研究則於此小節則針對外傘頂洲陸側潟湖區進行地形變遷演進探討，圖 5 為 1991 年至 2020 年外傘頂洲陸側潟湖地形變遷演進圖，圖 6 為過去 25 年陸側潟湖地形變遷分布。

外傘頂洲陸側潟湖地形變遷主要發生於靠近鰲鼓濕地之潮溝，其中 1996 年~2001 年則呈現零星局部侵淤分布；2001 年~2015 年侵蝕現象則隨著潮溝地形呈現帶狀分布且周邊伴隨零星淤積；2015 年~2020 年則轉為淤積現象略為顯著。整體而言近 25 年間(1996 年~2020 年)侵蝕淤積分布則隨著潮溝地形呈帶狀分布，且兩者亦呈現交錯分布現象。而於外傘頂洲潟湖區域由監測資料成果比較顯示侵淤現象不明顯，另透過灘線移動可得外傘頂洲逐年向陸側移動，使潟湖區域面積縮減。

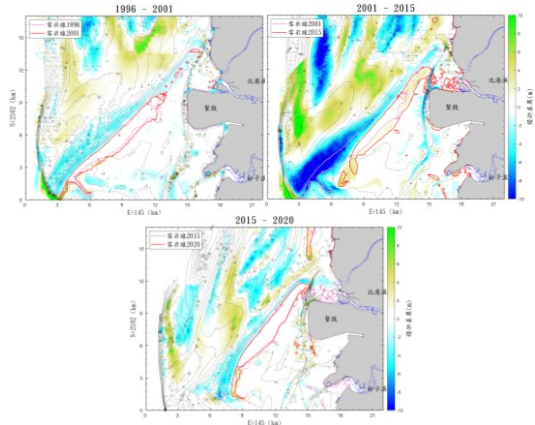




圖 5 1991 年至 2020 年陸測瀉湖地形變遷演進圖

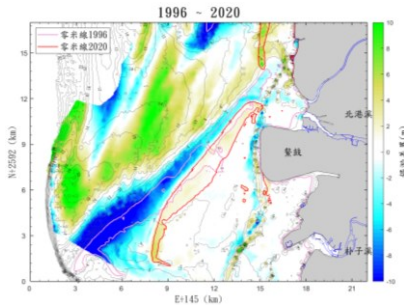


圖 6 過去 25 年陸測瀉湖地形變遷分布

### 3.3 外傘頂洲灘線分布變化

本研究利用上述蒐整監測資料擷取外傘頂洲岸線，引用相關文獻研究成果與國海院於 2021 年 6 月灘線量測成果一同比較，如圖 7 所示，自 1984 年~2021 年間，外傘頂洲整體呈現面積縮小趨勢，其中沙洲北側早期位於雲林臺子村外海處，而今則向南移縮短至蟹鼓海域，北側端大約縮短約 3.5 公里，年平均向南移動速率為 95 公尺/年；沙洲南側端向東移動約 6 公里，年平均向東移動速率為 162 公尺/年；而於外傘頂洲海側與陸側海岸線均向東移，以外傘頂洲中段海岸線分析，海側與陸側海岸線分別東移 3.1 公里與 1.2 公里，東移速率分別為 83.8 公尺/年與 32 公尺/年，整體呈現向陸側移動並呈現逆時針旋轉趨勢。

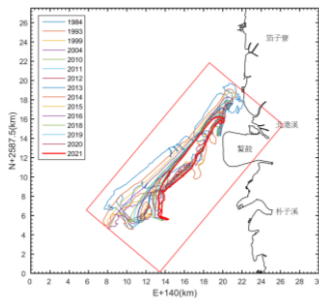


圖 7 1984 年至 2021 年期間外傘頂洲灘線演進圖

### 3.4 斷面地床高程變化

為了解外傘頂洲海域細部變動特性與岸線沙洲移動向位，本研究將外傘頂洲區域以等間距進行斷面地床高程分析，並選取北、中、南側三個斷面進行分析探討，即為斷面 49、57、67 三斷面，分析斷面示意圖如圖 8 所示，其三處斷面地床高程變化圖則羅列於圖 9~圖 11 所示。

由於外傘頂洲北側逐年向南縮減且移動，故斷

面地床高程分析成果顯示，外傘頂洲北側(斷面 49)原先 1996 年高程 0m 以上沙洲區域於 2001 年與 2015 年時僅往陸側移動趨勢，沙洲高程尚未侵蝕下降，而於 2020 年顯示，沙洲高程已降至 0m 以下，其中最大侵蝕深度可達 5m 左右；沙洲海測(斷面距約 4000m 以外)原為一緩坡海底地形，而於原水深-5m 以外區域逐漸淤積形成海底沙丘，並於 2015 年起逐漸形成多處小型沙丘分布。

外傘頂洲中段區域(斷面 57)呈現沙洲本體往陸側移動演進，而於 1996 年水深 0m~-5m 處則呈現明顯侵蝕現象，侵蝕深度發生於斷面距離 8700m 處，侵蝕深度約為 10m；於原水深-6m 以外區，呈現大範圍淤積現象，最大淤積幅度約達 10m 左右，此近岸侵蝕遠域淤積情況可於圖 4 明顯看出。

由於外傘頂洲地形演進以南北側縮減且呈逆時針旋轉趨勢，其中又以外傘頂洲南側端變遷最為劇烈，外傘頂洲南側端斷面地床高程變化圖為圖 11，由地床高程變化圖顯示，其中沙洲地床斷面於 1996 年至 2001 年呈現往陸側縮減，其沙洲高程與斷面坡度尚未明顯差異，而於 2015 年起外傘頂洲已淪為潛沒沙洲，整體沙洲呈現大幅度侵蝕，由原先高程 1m 沙洲降至水深-17m 左右。

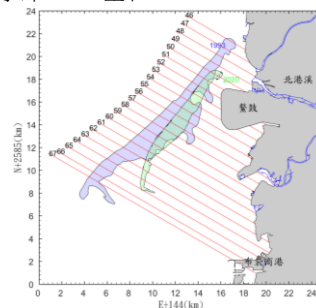


圖 8 外傘頂洲地床高程分析斷面示意圖

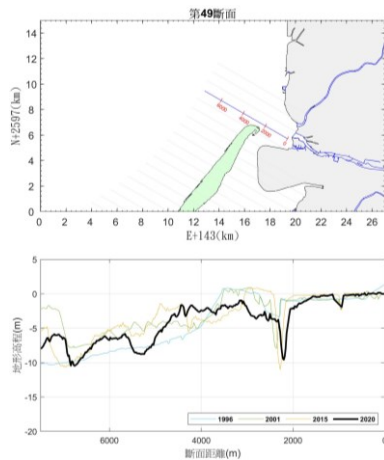


圖 9 外傘頂洲北側(斷面 49)底床高程變化

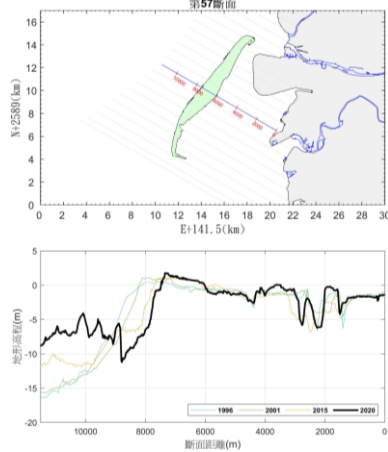


圖 10 外傘頂洲中側(斷面 57)底床高程變化

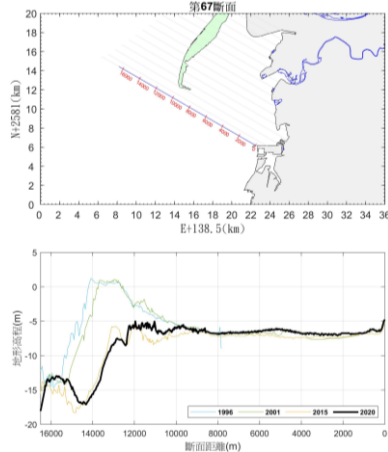


圖 11 外傘頂洲南側(斷面 67)底床高程變化

#### 四、結論

本研究盤點近三十年(1991~2021年)各機關於雲嘉海域進行地形水深監測資料成果，選取量測範

圍空間完整性與時間連續性之監測年度，據以分析時空下雲嘉海域海岸地形變遷特性，包含雲嘉海岸整體海岸與陸側潟湖區域之地形侵淤變化、斷面底床高程變化演進圖，可獲下列結論。1996年~2020年雲嘉海域整體地形變遷趨勢為麥寮港南側區域以淤積現象主導，淤積程度約達10m；麥寮港南側至三條崙漁港間呈現大範圍侵蝕現象，惟麥寮港南側端局部呈淤積現象；三條崙漁港至北港溪口區域呈大幅度侵蝕趨勢，近岸箔子寮沙洲與外海水深10公尺兩處皆呈現淤積現象；近岸侵蝕現象、遠域淤積趨勢。外傘頂洲整體呈現向陸側移動並呈現逆時針旋轉趨勢，其中1984年至2021年沙洲北側端點大約縮短約3.5公里，年平均向南移動速率為95公尺/年；沙洲南側端向東移動約6公里，年平均向東移動速率為162公尺/年。

#### 參考文獻

1. 林銘崇、柯昭綺(1981)，沙灘海岸變化之數值模式，第五屆海洋工程研討會論文集，中國土木水利工程學會，頁419-432。
2. 吳啟南(1990、1991)，遙測資料應用於嘉南地區海岸變遷研究，工研院能資所。
3. 林銘崇、莊文傑(1985)，外傘頂洲地形變遷之研究，土木水利季刊，12卷4期，頁23-39。
4. 顏志偉、張恆文(1999)，外傘頂洲對近岸地形變遷影響之研究，外傘頂洲開發保護聽研討會論文集，頁6-1~6-21，台中。
5. 黃清和(1999)，外傘頂洲地形變遷現場實測，外傘頂洲開發保護聽研討會論文集，頁1-1~1-25。
6. 林宏仁、許泰文、曾以帆(1993)，外傘頂洲海岸變遷機制之研究，第25屆海洋工程研討會論文集，國立台灣海洋大學。
7. 張憲國、陳蔚璋(2005)，以衛星影像探討外傘頂洲的海灘變遷，第二十七屆海洋工程研討會論文集，頁823-830。
8. 張憲國(2017)，應用衛星影像的水線辨識於外傘頂洲的灘線變遷，航測及遙測學刊，22卷4期，頁243-262。
9. 彭等(2019)，運用多時期衛星影像探討外傘頂洲變遷，國土測繪與空間資訊，7卷2期，頁103-119。

# 外傘頂洲長期變遷趨勢模擬之水動力影響 機制分析

盧韋勳<sup>2</sup> 江文山<sup>1</sup> 蕭士俊<sup>3</sup> 卓訓杰<sup>4</sup> 陳盈圻<sup>4</sup> 楊文昌<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水工試驗所研究員

<sup>2</sup> 國立成功大學水工試驗所研究助理

<sup>3</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

<sup>4</sup> 國家海洋研究院研究員

## 摘要

海岸由於過度的開發以及全球氣候變遷影響，改變了近岸之海象條件及沿岸漂砂，致使海岸地形發生了侵蝕問題，其中又以外傘頂洲之流失所造成之衝擊最大，外傘頂洲為台灣最大之離岸沙洲，它為雲嘉海岸之天然屏障，對於沙洲後方產業以及海岸防護皆具有關鍵性的保護作用，如何掌握水文環境變化對沙洲以及周圍海域的地形變化之影響，為本主要探討重點，以往氣候變遷引致海岸風險的研究，長期以來著重於海象條件如海水位上升、颱風增強等變動造成的影響，其前提都是基於海岸地形未變動之假設條件。然而對於台灣西南海域，多為沙質地形，歷年的實測地形顯示其呈現劇烈變動，於此情況下，依照前述的假設所推估得到的海岸風險，非常可能與實際狀況有相當的差異。為了解海岸地形變動對氣候變遷引致海岸災害風險評估之影響，本研究發展一套模擬分析流程，其中包括代表性波浪、潮汐條件分析，氣候變遷水文條件推估，水動力與輸沙模式應用，地形變遷加速因子引入以提升計算模擬效率。引用外傘頂洲歷年的實測地形資料進行模擬的參數調校與驗證。根據調校後的模式，本研究對外傘頂洲的未來變遷，於不同的水動力假設情境條件下，對水文環境對沙洲變化趨勢的模擬探討。

關鍵詞：地形變遷、數值模擬、外傘頂洲

## Simulation and Analysis of coastal morphology Evolution on Waisandingzhou Offshore Barrier Island

Wen-Son Chiang<sup>1</sup> Wei-Shn Lu<sup>2</sup> Shih-Chun Hsiao<sup>3</sup> Hsun-Chieh<sup>4</sup> Cho Ying-Chi<sup>4</sup> Chen  
Wen-Chang Yang<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Researcher, Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

<sup>2</sup> Research Assistant, Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

<sup>3</sup> professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

<sup>4</sup> Researcher, National Academy of Marine Research, OAC

## ABSTRACT

Due to the excessive development along sea and Global climate change, the Conditions of the inshore hydrometeor and floating sand were changed and resulted in the problems of sea shore erosion. The most serious problem is the gradual loss of the Waisanding sandbank island, the largest offshore sand shoal of Taiwan. This sandbank is a nature protective shield of Yunlin-Jiayi coast. It plays a key role in protecting the industry behind the sandbar and coastal protection. How to master the impact of hydrological environment changes on the topographic changes of sandbars and surrounding waters is the main focus of this study. Coastal disaster risk analysis under climate change was generally considered the effects of sea level rising and storm enhancing. In which the coastal morphology was assumed un-changed. However, Taiwanese south-western coast is a sandy beach and previous investigations of the coastal topography indicated that it changed frequently and dramatically due to both nature processes and human activities. So, the pre-assumption of constant topography in previous

risk assessment could be not suitable in the area. To discuss the effect of coastal morphology change on the coastal risk, the research develops a mid-term coastal morphology prediction model. In which the following factors will be included. Typical wave and tide conditions will be analyzed based on historic data. Global circulation model results will be used to drive the wave and surge model. Then, the sea state change will be estimated under climate change. The derived conditions will be applied to a hydrodynamic and sediment transport model. Meanwhile, a morphology acceleration factor was included to improve the computation efficiency. The developed model was tuned and calibrated according to the measured topography data. Then, the verified model was applied to predict the evolution of Waisandingzhou Offshore Barrier Island in the coming years based on vary scenario and results was discussed.

Keywords: coastal topography; numerical simulation; offshore barrier island

## 一、前言

台灣海岸最大的濱外沙洲為外傘頂洲，行政區域隸屬於雲林縣口湖鄉，為一個移動中的國土，其地理位置位於嘉義縣東石外海，正對澎湖列嶼。所在地理位置平均潮差約 2.5m，北側海域靠近濁水溪口潮差較大，南側外傘頂洲海域較小，冬季平均波高約 1.5m，外傘頂沙洲變遷由往昔衛星影像顯示逐年往南且往陸側移動，由影像觀測計算之外傘頂洲面積也逐漸縮減。1993 年外傘頂洲最北端位於太子村外側，其北近緊鄰陸地。至 2013 年影像可見，其沙洲最北側明顯向南方移動侵蝕，因此可推估沙洲北側有向外海移動之趨勢。同時，沙洲最南側位置及形狀每年均有變化，顯示沙洲南側處的地形變化較大。2018 年的資料顯示，外傘頂洲北側已位於北港溪河口中央位置，此時外傘頂洲最北側位置距離太子村漁港已有一段距離。為瞭解近二十年來外傘頂洲海岸線變遷情形，將往昔外傘頂洲量測之水深地形資料，擷取零米線位置進行海岸線套疊，成果如圖 1 顯示自 1984 年起，灘線位置即呈現退縮的趨勢，東半段灘線位置退縮較慢，西半段灘線退縮較快，且越接近沙洲南側之灘線退縮越明顯。在 2013 年以後，外傘頂洲西南部分逐漸分成兩段，且 2014 年以後缺口明顯變大。沙洲灘線變遷速率方面，依據灘線每年平均後退速率分析結果，顯示 1984~2004 年期間，外傘頂洲北岸灘線後退速率小於 100 公尺/年；2004 年以後灘線後退速率開始加快，2013 年以後，因沙洲流失之故，西南端以往露出水面的部份已完全沒入水中。進一步從沙洲灘線資料中，顯示灘線最北端移動每年移動之情形，移動狀況分成東西向移動及南北向移動。整體沙洲北端從 1984~2018 年向南移動約 3200 公尺，每年平

均約 95 公尺。就面積而言於 1984 年，其面積約 3200 公頃；而在 2018 年時，沙洲面積則減為 1400 公頃，至 2021 年剩下 1087。長時間沙洲變化趨勢如圖 2 所示，現階段對外傘頂洲後續變化之研究，主要由衛星影像分析如「外傘頂洲變遷對嘉義海岸防護影響之研究」(2014)，推估外傘頂洲於 2028 年後將不再有零米線以上之沙坵存在，張憲國(2017) 評估 2060 年完全低於平均潮位而淪為潛沒沙洲，錢樺(2019)預測 2048 年後沙洲本體會向鰲鼓濕地淤積。

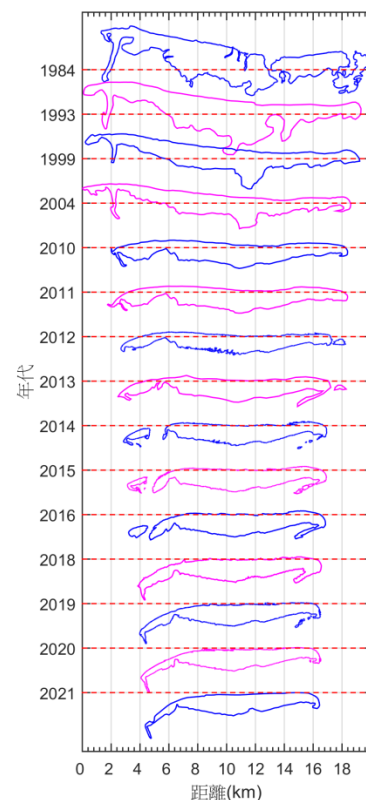


圖 1 外傘頂洲歷年岸線變遷

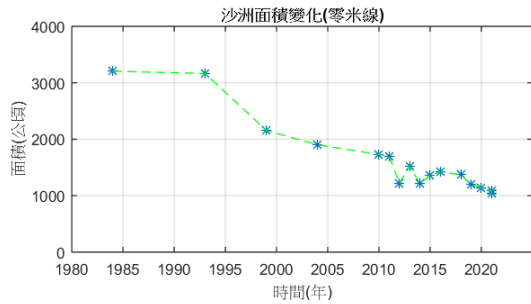


圖 2 外傘頂洲歷年岸線變遷

## 二、研究方法

海岸地形變遷預測基本方法約略可分為以下三種：1. 物理模式(physical model)，根據地形變遷的物理機制，建立數學模型與驅動力的條件，進而計算未來的變化。亦稱之為 bottom-up model，通常應用於工程規劃設計。擴展應用於大尺度長時間預測面臨計算效率低與隨模擬時間增長誤差累積的問題。2. 數據統計分析(data-driven technique)，根據歷史數據，經由統計分析技術如經驗正交函數(EOF)、類神經網路(neural network)與機器學習(deep learning)等技術，進行未來預測，需要累積長時間且高品質的數據。3. 混合模式(hybrid model)，透過物理模式與輸入條件的同時簡化，保留主要的物理機制與代表性的影響條件，進行模擬預測，以達到在合理的時間內掌握重要變動趨勢的目的。鑑於本研究目標在中長期海岸地形變遷預測且實測數據相當有限的條件下，本研究採用混合模式進行後續模擬。

### 1 使用模式

海岸水文與漂沙模式(Coastal Modeling System) CMS，其中包含 CMS-Flow 與 CMS-Wave，CMS-Flow 為 2 維水深平均近岸流場模式，控制方程式採用淺水波方程式，主要解流場以及水位，其外力項可結合波流、底床摩擦、風、浪、河川入流和潮汐作用等，其中搭配多種地形變遷計算模組。CMS-Wave 為基於波動作用守恆之頻譜模式加以改良之模式，主要利用有限差分法解波浪作用力守恆方程式，其可計算物理現象包含波浪淺變、折射、繞射、反射、波流交互作用，波浪破碎，風浪生成，白浪現象以及沿海結構的影響，可分別獨立計算波浪及流場，亦可以耦合計算，本研究同時將波浪以及海流佐以統計後，採用雙向耦合計算，以預測計算外

傘頂洲變遷趨勢。

### 2 條件分析

海岸地形變遷的預測技術，涉及的範圍包括水動力學的驅動力、漂沙的活動機制，甚至生物附著的影響，高度的複雜，難以兼顧所有的機制進行預測，必須適度的簡化而且保留主要的物理特性，即使如此，對於實際問題的長期預測還是耗時過久，必須對輸入的環境條件再進行簡化，才得以在合理可接受的時間內得到預測結果。

#### (1).波浪條件

##### a.長期代表性波浪條件

長期代表性波浪條件主要根據歐洲中期風場的在分析資料(ECMWF)，其資料時間長達 40 年且連續不間斷，有利於分析計畫區長期代表性之波浪特性，計畫擷取外傘頂洲北側約 20m 水深處觀測點之波向以及波高。進行代表性波浪條件分析，首先將波浪資料在時間與波高領域內，依據月份分開數個區塊再根據樁木(1982)之方法計算其代表性波浪，該代表性資料的作用時間則為該區塊內資料個數即發生時間(圖 3)。

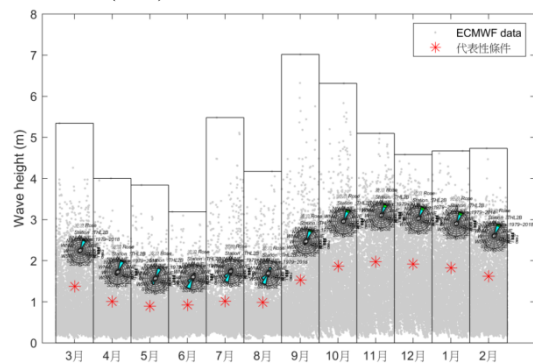


圖 3 外傘頂洲歷年岸線變遷

##### b.極端值代表性波浪條件

首先統計各路徑歷史颱風資料，結果如圖 4，將作用期間之統計資料加以正規畫並利用 Long, Joseph, et al. (2020)之經驗式來設計各颱風路徑下的波浪條件。

$$H(t) = H_s (Dn-t)/b^2 e^{-((Dn-t)/2b^2)} \quad (1)$$

圖 5 為代表性極端值條件結果(以路徑五為例)，據以研究針對不同之代表性極端值條件，計算各種條件地形變化之影響比例，以釐清外傘頂洲變遷之水動力影響機制。

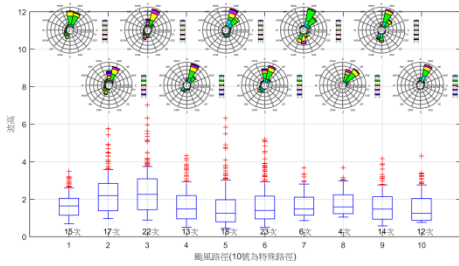


圖 4 外傘頂洲歷年岸線變遷

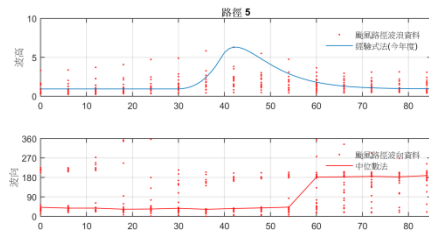


圖 5 代表性極端值條件結果(以路徑五為例)

### (2). 潮位條件

模式邊界潮位首先將研究區潮位資料進行調和分析得到主要的分潮數個，簡化潮位做法在於保持這些主要分潮合成總能量不變的原則下，保留主要分潮 M2 不變，將其餘潮汐成份合成以一個虛擬分潮代表，另外考量到潮流強度與實際流場的吻合程度，虛擬分潮的振幅透過流場率定決定，同時亦考慮季節性平均水位變化。為合理再現實測地形變化，模式中亦考慮由模擬領域邊界補沙的影響。

在前述的分析得到輸入條件後，進一步引用近岸模式 Coastal Modeling System 簡稱 CMS，進行近岸波浪、海流、水位、漂沙傳輸以及地形變遷之整合模擬。經由上述輸入條件的精簡後，本研究模式中使用的環境參數條件如圖 2 所示。

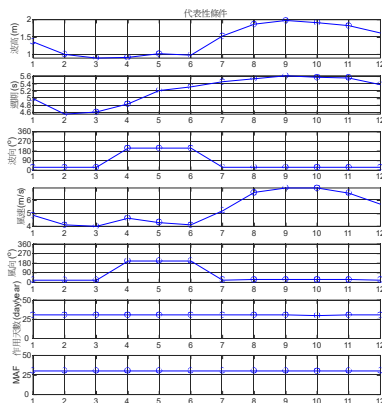


圖 2 模式中輸入的水文參數條件，由上而下分別為波高、週期、波向、風速、風向與地形加速因子

### (3). 輸沙條件

模式中邊界補沙條件係假設一系列不同的加沙量體(詳見表 1)，分別進行模擬計算，採用模擬得到的地形與實測地形之差異來做比對及率定。並透過量化評估地形變遷計算誤差，採用(Murphy & Epstein, 1989)提出之方法來檢核實測資料與模擬資料之吻合程度與偏差量，定義如下：

$$P = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (dz_{b,m,i} - dz_{b,s,i})^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (dz_{b,m,i})^2}$$

$$D = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (dz_{b,s,i} - dz_{b,m,i})$$

其中

$dz_{b,m,i}$ ：代表初始時間與模擬結束時間之期間實測地形的變化； $i$  為網格點。

$dz_{b,s,i}$ ：代表初始時間與模擬結束時間之期間模擬地形的變化； $N$  為總網格點數

當預測準度(P, forecast skill)越接近 1 表示模擬值與觀測值分佈型態越吻合，而偏差度(D, bias)越接近 0 時表示越精確。

表 1 模式驗證中邊界補沙條件

條件	模擬條件說明	
W12T1C106 每年的輸入條件為 12 個，每個波浪條件對應 1 典型潮汐週期，潮流強度係數 1.06	S00	每年從邊界補沙 0 萬方
	S01	每年從邊界補沙 111 萬方
	S02	每年從邊界補沙 222 萬方
	S03	每年從邊界補沙 333 萬方
	S04	每年從邊界補沙 444 萬方
	S05	每年從邊界補沙 555 萬方
S06	每年從邊界補沙 666 萬方	

## 三、地形變遷驗證

本研究模式網格建置分為兩層如圖 3，外層範圍北起濁水溪口南至急水溪南側，沿岸長度約 87 公里，向離岸寬度 50 公里，主要探討水動力的特性；內層則侷限在外傘頂洲的區域範圍，沿岸長度約 39 公里，向離岸寬度約 27 公里，針對地形變遷進行模擬。輸入條件包括圖 2 中的水文環境參數與表 1 中不同的邊界補沙條件。以 2011 年實測的地形作為初始地形進行海岸地形之後數年的地形變遷預測模擬，在不同邊界補沙條件下模擬得到 2014 年的外傘頂洲岸線與實測比較如圖 4，其中最上面的灘線為實測，往下則是不同補沙量條件下模擬得到之灘線，可見外傘頂洲灘線沿續過去近 20 年的變化趨勢持續演進，沿岸沙

洲逐漸變的細長並往南往內陸運移。顯示最大的變化特徵是最西端與本體分裂，此現象可藉由調整模式中不同邊界補沙量合理的再現。模式的表現透過方程式 1 與 2 的量化評估結果如表 2，顯示以單一邊界補沙條件並不能在各年度都得到與實測地形有最好的吻合度與偏差量，說明實際上每年度漂砂量體存在差異。

表 2 地形變遷模擬與實測地形間之吻合度與誤差

年度 條件	102		103		104	
	吻合度(P)	平均偏差(D)	吻合度(P)	平均偏差(D)	吻合度(P)	平均偏差(D)
s00	0.7006	-0.278	0.6335	-0.3372	0.5997	-0.1589
s01	0.7057	-0.2355	0.6381	-0.2754	0.6065	-0.076
s02	0.7047	-0.1902	0.633	-0.2058	0.5848	0.0221
s03	0.6998	-0.1509	0.6305	-0.1449	0.5703	0.1116
s04	0.6958	-0.1053	0.6193	-0.0715	0.5492	0.2037
s05	0.6946	-0.0551	0.6093	0.0015	0.5153	0.3068
s06	0.6902	-0.0179	0.6156	0.0545	0.5268	0.373

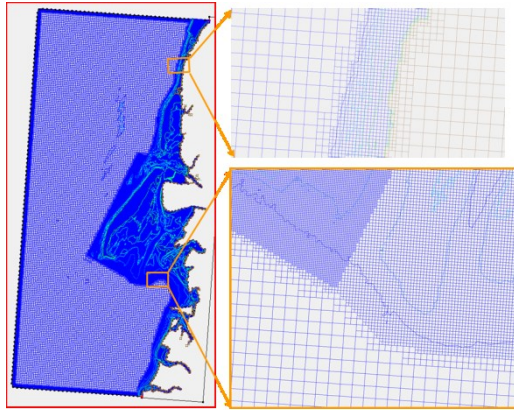


圖 3 海域水動力與地形變遷模擬範圍

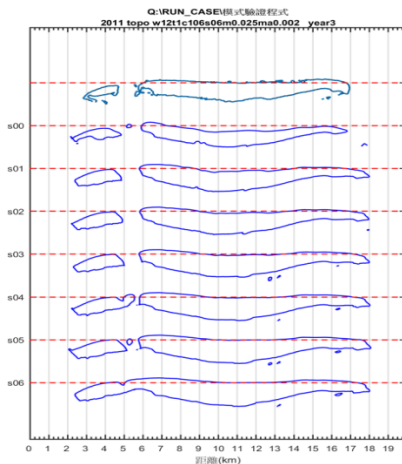


圖 4 不同邊界加沙模擬 2014 年岸線與實測比較，最上方為實測，往下為各種邊界補沙條件的結果

## 四、水動力影響機制分析

### (1). 代表性條件地形變遷機制分析

地形變動的驅動力依照 Davis & Hayes (1984) 的分類屬於混合型態的動力機，為了解各項環境因子造成地形變化量的比重，本研究依據 2020 年 8 月地形為起始條件，模擬預測一年地形變化量的發生機率與考慮不同環境因子影響所模擬得到的整場地形變化量發生率並比較如圖 5。非常明顯單純只考慮波浪地形的變化主要集中於±1m 之間，少數的變化超出上述範圍，最大變動在±2m 之間。考量潮汐影響的地形變化量，變動範圍大幅度±0.5~4m 之間的網格數增加許多，變動量分布於±0.5 間網格數筆存波浪小，且基本上侵蝕與淤積網格數目呈現對稱狀態。如果再考慮波浪與潮汐(流)耦合的效應，則在較大沖淤的部份再次增強，導致最大變動達到±6.0m，變動量分布於±0.5 間網格數目將會再減少，且侵蝕與淤積狀況開始有明顯失衡之情況，其侵蝕情形明顯會大於淤積網格。

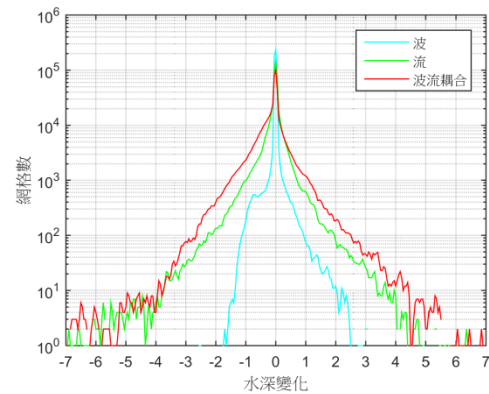


圖 5 波浪及其耦合狀況造成地形變化量比較

### (2). 極端條件地形變遷機制分析

颱風條件：利用中央氣象局颱風警報時間資料，擷取各種不同路徑颱風時段之波浪資料加以統計，如圖 6，將颱風作用期間之統計資料加以正規畫並利用 Long, Joseph, et al. (2020) 之經驗式來設計颱風，

$$H(t) = H_s (Dn-t)/b^2 e^{-(Dn-t)/2b^2}$$

其中  $t$  小時為單位的时间步階， $b$ =尺度因子 (0.17, 0.155, 0.107)， $Dn$ =平均颱風作用期間正規化參數， $H_s$ =颱風期間平均示性波高，單一路徑颱風條件計算結果。各颱風路徑之波浪能量，以及對對外傘頂洲整體所造成的侵淤狀況，量結果如圖 7，就結果而言，路徑 3 之颱風對沙洲區域造成波浪條件

較嚴苛，但是路徑 5 段沙洲侵蝕程度較嚴重。

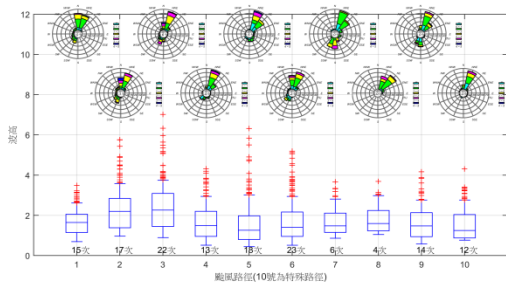


圖6 侵台颱風路徑發生波浪統計(1979~2020)

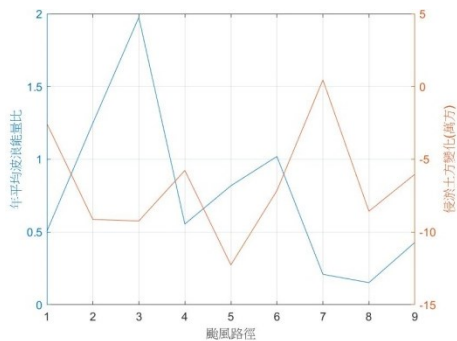


圖7 颱風路徑之波浪能量及整體侵淤狀況

就變動量的絕對值平均，將波浪以及海流分開計算結果，全年度波浪的影響約佔整體變化量的 8%，潮汐與潮流則佔 52%。前述的分析顯示外傘頂洲周圍海域每年波浪造成的侵淤變化介於 2.0m 範圍內且主要影響範圍在水深 7m 以淺。

## 五、結果與討論

就結果而言潮汐與潮流則佔整年度地形變化量 52%，因此於防護策略需再加強如何針流場以及養灘策略思考，從沙洲自然演替的角度來看，在海岸水文作用力沒改變的情況下，要能持續維持沙洲規模，那足夠沙源的供應就是必要的條件，然而觀諸過去近 40 年的海岸地形變遷，可以發現從 1984 至 2004 年期間沿岸沙洲的變化相對較為緩和，2004 年之後則快速侵退。亦即，現在的環境條件下期望透過自然的過程將足夠的沙源補充到雲林沿海近岸乃至外傘頂洲已經是不可能。

## 六、結論

本研究針對大區域海岸地形，考量到時間上計算模擬效率，建立中長期(數年)變遷的預測技術。模式中考量到代表性波浪、潮汐條件分析，氣候變

遷引起環境參數改變、海平面上升及輸沙條件影響等因素對海岸變遷影響。同時以 2011~2015 年的地形進行模式驗證，顯示在考慮不同邊界補沙情況下可以合理再現實測的外傘頂洲灘線變化。對於未來的變化預測可見於無人為介入的情況下，未來外傘頂洲的變遷將延續過去數十年的持續侵蝕，其中最外海側即西南端部分將先與沙洲本體分裂並逐漸縮減沒入海平面以下。同時沙洲整體將呈現北側侵蝕南側淤積現象，沙洲的最東端即靠近北港溪口部分亦將往海側退縮。前述的總體結果露出海平面以上的部分沙洲面積持續縮小。

由水動力影響機制分析結果顯示，外傘變動為海潮流與波浪共同作用下之結果，雖然波浪作用為沙洲侵蝕之關鍵因素，但其中海潮流大部分影響，屬於一個區域整體性的變化，針對小區域之防護策略需再檢討，並從整體海岸漂補償等大戰略思考。

## 謝誌

本論文係國家海洋研究院「外傘頂洲侵退防治技術開發與策略建構計畫」計畫案之部分研究成果。

## 參考文獻

1. 經濟部水利署第五河川局(2014~2015)「外傘頂洲變遷對嘉義海岸防護之影響分析研究」(1/2)、(2/2)。
2. 經濟部工業局(2019)「雲林離島式基礎工業區整體開發規劃委託技術服務」。
3. 張憲國(2017)「應用衛星影像的水線辨識於外傘頂洲的灘線變遷」，*航測及遙測學刊*，22 卷 4 期，第 243 – 262 頁。
4. 錢樺(2019)「運用多時期衛星影像探討外傘頂洲變遷」，*國土測繪與空間資訊*，7 卷 2 期，第 103 – 119 頁。
5. 榎木亨(1982)*漂沙と海岸侵蝕*，森北出版株式會社，日本。
6. Murphy, A. H. & Epstein, E. S. (1989). Skill scores and correlation coefficients in model verification. *Mon. Wea. Rev.*, 117: 572–581.



## 林口電廠鄰近海岸侵淤成因探討

吳芬華<sup>1</sup> 許國強<sup>1</sup> 陳榮華<sup>2</sup> 方聖荼<sup>2</sup> 何家榮<sup>2</sup> 江文山<sup>3</sup> 許泰文<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中興工程顧問股份有限公司

<sup>2</sup>台灣電力公司 林口發電廠

<sup>3</sup>國立成功大學水工試驗所

<sup>4</sup>國立臺灣海洋大學

### 摘要

為維繫自然系統、確保自然海岸零損失、因應氣候變遷、防治海岸災害與環境破壞、保護與復育海岸資源、推動海岸整合管理，並促進海岸地區之永續發展，特制定海岸管理法確保海岸地區之管理。為達到整體海岸管理目的。依據 106 年 2 月 6 日公告之「整體海岸管理計畫」，國土海岸侵淤熱點共分 13 組。其中林口電廠屬臺北港周邊海岸段為二級海岸防護區，應釐清各海岸段之侵淤成因，並提出因應措施。全計畫經由歷史地形資料、地形變遷數值模擬與漂沙水工模型試驗分析成果，就海岸結構物開發歷程之地形變化、海岸結構物興建前後地形變遷、現況影響機制進行研究，評估林口電廠導流堤興建後之影響範圍與機制。經由三大領域之研究成果，將各海岸段之地形變化趨勢與成果，林口電廠導流堤自興建後，其影響範圍為二期灰塘至新北桃園市界。

關鍵詞：地形變遷、海岸侵淤

## Discussion of the Causes of Seabed Morphology Change near the Coast of Linkou Power Plant

Fen-Hua Wu<sup>1</sup> Kuo-Chiang Hsu<sup>1</sup> Rong-Hua Chen<sup>2</sup>

Sheng-Fen Fang<sup>2</sup> Chia-Jung Ho<sup>2</sup> Wen-Son Chiang<sup>3</sup> Tai-Wen Hsu<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Sinotech Engineering Consultants Inc

<sup>2</sup> Taiwan Power Company Linkou Power Plant

<sup>3</sup> Tainan Hydraulics Laboratory NCKU

<sup>4</sup> National Taiwan Ocean University

### ABSTRACT

To maintain the natural system, respond to climate change, prevent coastal disasters and environmental damage, protect coastal resources, promote coastal integrated management, and promote the sustainable development of coastal areas, the Coastal Management Law is formulated to ensure the coast Management of the region. According to the "Overall Coastal Management Plan" announced on February 6, 106, there are thirteen groups of hot spots for coastal erosion that should be clarified the erosion causes. Linkou Power Plant is around Taipei Port and one of thirteen erosion groups Through historical seabed measurement data, numerical simulations, and hydraulic model test analysis, the whole project studied the seabed morphology changes during the development of coastal structures and the impact mechanism from the diversion dike of the Linkou Power Plant. Finally, after the construction of the diversion dike of the Linkou Power Plant, the impact range is from the second phase of the ash pond to the city boundary of Taoyuan, New Taipei.

Keywords: seabed morphology change; erosion

## 一、前言

依據 106 年 2 月 6 日公告之「整體海岸管理計畫」，國土海岸侵淤熱點共分 13 組。其中林口電廠屬臺北港周邊海岸段為二級海岸防護區，應釐清各海岸段之侵淤成因，並提出因應措施。爰此，本研究計畫除釐清海岸變遷與所屬海岸設施有無直接關聯及研擬因應策略之外，並作為二級海岸防護計畫內後續海岸防護相關事務、因應作為及權責分工等事項之依據。

## 二、研究方法

本研究以歷史地形資料、地形變遷數值模擬與漂沙水工模型試驗分析成果，就海岸結構物開發歷程之地形變化、海岸結構物興建前後地形變遷、現況影響機制進行研究，評估林口電廠導流堤興建後之影響範圍與機制。計畫範圍為林口電廠、臺北港及周邊人工構造物等之海岸段(全長約 11 公里)，如圖 1 所示。

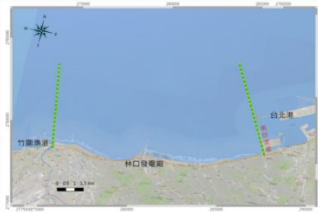


圖 1 林口電廠服務研究工作範圍

### (一) 歷史資料地形侵淤分析

一般評估海岸段之侵淤變化，均已量體分析為評估依據。量體減少為侵蝕，量體增加為淤積。本計畫依據 85 年~108 年地形測量資料，以水利單位監測斷面為基礎，進行海岸段歷年量體區塊化分析。分析範圍為高程 3m 至漂沙帶終端水深-7m，以 0m 岸線為界，高程 3m 至 0m 岸線為高灘地量體，0m 岸線至漂沙帶終端水深-7m 為水下漂沙量體。計算各區塊歷年量體變化如圖 2 所示。本區海岸段量體變化隨海岸構造物開發有較大相關性，特別為高灘地的變化。林口電廠導流堤自 101 年興建並於 106 年完工，而量體 V19 與量體 V22 高灘地量體變化略呈現侵蝕現象，量體 V23 則呈現淤積現象，且 107 年與 108 年變化持平(如圖面紅色圓圈)。而量體 V19 與量體 V22 水下漂沙量體亦呈現侵蝕趨勢，量體 V23 呈現淤積現象。一般而言，灘岸受海岸構造物

開發影響，於影響交界處之上下游會產生量體變化反轉現象，如無受影響，則量體變化一致，一同侵蝕或一同淤積。因此由量體 V19 與量體 V22 之侵淤變化一致與幅度來看，故研判林口電廠導流堤完工後影響範圍未達寶斗溪口，而量體 V23 呈現淤積主要為量體 V19 與量體 V22 之侵蝕量體往量體 V23 移動。進而研判本海岸段逐漸形成岬灣變遷型態，顯示此海岸段已逐漸形成一小型漂沙單元。

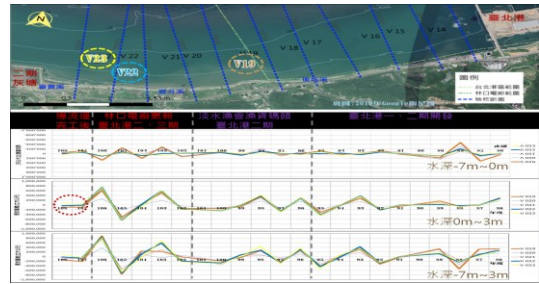


圖 2 林口電廠東側海岸段歷年海岸量體分析

另計算林口電廠西側各區塊歷年量體變化如圖 3 所示，其中西南側海岸段之量體為 V31~量體 V33。林口電廠導流堤自 101 年興建並於 106 年完工，各海岸段於施工期間，侵淤變化均有增減。完工後量體 V31 至量體 V33 水下量體變化呈現淤積現象，而高灘地量體變化亦呈現淤積現象，整體而言，量體 V31 至量體 V33 高灘地與水下漂沙量體變化均呈現淤積現象，顯示本海岸段自林口電廠導流堤完工後呈現淤積趨勢。

就長期變遷趨勢而言，依據各年分海岸線變動情況，林口電廠東側海岸段之 0m 岸線變動，隨臺北港建置歷程，岸線變遷呈現為侵退、侵退外推互現情形，與電廠海岸構造物建置之相關性較低。而林口電廠出水口至南崁溪海岸段，因北防波堤建置，TS031~TS033 海岸段受遮蔽，而形成岸線外推趨勢。北防波堤之影響範圍僅至新北桃園市界。

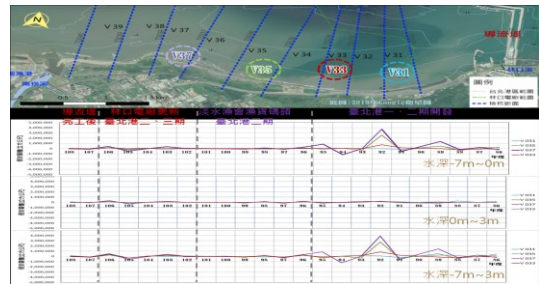


圖 3 林口電廠西南側海岸段歷年海岸量體分析

(二) 海岸地形變遷機制分析

本計畫以 MIKE21 HD 二維水動力模式，搭配 SW 模組及 ST 模組採波流耦合進行模擬及分析，以釐清海岸地形變遷機制，林口電廠鄰近海岸主要以砂質型態為主，因此海岸地形變遷以動態輸砂狀態研究(Dynamic)分析為主軸。

1.環境背景資料採用評估

(1)歷年地形水深資料

本計畫以 85 年地形資料作為海岸構造物開發前之地形基礎。另因林口電廠導流堤於 106 年 8 月完成，故以 106 年 7 月及 11 月之地形資料建置數值模式驗證之模型，如下表 1。考量分析時為避免邊界效應，故計算範圍需大於關切範圍，因此範圍內地形水深值不足之處，則以 MIKE21 C-map 地形水深資料庫進行補充。

表 1 地形水深資料說明

資料來源	施測年份	施測範圍	平面系統	高程基準	備註
交通部港研中心	85 年 10 月	淡水沙崙~林口溪；測量至-23m，距岸約 3 km	TWD67	淡水港築港高程 (EL.+1.43) / 中潮系統	海洋營力分析之用
	106 年 7 月/ 11 月	淡水沙崙~南崁溪南岸；測量至-25m，距岸約 5 km	TWD67/ TWD97	臺北港築港高程 (EL.+1.43) / 中潮系統	數值模式驗證之用
	108 年 7 月	淡水沙崙~南崁溪南岸；測量至-25m，距岸約 5 km	TWD67/ TWD97	臺北港築港高程 (EL.+1.43) / 中潮系統	數值模式驗證

(2)水位資料

本計畫進行季風情境模擬時，以平均潮位作為初始水位。而颱風情境則以一般海工構造物之使用年限與設計重現期進行考量，以估算每年遭遇機率為 99.5%以上重現期為 10 年颱風暴潮位做為考量。

(3)波浪資料

依據本計畫地區環境特性，季風波浪採用前章統計資料依季節分類整理如下表 2；颱風時期則採 10 年重現期颱風波浪如下表 3，作為後續模式之輸入資料。

表 2 計畫區冬夏季季風波浪

季節	Hs(m)	Tp(s)	波向
冬季(12~2月)	1.49	6.9	N
夏季(6~8月)	0.66	5.6	W

表 3 計畫區域外海 10 年重現期颱風波浪

波向 項目	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE
Hs(m)	5.4	6.4	7.4	8.4	7.7	6.6
Ts(sec)	9.78	10.62	11.45	12.17	11.67	10.78

(4)流量與輸砂量資料

淡水河及南崁溪為計畫區海岸主要輸砂源，故淡水河及南崁溪流量採 2 年與 10 年重現期，其中 2 年重現期流量遭遇機率已達 99.9%以上，故作為季風時期之流量輸入，而輸砂量則採年平均輸砂量。如下表 4 所示。

表 4 河川流量與輸砂量

河流	流量(cms)		年均輸砂量
	季風	颱風	
淡水河	6,800	13,800	320.0 萬 m <sup>3</sup>
南崁溪	554	1,081	58.7 萬 m <sup>3</sup>

(5)漂沙粒徑

參考本計畫海岸底質調查粒徑與淡水河輸砂粒徑，以 D<sub>50</sub> 粒徑為 0.25mm 輸入。

2.模擬範圍

MIKE21 HD、SW 及 ST 模組皆是以非結構網格建置，並於海岸結構物鄰近海域地形加密網格，網格最小尺度採 20m，針對林口電廠鄰近海域以 3 層巢狀網格佈置，隨開放海域之距離變化而加大，建立之地形模型範圍涵蓋臺北港及林口電廠，範圍共約 23kmx6km，網格建置成果如圖 4。

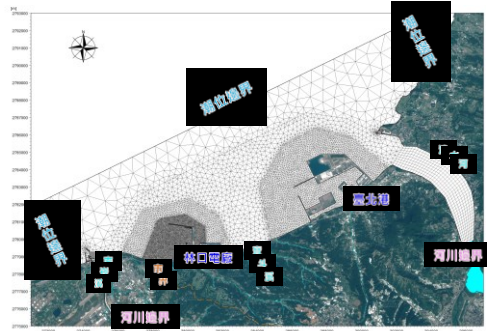


圖 4 網格建置成果

3.模式驗證

(1)流場驗證

潮流驗證係以平均潮位並於開放邊界加入天文調和潮位，定點潮位及流場模擬成果如圖 5 所示。由潮位驗證成果來看，實測潮位與模擬成果之潮型與潮差變化雷同，就流速驗證來看，流速峰值與流向變化趨勢相似，由整體流場模擬成果研判，模擬時序列與監測結果之變化趨勢大致相符，可符合本

計畫之流場模擬需求，後續將以此模組進行海岸變遷機制之流場模擬。

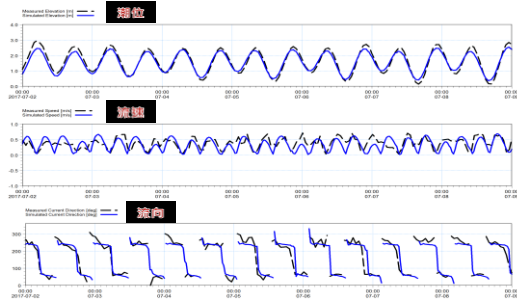


圖 5 潮流場模擬與實測值比較圖(黑虛線為實測值；藍線為模擬值)

## (2)長期地形變遷驗證

本計畫主要探討電廠導流堤對於鄰近海岸之影響，以高灘地 3m 至-7m 水深之近岸水域作為本計畫關切之重點區域。

由圖 6 為實測之 106 年 7 月與 106 年 11 月地形變化，可發現臺北港航道及林口電廠卸煤碼頭港池水域皆有因浚挖而成之地形變化，於近岸區域呈現侵蝕現象，對照圖 7 為本計畫 106 年 7 月至 106 年 11 月之短期海岸地形變遷數值模擬成果，於高灘地 3m 至-7m 水深之近岸水域，亦為呈現侵蝕，與實測情形相符。

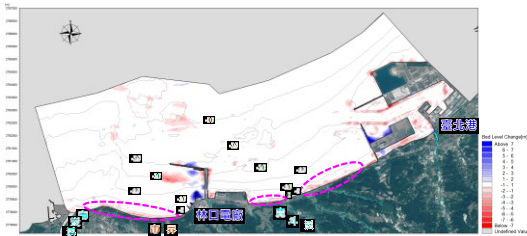


圖 6 鄰近實測海岸地形變遷(106/11-106/07)

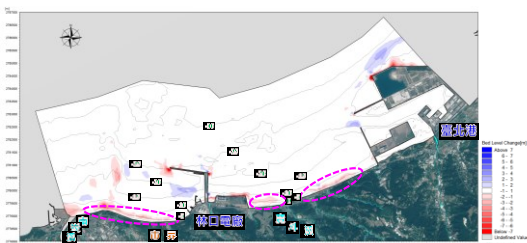


圖 7 鄰近海岸地形變遷模式驗證(106/11-106/07)

另圖 8 為實測之 106 年 7 月與 108 年 7 月地形變化，不考慮臺北港航道及林口電廠卸煤碼頭港池

水域皆有因浚挖而成之地形變化，對應圖 9 為本計畫 106 年 7 月至 108 年 7 月之長期海岸地形變遷模擬成果，依據成果可知自臺北港南堤至二期灰塘海岸段近岸呈現侵蝕趨勢，二期灰塘東側為淤積，與實測相符。而電廠進水口以西海岸段呈現淤積現象，市界至南坎溪口海岸段主要地形變化為近岸侵蝕遠岸淤積之向離岸變化趨勢，與實測雷同。

綜合上述，就短期季節變化及長期地形變遷驗證成果來看，本計畫地形變遷驗證成果與實測地形侵淤變化相符，故所用之參數符合本計畫之地形變遷模擬需求，後續將以相關參數進行海岸變遷機制及方案地形變遷之模擬。

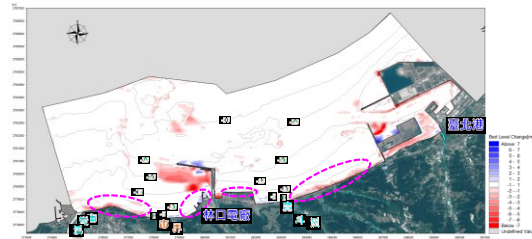


圖 8 鄰近實測海岸地形變遷(108/07-106/07)

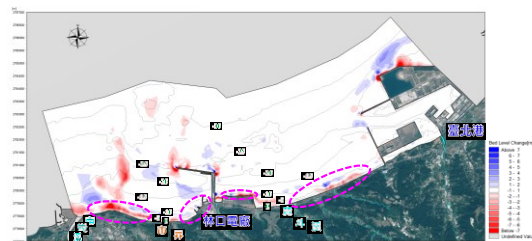


圖 9 鄰近海岸地形變遷模式驗證(108/07-106/07)

## 4.海岸結構物開發情境模擬及影響分析

### (1)模擬方案說明

海洋營力之探討將以不同情境分析林口電廠與周遭海岸地形變遷之關係，而情境方案係以季風及颱風條件搭配，如下表 5 所示，再依據各不同情境研擬評估方案如表 6 所示。本計畫以 85 年之地形水深資料為基礎，進行有無海岸結構物設施影響之情境研析時，僅依不同情境分別設置結構物外廓設施範圍之地形水深資料。

### (2)季風期分析

本計畫季風期間主要以東北季風期間為主要影響。依各種情境分析不同評估方案成果如圖 10 所示。

表 5 林口電廠周邊海岸結構物開發

情境	說明
情境零	海岸有臺北港和林口電廠灰塘及出水口導流堤等結構物
情境一	海岸無臺北港，但有林口電廠灰塘及出水口導流堤等結構物
情境二	海岸有臺北港，但無林口電廠灰塘及出水口導流堤等結構物
情境三	海岸無臺北港和林口電廠灰塘及出水口導流堤等結構物

表 6 林口電廠周邊海岸結構物不同情境影響分析

方案	情境	說明
方案一	情境零-情境一	情境零與情境一差值評估臺北港對地形之影響
方案二	情境零-情境二	情境零與情境二差值評估林口電廠灰塘對地形之影響
方案三	情境零-情境三	情境零與情境三差值評估臺北港與林口電廠灰塘地形之綜合影響

方案一主要評估臺北港對於近岸地形之影響，由圖可知，波浪受到臺北港防波堤遮蔽，波浪影響範圍未達寶斗溪口；而臺北港南防波堤與二期灰塘海岸段近岸-7m 等深線以淺地形呈現以向離岸侵蝕淤積互現變化趨勢，推估地形變化受到波浪影響成分較大。另電廠進水口以南海岸段地形變化不顯著。

方案二為評估電廠導流堤對於近岸地形之影響，由圖可知，出水口導流堤以西波高降低，影響範圍為西南側海岸；而出水口導流堤東、西側流速降低，影響範圍包含西南側海岸與二期灰塘海測水域。而臺北港南防波堤與二期灰塘海岸段近岸-7m 等深線以淺地形呈現以淤積變化趨勢。電廠進水口西南海岸段呈現淤積變化。

另由方案三來看，比較方案一與方案二，電廠進水口西南海岸段，林口電廠導流堤構建前後均有顯著變化。而臺北港南防波堤與二期灰塘海岸段近岸-7m 等深線以淺地形變化與方案一雷同，呈現向離岸侵蝕淤積互現變化。可知在臺北港興建後，再納入林口電廠導流堤構建時，方案三變化趨勢與方案一雷同，此處海岸段在冬季季風時期受 N 向波浪之地形變化推估地形變化主要受波浪影響成分較大。

### (3) 颱風期分析

颱風情境下以不同波向地形變遷差異分布如圖 11~圖 12 所示，圖中輪廓底色藍色色階為正值，代表有開發構造物時較無開發構造物時之值為大；紅

色色階為負值，代表有開發構造物時較無開發構造物時之值為小。

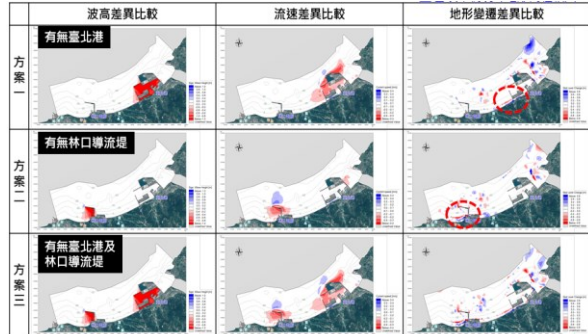


圖 10 林口電廠鄰近海岸冬季季風時期波高、流速與地形變遷差異比較

由方案一可知臺北港構造物興建後，於 N、NNE、NNW、NE 颱風波浪情境下，南北防波堤外側流速降低，南防波堤至二期灰塘海岸段有淤積現象。而於 NW、WNW 颱風波浪情境下，南防波堤外側流速降低，南防波堤至二期灰塘海岸段地形變動不顯著。

由方案二可知林口電廠構造物興建後，於 N、NNE、NE 颱風波浪情境下，港池南側流速減小，港池南側有淤積現象；而於 NNW、NW、WNW 颱風波浪情境下，卸煤碼頭港池內及電廠出水口導流堤以東波高降低，電廠出水口導流堤東側流速降低，電廠出水口導流堤以東之地形將有侵蝕現。

由方案三可知臺北港及林口電廠構造物興建後，於颱風時期之波場、流場及地形變遷為大致為方案一與方案二之疊加成果。

綜合前述分析，於季風及颱風情境下之模擬成果，可發現計畫區主要受 N 向波浪營力之影響。而臺北港與林口電廠之構造物對近岸波高與流場，無明顯相互作用之關係。而針對南防波堤至二期灰塘近岸海岸段地形變遷與臺北港開發有高度相關，而林口電廠導流堤影響範圍推估為二期灰塘範圍，未達寶斗溪口。而電廠進水口西南海岸段之海岸地形變化主要受林口電廠導流堤構建影響。

整體而言海岸結構物開發之影響分析來看，自林口電廠東側海岸段(臺北港南防波堤與二期灰塘海岸段)近岸-7m 等深線以淺地形之變化，因臺北港擴建，而漂沙活動減緩，與電廠導流堤構造物相關性較低。電廠導流堤構造物影響範圍主要在二期灰

塘海側水域。另外電廠進水口西南側海岸段之海岸地形變化主要受林口電廠導流堤構建影響，漂沙活動減緩，其影響範圍則無超過市界。

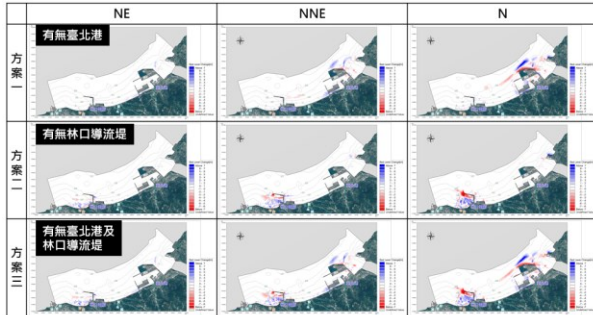


圖 11 林口電廠鄰近海岸颱風時地形變遷差異比較 (NE、NNE、N 波向)

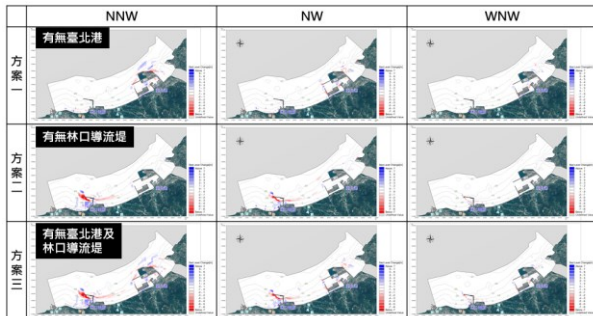


圖 12 林口電廠鄰近海岸颱風時地形變遷差異比較 (NNW、NW、WNW 波向)

### 5. 海岸漂沙水工模型試驗

經水工模型試驗模擬現況實際受長期季風作用下，林口電廠二期灰塘外圍出現明顯淤積現象；灰塘東側區域則有明顯侵蝕現象，在灰塘西側與導流堤水深-5m 至 0 m 附近之區域則由些微侵蝕至逐漸出現淤積。自市界至進水口及導流堤之間為明顯淤積現象，自蘆竹海岸段與林口電廠北防波堤頭外緣間區域水深-10m 至-15m 之範圍逐漸有淤積現象出現，並出現-2m~2m 之變動量。

## 三、結論

綜整上次研究成果，將各海岸段之地形變化趨勢與成果，說明如表 7 所示，並整理如圖 13。林口電廠導流堤自興建後，其影響範圍為二期灰塘至新北桃園市界。

表 7 林口電廠鄰近海岸影響說明表

海岸段方式	蘆竹海岸	林口電廠西南海岸	二期灰塘	林口電廠東側海岸
歷史地形	侵蝕 / 海洋營力	淤積 / 導流堤	-	自成漂沙小系統 / 臺北港
數值模擬	侵蝕 / 海洋營力	淤積 / 導流堤	外海淤積 / 堤前侵蝕	侵淤互現 / 臺北港
水工試驗	侵蝕 / 海洋營力	淤積 / 導流堤	外海淤積 / 堤前侵蝕	-



圖 13 林口電廠鄰近海岸影響說明圖

## 謝誌

本研究感謝台電公司長官們協助，同時也感謝海洋大學翁文凱教授協助辦理水工試驗與周俊邦工程師協助計畫事務。更承蒙海洋大學、成大水工所與審查委員們之大力幫忙，結合業界與學界力量，加上業主的鼎力支持，使本計畫得以順利完成。

## 參考文獻

- 交通部運輸研究所「2018 年港灣海氣象觀測資料統計年報(臺北港域觀測海氣象資料)」，109 年。
- 水利署第十河川局「淡水河口輸砂對鄰近海岸之影響評估」104 年
- 水利署「桃園縣管河川南崁溪水系治理規劃報告(南崁溪本流檢討)」98 年。
- 水利署水利規畫試驗所「海岸開發對防護設施之影響及補償措施研究」107 年
- 水利署第十河川局「台北海岸防護整合規劃」108 年
- Leo C. van Rijn, Principles of sedimentation and erosion engineering in rivers, estuaries and coastal seas, 1998.
- B Mutlu Sumer and JÅ,rgen FredsÅ,e, The Mechanics Of Scour In The Marine Environment, World Scientific Publishing Company.

# 以漂沙潛勢變化探討臺北港興建對鄰近海域之影響

洪維屏<sup>1</sup> 黃瑋華<sup>2</sup> 郭少谷<sup>2</sup> 賴彥廷<sup>2</sup> 朱志誠<sup>3</sup> 陳蔚璋<sup>4</sup>

<sup>1</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

<sup>2</sup>台灣世曦工程顧問股份有限公司工程師

<sup>3</sup>台灣世曦工程顧問股份有限公司技術經理

<sup>4</sup>國立陽明交通大學土木工程學系博士後研究員

## 摘要

隨著臺北港近年之開發過程，淡水河口鄰近海岸有不同之演變，建港前淡水河口南岸之海岸地形變遷屬於侵蝕型態，然建港後受外廓防波堤攔砂之影響，淡水河口南岸至臺北港北堤海岸逐漸轉變為淤積趨勢，故為瞭解臺北港興建對於鄰近海域地形變遷之影響，本計畫利用歷年實測水深資料與遙測影像資料，針對臺北港鄰近海岸進行實測海岸變化趨勢分析及遙測影像岸線變遷分析等相關評估作業，並輔以 MIKE 21 數值模式進行漂沙潛量分析，以瞭解臺北港建港後對鄰近地形變遷之影響。

由分析結果可知，臺北港興建阻擋沿岸流及潮流之漂沙路徑，造成臺北港上、下游水域之水動力特性有重大流況變化，大致而言，淡水河口南岸至臺北港北堤海岸受外廓堤影響，減弱由南往北及由北往南之輸沙能量，故該段海岸由侵蝕轉為淤積現象；而臺北港南堤至林口電廠海岸建港前受近岸漂沙潛勢旺盛影響呈現侵蝕現象，建港後其遠岸潮流受外廓堤部分阻隔由南往北之輸沙，並在近岸因形成反向渦流使漂沙潛勢減弱，再加上沿岸流受遮蔽效應減弱由北往南之漂沙潛勢雙重影響下，近岸輸沙能量明顯減弱造成此段海岸侵蝕減緩，惟減緩趨勢越往南側越小。故以海岸保護觀點而言，臺北港興建對鄰近南、北側海岸皆有正面效益。

關鍵詞：臺北港、地形變遷、MIKE 21、岸線變遷、遙測影像

## Analysis of Coastline Changes and Coastal Topographic Features at the Sea Area Adjacent to Taipei Harbor

Wei-Ping Hung, Wei-Hua Huang\*, Shiao-Ku Kuo, Yen-Ting Lai, Jyh-Cheng Chu, Wei-Wei Chen

\* Engineer, Department of Harbour and Coastal Engineering, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

## ABSTRACT

With the development of Taipei Port in recent years, the near shore of the Tamsui estuary has evolved differently. In order to understand the impact of the construction of Taipei Port on the topographic changes of the adjacent sea areas, this study uses the measured water depth data and satellite telemetry images over the years to carry out related evaluations such as the analysis of the measured coastal variation trend and the shoreline changes of the telemetry images for the coast near Taipei Port. In addition, MIKE21 numerical model is used to analyze the drift sand potential.

The study results show the construction of Taipei Port has caused significant changes in the nearshore current field and sediment transport mechanism. Generally speaking, the north bank of Taipei Port is affected by the outer breakwaters, which weaken the sediment transport capacity, and the coast of this section has changed from erosion to siltation. On the south bank of Taipei Port, the coastal erosion of this section has been slowed down, but the slowing trend becomes smaller as it goes to the south. Therefore, from the viewpoint of coastal protection, the construction of Taipei Port will have positive benefits for both the adjacent south and north coasts.

## 一、前言

臺北港位於新北市八里鄉訊塘村濱海，自民國 82 年起開工建港，為滿足港埠運能需求，近 20 餘年陸續推動各期工程擴建計畫，而為因應此類港埠興建後造成鄰近海域複雜之水利及輸沙行為變化，本研究將針對臺北港鄰近海岸(分析範圍自淡水河口南岸至林口電廠，詳圖 1 所示)進行實測海岸變化趨勢分析及遙測影像岸線變遷分析等相關評估作業，並輔以數值模式進行漂沙潛量分析，以瞭解臺北港建港後對鄰近地形變遷之影響。



圖 1 計畫區範圍示意圖

## 二、文獻回顧

本研究為瞭解臺北港鄰近海岸地形之變遷，茲蒐整範圍內之相關文獻並摘述其研究成果，以作為本研究之參考依據。

依據台灣電力公司報告(1999)，在民國 76 年~79 年間淡水河口南岸至寶斗溪屬侵蝕海岸，而寶斗溪至林口煤港西側海岸則呈現淤積。另在淡水港附近區域因海岸棄土之影響形成人為淤積現象。

第十河川局(2015)曾研究以艾利颱風為例，在短期作用下，配合石門水庫防淤操作策略情境分析，改變上游來砂量分析結果，其對於淡水河口之地形變化影響甚微。

基隆港務分公司報告(2020)指出，臺北港建港後的影響以北堤攔沙附近淤高為主，就無因次的平均淤沙變化比例而言，河口區域建港後的平均淤沙變化比例依不同建港階段為二期完工後 28.0%、現況完工後 27.9%、全期完工後 25.5%。

根據經濟部水利署(2019)進行之平面侵淤分析

結果顯示，在淡水河口南岸至臺北港北防波堤海域，建港後之總侵淤量較建港前增加，顯示建港後本區域海域有持續淤積之情況；在臺北港至林口電廠海域，建港後之總侵淤量較建港前減少，顯示建港後本區域海域雖有持續侵蝕，但有減緩之情況。

## 三、地形侵淤特性分析

### 3.1 歷年海岸分區侵淤量分析

有鑑於本研究區建港前之地形實測資料有限，茲參考台灣電力公司民國 88 年「林口電廠第二期灰塘工程規劃」，以臺北港建港前(民國 76 年 5 月及民國 79 年 5 月)之水深測量資料，依據六個不同分析區域(如圖 2 所示)，歸納出研究區建港前之地形侵淤趨勢，如圖 3 所示。由圖可知，在臺北港尚未興建前，除淡水河口南岸至瑞樹坑溪間(樁號 TS01~樁號 TS20)海岸呈現侵蝕外，其餘林口灰塘鄰近海域則呈現淤積現象。另在淡水港外海(樁號 TS06~TS09)所呈現之局部淤積現象可能係因人為棄土行為所致。

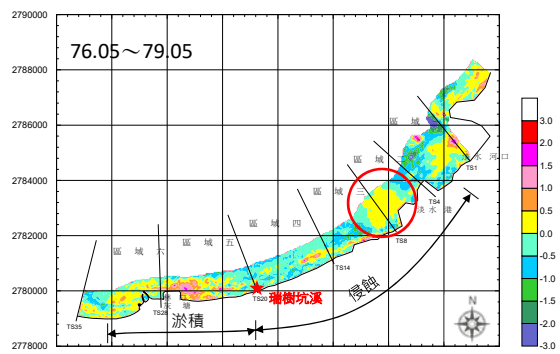


圖 2 臺北港興建前海岸侵淤分布之分區示意圖

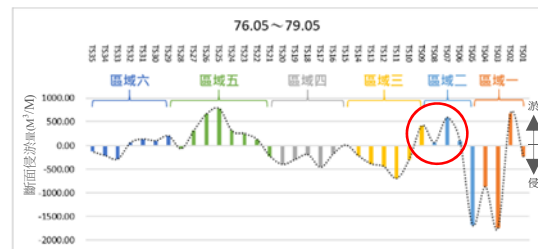


圖 3 臺北港興建前各分析區域之平均斷面侵淤量

為探討臺北港自民國 82 年興建後鄰近海域水深變化趨勢，本節將針對過往(民國 85~109 年)地形實測資料進行平面侵淤分析。在空間方面，將研



究區沿岸方向依海岸結構物及河口分布，由北往南分為九區(分區 A~I)，而離岸方向則從 0m 灘線起向海側距離 3.5km 止(約為-20~-25m 等深線)作為邊界，其範圍及架構詳圖 4 所示。

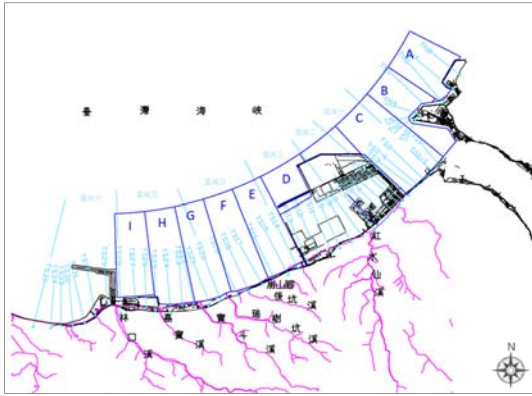


圖 4 臺北港興建前、後海岸侵淤分布之分區對照圖

並選用民國 85 年 10 月之水深資料作為基期，並以民國 86~109 年逐年水深資料統計各分區之侵淤趨勢，分析結果如圖 5 所示。由圖可知，淡水河口北岸至臺北港域範圍自外廓堤興建後阻斷輸沙路徑，造成此區海岸大致由侵蝕轉為淤積，而在臺北港南堤至林口電廠海岸，惟分區 G 維持與建港前之侵蝕現象一致，其餘區域皆發生侵淤狀況轉換情形，其中分區 E、H 及 I 由淤積轉為侵蝕，而分區 F 則由侵蝕轉為淤積，初步研判分區 E 受港口航道人為浚深影響所致，分區 H 及 I 可能與臺北港及林口煤港等外廓結構物阻斷輸沙路徑有顯著關聯，而分區 F 則受南防波堤影響，有局部淤積情形發生。

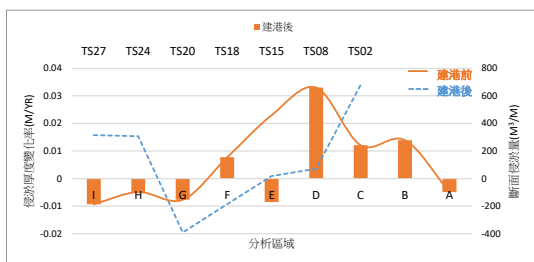


圖 5 臺北港興建後各分析區之海岸侵淤趨勢圖

### 3.2 遙測影像進行岸線變遷分析

本研究以高精度潮位推算(MOD)配合資料爬梳技術快速分析所有可用影像所對應的潮位，以配合

灘線修正之需要挑選接近於平均潮位的影像進行分析。所選用之衛星影像資料來源與解析度為 SPOT 系列(1.5~2.5m)及福衛二號(2m)，且經評估後採用民國 95~110 年間共 15 幅影像，分析出 12 個時間點的灘線位置。

為歸納相關灘線分析結果，選定計畫區內六個斷面進行灘線變遷趨勢分析，選定之斷面位置詳圖 6 所示，圖 7 則為各斷面灘線分布圖，圖中並以一階線性迴歸分析其趨勢線及年變化量。

由分析結果顯示，近 15 年內於寶斗厝海堤處之斷面 E，其灘線無明顯變化，年變化率約為 0.01m/yr；於後坑溪北側之斷面 F，灘線變遷呈現侵蝕的情況，年變化率約為-0.45m/yr；斷面 G 呈現較明顯的侵蝕現象，年變遷率約-1.48m/yr；於林口電廠灰塘北側之斷面 H，其灘線逐漸往海側前進，年變化率約為 0.59m/yr。

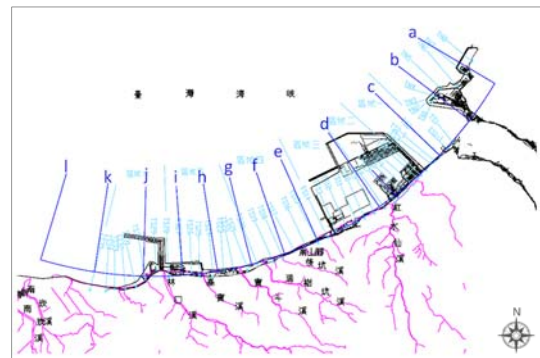


圖 6 計畫區斷面位置對照圖

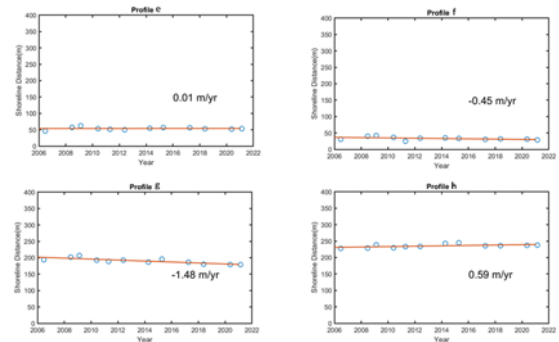


圖 7 各斷面趨勢分析結果

為評估海岸灘線與平面侵淤之相互關係，並作為初步驗證依據，茲參考 3.1 歷年海岸分區侵淤厚度統計結果，以向離岸至水深-5m(即漂沙限界水深)為邊界，統計 95~110 年之資料進行比較，比較結

果詳圖 8 所示。由圖可知，整體而言，衛星遙測影像之 0m 灘線辨識成果及平面侵淤分析結果趨勢相近，於臺北港南堤至林口電廠海岸均呈現兩側(分區 E 及分區 H)為淤積，中央(分區 F 及分區 G)侵淤變化幅度相對較小的現象。

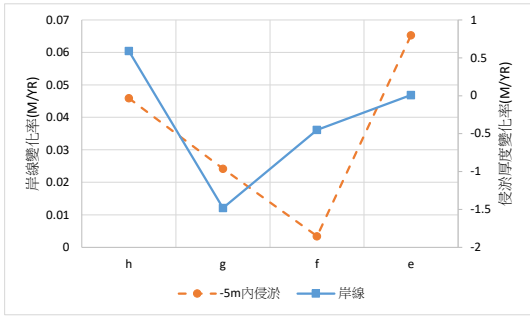


圖 8 0m 灘線與-5m 內平面侵淤年變化率比較圖

#### 四、漂沙潛量數值模擬

本研究擬採用 DHI 研發之 MIKE 21 水利模擬軟體，推估底床侵淤分布(ST 模組)，藉由模式計算結果瞭解臺北港鄰近海域飄沙移動與侵淤特性，俾作為地形變化趨勢之參考。

#### 4.1 模擬條件

##### 4.1.1 計算範圍及地形分布

本研究採用民國 107 年之實測資料，測量範圍外則以科技部海洋學門資料庫之臺灣附近海域數值海底地形圖加以補足，計算範圍地形分布如圖 9 所示，採中潮系統表示。

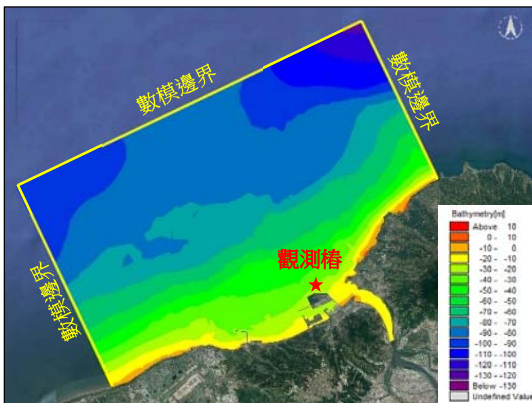


圖 9 數值模擬計算範圍及水深分布圖

##### 4.1.2 波浪條件

本研究區附近海域漂沙特性之分析，主要係依附近海域底質特性及波浪觀測資料，分析與漂沙相關之各項指標，如向、離岸斷面型態分類之判定係數( $C_s$ )、碎波水深( $D_b$ )、漂沙移動限界水深( $D_s$ 、 $D_g$ ：表層與集體移動限界水深)及沿岸流輸沙範圍之限界水深( $D_c$ )等，由上述指標可約略判定計畫區附近海岸漂沙之活動範圍及海岸特性，推估之各入射波向漂沙特性指標如表 1 所示。由表可知，計畫區之沿岸流漂沙限界水深約為 1.88~3.48m。

表 1 波浪漂沙特性一覽表

入射波向	代表波浪		碎波波高	碎波水深	漂沙移動限界水深		沿岸流漂沙限界水深
	$H_s$ (m)	$T_s$ (sec)	$H_b$ (m)	$D_b$ (m)	$D_s$ (m)	$D_g$ (m)	$D_c$ (m)
NNE	1.65	6.2	1.53	2.04	8.15	4.18	3.28
N	1.70	6.6	1.63	2.16	8.82	4.50	3.48
NNW	1.42	6.3	1.39	1.83	7.00	3.50	2.93
NW	1.22	5.9	1.19	1.56	5.63	2.79	2.50
WNW	0.96	5.4	0.94	1.24	4.05	1.98	1.98
W	0.95	5.0	0.89	1.17	3.79	1.87	1.88

參考上述漂沙特性分析所採用之代表波高及週期，考量其波浪條件皆為臺北港外海設置之 X1 觀測樁(位置詳圖 9 所示)統計資料，本研究方將引用淺化公式及試誤法，將觀測樁之波浪條件回推算至數模邊界水深，其輸入特性如表 2 及圖 10 所示。

表 2 波浪輸入條件彙整表

波向	觀測樁波高	觀測樁週期	數模邊界波高	數模邊界波向	模擬波高	模擬波向	
NNE	N11°E	1.65	6.2	2.08	24.8	1.65	11.2
N	N0°E	1.70	6.6	1.89	5.9	1.70	0.0
NNW	N23°W	1.42	6.3	1.47	338.0	1.42	337.5
NW	N45°W	1.22	5.9	1.24	314.8	1.22	315.0
WNW	N68°W	0.96	5.4	1.01	289.0	0.96	292.5
W	S90°W	0.95	5.0	1.39	250.8	0.95	270.0

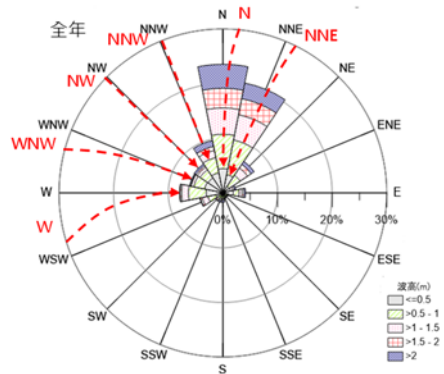


圖 10 模擬邊界與實際觀測樁波浪關係示意圖

本研究為真實模擬季風波浪期間潮流及沿岸流作用下之漂沙潛量變化，茲依據表 3 各代表波向發生機率之權重關係進行臺北港興建前、後之流場及漂沙潛量分析。

表 3 各外力權重加權表

波 向		模擬時間	佔年百分比	年影響天數
NNE	N11°E	30日	26.3%	96日
N	N0°E	30日	31.5%	115日
NNW	N23°W	30日	13.3%	49日
NW	N45°W	30日	8.4%	31日
WNW	N68°W	30日	8.2%	30日
W	S90°W	30日	12.3%	45日

#### 4.1.3 水位條件

本研究為了進行潮流分析，茲利用 Matsumoto 等人(2000)發展之 NAO.99b 全球潮汐預測模式輸出結果作為邊界條件。

#### 4.1.4 底質條件

本研究海域底質特性，初步採 0.2mm 予以計算。

#### 4.1.5 河川特性

本研究蒐集經濟部水利署臺灣水文年報，依據五堵及關渡測站 100 年回歸期洪峰流量之線性關係 (2100:3750) 推估關渡河口之平均流量輸入條件為 45.9cms。

### 4.2 模式驗證

為驗證本研究水動力數值模式推算潮流之合理性，茲參考前述港研中心實測資料進行驗證。圖 11 為本研究潮流模擬結果與實測資料之時序列圖，圖中黑色虛線為觀測值、藍色實線為模擬值，由圖可知，本研究之水位、流速及流向模擬結果良好，大致與實測資料之變化趨勢相符合，且能準確的模擬漲退潮間之流向變化。整體而言，本研究潮流模式能準確掌握臺北港附近海域之潮流特性，對於計畫區海域之潮流模擬具有一定程度之準確性。

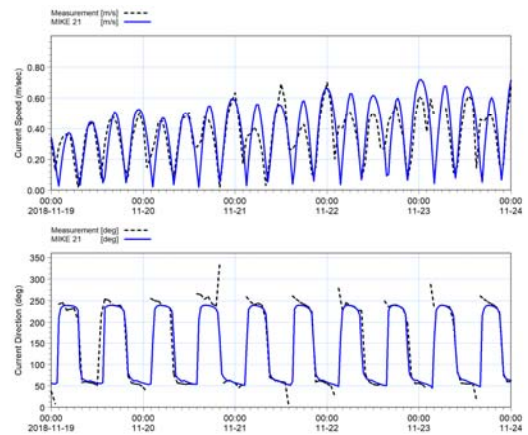
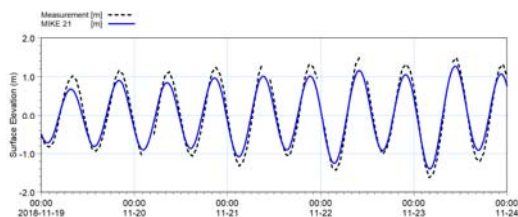


圖 11 計畫區潮流驗證之序列圖

(上：水位、中：流速、下：流向)

### 4.3 模擬結果

#### 4.3.1 平面漂沙潛勢分析

依據輸沙潛量(單位寬度海灘上，於一年時間內可輸送沙體之體積實方:m<sup>3</sup>/year/m)定義，沿漂沙傳輸路徑(箭頭方向)之輸沙潛量變化可判斷計算海域內之侵淤特性，即若沿漂沙傳輸路徑之漂沙潛能遞增，傳輸路徑上會發生侵蝕，反之則發生淤積。

在臺北港興建前，淡水河口南岸至臺北港南側海岸，受近岸漂沙潛勢旺盛影響呈現侵蝕現象，且漂沙潛勢越往南越大，直至嘉寶溪為最大。有關臺北港興建前受潮流及沿岸流耦合影響之平均漂沙潛勢分布圖詳圖 12 所示。

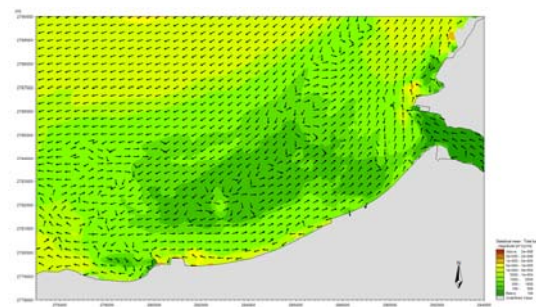


圖 12 臺北港興建前平均漂沙潛勢分布圖

在臺北港興建後，外廓堤阻斷沿岸流及潮流之漂沙路徑，於結構物附近形成顯著渦流分布，造成臺北港上、下游水域之水動力特性有重大流況變化。大抵而言，淡水河口南岸至臺北港北堤間海岸受外廓突堤效應影響，減弱由南往北及由北往南之輸沙

能量而產生淤積現象；臺北港南側水域之海岸漂沙機制亦受臺北港結構物影響，其遠岸潮流在防波堤轉折處形成反向渦流使漂沙潛勢減弱，加上沿岸流因遮蔽效應減弱由北往南輸沙能量的雙重影響下，近岸漂沙潛勢明顯減弱，造成此段海岸侵蝕減緩，惟減緩趨勢越往南側越小。有關臺北港興建後期受潮流及沿岸流耦合影響之平均漂沙潛勢分布圖詳圖 13 所示。

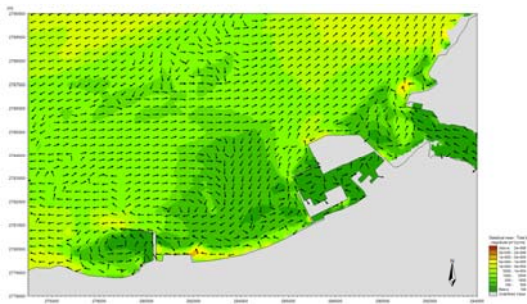


圖 13 臺北港興建後平均漂沙潛勢分布圖

#### 4.3.2 斷面漂沙潛勢分析

依據前章選用之地形侵淤分析區域架構，將各分區以中線作為代表斷面，由北往南分別編列為斷面 a~i，並於林口電廠以南新增斷面 j~l 進行斷面潛勢分析，其位置如圖 6 所示。

就臺北港興建前、後由南往北漂沙潛量變化圖(詳圖 14 所示)可知，由潮流主控之由南往北漂沙潛量，主要影響範圍皆為淡水河口北岸，且建港後造成其淤積現象減緩；而臺北港興建前、後由北往南漂沙潛量變化圖(詳圖 15 所示)則顯示，由沿岸流主控之由北往南漂沙潛量，主要影響範圍皆為淡水河口以南海岸，在建港前全段海岸大致以侵蝕狀態為主，而建港後淡水河口南岸至林口灰塘間海岸仍為侵蝕現象但有減緩趨勢，另在林口灰塘以南海岸則由侵蝕轉為淤積現象，其原因應為受林口電廠擴建改變流況所致。

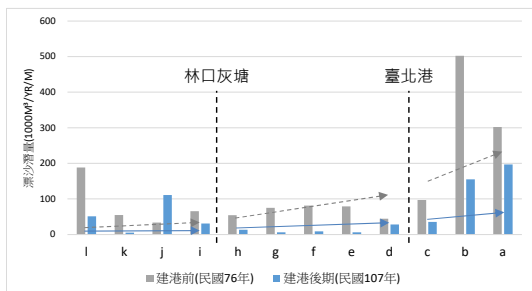


圖 14 臺北港興建前、後各斷面由南往北漂沙潛量變化圖

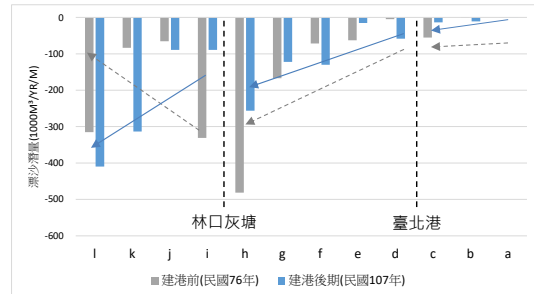


圖 15 臺北港興建前、後各斷面由北往南漂沙潛量變化圖

## 五、結論

依歷年水深測量之侵淤分析成果可知，臺北港在尚未有海岸結構物下之海岸地形侵淤特性，除淡水河口南岸至瑞樹坑溪間海岸呈現侵蝕現象外，其餘林口灰塘附近海岸皆呈現淤積現象，而近年來因淡水河沙源供應不足且受臺北港外廓堤阻斷沿岸漂沙情況下，臺北港以北側海岸由侵蝕轉為淤積，而臺北港南堤至林口電廠海岸則大多呈現侵蝕現象。

另由本研究數值模擬成果可知，受臺北港興建影響，淡水河口南岸至臺北港間海岸由侵蝕轉為淤積現象，而臺北港南側海岸在建港前、後雖然皆呈現侵蝕現象，惟建港後侵蝕現象有趨緩趨勢可知，若以海岸保護觀點而言，臺北港興建無論是對北側或南側海岸皆有正面效應，但若以河口通水觀點而言，其造成之河口淤積則稍屬負面，惟其影響量則不大。

## 參考文獻

1. 台灣電力公司(1999) 林口電廠第二期灰塘工程規劃。
2. 陳蔚璋、張憲國(2008) 台灣沿岸潮位推算之資料溶合法，第三十屆海洋工程研討會論文集，第 325-330 頁。
3. 經濟部水利署第十河川局(2015) 淡水河口輸砂對鄰近海岸之影響評估。
4. 經濟部水利署(2019) 臺北海岸防護整合規劃。
5. 基隆港務分公司(2020) 臺北港興建對淡水河口淤沙影響之調查研究。
6. 榎木亨(1982) 漂沙と海岸侵蝕。

# 海上船舶事故風險評估及分析

陳蔚瑋<sup>1</sup> 張憲國<sup>2</sup> 黃茂信<sup>3</sup> 李俊穎<sup>4</sup> 劉勁成<sup>1</sup> 曹勝傑<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國立陽明交通大學土木工程學系博士後研究員

<sup>2</sup>國立陽明交通大學土木工程學系教授

<sup>3</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

<sup>4</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長

## 摘要

臺灣不僅為東北亞與東南亞海上來往航運的樞紐，在海運與經濟貿易上更為重要據點，因船舶航行及靠港作業頻繁，易於產生海上事故而造成人身安全及船舶財產的損失，為降低海上事故發生的可能，本研究主要蒐集台灣海域往昔海上事故資料，分類與統計事故屬性與時空分布。並選擇高雄港進一步探討其發生的熱區與風險因子。

關鍵詞：船舶航行、自動辨識系統、海上事故、風險因子

## Risk Assessment and Analysis of Marine Accidents

Wei-Wei Chen<sup>\*</sup>, Hsien-Kuo Chang, Mao-Hsin Huang, Chun-Ying Lee, Jin-Cheng Liou,

Sheng-Chieh Tsao

<sup>\*</sup> Postdoctoral researcher, Department of Civil Engineering, National Yang-Ming Chiao-Tung University

## ABSTRACT

Taiwan is not only a hub for maritime transportation between Northeast Asia and Southeast Asia, but also a more important base for maritime transport and economic trade. Due to frequent ship navigation and port operations, it is prone to maritime accidents that may cause personal safety and ship property losses. The possibility of accidents, this research mainly collects data of past maritime accidents in Taiwan's waters, and classifies and counts accident attributes and temporal and spatial distributions based on factors of marine and wind, route and space, man-made and other possible factors. We choose Kaohsiung Port to further explore its hot spots and risk factors.

Keywords: ship navigation; automatic identification system; marine accident; risk factor

## 一、前言

根據世界經濟合作暨發展組織(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD) 2016 年的全球貿易量統計資料顯示，85%的貨物仍透過海上運輸，全球海運貿易價值約佔貿易總額約 50%，可見全球貿易物流的主要方式仍以海洋運輸為大宗。臺灣不臺灣位於東北亞和東南亞交界處，往北連結日本、韓國，往南連接東南亞各國，不僅為東北亞與東南亞海上來往航運的樞紐，在海運與經濟貿易

上更為重要據點。近 20 年以來船舶自動識別系統(AIS)提供了海域內各船隻的即時資訊，然而海上事故卻仍常造成人身安全及船舶財產嚴重損失，為降低海上事故發生的可能，本計畫主要蒐集往昔海上事故歷史資料，分析其類別與時空分布以進一步了解其發生的熱區與風險因子，並將各風險因子量化後，初步建立港口周邊之航行風險評估模式。

經過我國海域之船舶數量繁多且海洋事務活動頻繁，在未來水域交通密度持續增高的情況下，交通

部於民國 97 年已配合修訂「船舶設備規則」，依公約規定要求符合噸位條件的國籍船舶應裝設船舶自動辨識系統(Automatic Identification System, AIS)，為強化船舶航行安全，交通部規劃修正「船舶設備規則」，於民國 108 年 8 月 14 日修正各式船舶應裝設船舶自動辨識系統(AIS)船載臺的相關規定。智慧化船舶監測系統需將電子通訊技術、資料庫系統、計算伺服器與網路，有效整合並應用於船舶、港埠及沿岸之間的管理與監控，讓使用者藉由系統整合的相關資訊快速了解船舶航行間可能發生的問題，進而進行告警與災害的事前防治。

## 二、海上船舶事故資料彙整

國內海難事件定義為船舶發生故障、沉沒、擱淺、碰撞、失火與爆炸等情況，或其他有關船舶、貨載、船員與旅客之非常事故者。其中災害規模又依人員傷亡失蹤與殘油或洩漏量分為甲級、乙級與丙級三類，依航港局「海難災害防救應變標準作業流程」作為海難應變作業辦法。

### 2.1 航港局船舶事故資料

依「海難災害防救業務計畫」在海事調查與評議中，海難災害發生後，各級應變機關或機構應蒐集災情與通報應變作為，詳實記錄並於解除應變時提報予目的事業主管機關轉送航港局。

透過網際網路陸續蒐集 102 年 1 月起至 110 年 4 月份的交通部航港局海事案件統計表，其內容包括：事發日期、船名、噸位、船籍、船種、失事地點、失事原因、嚴重程度、傷亡情形、船體損害、原因分析、資料來源與附註等項。

表 1 航港局海事案件統計表

船舶中心編號	事發日期		船名		噸位	船籍	船種	失事地點	失事原因	嚴重程度	傷亡			船體損害	原因分析	資料來源
	年	月	年	月							死亡	失蹤	受傷			
001	102	1	102	1	711	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局
002	102	2	102	2	711	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局
003	102	3	102	3	500	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局
004	102	4	102	4	200	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局
005	102	5	102	5	100	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局
006	102	6	102	6	100	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局
007	102	7	102	7	100	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局
008	102	8	102	8	100	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局
009	102	9	102	9	100	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局
010	102	10	102	10	100	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局
011	102	11	102	11	100	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局
012	102	12	102	12	100	中華民國	貨輪	海峽	碰撞	嚴重	0	0	0	船體損壞	碰撞	航港局

### 2.2 資料品管與彙整

收集交通部航港局 102 年至 110 年四月所公告海事案件統計表，經與航港局洽詢發現其中 106 年以前已無資料表檔案，僅能採用光學字元辨識或人工輸入方式進行彙整，共收集 1932 筆。為確保後續分析的正確性與代表性，針對所收集海事案件統計表進行彙整並進行資料品管。經檢視後，整理其提供資料之問題為資料重複、失事原因與法規海難定義有差異及肇事地點紀錄不夠詳實等。在資料品管後扣除未詳實記載肇事位置的資料重新統計資料集中所有事故資料的時間分布如圖 1 所示。

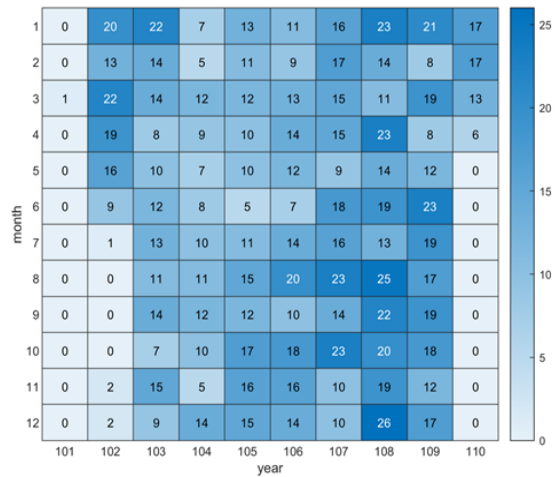


圖 1 海事案件統計表中所蒐集的資料時間分布

### 2.3 船舶事故統計

依照交通部航港局 2012-2021 年海事案件統計表的資料經過彙整與資料品管後來進行分析，其結果如圖 2。

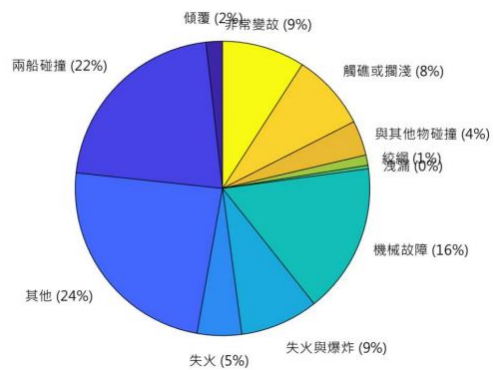


圖 2 2012-2021 年海難事故成因圓餅圖

排除海難事故資料中未詳實紀錄海難發生座標位置的事件，以其他海難件數最多，佔 25.34%，而其他海難包括多種因素造成的人員損傷或貨櫃受損而向岸上回報之情形；其次則以兩船碰撞為最大宗，佔 22.63%，機械故障則佔 17.29%，兩船碰撞與機械故障這兩者的百分比皆佔比 10%以上，可視為在台灣鄰近海域之最常見的海難原因，而後佔比較小的成因依序為非常變故、失火/爆炸、觸礁或擱淺、與其他物碰撞等。

## 2.4 船舶事故地點空間分布

依據各失事原因兩船碰撞、與其他物碰撞、觸礁或擱淺、失火或爆炸、機械故障、傾覆、洩漏絞網與其他非常變故及其他發生比例，及其事故特性，本研究將「兩船碰撞」及「觸礁或擱淺」案例，繪製空間分布圖及熱點分析。圖 3 為兩船碰撞事件的空間及熱點分布圖，圖中紫紅色點顯示在基隆港、臺北港、臺中港、高雄港與花蓮港有較明顯的群集。於熱區分析結果圖，選用 20km 為取樣半徑進行分析，最接近紅色的區域顯示代表海上發生兩船碰撞事故發生熱度較高的區域在高雄港，其次為基隆港、臺中港與花蓮港。此外臺北港與高雄港沿著海岸線往西北方的安平港海域延伸區域亦呈現淺藍色與綠色調，顯示也有兩船碰撞事件的發生。

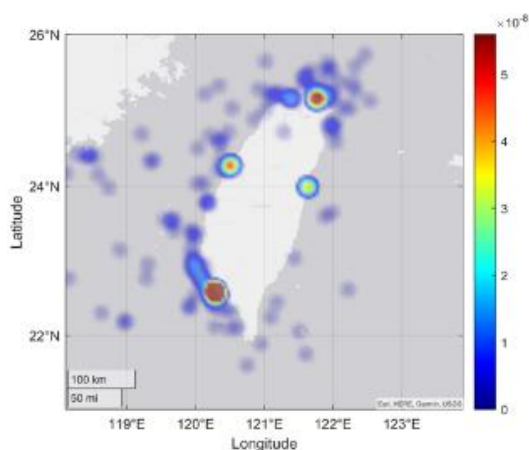


圖 3 兩船碰撞事故空間及熱點分布圖

圖 4 為觸礁或擱淺事件的空間及熱點分布圖，其位置幾乎發生於近岸範圍，台灣東北部與西南部明顯較常發生，另外西部海岸與外島也有部分零星事件。選用 20km 為取樣半徑進行分析，其熱區分析結果圖，最接近紅色的區域顯示代表海上發生觸礁

與擱淺事故發生熱度較高的區域在基隆港，其次高雄港。此外在臺北港、臺中港、布袋港、宜蘭沿岸與澎湖地區也呈現黃色調，顯示也有觸礁與擱淺的發生。

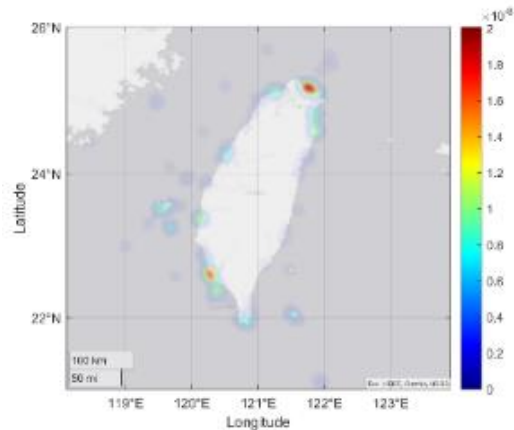


圖 4 觸礁或擱淺事故空間及熱點分布圖

在臺灣周邊海域的分析中，高雄港在兩船碰撞及與其他物碰撞的熱區是最明顯的，故針對高雄港進行細部分析，從海上事故資料集中篩選出兩船碰撞事件及與其他物碰撞事件進行合併分析，其結果如圖 5 所示。圖中顯示高雄港內主要熱區主要發生在圖中紅色範圍區域，對應圖下方高雄港區配置圖中的位置分別為#4 號至#9 號碼頭區(蓬萊商港區)與#25 號碼頭附近水域。



圖 5 高雄港範圍碰撞事故熱區分析

### 三、風險因子分析

#### 3.1 風險因子分析

海上事故若與陸上交通事故一樣有詳盡的紀錄即可進行深入的風險因子分析，針對近年國內外海上航行風險的相關研究進行蒐集與研析，將其風險因子分為四類包括：海氣象因子、航線空間因子、人為因子及其他可能因素。

目前本研究所分析的海上事故資料為交通部航港局的海事案件統計表，其來源為船長自述的海事簽證，其中針對各事件的原因分析為平均約不超過 50 字的文字敘述，由於目前無法取得記錄較為詳實的調查報告，故僅能採用原因分析欄位的內容來進行因子分析。

1.人為因子：透過爬梳海事案件統計表中原因分析欄位的文字敘述，列出一些本研究定義之人為因子的關鍵詞彙，如：人為、疏失、誤判、不慎、不當、反應不及、未注意、未盡、操作等，並透過這些詞彙篩分出相關事件，計算其造成之海難事故的佔比並進行文字雲分析，如圖 6 所示。

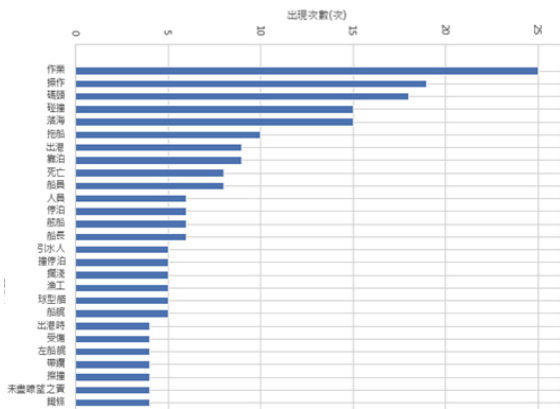


圖 6 人為因子關鍵字出現數量

2.海氣象因子：針對海氣象因子所設定的關鍵字為：惡天、風、天候、浪、海象、颱風、海流、水流與流況等，將有爬梳到有關關鍵字事件進行文字雲與數量分析，目的在於瞭解海氣象對海難事故造成之影響程度，如圖 7 所示。

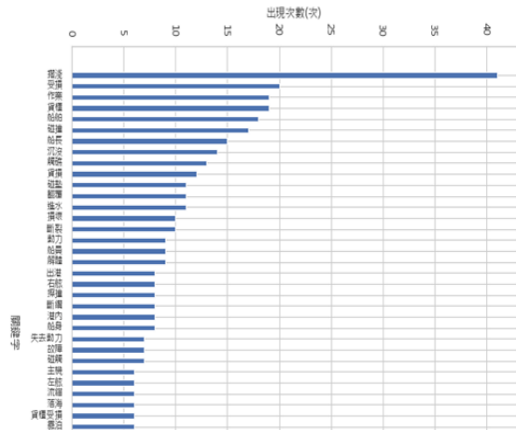


圖 7 海氣象因子關鍵字出現數量

3.航線空間因子：利用各港兩船碰撞的事故發生點來進行初步探討，圖 8 為高雄港兩船碰撞發生事故點的細部熱區分析結果，圖中立體柱狀圖的根部為兩船碰撞事故的發生位置，該地點發生的次數則以柱狀高度來做正規化呈現。圖中顯示高雄港兩船碰撞的事件大多集中在北端一港口內往二港口的南北主航道與一港口支航道，其中一港口船迴船池與一港口支航道內為明顯熱區，其他區域的事故分布則較為稀疏。



圖 8 高雄港兩船碰撞事故位置立體柱狀圖



4.其他可能因素：由於海事案件記錄表中，僅能針對船舶噸數來做基本分析，針對十種事故成因的船舶噸數特性，統計平均值與標準差如表 2，顯示各種事故類型的船舶噸數統計，以平均來說所有類型事故的群集中，以與其他物碰撞的群集的平均噸數最大，非常變故次之，最小的則是傾覆。以標準偏差來看，與其他物碰撞的偏差量最大，其他事件與兩船碰撞的事件群集中偏差量次之，偏差量最小的事故類型則為傾覆。

表 2 各種事故類型群集中的船隻噸數統計

事故類型	平均值	標準偏差
傾覆	223.56	551.25
兩船碰撞	9959.70	18138.22
其他	7389.01	18725.19
失火與爆炸	483.67	1433.00
機械故障	2150.87	7537.64
洩漏	6916.86	5615.61
絞網	8995.77	12107.99
與其他物碰撞	15504.06	24110.47
觸礁或擱淺	3514.13	11164.86
非常變故	10724.45	13692.41

### 3.2 高雄港碰撞及擱淺因子分析

依據熱區分析與相關因子分析的結果顯示高雄港在多種事故的分析中皆呈現為明顯的熱區，且高雄港吞吐量亦為國內重要港口，故海氣象數值模擬與分析，將以高雄港為目標港。以原因分析欄位的關鍵字進行分析，圖 9 為以關鍵字「風」、「浪」與「流」進行資料爬梳所篩分出的事故發生位置。



圖 9 原因分析欄位中有提及「風」「浪」「流」關鍵字的事件位置

根據圖「風」的事故發生位置分布可採用目前交通部運輸研究所港灣技術研究中心長期記錄的風速資料來進行陣風分析，如圖 10 所示，評估該發生時間與地點當時的情境來瞭解事故發生的原因與特性。

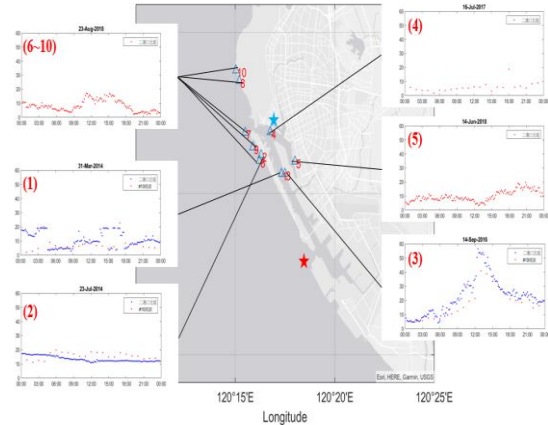


圖 10 海事案件之相關現場觀測風速資料

## 四、結論

海上事故統計分析的結果顯示其他海難件數最多，其次分別為兩船碰撞、機械故障，兩船碰撞與機械故障，可視為在台灣鄰近海域之最常見的海難原因。空間分布特性分析發現兩船碰撞、與其他物碰撞、觸礁或擱淺這三類的發生較具空間分布特性。海難屬性中，其他海難件數最多，佔 25.34%；其次為兩船碰撞，佔 22.63%。

經熱區分析顯示海上發生觸礁與擱淺事故發生熱度最高的區域在基隆港，其次高雄港。高雄港兩船碰撞的事件大多集中在北端一港口內往二港口的南北主航道與一港口支航道，其中一港口船迴船池與一港口支航道內為明顯熱區，其他區域的事故分布則較為稀疏。

未來本研究會透過現場海氣象觀測及冬季、夏季季風與颱風時期下水動力數值模擬，分別探討的船舶航行風險區域，可提供港務公司做為船舶航行安全資訊以及船舶航行規劃之參考依據。

## 謝誌

本文為交通部運輸研究所港灣技術研究中心計畫(編號 MOTC-IOT-110-H2CB001k)的部分研究內容，作者特別感謝港灣技術研究中心的經費支持。

## 參考文獻

1. 劉中平、梁金樹、朱經武(2004)「應用灰關聯分析於台灣地區國際商港海事事故天然致因之研究」，航運季刊，13(3)，95-114
2. 廖坤靜、吳展嘉、蕭永慶(2006)「應用層級分析法分析海難碰撞事故關鍵人因」，航運季刊，15(4)，62-85
3. 徐國裕、張運杰、周和平(2008)「台灣西部國際商港水域海難事故之分析」，航運季刊，17(1)，45-62。
4. 張憲章、羅德章、謝志敏 (2009) 高雄港第二港口雙向航行之研究，第 31 屆海洋工程研討會論文集，台中，669-674。
5. 蔡立宏、黃茂信、陳子健、簡靖承(2019)「船舶監控預警系統之研究」，交通部運輸研究所合作研究計畫報告。
6. Balmat, J. F., Lafont, F., Maifret, R., Pessel, N. (2009). MARitime RiSk Assessment (MARISA), a fuzzy approach to define an individual ship risk factor. *Ocean engineering*, 36(15-16), 1278-1286.
7. Balmat, J. F., Lafont, F., Maifret, R., Pessel, N. (2011). A decision-making system to maritime risk assessment. *Ocean Engineering*, 38(1), 171-176.
8. Blumberg, A. F., Mellor, G. L. (1987). A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, Vol. 4, edited by N. Heaps, pp. 208, American Geophysical Union, Washington, D.C..
9. Chen, P., Mou, J., van Gelder, P. H. A. J. M. (2017). Risk assessment methods for ship collision in estuarine waters using AIS and historical accident data. *Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources*.

# 微波雷達觀測海流資料分析流程

陳銘誼<sup>1</sup> 錢樺<sup>2</sup> 鄭皓元<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所博士班

<sup>2</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所教授

<sup>3</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所博士後研究員

## 摘要

本研究之目的在於建立一套可供微波雷達作業化應用之近岸流場反演流程，研究方法為現場實驗資料之分析，包括為降低微波雷達量測波浪的回波訊號對距離和方向之依賴性，增進圖像中波紋的亮暗對比，改善雷達影像的品質，並開發計算流程與各階段產品之檢視與比對。本研究以岸基 X-band 微波雷達作為主要觀測工具，使用位於桃園市觀音海岸的大潭微波雷達於 2021 年 1 月 5 日至 11 日觀測資料作為案例，藉由對比度受限自適應直方圖均衡化對雷達影像進行預處理，強化回波圖像的波紋特徵後，利用二維及三維傅立葉轉換分別求取一維雷達徑向及二維海面空間的角頻率及波數關係，並由波向和轉速對頻率和波數設定值進行修正，後以分散關係式擬合此頻域訊號求得雷達徑向流速，最後以速度-方位角處理(velocity-azimuth processing, VAP)技巧，由徑向流速運算轉換為空間流場。

關鍵詞：微波雷達、分散關係式、直方圖均衡化、方向波譜、雷達測流、VAP 方法

## Algorithm for Monitoring Sea Surface Currents with X-band Microwave Radar

Ming-Yi Chen<sup>\*</sup>, Hwa Chien, Hao-Yuan Zheng

<sup>\*</sup> Ph.D Student, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

Professor, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

Postdoctoral researcher, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

## ABSTRACT

The purpose of this research is to establish a set of nearshore flow field inversion algorithm that can be used for microwave radar operational applications. The research method is the analysis of field experimental data, including to reduce the dependence of the microwave radar measurement wave echo signal on the range and azimuth. This study uses the observation data of Datan radar located on the Guanyin coast of Taoyuan City from January 5 to 11, 2021 as an example. We pre-process the radar image by contrast-limited adaptive histogram equalization to strengthen the wavelength characteristics on radar image, then obtained the wavenumber and frequency of the 1D radar radial and those of 2D area by 2D and 3D Fourier transform respectively. The frequency and wave number setting values are corrected by the wave direction and speed, and then the frequency domain signal is fitted with a dispersion relationship to obtain the radar radial velocity. Finally converted from the radial velocity to the spatial flow field with the velocity-azimuth processing (VAP) technique is.

Keywords: Microwave Radar; Histogram Equalization; Dispersion Relationship; Directional Spectrum; Current Measurement; Velocity-Azimuth Processing

## 一、前言

微波雷達在近岸海洋觀測和資料蒐集具有便於岸邊架設、機動性高，且相較於傳統現地量測的觀測儀器，微波雷達具有可於定點針對固定觀測空間提供一次性大範圍觀測的優勢，惡劣海況下仍能全天候觀測，穩定安全地獲取海洋資訊，執行近即時與長期海況監測的作業。對於水深地形、海流等海面參數的測量有其高應用價值。本研究之目的在於建立一套可供微波雷達作業化應用之近岸流場反演流程。

## 二、實驗設置

本研究採用桃園觀音沿岸大潭工業區之雷達於 2021 年 1 月 5 日至 11 日所測量之海上波浪資料。大潭雷達每一小時執行一輪觀測，每輪觀測掃描浪況 64 回，轉速約為每分鐘 48 轉，天線長度 9 呎且離地面約 15 米(距海平面約 20 米)，使用波段為  $9410 \pm 30 \text{MHz}$ ，資料解析度為 3 公尺、0.25 角度。

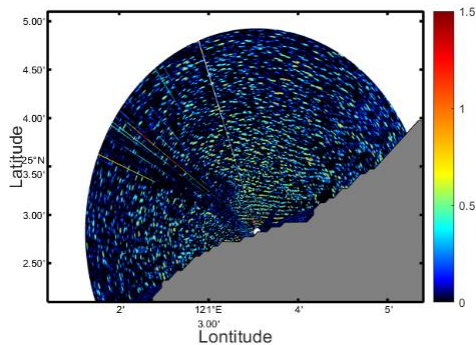


圖 1 大潭雷達觀測資料

## 三、研究方法

### 3.1 對比度受限自適應直方圖均衡化

由於微波雷達使用的頻段為 9410 MHz，屬於 X-band，根據布拉格散射(Bragg-Scattering)，所偵測到的海面特徵是波浪前端波長為一至二公分(雷達發射波的一半波長)的海浪波峰前側之海面粗糙度。由於岸基雷達為低掠角入射，波高造成的陰影及波面的傾斜度與朝向對於雷達圖像的波紋成像品質有相當程度的影響。另外，本研究藉由波浪角頻率與波數受海流影響後的分散關係來逆推海流，因此著重於波浪的重現性，即波紋亮暗變化的空間距離，

而非亮暗之間的差距。為改善回波訊號隨距離增加而減弱，以及波浪行進方向與雷達徑向間夾角較大時訊號較不明顯的限制，將雷達圖像預先通過對比度受限自適應直方圖均衡化(Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE)處理，以強化波紋的特徵性。

直方圖均衡化是一種進行影像處理時常使用的方法，通過累積分布函數(CDF)擴展影像的像素灰度值分佈範圍，將圖像對比度增強，但與此同時雜訊也將被放大，故於此研究選擇使用對比度受限的自適應直方圖均衡化，將圖像區分成許多小區域進行局部均衡化(自適應)，並且限制累積分布函數的斜率，設定一對比度上限(對比度受限)，讓灰度值超過此對比度上限的像素平均分配至其他灰度值。

此方法提升區域性的對比度再以雙線性插值將相鄰圖塊拼貼，而非一次性地對整張圖像的對比度進行調整，可有效地改善雷達圖像受距離與方位角的影響。(Chen, 2019)

在 CLAHE 中，對比度設定上限為介於 0 至 1 的值，0 代表將上限設定為像素數最多的灰階值其像素的數量，1 則等同於對圖像進行一般的直方圖均衡化，在圖 2 的測試結果中可發現，若將此上限設定值接近於 1，雜訊造成的影響也變得明顯，反而有可能造成雷達圖像不僅未改善，波紋還變得更斷斷續續，故此處建議使用 0.01 至 0.1 區間，視當地雷達圖像成像效果而定。

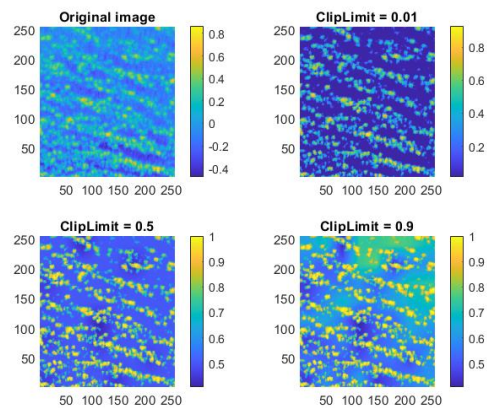


圖 2 不同對比度上限設定值之直方圖均衡化效果

由圖 3 的 CLAHE 之前後兩者所得的方向波譜可見，此作法並不會大幅影響譜的模樣，也就是有關方向的資訊沒有明顯改變，但會使訊號得到增強，

在經過 CLAHE 後所計算的方向波譜，其強度值的峰值相比未經處理之方向波譜的峰值高了約一成左右，代表在經過均衡化所得的頻譜具有更佳的擬合權重分布。而根據前後兩者所得之一維頻譜，將擬合範圍內，分散關係式殼層的訊號強度除以邊界的其它訊號強度，所得之訊噪比進行比較，也可發現相同的改善情形。

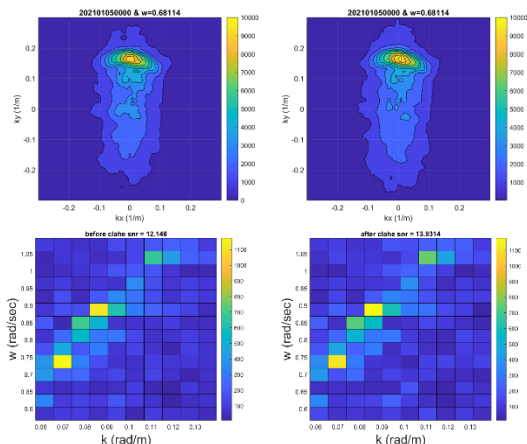


圖 3 方向波譜與一維頻譜經 CLAHE 之前(左圖)之後(右圖)比較

### 3.2 傅立葉轉換求分散關係

將單次觀測時序列取子影像，其所組成的三維矩陣，包含空間 x 方向和 y 方向的距離上以及時間上的回波強度訊息經傅立葉轉換後，形成一個新的三維頻域矩陣的訊號，距離轉換為 x 方向和 y 方向的波數，時間轉換為角頻率，即可得波數在平面上 x 與 y 方向和角頻率的關係。

在三維頻域矩陣中取其波浪主要頻率的斷面(圖 4)，這些斷面同時也代表了特定角頻率之波浪的方向波譜，可對高強度訊號分布位置進行擬合以得到符合分散關係式的海流，然而此作法的困難處在於，由於波浪可能由多種因素所造成，由不同方向、不同頻率所組成的分量的合成，因此不同頻率之下可能會有不同的結果，且當此方向波譜的波向分散程度較低時，擬合結果的不確定性較高，多組東西向與南北向的分量皆可能為其中一解。

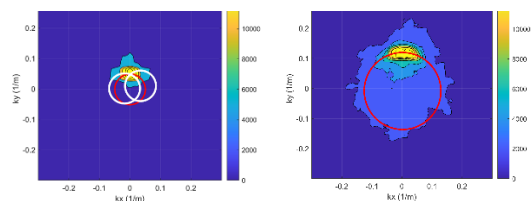


圖 4 不同角頻率之波浪方向分散程度

由於以二維的方向波譜擬合流速，需有波浪方向分布足夠分散的條件，才能有確定的擬合結果，不足以成為作業化的演算方式，故提出另一方法。

將雷達單次觀測內之雷達子影像，依照時間序列取徑向一維資料點進行排列(圖 5)，可見波浪前進過程。將一維徑向方向上之回波訊號隨時間的變化經二維傅立葉轉換，可得頻率與波數之關係圖(圖 6)，以此作為分散關係式(式 1)的擬合依據。

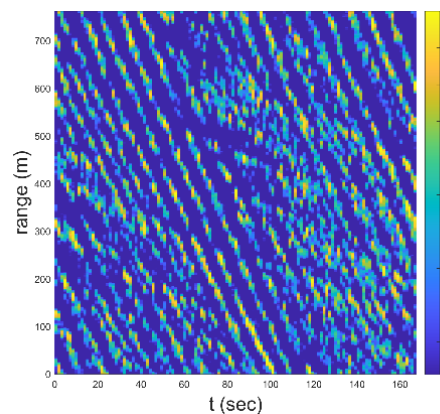


圖 5 雷達徑向上一維波浪訊號隨時間的變化

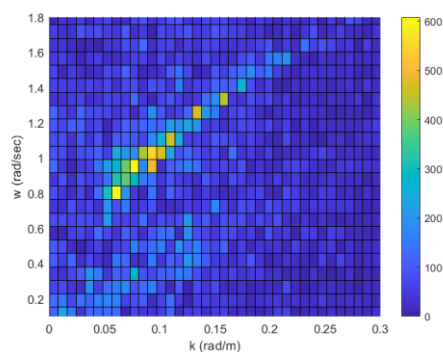


圖 6 波數與角頻率訊號分布關係圖

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kh)} + \vec{k} \cdot \vec{u} \quad (1)$$

### 3.3 波向及轉速校正

由於波的行進方向與雷達徑向並非總是一致，兩者之間的夾角造成波浪在圖 5 上所展現的波長為波向在雷達徑向上的正射影長，因此利用波向與雷達徑向間的夾角校正波長與波數，其夾角計算方式為將單次觀測子影像時序列所組成的三維矩陣經傅立葉轉換後取主要頻率斷面，計算此斷面(方向波譜)上的最大值的位置向量與 y 軸(徑向方向)形成的有向角(圖 7)，作為計算時的修正參數，意即將圖 5 的距離軸刻度與圖 6 的波數軸除此角度的餘弦。

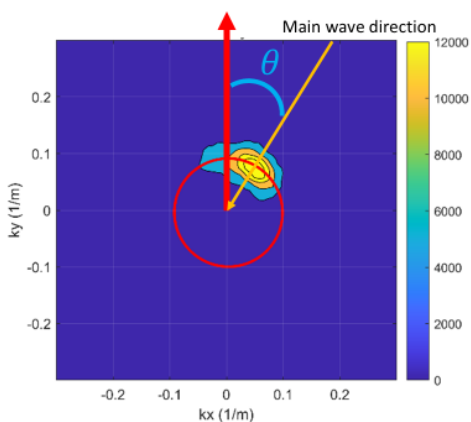


圖 7 波向與雷達徑向間的夾角

除了波長的修正以外，時步也需經由雷達的轉速進行修正，雷達運作的理想情況是天線皆以所設定之轉速進行等速旋轉，但由於實際情況雷達的轉速即便是連續的兩圈之間也會受到外在環境因素如風速造成外力、溫度造成電阻變化等，而有所不同，因此利用雷達運行時所記錄下的每一筆轉速紀錄，將圖 5 的時間軸刻度與圖 6 的角頻率軸進行校正，以求得更準確的頻率與波數關係。

### 3.4 流速擬合

此研究所採用的擬合方法(圖 8)是選取訊號主要反應之頻譜區域，計算各網格點與不同水深下之分散關係式的網格座標距離，並將網格上的值作為權重加乘，計算在此權重下最為接近的分散關係式。

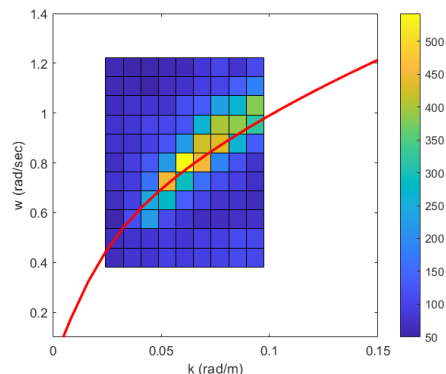


圖 8 分散關係式擬合方法示意圖

### 3.5 VAP 方法

都卜勒雷達最大的限制即是其量測僅提供流體向量的徑向分量資訊，在自然界局部均勻的假設下，相鄰兩方位角的徑向速度具有一致性(Zheng et al., 2003)，Zhou 於 2005 年提出速度向量可由速度-方位角處理技巧獲得。都卜勒徑向速度  $C$  可以通過簡單幾何關係與平面向量建立關係，

$$C = u \sin(\theta) + v \sin(\theta) \quad (2)$$

當向量遠離雷達時  $C$  為正，反之為負， $u$  和  $v$  分別為平面向量在西向與北向的分量， $\theta$  為自正北方算起順時針方向之方位角。

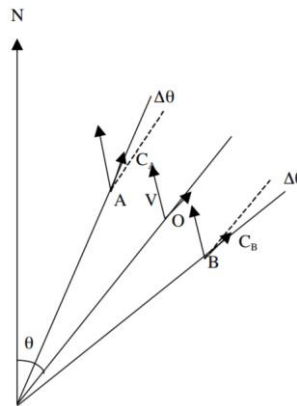


圖 9 VAP 概念示意圖 (Zhou, 2005)

如示意圖，給定自雷達相同距離的三點 A、O、B， $\theta$  為 O 點在級座標下的方位角，假設其相鄰徑向速度於 A、B 點上，與 O 一致，則 A、B 點上的徑向速度  $C_A$ 、 $C_B$  和方位角  $\theta - \Delta\theta$ 、 $\theta + \Delta\theta$  的關係可表示為

$$C_A = u \sin(\theta - \Delta\theta) + v \cos(\theta - \Delta\theta) \quad (3)$$

$$C_B = u \sin(\theta + \Delta\theta) + v \cos(\theta + \Delta\theta) \quad (4)$$

結合兩式可得 O 點 u、v 分量為

$$u = \frac{C_B \times \cos(\theta - \Delta\theta) - C_A \times \cos(\theta + \Delta\theta)}{\sin(2\Delta\theta)} \quad (5)$$

$$v = \frac{C_A \times \sin(\theta + \Delta\theta) - C_B \times \sin(\theta - \Delta\theta)}{\sin(2\Delta\theta)} \quad (6)$$

以此為理論基礎，在相鄰兩徑向流速具有局部空間均勻性的假設下，也可以同時分解成東西、南北分量並令兩者相等，同理，兩徑向方向各自的垂直方向也能夠分為東西與南北分量並且相等，此時徑向速度與角度和垂直角度已知，唯垂直方向的速度  $P_A$ 、 $P_B$  為未知數，即可就此求解，並將徑向方向的流速與其垂直方向的流速合成即為平面向量。

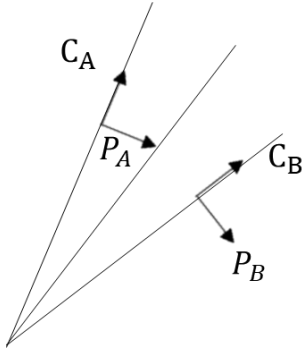


圖 10 VAP 方法的變形算法

$$u = C_A \times \sin(\theta - \Delta\theta) + P_A \times \cos(90 - \theta + \Delta\theta)$$

$$= C_B \times \sin(\theta + \Delta\theta) + P_B \times \cos(90 - \theta - \Delta\theta) \quad (7)$$

$$v = C_A \times \cos(\theta - \Delta\theta) + P_A \times \sin(90 - \theta + \Delta\theta)$$

$$= C_B \times \cos(\theta + \Delta\theta) + P_B \times \sin(90 - \theta - \Delta\theta) \quad (8)$$

#### 四、結果與討論

圖 11 為大潭沿岸徑向流場，圖 12 為利用 VAP 所計算後經空間平滑所求得之平面流場。由結果可發現，在靠近第三接收站已建造之結構物的一側(圖中左側)，流場的紊亂程度相對較大，但其為結構物所造成的邊界層影響或 VAP 方法在邊界的誤差則尚待未來另一座移動式雷達或流剖儀現場量測進以考證。



圖 11 大潭雷達徑向流場



圖 12 大潭雷達經 VAP 方法所得之平面流場

#### 謝誌

本論文係中央氣象局研究計畫「白沙灣測波流雷達實測校驗案」(約號 1082269C)之研究成果，承蒙中央氣象局支持使本研究得以順利，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. 錢樺、鄭皓元、林昭暉、賴堅戊(2014)「同調微波雷達開發及應用於近岸流場觀測」，第 36 屆海洋工程研討會論文集，第 653-656 頁。
2. Chen Z. et al (2019) Estimation of Sea Surface Current from X-Band Marine Radar Images by Cross-Spectrum Analysis, *Remote Sensing* (ISSN 2072-4292)
3. Serafino, F. et al. (2010) A Novel Strategy for the Surface Current Determination From Marine X-Band Radar Data” *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, VOL. 7, NO. 2, APRIL, pp. 231-235
4. Young, Ian R. et al. (1985) A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents, *Journal of Geophysical Research: Oceans* 90.C1: 1049-1059.
5. Zhou Y. (2005) Single-Doppler Radar Wind-Field Retrieval Experiment on a Qualified Velocity-Azimuth Processing Technique, Ninth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), P4.11



# 潮汐作用下高美濕地水質變化特性研究

溫志中<sup>1\*</sup> 葉秀貞<sup>2</sup> 蔡涵任<sup>2</sup> 謝智文<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>弘光科技大學環境與安全衛生工程學系 副教授

<sup>2</sup>弘光科技大學環境與安全衛生工程學系 研究助理

<sup>3</sup>弘光科技大學環境與安全衛生工程學系 研究生

## 摘要

海岸濕地位於海洋與陸地交界處，形成海水及淡水水體的過度帶，受潮汐影響，使濕地呈現乾濕交替的週期變化環境。高美濕地為臺中市內兼具生態與觀光功能之國家級重要濕地，綜合淡水注入與潮汐交替進而構成了海岸溼地，本研究針對高美濕地南界之清水大排進行連續基礎水質監測，期能透過水質監測調查，藉以瞭解潮汐作用下，高美濕地之水質變化特性。110 年三月、五月及八月之研究結果顯示，水溫、酸鹼度 pH、溶氧(DO)及濁度(Turb)，於三季觀測期間皆具顯著差異。

關鍵詞：高美濕地、潮汐作用、水質變化

## Study on Characteristics of Water Quality Variation in Gaomei Wetland under Tidal Action

Chih-Chung Wen\*, Hsiu-Chen Yeh, Han-Jen Tsai, Chih-Wen Hsieh

\* Associate Professor, Department of Health and Environmental Engineering, Hungkuang University

## ABSTRACT

Coastal wetlands are located at the junction of the ocean and land, forming a transitional zone of seawater and freshwater bodies. Affected by the tides, the wetlands present a current cyclical environment of alternating dry and wet. Gaomei Wetland is an important national-level wetland in Taichung City that has both ecological and tourist functions. The integrated freshwater and tidal alternation constitute a coastal wetland. In this study, continuous water quality monitoring was carried out in the Qingshui River Mouth at the southern boundary of Gaomei Wetland. to understand the water quality change characteristics of Gaomei Wetland under the action of tides. The results of the study showed that water temperature, pH, Dissolved Oxygen (DO) and Turbidity (Turb) were significantly different in March, May and August 2021.

Keywords: Gaomei Wetland; tidal action; Water Quality Variation

## 一、研究目的

海岸濕地位於海洋與陸地交界處，常見如河口、潟湖、岬灣和海灣等，此處受潮汐影響，成為乾濕交替的局部區域，而形成海岸濕地。海岸濕地通常具有向海出口，海水於漲潮時注入，淡水則透過河流、地表逕流或地下水滲入濕地之中，每天兩次的

漲退潮，形成海水及淡水水體的過度帶，潮差影響，使該區水陸兩棲環境呈現週期性轉換現象。受河流上、中遊河道沖刷帶入的泥沙，及出海口緩流區因流速降低而使泥沙在此沉積，因此海岸型濕地以泥沙為主要基質，形成穩定且豐富的生態系統提供生物棲地及養分。台灣中部包含：西湖濕地、高美

濕地及大肚溪口濕地三個國家級重要濕地。其中，高美濕地為臺中市內兼具生態與觀光功能的重要濕地，亦為臺灣最具特色的草澤海岸濕地。

高美濕地位於臺中市清水區西側，包括大甲溪出海口，綜合淡水注入與潮汐交替進而構成了海岸溼地，保護區南北兩處分別有清水大排與大甲溪兩淡水注入，整體區域範圍如圖 1 所示。本研究針對高美濕地南界之清水大排進行連續基礎水質監測調查，考量海水漲、退潮及波浪作用影響，進行連續 6-8 小時之連續監測，期能透過連續時段之水質監測調查，藉以瞭解潮汐作用下，高美濕地之水質變化特性。



圖 1 高美濕地及基礎水質觀測區域圖

## 二、研究方法

本研究於高美濕地景觀橋上，垂直下放 EXO 多參數水質儀，於漲退潮時段進行連續監測，觀測參數包含：溫度(Temp)、鹽度(Sal)、酸鹼度(pH)、溶氧(DO)及濁度(Turb)等，資料收集密度設定為每 10 分鐘 1 筆，並同步紀錄監測日期與時間。

110 年度，分別於三月(第一季)、五月(第二季)及八月(第三季)漲退潮期間，進行連續基礎水質觀測調查工作，紀錄各項水質參數於漲退潮時之變化情況，各季連續基礎水質觀測調查工作時間如表 1 所示。

表 1 各季連續基礎水質觀測調查工作時間表

	第一季	第二季	第三季
日期	110.03.31	110.05.27	110.08.17

## 三、結果與討論

本研究透過 EXO 多參數水質儀，分別於三月、五月及八月之漲退潮時段進行連續基礎水質觀測調查工作，觀測參數包含：溫度(Temp)、鹽度(Sal)、酸鹼度(pH)、溶氧(DO)及濁度(Turb)等五項參數進行連續基礎水質觀測調查工作，資料收集密度設定為每 10 分鐘 1 筆，並同步紀錄監測日期與時間。

觀測期間，各季水質參數監測變化情況，如圖 2 至圖 4 所示。潮位數據參考臺灣環境資訊網之台中港資訊而得(<https://isohe.ihmt.gov.tw/>)。

第一季(110 年 3 月)水質調查結果顯示，溫度介於 26.20~28.73 °C，鹽度介於 11.58~33.78，pH 介於 7.24~8.06，DO 介於 3.36~9.72 mg/L，濁度介於 3.36~14.99 NTU 之間，各水質參數變化情況如圖 2 所示。

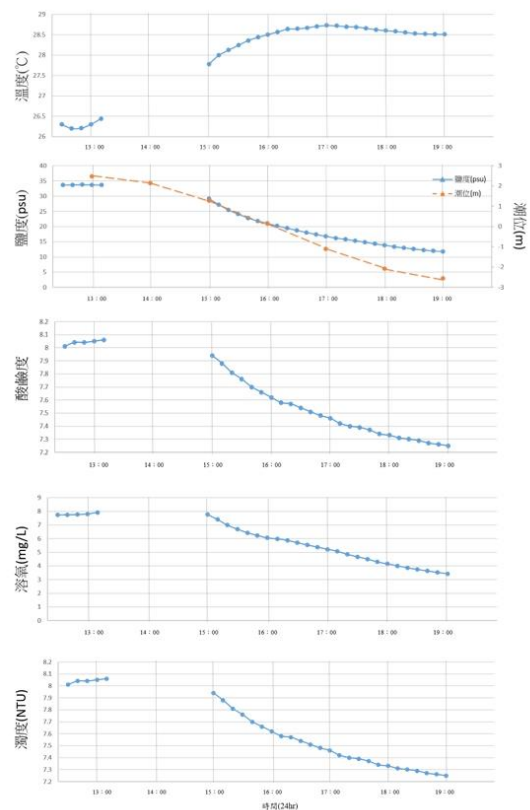


圖 2 第一季漲、退潮水質變化圖

第二季（110年5月）水質調查結果顯示，溫度介於30.43~33.27℃，鹽度介於16.46~33.18，pH介於8.06~8.28，DO介於7.34~14.99 mg/L，濁度介於3.31~21.02 NTU之間，各水質參數變化情況如圖3所示。

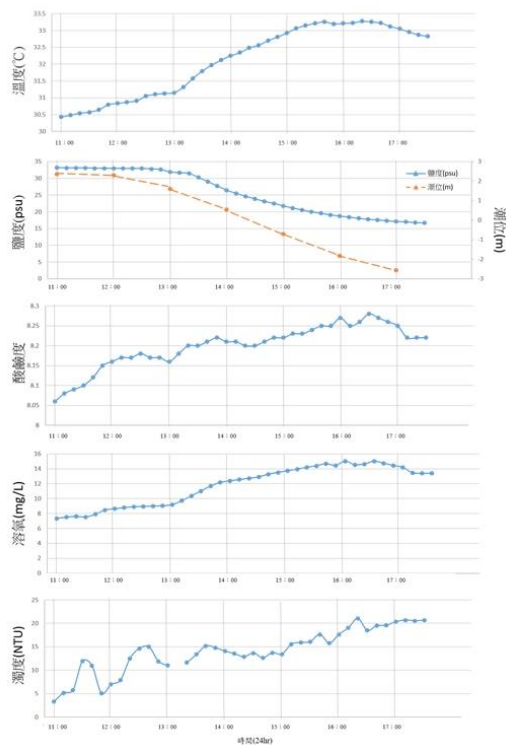


圖 3 第二季漲、退潮水質變化圖

第三季（110年8月）水質調查結果顯示，溫度介於29.57~33.52℃，鹽度介於0.69~29.15，pH介於7.18~8.17，DO介於6.00~7.83 mg/L，濁度介於4.09~25.81 NTU之間，各水質參數變化情況如圖4所示。

觀測期間，分別於三月、五月及八月，針對溫度、鹽度、pH、DO及濁度等五項參數進行連續基礎水質觀測調查工作，彙整各項水質參數觀測結果進行單因子獨立變異數分析（Analysis of Variance, ANOVA），藉以比較不同調查時間各項水質參數之平均值是否具有顯著差異。各項水質參數單因子獨立變異數分析結果，如表2所示。

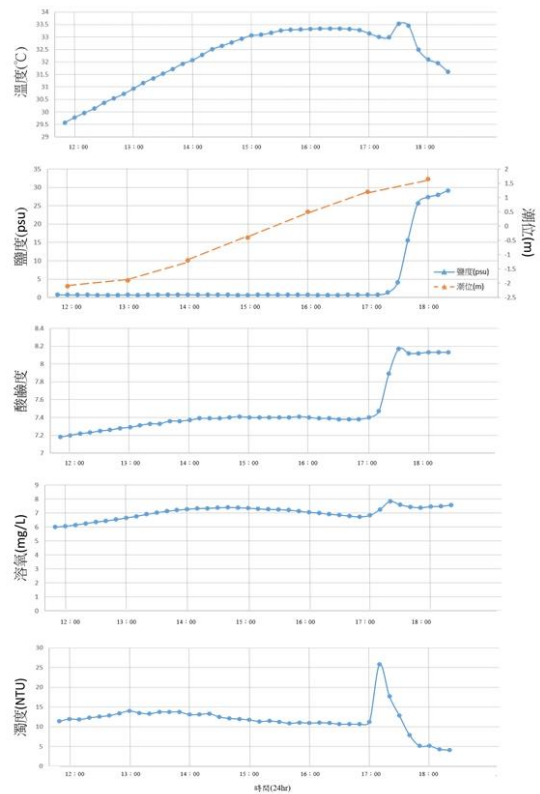


圖 4 第三季漲、退潮水質變化圖

表 2 單因子獨立變異數分析

		描述性統計量						
		個數	平均數	標準差	標準誤	平均數95% 信賴區間	最小值	最大值
Temperature	March	31	28.15	0.86	0.15	27.83	28.46	28.73
	May	40	32.12	1.02	0.16	31.80	32.45	33.27
	August	40	32.21	1.19	0.19	31.82	32.59	29.57
	總和	111	31.05	2.08	0.20	30.66	31.44	26.20
Salinity	March	31	20.26	7.56	1.36	17.49	23.04	11.58
	May	40	25.30	6.56	1.02	23.23	27.37	16.46
	August	40	3.87	8.34	1.32	1.20	6.54	0.69
	總和	111	16.25	12.06	1.14	14.00	18.51	0.69
pH	March	31	7.58	0.28	0.05	7.47	7.68	7.24
	May	40	8.20	0.05	0.01	8.18	8.22	8.06
	August	40	7.48	0.30	0.05	7.39	7.58	7.18
	總和	111	7.77	0.40	0.04	7.70	7.85	7.18
DO	March	31	5.59	1.53	0.28	5.03	6.15	3.36
	May	40	11.75	2.62	0.41	10.92	12.58	7.34
	August	40	7.03	0.45	0.07	6.89	7.17	6.00
	總和	111	8.36	3.19	0.30	7.76	8.96	3.36
Turbidity	March	31	9.49	3.88	0.70	8.06	10.91	2.45
	May	40	14.24	4.76	0.75	12.71	15.76	3.31
	August	40	11.79	3.55	0.56	10.65	12.93	4.09
	總和	111	12.03	4.50	0.43	11.18	12.87	2.45

表 2 單因子獨立變異數分析(續)

單因子變異數分析						
		平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性
Temperature	組間	361.63	2.00	180.82	165.22	0.000
	組內	119.29	109.00	1.09		
	總和	480.92	111.00			
Salinity	組間	9983.82	2.00	4991.91	88.44	0.000
	組內	6152.71	109.00	56.45		
	總和	16136.53	111.00			
pH	組間	12.05	2.00	6.02	111.27	0.000
	組內	5.90	109.00	0.05		
	總和	17.94	111.00			
DO	組間	779.62	2.00	389.81	120.24	0.000
	組內	353.37	109.00	3.24		
	總和	1132.99	111.00			
Turbidity	組間	397.41	2.00	198.70	11.74	0.000
	組內	1827.69	108.00	16.92		
	總和	2225.09	110.00			

(1) 溫度

觀測期間，水體溫度變化介於 26.20~33.52℃，第一季溫度介於 26.20~28.73℃，第二季溫度則介於 30.43~33.27℃，第三季溫度則介於 29.57~33.52℃。溫度隨春季邁入夏季而逐漸提升。由表 2 統計結果可知，溫度調查於三月有 31 個樣本，五月及八月各有 40 個樣本，總計包含 111 個樣本。三月、五月及八月之溫度平均值分別為 28.15、32.12 及 32.21℃，單因子變異數分析後 F 值為 165.22，顯著性 p 值 = 0.000 < 0.05，顯示三月、五月八月之水體溫度具顯著差異。

(2) 鹽度：

觀測期間，鹽度變化介於 0.69~33.78 之間，第一季鹽度介於 11.58~33.78，第二季鹽度介於 16.46~33.18，第三季鹽度介於 0.69~29.15。清水大排位處高美濕地南界，鹽度主要受到潮汐漲退之淡水海水混和情況而有所變化。由表 2 統計結果可知，鹽度調查於三月有 31 個樣本，五月及八月各有 40 個樣本，總計包含 111 個樣本。三月、五月及八月之鹽度平均值分別為 20.26、25.30 及 3.87，單因子變異數分析後 F 值為 11.74，顯著性 p 值 = 0.000 < 0.05，顯示三月、五月及八月之鹽度具顯著差異。

(3) 酸鹼度(pH)：

上層海水 pH 一般介於 8.0~8.5 之間，主要受

到季節循環及區域影響而改變。夏季，因增溫及強烈光合作用，使上層海水中的二氧化碳濃度降低，pH 值上升；冬季則作用相反，海水中的二氧化碳濃度增加，pH 值則隨之下降。依據台中市政府 107 年 3 月~110 年 3 月於清水大排上游米粉寮支線 pH 監測資料顯示，米粉寮支線 pH 介於 7.25~8.3 之間，平均 pH 為 7.66。

觀測期間，整體 pH 變化介於 7.18~8.28 之間。第一季 pH 介於 7.24~8.06 之間，第二季 pH 介於 8.06~8.28 之間，第三季 pH 則介於 7.18~8.17 之間，pH 與鹽度皆由滿潮至退潮逐漸遞減，顯示海水及淡水水體混合是影響 pH 變化的重要因子。由表 2 統計結果可知，pH 調查於三月有 31 個樣本，五月及八月各有 40 個樣本，總計包含 111 個樣本。三月、五月及八月之 pH 平均值分別為 7.58、8.20 及 7.48，單因子變異數分析後 F 值為 111.27，顯著性 p 值 = 0.000 < 0.05，顯示三月、五月八月之 pH 具顯著差異。米粉寮支線 107 年至 109 年間之水質監測，曾於四月、五月、九月及十一月出現 pH > 8 之情況，推測第二季觀測時，清水大排之 pH 可能現略為偏高的情況。

(4) 溶氧(DO)：

觀測期間，第一季 DO 介於 3.36~7.92 mg/L，第二季 DO 介於 7.34~14.99 mg/L，第三季 DO 介於 6.00~7.83 mg/L，DO 整體介於 3.43~14.99 mg/L 之間。第一季退潮時 DO 偏低(3.43~4.15 mg/L)；第二季調查時，風速強勁(9.26~12.19 m/s)，隨著退潮水體深度減低，強烈的水體混合致使 DO 顯著提升，最高可達 14.99 mg/L。第三季 DO 與溫度、鹽度變化一樣於 17 點後有顯著提升，顯示海水及淡水之初始 DO 極可能已有顯著差異。由表 2 統計結果可知，DO 調查於三月有 31 個樣本，五月及八月各有 40 個樣本，總計包含 111 個樣本。三月、五月及八月之 DO 平均值分別為 5.59、11.75 及 7.03，單因子變異數分析後 F 值為 120.24，顯著性 p 值 = 0.000 < 0.05，顯示三月、五月及八月之 DO 具顯著差異。

(5) 濁度：

觀測期間，第一季濁度介於 2.45~14.43NTU 之間，第二季濁度介於 3.31~21.02 NTU 之間，第三季濁度介於 4.09~25.81NTU 之間，整體濁度變化介於

2.45~25.81 之間。第一季及第二季濁度由滿潮至退潮逐漸遞減，推測可能受到退潮水體減少影響，第三季濁度與溫度、鹽度變化一樣於 17 點後有顯著高值出現，顯示濁度初始值可能受到水質區域特影響而變化，需持續進行觀測，藉以瞭解區域性之濁度特徵與變化。由表 2 統計結果可知，濁度調查於三月有 31 個樣本，五月及八月各有 40 個樣本，總計包含 111 個樣本。三月、五月及八月之濁度平均值分別為 9.49、14.24 及 11.79，單因子變異數分析後 F 值為 11.74，顯著性 p 值=0.000<0.05，顯示三月、五月及八月之濁度具顯著差異。

#### 四、結論

高美濕地，因臨近河口區，食物鏈豐富完整，底棲生物豐富且多樣，提供不同季節停棲鳥類食物來源，亦成為重要的候鳥棲息區之一，具有高度之生物多樣性。故有必要現地環境進行監測與調查，藉以掌握區域基礎環境資訊，作為相關生態保育、維護或相關研究之重要參考。

110 年三月、五月及八月之研究結果顯示，水體溫度變化介於 26.20~33.52℃、鹽度變化介於 0.69~33.78 之間，pH 介於 7.18~8.28 之間、DO 整體介於 3.43~ 14.99 mg/L 之間，濁度則介於 2.45~25.81 之間。

透過單因子獨立變異數分析分析三季水質調查結果，溫度及鹽度分別因季節及海水及淡水水體混合影響，三季間具顯著差異。pH 及 DO 及濁度受到區域水質特性及水體混合影響，三季間皆具顯著差異。建議需持續進行連續水質觀測，藉以瞭解高美濕地及清水大排區域性之水質特徵與變化。

#### 謝誌

本文係臺中市政府海岸資源漁業發展所研究計畫「110 年度高美野生動物保護區資源監測計畫」之研究成果，承蒙臺中市政府海岸資源漁業發展所之補助使本研究 得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. 林惠真(1998) *高美濕地生物資源*，臺中縣政府。
2. 陳敏(2009) *化學海洋學*，海洋出版社。
3. 林惠真、溫志中(2021) *110 年度高美野生動物*

*保護區資源監測計畫期中成果報告書*，臺中市政府海岸資源漁業發展所。

4. 國家級重要濕地保育計畫網站，檢自 <https://wetland-tw.tcd.gov.tw/tw/index.php>。
5. 港灣環境資訊網，檢自 <https://isohe.ihmt.gov.tw/>。
6. 臺中市政府資料開放平台，檢自 <https://opendata.taichung.gov.tw/dataset/3b71c237-1a9f-11e8-8f43-00155d021202>。

# 以臺灣海域三維海流作業化預報模式 探討表層通量對表層溫鹽之影響

周姿吟<sup>1</sup> 于嘉順<sup>2</sup> 陳維翔<sup>3</sup> 林芳如<sup>3</sup> 滕春慈<sup>4</sup>

<sup>1</sup>國立中山大學海洋環境及工程學系研究助理

<sup>2</sup>國立中山大學海洋環境及工程學系助理教授

<sup>3</sup>中央氣象局海象測報中心

<sup>4</sup>中央氣象局海象測報中心主任

## 摘要

應用與中央氣象局合作發展之台灣海域三維海流作業化預報模式(CWB-OCM)，每日產出海流預報資料，提供中央氣象局及各需求單位海流、海溫、海高等產品。CWB-OCM 校驗使用衛星資料 GHRSSST 及漂流浮標 ARGO，分析溫度及鹽度差異，發現漂流浮標之溫鹽垂直剖面與模式趨勢相同，且溫躍層與 CWB-OCM 相近。溫度均方根誤差 RMSE 平均約 1°C，鹽度約 0.2psu，且表層海溫及鹽度差異最明顯。考慮模式表層溫鹽受氣象場影響較多，如氣壓、氣溫、濕度、降雨、10 米風、向上長波輻射-向下長波輻射，過去嘗試分析降雨對模式之影響，發現降雨影響鹽度較大，同時提高 RMSE，其總表層通量中的感熱通量(Sensible heat flux)及潛熱通量(Latent heat flux)影響最為明顯。分析海流模式動量方程式中表層通量(Surface flux)之相互關係，發現感熱通量及潛熱通量與氣溫及濕度有關。本研究將設計案例模擬，藉由氣象場氣溫及濕度的敏感度分析測試其對模式表層溫鹽之影響，及與觀測資料之差異，分析其特性，以精進作業化海流模式預報，提高預報精確度，提供後續各相關單位參考及各類型產品之應用。

關鍵詞：台灣海域三維海流作業化預報模式、表層通量、敏感度分析

## The sensitivity analysis of the surface flux for developing three-dimensional operational ocean current model in Taiwan

Tzuyin Chou\*, Jason C.-S. Yu, W.-S. Chen, F.-R. Lin, C.-T. Terng

\* Research Assistant, National Sun Yat-Sen University, Department of Marine Environment and Engineering

### ABSTRACT

The study applies an operational forecast current model in Taiwan (CWB-OCM) which collaborate with the Central Weather Bureau (CWB), Taiwan. CWB-OCM is based on SCHISM and implemented for daily prediction of ocean current providing CWB and the concerned department with the customized-product, current velocity, sea temperature, sea surface height etc. The calibrations with the satellite data(GHRSSST) and ARGO S/T profile show the trend of the S/T profile is familiar, also the thermocline. The average RMSE of the temperature is about 1°C and the salinity is about 0.2 psu. Obviously, it is distinguished from the surface of the S/T and are probably affected by the surface flux of the meteorological field, for example, SLP, air temperature, specific humidity, precipitation, 10m AGL eastward/northward air velocity, downward long/short-wave radiation flux. The previous study show the precipitation not only has a great effect on the salinity, but also increase RMSE. Further, the most part of the total flux are the sensible heat flux and latent heat flux. This may be related to the air

temperature and the specific humidity in the momentum equation. The study will do several sensitivity analysis cases about the interaction between CWB-OCM and surface flux, the air temperature and specific humidity. Thus, enhance the accuracy of the CWB-OCM forecasting and provide/ apply more accurate and more type production to the concerned department.

Keywords: CWB-OCM; surface flux; sensitivity analysis

## 一、前言

台灣海域三維海流作業化預報模式 CWB-OCM 是與中央氣象局合作發展之作業化模式系統，每日作業化產出官網預報四日資訊，包含各場域之潮汐水位、海溫、鹽度、海流。CWB-OCM 初始場及邊界場使用 RTOFS 及 HYCOM 全球預報模式，類資料同化方式每日修正模式，且使用衛星資料 GHRSSST 及漂流浮標 ARGO 校驗模式，分析溫度及鹽度得知溫鹽垂直剖面的趨勢與 CWB-OCM 相同，溫躍層也相近。然而在表層溫鹽因海域特性不同、時空背景不同，仍有些許差異。

本文將探討表層通量對表層溫鹽之影響，過去文獻顯示降雨量對鹽度影響較大，提高均方根 RMSE(周姿吟等人, 2020)。且從總表層通量的計算方程式推論，感熱通量(Sensible heat flux)及潛熱通量(Latent heat flux)受氣溫及濕度影響最大(Zeng et al., 1998)。利用氣象場的相關表層通量參數案例測試，了解其對表層溫鹽之影響及特性，提供未來精進 CWB-OCM 預報能力之參考。

## 二、研究方法

CWB-OCM 使用 SCHISM 模式(Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model, Zhang et al., 2016)，納入洋流、渦流及潮汐的影響，為非結構式網格，其特點為利用水深分布及近岸複雜地形控制網格大小，得到臺灣海域更精確的海流狀況。由於 SCHISM 為半隱式法求解，可以加大時間步長進行計算，有效加速計算，提昇預報時效並縮減檔案大小。CWB-OCM 範圍東經 105°至 148°，北緯 4°至 47°，包含臺灣海峽、西太平洋、巴士海峽、南海與東海，示意如圖 1。使用美國國家物理資料中心(National Geophysical Data Center, NGDC)資料庫解析度一分的 ETOPO1 及來自科技部海洋資料庫臺灣周圍海域之水深地形，製作模式水平網格，解析度 500 公尺至 8 公里，約 50 萬個節點及 100 萬



圖 1 CWB-OCM 範圍圖

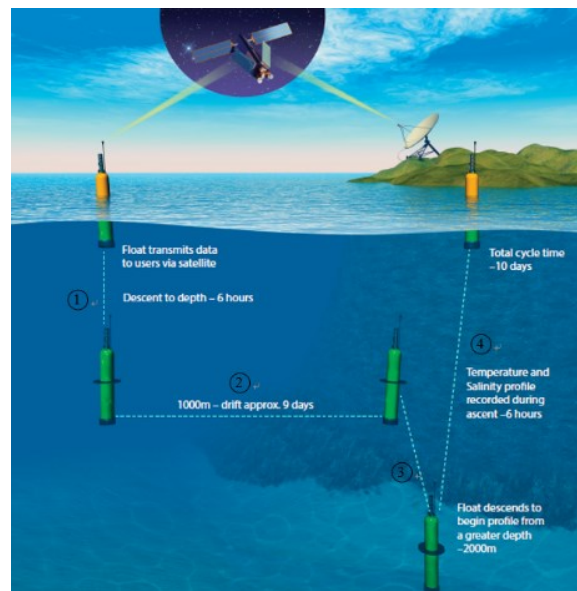


圖 2 ARGO 浮標量測示意圖(註:本文整理，來源：[http://www.argo.ucsd.edu/How\\_ARGO\\_floats.html](http://www.argo.ucsd.edu/How_ARGO_floats.html))①沈入海底 1000 米、②於水深 1000 米位置停留九天、③再下降至水深 2000 米、④上升至海表層上傳資料至衛星。

個元素。垂直網格使用 LSC2 方法進行垂直分層，表層利用 S 網格多層加密，而底層利用 Z 網格分層，避免在陡坡處因水平流造成異常的垂直流影響溫度與鹽度的變化(Zhang et al., 2015)。

初始場與邊界場使用 RTOFS 資料及 HYCOM 資料作為，並以中央氣象局 WRF 氣象場(CWB-WRF)作為氣象場驅動輸入模式，產出相關預報資料，與漂流浮標 ARGO 比對分析。ARGO 為全球國際合作之觀測計畫其隨海流移動，靠著浮標內的氣閥調整而潛入水下，如圖 2，有一固定週期時間約 10 天，將浮標感測器量測位置經緯度、時間、深度、溫度及鹽度。

### 三、案例分析

Zeng et al.(1998)研究，表層通量動量方程式：

$$SH = -\rho_a C_{pa} u_* \theta_*$$

$$LH = -\rho_a L_e u_* q_*$$

$\rho_a$  空氣密度,  $C_{pa}$  空氣比熱,  $L_e$  汽化潛熱,  $\theta_*$  氣溫,  $q_*$  表層濕度,  $u_*$  摩擦速度。

於模式中，總熱通量、感熱通量及潛熱通量。總通量為感熱通量 - 潛熱通量 - (向上長波輻射 - 向下長波輻射)。又方程式中影響感熱通量及潛熱通量之參數，可由相關性較高之濕度及氣溫進行敏感度分析。模式期間 2021/08/05 至 08/09，案例如下說明：

- 表層濕度乘 2 倍
- 表層濕度乘 10 倍
- 氣溫降低 10.°C

分析氣象場與模式結果，比對總通量、感熱通量、潛熱通量、溫度、鹽度，及 ARGO 溫鹽剖面。第二天(2021/08/06)降雨分布在臺灣海峽內，而表層濕度平均約 0.02(圖 3)。

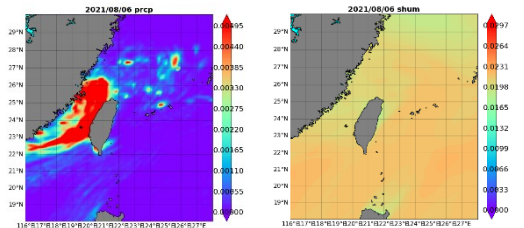


圖 3 CWB-WRF 分布圖  
(左：降雨量，右：表層濕度)

### 四、結果與討論

藉由 CWB-OCM 模式，進行氣象場之表層通量敏感度分析。如圖 4 (2021/08/06)，發現案例一、案例二將表層濕度放大乘 2、10 倍，發現表層海溫及鹽度隨著表層濕度增加，明顯上升。總通量及感熱通量亦同，與原氣象場之模擬結果比較，明顯增加，但案例一及案例二差異不大。而潛熱通量與原氣象場之模擬結果比較，明顯減少，從正值變負值。如圖 5 ARGO 溫鹽剖面，原模式結果與案例的 RMSE 差異從 0.01.°C、psu 至 0.2.°C 及 0.06psu，以案例三的表層溫鹽變化最為明顯。

另案例三探討氣溫對表層通量影響，將氣溫降低 10.°C 比對模式第三天(2021/08/07)之結果(圖 6)，發現表層海溫與鹽度差異不大，但是因為溫度變化與案例一及案例二不同，表層通量的趨勢不同。感熱通量及潛熱通量隨著氣溫降低而增加，總通量則降低，從正值變負值。如圖 7 ARGO 溫鹽剖面，原模式結果與案例的趨勢大致相同，且 RMSE 差異不大。

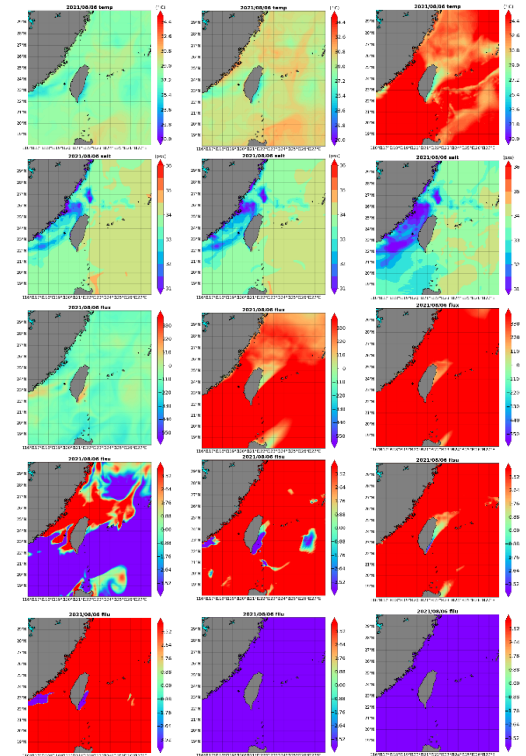


圖 4 CWB-OCM 模式結果分布圖(左：原模式結果，中：案例一，右：案例二，由上至下依序溫度、鹽度、總通量、感熱通量、潛熱通量)



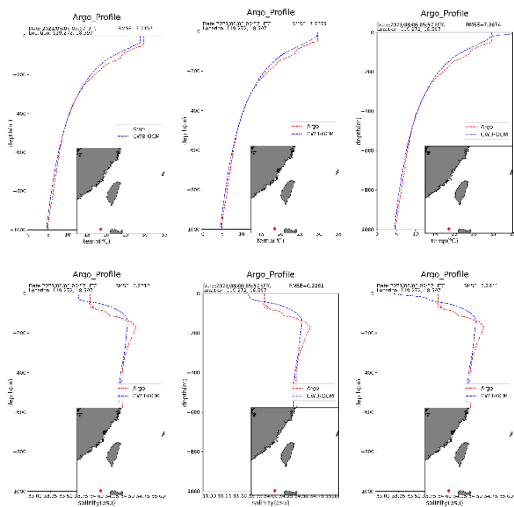


圖 5 CWB-OCM(藍)與 ARGO (紅)R2902711 2021/08/06 溫鹽剖面圖(左：原模式結果，中：案例一，右：案例二，上：溫度，下：鹽度)

量、感熱通量、潛熱通量)

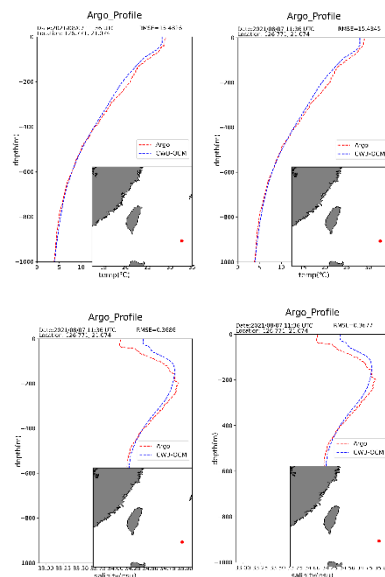


圖 7 CWB-OCM(藍)與 ARGO (紅)R2902718 2021/08/07 溫鹽剖面圖(左：原模式結果，右：案例三，上：溫度，下：鹽度)

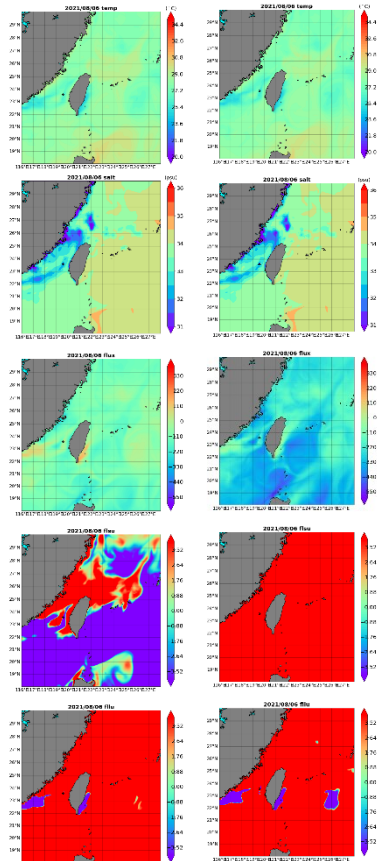


圖 6 CWB-OCM 模式結果分布圖(左：原模式結果，右：案例三，由上至下依序溫度、鹽度、總通

## 五、結論與未來展望

從前人文獻得知表層濕度及氣溫影響感熱通量及潛熱通量，又於 ARGO 溫鹽剖面比對結果其表層差異。根據研究結果，表層濕度與感熱通量正相關，而與潛熱通量負相關，計算總通量後是增加。模式結果於表層海溫及鹽度有明顯變化。另氣溫與感熱通量及潛熱通量同為正相關，計算總通量後是降低。模式結果於表層海溫及鹽度則差異不大。

總結上述，表層濕度及氣溫同影響表層通量，則以表層濕度影響較明顯，可依此結果調整氣象場中表層濕度參數之輸入值，透過校驗以精進海流預報模式，增加其可靠性，以提供後續各相關單位參考及各類型產品應用之使用。

## 參考文獻

1. 周姿吟、于嘉順、陳維翔、陳琬婷、滕春慈(2020) 台灣海域三維海流作業化預報模式降雨對表層溫度之敏感度分析，第 42 屆海洋工程研討會，2020 年 11 月 19-20 日，國立臺灣海洋大學，基隆。
2. Zhang, Y. J., Ateljevich, E., Yu, H. C., Wu, C. H.,

- &Yu, J. C. S. (2015). A new vertical coordinate system for a 3D unstructured-grid model. *Ocean Modelling*, 85, 16–31.  
<https://doi.org/10.1016/J.OCEMOD.2014.10.003>
3. Zhang, Y., Ye, F., Stanev, E.V., Grashorn, S. (2016) Seamless cross-scale modeling with SCHISM, *Ocean Modelling*, 102, 64-81.
  4. Zeng, X., Zhao, M., & Dickinson, R. E. (1998). Intercomparison of Bulk Aerodynamic Algorithms for the Computation of Sea Surface Fluxes Using TOGA COARE and TAO Data, *Journal of Climate*, 11(10), 2628-2644.

## B.海岸帶永續治理



# 應用模糊層級分析法確立臺灣智慧港發展 評估因素

林聖哲<sup>1\*</sup> 張憲國<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立陽明交通大學土木工程學系碩士生

<sup>2</sup> 國立陽明交通大學土木工程學系工程學系教授

## 摘要

智慧港的發展涉及許多考量，不僅在港埠物流效率的提升，航運安全與永續發展也是現今港務學者專家們所關心的課題。目前國際上並無統一的智慧港發展定義與架構，此外在評估指標的建立上缺乏系統性的研究。故本研究旨在建立一套符合臺灣港口現況的智慧港發展架構及評估指標，以瞭解智慧港發展的脈絡。本研究採文獻分析法、Borda function 與模糊層級分析法等多準則決策方法(MCDM)，來決定智慧港發展的核心因子和探討不同領域的港務專家所得之權重差異，並基於所求得各評估準則權重作 K-means 群集分析，找出較適合臺灣的智慧港發展優選準則群。

關鍵詞：智慧港、評估指標、Borda function、FAHP、K-means、優選準則群

## Factor Determination of Smart Port Development in Taiwan using Fuzzy Analytic Hierarchy Process

Sheng-Che Lin\* Hsien-Huo Chang

\*Master, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University

## ABSTRACT

The development of smart ports involves many considerations, not only in the improvement of port logistics efficiency, but also in maritime safety and sustainable development, which are nowadays the concerns of port academics and experts. At present, there is no unified definition and framework for the development of smart ports in the international arena, and there is a lack of systematic research on the establishment of evaluation indicators. Therefore, this study aims to establish a set of smart port development framework and evaluation factors that are in line with the current situation of Taiwan's ports, in order to understand the development context of smart ports. In this study, a multi-criteria decision making method (MCDM), such as literature analysis, Borda function and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), was used to determine the core factors of smart port development and to explore the differences in the weights obtained by port experts in different fields. The K-means cluster analysis was conducted to identify the preferred criteria for smart port development in Taiwan.

Keywords: Smart port; Evaluation factor; Borda function; FAHP; Preferred criteria

### 一、研究目的

近年來，智慧化、自動化和數位化已成為現代國家發展的顯學，身為海上交通樞紐的港口也面臨轉型，各國於 2010 年開始多應用工業 4.0 下所產生

的新興科技於營運管理、港埠作業等輔助及決策工作，試圖解決現代營運管理型態改變等問題，例如：無人船、水下海事機器人等(張，2021)。

新加坡、德國、荷蘭等各國際各標準港口皆將

智慧港的發展納入國家計畫的一環中，在全球化及中國大陸港口的發展下，臺灣的港口也勢必面臨轉型。身為我國港口唯一經營管理單位，臺灣港務公司於 2018 年所提出的臺灣港群智慧轉型計畫 Trans-SMART，強調未來我國港口的發展目標為「強化智慧創新與多元服務，鞏固海運樞紐地位」的策略方向，可得知我國在港口的發展上亦與國際趨勢接軌。

過去雖有國外文獻研究提出智慧港發展評估模式的核心因子和指標，然而，國內卻鮮少有研究去說明組成智慧港的核心因子與整體架構以及量化港口的智慧化程度，加上不同國家對於智慧港之發展項目也依其各自的需求而有所差異(林, 2019)，張(2021)也指出國外的研究結果也未必能符合我國之要求。基於上述研究動機，本文整合國內外智慧港評估架構與指標的相關研究資料，量化分析不同專家學者的對臺灣智慧港發展的認知程度及指標重視程度，找出專家們的認知差異處以及對智慧港發展的期望，而後建立一套符合臺灣港口之智慧港發展架構及評估指標。研究方法將使用 Borda function 與 FAHP(Fuzzy Analytic Hierarchy Process)法，來建立臺灣智慧港發展評估模式，並搭配 K-means 群集分析對資料分群，探討智慧港發展核心因子的執行優先順序，期以分組取代以往較常按照權重大小排名的方式，決定出智慧港發展的優選準則群。

## 二、研究方法

本研究首先由大量的文獻分析與資料蒐集取得，使用 Borda function 讓專家學者選出智慧港發展的核心評估指標，用以建構 FAHP 問卷來蒐集港務專家學者對評估指標的重要程度認知，分析和訂定出各評估指標的權重值，並比較業界與學界兩大決策群對於智慧港議題的差異所在，而指標經 K-means 群集分析後的分組，可了解臺灣港務專家對智慧港發展的優選準則有哪些。

Borda function 在 1770 年由法國數學家 Borda 所發明的一種選舉制度，相對於多數決只考慮選出單一候選人，其函式使得投票人可按喜好排列候選者，須考慮每位候選者的排序，基本原理即是對資料進行重要度排名與加權處理，其優點為投票後的結果，在意見的收斂性能取得普遍選民的認可且不易選出極端的選項。本研究先以文獻分析法整理國

內外有關港口智慧化之相關文獻後(Anahita et al., 2019; Alberto et al., 2020; Chen et al.,; 林, 2019; 林等, 2019; 王等, 2018)整理出相關指標，接著應用 Borda 專家問卷，針對業界與學界共 7 位港務領域者進行訪談，建立「智慧港發展評估架構」。

FAHP 為 AHP 的延伸方法，主要應用在不確定且具多個評估準則的決策問題上，然而傳統 AHP 的結果有無法適當的呈現評估者之主觀認知的疑慮。有鑑於此，Buckley(1985)提出 FAHP 將模糊理論(Fuzzy)與層級分析法結合，以反映真實的環境情境，其特色在於會結合模糊理論後，使其分析結果更符合人類的自然語意，故較 AHP 廣泛被使用。FAHP 的特色以簡明的層級架構將複雜的多準則問題系統化，其操作流程主要可分為下列十個步驟：

(1)問題的界定、(2)決策群體的組成、(3)建立評估層級架構、(4)問卷設計與調查、(5)建立成對比較矩陣、(6)一致性檢定、(7)建立模糊成對比較矩陣、(8)計算模糊權重、(9)解模糊化、(10)正規化。

K-means 群集分析係由 MacQueen 於 1967 年所提出，其特色在於無須事先給資料標籤，透過數據彼此的距離來計算相似度，即可將數據分群，通常相似度的計算以歐基里得距離為演算法。群集分析旨在瞭解數據的特性，希望使分類後的同一群集內數據的相似性越高越好，而不同群集間的相異性則越高越好，即「物以類聚」的概念，最基本的操作即為給予一組資料 $x_i$ 將之分為 k 群，公式如下：

$$\arg \min \sum_{c=1}^k \sum_{i=1}^{n_c} \|x_i - \mu_c\|^2, x_i \in S_c \quad (1)$$

其中 $\mu_c$ 為群心， $\|x - y\|$ 為歐基里得距離， $S_c$ 為分群後的資料集，而  $\arg \min$  指令為回傳該函數為最小值時所對應的變數值。

然而，K-means 的缺點在於使用者須預先設定分群數，此時便會帶入操作者的主觀判斷，故本研究會先透過輪廓係數法，找出最適合該資料的分群數，而後再代入式子(1)裡，以改善上述缺點。輪廓係數法會衡量物件和所屬群集之間的相似度，並透過 Silhouette score 實現。若 $s(i)$ 越接近 1，表示 i 群為最合適的分群數。其公式如下：

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (2)$$

式中 $a(i)$ 是樣本  $i$  到同群集其他樣本的距離， $b(i)$ 是樣本  $i$  到其他群集的所有樣本的平均距離。

### 三、結果與討論

#### 3.1 確立智慧港發展評估準則

本研究以 Borda function 訪問國內業界與學界共七位專家，依統計後確立的評估架構分為三個層級，第一層為目標決策層(Goal)，也就是「臺灣智慧港發展評估模式」，第二層則為主要構面層(Dimension)，可區分為五大面向分別為「O.營運效能」、「E.環境保護」、「S.能源永續」、「M.海運安全」、「P.社群服務」，最後則為第三層評估準則層(Criteria)分別接續在主要構面之下的子準則，總共 21 項，架構如表 1 所示。

表 1 臺灣智慧港發展評估之重點指標架構

第一層：臺灣智慧港發展評估模式	
第二層：主要構面	第三層：評估準則
O.營運效能	O-1.物流過程數位化
	O-2.機械系統自動化程度
	O-3.碼頭線效率
	O-4.儲藏貨物的容量
	O-5.可容納大型化船舶的碼頭數
E.環境保護	E-1.溫室氣體排放減少量
	E-2.自動化環境品質感測站
	E-3.港埠廢棄物回收率
	E-4.環境管理系統認證
S.能源永續	S-1.港區年節電、節油效率
	S-2.節能設施的數量
	S-3.船舶岸電系統使用量
	S-4.能源管理系統認證
M.海運安全	M-1.工作環境的安全性
	M-2.航行輔助系統
	M-3.即時偵測保全系統
	M-4.危險貨物追蹤管理系統
P.社群服務	P-1.工作環境的公平性
	P-2.資料透明程度及可及性
	P-3.鄰近社區連結度
	P-4.社群媒體的經營

#### 3.2 FAHP 操作流程

確立「臺灣智慧港發展評估模式」架構後，本研究使用 FAHP 方法來設計問卷，受訪對象為業界與學界的港埠管理相關領域之專家，共邀請 10 位專

訪者包括：實務經驗的專家者 6 位、學術研究者 4 位。本研究依第二章的操作步驟進行 FAHP 分析，並從一致性檢定開始詳述，流程如下：

##### (1) 一致性檢定

在兩兩因素比較的過程中，受訪者可能因評估準則過多而產生前後矛盾的情形，故須透過一致性指標(C.I.)和一致性比率(C.R.)檢驗權重的一致性。C.I. =  $(\lambda_{max} - n)/(n - 1)$ ，當 C.I. = 0 表示判斷完全具一致性，反之 C.I. > 0 則有矛盾判斷產生。C.R. = C.I. / R.I. 為在相同階數的矩陣下 C.I 與 R.I 的比率，Saaty(1984)指出，若 C.R. 值大於 0.1 表示問卷受訪者於填寫上有觀念上的矛盾，而 0.21 為誤差最多可接受的範圍(Saaty,1984)，故本研究會刪除以 CR 值為基準，刪除數值大於 0.21 的問卷。

##### (2) 建立模糊成對比矩陣

將作答者的評估分數依三角模糊數語意轉換，並建立模糊正倒值矩陣。本研究使用(余&魏，2017)的轉換表，因其圖形較對稱故予以使用。模糊正倒值矩陣定義如下：

$$\tilde{A}^K = [\tilde{A}_{ij}^K], \tilde{A}_{ij}^K = 1, \forall i = j \quad (3)$$

$$\tilde{A}_{ij}^K = \frac{1}{\tilde{A}_{ji}^K}, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中 $\tilde{A}^K$ 為第  $K$  位評估人員的正倒值矩陣， $\tilde{A}_{ij}^K$ 為第  $K$  位評估人員對  $i$  個準則相對於第  $j$  個準則的重要性比值。

##### (3) 計算模糊權重

Buckley(1985)建議使用列向量幾何平均法來計算模糊權重，可增加判斷的一致性程度及精確度，故本研究使用該方法來計算每項評估準則的模糊權重 $\tilde{W}_i$ ，其公式如下：

$$\tilde{W}_i = \frac{(\prod_{j=1}^n \tilde{a}_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n \tilde{a}_{ij})^{\frac{1}{n}}} \quad (5)$$

其中， $\tilde{W}_i = (W_{iu}, W_{im}, W_{iu})$ 代表第  $i$  個準則的模糊權重值。

##### (4) 解模糊化

係將模糊權重轉換成明確值，以利判斷準則的權重大小。基於重心法的運算過程簡單且不涉及分析者之主觀判斷，故予以使用；本研究所使用的公式是由 Liu et al.(2020)所提出，其發現下述公式能分析出的結果最佳。

$$DF_i = \frac{W_{iu} + 2 \times W_{im} + W_{iu}}{4} \quad (6)$$

其中， $DF_i$ 表示第  $i$  個評估準則的去模糊化權重。

(5) 正規化

因去模糊化後的評估準則權重相加不等於 1，故須將得出的權重正規化，公式如下：

$$NW_i = \frac{DF_i}{\sum_{i=1}^n DF_i} \quad (7)$$

其中， $NW_i$  表示第  $i$  個評估準則的正規化權重。

### 3.3 FAHP 結果分析

圖 1 為一致性檢定結果，x 軸為專家編號，y 軸為一致性比率(C.R.)。由圖可知在 10 份問卷中，編號 3 和編號 4 專家有多個答案的 CR 值超出最高容許誤差太多，故不將此兩份問卷納入群體決策中。最終採用 8 份問卷作權重計算。

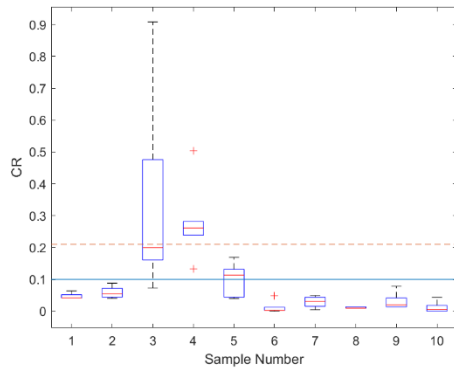


圖 1 一致性檢定箱型圖

將上述 8 份有效問卷之結果彙整，可獲得各階層的準則權重，如圖 2 和圖 3 所示。就第二層的主要構面來說，以營運效能 35.1% 和海運安全 34.6% 的權重最高，其次則依序為環境保護 14.6%、能源永續 10.2% 和社群服務 5.5%，顯示專家認為營運效能和海運安全兩大構面為評估智慧港的重要因子。

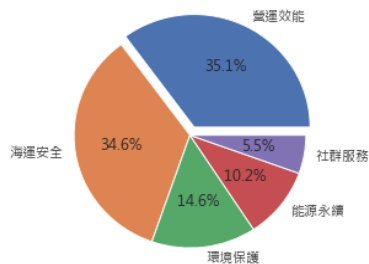


圖 2 主要構面權重圓餅圖

就第三層評估準則而言，「M-2.航行輔助系統」0.1270 為最高，「O-3.碼頭線效率」0.1213 次之，其

後依序為「M-1.工作環境的安全性」、「O-1.物流過程數位化」、「E-1.溫室氣體排放減少量」等。

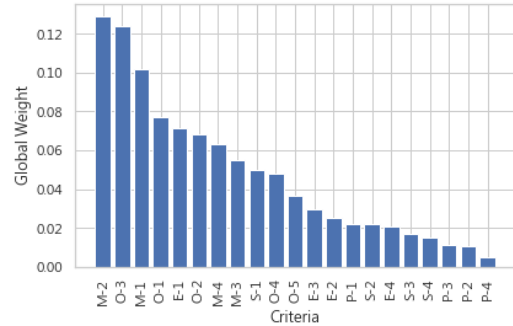


圖 3 評估準則權重長條圖

透過排序可知，有關營運效能與海運安全的評估準則在前幾順位的排名中為大宗，其中「E-1.溫室氣體排放減少量」的 0.0694 與「S-1.港區年節電、節油效率」的 0.0486 分別是環境保護與能源永續指標下，少數排名較前面的準則，顯示對臺灣的港務專家認為，降低港埠作業對全球暖化的衝擊也是評估智慧港所需考慮的重要因子。此外，由表可知社群服務指標對智慧港的發展來說，其改善被認為非當務之急，其權重值和排名皆在平均以下。

### 3.4 偏好準則差異分析

在 21 項的準則中，依主要構面權重的大小，區分成較重要的『O.營運效能、M.海運安全』等 9 個決策準則與次重要的『E.環境保護、S.能源永續、和 P.社群服務』等 12 個準則兩組。比較學界與業界專家於兩組的權重差異，分別如圖 X 及圖 X 所示。學界專家群權重為藍色折線，橘色折線則為業界專家群權重。

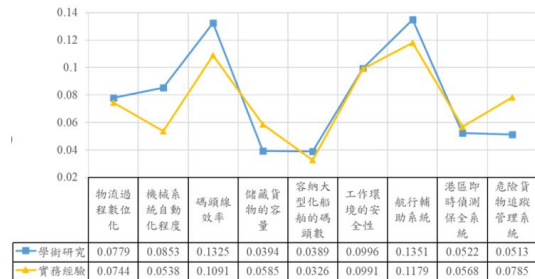


圖 4 兩決策群的『O 與 M』權重差異比較

由圖 4 可知，藍色折線於多數的準則中都高於橘色折線，顯示學界較重視港埠的營運效率與環境的安全性；就圖 5 而言，橘色折線大多高於藍色折



線，表示業界比學界更關心港埠環境維護、節約能源與服務提供等議題。

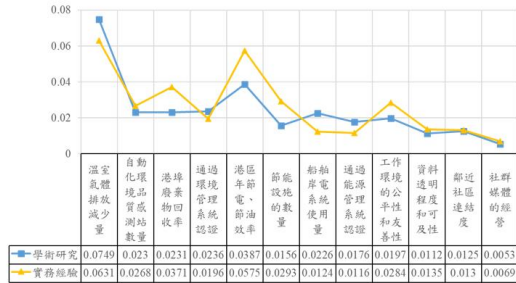


圖 5 兩決策群的『E、S與P』權重差異比較

此外，兩折線皆有一致的變化趨勢，此現象與專業受訪者有一致意見的假設相符，意見的一致性也使得後續應用幾何平均整合兩群專家的權重是合理且具代表性的。

### 3.5 臺灣智慧港發展優選準則群

為探討智慧港發展核心因子的執行優先順序，基於 FAHP 所求的準則權重，先透過輪廓係數法讓數據自行分組，再經 K-means 群集分析並將分群權重的高低分類成高度優選準則群、中度優選準則群... 依此類推。期以分組取代排名的方式，決定出臺灣智慧港發展的優選準則群。

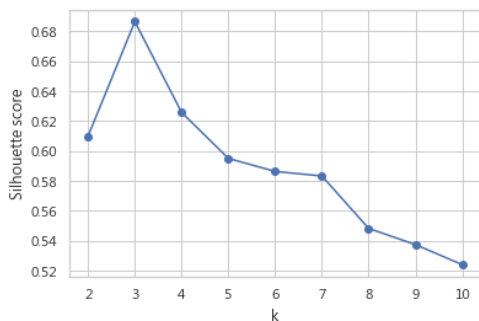


圖 6 輪廓係數法分析結果

圖 6 為輪廓係數法分析結果。其結果顯示 k 等於 3 的輪廓係數值 0.68 最高，即表示 k=3 的分組內的數據彼此相似度最高。故透過輪廓係數法的分群適合地將 21 項準則的各受訪者平均權重值，分類成 3 組。圖 7 為原始權重經 K-means 分群的結果，同一顏色的準則代表該分群內的權重值相似度最高。

由圖可知，紅色的 3 項準則為一群且權重皆為較高者，可稱為優選準則群，包含「O-3.碼頭線效

率」、「M-1.工作環境的安全性」與「M-2.航行輔助系統」，其次依序為藍色與灰色長條圖，即為次要的準則群。此 3 項優選準則於本研究的定義如下：

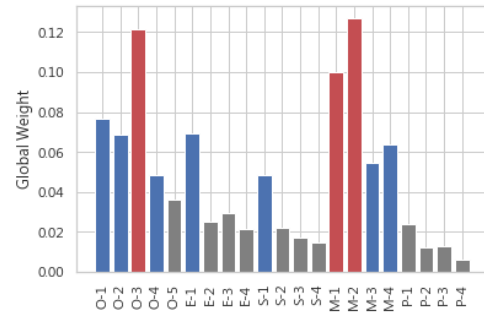


圖 7 K-means 資料分群結果

#### (1) O-3.碼頭線效率

根據 Alberto et al.(2020)的定義，碼頭線效率係指「TEU 年吞吐量/貨櫃碼頭總長度」和「貨物年吞吐量/總碼頭長度」，然而，此定義不足以衡量港埠作業的實質績效，故依專家建議加上吳榮貴(1990)所提出碼頭使用率的毛船席使用率(Gross Berth Occupancy):「船舶停靠碼頭年總時數/n 個碼頭」，以每年為單位計算碼頭佔用比例。碼頭線效率的提升，不僅可縮短輪船停泊碼頭時間，也能降低營運成本，對航運商與港務局而言，皆可增加收益。

#### (2) M-1.工作環境的安全性

根據國際港埠協會(IAPH)於 2017 年所提出的世界港口永續方案(WPSP)，「安全和保安」被認為是一重要的發展面向。隨著全球恐怖主義和數位化的發展，港口除著重於航海安全以及防災應變能力等訓練外，也須負起勞工安全與妥善照顧的責任。

#### (3) M-2.航行輔助系統

海上事故的主因大多來自於港區船舶作業勞動力不足或操作失誤，故海上安全委員會(IMO)於 2017 年設定自動駕駛作為國際船舶發展之重要方向，目前已航行輔助系統的發展最為常見。根據宇泰工程顧問公司總經理的指導，航行輔助系統即船舶操作智能輔助系統，透過電子海圖的更新以及海氣象資訊的整合，以提供船舶安全可靠之港灣服務目標，是一個富含多面向資訊的航運交通管理系統(Vessel

Traffic Services, VTS)。

#### 四、結論

發展智慧港不僅能夠銜接國際趨勢且有助於提高港口的競爭力，建構和分析帶動智慧港發展的核心因子是有意義的。在建立評估指標時，受訪的港務專家扮演著非常重要的角色，不同的工作崗位各有重視的指標，就一般大眾認知而言，業界可能較重視港口營運效能的提升和海運安全，而學界則可能較看重環境保護的永續發展議題。然而，本研究的成果呈現給出相反的答案，而是業界專家較看重環境議題大於學術研究者，反之學界其實是較看重港埠的效率與安全性的。

在決定臺灣智慧港發展的最佳策略時，本研究透過 K-means 將各準則分群，研究結果顯示「O-3.碼頭線效率」、「M-1.工作環境的安全性」與「M-2.航行輔助系統」為須優先發展的準則。其中，根據臺灣港務公司總經理於 2018 年打造智慧港口專欄指出，臺灣早在 2011 年即開始建置航港資料庫迄今，故基於原始航運資料庫與軟體實力，我國在發展「M-2.航行輔助系統」相對成本較低且有優勢的。

#### 參考文獻

1. Anahita Molavi, Gino Lim and Bruce Race (2019). "A Framework for Building a Smart Port and Smart Port Index". *International Journal of Sustainable Transportation*.
2. Alberto Rodrigo González, Nicoletta González-Cancelas, Beatriz Molina Serrano et al (2020). "Preparation of a Smart Port Indicator and Calculation of a Ranking for the Spanish Port System". *Logistics*, 2020, 4, 9.
3. Jihong Chen, Tiancun Huang, Xiaoke Xie et al. (2019). "Constructing Governance Framework of a Green and Smart Port". *Marine Science and Engineering*, 2019, 7(4), 83.
4. Saaty, T.L. (1980). "The Analytic Hierarchy Process", McGraw-Hill Inc.
5. J.J Buckley (1985). "Fuzzy hierarchical analysis", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 17 No. 3, December 1985, pp. 233–247.
6. 張欽森 (2021) 「智慧永續，港灣發展」，*中國*

*工程師學會會刊*，第九十四卷第一期。

7. 林暹耀 (2019) 「物聯網技術應用於智慧港口及碼頭作業之研究」，交通部運輸研究所。
8. 吳榮貴 (1990) 「貨物裝卸作業指標研究參考意見」，國立臺灣海洋大學。
9. 王國瑛、謝志男、蔡瑛材、張勝富 (2019) 「臺中港環境報告書」，臺灣港務股份有限公司。
10. 林麗美、張憲章、李念育等 (2020) 「高雄港環境報告書」，臺灣港務股份有限公司。
11. 余豐榮、魏宜如 (2017) 「結合模糊層級分析法與類似度理想解順序偏好法余中古車選購排序之模式」，*科學與工程技術期刊*，第十三卷第一期，第 1 -11 頁。

## 海域遊憩環境風險評估

何雅惠<sup>1</sup> 李敏豐<sup>2</sup> 陳沛宏<sup>3</sup> 廖建明<sup>4</sup> 董東璟<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士生

<sup>2</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系博士生

<sup>3</sup> 國家海洋研究院海洋產業及工程中心博士級研究員

<sup>4</sup> 國家海洋研究院海洋產業及工程中心主任

<sup>5</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

### 摘要

台灣海域遊憩發展日益蓬勃，以往對各類海域遊憩活動的政策及制度並不完善，多以全面禁止或限制的政策剝奪民眾從事海域遊憩的權力，如今法令鬆綁，改以管理開放取代全面禁止，並逐步地導入風險的概念，以風險高低作為規劃各項活動之安全準則。因此本研究藉由模糊德爾菲法及層級分析法建構屬於台灣海域遊憩環境安全之風險評估指標，並且以聯合國減災組織提出之風險概念為原則，以危險度、脆弱度的概念進行風險評估，本研究蒐集專家問卷進行分析，產出各因子權重，並結合各海岸的海氣象與現場調查資料，進行風險估算，最後將風險評估結果運用地理資訊系統呈現於各海岸段，繪製新北市海域遊憩環境風險地圖，以供後續規畫管理之參考。而研究結果顯示，以新北市 25 處海灘為例，多呈現中度風險，共佔了 10 處，其餘有 2 處為極低風險、9 處為低度風險以及 4 處為高度風險。

關鍵詞：風險評估、海域遊憩、模糊德爾菲、層級分析法

## The Risk Assessment of Marine Recreation Environment

Ya-Hui Ho<sup>\*</sup>, Ming-Feng Lee, Pei-Hong Chen, Dong-Jiing Doong,

<sup>\*</sup> Master Student, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

The water recreation is more and more popular in recent years. The policy of different kind of water recreation activity were under construction. Most of them used comprehensive prohibition or restriction policies to prohibit people to engage in recreational activities. Nowadays, the policies is loosened. By introducing the concept of risk, the management unit take the level of risk as the safety criterion for planning. This study uses the fuzzy Delphi method and the analytic hierarchy process to construct risk assessment indicators. Risk assessment is carried out with the concept of risk and vulnerability proposed by United Nations Disaster Reduction Organization. The weights of each factor could be calculated from expert questionnaires. Combining the sea weather and field survey data in the beach, the risk results on each coast was obtained and present by using geographic information system. The preliminary results in New Taipei City had been shown in this study including 10 of moderate risks, 2 of extremely low-risk, 9 of low-risk, and 4 of high-risk.

Keywords: Risk Assessment; Water Recreation; Fuzzy Delphi; AHP

## 一、研究目的

台灣四面環海，除地理環境豐富，水域資源也極具優勢，適合發展戲水、游泳、衝浪、獨木舟及風帆等各類水域遊憩活動，然而過去管理部門對於危險海域的認知大多是由該地區溺水事件發生頻率作為判定基準，以限制性的管理方式，禁止民眾從事相關海遊憩活動，使民眾更無法分辨危險的來源。行政院於民國 109 年大力推動人民走向海洋，以「開放」、「透明」、「服務」、「教育」及「責任」五大原則推動「向海致敬」政策，鼓勵國民走向海洋。其中的「開放」原則就是改變過去只有「擋」跟「管」的方式，將海岸管理從過去以限制為主要政策的方式逐步調整為風險管理；而「透明」的原則就是把一切資訊公開地傳達給民眾，包含即時的海氣象水文狀況、潛在的風險等，讓民眾可以根據自身狀況與能力，進行安全的海域遊憩活動。

本研究將針對台灣海域遊憩環境之特性，並納入社會及經濟層面之風險影響因子，以模糊德爾菲法及層級分析法建構台灣海域遊憩環境風險評估指標，利用風險矩陣計算出各新北市各海灘之風險等級，再輔以地理資訊系統將評估結果呈現風險程度。

## 二、研究方法

2004 年聯合國國際減災組織 (UNISDR) 提出「風險(risk)=危害度(hazard)×脆弱度(vulnerability)」的計算公式，危害度係指潛在危害事件、現象或人類活動可能造成生命損失、受傷、財產損害、擾亂社會及經濟，以及環境破壞；脆弱度係暴露範圍之敏感程度，包含物理因子、社會因子、經濟因子及環境因子之交互作用；本研究使用此概念作為風險評估之架構，並將暴露度之概念納於危害度與脆弱度之中，風險評估流程如圖一所示。風險(Risk)的高低與危險度和脆弱度有關，其中危險度為造成風險的主要成因，危險度越大風險越高；脆弱度表示受危險因素影響時，其負面影響的程度，脆弱度越高風險越大。

### 2.1 風險影響因子選定及權重分析

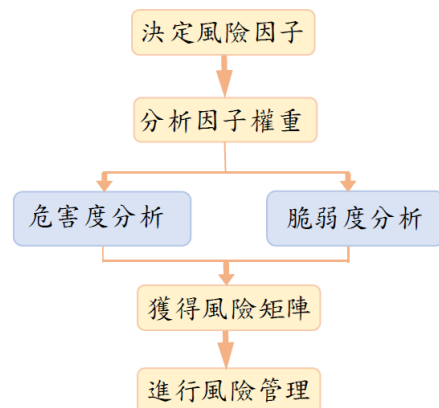
本研究廣納國內外文獻及專家學者之意見，彙整與海域遊憩活動相關之風險影響因子，並建置風險因子資料庫。而為了更有效且精確地進行風險處

理，須進一步應用模糊德爾菲法專家問卷(Fuzzy Delphi Method)，進行指標適宜性和重要性篩選危險度因子與脆弱度因子，以建構本次海域遊憩環境風險評估之指標，再透過層級分析法(analytic hierarchy process, AHP)比對各因子之間之重要性，進而求得各評估準則與風險影響因子之權重。

### 2.2 危險度及脆弱度分析

選定風險影響因子並得出各項之權重後，為能區分各風險影響因子所代表之可能性或嚴重程度，藉由定性分析、定量分析以及半定量分析訂定各因子之分級條件，危險度與脆弱度在分數的劃分上分為五個級分，1 分為無影響或影響最輕微，反之 5 分代表最具影響或最嚴重程度，再經現場調查、數值模擬、資料蒐集的結果，檢視各因子之影響程度。

完成風險影響因子分級後，即可應用於調查區位，將各因子分數與權重綜合計算出危險度指數以及脆弱度指數，將上述兩者代入至風險矩陣，如圖二所示，即可得出該區為之風險高低，最後透過地理資訊系統(GIS)繪製各海灘之遊憩活動風險地圖。



圖一 風險評估作業流程

風險矩陣		危險度				
		極低	低	中	高	極高
脆弱度	極低	極低	極低	極低	低	中
	低	極低	極低	低	中	高
	中	極低	低	中	高	極高
	高	低	中	高	極高	極高
	極高	中	高	極高	極高	極高

圖二 風險矩陣

### 三、研究成果

#### 3.1 風險因子選定

風險因子資料庫的架構分為三個層級，第一層級為風險評估指標，第二層級為風險評估準則，第三層級為風險影響因子，經由模糊德爾菲法篩選適當的風險影響因子，分析結果顯示，在評估指標上分為危險度和脆弱度，其中危險度的評估準則則包含海氣象特性、海岸環境、生化特性與歷史災害四項，於海氣象特性中除了評估海岸危險度常用的海氣象因子如風、波、潮、流外，也將裂流、碎波型態之即時、長期災害納入評估的因子之中；地理環境的部分則考量了海岸的坡度等因素；在環境生化部分，考慮海域環境中潛藏有毒及攻擊性生物等因素；在脆弱度的評估準則部分，考慮了社會面、環境面以及遊客面，社會面主要考慮了該海岸之醫療救災資源分布情形以及海岸區域的合法遊憩業者數量；在環境面則考量了該處海岸的設施建設、交通易達程度，以及警告標語與救生設備是否充足等；而在遊客面，主要是考量教練或專業玩家在處理緊急事件發生時的應付能力差異、從事遊憩活動有無裝備等。

#### 3.2 風險分析

層級分析法之專家問卷分析結果顯示，在危險度指標之中，以「近岸海底坡度」權重最高(0.16)，次之為「裂流」因子，其權重為 0.12，可見專家學者高度認為突然陡降的海岸地形以及裂流危害有一定程度的危險性，Klein et al.(2003)也指出裂流所造成意外事件比例佔了 8 成，是造成海域遊憩危險的主要因子之一。

在脆弱度指標中，以「安全救生設施」權重最高(0.17)，其次為「海岸資訊提供」(0.14)和「與海巡隊安檢所距離」(0.09)，可以顯示對於遊憩環境安全上，遊憩區域的救生設施、資訊提供與救難資源是否充足，對於脆弱度的評估上，有著很重要的影響。

在危險度分級上，「風」及「海流」因子乃參考危險海域劃設原則之研究(2019)，以從事各項水域遊憩之海氣象條件作為分級依據，並等間距的分為五級分；在「波浪」因子中，除了考慮年示性波高大小，亦加入極端波浪的條件進行分級；而「裂流」則是以發生時之海氣象條件，同時考慮各類型海灘產生裂流的時空間分布頻率，計算一年內符合

該條件之時間佔比；在脆弱度部分，考量發生意外當下救難人員到達的時間及醫療量能是否完善，而「與醫療院所距離」及「海巡消防隊距離」因子，則以黃金救援時間 15 分鐘為原則訂定分級條件，在「醫療院所完備性」以距海灘主要入口處最近的醫院等級作為分級依據；環境面則以現場調查全台灣各海灘之實際情形，以排序百分比訂定級別，其餘各因子細部分級如表一、表二所示。

表一 危險度因子權重與分級

	分數 權重	分級					
		1	2	3	4	5	
海氣象特性	風	0.03	排序分布百分比在20%以下者	排序分布百分比介於20%至40%者	排序分布百分比介於40%至60%者	排序分布百分比介於60%至80%者	排序分布百分比在80%以上者
	波浪	0.09	年平均示性波高在0.6公尺以下	年平均示性波高在0.6公尺以下且近三年內有8米以上極端波高	平均示性波高介於0.6公尺、1.5公尺之間	年平均示性波高介於0.6公尺、1.5公尺之間且近三年內有8米以上極端波高	年平均示性波高在1.5公尺以上
	海流	0.07	排序分布百分比在20%以下者	排序分布百分比介於20%至40%者	排序分布百分比介於40%至60%者	排序分布百分比介於60%至80%者	排序分布百分比在80%以上者
	灘沙	0.10	灘差在1m以下		平均灘差介於1m-2m		平均灘差在2m以上
	裂流	0.12	排序分布百分比在20%以下者	排序分布百分比介於20%至40%者	排序分布百分比介於40%至60%者	排序分布百分比介於60%至80%者	排序分布百分比在80%以上者
	碎波型態	0.10	溢出型碎波		湧波型或崩潰型		捲入型碎波
海岸環境	近岸海底坡度	0.16	排序分布百分比在20%以下者	排序分布百分比介於20%至40%者	排序分布百分比介於40%至60%者	排序分布百分比介於60%至80%者	排序分布百分比在80%以上者
	海灘坡度	0.06	排序分布百分比在20%以下者	排序分布百分比介於20%至40%者	排序分布百分比介於40%至60%者	排序分布百分比介於60%至80%者	排序分布百分比在80%以上者
生化特性	具攻擊性生物	0.12	無				有
歷史災害	歷史災害事件	0.15	排序分布百分比在33%以下者		排序分布百分比介於33%至66%者		排序分布百分比在66%以上者

#### 3.3 風險評估

本研究以新北市 25 處海灘為例，根據上述風險影響因子分級條件以及計算方式，得出各海灘危險度與脆弱度指數，再代入風險矩陣加以計算，分析結果如圖三所示，總計有 4 處海灘為高度風險、10 處海灘為中度風險、9 處海灘為低度風險，以及 2 處海灘為極低風險，整體而言，在危險度分數上，新北市的「海氣象條件」、「具攻擊性生物」及「歷史災害事件」的分數略高於其他縣市，分數大多落在四分以上，使危險度介於中、高風險；而脆弱度方面，各海灘距醫療院所、海巡隊消防隊不遠，因

此海灘基礎設施是否完善、安全設施的數量就成了影響脆弱度的重要關鍵，以三芝區的淺水灣海水浴場為例，在「安全救生設施」、「基礎設施發展」、「海岸資訊提供」因子得分為 1 分，表示該海灘在救生圈的數量、告示牌的設立數量充足，雖然危險度等級較高，但經由脆弱度因子的調適，將整體風險調降為低度風險。

表二 脆弱度因子權重與分級

		分數 權重	1	2	3	4	5
社會面	遊憩活動合法業者	0.07	排序分布百分比在66%以下		排序分布百分比介於33%至66%者		排序分布百分比在33%以下者
	醫療院所完備性	0.05	A1型態-綜合醫院		A2型態-醫院		A3型態-專科醫院
	與醫療院所距離	0.06	<15公里		15公里-30公里		>30公里
	與海巡河防隊距離	0.09	<5公里		5公里-10公里		>10公里
環境面	公共交通發展程度	0.04	省道		縣道鄉道		產業道路
	安全救生設施	0.17	2座以上/1km		1座/1km		無
	公共意外保險	0.08	有				無
	基礎設施發展程度	0.06	僅具備4種設施以上		僅具備2至3種設施		僅具備1種設施或無
	海岸資訊提供	0.14	每一處人口具一處輔助告示牌或警告告示牌	每一處人口不到一處輔助告示牌或警告告示牌	每一處人口至少具一處禁制告示牌	每一處人口不到一處禁制告示牌	無
遊客面	個人自救能力	0.08	五成以上遊客具備游泳能力				五成以上遊客不具備游泳能力
	個人遊憩能力	0.06	曾經從事2項以上之遊憩活動		曾經從事1項遊憩活動		無
	個人遊憩裝備	0.09	有穿著救生衣、救生圈之裝備		僅攜帶浮板、浮具等裝備		無攜帶任何裝備



圖三 新北市海灘海岸遊憩環境風險地圖

## 四、結論

這項研究中，利用風險的概念來建構台灣海域遊憩環境之指標，除了考量物理海氣象及地形因子外，對於遊憩環境的安全設施及救災、醫療量能以及遊客行為亦加入評估，透過層級分析法訂定各因子的權重值也有助於了解各項評估指標的相對重要性。影響海灘風險等級的因素包含了危險度與脆弱度，在研究成果中，顯示各海灘的風險來源，各管理單位即可針對危害度或脆弱度較高的區域進行風險處理，像是脆弱度較高的海灘，可針對脆弱度因子進行改善及調適，例如提升整體遊憩環境中的硬體設施、增設安全救生設備及遊憩相關安全標誌等，應能有效降低整體風險。在後續的研究，也將以本文提出之分析流程，應用於其他縣市，將風險評估結果提供予各管理單位制定海域遊憩活動相關規範。

## 謝誌

本論文係國家海洋研究院委託研究計畫「全國海灘及釣點環境調查與安全評估作業」之部分研究成果，承蒙國家海洋研究院經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. Klein, M., Sadiki, A., & Janicka, J. (2003). Investigation of the influence of the Reynolds number on a plane jet using direct numerical simulation. *International journal of heat and fluid flow*, 24(6), 785-794.
2. United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), *Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*, United Nations, Geneva, 2004.
3. 國家海洋研究院 (2019), 危險海域劃設原則之研究。
4. 鄧振源、曾國雄(1989)。層級分析法(AHP)的內涵特性與應用(上)。中國統計學報，第 27 卷第 6 期，5-22。

# 近體校正法應用於空拍熱顯像精度之初探

王星宇<sup>1</sup> 方惠民<sup>2</sup> 蘇育弘<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立高雄科技大學航運技術系助理教授

<sup>2</sup> 國立臺灣海洋大學海洋工程科技學士學位學程(系)助理教授

<sup>3</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士

## 摘要

本研究依據被測物體距離與紅外線熱顯像儀器的距離關係，設計適用於水體表面溫度量測之近體校正法。利用搭載紅外線熱像儀之無人飛行載具進行海水表面溫度量測，使用近體校正方法與直接測量結果進行分析結果顯示，於 12:00 之誤差約為 4.98%，10:00 之誤差約為 0.52%，顯示使用近體校正方法進行自主任務航拍時，應盡量避免於正午時段日光強烈照射之環境條件下進行，建議之最佳拍攝時段為上午 10:00 以及下午 14:00 進行飛航拍攝。

關鍵詞：表面溫度、近體校正、無人飛行載具、紅外線熱顯像

## Application of the Close-Target Calibration Method for Infrared Thermal Imaging Accuracy

Hsing-Yu Wang<sup>\*</sup>, Hui-Ming Fang, Yu-Hong Su

<sup>\*</sup> Assistant Professor, Department of Shipping Technology, National Kaohsiung University of Science and Technology

## ABSTRACT

In this study, the close-target calibration method was designed to improve the distance relationship between the infrared thermal image and the surface temperature of the measurement target. By using UAV equipped with infrared thermal imager to analyze the surface temperature of sea area. The analysis results show that the error at 12:00 is 4.98%, and the error at 10:00 is 0.52%. The experimental results show that when using the close-target calibration method to measure the surface temperature of sea area, the noon period should be avoided. It is recommended to take aerial shots in the morning or afternoon (14:00).

Keywords: surface temperature; close-target calibration method; UAV; infrared thermal imager

## 一、前言

海水溫度為表示海水熱力的物理量，係研究海洋水文特性的重要因子之一，對於大氣科學、海洋學、生態學、沿岸環境保護等都有著密切的關係與一定的參考價值。隨著紅外線攝溫顯像技術(Infrared Thermography, IRT)的發展，以非接觸式測量、較寬的溫度感知範圍、直接感知的測量成果、低功率消耗以及便攜性等相關優勢與特性，使得熱顯像在諸多領域皆有所應用。然受到量測距離對紅外線熱顯像的精度影響，使得紅外線熱顯像的溫度

量測精度無法滿足高精度要求，侷限了紅外線熱像儀器的適用範圍(Chrzanowski, 1995; Krapels & Driggers, 2001; Sun et al., 2009; Zhang et al., 2016)。緣此，本研究提出以無人飛行載具(UAV)搭載紅外線熱像儀，規劃以近體校正法降低受大氣中水氣、微型懸浮粒子等干擾、影響接收能量資訊，提出能有效提升紅外線熱像儀器的溫度測量精度，並降低及系統誤差的方法。藉由現場實際量測溫度進行比對分析，得出固定距離下紅外線鏡頭的測溫修正係數，以修正誤差取代實際誤差，藉此提升遠距離紅

外線熱像測溫準確度。

## 二、影像校正方法

考慮相機因透鏡失真所造成的成像扭曲，本研究參考 Zhang et al. (2016) 所提出的影像校正法，進行可同步針對熱顯像校正之方法改良。為使光學影像與灰階熱顯像能同步進行影像畸變校正，本研究設計如圖 1 所示之鋁製方格校正平板，藉由特殊方格校正平板的各網格交點，作為影像校正時的基準座標，並對熱顯像進行畸變差校正。

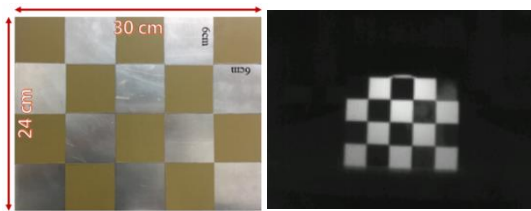


圖 1 金屬製方格校正平板與成像結果

透過手持無人機對所設置之加熱後金屬製特殊方格板進行如圖 2 所示各角度與方位之拍攝，可得到棋盤方格板於熱顯像中不同位置與不同角度之成像，並對各成像給予假定座標進行解算率定。經給定的際等距方格大小(6 x 6 cm)，解算出實際像素大小並求得影像平均投影誤差影像向量場圖如圖 3(a) 所示，而率定用方格板影像於解算後的各影像投影誤差值則如圖 3(b) 所示。經校正結果顯示，最大像素誤差為 0.47 pixels，最小為 0.15 pixels，而整體的平均影像投影誤差約為 0.34 pixels。

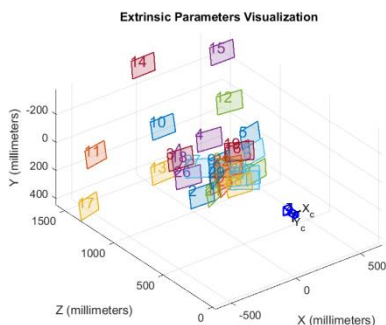


圖 2 影像與相機相對座標位置示意圖

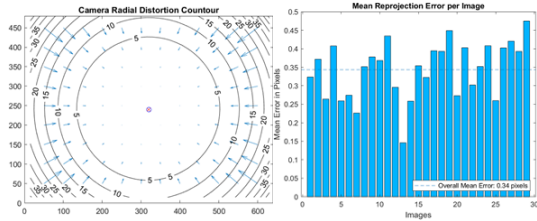


圖 3 投影誤差向量場暨投影誤差與平均投影誤差

## 三、近體校正法建立

參考 Zhang et al. (2016) 針對紅外線熱像儀測溫精度影響因素的相關論述如圖 4 所示，由儀器與被測物體的相對位置可知，進行遠距離、大範圍的溫度測量時屬於 P3 的情形，即被測標的物的量測溫度容易受到背景環境所影響。故為提升無人飛行載具的熱顯像紅外線鏡頭的遠距離測溫精度，本研究參考 Roc. Wang (2020) 先以較近待測物體之點溫作為基準，進而對遠距離待測物體進行修正處理。

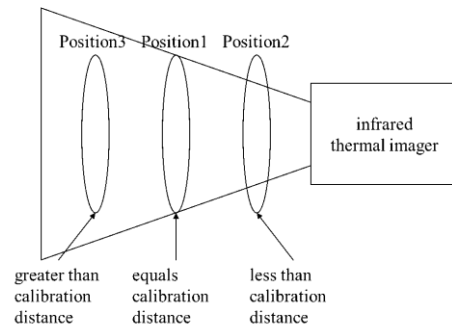


圖 4 熱像儀與被測物體相對位置示意圖

其中本研究所使用之灰階熱顯像主要係探討由水體表面所發射出的輻射量多寡所呈現之水表溫度分佈的擴散範圍與數值呈現，故由紅外線成像鏡頭所擷取之灰度影像，以數位影像分析原理，擷取其各像素元所記錄的灰度值以及其閾值與各區間(例如[0~255])，根據 Ye (2016) 灰度影像分析公式，進行灰度區間與溫度區間的轉換如式(1)至式(3)：

$$t_{result} = gray_{data} \times a - b \dots\dots\dots (1)$$

式中  $t_{result}$  為二維溫度轉換成果， $gray_{data}$  為原始二維灰度值， $a$  為區間轉換係數， $b$  為灰度轉換基礎值，其數學式分別為：

$$a = \frac{(t_{max} - t_{min})}{(gray_{max} - gray_{min})} \dots\dots\dots (2)$$



$$b = t_{\min} - (gray_{\min} \times a) \dots\dots\dots (3)$$

其中  $t_{\max, \min}$  為錄像擷取的溫度閾值， $gray_{\max, \min}$  為原始圖像的灰度閾值。

而為檢測使用近體校正方法之水面溫度量測精度，本研究規劃以圖 5 所示之海洋大學儲木池水域為研究區域，其中於圖 5 所示之黃色區域配置熱傳導型溫度計，並於實驗進行時同步蒐集實際水域溫度量測值作為比對資料。另考量於不同日照時段的溫度測量精度，本研究亦規劃於 10:00、12:00、14:00、16:00 等時段，以使用圖 6(a) 之近體校正配置於飛行高度 120 m 對待測水體進行等時間距拍攝。經以式(1)至式(3)對圖 6(b) 試驗所拍攝的連續熱顯像進行影像處理，可得不同時段下的溫度改正係數如表 1 所示。

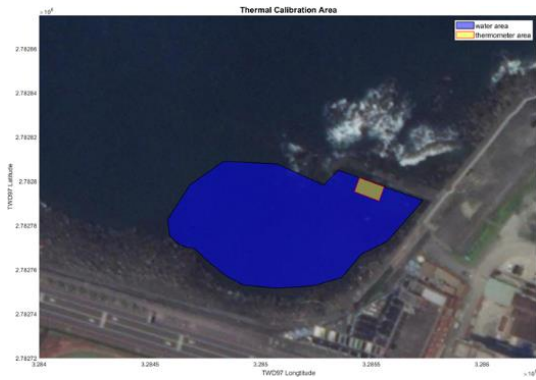


圖 5 試驗水域範圍示意圖

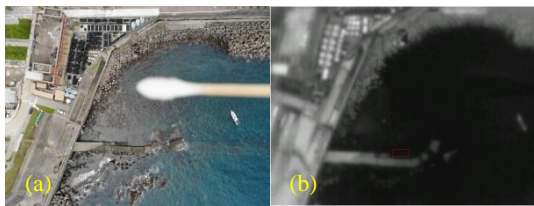


圖 6 光學影像(a)與熱顯像(b)比對示意圖

表 1 誤差分析表

Time	IR / THE. Avg. (°C)	Mean Error (°C)	correction coefficient
10:00	26.24 / 26.26	0.26	1.001
12:00	26.22 / 26.32	0.28	1.004
14:00	26.22 / 27.10	0.89	1.033
16:00	26.26 / 27.06	0.81	1.031

#### 四、現場試驗

本研究為增加熱顯像辨識度，規劃於花蓮縣和

平火力發電廠冷卻水排放口沿岸水域進行自主任務航拍實驗。整體試驗區域以圖 7 所示之溫水排放口為中心點，向外延伸約 250 公尺的輻射範圍水域。現場試驗規劃以前節所述之溫度改正實驗為基準，分於 10:00、12:00、14:00、16:00 等四個相同時段進行拍攝。飛行高度同定點校正實驗，設定 120 m 作為航拍高度，其餘自主任務規劃部分如拍攝模式、航線規劃、前後與側向重疊率、雲臺角度等設定則如表 2 所示。

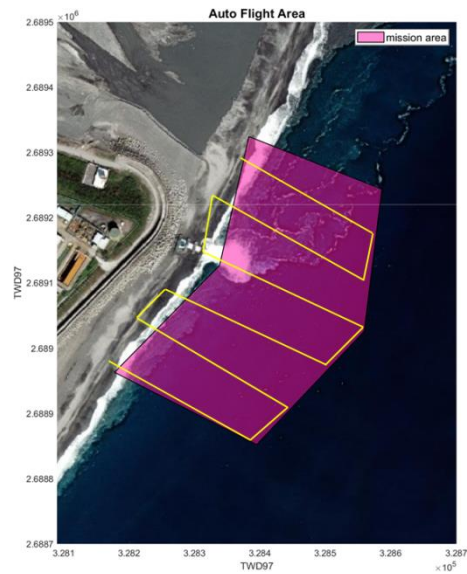


圖 7 自主任務航拍範圍示意圖

表 2 自主任務規劃設定表

航高設定	120 m
拍攝模式	2 維正射影像拍攝
航線設定	單 S 航線
重疊率設定	前後 50%、側向 50%
雲臺角度	90°

現場試驗所得影像，經以灰度值與溫度值的閾值轉換方程式，將各張熱顯像的灰度值轉換為量測溫度值，並透過無人機所紀錄的 GPS 地理資訊對範圍內的二維溫度散佈數據給定地理網格後進行內插分析。經比較使用(a)近體校正方法與(b)不使用近體校正方法兩者的成果差異，可得如圖 8 所示之各時段平面溫度分佈成果。由圖 8 中使用(a)近體校正方法與(b)無使用校正方法的溫度分佈成果進行對照，顯示在使用近體校正方法進行航拍的情況下，溫度分佈區間較無使用校正方法的情況下來得多，顯示在使用近體校正方法進行熱顯像溫度測量時，

能測量到更為細部的溫度區間，即係能對一般熱顯像在進行遠距離溫度測量的精度達到一定程度的提升效果。

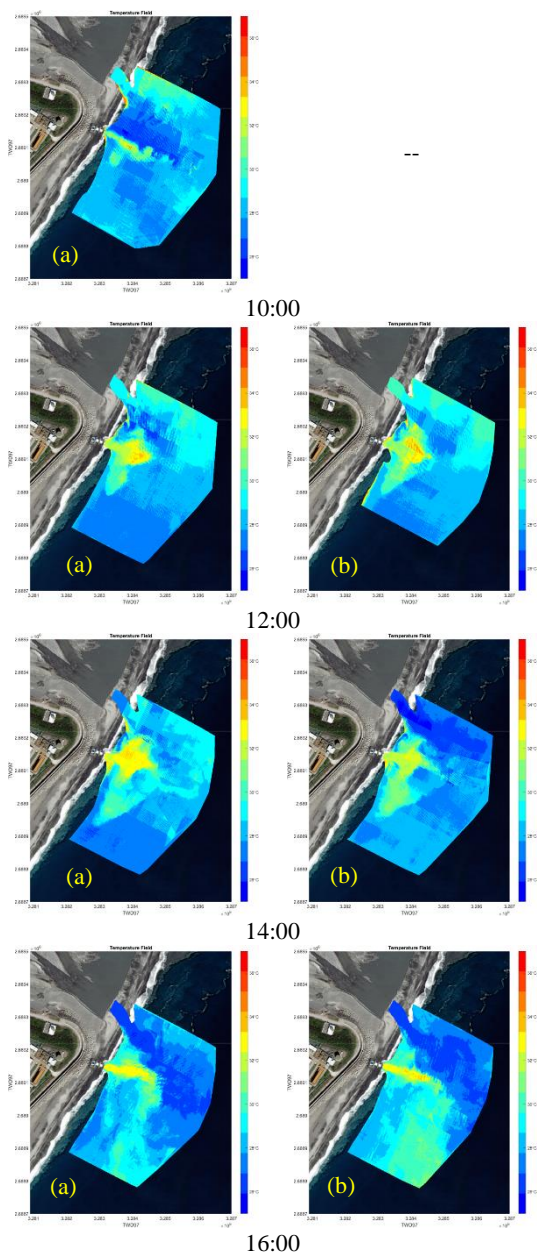


圖 8 各時段平面溫度分布圖

而為檢視使用近體校正方法提升的溫度測量誤差，依前節中分析各時段熱顯像溫度測量改正係數對任務航拍實驗中搭載近體校正配置拍攝並分析的溫度資料成果進行修正，並將改正後的溫度資料與現場定點式溫度計實測溫度值進行單點溫度驗證如

表 3 所示。經成果分析比較顯示，使用近體校正方法能有效降低紅外線在遠距離水域溫度測量時所造成的誤差。而根據表中列出各時段誤差所示，在上午 10:00 時段於使用校正方法進行溫度測量航拍上，有最小的溫度測量誤差，約為 0.52%。其次則為下午 14:00 時段使用校正法的測量誤差，約為 0.55%。最大測溫誤差則發生於中午 12:00 時段，約為 4.98%，直接測量的最大測溫誤差也出現在相同時段，約為 7.55%。由本研究成果顯示在進行大範圍水域任務規劃測溫時，應盡量避免於中午 12:00 時段進行，建議可於下午 14:00 時段過後，16:00 時段前進行測量，可降低外在環境對紅外線熱顯像測量溫度準確度的影響。

表 3 溫度資料誤差分析表

時段	無使用近體校正	定點溫度	溫度誤差
10:00	--	36.42°C	--
12:00	33.31°C	36.51°C	7.55%
14:00	36.84°C	36.12°C	1.99%
16:00	32.98°C	34.57°C	4.60%
時段	使用近體校正	定點溫度	溫度誤差
10:00	36.23°C	36.42°C	0.52%
12:00	38.33°C	36.51°C	4.98%
14:00	36.32°C	36.12°C	0.55%
16:00	34.00°C	34.57°C	1.65%

## 五、結論

1. 本研究設計改良之鋁製方格校正平板係以加熱鋁製方格板同步針對光學攝像鏡頭暨熱顯像鏡頭之成像扭曲進行校正，藉由簡化相機參數校正過程，可避免分別進行兩種鏡頭校正之系統誤差。
2. 根據本研究近體校正方法使用與否的比對成果，可清楚觀察在使用本研究設計的校正方法情況下，對溫度的可辨識度較細微，因此判斷使用近體校正方法能有效提升紅外線熱顯像鏡頭在遠距離測量條件下的測溫精度。
3. 近體校正方法與直接測量的測溫誤差全時段溫度改正比對成果，誤差範圍差異最大為下午 14:00 時段，差距約為 2.95%。
4. 分析各時段溫度改正成果，得知最大測溫誤差為正午時段的航拍成果，誤差約為 4.98%；最小誤差則為上午時段的航拍溫度測量成果，約為 0.52%。

5. 依據誤差分析成果，判斷使用近體校正方法進行自主任務航拍時，應盡量避免於正午時段日光強烈照射之環境條件下進行，最佳拍攝時段為上午 10:00 以及下午 14:00 進行飛航拍攝。

## 參考文獻

1. Chrzanowski, K. (1995) Influence of object-system distance on accuracy of remote temperature measurement with IR systems, *Infrared Physics & Technology*, 36(3), 703-713.
2. Zhang, Z. (2000) A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330-1334.
3. Krapels, K. A., Driggers, R. G., Vollmerhausen, R. H., & Tofsted, D. H. (2001) *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XII*.
4. Kargel, C. (2005) Infrared Thermal Imaging to Measure Local Temperature Rises Caused by Handheld Mobile Phones, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 54(4), 1513-1519.
5. Sun, J., Wu, J., Huang, Y., Liu, R., & Chen, L. (2009) Research on the Influence upon Accuracy of Temperature Measuring in Distance and Correction Method, *Asia-Pacific Conference on Information Processing*.
6. Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., & Kalogirou, S. A. (2014) Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review, *Applied Energy*, 134, 531-549.
7. Ye, W.-B. (2016) Thermal simulation and evaluation for non-uniformity detection of electrode, *Applied Thermal Engineering*, 96, 583-592.
8. Zhang, Y., Chen, Y., Fu, X., & Luo, C. (2016) A method for reducing the influence of measuring distance on infrared thermal imager temperature measurement accuracy, *Applied Thermal Engineering*, 100, 1095-1101.
9. Zhao, X., Zhao, Z., Guo, F., Zhang, X., Shi, Q. (2020) The Influence of Thermal Imager Parameters on the Accuracy of Infrared Thermal Imager, *IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science*, 1-4.
10. Roc. Wang. (2020) Procedure for measuring body temperature with DJI Mavic 2 DUAL. Retrieved from <https://www.flyingeye.fr/wp-content/uploads/2020/03/Procedure-for-measuring-body-temperature-with-DJI-Mavic-2-DUAL.pdf> (April 20,2020)
11. 莊弘豪(1997) 利用 Landsat 和 NOAA 衛星遙測電廠溫排水口附近海面溫度之研究，碩士論文，國立中山大學海洋資源學系。
12. 陳俊菁(2004) 應用紅外線攝溫影像術檢測磁磚黏貼完整性，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系。
13. 那至中(2010) 面陣列熱影像特性之研究，碩士論文，國立政治大學地政研究所。
14. 林谷陶(2014) 紅外線熱像技術檢測外牆磁磚系統界面缺陷之可行性研究，碩士論文，國立臺灣海洋大學材料工程研究所。
15. 錢軒宇(2019) 應用無人機熱紅外線影像於近海域溫排水擴散之研究，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程學系。
16. 張煜緯(2020) 應用無人機紅外線影像於海域表溫分佈特性之研究-以花蓮和平海域為例，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程學系。

# 臺灣船舶事故與油污染管制策略探討

曾柏興

<sup>1</sup> 國立臺灣海洋大學航運管理學系助理教授

## 摘要

本研究藉由文獻回顧與專家訪談探討臺灣重要船舶事故與油污染管制策略，10 位受訪專家包括航運業者 4 人、政府部門 4 人、學者 2 人。研究指出船公司本身應做好自主管理(如人員訓練、船舶預防維修保養、投保等)與落實航運與港埠公約(法規)等相關工作，政府相關單位則應強化災害通報、人員訓練與應變機制、案例探討、安全查核、法規修訂相關工作，發現成果可供航運業者、政府相關單位與其他利害關係人(如海洋生態與環保機構)制定防範相關事故決策之參考，減少潛在環境污染與外部成本。

關鍵詞：船舶、事故、油污染、策略

## Exploring Ship Accidents and Oil Pollution Regulation Strategies in Taiwan

Po-Hsing Tseng

\* Assistant Professor, Department of Shipping and Transportation Management, National Taiwan Ocean University

### ABSTRACT

This paper aims to explore ship accidents and oil pollution regulation strategies in Taiwan based on a literature review and qualitative data from expert interviewees. These experts are shipping operators (4), governmental officials (4), scholars (2). For shipping companies, results indicate they should conduct self-management works (e.g. crew training, ship preventive maintenance, insurance policies) and follow shipping and port conventions (rules). Regarding governmental authorities, it is suggested they strengthen disaster notification procedures, crew training, response mechanism, case studies, safety check, and rule modifications. These findings can help inform decision analysis of related accidents regarding shipping operators, governmental units and other stakeholders (e.g. ocean ecology and environmental organisations) in order to reduce potential environmental pollution and its external costs.

Keywords: Ship; Accident; Oil Pollution; Strategy

### 一、前言

根據聯合國海洋公約，海洋污染源主要包括陸源污染、傾廢、船舶污染、海底活動的污染與大氣污染等六類，船舶的污染約佔海洋污染總量 12%，船舶對於海洋環境污染影響層面最大者為油類污染，由於船舶發生意外時(如擱淺)容易造成的油污外洩，尤其是油輪事故發生所帶來的影響更為重大(Garcia-Borboroglu et al., 2006; Ferraro and Pavliha, 2010; Liu, 2010; Eronat et al., 2019; Linh and Tan,

2020; Wu et al., 2021)，隨著船舶大型化趨勢，船舶所運載的油料越多，若發生事故造成嚴重油污染對於海洋生態、經濟(如保險、賠償責任釐清與訴訟)與社會(如對周遭居民生活、精神壓力、復原工作、對觀光產業的影響)的影響更是難以衡量(Chiau, 2005; Carić and Mackelworth, 2014; Afenyo et al., 2019; Tan, 2021)。

譬如 1898 年 3 月 24 日埃克森油輪瓦迪茲號(Exxon Valdez oil spill)在阿拉斯加港灣觸礁，導致

1,100 萬加侖原油漏油事件(Prabowo and Bae, 2019)，成為後續船舶油污是件重要的探討案例，也引發後續學者持續探討如何強化與偵測船舶油污的相關工作 (Michinel-Álvarez, 2011; Muttin, 2011; Savov, 2020)。過去在許多國家發展許多關於船舶油污的研究(Zhu et al., 2013, Xiong et al., 2015; Ringbom, 2018)，譬如美國(Cakir et al., 2021)、中國渤海灣(Liu et al., 2015; Liu et al., 2016)、波羅的海 (Baltic Sea) (Ringbom, 2018)、土耳其 Çandarlı Bay (Eronat et al., 2019)、越南(Linh and Tan, 2020)等。在臺灣關於船舶事故油污的相關研究仍不多見，譬如 Fan et al. (2018)從法律的觀點探討 2016 年德祥臺北貨櫃輪擱淺油污外洩的問題。

為強化對於國內船舶事故產生的油污染相關議題的認識，本研究擬藉由國內外文獻回顧、國內外相關法規與判例，透過不同領域專家訪談分析探討船舶油污染事故發生的原因、所造成的影響，進而提出有效的油污染管制策略以強化對利害關係人(如當地居民、漁民等)的保障，預期研究成果可供未來修訂海洋污染防治相關法規與強化海洋污染緊急因應計畫之參考，同時對於政府相關單位(如臺灣港務股份有限公司、航港局、海洋委員會等)、船舶業者、其他利害相關人等等提供政策建議，此外，並可強化國人對於海洋環境污染防治的認識。

## 二、文獻回顧

船舶油類污染的來源可以分為意外事故之洩漏及輪機日常操作之排泄。除了發生事故檢查船舶是否漏油的工作外，船舶船員平時就必須透過儀器定期查核船舶本身是否已經存在漏油(Muttin, 2011)，透過事前的防範以降低潛在的事故發生，漏油事件嚴重者可能引發後續的失火爆炸，人員傷亡等情形。在過去的數十年來海上沉船事故造成油污事故仍不斷發生(Liu et al., 2016; Savov, 2020)，譬如 2012 年 1 月 13 日發生的歌詩達(Costa)協和號在地中海發生觸礁事故，裝滿 2,300 噸柴油的油缸破損釀成生態災難，污染海床與海岸線(吳東明，民 105 年)。在臺灣，2001 年的 1 月 14 日一艘希臘籍「阿瑪斯號 (Amorgos) 貨輪，行經台灣南部海域時因機械故障失去動力，油料外洩影響鵝鑾鼻沿海及附近珊瑚礁海岸(Chiau, 2005)。2016 年 3 月 10 日基隆港籍「德翔

台北」號貨櫃輪上午航經新北市石門外海時，因機械故障失去動力，船艙擱淺造成油污鄰近海岸。Fan et al. (2018)則探討德祥臺北貨櫃輪油污溢漏與控制回應策略。周琬絨等(2020)利用模擬方法探討 2018 年 1 月一艘伊朗籍的桑吉號油輪(Sanchi)的漏油事件，並預測油污軌跡擴散結果。李江作與許永恩(2020)以屏東縣東琉線客船事故案例探討國籍船舶營運安全與防止污染管理相關法規進行研析。

過去許多研究指出船舶污染容易被生物體吸收，進入生物食物鏈系統之中，使食物鏈底層生物將有毒物質存於體內，導致在食物鏈中層或高層生物食用後，致使該類生物中毒或產生病變致死。過去曾有鳥類學家研究指出在檢驗海鳥屍體後發現，發現違法排放油性廢棄物與生態衝擊有強烈關聯性(Camphuysen and Heubeck, 2001; Wiese and Ryan, 2003; Garcia-Borboroglu et al., 2006)。

## 三、研究方法

本研究以專家深度訪談方法探討船舶污染的防治策略，透過三類領域專家(航運業者 4 人、政府部門 4 人、學者 2 人，共計 10 人)的意見廣泛的蒐集相關資料並加以整理(如表 1)，本研究的訪談對象來源主要透過文獻回顧輔以滾雪球方式找到其他合適的人選，受訪者應具備相關工作經驗或研究經驗(如至少 10 年以上)，對研究主題有相當的認識或著作。

表 1 受訪專家彙整

類別	單位	年齡	教育程度	職務名稱	相關工作年資
船公司	貨櫃航商	51~60	碩士	經理	21~25 年
	貨櫃航商	51~60	碩士	工程師	21~25 年
	散裝航商	51~60	碩士	經理	21~25 年
	散裝航	51~60	大學	主任	26~30 年

政府部門	商 航政司	41~50	大學	專員	11~15年
	港務公司	31~40	碩士	經理	11~15年
	航港局	41~50	大學	經理	11~15年
	海委會	41~50	碩士	工程師	16~20年
學術單位	學者	41~50	博士	副教授	11~15年
	學者	41~50	博士	副教授	11~15年

專家訪談的日期為 110 年 9 月 1 日~110 年 9 月 30 日，訪談地點為受訪者的工作辦公室，採面對面訪談，每次訪談時間約 30 分鐘~1 小時。本研究初步擬定下列四個問題，藉由受訪專家的回答在從其內容中，延伸至其他潛在重要問題，訪談過程將遵照學術倫理與確保受訪者的隱私，受訪內容將整理為逐字稿，萃取重要的議題概念(Sciberras and Silva, 2018)，加以彙整重要的研究發現。

1. 請問您最有印象的船舶油污污染事件有哪些?理由為何
2. 請問您認為每次發生船舶污染事件，常發生的爭議問題有那些?您的看法為何?
3. 請問您認為有效防治船舶油污污染的具體作法(含環境污染防範、保險、賠償機制)有哪些?
4. 對於政府與產業單位，防治船舶油污污染議題，您有甚麼建議?

## 四、結果與討論

### 4.1 船公司看法

2001 年希臘籍阿瑪斯號(Amorgos)於墾丁與 2016 年紐埃籍耘海(Yun Hai)貨輪於澎湖油污事件造成海洋生態重大傷害，船公司平時除了做好人員訓練(如定期查核主機是否有漏油)與緊急應變工作(如視漏油情形依照船上油污污染應急計畫向有關單

位(如國家應變中心、當地港口主管機關、當地船務代理、船公司、清除油污契約商等)報告，並將油污處理情形記載於航海或輪機記事簿中)、船舶歲修維修保養、保險等相關工作外，審選船東防護與補償協會(Protection & Indemnity Club)也是重要課題，良好的 P&I 可提供迅速與完善的補救機制，降低船公司後續的成本損失與資源浪費(如船舶在港口發生嚴重漏油將面臨巨額罰款、延遲開航或扣船)。對受害者而言(如漁民)，過去可能受限於欠缺完善的海域或海岸的生態資料，對於損害搶救或賠償可能無法有效估算。擴散的油污與除油劑可能讓毒素在海洋食物鏈中循環，對於生態、人類的環境都是重大影響。現行油輪、油罐船皆採雙殼設計，其他貨輪或郵輪可能仍採單殼設計，然而大型船舶仍會載運大量油料，發生事故時仍會產生重大漏油事件。事實上，船舶在加油過程中或油桶搬運過程中亦可能造成油污外洩，在不同天候船舶航行過程或泊靠碼頭時可能造成船舶航行的不穩定性，間接影響事故發生與後續污染事件。

### 4.2 政府部門看法

2001 年阿瑪斯號貨輪(Amorgos)擱淺、2008 年巴拿馬籍貨輪「晨曦號」(Morning Sun)與 2016 年德翔臺北 (T.S. LINES)擱淺事件所造成的油污事件讓人印象深刻，重大油污事件的發生必須牽動許多跨部門的合作工作與後續搶救、裁罰、保險理賠與訴訟或抗爭等相關問題。隨著綠色航運的發展趨勢，目前船公司皆必須遵守國際海事組織所公布的相關公約(如 The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MAROPL)與備妥相關證書(如國際防止油污證書)，各國港口國官員也會依照這些管制標準來查核進出口的船舶，瞭解船舶適航性與降低次標準船的存在。此外，港口、海岸管理單位(如港務公司、航港局、海洋委員會、海巡署等)也會依國內相關法規(如海洋基本法、海洋污染防治法、海洋污染防治法施行細則、海水污染管理規則、海商法、商港法、船舶法、漁業法、民法、刑法等)對港區的船舶進行污染防範進行監測與查核。建議各港口管理單位應能落實政策或法規的執行力，定期做好緊急應變措施與演練，編列預算備妥足量的防污資材、攔油索、吸油棉索等，相信可以有效降低船舶油污事故發生與後續的災害嚴

重程度。再者，於進行油污採樣、搶救過程中，仍應強化個人防護安全相關工作(如配置工作服、安全帽、手套、護目鏡、安全鞋)。

### 4.3 學者看法

2010年英國石油公司(BP)在墨西哥灣的鑽油台發生爆炸引發重大傷亡與油污。荷蘭皇家殼牌公司(Royal Dutch Shell Plc)在2015年於阿拉斯加進行石油探測工作時曾發生石油外洩，2014年韓國世越號客船(Sewol)於航行時發生事故，造成重大傷亡與油污。在臺灣，2001年的阿瑪斯號貨輪油污與2016年德祥臺北貨櫃輪擱淺油污事件亦造成嚴重的環境污染與經濟損失。船舶油污的原因可能很複雜，可能會人為操作疏失、機械故障或其他不可抗逆因素，且污染事件往往會涉及民事與刑事責任，若船舶油污損害事實認定牽涉國際調查與追訴，往往曠日廢時，有可能受到國際政治壓力的影響，讓最後的判決結果不如預期。相關權責單位(如交通部、環保署、運輸安全委員會、農委會、行政院國家搜救指揮中心、經濟部)平時應做好平行與垂直通報機制與合作模式，透過建置有效資料庫分析來防範潛在的船舶油污事故發生。再者，可透過油污損害賠償基金以彌補受害者的損失並適當補償船舶所有人的額外經濟負擔。船舶污染產生的人體健康、環境生態、經濟、觀光、漁業、養殖業、社會影響有時難以短期內可以認定，過去曾聽過為清除油污所噴灑的清潔劑有可能危害工作人員與海洋生態，因此所產生的間接健康與經濟損失仍帶來一些爭議。

### 4.4 綜合討論

阿瑪斯號(Amorgos)、晨曦號(Morning Sun)、德翔臺北(T.S. LINES)是近年臺灣地區附近較為重大的船舶漏油事件，在國外，英國石油公司(BP)與荷蘭皇家殼牌公司對於油污外漏的處理過程經驗亦可作為現行對於海域(岸)油污搶救與環境復原的重要參考案例，現行涉及船舶海洋污染的管轄單位仍有許多行政機關，建議政府相關部門應瞭解國際油污污染整備、應急和合作國際公約(International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation)的運作過程，提出對於負責航政、海上安全、港口國管制、船舶管理、海難救助、溢

油應變策略的相關工作(如油污回收、就地燃燒、海岸線清理)提出政策改善建議。船公司本身應能做好自主管理，強化人員訓練、船舶認證、預防性維修保養與意外事故維修保養、歲修、油污承保範圍，防範船舶系統或裝備性能退化，若油污事故發生後則提出改善報告，以增進航行的安全性與減少營運潛在風險的發生。

## 五、結論

本研究透過國內外文獻回顧、不同領域專家訪談等方式歸納目前海洋船舶污染所面臨的問題(如生態與人體健康的危害、損害賠償、環境復原相關工作)與潛在的改善建議(如權責分工、強化緊急應變機制、污染防治人員的能力(含訓練與演練)與配備)，對政府而言，本研究可供檢討國內已頒布的法規(如海洋基本法、海洋污染防治法、海洋污染防治法施行細則、海水污染管理規則、商港法、船舶法等)是否有需改進之處，強化未來法規修訂的完備性。再者，政府相關部門(如交通部港灣技術研究中心、環境保護署、港務公司、航港局、中央氣象局、中央災害應變中心等)應持續強化合作機制與資訊交流，進而建立完善的海洋(岸)、港灣環境資料庫。對船公司而言，研究發現可供其瞭解油污事故防範的重要性，並進而強化船舶監控數據的分析以探究潛在故障的原因，改善船舶航行的可靠性與油料管理相關工作，若船公司能強化內部稽核與自主性使用更高品質的油料，更能落實海洋環境較友善的綠色環保行為(Tseng and Pilcher, 2019)。後續研究可進一步探討船舶漏油產生的環境成本估算、分析影響船舶污染的重要因素、比較不同類型船舶的漏油情形探討、船舶油污共同海損相關問題。

## 謝誌

本文係科技部專題研究計畫(編號 MOST 105-2410-H-035-030)之相關研究成果。

## 參考文獻

1. Afenyo, M., Jiang, C., Ng, A.K.Y. (2019) Climate change and Arctic shipping: A method for assessing the impacts of oil spills in the Arctic, *Transportation Research Part D*, 77, 476-490.
2. Cakir, E., Sevgili, C. Fiskin, R. (2021) An analysis of severity of oil spill caused by vessel accidents,

- Transportation Research Part D*, 90, 102662, 1-24.
3. Camphuysen, C. Heubeck, M. (2001) Marine Oil Pollution and Beached Bird Surveys: The Development of A Sensitive Monitoring Instrument, *Environmental Pollution*, 112(3), 443-461.
  4. Carić, H. Mackelworth, P. (2014) Cruise Tourism Environmental Impacts – The Perspective from the Adriatic Sea, *Ocean & Coastal Management*, 102, 350-363.
  5. Chiau, W.Y. (2005) Changes in the marine pollution management system in response to the Amorgos oil spill in Taiwan, *Marine Pollution Bulletin*, 51, 1041-1047.
  6. Eronat, A.H., Bengli, F. Nesar, G. (2019) Shipping and ship recycling related oil pollution detection in Çandarlı Bay (Turkey) using satellite monitoring, *Ocean Engineering*, 187, 106157, 1-8.
  7. Fan, C., Hsu, C.J., Lin, J.Y., Kuan, Y.K., Yang, C.C. Liu, J.H., Yeh, J.H. (2018) Taiwan's legal framework for marine pollution control and responses to marine oil spills and its implementation on T.S. Taipei cargo shipwreck salvage, *Marine Pollution Bulletin*, 136, 84-91.
  8. Ferraro, G. Pavliha, M. (2010) The European and international legal framework on monitoring and response to oil pollution from ships, *Journal of Environmental Monitoring*, 12, 574-580.
  9. Garcia-Borboroglu, P., Boersma, P.D., Ruoppolo, V., Reyes, L., Rebstock, G.A., Griot, K. Da Silva, R.P. (2006) Chronic oil pollution harms magellanic penguins in the Southwest Atlantic, *Marine Pollution Bulletin*, 52(2), 193-198.
  10. Linh, D.T.M. Tan, P.V. (2020) Civil liability for ship -source oil pollution damage: should Vietnam join FUND 1992?, *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 12(4), 259-268.
  11. Liu, X., Meng, R., Xing, Q., Lou, M., Chao, H. Bing, L. (2015) Assessing oil spill risk in the Chinese Bohai Sea: A case study for both ship and platform related oil spills, *Ocean & Coastal Management*, 108, 140-146.
  12. Liu, X, M Guo, M., Wang, Y., Yu, X., Juo, J., Tang, C., Hu, X. Wang, C. Li, B. (2016) Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 110, 194-202.
  13. Linh, D.T.M. Tan, P.V. (2020) Civil liability for ship -source oil pollution damage: should Vietnam join FUND 1992?, *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 12(4), 259-268.
  14. Liu, N. (2010) International legal framework on the prevention of vessel-sourced pollution, *China Oceans Law Review*, 2, 1-32.
  15. Michinel-Álvarez, M.A. (2011) International Environmental Law: Preventing oil pollution by ships, *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 10(7), 2586-2607.
  16. Muttin, F. (2011) Umbilical deployment modeling for tethered UAV detecting oil pollution from ship, *Applied Ocean Research*, 33, 323-343.
  17. Prabowo, A.R. Bae, D.M. (2019) Environmental risk of maritime territory subjected to accidental phenomena: Correlation of oil spill and ship grounding in the Exxon Valdez's case, *Results in Engineering*, 4, 100035, 1-7.
  18. Ringbom, H. (2018) Regulation of ship-source pollution in the Baltic Sea, *Marine Policy*, 98, 246-254.
  19. Savov, O. (2020) Pollution with oil transported by specialised ships. Issues with the existing international conventions, *Journal of Maritime Law & Commerce*, 51(1), 79-102.
  20. Sciberras, L. Silva, J. (2018) The UN's 2030 Agenda for sustainable development and the maritime transport domain: the role and challenges of IMO and its stakeholders through a grounded theory perspective, *WMU Journal of Maritime Affairs*, 17(3), 35-459.
  21. Tan, P.V. (2021) A study of compulsory insurance for civil liability for oil pollution damage caused



- by ships: what are the rules for small ships that have no formal obligations under the convention?, *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 33(2), 113-121.
22. Tseng, P.H. Pilcher, N. (2019) Evaluating the Key Factors of Green Port Policies in Taiwan through Quantitative and Qualitative Approaches, *Transport Policy*, 82, 127-137.
  23. Wiese, F.K. Ryan, P.C. (2003) The extent of chronic marine oil pollution in southeastern new found land waters assessed through beached bird surveys 1984-1999, *Marine Pollution Bulletin*, 46(9), 1090-1101.
  24. Wu, B., Zhang, J., Yip, T.L. Soares, C.G. (2021) A quantitative decision-making model for emergency response to oil spill from ships, *Maritime Policy and Management*, 48(3), 299-315.
  25. Xiong, S., Long, H., Tang, G. Wan, J. Li, H. (2015) The management in response to marine oil spill from ships in China: A systematic review, *Marine Pollution Bulletin*, 96, 7-17.
  26. Zhu, L., Dong, B. Li, K.X. (2013) Compensation for oil pollution damage from ships in China: A way toward international standards, *Ocean Development and International Law*, 44, 73-95.

# 應用衛星與航空偵測油污技術滾動式預測 海域油污擴散

邱啓敏<sup>1\*</sup> 莊士賢<sup>2</sup> 董東璟<sup>3</sup> 吳立中<sup>4</sup> 范揚洺<sup>5</sup> 黃清哲<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup>國立成功大學近海水文中心博士後研究

<sup>2</sup>國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授

<sup>3</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系教授暨近海水文中心主任

<sup>4</sup>國立成功大學近海水文中心副研究員

<sup>5</sup>國立成功大學近海水文中心計畫經理

<sup>6</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系教授

## 摘要

開放海域若發生油污污染事件，油污擴散範圍受到風與海流的作用力會快速擴散，為了全面監控海面上油污污染擴散範圍，需藉由衛星影像以及航空偵測油污技術取得海面上大範圍的油污污染分佈狀況，再透過海洋流體動力數值模式、氣象數值模式、油污污染擴散數值模式滾動式進行預測未來油污漂移軌跡與擴散範圍。本文以 2021 年 6 月 22 日高雄大林外海洩油事件為例，收集海洋保育署提供的衛星影像以及航空偵測油污污染擴散範圍，輸入至油污污染擴散數值模式做為模擬之初始條件，再以中央氣象局預報的海氣象資料，滾動式進行預測油污污染未來在時空擴散的情況，其模擬結果皆與海洋保育署現地調查結果相符。油污污染發生初期之緊急應變計畫需結合不同科技技術與工具，才能較精確的掌握油污污染擴散的動向，以期能在最短時間內動員各種工具來控制油污污染的擴散，可減少油污污染對海洋環境的衝擊。本文的研究結果可提供政府機關或相關單位在進行油污污染緊急應變計畫與策略調整之參考。

關鍵詞：油污偵測、衛星、飛機、數值模式、滾動式預測

## Application of Remote Sensing in Detection and Rolling Forecast of Marine Oil Spills

Chi-Min Chiu<sup>\*</sup> Laurence Z.H. Chuang Dong-Jiing Doong Li-Chung Wu  
Yang-Ming Fan Ching-Jer Huang

<sup>\*</sup> Postdoctoral, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

The oil spill diffusion will be faster under the force of wind and ocean currents when the oil spill event occurred in the open sea. In order to comprehensively monitor the diffusion of spilled oil on the sea surface, satellite and aerial remote sensing can be used to detect the diffusion area of spilled oil. In addition, rolling forecasts the oil spill trajectory and diffusion using numerical models of ocean hydrodynamic, meteorological, and oil spill. This study adopted the oil spill event off the Kaohsiung coast on June 22, 2021 as a case study. In this study, oil-spill diffusion area was detected by the satellite images and the aerial photography that provided by the Ocean Conservation Administration. Forecasting of ocean current and wind were provided by the Central Weather Bureau. This data can be used as inputs to the oil spill model for rolling forecast the diffusion of spilled oil in future. The forecast results are also consistent with the on-site survey results of the Marine Conservation Administration. Emergency response plans in the early stage of oil spill require a combination of different technologies

and tools in order to accurately forecast the diffusion area of oil spill for reducing the impact of oil spills on the marine environment. Consequently, the result of this study can provide as a reference for government agencies or related units to plan and respond for effective oil spill emergency response plans and strategic adjustments.

Keywords: Oil spill detection; Satellite; Aircraft; Numerical model; Rolling forecast

## 一、前言

臺灣自民國 89 年開始施行海洋污染防治法後，二十年來本國海域歷經多次的油污染事件，環保署與各機關持續改進油污染的相關應變處理機制，目前已臻完備。在法制面也進行過多次的調整與修正，譬如：民國 106 年 1 月 3 日修訂「重大海洋油污染緊急應變計畫」（簡稱應變計畫），內容提及因海難事件導致海洋污染發生，由交通部開設海難災害應變中心，統籌應變處理及執行油污染應變；而非因海難事件導致海洋污染發生，則由行政院環境保護署（簡稱環保署）依應變計畫內容執行應變。民國 107 年 4 月 28 日又因海洋委員會及所屬機關海洋保育署（簡稱海保署）成立，於民國 109 年 6 月 29 日海洋污染防治管轄權由環保署改為海洋委員會（海保署網頁）。

依據應變計畫中洩油量的分類共有三種，如洩油量未達一百公噸屬於第一級的小型外洩事件，洩油量達一百公噸至七百公噸屬於第二級的中等程度外洩事件，洩油量逾七百公噸屬於第三級的重大外洩事件。如發生任一種洩油量之洩油事件，皆會依據不同層級成立「油污染緊急應變中心」，由海委會招集相關部會進行緊急應變，以及時有效獲得各項人力與設備資源。近十年來在環保署與海保署的努力之下，已建立一套完整海域油污染緊急應變計畫，計畫中也建置衛星與航空等科相關技方式進行偵測海面上油污染擴散範圍，偵測結果可以提供電腦數值模式滾動式的進行預測油污染漂移軌跡與擴散範圍，可提供緊急應變策略調整之參考，希望能在最短時間控制海域油污染的影響範圍，以減少對海域環境的衝擊與影響。

今 110(2021)年 6 月 22 日高雄大林外海發生洩油事件，油污染漂移擴散至小琉球與與恆春地區，在油污染事件發生初期，海保署即應用如衛星、直昇機、UAV 無人機等各種科技方法，分別在不同時間進行偵測海面上油污染擴散範圍，以掌握油污染

對海域的影響範圍。如將海保署應用科技方法偵測到的油污染擴散範圍輸入油污染擴散數值模式，做為油污染擴散模擬的初始洩油條件，再搭配海氣象數值模式預測的風與海流，即可提升油污染漂移軌跡與擴散範圍預測的精度。

有鑒於此，本文即以海保署在高雄大林外洩油事件應用科技追查方法偵測的油污染擴散範圍，作為的油污染擴散模式輸入的洩油初始條件，油污染漂移擴散的驅動力則以中央氣象局海氣象數值模式預測的海氣象資料做為輸入條件，透過模擬可得知油污染在海面上擴散的影響範圍，模擬結果可提供油污染緊急應變策略調整之參考依據，以期未來若發生油污染事件時能將油污染的災害降至最小。

## 二、研究方法

本文在油污染擴散數值模式則採用美國 NOAA 的油污擴散模式 GNOME，GNOME 是一套 Eulerian/Lagrangian 的溢油軌跡模式 (Beegle-Krause, 2001)，是 NOAA 架構下有害物質緊急應變組 (Hazardous Materials Response Division, HAZMAT) 所發展的油污擴散模式。GNOME 模式也常被全世界應用在實際海域油污染擴散模擬及油污染相關學術研究上，邱等人(2018)曾應用 GNOME 預測臺灣近岸海域油污染的擴散。

海面上油污染擴散及漂移的驅動力主要是風與海流，因此掌握風與海流的變化趨勢才能進一步模擬油污染擴散及漂移方向。本文研究案例採用的海氣象預測資料是來自中央氣象局，在氣象模式是採用新一代的中尺度數值天氣預報系統 WRF(Weather Research and Forecasting) (Hong et al., 2020)，海流模式是採用美國 VIMS(Virginia Institute of Marine Science)發展的 SCHISM(Semi-implicit Cross-scale Hydrosience Integrated System Model)三維跨尺度海洋數值模式(Zhang et al., 2015)。SCHISM 模式也成功應用在 2016 年「德翔台北」油污事件(Chiu et al., 2018)。

本文研究案例即結合油污擴散數值模式 GNOME、氣象數值模式 WRF、海流數值模式 SCHISM 等模式進行初始洩油的油污擴散模擬，之後再以海保署應用科技追查方法偵測得到的海面上油污擴散範圍，滾動式輸入至 GNOME 模式做為初始洩油的條件，並更新海氣象預測條件進行二次的油污擴散模擬。藉由本文的方法可進一步探討如何提升海域油污擴散模擬的精度，以提供油污污染緊急應變策略調整之依據。

### 三、油污擴散模擬結果與討論

依據海保署及媒體資訊得知中油公司大林煉油廠外海 2 號浮筒約於 2021 年 6 月 22 日凌晨 2 時 18 分因賴比瑞亞籍「NISSOS RHENIA」油輪進行油輸送時，因內串蛇管第七節破裂發生油污洩漏，中油公司立即停止油輸送，也隨即出動多艘工作船進行現場處理(海保署網頁)，預估最大洩漏油量約 50 公秉。

本文依據上述資訊，以及海保署以遙測科技方法追查到的油污擴散範圍等資訊，來設定數值模擬參數，並進行二次的油污擴散模擬。第一個案例(0622-1)的初始溢洩油模擬參數設定如表 1，溢洩油地點為北緯 22° 29' 46.6" 及東經 120° 16' 40.5"；初始溢洩油時間為 2021 年 6 月 22 日 02:00；油品為 Medium Crude；總洩油量为 50 公秉；溢洩方式為持續溢洩 30 分鐘；模擬時間為 72 小時；預測風場來自中央氣象局 WRF 模式；預測流場來自中央氣象局 SCHISM 模式。

圖 1 為洩油事件初始時間 WRF 模式預測 6 月 22 日 02:00 臺灣西南海域的風場，圖中流矢表示風向，流矢顏色表示風速大小，由預測結果顯示小琉球附近海域風向約為西南方向，接近高雄外海風向受到陸地影響轉為東南方向，而在屏東縣車城鄉約轉為東方向。圖 2 為洩油事件初始時間 SCHISM 模式預測 6 月 22 日 02:00 臺灣西南海域的流場，圖中流矢表示海流流向，流矢顏色表示海流流速大小，由預測結果顯示高雄至小琉球附近海域海流流向約為南南東至東南方向，在屏東縣車城鄉外海受到陸地地形影響約轉為東方向。

圖 3 為海保署提供 6 月 23 日 18:00 由衛星影像偵測海面上油污擴散分佈情況，由圖中可知油污污染影響範圍在小琉球南方至屏東車城外海海域，估

算油污在海面上分佈的面積約有 290 平方公里。圖 4 為 GNOME 模式預測溢洩油發生後 40 小時後油污擴散的範圍，圖中綠色圓點為顯示漂浮在海面上的油污，紅色圓點為顯示黏附在岸邊的油污，紅色線條圈選出的不規則範圍是來自圖 3 中疑似油污的邊界線。模擬結果顯示油污除了影響小琉球北邊漁福漁港至烏鬼洞的海岸，海面上油污擴散範圍也繼續往南邊海域擴散漂移至屏東縣枋山鄉外海離岸約 20 公里處。此影響範圍與海保署應用衛星科技追查到的油污擴散範圍(圖 3)之比較，顯示油污污染皆有分布在小琉球以南至屏東縣車城外海的海域，但數值模式預測的污染範圍更接近位於北方的污染源，且預測的污染範圍比衛星所辨識出的範圍略小。

表 1 0622-1 高雄大林外海溢洩油事件模擬參數

參數名稱	參數設定
溢洩位置	Latitude: 22° 29' 46.6" N Longitude: 120° 16' 40.5" E
初始溢洩時間	2021/06/22 02:00
溢洩油品	Medium Crude
總洩油量	50 公秉
溢洩方式	持續溢洩 30 分鐘
預測風場	CWB-WRF
預測流場	CWB-SCHISM
模擬時間	72 小時

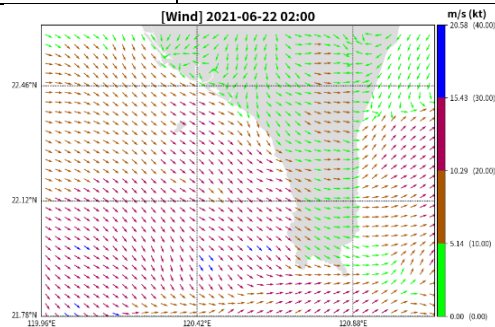


圖 1 CWB-WRF 預測 6 月 22 日 02:00 的風場

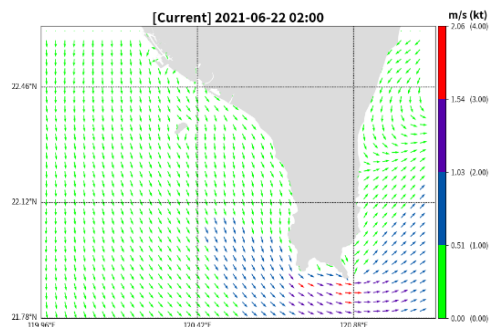


圖 2 CWB-SCHISM 預測 6 月 22 日 02:00 的流場

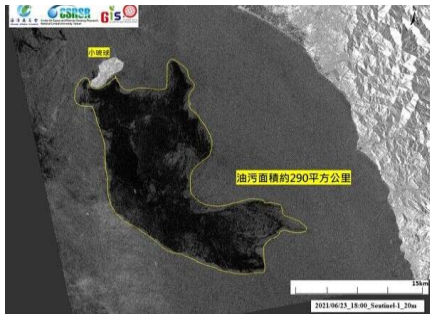


圖 3 海保署提供 6 月 23 日 18:00 衛星影像顯示海面上疑似油污的擴散分佈範圍

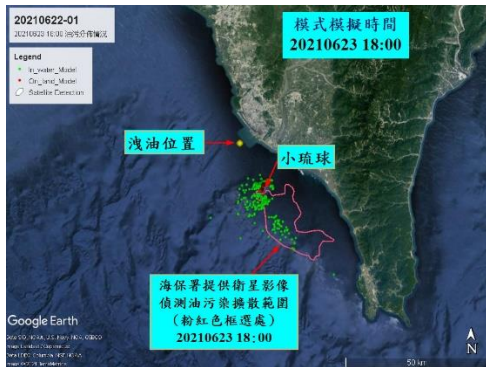


圖 4 0622-01 案例發生洩油 40 小時後油污染在海面上分佈情況

圖 5 為自開始溢洩油後經歷 40 小時的油污染漂移軌跡歷程，由模擬結果得知油污在開始溢洩時受到風與海流左作用即往小琉球方向漂移，並未往高雄海岸漂移擴散，油污約在 6 月 22 日 15:00 碰觸到小琉球北邊的海岸；由圖 5 的油污染漂移軌跡也顯示出油污繞過小琉球右邊海岸繼續往東南方漂移。

表 1 之洩溢油初始發生時間是在凌晨 02:00，有可能油污被發現前就已洩漏，因此洩溢油真正開始時間是有可能更早。據此我們認為更長的持續溢洩時間會導致更多洩溢油量，因此我們的油污模擬結果應會更往東南方漂移擴散，污染範圍也會更大，而與衛星影像辨識出的範圍會更相符合。

圖 6 為第一個案例發生洩油後 72 小時期間油污風化數量的變化趨勢，圖中綠色點線表示水面上油污，紅色點線顯示抵達岸邊油污，藍色點線表示蒸發與分散的油污。圖中水面上油污與抵達岸邊油污的變化趨勢顯示，油污染約在 6 月 22 日 16:00 至 6 月 23 日 10:00 抵達小琉球周圍海岸的數量明顯增加，此結果表示油污染在這段期間會影響到小琉球的海岸。在模擬經歷 72 小時後的油污數量變化趨

勢來看，水面上油污數量自初始溢洩的 50 公秉至模擬結束剩下 26 公秉；抵達岸邊油污數量雖在影響小琉球期間最多有增加至 24.5 公秉，但最後僅剩 4.5 公秉；蒸發與分散的油污數量共 19.4 公秉。

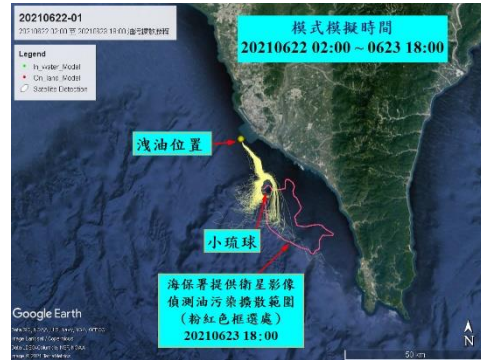


圖 5 0622-01 案例發生洩油 40 小時後油污染在海面上漂移軌跡的歷程

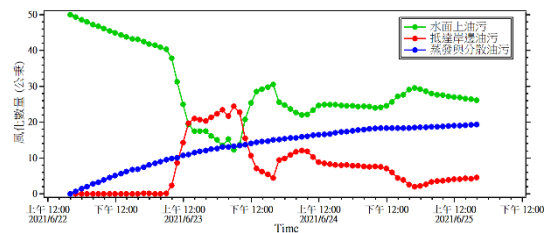
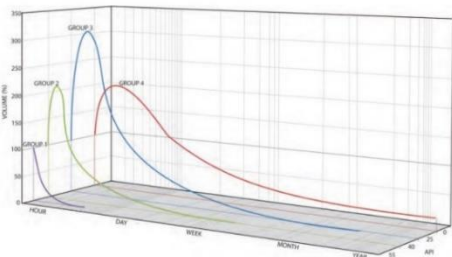


圖 6 0622-01 案例發生洩油 72 小時後油污染風化數量變化趨勢

真實溢洩油事件需要即時更新各項資料，並依據更新資料滾動式進行預測未來油污染擴散的情況。有鑑於此，第二個案例即依據海保署提供的衛星影像所辨識出的海面上油污染分佈範圍做為初始模擬的條件，海氣象資料也持續收集及更新中央氣象局最新的預測資料。第二個案例(0622-2)之模擬參數設定如表 2，洩油位置是依據圖 3 的海面上油污染擴散分佈範圍；洩油時間為 2021 年 6 月 23 日 18:00；油品為 Medium Crude。

圖 7 為 ITOPF(2014) 研究不同油品在海面上經乳化作用後體積變化率的結果，此次洩油油品較偏向"Group 3"的油品特性，此類型油污如溢洩在海面上，受到波浪作用會在幾小時內經乳化作用後海面上產生的油污體積會較原溢油量增加為 3 倍，但在二星期後海面油污體積會降至原溢油量的 50% 以下。表 3 為 ITOPF 估算海面上油污體積方式，透過海面上油污的顏色可估算油污的體積，經收集海保署及媒體資訊顯示在小琉球附近海面上油污顏色大部分

為彩虹色且呈現分散的情況，而 Medium Crude 原油的比重約 0.85，因此依據衛星影像分析得出的油污染擴散範圍，初略估算總洩油數量約有 60 公秉；溢洩方式為瞬間，模擬時間為 72 小時，預測風場來自中央氣象局 WRF 模式，預測流場來自中央氣象局 SCHISM 模式。



資料來源：ITOPF-TIP-02(2014)

圖 7 不同油品在海面上經乳化作用後體積變化率

表 2 0622-2 高雄大林外海洩油事件模擬參數

參數名稱	參數設定
溢洩位置	依據圖 3 衛星影像偵測海面上油污染擴散分佈範圍
初始溢洩時間	20210623-18:00
溢洩油品	Medium Crude
總洩油量	60 公秉
溢洩方式	瞬間
預測風場	CWB-WRF
預測流場	CWB-SCHISM
模擬時間	72 小時

表 3 海面上油污體積估算方式

顏色	大約厚度(mm)	大約體積(m³/km²)
銀色	>0.0001	0.1
彩虹色	>0.0003	0.3
黑色/暗棕	>0.1	100
棕色/橘色	>1.0	1000

資料來源：ITOPF-TIP-01(2014)

以 GNOME 模式滾動式進行第 2 次油污染擴散模擬，圖 8 為模擬洩油 51 小時後(6 月 26 日 06:00)油污染在海面上分佈情況，模擬結果顯示油污染已抵達屏東縣車城鄉海生館附近的海岸，且車城鄉外海仍有油污的分佈；另外，圖中橘色框選處為國家海洋研究院提供的衛星影像偵測到的油污染擴散分佈範圍，此結果亦驗證模擬油污染漂移方向及抵達位置與衛星影像偵查結果是吻合的。圖 9 為顯示模擬在洩油 55 小時後(6 月 26 日 10:00)油污染在海面上分佈情況，由模擬結果顯示油污染影響範圍更廣，已抵達車城鄉與恆春鎮的海岸，並沿著海岸擴散至恆春鎮貓鼻頭海岸，有少許油污染抵達鵝鑾鼻的海

岸。圖 10 為空勤總隊直升機在海生館附近海域勘查海面上油污染分佈的情況，由空拍照片顯示海面上有分散的油污染漂浮在海面上，由此可驗證圖 9 模擬油污染漂移方向與實際勘查結果也是吻合的。

圖 11 為第二個案例發生洩油後油污染風化數量之變化趨勢，在模擬經歷 72 小時後，水面上油污數量自開始溢洩的 60 公秉至模擬結束剩下 16.3 公秉；抵達屏東車城鄉至恆春鎮岸邊的油污數量約 20.3 公秉；蒸發與分散的油污數量共用 23.3 公秉。

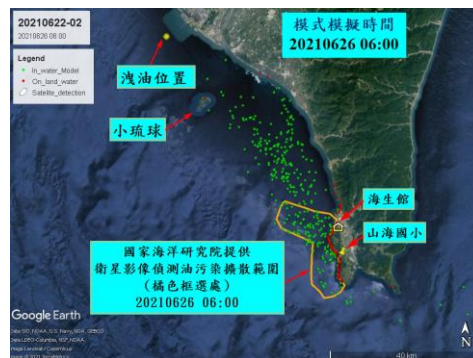


圖 8 0622-2 案例發生洩油 51 小時後油污染在海面上分佈情況

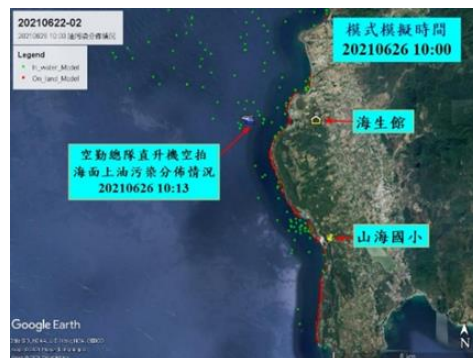


圖 9 0622-2 案例發生洩油 55 小時後油污染在海面上分佈情況



圖 10 海保署提供空勤總隊直升機空拍屏東海生館附近海域油污染在海面上分佈情況

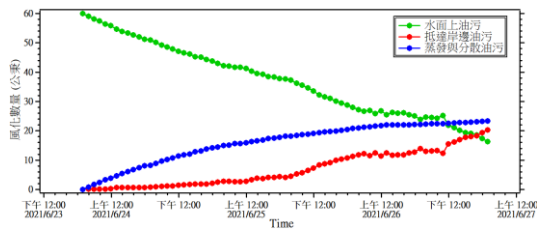


圖 11 0622-2 案例發生洩油 72 小時後  
油污染風化數量變化趨勢

#### 四、結論與建議

6 月 22 日高雄大林外海洩油事件發生時間是在凌晨，在夜晚漆黑的大海上無法像白晝一樣能在最短的時間內確認油品溢洩出海面上之面積與時間，所以第一次油污染模擬條件的溢洩油位置是輸入單一洩油點；但在經歷一段時間受到風與海流的作用，油污染即快速擴散演變成一個範圍，後續需滾動式修正油污染模擬條件，如洩油位置則需輸入一個範圍的油污染面積。

本文第一個案例初始洩油量與發生時間是依據海保署及媒體資訊來作為油污擴散模擬的輸入條件，可能與實際數值有所不同，因此模擬結果與衛星影像中的油污分佈範圍會有差異，但油污漂移方向相當一致。第二個案例本文依據衛星影像辨識的油污分佈範圍為起始條件，進行油污擴散模擬，漂移方向及分布範圍的預測結果雖與國海院應用遙測科技勘查到油污結果相符；但經由海保署空拍照片顯示油污染在屏東縣車城鄉至恆春鎮海域的油污染面積與第二次模擬結果會有差異，此結果可由圖 3 衛星影像標示油污染範圍內顏色有深淺之差異，可能是洩油事件發生期間正值梅雨鋒面通過導致天候狀況不佳，所以可能會影響衛星影像偵測的結果，因此若依據衛星影像辨識的油污擴散範圍滾動式進行模擬，就會造成海面上油污擴散影響的範圍較大。

本文研究模擬油污染擴散範圍結果雖與海保署現地勘查實際情況有些許差異，但油污漂移方向是吻合的。藉由本文研究成果可知，透過海委會所屬單位應用各種科技方式偵測到的海面上油污染擴散資訊，可輸入至油污擴散數值模式，滾動式地進行油污染未來漂移方向與擴散範圍之預測，確實可有效提升預測結果的精度，並提供現場指揮官做緊

急應變計畫擬定與應變能量調度及配置之參考，得以在最短的時間將油污染影響範圍控制住，以減少油污染對海洋環境與生態的衝擊。

#### 謝誌

本文的油污染(影像)資訊來源係海委會所屬的海保署及國海院在 6 月 22 日高雄大林洩油事件期間應用多種科技方式取得的現場實際油污染相關資訊；油污染擴散模擬所需的流場與風場則來自中央氣象局提供之海氣象預報資料，承蒙海委會與中央氣象局提供之資訊使本研究結果更臻完善，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. Beegle-Krause, C. J. (2001) General NOAA oil modelling environment (GNOME): A new spill trajectory model, in *Proceedings of the 2001 International Oil Spill Conference*, 2, 865-871.
2. Chiu, C. M., Huang, C. J., Wu, L. C., Zhang, J. Y. L., Chang, L. Z. H., Fan, Y. M., Yu, H. C. (2018) Forecasting of oil-spill trajectories by using SCHISM and X-band radar, *Marine Pollution Bulletin*, 137, 566-581.
3. Hong, J. S., Chen, W. J., Chen, Y. J., Jiang, S. Y., & Fong, C. T. (2020) Impact of FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO on High-Resolution Hybrid 3DnVar System at Central Weather Bureau of Taiwan, In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 4161.
4. ITOPF. (2014) Aerial Observation of Marine Oil Spills, *Technical Information Paper-01*.
5. ITOPF. (2014) Fate of Marine Oil Spills, *Technical Information Paper-02*.
6. Zhang, Y., Ateljevich, E., Yu, H.C., Wu, C.H., and Yu, J.C.S. (2015). A new vertical coordinate system for a 3D unstructured-grid model. *Ocean Modelling*, 85, 16-31.
7. 邱啓敏、黃清哲、莊士賢、范揚洺、吳立中 (2018) 「SCHISM 及 GNOME 油污擴散模式應用於臺灣近岸海域油污染的預測」，*海洋工程學刊*，第 18 卷，第 2 期，第 87-119 頁。

# 港區船舶能源使用及空氣污染排放 偵測技術評估之研究

李俊穎<sup>1</sup> 許義宏<sup>2</sup> 林啟燦<sup>3</sup> 葉金課<sup>4</sup> 翁健二<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長

<sup>2</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

<sup>3</sup>國立高雄科技大學海洋環境工程系教授

<sup>4</sup>國立高雄科技大學輪機工程系兼任助理教授

<sup>5\*</sup>國立高雄科技大學電訊工程系教授

## 摘要

我國交通部航港局因應 IMO MEPC 制定之防止船舶污染國際公約規範，於 2020 年 01 月 01 日開始管制航入臺灣國際商港區域之外籍船舶及國籍船舶應採用 0.5% 以下硫含量之低硫燃油或具有同等減排效應之裝置或替代燃料。此次研究著重於探討適切我國港埠地區之船舶空氣污染排放偵測技術分析與評估，並就我國港埠地區環境特性及條件研擬船舶空污排放偵測可行技術之先期規劃，藉以未來能有效針對船舶航行時之燃料油切換使用情形的調查。為增進我國海域航行安全並維護海洋生態環境，評估透過此次技術規劃與資料彙整研析之成果，將可協助我國對於我國海洋事務與污染防治規劃以及船舶使用低硫燃油管制之查核，提供技術發展方向與策略制定的輔助。

關鍵詞：船舶空污排放、低硫燃油政策、空氣品質偵測、空污檢測及採樣

## The Study of the Evaluation of Ship Energy Use and Air Pollution Emission Detection Technology in Harbor Area

Chun-Ying Lee, Yi-Hung Hsu, Chitsan Lin, Chin-Ko Yeh, Chien-Erh Weng\*

\* Professor, Department of Electronic Communication Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

## ABSTRACT

This research will focus on the analysis and assessment of ship air pollution emission detection technology suitable for harbor areas, and study the preliminary planning of feasible technology for ship air pollution emission detection based on the environmental characteristics and conditions in harbor areas. In the future, it will be able to effectively investigate the use of fuel oil when the ship is sailing. The international port state supervision and inspection mechanism has become an important trend in maritime supervision work. In order to enhance the safety of navigation in seas and maintain the marine ecological environment. Through the results of this technical planning and data compilation and analysis. It will be able to assist the review of marine affairs and pollution prevention plans and the control of low-sulfur fuel used by ships, and provide assistance in the formulation of technical development directions and strategies.

Keywords : Air Pollution from Ships; Low-sulfur Fuel Policy; Air-quality Monitoring; Air Pollution Detection and Sampling



## 一、研究目的

根據環保署最新之全國空氣污染物排放清冊 (TEDS10)(行政院環境保護署,2016)顯示,非公路運輸污染源,包括航空產業、海洋產業運輸排放空氣污染物於 2016 年之細懸浮微粒 (PM<sub>2.5</sub>)、硫氧化物 (SO<sub>x</sub>)、氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)排放量佔全國排放量之比例分別為 1%、7%與 5%(如表 1-2 所示),由此可知運輸產業相關活動排放 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>x</sub> 與 NO<sub>x</sub> 等污染物之比例已有一定程度之影響。英國自然通訊期刊的研究調查亦顯示全球每年近 40 萬人因為海上船舶所排放之細懸浮微粒造成肺癌或心血管疾病的死亡 (M. Sofiev et al., 2018)(James, M. S. et al., 2018)。亞洲東部地區其污染範圍大部分分佈在中國所有沿海地區與臺灣西部地區,以及一直向北延伸到日本、韓國之間的國際航道上的沿岸地區,若以人口比例進行初步概算,我國平均每年會有約 3,300 人,因為船舶排放之空氣污染物造成肺癌或心血管疾病的死亡。為了追求更為潔淨的海運環境,船舶污染排放規範已愈加嚴苛。除 IMO MARPOL 73/78 公約對全球海洋運輸產業全面性的管制規範外,各國亦陸續針對該議題提出相關政策。以臺灣為例,為提昇環境品質及維護國人健康,環保署於 2012 年 5 月 14 日增訂細懸浮微粒 (PM<sub>2.5</sub>) 周界空氣品質標準之 24 小時值與年平均值分別為 35 µg/m<sup>3</sup> 與 15 µg/m<sup>3</sup>。在因應細懸浮微粒之管制部分,環保署則於 2015 年 11 月 17 日頒布「空氣品質嚴重惡化緊急防制辦法」部分修正,並於 2016 年 8 月 5 日公告各縣市之空氣品質防制區劃分結果,其調查結果發現除臺東縣外,其餘縣市地區均為細懸浮微粒之三級防制區,亦表示這些地區未達細懸浮微粒之周界空氣品質標準。此外,交通部自聯合國氣候變化綱要公約開始正式生效,海洋運輸產業一直未被溫室氣體排放減量協議所納入。船舶在運輸過程中由於燃燒大量的燃油導致空氣污染物不斷排放,特別是沿岸航行或是在港期間,船舶所排放之污染物質對於人體健康、生態環境更是造成莫大的影響。為了使海洋運輸產業船舶能有效降低空氣污染物之排放,我國交通部航港局亦因應 IMO MEPC 制定之防止船舶污染國際公約規範,於 2020 年 01 月 01 日開始管制航入臺灣國際商港區域之外籍船舶及國籍船舶

應採用 0.5%以下硫含量之低硫燃油或具有同等減排效應之裝置或替代燃料。此次研究將著重於探討適切我國港埠地區之船舶空氣污染排放偵測技術分析與評估,並就我國高雄港埠區域環境特性及條件研擬船舶空污排放偵測可行技術之先期規劃,藉以未來能有效針對船舶航行時之燃料油切換使用情形的調查。

根據我國行政院環境保護署最新之全國空氣污染物排放清冊(TEDS11.0)顯示,船舶空氣污染物排放(含港區內及離岸排放)。當中細懸浮微粒 (PM<sub>2.5</sub>)、硫氧化物 (SO<sub>x</sub>)、氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)排放量佔全國總排放量之比例為 4%、27%與 9%。本研究最主要目的為調查外籍船舶及航行於國際航線之國籍船舶進入我國國際商港區域時,是否符合 MARPOL 規範使用 0.5%以下硫含量之低硫燃油或替代燃料。

表 1 船舶排放污染物

污染物	產生來源	危害性
氮氧化物 (NO <sub>x</sub> )	柴油發動機	具有刺激性臭味,會刺激眼、鼻及肺部。
二氧化硫 (SO <sub>2</sub> )	隨使用燃油中硫含量的多寡而改變	對眼睛和呼吸道具刺激性,對健康影響程度與吸入量有關。
粒狀污染物 (PM)	粒子的形成取決於燃燒特性和燃料類型	短期吸入對慢性支氣管炎病患可能增加呼吸道症狀及氣喘發生頻率。
二氧化碳 (CO <sub>2</sub> )	船用燃油的碳含量	會產生溫室氣體。
碳氫化合物 (HC)	包含燃料和潤滑油未完全燃燒部分	低濃度將刺激呼吸系統,較高濃度影響中樞神經系統甚或致癌,長期暴露可能致肺纖維化。
揮發性有機物 (VOCs)	散裝化學品船、液態天然氣船等船舶裝卸貨時排放	在短時間內人們感到頭痛、嘔吐、四肢乏力;嚴重時會抽搐、昏迷、記憶力減退。長期暴露會傷害人的肝臟、腎臟、大腦和神經系統。
重金屬 (Heavy Metal)	船用燃油燃燒	長期暴露可能對身體造成心血管疾病、不孕症、呼吸道疾病、免疫功能疾病、癌症風險等等疾病。

其它 (如 CO 等)	燃油燃燒、艙水排放	-
----------------	-----------	---

為了提升船舶燃油切換使用情形之調查精確度與機動性，於監測技術部分，研究分別針對光學監測技術、可移動式監測技術及固定監測技術等三個層面進行探討，並就設備、地點及種類等條件分析適切我國的船舶空污排放偵測技術可行性。

## 二、技術應用探討

傳統的船舶空氣污染檢測方法包括人工登船和固定位置裝載設備檢測。登機檢查主要是檢查船舶日常換油記錄及對油品進行採樣分析，然此傳統的檢查效率有其限制存在。為能加強船舶空氣污染檢測，國外現行亦會透過安裝固定探測器於船舶或天橋上進行監測。固定探測技術和光學遙感技術具有技術成熟，成本較低的特點，但安裝探測器是一種被動的檢測方法。本研究針對國內外相關學術單位、科學家及環保團體針對船舶廢氣排放，開發之不同監測方法進行歸納盤點。其光學監測技術(Optical monitoring technique)包括使用影像辨識、開徑式傅立葉紅外光譜儀(Open-Path Fourier Transform Infrared, OP-FTIR)、傅立葉轉換紅外線光譜儀(Fourier Transform Infrared spectroscopy, FTIR)、光學雷達(Light Detection and Ranging, LIDAR)及紫外差分吸收光譜法(Ultraviolet Doppler Optical Absorption Spectroscopy, UV-DOAS)；可移動式監測技術(Mobile sniffing monitoring technique)則是透過無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)，以及可攜式監測技術(Portable monitoring technique)的空氣盒子(AirBox)等方式。若論及應用場域，則可以區分為船上、岸上、港內、港嘴、泊區、錨區及近岸等不同尺度特性；稽查方式又可以區分為「登船檢查」與「不登船檢查」等不同方式。

### 2.1 開徑式傅立葉轉換紅外光

空氣中揮發性化合物篩檢方法—開徑式傅立葉轉換紅外光光譜分析法，是我國環保署 94 年 11 月 09 日公告之標準方法 NIEA A002.10C。本方法是開徑式傅立葉轉換紅外光 (Open-path Fourier transform infrared, OP-FTIR) 監測設備掃描空氣中揮發性污染物，經光譜分析求得在量測路徑內氣體樣品的平均濃度。FTIR 可依採樣方式區分為抽氣式

或密閉式(extractive 或 closed-cell)，以及開放光徑式或開放式(Open-path)。

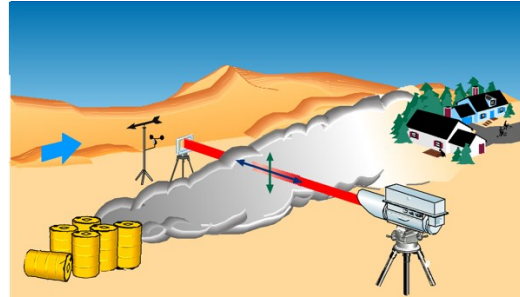


圖 1 開徑式紅外線遙測技術量測示意圖

兩者的差別在於，前者是先將外界氣體以採樣管導入密閉氣體光譜吸收槽後，再進行紅外線掃描；而後者則是不須經由採樣程序，直接以紅外線掃描開放空間中的氣體。目前，國內外開放光徑式傅立葉轉換紅外線儀(Open-Path Fourier Transform Infrared, OP-FTIR)的應用範疇，主要是在於廢棄物掩埋場、廢水處理廠、石化廠與工業區周界，以及廠內製程區污染源調查等量測工作。國內將 OP-FTIR 應用於工廠與工業區周界空氣品質量測已有多年的歷史，量測結果不僅可作為污染防制工作的量化指標，更可協助釐清污染來源及責任歸屬。

### 2.2 光學雷達

光學雷達或簡稱光達(Light Detection and Ranging, LiDAR, NOAA, 2013) LiDAR 主要是利用對人類跟生畜無害的紅外光束 Light Pluses 發射、反射和接收來探測物體。LiDAR 是一套結合數位攝影及雷射測距儀的技術，其高精度、能快速覆蓋大面積、亦可在陡峭的地形和陰影中收集數據。LiDAR 能探測白天或黑夜下的特定物體與車之間的距離。甚至由於反射度的不同，LiDAR 也是可以將車道線和路面區分開。但是，LiDAR 設備較貴、無法探測被遮擋的物體、對於大數據集較難解釋和處理，且沒有國際協議(Xingwei, 2019)。

### 2.3 紫外差分吸收光譜

DOAS 是差分吸收光譜法(Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS)。根據 Beer-Lambert 定律，不同的氣體分子對於光能的吸收有着不同的特徵吸收光譜，因此通過對各監測氣體在光路中特徵吸收光譜的分析，可以精確快捷地計算出監測節

範圍內該氣體的濃度。DOAS 方法採用氙燈作為光源，其發出的光譜包含包括整個由紫外(UV)、可見光(VIS)到紅外(IR)組成的波段。UV-DOAS 分析儀可在 200-500nm 波段內分析，所以可監測不同項目，如 O<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、NO、NH<sub>3</sub>、苯、甲苯、二甲苯、Hg、苯酚等氣體。因此，適合應用來監測船舶排放之污染物，例如：SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、NO、及苯環類等具有不飽和鍵之污染化合物。由於每種類型的分子、每種氣體，都有其獨特的吸收光譜特性，因此可以同時識別和確定光路徑中幾種不同氣體的濃度。DOAS 基於從特殊源（高壓 Xenon 燈）將光束傳輸到所選路徑上，然後使用先進的計算機計算來評估和分析路徑上分子吸收造成的光損耗。Xenon 燈的光線非常強烈，包括可見光譜以及紫外線和紅外波長。光線由接收器捕獲，並通過光纖進行到分析儀。該光纖允許將分析儀安裝在遠離潛在腐蝕性環境中。分析儀包括一個高品質的光譜儀、一台電腦和相關的控制電路。光譜儀使用光學光柵將光分割成窄波長帶。可以對此進行調整，以便檢測最佳波長範圍；光被轉換成電信號；一條狹窄的狹縫以高速掃過探測器，並構建了大量的暫態值，以形成相關波長範圍內的光譜圖像。此掃描重複一百次每秒，被標記的光譜在計算機記憶體中累積，等待評估。剛剛從光路徑標記下來的吸收光譜與計算機計算的吸收光譜資料庫進行比較。計算機可以通過更改每個參考頻譜的各項因子大小進行最佳化操作，直到達到最佳匹配，因此，可以高精度計算不同的氣體濃度。

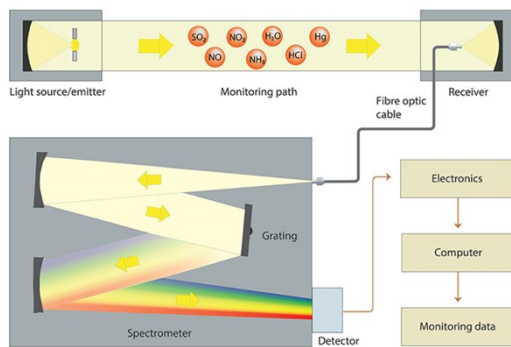


圖 2 差分吸收光譜法監測示意圖

## 2.4 影像辨識

隨著環境污染的加劇，依靠傳統的環境污染檢測已經無法滿足當前對環境監測的需求，採用先進的技術來檢測環境污染已變得越來越重要。隨著影像辨識技術的迅速發展，許多學者或科學家已開始研究如何將影像辨識應用於環境污染檢測中。舒等人(2020)指出影像辨識技術具有辨別力高，接受度高，觸感強的特點。在環境檢測過程中，空氣質量檢測是最基本的工作。影像辨識是通過數碼相機捕獲相同的環境，然後通過電腦存儲獲取的影像。影像辨識技術主要包括影像獲取、影像處理、特徵分析、影像分類等。舒等人的主要系利用 HSI (Hue-Saturation-Intensity) 模型，以色調、飽和度及強度對存儲的照片進行量化，利用梯度函數的方差形成清晰程度不同的照片和影像，從而根據量化結果對環境污染進行分析。研究結果指出，使用影像識別技術可以更直觀地反映空氣質量的直觀感受。同時，根據相關數據和拍攝的照片進行分析，發現人的直觀感受與空氣檢測數據存在差異，這種差異是普遍存在的。

## 2.5 無人機搭載偵測器

中國上海海事大學研究指出，設計一種適用於收集船舶廢氣的無人機系統主要由三部分組成：無人機、用於尾氣監測的輕型吊艙和移動控制終端。並於上海港港區內使用 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 感測器進行了現場測試，結果證明瞭可成功用於即時監測船舶排放。與傳統方式相比提供了一種有效、準確、及時、成本相對較低的方法並考慮到操作人員的安全問題。並透過計算六股煙流中 SO<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub> 的比例，以確定船舶是否切換低硫燃料。UAV 載具雖具備不受地形限制垂直升降與滯空停懸能力，但為有效延伸飛行滯空時間，在搭載空氣品質偵測器的選擇上，其需求以輕便、低功耗的感測模組為主。依據前述文獻團隊初步擬列出 UAV 適切搭載之檢測設備儀器，依據偵測方式的不同，可概分為電子嗅探器、高精度光學分析儀和光學氣體成像相機等檢測設備。而空氣品質偵測器類型則可進一步分為電化學感測器、金屬氧化物半導體感測器、非色散式紅外線感測器和光電離子檢測器。

### 三、空污排放偵測技術規劃

港灣能源使用、稽查及空氣污染排放之管制技術包含有機動式無人機監測系統、光學遙測系統、及各式物理化學感測器組合應用系統。若論及應用場域，則可以區分為船上、岸上、港內、港嘴、泊區、錨區及近岸等不同尺度特性；稽查方式又可以區分為「登船檢查」與「不登船檢查」等不同方式。整體規劃時，除了技術可行、經濟可行、安全性、時效性、立即性、國際公信力、船隻國籍問題及法源依據等考量外，亦應綜合考量不同系統彼此間的相容性、互補性，方能達到最佳化之管理目標。研究初步擬列船舶空氣污染排放固定式與移動式監測技術之實驗內容規劃。

#### 3.1 固定式監測技術

港嘴遙測監測項目包括二氧化硫、二氧化氮、BTEX 等，並同時氣象條件監測氣象監測項目包括風速、風向、溫度、溼度。本計畫規劃選用開徑式監測設備進行污染物之監測。設置目的則係瞭解船舶燃油切換影響之程度、有效紀錄污染地區之空氣品質、即時偵測突發事件以採取應變管制、評估稽查措施之效益等。由於本研究選用開徑式監測儀作為監測儀器，因此考量之條件如下：

- (1) 以污染源為導向之監測應限制光徑之長度：  
監測項目包含硫氧化物、二氧化氮等，因此若監測光徑過長，將使偵測極限降低。因此監測儀光徑應小於 500 公尺。
- (2) 考量地區性污染來源：  
初步考量高雄港之氣候與污染源特性，規劃光徑橫跨高雄港二港口東西二岸，並選定東西兩岸高度超過 10 公尺之建築物，避免受港區船舶進出作業之影響，且使偵測光徑穿過煙流。

依據上述需求規劃之監測位置，於監測執行前進行附近的地理位置及實際監測點詳細勘察，以讓監測結果更具代表性。初步實驗規劃如表 2 所示：

表 2 固定式監測技術規劃

項目	說明
使用儀器、設備	依據偵測需求結合光學監測、固定式監測等方式，包括差光吸收光譜法 (Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS) 及開放光徑式傅立葉轉換紅外線儀 (Open-Path Fourier Transform Infrared, OP-FTIR) 或各式感測器。
安裝地點	於港嘴架設遙測設備，並於監測執行前進行地理位置及實際監測點勘察，使監測結果更具代表性。
實測港域	初步選定高雄港二港口，並於後續針對光學遙測技術相關注意事項進行評估。
實驗方法	本項目之監測目的係瞭解入港船舶污染，因此初步考量港區之氣候與污染源特性，規劃光徑橫跨港嘴東西二岸，並避免影響港區船舶進出作業。實驗方法考慮之因素如下，(一)以污染源為導向之監測應限制光徑之長度；(二)考量地區性污染來源，並同時進行氣象條件監測，氣象監測項目包括風速、風向、溫度、溼度。

#### 3.2 移動式監測技術

移動式監測技術以 UAV 結合 AIS 系統提供的船舶航行資訊建立船舶追蹤目標，透過所建置的平台與操作介面控制 UAV 進行海上船舶的追蹤。研究透過擷取 AIS 系統資料庫，並對 AIS 資料進行欄位數據解析，即可獲取海上船舶的動態訊息進行船舶監測。初步實驗規劃如表 3 所示：

表 3 移動式監測技術規劃

項目	說明
使用儀器、設備	視船舶空污排放偵測需求，初步規劃使用之設備儀器將以 UAV 為移動平台搭載電化學式的空品感測模組、不鏽鋼採樣筒。
UAV 規格	評估 UAV 任務飛行環境與任務需求，初步擬採用 25 公斤級以下之 UAV。UAV 無刷馬達規格與匹配的載具槳翼尺寸，將依據 UAV 載具軸數計算其機體架構之軸距，將負載重量、機體架構重量、消耗電流等條件帶入計算，做為續航時間與電池選擇容量的評估依據。

項目	說明
安裝地點	有別於固定式監測設備的架設作業，其架設地點則可配合人員與作業地點移動，僅需滿足 UAV 起降條件，可於平坦地勢置放 UAV 與地面控制站架設。
實測港域	初步選定以高雄港為實測港域，其飛航地點為港區二港口之港嘴處，屬限航區域，飛行高度限制則為 200 尺以下。
實驗方法	第一階段將以學習演算法為基礎，利用 AIS 資訊建立海上船舶航跡預測模型，予以推估船舶的下一航行軌跡，提供做為第二階段 UAV 自主追蹤目標技術開發的資訊源。 第二階段則是進行資料平台與操作界面的建置，並透過資料平台解析船舶航行軌跡預測結果的經緯度座標資訊，驅動 UAV 自主前往該經緯度座標進行空污排放檢測、採樣調查等作業。

#### 四、結論

監測船舶空氣污染排放耗費人力甚鉅，而現階段我國在低硫燃油檢查作業人力寥寥可數，在技術人力缺口甚大的情況下，本次研究盤點國內外相關技術報告、文獻，並藉此探究適切我國船舶空氣污染排放偵測之技術發展，初步研提以光學式遙測技術結合 UAV 載具搭載空氣感測模組的移動式偵測方式，做一港區船舶空氣污染排放偵測與採樣的技術規劃評估，使研究規劃成果能夠確切符合國內港區環境的船舶空氣污染排放偵測技術需求。

#### 謝誌

本文係交通部運輸研究所計畫「港區船舶能源使用及空氣污染排放偵測技術評估之研究」(編號 MOTC-IOT-110-H2CB002)之相關研究成果，承蒙運輸研究所經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. 行政院環境保護署，「全國空氣污染物排放清冊 (TEDS10)」(2016)
2. M. Sofiev, J. J. Winebrake, L. Johansson, E. W. Carr, M. Prank, J. Soares, J. Vira, R. Kouznetsov, J.

- P. Jalkanen, and J. J. Corbett (2018). “Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs.” *Nature Communications*, vol. 9 (406), Feb.
3. James, M. S., Winbrake, J., Johansson, L., Carr, E. W., Prank, M., Soares, J., Vira, J., Kouznetsov, R., Jalkanen, J. P., and Corbett, J. J., (2018). “Cleaner fuels for shops provide public health benefits with climate tradeoffs”. *Nature communications*. 9:406, DOI: 10.1038/s41467-017-02774-9.
4. NOAA(2013), “LIDAR—Light Detection and Ranging—is a remote sensing method used to examine the surface of the Earth”
5. Jinhong Xian, Dongsong Sun, Wenjing Xu, Yuli Han, Jun Zheng, Jiancao Peng, ShaochenYang (2020), “Urban air pollution monitoring using scanning Lidar”. *Environmental Pollution*, Volume 258, Mar.
6. Xingwei (2019), 「光學雷達，馬斯克看不上，卻又無可替代？」。 <https://codingnote.cc/zh-tw/p/5286/>
7. 空氣品質監測網，「微脈衝雷射雷達監測儀器說明文件」。 <https://airtw.epa.gov.tw/CHT/TaskMonitoring/atmosphere/LaserRadar.aspx>
8. 傅瑋琦 (2013)，「應用紅外線熱顯像儀在空氣品質稽查管制之可行性研究」，國立中央大學環境工程研究所在職專班碩士論文。
9. Yufeng Shu, YongGang Chen, Changwei Xionga (2020). “Application of image recognition technology based on embedded technology in environmental pollution detection”. *Microprocessors and Microsystem*, Volume 75, June.

## 海岸廢棄物快篩技術與應用

胡介申<sup>1\*</sup> 顏寧<sup>1</sup> 徐季玄<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 澄洋環境顧問

### 摘要

海洋廢棄物與海洋塑膠污染是近十年來全球永續發展相關研究領域中，發展最為顯著的學門。聯合國指引中描述海岸快篩的重要與原則，以科學抽樣的方式短時間內具體量化數百至數千公里海岸線上的垃圾分佈樣態。鄰近之日本與韓國分別自 2006 與 2017 年以大尺度的海岸垃圾快篩，掌握國內海岸垃圾總量、分布熱點與類型組成等三項關鍵數據。我國於 2018 年展開本島之海岸快篩，以系統抽樣的原理調查 1%海岸後推估台灣本島現存垃圾總重約為 1059 公噸，主要集中於本島西岸 13 縣市(90.4%)，其中又以中南部四縣市(彰雲嘉南, 35.8%)與北部三縣市(北基桃, 33.5%)兩區域為主要熱點。東海岸三縣市僅佔本島之 9.6%。前 10%最髒亂之熱點海岸累積近 5 成之海廢，並有 50%海岸相當乾淨。快篩與相似調查法相比，具有範圍廣、樣本數高、人力少等優勢，可應用於海岸清理工程、長期監測或極端氣候造成之大量海廢事件。

關鍵詞：海洋廢棄物、海岸快篩、海岸清理、熱點清除

## Shoreline Rapid Assessment : Technology and Application

Chieh-Shen Hu<sup>1\*</sup>, Ning Yen<sup>1</sup>, Chihsuan Hsu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IndigoWaters Institute

### ABSTRACT

In the past decade, the subject of marine debris and marine plastic pollution has developed notably in the global sustainable development-related sciences. The importance and principles of the shoreline rapid assessment, which takes a scientific sampling method to quantify the distribution of garbage on hundreds to thousands of kilometers of coastline in a short period, has been addressed in the United Nations' guidebook. Japan and South Korean governments have both executed large-scale rapid assessments in recent years. As a result, they gained three crucial data – the total standing stock, distribution hotspots, and type composition of coastal debris. In 2018, the environmental groups conducted rapid assessments on Taiwan Island. After sampling 1% of the coastline across the Island, it is estimated that the total weight of the standing debris is about 1059 metric tons. To be noted, the coastal debris mainly concentrated on the west coast (35.8%) and the north coast (33.5%), and there is only 9.6% on the east coast. While the top 10% of the dirtiest hotspot coasts, which nearly 50% of debris accumulated on, the rest 50% of Taiwan's coastline is relatively clean. Compared with similar survey methods, the advantages of shoreline rapid assessment include a wide range, a large number of samples, and less manpower. In other words, it can be applied not only to coastal clean-up projects but also for long-term monitoring, tackling the incidents of a large number of marine debris flushed under extreme weather.

Keywords: Marine Debris; Shoreline Rapid Assessment; Coastal Cleanup

## 一、全球海廢議題發展

海洋廢棄物的來源、流向與影響(sources, fate & effects)被視為此領域的三個重要研究方向(Kershaw, 2015)。在來源與流向方面,每年全球沿岸地區估計約有 480 萬噸至 1270 萬噸管理不佳的塑膠廢棄物進入海洋(Jambeck et al., 2015),其中流經人口密集區域的 1 千條河川被認為貢獻全球年排放量的 80%(Meijer et al., 2021)。塑膠廢棄物被認為廣泛對各種生物階層與海洋生態系統造成不可逆的衝擊,並連帶減低其供給人類的各式生態系統服務,主要包含漁業、自然遺產與娛樂(Beaumont et al., 2019)。

聯合國科教文組織與科學期刊近日盤點 SDGs 相關科學領域近十年的發展,其中海洋塑膠垃圾研究的成長最為顯著,於 2011 年度僅有 46 篇學術論文發表,2019 年度則有 853 篇,成長之倍數遠遠超過其他 55 項永續發展議題。而環保塑膠替代材質之研究論文數在近十年亦有 3 倍增加,顯示海洋廢棄物與塑膠汙染議題受到全球學界壓倒性之關注(Schneegans et al., 2021; Rabesandratana, 2021)。

## 二、海岸快篩與日韓案例

聯合國海污專家小組(GESAMP)出版之海洋塑膠監測與評估指引(Kershaw et al., 2019)中多次描述海岸快篩調查的必要性,可運用有限的經費與人力,短時間產出一張大尺度的現況快照(snapshot)。例如在數百至數千公里的海岸線上取得垃圾的整體現存總量、分布熱點與類型組成等三項關鍵數據,並作為管理者編列清理預算、規劃清理時間點與頻度、釐清汙染來源時有所依循。以下概要說明日本與南韓兩國海岸垃圾快篩調查的內容與發現。

### 2.1 日本的全國海岸垃圾調查

日本國土交通省在 2006 年由 664 個臨海的市町村完成全國 3,000 多處海岸調查,累計調查範圍長度達日本海岸線總長度的 0.9%。此調查使用「100 平方公尺內的垃圾體積」為測量形質,透過目視定量(visual quantification)的方式,將海岸上 10\*10 公尺內的垃圾量轉換為數個家戶常見之 20 公升垃圾袋,由最乾淨的 0 公升/100 平方公尺至最嚴重的

2560/100 平方公尺,將海岸髒亂程度分為 12 等級。結果顯示污染最嚴重的 10%海岸線上累積了全國近七成的海岸廢棄物。不同地區亦有很大的差異,特別是九州北部、東北北部,與封閉的水域如瀨戶內海、或黑潮流經之琉球群島等地,均有大量的海岸廢棄物堆積(MLIT, 2007)。

### 2.2 南韓的海岸垃圾快篩調查

南韓簡化日本快篩技術,使用智慧型手機進行資料上傳與拍照,2017 年在全國自然海岸段進行四次調查,每 10 公里設置一個測站,共 382 站。結果推估南韓全國海岸段上有 17,000 噸海岸廢棄物,且有六成的海岸廢棄物聚集在 10%的海岸上,大部分海岸汙染程度低。水產養殖廢棄物是主要汙染來源,占 56.5%至 61%(Lee et al., 2019)。

## 三、台灣的海岸垃圾快篩調查

我國民間自 2012 年起與環太平洋各國建立海廢調查交流管道,並邀請學者來台分享快篩實務經驗。2018 年由環保團體共同規劃執行台灣本島海岸共計 121 測站之四季快篩調查(顏, 2019)。

### 3.1 實驗設計

以系統抽樣的方式將本島 16 縣市主要陸地與島嶼共 1,210 以 GIS 軟體間隔每 10 公里之海岸設置 1 測站,共計 121(圖 1)。每站調查樣區之長度為 100 公尺,相當於海岸線抽樣 162.1 公里,佔母體 1%。2018-2019 年於台灣本島之 121 個固定範圍之樣區內進行 4 次調查。

每站調查範圍之寬度為高潮線延伸至濱海植物內一公尺(圖 2)。由培訓合格之調查員以目視計量方式,分別紀錄人造垃圾之體積、類型與比例,同時於樣區內固定角度與方向拍攝 6 張照片。數據藉由建立各類垃圾質量密度由體積轉換為重量,以線密度或面積密度等單位進行數據之標準化與時空分析,並以外推法預測海廢現存量(standing stock)。

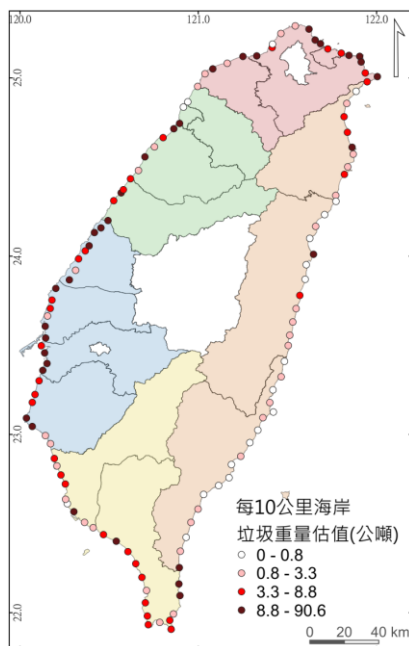


圖 1 2018-2019 年 4 次本島調查海岸垃圾平均重量與分布

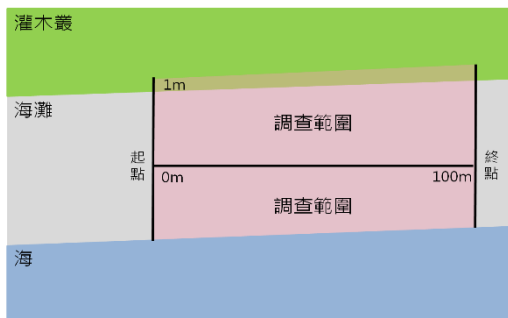


圖 2 每測站 100 公尺海岸調查區域之範圍

### 3.2 初步結果

2018 年 7 月至 2019 年 9 月於進行 4 次海岸快篩，每次調查於 2 周內完成。已抽樣數據估計本島 16 濱海縣市海岸現存垃圾之平均總重為 1059 公噸 (n=4, SD=±79)，並繪製分布熱區地圖(圖 1)。依據各縣市垃圾組成與重量特性，初步區分為以下五個區域並計算佔全國總重量之比例(由高至低排序):中南部(彰雲嘉南, 35.8%)、北部(北基桃, 33.5%)、南部(高屏, 12.2%)、東部(宜花東, 9.6%)與中部(竹苗中, 9.0%)。若將 4 次調查各海岸平均重量由高至低繪製之海岸與垃圾重量之累積曲線，可觀察出僅 10%熱點海岸累積了接近 5 成之海廢，較乾淨之半數海岸線僅累積整體 10%之海廢(圖 3)。而少數區域變異較

大，垃圾量之多寡與組成之變化可能與淨灘清理努力或氣候因素(季風、颱風與梅雨)有關。

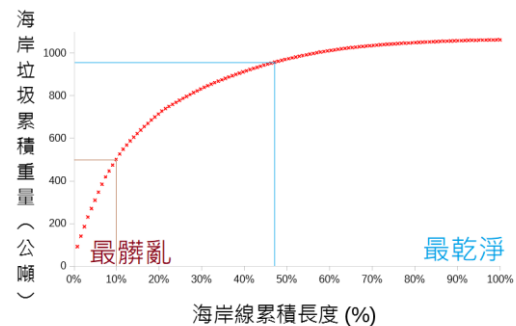


圖 3 2018-2019 年 4 次本島快篩調查各海岸海廢現存平均重量累積曲線

### 3.3 後續應用

一位經驗豐富之調查員可在 30 分鐘內完成 100 公尺海岸線之快篩調查，因此少數之人力即可在 1 天至數天內收集數百至上千公里海岸線之海廢分布與熱點位置等空間資訊，以及海岸維護管理需要的現存總量、類型組成、來源分析等關鍵數值。與現行之撿拾秤重、人力計數或空拍結合人工智慧辨識等方法相比，具有調查範圍廣、樣本代表性高、執行人力少等優勢，且不受無人機作業時空間與天候限制，適合應用於海岸清理工程驗收、大範圍海岸長期監測。當強降雨與颱風等極端氣候事件造成之大量海廢入侵海岸時，亦可短時間啟動海岸快篩，擬定緊急應變策略。

### 謝誌

本研究感謝綠色和平與荒野保護協會「海岸垃圾快篩」計畫支持。

### 參考文獻

1. Kershaw, P. J., & Rochman, C. M. (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part 2 of a global assessment. *GESAMP Reports and Studies No. 93*.
2. Eriksen, M., Lebreton, L. C., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borero, J. C., ... & Reisser, J. (2014). Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLoS one*, 9(12), e111913.
3. Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.



- R., Perryman, M., Andrady, A., ... & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771.
4. Meijer, L. J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C., & Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science Advances*, 7(18), eaaz5803.
  5. Beaumont, N. J., Aanesen, M., Austen, M. C., Börger, T., Clark, J. R., Cole, M., ... & Wyles, K. J. (2019). Global ecological, social and economic impacts of marine plastic. *Marine pollution bulletin*, 142, 189-195.
  6. Schneegans, S., Lewis, J., & Straza, T. (2021). *UNESCO Science Report: the Race Against Time for Smarter Development*. UNESCO Publishing, Paris, pp. 729
  7. Zhongming, Z., Wangqiang, Z., & Wei, L. (2021). Research on ocean plastic surging, UN report finds. *Science*, AAAS, 10 June 2021,
  8. United Nations Environment Programme. (2021). *Understanding the State of the Ocean., A Global Manual on Measuring SDG 14.1.1, SDG 14.2.1 and SDG 14.5.1*. UNEP, Nairobi, pp. 81
  9. Kershaw, P., Turra, A., & Galgani, F. (2019). Guidelines for the Monitoring and Assessment of Plastic Litter in the Ocean. *GESAMP Reports and Studies No. 99*.
  10. MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism), (2007). *Nationwide Survey of Drifted Litter in Japan: Report on the Investigation into Integrated Measures against Drifting Garbage on the Coast*.
  11. Lee, J., Hong, S., & Lee, J. (2019). Rapid assessment of marine debris in coastal areas using a visual scoring indicator. *Marine pollution bulletin*, 149, 110552.
  12. 顏寧(2019)海，有什麼「塑」 臺灣海岸垃圾總體檢，綠色和平。

# UAV 攝影測量應用於表面水質辨識之初探

方惠民<sup>1</sup> 王星宇<sup>2</sup> 楊一中<sup>3</sup> 陳育鋒<sup>4</sup> 呂晏欣<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣海洋大學海洋工程科技學士學位學程(系) 助理教授

<sup>2</sup> 國立高雄科技大學航運技術系 助理教授

<sup>3</sup> 國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系 博士候選人

<sup>4</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系 碩士生

<sup>5</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系 碩士生

## 摘要

科技部計畫：MOST 109-2622-E-019-007

本研究利用無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 搭載光學鏡頭進行水域影像測量，以紅光作聚類指標變因，將航拍影像進行聚類指標分析，藉此快速分析案例水域表面水質分佈特性。研究成果顯示，UAV 航拍影像分析率定水域葉綠素的最佳航拍時段為 13:00 p.m. 至 15:00 p.m.，且最適航拍高度則為 70 m 至 80 m。根據研究案例水域水體葉綠素量測成果，比較 UAV 影像及水質儀量測成果，兩者最小及最大誤差分別為 5.28% 及 11.31%。本研究證實透過 K-means 演算法辨識水域色階分群，並結合水質儀實測葉綠素之數據，兩者結合後可快速辨識葉綠素之空間分佈特性。

關鍵詞：無人飛行載具、群類指標分析、葉綠素

## The Application of UAV Photogrammetry on Water Quality Identification

Hui-Ming Fang\* Hsing-Yu Wang Yi-Chung Yang Yu-Feng Chen Yen-Hsin Lu

\* Assistant Professor, Bachelor Degree Program in Ocean Engineering and Technology, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

This research uses Unmanned Aerial Vehicle (UAV) equipped with optical lens to take water image surveys and use red light as the clustering index variable. The aerial images are analyzed for clustering index, so as to quickly analyze the surface water quality distribution characteristics of the case water area. The research results show that the best aerial time period for UAV aerial image analysis calibrating chlorophyll is from 13:00 p.m. to 15:00 p.m., and the most suitable height for aerial photography is 70 m to 80 m. According to the chlorophyll measurement results of the research case water body, compare the measurement results of UAV images and water quality instrument, the minimum and maximum errors of the two are 5.28% and 11.31%, respectively. This article proves that the K-means algorithm is used to identify the water color gradation grouping, and combined with the measured chlorophyll data of the water quality instrument, the combination of the two can quickly obtain the spatial distribution characteristics of the identified chlorophyll.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle; Cluster Index Analysis; Chlorophyll

## 一、前言

傳統水域水質監測係透過現場採樣，惟針對大範圍水域環境品質監測較無效率，且難以同步掌握量測物質的時空分佈特性，特別是在異常事件期間入海物質的掌握。隨著攝影測量技術的發展可彌補傳統接觸式採樣方法的不足，在人力及時間成本較為經濟。如 Koponen 等人 (2002) 以遙測衛星針對湖泊水質進行沙奇盤深度、濁度及葉綠素的量測，藉以探討沙奇盤深度、濁度與葉綠素的相關性。然而應用衛星影像進行局部區域的水域環境監測工作，受限於監測範圍尺度與水環境監測機動性等問題，因此可透過無人飛行載具 (UAV) 搭載多光譜鏡頭，輔助衛星遙測於局部小範圍空間解析度不足的問題。或以無人水面載具 (Unmanned Surface Vehicle, USV) 掛載水質儀進行水環境監測，逐漸取代傳統由研究人員進行水環境監測作業方式。相關研究如 Wojcik 等人 (2019) 以無人機搭載多光譜進行水體表面量測，透過最大 RGB 演算法，針對不同沉積物分類，並與水質儀數據進行檢驗分析。最後再以影像辨識技術對多光譜影像或可見光影像進行分析，透過光譜反射得出大範圍之資料，藉由不同的波譜範圍，針對該區域所需量測水質項目以非監督式學習進行聚類分析。郭宇鑫 (2017) 以自我學習熵指標探討熵在群集分析中的應用及決定群的數量，結果顯示以 CH 指標較為穩定及 K-means 分群法較佳。緣此，本研究利用無人飛行載具，對所拍攝之水域光學影像進行聚類指標分析，並以紅光作聚類指標，搭配無人水面載具搭載水質儀，進行水質監測探討水域葉綠素分佈特性。

## 二、可見光聚類分析理論

### 2.1 光源組成

電磁波譜可分為可見光 (Visible light) 與非可見光，可見光光譜波段範圍介於 360 nm 至 750 nm，非可見光為電磁波譜中人類的眼晴所看不到之範圍。本研究藉由可見光所拍攝出之影像進行聚類分析，探討不同時段彩度、照度、色溫與水體水質的關係。

### 2.2 Calinski-Harabaz 指標

本研究使用 Calinski 和 Harabasz (1974) 年提出 Calinski-Harabaz 指標 (CH index)，係由群集間的分

散程度與緊密度的比值而得，並透過此聚類指標給定 K-means 最佳分群數。CH 指標分數定義為：

$$CH = \frac{\frac{\text{trace } B}{(k-1)}}{\frac{\text{trace } W}{(n-k)}} \dots\dots\dots(1)$$

其中， $k$  為群集數， $n$  為資料點

$$\text{trace } B = \sum_{i=1}^k n_i \|z_i - z\|^2 \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{trace } W = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_k} \|x_j - z_i\|^2 \dots\dots\dots(3)$$

其中， $n_i$  為群集中的資料點、 $x_j$  為全體資料點、 $z_i$  為群集  $i$  的中心點、 $z$  為所有資料點的中心點、 $\text{trace } B$  表示以歐基米德距離為分散程度、 $\text{trace } W$  表示緊密程度。

## 2.3 K-means 分群法

K-means 演算法為非監督式分類向量量化方法，此演算法於 1967 年由 MacQueen 所提出，目的為將所有資料點找出對應至起始聚類群集中心  $k$ ，透過每筆資料至群集之歐基米德距離 (Euclidean Distance)，進行分群後，以使得每個資料點和群集中心之最短距離，並重新計算新的群集中心，重複此方法直到群集中心點不再變動，以之作為聚類的標準。故需藉由 CH 指標給定分群數變因作為聚類指標，以尋找最佳分群結果。

$$J = \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_k)^2 \dots\dots\dots(4)$$

其中， $k$  為給定已知群數， $N$  為資料點數量， $x_i$  為資料點， $\mu_k$  表示群集中心。

## 三、影像水質量測預備實驗

### 3.1 實驗佈置與儀器設備

本研究實驗佈置如圖 1 所示，以無人水面載具搭載水質儀進行水質量測，同步配合 UAV 攝影實驗時間進行監測，藉由不同日照時間的水體葉綠素量測，再透過聚類分析辨識葉綠素，率定日照與彩度的變化，找出最佳航拍條件及時間，進一步繪製出葉綠素分佈及探討葉綠素與彩度的關係。本研究使用之 UAV 光學鏡頭規格與 YSI-EXO2 水質儀規格如表 1 至表 2 所示。

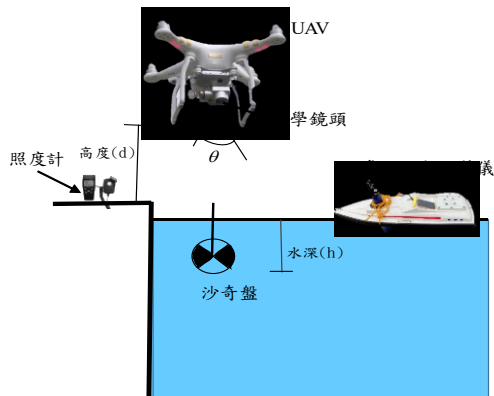


圖 1 實驗佈置示意圖

表 1 UAV 光學鏡頭規格

影像感測器	1/2.3"CMOS
鏡頭視角	94°FOV
光圈	f/2.8
解析度	4000×3000
影像解析度	4096×2160p
圖片格式	JPEG, DNG (RAW)
影像格式	MP4 / MOV

表 2 YSI-EXO2 水質儀規格

測量參數	範圍
氣壓	375~825 mmHg
溶解氧	0~50mg/L
葉綠素	0~400 $\mu$ g/L Chl
溫度	0~100RFU
總懸浮固體(TSS)	-5~50°C
總溶解固體(TDS)	0~1500mg/L

### 3.2 光學鏡頭校正

相機光學鏡頭因透鏡像差造成成像扭曲，當光線通過透鏡時，受到透鏡影響而改變光線路徑，進而產生畸變。故攝影前需透過相機鏡頭校正，求得精確的內部參數，以解算透鏡畸變與焦距等參數。本研究參考 Zhang (2000) 提出的鏡頭校正法，於相機內部參數校正所使用之影像如圖 2 所示，可看到鏡頭在校正後，影像中黑白方格呈現正方形而沒有扭曲的情況，即表示相機內部參數影像率定作業完成。本次相機內方位參數校正結果，於空間座標中內方位校正位置如圖 3 所示。影像照片之平均投影誤差為 0.40 Pixel，如圖 4 顯示，表示內方位參數校正之結果良好。

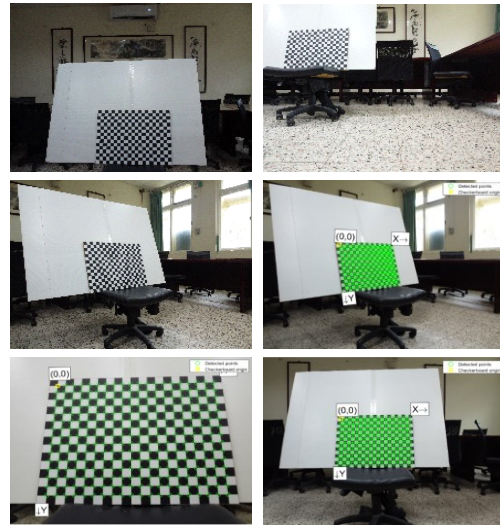


圖 2 相機內部參數校正影像

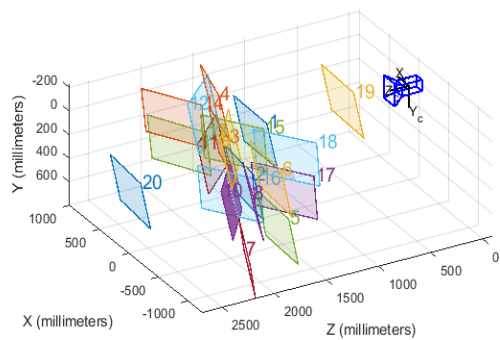


圖 3 內方位校正位置圖

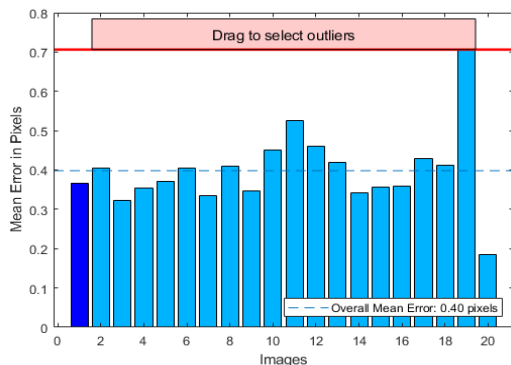


圖 4 成像平均投影誤差

### 3.3 色溫率定

陽光照射角度之差異，使影像光源有強弱之分，於影像判別時容易產生誤差，影響影像彩度值，故進行影像分析時必須考慮環境色溫因子。

### 3.3.1 陸域色溫率定

本研究陸域色溫率定工作於國立臺灣海洋大學後海堤陸域進行實驗，透過一天當中日照環境，藉由不同高度，針對由紅、綠、藍、黃之顏色以等間距所組成大小之校正板進行拍攝，拍攝高度為 10 m 至 100 m，每 10 m 之不同高度及照度，分別與 R、G、B 進行分析；拍攝時間為 9:00 a.m. 至 17:00 p.m. 每小時拍攝一次，並同步進行照度量測，其成果如圖 5 所示，在正午 11:00 a.m. 時有最大照度，並隨午後越接近傍晚呈遞減趨勢。圖 6 為紅、綠及藍光彩度-高度之關係，得知高度 30 m 至 50 m 彩度離散程度介於 0.8 至 1.7，適合飛行時間為 13:00 p.m. 至 15:00 p.m.，其彩度介於 249 至 250 之間，定點彩度值隨著飛行高度差異愈大，彩度亦隨著時間越晚愈低。

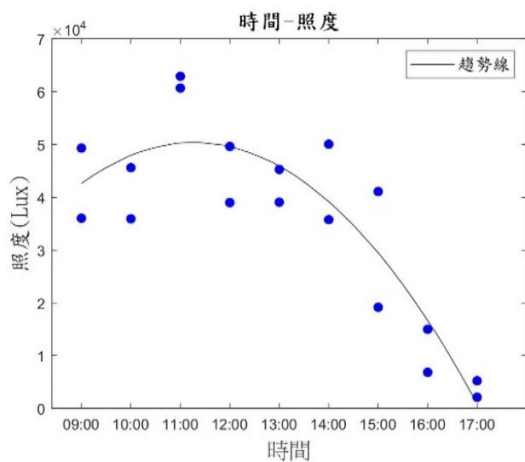
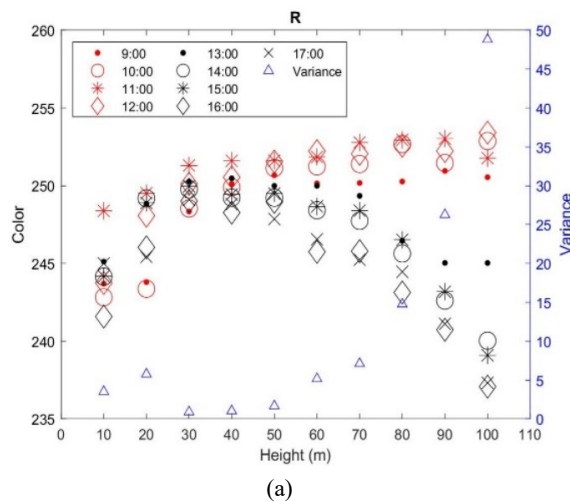
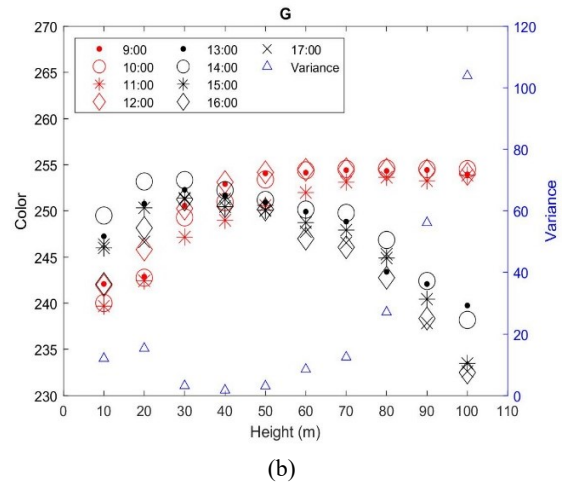


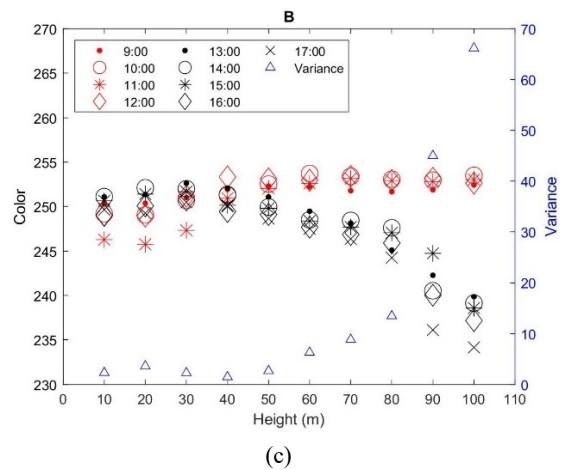
圖 5 時間與照度關係



(a)



(b)



(c)

圖 6 陸域(a)紅光彩度-高度之關係 (b)綠光彩度-高度之關係 (c)藍光彩度-高度之關係

### 3.3.2 水域色溫率定

本研究案例色溫率定實驗於 2021 年 6 月 2 日及 6 月 3 日 9:00 a.m. 至 17:00 p.m. 進行水域拍攝，率定結果如圖 7 所示，其紅光高度 50 m、60 m 及 100 m 彩度離散程度介於 17.0 至 20.8，影像時間 13:00 p.m. 至 15:00 p.m.，UAV 高度 50 m 至 100 m，彩度介於 41.85 至 48.47，彩度變化小。透過陸域色溫率定及水域色溫率定得知，葉綠素適合拍攝時段為 13:00 p.m. 至 15:00 p.m.，且綠光及藍光資料較紅光分散，故以紅光分析資料較為準確。

## 四、研究案例成果討論

### 4.1 臺灣海洋大學小艇碼頭案例

研究案例於臺灣海洋大學小艇碼頭水域以無人水面載具搭載水質儀進行水質量測，同步配合 UAV 攝影實驗時間進行監測，以交叉比對航拍影像成果，並繪製水域葉綠素分佈。經實驗數據如表 3 所示，葉綠素含量介於 1.5 至 2.4  $\mu\text{g/L}$ 。透過量測出葉綠素與彩度進行迴歸分析，UAV 量測之葉綠素測點 #A3 為 1.96  $\mu\text{g/L}$  及 #A5 為 1.96  $\mu\text{g/L}$ ，兩測點相對誤差分別為 11.31% 及 9.69%。研究案例海洋大學小艇碼頭水域葉綠素分佈如圖 8 所示。

表 3 小艇碼頭水質儀與 UAV 量測之數據

點位	水質儀 (YSI-EXO2)	UAV	相對誤差 (%)
	葉綠素( $\mu\text{g/L}$ )	葉綠素( $\mu\text{g/L}$ )	
A1	1.59	-	-
A2	1.73	-	-
A3	2.21	1.96	11.31
A4	2.48	-	-
A5	1.77	1.96	9.69
A6	1.99	-	-
A7	1.45	-	-
A8	2.20	-	-

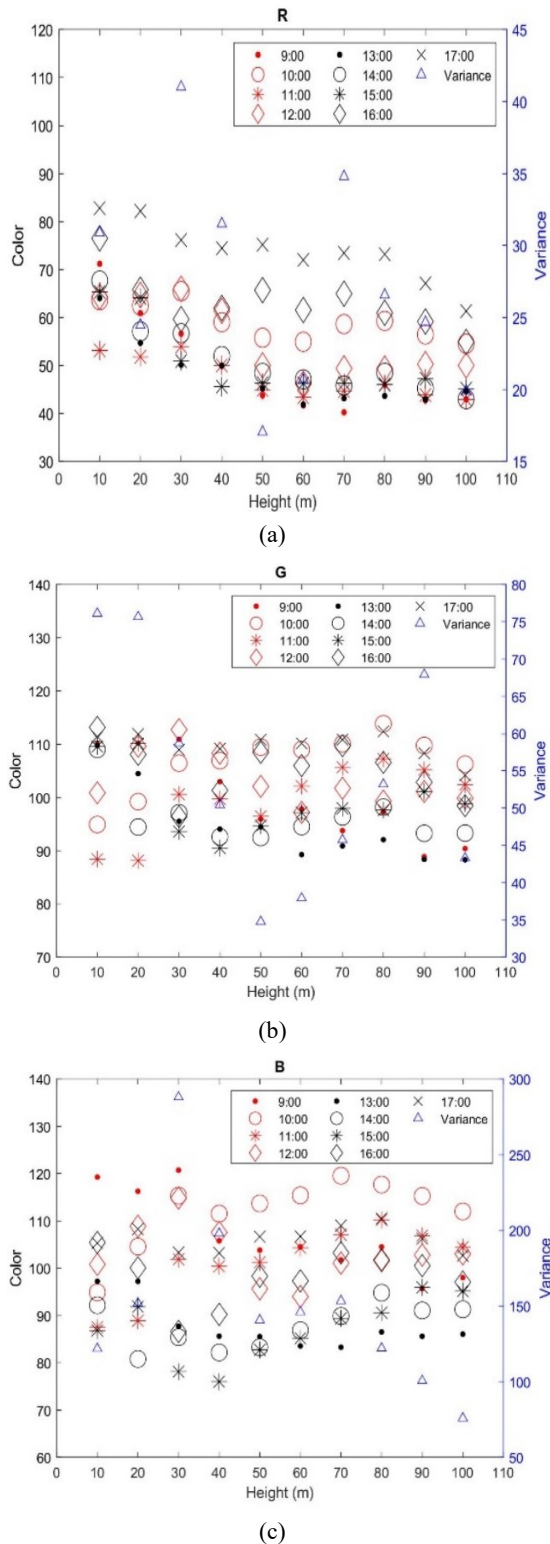


圖 7 水域(a)紅光彩度-高度之關係 (b)綠光彩度-高度之關係 (c)藍光彩度-高度之關係

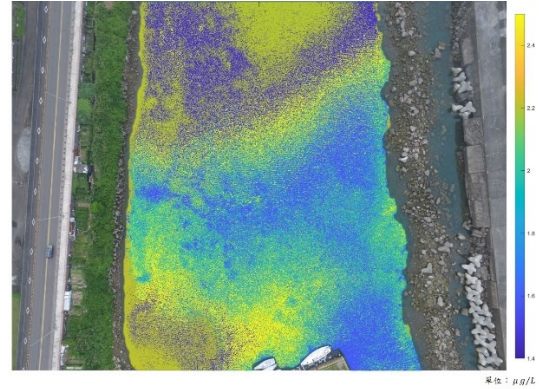


圖 8 臺灣海洋大學小艇碼頭葉綠素分佈圖

### 4.2 基隆大武崙情人湖案例

研究案例情人湖位於基隆市安樂區大武崙山腰之高地湖泊，由 6 條溪流匯集而成，自然生態豐富。實驗佈置亦結合 UAV 攝影測量及遙控載具搭載水質儀進行水質量測，水質儀量測成果提供航拍影像色溫率定與辨識使用。實驗研究 UAV 飛行(光學

鏡頭)高度乃依據前述預備實驗與水域色溫辨識成果採最適飛行高 70 m 進行攝影測量。經實驗數據如表 4 所示,測站 #C4 及 #C5 的葉綠素濃度分別為 2.33 及 2.35  $\mu\text{g/L}$ ,相較上該測點之水質儀實測值為 2.46 及 2.52  $\mu\text{g/L}$ ,兩者測點之相對誤差分別為 5.28 及 6.75 %。研究案例情人湖葉綠素分佈如圖 9 所示。

表 4 情人湖水質儀與 UAV 量測之數據

點位	水質儀 (YSI-EXO2)	UAV	相對誤差 (%)
	葉綠素( $\mu\text{g/L}$ )	葉綠素( $\mu\text{g/L}$ )	
C1	2.41	-	-
C2	2.33	-	-
C3	2.43	-	-
C4	2.46	2.33	5.28
C5	2.52	2.35	6.75
C6	2.56	-	-
C7	2.39	-	-
C1	2.41	-	-

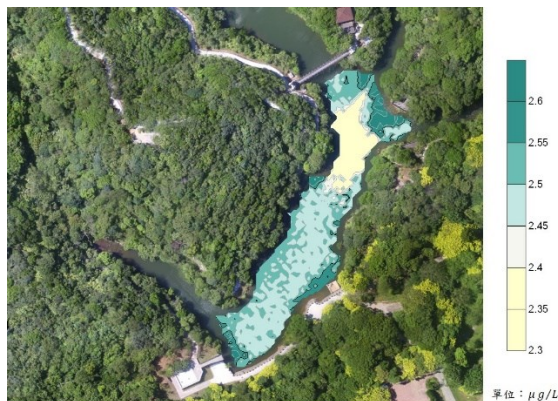


圖 9 情人湖葉綠素分佈圖

## 五、結論與建議

1. 本研究應用 UAV 影像技術分析水域表面水質較佳拍攝時段為 13:00 p.m.至 15:00 p.m.,最佳飛行高度為 70 m 及 80 m,並以紅光進行分析。
2. 根據小艇碼頭水域案例水質調查成果,以 UAV 航拍影像分析及水質儀量測表面水體葉綠素含量,測點成果之相對誤差分別為 9.69 % 及 11.31 %。

3. 情人湖水域案例測站 #C4 及 #C5 之水質調查成果,兩者相對誤差分別為 5.28 %及 6.75 %,顯示以 UAV 影像分析水質的適用性。
4. 本研究針對照度、高度、彩度之因素考量,未來可將日照角度納入討論範圍,並增加不同季節之日照角度,進一步探討不同季節日照角度與水域彩度之變化。

## 謝誌

本文係科技部專題研究計畫「產學合作計畫-雲端自動化河渠水動力量測系統之研究」(編號 MOST109-2622-E-019-007)之研究成果,承蒙國科會經費之補助使本研究得以順利完成,謹致謝忱。

## 參考文獻

1. Caliński, T., Harabasz, J. (1974). A dendrite method for cluster analysis. *Communications in Statistics-theory and Methods*, 3(1), 1-27.
2. Koponen, S., Pulliainen, J., Kallio, K., & Hallikainen, M. (2002). Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data. *Remote Sensing of Environment*, 79(1), 51-59. doi:10.1016/s0034-4257(01)00238-3
3. MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Paper presented at the Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability, Vol. 1, No. 14, pp. 281-297.
4. Wojcik, K. A., Bialik, R. J., Osinska, M., & Figielski, M. (2019). Investigation of Sediment-Rich Glacial Meltwater Plumes Using a High-Resolution Multispectral Sensor Mounted on an Unmanned Aerial Vehicle. *Water*, 11(11). doi:10.3390/w11112405
5. Zhang, Z. Y. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330-1334. doi:10.1109/34.888718
6. 郭宇鑫 (2017) 自我學習熵指標對於縱式資料之二階段分群法, 國立中興大學統計學研究所碩士學位論文。

## 智慧港口之海氣象及應變即時系統

林騰威<sup>1</sup> 蔣敏玲<sup>2</sup> 林雅雯<sup>3</sup> 賴志炫<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 數位地球科技有限公司總經理

<sup>2</sup> 交通部運輸研究所研究員

<sup>3</sup> 交通部運輸研究所科長

<sup>4</sup> 臺灣港務股份有限公司工程處助理工程師

### 摘要

我國現有基隆港、高雄港、花蓮港、臺中港、蘇澳港、安平港、臺北港等 7 大國際商港，在經濟發展上扮演了極重要的角色，為了讓船舶進出港、港埠營運單位及航商掌握即時及未來 36 小時之海氣象環境資訊，交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)在各商港設置許多即時海氣象觀測站，蒐集即時的風力、波浪、潮位、海流等資料，並受臺灣港務股份有限公司(以下簡稱港務公司)委託，客製化國際商港之海氣象及應變即時系統，藉由資訊與通訊科技技術(Information and Communication Technology, ICT)，將資訊彙整於地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)顯示，而系統海氣象自動監測數據，在超過告警門檻值時，透過通訊軟體 Line 之聊天機器人(LINE Bot)推播告警資訊，讓相關人員能夠迅速掌握海氣象資訊，以做為決策支援，提升港埠營運效率與船舶航行安全。

關鍵詞：海氣象環境資訊、自動告警

## Marine Meteorological Real-time Display System of Smart Port

Teng-Wei Lin<sup>1</sup> Min-Ling Chiang<sup>2</sup> Ya-Wen Lin<sup>3</sup> Zhi-Xuan Lai<sup>4</sup>

<sup>1</sup>General Manager, Geo3DEarth Systems Co., Ltd.

<sup>2</sup>Researcher, Institute of Transportation, Ministry of Transportation and Communications

<sup>3</sup>Section Chief, Institute of Transportation, Ministry of Transportation and Communications

<sup>4</sup>Assistant Engineer, Construction Management/Engineering Dept., Taiwan International Ports Corporation, Ltd.

### ABSTRACT

There are seven international commercial ports in Taiwan, including Keelung Port, Kaohsiung Port, Hualien Port, Taichung Port, Suao Port, Anping Port, and Taipei Port, which play an important role in economic development. In order to provide real-time and upcoming 36 hours' marine meteorological information for reference by port operators and shipping companies, Harbor and Marine Technology Center(HMTC), Institute of Transportation, Ministry of Transportation and Communications has set up many instruments in those ports to collect real-time marine meteorological data includes wind, wave, tide, current, etc. HMTC was commissioned by Taiwan International Ports Corporation, Ltd. to customize the marine meteorological real-time display system, it used the Information and Communication Technology(ICT) to display marine meteorological data via Geographic Information System(GIS) platform. In addition, it will check the data and automatic notification by communication software(LINE Bot) automatically when the alarm threshold is exceeded. This system aims to improve port operational efficiency and ship navigation safety.

Keywords: marine meteorological information; automatic notification



## 一、前言

全球海上航運的重要港口，近年來都藉由資訊與通訊科技 (Information and Communication Technology, ICT) 的技術發展智慧港口，期望船舶能像自動駕駛的汽車一樣，達到自動進出港、停泊與裝卸貨，而海氣象即時觀測與預測資訊則是智慧港口基礎資訊重要的一環，尤其現今的大型貨櫃輪船越來越多，且排水量越來越大，港埠營運單位必須精準掌握海氣象資訊，俾利船舶順利進出港。

港研中心長期在各商港設置許多即時海氣象觀測站，蒐集即時風力、波浪、潮位、海流等資料，至今已累積三十餘年，同時也發展出海象模擬預測系統，提供波浪、潮位、海流資訊給各界參考。港研中心受港務公司委託，客製化國際商港之「海氣象及應變即時系統」，藉由 ICT 將所有資訊收整於地理資訊系統，除了透過視覺化的地圖介面，可瀏覽各海氣象測站位置的即時觀測值外，本系統自動監測各項數據，在超過告警門檻值時，透過通訊軟體 Line 之聊天機器人(LINE Bot)推播告警資訊，讓相關人員能夠迅速掌握港口的海氣象資訊，以做為決策支援，提升港埠營運效率與提高船舶航行安全。

## 二、研究方法

### 2.1 使用工具

本系統採用三層式網路架構 (3-Tier Architecture)，此架構可確保使用者與資料庫隔離，增加主機與資料庫的安全性；此架構第一層架構為客戶端(Client)，主要是使用者及遠端管控者透過國際網路協定(TCP/IP)方式，以網站應用程式來瀏覽網頁。第二層架構是應用程式伺服器(Application Server)，提供應用程式給客戶端進行資料的查詢，應用程式伺服器再經由內部虛擬私人網路(Virtual Private Network, VPN)或政府服務網路(Government Service Network, GSN)等來存取資料庫相關資訊。第三層架構為資料庫伺服器(Database Server)，依應用程式伺服器的要求，透過 GSN/VPN 網路，將資料庫數據透過 TCP/IP 協定回應使用者相關資訊。

本案使用設計方法、使用工具及相關技術共分 3 大層面，系統開發環境(程式語言)，網頁開發主要使用 ASP.NET 為主並搭配其他相關前端語法如

HTML5、JavaScript、jQuery、CSS 及 XML 等，後端語法以 VB.NET 為主，資料庫系統使用 Microsoft SQL Server。

在 GIS 的部分是使用 OpenLayers，它是一個用於開發 WebGIS 用戶端的 JavaScript，其建立 GIS 資料的方法符合 OpenGIS 的 WFS 和 WMS/WMTS 規範標準，支援介接國土測繪中心、OpenStreetMap 的地圖服務。

### 2.2 資料介接

本系統展示資料主要使用港研中心設置在各商港之測站，包含風、潮位、波流(ADCP)、流速(側向 ADCP)，以及港務公司設置之側向 ADCP，所使用資料如表 1。

表 1 資料介接一覽

資料	來源
風速	1.即時觀測：港研中心設置(基隆港、高雄港、花蓮港、臺中港、蘇澳港、安平港、臺北港) 2.模擬：港研中心提供
潮位	1.即時觀測：港研中心設置(基隆港、高雄港、花蓮港、臺中港、蘇澳港、安平港、臺北港) 2.模擬：港研中心提供
波流	1.即時觀測：港研中心設置(基隆港、高雄港、花蓮港、臺中港、蘇澳港、安平港、臺北港) 2.模擬：港研中心提供 註：港研中心使用 Nortek 公司生產之 ADCP，該公司將儀器另取名為 Acoustic Wave and Current profiler(聲學的波浪與海流剖面儀，簡稱 AWAC)。
流速	1.港研中心設置(臺中港 1 處) 2.港務公司設置(高雄港 3 處)
GIS 底圖	內政部國土測繪中心、OpenStreetMap(開放源)
雷達回波圖	介接中央氣象局資料
衛星雲圖	介接中央氣象局資料
模擬成果圖	港研中心提供

### 2.3 系統架構

本系統架構詳如圖 1 所示，海氣象資料係由港研中心設置在各國際與國內商港的觀測站，透過網路將即時觀測資料回傳至港研中心的伺服器資料庫，並再傳送至本系統的伺服器資料庫，同時本系統也定時讀取港研中心的海象模擬資料至資料庫儲存，

以提供本系統使用者在即時觀測值與海象模擬的預測值瀏覽參考。

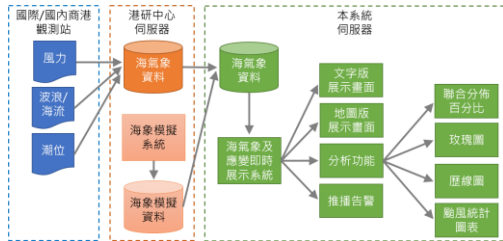


圖 1 系統架構

雷達回波圖與衛星雲圖則介接中央氣象局資料；模擬成果圖則介接港研中心資料；各式資訊由以 GIS 技術建置之「海氣象及應變即時系統」呈現。

本系統以 Web GIS - Openlayers 整合展示各項資料，各項系統功能如下：

1. 底圖：
  - (1) 國土測繪中心-通用版電子地圖。
  - (2) 國土測繪中心-正射影像混合圖。
  - (3) OpenStreetMap。
2. 海象觀測資料：
  - (1) 風速計：風速、風向。
  - (2) ADCP：波高、週期、波向、流速、流向。
  - (3) 潮位計：潮位。
  - (4) 側向 ADCP：流速、流向。
3. 模擬資料：
  - (1) 風速、風向。
  - (2) 波高、週期、波向。
  - (3) 潮位。
4. 套疊中央氣象局雲圖、雷達回波圖。
5. 套疊「港灣環境資訊網」之各式模擬成果圖 (風速向量場分佈圖、水位分佈圖、波高分佈圖、波浪週期分佈圖、波向分佈圖、流速流向向量場分佈圖、中尺度暴潮模式流速向量場分佈圖、各港區近岸波高分佈圖、近岸流速向量場分佈圖等)。

## 2.4 統計圖表產製

現今的趨勢為雲端計算，個人電腦已不是計算或統計的主要運算元，因此，本系統採用網頁的方式來建置資料分析機制，而資料皆在伺服器上處理，在維護上也較方便，使用者只要開啟網頁就能產製統計表與繪製相關圖資，不因使用者的作業系統的

關係而有無法適用的疑慮。於伺服器執行產製圖表的工作，產製「聯合分佈百分比統計表」，而統計的工作皆以 SQL 的指令於資料庫中完成(圖 2)，不需要將數據全數取出，不會有陣列過大而無法計算的問題。本系統於伺服器端計算，可產出聯合分佈圖、玫瑰圖、歷線圖與颱風統計圖等。

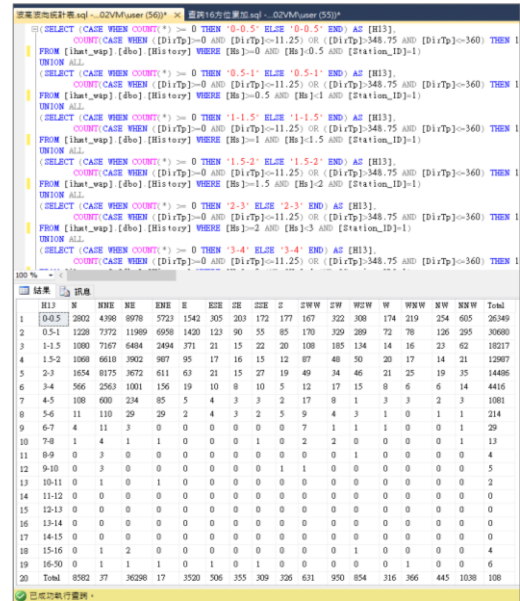


圖 2 以 SQL 內建指令完成聯合分佈百分比統計表

## 2.5 自動化告警

為了即時提醒使用者獲得海氣象觀測的告警資訊，因此本系統可依各港口特性率定出各項海氣象觀測之告警的門檻值，當實際觀測值到達門檻值時，透過通訊軟體 Line 之聊天機器人(LINE Bot)推播告警通知使用者，運作機制如圖 3，俾利爭取應變處理時間。

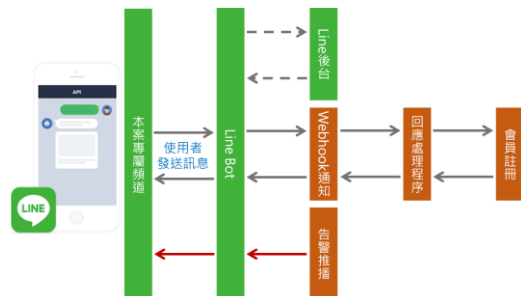


圖 3 Line@推播(Message API)機制

### 三、研究成果

#### 3.1 海氣象及應變即時系統

本研究的系統採用響應式網頁設計，可在不同的裝置(電腦顯示器與行動裝置)上瀏覽，且提供文字版(圖 4)與地圖版(圖 5)讓使用者瀏覽，文字模式可以顯示各港測站的即時觀測資訊，而地圖模式則以單一港口呈現為主，在行動裝置顯示如圖 6 所示。

港口	基隆港	蘇澳港	花蓮港	臺中港	高雄港(一)	高雄港(二)	安平港	花蓮港
時間	10/15 07:40	10/15 07:50	10/15 07:50	10/15 08:00	10/15 08:00	10/15 07:40	10/15 07:50	
平均風速	4.8級(6m/s)	5.8級(8.2m/s)	1.8級(2.6m/s)	2.8級(4.0m/s)	1.8級(2.6m/s)	1.8級(2.6m/s)	2.8級(4.0m/s)	
平均風向	東	東	西南風	東	東	西南	西南	
相對潮位(m)	2.98	非即時觀測	非即時觀測	5.18	0.89	0.66	2.04	非即時觀測
TWVD(m)	0.30			1.46	0.32			
CDL(m)	1.02			4.13	0.87			
浪高	10/15 06:10	非即時觀測	10/15 06:10	10/15 06:10	10/15 06:10	10/15 06:10	非即時觀測	10/15 06:10
示性波高(Hs,m)	0.9		1.4	1.5	1.1	1.1		1.4
週期(Tp,s)	8.2		7.8	7.7	8.5	8.5		7.2
波向	浪來		東	東	東	東		東
浪向	0.55級(0.8)		0.12級(0.2)	0.26級(0.4)	0.35級(0.5)	0.35級(0.5)		0.31級(0.4)
浪向	東		北北東	東	東	東		東

圖 4 文字模式

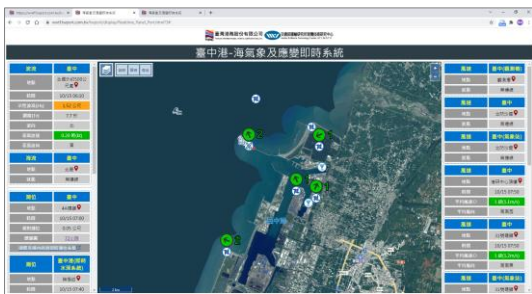


圖 5 地圖模式

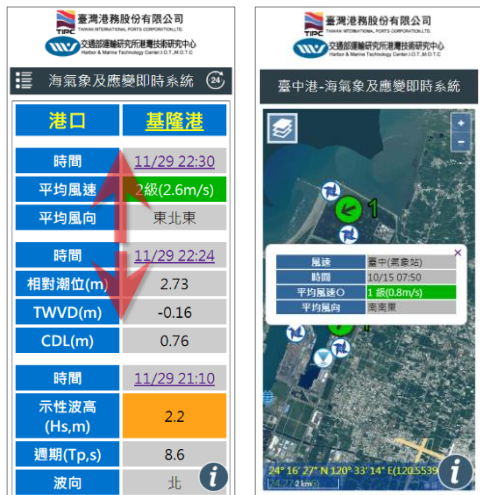


圖 6 文字與地圖模式於行動裝置顯示  
文字模式係以文字排列搭配警示燈號顏色，凸

顯各項監測數據的狀態(如圖 4)。點擊港口名稱，以地圖顯示儀器位置；於風速風向儀、潮位儀、潮波流儀顯示項目資料中，點擊「更新時間」，以彈跳視窗顯示歷線圖，如圖 7。

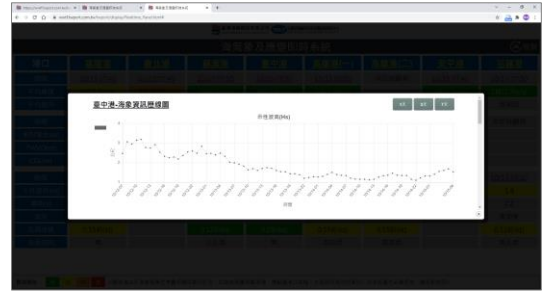


圖 7 潮波流儀歷線圖

在文字模式的右上角點擊，可切換至模擬資訊的頁面，在模擬的頁面的右上角點擊，可切換至觀測資訊的頁面，由港研中心提供 1、3、6、12、18、24、36 小時後的模擬結果，如圖 8，讓使用者針對未來的海氣象變化有一個預先的了解，以利做好防範災害的準備工作。

港口	基隆港	蘇澳港	花蓮港	臺中港	高雄港(一)	高雄港(二)	安平港	花蓮港
時間	10/15 08:00	10/15 08:00	10/15 08:00	10/15 08:00	10/15 08:00	10/15 08:00	10/15 08:00	10/15 08:00
風速								
風向								
潮位	-0.14	0.33		0.90			-0.19	-0.51
浪高	1.5	1.0	1.4	0.9	0.9	0.9	0.9	1.3
浪向	3.7	3.0	5.0	4.7	6.0	6.0	6.9	5.8
浪向	東	東北	東	北	西南	西南	西南	東
浪向	0.7級(0.9)	0.8級(1.1)		0.14級(0.2)			0.27級(0.4)	1.56級(2.2)
浪向	東	東北		北北東			東	東北

圖 8 模擬資訊

地圖模式的畫面以顯示單一港口資訊，以列表與地圖顯示，以利各港口的海氣象監控面板進行應用，如圖 5。左側列表顯示「潮波流」、「水溫」、「潮位」、「能見度」、「海流模擬」、「波浪模擬」、及「潮位模擬」等資料。右側列表顯示「風」及「風的模擬」等資料。中間主要顯示「地圖」與「風」資訊，圖示「1」的左側為平均風速的來向，右側為蒲氏風力級數，可以透過地圖的顯示，了解港區各位置的風力狀況。

本系統介接中央氣象局「氣象雲圖」與「雷達回波圖」資訊，如圖 9 與 10 所示，可透過地圖了解目前的氣象狀況。

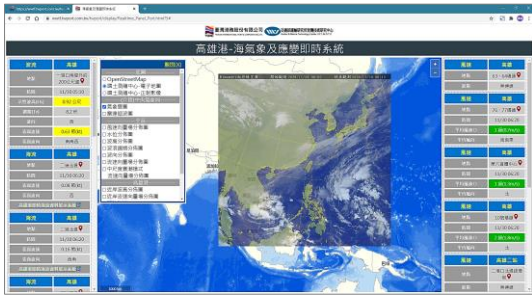


圖 9 系統套疊氣象雲圖

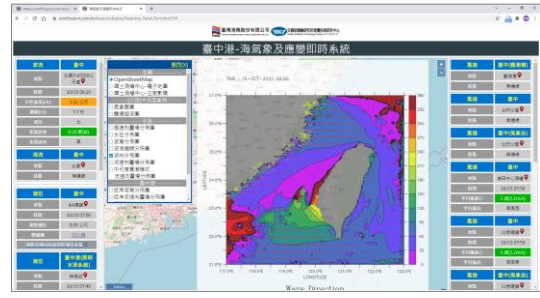


圖 13 系統套疊波向分佈圖

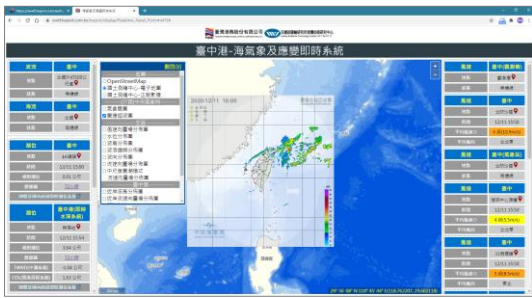


圖 10 系統套疊雷達回波圖

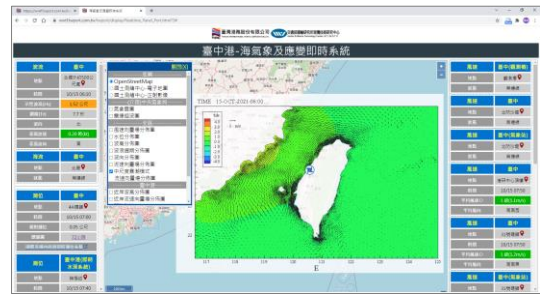


圖 14 系統套疊中尺度暴潮模式流速向量場分佈圖

另介接港研中心各式模擬圖套疊在地圖上，包括「波高分佈圖(圖 11)」、「波浪週期分佈圖(圖 12)」、「波向分佈圖(圖 13)」，及「中尺度暴潮模式流速向量場分佈圖(圖 14)」等資料。

側向 ADCP 的顯示如圖 15 所示，於地圖顯示 ADCP 各剖面位置的流速流向，以箭頭與數字標註，讓使用者容易閱讀。系統亦提供聯合分佈百分比統計表(圖 16)、玫瑰圖(圖 17)、颱風統計圖表(圖 18)等資訊。

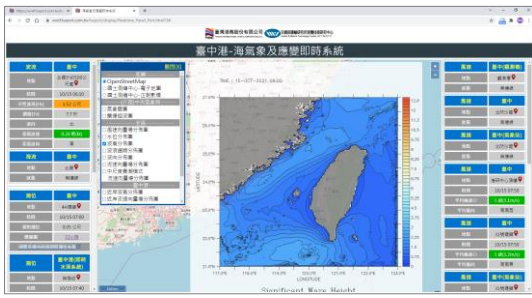


圖 11 系統套疊波高分佈圖

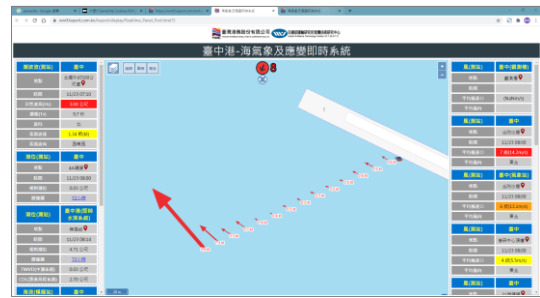


圖 15 側向 ADCP 之展示

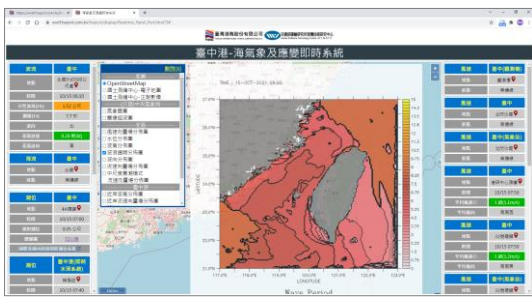


圖 12 系統套疊波浪週期分佈圖



圖 16 聯合分佈百分比



圖 17 玫瑰圖



圖 18 颱風統計圖表

### 3.2 自動化告警功能

透過自動化的監控，並搭配通訊軟體 Line 的推播，當測站的觀測值大於警戒門檻值時，透過 Line Message API 發送訊息，讓使用者可以即時掌握海氣象資訊，如圖 19 之左圖。同時當測站沒有資料時，也發送訊息通知管理員，如圖 19 之右圖。

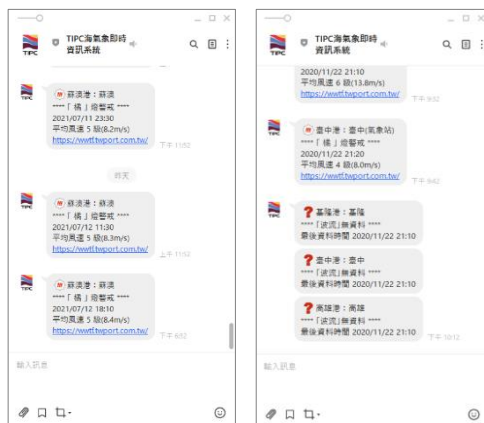


圖 19 Line 推播告警畫面

## 四、結論

海氣象及應變即時系統呈現海氣象觀測及模擬資料、數值模擬資訊、測站位置圖與相關統計圖表等，另外也加入側向 ADCP 監測的資訊，介接套疊中央氣象局氣象雲圖、雷達回波圖，以及港研中心的各式模擬成果圖，將所有資訊綜合彙整於 GIS 圖臺，透過地圖呈現各式資訊了解港區各測站的海氣象狀況，並且以訊息推播讓使用者即時獲得通知，爭取應變處理時間，強化港務管理及防災應變效率。本研究透過 ICT 的技術，提升航運安全，降低危險的發生，以達港埠經營管理之效益。

## 參考文獻

1. 蘇青和、廖慶堂、黃茂信、羅冠顯、衛紀淮、李政達、林達遠、洪維屏、許義宏、劉明鑫、林受勳、蔡金吉(2021) 2019 年臺灣海氣象觀測資料統計年報(12 港域觀測風力資料),交通部運輸研究所。
2. 蘇青和、廖慶堂、黃茂信、羅冠顯、衛紀淮、李政達、林達遠、洪維屏、許義宏、劉明鑫、林受勳、蔡金吉(2021) 2019 年臺灣海氣象觀測資料統計年報(12 港域觀測潮汐資料),交通部運輸研究所。
3. 蘇青和、廖慶堂、黃茂信、羅冠顯、衛紀淮、李政達、林達遠、洪維屏、許義宏、劉明鑫、林受勳、蔡金吉(2021) 2019 年臺灣海氣象觀測資料統計年報(12 港域觀測波浪資料),交通部運輸研究所。
4. 蘇青和、廖慶堂、黃茂信、羅冠顯、衛紀淮、李政達、林達遠、洪維屏、許義宏、劉明鑫、林受勳、蔡金吉(2021) 2019 年臺灣海氣象觀測資料統計年報(12 港域觀測海流資料),交通部運輸研究所。

## 七股瀉湖內牡蠣礁成長研究

黃翔瑜<sup>1\*</sup> 劉景毅<sup>2</sup> 張引<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>國立成功大學水工試驗研究助理

<sup>2</sup>國立成功大學水工試驗研究員

### 摘要

國外牡蠣礁案例多，但台灣仍無案例可循，本研究在七股瀉湖內建置小型牡蠣礁試驗來探究牡蠣礁的成長變化，評估未來運用在海岸保護上的可能性與實際運用的範疇。規劃中為 9 個方案(磚塊型\*4、浮式型\*2、插筴型\*2 與堆積型\*1)等 4 種試驗組別下進行一年 3 個月總共六次調查。結果為磚塊型 A2 樣區與插筴型 C1 樣區的牡蠣成長狀況最佳，而在單一牡蠣殼(塊)的成長狀況看放入樣區時的平均長度約 4cm，於 9 個月後可長到 16.7cm。至於穩定領先為磚塊型 A2 樣區的牡蠣殼苗串平均增加重量(介於 1.5~2.0kg 間)與體積(平均約 2880cm<sup>3</sup>)領先其他樣區。

關鍵詞：牡蠣礁、復育、生態工法

## Oyster Reef Field Test Inside Ci-Gu Lagoon

Hsiang-Yu Huang<sup>1\*</sup>, Jiing-Yih Liou<sup>2</sup>, Yin Chang<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Research Assistant, Tainan Hydraulics Lab., National Chen-Kung University

<sup>2</sup>Researcher, Tainan Hydraulics Lab., National Chen-Kung University

### ABSTRACT

Although overseas oyster reef construction are quite popular, till now there are not seen in Taiwan. Thence, constructing oyster reef in Ci-Gu lagoon to evaluate growth and possibility in coastal protection are this research main concerns. The plan begin with 9 test samples (which includes brick type\*4, float type\*2, stick type\*2 and pile type\*1) within 4 basic type, that lasted for a year and 3 month and 6 check points. The result shows that brick type A2 and stick type C1 are the best. Which the average length of oyster shell ball can grow from 4cm to 16.7cm. Brick type A2 shows best and stable growth that increase weight can go up to 1.5~2.0kg with an average volume of 2880cm<sup>3</sup> faster than other types.

Keywords: Oyster reef; Restoration; Eco-engineering

### 一、研究目的

依據文獻記載、人工牡蠣礁的復育最早可追溯至 1949 年在美國佛羅里達州 Apalachicola Bay(Nelson et al. 2001)所進行的研究。O'Beirn et al. (2000)則將牡蠣殼應用在海岸防護工法上，其利用貝殼、水泥及橡膠輪胎製成有利於牡蠣附著的潛礁結構物，再進行現地試驗。美國 Louisiana 州的一間民營公司曾將人工漁礁製作成有利於牡蠣附著的潛礁結構物，其做法是利用巨大鋼骨將裝袋的牡蠣殼

結合在一起(Gagliano, 1993)。該工法後來也被 Coastal Wetlands Planning, Protection and Restoration Act (CWPPRA)計畫採納，作為海岸復育與保護的策略選項(Foret, 2003)(LDNR, 2004)，之後陸續有不同單位進行不同牡蠣礁的案例。

雖然至今牡蠣礁在國外執行的案例很多，但截至目前為止台灣仍沒有一個牡蠣礁實際案例可循，因此在七股瀉湖內建置小型牡蠣礁試驗來探究牡蠣礁的成長變化，並評估未來運用在海岸保護上的可

能性與實際運用的範疇，乃是本研究的目的。

## 二、研究方法

本研究在執行前以及過程中，針對人工牡蠣礁、牡蠣礁基質放置方式、牡蠣礁試驗區位選擇、牡蠣養殖環境等，進行一連串的資料蒐集與調查分析，並擬出牡蠣礁現地試驗方案如圖 1~圖 3 所示為本研究規劃之 9 個現地試驗方案，其包括(A)磚塊型、(B)浮式型、(C)插筴型與(D)堆積型、4 種試驗組別。在同時考量牡蠣礁的成長與礁體沒水時間有關，本研究規劃將試驗配置置於平均低潮位線附近(大潮低潮位與小潮低潮位之間)，(A)組有 4 個試驗方案(圖 1)，包含有不同高度與間距的組合，(B)組有 2 個試驗方案(圖 2)，包含浮式垂吊型與浮式懸掛型、預計放置於低潮位與低低潮位間，(C)組亦有 2 個試驗方案(圖 3)，插筴間距分別為 0.5m 與 1m，(D)組為堆積型方案(圖 3)。至於每個試驗方案樣區的面積預定为 2m×1m(為兩個 1m×1m 樣區進行組合)。

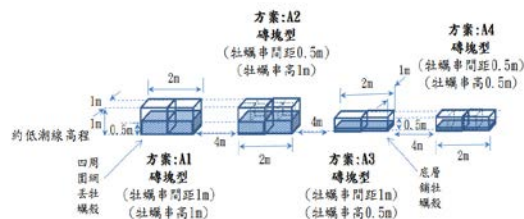


圖 1 磚塊型試驗配置示意圖(A 組)

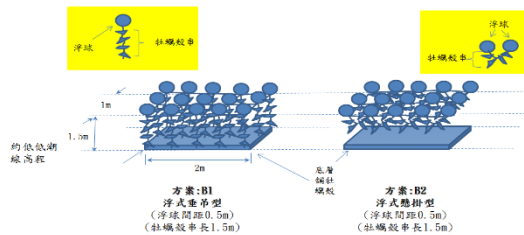


圖 2 浮式型試驗配置示意圖(B 組)

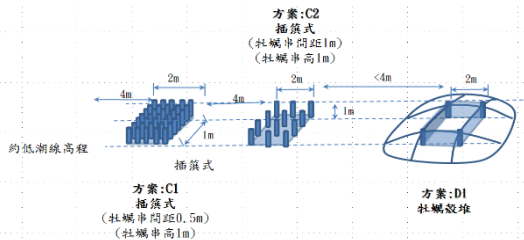


圖 3 插筴型與堆積型試驗配置示意圖(C 組、D 組)

分析的方法包括：1.牡蠣成長性調查，其內容含牡蠣殼苗串增重與體積變化分析以及牡蠣殼內蚵苗數量與大小分析(試驗樣區的牡蠣殼苗串)。2.牡蠣幼生豐度調查。3.附著性生物(蚵苗附著)調查，其內容含附苗板上牡蠣苗、藤壺及管蟲數量比較以及各樣區附苗板上牡蠣苗大小之比較分析。

## 三、監測項目

1. 水質調查：酸鹼值、濁度、鹽度、溶氧、葉綠素 a 及生化需氧量等六項與生態相關之項目，如照片 1 所示。



照片 1 水質調查

2. 牡蠣成長性調查：牡蠣殼苗串的吊掛後每三個月量測牡蠣的重量、體積與蚵苗數量，如照片 2 所示。



牡蠣殼苗串秤重 排水法計算牡蠣殼苗串體積 量測牡蠣殼苗殼長

照片 2 牡蠣成長性調查實況

3. 牡蠣幼生豐度調查：採集浮游期之牡蠣幼生，如照片 2 所示。



顯微鏡下所見之牡蠣眼點幼生  
照片 3 牡蠣幼生現採實況與顯微鏡下之幼生

4. 附著性生物(蚵苗附著)調查：採用標準化的附苗版進行試驗，以利於監測成果的比較分析，並於試驗樣區施作完成後每季一次調查，如照片 4 所示。



照片 4 附苗板採集底棲生物群聚標本

#### 四、初步結果

水質調查結果方面，平常網仔寮汕碼頭附近的水質狀況良好且穩定。但大雨後生化需氧高。雖供牡蠣成長養分，但也因鹽度的變化而影響牡蠣的成長及存活量。

本研究在牡蠣成長性調查方面(如圖 4-5 所示)，磚塊型 A2 樣區的牡蠣殼苗串平均增加重量(介於 1.5~2.0kg 間)與體積(平均約 2880cm<sup>3</sup>)穩定領先其他樣區，C2 樣區次之。而浮式型 B1、B2 樣區雖在第一次調查時有最佳的成長性，但受大量海洋生物附著影響後，調查結果顯示此二樣區的牡蠣成長性最差。

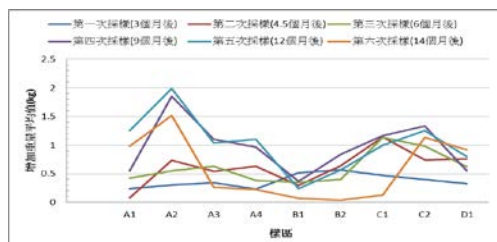


圖 4 各樣區牡蠣殼苗串的平均增加重量比較

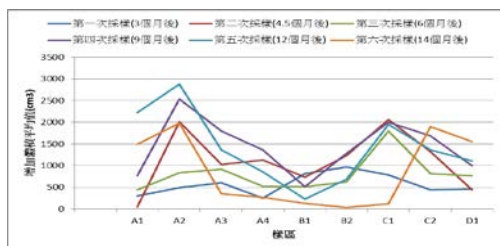


圖 5 各樣區牡蠣殼苗串的平均增加體積比較

另外在現地試驗樣區設置後 3 個月(第一次調查結果)，以浮式型 B2 樣區與堆積型 D1 樣區的牡蠣成長狀況最佳；現地試驗樣區設置後 4.5 個月(第二次調查結果)，以磚塊型 A2 樣區與堆積型 D1 樣區的牡蠣成長狀況最佳；現地試驗樣區設置後 6 個月(第三次調查結果)，以磚塊型 A2 樣區與插筴型 C1 樣區的牡蠣成長狀況最佳；現地試驗樣區設置後 9 個月(第四次調查結果)改以磚塊型 A1 及 A2 樣區的牡蠣成長狀況最佳；現地試驗樣區設置後 12 個月(第五次調查結果)持續以磚塊型 A1 及 A2 樣區的牡蠣成長狀況最佳；而最後現地試驗樣區設置後 14 個月(第六次調查結果)則以磚塊型 A1 及 A2 樣區與插筴型 C2 樣區的牡蠣成長狀況最佳。綜合言之，調查結果顯示 A2 樣區最優，C2 樣區次之。

在牡蠣幼生豐度調查方面，從 106~108 年在樣區附近調查結果(如圖 6 所示)顯示，該水域的牡蠣眼點幼生密度超過最低採苗基準，此顯示試驗樣區內有天然蚵苗附著的條件，這與各樣區的牡蠣殼串與附苗板上均已有的新的牡蠣苗附著吻合。

在附著性生物(蚵苗附著)調查方面，水深分布結果顯示牡蠣苗在整個附苗板(10 個磁磚)雖然都有附著，但以平均潮位附近為主要附著區域，此與牡蠣殼苗串上的蚵苗主要附著在平均水位附近相一致。而藤壺的附著區位主要在平均潮位至高潮位的區位。至於管蟲，則主要附著在平均潮位以下區位。

而各樣區附苗板上牡蠣苗大小之比較方面，其結果顯示各試驗樣區都有新苗持續附著，此與本研究在牡蠣殼苗串上的新苗分析結果一致。此結果證實現地試驗樣區水域在調查期間都有天然蚵苗，且可持續在牡蠣殼與附苗板上附著成長。

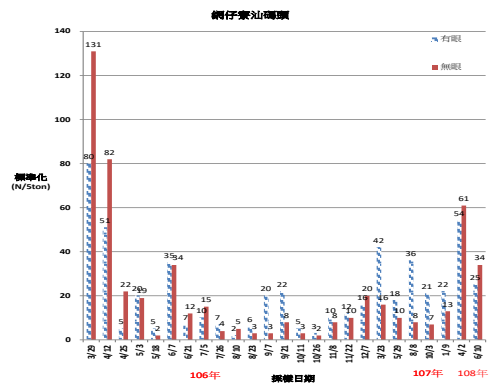


圖 6 牡蠣幼生數量(網仔寮汕碼頭附近水域)



## 五、結論

本研究選擇在台南七股的潟湖側進行現地試驗，試驗方案依試驗配置之型式、高度、間距與吊掛方式的不同，共分為 9 個方案。現地試驗的時間從 107 年 3 月至 108 年 6 月共完成六次調查。其監測結果、綜合評估牡蠣礁的成果如下：

1. 表 1 所示的現地試驗影響因子與評分權重後依據本研究現場調查成果與經驗所研擬。評估項目有分為物理因子、生物因子與經費三大項，權重佔比依序為 25%、65%與 10%。其中物理因子包含砂埋危害程度、材料與沒水時間三種指標，生物因子則主要針對牡蠣殼苗串與附苗板的調查成果進行評比，評估的子項目包括牡蠣殼苗串的增加體積與重量、蚵苗大小與數量、死蚵苗數量與平均長度、附苗板上的藤壺與管蟲數量以及海綿、海葵、海鞘、蚵螺的危害程度等，由於歷次的調查成果不同，這些子項目的評分結果亦會隨之改變。

表 1 所示的現地試驗影響因子與評分權重  
(以第六次採樣結果為例)

評估項目	樣區	磚塊型				浮式型		插筴型		堆積型
		A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1	C2	D1
物理因子 (25%)	遭受砂埋的危害(10%)	10	10	5	5	5	5	5	5	3
	配置設計材料(5%)	5	5	5	5	2	2	3	3	2
	強體設計沒水時間(10%)	5	5	8	8	10	10	5	5	8
生物因子 (65%)	增加體積(牡蠣串)(8%)	6	8	1	1	1	1	1	1	8
	增加重量(牡蠣串)(8%)	5	8	1	1	1	1	1	1	6
	蚵苗數量(牡蠣串)(8%)	7	7	1	2	1	1	1	1	8
	蚵苗大小(牡蠣串)(8%)	4	8	1	3	1	1	1	1	7
	牡蠣苗量綜合評估(5%)	4	4	1	1	1	1	1	1	1
	死蚵苗數量(3%)	1	1	2	2	3	2	2	1	2
	死蚵苗平均長度(3%)	2	1	1	2	3	3	1	1	1
	附苗板上的藤壺(3%)	3	2	1	1	1	1	1	1	1
	附苗板上的管蟲(3%)	3	2	1	1	1	1	1	1	1
	海綿、海葵、海鞘危害(8%)	6	6	5	5	3	3	6	6	5
	蚵螺危害(8%)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	經費(10%)	5	5	5	5	6	6	8	8	10
	總分	67	72	39	42	38	36	34	57	51

評分級距：從劣至優共分 10 個級距，分數級距由 1 至 10，最優為 10。

2. 依據六次牡蠣成長性調查成果綜合評分總表(如表 2 所示)。表中在試驗樣區建置完成後 3 個月(第一次採樣調查時)，海洋生物的危害仍未開始，各驗樣區的牡蠣成長狀況，以牡蠣殼苗串長時間浸沒水中的浮式型樣區表現較優(B2 樣區最佳)。但隨著外在物理環境(沙埋與持續豪雨導致潟湖水變淡)與生態環境(海鞘、海綿、蚵螺等)的改變，各試驗方案顯現各自的優劣點。現地試驗樣區設置後 4.5 個月(第二次採樣調查時)，以磚塊型 A2 樣區與插筴型 C1 樣區的牡蠣成長狀況最佳；現地試驗樣區設置後 6 個月(第三次採樣調查時)，磚塊型 A2 樣區與插筴型 C1 樣區仍維持最佳的牡蠣成長狀況。在第四次至第六次調查期間，則均以 1m 高的磚塊型 A1、A2

樣區的牡蠣成長狀況較佳，其中 A1 樣區係由前兩次調查時的較差表現逐次改善攀升，至第六次採樣時已為歷次調查最佳；而 A2 樣區則在歷次的調查中均能穩定維持在較優或最優表現，因此整體而言本研究的牡蠣礁小型現地試驗，以磚塊型 A2 樣區的牡蠣成長狀況表現最優。

表 2 牡蠣礁小型現地試驗評分總表

調查時間	磚塊型				浮式型		插筴型		堆積型
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1	C2	D1
第一次採樣	44	50	38	37	58	68	49	36	46
第二次採樣	40	64	43	49	39	47	55	41	49
第三次採樣	50	61	43	42	43	46	61	40	42
第四次採樣	51	72	45	43	43	44	46	46	40
第五次採樣	63	66	44	48	38	40	44	43	41
第六次採樣	67	72	39	42	38	36	34	57	51
平均值	47	62	42	43	46	51	53	41	44

3. 表 3 所示為 A2 樣區單一牡蠣殼(塊)的成長狀況，由剛放入樣區時的平均長度約 4cm，於 9 個月後長到 16.7cm，照片 5 則顯示磚塊型樣區角鋼上(平均水位附近)長滿牡蠣塊，寬度達 60cm。由於試驗區水質佳，也有天然蚵苗，且會持續附著在基質上成長，長期而言，可形成有益於沙洲侵蝕防護的牡蠣礁體。但有別於傳統工法，生態性工法常需要較長的發展時間。在實用面上，需思考如何增加牡蠣成礁的速度。

表 3 A2 樣區平均水位附近單一牡蠣塊的成長速率

時間	起始	3 個月	4.5 個月	6 個月	9 個月	12 個月	14 個月
牡蠣殼(塊)平均長度	4.0 cm	8.8 cm	11.0 cm	12.2 cm	16.7 cm	16.8 cm	16.8 cm



照片 5 磚塊型樣區角鋼上長滿牡蠣塊(108/9/5 低潮位時拍攝)

## 謝誌

本研究經費由台江國家公園管理處輔助完成，在此謹誌謝忱。

## 參考文獻

1. Ford, S., & Tripp, M., 1996. Diseases and Defense Mechanisms. In: Kennedy, V. S., Newell, R.I.E., and Eble, A.F., Eds. *The Eastern Oyster Crassostrea virginica*, Maryland Sea Grant College, University of Maryland System, College Park, pp 581-642.
2. Foret, J., 2002. Role of artificial oyster reef development in the restoration of Coastal Louisiana. 6th International Conference on Shellfish Restoration, Charleston, SC, USA, NOAA/Sea Grant.
3. Hsiang-Yu Huang, Ying-Chih Wu, Jiing-Yih Liou, Hwung-Hweng Hwung (2005) "Extensively Ecological Solution for Shore Protection Matter." PACON. 2005-Harmonization of Port and Industry.
4. Jim Henderson and Jean O'Neil, Sept. 2003; Economic Values Associated with Construction of Oyster Reefs by the Corps of Engineers., ERDC TN-EMRRP-ER-01, pg.6-7
5. Leonard M. Bahr., William P. Lanier., 1981, The ecology of intertidal oyster reefs of the South Atlantic coast:a community profile. Fish and Wildlife Service U.S. Department of the Interior. Biological Services Program FWS/OBS-81/15.
6. Nelson L. Bills and Jane Maestro Scherer;(Dec, 2001); Market Enhancement Programs Operated in New York's Key Competitor States and Provinces; Department of Applied Economics and Management – College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, pg. 38
7. O' Beirn, F., Luckenback, M., Nestlerode, J., Coates, G., 2000, Toward design criteria in constructed oyster reef: Oyster recruitment as a function of substrate type and tidal height. *Journal of Shellfish Research*, 19, 1, 387-395.
8. Sherwood M. Gagliano, 2002, Louisiana Landowners Association; Coastal Restoration in Louisiana: Striving for a Higher Level, pg.23.
9. Shumway, S.E., 1996, Natural Environmental Factors. In: Kennedy, V.S., Newell, R.I.E., and EBLE, A.F., Eds. *The Eastern Oyster*

*Crassostrea virginica*, Maryland Sea Grant College, University of Maryland System, College Park, pp. 467-513.

1. 台江國家公園管理處，2017~2019，七股潟湖與沙洲復育規劃及試驗。

## 海難漂流搜索之海流數據選用指南芻議

賴堅戊<sup>1\*</sup> 呂宜潔<sup>2</sup> 陳奕光<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國家海洋研究院海洋產業與工程研究中心研究員  
<sup>2</sup>國家海洋研究院海洋科學與資訊研究中心助理研究員  
<sup>2</sup>海洋委員會海巡署巡防組災害防救科科長

### 摘要

海巡署為我國負責海域及海岸巡防業務之機關，根據其 2018 年「行政院海岸巡防署的回顧與展望」報導，在改隸海洋委員會之前的 18 年間，在「救生救難」方面，總計救援海上遇險船舶 2,988 艘、1 萬 1,383 人，不僅突顯了海域安全業務的繁重，也展現了海巡署同仁在海面上人道救援的貢獻。本研究從海巡署搜救優選規劃系統(SAROPS)漂流模擬所碰到的問題開始，就可資運用的海洋環境資料進行平故，並藉由正規化拉格朗日追蹤技能得分 (Skill Score) 以及統計第 95 百分位漂流模擬推估位置差異 ( $S_{95}$ ) 之分析，探討包括美國 NRL HYCOM 及臺灣 CWB OCM 數值流場以及臺灣 TOROS 10 公里格網雷達測流等三種表面海流資料平臺用來進行漂流模擬及其與全球表面漂流浮標 (GDP) 軌跡之差異，瞭解各海流數據平臺做為漂流模擬之總水文量數據源之可靠度。同時，亦探討了各平臺在一年四季中以及在東西南北四個分區海域的品質差異，其成果將再與海巡署 SAROPS 專責小組討論後，嘗試建立一套海洋環境資料庫伺服器 (EDS) 之海流數據選擇指南，供第一線作業人員依據季節及海域選擇最適的海洋環境資訊。

關鍵詞：搜索與救援、表面海流、漂流軌跡、搜救優選規劃系統

## A Preliminary Study on the Guidance for Selection of Ocean Current Data for Search and Rescue

Jian-Wu Lai<sup>\*</sup>, Yi-Chieh Lu, Yi-Kuang Chen

<sup>\*</sup> Research fellow, Marine Industry and Engineering Research Center, National Academy of Marine Research

### ABSTRACT

According to the "Review and Prospects of the Executive Yuan Coastal Guard Agency" issued in 2018, in the past 18 years, a total of 2,988 ships in distress at sea and 11,383 people have been rescued. This not only highlights the arduous maritime security business, but also demonstrates the contribution of the Coastal Guard Agency in maritime humanitarian rescue. This research starts with the problems faced by SAROPS drifting simulation, introduces the available marine environment dataset, and evaluation of trajectory in different dynamic dataset using normalized cumulative Lagrangian separation. Analysis of location difference ( $S_{95}$ ), discussing three surface ocean current data platforms including the United States NRL HYCOM and Taiwan CWB OCM numerical flow field and Taiwan TOROS 10 km grid radar surface current maps for drift simulation and its relationship with the global surface drifting buoy (GDP) trajectory difference. This allows us to understand the reliability of the total hydrological data of each ocean current data as a drift simulation. Furthermore, the quality differences of each dataset in the four seasons of the year and in the four sea areas of Taiwan are also discussed. The results will be further discussed with the SAROPS task force of the Coastal Guard Agency to establish a ocean current dataset selection guidance for front-line operators to select the most suitable marine environment information according to the season and sea area.

Keywords: Search and Research; Surface Current; Drifting Trajectories; SAROPS

## 一、前言

臺灣周邊海域交通繁忙，位處亞太航運樞紐，周邊海域多有海難事故發生，根據其 2018 年「行政院海岸巡防署的回顧與展望」報導，在改隸海洋委員會之前的 18 年間，在「救生救難」方面，總計救援海上遇險船舶 2,988 艘、1 萬 1,383 人，不僅突顯了海域安全業務的繁重，也展現了海巡署在海上人道救援的貢獻。海難搜救與發生在陸域的災難救援最大差異在於落海者容易隨著海流與風的作用而漂移，在海況不佳時，更增添趕赴現場救援隊伍的搜救困難度。爰此，為提升海巡署搜索效率，進而提升海域安全及救助成功率，亟須引入科學化、智慧化的搜索規劃工具。

近代海洋搜救理論以國際海事組織 (International Maritime Organization; IMO) 和國際民用航空組織 (International Civil Aviation Organization; ICAO) 所發展的國際航空和海上搜尋救助手冊 (International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual, 簡稱 IAMSAR) 為圭臬 (IMO, 2016)，以海面風、表面海流為動力依據，並且將不同的待搜索標的之風壓差 (leeway) 予以參數化，再結合蒙地卡羅法 (Monte Carlo method) 導入不確定度，以利劃定漂流方向位置及搜索範圍，供勤務指揮官下達搜救決策。因此，海面風或表面海流數據的可信度以及風壓差參數選擇的適用性，成了影響搜救效率的關鍵因素。

本研究結合國家海洋研究院及海巡署巡防組災害防救科在運作搜救優選規劃系統 (Search and Rescue Optimal Planning System; SAROPS) 的能量與經驗，以提升我國海難搜救效能為目的，利用 2016 年 3 月至 2018 年 2 月兩年間通過臺灣周遭海域共計 55 只表面漂流浮標軌跡，檢視目前可搜集到之海流流場觀測與模擬數據，以科學的量化指標進行比對分析，報導各數據用於漂流軌跡模擬的可靠度/可信度，並進一步探討數據品質在一年四季及四個海域分區之差異，建立海流資料使用指南，供海巡署 SAROPS 專責小組作業一線人員參考，使其得以依據季節及海上事故發生海域，導入適當的海流資訊進行漂流軌跡模擬，提供可靠的搜救任務專家決策支援資訊，逐步提升我國搜救任務船艦與飛機至搜索區域執行搜索之可靠度與效能。

## 二、研究方法

本研究從 SAROPS 漂流模擬所碰到的問題開始，收集可資運用的作業化海洋環境資料 (整理如表 1 所示)，並藉由 Liu 和 Weisberg (2011) 所開發之正規化累積 Lagrangian 分離評分 (Skill Score; SS)，其評分方法如圖 1 所示，並根據第 24 小時模擬位置第 95 百分位漂流模擬推估位置差異 ( $S_{95}$ ) 之統計分析，評估各種海流資訊用來做漂流推估時之誤差情形。本研究以美國 NRL HYCOM 及臺灣 CWB OCM 數值流場以及臺灣 TORI TOROS 10 公里格網雷達測流等三種表面海流資料平臺用來進行漂流模擬及其與全球表面漂流浮標 (Global Drifter Program; GDP) 漂流軌跡之差異，瞭解了各海流數據平臺做為漂流模擬之總水文學數據源之可信度。

為了使海難搜索救援規劃第一線作業同仁在多種海流數據使用時有所依循，本研究進一步對各平臺進行一年四季中以及在東、西、南、北四個分區海域的品質差異，嘗試建立一套海洋環境資料庫伺服器之海流數據選擇指南，供海難搜索救援規劃作業人員依據季節及海域選擇最適的海洋環境資訊。

表 1 作業化/準作業化平面二維流場資訊特性

資料類型	資料名稱	運作單位	空間解析	時間解析	更新頻率
數值模式	HYCOM <sup>1</sup>	US NAVY	8公里	3小時	每24小時
數值模式	RTOFS HYCOM <sup>2</sup>	NOAA	8公里	1小時	每24小時
數值模式	CWB OCM	中央氣象局	0.75~13分 <sup>3</sup>	1小時	每24小時
數值模式	TaiCOMS	港研中心	1分	1小時	每24小時
雷達遙測	TOROS	NARLabs TORI	10公里	1小時	逐時

<sup>1</sup> Global\_HYCOM\_Navy\_C (Global Ocean Forecasting System (GOFS) 3.1)  
<sup>2</sup> Global\_HYCOM\_NCEP\_C (RTOFS - Real-time Operational Forecast System)  
<sup>3</sup> CWB OCM為非結構化網格

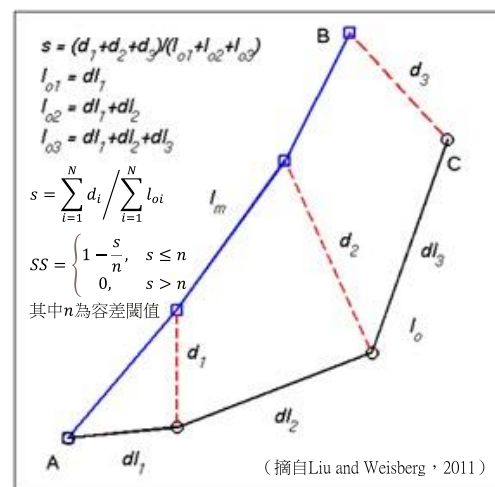


圖 1 正規化累積 Lagrangian 分離評分法示意圖

### 三、結果與討論

#### 3-1 漂流軌跡模擬與技能得分

本次以 2016 年 3 月至 2018 年 2 月間，通過臺灣周遭海域（東經 118.5 度至 123.5 度間，北緯 21 度至 26.5 度間）之 GDP 表面漂流浮標進行與各個海流數據模擬漂流結果之比較分析，以瞭解各海流數據之可靠度。在本研究中，以各浮標每 6 個小時一次之發報位置做為漂流模擬之起點，由三種不同的表面海流數據進行 0-6-12-18-24 小時之漂流軌跡推算，將海流數據模擬之漂流軌跡與 GDP 實海漂流軌跡分別進行比較，並計算分析其技能得分 SS 值及位置偏差情形。在此以 GDP 編號 5201562 浮標漂流比對分析為例，其結果彙整如圖 2 所示。

#### 3-2 漂流軌跡模擬技能得分之季節特性

臺灣周邊海域波流具有顯著的季節特性，在此以春季（3 月至 5 月）、夏季（6 月至 8 月）、秋季（9 月至 11 月）及冬季（12 月至翌年 2 月）進行區分。兩組數值模擬及一組高頻雷達遙測流場數據與 55 只 GDP 浮標漂流模擬比對，依季節區分整理如表 2 及圖 3 至圖 6。表格中列出了技能得分之平均值、最大值以及模擬 24 小時偏差距離  $S_{95}$ ，又圖 3 至圖 6 中，上排中分別展示了美國 NRL HYCOM 數值流場、臺灣 CWB OCM 數值流場及臺灣 TOROS 10 公里格網雷達測流之拉格朗日軌跡模擬 SS 值分佈、中排則為得分直方圖，而下排左圖則是將不同海流環境數據之漂流模擬預測位置與實際位置的距離差異（Separation），以 20 公里為組距，統計各組距內之次數（Number）所繪製之推移時間 24 小時內之距離差異直方圖。下排右圖則是各海流環境數據進行漂流模擬之第 95 百分位對應之位置距離差異繪製隨著時間推移之折線圖，其中橫軸為 0-24 小時漂流模擬延時，而縱軸為各時刻對應之模擬位置與實際浮標位置之間的距離差異的第 95 百分位。

整體而言，雷達測流模擬浮標漂流之 SS 平均值介於 0.39~0.46，以夏季表現最佳，春季最差，而兩個數值模式則落在 0.27~0.40 間，以秋季表現最佳，夏季最差。在 24 小時漂流模擬的偏差距離  $S_{95}$  方面，美國 HYCOM 模式介於 67.3~104.2 公里，我國氣象局 OCM 模式介於 59.8~86.8 公里，而我國 TORI 之高頻雷達測流則介於 57.8~65.6 公里。

表 2 以季節區分各海流數據技能得分統計表

季節	浮標數 (只)	比對樣本 (個)	美國 NRL HYCOM			臺灣 CWB OCM			臺灣 TORI TOROS		
			SS	SS <sub>max</sub>	S <sub>95</sub>	SS	SS <sub>max</sub>	S <sub>95</sub>	SS	SS <sub>max</sub>	S <sub>95</sub>
春	28	2775	0.35	0.93	71.1	0.27	0.94	65.9	0.39	0.92	57.8
夏	12	1365	0.32	0.93	104.2	0.31	0.9	86.8	0.46	0.92	58.7
秋	11	1395	0.4	0.94	83.5	0.35	0.92	70.8	0.42	0.86	65.6
冬	29	3154	0.35	0.98	67.3	0.28	0.94	59.8	0.42	0.95	58.1
算數平均			0.355	0.945	81.50	0.303	0.925	70.81	0.423	0.913	60.06
樣本數加權平均			0.353	0.950	76.89	0.293	0.931	67.75	0.417	0.921	59.32

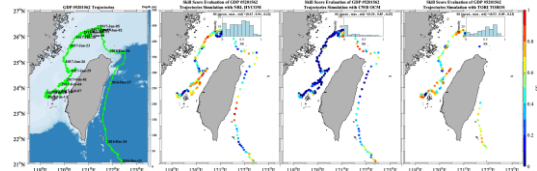


圖 2 GDP 浮標 5201562 漂流軌跡技能得分結果

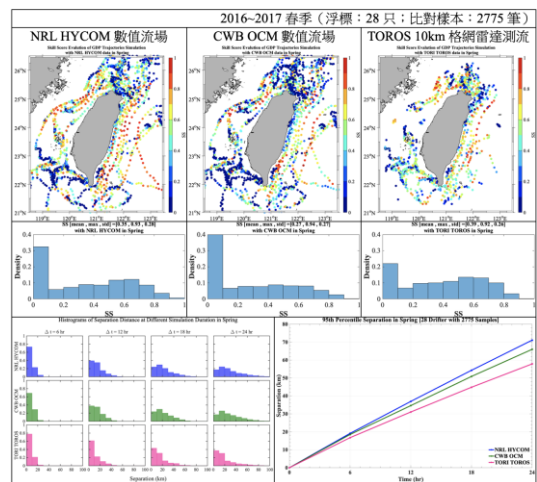


圖 3 海流數據在春季之技能得分與模擬偏差

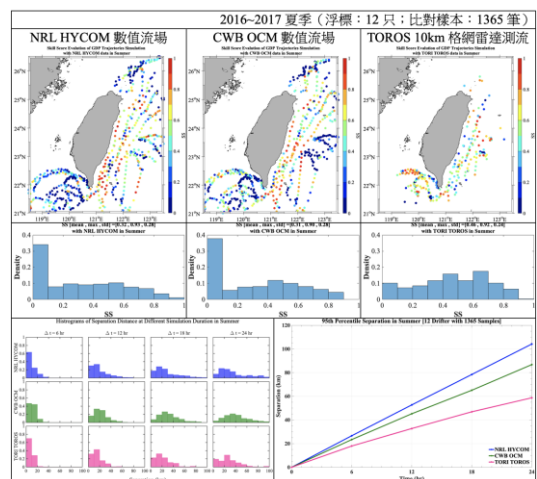


圖 4 海流數據在夏季之技能得分與模擬偏差

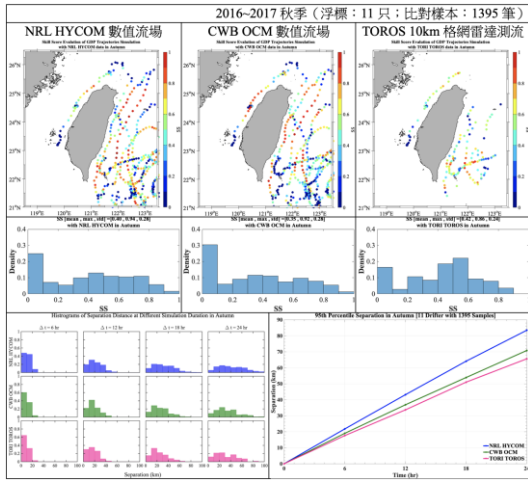


圖 5 海流數據在秋季之技能得分與模擬偏差

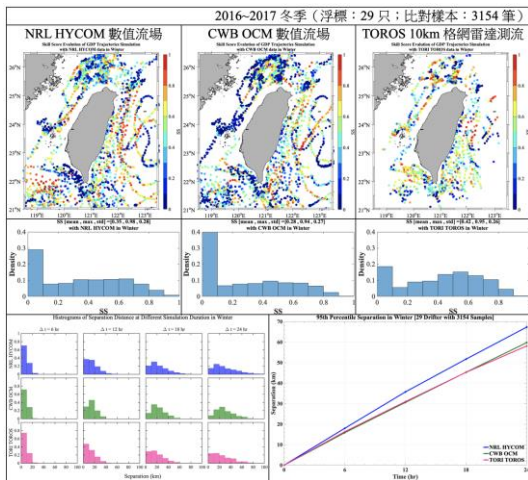


圖 6 海流數據在冬季之技能得分與模擬偏差

### 3-3 漂流軌跡模擬技能得分之區域特性

為瞭解三種海流數據在臺灣周遭海域是否存在空間上的品質差異，而使得漂流模擬有區域特性，本研究參考中央氣象局（2018 年）建構臺灣海象及氣象防災環境服務系統(2/4)，將臺灣周遭海域區分為東、西、南與北部四個海域進行探討。北部海域包括有基隆、新北、桃園以及馬祖等縣市海域，西部海域則有新竹、苗栗、臺中、彰化、雲林、嘉義、臺南以及澎湖、金門等縣市海域，南部海域計有高雄至屏東貓鼻頭海域，而東部海域則包括屏東鵝鑾鼻以北至新北市三貂角之間的東側海域。

各浮標的分析比對結果依臺灣周遭四個分區以三種表面海流資訊進行漂流推估之  $SS$  得分情形及其漂流模擬位置偏差，整理如表 3 及圖 7 至圖 11 所

示。結果顯示，各海流數據之  $SS$  平均值在東部海域的正規化模擬效能較好，而在南部海域較差，然而以模擬位置偏差  $S_{95}$  探討，則發現流速較強的東部黑潮海域偏差最大，以 HYCOM、OCM 和 TOROS 等海流數據進行 24 小時的漂流模擬，偏差距離分別可達 89.8、76.7 和 68.8 公里，同樣受黑潮支流影響的南部海域次之，對於搜索救援的挑戰甚鉅。

表 3 以季節區分各海流數據技能得分統計表

海域	浮標數	比對樣本(個)	美國 NRL HYCOM			臺灣 CWB OCM			臺灣 TORI TOROS		
			$\overline{SS}$	$SS_{max}$	$S_{95}$	$\overline{SS}$	$SS_{max}$	$S_{95}$	$\overline{SS}$	$SS_{max}$	$S_{95}$
東部	43	1986	0.40	0.98	89.8	0.33	0.94	76.7	0.43	0.93	68.8
西部	10	572	0.33	0.92	51.8	0.19	0.94	65.9	0.34	0.83	30.9
南部	22	996	0.25	0.96	71.6	0.22	0.89	59.4	0.38	0.87	40.9
北部	43	1846	0.32	0.92	49.9	0.26	0.88	50.8	0.41	0.95	41.1
算數平均			0.325	0.945	65.78	0.250	0.913	63.20	0.390	0.895	45.39
樣本數加權平均			0.336	0.946	66.43	0.265	0.910	62.83	0.401	0.912	48.27

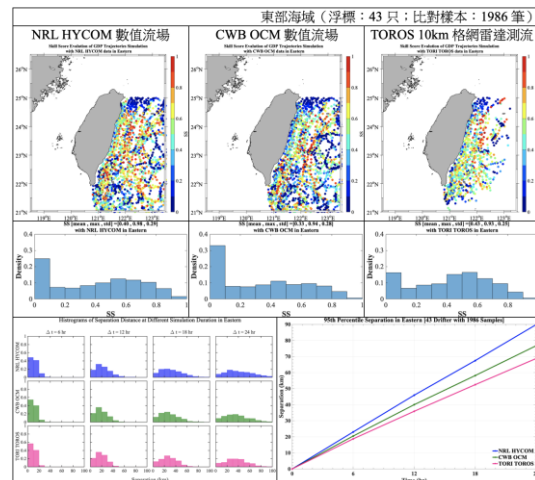


圖 7 海流數據在東部海域之技能得分與模擬偏差

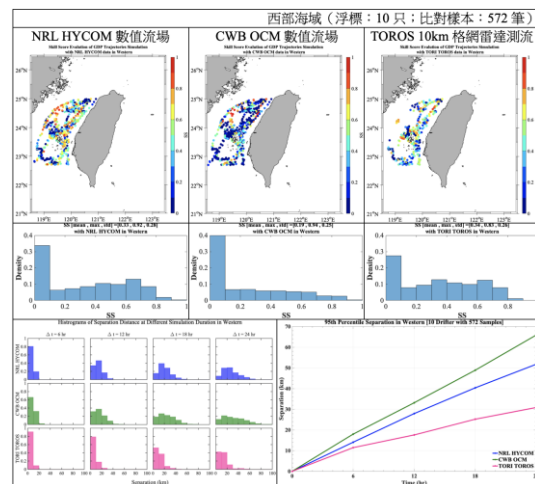


圖 8 海流數據在西部海域之技能得分與模擬偏差

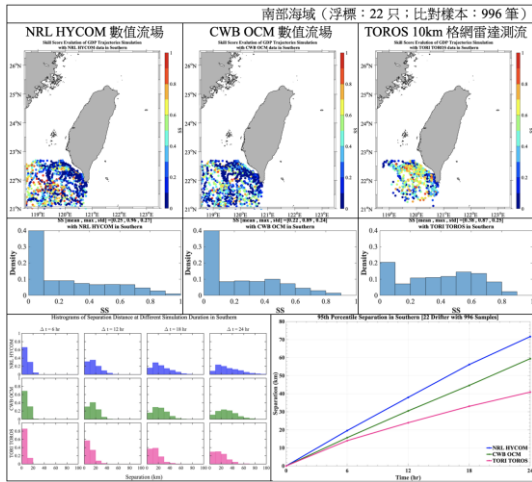


圖 9 海流數據在南部海域之技能得分與模擬偏差

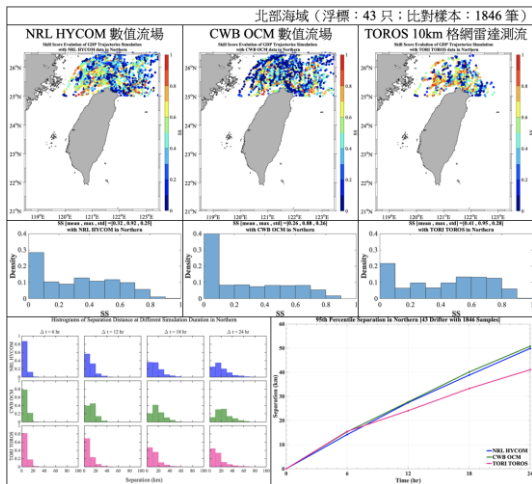


圖 10 海流數據在北部海域之技能得分與模擬偏差

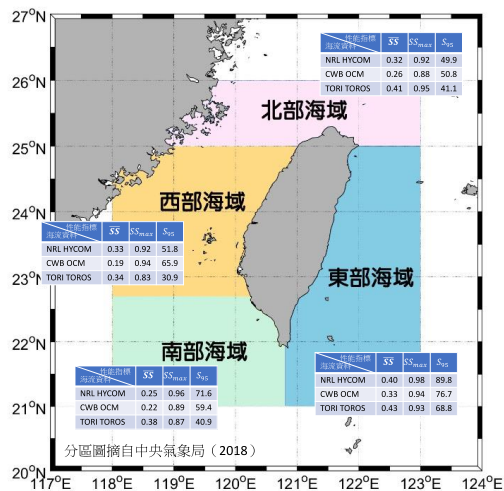


圖 11 海流數據在各海域之技能得分與模擬偏差

### 3-4 小結

我國周邊海域之表面海流受潮汐、季風、黑潮擺盪、黑潮入侵南中國海、中尺度渦旋及地形水深等影響，複雜而多變，加深了海流觀測及數值模擬的需求與挑戰。本次探討我國可取用的表面海流資料之漂流模擬品質顯示 SS 總平均值介於 0.25~0.4 之間。近一步與美國學者 Roarty 等人 (2016 年) 以 5 只漂流浮標分別與美國東岸的遙測、模擬等海流資訊進行漂流模擬之比對分析，比對結果之 Skill Score 總平均值為 0.2。再者，Liu 等人 (2014 年) 利用衛星測高儀資料所建立的地轉流漂流推移軌跡模型，透過追蹤漂流模擬 72 小時的模擬，得到衛星測高數據在墨西哥灣深水區和西佛羅里達州陸棚區之 SS 值分別為 0.49 - 0.51 和 0.35 - 0.43。上述結果顯示，我國氣象局及台灣海洋科技研究中心在海流數值模擬與高頻海洋雷達的表面海流品質雖接近美國 NOAA IOOS 計畫維持之海洋數據系統，但仍有進步的空間。

## 四、結論與建議

海難搜救是人道議題也是專業技能，而影響其成敗及效率的因子，從現場實務上來說是個非常複雜的問題，包括最後已知點的時空精確度、搜索目標物的幾何形狀與浮體條件、對風和海流環境資訊掌握的準確度和不確定度、甚至是現地搜索人力的疲勞度與機具的性能限制等，從美國海岸防衛隊研發中心開發 SAROPS 系統的過程，雖然這樣的系統仍有不夠理想，或無法滿足各類型搜救任務實況之處，但從搜救指揮官的決策支援來說，它體現了善用科技的力量來解決問題是最好的道路。

本研究以 55 只於 2016 年 3 月至 2018 年 2 月間隨著表面海流通過臺灣周遭海域之 GDP 漂流浮標軌跡為漂流實測數據 (ground truthing)，並利用包括美國 NRL HYCOM 數值流場、臺灣 CWB OCM 數值流場及臺灣 TORI TOROS 10 公里格網雷達測流等三種臺灣周遭海域可取得之作業化或準作業化海流觀測/模擬海洋環境數據進行漂流軌跡預測，嘗試對此一外購搜救系統在本地化過程中的拉格朗日漂流追蹤技能得分 (Skill Score; SS) 以及 24 小時模擬位置距離偏差 (95th Percentile Separation; S<sub>95</sub>) 進行量化評估。具體之研究成果可以我國搜救優選規

劃系統專責小組作業人員所需的「SAROPS 海流數據選用指南」來進行描述，即：

1. 量化海流數據可靠度：研究證明三種表面海流數據各據優缺點，作業人員在選擇海流數據進行漂流追蹤模擬時，可依季節或依海域，參考本研究產出之表 2 或表 3 中，漂流模擬 SS 值統計數據，選擇較可靠之數據庫，導入搜救任務模擬工作；
2. 量化隨時間推移之漂流模擬偏差：海洋是複雜且紛紜的系統，漂流過程的隨機性目前可透過參數化的方式結合蒙地卡羅法予以呈現，然而模擬與實海漂流的位置偏差距離可能會隨著模擬延時而快速變大。作業人員在選定導入漂流模擬工作之數據庫後，可以依春夏秋冬四個季節或依東西南北四個海域，參考本研究產出之表 2 或表 3 中，推估漂流模擬 24 小時後之位置距離  $S_{95}$  統計數據，瞭解導入搜救任務模擬工作可能存在的偏差。

必須特別強調，由於海氣象資訊平臺受到運作原理之物理限制、起始與邊界條件的準確度、海洋環境的複雜與紛紜以及全球環境變遷等因素影響，受限於本研究僅以 2016 年 3 月至 2018 年 2 月間之海流數據及 55 漂流浮標進行分析討論，漂流軌跡的空間和時間分佈有限，因此本次的比對分析及其結果，尚不足以代表任一海洋環境數據的絕對優劣。

自 1990 年代起美國、法國等海巡科研單位對於海面搜救漂流模擬的知識有了快速的發展，而對於漂流模擬所需的二維平面海面風與表面海流資訊，不論是觀測或模擬都有了更多的成長，使得海難搜救成效有機會的提升。建議未來可就 1) 提高風及其風壓差參數的掌握，目前風壓差參數多為美國就其實務上的搜索目標物所建立，應對臺灣特有搜救目標物進行本土化的研究；2) SAROPS 以中尺度進行規劃，然而岸際或近岸的模擬等可能受到海岸地形地貌、近岸波流影響之區域，恐有資料精度、解析度不足之處、而影響其模擬成效，建議後續加強相關資訊的整合與應用；3) 提高海難熱區之海氣象數據的收集品質，如提高數值解析度或增設海洋雷達與錨碇系統；4) 開發利用深度學習之測流數據短時預報模式；5) 建置具資料同化(Data Assimilation)、精細化(High Resolution)之海洋數值模式，以利朝三維的搜索技術發展；6) 建議組織跨單位之海流實測資源，定期進行海流數據實海驗證，並進行客觀

的技術評分(賴等人, 2017)，以利海巡署 SAROPS 小組於接獲搜救任務資訊開始作業時，得以瞭解所使用的 EDS 數據之可靠度與限制。

## 謝誌

本研究所使用到臺灣產出之表面海流流場資料分別來自交通部中央氣象局及國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心，特此感謝。在搜救實務的以及我國海域安全科技發展方面，感謝警察大學水上警察學系吳東明教授、陳先文副教授，海巡署企劃組姚洲典組長、巡防組賈治國副組長、莊昆霖專員，海委會海域安全處林章成科長、陳韋睿專員，以及國海院綜合規劃及人力培訓中心施義哲主任、胡誠友研究員、林世昌副研究員等人的不吝分享指教。

## 參考文獻

1. IMO (2016) International Aeronautical and Maritime Search and Rescue (IAMSAR) Manual, 2016 Edition.
2. Liu, Y., R.H. Weisberg, S. Vignudelli, and G.T. Mitchum (2014) Evaluation of altimetry-derived surface current products using Lagrangian drifter trajectories in the eastern Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 119(5), 2827-2842.
3. Roarty H., S. Glenn and A. Allen (2016) Evaluation of environmental data for search and rescue, *Proceeding of OCEANS 2016 - Shanghai, Shanghai, 2016*, pp. 1-3.
4. 賴堅戊、廖建明、楊益、錢樺、陳孟遠、盧濟明、朱啟豪、陳仁曾、滕春慈、林彥岑、崔怡楓(2017)「海洋遙測與模擬驗證之派對聚會提案」，106 年天氣分析與預報研討會，臺北。
5. 中央氣象局 (2018)「建構臺灣海象及氣象災防環境服務系統(2/4)」，107 年度政府科技發展計畫績效報告，153 頁。
6. 行政院海岸巡防署 (2018)「行政院海岸巡防署的回顧與展望」新聞稿，<https://www.ey.gov.tw/Page/448DE008087A1971/c9c10b59-7adc-4c3c-b20e-5e87abb28fcd>



# 應用無人機及物件偵測於大園海灘的瓶裝 海洋垃圾

陳氏玲慈<sup>1</sup> 黃志誠<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立中央大學水文與海洋研究所博士生

<sup>2</sup> 國立中央大學水文與海洋研究所副教授

## 摘要

在現今社會中人們的環保意識日益增強，然而，瓶裝海洋垃圾 (BMD) 仍然是世界上備受重視的環境問題之一。傳統海灘垃圾研究中的監測方法因為人力資源的關係存在著許多局限性，因此本研究提出了一種利用無人機和物件辨識 BMD 的方法，在桃園市大園區的沙灘上進行了相關研究。首先，本研究設計了三個實驗區域進行圖像收集用於模型訓練，且為了確保此方法在長期研究上的可行性，另外收集了兩處真實區域(非實驗區域)之圖像用於驗證模型強健性。接著，使用無人機於不同高度收集圖像，其解析度為 0.12 至 1.54 厘米/像素；物件辨識系統則採用 You Only Look Once version 2 (YOLO v2)，其使用無人機收集之圖像進行訓練 BMD 辨識模型；於訓練過程中應用數據增強(Data augmentation)之技術增加訓練數據量以提升模型可信性，並採用聯合交集 (IoU) 來評估訓練效率。本研究發現在航測上使用 0.5 厘米/像素的解析度能得到最佳的結果，該解析度於實驗區域之準確率(precision)達到 0.92 及召回率(recall rate)達到 0.95，可得 0.93 的 F1-score；在真實區域上，檢測的平均準確率為 0.31，召回率為 0.94，F1-score 為 0.47。本研究顯示，數據增強之應用在訓練過程中起著至關重要的作用，其結果 IoU 超過 0.68；證實數據增強可以更準確和客觀地識別海灘上的垃圾。

關鍵詞：瓶裝海洋垃圾, 無人機, 機器學習, YOLO v2, 物件偵測, 背景去除 數據增強。

## Detection of bottle marine debris on Dayuan beaches using unmanned aerial vehicles and machine learning techniques

Tran Thi Linh Chi<sup>1</sup> Zhi-Cheng Huang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Science, National Central University

<sup>2</sup> Assistant Professor, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Science, National Central University

## ABSTRACT

While humanity's awareness of the environment has been increasing days by days, bottle marine debris (BMD) remains one of the most pressing global concerns. An alternative approach to estimating BMD is suggested to tackle this issue by the aggregation of unmanned aerial vehicle (UAV) surveys and machine learning techniques. Research regions were located on sandy beaches in Dayuan district, Taoyuan city. A design site was set to create training datasets and test the detecting algorithm and performance, then a real site was surveyed to evaluate our approach in a complex sandy beach. To obtain aerial images, UAVs were operated at different fly heights, corresponding with resolution from

0.12 cm to 1.54 cm/pixel. The object detection system You Only Look Once version 2 (YOLO v2) used UAV-derived data to train to identify BMD; data augmentation step was added in training process to improve training data; and intersection over union (IoU) was the key index to evaluate the training efficiency. This study highlighted the role of data augmentation with IoU over 0.68 in training process, and approximate 0.5 cm/pixel should be the optimal resolution for aerial surveys on BMD researches. When operating the UAV at a fly height equivalent to image resolution 0.5 cm/pixel, the performance achieves of mean precision, recall rate, and F1-score are respectively, 0.92, 0.95 and 0.93 at the designed site and are 0.31, 0.94, and 0.47 at the real site. Based on the results, this work novel approach contributes to accurately, quickly and objectively identify BMD on beaches.

Key words: bottle marine debris, UAV, machine learning, YOLO v2, object detection, background removal image, data augmentation

## 1. Introduction

Since the mid-1980s, trash and other anthropogenic waste in the marine environment has been identified as one of global problem (Wehle & Coleman, 1983) due to its implications in (1) environmental damage, (2) economic losses, and (3) human health risks (NOAA & UNEP, 2011). Especially, bottle marine debris (BMD) has been still one of the top 10 marine debris items removed from the global coastline and waterways since 1991 (Conservancy, 2010). Therefore, the estimation of BMD is such an urgent need.

However, beach litter researches primarily rely on the visual census method and the results from such surveys may not be exactly reproducible due to many shortcomings of subjective, time and labor consuming (Martin et al., 2018). Therefore, aerial surveys involving the use of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and artificial intelligence (AI) has just been suggested and expanded since 2018 (Fallati et al., 2019; Kako, Morita, & Taneda, 2020; Martin et al., 2018). Some previous reviews related to this new approach suggest flight height of drone based on image resolution and imaging foot print, but the flight heights, or image resolutions, have not assessed on performance of object detection, and those studies also used different research equipment.

This study is aimed to determine the optimal image resolution for BMD research efficiency and to

identify some methods to overcome the bottle neck of data limitation in machine learning.

## 2. Methodology

Two research regions with the range of 10 \* 15 m were selected at supratidal zone of sandy beaches in Dayuan district. A designed site (25.0792°N 121.1525°E), which was cleaned up before randomly arranging 85 bottles on 2020/08/27, was first set up for accumulating datasets and testing the usability of our detecting process. A real site (25.0742°N 121.1291°E) near the garbage burial area of Taoyuan City were then surveyed on 2020/11/05 to judge our method in such a sandy complex beach.

For collecting aerial images, two quadcopters such as a Mavic 2 and a DJI Phantom 4 Professional were operated at 12 fly heights spaced uniformly from 5 m to 60 m, corresponding with image resolutions from 0.12 cm to 1.54 cm.

20 aerial images that were taken at the designed site were divided into 264 segments by an application which we created to collect bottles' datastore. 80% of the datastore was randomly picked up for training while the rest was collected for validating the trained dataset. Those images were then processed by the You Only Look Once version 2 (YOLO v2) object detection

system to form detectors (Joseph & Ali, 2017). In this research, we built 22 different detectors by processing at different time or changing YOLO v2 training options throughout this machine learning procedure (Figure 2).

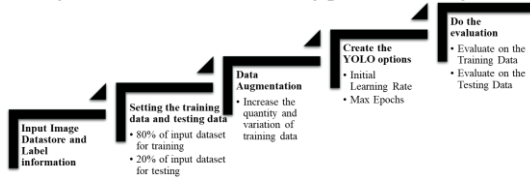


Figure 1 Machine learning process

In above proces, data augmentation is an additional phase to overcome the limitation of training data amount in training process (Figure 3).

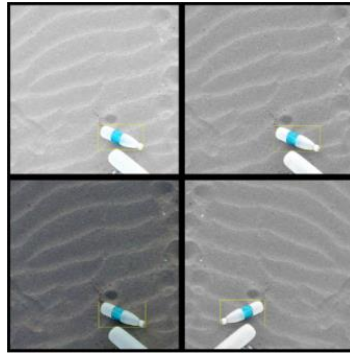


Figure 2 Example of image augmentation (upper left part: bright version, upper right part: original version, lower left part: dark version, lower right part: changing direction version)

After training, the dataset were checked again based on the spatial ratio of intersection over union (IoU) between the predicted box A (detected box) and anchor box B (ground truth box) (Figure 3) (Bouchar, Jusselme, & Doré, 2013).

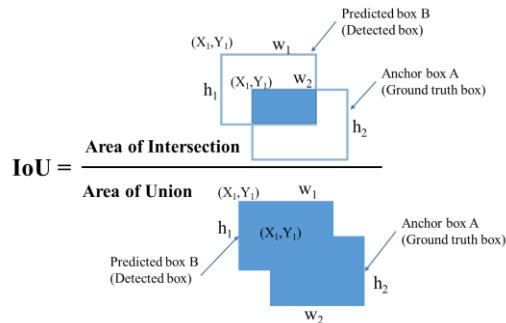


Figure 3 Intersection over union

$$IoU = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{|A \cap B|}{|A| + |B| - |A \cap B|} \quad (1)$$

All the object detecting process performed in 4 main stages consisting of: (1) input image, (2) divide it into segments, (3) do the detection, and (4) check and analysis the results (Figure 4)



Figure 4 Object detecting process

The performance of the automatic detection were observed by comparing the mean results in the two study areas. We used three indices like precision, recall and F1-score (Sammut & Webb, 2011) to evaluate the performance of detecting results:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$F1 - score = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \quad (4)$$

where true positive (TP) refers to the number of correct bottles that were detected from the detector; false positive (FP) refers to the number of non-bottles that were mistakenly detected as bottles; false negative (FN) refers to the number of bottles that were not detected.

### 3. Results

#### 3.1 Training results

We quantified all trained datasets and efficiency of data augmentation phase, which is the supplement step in our training process, by IoU index on training data (80% of datastore) and testing data (the rest of datastore). Table 1 indicates mean evaluating results of datasets that was trained with or without augmentation step.

Table 1 Training process results with and without augmentation phase

	IoU (mean ± std)	
	Augmentation	No augmentation
Evaluation on training data	0.78 ± 0.01	0.66 ± 0.01
Evaluation on testing data	0.68 ± 0.00	0.50 ± 0.01

The scores highlight that trained datasets with augmentation phase achieved IoU greater than 0.68, whereas that ratio of those without augmentation is lower 0.66. Hence, the performance of training process with augmentation phase is better in both of training

and testing data.

In order to evaluate the efficiency of data augmentation in detecting items, all trained datasets were conducted for assessment. Hereafter, those are called “detectors” due to their intended use. We found out that detectors trained with augmentation step all showed better performance. Table 2 shows an example of mean detecting results at 0.54cm/pixel image resolution.

**Table 2** Example of mean detecting results at 0.54 cm/pixel resolution

	Augmentation	No augmentation
Precision (mean ± std)	0.92 ± 0.01	0.98 ± 0.01
Recall rate (mean ± STD)	0.95 ± 0.02	0.082 ± 0.00
F1-score (mean ± std)	0.93 ± 0.01	0.15 ± 0.01

Table 2 enumerates that the data augmentation step aids in the development of detectors with recall rates and F1-score that are 11 and 6 times higher, respectively. Hence, data augmentation has such an essential role in boosting the efficiency of training process. Since this part, all detecting results at different resolutions will be the outcomes of the detectors generated with data augmentation phase.

### 3.2 Detecting results

In order to observe our automatic detecting process and the optimal resolution, we compare the performance at two types of study sites, e.g. designed site and real site.

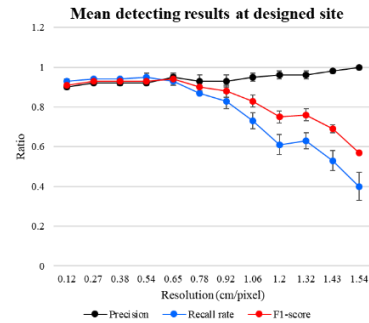
The detecting process at the designed site shows their detected-box map (Figure 5), Table 3 reports these outcomes by comparing at different resolutions, and all data in that table are illustrated in Figure 6. Table 3 and Figure 6 indicate that from 0.12 to 0.65 cm/pixel resolution, precision, recall rate and F1-score fluctuate around 0.9. Since resolution is over 0.65 cm/pixel, both recall rate and F1-score decrease significantly because some bottles have unobvious boundaries with sandy beach surface by being buried or clustered together. In contrast, precision slightly increase in this period, this could be explained due to the efficacy of YOLO v2 and the step of making segments in the detecting process. Hence, this study site indicates that images with the resolution from 0.12 to 0.65 cm/pixel have more precise and reliable detecting performance.



**Figure 5** Example of detecting results at the designed site at 0.65 cm/pixel resolution.

**Table 3** Mean results of 22 detectors at the designed site

Resolution (cm/pixel)	Precision (mean ± STD)	Recall rate (mean ± STD)	F1-score (mean ± STD)
0.12	0.90 ± 0.01	0.93 ± 0.01	0.91 ± 0.01
0.27	0.92 ± 0.00	0.94 ± 0.01	0.93 ± 0.01
0.38	0.92 ± 0.01	0.94 ± 0.00	0.93 ± 0.00
0.54	0.92 ± 0.01	0.95 ± 0.02	0.93 ± 0.01
0.65	0.95 ± 0.02	0.93 ± 0.02	0.94 ± 0.02
0.78	0.93 ± 0.03	0.87 ± 0.01	0.90 ± 0.02
0.92	0.93 ± 0.03	0.83 ± 0.04	0.88 ± 0.03
1.06	0.95 ± 0.02	0.73 ± 0.04	0.83 ± 0.03
1.2	0.96 ± 0.02	0.61 ± 0.05	0.75 ± 0.03
1.32	0.96 ± 0.02	0.63 ± 0.04	0.76 ± 0.03
1.43	0.98 ± 0.01	0.53 ± 0.05	0.69 ± 0.02
1.54	1 ± 0.00	0.4 ± 0.07	0.57 ± 0.00



**Figure 6** Mean results of 22 detectors at the designed site

Example of detecting results at the real site performs as a detected-box map on Figure 7, while Table 4 and Figure 8 display all mean outcomes at different resolutions. When resolution goes from 0.12 to 0.65 cm/pixel, recall values have a significant variance by about 0.3 because the clarity of objects in the image changes at different resolutions. This can be justified by at high image resolutions, some impacts on bottles’ appearance can lead their out-looking to become more different from the training data (ground

truth), causing them to be disregarded. Detecting precision and F1-score result in an increase by respectively 0.2 and 0.16 due to the change of obviousness by resolutions. Noticeably, Table 4 and Figure 8 highlights that at 0.54 cm/pixel, our approach peaked the mean recall rate at 0.94, corresponding with precision and F1-score at 0.31 and 0.47, respectively.

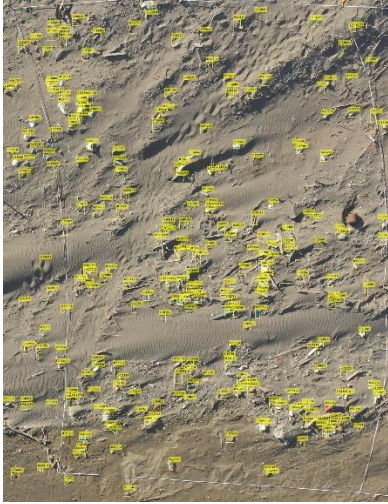


Figure 7 Example of detecting results at the real site at 0.54 cm/pixel resolution

Table 4 Mean results of 22 detectors at the real site

Resolution (cm/pixel)	Precision (mean ± STD)	Recall rate (mean ± STD)	F1-score (mean ± STD)
0.12	0.26 ± 0.06	0.63 ± 0.05	0.37 ± 0.05
0.27	0.30 ± 0.02	0.76 ± 0.03	0.43 ± 0.02
0.38	0.24 ± 0.01	0.80 ± 0.04	0.37 ± 0.02
0.54	0.31 ± 0.01	0.94 ± 0.02	0.47 ± 0.01
0.65	0.33 ± 0.02	0.84 ± 0.02	0.47 ± 0.02
0.78	0.33 ± 0.03	0.80 ± 0.01	0.47 ± 0.02
0.92	0.38 ± 0.03	0.83 ± 0.04	0.52 ± 0.03
1.06	0.35 ± 0.02	0.71 ± 0.04	0.47 ± 0.03
1.2	0.44 ± 0.02	0.67 ± 0.05	0.53 ± 0.03
1.32	0.47 ± 0.02	0.53 ± 0.04	0.50 ± 0.03
1.43	0.39 ± 0.01	0.37 ± 0.05	0.38 ± 0.02
1.54	0.37 ± 0.00	0.35 ± 0.07	0.36 ± 0.00

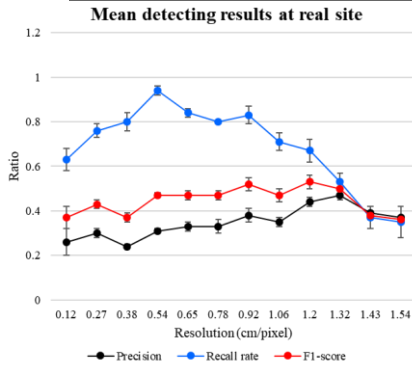


Figure 8 Mean results of 22 detectors at the real site

The rapid change of three indices between the two study sites are due to the existence of background noise at the complex beach (real site) and the small amount of training data. Considerably, the resolution at the data peak in the real site is consistent with the resolution range recommended in the designed site. Hence, approximate 0.5 cm/pixel should be the optimal resolution for operating UAVs in aerial surveys.

## 4. Conclusion

This paper presented a novel approach to automatically detect BMD on two sandy beaches. The procedure included (1) field experiments using UAV aerial surveys in both of designed site and real site at different fly heights, (2) a machine learning process via YOLO v2 algorithm with the additional step of data augmentation, (3) selecting detectors based on IoU index, (4) analyzing results of detection according to precision, recall-rate and F1-score.

From comparing the IoU index of detecting results of detectors that generated from the training process with and without the data augmentation, we concluded that data augmentation has such an important role in forming efficient detectors.

From the observation of detecting results in two study sites, we highly recommend resolutions of approximately 0.5 cm/pixel for operating UAVs in aerial surveys of studies that related to BMD.

## 5. Future plan

The above method will be conducted with a considerable increase in the amount and categories of training data. After that, the outcomes will be applied for long-term studies related to distribution of marine debris on beaches of Taoyuan city.

## References

1. Bouchard, M., Joussetme, A.-L., & Doré, P.-E. (2013). A proof for the positive definiteness of the Jaccard index matrix. *International Journal of Approximate Reasoning*, 54(5), 615-626.
2. Conservancy, O. (2010). Trash travels. From our hands to the sea, around the globe, and through time. *International Coastal Cleanup*, 15.

3. Fallati, L., Polidori, A., Salvatore, C., Saponari, L., Savini, A., & Galli, P. (2019). Anthropogenic Marine Debris assessment with Unmanned Aerial Vehicle imagery and deep learning: A case study along the beaches of the Republic of Maldives. *Sci Total Environ*, 693, 133581. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.133581
4. Joseph, R., & Ali, F. (2017). YOLO9000: Better, Faster, Stronger.
5. Kako, S. i., Morita, S., & Taneda, T. (2020). Estimation of plastic marine debris volumes on beaches using unmanned aerial vehicles and image processing based on deep learning. *Marine Pollution Bulletin*, 155, 111127.
6. Martin, C., Parkes, S., Zhang, Q., Zhang, X., McCabe, M. F., & Duarte, C. M. (2018). Use of unmanned aerial vehicles for efficient beach litter monitoring. *Mar Pollut Bull*, 131(Pt A), 662-673. doi:10.1016/j.marpolbul.2018.04.045
7. NOAA, & UNEP. (2011). *The Honolulu Strategy: A Global Framework for Prevention and Management of Marine Debris* (5th ed.): The Fifth International Marine Debris Conference.
8. Sammut, C., & Webb, G. I. (2011). *Encyclopedia of machine learning*: Springer Science & Business Media.
9. Wehle, D., & Coleman, F. C. (1983). Plastics at sea. *Natural History*, 92(2), 20.

# 微生物誘導碳酸鈣沉澱(MICP)技術 應用於抑制海岸侵蝕試驗研究

柯鈞瀚<sup>1</sup> 蔡清標<sup>2</sup> 林佑任<sup>3</sup> 葉錦華<sup>4</sup>

<sup>1</sup>國立中興大學土木工程學系 博士後研究員

<sup>2</sup>國立中興大學土木工程學系 特聘教授

<sup>3</sup>國立中興大學土木工程學系 博士候選人

<sup>4</sup>國立中興大學土木工程學系 碩士

## 摘要

本研究探討微生物誘導碳酸鈣沉澱(MICP)應用於抑制海岸侵蝕之可能性。MICP 是一種利用微生物加速成岩作用，使砂、土結晶固化一種技術。本研究利用源自自然界且無致病性之菌種，擴大培養後以台灣現地之砂種與不同濃度之膠結液進行固結試驗。首先利用無圍壓縮試驗進行 MICP 固化效果之測試，再利用動床模型試驗探討最佳之施作工法及噴灑方式，最後進行 MICP 對抑制海岸侵蝕功效試驗。實驗結果顯示，隨著膠結液濃度的增加，試體的抗壓強度也隨之提升，本試驗中 MICP 之固結效果可使海砂產生約 517.3kPa 的抗壓強度；而施工方法的不同亦會影響砂樣的膠結方式，直接灌入法很可能會造成差異侵蝕之現象，如改由表面噴灑則可避免此情況發生；在各波浪條件下，施作 MICP 後之土樣最多能抑制 40.8% 的最大沖刷深度，且波浪規模越大，抑制的成效越明顯。

關鍵詞: MICP、微生物誘導碳酸鈣沉澱、海岸侵蝕、水工試驗。

## An Experimental Study of Mitigating Coastal Sand Beach Erosion by Microbial-Induced Carbonate Precipitation

Chun-Han Ko\* Ching-Piao Tsai\* Yu-Ren Lin\* Jin-Hua Ye\*

\*Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taiwan

## ABSTRACT

This paper proposes a Microbial-Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) technology for mitigating the coastal erosion of the sandy beach. A natural and not pathogenic microorganism is applied in the present study, and it has clarified the performance by a series of tests. According to the Natural Unconfined Compressive Strength (UCS) test, increasing the concentration of the solidification solution would improve the compressive strength up to 517.3 kPa. A small-scaled wave tank was carried out to investigate the influences of the treated method. The results indicate that the two-phase method increases the anti-erosion ability of the sand than the one-phase method. On the other hand, the underground injection method might cause uneven consolidation; the surface spraying could avoid the situation. Under the optimal treated method in this study, the MICP technology reduced the maximum beach erosion depth by 40.8% under the storm waves.

Keyword: microbiologically induced calcite precipitation (MICP); experimental study; coastal erosion.

## 一、前言

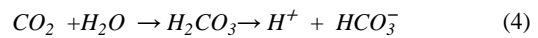
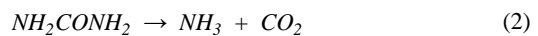
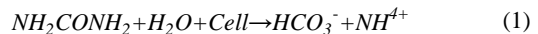
台灣為一海島國家，土地資源有限，同時具備生態及遊憩價值的砂灘，相當珍貴。然而台灣海岸因受到各式海岸作用力如海流、波浪等影響，除極少數之河口和海濱有淤積之現象外，多數的砂質海岸有侵蝕的現象(hsu et al., 2007)。如砂灘過度遭受侵蝕，可能連帶影響到後方人工構造物以及防波堤等等，相關案例如民國 100 年台南黃金海岸護堤，受到海灘退縮及颱風豪雨影響，護堤產生嚴重傾倒坍塌，間接影響了防波堤對其背後開發區所提供的保護。在過去幾十年來，相關單位面對侵蝕嚴重之地區，建築海堤或是拋置大量各種形式之消波塊一直是工程單位用來保護海岸最常見的方法，雖暫時抑制了海灘面的持續侵蝕，但也增加了海岸景觀之衝擊感，甚至可能加速堤趾處之砂層的流失，使結構物下陷或消波塊遭浪捲走。

近年來，國內外學者曾提出一種利用微生物誘導碳酸鈣沉澱(Microbial-Induced Calcium Carbonate Precipitation,以下簡稱 MICP)進行地質改良的技術。即利用原本已存在自然界中的微生物加速成岩作用，進而使砂、土結晶固化，增加其穩定性。MICP 技術根據微生物種類不同誘導碳酸鈣沉澱之機制也不同，如尿素水解型、硫酸鹽還原型、三價鐵還原型、反銷化作用型，而其中尿素水解型對應之微生物在土壤中分布廣泛且能在短時間內產生大量的  $\text{CO}_3^{2-}$ 、對於環境之影響較小且單純，變數較易操控，故一直作為主流的碳酸鈣生物礦化技術被廣泛應用(Bachmeier et al., 2002; Muynck et al., 2010)。如能給予微生物合適生長條件，便能在短時間內沉澱大量的碳酸鈣於土壤間之空隙膠結成塊，讓自然界中需要耗費數年之生物礦化作用縮短至數日內完成。其反應方程式如式(1)-(5)所示(DeJong et al. 2008)，該技術主要通過尿素水解微生物(*Sporosarcina Pasteurii*)產生的尿素酶水解尿素後生成碳酸根離子並引起鹼性的環境，當環境中之鈣源充足與氫氧根離子進行鈣化反應後而生成碳酸鈣於土壤粒間空隙，來達到對土壤膠結，穩定性增加之效果。

根據國內外學者的研究中，MICP 也已被廣泛應用於各種應用中，例如：Rong (2014)對細粒料邊坡進行了 1 分鐘的降雨試驗，這些細粒料邊坡透過 MICP 技術使用噴灑方法進行，結果說明未經過 MICP 技

術處理之邊坡的質量損失率是經過 MICP 技術處理過的八倍，並且處理後邊坡的耐酸蝕、抗侵蝕性得到了顯著改善。蔡、陳(2021)研究了以生物礦化抑制土壤液化，通過對標準砂重模試體抗壓、共振柱試驗說明 MICP 工法可以有效地將無凝聚力的鬆砂固結，且由共振柱試驗結果顯示，重模試體的剪力波速會隨著齡期增加而上升，讓原本鬆散的軟弱地盤提升至普通地盤。而有關 MICP 大型應用案例，如 Gomez et al. (2014)則研究了 MICP 現場規模的應用，使用不同濃度的菌液及膠結液於三個試驗區施作 MICP，試驗結果說明固化後砂土形成 2.5cm 厚的砂岩狀，並經動力圓錐灌入試驗表明其深度可達約 28cm；而水刀試驗結果則說明未施作 MICP 區域因顯著的表面侵蝕而形成坑洞，而施作 MICP 區顯示出顯著抗侵蝕之能力。

如將該技術加以優化，使 MICP 技術中可以調控之變數，例如：微生物種類、反應物濃度等，便能應用於地質改良中，獲得良好之工程效益，並應用於海岸保護，增加砂灘面的穩定性，達到抑制海岸侵蝕之功效；或可部分取代用於護灘之人工構造物，降低其與自然環境的衝突感。且相較於傳統保護工，該技術更能符合生態及永續工法之願景，成為未來新興工法之一。本研究即根據文獻中所提到之最適菌種，分別進行無圍壓縮試驗、工法及噴灑方式優化以及 MICP 應用於抑制海岸侵蝕試驗，以探討 MICP 應用於抑制海岸侵蝕之可行性。



## 二、研究方法

### 2.1 無圍壓縮

尿素水解型 MICP 是一個複雜的生物化學過程，許多因素會對其產生影響而導致工程性能上的不同，故在應用於抑制海岸侵蝕試驗前，首先須確認 MICP 之功效。試驗採用無圍壓縮試驗探討固定細菌濃度  $\text{OD}_{600}=1.2$ ，試驗使用之砂土種類有兩種，取自台灣海岸之海砂以及飛砂，海砂之比重為 2.67、中值粒徑



$D_{50}=0.403$  mm；飛砂之比重則為 2.60、中值粒徑  $D_{50}=0.230$  mm。本試驗選用 *Sporosarcina Pasteurii* 菌種，編號為 BCRC11596，該微生物為革蘭氏陽性耗氧菌，在土壤中普遍存在且能夠在短時間內通過分泌大量尿素酶來水解尿素並具有較高的尿素酶活性而不被  $\text{NH}_4^+$  抑制，另外它也無致病性和基因改造之風險，是 MICP 技術中理想的菌種(Ma et al., 2020)。培養基配方使用 Tryptic soy broth 及 Urea 進行培養(Zhao,2014)，取用活化培養後之 S.P.菌菌液於原地滅菌式發酵槽進行擴大培養，並以微電腦 PID 控制攪拌速度、溶氧、pH 值、溫度、氣體流量及饋料(Wang et al., 2005；Hattori, 1973)，在發酵培養達到試驗所規劃之濃度  $\text{OD}_{600}$  約為 1.2 後(Madigan,2003)，進行收槽並儲藏。

試驗根據 Varenayam Achal et al.(2014)、S.A. Abo-El-Enein et al.(2012)使用試藥級尿素與氯化鈣配置膠結液，在試驗過程中會依照比例配成三種不同濃度之膠結液分別為 0.5M、1.0M、1.5M，以比較膠結液中尿素和鈣離子對重模試體工程性能提升之效果(Whiffin,2004)。而膠結液主要作用是為 MICP 提供尿素及鈣離子，為了 S.P.菌之生長繁殖，膠結液中還包括了營養物質，根據尿素水解化學反應式可知，在此過程中 Urea 和  $\text{Ca}^{2+}$  之最佳莫耳濃度比為 1:1，膠結液中各物質之濃度如表 1。

表 1 膠結液中化學物質濃度

試劑名稱	試劑濃度(g/L)		
	0.5M Ca	1M Ca	1.5M Ca
Urea	30.0	60.0	90.0
$\text{CaCl}_2$	55.5	111	166.5
TSB	3	3	3

試驗使用中興大學混凝土實驗室之噸萬能抗壓試驗儀進行，最大載重為 25 噸，將已透過 MICP 固化完成之重模試體脫模後放置儀器內，量測側向不受限制的條件下，抵抗軸向壓力之極限強度，每分鐘軸向應變設定為 1%/min。

為了確認 MICP 應用於取自台灣海岸砂土之功效及不同膠結液濃度下試體之工程性能，本節參考 Zhao(2014)，使用浸泡法於一反應容器內進行 MICP 技術反應。浸泡法的試驗模具採用土工不織布縫製而成，為一直徑 5cm，高 10 cm 之圓柱。反應容器則為一長 7cm、寬與高接為 14 cm 的透明壓克力箱，箱

內配有 0.5M、1.0M、1.5M 三種不同濃度之膠結液，試驗溶液以淹沒試樣並高出 1cm 為準。



圖 1. 試體養護

## 2.2 施作及噴灑工法

不同 MICP 施作之工法及不同試驗溶液之噴灑方式可能會影響砂土膠結均勻性，本節以水工試驗先探討不同 MICP 施作工法配合兩種試驗溶液噴灑方式(表面噴灑+單點灌入、純表面噴灑)土壤膠結之情形。本試驗選用海砂搭配  $\text{OD}_{600}=1.2$  之 S.P.菌液、1.0M 濃度之膠結液進行試驗。試驗於國立中興大學土木工程研究所水工試驗室之斷面水槽進行，如圖 2 所示，水槽長 15 m、寬 0.5m、高 0.6 cm，水槽中地形為平直底床且底部為光滑不鏽鋼板，兩側嵌有強化玻璃做為槽壁，以便於試驗之觀測，水槽末端設有曲軸式造波機一座而另一端即為試驗之動床模型，水槽上方設有軌道及工作架做為架設波高計、沖刷深度量測測針儀器設備。波高量測使用容量式波高計 1 隻編號為 G1 並設置於造波機前 2.2m 處，用以量測入射波之波形並確認波浪特性符合試驗要求。試驗先以試驗水深 0.4m、波浪週期 1.35 秒、入射波高 0.059m、波浪尖銳度 0.0208 求得碎波相似參數為 1.73 作為固定波浪條件並比較不同工法配合不同噴灑方式之差異。其中波浪根據 Battjes (1974)所定義之碎波相似參數(surf similarity parameter,  $\xi$ )為捲浪型碎波。

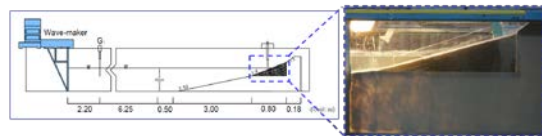


圖 2. 試驗配置圖

## 2.3 MICP 抑制海岸侵蝕

本試驗延續前節所得之最佳施作及噴灑工法後，進行不同波浪條件下，MICP 抑制海岸侵蝕之成效，其波浪條件如下表 2，同樣以捲浪型碎波為主，其中波浪尖銳度  $H_0/L_0$  為 0.0172 至 0.0258。本試驗將動

床分割為左右兩道，如圖 3，比較有無 MICP 施作的差異。

表 2 MICP 應用於抑制海岸侵蝕試驗之波浪條件

Water depth h(m)	Period T(sec)	Wave height H <sub>0</sub> (m)	Wave steepness H <sub>0</sub> /L <sub>0</sub>	$\xi$	碎波型態
0.4	1.22	0.04	0.0172	1.91	捲浪型
		0.05	0.0215	1.71	捲浪型
		0.06	0.0258	1.55	捲浪型



圖 3. 動床分割圖

### 三、結果與討論

#### 3.1 無圍壓縮試驗

試體經無圍壓縮試驗後其輸出之結果如圖 4。該圖顯示了不同膠結液濃度下兩種砂樣重模試體無圍壓縮試驗之數據，當膠結液為 0.5M 時，不論是海砂(A)、飛砂(B)樣製成之重模試體皆無法量測出其抗壓強度，於脫模後呈現軟心的型態。而海砂重模試體在膠結液為 1.0M 濃度下所測得之最大抗壓強度為 80.3kPa，當膠結液濃度增加至 1.5M 時，最大抗壓強度增加了 644%達到 517.3kPa；飛砂重模試體在膠結液 1.0M 濃度下，雖然有固化成一圓柱體狀，但在機器施加壓力的同時，形變量也同時在發生，無法量測出其抗壓強度，而當膠結液

濃度增加至 1.5M 時，最大抗壓強度則提升至 57.4kPa。故本試驗中將使用 1.5M 之膠結液進行。

而不同砂樣對於 MICP 提升工程性能的影響主要體現在砂土顆粒之粒間間隙，砂土的粒徑須保證膠結液能夠在土壤顆粒間縫隙充分的反應又須使 MICP 生成之碳酸鈣結晶體能將土壤顆粒相互膠結。觀察圖 4，可以看到在膠結液濃度均為 1.5M 下，使用海砂製作之重模試體其最大抗壓強度為 517.3kPa；而使用飛砂製作之重模試體最大抗壓強度則為 57.4kPa，試驗結果說明中值粒徑較大之砂，有較佳之工程性能，而造成此結果推測是因小粒徑砂土間之縫隙較小，在產生一定量的碳酸鈣沉澱後，造成砂土顆粒間縫隙的堵塞，使微生物和膠結液無法充分滲入導致試體工程性能較差；又隨著砂土粒徑的增大，砂土間之縫隙也越大，則有利於微生物和膠結液在縫隙中充分反應而產生相對大量的碳酸鈣沉澱使試體工程性能較佳。另外根據文獻，Zhao(2014)說明當砂土粒徑增大到一定程度時，碳酸鈣會因結晶尺度不足以填補粒間間隙，導致膠結力不足以將砂土固化，使強度降低。為了解 MICP 是否適用於台灣海岸之砂種，本試驗選取了台灣海岸之砂樣進行試驗，證明了 MICP 確實能改良台灣海岸砂樣之土壤性質，而海砂有較佳之工程性能，故 MICP 應用於抑制海岸侵蝕試驗將使用海砂進行。

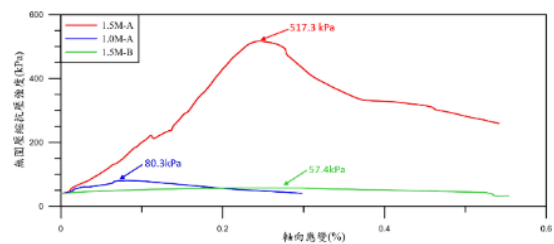


圖 4. 無圍壓縮試驗

#### 3.2 施作及噴灑工法試驗

本節試驗溶液皆以表面噴灑+單點灌入方式進行，Case1 為新型單相工法、Case2 為改良雙相工法，其中不同 MICP 施作工法之編號表如表 4 所示。圖 5 為動床模型經波浪作用後的上視圖與側視圖。觀察上視圖可以發現 Case1 與 Case2 相比之下，Case2 表面砂土受波浪作用後於灌入點周圍有明顯的結塊情形。此結塊經波浪作用後仍保有原有固結之形體，由

此可說明雙相工法(Case2)較單相工法(Case1)具有較佳之土壤膠結性以及強度，且能夠抵抗波浪衝擊。

另外使用測針量測 Case1、2 動床模型受冲刷後之中央斷面高程，如圖 6 所示，雙相工法在灌入點周圍砂土的抑制侵蝕能力較單相佳，但在  $X=65\text{cm}$  及  $X=75\text{cm}$  兩灌入點間有一明顯落差，推測形成此現象的原因為改良雙相工法雖具有較佳的土壤膠結性，可使灌入點周圍砂粒膠結強度較高，但卻因固結的範圍較集中，在固結範圍外的砂體受波浪侵蝕之情形就會相對較顯著，產生一差異侵蝕情形。

將具較佳土壤膠結性之 Case2 改良雙相工法配合不同試驗溶液噴灑方式進行比較，其編號如表 3。圖 7 為動床模型經波浪作用後不同噴灑方式之上視圖與側視圖，觀察可以發現 Case2-2 使用純表面噴灑方式於表面及側面沒有 Case2-1 因使用灌入方式而造成差異侵蝕的現象發生，相比之下具有較佳之土壤膠結均勻性，使其在受波浪侵蝕後形成較為平整之表面。然而，實際應用上應避免此差異侵蝕的現象，故後續試驗將使用純表面噴灑方式進行。

表 3. 試驗工法編號

代號	MICP 施作工法	試驗溶液噴灑方式
Case1	新型單相工法	表面噴灑+單點灌入
Case2	改良雙相工法	
Case2-1	改良雙相工法	表面噴灑+單點灌入
Case2-2		表面噴灑

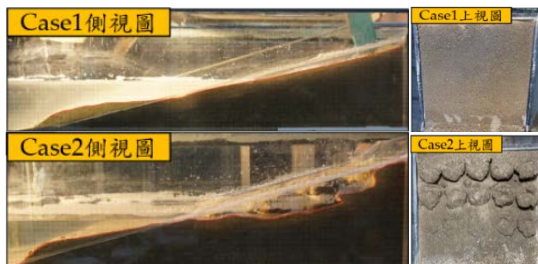


圖 5. Case1、2 側視圖、上視圖

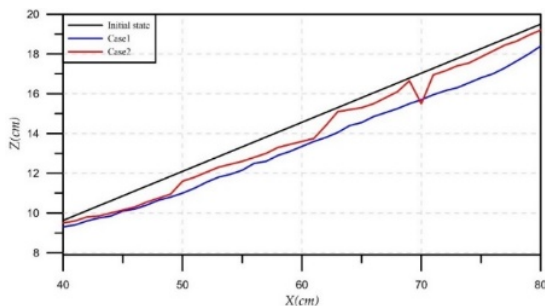


圖 6 Case1、2 受侵蝕區斷面

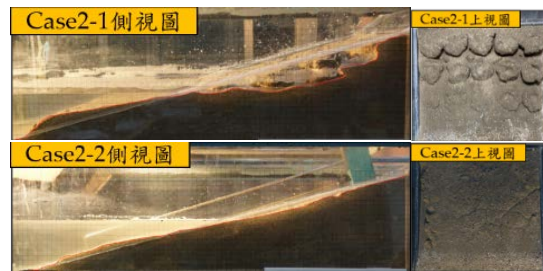


圖 7 Case2-1、2-2 側視圖、上視圖

### 3.3 MICP 抑制海驗侵蝕試驗

各波浪條件下，最大冲刷深度隨造波數( $N$ )之關係如圖 8、9 所示。可以看到在波浪的持續作用下，不論有無施作 MICP，其最大冲刷深度皆隨著造波數增加而變大。且當波浪尖銳度越大時，最大冲刷深度也隨之變大。比較圖 8 及圖 9 結果，不論在何種波浪條件，無施作 MICP 之最大冲刷深度皆大於有施作 MICP；隨著波浪尖銳度的提升，MICP 抑制海岸侵蝕的效果越佳，且當造波數  $N=300$  時，約可抑制 40.8% 的最大冲刷深度。綜合以上試驗結果，MICP 應用於砂質海岸確實能達到抑制侵蝕之功效。

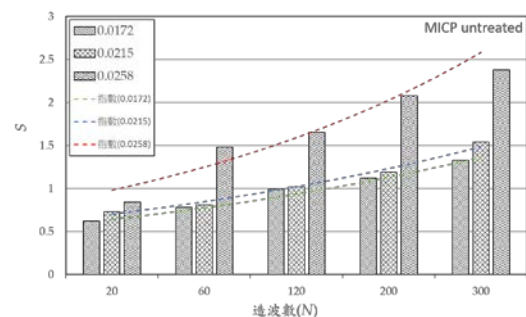


圖 8 不同波浪尖銳度下未施作 MICP 最大冲刷深度

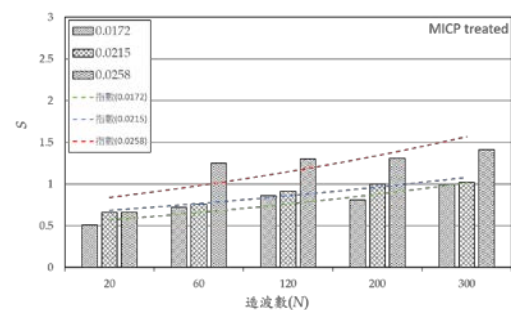


圖 9 不同波浪尖銳度下施作 MICP 最大冲刷深度

#### 四、結論

本研究利用一源自自然界且無致病性之菌種，進行無圍壓縮試驗、工法及噴灑方式優化以及水工模型動床試驗，以探討 MICP 應用於抑制海岸侵蝕之可行性。

1. 不論在何種砂樣配置下，膠結液濃度(0.5M~1.5M)越高，砂樣固結的效果就越好，且所測得之抗壓強度也越高。本試驗可使取自台灣西岸之海砂經 MICP 固結後，達到 517.3 kPa 之抗壓強度。
2. 改良雙相工法相較於新型單相工法具有較佳之土壤膠結性；如使用灌入法進行，容易使砂灘呈現局部固化，造成差異侵蝕使已固化砂體周圍較鬆散之砂粒更容易受波浪作用而被帶離，較不適用於抑制海岸侵蝕之施工，反之如使用純表面噴灑方式取代灌入，使試驗溶液自由入滲，將具有較佳的土壤膠結均勻性。因此如將 MICP 應用於抑制海岸侵蝕時，建議使用改良雙相工法搭配表面噴灑之方式進行。
3. 試驗結果說明在三種波浪規模  $H_0/L_0=0.0172$ 、 $0.0215$ 、 $0.0258$  下，施作 MICP 確實能增加砂土抑制侵蝕的能力。而經過造波數  $N=300$  之動床試驗後，施作 MICP 相較於未施作 MICP 最多可抑制 40.8% 之最大沖刷深度。

#### 參考文獻

1. 蔡亭孟、陳豪吉 (2021) 以生物礦化抑制土壤液化之工法研究 "Research on the Application of Biomineralization for Soil Liquefaction Prevention", 國立中興大學土木工程研究所博士論文。
2. Abo-El-Enein, S. A., Ali, A. H., Talkhan, F. N. and Abdel-Gawwad, H. A. (2012) Utilization of microbial induced calcite precipitation for sand consolidation and mortar crack remediation. *HB RC Journal*, 8(3), 185– 192.
3. Achal, V. and Pan, X. (2014) Influence of Calcium Sources on Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation by *Bacillus* sp. CR2. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 173(1), 307–317.
4. Bachmeier, K. L., Williams, A. E., Warmington, J. R. and Bang, S. (2002) Urease activity in mi-

- crobiologically-induced calcite precipitation. *Journal of Biotechnology*, 93(2): 171–181.
5. DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C. and Nelson, D. C. (2010) Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197–210.
6. Gomez, M. G., B. C. Martinez, and J. T. DeJong. (2013) "Bio-mediated soil improvement field study to stabilize mine sands." In Proc., *Geo Montreal. Montreal: Ontario Water Works Association*
7. Hattori, T. (1973) *Microbial life in the soil: An introduction*, vi. New York: Dekker., 427.
8. Hsu, T.-W., Lin, T.-Y. and Tseng, I.-F. (2007) Human Impact on Coastal Erosion in Taiwan. *Journal of Coastal Research*, 234, 961– 973.
9. Muynck D. W., Belie D. N. and Verstraete W. (2010) Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review [J]. *Ecological Engineering*, 36(2): 118–136.
10. Madigan, M. T., J. M. Martinko, J. Parker, et al. (2003) *Brock biology of microorganisms*, 10th ed., xxv. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall/Pearson Education. 1019-1056.
11. Ma, L., Pang, A.-P., Luo, Y., Lu, X., and Lin, F. (2020) Beneficial factors for biomineralization by ureolytic bacterium *Sporosarcina pasteurii*. *Microbial Cell Factories*, 19(1).
12. Rong, H. (2014) *Microbial Cement Development and Cementing Mechanism*. PhD diss., Southeast University (in Chinese).
13. Whiffin, V.S. (2004) *Microbial CaCO<sub>3</sub> precipitation for the production of Biocement*. Ph.D. Thesis, Murdoch University, Australia, pp. 155.
14. Wang RX, Qian CX and Wang JY (2005) Study on microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>. *Journal of Southeast University (Nat Sci Edit)*. 35(z1):191–195.
15. ZHAO Qian. (2014) *Experimental study on soil improvement using microbial induced calcite precipitation* [D]. China University of Geosciences.

## 對稱及非對稱參數化風場模式評估

張憲國<sup>1\*</sup> 陳蔚瑋<sup>2</sup> 劉勁成<sup>2</sup> 王順寬<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>國立陽明交通大學土木工程學系工程學系教授

<sup>2</sup>國立陽明交通大學土木工程學系工程學系博士後研究員

<sup>3</sup>中華醫事科技大學職業安全衛生系暨碩士班副教授

### 摘要

建立可行的即時波浪預警系統以減低沿海災害，在台灣是極為重要且急需研究的課題。延續去年所篩選出最佳最大風速半徑的 KN07 為基準，比較 3 個近期的對稱風場模式及傳統的 RVM 與 HM 模式的計算 12 場颱風在臺北港風速與實值比較。經評估 5 種的模式後，WW11 模式評估是 5 個模式中最佳的，而傳統的 RVM 優於 HM 模式。以 KN07 公式為輸入條件，經計算 10 場颱風的風速比較後發現，對稱及非對稱 RVM 模式相對於對稱及非對稱 WW11 模式是有所差別，但是相同模式的對稱及非對稱所得評估值均相近的。就偏差及均方根誤差而言，WW11 優於 RVM 模式。WW11 模式的均方根誤差比 RVM 模式稍低 0.2-0.4 m/s。

關鍵詞：非對稱性參數化風場模式、最大風速半徑、表面風速

## Model evaluation of symmetrical and asymmetrical parametric wind models

Hsien-Huo Chang<sup>\*</sup> Wei-Wei Cheng Jin-Cheng Liou Swun-Kwang Wang

<sup>\*</sup> Professor, Department of Civil Engineering., National Yang Ming Chiao Tung University

### ABSTRACT

Model development of real-time wave calculation for early protection preparation is an urgent and important research to reduce possible typhoon disaster around waters of Taiwan. In the first year study the best formula, KN07, for the radius of maximum wind speed (RMW) of a hurricane were determined by comparing with wind data at the Taipei Harbor of 12 chosen typhoons. Three newly symmetrical parametric wind models were compared with traditional models, the Rankine vortex model (RVM) and Holland model (HM). The indexes of model evaluation for the wind data showed that the WW11 model is the best among five examined models and RVM is better than HM. The symmetric/asymmetric RVM and WW11 models with RMW by KN07 were compared for ten typhoons. For both models the symmetric model has similar evaluation indexes to the asymmetric model. However, for symmetric/asymmetric models, the WW11 model has lower rmse than does the RVM model by 0.2-0.4 m/s.

Keywords: asymmetrical parametric wind model; radius of maximum wind speed; surface wind

### 一、前言

颱風大浪在海岸可能會造成結構物破壞及其強風與降雨會造成人員及財產的損失。颱風風場結構及颱風波浪推算一直是國外及台灣學者及專家長期關注的研究課題。風速是颱風波浪推算模式的重要

輸入變數，有正確的颱風風場方能有準確的颱風波浪推算。因此，若要建立一個精準的即時颱風波浪的預報系統，精準颱風風場是必要的輸入條件。颱風風場是非常複雜的海氣象交互的流體力學問題，若以 2.5km 或 5km 的大氣尺度網格來計算一天颱風

在格點的風速，常需 2-3 小時。若再使用波浪模式計算台灣附近的波浪，計算時間也須 0.5-1 小時左右，在颱風警報 3 或 6 小時而言，風場及波浪的計算時間幾乎需要 1-2 小時。當接受氣象局警報的颱風資料後，1-2 小時後才能提供風速及波浪的預警。颱風的數值風場雖可提供精準的風速以供波浪模式計算波浪特性，然而，風場模式的長計算時間造成颱風波浪預警的時效問題。為縮減風場的計算時間及維持風速計算精度，在颱風接近時，常用參數化風場可以計算加密空間的風速，且快速計算。

本研究在建立一個即時颱風風速及波浪的預報系統的目標下，需要先建立一個考慮陸域高山影響的修正非對稱性參數化風場模式，此模式須可快速地描述精準的颱風風速，以供後續波浪模式地外力輸入的精準波浪計算。此創新的預報系統有助於降低台灣常處於颱風侵襲所造成人員財產的災害威脅。

若收集氣象局颱風警報時山竹颱風(2018)、馬利亞颱風(2018)、蘇迪勒颱風(2015)及蘇力颱風(2013)的颱風衛星影像。從衛星影像的颱風形狀來看，有些是對稱的(如蘇迪勒颱風)，但有的是非對稱性(如山竹颱風)，有些是颱風尾以螺旋狀往中心流入的(如馬利亞颱風)。有關颱風非對稱性的研究如，Mohapatra and Sharma (2015)分析 2007 至 2013 年間 25 個在印度洋颱風的四象(quadrants)非對稱性及颱風大小。Chavas et al. (2016)利用 QuikSCAT 的風速資料庫及修正颱風外圍風場模式估算颱風的大小。Xie et al. (2006)利用 2003 及 2004 的 NOAA 的大西洋墨西哥灣的颱風資料及國家符標風速(NDBC, National Data Buoy Center)驗證非對稱 Holland 風場模式的可行性。Dean et al. (2009)提出以 34 節風速及其半徑來估算颱風外圍半徑的方法。Li et al. (2013)區分 83 幅颱風的合成孔徑雷達影像 SAR (synthetic aperture radar)的颱風眼成六類，並探討各類的旋轉渦度形式(intense transient vorticity features)與邊界捲(boundary layer rolls or roll vortices)。

先進國家氣象局公告的颱風警告單除颱風中心位置、氣壓及最大風速，尚包括四個方位颱風範圍。日本氣象廳目前公告的颱風警告單則增加 30 節(knot)及 50 節風速，即 7 級及 10 級，的長暴風半徑及短暴風半徑。本研究基於上述修正 Holland 模式及 RVM 模式的基礎，探討使用日本氣象廳目前公

告颱風警告的 30 節(knot)及 50 節風速條件是否改善對稱性方常模式的計算風速。因第一年的研究已評估出幾種最大風速半徑的公式的最適者，為 KN07 公式，在今年計畫首先直接引用 KN07 最大風速半徑的公式，來優選近年提出的修正對稱參數化風場模式。

## 二、研究方法

### 2.1 對稱參數化風場模式

最早的參數化風場為 Rankine vortex model (1882)，在颱風眼(hurricane eye)內，速度與離颱風中心的半徑成線性正比，如式(1)的方式；但颱風核心外的速度分布卻與距離成反比。因此，修正的 Rankine vortex model 乃指表面風速，表為：

$$v = \begin{cases} v_{\max} \frac{r}{R}, & r < R \\ v_{\max} \left( \frac{R}{r} \right)^m, & r \geq R \end{cases} \quad (1)$$

其中  $R$  最大風速的半徑， $v_{\max}$  為最大風速， $r$  為離中心點的距離， $m$  為風速衰減率或尺度參數。當  $R$  及  $v_{\max}$  為已知，由式(1)就可計算颱風圈內任何離中心點距離  $r$  的風速。Wurman and Gill (2000)，Wurman (2002)建議  $m$  約為  $0.6 \pm 0.1$ 。

另外被使用的為 Holland Model (1980)，表示為

$$v = \sqrt{\frac{B(p_n - p_c)}{\rho} \exp\left[-\left(\frac{R}{r}\right)^B\right] \left(\frac{R}{r}\right)^B + \left(\frac{rf}{2}\right)^2} - \frac{rf}{2} \quad (2a)$$

$$B = \frac{e\rho(v_{\max}^2 + v_{\max}Rf)}{p_n - p_c} \approx \frac{e\rho v_{\max}^2}{p_n - p_c} \quad (2b)$$

式中  $f=2\Omega\sin\phi$  為 Coriolis parameter， $B$  為形狀參數(shape parameter)， $p_c$  為颱風中心氣壓， $p_n$  為颱風外圍氣壓，一般可設為 1010 百帕(hPa)， $\rho$  為空氣密度(在溫度 20° 時，約為  $1.204 \text{ kg/m}^3$ )。

Emanuel (2004)提出修正的風速式為

$$\frac{v}{v_{\max}} = \left( \frac{R_0 - r}{R_0 - R} \right) \left( \frac{r}{R} \right)^m \times \left\{ \frac{(1-a)(m+n)}{n+m \left( \frac{r}{R} \right)^{2(m+n)}} + \left[ \frac{a(1+2m)}{1+2m \left( \frac{r}{R} \right)^{2m+1}} \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

其中  $a$ 、 $m$  及  $n$  為分布形狀參數(shape parameter)， $R_0$  為颱風外圍的半徑。在本研究簡稱 Emanuel (2004) 的風速模式為 EM04。Emanuel et al. (2006)建議此三

參數為  $a=0.25$ 、 $m=1.6$  及  $n=0.9$ 。

Willoughby et al. (2006) 利用實測資料或數值模擬資料，回歸出颱風眼內及外圍速度的幕次方指數，其修正方式為

$$\frac{v}{v_{\max}} = \begin{cases} \left(\frac{r}{R}\right)^{n_1} \exp\left[\left(n_1 - \frac{R}{x_R}\right)\left(1 - \frac{r}{R}\right)\right], & r \leq R \\ \left(\frac{r}{R}\right)^{n_2} \exp\left[-\left(\frac{r-R}{x_R}\right)\left(\frac{r}{R}\right)^{n_2}\right], & r > R \end{cases} \quad (4)$$

其中  $x_R$ 、 $n_1$  及  $n_2$  為速度分布的形狀參數(shape parameter)的回歸係數。若要獲得  $x_R$ 、 $n_1$  及  $n_2$  等形狀參數須要有實測資料或數值模擬資料。在本研究簡稱 Willoughby et al. (2006) 的風速模式為 WI06。

Wood and White (2011) 提出修正 Rankine vortex 的參數化模式為

$$\frac{v}{v_{\max}} = \frac{\eta^\lambda (r/R)^\kappa}{[\eta - \kappa + \kappa(r/R)^{\eta/\lambda}]^2} \quad (5)$$

其中  $\kappa$ 、 $\lambda$  及  $\eta$  為形狀參數(shape parameter)， $1 \leq \kappa < \eta$ ， $\lambda > 0$ 。當式(5)的  $r \rightarrow 0$ ， $v \rightarrow 0$ ，當式(5)的  $r \rightarrow \infty$ ， $v \rightarrow 0$ ，且  $r \rightarrow R$ ， $v \rightarrow v_{\max}$ 。在本研究簡稱 Wood and White (2011) 的風速模式為 WW11。

## 2.2 非對稱參數化風場模式

日本氣象廳公告的颱風警告單已考慮颱風的非對稱，而列出 30 節(knot)及 50 節風速的長暴風半徑及短暴風半徑，二者多為反向。若能利用此 30 節及 50 節風速的長暴風半徑及短暴風半徑不同時，確定當時風場為非對稱。往昔處理非對稱風場的方法多為選擇風場分布模式，在其模式參數修正之。如 Wang et al. (2021) 提出過去早期的修正非對稱風場模式的風速(improved asymmetric hurricane parametric model, IMAHP)， $v(r, \theta)$ ，如 Olfateh et al. (2017) 的 OLF17 模式。Wang et al. (2021) 的非對稱風場模式為

$$v(r, \theta) = v(r) + \varepsilon v^i(r) \sin(\theta + \alpha) \quad (6)$$

其中  $v^i(r)$  為風速軸向分布(radial distribution)， $\varepsilon$  為非對稱性的方位角修正因子(degree factor of azimuthal asymmetry)， $\theta$  為任一點與水平軸的夾角， $\alpha$  為最大風速位置與水平軸的夾角。若簡潔表示修正非對稱風場模式大多為對稱性切線風速再加上非對稱的修正項。

因為研究所收集的颱風氣象資料僅有長暴風半

徑及短暴風半徑，而無其他如往昔學者所提公式中參數，所以本研究根據式(6)的基礎，提出適合僅有長暴風半徑及短暴風半徑資料的另一種非對稱風場的表示形式

$$v(r) = f(r; v_{\max}, R, \dots) \quad (7)$$

若考慮颱風的非對稱性時，則將上式改為

$$v(r, \theta) = f(r; v_{\max}, R, R_{30}(\theta), R_{50}(\theta), \dots) \quad (8)$$

假設暴風 30 節風速分布是一個橢圓形，日本氣象局資料中的暴風 30 節風速離颱風中心的長半徑( $r_{30l}$ )及其反方向的短半徑( $r_{30s}$ )，此示意圖如圖 1 所示，其座標系統為  $(x, y)$ 。另外再假設颱風是位於此橢圓形的焦點(focus)處，此橢圓形的長軸及短軸分別為  $a$  及  $b$ ，半焦距長為  $c$ 。暴風 30 節風速的長半徑的方位角為  $\theta_p$ ，及橢圓形的  $x$  軸與  $N$  方向的夾角，其中星號的目標點(TP)的方位角為  $\theta_c$ ，而與颱風中心的連線會與橢圓相交，此位置與颱風中心的距離為  $r_e$ ，夾角為  $\theta$ ，其切線(示如圖中的虛線)與橢圓形  $x$  軸的夾角為  $\alpha$ 。在北半球的颱風風速為逆時鐘旋轉，因此示如圖中的  $v_c$ 。

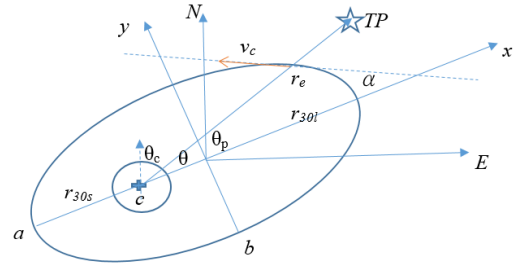


圖 1 暴風 30 節長及短半徑構成橢圓形示意圖及與目標點的切線風速

$$\text{暴風長半徑及短半徑與橢圓幾何關係如下所示} \\ a = (r_{30l} + r_{30s})/2 \quad (9)$$

$$c = (r_{30l} - r_{30s})/2 = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (10)$$

$$\theta = \theta_p - \theta_c \quad (11)$$

$$r_e = \frac{a(1 - e^2)}{1 - e \cos \theta} \quad (12)$$

其中  $e=c/a$  為橢圓的離心率(eccentricity)， $\alpha$  可表為

$$\alpha = -\tan^{-1} \frac{b^2 / (r_e \sin \theta)}{-a^2 / (r_e \cos \theta - c)} \quad (13)$$

在此假設下，長暴風半徑離颱風中心的 30 節風速與短暴風半徑的 30 節風速相同，若用相同函數來描述風速分布，則代表在短暴風半徑方向的颱風最

大風速半徑處的風速一定比長暴風半徑者小。因此，颱風最大風速半徑處的風速就與  $r_e$  及方向有關。

為展現本研究提出的非對稱風場模式的風速計算結果，選擇 2011 年米雷輕度颱風在 6 月 24 日 17 時為例來說明。此颱風在菲律賓形成後，以北北西方向沿台灣東部北上前進，此時的颱風條件為最大風速為  $30.84 \text{ m/s}$ ，移動速度為  $9.74 \text{ m/s}$  而方位角為  $333.48$  度，50 節風速的長短半徑分別為  $222 \text{ km}$  及  $185 \text{ km}$ ，而 30 節風速的長短半徑分別為  $742 \text{ km}$  及  $444 \text{ km}$ ，30 節長方為  $135$  度。在此條件下，以 Knaff et al. (2007) 計算的最大風速半徑  $R$  為  $55.22 \text{ km}$ ，若考慮對稱性及非對稱性的 RVM 模式，在  $r/R=6$  的範圍內的計算相對速率分布圖分別示如圖 2 及圖 3。

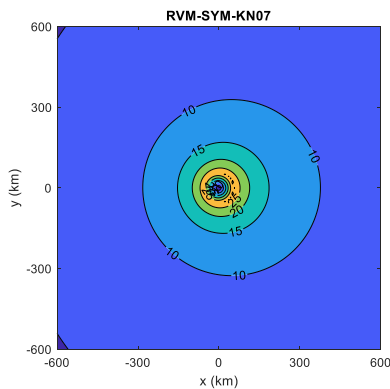


圖 2 對稱性 RVM 模式計算米雷颱風的速率空間分布

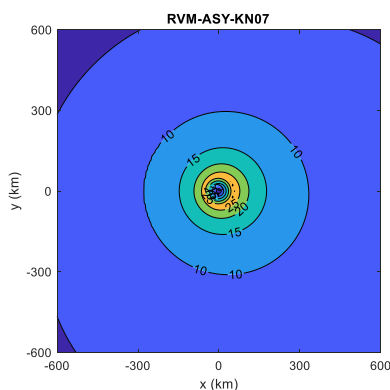


圖 3 如圖 2 說明，非對稱性 RVM 模式

以此最大風速為基準，計算 50 節及 30 節風速的相對值約為  $0.82$  及  $0.49$ 。50 節風速的平均相對距離為  $3.68$ ，而其長及短半徑的相對距離分別為  $4.02$  及  $3.35$ ，而 30 節風速的平均相對距離為  $13.40$ ，而

其長及短半徑的相對距離分別為  $10.72$  及  $8.04$ 。

比較圖 2 及圖 3 可知，二者的最大相對風速率都位於颱風中心的正右邊，此因對稱型的 RVM 模式有颱風移動的速度修正，因此在北上颱風的中心右手邊會比左手邊的風速大，另外 50 節主半徑方向為東，因此也是中心右邊風速於左邊。因為 30 節主半徑方向為東南，因此圖 3 的外圍風速等值也是朝向東南，但圖 2 就沒此明顯的現象。

### 三、結果與討論

#### 3.1 對稱參數化風場模式評估

選擇 12 場測試颱風風速資料，以最小二乘法回歸 EM04、WI06 及 WW11 公式參數後，並比較計算風速結果示如圖 5。以此資料獲得的 EM04 參數為  $a=0.6038$ 、 $m=0.7689$ 、 $n=0.3957$  及  $R_0=143230 \text{ km}$ ，此參數值與 EM06 建議參數  $a=0.25$ 、 $m=1.6$  及  $n=0.9$  ( $R_0$  值是給定的)而有所差異。迴歸的  $R_0$  值過大已不符合原定義的颱風全外圍半徑，但若以 EM06 建議的參數值所計算的核心外地風速的減速率比以本文所獲得者快，有不符合現有的數據分布型態。所獲得的 WI06 參數為  $n_1=-0.4866$ 、 $n_2=-2.7312$  及  $x_R=23.6626$ ，而 WW11 參數為  $\kappa=1.9658$ ， $\eta=2.5181$  及  $\lambda=0.0074$ 。

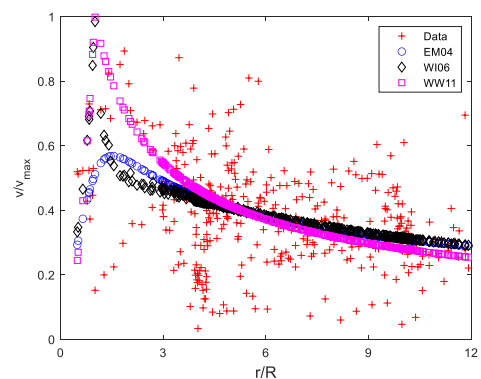


圖 4 新三種模式的計算 12 場颱風風速與實測值比較

由圖 4 可知 EM04 及 WI06 模式計算在相對距離大於 3 的風速極為相近，且大於 WW11 者。在相同的距颱風中心相對距離的 12 場颱風實測相對風速分布相當的散亂，但整體的趨勢還是約略可知相對風速隨距颱風中心相對距離遞減的。因為 EM04



及 WI06 模式不僅是(r/R)的單純函數，且與(R0-R)及 R/xR 有關，亦即即使在相同的相對距離條件下(r/R)，最大風速半徑不同，EM04 及 WI06 的計算風速也會稍微的差異，因此圖 4-1 中有些 EM04 及 WI06 的計算風速會有上下稍微重疊的現象。四、結論

為量化 RVM、HM、EM04、WI06 及 WW11 五種模式計算 12 場颱風的風速模擬實測值的優劣程度，以一般評估模式能力的偏差(bias)及均方根誤差 (root-mean squared error, rmse)指標來判斷，偏差及 rmse 的最大值、最小值、平均值及標準差，分別示如表 1。

由表 1 可知，WW11 及 HM 有較小的平均 Bias，其值分別為 0.19m/s 及 -0.01m/s，而其他三者的平均 Bias 絕對值大約為 0.97m/s。Bias 的變動性，HM 的標準差最大，為 2.21m/s，最低標準差為 EM04，為 1.97m/s。且 W11 的 rmse 平均值最低為 4.14m/s，HM 的 rmse 平均值最高為 4.82m/s，其他三者的 rmse 平均值約為 4.0m/s。至於 rmse 的標準差方面，由表 1 可知 WW11 的標準差相似，約在 0.85 m/s 至 0.92m/s 之間。

表 1 模式所得 12 場颱風 bias 及 rmse 的統計值

統計特性	RVM	HM	EM04	WI06	WW11	
bias	max	1.82	3.53	3.58	3.67	2.80
	min	-4.22	-3.57	-2.37	-2.47	-3.11
	mean	-0.91	-0.01	1.02	0.97	0.19
	std	2.08	2.21	1.97	1.99	2.02
rmse	max	5.86	6.92	5.40	5.39	5.22
	min	3.06	3.64	2.60	2.60	2.52
	mean	4.02	4.82	3.98	4.00	3.91
	std	0.85	0.92	0.90	0.90	0.86

需考慮臺北港是否在颱風圈內或圈外。將颱風以 30 節風速半徑為界線，若臺北港在 30 節風速半徑內則算為圈內情況，反之為圈外情況。臺北港在 12 場颱風圈內的風速資料共 321 筆，而圈外為 1332 筆。為分析 5 種模式計算風速與實測值的比較的吻合程度，其結果示如表 2。

由表 2 可知，HM 模式在圈內的負偏差是最大的，為 3.22m/s，RVM 次之，而 EM04、WI06 及 WW11 相近，且接近於 0，此乃因此三者的參數是由 12 場颱風圈實測風速資料以最小二乘法迴歸所得，因此誤差平均值需接近於 0。至於圈外及全部的正偏差 RVM 有最大的正偏差，分別為-1.45m/s 及 -1.32m/s，而 HM 與 EM04 有圈外最小的負偏差，而

HM 有全部最小的負偏差，為-1.32m/s。WW11 在圈外及全部的平均偏差是最低的，分別為-0.28 m/s 及 -0.19m/s。由偏差而言，WW11 的模式適合於圈內及圈外的風速分布特性。

表 2 每場颱風圈內或外圈平均 bias 及 rmse

統計特性		RVM	HM	EM04	WI06	WW11
bias	圈內	-1.03	3.22	-0.18	0.01	0.20
	外圈	-1.45	1.32	1.32	0.89	-0.28
	全部	-1.37	1.69	1.03	0.72	-0.19
rmse	圈內	4.72	5.20	3.89	4.15	4.37
	外圈	3.98	4.09	4.10	3.93	3.77
	全部	4.14	4.33	4.06	3.97	3.90

至於在颱風圈內均方根誤方面，EM04 是 5 個中最小的，最大為 HM，二者相差 1.05m/s。而在圈外，WW11 有最小 rmse，而最大者為 EM04，二者相差 0.33m/s，全部最小的 rmse 是 WW11，其值為 3.90m/s，最大者為 HM。同時考慮平均偏差及均方根誤差，WW11 有優的評估值，算是 5 種模式中最佳的。單就 RVM 與 HM 的 rmse 比較，RVM 優於 HM。

### 3.2 對稱與非對稱風場模式之比較

因為臺北港位在 2010 年的 MERANTI 颱風及 2011 年的 AERE 颱風 30 節長半徑之內所以沒比較結果，所以只比較 10 颱風的風速。量化對稱及非對稱模式計算 10 場颱風的風速模擬實測值的優劣程度，則偏差及均方根誤差指標來判斷，示如表 3。

表 3 對稱及非對稱模式所得 10 場颱風 bias 及 rmse 的統計值

統計特性		RVM		WI06	
		對稱	非對稱	對稱	非對稱
bias	max	1.82	1.82	2.80	2.27
	min	-4.22	-4.33	-3.11	-3.23
	mean	-0.91	-1.07	0.19	-0.18
	std	2.08	2.02	2.02	1.82
rmse	max	5.86	5.94	5.22	5.32
	min	3.05	2.94	2.52	2.61
	mean	4.02	4.05	3.91	3.80
	std	0.85	0.87	0.86	0.84

由表 3 可知，對稱及非對稱 RVM 模式的 Bias 統計值相近，而對稱及非對稱 WW11 模式亦有如此結果。就 Bias 的平均值及標準差而言，WW11 優於 RVM 模式。就 rmse 而言，對稱及非對稱 RVM 模式的均方根誤差統計值相近，而對稱及非對稱

WW11 模式亦如此。就均方根誤差的平均值及標準差而言，WW11 優於 RVM 模式。非對稱 WW11 模式的均方根誤差平均值比對稱 WW11 模式有僅低 0.1m/s。

#### 四、結論

延續去年的研究基礎下，本年度研究主要探討非對稱性風場模式的可行性，由分析結果可獲得下列結論。

1. 以日本氣象廳公告的 30 節 50 節風速的長短半徑資料，假設颱風的等值風速分布為橢圓形，颱風中心位置處於橢圓的焦距及颱風核心仍為圓形下，提出可計算任何目標點的風速切線方向公式及其方向上風速分布的颱風核心最大風速值，做為非對稱風場的計算基本資料。
2. 除以去年比較 8 種最大風速半徑的最佳公式，KN07 為基準來計算 12 場颱風的臺北港風速外，今年再以 30 節 50 節風速的長短半徑資料解算出最大風速半徑，並以比較 KN07 的結果。扣除輕度颱風無 50 節風速的情況的 51 筆資料，所得解算最大風速半徑的平均值為 64.34 km，大於 KN07 公式的平均值約 11km。
3. 今年度另外提出 3 個近期的對稱型風場模式，加上傳統的 RVM 及 HM 模式，比較 12 場颱風風速與實測值的 bias 及 rmse 後發現，WI06 的風速分布在核心區稍外圍的檢速度太快，與實際資料有較大的偏差，且所得的模式評估指標的 bias 及 rmse 都是有較大偏差的結果。EM04 的風速分布特性無在最大風速半徑處有等於 1 的相對風速。在 5 種的模式評估後，WW11 的模式是最佳的，而傳統的 RVM 優於 HM 模式。
4. 以 KN07 公式最大風速半徑為各對稱及非對稱 RVM 及 WW11 模式的輸入條件，經計算 10 場颱風的風速比較後發現，對稱及非對稱 RVM 模式相對於對稱及非對稱 WW11 模式是有所差別，但是相同模式的對稱及非對稱所得評估值均相近的。就偏差及均方根誤差而言，WW11 優於 RVM 模式。WW11 模式的均方根誤差比 RVM 模式稍低 0.2-0.4 m/s。

#### 謝誌

本論文係科技部專題研究計畫「修正非對稱參數化風場驅動的即時波浪預報模式研發 (編號 108-2221-E-009 -040 -MY3)之第二年研究成果，承蒙科技部經費之補助，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. Chavas, D. R., N. Lin, W. H. Dong and Lin, Y.L. (2016) Observed tropical cyclone size revisited, *Journal of Climate*, 2923-2939.
2. Emanuel, K. (2004) *Tropical cyclone energetics and structure*, in *Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology*, edited by E. Fedorovich, R. Rotunno, and B. Stevens, 165-192, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
3. Holland, G.J. (1980) An analytical model of the wind and pressure profiles in hurricanes, *Monthly Weather Review*, 108, 1212-1218.
4. Knaff, J.A., Sampson, C.R., DeMaria, M., Marchok, T.P., Gross, J.M., and McAdie, C.J. (2007) Statistical tropical cyclone wind radii prediction using climatology and persistence, *Weather Forecast*, 22 (4),781-791.
5. Olfateh, D. P. Callaghan, P. Nielsen, and T. E. Baldock, (2017) Tropical cyclone wind field asymmetry—Development and evaluation of a new parametric model, *J. Geophys. Res., Oceans*, 122 (1), 458-469.
6. Wang, S., X.F. Yang, H.Y. Li, K.J. Ren, X.B. Yin, D. Hu, and Du, Y.L. (2021) An Improved Asymmetric Hurricane Parametric Model Based on Cross-Polarization SAR Observations, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14.
7. Willoughby, H. E., R. W. R. Darling and Rahn, M. E. (2006) Parametric representation of the primary hurricane vortex, part II: a new family of sectionally continuous profiles, *Monthly Weather Review*, 134, 1102-1120.
8. Wood, V. T., and White, L. W. (2011) A new parametric model of vortex tangential-wind profiles: Development, testing, and verification, *J. Atmos. Sci.*, 68, 990-1006.
9. 張憲國、劉勁成、陳蔚瑋、王順寬 (2020) 「優選最大風速半徑的經驗公式及對稱參數化風場模式評估」, 第 42 屆海洋工程研討會, 291-296。

# 無人飛行載具於近岸觀測應用初步探討

王星宇<sup>1</sup> 楊一中<sup>2</sup> 方惠民<sup>3</sup> 張崑宗<sup>4</sup>

<sup>1</sup>國立高雄科技大學航運技術系助理教授

<sup>2</sup>國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系博士候選人

<sup>3</sup>國立臺灣海洋大學海洋工程科技學士學位學程助理教授

<sup>4</sup>明新科技大學土木工程與環境資源管理系教授

## 摘要

近年來無人飛行載具(UAV)隨著技術方面的成熟，國內外已有許多學者使用 UAV 在近岸地區進行相關研究。本文概要介紹至今國內海洋工程領域使用 UAV 相關研究外，另使用多種型號 UAV 及儀器進行近岸地區拍攝並得出初步成果，以供學者們參考及後續利用。

關鍵詞：無人飛行載具、無人機、空拍機、海岸地區、近岸地區

## Preliminary Study on the Application of Unmanned Aerial Vehicles in Nearshore Observation

Hsing-Yu Wang Yi-Chung Yang\* Hui-Ming Fang Kuen-Tzung Chang

\* PhD Candidate, Department of Marine Environmental Informatics, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

In recent years, the technology of unmanned aerial vehicles (UAV) has matured, many scholars have used UAV to conduct related research in coastal zone. This paper introduced the UAV correlation study of coastal engineering in Taiwan, this study uses types of UAVs and instruments to observed coastal zone and obtain preliminary results for reference follow-up research.

Keywords: UAS; UAV; drone; coastal zone; nearshore

## 一、前言

海岸地區一直以來使許多學者研究的地區，因為位於陸地和海洋的交界處，其中包含了許多複雜的現象及機制。傳統為了瞭解海岸變遷使用人工的方式進行測量，但通常需要大量的時間及人力才能完成較大區域的調查探勘；而之後發展出使用衛星等遙測的方式來監控沿岸地區，可在較短時間得到較大範圍的資料及成果。而遙測的方式有許多種不同的載具如衛星、空載及陸地架設，而接收儀器又分為光學及多光譜相機、光達及高頻低頻雷達等不同種型態方式來應用於許多研究領域。

近年來無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV, 又稱無人機、空拍機等)的發展迅速，其載具

和以往比較已降低了不少成本，而又隨著技術方面的成熟，載具上又可以掛載不同的儀器進行觀測，國內已有許多學者在近岸地區使用 UAV 進行研究。莊等(2020)使用承載能力較高的 DJI Matrice 100 於七股瀉湖旁沙洲進行航拍並研發偵測灘線的方法。林等(2020) 使用 DJI Phantom 4 Pro V2.0 以及 DJI Mavic 2 Zoom 來調查彰化縣較大區域海堤，並進一步之應用 UAV 進行海堤結構物之外觀檢測是否有大型裂縫。Trần *et al.* (2020)使用 DJI Mavic 2 Pro 拍攝桃園大園海灘並搭配 YOLO 程式來辨識沙灘上的瓶罐狀垃圾研究。

葉與黃(2019)使用 UAV 搭配 RTK 定位系統及光達來觀測永安漁港附近的藻礁保護區波浪能量消散狀況。方等(2019)使用 DJI Mavic 2 Enterprise Dual

的熱紅外鏡頭拍攝花蓮和平的溫排水，進而評估近岸範圍溫排水擴散隨漲退潮的差異。莊等(2019)使用 DJI Phantom 3 Professional 拍攝美國德州 Freeport 附近沙灘並搭配 PIV 方式進行波速的分析，進一步回推該區域的水深。

楊等(2019)使用 DJI Phantom 3 Professional 拍攝鹽寮海岸並搭配加速穩健特徵法 (Speeded Up Robust Features, SURF) (Bay *et al.*, 2008) 來修正影像抖動的問題以及 Sobel 理論 (Gonzalez *et al.*, 2009) 進行海岸影像邊界偵測 (楊等, 2016) 來進行岸線及碎浪區的辨識。王等 (2019) 使用 DJI Phantom 4 Advanced 拍攝七股海域並搭三維傅立葉轉換理論進而推算該區域的表面流場。張等 (2018) 使用 DJI Matrice 600 高酬載 UAV 於新竹新月海灘拍攝並利用影像處理分析方式計算海岸的溯升線。陳與張 (2017) 利用 UAV 拍攝七股潟湖內的浮筏式蚵棚，合成正射影像後來標示蚵棚精確位置以利相關單位管理。

四軸 UAV 是多旋翼 UAV 較為常見的一種類型，使用對稱的四個旋翼來運作，通過一對逆時針旋轉及另一對順時針旋轉旋翼的配置，以及四個旋翼之間的相對速度來調節不同位置的推力達到懸停、維持姿態、升降及平飛的飛行運動 (Klemas, 2015)。而本研究主要探討成本較低的 UAV 在海岸觀測的可能性及一些初步的研究成果以利學者參考及後續使用。

## 二、研究方法

### 2.1 使用 UAV 及相關儀器

本研究所用 UAV 為 DJI 所製造的 Inspire 1、Phantom 3 Professional、Phantom 4 Pro V2.0、Mavic 2 Enterprise Dual 以及 Mavic Mini 等機型來進行研究，除了載具本身的光學鏡頭外，另搭配 Parrot Sequoia 多光譜及 DJI Zenmuse XT 熱紅外鏡頭初步探討研究上的可行性。載具硬體規格及光學鏡頭參數可參閱 DJI 官方網站，表 1 列出多光譜及熱紅外鏡頭的參數以供參考。

表 1 儀器參數

Parrot Sequoia 多光譜鏡頭	
影像解析度	1280 × 960 pixel
焦距	4 mm

水平視角	62°	
垂直視角	49°	
波長	近紅外光(near IR)	770~810nm
	紅邊光(red edge)	730~740nm
	紅光	640~680nm
	綠光	530~570nm
DJI Zenmuse XT 熱紅外鏡頭		
影像解析度	640 × 512 pixel	
焦距	9 mm	
水平視角	69°	
垂直視角	56°	
波長	7500 ~ 13500 nm	
DJI Mavic 2 Enterprise Dual 熱紅外鏡頭		
影像解析度	160 × 120 pixel	
焦距	20 mm	
水平視角	57°	
垂直視角	44°	
波長	8000 ~ 14000 nm	

### 2.2 研究方法

由前人研究可看出大多學者使用 UAV 上所配套的光學相機所拍攝的影像進行分析研究。楊等 (2019) 拍攝鹽寮海岸並搭配影像修正處理理論來進行岸線辨識。

除了岸線辨識，現今 UAV 搭配光學相機最多使用的一個領域即是利用多張影像合成立體模組以及大型正射影像。本文於海洋大學海堤外的混凝土林克塊以及潮境望海巷資源保育區為拍攝區域，初步以合成軟體進行影像合成的立體三維模組以及正射影像(orthophotograph image)進行後續研究。

除了光學相機應用外，載具搭配熱紅外線可看出欲觀測物體的溫度特徵，本文延續方等(2019)研究，使用 Mavic 2 Enterprise Dual 於花蓮和平港拍攝發電廠的溫排水現象，載具本身包括了普通的光學鏡頭與熱紅外鏡頭，另外該時段同時搭配 Inspire 1 及 Zenmuse XT 高解析度熱紅外鏡頭進行比較。

早期衛星影像及含有多個波段可使用，如 1972 年所發射的 Landsat 1 即有四個波段，發展至今 Landsat 8 已經多達 11 個波段影像可使用。而衛星所拍攝到的各種波長影像能推導出超過 71 種植生指標 (Agapiou *et al.*, 2012)，用於農業、植生調查與災害評估上。近年來多光譜相機已經往輕量化發展，

甚至已有可搭載至 UAV 使用的多光譜相機；本研究使用 Phantom 4 Pro V2.0 並搭配 Parrot Sequoia 多光譜相機於潮境望海巷資源保育區為拍攝區域為拍攝區域進行測試，以期能找出多光譜在海岸研究中的可能性。

除以上使用多種飛行載具及相機外，主要使用 PIX4D mapper 及 Agisoft Metashape 軟體將所拍攝影像進行處理及合併。

### 三、初步成果

#### 3.1 光學相機成果

圖 1 為楊等(2016)於海岸拍攝及岸線辨識的成果，該研究主要使用 UAV 懸停於海岸上空進行連續攝影後所得成果。可看出比起單張照片使用連續攝影可將碎浪干擾排除，可更精確辨識出水陸交界處。其中必須注意 UAV 飛行高度超過 120 公尺需向民航局申請。



圖 1 楊(2016)使用影像邊緣理論所偵測之海岸邊界

圖 2 為 UAV 拍攝海洋大學海堤外的混凝土林克塊後，使用多張光學影像及 PIX4D mapper 軟體進行合成的立體三維模組成果。由圖中可看出使用 UAV 拍攝放置岸邊消波設施可簡易合成其立體模組，但在水面下結構因波浪及水體反光等干擾因素，該方法無法得到水面下的相關結構。



圖 2 上圖為混凝土林克塊立體三維模組，下圖為該模組以不同角度的局部放大。

圖 3 左為於潮境望海巷資源保育區使用 UAV 拍攝影像並搭配 Metashape 合成的正射影像結果，其合成詳細資訊如表 2。將該影像進行 k-mean 分類法進行分類，並搭配 Calinski Harabasz index (Caliński and Harabasz, 1974)參考指標以最佳分群數進行影像的分類辨識，其辨識結果如圖 3 右。

表 2 正射影像資訊

使用 Agisoft Metashape 合成	
總飛行時間	41 分
單張影像解析度	5472 x 3648
拍攝影像數量	1691 張
影像總容量	13.8 GB
合成後正射影像解析度	22030x43897
合成後正射影像容量	741 MB

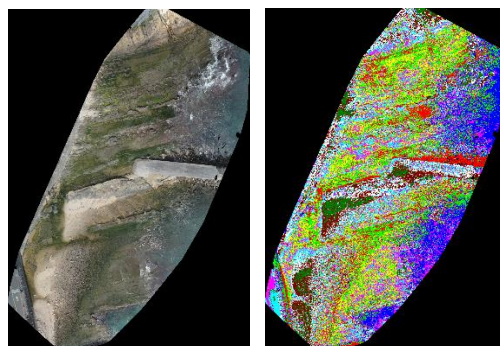


圖 3 左圖為使用 UAV 所合成的正射影像，右圖為使用 k-mean 分類成果

圖 4 左為於正射影像中找出每一分群中像素離群值(outlier)的位置，圖 4 右為其中一點離群值為中心的影像圖。可看出使用該方法可簡易辨識出顏色較為特殊的物體，可做為海岸垃圾辨識的初步方法使用。

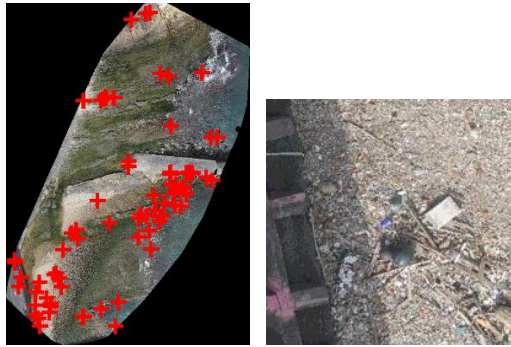


圖 4 右圖為於正射影像使用離群值的分布點，左圖為其中一點的影像範例。

### 3.2 熱紅外相機成果

Mavic 2 Enterprise Dual 為 DJI 所推出的雙鏡頭版本，多旋翼上搭載了普通的光學鏡頭外還搭配了熱紅外鏡頭來做為更廣泛的應用。圖 5 為使用 Maric 2 Enterprise Dual 於花蓮和平港所拍攝出來的溫排水光學照片，以及同步所拍攝的熱紅外影像如圖 6。另外該時段同時搭配 Inspire 1 及 Zenmuse XT 高解析度熱紅外鏡頭作為比較，影像結果如圖 7。由圖中可看出 Zenmuse XT 與 Maric 2 Enterprise Dual 所拍攝出的影像，前者解析度較高且可明顯看出溫排水各溫度的階層變化及更為細節的特徵；且兩種紅外線影像可明顯辨識出溫排水的位置及其分布的範圍，可見使用紅外線影像於溫排水的研究有其利用價值。

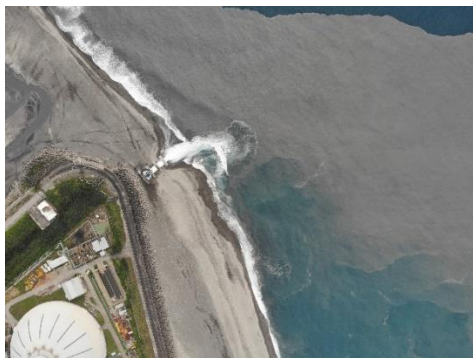


圖 5 使用 Maric 2 Enterprise Dual 所拍攝花蓮和平港光學影像圖



圖 6 使用 Maric 2 Enterprise Dual 所拍攝花蓮和平港熱紅外影像



圖 7 使用 Zenmuse XT 所拍攝花蓮和平港熱紅外影像圖

### 3.3 多光譜相機成果

Parrot Sequoia 若安裝至 Phantom 4 Pro V2.0 需要符合其規格的支架，本研究搭配 3D 列印方式使用 PVC 材質製作出來可放置儀器至 UAV 上，搭配外接電源後於潮境望海巷資源保育區為拍攝區域為拍攝區域進行測試。圖 8 為拍攝近紅外光影像搭配 PIX4D mapper 合成的正射影像結果，其合成詳細資訊如表 3。由 PIX4D mapper 軟體可另合成拍攝範圍的 NDVI 指標。但此次初步測試發現由於水面反光情況較為嚴重，且潮境海域水質本身較為清澈，故在海域部分並未取得理想的研究成果。

表 3 多光譜正射影像資訊

使用 PIX4D mapper 合成	
拍攝影像數量	1030 張
影像總容量	2.35 GB
合成後正射影像解析度	8890x8732
合成後正射影像容量	171 MB

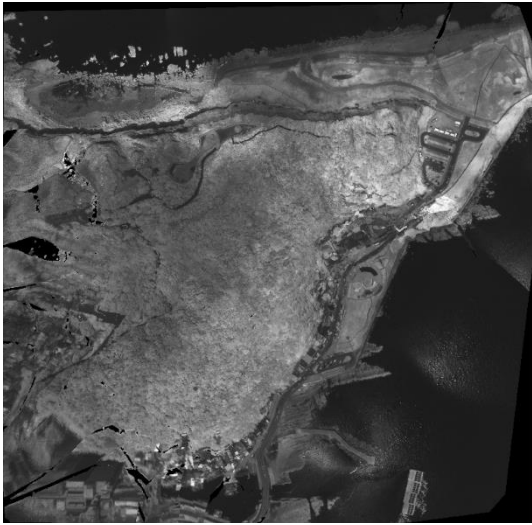


圖 8 使用 Parrot Sequoia 多光譜鏡頭所拍攝潮境海岸近紅外光合成圖。

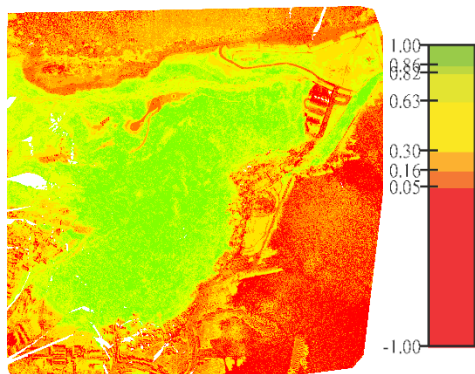


圖 9 使用 Parrot Sequoia 多光譜鏡頭所計算出來的 NDVI 指標

## 附錄

若要使用 UAV 進行研究需要遵守民用航空法，學術單位需申請能力審查認證，飛行載具需要註冊且操縱者需持有專業證照，民用航空法遙控無人機專章部分可參照民航局網站無人機專區 (<https://www.caa.gov.tw/article.aspx?a=188>)。

## 參考文獻

- Agapiou, A., Hadjimitsis, D.G. and Alexakis, D.D. (2012) "Evaluation of broadband and narrowband vegetation indices for the identification of archaeological crop marks", *Remote Sensing*, Vol. 4, Issue 12, 3892-3919.
- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T. and Van Gool L. (2008) "SURF: Speeded Up Robust Features", *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 110, No. 3, 346-359.
- Caliński, T. and Harabasz, J. (1974) "A dendrite method for cluster analysis", *Communications in Statistics*, Vol. 3, Issue 1, 1-27.
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E. and Eddins, S.L. (2009) *Digital Image Processing Using MATLAB 2nd edition*, Gatesmark Publishing.
- Klemas, V.V. (2015) "Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: an overview", *Journal of Coastal Research*, Vol. 31, Issue 5, 1260-1267.
- MacQueen, J. B. (1967) "Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations", *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 281-297
- Trần Thị Linh Chi, Zhi-Cheng Huang, Ping-Hsien Chou, Juh-Yuan Deng and Yan-Hao Shen (2020) "Estimation of bottle marine debris on Dayuan beaches using unmanned aerial vehicles and image processing", *Proceedings of the 42th Ocean Engineering Conference in Taiwan*, 256-260.
- 楊一中、王星宇、方惠民、蕭松山、蔡政翰 (2016) 「四軸飛行器於海岸觀測之應用」，第 38 屆海洋工程研討會論文集，509-513。
- 陳靜茹、張引 (2017) 「應用無人機管理臺南海浮式蚵棚之研究」，第 39 屆海洋工程研討會論文集，489-493。
- 張憲國、張恩維、陳蔚璋 (2018) 「無人機光達系統應用於沙岸與藻礁地區之波浪能量消散之研究」，第 40 屆海洋工程研討會論文集。
- 葉正陽、黃志誠 (2019) 「無人機光達系統應用於沙岸與藻礁地區之波浪能量消散之研究」，第 41 屆海洋工程研討會論文集，66-71。
- 方惠民、張崑宗、蕭松山、錢軒宇、蘇育弘 (2019) 「應用無人熱紅外線影像於近海域溫排水擴散之研究」，第 41 屆海洋工程研討會論文集，346-351。

13. 莊偉良、孫碩亨、張廣安 (2019) 「結合消費型無人航空載具及影像分析之近岸海底地形量測方法」，第 41 屆海洋工程研討會論文集，362-366。
14. 楊一中、王星宇、方惠民、蕭松山、蔡政翰 (2019) 「無人飛行載具於海岸地區長期監測之探討」，第 41 屆海洋工程研討會論文集，407-411。
15. 王敘民、李丞哲、吳立中、董東璟 (2019) 「結應用多旋翼空拍機於近岸海域流場觀測研究」，第 41 屆海洋工程研討會論文集，418-423。
16. 林敬樺、蕭冠宇、葉鳳美、韓佳安、劉正琪 (2020) 「無人飛行載具應用於海堤外觀檢測之初探」，第 42 屆海洋工程研討會論文集，267-272。
17. 莊士賢、陳禹儒、鍾育仁、周嘉銘 (2020) 「以 UAV 航測影像序列偵測海岸灘線變化」，第 42 屆海洋工程研討會論文集，448-453。



# 人工智慧演算法在瘋狗浪機率預警系統建置之研究

陳威成<sup>1</sup> 陳盈智<sup>2</sup> 陳憲宗<sup>3</sup> 董東璟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系研究助理

<sup>2</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系博士班

<sup>3</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系教授

## 摘要

台灣海岸遊憩活動興盛，海岸瘋狗浪常將海岸邊的遊客或是釣客捲入海中，其發生機制複雜至今仍未有理論可以完整說明，很難預測發生的時機和地點。近年因電腦計算能力增強，人工智慧演算法應用於自然現象分析的研究層出不窮，因此本研究利用人工智慧領域中能有效處理非線性、小樣本資料的支撐向量機方法來建置瘋狗浪機率預警系統，並探討影響瘋狗浪發生的因子。選用 13 個影響瘋狗浪發生的潛在因子建立預測模式，透過瘋狗浪發生時之實測資料訓練，獲得訓練預測模式最佳的相關參數。結果顯示，以支撐向量機方法預測近岸異常波浪發生機率之正確率及相關評估指標皆可達 7 成以上，透過探討不同因子對模式的影響程度，發現使用全部因子來建置瘋狗浪預測模式能得到最佳的結果，其中，輸入因子中以方向類別因子(包含風向、波向)對結果的影響最顯著，其中又以波向影響最大，代表波向是造成海岸瘋狗浪發生的重要關鍵。以上結果均顯示這類人工智慧演算法可合理建置瘋狗浪預警系統。

關鍵詞：人工智慧、支撐向量機、機率預測、瘋狗浪

## Application of AI technology on the development of Coastal Freak Wave Probability Warning System

Wei-Cheng Chen<sup>\*</sup>, Ying-Chih Chen, Shien-Tsung Chen, Dong-Jiing Dong

<sup>\*</sup> Research assistant, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

Taiwan coastal recreational activities are prosperous. Coastal freak waves often attack tourists or fishermen into the sea. But there is still no theory that can fully explain the mechanism of its occurrence, and it is difficult to predict the timing of occurrence. The application of artificial intelligence(AI) for the analysis of natural phenomena has emerged in recent years. This research uses the Support Vector Machine(SVM) that can effectively analysis nonlinear and small data to build coastal freak wave probability warning system and discuss the factors that affect the occurrence of coastal freak wave. Select 13 potential factors to establish the warning system and obtain the best relevant parameters of the training model through the measured data. The results show that the accuracy and related evaluation indices of predicting the occurrence probability of freak wave can reach more than 70%. Through exploring the influence of different factors on the model, found that it is best to use all factors to build warning system. Among the factors, the direction category factors(wind direction and wave direction) have the most significant impact, and the wave direction has largest impact, which represents the wave direction is the important key to the occurrence of coastal freak wave. The above result all show that this artificial intelligence can reasonably establish the coastal freak wave probability warning system.

Keywords: Artificial intelligence; Support Vector Machine; Probability prediction; Coastal freak wave

## 一、前言

台灣四面環海，海岸遊憩活動興盛，而海岸瘋狗浪(coastal freak wave)常將海岸邊的遊客或是釣客捲入海中，常見於如礁岩、消波塊及近海面的平台等區域，瘋狗浪一詞為一種俗稱，尚未有明確的定義，只要是在岸邊激起可能傷害到人員的大浪就可以稱之為瘋狗浪，且瘋狗浪發生機制未明且複雜，至今仍未有完整理論可以說明，綜合目前的研究，瘋狗浪的發生可能與當地的地形條件以及海氣象條件有關。台灣周遭海域常有釣客或是遊客遭到海岸瘋狗浪襲擊的事件發生，因此在每年造成不少死傷人數，以及耗費大量救災資源。據中央氣象局(2019)統計 2000 至 2019 年間在台灣地區的發生海岸瘋狗浪事件有 360 件合計 589 人落海，平均每一年會發生約 18 件瘋狗浪事件、約 29 人落海。因此若能對瘋狗浪發生時機有所掌握，即可提前發布預警，也能使民眾的生命安全有更多保障

近年因電腦計算能力增強，對於利用資料探勘和機器學習方法預測自然現象的研究層出不窮，其中機器學習方法包含支撐向量機(support vector machine)、類神經網路(artificial neural network)、隨機森林(random forest)等，主要透過對輸入資料進行分析，從資料中找出規律或特徵進而對新的資料進行準確的預測。

本研究目的為建置瘋狗浪機率預警系統，並探討影響瘋狗浪發生的潛在因子，如瘋狗浪目前發生機制尚未明確且發生案例並不多的自然現象，擁有非線性且樣本數不多的特性，因此對於預測瘋狗浪的訓練，可採用對於非線性資料較有效的機器學習方法。支撐向量機擁有有效處理非線性資料的能力，因此本研究使用支撐向量機方法，預期能有效針對瘋狗浪事件建置瘋狗浪預警系統。

## 二、研究方法

### 2.1 研究區域及資料

#### 2.1.1 研究區域

本研究的主要研究區域為位於新北市貢寮區的龍洞海岸，其中又專注於研究該區域的龍洞灣岬發生的瘋狗浪事件，同時結合鄰近於該區域的龍洞浮標以利研究。龍洞灣岬左側面山、右側面海，有因

海蝕作用造成懸崖峭壁的地形，且因為位於台灣海岸東北部的關係，容易受到東北季風影響而常有湧浪，但長年以來仍有不少釣客和遊客冒著風險前往此地進行遊憩活動，也因此累積不少岸邊人員落海事件。因應當地的瘋狗浪事件較多和鄰近浮標可提供海氣象數據等特性，本研究選定在該區域進行瘋狗浪的研究。

因此中央氣象局(2019)自 2016 年至今在龍洞海岸的建築物上架設攝影機拍攝龍洞灣岬，影像經過王(2017)分析後得到瘋狗浪發生的時間並且透過鄰近的龍洞浮標得到瘋狗浪發生當下的海氣象數據，以提供瘋狗浪資料，圖 1 標示出本研究為收集瘋狗浪事件設置的光學監視站和其拍攝的地點，以及鄰近的龍洞浮標位置。圖 2 則為光學監視站拍攝瘋狗浪發生時之原始全彩影像。



圖 1 本研究的主要研究區域，圖中標示出光學監視站、近岸浮標以及龍洞灣岬的位置



圖 2 光學監視站拍攝瘋狗浪發生時之原始全彩影像(中央氣象局，2019)

#### 2.1.2 潛在因子

瘋狗浪發生的機制雖目前仍尚未明確，但已有不少的前人文獻探討可能有關於瘋狗浪發生的潛在因子(White and Fornberg, 1998; Chien et al., 2002; Janssen, 2003; Tsai et al., 2004; Dyachenko and Zakharov, 2005; Mori and Janssen, 2006; Zakharov et al., 2006; Tamura et al., 2009)，因此除了有關於波浪

的基本海氣象因子外，本研究也參考前人文獻的研究結果來決定輸入訓練過程的影響瘋狗浪發生之潛在因子，如表 1 所示，本研究選取了 6 種不同類別因子，一共 13 個因子來訓練。

表 1 影響瘋狗浪發生的潛在因子

海象類別因子	示性波高
	平均週期
氣象類別因子	平均風速
方向類別因子	波向
	風向
湧浪類別因子	尖峰週期
	湧浪波高
	湧浪週期
	波浪尖銳度
非線性類別因子	峰度
	BFI 值
波浪群性因子	窄度係數
	譜尖參數

### 2.1.3 研究資料

本研究透過光學監視站得到瘋狗浪發生的時間，以一個小時為間隔，該小時內發生一個或一個以上的瘋狗浪事件即視為一筆瘋狗浪資料，將 2016~2018 年的瘋狗浪事件整理成以一個小時為單位並且同樣以該時間結合同個區域的龍洞浮標量測到的海氣象數據，最終得到共 717 筆瘋狗浪資料。為了避免訓練不平衡(imbalanced training)，從 2016~2018 年間的龍洞浮標海氣象數據中，隨機選取同瘋狗浪資料數量的資料，建立無瘋狗浪資料。

當在分析擁有不同因子的資料時，因為因子之間的單位不同，其數值大小的代表性也各不相同，影響機器學習訓練的結果。因此為有效地訓練，可對資料進行正規化(normalization)，藉由將原始資料轉換成無因次的純量後，再進行機器學習的訓練。本研究設定資料正規化的上下限範圍為 0~1 之間。如下表 2 所示，將已資料正規化的瘋狗浪資料與無瘋狗浪資料各取出 70% 的資料作為機器學習的訓練資料，剩餘的 30% 作為驗證預測效果的驗證資料。

表 2 訓練與驗證資料數量

訓練資料	瘋狗浪資料	1004	502
	無瘋狗浪資料		502
驗證資料	瘋狗浪資料	430	215
	無瘋狗浪資料		215
總資料數		1434	

## 2.2 支撐向量機

### 2.2.1 支撐向量機理論

本研究運用機器學習方法中的支撐向量機來分析瘋狗浪案例，支撐向量機具有以嚴謹的數學演算和利用核函數(kernel function)處理高維度數據等特點，且支撐向量機為監督式機器學習方法，給定一組訓練資料，從已標籤化(labeled)的資料中分析，透過計算後即可得到預測模型。

如圖 5 所示，支撐向量機的基本概念即透過在資料中找出最適的幾筆資料，並劃分出一線性可分函式(linearly separable function)使兩組資料間の間隔(margin)最大化，以最佳區分出兩組資料，而在支撐向量機領域劃分出來的線性可分函式稱為超平面(hyperplane)，而決定超平面的資料稱為支撐向量(support vector)，當輸入新的資料時，即能直接進行分類並透過轉換函數(transition function)預測每個新輸入的資料在各組的分類。

而對於無法線性可分的資料，如圖 6 和圖 7 所示，可將資料透過核函數投射到更高維度的向量空間中，再同樣透過找出間隔最大，也就是最佳的超平面來分類出兩組資料。而核函數有許多類型，根據不同需求可選擇不同的核函數來映射資料至更高維度，在機器學習領域常見如線性核函數(linear kernel function)、多項式核函數(polynomial kernel function)、Sigmoid 核函數(sigmoid kernel function)、RBF 核函數(radial basis function)。

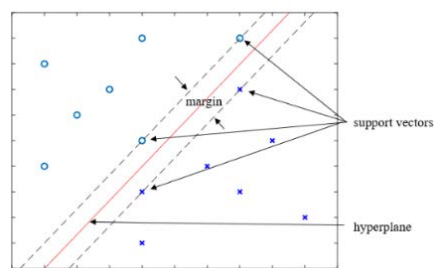


圖 5 支撐向量機基本概念，圖中標示出兩組資料間の間距、支撐向量和超平面

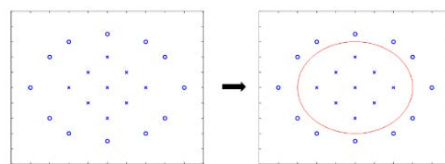


圖 6 從非線性可分資料找出超平面示意圖

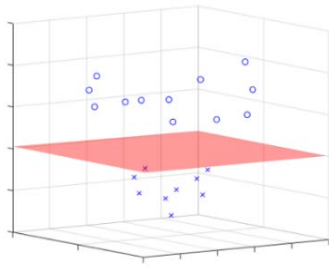


圖 7 利用核函數投射資料至高維空間找出超平面示意圖

### 2.2.2 預測模型之建置

支撐向量機在建置預測模型的訓練過程中，使用核函數來對非線性可分資料投射至高維空間找出超平面，訓練過程所需要選定的參數包含了影響訓練過程中允許誤差程度的參數  $C$  和影響資料投射在高維空間的分布情形之參數  $\gamma$ 。

為了利用已建立好的訓練資料來建置最佳瘋狗浪預測模型，因此需要擬定出最佳的訓練參數  $\gamma$  和  $C$  輸入訓練過程，本研究為求出最佳訓練參數所採取的方法為網格搜尋法(grid search)，如圖 8 所示，利用在指定的範圍內測試所有不同的參數組合並比較，選出訓練結果最佳的訓練參數組合，而比較的依據是藉由  $k$ -fold 交叉驗證( $k$ -fold cross-validation)輸出訓練結果，如圖 9 所示， $k$ -fold 交叉驗證將訓練資料分成  $k$  等份， $k-1$  等份的資料建置預測模型，其餘的資料用來測試該模型的正確率，此過程將會重複進行直至每一等份的資料都曾作為測試資料後，最後將每一次的測試結果平均加總起來，即為  $k$ -fold 交叉驗證的輸出結果，亦為本研究預測模型的訓練結果。本研究參考 Chang(2011)的建議，將使用網格搜尋法時，兩個參數的範圍設定介於  $2^{-8}$  到  $2^8$  之間以及  $k$ -fold 交叉驗證的  $k$  值設定為 10，比較不同參數組合下的訓練結果並找出最佳的訓練參數來建置最佳預測模型。

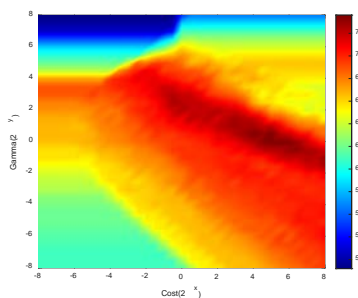


圖 8 利用網格搜尋法找出最佳訓練參數。圖中橫坐標為訓練參數  $C$ ，縱坐標為訓練參數  $\gamma$ ，顏色的深淺代表正確率的高低

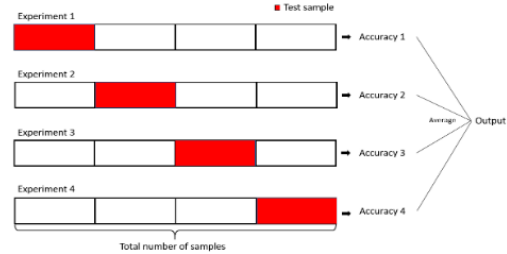


圖 9  $k$ -fold 交叉驗證示意圖(假設  $k=4$ )

## 三、研究結果

### 3.1 模型建置結果

本研究分別利用四種常見的核函數：線性核函數、多項式核函數、Sigmoid 核函數以及 RBF 核函數建置預測模型，輸入相同的訓練資料並且利用  $k$ -fold 交叉驗證輸出的訓練結果以及輸入相同的驗證資料得出的驗證結果之正確率，來比較出效果最佳的核函數。

圖 11 顯示不同核函數建置模型的結果，發現以 RBF 核函數建置模型的訓練與驗證正確率最高，其中多項式核函數建置模型的表現雖僅略低於 RBF 核函數的結果，但其訓練結果之正確率比驗證結果高，當訓練結果比驗證結果好時可能會有過度擬合的問題，而 RBF 核函數並無此趨勢且表現良好。因此，本研究選擇 RBF 核函數來建置瘋狗浪預測模型，再根據網格搜尋法擬定訓練參數，最終以訓練參數  $C$  為 16 和參數  $\gamma$  為 1.414 來建置支撐向量機瘋狗浪預測模型。

本研究選定建置效果最佳的核函數並利用網格搜尋法和  $k$ -fold 交叉驗證擬定最佳訓練參數(參數  $C$  和參數  $\gamma$ )建置支撐向量機瘋狗浪預測模型，將驗證資料輸入模型輸出正確率、反查率、回應率以及真陰性率等評估指標。表 6 為支撐向量機瘋狗浪預測模型的建置結果，其模型的驗證結果之正確率均表現良好，達 74% 上下；從反查率可知，預測模型在實際有瘋狗浪發生時的預測能力表現良好；從真陰性率可知，模型在實際沒有瘋狗浪發生時的預測能力也表現良好；從回應率可知，預測模型預測有瘋狗浪發生時且實際亦有瘋狗浪發生的比率高，代表沒有高估預測瘋狗浪的傾向。綜以上結果顯示支撐

向量機瘋狗浪預測模型無論實際瘋狗浪會發生或未發生，模型均能預測表現良好。

表 6 支撐向量機建置模型之驗證結果

驗證結果	正確率	74.4%
	反查率	74.0%
	回應率	74.7%
	真陰性率	75.0%

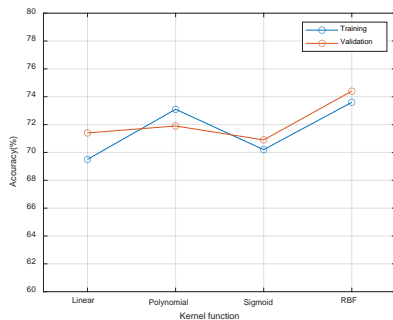


圖 11 不同核函數建置的訓練與驗證正確率

### 3.2 潛在因子之影響

本研究探討可能影響瘋狗浪發生的潛在六種類別因子以及個別的 13 個因子中，比較不同因子對瘋狗浪發生的影響程度以及探討因子之間的關係，進而探討影響瘋狗浪發生的因子。

#### 3.2.1 因子個數之影響

根據本研究參考前人文獻及理論基礎下認為可能是影響瘋狗浪發生的潛在因子中，分別以 1 到 13 個因子個數之限制選取不同排列組合因子，建置所有因子組合下的預測模式，以各模式的正確率作為比較的基準，探討在相同資料的條件下，因子個數多寡對模式的影響。

圖 12 的橫坐標為建置各模式所輸入的因子個數，縱坐標為該因子個數下不同因子組合預測模式的正確率平均，而由圖中的趨勢可發現，當因子個數逐漸增加時，預測模式的正確率也會隨之升高，但當因子個數增加至 9 個時，正確率的變化已趨近於 0，無論再增加多少因子對模式的正確率已不再敏感。理論上來說輸入因子的個數越多，越有利於模式的建置，但從結果發現並不會一直保持這樣的趨勢，推測在輸入的潛在因子中可能已經選取足夠影響瘋狗浪發生的潛在因子。

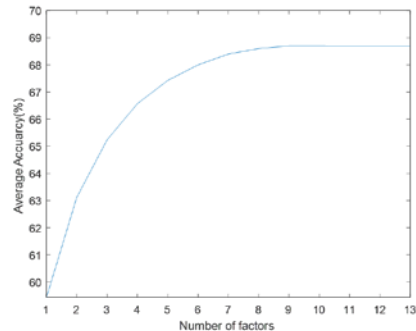


圖 12 模式訓練結果隨因子個數多寡之趨勢

#### 3.2.2 不同類別因子之影響

本研究選取六種類別的因子來建置瘋狗浪預警系統，這六種類別因子分別是海象、氣象、方向、湧浪、非線性以及波浪群性，為了解不同類別因子對瘋狗浪預測模式的影響，本研究利用未輸入某一類別因子來建置瘋狗浪預測模式，並以該模式與使用全部因子建置模式的結果進行比較，探討不同類別因子對模型預測結果的敏感性。

表 7 列出未輸入某一類別因子與原模型的差異，從表中可以發現，六種不同類別因子未輸入時，均會使正確率下降，以方向類別因子的降幅最為顯著，此結果代表本研究選取的六種類別因子均會對瘋狗浪發生造成影響，而以方向類別因子的影響最為顯著。

表 7 不同類別因子之敏感度分析結果

未輸入之因子	與原模型相比之正確率變化率
海象類別因子	-0.8%
氣象類別因子	-2.1%
方向類別因子	-5%
湧浪類別因子	-1.4%
非線性類別因子	-1.2%
波浪群性類別因子	-0.8%

#### 3.2.3 不同個別因子之影響

本研究使用的六個類別因子中合計有 13 個個別因子，為了探討個別因子對瘋狗浪預測模式的影響並且了解因子之間存在著何種關係。本研究透過未輸入某一個個別因子來建置瘋狗浪預測模式，並比較該預測模式與原先全部因子建置模式的正確率來探討該因子的敏感度。

表 8 列出未輸入某一個個別因子的正確率變化率，從表中可以發現所有因子中以模式缺少波向因子的

正確率降幅最高，顯示在上一小節中獲知整體而言方向類別因子影響模型正確率最為顯著，更進一步得知其中以波向因子為主要影響因子，此結果代表波向是造成海岸瘋狗浪發生的重要關鍵。

而從分析結果中發現，BFI 值、譜尖參數以及湧浪週期等三個因子未納入建置模式時，其對正確率的影響均為 0%，初步推測此三個個別因子不重要，然而當這三個因子同時未納入時，模式預測正確率仍舊下降，同理也發現如果僅取出同樣為非線性類別因子的峰度來建置預測模式，預期上正確率的降幅率應與未輸入整個非線性類別因子(峰度和 BFI 值)的降幅率相同，結果卻發現同時未輸入兩個因子的降幅率比只取出峰度的降幅率還高，而波浪群性類別因子和湧浪類別因子也有相同的情形，代表因子之間有相關性並且存在著相依的特性。

因此考慮到因子之間存在相關性且為相依關係，建置瘋狗浪預測模式可輸入本研究所選取的 13 個因子，使預測模式有最佳的預測效果，而如果出現無法選取全部 13 個因子的情形時，可考慮由 BFI 值、譜尖參數以及湧浪週期等對模式影響程度較不顯著的因子不納入選取，而根據因子個數對模式影響的結果，本研究建議選取的因子至少要有 9 個以上才能有較佳的瘋狗浪預測模式。

表 8 不同個別因子之敏感度分析結果

因子類別	未輸入之因子	與原模型相比之 正確率變化率
海象類別因子	示性波高	-0.7%
	平均週期	-1.2%
氣象類別因子	平均風速	-2.1%
方向類別因子	波向	-3.9%
	風向	-2.4%
非線性類別因子	峰度	-1.8%
	BFI 值	-0.0%
波浪群性類別因子	窄度係數	-2.0%
	譜尖參數	-0.0%
湧浪類別因子	尖峰週期	-0.7%
	湧浪波高	-1.5%
	湧浪週期	-0.0%
	波浪尖銳度	-0.7%
未輸入之因子		與原模型相比之 正確率變化率
BFI 值、譜尖參數、湧浪週期		-4.9%
峰度、BFI 值		-4.0%
窄度係數、譜尖參數		-4.4%

## 肆、結論

本研究輸入實測瘋狗浪資料並利用支撐向量機方法來建置瘋狗浪機率預警系統，選用 13 個影響瘋狗浪發生的潛在因子建立預測模式，透過瘋狗浪發生時之實測資料訓練，獲得訓練預測模式最佳的相關參數，並探討影響瘋狗浪發生的因子。驗證結果顯示預警模式的預測效果良好，正確率達 75%，其餘的評估指標如反查率、回應率均表現良好，亦可達 74% 上下。

本研究探討了不同的潛在因子對模式的影響程度，透過研究結果證實，使用全部因子來建置瘋狗浪預測模式能得到最佳的結果，其中，輸入因子中以方向類別因子(包含風向、波向)對結果的影響最顯著，其中以波向影響最大，代表波向是造成海岸瘋狗浪發生的重要關鍵。以上結果均顯示這類人工智慧演算法可合理建置瘋狗浪預警系統。

## 參考文獻

1. 王敘民、陳盈智、董東璟、滕春慈 (2017) 「海岸瘋狗浪光學影像分析之研究」，第 39 屆海洋工程研討會，第 555-560 頁
2. 中央氣象局 (2019) 「異常海象機率預警研究與作業試用」，研究計畫報告
3. Cortes, C., & Vapnik, V. (1995) Support-Vector Networks, *Machine Learning*, 20(3), 273-297.
4. Chang, C. C., & Lin, C. J. (2011) LIBSVM: A Library for Support Vector Machines. *Acm Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2(3).
5. Doong, D. J., Chen, S. T., Chen, Y. C., & Tsai, C. H. (2020). Operational Probabilistic Forecasting of Coastal Freak Waves by Using an Artificial Neural Network. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3).

## 謝誌

本論文係中央氣象局研究計畫「沿岸異常波浪預警系統之建置(1/3)」之研究成果，承蒙中央氣象局經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

# 氣候變遷下之海岸地區複合型災害 風險評估與調適管策略研究

簡連貴<sup>1</sup> 徐浩然<sup>2</sup> 李昱錡<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國立臺灣海洋大學工學院副院長、河海工程學系教授、近海防災科技研究中心主任

<sup>2</sup>國立臺灣海洋大學河海工程碩士

<sup>3</sup>國立臺灣海洋大學河海工程碩士研究生

## 摘要

本研究考量氣候變遷影響及複合型災害時間特性，將暴潮、洪氾溢淹合併為溢淹危害，以 2020 年為基期推估近未來 2030 年與世紀中 2050 年海岸地區複合型災害風險。危害度分析以地層下陷、海岸侵蝕、溢淹危害三項危害因子進行分析，利用帕累托等級分析法概念將三項危害結合、分級後利用 GIS 繪製無考量溢淹危害、考量溢淹危害兩情境下各目標年之複合型危害等級地圖；選定脆弱度分析因子及韌性分析因子，而後利用主成分分析法評定各脆弱度、韌性指標因子權重並將各因子結合、分級，搭配 GIS 繪製脆弱度、韌性等級地圖。最後利用三維風險矩陣結合危害、脆弱、韌性並分級後繪製有、無考量溢淹危害兩情境各目標年之複合型災害風險等級地圖。由成果可得知當海岸地區有考量溢淹危害時與無考量溢淹危害情境相比較分析，部分村里風險有上升的趨勢，後續進行風險管理時應優先對這些高風險的村里進行檢討、辨識高風險的原因而後從危害、脆弱、韌性面向著手擬訂適當的措施降低災害風險。

關鍵字:氣候變遷、海岸地區、複合型災害、風險評估、地理資訊系統

## The Study of Risk Assessment and Adaptation Management for Multi-Disaster Under Climate Change in Coastal Area

Lien-Kwei Chien<sup>1</sup> Hao-Ran Shu<sup>2</sup> Yu-Chi Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Vice President, College of Engineering, National Taiwan Ocean University; <sup>1</sup>Professor, Harbor & River Engineering, National Taiwan Ocean University; <sup>1</sup>Director, Coastal Disaster Prevention Research Center, National Taiwan Ocean University

<sup>2</sup>Master, Harbor & River Engineering, National Taiwan Ocean University

<sup>3</sup>Master Student, Harbor & River Engineering, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

This research considers the impact of climate change and the time characteristics of multi-disaster, and use 2020 as the base period to estimate the compound disaster risk of coastal areas in 2030 and 2050. The three hazard factors of land subsidence, coastal erosion, and flooding hazards are analyzed., combine the three hazards with the concept of the Pareto Ranking analysis method, then use the GIS system draw the multi-disaster grade map for each target year under the two scenarios of no overflow hazard and overflow hazard. After selects vulnerability analysis factors and resilience analysis factors, use the principal analysis method to give the weight of each vulnerability and resilience index factor then combine and grade each factor. Finally, by use of GIS to draw the vulnerability and resilience grade map. Finally, the three-dimensional risk matrix adopted to combine with hazard, vulnerability, and resilience to draw a multi-disaster risk level map for each target year in the two scenarios of no overflow hazard and with overflow hazard. From the results, it indicated that the risks in some villages will increase when there is an overflow flooding disaster in the coastal area compared

with the situation of no flooding disaster. In the follow-up risk management, priority should give to reviewing these high-risk villages, identifying the causes of high risks, and then starting from the hazard, vulnerability, and resilience aspects to formulate appropriate measures to reduce disaster risks.

Keywords: climate change;coastal area;multi-disaster;risk assessment;Geographic Information System

## 一、前言

因溫室氣體的高度排放導致全球暖化、引發了全球性的氣候變遷影響，且諸多研究也指出各項災害發生頻率與規模亦有逐漸增加及擴大的趨勢；由許多重大災害案例可發現自然現象之作用力經常並非「單獨」存在與發生，不同種類的災害會相互結合存在複合特性此種災害稱為「複合型災害」。

然而過去對於災害之相關研究大多以單一災害作為主要探討對象，對複合型災害研究仍缺乏一個共通性風險評估階層架構，對於海岸地區而言一般對複合型災害定義著重於探討突發性且強烈相關的災害複合狀況卻忽略了長時間累加影響具潛在關聯性災害類型，因此本研究將以複合型災害之特性與觀點考量海岸地區之災害與複合型態，建構一套適宜臺灣海岸地區之複合型災害風險評估模式進行分析，並研擬出適宜的調適策略以利決策者進行整合性海岸地區管理。

為契合本研究於海岸地區之複合型災害研究主題，於研究區域之選定以存在海岸管理法中四大災害(暴潮溢淹、洪氾溢淹、海岸侵蝕、地層下陷)之區域為優先考慮，故選定屬一級海岸防護地區之「雲林縣」為研究區域。研究範圍則以海岸管理法中「濱海陸地」進行分析，為「平均高潮線至第一條省道、濱海主要公路或山脊線之陸域」，並以村里為分析單元，本研究區域範圍共包含 5 個鄉鎮、40 個村里，如圖 1 所示。



圖 1 雲林縣濱海陸地範圍示意

## 二、研究方法

本計畫以 2020 年為基期推估海岸地區 2020、2030、2050 年之複合型災害風險程度，於危害度分析當中對各危害因子進行計算與分級後，採用帕累托等級分析法概念搭配距離公式將各危害因子結合得海岸地區各村里之複合型危害分數，然後利用自然分類法得到海岸地區之複合型危害等級。脆弱及韌性因子分析成果利用 SPSS 分析軟體採用主成分分析法計算各因子之指標權重了解各因子之重要程度，而後將各脆弱度因子數值進行標準化後依據權重分析結果結合，即可得雲林縣濱海陸地各村里之脆弱度級韌性分數，然後將脆弱度分數採自然分類法(Natural Breaks)分成五個等級。最後再以風險矩陣將危害度與脆弱度與韌性進行結合，建立氣候變遷下整體海岸地區複合型災害風險評估模式。

## 三、風險分析

### 3.1 複合型危害度分析

本研究經風險辨識最終選定地層下陷、海岸侵蝕及溢淹危害為複合型危害因子，對各危害因子進行計算與分級後繪製 2020、2030、2050 年溢淹前、後之複合型危害等級地圖。

#### 3.1.1 地層下陷危害

本計畫於地層下陷危害分析中，以「累積下陷量」衡量雲林縣濱海陸地地層下陷現況及未來之危害程度，做法為先利用經濟部水利署所提供之累積地層下陷量(1992~2019)資料經計算後得 1992~2019 年各村里之平均累積下陷量；而後利用水利署提供之 2001 年至 2019 年歷年下陷速率將其平均，以各村里近 10 年平均下陷速率做為未來下陷速率之推估，以得 1992 致各目標年之累積地層下陷量。而後將上述 1992~2020、1992~2030、1992~2050 年之累積下陷量分為五級，分級標準乃是考量累積下陷量實際可能引發之危害，主要考量累積下陷量對海堤之影響，建立以海堤為主要考量之分級如表 1。



表 1 累積地層下陷分級表

累積地層下陷量(公尺)	危害等級
50 公分以下	1
50~100 公分	2
100~150 公分	3
150~200 公分	4
大於 200 公分	5

### 3.1.2 海岸侵蝕危害

本計畫海岸侵蝕危害分析方法參考葉純甄(2018)、吳晨瑋(2019)探討雲林縣海岸侵蝕時之方法(如表2)將氣候變遷之影響納入考量進行些微修改,以探討雲林縣濱海陸地各村里 2020、2030、2050 年海岸侵蝕危害程度。

表 2 海岸侵蝕因子及分級方式 (修改自葉純甄(2018)、吳晨瑋(2019))

	海岸侵蝕			
	地貌與海岸坡度條件	海氣象條件	海岸侵蝕速率	消波緩衝帶寬度
權重 危害 等級	0.22	0.12	0.26	0.40
1	珊瑚礁海岸	排序分布百分比 20% 以下	每年後退量 達 2 公尺以下	大於 15 年後將無海岸緩衝帶
2	岩石海岸	排序分布百分比介於 20%至 40%		15 年內將無海岸緩衝帶
3	礫石海岸	排序分布百分比介於 40%至 60%	每年後退量 達 2~5 公尺	10 年內將無海岸緩衝帶
4	砂質海岸	排序分布百分比介於 60%至 80%		5 年內將無海岸緩衝帶
5	泥灘海岸	排序分布百分比 80% 以上	每年後退量 達 5 公尺以上	無海岸緩衝帶

完成地貌與海岸坡度、海氣象條件、海岸侵蝕速率、消波緩衝帶四項海岸侵蝕危害因子分析與分級後,將四項因子之危害等級依權重結合後得各村里各目標年之海岸侵蝕危害分數,將海岸侵蝕危害分數以無條件進位方式計算,即可得雲林縣濱海陸地各村里各目標年之海岸侵蝕危害等級。

### 3.1.3 溢淹危害

海岸地區溢淹危害,主要是由颱風暴潮水位引發之暴潮溢淹與強降雨引發的洪氾溢淹所造成,此外海平面上升與地層下陷引發的直接或相對水位抬升,亦會影響海岸地區之溢淹危害程度,故本研究以雲林縣濱海陸地各村里遭受不同時期之海平面上升、暴潮水位、洪氾溢淹與地層下陷所產生之「溢淹水深度」探討雲林縣濱海陸地各村里 2020、2030、2050 年之溢淹危害程度。而後參考經濟部水利署淹水深度分級標準,將上述淹水深度分為五級如表 3。

表 3 淹水深度分級表

淹水深度(公尺)	危害等級
大於 3 公尺	5
2~3 公尺	4
1~2 公尺	3
0.5~1 公尺	2
0.3~0.5 公尺	1

### 3.1.4 海岸地區複合型危害分析與成果

配合有、無考量溢淹兩情境採用帕累托等級分析法之概念以距離公式,將各危害因子進行結合,得到各村里有、無溢淹兩情境下的「複合型危害分數」,危害分數幾何意義代表各危害因子結合後與原點之距離,距離越遠則代表危害分數越大其複合型危害程度也越高;最後再將危害分數採自然分類法將危害分數由分為 1~5 級如表 4 即可得海岸地區各村里之「複合型危害等級」呈現複合型災害的危害程度如圖 2 至圖 7。

表 4 複合型危害等級分級表

危害度 分數	分級方式	等級 5	等級 4	等級 3	等級 2	等級 1
	Natural Breaks (Jenks)	2.800   3.600	3.600   5.100	5.100   6.000	6.000   6.700	6.700   8.600



圖 2 2020 年複合型危害等級(無考量溢淹危害)

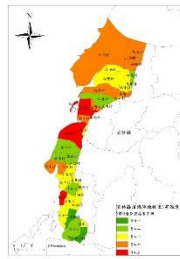


圖 3 2020 年複合型危害等級(考量溢淹危害)



圖 4 2030 年複合型危害等級(無考量溢淹危害)



圖 5 2030 年複合型危害等級(考量溢淹危害)



圖 6 2050 年複合型危害等級(無考量溢淹危害)

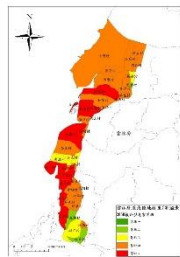


圖 7 2050 年複合型危害等級(考量溢淹危害)

### 3.2 脆弱度分析

本計畫採用 UNISDR(2009)之脆弱度定義為「社區、系統、資產或環境容易受到災害或危害的影響的敏感程度」，本研究以實體、社會、經濟三面向進行脆弱度指標因子選取及分析，本計畫挑選六項脆弱因子進行分析，最後將脆弱度分數採自然分類法分成五個等級後繪製脆弱度等級地圖完成本計畫脆弱度分析。

#### 3.2.1 海岸地區脆弱度指標

於脆弱度因子的評選部分，本研究參考 UNISDR(2004)、GTZ(2004)、UNEP(2005)、NCDR(2010)等，最終決定以實體(人口密度、依賴人口比)、社會(身障人口比、土地利用類型)、經濟(營利所得、低收入戶比)三大面向進行脆弱度因子選取及分析。

#### 3.2.2 脆弱度分析成果

本研究將上述計算之各脆弱度因子分析數據成果，利用 SPSS 軟體進行主成分分析，進行各因子權重計算以了解不同因子重要程度。將各項脆弱度因子數值進行標準化後，將標準化數值依上述權重分析結果結合即可得海岸地區各村里之脆弱度分數，最後將各村里的脆弱度分數利用自然分類法(Natural Breaks)由低至高分為 1~5 級(分級標準如表 5)，即可得到各村里脆弱度等級分布圖如圖 8。

表 5 脆弱度分級標準

分級方式	等級 1	等級 2	等級 3	等級 4	等級 5
Natural Breaks	-0.848	-0.509	-0.202	0.094	0.358
Jenks	-0.508	-0.201	0.093	0.357	0.646

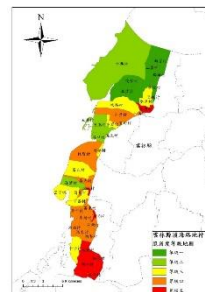


圖 8 雲林縣濱海路地村里脆弱度等級地圖

### 3.3 海岸地區韌性分析

本計畫對韌性之定義採用 UNISDR(2009)韌性定義為：「指一個系統、社區或社會抵抗、吸收、適應災害造成的影響並從災害影響中及時有效恢復的能力」，本研究以基礎設施、社會組織、經濟三面向進行韌性指標因子選取及分析，本計畫挑選八項韌性因子進行分析，最後將韌性分數採自然分類法分成五個等級後繪製韌性等級地圖完成韌性分析。

#### 3.3.1 海岸地區韌性指標

韌性指標參考 UNISDR(2004)、Pearl(2019)、游保衫(2018)所建立之各韌性層面指標，考量資料可蒐集性及完整性以基礎設施(抽水能力、排水能力、滯洪池)、社會組織(防災規劃、醫療機構、人類發展指標)、經濟韌性(薪資中位數、財政預算)三面向進行韌性因子選取。

#### 3.3.2 韌性分析成果

本研究將這些韌性分析數據成果與分析脆弱度權重時做法相同，利用 SPSS 軟體進行主成分分析計算各韌性因子權重以了解不同因子重要程度，各因子透過主成分分析出之權重。將各項韌性因子數

值進行標準化而後將標準化數值依上述權重分析結果結合即可得海岸地區各村里之「韌性分數」，最後將溢淹前後兩種情境各村里的「韌性分數」利用自然分類法由高至低分為 1~5 級(分級標準如表 6) 各村里兩情境之韌性等級地圖如圖 9、圖 10。

表 6 韌性分數分級標準

分級方式	等級 5	等級 4	等級 3	等級 2	等級 1
Natural Breaks (Jenks)	-1.032	-0.726	-0.450	0.033	0.716
	-0.725	-0.451	0.032	0.715	1.39



圖 9 韌性等級地圖 (無考量溢淹危害)



圖 10 韌性等級地圖 (考量溢淹危害)

#### 四、風險等級與成果

本研究採用簡連貴(2021)所建立之氣候變遷下海岸地區之複合型災害風險評估模式來進行分析，如圖 11 所示，分析各目標年在無考量溢淹危害情境下之複合型災害風險如圖 12、圖 14、圖 16，考量溢淹情境下各目標年之複合型災害風險等級地圖如圖 13、圖 15、圖 17，分級標準如表 7 所示。

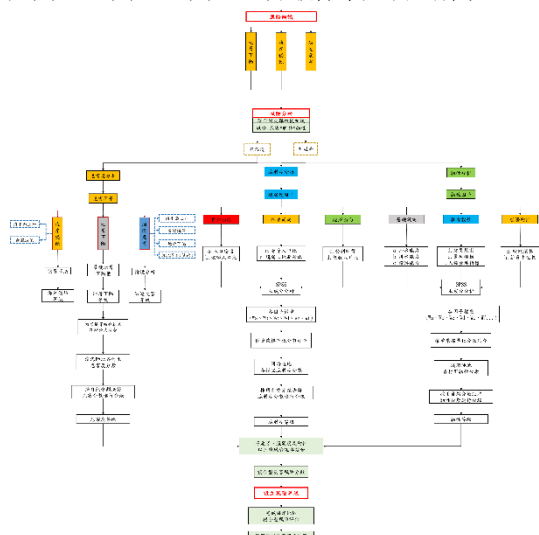


圖 11 氣候變遷下海岸地區複合型災害風險評估模式

表 7 複合型災害風險分級標準(幾何分類法)

分級方式	等級 1 (極低)	等級 2 (低)	等級 3 (中)	等級 4 (中高)	等級 5 (極高)
Geometrical Interval	1   8	9   20	21   40	41   72	73   125

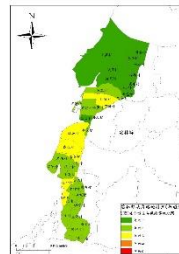


圖 12 2020 年複合型災害風險等級地圖(無考量溢淹危害)

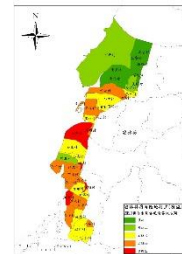


圖 13 2020 年複合型災害風險等級地圖(考量溢淹危害)



圖 14 2030 年複合型災害風險等級地圖 (無考量溢淹危害)



圖 15 2030 年複合型災害風險等級地圖(考量溢淹危害)

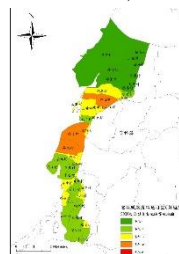


圖 16 2050 年複合型災害風險等級地圖(無考量溢淹危害)



圖 17 2050 年複合型災害風險等級地圖(考量溢淹危害)

由結果可知當海岸地區因極端事件而產生溢淹災害時，村里的災害風險與無溢淹時相比有明顯的上升，有上述此現象的原因除了溢淹災害本身強力的危害程度以外，溢淹災害的發生還會降低地區原有對災害的韌性及調適能力。

## 五、結果與討論

1. 本研究重新定義海岸地區複合型災害為「使受災區域衍生二次災害或與既有之災害複合產生兩種以上災害疊加而引致複合災損之災害。」
2. 韌性分析中本研究認為韌性因子當中的排水能力、滯洪能力兩項因子會因溢淹危害的發生而有所降低，可針對上述村里研擬強化韌性策略韌性分析中本研究認為韌性因子當中的排水能力、滯洪能力兩項因子會因溢淹危害的發生而有所降低，可針對上述村里研擬強化韌性策略。
3. 由分析成果可得知當海岸地區存在溢淹災害時與無溢淹災害情境相比風險有上升的趨勢，後續在對海岸地區進行風險管理時應優先針對這些較高風險的村里進行細部檢討，辨識出造成高風險的原因從危害、脆弱、韌性面向著手擬訂適當的措施以降低災害風險。
4. 本研究以 2020 年為基期推估 2030 年、2050 年海岸地區之複合型災害風險(有、無考量溢淹危害)，可供給管理單位針對未來有較高風險的區域提前擬定防護、調適策略，預防或以降低未來災害衝擊海岸地區時實際產生之災損與影響。

## 謝誌

本文係科技部專題研究計畫「氣候變遷下海岸地區之複合型災害風險評估及整合性避災與減災策略研究-氣候變遷下海岸地區之複合型災害風險評估與防護策略研究」(編號 MOST109-2625-M-019-008-)之相關研究成果，承蒙科技部經費補助使本研究得以順利，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. 國家災害防救科技中心(NCDR)(2010)，「氣候變遷下之關鍵議題報告」
2. 內政部(2015)，「海岸管理法」
3. 游保衫(2017)，「韌性水城市評估與調適研究(1/2)」，經濟部水利署。
4. 游保衫(2018)，「韌性水城市評估與調適研究(2/2)」，經濟部水利署。
5. 葉純甄(2018)，「台灣海岸侵蝕風險評估-以雲林、台東海岸為例」，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程學系。
6. 吳晨瑋(2019)，「海岸侵蝕風險評估及因應策略

研究-以雲林、高雄為案例」，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程學系。

7. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2019)，「海岸防護整合規劃及海岸防護計畫擬訂作業參考手冊」
8. 簡連貴(2021)，科技部專題研究計畫「氣候變遷下海岸地區之複合型災害風險評估及整合性避災與減災策略研究-氣候變遷下海岸地區之複合型災害風險評估與防護策略研究」(編號 MOST109-2625-M-019-008-)成果報告。
9. UNISDR(2009). "2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction", UNISDR books.
10. UNISDR, 2004, *Terminology: Basic Terms of Disaster Risk Reduction*.
11. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) (2004), "Risk Analysis—a Basis for Disaster Risk Management." Section 42 Governance and Democracy.
12. UNEP, 2005. *Assessing Coastal Vulnerability: Developing a Global Index for Measuring Risk*, United Nations Environment Programme, UNEP.
13. EU PEARL (2018) "Development of a framework for strengthening resilience and coping capacities in coastal areas. Flood Resilience Index (FRI)" work package D-5.2.

# 以單位海嘯法建置屏東外海機率式海嘯波高之研究

陳彥龍<sup>1\*</sup> 沈煜修<sup>2</sup> 吳漢倫<sup>1</sup> 蕭士俊<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系博士後研究員

<sup>2</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系碩士生

<sup>3</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系教授兼國立成功大學水工試驗所所長

## 摘要

本文係以建立單位海嘯法應用於機率式海嘯危害度分析(PTHA)方法之研究，研究採用 FUNWAVE 數值模式進行 PTHA 所需之偶然不確定性及認知不確定性之計算。在偶然不確定性方面，是以模擬分析「2006 年台灣恆春西南外海地震」和「2011 年日本東北地方太平洋近海地震」引致海嘯事件所觀測到的海嘯波高為依據進行計算；在認知不確定性方面，則是以國內 PSHA SSHAC-3 的馬尼拉隱沒帶引致之海嘯為情境，透過單位海嘯法資料庫之建立，進行屏東外海的機率式海嘯波高計算。最後，研究初步的透過機率模型建構了不同超越機率下的外海機率式波高分布情形。

關鍵詞：機率式海嘯危害度分析、單位海嘯法、數值模擬、FUNWAVE

## Probabilistic Tsunami Hazard Assessment of Offshore Wave Heights for Pingtung by Unit Tsunami Method

Yen-Lung Chen<sup>\*</sup>, Yu-Hsiu Shen, Han-Lun Wu, Shih-Chun Hsiao

<sup>\*</sup> Postdoctoral Fellow, Department of Hydraulic and Ocean Engineering

## ABSTRACT

This study is based on the establishment of the unit tsunami method applied to the study of the probabilistic tsunami hazard analysis (PTHA) method. The study uses the FUNWAVE numerical model to calculate the aleatory and epistemic uncertainties. The former is analyzed by the simulation of the tsunami wave heights of historical events caused by the "2006 Hengchun Southwestern Taiwan Earthquake in Taiwan" and the "2011 Tohoku Earthquake in the Pacific Ocean". The latter is evaluated by the scenario caused by the Manila subduction zone according to PSHA SSHAC-3 in Taiwan. Through the establishment of the unit tsunami method database, a probability-based offshore tsunami wave heights for Pingtung is carried out. Finally, through the probability model, the preliminary results construct the probability offshore wave height distribution under various exceedance probabilities.

Keywords: Probabilistic Tsunami Hazard Assessment; Unit Tsunami Method; Numerical Simulation; FUNWAVE

## 一、前言

海嘯是一種發生機率較低但破壞力相對較大的一種水災，屬於一種能量集中的重力長波，具有較長的週期和波長；週期介於數十至數百分鐘之間，波長則可達數十至數百公里之遠。由於能量集中的關係，其撞擊海岸結構物或海港時，會引起海水面巨大的震盪，進而導致結構物的損壞。

早期的海嘯危害度評估以定率式(Deterministic Tsunami Hazard Analysis, DTHA)方法為主，透過水動力數值模式的計算，探討不同海嘯情境造成之海嘯波高及溢淹。時至今日，DTHA 已被廣泛應用在日本及美國的海嘯預警系統。另一方面，機率式海嘯危害度分析(Probabilistic Tsunami Hazard Analysis, PTHA)自 Lin and Tung (1982)發展至今，透過納入各種可能發生的海嘯情境之方式，以數值模式計算海嘯之發展過程，同時考量數值和地震等參數的隨機及認知不確定性，進而推求不同重現期下的海嘯超越波高和溢淹範圍等危害度潛勢評估，提供防災及減災決策方面較為全面的海嘯危害度分析成果 (PG&E, 2010)。此外，美國國家海洋暨大氣總署更指出 USNRC 在進行核電廠審查時，PTHA 可提供決策者一個貼近現實且具科學依據的評估方式 (NOAA, 2007)。美國土木工程學會(ASCE)建議溢淹深度和流速之計算可利用 PTHA 計算外海的海嘯波高作為輸入條件進行細部的二維水動力模擬分析，或是以 PTHA 計算所得之溯升高和溢淹距離作為能量坡降線(Energy Grade Line, EGL)的輸入條件，進行斷面水力分析(ASCE 7-16, 2017)。

本研究利用台灣 PSHA SSHAC-3 的隱沒帶震源資料，美國 Thio et al. (2010)提出之 PTHA 方法為基礎，以單位海嘯法(Lee et al., 2005)做為模擬海嘯情境之方式，分析屏東外海的機率式海嘯波高分布情形。

## 二、研究方法

### 2.1 水動力數值模型

本研究使用由 Kirby et al. (1998)所發展之完全非線性 Boussinesq 波浪模式(FUNWAVE)，該模式使用之 Boussinesq 方程為沿著水深積分之平面二維波浪運動方程，並且考慮摩擦阻力、吸收邊界、乾

濕移動邊界等，其統域方程式如下(粗體代表向量)：

$$\begin{aligned} \eta_t + \nabla \cdot \left\{ (h + \eta) \left[ \mathbf{u}_\alpha + \left( z_\alpha + \frac{1}{2}(h - \eta) \right) \nabla (\nabla \cdot (h\mathbf{u}_\alpha)) + \left( \frac{1}{2} z_\alpha^2 - \frac{1}{6}(h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \right] \right\} = 0 \quad (1) \\ \mathbf{u}_{\alpha t} + (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) \mathbf{u}_\alpha + g \nabla \eta + z_\alpha \left\{ \frac{1}{2} z_\alpha \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha t}) + \nabla (\nabla \cdot (h\mathbf{u}_{\alpha t})) \right\} \\ + \nabla \left\{ \frac{1}{2} (z_\alpha^2 - \eta^2) (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \right. \\ \left. + \frac{1}{2} [\nabla \cdot (h\mathbf{u}_{\alpha t}) + \eta \nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha t}] \right\} \quad (2) \\ + \nabla \left\{ (z_\alpha - \eta) (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot (h\mathbf{u}_{\alpha t})) \right. \\ \left. - \eta \left[ \frac{1}{2} \eta \nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha t} + \nabla \cdot (h\mathbf{u}_{\alpha t}) \right] \right\} = 0 \end{aligned}$$

其中為  $\eta$  為水位高程、 $h$  為靜水深、 $\mathbf{u}_\alpha$  為水深  $z = z_\alpha = -0.531h$  處之水平速度向量、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 、 $g$  為重力加速度、下標  $t$  為對時間的偏微分。

式(1)和式(2)分別為質量 and 動量守恆方程，適用於無碎波、無摩擦，光滑不透水底床波傳之情況。為使模式應用於實際情況，必須將摩擦阻力及碎波等物理效應納入模式，以及為了數值上之應用，模式中需包含造波、吸收邊界及移動邊界等，詳細資訊可參閱 FUWAVE 的使用手冊。

### 2.2 地震型海嘯模擬

#### 2.2.1 初始水位模擬

地震引致之海嘯可透過 Okada (1985)的理論模型計算海底位移量，再計算海水面變化以求得海嘯波的初始波形，此方法已被廣泛應用在不同的海嘯模式之中。地震參數一般是透過地質調查所得的資料，例如：USGS (United States Geological Survey, 美國地質調查局)或由專家學者提出，包含有震央、破裂深度、斷層長度、斷層寬度、滑移量、走向角、傾角和滑移角，共 8 個參數。

#### 2.2.2 單位海嘯法

為了能有效率地考慮各種地震型海嘯情境，本研究以建置單位海嘯法的方式節省計算大量情境所需之資源。單位海嘯法考量一波源點(source)發生一初始單位高度( $\eta_{0,s}$ ，一般為 1 公尺)之海嘯，對接收點(receiver)造成之水位變化( $\eta_r(t)$ )，兩者之比值以  $GF_r^s$  表示。

$$GF_r^s = \frac{\eta_r(t)}{\eta_{0,s}} \quad (3)$$

透過數值模擬的方式，建立一系列波源點與接收點的  $GF_r^s$  資料庫後，可依據 Okada (1985)的初始水位資料，計算任一接收點的海嘯水位變化( $\zeta_r$ )。

$$\zeta_r = \sum_{s=1}^N (GF_s^2) \times H_s \quad (4)$$

## 2.3 機率式海嘯危害度分析模型

本研究是以 Thio et al. (2010)所提之方法為基礎進行，但 Thio et al. (2010)未完整說明建立之機率模型計算公式，僅提及偶然不確定性是以機率密度函數的方式進行考量，而偶然不確定性之計算皆以 natural log 進行表示。另一方面，PG&E (2010)是以對數常態分布的機率密度函數建立機率模型。此外，PG&E (2010)的偶然不確定性計算方式與 Thio et al. (2010)相近，且評估方式是與 Dr. Hong Kie Thio 討論之結果，故本研究採用 PG&E (2010)所述之機率模型設定方法：

$$v(W_{tsu} > z) = \sum_{i=1}^{N_{FLT}} \sum_{j=1}^{NS_i} rate_{ij} P(W_{tsu} > z | M_{ij}, Loc_{ij}) \quad (5)$$

其中， $W_{tsu}$ 為海嘯波高， $N_{FLT}$ 為造成海嘯的斷層數目， $NS_i$ 為第  $i$  個地震源的情境數目， $rate_{ij}$ 為第  $i$  個地震源所引發第  $j$  個情境的海嘯發生機率， $P(W_{tsu} > z | M_{ij}, Loc_{ij})$ 為在地震規模  $M$ 及震源於  $Loc$  位置處的條件下， $W_{tsu}$ 超過水位  $z$  的機率，此機率可表示為：

$$P(W_{tsu} > z | M, Loc) = 1 - \Phi \left( \frac{\ln z - \ln(\hat{W}_{tsu}(M, Loc))}{\sigma_{EQK}} \right) \quad (6)$$

其中， $\Phi$ 代表累積常態分佈函數，數值模式計算中的海嘯最大最大波高定為機率分布的中值波高 $\hat{W}_{tsu}$ ，標準差 $\sigma_{EQK} = (\sigma_{mod}^2 + \sigma_{par}^2)^{0.5}$ 則透過偶然不確定性的計算得到( $\sigma_{mod}$ 和 $\sigma_{par}$ 分別代表數值模式和地震參數的變異量)。

## 三、結果與討論

### 3.1 數值模型變異量分析

以數值模擬計算海嘯引致之波高危害有其不確定性，為量化此不確定性，需分析數值模型於計算歷史海嘯事件時之結果與真實世界量測到之差異情形。因此，本研究模擬台灣現有海嘯觀測資料中，水位資料較為顯著且齊全之「2006年台灣恆春西南

外海地震」和「2011年日本東北地方太平洋近海地震」引致之海嘯潮位站資料。透過帶通濾波之方式，從取樣頻率6分鐘的潮位站資料中萃取出海嘯水位訊號(5-60分鐘(IOC, 2019))，需要注意的是，由於水位資料本身為6分鐘一筆之觀測資料，故無法解析出海嘯較高頻率(小於6分鐘)的成分。

圖1和圖2分別為「2006年台灣恆春西南外海地震」和「2011年日本東北地方太平洋近海地震」於後壁湖和東港潮位站的觀測和模擬之海嘯水位變化，圖中標示之水位值代表該站之最大海嘯波高，其海嘯波高之定義為海嘯引致之最大水位高度與平均水位之高度(<https://www.usgs.gov/media/images/tsunami-terms>)。由於本研究以PTHA分析海嘯危害時，是考量最大海嘯波高，故即便出現觀測與模擬的最大海嘯波高發生時間點有不同之情況時，仍是以其最大海嘯波高為分析模式偶然不確定性之參數。

透過分析「2006年台灣恆春西南外海地震」和「2011年日本東北地方太平洋近海地震」於台灣周圍的潮位觀測和數值資料，可進一步將觀測與模擬海嘯波高之比值以對數常態分布進行擬合，藉此評估數值模式的隨機不確定性。然而，由於觀測到之最大海嘯波高最大不超過35 cm，加上以濾波取得之海嘯水位在海嘯不顯著的情況下，所得之最大海嘯波高可能受到其他長週期波之影響而有其誤差。因此，在此探討分別分析最小5 cm至最小30 cm的最大海嘯波高觀測值情況下，觀測值與模擬值之比值的機率密度分布情形，如圖3所示。

圖3(a)是資料筆數最多的一個分析結果，可發現平均值有較顯著的偏移，以及較大的變異量。平均值有較大的偏移，代表數值模擬整體的模擬結果與觀測值存在偏差，而「負號」代表數值模擬結果整體有「高估」之情形。透過篩選掉最大海嘯波高小於10 cm、15 cm、20 cm、25 cm之結果顯示(圖3(b)-(e))，其平均值有顯著趨於0之現象，且變異量從0.5280降至0.4445~0.4905。然而，當只考慮具有至少30 cm以上之海嘯波高時，可以發現到其平均值又呈現較顯著的偏移(圖3(f))。

從上述的分析結果可知，若適度的排除觀測海嘯波高較小之情況時，所得之平均值會較接近0

值，而變異量亦會略微變小。然而，過少的資料量亦會使分析結果喪失代表性。現階段為了使資料量能呈現出一定程度的意義，故採用觀測值最大海嘯波高至少超過 10 cm 做為資料篩選之門檻值。因此，本研究採用之數值模式之變異量為 0.4445。

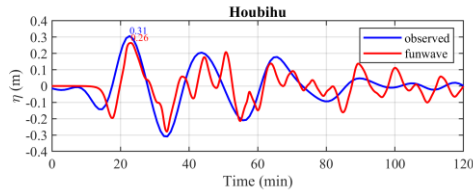


圖 1 「2006 年台灣恆春西南外海地震」引致海嘯之後壁湖潮位站的海嘯波觀測值(observed)與數值模擬(funwave)之比較

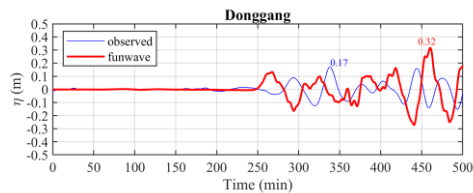


圖 2 「2011 年日本東北地方太平洋近海地震」引致海嘯之東港潮位站的海嘯波觀測值(observed)與數值模擬(funwave)之比較

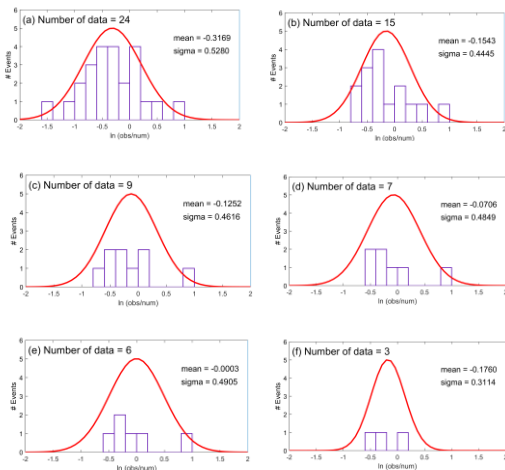


圖 3 不考慮最大海嘯波高觀測值未達(a) 5 cm、(b) 10 cm、(c)15 cm、(d) 20 cm、(e) 25 cm、(f) 30 cm

### 3.2 單位海嘯法之海嘯源解析度分析

以單位海嘯法建置海嘯模擬資料庫可大幅度的提升探討各種地震海嘯情境之效率，藉以節省相當的計算時間，達到建立具有多元情境 PTHA 分析成

果之目的。然而，海嘯源採用之單位海嘯波源之解析度對於不同區域之外海波高結果之影響性仍屬未知，如表 1 所示。

為此，本研究比較由不同大小(空間解析度)的單位海嘯波源所建置之資料庫，並以由 Okada (1985) 得到之初始水位變化直接模擬之結果為基準進行分析。透過瞭解單位海嘯法的空間解析度，與計算精度和其時間成本之比較，藉此提出一個兼顧效率及精度之作法。

在相同的模擬設定條件下(網格配置、地形解析度和其他數值模擬參數)，分別建置 0.25 度\*0.25 度和 0.50 度\*0.50 度之單位海嘯法資料庫，如圖 4 所示。為了比較這兩種解析度所得結果之差異性，故進行以 Okada (1985)模型直接進行海嘯波傳至屏東外海不同水深(25 m、50 m、75 m 和 100 m)之模擬(圖 5)，藉此做為比較之基準。

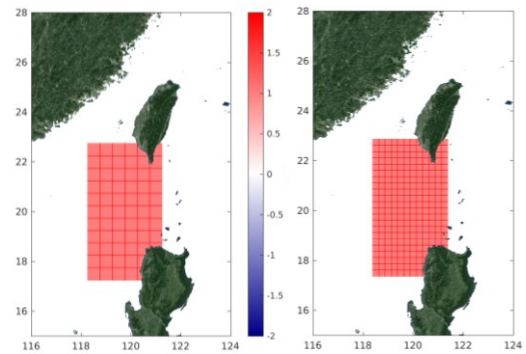


圖 4 單位海嘯法資料庫海嘯源建置區域 (左圖：0.50 度\*0.50 度，右圖：0.25 度\*0.25 度)

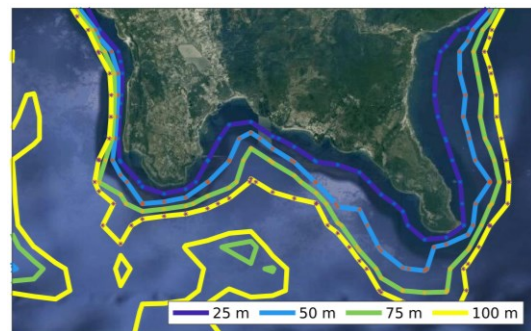


圖 5 屏東外海不同水深的分布

研究考慮可能於屏東外海形成較大海嘯波高之 T02 情境 (吳作任, 2011)設定進行模擬，結果顯示當解析度為 0.50 度\*0.50 度時，正規化之海嘯最高(NMAX)和最低水位(NMIN)皆較直接進行模擬之



結果低估達約 50%；另一方面，較高之解析度(0.25 度\*0.25 度)之誤差則顯著減少 1 倍以上，如圖 6 所示。

值得一提的是，即便水深減至 25 m，單位海嘯法所得之最大和最低水位誤差並無顯著放大之情形。然而，此現象在不同海嘯情境之適用性則需要更進一步的探討。保守起見，本研究仍以 50 m 水深結果建立屏東外海機率式海嘯波高，確保海嘯傳遞至此能滿足線性 (Shuto,1991)。

以計算需耗費的成本來看，本研究建構一組多機多核的平行計算電腦進行資料庫所需之單位海嘯模擬，在使用 105 CPU 進行計算的情況下，建構 0.50 度\*0.50 度(66 組)和 0.25 度\*0.25 度(264 組)資料庫所需之時間成本分別為 16 和 66 小時。此結果顯示，基本上所耗費之時間成本約略與資料庫所劃分之單位海嘯情境組數呈正比且接近為線性變化。由於進行更高解析度的分析需要更多的時間進行，目前暫以 0.25 度\*0.25 度之結果進行本研究的後續分析。

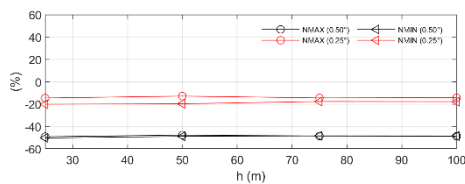


圖 6 兩種不同單位海嘯法解析度於屏東外海水深 25、50、75 和 100 m 處之水位誤差變化

表 1 單位海嘯法研究案例的單位海嘯法空間解析度設定

參考文獻	地點	海嘯源的空間解析度
Lee et al. (2005)	韓國東部海域	5.5 km * 5.5 km
林柏佑 (2009)	台灣地區周圍海域	0.25 度*0.25 度
陳伯飛，等人 (2009)	台灣地區周圍海域	0.25 度*0.25 度

### 3.3 PSHA SSHAC-3 SSC 馬尼拉隱沒帶引致海嘯之 PTHA 分析

為因應我國行政院原子能委員會之要求，台灣電力公司需針對核能電廠執行地震危害重新評估，藉以完成機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)和地震動反應譜之

建立(<http://sshac.ncree.org.tw/>)。執行程序遵循美國「地震危害分析資深委員會(Senior Seismic Hazard Analysis Committee, SSHAC)」所訂定第 3 層級(以下簡稱 SSHAC-3)之程序，其中建置之「地震源特徵(Seismic Source Characterization, SSC)模型」即為本研究採用之地震情境資料。

本研究以 PSHA SSHAC-3 的馬尼拉隱沒帶地震情境中的部分邏輯樹設定(共計約 45 組)為例，其地震矩規模落於  $M_w = 8.05$  至  $M_w = 8.78$  之間，馬尼拉海溝位置如圖 7 所示。透過本研究建置的單位海嘯法資料庫可快速的分析海嘯情境在屏東外海 50 m 處的海嘯危害度，以及周圍的機率式海嘯波高分布情形。

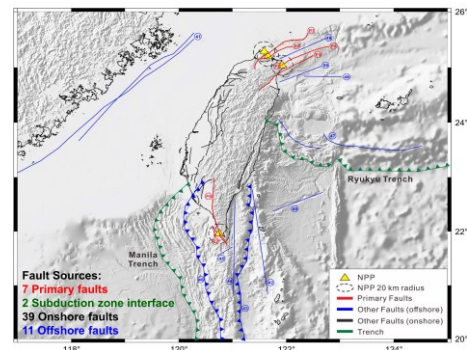


圖 7 PSHA SSHAC-3 考量之台灣周圍震源區域 (吳俊霖，2019)

圖 8 為 45 組邏輯樹情境於屏東外海 50 m 水深處的危害度曲線分析結果。在超越機率為  $10^{-4}$  的情況下，外海海嘯波高使用不同邏輯樹情境的模擬結果存在小至約 1 m，或是大至約 18 m 之情形。然而，當考量了不同情境所對應之邏輯樹權重後，其結果約為 8 m。此結果顯示，藉由邏輯樹的計算，降低因海嘯情境的認知不足所造成之不確定性的重要。

圖 9 為考量超越機率為  $10^{-4}$  於屏東周圍 50 m 水深之外海海嘯波高分布，可以看到以空間上來說，目前所使用之情境在南灣外海區域造成之海嘯波高較其他區域來的大，造成這個結果的原因可能與地形和初始海嘯波之分布型態有關。需要再次強調，目前研究僅考量少部分的馬尼拉地震情境，故目前的結果僅為 PTHA 方法建構之研析。

## 四、結論

本研究以數值模式 FUNWAVE 和單位海嘯法

進行屏東外海機率式海嘯波高之建置研究。透過歷史海嘯事件的模擬分析，探討進行 PTHA 所需之參數分析時，觀測資料所需具備之要求。以現有之觀測資料，目前初步建議以最大海嘯波高達 10 cm 做為挑選之門檻值。

以單位海嘯法進行不同海嘯源解析度分析之結果顯示，從 0.50 度\*0.50 度的解析度提升至 0.25 度\*0.25 度後，最大和最小海嘯波高的誤差皆顯著減少 1 倍以上。此外，從外海不同水深的結果發現，即便水深降至 25 m，仍可能滿足單位海嘯法所需之線性假設。然而，目前僅為單一情境所見之現象，仍有待進一步的釐清。

最後，研究以國內 PSHA SSHAC-3 SSC 馬尼拉隱沒帶的一部分邏輯樹設定為例，進行引致海嘯之 PTHA 分析。因此，本研究呈現之危害度分析結果僅供 PTHA 方法建置之參考。PTHA 的危害度曲線顯示不同情境所呈現之危害度曲線發生機會越小的情況存在相當大的差異，顯示邏輯樹是降低因海嘯情境的認知不足造成不確定性的重要方式。此外，邏輯樹之權重分配亦是影響最終分析結果的關鍵之一。

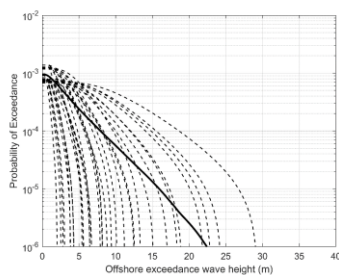


圖 8 部分馬尼拉海溝邏輯樹於屏東外海 50 m 之海嘯波高的超越機率分布情形 (虛線代表不同情境的結果，而實線代表考量加權後之結果)

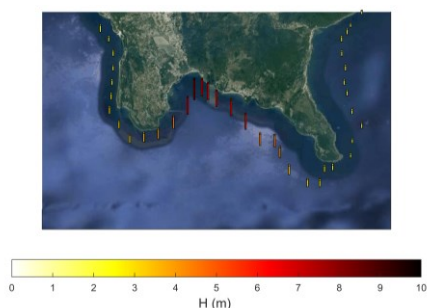


圖 9 部分馬尼拉海溝邏輯樹於屏東外海 50 m 於超越機率為  $10^{-4}$  的外海最大海嘯波高分布

## 謝誌

本論文係原子能委員會研究計畫「110 年核電廠水災與海嘯危害再評估精進技術研究與管制技術諮詢」(編號：110B014)之研究成果，承蒙原子能委員會經費之補助使本研究的以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

- ASCE 7-16 (2017). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures.
- IOC (2019). Tsunami Glossary. Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series 85.
- Kirby, J. T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A. B. and Dalrymple, R. A. (1998). FUNWAVE 1.0 Fully nonlinear Boussinesq wave model. Documentation and users manual.
- Lee, H. J., Cho, Y. S., & Woo, S. B. (2005). Quick tsunami forecasting based on database. In *Tsunamis* (pp. 231-240). Springer, Dordrecht.
- NOAA (2007). Geologic evidence of tsunamis. Scientific and technical issues in tsunami hazard assessment of nuclear power plant sites.
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4): 1135-1154.
- PG&E (2010). Methodology for Probabilistic Tsunami Hazard Analysis: Trial application for the Diablo Canyon Power Plant site.
- Shuto, N. (1991). Numerical simulation of tsunamis—Its present and near future. *Natural Hazards*, 4(2-3), 171-191.
- Thio, H.K., Somerville, P. and Polet, J. (2010). Probabilistic Tsunami Hazard in California.
- 吳祚任 (2011) 「台灣潛在高於預期之海嘯模擬與研究」，行政院災防應用科技方案，行政院國家科學委員會。
- 吳俊霖 (2019) 「台灣地震危害高階模型建置」，國家地震工程研究中心。  
(<http://sshac.ncree.org.tw/>，公開課程)
- 林柏佑 (2009) 利用單位海嘯模擬方法建立台灣近海海嘯警報系統，碩士論文，國立中央大學地球物理研究所。
- 陳伯飛 (2009) 「利用單位海嘯模擬來建立臺灣海域近海海嘯預警系統」，交通部中央氣象局。

## 裂流模擬與影響因子之評析

王敘民<sup>1</sup> 邱啟敏<sup>2</sup> 董東璟<sup>3</sup> 蔡政翰<sup>4</sup>

<sup>1</sup>\*國立成功大學水利及海洋工程學系博士生

<sup>2</sup>國立成功大學近海水文中心博士級研究員

<sup>3</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系教授

<sup>4</sup>國立台灣海洋大學海洋環境資訊學系名譽教授

### 摘要

裂流(rip current)是海岸邊的隱形殺手，流速強，垂直海岸線向外海流去，時常將遊客牽引流向外海，造成生命財產的損失。若能了解裂流發生的成因，進而從事預警作業，便能大幅降低意外事件的發生，因此本研究接續先前的研究成果，透過波流偶和數值模式(SCHISM&WWM-III)模擬近岸海域之流場，探討在不同海氣象條件下裂流發生之情形，該模式模擬結果於水位、波高及週期驗證，皆與實測資料相當吻合。此外，本研究亦將透過小波轉換邊緣化偵測的技術，建立一套半自動化裂流影像辨識系統，蒐集完善的裂流資料庫，藉由與鄰近的浮標站比對，探討裂流發生當下之海氣象特性。目前已完成半自動化裂流影像辨識系統，可從衛星影像中盼釋出是否有裂流的發生，準確率可達 8 成。綜整模式模擬以及遙測分析之結果，顯示裂流發生時，波高多介於 0.5-1.5 公尺間，且在波高大於 1 公尺時裂流現象較明顯，流速亦較強，而風速約小於 4m/s(約三級風)。上述結果未來可用於臺灣海岸裂流預警之統計經驗模式的基礎。

關鍵詞：裂流、波流耦合、數值模擬、小波轉換、影像辨識

## Numerical Model Simulation and Impact Factor Analysis for Rip Current

Shu-Min Wang<sup>\*</sup>, Chi-Min Chiu, Dong-Jiing Doong, Cheng-Han Tsai

<sup>\*</sup> Ph.D. student, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

Rip current is one of the hazard in the coastal area, especially in the beach. They are fast-moving flowing and traveling outward at right angles to the shore. To understand, monitoring and warn it is necessary. Not like the waves or tides, the occurrence of rip is difficult to be seemed. In order to understand the mechanism of rip currents, this research uses SCHISM&WWM-III wave-current coupling model to simulate the flow field in different meteorological and wave condition. The results are very closed to the water level, wave height and period. In addition, this research developed image analysis process to collect rip current cases from satellite image or camera by wavelet transform technology. A set of semi-automatic image detection technology has been completed, which can determine the rip current from satellite images, and the accuracy rate could reach 80.5%. In summary, the results of numerical model simulation and remote measurement analysis show that the most of rip current cases occur when wave height is between 0.5-1.5 meters and the wind velocity is less than 4m/s. The above results can be used as the basis for the rip current warning in Taiwan in the future.

Keywords: Rip current; wave-current coupling; numerical simulation; wavelet transform; Image detection

## 一、前言

近二十年來，台灣周遭水域裂流(Rip current)事件頻傳，導致人員遭海流捲走時有耳聞，造成民眾生命威脅並花費大量救災資源。裂流不意察覺，常出現在海灘，流速強，將遊客牽引流向外海，時常造成海岸邊的漁民、釣客、戲水民眾及海巡人員的危害。

裂流不像波浪高低和潮汐變化都目視可辨別，加上裂流發生的成因相當複雜，據文獻所述裂流的發生主要是因為地形不均所引致的淺化和折射效應，亦或是為平衡波浪造成輻射應力的外力所導致的(Longuest-Higgins and Stewart, 1964)，隨著不同時間和營力產生變化，其裂流位置和強度也會產生不同的變化。而影響裂流發生與否以及裂流強度除了上述所提及之地形因素外，與海氣象條件亦有所關係。隨著近年來各國開始注重該海岸災害，裂流監測和預警系統亦開始發展，然因裂流的特性所致，在模擬上需要相當高的解析度，導致運算效率過低，若要能實際作業畫執行將會有所阻礙，故目前國際上裂流預警系統多根據上述觀測及數值模式分析之結果，瞭解裂流發生時之海氣象條件(Lushine, 1991; Lascody, 1998)，進而針對各個海氣象參數給定權重進而評估裂流發生之機率。Liu and Wu (2019)以影像分析技術蒐集裂流案例，並根據裂流發生時海氣象資料建立裂流即時預報系統，該研究認為風速、風向、波高是造成裂流發生的重要海氣象參數。而Mucerino et al.(2021)藉由Xbeach 數值模式模擬裂流發生時的海氣象條件，並以加權分析的方式提出裂流風險分級之方法。

目前國內並未有完善的裂流監測系統，裂流案例多來自於報章媒體所刊登之意外事件，然而並非沒有意外事件的發生就無裂流現象的出現，該些案例並未能完整的描述裂流的特性。有鑑於此，本研究建置一套半自動化裂流辨識系統，藉此蒐集完善的裂流資料庫。並藉由前期研究之成果王等(2020)透過SCHISM&WWWM-III 波流耦合模式所建置之裂流數值模式，模擬不同的海氣象時空條件，探討近岸波、流特性，找出流發成因，並評析各因子對裂流發生的影響程度，以及裂流發生時之特性。

## 二、文獻回顧

裂流的發生通常位於碎浪區 (surf zone) 內，波交互作用或波浪與地形交互作用導致波浪破碎後，碎波引起的水流以垂直海岸線的方向離開碎波帶，由於裂流可以在很短的時間內將泳客帶離海岸，過去有許多學者致力於找到影響裂流的主要成因(Castelle et al., 2016)，且歸納裂流好發條件，以作為預測裂流發生與否的重要參考依據。

Wright and Short (1984) 根據近岸地形的測量結果，提出海灘類型參數  $\Omega$ ，並歸納出各種地形型態以極易發生裂流的地形型態。除了地形外，波浪破碎後的水體運動亦是影響裂流發生與否的關鍵，因此許多學者從實驗、觀測討論裂流容易發生時的波浪條件。在觀測部分，MacMahan et al. (2008)藉由 ADCP 發現裂流發生當下的波高介於 0.9 至 1.6 公尺間；Austin et al. (2012)發現裂流會隨著波高增長而增強，然當波高大於 3.0 公尺時，裂流現象則會開始消失；Leatherman (2017)以 GPS 浮球觀測，發現裂流發生當下波高介於 0.6 至 0.9 公尺時，裂流現象較不明顯。亦有部份學者以數值模式探討裂流，其結果與實驗與觀測相近，的如 Bruneau et al. (2007)以 MARS 2DH 進行模擬，發現當波高小於 1.0 公尺時，裂流現象較不明顯；Austin et al. (2012) 以 Xbeach 進行模擬，發現裂流發生當下的波高介於 0.9 至 1.2 公尺間；Mucerino et al. (2021) 以 Xbeach 進行模擬，找出裂流發生時波高介於 0.5 至 1.34 公尺、週期 4.7 至 7.0 秒，波向約垂直海岸線。

本研究統整上述相關研究，顯示裂流的發生主要與波高有關，且多發生於 0.5-1.5 公尺之間(如圖 1)。

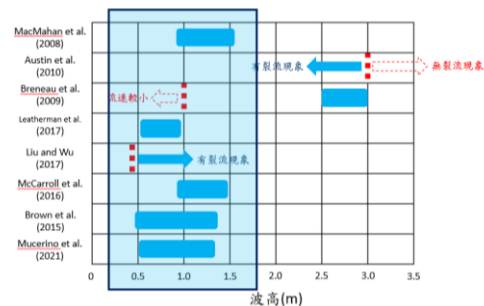


圖 1 過去文獻記載裂流發生時的波高條件

### 三、研究方法

裂流具有很大的變動性，監測站的架設範圍將會有所侷限，以全面設置監測站進行研究易造成資源過度的浪費，若能以數值模式進行模擬，便能大幅降低現場觀測的成本。本研究將採用 SHCIMS&WWM-III 波流耦合數值模式針對不同的海氣象條件進行模擬。然進行裂流模擬需要精細的地形水深，因此本研究亦會透過影像偵測的方法，建置完善的裂流資料庫，並透過與鄰近浮標站比較，統計裂流號發之波浪條件。

#### 3.1 裂流數值模式

裂流主要是因地形不均下所產生的波流交互作用所導致的，故本研究在進行裂流模擬時，採用美國 VIMS 發展的 SCHISM 三為跨尺度海洋數值模式求解二維 Boussinesq 以解析淺水方程，耦合第三代波浪數值模式 WWM-III(Wind Wave Model)，並採用非結構線性網格進行模擬。

##### 3.1.1 波浪模式

本研究分析近岸波場以 WWM-III 模式進行模擬，求解之波浪作用立平行方程式如下(1):

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \nabla_x \left( \hat{c}_x \dots \right) + \nabla_\theta \left( \hat{c}_\theta \dots \right) \quad (1)$$

式中  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$  為波浪作用力密度波譜， $E(\sigma, \theta)$  為能量密度波譜， $\sigma$  和  $\theta$  分別表示成份波之頻率與角度。

$S_{tot}$  表示波浪傳遞時可能發生之波浪能量成長、消散及非線性交互作用等物理現象支援函數，包含風引起的能量 ( $S_m$ )、深水和淺水相互作用 ( $S_{nl4}$  和  $S_{nl3}$ )、波浪所產生之白浪或破碎的能量消散 ( $S_{ds}$  和  $S_{br}$ ) 以及底床摩擦立 ( $S_{bf}$ )，公式如下

$$\frac{DN}{Dt} = S_{tot} = S_m + S_{nl4} + S_{ds} + S_{nl3} + S_{br} + S_{bf} \quad (2)$$

##### 3.1.2 海洋流體動力模式

SCHISM 控制方程式主要為求解三維淺水波方程 (3D shallow-water equations)、靜水壓方程 (Hydrostatic) 和 包式近似 (Boussinesq approximations)：

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - g \nabla \eta + F \quad (3)$$

而 SCHISM 所使用的控制方程式是在笛卡爾座標系

統下符合靜水壓假設，藉此表示三維雷諾平均 Navier-Stokes 方程，目的為計算流場之渦流現象。公式(6)中的 F 可由下式所得：

$$F = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - f k \times u - \frac{1}{\rho_0} \nabla p_A + \alpha g \nabla \varphi + R_s \quad (4)$$

當中  $k$  是  $z$  軸的單位向上(垂直向上為正)、 $f$  為科氏力參數、 $\alpha$  為有效地球彈性因子(=0.69)、 $\nu$  和  $\mu$  分別是垂直和水平渦流黏制度， $\rho_0$  是水密度， $p_A$  為大氣壓力。假設流體不可壓縮的情況下可表示如下：

$$\nabla \cdot u + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

其中  $u = (u, v)$  是水平速度、 $\eta$  為表面高程、 $\nabla = (\partial / \partial x, \partial / \partial y)$  為水平梯度因子、 $g$  為重力加速度， $w$  為垂直速度。為了求解水位高度，可藉由求解水深梯度積分之結果所得，公式如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} u dz = 0 \quad (6)$$

SCHISM 模式在進行波浪耦合數值模式計算以有限元素法 (Finite-Element methods, FEM) 進行數值解析，會先計算 WWM-III 風浪模式所產生之算輻射應力，再將波浪引起的表面動量傳遞至流體水動力模式，進而再次計算流場和水位，確保準確的考慮到波流交互作用下之情形。

##### 3.1.3 模式設置

本研究選址宜蘭縣外澳沙灘進行數值模擬，該範圍垂直外澳沙灘往外海延伸約 25 公里，沿岸方向由北至南約 30 公里的範圍，模擬時間為 2019 年 7 月 21 至 2019 年 8 月 20 一個月的時間。在往格設置上考量運算效率以及裂流尺度大小，採用非矩形槽狀網格，在沿岸區域網格設定為 10 公尺×10 公尺，採用的地形資料為水產規劃試驗所提供之 10 公尺解析度資料，而外海地區則採用科技部海洋資料庫 200 公尺解析度的水深資料設置為 1.0° (如圖 2)；而在垂直網格上基於水平網格給定之深度設置 20-30 層之混和 S 網格，以及混和曲率為  $1 \times 10^{-6}$  之 Z 網格。

在邊界波浪條件使用 WAVEWATCH III(WW III)所計算的大網格解析度波浪場以內插方式代入模式，空間解析度為 0.15°，時間解析度為 1 小時；而潮汐邊界採用 FES(Finite Element Solution)模式於 2014-2016 年計算的 8 個分朝(K1、P1、O1、Q1、

S2、M2、N2 和 K2)，並將分析結果與鄰近潮位站相比針對平均水位和潮汐相位進行微調；而氣象條件則採用氣象預測系統第二代 (Climate Forecast System Version 2, CFSv2)所計算的全球大氣資料，包括風速(velocity)、短波輻射(Short radiation)、長波輻射(Long radiation)、氣壓(pressure)、濕度(Humidity)和降雨量(precipitaion)。

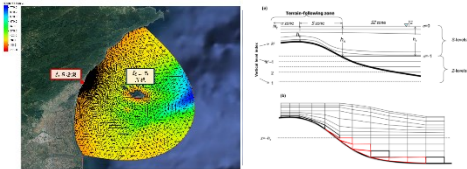


圖 2 宜蘭外澳海岸 SCHISM 模式計算網格 (左.水平網格、右.垂直網格)

另，為探討不同海氣象條件下裂流發生之情形，本研究採用 JONSWAP 能譜代入不同波高條件 (0.5m、1.0m、1.5m、2.0m、2.5m 和 3.0m)和風速(3 級風、5 級風和 7 級風)作為初始邊界條件進行 WWM-III 數值波浪場的模擬，潮汐邊界和風速已外的氣象條件同上述採用 FES 模式和 CFSv2 模式全球模式運算之結果。每組條件的模擬時間均設定為一個禮拜，最後每一小時輸出一筆資料，探討在不同波高和風速條件下裂流發生的情形，藉以評估裂流發生時之海氣象條件。

### 3.2 影像邊緣化偵測

現有衛星與攝影機影像量過於龐大，為此本研究建置一套人工半自動化系統進行判讀判讀，將衛星影像進行數位處理，量化為可用的資訊，該系統以「小波轉化邊緣化偵測法」作為核心，再搭配多種影像處理，包含影像灰階、影像強化、影像二值化等技術，概略挑選出疑似裂流之影像案例，再經人為檢視判定是否有裂流的發生。

本研究為增加裂流影像判定之可信度，參考 Maryan(2013)所提出之原則，以及 Wright and Short(1984)認為之裂流成因，以碎波帶斷裂處作為裂流判定之基礎上，再額外提出兩項原則

1. 裂流發生位置彼此間須大於 40 公尺
  2. 若無顯著的氣象災害(颱風，海嘯)造成嚴重的地形變遷，短時間內裂流應有復發之情形
- 本研究透過小波轉換邊緣化偵測進行碎波帶範

圍辨識該技術是將灰階影像視為一個二維訊號矩陣  $f(x, y)$ ，利用快速傅立葉轉換 (FFT) 和逆二維快速傅立葉轉換演算法計算其  $F(\alpha, \beta)$  的傅立葉轉換和小波轉換  $Wf(\zeta, s)$ ，其二維小波轉換定義為

$$\begin{aligned}
 Wf(\zeta, s) &= \left\langle f(x), \psi_{\zeta, s}(\cdot) \right\rangle \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{\zeta, s}(\cdot) dx dy \\
 &= Wf(\zeta, \eta, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) - \psi \left( \frac{\cdot}{s} \right) dx dy
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

並利用二維迴旋定理可將影像的二維小波轉換表示為與二維迴旋積分，並由共軛複數性可得到，並從中取出逆二維傅立葉轉換，將去除係數等於 0 之結果便可獲得邊緣偵測之結果，表示為

$$\begin{aligned}
 \Psi_{\zeta, s}(\cdot, \cdot, \beta) &= F_{\alpha}^{-1} F_{\beta}^{-1} \{F_x F_y [Wf(\zeta, s)]\} \\
 &= \left( \frac{1}{2\pi} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\alpha) s \Psi(s\alpha) \exp(i\alpha\zeta) \exp(i\beta\eta) d\alpha d\beta
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

利用上述所提及之理論，針對衛星航拍影像進行五次影像邊緣畫偵測，於第二次疊代結果可準確的辨識出碎波帶的範圍，同時可以初步辨識出碎波帶是否有斷裂。最後，本研究挑選 30 筆以人工辨識之裂流影像資料，將裂流出現位置附近影像進行分群並計算其特徵值，置三種不同大小之「裂流影像遮罩視窗」(30×30、40×40 和 50×50)，將裂流影像遮罩以每 15 度選轉一圈，針對邊緣化偵測影像比對，若比對結果程度大於 0.8 時，將該位置記錄且視為裂流發生之區域，本研究建立之半自動化裂流影像辨識系統過程如圖 3。

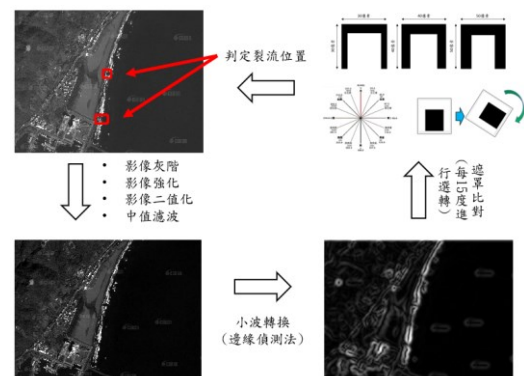


圖 3 半自動化裂流影像判釋流程圖

## 四、結果與討論

### 4.1 數值模式結果

#### 4.1.1 模式驗證

本研究已於去年(2020年)完成裂流模式模擬建置，今年僅更改邊界條件帶入之方式，從原先以龜山島風場資料作為整個面的造波風場，改以帶入 CFSv2 全球模式預測風場資料內插帶入，故同先前研究，本研究採用龜山島資料浮標量測之波浪資料進行驗證。

由圖 4 結果顯示，其波高和週期模擬結果與時測資料趨勢相當一致，僅在颱風期間 8 月 8 日至 9 日模式有低估之情形，主要是由於輸入的為預測風場與實際風場有異所導致的，而週期的 RMSE 分別為 0.1315 和 0.2649。故表示該 SCHISM-WWM III 波流耦合模式可應用於外澳附近海域，重現近岸流場之演變。

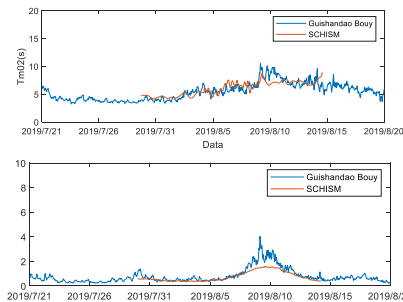


圖 4 SCHISM 模式模擬波浪參數與龜山島資料浮標實測之比對圖

#### 4.1.2 裂流模擬

從過往對裂流文獻中，裂流的發生主要是由於波浪於近岸所產生之輻射應力所引致的，而風則是會影響到波浪的消散與成長，甚至在特定的時空環境下風更是可以牽引流場的變化。因此，本研究透過 SCHISM&WWM-III 模擬不同的波高與風速條件下，裂流的發生情形，並根據流速較大的範圍判斷其流向，若流向為遠離海岸則將其視為裂流。

從結果表 1 顯示，裂流的發生並非波浪愈大或釋風速愈大就會發生，而是有規則性的在一個區間內。從波高方面進行探討可發現，裂流發生時波高多屆於在 1.0 公尺-2.5 公尺間，在波高較小時(約小

於 0.5 公尺時)，近岸流場仍由潮流所主導，反之，當波高較大時(約 3.0 公尺時)，由於近岸波浪能量過大，使得近岸流場整體呈現相當混亂的情況，以無法明顯辨識出流場大致的方向(如圖 5)。而從風速結果進行探討，近岸流場受風趨流的影響並不大，風的作用主要是在於波浪成長上的影響，當波高較小時(約 0.5 公尺時)，在風速較大為 7 級風的情形下仍有短暫的裂流發生，而在波高為 2.5 公尺時，風速為 7 級風也會導致波浪能量過大，因而導致流場混亂情形。

表 1 不同海氣象條件裂流發生與否

	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m
3 級風	X	X	O	O	O	O
5 級風	X	O	O	O	O	X
7 級風	O	O	O	O	X	X

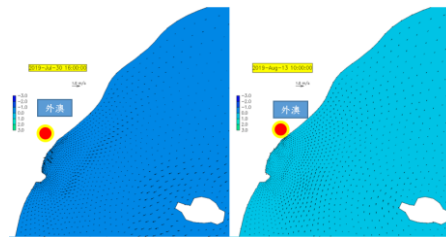


圖 5 不同海氣象條件近岸流場分布情形 (左:波高=3m 7 級風、右:波高=0.5 公尺 3 級風)

### 4.2 影像辨識結果

#### 4.2.1 結果驗證

本研究透過計算準確率和精確率，藉以檢視該系統是否能精準的判別是否有疑似裂流影像。結果如表 2 所示，由人工判釋 100 筆疑似裂流影像中，系統判釋有裂流的影像有 91 筆，無裂流影像有 9 筆；而人工判釋為平時影像，經系統判釋後有 22 筆是有裂流的影像，而 78 筆是沒有裂流的影像，故該系統之準確率為 84.5%，精確率則為 80.5%。

表 2 半自動化裂流影像辨識結果

	疑似裂流影像 (人工判識)	平時影像 (人工判識)
裂流影像 (系統判識)	91 筆/100 筆	9 筆/100 筆
一般影像 (系統判識)	22/100 筆	78/100 筆

該系統可大致將裂流影像擷取出來，然而精確率有較低的情形，顯示該系統在判定裂流上有高估

之情況。另，本研究挑選 20 個裂流影像案例進行分析，由圖 6 顯示該系統僅能針對較明顯之碎波帶區域進行辨識。然上述兩不足處均可藉由半自動化分析後，由人工方式檢視進行補足，故本研究認為該系統已可達到作業化程度，大幅降低影像分析所需之時間和人力。

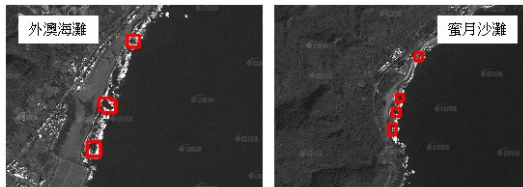


圖 6 半自動化裂流影像判釋結果

#### 4.2.2 裂流發生時之海氣象特性

目前本研究以從現有影像資料庫中分析五年以上(2016年至2018年)的影像裂流案例，主要探勘範圍為台灣東北角海域和西南部海域，資料來源為中央大學太遙中心和Google Earth衛星航拍影像，共計432筆資料、34處海灘，包含外澳沙灘、蜜月灣、福隆沙灘、黃金海岸等著名遊憩景點。為了解該些裂流影像案例發生當下之海氣象條件，本研究參考Cavaleri et al.(2012)的研究成果，以浮標位置 25公里內之海氣象特徵，均以該浮標資料作為代表，經統計結果顯示，示性波高和週期較有明顯的規律性，當波高介於0.5m-1.5m的案例有131件佔約86%，裂流案例發生時之示性波高整體平均約為0.96m(如圖10)，而平均週期則位於4.5秒至7.5秒間，尖峰周期則位於6秒至10秒(如圖7)。

此外，本研究亦分析風向波向差，發現有 5 個以上的案例兩方向差達 140 度，該現象本研究認為是由於風浪關係和風趨流成長關係有所抵觸所造成的，風會造成波能的增加使得輻射應力更加明顯，然風亦會產生風趨流，使得原本應向外海流的流廠受到阻礙，因而使得離岸流的現象減弱。

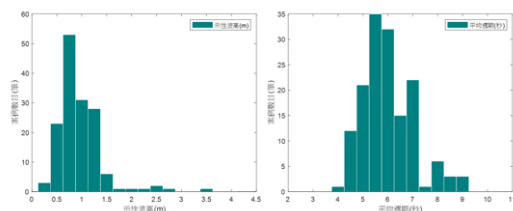


圖 7 裂流發生時波高與週期分布圖(左:波高分布圖、右:週期分布圖)

## 五、結論與建議

本研究利用 SCHISM&WWM-III 波流耦合模式模擬不同海氣象條件近岸流場分布情形，以及建置一套半自動化裂流影像辨識系統，蒐集完善的裂流影像資料庫，透過上述兩方法分析裂流發生時之海氣象特性。綜上所述，本研究認為在有裂流潛勢的地形下，波高、週期和風速是主要發生裂流的原因，當波高介於 0.5m-1.5m 和週期介於 4.5 秒-7.5 秒間是最容易發生裂流的條件，且當波高越大裂流的現象會愈加明顯，然在波高大於 3 公尺時會因為近岸流場的混亂使得裂流現象的消失，而風速在適當增加波能的情況下亦會造成裂流的發生，若風速過大則會導致使得海流獸風趨流所主導，則亦可能造成裂流的現象消失。

## 謝誌

本論文係中央氣象局研究計畫「海岸裂流監測與預警技術研究(1/3)」之研究成果，承蒙中央氣象局經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. Longuet-Higgins, M.S., and Stewart, R.W. 1964. Radiation Stresses in Water Waves; A Physical Discussion, with Applications[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 11(4): 529-562.
2. Wright, L.D., and A.D. Short. 1984. Morphodynamic variability of surfzone and beaches : a synthesis. Marine Geology, 56, 93-118.
3. 林雪美、黃翊翔、沈淑敏，2009，台灣東北部福隆海灘類型和裂流分布之長期變動研究，第十期地理研究，第 47-65 頁。
4. 王敘民、邱啟敏、梁立翰、董東璟(2020) 應用 SCHISM 模式模擬裂流時空分布，第 42 屆海洋工程研討會，國立臺灣海洋大學。



## 臺灣海域作業化水質模式建置

江朕榮<sup>1\*</sup> 許弘莒<sup>2</sup> 陳陽益<sup>3</sup> 楊文昌<sup>4</sup> 林昆毅<sup>6</sup> 李孟學<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup>成功大學水工試驗所研究助理

<sup>2</sup>中山大學海洋環境及工程學系副教授

<sup>3</sup>中山大學海洋環境及工程學系特聘教授

<sup>4</sup>國家海洋研究院主任

<sup>5</sup>國家海洋研究院副研究員

<sup>6</sup>國家海洋研究院助理研究員

### 摘要

科技部計畫：

近年來國人日益重視各式戶外休閒活動，休閒活動區域也由陸地擴及濱海地區及海洋，民眾從事水域遊憩活動的項目及人次有越來越多之趨勢，活動範圍也愈來愈廣，如潛水、風帆等較為遠域的水上活動。然國內對於海域觀光遊憩熱區之水質環境動態資訊掌握仍缺乏，因此無法提供民眾即時行前水質資訊，以確保民眾親海安全。本文係利用數值模式 ROMS(Regional Ocean Model System)配合巢狀網格，建置由西北太平洋範圍至近岸重點海域，包括澎南海域、北部海域、東北角海域及恆春半島海域之作業化水質模式，以期未來能提供民眾水上活動之參考資訊。

關鍵詞：作業化模式、水質模式、潮位、海流、葉綠素 a、懸浮固體物

## The Development of an Operational Water Quality Model of Taiwan Ocean

Chen-Jung Chiang<sup>\*</sup>, Hung-Chu Hsu, Yang-Yih Chen, Wen-Chang Yang, Kun-Yi Lin, Meng-Syue Lee

<sup>\*</sup> Research Assistant, Division of Coastal Environment and Resources, Tainan Hydraulics Laboratory

### ABSTRACT

In recent years, people have paid more and more attention to all kinds of outdoor leisure activities. The area of leisure activities has also expanded from land to coastal areas and oceans. There is an increasing trend for people to engage in water recreational activities and the number of people, and the scope of activities is also expanding. Diving, windsurfing and other remote water activities. However, there is still a lack of domestic information on the water quality and environmental dynamics of sea tourism and recreation hotspots, so it is impossible to provide people with real-time pre-departure water quality information to ensure people's safety in the sea. This paper uses the numerical model ROMS (Regional Ocean Model System) with nested grids to establish operational water quality from the Northwest Pacific to the coastal area, including the Pengnan, the northern and the nirseastern of taiwan, and the Hengchun Peninsula area. The model is expected to provide reference information for the public on water activities in the future.

Keywords: Operational model; Water quality model; Tide; Current; Chlorophyll a; Suspended solids

## 一、前言

臺灣四周環海，行政院推動「向海致敬」之海洋政策，以鼓勵民眾「淨海、知海、近海、進海」，透過「開放」、「透明」、「服務」、「教育」及「責任」五大原則實踐開放海洋，讓國民走向海洋。

近年來國人日益重視各式戶外休閒活動，休閒活動區域也由陸地擴及濱海地區及海洋，雖然受到季節影響，臺灣可從事水域遊憩活動的區域仍有多樣選擇，從相關的活動協會亦相繼成立，民眾從事水域遊憩活動的項目及人次有越來越多之趨勢，活動範圍也愈來愈廣，如潛水、風帆等較為遠域的水上活動。然國內對於海域觀光遊憩熱區之水質環境動態資訊掌握仍缺乏，因此無法提供民眾即時行前水質資訊，以確保民眾親海安全。

過去由於電腦計算能量不足，要利用高解析度水動力模式搭配水質模式，即時模擬海域水質變化是相當困難的，同時也缺乏即時的量測資料進行比對及校驗模式。近年來電腦主機的計算能力大幅提昇，同時運行高解析度水動力模式搭配水質模式的可行性變高了，另外自動化的水質監測儀器發展也愈來愈完善，對於水質的即時資訊取得也變的較為容易。

基於以上原因，本研究發展高解析度水動力模式搭配水質模式，並利用國家海洋研究院施放的水質觀測浮標之實測資料進行模式的校驗，以期未來能提供民眾親海的資訊參考，同時也能作為後續相關防、救災的應用。

## 二、研究方法

本研究利用 ROMS(Regional Ocean Model System) (Wilkin et al., 2005 ; Di Lorenzo et al., 2007 ; Warner et al., 2008)為基礎，先建立三維水動力數值模式。ROMS 由 Arango (Rutger Univesity) 、Ezer (Princeton University)及 Shchepetkin (UCLA)所領導發展，經費則是由 Office of Naval Research (ONR)及 Ocean Modeling and Prediction Program 所贊助。為自由表面計算模式系統，垂直座標使用  $s$  座標系統，且適用範圍相當廣的模式，其符合 Earth System Modeling System 架構，可以很容易的與符合此架構的模式進行耦合運算。ROMS 的動態核心包含了四個模式系統，分別是 nonlinear (NLM)、tangent

linear(TLM)、representer tangent linear(RPM)及 adjoint (ADM)，此四個模式系統可以藉由不同的驅動方式分開或者同時進行運算。除了上述四個模式系統，ROMS 在資料同化的也提共了兩種狀態的計算方式，分別為 Strong (S4DVAR, IS4DVAR)及 Weak (W4DAVR)，因此 ROMS 在各種狀況的使用是相當靈活的。ROMS 在世界也有許多使用者用來模擬，如菲律賓群島區域(Han et al., 2009)、阿拉斯加灣(Hermann et al., 2009)、墨西哥灣流(Warner et al., 2010 ; Xue, 2013)、韓國海域(Lim et al., 2013)、加州杭亭頓海岸(Kumer et al., 2015)、南海(Wang et al., 2015)等。

由於，影響水質的相關物質如營養鹽、浮游生物、溫度、鹽度...等是隨著水動力系統而變化的。因此待水動力系統模擬穩定後，再加入水質模組。本研究採用的水質模式是 ROMS 內的 Fennel 生態模組(Fennel et al., 2006a、2008a)建置，Fennel 模組是以氮循環為基礎發展的水質模式，適用於海洋環境之使用。

本文主要著重於澎南海域、北端海域、東北角海域及恆春半島等四個海域建置作業化水質，然其水動力條件需藉由更大尺度的模式來提供，因此需先建置更大範圍之水動力模式，考量未來作業化的時效性，將整個作業化水質模式分三個階段執行，說明如下：

第一階段為建置西北太平洋尺度海流模式(大尺度)，範圍如圖 1，經度 105-140E，緯度 2-34N，模式解析度為 5 分，水平網格數預計為 434\*386，垂直分層為 40 層，使用的地形資料為 etopo5 之地形網格資料。

第二階段為建置臺灣周圍海域尺度海流模式(中尺度)，範圍如圖 2，經度 119-123E，緯度 21-26N，模式解析度為 1 分，水平網格數預計為 242\*306，垂直分層為 40 層，使用的地形為 etopo1 之地形網格資料。

第三階段為建置四海域海流及水質模式(小尺度)，範圍如圖 3，模式解析度為 200 公尺，水平網格數澎南海域預計為 194\*210，北端海域預計為 130\*114，東北角海域預計為 162\*194，恆春半島海域預計為 194\*162，垂直分層預計為 20 層，使用的地形為海洋學門 200 公尺地形網格資料。

大尺度及中尺度僅建置水動力系統,提供流速、水位、溫度及鹽度,小尺度則再提供溶氧、葉綠素 a 濃度及懸浮固體物濃度等水質項目。

模式邊界區動力部分,主要於大尺度邊界輸入,臺灣海域狀況除了會受到天文潮汐的影響,也會受到大洋洋流的影響,除了利用 OTFS (OSU Tidal Prediction Software) 來建立天文潮位邊界,輸入常見的全日潮及半日潮外 (K1、O1、P1、Q1、M2、S2、N2、K2),也利用更大尺度之洋流模式資料輸入邊界,使用 HYCOM (HYBRID COORDINATE OCEAN MODEL) 全球模式之結果納入洋流的影響,中尺度及小尺度之邊界條件則銜接上一層之模式結果。

氣象驅動力使用中央氣象局的 WRF 大氣模式資料,可提供解析度 15 公里及 3 公里之風場、氣壓場及相關熱通量資料,每日可提供四次資料(00、06、12 及 18 時刻),每次 84 小時預測資料。圖 5 為中央氣象局 WRF 氣象場之範圍圖,黑色框為 15 公里解析度,紅色框為 3 公里解析度。

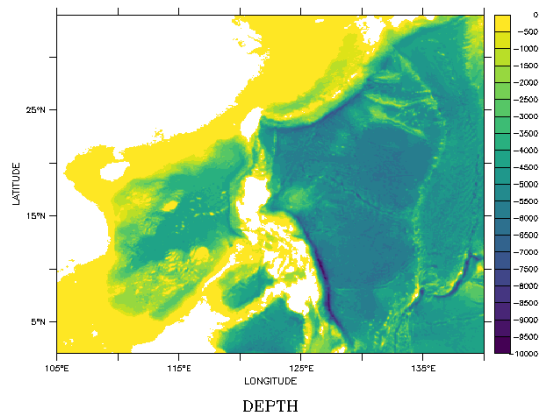


圖 1 西北太平洋尺度海流模式模擬範圍及地形水深示意圖

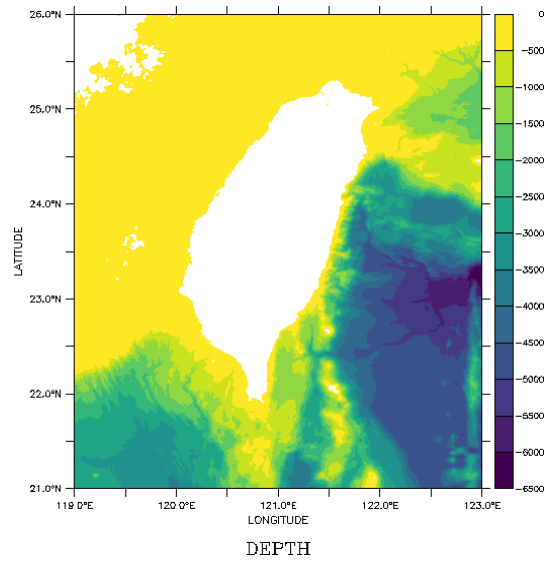
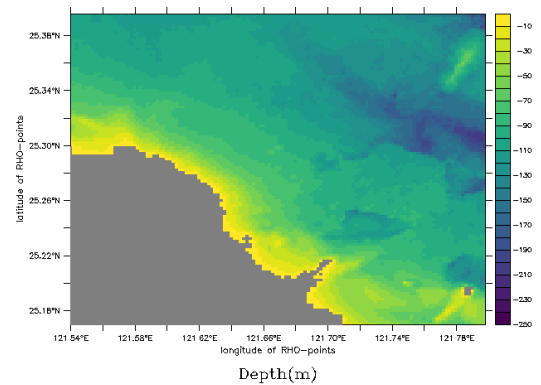
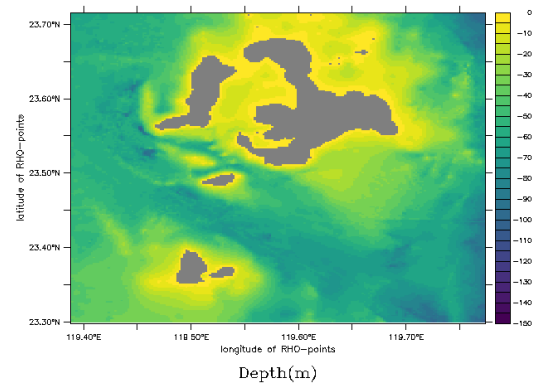


圖 2 臺灣周圍海域尺度模擬範圍及地形水深示意圖



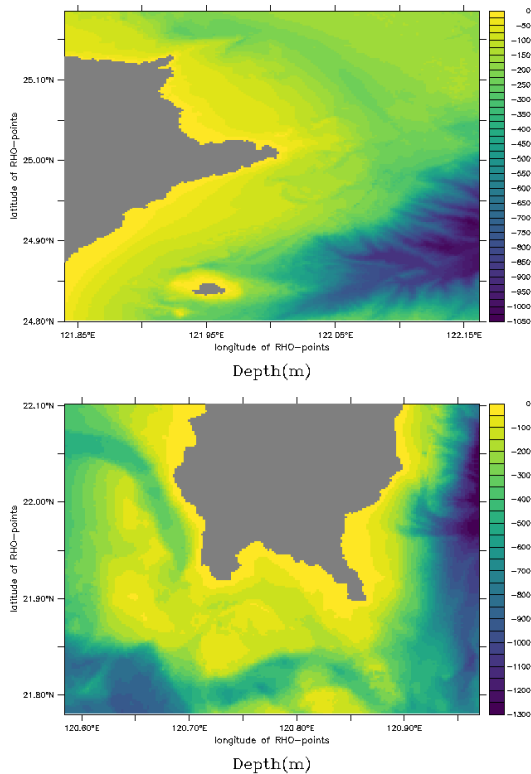


圖 3 四海域海流及水質模式模擬範圍及地形水深示意圖(依序為澎南海域、北部海域、東北角海域及恆春半島海域)

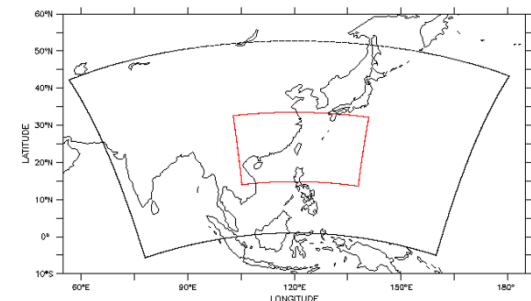


圖 5 中央氣象局 WRF 氣象模式之計算範圍(黑：15 公里解析度，紅：3 公里解析度)

### 三、初步成果

本研究目前已完成建置大尺度及中尺度之水動力模式、小尺度(北端海域、東北角海域、恆春海域及澎南海域)之水質模式。利用收集到的實測資料，先進行大尺度及中尺度之水位時序資料比對。目前收集 2021 年 1 月至 5 月四海域之測站，澎南海域為馬公、七美及東吉島，北端海域為麟山鼻、龍洞、基隆及淡海，東北海域為烏石、蘇澳及福隆，恆春海域為東港、後壁湖及小琉球等測站，進行水位比

對。

圖 6 至圖 11 為大尺度及中尺度模式，2021 年 1 月模式水位與實測水位比對時序圖，圖中顯示模式水位結果與實測水位相符合。

表 1 及表 2 為大尺度及中尺度模式水位與實測水位之 RMSE(均方根誤差)計算。表中結果顯示澎南海域測站，大尺度模式結果介於 0.09-0.11 公尺，以東吉島 2 月份結果最大，為 0.11 公尺，中尺度模式結果則介於 0.083 至 0.1 公尺，以馬公 2 月份結果最大，為 0.1 公尺；北端海域測站，大尺度模式結果介於 0.092-0.13 公尺，以龍洞 2 月份結果最大，為 0.13 公尺，中尺度模式結果則介於 0.087 至 0.12 公尺，以龍洞 2 月份結果最大，為 0.1 公尺；東北海域測站，大尺度模式結果介於 0.094-0.12 公尺，以福隆 1 月份結果最大，為 0.12 公尺，中尺度模式結果則介於 0.092 至 0.109 公尺，以福隆 1 月份結果最大，為 0.109 公尺；恆春海域測站，大尺度模式結果介於 0.101-0.121 公尺，以後壁湖 2 月份結果最大，為 0.121 公尺，中尺度模式結果則介於 0.093 至 0.112 公尺，以後壁湖 2 月份結果最大，為 0.112 公尺。整體 RMSE 結果，兩個模式最大誤差約為 0.1 公尺，顯示水位結果與實測資料相符合。

圖 12 為四個重點海域之日平均表層葉綠素 a 濃度平面分布圖。

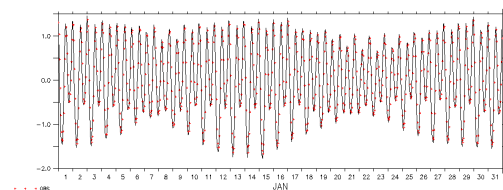


圖 6 大尺度模式馬公測站 2021 年 1 月模式與實測資料比對時序圖

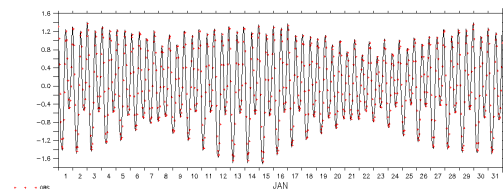


圖 7 中尺度模式馬公測站 2021 年 1 月模式與實測資料比對時序圖

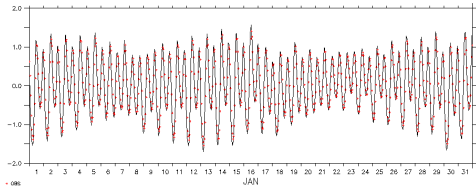


圖 8 大尺度模式麟山鼻測站 2021 年 1 月模式與實測資料比對時序圖

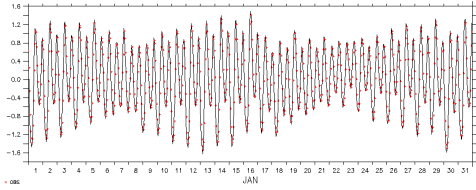


圖 9 中尺度模式麟山鼻測站 2021 年 1 月模式與實測資料比對時序圖

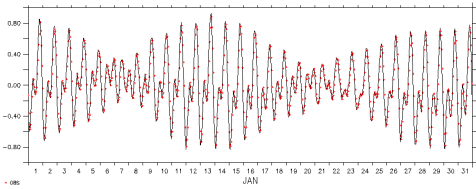


圖 10 大尺度模式後壁湖測站 2021 年 1 月模式與實測資料比對時序圖

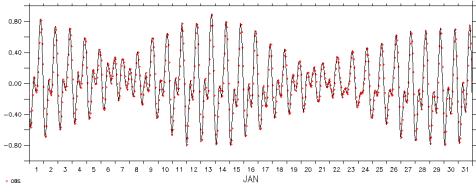


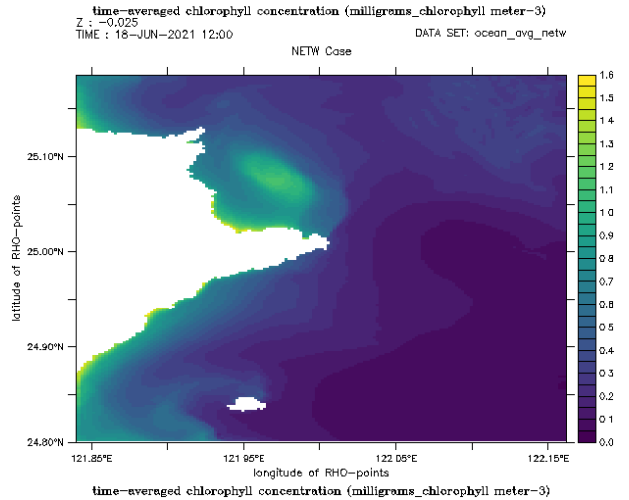
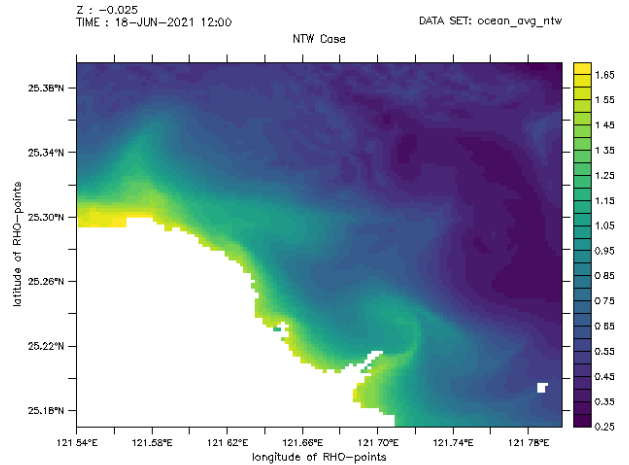
圖 11 中尺度模式後壁湖測站 2021 年 1 月模式與實測資料比對時序圖

表 1 大尺度模式模式水位與實測水位 RMSE 統計

海域	測站	大尺度模式(公尺)				
		1月	2月	3月	4月	5月
澎南海域	馬公	0.101	0.099	0.091	0.092	0.093
	七美	0.11	0.1	0.09	0.095	0.094
	東吉島	0.102	0.11	0.09	0.099	0.093
北端海域	麟山鼻	0.12	0.106	0.095	0.01	0.096
	龍洞	0.11	0.13	0.102	0.011	0.101
	基隆	0.109	0.121	0.1	0.096	0.098
	淡海	0.103	0.098	0.092	-	-
東北海域	烏石	0.11	0.106	0.094	0.098	0.096
	蘇澳	0.099	0.103	0.102	0.099	0.094
	福隆	0.12	0.099	0.098	0.098	0.096
恆春海域	後壁湖	0.11	0.121	0.105	0.1	0.099
	小琉球	0.109	0.106	0.101	0.099	0.093

表 2 中尺度模式模式水位與實測水位 RMSE 統計

海域	測站	中尺度模式(公尺)				
		1月	2月	3月	4月	5月
澎南海域	馬公	0.095	0.01	0.083	0.085	0.086
	七美	0.089	0.093	0.088	0.084	0.087
	東吉島	0.096	0.099	0.09	0.091	0.09
北端海域	麟山鼻	0.11	0.1	0.091	0.099	0.094
	龍洞	0.103	0.12	0.094	0.098	0.094
	基隆	0.101	0.116	0.089	0.09	0.093
	淡海	0.097	0.095	0.087	-	-
東北海域	烏石	0.1	0.102	0.092	0.095	0.093
	蘇澳	0.093	0.101	0.1	0.095	0.092
	福隆	0.109	0.096	0.101	0.093	0.095
恆春海域	後壁湖	0.104	0.112	0.097	0.096	0.097
	小琉球	0.106	0.111	0.093	0.091	0.096



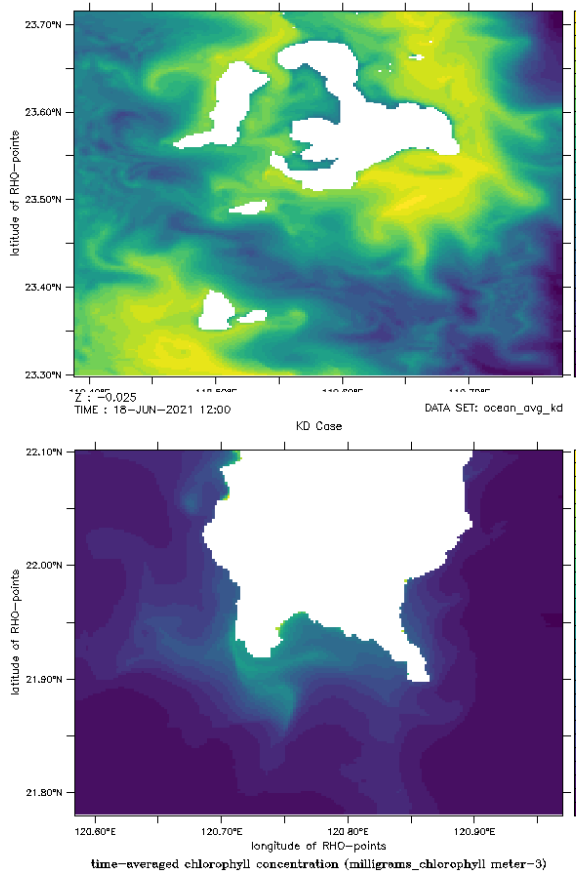


圖 12 四個海域水質模式之表層葉綠素日平均濃度平面分布(依序為澎南海域、北部海域、東北角海域及恆春半島海域)

### 三、結論

本文目前已完成大尺度及中尺度的水位比對成果，也完成四個重點海域水質模式建置，後續仍須使用實測資料，進行海流、海溫、鹽度、葉綠素 a 濃度、溶氧及懸浮固體物濃度之比對。

### 謝誌

本文係國家海洋研究院「臺灣海域作業化水質模式建置委託專業服務案」之相關研究成果，承蒙國家海洋研究院提供協助，使本研究得以順利完成，僅致謝忱。

### 參考文獻

1. 24. Di Lorenzo, E., Moore A.M., Arango H.G., Cornuelle B.D., Miller A.J., Powell B., Chua

B.S., and Bennett A.F. (2007) Weak and Strong Constraint Data Assimilation in the inverse Regional Ocean Modeling System (ROMS): development and applications for a baroclinic coastal upwelling system, *Ocean Modelling*, Volume 16 (3–4), 2007, 160-187

2. Fennel, K., J. Wilkin, J. Levin, J. Moisan, J. O'Reilly, and D. Haidvogel (2006) Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget, *Global Biogeochem. Cycles*, 20, GB3007

3. Fennel, K., J. Wilkin, M. Previdi, R. Najjar (2008) Denitrification effects on air-sea CO<sub>2</sub> flux in the coastal ocean: Simulations for the Northwest North Atlantic, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 35, L24608

4. Han W., Moore A.M., Levin J., Zhang B., Arango H., Curchiter E., Di Lorenzo E., Gordon A. L., and Lin J. (2009) Seasonal surface ocean circulation and dynamics in the Philippine Archipelago region during 2004–2008, *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 47(1-3), 114-137

5. Hermann A. J., Hinckley S., Dobbins E. L., Haidvogel D. B., Bond N. A., Mordy C., Kachel N., and Staben P. J. (2009) Quantifying cross-shelf and vertical nutrient flux in the Coastal Gulf of Alaska with a spatially nested, coupled biophysical model, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(24), 2474-2486.

6. Kumar, N., Feddersen F., Uchiyama Y., McWilliams J., and O'Reilly W. (2015) Midshelf to Surfzone Coupled ROMS–SWAN Model Data Comparison of Waves, Currents, and Temperature: Diagnosis of Subtidal Forcings and Response, *Journal of Physical Oceanography* 45(6), 1464-1490.

7. Warner, J. C., Sherwood C. R., Signell, R. P., Harris, C. K., and Arango H. G. (2008) Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model, *Computers & Geosciences* 34, 1284-1306.

## C. 港灣、海域及海岸工程實務





# 運用視覺化電子地圖整合港灣環境資訊之 輔助決策模式(II)

林騰威<sup>1</sup> 劉清松<sup>2</sup> 林珂如<sup>3</sup> 林雅雯<sup>4</sup>

<sup>1</sup>數位地球科技有限公司總經理

<sup>2</sup>交通部運輸研究所研究員

<sup>3</sup>數位地球科技有限公司工程師

<sup>4</sup>交通部運輸研究所科長

## 摘要

港灣環境資訊系統為一整合 9 個港區及海域海氣象資訊與港灣環境資訊之平臺，為使即時觀測或模擬預測資訊能提供更廣大使用者的運用，藉由地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)圖臺呈現各種港灣相關的環境資訊，讓數據具有地域化(Geographical Distribution)的顯示，並透過視覺化的技術，且將數據轉化為淺顯易懂的資訊。圖臺可套疊海氣象觀測資訊、海氣象模擬資訊、颱風資訊、海象模擬分佈圖、大氣腐蝕資訊、介接中央氣象局衛星雲圖與雷達回波圖等，透過圖形化的呈現，以及粒子特效顯示風向、波向、流向的數值模擬預測結果，讓使用者可藉由 GIS 之地域化顯示，快速瞭解港區海域的海氣象變化，輔助決策相應的措施或行動。

關鍵詞：港灣環境資訊系統、視覺化輔助決策圖臺

## Using Visual Electronic Maps to Integrate the Harbor Environmental Information as an Auxiliary Decision- making Model(II)

Teng-Wei Lin<sup>1</sup> Ching-Sung Liu<sup>2</sup> Ko-Ju Lin<sup>3</sup> Ya-Wen Lin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>General Manager, Geo3DEarth Systems Co., Ltd.

<sup>2</sup>Researcher, Institute of Transportation, Ministry of Transportation and Communications

<sup>3</sup>Engineer, Geo3DEarth Systems Co., Ltd.

<sup>4</sup>Section Chief, Institute of Transportation, Ministry of Transportation and Communications

## ABSTRACT

The Harbour Environment Information Website is a platform that integrates all kinds of marine meteorological information with environmental information in nine harbors and surrounding oceans. In order to provide real-time observation data and simulation information, the webpage uses the Geographic Information System (GIS) map platform to display meteorological information. The map overlays with observation data, simulation data, typhoon information, corrosion data, satellite images, radar return images, etc. It also exhibits wind direction, wave direction, and flow direction via particle special effects. Users can quickly understand the changes of regional marine meteorology of port by GIS map. This system assists commander to do the decision or policy making.

Keywords: Harbor environment information system; Visual auxiliary decision-making platform

## 一、前言

臺灣四周環海，海洋資源豐富，漁業活動以及航運發展均需長期可靠之海氣象資料作為依據。交通部運輸研究港灣技術研究中心(以下簡稱運研所港研中心)在 9 商港(包括臺北港、基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、布袋港、安平港、高雄港及馬祖港)設置許多即時海氣象觀測站，蒐集即時風力、波浪、潮位、海流、大氣腐蝕、水下腐蝕等資料，至今已累積近四十年，同時也發展出海象模擬預測系統，提供波浪、潮位、海流資訊給各界參考，讓相關管理人員即時掌握必要的海氣象資訊。

港灣環境資訊系統所提供資料查詢與應用，考量到多元性、廣泛性、便利性，讓一般民眾、港灣管理機關、國內外船舶業者及相關人員能夠快速地取得所需資訊，隨著資訊科技日益發展，可透過視覺化的技術，且將數據轉化為淺顯易懂的資訊。本研究延續劉等人(2020)開發之視覺化圖臺進行精進，除了於 Web GIS 提供海氣象觀測資訊、海氣象模擬資訊(以粒子特效顯示風向、波向、流向的數值模擬預測結果)、颱風資訊、及海象模擬分佈圖之外，今年新增大氣腐蝕與水下腐蝕資訊的查詢與呈現。此外也介接中央氣象局衛星雲圖、雷達回波圖、溫度分布圖、累積雨量圖等，以及環保署的空氣品質(AQI 與 PM2.5)、紫外線指數等，讓本系統能夠提供海氣象相關的全面性資訊，以利相關管理人員即時掌握必要的海氣象資訊，輔助其決策及應變作為。

## 二、研究方法

本網頁開發主要使用 ASP.NET 為主並搭配其他相關前端語法如 HTML5、JavaScript、jQuery、CSS 及 XML 等，後端語法以 VB.NET 為主，資料庫系統使用 Microsoft SQL Server。在 GIS 的部分是使用 OpenLayers，為一個用於開發 WebGIS 用戶端的 JavaScript，其建立 GIS 資料的方法符合 OpenGIS 的 WFS 和 WMS/WMTS 規範標準，支援介接國土測繪中心、OpenStreetMap 的地圖服務。

本系統藉由 Web GIS 將現場觀測與海氣象模擬資料整合顯示，讓使用者可以快速掌握即時及未來 48 小時海氣象相關資訊。

系統使用開放源 OpenLayer 為展示平臺，底圖

介接內政部國土測繪中心電子地圖與正射影像，以及開放源 OpenStreetMap。為使圖臺更能表現海象之方向特性，利用開放源 WindLayer.js 元件，以粒子特效展示風向、波向及流向。

系統介接的資料包含觀測與模擬資料，觀測資訊包含中央氣象局開放資料及港灣環境資料庫之海象資訊與颱風資訊；模擬資料為運研所港研中心「臺灣近岸海象預報系統」(TaiCOMS)產製之海象模擬資料，使用中央氣象局提供之風場資料，以數值模式模擬未來 48 小時內的海氣象環境變化。

TaiCOMS 系統產製之海氣象模擬資料為 ASCII 文字檔案，為了能夠符合圖臺所需的格式，以轉換程式將檔案轉換成 JSON 格式，此外亦將其網格資料以開放源 GMT(v6)繪製該時刻的色階渲染圖，以利套疊在圖臺上展示使用。

表 1 為系統提供使用者之圖層，透過 GIS 的圖層切換，可針對所需的資訊進行綜合性瀏覽，可做為決策判斷的參考。

表 1 系統圖層

主選單	次選單
觀測資訊	1.風力 2.潮汐 3.波浪 4.海流
數值模擬 (色階圖與 粒子動畫)	1.風速/風向 2.波高/波向 3.流速/流向 4.潮位
數值模擬 (平面分佈 圖)	1.波高分佈圖 2.波浪週期分佈圖 3.波向分佈圖 4.中尺度暴潮模式流速向量場分佈圖
開放資料 介接	1.氣象雲圖 2.雷達回波圖 3.溫度分佈 4.累積雨量 5.空氣品質(AQI、PM2.5) 6.紫外線指數
颱風 資料庫	1.近期颱風 2.歷史颱風
腐蝕環境 資料庫	1.螺旋狀金屬腐蝕試驗 (1)碳鋼腐蝕速率試驗色階圖 (2)鋅腐蝕速率試驗色階圖 (3)銅腐蝕速率試驗色階圖 (4)鋁腐蝕速率試驗色階圖 (5)濕潤時間百分比試驗色階圖 (6)氯沉積速率試驗色階圖

	(7)二氧化硫沉積速率試驗色階圖 2.試驗地點 (1)氯鹽沉積試驗 (2)二氧化硫沉積試驗 (3)水下腐蝕 (4)大氣板狀金屬腐蝕 (5)大氣螺旋狀金屬腐蝕
底圖來源	1.底圖來源 (1)國土測繪中心-通用電子地圖 (2)國土測繪中心-通用電子地圖(灰階) (3)國土測繪中心-正射影像(混和) (4)OpenStreetMap 2.港區範圍圖 (1)基隆港整體規劃(110年) (2)臺北港整體規劃(110年) (3)臺中港整體規劃(110年) (4)安平港整體規劃(110年) (5)高雄港整體規劃(110年) (6)花蓮港整體規劃(110年) (7)蘇澳港整體規劃(110年)

### 三、研究成果

系統採響應式 (Responsive Website Design, RWD) 網頁，無論使用電腦、平板或手機都能夠獲得最佳的使用畫面，如圖 1 所示。

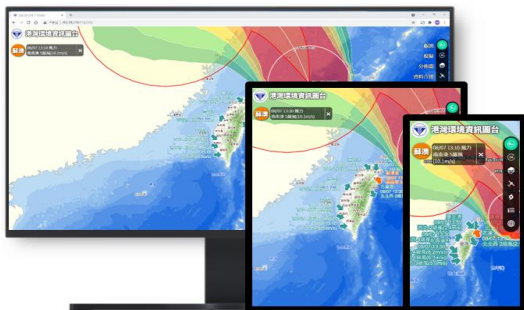


圖 1 圖臺採用 RWD 網頁

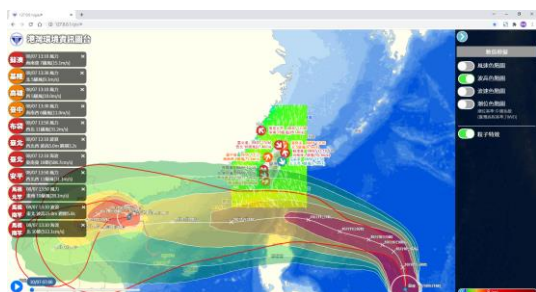


圖 2 電腦版顯示畫面

系統畫面如圖 2 所示，右側為工具選單，可開

關圖層，右下角為色階變化代表值，當海象超過設定警戒值時，畫面左側將顯示告警氣泡，畫面中呈現模擬的色階圖，左下角為時間軸，可以播放方式顯示即時及未來 48 小時海象模擬色階圖，另以粒子特效顯示海象模擬值的方向(如風向、波向及流向)，海象觀測站處以箭頭顯示觀測資料的方向，同時將觀測值以文字標註在旁，亦可查詢歷線圖(如圖 3)。颱風資訊顯示中央氣象局預測的颱風軌跡與其侵襲各港之機率。

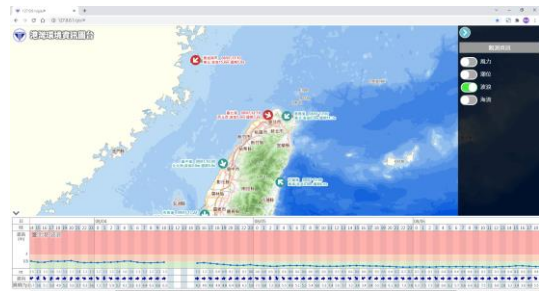


圖 3 查詢歷線圖

除了提供各港即時的海氣象觀測資訊外，也提供運研所港研中心 TaiCOMS 系統產製之未來 48 小時的海氣象模擬資料，並以色階圖與粒子動畫特效呈現(圖 4)，讓使用者透過視覺化的顯示風向/波向/流向的趨勢，同時於畫面中點擊任意位置，可呈現經緯度坐標與該項海氣象預測值，方便擷取地區性的資訊。此外也提供靜態的模擬分佈圖顯示(圖 5)，讓使用者可以不同方式閱讀資訊。而左下方的時間軸可以連續動畫的方式播放預測時間內資料，呈現現在及未來 48 小時的海氣象變化。

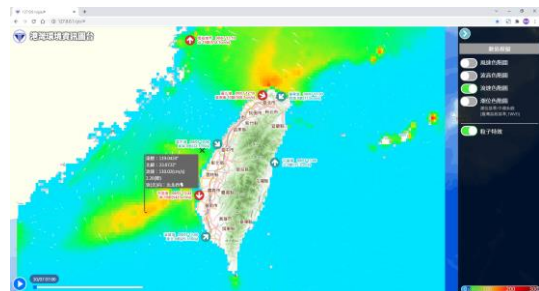


圖 4 海氣象模擬資料(動態顯示)

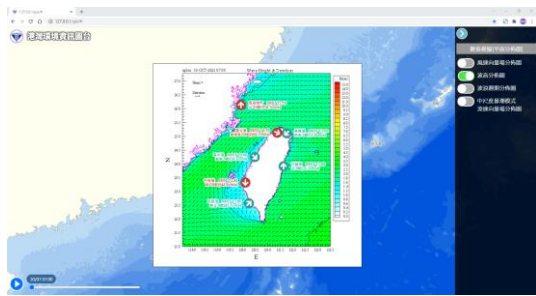


圖 5 海氣象模擬資料(靜態顯示)

在開放資料介接方面，藉由 GIS 的套疊顯示之特點，可將觀測資訊與氣象雲圖做套疊顯示(如圖 6)，綜合所有數據與資訊，作為輔助決策的依據。



圖 6 氣象雲圖

另外其他介接圖資包括雷達回波圖(圖 7)、溫度分佈(圖 8)、累積雨量(圖 9)、空氣品質 AQI(圖 10)及紫外線指數(圖 11)等。

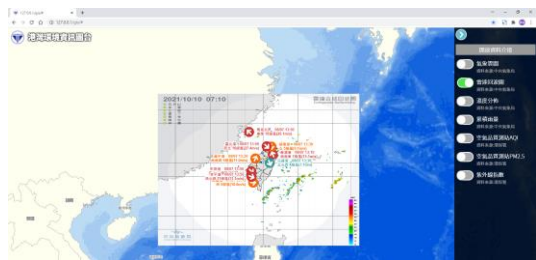


圖 7 雷達回波圖

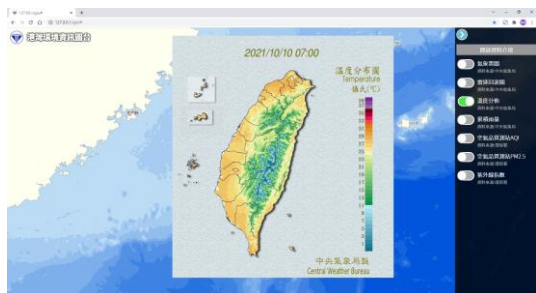


圖 8 溫度分佈

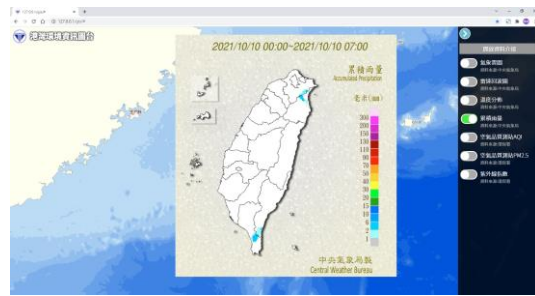


圖 9 累積雨量

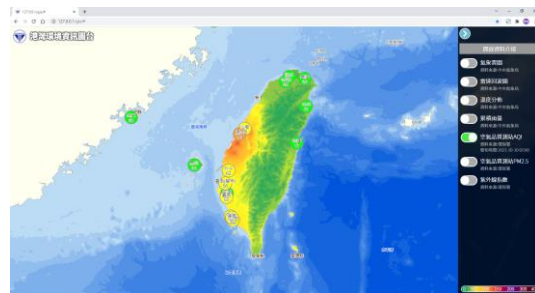


圖 10 空氣品質 AQI

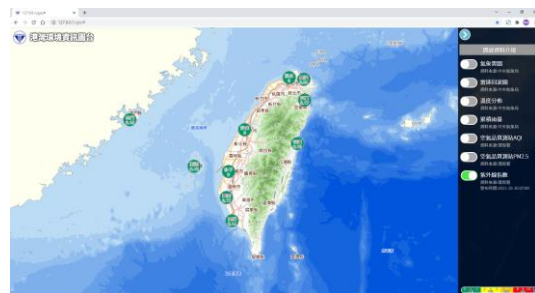


圖 11 紫外線指數

颱風資料部分有近期颱風與及歷史颱風可供查詢使用，近期颱風係介接中央氣象局之預測路線與侵襲機率，如圖 12 所示，亦可以年度篩選歷史颱風，歷史颱風路徑顯示於圖面上(如圖 13)。

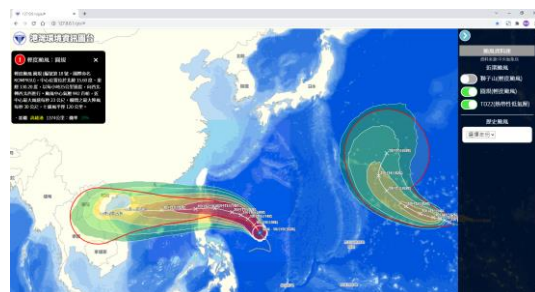


圖 12 近期颱風

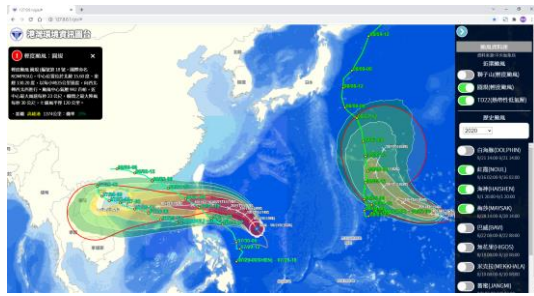


圖 13 歷史颱風

腐蝕環境資料查詢分為試驗地點與螺旋狀金屬試驗兩項功能查詢，試驗項目包含氯鹽沉積試驗(如圖 14)、二氧化硫沉積試驗、水下腐蝕、大氣板狀金屬腐蝕、大氣螺旋狀金屬腐蝕等，點選試驗站圖示，可顯示試驗位置的街景與試驗項目近期試驗數據圖表。螺旋狀金屬試驗包含碳鋼(如圖 15)、鋅、銅、鋁之腐蝕速率試驗色階圖、濕潤時間百分比試驗色階圖、氯沉積速率試驗色階圖、二氧化硫沉積速率試驗色階圖等，下拉式選單篩選年份後於地圖中以色階圖顯示，同時於畫面中點擊任意位置，可呈現該處之經緯度坐標、腐蝕速率及腐蝕分類，讓全臺及任意位置金屬腐蝕資訊清楚呈現。

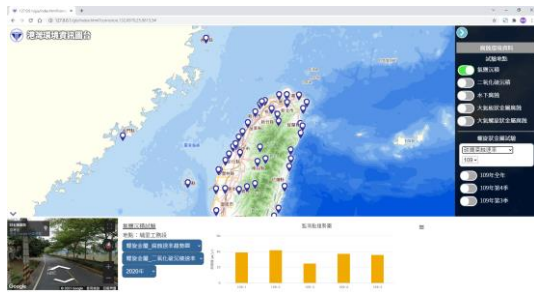


圖 14 氯鹽沉積試驗

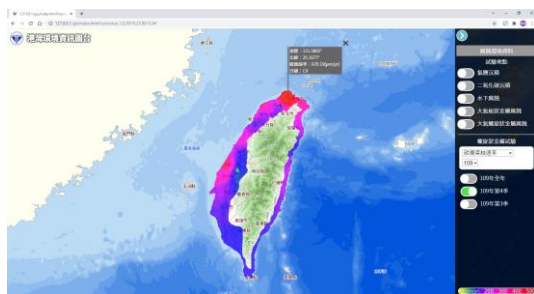


圖 15 碳鋼腐蝕速率試驗色階圖

另外可透過底圖的切換凸顯數據的呈現效果，例如以國土測繪中心的灰階版電子通用地圖套疊碳

鋼腐蝕速率試驗色階圖(如圖 16)。本系統亦呈現港區整體規劃圖，如圖 17 所示，讓使用者對港區資訊全盤掌握。

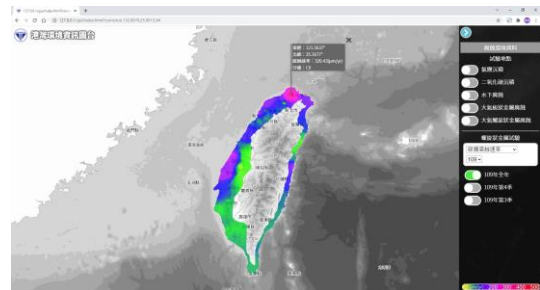


圖 16 底圖切換



圖 17 高雄港整體規劃(110年)

#### 四、結論

本年度使用 Web GIS 開放源 OpenLayers 元件建立「港灣環境資訊平臺」，並採用響應式網頁設計，可適用於電腦、平板與手機，並將運研所港研中心之海氣象觀測與海象模擬資料載入系統中，資料包含 9 商港(包括臺北港、基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、布袋港、安平港及高雄港)之風力、波浪、潮位與海流的即時現場觀測資料，以及臺灣海域的風力、波浪、潮位與海流未來 48 小時模擬資料。

海氣象觀測資料之風向、波向或流向以方向箭頭直接標示在地圖上，並以文字註記風速、波高或流速大小，讓使用者透過地圖可以快速瀏覽臺灣附近海域的即時海氣象狀況，若點選圖示可呈現該測站的歷線圖，取得更詳細的資訊。

海象模擬資料的呈現部分，可利用時間軸播放未來 48 小時內的模擬結果，以色階圖顯示數值的大小，包含風速色階圖、波高色階圖、海流色階圖、潮位色階圖，同時可啟用粒子特效，於地圖中任意點選位置，以旗幟顯示該點之海象模擬值。

此外也可套疊平面分佈圖，包含波高分佈圖、波浪週期分佈圖、波向分佈圖、中尺度暴潮模式流速向量場分佈圖，藉以與其他資料進行比對判釋。

為使平臺的海氣象相關的資訊更加豐富，介接中央氣象局的氣象雲圖、雷達回波圖、溫度分佈、累積雨量與颱風資訊，以及環保署的空氣品質與紫外線指數，讓商海港灣環境資訊更齊全。

## 參考文獻

1. 劉清松、林珂如、孟昭立、邱仁成(2020) 「運用視覺化電子地圖整合港灣環境資訊之輔助決策模式」，第42屆海洋工程研討會論文集，第708-712頁。
2. 蘇青和、廖慶堂、黃茂信、羅冠顯、衛紀淮、李政達、林達遠、洪維屏、許義宏、劉明鑫、林受勳、蔡金吉(2021) 2019年港灣海氣象觀測資料統計年報(12 港域觀測風力資料)，交通部運輸研究所。
3. 蘇青和、廖慶堂、黃茂信、羅冠顯、衛紀淮、李政達、林達遠、洪維屏、許義宏、劉明鑫、林受勳、蔡金吉(2021) 2019年港灣海氣象觀測資料統計年報(12 港域觀測風力資料)，交通部運輸研究所。
4. 蘇青和、廖慶堂、黃茂信、羅冠顯、衛紀淮、李政達、林達遠、洪維屏、許義宏、劉明鑫、林受勳、蔡金吉(2021) 2019年港灣海氣象觀測資料統計年報(12 港域觀測波浪資料)，交通部運輸研究所。
5. 蘇青和、廖慶堂、黃茂信、羅冠顯、衛紀淮、李政達、林達遠、洪維屏、許義宏、劉明鑫、林受勳、蔡金吉(2021) 2019年港灣海氣象觀測資料統計年報(12 港域觀測海流資料)，交通部運輸研究所。

# 應用自動化無人機巡檢測繪技術於海 港環境監測評估

洪維屏<sup>1</sup> 甘翊萱<sup>2\*</sup> 林彥廷<sup>3</sup> 黃春嘉<sup>4</sup> 李政軒<sup>5</sup> 韓仁毓<sup>6</sup>

- 1 交通部運輸研究所港灣技術研究中心
- 2 國立台灣大學土木工程學系研究助理(\*表示通訊作者)
- 3 國家實驗研究院國家地震工程研究中心博士後研究員
- 4 國立台灣大學土木工程學系博士生
- 5 國立台灣大學土木工程學系碩士生
- 6 國立台灣大學土木工程學系教授

## 摘要

台灣四面臨海，廣闊海港腹地提供國內外商船往來貿易窗口，因位處季風及颱風影響區帶，港區重要人工構造物易受海水及強風侵蝕破壞。傳統養護勘查方式需仰賴人工至現地進行，大範圍巡檢工作使得港務管理單位面臨巡查人力及時間效益之壓力。無人飛行載具在近年來發展成熟，其可搭載高解析攝影機同時具高度的移動性以及遠距遙控功能，能夠取代人力快速且輕易地到達過去不容易接近的區域。目前無人飛行載具結合影像技術廣泛應用於大範圍或特殊環境條件完成空間資料收集任務，於有限人力對於如大範圍港區進行空間監測。本研究透過無人飛行整合載具控制與取像邏輯之分析，建構無人機飛航作業之軟體流程；再者，基於該流程取得穩健影像資訊來源進行特徵辨識，提供多時期影像幾何糾正及比對套疊量測。最後以台中港為施測執行案例，驗證本研究提出方法之可應用於港區巡檢任務，並達到追蹤港區土地使用狀況及環境之監測目標。

關鍵詞：海港環境監測、無人飛行載具、飛行規劃、影像特徵偵測、影像套疊

## Application of Autonomous Facility Inspection using UAV images in Port Environmental Monitoring and Evaluation

Hung wei-ping<sup>1</sup>, Yi-Hsuan Kan<sup>2\*</sup>, Yen-Ting Lin<sup>3</sup>, Chun-Jia Huang<sup>4</sup>, Zhen-Xuan Li<sup>5</sup>,  
Jen-Yu Han<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Associate Research Fellow, Harbor and Marine Technology Center

<sup>2\*</sup> Research Assistant, Department of Civil Engineering, National Taiwan University (Corresponding author)

<sup>3</sup> Project assistant researcher, National Center for Research on Earthquake Engineering

<sup>4</sup> Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, National Taiwan University

<sup>6</sup> Professor, , Department of Civil Engineering, National Taiwan University

## ABSTRACT

Taiwan is a country surrounded by the sea. The port- hinterland provides the area for international commerce ships as the business gateway. Due to the location-based in monsoon and typhoons zone, some important artificial structures are easy to erosion damage by seawater and strong winds. Traditional maintenance and detection practices rely on implementing manually on site. However, the

large-scale inspection missions make the harbor management unit face the pressure of manpower inspection and time efficiency. The development of UAV techniques has improved gradually recently. With the high-resolution sensor and the high mobility and remote-control function, it can replace manpower and reach inaccessible areas easily, which is an ideal choice for limited manpower. Besides, the combination of UAV and image has been widely used in data acquisition tasks in large areas or specific environments. The study through the analysis of UAV controller and image acquisition logic to build the flight operations software process of the UAV. Moreover, we extract the robust image information for feature detection by the process and provide multi-temporal images geometric correction and comparison measurement. Finally, select Taichung harbor as the study area for the case study to validate the possibility of the approach proposed. We achieve the goal which can monitor the condition of land use in the port area and track specific facilities successfully.

Keywords: facility inspections; image technique; UAV; multi-temporal comparison and analysis

## 一、前言

臺中港為我國國際商港，為以近洋航線為主的中部區域加值型物流港，是主要能源、重工、石化原料進口港及油品儲轉中心。港區使用單位以及使用名目繁多，相關之土地利用與規劃是港區營運的重要工作之一。然而港區幅員廣大，且人力有限，要快速掌握各區域之使用狀況並妥善管理難度極高。另一方面，港區設施受海潮以及劇烈天氣狀況（如颱風地震等）衝擊影響之下，其穩定性與安全性備受考驗，同樣的在有限人力之下要能持續監測港區環境穩定性並及早採取預防或補強措施，也成為一項難題。

目前港區巡檢多以人工為主，透過巡檢人員攜帶巡檢紀錄表格進行巡檢作業，追蹤及評估臺中港區環境各項數據以建立背景資料，也因此每年需要編列巨額來進行不同環境監測。近年來自動化巡檢觀念的興盛，大眾開始對無人機技術表現出更大的興趣，相關技術也被套用在不同領域(Greenwood et al., 2019)，無人機的飛行可以在操作員的遠端控制下執行任務 (Hu and Lanzon, 2018)，同時降低了執行任務的風險。無人機也具有不同程度的自主權，例如自動航線飛行，無需人工干預 (Cary and Coyne, 2012)。藉由無人機所具有的高度的移動性以及遠距遙控功能，能夠取代人力快速且輕易地到達過去不容易接近的區域，此外，由機器從事繁複的任務可減少紀錄及判斷錯誤，研究顯示這將提高結果可靠性和準確性(See et al., 2017)，本研究以自動化方式掌握港區之使用狀況與異動，並透過多時期影像套疊進行重要區域監測，也可使巡查次數更加頻繁，及時處理突發狀況，確保港區的營運安

全。

影像測繪技術在近年不斷推陳出新，航空攝影測量領域也因此而受惠，記錄媒介從類比影像演進到數位元影像，許多在電腦視覺計算上的理論也逐漸被引進到數位攝影測量應用當中。結合無人機飛行拍攝，高機動性優勢條件提供如海上(岸)構造、邊坡崩塌等不易抵達區域進行影像蒐集，Colomina and Molina (2014) 以地理定位高解析影像經正射化、點雲資訊產製有效利用於空間環境監測。時序性影像執行環境變遷比較時，則需進行特徵匹配來搜尋影像中共同存在共軛點位(稱之為特徵點位)進行連結，透過影像中明顯變化處之梯度作為特徵標示，再藉由共同特徵間的鏈接距離篩選判識是否為共軛特徵。現今影像匹配豐富應用於各影像類別，如近距離攝影、航拍圖像及車輛辨識(Shan et al., 2014; Malik and Siddiqi, 2014; Li et al., 2015)。因此，透過無人機影像匹配技術發展，將凸顯空間鏈接與實現時序性監測研究價值。

本文使用交通部運輸研究所臺灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)內設立之氣象站所提供的2018年至2020年的風速資料，以月分為單位計算逐時風速分布來了解無人機於台中港的可飛行天數百分比，配合各區所合適之無人機及所搭載之感測器，選出最適合用於港區環境監測任務的組合，並輔以物件影像匹配，達到 UAV 時序性自動化區域監測的目的。

## 二、理論分析

基於港區特性進行自動化區域巡檢目的，整體研究方法與步驟流程如圖 1 所示，共分成三大部



分：(1)基本資料蒐集分析，(2)載具控制與取像邏輯，(3)UAV 影像辨識。

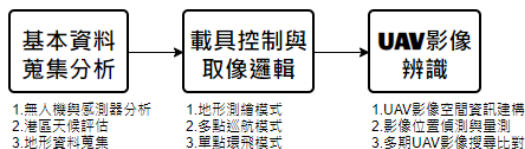


圖 1 研究流程

## 2.1. 基本資料蒐集分析

### 2.1.1. 無人機及感測器評估

本案分別針對定翼機及旋翼機的重量進行分析，分級標準參照「民航通告：遙控無人機術科測驗規範」如表 1 所示，依據民航局所設定無人機重量與證照分級規範標準分成 Type1、Type2、Type3、Type4 四個類別。不同類型的無人機根據其重量可搭載的感測器也有所不同，同時考量區範圍幅員廣大，因此納入載具的飛行里程，以利後續相關應用能快速評估適用性。而影響著飛行里程的首要條件為無人機電池續航時間，目前原廠公告的無人機續航時間，是在天候狀況良好時的理想情況下，但本案位於氣候條件不佳的港區，需再將電力總飛行時間乘上安全係數，而安全係數會根據天候狀況進行調整。

表 1 民航局無人機證照與重量分級表

旋翼無人機	定翼無人機	重量	自然人	法人
Type1	-	未達 2kg (250g 以下)	免註冊、免操作證	註冊、專業基本級操作證 Ia(未達 2Kg 註記)
Type2	Type2	未達 2kg (250g-2kg)	註冊、免操作證	
Type3	Type3	2kg-15kg	註冊、普通操作證	
Type4	Type3	15kg-25kg	註冊、專業基本級操作證 I	註冊、專業基本級操作證 Ib
-	Type4	25kg-150kg	註冊、專業基本級操作證 II	註冊、專業基本級操作證 IIc

### 2.1.2. 港區天候評估

天候為無人機能否穩定順利完成任務之最大關鍵因素，若執行飛行任務時遭受到較差的天氣狀況，例如強風、降雨等，可能會造成無人機直接墜毀，或是無法有效率執行任務，因此天候評估是相

當重要的一環。本文蒐集了臺中港周邊的氣象站包含 T2(北堤綠燈塔), T5(31 號碼頭), T6(港研中心頂樓), T8(北防砂堤)之逐時風速資料用以評估無人機的適用性。

為分析各類無人機於適用於港區之飛行範圍，如圖 2 所示劃定 A, B, C, D 四個區域，再以逐時風速資料評估各區域內最適用之無人機，逐時風速分別以黃色表風速 $\leq 4\text{m/s}$ 、橙色表風速介於 $4\text{m/s}\sim 6\text{m/s}$ 、橘色表風速介於 $6\text{m/s}\sim 8\text{m/s}$ 以及紅色表風速 $\geq 10\text{m/s}$ 。本文以趨勢內插法(Linear Trend Interpolation)(Luo et al., 2008)計算全港區所有範圍風速趨勢，其定義如下

$$W_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

其中 $(x_i, y_i)$ 為測站位置;  $a_0, a_1, a_2$ 為擬合參數;  $W_i$ 為擬合風速成果。如圖 3 與圖 4 所示，為每個月風速之趨勢變化成果。



圖 3 港區分區範圍圖

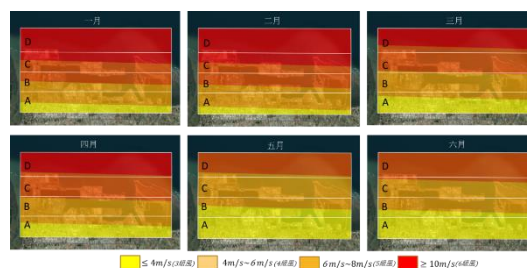


圖 2 一月至六月風勢趨勢圖

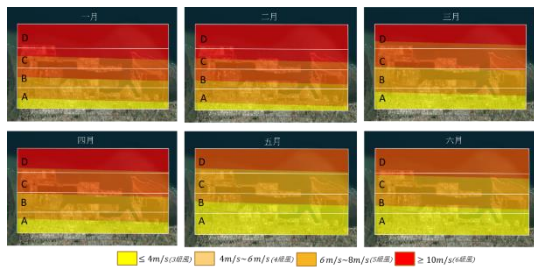


圖 4 七月至十二月風勢趨勢圖

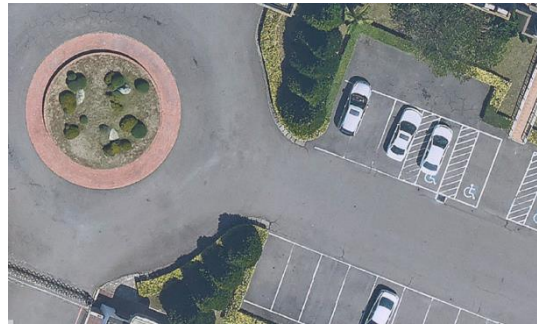


圖 6 高解析度影像示意圖(5 公分)

### 2.1.3. 地形資料蒐集

地形資料分為控制點測量及影像資料蒐集兩部分。控制測量作業採用 GNSS 靜態量測方式獲取三維空間資訊。共施測 16 個地面控制點，並採用臺中港一等衛星連續追蹤站 TACH 作為約制基準，共同聯測達 40 分鐘以上。

影像資料蒐集則以多個視角蒐集全臺中港測區影像，以航高為 120m 共計飛行 25 條航帶，涵蓋所有地面控制點，每個控制點至少涵蓋兩條航帶，每一位置同時拍攝 5 張影像，總計拍攝 8885 張高解析度(5 公分)影像。同時，正射影像產製會基於數值地形(DTM)三維地表變化，再根據影像幾何，由共線式描述投影中心、影像、與地面點的關係，配合數值進行正射糾正，可求得 DTM 每個一個物點(X,Y,Z)在影像上的坐標(x,y)，根據影像點上之灰度值而倒投影填入原物點網格，正射影像成果如圖 5 所示，每一個影像網格皆具有地理坐標資訊，圖 6 則為高解析度影像示意圖。

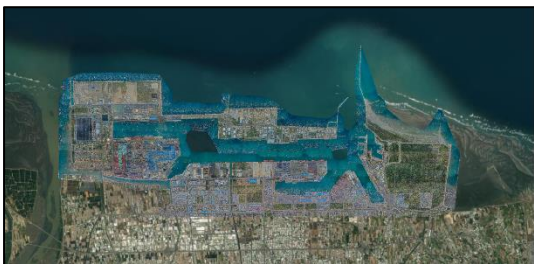


圖 5 臺中港正射影像圖

## 2.2. 載具控制與取像邏輯

本文根據無人機所執行之任務特性，設定三種飛行模式：(1)地形測繪模式；(2)多點巡航模式；(3)單點環飛模式。三種模式皆需先設定取像方法之相關參數，再經由路徑規劃演算法自動規劃各飛行點位，並估算任務之飛行時間與預計拍攝之影像張數，最後完成整體飛行任務。

### (1) 地形測繪模式

可對指定區域進行範圍式區域檢視，用於對地形物件之詳細檢驗抑或是連續性蒐集區域資料。

### (2) 多點巡航模式

方法為連續對於多目標點位進行檢視與拍攝，可用於快速勘查特定區域或用於規律性之巡航作業。

### (3) 單點環飛模式

對地圖上單一物件或點位進行自動化環繞式飛行任務，在飛行中系統邏輯將會判斷物件之位置調整拍攝角度與方向，對相同特定物件進行連續性的拍攝，可執行針對特定事件之物體監測使用，能蒐集更細部且完整的資訊，以滿足的作業需求。

不同模式下所需要輸入目標物、相對飛行高度、飛行高度限制，與影像相關參數會有所不同。藉由預先建構或模擬之底圖，可知在施測範圍的空間資訊，並在選取目標物與目標範圍後進行無人機路徑規劃。

## 2.3. UAV 影像辨識

整體 UAV 影像辨識方法流程有三階段：

(1) UAV 影像空間資訊建構，(2)影像位置偵測與量測，(3)多期 UAV 影像搜尋比對。透過 UAV 測繪

技術完成現地影像蒐集，基於 UAV 空拍影像將進行空間屬性及幾何資訊建構，其中包括三維點雲、數值高程模型及正射影像建置；再者，UAV 垂直地面所拍攝影像透過定位搜尋，可與正射影像進行匹配，除能獲得有效地理對位資訊外，亦能由影像糾正及套疊對位提供影像量測；最後，多期 UAV 影像藉由空間條件篩選，可從候選影像進行匹配比對而挑選出相同地理位置之影像，提供使用者快速基於影像資訊進行比較。

依本計畫 UAV 飛行調查為例，當距離小於 30m 時可達 80% 影像重疊率，其範圍中的影像為主要目標；當距離於 30m 至 60m 間為高相關影像、60m 至 100m 為中度相關。

### 三、結果與討論

#### 3.1. 無人機適宜性評估

根據氣象資料評估，A 區最適合多旋翼無人機 Type1，五至八月平均風速約為 4m/s 以下，對應至逐日資料，超過 60% 可飛行天數，為所有區域中最高。B 區最適合多旋翼無人機 Type2,3,4，三至八月平均風速約為 4m/s~6m/s 以下，對應至逐日資料，超過 60% 可飛行天數。C 區最適合定翼無人機 Type1,2，三至七月與十月、十二月，超過 60% 可飛行天數。D 區最適合定翼無人機 Type3,4，三至八月，超過 60% 可飛行天數。此外，D 區之無人機同時也可飛行於 A,B,C 區，C 區之無人機可飛行 A,B 區，除了 A 區之無人機以外，其餘以此類推。

感測器部分，除多旋翼機 Type1 僅能掛載光學相機，以及多旋翼機 Type2 僅能掛載光學與熱像外，其餘機種皆能掛載各類感測器。本案將各區所適用的無人機飛行區域以及可掛載感測器以圖 7 呈現。

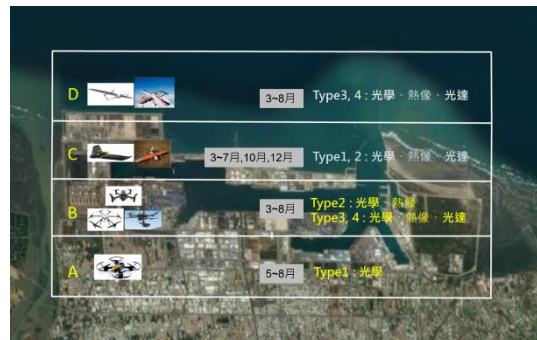


圖 6 各區適宜無人機與可掛載感測器分布圖

#### 3.2. 多期影像匹配

多時期 UAV 影像因拍攝航高、飛行朝向方位、相機俯視仰角角度等差異，使在相同位置拍攝影像呈現不同影像資訊。因此多期 UAV 影像搜尋及比對除了透過距離篩選外，亦需考量影像拍攝條件篩選候選圖像，於匹配比對前像幅，再將兩時期影像進行比對。

圖 8 顯示兩期具相同方位及傾角在位移小於 60m 情況時所拍攝影像，經匹配對位後提供左右方向套疊及比對。圖 9 顯示兩期影像具備同方位，但在傾角小於 15 度及位移小於 60m 拍攝條件下，經 SURF 匹配獲得共同影像特徵，經套疊後達到上下幅重疊供比對辨識。

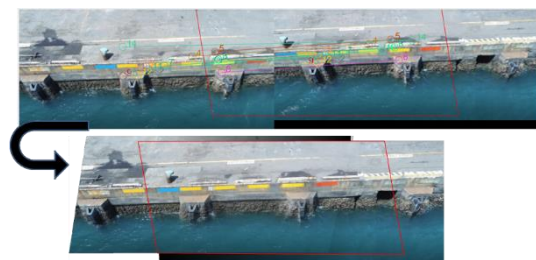


圖 7 具位移且相同方位角及傾斜角之多期影像匹配套圖

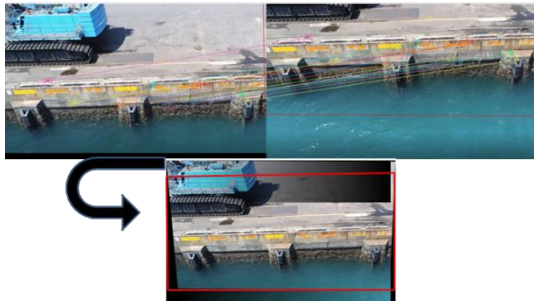


圖 8 在同方位角下具位移且傾斜角之多期影像匹配套圖

#### 四、結論

針對港區無人機作業，本案蒐集了不同種類的無人機，同時也明確定義各種無人機的特性以及飛行性能，再依據無人機的酬載能力選擇可掛載之感測器。此外，巡檢過程中最為重要的影響因素為天候，在天候佳的情況下對於無人機作業過程能更有效率執行，故本案再依據過去天候條件，經由數據分析明確劃分各個區域最適合使用之無人機以及可飛行之月份。透過本案分析，能針對不同種類之任務有最佳選擇之依據。

影像匹配方面，基於影像資訊強化處理後，利用 SURF 影像特徵偵測與匹配獲得 UAV 影像與正射影像間的特徵連結，藉由地理定位及套疊垂直地面拍攝之 UAV 影像於正射影像中，以仿射糾正 UAV 影像提供多時期影像進行長度及面積量測比較；另外，非垂直地面拍攝之 UAV 影像將依其他相關輔助定義資訊如：方位角、位置、航高及仰俯角進行預先區分類別，進而依類別進行 UAV 影像匹配比對，達到多時期 UAV 影像監測空間變遷資訊目的，該技術在未來除了能應用於港區構造物件巡檢及海岸線變遷監測外，更能進一步進行港區道路鋪面及標線維護或是港口垃圾及油汙偵測，提供日後港區科學化管理發展之願景及期待。

#### 謝誌

本文係交通部運輸研究所臺灣技術研究中心研究計畫「無人機影像監測技術應用於臺中港區管理之研究」(2021)之部份研究成果，承蒙臺灣技術研究中心經費補助使得本研究足以順利完成，在此誌謝。

#### 參考文獻

1. Cary, L., and Coyne, J., 2012. ICAO Unmanned Aircraft Systems (UAS). 2011-2012 UAS Yearbook - UAS: The Global Perspective, 112-115.
2. Colomina, I., and Molina, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 92, 79-97.
3. Greenwood, W. W., Lynch P, J., and Zekkos, D., 2019. Applications of UAVs in civil infrastructure. *J. Infrastruct. Syst.*, 25 (2).
4. Hu, J.; Lanzon, A., 2018. An innovative tri-rotor drone and associated distributed aerial drone swarm control. *Robotics and Autonomous Systems*, 103, 162-174.
5. Li, H., Sun, F., Liu, L., and Wang, L., 2015. A novel traffic sign detection method via color segmentation and robust shape matching. *Neurocomputing*, 169, 77-88.
6. Luo, W., Taylor, M., Parker, S., 2008. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. *International Journal of Climatology*, 28(7), 947-959.
7. Malik, Z., and Siddiqi, I., 2014. Detection and recognition of traffic signs from road scene images. In 2014 12th International Conference on Frontiers of Information Technology, 330-335.
8. See, J. E., Drury, C. G., Speed, A., Williams, A., Khalandi, N., 2017, September. The Role of Visual Inspection in the 21st Century. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 61, No. 1, pp. 262-266). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
9. Shan, Q., Wu, C., Curless, B., Furukawa, Y., Hernandez, C., and Seitz, S. M., 2014. Accurate geo-registration by ground-to-aerial image matching. In 2014 2nd International Conference on 3D Vision, 1, 525-532.

## 可調式張力腿浮動平台之運動分析

張博維<sup>1</sup> 梁乃匡<sup>2</sup> 陳吉紀<sup>3</sup> 胡聰明<sup>4</sup> 楊瑞源<sup>5</sup>

<sup>1</sup>成功大學水利及海洋學系碩士生

<sup>2</sup>台灣大學海洋研究所名譽教授

<sup>3</sup>宇泰工程顧問公司董事長

<sup>4</sup>宇泰工程顧問公司副總經理

<sup>5</sup>成功大學水利及海洋學系副教授

### 摘要

浮動式平台目前主流有三種，半潛式(semi-submersible)、浮筒式(spar)及張緊式(TLP)，在本文中採梁等人所研發之可調式浮動平台搭載 NREL 5MW 風機作為主要研究對象，並且使用張緊式(TLP)繫纜系統之設計，探討此類型平台的自然週期、運動響應以及繫纜的張力變化。本文使用兩種軟體 AQWA 及 FLOW-3D 作交互比對。透過 AQWA，我們可以輕易的計算頻域之水動力，並且以一些合理的假設，得到浮動平台與繫纜的耦合分析。而使用 FLOW-3D 此種 CFD 軟體，則可用最為基本的流體連續及動量方程式，進行自由液面的準確計算，得到黏性作用下，浮體與波浪交互作用下所出現的物理現象。

關鍵字：張緊式(TLP)、可調式平台、NREL 5MW、AQWA、FLOW-3D

## Dynamic Analysis of Adjustable Tension Leg Platform Wind turbine in Taiwan

Po-Wei Chang Nai-Kuang Liang Chi-Chi Chen Tsung-Ming Hu

Ray-Yeng Yang\*

\* Asosociate Professor, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

There are currently three mainstream floating platforms, semi-submersible, spar and tension leg platform (TLP). In this article, the adjustable platform designed by liang et al. equipped with NREL 5MW wind turbines, and the mooring system uses the form of tension. We explore the natural period, motion response and dynamic tension of this type of platform. This article uses two software AQWA and FLOW-3D for interactive comparison. Through AQWA, we can easily calculate the hydrodynamic force in the frequency domain, and use some reasonable assumptions to obtain the coupling analysis between the floating platform and mooring line. By using FLOW-3D, a CFD software, the basic fluid continuity and momentum equations can be used to accurately calculate the free liquid surface and obtain the physical phenomena that occur under the interaction of floating body and the wave under the action of viscosity.

Keywords: Tension Leg Platform(TLP); dynamic tension; NREL 5MW; AQWA; flow-3D

## 一、前言

浮體式離岸風力發電概念於 1972 年首度由麻薩諸塞大學阿默斯特分校的 William E. Heronemus 教授提出，但直到 1990 年代中期，在風力發電技術大量商業化之後，該技術才再受到重視。

2008 年，荷蘭 Blue H 建造了 TLP 的原型，並在 2009 年水深 113 公尺處進行測試，顯示出此為一種可行的浮動裝置。Lundteigen and Rausand (2008) 已經證實浮動風機在 40 米以上的區域比固定區域更有效。於 2012 年，Yongsheng Zhao (趙永生) 於上海交通大學提出多浮筒式張力平台，並且搭載 NREL 5MW 海上風力發電機，此篇論文通過水動力和固有頻率進行研究，避免因轉子轉動引起共振，使 TLP 概念有了初步的設計觀點。

到了 2014 年，Erin Elizabeth Bachynski 於挪威科技大學(NTNU)提出三浮筒(pontoons)作為輔助安裝的張力腿式平台，比較五種不同浮筒直徑與形狀對於風機平台的影響，並給予設計的簡化方法，為 TLP 的研究提供了較為完善的統整。

而 2016 年，Xiaoshuang Tian 更進一步將張力腿平台上搭載的風機大型化，改採用 DTU 10MW 的風機作為初步設計，並且為後人奠定了良好的基礎。

在本文中所使用的張力腿式平台為宇泰工程顧問公司專利設計之可調式平台，參考 Erin Elizabeth Bachynski 於 2014 年提出之 TLPWP1 進行改動，於先前並未被研究其浮體特性，因此，在進行整體耦合前，需考慮浮台本身之性質，確認其行為良好後，再加入風機進行耦合，並得到符合規範的運動行為，才能保證其為一個完善的設計。

## 二、研究理論

本文使用 AQWA 及 FLOW-3D 進行浮動平台的運動行為及纜繩張力分析，AQWA 以有限元素法為基礎，加入 3D 繞射、輻射以及勢流理論，計算浮體與波浪交互作用下所發生之運動響應以及在導覽孔(fairlead)所受到之張力變化情形，其優勢為計算快速，能以極短的時間看出浮體運動的趨勢，為一廣泛於工程運用的商業軟體。

然而，使用 AQWA 此類的勢流理論軟體，假設流體為無黏、非旋流動，在相對較大、較淺的結

構物，可能會出現失真抑或是較大誤差的情況發生，一般常以模型實驗進行校準。而 Flow-3D 為一計算流體力學軟體，通過有限差分法將離散的那維爾-史托克方程式(Navier-Stokes Equations)做計算求解。由於自由表面是採用流體體積法(TruVOF)進行模擬，故使網格的建立更加地容易，並且讓模擬的時間縮短，讓計算成本有效降低。與 AQWA 相比，FLOW-3D 定義並追蹤流體的自由液面，對於黏性及高階非線性項並未做假設，故能看到更加符合現況的物理現象。

## 三、結果與討論

### 3.1 自由衰減

本文採用的浮動平台為梁乃樞等人設計之張力腿平台，目標水深為 50 米，因其穩定性尚未經過研究，故先以 AQWA 比較平台與平台加上部風機(無運作)，在有張緊繩的情況下做自由衰減，並且以快速傅立葉轉換(FFT)進行處理，即可得到自然週期，觀察自然週期隨重量及慣性矩不同產生的變化。平台與風機平台之示意圖及參數如下所示。

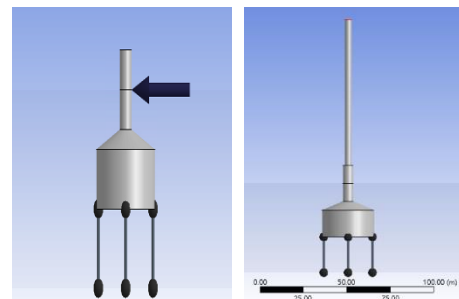


圖 1 張緊平台示意圖

表 1 張緊式平台性質

上圓柱直徑	6 m
下圓柱直徑	30 m
吃水深	30 m
相對於水面之重心	-26.81 m
平台 roll 方向慣性矩	739,021,000 kg*m <sup>2</sup>
平台 pitch 方向慣性矩	739,021,000 kg*m <sup>2</sup>
平台 roll 方向慣性矩	1,122,089,984 kg*m <sup>2</sup>
排水體積	12,522.7 Tons
重量	9,479.8 Tons

表 2 NREL 5MW 風機性質

RNA 重量	544,900 kg
輪轂高度	90 m
塔柱重量	493,500 kg
塔柱重心位置	43.85 m
塔柱長度	78.2 m

表 3 張緊式風機平台性質

吃水深	30 m
相對於水面之重心	-17.4433 m
roll 方向慣性矩	10,407,853,966 kg*m <sup>2</sup>
pitch 方向慣性矩	10,407,853,966 kg*m <sup>2</sup>
roll 方向慣性矩	1,122,089,984 kg*m <sup>2</sup>
排水體積	12,522.7 Tons
重量	10,518.2 Tons

做自由衰減的流程為將浮體分別向 X、Z 方向做平移、Pitch 方向做轉動，並將其自由釋放，得到三個方向的時序列後，進行快速傅立葉轉換，即可得到浮體的自然週期。於台灣海域處之波浪，週期約 5~25 秒，若浮體自然週期與波浪週期重合，便有可能發生共振現象。

在本文中，分別進行單純平台、加張緊纜繩及加上部風機後的自然衰減，探討自然週期的變化，如表 4 所示，結果顯示在加入張緊纜繩後，Heave 及 Pitch 方向的自然週期變得極小，原因為張緊纜繩於 Heave 及 Pitch 方向的剛度極大，而 Surge 方向的自然週期則可以看到為 6 秒左右，與台灣波浪週期重合，可能會因此產生較大的振福。而加入上部風機後，發現自然週期略為變大，原因為自然週期與質量呈正相關，且與剛度呈負相關，加入風機後，質量變大，剛度因預張力變小而變小，故自然週期會略為上升。

表 4 三自由度之自然週期

DOF	平台	平台+張緊纜繩	風機平台+張緊纜繩
Surge		5.68 s	6.33 s
Heave	9.1 s	0.64 s	0.66 s
Pitch	7.7 s	0.48 s	1.47 s

### 3.2 規則波

AQWA 採用 2 階 Stoke 波，為一有限振幅波，考慮波浪於自由液面所造成之非線性效應，其假設如下所示。

- 流體無黏、不可壓縮並且為均勻流
- 流體為勢流
- 流體於自由液面的壓力為大氣壓力
- 重力是唯一的外力

由勢流理論及 Laplace 方程式，可以得到 n 階偏微分方程組。在 AQWA 軟體中僅求解到 2 階 Stoke 波，忽略高階非線性的影響。

由於不同的假設及簡化，可能會造成計算結果的差別，故本文根據 Le Méhauté's diagram 的區分得到所有規則波條件皆在二階 Stoke 波的適用範圍內。

本文規則波第一種造波條件為固定週期，改變不同的波高，確認波浪是否會呈現一線性的狀態，目的為確認波浪振幅運算子(Response Amplitude Operator, RAO)的合理性。RAO 的含意為在規則波的情形下，在特定週期範圍內，波浪單位振幅造成船體的運動振幅。確認 RAO 的使用合理，便固定波浪波高，改變波浪週期，衡量波浪週期對於平台運動的影響性。

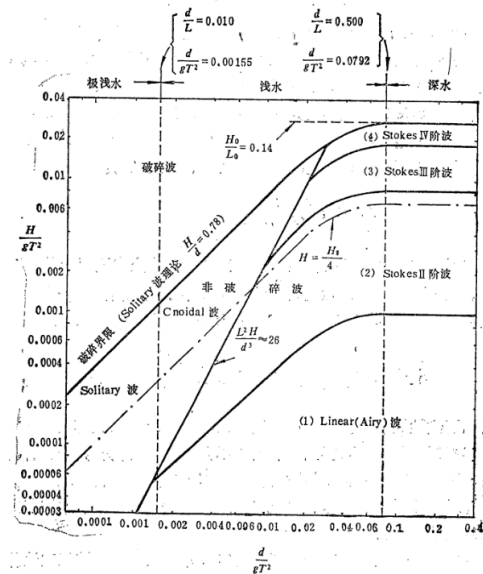


圖 2 Le Méhauté's diagram (竺艳蓉, 1991)

表 5 規則波波浪條件

波	波高 H(m)	週期(s)
RH32T10	3.2	10
RH4T10	4	
RH48T10	4.8	
RH56T10	5.6	

RH64T10	6.4	
RH32T6	3.2	6
RH32T7		7
RH32T8		8
RH32T9		9
RH32T12		12
RH32T14		14

模擬從 5 秒到 14 秒的 Stoke 二階規則波，得到有無放置風機下所形成之振幅 RAO，並且進行疊圖如下所式。明顯看到不論是有無風機，其自然週期與 RAO 之最大振幅皆重合，顯示使用 RAO 此方法之可行性。而加入風機後，也可以看出其振幅有增加的趨勢，這是由於加入風機後，整體的預張力變小，降低了其恢復能力，並且整體的重心位置上移，導致傾覆力矩變大，平台穩定性下降，抑是造成振幅上升的原因之一。

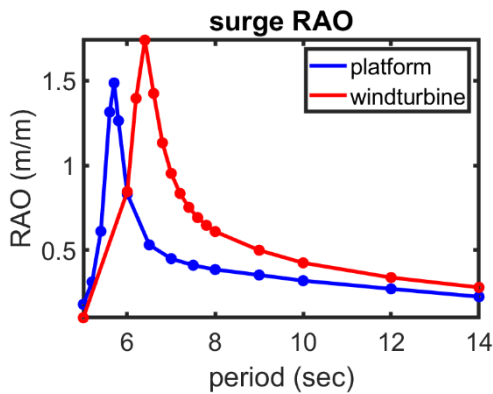


圖 3 Surge RAO

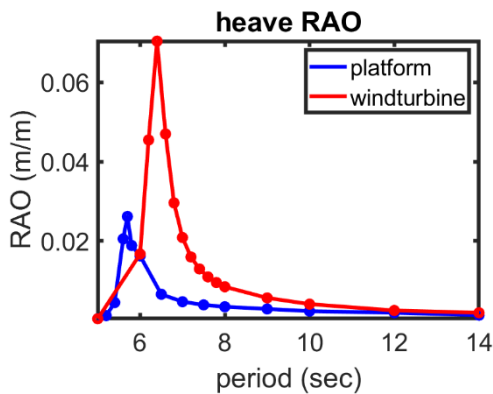


圖 4 Heave RAO

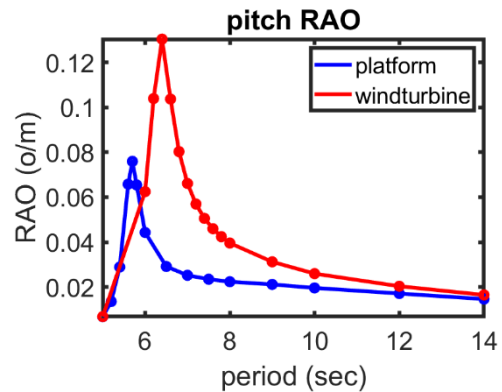


圖 5 Pitch RAO

同樣模擬 5 到 14 秒的 Stokes 二階規則波，並使用張力比來分析平台受規則波作用影響下，於導纜孔處動態張力與預張力的關係，其結果如圖 6 所示。

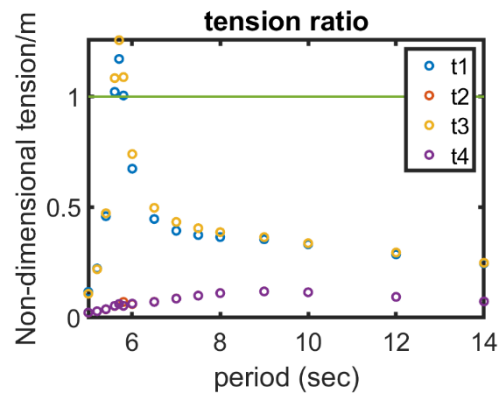


圖 6 張力比隨波浪週期之變化

### 3.3 不規則波

本文以 JONSWAP 不規則波譜進行實際海況的模擬，確保平台在任何的時候都能夠符合規範的限制。由歐等人研究，發現於台灣西北海域之  $\gamma$  值應該取 2.08，由中興工程顧問社於 2018 年所做的迴歸週期分析與新竹港規畫報告之波高與週期關係式，可以推得新竹外海之 1 年、10 年及 50 年的迴歸週期之颱風條件。下表為不規則波的選取，分別代表常態海況、1 年回歸期、10 年回歸期及 50 年回歸期之颱風條件。



表 6 不規則波波浪條件

$\gamma = 2.08$	波高(m)	週期(s)
JH16T51	1.67	5.17
JH43T82	4.3	8.29
JH95T12	9.5	12.33
JH11T13	11.9	13.8

於 TLP 中，張力的變化是非常重要的，必須注意纜繩的最大張力及最小張力在 ULS 情形下，必須符合 DNVGL 之規範，故不規則波的部分以張力時序列表示，由圖 7 可以看出在上部風機尚未放置前，會在 10 年及 50 年迴歸期的波浪條件發生鬆弛機率過高的現象。而在將上部風機放置於本文平台之上後，整體的張力變化更加劇烈，如圖 8 所示，並且在 1 年迴歸期的波浪條件亦發生高機率鬆弛的現象，由此也可看出如規則波同樣穩定性減少的趨勢。

在 TLP 規範中，雖容忍一定程度的纜繩鬆弛，但鬆弛狀態長時間的發生即代表設計須進行改善，讓其鬆弛機率降低，甚至不發生鬆弛行為。由 DNVGL-OS-C105 提到，TLP 纜繩於 ULS 時滿足式 (1):

$$\gamma_0 S_0 - \gamma_E S_E > 0 \quad (1)$$

其中， $S_0$  為軸向預張力， $S_E$  為環境載荷引起之軸向張力，對於 TLP， $\gamma_0$  為 1.2， $\gamma_E$  為 0.7。

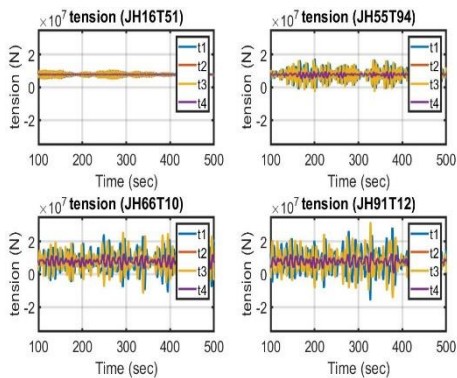


圖 7 平台之張力時序列

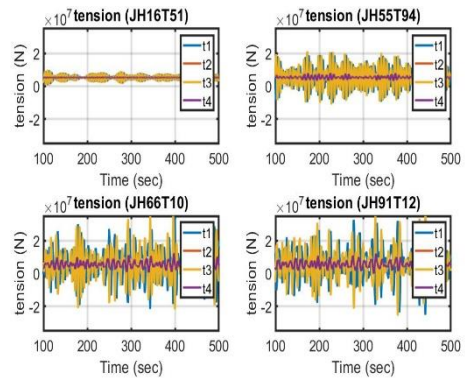


圖 8 風機平台之張力時序列

因 AQWA 並未考慮黏性效應，且為單向耦合，故希望使用 FLOW-3D 實現較為真實的模擬情形，判斷纜繩在相同的造波狀況下，呈現的模擬差異。同樣給予 JONSWAP 波譜，常態、1 年、10 年及 50 年迴歸期之波浪。

張力時序列結果如圖 9 所示，FLOW-3D 所做出的 1 年迴歸期波浪條件並不會如 AQWA 所做出的值一般呈現鬆弛，可以推測勢流理論於正常狀況之張力變化較大，然而一旦發生鬆弛，因 FLOW-3D 纜繩張力滿足虎克定律，而 AQWA 則限制無軸向變形且小位移變化，故鬆弛後的變化會出現大量的不同，AQWA 在鬆弛後張力值仍呈現上下之振幅擺動，而 FLOW-3D 於纜繩鬆弛後便會十分不穩定，張力出現大量極端值。

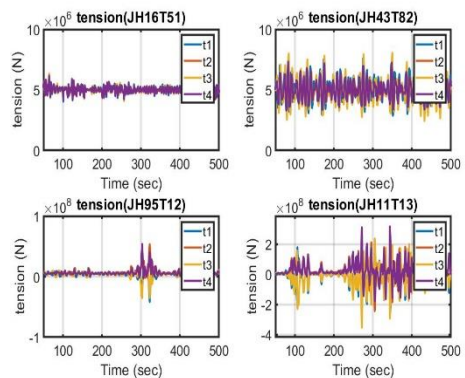


圖 9 不規則波之張力時序列(FLOW-3D)

## 四、結論

於一開始的自由衰減，得到平台及風機平台之自然週期，發現自然週期與波浪週期有交集的現象，並且以 RAO 的方式觀察浮體之運動變化，也發現浮體會於平台共振週期發生共振的現象，而此現象對於運動性能是較為不利的。然而，因自然週期與海浪重和處較小，波浪波高也相對較小，故運動振幅可能會滿足設計條件，故將平台及風機平台放入台灣極端條件中，評估平台是否符合標準，結果顯示，不論是以 AQWA 抑或是 FLOW-3D 兩種軟體，皆不滿足設計條件，有鬆弛的現象發生。因此，後續需重新將纜繩進行設計或是進行優化以滿足波浪條件。

## 參考文獻

1. 竺艳蓉. (1991). *海洋工程波浪力学*. 天津大学出版社.
2. 經濟部水利署第二河川局. (2005). *新竹港南海岸環境保護及營造計畫規劃報告*. Retrieved from
3. 張中宇, 王金山, & 王天佑. (2018). 離岸風場極限波高研析-以新竹外海為例. *營建知訊* (429), 32-42.
4. ANSYS, AQWA. (2021). *AQWA theory manual*.
5. Bachynski, E. E. (2014). Design and dynamic analysis of tension leg platform wind turbines.
6. DNV, G. (2015). Offshore standard DNVGL-OS-E301 position mooring. *Høvik, DNV GL AS.* [Online] Available from: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/os/2015-07/DNVGLOS-E301.pdf> [Accessed 5th February 2018].
7. FLOW-3D. (2019). *FLOW-3D User Manual*.
8. Ou, S.-H. (1977). *Parametric determination of wave statistics and wave spectrum of gravity waves*. Tainan Hydraulics Laboratory of Water Resources Planning Commission-Ministry ...,

# 台灣港區海氣象資料品管檢核之研究

黃義傑<sup>1\*</sup> 羅冠顯<sup>2</sup> 許文陽<sup>1</sup>

<sup>1</sup>工業技術研究院綠能與環境研究所

<sup>2</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心

## 摘要

本研究主要依據美國海洋綜合觀測系統(Integrated Ocean Observing System, IOOS)所管理維護的海洋即時資料品保手冊,應用在各港口佈放之超音波式波流儀(Acoustic Wave and Current Profiler, AWAC)時序資料品管作業上,包含前處理解決原始資料遺漏和超量之問題,確保資料符合連續性、合理性與關聯性等品管檢驗原則,擬建立一套自動化品管流程,透過統計分析訂定各港區不同季節之檢核門檻,給予品管檢核標記(Flags),以便資料使用者快速簡易地瞭解資料品質優劣,供後續港區航線波浪推算展示系統與資料進階分析等應用。

關鍵詞: 超音波式表面波高波向與剖面海流儀、美國海洋綜合觀測系統、品質管制

## Study on Quality Management Verification of Marine Meteorological Data in Taiwan Port Area

Yi-Chieh Huang<sup>1\*</sup>, Guan-Sian Luo<sup>2</sup>, Wen-Yang Hsu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute (ITRI).

<sup>2</sup> Harbor and Marine Technology Center, Institute of Transportation (MOTC).

## ABSTRACT

This study is mainly based on manual for real-time quality control of in-situ marine meteorological data by U.S. Integrated Ocean Observing System. The quality control work is targeting time series data of AWAC(Acoustic Wave and Current Profiler) provided by the Harbor and Marine Technology Center, including pre-processing to solve the problem of missing data and repeated data. It is in line with the quality principles of data continuity, rationality and relevance. This study has established an automated quality control process based on the marine meteorological data, and set the thresholds for different seasons in each port area through statistical analysis. Finally given check mark for quality control (Flags), and users quickly and easily understand the pros and cons of data quality, so as to provide applications such as the wave forecasting system of the port area and the advanced analysis of the data.

Keywords: AWAC; IOOS; Quality Control

## 一、前言

依據交通部「2020 運輸政策白皮書海運分冊」之「推動航港智慧轉型」策略、臺灣港務公司所提出臺灣港群智慧轉型計畫(Trans SMART Plan)等國家政策發展策略,指出物聯網海氣象即時系統在國家智慧港發展中扮演關鍵地位。為提供正確可靠的港區波流即時資訊,本研究針對國內台北港、基

隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、臺中港、安平港及布袋港等 8 個港區波流觀測站建立資料無人化品管作業,數位商港架構如圖 1 所示。

為確保 8 個港區觀測資料正常,IOOS 建議將觀測資料進行品質分類與標記,技術發展藍圖先以海氣象資料品管流程建立與資料特性統計分析為主,並應用於其他類型之海氣象觀測資料(浮標型),以及未來商港環境資訊將即時自動品管與展示,實現

港灣資源整合與共享。例如運用品管後觀測資料輔以海氣象數值模擬，建立商港區航線與船舶停靠最佳化推算模組，整合智慧航線服務體系，提供進出港口船隻操船及靠泊應用參考，提升港灣船務作業效率。

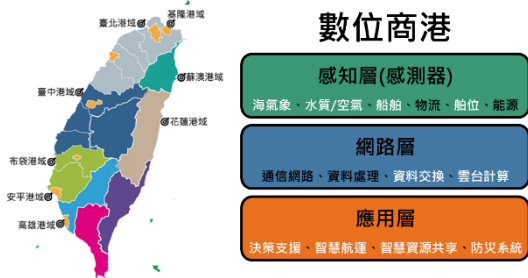


圖 1 數位商港架構圖

## 二、品管流程

本研究所用之波流觀測資料為 NORTEK 超音波式波流儀(Acoustic Wave and Current Profiler，以下簡稱 AWAC)測得之，儀器採用水下電纜進行電力供應與資料通訊，量測原理為聲波都卜勒式，具備 4 個聲波探頭，以聲波和壓力觀測海氣象資料，採用 BINARY 二進位格式儲存原始資料(\*.wpr)，該檔案可經由 NORTEK 所開發之套裝軟體轉換求得逐時波浪與分層流向流速與水位值等參數，流速量測可依不同設置水深即自海床上之儀器到水表面來設定量測的間距，觀測範圍為-10 至 10m/sec(水平方向)，-5 至 5 m/sec(沿波束)，流向觀測範圍為 0 至 360 度；波量測為波高精度在每 0.5 秒間隔內分別量測所得速度 U、V、W 向量與壓力量測得到的資料作整合而得到波高、波向的資料，觀測範圍為-15 至 15 公尺，週期範圍為 0.5 至 50 秒。

海氣象觀測站之監測系統架構如圖 2 所示(出自港研中心-港灣環境資訊網)，主要由 AWAC 透過水下電纜將資料傳輸至岸上接收站，以數據機室內電話連線或 GSM 無線傳輸的方式，傳回至港研中心雲端主機，並透過後端接收程式轉檔與確認，最後上傳至港灣海情中心伺服器資料庫內。AWAC 原始資料一般而言為即時觀測，當部分港口纜線故障時，則採用自記資料，因自記原始資料於儀器內，需待保養維護時方能取出。根據各港區水深不同，儀器則採不同的音鼓頻率，其中台北港、高雄港、

安平港與布袋港之儀器採 1MHz；台中港、基隆港、蘇澳港與花蓮港則採 600kHz，波流儀底碇在海床上，傾斜度不超過手冊建議值 5 度。觀測時間間隔為 1 小時每小時 0-10 分連續量取 600 筆流資料點，10-44 多分連續量取 2048 筆波資料點，取樣頻率為 1Hz。儀器紀錄之原始資料檔(\*.wpr)經轉檔後，可得 ASCII 格式之原始資料與處理後的資料，本計畫資料品管所使用檔案包含 hdr 檔(儀器參數資料)、wad 檔(2048 筆逐秒資料)、wap 檔(逐時資料)與 sen 檔(逐時資料)。

本研究規劃設計之品管作業流程如圖 3 所示，從港研中心所提供港即時與自記觀測資料(\*.wpr)，經 NORTEK 所開發之套裝軟體轉檔產出品管所需檔案(\*.hdr、\*.sen、\*.wad、\*.wap)，透過編程將資料重新排序切割與前處理(Preprocessing)資料缺失、重複與多餘值等原始資料缺陷，品管檢核前先進行資料有效率計算，以瞭解資料觀測完整度，過程中透過對波流觀測資料統計分析，可訂定各港於不同季節與環境下的品管門檻，該作業階段為回饋式架構，未來可依累計的觀測資料持續地修訂門檻值，以進行合理的品管檢核作業，最終產出具檢核標記的逐時品管資料(\*.wap with flags)。

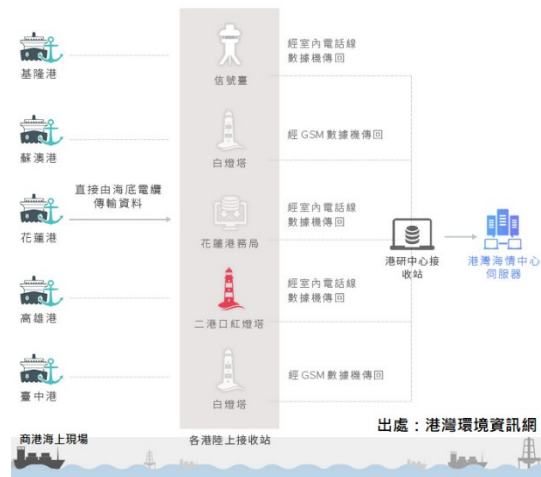


圖 2 海氣象觀測站之監測系統架構圖

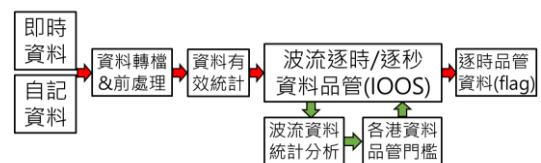


圖 3 觀測資料品管作業流程圖

本研究依據美國海洋綜合觀測系統(Integrated Ocean Observing System, IOOS)所管理維護的海洋即時資料品保手冊(Quality Assurance / Quality Control of Real Time Oceanographic Data, QARTOD Manual),符合資料合理性、連續性與關聯性之品管檢驗原則,針對 AWAC 時序資料進行資料品管,逐項品管檢核後,將於逐時檔案內(\*.wap)新增各項檢核之資料標記(Flag),顯示該資料於各項不同品管檢核之結果,其標記定義為正常資料(Flag=1)、未經品管資料(Flag=2)、可疑或高度關注資料(Flag=3)、異常資料(Flag=4)以及遺失資料(Flag=9),並給予標記顏色分類,詳述定義如表 1 所示。

有別於前人研究(李等, 2018)之處為本品管具較多且深入之波流檢核項目,如儀器傾斜度、訊號強度與低頻能量等檢核作業,經品管後之逐時檔案內(\*.wap)所新增欄位共有 20 項,依檢核要求強弱分別區分為 Group1 必需作的 12 項檢核(如表 2)與 Group2 強烈推薦作的 8 項檢核(如表 3),表格中淺背景為波浪資料品管檢核項目;深背景為海流資料品管檢核項目,可提供資料使用者快速地判別該資料品質與各項檢核通過率等應用。

表 1 QARTOD 資料標記值定義(IOC/UNESCO, 2013)

標記(Flag)	定義
正常資料 (Pass=1)	資料已通過即時品質控制檢測,可視為初步資料來使用。
未經品管資料 (Not evaluated=2)	資料未經過品質控制檢測。
可疑或高度關注資料 (Suspect or of High Interest=3)	資料被使用戶視為可疑或高度關注的,請使用者需注意。
異常資料 (Fail=4)	資料未通過一項或多項即時品質檢測,其資料品質是不能接受的。
遺失資料 (Missing data=9)	資料遺漏,使用佔位符號代之。

表 2 IOOS 必需作的波流品管檢核項目(Group 1)

波浪時序列平頭訊號 (Test 16)	合理性檢測
波浪時序列低頻能量 (Test 18)	合理性檢測
波浪時序列之體波參數最大值/最小值/可接受範圍 (Test 19)	合理性檢測
波浪時序列變化率 (Test 20)	連續性檢測
海流數據傳輸完整度 (Test 2)	合理性檢測
AWAC 感測器傾斜度 (Test 3)	合理性檢測
水下聲速 (Test 4)	合理性檢測
海流訊號強度 (Test 6)	合理性檢測
海流流速 (Test 10)	合理性檢測
海流流向 (Test 11)	合理性檢測
海流水平速度 (Test 12)	合理性檢測
海流時序列平頭訊號 (Test 18)	合理性檢測

表 3 IOOS 強烈推薦作的波流品管檢核項目(Group 2)

波浪訊號強度 (Test 1)	合理性檢測
壓力或聲表面追蹤 (Test 5)	合理性檢測
波浪樣本數 (Test 8)	合理性檢測
波浪時序列突波 (Test 10)	合理性檢測
波浪時序列範圍 (Test 11)	合理性檢測
電池電壓 (Test 1)	合理性檢測
流速時序列變化率 (Test 15)	連續性檢測
流速突波 (Test 16)	合理性檢測

### 三、結果與討論

執行 IOOS 品管檢核作業前,由於 AWAC 原始資料偶爾會夾雜冗餘數據,因此需透過編程進行資料清洗(Data Cleansing),其包含處理缺漏值、重複值與合併排序切割等清洗邏輯,並校驗資料維度,以確保輸入資料一致性。本計畫依據 U.S. IOOS: QARTOD Manual 之品管檢核演算進行編程,符合資料合理性、連續性與關聯性之品管檢驗原則,波流各品管演算之檢核門檻由於品管資料量不多,又各商港間位置與地形不一,故目前根據文獻與品管手冊建議暫訂一合適門檻值,部分檢核門檻則透過統計分析,訂定具空間特性與時間特性之門檻,以確保品管檢核結果之合理性。

因論文投稿篇幅受限,故本文將以基隆港 1~8 月資料之品管檢核結果進行討論,波流儀位置座標為 N25°9'46.17", E121°44'59.33", 設置水深為

36~37m，品管結果如表 4~7 所示，表中包含逐時觀測資料(\*.wap、\*.sen)與逐秒觀測資料(\*.wad)之資料有效百分比，以瞭解當月份實際觀測筆數佔應觀測筆數多寡程度，可優先判斷該月份之儀器觀測資料完整度，以及各項波流品管檢核標記之統計比例，本計畫將各項品管檢核標記(Flag)附加在逐時觀測資料(\*.wap)後方，以便逐時瞭解各項品管檢核之標記狀況。

從基隆港 1~8 月之品管標記統計表顯示，原始資料經波流品管檢核之通過率較低者，包含波浪時序列平頭訊號(Flat line)、AWAC 感測器傾斜度(Sensor Tilt)與流速時序列變化率(u, v rate of Change)等，本文將以上述品管檢核作為討論標的。波浪時序列平頭訊號檢核主要用於因儀器異常導致輸出連續固定值之情況，該項品管檢核邏輯為示性波高差值( $\Delta H_s$ )小於 0.01 公尺或尖峰週期差值( $\Delta T_p$ )小於 0.1 秒連續達 2 次以上，且 3 次以下，表示有連續 3~4 筆平頭訊號發生，該列為可疑或高度關注資料；若  $\Delta H_s$  或  $\Delta T_p$  連續達 4 次以上，表示有連續 5 筆以上平頭訊號發生，該列為異常資料。如圖 4 所示，從波高週期逐時序列資料可發現尖峰週期之平頭訊號較為明顯，主要因夏季短浪居多(尖峰週期短)與品管檢核容忍差值( $EPS < 0.1s$ ，擬訂)所導致可疑或高度關注資料比重偏高，可視需求調整差值門檻至 0.05s 進行檢核；示性波高除了 7 月底期間受烟花颱風(07/21~07/24)影響之外，於夏季時較為平緩無浪，故 5、6 月觀測資料之平頭訊號比重較為多些。AWAC 感測器傾斜度檢核主要確保儀器佈放傾斜度符合操作角度，以避免儀器量測之系統誤差(System error)。如圖 5 所示，可明顯瞭解到該 AWAC 波流儀於 5、6 月期間有進行更換保養，因儀器佈放偏差所導致儀器傾斜度超過使用手冊建議值 5 度。流速時序列變化率檢核主要是確保流速變化率於合理之門檻值內，門檻值為參考 IOOS 品管手冊建議值，分別為 0.5m/s(虛線)和 1.0m/s(實線)，若東西向(U)或南北向(V)之流速差值大於 0.5m/s 且小於 1.0m/s，該列為可疑或高度關注資料；流速差值大於 1.0m/s 以上，該列為異常資料。如圖 6、7 所示，分別為基隆港 1~8 月之東西向(U)或南北向(V)之流速差值時序列圖，當中可發現 5~7 月份之流速上下擺盪較為明顯，異常資料比重皆有 1%以上，尤其 5~6

月份觀測資料之連續性明顯較差。品管檢核標記主要是讓使用者有效率地瞭解資料於各層面檢核的品質優劣，確保使用者採用資料之準確性與預期用途之相關性，以避免因使用到失真無效的資料導致重大損失。

表 4 基隆港觀測資料之 IOOS 品管標記統計表(1、2 月)

Month	1				2			
Validity(*.wad)	91.5%				86.5%			
Validity(*.wap)	91.3%				86.3%			
Validity(*.sen)	98.1%				95.5%			
Flag	1	3	4	9	1	3	4	9
Flat Line	69.8%	16.7%	4.8%	8.7%	67.1%	12.8%	6.4%	13.7%
Low-Frequency Energy	91.1%	0.1%	0.0%	8.7%	86.2%	0.1%	0.0%	13.7%
Bulk Wave Parameters Max/Min/Acceptable Range	91.3%	0.0%	0.0%	8.7%	86.3%	0.0%	0.0%	13.7%
Rate of Change	89.9%	0.0%	1.3%	8.7%	83.9%	0.0%	2.4%	13.7%
Check Sum	88.0%	0.0%	3.2%	8.7%	80.5%	0.0%	5.8%	13.7%
Sensor Tilt	91.3%	0.0%	0.0%	8.7%	86.3%	0.0%	0.0%	13.7%
Speed of Sound	91.3%	0.0%	0.0%	8.7%	86.3%	0.0%	0.0%	13.7%
Signal Strength	74.5%	0.0%	16.8%	8.7%	75.1%	0.0%	11.2%	13.7%
Current Speed	91.3%	0.0%	0.0%	8.7%	86.2%	0.1%	0.0%	13.7%
Current Direction	91.3%	0.0%	0.0%	8.7%	86.3%	0.0%	0.0%	13.7%
Horizontal Velocity	91.3%	0.0%	0.0%	8.7%	86.3%	0.0%	0.0%	13.7%
Flat Line	89.5%	1.7%	0.0%	8.7%	85.9%	0.4%	0.0%	13.7%
Signal Strength	89.1%	0.0%	2.2%	8.7%	85.6%	0.0%	0.7%	13.7%
Pressure or Acoustic Surface Tracking	86.3%	0.0%	5.0%	8.7%	85.0%	0.0%	1.3%	13.7%
Sample Count	91.3%	0.0%	0.0%	8.7%	86.3%	0.0%	0.0%	13.7%
Spike Test	91.3%	0.0%	0.0%	8.7%	86.3%	0.0%	0.0%	13.7%
Series Range	85.3%	0.0%	5.9%	8.7%	84.8%	0.0%	1.5%	13.7%
Battery Voltage	91.3%	0.0%	0.0%	8.7%	86.3%	0.0%	0.0%	13.7%
u, v rate of Change	49.7%	40.3%	1.2%	8.7%	56.0%	30.1%	0.3%	13.7%
u, v Spike	91.3%	0.0%	0.0%	8.7%	86.3%	0.0%	0.0%	13.7%

表 5 基隆港觀測資料之 IOOS 品管標記統計表(3、4 月)

Month	3				4			
Validity(*.wad)	85.5%				85.9%			
Validity(*.wap)	85.2%				85.0%			
Validity(*.sen)	93.3%				94.7%			
Flag	1	3	4	9	1	3	4	9
Flat Line	68.1%	13.3%	3.8%	14.8%	64.6%	11.5%	8.9%	15.0%
Low-Frequency Energy	84.9%	0.3%	0.0%	14.8%	82.8%	2.2%	0.0%	15.0%
Bulk Wave Parameters Max/Min/Acceptable Range	85.2%	0.0%	0.0%	14.8%	84.9%	0.1%	0.0%	15.0%
Rate of Change	83.9%	0.0%	1.3%	14.8%	84.4%	0.0%	0.6%	15.0%
Check Sum	77.7%	0.0%	7.5%	14.8%	73.8%	0.0%	11.3%	15.0%
Sensor Tilt	85.2%	0.0%	0.0%	14.8%	78.2%	0.0%	6.8%	15.0%
Speed of Sound	85.2%	0.0%	0.0%	14.8%	85.0%	0.0%	0.0%	15.0%
Signal Strength	77.8%	0.0%	7.4%	14.8%	78.6%	0.0%	6.4%	15.0%
Current Speed	85.1%	0.1%	0.0%	14.8%	84.9%	0.1%	0.0%	15.0%
Current Direction	85.2%	0.0%	0.0%	14.8%	85.0%	0.0%	0.0%	15.0%
Horizontal Velocity	85.2%	0.0%	0.0%	14.8%	85.0%	0.0%	0.0%	15.0%
Flat Line	84.8%	0.4%	0.0%	14.8%	84.0%	1.0%	0.0%	15.0%
Signal Strength	84.7%	0.0%	0.5%	14.8%	84.7%	0.0%	0.3%	15.0%
Pressure or Acoustic Surface Tracking	84.7%	0.0%	0.5%	14.8%	84.0%	0.0%	1.0%	15.0%
Sample Count	85.2%	0.0%	0.0%	14.8%	85.0%	0.0%	0.0%	15.0%
Spike Test	85.2%	0.0%	0.0%	14.8%	85.0%	0.0%	0.0%	15.0%
Series Range	84.4%	0.1%	0.7%	14.8%	83.6%	0.1%	1.3%	15.0%
Battery Voltage	85.2%	0.0%	0.0%	14.8%	85.0%	0.0%	0.0%	15.0%
u, v rate of Change	64.5%	19.8%	0.9%	14.8%	67.6%	16.7%	0.7%	15.0%
u, v Spike	85.1%	0.0%	0.1%	14.8%	85.0%	0.0%	0.0%	15.0%

表 6 基隆港觀測資料之 IOOS 品管標記統計表(5、6 月)

Month	5				6			
Validity(*.wad)	95.4				98.7%			
Validity(*.wap)	91.4				98.8%			
Validity(*.sen)	96.1				98.9%			
Flag	1	3	4	9	1	3	4	9
Flat Line	51.9%	20.0%	19.5%	8.6%	59.2%	16.5%	23.1%	1.3%
Low-Frequency Energy	47.2%	44.2%	0.0%	8.6%	81.4%	17.4%	0.0%	1.3%
Bulk Wave Parameters Max/Min/Acceptable Range	90.2%	1.2%	0.0%	8.6%	97.6%	1.1%	0.0%	1.3%
Rate of Change	91.4%	0.0%	0.0%	8.6%	98.8%	0.0%	0.0%	1.3%
Check Sum	0.0%	0.0%	91.4%	8.6%	20.0%	0.0%	78.8%	1.3%
Sensor Tilt	0.0%	0.0%	91.4%	8.6%	30.7%	0.0%	68.1%	1.3%
Speed of Sound	91.4%	0.0%	0.0%	8.6%	98.8%	0.0%	0.0%	1.3%
Signal Strength	84.1%	0.0%	7.3%	8.6%	89.2%	0.0%	9.6%	1.3%
Current Speed	90.3%	1.1%	0.0%	8.6%	97.4%	1.4%	0.0%	1.3%
Current Direction	91.4%	0.0%	0.0%	8.6%	98.8%	0.0%	0.0%	1.3%
Horizontal Velocity	91.4%	0.0%	0.0%	8.6%	98.8%	0.0%	0.0%	1.3%
Flat Line	87.0%	4.4%	0.0%	8.6%	93.5%	4.6%	0.7%	1.3%
Signal Strength	89.4%	0.1%	1.9%	8.6%	96.4%	0.1%	2.2%	1.3%
Pressure or Acoustic Surface Tracking	90.9%	0.0%	0.5%	8.6%	98.1%	0.0%	0.7%	1.3%
Sample Count	91.4%	0.0%	0.0%	8.6%	98.8%	0.0%	0.0%	1.3%
Spike Test	80.8%	0.0%	10.6%	8.6%	98.8%	0.0%	0.0%	1.3%
Series Range	89.4%	0.4%	1.6%	8.6%	96.1%	0.1%	2.5%	1.3%
Battery Voltage	91.4%	0.0%	0.0%	8.6%	98.8%	0.0%	0.0%	1.3%
u, v rate of Change	74.5%	14.8%	2.2%	8.6%	81.8%	15.1%	1.8%	1.3%
u, v Spike	90.2%	0.0%	1.2%	8.6%	96.4%	0.0%	2.4%	1.3%

表 7 基隆港觀測資料之 IOOS 品質標記統計表(7、8 月)

Month	7				8			
Validity(*.wad)	88.5%				84.0%			
Validity(*.wap)	88.2%				83.6%			
Validity(*.sen)	94.8%				92.9%			
Flag	1	3	4	9	1	3	4	9
Flat Line	67.9%	13.4%	6.9%	11.8%	56.6%	13.8%	13.2%	16.4%
Low-Frequency Energy	87.2%	0.9%	0.0%	11.8%	82.9%	0.7%	0.0%	16.4%
Bulk Wave Parameters Max/Min/Acceptable Range	88.0%	0.1%	0.0%	11.8%	83.5%	0.1%	0.0%	16.4%
Rate of Change	86.7%	0.0%	1.5%	11.8%	83.6%	0.0%	0.0%	16.4%
Check Sum	84.9%	0.0%	3.2%	11.8%	83.6%	0.0%	0.0%	16.4%
Sensor Tilt	88.2%	0.0%	0.0%	11.8%	83.6%	0.0%	0.0%	16.4%
Speed of Sound	88.2%	0.0%	0.0%	11.8%	83.6%	0.0%	0.0%	16.4%
Signal Strength	82.3%	0.0%	5.9%	11.8%	77.7%	0.0%	5.9%	16.4%
Current Speed	86.7%	1.5%	0.0%	11.8%	83.2%	0.4%	0.0%	16.4%
Current Direction	88.2%	0.0%	0.0%	11.8%	83.6%	0.0%	0.0%	16.4%
Horizontal Velocity	88.2%	0.0%	0.0%	11.8%	83.6%	0.0%	0.0%	16.4%
Flat Line	87.2%	0.9%	0.0%	11.8%	82.7%	0.9%	0.0%	16.4%
Signal Strength	88.0%	0.0%	0.1%	11.8%	83.1%	0.0%	0.5%	16.4%
Pressure or Acoustic Surface Tracking	88.2%	0.0%	0.0%	11.8%	83.2%	0.0%	0.4%	16.4%
Sample Count	88.2%	0.0%	0.0%	11.8%	83.6%	0.0%	0.0%	16.4%
Spike Test	88.2%	0.0%	0.0%	11.8%	83.6%	0.0%	0.0%	16.4%
Series Range	88.0%	0.0%	0.1%	11.8%	83.2%	0.0%	0.4%	16.4%
Battery Voltage	88.2%	0.0%	0.0%	11.8%	83.6%	0.0%	0.0%	16.4%
u, v rate of Change	69.1%	17.7%	1.3%	11.8%	76.3%	6.6%	0.7%	16.4%
u, v Spike	85.3%	0.0%	2.8%	11.8%	82.4%	0.0%	1.2%	16.4%

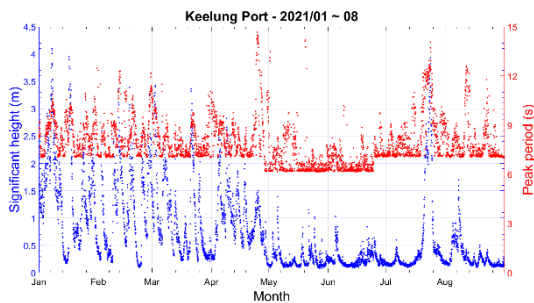


圖 4 基隆港 1~8 月之波高週期逐時序列圖

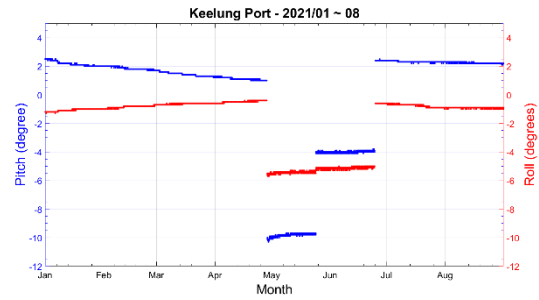


圖 5 基隆港 1~8 月之 AWAC 傾斜度逐時序列圖

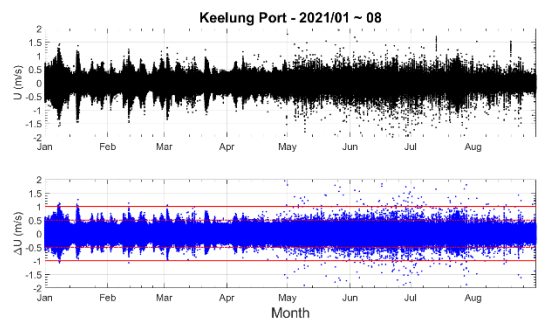


圖 6 基隆港 1~8 月之東西向流速逐秒序列圖(上)；  
基隆港 1~8 月之東西向流速差時序列圖(下)

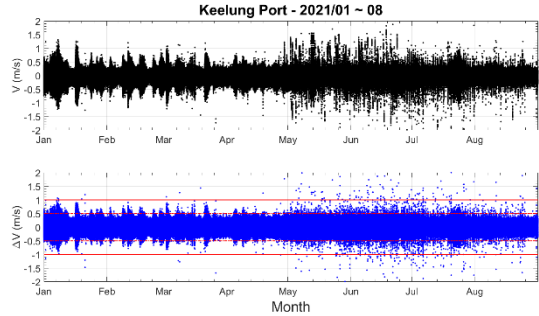


圖 7 基隆港 1~8 月之南北向流速逐秒序列圖(上)；  
基隆港 1~8 月之南北向流速差時序列圖(下)

#### 四、結論

本計畫依據美國海洋綜合觀測系統(Integrated Ocean Observing System, IOOS)所管理維護的海洋即時資料品保手冊針對波流觀測資料進行分項自動化品質檢核，並透過品質標記來鑑別資料品質，以便資料選用之參考，未來發展數位商港來實現港灣資源整合與共享，以建立商港區航線與船舶停靠最佳化模擬推算，整合智慧航線服務體系，海氣象資料自動品質技術發展勢在必行，建議可搭配雲端資料庫來整合處理感知層巨量資料，以利應用層多元

化發展。

## 謝誌

本計畫係運輸研究所合作計畫「港研中心 110 年度波流觀測站定期維護保養、資料品管及加值應用」(編號 MOTC-IOT-110-H2C019)之研究成果，承蒙交通部運輸研究所經費之補助，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. Integrated Ocean Observing System.(IOOS) Quality Assurance / Quality Control of Real Time Oceanographic Data, QARTOD Manual.
2. 港灣技術研究中心「港灣環境資訊網」：  
<https://isohe.ihmt.gov.tw/>
3. NORTEK 超音波式波流儀儀器規格書：  
<https://www.nortekgroup.com/products>
4. 李忠潘、張憲國、曾以帆、許弘莒、劉勁成、李孟學、陳蔚璋、劉黃宗隆、莊曜陽、吳泓毅、王韋樺、江朕榮、陳沛宏、李明峯、許城榕、林照川，2018，「臺北港海氣地象資料檢核與分析」，交通部運輸研究所。



# 海洋大數據之整合加值-全國海域風波潮流統計年報製作(以 2019 年為例)

呂宜潔<sup>1\*</sup> 楊文昌<sup>2</sup> 邱永芳<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>國家海洋研究院海洋科學及資訊研究中心助理研究員

<sup>2</sup>國家海洋研究院海洋科學及資訊研究中心主任

<sup>3</sup>國家海洋研究院院長

## 摘要

為維繫海洋自然系統、因應氣候變遷、防治海岸災害與環境破壞、保護與復育海岸資源、推動海岸整合管理，並促進海岸地區之永續發展，我國各涉海機關依其權管設置包括風力、波浪、潮汐及海流等海洋環境調查測站，以供海岸研究、規劃、教育、保護及管理運用。國家海洋研究院自 2019 年成立以來，即被賦予統合各機關(構)海洋資料、建構全國海洋資料庫的使命，期望發揮資源整合及海洋大數據之效益。

本研究即嘗試彙整交通部中央氣象局、交通部觀光局、經濟部水利署、交通部運輸研究所港灣技術研究中心及本院等 5 個單位之風、波、潮、流等觀測資料，並自主開發自動檢核、統計分析程式及繪製相關圖表資訊，製成 2019 年臺灣海域水文觀測資料月統計年報，期望能對離岸風電施工規劃、海洋政策訂定、海洋空間規劃、海域救生救難及防救災等提供實務所需的海洋環境基礎資訊。

關鍵詞：風力、波浪、潮汐、海流、海洋環境數據統計、海洋資料庫

## Annual Report of Wind, Wave, Tide and Current Statistics in Taiwan Waters with Integration and Value-added of Ocean Data - A Case Study of 2019

Yi-Chieh Lu<sup>\*</sup>, Wen-Chang Yang, Yung-Fang Chiu

<sup>\*</sup> Research Assistant, Marine Science and Information Research Center, National Academy of Marine Research

## ABSTRACT

In order to promote integrated coastal management and sustainable development of coastal areas, various marine related authorities in Taiwan have set up marine environmental survey stations including wind, wave, tide and current for coastal research, planning, education, protection and management. Since the establishment of the National Academy of Marine Research in 2019, it has been given the mission of integrating ocean data of various agencies/institutions and constructing a national ocean database, hoping to bring out the benefits of resource integration and ocean big data. This study attempted to compile the observation data from five domestic units, and developed an automatic verification and statistical analysis program and related chart information to produce the 2019 Annual Report of Wind, Wave, Tide and Current Statistics in Taiwan Waters, which is expected to provide basic information on the marine environment for offshore wind power construction planning, marine policy formulation, marine spatial planning, search and rescue and disaster prevention.

Keywords: Wind; Wave; Tide; Ocean Current; Marine Environmental Data Statistics, Ocean Database

## 一、前言

海洋是地球表面最大的組成部分，具有穩定氣候、維持物種生命和人類福祉的功能。為了地球的永續發展，聯合國教育、科學與文化組織於 2017 年 12 月 6 日宣布「海洋科學促進永續發展國際十年（2021-2030）」的構想，期望科學家、決策者、管理者和服務消費者應共同努力，確保海洋科學為海洋生態系統和社會帶來更大的利益，扭轉海洋健康衰退的趨勢，進而實現乾淨的海洋(clean ocean)、健康有韌性的海洋(healthy and resilient ocean)、可預測的海洋(predictable ocean)、安全的海洋(safe ocean)、永續收穫與生產的海洋(sustainably harvested and productive ocean)以及透明的海洋(transparent ocean)等海洋永續發展目標。

爰此，海洋委員會將以科學為基礎，訂定合適的策略來應對海洋環境變化，並責成國家海洋研究院應有系統性地、科學化地瞭解海洋對環境壓力和管理行為的反應，作為永續發展策略之擬定基礎。這包括幾個重點工作：綜合海洋數據與資訊圖集、海域綜合觀測系統能量建置、海洋災害預警系統、導入人文社會科學及經濟角度的海洋評估機制，以及技術轉化、培訓和教育等面向。

為掌握臺灣全海域長期水文與海洋環境特性，國海院刻正進行臺灣周遭海域之長期性、應用性與基礎性之調查研究工作，整合在全國各單位海洋相關資料，規劃藉由蒐集長期基礎水文時空變化，以瞭解臺灣海洋環境特性，進而提供水文統計特性和精進海洋模式。

我國目前對於海洋觀測及海洋研究相關資料分散於政府部門、研究單位等地，如交通部中央氣象局(下稱氣象局)、經濟部水利署(下稱水利署)、交通部運輸研究所港灣技術研究中心(下稱港研中心)等單位，依其業務職掌於設置風力、波浪、潮汐及海流等測站。但也因資料分散於各單位以致相關資料無法有效利用。國家海洋研究院(下稱本院)依海洋基本法第 12 條「政府應促成公私部門與學術機構合作，建立海洋研究資源運用、發展之協整合機制，提升海洋科學之研究、法律與政策研訂、文化專業能力，進行長期性、應用性、基礎性之調查研究，並建立國家海洋資訊系統及共享平台。」整合各機關(構)之海洋資料，建構完整的海洋大數據資

料收集、整合，以提供政府機關、科研單位整合性之海洋資料共享平臺。另根據海岸管理法第六條「中央主管機關應會同有關機關建立海岸地區之基本資料庫，定期更新資料與發布海岸管理白皮書，並透過網路或其他適當方式公開，以供海岸研究、規劃、教育、保護及管理運用。」

## 二、研製流程

本院彙整各單位全國海域水文觀測資料，進行各測站及各海域之分析，結合統計的方法，以合理性、連續性、關聯性等資料檢核標準因素，來開發自動檢核的系統程式；並整合全國周遭海域的水文觀測資料，製成觀測時序列圖、重要參數統計表、玫瑰圖及波高與連續作用時數統計，以提供離岸風電施工規劃、海洋政策、應用海洋發展規劃、海洋空間規劃、海域安全救難及防災及救災等各層面之歷史資料統計圖表。

### 2.1 資料分析 (Data Analysis)

正確完成數據處理是取得數據後相當重要的一環，其目的是避免對最終產品或數據輸出產生影響，將數據轉換為更具可讀性的格式(圖表、文檔等)，透過收集數據並將其轉換為可用的資訊，數據處理可分為三個階段，說明如下：

#### 2.1.1 資料收集 (Data Collection)

收集資料是資料分析的第一步。本研究收集的數據來自氣象局建置之臺灣海象防災環境平台、水利署建置之水文資訊網整合服務系統以及港研中心港灣環境資訊網。良好的及可用的數據來源是值得信賴且構建良好的，因此收集到的數據（並在以後用作信息）具有盡可能高的質量。

#### 2.1.2 資料前處理 (Data Processing)

資料是資料科學中的基礎，要有好的資料，才能產生好的資料價值。在實務中，資料會有資料缺失 (Incomplete/Missing data)、雜訊 (Noise)、離異值等等的問題。資料前處理泛指的是在分析演算法之前，先對資料進行處理，讓資料在格式上比較標準一致。為的是讓演算法不會因為資料產生的瑕疵而誤判。

##### A. 資料清理 (Data Cleaning)

資料清理是資料前處理的第一步，舉例來說在海流資料上，氣象局若無觀測到此筆資料或因品管檢核為無效值時，以不顯示此筆資料進行呈現，而水利署及港研中心則會將此筆資料以不同數值進行標註，如表 1。本院僅對所收集之資料進行加值統計分析，為維持原觀測單位之原始性，故對於缺失值僅以無效值 NaN 進行取代，並於標示代碼(Flag)中進行標註，避免誤將無效的數值納入統計，造成影響統計結果。

此外，各單位之使用之觀測儀器及設置位置，亦可能對於觀測資料蒐集結果略有不同，如表 1。在風力觀測上，三個單位皆使用風速計，但氣象局及水利署是將風速計架設於資料浮標上，港研中心則架於近岸觀測樁頂/堤頭/建物樓頂。波浪觀測上，氣象局及水利署採用加速度-傾角-電羅經 (accelerometer-tilt-compass, ATC) 波浪儀架設於資料浮標系統中，港研中心則使用超音波式波浪波高與剖面海流儀(Acoustic Doppler Wave and Current Profiler, AWAC)，底碇於海床上觀測波浪變化。在潮位觀測上，氣象局及水利署主要以超音波式潮位儀為主，而港研中心則以壓力式潮位儀為主，壓力式潮位儀係將儀器布放於最低潮位以下的深度，透過感應器感應海水升降產生的壓力變化，再透過訊號轉換成水位高度。超音波式潮位儀係將儀器置於穩定井之上方，計算音波來回測量水面與感應器間之時間，推算水位高度。海流觀測上氣象局及水利署採用聲學都卜勒流速剖面儀 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)，將儀器架設於資料浮標系統中，向下收集海流資料，港研中心則使用超音波式波浪波高與剖面海流儀(Acoustic Doppler Wave and Current Profiler, AWAC)，儀器架設於海床上，向上收集海流資料。

#### B. 資料整合 (Data Integration)

資料整合也有人稱為是合併資料，將不同資料集/資料表的資料進行合併。故本研究依風、波、潮、流四種海氣象參數進行資料整合。資料整合可以整併所有類型的資料 (結構化、非結構化、批次和串流等)，有利於完成難易度不同的工作，從庫存資料庫的基本查詢，到複雜的預測分析都不成問題。

#### C. 資料轉換 (Data Transformation)

本研究蒐整之資料為 3 個單位所產製，具有不

同之資料類型、資料格式、詮釋資料定義等，如表 1，有許多需要統整並進行資料檔案標準正規化工作的需求。本研究參照建置案倉儲資料型式及檔案格式，進行資料數據標準化，以期未來在資料庫建置上可有較好的效率，對後續資料庫查找等工作亦能有所助益。

### 2.1.3 資料分析與視覺化

輸出/解釋階段是數據最終可供非數據科學家使用的階段。它經過翻譯、可讀，通常以圖表、視頻、圖像、純文本等形式存在。本研究整合全國周遭海域的水文觀測資料，製成觀測時序列圖、重要參數統計表、玫瑰圖及波高與連續作用時數統計，以提供離岸風電施工規劃、海洋政策、應用海洋發展規劃、海洋空間規劃、海域安全救難及防災及救災等各層面之歷史資料統計圖表。

## 2.2 區域特性探討

除針對各測站進行單一點之統計分析外，本院並依各測站知地理位置，進行區域特性探討，分為臺北基隆、宜蘭蘇澳、花蓮、臺東、鵝鑾鼻、屏東小琉球、高雄、嘉義、臺南、新竹臺中、澎湖、金門、馬祖共 12 個海域，測站位置及海域分區如圖 2，藉由瞭解其時空變化，以瞭解該海域水文統計特性。

## 三、初步結果

本院蒐整各單位風力、波浪、潮汐及海流等水文觀測資料，結合統計的方法，以合理性、連續性、關聯性等資料檢核標準因素，來開發自動檢核的系統程式；並整合臺灣周遭海域的水文觀測資料，製成觀測時序列圖、重要參數統計表、玫瑰圖及波高與連續作用時數統計圖，期能作為我國離岸風機施工規劃、海域基礎資料蒐整及其他應用之參考資料。

圖 3 為依各測站逐時之平均風速與平均風向繪製每月風力玫瑰圖，圖中繪製馬祖測站各月之風力玫瑰圖，風力玫瑰圖之顏色分別代表該月不同範圍之風速值，如藍色為風速小於 2 級，綠色為風速介於 2-4 級，黃色為風速介於 4-6 級，紅色則為風速大於 6 級。圖中藍框區域上列顯示測站英文名稱及月份，下列顯示該月風速觀測之有效筆數及百分比。藉由此圖可觀測該測站整年度之變化情形，可

用於探討該位置之特性分析。

圖 4 為依各海域繪製每月各測站逐時之示性波高與波向之波浪觀測玫瑰圖，透過繪製各海域玫瑰圖可用於瞭解同一海域於同一月份各測站觀測結果之相關特性，由此圖可觀察到臺東浮標、成功浮球及蘭嶼浮標皆位於海岸之右側，2019 年 9 月主要波向為東北東向；然而綠島南寮漁港之測站架設於海岸之左側，故主要波向為西南向。

黃清和等人(2012)年提出之可工作日數分析，以有義波高 0.6 公尺為門檻，探討每個月波高小於該門檻並且持續 6、12、18 及 24 小時等四種延時條件的發生機率。

本院參考黃清和等人(2012)之構想，製作圖 5 為依各測站繪製示性波高(Hs)與連續作用時數百分比統計圖，如圖 5 之橫軸為百分比，縱軸為該長條圖計算之示性波高值，單位為公尺。當示性波高  $H_s < 1.5$  公尺且時間小於 24 小時為綠色，表示當月逐時示性波高  $H_s$  小於 1.5 公尺連續時間小於 24 小時之百分比，藍色則表示逐時示性波高  $H_s$  小於 1.5 公尺連續時間 25 至 48 小時之百分比，以此類推至大於 120 小時之百分比。

由此圖可瞭解該測站該月波高連續作用時間比例，可作為未來海洋產業可施工日估算及船隻出海作業規劃參考。未來擬持續整合各單位長期觀測資料並出版觀測年報，整合我國海洋研究學術量能，俾利離近岸工程施工規劃、海域開發基礎資料蒐整、海域開發保全之使用及產官學研應用。

## 四、未來展望

國家海洋研究院整合國內外海洋相關資料與各監測技術發展現況，研究能量與資源，建構完整的海洋大數據資料收集、整合，充分發揮科研資源整合效益，納入國內之機關海洋資料庫，應用海洋發展規劃、海洋政策、海洋空間規劃、環境生態維護、海域安全救難、防災及救災、建立環境保育機制等各層面。

本研究未來擬納入全國海洋資料庫，透過建置自動化產出相關統計圖表，期能提供使用者可透全國海洋資料庫取得各站月統計圖表，並可自行產出選擇時間區段之成果圖。

## 五、謝誌

本研究使用之風波潮流資料分別來自交通部中央氣象局、經濟部水利署、交通部運輸研究所港灣技術研究中心及交通部觀光局，特此感謝國立成功大學近海水文中心在資料分析上提供寶貴的建議及經驗分享。

## 六、參考文獻

1. 臺灣海像災防環境平台，交通部中央氣象局，<https://safesee.cwb.gov.tw/V2/>。
2. 水文資訊網整合服務系統，經濟部水利署，<https://gweb.wra.gov.tw/hydroinfo/>。
3. 港灣環境資訊網，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，<https://isohe.ihmt.gov.tw/>。
4. 黃清和、錢樺、李文欽、游微娟、洪子軒(2012)



「台灣周邊海域可工作日分析」，第 34 屆海洋工程研討會論文集，第 607-612 頁。

圖 1 年報研製流程圖

圖 2 各海域及波浪資料觀測站位置示意圖

	CWB	WRA	IHMT
<b>風力</b>			
時間解析度	1小時1筆	1小時1筆	10分鐘1筆
平均風速	0.1公尺/秒	公尺/秒	公尺/秒
平均風蒲福風級	O	X	X
平均風向	度	度	度
陣風	0.1公尺/秒	公尺/秒	公尺/秒
陣風蒲福風級	O	X	X
品管後無效值標示	不顯示此筆資料	不顯示此筆資料	不顯示此筆資料
觀測儀器	風速計	風速計	風速計
設置形式	資料浮標	資料浮標	近岸觀測樁頂/堤頭/建物樓頂
<b>波浪</b>			
時間解析度	1小時1筆	1小時1筆	1小時1筆
示性波高	公分	公分	公尺
浪級	O	X	X
尖峰週期	0.1秒	秒	秒
平均週期	0.1秒	秒	X
波向(來向)	度	度	度
品管後無效值標示	不顯示此筆資料	不顯示此筆資料	-999.00、-999.99
觀測儀器	波浪儀	波浪儀	波潮流儀
設置位置	資料浮標	資料浮標	底碇式
<b>潮汐</b>			
時間解析度	6分鐘1筆	6分鐘1筆	1分鐘1筆
潮高	公釐	公分	公分
品管後無效值標示	不顯示此筆資料	44444.4、66666.6、77777.7、88888.8、99999.9	-9999
觀測儀器	壓力式/超音波式	超音波式	波潮流儀
設置位置	觀測井	觀測井	底碇式
<b>海流</b>			
時間解析度	1小時1筆	6分鐘1筆	1小時1筆
表層海流流速	公分/秒	公分/秒	公尺/秒
表層海流流向	度	度	度
品管後無效值標示	不顯示此筆資料	-3、-6、-7	-9.99、-999.00、-999.99
觀測儀器	流速儀	流速儀	波潮流儀
設置位置	資料浮標	資料浮標	底碇式
CWB：交通部中央氣象局			
WRA：經濟部水利署			
IHMT：交通部運輸研究所港灣技術研究中心			

表 1 本研究蒐整各單位觀測儀器與資訊

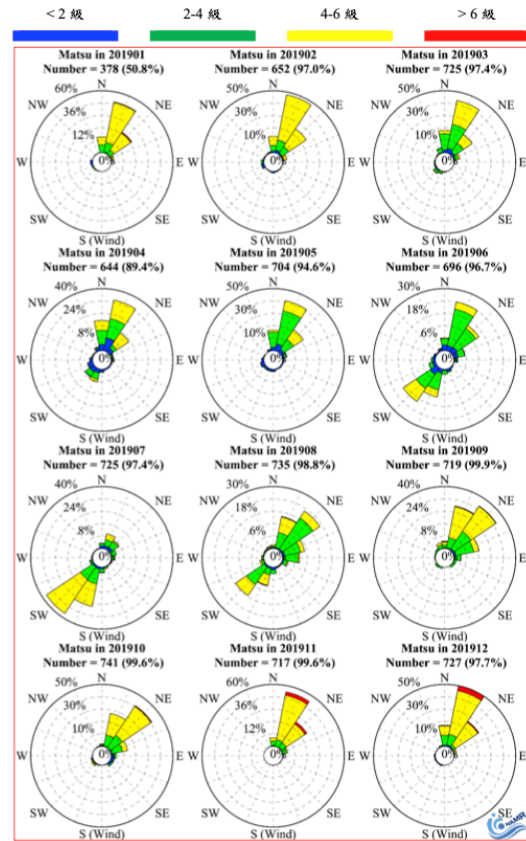


圖 3 馬祖浮標測站 2019 年風力逐月玫瑰圖

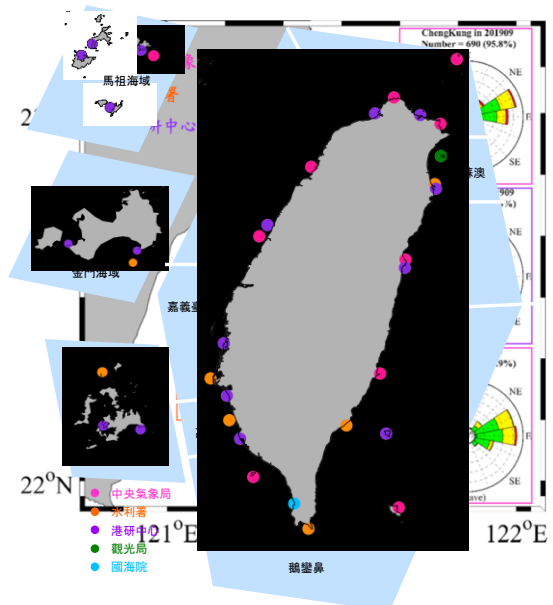


圖 4 臺東海域 2019 年 9 月波浪觀測玫瑰圖

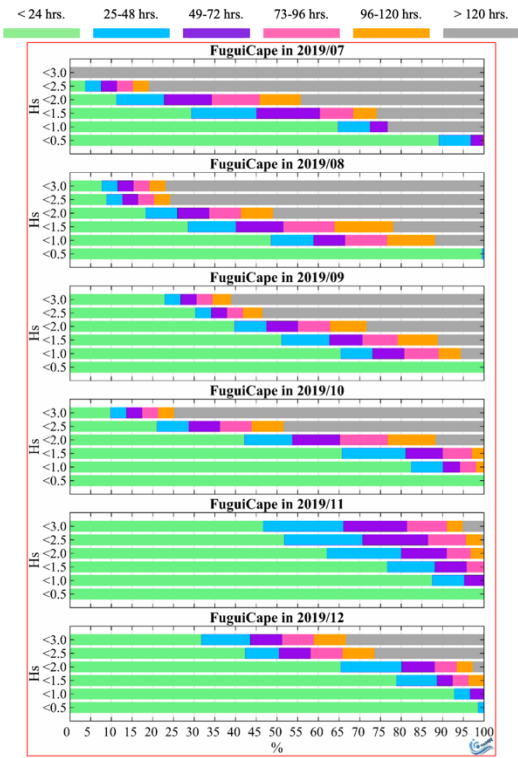


圖 5 富貴角浮標 2019 年 7-12 月  
波高與連續作用時數百分比統計圖

# 應用無人機檢測海堤消波塊之研究

方惠民<sup>1</sup> 江宗翰<sup>2</sup> 蕭松山<sup>3</sup> 劉乃慈<sup>4</sup> 蔡秉杰<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣海洋大學海洋工程科技學士學位學程(系)助理教授

<sup>2</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系博士候選人

<sup>3</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系教授

<sup>4</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士

<sup>5</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士班研究生

## 摘要

海堤堤體安全及設施功能的確保，有賴堤前消波塊拋石的安定性。海堤常年受季節性浪流作用致堤前拋石滑落，消能御浪功能不足，終將危及海堤安全，正突顯海堤堤前拋石區消波塊消波功能檢測維護的重要性。海堤堤前海側消波塊實務檢測工作存在作業困難及安全風險。緣此，本研究應用無人機搭載光學鏡頭，藉由射影測量分析技術評估海堤堤前拋石區消波塊的安定性，可作為海堤消波功能維護管理之輔助檢測工具。

關鍵詞：消波塊檢測、無人飛行載具、港灣構造物

## Using Unmanned Aerial Vehicle to Detect Armor Blocks of Seawall

Hui-Ming Fang\*, Tzung-Han Jiang, Sung-Shan Hsiao, Nai-Tzu Liu, Ping-Chieh Tsai

\* Assistant Professor, Department of Ocean Engineering and Technology, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

The safety of the sea dyke body and the function of the facilities depend on the stability of the riprap of the wave-eliminating block in front of the sea dyke. The seawall is affected by seasonal waves all the year round and the front of the embankment has been thrown and slipped. The energy dissipation function is insufficient and the safety of the seawall will eventually be endangered. This is highlighting the importance of the inspection and maintenance of the wave elimination function of the wave-breaking block in the front of the seawall. There are operational difficulties and safety risks in the practical inspection of the wave-breaking block on the sea side in front of the seawall. For this reason, this research uses UAVs equipped with optical lenses to evaluate the stability of wave-eliminating blocks in front of the seawall by projective measurement and analysis technology, which can be used as an auxiliary inspection tool for the maintenance and management of seawall wave-elimination functions.

Keywords: wave-breaking block detection; unmanned aerial vehicle; harbor structure

## 一、前言

臺灣位處西太平洋夏秋季節颱風好發地區，平均每年 4.7 個颱風衝擊海岸地區，造成海岸線退縮、海岸結構物損壞、海岸濕地生態平衡破壞等，嚴重影響海岸地區人民活動的安全及產業發展。海堤、

防波堤等構造物為海岸及港灣防護的重要設施，主要係依靠其自重及高度以抵抗波浪力及越波現象，多採重力式混凝土結構設計，惟若堤前消能設施不足基礎經波流反覆掏刷，容易產生基礎掏空而導致堤體斷裂、損壞甚或崩塌等情形(如圖 1 所示)，現況多採用方塊或消波塊等混凝土塊拋放於堤前。



圖 1 消波塊流失後海堤基礎掏空坍塌情形

根據海堤構造物檢測維護管理作業構想，郭等(2010)基於港灣防波堤設施安全及功能評估維護管理策略分為檢測、評估、維修補強及資料庫處理等四項，建構評估方式及檢測項目與防波堤的破壞模式有相對應之關聯，依據構造破壞行為，決定檢測項目及維修補強的方法。港灣及海岸結構物以人力檢測較為耗時，檢測現場檢測評估劣化程度不易，若能借重無人機進行海堤結構物外觀檢測，將可提升及改善以人力檢測的經濟及效率。賴等(2013)以無人飛行載具搭載影像設備，進行海堤檢測作業有效降低檢測困難度及成本，並可提高人員作業安全性。蕭等(2018)辦理海岸調查計畫，並將此一概念模式應用於彰化縣海堤外觀檢測，結果顯示有助於定期海堤外觀檢測以及港灣環境空間資訊之收集。

港灣隨著功能、地點、地形、海象環境的不同，檢測方式也不一樣。以港灣動力地形學的研究觀點，Bishop(2012)回顧了歷史 DEM 重建方法的優點和局限性，重點是將它們與後續 DEM 結合起來構建差異 DEM，可以通過從另一個高程模型中減去一個高程模型來創建，以沉積和體積變化。Papakonstantinou(2016)認為遙測提供了關於港灣地形變化的空間分佈的充分信息，使我們能夠以更高的空間分辨率分析沿海動態。本文將就 UAV 攝影測量應用於消波塊保護工檢測及管理進行研究評估，並以海洋大學海堤後消波塊保護工為例，期能取代現行消波塊檢測方法，使檢測工作得更快速、精確、安全及一致性，確實掌握消波塊劣化及流失情形。

## 二、消波塊機制及量化方法

混凝土消波塊排放方式可分為整齊排列或亂拋方式或混之，單層或雙層、單排或兩排以上排列，均須依設計圖說於規定範圍內拋放。不同的塊體形狀有其各別之適宜置放式樣，塊體排列式樣，並非

規則排列一定比亂拋來得穩定。消波塊體間的鍵結及整體形成的包絡體積，將影響消波功能及消波塊的安定性。吳啟蕙(2018)針對海洋大學工學院海堤檢測作業，將海堤段分為五單元並設定里程。將海堤三維模型轉換為平面座標及高程，可得研究範圍之堤外消波塊測量平面圖，再依據間距 20 公尺繪製各斷面圖，並由圖中擷取各里程消波塊流失面積，進一步以平均斷面法計算消波塊流失體積。

## 三、攝影測量檢測法

### 3.1 光束法空中三角測量

光束法空中三角測量係指利用攝影像片及目標之間的空間關係，透過像片控制點計算實際點位於空間中之位置、高程及外方位參數的測量方法。基本理論為中心投影的共線式方程式(1)，連結地面空間座標得出各加密點之座標 (Wolf and Dewitt, 2000)，詳圖 6 所示。

$$\begin{cases} x_a - x_0 = -f \frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \\ y_a - y_0 = -f \frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \end{cases} \quad (1)$$

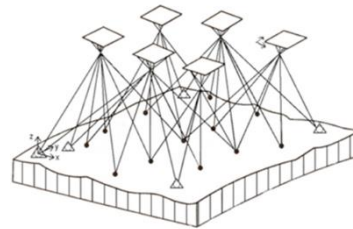


圖 2 光束法空中三角示意圖(Kraus, 1993)

### 3.2 影像匹配

本研究使用之影像辨識及匹備軟體為「Pix4Dmapper」其係改良 David G. Lowe(1999)提出之 Scale-invariant feature transform(SIFT)尺度不變特徵轉換演算法。SIFT 演算法(David G. Lowe,2004)改良 Harris 演算法如下圖 3，改善 Harris 演算法無法抵抗影像尺度改變的問題，並具備抵抗影像旋轉的能力。



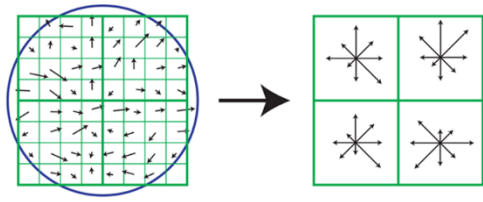


圖 3 SIFT 影像匹配

## 四、檢測案例任務規劃

### 4.1 預備鏡頭校正

相機影像成像過程因鏡頭透鏡像差造成扭曲，除了使影像產生變形，也造成了影像座標之非線性偏移，如圖 4 所示。根據(Z. Zhang,2000)定義徑向扭曲量值與徑向距離的關係如圖 5 所示。當主軸點和扭曲係數決定後，既可針對影像上的徑向扭曲進行校正。

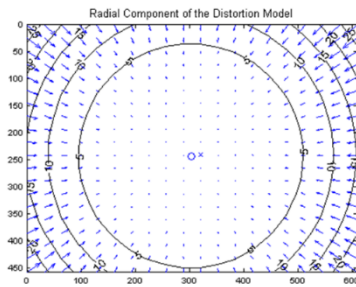


圖 4 徑向扭曲大小示意圖

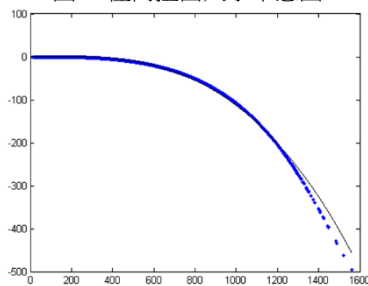


圖 5 徑向扭曲量值與徑向距離回歸關係

為解決相機鏡頭可能產生影像扭曲的問題，本研究參考 Z. Zhang. (2000)所提出的方法，並設計校正實驗，相機內方參數校正所使用之黑白格板如圖 4 所示，係由等間距 3 公分x3 公分網格所組成大小為 100 公分x100 公分之校正版。為求得立體影像之正確，使用相機進行內方位參數校正如下圖 6。

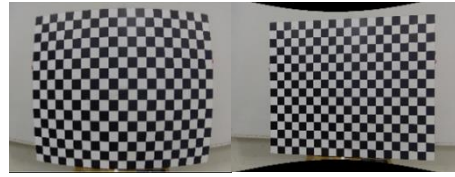


圖 6 相機內方位校正前後影像

### 4.2 檢測範圍

本研究案例海堤位於海洋大學工學院後方，該海堤為混凝土塊堆疊及堤前拋消波塊保護，屬於一般性海堤，全長約 890 公尺。後續因擴展校區逐年增建，然而受經費預算有限及保全視覺上之美感等條件，工學院海堤並未採用與相鄰八斗子漁港相同設計之胸牆及海堤，遂採用複合式海堤，利用低胸牆海堤與複合斷面以維持觀景及越波溢淹遲緩之功能如下圖 7 所示。2004 年已有部分消波塊滑落致使海堤後線局部基礎疏鬆之情況發生，避免消波塊滑落區域影響整體海堤安全，並於同年進行第二次海堤整建工程。



圖 7 海洋大學後海堤空拍圖

### 4.3 控制點佈設

遙感技術對於地形測繪結果精度地面控制點是座標修正中重要的依據。控制點採黑白相間隔板形式如圖 8，材質選擇實厚木板避免風吹位移，尺寸則選定 100x100 cm。本研究因係採用 VBS-RTK 可測得 GCP 皆為全控制點，可將平面與高程控制點稍作修正為全控點。



圖 8 黑白相間實木隔板

#### 4.4 飛行任務配置

表 1 任務參數配置表

飛行高度(Altitude)	10m
鏡頭角度(Camera Angle)	80°
前後重疊率(End Lap)	80%
側向重疊率(Side Lap)	30%
飛行範圍(Dimensions)	20m×101m
飛行軌跡模式(Flight Type)	雙 S 型(Double Gird)

航線規劃部分因需建置數值高程地形模型所以選擇雙 S 型，可取得相較單 S 型軌跡模式產出更高精度之三維模型。控制點分布參考內政部國土測繪中心之「一千分之一數值航測地形圖測製作業規定」航拍影像之前後重疊率需滿足 80%，左右重疊率則需滿足 30%，航高選定需符合地面解析度 10cm 以上，詳細飛行任務配置如上表 1。航線範圍海堤長度過長，因電池容量無法單次完成完整檢測範圍，將海堤分五次飛行任務進行整合，其一測線規劃圖如下圖 9。

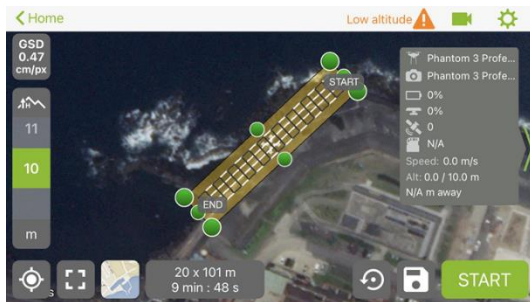


圖 9 研究區域測線規劃圖

### 五、案例成果分析

本次實驗拍攝成果共擷取 1389 張影像進行分析，配合地面控制點，利用 Pix4Dmapper 軟體生成三維點雲圖，地面解析度約 4.96cm/pix，數值地形模型如下圖 10，正射影像如下圖 11 所示。

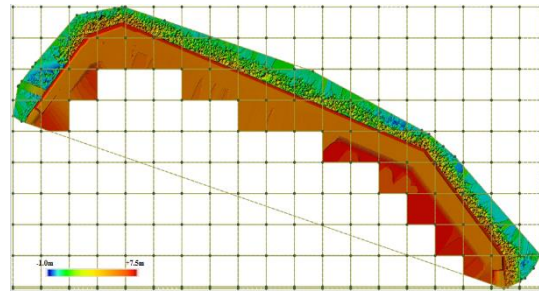


圖 10 影像匹配產製數值地形模型示意圖

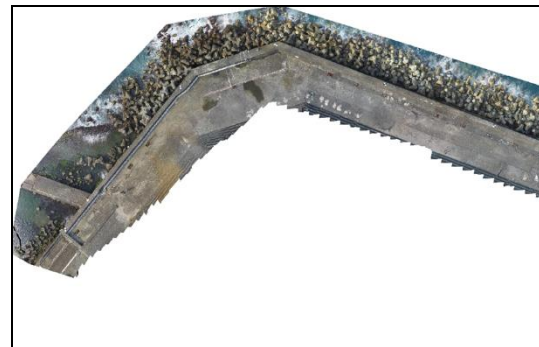


圖 11 海堤正射鑲嵌影像



圖 12 海洋大學海堤單元劃分圖

如上圖 12 所示，將研究案例海堤分為五單元並設定里程。本研究海堤及消波塊影像建置之三維模型顯示，在第二、三及四單元(里程 0K+100~0K+400)處，有明顯消波塊流失之情形如下圖 13，因此本研究消波塊損壞量化計算以里程 0K+100~0K+400 處之範圍為計算目標。

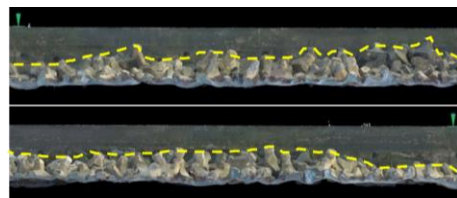


圖 13 里程 0K+100~0K+200 處消波塊流失情形

藉由上述 Pix4Dmapper 軟體生成三維點雲圖，各消波塊表面點雲之高程值，確認各消波塊位置後將各消波塊高程數值標示如圖，以利後續與原海堤設計斷面比較計算用。

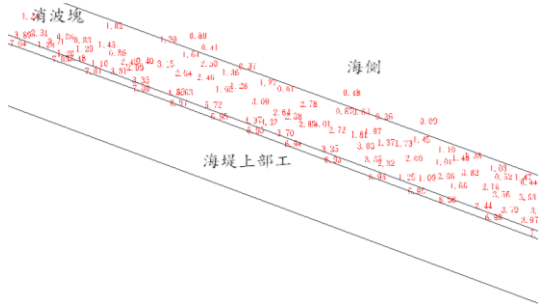


圖 14 堤外消波塊測量平面圖

將原海堤設計圖如圖 15 已知設計海堤消波塊尺寸、塊體型態與排列方式，將其與斷面高程空拍建置三維地形成果相比，透過消波塊各里程斷面高程數值計算面積差量，列出各斷面面積差量如圖 16，

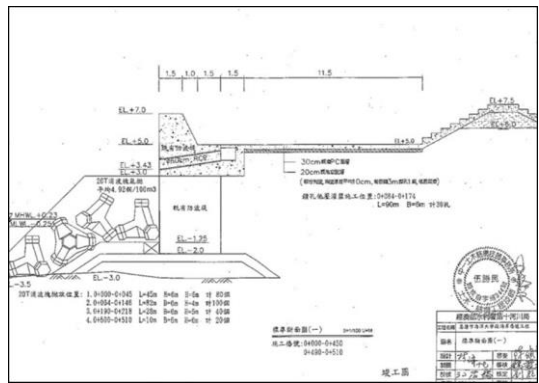


圖 15 海洋大學海堤斷面圖

消波塊數量計算需考量包含消波塊種類、消波塊體積、消波塊排列方式及孔隙率等，其與拋放體積之關係式(2)如下。

$$N = \frac{V(1-0.59)}{v} \quad (2)$$

式中，N 為消波塊個數、V 為混凝土單塊體積、v 為消波塊拋放孔隙率。現況消波塊為 20T 林克塊，採亂拋法排列，參照林克塊型錄，20T 林克塊型消波塊體積約為 8.33 m<sup>3</sup>，如採亂拋法排列孔隙率約為 59%。

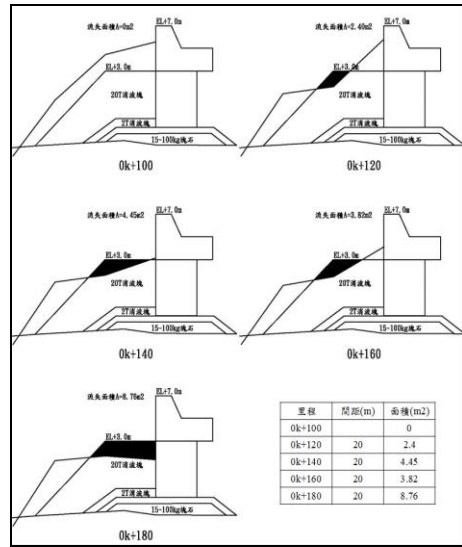


圖 16 堤外消波塊流失面積斷面圖

表 2 消波塊流失個數計算表

里程	間距(m)	面積(m <sup>2</sup> )	體積(m <sup>3</sup> )	流失數量(個)
0k+100		0	0	0
0k+120	20	2.4	24	2
0k+140	20	4.45	68.5	4
0k+160	20	3.82	82.7	5
0k+180	20	8.76	125.8	7
0k+200	20	0	87.6	5
0k+220	20	0	0	0
0k+240	20	0	0	0
0k+260	20	6.35	63.5	4
0k+280	20	6.38	127.3	7
0k+300	20	0	63.8	4
0k+320	20	0.77	7.7	1
0k+340	20	0	7.7	1
0k+360	20	2.37	23.7	2
0k+380	20	3.15	55.2	3
0k+400	20	0	31.5	2
總計			N=	47

消波塊流失個數計算如上表 2，0K+160~0K+180 間消波塊流失個數為 7 個；0K+260~0K+280 間消波塊流失個數為 7 個；此兩區間里程海堤堤外消波塊流失數量較多，與其他里程區間加總流失數量為 47 塊

## 六、結論

1. 本研究以海洋大學工學院海堤為例，透過建置完成之海堤及堤前消波塊三維模型，顯示在第二單元、第三單元及第四單元(里程 0K+100~0K+400)處，有明顯消波塊流失之情形，進一步依據原設計消波塊斷面，採現場 20T 林克塊亂拋法排列進行流失消波塊計算，總流失數量約 47 個。
2. 部份消波塊於退潮後仍有水分殘留，容易產生光線反射而影響影像匹配作業，造成明顯誤差，未來可針對誤差範圍及情形進行討論，並作為點雲圖編修之參考依據，鏡頭與水體反光部分可透過偏光鏡或減光鏡消除光線干擾。
3. 本研究結合 UAV 的機動性及攝影測量技術，產製消波塊高密度三維點雲，完整建置受測目標之三維模型，有效掌握消波塊空間資訊，有效降低人力及時間成本，可作為輔助檢測工具。

7. 郭世榮、蕭松山、方惠民、何良勝、蘇乙評、許宏銘(2010)“港灣防波堤維護管理系統建置之研究”，第 32 屆海洋工程研討會論文集第 605-610 頁。
8. 賴澄燦、方惠民、王星宇、蕭松山、曾俊彬、王振信(2013)，停旋機應用於消波塊檢測之初步研究，第 35 屆海洋工程研討會論文集 755-759。
9. 邱永芳、林紹圭、何良勝、蔡金吉(2013)“消能式結構物應用於台灣港灣設施保全之研究(4/4)”，交通部運輸研究所。
10. 內政部國土測繪中心(2010)，「採用虛擬基準站即時動態定位技術辦理加密控制及圖根測量作業手冊」。
11. 第十河川局，「台北海岸一般性海堤功能評估及防護基本資料調查」(民國 108)
12. 內政部國土測繪中心(2011)，「建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊」。

## 參考文獻

1. Michael P.Bishop(2012) “Geospatial technologies and digital geomorphological mapping, Concepts”, Geomorphology, Volume 137, .pp 5-26.
2. Wolf P. and Dewitt B. ( 2000) “Elements of photogrammetry with applications in GIS”
3. Z. Zhang (2000) “A flexible new technique for camera calibration”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11) , pp.1330-1334.
4. Lowe D.Lowl, (2004) “Distinctive image features from scale-invariant keypoints” International journal of computer vision, 60(2), pp. 91-110.
5. 李賢華、許書王(2001) “港灣碼頭之破壞檢測及初步安全評估”，第 23 屆海洋工程研討會，第 676-683 頁。
6. 林敬樺、蕭冠宇、葉鳳美、韓佳安、劉正琪(2006) “無人飛行載具應用於海堤外觀檢測之初探”，第 28 屆海洋工程研討會論文集 267-272 頁。

# 花蓮港颱風波浪之數值模擬

周立翔<sup>1\*</sup> 夏武成<sup>1</sup> 蘇仕峯<sup>2</sup>

<sup>1</sup>淡江大學水資源及環境工程學系碩士生

<sup>2</sup>國立臺灣海洋大學海洋工程科技學士學位學程副教授

## 摘要

科技部計畫：MOST 109-2221-E-032-020

花蓮港地理位置面臨太平洋容易直接受到颱風波浪侵襲，期間引發的長週期亞重力波導致港池水位劇烈振盪，靜穩度不佳的港域會影響船舶作業及停靠安全。港內波高會隨外海波高、週期及波向不同而改變，為了瞭解不同入射方向之颱風波浪在港內的示性波高及亞重力波，本研究利用 FUNWAVE-TVD 數值模式模擬 2005 年龍王颱風之波浪，採用波高 7.81 公尺及尖峰週期 14.22 秒之 JONSWAP 波譜，分別以 ESE 向及 SE 向波浪入射花蓮港海岸，模式與現場觀測比對，並探討港內平面空間之波浪分布特性。結果顯示模式能模擬出港內外的亞重力波能量，示性波高僅在外港區較高，內港區相對穩靜，然而，亞重力波在內港區及連結內外港之航道都十分顯著，最大的亞重力波高出現在離港口最遠的內港區碼頭。比較兩個波向，示性波高在外港區的差異性小，但亞重力波的空間分布差異性大，呈現不同的共振結構，入射波浪 ESE 向在港內的亞重力波能量高於 SE 向。本研究之數值模式提供長週期波在港內所有位置之空間分布，可作為港灣防颱策略與港灣規畫之參考。

關鍵詞：花蓮港、FUNWAVE-TVD、亞重力波、港池共振

## Numerical Modeling of Typhoon Waves in Hualien Port

Li-Hsiang Chou, Wu-Cheng Hsia, Shih-Feng Su<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Associate Professor of Bachelor of Science and Technology in Ocean Engineering, National Taiwan Ocean University

### ABSTRACT

The Hualien Port faces to the Pacific Ocean and frequently experiences threats from typhoon waves. Harbour oscillations induced by infragravity motions result in excessive movement of vessels, which leads to irruption of operations and berthing safety. Wave characteristics within harbours depend on offshore wave conditions. To explore infragravity energy inside the port with different incident wave angles during typhoon events, a numerical model FUNWAVE-TVD is applied to simulate a maximum wave scenario in Typhoon Longwang. Incident wave height of 7.81 m with a peak period of 14.22 sec under directions from ESE and SE are studied. Model results are compared with measured data, and spatial variations of wave pattern inside the harbour are illustrated. Structures of standing waves are displayed in the entire harbour. Distributions of infragravity waves are significantly varied with incident wave directions. Infragravity energy in ESE is higher than that in SE, and the maximum energy occurs at the innermost pier. This study provides the characteristics of long-period wave oscillations in the whole harbor basin, which can be a guide for typhoon hazards strategy and harbour planning.

Keywords: Hualien Port; Infragravity waves; FUNWAVE-TVD; Harbour oscillations

## 一、研究目的

花蓮港位於台灣東部海岸，地理位置面鄰西北太平洋，容易遭受颱風波浪侵襲，其港型以狹長之航道區分成內港及外港，颱風期間的湧浪引起外港之水位振盪導致靜穩度不佳，內港距離港口最遠，可有效降低湧浪影響，然而卻出現週期大於湧浪之亞重力波，顯著的水位起伏甚至造成船舶繫纜斷裂而危及停泊安全。

花蓮港因長週期波動導致港池共振是多年來持續被研究探討的議題，交通部港灣技術研究中心(簡稱港研中心)為了解港內外長週期波動特性及形成原因，執行多次現場波浪觀測，由 2004 年至 2007 年資料分析指出，防波堤對週期小於 25 秒之波浪提供良好的遮蔽效果，但對 25 秒以上之長週期波浪則效果減弱，颱風期間水位變化顯著，各水域皆受到亞重力波影響(簡等人, 2009)。

長週期亞重力波於港外的生成機制是以往國內研究所關注的問題(張和曾, 1995; 蘇, 2003; 吳等人, 2006; 莊和曾, 2009)，主要原因是藉由了解生成機制，才能思索降低港池共振的方法。亞重力波沿著花蓮港南側海岸以緣波傳遞進入港內(Chen et al., 2004)，是先前研究極具創建的看法，另外，颱風之群波在港口處以時間變動碎波後驅動長波進入港內是另一個獨特的見解(莊和曾, 2009)，這兩個觀點皆觸發本計畫延續研究的動機，延續以往研究，本計畫進一步了解長週期波浪於整個花蓮港港內的分布，本研究利用 FUNWAVE-TVD 非線性波浪數值模式，重現港研中心 2005 年於花蓮港觀測之颱風波浪，與實測資料比對分析，以了解模式預測港池靜穩度之能力及港內外波譜之特性。

## 二、研究方法

本研究搜集港研中心在 2005 年颱風期間於花蓮港內外所觀測之時序列水位資料，每小時記錄 600 秒，取樣頻率 2Hz，以波譜分析與示性波高計算後，找出期間發生的最大波浪事件，利用 FUNWAVE-TVD 數值模式模擬港內外波高，此模式能夠解析不規則波非線性交互作用，因此能計算出長週期亞重力波。由於颱風波浪週期較長，且港內波浪主要為亞重力波，因此模式計算採用 5 公尺矩形網格，模擬網域由 720 乘 1600 個網格所組成，

上側包含內港碼頭區，下側至花蓮溪出海口，全長約 8 公里，右側至港口外 1.8 公里處，由於水深驟降，超出 60 公尺皆設定為 60 公尺，而為了使陸地在左側網域均勻分布，地形予以逆時針方向旋轉 22.5 度，依此設定，ESE 波向會由右側正向入射，旋轉後之地形網域詳圖 1 所示。模式不考量越波情況，因此將防波堤及碼頭設定為 20 公尺。為了避免波浪於邊界反射，在網域上、下及右面邊界分別設定 150 公尺、100 公尺及 300 公尺之吸收邊界。

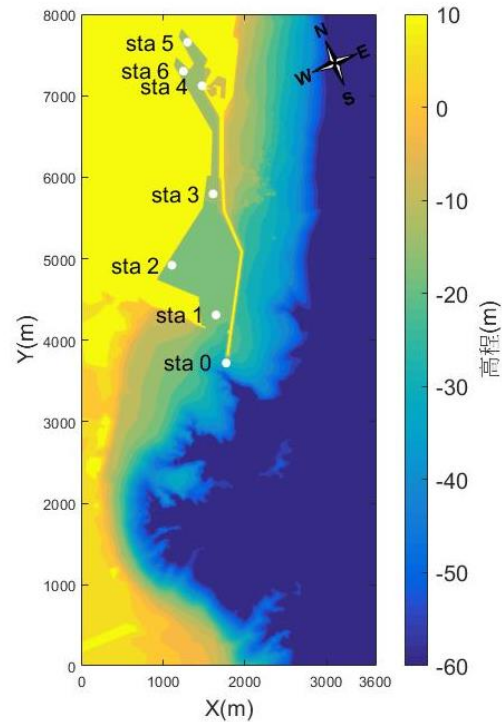


圖 1 花蓮港之地形水深與模式計算網域(sta 表示測站位置)

港研中心於花蓮港內外設置 7 個測站(詳圖 1)，本計畫分析資料後選取 2005 年龍王颱風作為入射波浪條件，颱風期間之示性波高詳圖 2 所示，港外(sta0)最大示性波高 8.11 公尺和尖峰週期 13.8 秒，次之為下一小時的示性波高 7.51 公尺和尖峰週期 14.6 秒，本研究選取此最大兩個小時之波浪平均作為入射波浪，即示性波高 7.81 公尺、尖峰週期 14.22 秒，以頻譜範圍在 0.04Hz 至 0.3Hz 的 JONSWAP 波譜，分成 100 個成分波，譜峰參數  $\gamma$  值採用 1.8(郭等人, 2003)來代表此計畫區颱風波浪之特性，以模式之內部造波功能製造波浪。由於波向尚未觀測，而不同波向入侵港內程度及形成緣波之情況不同，

因此本研究初步探討 ESE 及 SE 兩種不同入射波向。模擬時間設定為 3000 秒，取模式輸出之最後 800 秒水位進行後處理，計算示性波高、亞重力波高及頻譜，以現場資料驗證模式後，再探討港內於颱風波浪之波高空間平面分布。

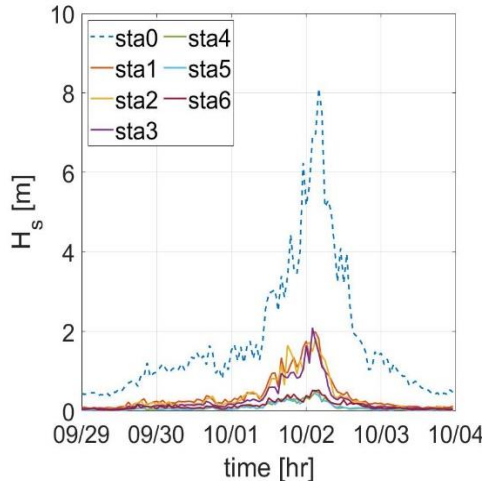


圖 2 龍王颱風期間花蓮港內外測站之示性波高

### 三、模式結果

數值模擬之長週期水位波動參考夏等人(2020)分析蘇澳港之方式，圖 3 顯示 ESE 向模擬水位及經濾波後之亞重力波時序列，港外亞重力波強弱與群波大小有關(圖 3a)，外港區之模擬水位相對於港外減少許多，亞重力水位變化約 0.5 公尺(圖 3b)，航道口及內港區之湧浪明顯衰減，但亞重力波約 1.0 公尺的水位變化皆大於外港區(圖 3c、3d 和 3e)。

濾波後之模擬水位可看出亞重力波成分，為了辨識其主控週期，可將模擬水位進行頻譜分析，圖 4 顯示 ESE 及 SE 向入射波浪於港內外測站之波譜，由圖可看出港外亞重力波都明顯大於港內，能量隨頻率減少而有增加的趨勢。外港區因接近港口故湧浪能量較其他港內測站高，但亞重力波能量卻不是最大。航道口測站能量約在 22 秒處驟降且低於所有測站，表示此測站位於此週期構成之節點處。內港區湧浪能量因受到遮蔽而減到最低，然而亞重力波能量則與外港區相近，並未因遮蔽而降低。值得注意的是 ESE 向，距離港口最遠的測站(sta5)在 73 秒和 170 秒處出現的尖峰能量，高於港內所有測站，73 秒處之能量甚至大於港外測站(圖 4a)。SE 向之波譜顯示內港區測站(sta5)在 43 秒、64 秒及 171 秒

處出現尖峰能量，171 秒之能量大於其他港內測站(圖 4b)。

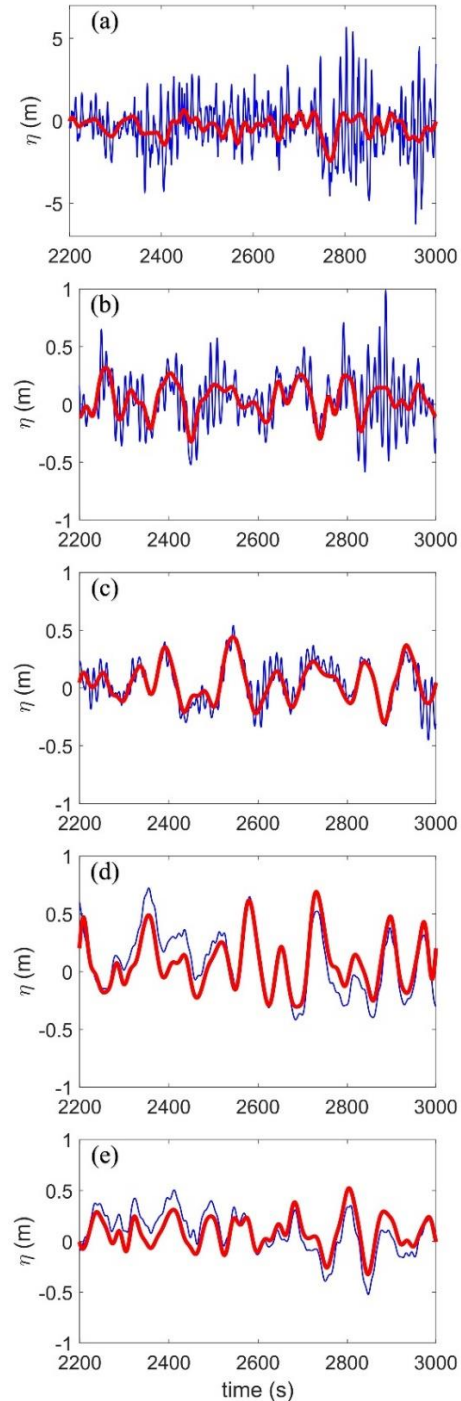


圖 3 花蓮港 ESE 向之模擬水位時序列。(a)港外 sta0；(b)外港區 sta1；(c)航道口 sta3；(d)內港區 sta5；(e)內港區 sta6。(藍色表示頻率 0.04~0.3Hz 之水位；紅色表示濾波後之亞重力波水位)

模式可模擬各頻率成分之波浪能量，而模擬的準確度需要現場資料驗證，圖 5 以現場觀測結果比對模擬之示性波高與亞重力波波高，SE 向大於 ESE 向且接近觀測值，但兩個波向的港外模擬示性波高皆低於現場觀測，這表示入射波浪能量從邊界傳遞之港口時出現衰減，後續工作需調整模式造波方式以提高精確性。港內模擬之示性波高仍低於觀測值，但結果相近。有別於示性波高，港外之模擬亞重力波波高大於現場觀測值，以 SE 向之波浪約等於觀測值，然而港內之模擬仍低估亞重力波波高，越往內港差距越大，推測將入射波浪衰減情況改善後也可增加港內亞重力波之準確度。

儘管模式低估各測站之波高，但仍可用來展現整個平面空間之分布特性，作為未來港域規劃之依據。圖 6 顯示兩個波向在港內的示性波高及亞重力波波高空間分布，在外港區，SE 向波浪因接近港口方向而有較大波浪入侵，靜穩度較 ESE 向差。在內港區，狹長的航道限縮波浪傳遞進入，提供完善的遮蔽條件讓示性波高明顯降低，兩個波向情況下內港區靜穩度都良好(圖 6a 和 6c)。特別的是，兩個波向的亞重力波波高空間分布有顯著差異，在外港區，ESE 向波浪在碼頭及防波堤沿岸有較大的亞重力波，如同駐波之波腹，迴船池波高低降到最低如同波節(圖 6b)，相反地，SE 向波浪沿著碼頭與防波堤的亞重力波不大，但波浪在迴船池如同波腹達到最高(圖 6d)，兩個波向有不同的共振結構。在航道區，兩個波向的亞重力波波高大小有別，ESE 向的波高明顯高於 SE 向。在內港區之碼頭(sta5)，即使距離港口最遠，但都出現明顯的亞重力波，ESE 向高於 SE 向，然而，現場資料顯示在碼頭 sta6 的位置量測到最大亞重力波，若利用模式結果推論，龍王颱風發生最大波浪時入射波向應為 ESE 向。

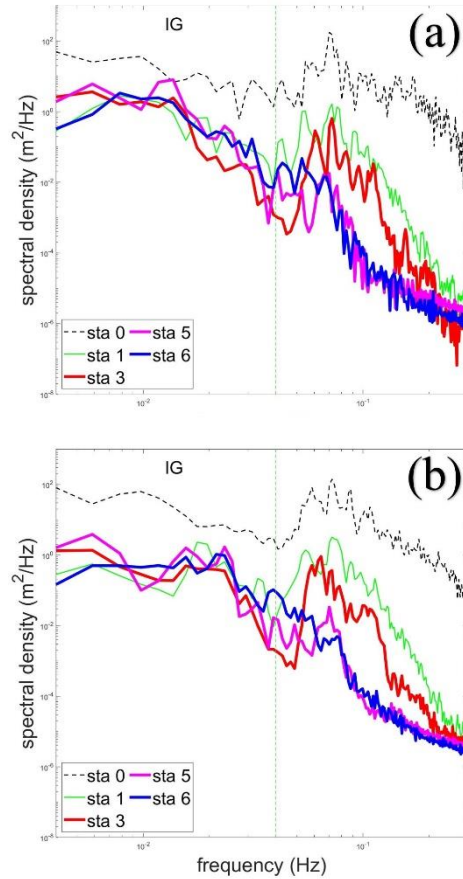


圖 4 花蓮港模擬之波譜。(a)ESE 向；(b)SE 向

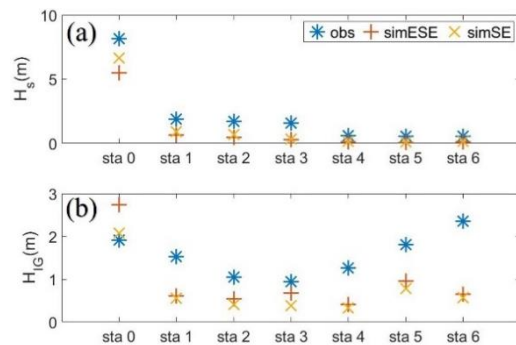


圖 5 花蓮港各測站現場觀測及模擬之(a)示性波高；(b)亞重力波波高



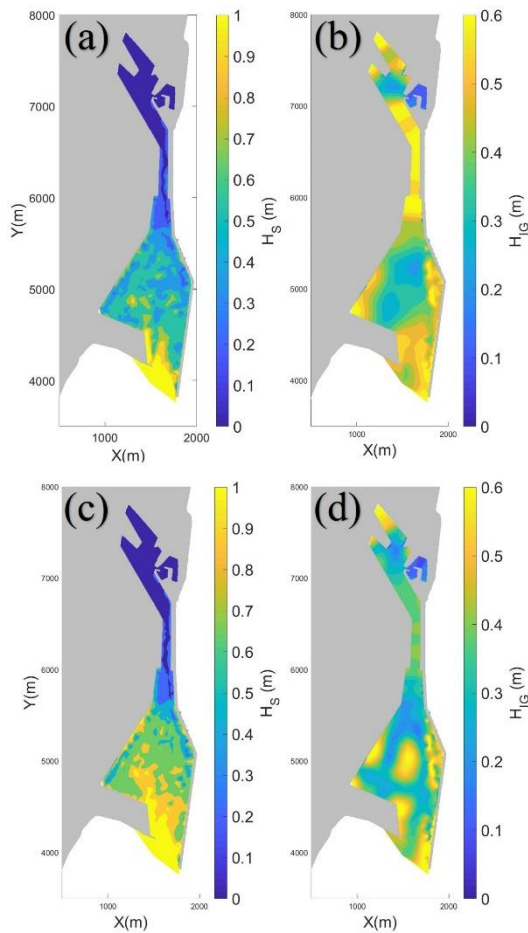


圖 6 花蓮港之模擬示性波高和亞重力波高空間分布。(a)ESE 向  $H_s$ ; (b)ESE 向  $H_{IG}$ ; (c)SE 向  $H_s$ ; (d)SE 向  $H_{IG}$

#### 四、結論

花蓮港受颱風波浪侵襲導致港池靜穩度不佳，危及船舶作業與安全停靠，根據現場觀測資料，港內在颱風期間量測到約兩公尺的長週期水位振盪，而外海波浪之波高、週期和波向決定港內波浪特性，本研究探討 2005 年龍王颱風期間在港內所形成之劇烈長週期亞重力波，利用非線性數值模式 FUNWAVE-TVD 模擬颱風波浪從 ESE 及 SE 向入射港口之情況，檢視港內各測站之水位、波譜、示性波高與亞重力波高，與現場觀測值比對發現模式低估，原因為入射波浪傳遞過程中有衰減的情況，改善造波型態可增加準確度。模式結果顯示平面空間之波浪分布，示性波高在外港區稍高，內港區相

對穩靜，亞重力波在內港區及連結內外港之航道都相當顯著，最大的亞重力波高出現在港最內側的碼頭。兩個波向對於示性波高之分布影響性小，但對於亞重力波分布則有較大差異，外港區呈現出不同的共振結構。整體而言，SE 向之示性波高分布大於 ESE 向，相反地，ESE 向的亞重力波高大於 SE 向。本研究模擬範圍涵蓋花蓮港南側海岸，斜向入射之 SE 向波浪理論上可形成較顯著的緣波傳入港內，後續研究可分析南側海岸之亞重力波特性和了解其主控週期成分與港內亞重力波之關係。

#### 謝誌

本文係科技部專題研究計畫 (編號 MOST 109-2221-E-032-020) 之部分研究成果，承蒙科技部經費補助以及港研中心提供現場觀測資料，使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. Guan-Yu Chen, Chung-Ching Chien, Ching-Ho Su, and Hsiang-Mao Tseng, 2004, Resonance induced by edge waves in Hua-Lien Harbor, *Journal of Oceanography*, V60, no. 6, pg.1035-1043.
2. 夏武成、謝杰恩、周立翔、蘇仕峯，「蘇澳港長週期波動之數值模擬」，第 42 屆海洋工程研討會論文集，第 622-627 頁。
3. 吳佳珊、陳頌恣、陳冠宇(2006)，「以 Matlab PDE 模組探討邊緣波導致之花蓮港港池共振」，第 28 屆海洋工程研討會論文集，第 807-810 頁
4. 張金機、曾相茂(1995)，「花蓮港港池不穩靜調查研究」，第 17 屆海洋工程研討會論文集，第 131-143 頁
5. 莊文傑、曾相茂 (2009)，「花蓮港近岸引致港灣共振之亞重力波波緣辨識」，第 31 屆海洋工程研討會論文集，第 435-440 頁
6. 郭一羽主編(2003)，「海岸工程學(第三版)」，台中市:台灣海洋工程學會。
7. 簡仲環、張富東、單誠基(2009)，「花蓮港颱風波浪之長週期波動研究」，第 31 屆海洋工程研討會論文集，第 441-446 頁。
8. 蘇明陽(2003)，「花蓮港港池振盪入射波種類之探討及建議」，第 25 屆海洋工程研討會論文集，第 917-924 頁。

# 以水工模型試驗暨數值模式探討臺中港外 港區擴建變化研究

李政達<sup>1\*</sup> 林受勳<sup>2\*</sup> 張君名<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

<sup>2</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員

<sup>3</sup>DHI 臺灣辦公室 工程師

## 摘要

本研究依據臺灣港務股份有限公司委託台灣世曦工程顧問股份有限公司「臺中港 40 年期主計畫」長程外廓堤增建設施規劃，以及蒐集臺中港地形水深資料，研究臺中港長程配置方案完成後，推估 2 年後之港區變化、港灣安全與水域穩定性之影響。配合臺中港長程配置方案進行水工模型試驗與利用數值模式加以評估水工模型試驗之結果，掌握臺中港長程外廓堤增建設施完成後與鄰近港區之地形變化特性，堤防內側渦流與紊流確實對於結構物周邊產生摩擦剪應力集中之現象，結果顯示不論水工模型試驗與數值模式研究，兩者比對均有一致性情形。

關鍵詞：水工模型試驗、動床、漂沙、臺中港

## Study on the Port Changes in the Expansion of Taichung Port with Hydraulic Model Test and Numerical Model

Cheng-Da Lee, Shou-Shiun Lin, Chun-Ming Chang

\* Postdoctoral, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University (affiliation)

Senior Coastal engineer, DHI Taiwan Office

## ABSTRACT

This research is based on the long-distance external dike extension facility planning of Taiwan Shixi Engineering Consulting Co., Ltd. "Taichung Port 40-year Master Plan" commissioned by Taiwan Port Corporation Limited, and the collection of topographic and water depth data of Taichung Port to study the long-distance configuration plan of Taichung Port After completion, estimate the impact of port area changes, port security and water stability in 2 years. Cooperate with Taichung Port's long-distance configuration plan to carry out hydraulic model tests and use numerical models to evaluate the results of the hydraulic model tests, grasp the characteristics of topographical changes between the Taichung Port's long-distance external dike and the adjacent port area after the completion of the long-distance outer embankment. The results show that regardless of the hydraulic model test and the numerical model study, the comparison of the two results is consistent.

Keywords: Hydraulic model test; movable bed; floating sand; Taichung Port

## 一、前言

隨著液化石油天然氣的燃氣需求漸增，長期而言，現有 LNG 接收站容量不足以負荷，因此中油於觀塘港及台電於臺中港、協和電廠皆會新設接收站，以解決 LNG 設備供給量不符需求等問題(預計 2025

年達成燃氣需求量 50%之目標)，同時面對離岸風電場開發，基地母港臺中港船舶運量、港區水陸運輸、海上運補，以及碼頭靠泊需求與日俱增；根據臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司(以下簡稱臺中港務分公司)近年船舶進出統計資料分析，港區進出

口船舶運量已由 103 年至 109 年之月平均運量逐漸由 1,250 艘次增加至 1,541 艘次，顯示船舶運量與港區負荷逐漸增加，如圖 1 所示。

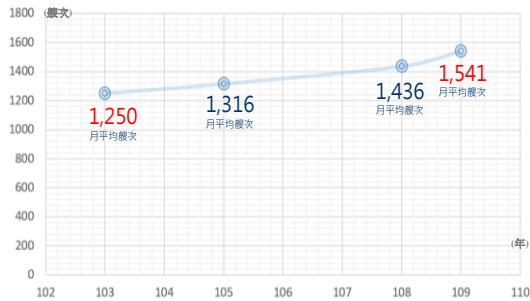


圖 1 臺中港船舶運量分析圖

因此，為解決船舶運輸繁忙問題，以及緩解 LNG 接氣之急迫需求，臺中港務分公司於臺中港規劃回填區新設 LNG 接氣設施，並於外港區擴建堤防加以保護，解決港池不靜穩或者港灣鄰近地形侵蝕與淤積不均勻之情況。

## 二、實驗設置

本研究係於交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)第二試驗廠棚平面造波水池進行，實驗接續 2019-2020 年期間執行臺中港漂沙試驗(亦即動床試驗)，模擬近程外廓堤增建設施完成後，推估 5 年之侵淤情況比較及影響結果，再接續依相同試驗模擬條件，進行長程外廓堤增建設施完成後，推估 2 年之侵淤情況比較及影響結果。

本試驗平面水槽，其全長為 56.5m、寬 53m、高 1.13m，試驗廠棚內共安裝 2 組往復式平推造波機(piston type)，每塊造波板寬度皆為 6m，每組造波系統經由 4 片造波板組成，其中一組造波機模擬夏季季風之波浪，造波機設置於西邊，另一組造波機模擬冬季季風與颱風，造波機設置於北北東。

本試驗所進行之臺中港漂沙試驗，主要量測儀器為波高計，並選用 2 種廠牌之波高計儀器進行量測，總計數量為 22 只波高計，波高計與試驗平面配置情形，如圖 2 所示，其中符號○號 1-16 所示為第一種波高計設置之位置，該儀器為日本 KENEK 公司製造之容量式波高計、另一符號◎號 A-D 所示為第二種波高計設置之位置，該儀器為英國 HR 公司製造之波高計，兩儀器功能相同，皆能量取試驗波高。

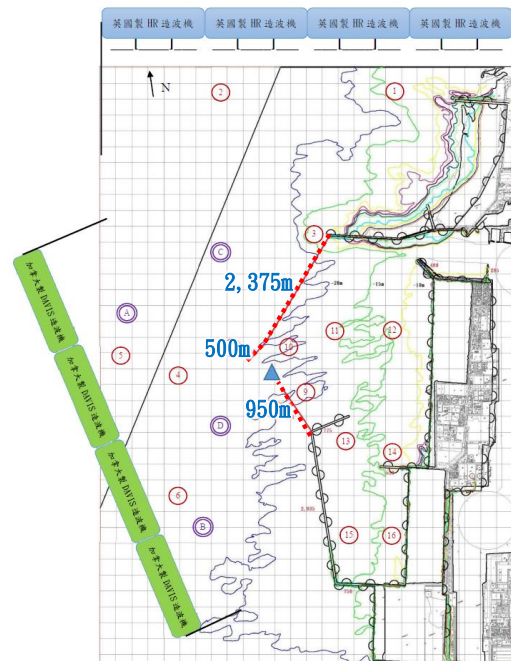


圖 2 水工模型試驗平面配置圖

本試驗採用不等比例尺進行臺中港配置範圍之縮尺佈置，其中水平比例尺採用 1/300，垂直比例尺採用 1/75，波高比例尺採用 1/25.74，週期比例尺採用 1/5.07，並以漂沙試驗進行，研究著重於重現地形變化，因此試驗條件採用規則波，其中冬季波浪週期 1.48sec 與波高 8.35cm，夏季波浪週期 1.28sec 與波高 3.38cm，颱風波浪週期 1.68sec 與波高 16.28cm 等條件，相關試驗條件與比例尺資訊，整理如表 1 所示。

表 1 試驗條件與比例尺

物理量比尺		類別	現場	試驗
水平	1/300			
垂直	1/75	潮位	季風 +4.61 ~ +0.89 m 颱風 +6.00 ~ +2.76 m	+6.15 ~ +1.19 cm +8.00 ~ +3.68 cm
		波高	1/25.74	冬季波浪 2.15 m 夏季波浪 0.87 m 颱風波浪 4.19 m
週期	1/5.07	冬季波浪	7.5 sec	1.48 sec
		夏季波浪	6.5 sec	1.28 sec
潮汐	1/34.6	颱風波浪	8.5 sec	1.68 sec
		半日潮	12 hr	20.8 min

此外，本試驗進行之前，為掌握波浪、時間與地形變化重現的關係，需配合辦理預備試驗，故搭配波浪條件進行試驗，以尋求模型與現場地形變化之冬季季風、颱風與夏季季風重現時間，決定漂沙變化之時間比尺，提供做為後續規劃港型試驗時間

之依據，爰按港研中心往昔從事漂沙試驗之經驗，與辦理離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討(2/4)研究成果，利用臺中港 99 年 11、12 月份，100 年 1、2、3 月份之冬季季風波浪條件，以及臺中港 100 年 5 月 27 日桑達颱風之颱風波浪條件，做為探討冬季與颱風漂沙試驗重現時間之基本資料，並利用經濟部水利署第三河川局提供之 99 年 12 月(模擬冬季季風波浪影響前)、100 年 5 月(模擬冬季季風波浪影響後)之地形測量資料，以及臺中港務分公司提供之 99 年 11 月(模擬冬季季風波浪影響前)、100 年 8 月(模擬冬季季風與夏季颱風波浪影響後)之地形測量資料，相關水深地形資料之測量範圍皆為臺中港北防沙堤至烏溪出海口附近區域。

另外依據離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討(3/4)研究成果，參考港研中心辦理之現場觀測資料。本所港研中心於臺中港外海之波浪觀測屬長期性之資料，冬季季風期間採用每年 10 月至翌年 3 月與夏季季風期間採用每年 4 月至翌年 9 月之波浪條件，以及 101 年 7 月 26 日蘇拉颱風之颱風波浪條件，做為探討冬季、夏季與颱風漂沙試驗重現時間之基本資料，並利用港研中心 107 年 5 月自行測量(模擬夏季季風波浪影響前)與臺中港務分公司提供之 107 年 8 月(模擬夏季季風波浪影響後)之地形測量資料；之後再利用臺中港務分公司提供之 100 年 8 月(模擬冬季季風波浪影響前)、101 年 9 月(模擬冬季、夏季季風與颱風波浪影響後)之地形測量資料進行校驗工作，相關預備試驗條件與地形變化關係整理如下表 2。

表 2 預備試驗表

編號	試驗條件	現場地形時間	備註
1	冬季波浪	99.12~100.5	水利署
2	冬季波浪+桑達颱風	99.11~100.8	港務公司
3	夏季波浪	107.5~107.8	港研中心 港務公司
4	冬季波浪+夏季波浪+蘇拉颱風	100.8~101.9	港務公司 (校驗工作)

預備試驗結果以冬季季風波浪作用 8 小時(採大潮平均高潮位做為季節波浪試驗水深 41.36cm，冬季季風波浪造波方向為 NNE 方向)，再以夏季季

風波浪 3 小時(夏季季風波浪造波方向為 W 方向)、颱風波浪 30 分鐘(颱風波浪使用 50 年迴歸期暴潮水位做為颱風波浪試驗水深 42.59cm，颱風波浪造波方向為 NNE 方向)、夏季季風 3 小時之波浪作用情況，可重現現場 1 年時間之地形變化，試驗流程如圖 3 所示。

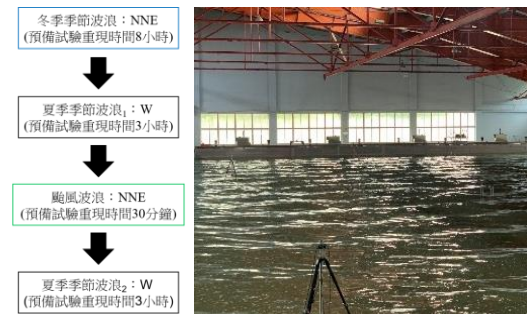


圖 3 試驗流程圖

### 三、長程外廓堤水工模型試驗

本試驗結果冬季季風北防波堤模型造波初期入射條件週期 1.48sec，波高 8.35cm，產生大量越波現象，波高計 CH3 量測得  $T_{1/3}$  為 1.47sec， $H_{1/3}$  為 5.41cm，如圖 4 所示，且冬季季風試驗波浪試驗初期 LNG 港池內有長週期震盪，震盪處於放置消波塊(即圖 4 紅圈處放置消波塊)後，港內較不穩靜現象獲得改善並趨於穩定。



圖 4 冬季季風試驗情形(北防波堤)

冬季季風於長程外廓防波堤模型延伸布置方案，波浪入射條件週期 1.48sec，波高 8.35cm，防波堤堤頭處(即最後 500m 位置)於試驗中觀察波浪明顯越堤，且越接近結構物附近越產生紊亂現象，波高計 CH8 量測得  $T_{1/3}$  為 1.47sec， $H_{1/3}$  為 6.71cm，同樣於冬季季風造波試驗時，外商港區(迴船池)觀察出顯著紊亂現象，反而於 LNG 港池內呈現平靜而穩定

現象，如波高計 CH9~CH12 量測得  $T_{1/3}$  為 0.74~1.45sec， $H_{1/3}$  降至 1.44~2.17cm，如圖 5 所示。此外，夏季季風於長程外廓防波堤模型延伸布置方案，波浪入射條件週期 1.28sec，波高 3.38cm，此時，外商港區(迴船池)除 CH12 量測得  $T_{1/3}$  為 1.25~1.28sec， $H_{1/3}$  為 3.02~3.46cm 量測波高稍微偏高，其餘波高計 CH9~CH11 量測得  $T_{1/3}$  為 1.25~1.28sec， $H_{1/3}$  為 1.19~1.47cm 波浪呈現變緩趨勢，至於 LNG 港池波浪部分，波高計 CH15 量測得  $T_{1/3}$  為 1.26~1.28sec， $H_{1/3}$  為 0.79~1.12cm，顯示港池越往內側越呈現水面平穩現象，如圖 6 所示。

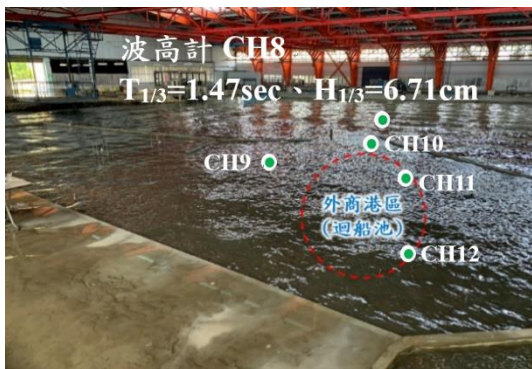


圖 5 冬季季風試驗情形(外商港區)



圖 6 夏季季風試驗情形(外商港區與 LNG 港池)

另外，於颱風期間波浪試驗之入射條件週期 1.68sec，波高 16.28cm 部分，除 LNG 港池波浪(即港內波高計 CH15 量測得  $T_{1/3}$  為 0.8sec， $H_{1/3}$  為 3.16cm) 稍微變小以外，其餘港區內外皆呈現不靜穩情況，比如：港外波浪波高計 CH1~CH8 量測得  $T_{1/3}$  為 1.66~1.67sec， $H_{1/3}$  為 11.82~14.48cm，或於外商港區(迴船池) 波高計 CH9~CH12 量測得  $T_{1/3}$  為 0.8~1.63sec， $H_{1/3}$  為 6.35~8.82cm，但比較外商港區(迴船池)與港外波浪，仍顯示長程外廓堤配置

後，港內確實能減少港內不靜穩之情況，如圖 7 所示。本試驗完成後於觀察長程外廓防波堤增建設施內側動床地形產生 4 處沉箱趾部地形刷深與淘空現象，如圖 8 所示，因此，有關水工模型試驗可能發生防波堤基礎之穩定與傾斜問題，須進一步以數值模式加以驗證，以確認試驗的真實性。



圖 7 夏季颱風試驗情形

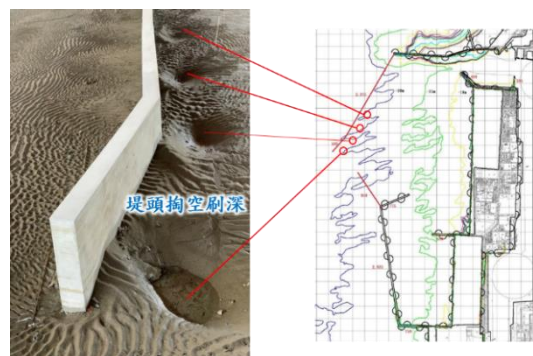


圖 8 長程外廓防波堤內側淘空刷深

#### 四、數值模式驗證分析

為進一步驗證長程外廓防波堤增建設施之內側是否產生 4 處沉箱趾部地形刷深與基礎淘空現象，本研究初步以數值模式加以驗證，本模式採用丹麥水力研究所(Danish Hydraulic Institute，簡稱 DHI)發展之二維數值水動力模式 MIKE21 HD (Hydrodynamic Module)模型，藉此模擬近海及海岸地區潮流生成對結構物間之交互作用，以評估分析底床摩擦之剪應力行為。

模式起始條件與邊界條件之地形條件，採用臺中港務分公司 109 年全域水深測量成果，做為模式三角網格之水深地形，並以臺灣港務股份有限公司 108 年委託台灣世曦工程顧問股份有限公司辦理「臺中港 40 年期主計畫」技術服務報告之長程外廓堤增建設施，做為港區結構物之邊界與各轉折之節

點條件、非結構性三角網格(結構物趾部與轉折處網格已加密處理)、設置數值各項基本參數、初始條件、粗糙度與運行條件等, MIKE21 HD 建模情形, 如圖 9 所示。

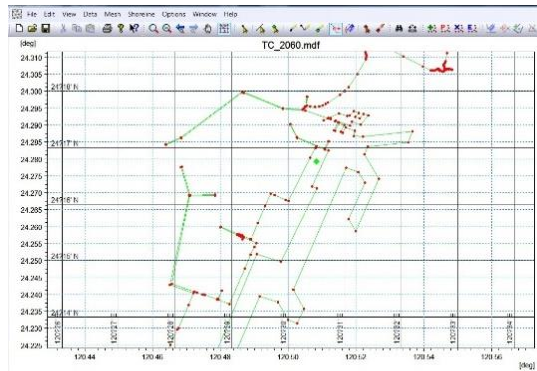


圖 9 MIKE21 HD 建模情形

由於波浪引致的剪力淘刷與潮流模式引致結構物周邊行為類似, 故本研究數值水力條件採用 2018 年 1 月 1 日 00:00:00~2018 年 1 月 15 日 DHI 全球潮位預報模式逐時潮位預報資料, 作為潮流模式之設定, 該模式設定三邊界潮時資料(分別將南側、北側與西側潮時邊界輸入於模式中), 如圖 10 所示。

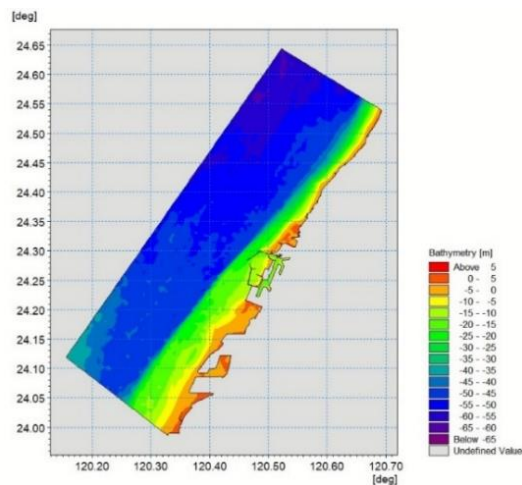


圖 10 數值模式之潮時邊界(逐時)

經數值摩擦剪應力分析, 由模式運算得出之流速, 再透過流速與剪應力的關係, 推導出摩擦剪應力分佈之結果, 本模式因格點資料甚多, 為簡要解釋流體之水動力行為, 僅就摩擦剪應力最大發生處進行討論, 模擬研究結果顯示, 當潮流經過港灣結構物時, 結構物周邊發生流速加快的現象, 如模式初期於 2018 年 1 月 4 日 5:00 發生最大剪應力, 該地點位於長程外廓防波堤北方外側(東經 120.463 度、

北緯 24.285 度), 剪應力值為  $1.30 \text{ Nt/m}^2$ , 此時港外潮流影響尚未傳遞至港內, 因此港內摩擦剪應力尚未有明顯增加情形, 如圖 11 所示。

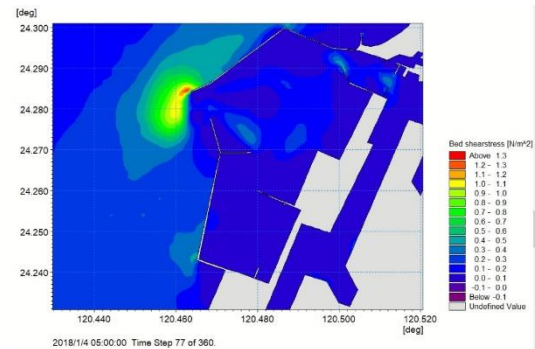


圖 11 於 2018 年 1 月 4 日 5:00 最大剪應力分佈

模式運算於次日後(即初始模擬後 24 小時)於 2018 年 1 月 5 日 5:00, 潮流持續影響長程外廓防波堤北方外側, 並且於堤外(東經 120.463 度、北緯 24.285 度)處發生最大剪應力, 此時剪應力提高至  $1.60 \text{ Nt/m}^2$ , 此時港外潮流已逐漸影響港內, 因此, 剪應力由防波堤頭擴散至港內以及原臺中港進出口, 如圖 12 所示。

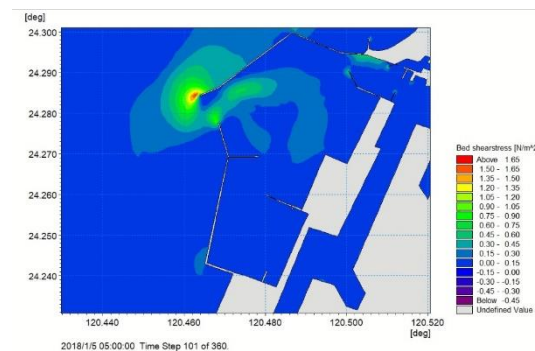


圖 12 於 2018 年 1 月 5 日 5:00 最大剪應力分佈

模式運算於隨後 6 小時後(即初始模擬後 30 小時), 時刻於 2018 年 1 月 5 日 11:00, 潮流持續影響長程外廓防波堤北方外側, 並且於堤頭內側(東經 120.464 度、北緯 24.284 度)處發生最大剪應力, 此時剪應力減少至  $1.09 \text{ Nt/m}^2$ , 如圖 13 所示; 緊接模擬運算無間斷, 再模擬 6 小時後(即初始模擬後 36 小時), 時刻於 2018 年 1 月 5 日 17:00, 此時最大剪應力已由長程外廓防波堤外側逐漸轉向堤防內側(東經 120.471 度、北緯 24.286 度), 但剪應力已逐漸減小至  $0.56 \text{ Nt/m}^2$ , 如圖 14 所示; 此後再經歷 12 小時模式運算後(即初始模擬後 48 小時), 時刻於 2018 年 1 月 6 日 5:00, 於長程外廓防波堤趾(東經

120.463 度，北緯 24.284 度)處持續產生剪應力集中現象，該剪應力提高為  $1.54 \text{ Nt/m}^2$ ，外商港區迴船池內與原臺中港進出口南堤頭(東經 120.500 度、北緯 24.290 度)處發生最大剪應力  $2.34 \text{ Nt/m}^2$ ，原臺中港進出口北堤頭(東經 120.510 度、北緯 24.291 度)處發生次要剪應力  $2.31 \text{ Nt/m}^2$ ，如圖 15 所示。

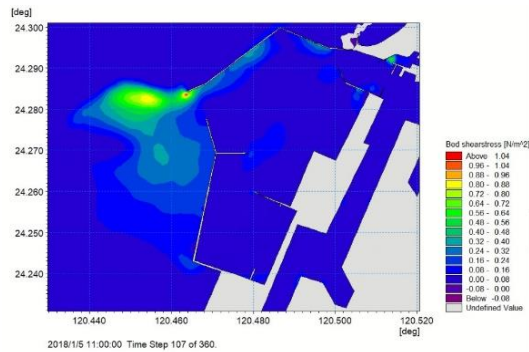


圖 13 於 2018 年 1 月 5 日 11:00 最大剪應力分佈

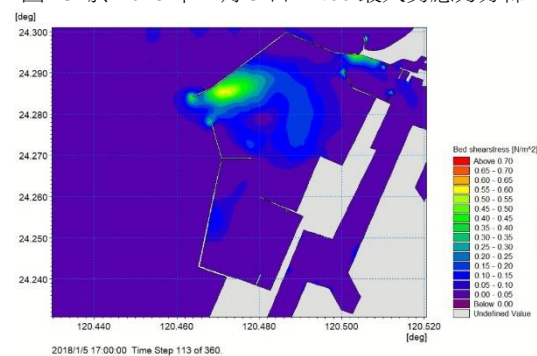


圖 14 於 2018 年 1 月 5 日 17:00 最大剪應力分佈

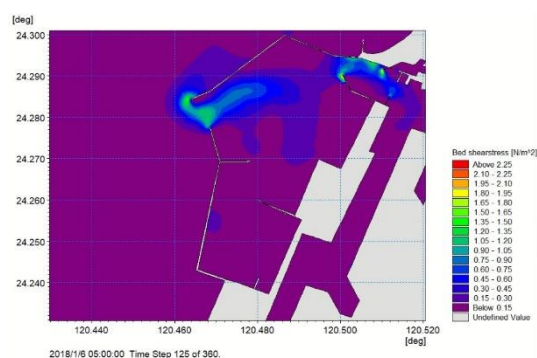


圖 15 於 2018 年 1 月 6 日 5:00 最大剪應力分佈

## 五、結論

本研究以水工模型試驗暨數值模式探討臺中港外港區擴建變化，經由長程外廓堤延伸水工模型試驗定性初步結果，長程外廓堤配置確實能阻擋長波進入港池，解決港池(外商港迴船池與 LNG 港池)不

靜穩之情況，能增加 LNG 港池之安定性。

此外，本研究水工模型試驗之長程外廓堤延伸堤內側趾部發生淘刷現象(產生 4 處冲刷坑)，此與數值模式潮流影響港灣結構物之剪應力分佈情況比對初步吻合，模式初期於 2018 年 1 月 4 日 5:00 發生最大剪應力，地點位於長程外廓堤頭北方外側，此時港內剪應力尚未有明顯增加；經歷 24 小時後，剪應力經由港外逐漸向港內擴散；經歷 30 小時後，剪應力沿著長程外廓堤內側方向傳遞增加；經歷 36 小時後，長程外廓堤內側堤頭周邊持續發生影響；經歷 48 小時後，於 2018 年 1 月 6 日 5:00 傳遞至原臺中港進出口發生最大剪應力效應。

綜上所述，堤防內側渦流與紊流確實對於結構物周邊產生摩擦剪應力集中之現象，結果顯示剪應力越大越易造成底床顆粒間之滑移，淘刷範圍亦越大；因此，不論水工模型試驗與數值模式研究，兩者比對均有一致性結果。

## 參考文獻

- Hilden, M. (2003). *Extensions of Shallow Water Equations: Erweiterungen Der Flachwassergleichungen*, Doctoral dissertation.
- 歐善惠、許泰文(1985), *傾斜海灘上之海岸動床模型相似律*, 港灣技術第一期, 臺灣省政府交通處港灣技術研究所。
- 衛紀淮、洪維屏(2018) *離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討(2/4)*, 研究技術報告, 交通部運輸研究所。
- 衛紀淮、洪維屏、林受勳、李政達(2019) *離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討(3/4)*, 研究技術報告, 交通部運輸研究所。
- 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2019), *臺中港 40 年期主計畫*, 研究技術報告, 臺灣港務股份有限公司。
- 鍾英鳳、張欽森、王嫻文(2021) 「配合國家能源政策於國際商港 LNG 接收站之規劃及建設」, 中國工程師學會會刊, 第 94 卷第 1 期, 37-43 頁。

# 以 By-passing 港型改善漁港淤沙案例初探

陳柏旭<sup>1</sup> 陳昌生<sup>2</sup> 許永城<sup>3</sup> 陳仕元<sup>4</sup>

<sup>1</sup>\*浩海工程顧問股份有限公司工程師

<sup>2</sup>浩海工程顧問股份有限公司總經理

<sup>3</sup>浩海工程顧問股份有限公司工程部經理

<sup>4</sup>屏東海洋及漁業事務管理所課長

## 摘要

枋寮漁港之港型於民國 82~85 年擴建南側泊區及延長港口防波堤後，迄今已 24 年未變動，而於 107 年航道淤積至水深不到 1m，108 年更是淤沙浮出水面，漁船筏無法進出，顯示枋寮漁港淤積情形越來越嚴重，確實需要進行改善。

漁港淤沙改善最適方案為以 By-passing 平滑型式之外廓防波堤，以形成沿岸流平滑通過外廓防波堤及港口，使沿岸漂沙減少進入港內，並增加 passing 至下游海岸，建議延長南防波堤 90m，新建北防波堤 390m，初步以數值計算能減少 79% 淤沙進入港內，並補足下游海岸。

關鍵詞：漁港淤積、By-passing 外廓防波堤

## Using the By-Passing Outline to Modify the Sediment of the Fish Port

Boe-Shiun Chen<sup>\*</sup>, Chang Sheng Chen, Yung Cheng Hsu, Shih Yung Chen

<sup>\*1</sup> Engineer, Vasty Engineering Consultants Co., Ltd.

## ABSTRACT

Using the by-passing outline offer the smooth current around the port. This will be a good for the sediment of the fish port. Because the smooth current take the more sediment to the downstream, the less sediment enter to the port. From the sedimental numerical calculating, there will be 79% reduced to the port. The reduced sediment will supplement the coastal area on the downstream.

Keywords: By-passing outline; Sedimental calculating;

## 一、前言

國內漁港興建後對附近海岸漂沙造成影響，隨建港完成一段時間後，由於上游海岸因沙空間變少，沿岸漂沙影響港口數量越多，影響港口及航道水深，且下游海岸亦持續發生侵蝕，不僅是台灣西部沙質海岸的漁港，東部海岸亦有漁港有同樣情形，如台東長濱漁港及大武漁港。

本文希望以 By-passing 平滑型式之外廓防波堤，形成沿岸流平滑通過外廓防波堤及港口之特性，將部分沿岸漂沙帶至下游海岸，減少沿岸漂沙進入港

口，改善漁港港口航道淤積及下游海岸侵蝕情形，並以海岸變遷數值計算其成效，以作為未來施作成效參考，相關 By-passing 平滑型外廓防波堤可參考 Nicholas Grunnet, 2009 及 Brøker, I. 2007。

## 二、研究方法

本研究以屏東枋寮漁港港口淤積改善為例，枋寮漁港之港型於民國 82~85 年擴建南側泊區及延長港口防波堤後，迄今已 24 年未變動，而於 107



年航道淤積至水深不到 1m，造成進出漁船擱淺，108 年 8 月更是淤沙浮出水面(如圖 1)，漁船筏無法進出，顯示枋寮漁港淤積情形越來越嚴重，確實需要進行改善。

首先，蒐集枋寮漁港近年疏浚工程之頻率與疏浚量，以確實整體了解漁港淤積情況，其次，探討漁港海岸漂沙問題及漂沙相關指標，及以 MIKE21 數值模組分析波場與重現 108 年 8 月港口航道淤積高度變化之時系列，確時掌握與瞭解港口淤積成因。



圖 1 枋寮漁港 108 年港口淤積情形

由於枋寮漁港附近海岸並未有較多海氣象及海岸地形水深監測資料，故先以 NCEP 風場及 MIKE21 SW 模組進行大區域波浪推算，再進行中尺度區域如圖 2 進行計算波場並與小琉球浮標實測結果驗證。

波場驗證後再建立計畫區附近海岸計算區域，並以 MIKE21 之 SW、HD 及 ST 數值模式分析(如圖 3)並重現 108 年 8 月港口航道淤積高度變化之時系列作為驗證。

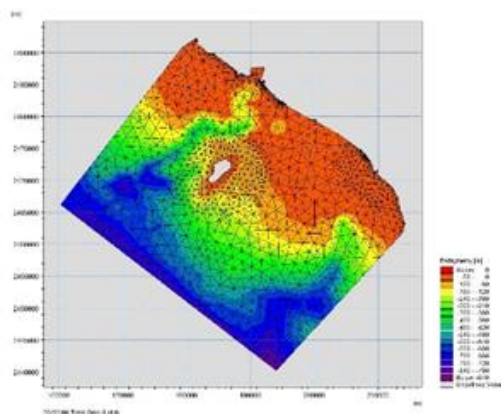


圖 2 波場模擬驗證模擬範圍

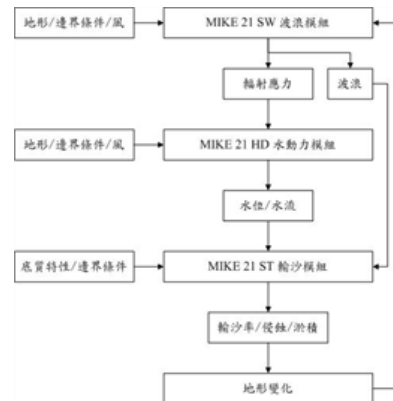


圖 3 海岸地形變遷流程圖

### 三、初步結果

#### (一)港口淤積現況數值計算驗證

波浪條件取 1080101~1081220 之 NOAA 風場資料，由 MIKE21 之 SW 模組計算東亞區域波場，再擷取計畫區附近波場邊界，做為數值計算之輸入條件，其中為確認風場所推算波場可信度，先取中尺度區域包含小琉球測站，確認所計算波場可信度後，再進一步取漁港附近區域，取較精細漁港海岸邊界及網格，底床粒徑參考本計畫調查結果及輸沙模式測試採用 0.189mm。

漁港內港口淤積計算結果如圖 4 所示，於港口取 3 點(t1、t2、t3)，淤積高度時系列如圖 5 所示，由圖之淤積時序列研判分析：

- A. 於 6 月下旬開始，內港口附近 t1 及 t2 點發生少量淤積，港口附近 t3 點則發生小侵蝕。
- B. 至 7 月上旬，t1 點發生大量淤積約 0.8m，7 月中旬推移進入 t2 及 t3。
- C. 至 8 月上旬發生更大量淤積，t1、t2、t3 分別淤積 0.9m、1.9m 及 1.35m，t1 至 t2 間淤積 0.9~1.9m，內港口附近水深約 2~2.5m，計畫區平均低潮位-0.3m，最低低潮位-0.7m，故於低潮位時，淤沙會露出水面，與枋寮漁港 108 年 8 月初發生內港口附近淤積之時間與位置相近。

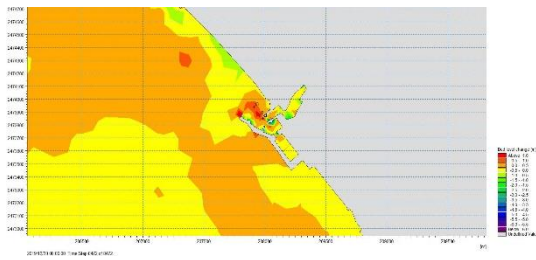


圖 4 漁港港口航道淤積數值計算平面結果

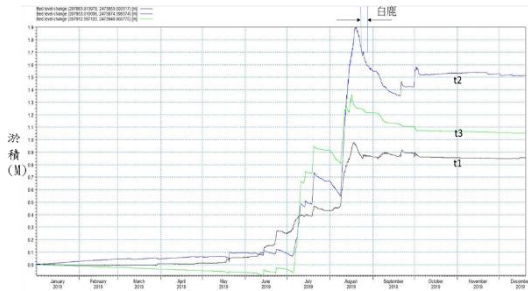


圖 5 漁港內港口淤積數值計算斷面分布結果

## (二)綜合討論

根據上述漁港疏浚工程情形及 108 年港口航道淤積探討結果，綜合整理漁港 108 年港口航道淤積原因，概述如下：

### 1. 漁港南北海岸囚沙空間變少

由枋寮漁港附近南北海岸線變化情形，可知漁港附近南北海岸之囚沙空間都變少。

#### (1)漁港南邊海岸

漁港南邊海岸線因淤積，已向前移至漁港南防波堤外側，故失去原來可提供南往北之沿岸漂沙之囚沙區域，由南往北之沿岸漂沙沿淤積後之海岸，直接帶至漁港南防波堤堤頭附近，很容易因波浪繞射作用而進入港區。

#### (2)漁港北邊海岸

由實際地形水深測量結果可知，漁港北防波堤外側幾乎已淤滿淤沙，沒有太多空間可再容納海岸沿岸漂沙，故沿岸漂沙容易越過北防波堤堤頭進入港區，遇到泊區較穩靜時就會沉澱為港內淤沙。

### 2. 夏季西南向波浪

模擬 108 年漁港港口航道淤積之數值模擬結果，於淤積時間及空間上尚稱良好，數值計算之邊界波浪條件如圖 6~圖 8 所示，由圖可知，波高及週期都約從 108/06 開始變大，於 8 月 9 日波高超過 4m，週期超過 10 秒，而由圖 8 波向分布可知，6 月 1 日至 9 月 15 日之波向集中於 SW(225°)。

由數值計算邊界波浪條件可知，對枋寮漁港港口淤沙影響比較大之波浪條件，主要為夏季較大波高及週期之 SW 向波浪。

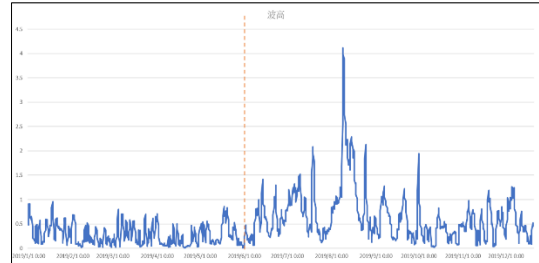


圖 6 枋寮漁港淤積數值計算邊界條件波高分布

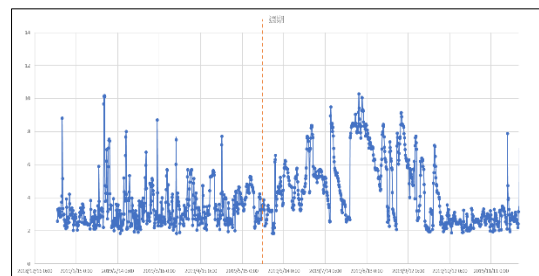


圖 7 枋寮漁港淤積數值計算邊界條件週期分布

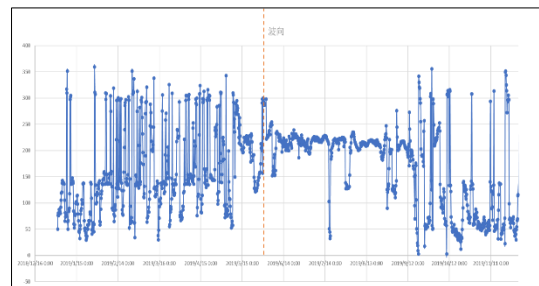


圖 8 枋寮漁港淤積數值計算邊界條件波向分布

## (三)港口淤積漂沙機制推定

為能研擬有效港口淤砂改善方案，整理本章 108 年港口航道淤積探討結果，初步推定枋寮漁港港口航道淤積機制如圖 9 所示，由圖可知，由主要波向之 SW 向波浪，產生主要二股海流帶動漂沙至港口航道，說明如下：

南往北沿岸流，沿南防波堤至堤頭，經繞射進入港區，所帶漂沙於流速減緩後沉降為港內淤沙。

北防波堤外南防波堤遮蔽區內產生循環流，至北防波堤堤頭產生一部份分流至港內，遇到流速減緩後產生淤沙。



圖 9 枋寮漁港港口航道淤積機制示意圖

#### (四) By-passing 外廓防波堤港口數值計算

為了防止港口淤沙，仿照 Nicholas Grunnet，2009 於港口處設置 By-passing 外廓防波堤如圖 10，說明如下：

- A. 延長南防波堤 90m，先沿目前南防波堤堤向向西轉 45° 延長 50m 後，再將堤向向北轉 45° 延長 40m。
- B. 於距目前北防波堤約 389m，興建一垂直海岸偏南 10° 之突堤，長度 300m，續轉向南 15° 延長 50m 後，再轉向南 15° 延長 40m。
- C. 疏浚港口航道區域至水深-3.0m，面積約 1.6 公頃。

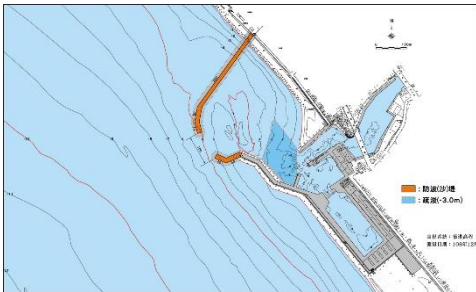


圖 10 By-passing 外廓防波堤配置示意圖

現況及 By-passing 外廓防波堤數值計算結果如圖 4 及圖 11 所示，原來內港口附近淤沙情形相同並未產生，進入港區之淤沙淤積厚度多小於 0.5m；海岸漂沙明顯 bypassing 至北外廓防波堤外側海岸，於外廓防波堤堤頭轉折附近及連接海岸附近有少部分淤積較大。

為較清楚表示漁港淤積及海岸侵蝕情況，將區域依港口航道及海岸分區如圖 12 所示，各分區說明如下：

- ◎港口航道區域：細分航道 1、航道 21、航道 22 及港口等分區，其中，航道 1 為接近內港口，為原來淤積較嚴重區域，航道 2 為銜接港口區域，航

道 21 接近海岸，航道 22 銜接港口分區。

- ◎海岸區：細分海岸 1 及海岸 2 等分區，其中，海岸 1 分區為銜接航道 21 區，海岸 2 為目前枋寮海堤。

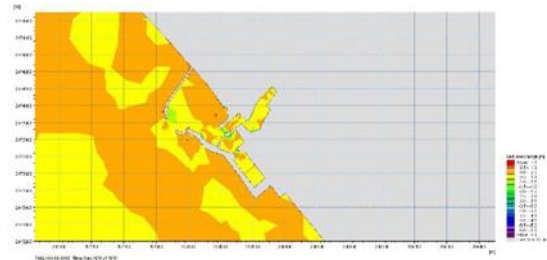


圖 11 漁港港口淤積改善數值計算結果侵淤分布圖

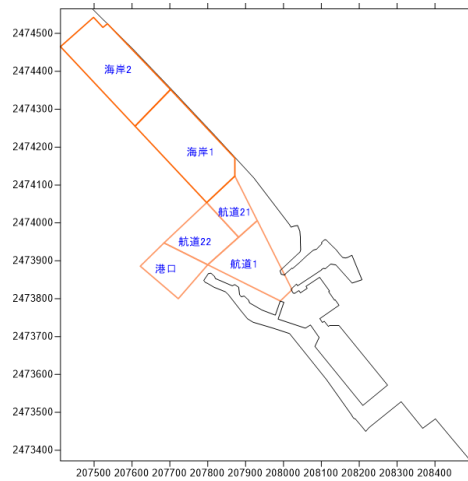


圖 12 侵淤計算分區示意圖

由圖 13~圖 14 及表 1~表 2 可知現況及 By-passing 外廓工程方案的侵淤變化，由圖表可知現況港內淤積 21,776 立方米，海岸侵蝕 44,864 立方米；passing 外廓工程方案淤積 9,316 立方米，海岸侵蝕 5,890 立方米，港內淤積量為原來 20.7%，下游海岸侵蝕量漸少 87%。

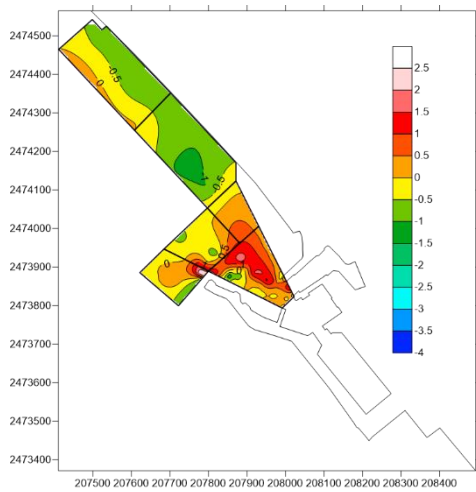


圖 13 現況外廓侵淤量分區結果示意圖

表 1 現況侵淤量計算分區結果表

分區	淤積量(立方米)	侵蝕量(立方米)	淨侵淤量(立方米)
航1	13,825	904	12,921
航21	3,012	312	2,700
航22	2,454	2,981	-527
港口	2,485	1,783	702
小計	<b>21,776</b>	5,981	15,795
海岸1	0	28,015	-28,015
海岸2	489	16,850	-16,361
小計	489	<b>44,864</b>	-44,375
總計	22,265	50,845	50,845

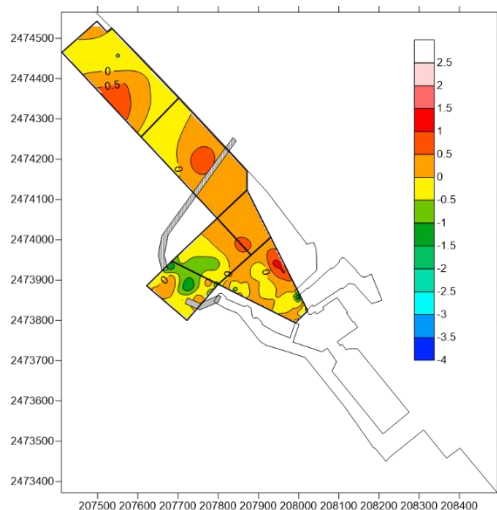


圖 14 By-pass 外廓侵淤量分區結果示意圖

表 2 By-pass 外廓侵淤量計算分區結果表

分區	淤積量(立方米)	侵蝕量(立方米)	淨侵淤量(立方米)
航1	3,905	1,356	2,549
航21	3,041	0	3,041
航22	1,824	3,781	-1,958
港口	546	4,541	-3,995
小計	<b>9,316</b>	9,678	-363
海岸1	7,591	2,076	<b>5,515</b>
海岸2	5,352	3,814	<b>1,537</b>
小計	12,942	<b>5,890</b>	7,052
總計	22,258	15,568	6,689

#### 四、結論

本計畫初步以 By-passing 外廓防波堤作為枋寮漁港港口淤沙改善方案，優化沿岸漂沙入港比例，經以數值計算成效良好，港內淤積量為原來 20.7%，下游海岸侵蝕量漸少 87%，顯示如愛沿岸漂沙影響之漁港，藉由 By-港型可減少進港淤積情形及提供漂砂下游之輸沙，減少下游海岸侵蝕，未來也許是漁港與海岸共存之工法，後續由水工試驗進行驗證。

#### 參考文獻

1. Nicholas Grunnet, Ida Brøker, Erik Clausen and Per Sørensen (2009) Improving Bypass and Increasing Navigation Depth: A Vision For Hvide Sande Harbour, Denmark, *Coastal Dynamics 2009*, Paper No. 145.
2. Brøker, I., Zyserman, J., Østergaard Madsen, E., Mangor, K. and Jensen, J., (2007) Morphological modelling: A tool for optimisation of coastal structures. *Journal of coastal research*, Vol. 23, Issue 5, Sept. 2007 pp. 1148-1158.

# 氣候變遷條件下海岸結構物防護標準檢討 之初探

王星宇<sup>1</sup> 蕭松山<sup>2\*</sup> 林鼎傑<sup>3</sup> 張博涵<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 國立高雄科技大學航運技術系助理教授

<sup>2\*</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系教授

<sup>3</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系助理教授

<sup>4</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士生

## 摘要

科技部計畫：MOST 109-2625-M-019-005

本研究以分析氣候變遷下水文環境條件進而評估海岸結構物防護之功能性及安全性，提供海岸結構物防護標準檢討之參酌。藉由海平面上升變化分析與重現期波浪條件討論氣候變遷下河口海岸水文環境條件改變對現行海岸構造物之防護標準影響之情形，分析結果顯示研究區域之海平面上升高度約為 0.054m，50 年迴歸期颱風波高與週期分為 13.82m 與 13.4s。經導入最大溯升高程暨越波溢流量計算，外澳海堤(二)之單位越波量為 0.0000045 CMS/m，低於 0.05 CMS/m 標準，不需進行堤頂加高改善作業。

關鍵詞：海岸結構物、海平面上升、氣候變遷

## The Exploratory Research on the Review of the Protection Standards for Coastal Structures under Climate Change

Hsing-Yu Wang, Sung-Shan Hsiao<sup>\*</sup>, Ting-Chieh Lin, Po-Han Chang

<sup>\*</sup> Professor, Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

This study analyzes the marine environmental conditions under climate change to evaluate the functionality and safety of coastal structures. The result of the analysis is used as a reference for protection standards. Based on the analysis results of climate change based on sea level rise and regression wave conditions, it will be discussed whether changes in the marine environment will affect the coastal structure. According to the analysis results, sea level rise is about 0.054m, and the return period wave and period are 13.82m and 13.4s. Then, import the analysis result into runup height and overtopping calculation, it can get a result less than 0.05CMS/m, which is 0.0000045CMS/m, and there is no need to raise and improve the top of the embankment.

Keywords: Coastal structure; Sea level rise; Climate change

## 一、前言

參考 IPCC 「促進氣候變遷調適之風險管理-針對極端事件及災害」特別報告指出，自 1950 年起觀

測極端氣候及氣候事件紀錄，顯示出氣候變遷造成暖期頻率及持續時間、降雨量及強度、強烈熱帶氣旋活動及極端高海平面發生機率等現象增加。其中

極端氣候對全球多數陸地及海域造成極大衝擊，如水文條件的改變直接影響河口海岸環境特性，進而對海岸防護設施功能之可能造成影響。臺灣過往於結構物安定設計及研究，多採極端事件重現期作為分析條件。然受氣候變遷三合一(海平面上升、颱風及豪雨)情形的發生，目前對海岸工程產生之衝擊包含波浪溯升增高、河口周邊地區淹水、海堤護岸堤後淹水、海堤護岸破壞、河口附近侵淤型態改變、海岸濕地及棲息地喪失等問題多所倡議。

臺灣鄰近颱風好發區域之太平洋西側，每年颱風侵襲臺灣的平均次數約計 3~4 次，如以登陸地點區分，東北角海域至花蓮之間登陸次數為最。其中宜蘭境內海岸段約計 33 公里，海岸以砂質為主，據統計屬地形變遷較為劇烈之區域。其中綜觀宜蘭境內作為保護海岸後線人民生命財產安全之海岸防護設施，相關災損問題多發生於歷年颱風期間。本研究為探討氣候變遷條件下對現行海岸構造物之防護標準影響之情形，除針對氣候變遷三合一之海平面上升問題，應用希爾伯特-黃轉換(Hilbert-Huang Transform, HHT)進行海平面上升之計算，亦針對氣候變遷三合一之颱風事件，以實測波浪資料進行迴歸分析，藉由颱風波浪長期變化趨勢進行分析，並統計推估未來 50 年海域的颱風波浪變化趨勢。嗣後，參考 Waal & Meer (1992)研究所得推算波浪之最大溯升高度公式，以及 Meer & Janssen (1995)研究所得之越波預測公式，將本研究以 HHT 與迴歸分析所得結果導入，進一步評估現行海岸結構物防護之功能性及安全性，期望提供研究區域海岸結構物防護標準檢討之參酌。

## 二、自然條件分析

### 2.1 海岸防護措施案例選擇

參考經濟部水利署(2015)宜蘭縣海堤安全性評估分析研究計畫成果報告內容顯示，受區域性地層下陷影響，以如圖 1 至圖 4 所示之更新暨外澳海堤高程變化較大(-0.052~-0.081m)。經統計每年颱風侵襲臺灣之颱風登陸地點多分布於東北角海域至花蓮之間，若堤頂高度比波浪溯升高度低時，可能造成後線人民財損，故本研究後續即以更新與外澳海堤為研究案例進行氣候變遷條件下海岸結構物防護標準檢討之討論。



圖 1 更新海堤(北)示意圖



圖 2 更新海堤(南)示意圖

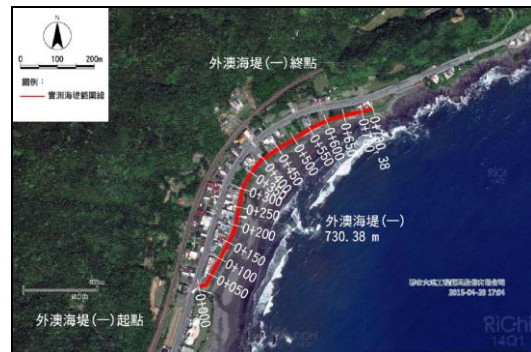


圖 3 外澳海堤(一)位置示意圖

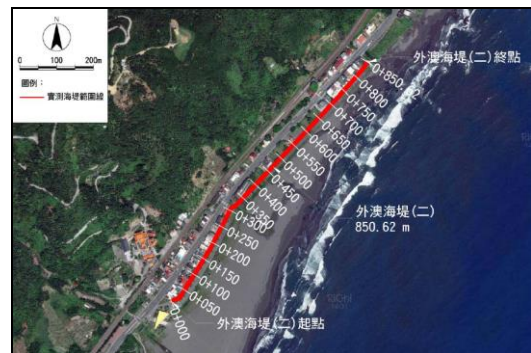


圖 4 外澳海堤(二)位置示意圖

## 2.2 海平面上升分析

本研究參考蕭等(2018)研究成果,應用 Huang et al. (1999)和 Huang et al. (1998)所發展之希爾伯特-黃轉換(HHT)處理水位資料特性分析。HHT 分析方法包含經驗模態分解(EMD)和希爾伯特轉換(Hilbert Transform, HT),即  $HHT = EMD + HT$ ,內建模態函數經希爾伯特轉換(HT)所得之局部能量及瞬時頻率可給予整個訊號能量-瞬時頻率-時間分佈。整個 HHT 流程如圖 5 所示,EMD 之分解流程圖則如圖 6 所示。

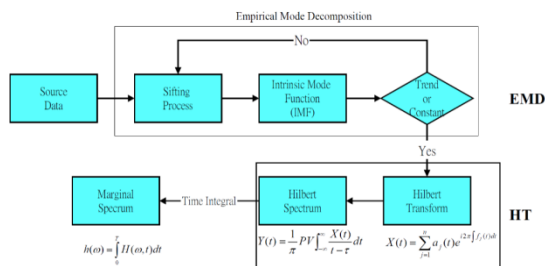


圖 5 HHT 過程示意圖

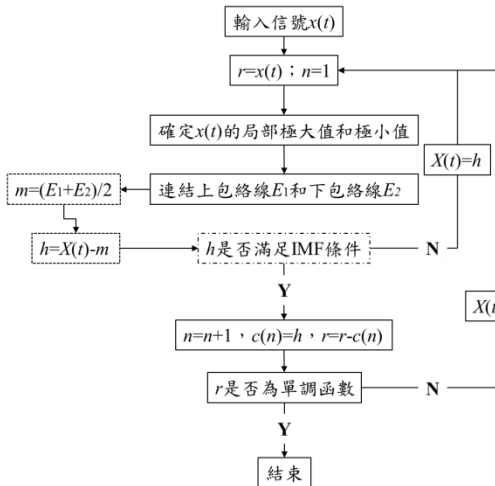


圖 6 EMD 分解流程圖

本研究應用 HHT 分析 2004 年 1 月至 2021 年 9 月蘇澳潮位站潮汐水位資料,以經驗模態分解(EMD)後,可得如圖 7 所示之趨勢項。經分析蘇澳潮汐水位資料顯示,蘇澳潮位站之海水面上升高度約為 0.054m,水位有先上升再下降之趨勢,然因本研究所蒐集資料長度小於潮汐週期(18.61 年),故無法推斷蘇澳潮位站的水位趨勢會繼續下降。

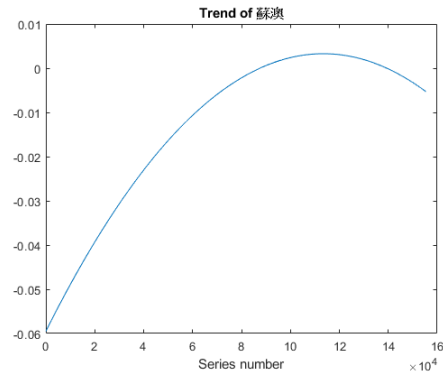


圖 7 蘇澳潮位站水位變化趨勢圖

## 2.3 颱風波浪分析

本研究為求得颱風波浪長期變化趨勢,參考江等(2020)研究成果,將所蒐集 2010 至 2020 之龜山島波浪資料,以超量選用(Partial-duration series)的方式將波浪資料選出最大波高後進行排序,並將對比其累積機率函數(Cumulative Probability Function)後,分別選用 Weibull、Hazen 及 Goda 方式進行統計分析。嗣後於分位圖完成後,分別使用 Weibull、對數常態(log-normal)暨廣義極端值(generalized extreme value, GEV)分佈進行機率分佈函數(Probability Distribution Function, PDF)擬合。經使用三種分位圖進行擬合之結果如圖 8 至圖 9 以及表 1 至表 2 所示。綜合比較擬合結果顯示,使用 GEV 進行波高與週期之擬合相關性皆為最高,故後續之計算以計算所得之 50 年迴歸期颱風示性波高 13.8224m 與 50 年迴歸期颱風示性週期 13.4448sec 作為最大潮升高程及越波溢流量計算條件。

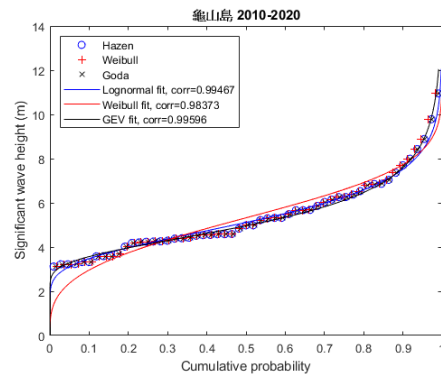


圖 8 龜山島浮標測站之波高累積分佈函數圖

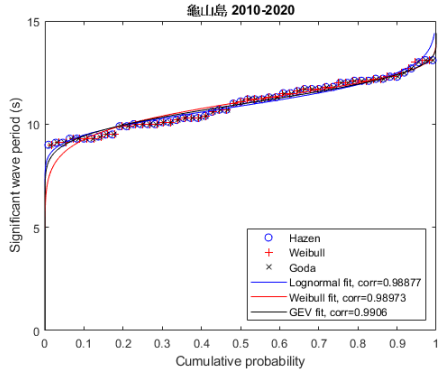


圖 9 龜山島浮標測站之週期累積分佈函數圖

表 1 龜山島浮標測站波高統計分析結果

	Weibull	Lognormal	GEV
Corr.	0.9947	0.9837	0.9960
50 yr	11.3531	10.1502	13.8224
RMSE	0.0331	0.0592	0.0279

表 2 龜山島浮標測站週期統計分析結果

	Weibull	Lognormal	GEV
Corr.	0.9888	0.9897	0.9906
50 yr	14.4794	13.4835	13.4448
RMSE	0.0497	0.0461	0.0472

### 三、防護標準分析

#### 3.1 最大溯升高程

參考經濟部水利署水利規劃試驗所研提之「海岸防護設施設計準則(草案)－海堤篇」報告，以及美國工程兵團(U.S. Army Corps of Engineers)之海岸工程手冊(Coastal Engineering Manual, 2011)中，J.P. de Waal & J.W. van der Meer (1992)所發表推算波浪之最大溯升高程公式進行計算：

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = \begin{cases} 1.5\gamma_f\gamma_h\gamma_\beta\xi_{eq}, & 0.5 < \xi_{eq} \leq 2.0 \\ 3.0\gamma_f\gamma_h\gamma_\beta, & \xi_{eq} > 2.0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $R_{u2\%}$  為溯升高度， $H_s$  為堤前波高， $\gamma_f$  為堤面粗糙係數， $\gamma_h$  為水深對溯升影響係數， $\gamma_\beta$  為波浪斜向入射折減係數， $\xi_{eq}$  為考慮複合式堤面平均坡度的碎波相似參數，定義為：

$$\xi_{eq} = \gamma_b \times \xi_p \quad (2)$$

式中  $\gamma_b$  為平台影響係數， $\xi_p$  為碎波相似參數：

$$\xi_p = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{S_p}} \quad (3)$$

式中  $\tan \alpha$  為堤面坡度， $S_p$  為波浪尖銳度(wave steepness)：

$$S_p = \frac{H_s}{L_p} = \frac{2\pi H_s}{g T_p^2} \quad (4)$$

式中  $T_p$  為不規則波浪頻譜(wave spectrum)極大值對應之週期，與平均週期  $T_m$  存在  $T_p/T_m = 1.1 \sim 1.2$  的關係式。

#### 3.2 越波溢流量

越波量估算參考 Van der Meer & Janssen (1995) 提出平台、堤前水深、粗糙度以及斜向入射等因素之預測公式如下：

碎波相似參數  $\zeta_p < 2$ ：

$$q = 0.06 \exp \left( -5.2 \frac{R_c}{H_s} \frac{\sqrt{S_p}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma_f \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} \right) \frac{\sqrt{g H_s^3}}{\sqrt{S_p / \tan \alpha}} \quad (5)$$

$$0.3 < \frac{R_c}{H_s} \frac{\sqrt{S_p}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma_f \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} < 2 \quad (6)$$

碎波相似參數  $\zeta_p > 2$ ：

$$q = 0.2 \exp \left( -2.6 \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_f \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} \right) \sqrt{g H_s^3} \quad (7)$$

式中  $q$  為單位寬度平均越波量(CMS/m)， $R_c$  為堤頂出水高。

#### 3.3 容許溢流量標準

當堤頂高度比溯升高度低使波浪水體超出堤頂時稱為越波，若直接將堤頂高度設計至防止越波發生不甚經濟，故一般堤頂高度設計以在不影響堤體安全下容許部份越波。參考 Goda (1985)海堤受災實例，所推定之容許越波量如表 3 所示。

表 3 容許溢流量之推定值

種類	保護工	越波量 (CMS/m)
護岸	堤頂無保護工	0.05
	堤頂有保護工	0.20
海堤	堤頂及背後均無保護工	0.005 以下
	堤頂保護、背後無保護工	0.02
	三面混凝土保護	0.05

#### 3.4 海岸防護標準檢討

依本研究計算 50 年迴歸期颱風波浪並加入海平面上升計算結果，以前述之更新海堤(北)、更新



海堤(南)、外澳海堤(一)以及外澳海堤(二)為例，海堤溯升高度與越波量檢算成果如表 4 所示。其中更新海堤(北)、更新海堤(南)、外澳海堤(一)之堤頂高程均高於溯升高程，故無越波量之產生；外澳海堤(二)之單位越波量為 0.0000045 CMS/m，低於表 3 所示海堤容許越波量中三面混凝土保護之 0.05 CMS/m 標準，於容許範圍內，即海堤現況堤頂高程尚滿足 50 年頻率颱風波浪標準，不需進行堤頂加高改善作業。

表 4 溯升高度與越波量統計表

海堤名稱	堤頂高程(m)	計算水深(m)	堤前波高(m)	溯升高度(m)	單位越波量(CMS/m)
更新海堤(北)	6.931	3.759	3.46	3.89	無
更新海堤(南)	6.932	3.759	3.54	3.93	無
外澳海堤(一)	6.595	3.759	3.50	3.89	無
外澳海堤(二)	6.454	3.759	3.40	6.78	0.0000045

#### 四、結論

本研究以海平面上升變化分析與重現期波浪條件討論氣候變遷下河口海岸水文環境條件改變對現行海岸構造物之防護標準影響之情形。經整體提高檢討而言，在考慮平均天文大潮高潮位 1.009m、既往最大暴潮偏差 0.696m 加上海水面上升高度 0.054m 與 50 年重現期颱風波浪作用下，除外澳海堤(二)有越波情形外，其餘海岸防護能力均能滿足基本安全需求。藉由探討氣候變遷下河口海岸水文環境條件改變對現行海岸構造物之防護標準影響之結果，評估現行海岸結構物防護之功能性及安全性，應可提供研究區域海岸結構物防護標準檢討之參酌。

#### 謝誌

本文係科技部專題研究計畫「氣候變遷下創新海岸災害風險評估計數之研究－氣候變遷條件下河口海岸環境動態變化分析與海岸結構物防護標準檢討(子計畫四)(I)」(編號 MOST 109-2625-M-019-005)

之相關研究成果，承蒙國科會經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. Goda, Y. (1988) "Numerical Investigations on Plotting Formulas and Confidence Intervals of Return Values in Extreme statistics," *Report of the port and harbor research institute*, Vol. 27, No. 1, pp. 31-92.
2. De Waal, J.P. and van der Meer, J.W. (1992) "Wave runup and overtopping on coastal structures," ICCE, *Coastal Engineering Proceedings*, Ch. 134, pp. 1758-1771, Venice, Italy.
3. Van der Meer, J. W., and Janssen, J. P. F. M. (1995) "Wave run-up and wave overtopping at dikes," In: Demirebilek, Z. (Ed.), *Published in: Wave Forces on Inclined and Vertical Structures*, ASCE, pp. 1-27.
4. Huang, N.E., Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C.C. Tung, and H.H. Liu (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society A*, 454, 903-995.
5. Huang, N.E., Z. Shen, and S.R. Long (1999) A new view of water waves – The Hilbert spectrum, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31, 417-457.
6. *Coastal Engineering Manual* (2011), U.S. Army Corps of Engineers.
7. 經濟部水利署(2015) *宜蘭縣海堤安全性評估分析研究計畫成果報告*，經濟部水利署委託研究計畫。
8. 蕭松山、方惠民、謝志敏、王星宇、許灝騰、鐘承憲、周顯光(2018) *臺灣西部海域平均海水面變化分析*，第 40 屆海洋工程研討會論文集。
9. 江允智、王星宇、方惠民、蕭松山(2020) *氣候變遷對竹南海域波浪影響與分析*，第 42 屆海洋工程研討會論文集，第 144-149 頁。

## 轉爐石及氣冷高爐石應用為填料時對混 凝土工程性質比較研究

李賢華<sup>1</sup> 陳冠甫<sup>1</sup> 黃煒智<sup>1</sup> 郭馨<sup>1</sup> 甄亮絜<sup>1</sup>

李育成<sup>2</sup> 詹鎮鋒<sup>2</sup> 徐泓璋<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立中山大學 海洋環境及工程學系

<sup>2</sup>中國鋼鐵股份有限公司

### 摘要

科技部計畫：MOST 108-2218-E-110-012-

本研究為增加爐石資源化管道，將煉鋼副產物應用於港灣海岸工程，基於氣冷高爐石與水淬高爐石之性質不同，使得氣冷高爐石在工程應用上不如水淬高爐石得以廣泛使用。而轉爐石同樣為一貫煉鋼廠煉鋼過程中之副產品，但由於其不穩定之特性，作為一般工程使用時有其困難度，大部分作為鋪面材料之低度應用，故本研究並以煉鋼副產物—轉爐石為研究對象，並搭配氣冷高爐石共同作為限定空間內之工程填充材料使用進行探討。本研究希望能進一步落實國家循環經濟政策，利用循環經濟中資源再利用之觀念，在秉持爐石固有的優點，又不影響環境的目標下，往綠色建材方向將煉鋼副產物再利用為有用之材料，甚至提高其價值較傳統材料為佳(且成本較低)。本研究擬分析未經安定化之轉爐石加上氣冷高爐石作為填充材料之可行性，根據爐石之材料性質及應用於工程性質進行探討，期相關研究成果未來可作為相關產業參考與遵循外，亦可提供爐石資源化應用於港灣海岸工程之相關技術參考，推廣未經安定化處理之轉爐石應用於工程之使用，並將轉爐石與氣冷高爐石之資源價值提高，期能利於循環經濟及確保公共工程之品質。

.....  
關鍵詞：煉鋼爐石、轉爐石、高爐石、循環材料、海岸工程、港灣工程

## Comparison Study On The Influence Of Basic Oxygen Furnace Slag And Blast Furnace Slag As Filling Material To The Engineering Properties Of Concrete

Hsien Hua Lee<sup>1</sup> Kuan-Fu Chen<sup>1</sup> Hsin Kuo<sup>1</sup> Wei-Chih Huang<sup>1</sup> Liang-  
Chieh Chen<sup>1</sup> Yu-Cheng Lee<sup>2</sup> Chen-Feng Chan<sup>2</sup> Hung-Chang Hsu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University

<sup>2</sup> China Steel Corporation

## ABSTRACT

Iron and steel slag, which are inevitable by-products from steel product manufacturing. In this study, steelmaking of by-products are applied to harbor engineering to increase resource reuse. Due to the different properties of air-cooled blast furnace slag and water-quenched blast furnace slag, air-cooled blast furnace slag is not as widely used in engineering application as water-quenched blast furnace slag. Therefore, in this study both basic oxygen furnace slag and air-cooled blast furnace slag are proposed to be used as engineering filling materials in a confined space. This study implements the circular economy in the direction of green engineering materials without affecting the environment. By applying the good properties of the material of basic oxygen furnace slag (BOF slag) such as the high hardness, high density, angular shape, high abrasion resistance, low aggregate crushing value, and excellent resistance to fragmentation, BOF slag can be better utilized for engineering purposes. It is expected that the results of this research can not only be used as relevant industries in the future, but also provide a technical means for the resource utilization of steelmaking slags in harbor engineering.

\*\*\*\*\*

Keywords: steel slags; basic oxygen furnace slag; blast furnace slag; recycled material; coastal engineering; harbor engineering

### 一、研究目的

中鋼公司每年超過百萬噸的爐石生產量，若不能有效處理，將只能不斷堆置在廠區或運送至許可置放區儲存，直到鋼鐵生產中斷為止。從鋼鐵生產的角度出發，氣冷高爐石及轉爐石的處理不只是環境問題而已，而是有關國家整體經濟發展的關鍵議題。依中鋼公司 2017 年統計資料，中鋼集團年平均鋼鐵生產量約為 1600 萬噸，而由煉鋼過程所產出之轉爐石約 160 萬噸(中鋼公司, 2017)，未經安定化處理之轉爐石遇水後易產生體積膨脹，具不穩定性，使其在資源再利用上受到限制。高爐石年產量約 450 萬噸，約 95% 為水淬高爐石，多磨成粉做為水泥替代原料，水淬高爐石為非結晶結構具有活性，主要化學成分為  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{CaO}$  等，研磨至一定細度的水淬高爐石粉，可代替部分卜特蘭水泥做為混凝土的膠結料(中聯公司, 2021)。然而，約 5% 為氣冷高爐石，以空氣自然冷卻方式產出，目前大都用於道路級配使用。為落實國家循環經濟政策，推動再生利料之運用，如何將副產物再利用為有用材料，甚至提高其價值較傳統材料為佳，為本研究之主要目標。

本研究為解決目前爐石資源化問題，更重要的意義在於將煉鋼副產物應用為有用的工程材料，其過程中對於減碳有所助益同時亦保護台灣的生態環境。減碳的方案中除了開發新能源，以減少碳氫化合物的燃燒之外，另外則是減少能源的利用，例如工業生產過程中能以最少的能源達到生產的目標。轉爐石與氣冷高爐石雖然目前也有多種用途，以往國內多以道路級配等來處理，值得開拓多元資源化途徑。轉爐石受限於其中之游離氧化鈣(f-CaO)以及氧化鎂(MgO)，其吸水後將造成的體積膨脹問題，因此國內大多以安定處理後的轉爐石進行應用，資源化價值較低。本研究針對轉爐石與氣冷高爐石其化學性質之變化、其使用在工程上之可行性分析進行研究，期望未來可作為各種工程有效的應用。

### 二、研究方法

本研究針對轉爐石與氣冷高爐石應用於沉箱結構之回填材料進行相關之試驗及分析，其工作項目將包括:基本性質試驗及分析、爐石於海水中之 pH 值釋出試驗與混凝土浸泡於爐石海水中反應物質之影響分析。

基本性質試驗及分析將以實驗為主，尤其是各種材料的基本性質試驗，製作成相關的工程應用材料，或其他不同性質(非工程)應用的材料。而材料試驗方法中主要為依據 CNS 標準，或者以美國材料試驗協會所訂 ASTM 標準作為各種材料進試驗時之依據，對轉爐石與氣冷高爐石進行以下材料相關基本試驗項目包含：

- (1) 粒料容積密度與空隙率試驗：依據 CNS 1163、ASTM C29 規範，量測粗細骨材之單位體積重量及骨材間空隙率，以決定粒料組織及級配性質，供混凝土配比設計中骨材用量之計算依據。
- (2) 粗粒料密度、相對密度(比重)及吸水率試驗：依據 CNS 488、ASTM C127 規範，評估水分子進入試體的能力，影響混凝土配比上的用水量，以作為控制混凝土強度之依據。
- (3) 粗粒料洛杉磯磨損試驗試驗：依據 CNS 490、ASTM C29 規範，以洛杉磯磨損試驗儀測定粒料之磨損率，以判別粗粒料對磨損之抵抗力，為測定轉爐石之抗磨損之能力。
- (4) 粒料健度試驗：依據 CNS 1167、ASTM C88 規範，測定粒料於飽和硫酸鈉溶液內抵抗分解的能力，以及兩者之間的反應，提供判斷風化作用下粒料之健性。
- (5) 粒料受水合作用之潛在膨脹試驗：轉爐石資源化再利用前必須確保其穩定性，為測定其安定性，達到工程所需之粒料性質要求，參照規範 CNS 15311 進行試驗。

爐石於海水中之 pH 值釋出試驗主要以 pH 值檢測棒快速的檢測砂石溶液的酸鹼度，材料本身具有一定的酸鹼緩衝能力，在隨著時間推移以及外在環境因素的影響之後，將具有決定材料最終在於環境中的 pH 值。本研究以不同粒徑大小之氣冷高爐石及自然級配轉爐石分別浸泡於人工海水中，針對不同試驗條件對 pH 之影響進行探討，以瞭解不同浸泡條件下之 pH 值變化情形。

混凝土浸泡於爐石海水環境中反應物質之影響分析，使用卜特蘭第 II 型水泥製成混凝土圓柱及砂漿試體，與轉爐石及氣冷高爐石共同於浸泡於海水中 14、28、56、91 天，將混凝土試體進行抗壓試驗，

並透過掃描式電子顯微鏡分析，配合 pH 值釋出試驗之結果，探討爐石對於混凝土之滲透程度，與爐石釋出之鹼度是否會對混凝土造成影響。

### 三、初步研究結果

#### 3.1 粒料受水合作用之潛在膨脹試驗結果

本研究參照 CNS 15311 粒料受水合作用之潛在膨脹加速試驗法進行。將轉爐石置於  $80\pm 3^{\circ}\text{C}$  之水中，連續紀錄 91 天之測微錶讀數。轉爐石膨脹試驗結果如圖 1，轉爐石粒料於 91 天的膨脹率約為 7.8%；實際上在室溫下，轉爐石達到此膨脹率則須數十年之時間。氣冷高爐石膨脹試驗結果如圖 2，氣冷高爐石膨脹率約為 0.0011%，合理推斷氣冷高爐石所發生的微小變化量應以熱膨脹為主，其在膨脹試驗中相當安定，膨脹行為為幾可忽略。倘若轉爐石依比例的混拌氣冷高爐石，則膨脹率將可依混拌比例降低。

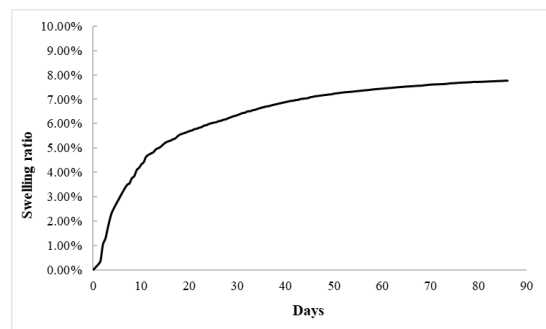


圖 1 轉爐石膨脹試驗結果

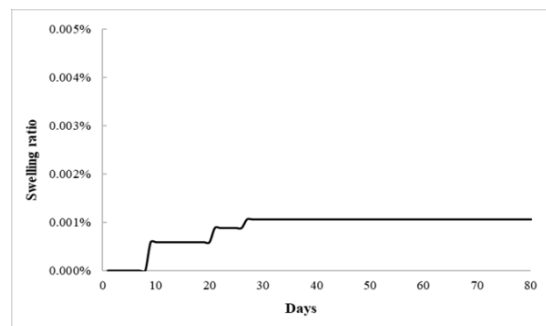


圖 2 氣冷高爐石膨脹試驗結果

#### 3.2 爐石浸泡於海水中 pH 值釋出試驗結果

在爐石於海水中之 pH 值釋出試驗中，為了解浸泡轉爐石與氣冷高爐石後，海水 pH 值之變化對混凝土結構物是否會造成影響，因此分別針對轉爐石及氣冷高爐石浸泡海水後的 pH 值釋出進行試驗，試驗結果如圖 3。

圖 3 綠色實線及黑色點節線，分別代表不同粒徑之氣冷高爐石浸泡於人工海水中的 pH 值變化趨勢，BFS50 為平均粒徑氣冷高爐石，其 pH 值於浸泡初期略高於單一粒徑六分石的條件，推測其原因係 BFS50 下有不同粒徑大小的級配分布，而較小粒徑的表面積較大，也因此加速其影響 pH 值的反應速度，而在浸泡時間 30 天後，不同粒徑之氣冷高爐石的 pH 值開始呈現一致的趨勢，其值約落在 8.5~9.0 區間。在浸泡人工海水約 60 天後可以由圖中看到，最後趨於穩定時 pH 值於 8.5~9.0 區間。該 pH 值顯示海水浸泡轉爐石之後水質呈現鹼性狀態，對於混凝土材料的力學性質是否產生負面影響則為本研究探討之重點。

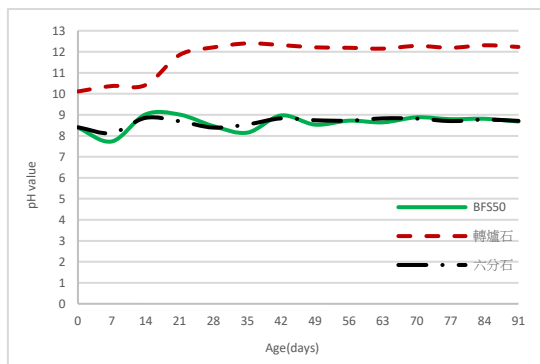


圖 3 轉爐石與氣冷高爐石浸泡於海水之 pH 值圖試驗結果

### 3.3 混凝土浸泡於爐石海水中反應物質之影響分析

圖 4 為養護 28 天之圓柱試體浸泡於含爐石海水之抗壓強度試驗結果，爐石於海水中則分成氣冷高爐石、轉爐石共 5 種不同情況：

- (1)  $R_b$  (紅色實線) 為自然級配轉爐石浸泡人工海水之環境。
- (2)  $R_g$  (橘色實線) 為 BFS50 氣冷高爐石浸泡於人工海水之環境。
- (3)  $R_f$  (紫色實線) 為單一粒徑六分石氣冷高爐石浸泡於人工海水之環境。
- (4)  $W_s$  (藍色實線) 為無爐石之人工海水環境。
- (5)  $W_c$  (綠色實線) 為飽和石灰水溶液之環境。

由圖 4 中觀察發現，於自然級配轉爐石浸泡人工海水之環境下，混凝土圓柱試體的抗壓強度最高，最大值为 443 kgf/cm<sup>2</sup>。其餘環境條件如下：於氣冷高爐石浸泡於人工海水之環境、於單一粒徑六分石氣冷高爐石浸泡於人工海水之環境、及於無爐石之人工海水環境下，對比於飽和石灰水溶液之環境下，混凝土圓柱試體的抗壓強度均略有降低。

表 1 為混凝土試體於不同浸泡條件下之抗壓強度試驗百分比增長率。由試驗結果可得知混凝土圓柱試體在不同浸泡條件下的抗壓強度，混凝土試體抗壓強度皆高於設計強度 280(kgf/cm<sup>2</sup>)，相較於一般混凝土養護環境所用之飽和石灰水溶液為基準，除了於自然級配轉爐石浸泡人工海水之環境中，強度成長達 14% 之外；其他部浸泡環境條件之抗壓強度稍有降低。其中以處於氣冷高爐石浸泡之人工海水環境中降低較大，混凝土抗壓強度之降低率，依爐石粒徑為平均級配或單一級配，分別為 15% 及 16%。

混凝土圓柱試體浸泡在人工海水環境下，其抗壓強度會稍低於飽和石灰水養護，可以推斷單浸泡在海水中對於混凝土的水化與養護並無太大功效；浸泡在氣冷高爐石海水環境之混凝土試體雖無明顯的強度提升，但無因為浸泡氣冷高爐石而致抗壓強度下降之情況，故混凝土浸泡在氣冷高爐石海水環境中對抗壓強度無負面影響；浸泡在轉爐石海水中的試體在各齡期之抗壓強度明顯高於其他浸泡條件，因此可推測在人工海水的浸泡情況下，轉爐石的添加使得混凝土持續處於鹼性的類養護環境中，有助於混凝土的水化速度。因此，混凝土處於添加轉爐石粒料之人工海水環境下，其抗壓強度之提升有正面之影響。

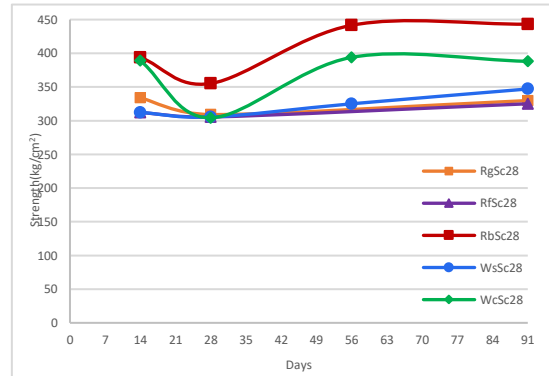


圖 4 轉爐石與氣冷高爐石比較  
混凝土圓柱試體於不同浸泡條件下之抗壓強度試驗結果

表 1 混凝土試體於不同浸泡條件下之抗壓強度(kgf/cm<sup>2</sup>)  
結果比較

混凝土圓柱試體91天 抗壓強度數據	百分比 增長率(%)	
WcSc28	388.09	
WsSc28	347.08	-10.568
RbSc28	443.16	14.191
RgSc28	329.87	-15.001
RfSc28	325.08	-16.236

### 3.4 電子顯微鏡(SEM)分析結果

爐石與天然粒料之差異在於，爐石富含 CaO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，將其應用於結構物時，是否將因此對混凝土產生影響，將是我們需要探討的目標，於前述試驗結果可見於轉爐石及氣冷高爐石浸泡環境下之混凝土強度並無下降的情況。而於此試驗將針對抗壓後之混凝土試體進行微觀試驗，因海水中含有大量離子如氯、鎂離子等，氯離子亦是造成鋼筋鏽蝕的主因之一，因此此次試驗內容乃從微觀的角度討論浸泡有爐石的海水環境是否將產生對混凝土性質額外影響的因子。

水泥水化物結晶形貌於電子顯微鏡試驗觀察中呈現不同形狀，不同礦物摻料對其內部水化產物型態與結構變化的影響，一般進行水化反應之生成物大致分成下列幾種：

- (1) C-S-H 膠體呈刺球狀之連續母體。
- (2) Ca(OH)<sub>2</sub> 呈六角薄板或不規則板狀。
- (3) AFm 呈六角薄片狀或不規則玫瑰狀。
- (4) Aft 呈細長條型針狀。

本研究使用混凝土浸泡於不同養護條件下之 SEM 試驗結果如圖 5，從該電子顯微鏡之顯影結果觀察，並未發現與上述水泥水化之生成物有重大差異之物質，因此、推論在爐石浸泡下的海水環境中，不至於對混凝土生成其他額外的生成物。

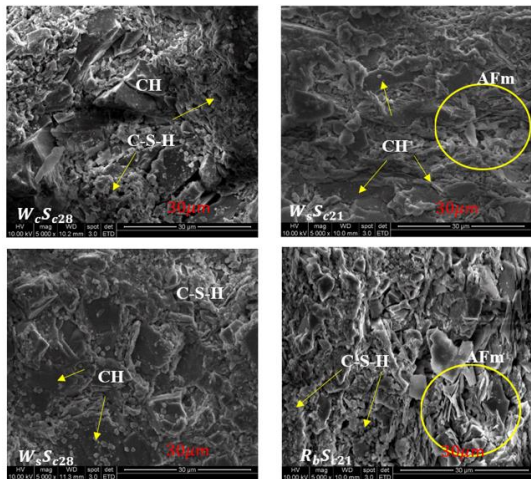


圖 5 SEM 試驗結果圖

## 四、結論

本研究為拓展爐石經濟價值並秉持資源再利用理念，將轉爐石及氣冷高爐石取代天然粒料作為回填材料使用，並進行一系列相關研究，以下針對目

前試驗結果提出幾項較為具體的結論：

1. 依目前研究成果，認為轉爐石雖然在常溫下的膨脹歷程緩慢，但仍不能小覷，轉爐石於粒料受水合作用之潛在膨脹試驗結果，其膨脹率在加速膨脹試驗 91 天的結果為 7.79%；氣冷高爐石膨脹率 91 天數據認為是幾乎可以忽略不計的，因此，將轉爐石與氣冷高爐石混拌預期能夠大幅的改善轉爐石之膨脹問題。
2. 本研究模擬封閉工程建物，轉爐石浸泡於人工海水中 pH 值約 12.2 左右，符合環境安全性評估作法及規範，依目前研究成果顯示，其對混凝土結構不具影響，甚至有正面效果。BFS50 之氣冷高爐石初期變化較大，推測原因係因其粒料表面積不同導致影響速率差異，不同粒徑的實驗組別在約 40 天後其 pH 值皆趨於接近，各組數據約於 91 天後趨於一致，落於 8.5~9.0 之間。
3. 由混凝土圓柱試體抗壓強度試驗結果，可得各試驗組之抗壓強度皆高於設計強度，且浸泡在轉爐石海水中之抗壓強度高於浸泡在海水與飽和石灰水，由此推估轉爐石海水對於抗壓強度有正面影響；混凝土體浸泡在氣冷高爐石海水中皆高於設計強度，但低於浸泡在飽和石灰水，因此認為浸泡氣冷高爐石於沉箱結構中，對混凝土強度較無正面效果。
4. 電子顯微鏡(SEM)分析結果，可以推論在轉爐石浸泡下的海水環境，並未因此對混凝土內部產生其他額外的生成物，內部組成皆可見於一般混凝土結構，未產生其他生成物。

## 謝誌

本文部分為科技部專題研究計畫「鋼鐵副產品轉爐石之高值化工程應用創新研發」(編號 MOST 108-2218-E-110-012-)並結合中鋼公司之計畫配合相關研究成果。

## 參考文獻

1. 中國鋼鐵股份有限公司，中龍鋼鐵股份有限公司，「轉爐石海事工程使用手冊」，2017。
2. 中聯資源股份有限公司，2021，<https://www.chc.com.tw/>。

# 層析成像分析法於水下單側震測法資料之 可行性評估

林俊宏<sup>1\*</sup> 洪湘詒<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>國立中山大學海洋環境及工程學系助理教授

<sup>2\*</sup>臺灣港務股份有限公司高雄港務分公司助理技術員

## 摘要

科技部計畫：MOST 108-2221-E-110-022 -

海床調查為海洋工程之重要基礎工作，透過水下地球物理方法可快速且有效地進行大範圍的調查，其中，水下單側震測法可提供海床之剪力波速以及壓縮波速，以作為後續工程設計使用。水下單側震測法為水下折射震測與水下表面波震測的整合施作分析方式，前者受到單筆資料量的不足後者受到分析理論限制皆僅能採用 1D 分析方法，透過不斷移動測線獲得擬 2D 之海床影像。本文主要針對水下折射震測之分析，透過理論走時曲線的探討，評估水下單側震測法之走時曲線資料採用 2D 層析成像分析的現場施測要求與反算設定。研究結果顯示，採用 2D 層析成像法分析水下單側震測法之走時曲線時，控制總網格點數介於 10000~13000 個網格點數之間，並同時考慮 x 方向網格大小對接收器間距的比例為 0.175~0.25，以獲得適當合理的反算參數。而在此反算設定下，施作時每次炸點施炸的移動距離應當小於 1/3 測線，可有良好結果。此外，由探討結果顯示，水下單側震測施作較適合對於海床下 5 公尺以內的調查需求。後續將進一步採用現地收錄資料進行驗證。

關鍵詞：水下折射震測、層析成像法、壓縮波速、海床調查

## Fesibility of Applying Traveltime Tomography Analysis in Underwater Single-side Seismic Survey

Chun-Hung Lin\*, Hsiang-Yi Hung

\* Assistant Professor, Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University

### ABSTRACT

Seabed characterization is one of the most important task in offshore engineering. Underwater geophysical methods can finish the survey efficiently even for large area. Underwater single-side seismic method is one of the available method and can provide the Vs and Vp of the seabed for the following engineering designs. Underwater single-side seismic method is the combined survey method for underwater surface wave method(UMASW) and underwater seismic refraction method(USRM). Restricted by the theory(UMASW) and the low data density(USRM), currently they can be analyzed with 1D theories. The aim of the study is to apply 2D tomography to analyze the data and find out the required field configurations and inversion parameters. Based on the inversion results from theoretical traveltime curves, the underwater single-side seismic method can be analyzed with tomography inversion if the distance between each shot is small than 1/3 survey line length. Futher, the total cells in inversions should be within 10000~13000 and the width of the cell should be 0.175~0.25 receiver spacing. The suvey is suitable for high resolution and shallow depth(<5m) investigations. More field data would be collected for verifications.

Keywords: Underwater Seismic Refraction Method; Tomography; Compression wave velocity; Shear wave velocity; Seabed characterization

## 一、前言

我國近年來離岸工程的發展越發興盛，由港灣、海纜至風機基礎，乃至於箱網養殖之錨碇，皆與海床之工程性質息息相關，而為有安全穩定之設計，海床的工程性質調查扮演非常重要的角色，影響層面包括場域選擇、興建施工及運維。就現階段之應用而言，海洋地球物理技術主要在規劃階段協助調查工作，除了底床深度調查外，以反射震測類之聲學技術進行底床下之地質狀況調查(如底層剖面儀)為一重要應用，其可定性的顯示底床下方地質之不連續面，配合少數之鑽孔資料協助對地質之判讀。然而此些反射震測類之調查技術無法提供底床之工程性質。

水下單側震測施作法可定量的提供海床淺層之壓縮波速( $V_p$ )與剪力波速( $V_s$ )，由眾多室內試驗之文獻顯示，此彈性波速與工程參數有著明顯的關聯性，其密度、液性限度、底床孔隙率等，甚至可採用剪力波速直接進行海底底床穩定度分析。透過此些經驗式將可透過非取樣鑽探之調查工作更具效率的收集海床工程參數。

水下單側震測施作法所獲得之資料係透過水下表面波震測分析以及水下折射震測分析兩種技術進而分別獲得海床之  $V_s$  以及  $V_p$  數據，在此中，兩種分析方法在實務上仍採用 1D 之解析方式，可獲得 1D 之波速剖面，並透過不斷移動側線位置進而組成 2D 影像。然而，採用此種方式所組成之 2D 影像對於地層在水平向上會有較高的平滑化現象，為進一步提升此法之解析能力，應考慮直接採用 2D 的分析方法。

2D 解析的水下表面波震測目前仍在發展中，尚未達到足夠的應用可靠度，相較於此，採用層析成像法(tomography inversion)進行折射震測資料解析的技術則相對成熟，但一般而言，為採用層析成像法進行折射震測資料解析，在一條測線中其至少需要在測線七處不同位置進行施炸，相較單側施炸，在每一條測線僅有一個炸點的情況無法直接採用。

本研究在層析成像法之分析概念下，提出採用重疊率較高的測線移動方式，以層析成像之 2D 解

析方式由水下單側震測所得之水下折射震測資料一次性進行 2D 反算，並透過理論解所建立之水下折射震測資料進行現地施作時重疊率的設定方式，以及採用層析成像法分析時，相關反算參數的最佳設定方式。

## 二、研究方法

### 2.1 水下單側震測法

水下單側震測法是水下折射震測法以及水下表面波震測法的整合施作方式，施作方式如圖 1 所示，將可接收振動訊號之水聽器串(streamer)沉底採深拖的方式移動，人工震源與水聽器串最近的一個水聽器稱為近站支距  $X_0$ ，待水聽器串與震源移動至預計施炸點位即利用人工振源產生震動，由水聽器串將振動訊號轉為電壓訊號後由訊號擷取器進行收錄。收錄所得之振動訊號即可進行水下折射震測以及水下表面波震測法之分析。本研究主要針對水下折射震測的部分進行分析方法的提升。

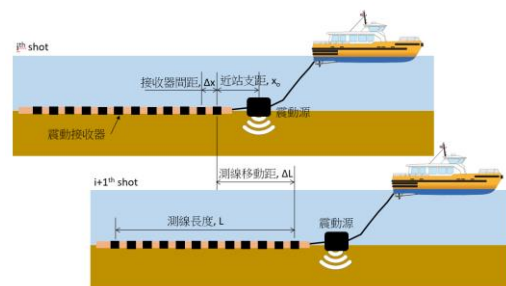


圖 1 水下單側震測法施作示意圖

水下折測震測法係藉由爆炸或衝擊產生人造震波，波傳至地下地層，因地層間速度不同，震波於層面處，依司涅爾定律(Snell's Law)發生折射現象返回地表，經海床面上之水聽器串接收。折射波在震波記錄上表現為初達波，如圖 2 所示，初達波係振動到達接收器的第一個訊號，根據其時間距離關係(通稱走時曲線)可加以求出下方地層之構造(層厚以及波速)。



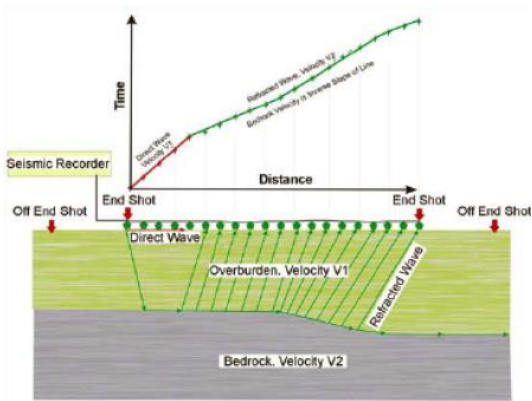


圖 2 水下折射震測法原理

## 2.2 層析成像分析法

在對於走時曲線之分析上的分析方法眾多，若假設地層為水平層狀地層(即 1D 分析，如圖 3 所示)，則地層的厚度與波速會與走時曲線之斜率以及截距有關，通常採用 1D 分析可將地層分為 2-3 層，更多層之理論計算雖亦可行，但是實務上在對走時曲線進行不同斜率之範圍分段上有其困難度，反而無法掌握地層波速變化之實際特性。

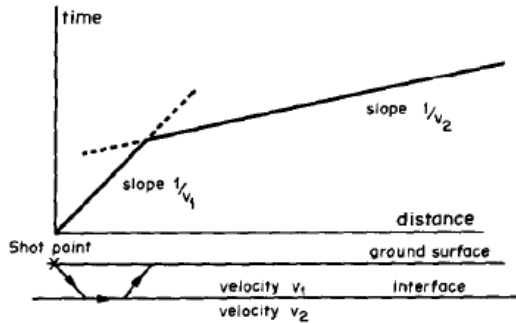


圖 3 1D 折射震測走時曲線分析示意圖(Green, 1974)

除前述之 1D 分析外，2D 乃至 3D 之分析更為目前分析應用上的主流，在 2D 的分析施作上，期需要更多在不同炸點位置之走時曲線，因此實務上其常在測線內會有 5-7 個炸點，測線外側的兩側會各有一個炸點。每個炸點都會先對其進行初達波挑選以獲得走時曲線，再接著採用 2D 的分析方法。

2D 分析方法眾多，主要有 Plus-Minus 法、General Reciprocal method 法以及層析成像分析法 (Traveltime Tomography) 可使用。層析成像分析法是將與反算的地層分為許多元素(如圖 4 所示)，由射線追蹤 (Ray tracing) 理論可計算獲得特定炸

點到接收器的理論走時曲線，藉由此數值模式由量測之走時曲線反算各元素之速度值，進而得到地層之速度分布。

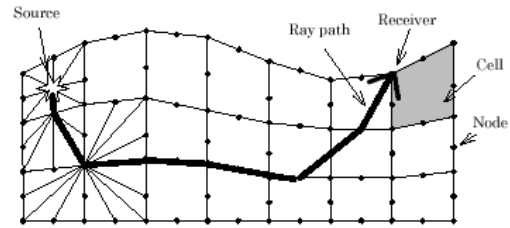


圖 4 折射震測層析成像分析原理

採用層析成像法解算各元素中波速的主要依據就在於射線通過與否，為可盡可能的解算到所有元素，最理想的狀態是每個元素皆有射線經過，但實際上並不容易達到，因此，最好的方式則是讓射線盡可能的通過最多的元素。一般的施作法即是採用在測線中的不同地方進行施炸，使得在欲探測的地層範圍盡可能被此些不同位置出發的射線涵蓋。而在單側震測施作法中，由於震源永遠只位於測線的特定位置，因此為了可以讓欲探測的地層中有較多的射線通過，其最主要就是需要讓拖動測線時的炸點距離不要相差太大，以確保有足夠的射線涵蓋。

## 三、研究成果

本文採用射線理論針對設計之傾斜地層模擬出多筆移動測線位置之理論走時曲線，在此理論走時曲線之模擬中，近站支距以及測線重疊率為變動的參數，藉以了解現地施作參數對於反算結果的影響；此中反算方式是採用商業軟體 SeisOptim pro 5.0 所建構的 2D 層析成像法進行。由於商業軟體主要是針對多炸點式的折射震測施作資料進行反算模型參數的最佳化設定，因此，本研究在討論此反算應用之可行性中，同時針對層析成像法的反算模型參數設定進行探討。

在進行比較的地層模型上(如圖 5 所示)採用兩層的傾斜層狀地層，在此地層模型中，上方地層壓縮波速  $V1$  為 1500m/s，下方半無限地層之壓縮波速  $V2$  為 2000m/s。地層之傾斜角度為 0.6 度，施測範圍為 184 公尺，最淺處為 2 公尺，此外，施作時，震源是位於較深的地層側，亦即振動源在左側，水聽器串在右側。

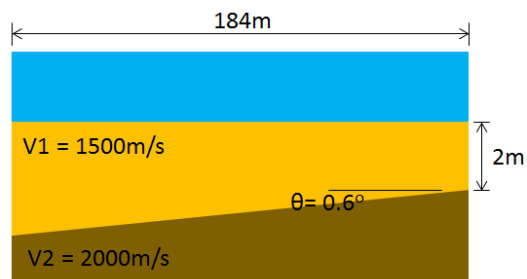


圖 5 地層模型

在進行理論水下折射震測之走時曲線計算上，採用 Green(1974)對於兩層傾斜地層所提出的計算方法，而計算之施作模式如圖 1 所示，採用近站支距為 2 公尺，水聽器間距為 2 公尺，共 24 個水聽器，測線長  $L$  為 46 公尺，而主要探討之移動測線長( $\Delta L$ )採用每次移動 1/2、1/3 及 1/4 條測線的距離，為維持分析的地層範圍一致，分析之資料分別移動 7、9、11 次進行施炸之模擬，並以此分析較佳之施作參數及反算參數。計算所得之理論走時曲線如圖 6 所示，採用兩層傾斜地層之走時曲線在移動過程中的變化不大，但可約略發現各走時曲線的轉折處由最左側發生的時間約在 15ms 處漸漸降到最右側發生時間約 10ms。

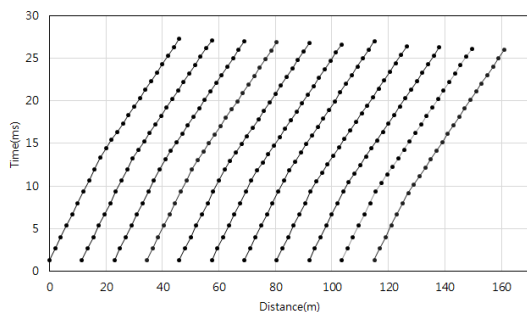


圖 6 理論走時曲線(以  $\Delta L=1/4L$  為例)

為可有效比較，在此地層下採用一般施作法(水聽器間距為 5 公尺，共 24 個水聽器，採用 7 個震源，設置點兩邊線外 10 公尺、0、30、55、85、115 公尺)之結果亦同樣進行分析比較，採用層析成像分析所得之結果如圖 7 所示，由圖中影像結果可見，採用傳統多炸點式施作的結果可獲得較深的探測深度，在此計算中，115 公尺測線展距探測深度約 10 公尺，由於折射震測主要透過長測線以收錄到由較深地層回傳至地面的訊號，由此範例可估計其探測深度與測線長的比例約 1/10，而單側施作的單一次測線長

度較短，即使透過多次移動組成較長的調查範圍，但仍受每一次的測線長度控制了調查深度，以本研究在此之結果，46 公尺的單側震測施作測線長度，其探測深度約 4.5 公尺，與一般性施測的探測深度與測線長之比例接近，因此可初步了解水下單側震測之施作目標在於側向變化的高解析能力而不在於大深度的調查能力。若調查之目的在於大深度，則仍因採用一般固定接收器而變化炸點位置之一般施作法為佳。

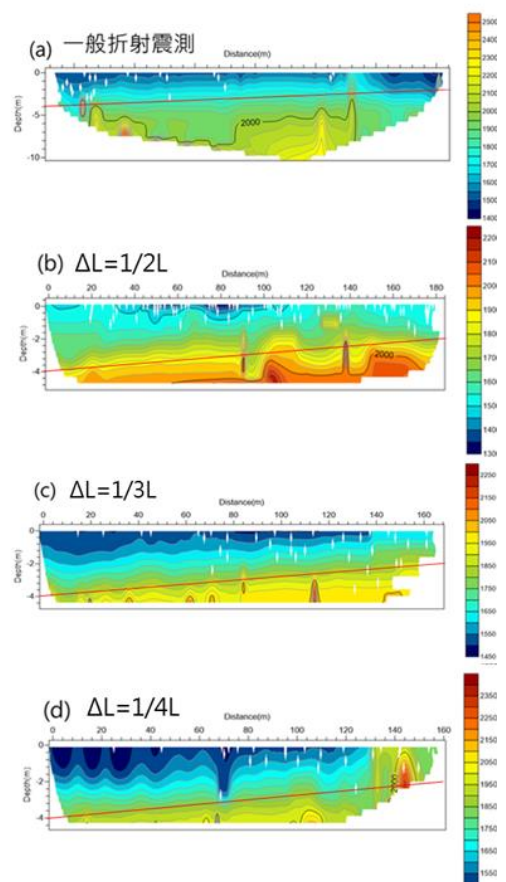


圖 7 傾斜地層中水下折射震測法採用層析成像反算成果(a)多炸點式施作法 (b)單側震測施作，測線移動距為 1/2L (c)單側震測施作，測線移動距為 1/3L (d)單側震測施作，測線移動距為 1/4L

進一步比較不同的測線移動距，圖中實線為地層模型介面的位置，比對層析成像分析所得之  $V_p$  影像，在一般折射震測施作的結果(圖 7a)中，波速 2000m/s 的等高線與實際介面位置差距最大可到接近 5 公尺，相去甚大，而採用水下單側震測施測法的結果(圖 7b-d)不論採用測線移動距為何其波速

2000m/s 等高線與實際介面位置誤差皆在 1 公尺以內，若以整體的連續性來考量，測線重疊長度應達到測線長之  $2/3$ (亦即  $\Delta L < 1/3L$ ) 能夠獲得較佳的反算成果(圖 7c,d)。但受限於單側施作法在測線最尾端的資料會較為有限，由圖 7b-d 的結果顯示，在測線最後  $L/2$  反算所得資料可靠度較低，建議後續實務上在對結果判釋時予以忽略不考慮。

在此所談到的成果都是基於採用層析成像反算的結果，一般商用軟體主要是針對多炸點施作之資料進行反算參數的最佳化，因此，本研究前述成果是針對單側震測施作進行反算參數最佳化測試後獲得，根據針對反算參數之探討成果顯示，總網格點數介於 10000~13000 個網格點數之間會有較佳結果，並同時考慮 x 方向網格大小對接收器間距的比例為 0.175~0.25，以獲得適當合理的反算參數，避免產生反算深度不足、反算地層速度錯誤、過渡等問題產生。

#### 四、結論

水下單側震測施作法可獲得海床剪力波速以及壓縮波速作為後續工程分析使用，其中壓縮波速是利用水下折射震測之分析方法獲得。但單側震測施作法之資料採用水下折射震測分析常受限於有限資料而僅採用將地層區分為 3 層以內之 1D 分析法，為有效增加其解析能力，本研究透過理論模擬之方式探討採用 2D 層析成像法時所需之水下單側震測施作參數以及分析時所需考量之反算參數。探討結果顯示，採用一般商用層析成像法之分析軟體，設定分析總網格點數介於 10000~13000 個網格點數之間，並同時考慮 x 方向網格大小對接收器間距的比例為 0.175~0.25，可獲得良好分析成果。在此反算參數下，施作時，水下單側震測施作法每次施炸的距離應當小於測線長度的  $1/3$ ，以獲得足夠的資料量進行 2D 層析成像分析。

#### 謝誌

本文係科技部專題研究計畫 (編號 MOST 108-2221-E-110-022 -) 之相關研究成果。

#### 參考文獻

1. Green R.,(1974). The Seismic Refraction Method— A Review. *Geoexploration*, 12 (1974) 259-284.

# 離岸基礎在互層非均質黏性土壤 之極限承載力

紀昭銘<sup>1</sup> 黃普源<sup>2</sup> 林正山<sup>3</sup> 許盈松<sup>4</sup> 劉建榮<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 逢甲大學土木工程學系助理教授

<sup>2</sup> 逢甲大學水利發展中心研究助理

<sup>3</sup> 逢甲大學土木工程學系研究生

<sup>4</sup> 逢甲大學水利工程與資源保育學系特聘教授兼水利發展中心主任

<sup>5</sup> 逢甲大學水利發展中心副主任

## 摘要

台灣政府計劃發展可再生能源產業並建設離岸風場。離岸基礎的尺寸通常大於陸域基礎的尺寸，例如自升式平台船的 spudcan 基礎或離岸風機的 monopile 基礎。由於離岸基礎較大的尺寸，基礎受崩潰荷重作用下所影響的土壤區域較大，而這個區域可能包含不同種類的土層。因此，在基礎承載力評估中，考量非均質土壤因素與互層土壤效應是必須的。本研究分別採用圓弧滑動機制與 FLAC 數值模擬調查基礎放置於非均質互層黏性土土壤系統的基礎承載力，其中上土層是相對較為堅硬；而下土層相對較軟且其不排水剪力強度將隨深度增加而線性增加。根據結果顯示，對於上土層較薄的條件，承載力因子可能有增加的現象且其所對應的圓弧滑動面或土壤塑性流區域可能收縮。另一方面，對於相對較厚的上土層條件，基礎承載力與其所對應的土壤滑動面可能不受下土層因素影響。

關鍵字：離岸風能、自升式平台船、FLAC、基礎承載力、非均質互層黏性土

## The Bearing Capacity Assessment of Offshore Foundation on Two-Layered Nonhomogeneous Cohesive Soils

Chao-Ming Chi\*, Pu-Yuan Huang, Zheng-Shan Lin, Yin-Sung Hsu, and Chien-Jung Liu

\* Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Feng Chia University

## ABSTRACT

Taiwan government plans to develop the renewable energy industry and construct the offshore wind farms. The dimensions of offshore foundations are in general larger than those applied in onshore, such as the spudcan footings for jack-up barges or the monopile for offshore wind turbines. Due to the large sizes of offshore foundations, the affected soil range by the footing under the collapse load would increase and it might contain different soil layers. Hence, it is necessary to consider the effects of nonhomogeneous soil properties and layered soils in the bearing capacity evaluation. This study utilizes the Circular Mechanism and FLAC numerical simulation, respectively, to investigate the bearing capacity of the foundation on a stronger cohesive stratum overlying a nonhomogeneous weaker cohesive soils of which the undrained shear strength would linearly increase with the depth. The results indicate that for the relatively thin top layer conditions there might be an incensement in bearing factors and the associated soil slip surface or the range of soil plastic flows would shrink. Oppositely, the bearing capacity and the associated soil slip surface would not be affected by the subsequent soil deposit for the relatively thick top layer condition.

Keywords: Offshore Wind Energy; Jack-up Barge; FLAC; Bearing Capacity; Two-Layered Nonhomogeneous Cohesive Soils

## 一、前言

近年來可再生能源 (renewable energy) 產業的發展受到許多國家的重視，而台灣政府亦大力推動相關產業的發展並預計於 2025 年達到 5.5GW 的離岸風場 (offshore wind farm) 建設目標。在離岸工程建設期間，自升式平台船 (jack-up barge) (圖 1) 廣泛地被應用於各類建造項目，例如：風機元件運輸、風機基礎安裝、風機架構組件等。其中，自升式平台船的基础型式常為 spudcan 基礎，而 spudcan 基礎直徑可能超過 20 公尺，其尺寸大小可數倍於陸域基礎。根據 Randolph and Gourvenec (2011) 指出，離岸結構物 (offshore structures) 所受的環境外力 (environmental loads) 可為陸域結構物 (onshore structures) 的數倍，故此項因素將導致離岸基礎尺寸大幅度地的提升。



圖 1 自升式平台船

([https://www.twport.com.tw/chinese/News\\_Content.aspx?n=4E4437C60EA3BF8E&s=6AC2E4E71CB700A3](https://www.twport.com.tw/chinese/News_Content.aspx?n=4E4437C60EA3BF8E&s=6AC2E4E71CB700A3))

紀昭銘等人 (2020b) 指出，在海洋自然沉積的厚層黏性土多為正常壓密土壤 (normally consolidated clays)，特性之一為其不排水剪力強度 (undrained shear strength,  $S_u$ ) 大約隨深度線性增加。然而，近岸海床的表土層常有較硬的土壤沉積，或土壤與海生物殘骸混合形成 carbonate soils，而有著局部硬層的現象是常見的 (如圖 2 與圖 3 所示)。

由於其尺寸的上升，基礎於塑性崩潰荷重 (plastic collapse load) 作用下，其所激發的土壤破壞面 (soil failure surface) 內含有不同性質的土壤機率較高。因此，對於離岸大型基礎的極限承載力 (ultimate bearing capacity) 評估，進一步地考量非均質 (nonhomogeneous) 效應與互層土壤所造成的影響是不可避免的。因此，本文將採用圓弧滑動機制 (Circular Mechanisms) 與 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 數值模擬 (numerical

simulation) 軟體分析基礎分別於圖 2 與圖 3 土層表面時，其所對應的極限承載因子 (bearing factor,  $N_c$ )。

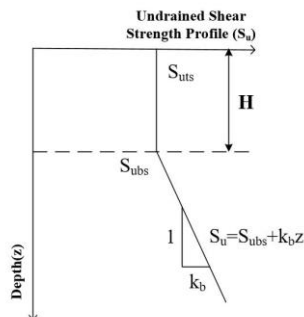


圖 2 互層黏性土強度變化示意圖 (Case-A)

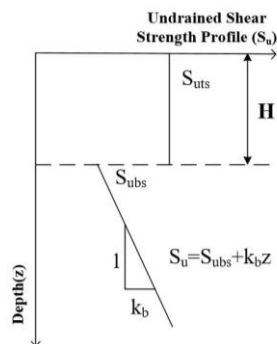


圖 3 互層黏性土強度變化示意圖 (Case-B)

## 二、理論分析

Reddy and Srinivasan (1971) 所提出的圓弧滑動機制 (圖 4) 係採用極限平衡分析法 (Limit Equilibrium Theorem) 獲得條形基礎於黏性土層的極限承載因子並可表示為式 1：

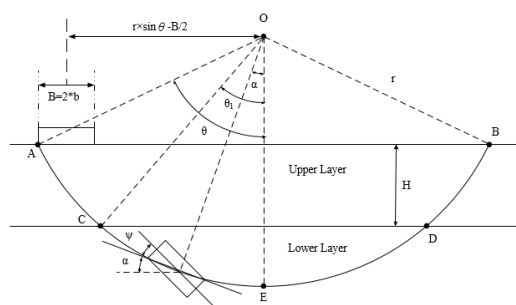


圖 4 圓弧滑動機制示意圖  
(Redraw from Reddy and Srinivasan, 1971)

### 三、結果與討論

$$N_c = \frac{q_0}{S_{uts}} = \frac{(r')^2}{2(r'\sin\theta - 1)} \left\{ 2\theta + 2n\theta_1 + \frac{k_t B}{S_{uts}} r'(\sin\theta - \theta\cos\theta) - \frac{k_t B}{S_{uts}} r'(\sin\theta_1 - \theta_1\cos\theta) + \frac{k_b B}{S_{uts}} r'(\sin\theta_1 - \theta_1\cos\theta_1) \right\} \quad \text{式 1}$$

其中：B為基礎寬度；H為上層黏性土層厚度； $S_{ut}$  與  $S_{ubs}$  為上、下土層表面所對應的不排水剪力強度； $k_t$ 、 $k_b$ 為上、下土層不排水剪力強度隨深度變化之斜率； $\theta$ 為圓弧破壞面影響範圍的一半角度； $r$ 為土壤破壞面半徑；而  $n$ 、 $\theta_1$ 、 $r'$ 可被表示為：

$$n = \frac{S_{ubs}}{S_{uts}} - 1 \quad \text{式 2}$$

$$\theta_1 = \cos^{-1}(\cos\theta + \frac{H}{r}) \quad \text{式 3}$$

$$r' = 2r/B \quad \text{式 4}$$

為獲得式 1 的最小值，式 5 必須被滿足。此外，本研究欲探討之土層條件如圖 2 與圖 3 所示，而其所對應的計算參數被整理於表 1。

$$\begin{cases} \frac{\partial N_c}{\partial \theta} = 0 \\ \frac{\partial N_c}{\partial r} = 0 \end{cases} \quad \text{式 5}$$

表 1 案例計算參數內容彙整

Case	$k_t$	$k_b$	$S_{ubs}/S_{uts}$	示意圖
A	0	$\geq 0$	1	圖 2
B	0	$\geq 0$	0.5	圖 3

FLAC 數值模型中將採用莫爾-庫倫模型 (Mohr-Coulomb model)，而基礎與土壤交界面被設定為完全粗糙。另一方面，基礎區域將有著一固定向下的速度對土壤系統進行加載直到基礎與土壤系統到達穩定狀態 (steady state) (Itasca, 2016)。

本研究考量條形基礎置於非均質互層黏性土表面進行數值模擬，探討上下層交接面土壤不排水剪力強度 ( $S_{ubs} \leq S_{uts}$ ) 改變時對極限承載力的影響。

圖 5 為 Case-A 的承載力因子 ( $N_c$ ) 分析結果，據結果顯示可知：(I) 於非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 為零時，所得承載力因子 ( $N_c$ ) 為 5.52 略小於 Chen (1975) 所得承載力因子結果 5.53 (紀昭銘等人，2019)；(II) 於相同  $H/B$  的案例下，隨非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 增加，會使承載力因子 ( $N_c$ ) 隨之增加並且發生逐漸收斂的趨勢。即相同  $H/B$  下當非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 達臨界 (critical) 值後，承載力因子 ( $N_c$ ) 不再有所改變，其所對應的土壤破壞弧皆恰切於下層土壤表面且臨界非均質影響因子隨  $H/B$  增加而遞減 (紀昭銘等人，2020a)；(III) 在  $H/B = 0.66$  的案例中，其曲線結果顯示承載力因子為一常數 ( $N_c = 5.52$ ) 不受非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 變化而改變。

圖 6 為 Case-B 的承載力因子 ( $N_c$ ) 分析結果，據結果顯示可知：(I) 於非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 為零時，所得承載力因子 ( $N_c$ ) 會受隨  $H/B$  增加的情況影響而提升；(II) 於  $H/B = 0.66$  的案例下，隨非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 增加，使承載力因子 ( $N_c$ ) 隨之緩慢增加並且發生逐漸收斂的趨勢。而於  $H/B = 0.25$  的案例下，隨非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 增加，承載力因子 ( $N_c$ ) 卻會隨之快速增加，且較  $H/B = 0.66$  的案例在常見的土層參數範圍內 ( $k_b B/S_{uts} \leq 3$ )，增加的趨勢並無趨緩；(III) 於上層黏性土層厚度 ( $H$ ) 較薄時，由結果可推論得承載力因子 ( $N_c$ ) 易受下層黏性土壤強度變化的影響。而若下層黏性土層厚度 ( $H$ ) 較厚時，承載力因子 ( $N_c$ ) 相對較不易受下層黏性土壤強度變化的影響。

圖 7 與圖 8 分別為圓弧滑動機制的破壞弧圖，前者為 Case-A，而後者為 Case-B。據結果可知：(I) 隨非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 增加，黏性土壤影響範圍會隨之縮小；(II) 於相同非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 下， $H/B$  較大條件下，其黏性土壤影響範圍較大；於  $H/B$  較小條件下，其影響範圍較小。

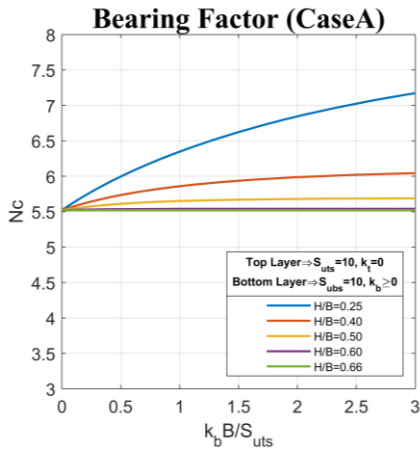


圖 5 Case-A 承載力因子變化圖

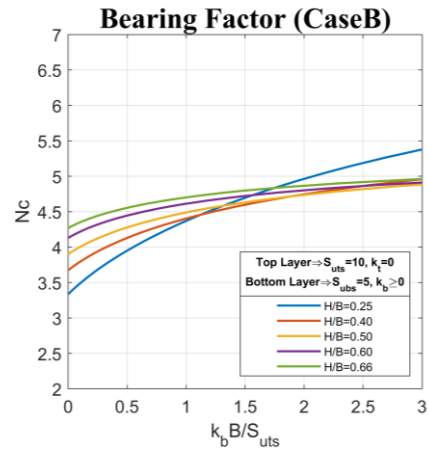


圖 6 Case-B 承載力因子變化圖

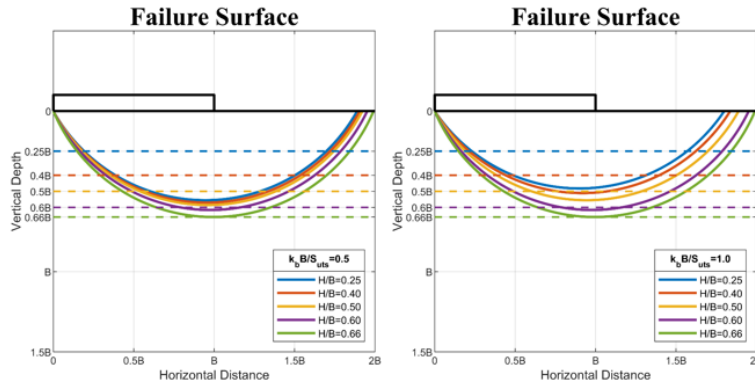


圖 7 圓弧滑動破壞於 Case-A 之  $k_b B/S_{uts} = 0.5$  (左) 及  $k_b B/S_{uts} = 1.0$  (右) 破壞弧圖

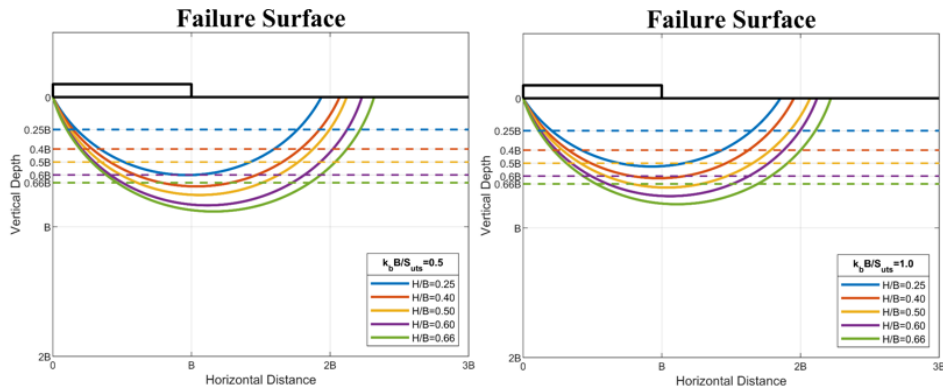


圖 8 圓弧滑動破壞於 Case-B 之  $k_b B/S_{uts} = 0.5$  (左) 及  $k_b B/S_{uts} = 1.0$  (右) 破壞弧圖

圖 9 為 Case-A 之圓弧滑動破壞與數值模擬 FLAC 的承載力因子 ( $N_c$ ) 結果，據結果顯示可知：(I) FLAC 得基礎於均質黏性土的狀況下，基礎承載力因子為  $N_{c,FLAC} = 5.17$  與 Prandtl (1921) 所提出承載力因子 ( $N_c = 5.14$ ) 相近；(II) 與圓弧分析法

結果趨勢相同，FLAC 所分析之基礎承載力數值會隨著非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 的成長增加而提高；(III) 利用圓弧滑動法所求得之承載力因子數值高於採用 FLAC 模擬求得的數值；(IV) 隨著非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 的成長，圓弧滑動法與 FLAC

之基礎承載力因子數值曲線呈現相似的變化趨勢。

圖 10 為 Case-B 之圓弧滑動破壞與數值模擬 FLAC 的承載力因子 ( $N_c$ ) 結果，據結果顯示可知: (I) 與圓弧分析法結果趨勢相同，FLAC 所分析之基礎承載力數值會隨著非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 的成長增加而提高; (II) 利用圓弧滑動法所求得之承載力因子數值高於採用 FLAC 模擬求得的數值; (III) 於較小  $H/B$  狀況下，隨著非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 成長，圓弧滑動法與 FLAC 之基礎承載力因子數值差異有明顯擴大的趨勢。反之較大於

$H/B$  的狀況下，兩法之基礎承載力因子數值曲線約略平行; (IV) 圓弧滑動破壞與 FLAC 模擬在相異  $H/B$  的狀況下，承載力因子交錯點有明顯的差異。

圖 11 與圖 12 為 FLAC 分析於  $H/B = 0.5$  的狀況下，Case-A 與 Case-B 在非均質影響因子分別為  $k_b B/S_{uts} = 0$  與 1.0 之速度場變化圖。根據分析結果顯示: I)  $k_b B/S_{uts} = 0$  時，Case-A 之速度場範圍小於 Case-B; II) 隨非均質影響因子的增加，Case-B 所得速度場範圍的縮小的現象較 Case-A 明顯。

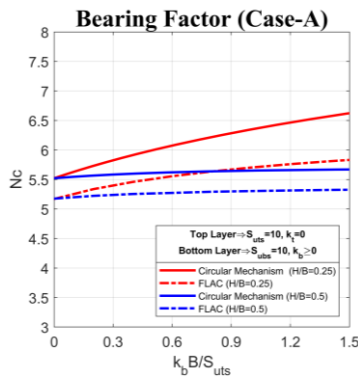


圖 9 圓弧破壞與 FLAC 承載力因子變化圖

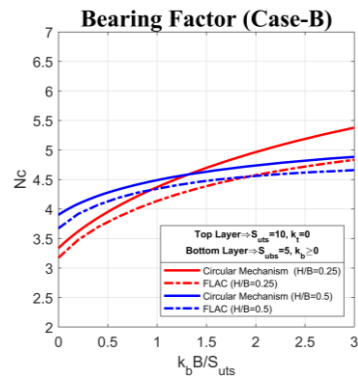


圖 10 圓弧破壞與 FLAC 承載力因子變化圖

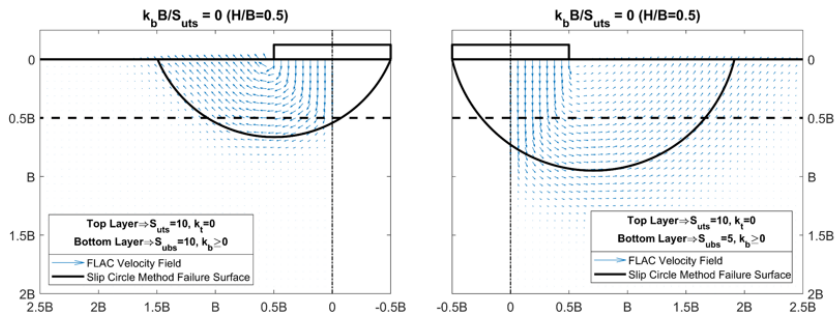


圖 11 FLAC 分析於  $H/B = 0.5$  Case-A (左) 與 Case-B (右) 之速度場 ( $k_b B/S_{uts} = 0$ )

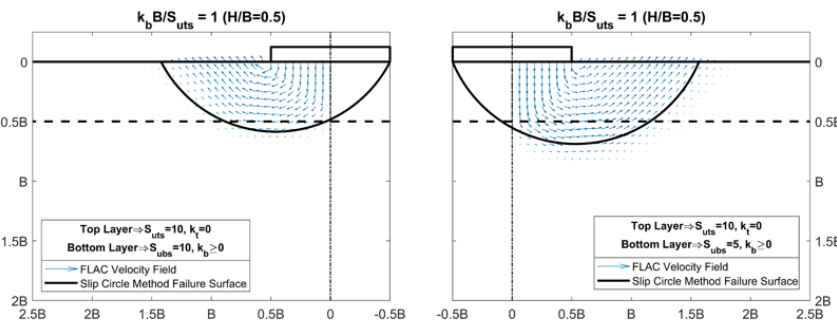


圖 12 FLAC 分析於  $H/B = 0.5$  Case-A (左) 與 Case-B (右) 之速度場 ( $k_b B/S_{uts} = 1$ )



## 謝誌

本論文係科技部專題研究計畫「自升式平台船之獨立基礎在互層土壤中之極限承載力評估」(編號:108-2218-E-035-016-MY2)、「台灣離岸浮動式風機平台與自升式平台船之錨錠基礎極限承載力分析」(編號: MOST 110-2221-E-035-029)與教育部新工程教育方法實驗與建構計畫「智慧營建在海陸域風力發電設施之理論設計與實務應用」(編號 MOE-NEEMEC-B-108-02)之研究成果,承蒙科技部及教育部補助相關經費與研究人力使本研究得以順利完成,僅致謝忱。

## 參考文獻

1. 紀昭銘、林正山、黃普源 (2019),「大型基礎在互層黏性土壤之承載力評估」。第四十一屆海洋工程研討會論文集,第 660-665 頁。
2. 紀昭銘、黃普源、林正山 (2020a),「非均質互層黏性土壤的擠壓現象對獨立基礎之承載力因子影響」。第二十二屆水下技術研討會暨科技部、文化部成果發表會論文集,第 209-217 頁。
3. 紀昭銘、林正山、黃普源、許盈松 (2020b),「圓形基礎在正常壓密黏性土之承載力評估」。四十二屆海洋工程研討會論文集,第 591-598 頁。
4. Chen, W. F. (1975). Limit Analysis and Soil Plasticity. Elsevier Scientific Pub. Co.
5. Itasca Consulting Group, Inc. (2016) FLAC — Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 8.0. Minneapolis: Itasca.
6. Prandtl, L. (1921). Über die eindringungsfestigkeit plastischer baustoffe und die festigkeit von schneiden. Z. Ang. Math. Mech., 1(1), 15-20.
7. Randolph, M. F. and Gourvenec, S. (2011). Offshore Geotechnical Engineering. Spon Press.
8. Reddy, A. S. and Srinivasan, R. J. (1971). Bearing Capacity of Footings on Clays. J. Soils and Foundations, 11(3), 51-64

## 四、結論

本研究為模擬黏性土壤表層為一硬層,而下層土壤強度會隨深度增加而變強的互層土壤條件(圖 2 與圖 3)。研究採用 Reddy and Srinivasan (1971) 所建立的圓弧滑動機制及數值模擬 FLAC 分析條形基礎於非均質黏性互層土壤表面之極限承載變化,根據兩法所得各項分析成果,其結論與重點如下:

- (1) 當條形基礎於均質黏性土層時,透過圓弧滑動機制分析所得承載力因子 ( $N_c$ ) 為 5.52 略小於 Chen (1975) 所得承載力因子結果 5.53;另外 Prandtl (1921) 在所得承載力因子為 5.14 與 FLAC 模擬所得 ( $N_{c,FLAC} = 5.17$ ) 相近。
- (2) Case-A ( $S_{ubs} = S_{uts}$ ) 的研究結果顯示,在相同  $H/B$  的條件下,承載力因子 ( $N_c$ ) 隨非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 增加而增加,並且圓弧滑動法與 FLAC 之基礎承載力因子數值曲線呈現相似的變化趨勢。此外,利用圓弧滑動法所求得之承載力因子數值高於採用 FLAC 模擬求得的數值。而於圓弧滑動機制下  $H/B = 0.66$  之曲線結果顯示承載力因子為一常數不受非均質影響因子變化而改變。另一方面,圓弧滑動機制所得土壤破壞弧與 FLAC 模擬所得土壤速度場的影響範圍隨著非均質影響因子的成長而有縮小趨勢。
- (3) Case-B ( $S_{ubs} = \frac{1}{2} S_{uts}$ ) 結果顯示,在非均質影響因子 ( $k_b B/S_{uts}$ ) 為零時,所得承載力因子 ( $N_c$ ) 會受隨  $H/B$  增加的情況影響而提升。隨非均質影響因子上升,在較大  $H/B$  下,承載力因子隨之緩慢增加並且發生逐漸收斂的趨勢。反之,在較小  $H/B$  條件下,承載力因子卻會隨非均質影響因子快速增加,但無明顯收斂的趨勢。與 Case-A 相同的是,利用圓弧滑動法所求得之承載力因子數值高於採用 FLAC 模擬求得的數值。另一方面,圓弧滑動機制所得土壤破壞弧與 FLAC 模擬所得土壤速度場的影響範圍隨著非均質影響因子的成長而有縮小的趨勢。
- (4) 根據兩法在案例分析結果顯示在上層黏性土層厚度 ( $H$ ) 較薄時,承載力因子 ( $N_c$ ) 易受下層黏性土壤強度變化的影響,而上土層較厚時,承載力因子相對較不易受下層黏性土壤強度變化的影響。

## 海域救助人員職能之發展與探討

張珮綺<sup>1\*</sup> 謝馥蔓<sup>2</sup> 陳思樺<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>國家海洋研究院綜合規劃及人力培訓中心副研究員

<sup>2</sup>文藻外語大學國際企業管理系教授

<sup>3\*</sup>國家海洋研究院綜合規劃及人力培訓中心助理研究員

### 摘要

推動「向海致敬」政策，未來從事海域遊憩活動的人數勢必增加，海域安全成為不容忽視之議題。其中海域救援需具有專業技術與能力，為有效地掌控海域救助人員的素質，建立海域救助人員專業素養的社會公信力，給予大眾更安全的海洋環境，甚至從中提高從業人員的實質金錢報酬，本研究主要採用文獻探討、次級資料分析、一般訪談法和專家焦點團體法，檢視此領域之發展，探討此職類之工作任務、從事此專業工作之人員所應具備之能力、以及應有之知識、技能和態度等職能內涵等。

本研究將目標放於已取得開放水域訓練的救生員認證者，探討與發展海域救助科技輔具職能基準，期得以藉由本研究之探討與產出，發展出海域救助人員之職能模型，用以作為後續發展相關課程之依據，藉此提升海域救助人員的專業知識與技能，增加海上救援成功機率。

關鍵詞：海域救助人員、水域救援、職能

## Discussion and Development of Ocean Lifesaver Competency

Pei-Chi Chang<sup>\*</sup>, Fu-Man Hsieh, Szu-Hua Chen

<sup>\*</sup> Associate Researcher, Planning and Training Center, National Academy of Marine Research

### ABSTRACT

Promoting the Salute to the Sea Policy, there will be more people engaged in offshore recreational activities in the future. The issue of ocean safety cannot be ignored. It should be mentioned that the ocean lifesaver requires professional skill and ability in order to effectively control the competency of ocean lifesaver, develop the social credibility on ocean lifesaver, offer a safer ocean environment to the public, and increase the remuneration of ocean practitioner. The research methods are based on literature analysis, secondary data analysis, expert interview and expert focus group meeting. The objectives are reviewing the development in this field, and discussing the tasks, competence, knowledge, skills and attitude of ocean lifesaver.

The main object of this research is analyzing and developing the competency of lifesaving appliances for the people already had the open water lifeguard certification. The results obtained to build the competency of ocean lifesaver. As a basis for the related courses to improve the professional knowledge and skills of ocean lifesavers and increase the rescue achievement ratio.

Keywords: Ocean Lifesaver; Aquatic Rescue; Competency

### 一、計畫緣由與目的

臺灣是海洋國家，鼓勵國人知海、近海、進海、淨海是「向海致敬」國家策略的重要精神之一。隨

著國人從事海域遊憩活動蓬勃之際，海域安全為不容忽視的議題。

依據世界衛生組織溺水報告，顯示每年約發生

32 萬例溺水事件，是全球非故意傷害死亡的第三大原因，其中以兒童、男性及接觸水的機會較高者，溺水的危險性最大。國內內政部統計近 5 年平均每年 440 人死於溺水，長年以來國人溺水憾事發生於開放性水域高達八成以上，而發生於開放性水域事故場域中，又以溪河 41% 及海邊 21% 最常見，故水域救助人員之重要性可見一般。

「救生員資格檢定辦法」第 2 條揭露救生員指經檢定合格，具備救生基礎知識及能力，擔任水域救生工作之體育專業人員。國內現行救生員制度由教育部體育署統一制定及管理。救生員檢定自 2011 年實施，分「游泳池」及「開放性水域」兩項，期效三年，「游泳池救生員」年滿 18 歲可直接報考，「開放性水域救生員」需持有效期內「游泳池救生員證」及協會救生員訓練證明始可報考。2019 年起，教育部體育署將兩證合一，廢除「開放性水域救生員」證照，但在學科加考開放性水域救援知識。

海域救援需具有專業技術與能力，在推行「向海致敬」政策同時，為給予大眾更安全的海洋環境，提升海域救助人員人數與專業能力是必須的。經查新版救生員檢定中救援器材運用僅拋繩救援項目，基於救溺原則為器材救援勝於徒手救援，故本文將主要對象設定為已取得救生員證照之人員，主要目的為提升專業救生人員(海巡人員、救生員等)的輔具救援技能。

另為更有效地掌控海域救助人員的素質，建立海域救助人員專業素養的社會公信力，同時使民眾的海域安全更有保障，甚至從中提高從業人員的實質金錢報酬，故本計畫擬採用文獻探討、次級資料分析、一般訪談法和專家焦點團體法，檢視並探討此職類之工作任務、從事此專業工作之人員所應具備之能力、以及應有之知識、技能和態度等職能內涵，期後續可以此為據發展訓練課程，提升救助人員運用科技輔具救援的專業知識與技能，增加救援成功機率。

## 二、文獻探討

目前我國海域救助人員類別共有 11 類，包含(1)海巡署人員、(2)岸巡署人員、(3)消防機關人員(含義勇消防人員)、(4)國軍單位人員(含陸海空軍等)、(5)消防署登錄災害防救團體(目前有 124 個團體，

類別區分：山域艘救、水域救援、緊急救護、營建搶救、資通訊等)、(6)各縣市政府登錄民間災害救難團體、(7)全國未登錄民間救難團體(如：中華民國搜救總隊)、(8)體育署檢定合格救生員暨訓練機構認定單位合格救生員、(9)體育署訓練機構認定單位救生教練(目前有紅十字會、水上救生協會、水中運動協會、游泳救生協會、水域訓練檢定協會、海軍水中爆破退伍人員協會、海上救生協會、海浪救生總會、輔英科技大學、競技與休閒運動教練協會等)、(10)從事海域遊憩運動活動相關從業人員暨玩家(如：SUP、獨木舟、風帆板、帆船)與(11)其他。

國際救生組織(International Life Saving Federation(ILS))相關文獻指出救生員分成 lifeguard 和 lifesaver，在 ILS Beach Lifeguard 指出使用設備進行救援是救生員的職能，組織必須發展一套評估指標需求之標準，以確保救生員能在現場使用必要的技能和設備。

澳洲衝浪救生協會(Surf Life Saving Australia, SLS)和皇家救生協會(Royal Life Saving, RLS)為國內救生組織的重要相關聯盟，依據澳洲資歷架構 PUA42619 - Certificate IV in Public Safety (Aquatic Search and Rescue Management)、PUA30319 - Certificate III in Public Safety (Aquatic Search and Rescue)及 PUA20119 - Certificate II in Public Safety (Aquatic Rescue)所發展的核心任務比較，目前我國海域救助人員的工作任務似比較偏向 Certificate II in Public Safety。Certificate II in Public Safety (Aquatic Rescue)中參與水域救生與其對應的行為指標和知識技能如表 1，至於所需要的整體知識與技能可參閱表 2。

表 1 參與水域救生的工作任務和行為指標

工作任務	行為指標
1.準備和回應救援	1.1 取得執行任務的訊息，並與團隊成員討論。
	1.2 依據主管指派的任務訊息，確認後選擇適當的救援設備
	1.3 根據救援現場，選擇適當的個人防護衣和設備。
	1.4 依據組織程序，在出發途中與到現場時，持續接受救援現場的更多細節
2.參與救援現場評估	2.1 確認和評估救援現場的風險和危害

	2.2 和團隊成員討論最低危害的救援方法
	2.3 依據組織程序，使用風險緩解流程，減少或控制危害程度和環境條件
	2.4 使用適當的技術和術語與其他成員保持溝通
	2.5 根據組織程序，依循工作、安全衛生(WHS)/職業安全衛生(OHS)和安全程序
	2.6 依據組織程序，了解個人能力與限制，向主管報告。
	2.7 將更多個人和/或專業設備的需求，向主管報告。
	2.8 向主管報告現場的人員傷亡情形，並按照指示採取行動。
3.執行救援	3.1 依據組織程序，使用技術和設備，處理事件和/或人員傷亡。
	3.2 依據組織程序和主管指示，執行救援程序
	3.3 依據組織程序和主管指示，準備安全移動或撤除傷亡人員
	3.4 依據組織要求，實施衛生預防措施
4.結束救援	4.1 依據組織程序和使用指引，復原、清潔和維護設備，並適當的保存以維持操作的準備度
	4.2 向相關人員報告自我壓力的現象與症狀
	4.3 依據組織程序，參與匯報和完成書面報告

此外在 MARM010 Survey lifesaving appliances, fire and other safety system 和 MARF043 Operate survival craft, rescue boats and lifesaving appliances 也有與本計畫相關可參考之內容，例如依據規模、類型和水域條件等(MARM010)，準備適當的基本配備、輔助配備與溝通工具(MARF043)，在節點檢查和評估配備與輔具的安全狀態(MARM010) 和在操作救援設備時，能有效地與相關人員溝通(MARF043)，以及攜帶適合溺水情境的救生配備與輔具，於第一時間抵達援助地點(MARF043)等。

另外致力於使救生員看到危險情況和避免溺水的 the Beersheba-based startup 團隊，在以色列國家公園處的協助下，於頻頻發生意外事故的 Palmachim 海灘的救生塔設置三台攝影機，並將資料饋給單一 NVIDIA Jetson AGX，接著由 NVIDIA

Metropolis 進行影像數據分析，這套危險探測器系統不僅能使救生員在掃描海灘時，能夠注意電腦螢幕的標籤，還利用光流演算法(optical flow algorithms)偵測海洋中的危險離岸流(rip currents)，幫助救生員順利帶人員脫離這些區域，光流演算法能確認圖像中每個物件的速度，並使用偏微分計算圖像中每個立體像素的加速向量。因此當救生員開始工作時，可更新海洋的情況，對於當天的風險有所知覺，因為救生塔上的攝影機、NVIDIA Jetson AGX 和 NVIDIA Metropolis 共同提供即時的警告、追蹤、統計和風險分析。

表 2 參與水域救生所需的知識與技能

知識	技能
1. 救援設備的用途與限制	1. 在救援現場應用安全工作實務
2. 掌握傷亡的技術	2. 應用減輕風險的工作、安全衛生/職業安全衛生技巧
3. 包括手勢符號的溝通技術	3. 完成組織的文件
4. 環境條件和風險	4. 總結救援程序
5. 衛生預防措施	5. 依循組織政策和程序
6. 手工處理措施	6. 確認、紀錄、準備和清除傷亡人員
7. 國家認可的文獻標記系統	7. 參與團隊
8. 包含傷亡和意外報告程序的組織文件、政策和程序	8. 參與簡報和匯報
9. 個人能力	9. 準備和執行水域救援
10. 個人衛生	10. 壓力符號的辨認和報告
11. 個人防護衣和設備	11. 依據組織程序，復原、清潔和維護設備，並報告設備的損害情形
12. 救援設備	12. 使用安全與符合時效性的態度，反應與回應指令
13. 包括人員傷亡清除和地面搜查的救援行動	13. 選擇和穿戴個人防護衣與設備
14. 團隊成員的角色和責任	14. 使用適當的溝通技術與術語
15. 包含現場知覺的安全預防	15. 使用救援設備
16. 壓力的符號和症狀	16. 在即時移動平台上工作
17. 包含減輕風險的工作、安全衛生/職業安全衛生需求	

澳洲衝浪救生協會(Surf Life Saving Australia, SLS)和皇家救生協會(Royal Life Saving, RLS)為國內救生組織的重要相關聯盟。澳洲在職教育訓練係以資歷架構為基準，本計畫主要引用上述文獻作為內涵來源之一，並統整部分國際救生組織與其他文

獻之相關內容；另外 NVIDIA 相關文獻則使用新興科技及演算法，協助海域救助人員在海流中搜尋遇難者的正確方位，此日後足以作為我國海域救助人員的訓練內容。

### 三、研究流程

一般職能評估與發展的方法，主要有訪談法、調查法、集會法等研究方式，本計畫主要採用次級資料分析、文獻探討、訪談法和專家焦點團體法來進行，計畫流程如下。

1. 次級資料分析：本計畫首先搜集國內外海域救援資料，完成需求分析與目的。
2. 第一場次訪談會議：有鑒於目前國內外相關救援職能的資料不多，因此於次級資料分析後，以產業界具代表性專家一人發展初步職能模型，作為專家焦點團體會議的討論初稿。
3. 第一場次專家焦點團體會議：根據第一場次專家訪談會議初稿，以學術界、產業界和政府單位具代表性人員計 8 人，運用三方對話進行討論，此次會議將職能範疇界定為科技動力輔具救援職能課程，討論內容包括工作任務、行為指標、知識、技能與態度等(會議照片如圖 1)。
4. 文獻分析：依據第一場次專家會議討論結果，並彙整相關國內外文獻，發展出第二版職能模型，作為第二場次專家焦點團體會議之稿件內容。
5. 第二場次專家焦點團體會議：以學術界、產業界和政府單位具代表性人員 10 人，運用三方對話進行第二版職能模型之討論(會議照片如圖 2)。
6. 第二場次訪談會議：接著再以產業界具代表性專家一人，驗證第二場次專家焦點團體會議討論結果所發展出職能模型之相關內容並完成定稿。



圖 1 第一場次專家焦點團體會議



圖 2 第二場次專家焦點團體會議

### 四、結果分析

經由上述之步驟流程進行次級資料分析、文獻探討、訪談法和專家焦點團體法，本計畫所取得之結果如下。

1. 將本文所提之海域救助人員界定為 lifesaver，且主要職能範疇界定為科技動力輔具救援職能課程。
2. 職能課程入門水準定義為「具備開放水域訓練認證之救生員證明」人員。
3. 此職能級別為第 4 級，即能夠在經常變動的情況中，在少許監督下，獨立執行涉及規劃設計且需要熟練技巧的工作。且人員需要具備相當的專業知識、技術，以及判斷與決定之能力。
4. 規劃出 4 項工作任務，包含 T1 準備和回應救援、T2 參與救援現場評估、T3 執行救援、T4 結束救援。
5. 依據 4 項工作任務，分別研擬出之海域救助人員科技動力輔具救援之行為指標、工作產出，以及應具備之知識與技能如下表 3。
6. 海域救助人員科技動力輔具救援之人員應有之態度為 A01 主動積極、A02 持續學習、A03 自我管理、A04 自信心、A05 團隊意識、A06 彈性、A07 壓力容忍、A08 應對不確定性、以及 A09 謹慎細心。

表 3 海域救助人員科技動力輔具救援之行為指標、工作產出，以及應具備之知識與技能

T1 準備和回應救援

行為指標	工作產出	職能	
		知識	技能
P1.1 日常測試與檢查科技輔具的油量與機油，外	O1.1.1 器材測試功能表	K01 科技輔具的維保	S01 科技輔具的維保技巧

觀是否完整，及安全插硝、救援板和無線電的功能測試，以確保入水的安全性。		認知	
P1.2 接收目擊事件或非目擊事件的開放水域溺水訊息，依據規模、類型和水域條件等，準備適當的科技輔具與溝通工具等，於第一時間抵達援助地點。	O1.2.1 事件記錄表 O1.2.2 訊息記錄表（含對上級對下等，準備適當的科技輔具與溝通工具等，於第一時間抵達援助地點。 O1.2.3 通報系統相關紀錄表（內容應涵蓋人事時地物、現場環境資訊等） O1.2.4 裝備的使用清單 O1.2.5 裝備使用索引表 O1.2.6 裝備紀錄表	K02 科技輔具的用途與限制 K03 水域危害的認知 K04 團隊成員的角色與責任 K05 交通動線	S02 訊息處理能力 S03 災害分級能力 S04 判斷能力 S05 科技輔具調配能力
P1.3 依據所得訊息，如規模過大或狀況特殊，立即研判並通知需要增援單位、動員規模。	O1.3.1 特殊單位資料庫	K03 水域危害的認知 K06 危害種類與影響	S04 判斷能力 S06 危害辨識技巧 S07 通報技巧
P1.4 根據救援現場，選擇適當的個人安全防護裝備。	O1.4.1 個人安全防護裝備一覽表	K07 個人安全防護裝備	S08 選擇個人防護裝備 S09 正確穿戴個人防護裝備

T2 參與救援現場評估

行為指標	工作產出	職能	
		知識	技能
P2.1 辨認和評估救援現場的風險和危害		K08 風險知覺 K09 危害辨識	S10 風險評估技巧
P2.2 和團隊成員討論最低危害的救援方法		K10 救援方法	S11 溝通技巧 S12 合作協調
P2.3 依據組織程序的標準化作業流程，實施風險緩解步驟，以減少或控制危害的	O2.3.1 風險緩解步驟	K11 組織程序 K12 環境條件和風險	S10 風險評估技巧 S13 風險避免

程度和環境條件			技巧
P2.4 使用官方或資深人員確認的手勢和訊號，及運用適當的技術和術語與其他成員保持溝通。		K13 手勢符號的溝通系統 K14 國家認可的標記系統	S11 溝通技巧
P2.5 依循與執行組織程序中的工作安全衛生(WHS)/職業安全衛生(OHS)原則		K15 職業安全衛生規則	S12 職業安全衛生應用技巧
P2.6 將自我身心健康狀態的評估及所攜帶之裝具、人力，回報給現場指揮官，以協助其分配適當的救災職務。	O2.6.1 執勤安全守則 O2.6.2 執行任務全程無線電通聯摘要紀錄表 O2.6.3 人員出勤紀錄表 O2.6.4 事前裝備器材查檢表 O2.6.5 人員健康檢查表	K11 組織程序 K16 健康衛生知識	S11 溝通技巧 S14 自我覺察能力

T3 執行救援

行為指標	工作產出	職能	
		知識	技能
P3.1 配備影像整合功能（水面空拍、水下攝影），將情境與資料分析結果，提供給現場指揮官，做為救災決策依據。	O3.1.1 配備影像整合資訊	K02 科技輔具的用途與限制	S15 資訊科技應用能力 S16 數據解讀能力 S17 操作無人飛行載具 S18 水下攝影技巧 S19 配合GPS無線電定位人員正確位置
P3.2 在入水域中，依據安全規範駕駛，並遵從岸邊指揮官的指令，使用適當的科技輔具進行搜救。	O3.2.1 無線電通聯代號賦與表 O3.2.2 無線電頻道	K02 科技輔具的用途與限制 K17 安全規範	S04 判斷能力 S11 溝通技巧 S12 合作協調 S15 資訊

			科技應用能力 S20 解讀指令能力
P3.3 在節點檢查和評估科技輔具的安全狀態。	O3.3.1 器材測試功能表	K18 科技輔具的安全檢查項目	S21 科技輔具安全性的檢查技巧
P3.4 在操作救援設備時，能有效地與相關人員溝通，並適時回報，建議現場指揮官持續作為。		K02 科技輔具的用途與限制	S11 溝通技巧
P3.5 依據現場要求，實施衛生預防措施。		K15 職業安全衛生規則	S12 職業安全衛生應用技巧

#### T4 結束救援

行為指標	工作產出	職能	
		知識	技能
P4.1 救援結束後，當即回報指揮官，人員安全狀況及裝備器材妥善情形	O4.1.1 裝備器材妥善報告表 O4.1.2 人員妥善報告表	K01 科技輔具的維保認知	S11 溝通技巧 S22 報告設備損害情形
P4.2 依據組織程序及使用者指引，對於科技輔具進行清潔保養及復原等工作。	O4.2.1 科技輔具的維保流程表	K11 組織程序 K19 科技輔具的維保程序 K20 科技輔具的維保方法	S01 科技輔具的維保技巧 S23 科技輔具的歸位能力
P4.3 根據組織程序，參與匯報和完成書面報告。	P4.3.1 救援書面報告	K11 組織程序	S24 文書撰寫能力 S25 匯報技巧

## 五、結論與建議

本計畫採用次級資料分析、文獻探討、訪談法和專家焦點團體法等研究方法，探討海域救助人員運用科技動力輔具救援之職能內容，包含界定入門水準、工作任務、行為指標、工作產出、以及應有之知識、技能與態度等。

根據本計畫所發展之「海域救助人員科技輔具救職能模型」，可(1)依據四項工作任務繪製訓練地圖，作為後續訓練之實施流程；(2)依據行為指標、職能級別和知識、技能等撰寫訓練目標，可發展適當的訓練課程內容；(3)進行行為指標的重組，可將重組的結果作為規劃後續課程單元的參考，以匹配適當的訓練時數；(4)使用行為指標或知識、技能作為訓練成果評估的指標來源，以便有效、客觀的評估受訓者的訓練效益；(5)以課程單元所涵蓋的知識、技能，作為設計與發展教材、教具、師資、課程助教條件等的基礎。

## 參考文獻

1. 勞動部勞動力發展署(2021)，iCAP 職能發展應用平台，取自 <https://icap.wda.gov.tw/>
2. 海洋委員會(2020)，2020 國家海洋政策白皮書，海洋委員會
3. 全國法規資料庫(2020)，救生員資格檢定辦法，2020年10月7日
4. 全國法規資料庫(2020)，產業創新條例，2019年7月24日
5. 中央社(2019)，戲水消暑須留意 內政部：平均每年釀 440 死。
6. Scott Martin(2020), Sand Safety: Startup's Lifeguard AI Hits the Beach to Save Lives. Israel-based Sightbit is developing water safety AI to augment beach lifeguards. Retrieved July 2, 2020
7. International Life Saving Federation(ILS)(2018), International Pool Lifeguard, Inland/Open Water Lifeguard, Surf Lifeguard International Lifesaver International Junior Lifesaver Appendix
8. World Health Organization.(2014), Global report on drowning: preventing a leading killer. World Health Organization
9. International Life Saving Federation(2011), Main Skills for Lifesaving and How to Train these Skills.
10. International Life Saving Federation(ILS)(2003), International Life Saving Federation Beach Lifeguard Appendix10.

## 離岸風電水上支撐結構檢修人員之職能分析

張珮綺<sup>1\*</sup> 謝馥蔓<sup>2</sup> 黃千綺<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>國家海洋研究院綜合規劃及人力培訓中心副研究員

<sup>2</sup>文藻外語大學國際企業管理系教授

<sup>3</sup>國立高雄科技大學人力資源發展系碩士生

### 摘要

開發離岸風場的同時應強化產業技術能量與建構離岸風電產業在地化，離岸風電生命週期中運維階段長達 20 年以上，應儘早補足運維階段人力之缺口。本研究主要依據離岸風電運維市場之產業人員需求，採用 I-P-O 職能發展模式，透過文獻分析、一般訪談法和專家焦點團體法建構「離岸風電水上支撐結構檢修人員」職能模型。研究過程中進行離岸風電產業的人力需求分析，對於離岸風電產業與產業人才需求資料進行蒐整與分析，並採用專家訪談法，選定並發展關鍵職類；接續進行職能分析階段，整理國內外相關職能資料，並辦理 2 場次專家訪談與 2 場次專家焦點會議，完成離岸風電水上支撐結構檢修人員所需具備之能力組合，包含此職類之工作職責、工作任務、行為指標、工作產出，以及所對應之知識、技能和態度等。

關鍵詞：IPO 模式、職能、離岸風電、營運與維護

## Competence Analysis of Tower Technician for Offshore Wind Farm

Pei-Chi Chang<sup>\*</sup>, Fu-Man Hsieh, Chian-Chi Huang

<sup>\*</sup> Associate Researcher, Planning and Training Center, National Academy of Marine Research

### ABSTRACT

The localization of offshore wind industry shall be established at the stage of development of wind farms. Operation and Maintenance (O&M) period is around 20 years in the life cycle of offshore wind. The manpower gap in O&M is stressed by a growing demand. This research methods are based on secondary data analysis, literature analysis, expert interview and expert focus group meeting. The objective is to complete the "Competence Model of Offshore Overwater Structural Inspector" by I-P-O model. The research processes include: 1. To analysis the workforce demand in offshore wind industry; 2. To develop the critical job position; 3. To hold 2 expert interviews and 2 expert focus group meetings; 4. To complete the "Competence Model of Offshore Overwater Structural inspector" with main responsibilities, tasks, key performance indexed, outputs, knowledges, skills and attitudes.

Keywords: I-P-O model; Competence; Offshore Wind; Operation and Maintenance

### 一、前言

離岸風電為國家重點發展政策，經濟部積極推動離岸風電產業，隨著產業聚落形成，西岸風場的陸續完工，預計將帶動運維階段的產業發展。目前各開發商皆已開始規劃與建造風場，考量到後續眾

多風場完工商轉後，將進入長達 20 以上之運維階段，且台灣風場環境特殊，如結構防蝕、生物附着之影響等問題，無法完全套用國外經驗，加上維護檢測等技術又是屬於急需高度專業之工作，由於運維階段為強化國內產業技術能量與建構我國離岸風電產業在地化最重要階段，故應儘早補足後續運維



階段人力之缺口，加強風場產業在地化之連結。

為達此一目的，本研究經由人力分析需求試圖找到可發展之離岸風電行業方向，列舉出離岸風電領域範疇中可發展之關鍵職類。由於若以產業人力需求為標的物來發展應重視標的產業或領域所需能力需求的共通性與必要性，因此應以科學方法建立能力內涵以力求客觀性，故本研究擬採用 I-P-O 模式，選擇適切之職能分析方法來分析發展本研究職類之職能內涵。

## 二、研究方法

職能模型發展模式係以輸入 (Input) -過程 (Process) -產出 (Output) 模式 (簡稱為 IPO Model) 為基礎，分成需求面 (Input) -流程面 (Process) -結果面 (Output) 三構面，共有 9 項審核指標，如圖 1 (勞動部勞動力發展署，2017)。本研究引用此職能模型發展模式，進行離岸風電產業之人力需求分析，並選擇適當的職能分析方法來進行職能分析。

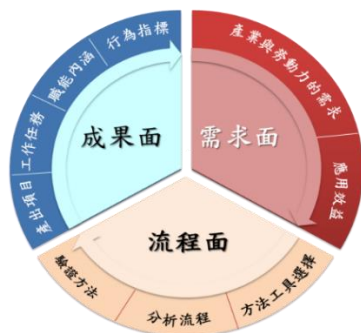


圖 1 IPO 模式

於「職能基準發展指引」(勞動部勞動力發展署，2017)中指出發展職能基準的過程應選擇適當職能分析方法，且提及經文獻與實務經驗整理，參考 Gonczi, Hager 與 Oliver (1990)所提的架構，可將目前常用的職能分析方法分為四大類，主要有一般訪談法、職能訪談法等共計 14 種方法。本研究於執行過程中採用了次級資料分析法、一般訪談法、職能訪談法，與專家焦點會議法(利害關係人訪談法)等來進行職能內涵的需求與職能分析。

## 三、人力需求分析

本研究於人力需求分析中進行相關文獻之整理，對於離岸風電產業與產業人才需求資料進行蒐整與

分析，後再採用專家訪談法，選定並發展之關鍵職類，此階段之步驟流程如圖 2。

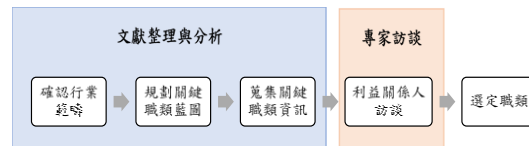


圖 2 人力需求分析步驟流程圖

綜整離岸風力發電產業發展現況(台灣就業通，2021)、2021-2023 離岸風力發電產業專業人才需求推估調查(經濟部工業局，2020)、離岸風電運維安全規範與規劃研析(房辰陽，2018)、離岸風力運維產業之介紹(財團法人臺灣經濟研究院，2014)、A Guide to UK Offshore Wind Operation and Maintenance (The Crown Estate, 2013)等文獻資料，擬以發展離岸風電運維階段相關職能為主之原因為

- (1) 符合國家重要政策：目前國內正積極建立離岸風電產業聚落，帶動了產業人才需求，各方均期望得以推行在地政策，培育本土離岸風電的人才，將產業人才根留台灣。
- (2) 運維階段為離岸風場開發生命週期最長：運維階段長達 20 年以上最久，能讓風場在安全無虞的情況下，順利進行發電工作，且運轉維護的需求可增加本地相關產業與工作機會。
- (3) 彌補職能落差：離岸風電產業人才欠缺之主要原因為人員技能或素質不足，以及人才供給不足、流動率高等因素。

由於為確保離岸風場正常運作與供電，離岸運維工作扮演相當重要的關鍵，本研究依據上述文獻資料，並參考經濟部標準檢驗局目前所訂定離岸風力發電技術規範之運轉及維護技術要求項目，初步發展出有關檢修人員之關鍵職類清單如表 1。

表 1 離岸風電產業運維階段關鍵職類表

職類代碼	關鍵職類名稱
SET	離岸風力機檢修人員
SET	離岸支撐結構檢修人員
SET	離岸電力系統電纜檢修人員
SET	離岸變電站檢修人員

備註：職類代碼依據職能導向課程領域類別架構表(領域類別：科學、技術、工程、數學；職類代號與名稱為 SET、工程及技術)而來。

本研究經由文獻整理歸納關鍵職類資訊後，進

一步採用專家訪談法，透過專家訪談選定本研究欲發展之關鍵職類。透過專家訪談會議取得之重點為，(1)具檢修人才之需求，應儘早進行培育作業：ROV 水下無人操控載具之訓練、海底電纜之檢修作業，與支撐結構的檢測人才等皆是目前產業所欠缺，是急需培訓之職類。

(2)台灣風場環境特殊，檢修作業有需納入在地化之必要：台灣颱風、地震、結構防蝕與生物附著等特殊環境因素，皆是海外風場經驗無法完全套用於台灣之主因，應於訓練中納入在地環境元素，培養在地之專業技術人員。

(3)承作廠商之差異性：於運維階段，風機一般會由風機製造商自行聘僱員工進行風機保固作業，反觀支撐結構部分，因在地環境與成本等考量，會讓在地之廠商來執行相關作業。

(4)可先進行水上作業培訓、後進行水下作業訓練：目前在台灣無論是水上或是水下檢修作業皆有人力欠缺、急需培育專業技能之需求。就訓練資源而論，國內水下作業相關技術資源相對複雜且仍有待發展，發展之困難度會大於水上作業部分，建議可先進行水上檢修人員訓練，後再進行水下作業人員之作業。

(5)職能發展與建立職能基準之效益：建置「職能基準」最主要效益是提供企業與訓練單位培育在地人才，亦可作為在職人員訓練課程的依據，加強能力的具備度，再者亦可作為個人能力評估之參考。

綜合上述，考量離岸運維工作之屬性，依據需求與難易度，故於本研究中以發展「離岸風電水上支撐結構檢修人員」為主軸。另參照「Offshore Wind Energy Inspection Procedure Assessment Final Report」(A. C. Inc., 2015)，離岸風電水上支撐結構檢修人員的工作範疇有

- (1)進行離岸風電支撐結構之外觀檢測與維護，並評估其腐蝕控制裝置位置、範圍和有效性。
- (2)工作區域含飛濺區，主要工作含檢測腐蝕、防蝕（如陰極保護）、海洋生物生長、外觀目測檢查（如損壞、變形、剝落、磨損、裂縫），及檢測前之表面清潔等工作。

經本過程之分析界定出本研究發展「離岸風電水上支撐結構檢修人員」職能模型之行業別與職業別如下。

- ◆ 行業別：M 大類-專業、科學及技術服務業

71 中類-建築、工程服務及技術檢測、分析服務業  
 定義：從事建築與工程服務，或物質、材料及產品之物理性、化學性及其他分析檢測之行業（行政院主計總處，2016）。

- ◆ 職業別：7 大類-技藝有關工作人員

72 中類-金屬、機具製造及有關工作人員；

723 小類- 機械維修人員； 7233 細類-產業用機器維修人員

定義：從事農業、工業或商業用之機器、設備、零件、引擎（機動車輛及飛機引擎除外）等檢測及維修之人員（行政院主計處，2010）。

## 四、職能分析

本研究選擇之職能分析方法包含次級資料分析法、職能訪談法，與專家焦點會議法，此階段步驟流程如圖 3。

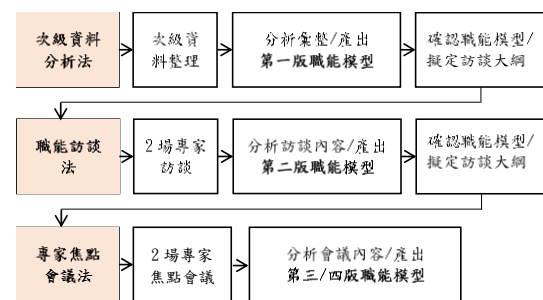


圖 3 職能分析步驟流程圖

「職能(Competence)」，指完成某項工作任務或為提高個人與組織現在及未來績效所應具備之知識、技能、態度或其他特質之能力組合。而「職能基準(Competence Standards)」是為指為完成特定職業或職類工作任務，所應具備之能力組合，包括該特定職業或職類之各主要工作任務、對應行為指標、工作產出、知識、技能、態度等職能內涵（勞動部，2020）。

於職能分析中，本研究依據國內外相關職能資料整理，針對 NACE 課程（NACE，2021）的資訊進行蒐集與彙整，同時也蒐集美國 O\*NET 職能（O\*NET，2020）、英國 NOS 職能（ECITB，2013），以及澳洲管線與天然氣協會等國外次級資料（APGA，2021），並參考我國職能平台（勞動部勞動力發展署，2021）相近職類之「測量工作人員職能基準」與職能態度內涵等資料，彙整本次職能模

型中工作職責、工作任務、行為指標與職能內涵(知識、技能、與態度)等內容,產出第一版之職能模型。

產出第一版之職能模型後,本研究接續舉辦 2 場次的專家訪談產出第二版職能模型,為進一步完善此職能模型因此接續再採用專家焦點會議法,邀請離岸風電產業界相關之人士,分別於 2021 年 6 月 8 日與 6 月 15 日辦理了 2 場次專家焦點會議。於會議前設計半結構式問卷並將問卷與會議資料送交與會專家,以利於會議中更有效率地共同檢視工作任務、工作產出、行為指標、知識與技能之職能內涵。經專家之討論與建議,修正並產出第四版「離岸風電水上支撐結構檢修人員」職能模型。

討論發展出「離岸風電水上支撐結構檢修人員」職能模型,完成離岸風電水上支撐結構檢修人員所需具備之能力組合,如下。

#### 1. 工作職責、工作任務與工作產出

本職能模型共計產出 4 項主要工作職責,包含「T1 制定離岸風電水上支撐結構規劃預防與維護計畫」、「T2 離岸風電水上支撐結構之預防與維護」、「T3 離岸風電水上支撐結構檢測與評估」與「T4 收集及分析平台資訊系統」。各工作職責內之工作任務與工作產出,如表 2 所示。

表 2 工作職責、工作任務與工作產出

工作職責	工作任務	工作產出
T1 制定離岸風電水上支撐結構規劃預防與維護計畫	T1.1 制定計畫	O1.1.1 預防與維護計畫
	T1.2 依據支撐結構損害辨識結果補充計畫	O1.2.1 損害檢測對策
T2 離岸風電水上支撐結構之預防與維護	T2.1 維護前準備	O2.1.1 裝備儀器自主檢核表
	T2.2 執行支撐結構預防與維護作業	O2.2.1 施工團隊人員職責與名冊
	T2.3 完成支撐結構預防與維護作業	O2.3.1 施工紀錄
T3 離岸風電水上支撐結構檢測與評估	T3.1 檢測前準備	
	T3.2 執行支撐結構檢測	
	T3.3 完成支撐結構檢測作業	O3.3.1 檢測結果紀錄
T4 收集及分析平台資訊系統	T4.1 收集資訊與數據	
	T4.2 使用平台資訊系統紀錄資訊與數據	

	T4.3 平台資訊分析與回饋	O4.3.1 平台資訊分析暨適用性評估建議報告
--	----------------	-------------------------

#### 2. 行為指標

各工作任務所對應之行為指標,如下表 3。

表 3 各工作任務所對應之行為指標

工作任務	行為指標
T1.1 制定計畫	P1.1.1 閱讀業主或運維部門提出之檢測及運維要求,以正確提出工作範圍與目標。
	P1.1.2 閱讀業主或運維部門提出的結構設計標準與維護品保手冊,掌握工作項目與結構資訊。
	P1.1.3 辨別因結構異常可能造成的機組安全風險與潛在問題。
	P1.1.4 區別風險與問題,規劃風險管控措施,以制定預防與維護計畫。
	P1.1.5 依據業主要求的職安衛要求,評估預防與維護作業風險或危害因子,擬定因應措施。
T1.2 依據支撐結構損害辨識結果補充計畫	P1.2.1 依據辨識損害成果提出工具或設備,修正或補充現有的預防與維護計畫。
	P1.2.2 根據計畫內容或檢查表紀錄,辨識與紀錄支撐結構性能與主要損害區域,並調整檢查表項目。
T2.1 維護前準備	P2.1.1 依據預防或維護計畫,確認與協調工作範圍,完成工作前準備。
	P2.1.2 檢查與核對支撐結構預防與維護作業之裝備、儀器與材料。
	P2.1.3 瞭解施工作業風險與危害因子及其因應措施。
T2.2 執行支撐結構預防與維護作業	P2.2.1 檢查所需工具與設備,確認個人安全防護機具的適用。
	P2.2.2 執行團隊人員的施工職責與造冊,並點名。
	P2.2.3 按照計畫內容,依序執行支撐結構外觀之預防與維護工作。
	P2.2.4 遵守施工安全衛生原則及作業相關法規。
	P2.2.5 依照品質管理要求,完成維護工作後的自行檢驗。
T2.3 完成支撐結構預防與維護作業	P2.3.1 預防與維護作業完成後,依程序清理工作場所,以維護場域安全。
	P2.3.2 依裝備儀器自主檢核表,清點所攜工具,並依施工人員名冊點名。
	P2.3.3 取得授權人員(如業主、MCC、內部高端技術人員等)的同意,安全處理異常情況,紀錄解決方案。
	P2.3.4 紀錄施工過程,將成果通知專責人員。
T3.1 檢測前準備	P3.1.1 依據業主需求或與專責人員討論,確認檢測工作範圍。
	P3.1.2 彙整檢測數據及流程,並確認檢測範圍所需之後勤支援項目,以規劃檢測工作執行情序、時間與目標內容。
	P3.1.3 評估檢測工作所需之時間、成本與資源,徵詢督導人員建議,以確保能與他人有效協調工作,並釐清責任。
	P3.1.4 瞭解檢測作業風險與危害因子及其因應措施。

工作任務	行為指標
	P3.1.5 提出檢測工作替代方案，作為應變計畫。
T3.2 執行支撐結構檢測	P3.2.1 核對執行檢測工作之設備儀器與材料。
	P3.2.2 遵守職業安全衛生及其他相關法規，維持工作安全原則。
	P3.2.3 進入工作區域，必要時攀登至支撐結構平台或飛濺區，進行外觀清潔。
	P3.2.4 依照檢查表，依序進行支撐結構檢查與數據測量。
	P3.2.5 若發現損壞或鬆脫零件，經業主同意可當場修護時，應及時恢復，並加以紀錄與回報。
T3.3 完成支撐結構檢測作業	P3.3.1 檢測作業完成後，依程序清理工作區域，以維持其安全性。
	P3.3.2 依程序紀錄檢測結果，並評估檢測與量測結果與檢查表容許值之差異。
	P3.3.3 經品管人員同意，將紀錄輸入分析平台資訊系統或通知專責人員。
	P3.3.4 針對檢查結果之異常處，與專責人員討論嚴重性，並評估適用性。
T4.1 收集資訊與數據	P4.1.1 使用觀察、檢測或運用平台資訊系統取得資訊與數據。
T4.2 使用平台資訊系統紀錄資訊與數據	P4.2.1 將資訊與數據導入產業軟體或程式。
T4.3 平台資訊分析與回饋	P4.3.1 將資訊與數據使用編譯、編碼、分類、計算、製表、審核或驗證等方式加以處理，以達到預防及維護的工作目標。
	P4.3.2 詮釋資訊與數據的涵義，以分析潛在原因與確認事實。
	P4.3.3 向業主或專責人員報告分析與調查結果。
	P4.3.4 依據規格標準或品保管理內容，確認資訊與數據之正確度，提出適用性評估(Fitness For Service, FFS)與改善建議。(E08)(E07)

### 3. 知識職能

本職能模型共計產出 4 項工作職責，各工作職責所應具備之知識職能，如下表 4。

表 4 各工作職責所應具備之知識職能

工作職責	知識職能
T1 制定離岸風電水上支撐結構規劃預防與維護計畫	K01 風險管理 K02 安全管理 K03 相關法律、監管、在地需求、程序和安全工作規範 K04 典型支撐結構損壞的類型與造成原因 K05 損壞檢測方法與原理 K06 海上平台及高空作業風險管理 K07 常見英語溝通應對
T2 離岸風電水上支撐結構之預防與維護	K01 風險管理 K02 安全管理 K07 常見英語溝通應對 K08 職業安全衛生及相關防護具規範 K09 施工設備與材料使用方式

	K10 預防與維護工程系統 K11 常見風險評估與應變 K12 工作彙報責任 K13 設備儀器品質管理
T3 離岸風電水上支撐結構檢測與評估	K02 風險管理 K03 安全管理 K06 職業安全衛生及相關規範 K07 常見英語溝通應對 K12 工作彙報責任 K14 風場背景與知識 K15 資料獲得與蒐集來源 K16 量測工具使用方法與原理 K17 支撐結構效能判讀與品質管理 K18 無線電使用知識
T4 收集及分析平台資訊系統	K10 工作彙報責任 K13 設備儀器品質管理 K19 平台資訊系統操作知識 K20 資訊精確度與數據敏感度 K21 資訊與數據歸納與處理

### 4. 技能職能

本職能模型 4 項工作職責中，各工作職責所應具備之技能職能，如下表 5。

表 5 各工作職責所應具備之技能職能

工作職責	技能職能
T1 制定離岸風電水上支撐結構規劃預防與維護計畫	S01 規劃及組織能力 S02 危害與問題敏感度 S03 判斷與決策能力 S04 讀寫能力 S05 檢測工具應用 S06 工作船舶或人員運輸船登塔技術 S07 英語表達技巧
T2 離岸風電水上支撐結構之預防與維護	S02 危害與問題敏感度 S03 判斷與決策能力 S04 讀寫能力 S07 英語表達技巧 S08 施工設備與材料應用 S09 預防與維護工程應用 S10 解決問題能力 S11 典型支撐結構組建修復技術 S12 設備儀器品質實務
T3 離岸風電水上支撐結構檢測與評估	S02 危害與問題敏感度 S03 判斷與決策能力 S05 檢測工具應用 S07 英語表達技巧 S13 遠距離觀察技巧與應用 S14 近距離觀察技巧與應用 S15 量測工具操作 S16 量測工具基本維護 S17 無線電系統操作 S18 使用個人保護裝置及防墜裝置
T4 收集及分析平台資訊系統	S02 危害與問題敏感度 S04 讀寫能力 S07 英語表達技巧 S19 平台資訊系統操作 S20 資訊與數據判讀與應用 S21 適用性分析與評估能力

## 5. 態度職能

本職能模型所應具備之態度職能內涵，如表 6 所示。

表 6 本職能模型所應具備之態度職能

職能內涵 (A=attitude 態度)	
A04	持續學習：能夠展現自我提升的企圖心，利用且積極參與各種機會，學習任務所需的新知識與技能，並能有效應用在特定任務。
A05	自我管理：設立定義明確且實際可行的個人目標；對於及時完成任務展現高度進取、努力、承諾及負責任的行為。
A08	團隊意識：積極參與並支持團隊，能彼此鼓勵共同達成團隊目標。
A10	壓力容忍：冷靜且有效地應對及處理高度緊張的情況或壓力，如緊迫的時間、不友善的人、各類突發事件及危急狀況，並能以適當的方式紓解自身壓力。
A14	謹慎細心：對於任務的執行過程，能謹慎考量及處理所有細節，精確地檢視每個程序，並持續對其保持高度關注。

## 五、結論與建議

本研究經由人力分析需求試圖找到可發展之離岸風電行業方向，列舉出離岸風電領域範疇中可發展之關鍵職類，並採用職能分析方法來分析本研究發展出之「離岸風電水上支撐結構檢修人員」職能模型，完成離岸風電水上支撐結構檢修人員所需具備之能力組合，內容包括

1. 建議擔任此職類/職業之學經歷/或能力條件為(1) 海事工作經驗 1 年以上或相關工作經驗 3 年以上；(2) 具備 GWO-BST/STCW/OGUK 等相關證照為宜。
2. 界定職能級別為第 3 級：能夠在部分變動及非常規性的情況中，在一般監督下，獨立完成工作；需要一定程度的專業知識與技術及少許的判斷能力。
3. 離岸風電水上支撐結構檢修人員」職能模型之行業別為 M71 建築、工程服務及技術檢測、分析服務業
4. 本職能模型共計產出 4 項主要工作職責，其職能內涵包括 10 項工作任務、38 項行為指標、7 項工作產出，以及 18 項知識、26 項技能和 5 項態度。

職能的建置是考量產業發展之前瞻性與未來性，並兼顧產業中專業人才能力之共通性，以及反應從事該專業能力之必要性。職能模型有助於提供企業參考設計用人標準、降低求才成本或規劃訓練內容；可提供學校及培訓機構據此規劃與調整課程內涵，

使其培訓對象之能力貼近產業需求；亦可提供個人瞭解業界對能力的要求、個人進行自我能力評估的參考，規劃自我能力養成計畫，針對能力缺口進行學習。

## 參考文獻

1. 台灣就業通(2021)「離岸風力發電產業發展現況」。
2. 勞動部勞動力發展署(2021)iCAP 職能發展應用平台， Available: <https://icap.wda.gov.tw/index.php#>..
3. 勞動部(2020)，職能發展及應用推動要點。
4. 經濟部工業局(2020)「2021-2023 離岸風力發電產業專業人才需求推估調查」。
5. 房辰陽(2018)「離岸風電運維安全規範與規劃研析」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
6. 勞動部勞動力發展署(2017)「職能基準發展與應用推動計畫-職能基準發展指引」。
7. 行政院主計總處(2016)「行業標準分類」。
8. 財團法人臺灣經濟研究院(2014)「離岸風力運維產業之介紹」。
9. 行政院主計處(2010)「中華民國職業標準分類」。
10. APGA(2021)*Offshore Pipeline Engineer Competency Standards*, Australian Pipelines and Gas Association.
11. NACE(2021)*Offshore Corrosion Assessment Training (O-CAT)*, National Association of Corrosion Engineers (NACE).
12. O\*NET(2020)*Wind Turbine Service Technicians*, The Occupational Information Network (O\*NET) (CODE: 49-9081.00).
13. A. C. Inc.(2015)*Offshore Wind Energy Inspection Procedure Assessment Final Report*, BSEE project report, Project No: 3371870.
14. The Crown Estate(2013) *A Guide to UK Offshore Wind Operation and Maintenance*.
15. ECITB(2013)*ECINDT06 Deal with variations and defects in engineering products or equipment identified using NDT techniques*, National Occupational Standards (NOS), URN: ECINDT06.

# 基於 CDIO 之教育框架在新工程教育方法 實驗與建構計畫來建立海洋工程教育

紀昭銘<sup>1</sup> 蕭兆昇<sup>2</sup> 林正山<sup>2</sup> 廖為忠<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 逢甲大學土木工程學系助理教授兼新工程教育 B 類計畫主持人

<sup>2</sup> 逢甲大學土木工程學系研究生

<sup>3</sup> 逢甲大學土木工程學系教授兼新工程教育 A 類計畫主持人

## 摘要

為了使工程主修學生畢業後能適應業界技術的快速發展，教育部推行「新工程教育方法實驗與建構計畫」來提升學生的學習成效。基於過去在美國離岸石油業界的工作經驗，第一作者於 2019 年帶領逢甲土木系獲得此計畫的 B 類計畫補助。在 2021 年，該系基於原計畫進而獲得 A 類計畫。在兩個計畫中的大地工程領域，基於真實工程問題開發相關教材「離岸風能之大地工程導論」且在課堂上執行，它包含三部分並串聯三門土木系的必修課知識，包含工程數學、土壤力學、與基礎工程。執行計畫過程中，培養研究生成為課堂助教協助大學部同學理解教材內容、解演算習題、以及專案作業所需之程式碼編輯。課程進行輔以主題式專題演講與校外工程參訪，最終引導學生執行課程所學的知識用在畢業設計。因此，整體計畫執行基於 CDIO 的教育架構以培養學生成為業界所需之人才。

關鍵字：離岸風能產業、新工程教育方法實驗與建構計畫、多門學科知識串聯、工程教育、CDIO

## Construct Offshore Engineering Education in NEEMEC Projects based on CDIO Educational Framework

Chao-Ming Chi\*, Zhao-Sheng Xiao, Zheng-Shan Lin, and Wei-Chong Liao

\* Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Feng Chia University

## ABSTRACT

To enable engineering major students to adapt to the rapid development of industry technologies after graduation, the Ministry of Education implements the “New Engineering Education Method Experiment and Construction” (NEEMEC) to enhance students’ learning effectiveness. Based on previous work experience in USA offshore oil and gas field, the first author led the Department of Civil Engineering of Feng Chia University to obtain the B-type project of NEEMEC in 2019. In 2021, the department gained A-type project of NEEMEC on the basis of the original one. In the geotechnical engineering section of two projects, the course material “An introduction to Geotechnical Engineering on Offshore Wind Power” are developed based on practical engineering problems and executed in the classes, and it contains three sections and connects three required course knowledge, including Engineering Mathematics, Soil Mechanics, and Foundation Engineering. In the process of implementing the projects, graduate students are trained to become teaching assistants who help students to understand the course material, solve homework problems, and edit computer programs for homework projects. The courses also proceed with specific topic lectures or on-site engineering visits, and finally guide students to implement the knowledge they learn from the courses on their Graduation Design. Therefore, the projects are operated based on CDIO educational framework to breed students satisfied the requirements of the industry.

Keywords: Offshore Wind Power Industry; New Engineering Education Method Experiment and Construction; Connection of Multiple Curriculums Knowledge; Engineering Education; CDIO

## 一、前言

### 1.1 CDIO

為了縮小工程教育與現今業界對於工程師需求的落差，以麻省理工學院 (MIT) 為主等四所知名大學於 2000 年，共同推動 CDIO 工程人才培育教學模式 (圖 1)，「CDIO」分別代表「構思 (Conceive)-設計 (Design)-實施 (Implement)-運作 (Operate)」，是近幾年以來工程教育改革的最具國際性也是最新的成果。

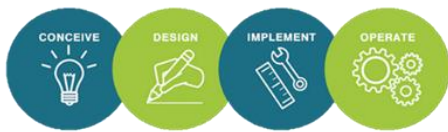


圖 1 CDIO 之構思 (Conceive)-設計 (Design)-實施 (Implement)-運作 (Operate) (from CDIO, 2021)

CDIO 工程教育模式是經由建構與產業界真實問題連結的教學情境，引導學生在解決問題的過程中，培養解決真實問題的能力。逢甲大學土木系以專題導向式學習、工程實際問題為核心，建構 CDIO 的工程教育環境：(a) Conceive (構思) 教師以解決真實工程問題為核心精神，將業界相關議題融入專業學科的教學中，使學生由真實工程問題反思在課堂上所接收的理論知識。(b) Design (設計) 學生將本身所學之土木專業知識結合現代科技軟體設計出解決真實工程問題的方案。(c) Implement (實施) 學生將構思的想法利用學校提供的數值軟體 (例如：分析軟體 FLAC、SAP2000 或 MATLAB) 轉換成實際的解決方案，並在過程中不斷嘗試找尋最佳的解決方案 (d) Operate (運作) 學生在重複不斷的測試中學習並應用在解決問題中。最終，學生將學習成果展示於畢業設計上。

## 二、教學主題

### 2.1 新工程教育

#### 2.1.1 B 類計畫之緣起

為配合政府推動離岸風能產業，並確保日後學生發展目標與未來產業趨勢一致。在 2019 年，B 類計畫主導人基於過去在美國石油業界多年工作經驗，

成功以主題「智慧營建在海陸域風力發電設施之理論設計與實務應用」幫助逢甲大學土木工程學系申請獲得「教育部補助大學校院新工程教育方法實驗與建構計畫」。圖 2 為顯示在計畫中之課群 1「智慧型風機塔座力學分析與應用」的新課程地圖。教師們將固有的力學專業課程結合離岸工程議題，帶領學生從陸地上的土木工程探索海洋風能的工程應用。

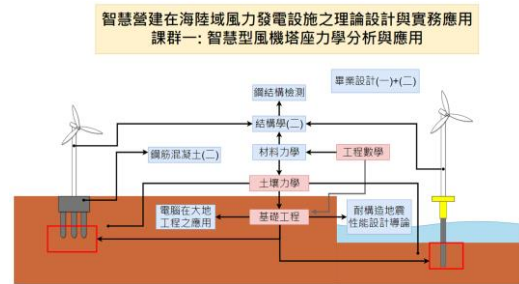


圖 2 B 類計畫-課群 1

教師將離岸風機設計及建置過程中的工程實際案例，融入基礎力學課程的教學中，課程進行輔以主題式專題演講與校外工程參訪。基於現今電腦計算的高速發展，許多工程問題都能夠以數值軟體進行分析。因此程式語言的編輯能力，是未來成為頂尖工程分析人才必備的技能。整體來說，新工程教育計畫的目標是讓學生在未來能將所學之專業知識應用於解決實際工程問題。

#### 2.1.2 複製經驗 邁向 A 類計畫

B 類計畫的執行在 2021 年 2 月結案，藉由執行 B 類計畫的經驗，調整授課科目的順序與課群，並從 B 類計畫的 2 個專題式課群擴大成 A 類計畫的 5 個專題式課群共 24 個學程。其目的為延伸各課程的應用範疇並有效地執行教育部新工程教育 A 類計畫 (主題：「智慧營建 深耕土木 永續防災」)。A 類計畫引領學生由智慧營建出發，透過深耕土木厚植本系固有力學觀念，以培養學生永續防災的精神。

逢甲大學土木系推動 A 類計畫時，導入 CDIO 教學理念，配合專題式課群設計，規劃學生學習路徑 (圖 3)。

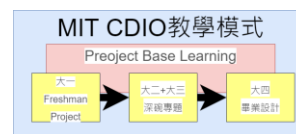


圖 3 逢甲大學土木系 CDIO 操作模式

逢甲土木系帶領大一新生從 Freshman Project 進入新工程教育 A 類計畫中，接著以 5 大專題式課群的專業課程搭配學校端的深碗專題計畫，確保學生在土木系本科專業知識的培育。以上階段都是為引導學生反思課堂上知識與真實工程的關聯；最終，銜接至大四畢業設計終端課程，學生能將大學四年所學知識的實際應用成果，展示於畢業設計上 (圖 4)。由此可知，本系規劃的 A 類計畫目標除了與政府施政方向一致亦跟逢甲大學所推行之智慧城市與 CDIO 工程教育之導向相輔相成。



圖 4 本系教育部新工程教育 A 類計畫之課程整體

### 2.1.3 離岸風能之大地工程導論

A 類計畫中的課群二「離岸風能之大地工程分析」(圖 5)，是由「工程數學」、「土壤力學」、「基礎工程」組成，也是 B 類計畫中課群 1 的大地工程領域在 A 類計畫中之延伸。

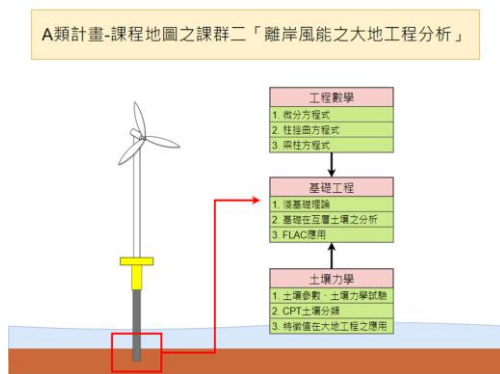


圖 5 離岸風能之大地工程分析

在兩個計畫的執行過程中，B 類計畫主導人以真實工程問題為主軸來產出三門課所對應之教材。期望學生借助三本教材的內容，學習不同科目間專業知識的整合及數值軟體的應用。

離岸風能之大地工程導論單元一 (工程數學篇) 屬於第一個連結課程，以微分方程式為理論背景，對應實際的工程問題 (梁撓曲、柱曲、基樁側向力) 之求解法。接著於離岸風能之大地工程導論單元二 (土壤力學篇) 中引用台灣電力公司 (2018) 「離岸風力發電第二期計畫可行性研究」的現地土壤調查參數報告為例，讓同學由真實業界的內容出發，連結到教科書與單元二教材所規劃的學習主題，包含土壤力學的材料設計參數、與室內或現地試驗，使同學了解上課講授的教材內容能對應真實的工程需求。在離岸風能之大地工程導論中，單元一及單元二的內容皆是為銜接單元三基礎工程的課程做準備。離岸風能之大地工程導論單元三 (基礎工程篇) 將工程數學中的數學理論結合土壤力學中的土壤材料設計參數，應用在實際的工程問題上，並由不同的理論方法與破壞機制了解其承載力評估結果的差異。在 B 類計畫的執行經驗中，證明新課程地圖、授課教材、學生的學習成果以及實際工程問題環環相扣 (圖 6)。

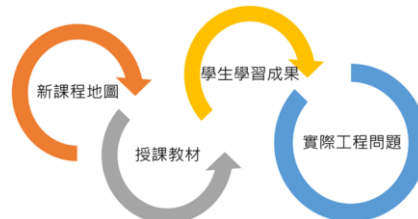


圖 6 真實工程問題與教育環環相扣

## 三、課程設計與實施

配合政府的離岸風能產業，本系將在離岸風機設計、施工及安裝維護階段的可能發生的真實工程問題反推至課程教材上。其目的為以下三項：**I. 於課堂教學中使學生了解實際工程的破壞機制；II. 訓練學生建立數理及物理推導邏輯能力；III. 引導學生思考如何防止災害再次發生。**

### 3.1 工程數學

「工程數學」在「離岸風能之大地工程導論」系列中，屬於第一個連結課程 (圖 7)。單元一教材內容由離岸風力發電的簡介開始，之後連結到廣泛應用於海事工程的自升式平台船 (jack-up barges)。當自升式平台船立於上硬下軟的土層施工時，下方基腳 (footing) 可能因承載力不足而導致貫穿剪力破壞



(punch-through shear failure) 發生。不同基腳間的差異沉陷量是造成平台船傾斜的原因，進而導致人員與設備損傷的巨大災難。當陷落的基腳停止貫入時，巨大的土壤反力與船艙重量造成中間的腿柱系統挫曲破壞 (buckling failure)(圖 8)。因此，教材引導同學認識整體平台船的致災原因是由大地工程領域的基礎貫穿剪力破壞開始，進而導致結構工程領域的柱挫曲破壞。

在單元一的教材中，以工程數學理論為背景，並分別介紹挫屈及基樁側向載重兩種力學模型。之後再將工程數學理論導入兩種力學模型中，來模擬離岸風機基礎及自升式平台船的受行為及可能的破壞機制。單元一的教材帶領學生進入不同於以往固有的工程應用面。

內容	
離岸風力發電簡介 (Offshore Wind Power Introduction) .....	1
微分方程式 (Differential Equation) .....	13
挫屈方程式 (Buckling Equation) .....	17
基樁側向載重 (Laterally Loaded Piles) .....	23
附錄(一) 歐拉公式 (Euler Formula) .....	33
附錄(二) 德莫弗定理 (De Moivre's Theorem) .....	34
附錄(三) 複數根 (Complex Roots) .....	36
參考文獻 .....	40

圖 7 離岸風能之大地工程導論

單元一:工程數學篇教材目錄 (紀昭銘, 2019a)

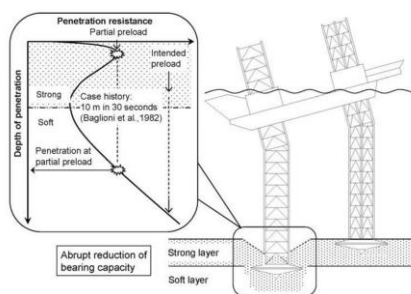


圖 8 自升式平台貫穿剪力破壞示意圖

(from Lee, 2009)

基樁側向載重的章節裡，藉著基樁側向載重的問題，教師教導學生計算題目所需的運算邏輯及邊界條件。學生將數學運算指令轉換成程式碼有邏輯性地應用在 MATLAB 數值軟體中。同學們在不斷的嘗試後，能夠利用 MATLAB 數值軟體產出基樁受側

向力其彎矩及剪力的趨勢圖。

單元一工程數學導入樁基礎內容的目的除了培養學生編輯程式碼的能力及自我解決問題的能力。其中，樁端點支承力以及土壤反力參數皆與基樁斷面尺寸、基樁埋入深度及土壤性質有關。土壤性質的判定及相關應用，則將在土壤力學與基礎工程的教材中介紹。

### 3.2 土壤力學

不論是單元一「工程數學」的基樁側向力分析或是在下一小節「基礎工程」中提到的淺基礎承载力分析，其工程問題皆與「土壤力學」息息相關。

單元二的教材 (圖 9) 透過現地土壤鑽探報告，讓學生了解真實工程報告的製作流程。包括工程業界如何將現地的單孔鑽探，分析並整合成區域性的地層特性及土壤分布資料。土壤在現地取樣後依照不同性質，施作不同的室內試驗，才能產出完整的土壤鑽探報告，以提供完整的力學參數報告。因此，土壤種類的初步判定是極為重要的。

內容	
大地工程 (Geotechnical Engineering) .....	3
現地土壤鑽探及試驗報告 .....	7
特徵值與特徵向量問題 (Eigen Value and Eigen Vector Problems) .....	16
特徵值及特徵向量的應用 .....	19
參考文獻 .....	32
附錄 (一) Donald Wood Taylor .....	34
附錄 (二) Arthur Casagrande .....	35
附錄(三) [習題 1]所需數據資料 .....	36

圖 9 離岸風能之大地工程導論

單元二:土壤力學篇教材目錄 (紀昭銘, 2019b)

#### 3.2.1 現地土壤鑽探資料

在單元二教材的前半部，以現地土壤鑽探資料為主軸，介紹了圓錐貫入試驗 (Cone Penetration Test, CPT) 以及如何將真實工程中 CPT 試驗量測到的力學參數，經由 MATLAB 數值軟體的資料分析後，對現地土層進行土壤種類的判定。再以土壤分類為依據，對不同種類的土壤做各類的室內試驗。單元二教材除了指引學生將土壤力學中固有的專業知識透過 MATLAB 應用在真實的工程上，亦以土壤類型的內容串聯工程數學中的基樁側向載重問題，引導學生思考不同土壤的工程性質 (滲透性、壓縮性及剪力強度) 如何結合數學理論應用於實際工程問題上。

### 3.2.2 大地工程應力分析

於單元二教材的後半部，以「工程數學」中的「特徵值與特徵向量問題」為起點，將此數學理論應用在大地工程的問題中，包含大地沉積及土堤加載的主軸應力問題。接著導入相關課程的專業知識，例如：教師利用教材向學生詳細介紹「土壤力學」中「應力莫爾圓」的理論及使用原則，並引導學生利用「應力莫爾圓」的求解方法處理相同的主軸應力問題。學生不論是以「特徵值求解」方法還是以「應力莫爾圓」的觀念處理相同的主軸應力問題，最終求得的主軸應力皆相同。教材導入相關課程的知識是為了讓學生在思考與解題的過程中，可以感受到各專業課程的觀念及方法是相互連結的。

## 3.3 基礎工程

### 3.3.1 基礎承载力與破壞機制

單元三教材 (圖 10) 的「基礎於均質土壤之承载力評估」章節裡，由 Terzaghi (1943) 提出的條型淺基礎承载力理論及 Meyerhof (1951, 1963) 提出的淺基礎承载力理論分析模型為起點，引導學生思考基礎承载力、承载力因子及土壤內摩擦角 ( $\phi$ ) 三者的交互關係。大地工程的學術發展上，眾多學者利用假設不同的破壞機制與假設條件下提出不同的極限承载力理論。有別於多數對稱型破壞面的理論，Reddy & Srinivasan (1967)建議對於凝聚性土壤而言，可採用單側圓弧破壞法 (Slip Circle Method)對於基礎極限承载力進行分析。不同破壞機制的理論在教材中呈現，輔以實際案例分析，讓同學更能了解理論間的差距以及如何選擇適當的分析方法在不同工程問題。

內容	
基礎工程 (Foundation Engineering)	4
基礎於均質土壤之承载力評估 (The Bearing Capacity Evaluations of a Shallow Foundation on Homogeneous Soils)	7
基礎於非均質黏性土壤之承载力評估 (The Bearing Capacity Evaluations of a Surface Footing on Inhomogeneous Cohesive Soils)	14
Foundation on Single Thick Stratum	14
Foundation on Two-Layered Cohesive Soils	16
淺基礎承载力案例分析 (Case Studies on Ultimate Bearing Capacity)	21
樁基礎 (Pile Foundations)	26
FLAC 數值分析	32
參考文獻	37
附錄 (一) Mark F. Randolph	40
附錄 (二) Peter A. Cundall	41

圖 10 離岸風能之大地工程導論

單元三：基礎工程篇教材目錄 (紀昭銘，2019c)

於單元三的教材中，以現今廣泛應用於大地工程領域的商業數值模擬軟體 - FLAC 為例，並設計專案習題讓學生練習要模擬給定符合的現地條件、材料性質及外力條件，透過 FLAC 分析，產出工程分析結果並評估是否符合真實情況。期望學生在單元一及單元二培養的編輯程式碼的技能及邏輯推理能力，活用在單元三中。

## 3.4 學生學習結果

經過兩年的「智慧營建在海陸域風力發電設施之理論設計與實務應用」B 類計畫期間，助教在協助學生理解「離岸風能之大地工程導論」教材時，發現學生普遍有以下兩大重點需要花上較多時間理解。

### 3.4.1 教材習題內容

「離岸風能之大地工程導論」中的每一單元會配合教材綱要及相關課程教科書上的內容設計專案習題。專案習題的設計導向，不僅與實際工程問題環環相扣，也期望學生從「做中學」(Learning by Doing)的過程中，透過思考真實存在的工程問題，進而自行發現個專業理論間內容的相互連結。但學生在理解單一理論應用在工程問題上，需花費大量時間，僅有少數同學能在解題過程中自行串連各理論的關係並活用於工程專案習題。

### 3.4.2 各教材內容間的連結

學生在學習以實際工程問題為核心的「離岸風能之大地工程導論」的內容時，普遍認為「工程數學」、「土壤力學」與「基礎工程」各單元教材的內容是各學科的教科書內容與其相對應的實際工程問題組成的。然而，各單元間的內容是相互鏈結的。舉例來說，在單元一「工程數學」中教導的梁理論控制方程式，與在單元二「土壤力學」中教導的現地土壤鑽探資料分析與試驗，融合以上的觀念，應用在單元三「基礎工程」中教導的樁基礎工程分析上 (圖 11)。透過操作 FLAC 數值軟體的前處理過程中，透過設定數值模擬必須要給定的邊界條件 (boundary conditions)、初始條件 (initial conditions) 與材料組成律 (constitutive law) 等資料的過程中，也就是將工程數學及土壤力學所學的數理及物理觀念，應用在實際工程分析上。

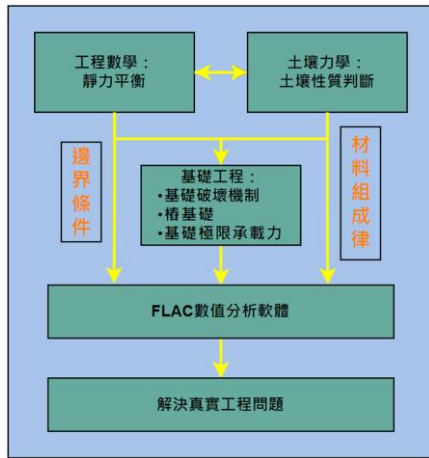


圖 11 各課程間內容環環相扣

#### 四、結論

統整在課堂上實際操作以真實工程問題為主軸的「離岸風能之大地工程導論」教材來串聯「工程數學」、「土壤力學」、及「基礎工程」三門土木系的必修課的執行經驗，歸納出以下結論：

- (1) 雖然學生在課程的學習上，普遍需要花費更多的時間才能理解教材習題內容的意涵以及各單元課程間的相互連結關係。因為每一份教材都與真實工程問題的結合，激發學生的好奇心，促使學生願意將更多的時間來學習「數學理論」以及「程式語言」。
- (2) 專案習題的設計目的，期望學生在解題的過程中，建立對於實際的物理現象及數學理論能夠相互串連的邏輯思考。以單元二的土體單元應力分析專案習題為例（圖 12），此專案習題縱向串聯應力莫爾圓、工程數學的特徵值問題以及土體在不同荷重情況下的應力變化及分布情形，最後延伸至碩士班課程「彈塑性力學」。

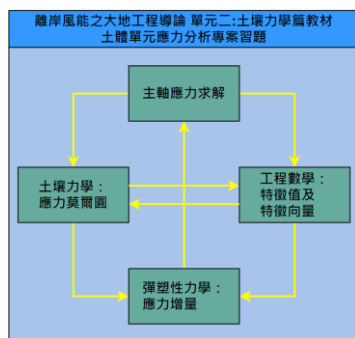


圖 12 單元二：土壤力學篇之專案習題

(3) 在單元一「工程數學」及單元二「土壤力學」的部分，培養學生數理邏輯推理能力及編輯程式碼的技能。接著構思如何將「數學理論」以及「程式語言」兩者交互活用在單元三「基礎工程」的工程專案習題中。在不斷的嘗試後，建立完整的邏輯性思考並能夠成功的解決在學習道路上的任一問題。最終，將大學四年的學習成果展示於畢業設計發表上，並將成功的經驗複製到未來的挑戰上。

#### 謝誌

本論文係科技部專題研究計畫「自升式平台基礎在互層土壤中之極限承載力評估」（編號 108-2218-E-035-016-MY2）與科技部專題研究計畫「台灣離岸浮動式風機平台與自升式平台船之錨錠基礎極限承載力分析」（編號 110-2221-E-035-029）與教育部新工程教育與建構計畫「智慧營建在海陸域風力發電設施之理論設計與實務應用」（編號 MOE-NEEMEC-B-108-02）之研究成果，承蒙科技部及教育部補助相關經費與研究人力使本研究得以順利完成，僅致謝忱。

#### 參考文獻

1. 台灣電力公司，2018。離岸風力發電第二期計畫可行性研究(報部版)。
2. 紀昭銘 (2019a)。新工程教育計畫-智慧營建在海陸域風力發電設施之理論設計與實務應用之離岸風能之大地工程導論 單元一：工程數學篇。
3. 紀昭銘 (2019b)。新工程教育計畫-智慧營建在海陸域風力發電設施之理論設計與實務應用之離岸風能之大地工程導論 單元二：土壤力學篇。
4. 紀昭銘 (2019c)。新工程教育計畫-智慧營建在海陸域風力發電設施之理論設計與實務應用之離岸風能之大地工程導論 單元三：基礎工程篇。
5. Lee, K.K. (2009). Investigation of Potential Spudcan Punch-through Failure on Sand Overlying Clay Soils. PhD thesis, National University of Singapore, Singapore.
6. Worldwide CDIO Initiative. (2021). Retrieved February 20, 2021, from <http://www.cdio.org/>

# 應用有限元素法分析矩形聲納陣列效能與結構

蔡明廷<sup>1\*</sup> 邱永盛<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>國家中山科學研究院 工程師

<sup>2</sup>國立中山大學 副教授

## 摘要

近年因國家政策使得海事工程需求大幅提升，且應用多為高精度海底地形測繪以及目標物探測，故經常使用多波束測深儀(Multibeam)、側掃聲納(Side-scan Sonar)等儀器進行工作，而其工作原理皆使用水中陣列之波束成形與操作。本研究即利用有限元素分析軟體，針對面陣列(Plane Array)系統中矩形陣列(Rectangular Array)型電聲換能器，進行聲學效能與硬體結構之分析，使水下技術應用與其硬體開發挹注更多研究能量。

由於水中聲納之波束成形，可由陣列式電聲換能器之發射或接收所實現，而其陣列又以數個單一壓電元件所組成。故本研究將以建立矩形陣列之模型為目標，先進行單一壓電立方體之自然頻率以及電路特性頻率響應分析，俟了解其元件特性後，再以數只微型壓電元件並聯為基礎構型，進行矩形陣列之設計。因水下換能器設計包含防水以及保護陶瓷等結構，故該模型中亦引入各種複合材料，探討其對於換能器之影響。

研究結果指出，單一壓電元件中，因使用  $d_{33}$  模式工作，故其電路諧振頻率位置，將由元件高度尺寸影響；而將數只元件並聯後，其頻率響應位置仍受高度主導，但可於頻帶內觀察到不同工作模式產生，且頻率位置不受高度尺寸變化所影響，故推測可能亦透過  $d_{31}$  模式工作。利用玻璃纖維與橡膠等複合材料進行厚度分析，發現其對於聲源位準大小具有相當影響，而針對電路特性響應與應力分析之比較發現，其電路特性並未完整反應所有陣列工作模式之頻率。在聲學方面，該矩形陣列於 191 至 192 kHz 具有相當功率之有效波束，僅四只微型壓電元件之單排陣列其聲源位準可達到約 136 dB，係適合使用於高精度之聲納成像分析之頻段，未來，有機會利用其設計進行多波束測深儀之換能器研製。

關鍵詞：換能器、水中聲學、聲納陣列、有限元素法

## Applying Finite Element Method to Analyze Rectangular Sonar Arrays and Structures

Ming-Ting Tsai<sup>\*</sup>, Linus Y.S. Chiu

<sup>\*</sup> Engineer, National Chung-Shan Institute of Science & Technology  
Associate Professor, Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

## ABSTRACT

The demand in maritime engineering has significantly increased due to national policy, mostly applied to high precision submarine topography and target detection. Equipments such as multibeam echosounder, side-scan sonar are often in use, with operational principles such as underwater array and beam-forming. This study applies finite element analysis (FEA) software to analyze acoustic performance and hardware structure, focusing on rectangular array electroacoustic transducer in plane

array. It is hoped that this study can give new momentum to underwater technology application and hardware development.

The beam-forming of underwater sonar can be achieved by the emission and receiving of matrix-array electroacoustic transducer. Therefore, the aim of this study is to build a model for rectangular array. First, frequency response analysis is conducted to understand the natural frequency and circuit characteristics of single piezoelectric cube. After grasping its properties, the study then design the rectangular array with several micro piezoelectric elements parallel connected as the basic structure. Because the design of underwater transducers incorporates waterproof and ceramic protective structures, the model also includes composite materials to examine its influence on transducers.

The result suggests that in single piezoelectric cube, with  $d_{33}$  mode, its location of circuit resonance will be affected by the height of elements. If several elements are parallel connected, the location of frequency response is still decided by the height. However, different working modes can be observed in frequency bands, and the location of frequency is not affected by height. Thus it could also be done with  $d_{31}$  mode. Conducting thickness analysis with composite materials such as glass fiber and rubber, this study finds significant influence on sound source level. Comparing the analysis of circuit characteristics response and stress, this study finds that the circuit characteristics do not reflect all frequency of the array working modes. In terms of acoustics, the rectangular array displays effective beams with considerable power between 191 to 192 kHz. A single array with only four micro piezoelectric elements can achieve sound source level of 136 dB, which is a frequency band suitable for analyzing high precision sonar imagery. In the future, there are chances to apply it to develop the transducer of multibeam echosounder.

Keywords: Transducer; Underwater acoustics; Sonar array; Finite element method

## 一、緒論

### 1.1 研究背景

近年因國家政策使得海事工程需求大幅提升，且應用多為高精度海底地形測繪以及目標物探測，例如離岸風場之海床探測、底質剖面分析，皆經常使用多波束測深儀(Multibeam)、側掃聲納(Side-scan Sonar)等儀器進行工作。而其原理皆使用水中陣列之波束成形操作，並透過高指向性以及高頻訊號發射與接收進行工作[1]。因具指向性之聲納系統，其發射訊號將使得能量集中，其訊雜比得以提高，對於後續訊號處理上具相當助益。

而針對聲納陣列與其電聲換能元件，雖可利用數學推導方式，求得簡易構型與尺寸下工作頻率以及其效能，但由於其模型建立往往無法符合實際情形。例如，用於水密以及保護換能器之橡膠層與金屬外殼，或者是組裝時所施加於壓電材料之應力大小，甚至元件之間黏合所使用的膠水等，皆不便以機電等效網路法[2]，建立其物理模型。

而現今因電腦科學進步，利用有限元素法(Finite element method, FEM)計算各種固體、流體力學、靜電等問題已行之有年，並具有大量研究證實該方法

係有效評估與預測多物理場之間耦合情形，故本研究將利用 COMSOL Multiphysics 進行物理模型建立。

### 1.2 文獻回顧

水下聲納操作之波束成形，可由陣列式電聲換能器之發射或接收所實現，而其陣列又以數個單一壓電元件或換能器所組成。以有限元素分析模型角度來說，聲波換能器之設計大抵分為三大物理場，其包含「電學、固體力學、聲學」[3]。因換能器可由具壓電效應之材料，將能量於外加電場與應力及應變之間轉換，再由該應力傳遞至其他固體結構，最後由固體與介質接觸面，將能量向外持續傳遞。

以常見的水下電聲換能器，通皮爾茲(Tonpilz)型電聲換能器為例，即對壓電陶瓷施加不同頻率之外加電壓後，透過壓電陶驅動前方質量將能量傳遞至水體，達到發射聲波之目的。而面陣列之設計，常基於發射與接收之波束成形應用進行考量，其形式包含圓盤陣列、環形陣列、矩形陣列、任意形狀陣列等[4]，其設計方法亦使用壓電陶瓷與前後方質量組成，進行不同工作頻率的的操作，但其有效波束與操作功率亦為設計之重點。

表 1 市售水下儀器應用領域及頻率對照表

應用範疇	廠牌與型號	應用頻段
水下通訊	Kongsberg cNODE -Modem	20 k ~ 30 kHz (MF) 10 k ~ 15 kHz (LF)
	Teledyne marine Compact Modem	9 k ~ 14 kHz (LF) 22 k ~ 27 kHz (C)
底質剖析	Triteh SeaKing SBP - Parametric Sub Bottom Profiler	200 kHz
	EdegTech Hull Mount Sub-Bottom Profiler	4 k ~ 16 kHz
海床探測	EdegTech Tri-Frequency/Motion Tolerant Side Scan Sonar System	120 k ~ 410 kHz 230 k ~ 540 kHz 230 k ~ 850 kHz
	Kongsberg Multibeam EM 2040C MKII	200 k ~ 400 kHz

目前國內外普遍利用有限元素分析，進行聲納系統之聲機電耦合模型建立，達到減少開發成本與精進設計之目的。表 1 為目前市面常見水下聲納系統與其應用頻帶，本研究基於建立使用於多波束側深儀及側掃聲納之高頻換能器硬體設備，將設計操作頻率於 100 k 至 300 kHz 之矩形陣列換能器，且頻帶內具有指向性波束等功能為目標。

### 1.3 研究目的

由於壓電陶瓷種類繁多，故本研究將透過不同 PZT 材料之參數分析，尋找適用於發射頻率 200 kHz 之材料。經由材料種類確認後，進行其他複合材料導入模型，便可了解整體矩形陣列之聲學效能，以及其他結構如何影響陣列波束以及電路特性。

## 二、研究方法

本研究將基於聲波換能器中「壓電材料」進行結構與材料之分析。首先，將於特定尺寸下，進行該結構的自然頻率分析；再透過頻率與材料掃描方式，使用該軟體內建的各種壓電材料進行不同頻率下壓電效應之研究。最後，再由四只特定材料之壓電元件並聯組成小型矩陣陣列，探討包含複合材料之模型，其聲學特性與電路特性頻率響應。

### 2.1 有限元素分析理論

大部分聲學工程所碰到問題，皆包含多種物理領域，舉例來說，聲納系統工作於水下時，包含電學

與力學變化之間的耦合，而作為介質的海水，其溫度、深度、鹽度之變化，將影響聲場分布狀況，這是因為聲速與其變化具有相依性。

常見的物理現象及工程問題，大多可利用偏微分方程式來描述，但由於其解析解常須於簡單的空間或條件簡化下才可求得，例如實心球體、立方體等結構；然而，實際應用上所處理之模型則複雜上許多，故人們使用數值模擬方法求得其近似解，進而了解模型行為，而本研究所使用之數值軟體，其模型建立流程如圖 1。



圖 1 有限元素模型建立流程

### 2.2 固體力學與靜電

由於壓電陶瓷之特性包含「介電性、彈性、壓電性」，使其具有正逆壓電效應。其中，逆壓電效應即本研究所進行模擬之部分，即壓電陶瓷受電場作用下，產生應力之變化，而該變化量將隨頻率而改變，故其電路特性頻率響應將受固體結構本身自然頻率以及材料之特性所影響。

基於壓電多晶體之解理性、自限性、均勻性、各項異性，可由介電常數矩陣、楊氏模量矩陣所構成之線性本構方程所描述，而機電耦合效應線性部分，則由壓電常數描寫其壓電性質，以反映出其彈性物理量所引起之電學物理量，反之亦然，本文便不再此贅述各方程式之關係；而本研究所使用之壓電方程模型為第二類壓電方程，其數學描述如下式：

$$T = C^E S - e_t E \quad (1)$$

$$D = e S - \epsilon^S E \quad (2)$$

其中， $T$  為應力， $D$  為電位移，而  $C^E$  表示為電路邊界條件短路之彈性矩陣，其高階張量形式如下：

$$C_{ij}^E = \begin{bmatrix} C_{11}^E & C_{12}^E & C_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ C_{12}^E & C_{11}^E & C_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ C_{13}^E & C_{13}^E & C_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}^E \end{bmatrix} \quad (3)$$

而  $\epsilon^S$  則表示為機械邊界條件夾持下，相對介電常數矩陣，並根據各向異性晶體特性可簡化並表示為下式：

$$\varepsilon_{ij}^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (4)$$

壓電耦合矩陣則以  $e$  表示，下標  $e_t$  為其轉置矩陣，可由下式：

$$e_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

基於上述可知，壓電材料以及其複合結構之特性模擬將包含各種參數，故本研究將透過適當材料係數的選用(如 2.4 節)，以及外加電壓的添加進行固體力學以及靜電模組的建立。

### 2.3 聲場與耦合理論

如上節所述，該模型包含「固體力學、靜電、聲學」之物理界面，而其中聲學部分選用邊界元素法 (Boundary element method, BEM) 進行模擬，係因若使用有限元素法建立該聲場模型，為符合最大元素至少為計算頻率之四分之一波長，將不符合計算效益。同時，利用邊界元素法進行大尺度之水下聲場模擬，亦可進行軟硬聲場邊界等設定，使模型更趨近於真實換能器使用情形。

### 2.4 材料與模型建立

本研究建立之單一壓電元件尺寸，其長寬為 6mm、高度為 7 mm，其網格化模型如圖 2 所示。

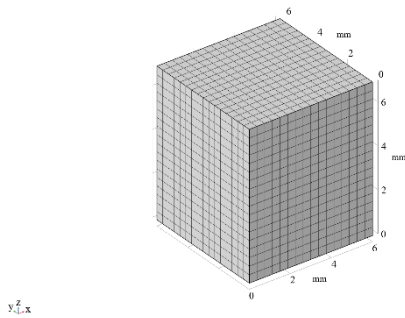


圖 2 單一壓電元件網格化模型

俟壓電材料選定後，將導入複合材料之結構，其尺寸及模型如所圖 3 示。其中，最底層為電木塑膠，長寬尺寸與橡膠、玻璃纖維結構相同；壓電元件間距為 0.15 mm，並針對橡膠層進行 0.1 至 1 mm 之厚度變化分析。

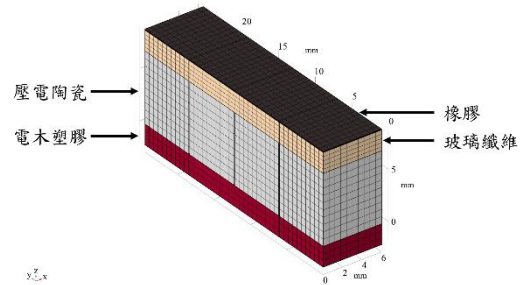


圖 3 複合材料之矩形陣列網格化模型

針對壓電材料使用之詳細材料參數，可參閱書目[3]，在此不贅述。本研究於「單一壓電元件分析」使用材料如表 2，其密度介於 7400 至 7700 kg/m<sup>3</sup>。

表 2 壓電材料參數表

壓電材料	介電係數(1)	耦合係數(C/m <sup>2</sup> )
PZT-4	$\varepsilon_{13}^S = 663.2$	$e_{33} = 15.0804$
PZT-4A	$\varepsilon_{13}^S = 762.9$	$e_{33} = 15.2586$
PZT-2	$\varepsilon_{13}^S = 270.0$	$e_{33} = 9.0506$
PZT-5A	$\varepsilon_{13}^S = 826.6$	$e_{33} = 15.7835$
PZT-5J	$\varepsilon_{13}^S = 1143$	$e_{33} = 16.5793$
PZT-7A	$\varepsilon_{13}^S = 229.9$	$e_{33} = 9.4859$
PZT-8	$\varepsilon_{13}^S = 561.6$	$e_{33} = 13.9108$

此外，於複合材料之矩形陣列所使用材料參數，則參考市面常見氯丁橡膠、玻璃纖維之資料[5]，如表 3 所示。

表 3 複合材料參數表

材料名稱	密度(kg/m <sup>3</sup> )	帕松比(1)	楊氏模量(Pa)
橡膠	1230	0.48	1.65 M
玻璃纖維	2550	0.21	72 G
電木塑膠	1900	0.15	22 G

## 三、單一壓電元件分析

為了有效進行模擬，本文已利用特徵頻率研究，針對該幾何實部大於 190 kHz 範圍進行分析，得到其特徵頻率包含 162k、197k、199k、206k、217k、220 kHz，故材料、厚度等分析於此範圍進行頻域研究。

### 3.1 材料應用分析

透過特徵頻率分析後，即可縮小頻域研究範圍，進行不同壓電材料之掃描分析。而本文基於此分析結果，將選擇 PZT-4 進行厚度與矩形陣列之分析。

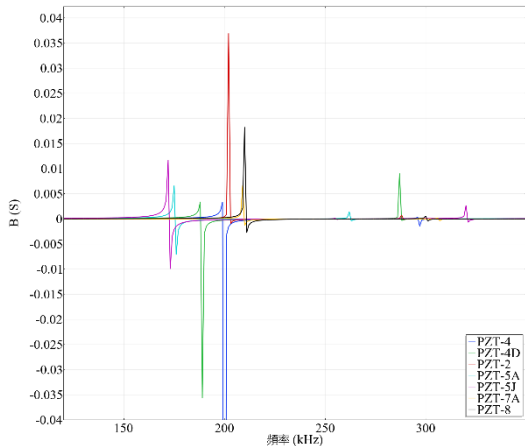


圖 4 材料掃描電路特性分析結果

### 3.2 元件尺寸分析

基於此壓電元件使用  $d_{33}$  模式工作，即以垂直方向厚度主導其諧振位置，故本研究進行 6 至 7 mm 之元件垂直厚度變化分析。結果顯示，隨著厚度增加，諧振頻率位置將逐漸降低，如圖 5 所示。

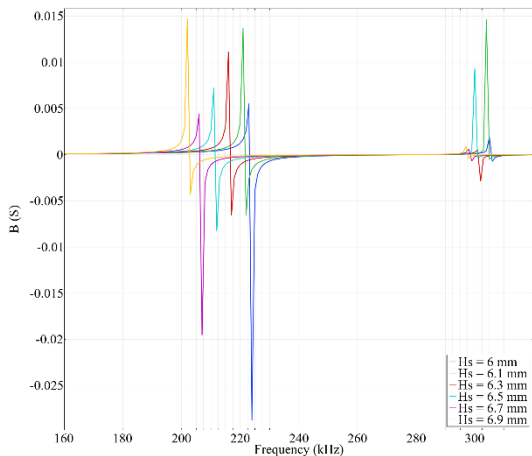


圖 5 元件尺寸電路特性分析結果

### 3.3 應力變化分析

本文亦使用應力分析，了解元件於諧振頻率附近之工作模式。如圖 6 所示，桃紅色箭頭表示為各方向之分量，可觀察到使用 PZT-4 之壓電元件於該尺寸下，200 kHz 工作模式呈垂直方向運動。

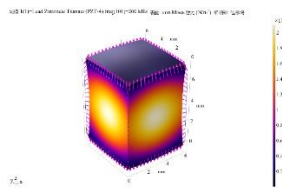


圖 6 應力變化分析結果

## 四、矩形陣列分析

透過單一壓電元件材料與尺寸之分析，有助於建立後續矩形陣列模型，預估其工作頻率與模式。本節建立之矩陣模型，包含四只壓電元件以及複合材料，下將簡述其橡膠厚度與波束分析結果。

### 4.1 橡膠厚度分析

本文利用參數化尺寸，將針對橡膠厚度進行 0.1 至 1 mm 之厚度變化分析。如圖 7 所示，不同橡膠層厚度，對於電納有著較顯著影響，而針對諧振頻率位置，僅產生些微偏移，故本文將利用波束能量分析其聲學響應與橡膠厚度之關係。

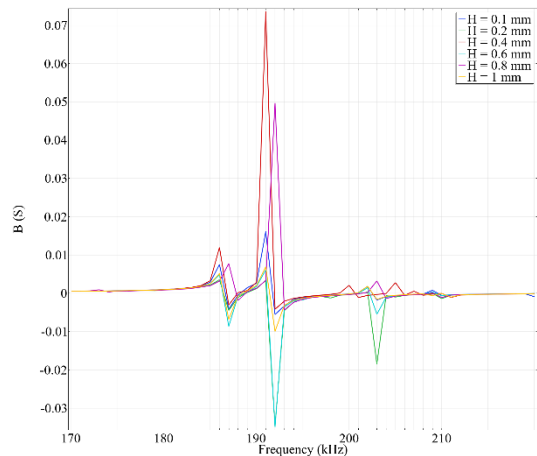


圖 7 橡膠尺寸電路特性分析結果

### 4.2 波束陣列分析

根據傳輸電壓響應之定義，聲源位置須於 1 公尺處施加 1 伏特電壓，其產生之聲壓位準。故本文應用於陣列波束聲學分析，其距離為 1000 mm，如圖 8 所示。

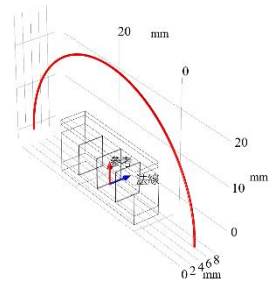


圖 8 波束計算範圍示意圖

分析結果顯示，不同橡膠層之厚度，對聲學效能部分有顯著影響。如圖 9 所示，在發射頻率 192kHz 時，且厚度為 0.6 mm，其聲壓位準可達 136 dB；但



當厚度為 1 mm 時，則降至 124 dB，且厚度與聲壓位準大小之關係，並非正反比關係。

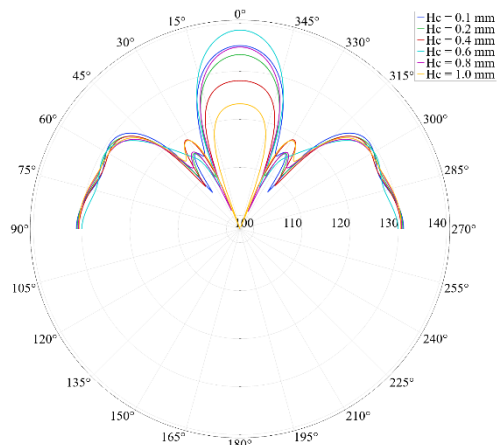


圖 9 波束能量與厚度分析結果

基於上述原因，本文繼續探討發射頻率與橡膠厚度之關係。如圖 10 所示，在厚度為 0.1 mm 時，使用 192 kHz 可得到最佳聲學傳輸響應，但其波束亦隨著頻率變化，例如 186 kHz 時，具有較窄的波束寬度，係利於高指向性之聲納陣列使用。

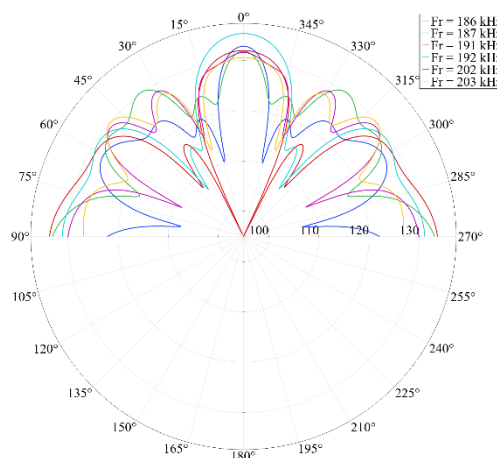


圖 10 波束能量與頻率分析結果

## 五、結論

本研究係基於應用於高頻與具指向性聲納系統所進行之研究，故建立之模型尺寸以及使用之材料參數僅供參考性質，如圖 11 所示，為該模型於 192 kHz 所產生之陣列波束。目前研究結果指出，單一壓電元件中，其 200 kHz 處之電路特性諧振位置，將由元件高度尺寸影響，而將數只元件並聯後，其頻率響應仍受高度主導，故其工作模式應為  $d_{33}$ ；但由於頻

帶內可觀察到不同工作模式，且頻率位置不受高度變化影響，故推測可能包含  $d_{31}$  模式工作。

而利用橡膠材料進行厚度分析，發現其對於電納值與聲源位準大小具有相當影響。比較結果顯示，橡膠厚度應與發射頻率較為相關，即不同厚度下，皆具有其最佳發射頻率。

最後，該矩形陣列於 191 至 192 kHz 具有相當功率之有效波束，僅四只微型壓電元件之單排陣列其聲源位準可達到約 136 dB，若增加其陣列數量，係適合使用於高精度之聲納成像分析之頻段。

未來，有機會利用其設計進行多波束測深儀之換能器研製，同時可針對其他複合材料之結構與參數，進行最佳化分析，以提升設備之效能。

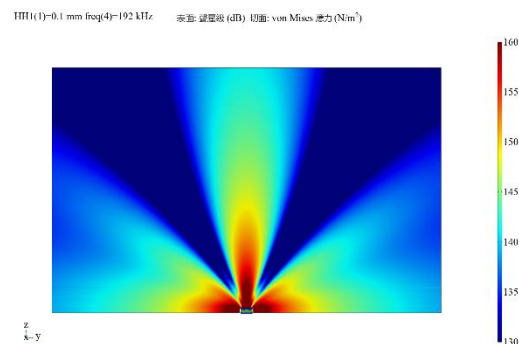


圖 11 陣列波束模擬結果

## 謝誌

本研究承蒙國家中山科學研究院的同仁、長官，以及國立中山大學海下科技研究所的合作夥伴，共同的支持與協助，使研究得順遂進行。

## 參考文獻

1. Blondel, P. (2010). *The handbook of sidescan sonar*. Springer Science & Business Media.
2. Sherman, C. H., & Butler, J. L. (2007). *Transducers and arrays for underwater sound* (Vol. 4). New York: Springer.
3. Multiphysics, C. O. M. S. O. L. (1998). Introduction to COMSOL multiphysics®. COMSOL Multiphysics, Burlington, MA, accessed Feb, 9, 2018.
4. Urick, R. J. (1975). Principles of underwater sound.
5. AZOM, T. The A to Z of Materials and AZojomo. The AZo Journal of Materials Online.
6. Favre, H. (1935) *Ondes de Translation*, Dunod, Paris.

# 三模式無人海洋載具之系統架構概念設計

陳家昊<sup>1</sup> 陳信宏<sup>2\*</sup> 周佑誠<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立中山大學海下科技研究所碩士班研究生

<sup>2\*</sup> 國立中山大學海下科技研究所教授

<sup>3</sup> 國立中山大學海下科技研究所副教授

## 摘要

本研究進行混合模式海洋載具概念設計，使之具備自主式水面載具(Autonomous Surface Vehicle, ASV)、遙控水面載具(Remotely-operated Surface Vehicle, RSV)、自主式水下載具(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)作業能力，可因應不同淺水域作業條件而變換其運作模式。本研究在 IUT-AUV I 的開發基礎下發展 AUV-ASV-RSV 三模式一體的無人海洋載具，硬體架構包括中控核心單元、通訊系統、電力單元與感測器。控制架構方面，AUV 模式仍沿用 IUT-AUV I 之命令、控制與導航設計，ASV 模式則以 AUV 導航控制架構為基礎，但將載具定位參考感測器由 DVL 與 IMU 轉換為 GPS，而 RSV 模式則透過 RF 通訊模組下達載具推進控制命令與回傳載具狀態資訊，達到即時遠距無線操控。本研究也進行 AUV-ASV-RSV 三模式間的切換機制設計，而 ASV 與 RSV 之控制與操縱設計概念亦藉由 IUT-AUV I 載台進行實水域測試並驗證其可行性。

關鍵詞：無人海洋載具、自主式水下載具、自主式水面載具、遙控水面載具

## Conceptual Design of a Three-modal Unmanned Maritime Vehicle System

Jia-Hou Chen, Hsin-Hung Chen\*, Yu-Cheng Chou

\* Professor, Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

## ABSTRACT

This study introduces the conceptual design of a hybrid maritime vehicle, a combination of autonomous surface vehicle (ASV), remotely-operated surface vehicle (RSV), and autonomous underwater vehicle (AUV), for facilitating the operations in different shallow environmental conditions. The development of hardware and software architectures of the AUV-ASV-RSV hybrid maritime vehicle is based on the system architecture of the autonomous underwater vehicle IUT-AUV I. The hardware architecture of the AUV-ASV-RSV hybrid maritime vehicle consists of a central unit, a communication system, a power unit, and sensors. In the control architecture, the hybrid maritime vehicle employs the same command, control and navigation as the IUT-AUV I while working in AUV mode. When in ASV mode, control and navigation are the same as in AUV mode except for using GPS instead of DVL and IMU for navigation. While switching to RSV mode, pilot's commands and vehicle's sensor data are transmitted over an RF link for wireless teleoperation of the maritime vehicle. In addition, the mechanism for switching among AUV, ASV and RSV mode is designed. The command, control and navigation of the ASV and RSV modes are implemented and tested on the IUT-AUV I and their validities are verified through sea trials.

Keywords: Unmanned maritime vehicle; Autonomous underwater vehicle; Autonomous surface vehicle; Remotely-operated surface vehicle

## 一、前言

透過複合式載具執行海洋探勘調查與檢測作業是未來發展趨勢，其中一種是整合多台單一模式載具執行任務，例如 Rui 與 Chitre (2010) 提出兩艘自主式水下載具 (Autonomous Underwater vehicle; AUV) 之間的協作定位。另一種則是將多模式運作功能整合於單一無人海洋載具，例如 Nakatani 等人 (2016) 提出自主式水面載具 (Autonomous surface vehicle; ASV) 追隨 AUV 的作業方式。

中山大學發展自主式水下載具測試載台 IUT-AUV I (蘇, 2018, 圖 1), 執行水下目標物追蹤與航點導航任務。本研究延續 IUT-AUV I 開發基礎, 進行混合模式海洋載具之概念設計開發, 使之具備自主式水面載具 (ASV)、遙控水面載具 (Remotely-operated Surface Vehicle; RSV)、自主式水下載具 (AUV) 多工作業能力, 可因應不同的水域作業環境條件而變換其運作模式, 例如東沙環礁地形崎嶇的淺水海域探勘或是港灣碼頭複雜結構物檢測。當海域有足夠水深執行水下作業時, 可透過 AUV 模式執行任務; 當面臨極淺水域且地形崎嶇使載具於水面航行較為安全時, 可採用 ASV 或 RSV 模式作業; 當崎嶇淺水海域有礁岩微露水面不易由載具自主偵測, 則可採用 RSV 模式, 透過人為操縱避開障礙區域。本研究對 ASV 與 RSV 模式之命令、控制與導航進行設計, 並藉由自主式水下測試載台 IUT-AUV I 進行實際水域功能測試, 以驗證其可能性。接著進行三模式無人海洋載具系統架構概念設計, 並考量載具輕量化、提升載具推進力、以及 ASV-AUV-RSV 三模式間的切換機制設計。

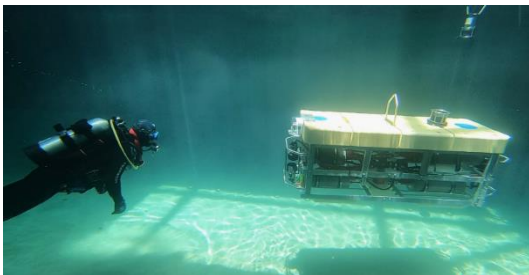


圖 1 IUT-AUV I 進行潛水員追蹤測試

## 二、USV 模式設計

本研究設計之 ASV-AUV-RSV 三模式無人海洋載具, 在 AUV 模式上沿用 IUT-AUV I 測試載台的

系統架構, 因此在進行三模式系統架構設計之前, 本研究先分別針對 ASV 與 RSV 模式之命令、控制與導航進行設計, 並利用 IUT-AUV I 測試載台進行性能測試與驗證。

### 2.1 ASV 模式設計

本研究設定 ASV 模式之運動功能為自主水面航點導航 (Waypoint navigation), 因此本研究以 IUT-AUV I 測試載台之航點導航控制架構為基礎, 發展 ASV 模式之航點導航功能。IUT-AUV I 測試載台之航點導航定位參考來自於 DVL 與 IMU 量測資料, 而 ASV 模式航點導航之定位參考則使用更為可靠的 GPS 定位資料。

#### 2.1.1 導航硬體

以 ASV 模式在水面執行航點導航作業時, 本研究利用 GPS 進行載具之水面定位, 以控制載具到達指定航點。本研究採用 Trimble Copernicus II GPS 模組以接收衛星定位資料, 並進行其耐壓艙體水密設計。載具在 ASV 模式下與水面工作船之通訊架構仍維持與 IUT-AUV I 測試載台一樣, 使用聲學數據機作為雙方溝通的工具。

#### 2.1.2 任務腳本

ASV 模式之航點導航任務設定仍依據陳 (2019) 所開發之任務腳本架構, 於任務腳本中設定起點座標與途中各航點之座標 (經緯度), 並透過 GPS 模組更新載具自身位置以判斷偏航程度, 再由主控電腦計算載具行進方向之修正量, 據此輸出控制推進器之命令電壓, 使載具往指定航點航行前進。

### 2.2 RSV 模式設計

RSV 模式作業需透過遠端人為操縱載具進行運動, 本研究利用 RF 模組達成遠端無線通訊遙控, 一方面由操作員從岸端或工作船上達載具推進器控制命令, 另一方面載具則透過 RF 模組回傳載具狀態資訊, 包括載具座標與航向。

#### 2.2.1 通訊與導航硬體

以 RSV 模式在水面執行任務時, 所需的通訊與導航硬體包括 RF 模組、GPS、運動操縱搖桿。GPS 是為了取得載具水面定位資訊, 操縱搖桿與遠端操作人機介面結合, 將搖桿位置參數轉換為推進器控制電壓命令並以 RF 傳送至載具, 同時載具會將 GPS

座標回傳至遙控端。本研究採用 Xbee-Pro XSC900 RF 模組，為了使 RF 模組先行於 IUT-AUVI 載台上進行測試，本研究進行 RF 模組之水密設計，其水密艙端蓋與艙體之固定方式採用穿線環設計，並且透過 O-ring 達到水密效果。RF 通訊模組水密艙如圖 2 所示。



圖 2 RF 模組水密艙設計(左) 與成品(右)

### 2.2.2 RSV 人機介面

RSV 人機介面程式整合軟體與硬體，以達成命令發送與資訊顯示之功能。本研究使用 C#開發 RSV 模式之人機介面，如圖 3 所示。此人機介面整合載具運動操縱搖桿與 RF 通訊模組，可讀取搖桿位置資訊並轉換為推進器控制命令，再藉由 RF 模組發送控制命令以達成遠端無線操縱載具，同時也接收並顯示載具回傳之狀態資訊。

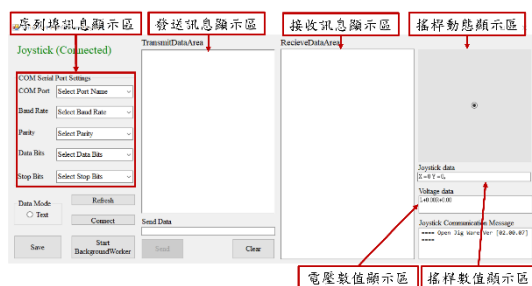


圖 3 RSV 模式之遠端操作人機介面

### 2.2.3 推進控制命令收發正確性驗證

遠端透過 RF 模組發送推進控制命令後，載具以對應的 RF 模組來接收命令。載具接收推進控制命令的正確性與完整性，直接影響其運動的可操控性，因此本研究採取兩個機制對於所接收的命令字串進行檢驗：(1) 循環冗餘校驗(Cyclic redundancy check, CRC)；(2) 特定字元判讀，如圖 4 之控制命令字串所示。

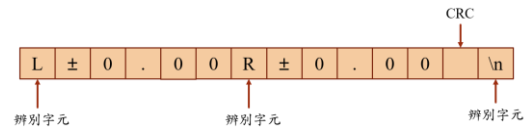


圖 4 載具 RSV 模式下之推進器控制命令字串

### 2.2.4 RF 通訊中斷之安全機制設計

一旦載具位於 RF 通訊範圍之外，就無法接到收遠端對載具下達的推進控制命令，如果此時載具中控系統仍停留在最後一筆接收到的推進控制命令而維持推進器運轉，載具有可能在推進器不受控的情況下發生意外（遺失、碰撞）。因此，本研究進行 RF 通訊中斷時之載具推進器控制安全機制設計，推進安全機制控制流程如圖 5 所示。

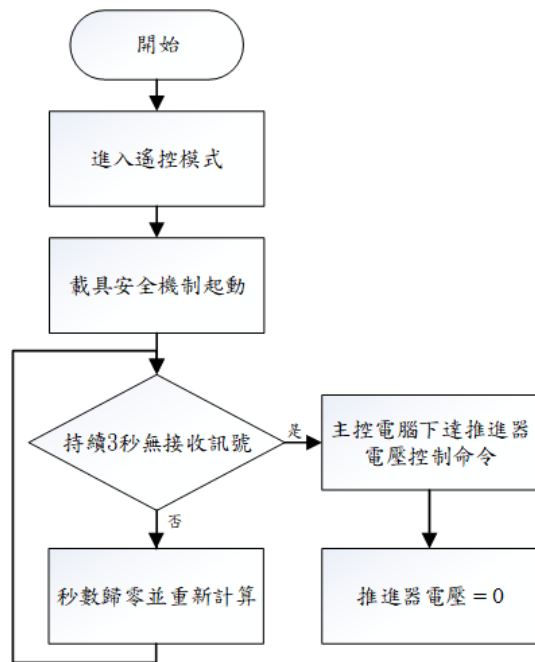


圖 5 RF 通訊中斷之載具推進器安全機制控制流程

## 三、USV 模式性能測試

本研究完成 ASV 與 RSV 模式之命令、控制、導航設計之後，接著利用 IUT-AUVI 測試載台進行實際水域測試，以驗證兩種模式之操作性能。

### 3.1 ASV 模式測試

本研究於台南安平港實施 ASV 模式之航點導航測試(圖 6)，於 IUT-AUV I 測試載台上裝載 GPS 定位模組，並於 IUT-AUV I 測試載台控制核心加入

水面航點導航任務模式。表 1 為 ASV 模式測試設定之航點座標(P1-P2-P3-P4)，圖 7 實線則為載具執行 ASV 模式之航點導航運動軌跡，測試結果顯示 ASV 達成依序通過指定之航點。



圖 6 IUT-AUV I 於台南安平港進行 ASV 模式之航點導航測試

表 1 ASV 模式實水域測試之航點座標

航點	經度	緯度
P1	120.1733123	22.9721643
P2	120.1732052	22.9723155
P3	120.1733755	22.9724063
P4	120.1734822	22.9722556

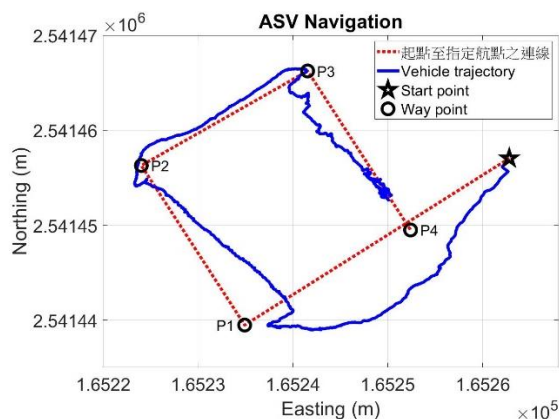


圖 7 執行 ASV 模式航點 (P1-P2-P3-P4) 導航測試之載具運動軌跡

### 3.2 RSV 模式測試

本研究於成功大學系統及船舶機電工程學系的拖航水槽進行 RSV 模式遠端操控測試，於 IUT-AUV I 測試載台上裝載 RF 通訊模組，並於 IUT-AUV I 測試載台控制核心加入 RSV 模式切換機制，以驗證 RSV 模式之性能。本研究透過 RF 通訊傳送載具模式切換命令與推進器控制命令，遙控端先發送 @RSV\_MODE 命令使載具進入 RSV 模式，接著遙控端持續發送推進器控制命令以控制載具運動，載

具移動軌跡如圖 8 所示。此外，本研究也於成功大學系統及船舶機電工程學系的拖航水槽進行 RSV 模式通訊中斷之安全機制測試，利用遙控操作使載具逐漸遠離遙控端，並測試當 RF 訊號斷訊後，載具是否能依據內建安全機制停止推進器運作。於該實驗中，當載具遠離發送端約 80 公尺左右 RF 通訊中斷，發現載具推進器也隨之停止轉動，驗證此一安全機制可以正常運作。

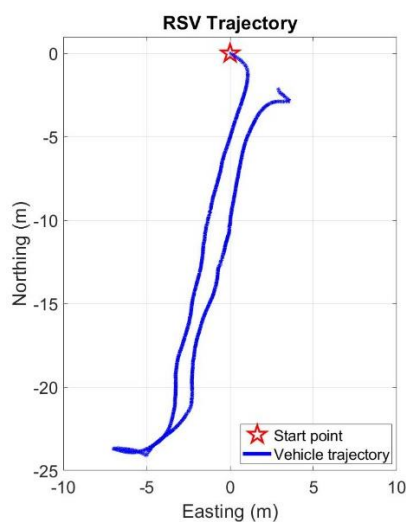


圖 8 RSV 模式之載具運動軌跡

## 四、三模式無人海洋載具概念設計

本研究透過 IUT-AUV I 測試載台驗證了 ASV 模式與 RSV 模式設計在實際水域作業之可行性，基於 IUT-AUV I 為專用於測試不同感測儀器與作業功能之載台，並不適合做為三模式無人海洋載具之應用。因此，本研究進一步進對於整合 AUV-ASV-RSV 三模式之無人海洋載具系整架構進行概念設計。

### 4.1 輕量化設計

IUT-AUV I 測試載台空氣中重量為 210 kg，進行水域測試時，其佈放回收需要足夠荷重吊掛設備，動員成本與前置作業時間不低。三模式無人海洋載具的開發目的，是希望便於小型水域（例如測試水槽）進行測試，以加速掌握載具各模式的特性之後，再於開放海域執行驗證測試。因此，三模式無人海洋載具設定朝向輕量化方向設計，深水作業將不會是現階段之設計考量，而是以驗證功能性為載具設

計主要需求。所以輕量化主要設計概念將從淺水域之應用觀點著手，設定作業水深為 50 公尺，另外，選用體積較小的感測器與推進器，並使用較輕材質作為載具的骨架。

## 4.2 推力提升設計

依據 ASV 模式在安平港的測試結果，可以看出 IUT-AUV I 測試載台的推進器在半開放式海域推力不大，載具運動容易受海流干擾而偏離指定路線。三模式無人海洋載具之推進力須較 IUT-AUV I 測試載台的推進力有所提升，並且滿足輕量化設計，因此本研究採用兩具 Blue Robotics 公司的 T200 推進器做為三模式無人海洋載具水平推進之用。

## 4.3 通訊距離提升設計

依據本研究在成功大學系統及船舶機電工程學系拖航水槽進行 RSV 模式的測試結果，發現所採用的 Xbee-Pro XCS900 RF 模組在障礙空間中的通訊性能極容易受限，也限制了 RSV 只能於小範圍內執行任務。因此，本研究改採用 LoRa (Long Range) 通訊模組做為 RSV 無線傳輸之用，該模組最遠通訊距離可達 8 公里。

## 4.4 三模式切換機制設計

本研究進行 AUV-ASV-RSV 三模式之切換機制設計，載具起始設定以 ASV 模式於水面待機，載具依據所接收之任務命令可切換至 AUV 或 RSV 模式。此外，當 AUV 模式的任務完成或失敗時，載具會切換回 ASV 模式返回水面。當載具以 RSV 模式執行任務時，一旦接收到停止 RSV 模式之命令，便會切換至 ASV 模式；而 RSV 超出通訊範圍時，載具也會切換至 ASV 模式並返回起始點。

## 4.5 感測器

三模式無人海洋載具之設計概念，主要是為了便於因應不同的水域作業環境條件而變換其運作模式，尤其是一些極淺海域作業環境的需求，因此其概念設計考量重點在於載具的輕量化與三模式功能之開發。其搭載感測器與周邊配備之選擇，著重於使載具達到體積小、重量輕、具三模式導航與操縱、並且容易在實際海域佈放回收與執行任務，在此設計考量下，三模式無人海洋載具搭載的感測器與周邊配備規劃如表 2 所列。

表 2 三模式無人海洋載具採用之感測器電力與通訊規格

感測器	電力與通訊規格		
	輸入電壓 (VDC)	消耗功率 (W)	通訊
RF 通訊模組	3.3	0.71	RS232
GPS 定位模組	3.3	0.145	RS232
高度及深度計	24	1.5	RS232
側掃聲納	24	12	RS232
都卜勒測速儀(DVL)	24	80	RS232
聲學數據機	24	20	RS232
慣性測量單元(IMU)	3.3	0.053	UART
推進器	14.4	288	類比電壓

## 4.6 通訊系統

本研究延續蘇 (2018) 開發 IUT-AUV I 之通訊系統架構，利用乙太網路集線器與序列埠模組 (Serial communication module) 進行資料傳輸，以此方式建構三模式無人海洋載具的通訊系統。各感測器透過序列埠轉乙太網路之方式將所收集到的資料傳送給主控電腦，通訊系統架構圖如圖 9 所示。

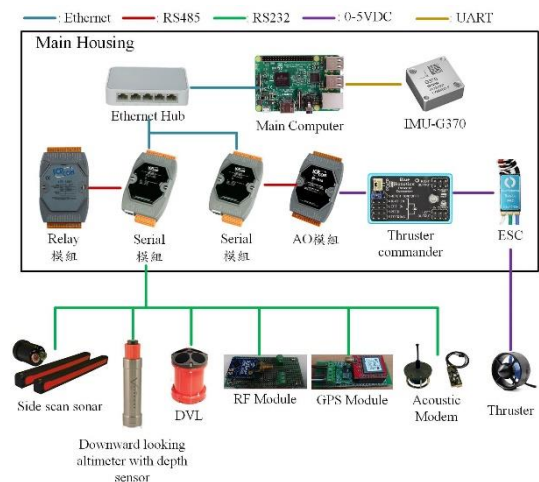


圖 9 三模式無人海洋載具之通訊系統架構

## 4.7 電力系統

IUT-AUV I 採用兩組電池供電，一組專供給推進器之用，另一組則供給中控系統與周邊感測器。為了滿足輕量化之需求，三模式無人海洋載具僅採用一組電池 (640 W@14.8 VDC) 供應載具運作所需電力，其電力系統架構設計如圖 10 所示。

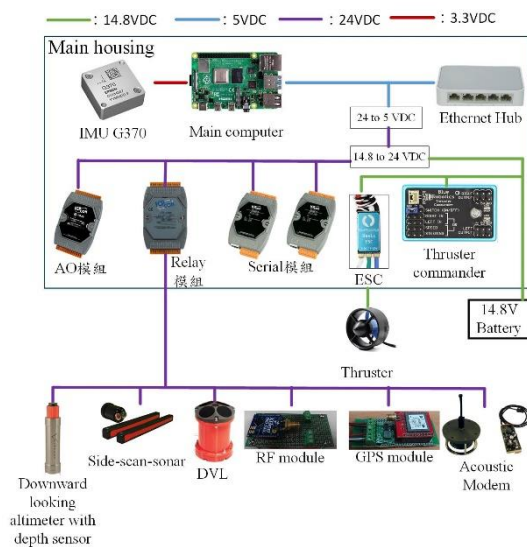


圖 10 三模式無人海洋載具之電力系統架構

#### 4.8 控制系統

本研究之三模式無人海洋載具採用樹莓派 (Raspberry Pi) 作為系統控制核心，其優點為體積小、耗電量低、具備多元擴充性等。在控制系統的開發上，仍以 IUT-AUV I 測試載台之控制核心為基礎 (AUV 模式)，進行 ASV 以及 RSV 模式控制之功能擴充。主控電腦會根據任務腳本 (ASV、AUV 模式下) 或 RF 所接收之命令 (RSV 模式下)，透過類比輸出 (Analog Output) 模組發送推進器控制電壓命令，以控制載具移動。

### 五、水密艙體概念設計

依據三模式無人海洋載具的通訊與電力系統架構設計，進一步針對主控制水密艙 (Main Housing) 與電池水密艙 (Battery Housing) 進行概念設計。同時，設計水深 50 公尺的條件下，水密艙體材質選用壓克力與鋁合金，以滿足輕量化設計需求。

#### 5.1 主控制水密艙

本研究採用圓柱艙體做為主控制系統耐壓水密艙，並進行艙體內部元件空間配置、端蓋水密接頭配置、艙體水密設計。依據通訊系統與電力系統架構，艙體內部主要元件包含核心電腦、乙太網路集線器、序列埠/乙太轉換模組、繼電器/乙太模組、類比/乙太轉換模組、慣性測量單元、推進器控制器、以及直流電壓轉換器。

### 5.2 電池水密艙

本研究採用圓柱艙體做為電池耐壓水密艙，並進行艙體內部元件空間配置、端蓋水密接頭配置、艙體水密設計。本研究採用八顆 14.8 VDC 鋰電池組作為載具的電源供應，每顆電池組容量為 5400 mAh，並利用電源管理板控制充放電與監測電量。

## 六、結論

本研究透過 IUT-AUV I 測試載台完成 ASV 模式與 RSV 模式的命令、控制、導航功能開發，並透過實際水域測試完成 ASV 與 RSV 模式功能驗證。AUV 模式之功能沿用 IUT-AUV I 既定架構，ASV 模式則以 AUV 模式的航點導航功能為基礎進行任務腳本規範設計，並透過搭載 GPS 定位模組之 IUT-AUV I 測試載台完成實際水域的水面航點導航測試與驗證，RSV 模式則透過 IUT-AUV I 測試載台搭載 RF 通訊模組實施遠端遙控。驗證 ASV 以及 RSV 之命令、控制、導航功能之後，本研究完成 AUV-ASV-RSV 三模式無人海洋載具之概念設計，包括三模式的切換控制、通訊與電力系統架構設計、輕量化設計。通訊系統沿用 IUT-AUV I 測試載台架構，透過乙太網路與序列埠模組接收各感測儀器資料，電力系統則採單一電池艙提供載具運作電力。在輕量化概念設計採用輕巧大出力之推進器、選用小體積之感測器、以輕巧材質作為骨架與水密艙體的使用。同時依據通訊與電力系統之架構設計，完成主控制水密艙體與電池水密艙體之結構設計。

## 參考文獻

1. 蘇于銘 (2018) 自主式水下測試載台之硬體系統整合，國立中山大學海下科技研究所碩士論文。
2. 陳威翔 (2019) 自主式水下測試載台之航點導航，國立中山大學海下科技研究所碩士論文。
3. T. Nakatani et al (2016) ASV MAINAMI for AUV monitoring and its sea trial, 2016 IEEE/OES Autonomous Underwater vehicle, 6-9 Nov. 2016, Tokyo, Japan, pp. 301-306.
4. G. Rui and M. Chitre (2010) Cooperative positioning using range-only measurements between two AUVs, IEEE OCEANS'10, 24-27 May 2010, Sydney, Australia, pp.1-6.

# 可加壓充水阻抗管的開發與應用

沈宗佑<sup>1</sup> 鐘冠閔<sup>1</sup> 黃清哲<sup>1</sup>

<sup>1</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系

## 摘要

充水阻抗管的開發可應用於材料於水中聲學特性的量測，實際環境下，材料於不同的水深下所受的壓力不同，可能造成材料特性的改變，因而影響其聲學特性。本研究將充水阻抗管安裝加壓設備，開發出可加壓的充水阻抗管，並應用三參數校正法實施阻抗管內水體校正。分別於同一天實施三次實驗及不同日期進行吸音材料量測實驗，來驗證實驗的重複性，結果證明本研究具備良好的可重複性，且確認實驗設置是可正常運作的。透過阻抗管的加壓量測實驗中，量測橡膠多孔材質在不同厚度與壓力下的聲學特性，並藉由量測結果可觀察出材料在不同的厚度及不同的壓力的組合下所呈現的聲學特性。運用可加壓的充水阻抗管可模擬材料在不同水深下所遭受的壓力，透過量測阻抗管內的聲壓，計算材料在不同壓力下的反射係數。

關鍵詞：充水阻抗管、可加壓充水阻抗管、三參數校正法、反射係數

## Development and Applications of a Pressurized Water-filled Impedance Tube

Zong-You Shen\* Guan-Ming Zhong Ching-Jer Huang

\* Phd student, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

This work develops a water-filled impedance tube with a pressurized system to investigate the acoustic characteristics of underwater sound-absorbing materials under various hydrostatic pressures. Experiments are conducted using a three-parameter calibration method to obtain the reflection coefficient and acoustic impedance of materials. Accuracy of the measurements was verified by comparing the measured and theoretical reflection coefficients at the water/air interface. To verify the repeatability of the experimental results, reflection coefficients of a test sample made of porous rubber were measured on the same day and on different days under three static pressures. The results reveal that good repeatability was achieved.

Keywords: water-filled impedance tube; three-parameter calibration method; reflection coefficient

## 一、前言

為了驗證吸音材料的聲學特性，量測方法除了迴響實驗室(Reverberation chamber)外，亦有聲學阻抗管(Acoustic impedance tube)提供便利且經濟的量測方式。空氣阻抗管已發展為商業化產品，相關的量測規範皆已發展完備。然而，隨著水下技術與國防科技的發展，材料在水中聲學特性亦是需要獲得的物理參數，因此有了充水阻抗管的開發。

Corbett (1982)將轉移函數法應用於阻抗管中，並於實驗中進行了水及空氣介面(自由液面)的反射係數驗證，得到的振幅、相位分別與理論值有 7%、30°的誤差。為改善傳統雙麥克風方法於充水阻抗管中量測的準確性以及操作上的不便，Wilson et al. (2003)將三參數校正方法應用於充水阻抗管的量測，藉以修正阻抗管內之聲傳誤差、麥克風和擷取系統等量測誤差(Gibat and Laloë, 1990; 周等人, 2010)。



阻抗管實驗之基本假設為聲場需符合平面波傳遞。充水阻抗管內部聲傳介質為水，其與管壁(不鏽鋼)之特徵阻抗(Characteristic impedance)接近，故管壁之彈性波將對管內聲波傳遞產生影響。聲波傳遞介質的特徵阻抗定義為該介質的密度乘上聲波在該介質傳遞的速度。Del Grosso (1971)提出了彈性波導的相關理論解析解，並得到了管內介質點的位移變化與頻散關係。Lafleur 和 Shields (1995)以不同管壁材質的實驗驗證了其理論。Wilson (2002)和簡(2005)皆於其論文中比較了不同管壁厚度的阻抗管，利用數值計算與實驗結果驗證平面波理論的可行性。

在充水的阻抗管中量測材料的聲學特性，除了水與阻抗管鋼材的特徵阻抗差異影響，造成阻抗管內的聲波可能不完全是平面波外，於注水的過程中易將空氣導入管內形成小氣泡。由於聲波在水中傳遞速度與氣泡多寡及大小有很大的關係(黃等人，2016)，因此氣泡的存在會大大增加量測的不確定性。此外，使用交換麥克風法量測，量測系統的設置相當耗時，在安裝的過程中也會帶入更多的誤差，包含氣泡的產生與對系統的擾動(Wilson, 2003)。

為了解材料於水中受壓力影響後的聲學特性，本研究利用充水阻抗管及三參數校正法，發展出可加壓的充水阻抗管，可用來探討吸音材料在不同靜水壓力下的聲學特性。在確認實驗結果的可重複性之後，本研究利用所發展的充水阻抗管量測橡膠多孔材料試片在不同厚度及不同壓力下所呈現的聲學特性，探討其差異，量測結果可供材料開發者作為參考。

## 二、理論介紹

### 2.1 轉移函數法

轉移函數法被廣泛的應用於空氣阻抗管量測材料反射係數的實驗中，此方法改善了單麥克風駐波比法需要一直移動麥克風量測的缺點，增加了實驗的效率及準確性。圖 1 中麥克風 A 及 B 所測得的聲壓  $P_1$ 、 $P_2$  可分別表示為

$$\begin{cases} P_1 = P_i e^{ik(L-x_1)} + P_r e^{-ik(L-x_1)} \\ P_2 = P_i e^{ik(L-x_2)} + P_r e^{-ik(L-x_2)} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $k = \frac{\omega}{c}$  為聲波波數， $\omega$  表示角頻率， $c$  為聲波波速。

轉移函數( $H$ )定義為麥克風 A 及 B 測得的聲壓比值:

$$H = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_i e^{ik(L-x_2)} + P_r e^{-ik(L-x_2)}}{P_i e^{ik(L-x_1)} + P_r e^{-ik(L-x_1)}} \quad (2)$$

將反射係數定義  $R = \frac{P_r}{P_i}$ ，代入(2)式中，推導後得材料處反射係數  $R_L$  與轉移函數的關係為

$$R_L = \frac{e^{-iks} - H}{H - e^{iks}} e^{2ik(L-x_1)} \quad (3)$$

式中  $s = x_2 - x_1$  為麥克風間距，由(3)式可知求得轉移函數後，即可計算材料的反射係數。

於空氣阻抗管實驗使用轉移函數時，需透過交換麥克風位置來計算消除兩麥克風間的靈敏度誤差，本實驗則是應用三參數校正法來提高實驗準確性與便利性。

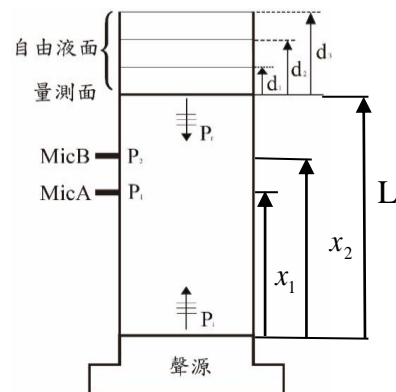


圖 1 聲波於圓管中量測示意圖

### 2.2 三參數校正法

充水阻抗管實驗中，量測系統存在安裝誤差、系統電路誤差、麥克風靈敏度誤差、聲波於水中傳遞時振衰減誤差及相位變化誤差等，Wilson et al. (2003)提出三參數校正法，可用來修正充水阻抗管實驗所造成各項誤差。

假設電壓訊號與聲壓間的關係式可表示為

$$V = P \cdot \alpha \quad (4)$$

式中  $V$  為電壓訊號， $\alpha$  為水下麥克風的複數靈敏度。因此，可重新定義水下麥克風 A 及 B 的轉移函數為

$$H = \frac{V_B}{V_A} = \frac{P_2 \cdot \alpha_B}{P_1 \cdot \alpha_A} \quad (5)$$

$P_i$  與  $P_r$  為圓管中入射與反射聲波實際的聲壓。聲波於充水阻抗管中傳遞時易受干擾而產生誤差。因此，將入射和反射聲波在麥克風 A 量測處的修正因子分別設為  $\alpha_{i1}$  和  $\alpha_{r1}$ ，而在麥克風 B 量測處的修正因子設為  $\alpha_{i2}$  和  $\alpha_{r2}$ ，則兩水聽器所測得的聲壓可表示成

$$\begin{cases} P_1 = P_i \alpha_{i1} + P_r \alpha_{r1} \\ P_2 = P_i \alpha_{i2} + P_r \alpha_{r2} \end{cases} \quad (6)$$

$\alpha_{i1}$ 、 $\alpha_{r1}$ 、 $\alpha_{i2}$ 、 $\alpha_{r2}$  為複數係數，同時包含幅度與相位的變化。將(6)式代入(5)式中，可得

$$H = \frac{(P_i \alpha_{i2} + P_r \alpha_{r2}) * \alpha_B}{(P_i \alpha_{i1} + P_r \alpha_{r1}) * \alpha_A} \quad (7)$$

將反射係數定義  $R = \frac{P_r}{P_i}$  代入(7)中，移項整理後反射係數可由轉移函數求得

$$R = \frac{-H \alpha_{i1} \alpha_A + \alpha_{i2} \alpha_B}{H \alpha_{r1} \alpha_A - \alpha_{r2} \alpha_B} \quad (8)$$

將(8)式簡化為

$$R = \frac{\lambda_1 H + \lambda_2}{H + \lambda_3} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\frac{\alpha_{i1}}{\alpha_{r1}} \\ \lambda_2 = \frac{\alpha_{i2} \alpha_B}{\alpha_{r1} \alpha_A} \\ \lambda_3 = -\frac{\alpha_{r2} \alpha_B}{\alpha_{r1} \alpha_A} \end{cases} \quad (10)$$

$\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  及  $\lambda_3$  為系統的三個無因次校正參數，利用三種已知參考材料的反射係數和 underwater 麥克風分別量測到的轉移函數值，分別表示為  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ ，並將上述的值分別代入(10)式聯立求解，可得到

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\frac{R_2 R_3 (H_3 - H_2) + R_1 R_3 (H_1 - H_3) + R_1 R_2 (H_2 - H_1)}{R_1 (H_3 - H_2) + R_2 (H_1 - H_3) + R_3 (H_2 - H_1)} \\ \lambda_2 = \frac{R_2 R_3 H_1 (H_3 - H_2) + R_1 R_3 H_2 (H_1 - H_3) + R_1 R_2 H_3 (H_2 - H_1)}{R_1 (H_3 - H_2) + R_2 (H_1 - H_3) + R_3 (H_2 - H_1)} \\ \lambda_3 = -\frac{R_1 H_1 (H_3 - H_2) + R_2 H_2 (H_1 - H_3) + R_3 H_3 (H_2 - H_1)}{R_1 (H_3 - H_2) + R_2 (H_1 - H_3) + R_3 (H_2 - H_1)} \end{cases} \quad (11)$$

目前尚無已知材料阻抗值的標準試片，但於充水阻抗管量測時，由於水/空氣介面之特徵阻抗差異極大，會發生負全反射。負全反射的相位為 180 度，依據此特性，可選定一水位高度作為量測基準面，再利用三個不同水柱高，計算三個不同水柱高的理論反射係數為

$$R_i = R_{\text{水/空氣}} \cdot e^{-2ikd_i} = e^{i(\pi - 2kd_i)} \quad (12)$$

$d_i$  為不同水柱高度與量測基準面的距離(如圖 1)，經由計算三組不同水柱高的理論反射係數  $R_1$ 、 $R_2$  及  $R_3$  與水下麥克風量測的轉移函數值  $H_1$ 、 $H_2$  及  $H_3$ ，代入(11)式中即可求得  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  及  $\lambda_3$  三個校正參數，將三個校正參數代入(9)式即可計算材料的反射係數。

### 三、實驗配置

#### 3.1 充水阻抗管的規格

本實驗所使用之充水阻抗管依據美國材料和試驗協會 ASTM E 1050-98 (1990) 規範設計，參考阻抗管工作頻率定義

$$f_l < f < f_u \quad (13)$$

$f$  為工作頻率， $f_u$  為頻率上限，為使管內聲波符合平面波傳遞狀態，阻抗管直徑與工作頻率上限的關係如下

$$f_u < Kc/b \quad (14)$$

其中  $K=0.586$ ， $c$  為管內聲速， $b$  為管內徑。工作頻率下限  $f_l$  則與麥克風間距有對應關係，

$$f_l > (c/s) \times 1\% \quad (15)$$

$s$  為麥克風間距，根據 ASTM E 規範麥克風間距應滿足以下條件

$$s = (c/2f_u) \times 80\% \quad (16)$$

為避免聲源產生之非平面波對量測造成影響，麥克風位置與聲源間距至少是直徑的三倍以上。

ASTME 1050-98 (1990) 標準規範主要是針對空氣阻抗管訂定，當阻抗管中的聲波傳遞介質為空氣時，因為空氣與管壁的特徵阻抗值差異極大，此時阻抗管可視為理想剛體。阻抗管中之傳聲介質若為水時，因為水與管壁特徵阻抗接近，管壁材料所產生的彈性波將影響阻抗管內的平面波傳。根據 Del Grosso (1971) 提出的彈性波導理論，管內介質為水時，平面波傳假設將不再成立。當管壁材料為鋼材且厚度增加時，可使管內最低階聲波模態，亦即 (0,0) 模態之相位速度接近平面波模態 (Lafleur and Shields, 1995; Wilson, 2002; 簡, 2005)，管內聲波傳播速度亦須以最低階模態修正。簡(2005)於論文中驗證了管壁厚度的影響，並提出了管內波速修正的計算方法。

本研究根據上述規範與理論解析，以 304 不鏽鋼材質製成充水阻抗管，幾何參數如表 1。

表1 阻抗管幾何參數

	尺寸(mm)
內徑	116
外徑	176
長度	1660
厚度	30
水聽器間距	65

### 3.2 加壓系統介紹

本研究利用充水阻抗管加裝加壓系統，將原本為開放式充水阻抗管，改裝為密閉式量測系統。實驗中使用 TH400P 壓縮機作為加壓設備，並於加壓管路安裝壓力儀表，以利監控充水阻抗管內部壓力。此外，在阻抗管上方安裝一段試片固定管，除了作為試片固定位置使用外，亦可用來量測不同厚度的試片。最後，於管路上方安裝不銹鋼板，建立一套可加壓密閉式的阻抗管系統。

完成後的可加壓充水阻抗管如圖 2，為確保阻抗管在實驗過程維持水密狀態，實驗前應確認各管路接頭是否密封，避免於加壓過程造成水體滲漏，影響實驗結果及設備安全。當壓力達到目標壓力時，需靜置 15 分鐘，確認管內壓力穩定後，即可實施反射係數量測。實驗結束後，應由上方通氣孔洩放管內壓力，避免直接拆卸頂蓋，以防水壓造成管內水體洩漏。



圖 2 可加壓充水阻抗管

### 3.3 實驗流程

圖 3 實驗配置圖，本研究的聲學量測系統主要區分為聲源及量測等二類。聲源系統配合水下音鼓頻率範圍以 Lab View 撰寫控制，將訊號經由數位類比轉換器(A/D converter)傳送至功率放大器，藉以驅動水下音鼓發出聲源。量測系統是以安裝在阻抗管上不同位置的水下麥克風所接收的聲壓，將類比訊

號藉由電荷放大器完整放大，再經由數位類比轉換器轉成數位訊號，最後透過 NI 擷取卡進行資料擷取。本實驗頻率範圍為 2000(Hz)-7000(Hz)，每隔 10(Hz)做單頻量測，將水下麥克風接收到訊號擷取後，於 Matlab 中將兩把麥克風取得的訊號做快速傅立葉轉換，再針對相對應的頻率計算轉移函數、三個校正參數及反射係數。

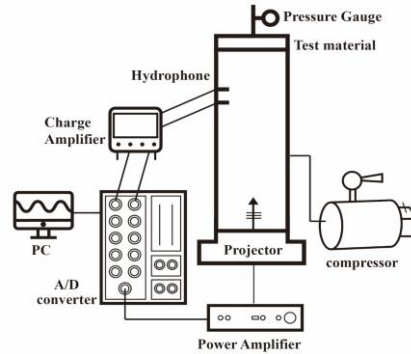


圖 3 實驗配置圖

利用三參數校正法實施管內水體校正，確認管內水體穩定後，即可量測受測試片於大氣壓力下或加壓狀態時的反射係數，加壓量測流程如圖 4

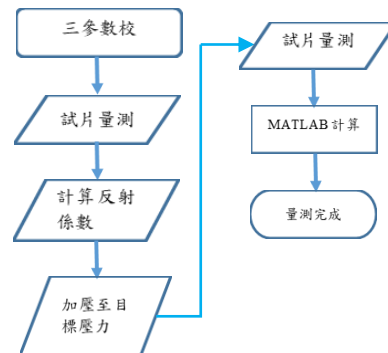


圖 4 加壓量測流程圖

## 四、結果與討論

本研究使用橡膠多孔性材料作為量測試片，此種材料具備有效控制聲學特性、易達到吸音效果及能夠吸收寬頻帶水聲等優點。試片單層厚度為 2.5 公分，可依實驗需求製造不同厚度之試片(如圖 5)。試片於量測前均應泡水 4 小時以上，目的在避免不同含水量造成量測上的差異。

為驗證三參數校正法對本實驗結果的影響，將利用單層試片在  $4 P_{atm}$  下量測材料的反射係數，比較有無三參數校正下的試片加壓後所量測的反射係

數，並針對實驗重複性實施驗證。其次，針對不同厚度及不同壓力下組合實施量測，實驗組別如表 2。



圖 5 橡膠多孔性材料試片

表 2 實驗組別

組別	材料厚度(cm)	測試壓力( $P_{am}$ )
Case1	2.5	4
Case2	2.5	1、4、8
Case3	5	1、4、8
Case4	7.5	1、4、8

#### 4.1 可重複性實驗

利用 Case 1 驗證三參數校正法對材料反射係數的影響，圖 6 為未使用三參數校正法量測結果，受到水下麥克風量測靈敏度誤差、水中氣泡造成的聲速誤差等各項誤差加總的影響，吸音材料試片反射係數值明顯大於 1，物理上不合理，且三次量測結果的可重複性不甚理想。圖 7 為 Case 1 利用三參數校正法校正過後，修正了各項量測誤差後，可以發現重複性和準確性均優於未校正的結果。

為了驗證實驗的可重複性，比較圖 7 與圖 8 的量測結果，圖 7 為同一天內不同時段量測的結果，阻抗管內水體較穩定，量測結果近似重合。圖 8 為不同日期量測結果，雖有些微誤差，但結果相當一致。造成微小誤差的原因可能是，實驗中試片置放時所造成的水體擾動，亦或是水位量測的誤差等。儘管有些微的差異，圖 7 及圖 8 的結果顯示，利用三參數校正，試片加壓後的反射係數量測，結果具良好的可重複性。

#### 4.2 試片加壓量測結果

圖 9-11 所示分別為 Case 2-4 試片在 1、4、8  $P_{am}$  下，所量測到的反射係數。圖 10 顯示，在 1  $P_{am}$  時，最小的反射係數約為 0.5，出現的頻率範圍在 2.5-3 kHz 間。在 4  $P_{am}$  時，最小的反射係數約為 0.45，出現的頻率範圍在 6.5-7 kHz 間，在 8  $P_{am}$  量測到的反

射係數則介於兩者之間。圖 11 顯示，當試片厚度增加時，在 1  $P_{am}$  時，有較大的反射係數值(約 0.9)，在 4  $P_{am}$  時，則有較小的反射係數值(約 0.6)，8  $P_{am}$  時的反射係數則有下降的趨勢。在圖 12 中，在 2-4 kHz 間，1 與 4 輪流出現反射係數最大值，而在 8  $P_{am}$  則存在最小值(約 0.4)，於 4-7 kHz，反射係數則隨著壓力越大，數值越小。

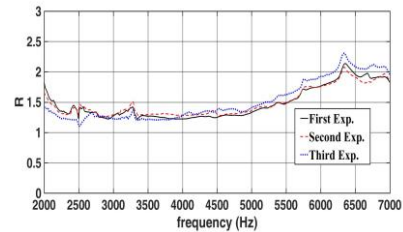


圖 6 未使用三參數校正法量測值

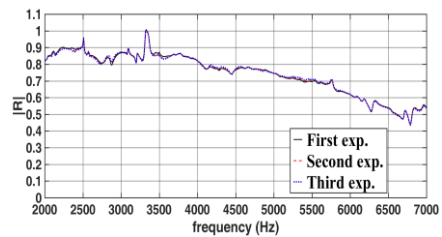


圖 7 Case 1 使用三參數校正法量測值

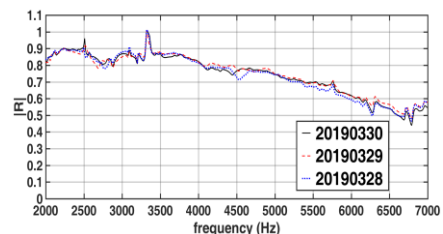


圖 8 Case 1 不同日期量測值

比較上述結果發現，不同壓力條件下所量測到的反射係數值沒有明顯的相互關係。以物理角度來分析時，預測壓力越高材料越緊密，材料間孔隙間隙變小，聲波無法進入材料中，使能量於材料內部消散，而導致反射係數值上升。實際量測結果發現，在相同的試片厚度不同的壓力條件下量測，並沒有一定的規則。造成此現象的原因，推測可能與試片的製程有關，本研究僅針對單一試片實施測試，並未對試片製程及材料特性加以研究，試片製作的過程中無法掌握其受到壓力後孔隙間隙的變化及耐壓的程度。其次，不同厚度的試片並非一體成型，是

一單層試片為基礎，利用黏著劑貼合而成，此亦可能造成實驗相關性受影響。

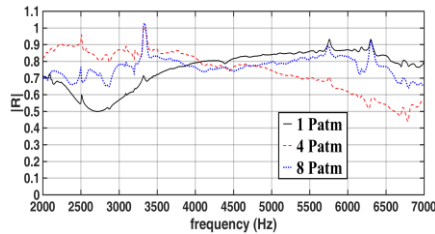


圖 9 Case 2 反射係數量測值

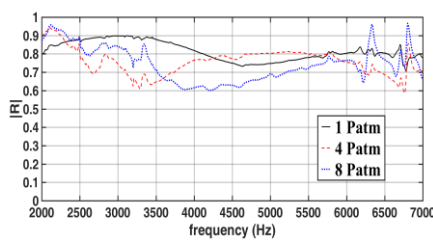


圖 10 Case 3 反射係數量測值

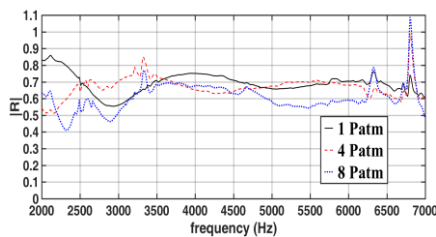


圖 11 Case 4 反射係數量測值

## 五、結論

本研究利用充水阻抗管工作原理，將充水阻抗管發展為可加壓型式，藉以量測材料在靜水壓力下的反射係數。同時，利用三參數校正法來修正量測過程中產生的麥克風靈敏度誤差、聲波在水中傳遞的衰減誤差等各項誤差，透過實驗，驗證此校正方法的重要性。利用試片在  $4 P_{atm}$  的環境下，同一天不同時段及不同日期的量測結果驗證，本實驗俱備良好的可重複性。

針對試片的量測結果發現，相同厚度的試片在不同的壓力環境下，量測到的試片反射係數是有所差異的。本研究中並沒有針對材料的孔隙大小、材質及黏著劑等加以討論。然而，經由實驗結果發現，材料的厚度及環境的壓力均會影響反射係數的量測結果。本研究所發展的量測方法，可以應用於

不同製程的水下材料之聲學特性的探討，做為材料開發人員的參考。

## 參考文獻

1. 簡志宇(2005)，以注水彈性阻抗管測量材料之水中聲學特性之研究，國立台灣大學工程科學及海洋工程學研究所碩士論文，102 頁。
2. 周城光, 白國鋒, 劉碧龍, 李曉東(2010)，"充水阻抗管中測量材料聲學性能的校准方法研究," *聲學學報*, 第 35 卷第 2 期, 154-161 頁。
3. 黃清哲、林彥岑、張宏煜、田宗謨、許泰文(2016)，"水中聲波通過氣泡幕衰減特性實驗探討", *海洋工程學刊*, 第 16 卷第 1 期, 43-53 頁。
4. ASTM E1050-98 (1990). Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method. ed: ASTM International.
5. Corbett, S.S. III (1982). A Two-Hydrophone Technique for Measuring the Complex Reflectivity of Materials in Water-Filled Tubes. M. S. Thesis, Pennsylvania State University, 158 pages.
6. Del Grosso, V.A. (1971). Analysis of multimode acoustic propagation in liquid cylinders with realistic boundary conditions-application to sound speed and absorption measurements. *Acustica*, Vol. 24(6), pp. 299-311.
7. Gibiat, V. and Laloë, F. (1990). Acoustical impedance measurements by the two-microphone-three-calibration method, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 88(6), pp. 2533-2545.
8. Lafleur, L.D. and Shields, F.D. (1995). Low-frequency propagation modes in a liquid-filled elastic tube waveguide. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 97(3), pp. 1435-1445.
9. Wilson, P.S. (2002). Sound Propagation and Scattering in Bubbly Liquid. Ph.D. Dissertation, Boston University.
10. Wilson, P.S., Roy, R.A. and Carey, W.M. (2003). An improved water-filled impedance tube. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 113(6), pp. 3245-3252.

## 衛星影像灘線 AI 辨識技術研發

陳蔚瑋<sup>1\*</sup> 張憲國<sup>2</sup> 張家義<sup>3</sup> 楊文昌<sup>4</sup> 卓訓杰<sup>5</sup> 李孟學<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 國立陽明交通大學土木工程學系博士後研究員

<sup>2</sup> 國立陽明交通大學土木工程學系教授

<sup>2</sup> 國立陽明交通大學土木工程學系碩士

<sup>4</sup> 國家海洋研究院海洋科學及資訊中心組研究員兼主任

<sup>5</sup> 國家海洋研究院海洋科學及資訊中心副研究員

### 摘要

本文主要研究目的為發展一個精準且易於操作以外傘頂洲水線為例的 AI 辨識模型。因使用批次預處理遙測影像下載及系統化的辨識，故可大幅降低往昔感興趣區域(ROI)與半自動海陸域標記所需花費的時間。採用重新採樣方式解決遙測影像的陸域及海域細小區塊數量極為不均的問題，並嵌入孿生網路模型於基本 DeepUnet 而發展出一個精進 AI 模式。此模式比原本單純的 DeepUnet 模式具有較佳適用性及正確性以辨識不同亮度影像的海域。

關鍵詞：孿生網路、深度學習神經網路、辨識技術、重新採樣

## Development of AI Recognition Technology for Satellite Images

Wei-Wei Chen\* Hsien-Kuo Chang Jia-Si Jhang Wen-Chang Yang Hsun-Chieh Cho  
Meng-Syue Li

\* Postdoctoral researcher, Department of Civil Engineering., National Yang Ming Chiao Tung University

### ABSTRACT

The main research purpose of this paper is to develop an accurate and easy-to-operate AI identification model based on Waisanding sandbar waterline as an example. The batch preprocessing method is used to download satellite images and systematic identification, which can greatly reduce the time required for region of interest (ROI) and semi-automatic sea and land labeling in the past. Using resampling method to solve the problem of extremely uneven number of small land and sea areas of the 85 satellite images collected with a pixel resolution of about 2.5 m. Embedded siamese net in the basic DeepUnet an advanced AI model was developed in this study. This model has better applicability and accuracy than the original DeepUnet to identify sea areas with different brightness in images

Keywords: siamese net; DeepUnet; recognition technology; re-sampling method

### 一、前言

外傘頂洲為雲嘉海岸地區之天然屏障，往昔許多研究顯示沙洲有逐年縮減的趨勢，除對當地自然景觀及環境造成影響，並同時對當地養殖與觀光產

業造成損害。為了解外傘頂洲長期變遷特性，無早期且長期定期的地形實測資料以做比較。衛星遙測技術的發展使研究人員能能夠快速取得大範圍的地表資訊，於地理資訊學及河口與海岸調查上有所幫助，並具有很大的發展性。為持續關注外傘頂洲之

變化，Chang et al. (2021)發展衛星影像辨識技術擷取 25 張外傘頂洲影像的水線，並平移至平均水位地灘線，並分析外傘頂洲的灘線變遷。

國內已探討過外傘頂洲變遷的分析，如林與莊(1985)、吳等人(1991)、依經濟部工業局(2013)「雲林離島式基礎工業區永續環境管理計畫」報告、林等人(2003)、張與陳(2005)、蘇等人(2006)、林等人(2007)、黃等人(2015)、蔡等人(2015)、張等人(2017) 發現外傘頂洲的海側灘線在北端以-30.5m/yr、水利署(2018)「氣候變遷對臺灣自然海岸與近岸沙洲之衝擊研究(2/2)」、彭等人(2019)、陳等人(2020)。

遙測技術可避免往昔使用人力的傳統灘線測量方法，改善費時、費力，而且測量經費亦高的問題。由於水位會隨著潮汐或波浪影響，灘線的位置會隨時間不同而有變化，若直接採用瞬時擷取出來的水線位置來做分析並非適當的。Chang et al. (2021)使用接近於平均水位的影像 25 張，利用人力來標註陸地與海面，測試三種不同的卷積網路模式，證實 VGG16UNet 模式優於其他兩種，然因為測試的影像數量尚不足，訓練模型用的樣本影像無法涵蓋各種不同亮度的情況。本研究為克服上述問題，選擇約 2.5 公尺高解析度的 85 幅衛星影像，利用影像處理技巧結合海岸工程的知識，建立一個精準且易於操作以外傘頂洲水線為例的 AI 辨識模型，以分析外傘頂洲變遷特性。

## 二、影像資料與處理

### 2.1 背景資料

研究區外傘頂洲為臺灣最大沙洲，從雲林湖口村沿海往西南延伸到嘉義網寮村外海，呈東北西南走向，以 2019 年底衛星影像估計其長度約達 12.6 公里，在低潮位(約相對平均水位-1.2m)時其陸地面積約 12.5 平方公里(如圖 1)。

海象部分外傘頂洲周邊測站平均潮差由北側箔子寮塭港、東石、布袋至南邊將軍站的平均潮差依次為 220cm、152cm、149cm、135cm 及 113cm，大潮差則分別為 281cm、225cm、198cm、201cm 及 158cm，均呈現由北向南遞減的趨勢。波浪部分西南季風轉東北季風期間外傘頂洲外海所觀測的波高較大，主要波高平均為 50~150cm 之間，其主要週期分佈在 4~7sec 之間。

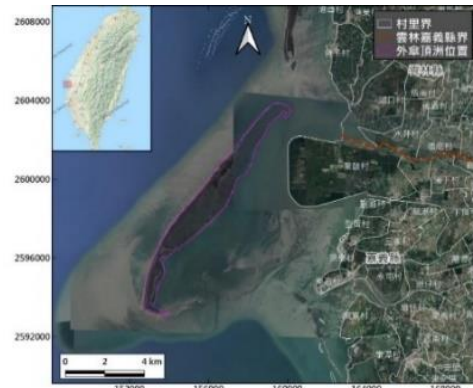


圖 1 外傘頂洲位置圖

### 2.2 影像資料

SPOT-5 搭載了全色態與多頻譜兩種感測器，經由同時拍攝，再經過影像融合處理可以提升其空間解析度到 2.5 公尺。SPOT-6 與 SPOT-7 則分別於 2012 年與 2014 年相繼升空，可提供 1.5m 解析度與 16 位元灰度的影像。研究團隊盡可能蒐集中央太空遙測中心開放平台可用的高解析度影像資料進行分析。影像主要包含 SPOT5 以上等級自 2004 年至 2020 年之影像。

### 2.3 影像處理及海陸範圍的標記

影像需經(1)輻射與幾何校正；(2)色彩融合與計算常態化差異水體指數(NDWI)；(3)影像強化與修補，包括衛星影像 IHS 融合、影像強化；(4)膨脹或侵蝕的形態學(morphology)組合運算。經此影像處理技術後可建立能辨識高解析度、高適應性且高準確度的水線辨識訓練基準模型。最後將標記範圍做成遮罩配合強化的原圖進行人工標記，如圖 2 所示。

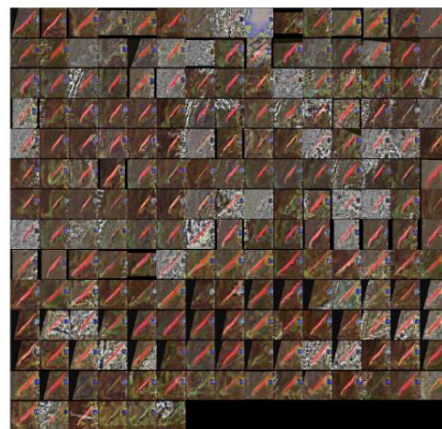


圖 2 201 張影像標記外傘頂洲的結果

### 三、研究方法

#### 3.1 模型測試

自所有影像中挑選具代表性的影像 85 幅進行 DeepUnet 模型訓練，將照片依照預定模型輸入大小 256 x 256 切割後，在資料集中共有 44,780 筆資料，其中，有包含沙洲的部分有 5,556 筆資料，僅占訓練資料集中的 12.41%。以 DatasetA 與 DatasetB 兩種資料集進行訓練，DatasetA 為全部 5556 影像區塊資料，DatasetB 則僅選擇有包含沙洲部分的影像區塊。選用參數較少的 DEEPUNET 架構進行快速訓練。圖 3 左圖為以 DatasetA 進行訓練的推算結果，右圖則為以 DatasetB 進行訓練的推算結果。其結果顯示 DatasetA 的測試資料集中 IOU score 達到 0.80，然而整張影像在推算時完全被誤判為海域；DatasetB 的測試資料集中 IOU score 達 0.79，但在海域的部分有較多誤判為陸地，且因影像進行區塊切割，多數沙洲位置都在圖片邊緣處，使推算結果容易在邊界處判斷為陸地，將所有區塊組回原圖時，會有類似網格邊框線產生。此部分測試可發現資料集分布不均衡 (Imbalanced dataset) 對模型訓練或推算結果都會造成影響，若單以 IOU score 等評估指數來看，也無法明確地表現出上述全域辨識結果的問題，故本年度將使用重新採樣 (Resampling) 方式解決資料集分布不均衡問題。

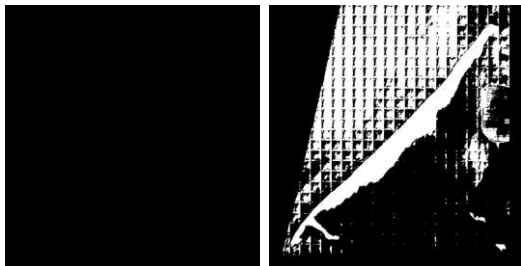


圖 3 DatasetA(左圖)與 DatasetB(右圖)所訓練模型的推算結果

#### 3.2 重新採樣及資料增補

重新採樣 (Resampling) 中包含下採樣 (Under sampling) 及上採樣 (Over sampling)，如圖 4 所示，本研究兩種採樣方式皆使用，對全海域資料使用下採樣 (Under sampling)，使用隨機取樣方式取得 80% 的資料，對包含沙洲陸域部分使用上採樣 (Over sampling)，將陸域資料使用資料增補 (Augmentation)

方式增加 4 倍資料。

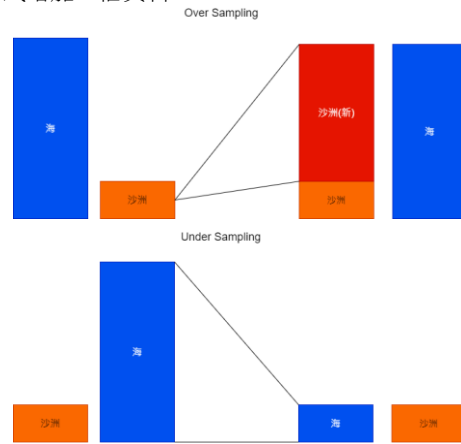


圖 4 外傘頂洲灘線辨識結果

另外選用的資料增補方法包含影像的鏡像擴增、隨機大小擷取、水平翻轉、垂直翻轉、隨機旋轉以及彈性變化 (Elastic deformation)，每種方法選用機率皆為 50%。鏡像擴增將圖片往右側及下側擴增，再透過隨機位置、大小擷取圖片。因外傘頂洲形狀為長條橫向，在進行影像區塊切割時各區塊中海陸域分界線的分佈幾乎皆為類似方向，使得影像區塊形狀過於相似，透過資料增補的作法可避免模型在訓練時，讓形狀因子也成為其特徵。此外衛星影像在拍攝時可能也會由於其軌道與角度而會在影像中有缺值的情況發生，透過資料增補中的鏡像擴增亦可避免影像區塊切割時遇到缺值的情況。

#### 3.3 孿生網路模型架構

UNet 是基於全卷積網路 (Fully Convolutional Networks, FCN) 建立的圖像分割模型，經由 UpBlock 取代傳統 CNN 直接連接全連接層 (Fully connected layer) 方法，提高輸出的精度，UNet 有別於一般 FCN，保留上游 DownBlock 的特徵與下游 UpBlock，能使模型更準確定位，且能保留更高解析度的資訊，達到優化圖像分割效果。而加深網路結構可以切高較複雜的影像，且能有效辨識高解析度圖片。而 Dickens 等人 (2019) 提出 DeepUnet 的改良模型，如圖 5 所示，亦能針對海陸域辨識的問題有不錯的應用結果。

孿生網路 (Siamese Net) 最早在 1993 年 AT&T 貝爾實驗室 Bromley 等人所提出，解決判斷兩個支票簽名是否是同一人筆跡的問題。由前期研究在海面反光過亮與部分特殊光譜分布等影像，無法有較好



的辨識結果，推估可能是模型僅接受切割後的影像資訊，無法了解全域狀況而造成，本研究期望孿生網路(Siamese Net)的方式來進行，期望能藉由孿生網路的方式，能完整影像的資訊也能傳遞至模型中而改善原模式的辨識能力。

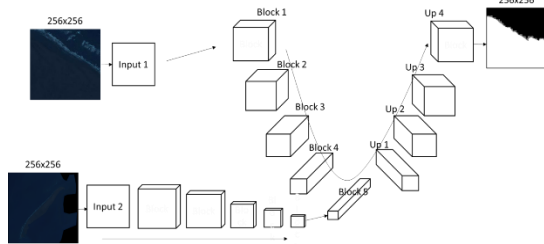


圖 5 孿生網路結構示意圖

### 3.4 模型評估指標

本研究使用 Dice loss 及 Focal loss 做為損失函數(Loss function)，Dice loss 是 Milletari 等人(2016)在 V-net 中提出的 Loss function，其源於 Sørensen - Dice coefficient，是 Sørensen 和 Dice(1945)發展出的統計學指標。Dice loss 的計算方式是 1- F score，F score 的定義如式(1)，其中 P 值(Precision)及 R 值(Recall)，如式(2)對應表 1 混淆矩陣，分別為精確率及召回率，F score 同時能表現此兩種數值。

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{P} + \frac{1}{R} \rightarrow F = \frac{PR}{P+R} \quad (1)$$

$$P = \frac{TP}{TP+FP}, R = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

表 1 混淆矩陣(confusion matrix)

	Positive	Negative
Truth	TP (事實為真，判斷為真)	TN (事實為真，判斷不為真)
False	FP (事實不為真，判斷為真)	FN (事實不為真，判斷不為真)

本研究中陸域與海域地區自身的特徵相似，惟在交界處或少部分特殊特徵(濕沙地、白沫與水窪等)會有比較難判斷的區域，大多數的簡單樣本的 loss 遠大於困難的樣本者，故本研究使用此種損失函數來進行網路模型訓練。

待完成模式的訓練，再採用 IOU score 當為驗證指標，Chang et al. (2021)僅評估包含沙洲陸域範圍的影像區塊(256 x 256)，模型推算後直接計算分數，最後平均所有分數作為其最終分數，本文則合併區層

成整張圖後，示如圖 6，再計算其 IOU 值。IOU 值為將辨識交集除以聯集。

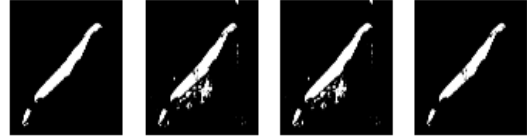


圖 6 海陸域標記圖、辨識圖、聯集圖及交集圖(由左至右)

## 四、結果與討論

### 4.1 資料增補對辨識能力的影響

為探討本研究增資料的辨識效果，以圖 7 採用資料增補進行模型訓練後較具代表性的推算結果來說明。圖 7 顯示模型準確地描述沙洲的位置，且不會將台灣本島位置的陸地辨識為沙洲。

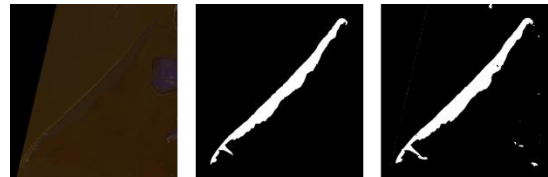


圖 7 資料增補後訓練模型的推算結果 (由左至右，衛星影像、標記圖、辨識圖)

此外 Chang et al. (2021)提出的 VGG16UNet 模型當在高亮度海面時，會有辨識結果較差的問題，經資料增補的辨識結果，如圖 8 的海面高亮度影像為例，無資料增補的 VGG16UNet 模型辨識第三小圖圖卻無法正確辨識出外傘頂洲外，且多辨識出台灣本島的東石陸地。最右邊的小圖顯示 DeepUnet 辨識在資料增補的取樣方式調整，正確辨識出外傘頂洲位置，證實資料增補視可克服海面高亮度的問題。

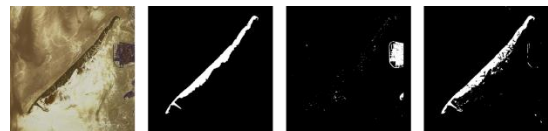


圖 8 高亮度海面影像的推算結果 (由左至右，衛星影像、標記圖、VGG16UNet 辨識圖、資料增補模型辨識圖)

### 4.2 孿生網路模型的辨識能力評估

為比較兩種網路架構在推算各幅影像的辨識能力，將兩種模式在各幅影像推論結果的 IOU 分數示如圖 9。由圖 9 可發現大多數圖片的二者分數相近，

僅有少數 IOU 相差較大的結果，此 85 幅 IOU 的統計分析，示如表 2，其中 Q1、Q2 及 Q3 代表 IOU 從小至大排序後四分位距(interquartile range)中 25%，中位數及 75%的數值。因為，IOU 高代表模式的辨識能力較強，從表 2 的所有統計值來看，基本的 DeepUnet 模式的 85 幅 IOU 都低於孿生網路模型，前者標準差高於後者，此結果都顯示此孿生網路模型有優於基本 DeepUnet 模式的影像辨識能力。

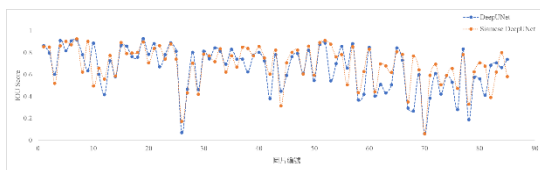


圖 9 兩種網路辨識 85 幅影像 IOU 的比較

表 2 兩種網路辨識 85 幅影像 IOU 的統計比較

統計值	DeepUnet	Siamese DeepUnet
平均數	0.6604	0.6935
標準差	0.2030	0.1769
最小值	0.0609	0.0617
Q1	0.5452	0.6060
Q2	0.7273	0.7415
Q3	0.8145	0.8316
最大值	0.9298	0.9279

接下來探討二種模式辨識較差兩幅影像(編號 10 及 68)的細部比較，分別示如圖 10 及圖 11。由圖 10 可知 DEEPUNET 辨識編號 10 影像雖然在海域部分有些許誤判，但 Siamese DeepUnet 在陸域的辨識上卻有破碎的現象，所以 DeepUnet 在此幅影像的 IOU 較高。

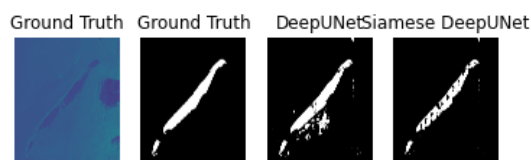


圖 10 兩種網路的推論編號 10 影像的比較

至於編號 68 影像的辨識比較，由圖 11 可看到 DeepUnet 的推算結果在海域有大範圍的誤判，而 Siamese DeepUnet 對於海域的雜訊容忍度較高，而有效的排除圖片中有雲等其他雜訊造成的影響，因

此 SiameseDeepUnet 在此幅影像的 IOU 較高。

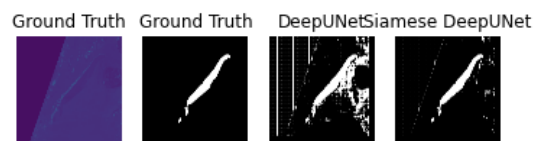


圖 11 兩種網路的推論編號 68 影像的比較

## 五、結論

本文採用中央大學太空遙測中心開放平台的 85 張衛星影像，以更多不同影像條件精進 Chang et al. (2021)僅使用 25 張影像的基本模式的辨識能力。除影像數增加外，技術上在輔多種資料增補方法，克服影像區塊切割海陸比例極為不均的缺點，有效提升模型在不同亮度特性影像的適用性，也減少一定程度的誤判情況。為了進一步提升模型適用性，本研究提出孿生網路架構在原本只有小部分影像區塊做為輸入的網路架構中，新增一條能輸入全幅影像資訊的通道，目的在於減少各影像區塊間的辨識成果差異，期望能減少區塊間的不連續現象。測試結果顯示孿生網路的推算結果在不同亮度的海域範圍有較好的容忍性，整體的辨識能力評估指標均顯示孿生 DeepUnet 網路模型優於基本 DeepUnet 模式。然而，在全陸域範圍內仍有部分影像有辨識成破碎的現象而需再改善之處。

## 謝誌

本文為國家海洋研究院計畫的部分研究內容，編號 NAMR110004，作者感謝國海院經費支持。同時感謝中央太遙中心『衛星影像開放資料服務平台』提供本研究所需的影像。

## 參考文獻

1. 吳啟南、彭森祥、蕭國鑫(1991)「外傘頂洲的變遷分析」，*遙感探測*，15 期，第 1-15 頁。
2. 林宏仁、許泰文、曾以帆(2003)「外傘頂洲海岸變遷機制之研究」，*第二十五屆海洋工程研討會論文集*，第 735-742 頁。
3. 林銘崇、莊文傑(1985)「外傘頂洲地形變遷之研究」，*土木水利季刊*，12 卷 3 期，第 23-39 頁。
4. 張憲國、陳蔚瑋(2005)「以衛星影像探討外傘頂洲

- 的海灘變遷」，第二十七屆海洋工程研討會論文集，第 823-830 頁。
5. 張憲國、賴羿齊、陳蔚璋(2017)「應用衛星影像的水線辨識於外傘頂洲的灘線變遷」，*航測及遙測學刊*，第二十二卷，第四期，第 243-262 頁。
6. 彭新雅、曾國欣、錢樺、陳彥秋(2019)「運用多時期衛星影像探討外傘頂洲變遷」，*國土測繪與空間資訊*，第七卷，第二期，第 103-119 頁。
7. 黃建維、蔡雨農、施冠足、郭晉安、楊明道(2015)「外傘頂洲高度降低對近岸波高的影響」，*第三十七屆海工程研討會論文集*，第 261-266 頁。
8. 經濟部工業局(2013, 2014)「雲林離島式基礎工業區永續環境管理計畫」。
9. 經濟部水利署第五河川局(2006)「外傘頂洲變遷對嘉義海岸防護之影響分析研究(總報告)」。
10. 蔡雨農、施冠足、郭晉安、簡仲和、楊明道，「外傘頂洲灘線及規模變遷分析」，*第三十七屆海洋工程研討會論文集*，第 361-366 頁。
11. 蘇榮昌、劉進義、王冠斐、游振偉、潘素禎、郭宗雄，「雲林海岸沿岸沙洲地形變遷探討」，*第二十八屆海洋工程研討會論文集*，第 587-591 頁。
12. Chang, H.K., W.W. Chen, J. C. Liou, Y. F. Chiu W. C. Yang, H. C. Cho and M. S. Li (2021) Development of Recognition Technology for the Shoreline Extraction of Waitanding Sandbar in Satellite Images, submitted to *Journal of Marine Research*.
13. Chang, H.K., W.W. Chen, F.C. Tsai, J.C. Liou and S.G. Kuo (2018) "Annual and seasonal shoreline evolution of Tainan Gold Coast using multiband satellite images," *Int. Journal of Engineering and Technology*, Vol. 10 (1), pp. 52-58.
14. Chen, W. W. and Chang, H. K. (2009) "Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 84, pp.54-60.
15. Jishuang, Q., Chao, W., & Zhengzhi, W. (2002) "A multi-threshold based morphological approach for extracting coastal line feature in remote sensed images," *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial Information Sciences*,

## 投放式溫深儀-XBT 終端速度之模擬探討

林世哲<sup>1\*</sup> 李芳承<sup>2</sup> 曾以帆<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>國立中山大學海洋環境及工程學系 碩士班研究生  
<sup>2</sup>財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心 博士  
<sup>3</sup>國立中山大學海洋環境及工程學系 副教授

### 摘要

海洋溫度是海洋物理學當中的重要因子，海洋溫度的變化影響海洋環流、氣象和生物活動等現象。在當代物理海洋學的研究中，投棄式溫深儀(Expendable Bathythermograph, XBT)、溫鹽深儀(Conductivity-Temperature-Depth, CTD)等是現今進行海水溫深剖面測量常用的儀器，其中 XBT 因為現場操作簡便、效率高、成本低等特性，在海洋物理界被廣泛的使用。XBT 是直接由船舷拋放入水中並開始自由下沉，下沉過程中通過漆包線將溫度感測器測得的資料回傳船上接收裝置。但因為 XBT 本身沒有壓力感測裝置，若要獲得溫度資料所對應之水深，必須透過下降速率公式(falling rate equation, FRE)計算，該公式的準確性直接影響了該溫度資料的可靠性，因此下降速率公式是 XBT 的重點研究項目。本研究為利用無網格法中光滑粒子法(Smooth Particale Method, SPH)探討 T-6 型 XBT 之終端速度及其下降速率公式，並與相關的研究結果相互比較。

關鍵詞：投棄式溫深儀、終端速度、光滑粒子法、卡門渦街

## Simulation of Expendable Bathythermograph (XBT) Terminal Velocity

Shie-Jhe Lin\* Fang-Cheng Li I-Fan Tseng

\* Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-Sen University

### ABSTRACT

Ocean temperature is an important factor in ocean physics, and its changes affect ocean circulation, meteorological and biological activities and other phenomena. In contemporary research, expendable bathythermograph (XBT) and conductivity-temperature-depth (CTD) are commonly used for measuring temperature profiles. XBT is widely used in marine physics because of its simple operation, high efficiency, and low cost. XBT falls directly into the water from the side of a ship and begins to sink freely to the bottom. During the sinking process, the temperature data measured by the sensor is transmitted back to the receiving device on the ship through the enameled wire. However, because XBT itself does not have a pressure sensing device to obtain the water depth corresponding to the temperature data, it must be calculated by the falling rate equation (FRE). The accuracy of this equation directly affects the reliability of the temperature data. Therefore, the study of the falling rate equation is a key element of XBT. This research is to use the Smooth Particale Method (SPH) to discuss the terminal velocity and the falling rate equation of the T-6 XBT probe, and compare them with related research results.

Keywords: Expendable bathythermograph; Terminal velocity; Smooth particale method; XBT

## 一、研究目的

由於 XBT 探頭本身並無裝備壓力感測計等深度量測的裝置，無法直接測得溫度數據所對應的深度，因此為了獲得深度資料，通常是根據 XBT 的下降速率公式(falling rate equation, FRE)來計算 XBT 的深度及所對應的時間。下降速率公式的一般形式為：

$$z(t) = at - bt^2 \quad (1)$$

其中 $z(t)$ 為時間 $t$ 時所對應的 XBT 探頭深度，而 $a$ 、 $b$ 為待求之係數。以本研究所探討的 XBT 探頭為 TSK 公司生產的 T-6 型 XBT 為例，官方提供之下降速率公式為(表 1 所示)：

$$z(t) = 6.472t - 0.00216t^2 \quad (2)$$

下降速率公式受非常多因素所影響，不同廠商、不同型號的 XBT 都有不同的外型、重量，從而對應不同的下降速率公式。在現場試驗中，XBT 投放的高度，入水的速度也都會影響下降的速率。不同型號探頭的下降速率公式通常由製造商提供，若要進一步優化公式，大多是在同一地點將 XBT 探頭測得的現場數據與溫鹽深儀(Conductivity-Temperature-Depth, CTD)測得的數據比對後進行修正。

過往關於 XBT 的下降速率公式的研究有：Hanawa 等人(1995)提出深度校正方案(簡稱 H95)，將大致相同地點的 285 組 XBT 資料及 CTD 資料相比較，將 TSK 之 T-7、T-6 及 T-4 型號之下降速率公式優化為：

$$z(t) = 6.691t - 0.00225t^2 \quad (3)$$

該方案是首個受科學界認同的深度校正方案，目前被學界廣泛使用。

表 1 XBT 各型式適用深度與 a、b 係數表

XBT type	Product No.	Max speed (kt)	Rated depth (m)	Max depth (m)	Coefficient $A_1$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	Coefficient $B_2$ ( $m \cdot s^{-2}$ )
T4	20792-1	30	400	-550	6.472	0.00216
T5	21105-1	06	1830	-2100	6.828	0.00182
TS20	21105-3	20	1830	-2100	6.828	0.00182
FD	21105-2	20	1000	-1200	6.590	0.00182
T8	21965-1	15	400	-550	6.472	0.00216
T7	21083-1	15	760	-900	6.472	0.00216
DB	30636-2	20	760	-900	6.472	0.00216
T10	21342-1	10	200	-250	6.501	0.00216
T11	21371-1	06	400	—	1.7779	0.000235
T12	—	20	2000	—	9.227	0.0000473
LMP5-T1(T12)	—	20	2000	—	8.695	0.001784

## 二、研究方法

本節為了能更進一步精準掌握終端速度正確性，將針對等徑球體進行模擬比較，再針對固定邊界與開放邊界比較模擬結果之差異。

## 2.1 數值模型介紹

過去針對 XBT 的下降速率公式的計算大多局限在與現場 CTD 測得的資料作比對，但受限於實驗尺度相當大，若要在實驗室內理想狀態下進行試驗有一定的難度。本研究為了探討理想狀態下 XBT 下降速率及終端速度的計算，將採用 DualSPHysics 開源工具來進行研究探討其相關議題，藉此克服上述問題。DualSPHysics 利用無網格方法中之光滑粒子法(Smooth Particale Method; SPH)，並將過去大量粒子計算於移至 GPU 加速運算平台，能大幅減短運算時間，應付更大更精細的計算量。DualSPHysics 之數值模型中，先是利用 XML 語言設定環境及流體參數，再配合 Windows 批次檔案(.bat)進行模擬及輸出資料。

在數據後處理方面 DualSPHysics 之數據後處理為利用開源的可視化程式 ParaView 進行數據分析及後處理繪圖，利用該軟體快速建立可視化環境，將模擬結果轉為動畫並加上速度場、渦度場等其他輔助工具，也能將物體的運動狀況、物體受力等資料做繪圖以及剖析。

本研究建立之二維數值斷面水槽，深 90m、寬 1.5m 之深水槽，T-6 型 XBT 之 3D 模型如圖 1。XBT 設置於水面上 25cm，初速度 11.109 m/s 向 -z 方向落下，用以模擬 XBT 於 6.52m 高的船舷邊自由下落，數值模型配置如下圖 2。

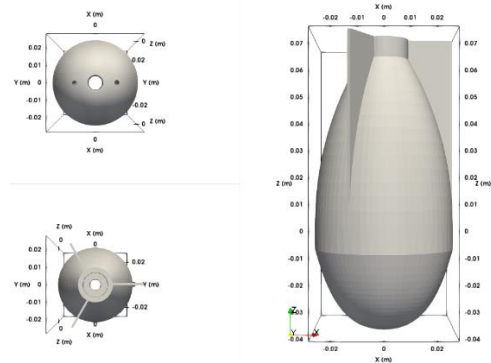


圖 1 T-6 型 XBT 之 3D 模型(長 5.2cm、寬 5.2cm、高 11.7cm)

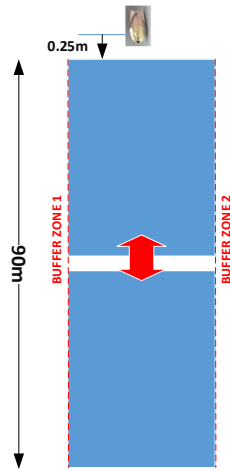


圖 2 數值模型配置示意圖(Inlet/Outlet)

## 2.2 模式驗證

在 2D 數值模式中，浮體的密度會與真實狀況不同，因此為驗證數值模式的準確性並獲得正確的密度值，本研究另建置一二維斷面水槽，深 60m、寬 1.5m 之深水槽，將一與 T-6 型 XBT 相同直徑(5.2 cm)之不鏽鋼球(相對密度 7.98，如圖 3)設置於水面上 25cm，初速度 11.109 m/s 向 -z 方向自由落下。

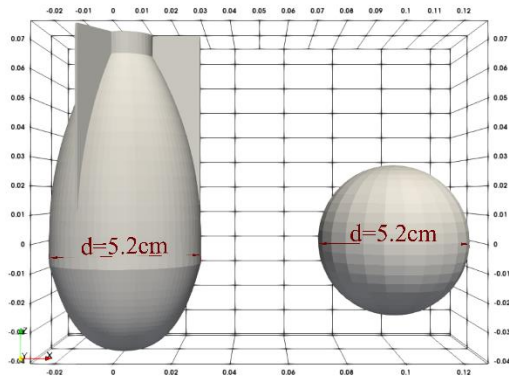


圖 3 T-6 型 XBT(左)與球體(右)模型比較

並於上述水槽測試相對密度 2 倍、2.5 倍、3 倍及 3.5 倍的不鏽鋼球。再將測試結果與終端速度  $u_t$  之理論公式做比較，如圖 4。其公式為：

$$u_t = \left( \frac{4}{3} \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \frac{gd}{Cd} \right)^{0.5} \quad (4)$$

其中  $\rho_p$  為球體密度、 $\rho_f$  為流體密度、 $g$  為重力加速度、 $d$  為球體直徑。而其中  $Cd$  為阻力係數，由 Morrison, F. A. (2013) 給出之 Morison equation 計算得知。圖 4 中可以看出，在 SPH 數值模式中球體的終端速度能夠達到推估的理論值，用於探討 T-6 型 XBT 之終端速度。

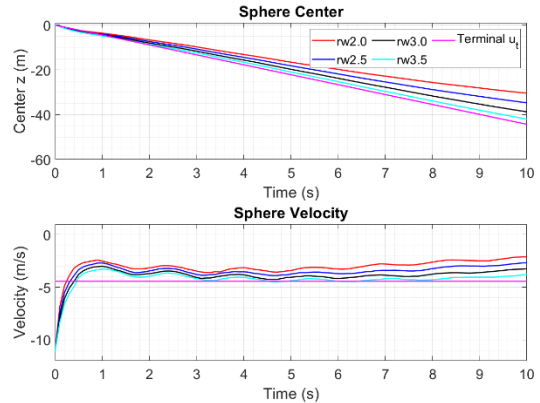


圖 4 不同密度球體之速度時序列與理論相較結果

## 2.3 固定與開放之邊界比較

初步測試的數值模型中，左右兩側之邊界是採用固定邊界，測試結果如圖 5(紅色線-)，測試結果中可以明顯看出接近底床時(約水下 60m 開始)下落速率明顯下降。初步猜想是因為 XBT 受水壓及水粒子擠壓邊界，使得 XBT 所受的阻力增加，造成速率下降。

為解決上述問題，本研究將原本的固定邊界改為 Inlet/Outlet 的開放邊界技術，採用 DualSPHysics 中的開放邊界求解，會在粒子流入或流出的區域創建緩衝層，在其中生成或刪除粒子，防止在邊界形成空隙，而緩衝區中粒子的物理量(速度及壓力)能夠強制執行使其流入或流出緩衝區，使粒子能夠自由的進出緩衝區。

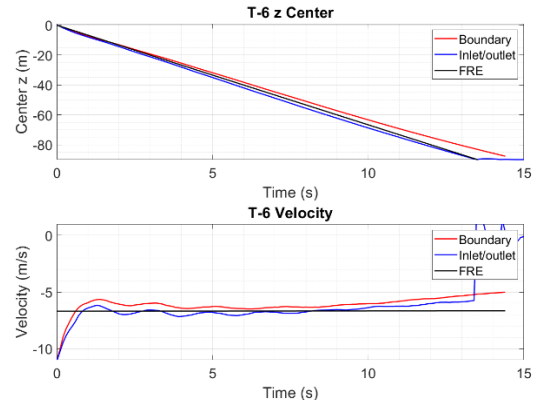


圖 5 T-6 終端速度計算結果與理論相較結果

使用 Inlet/Outlet 開放邊界後的測試結果如圖 5(藍色線-)。使用開放邊界後因為粒子不會受到邊界的擠壓，因此開放邊界相較於固定邊界(紅色線-)，XBT 所受的阻力有顯著的下降，使得 XBT 整體的

下落速率有明顯的提升，接近底床前速度的衰減幅度也有減少的趨勢。在終端速度方面，落水一段時間後有趨於穩定，也接近 Hanawa 等人(1995)提出的下降速率公式和終端速度(黑色線-)，由此可看出使用 Inlet/Outlet 開放邊界的方式之後，能夠使結果更貼近真實狀態。

## 2.4 數值參數設定

數值參數設定為數值模擬中最重要的一環，其設定將會大幅影響模擬結果，其中粒子間距  $dp$  會影響粒子總數，粒子數量越大就要耗費更多計算時間，但若粒子間距過長，將無法真實表現出物體的外觀(如圖 6)，因此該數值的選用非常重要。本研究之 SPH 數值參數如表 2 所示，考量物體外觀表現及平台硬體接受程度，也參考 2.2 節之浮體密度進行模擬。

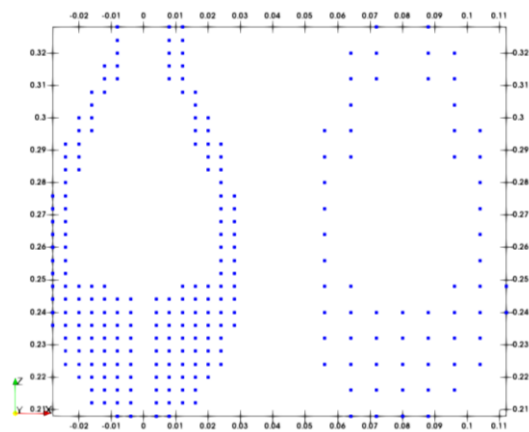


圖 6 不同  $dp$  值之物體粒子(左：0.4mm、右：0.8mm)

表 2 數值條件

粒子間距 $dp$ (m)	0.004
流體粒子數	8414626
緩衝層粒子數	30000
靜水深 (m)	90
浮體(XBT)相對密度	27.93
浮體粒子數	192
浮體質量(kg)	159.345
物理時間(s)	15
時間步長(s)	0.1
計算時間(hr)	151

## 三、結果與討論

### 3.1 XBT 下落時之流體運動

圖 7 為經過 ParaView 的可視化處理之速度分布時間歷程圖，圖中可以看出 XBT 下落時周遭流體之運動狀況。圖 8 為 T-6 型 XBT 之  $z$  方向位移及速度曲線(紅色線-)與 Hanawa 等人(1995)提出的下降速率公式曲線(黑色線-)之比較圖，圖中可以發現 SPH 之速度曲線前半段有明顯震盪的現象，直到後半段速度才趨於穩定。接近底床前雖然有 Inlet/Outlet 開放邊界，但還是有些微減速的現象發生，而觸底時間與下降速率公式觸底的時間幾乎相同。

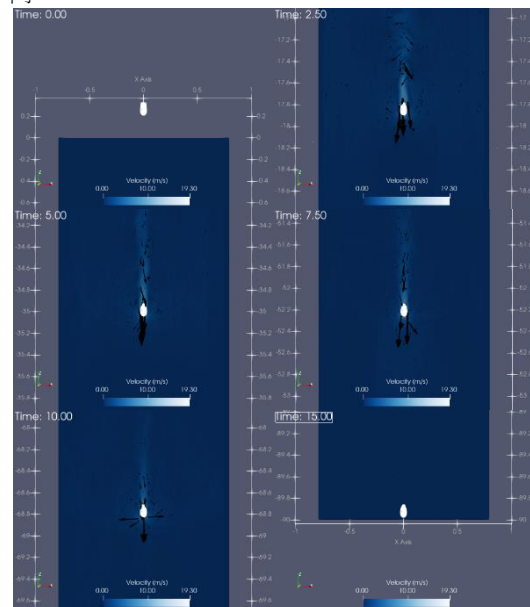


圖 7 T-6 型 XBT 下落時之速度分布

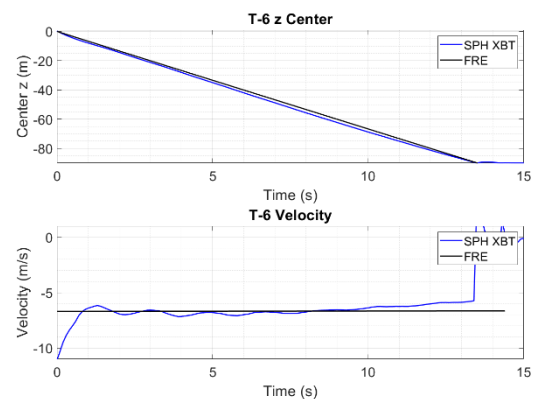


圖 8 T-6 型 XBT 之  $z$  方向位移及速度曲線

下圖 9 為 T-6 型 XBT 下落時之渦度分布，約在  $t=2.5s$  前後出現明顯渦街現象，該現象隨 XBT 下落而逐漸消失，將於 3.2 節詳細探討該現象。

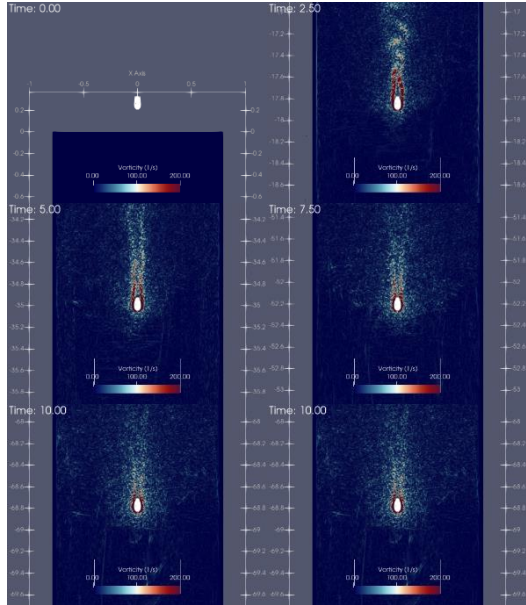


圖 9 T-6 型 XBT 下落時之渦度分布

### 3.2 卡門渦街頻率

本節針對球體與 T-6 型 XBT 進一步觀察，在落下時流體周遭出現明顯渦街(vortex street)，圖 9 顯示約在  $t=2.5s$  前後出現明顯渦街現象，為更清楚探討分析，圖 10 及圖 11 分別為 T-6 型 XBT 及球體更密時間觀察之。渦街間距大約落在 18 cm，依據渦街生成條件，流體流經一結構體時，流體從結構體兩側分離，形成交替的渦流。在交替渦流的作用下，結構體兩側之流體速度與壓力不同，會使結構體產生震動。震動的頻率由下式給出：

$$f = \frac{St \times V}{d}, \quad St \sim 0.2 \quad (5)$$

其中  $f$  為震動頻率， $V$  為流體速度， $d$  為結構體之迎面直徑， $St$  為斯特勞哈爾數(Strouhal number)。經計算，T-6 型 XBT 之振動頻率約落在 25 Hz，球體之振動頻率約落在 17 Hz。

為取得數值模擬之振動頻率，本研究將 T-6 型 XBT 及球體之  $x$  方向受力、 $z$  方向受力及總受力進行快速傅立葉轉換，取得其頻譜分析圖如圖 12 至 14 及圖 15 至 17。但上述頻譜圖因為本次數值模擬之取樣頻率僅 10 Hz，因此未能顯示出上述 T-6 型 XBT 約 25 Hz 及球體約 17 Hz 的振動頻率，盼未來能增加取樣頻率並針對該現象更深入探討。

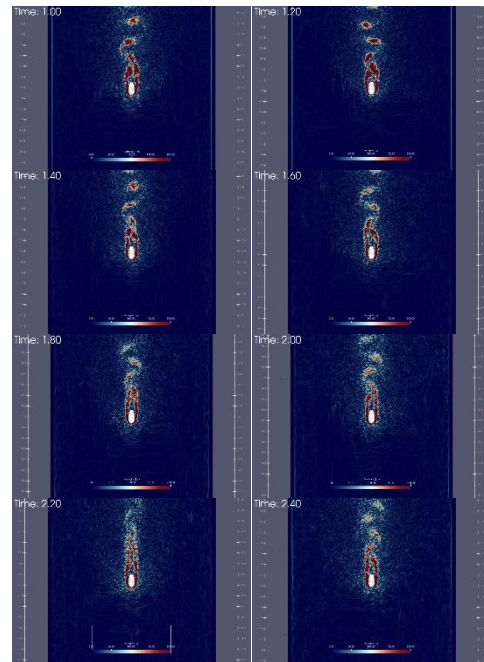


圖 10 T-6 型 XBT 之卡門渦街現象

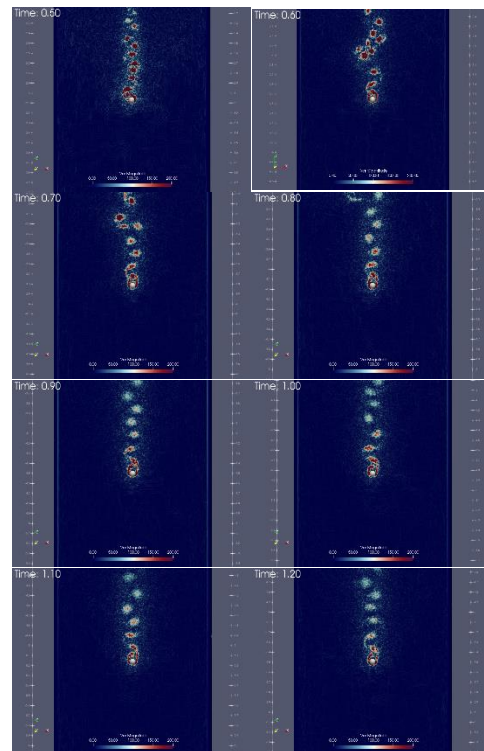


圖 11 球體之卡門渦街現象



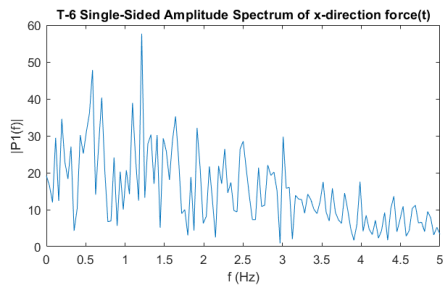


圖 12 T-6 x 方向受力之頻譜分析圖

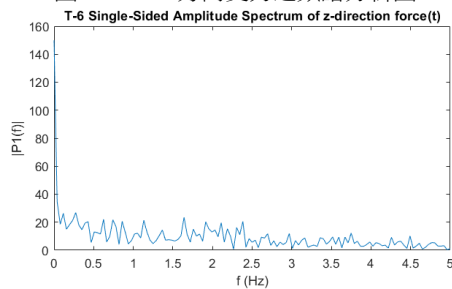


圖 13 T-6 z 方向受力之頻譜分析圖

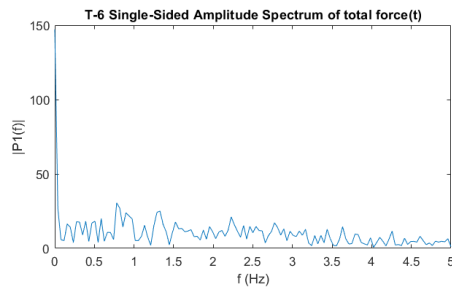


圖 14 T-6 總受力之頻譜分析圖

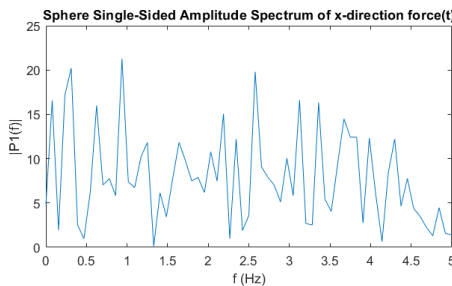


圖 15 球體 x 方向受力之頻譜分析圖

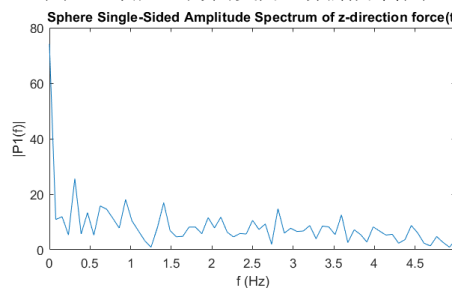


圖 16 球體 z 方向受力之頻譜分析圖

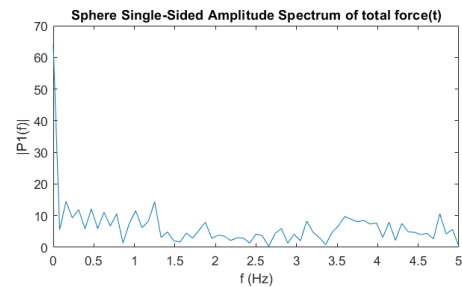


圖 17 球體總受力之頻譜分析圖

#### 四、結論與建議

本研究利用無網格方法中光滑粒子法探討理想狀態下 XBT 下降速率及終端速度的計算，並配合 GPU 加速運算平台提升計算能力，而根據上述研究結果可以，利用 SPH 之數值運算能夠貼近前人之研究結果，甚至能夠跟精細的表現出 XBT 下落時周遭的流體運動狀況。以下就研究結果整理出幾點建議以及未來的研究方向：

如 3.2 節提到，本次數值模擬之取樣頻率過低，未能在頻譜分析圖上得出明顯的結果，因此未來能夠增加數值計算的取樣頻率，並針對 XBT 下落時周遭流體的運動狀況更深入的探討。

本研究受限於現階段的硬體運算能力，僅在 2D 的維度進行運算，而 2D 在物體的描述上與 3D 的真實度相差甚遠，盼未來能夠結合多 GPU 運算平台，增強硬體運算能力，向 3D 的運算維度發展。

#### 參考文獻

1. 周士傑(2003)圓柱下游之卡門渦街流場數值模擬，逢甲大學土木及水利工程所碩士論文。
2. Hanawa, K., and T. Yasuda, 1992: New detection method for XBT depth error and relationship between the depth error and coefficients in the depth-time equation. *J. Oceanogr.*, 48, 221–230.
3. Hanawa, K., P. Rual, R. Bailey, A. Sy and M. Szabados (1995): A new depth-time equation for Sippican or TSK T-7, T-6 and T-4 expendable bathythermograph (XBT). *Deep-Sea Res.*, 42(8), 1423–1451.
4. Morrison, F. A. (2013) *An Introduction to Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, New York

# 基於視覺智能感知架構應用於自主水下載具之實現與驗證

余昭明<sup>1</sup> 林宇銜<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學系統及船舶機電工程學系  
<sup>2\*</sup> 國立成功大學系統及船舶機電工程學系副教授

## 摘要

科技部計畫：MOST 109-2221-E-006-100-MY2

本研究旨在利用自主水下無人載具(Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 導入具有深度學習能力的視覺感測系統,設計與建構一套「智能導引系統」(Intelligence Guidance System, IGS), 促使 AUV 將不再只受限於特定已知的識別特徵條件, 執行水下目標物體偵蒐任務。為驗證智能導引系統之功能, 本研究基於團隊自製研發的 Matlab AUV 中導入 IGS, 於國立成功大學系統及船舶機電工程學系穩定性能水槽及拖航水槽進行一系列試驗。在試驗過程中, 首先是以一系列的人造結構物作為識別基礎資訊進行影像校正、特徵強化以及類神經識別訓練, 並以紅色三角錐狀物體做為最終試驗之導引標的。智能導引系統可即時自艙艙攝影機取得連續影像進行 AUV 周邊環境視覺資訊之演算與識別, 藉由獲取標的於 AUV 視覺座標影像座標資訊映射到大地座標, 進而定義標的物體與 AUV 間的距離及方向角, 計算與控制 AUV 航速與航向, 實現本研究提出之基於視覺智能感知架構之自主水下載具導航與運動控制。

關鍵詞：自主水下載具、AUV、智能載具、視覺導航

## Implementation and Verification of Vision-based Intelligent Autonomous Underwater Vehicle

Chao- Ming Yu, Yu-Hsien Lin\*

Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering, National Cheng Kung University

\* Associate Professor, Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

In this study, an autonomous underwater vehicle (AUV) was used in the construction of an intelligent guidance system (IGS) that executes missions involving the identification and tracking of underwater target objects. To verify the IGS functions, a series of tests were conducted in the stability tank and towing tank of the Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering at National Cheng Gung University, Taiwan. First, image revision, feature enhancement, and neural network training were conducted using identification based on information from a series of man-made structures; subsequently, a red pyramid was used as the guidance target in the final experiments. The IGS was able to capture real-time images from the bow camera to calculate and identify visual information concerning the AUV's surroundings. By mapping the target's AUV visual coordinates system (two-dimensional) information onto the earth-fixed coordinates (three-dimensional), the corresponding distance and directional relationship between the target and the AUV were defined. This information

was used to calculate the control parameters of the AUV's speed and heading, completing the visual motion control framework.

Keywords: Autonomous Underwater Vehicle; AUV; Intelligence; Visual Navigation

## 一、前言

海洋地形與地貌測繪、長期海底資源調查、高經濟價值水域環境評估、汙染源追蹤監測、海洋生物棲地追蹤以及深海基礎設施與管線檢查等海洋資源探勘任務，常以被動感測元件進行搭配應用，例如聲學、光學與化學感測元件。在海洋執行探測任務時，經常存在耦合樣態以及許多無法預先定義的探測環境條件，當使用被動元件作為感測元件時，常會造成探測任務完整度不足的問題，導入視覺化感測元件是一個提升海洋探測任務與應用資訊完整度的重大進程。

許多研究中使用視覺感測來作為提升探測感知的應用於人造水下結構物之檢測[1-5]。Fan and Balasuriya [6]提出使用 CCD 攝影機進行光流法演算進行目標物追蹤。Kim, et al. [7]提出使用視覺影像進行目標識別檢查，採用明顯區別於環境色彩的物體進行測試。HORIMOTO, et al. [8]提出使用影像進行海龜的識別與棲息追蹤。Balasuriya, et al. [9] 使用單顆攝影機與聲學傳感器計算水下電纜在三維空間中之相對位置計算水下電纜的相對距離。Foresti [10] 採用視覺系統重建了三維環境資訊進行定位執行管道檢測。許多研究建構在目標物的條件與特徵必須在系統中預先明確標定，然而在多數的海洋環境中預先制定的條件與特徵經常因為環境影響(如光強度、濁度或陰影遮蔽等)而出現異變，造成目標預定特徵無法被正確識別導致誤判。

本研究實現智能自主水下載具，藉由導入具有深度學習能力的視覺感測系統智能地衍生出相似判斷，使特徵條件不再只受限於已知的輸入條件提高特徵辨識能力，更可降低海洋環境影響所導致的特徵資訊異變的誤判。

## 二、研究方法

本研究將智能演算系統導入團隊自行研發製作的自主水下載具(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)，設計一套「智能導引系統」(Intelligence Guidance System, IGS)，執行水下目標物體的識別與

運動控制，構成智能自主水下載具導引系統。

本團隊自行設計研發製作之 AUV(如圖 1 所示)，主要區分為三個部份:艙艙、控制艙及艙艙，以具有視覺功能之魚雷型 AUV 設計，在艙艙搭載了廣角及雙眼影像攝影模組以及環形 LED 光源;控制艙區為平行艙艙設計，配置有姿態航向參考系統、通訊裝置、電源管理模組、運動驅動與控制模組及主控制器等;艙艙提供載具之運動驅動力，使用四組分時獨立方向舵機，可達成俯仰(Pitch)、偏擺(Yaw)以及橫搖(Roll)的運動方向，推進器採用直流無刷馬達搭配四葉螺槳提供前進動力。

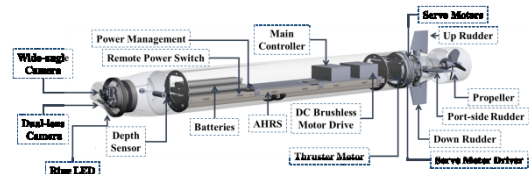


圖 1 Matlab AUV 外型及功能模組

由於水中影像受環境干擾的影響範圍變動大，若採用單一影像辨識技術常容易受環境干擾而導致誤判[11]。例如，顏色辨識法受環境光源的動態變化使物體顏色的表現會因光譜被水吸收呈現色彩鈍化。此外，特徵點辨識計算方法受雜訊影響導致資訊量不足而難以辨識目標特徵，尤其在混濁或昏暗水域環境下將難以使用。而在類神經識別演算的高複雜度辨識方法中，由於其高運算量必須消耗龐大的系統資源，在中小型 AUV 類別的能源精省系統中將難以負擔。

本研究提出之 IGS AUV 基於視覺識別處理技術使用即時影像作為輸入資訊，是以導入 Mask R-CNN 類神經網路為基礎、辨識特徵點與顏色辨識，三種辨識方法整合而成。擷取特徵點計算將影像運算縮小範圍，將色彩辨識方法引入 Mask R-CNN 中，提高類神經網路辨識結構能力且降低辨識延遲時間。自 AUV 艙艙攝影機取得連續影像進行視覺訊息識別與演算，使用 Mask R-CNN 類神經網路搜尋目標物特徵資訊進行精確框定，同時 Mask R-CNN 的 ROI Align 程序計算目標物體在畫面中位置、形心與 AUV 影像座標中心之誤差值。經過船艙座標系統與

大地座標系統之間的轉換對應關係，藉由定義目標物與 AUV 之間的距離及方向角對應關係，計算航速與航向之控制參數進行 AUV 平擺角( $B_N$ )、俯仰角( $B_M$ )與推進器轉速( $P_S$ )的控制，完成視覺化運動控制架構，實現智能自主水下載具。本研究之智能導引系統流程與架構圖，如圖 2 所示。

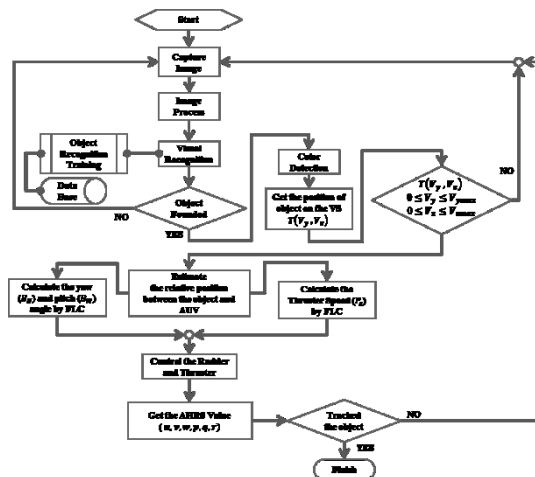


圖 2 智能導引系統(IGS)架構流程圖

## 二、實驗規劃與設置

為驗證智能導引系統之功能，於國立成功大學系統及船舶機電工程學系穩定性能水槽及拖航水槽進行一系列試驗。在試驗過程中，以人造結構物作為識別基礎資訊進行影像校正、特徵強化以及 Mask R-CNN 類神經網路識別訓練，最後以一紅色三角錐狀物體做為最終試驗之導引標的進行不同動態速度實驗，實驗環境如圖 3 所示。

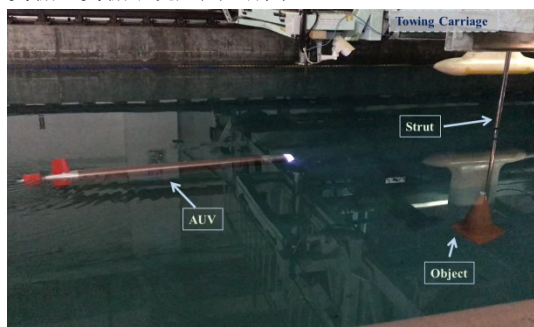


圖 3 動態實驗環境

實驗步驟說明如後。步驟一：視覺識別係數調校。實驗中，初始條件設定為 AUV 攝影機可以觀察到導引目標物體的距離(約 2m)，開啟輔助光源並測試視覺識別能力。使用在靜態試驗第二階段獲得的識別物體之資料庫進行物體識別，並在池化層中得

到顏色區間，再利用高通與低通濾波器濾除極端色彩，然後在程式中調整顏色辨識演算法所需 HSV 值。由於拖航水槽環境較穩定性能水槽更為昏暗，且識別物體置放的深度達 1.5m，因此色彩偏差範圍會更為劇烈。特別一提的是，本研究在動態實驗過程中不再於拖航水槽環境中做識別資料庫的補充，而是使用靜態試驗中訓練完成的資料庫做為基礎。另外，動態實驗只調整顏色辨識演算法的 HSV 範圍而完成測試，由此可見 IGS 的環境高適應性。IGS 可以計算得到導引物體位於 AUV 影像範圍中的形心座標值  $T(V_y, V_z)$ 。

步驟二：載具運動控制係數調校。利用攝影機校正後所得到視覺座標之最大範圍 ( $V_{y,max}, V_{z,max}$ )，接著進行模糊邏輯控制測試。例如，當導引物體出現在視覺座標  $T(V_y)$  的定義區域中央時，AUV 平擺角 ( $B_N$ ) 應為 0 度；當導引物體出現在視覺座標的  $T(V_z)$  的定義區域中央時，AUV 俯仰角 ( $B_M$ ) 應為 0 度，且 AUV 的推進器轉速 ( $P_S$ ) 此時應保持為原轉速。若有舵機硬體組裝上所造成的角度差，則可由程式進行細微調整。而利用靜態試驗中所得到的推進器轉速與速度的關係，可於程式中設定推進器最大與最小轉速值。

步驟三：卡爾曼濾波器係數調教。實驗中加入卡爾曼濾波器後，可利用當前目標物與 AUV 相對運動之記錄數據，預測出下一步之相對移動模式，搭配即時影像讀取且辨識到之目標物位置，加權計算驅動之控制參數。為了確保參考之過往紀錄數據足夠，實驗前 5 秒鐘不進行預測計算，而是在實驗 5 秒後啟動預測結果及實際偵測結果之整合計算。

步驟四：進行識別物體安全距離設定與動態測試。完成上述步驟一到步驟三後，將進行動態實驗以測試 IGS。設定拖航台車 (Towing Carriage) 提供 0.3 m/s、0.4 m/s、0.5 m/s 三種穩定移動速度，使導引物體分別以 0.3 m/s、0.4 m/s、0.5 m/s 速度在 AUV 前方移動。AUV 經 IGS 即時識別物體進行載具自主航控，同時將記錄 AHRS 資訊以進行後續分析。

## 三、驗證結果與分析

實驗數據結果如圖 4 至圖 36 顯示，本研究提出之智能自主水下載具完整實現並執行動態導引實驗，詳細數據說明如後。圖 4 呈現在設定 AUV 與識別

物體之最小安全距離為 1.8 m 的情況下視覺座標實驗數據，結果發現識別物體均維持在視覺座標  $T(u, v)$  所定義的區域範圍內，表示 IGS 確實可將 AUV 控制在與識別物體維持在安全距離以內，其中視覺座標中心點為  $(V_{y,c}, V_{z,c})$ 。

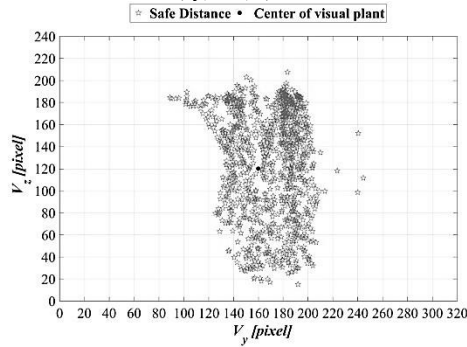


圖 4 動態識別實驗於視覺座標記錄

動態導引實驗分別進行 0.3、0.4 以及 0.5 m/s 的目標物體移動速度驗證試驗，實驗過程紀錄 AHRS 數據與影像計算等資訊。其中，以 0.5 m/s 移動速度實驗數據進行說明。如圖 5(a)-(f) 呈現導引目標物體以 0.5 m/s 速度移動，動態導引實驗結果數據，依序為導引目標物在載具視覺座標系統的位移軌跡與大地座標系統的關係(圖 5a)；目標物在載具視覺座標系統 Y 軸與 AUV 在船體座標系統平擺角的時序列(圖 5b)；導引目標物在載具視覺座標系統 Y 軸與 AUV 垂直舵板的時序列(圖 5c)；導引目標物在載具視覺座標系統 Z 軸與 AUV 在船體座標系統俯仰角的時序列(圖 5d)；導引目標物在載具視覺座標系統 Z 軸與 AUV 水平舵板的時序列(圖 5e)；導引目標物在載具視覺座標系統的面積大小與 AUV 推進器轉速的時序列(圖 5f)。

由圖 5(a) 的結果可發現，除了最後階段因拖航台車開始減速造成位移軌跡起伏較大以外，導引目標物體在實驗過程中皆控制在視覺座標  $T(V_y, V_z)$  所定義的區域範圍內。圖 5(b) 顯示導引目標物在載具視覺座標系統 Y 軸和 AUV 在船體座標系統平擺角的趨勢一致，代表 IGS 可即時追蹤導引目標物體在水平面的運動變化情形。圖 5(c) 呈現導引目標物在載具視覺座標系統 Y 軸和 AUV 垂直舵角的變化情形幾乎同步，表示 IGS 可即時反應載具視覺座標系統 Y 軸的變化情形。圖 5(d) 顯示導引目標物在載具視覺座標系統 Z 軸和 AUV 在船體座標系統俯仰角的趨勢一致，代表 IGS 也可即時追蹤導引目標物體

在垂直面的運動變化情形。圖 5(e) 呈現導引目標物在載具視覺座標系統 Z 軸和 AUV 水平舵角的變化情形幾乎同步，表示 IGS 可即時反應載具視覺座標系統 Z 軸的變化情形。圖 5(f) 顯示 AUV 推進器轉速與導引目標物體的面積變化的趨勢極為接近，表示 AUV 推進器轉速可即時反應載具視覺座標系統之面積變化情形。

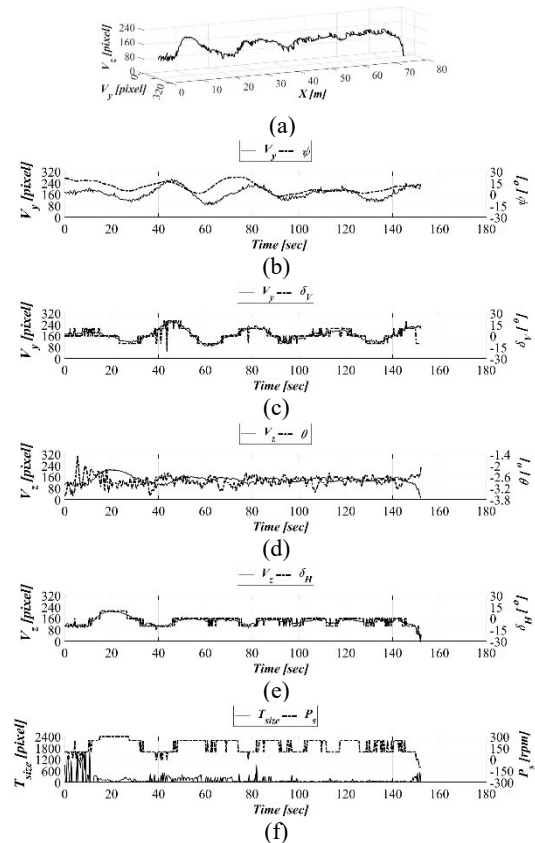


圖 5 在拖航速度 0.5m/s 的情況下所進行的動態導引實驗：導引物體在(a)視覺座標之位移軌跡；(b)視覺座標 Y 軸與 AUV 平擺角之時序列；(c)視覺座標 Y 軸與 AUV 垂直舵角之時序列；(d)視覺座標 Z 軸與 AUV 俯仰角之時序列；(e)視覺座標 Z 軸與 AUV 水平舵角之時序列；(f)視覺座標面積大小與 AUV 推進器轉速之時序列

圖 6-8 顯示動態導引實驗在拖航速度 0.3、0.4 及 0.5 m/s 的情況下，識別物體形心點與視覺座標系統中心點差值之長條圖及其高斯分佈曲線。由  $V_y - V_{y,c}$  的統計結果(如圖 6a、7a 及 8a 所示)可以得到平均值分別為 18.53、13.31 及 9.97 pixel，而其標準偏差則為 29.15、31.13 及 38.88 pixel。另外，從  $V_z - V_{z,c}$  的統計結果(如圖 6b、7b 及 8b 所示)可以得到平均值分別為 23.39、30.59 及 21.34 pixel，而其標準

偏差則為 26.73、28.39 及 26.59 pixel。由上述結果可以發現， $V_y - V_{y,c}$  的平均值會隨著拖航速度增加而變小；然而，標準偏差卻有變大的情況發生。這是因為 AUV 在追蹤動態目標物的過程中，在低速的條件下相較於高速的條件下容易穩定控制目標物於安全距離內，然而卻也造成平擺角的即時修正較為緩慢。另一方面，實驗結果指出動態目標物的移動速度對於  $V_z - V_{z,c}$  的平均值與標準偏差影響不大，而是與目標物面積變化的關係較為密切，因此造成俯仰角的即時修正影響甚微。

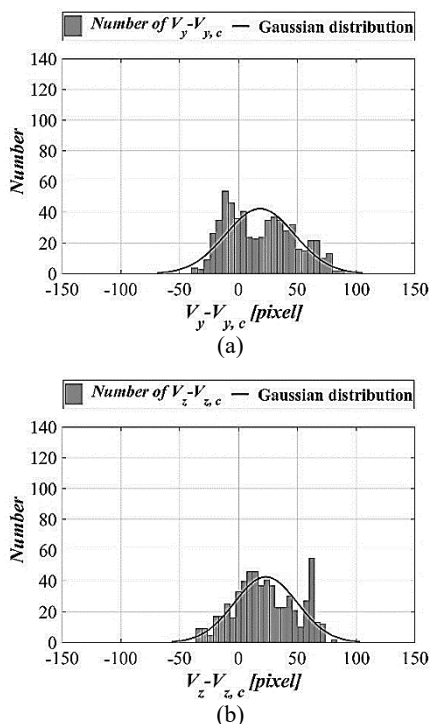


圖 6 動態導引實驗在拖航速度 0.3 m/s 的情況下之統計分佈情形:(a)標記物體形心點水平軸數值與視覺座標系統水平軸中心點差值;及(b)標記物體形心點垂直軸數值與視覺座標系統垂直軸中心點差值

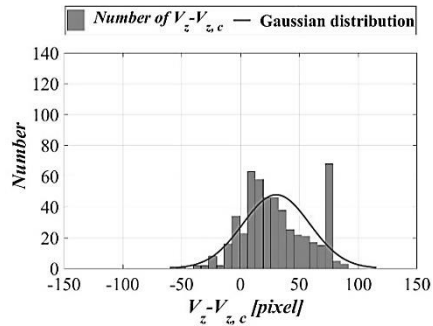
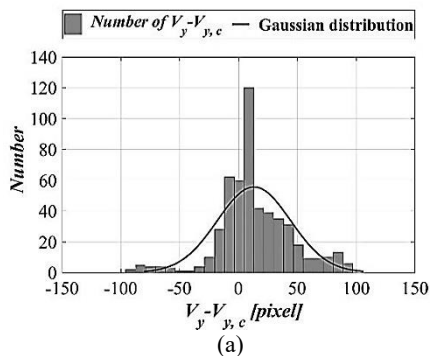


圖 7 動態導引實驗在拖航速度 0.4 m/s 的情況下之統計分佈情形:(a)標記物體形心點水平軸數值與視覺座標系統水平軸中心點差值;及(b)標記物體形心點垂直軸數值與視覺座標系統垂直軸中心點差值

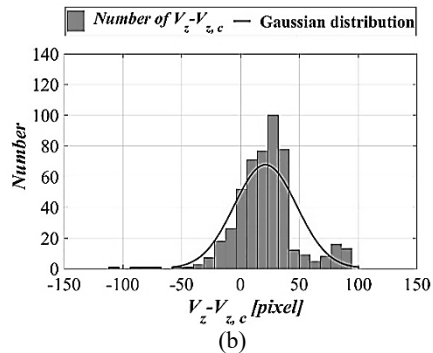
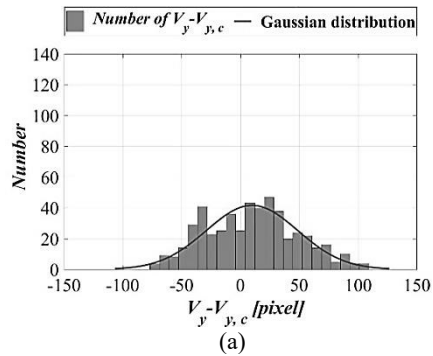


圖 8 動態標記導引實驗在拖航速度 0.5 m/s 的情況下之統計分佈情形:(a)標記物體形心點水平軸數值與視覺座標系統水平軸中心點差值;及(b)標記物體形心點垂直軸數值與視覺座標系統垂直軸中心點差值

#### 四、結論

本研究以即時影像數據演算為基礎，提出一種基於類神經辨識之識別追蹤運動控制系統，並在自行開發的 Matlab AUV 中實現了一套智能導引系統自主水下載具(IGS AUV)，未來將基於視覺識別與

導航技術應用於水下環境。視覺識別控制的優點是能夠立即計算周邊環境信息，不必預先製作與複雜的模板條件作為判斷及控制參數，易於實現 AUV 在任務期間執行可變動之動態識別與標記應用程序。

本研究透過視覺座標(Visual Coordinate)與透視投影(Perspective Projection)標定大地座標系統中導引標記物體於視覺座標之位置，經 Mask R-CNN 獨特的 ROI Align 程序，快速計算出導引物體和 AUV 之距離和方向的對應關係，融合特徵辨識與顏色辨識方法得以在貧瘠的類神經識別數據資料庫中快速識別，緩解水下環境之影像干擾、提供識別之穩定性，突顯出 IGS 的高適應特性。

最後，實際在拖航水槽試驗整合後的 IGS 操縱性能表現，在 0.3、0.4 與 0.5 m/s 的拖航速度下，成功地驗證了視覺識別與導航技術對於舵和螺旋槳的自主動態控制。

## 謝誌

本文係科技部專題研究計畫 (編號 MOST 109-2221-E-006-100-MY2) 之相關研究成果，承蒙科技部提供研究上相關支持。

## 參考文獻

1. J. O. Hallset, "Simple vision tracking of pipelines for an autonomous underwater vehicle," in *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991: IEEE, pp. 2767-2772.
2. A. Balasuriya and T. Ura, "Vision-based underwater cable detection and following using AUVs," in *OCEANS'02 MTS/IEEE*, 2002, vol. 3: IEEE, pp. 1582-1587.
3. A. V. Inzartsev and A. M. Pavin, "AUV cable tracking system based on electromagnetic and video data," in *OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, 2008: IEEE, pp. 1-6.
4. D.-j. Li, Y.-h. Chen, J.-g. Shi, and C.-j. Yang, "Autonomous underwater vehicle docking system for cabled ocean observatory network," *Ocean Engineering*, vol. 109, pp. 127-134, 2015.
5. Z. Zhou *et al.*, "Autonomous Underwater Pipeline Tracking Control Based on Visual Images," in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2018: IEEE, pp. 2101-2106.
6. Y. Fan and A. Balasuriya, "Optical flow based speed estimation in AUV target tracking," in *MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 01CH37295)*, 2001, vol. 4: IEEE, pp. 2377-2382.
7. D. Kim, D. Lee, H. Myung, and H.-T. Choi, "Object detection and tracking for autonomous underwater robots using weighted template matching," in *2012 Oceans-Yeosu*, 2012: IEEE, pp. 1-5.
8. H. HORIMOTO, M. Toshihiro, K. KOFUJI, and T. ISHIHARA, "Autonomous Sea Turtle Detection Using Multi-beam Imaging Sonar: Toward Autonomous Tracking," in *2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV)*, 2018: IEEE, pp. 1-4.
9. B. Balasuriya, M. Takai, W. Lam, T. Ura, and Y. Kuroda, "Vision based autonomous underwater vehicle navigation: underwater cable tracking," in *Oceans' 97. MTS/IEEE Conference Proceedings*, 1997, vol. 2: IEEE, pp. 1418-1424.
10. G. L. Foresti, "Visual inspection of sea bottom structures by an autonomous underwater vehicle," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 31, no. 5, pp. 691-705, 2001.
11. R. Schettini and S. Corchs, "Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2010, pp. 1-14, 2010.

# 運用多角度反射係數進行實海域海底沉積物性質分析初探

黃滄介<sup>1</sup> 邱永盛

<sup>1</sup>國立中山大學海下科技研究所

## 摘要

科技部計畫：MOST 109-2623-E-110-001-D; 110-2218-E-110-008; 110-2218-E-110-010

在海洋工程應用中，海床結構與物理特性是相當重要的一環，且對於海上施工與海上結構物穩定度均有關鍵影響，因此提升海床土層結構與參數之探測技術是國際上海洋工程技術之發展重點之一。由於傳統岩心採樣及底質鑽探需耗費大量的時間及資源，更對表層沉積物造成破壞，因此水中聲學遙測技術成為海床沉積物探測之有效配套措施。

本研究之目的為探討運用多角度聲學反射係數進行海床沉積物性質分析之可行性與準確性，研究方法包含聲學反射模擬與實海域量測分析。首先透過 Brekhovskikh(1980)所使用的多路徑分析法及 Lindsay(1972)所提出的反射係數估算技術，模擬不同聲波反射角度與沉積物性質所造成之反射係數變化，進而透過多角度反射係數分析海底沉積物之性質。在實海域量測分析部分，本研究團隊位於 2020 年 10 月於台灣西南海域針對水深 250 公尺沙地進行量測，藉由錨定的方式掛載水下錄音機，並且拖曳本實驗室自主研發的水下載具進行 3-7kHz 的線性掃頻訊號拍發，以量測並分析多角度聲學反射回波強度。研究成果顯示在多角度聲學反射係數中可明顯觀察到砂質海床之全反射的特性，透過全反射角之分析可估算海床沉積物參數；透過海床表層沉積物樣本分析結果，發現全反射角之量測可用於準確估算海床參數，證實了本聲學遙測技術之可行性與準確性。

關鍵字:多角度反射係數、全反射角、台灣西南海域、海床底質參數

## A Preliminary Study on Using Wide-Angle Acoustic Reflections in Geoacoustic Inversion

Cang-Jie Huang Linus Chiu\*

\* Associate Professor, Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

## ABSTRACT

In ocean engineering application to determine sediment structure and surficial material is very crucial. This manuscript is to obtain geoacoustic parameters using wide angle reflection coefficient. The experiment was conducted in Oct. 2020 in Taiwan bank and passive acoustic array mooring was deployed, listened to the tow acoustic active source. The LFM signal of bandwidth 3-7kHz was used in experiment. The range of over 1km acoustic track was obtained to collect wide angle reflection coefficients. The future work is to obtain geoacoustic inversion by using wide angle reflection coefficient and matched field processing.

Keywords: multi-angle reflection coefficient; total reflection angle; southwestern Taiwan waters; seabed bottom parameters



## 一、緒論

台灣是四周環海的島嶼國家，海洋本身為相當重要的資源，近年來隨著海洋工程的發展，精確的得知海底地沉積物的性質重要性日益增加。過去探測底質的方式主要使用岩心採樣及底質鑽探等技術，此類技術在採集樣本的同時會破壞底床表面的沉積物，這會影響海底的生態及樣本的準確性，為了解決此類問題人們研發水下技術去探討研究底床的性質，其中一項便是使用水中聲學的方式來得知底床的特性。現今使用聲納進行聲學探測海底沉積物已經行之有年，如陳(2015)和黎(2016)都對底床垂直反射強度進行探討，並發現孔隙率、密度的改變都會影響反射強度變化。

唐(2019)指出海底的淘刷與海底工程的穩定性有關，其影響參數包括聲速以及密度，為了得知底床更精確的數值，根據 Lindsay(1972)所提出反射係數理論估算技術得知透過多角度的方式，可以反算出底床的聲速及密度，因此本研究利用 2020 年於台灣西南海域量測到的聲學資料，探討多角度反射係數於海床參數反算之運用成效，並與正向反射係數結果進行比較。

## 二、理論分析

### 2.1 反射係數計算

本研究依據 Lindsay(1972)所提出的反射係數估算技術，定義如式(1)所示

$$R = \frac{m \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{m \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

根據此理論得知聲音以不同角度入射海床，將呈現不同的反射強度，其中  $n = c/c_1$ ， $m = \rho_1/\rho$ ， $c_1$  為底質之聲速、 $\rho_1$  為底質密度、 $c$  為水中聲速、 $\rho$  為水的密度，藉由式(1)可繪出圖 2-1，其中圖 2-1(左)為聲波自高聲速入射低聲速且密度較小介質之多角度反射係數曲線；圖 2-1(中)為聲波自高聲速入射低聲速慢且密度較介質之多角度反射係數曲線；圖 2-1(右)則為聲波自低聲速入射高聲速且密度大介質時之多角度反射係數曲線。

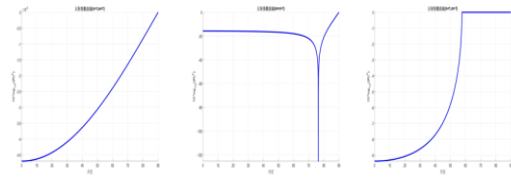


圖 2-1、反射係數圖( $n > 1$ 且 $m < 1$  水到空氣介面(左)、 $n > 1$ 且 $m > 1$  水到黏土介面(中)、 $n < 1$ 且 $m > 1$  水到沙介面(右))

透過多角度反射係數曲線之計算與比對，可更進一步可以推算出表層底質聲速以及密度。舉例來說，在固定聲速之條件下，將不同密度代入式(1)便可得到如圖 2-2(左)之結果，同樣的在密度固定時，改變聲速代入式(1)便可得到圖 2-2(右)之結果。通過此曲線圖可以看出在不同角度下能量變化的曲線，由圖中可以看到不同的參數對於反射係數的反應敏感度不同，在低角時密度變化較大，而在高角度的部分聲速對底質影響較強烈，藉此方式將聲速與密度分離並反算出地質特性。本研究設計實驗如圖 2-3 所示，以拖曳載具的方式可以得到在不同角度下的能量強度，藉此分析波速及密度。

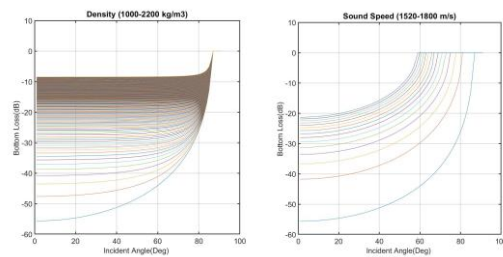


圖 2-2 反射模擬曲線圖

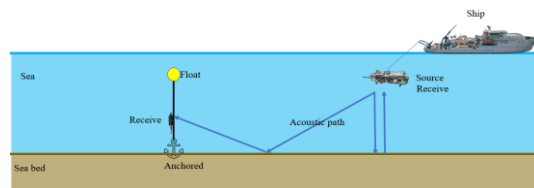


圖2-3 實驗設計

### 2.2 多路徑效應分析

根據上述的研究設計，可以得知不同角度下聲場能量會有不同，為掌握船移動時聲場反射角度的變化為何，本研究使用多路徑分析法，來計算載具在不同位置時的拍發接收角度。

#### 2.2.1 聲學路徑演算

根據 Brekhovskikh (1980)提出當聲音傳遞至介

質時，聲場會如同光線照射於鏡面上，一個實體源位置一個虛擬源位置，而從虛擬源位置所繪出的直線繪與反射路徑等長，如圖 2-4 所示，假設底床與水面為平面， $r_{gps}$  為船載 GPS 與接收源的水平距離， $z$  為接收源深度， $z_0$  為拍發源深度， $h$  為水深，首先底床當作鏡面將發射源鏡像於底床之下，假想聲源便會落於  $2h - z_0$  處；以同樣的當方式鏡像於水面之上，可以得到  $-z_0$  處

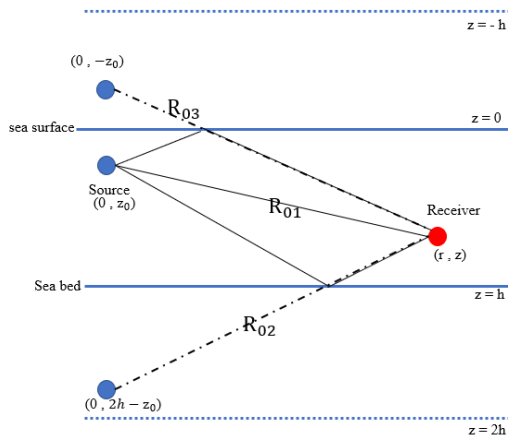


圖2-4 反射曲線圖

通過此方式可以得到式(2)  $R_{01}$  直達波、式(3)  $R_{02}$  水底反射、式(4)  $R_{03}$  水面反射路徑長

$$R_{01} = \sqrt{r_{gps}^2 + (z - z_0)^2} \quad (2)$$

$$R_{02} = \sqrt{r_{gps}^2 + (z + z_0 - 2h)^2} \quad (3)$$

$$R_{03} = \sqrt{r_{gps}^2 + (z + z_0)^2} \quad (4)$$

此式用已計算不同距離拍發的聲音，於不同聲學路徑並可根據球型擴散理論得到此訊號的傳輸損耗，此理論會於 2.3 節進行更深入的探討。

### 2.2.2 角度

為了得知底床反射的角度，本節透過 2.1.1 節的作法，將接收源鏡像於底床以下如圖 2-5 所示，並將每個點的相連其距離表示為式(5)、(6)、(7)

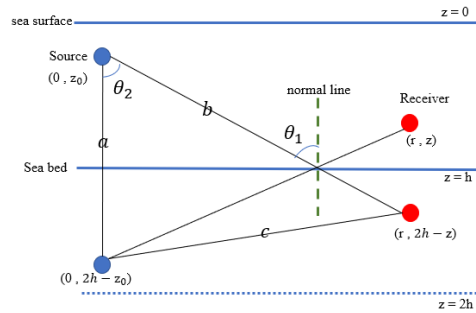


圖2-5 聲學路徑模擬圖

$$a = \sqrt{(2h + 2z_0)^2} \quad (5)$$

$$b = \sqrt{r_{gps}^2 + (z_0 - 2h + z)^2} \quad (6)$$

$$c = \sqrt{r_{gps}^2 + (-z_0 + z)^2} \quad (7)$$

通過知道此三點之距離，透過餘弦定理(式 8)，可得知 a 與 b 的夾角，接著由於 a 與海床垂直且法線與海床垂直，故 a 與法線相互平行，所以  $\theta_2 = \theta_1$ ，由此可推算出聲音的發射角度以及傳遞至底床的反射角度。

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left( \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \right) \quad (8)$$

### 2.3 反射強度計算

本次實驗於實海域進行聲學實驗，由於海洋狀態每時每刻都在變化如地形、溫度等，因此採用瞬間電壓的意義不大，故會採取一段時間進行均方根，得到平均聲壓值並表示為式(9)， $P(t)$  為瞬時聲壓， $t$  為時間， $T$  為聲壓間格的時間，其中  $T$  的範圍取決於波束寬的大小。由於此數值變動範圍之大，使其不易觀察，為了更清楚的觀察變化，會將得到數值成取對數並乘上 20 如式(10)所示， $P_{ref}$  為參考聲壓。

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot T} \int_{t_0-T}^{t_0+T} [P(t)]^2 dt} \quad (9)$$

$$P = 20 \log_{10} \left( \frac{p_{rms}}{P_{ref}} \right) \quad (10)$$

聲音在傳遞的過程中會產生損耗，根據聲學球型擴散理論，損耗強度與距離成反比關係，因此可寫成式(11)， $r$  為總距離

$$TL = 20 \log_{10}(r) \quad (11)$$

由於本次採用的聲納系統並非全像性，聲音會因為拍發角度不同，而有不同的能量產生，這會導致在反算地質反射時會有誤差產生，因此會加入波束 (beam pattern) 進行計算，本次使用儀器之波束圖將於 3.2 進行深入探討並命名為  $DI(\theta)$ ，其中  $\theta$  為拍發角度。

最後將以上各式進行整理後，可得到式(12)，其中  $SL$  為直接到達接收源之能量， $TL_d$  為直達波行進所產生能量損耗， $DI(\theta_d)$  為直達波之拍發角度， $TS$  為底床反射波到達接收源之能量， $TL_b$  為底床反射波行進所產生能量損耗， $DI(\theta_b)$  為底床反射波之拍發角度，由此可推算出底床反射時所產生的損耗  $P_{BL}(r, \theta_d, \theta_b)$ ，藉此推算出底床的性質。

$$P_{BL}(r, \theta_d, \theta_b) = -(SL + TL_d - DI(\theta_d)) + (TS + TL_b - DI(\theta_b)) \quad (12)$$

### 三、 實驗過程

#### 3.1 實驗地點

本次實驗是 2020 年 10 月 17 號以勵進研究船於台灣西南海域進行，其實驗地點如圖 3-1(左)所示，橘框內為本實驗海域。此次實驗共分為兩條側線東西向及南北向如圖 3-1(右)所示，其中東西走向之實驗時間為台灣時間早上 11 點 04 分至 11 點 22 分，紅色測線為東西走向測線，紅色圓形為側線起始點；南北走向之實驗時間為台灣時間下午 15 點 40 分至 16 點 23 分，藍色測線為南北走向測線，藍色圓形為側線起始點；圖中藍色星號為本實驗錨碇佈放位置。

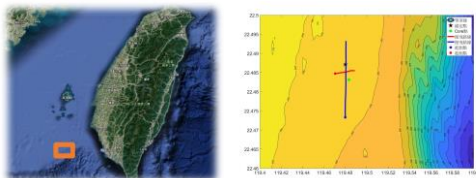


圖3-1 實驗海域位置

#### 3.2 實驗設備及配置

本次實驗使用本團隊所研發的「拖曳式主被動聲納系統」(如圖 3-2)，其上掛載包含:(1)中低頻水下換能器、(2)水聽器、(3)溫壓紀錄儀等儀器，用

於音訊傳輸及底質探測使用。本次系統中所使用的拍發換能器為 TR208，聲音大小會因為角度的不同而改變；實驗接收的部分本次實驗使用 ITC 所生產的水聽器 1032，其圓形結構可提供全向性的接收使用。圖 3-3 為量測系統之架構圖，量測過程之接收訊號範例如圖 3-4 所示。



圖3-2 AIO拖曳載具

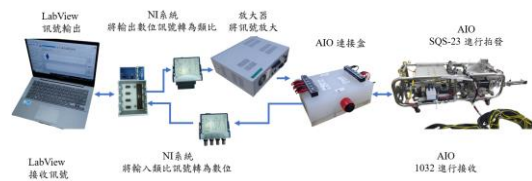


圖3-3 系統流程圖

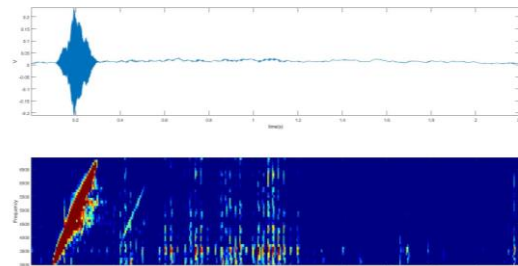


圖3-4 結果頻譜圖



圖3-5 實驗佈放過程圖

為了計算聲學多路徑效應，載具所在深度是非

常重要的資訊，本研究於載具掛載 SBE39。其接收結果分為東西走向及南北走向，拖曳載具所在深度平均約為 54 公尺左右。

### 3.3 儀器佈放

本次實驗為了於深海進行研究，本團隊與美國 Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) 合作，將錨定串方至於約 250 公尺深海中，此錨定串掛載了多個溫壓鹽感測器如圖 3-5(左)所示，以測量不同深度的溫度，並計算出不同深度的聲速，其中各個不同深度(D)測量到的鹽度(S)、溫度(T)分別為圖 3-5(右)左、中，即可繪出平均聲速剖面圖。

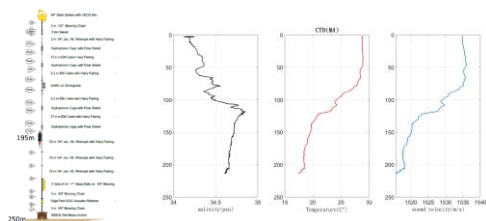


圖3-5 錨定串與聲速剖面圖

最後本次實驗將 Ocean Instruments 所開發的 Sound trap300 至於 WHOI 錨定串離水面約 195 處，此水聽器具有可在深海中進行長時間錄音，很適合本次底質探測實驗使用。圖 3-6、3-7 為本次實驗 Sound trap300 所接收到的背景噪音，圖中紅框的部分為 AIO 所拍發 3-7kHz 的訊號為本次實驗的訊號。

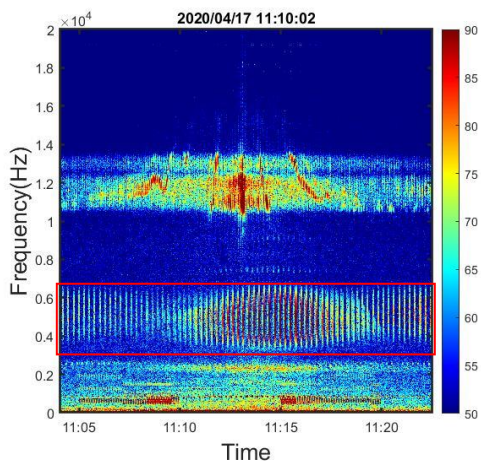


圖3-6 東西走向背景噪音頻譜圖

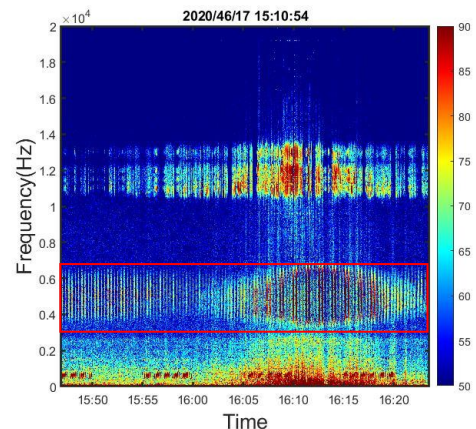


圖3-7 南北走向背景噪音頻譜圖

## 四、 實驗成果

本次實驗將圖 3-6、3-7 拍發結果，使用脈衝壓縮後提高其 SNR，並將第一到達波進行排列後可以得到圖 4-1，根據聲學路徑可以計算出底床反射與直達波之時間差，進而判斷底床反射產生時間

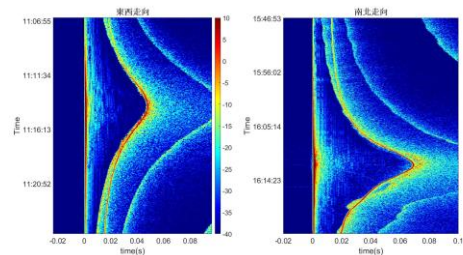


圖4-1 水下聲學通道脈衝響應圖(多路徑抵達圖)

通過圖 4-1 可以將反射波到達時間匡列出來，並且運用反射強度計算補償底床反射能量，得到之結果圖 4-2 所示，圖中不同的顏色代表著東西、南北走向接近以及遠離時，所計算出的不同角度的反射能量強度，由圖中可以看出各個路徑之能量趨勢都較為相近。

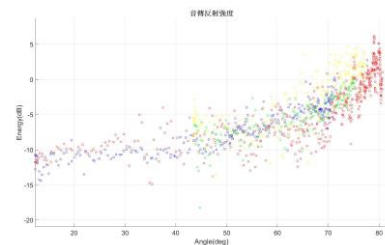


圖4-2 各角度之聲學反射強度

由圖 4-3 可以看出聲音於垂直反射時損耗大概-10dB 左右，此兩種結果接近於砂質反射之特性，與過去在當地地質探勘結果相符。

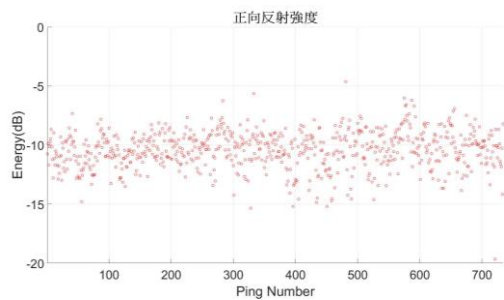


圖4-3 聲學 正向反射係數

## 五、 結論

本次研究在聲學反射係數反算中可明顯觀察到其砂質反射性曲線，未來會針對其使用匹配場演算技術，進行觀察並推斷其聲速、密度、吸收結果以及誤差範圍，並且與採集回來的樣本進行比對並分析是否與聲學計算結果相符合。

## 謝誌

本研究係由科技部(計畫編號：MOST 108-2623-E-110-001-D、MOST 110-2218-E-110 -008 - )、美國 Office of Naval Research Global (ONRG, 計畫編號：N62909-19-1-2070)計畫經費支持，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. Camin, H. J., &Isakson, M. J. (2006). “A comparison of sediment reflection coefficient measurements to elastic and poro-elastic models,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(5), 2437–2449
2. Yang, J., Jackson, D. R., &Tang, D. (2012). “Mid-frequency geoacoustic inversion using bottom loss data from the Shallow Water 2006 Experiment,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(2), 1711–1721
3. 黎光昫(2006). 「聲學正向反射係數之不確定性探討」，國立中山大學海下科技研究所
4. 陳思宇(2014). 「發展掃頻聲納系統量測海床反射係數-舉台灣西南海域為例」，國立中山大學海下科技研究所
5. Muzi, L., Siderius, M., &Gebbie, J. (2018). “An analysis of beamforming algorithms for passive

bottom reflection-loss estimation,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(5), 3046–3054.

6. Holland, C. W. (2003). “Seabed reflection measurement uncertainty,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(4), 1861–1873.
7. Maguer, A., Bovio, E., Fox, W. L. J., &Schmidt, H. (2000). “In situ estimation of sediment sound speed and critical angle,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(3), 987.

# 離岸風電場生態保育環境之水下噪音分析

鄭凱文<sup>1</sup> 邱永盛<sup>2\*</sup> 張元櫻<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立中山大學海下科技研究所 研究生

<sup>2\*</sup> 國立中山大學海下科技研究所 副教授

<sup>3</sup> 國立中山大學海下科技研究所 助理研究員

## 摘要

科技部計畫：MOST 110-2221-E-110-018

近年來依國家「能源政策」全力推廣「千架海陸風力機」計畫，臺灣積極推動離岸風電之發展，以提高再生能源發電比例，使本國逐步邁向非核家園之政策目標。而其中又以臺灣西部海域為離岸風電主要開發場域，然而臺灣西部淺水海域為中華白海豚（*Sousa chinensis*）的重要棲息地。在過去經驗中，工程發展經常導致生物與棲地遭受危害，舉例來說，離岸風機打樁時，產生的高強度低頻噪音可能影響到對聲音較敏感之生物，嚴重時甚至會造成聽力受損與永久性傷害。因此，我國西海岸對噪音傳播與海洋生物動態之監測需求開始大幅增加。本研究以彰化外海為研究標的海域，將進行水下聲景環境分析。希望可對此海域之聲景有更深入的了解，並將建立完成之分析技術應用於其他海域，以逐步提升對於各離岸風電建設海域之聲學掌握度。

關鍵詞：離岸風場、水下背景噪音、中華白海豚、環境影響評估

## Analysis of Underwater Ambient Noise in Ecological Conservation of Offshore Wind Farm

Kai-Wen Zheng, Linus Y.S. Chiu\*, Andrea Y.Y. Chang

\* Student, Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

Associate Professor, Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

Assistant researcher, Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

## ABSTRACT

In recent years, in accordance with the national "energy policy" to promote the "thousand land and sea wind turbines" plan, Taiwan has actively promoted the development of offshore wind power in order to increase the proportion of renewable energy power generation, so that the country has gradually moved towards the policy goal of a non-nuclear homeland. Among them, the western waters of Taiwan are the main development areas for offshore wind power. However, the shallow waters of western Taiwan are important habitats for the Chinese white dolphins (*Sousa chinensis*). In the past experience, engineering development often caused harm to organisms and habitats. For example, the high-intensity low-frequency noise generated by offshore wind turbine piling may affect organisms that are more sensitive to sound, and even cause hearing loss in severe cases. And permanent damage. Therefore, the demand for monitoring of noise transmission and marine biological dynamics on the west coast of China has begun to increase significantly. In this research, the sea area off Changhua and the underwater soundscape analysis will be carried out. The

soundscape data was analysis and to correlate with wind, tide and shipping activities in this area. The results can provide a basic knowledge of under soundscape for Taiwan's windfarm.

Keywords: Offshore Wind Farm; Underwater ambient noise; Environmental impact assessment

## 一、緒論

海洋環境噪音組成相當複雜，可分為自然噪音與人為噪音，在自然噪音中包括風浪、潮汐、降雨及海洋生物等；而人為噪音則有船舶、海事工程等。然而水下背景噪音受天候、海況影響非常明顯，主要的噪音來源有船舶噪音、生物噪音、風浪噪音及人類近岸活動所產生之噪音等[錯誤! 找不到參照來源]。由於打樁施工時，噪音將透過海水以聲波方式往外傳遞至遠處，而傳播時將會受海洋環境條件影響，其變因包含水中的聲速分佈、地形、以及海床底質等條件，因此打樁噪音之傳播距離與作用範圍將由海洋環境條件來決定。海洋環境噪音會因其時空變化，受地形、氣候、潮汐等影響，而有不同的表現。同時，在不同季節以及氣候下，海洋的聲景亦受到生物、人為活動所影響，透過實海域之量測，分析其環境噪音可以得知該場域主要受到上述何種噪音影響，亦可得知其日夜變化、潮汐變化、風速作用變化等，瞭解環境中噪音之分佈。

## 二、研究方法

### 2.1 量測地點

本研究於 2021 年 3 月與 5 月至 6 月間，於彰化海域佈放底錠式聲學錨碇串進行兩季次聲學量測，量測點位如圖 1 所示，實際儀器佈放之經緯度與時間如表 1 所列。被動式水下監測 (Passive Acoustics Monitoring, PAM)，被視為觀察海洋環境噪音與生物行為的重要監測工具，因此本實驗使用 PAM 方式於彰化外海進行長時間之水下聲景量測，進而探討及分析彰化外海水下聲景之時空變動性。

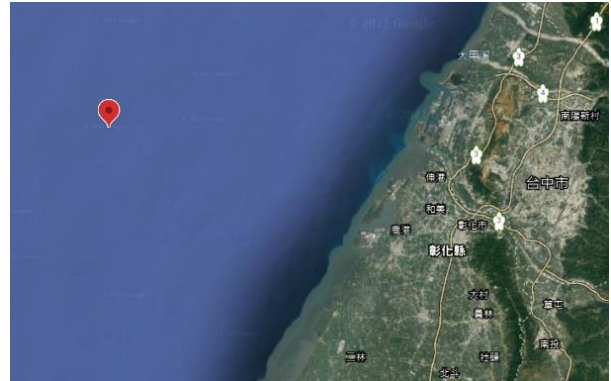


圖 1 被動聲學量測位置圖

表 1 佈放座標及時間表

佈放點位	第一季	第二季
經緯度	119°59.061'E 24°13.596' N	
佈放時間	2021/03/01	2021/05/13
回收時間	2021/03/31	2021/06/15
合計	744 小時	989 小時

### 2.2 聲學儀器

本研究所採用的水下聲學紀錄器為紐西蘭 Ocean Instruments 公司產品 SoundTrap ST-500，其靈敏度為-177 dB re 1μPa，採樣頻率設定為 96k Hz，其自身噪音僅有 36dB，小於零級海況之高頻噪音，具有不影響後續資料分析的優勢，其外觀及規格如圖 2 與表 2 所示。



圖 2 ST-500 水下聲學紀錄器外觀

表 2 ST-500 水下聲學紀錄器規格表

項目	規格
Bandwidth	20 Hz 至 90 kHz (±3dB)
Self-noise	< 36 dB re 1μPa
Sample rates	288、144、96、48、36、24 kHz
Batteries	最長 180 天
ADC	16-bit SAR
Maximum Depth	100m
Dimensions	350mm(長)x 100mm(直徑)

## 2.3 資料分析流程

本研究第一階段針對海域環境噪音進行分析與討論，資料處理主要包含時頻譜分析與聲壓位準強度計算。時頻譜分析的部分，首先是將量測到的聲學資料透過傅立葉轉換得到聲音訊號在頻域上的能量分佈，藉此觀察噪音在不同頻率下的能量變化。除此之外頻率分析也常用於分辨噪音聲源對於不同頻帶範圍的影響。

### 2.3.1 1/3 倍頻帶

倍頻帶(Octave Band)是頻帶分析常見的頻寬選定法，而本研究採用 1/3 倍頻帶 (One-third Octave band)，其數學定義式如下，

$$f_c = \sqrt{f_l \times f_u} \quad (1)$$

$$f_l = 2^{-1/(n \times 2)} f_c \quad (2)$$

$$f_u = 2^{1/(n \times 2)} f_c \quad (3)$$

式中  $f_c$  為頻帶中心頻率， $f_l$  為下限頻率， $f_u$  為上限頻率，當  $n = 3$  時，頻寬為中心頻率的 23.6%。

### 2.3.2 聲壓位準

聲壓位準(Sound Pressure Level, SPL)強度之計算，其數學定義式如下，

$$SPL = 10 \log \frac{P_{rms}^2}{P_{ref}^2} \quad (4)$$

單位為 dB re 1μPa， $P_{ref}$  為參考聲壓，在空氣中為 20μPa，在水中為 1μPa。

## 2.4 氣象資料分析

由於海洋環境噪音與天氣變化具有高度之相關性，因此除了聲學資料之外，本研究分析包含鄰近各量測地點之測站所記錄的氣象資料。目前所分析的氣象資料包含潮汐資料與風速資料，本研究根據臺灣中央氣象局海象防災環境資訊平台(cwb.gov.tw)所提供的潮汐站潮汐資料與風速站風速資料進行比

對分析。

### 2.4.1 潮汐資料分析

首先分別將聲學資料從低頻至高頻挑選六個頻率，包括極低頻(50Hz)、低頻(800Hz)、中低頻(2kHz)、中高頻(5kHz)、高頻(10kHz)及較高頻(20kHz)，分別計算其三分之一倍頻帶頻譜強度，並與潮汐資料比較。圖 3 與圖 4 分別為為 3 月份、5 月份至 6 月份潮汐資料與各個頻率三分之一倍頻帶頻譜強度比較圖，圖中灰白色粗線為潮汐資料，呈現半日潮之潮位變化週期。由圖中可觀察到，各個頻率每日強度變化與潮位變化資料相關度低。目前根據潮汐資料與聲學資料分析，並無觀察兩者具直接相關性。

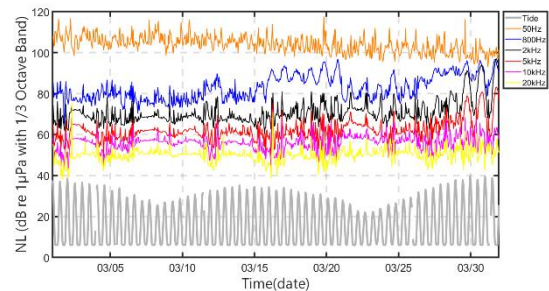


圖 3 潮汐資料與 3 月份六種頻率的三分之一倍頻帶頻譜強度

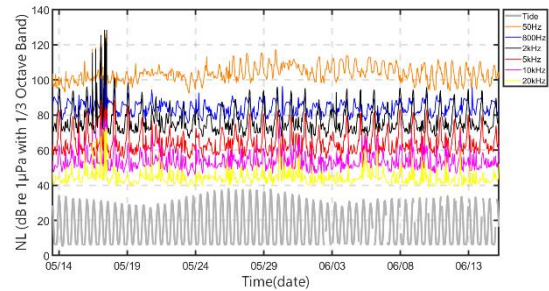


圖 4 潮汐資料與 5 月至 6 月六種頻率的三分之一倍頻帶頻譜強度

### 2.4.2 風速資料分析

接續分析三分之一倍頻帶頻譜強度與風速變化之關係，由圖 5 可以發現 3/02-3/04、3/07-3/11、3/12-3/15 及 03/21-03/23 期間發生高風速的東北季風事件，又以 3/02-3/04 及 03/21-03/23 最為強烈，風速最高可達 32 節(16m/s)。且由圖 5 可以清楚看見中高頻噪音強度變強，且最明顯頻段集中在 2k-20kHz。而在圖 6 可以看到 5/16、5/20-5/23、與



5/26-5/31 三段時間，同樣可以在三分之一倍頻帶頻譜強度看見中頻段 2k-20kHz 噪音強度變強，顯示中高频噪音與風速具有高度相關。

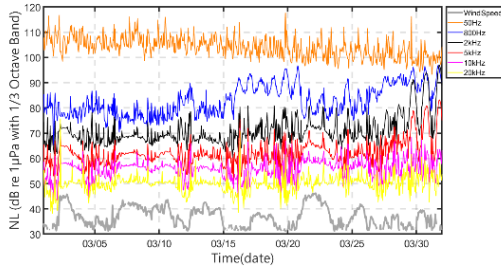


圖 5 風速資料與 3 月六種頻率的三分之一倍頻帶頻譜強度

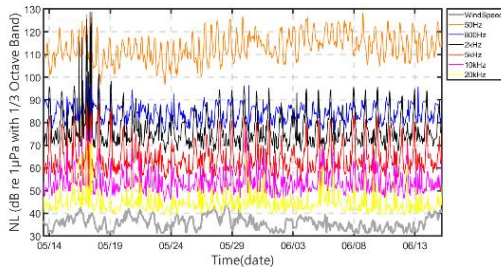


圖 6 風速資料與 5 月至 6 月六種頻率的三分之一倍頻帶頻譜強度

### 三、結果與討論

依上述之資料分析方式，對聲學資料進行時頻譜計算，並以每小時的平均頻譜呈現，圖 7、圖 8 分別為 3 月 1 日至 3 月 31 日與 5 月 13 日至 6 月 15 日之時頻譜圖，圖中縱軸為頻率，橫軸為時間，色階表示聲壓位準。由圖中可發現在頻段 2k Hz 以下有較高的聲壓位準。透過參考[2]呈現在不同頻帶之環境噪音源分類中，在中低頻的部分主要為船舶噪音與部分生物噪音所貢獻，而直接以監聽方式探討其聲源，可以明顯聽到船舶與石首魚等聲音，且這兩季聲學量測資料皆有打樁施工所產生的高強度低頻噪音，符合一般海域環境噪音特性。

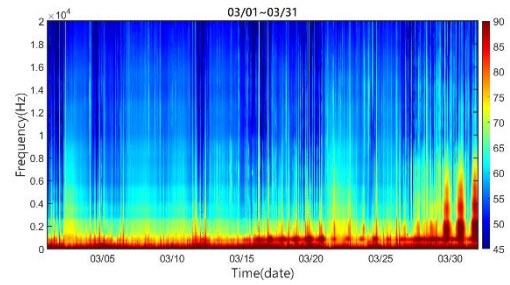


圖 7 3 月 01 至 3 月 31 日之時頻譜圖(20kHz 以下)

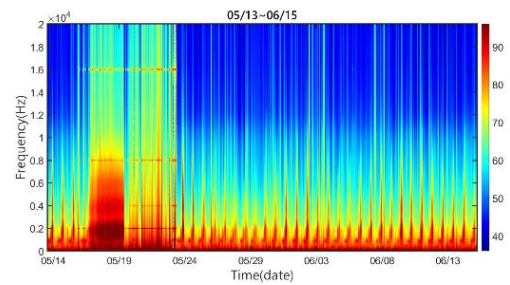


圖 8 5 月 13 至 6 月 15 日之時頻譜圖(20kHz 以下)

圖 9 與圖 10 為每小時三分之一倍頻帶頻譜強度曲線，縱軸為噪音位準，橫軸為頻率，由結果可見，在低頻段之噪音位準明顯第二季比第一季還大，平均增加了 30dB，原因可能是 5 月 13 至 6 月 15 日這段時間有更多的打樁施工工程，導致低頻噪音位準上升。

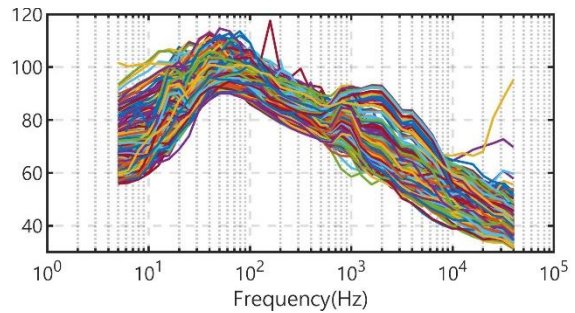


圖 9 3 月 1 至 3 月 31 日之三分之一倍頻帶頻譜強度曲線

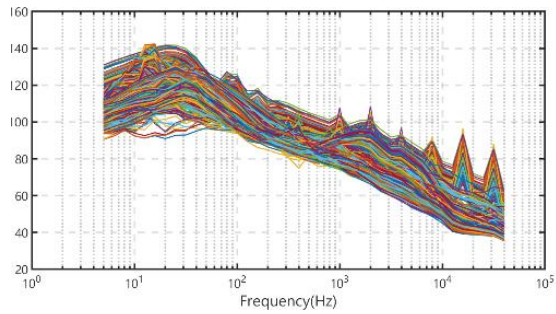


圖 10 5 月 13 至 6 月 15 日之三分之一倍頻帶頻譜強度曲線

### 謝誌

本論文係科技部國家海洋研究院離岸風電場生態保育環境監測研究-水下噪音傳遞研究(編號 MOST 110-2221-E-110-018)之研究成果,承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成,謹致謝忱。

### 參考文獻

1. Urick, R.J. (1986) "Ambient Noise in the Sea," Peninsula Publishing.
2. G. M. Wenz (1962) "Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Source," The Journal of the Acoustical Society of America, 34, 12, pp. 1936-1956.
3. 陳琪芳等人, 離岸風場之水下背景噪音量測, 第 35 屆海洋工程研討會論文集, 2013 年。
4. 魏瑞昌、郭連翰(2013)「中華白海豚棲地夏季環境噪音之統計分析」, 第十五屆水下技術研討會暨國科會成果發表會論文集, 第 149-154 頁。

# 自製水下電聲換能器陣列特性探討及合成孔徑法之應用

鄒宇杭<sup>1\*</sup> 邱永盛<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 國立中山大學海下科技研究所

## 摘要

科技部計畫：MOST 110-2623-E-110-001-

隨人類文明快速進步，海洋科技亦日趨發達。國防軍事活動、AUV 的探勘任務、海洋資源的開採及監測等重點發展項目皆須仰賴水中聲學技術。而有時為提升信號之訊雜比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 與指向性，會應用聲納陣列來增加其傳播效益。

本研究使用有限元素法模擬並自主開發一套水下電聲換能器陣列，進行陣列系統之實海域海床探測應用，並從回波資料觀察陣列特性。為驗證此聲納陣列系統效能，亦使用拖曳式全向性主動聲納系統探測比對，利用合成孔徑法達到虛擬陣列之功效，後將兩者海底床回波資料加以分析，探討其差異性。

關鍵詞：水中聲學、聲納陣列、有限元素法、脈衝壓縮、合成孔徑法

## Study on Characteristics of Self-Made Underwater Electroacoustic Transducer Array and Application of Synthetic Aperture Method

Yu-Hang Zou<sup>\*</sup>, Linus Y.S. Chiu

<sup>\*</sup> Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

## ABSTRACT

With the rapid progress of human civilization, marine technology has also become more advanced.

Key development projects such as national defense and military activities, AUV exploration missions, and the exploitation and monitoring of marine resources all rely on underwater acoustic technology. In order to improve the signal-to-noise ratio (SNR) and directivity of the signal, a sonar array is used to increase its propagation efficiency and sonar performance.

This research uses the finite element method to simulate the optimum resonance of a transducer, and independently develop each one to form a set of underwater electroacoustic transducer arrays. This shelf-build array was conducted in the south wester seas of Taiwan to collect normal incidence acoustic echoes. The synthetic aperture method was also applied to achieve the effect of a virtual array and to compare to the data transmitted by virtual array.

Keywords: Underwater acoustics; Sonar array; Finite Element Method; Pulse compression; Synthetic aperture method

## 一、緒論

隨著科技日新月異，海洋探索及相關技術亦快速發展，港灣防衛、海洋資源開發、環境探勘及評估…等皆為多國重視之領域。然而，並非所有陸地上常見能量的波動，皆能於海洋環境中有效率地傳播，如光波及電磁波於海洋介質中易被吸收或劇烈衰減，無法做中長距離之傳輸，故聲波為目前水中遠距離傳播之主要方式。但即使是相對穩定的水聲傳播，因海洋環境複雜多變，仍對訊號傳輸造成不良影響，例如：由海洋邊界結構形成之多路徑效應 (Multipath Effect)、環境噪聲大等限制。因此，有時為提升訊雜比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 以及指向性，會應用聲納陣列以增加傳播效益。

陣列係將多個傳感器依一定間距做排列，使其能量輻射具指向性的一項技術。而聲納陣列系統中最為主要之傳感器即水下電聲換能器 (Underwater Electroacoustic Transducer)。一般來說，市售的水下電聲換能器以國外生產居多，不僅購買流程耗時複雜，價格也十分昂貴。因此，若大部分零件設計、加工及組裝皆於國內進行，採自製方式產出換能器，製作成本得以大幅縮減亦更符合規格需求。

## 二、模擬及實驗方法

對聲納陣列而言，陣列元件 (Array Element) 性能優劣為直接影響陣列整體表現之關鍵因子之一。因此，換能器須先以有限元素法 (Finite Element Method, FEM) 模擬設計，相比傳統的試誤法，可減少大量時間與成本，待確認模擬結果符合使用需求或工作頻段後，方可加工零件及組裝。本研究使用之有限元素法模擬軟體為 COMSOL Multiphysics，其模擬過程之網格化頁面如圖 1 所示。

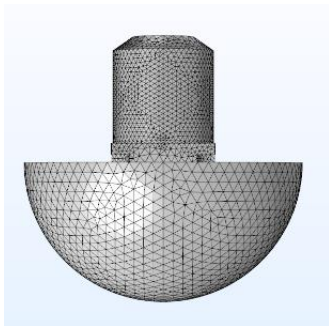


圖 1 模擬過程中創建換能器及水域之網格化模型

本研究基於模擬設計結果進行換能器製作，換能器製作完成後，量測其各自阻抗，以便瞭解頻率響應及其他特性，亦可藉由阻抗值計算出與功率放大器間匹配之變壓設計，使其能發揮較完全之功率。為進行其效能測試，本研究將自製換能器陣列安裝於拖曳式載體，如圖 2 所示，吊掛於研究船甲板後方進行拍發與接收。另一方面，驗證用之全向性系統則裝載單顆換能器及水下麥克風，運用合成孔徑法，即聲源移動拍發時同時也接收回波，形成之位置及相位差，達到虛擬陣列之功效。並於回波訊號作疊加，可得較清晰之回波能量成像。



圖 2 裝載自製換能器陣列之拖體

## 三、初步結果

經由 COMSOL 軟體建模及輸入參數，可得出若干換能器重要之模擬結果，例如：傳輸電壓響應 (Transmitting voltage response, TVR)、聲學比阻抗、總輻射功率、輻射波束模型…等，並從中得知換能器頻率響應較佳位置及其頻段。圖 3 為模擬之 TVR 結果圖，可看出頻率響應較佳之頻率為：3.2kHz、7.8kHz、9.5kHz、12.6kHz。

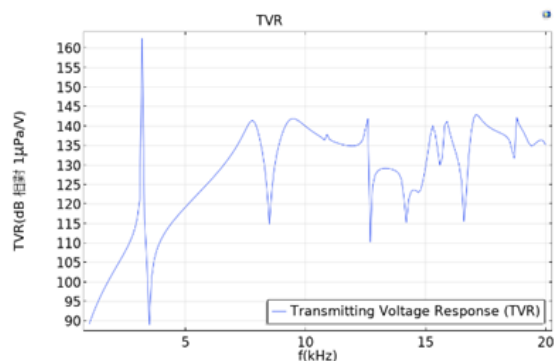


圖 3 COMSOL 模擬自製換能器之傳輸電壓響應結果

圖 4 為換能器拍發表面之聲學比阻抗結果圖，其數學定義如下：

$$Z_{aco} = \frac{(\int_A p da) / (\int_A v_n da)}{Z_0} \quad (1)$$

即為接觸水之換能器頂端蓋表面阻抗與水特性阻抗  $Z_0$  之比。其中式(1)分子部分乃頂端蓋輻射面阻抗，計算方法為聲壓  $p$  面積分及表面速度法向分量  $v_n$  面積分之比；水特性阻抗  $Z_0$  值則為攝氏 20 度時水密度與聲速之乘積。聲學比阻抗數值較高處，即位於頻率響應較差之區域，應避免工作於此頻段，由圖中觀察出為 3.5kHz、8.5kHz、12.7kHz。

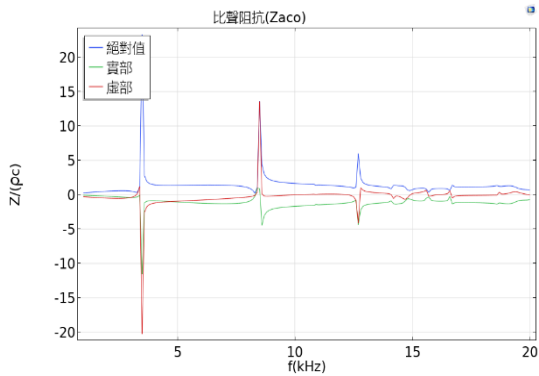


圖 4 自製換能器之比聲阻抗模擬結果

圖 5 為換能器相對波束靈敏度極座標圖，係模擬電聲換能器位於不同頻率響應較佳處之頻段時，工作模式與各角度、距離之聲壓級(Sound Pressure Level,SPL)分布，並以極座標呈現。據圖中顯示，於第一頻率響應處 3.2kHz 時，拍發情形為全向性；達第二頻率響應處 7.8kHz 時，具些微指向性；直至第四頻率響應處 12.6kHz 時，產生非常明顯指向性情形，此應與換能器各頻段下相異之工作模式有關。

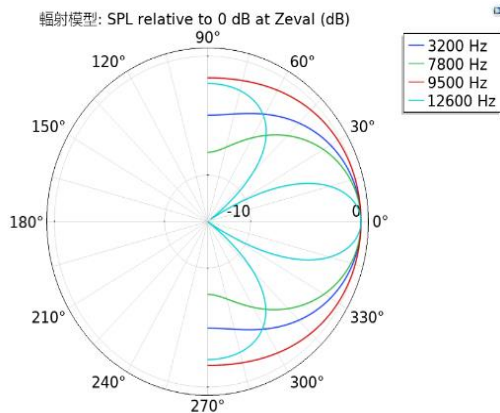


圖 5 自製換能器之波束圖形模擬結果

四顆自製換能器組裝完成後，將其實際量測之阻抗作圖，如圖 6。阻抗較低之頻段即為頻率響應較佳之位置，可看到，雖四顆換能器間存在阻抗差異，但頻率響應位置落點仍非常一致: 3.7kHz 以及 7.8kHz，與圖 3 模擬之結果相符。

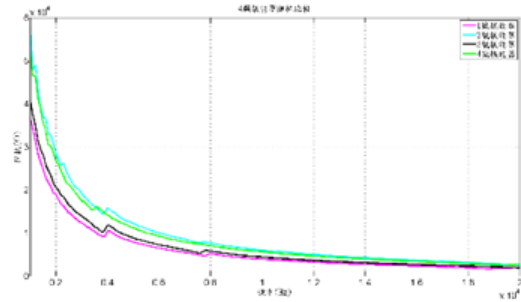


圖 6 自製換能器實際阻抗比較圖

實海域資料方面，為分離目標信號及雜訊，首先將接收到之回波資料做脈衝壓縮處理，步驟如下：先使拍發及接收訊號解調至基頻，濾波後留下欲觀察之頻段，兩者訊號進行相關性積分，再將其積分所得最大峰值選取出來排列，即可獲得海床聲學回波特徵。如圖 7 所示，此為全向性系統內水下麥克風處理後資料，可從圖上觀察出，於具最大能量之訊號直達波下方處有若干個海面反射波存在，且再隨著與直達波相對延遲時間增加，亦可看見海底床反射波，清楚地描繪出底床地形以及結構較淺層之地層樣貌。此資料將運用於與聲納陣列探測結果進行比較分析。

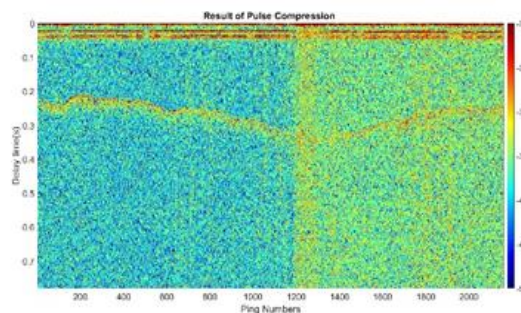


圖 7 全向性系統自收發訊號經脈衝壓縮之結果圖

## 謝誌

本研究由科技部計畫支持(計畫編號：MOST 110-2623-E-110-001-)，並由新海研三號工作人員們支持和幫助，使實驗得以順利進行。

## 參考文獻

1. Hawkins, D. W., & Gough, P. T. (1996). Multiresonance design of a Tonpilz transducer using the finite element method. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 43(5), 782-790.
2. 蔡明廷 (2020)。水下電聲換能器之開發與研究。國立中山大學海下科技研究所碩士論文，高雄市。
3. Chen, Y. T. (2014). 陣列聲源於多點聲音傳遞效應分析之研究. 成功大學系統及船舶機電工程學系學位論文, 1-77.
4. 張哲維. (2010). 適用於小型水下載具使用之高感度水聽器製作與測試研究. 成功大學系統及船舶機電工程學系學位論文, 1-79.
5. 劉桓嘉. (2015). 相位式線陣列超音波換能器幾何參數對聲場之影響. 臺灣大學工程科學及海洋工程學研究所學位論文, 1-97.

## 水下聲學偵測浮標設計與建置

陳琪芳<sup>1</sup> 洪靖唐<sup>2</sup> 洪徐永<sup>3\*</sup> 張祐誠<sup>3\*</sup> 吳昭蓉<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系教授

<sup>2</sup> 國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系博士生

<sup>3\*</sup> 國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系碩士生

### 摘要

科技部計畫：109-2221-E-002-198-MY3

台灣海峽坐擁全世界最佳之風力資源，政府亦於 2013 年推動千架海陸風力機之國家型計畫，惟離岸風場場址與已被列為極度瀕危 (Critically Endangered) 物種-台灣白海豚 (Sousa Chinensis) 棲地有部分重疊。根據研究顯示海上施工船於打樁期間所輻射之水下噪音會嚴重影響白海豚的生物行為，故施工水域 750 公尺內是否有白海豚出沒為開發商及環保單位所關心之重要訊息。因此，被動式水下聲學監測 (Passive Acoustic Monitor) 與鯨豚觀測員 (Marine Mammal Observer) 制度的設置刻不容緩，以視覺及聲音作為保護鯨豚的雙重保險。為分析中華白海豚生物族群與海洋環境時空上的變動趨勢，科技部與台灣大學陳琪芳教授團隊擬於台中港北堤水域設置聲學監測網 (PAM Network)，整合底碇式水下噪音監測站、近岸被動偵測浮標與海上無人載台，蒐集水下聲景資料，建立資料庫供相關單位進行評估與分析。本研究以此為出發點，欲建立一水下聲學偵測浮標系統，透過軟硬體整合，以 C++ 和 Python 語言開發程式於機器人作業系統 (Robot Operating System) 之上，並應用於嵌入式系統，透過即時音訊回傳，實時監測打樁分貝值並偵測海豚哨叫聲 (Whistle) 出沒，作為聲學監測網之關鍵技術。本文之系統可分為四大部分，分別為硬體架構、軟體架構、即時哨聲偵測與即時監控系統。本文將詳細說明各部分並於實驗驗證其效能與應用，並且分析未來可精進之項目。

關鍵詞：被動式聲學監測、被動式聲學系統、機器人作業系統、即時哨聲偵測、即時聲學監測系統

## Design & Development of PAM (Passive Acoustic Monitor) BUOY

Chi-Fang Chen, Ching-Tang Hung, Hsu-Yong Hung\*, You-Cheng Zhang\*, Chao-Jung Wu\*

Professor, Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

PhD student, Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

\* Master student, Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

### ABSTRACT

Taiwan Strait is recognized as one of the best wind resources in the world by possessing 16 of the top 20 offshore wind farms. This wind energy potential promoted the Taiwan government to take up the "Thousand Wind Turbines" project. However, the expected development area for potential wind turbines is overlapped with the habitat of the Sousa Chinensis, which meets the IUCN Red List requirements for endangered. Recently, Passive Acoustic Monitoring (PAM) has been increasingly used as a tool for cetacean research and risk mitigation. To analyze the spatial and temporal occurrence

and vocalization behavior of *Sousa Chinensis*, Ministry of Science and Technology (MOST) and NTU research team cooperated together to set up the PAM Network around the Taichung Harbor. The PAM Network consists a bottom-mounted hydrophone, unmanned surface vehicle and PAM buoy. As a result, this thesis provides a PAM buoy system which is one of the critical elements among the network. The buoy hardware/software system is capable of transmitting 96kHz/24bit sound data to shore and detecting whistle clips in real-time. Software for this platform is built on top of Robot Operating System (ROS) and programmed in C++ and Python. Overall, this study has four main parts, including hardware structure, software structure, real-time whistle detector and shoreside monitoring. This thesis will go into the details of these parts.

Keywords: passive acoustic monitoring; PAM system; robot operating system; real-time whistle detector; real-time monitoring

## 一、前言

根據台大周蓮香教授為首的研究團隊過去透過目視法的研究結果顯示其主要棲地為苗栗縣北部至台南縣北界將軍港，其族群數僅存七十隻左右，而台中港為其頻繁出沒之處。台中港腹地廣大、地理位置居於西部海域中樞，現已成為離岸風機在組裝及運維的重要作業區域，故行政院科技部擬在其附近海域建置被動式監測網 (PAM Network)，如圖 1 所示，期望能夠建立長期水下量測監測網，蒐集大量水下聲景資料、建立鯨豚聲紋資料庫，以利分析海洋環境變動與海洋生物時空變動的趨勢。

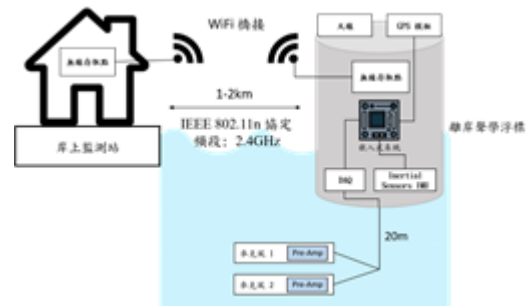
本研究旨為開發一被動式聲學偵測浮標，在提供高解析度之水下即時音訊的前提下，提供高實用性、可進行即時鯨豚偵測，且具長距離傳輸功能之被動式聲學載台，透過載台與監測站之間的自主溝通，使其達到偵測警示之目的；此聲學載台亦是台中港被動式監測網之先導關鍵技術，未來擬與水上無人載具、底碇式水下監聽站三平台形成一監測網絡，以提升被動式監測網之效率以及精確度。



圖 1 PAM Network 場域示意圖

## 二、浮標系統架構

如下圖 2 所示，本系統可拆分為兩部分，包括離岸聲學浮標以及岸上監測站。此聲學量測系統包括一組置於水下 20m 之麥克風，聲壓透過麥克風接收經壓電轉換並於內部前置放大器放大訊號後，數位化存入嵌入式系統，同一時間資料流亦經 WiFi 橋接將聲學資料即時回傳至離岸約 1-2Km 之岸上監



測站內，以達到被動式監測網絡之長距離傳輸和即時解算之目的。

圖 2 浮標系統架構

本研究欲整合音效擷取系統、姿態定位感測系統、通訊系統、以及使用者即時監看介面等。於控制硬體層面，我們不僅需要控制多種感測器，例如資料擷取器、姿態感測組件、全球定位系統元件等，同時如何溝通各感測器資料亦是其中一大挑戰。因此，本研究欲透過機器人作業系統 (Robot Operating System, ROS) 整合此聲學載台。ROS 為一專為機器人開發人員設計之開源平台，平台上提供許多成熟且開源之程式，包括控制硬體之韌體程式，載具運動之各類演算法等。一方面，如若從頭設計一些在線上已開發且測試完成之程式缺乏效率，加上



ROS 作業系統提供很好的資料交流架構，筆者欲利用其龐大的線上資源以及作業系統之特性，加上部分自行開發之控制程式和演算法，使各感測元件溝通，達到最後偵測浮標即時音訊回傳以及自主控制之目的。總地來說，使用 ROS 作為系統之主架構有以下幾點原因：

1. 線上已有相當多可開源使用且成熟之控制程式、濾波演算法、工具程式包等。
2. ROS 於資料溝通方面有 Publish-subscribe 架構，有助於感測器間的資料流通；於開發程式方面，可根據需求於計算圖增減運算節點，開發端較為靈活方便；於運行層面，系統不僅較為穩定且擁有多工的效率。
3. 現階段雖僅為了開發聲學浮標，然而使用一統一的 ROS 架構將有助於未來 PAM Network 載台間的整合與溝通。

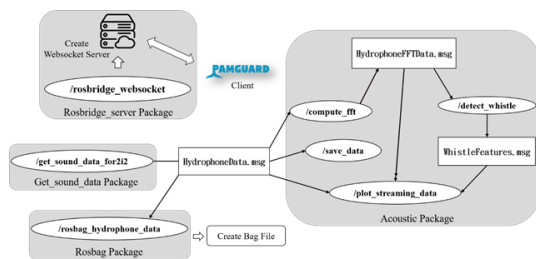


圖 3 偵測浮標之音訊擷取系統 ROS 計算圖

如上圖 3 所示，此圖為音訊擷取系統於 ROS 架構下之計算圖，系統由 4 個軟體包組成，包括 get\_sound\_data 軟體包、acoustic 軟體包、roslab 軟體包以及 roslab\_server 軟體包。roslab 為線上開源軟體包，創建紀錄特定話題的 bag 檔案；而 roslab\_server 為線上開源軟體包，提供建立 WebSocket 伺服器功能，透過客戶端 PAMGuard 與之連線溝通，將取得的即時音訊資料流重導入至 PAMGuard 音訊處理引擎。另外 get\_sound\_data 為自行開發之軟體包，其主要功能為控制音訊擷取裝置並取得音訊資料，於擷取裝置記憶體中抓取資料並發佈至 ROS 話題，供其他節點訂閱使用。藉由確立 HydrophoneData 訊息資料型態，並通過 Publish-Subscribe 方式使此資料溝通於 ROS 計算圖中。最後 acoustic 為自行開發之軟體包，其中節點包括

compute\_fft、save\_data、plot\_streaming\_data、detect\_whistle 等節點。透過傅立葉轉換將時域資料轉為頻域資料，並以哨聲偵測器進行偵測，最後將被偵測之哨聲片段呈現於使用者介面監看。

### 三、系統效能測試與實測

此浮標系統的資料傳輸與處理流程如下圖 4 所示，雙通道麥克風提供 24bit 和 96kHz 取樣頻率的高解析度音訊資料，資料流以平均每小時 2GB 的流量，透過與岸上無線橋接溝通將即時音訊資料回傳至岸上監測站供前端使用者介面監看，包括即時監看軟體 PAMGuard 和 NTU PAM。於資料儲存方面，音訊資料分別儲存於浮標端以及岸上監測站端，透過將實驗重要數據儲存於兩側，以利供後續作驗證以及研究。

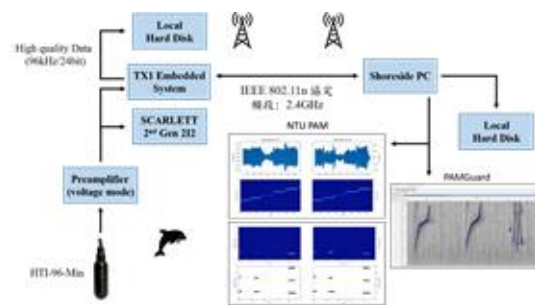


圖 4 音訊資料傳輸與處理流程

為執行聲學浮標之系統測試，於桃園市新竹縣交界之石門水庫進行實水域實測，實驗場域及偵測浮標如圖 5 所示。透過 TR-208A Transducer 拍發模擬音源，模擬聲源以 5 種類型模擬海豚哨叫聲，包括 Flat、Rise、Down、U-shape 以及 Convex 5 種。

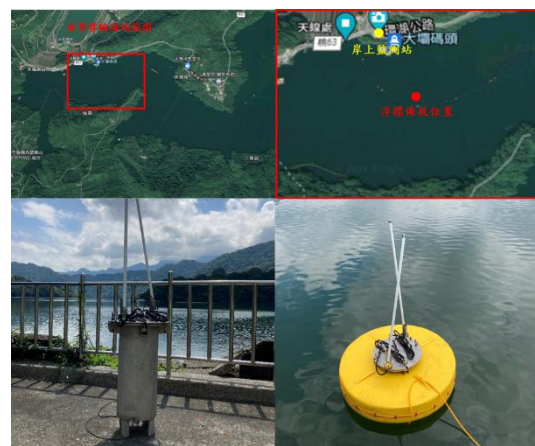
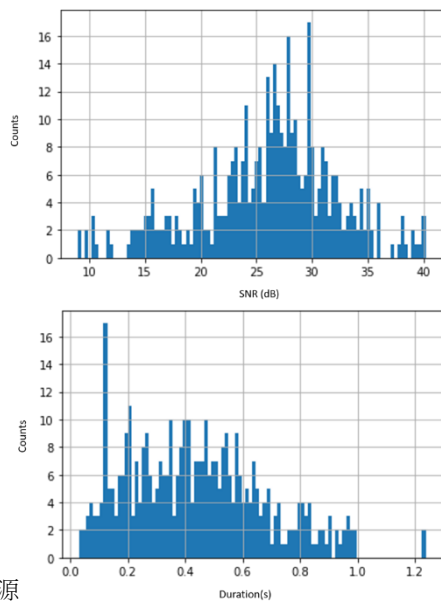


圖 5 石門實驗場域與偵測浮標佈放圖

透過施工船佈放至石門水域中間，水深約 80 公尺處，並以模擬音源拍發模擬訊號，透過比對偵測結果與模擬音源藉以驗證偵測系統之偵測率以及誤報率。此次前導實驗總共拍發了 389 聲音源，模擬音源分別包括五種類型，分別為 flat 類型 105 聲 (27%)、down 類型 88 聲 (23%)、rise 類型 99 聲 (25%)、U-shape 71 聲 (18%) 以及 convex 26 聲 (7%)。下圖 6 分別為 389 聲音源中的 SNR 大小以及哨聲持續時間之 histogram。麥克風所接收之模擬



聲源

SNR 大小為  $26.1 \pm 6.1$  dB (range: 9-40dB)，另一方面哨叫聲持續時間為  $0.44 \pm 0.24$  s (0.032-1.24s)。

圖 6 上為模擬音源 SNR 大小之 Histogram。

下為模擬音源持續時間之 Histogram。

模擬類型	聲源總數	偵測聲數	偵測率
Flat	105	104	99%
Down	88	77	87.5%
Rise	99	82	83%
U-shape	71	63	89%
Convex	26	23	89%
Total Amount	389	349	90%

透過比對偵測結果以及模擬聲源可得以下結果，如上表 7 所示，於 389 聲模擬聲源中有 349 聲哨聲被偵測出，其偵測率為 90%。根據哨聲種類進行分析，發現哨聲偵測器對於平坦波形的偵測率極高，接近 100%。然而對於上升以及下降的波形其偵測率相對較低，其原因在於當哨聲持續時間低且波形為

上升或下降時，對於哨聲偵測器，其哨聲於短時間內頻率變化過大，導致無法通過偵測器之時間延續性窗，從而造成偽陰性的產生。整體而言本哨聲偵測器其偵測率為 90%，另一方面其誤報率為 10%。

## 謝誌

本文係科技部專題研究計畫 (編號 MOST 109-2221-E-002-198-MY3) 之相關研究成果，承蒙貴單位的資助以及對此計畫相助的研究人員們。

## 參考文獻

1. Van Parijs, S. M., Clark, C. W., Sousa-Lima, R. S., Parks, S. E., Rankin, S., Risch, D., & Van Opzeeland, I. C. (2009). Management and research applications of real-time and archival passive acoustic sensors over varying temporal and spatial scales. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 21-36.
2. Spaulding, E., Robbins, M., Calupca, T., Clark, C. W., Tremblay, C., Waack, A., ... & Newhall, K. (2009, May). An autonomous, near-real-time buoy system for automatic detection of North Atlantic right whale calls. In *Proceedings of Meetings on Acoustics 157ASA* (Vol. 6, No. 1, p. 010001). Acoustical Society of America.
3. Sanguineti, M., Alessi, J., Brunoldi, M., Cannarile, G., Cavalleri, O., Cerruti, R., ... & Viano, G. (2021). An automated passive acoustic monitoring system for real time sperm whale (*Physeter macrocephalus*) threat prevention in the Mediterranean Sea. *Applied Acoustics*, 172, 107650.
4. Patoliya, J., Rajai, P. T., Saini, J. K. S., & Khatwani, K. (2019). BRIEF REVIEW ON WIRELESS ROS MASTER-SLAVE COMMUNICATION USING EMBEDDED IoT Device: NodeMCU. *IJRAR-International Journal of Research and Analytical Reviews* Vol. 6.
5. Lin, T. H. (2013). 應用被動式聲學監測台灣西海岸中華白海豚行為生態與棲地利用. 臺灣大學生態學與演化生物學研究所學位論文, 1-150.
6. Wang, Z. T., Au, W. W., Rendell, L., Wang, K. X., Wu, H. P., Wu, Y. P., ... & Wang, D. (2016).

Apparent source levels and active communication space of whistles of free-ranging Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in the Pearl River Estuary and Beibu Gulf, China. *PeerJ*, 4, e1695.

7. 周蓮香、丁建均、林幸助、孫建平, (2018). "中華白海豚族群生態與河口棲地監測(II)," 行政院農業委員會林務局補助研究計畫  
計畫編號: 107 林發-08.1-保-26

# 超短基線輔助之感測資料融合於 AUV 定位估算

鄭鈺翰<sup>1</sup> 陳信宏<sup>2\*</sup> 周佑誠<sup>3</sup> 王朝欽<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 國立中山大學海下科技研究所碩士班研究生

<sup>2\*</sup> 國立中山大學海下科技研究所教授

<sup>3</sup> 國立中山大學海下科技研究所副教授

<sup>4</sup> 國立中山大學電機工程學系教授

## 摘要

科技部計畫：MOST 109-2218-E-110-009-

水下導航仰賴精確可靠的水下定位估測，其性能也是影響自主式水下載具(AUV)任務成敗與執行效率的關鍵因素之一。本研究開發定位感測資料融合演算法，透過擴展式卡曼濾波融合 AUV 感測資訊，包括陀螺儀 (Gyro)、都卜勒速度儀 (DVL)、超短基線 (USBL) 定位系統量測資料，並探討融合 USBL 定位資料對於 AUV 定位估算效能的影響。本研究將所開發的 Gyro/DVL/USBL 定位資料融合演算法於自主式水下測試平台 IUT AUV I 上實現，並於水域進行導航試驗，測試結果顯示此一定位資料融合演算法有效提高 AUV 定位估算精度。此外，本研究利用 RTS 軌跡平滑法進行定位估算資料後處理，有效改善載具定位估算可靠度。

關鍵詞：自主式水下載具、水下定位、擴展式卡曼濾波、陀螺儀、都卜勒流速儀、超短基線

## Evaluation of USBL-Aided Sensor Data Fusion for AUV Localization

Zheng-Han Zheng<sup>1</sup> Hsin-Hung Chen<sup>2\*</sup> Yu-Cheng Chou<sup>3</sup> Chua-Chin Wang<sup>4</sup>

\* Professor, Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

## ABSTRACT

In navigation of underwater vehicles, the estimation of vehicle's position is crucial for the success of a mission. This study proposes a numerical iterative algorithm for estimating the position of a vehicle, in which the extended Kalman filter are used to fuse sensor data measured from the ultra-short line (USBL) positioning system, gyro compass, and Doppler velocity log (DVL). The developed data fusion algorithm is implemented as a module in the main controller of the vehicle IUT AUV I developed by the National sun yat-sen University. Navigation tests are carried out in enclosed waters to evaluate the performance of the proposed fusion algorithm on estimation of the vehicle's position. The experimental results demonstrate that the proposed algorithms are effective on the fusion of measurements from the USBL positioning system, gyro compass, and the DVL for improving the position estimation of an underwater vehicle. Furthermore, the RTS algorithm is employed to smooth the vehicle's predicted trajectory, which improves the reliability and robustness of the integrated navigation system effectively.

Keywords: Autonomous Underwater Vehicle; Underwater positioning; Extended Kalman Filter; Gyro Compass; Doppler velocity log; Ultra short baseline

## 一、前言

自主式水下載具 (Autonomous Underwater Vehicle; AUV) 廣泛應用於水下作業，例如海洋地形測繪 (Bathymetry)、水文調查、水下搜索或是水下工程檢測等，其獨立作業與大範圍調查能力的特性越趨受到重視，然其水下探勘調查作業之成效，有賴於水下定位估測的可靠度。當前已有許多水下定位感測器可運用於水下載具定位，但 Kussat et al. (2005) 等人亦指出，僅透過單一定位系統取得精確水下定位，目前仍有其實務應用上的限制（例如作業時間成本過高）。融合不同感測器資料以獲得可靠的水下定位資訊，已是當前發展的趨勢。

本研究開發定位感測資料融合演算，採用擴展式卡曼濾波 (Extended Kalman Filter; EKF) 融合 AUV 感測資訊，除了整合相對位移定位資訊的陀螺儀 (Gyro Compass) 量測之 AUV 三軸向加速度以及都卜勒速度儀 (Doppler Velocity Log; DVL) 量測之 AUV 三軸向對地速度之外，同時考量加入絕對定位資訊的量測資料。長基線 (Long Baseline; LBL) 定位系統能提供局部範圍的高精度絕對定位資訊，但需佈放多個應答器於海面上，每個應答器佈放與定位校正花費時間長，作業成本相當昂貴，且當載具超出應答器佈放範圍之外，定位性能便降低 (邱，2011)。超短基線 (Ultra-Short Baseline; USBL) 定位系統亦能提供絕對定位資訊，但定位精度較 LBL 差，不過其僅需將收發器安裝於水面船下，具有安裝簡便、水面船可跟隨 AUV 航行而不會有佈放範圍限制的優勢。因此，本研究擬加入融合 USBL 絕對定位感測資料於資料融合演算，探討 USBL 定位系統對於 AUV 感測資料融合之定位估算效能影響。

本研究將此一定位資料融合演算法實現於中山大學海下科技研究所開發之自主式水下測試平台 IUT AUV I (蘇，2018)，並於封閉水域進行 IUT AUV I 導航測試以蒐集感測資料，透過處理分析所量測的定位感測資料以評估本演算法之定位估算效能。此外，本研究利用 RTS (Rauch Tung Striebel) 平滑法進行定位融合資料後處理，透過狀態變數前後時刻的觀測值修正狀態變數值 (Rong, 2008; Belinska et al., 2012)，以提高定位估算之精確度與可靠度。

## 二、資料融合演算

卡曼濾波器用於線性最優狀態估計，其主要特點是利用遞迴化與最佳化來達到最佳狀態估測。在遞迴化 (Recursive) 程序中，僅需當時刻的量測值，不需要保留過去的數據或估測值，因此可以在即時 (Real-time) 控制系統中執行，也適合用於感測器資料融合，來達成即時導航與追蹤。

### 2.1 擴展式卡曼濾波

對離散數據進行卡曼濾波時，可分別描述系統狀態方程和量測方程式。狀態方程描述狀態隨時變化的規律，測量方程描述測量值和狀態之間的關係式。離散一階線性模型之狀態及量測方程為可分別以式(1)、式(2)表示：

$$\mathbf{m}_k = \mathbf{A}\mathbf{m}_{k-1} + \mathbf{q}_{k-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}\mathbf{m}_k + \mathbf{r}_k \quad (2)$$

上述方程式中， $\mathbf{m}_k$ 、 $\mathbf{y}_k$  為系統在  $t_k$  時刻下的系統狀態與量測值； $\mathbf{A}$  為系統之狀態轉移矩陣； $\mathbf{H}$  為系統之觀測矩陣； $\mathbf{q}_{k-1}$ 、 $\mathbf{r}_k$  為系統狀態誤差及量測誤差。其中， $\mathbf{q}_{k-1}$  及  $\mathbf{r}_k$  假設為兩者均互不相關的高斯白噪音，如式(3)：

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[\mathbf{q}_k \mathbf{q}_i^T] &= \begin{cases} \mathbf{Q}_k & k = i \\ \mathbf{0} & \text{otherwise} \end{cases} \\ \mathbf{E}[\mathbf{r}_k \mathbf{r}_i^T] &= \begin{cases} \mathbf{R}_k & k = i \\ \mathbf{0} & \text{otherwise} \end{cases} \\ \mathbf{E}[\mathbf{q}_k \mathbf{r}_i^T] &= \mathbf{0} \quad \text{for all } k, i \end{aligned} \quad (3)$$

卡曼濾波只適合用於線性系統，然而大多數實際應用屬於非線性系統，可透過泰勒級數展開將非線性系統模型線性化，以利融合於卡曼濾波進行運算，稱為擴展式卡曼濾波 (Extended Kalman Filter; EKF)。將式(1)、式(2)經非線性函數轉換，擴展式卡曼濾波之系統狀態及量測方程式非線性系統表示如下：

$$\mathbf{m}_k = \mathbf{f}(\mathbf{m}_{k-1}, \mathbf{q}_{k-1}) \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{h}(\mathbf{m}_k, \mathbf{r}_k) \quad (5)$$

其中，非線性函數以  $\mathbf{f}$  和  $\mathbf{h}$  代替，系統狀態  $\mathbf{m}_k$  為  $\mathbf{m}_{k-1}$  經非線性函數  $\mathbf{f}$  轉換，而量測值  $\mathbf{y}_k$  是  $\mathbf{m}_k$  由非線性函數  $\mathbf{h}$  轉換求得，然而  $\mathbf{f}$  及  $\mathbf{h}$  不能直接使用在斜方差中，因而利用 Jacobian 取代計算。

擴展式卡曼濾波其演算法流程圖如圖 1 所示，其演算可分為兩大步驟，分別為預測及更新。在預測階段中，依據先前的測量結果預測下一時刻的狀態，方程式表示如下：

$$\mathbf{m}_k^- = \mathbf{f}(\mathbf{m}_{k-1}, \mathbf{q}_{k-1}) \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (7)$$

其系統轉移狀態  $\mathbf{A}_k$  為  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  對  $\mathbf{x} = \mathbf{m}_{k-1}$  展開之 Jacobian 矩陣，而觀測矩陣  $\mathbf{H}_k$  為  $\mathbf{h}(\mathbf{m})$  對  $\mathbf{m} = \mathbf{m}_k$  展開之 Jacobian 矩陣：

$$\mathbf{A}_k = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{m}}(\mathbf{m}_{k-1}, \mathbf{q}_{k-1}) \quad (8)$$

$$\mathbf{H}_k = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{m}}(\mathbf{m}_k, 0) \quad (9)$$

於更新步驟中，則利用該時刻的測量結果修正系統的當前狀態，公式如下：

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{y}_k - \mathbf{h}(\mathbf{m}_{k-1}^-) \quad (11)$$

$$\mathbf{m}_k = \mathbf{m}_k^- + \mathbf{K}_k \mathbf{v}_k \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_k^- \quad (13)$$

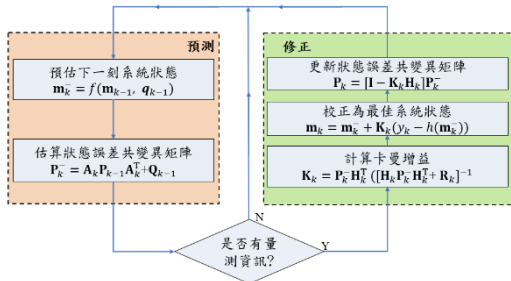


圖 1 擴展式卡曼濾波演算流程

## 2.2 RTS 軌跡平滑法

卡曼濾波演算主要著重在估計當前時刻的最佳預測，而平滑演算法則是用所觀測的數據往前回推最佳估測值。一般而言，平滑演算可以改善卡曼濾波估算的結果，主要因使用更多的測量值進行估算。RTS 平滑演算法是由前掃(forward sweep)與後掃(backward sweep)所構成。前掃是利用卡曼濾波儲存每一時刻所預估和更新修正及共變異矩陣的數據，而後掃則是 RTS 將前掃所蒐集資料作為運算。其步驟可以表示如下：

$$\mathbf{m}_k^- = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{m}_{k-1} \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_{k-1}^T + \mathbf{Q}_k \quad (15)$$

$$\mathbf{J}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{A}_{k+1}^T / \mathbf{P}_{k+1}^- \quad (16)$$

$$\mathbf{m}_k^s = \mathbf{m}_k + \mathbf{J}_k [\mathbf{m}_{k+1}^T - \mathbf{m}_{k+1}^-] \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_k^s = \mathbf{P}_k - \mathbf{J}_k [\mathbf{P}_{k+1}^T - \mathbf{P}_{k+1}^-] \mathbf{J}_k^T \quad (18)$$

上式中， $\mathbf{m}_k^-$ 、 $\mathbf{P}_k^-$  為預測出的下一時刻系統平均狀態與共變異誤差矩陣； $\mathbf{m}_k$ 、 $\mathbf{P}_k$  為卡曼濾波估測出的系統平均狀態與共變異誤差矩陣； $\mathbf{m}_k^s$ 、 $\mathbf{P}_k^s$  為平滑法估測出的系統平均狀態與共變異誤差矩陣； $\mathbf{J}$  為平滑增益，對平滑估計進行校正。

## 三、載具定位資料融合

本研究於水下載具 IUT AUV I 實現定位資料融合演算開發，IUT AUV I 由國立中山大學海下科技研究所開發，其主要功能是做為水下感測與導航控制系統開發之測試載台。本研究依據 IUT AUV I 搭載之 USBL、DVL 及 Gyro 等感測器，建立 AUV 基於擴展式卡曼濾波之定位資料融合演算法架構，如圖 2 所示。

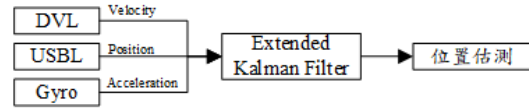


圖 2 AUV 水下定位估算之感測資料融合架構

### 3.1 載具系統架構

IUT AUV I 測試載台之系統架構如圖 3 所示，其以樹梅派 (Raspberry Pi 2) 作為主控電腦，並採用乙太網路架構系統通訊。IUT AUV I 主控器為利用 C 語言開發之多執行緒程式，其功能包含載台運動操縱、感測器收發與資料處理、任務腳本處理、及導航 (王, 2018; 陳, 2019)。導航系統藉由 AUV 位置資訊作為運動控制依據，本研究透過開發之定位資料融合演算來提供載具位置估測，感測儀器包括 USBL 定位系統、DVL 及 Gyro，USBL 定位系統提供 AUV 大地座標位置，DVL 量測 AUV 之運動速度，Gyro 則量測 AUV 之加速度與角速度。USBL 定位系統、DVL 及 Gyro 量測資料運用於擴展式卡曼濾波演算修正 AUV 位置，以提供精確可靠的 AUV 位置估算。

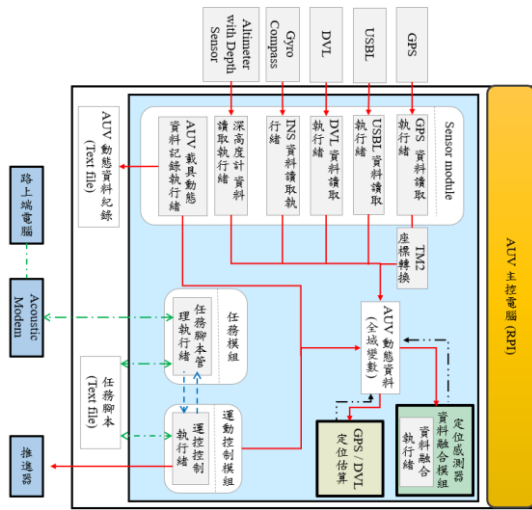


圖 3 IUT AUV I 測試載台系統架構

### 3.2 感測資料融合定位估算

本研究建立擴展式卡曼濾波進行 AUV 定位感測資料融合，並與 IUT AUV I 之導航系統整合。除了建構擴展式卡曼濾波之系統狀態方程之外，也利用 USBL、DVL 以及 Gyro compass 之量測資料建立量測方程。量測方程採用之資料包括 AUV 於大地座標系統下的 USBL 定位資訊  $[x, y, z]$ 、DVL 於載具座標下量測的速度  $[u, v, w]$ 、Gyro compass 於載具座標下之加速度  $[\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}]$ 、以及 AUV 之姿態  $[h, p, r]$  (艏向角(Heading)、縱搖角(Pitch)、橫搖角(Roll))。擴展式卡曼濾波之系統狀態  $\mathbf{m}_k$  與觀測值  $\mathbf{y}_k$  可表示如式(19)及式(20)：

$$\mathbf{m}_k = [x, y, z, u, v, w, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}]_{k-1}^T + \mathbf{q}_{k-1} \quad (19)$$

$$\mathbf{y}_k = [x, y, z, u, v, w, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}]_{k-1}^T + \mathbf{r}_k \quad (20)$$

其狀態轉移矩陣  $\mathbf{A}_k(\mathbf{m}_{k-1})$  如下：

$$\mathbf{A}_k(\mathbf{m}_{k-1}) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \Delta t \times \sin(h) & \Delta t \times \cos(h) & 0 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 & 0 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (21)$$

透過 2.1 節之擴展式卡曼濾波演算，可建立 AUV 基於擴展式卡曼濾波之定位資料融合演算法架構，其詳細架構流程如圖 4 所示。

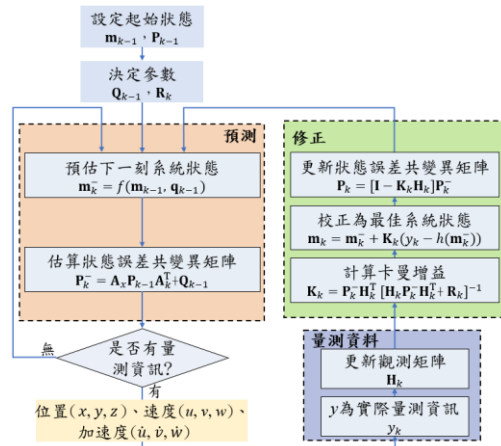


圖 4 AUV 之擴展式卡曼濾波定位演算流程

## 四、水域定位實驗與結果

本研究於台南安平港執行 AUV 航點導航測試，並收集定位感測資料，如圖 5 所示。為了取得 AUV 絕對定位參考基準，以評估感測資料融合之定位估算效能，AUV 採取水面航行以進行航點導航測試，並於 AUV 上安裝 GPS 接收器，以取得 AUV 之絕對參考座標。而 USBL 定位資料則從依據其詢答週期(Interrogation period) 從 GPS 定位資料擷取並加入高斯雜訊以進行模擬。

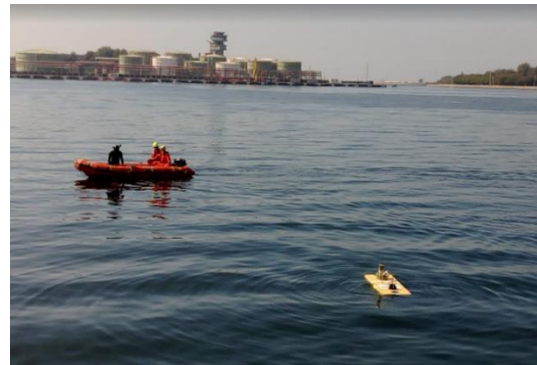


圖 5 AUV 於台南安平港進行航點導航測試並收集定位感測資料

### 4.1 航點導航實驗規劃

此實驗由 AUV 搭載 DVL、Gyro、USBL 應答器及 GPS 收集感測器之量測資料，各感測器之規格如表 1。實驗採取兩種不同載具定位方式進行導航，分別為 EKF 資料融合演算 (圖 6) 及 GPS/DVL 組合定位 (圖 7)，所估算之載具位置資訊將提供導航系統作為 AUV 運動控制之依據。

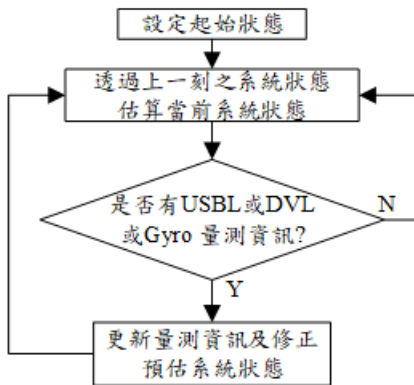


圖 6 基於 EKF 定位模組演算流程圖

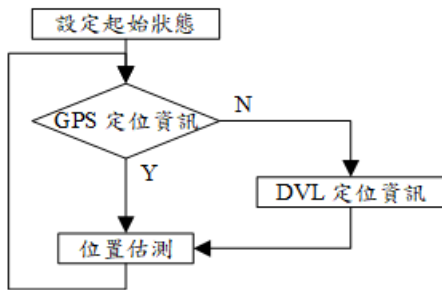


圖 7 基於 GPS/DVL 組合定位估算流程圖

表 1 實海域定位感測器之量測規格

Instrument	Accuracy	Refresh rate
USBL	Position accuracy: >0.2% of slant range Depend on noise level	$\frac{1}{3}$ Hz Max
DVL	0.2%±1mm/s	5 Hz Max
Gyro	Better than 1°	20 Hz Max
GPS	2.5m	1 Hz

## 4.2 定位實驗結果與分析

### 4.2.1 定位估測結果與分析

本研究探討三種不同定位估測方法之效能，包括：單一 DVL 定位估算、EKF 融合 USBL 與 DVL 定位估算(許，2020)、EKF 融合 USBL 與 DVL 及 Gyro 定位估算，估算之結果並與 AUV 之 GPS 定位參考軌跡進行比對，以得出各定位估測方法之平均誤差及均方根誤差。測試與分析結果如圖 8、圖 9 及表 2、表 3 所示，驗證本研究所提出之 EKF 演算法融合 USBL、DVL 及 Gyro 量測資料，能有效大幅提升 AUV 定位估算精確度。

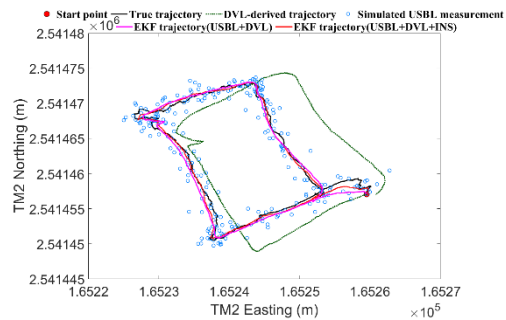


圖 8 定位估算結果之基於 EKF 定位模組演算

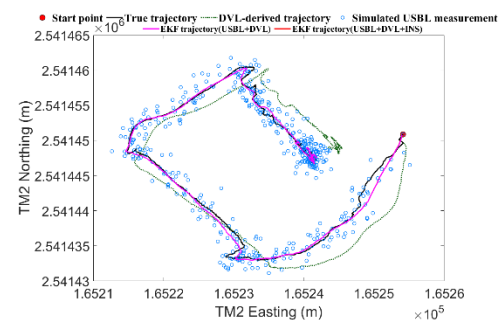


圖 9 定位估算結果之基於 GPS/DVL 組合導航

表 2 於 EKF 資料融合導航下不同定位方法之估算誤差

Position Estimation	Mean Error (m)	RMSD (m)
DVL-Derived	5.18	5.51
EKF (USBL+DVL)	0.76	0.90
EKF (USBL+DVL+ Gyro)	0.48	0.54

表 3 於 GPS/DVL 導航下不同定位方法之估算誤差

Position Estimation	Mean Error (m)	RMSD (m)
DVL-Derived	3.98	4.12
EKF (USBL+DVL)	0.62	0.72
EKF (USBL+DVL+ Gyro)	0.41	0.46

### 4.2.2 RTS 平滑演算之性能表現

依據 EKF 定位資料融合演算之結果，本研究進一步利用 RTS 軌跡平滑法修正 EKF 定位估算結果，以探討平滑修正之效能，結果如表 4 及表 5 所示。依據此一結果，經由 RTS 軌跡平滑修正後能降低定位估算誤差約 39%，有效提升定位估測之性能。



表 4 比較軌跡平滑法修正之平均誤差

	Mean errors (m)	
	Before	After
EKF Estimation	0.78	0.48

表 5 比較軌跡平滑法修正之均方根誤差

	RMSD (m)		RMSD Reduction (%)
	Before	After	
EKF Estimation	0.78	0.48	39.33%

#### 4.2.3 USBL 詢答週期之影響

本研究亦探討不同 USBL 詢答週期對於 AUV 定位估算效能之影響，模擬之 USBL 詢答週期分別為 3、10、30、60 秒，結果如表 2 所示。如預期，USBL 詢答週期越短，EKF 感測資料融合之定位估算效能越好。不過，雖然 USBL 的詢答週期越短，可越快更新 AUV 定位狀態，定位估算性能也越好，但越頻繁的 USBL 詢答越耗費 AUV 電量。AUV 透過電池供電，電量消耗速度會影響其水下作業時間長度，因此，依據表 6 於不同 USBL 詢答週期下之定位估算誤差，可提供使用者權衡 AUV 電量消耗與定位精度而取得最佳 USBL 詢答週期。

表 6 不同 USBL 詢答週期之 EKF 定位估算效能

詢答週期(s)	EKF Estimation	
	RMSD (m)	RMSD Reduction (%)
None	6.20	-
3	0.89	85.6
10	1.18	81.0
30	1.93	68.8
60	2.71	56.4

## 五、結論

本研究透過擴展式卡曼濾波融合 USBL、DVL 及 Gyro 定位感測器之量測資料，建構 AUV 定位資料融合演算，並於自主式水下測試載台 IUT AUV I 上實現。此一定位資料融合演算法經由實海域測試實驗，驗證能有效融合 AUV 定位感測器之量測資料。實驗結果顯示，IUT AUV I 僅靠單一 DVL 量測之定位誤差約為 5 公尺，經由 EKF 融合 USBL 與 DVL 量測資料後，定位誤差大幅降低至約 0.8 公尺，若融合 USBL、DVL、Gyro 量測資料後更進一步將

定位誤差降至 0.5 公尺左右，顯示了本研究所開發之 EKF 定位資料融合演算能有效提升 AUV 定位估算精度。此外，將 AUV 經由 EKF 融合感測資料之定位估算結果再進一步利用 RTS 平滑演算處理後，其定位均方根誤差可降低約 39%，此一結果也顯示 RTS 平滑化處理能進一步提高定位估算的性能。

## 謝誌

本研究承蒙科技部之經費補助(計畫編號 MOST 109-2218-E-110-009-)，得以順利執行，特此致謝。

## 參考文獻

1. 邱楫文(2011)長基線定位系統與載具動態模式之整合研究，國立中山大學海下科技研究所碩士論文。
2. 王駿程(2018)自主式水下測試載台運動模擬系統之設計，國立中山大學海下科技研究所碩士論文。
3. 蘇于銘(2018)自主式水下測試載台之硬體系統整合，國立中山大學海下科技研究所碩士論文。
4. 陳威翔(2019)自主式水下測試載台之航點導航功能開發，國立中山大學海下科技研究所碩士論文。
5. 許宏溢(2020)卡曼濾波應用於自主式水下載具定位之性能探討，國立中山大學海下科技研究所碩士論文。
6. Kussat, N. H., Chadwell, C. D., Zimmerman, R., 2005. "Absolute Positioning of an Autonomous Underwater Vehicle Using GPS and Acoustic Measurements," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 30, No. 1, pp. 153-164.
7. Rong, J., Zhang, H., Zhong, X., Chen, K. (2008) Research and Application of a Kalman Smoother Based on INS/GPS Integrated Navigation, *2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*, 3-4 Aug. 2008, Guangzhou, China, pp. 672-676.
8. V. Belinska, A. Kluga and J. Kluga, "Application of Rauch-Tung-Striebel smoother Algorithm for Accuracy Improvement," *2012 13th Biennial Baltic Electronics Conference*, 2012, pp.157-160.

# 應用基於深度學習與顏色特徵之潛水員偵測於 AUV 潛水員追隨控制

何鎮守<sup>1</sup> 周佑誠<sup>2\*</sup> 陳信宏<sup>3</sup> 謝孟璋<sup>4</sup>

<sup>1</sup>國立中山大學海下科技研究所碩士班研究生

<sup>2\*</sup>國立中山大學海下科技研究所副教授

<sup>3</sup>國立中山大學海下科技研究所教授

<sup>4</sup>國立中山大學海下科技研究所助理教授

## 摘要

科科技部計畫：MOST 109-2218-E-110-008-

潛水員任務通常具有高複雜度與高風險性，若自主式水下無人載具 (Autonomous underwater vehicle, AUV) 能從旁協助潛水員執行任務，則可提高潛水員作業之效率與安全。追隨型自主式水下載具可基於光學攝影機或聲納儀器進行開發。相較於聲納儀器，光學攝影機之主要限制為其水下能見距離短，但卻具有高解析度、高影格率、低成本、以及高應用普及性等優點。本研究以顏色作為偵測潛水員之特徵。本研究利用硬體迴路 (Hardware-in-the-loop, HIL) 模擬平台進行潛水員偵測之模擬測試，並修正顏色特徵篩選步驟之相關參數與方法。本研究亦利用 HIL 模擬平台，在兩潛水員衣著顏色不同之下，進行 AUV 追隨特定潛水員之模擬測試。模擬測試結果顯示，AUV 可以追隨特定潛水員，亦即身著紅衣之潛水員，初步驗證所提方法之可行性。

關鍵詞：自主式水下載具、潛水員偵測、潛水員追隨、光學影像、卷積神經網路、顏色特徵

## Applying Diver Detection based on Deep Learning and Color Features to Diver-following Control of an AUV

Zhen-Shou Ho<sup>1</sup>, Yu-Cheng Chou<sup>2\*</sup>, Hsin-Hung Chen<sup>3</sup>, Meng-Chang Hsieh<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Graduate student, Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

<sup>2\*</sup>Associate professor, Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

<sup>3</sup>Professor, Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

<sup>4</sup>Assistant professor, Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University

## ABSTRACT

Divers have a variety of tasks typically with high complexity and high risk. Autonomous underwater vehicles (AUVs) can improve the efficiency and safety of divers by assisting divers in performing underwater operations. Dive-buddy AUVs can be developed based on machine vision technology or acoustics technology. Compared with sonar devices, the main limitation of optical cameras is their short underwater visibility range. However, optical cameras have the advantages of high resolution, high frame rate, low cost, and high application popularity. In this work, color is used as the feature to determine which diver to be followed. In this study, a hardware-in-the-loop (HIL) simulation platform was used to conduct diver detection simulations. The parameters and methods

related to color-based diver detection algorithm were modified according to the simulation results. In addition, the HIL simulation platform was used to conduct diver following simulations in which two divers in front of the AUV have different diving suit colors. The simulation results show that the AUV can follow a specific diver, i.e. the one in a red diving suit, thereby preliminarily verifying the feasibility of the proposed method.

Keywords: Autonomous underwater vehicle; Diver detection; Diver following; Optical image; Convolutional neural network; color feature;

## 一、前言

潛水活動種類繁多，而從安全性角度而言，無論是娛樂性質、科學性質、或工程性質的潛水活動，皆具有高風險性。根據統計資料，50%以上的潛水事故是在潛水員獨自一人時所發生，包括40%發生於潛水員與潛伴 (Dive buddy) 分開期間、以及14%發生於單人進行無潛伴之潛水活動時。因此，在進行單人潛水活動或潛伴離開期間，若有自主式水下載具 (Autonomous underwater vehicle, AUV) 在附近作為潛伴，並從旁協助潛水員，則可提高潛水員水下作業之效率與安全，例如，作為潛水員的參考物件、提供潛水員定位座標、攜帶額外氣瓶、提供水下照明、作為水面平台與潛水員之間的通訊中繼節點、監視潛水員與任務執行狀態並做出相應動作。成為潛伴型 AUV 的首要條件，係具備追隨特定潛水員之功能。因此，開發潛伴型 AUV 的首要階段便是開發追隨型 AUV。本研究透過顏色特徵，達到偵測並追隨潛水員的效果。(Islam et al., 2019) 提到這十年來，不同設備與方法達成水下潛水員的追隨，並且其中提到設備為單攝影機的追隨的困境包含：水下的低光照、水下顏色失真。(Islam et al., 2018) 也使用單攝影機的設備來實踐潛水員跟隨，並開發一組能達到即時運算並且保持良好的偵測準確度之深度卷積神經網路，應用此深度網路訓練出適用於多變水下環境的潛水員偵測系統。為了能達到水下即時運算，並追隨潛水員，(周, 2020) 也建立起一組能高準確度偵測水下潛水員的卷積神經網路。

使用顏色為特徵達成偵測水下目標，(Sattar et al., 2006) 提出將 RGB 顏色域標準化 (Normalization) 的方式，減少水流以及水下光線衰退所造成的困擾。然而，在 (Bazeille et al., 2012) 中也提到，目前並沒有單一使用顏色作為特徵，就能追隨潛水員的方法。在有 (周, 2020) 開發卷積神經網路的前提下，透過顏色與偵測框特徵，達成以顏

色為特徵的潛水員偵測與追隨。

## 二、研究方法

中山大學海下科技研究所於 2020 年開發基於光學影像與卷積神經網路之潛水員偵測演算法、以及基於光學影像平面之潛水員追隨演算法 (周, 2020)，並將演算法實現於中山大學海下所開發之自主式水下測試載台 IUT-AUV I，且透過封閉式水域實驗，驗證 IUT-AUV I 在前方僅有單一潛水員之下，能成功追隨該潛水員。此潛水員偵測演算法中，於 CNN 輸出偵測結果之後，加入一項步驟，此步驟主要利用影像平面中邊界框 (Bounding box) 之間的並交比 (Intersection over union, IoU) 作為特徵，來決定追隨之特定潛水員，而 IoU 則隱含潛水員與 AUV 之間的相對距離和方位。在上述研發基礎上，本研究將原本以 IoU 作為特徵之篩選步驟，置換為以顏色作為特徵之篩選步驟，來決定所欲追隨之特定潛水員。

### 2.1 潛水員影像偵測流程

針對 AUV 前方有兩位潛水員 (紅衣與非紅衣各一位) 之潛水員影像偵測流程，則如圖 1 所示。

首先從 AUV 上攝影機取得即時影像，接著透過 CNN Tiny-YOLOv3 產生潛水員偵測框，再藉由類別信賴分數篩選 (Confidence filtering) 與非極大值抑制 (Non-maximum suppression) 閾值兩步驟，濾除低信賴度和相同物件之偵測框。若取得偵測框數量為 1，在進行偵測框之背景濾除與潛水員上紅色比例計算之後，會以潛水員身上紅色比例是否超過閾值，來判斷該潛水員是否為追隨目標。若取得之偵測框數量為 2，在將進行偵測框之背景濾除與潛水員上紅色比例計算之後，會將紅色比例較高之偵測框，視為追隨目標。作為追隨目標之當前偵測框，將與前一次偵測框進行 IoU 之比較，以降低顏

色上的誤判機率。最後，將所獲得之偵測框的中心座標與邊長尺寸，傳送至 AUV 主控程式，以產生推進器控制命令，驅動 AUV 追隨紅衣潛水員。

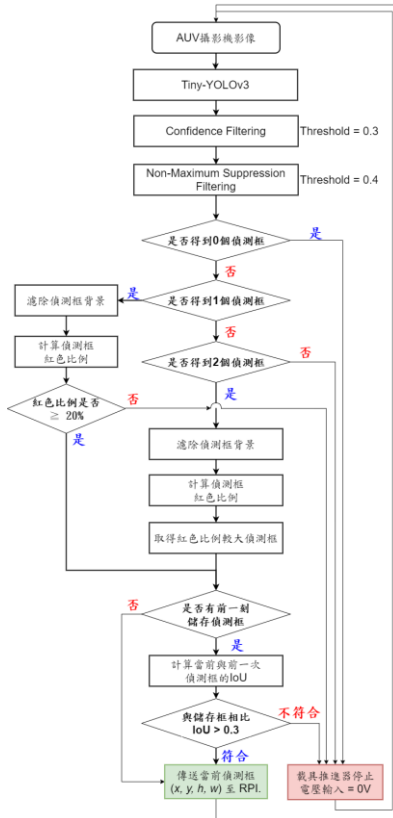


圖 1 潛水員影像偵測流程

## 2.2 偵測框背景濾除方法

由於要使用潛水員身上的顏色特徵來進行 AUV 的追隨控制，然而，若是考慮整個偵測框內的顏色來進行接下來的紅色比例計算，則會發生將部分背景加入計算或偵測框大小不同而導致的顏色比例錯誤。因此在進行顏色特徵上的判斷之前，需要濾除偵測框內潛水員以外的背景，並找出潛水員的輪廓。

在 (Nick, 2020) 中提及，影像分割的方法可以分成有空間性關係的 (Contextual) 和沒有空間性關係的 (Non-contextual) 兩類。前者可根據像素關係使用特定演算法來分割影像，後者則是設定閥值來達到影像切割的效果。使用演算法雖然能夠切割出特定範圍，但卻會讓整個計算時間拉長。因為潛水員追隨為即時的控制，為了不讓追隨的效果變差，

本研究採用沒有空間性關係的方法，來達成偵測框的背景濾除。

潛水員在水域時，通常會穿著深色系的潛水衣，如圖 2 所示。並且偵測框內的背景涵蓋比例通常佔得不低。利用上述兩點潛水員在水下的特徵，本研究使用影像的明度作為影像切割的基準，影像的明度是由 RGB 轉換成 HSV 所得。

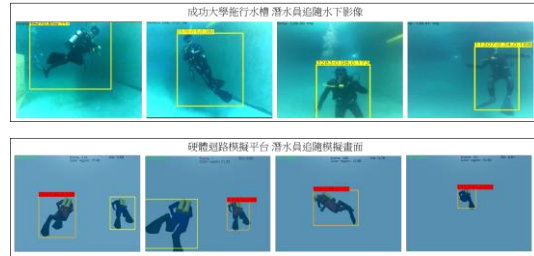


圖 2 潛水員封閉水槽及模擬影像

透過影像明度與像素數量作圖得到明度的數量分布，如圖 3 所示。依據潛水員背景顏色叫潛水員本身顏色淡，也就是明度值較高，並且背景的涵蓋面積大，可以認定明度的數量分布圖中，明度值較高、且數量較多的峰值前後為背景的像素。將這些被認為為背景的像素濾除，達到影像切割的效果，如圖 4 所示，左側圖片為偵測框內影像，中間為明度影像，右側圖片為影像切割後的結果。

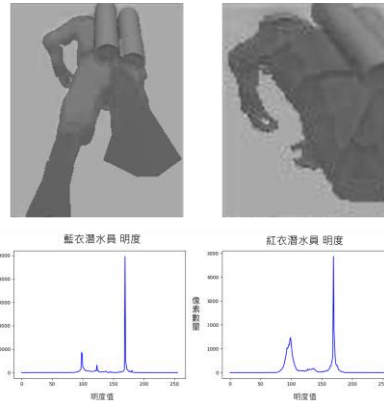


圖 3 紅、藍衣潛水員影像明度值對數量圖

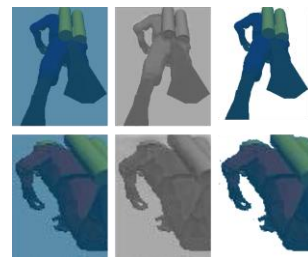


圖 4 潛水員影像切割前後

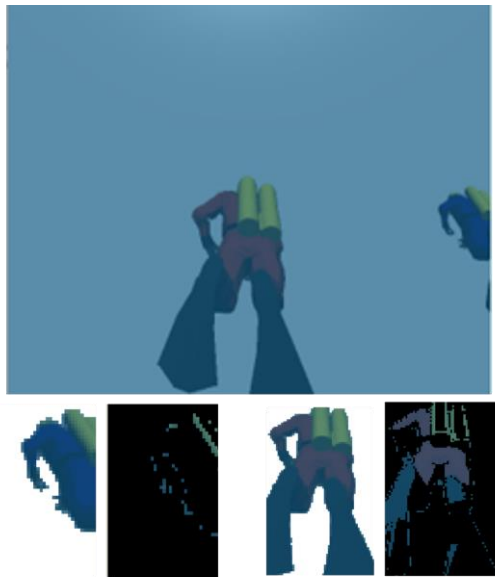
## 2.3 潛水員顏色比例計算

水下顏色的辨別因為水下光源的原因會產生與原本不一樣的顏色，在 Bazeille[2]中提到，水下的環境，顏色會因為光線的衰減而改變，通常具有突出的綠色或藍色調。所以在水下顏色的辨別上，不能使用正常光源下的顏色範圍。

本研究是透過 Colormap 的方式，將水下潛水員上的顏色，這邊的顏色是指紅色，重新界定紅色在該水域下的範圍分布，接著使用得到的矩陣，得出潛水員上的紅色像素比例，比例的計算式如下。

$$\text{Red percent} = \frac{\text{Pixels in the range of matrix}}{\text{Total pixels of the image}} \quad (1)$$

圖 5 為使用影像切割後再經紅色矩陣計算所得比例，以及兩潛水員上的紅色涵蓋範圍。



紅色佔潛水員比例：3.14 %      紅色佔潛水員比例：22.53 %

圖 5 紅、藍衣潛水員紅色涵蓋範圍

## 三、硬體迴路模擬

在封閉水域實驗前，透過模擬來檢視演算法及影像處理方法的可行性。(王，2018) 研發硬體迴路模擬系統，透過模擬器透過接收 IUT AUV 輸出的推進器控制訊號，模擬出 IUT AUV 的運動狀態並產生符合現實感測器的模擬資料，回傳給 IUT AUV 進行控制以完成任務模擬。

硬體迴路模擬系統架構圖，如圖 6 所示。整個系統可以分成兩個部分：IUT AUV I 的主控電腦和

模擬器。模擬系統的流程是由任務脚本編輯程式設定 AUV 的潛水員追隨任務開始，此時會將任務資料傳送給 IUT AUV I 主控電腦 (樹梅派)，等待任務開始。任務開始後，模擬器會將感測器資料傳給 AUV 主控電腦 (樹梅派)，並且會在模擬器中的動態 3D 繪圖程式上顯示目前 AUV 的姿態，再透過 AUV 上的相機得到目前潛水員的畫面，將此畫面傳送給潛水員影像偵測程式。偵測程式得到畫面後就會進行潛水員偵測的流程，最後會將要進行追隨潛水員的位置與偵測框資訊傳給 AUV 主控電腦 (樹梅派)。在整個任務的過程中，AUV 主控電腦 (樹梅派) 會根據得到的感測器資料和潛水員偵測結果，將 AUV 推進器的控制電壓訊號傳回 AUV 運動模擬程式。

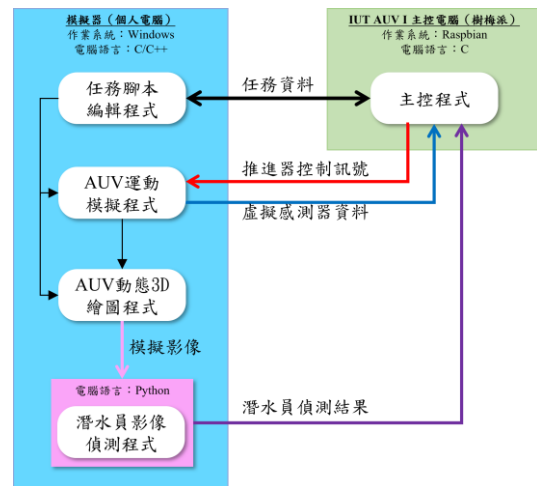


圖 6 硬體迴路模擬系統架構

## 四、模擬測試

由於 (周，2020) 已經於模擬平台和封閉式水域驗證過 AUV 追隨單一潛水員的可行性。而本研究使用顏色特徵來追隨特定顏色潛水員，所以模擬以雙潛水員的情境為主。第一個情境模擬為雙潛水員的模擬，該次模擬主要是驗證在兩個潛水員的情況下，AUV 是不是能追隨紅色的潛水員。第二個情境模擬為單潛水員的模擬，讓潛水員在整個模擬的過程中，多次的從 AUV 視野消失再出現，以此驗證符合追隨條件的潛水員再次出現時，AUV 也能繼續追隨。

### 4.1 情境 1 模擬結果

圖 7 為此情境模擬潛水員軌跡圖。紅衣潛水員的游動速度為 0.16 (m/s)，藍衣潛水員的游動速度為 0.3 (m/s)。該次模擬主要是驗證在兩個潛水員的情況下，AUV 是不是能追隨紅色的潛水員，所以模擬過程中兩潛水員都在 AUV 的攝影機視野內。圖 8 為此模擬結果。

模擬結果右側軌跡途中，藍色線為 AUV 移動軌跡、綠色線為紅衣潛水員軌跡、紅色線為藍衣潛水員移動軌跡，軌跡圖中，AUV 持續追隨正確目標紅衣潛水員。圖 8 的左側四張小圖，黃色偵測框為卷積神經網路所偵測出且經過閾值篩選後的偵測框，而紅色偵測框是當下 AUV 所選擇追隨的偵測框，從整個模擬挑出四張影片，上面兩張為潛水員直線前進影像，下面兩張則是兩潛水員正在轉彎時的影像。整個模擬過程，在畫面有兩位潛水員情況下，追隨目標偵測框內幾乎都是紅衣潛水員。

紅衣潛水員移動速度：0.16 m/s  
藍衣潛水員移動速度：0.3 m/s

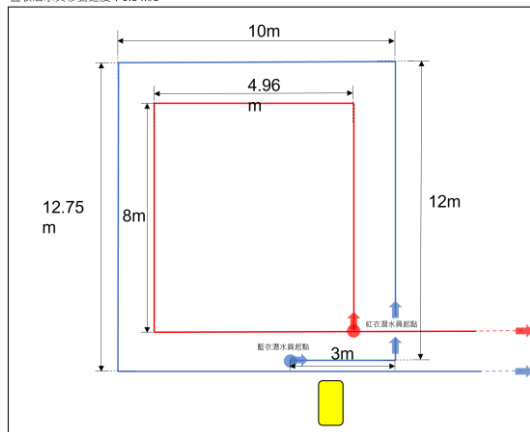


圖 7 雙潛水員模擬軌跡圖

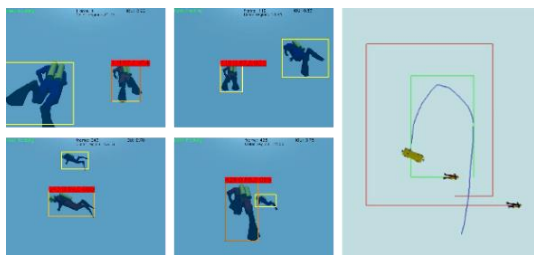


圖 8 情境 1 模擬結果

## 4.2 情境 2 模擬結果

圖 9 為此情境模擬潛水員軌跡圖。潛水員的游動速度為 0.16 (m/s)，潛水員在要離開 AUV 攝影機的視野和回來視野時的速度是 1.0 (m/s)。此模擬要

驗證目標潛水員離開視野後再回來，或是換成另外一位目標潛水員，AUV 是否會繼續執行追隨。

圖 10 為模擬結果，右側為 AUV 和潛水員軌跡，藍色線為 AUV 移動軌跡、紅色線為紅衣潛水員軌跡。過程中，潛水員有五次的消失在出現，並且在圖 10 左側四張圖有標示 1 到 4，分別是：一，潛水員在離開視野前向右轉；二，潛水員離開視野；三，再次出現在攝影機視野內；四，回到畫面中央。編號二的影像中，潛水員偵測框為綠色，代表認為追隨目標，但是因為潛水員上的紅色比例為到達目標，所以沒有達到追隨的標準。根據圖 10 右側軌跡圖，目標潛水員多次再次出現在 AUV 攝影機視野內，AUV 依然能繼續追隨潛水員。由第一和第二情境模擬得知，目前潛水員偵測程式內，會去辨別兩潛水員中，紅色比例較高的一位，做為目標；潛水員消失在 AUV 攝影機視野後，再回到畫面中，若符合追隨條件 AUV 依然會進行追隨。

紅衣潛水員移動速度：0.16 m/s

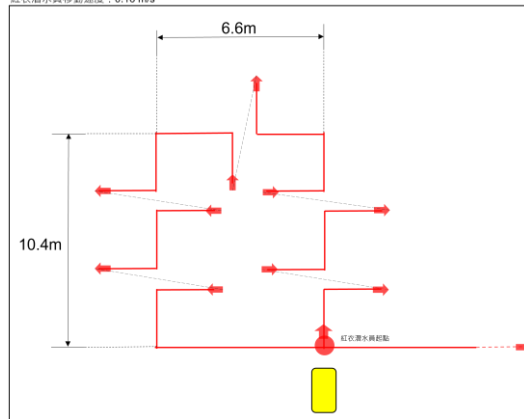


圖 9 潛水員多次消失模擬軌跡圖

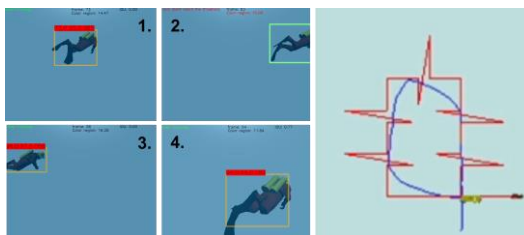


圖 10 情境 2 模擬結果

## 五、結論

由本研究模擬得知，目前透過 (周, 2020) 所開發卷積神經網路和顏色特徵，可以利用紅色為目標進行潛水員追隨。在兩個潛水員的情況下，會去分

辨潛水員身上紅色的占比，並去追隨紅色比例較高的潛水員。就第二情境模擬而言，雖然有少部分影像內潛水員身上的顏色比例沒有達到閾值的情況發生，AUV 依然能成功完成追隨任務，任務期間沒有發生 AUV 追不上潛水員的狀況。所以以目前的模擬結果來看，還沒有更改顏色閾值的必要性。由於尚有多種情境模擬尚未考慮，這部分仍待再進一步探討。

## 謝誌

本研究承蒙科技部經費補助 (編號 MOST 109-2218-E-110-008-)得以順利執行，特此致謝。

## 參考文獻

1. 王駿程(2018)自主式水下測試載台運動模擬系統之設計，國立中山大學海下科技研究所碩士論文。
2. 周慧敏(2020)應用深度學習物件偵測於自主式水下載具之潛水員跟隨技術開發，國立中山大學海下科技研究所碩士論文。
3. Bazeille, S., Quidu, I. & Jaulin, L. (2012)Color-based underwater object recognition using water light attenuation. *Intel Serv Robotics* 5, 109–118.
4. M. J. Islam, J. Hong, and J. Sattar. (2019)Person-following by autonomous robots: A categorical overview, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 38, no. 14, 1581–1618.
5. M. J. Islam, M. Fulton, and J. Sattar. (2018)Toward a generic diver-following algorithm: Balancing robustness and efficiency in deep visual detection, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 1, 113–120.
6. Nick Efford. (2020)*Digital Image Processing: A Practical Introduction Using Java*. Pearson Education, Chapter 10 "Segmentaiton".
7. Sattar, Junaed & Dudek, G. (2006)On the performance of color tracking algorithms for underwater robots under varying lighting and visibility. 2006. 3550 - 3555.

## 自主巡航水下滑翔機實海域實驗

張家溥<sup>1\*</sup> 宋雨霖<sup>1</sup> 陳柏棋<sup>1</sup> 張旭光<sup>1</sup> 蕭毓宏<sup>1</sup> 王兆璋<sup>1</sup>

<sup>1</sup>財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心

### 摘要

科技部計畫：

在大範圍且長期的海洋觀測中，自主巡航水下滑翔機是重要的水下觀測載具，水下滑翔機主要為透過浮力引擎改變載具排水體積以增減浮力，進一步移動重心位置可使其在海中滑翔。因為載具的移動僅在浮力與重心改變時才消耗電力，因此能以極少的電量進行長距離、大範圍的觀測任務。在本文研究當中，目標能夠開發出小型浮力引擎模組，能夠安裝於有限空間的艙體內部，除了水下滑翔機的運用外，亦能應用於自主式無人載具、漂流載台…等小型儀器。

在浮力引擎模組構成上，利用具有彈性的橡皮油囊作為調整排水量的內、外部油囊。液壓系統則使用無刷馬達(Brushless motor)驅動柱塞泵(Piston pump)提供高達 1450 psi 的壓力來源，進而改變外部油囊的大小以控制載具浮力。本研究已將研發之浮力引擎模組安裝於水下滑翔機中，並於深水池完成浮力引擎的測試實驗，並成功於台灣西南海域完成數次沉降往返之巡航。

關鍵詞：水下滑翔機、浮力引擎

### Autonomous sea glider in real sea area experiment

Jia-Pu Chang<sup>\*</sup>, Yu-Lin Sung, Po-Chi Chen, Hsu-Kuang Chang, Yu-Hung Hsiao, Chau-Chang Wang

<sup>\*</sup> National Applied Research Laboratories Taiwan Ocean Research Institute

### ABSTRACT

In the large-scale and long-term ocean observation, the autonomous sea glider is an important underwater observation vehicle. The sea glider mainly uses the buoyancy engine to change the drainage volume of the vehicle to increase or decrease the buoyancy. Further moving the center of gravity can make it glide in the sea. Because the movement of the vehicle consumes power only when the buoyancy and the center of gravity change, it can carry out long-distance and large-scale observation tasks with low-power consumption. In this research, the goal is to develop a small buoyancy engine module that can be installed inside a cabin with limited space. In addition to the use of sea gliders, it can also be applied to small instruments such as autonomous unmanned vehicles, drifting platforms, etc.

In the structure of the buoyancy engine module, elastic rubber bladder are used as internal and external oil bladder to adjust the displacement. The hydraulic system uses a brushless motor to drive a piston pump to provide a pressure source of up to 1450 psi, and then changes the size of the external oil bladder to control the buoyancy of the vehicle. In this research, the developed buoyancy engine module has been installed in the underwater glider, and the test experiment of the buoyancy engine has been completed in the high-pressure cabin, and successfully completed several round-trip cruises in the waters of southwest Taiwan..

Keywords: Sea glider; Buoyancy engine



## 一、緒論

水下滑翔機(underwater glider)是廣為人知使用浮力引擎作為動力於水下長時間收集數據的載具。在 2001 年 Eriksen 等人[1]在文章中提及水下滑翔機可以在 1500m 縱深的水域執行長達 6000 km 的任務，並認為水下滑翔機的建造成本約為幾天的船舶租金，卻能提供數倍的效益，能夠迅速且確實的提升水文觀測資料的密度。但早在水下滑翔機之前，即時地轉海洋陣列(Argo, Array for Real-time Geostrophic Oceanography)浮標的相關計畫於 1999 年 OceanObs 會議提出，而 2012 年由 Argo 所收集的水層剖面資料已經達到一百萬筆[2]，該計畫橫跨了全世界，由 30 幾個國家共同維持。本研究目的希望能夠掛載各式儀器的水下滑翔機，用於大範圍的水文資料收集。

除此之外浮力引擎用於其他更多的應用，例如水下自主式無人載具(AUV, Autonomous Underwater Vehicles)可以大幅的縮減載具在下沉或維持於指定深度的功耗，C. Thangavel 等人[3]在研究中提到浮力引擎用比起以往螺旋槳更具動力效率。這種非旋轉式動力系統更能減少對於海水的干擾，Masmitjà 等人[4]就是利用了浮力引擎減少 AUV 對於海洋的干擾，增進所收集的數據穩定度。

## 二、系統架構

### 2.1 油壓系統

油壓系統為整個浮力引擎的主要骨幹，將儀器內油艙的油體推送至外部油囊，在同樣質量下取得更大的排水體積來增加浮力，現有浮力引擎由柱塞泵提供油壓輸出。柱塞泵能在固定的轉速下提供固定的流量，相對而言低壓時效率較差，但高壓時，能不增加過多功率而穩定的輸出流量，如圖 1 表示扭矩增加 1.5 倍的情況下，輸出壓力可以提升三倍。而圖 2 表示 1100rpm 的轉速下，柱塞泵可以提供高達 3,000psi 的壓力，比起 108 年利用無刷馬達直驅齒輪泵，在 2,000rpm 的轉速下，只能提供 500psi 的壓力輸出。然而在本研究中經壓力艙測試後，目前所架構之浮力引擎油壓系統可驅動之最大外部壓

力為 1450 psi，即於此壓力環境下，浮力引擎能順利將液壓油從內油囊注入外油囊，進而改變載具浮力，配合重心位置的變化，達到改變載具姿態之目的。

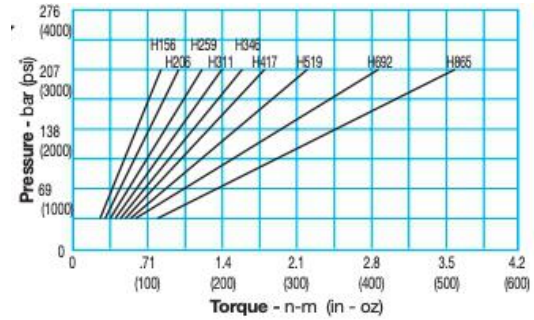


圖 1 壓力與扭矩關係圖

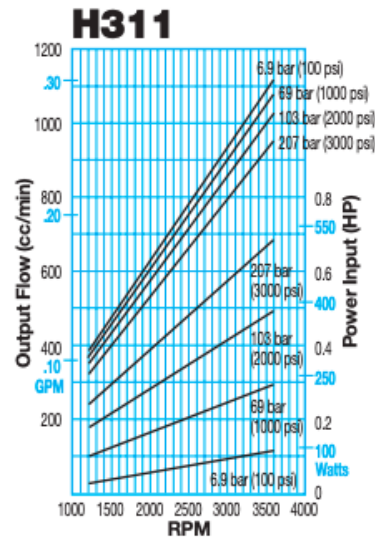


圖 2 轉速流量關係圖

### 2.2 載具外型設計

整體的載具如圖 3，以一水密艙體做為主要結構，艙體長度為 1360 mm，直徑為 200 mm，材質以透明壓克力及鋁合金為主。艙體內含浮力引擎控制系統、線性導螺桿、重心轉向配重塊(電池組)、艙內儲油囊等，透過透明壓克力可以觀察內部機器燈號、油路狀態、系統運作狀況...等；主艙體積主要作為配重塊位移使用，艙體自身浮力可達 27KG。載具翼展為 1400mm，可以有效提供導流作用使載具驅動，並搭配尾翼以加強方向穩定性。載具前艙提供浮力引擎之內、外油囊所需安置的空間，載具的主要控制系統、傳動系統、感測器(CTD

Sensor)、定位與衛星通訊系統(GPS & Iridium)則配置於載具後艙空間。載具所搭載的配重電池可達 3KG, 利用步進馬達控制配重電池的移動, 移動行程可達 460mm, 使重心能前後移動 40mm。而線性滑軌亦連接了一組伺服馬達, 可以改變滑軌左右向約 70 度的傾角, 進而改變載具左右傾角使載具得以轉向。

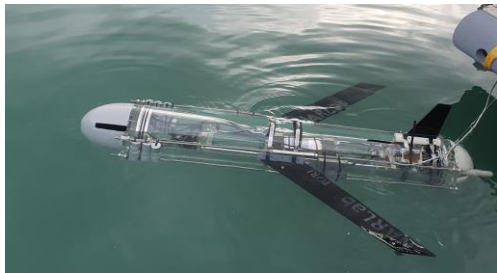


圖 3 水下滑翔機外型

## 2.2 控制系統

為實現載具性能, 需建構一個主控系統控制感測模組資料收集以及控制浮力引擎運作包含沉浮滑翔運動、定深懸浮等功能, 目前使用嵌入式系統樹莓派(Raspberry Pi), 利用搭載 ubuntu 作業系統建構使用者介面, 可透過手機即時顯示資料與操作, 介面如圖 4 所示, 當載具位於水面時可透過 wifi 連接至載具讀取目前系統狀態。目前規劃執行任務動作為: 系統上電後自動採集溫鹽深儀(Conductivity Temperature Depth)、主體姿態(PITCH、ROLL、YAW)、內艙溫度與壓力相關資料, 等待接收啟動命令後進入自動化排程:

1. 外油囊開始排油, 等待主體下沉
2. 下沉至設定深度後調整主體姿態為水平並採集資料(註 1)
3. 外油囊開始注油, 等待主體上浮
4. 至水表面後開始傳輸資料並準備下潛(註 2)
5. 重複 1-4 動作

註 1、藉由溫鹽深儀內深度資料, 可設定載具自動潛返水下深度。

註 2、主艙體內有慣性測量單元, 可即時調整水中運動姿態, 確保下沉與上浮之仰角。

系統核心透過 UART 及 RS232 通訊介面完成載具姿態資訊、鹽溫深感測資訊、GPS 定位資料收集以及銜衛星雙向通訊功能, 並掛載馬達驅動模組, 輸出 PWM 訊號控制無刷馬達、步進馬達以及伺服馬達

等運作, 以調整載具浮心重心位置與姿態, 棋系統架構如圖 5。



圖 4 網頁控制介面

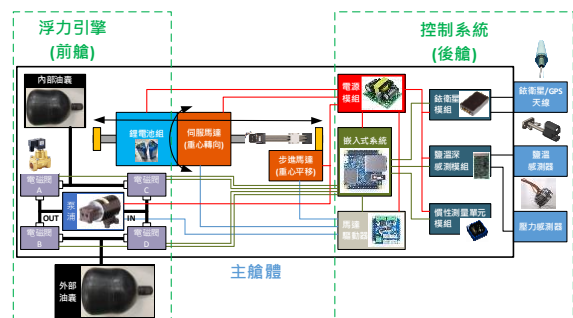


圖 5 系統架構圖

## 三、初步結果

至今本研究已於墾丁南灣海域進行實海域實驗, 水下滑翔機依程式腳本規畫進行連續 5 次沉降往返之巡航運動, 垂直巡航水深達 10 公尺, 並由姿態傾角隨時間及深度的變化符合載具下潛及上浮的設計姿態。

實驗測試的地理位置, 如圖 6 所示, 載具佈放與回收點位分別為 (21.95053°N, 120.76952°E)、(21.95058°N, 120.76946°E), 兩地點水平距離約 26.5 公尺, 實驗期間, 載具依程式腳本規劃共執行 5 個週期的運動(下潛及上浮), 歷時約 50 分鐘, 垂直運動範圍約為 0-10 米, 由姿態傾角隨時間及深度的變化可看出符合載具下潛及上浮的預設姿態, 0-4 米處為載具停止增減浮力的區間, 此區間下潛與上浮的平均運動速度分別為 12.6 cm/s、17.9 cm/s, 下潛時姿態傾角介於 40-45°, 上浮時則介於 20-40°, 如圖 7。從上述載具垂直運動軌跡變化可初步歸納兩個觀測結果:

1. 依中央氣象局貓鼻頭測站 10/28 日 10:00-11:00 觀測資料顯示當地風向為 60°(東北向), 風速約 5.6

m/s，而載具之佈放-回收路徑呈現西南向漂流，符合表面海流(0-10 m)與風成反向的趨勢。

2.由載具垂直速度分布的推算，可推測當時實驗地點可能受到當地地形及水文狀態所引發的湧升流現象影響，導致載具上浮速度略大於下潛速度。



圖 6 實海域測試地點座標(墾丁南灣)

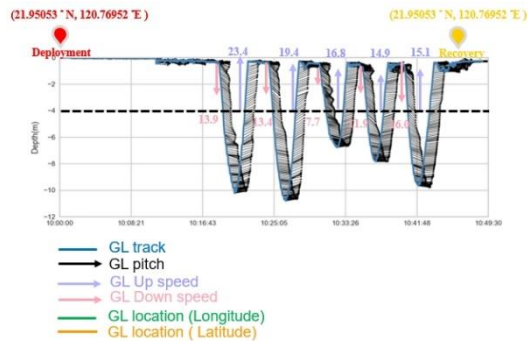


圖 7 水下滑翔機實海域測試運動軌跡圖

## 謝誌

感謝財團法人國家實驗研究院提供 iDream 創新科技計畫，支持相關經費。

## 參考文獻

1. C.C. Eriksen and T.J. Osse and R.D. Light and T. Wen and T.W. Lehman and P.L. Sabin and J.W. Ballard and A.M. Chiodi(2001)" Seaglider: a long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Volume: 26 , Issue: 4.
2. British Oceanographic Data Centre (2012)"One million Argo profiles".
3. C. Thangavel ; P. Muthuvel ; Sarojani Maurya ; Tata Sudhakar(2015)" Design and development of non- rotary propulsion for autonomous underwater vehicles" , IEEE Underwater Technology (UT).
4. I. Masmijà and J. González and S. Gomàriz (2014)" Buoyancy model for Guanay II AUV" , OCEANS 2014 - TAIPEI 。
5. Chris Yahnker (2011) "Overview of the

development and advantages of new, larger fairings for the iRobot Seaglider" OCEANS'11 MTS/IEEE KONA

# 以數值模式探討感潮河段半鹹水淡化

東佳穎<sup>1\*</sup> 于嘉順<sup>2</sup> 楊宗翰<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>財團法人資訊工業策進會副工程師

<sup>2</sup>國立中山大學兼任助理教授

<sup>3</sup>黎明工程顧問股份有限公司水利技師

## 摘要

為評估曾文溪半鹹水淡化後副產物鹵水排放對河川影響，探討枯水期及豐水期兩種情況，考慮河川流量最小及最大時期，由於淡化廠採用 RO 逆滲透處理，水溫部份並不影響，因此模擬情境僅考慮鹽度變化。本計畫所使用之模式為 SCHISM，在網格方面使用非結構式網格模擬計算區域，以半隱式有限元素法解析水動力方程式。為了解排放鹵水對河川可能影響，對於河道區域進行加密以適當解析附近鹽度擴散模擬，透過有限元素法優點，外海可使用較大網格解析，近岸海域及河道內部則以較小網格解析，網格解析度最小為 30 公尺，依此設計水平網格除了可以增加計算速度，同時也能清楚解析淺水區流場，垂直網格部分則以 LSC2 來計算，隨深度改變層數。案例情境模擬分為枯水期(3 月)及豐水期(9 月)，鹵水排放與上游流量及潮汐之交互作用，情境設計為鹵水排放點在河川底層排放。由潮通量得知，在枯水期間河川之流量受到潮汐所影響而有往復的運動；豐水期間則是受到上游流量主導。本計畫建置由上游至下游之河川斷面以便觀察鹵水排放後在河川內傳輸之情況。在枯水期間鹵水傳輸的現象，在高潮位時有短暫堆積在底層區域，但隨著退潮開始，鹽度較高的水團開始向下游傳輸。最後，便無鹽度較高的水團出現。在豐水期間，傳輸現象更為明顯，鹵水在高潮位時因上游流量大，導致在排出後便向下游傳輸。

關鍵詞：數值模式、SCHISM、曾文溪、海水淡化

## 一、前言

近年來環境意識抬頭與土地徵收困難等因素，使水庫開發計畫難以進行，又受到全球氣候變遷劇烈，台灣水文環境產生極大變化，水資源匱乏現象日益明顯，此外隨著人口增加、經濟成長、都市化發展與生態環境的變遷，對於水資源運用更加不利。經濟部水利署南區水資源局規劃河川感潮河段半鹹水淡化，開發曾文溪河川感潮河段水資源利用可行性，期望能提升水資源供應量，應民生與產業發展所需用水量。為評估曾文溪半鹹水淡化後副產物鹵水排放對河川影響，本模擬情況較為嚴苛，探討枯水期及豐水期兩種情況，考慮河川流量最小及最大時期。由於淡化廠採用 RO 逆滲透處理，水溫部份並不影響，因此模擬情境僅考慮鹽度變化。

## 二、研究方法

### 2.1 SCHISM 模式

近年海洋數值模式發展多元，從大尺度海洋至小尺度河川、湖泊皆是可模擬之區域。各海洋數值模式皆有其特性，以數值分法可區分成有限體積法、有限元素法及有限差分法；以網格可以區分為結構式網格與非結構式網格。本計畫所使用之模式為 SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydrosience Integrated System Model) (Zhang et al., 2016)，在網格方面使用非結構式網格模擬計算區域，以半隱式有限元素法解析水動力方程式。SCHISM 模式以水動力作為核心，可耦合多種模組，例如：生態模組、沉積物模組、油污擴散模組及風浪計算模組等等(如圖 1)。

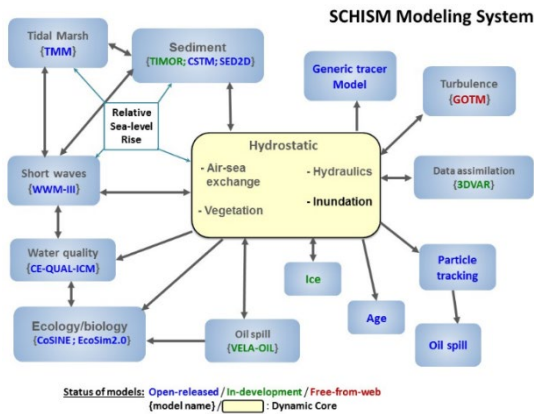


圖 1 SCHISM 模式應用模組示意圖

SCHISM 模式包含了兩個假設的條件，一為布式近似 (Boussinesq approximation)，及水體內部的密度差異可忽略，另一為靜水壓近似 (hydrostatic approximation)，及垂直壓力梯度力與浮力平衡，並以傳輸方程式 (transport equations) 計算鹽度與溫度，以卡氏座標表現方程式如下所述：

流體不可壓縮之性質：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

連續方程式，可以求得水位高度：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} \mathbf{u} dz = 0 \quad (2)$$

動量方程式，用來求得流速，式中  $\partial/\partial z (v \partial u/\partial z)$  為對流項：

$$\frac{Du}{Dt} = F - g\nabla\eta + \frac{\partial}{\partial z} \left( v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

其中：

$$F = -fk \times u + \alpha g \nabla \psi - \frac{1}{\rho_0} \nabla p_A - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \rho d\zeta + \nabla \cdot (\mu \nabla u) \quad (4)$$

計算鹽度及溫度之傳輸方程式：

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_s \quad (5)$$

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q}{\rho_0 c_p} + F_h \quad (6)$$

模擬運算的水位結果與經濟部水利署水文資訊網提供之潮位站進行比對較驗後，模式再增加溫度及鹽度進行案例情境模擬。

## 2.2 網格設定

模式網格需要岸線及地形資料，須先取得詳細的岸線資料，岸線部分來自 NOAA coastline，利用 Google Earth 進行描繪，記錄點位經緯度資料，再透過前處理程式，產生模式所需的計算網格；曾文溪外海水深地形資料取自科技部海洋資料庫，河川斷面水深地形資料由水利署提供，依據水深地形資料與岸線地形資料進行差分。

為了解排放鹵水對河川可能影響，對於河道區域進行加密以適當解析附近鹽度擴散模擬，取水點位置為河川斷面樁位 L053，鹵水排放點為河川斷面樁位 L041(圖 2)，水利署水位測站分別為西港橋及國姓橋水位站，圖 3 為模式網格及水深分布，曾文溪為感潮河段受到潮汐影響，因此模式計算範圍包含曾文溪外海，由東經 119.79 度至 120.34 度，北緯 22.78 度至 23.32 度，共 24,312 個計算節點、45,614 個計算元素，透過有限元素法優點，外海可使用較大網格解析，近岸海域及河道內部則以較小網格解析，網格解析度最小為 30 公尺，依此設計水平網格除了可以增加計算速度，同時也能清楚解析淺水區流場。垂直網格部分則以 LSC2 來計算，隨深度改變層數，平均層數 9 層，最多 21 層，最少 1 層。

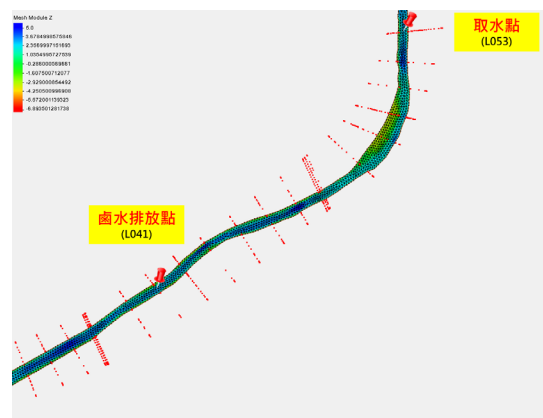


圖 2 河川斷面位置圖

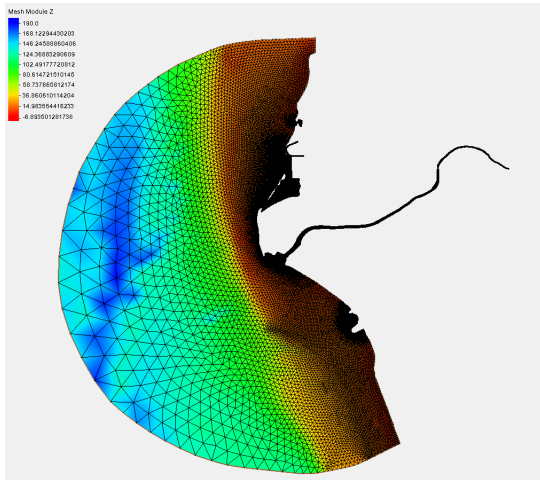


圖 3 網格範圍及水深地形圖

### 2.3 模式驗證

模式中潮汐邊界使用八個分潮，包含全日潮(K1、Q1、O1、P1)及半日潮(K2、S2、N2、M2)。潮位站資料取自水利署即時水位，資料經由調和分析將天文潮與非天文潮分開，再依據潮位站資料分別與模式結果進行校驗。模式模擬枯水期時間從 2021 年 3 月 1 日至 2021 年 3 月 30 日，另一模擬時間為豐水期從 2020 年 9 月 1 日至 2020 年 9 月 30 日，時間步長為 120 秒，水位模擬結果與西港橋及國姓橋測站進行校驗。

枯水期情境模式模擬水位與 2021 年 3 月國姓橋及西港橋水位站調和分析後比對校驗(圖 4 及圖 5)，紅色實測資料，黑色為模式模擬結果，模式計算結果與實測資料之均方根誤差分別為 6.99 及 13.67 公分；豐水期情境模擬水位與 2020 年 9 月國姓橋及西港橋水位站調和分析後比對校驗，模式計算結果與實測資料之均方根誤差分別為 7.79 及 7.38 公分。綜合以上，表示在純潮汐狀況下，模式水位與實際情況接近。

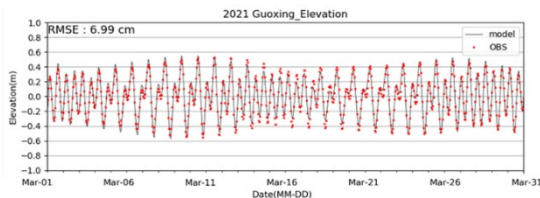


圖 4 枯水期國姓橋潮汐比對圖

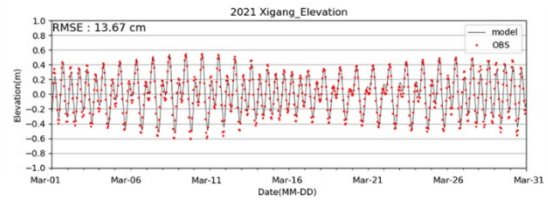


圖 5 枯水期西港橋潮汐比對圖

### 2.4 案例設定

為探討排放鹵水在不同季節水量影響，因此模擬情境包括枯水期及豐水期，以分析不同流量所造成的變化，模擬情境時間為 2021 年 3 月及 2020 年 9 月。模式邊界可分為開放邊界與非開放邊界，開放邊界為水位、流速、溫度及鹽度驅動等，其中水位驅動即潮汐驅動。本計畫中有一個半圓弧形的開放邊界，資料使用全球海洋預報系統 Global RTOFS (Real-Time Ocean Forecast System)，非開放邊界則沒有任何輸入。模式中氣象資料取自中央氣象局 WRF (Weather Research and Forecasting model)，包含氣溫、氣壓、風速、風向、相對溼度、向下短波及長波輻射。

淡化廠取水點為 L053，鹵水排水點為 L041，鹽度皆為 36.21 PSU，設計進水 120,000 CMD，約為 1.4 CMS，鹵水排放量為 55,800 CMD，約 0.65 CMS，其中在枯水期模擬兩種情況，連續取水及排水，另一為連續取水在退潮時排兩倍水量，即 1.3 CMS；豐水期因上游流量較大，不考慮退潮排放，模擬情境詳細設定如表 1。曾文溪河道內初始溫度及鹽度設定依據環保署近十年採樣平均值，依序為河口、國姓橋、西港橋至上游麻善橋將其值做內插。

表 1 模擬情境設定

案例	模擬時間	上游平均流量 (CMS)	取水及排水設定	鹵水排放量 (CMS)	鹵水鹽度 (PSU)
A	枯水期 2021 年 3 月	3.2 (11-4 月)	連續取、 排水	0.65	36.21
B			連續取 水，退潮 時排 2 倍水量	1.3	
C	豐水期 2020 年 9 月	77.9 (5-10 月)	連續取、 排水	0.65	

### 三、結論

案例情境模擬分為枯水期(3 月)及豐水期(9 月)，鹵水排放與上游流量及潮汐之交互作用。情境設計為鹵水排放點在河川底層排放。由潮通量得知，在枯水期間河川之流量受到潮汐所影響而有往復的運動；豐水期間則是受到上游流量主導。

情境 A 為枯水期間鹵水排放與上游流量及潮汐之交互作用。大潮期間因潮汐通量增加，導致鹵水在排放之後與河川內的水體混和較為均勻，使底層並無有明顯之鹽度較高分布的現象，僅在高潮位時有短暫較高濃度水團出現(圖 6)。漲潮時距離排水口上游 1,000 公尺處鹽度為 18.7 PSU，下游 1,000 公尺鹽度為 19.5 PSU(圖 7)。圖 8 顯示退潮時受上游影響鹽度較低。由此結果可以得知，在枯水期間曾文溪河道內是由潮汐影響為主，小潮時鹵水擴散較為緩慢，大潮時潮通量大使鹵水擴散較為迅速。

情境 B 為枯水期間鹵水排放與上游流量及潮汐之交互作用。情境設計為鹵水排放點在河川底層排放，排放時間為退潮時排放，與情境 A 有相同現象。在小潮期間，當鹵水在退潮時由排放口排放時，可在底部觀察到高鹽度的水團(圖 9)，但轉潮後開始漲潮時，底部鹽度較高的鹵水被河川內較淡的水團稀釋

(圖 10)。然而，當潮通量增加變為大潮時，底層擴散速率增加，鹽度較高的現象便不存在(圖 11)。

情境 C 設計為豐水期間鹵水排放與上游流量及潮汐之交互作用。情境設計為鹵水排放點在河川底層排放，排放時間為全時段排放。圖 12~圖 14 為小潮期間河川鹽度分布，因河川上游流量較枯水期大，大致上為向下游排放，因此，潮汐的影響減弱，使得在排放口的鹵水排放後受到上游流量的影響迅速擴散，但同樣與大潮期間相比，擴散現象略為不足(圖 15~圖 17)。大潮期間，河川上游流量大，大部分的流量向下由流動。因流量較大，排放口的鹵水排放後迅速擴散。因此，可以得知在豐水期間，河川內的鹽度是由上游的流量所控制，使得鹵水排放後皆迅速擴散，且並無明顯堆積現象。

本計畫建置由上游至下游之河川斷面以便觀察鹵水排放後在河川內傳輸之情況。在枯水期間鹵水傳輸的現象，在高潮位時有短暫堆積在底層區域，但隨著退潮開始，鹽度較高的水團開始向下游傳輸。最後，便無鹽度較高的水團出現。在豐水期間，傳輸現象更為明顯，鹵水在高潮位時因上游流量大，導致在排出後便向下游傳輸。此外，豐水期間更快速的將高鹽度水團擴散。

### 參考文獻

- Chen, C., R. C.Beardsley, and G.Cowles. 2006. An unstructured-grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. *Oceanography* 19 (SPL.ISS. 1):78–89.
- Zhang, Y. J., F.Ye, E.V.Stanev, and S.Grashorn. 2016. Seamless cross-scale modeling with SCHISM. *Ocean Modelling* 102:64–81.
- Zhang, Y., and A. M.Baptista. 2008. SELFE: A semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling* 21 (3–4):71–96.

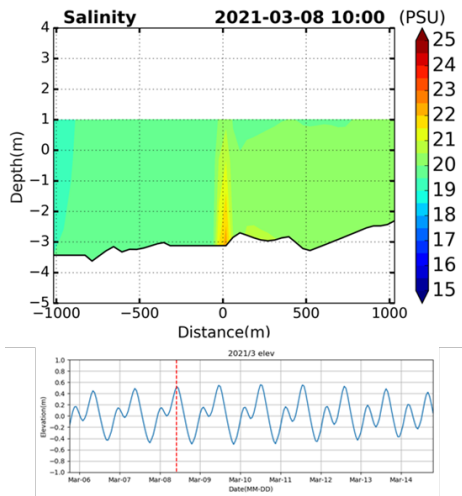


圖 6 情境 A 大潮高潮位之河川斷面鹽度分布

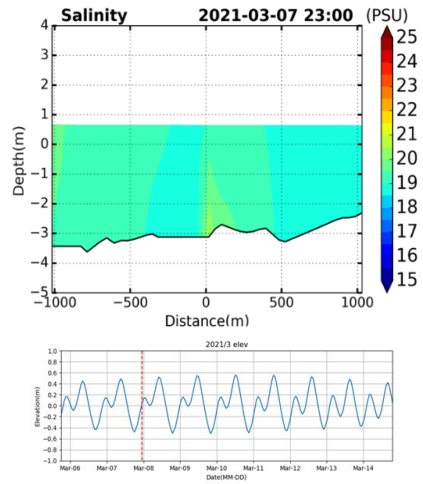


圖 7 情境 A 大潮漲潮時河川斷面鹽度分布

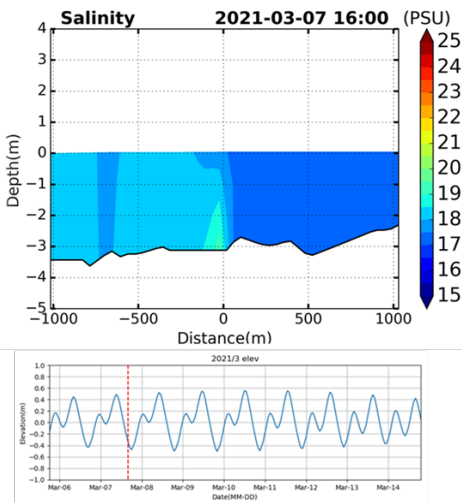


圖 8 情境 A 大潮退潮時河川斷面鹽度分布

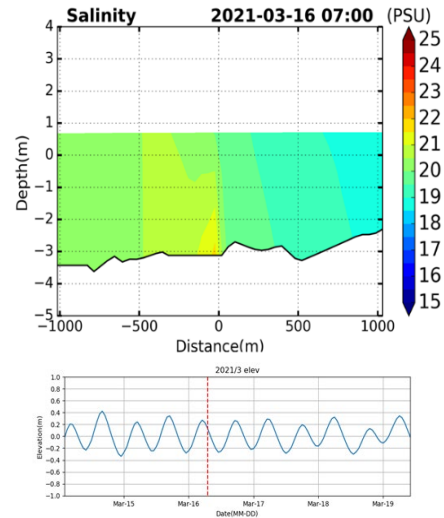


圖 9 情境 B 小潮退潮時河川斷面鹽度分布

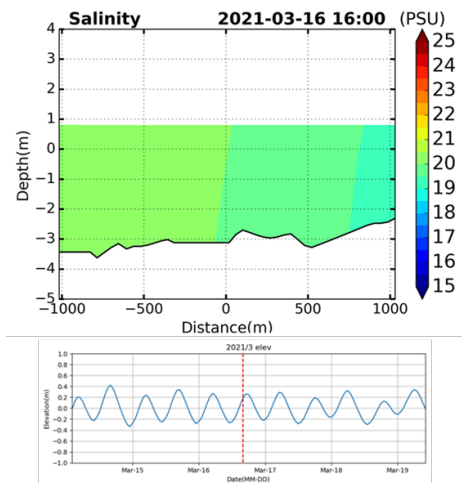


圖 10 情境 B 小潮漲潮時河川斷面鹽度分布

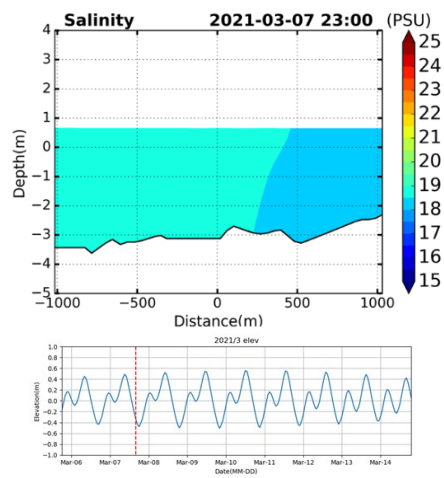


圖 11 情境 B 潮漲潮時河川斷面鹽度分布



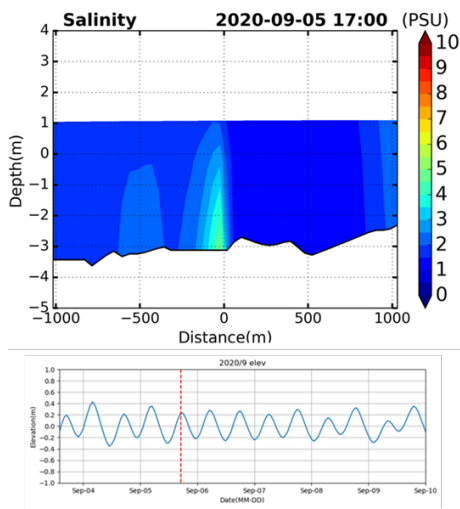


圖 12 情境 C 小潮高潮位之河川斷面鹽度分布

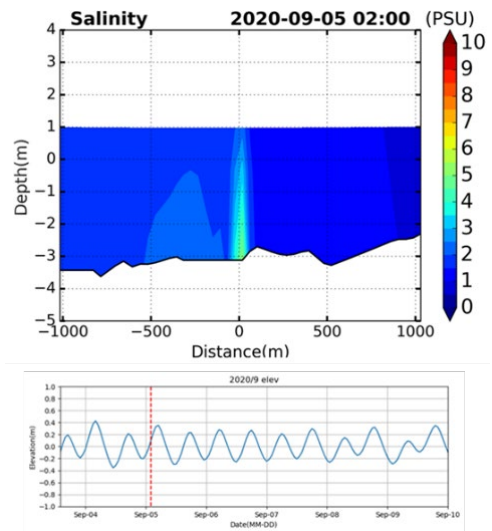


圖 13 情境 C 小潮漲潮時河川斷面鹽度分布

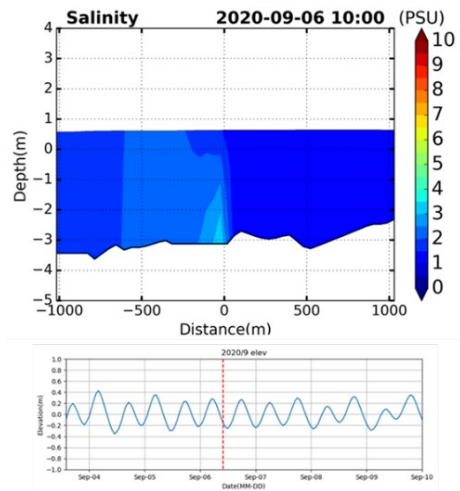


圖 14 情境 C 小潮退潮時河川斷面鹽度分布

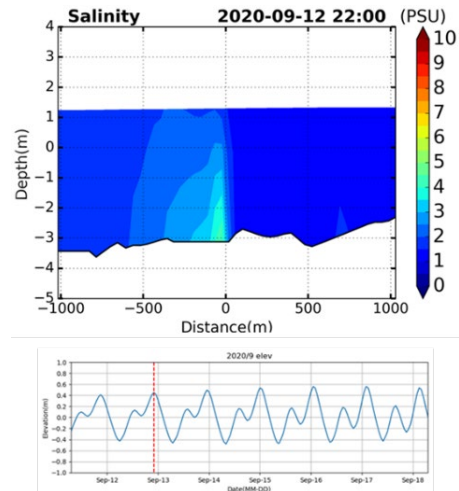


圖 15 情境 C 大潮高潮位之河川斷面鹽度分布

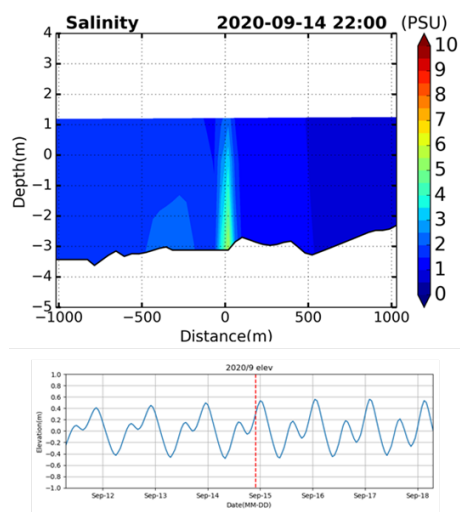


圖 16 情境 C 大潮漲潮時河川斷面鹽度分布

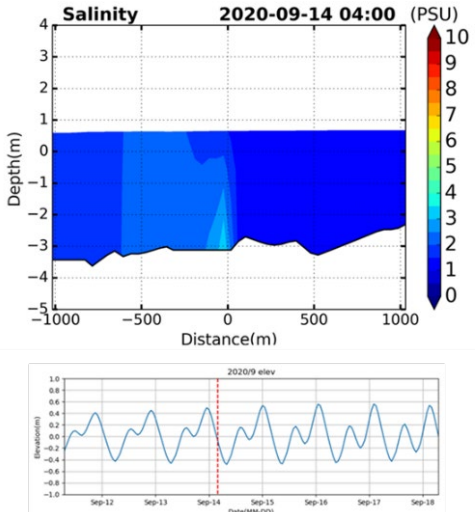


圖 17 情境 C 大潮退潮時河川斷面鹽度分布

# 應用聲牆法反向導引 誤入港區鯨豚出海之方案探討

張引<sup>1\*</sup> 任一凡<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>國立成功大學水工試驗所 副研究員

<sup>2</sup>遠雄海洋公園股份有限公司 海洋部總監

## 摘要

臺灣沿岸港口眾多，歷年來偶有出現鯨豚入港之情況。當鯨豚因追捕魚群等等原因，不慎進入港區面積廣闊且水道縱橫複雜之大型漁港、商港或軍港，常會發生迷航而無法自行游出之狀況。港區不是鯨豚熟悉的水域環境，港內迷航之鯨豚可能處於緊迫的狀況，再加上水質不佳且食餌不足的負面效應綜合作用下，鯨豚停留在港內時間愈久，對其健康的負面影響愈大。故當鯨豚在港內迷航無法找到出口，且判斷港區無充足食物，或動物無法有效覓食保持體力時，需以適當之措施導引其出港。但野生鯨豚沒有被制約的經歷，因此無法在短時間內運用動物訓練的方式，引導誤入港區的鯨豚離開。因此，在有時間急迫的壓力下，反向導引(柔性驅趕)是比較可行的方式。本報告以聲牆法為基礎，研擬一組反向導引港內迷航鯨豚出海之方案，提供參考。

關鍵詞：鯨豚救援、港內迷航、聲牆法、柔性驅趕

## Discussion on the plan of using underwater sound wall as reverse guide to lead cetaceans those have got lost in harbor to return to the sea

Yin Chang\* I-Fan Jen

\* Associate Research Fellow, Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

There are many harbors along the coast of Taiwan, and there have been cases of cetaceans entering, occasionally. When cetaceans, due to chasing fish or other reasons, accidentally enter large fishing ports, commercial or military harbors with a large water area and complex waterways, they often get lost and cannot return to the sea by themselves. Harbors are not the familiar water environment of cetaceans. The trekking cetaceans in harbor may be in a state of urgency, continually. Coupled with poor water quality and insufficient food, the longer the cetaceans stay in the harbor, the worse impact on their health. Therefore, when cetaceans are lost the harbor and cannot find an exit, and it is judged that there is not enough food, or animals cannot effectively forage to maintain physical strength, it is necessary to take appropriate measures to guide them out of the harbor. However, wild cetaceans have no experience of being constrained, it is very difficult to apply animal training methods to guide cetaceans return to the sea in a short period of time. Therefore, under the pressure of time, reverse guidance (drive away gently) is a more feasible way. In this paper, based on the underwater sound wall technique, we deduced a set of reverse guide plans to lead cetaceans those have got lost in harbor to return to the sea.

Keywords: Marine mammal rescue; Get lost in harbor; Underwater sound wall; Gently drive away

## 一、前言

臺灣沿岸港口眾多，偶有鯨豚迷航進入港中之事件。以高雄港為例：2018年3月即發生三頭小虎鯨在港內迷航之事件；間隔一年，又於2020年4月再度發生小虎鯨在港內迷航，而且個體數量更多，達到六頭。迷航進入港區之鯨豚，若無法在短期內自行游出，健康狀況會隨時間而持續惡化，2018及2020年兩次進入高雄港之小虎鯨，最後也皆以最不幸全數死亡之結局收場。2020年高雄港發生小虎鯨於港內迷航之事件後，曾出現擬在高雄港出口裝設常態性聲學威懾裝置(Acoustic Deterrent Device)驅趕鯨豚之想法。然而，由於鯨豚是海洋生態系統最高階的生物，常有鯨豚在港區附近活動，代表港區營運時環境生態保護的工作有落實，港區管理者，應該以正面和歡喜的心態來面對，而不是將其視為麻煩而加以驅趕；再加上聲學威懾裝置長期製造高分貝海洋噪音，對鄰近海洋生態環境系統造成負面影響；又可能幫助引導敵軍潛艦及魚雷瞄準進出港口，有國安疑慮。總而言之，裝設常態性鯨豚驅趕設施防止鯨豚入港，實非優良之方案。

然而，若不在港口設置常態性之鯨豚驅趕設施，則必需要面對鯨豚入港之問題。當發現鯨豚入港後，可先略為觀察一段時間，再依鯨豚之狀況，決定後續處理方式。本報告將入港鯨豚之狀況區分為『自行離開』、『滯留且健康不佳』及『滯留但健康良好』三種，建議處理流程如下圖：

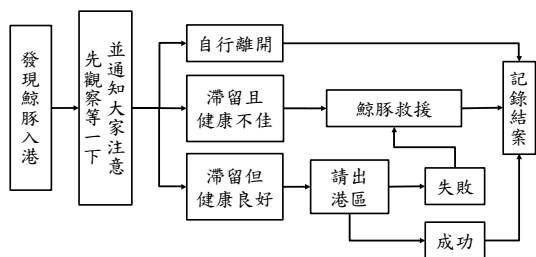


圖 1 發現鯨豚入港後建議之處理流程

當入港之鯨豚能在合理之時間內自行離開，不需要特別之處理。滯留港區內健康狀況不佳之鯨豚，則應按國內鯨豚救援之機制，儘速啟動救援行動。最後，當健康狀況良好之鯨豚滯留港內，由於港區不是鯨豚熟悉的水域環境，動物可能會處於緊迫的狀況，再加上水質不佳且無法有效攝食保持體力，

動物停留在港內時間愈久，對其健康的負面影響愈大。故當鯨豚在港內迷航無法找到出口，就算其健康狀況良好，仍需在合理之時間內，以適當之措施將其請出港。但野生鯨豚生活史中沒有被制約的經歷，難以在短時間內運用動物訓練的方式，引導其離開。而且，健康的鯨豚是天生的游泳好手，又具有相當好之觀察力與逃避威脅的智慧，想運用圍捕或是船隻驅趕之方式迫其出港，困難度高，還可能造成救援人員或動物受傷，過程中，甚至會使得動物因為緊迫而死亡。

本報告構想了一組應用聲牆法反向導引(柔性驅趕)鯨豚出港之措施，此措施在設計上，可由港內迷航之鯨豚個體自行主導整個被請離之節奏，過程中動物可以有機會讓緊迫的壓力得到舒緩，且使用聲牆之原則為『背動防堵而非主動驅趕』，相較主動使用網具捕捉或是利用機動船舶追趕驅逐，方法較為溫和。但是由於本報告所構想之措施，係由兩位作者，依據其自身所具備之水下聲學、鯨豚生理及動物訓練等專長領域知識所推演，目前未有實際執行之經驗。期望能藉由此報告之發表，與國內關心鯨豚救援之先進交流，共同努力減少未來發生港內迷航鯨豚因滯留過久而失去生命之憾事。

## 二、方案研擬

本報告所提及之聲牆驅趕法，最早是日本和歌山縣為了獵捕鯨而發展出的技術。執行時，首先找數艘船排列成適當之陣形，船上人員手持長金屬桿，插入水中並且敲打製造噪音形成聲牆，聲牆船隊慢慢向鯨豚移動。鯨豚在主要棲息地區因為不曾遇過這類聲音的刺激，且一次有眾多音源同時發出聲響，動物基於本能，面對突如其來且無法判斷該環境刺激所帶來的後果，於是會盡可能的遠離該刺激發生的位置，進而達到驅趕的效果，如圖 2。近年中國大陸在進行水下爆破工程前，也使用聲牆驅趕法將鯨豚驅離危險工區，經證實具有成效(王等，2014；王等，2018)。國內 2004 年也曾在臺北市淡水河救援鰻齒海豚時用過聲牆法(中華鯨豚協會，2004)，但因使用此法需要動用大量人力及物力，且平時沒有太多的演練，加上動物福利概念的考量，使得後續多數時候難以決定是否要以聲牆方式來驅趕誤入港區的鯨豚。



圖 2 日本應用聲牆法捕鯨之繪圖(來源：くじら資料館の古式捕鯨絵図)

為了降低應用聲牆法，可能會對鯨豚造成之緊迫，本報告所建議之方案，使用聲牆之原則為：『背動防堵而非主動驅趕』。執行時，聲牆船隊佈放於鯨豚不應進入之方位，首先確認聲源與鯨豚之間有足夠安全距離，再以緩啟動的方式，開始穩定持續製造聲響，形成一堵鯨豚不願穿越的聲牆防線，起到攔截鯨豚不再深入港區的效果。待鯨豚因厭惡噪音自主向港區出口方向移動後，聲牆船隊再緩慢推進與重組；隨鯨豚移動步調，逐步擴大聲牆防堵之面積，反向導引鯨豚出港，示意如圖 3。由於使用聲牆為背動防堵，而非主動驅趕，讓鯨豚自行決定被請離的步調，整體而言，是用一種比較緩慢且溫和的方式，將鯨豚請離港區；過程中動物可以有機會讓緊迫的壓力得以舒緩，並認知到它可以掌控這個環境的變化。

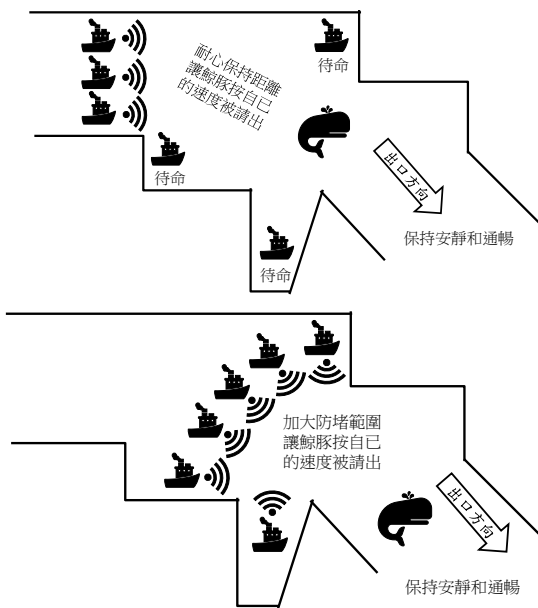


圖 3 應用聲牆法反向導引港內鯨豚出海之示意圖

有鑑於港區內多為硬式結構物，可能使得聲牆所發出之聲波，在港池內形成雜亂的反射，造成鯨豚無法被順利反向導引出港。此時，可考慮在港區內適當的位置，設置氣泡幕，吸收聲波能量。原則上，在港區內設置氣泡幕消音時，於規劃讓鯨豚離開的方向，要儘量保持安靜，有聲音反射就要想辦法設氣泡幕消音；不想讓鯨豚進入的方向，稍微吵一些沒關係。示意圖如下：

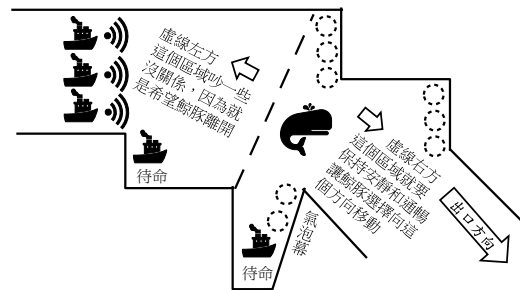


圖 4 港池內設置氣泡幕消音位置之示意圖

但是由於在應用聲牆時，所發出之噪音，可能會造成鯨豚受傷害，因此需事前進行規劃，並在完整人員訓練後再執行，應注意之重點整理如下：

- (1). 事先建立穩定及標準化之聲牆音源單元(最好設計適合的機械，而非以人工敲打)。
- (2). 確定聲牆音源單元的防護範圍。
- (3). 評估港內組成聲牆防線時，最佳船舶數量與船隊排列形式。
- (4). 港區聲波反射效應測量與估算。
- (5). 建立海面及水下測量鯨豚距離之標準方法。
- (6). 依國內外鯨豚保育標準，計算聲牆船隊與鯨豚應保持之安全距離。
- (7). 建立人員教育演練計畫。
- (8). 實際執行時，聲牆需以緩啟動之方式開始運作。
- (9). 規畫讓鯨豚離開之出口側，應保持淨空。
- (10). 實際執行時，需有鯨豚救援人員及獸醫在現場待命。

綜上所述，當鯨豚誤入港內迷航而無法自行游出港時，若能使用不讓動物感受到太大緊迫的方法將其導引出港，將能降低動物在港區內失去生命的機率。本報告研擬之聲牆法反向導引鯨豚出港，最重要之原則為背動防堵而非主動驅趕，對比主動使用網具捕捉或是利用機動船舶追趕驅逐，方法較為

溫和，且是由動物主導整過程。希望此方法能儘量減輕迷航鯨豚被導引出港過程中之負面影響。

### 參考文獻

1. 中華鯨豚協會 (2004) 淡水河糙齒海豚救援行動，YouTube 影片，網址 <https://www.youtube.com/watch?v=BXbz2wFHTqU>。
2. 王克雄、王丁、方亮、王志陶、吳玉萍、段國欽、曹漢江、劉建昌 (2014) 施工海域中華白海豚聲學驅趕保護方法，中華人民共和國發明專利 第 CN201410423815 號。
3. 王丁、吳玉萍、餘烈 (2018) *施工海域中華白海豚聲學保護技術*，北京人民交通出版社股份有限公司。

# 高雄港船舶進出港機率探討

羅冠顯<sup>2</sup> 蔡立宏<sup>1</sup> 陳子健<sup>3</sup>

<sup>1</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

<sup>2</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

<sup>3</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究助理

## 摘要

高雄港為我國主要國際商港，亦為亞洲與歐美地區海域運輸重要樞紐，本文蒐集交通部運輸研究所港灣技術研究中心高雄港波高及風速資料，參考「高雄港船舶進出港管制基準」，探討高雄港船舶在不同月份、季節及時段進出港機率，分析成果可提供高雄港船商與管理調度單位參考應用。

關鍵詞：高雄港、波高、風速、機率

## Probability of vessels entry and exit of Kaohsiung Port

Guan-Sian Luo<sup>2</sup>, Li-hung Tsai<sup>1</sup>, Tzu-Chien Chen<sup>3</sup>

\*Associate Researcher, Center of Harbour and Marine Technology, Institute of Transportations, M.O.T.C.

## ABSTRACT

Kaohsiung Port is main international commercial port in Taiwan, it's also an important key position for maritime transportation in Asia, European and American regions. This study collects Center of Harbour and Marine Technology, Institute of Transportations, M.O.T.C. Kaohsiung Port significant wave height and wind speed data. Refers to the "Kaohsiung Port guidelines for the entry and exit of vessels" to analyze the probability of vessels entry and exit the in different months, seasons and time periods. The analysis results can provide a reference application for Kaohsiung Port vessels, management and dispatching units.

Keywords: Kaohsiung Port; significant wave height; wind speed; probability

## 一、研究目的

臺灣位處歐亞大陸與太平洋交界處，氣候廣受季風及颱風影響，高雄港位處臺灣西南角，為連結亞洲與歐美地區海上運輸重要橋梁，根據臺灣港務股份有限公司(以下簡稱港公司)110年統計資料，高雄港截至7月底船舶進出港量已達到18,613艘次，為我國各國國際商港之最。為使港區船舶進出管制標準化，高雄港務局(高雄港務分公司前身)於92年10月13日訂定「高雄港船舶進出港管制基準」，並於93年8月19日修正，該基準明確定義高雄港封港禁航與開港放行應符合之海氣象條件。

以往針對不同海事作業目的、海氣象環境及作業延時相關性研究有：朱等人(2000)就波浪、風

速及過繼時間對可工作日數之各別及共同影響進行研究，估算各種影響因素的發生機率特性，推導可工作日數，加入過繼時間之影響，以龍洞海域實測海氣象資料為例，估算其可工作日數。黃等人(2012)以SWAN模式推算1948~2008年臺灣周邊海域可工作天數，以有義波高0.6m為門檻，探討每個月波高小於該門檻並且持續6、12、18、24小時等四種延時條件發生機率。陳等人(2018)採用波浪擾動模擬(MIKE 21 BW)與大範圍長期波浪模式(MIKE 21 SW)對桃園觀塘海域施工區域之不可作業時間進行分析，以不同海上作業項目做為波高標準區隔，統計不可作業時間。

本文蒐集交通部運輸研究所港灣技術研究中心

(以下簡稱港研中心)高雄港歷年波高及風速資料，並參考前述進出港管制基準，分析探討高雄港船舶在不同月份、季節與時段進出港機率(Probability)，分析成果可提供高雄港船舶調度單位或航商，做為船舶管理調度應用參考。

## 二、研究方法

本文採用之波高及風速資料為港研中心佈設於高雄第一及第二港口底碇式波流觀測儀 AWAC (Acoustic Wave and Current profiler) 與二維超音波式風速風向儀歷年所觀測海氣象資料，架設位置如圖 1 所示。



圖 1 高雄港海氣象觀測站位置圖

為提升分析資料可信度，定義波高與風速觀測站每月資料蒐集率至少需達 8 成，未達此標準將不列入統計分析樣本，資料分析區間為 2005 年 8 月~2021 年 8 月，共蒐集波高資料 118,349 筆，風速 84,110 筆，做為本次分析主要樣本，資料筆數及蒐集率如表 1 所示。逐時風速資料係取整點前 10 分鐘內風速數據加以統計，而求得該小時平均風速；波高的取樣頻率為 1Hz，每小時取樣 2,048 筆。

表 1 分析資料樣本數及蒐集率統計表

	波高	風速
樣本數 (時)	118,349	84,110
蒐集率 (%)	84.44	87.94

參考「高雄港船舶進出港管制基準」第貳點船舶進出港管制基準，將高雄港第一、二港口封港波高及風速條件定義如下：

- (1) 外海示性波高大於 3.0 公尺，持續超過 1 小時。
- (2) 平均風速超過蒲福風級 7 級 (13.9 ~ 17.1 公尺/秒)，持續超過 1 小時。

前述波高或風速任一條件滿足，即開始實施封港禁止船舶進出，本文依據此作業規則，將每日劃分為 T1 (00:00~05:00)、T2 (06:00~11:00)、T3 (12:00~17:00) 及 T4 (18:00~23:00) 共 4 時段，探討高雄港船舶在不同月份、季節封港機率，機率估算公式如式(1)所示。有關季節定義，12 月至 2 月為冬季，3 月至 5 月為春季，6 月至 8 月為夏季，9 月至 11 月為秋季，以此原則分析。

$$\text{機率 } P = \left( \frac{\text{符合連續 } N \text{ 小時筆數}}{\text{資料總筆數}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

## 三、機率分析探討

### 3.1 月封港機率

高雄港 1~12 月封港機率彙整如表 2 及圖 2~圖 14，高雄港位於臺灣西南側，東北季風吹拂至此，吹風能量已大幅減弱，影響高雄港海氣象環境主要因素為西南季風及颱風，查詢中央氣象局颱風資料庫統計資料，本文分析期間有發佈警報颱風以 8 月 29 次最多，9 月發佈 22 次，7 月發佈 19 次，5 月 5 次、6 月 6 次，10 月 5 次，11 月 2 次，12~4 月則無颱風警報發佈，根據港研中心歷年統計資料，高雄港年平均風速與波高分別為 2.5 m/s 及 0.8 m，5~10 月因受季風與颱風侵襲影響，海氣象環境會於短時間內呈現較大之變化，11~4 月高雄港風浪條件相對穩定，可提供較佳進出港機率，此特性與表 2 全年封港機率分析結果相當一致。

T1~T4 不同時段封港機率，8 月相較其餘月份有較高之封港機率，T1 時段分析結果，封港機率為 5.14% (約 2 天)，T2 時段機率為 3.58%，T3 時段 4.46%，T4 時段則為 3.87%，不同時段分別有約 1~2 日封港機率，凌晨 T1 時段有較高之封港機率，接近中午 T2 時段封港機率為各時段最低。7、9 兩月封港機率僅次於 8 月，以 T2 時段分析，9 月機率為 3.57%，7 月則為 2.5%；7 月期間下午 T3 時段相較其餘時段有較高機率封港，機率為 4.23%，而封港機率於凌晨 T1 時段最低，機率為 1.92%，船舶安排於此時段進出高雄港，可獲得較佳進出港機率；9 月各時段封港機率相似，以 T1 時段封港禁止船舶進

出港機率 3.96%最高，T4 夜間時段封港機率 3.5%最低。整體而言，高雄港 7~9 月有較高機率發佈封港禁止船舶進出，5~6 月、10 月封港機率相對較低，約介於 1~2%，11~4 月高雄港海氣象環境穩定，封港機率接近 0%。

表 2 T1~T4 時段各月封港機率 (%)

月份	T1	T2	T3	T4
1 月	0.00	0.21	0.00	0.21
2 月	0.00	0.00	0.72	0.00
3 月	0.00	0.00	0.00	0.00
4 月	0.00	0.00	0.00	0.00
5 月	0.23	0.42	0.21	0.21
6 月	2.05	1.54	2.21	1.79
7 月	1.92	2.50	4.23	2.43
8 月	5.14	3.58	4.46	3.87
9 月	3.96	3.57	3.64	3.50
10 月	1.20	1.24	1.03	1.07
11 月	0.25	0.00	0.00	0.00
12 月	0.00	0.21	0.00	0.21

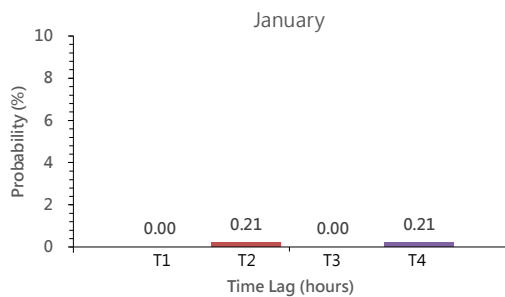


圖 2 T1~T4 時段 1 月封港機率分佈圖

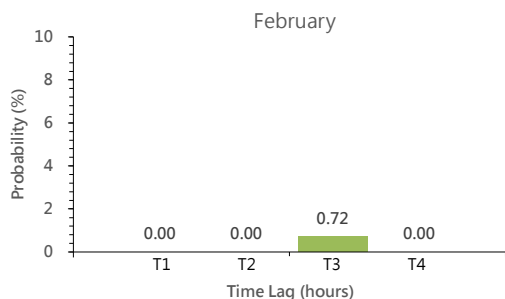


圖 3 T1~T4 時段 2 月封港機率分佈圖

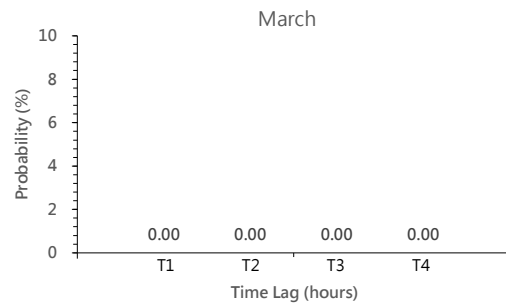


圖 4 T1~T4 時段 3 月封港機率分佈圖

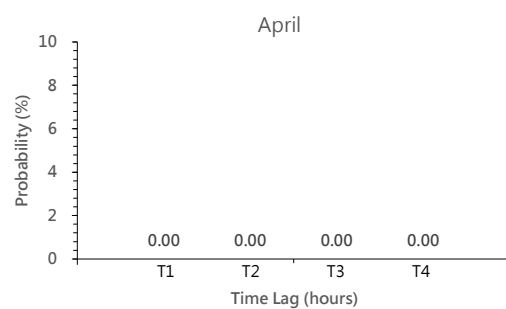


圖 5 T1~T4 時段 4 月封港機率分佈圖

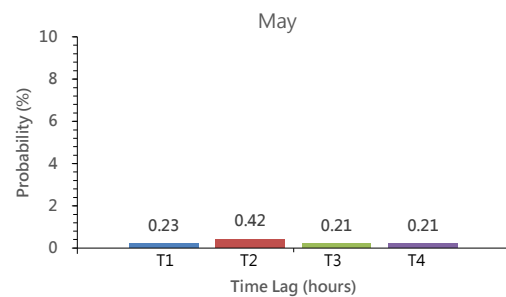


圖 6 T1~T4 時段 5 月封港機率分佈圖

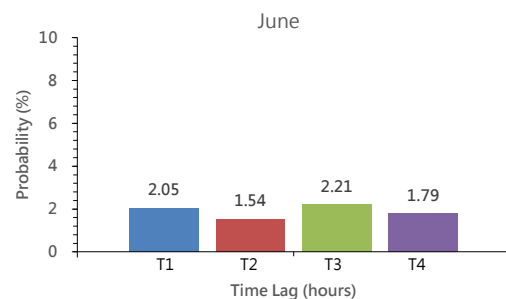


圖 7 T1~T4 時段 6 月封港機率分佈圖



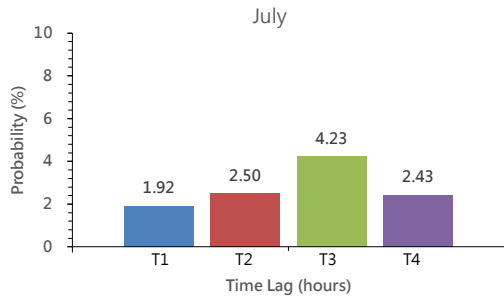


圖 8 T1~T4 時段 7 月封港機率分佈圖

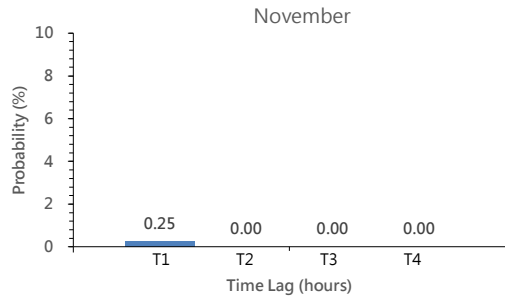


圖 12 T1~T4 時段 11 月封港機率分佈圖

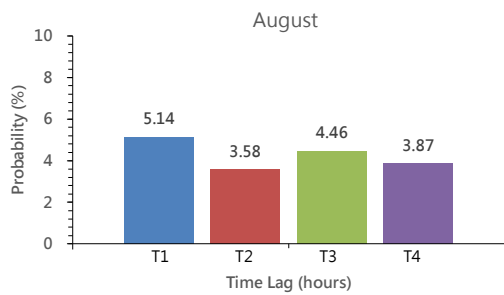


圖 9 T1~T4 時段 8 月封港機率分佈圖

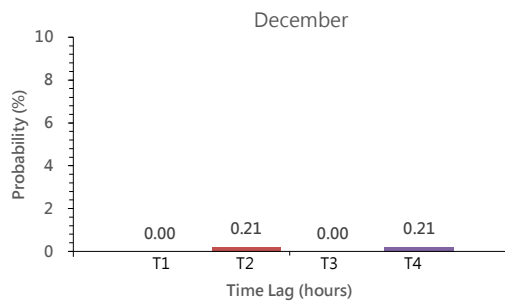


圖 13 T1~T4 時段 12 月封港機率分佈圖

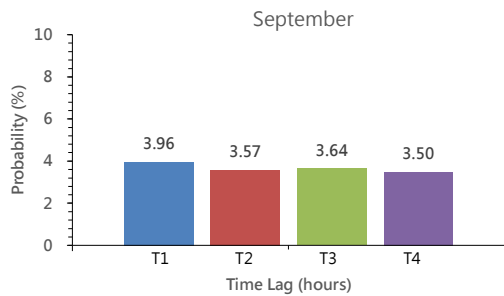


圖 10 T1~T4 時段 9 月封港機率分佈圖

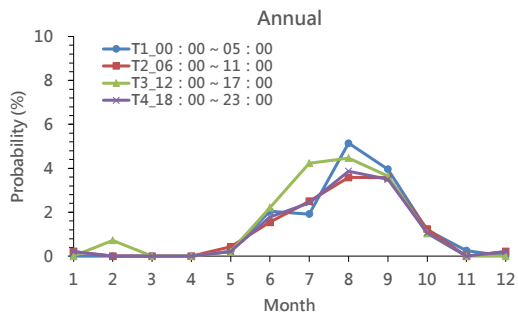


圖 14 T1~T4 時段全年各月封港機率分佈圖

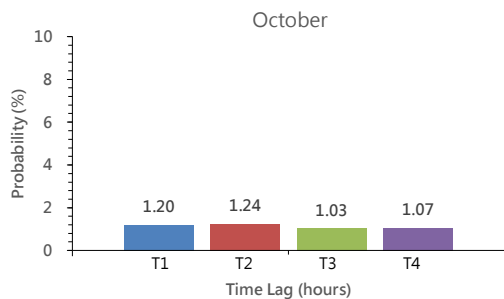


圖 11 T1~T4 時段 10 月封港機率分佈圖

### 3.2 四季封港機率

將高雄港實施封港機率依季節區分為春夏秋冬四季論述，表 3 及圖 15~圖 19 為高雄港四季不同時段封港機率，夏季高雄港海域因受西南季風與颱風影響，T1~T4 時段封港機率為各季節中最高，以 T3 時段實施封港機率 3.63% 最高，T2 時段 2.54% 最低；秋季時，西南季風逐漸轉為東北季風，各時段啟動封港機率僅次於夏季，分別為 T1=1.8%，T2=1.6%，T3=1.56%，T4=1.52%，T2~T4 時段機率相近，T1 封港機率最高；冬季時，臺灣大氣環境主要受東北季風影響，東北季風吹撫至西南海域時，因吹風距離長，吹風能量大幅減弱，各時段封港機率均低於

0.3%，以 T1 時段為例，機率为 0%；春季，東北季風減弱，逐漸轉換為西南季風，此時高雄港海域海氣象環境仍屬平穩，各時段實施封港機率均低於 0.2%。綜上所述，高雄港海域以夏季封港機率最高，秋季次之，冬~春季期間為啟動封港機率較低之季節。

表 3 T1~T4 時段四季封港機率 (%)

季節	T1	T2	T3	T4
春季	0.08	0.14	0.07	0.07
夏季	3.04	2.54	3.63	2.70
秋季	1.80	1.60	1.56	1.52
冬季	0.00	0.14	0.24	0.14

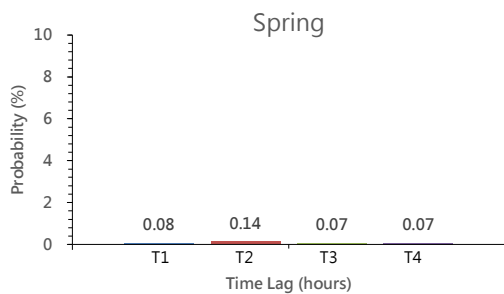


圖 15 T1~T4 時段春季封港機率分佈圖

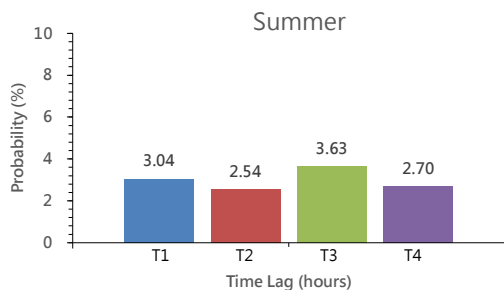


圖 16 T1~T4 時段夏季封港機率分佈圖

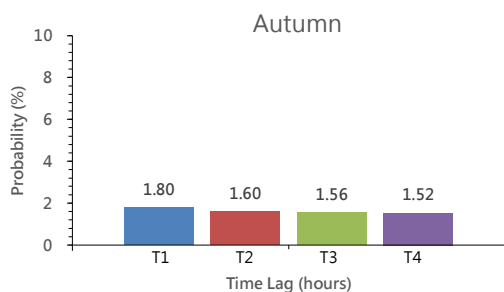


圖 17 T1~T4 時段秋季封港機率分佈圖

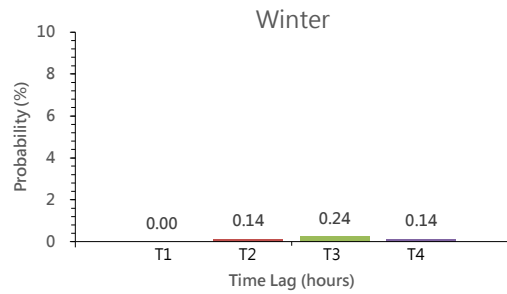


圖 18 T1~T4 時段冬季封港機率分佈圖

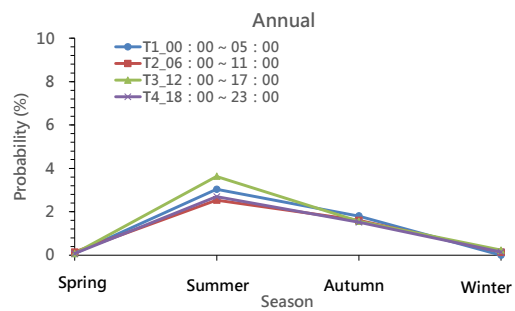


圖 19 T1~T4 時段不同季節封港機率分佈圖

#### 四、結論

本文參考「高雄港船舶進出港管制基準」，分析高雄港在不同月份、季節及時段實施封港機率，T1~T4 不同時段封港機率，8 月相較其餘月份有較高之封港機率，凌晨 T1 時段封港機率最高，T2 時段封港機率最低，7、9 兩月封港機率僅次於 8 月，7 月 T1 時段封港機率最低，船舶安排於此時段進出高雄港，可獲得較佳進出港機率，9 月 T1 時段封港禁止船舶進出港機率 3.96% 最高，T4 時段機率 3.5% 最低，以月份分析，高雄港 7~9 月有較高機率發佈封港禁止船舶進出，5~6 月、10 月封港機率較低，11~4 月高雄港海氣象環境穩定，封港機率接近 0%。

高雄港海域四季中，以夏季封港機率最高，秋季次之，冬、春兩季為封港機率較低之季節，夏季期間高雄港受西南季風與颱風影響，各時段封港機率為四季中最高，秋季時，季風型態逐漸轉為東北季風，T1~T4 時段封港機率僅次於夏季，冬季時，東北季風主導臺灣周邊海域，惟因吹風距離甚長，吹拂至高雄港時，吹風能量大幅減弱，各時段封港機率均低於 0.3%，春季期間各時段啟動封港機率均低於 0.2%。本文將單日分為 T1~T4 時段，探討高雄

港海域在不同月份及季節封港機率，分析成果可提供高雄港航商及船舶調度管理單位應用參採。

### 參考文獻

1. 朱宗蔚、錢樺、高家俊、莊士賢（2000）「海事工程可工作日分析之探討」第 22 屆海洋工程研討會論文集，第 480-486 頁。
2. 黃清和、錢樺、李文欽、游微娟、洪子軒等（2012）「台灣周邊海域可工作日數分析」，第 34 屆海洋工程研討會論文集，第 607-612 頁。
3. 陳宗邦、劉恩昊、張君名等（2018）“桃園觀塘海域海上可施工日探討”，第 40 屆海洋工程研討會論文集，第 185-190 頁。
4. 臺灣港務股份有限公司，「高雄港船舶進出港管制基準」，2004 年 8 月。

## 臺北港港區航線波浪展示系統建立

胡凱程<sup>1\*</sup> 羅冠顯<sup>2</sup> 顏厥正<sup>1</sup> 李芝瑩<sup>3</sup> 許文陽<sup>1</sup> 楊瑞源<sup>3</sup>

<sup>1</sup>工業技術研究院綠能所

<sup>2</sup>交通部港灣研究中心

<sup>3</sup>國立成功大學水利暨海洋工程所

### 摘要

本文結合波浪追算計算成果及船舶自動識別系統 (Automatic Identification System, AIS) 歷史記錄建立台北港波浪展示系統。為建立台北港港區波浪資料，針對台北港鄰近海域分別以遠域(WW3)及近岸(SWAN)波浪模式進行 2016-2020 波浪追算模擬，並蒐集未受新冠肺炎影響的 2018 年航港局 AIS 歷史船舶定位資訊。波浪追算結果及 AIS 數據最終以資料庫形式儲存。整體台北港波浪港區波浪展示系統主以 Leaflet GIS 圖台進行開發。港區航線透過分析 AIS 船舶通行密度決定，後續將針對航線上歷史波浪數據進行統計，提供後續智慧航行及港嘴進出參考。  
關鍵詞：波浪追算、海氣象、AIS、展示系統

## The Wave Demonstrate System along the Course within Taipei Port

Kai-Cheng Hu<sup>\*</sup>, Guan-Sian Luo, Chieh-Cheng Yen, Jhih-Ying Li,  
Wen-Yang Hsu, Ray-Yeng Yang

<sup>\*</sup> Researcher, Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

### ABSTRACT

Wave hindcast and automatic identification system records (AIS) were employed to develop the demonstrate system within Taipei port in this paper. Wave model wave water III (NWW3) and nearshore wave model (SWAN) were employed to calculate the wave field during 2016-2020 around Taipei port. The 2018 AIS records nearby Taipei in the region within 20 km were collected to this demonstrate system. The wave hindcast results and 2018 AIS records were stored as the data base format. The demonstrate system were based on the Leaflet GIS platform. The ship tracks were analyzed by the AIS records. The metocan nearby Taipei port were counted to provide a reference for ship handling and berthing applications for ships entering and leaving the port further.

Keywords: Keyword1; Keyword2; Keyword3; Keyword4

### 一、前言

依據交通部「2020 運輸政策白皮書海運分冊」之「推動航港智慧轉型」策略、臺灣港務公司所提出「臺灣港群智慧轉型計畫」(Trans SMART Plan)等國家政策發展策略，指出物聯網技術為智慧港口核心關鍵技術，包含網路層、感知層及設施層，如圖 1 所示。其中，海氣象資訊為港灣環境必要之背

景環境資料位在網路層發展技術項目。「物聯網海氣象即時系統」亦為「臺灣港群智慧轉型計畫」發展項目之一，足見海氣象資訊在國家智慧港發展中所扮演關鍵地位。

完整物聯網海氣象即時系統應串接歷史資訊、即時觀測及未來預報三部分。為建立台灣港埠觀測量能，港研中心陸續在主要商港升級及調整波流觀

測儀器規格及數量，為國家海象觀測網重要一環。



資料來源：臺灣港務公司

圖 1 座標系統及相關參數示意圖

相關觀測數據不僅可提供港區營運使用，更可作为緊急應變參考。然量測儀器維護費用昂貴，僅能採有限點位方式進行佈設。若要得到完整港區及鄰近海域波浪統計資訊，乃至於未來預報趨勢，仍須透過波浪數值模擬方法來獲得。

所鑑於此，本文以數值追算方式建立台北港港區歷史資料並儲存成資料庫。為發展智慧航行功能，蒐集航港局 AIS 庫中所記錄台北港範圍船舶定位數據，藉由分析不同船舶型態 AIS 數據獲得港區航線，並根據航線上波浪數據進行統計，最後將上述功能以 GIS 圖台方式呈現及查詢，做為未來數位港口海氣象即時功能需求預作準備，亦針對港區航行歷史海況不佳時段提出航行建議。

## 二、研究方法

### 2.1 波浪追算

台灣海域的波浪特性略可區分為短週期風浪及長週期成分波，前者受風場驅動生成；後者係脫離風場作用後，以湧浪的形式繼續向遠方傳遞之波浪。實務設計上，港區設計多可抵抗短週期波浪，但無法有效降低入射的長週期湧浪。此外，當長週期波在港區邊壁間來回傳遞，極易使不同成分波浪疊加形成的港池震盪現象。港池震盪亦是港區泊位極不穩定發生條件，說明長週期波為影響船舶靜穩的重要因素之一。

就數值模擬而言，描述風浪與驅動風場精確度高度相關；然對於遠處傳播而來的湧浪，則需擴大計算域並盡可能包覆進入研究區域的湧浪之生成源頭。故本計畫台北港波浪追算工作將分為主要描述湧浪傳播的遠域模式及台北港區的近岸波浪模式兩

部分進行。遠域模式使用美國國家海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 發展之 WAVEWATCH III V5.16 風浪模式 (以下簡稱 NWW3)。近岸模式則使用荷蘭 Delft 大學主導發展之波浪模式 SWAN V3.14 (Booij 等人, 1996)，其中 SWAN 近年已發展出具備模擬波浪經過結構物之繞射、反射、透射等功能。

波浪模式所需風驅動場使用美國國家環境預報中心 (National Center for Environmental Prediction, NCEP) 所發布第二代氣候預報系統再分析全球資料 (Climate Forecast System version 2, CFSv2)。本文使用 2016 年~2020 年，空間解析度為 0.5 度及 0.2045 度 (平均值)，時間解析度為 6 小時之海平面 10m 高風場。

為由執行遠域波浪模式 (NWW3) 產生近岸波浪模式 (SWAN) 邊界輸入波浪方向頻譜，做為本計畫台北港港區波浪輸入條件。在遠域波浪模式部分以 4 層槽狀網格 (d01-d04) 求解如圖 2 所示。格網解析度由 0.25 度縮至台北港外海 250m。網格地形水深資料取自美國 NOAA 國家地球物理資料中心 (NGDC) ETOPO5-5 分及 2 分網格之地形資料，近台灣海域部分再以科技部所發布 200 公尺水深資料取代。

近岸波浪模式 (SWAN) 部分，採用遠域波浪模式所產出台北港外海波浪邊界條件進行台北港波浪場計算。分為兩層計算域進行計算，外層為空間解析度 500m 之規則網格網格做為輸入遠域波浪邊界條件之緩衝層，500m 均勻網格產出再做為內層計算域之邊界條件使用。內層採用三角網格以貼近港區幾何形狀，三角網格解析度由外海 500m 縮至港灣邊壁及海岸線處 10~20m。網格地形水深資料由 109 年「臺北港 (106-110 年) 海岸漂沙調查及海氣象與地形變遷監測作業」海域地形測量及岸線結構物測量成果內插處理而得，惟由該計畫成果僅可獲得岸線至 30m 水深處網格地形水深，30m 以深部分由科技部所發布 200 公尺水深資料進行內插，整體近岸網格及水深繪製如圖 4 所示。

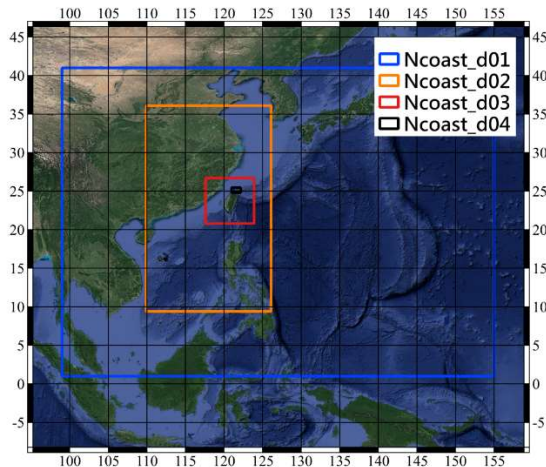


圖 2 遠域波浪模式(NWW3)槽狀網格分佈圖

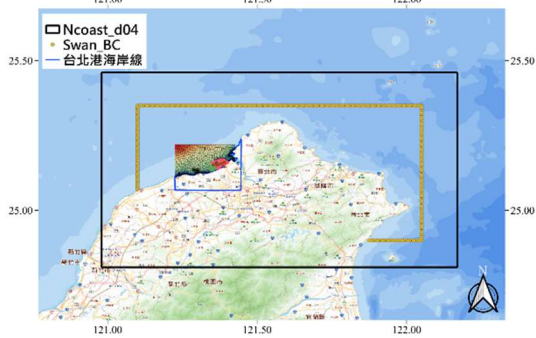


圖 3 近岸波浪模式(SWAN)計算範圍圖

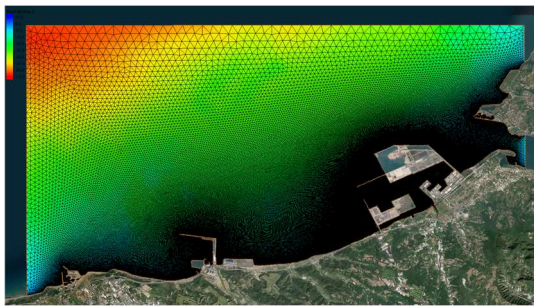


圖 4 近岸波浪模式(SWAN)三角網格分佈圖

NWW3 模式提供單向嵌套(one-way nesting)和雙向嵌套(two-way nesting)兩種方式。單向嵌套僅考單向連結，即網格低解析度大(外層)的數值作為高解析度網格(內層)的邊界；而雙向嵌套則可使不同解析度網格中資料進行雙向交換，考慮各層間波浪計算結果的反饋作用(廖等人, 2018)。數值上，雙向嵌套可以得到較好的波場模擬結果，故本文 NWW3 槽狀網格分層計算採用雙向嵌套(two-way nesting)方式進行。

參考模式使用手冊建議，各層在計算時，模擬時間步階原則需滿足 CFL(Courant - Friedrichs - Lewy) $<1$  限制，而 NWW3 模式使用手冊建議部分設置下可以放寬至 CFL $<2$ 。本文各層最大時間步階皆經過系統性測試決定，以兼顧準確度及計算效率。

## 2.2 AIS 定位資訊

考量展示系統目前為初始建置階段，基於資安考量，AIS 應改由蒐集某時間區段資料做為展示系統相關演算法發展使用。經初步查詢，近年全球海域船舶使用受新冠肺炎影響甚劇，為得到較接近真實台北港鄰近海域船舶航行狀態，以 2018 年為例進行展示系統建置。本文蒐集航港局 2018 年台北港鄰近 20km 範圍 AIS 歷史記錄，航港局 AIS 欄位整理如表 1，以 2018 年 1 月 AIS 發報數據位置分佈繪製如圖 5 所示。經審視，航港局 AIS 資料品質良好，資料不具代表性比例少(如 COG 超出 360 度情形)，惟部分數據受發報當下的通訊/接收品質較差而缺漏。

表 1 航港局 AIS 欄位表

名稱	描述	名稱	描述
[IMO_Number]	國際海事組織編號	[Communication_State]	通訊狀態
[Call_Sign]	船舶呼號	[Ship_and_Cargo_Type]	船舶類型
[ShipName]	船名	[Reference_Position_A]	AIS 設備相對船舶位置
[MMSI]	水上行動業務識別號碼	[Reference_Position_B]	
[Navigational_Status]	航行狀態碼	[Reference_Position_C]	
[ROT]	航行的迴轉速率	[Reference_Position_D]	
[SOG]	航行對地航速	[Fixing_Device]	電子定位裝置類型
[Position_Accuracy]	位置準確度旗標	[ETA]	預估到達時間
[Longitude]	經度	[MAX_Draught]	最大吃水深
[Latitude]	緯度	[Destination]	目的港口
[COG]	航行對地航向	[DTE]	數據終端設備
[True_Heading]	真船向	[Gross_Tonnage]	船舶噸位
[Time_Stamp]	發報時間	[Record_Time]	記錄時間

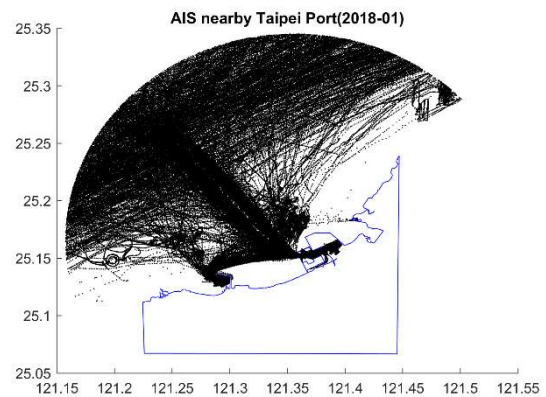


圖 5 台北港鄰近 20km 範圍 AIS 數據分佈圖(2018)

年 1 月)

## 2.3 波浪展示系統

本文展示系統資料庫包含兩部分：

- 台北港港區波浪追算結果
- 航港局 2018 年 AIS 資料

展示系統介面將規劃以 Leaflet GIS 圖台方式及 Web Application 進行開發，波浪動態粒子圖使用 earth 視覺套件([github.com/cambecc/earth](https://github.com/cambecc/earth))呈現，系統整體將以 java script 及 php 語法撰寫，展示系統亦將以 Responsive Web Design (RWD)網頁技術進行開發，除可使用電腦之網頁瀏覽器外，亦可於港內外等無法使用電腦之情況下，透過手機使用該系統。

## 三、討論與後續規劃

### 3.1 波浪追算

波浪追算結果與中央氣象局基隆北海岸富貴角浮標(C6AH2)、龍洞浮標(46694A)及宜蘭龜山島浮標(46708A)波浪及風速資料實測資料進行比對，比對結果顯示 CFSv2 再分析風場與實測風速、風向相比，均呈現一致的變化趨勢，說明 CFSv2 可以良好描述北台灣風場主要變化趨勢。波高或週期方面，模式與實測值變化趨勢一致。波高驗證結果以與龍洞測站相比較佳，富貴角測站稍微偏低；而龜山島測站則稍微偏高。計算成果與龍洞測站相比之時序列及定量分析如圖 6 及圖 7 所示，其中圖 6 波向部分，則因實測值僅劃分為 16 方位，故僅可間接進行比較。

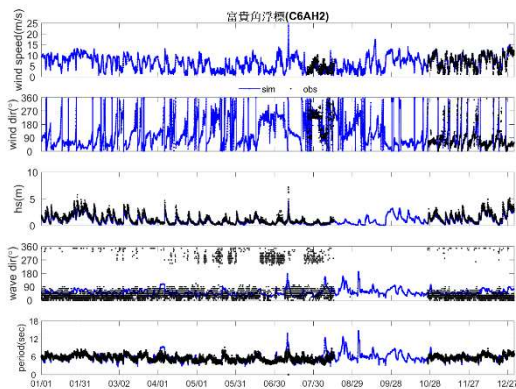


圖 6、龍洞測站之風場、波浪歷時比較圖(2018)

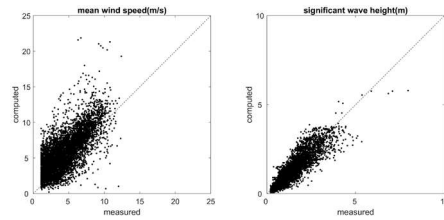


圖 7、龍洞測站之平均風速、波高比較圖(2018)

### 3.2 AIS 定位資訊

為讓本文展示系統能針對不同類型船舶提出航行建議，針對 AIS 數據中 Ship\_and\_Cargo\_Type 欄位進行分類如表 2 所示。使用美國海事登記處所開發 ArcGIS 套件 AIS Track Builder 3.1 中的 AIS TrackBuilder 功能建立航跡。為剔除 AIS 因定位誤差所到成的點位跳躍，使用 Break Track Line Method 並交 Maximum Time and Distance 參數設定為 5 分鐘，篩選距離設定 1 海哩。代表性船舶密度分布圖如圖 8~圖 10 所示，圖 8~圖 10 說明不同類型的船舶，航行區域不同，故為達到智慧航行的目標，應該就不同船舶類型活動熱區及使用率高的航線進行分析，以提朝向智慧化航行之目的。另由 2018 年整體台北港區 AIS 定位數據分佈，可知港區內紅水仙溪下游港內空間使用率較低。

表 2 船舶分類依據

中文分類	英文分類	Ship_and_Cargo_Type 編號
漁船	Fishing	30
拖船	Tug	31, 32, 52
挖泥船	Dredger	33
高速船	High Speed Craft (HSC)	40, 49
引水船	Pilot	50
執法船	Law Enforcement	55
客船	Passenger	60
貨船	Cargo	70, 71, 72, 73, 74, 75, 77, 79
液貨船	Tanker	80, 81, 82, 83, 89
其它	Other	90, 99

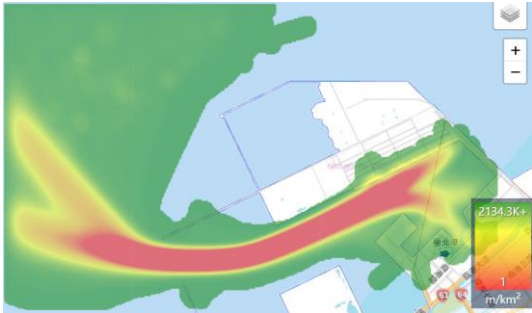


圖 8 貨船航行密度圖

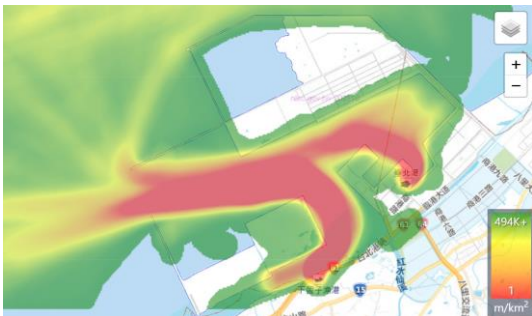


圖 9 漁船航行密度圖

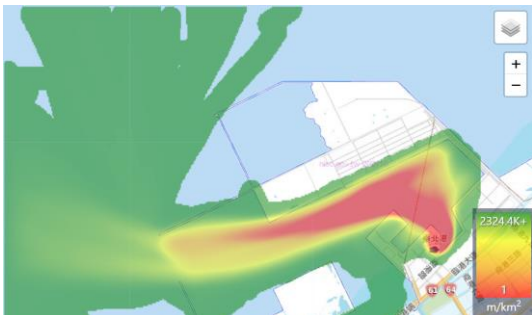


圖 10 引水船航行密度圖

### 3.3 波浪展示系統

台北港波浪展示系統仍在開發，目前已完成圖資切換、GIS 圖台(圖 11)、AIS 數據展示(圖 12)、波浪動態粒子圖展示(圖 13)及船舶密度展示(圖 9~圖 10)。圖資介接部分，系統目前介接常用地形圖資如 TGOS、open street 及 google，並建置航行競合圖資如人工魚礁、保護礁區及海洋棄置區(圖 11)。

後續將加入海氣象航線功能如圖 14，並針對港區關鍵航行控制點如港嘴、泊位進行波浪統計分析，以瞭解台北港船舶航行、停泊主要波浪條件區間。最後預擬船舶停泊情境，配合 2018 年 AIS 歷史資訊提出最佳化航行停泊建議。

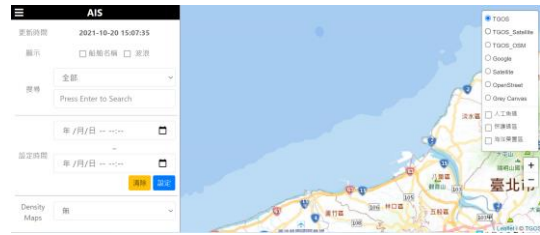


圖 11 波高展示系統介面圖



圖 12 AIS 展示介面圖

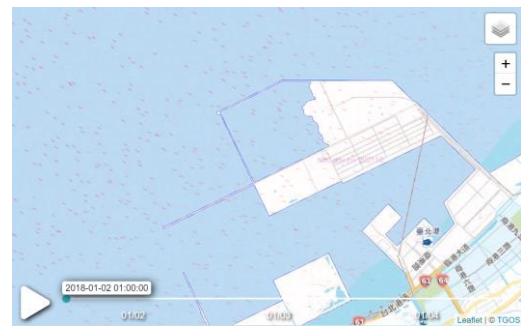


圖 13 波浪動態粒子展示圖

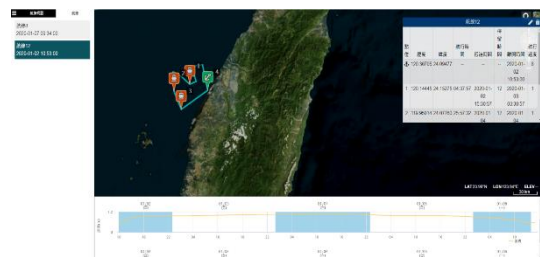


圖 14 波浪航線展示系統範例圖

### 謝誌

本文係交通部運輸研究所專題研究計畫「110 年度波流觀測站定期維護保養、資料品管及加值應用」(編號 MOTC-IOT-110-H2C019)之相關研究成果，承蒙交通部運輸研究所經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。



## 參考文獻

1. Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999, "A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666.
2. Tolman, H.L. (2016) —"User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 5.16," *NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 329*, 326 pp.+ Appendices.
3. 蔡立宏、羅冠顯、曾俊傑，「106年國際商港海氣象觀測與特性分析」，交通部運輸研究所研究報告(106-37-7610，MOTC-IOT-106-H2DA001a)，2018。

# 台灣湧升流預報系統發展建置與系統較驗

徐誌壕<sup>1</sup> 于嘉順<sup>2</sup> 陳琬婷<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立中山大學海洋環境及工程學系研究助理

<sup>2</sup> 國立中山大學海洋環境及工程學系助理教授

<sup>3</sup> 交通部中央氣象局海象測報中心研究助理

## 摘要

湧升流區為重要的漁業資源區域。湧升現象為水體由下層或底層區域上升至表層區域，會對表層海域注入豐富的營養鹽，提供藻類生長所需的資源，進而吸引魚群來此。由於水體是由底部上升至表層區域，底部水體水溫較低，會使表層區域的水溫下降，形成明顯的低溫區域。因此，可透過湧升流指標觀察表層區域的水溫變化，判斷湧升現象的發生。然而，當表層水溫出現明顯下降時，往往都是湧升現象已經發生的時候。為了提早預測湧升現象出現的時間，本研究透過混合層深度判斷垂直水體的變化。透過相關性分析得湧升流指表與混合層深度的相關性為 0.372，以此作為預報系統內之權重。以 2021 年 5 月預報結果與同月份之葉綠素濃度比較，在大陸沿岸可觀察兩處到較高的湧升機率。分別為汕頭市(約 117°N、23°N)及東山(約 119°N、24°N)，是因南海海流與夏季季風形成湧升現象造成，同樣在葉綠素也可觀察到相同趨勢分布；此外，在台灣灘上方的葉綠素濃度出現濃度較高的區域，在預報結果中同樣可觀察到。

關鍵詞：湧升流、台灣海峽、混合層、湧升流指標

## English Title

Chih-Hao Hsu<sup>1</sup>, Jason J.S. Yu<sup>2</sup>, Wan-Ting Chen<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Research Asistant, Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yet-Sen University

<sup>2</sup> Asistant Professor, Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yet-Sen University

<sup>3</sup> Research Asistant, Marine Meteoroloty, Central Weather Bureau

## ABSTRACT

Upwelling zones are well-known for their fishery productivity. The upwelling phenomenon is the water moves from the bottom layer to the surface layer, which provides phytoplankton with abundant nutrients and growing resources. Because of upwelling movement, the colder water uplifts to the surface layer, which results in sea surface temperature(SST) is decreased and then forming the lower temperature region. Therefore, the variations of temperature are detected by the Upwelling Index, which is the latitudinous temperature average value. Nevertheless, while SST is decreased significantly, the upwelling phenomenon had already happened. To detect the upwelling phenomenon earlier, the study used Mixing Layer Depths(MLDs) to determine the changes in the vertical water column. According to the correlation analysis, the correlation factor was 0.372, and the study used the correlation factor as the weight in the prediction system. Based on the validation of prediction results and satellite chlorophyll data in May 2021, a higher possibility of forming upwelling showed up along the china coastal area, where are the DongShang(117°N、23°N) and the Shantou(119°N、24°N) respectively. Those two upwelling regions are induced by the summertime southwestern monsoon. The high concentration of chlorophyll was observed in the same area simultaneously. Besides, in Taiwan Strait, Taiwan Bank is another high concentration area of chlorophyll, and there could be observed the higher possibility of forming upwelling as well.

Keywords: Upwelling, Taiwan Strait, Mixing Layer Depths, Upwelling Index

## 一、前言

(本節開始為論文內容。)本研究藉由波高計及高時間解析度 HSPIV 量測系統，.....

總結來說，過去湧波.....波流場之質量通量的相似性與非相似性進行探討。

湧升流區為重要的漁業資源區域，全球海洋魚類的捕撈量約有 20% 是來自湧升流海域，但湧升流海域僅占海洋總面積的 5% (Lopez-Lopez et al., 2017)。湧升現象為水體由下層或底層區域上升至表層區域，會對表層海域注入豐富的營養鹽，提供藻類生長所需的資源，進而吸引魚群來此(Escribano et al., 2016)。過去研究顯示，在台灣周邊有許多湧升流形成，分別在台灣海峽的西南岸、西北岸、台灣灘以及澎湖北方等有湧升流區的出現(Hu et al., 2003)(圖 1)。

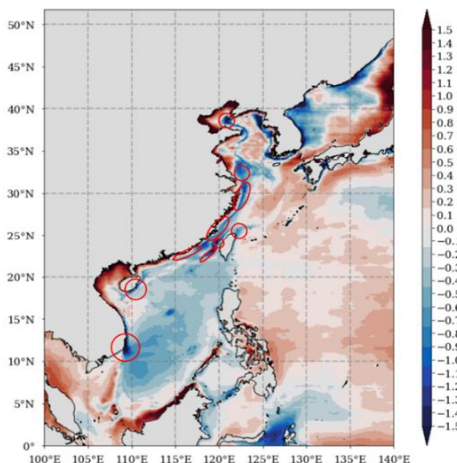


圖 1 台灣週邊湧升流分布圖，色階為 2001~2018 年 HYCOM 海洋模式計算之湧升流指標，溫度低於 1 °C 區域為湧升流可能發生區域

湧升流是以水體由底部上升至表層區域為特色(Sverdrup et al., 1942)。海洋底部水體水溫較低，上升至表層後，使表層水體的溫度下降，形成明顯的低溫區域。因此，可透過湧升流指標觀察表層區域的水溫變化，判斷湧升現象的發生(Benazzouz et al., 2014)。然而，當表層水溫出現明顯下降時，往往都是湧升現象已經發生的時候。為了提早預測湧升現象出現的時間，本研究透過混合層深度判斷垂直水

體的變化(Holte & Talley, 2009)。

徐誌壕等(2020)在過去使用湧升流指標(Upwelling Index)與混合層深度(Mixing Layer depth)，建立湧升流預報系統。儘管在湧升流區有良好的數值表現，但是在其他區域有較不符合湧升現象發生的數值出現。因此，本研究為了改善湧升流預報系統，透過相關性分析，以及相關性分布，分析湧升流與混合層深度之關係，並提出解決方案，達到較好且較高的預報精度。

## 二、研究方法

### 1. 研究資料

本研究透過，蒐集 2001~2018 年 HYCOM 全球海流模式的溫度資料，建立歷年海溫資料庫。HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model)為全球三為海洋模式，模式產出結果每日一筆，資料結果包含溫度、鹽度以及流速等。HYCOM 之垂直網格為固定網格，在表層海域有良好的解析度。

以 CWB-OCM 作為每日之基礎資料，加入湧升流預報系統的計算。CWB-OCM 為氣象局合作開發之三維海流作業化預報系統，可預報水位、流速、溫度以及鹽度等海洋資訊。格點計算為非結構網格計算，可更有效的貼合複雜的岸線，達更精準的計算。垂直分層採用 LSC2 垂直網格計算方式，在最小水深區域亦有五層分層，在地形複雜的區域也可以有良好的解析度。

### 2. 混合層深度計算

混合層存在於海洋表層海域，因為受到日照、風及波浪的影響，在表層海域的水體物理性質(如溫度，鹽度等)差異較不明顯。本研究採用 Holte & Talley (2009)所提出之混合層深度(Mixed Layer Depths)計算公式。計算方式主要分為兩種，分別為溫度差異(Temperature Threshold)及溫度梯度(Temperature gradient)(圖 2)。溫度差異為水體溫度與參考點之溫度差異達到 0.8°C，即為混合層深度所在之深度。溫度梯度為每公尺水溫下降之溫度達到 0.025°C/m 時，即為混合層所在之深度。再透過深度篩選，選擇合適之混合層深度。

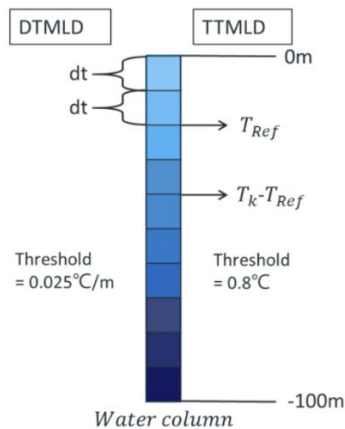


圖 2 混合層計算方式示意圖

### 3. 湧升流指標計算

本研究修改 Benazzouz et al. (2014) 提出湧升流指標計算方式，修正後之計算方式是利用相同緯度的溫度平均表示該緯度的平均海表面溫度，以相減的方式表示該區域的湧升流指數。計算方式如下：

$$UI = T_{i,j} - T_{latitude,average} \quad (式 1)$$

$T_{i,j}$  為計算區域之海表面溫度； $T_{latitude,average}$  為相同緯度之平均溫度。透過湧升流指數可用來分析湧升流的強度。

### 4. 湧升流預報系統

湧升流預報系統是由混和層深度以及湧升流指標共同組成。在計算湧升流預報資訊(IndexUI 及 IndexMLD)，因為因子所代表的分析方向不同(水平與垂直方向)，分別採用不同的計算方式。

#### A. 混合層指標參數計算

混合層預報資訊是計算垂直湧升判定機制。本研究利用 2002~2018 年 HYCOM 水溫資料計算混合層深度(MLD)之平均值(MLD<sub>ave</sub>)、最小值(MLD<sub>min</sub>)做為參考資料，並與當日資訊(MLD 由 CWB-OCM 計算得出)比較其差異，計算公式如下：

$$Index_{MLD} = 1 - \frac{MLD - MLD_{min}}{MLD_{ave} - MLD_{min}}$$

當混合層深度越薄，表示該區域可能受湧升流的影響越大；因此當該年度之混合層深度與歷年最小值差異越小時，表示該區域湧升流發生機率越高。

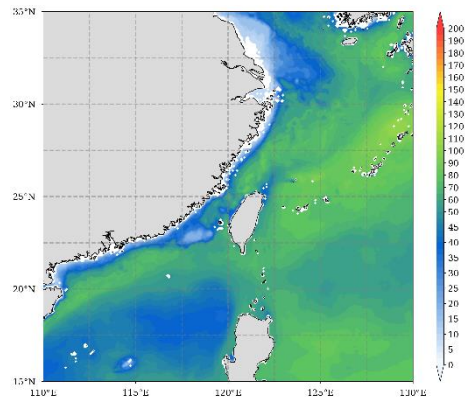


圖 3 2002~2018 年 HYCOM 混合層深度平均分布

#### B. 湧升流指標參數

透過湧升流指標對於混合層深度之相關性(相關係數為 0.372)，對湧升流預報系統之權重進行參數修正。此外，根據數值相關性分佈(濾除平均溫度以上)，溫度分佈在  $-0.5 \sim 0^\circ\text{C}$  區間，此溫度區間判斷為無湧升現象發生；在  $-1.5 \sim -0.5^\circ\text{C}$  區間，則可觀察到兩種情況：低溫混合層深度較淺，為混合層受湧升流抬升至表層區域；低溫混合層深度較深，為湧升流衝破的現象，造成垂直混合均勻之現象。

本研究將這兩種情況做為修正湧升流指標參數計算方式之依據，修正位於湧升流架構內 A 的計算邏輯式，修正示意圖如圖 4 所示：

- 若 [湧升強度於平均值]，則回傳 IndexUI 值等於 1
- 若 [湧升強度小於最小值]，則回傳 IndexUI 值等於 0，表無湧升現象發生
- 若 [湧升強度位於平均值及最小值區間]，則回傳計算 0~1 區間權重，權重計算方式為計算湧升強度在平均值與最小值間之比例

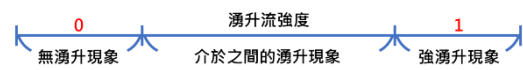


圖 4 湧升流指標參數計算示意圖

## 三、結果與討論

研究透過相關性分析湧升流相關因子，尋找對湧升流影響顯著的因素。本研究分析表層水溫、湧升流指標以及混合層深度，表層水溫以及湧升流指標為水平水溫判斷系統，而混合層深度則為垂直水溫判斷系統。透過分析表層水溫對於混合層深度之

相關性，得知其相關係數約為 0.60；分析湧升流指標對於混合層深度之相關性，得知其相關係數約為 0.372。

此次分析結果在湧升流指標對於混合層深度之相關性與去年度提供之分析結果略有差異，其差異約為 0.05。此差異為本次相關性分析有濾除表層水溫較高的部分，僅保留平均溫度下的湧升流指標做為分析群體。此用此分析方式是因為再判定湧升現象時，是透過湧升流指標做為主要判定因子，透過濾除非湧升現象之湧升流指標及混合層深度，可以較明確的觀察到湧升現象發生。

本研究本研究分析以 2021 年 8 月的平均預報結果，在結果中可觀察到有明顯的溫度梯度出現在中國沿岸和台灣海峽之內（圖 4）。透過 CWB-OCM（每日預報）與 HYCOM（歷年資料）比較之後再經計算得知的湧升流預報結果，可發現湧升機率較高的區域主要在陸棚區，又以台灣海峽內部出現的機率最高（圖 4）。其中，在大陸沿岸的汕頭市（約 117°N、23°N）所觀察到的較高湧升機率是因為南海海流在此區域受到了地形抬升的影響，而在東山（約 119°N、24°N）附近區域也有較高的數值，這是因為季風所導致的沿岸湧升現象。

以 MODIS 衛星資料來驗證，在中國沿岸出現高濃度葉綠素的現象與預報的結果相符（圖 5）；此外，在預報結果中同樣可觀察到台灣灘上方出現葉綠素濃度較高的區域。然而，在台灣海峽內卻可觀察到大範圍的高湧升機率區域，其中的原因可能是 HYCOM 與 CWB-OCM 計算差異，CWB-OCM 在計算過程中有包含潮汐的影響，而 HYCOM 則無納入潮汐計算。未來將修正兩模式之間的可能差異，如表層溫度，以求更準確的預測湧升流出現的區域。

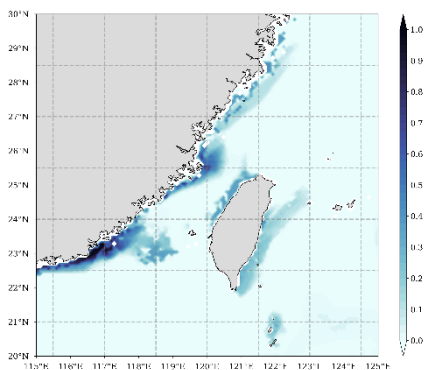


圖 4 2021 年 8 月湧升流預報模式結果

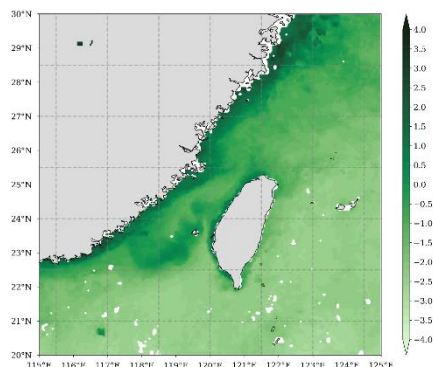


圖 5 2021 年 8 月平均台灣周邊葉綠素(log)分布 (mg·m<sup>-3</sup>)

#### 四、結論

過去研究指出，夏季在台灣周邊有許多湧升現象，分別在台灣灘、彰雲隆起以及台灣東北部(Tang et al., 2002; Wu et al., 2008)。湧升的過程中會使表層的水溫下降以及改變水體的垂直分層現象。因此，本研究建立長期(2002~2018 年)的模式資料做為基礎資料，並利用表層海溫以及混合層深度的變化，做為預報基準，建立預報模式，並且改善模式的計算方式以達較精確的預報結果。以 2021 年 8 月平均結果比對葉綠素資料，根據比對結果顯示，在中國沿岸可觀察到較高的湧升機率，而同樣在葉綠素分布結果也可以觀察到有較高的葉綠素濃度在中國沿岸，尤其是在汕頭以及東山。在台灣灘區域亦可觀察到有較高的葉綠素濃度，同時在湧升機率的分布也較高。然而，在台灣東部海岸觀察到有較大的湧升機率，葉綠素濃度卻沒有觀察到較高的數值，推測是相較於過去湧升的影響未達表層海域，但在整體的預報結果能可接受。未來會在透過分析 HYCOM 與 CWB-OCM 的模式差異，精進湧升流預報系統的預報能力，以達較高的預報精度，為台灣的漁業做出貢獻。

#### 參考文獻

1. 徐誌壕、于嘉順(2020)「台灣周邊湧升流預測系統之應用及開發」，109 年天氣分析與預報研討會。
2. Tang, D. L., Kester, D. R., Ni, I. H., Kawamura, H., & Hong, H. (2002). Upwelling in the Taiwan Strait during the summer monsoon detected by satellite

- and shipboard measurements. *Remote Sensing of Environment*, 83(3), 457–471.  
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00062-7)
3. Wu, C. R., Lu, H. F., &Chao, S. Y. (2008). A numerical study on the formation of upwelling off northeast Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. <https://doi.org/10.1029/2007JC004697>
  4. Benazzouz, A., Mordane, S., Orbi, A., Chagdali, M., Hilmi, K., Atillah, A., et al. (2014). An improved coastal upwelling index from sea surface temperature using satellite-based approach – The case of the Canary Current upwelling system. *Continental Shelf Research*, 81, 38–54.  
<https://doi.org/10.1016/J.CSR.2014.03.012>
  5. Holte, J., &Talley, L. (2009). A new algorithm for finding mixed layer depths with applications to argo data and subantarctic mode water formation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(9), 1920–1939.  
<https://doi.org/10.1175/2009JTECHO543.1>

# 提升海岸地區工程結構耐久性的策略與技術-以許厝港自行車景觀大橋為例

陳彥睿<sup>1</sup> 陳建中<sup>2</sup> 巫秀堅<sup>3</sup> 林庭輝<sup>4</sup> 江正宏<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>臺灣蘇博特新材料有限公司總經理

<sup>2</sup>菴園工程顧問有限公司總經理

<sup>3</sup>桃園市政府海岸管理工程處副總工程司

<sup>4</sup>桃園市政府海岸管理工程處科長

<sup>5\*</sup>桃園市政府海岸管理工程處正工程司

## 摘要

近年來臺灣地區陸續在沿海或海上建造了數座跨海大橋等離岸構造物，這幾座跨海大橋有一個共同點，那就是設計年限明確設定為超過 100 年不等，因此海岸地區工程結構耐久性成為工程界關注的焦點。沿海或海岸重大的鋼筋混凝土結構主要是因為混凝土或鋼筋材料等幾乎無法被更換，相關結構材料或其組合耐用年限必須超過整體構造物設計年限，其中混凝土材料除了擔任結構力學上的重要角色外，自身也必須抵抗外來腐蝕因子(硫酸鹽)的侵蝕，同時必須擔負保護鋼筋不受外界腐蝕因子(氯離子)的侵入導致銹蝕的發生。本文主要是介紹提升鋼筋混凝土結構耐久性的完整策略與技術，並以「許厝港自行車景觀大橋新建工程」為例，說明該工程在耐久性設計所採取的措施。

關鍵詞：耐久性、硫酸鹽、氯離子、防銹劑

## Strategies and Techniques for Improving the Durability of Engineered Structures in Coastal Areas-Taking Xucuogang Bicycle Landscape Bridge as an Example

Yen-Jui Chen, Chien-Chung Chen, Hsiu-Chien Wu, Ting-Hui Lin, Cheng-Hung Chiang\*

\*Section Chief, Office of Coast Administration Construction, Taoyuan

## ABSTRACT

In recent years, Taiwan has successively built several offshore structures such as sea-crossing bridges. These sea-crossing bridges have one thing in common, that is, the design lifetime is clearly set to exceed 100 years. Therefore, coastal engineered structural durability has become the focus of attention in the engineering community. Due to concrete or reinforcement can hardly be replaced in major reinforced concrete structures along the coast, the durability of related structural materials or their combination must exceed the design lifetime of the overall structure. In addition to playing an important role in structural mechanics, concrete materials must resist the corrosion of external corrosive factors (sulfate), and at the same time, it must be responsible for protecting the steel rebars from the intrusion of external corrosive factors (chloride ions) to cause corrosion. This article mainly introduces the complete strategies and techniques to improve the durability of reinforced concrete structures, and takes the "Xucuogang Bicycle Landscape Bridge new construction project" as an example to illustrate the measures taken in the durability design of the project.

Keywords: Durability; Sulfate; Chloride ion; Inhibitor

## 一、前言

提升鋼筋混凝土結構長期耐久性的先決條件是混凝土配比及施工過程中必須考量抗裂機制，包括巨積混凝土的水化溫升控制、提升混凝土體積穩定性(乾縮、潛變)等，此外，結構體因混凝土中氯離子濃度過高而衍生的鋼筋腐蝕問題更是不容忽視。限制最高混凝土的水膠比、限制混凝土的最低抗壓強度、限制混凝土最小保護層厚度等措施為一般混凝土結構耐久性規範[1]的作法，但是面臨更嚴苛的腐蝕環境下(例如高濃度氯鹽的海洋環境等)，還必須採用其他「防腐蝕附加措施」方能有效達到結構設計年限的耐久性要求。所以完整的工程結構防腐蝕策略必須涵蓋抗裂設計與耐久性設計，抗裂設計著重在短、中、長期混凝土材料抗裂技術，而耐久性設計則聚焦在降低混凝土中有害物質擴散速率與鋼筋阻銹防護技術兩大部分。根據 ACI 222R-01，「Protection of Metals in Concrete Against Corrosion」Reported by ACI Committee 222[2]的報告第 3.4 節中提出幾種鋼筋防蝕措施：耐蝕鋼筋(Noncorrosive Steel)、塗層鋼筋(Coatings)、化學阻銹劑(Chemical Inhibitors)、陰極保護(Cathodic Protection)等四大類。其中塗層鋼筋的塗層材料提到三種類型：犧牲型(Sacrificial)和非犧牲型(Noble, Non-sacrificial)以及環氧塗層鋼筋(Fusion-bonded Epoxy Powder Coating)。犧牲型使用的金屬材料有鋅(Zinc)和鎘(Cadmium)等，非犧牲型則有銅(Copper)和鎳(Nickel)等金屬，目前台灣工程上應用最多的方式為採用熱浸鍍鋅鋼筋(Galvanized Reinforcing Rebar)，但報告中引述文獻[3-5]指出熱浸鍍鋅鋼筋在很多實驗室和工程實際案例中出現矛盾的結果，文獻則指出熱浸鍍鋅鋼筋在嚴重氯鹽環境下對於延長鋼筋混凝土結構的使用年限效果有限。另外在第 2.3.3 款 熱浸鍍鋅鋼筋(Galvanized Steel) 章節中認為熱浸鍍鋅鋼筋在防止混凝土中性化鋼筋銹蝕的問題上表現良好，因為鋅在較低的 pH 環境下的鈍化情形比鋼(Black Steel)來得佳，但是在高 pH 溶液環境下隨著陰極反應導致氫氣產生而會有溶解的疑慮。因此，在「許厝港自行車景觀大橋」的鋼筋防銹策略中並未採用特殊鋼筋的方式，而是根據國內的「CNS 12456 鋼筋混凝土用防銹劑」[6]及「CNS 12457 鋼筋混凝土用防銹劑檢驗法」[7] 兩項標準，

採用鋼筋混凝土用防銹劑作為鋼筋防銹措施之一。近海與海洋環境耐久性設計需考量的面向示意圖詳圖 1[8]。

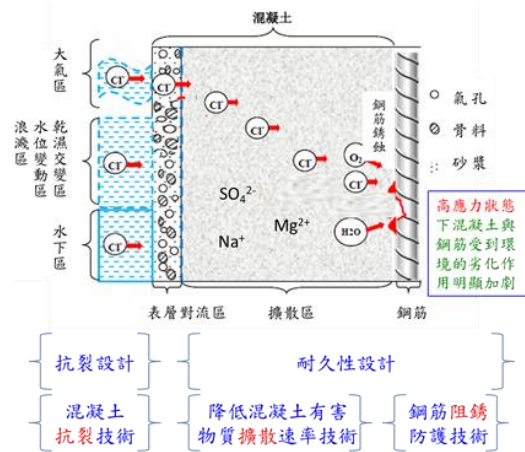


圖 1 近海與海洋環境耐久性設計考量示意圖[8]

## 二、工程結構防蝕技術

透過混凝土化學外加劑的方法，完整的鋼筋混凝土結構防蝕技術，由外而內可分為「隔、阻、緩」三大面向。「隔」是透過「混凝土表層強化材料」分次塗佈在混凝土表面形成永久密封層，該產品主要是透過一些活性組分以有效滲透(毛細孔作用)的方式，與混凝土中活性化學組分發生反應，最高可進入混凝土內部 1 公分以上，同時封堵混凝土毛細孔和微裂縫，使混凝土表層凝結成堅固實體，從而得到緻密的整體，能夠明顯提高混凝土表層防水性能、耐酸鹼腐蝕、抗硫酸鹽等性能指標，常見的混凝土表層強化材料有矽烷類的疏水型化學外加劑。「阻」是透過添加「混凝土抗侵蝕抑制劑」在新拌混凝土中，是一種具有疏水密實功能的混凝土外加劑。該產品一方面通過改變混凝土內部毛細孔的表面張力，提高混凝土憎水性，從而大幅度降低混凝土吸水率；另一方面，可細化混凝土毛細孔結構，提高混凝土密實度，從而降低氯離子滲透速率，減低鋼筋銹蝕風險，特別適用於高度鹽結晶侵蝕等環境下的海工、核電、橋樑、隧道、鐵路等混凝土工程，常見的混凝土抗侵蝕抑制劑有活性矽質材料等。「緩」是透過有效的措施讓混凝土內的鋼筋受到直接保護，防止或延緩鋼筋銹蝕的速率。防銹劑通常分為內摻型和外塗型，內摻型防銹劑在混凝土



拌合過程中加入，直接作用於所有鋼筋表面，抑制鋼筋銹蝕，同時還能抑制鋼筋鈍化膜的溶解。外塗型又稱為「遷移型鋼筋防銹劑」，是近些年來新興發展的新型防銹劑，將它塗佈在混凝土表面，利用混凝土多孔性和防銹劑分子自身的遷移和擴散特性，滲透至表層鋼筋的表面，並在鋼筋表面形成緻密吸附膜，抑制腐蝕性介質與鋼筋本體接觸，減緩鋼筋銹蝕的作用。圖 2 顯示前述「隔、阻、緩」三大面向防腐蝕技術的示意圖[8]。

以「許厝港自行車景觀大橋新建工程」為例，為了確保結構耐用年限必須在有限的預算內達成設計需求，因此必須採用最有效率的防腐、防蝕策略與技術，尤其混凝土材料上更是以「性能指標」為設計重點，同時擴大了混凝土最新科技的應用範圍。主要採用的策略如下：(1)提高混凝土設計強度：除了縮減結構尺寸與材料用量外，也因降低結構自重同時降低耐震力影響，而提升混凝土強度亦代表提升其抵抗腐蝕因子的滲透能力。可採用同時添加礦物摻料(爐石、飛灰或矽灰等)與化學摻料(例如羧酸系高性能減水劑等)的配比雙摻模式。(2)提升混凝土材料抗裂性能：具體措施包括原材料(例如砂、石等)物、化性能的特殊限制，同時限定混凝土的體積穩定性(例如自體收縮率)，因此要求施工單位必須提出有效完整的塑性及硬固狀態的混凝土養護方式(減少塑性收縮及乾燥收縮)，以及巨積混凝土水化熱溫度控制的作法。可採用同時添加礦物摻料與化學摻料(例如減縮劑、膨脹劑、纖維、水化溫升抑制劑等)的配比雙摻模式。(3)限制混凝土氯離子滲透係數：透過限制混凝土的氯離子滲透係數，達成保護鋼筋延長結構壽命的目的。可採用同時添加礦物摻料與化學摻料(例如抗侵蝕介質抑制劑、滲透結晶型防水劑、混凝土表層強化材料等)的配比雙摻模式。(4)添加鋼筋防銹劑：以往國內工程最常採用熱浸鍍鋅鋼筋或環氧樹脂鋼筋作為鋼筋防蝕的設計，但由於施工時期外保護層(例如鍍鋅層或環氧樹脂層等)容易受到損傷，且部分材料在高濃度氯鹽環境下的效能仍有疑慮，因此，透過在混凝土內添加鋼筋防銹劑，在鋼筋表層再形成堅固的鈍化膜，為鋼筋防銹蝕提供多層防護，同時有效降低建造成本。乾濕循環鋼筋銹蝕面積比是最為快速篩選和對比阻銹劑阻銹性能的评价方法[9]，該方法通過在模

擬海水污染的混凝土孔隙液，在乾濕循環條件下，對比空白鋼筋和加入阻銹劑的孔隙液中鋼筋的銹蝕面積變化，對比阻銹劑的阻銹性能。圖 3 為 A 品牌鋼筋阻銹劑與 B 品牌同類產品在某固定摻量條件下抑制鋼筋銹蝕的效果對比。空白鋼筋表面銹蝕較為嚴重，加入阻銹劑後鋼筋銹蝕面積得到顯著抑制，而且 A 品牌鋼筋阻銹劑具有更好的銹蝕抑制效果。目前國內針對鋼筋混凝土防銹劑的參考規範則有「CNS 12456 鋼筋混凝土用防銹劑」[6]，相關的防銹性能要求詳表 1，至於鋼筋混凝土用防銹劑的檢驗方法可參照「CNS 12457 鋼筋混凝土用防銹劑檢驗法」[7]，可分為「鋼筋之浸鹽水試驗法」與「混凝土之鋼筋加速銹蝕試驗法」兩種。

綜上所述，「許厝港自行車景觀大橋新建工程」對於提高混凝土設計強度規定如下：主結構體混凝土抗壓強度(56 天) $\geq 420\text{kgf/cm}^2$ 。對於提升混凝土材料抗裂性能規定如下：巨積混凝土定義為結構物中混凝土最小澆置尺寸達 120 cm 以上、膠結材料用量超過  $390\text{kg/m}^3$  或在難以散熱的環境下澆置時，須依工程特性考量水合熱問題，如使用飛灰，須符合 CNS 3036 混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物之 F 類規定，飛灰用量不得超過總膠結材料重量之 30%；如使用水淬高爐爐渣粉，須符合 CNS 12549 混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉之規定，水淬高爐爐渣粉用量不得超過總膠結材料重量之 65%；而飛灰與水淬高爐爐渣粉總用量不得超過總膠結材料重量之 65%。澆置溫度不得高於  $30^\circ\text{C}$ ，澆置後之內部最高溫度不得大於  $70^\circ\text{C}$ ，表面使用之保溫材質與尺寸，應可使澆置單元於養護齡期中，心表溫差(澆置單元之中心與澆置面下 5cm 處之溫差)小於  $20^\circ\text{C}$ ，可於實作試驗中進行保溫養護成效確認。另外須限制混凝土的收縮率，試驗法須符合 CNS 14603 硬固水泥砂漿及混凝土長度變化試驗法之規定，自體收縮率 $\leq 300\mu$ ，如需添加其他特殊摻料(減縮劑、膨脹劑或聚丙烯抗裂纖維等)，其添加量須經由試驗確認並經工程司認可。對於限制混凝土氯離子滲透係數的規範要求如下：試驗法參考 NT BUILD 492 混凝土氯離子擴散係數快速測定方法之規定，氯離子擴散係數 $\leq 2\cdot 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 。至於對於添加鋼筋防銹劑的規定如下：混凝土中之鋼筋加速銹蝕試驗須符合 CNS 12457 鋼筋混凝土用防銹劑檢驗法第 3.2

節之規定防銹率 $\geq 95\%$ 。

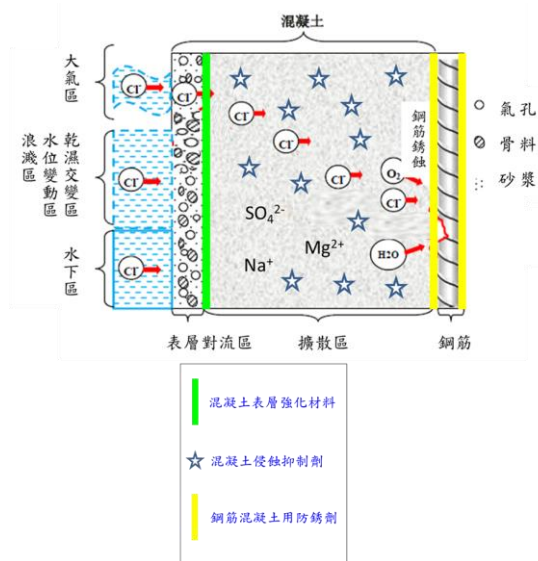


圖 2 「隔、阻、緩」三大面向防腐蝕技術示意圖[8]

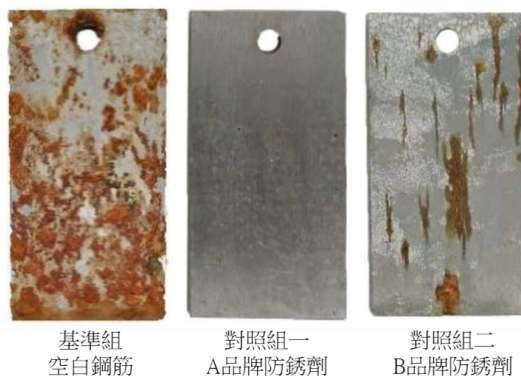


圖 3 乾濕循環下兩種防銹劑對鋼筋銹蝕的抑制

表 1 防銹劑之性能[6]

試驗項目	規定	試驗方法
鋼筋之浸鹽水試驗	不得有銹蝕現象	依CNS12457第3.1節
混凝土中之鋼筋加速銹蝕試驗	防銹率95%以上	依CNS12457第3.2節
混凝土之凝結時間及抗壓強度試驗	凝結時間差異	初凝 ±60分鐘以內 終凝 依CNS12457第3.3節
	抗壓強度比	齡期7天 0.90以上 齡期28天

### 三、結論

- 完整的工程結構防腐蝕策略必須涵蓋抗裂設計與耐久性設計，抗裂設計著重在短、中、長期混凝土材料抗裂技術，而耐久性設計則聚焦在降低混凝土中有害物質擴散速率與鋼筋阻銹防

護技術兩大部分。

- 完整的鋼筋混凝土結構防蝕技術，由外而內可分為「隔、阻、緩」三大面向。「隔」是透過「混凝土表層強化材料」分次塗佈在混凝土表面形成永久密封層。「阻」是透過添加「混凝土抗侵蝕抑制劑」在新拌混凝土中，是一種具有疏水密實功能的混凝土外加劑。「緩」是透過有效的措施讓混凝土內的鋼筋受到直接保護，防止或延緩鋼筋銹蝕的速率，例如於混凝土中添加鋼筋混凝土用防銹劑。
- 以「許厝港自行車景觀大橋新建工程」為例，採用最有效率的防腐、防蝕策略與技術，尤其混凝土材料上更是以「性能指標」為設計重點。主要採用的策略如下：(1)提高混凝土設計強度(56 天)大於等於  $420\text{kgf/cm}^2$ 。(2)提升混凝土材料抗裂性能，須考量巨積混凝土效應，並限制自體收縮率在  $300\mu$  之內。(3)限制混凝土氯離子滲透係數，參考 NT BUILD 492 混凝土氯離子擴散係數快速測定方法之規定不得大於  $2 \cdot 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 。(4)添加鋼筋防銹劑，須符合 CNS 12457 鋼筋混凝土用防銹劑檢驗法第 3.2 節之規定防銹率不小於 95%。

### 參考文獻

- 中國土木水利工程學會 (2021) 「土木 401-110 混凝土結構設計規範與解說」。
- ACI Committee 222 (2010) Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222R-01), Reported by ACI Committee 222.
- Cornet, I., and Bresler, B. (1966) Corrosion of Steel and Galvanized Steel in Concrete, *Materials Protection, V. 5, No. 4, Apr. 1966, 69-72.*
- Griffin, D. F. (1969) Effectiveness of Zinc Coating on Reinforcing Steel in Concrete Exposed to a Marine Environment, *Technical Note No. N-1032, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, 42.*
- Hill, G. A., Spellman, D. L., and Stratfull, R. F. (1976) Laboratory Corrosion Tests of Galvanized Steel in Concrete, *Transportation Research Record No. 604, Transportation Research Board, 25-30.*

6. CNS 12456 (2015) 鋼筋混凝土用防銹劑，中華民國國家標準。
7. CNS 12457 (2016) 鋼筋混凝土用防銹劑檢驗法，中華民國國家標準。
8. 陳彥睿、王自強(2021) 鋼筋混凝土結構之防蝕策略及腐蝕監測，混凝土科技 第十五卷 第一期，臺灣混凝土學會。
9. GB/T 31296 (2014) 混凝土防腐阻銹劑。
10. 林福壽(2007) 鋅基塗層鋼筋於混凝土中之腐蝕行為，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程學系。
11. 鄭安(2005) 使用爐石及熱浸鍍鋅鋼筋對混凝土梁抗蝕及力學行為影響之研究，博士論文，國立臺灣海洋大學材料工程研究所。
12. 陳彥睿(2021) 海峽兩岸規範對於氯鹽環境中混凝土結構的防腐蝕附加措施之建議，混凝土科技 第十五卷 第三期，臺灣混凝土學會。

# 海域金屬材料腐蝕因子調查研究

溫志中<sup>1</sup> 謝智文<sup>2</sup> 葉秀貞<sup>3</sup> 蔡涵任<sup>3</sup> 羅建明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>弘光科技大學環境與安全衛生工程學系 副教授

<sup>2</sup>弘光科技大學環境與安全衛生工程學系 研究生

<sup>3</sup>弘光科技大學環境與安全衛生工程學系 研究助理

<sup>4</sup>交通部運輸研究所港灣研究中心 研究員

## 摘要

本研究於臺中港 4 號碼頭進行水下金屬試片暴露試驗，選用港工常用之金屬結構材料 SM490B 碳鋼、SS316L 不鏽鋼、SS400 低碳鋼三種金屬試片，針對基礎水質環境、海洋附著生物情況進行觀測與調查，藉以瞭解水下金屬材料之腐蝕速率情況並進行腐蝕因子分析。調查結果顯示，金屬腐蝕速率由高到低為：SS400 低碳鋼 > SM490B 碳鋼 > SS316L 不鏽鋼；附著生物以藤壺、二枚貝類及管蟲為大宗。另由水質參數因素分析顯示，鹽度、總溶解固體量、導電度、溫度及溶氧為主要影響因子，可解釋相關海域水質監測資料 83.397% 的變數變異量。

關鍵詞：水質監測、鋼材腐蝕、海生物附著、腐蝕因子

## Investigation on Corrosion Factors of Metal Materials in Sea Area

Chih-Chung Wen\*, Chih-Wen Hsieh, Hsiu-Chen Yeh, Han-Jen Tsai, Chien-Ming Lo

\* Associate Professor, Department of Health and Environmental Engineering, Hungkuang University

### ABSTRACT

In this research, the underwater metal test piece exposure test was conducted in Taichung Port 4 Pier. Three types of metal materials: SM490B, SS316L and SS400, which are commonly used in harbor engineering, were selected. Observe and investigate the basic water environment and marine attached organisms to understand the corrosion rate of underwater metal materials and analyze the corrosion factors. The survey results show that the metal corrosion rate from high to low is: SS400 > SM490B > SS316L; the attached organisms are mainly Balanus, Bivalves and Sabellidae. In addition, the analysis of water quality parameters shows that Salinity, Total Dissolved Solids (TDS), Conductivity, Temperature and Dissolved Oxygen (DO) are the main influencing factors, which can explain 83.397% of the variable variation of the relevant sea area water quality monitoring data.

Keywords: Water quality monitoring; Steel corrosion; Sea creatures attached; Corrosion factor

### 一、研究目的

配合政府離岸風力發電政策之推行，臺中港於 106-109 年進行「前瞻基礎建設計畫-臺中港離岸風電作業碼頭興建工程」，進而成為臺灣中部之離岸風電基地母港。故本研究在 08 年 6 月至 109 年 6 月期間於臺中港 4 號碼頭進行金屬材料腐蝕因子調查研

究與分析，針對水域裝設多參數水質監測儀，收集海水溫度、導電度、溶氧量、酸鹼度、鹽度、濁度、總溶解固體量等各項數據；於水中帶設置金屬試驗架，進行金屬暴露試驗，觀測金屬試片腐蝕速率與海生物附著情況，藉以建立穩定臺中港之水域環境資訊紀錄，調查與分析水質參數對腐蝕速率與海生物附著之間的關聯性，提供做為臺中港區興建與整

建計畫擬定參考，以延長港區之使用壽命，提高經濟效益。

## 二、研究方法

本研究以 108 年 6 月至 109 年 6 月，於臺中港 4 號碼頭架設多參數水質監測儀及水下金屬試架，以進行長時間水質數據監測與金屬材料試片暴露試驗，臺中港 4 號碼頭位置圖，如圖 1 所示，研究流程圖，如圖 2 所示。

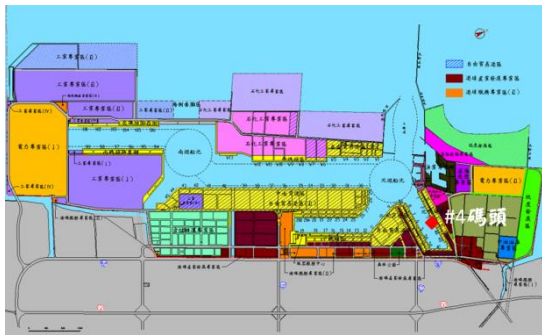


圖 1 臺中港 4 號碼頭位置圖

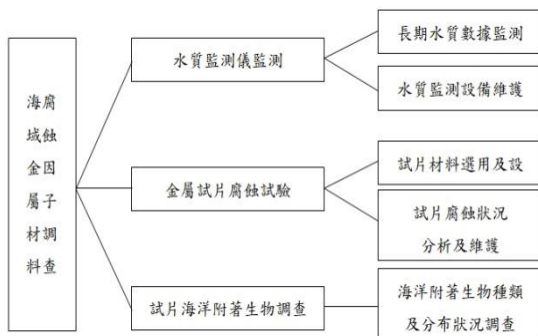


圖 2 研究流程圖

### 2.1 多參數水質觀測系統

本研究於臺中港 4 號碼頭建立水質監測系統觀測站，進行定點水質參數資料收集，監測項目包括；海水溫度、導電度、溶氧量、酸鹼度、鹽度、濁度、總溶解固體量等，進行連續基礎水質觀測調查工作，資料收集密度設定為每五分鐘 1 筆，將收集之水質參數進行研究分析，收集臺中港區水域基礎背景資料。

### 2.2 金屬試片附著生物及腐蝕調查

水下結構物受海水中存在的大量氯離子影響，易造成金屬鈍化，為海洋環境中高腐蝕之環境。因

此，本研究於水中帶進行金屬試片暴露試驗，以調查環境對海洋附著生物種類與數量及腐蝕速率之關聯性，相關金屬暴露試驗規劃詳述如下：

1. 試片材質：採用港工結構常用金屬材料之試片，三種材料分別為：SM490B 碳鋼、SS316L 不鏽鋼、SS400 低碳鋼，各種試片於試驗週期中取三重複，避免單一誤差值；於金屬試片中分別以「暴露區域-暴露週期-試片排序」進行編碼，暴露區域中，飛沫帶為編號 1、潮汐帶為 2、水中帶為 3，金屬試片裝設及編號示意圖，如圖 3 所示。

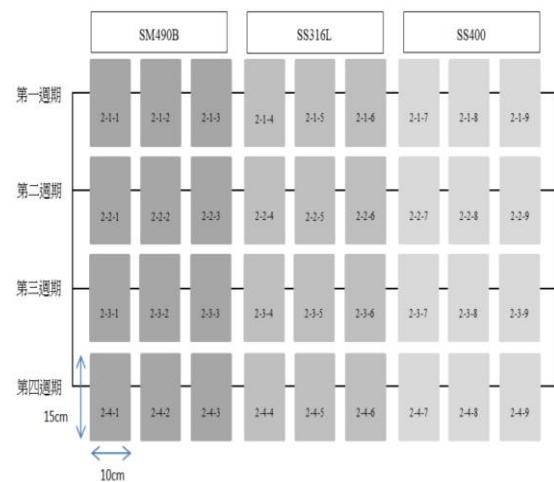


圖 3 金屬試片裝設示意圖

2. 金屬試片大小：為利於觀測及比較腐蝕速率與海洋附著生物情況，於三種不同港工結構常用金屬材料之附著情況，金屬試片大小為 15 cm \* 10cm，厚度為 1cm。
3. 試驗期程與取樣頻率：本次暴露試驗以四個週期規劃，分別於 108 年 6 月、9 月與 109 年 3 月、6 月進行金屬試片取樣作業。
4. 觀察金屬試片於各週期採樣後，附著生物之種類與數量。

### 三、結果與討論

#### 3.1 水質數據觀測與分析

以 108 年 6 月至 109 年 6 月於臺中港 4 號碼頭，透過多參數水質監測儀所實測數據，針對溫度、鹽度、酸鹼度、溶氧量、導電度、總溶解固體量及濁度七項，進行連續基礎水質觀測調查工作，資料蒐集密度設定為每五分鐘 1 筆，並記錄觀測日期及時間，各水質參數季平均監測資料，如表 1 所示。

表 1 各季平均水質觀測紀錄表

季均	溫度 (°C)	鹽度	酸鹼度	溶氧 (mg/L)	導電度 (ms/cm)	總溶解固體量 (g/L)	濁度 (NTU)
夏 6.7.8 月	29.59	32.45	8.28	6.07	49.80	32.37	2.17
秋 9.10.11 月	25.76	33.75	8.13	6.10	51.41	33.41	3.46
冬 12.1.2 月	19.79	33.93	8.20	7.35	51.53	33.50	3.36
春 3.4.5 月	24.75	34.11	8.17	6.77	51.86	33.71	3.32
最小值	19.79	32.45	8.13	6.07	49.80	32.37	2.17
最大值	29.59	34.11	8.28	7.35	51.86	33.71	3.46
平均值	24.97	33.56	8.20	6.57	51.15	33.25	3.08

##### (1)溫度

觀測期間，臺中港 4 號碼頭溫度變化介於 19.79~29.59°C 之間，溫度隨季節變化呈現夏高冬低之變化趨勢，平均水溫為 24.97°C。

##### (2)鹽度

鹽度主要受溫度、降雨量及蒸發量等影響，觀測期間，臺中港 4 號碼頭鹽度變化介於 32.48~34.11 之間，夏季平均鹽度偏低為 32.45，平均鹽度為 33.56。

##### (3)酸鹼度 pH

海水 pH 值一般介於 8.0~8.5 之間，受到季節循環與區域影響而變化，夏季因高溫及強烈光合作用，使海水中二氧化碳濃度下降，pH 值上升；冬季則作用相反，海水中二氧化碳濃度上升，pH 值隨之下降。觀測期間，pH 值變化位於 8.13~8.28 之間，平均值為 8.2，皆符合乙類海洋環境品質標準 pH 值 7.8~8.5 之規範內。

##### (4)溶氧(DO)

溶氧受到水體光合作用強度及水溫高低影響，當水溫偏低時，水體溶氧量會較高；此外當水中浮游植物行光合作用旺盛時，亦會使水中溶氧量提高。若水體受到有機物質污染，水中微生物將於分解有機物過程中消耗水中的溶氧，造成水中溶氧降低甚至缺氧的情況產生。觀測期間，臺中港 4 號碼頭溶氧量介於 6.07~7.35mg/L 之間，平均值為 6.57mg/L，符合乙類海洋環境品質標準溶氧量>5.0 之規範。

##### (5)導電度

導電度與水中離子總濃度、移動性、相對濃度及水溫等有關，通常導電度越高表示水中電解質含量較多。觀測期間，臺中港 4 號碼頭導電度介於 49.8~51.86ms/cm 之間，平均值為 51.15ms/cm。

##### (6) 總溶解固體量

總溶解固體量表示在水中溶解的固體物質總量，其中包括：溶解性碳酸氫離子、氯鹽、硫酸鹽、鈣、鎂、鈉與鉀；揮發及非揮發性固體等。觀測期間，臺中港 4 號碼頭導電度介於 32.37~33.71g/L，平均值為 33.25 g/L。

##### (7) 濁度

濁度的來源包括黏粒、粉粒、細微有機物、浮游生物或微生物等，濁度高會影響水體外觀並阻礙光的穿透，進而影響水生植物的光合作用，使魚類的呼吸作用受阻，影響魚類的生長與繁殖。觀測期間，臺中港 4 號碼頭濁度介於 2.17~3.46NTU，平均值為 3.08NTU。

#### 3.2 金屬試片暴露觀測與分析

試片暴露試驗分別觀測 SM490B 碳鋼、SS316L 不鏽鋼、SS400 低碳鋼三款不同金屬材料，於水中帶架設試片試架進行暴露試驗，至 108 年 5 月開始，分別於暴露第一、三、十及第十三個月進行重量損失記錄以觀測其腐蝕速率，如表 2 所示。

表 2 水中帶各週期平均鋼材腐蝕速率紀錄表

	試片材質	重量損失 (g)	表面積 (cm <sup>2</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	暴露時間 (month)	腐蝕速率 (μm/yr)
夏 108.06	SM490B	11.3	350	7.85	1	506.6
	SS316L	1.4	350	7.98	1	60.2
	SS400	9.7	350	7.85	1	423.7
秋 108.09	SM490B	22.1	350	7.85	3	321.7
	SS316L	3.8	350	7.98	3	54.4
	SS400	23.5	350	7.85	3	342.1
春 109.03	SM490B	34.4	350	7.85	10	150.2
	SS316L	7.9	350	7.98	10	33.9
	SS400	49.8	350	7.85	10	217.5
夏 109.06	SM490B	113.4	350	7.85	13	381.0
	SS316L	10.9	350	7.98	13	36.0
	SS400	94.2	350	7.85	13	316.5

由臺中港 4 號碼頭金屬試片暴露試驗結果可知，於水中帶中，以 SS316L 不鏽鋼防腐蝕程度最佳，遠低於 SM490B 碳鋼及 SS400 低碳鋼之腐蝕程度；SM490B 碳鋼腐蝕速率介於 150.2~506.6 μm/yr，SS400 低碳鋼腐蝕速率介於 217.5~423.7 μm/yr，SS316L 不鏽鋼腐蝕速率介於 33.9~60.2 μm/yr。三種金屬試片暴露十三個月後，其腐蝕速率由高至低分別為：SS400 低碳鋼 > SM490B 碳鋼 > SS316L 不鏽鋼，如圖 4 所示。

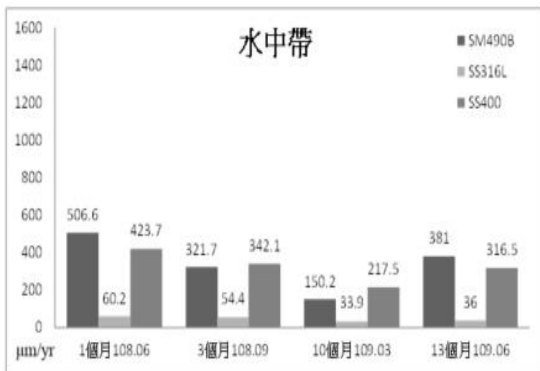


圖 4 水中帶各季試片暴露腐蝕速率變化

### 3.3 水中帶金屬試片海生物附著觀察

本研究以「水中帶」作為研究觀察依據，金屬試片全時段皆浸泡於海水中，所發現之海生物附著種類豐富，包含藤壺、二枚貝類及管蟲等，其中以管蟲的數量，於暴露時間三至十個月成長最為迅速；就二枚貝類觀察，其附著於金屬試片上的數量稀少，但個體體積較大，最大直徑約 9cm；三種金屬試片

暴露十三個月後，海生物附著之數量由多至少皆為：管蟲 > 藤壺 > 二枚貝類，各種金屬試片之海生物附著數量，如表 3 至 5 所示。

表 3 水中帶 SM490B 碳鋼海生物附著數量表

SM900B 碳鋼				
	1 個月	3 個月	10 個月	13 個月
藤壺	7.33	20	27	27.33
二枚貝類	0.67	4	2	0.67
管蟲	19	0	46	55.67

表 4 水中帶 SS316L 不鏽鋼海生物附著數量表

SS316L 不鏽鋼				
	1 個月	3 個月	10 個月	13 個月
藤壺	2.67	1	47.33	32
二枚貝類	2	8	3.67	4.33
管蟲	2.67	18.33	64.33	69.67

表 5 水中帶 SS400 低碳鋼海生物附著數量表

SS400 低碳鋼				
	1 個月	3 個月	10 個月	13 個月
藤壺	20	12.33	49.67	75
二枚貝類	1.33	4.33	11.33	2.67
管蟲	72	14.33	37	93

### 3.4 水質參數因素分析

研究針對臺中港 4 號碼頭 108 年 6 月至 109 年 6 月間之水質監測項目：海水溫度、導電度、溶氧量、酸鹼度、鹽度、濁度、總溶解固體量，七項變異數進行 KMO 與 Barlett's 檢定，以判定資料是否適合進行因素分析。

KMO 是 Kaiser-Meyer-Olkin 的取樣適當性衡量量數，當 KMO 值越大，代表變數間的共同因素越多，越適合進行因素分析，KMO > 0.9 表示應用因素分析適合性極佳，KMO > 0.8 表示良好，KMO < 0.5 則代表無法接受採用因素分析。

各項水質監測參數觀測數據利用 KMO 與 Barlett's 檢定結果，如表 6 所示。分析結果顯示，KMO 統計量為 0.666，Barlett's 檢定統計量之顯著性達顯著 (p < .001)，可使用所收集之水質參數數據接續進行

因素分析。

表 6 水質參數之相關性檢定

KMO 與 Barlett's 檢定		
Kaiser-Meyer-Olkin 取樣適切性量數		.666
Barlett's 球形檢定	近似卡方分配	180.300
	Df	21
	顯著性	.000

依據變異數之分析結果，可知因素分析所抽取的因素與全體變數變異量之比例，如表 7 所示，第一項因數為 61.949% 的變數變異量，第二項因素為 21.488% 的變數變異量，由成分矩陣，如表 8 所示，可知第一項因素主要受到鹽度、總溶解固體量、導電度、溫度及溶氧量之影響，第二項因素則受到 pH 值及濁度影響，綜合兩項因素結果顯示，其變數變異量高達 83.397%。由此說明鹽度、總溶解固體量、導電度、溫度、溶氧量、pH 值及濁度對海域金屬材料之腐蝕速率與海生物附著數量，有顯著關聯性。

表 7 水質參數之解說總變數變異量

元件	初始特徵值			平方和負荷量萃取		
	總數	變異數的 %	累積%	總數	變異數的 %	累積 %
1	4.336	61.949	61.949	4.336	61.949	61.949
2	1.501	21.448	83.397	1.501	21.448	83.397
3	.628	8.973	92.370			
4	.431	6.159	98.529			
5	.068	.972	99.501			
6	.035	.499	100.000			
7	1.413E-005	.000	100.000			

表 8 水質參數之成份矩陣

轉軸後的成份矩陣 <sup>a</sup>		
	元件	
	1	2
salinity	.937	
TDS	.913	
conductivity	.912	
temperature	-.897	
DO	.836	
pH		-.896
turbidity		.825

萃取方法：主成分分析。

旋轉方法：含 Kaiser 常態化的 Varimax 法。

a. 轉軸收斂於 3 個疊代。

#### 四、結論

- 於「水中帶」進行暴露區域之金屬腐蝕速率試驗中，暴露試驗前期(1~3 個月)腐蝕速率較為顯著，隨暴露時間增加越趨於穩定，暴露 3 個月後腐蝕速率逐漸趨緩。
- 比較 SM490B 碳鋼、SS316L 不鏽鋼及 SS400 低碳鋼三種金屬試片暴露一年後，其金屬腐蝕速率由高至低大致呈現：SM490B 碳鋼>SS400 低碳鋼>SS316L 不鏽鋼之情況，故 SS316L 不鏽鋼是為三種港工結構材中抗腐蝕性最高之金屬材料。
- 觀察 SM490B 碳鋼、SS316L 不鏽鋼、SS400 低碳鋼三種不同金屬材料試片之海生物附著數量，以管蟲占比最大，其次為藤壺，而二枚貝類數量相對稀少；管蟲於暴露第 3 個月至第 10 個月數量成長許多，可推測可能與管蟲生長週期有關；二枚貝類之附著數量隨暴露時間增長，數量雖無明顯增長，但觀測其個體體積有明顯變大。
- 通過水質參數主成分分析顯示，因素分析可分為兩項，第一項因素主要受到鹽度、總溶解固體量、導電度、溫度及溶氧之影響，第二項因素則受到 pH 及濁度影響，綜合兩項因素，顯示其變數變異量關係高達 83.397%。



## 謝誌

本論文係交通部運輸研究所專題研究計畫「臺中港區及鄰近海域金屬材料與腐蝕因子調查」(編號 IOT-109H1C003)之研究成果，承蒙交通部運輸研究所經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. 羅建明、黃宇謙(2019)臺灣沿岸地區金屬材料腐蝕環境調查研究，交通部運輸研究所，。
2. 羅建明(2018)臺灣大氣環境下金屬腐蝕特性研究:以台中港為例。
3. 羅建明、胡啟文、黃宇謙、柯正龍(2018)臺灣商港水下金屬材料一年期腐蝕速率調查研究。
4. 交通部(2017)前瞻基礎建設計畫—臺中港離岸風電產業專區。
5. 林維明、饒正、柯正龍、羅建明、張道光、陳正義、李昭明、何木火、王培源、林隆貞、吳建國、黃然、林志洋、邵廣昭、林幸助、蘇易男、李賢華、宋克義、羅俊雄、余宗鴻、王佩文(2007)港工結構材海生物附著與對策研究，港灣技術研究所研究報告。
6. 張銘榜(2005)海岸人工結構物-附著性指標生物之研究。
7. 林維明、毛維雲、魏豐義(1991)臺灣海域之腐蝕特性、防蝕設計及材料之選用及開發研究。
8. Snyder, R. M. & Huil, S. (1965). Parametric Variables Affecting Corrosion, *Geo-Marine Technology*, 17-24.
9. Tomashov, N. D. (1966). *Theory of corrosion and protection of metals; the science of corrosion*, New York, Macmillan.



## D. 海洋能與離岸風力



# 離岸風電機在地震下的動態反應

黃勝翊\*

\*國立中山大學機械及機電工程學系助理教授

## 摘要

本研究分析套管架式離岸風力發電機在地震下的動力反應。風力發電機的結構部分由殼元素模擬但套管架基礎則用樑元素模擬。振動模態的分析結果可以發現利用集中荷重結構模型會造成有些振動模態被忽略。動態分析結果顯示全結構模型所得的反應遠大於集中荷重結構模型有十倍以上。另外，考慮自重的動態反應遠大於不考慮自重的動態反應。研究的結果建議設計大型離岸風電時，應用殼元素建立的風電機全結構模型並考慮自重以避免反應被低估。

關鍵詞：離岸、風機、地震、複合材料

## Dynamic responses of offshore wind turbines under seismic loads

H. S. Huang\*

\* Assistant Professor, Department of Mechanical and Electromechanical Engineering, National Sun Yat-sen University

## ABSTRACT

In this research, the dynamic responses of a jacket-style offshore wind turbine under seismic loads are studied. The wind turbine is modelled by shell-based finite element model whereas the jacket-style foundation is modelled by beam-elements.

Studying on natural vibration frequencies for both full model and lumped mass model shows that using the lumped mass model may not capture vibration modes that can only be seen in the full model. The comparison of dynamic analysis between the full model and the lumped mass model shows that some responses in the full model are one order of magnitude larger than those in the lumped mass model. The comparison of dynamic analysis between the model with consideration of self-weight and the model without consideration of self-weight shows that neglecting the self-weight will underestimate the dynamic responses of the wind turbines. This study suggests that, during the design phase for certification, shell-element based full model and self-weight are recommended to be included in order to reliably predict the responses of offshore wind turbines under seismic loads.

Keywords: Offshore; Wind Turbines; Earthquake; Composites

## 一、前言

由於全球暖化日益嚴重的問題，綠色能源變成一個相當受歡迎的替代能源。台灣因為陸上土地大多已被利用，離岸風力發電被視為相當有潛力且可行的綠色能源。鑒於離岸風力發電分析多用全部樑元素進行分析，其中最受歡迎的為 Open Fast 軟體和 HAWC 軟體。值得一提的是 Open Fast 的葉片樑元素只能用等向性的樑來做模擬。本研究利用殼元素來模擬由複合材料組成的 10MW (Mega Watt) 離岸風機的風葉結構及風葉塔結構，在離岸風機的基礎部分則用樑元素組合而成的離岸風機結構（之後將稱全結構模型）並探討離岸風力發電機在震動下的動態反應。本研究分成三部分。第一部分為全結構模型及集中質量結構模型的振動頻率比較，第二部分為全結構模型及集中質量結構模型在震動下的動態分析比較，第三部分為考慮自重及不考慮自重的全結構模型在震動下動力分析比較。

## 二、離岸風機的材料參數

本研究的離岸風機材料參數係利用丹麥科技大學 2013 年出版的研究報告(Bak et al., 1995)內 10MW (Mega Watt) 風機資料。其中旋翼(rotor)的質量為 227,962kg，直徑為 178.3m。螺殼(hub)的質量為 105,520kg，直徑為 5.6m。機艙(nacelle)的質量為 446,036kg。風力發電機的葉片由複合材料組成，其勁度係數及複合材料強度如下(Bak et al., 1995)。

表 1 複合材料勁度係數

Type	Uniax	Biax	Triax
Ex(GPa)	41.63	13.92	14.7
Ey(GPa)	14.93	13.92	21.8
Ez(GPa)	13.42	12.1	12.1
Gx(GPa)	5.04	11.5	9.41
Gy(GPa)	5.04	4.53	4.53
Gz(GPa)	5.04	4.53	4.53
$\nu_x$	0.24	0.53	0.47
$\nu_y$	0.26	0.27	0.27
$\nu_z$	0.33	0.33	0.33
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1915.5	1845.0	1845.0

表 2 複合材料強度

Type	Uniax	Biax	Triax
Xt(MPa)	416.3	139.2	157.9
Xc(MPa)	149.3	120.2	217.9
Yt(MPa)	416.3	139.2	157.9
Yc(MPa)	149.3	120.2	217.9
S(MPa)	50	115.0	94.13

風力發電機的塔由鋼材料組成其塔斷面直徑及斷面厚度如表 3 所示

表 3 風力發電機的塔斷面直徑及斷面厚度

高度(米)	外圍直徑(米)	厚度 (釐米)
0.0	8.03	38
11.50	8.0215	38
11.501	8.0215	36
23.00	7.7430	36
23.00	7.7430	34
34.50	7.4646	34
34.50	7.4646	32
46.00	7.1861	32
46.001	7.1861	30
57.5	6.9076	30
57.501	6.9076	28
69.00	6.6292	28
69.001	6.6292	26
80.5	6.3507	26
80.501	6.3507	24
92.00	6.0722	24
92.00	6.0722	22
103.5	5.7937	22
103.501	5.7937	20
115.61	5.5	20

至於套管架(jacket)結構參數則參考(Li, 2010) 其斷面如圖 1 所示。套管架結構有 54.6 公尺埋於土壤，土壤數值模擬的參數則用彈簧及阻尼來模擬。彈簧係數及阻尼係數分別為 30M (N/m) 及 10M (N.s/m)。

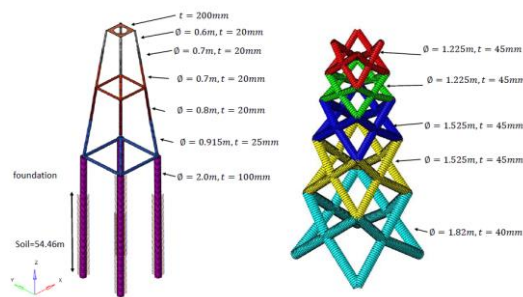


圖 1 套管架結構及斷面參數

以得知簡化結構模型所得的振動頻率沒有跟全結構模型所得的振動頻率吻合，也就是利用簡化結構模型可能會忽略真正結構的振動頻率。

### 三、全結構模型及簡化結構模型的振動模態比較

在風力發電塔的設計部分，有別於一般將風葉結構用一個集中質量置於塔頂端(簡化結構模型)進行動態分析，本研究建立全結構模型及簡化結構模型。其前十個振動模態比較列於表 4

表 4 全結構模型及簡化結構模型振動模態比較

振態	全模型 赫茲(HZ)	簡化模型 赫茲(HZ)
1	0.053	0.055
2	0.053	0.056
3	0.207	0.377
4	0.269	0.378
5	0.319	0.806
6	0.347	0.932
7	0.378	1.42
8	0.38	1.42
9	0.411	1.69
10	0.455	1.70

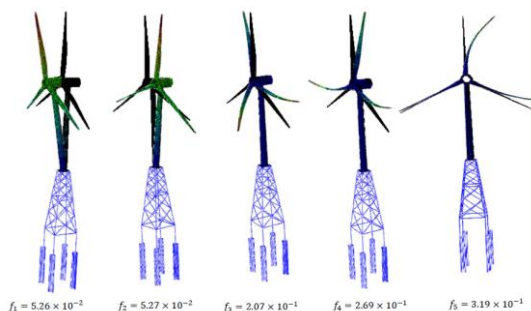


圖 2 全結構模型第一至第五振態

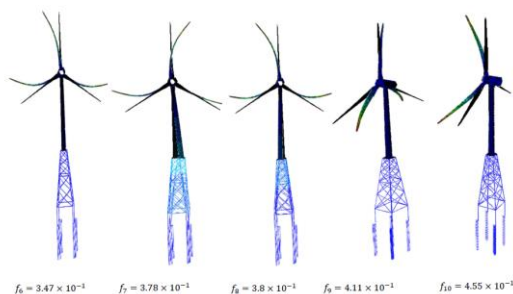


圖 3 全結構模型第六至第十振

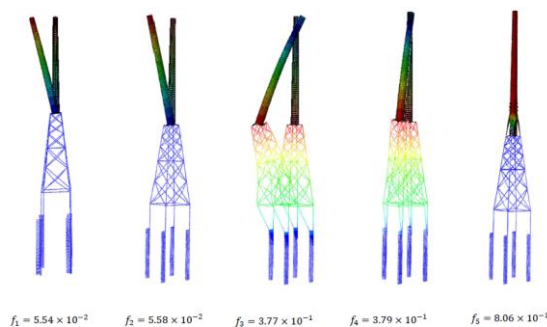


圖 4 簡化結構模型第一至第五振態

圖 2 為全結構模型的第一振態到第五振態，圖 3 為全結構模型的第六振態到第十振態。圖 4 為簡化結構模型的第一振態到第五振態。比較圖 2 及圖 4 可以發現簡化結構模型的第一振動頻率和全結構模型的第一振動頻率相近。比較圖 3 及圖 4 可以發現簡化結構模型的第三振動頻率和全結構模型的第七振動頻率相近，在此振動頻率套管架和楓葉同時產生很大的相對位移。從圖 2 圖 3 及圖 4 可

#### 四、全結構模型及簡化結構模型在地震下的反應比較

台灣位於地震帶，離岸風機的設計不只應該考慮風力、潮汐力，也需要考慮地震力。在設計離岸風機的對地震抵抗能力時，雖然可以利用已知的單一的地震資料來進行動態分析，但單一的地震資料卻不能符合設計規範的加速譜，因此本文利用設計加速譜如圖 5。並將圖 5 加速譜轉換成加速度如圖 6。本研究的動態分析並沒有考慮風力及潮汐力但考慮風力及潮汐力並不會造成問題。圖 7 為全結構模型及簡化結構模型塔頂在地震方向歷時最大力的比較，可以觀察到全結構模型下所得的最大力遠大於簡化結構模型下所得的最大力。同樣的情形也可以在塔頂在地震方向位移的歷時反應觀察到。

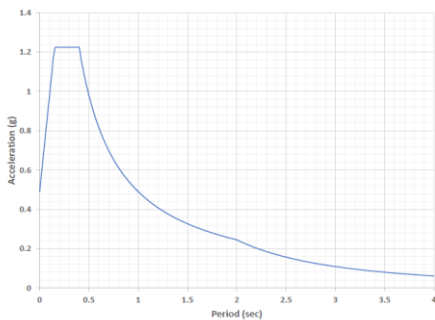


圖 5 歐洲第四類建築設計頻譜

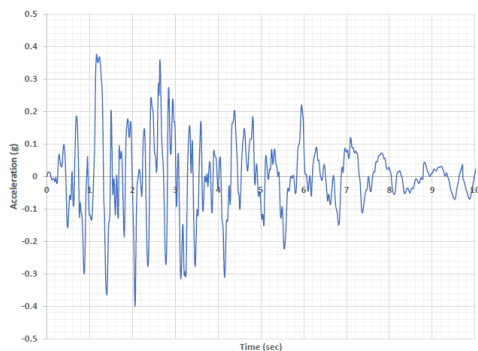


圖 6 設計譜轉換成的地震加速度歷時反應

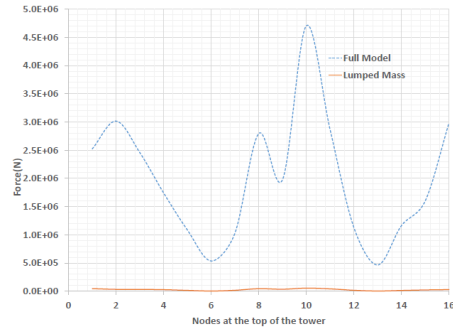


圖 7 全結構模型及簡化結構模型塔頂在地震方向歷時最大力的比較

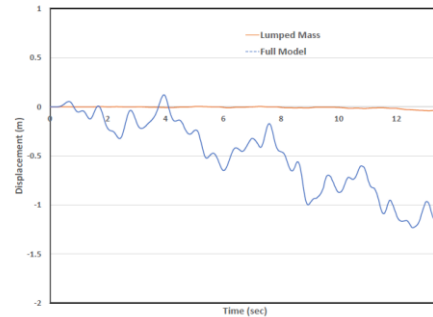


圖 8 全結構模型及簡化結構模型塔頂位移在地震方向的歷時比較

#### 五、重力效應對全模型離岸風電在地震下的反應比較

因 10MW 的風力發電結構相當巨大，本研究同時探討在考慮自重效應及忽略自重效應下的地震動態反應。圖 3 為風葉的殼元素網格。圖 9 左邊的圖為風葉內部的抗剪腹板 A，抗剪腹板 B，抗剪腹板 C (由右而左)。

研究顯示在忽略自重效應的情形下其應力遠低於考慮自重效應的應力。圖 10 為抗剪腹板 A 考慮自重及沒有考慮自重的比較。X 軸為由風葉根部算來的有限元素的結點順序，Y 軸為該節點在動態歷時分析中的在 x 方向 (地震方向) 的最大反應力。



由圖 10 可以發現考慮自重的反應遠大於沒有考慮自重的反應。同樣的情形可以發現在圖 11 抗剪腹板 B 及圖 12 抗剪腹板 C 的比較。

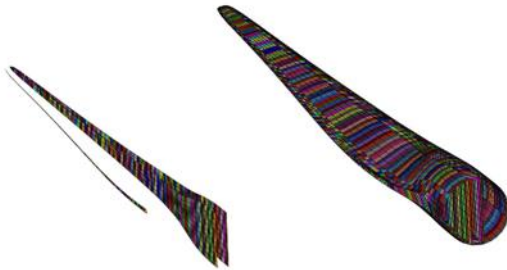


圖 9 複合材料組成風葉其殼元素網格

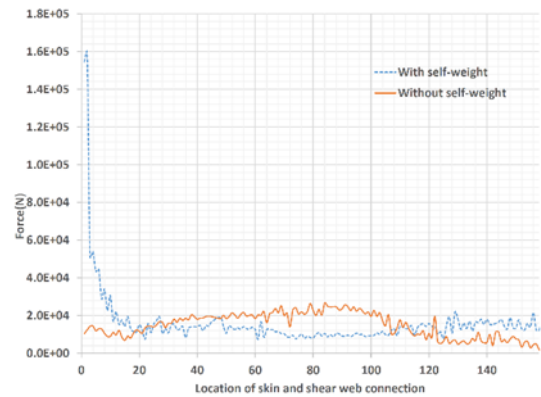


圖 12 抗剪腹板 C 考慮自重及沒有考慮自重的節點力比較

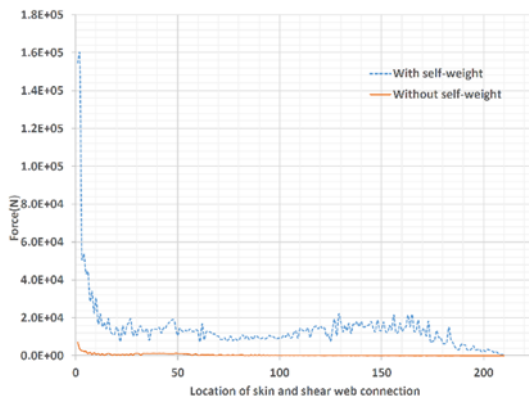


圖 10 抗剪腹板 A 考慮自重及沒有考慮自重的節點力比較

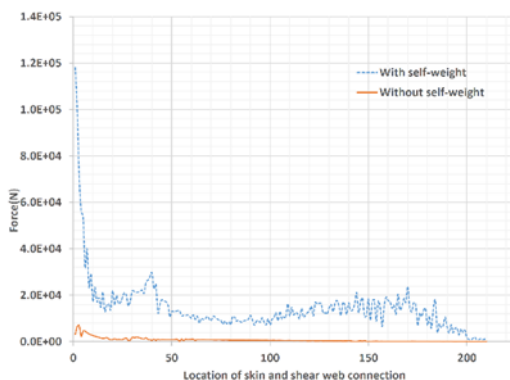


圖 11 抗剪腹板 B 考慮自重及沒有考慮自重的節點力比較

## 五、結論

本研究發現利用全結構模型所得到的振動模態是簡化結構模型沒有辦法捕捉到振動模態。另外，在動態反應方面，全結構模型所得的反應為簡化結構模型的十倍以上，這可以說明利用簡化結構模型將會遠遠的低估風力發電機在動態下的反應。最後，忽略自重也將導致動態下的反應的低估。

雖然殼結構元素建樑元素的建置相當耗時且分析也花較多時間，但由於全結構模型可在動態模擬中同時取得額外複合材料葉片的應力及其他物理量簡單結構模型卻沒法求得的物理量，綜合以上研究結果，建議於離岸風機設計時需用全結構模型及考慮自重效應來做動態模擬分析及設計。

## 參考文獻

1. Open fast: open source wind turbine simulation tool, <https://github.com/openfast>
2. HAWC, Horizontal axis wind turbine simulation code, <https://www.hawc2.dk/hawc2-info>
3. Bak, C., Zahle, F., Bitsche, R., Kim, T., Yde, A., Henriksen, L.C., Natarajan, A., and Hansen, M. H. (2013) Description of the DTU 10 mw reference wind turbine. *DTU Wind Energy Report-I-0092*.
4. Li, P. (2010) Analysis and design of offshore jacket wind turbine. *Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology*.

# 生物附著於海上箱網繫纜及網袋 之繫纜疲勞分析

唐宏結<sup>1\*</sup> 江文山<sup>2</sup> 冉繁華<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水工試驗所副研究員

<sup>2</sup> 國立成功大學水工試驗所研究員兼副所長

<sup>3</sup> 國立臺灣海洋大學水產養殖學系特聘教授

## 摘要

本研究採用自行研發的數值模式，進行箱網的繫纜疲勞分析，情境包含未受生物附著、網袋受生物附著，以及繫纜受生物附著等三種。研究案例為屏東海域的實際尺寸箱網，輸入條件為小琉球浮標長期波浪分佈數據，數值模式以不規則波進行3小時模擬，計算結果通過雨流法 (rain-flow counting) 分析錨碇張力之應力範圍及圈數，利用繫纜材質的 S-N Curve，並搭配 Miner's Rule，得到繫纜3小時疲勞損傷，最後以波浪的年出現機率為權重，得到年疲勞損傷。分析結果顯示，年疲勞損傷以波浪出現機率為主要因子，波高為次要因子，而繫纜和網袋兩種生物附著情境，都會加速繫纜的疲勞損傷。然而，現行國際規範的疲勞分析，並不考慮繫纜磨損、銹蝕和腐蝕等因素，疲勞分析結果相對保守，故建議須經常性的檢視錨碇系統。

關鍵詞：養殖、箱網、生物附著、繫纜疲勞分析、不規則波

## Fatigue analysis of mooring lines with biofouling on lines and nets of a fish cage in the real sea

Hung-Jie Tang\* Wen-Son Chiang Fan-Hua Nan

\* Associate Researcher, Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

In this study, a self-developed numerical model was used to analyze the fatigue of the mooring line of the offshore fish cage, including the clean situation, the net-biofouling situation, and the line-biofouling. A practical fish cage in the Pingtung waters was taken as an example. The long-term record of the Xiaoliuqiu wave buoy was given as the input condition. The time-domain numerical model was used to simulate the mooring tension of the fish cage subjected to irregular waves for 3 hours, and then through the rain-flow counting method to calculate the stress range and the number of turns of the tension, substitute it into the S-N Curve corresponding to the material of the mooring line, and obtain the cumulative fatigue damage for 3 hours through the Miner's Rule, and then use the annual probability of wave appearance as a weight to obtain the cumulative fatigue damage. The results show that the annual cumulative fatigue damage takes the wave appearance probability as the main factor and the wave height as the secondary factor. Moreover, the two biofouling scenarios will boost the fatigue accumulation of the mooring line. However, since the fatigue analysis of the current international standards does not consider factors such as wear, rust, and corrosion, the analysis results are relatively conservative, so it is recommended that the mooring system be inspected regularly.

Keywords: Aquaculture; Net cage; Biofouling; Fatigue analysis; Irregular waves.

## 一、前言

台灣發展海上箱網養殖雖已超過 20 年，但實務上仍有需多不確定性因素需要深入研究探討，其中生物附著於網袋或繫纜所引起的繫纜疲勞，一直都沒有明確準則，因此多久需要更換錨碇繫纜，僅能依賴業者經驗法則，然而若太過頻繁更換繫纜，將增加養殖成本；而更換頻率過低，則會增加斷纜風險(Yang et al. 2020; Tang et al. 2020, 2021)，因此本文擬進行生物附著於網袋及繫纜的情境下的繫纜疲勞分析，藉以推估繫纜的使用年限，提供業者營運參考。

台灣現行常見的海上箱網設施主要有兩種，一種是可沉式圓形箱網，其設計可沉入水中減輕波浪影響，故抗浪性較佳，較適用於開放性海域；另一種是澎湖灣內的軟式箱網，其抗浪性較差，不可下沉，因此較適用於受遮蔽的內灣型海域，此兩種箱網設施的發展都已超過 20 年，而本文以可沉式箱網為主要研究對象。

綜觀國內外研究，主流方法都是將可沉式箱網視為小結構物，採用 Morison 經驗式計算流體力，進而建立時序列運動模式。國內相關研究如，唐(2001)建立三維可沉式箱網在波流作用下水動力特性數值模式，並輔以水工模型試驗驗證。在此基礎上，Huang et al. (2006 和 2007)進一步透過純流和波流情境下的模型試驗，證實數值模式具有良好的可信度。另外，依據 Huang et al. (2010)所發表的箱網實海域測試研究，該團隊於屏東小琉球海域進行單點錨碇式箱網實海域測試(浮框圓周 10m、網袋深 6m)，量測計畫海域的波浪、流速及錨碇張力，成功測得 2005 年泰利颱風期間所測量到的張力結果，經與數值模式進行比對，顯示數值模式應用於實海域亦具有良好的可信度。

緣此，本研究持續開發利用此套數值模式，參考國外有關生物附著的規範或研究，進行繫纜疲勞分析，以提供業者實務上的因應參考。

## 二、研究方法

### 2.1 研究標的及範圍

本案例研究標的為屏東縣車城海域的可沉式箱網，如圖 1，相關材質尺寸列於表 1。本計畫收集鄰

近計畫海域的長期波浪觀測資料，如圖 2，做為實海域箱網繫纜疲勞分析的波浪條件，如表 2。

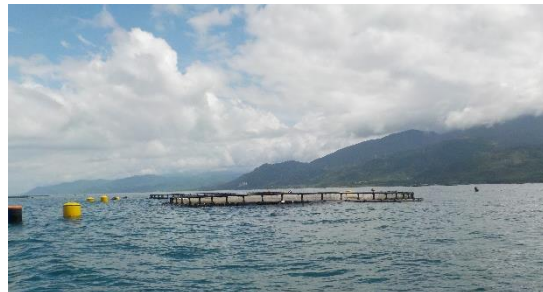


圖 1 本計畫目標箱網(恆春海洋養殖有限公司)

表 1 箱網材質尺寸資料表

組成構件	部位	數值	單位
浮框	內圈圓周	101	m
	外圈圓周	103	m
	管徑	0.4	m
	材質密度 (HDPE)	950	kg/m <sup>3</sup>
浮球	直徑	1.0	m
	長度	1.5	m
	總浮力	1,000	kg
	總質量	90	kg
纜繩	直徑	0.06	kg
	材質密度 (PE)	960	kg/m <sup>3</sup>
網袋	線徑	0.003	m
	半目長	0.05	m
	固相比 (Solidity)	0.24	-
	網袋深度	15	m
	材質密度(nylon)	1140	kg/m <sup>3</sup>
沉框	圓周	103	m
	管徑	0.2	m
	內嵌鐵鍊	30	kg/m
	材質密度 (HDPE)	950	kg/m <sup>3</sup>

表 2 小琉球浮標波浪統計資料(2003-2019)

Probability (%)	週期 (s)				
	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
0.4	2.5	6.1	1.3		
0.6	2.9	13.5	5.1	0.5	
0.8	1.5	12.7	9.2	1.1	
1.0	0.5	6.5	8.7	1.6	0.1
1.2		2.5	5.3	1.6	0.2
1.4		0.9	2.8	1.1	0.2
1.6		0.4	1.5	0.9	0.2
1.8			0.9	0.7	0.2
2.0			0.6	0.6	0.2
2.2			0.3	0.5	0.1
2.4			0.2	0.3	0.2
2.6			0.1	0.3	0.2
2.8				0.2	0.1

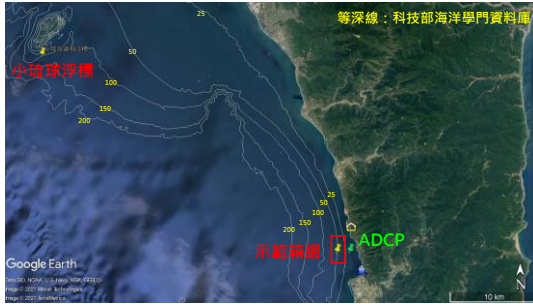


圖 2 計畫海域及測站位置圖(屏東海域)

## 2.2 數值模式簡介

本研究將箱網視為無數細小圓柱體所構成，其尺寸相對流場的特徵長度而言極小，可視為小結構物(small body)，可忽略箱網構件與流場間的交互作用，因此可採用 Morison 經驗公式計算環境外力，再搭配質量集結點法，以及牛頓第二運動定律，便能建立箱網結構在流場中運動的數值模式。

$$(m + k_m \rho_w V) \ddot{\mathbf{x}} = \frac{1}{2} C_D \rho_w A (\mathbf{v} - \dot{\mathbf{x}}) |\mathbf{v} - \dot{\mathbf{x}}| + C_M \rho_w V \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_W + \mathbf{F}_T \quad (1)$$

其中， $m$  為細小元件質量， $k_m$  為附加質量係數， $\rho_w$  為海水密度， $V$  為構件排水體積， $A$  為構件投影面積， $C_D$  為流阻力係數， $C_M$  為慣性力係數， $\mathbf{v}$  為流體質點速度， $\dot{\mathbf{x}}$  和  $\ddot{\mathbf{x}}$  分別為元件質點的速度和加速度， $\mathbf{F}_B$  為浮力， $\mathbf{F}_W$  為重力， $\mathbf{F}_T$  為張力，詳細相關計算可參考唐(2001)以及 Huang et al. (2006, 2007)。

本案例環境外力僅考慮波浪，採 JONSWAP 波譜產生不規則波時序列，並參考 Doong et al (2015) 建議，台灣海域深水區的波譜形狀函數採用 2.48。此外，本案例箱網網袋材質為 Dyneema，因此採用 Kumazawa et al. (2012) 經由實驗室所得到的 Dyneema 無結網網片流阻力經驗公式。

## 2.3 生物附著參數設定

海洋生物附著在繫纜的厚度及密度，可參考 NORSOK N-003 規範，本計畫以最嚴重情境做為模擬條件，即附著厚度 100 mm，密度 1325 kg/m<sup>3</sup>。

生物附著後的單位質量  $M_b$  和單位重量  $W_b$  可分別表示為

$$M_b = \frac{\pi}{4} \left[ (D_m + 2\Delta T_b)^2 - D_m^2 \right] \rho_b \cdot n \quad (2)$$

$$W_b = M_b \left[ 1 - \frac{\rho_w}{\rho_b} \right] \frac{9.81}{1000} \quad (3)$$

其中， $D_m$  為繫纜直徑， $\Delta T_b$  為附著厚度， $\rho_b$  為生物附著密度， $n$  為附著的層數(鐵鍊為 2，繩索為 1)。因生物附著而改變的流阻力係數則為

$$C_{D_b} = C_D \left[ \frac{D_m + 2\Delta T_b}{D_m} \right] \quad (4)$$

另一方面，考量網袋被生物附著時，可參考挪威規範 NS9415 (Norwegian Standard 9415)，應將網袋的固相比(solidity)提高到 0.5，作為最嚴重情境。然該規範並無詳加說明原因及細節，故為方便數值模擬，Gansel et al. (2015) 將生物附著網袋的試驗研究結果參數化，固相比為 0.5 的生物附著網袋，與固相比為 0.42 的乾淨網袋(無生物附著)，兩者具有相同流阻力。據此，本研究將網袋固相比由 0.129 提高到 0.42，模擬網袋生物附著情境。由於固相比的定義為網線佔據的面積/網面總面積的比值，因此可將網袋單位面積的體積和質量，乘上有無生物附著之固相比的比值(0.42/0.129)，藉以推算生物附著後網袋的體積和質量。

## 2.4 繫纜疲勞分析

繫纜疲勞分析主要可分為時間域和頻率域兩種方式，其中時間域分析較接近真實情境，而被廣泛採用，如 Hou et al. (2018, 2019, 2020)。在進行疲勞分析時，可以假設

$$N \cdot S^m = K \quad (5)$$

其中， $S$  為應力範圍(2 倍振幅)， $N$  為達到疲勞損壞所需的圈數， $K$  為曲線的截距參數， $m$  為 S-N 曲線的斜率，本研究依據 DNVGL-OS-E301(2018)規範，分別採用  $6.0 \times 10^{10}$  和 3.0 來代表直徑 16 mm 的卸克所對應之參數。透過雨流法搭配 Miner's Rule 計算累積疲勞損傷  $D_i$ ，

$$D_i = \sum_{j=1}^{n_i(T_L)} \frac{1}{N(S_{ij})} \quad (6)$$

其中， $n_i(T_L)$  為第  $i$  種波浪在作用時間  $T_L$  內應力反應  $S_{ij}$  的圈數，將(5)代入(6)可得

$$D_i = \sum_{j=1}^{n_i(T_L)} S_{ij}^m \frac{1}{K} \quad (7)$$

若以第  $i$  種波浪的出現機率  $p_i$  為權重，而且每種波浪條件計算 3 小時，則全年累積疲勞損傷可表示為

$$D_{total} = \frac{1}{3} \times 365 \times 24 \times \sum_{i=1}^{n_s} p_i \cdot D_i \quad (8)$$

其中， $n_s$  代表波浪組合總數，實務上可用資料浮標的波高週期聯合機率(如表 2)分布進行分析。

整體分析流程如圖 3，透過自行開發的數值模式，計算示範箱網受到不規則波連續作用 3 小時之繫纜張力，透過雨流法計算應力範圍 S 及圈數 N，代入繫纜對應的 S-N Curve，再透過 Miner's Rule 即可得到 3 小時的累積疲勞損傷，再以波浪的年出現機率為權重，則可得到年累積疲勞損傷。

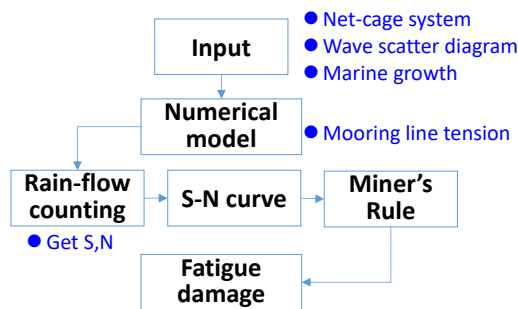


圖 3 繫纜疲勞分析流程圖

### 三、結果與討論

圖 4 為本研究之波浪方向及錨碇繫纜編號，在此對稱佈置下，將以上游面繫纜(L-1 和 L-2)承受最大之錨碇張力，而且兩者張力特性相似，因此本文以 L-1 繫纜為討論的主要對象，在綜合分析時再列出其餘繫纜的疲勞損傷情況。

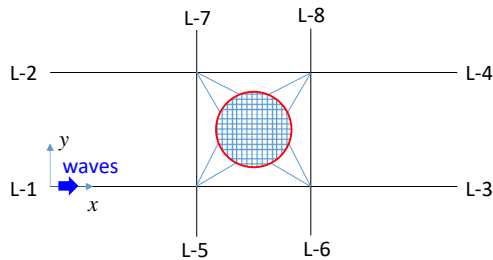


圖 4 波浪方向及繫纜編號示意圖

數值模式以小琉球資料浮標的波浪分佈機率為輸入條件，表 2，故有 45 組波高和週期組合。取其中一個案例的張力計算結果為例，經過雨流法分析後，可得到應力範圍 S 和圈數 N，結果如圖 5。搭配公式(6)和(7)，可得不同時間的累積疲勞損傷。

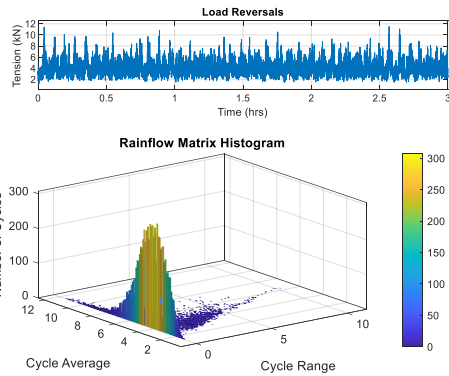


圖 5 雨流法分析案例(示性波高 2.8m、週期 8.0s)

### 3.1 無生物附著之繫纜疲勞分析

本案例考慮無生物附著情境，表 3 為 L-1 繫纜受不規則波 3 小時連續作用下的累積疲勞損傷，結果顯示，在相同週期下，波高越高，疲勞損傷累積越快，反之，相同波高情況下，週期越大，疲勞損傷累積越慢。不過，以波浪出現機率為權重後，所得到的年疲勞累積損傷(如表 4)顯示，波浪出現機率的貢獻度，明顯高於波高或週期的影響。

表 3 無生物附著之 3 小時疲勞損傷分佈

疲勞損傷 (L-1)	波浪週期 (m)				
	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
0.4	5.57E-08	3.38E-08	1.88E-08		
0.6	2.62E-07	1.75E-07	1.09E-07	4.41E-08	
0.8	7.12E-07	4.95E-07	3.45E-07	1.45E-07	
1.0	1.73E-06	1.07E-06	7.97E-07	3.68E-07	1.68E-07
1.2		2.08E-06	1.53E-06	7.69E-07	3.66E-07
1.4		3.74E-06	2.61E-06	1.42E-06	7.28E-07
1.6		6.92E-06	4.23E-06	2.41E-06	1.30E-06
1.8			6.66E-06	3.88E-06	2.13E-06
2.0			1.02E-05	6.01E-06	3.43E-06
2.2			1.64E-05	9.07E-06	5.18E-06
2.4			2.51E-05	1.33E-05	7.58E-06
2.6			4.00E-05	1.99E-05	1.08E-05
2.8				2.89E-05	1.54E-05

表 4 無生物附著之年疲勞損傷分佈

疲勞損傷 (L-1)	波浪週期 (s)				
	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
0.4	4.06E-06	6.02E-06	7.12E-07		
0.6	2.22E-05	6.91E-05	1.62E-05	6.44E-07	
0.8	3.12E-05	1.83E-04	9.28E-05	4.65E-06	
1.0	2.52E-05	2.02E-04	2.02E-04	1.72E-05	4.92E-07
1.2		1.52E-04	2.36E-04	3.59E-05	2.14E-06
1.4		9.83E-05	2.13E-04	4.57E-05	4.25E-06
1.6		8.08E-05	1.85E-04	6.34E-05	7.56E-06
1.8			1.75E-04	7.94E-05	1.25E-05
2.0			1.78E-04	1.05E-04	2.00E-05
2.2			1.44E-04	1.32E-04	1.51E-05
2.4			1.46E-04	1.17E-04	4.43E-05
2.6			1.17E-04	1.74E-04	6.32E-05
2.8				1.69E-04	4.50E-05

另外，本研究所計算的 3 小時疲勞損傷分析結果，與國外相關研究(Hou et al. 2018, 2019, 2020)在位階上屬於接近(約 1E-05)，但本研究的年疲勞損傷總和卻相對較小，這可能與小琉球資料浮標位置有關，因浮標在冬季東北季風期間受島嶼遮蔽，冬季期間波高較小，進而造成全年的波高分佈偏小。

### 3.2 網袋生物附著之繫纜疲勞分析

本研究之網袋生物附著情境參考 NS9415 規範，取固相比 0.5 為標準。表 5 為網袋生物附著情境下，L-1 繫纜的年累積疲勞損傷，與無生物附著情境比較顯示，其整體的年累積疲勞損傷有增高的趨勢，分布特性仍以波浪出現機率為主要因素，波高大小為次要因素。

表 5 網袋生物附著之年疲勞損傷分佈

疲勞損傷 (L-1)		波浪週期 (s)				
		4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
示性波高 (m)	0.4	4.51E-06	4.39E-06	5.76E-07		
	0.6	3.16E-05	8.91E-05	1.51E-05	5.26E-07	
	0.8	5.42E-05	2.93E-04	1.04E-04	4.22E-06	
	1.0	4.36E-05	3.73E-04	2.72E-04	1.74E-05	4.04E-07
	1.2		2.84E-04	3.57E-04	4.21E-05	1.90E-06
	1.4		1.84E-04	3.51E-04	5.80E-05	3.92E-06
	1.6		1.42E-04	3.15E-04	8.75E-05	7.71E-06
	1.8			2.98E-04	1.15E-04	1.36E-05
	2.0			3.21E-04	1.61E-04	2.29E-05
	2.2			2.47E-04	2.03E-04	1.83E-05
	2.4			2.57E-04	1.87E-04	5.58E-05
	2.6			2.00E-04	2.78E-04	8.38E-05
2.8				2.74E-04	6.21E-05	

### 3.3 繫纜生物附著之繫纜疲勞分析

本研究之繫纜生物附著情境參考 NORSOK N-003，以其中生物附著最嚴重情境做為模擬條件，附著厚度 100 mm，密度 1325 kg/m<sup>3</sup>。

表 6 繫纜生物附著之年疲勞損傷分佈

疲勞損傷 (L-1)		波浪週期 (s)				
		4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
示性波高 (m)	0.4	2.80E-04	8.88E-04	1.67E-04		
	0.6	3.32E-04	2.30E-03	7.51E-04	7.26E-05	
	0.8	1.81E-04	2.66E-03	1.63E-03	1.76E-04	
	1.0	6.47E-05	1.71E-03	1.91E-03	2.94E-04	1.70E-05
	1.2		8.21E-04	1.47E-03	3.53E-04	3.96E-05
	1.4		3.66E-04	9.85E-04	2.95E-04	4.67E-05
	1.6		1.99E-04	6.69E-04	2.95E-04	5.55E-05
	1.8			4.99E-04	2.82E-04	6.69E-05
	2.0			4.07E-04	2.95E-04	8.04E-05
	2.2			2.47E-04	2.97E-04	4.82E-05
	2.4			1.97E-04	2.13E-04	1.15E-04
	2.6			1.17E-04	2.52E-04	1.37E-04
2.8				1.98E-04	8.10E-05	

表 6 為繫纜生物附著情境下，L-1 繫纜的年累積疲勞損傷，與無生物附著情境比較顯示，其整體

的年累積疲勞損傷有明顯增高的趨勢，分布特性仍以波浪機率為主要，波高大小為次要。

### 3.4 綜合分析

圖 6 為無生物附著、生物附著於繫纜及生物附著於網袋等三種情境下，錨碇系統 8 條繫纜之年疲勞損傷總和比較。整體分析結果顯示，生物附著於繫纜的年疲勞損傷，約沒有生物附著情境的 6.3 倍；生物附著於網袋的年疲勞損傷，約沒有生物附著情境的 1.6 倍。

在沒有生物附著情境下，約使用 267 年才會達到疲勞損壞；繫纜有生物附著，則使用年限會提早到 42.4 年；網袋有生物附著，則提早到 168 年。

此外，本研究亦針對金屬材質(鐵鍊或卸克)和塑膠材質(繫纜)組件進行疲勞分析比較，其分析結果顯示，塑膠材質的疲勞損傷幾乎可以忽略，因篇幅有限本文不另說明。

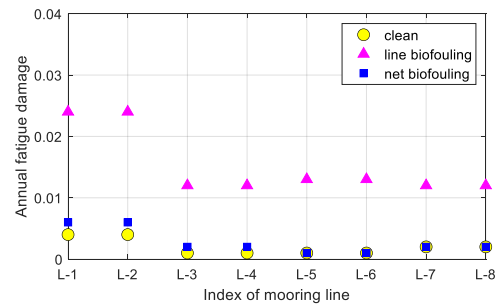


圖 6 三種生物附著情境之年疲勞損傷總和

## 四、結論

本研究利用自行開發之數值模式，以屏東車城海域之實際箱網為研究對象，採用小琉球資料浮標長期波浪統計中 45 種組合，模擬各種組合的不規則波連續 3 小時作用在海上箱網，所造成的錨碇張力時序列資料，透過雨流法和 Miner's Rule，分析繫纜的累積疲勞損傷，最後以波浪出現機率為權重，評估繫纜的年累積疲勞損傷。

疲勞分析結果顯示，三種情境的年累積疲勞均以波浪出現機率為主要因子，波高為次要因子。而兩種生物附著情境都會加快繫纜的疲勞累積，然因兩種情境附著程度及定義不同，無法充分比較。另外，金屬材質(如鐵鍊和卸克)累積疲勞較明顯，而塑膠材質(PE)的疲勞幾乎可以忽略。最後，因目前

國際規範的疲勞分析並不考慮繫纜磨損、銹蝕和腐蝕等因素，故疲勞分析結果相對保守。建議應定期檢查錨碇系統組件，適時更換磨損或腐蝕的金屬零件，即可避免因零件強度下降，而在颱風季節發生意外事故。

## 謝誌

本研究係農委會漁業署「臺灣周邊海域箱網抗風浪研究試驗」(計畫編號:110 農科-6.2.1-漁-F6(1))之研究成果，感謝漁業署的經費支持，使研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. 唐宏結(2001)箱網容積變形改善研究，碩士論文，國立中山大學海洋環境及工程學系。
2. DNV GL AS (2018) Offshore Standards, DNV GL-OS-E301, Position Mooring.
3. Doong, D.J., Tsai, C.H., Chen, Y.C., Peng, J.P., and Huang, C.J. (2015) Statistical Analysis on the Long-term Observations of Typhoon Waves in the Taiwan Sea. *Journal of Marine Science and Technology* 23(6), 893-900.
4. Gansel, L.C., Plew, D.R., Endresen, P.C., Olsen, A.I., Misimi, E., Guenther, J., and Jensen, Ø. (2015) Drag of clean and fouled net panels – measurements and parameterization of fouling. *PLoS One* 10(7): e0131051
5. Hou, H.M., Dong, G.H., Xu, T.J., Zhao, Y.P., and Bi, C.W. (2018) Fatigue reliability analysis of mooring system for fish cage. *Applied Ocean Research* 71,77-89.
6. Hou, H.M., Dong, G.H., and Xu, T.J. (2019) Fatigue damage distribution and reliability assessment of grid mooring system for fish cage. *Marine Structures* 67, 102640.
7. Hou, H.M., Dong, G.H., and Xu, T.J., (2020) Assessment of fatigue damage of mooring line for fish cage under wave groups. *Ocean Engineering* 210, 107568.
8. Huang, C.C., Tang, H.J. and Liu, J.Y. (2006) Dynamical Analysis of Net Cage Structures for Marine Aquaculture: Numerical Simulation and Model Testing, *Aquacultural Engineering*, 35, 258-270.
9. Huang, C.C., Tang, H.J. and Liu, J.Y. (2007) Modeling Volume Deformation in Gravity-type Cages with Distributed Bottom Weights or a Rigid Tube-Sinker, *Aquacultural Engineering*, 37, 144-157.
10. Huang, C.C., Tang, H.J. and Wang, B.S. (2010) Numerical Modeling for an In Situ Single-point-mooring Cage System, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 35(3), 565-573.
11. Kumazawa, T., Hu, F., Kinoshita, H., and Tokai, T. (2012) Hydrodynamic Characteristics of Plane Minnow Netting Made of High-strength Polyethylene (Dyneema), *Nippon Suisan Gakkaishi*, 78(2), 180-188.
12. Tang, H.J., Yeh, P.H., Huang, C.C., and Yang, R.Y. (2020) Numerical study of the mooring system failure of aquaculture net cages under irregular waves and current. *Ocean Engineering* 216, 108110.
13. Tang, H.J., Yang, R.Y., and Yao, H.C. (2021) Experimental and numerical investigations of a mooring line failure of an aquaculture net cage subjected to currents. *Ocean Engineering* 238, 109707.
14. Yang, R.Y., Tang, H.J., and Huang, C.C. (2020) Numerical modeling of the mooring system failure of an aquaculture net cage system under waves and currents. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 45(4), 1396-1410.

# 模型箱網斷纜試驗

唐宏結<sup>1\*</sup> 姚皓晟<sup>2</sup> 楊瑞源<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水工試驗所副研究員

<sup>2</sup> 國立成功大學水利及海洋工程系碩士生

<sup>3</sup> 國立成功大學水利及海洋工程系副教授

## 摘要

科技部計畫：109-2222-E-006-003-MY2

國際上箱網斷纜相關的實驗研究目前仍相當缺乏，因此本研究進行水槽實驗探討斷纜議題，並搭配數值模擬交互驗證。水槽實驗中模型以對稱方式繫泊固定於底床上的 8 個錨碇塊，其中上游面兩個錨碇塊安裝滑輪，將兩條繫纜通過滑輪再拉到水面上的平台，並在平台後端架設兩個張力計，測量在正常與斷纜兩種情境中水流對箱網造成的繫纜繩張力變化。本實驗的斷纜裝置是由氣壓缸和刀片所組成。研究結果顯示，當上游其中一條纜繩被切斷時，另一條纜繩上的繫泊張力會大幅增加，隨後整個箱網系統會在短暫幾秒鐘內達到新的力平衡。本研究中觀察到的斷纜狀態和正常狀態之張力比介於 1.5 和 2.0 之間。此外，試驗可觀察到箱網浮框有明顯的偏航旋轉(yaw)，且在斷纜後一秒內即停止。最後，模型試驗和數值模擬的錨碇張力比較結果顯示，在流速小於 25 cm/s 的案例中，兩者具有良好的一致性。

關鍵詞：箱網、錨碇系統、斷纜、水槽試驗、模型試驗

## Mooring line cut-off experiment of a net-cage model in a recirculating flume tank

Hung-Jie Tang<sup>\*</sup> Hao-Cheng Yao Ray-Yeng Yang

<sup>\*</sup> Associate Researcher, Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

At present, the laboratory flume experiment of mooring line failure effect on the net cage is still rare. This study investigates the impact of a mooring line failure on an aquaculture net cage through a laboratory experiment and numerical simulations. An eight-point mooring net-cage model with two load cells in its upstream mooring lines was installed in a water flume. An experiment was conducted to measure the upstream mooring force acting on the net cage exposed to currents in the intact and failed mooring conditions. A device equipped with a pneumatic cylinder and a blade was designed to cut the mooring line. The obtained results revealed that as one of the upstream mooring lines was cut, the mooring load in the other line increased greatly. However, the net-cage system reached a new force equilibrium within a few seconds. The mooring line tension ratios between the failed and intact states observed in this study were between 1.5 and 2.0. In addition to the strong mooring tension response, a significant yaw rotation of the floating collar of the net-cage system was also observed, but the motion stopped within a second after the failure occurred. In addition, a comparison of mooring forces between the experiment and numerical simulations exhibited good agreement for current velocities less than 25 cm/s.

Keywords: Net cage; Mooring system; Cut-off; Flume tank experiment; Model test.



## 一、前言

台灣箱網養殖在 2000 年左右曾經盛極一時，然而在幾次重大的斷纜事件中深受打擊，導致養殖規模大幅滑落。其中，2001 年的奇比颱風造成澎湖半軟式箱網的錨碇系統出現斷纜及流錨現象，導致箱網網袋纏繞而出現養殖魚大量死亡的情況，造成業者慘重的經濟損失。此外，台灣海峽漲退潮時，受地形束縮效應影響，偶而會導致瞬間強大水流，也是一大威脅，2005 年屏東小琉球斷纜事件(如圖 1)，就是海流所引起，此事件造成當時台灣最大箱網業者承受巨大的經濟損失，最終導致台灣的箱網養殖產量明顯萎縮。時至今日，在台灣可以存留下來的箱網業者，大多已能克服颱風威脅，降低災害損失，然而錨繩斷纜或流錨仍然會零星發生，而且只要發生幾乎都是災情慘重，因此對箱網養殖產業而言，錨碇系統斷纜仍是必須解決的課題。



圖 1 小琉球海域斷纜事件照片(2005 年)

目前國際上箱網養殖錨碇系統斷纜的相關研究仍然罕見，僅本團隊有較完整成果，例如 Yang et al. (2020)開發數值模式模擬 1/30 縮尺的箱網在規則波和均勻流作用下發生斷纜的水動力特性。Tang et al. (2020)開發數值模式模擬實海域箱網在不規則波和均勻流作用下斷纜的水動力特性。Tang et al. (2021)進行縮尺 1/25 的模型箱網斷纜試驗驗證數值模式。

本研究在科技部經費支持下，於國立成功大學水工試驗所(下稱成大水工所)新建風波流水槽進行，並透過自行建置的數值模式進行交互驗證，詳細內容可參考 Tang et al. (2021)所發表的論文，本文受限篇幅僅探討在不同流速作用下，切斷上游端一條纜繩後，上游另一條纜繩的張力增加情況，並藉由影像紀錄說明斷纜後的變化過程，最後再討論實驗結果和數值模擬的差異。

## 二、模型試驗

### 2.1 試驗佈置

試驗在成大水工所進行，水槽長 50 m、寬 7 m、深 1.2 m，搭配低紊流造風系統、活塞式造波機、及循環軸流造流系統，可以同時或單獨造風、造浪和造流。惟小琉球海域斷纜事件，主要環境外力為海流，因此本研究僅考慮水流的作用，波浪和風力則留待未來持續探討。

表 1 模型箱網尺寸資料表

組件	參數	Model scale	Full scale
浮框	內框圓周	377.0 cm	94.25 m
	外框圓周	408.4 cm	102.1 m
	管徑	3.4 cm	0.85 m
	密度	0.950 g/cm <sup>3</sup>	950 kg/m <sup>3</sup>
	總重	3,724 g	58,188 kg
	總浮力	6,774 g	105,844 kg
網袋	線徑	0.02 cm	0.5 cm
	網目	0.60 cm	15 cm
	固相比	0.128	0.128
	深度	50 cm	12.5 m
	密度	1.14 g/cm <sup>3</sup>	1140 kg/m <sup>3</sup>
	楊氏係數	2.424 GPa	2.424 GPa
	總重	71.5 g	1,117 kg
沉框	圓周	408.4 cm	102.1 m
	管徑	3.4 cm	0.85 m
	總重	1,320 g	20,625 kg
	密度	0.95 g/cm <sup>3</sup>	950 kg/m <sup>3</sup>
繫纜	線徑	0.265 cm	6.625 cm
	單位重	0.039 g/cm	2.437 kg/m
	密度	1.14 g/cm <sup>3</sup>	1140 kg/m <sup>3</sup>
	楊氏係數	0.753 GPa	0.753 GPa
浮球	直徑	15 cm	3.75 m
	浮力	1,450 g	22,656 kg
	重量	230 g	3,594 kg

本研究採用的模型箱網的布置如圖 2，試驗照片如圖 3，模型箱網的材質尺寸表列於表 1。對應的原型箱網為直徑 30 m 的浮框，安裝在水深 20 m 的海域，網袋深度為 12.5 m。水槽模型試驗採用幾何相似及 Froude 數相似。須注意，雖然箱網模型是參考實海域箱網進行縮尺，但受限於尺寸限制，很難找到完全符合的網袋、纜繩和管材等，因此若按模型比 1:25 回推，其全尺寸並不符合實際箱網尺寸，故表 1 列出相應的全尺寸值僅供參考(如 Huang et al., 2006 和 Kristiansen and Faltinsen, 2015)。故本研究水槽模型試驗結果，主要是用來驗證模擬模型箱網尺寸的數值模式。實務上，則可通過此數值模式，輸入實海域箱網的實際尺寸進行模

擬。此外，往昔研究箱網模型試驗大多在斷面水槽進行，通常使用 4 點錨碇，例如 Huang et al. (2007)。而本研究試驗水槽寬度達 7 m，因此使用貼近實際情況的 8 點錨碇方式佈置模型箱網。

模型箱網主體是由浮框、圓柱形網袋及沉框所組成。上游面的兩條繫泊纜繩通過底床滑輪，連接到水面上橫跨水槽之平板上固定的兩個張力計 (load cell)。張力計為日本 SSK 公司生產的 LT6-5 型，再現性 0.2%FS，線性 0.2%FS，溫度特性 0.05%RO/°C，輸出電壓 ±10V，輸入輸出電阻

500Ω，工作溫度範圍在 -15°C 和 75°C 之間，試驗測試期間記錄的最大張力為 49.05 N。流速儀 (ADV)則由挪威 Nortek 公司製造，安裝在模型前方的人流端，測量水流速度。本實驗佈置 3 組流速儀，並以 100 cm 間隔均勻分佈(如圖 2)，最後取 3 組的平均值代表水流入流速度。專為本研究設計的纜繩切割器，如圖 4 所示，是由氣壓缸(pneumatic cylinder)和刀片組成，通過空氣壓縮機提供切割動力，按下控制按鈕即可瞬間切斷繫纜。

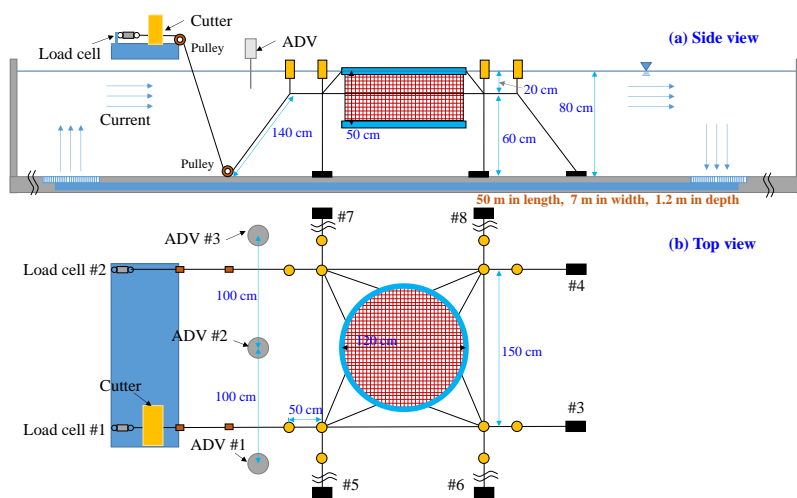


圖 2 箱網斷纜模型試驗佈置圖

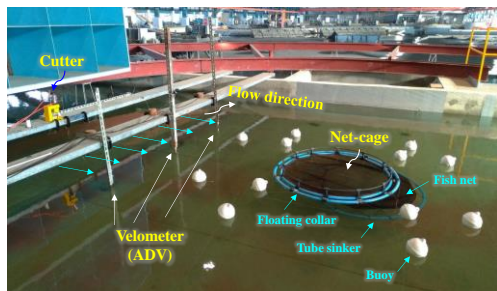


圖 3 箱網斷纜模型試驗照片

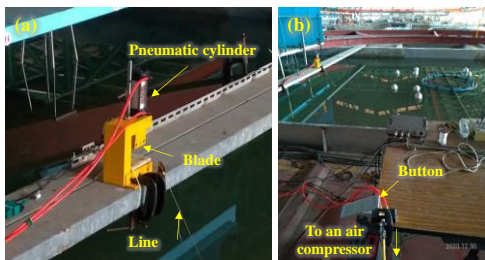


圖 4 斷纜裝置照片：(a)切割器、(b)控制按鈕

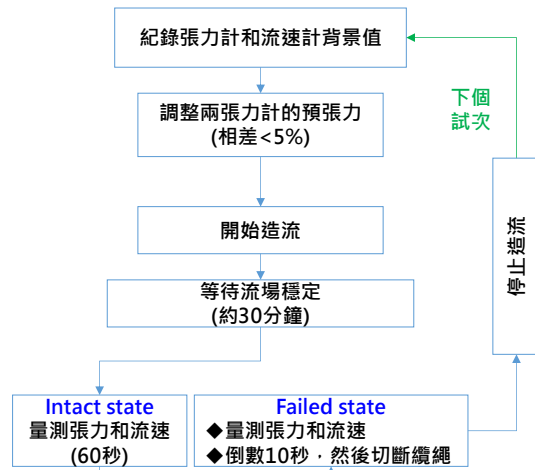


圖 5 模型試驗流程圖

## 2.2 試驗步驟

圖 5 為箱網斷纜試驗的流程圖，試驗開始先記錄張力計和流速計的背景值，之後透過張力計調整

上游面兩條纜繩預張力使相對誤差小於 5%，以確保錨碇系統受力對稱。之後啟動軸流馬達開始造流，靜待約 30 分鐘讓流場趨於穩定。首先，執行正常狀態(intact state)的試次，儀器收錄時間 60 秒。接著，執行斷纜狀態(failed state)試次，儀器同樣收錄時間 60 秒，斷纜時間控制是在開始收錄後，倒數 10 秒，按下按鈕(圖 4b)切斷繫纜#1。之後即可進入下個流速試次，直到完成所有設計的試次。

### 三、數值模式簡介

假設箱網為無數細小圓柱體所構成，其尺寸相對流場的特徵長度而言極小，可視為小結構物(small body)，故可忽略構件與流場間的交互作用。除了網袋外，多數的箱網構件(如浮框、沉框、繫纜和浮球)都可視為圓柱體，採用 Morison 經驗公式計算其流體力。

數值模式採用質量集結點法(lump-mass method)搭配牛頓第二運動定律，建立各別質點的運動方程式，如式(1)，而浮框和沉框則採用剛體運動方程式。所有運動方程式都可透過 4 階 Runge-Kutta 法進行時間積分，完成箱網在流場中的動態模擬。

$$(m + k_m \rho_w V) \ddot{\mathbf{x}} = \frac{1}{2} C_D \rho_w A (\mathbf{v} - \dot{\mathbf{x}}) |\mathbf{v} - \dot{\mathbf{x}}| + C_M \rho_w V \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_W + \mathbf{F}_T \quad (1)$$

其中， $m$  為細小元件質量， $k_m$  為附加質量係數， $\rho_w$  為海水密度， $V$  為構件排水體積， $A$  為構件投影面積， $C_D$  為流阻力係數， $C_M$  為慣性力係數， $\mathbf{v}$  為流體質點速度， $\dot{\mathbf{x}}$  和  $\ddot{\mathbf{x}}$  分別為元件質點的速度和加速度， $\mathbf{F}_B$  為浮力， $\mathbf{F}_W$  為重力， $\mathbf{F}_T$  為張力，各箱網構件的相關計算可參 Huang et al. (2006) 和 Tang et al. (2021)。另外，模式將網袋分成數個小網片，利用網面在水槽試驗所得的經驗公式計算流體力，此種方法亦稱為 screen force model (Xu et al., 2000)，而數值模式採用 Løland(1991)的經驗公式，如下

$$\begin{cases} C_D(\beta) = 0.04 + (-0.04 + 0.33S_n \\ \quad + 6.54S_n^2 - 4.88S_n^3) \cos(\beta) \\ C_L(\beta) = (-0.05S_n + 2.3S_n^2 - 1.76S_n^3) \sin(2\beta) \end{cases} \quad (2)$$

其中， $C_D$  為流阻力係數， $C_L$  為升力係數， $\beta$  為流速與網面的夾角(攻角)， $S_n$  為無結網網袋的固相比(solidity)，其定義為網線投影面積/網面面積，其中  $D$  為網線線徑， $\lambda$  為網目的半目長。

$$S_n = \frac{2D}{\lambda} - \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 \quad (3)$$

## 四、結果與討論

### 4.1 箱網斷纜試驗過程

為了解箱網斷纜的重要過程，本節以流速 14.5 cm/s 試次為例，從拍攝的影片中擷取斷纜瞬間及後 3 秒的連續照片進行分析，結果如圖 6。

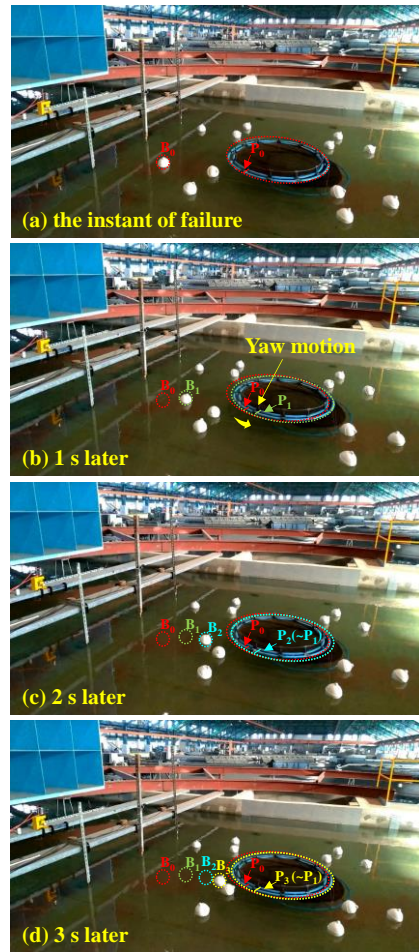


圖 6 斷纜過程靜態連續照片

其中，圖 6(a)為纜繩被切斷的瞬間，圖 6(b)-(d) 分別是斷纜後 1、2 和 3 秒的瞬間。由圖 6(a)和圖 6(b)可知，扶手管邊緣位置從  $P_0$  移到  $P_1$ ，有顯而易見的 yaw 旋轉。而在此期間，由於失去了繫纜#1 的繫留力，浮球從  $B_0$  漂移到  $B_1$ 。由圖 6(b)至圖 6(d)，可見 yaw 旋轉在 1 秒後已無明顯變化，而此期間浮球則從  $B_1$  漂移到  $B_3$ 。整體而言，斷纜後箱網系統

僅需 1~3 秒內，即可達到新的力平衡。此外，圖 6 所有照片的網袋變形，看起來似乎都很嚴重。不過，這是水的折射作用和拍攝角度的關係，事實上並不那麼嚴重。而如果是為了準確地觀測網袋變形，可從水面下或側面的透明視窗進行觀察，如 Huang et al. (2006) 和 Kristiansen and Faltinsen (2012)。

## 4.2 箱網斷纜張力及運動反應

本節主要探討箱網系統在斷纜前後的張力反應，以及浮框運動反應。

圖 7 為流速 14.5 cm/s 時，試驗和數值在斷纜前後的張力變化比較，雖然試驗上游面的繫纜預張力控制在 5% 以內，但實際造流後，兩條繫纜的預張力仍可見到清楚的誤差，而數值模式則無此問題。在 #1 切斷後，其張力瞬間歸零，另一條繫纜張力則明顯增加。整體而言，數值模擬的斷纜張力反應與試驗一致，張力值也與實驗值接近。

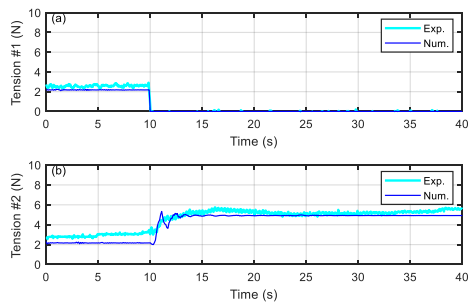


圖 7 斷纜後的張力變化比較 ( $V = 14.5$  cm/s)

接著挑選試驗的 6 種不同流速試次，將時間軸放在 7 至 16 秒之間，可更清楚看到的斷纜前後之張力變化，如圖 9。可觀察到，除了斷纜後張力明顯變大以外，斷纜後的張力反應有明顯的振盪(1 秒內約 3 次)，可能和斷纜後錨碇系統不對稱有關。

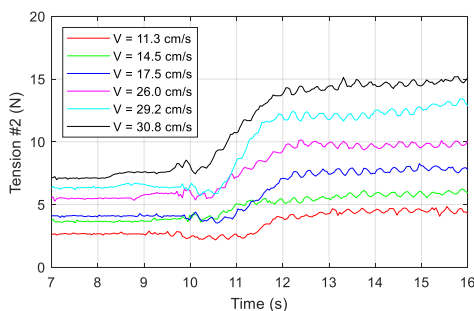


圖 8 不同流速下斷纜前後張力變化實測值

圖 9 為浮框運動的數值模擬結果，可見 yaw 旋轉在 1 秒後達到平衡，期間其角速度也有顯著的反應，不過在 1 秒內趨於緩和，而其中 yaw 的變化特性與圖 6 所觀察到的趨勢一致，類似的結果也可見於 Yang et al. (2020)。不過，為更加了解發生斷纜後箱網的運動行為，建議未來可進行實測。

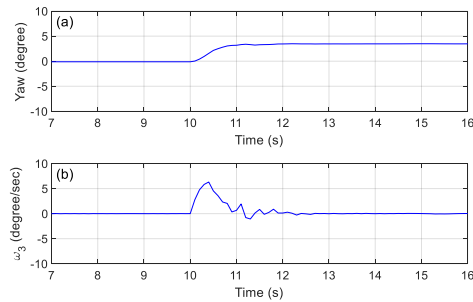


圖 9 斷纜後的 yaw 旋轉運動及其角速度(模擬)

## 4.3 試驗與模擬結果比較

圖 10 為不同流速下，試驗與模擬的繫纜 #2 張力值在正常與斷纜兩種情境下之比較結果。結果可知，在正常情境下試驗與數值在各種流速均相當吻合，惟在高流速(約 30cm/s)時數值有高估的情況。而斷纜情境下，試驗和數值在流速 25 cm/s 以內，兩者有良好的一致性，但超過流速 25 cm/s 以後，數值明顯高估，最高達約 30%，原因可能與高流速時流場均勻度較差有關。

圖 11 為 3 支流速計之標準偏差與紊流強度(標準偏差/平均流速)的個別值及平均值，結果可知標準偏差會隨著流速增加而加大，代表高流速區流速值的變化幅度也較大，即流場較不均勻。另外，不同流速試次的紊流強度，其結果相當一致約為 0.1。

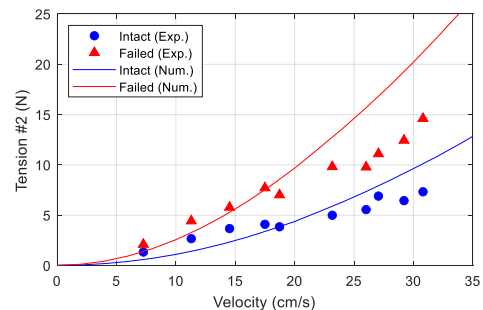


圖 10 正常與斷纜情境下試驗與數值之張力比較

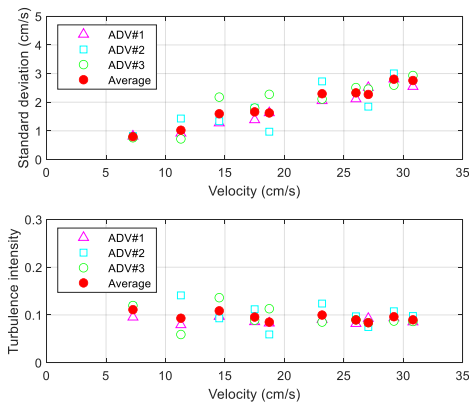


圖 11 流速測量值之標準偏差及紊流強度

#### 四、結論與建議

本文採用水槽模型實驗並搭配專為實驗建置的數值模式，分析探討斷纜對箱網錨碇系統的影響。研究結果顯示，當上游面其中一條纜繩被切斷後，其張力瞬間歸零，而相鄰的另一條上游面纜繩上的張力則會顯著的增加，經試驗觀察到所有流速試次的張力比(斷纜狀態/正常狀態)皆落在 1.5 和 2.0 之間。而且，試驗可觀察到箱網浮框，在斷纜後有明顯的 yaw 旋轉。而無論是繫纜張力和浮框運動反應，都會在斷纜後的短暫幾秒鐘內達到新的平衡。最後，模型試驗和數值模擬的繫纜張力比較結果顯示，無論正常或斷纜狀態，在流速小於 25 cm/s 的案例中，都具有良好的一致性。而在較高流速且斷纜的情況下，試驗和數值存在的誤差，可能與流場均勻度變差和錨碇不對稱有關。

由於本研究僅考慮水流作用，且偏重於繫纜張力的反應，整體而言內容尚不完整，故建議後續應針對浮框運動及網袋變形進行試驗研究，並建議深入探討波浪或風力對斷纜現象的加乘效果。

#### 謝誌

本研究係科技部專題研究計畫「錨碇系統斷纜對箱網養殖結構水動力特性影響之研究」(編號 109-2222-E-006-003-MY2)之研究成果，承蒙科技部的經費補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. Huang, C.C., Tang, H.J. and Liu, J.Y. (2006) Dynamical Analysis of Net Cage Structures for

Marine Aquaculture: Numerical Simulation and Model Testing, *Aquacultural Engineering*, 35, 258-270.

2. Huang, C.C., Tang, H.J. and Liu, J.Y. (2007) Modeling Volume Deformation in Gravity-type Cages with Distributed Bottom Weights or a Rigid Tube-Sinker, *Aquacultural Engineering*, 37, 144-157.

3. Kristiansen T. and Faltinsen, O.M. (2012) Modelling of Current Loads on Aquaculture Net Cages. *Journal of Fluids and Structures*, 34, 218-235.

4. Kristiansen T. and Faltinsen, O.M. (2015) Experimental and Numerical Study of an Aquaculture Net Cage with Floater in Waves and Current. *Journal of Fluids and Structures*, 54, 1-26.

5. Løland, G. (1991). *Current Forces on and Flow through Fish Farms*. Doctoral dissertation, Division of Marine Hydrodynamics, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.

6. Tang, H.J., Yang, R.Y. and Yao, H.C. (2021) Experimental and Numerical Investigations of a Mooring Line Failure of an Aquaculture Net Cage Subjected to Currents. *Ocean Engineering*, 238, 109707.

7. Tang, H.J., Yeh, P.H., Huang, C.C. and Yang, R.Y. (2020). Numerical Study of the Mooring System Failure of Aquaculture Net Cages Under Irregular Waves and Current. *Ocean Engineering*, 216, 108110.

8. Xu, Z. and Qin, H. (2020) Fluid-Structure Interactions of Cage Based Aquaculture: From Structures to Organisms. *Ocean Engineering*, 217, 107961.

9. Yang, R.Y., Tang, H.J. and Huang, C.C. (2020) Numerical Modeling of the Mooring System Failure of an Aquaculture Net Cage System under Waves and Currents. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 45(4), 1396-1410.

# 海上通訊浮筒研發

李治廣<sup>1\*</sup> 許文陽<sup>1</sup> 黃子鴻<sup>1</sup> 張碩軒<sup>1</sup> 徐仕昇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>工業技術研究院 綠能與環境研究所

## 摘要

本研究因應底定式波浪發電機組海上電力與通訊傳輸目的，設計開發海上通訊浮筒，主要包含：浮筒平台、替換式監測模組與海纜夾具。以計算流體力學軟體 ANSYS AQWA 計算海上通訊浮筒動態與靜態受力分析，確保於極端波浪條件下，通訊浮筒與固定用之係纜不會造成嚴重性的損壞，證實海上通訊浮筒之功能性能符合海上測試需求，並提供未來通訊浮筒設計改善之依據。本研究開發之通訊浮筒功能具備：通訊浮筒透過海纜與水下波浪發電機組的電力與訊號傳送、波浪發電機組最大功率追蹤(MPPT)以及資料庫的無線通訊，藉以驗證波浪發電機長期在海上發電效果，透過無線通訊系統，即時診斷波浪發電機組的運作狀態。

關鍵詞：通訊浮筒、波浪發電機組、海纜

## R&D of Communication Buoy on the Sea

Chih-Kuang Lee<sup>1</sup> Wen-Yang Hsu<sup>1</sup> Tzu-Hung Huang<sup>1</sup> Shuo-Xuan Chang<sup>1</sup> Shih-Sheng Hsu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

## ABSTRACT

In order to fulfill Wave Energy Converter(WEC) power and communication transmission on the sea, this reserach is aimed at developing a communication buoy, inclusive of buoy platform, extractable monitoring device and fixing structure of subsea cable. The fluid dynamic software ,ANSYS AQWA, is used to calculate force analysis of communication bouy. To ensure the force of communication buoy and fixed cable will not cause damage. Confirm that the developed communication buoy performance meets requirements in ocean testing level. It will provide the basis for future improvement of communication buoy design. Communication buoy functions incldue power and data transmmision between communication buoy and WEC through subsea cable, Maximum power point tracking(MPPT) of WEC and wireless communication of database. The objective of this research is not only verifying long-term power generation of WEC in ocean, but also diagnosing WEC conditions immediately through wireless communication system.

Keywords: Communication Buoy; Wave Energy Converter; Subsea Cable

## 一、前言

台灣屬於海島型國家，四面環海，自產的能源相當有限，能源需求大多仰賴進口，未來隨著國家經濟的發展、人口的劇增、科技的進步，人們對於能源的需求將會日益漸增，除積極地開發各項再生能源技術，將豐沛的海洋和風力能源轉換為電能外，

電力傳輸與海上通訊技術也是一重要的議題。

本計畫對波浪發電需要的電力與通訊傳輸技術，進行海上通訊浮筒設計開發，通訊浮筒以海底轉接電纜與波浪發電機組連接，並以水動力模擬驗證，確定目前開發之通訊浮筒相關規格符合設計需求，有助於加速國內海洋能發電相關技術之發展。

本研究開發之通訊浮筒主要功能包含電力傳送、水下機組量測訊號傳送、電力系統充電、MPPT 控制系統以及即時無線通訊傳輸，可作為離岸水下機組測試用之展示平台。

## 二、設計方法

### 2.1 通訊電力展示平台開發

本項目之目標為開發**通訊電力展示平台**，其相關規格數據如**錯誤!未找到引用源。**所示。將通訊浮筒、波浪發電機組及海底轉接電纜整合，其目的除為驗證波浪發電機長期在海上發電之效果外，還可以即時將波浪發電機組運作的資料透過海上的通訊電力浮筒利用浮筒內無線通訊系統傳輸至資料庫中。

表 1

波浪發電機建造版通訊浮筒設計規格參數				
項次	項目	單位	值	備註
1	筒身外徑	mm	2300	
2	浮筒最大寬度	mm	2400	含導線架
3	維修甲板高度	mm	1000	吃水線上
4	監測模組空重量	kg	438	不含監測
5	監測模組總重量	kg	573	含監測
6	結構總重	kg	4213	含監測
7	排水重量	kg	5817	
8	浮力	kg	4806	
9	單位排水量	kg/100mm	415	
10	鍊條預裝設重量	kg	1604	深度30米
11	錨鍊尺寸	mm	30	
12	錨鍊重量	kg/m	20.6	
13	錨鍊拉力	ton	52.4	M3規格
14	配重錨鍊總長度	m	78	單條100m
15	錨碇總成質心位置	mm	4578	水線下
16	GM值(加錨重心重量)	mm	3878	

圖 1 為通訊電力展示平台總成海上裝設，通訊浮筒直徑為 2.3 米；筒身高度 2.4 米；空重 4.2 噸；排水重 5.8 噸，如圖 2 所示。通訊浮筒內部裝載水下機組量測系統、電力充放電系統、負載系統、無線通訊系統等。此外，為了便於海上維護，將監測系統將整合至一機架中，並透過抽取式機構來達到海上更換檢修之目的。通訊電力展示平台的模組化整合架構，將可模擬應用於未來大型產業化與海纜上岸架構，驗證該系統產業化之可行性，並利用波浪發電所產生之電力進行海上展示，證明已達實際應用之目標。本項通訊浮筒具有以下兩點創新性：

#### A. 抽取式監測模組裝置(圖 3)：

為便於海上檢修作業，將大部分的監測

通訊電力系統整合至監測機架中，並於上方裝設維修艙蓋，可根據維修等級的差異選擇整機現場檢修或式分離替換檢查修，**僅需利用維修船上的吊裝機具將監測模組吊放至船隻甲板上，即可進行全面性檢查修**，波浪發電機組不需進行水下回收作業，因此可容許更大彈性的的施工作業天候條件。監測模組總成，包含維修艙蓋、天線詭桿、基架、電池座、鋰電池、控制箱、升壓器、傳輸模組等，將所有元件整合置監測機架中。並利用上方四個吊點進行監測模組機架吊裝作業，其規格說明如下。

[1]尺寸：裝設規格高 110cm 寬 100cm 深 100cm；鋰電池 4 組 50cm×22cm×22cm。

[2]重量：結構空重 438kg、裝置重量 135kg、總重 573kg。

#### B. 側裝式海纜夾具結構：

為改善過往海纜夾具裝設於浮筒底部無法海上拆裝問題，本次將浮筒端的海纜夾具設計於浮筒甲板處，**可在水面上進行拆裝接線作業**，並於海纜及浮筒側面裝設海纜保護器，確保浮筒受到波浪運時海纜與浮筒不會因為摩擦造成損壞。如圖 4 所示為海纜與浮筒固定裝置，於海纜夾具裝製完成後，利用人工將其整線固定。



圖 1 通訊電力展示平台

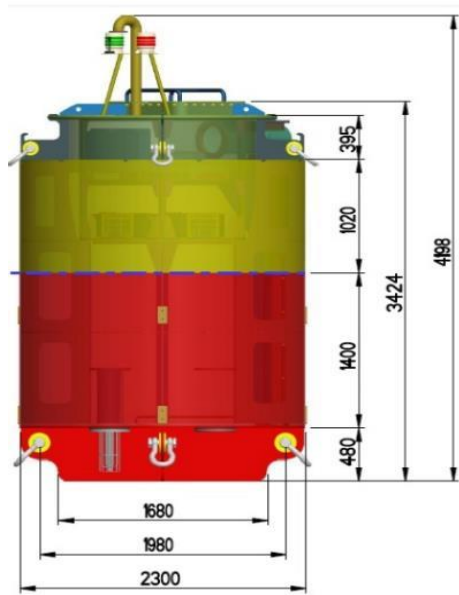


圖 2 通訊電力展示平台外型尺寸(mm)

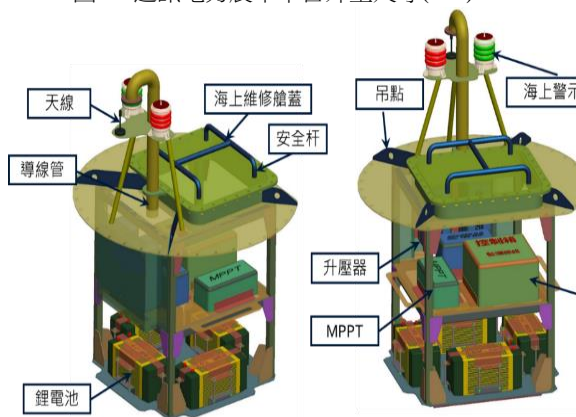


圖 3 抽取式監測模組裝置

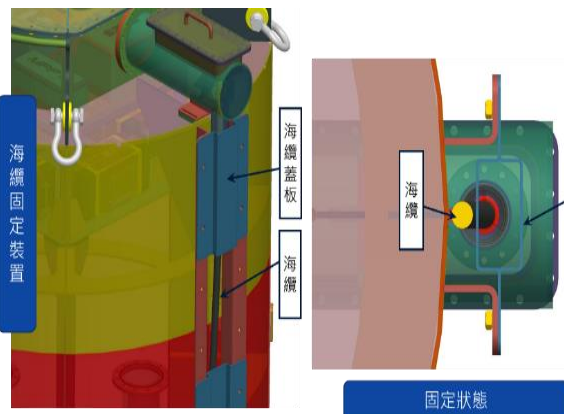


圖 4 海纜浮筒固定裝置示意圖

## 2.2 通訊浮筒監測模組功能

本研究開發之通訊浮筒可透過海纜提供水下機組雙向電力傳輸，且可利用光纖傳送水下機組量測訊號，透過浮筒上之天線將訊號無線傳輸至網路平台。本團隊開發之通訊浮筒監測模組，如圖 6 所示，功能包含水下機訊號量測系統、電力充放電系統、無線通訊系統以及波浪發電機組 MPPT 系統，相關之詳細說明如下：

### A. 量測系統：

量測系統主要目的為檢視水下波浪發電機組健康資訊，監測項目有水下機組輸入軸旋轉位置與扭力、腔體壓力、發電機發電量與溫度、電池電量以及充放電功率，確保水下機組在海上測試過程中，所有參數都符合設計目標。

### B. 電力充放電系統：

利用充放電系統供應 MPPT 系統與量測系統電力，同時充放電系統透過波浪發電機組轉換之發電功率對 24VDC 鋰電池充電。有鑑於此，通訊浮筒可達到供電自給自足之功能性，大幅增加海上測試時程，亦可降低測試階段的檢修成本。

### C. 無線通訊系統：

為能即時瞭解水下波浪發電機組運作情形，無線通訊系統將量測系統的所有資料以 4G 通訊的方式上傳至資料庫伺服器，並架設展示網頁，如圖 5 所示，可藉由展示網頁所顯示的機組資訊，即時得知水下機組的發電電壓與電流、充放電系統充電電流或是水下機組的作動狀態。

ID	Time(Relat.Chou)	Va1	Va2	Va3	Ia1	Ia2	Ia3	Vc	Battery	Charge	Temp	Vc	MPPT
91800	2023-04-05 12:24:53	0	0.202	0	0.347	0.276	0.229	0.038	25.93	-0.43	23.03	-0.05	0
91879	2023-04-05 12:24:54	0	0.15	0	0.358	0.271	0.226	0.034	25.66	-0.402	24.11	-0.079	0
91874	2023-04-05 12:24:53	0	0.301	0	0.339	0.254	0.226	0.033	25.97	-0.408	23.623	-0.102	0
91879	2023-04-05 12:24:52	0	0.04	0	0.371	0.268	0.223	0.026	25.91	-0.478	23.88	-0.061	0

圖 5 量測系統展示網頁

### D. MPPT 控制系統：

通訊浮筒上之 MPPT 系統主要功能為：利用擾動法控制水下波浪發電機組發電電壓之升降壓，進行電機的負載匹配，達到波浪發



電機組最大功率追蹤的效果。MPPT 控制系統可承載 15kW 之發電功率。



圖 6 通訊浮筒監測模組

### 2.3 通訊浮筒水動力分析

本研究採用 ANSYS AQWA 進行通訊浮筒水動力計算，該軟體採用邊界元素法，進行浮體在頻域下的特性模擬，求解波浪頻率域水動力矩陣(波浪擾動外力、輻射力、浮力回復力等)、以及響應振幅運算子 RAO (Response Amplitude Operator, RAO)。為使通訊浮筒可有效對抗極端氣候條件，本研究在通訊浮筒裝置三條係纜，確保通訊浮筒在高波能衝擊下，不會完全翻覆，進而造成功能性毀損，且確認三條係纜不會扯斷，導致通訊浮筒飄移行程過大。本文模擬設定通訊浮筒重量為 4213kg，質心位置在水面下 708 mm，水深設定 30m，每條係纜長度與比重為 100 m 與 20 kg/m。模擬以實際佈放海域(台灣龍洞海域)的 50 年重現期極端波浪條件：波高 10m 週期 12s 作為水動力模擬參數條件，而通訊浮筒與三條係纜模擬之對應座標如圖 7 所示。

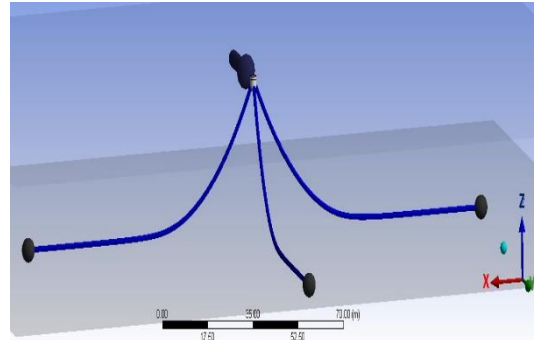


圖 7 通訊浮筒模擬座標示意

經 ANSYS AQWA 水動力模擬後，將模擬結果匯入 ANSYS WORKBENCH 中的 Static Structure，對通訊浮筒進行外殼強度的靜態模擬。

## 三、結果與討論

以下為 ANSYS AQWA 以極端波浪條件(波高 10m 週期 12s)做為通訊浮筒輸入參數之模擬結果：

### 3.1 通訊浮筒位移模擬結果

通訊浮筒質心 X 方向與 Y 方向最大有效位移行程分別為 1.745 與 17.57 m，如圖 8、圖 9 所示。透過三條係纜的錨定，通訊浮筒可有效的抵抗極端氣候條件，不會被波浪帶走。本團隊開發之通訊浮筒具有水密性，即便通訊浮筒 Z 方向負位移達 4.84m，如圖 10 所示，海水蓋過整座通訊浮筒，依然能保持其功能性。

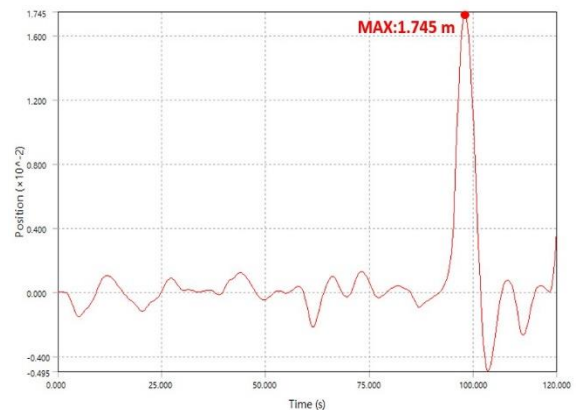


圖 8 通訊浮筒質心 X 軸位移

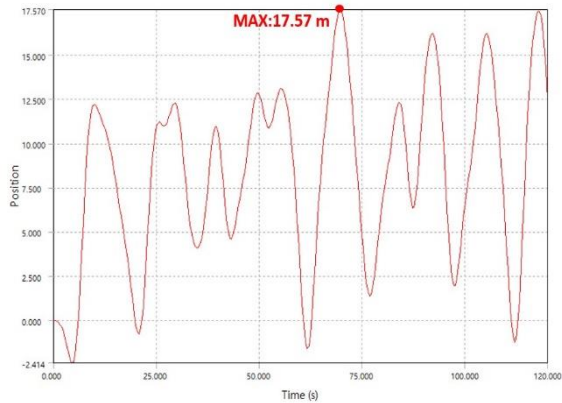


圖 9 通訊浮筒質心 Y 軸位移

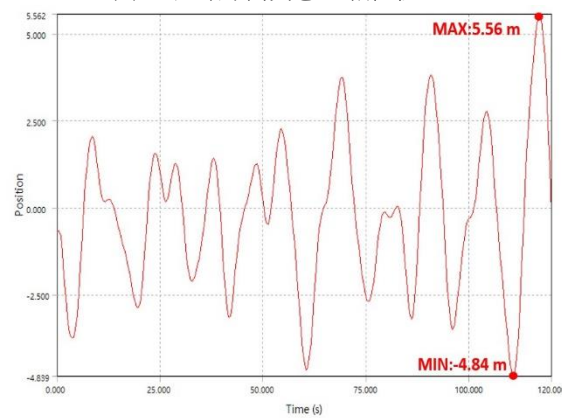


圖 10 通訊浮筒質心 Z 軸位移

### 3.2 通訊浮筒轉角模擬結果

通訊浮筒模擬之 X 軸旋轉角度與 Y 軸旋轉角度如圖 11、圖 12 所示，其中 X 軸最大有效旋轉角為  $43^\circ$ ，Y 軸最大有效旋轉角為  $7.53^\circ$ ，表示在極端波浪條件下，不會造成通訊浮筒  $180^\circ$  的翻覆而無法導正，符合設計目標。

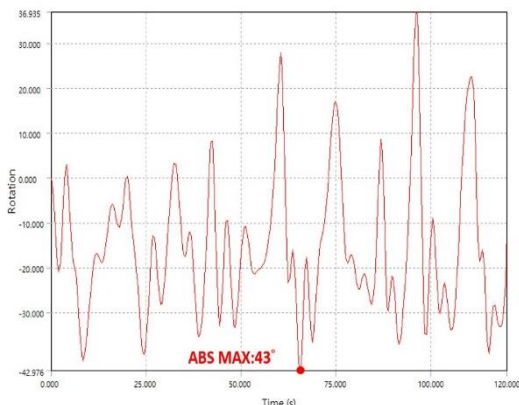


圖 11 通訊浮筒質心 X 軸旋轉角度變化

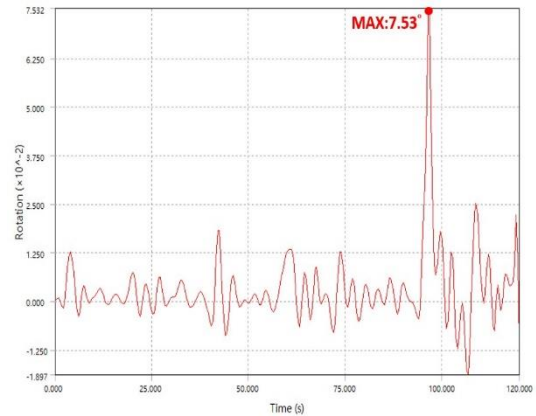


圖 12 通訊浮筒質心 Y 軸旋轉角度變化

### 3.3 係纜張力模擬結果

本階段模擬之係纜參數即為表 1 中的錨鍊規格，抗拉強度可達 50 噸，從圖 13 中，可得出在極端波浪條件下，單條錨鍊產生的最大有效拉力為 32.9kN(3.29 噸)，是錨鍊抗拉強度的 6%，表示在極端波浪條件下，錨鍊不會因為破斷造成浮筒漂走。

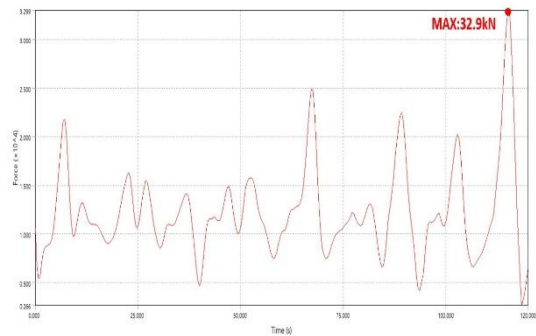


圖 13 係纜拉力

### 3.4 通訊浮筒強度模擬

為確認設計之通訊浮筒在波高 10m 週期 12s 的波浪條件衝擊下，浮筒本體不會因外力過大而造成毀損，本研究將上述 AQWA 之模擬結果匯進 **Static Structure**，靜態模擬通訊浮筒之應力，如圖 14 所示，從模擬結果中得出應力最大點為 4.0 MPa，是通訊浮筒材料降伏強度的 2%，因此，通訊浮筒外殼的耐海性相當好。此外，根據係纜張力模擬結果(圖 13)，將通訊浮筒的三個係纜吊掛點施加 33kN 之拉力，進行應力分析，如圖 15 所示，產生之最大應力為 100MPa，為通訊浮筒降伏強度的 50%，表示通訊浮筒之吊點強度符合目標。

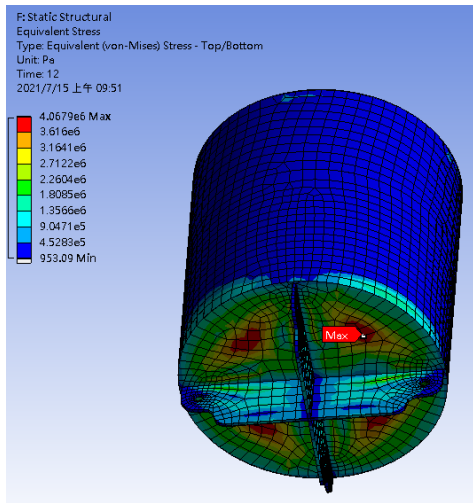


圖 14 通訊浮筒應力分析結果

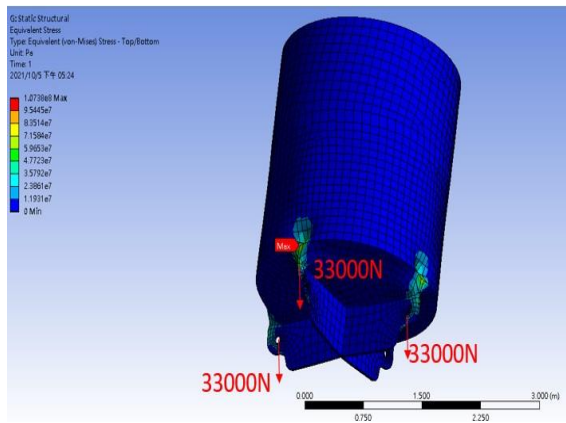


圖 15 通訊浮筒吊點拉力應力分析

## 謝誌

本論文係經濟部能源局計畫(編號:110-D0311)之研究成果，承蒙此計畫經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. OES, Annual Report- An overview of ocean energy activities in 2020,2021.
2. 財團法人工業技術研究院(2021) 110 年度「基礎式波浪發電機組開發與測試計畫」(3/3)，經濟部研究機構能源科技專案 110 年度期中報告。
3. 林勝豐、馬名軍、陳進益、吳家苓、羅聖宗、滕春慈 (2014) 「臺灣周圍海域潮位模擬結果比對分析」，103 年天氣分析與預報研討會，彙編頁碼：A8-8。
4. 段文洋(2013)「深海浮體運動耦合及外載荷分析研究進展」，研究報告，哈爾濱工程大學船舶工程學院。

## 四、結論

本研究研發之海上通訊浮筒結構設計具備兩大特點：抽取式監測模組裝置與側裝式海纜夾具結構，使檢修與安裝作業更加簡便，降低檢修風險與成本。通訊浮筒之功能包含水下機組的運作情形監測、與水下機組的充放電力傳輸、無線通訊以及波浪發電機組 MPPT 控制。在台灣龍洞海域五十年重現期的極端波浪條件下，通訊浮筒產生之最大位移與旋轉角皆不影響其功能性運作，而纜繩最大有效拉力值相較最大抗拉強度相當微小，通訊浮筒承受最大有效應力也較其降伏強度甚小許多，因此，本研究研發的海上通訊浮筒耐海性能是相當優越的。

# 駁船式浮動平台於波流作用下 繫纜失效後運動行為響應

姚皓晟<sup>1</sup> 陳俐妤<sup>1</sup> 楊瑞源<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生

<sup>2</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系 副教授

## 摘要

本研究以駁船式浮動平台為基礎，在不考慮風的情況下，探討端氣候下的條件，平台於單條繫纜失效後所牽連的運動響應，探討的方向為：平台於繫纜失效後的姿態變化、平台的飄移範圍以及剩餘繫纜的張力變化。本研究先行利用 CFD 軟體的 FLOW-3D 來計算駁船式浮動式平台於自由衰減下，將時序列透過快速傅立葉轉換下得到的頻率分布，找出該平台於 Heave(起伏)、Roll(橫搖)、Pitch(俯仰)三個自由度的共振週期；並統計台灣新竹外海 50 年重現期的颱風海況條件，再由 Orcaflex 套裝軟體進行平台與繫纜耦合的模擬，探討繫纜失效後，整體後續的運動行為。

關鍵詞：浮動式平台、自由衰減、繫纜設計、繫纜失效。

## Motion response of barge-type floating platform after mooring failure under wave and current

Hao-Cheng Yao\* Li-Yu Chen Ray-Yeng Yang

\* Master Student, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

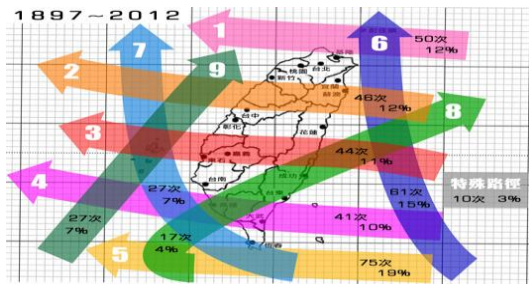
This research is based on a barge-type floating platform. Without considering the wind, it explores the extreme climate conditions and the motion response of the platform after a single mooring line fails. The issues are: the motion changes of platform, the drift range of the platform, and the tension changes of the remaining mooring lines. This research first uses FLOW-3D of the CFD software to calculate the natural frequency of the barge-type floating platform under free decay test, and the time series through the Fast Fourier Transform to find the platform in Heave, Roll, Pitch three-degree-of-freedom natural period; and calculate the typhoon sea conditions in the 50-year return period of Hsinchu, Taiwan. And then use the Orcaflex software package to simulate the coupling between the platform and the mooring system. After the mooring line fails, the follow-up response behavior of structures.

Keywords: floating platform; free decay; mooring design; mooring failure

## 一、研究目的

世界前 20%的天然風場，台灣即佔了八成以上的地點，而位於天然風縮口的台灣海峽也成為風能資源最密集且珍貴的地方，本研究地點為新竹外海，依據 Ma et al. (2021)所提出台灣浮動式風機適用之水深範圍 50~100m，而將目標水深訂為 50m。

在氣候條件下，由於台灣每年頻受颱風侵襲，如圖一為每年颱風主要的路徑種類，對於西部海岸的影響可謂甚大，經由統計資料後選擇台灣新竹外海 50 年重現期颱風的海況條件，對於繫纜失效後浮動式平台的運動姿態做初步的了解，由於平台的運動姿態影響風機的受風方向及面積，間接使剩餘繫纜因風機受力不同而造成張力變化過大而產生連續斷纜，對於平台飄移範圍影響較大，航運上的安全也隨之而出，因此希望透過極端條件下的海況，研究駁船式浮動式平台於繫纜斷裂後的相關議題進行探討。

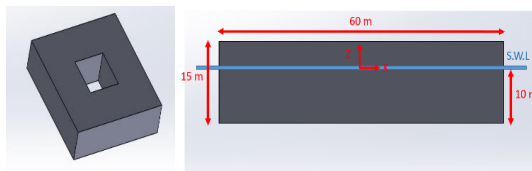


圖一、台灣每年颱風路徑  
(參考來源:中央氣象局)

## 二、研究方法

### 2.1 平台選擇

浮動式平台的選擇沿用楊(2020)的研究，選擇駁船式浮動式平台，如圖二。



圖二、駁船式浮動平台

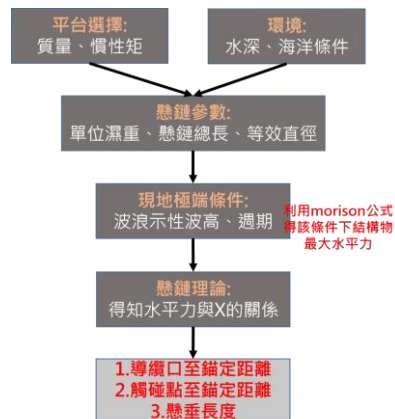
將模型建置完成，資料如表一匯入 FLOW-3D 進行自由衰減的測試，而計算出平台 Heave、Roll、Pitch、三個自由度的共振週期。

表一、平台資料

平台大小	60*60*15 m
阻尼池大小	20*20*15 m
吃水深	10 m
質量(含壓艙水)	32,200,282 kg
質量中心(以原點為中心)	(-0.37,0,-4.86)
Ixx	9.66e+09 kg*m2
Iyy	9.66e+09 kg*m2
Izz	1.93e+10 kg*m2

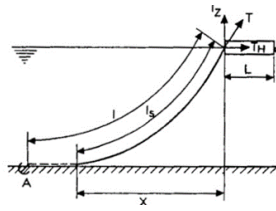
### 2.2 淺水繫纜設計理論

由於水深的設定，且淺水條件下不易設計，因此採用懸垂理論並參考 Sea loads on ships and offshore structures(O.M.Faltinsen)中的 Stationkeeping-Mooring system 進行設計，以達到抑制上部結構最佳化的繫纜配置，其流程如圖三利用 Morison Equation 計算平台於 50 年回歸期的颱風海況所受到的最大外力。



圖三、淺水繫纜設計流程

而利用試誤法進行不同等效直徑、單位濕重的條件，可代入下四式得到繫纜設計最小長度，為確保繫纜受力過程中不會拉到錨定點，可將其最小長度乘上 1.5~2 倍當作總繫纜長度，一旦繫纜總長度確定後即可代入式(4)獲得錨定點至導纜口的水平距離。在設計繫纜所受最大張力不超過本身的破斷力時，其設計即合理。



$T_H$	繫纜水平受力
$\omega$	繫纜單位濕重
$T_{max}$	最大水平力
$l$	繫纜繩長
$X$	錨定點至導纜口水平距離

圖四、淺水繫纜設計示意圖

$$T = T_H + \omega h + (\omega + \rho g A)z \quad (1)$$

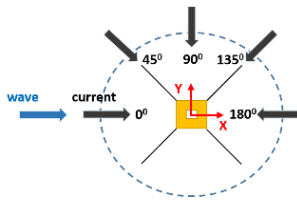
$$a = \frac{T_H}{\omega} \quad (2)$$

$$l_{min} = h(2\frac{T_{max}}{\omega h} - 1)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$X = l - h(1 + 2\frac{a}{h})^{\frac{1}{2}} + a \cosh^{-1}(1 + \frac{h}{a}) \quad (4)$$

### 2.3 試次選擇與配置

將水動力運算結果的平台資料及繫纜的配置匯入 Orcaflex 進行試次的模擬，每次斷纜時間為在繫纜受到最大張力的時刻，根據由新竹港南海岸環境保護及營造計畫規劃報告，新竹外海水深 20 幾米處 50 年重現期颱風波浪條件為示性波高 8.7 m、示性周期為 12.4 s，而流速則使用 50 年回歸期的均勻流速 1.0 m/s 於整個模擬試次，由於海況條件於 Orcaflex 所造出來的波形於每個試次皆為一樣，因此斷纜的時間點對於每個試次也是一樣的，波流方向如圖五。



圖五、極端條件波流方向示意圖

考慮波浪與流場不同的角度下將試次列為如表二及表三，可利用模擬觀察平台於繫纜失效後的運動變化及漂移範圍，以及剩餘繫纜的張力變化。

表二、環境條件

波浪	示性波高:8.7 m 示性周期:12.4 s
流場	流速:1.0 m/s

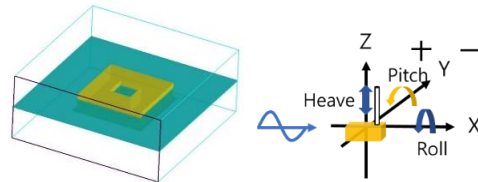
表三、極端條件試次表

Case	波浪方向 (deg)	流場方向 (deg)	簡寫
LC1	0	0	W0C0
LC2	0	45	W0C45
LC3	0	90	W0C90
LC4	0	135	W0C135
LC5	0	180	W0C180

## 三、結果與討論

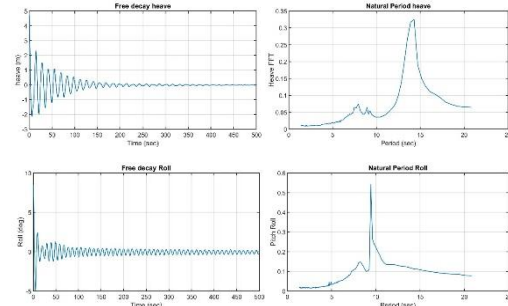
### 3.1 平台自然周期

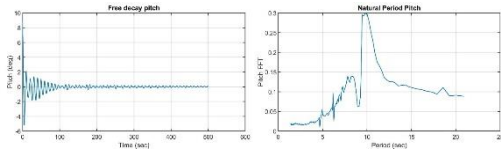
利用計算流體力學模擬軟體(CFD)中的 FLOW-3D 進行自由衰減試驗可將各式阻尼考慮在平台的運動過程中，由於平台運動的限制，本研究僅探討能恢復至初始位置的自由度進行測試，三個自由度分別為 Heave、Roll、Pitch，方向示意圖可參考圖六。



圖六、模擬平台自由衰減及自由度示意圖

先將平台移動到固定的位置或是旋轉一定的角度，對於 Heave 方向的自然週期與平台的初始質心位置與浮心有關，將其抬升 5 m，有如自由落體般將其垂放下來直到平台穩定為止；對於 Roll 及 Pitch 兩個方向的自然週期與平台的形狀、長度與寬度有一定的關係，將其預先逆時針旋轉 10 deg，直至平台接近靜穩為止，模擬時間為 500 s，利用快速傅立葉轉換(FFT)將時序列轉換成頻域的結果如圖七。





圖七、自由衰減時序列及頻域結果  
(上: Heave、中: Roll、下: Pitch)

由於台灣常時海況週期大約落在 6~16 s 之間，因此選定的共振週期以 20 s 內為主，選擇平台在該週期運動響應最大的即為該平台的共振週期，結果如表四，未來可利用平台的共振週期來觀察其於繫纜失效後是否會產生更大的運動變化。

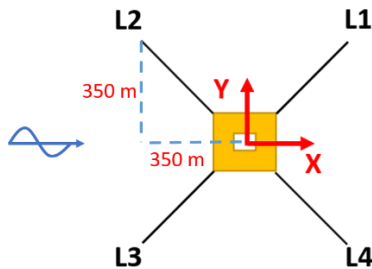
由於使用的平台中間具有阻尼池，在進行 Heave 這個方向的自由衰減時具有兩個不同的高峰值，分別為週期 7.937 s 及 14.285 s；Roll 為 9.434 s；Pitch 為 9.824 s，未來可將規則波的試次訂在週期 6~16 s 的區間內進行模擬。

表四、自由度與其相對應的自然週期

自由度(deg)	自然週期(s)
Heave	7.937, 14.285
Roll	9.434
Pitch	9.824

### 3.2 淺水繫纜設計結果

由於考慮日後實驗的方便性，將模擬中的繫纜設計為 4 條，個別連接在平台的四個角落，且導纜口位於水面下 10 m 處的平台角落，其編號方式如平面座標系統中的第一象限對應到 Line1、第二象限對應到 Line2、第三象限對應到 Line3、第四象限對應到 Line4，繫纜配置如圖八與表五。在水平和垂直方向上，每一條繫纜的錨定點皆距平台中心點 350 m，選用的繫纜材質為 studless chain，直徑為 0.16 m，繫纜總長度為 480 m，繫纜最小破斷力 (MBL) 約為 17,811(kN)。

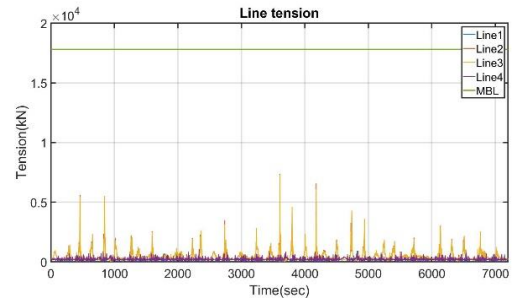


圖八、繫纜配置圖

表五、繫纜系統配置

繫纜數目	4*1
總長	480 m
水深	50 m
海平面至導纜口距離	10 m
錨定點至平台中心水平距離	$350\sqrt{2}$ m
繫纜等效直徑	0.16 m
溼重	522.25 kg/m
最小破斷力	17,811 kN

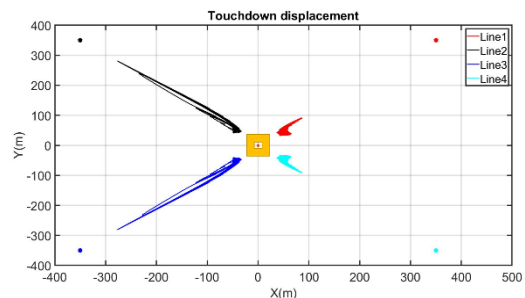
透過模擬 50 年重現期的颱風試次，判斷設計繫纜張力有無超過最小破斷力，結果如圖九，可知在 7200 s 內四條繫纜的最大張力皆未超過最小破斷力，設計屬合理。



圖九、50 年重現期颱風試次下繫纜張力變化

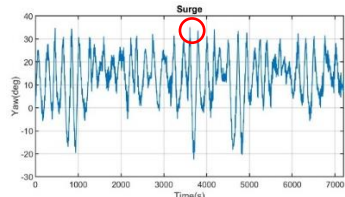
由於現今浮動式風力發電的錨定大多使用的是拖曳錨(Drag Anchor)，其缺點在於無法承受瞬間較大的垂直力，且對於淺水繫纜系統的回復力曲線，當繫纜所受到的力量越大時，其回復力會隨著觸碰點的繫纜被拉升時跟著上升許多，間接影響系纜對於錨定點的垂直力。

圖十為模擬 50 年回歸期極端條件下，繫纜的觸碰點位置，由圖八可知錨定點在水平(X)及垂直(Y)方向上，位於距離平台中心 350 m 處，因此可以判定此繫纜設計並不會使錨定點有向上拉升的力量存在，設計屬合理。

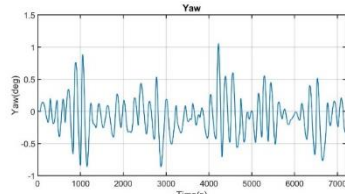


圖十、四條繫纜觸碰點及錨定點位置

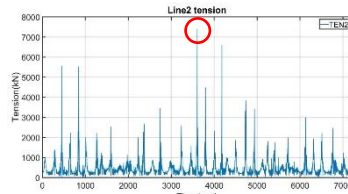
從迎波兩條繫纜(Line2、Line3)張力變化可得當平台於 surge 方向位移過大時，其主要影響繫纜的張力值，如圖十一及圖十三可以發現繫纜張力發生極值時平台的位移量也在最大值的時刻，而由圖十二可得由於平台迎波方向受到不平均的外力時會有 yaw 方向的轉動，而在這個自由度的變化雖不是造成繫纜張力飆升的主要原因，但是對於接下來繫纜失效後張力的變化有一定的影響。



圖十一、50年重現期颱風試次下平台 surge 變化



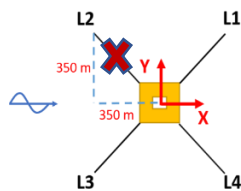
圖十二、50年重現期颱風試次下平台 yaw 變化



圖十三、50年重現期颱風試次下 Line2 張力變化

### 3.3 模擬試次結果

依據在繫纜設計結果，在無繫纜失效的情況下，選擇迎波兩條繫纜張力變化最大的時刻進行斷纜模擬，如圖十一可以發現平台 surge 變化最大時，圖十三的 Line2 繫纜張力變化同時也達到最大，因此將往後五個試次的繫纜失效時間設置於  $t=3,208\text{ s}$ ，且皆為 Line2，示意圖如圖十四。



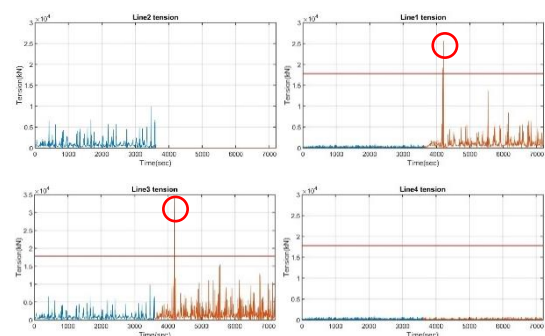
圖十四、繫纜失效示意圖

#### 3.3.1 繫纜張力變化

使用的繫纜為 Grade R3 等級的鐵鏈，其 MBL(最小破斷力)為 17,811 kN，模擬總共時間 7,200 s 可將各條繫纜張力變化表示如圖十五及圖十六，為方便識別繫纜代號，依據平面座標中的第一、二、三、四象限分別命名 Line1~4 條繫纜。

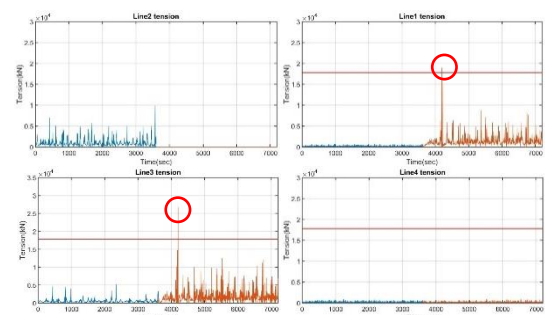
五個試次中，分別在波流同向及夾角 45 度的兩個試次 LC1、LC2 中發現繫纜張力超過最小破斷力的值，如表六，由於繫纜失效後，從 XY 平面系統來看，平台漸漸地往右下角(第四象限)移動，且由於平台四個角落受力不均勻造成 yaw 方向地轉動變大，使兩條主要被拉動的繫纜:Line1、Line3 在 Line2 繫纜失效後張力值變大許多。

其餘三個試次的繫纜張力未超過最小破斷力，因此無展示出來。



圖十五、LC1 繫纜張力變化

(右上:Line1；左上:Line2；左下:Line3；右下:Line4)



圖十六、LC2 繫纜張力變化

(右上:Line1；左上:Line2；左下:Line3；右下:Line4)

如表六，可以發現在 LC1 的最大張力值較 LC2 中的大，因為在某些時刻由於波流不同向，流場可抑制波浪對於平台造成 yaw 方向的轉動，而如前述所解釋在某些時刻平台的 yaw 角度變化會影響繫纜的

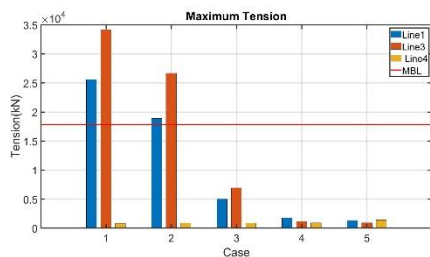


張力變化，因此可以推測波流同向的繫纜張力變化較波流方向不一致的大

表六、五個試次中超過最小破斷力的張力值

Load Case	Tension(kN)
LC1	Line1: 25,598 Line3: 34,216
LC2	Line1: 18,873 Line3: 26,271

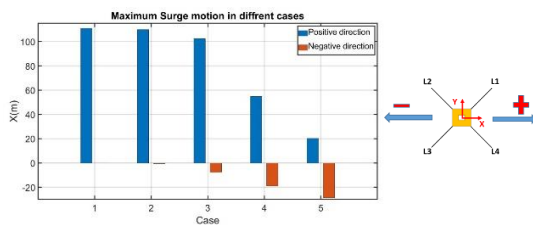
由圖十七可以知道在波流漸漸反向時，由於 Line1 為主要迎流方向，因此在流場抑制波浪的運動下，受到流場的作用其最大張力漸漸大於 Line3。



圖十七、繫纜最大張力

### 3.3.2 平台位移範圍

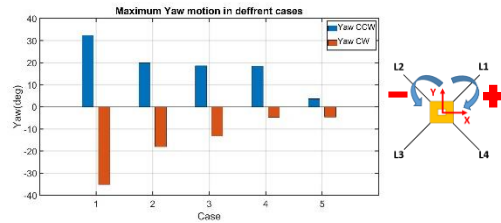
由於平台在 surge 方向的變化為繫纜張力變化的主因，因此將五個試次中最大的平台漂移距離呈現如圖十八，可看到在流場漸漸與波浪反向時，於繫纜失效後，其能牽制平台往右(正方向)的位移量。



圖十八、平台 surge 方向最大位移量

### 3.3.3 平台運動表現

由圖十九可看出平台在受到波流漸漸反向時，其 yaw 方向的轉動量漸漸變小，由於流場可達到抑制波浪對於平台 yaw 方向的轉動，也同時驗證了當繫纜失效後，由於 yaw 轉動量變大而造成繫纜張力值於特定時刻的變大，可以去推論當波流反向時在考慮平台漂移範圍不大以及 yaw 轉動的變化量不大下，其繫纜張力較其他四個試次來的小。



圖十九、平台 yaw 方向最大轉動量

## 四、結論

繫纜張力主要受到平台 surge(水平方向)的運動所影響，而在其中一條繫纜失效後，由於平台 yaw(平擺)變化增加，導致該自由度對於繫纜的張力有一定的影響。當波流不同向時，流場可抑制波浪對於平台 yaw 方向的運動，使繫纜張力降低。波流同向時張力最大；反向時張力最小。平台於初始位置及繫纜失效後的最大漂移位置附近，其 pitch(俯仰)的運動變化最劇烈。

## 參考文獻

1. 詹政祥(2005)新竹港南海岸環境保護及營造計畫規劃報告，經濟部水利署第二河川局
2. 楊雯煊(2020)駁船式浮動風機平台水動力及穩定性之實驗與數值分析，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文
3. 王詮文(2021)駁船式浮動風機近全尺度水工及實海域試驗研究，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文
4. Faltinsen, O. (1993) *Sea loads on ships and offshore structures (Vol. 1)*, Cambridge university press.
5. Ma, K.-t., Wu, Y., Stolen, S. F., Bello, L., ver der Horst, M., & Luo, Y.(2021). Mooring Designs for Floating Offshore Wind Turbines Leveraging Experience From the Oil & Gas Industry. Paper presented at the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.

# The Influence of Breaking Wave Locations to The Slamming Wave Load on The Offshore Wind Turbine Foundation in Shallow Water

Ahmad Darori Hasan\*, Yu-Hsien Lin\*

\* Dept. of Systems & Naval Mechatronic Eng., National Cheng-Kung University, Tainan City 70101, Taiwan

## ABSTRACT

This study used computational fluid dynamics (CFD) to simulate breaking waves induced by sloping beds and to analyze the impact of these waves on an offshore wind turbine (OWT) foundation. A Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equation was established to numerically analyze the water surface of two-phase fluids by using a volume of fluid method. The Boussinesq approach was used to determine the Reynolds stresses for developing a Re-Normalisation Group (RNG)  $k-\epsilon$  turbulence model. The cut-cell method was used to generate grids for the monopile geometry and the computational domain. The results of the numerical model for the wave elevation, wave load, and pressure on the foundation structure were validated by comparing them with the experimental results obtained by Irschik (2002) at the Large Wave Channel, Hannover, Germany. Next, the wave elevation and wave load subject to the surf similarity parameter  $\xi_0$  on the OWT foundation were examined. By using empirical mode decomposition (EMD) and the Hilbert–Huang transform (HHT), the total wave load forces were decomposed into the quasi-static force and slamming force. Furthermore, the wave load analysis would be summarized by considering the slamming force coefficient, rising time, duration time, and impulse. The normalized run-up height of the wave around the OWT foundation was also examined.

Keywords: Breaking wave, Wave load, Computational fluid dynamics (CFD), Offshore wind turbine foundation

## 摘要

本研究擬利用計算流體動力學方法模擬斜坡引發之碎波事件，並進一步分析了波浪對離岸風力發電機基樁的衝擊過程中的交互作用。經由 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equation 並結合有限體積法在二相流之耦合，可利用 Boussinesq 方法得到雷諾應力，進一步在自由液面的數值設定上採用 RNG  $k-\epsilon$  紊流模型。基樁幾何外型及計算流域皆透過六面體網格生成。藉由 Irschik 在德國漢諾威的大型造波水槽所進行的實驗結果驗證，並且提供了準確的波浪波高、波浪荷載及基樁結構上的壓力數據。本文將探討離岸風力發電機基樁在波浪作用過程中受碎波相似參數  $\xi_0$ 、波高和波浪荷載等條件的影響，並通過 EMD 和 HHT 方法將波浪荷載的總力分解為準靜態力和碎擊力。此外，本研究將碎擊係數、上升時間、持續時間及碎擊力分析的結果進行總結。同時，本研究也將討論離岸風力發電機基樁周圍正規化溯升高度的分佈情形。

關鍵字：碎波，波浪荷載，計算流體動力學方法，離岸風力發電機基樁。

## I. Introduction

Offshore wind resources in coastal areas have excellent potential for the generation of wind energy. Considerable research has examined the wave loads on the structures used in coastal and offshore wind fields. With the Morison formula, the wave force on the cylinder can be estimated as the inertial and drag

components for a Keulegan–Carpenter (KC) number greater than 2 and a cylinder-diameter-to-wavelength ratio of less than 0.2 [1]. However, in the study of breaking wave loads, the Morison formula is associated with the slamming force. Therefore, the slamming term must be estimated in addition to the quasistatic force to examine the total force resulting in breaking waves [2].

The numerical simulation of breaking waves in

shallow water is challenging due to nonlinear interactions of the hydrodynamic physical processes. Since it is challenging to simulate breaking waves in shallow water, RANS-based solvers or analytical methods are usually adopted to investigate breaking waves and their associated wave loads [3-5]. In order to investigate the influences of three important environmental parameters, i.e. water depth, offshore wave steepness, and beach slope, on the characteristics and geometric properties of spilling breakers propagating over slopes, a two-phase flow CFD model was developed [6]. Aggarwal et al. [7] performed a numerical analysis to observe the influences of higher-frequency components on the secondary peaks in the breaking-wave load spectrum. Kamath et al. [8] used an open-source CFD model to simulate the impact of plunging breakers on the vertical cylinder by varying the cylinder location at different stages of wave breaking. Jose et al.

Most offshore wind power farms are constructed near the coastal areas in shallow waters. The physical process of hydrodynamics in shallow nonlinear waters is complicated because the bottom seabed strongly influences wave motion. Breaking waves exert significant hydrodynamic loads on offshore wind turbine (OWT) structures. Moreover, impulsive loads can cause permanent structural damage. This research investigated the evolution of breaking waves and the wave loads on OWT structures. Numerous simulations of breaking waves were conducted using computational fluid dynamics (CFD) based on published laboratory data. The main purpose of this study is to estimate the effects of impact forces and run-ups on the foundations under different breaking wave conditions.

## II. Mathematical Model

### 1. Governing Equation

The problem of fluid mechanics to become extremely complex and challenging to understand. Therefore, to describe the fluid dynamics of turbulence, the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) [9] equation is used. The Reynolds stresses are modeled by relating the Reynolds pressure to the average velocity gradient by using the Boussinesq hypothesis [10]. The aforementioned hypothesis is adopted in several turbulence models, such as the Spalart-Allmaras,  $k - \omega$ , and  $k - \varepsilon$  models [9]. The renormalization group (RNG)  $k - \varepsilon$  [11] model is used in this simulation.

The volume of fluid (VOF) method is a numerical method used for modeling water surfaces in a computational domain. In this method, the flow equations are volume-averaged directly to obtain a set of equations. A phase indicator function  $\gamma$  is used to define the interface of the two-phase.

### 2. Wave Breaking

The surf similarity parameter  $\xi_0$  (Iribarren number), which was suggested by Battjes [12],

determines whether the wave break and the wave breaking type. This parameter is expressed as below:

$$\xi_0 = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad (1)$$

where the  $\beta$  is the slope,  $H_0$  is the initial wave height, and  $L_0$  is the initial wavelength. In this study, all the wave conditions can be classified into two categories considering the surf similarity parameter, i.e. spilling and plunging breakers.

Meanwhile, the relative breaking distance ( $x'_b$ ) [13] can be described as follows:

$$x'_b = \frac{x_{fc} - x_b}{L_0} \quad (2)$$

where  $x'_b$  is the relative breaking distance between the wave breaking point ( $x_b$ ) and the location at the front surface of the circular cylinder ( $x_{fc}$ ).

### 3. Run-up Height

Hellermeier [14] suggested a run-up height estimation by considering the velocity stagnation head theory at the wave breaking crest while impacting the monopile. The energy of the water particles at the wave crest is converted from kinetic energy to potential energy by rising water particles a distance up the monopile above the elevation crest. The wave run-up height can be predicted as follows [14]:

$$R_u = \eta_{max} + m \cdot \frac{u_c^2}{2g} \quad (3)$$

where  $\eta_{max}$  is the elevation wave crest value,  $u_c$  is the horizontal velocity component of the particles in wave crest;  $g$  is the acceleration of gravity,  $m$  is the ascending correction coefficient, and  $R_u$  is the run-up height.

### 4. Wave Load

The Morison equation depends on the ratio of the wavelength to the member diameter. In the case of breaking wave force, the Morison formula is associated with the slamming force. Therefore, to describe the total force from breaking waves, the slamming force term is estimated in addition to the quasistatic force presented by Goda Y [2]:

$$F = F_B + F_{QS} = F_{LF} + F_S \quad (4)$$

$$F_S = \frac{1}{2} \lambda \eta_b \rho D C_b^2 \quad (5)$$

where  $F_S$  is slamming force,  $C_S$  is the slamming coefficient,  $\rho$  is the mass density of water,  $C_b$  is the wave breaking celerity,  $\lambda$  is the curling factor,  $\eta_b$  is the breaking wave crest,  $R$  is the radius of the cylinder, and  $d$  is the water depth.

### 5. Decomposition of the Wave Load

The slamming force cannot be estimated using the Morison formula, the EMD method of Hilbert transformation was used to decompose the total force into two parts. The total force data was decomposed through one sifting process to get the first IMF component considered as a dynamic force and the residual value as a net-breaking wave force. The net

breaking force and the dynamic force can be defined by using the following relationship.

$$F_B(t) = F_T(t) - F_{QS}(t) \quad (6)$$

where  $F_D$  means the dynamic force, and  $F_B$  represents a residue obtained from the total force  $F_T$ .

The band-pass filtering method based on the Fourier transform was used to perform a second separation step, which involved dividing the total force into a quasi-static force and slamming force as shown below:

$$F_B(t) = F_{Lf}(t) + F_S(t) \quad (7)$$

### 6. Slamming Force Model

In order to investigate the effect of the different characteristics of slamming loads on the response of the structure, the definition suggested by [15] is used. The model substitutes the complicated loads with impulsive loads with shapes that can easily be defined mathematically. An exponential impulse load model is used to represent the slamming wave load for the dynamic case. Consequently, a refined model is developed based on the filtered slamming wave load  $F_S$ . To normalize the slamming wave load model, the slamming wave load  $F_S$  would be replaced by the slamming coefficient  $C_S$  and can be indicated as shown below:

$$C_S(t) = \begin{cases} C_{S,P} \cdot \exp(\alpha_1 \frac{t-t_p}{t_R}), & t_p - t_R < t \leq t_p \\ C_{S,P} \cdot \exp(\alpha_2 \frac{t-t_p}{t_D-t_R}), & t_p < t \leq t_p - t_R + t_D \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

where  $t_R$  means the rising time,  $t_D$  implies the total time duration, and  $t_p$  represents the moment of the force peak in the time series.  $C_{S,P}$  is defined as the maximum slamming coefficient;  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$  are the exponential parameters that determine the exponential rate on both sides of  $C_{S,P}$  from the fitting curves. The exponential parameters can be determined by fitting the several time series of  $C_S(t)$  for different breaking waves.

Furthermore, the slamming wave load model in Eq. (8) can be represented as the form of natural logarithm. For simplification,  $t_p$  can be given as zero and then Eq. (8) becomes

$$\ln(\frac{C_S(t)}{C_{S,P}}) = \begin{cases} \alpha_1 \frac{t}{t_R}, & -t_R < t \leq 0 \\ \alpha_2 \frac{t}{t_D-t_R}, & 0 < t \leq t_D - t_R \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

Since the slamming wave load is subjected to the breaking wave condition, three wave-dependent parameters, i.e. time duration parameter  $\omega_1$ , rising time parameter  $\omega_2$ , and the impact parameter  $\omega_3$ , in the slamming wave load model would be indicated in the following.

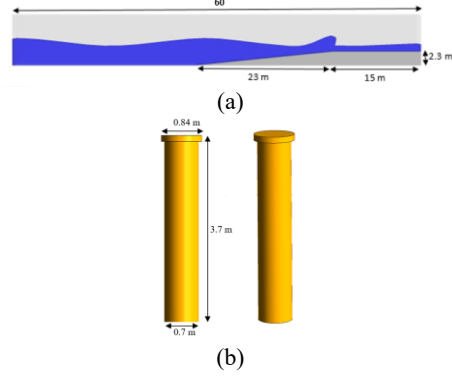
$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{t_D}{D} \\ \omega_2 = \frac{t_R}{t_D} \\ \omega_3 = C_S \lambda \end{cases} \quad (10)$$

where  $D$  is the cylinder diameter.  $C_b$  is the breaking wave celerity measured in front of the circular cylinder, and it can also be approximated by  $C_b = \sqrt{g(d + \eta_b)}$  [16, 17].  $\lambda$  is the curling factor that can be determined by the wave impact area, and it is combined with  $C_S$  to show their dependence.

## III. Fluid Domain And Mesh Generation

### 1. Fluid Domain and Geometry of Foundations

Numerical simulation refers to the experimental fluid domain conducted by Irschik [18]. The numerical wave tank is 60 m long, 5 m wide, and 6.8 m high, with a 23-m long 1:10 slope reaching a height of 2.3 m located 22 m from the inlet, see Figure 1(a). In this study, Solidworks software developed in Waltham, Massachusetts, United States was used to design the support structure. The model of the support structure is based on a vertical cylinder with a height of 6 m and a diameter of 0.7 m. Moreover, the working platform on top of the cylinder is simply assumed to be a disc with a diameter of 0.84 m [Figure 1 (b)].



**Figure 1.** Schematic diagram indicating (a) the side view of the fluid domain and (b) the monopole support structure.

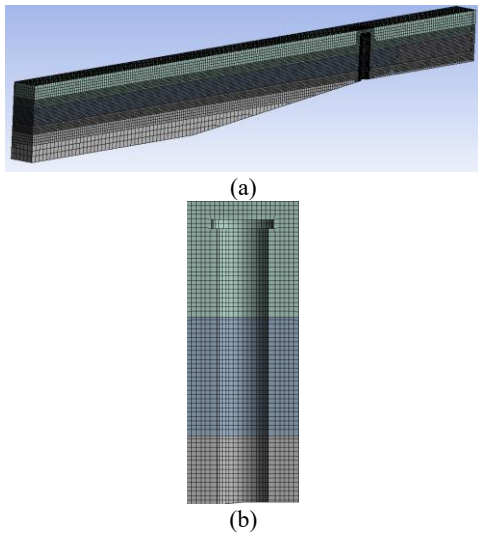
### 2. Boundary Condition

The open-channel wave is used in the setup of boundary conditions. The inlet boundary condition is generated using velocity inlet, which is used to define the flow velocity of the wave. At the end of the fluid domain, the pressure outlet is set as the outlet boundary condition. A numerical beach treatment is conducted in front of the outlet boundary to reduce the numerical reflection of waves by the outlet boundary. Moreover, a damping sink term is used to prevent wave reflection. The top, bottom, and side walls are stationary walls at

which the no-slip boundary condition is applied to simulate viscous flows.

### 3. Grid Generation

The fluid domain mesh is divided into three parts, as shown in **Figure 2.(a)**, the free surface is plotted in the middle part of the mesh. The mesh consists of hexahedral cells and is refined by 5 cm for  $C_r = 0.5$ . Soft behavior is used to generate smaller grids around the foundation. Curvature and proximity were adopted to generate the meshes around the vertical cylinder as shown in **Figure 2.(b)**.



**Figure 2.** (a) Grid setup in the fluid domain, and (b) inflation treatment around the foundation.

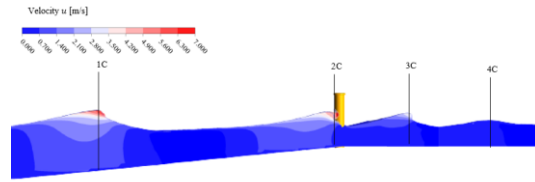
### 4. Wave Conditions

Different simulation scenarios are established to investigate the wave forces acting on the foundation of a structure during wave-breaking processes due to the bottom slope. The surf similarity parameter  $\xi_0$  (also known as the Iribarren number) is used to determine the wave-breaking type. Twenty Iribarren numbers in the ranges of  $\xi_0 < 0.5$  and  $0.5 < \xi_0 < 2.3$  are selected. These wave conditions are simulated under a water depth  $d$  of 3.8 m, sloping bottom angle  $\beta$  of  $5.71^\circ$ , and cylinder axis position of 45 m from the inlet. The surf similarity parameter  $\xi_0$  is obtained using **Eq 1** [12].

## IV. Results And Discussion

### 1. Transient Analysis of Breaking Waves

A series of incident waves propagating over a sloping bed were simulated according to the wave conditions. There are totally twenty cases for the different wave conditions. In order to realize the effect of breaker type on the generation of the slamming force during the breaking process, the transient analysis of breaking waves in the shoaling process is necessary.

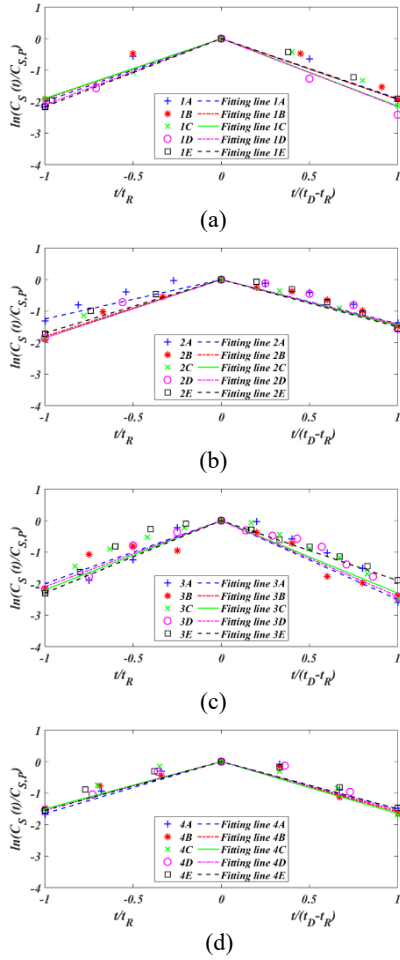


**Figure 3.** Snapshots of breaking waves for (a) case 1C ( $x_b=27.75$  m;  $H_b=1.66$  m;  $u_c=6.05$  m/s), (b) case 2C ( $x_b=44.65$  m;  $H_b=1.35$  m;  $u_c=4.84$  m/s), (c) case 3C ( $x_b=49.98$  m;  $H_b=1.16$  m;  $u_c=4.12$  m/s), and (d) case 4C ( $x=55.68$  m;  $H_{max}=0.67$  m;  $u_c=0.78$  m/s), respectively.

The properties of breaker types for regular waves with surf similarity parameters  $\xi_0 = 0.35, 0.41, 0.51$  and  $0.72$  (Case 1C, 2C, 3C, and 4C) were investigated in the numerical wave flume to identify different scenarios and locations of wave breaking as shown in **Figure 3**. For Case 1C ( $\xi_0 = 0.35$ ), the wave breaks over the sloping bottom ( $x'_b = -0.76$ ) and the overturning wave crest would impact the vertical cylinder below the crest height of the breaking wave. As the initial wave height decreases (Case 2C,  $\xi_0 = 0.41$ ), the wave breaks in front of the circular cylinder ( $x'_b = 0$ ) and the overturning wave crest impacts the circular cylinder exactly at the crest height. When the breaking point moves farther shoreward ( $x'_b = 0.26$ ) with the decrease of the initial wave height (Case 3C,  $\xi_0 = 0.51$ ), the wave breaks behind the circular cylinder and the wave crest is vertical at the impact. Regarding Case 4C ( $\xi_0 = 0.72$ ), the wave does not break and the wave crest is not vertical at the impact.

### 2. Determination of the Slamming Wave Load Model

According to the slamming load model suggested by Tu et al. [17], the slamming wave load model would be normalized to show the time series of the slamming coefficient as indicated in **Eq. (9)**. In order to elaborate on the characteristics of the slamming wave load model, all the slamming peaks are aligned in the time series. **Figure 4(a)-(d)** exhibit the refined slamming wave load model in the normalized time scales for cases of  $H_0 = 1.8$  m, 1.3 m, 0.8 m, and 0.4 m, respectively. The fitting curves are obtained by using the linear regression method with the coefficients of determination [19, 20], i.e.  $R^2$  values, equaling to 0.95. In that case, both the exponential growth and decay parameters, i.e.  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$ , can be estimated with a high confidence level. On the other hand, the wave-dependent parameters, i.e.  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  and  $\omega_3$ , can be determined from the parameters of time duration  $t_D$ , rising time  $t_R$ , the maximum slamming coefficient  $C_{S,P}$ , the curling factor  $\lambda$  and the diameter  $D$  in the refined slamming wave load model as well.

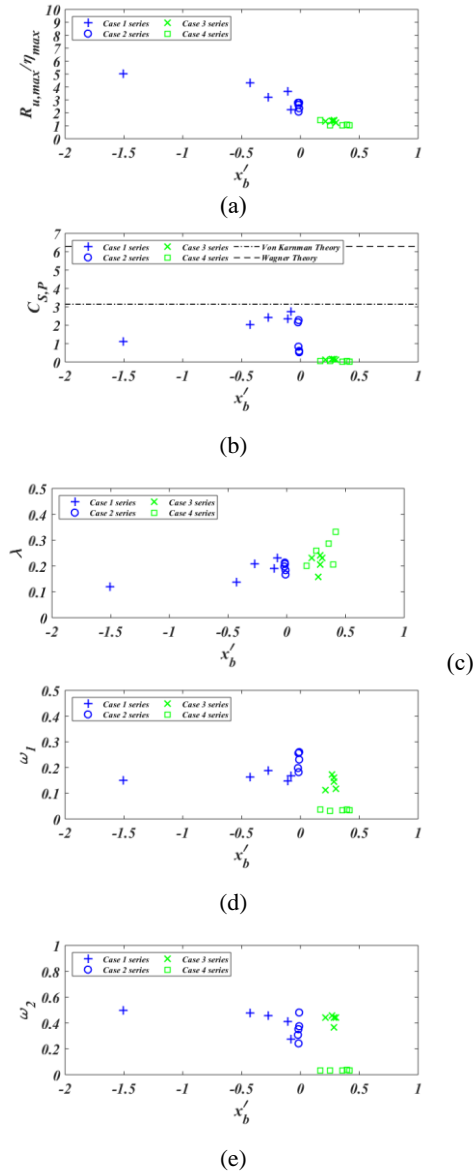


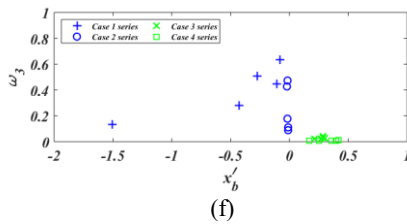
**Figure 4.** The refined slamming wave load models for (a)  $H_0 = 1.8$  m, (b)  $H_0 = 1.3$  m, (c)  $H_0 = 0.8$  m and (d)  $H_0 = 0.4$  m, respectively.

### 3. Quantitative Analysis of the Slamming Wave Load Model

A **Figure 5(b)** shows a series of wave conditions for specified wave heights to discuss the variations of  $C_{S,P}$  against  $x'_b$ . In addition, the analyzed results are compared with the theoretical  $C_{S,P}$  values of Von Karman [21] and Wagner [22]. Obviously, the peak slamming coefficients  $C_{S,P}$  within the range of  $-0.5 < x'_b < 0$  are more close to the Von Karman value than the Wagner value. On the other hand, the results of  $x'_b > 0$  are almost 0, which indicate that the slamming force does not occur behind the vertical cylinder. (c) introduces the relationship between the curling factor  $\lambda$  and the relative breaking distance  $x'_b$ . It is evident that the  $\lambda$  values become large accompanied by the increase of  $x'_b$  values. **Figure 5(d) and (e)** exhibit that the natures of  $\omega_1$  and  $\omega_2$  can be clearly distinguished at  $x'_b \approx 0$ . Specifically, the values of  $\omega_1$  and  $\omega_2$  for Case 1 series become gradually small when  $x'_b$  approaches 0. In contrast, the

values of  $\omega_1$  and  $\omega_2$  for Case 2 series appear a rapidly growing trend at  $x'_b \approx 0$ . For Case 3 series, the maximum values of  $\omega_1$  and  $\omega_2$  occur at  $x'_b \approx 0.25$ . Since there are no wave-breaking events for Case 4 series, the values of  $\omega_1$  and  $\omega_2$  are close to zero compared to the other three series. It is pointed out in **Figure 5(f)** that the values of  $\omega_3$  have significant responses in the range of  $-0.5 < x'_b < 0$ , but they decrease rapidly to the tiny values when  $x'_b > 0$ . Furthermore, the values of  $\omega_3$  are in good agreement with the variations of  $C_{S,P}$ , indicating that  $\omega_3$  is principally dominated by  $C_{S,P}$  instead of  $\lambda$ . When the relationship between  $R_{u,max}/\eta_{max}$  and  $x'_b$  is taken into account as shown in **Figure 5(a)**, the decrease of  $R_{u,max}/\eta_{max}$  is in accordance with the increase of  $x'_b$ , which shows an opposite trend compared to the variation of  $\lambda$  in **Figure 5(c)**.





**Figure 5.** Variations of (a)  $R_{u,max}/\eta_{max}$  (b)  $C_{S,P}$ , (c)  $\lambda$  (d)  $\omega_1$ , (e)  $\omega_2$ , and (f)  $\omega_3$  with respect to  $x'_b$ .

## V. CONCLUSION

In order to realize the impact of the slamming wave loads induced by different breakers on the monopile support structure (vertical cylinder), the CFD model by combining the Boussinesq-based RANS-VOF solver with RNG k- $\epsilon$  turbulence closure has been established. The slamming wave load is obtained by using the EMD method and the low-pass filter. Afterwards, the slamming wave-load model based on the exponential load shape can be calculated with two exponential parameters and three wave-dependent parameters. According to the simulation results, The maximum slamming coefficients  $C_{S,P}$  obtained from the spilling breaker are found to approach the Von Karman value rather than the Wagner value. The relative breaking distance  $x'_b$  has considerable influences on  $C_{S,P}$  and  $R_{u,max}/\eta_{max}$ , in which both of them have opposite trends when  $x'_b < 0$ . Meanwhile, the increase of  $x'_b$  leads to the growth of  $\lambda$  values and the reduction of  $R_{u,max}/\eta_{max}$  values. The impact parameters  $\omega_3$  have evident responses in the range of  $-0.5 < x'_b < 0$ , but they decrease rapidly to the tiny values when  $x'_b > 0$ . Eventually,  $\omega_3$  is demonstrated to be principally dominated by  $C_{S,P}$  instead of  $\lambda$ .

## References

[1] Morison J O, Johnson J, And Schaaf S. The Force Exerted By Surface Waves On Piles. *Journal of Petroleum Technology* 1950;189:p. 149-54.  
 [2] Goda Y HS, and M. Kitahata. Study on Implusive Breaking Wave Forces on Pile. *Port and Harbour Res. Inst*; 1966. p. 1-30.  
 [3] Alagan Chella AT, and Dag Myrhaug. An Overview of Wave Impact Forces on Offshore Wind Turbine Substructures. *Energy Procedia*. 2012;20:p. 217-26.  
 [4] Zhao Q AS, and Tanimoto K. Numerical Simulation of Breaking Waves By A Multi-Scale Turbulence Model. *Coastal Engineering*. 2004;51:p. 53-80.  
 [5] Pengzhi Lin PL. A Numerical Study Of Breaking Waves in The Surf Zone. *Journal of Fluid Mech*. 1998;359:p. 239-64.  
 [6] Chella A HB, Myrhaug D, and Muskulus M. Breaking Characteristics and Geometric Properties of Spilling Breakers Over Slopes. *Coastal Engineering*. 2014;95:p. 4-19.

[7] Aggarwal HB, Myrhaug D, and Chella A. Characteristics of Breaking Irregular Wave Forces on A Monopile. *Applied Ocean Research*. 2019;90.  
 [8] Kamath CA, Hans B, and Øivind A. Breaking Wave Interaction with A Vertical Cylinder and The Effect of Breaker Location. *Ocean Engineering*. 2016;128:p. 105-15.  
 [9] ANSYS I. ANSYS Fluent Theory Guide 2013.  
 [10] Hinze. *Turbulence*. New York: McGraw-Hill Publishing Co.; 1975.  
 [11] Victor Yakhot SAO. Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations. In *International Conference on Near-Wall Turbulent Flows*. Arizona 1993.  
 [12] Battjes JA. Surf Similarity. *Proceedings of 14th Coastal Engineering Conference*, American Society of Civil Engineers. Copenhagen, Denmark 1974.  
 [13] Kamath A, Chella MA, Bihs H, Arntsen ØA. Breaking wave interaction with a vertical cylinder and the effect of breaker location. *Ocean Engineering*. 2016;128:105-15.  
 [14] Hallermeier R. Nonlinear Flow of Wave Crests Past a Thin Pile. *Journal of the Waterways Harbors and Coastal Engineering Division*. 1976;4:365-77.  
 [15] Ying Tu ZC, Michael Muskulus. A Global Slamming Force Model for Offshore Wind Jacket Structures. *Marine Structures*. 2018;60:201-17.  
 [16] Mei CC, Stiassnie MA, Yue DK-P. *Theory and Applications of Ocean Surface Waves: Part 1: Linear Aspects*: World Scientific; 2005.  
 [17] Tu Y, Cheng Z, Muskulus M. A global slamming force model for offshore wind jacket structures. *Mar Struct*. 2018;60:201-17.  
 [18] Irshik. *Breaking Wave Characteristics For The Loading Of A Slender Pile*. *International Conference on Coastal Engineering*. Cardiff, Wales 2002. p. 1341-52.  
 [19] Draper NR, Smith H. *Applied regression analysis*: John Wiley & Sons; 1998.  
 [20] Devore JL. *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*: Cengage learning; 2011.  
 [21] Von Karman T. *The impact on seaplane floats during landing*. 1929.  
 [22] Wagner H. "Über Stoss und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1932;12.

# DeepCwind 半潛浮式風機搭配繫泊系統在 動態風條件下之模擬

黃彥儒<sup>1</sup> 林宇銜<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>國立成功大學系統及船舶機電工程學系研究生

<sup>2\*</sup>國立成功大學系統及船舶機電工程學系副教授

## 摘要

本研究基於 NPD 風譜，在考慮動態與準靜態繫泊模型的基礎上，分析 OC4 DeepCwind 半潛式浮式風機在不規則風條件下的動態響應。此外，在分析浮台運動中考慮了風力作為一個影響參數。為了引入非線性黏性阻力的影響，本研究採用二次阻尼矩陣取代莫里森公式。在模擬非線性運動響應下，本研究使用二次轉換函數(QTF)計算慢漂移力，並藉由研究纜繩對運動響應的影響，在動態模型中採用堆積質量法，而準靜態模型則採用優化過的多段準靜態(MSQS)模型。最後，本研究採用同時考慮風-繫泊的模擬下，對 OC4 DeepCwind 半潛式浮式風機的性能進行分析。

關鍵詞：風-繫纜模擬、動態繫纜模型、準靜態繫纜模型、二次轉換函數

## The Simulation of a DeepCwind Semi-Submersible Floating Offshore Wind Turbine with Mooring Systems in a Dynamic Wind Condition

Huang, Yan-Ru Lin, Yu-Hsien\*

\* Associate Professor, Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering,

National Cheng Kung University

## ABSTRACT

This study aims to analyze the motion response of the OC4 DeepCwind semisubmersible floating platform in dynamic wind condition based on Norwegian Petroleum Directorate (NPD) wind spectrum by considering the dynamic mooring model and the quasi-static mooring model. In addition, the wind force is considered as an influential parameter in the analysis of platform motion. To supplement the nonlinear viscous drag, this study adopts the quadratic damping matrix instead of Morison's element. Besides, the slow-drift force is calculated using quadratic transfer function (QTF) matrices to simulate nonlinear motion responses. The study also investigates the mooring effect on motion responses. Finally, this study applies a wind-mooring simulation for the analysis of the OC4 DeepCwind semisubmersible floating offshore wind turbine (FOWT).

Keywords: Wind-mooring simulation; Dynamic mooring model; Quasi-static mooring model; Quadratic transfer function



# 1. Introduction

Considering of environmental concerns and global climate change, the requirement for renewable resources has been increased in recent decades. Among the clean and renewable energy, wind energy is the fastest growing resource. In the development of floating offshore wind turbines, the design concept of large floating offshore wind turbines had been introduced [1].

Both the quasi-static and dynamic mooring models are employed in this study. Masciola, et al. [2] proposed an expansion of the quasi-static model called the multi-segmented, quasi-static (MSQS) model, which allows user to model the nonlinear stiffness matrix and static forces of practical mooring systems with arbitrary connection geometries and profiles. Similarly, the dynamic mooring model utilizes a lumped mass method to discretize all the mooring cables [3].

In view of the harsh sea conditions in Taiwan's sea area, the Offshore Code Comparison Collaboration Continuation (OC4) DeepCwind semisubmersible FOWT developed by National Renewable Energy Laboratory (NREL) [4] was adopted in this study. Coulling, et al. [5] distributes the comparisons of FAST predictions and test data that focus on system global and structural response resulting from aerodynamic and hydrodynamic loads.

In this study, the OC4 DeepCwind semi-submersible FOWT is moored by three catenary lines, the angle between adjacent lines is  $120^\circ$ . Performances of the FOWT under a condition of dynamic wind will be simulated and investigated. The Norwegian Petroleum Directorate (NPD) wind spectrum is also adopted for exciting forces to simulate the platform drift and turbine performance.

## 2. Mathematical Model

### 2.1 Configuration

The present study applies the potential-flow solver based on the commercial software ANSYS AQWA to simulate the OC4 DeepCwind semisubmersible FOWT

described in the OC4 project [4] under several sea conditions. The floating platform is composed of three offset columns, three base columns, and one main column attached to the tower. Each part is connected by several cross braces. In this study, the aerodynamic loads and the power generation are considered. The basic design of the DeepCwind semisubmersible FOWT is presented in Fig. 1.

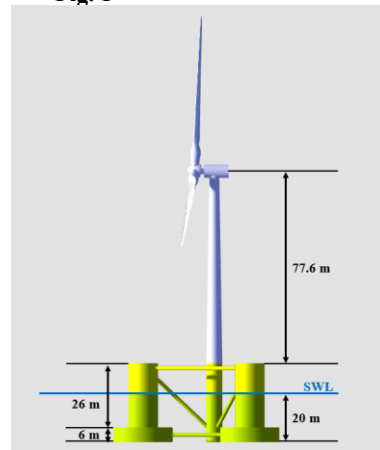


Fig. 1 The configuration of the OC4 DeepCwind semi-submersible FOWT.

### 2.2 Coordinate System

Fig. 2 illustrates the schematic of the earth-fixed ( $O_0-X_0Y_0Z_0$ ) and the body-fixed ( $O-XYZ$ ) coordinate systems. The body-fixed coordinate system is able to define the free surface boundary condition. In Fig. 2, the parameters  $\theta$  represents the wind heading angle. In this study,  $\theta$  is set to be  $0^\circ$ . In addition,  $h$  is defined as the water depth, which is 200 m in this study.

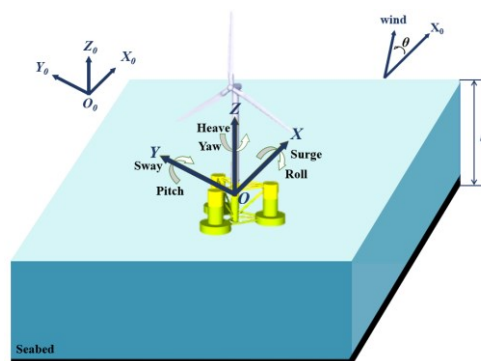


Fig. 2 Schematic of the earth-fixed ( $O_0-X_0Y_0Z_0$ ) and

the body-fixed (O-XYZ) coordinate systems.

## 2.3 Cummins Time-Domain Equation

For the FOWT with mooring lines, the external forces, such as wind and mooring forces, would have influences on the results of motion responses. In order to integrate the coupling motion of the DeepCwind FOWT, the Cummins time-domain equation [6] is represented as follows:

$$\begin{aligned} [M + A_\infty] \ddot{\zeta}(t) &= F^{(1)}(t) + F^{(2)}(t) + F_W(t) \\ &+ F_M(t) - c \dot{\zeta}(t) - B|\dot{\zeta}(t)|\dot{\zeta}(t) - K\zeta(t) - \\ &\int_0^t h(t-\tau) \ddot{\zeta}(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

where  $F^{(1)}(t)$  is the 1<sup>st</sup>-order wave excitation force and moment;  $F^{(2)}(t)$  is the 2<sup>nd</sup>-order wave excitation force and moment;  $F_W(t)$  is the wind drag force;  $F_M(t)$  is the mooring force;  $c$  is the linear damping matrix;  $B$  is the damping matrix;  $K$  is the total stiffness matrix;  $M$  is the structural mass;  $A_\infty$  is the added mass matrix at the infinite frequency;  $h(t)$  is the impulse response function;  $\zeta(t)$ ,  $\dot{\zeta}(t)$ , and  $\ddot{\zeta}(t)$  are the displacement, velocity and acceleration time-series vectors in translational or rotational motions.

## 2.4 Wind Load Model

This study applies the NPD wind spectrum [7, 8] to simulate a long-term dynamic winds. The NPD wind spectrum at the height  $Z$  can be expressed as:

$$S(f) = \frac{320 \left(\frac{V_{10}}{10}\right)^2 \left(\frac{Z}{10}\right)^{0.45}}{(1 + \tilde{f}^{0.468})^{3.561}} \quad (2)$$

where

$$\tilde{f} = \frac{172f \left(\frac{Z}{10}\right)^{2/3}}{\left(\frac{V}{10}\right)^{3/4}} \quad (3)$$

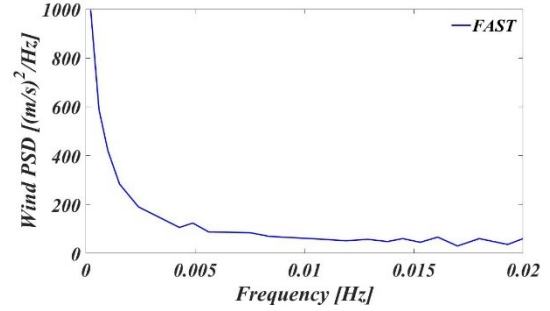
The wind drag coefficient matrix shown in **Table 1** is calculated by Ansys Fluent, and the wind force in the specific wind direction is represented in the form of:

$$F_w = C_w^i P_d A = 0.5 C_w^i \rho_{air} V_H^2 A$$

$$i = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

where  $F_w$  is the total wind force;  $C_w^i$  is the wind drag coefficient matrix;  $P_d$  is the dynamic pressure;  $A$  is the cross-sectional surface area of wind turbine;  $\rho_{air}$  is density of air; and  $V_H$  is the relative wind velocity.

The dynamic wind from the NPD spectrum with a mean wind speed of 20.6 m/s at a hub height of 90 m is used in this study. The wind setting is the same as in [5, 7]. The total simulation time is 3 hours, and the NPD wind power spectrum density (PSD) diagram is presented in **Fig. 3**.



**Fig. 3** The PSD of the NPD spectrum with a mean wind speed at hub height.

**Table 1** Six degrees-of-freedom (6 DOF) wind drag coefficient matrix.

Mode	$C_w^i$	Mode	$C_w^i$
Surge (i=1)	1	Roll (i=4)	0
Sway (i=2)	1.2	Pitch (i=5)	0
Heave (i=3)	1.2	Yaw (i=6)	0

## 3. Numerical Setting

### 3.1 Meshing

**Fig. 4** represents the mesh discretization of the semisubmersible FOWT and its three-view drawing. The details of meshing are indicated in **Table 2**. The amount of the total elements and the diffracting elements are

26610 and 14267, respectively.



**Fig. 4** Mesh discretization of the DeepCwind FOWT.

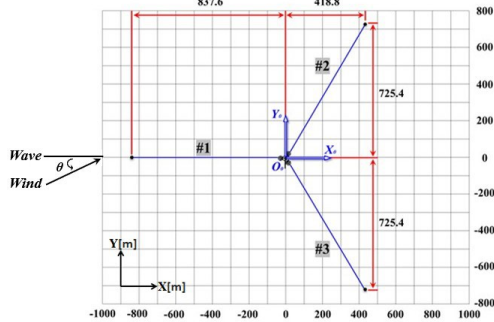
**Table 2** Details of mesh setting

Mesh Properties	Value
Maximum Element Size	1.2 m
Total Mesh Elements	26610
Diffraction Mesh Elements	14267
Maximum Allowed Frequency	0.509 Hz

## 4. Mooring System

### 4.1 Catenary Mooring Lines

The OC4 DeepCwind platform is moored by three catenary mooring lines [9], and the angle between adjacent lines is 120 degrees. The schematic diagram of the mooring layout is introduced in **Fig. 5**. This study applies the same properties of catenary mooring lines as [4]. It is noted that  $\theta=45^\circ$  in **Fig. 5** is defined as the relative angle between wind and wave.

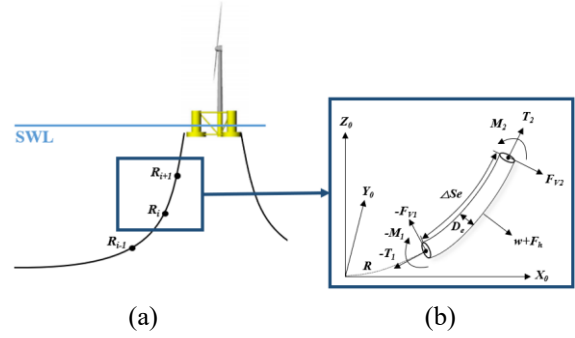


**Fig. 5** Mooring layout against wave and wind directions in the top view. (unit: m)

## 4.2 Mooring Model

### 4.1.1. Dynamic Mooring Model

The description of dynamic mooring model shown in **Fig. 6** refers to a lump-mass approach [3]. **Fig. 6(a)** represents schematic of the dynamic mooring model, and **Fig. 6(b)** shows the forces on a cable element in detail. In this study, each dynamic mooring cable is divided into 250 cable elements.



**Fig. 6** Schematic of (a) the dynamic mooring model, and (b) the forces on a cable element.

The motion equation of this cable element is

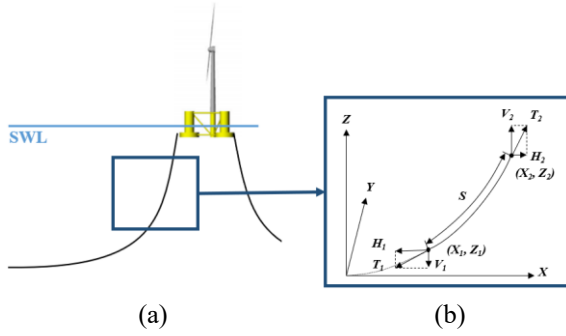
$$\frac{\partial T}{\partial s_e} + \frac{\partial V}{\partial s_e} + \mathbf{w} + \mathbf{F}_h = m \frac{\partial^2 \mathbf{R}}{\partial t^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial s_e} + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial s_e} \times \mathbf{V} = -\mathbf{q} \quad (6)$$

where  $m$  is the structural mass per unit length;  $\mathbf{q}$  is the distributed moment loading per unit length;  $\mathbf{R}$  is the position vector of the first node of the cable element;  $\Delta s_e$  and  $D_e$  are the length and diameter of the element respectively;  $\mathbf{w}$  and  $\mathbf{F}_h$  are the element weight and external hydrodynamic loading vectors per unit length respectively;  $\mathbf{T}$  is the tension force vector at the first node of the element;  $\mathbf{M}$  is the bending moment vector at the first node of the element; and  $\mathbf{V}$  is the shear force vector at the first node of the element.

### 4.1.2. Quasi-static Mooring Model

The quasi-static mooring model shown in **Fig. 7** applies the MSQS approach [2] to obtain the mooring force. **Fig. 7(a)** represents schematic of the dynamic mooring model, and **Fig. 7(b)** shows the forces on a cable element in detail.



**Fig. 7** Schematic of (a) the quasi-static mooring model, and (b) the forces on a cable element.

The motion equation of each catenary section is expressed as follows:

$$H_2 = AE \sqrt{\left(\frac{T_2}{AE} + 1\right)^2 - \frac{2wZ_2}{AE}} - AE = H_1 \quad (7)$$

$$X_2 = \frac{H_2}{w} \sinh^{-1}\left(\frac{wL}{H_2}\right) + \frac{H_2 L}{AE} \quad (8)$$

$$V_2 = wL \quad (9)$$

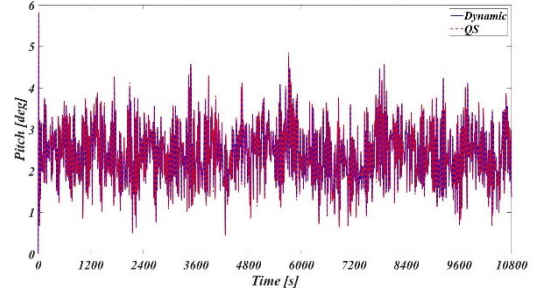
$$T_2 = \sqrt{H_2^2 + V_2^2} \quad (10)$$

where  $L$  is the unstretched suspend length from the origin to the point  $(X_2, Z_2)$ ;  $w$  is the submerged weight per unit length;  $T_1$  and  $T_2$  represent the tension force;  $V_1$  and  $V_2$  denote the vertical component of the tension force;  $H_1$  and  $H_2$  denote the horizontal components of the tension force; and  $AE$  is the stiffness per unit length.

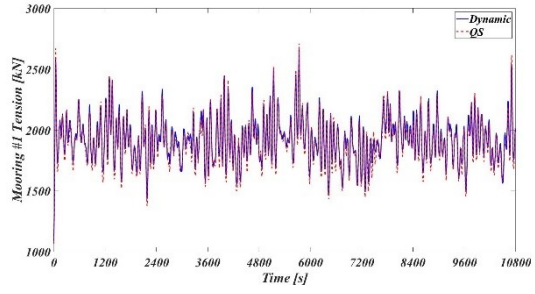
## 5. Results and Discussion

The study utilizes the NPD wind spectrum in  $0^\circ$  direction to simulate the motion response of the platform, which references the simulation setting in [5].

**Fig. 8** shows the time series of the pitch and the mooring line #1 tension by comparing dynamic and quasi-static mooring models. It can be found that the results of the different mooring models in the pitch are similar. However, the fluctuation of the quasi-static is bigger than that of the dynamic in the mooring line #1 tension.



(a)

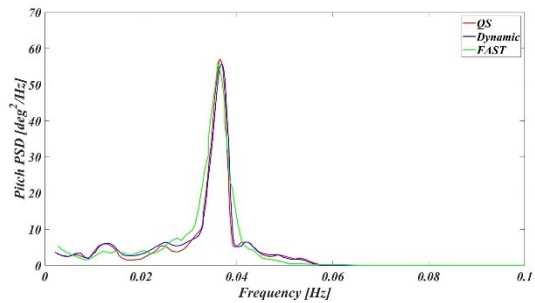


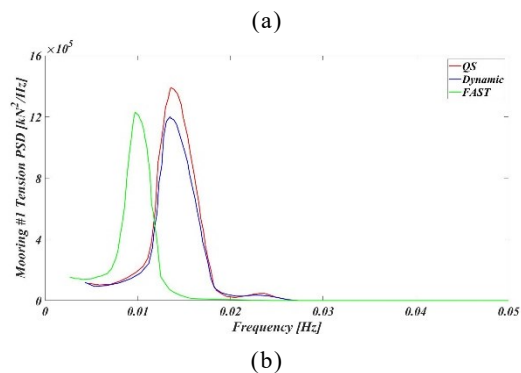
(b)

**Fig. 8** Time series of (a) the pitch, and (b) the mooring line #1 tension from dynamic and quasi-static mooring model under the NPD spectrum.

**Fig. 9(a)** illustrates the pitch PSD of the platform comparing with FAST results. The peak frequencies in FAST and simulations are 0.036 and 0.04 (Hz), respectively. It is shown that the deviations among three results are small.

**Fig. 9(b)** represents the mooring line #1 tension PSD of the platform comparing with FAST results. It reveals that the peak frequencies of the quasi-static and dynamic mooring tension slightly deviate from the FAST result. It is probably caused by the drift force. In FAST, the slowly varying force are visibly ignored. This reason may lead to different line tensions.





**Fig. 9** Comparisons of (a) the pitch PSD, and (b) the mooring line #1 tension PSD from FAST and simulation data under the NPD spectrum.

## 6. Conclusion

This study aim to verify the numerical model of dynamic wind by comparing the simulations and FAST. According to the simulation results, it indicated that the simulation results are in good agreement with the FAST response in the pitch PSD. In pitch mode, the mooring cables only provide the function of station-keeping and doesn't have a significant effect on stabilization. Although the peak frequencies of quasi-static mooring model and the dynamic mooring model are slightly deviate from the FAST result, the peak values of the simulations and FAST are still similar. In conclusion, this validation study has performed well in predicting the response of the DeepCwind semi-submersible floating wind turbine in dynamic wind condition.

## 謝誌

本論文係科技部專題研究計畫(編號 MOST 109-2221-E-006-100-MY2)之部分研究成果,承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成,謹致謝忱。

## Reference

1. W. E. Heronemus, "Pollution-free energy from offshore winds," in 8th Annual Conference and Exposition, Marine Technology Society, Sep. 11-13, 1972, Washington, DC, 1972.
2. M. Masciola, J. Jonkman, and A. Robertson, "Implementation of a multisegmented, quasi-static cable model," in The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference, 2013: International Society of Offshore and Polar Engineers.
3. M. Hall and A. Goupee, "Validation of a lumped-mass mooring line model with DeepCwind semisubmersible model test data," *Ocean Engineering*, vol. 104, pp. 590-603, 2015.
4. A. Robertson et al., "Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4," National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2014.
5. A. J. Coulling, A. J. Goupee, A. N. Robertson, J. M. Jonkman, and H. J. Dagher, "Validation of a FAST semi-submersible floating wind turbine numerical model with DeepCwind test data," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, p. 023116, 2013.
6. W. Cummins, W. Iiuhl, and A. Uinm, "The impulse response function and ship motions," 1962.
7. D. API, "Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures," New York: American Petroleum Institute (API), 2005.
8. API, "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—Working stress design," ed, 2000.
9. T. T. Tran and D.-H. Kim, "Fully coupled aerohydrodynamic analysis of a semi-submersible FOWT using a dynamic fluid body interaction approach," *Renewable energy*, vol. 92, pp. 244-261, 2016.

# 非線性波浪作用下洋流發電機組受力之試驗分析

陳陽益<sup>1</sup> 湯智誠<sup>2</sup> 陳信宏<sup>3</sup> 賴明松<sup>4</sup> 許弘莒<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 國立中山大學海洋環境及工程學系特聘教授

<sup>2</sup> 國立中山大學海洋環境及工程學系碩士班

<sup>3</sup> 國立成功大學水工試驗所海岸環境資源組副組長

<sup>4</sup> 國立成功大學水工試驗所技術師

<sup>5</sup> 國立中山大學海洋環境及工程學系副教授

## 摘要

本研究於國立成功大學水工試驗所進行 1:49 的模型之縮尺試驗，張力計量測各纜繩的張力變化，無線陀螺儀量測洋流發電機組模型的動力穩定度，以及架設攝影機拍攝模型的運動行為。試驗共分為規則波與不規則波試驗，在進行試次試驗之前，先進行自由運動衰減試驗，以獲得洋流發電機組在橫搖（Roll）、縱搖（Pitch）及起伏（Heave）等運動行為之自然頻率，可透過衰減的振幅得到對數衰減值及阻尼比等。規則波試驗為了解洋流發電機組模型，固定波高後在不同週期的運動行為以及各纜繩的張力變化，得到六個自由度的 RAO 值，再將六個自由度的運動時序列與纜繩張力時序列轉為頻譜，去觀察彼此互相影響的關聯。不規則波試驗為了解洋流發電在極端波浪條件下的運動行為以及纜繩最大張力值，提供設計參考。

關鍵詞：洋流發電機組、縮尺試驗、RAO 值

## The Force Analysis for the Ocean Current Power Generator of Nonlinear Waves by Physical Modeling

Yang-Yih Chen Chih-Cheng Tang Hsin-Hung Chen Ming-Song Lai Hung-Chu Hsu\*

\*Associate Professor, Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University

## ABSTRACT

This research conducted a 1:49 scale test of models at the National Cheng Kung University, Tainan Hydraulic Laboratory. Tension gauge was used to measure the tension change of each cable, the gyroscope was used to measure the dynamic stability of the model, and set up a camera to shoot the movement behavior of the model. Before the trial test, a free decay test is carried out to obtain the model in roll, pitch, and heave motions. The natural frequency of the behavior avoids resonance in future tests in real sea areas. The logarithmic decrement value and damping ratio can also be obtained through the decrement amplitude. The regular wave test is to understand the motion behavior in different periods and the tension change of each cable, then turn the six-degree-of-freedom motion time series and the tension time series into a frequency spectrum to observe the mutual influence of each other. The irregular wave test provides design reference for understanding the motion behavior of ocean current power generator under extreme wave conditions and the maximum tension value of the cable.

Keywords: Ocean Current Power Generator; Scale test; RAO value

## 一、前言

由經濟部能源局資料統計，2020 年臺灣主要發電方式分別為火力、核能、可再生能源及抽蓄水力，其中，火力發電仍為臺灣最主要發電的方式，在總發電量中佔了高達 82% 的比例，如圖 1 所示，隨之產生的空氣污染，已是目前政府極力改善的首要環境問題，為因應環境惡化及能源短卻問題，近年來，提倡使用可再生能源的意識興起，臺灣具有四面環海的優越地理條件，擁有極豐富的海洋能源，海洋能相較於其他再生能源，發電型式眾多，如波浪能、潮汐能、海流能、溫差及鹽差能等，目前在海洋能中，國際上除了潮汐能發電技術已較成熟且有商業化運轉之外，其他形式的發電技術仍屬新興發電技術。根據科技部 NEP II 離岸風力及海洋主軸中心對海洋能的評估，結果如下表 1-1 所示，黑潮長年穩定流經臺灣東部海域，以洋流能開發潛能為最高。

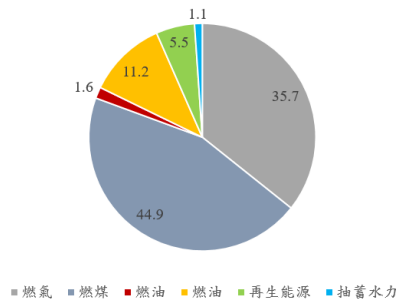


圖 1 臺灣 2020 年發電結構，本研究重新繪製

表 1 海洋能源開發評估

海洋能源	最大能量/蘊藏量	衍生性經濟效益	潔淨永續	能源安全/穩定	成本競爭性/技術成熟度
洋流	高	低	高	高	低
潮汐	低	低	高	低	中
波浪	低	中	高	低	中
溫差	低	中	高	中	中

## 二、試驗規劃與建置

本研究以萬機公司自行研發之洋流發電機組，藉由 1:49 縮尺比的水工模型試驗進行錨碇纜繩於極端海象條件下之受力以及動力穩定度分析，評估以規則波條件及 50 年迴歸期與 200 年迴歸期颱風波浪條件下，綜合以上不同條件衍生出共 13 個不同的 case，由此 13 個 case 分析錨碇纜繩於不同條件下之

受力及運動情形。

本研究以水工模型試驗進行洋流發電機組錨碇纜繩受極端海象條件作用下之受力情形分析，試驗規劃於國立成功大學水工試驗所（以下簡稱成大水工所）進行，由於洋流發電機組錨碇水深為 1000 公尺，根據 Stansberg et al. (2000) 中提到，要做原型位於 800~1000 公尺水深的試驗，會受限於試驗水槽的深度大小，Stansberg et al. (2000) 以 1:55、1:100 及 1:150 三種縮尺比進行平台試驗，驗證出不同縮尺比的平台模型在波浪試驗中得出的響應曲線大致相同，根據不同的水槽及儀器所能量測資料的精度有限，在縮尺比無法縮小的情況下，可先以較小水深進行試驗，再結合數值模擬的方法做出全尺寸模型受力分析。

本試驗於成大水工所斷面水槽進行，水槽長約 300 公尺、寬 5 公尺、深 5 公尺，試驗比尺以 1:49 等比模型進行，模型如圖 2 所示，並依照福祿數相似律，時間比尺為 1:7，力比尺為 1:117,649。本試驗使用波高計量測波高變化，張力計量測各纜繩在不同波浪條件下受力變化，各纜繩定義如圖 3 所示，無線陀螺儀量測洋流發電機組模型在波浪作用下的動力穩定度，浮式平台側面則安裝 LED 燈以利攝影機拍攝捕捉其運動行為如圖 4 所示，整體水槽試驗配置圖如圖 5 所示。



圖 2 400kW(1:49)模型圖

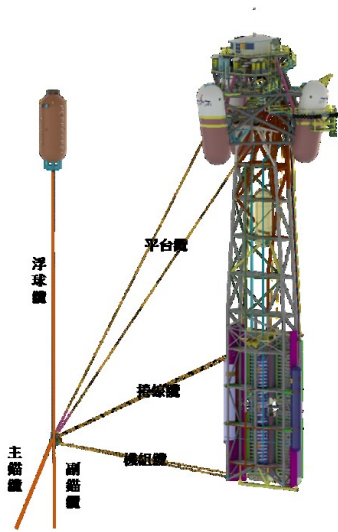


圖 3 各纜繩定義圖

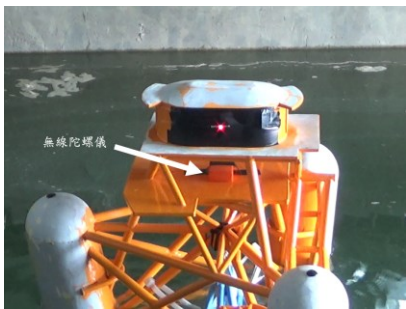


圖 4 浮式平台佈置

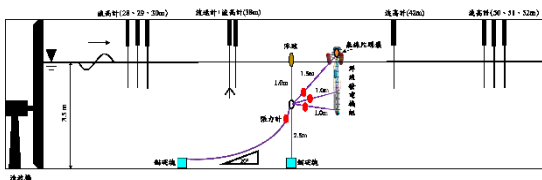


圖 5 試驗斷面水槽配置圖

### 三、試驗結果分析與討論

本試驗共分為 13 個 case，根據臺東縣綠島漁港南防波堤堤頭修復調查規劃工作報告書(2017)對於綠島海域各迴歸期之颱風波浪推算，考量到一般海岸工程設計以及會有極端狀況的發生，本研究試驗採用 50 年及 200 年迴歸期作為不規則波試驗條件，不規則波為 JONSWAP 波譜，另外，本研究試驗亦規劃長期波浪條件(規則波)，實際波高 5m 轉換成試

驗波高為 10.2cm，週期也從實際的 8~30 秒轉換成 1.14~4.29 秒，固定波高下，觀察洋流發電機組之動力穩定度與纜繩張力會隨週期不同而有何變化，完整試驗條件對照 case 編號如表 2 所示。

表 2 試驗試次表

	水深 (m)	造波方式	波高 (cm)	週期 (sec)	備註
case1	3.5	規則波	10.2	4.29	
case2				3.71	
case3				3.14	
case4				2.86	
case5				2.57	
case6				2.29	
case7				2	
case8				1.43	
case9				1.14	
case10	不規則波			24.5	50 年 S 向
case11				29.4	200 年 S 向
case12				30.8	50 年 NE 向
case13				35.9	200 年 NE 向

以上試次都需重複至少做三次，確認試驗結果的再現性，在進行試次試驗之前，先進行自由運動衰減試驗，以獲得洋流發電機組在橫搖 (Roll)、縱搖 (Pitch) 及起伏 (Heave) 等運動行為之自然頻率。

#### 3.1 自由運動衰減試驗

自由運動衰減試驗為賦予模型某初始位移，爾後釋放並觀察其運動衰減過程，便可獲得不同運動行為的自然頻率，也可透過衰減的振幅得到對數衰減值、阻尼比及阻尼係數等。以下分別檢視單一浮式平台及完整洋流發電機組的自然頻率，以避免實海域海象條件與洋流發電機組引起共振的情況。Roll 及 Pitch 可藉由無線陀螺儀所收錄資料直接進行處理，而 Heave 則因加速度二次積分成位移的過程中會產生資料的偏移，所以必須藉由攝影機搭配 LED 燈拍攝其運動行為再進行資料分析。

圖 6 的左上角為 400kW 模型單一浮式平台 Roll 的自由運動衰減時序列，右上角為 400kW 模型單一浮式平台 Pitch 的自由運動衰減時序列，下方為 400kW 模型單一浮式平台 Heave 的自由運動衰減時



序列。圖 7 的左上角為 400kW 模型完整機組 Roll 的自由運動衰減時序列，右上角 400kW 模型完整機組 Pitch 的自由運動衰減時序列，下方為 400kW 模型完整機組 Heave 的自由運動衰減時序列。圖 6 及圖 7 皆為重複試驗三次平均之結果。

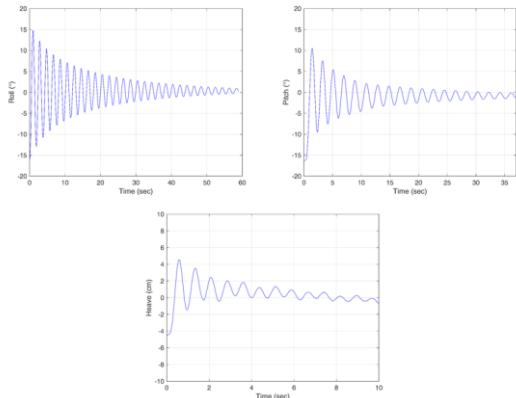


圖 6 自由運動衰減時序列（浮式平台）

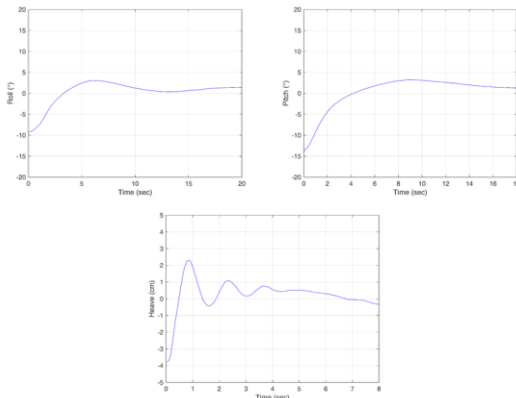


圖 7 自由運動衰減時序列（完整機組）

將圖 6 的自由運動衰減時序列中的振幅取前四個振幅代入下式 1 做對數衰減 ( $\delta$ ) 的計算，得到三個  $\delta$  值後將其平均，再將三次試驗的結果平均後得出最終的對數衰減值 ( $\delta$ )，最後將此  $\delta$  值代入下式 2 計算出阻尼比 ( $\zeta$ )。

$$\delta = \frac{1}{i-1} \ln \frac{\theta_1}{\theta_i} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{\delta^2}{\sqrt{(2\pi)^2 + (\delta)^2}} \quad (2)$$

式 1 中， $\theta_i$  代表第  $i$  個振幅，在單一浮式平台的

自由運動衰減試驗中，可經由圖 6 的時序列看出為典型的欠阻尼運動，而在完整機組的試驗中，Roll 與 Pitch 則與單一浮式平台時有很大的不同，有了下面的機組部分後，時序列就從原本的欠阻尼運動變成過阻尼運動的情況，如圖 7 所示，Heave 的時序列振幅數也減少許多，機組很快就趨於平穩，以下將單一浮式平台及完整機組試驗求得之自然頻率及對數衰減值 ( $\delta$ ) 及阻尼比 ( $\zeta$ ) 彙整，如表 3 及表 4 所示。

表 3 浮式平台自然頻率、對數衰減值與阻尼比

	Roll	Pitch	Heave
自然頻率 (Hz)	0.509	0.569	1.339
週期 (sec)	1.964	1.757	0.747
對數衰減值 ( $\delta$ )	0.173	0.270	0.416
阻尼比 ( $\zeta$ )	0.005	0.012	0.027

表 4 完整機組自然頻率、對數衰減值與阻尼比

	Roll	Pitch	Heave
自然頻率 (Hz)	0.141	0.160	0.703
週期 (sec)	7.092	6.250	1.422
對數衰減值 ( $\delta$ )			1.086
阻尼比 ( $\zeta$ )			0.185

將表 2 得到的週期轉成現場條件後，Roll 的週期為 49.644 sec，Pitch 的週期為 43.750 sec，Heave 的週期為 9.954 sec，在 Roll 及 Pitch 方面，其結果與現場波浪條件之週期有相當大的差異，超過規則波試次所設的最大週期 30 sec，可以推測 400kW 實際機組在實海域測試時，Roll 及 Pitch 發生共振的機率會非常小。

### 3.2 RAO 及張力量測

RAO 定義了結構物對一個特定自由度、波浪方向、波高與週期的運動響應，如式 3 所示，式 3 中，A 代表振幅， $i$  代表入射波， $m$  代表各自由度。

$$RAO = \frac{A_m}{A_i} \quad (3)$$

將結構物運動振幅除以入射波振幅，所得到的值即為該自由度的 RAO，於本研究試驗中，固定波高條件情況下，以觀察 400kW 模型在各自由度隨週期改變之變化。張力量測方面亦與 RAO 量測相同，將針對不同的纜繩以及週期進行討論，為避免試驗量測收錄的極值導致誤差，取資料前百分之一的平均作為試驗獲得之最大張力值，以供設計參考。

### 3.2.1 規則波試驗

為了檢視洋流發電機組在不同波浪週期條件下的運動響應，規劃 9 組不同週期的規則波條件進行試驗，旋轉的自由度可直接以陀螺儀收錄資料進行分析，陀螺儀取樣頻率為 100Hz，平移的自由度（縱移則因陀螺儀收錄之加速度資料經二次積分會導致誤差，必須利用 LED 燈搭配 DV 影像進行平移的資料分析，其幀率為 30fps，表 5 即為六個自由度在不同週期下的 RAO 值。

表 5 六個自由度的 RAO

	Surge (m/m)	Sway (m/m)	Heave (m/m)	Roll (°/m)	Pitch (°/m)	Yaw (°/m)
case1	1.959	0.440	0.811	0.397	1.642	1.717
case2	1.632	0.600	0.894	0.297	1.374	1.886
case3	1.603	0.696	0.820	0.344	0.995	1.521
case4	1.486	0.597	0.972	0.574	1.044	1.813
case5	1.504	0.333	0.964	1.364	1.028	1.798
case6	1.166	0.210	1.001	0.236	0.978	1.838
case7	1.113	0.180	0.991	0.250	1.095	0.591
case8	0.949	0.215	0.964	0.333	1.921	0.531
case9	1.016	0.242	0.340	0.401	1.471	0.730

由表 5 可看出 Surge 方面隨週期變短，其 RAO 值也跟著變小，在 Heave 方面隨週期變短，RAO 值的趨勢為增加的，但在週期 8 秒時其值明顯下降，可能的原因在於纜繩受力變大後，纜繩緊繃後牽制住 Heave 方面的運動。

本研究試驗共量測了主錨纜、平台纜、捲線纜與機組纜等四組纜繩張力，下表 6 則為規則波試驗所得之各纜繩張力最大值。

表 6 400kW 模型受不同週期波浪作用下各纜繩之最大張力值

	主錨纜 (kgf)	機組纜 (kgf)	捲線纜 (kgf)	平台纜 (kgf)
case1	0.311	0.311	0.003	0.033
case2	0.289	0.289	0.002	0.028
case3	0.264	0.266	0.002	0.028
case4	0.241	0.257	0.002	0.028
case5	0.234	0.248	0.002	0.027
case6	0.178	0.205	0.002	0.028
case7	0.135	0.161	0.002	0.027
case8	0.216	0.197	0.009	0.194
case9	0.609	0.211	0.012	0.476

由表 6 可看出在 case7 試驗週期 2 秒（實際週期

14 秒）以下時，四組纜繩皆隨著週期越短，張力值變得更大，其中，主錨纜及平台纜增加的幅度更是遠超過其他兩組纜繩，也就是說在短週期時，平台纜作用的效果較顯著；在試驗週期 2 秒（實際週期 14 秒）以上時，主錨纜及機組纜隨著週期變長，張力值也跟著增加，可看出在長週期時，機組纜作用是遠大於平台纜。

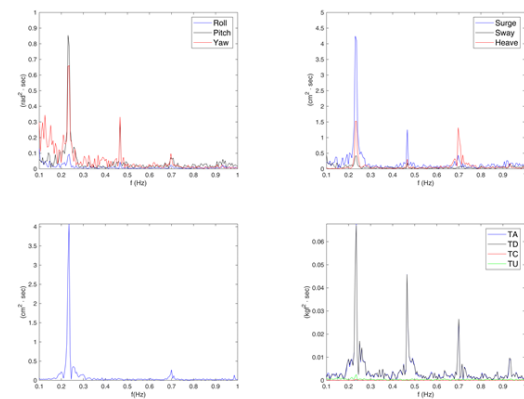


圖 8 case1 各項頻譜圖

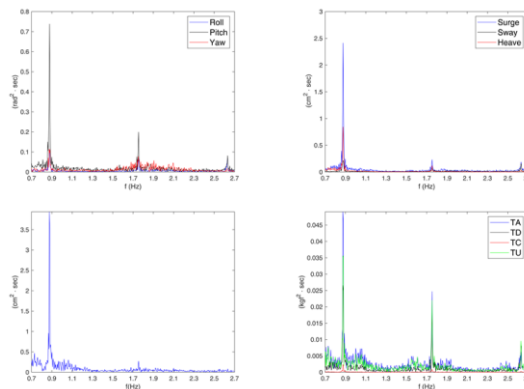


圖 9 case9 各項頻譜圖

圖 8 及圖 9 為 case1、case9 的造波、六個自由度及四組纜繩張力經由 Matlab FFT 所轉換的頻譜圖，進而找出 400kW 模型的運動姿態與纜繩張力之關係。圖的上半部為六個自由度的頻譜，左下為波高計資料的頻譜，右下為四組纜繩張力的頻譜，TA 為主錨纜，TD 為機組纜，TC 為捲線纜，TU 為平台纜。在圖 8 及圖 9 右下部分可看到纜繩張力除了在試驗頻率出現了主峰，在兩倍頻率（試驗週期的二分之一週期），甚至是三倍頻率（試驗週期的三分之一週期）都出現了峰值。在 case1~case3 時，機組纜張力值較

大時，六個自由度運動也出現了如張力頻譜的情況；在 case8 與 case9 時，平台纜的值明顯提高，機組運動情形出現了類似 case1~case3 的情形，也有可能是週期下降而導致六個自由度頻譜出現了如張力頻譜的情況。可得到以下結論，在機組纜受力較大時，或是在週期下降時，平台纜受力變大時，六個自由度運動情形與此兩組纜繩受力有一定關聯。

### 3.2.2 不規則波試驗

考量到一般海岸工程設計以及會有極端狀況的發生，本研究試驗採用 50 年及 200 年迴歸期之颱風波浪作為不規則波試驗條件如表 2 的 case10~case13 所示，動力穩定度以及張力試驗如規則波試驗的方式進行，下表 7 為六個自由度的資料取前三分之一做平均之結果，表 8 為四組纜繩張力之最大值，以供設計之參考。

表 7 六個自由度運動姿態

	Surge (cm)	Sway (cm)	Heave (cm)	Roll (°)	Pitch (°)	Yaw (°)
case10	24.993	9.634	22.102	2.037	8.973	4.661
case11	32.946	10.956	26.453	2.577	10.581	5.856
case12	31.971	13.148	25.622	2.939	11.031	8.016
case13	36.428	14.820	28.001	3.168	11.561	9.351

表 8 400kW 模型各纜繩受力之最大值

	主錨纜 (kgf)	機組纜 (kgf)	捲線纜 (kgf)	平台纜 (kgf)
case10	2.338	0.500	0.032	2.168
case11	2.407	0.482	0.033	2.219
case12	2.604	0.561	0.034	2.682
case13	3.220	1.036	0.040	3.315

由上表 7 發現在波高越高的情況下，六個自由度的運動情形都是加劇的，在纜繩張力方面亦是如此，如上表 8 所示，四組纜繩皆在隨著波高增加，張力值跟著上升，由表 8 可發現主錨纜與平台纜相較於其他纜繩，受力較顯著，轉換成現場條件，主錨纜張力值為 275~380 噸力，平台纜張力值為 255~390 噸力，可判定洋流發電機組在受極端波浪作用下，主錨纜及平台纜為主要繫纜。

## 四、結論

本研究以水工模型試驗，在規則波試驗中探究不同波浪週期條件下纜繩受力分析以及發電機組的

動力穩定度分析，不規則波試驗為考量極端情形發生，評估在 50 年與 200 年迴歸期颱風波浪條件情況下，各纜繩受力最大值，可供發電機組強度設計參考，未來可進一步規劃數值模擬與試驗結果比對。

## 謝誌

本文係海洋委員會國家海洋研究院委託國立中山大學所執行之「數百 KW 級洋流發電機組實海域發電測試委託專業服務案」(案號: NAMR109032)，其中一個有關工作項目「深海錨碇系統型式評估與設計」之「錨碇纜繩受力分析之水工模型試驗」延伸而得之結果。承蒙國家海洋研究院經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. 莊紫晴 (2016) 浮體式平台與錨鍊系統之實驗研究，國立成功大學水利及海洋工程學系研究所碩士論文。
2. Borghi, M., et al.(2012). Design, fabrication and installation of a hydrodynamic rotor for a small-scale experimental ocean current turbine, 2012 *Proceedings of IEEE Southeastcon*, pp. 1-6, doi: 10.1109/SECon.2012.6196973.
3. Namwoo Kim, Yong Jig Kim, Youngrok Ha (2015) Experimental Study of the Free Roll Decay Test for the Evaluation of Roll Damping Coefficients, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Volume52 Issue6, 460-470.
4. Katsutoshi Shirasawa, Junichiro Minami and Tsumoru Shintake (2017) Scale-Model Experiments for the Surface Wave Influence on a Submerged Floating Ocean-Current Turbine, *Energie*,10(5),702.
5. Stansberg, C.T., Oritsland, O., and Kleiven, G. (2000) Verideep: reliable methods for laboratory verification of mooring and station-keeping in deep water, *OTC 2000 Conference*, Houston, TX, 12087, 1-11.

# 震盪水柱波能轉換系統結合離岸風機套筒式基礎 發電效益評估試驗研究

李賢華<sup>1</sup> 溫辰諺<sup>2</sup> 陳冠甫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中山大學海洋環境及工程學系教授

<sup>2</sup>中山大學海洋環境及工程學系

## 摘要

科技部計畫：MOST108-2221-E-110-025-MY2

本文以離岸式震盪水柱波能轉換系統的波能轉換裝置與剛架結構結合，期能以波浪發電的方式結合風力發電，有效運用風機基礎的空間，同時在提升風機發電效率的同時亦能增加結構本身的額外波能轉換效益。本研究中以實驗水槽結合縮尺模型的方式，設計一附屬於離岸風電套管剛架式基礎下方之震盪水柱發電系統，其額外增加的氣室結構則可進行波能之發電。探討之重點以氣室之幾何外觀進行參數變化之相關研究，內容包含數值模擬及水工模型試驗相互驗證，以及氣流出口面積、前牆開口、氣室高度等參數變化，探討其氣流速度以及轉換效率，希望能提出較佳的設計參數供後續研究應用。

關鍵詞：離岸風力發電、剛架基礎、震盪水柱波能轉換、波浪能轉換、再生能源

## On the oscillating water column wave energy conversion system combined with template-type foundation of offshore wind power generation

Hsien Hua, Lee<sup>1</sup> Chen-Yen, Wen<sup>2</sup> Kuan-Fu, Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University, professor

<sup>2</sup> Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University

## ABSTRACT

In this research, the wave energy conversion device of the oscillating water column wave energy conversion system is combined with the foundation of a template structural system for an offshore wind-power generation station. It is expected that the combination between the wave power generation device and wind power generation system, can effectively use the space of the infrastructural of the wind-power generation system. In this study, the additional air chamber structure of the oscillating water column power generation system is established and the geometric appearance of the chamber as parameters to be studied are varied in sizes. The experimental results are compared with analytical results of a previous study. It is found that the results are in a good agreement while the efficiency in terms of the power conversion for the system under study may have opportunity to be improved.

Keywords: Offshore wind power; Jacket foundation; Oscillating Water Column; Wave power conversion; Renewable energy

## 一、前言

隨著科技的發展與進步，各國對於能源的需求也不斷增加，為了在環境保育及科技發展之間取得平衡，各國開始積極發展替代能源取代燃燒石化燃料，以降低人類生活對於石化燃料的依賴，加上在 2011 年福島核災後，各國也開始重新評估核能的安全性與必要性，轉而朝向再生能源進行研究發展。根據台灣地理環境及 4C Offshore 在台灣海峽的研究分析，台灣在發展海洋能及風力能上具有潛力。

波浪能的轉換是波浪起伏造成的位能差轉換成電能。以目前技術而言，波浪能的擷取方式總共有八種：震盪水柱波能轉換系統(Oscillating Water Column)、點吸收式(Point Absorber)、衰減式(Attenuator)、波浪振盪衝擊式/推拉板式(Oscillating Wave Surge Converter)、越頂式(Terminator Device)、水下壓差式(Submerged Pressure Differential)、漲波式(Bulge Wave)以及旋轉質量式(Rotating Mass)。根據台電公布之離岸風力發電第一期計畫可行性研究報告建議在台灣建置之離岸風機使用剛架式基礎(Jacket Foundation)。

本文為提升離岸風機組整體發電效益以及空間上的利用，參考本研究團隊過去岸基式震盪水柱之研究成果(Lee and Chen 2020, Lee et al. 2020, Lee et al. 2021a)，將離岸風機剛架式基礎與離岸式震盪水柱波能轉換系統進行結合進行水工模型試驗，對離岸式震盪水柱波能轉換系統模型進行設計及驗證，找出擁有最佳發電之幾何設計。

## 二、研究方法

本研究進行水工模型試驗將震盪水柱波能轉換裝置(OWC)與離岸風力發電剛架式基礎結合，並改變不同的震盪氣室幾何參數，探討其產生之氣流速度與轉換效率。

造波水槽試驗之波浪條件參考彰化外海水深 30 公尺之波浪資料，進行縮尺模型試驗，波高界於 0.06~0.14m，週期界於 1.5~1.8s。模型設計試驗之參數包括：改變氣室高度比、出口面積比及前牆開口比，並利用熱線式風速計量測波能轉換系統之出風口風速，同時計算其發電功率及轉換效率。

本文依據能量轉換公式推算轉換效率，將氣流出口風速所推算出之氣流動能除以波浪總能量，求

得其轉換效率，其轉換效率公式於下表示：

$$\frac{E_a}{E} = \frac{0.5\rho_a A_a v_a^2 T}{\frac{\rho g}{8} H^2 A_w} \quad (1)$$

其中  $E_a$  及  $E$  分別為氣流動能與波浪總能， $\rho_a$  及  $\rho$  分別為空氣密度及水的密度， $A_a$  及  $A_w$  為氣流出口面積與單一週期入射波涵蓋面積， $v_a$  為氣流風速， $T$  為週期， $H$  為水深。

本研究根據所設計之氣室結合套筒式基礎，進行不同參數進行一系列研究，進行水工模型試驗，並與陳冠甫(2019)之數值模擬結果驗證。

針對 OWC 氣室幾何外觀之參數變化有以下幾種：

1. 出口面積比：定義為氣流出口與氣室水域面積之比值，參考圖 1-A
2. 前牆開口比：定義為前牆開口與氣室高度之比值，參考圖 1-B
3. 氣室高度比：定義為氣室沒水深度與氣室高度之比值，參考圖 1-C

本次試驗剛架示意圖如圖 2，進行水工試驗之震盪氣室採用壓克力設計，並配合參數改變作調整，並以可視性高的煙霧確認其密封狀態

試驗水槽配置圖參考如圖 3，氣流速度量測之儀器使用記憶式熱線風速計。

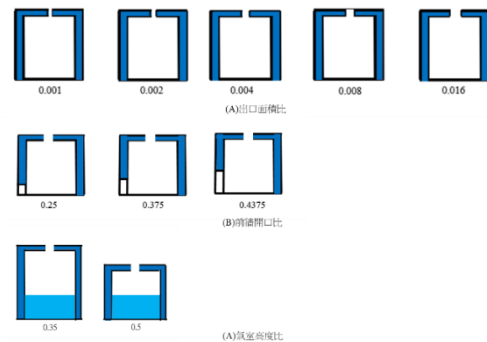


圖 1 OWC 氣室幾何外觀參數示意圖



圖 2 剛架與震盪氣室示意圖

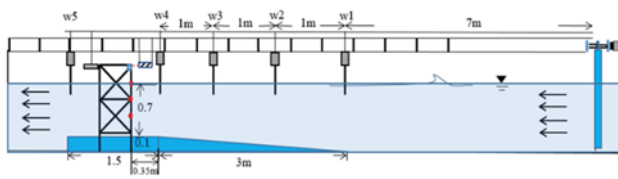


圖 3 水槽配置示意圖

### 三、試驗結果

本研究進行水工模型試驗將震盪水柱波能轉換裝置(OWC)與離岸風力發電剛架式基礎結合，並改變不同的震盪氣室幾何參數，探討其產生之氣流速度與轉換效率，並在最後將與 Lee et al.(2021b)及陳(2019)之數值模擬結果相互驗證。

在出口面積比之結果，參考圖 4 可見平均速度隨出口面積減少，而有較大之氣流速度，係因內部水位上升壓縮空氣形成壓力差，進而影響風速，而出口面積在 0.002 時達最大值，出口面積 0.001 時反正有少許降低。在轉換效率之趨勢可參考圖 5 之結果，雖平均速度在面積比 0.002 時有最大值，然轉換效率經前述提及之計算公式可得最佳結果發生於面積比為 0.008 時。

在考慮波浪有盛行方向的情況下，若在氣室迎波面增加一開口，推論能增加內部氣室震盪效果，並增加其氣流風速及轉換效率。試驗結果如圖 6 顯示，當開口比越大時，整體效率有增加的趨勢，最佳氣流速度發生於前牆開口比為 0.4375 時，當波浪到達波谷位置時，剛好會與前牆開口切齊，若前牆開口比再提升，波谷位置將低於前牆開口，使氣室不為密封狀態而降低出口風速，故本試驗雖然在前牆開口比為 0.4375 時有最佳出口風速，但若在較大的波高條件時，其出口風速也會下降，導致發電效果降低。故在前牆開口的設計上，建議使用前牆開口比 0.375 至 0.4375 之間，但仍需考慮裝設地區之盛行波浪條件，以增加其發電效率

本試驗亦有進行氣室高度不同之比較，乃固定沒水深度，調整氣室高度，即改變內部空氣含量進行比較，結果如圖 8 及圖 9 所示，氣室高度比為 0.5 時，其氣流表現皆較 0.35 時為佳，推測係因氣室體積增加後導致壓縮之空氣壓差降低，影響其氣流速度表現。

將數值模擬的結果與水工模型試驗的結果相互比較後，兩者出口面積比分別與氣流速度、轉換效率做圖，可得圖 11、圖 12 所示，可以發現兩者間趨勢接近，在面積比為 0.004 時幾乎一致。

而在前牆開口比的比較時，比較如圖 13、圖 14，兩者在在前牆開口比上升的情況下，風速及轉換效率皆有隨之上升的趨勢，在平均風速的表現，數值模擬的結果較優於水工試驗，換算成轉換效率後兩者差異則不明顯。

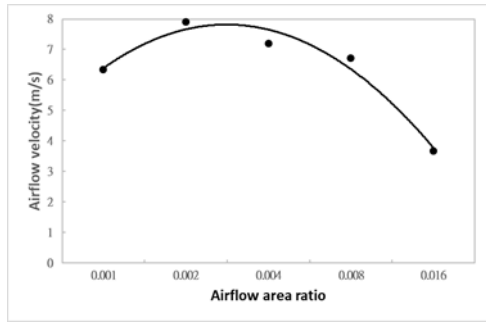


圖 4 氣流面積比對平均風速關係圖

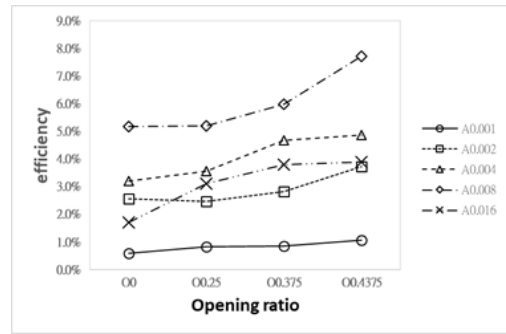


圖 7 前牆開口比與轉換效率關係圖

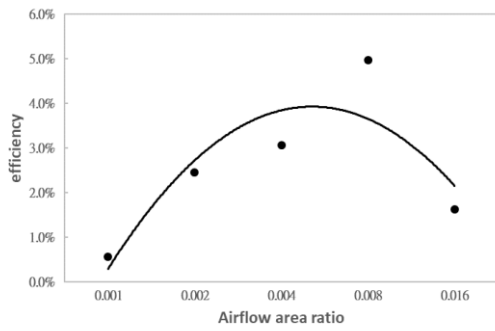


圖 5 氣流出口面積比與轉換效率關係圖

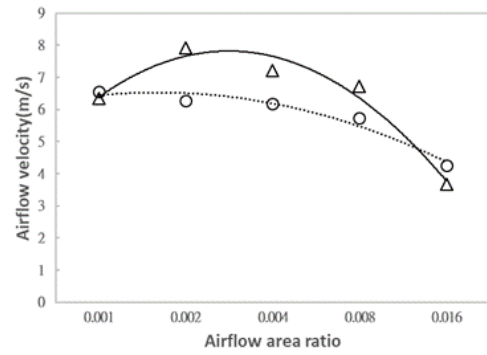


圖 8 氣室高度與平均風速關係圖

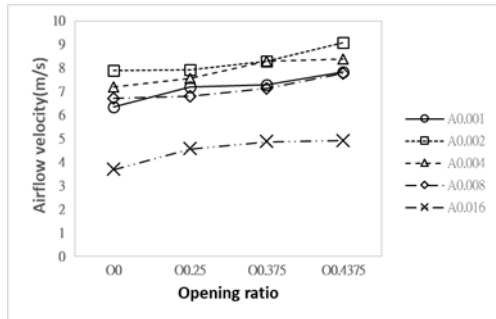


圖 6 前牆開口比與氣流速度關係圖

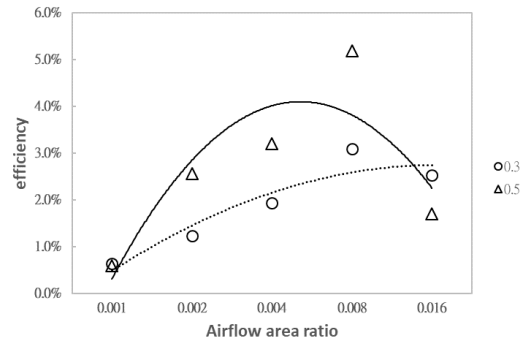


圖 9 氣室高度與轉換效率關係圖

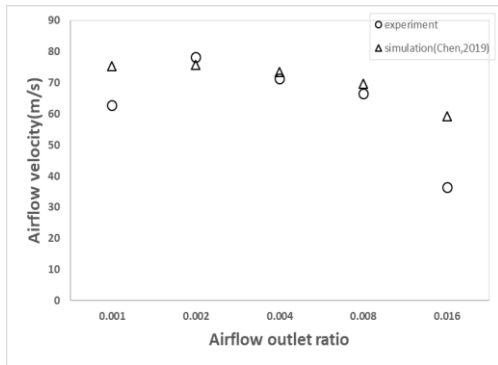


圖 10 模擬與試驗出口面積之平均風速比較關係圖

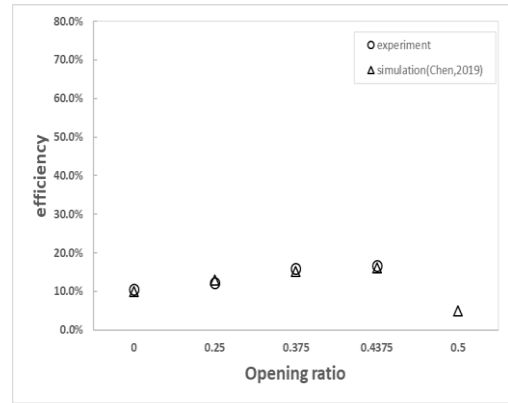


圖 13 模擬與試驗前牆開口之轉換效率比較關係圖

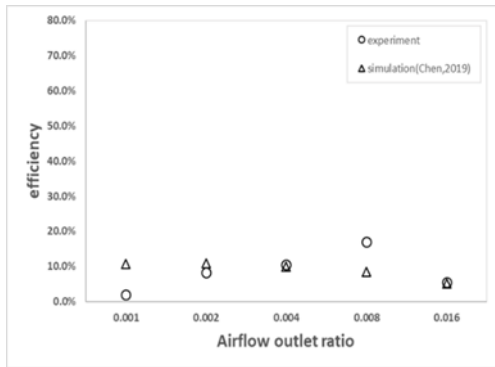


圖 11 模擬與試驗出口面積之轉換效率比較關係圖

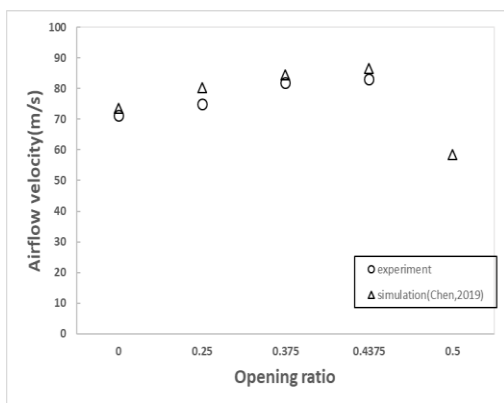


圖 12 模擬與試驗前牆開口之平均風速比較關係圖

#### 四、結論

本次研究目的在於利用水工模型試驗，與數值模擬試驗結果相互驗證，討論改變波能轉換系統之幾何設計，對其平均氣流風速、平均功率及轉換效率的變化，並找出整體波能轉換系統之最佳設計，以下做出幾點結論：

1. 在模擬與試驗中，最大的氣流速度皆發生於出口面積比 0.002 時，較佳的轉換效率則發生在面積比為 0.008 時，考量渦輪機尺寸等因素，建議設計時使用出口面積比 0.004 至 0.008 來進行設計。
2. 考慮到波浪有盛行方向的情況下，在氣室迎波面增加一開口，試驗結果顯示開口越大，能提升整體風速及轉換效率，考量波浪條件，建議開口比可採用 0.375 至 0.4375 間。
3. 數值模擬與水工試驗結果相互驗證下，兩者在氣流速度及轉換效率趨勢接近，數值差異小。



## 謝誌

本文係科技部專題研究計畫 MOST108-2221-E-110-025-MY2 之相關研究成果。

## 參考文獻

1. 台灣電力公司(2015),「離岸風力發電第一期計畫可行性研究報告」
2. 陳冠甫(2019),「震盪水柱波能轉換系統結合離岸風機剛架基礎之研究」,國立中山大學海洋環境及工程學系,碩士論文
3. Dongsheng Qiao , Dynamic Response Analysis of Jacket Platform Integrate With Oscillating Water Column Device, *Frontiers in Energy Research*,2020
4. Lee, Hsien Hua and Cheng-Han Chen, Parametric Study for an Oscillating Water Column Wave Energy Conversion System Installed on a Breakwater, *Energies* 2020 (IF=2.702), 13, 1926
5. Lee, Hsien Hua; Thung-Yeh Wu, Chung-You Lin and Yung-Fang Chiu, Structural Safety Analysis for an Oscillating Water Column Wave Power Conversion System Installed in Caisson Structure, *J. Mar. Sci. Eng.* 2020 (IF=2.033), 8(7), 506
6. Lee, Hsien Hua; C.-W. Wang, P.-Y. Chung, Experimental Study on the Strength and Durability for Slag Cement Mortar with Bentonite. *Appl. Sci.* 2021 (IF=2.753), 11, 1176.
7. Lee, Hsien Hua; G.-F. Chen, H.-Y. Hsieh, Study on an Oscillating Water Column Wave Power Converter Installed in an Offshore Jacket Foundation for Wind-Turbine System Part I: Open Sea Wave Energy Converting Efficiency. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021 (IF=2.033), 9, 133.

## 波流作用下海洋結構物保護工之試驗研究

陳信宏<sup>1\*</sup> 楊瑞源<sup>2</sup> 萬竣翔<sup>3</sup> 賴明松<sup>4</sup> 吳恩綺<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup>國立成功大學水工試驗所副研究員

<sup>2</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系副教授

<sup>3</sup>財團法人金屬工業研究發展中心海洋科技產業創新服務處專案經理

<sup>4</sup>國立成功大學水工試驗所技術師

<sup>5</sup>國立成功大學水工試驗所研究助理

### 摘要

本文於國立成功大學水工試驗所之風波流水槽(27m\*19m\*1m)進行一系列海洋結構物沖刷與保護工之水工模型試驗。針對四種不同型式海洋結構物基礎(單樁、套管式、重力式、群樁)之沖刷試驗，探討海洋結構物周圍保護工之型式，更進一步探討保護工效果與不同保護工型式對結構物周圍沖刷之影響。最後根據試驗結果，本文在海洋結構物周圍進行了各種類型的防沖刷保護工，並調整保護工範圍和厚度，提出了海洋結構物周圍適當的沖刷防護工作，並進行了測試且有效地防止局部沖刷，同時針對保護工成本進行評估。希望對工程上所遭遇之沖刷與保護工問題能預期提供其發生之狀況與解決之方式。

關鍵詞：海洋結構物、保護工、水工模型試驗、單樁、套管式、重力式、群樁

## Experimental study on the scour protection around marine structures under wave and current

Hsin-Hung Chen<sup>\*</sup>, Ray-Yeng Yang, Jiun-Shiang Wan, Ming-Sung Lai, En-Chi Wu

<sup>\*</sup> Associate Researcher, Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

In this paper, a series of marine structure scour and scour protection hydraulic model tests were carried out at the Wind-Wave-Current Basin (27m\*19m\*1m) of the Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University. For the scour tests of four different types of marine structures (i.e., monopile, jacket-type, gravity, pile group), the maximum scour depth and scour range around the marine structure are discussed, and the structure protection is evaluated by the scour test results. Finally, based on the experiment results, various types of scour protection around the marine structures are explored. During the test, the scope and thickness of the protection were adjusted as well. The appropriate scour protection work around the foundation was proposed and tested to be effective in preventing local scour. The study of design solutions with and without scour protection will be investigated by the comparison with respect to technical feasibility, risks and costs in the near future. The scour problem encountered in the project is expected to provide the status and solution of its occurrence.

Keywords: marine structure; scour protection; hydraulic model test; monopile; jacket-type; gravity; pile group

## 一、前言

由於過去幾十年工程技術的快速發展，在工程實踐中已經實施了大量的海洋和海底結構物。然而，在結構穩定性方面仍出現了一些問題，其中大多數問題歸因於在風、波浪、海流、潮汐及海底地質與海上結構物的複雜相互作用。海洋結構物的建置與海底床的侵蝕和沉積密切相關，因為海洋結構的存在將改變海床的沉積物動態。一旦沖刷孔形成，沖刷孔周圍的流動分離和混合層將同時被誘導，甚至產生更強的湍流，然後將進一步產生沖刷。因此必須海上和海底結構進行保護，並加以探討波浪、海流、海底床與海洋結構物相互作用之相關問題。

由於台灣本身因屬於季風氣候區的國家，本身蘊含了極為豐富的風力資源，尤以西部沿岸風力強勁，非常適合陸上及離岸式(offshore)風力發電，加上受到核能發電與火力發電產生空汙議題之影響，政府致力於能源轉型，而政府規劃再生能源配預期 2025 年達到 20% 之目標，其中風力佔 15% 以上，而離岸風力預期目標將達到 5.7GW 之發電量，突顯出離岸風力發電是所有再生能源預期增長最快、佔比最高，顯示其重要性與急迫性。惟台灣本島地小人稠，陸上可供建機組之位置有限，故朝離岸海域開發風力電廠乃為目前開發之趨勢。但台灣地理環境特殊，為颱風與地震等天然災害高潛勢地區，國際間雖已有水深 20 公尺以上離岸風場開發經驗，但面對台灣特殊的環境，先進國家離岸風力發展經驗難以直接轉移供國內使用。

考量海洋結構物型式非單一形狀，如離岸風機套管式基座，此等複合式結構物其水動力問題甚為複雜，若再考慮波浪交會之條件時，數值模式更難模擬。因此本文將以不同型式海洋結構物(單樁、套管式基座、重力式和群樁基礎)進行水工模型沖刷與保護工試驗，以得知結構物周圍之地形沖刷範圍與最大沖刷深度等數據，再進行不同型式保護工之探討。而水工模型試驗結果不但可提供給數值模式進行驗證，也可提供給設計單位於結構物附近沖刷之預防及保護工鋪設之範圍及型式，確保結構物施工過程或完工後安定之狀態。

## 二、研究方法

一般工程上常使用保護工的方法來減輕海洋結

構物周圍之沖刷，而在結構物周遭放置塊石之防沖刷保護裝置。但是，這種方法也可能會增加可觀的成本。近年來，保護工的研究中提出了幾種替代方案來控制基樁或結構物之沖刷，它們的特徵通常在於改變流場(例如分流板、狹槽、葉片、螺旋線)或鎧裝保護(例如土工沙袋、礫石袋、方塊、消波塊)。保護工技術納含在結構物周圍拋置碎石與鏈結之塊石等，如 Whitehouse et al.(2006)使用單樁式(Monopile)離岸風機基座搭配不同種高度、粒徑大小之拋石保護工。Sumer 和 Fredsøe (2002)、Sumer et al.(2008)與 Leen De Vos et al. (2012)也使用單樁式基座搭配拋石保護工，探討單層拋石與雙層拋石保護工之效果。

至於流場變更技術則如樁柱前側設置之流場破壞板(Melville and Sutherland 1988)，圍繞樁柱的圓形柱環，潛沒式翼片、樁柱壁上之細長孔與樁柱靠底床位置設置流場破壞之分流板及圍繞樁柱的纜繩(Dey et al. 2006)等。其中 Chiew(1992)在河流環境下橋墩底床沖刷研究中，使用項圈(collar)及狹長孔槽(slot)兩種保護工型式。而目前工程上一般應用的沖刷保護大部分由幾個塊石與礫石層組成，而關鍵問題是確定保護工所需的石材尺寸、保護範圍和保護層的厚度。本文將以單樁式、套管式、重力式與群樁基礎的一系列海洋結構物，以水工模型試驗探討保護工之穩定性、經濟性和防護效果。

三維動床基礎沖刷與保護工試驗係針對不同型式之海洋結構物附近可能形成之沖刷或淤積所進行之動床試驗，因此重點在觀測底床地形受到水流與波浪作用後，從開始沖刷到最大沖刷深度時的變化，並探討保護工之安定。模型率的部分，Oumeraci(1984)提出根據 Kamphuis 的研究整理出動床模型中泥沙運移的四個主控相似準則，即泥沙顆粒雷諾數；與泥沙起動有關的 Shields 參數；泥沙相對密度  $\rho_s / \rho_w$ ；水體運動振幅特徵值(a)與泥沙粒徑( $d_{50}$ )的相對長度  $a/d_{50}$  比尺。綜整可能比尺效應影響，根據大多數研究顯示，無論選用何者模型相似準則，為減低比尺效應影響應儘可能選擇較大的模型比尺進行試驗；本研究考量泥沙起動 Shields 參數，滿足動力相似條件、試驗範圍、實驗設備、底床鋪設厚度、海洋結構物大小及試驗場地等因素之限制，決定水工模型試驗之比尺為 1/36 或 1/49。

### 三、實驗設置

本研究係於國立成功大學水工試驗所風波流循環水槽進行，如圖 1 所示。該水槽長 27 m、寬 19 m、深 1 m，可同時造風、造波與造流，水槽內安置一部平推活塞式(piston type)不規則造波機，造波機配置具有主動吸收反射波功能之裝置。造流系統以一組軸流式抽水馬達，可產生正逆流之水，該馬達轉速最大達 50 Hz，約相當最大可提供 0.4 CMS 零揚程之流量；而整流段包括導流面板以及由長 20 cm、直徑 0.8 cm 之吸管所組成之蜂巢結構，以調整流況至均勻與穩定。造風系統由 4 組鋁合金三葉風扇、4 組變頻器、4 組風速計及導風設施所組成，最大可造出 10 m/sec 之風速，使得風波流可同時作用於離岸結構物之試驗水槽。

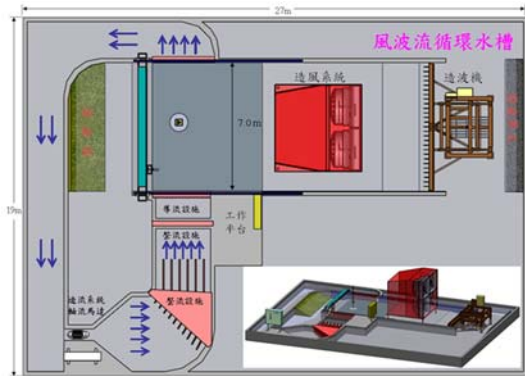


圖 1 水工模型試驗佈置示意圖

在模型鋪設試驗區中鋪設長 3.4 m，寬 7 m，高 0.35 m 之動床(煤灰底床)試驗區域。前方則鋪設坡度為 1/10 之混凝土固定底床，動床試驗區域左右兩側為造流之循環水道，搭配軸流式馬達進行造流，水流行進過程中分別以導流片與蜂巢式整流設施使流況穩定，海洋結構物(單樁、套管式、重力式、群樁)模型則架設於動床試驗區域靠近中央位置。此外，動床試驗區域後方為消波設施以減少波浪之反射情況；另於試驗區域中架設波高計、超音波流速儀及超音波連續式砂面測定儀，其中結構物前方迎波面架設 2 組波高計及迎流面架設 1 組超音波流速儀，以量測並率定入射波高與水流速度大小，而地形變化之量測以海洋結構物基礎附近產生沖刷之區域為主。

### 四、試驗結果

#### 4.1 單樁式基座保護工

本文針對單樁式結構(直徑  $D_1=4.2$  m)設計三種保護工型式，如圖 2 所示，並搭配試驗以期比較出這三種保護工佈置方式中，最安定且符合經濟效益的配置方式。第一方案保護工佈置方式以四層為主，分別為土工織布、土工砂袋、100~300 公斤塊石與 300~500 公斤塊石，保護工範圍為  $5.5D_1$ ，厚度  $0.75D_1$ 。第二方案為 3 層，土工織布、土工砂袋與 300~500 公斤塊石，範圍縮小至  $4D_1$ ，厚度降為  $0.5D_1$ 。而第三方案為二層，土工織布、內圍土工砂袋與外圍 300~500 公斤塊石，範圍縮小至  $2.5D_1$ ，厚度降為  $0.25D_1$ 。

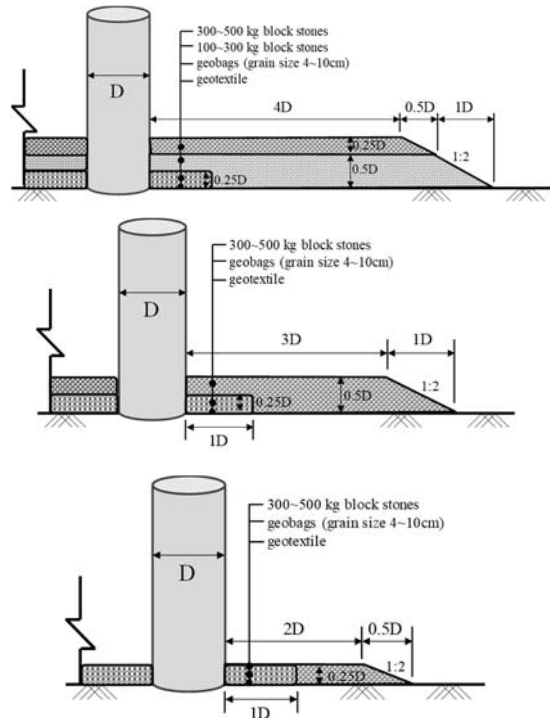


圖 2 單樁式基座不同型式保護工示意圖

以颱風波浪( $H= 5.8$  m,  $T= 11.8$  sec)與海流( $V=1.267$  m/sec)於水深 17.54m 之作用下來進行測試保護工安定與沖刷狀況。試驗結果顯示 3 組保護工範圍，均有 42%~46%左右的沖刷減緩率，代表不管哪種保護工大小均能有效減緩周遭之最大沖刷深度(圖 3)。然而當不同範圍大小之保護工均具有差不多的效果時，則鋪設範圍越大之保護工，不僅在施作

成本上來的較為昂貴，且對於海底床的底棲生態也有比較大的破壞性，因此以保護工試驗所呈現的結果來看，在這三種型式的拋石保護工中，以範圍為 2.5 倍樁徑大小的拋石保護工最具有經濟效益。

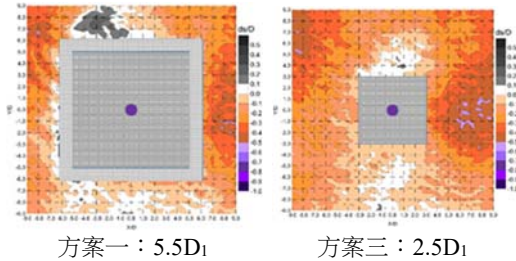


圖 3 單樁式基座保護工地形變化圖

## 4.2 套管式基座保護工

### 4.2.1 護塊保護工

套管式基座 I 護塊保護工佈置方式於基座柱體(直徑  $D_2=2.08\text{ m}$ )旁下挖 2 m 深之凹槽(上方 14 m 寬，下方 6 m 寬)，先鋪設地工織布，再回填 5~100 kg 塊石 0.6 m 與 0.5~1 ton 塊石 1.4 m，最後塊石上方再放置  $2\times 2\times 1\text{ m}$  之預鑄方塊 6 排(12 m 寬)，保護工佈置環繞基座四方周圍，如圖 4 所示。

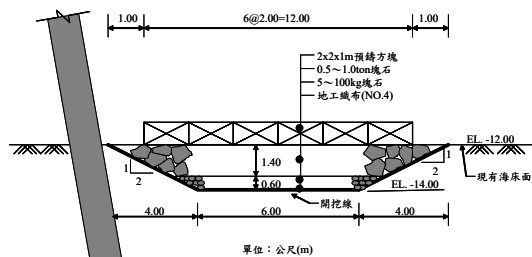


圖 4 套管式基座 I 護塊保護工型式示意圖

套管式基座 I 護塊保護工在 12m 與 16m 水深時，經颱風波( $H=6.77\text{ m}$ ,  $T=11.74\text{ sec}$  與  $H=7.72\text{ m}$ ,  $T=11.67\text{ sec}$ )與流( $V=1.0\text{ m/sec}$ )之作用後，套管式基座內側沖刷趨勢較為明顯，但保護方塊呈現安定之狀態(圖 5)。儘管如此，保護工周圍的底床沖刷高達  $0.59D_2$ ，基座內部沖刷則為  $0.86D_2$ ，但沖刷深度分別減緩了 55% 與 34%。然而，四層的護塊保護工型式，可有效地防止在套管式基座 I 周圍之沖刷；尤其是保護工外圍，幾乎沒有明顯之沖刷情形，只有在迎波面有些微之沖刷情況。反而是套管式基座 I 內側，仍有較明顯之沖刷發生，應該是套管式基座

I 內側沒有鋪設保護工之原因。

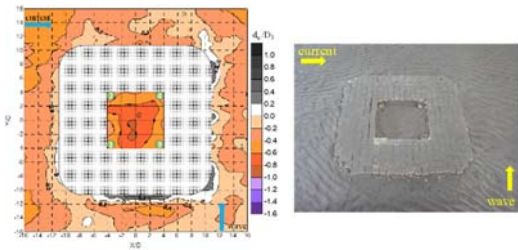


圖 5 套管式基座 I 護塊保護工地形變化圖

### 4.2.2 拋石保護工

針對套管式基座 II 拋石保護工之型式與佈置方式，第一種保護方案之保護工佈置方式以四層為主，如圖 6 所示。首先於基座柱體(直徑  $D_3=2.0\text{ m}$ )旁鋪設最下層之地工織布，接著第二層鋪上從基座向外延伸 18m 且厚度 0.5m 之礫石層(直徑 10~30cm)；第三層則是向外延伸 16m 且厚度 0.5m 之 100~300kg 塊石層；第四層也是最上層，則鋪上 300~500kg 之塊石，厚度 1m，範圍為  $6D_3$ ，整體保護工高度為 2m。除了第一種保護工方案外，尚另外設計了四種不同範圍大小與高度的保護工；範圍分別是 2 倍與 3 倍樁徑( $2D_3$  與  $3D_3$ )，而高度則是 1m 與 2m，並採用 300~500kg 塊石鋪設，以期比較出這幾種保護工佈置方式中，保護工安定且最符合經濟效益的配置方式。不同保護工布置方案如表 1 所示。

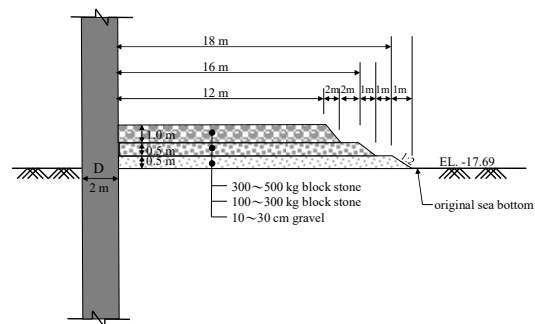


圖 6 套管式基座 II 拋石保護工型式示意圖

表 1 離岸風機套管式基座保護工布置方案

項目	保護工方案				
	一	二	三	四	五
試驗編號	6D2H	3D1H	3D2H	2D1H	2D2H
範圍( $D_3$ )	6	3	3	2	2
高度(m)	2	1	2	1	2
層數	3	1	1	1	1

保護工方案一在颱風波浪( $H=8.0\text{ m}$ ,  $T=12.0\text{ sec}$ )

與海流( $V=1.267$  m/sec)條件下, 基座沖刷深度在有保護工時明顯比無保護工時減緩 55%(圖 7), 因此保護工確實發揮其保護之功效。隨後保護工方案二~方案五改為使用單層塊石鋪設, 依不同保護範圍與高度之保護工鋪設後, 進行與方案一保護工同樣之波浪與海流條件, 試驗結果顯示保護效果最好的是保護工方案二(3D1H), 保護工周圍最大沖刷深度減緩 49%。該保護工方案在減少了一半高度與一半鋪設範圍後, 並只使用 300~500kg 塊石鋪設的單層保護工, 保護工周圍最大沖刷深度減緩 35~49%, 其減少沖刷效果雖然略微降低, 然而增加之沖刷深度僅約  $0.13D_3$ , 但所需施作之成本經費則可能大幅度降低, 並減少對海底床原始生態破壞的範圍。

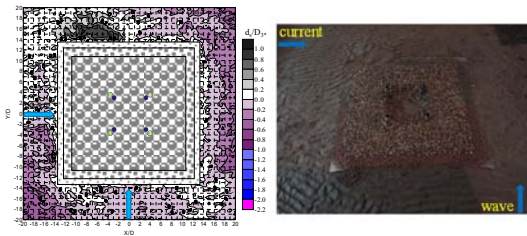


圖 7 套管式基座 II 拋石保護工方案一地形變化

### 4.3 重力式基座保護工

重力式保護工型式配合載體式基座進行規劃設計為導流板型式, 於基座四周的導流板向四周伸展並攤平, 每個導流板皆有鉤爪, 使導流板順利埋入海床。因此, 當四周導流板平穩沈放於海床上, 使基座形成三角椎體, 以減少沖刷及避免過度沖刷導致離岸風機傾斜, 如圖 8 所示。

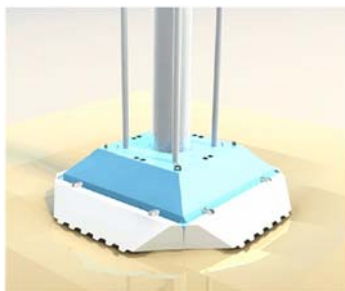


圖 8 重力式基座保護工型式示意圖

綜合海流( $V=1.5$  m/sec)及 2 組颱風波浪( $H= 6.6$  m,  $T= 10.8$  sec 與  $H= 9.1$  m,  $T= 12.7$  sec)作用於基座保護工之沖刷試驗結果, 純流試次中(GV150P 試次), 載體式基座展開保護工導流板後, 整體沖刷深度與

沖刷範圍都有明顯變小, 基座保護工導流板展開確實可減緩沖刷之深度與範圍, 而最大沖刷深度可降低約 22.3%; 當颱風波與流同時作用下, 二組颱風波試次(GH66V116P 及 GH91V116P)之最大沖刷深度分別可降低 49.9%與 43.7%(圖 9)。

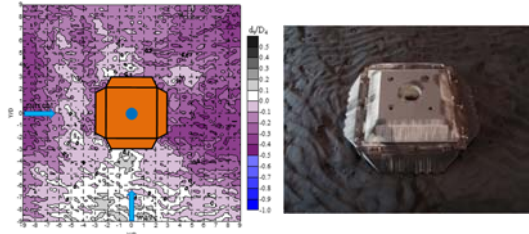


圖 9 重力式基座展開保護工附近地形變化 (GH91V116P 試次)

### 4.4 群樁式基座保護工

群樁式基座保護工佈置方式於群樁(由 28 根單樁組成, 單樁  $D_s=2.7$  m)周圍鋪設三層粒石, 第一層為土工織布包覆粒徑 4~10cm 之卵石排列, 範圍為  $99.4$  m  $\times$   $79.4$  m, 厚度為 1.5m; 第二層為粒徑 10~30cm 之礫石, 範圍為  $89$  m  $\times$   $69$  m, 厚度為 0.6m; 最上層為 300~500 kg 之塊石, 範圍為  $79$  m  $\times$   $59$  m, 厚度為 1.5m, 保護工佈置環繞群樁四方周圍, 如圖 10 所示。



圖 10 群樁式基座保護工型式示意圖

整體而言, 在波浪( $H= 2.0$  m,  $T= 11.9$  sec)與海流( $V=1.5$  m/sec)交互作用對群樁墩柱保護工後方所造成沖刷深度較深且範圍也較廣, 最大沖刷深度  $d_{s,max}$  為  $1.03D_s$  (2.77m), 主要發生於背波面保護工後方  $5.8D_s$  位置, 而沖刷深度大於  $0.8D_s$  (2.16m)時, 沖刷範圍主要集中於背波面保護工後方  $4.0\sim 6.0D_s$  之間(圖 11); 而流作用對保護工周圍沖刷範圍影響較小, 最大沖刷深度  $d_{s,max}$  為  $0.16D_s$  (0.43m)左右。而保護工於流與波流同作用後, 三層保護工仍然保持安定, 堤心石及塊石未有移動及滾落之情況發生,

且保護工周圍地形也無較大之沖刷發生，顯見保護工發揮相當之作用，可避免沖刷之情況發生。

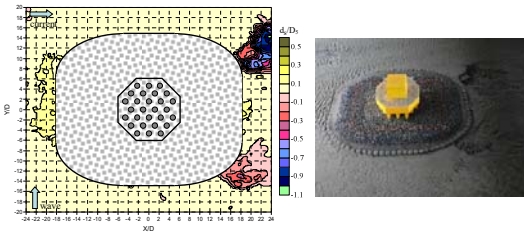


圖 11 群樁式基座保護工附近地形變化

#### 4.5 保護工安定性

經由一系列保護工試驗結果，保護工大致上都呈現安定之狀態，只有少數保護工邊緣有發生塊石滾落或移動之現象。基本上，拋石或混凝土方塊都有達到保護之效果，且保護工上層塊石越重(500kg以上)，保護工越安定，塊石滾落或移動之現象較輕微。

#### 4.6 經濟效益

由海洋結構物保護工試驗結果，我們將未保護工前與保護工後之最大沖刷深度進行比較，並計算其沖刷減緩率。由單樁保護工試驗結果，三組保護工範圍與厚度，均有 42%~46%左右的沖刷減緩率。代表三種保護工形式均能達到有效減緩單樁基座周遭之最大沖刷深度。然而當不同保護工範圍均具有差不多保護效果時，當鋪設範圍越大之保護工，則施工成本上較為昂貴。因此以單樁保護工試驗之結果，以範圍為  $2.5D_1$  的拋石保護工最具有經濟效益，相對也可達到保護沖刷之效果。

套管式保護工試驗結果，當不同的保護工範圍與高度而具有相似的防護效果時，當防護範圍較大時，建設成本相對昂貴。因此，經由保護工試驗之結果，在  $2D \sim 3D$  範圍內的拋石保護工型式最為經濟，而且可以達到結構物周圍沖刷防護的效果。相對地，也可節省大量材料與施工之成本。

### 五、結論

海洋結構物不同佈置之保護工試驗結果，可以有效防止結構物周圍的沖刷，儘管通常在可能產生局部沖刷的場所使用沖刷保護，但這項研究的分析表明，保護功能很可能會提供技術上可接受的解決方案。它還有效地減緩了侵蝕並保護了海洋結構的

穩定性。根據不同型式保護工之試驗結果，當不同型式的保護工也具有防護效果時，當保護工範圍較大時，施工成本相對昂貴；但  $2D \sim 3D$  範圍內的保護工範圍是最節省成本的，而且可以達到減緩沖刷及保護海洋結構物的效果。此外，它還可以減少所用材料的數量以及建造之成本。後續將分析更完整且具體的結果，並進行比較保護工技術可行性、風險和工程成本之保護工研究方案，以為將來的工程應用提供參考。

### 參考文獻

1. Sumer, B.M., Fredsøe, J. (2002) *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*, Volume 17, World Scientific, Singapore.
2. Sumer, B.M., Hatipoglu, F., Fredsøe, J. (2007) Wave scour around a pile in sand, medium dense and dense silt. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 133(1), 14-27.
3. De Vos, L., De Rouck, J., Troch, P., & Frigaard, P. (2012). Empirical design of scour protections around monopile foundations. Part 2: Dynamic approach. *Coastal Engineering*, 60, 286-298.
4. Melville, B.W. and Sutherland, A.J. (1988) Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 10.
5. Dey, S., Sumer, B. M. and Fredsøe, J. (2006) Control of Scour at Vertical Circular Piles under Waves and Current, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, 270-279.
6. Chiew, Y.M. (1992) Scour Protection at Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9).
7. Oumeraci H. (1984) Scale effects in coastal hydraulic models, Symposium on scale effects in modeling hydraulic structure, *International association for hydraulic research*.
8. 陳信宏(2020) *海洋結構物沖刷過程試驗與數值模擬之研究*，博士論文，國立成功大學水利及海洋工程學系。
9. 萬竣翔、陳信宏、楊瑞源(2019) 離岸風機單樁式與套管式基座保護工之試驗研究，*第41屆海洋工程研討會論文集*。

# 大水深海域離岸風場開發優先次序 空間分析

簡連貴<sup>1</sup> 卓可威<sup>2</sup> 廖嘉宏<sup>3</sup> 劉為朋<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國立臺灣海洋大學河海工程學系、海洋工程科技中心教授兼台灣風能協會理事長

<sup>2</sup>國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士

<sup>3</sup>國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士班研究生

## 摘要

再生能源為目前我國積極發展之重要國家政策，而離岸風電則為其中發展之重點，依據經濟部能源局之規劃目標，預計在 2026 至 2035 年的 10 年間，釋出累計達 15GW 的裝置容量，大規模風場開發，勢必會在海域空間利用方面與諸多既有海域使用類型產生競合，且現階段台灣西部水深 50 公尺內之風場多已釋出開發，因此離岸風場向大水深區域(水深>50 公尺)規劃已成趨勢，然目前國內對於海域管理相關制度尚未完善，故以海洋空間規劃(MSP)之理念，進行離岸風場之開發，為現階段國內重要課題。此外為了解離岸風場之具體可利用空間，本研究分別以風場潛勢需求及海域空間脆弱度分析進行探討。最後研擬離岸風場區位開發優先次序，以提供相關主管機關進行離岸風場空間規劃之參考。

關鍵詞：海洋空間規劃、空間競合分析、脆弱度分析、離岸風場、區塊開發、地理資訊系統

## Spatial Analysis of The Development Priority of Offshore Wind Farms in Deep Sea Areas

Lien-Kwei Chien<sup>1</sup> Ko-Wei Cho<sup>2</sup> Jia-Hong Liao<sup>3</sup> Wei-Peng Liu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professor, Harbor & River Engineering, and Center of Excellence for Ocean Engineering, National Taiwan Ocean University; Chairman, Taiwan Wind Energy Association

<sup>2</sup>Master, Harbor & River Engineering, National Taiwan Ocean University

<sup>3</sup>Master Student, Harbor & River Engineering, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

Renewable energy is a critical national energy policy in our country, especially offshore wind energy. According to the planning target of the Energy Bureau of the Ministry of Economic Affairs, estimated a total of 15 GigaWatts(GW) of installed capacity will release in 10 years from 2026 to 2035. Massive development of offshore wind farms is bound to coepetition with many existing sea users. Most of the shallow sea areas in the Taiwan Strait, released for developing offshore wind farms. Therefore, the planning of offshore wind farms to deep sea areas (water depths more than 50 meters) has become a trend. However, a perfect management system for the sea areas has not been established in our country, so the development of offshore wind farms based on marine spatial planning (MSP) is a major domestic issue at this stage. In addition, to understand the specific usable space of offshore wind farms, this study separately analyzes the potential demand of wind farms and the vulnerability of sea space. Lastly, this study draws up the development priorities to provide the relevant authorities with reference for marine spatial planning for offshore wind farms.

Keywords: Marine spatial planning; Spatial coepetition analysis; Ocean spatial vulnerability analysis; Offshore wind farms; Block development; Geographic Information System



## 一、前言

海域管理一直是各國海洋政策的關鍵施政要點，且多屬於長期推動工作，並以政策引領整體的發展方向。在當前各國間海洋經濟競爭白熱化的情況下，海洋空間規劃(Marine spatial planning, MSP)的推動更顯其重要，各國積極加速推動海洋空間規劃的相關作為，以確保在國際間海洋發展的競爭力與地位。然而我國目前之海域利用規劃，主要依據各單位部門間之職權進行管理，仍未有整合性之空間使用規劃。由於臺灣四面環海且陸域資源有限，因此海洋開發亦與國家海域使用之永續息息相關，對海洋相關政策與管理進行統合規劃、推動及協調亦顯重要。因此本研究期望以整體性海域使用情況分析臺灣海域之離岸風場開發利用，提供相關主管機關作為離岸風場於海洋空間國土規劃時之重要參考，期望達到永續發展之目標。

## 二、研究方法

本研究分析臺灣離岸風場之空間需求，再將分析結果與海域空間使用之脆弱度分析成果進行整體評估，以提供相關單位作為離岸風場開發之參考依據。針對臺灣海域既有使用資料和海域環境資料進行盤點，以風速和海域沉積物進行潛勢分級並依水深分類，呈現各水深範圍離岸風場潛勢分級之空間分布。有關脆弱度分析本研究期望臺灣海洋空間規劃能達到永續發展之目的，以永續發展之精神，考量社會永續、經濟永續與環境永續等三面向，並加入正向之回復面向(韌性因子)進行脆弱度因子之選定，推求海域空間使用之脆弱度分級地圖，並量化海域空間使用交互關係之負面影響程度。最後利用海域空間使用脆弱度分析成果進行整體性評估，研析離岸風場開發海洋空間使用之優先順序。

## 三、研究內容

### 3.1 離岸風場空間潛勢分析

本章節主要就離岸風場海域空間需求之分析過程與結果進行說明，本研究蒐集國內外針對離岸風場進行空間需求分析之考量因子，歸納並選定出水深、風速及海域沉積物作為本研究考量因子，以風速和海域沉積物進行潛勢分級並依水深分類，呈現各水深範圍離岸風場潛勢分級之空間分布。

### 3.1.1 各水深範圍潛勢因子分析

本研究以風速和海域沉積物，兩潛勢因子作為離岸風場潛勢分級之依據，並以水深區間劃分範圍，針對各水深區間範圍內之風速和海域沉積物進行資料分析，得出各水深範圍內上述兩潛勢因子之空間分布狀況及面積佔比，以了解各水深區間範圍之潛勢特質，如圖 1~圖 6。

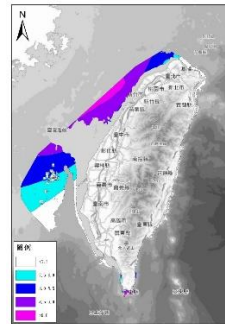


圖 1 水深 50m~100m 風速分布

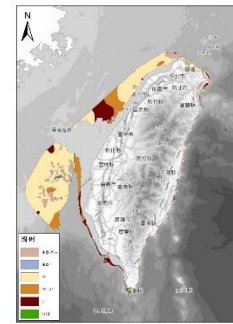


圖 2 水深 50m~100m 海域沉積物分布

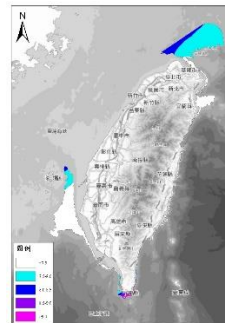


圖 3 水深 100m~150m 風速分布

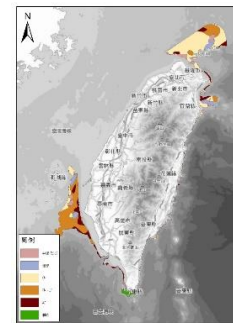


圖 4 水深 100m~150m 海域沉積物分布

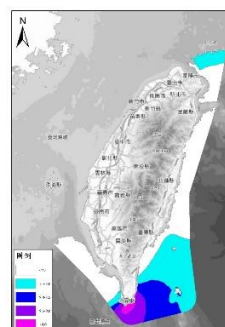


圖 5 水深 150m 以上風速分布

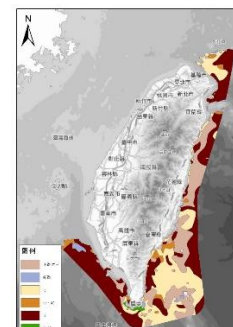


圖 6 水深 150m 以上海域沉積物分布

### 3.1.2 離岸風場潛勢分級

本研究參考國內外針對風速及沉積物進行分級之相關研究資料，將風速和沉積物潛勢因子由低潛勢至高潛勢依序分為 Level 1~Level 5，共 5 個區間等級，詳如表 1。以矩陣圖分析的方式將海域風速和海域沉積物之潛勢等級相結合，兩潛勢因子以等權重方式進行乘積計算，並將得出之乘積值以幾何分類法(Geometrical interval)進行分級，總計分為 5 個潛勢等級，低潛勢至高潛勢依序為 Level 1~Level 5，矩陣圖及潛勢分級之乘積值分布區間詳如表 2 及表 3 所示。最後依據矩陣圖分析之潛勢分級結果以 GIS 圖資進行圖資套疊及乘積計算，得出潛勢分級之空間分布狀況，並探討各水深區間潛勢分級之特性。

表 1 海域風速和海域沉積物之潛勢因子分級

潛勢等級	風速(m/s)	沉積物種類
Level 1	<7.5	中礫-岩石
Level 2	7.5-8.0	細礫
Level 3	8.0-8.5	砂
Level 4	8.5-9.0	砂、泥
Level 5	>9.0	泥

表 2 各潛勢等級之乘積值分布區間(幾何分類法)

潛勢等級	乘積值
Level 1	1-3
Level 2	4-5
Level 3	6-8
Level 4	9-14
Level 5	15-25

表 3 潛勢分級矩陣分析圖

		風速潛勢分級				
		等級	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
沉積物潛勢分級	Level 1	1	2	3	4	5
	Level 2	2	4	6	8	10
	Level 3	3	6	9	12	15
	Level 4	4	8	12	16	20
	Level 5	5	10	15	20	25

### 3.2 海域空間脆弱度分析

依據政府間氣候變化專門委員會(IPCC, 2007) 全球氣候變遷第四次評估報告中，將本研究脆弱度定義為「系統易受或無法處理氣候變遷(包括氣候易變性與氣候極端事件)負面效應影響的程度」。本研究海域空間使用脆弱度分析是為就目前國內海域使用現況，量化海域空間使用交互關係之負面影響程度，做為海域使用相容性、調適等輔助參考。並作

為離岸風場海域空間使用規劃之輔助參考。由於目前最高精度之海域網格地形圖以 200 公尺網格為尺度，因此本研究海域空間使用脆弱度分析之研究尺度以 200 公尺\*200 公尺網格為研究單元。

#### 3.2.1 脆弱度因子選定

考量目前國內外針對海域使用行為與情境等相關脆弱度評估之案例較少，因此本研究以國內外相關文獻針對海域脆弱度評估之相關因子予以蒐集，再歸納出適用於臺灣海域脆弱度分析之相關因子，作為本研究評估並量化海域空間使用脆弱度之指標，如既有海域使用現況、海洋經濟規模、環境敏感區、海域地質、海域水深、海巡署海巡隊駐港距離及內政部空勤總隊駐地距離。由於近年國內外相關單位逐重視防救災反應能力，因此在施做脆弱度評估時，多納入韌性(Resilience)進行綜合討論，量化防護標的實際耐災能力，考量海上急難救援之性質與陸地較為不同，救援之方式多以搜救艇或直升機進行，因此本研究將海巡隊駐港距離及搜救直升機駐地距離作為因子並納入韌性指標，以貼近目前海域空間使用脆弱度情況。

#### 3.3 熵值權重法(Entropy Method)

脆弱度因子評定計算上，一般視該研究範圍之環境特性、研究發展程度等，利用有或無權重之計算方式，因地制宜選定可執行且較能表現該地實際脆弱度現況之方法。參考黃琦紋(2018)針對臺灣近岸海域脆弱度評估成果，顯示就台灣近岸海域脆弱度評估而言，相較因子間無權重之結果，具有權重關係之評定方法更能貼近臺灣海域之現況。本研究參考黃琦紋(2018)使用熵值權重法(Entropy Method)，其屬於客觀賦權法，相較於主觀賦權法較具有可信度。然熵值權重法無法考量各指標間之關聯性，但因本研究所選定之脆弱度指標關聯性較小，因此該缺點所造成之影響較小。

熵值權重法賦予各指標權重之過程如下：

##### (1) 數據正規化(Normalization)

將各指標數據進行正規化處理，其正規化公式如下：

I. 若該指標屬於正向指標，其標準化公式

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (式 3.1)$$

其中， $x_{ij}$  為第 i 個網格中 j 指標之數值； $\min x_j$  為 j 指標之最小值； $\max x_j$  為 j 指標之最大值。

II. 若該指標屬於負向指標，其標準化公式

$$x'_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \quad (\text{式 3.2})$$

(2) 求各指標信息熵

各指標進行正規化後，再求出各指標之信息熵。信息熵之計算方式如下：

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (\text{式 3.3})$$

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \quad (\text{式 3.4})$$

若  $p_{ij} = 0$ ，則  $p_{ij} \ln(p_{ij}) = 0$

其中， $n$  為研究單元個數。

(3) 確定各指標權重

求出各指標之信息熵後，再依據信息熵計算出各指標之權重，計算公式如下：

$$W_i = \frac{1-E_i}{k-\sum E_i} \quad (i=1,2,\dots,k) \quad (\text{式 3.5})$$

其中， $k$  為指標個數。

### 3.4 海域空間脆弱度分析

本研究主要探討目前海域既有使用現況所造成之脆弱程度，並量化海域空間使用交互關係之負面影響程度。以社會、經濟、環境及韌性面向進行脆弱度指標選定，考量臺灣海域既有使用現況與海域環境的資料完整性與操作可行性，本研究選定適合之臺灣海域脆弱度指標因子為海洋經濟規模、環境敏感區、海域沉積物、海域水深、海巡署海巡隊駐港距離及內政部空勤總隊駐地距離。

再將各脆弱度因子量化數值進行正規化(式 3.1 及式 3.2)，之後以各因子之正規化數值代入公式 3.3 得到各因子信息熵值，最後將各因子信息熵數值，以公式 3.4 去計算賦予各因子之權重。本研究因採用指標之單位不盡相同，因此進行各脆弱度因子結合時，是以各因子正規化值與對應之權重進行乘積並相加得出脆弱度分數量值，最後再利用自然分類法 Natural Breaks(Jenks)進行分級以得到各研究單元之脆弱度等級。各相關脆弱度因子、因子正規化結果與所賦予之權重分別說明如下：

1. 既有海域使用現況(社會面向)

本研究為探討海域於目前使用現況下所造成之脆弱程度，而所提及之使用現況資料來源，以海委會「海域分區劃設及分級使用管理研究」所彙整各用海相關單位所提供之資料作為依據。

2. 海洋經濟規模(經濟面向)

本研究將海域使用的經濟規模作為經濟面向之脆弱度指標因子，若海洋經濟規模越大，當受

到災害侵襲時，所受到的損失及負面影響則越大。本研究海洋經濟規模的量化方式是以海域有無設施、重疊使用數與使用規模(面積)三個因子進行等權種結合，各因子之量化方式詳表 4 所示。

表 4 海洋經濟規模各因子數值量化

因子	分級方式	量化數值(相對分數)
有無設施	無設施	0
	有設施	1
重疊使用數	0 種使用	0
	1 種使用	1
	2 種使用	2
	3 種使用	3
	4 種使用	4
	5 種使用	5
使用規模(面積)	既有海域使用類別之面積以自然分類法分為 0~5。	0
	0 為尚未使用海域。	1
		2
		3
		4
		5

3. 環境敏感區(環境面向)

環境敏感區是指對人類具有特殊價值或據有潛在天然災害，極容易受到人為的不當開發活動之影響而產生環境負面效應的區域。環境敏感區分為一級和二級環境敏感區，若某海域區存有一級和二級環境敏感區，則脆弱度最高，反之若海域無環境敏感區則脆弱度較低。因環境敏感區並非數值資料，因此進行脆弱度分析前須先進行量化，考量可操作性，本研究以該網格海域有無環境敏感區，並用給定相對分數之方式進行分級量化，詳如表 5 所示。

表 5 海域環境敏感區數值量化

分級	量化數值(相對分數)
一級和二級環境敏感區	3
一級環境敏感區	2
二級環境敏感區	1
無	0

4. 海域沉積物(環境面向)

當海域進行工程建設時，海域地質條件是重要的考量因素，地質之淘刷與沉陷皆會使工程建設有著負面影響。海床土壤參數之不確定性亦會使建設成本增多。本研究採用中央地質調查所-五十萬分之一臺灣海域沉積物分佈圖進行該指標之分析評估，若該網格大多為相對緊密堅硬之區域和重要海洋保護標的之珊瑚礁，脆弱度較高；疏鬆及軟弱區

域，脆弱度則較低。因海域沉積物並非數值資料，因此本研究進行脆弱度分析前亦須先根據海域沉積物之脆弱程度給定相對分數進行量化，如表 6 所示。

表 6 海域沉積物數值量化

沉積物種類	粒徑(mm)	量化數值(相對分數)
中礫-岩石	>6	1
細礫	2~64	2
砂	1/16~2	3
砂、泥	-	4
泥	<1/16	5
珊瑚	-	6

#### 5. 海域水深(環境面向)

水深於開發時亦為重要關鍵因子之一，本研究海域水深資料以海軍大氣海洋局所提供之水深點位資料，藉由空間內插(Kriging)之方式得出台灣海域水深之空間分布情形。對於本研究而言，若網格之水深越深，代表受到地形淺化、波浪碎波等影響越小即脆弱程度越小；若水深越小，則脆弱度越高。

#### 6. 海巡署海巡隊駐港距離(韌性面向)

本研究選定具正向意涵之脆弱度指標，即代表韌性面向之因子。考量海上事務或救難多用船舶進行，因此本研究以海巡署海巡隊駐港距離作為脆弱度韌性面向因子之一，數據量化方法則利用 ArcGIS 工具 Analysis 中之 Buffer，以臺灣本島平均高潮線為起點，並以每 2 公里進行劃設，其劃設成果作為該脆弱度因子之量化數值。若海域網格位置離港越遠，代表其受到救災的困難度越高，即脆弱度越高；反之若網格位置離港越近，代表困難度越低，則脆弱度越低。

#### 7. 內政部空勤總隊駐地距離(韌性面向)

海域的搜索和救難除船舶外，直升機亦是重要之交通工具，且針對海上人員的緊急救難也多以直升機吊掛之方式進行，因此本研究亦將內政部空勤總隊駐地距離作為脆弱度韌性面向因子之一，數據量化方法同海巡署海巡隊駐港距離之量化方式，以每 2 公里進行劃設，其劃設成果作為該脆弱度因子之量化數值。若海域網格位置離駐地越遠，代表其受到救災的困難度越高，即脆弱度越高；反之若網格位置離駐地越近，代表困難度越低，則脆弱度越低。

藉由將各脆弱度因子量化數值進行正規化並代入公式計算，得出各因子信息熵及權重，本研究脆弱度因子之信息熵與權重彙整如表 7 所示。考量各

脆弱度因子之單位不儘相同，因此各研究單元(網格)之脆弱度= $\Sigma$ (各因子正規化值\*權重)，並以自然分類法 Natural Breaks(Jenks)進行分級並分為 5 個等級，得出本研究海域空間使用脆弱度等級。本研究以區域計畫法所訂定之非都市土地使用管制規則當中；明訂之各縣市海域區範圍為依據，統計各脆弱度等級於各縣市海域當中之面積佔比，以釐清各縣市海域空間使用脆弱度之差異情形，相關脆弱度等級於各縣市海域區之空間分佈狀況如圖 7 所示。

表 7 本研究脆弱度因子之信息熵與權重

脆弱度因子	Ei	Wi
海域沉積物	0.98505	0.06272
環境敏感區	0.83515	0.69173
海域水深	0.99688	0.01310
海洋經濟規模	0.96297	0.15538
空勤總隊駐地距離	0.99190	0.03401
海巡隊駐港距離	0.98974	0.04306



圖 7 海域空間使用脆弱度等級空間分布地圖



圖 8 離岸風場各水深範圍之區位開發優先次序空間分布

### 3.5 離岸風場區位開發優先次序

本研究將空間競合分析成果與海域空間脆弱度分析成果之資料相結合，將海域空間脆弱度之分級成果納入離岸風場空間規劃之考量因素。以分析所得之離岸風場適宜規劃區域為範圍，以水深較淺之區域為優先開發次序，如表 8 所示。各水深範圍內之區位開發次序則根據離岸風場潛勢分級結果，以潛勢較高之等級為優先開發次序；潛勢等級 Level 5~Level 3 分別對應開發次序 1~3，再將脆弱度分級結果納入開發次序之考量，由脆弱度較低之等級為優先開發次序，以 Level 5 及 Level 4 為次序 3、Level 3 為次序 2、Level 2 及 Level 1 則為次序 1，再將潛勢分級與脆弱度分級所得之開發次序，以矩陣圖分析方式相互結合，最後將矩陣分析出之各乘積值

以自然分類法分為 3 個等級，分別為高優先次序、中優先次序及低優先次序，以高優先次序區域優先開發，藉此初步歸納出離岸風場之區位開發優先次序，矩陣分析相關結果詳如表 9 所示。最後依據開發次序分級結果，將相關空間資料進行套疊，藉此呈現各水深區間範圍內；區位開發優先次序之空間分布狀況如圖 8 所示。

表 8 離岸風場各水深區間範圍之開發次序

範圍	開發次序
水深 50m 以內	1
水深 50m-100m	2
水深 100m-150m	3
水深 150m 以上	4

表 9 各水深區間範圍內潛勢等級結合脆弱度等級之開發次序矩陣圖

		潛勢分級			
		等級	Level 1	Level 2	Level 3
脆弱度分級	等級	開發次序	3	2	1
	Level 1	1	3	2	1
	Level 2				
	Level 3	2	6	4	2
	Level 4				
Level 5	3	9	6	3	

#### 四、結果與討論

1. 本研究蒐集國內外進行離岸風場空間潛勢分析之考量因子，主要為水深、風速與海域沉積物，最後採用矩陣圖分析結合幾何分類法進行分級，推估離岸風場之潛勢分級，可作為離岸風場空間規劃之參考依據。

2. 本研究之海域空間使用脆弱度分析主要探討目前海域既有使用現況所造成之脆弱程度，並量化海域空間使用交互關係之負面影響程度，選定之脆弱度指標因子包括海洋經濟規模、環境敏感區、海域沉積物、海域水深、海巡署海巡隊駐港距離及內政部空勤總隊駐地距離等。並以脆弱度分級成果，作為離岸風場開發次序之參考依據。

3. 本研究各項分析成果進行綜整，同時考量風場空間規劃各面向所注重之處，如海域環境、海域既有使用現況、海域空間脆弱度、風場潛勢等，可作為第三階段區塊開發風場場址規劃之應用。

#### 謝誌

本文係海洋委員會委託研究報告「海域分區劃設及分級使用管理研究(1/2)」(編號：OAC-109-011)與船舶暨海洋產業研發中心委託研究報告「臺灣浮式風場開發環境議題及未來發展短中長期建議」(編號：SOIC-1012-T011(109U))之相關研究成果，承蒙海洋委員會與船舶暨海洋產業研發中心經費補助使本研究得以順利，謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. UNDR0(1979). Natural Disaster and Vulnerability Analysis: Report of Expert Group Meeting. Geneva, UNDR0 books.
2. IPCC(2014), "IPCC Fifth Assessment Report (AR5)— Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability", New York, IPCC books.
3. Directive of establishing a framework for maritime spatial planning(MSP) :[https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/maritime\\_spatial\\_planning\\_en](https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/maritime_spatial_planning_en)
4. The White House Council on Environmental Quality. Interim Framework for Effective Coastal and Marine Spatial Planning. Interagency Ocean Policy Task Force., 2009, <http://oceanpolicy.com/wp-content/uploads/2011/02/091209-Interim-CMSP-Framework-Task-Force.pdf>
5. UK' s Coastal handbook, 2010, : <http://www.scopac.org.uk>
6. UNESCO & Intergovernmental Oceanographic Commission(IOC), Marine Spatial Planning, A Step-by-Step Approach, Manual and Guides No. 53, ICAM Dossier No. 6.
7. 陳文亮、陳姿樺(2008)，「應用熵值權重法與 T OPSIS 法於布料摺飾設計評估決策模式之研究」，設計學研究，第 11 卷，第 1 期。
8. 陳禹銘、蘇昭郎、黃詩倩(2009)，「災害風險評估研究之探討」，災害防救電子報，第 48 期。
9. 張書瑋(2011)，「氣候變遷下台灣海岸地區脆弱度分析」，國立臺灣海洋大學，碩士論文。
10. 內政部(2000)，「區域計畫法」。
11. 黃琦紋(2018)，「近岸海域危害脆弱風險評估於國土利用與規劃之應用」，國立臺灣海洋大學，碩士論文。

# Lidar Observation of the Wind Speed Profiles for the Northeast Monsoon

Yuan-Shiang Tsai<sup>1</sup> Chih-Min Hsieh<sup>2</sup> Wen-Chang Yang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Master's Program in Offshore Wind Energy Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

<sup>2</sup> Department of Maritime Information and Technology, National Kaohsiung University of Science and Technology  
Marine Science and Information Research Centre, Nation Academy of Marine Research<sup>3</sup>

## ABSTRACT

The wind speed profiles developed in the northeast monsoon are studied using a profiling Lidar together with an ultrasonic anemometer to measure the atmospheric stratification at the shoreline of Hanbour, Changhua County, Taiwan. Three types of the wind profiles are characterized. They are the conventional boundary layer in agreement with the power law and log law caused by strong cold fronts with high wind speeds, the jet-like profile observed for the cold fronts with intermediate wind speed, and the sea/land breeze dominated profile showing the decrease of the wind speed with respect to the height. The empirical mode decomposition is capable of separating the diurnal cycle inherently in the time series of the wind speed. This reveals that the wind speed pattern and the profiles are caused by the mixture of the monsoon and the sea/land breeze with different scales.

Keywords: Wind speed profile; northeast monsoon; Lidar observation; diurnal cycle

## 光達風剖儀東北季風風速剖面觀測

蔡原祥<sup>1\*</sup> 謝志敏<sup>2</sup> 楊文昌<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> 國立高雄科技大學海事學院海事離岸風電工程碩士學程助理教授

<sup>2</sup> 國立高雄科技大學海事學資訊系教授

<sup>3</sup> 國家海洋研究院海洋科學與資訊中心研究員兼主任

## 摘要

科技部計畫：MOST 110-2221-E-992-022-

本研究使用光達風剖儀於彰化漢寶潮澗帶，觀測東北季風風速剖面特性，並同時使用超音波風速計量測大氣穩定參數。光達量測顯示出三種風速剖面型態。在強勁冷鋒面較大風速下，風速剖面為傳統邊界層，符合指數與對數模式，當冷鋒面並不強勁時則發生類噴流剖面，以及冷鋒面過後由海陸風主導的風速剖面，其風速隨著高度而減小。使用經驗模式分解法分離日週期海陸風，代表風速的變化以及風速剖面的型態，與季風和海陸風不同程度的混合相關。

關鍵詞：風速剖面、東北季風、光達觀測、日週期

## 1. Introduction

Offshore wind farms have been rapidly developed in recent years in Taiwan because the potential wind energy is great in the Taiwan Strait where the annual wind is predominated by the two kinds of trade winds, that is, the northeast monsoons in winter and southwest monsoons in

summer. The wind sources provided by cold monsoons occupies 90 % of the total wind energy, lasting from September to the following April, in which high wind speeds are usually observed. In the design of wind turbines, it is needed to examine the atmospheric boundary layer (ABL) formed in the northeast monsoon with the height up to the top of the turbine blade to account the wind shear

loadings. For the contemporary wind turbine, this altitude is approximately 200 m, which is beyond the surface layer with be a height of approximately 100 m (Panofsky and Dutton 1984).

To describe the wind speed profile, the empirical power law and logarithmic law have been well documented to agree with the field observations in the surface layer (Davenport 1965, Panofsky and Dutton 1984). Considering the atmospheric stratification, Monin and Obukhov (1954) suggested that the effect of heat flux was represented using a length scale, that is, the Monin-Obukhov length, which determined the stability function employed to correct the logarithmic profile in neutral stratification. Regarding the diminishing of the surface shear along with the height, Gryning et al. (2007) described the entire ABL assuming the linear decrease of the friction velocity with height, resulting in the profile with the velocity larger than the logarithmic model.

In addition to the conventional boundary layer described by the logarithmic law, the low-level jet (LLJ) was rather common in the coastal region with the nose height between 200 and 300 m. Larsen and Fischereit 2021 explained that unusual LLJs increased the shear beneath the jet nose, which influenced performance of wind turbines and furthermore contributed the uncertainties to evaluate the turbulence intensity.

The objective of the present study is to characterize the wind profile developed under the northeast monsoon. A profiling Lidar was employed to measure the wind speed at the 12 levels with the height reaching 260 m as well as an ultrasonic anemometer facilitated to directly observe the fluctuations of the atmospheric flow and temperature fluctuations. It is noted that the observation frequently shows the presence of the jet-like profile in addition to the conventional boundary layer. The method of empirical mode decomposition is used to separate the components inside the wind speed variation. This is helpful to explain the formation of jet-like profile. The results are useful to understand the wind profile generated by the northeast monsoon as well as provide detailed information of the boundary layer to the wind energy community.

## 2. Wind profile models

In wind energy community, the empirical power law has been effectively used to describe the wind profile with the formulation expressed as follows

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (1)$$

where  $z$  denotes the height,  $U(z_r)$  denotes the reference wind speed at a reference height  $z_r$ , and  $\alpha$  denotes the power exponent. The power exponent is the parameter to

determine the profile shape. Theoretically,  $\alpha$  is dependent on the upwind terrain roughness in the neutral stratification.

With the variation of the solar heating in day and cooling at night, thermal buoyancy influences the formation of ABL near the surface. Monin and Obukhov (1954) established the well-known similarity theory, in which the Monin-Obukhov length was introduced to represent the buoyancy effects in the turbulent flow:

$$L = -\frac{u_{*o}^3 \theta_v}{kgw'\theta_v'} \quad (2)$$

where  $u_{*o}$  denotes the friction velocity in the surface layer,  $\theta_v$  denotes virtual temperature,  $k$  denotes Karman constant, and  $g$  denotes the gravitational acceleration,  $w$  indicates the vertical velocity, and  $\overline{w'\theta_v'}$  denotes the heat flux.  $L$  represents the ratio of momentum to heat flux, which gives the degree of atmospheric stability or instability caused by the thermal heating with  $L < 0$  indicating the unstable stratification and  $L > 0$  indicating the stable stratification. The surface friction velocity is calculated with

$$u_{*o} = \left(\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2}\right)^{1/4} \quad (3)$$

Hence, the wind speed profile, namely, the stability corrected profile given by Monin-Obukhov similarity theory (MOST) is shown as follows:

$$U(z) = \frac{u_{*o}}{k} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad (4)$$

where  $z_o$  represents the surface roughness length,  $\psi_m$  represents the stability function and  $z/L$  represents the dimensionless stability parameter. Dyer (1974) suggested the stability function with the following formulation:

$$\psi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} -5\frac{z}{L} & \frac{z}{L} > 0 \\ 0 & \frac{z}{L} \rightarrow 0 \\ 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2\tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2}\frac{z}{L} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

where  $x = (1 - 16z/L)^{1/4}$ . In the neutral stratification usually in the presence of a high speed more than 10 m/s, the convective turbulence is suppressed and the boundary layer is simplified to the well-known logarithmic profile:

$$U(z) = \frac{u_{*o}}{k} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \right] \quad (6)$$

Equation (4) and (6) are applied for the height in the surface layer usually less than 100 m. In use of finite mixing length theory, Gryning et al. (2007) extended the profile to the upper atmospheric boundary layer implemented the inverse summation for three components of the mixing length in the surface, middle, and upper layers, resulting in the wind speed deviating from the logarithmic profile, for the atmospheric stable stability,

$$U(z) = \frac{u_{*o}}{k} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) + b \frac{z}{L} \left(1 - \frac{z}{2z_h}\right) + \frac{z}{l_M} - \frac{z}{z_h} \left(\frac{z}{2l_M}\right) \right] \quad (7)$$

and for atmospheric unstable stability

$$U(z) = \frac{u_{*o}}{k} \left[ \begin{array}{l} \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right) \\ + \frac{z}{z_h} \left(1 + \frac{(1 - 12z/L)^{2/3} - 1}{8z/h}\right) \\ + \frac{z}{l_M} - \frac{z}{z_h} \left(\frac{z}{2l_M}\right) \end{array} \right] \quad (8)$$

where  $z_h = u_{*o}/Cf_c$  is the Rossby-Montgomery relation used to evaluate the depth of the ABL, with the constant  $C = 6$  where  $f_c$  denotes the Coriolis parameter, and  $l_M$  represents the length scale in the middle layer, which was empirically determined by Gryning et al. (2007) as follows:

$$l_M = \frac{u_{*o}/f_c}{-2\ln(u_{*o}/f_c z_o) + 55} \quad (9)$$

### 3. Observation site and instrumentations

The in-situ observation was conducted at the shoreline of the Hanbour intertidal zone in Changhua County, Taiwan, where large wind farms are constructed offshore. Figure 1 shows the local geography of the site. The wetlands is in the east which submerges during the high tide. The west of the shoreline are fish farms and farms on land. A small village is approximately 1 kilometer away with low-rise buildings. The place is generally a flat and open terrain. Hence, it is not necessary to consider the displacement for the formation of the wind profile. Because the shoreline approximately extends along with the northeast-southwest direction, the northeast monsoon moves parallel to the coastline.

The observation was carried out from 12 December 2016 to the following year of 11 January 2017. The wind speed profiles were measured using a profiling Lidar, WINDCUBE v2, for 12 levels with the heights of 43, 53, 63, 83, 103, 123, 143, 163, 183, 203, 233, and 262 m above the mean sea level. The measurement principle and functions of the Lidar were explained by Tsai et al. (2017) and Tsai et al. (2019).

A small meteorological tower, installed on the breakwater at the edge of the intertidal zone as shown in figure 2(b), was used to setup the meteorological sensors which are the ultrasonic and propeller anemometers, thermometer, barometer, and hygrometer. The ultrasonic anemometer, Campbell CSAT3, measured the air flow fluctuations in three dimensions as well as the temperature fluctuations with the sampling rate of 10 Hz at the height of 3 m, which provides the direct observation of the momentum and heat flux to calculate the friction velocity

and Monin-Obukhov length and hence the stability function. Also, the measurement of humidity using hygrometer with the sampling rate of 1 Hz is employed to correct the humidity effect on the virtual temperature in equ. (2).

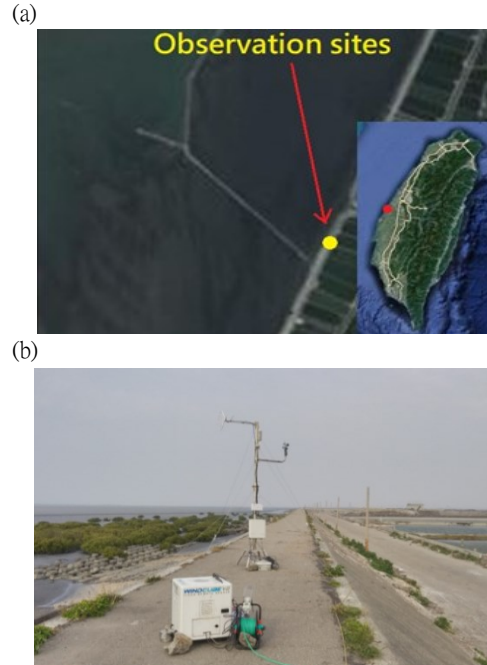


Figure 1 (a) Observation site of Hanbour intertidal zone, and (b) instruments of the profiling Lidar and meteorological station installed on the breakwater

### 4. Results and discussions

The Lidar observation of the 10-minute mean wind speed and direction at the height of 43 m and temperature measured using thermometer on the small tower are shown in figure 2. In this period predominated by the northeast monsoon dominated, the wind speed patterns demonstrate the mixture of the synoptic scale and mesoscale of diurnal cycle. The large scale is brought by the cold fronts moving southwards passing the island, lasting 2 to 3 days and contributing high wind speeds. For example, the wind speed peaks are observed at 15, 22, and 27 December and 9 January, among which the maximum wind speed is approximately 18 m/s observed at 27 December. In addition to the large scale oscillations, there are local wind peaks diurnally appeared at 14:00-16:00 associated with the daily maximum temperature. This is caused by the discrepancy of the solar heating between day and night, which produces the mesoscale sea/land breeze.

With the passage of the fronts, the wind speeds decrease significantly. The diurnal cycle becomes dominance with relatively low wind speed, for example, as



observed during the periods of 17 to 22 December and 31 December to 2 January. In contrast, with the fronts traveling nearby, the low temperature suppresses the thermal heating, resulting in the weak of sea/land breeze and mixed with the predominantly synoptic wind.

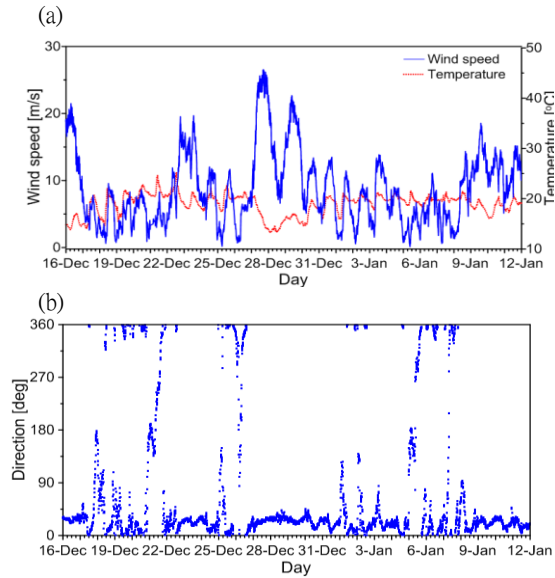


Figure 2 Time series of the 10-minute mean wind speed and direction observed using Lidar at the height of 43 m and temperature observed by the tower, (a) wind speed and temperature, (b) wind direction

The wind direction varied with time are displayed in figure 2(b). With the circumstance under the cold fronts, the wind directions are mainly north-north-east and northeast wind. However, influenced by the sea/land breeze, even under the strong northeast monsoon, the wind direction demonstrates considerable diurnal cycle as given, for example, during 22 to 24 and 29 to 31 December and 8 to 12 January with the direction discrepancies of 20°-30° between the day and night. As shown in figure 2(a), with the passage of the cold fronts and in low wind speed during the periods of 21 and 27 December and 5 and 7 January, the wind direction turn rapidly with 360° in a few hours. This phenomenon appears to relate to the movement of the high pressure eastwards from the northern Asia continent to the Pacific Ocean.

The Lidar observation of the hourly mean wind speed profiles are shown in figure 3 to figure 5. The figures are selected for the days with the wind conditions in the high, intermediate, and low wind speeds, respectively. The profiles are fitted using the power law with equ. (1), logarithmic profile with equ. (6), stability corrected profile with equ. (4), and the Gryning profile with equ. (7) and (8) for stable and unstable stratifications, respectively.

Figure 3 plots the wind profiles at 27 December 2016

for which the wind speed increases from 10 m/s to the maximum of 28 m/s and subsequently decreased to 12 m/s as shown in figure 2. In this high wind speed with the suppression of the convective turbulence, the atmospheric stratification tends to be neutral, forming the conventional logarithmic profile near the surface. The power law demonstrated very good agreement with the observation profiles with the power exponent varying between 0.06 and 0.11, which represents the surface roughness length in analogy to the sea surface (Hsu et al. 1994). To examine the stability effect, from 0:00 to 4:00 in the stable condition, the logarithmic law produces a better agreement than the prediction of the MOST corrected with the stability. For the following hours, it is noted that with the Monin-Obukhov length  $|L| > 500$  indicating the neutral or near-neutral stability, substantial discrepancies between the neutral logarithmic profiles and the stability corrected profiles and the stability corrected profiles show better agreement with the observations. The Gryning profile shows also agreement with the Lidar observed profile.

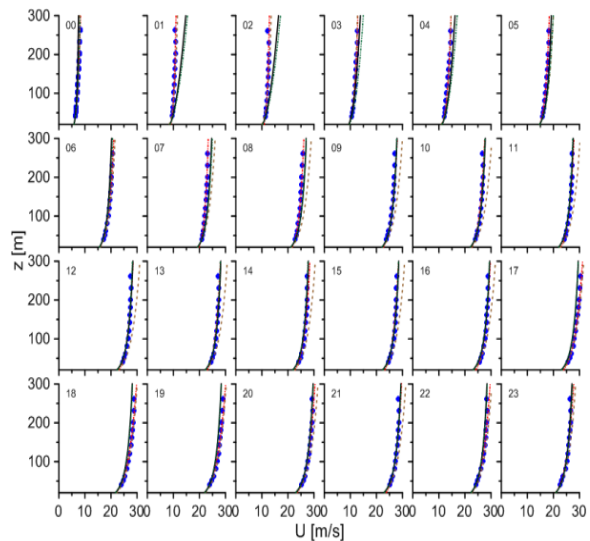


Figure 3 Lidar observation of the hourly mean wind speed profiles with the strong wind speed in 27 December 2016. The number in upper left of each figure represents the time in hour. ●, Observation, - - - , power law, - - - , log profile, —, MOST, ·····, Gryning profile.

Figure 4 shows the wind profiles with the wind speed in the intermediate range, decreasing from 12 m/s to 8 m/s in 23, December 2016. From 0:00 to 5:00, the wind speed keeps approximately equivalent and the observed and theoretical profiles agree well. With the process of the wind speed decrease from 6:00 to 23:00, the profiles show that the wind speed deviates the theoretical predictions in the upper layer, particularly demonstrating the significant

decrease of the wind speed above 160 m between 14:00 and 16:00, forming a jet-like profile. In the study of Larsen and Fischereit (2021), the WRF simulation and SAR observation in the North Sea show that the presence of LLJs are rather common. The nose height can be as low as 200 m, which is comparable with the present results, however, with a significant velocity gradient in the region close to the reverse height.

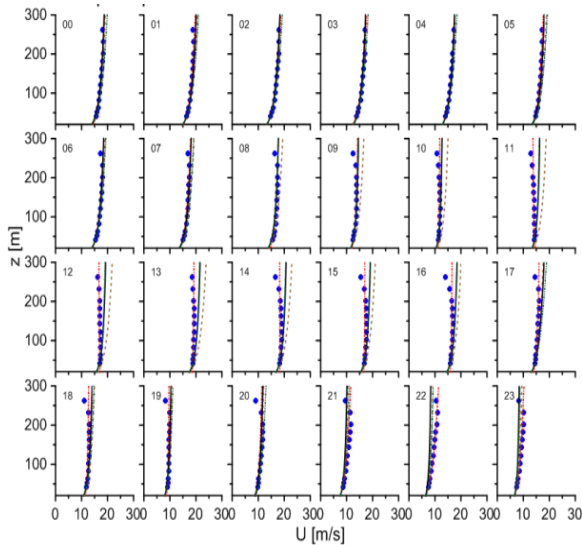


Figure 4 Lidar observation of the hourly mean wind speed profiles with intermediate wind speed in 23 December 2016. The symbol and lines are explained in figure 3.

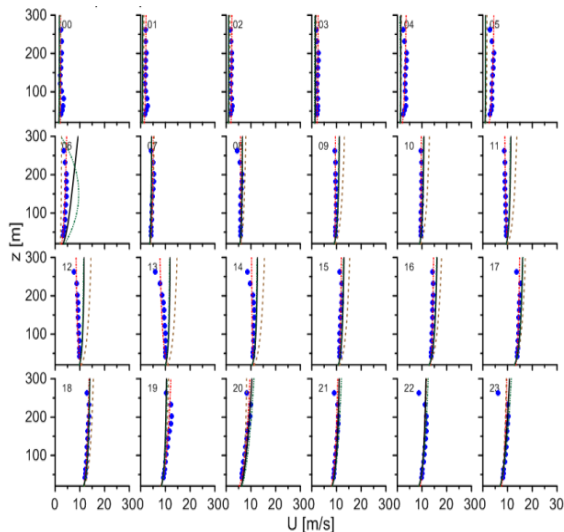


Figure 5 Lidar observation of the hourly mean wind speed profiles with intermediate wind speed in 8 January 2017. The symbol and lines are explained in figure 3.

The low wind speed profiles are exhibited in figure 5 with the increase and following decrease of the wind speed

in 8 January 2017. In the period from 0:00 to 7:00, the land breeze is dominated with the easterly wind, resulting in uniform distributions of the wind speed with the height. The occurrence of a new cold front increases the wind speed and gradually dominates the wind variations. However, this situation makes the wind profiles with the speed decreasing with respect to the height, particularly observed between 12:00 and 14:00. The power law fitting consistency with the observation, however, having negative values. Between 15:00 and 23:00, the profiles develop to the jet-like shapes in analogy to the profiles given figure 4 in the afternoon.

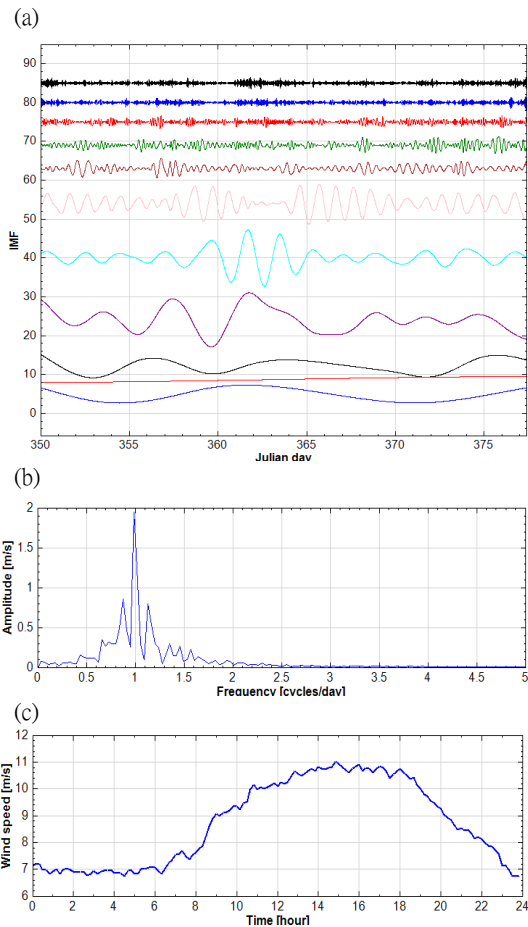


Figure 6 Inherent diurnal cycle in the wind speed (a) 10 IMF1s of the wind speed, denoted with the IMF1 on the top, (b) the spectrum of the IMF6 showing the peak at 1 cycle/day, (c) ensemble average for the period of one day.

Larsen and Fischereit (2021) illustrated that LLJs over the southern North Sea are subjected to relatively warm offshore wind passing over a cooler sea surface. This develops a stable internal boundary layer, giving rise to quasi-frictional decoupling and an acceleration of the airflow. The phenomena are usually observed in coastal

regions. The mechanism introduced above is incapable of explaining the formation of present jet-like profiles which occurred in the daytime with the presence of the sea breeze as well. It is anticipated that the jet-like profiles are formed due to the mixture of the monsoon wind and sea/land breeze because the breeze is associated with the temperature difference between the sea and land, forming a layer of airflow close to the surface, which increase the wind speed in the lower part of the profile.

To characterize that time series of the wind speed in figure 2 intrinsically contains the diurnal cycle caused by the sea/land breeze, the empirical mode decomposition (EMD) developed by Huwang et al. (1998) was employed to obtain the intrinsic mode functions (IMFs). Figure 6(a) demonstrates the 10 IMFs of the time history of the monsoon wind speed, showing that the decomposed component oscillates with modulation, in which the mean period decreases from IMF1 to IMF10. The IMF6 was transformed to the amplitude spectrum using Fourier transform as shown in figure 6(b). The spectrum exhibits the peak amplitude at the frequency of 1 cycle per day. The further investigation uses the equiphase averaging for 1 day as given in figure 6(c), showing the periodical variation with the maximum wind speed between 14:00 and 16:00. The results indicate the considerable influence of the sea/land breeze on the wind speed pattern as well as the wind profiles.

## 5. Conclusion

The wind speed profiles were observed using the profiling Lidar with the height between 43 to 263 m above the mean sea level together with the ultrasonic anemometer to correct the thermal buoyancy effect. With the strong wind speed, the wind profile develops to the conventional boundary layer and agrees well with the power law and the logarithmic profile corrected with the stability function as well as the Gryning profile. It is noted that in the intermediate wind speed, the jet-like profiles appear with the nose height of approximately 200 m. In the weak wind speed, the dominance of the sea/land breeze contributes the wind profile with the decrease of the wind speed with respect to height. The formation of the jet-like profile is studied using the EMD method. The spectrum of IMF clearly show the diurnal cycle raised by the sea/land breeze. The results show that the combination of the synoptic monsoon and mesoscale sea/land breeze majorly contribute the wind speed variation and the jet-like profiles when the wind speed is moderate.

## Acknowledgement

This research was founded by the Ministry of Science

and Technology with the grant number No. MOST 110-2221-E-992-022-. Also part of the founding is from Bureau of Standards, Metrology and Inspection, MOEA. The authors wish to express their grateful acknowledgement.

## Reference

1. Davenport, A. G. (1965) The relationship of wind structure to wind loading. National Physical Laboratory Symposium No. 16 "Wind effects on buildings and structures", 54-112.
2. Dyer, A. J. (1974) A review of flux-profile relationships, *Boundary Layer Meteorology*, 20, 35-49.
3. Gryning, S. E., Batchvarova, E., Brümmner, B., Jørgensen, H., and Larsen, S. (2007) On the extension of the wind profile over homogeneous terrain beyond the surface boundary layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, 124, 251-268.
4. Hsu, S. A., Meindl, E. A., and Gilhousen, D. B. Monin, A. S. (1994) Determining the power-law wind-profile exponent under near-neutral stability Conditions at Sea, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 33, 757-765.
5. Huang, N. E, Shen, Z., R. Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C., and Liu, H. H. (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 454, 903-995.
6. Larsén, X. G. and Fischereit, J. (2021) A case study of wind farm effects using two wake parameterizations in the Weather Research and Forecasting (WRF) model (V3.7.1) in the presence of low-level jets, *Geoscientific Model Development*, 14, 3141-3158.
7. Obukhov, A. M. (1954) Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere, *Tr. Akademii Nauk SSSR Geophys. Inst.*, 24, 163-187.
8. Panofsky, H. A. and Dutton, J. A. (1984) *Atmospheric turbulence: models and methods for engineering applications*, John Wiley & Sons, New York.
9. Tsai, Y. S., Miao, J. J., Yu, C. M., and Chang, W. T. (2019) Lidar observations of the typhoon boundary layer within the outer rainbands, *Boundary-Layer Meteorology*, 171, 237-255.
10. Tsai, Y. S., Yang, Y. C., Chang, W. T., Yang, W. C., Lin, P. H., and Chen, J. L. (2017) Wind speed profiles of Typhoon Matmo observed using Doppler Lidar, *Journal of Coastal and Ocean Engineering*, 17,1-20..

# 基隆海檻測試場址潮流能資源調查

陳勇隆<sup>1</sup> 臧效義<sup>2\*</sup> 羅耀財<sup>3</sup> 王昱善<sup>4</sup> 陳煥儒<sup>4</sup> 陳建宏<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 台灣明耐洋流發電設備有限公司 專案經理

<sup>2\*</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系 教授

<sup>3</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系 助理教授

<sup>4</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系海工組 碩士生

<sup>5</sup> 國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系 教授

## 摘要

針對基隆的海洋能測試場 TANETS，在靠近基隆嶼與和平島之間的水下海檻水域的潮流資源研究，分別應用 POM 數值模式與 ADCP 超音波流速剖面儀進行不同點位二維水深平均速度數值模擬，與單點水深剖面現場量測。結果顯示，數值結果比實測值略大，尤其漲潮時較退潮時差異較明顯，但在趨勢上則相對吻合。不同點位模擬結果發現海檻上點位的流速較遠離海檻的區位之值較大，但在海檻上不同水深處，則是水深越淺反而速度越小。從海檻水域水深 37.5m 實測資料顯示，大潮期間與小潮期間海床上方 15-35 m 間速度幾乎維持一樣，超過 50% 機率流速可大於 0.75 m/s，而超過 30% 時速度可大於 1.0 m/s。不論在平均流速或尖峰流速平均結果，都是退潮時略大於漲潮時。不同水層速度方向玫瑰分布結果顯示，雖大小分布略有不同，但在流速方向卻明顯的集中大約相同的兩個方向，分別是漲潮時流向西北西，退潮時流向東南東。

關鍵詞：基隆海檻、潮流能測試場、POM 模式、潮流資源調查

## Test Site Investigation on Current Resources over a Sill for a Tidal Energy Converter in Keelung, Taiwan

Chen, Y.L., Tzang, S.Y.\*, Lo, Y.T., Wang, Y.S., Chen, H.Z., Chen, J.H.

\* Professor, Department of Harbor & River Engineering, National Taiwan Ocean University

### ABSTRACT

The investigations on the tidal current resources in the permitted water zones of TAMETS (Taiwan Marine Energy Test Site) around the underwater sill extending from the Keelung Isle were carried out. The POM numerical model and an ADCP instrument were applied for present study. The results first illustrated well agreements of the depth-averaged current speeds between measurements and numerical simulations while simulated current speeds were generally greater than measured ones. Numerical simulations clearly illustrated that decreasing current speeds were found at sites away from the sill and in shallower depths on the sill. The field measurements at a depth of 37.5 m showed that current speeds remained almost similar from 15-35 m above the bed in both flood and ebb tides. More than 50% the depth-averaged current speeds could be higher than 0.75 m/s and 30% than 1 m/s. The measured data confirmed with numerical simulation on slightly higher current speeds in ebb tides than those in flood tides. Directional rose maps of current speed at selected layers have similarly indicated that the flood tides directed to WNW while ebb tides to ESE.

Keywords: Keelung underwater sill; tidal energy test site; POM; tidal current resources

## 一、前言

針對瑞典商明耐洋流測試場址的需要，基隆的海洋能測試場 (TAMETS) 的流能測試場域，如圖 1 所示，是位於基隆嶼及和平島之間的水下海檻水域。在基隆海域，水深 30m 以內岩層以火成頁岩和砂岩為主，部分底床為沈積砂，在海檻上會有分散的白色沈積物，由於鈣化的珊瑚礁所致。在海檻區域，一般最大潮差約 1.0 m，最大平均流速則小於在 0.5 m/s。由於在海檻上水域流可被放大數倍，圖 2 顯示過去的研究針對海檻區域約 20 m 處的量測值之比對所得的數值模式顯示(Lo, et al., 2012)，以主要的 M2 分潮分布，可看出漲潮時主要流向是 WNW，退潮時是 ESE，同時最大流速可達 1.0 m/s。因此，本研究目的是要探討海檻周遭潮流資源分布結果，以利尋找合適場址，供明耐公司的模型機組測試選擇之參考。

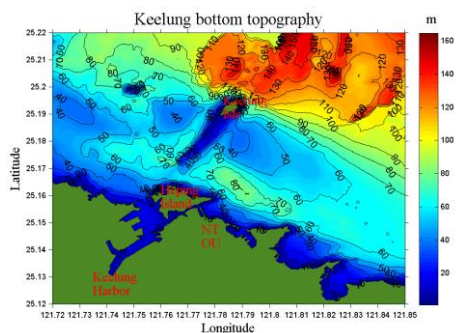


圖 1 基隆海洋能測試場 TAMETS 水深分佈圖

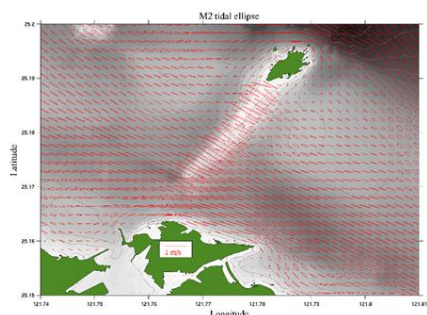


圖 2 M2 分潮平面分布二維平均速度軌跡圖(Lo, et al., 2012)

## 二、研究方法

本研究中主要針對海檻區域附近不同點位 (如圖 3 所示) 的流速場進行 POM 模式(Bloomberg, et al.,

1987)數值模擬評估，並針對有潛勢的點位應用超音波流速剖面儀 ADCP 進行實地量測，選擇海檻水域水深約 25 m 與 40 m 左右點位，並且設定量測期間至少含括六次大潮-小潮或小潮-大潮的週期。

### 2.1 POM 模式介紹

POM 模式是 Princeton Ocean Model 的縮寫，是由 Blumberg and Mellor (1987)所發展的三維非線性有限差分數值模式，採用空間中間差分、時間蛙跳法，以及能量熵守恆的 Arakawa-C 格點法 (Arakawa and Lamb, 1977)，並且採用垂直軸上以地貌配搭系統以及水平面的曲線座標，模式得以模擬複雜底床地形與不規則海岸線的流場變化，加上自由表面邊界的存在，使得潮汐引致流與表面重力波均可被合理計算。本文先針對二維流場進行模擬，相關理論公式介紹，可參 (Lo, et al., 2012)。模式的邊界輸入條件採用全球潮汐模式 TPXO (Egbert and Erofeeva, 2002)，外部條件的計算穩定條件採用 Courant-Friedrichs-Levy (CFL) 理論。

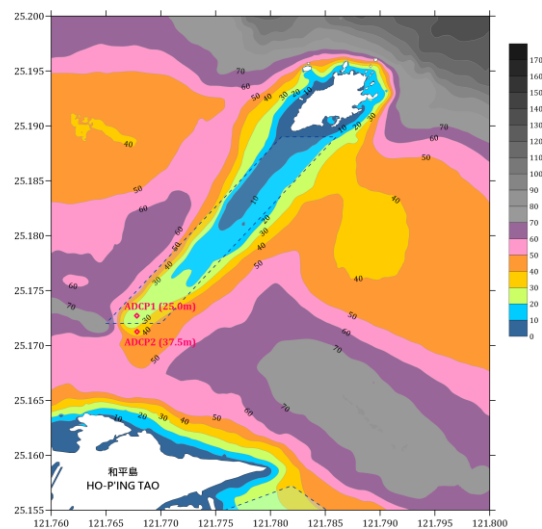


圖 3 ADCP 海檻水域佈放點位示意

### 2.2 ADCP 現場量測

現場實測的流速資料是由佈放在底床坐底朝上的 ADCP (Workhorse Sentinel (WHSW) 600kHz, TRDI)所得，圖 3 顯示分別在水深 25 m 與 37.5 m 處各佈放一次，兩次的分層間格設定因水深而異，分別是 0.5 m 與 0.75 m，因而可得 50 與 52 層資料。資料收集時間設定是總體擷取間隔 20 分鐘，期間發

射 50 道聲束。量測設定的時間總長均以超過 45 天為原則，可得至少 6 個漲與退潮的水位與相對的流速變化。最後的資料顯示，兩次的量測時間約是 08/18/2018 ~ 10/03/2018，以及 03/28/2019 ~ 05/26/2019。

### 三、2 維模式驗證與結果

#### 3.1 水深平均流速與實測值比較

圖 4 為二維水深平均流速之模式計算值(紅色線)與實測值(黑色線)比較結果。從比較結果顯示，流速大小隨水深增加而變小，尤其是退潮時流速減小最明顯。例如 25m 處與 37.5m 處退潮時流速最大可達 1 與 0.75 m/s 左右。此外，數值模擬結果一般比實測值大，尤其在漲潮時比退潮時差異較大，但兩者在變動趨勢上非常接近。

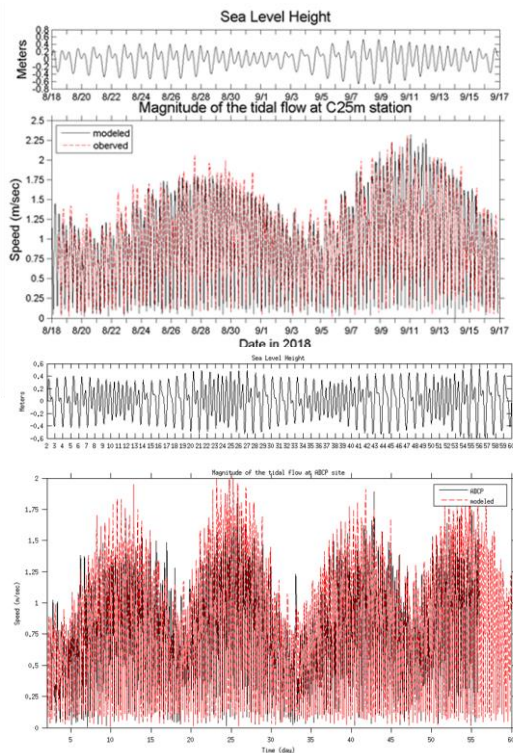


圖 4 水深平均流速數值計算與實測值比較於水深 25 m (上) 與 37.5 m (下) 處

#### 3.2 不同水深地點結果

為模擬海檻附近不同水深的流速大小，圖 5 顯示我們選擇 41 處的點位，水深介於約 22 m 至 60 m，進行數值模擬計算評估，作為選址的參考，其

中點位 23 與 24 分別靠近實測點位 1 與 2。如表 1 所示，可綜合幾點結論：1.海檻上點位的流速較遠離海檻的區位之值較大，但在海檻上不同水深處，則是水深越淺反而速度越小。2.水深平均流速超過 1 m/s 的機率，在點位 3&9 超過 50%，點位 2、15 與 23 則達 45-50%，點位 24 則介於 40-45%。這些點位，除了點位 24 的水深約 34 m，期於皆在 21-25 m 之間。3.從工程角度考量，速度與水深有時無法兼得，速度考量試基於測試機組的設計要求，但水深部分則會在大於 40 m 時因潛水工作者的安全考量，作業時間變短還有作業要求加壓打氣等設備之配置，會大大增加施工期與費用。

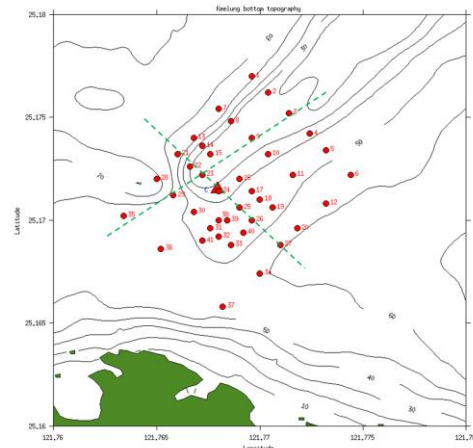


圖 5 海檻附近數值模擬點位示意

### 四、實測資料分析

#### 4.1 大小潮期間平均流速剖面分布

因為設計水深的考量，實測結果分析將以位於 37.5 m 的資料進行深入分析。從圖 6 的結果顯示在四個選定的潮汐水位變化時間點，分別是在大潮期間(藍色與桃紅點)與小潮期間(棕色與綠色)ADCP 儀器探頭上方 15-35 m 間速度幾乎維持一樣，圖 7 進一步確認越靠近上層的速度，即使不同深度區間都相對差異不大；例如，底床以上 12.5-32.5 m 或 7-27.2 m 的平均速度都略大於 2.5-34 m 或 2.5-22 m，且 2.5-34 m 的平均流速、最大尖峰平均流速與最大流速都比 2.5-22 m 的值大約 6.4%, 2.5% and 2.9%。圖 8 進而顯示超過 50% 機率流速可大於 0.75 m/s，而超過 30% 時速度可大於 1.0 m/s。

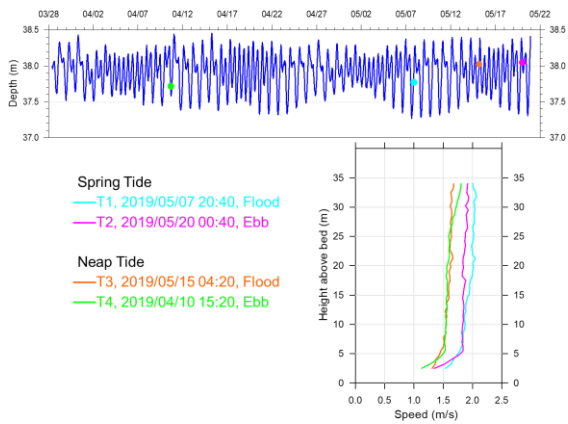


圖 6 ADCP2 點位不同水位變化時潮流速度剖面

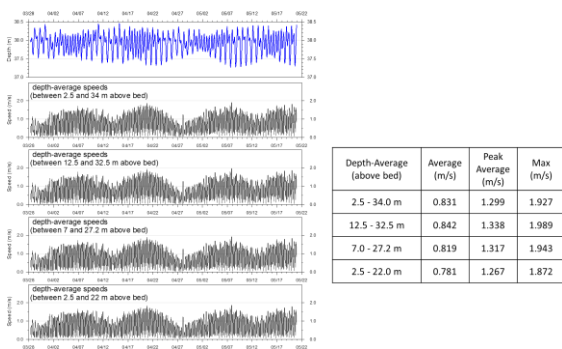


圖 7 不同水深區間平均流速

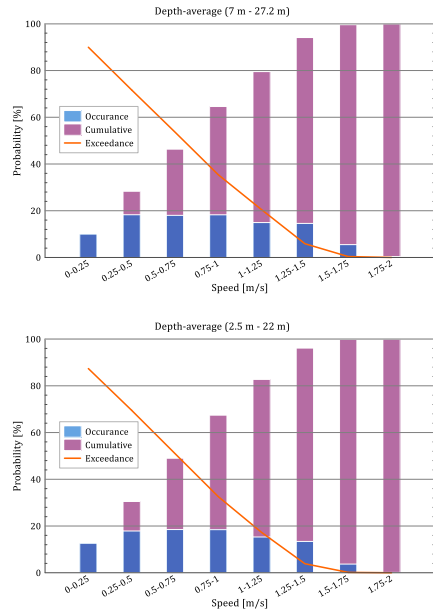
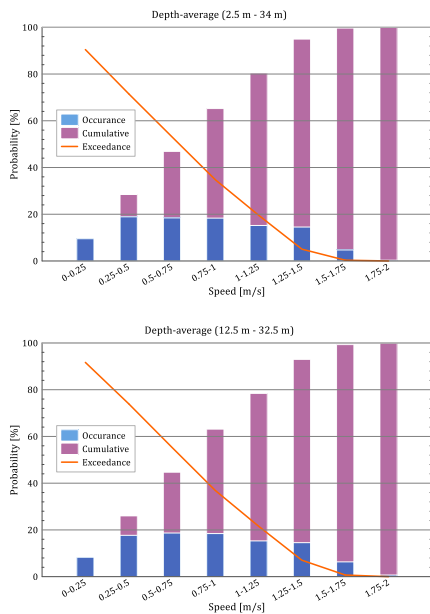


圖 8 不同水深區間流速柱狀圖

## 4.2 分層流速統計剖面分布

再將每一分層所得結果，統計平均值，尖峰平均，與最大流速，並繪得剖面分布結果。如圖 9 顯示，在每一深度最大流速最大，其次是尖峰平均，最小是平均值。除了最大值的剖面分布顯示，距底床 20 m 以上的流速分布變化不大，特別是平均與尖峰值平均在距底床 10-15 m 以上就已經變化不大。從所得統計結果發現，最上層三者的速度分別是 0.886, 1.401, 2.037 m/s 與最下層的速度 0.599, 0.988, 1.570 m/s。其結果顯示，三者最上層與最下層速度比值分別是：1.48, 1.42 與 1.3 倍左右。再者，最上層與最下層處相對於平均值分別得到 1.58 與 2.29 倍（最上層），以及 1.65 與 2.62 倍（最下層）的速度變化趨勢，顯然在最上層速度比值均小於最下層。

再針對漲潮與退潮時平均值與尖峰流速平均值結果整理，如圖 10 顯示，不論在平均流速或尖峰流速平均結果，都是退潮時略大於漲潮時，從統計資料得知，最上層的平均值與尖峰流速平均值比值分別是 1.09 與 1.05 倍，兩者極為接近。此外，也可從圖 10 發現，漲退潮時流速剖面分布約從底床上方 15 m 以上速度差異就不明顯。

最後選擇下中上三代水層針對流速分析其速度方向玫瑰分布結果，如圖 11 顯示，除了各層速度

大小分布略有不同，但在流速方向卻明顯的集中大約相同的兩個方向，分別是漲潮時流向西北西方向，而退潮時流向東南東方向。

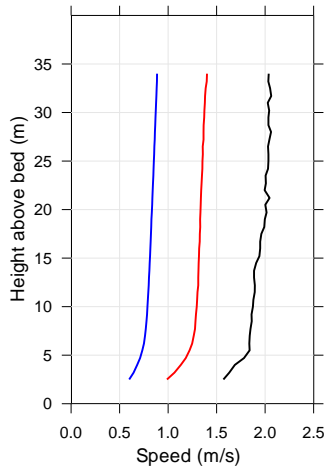


圖 9 平均(藍)，尖峰值平均(紅)，最大流速(黑)剖面分布

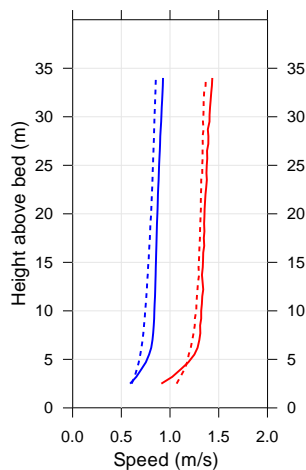


圖 10 平均流速(藍色)與尖峰平均值(紅色)在漲(虛線)退(實線)潮時剖面分布

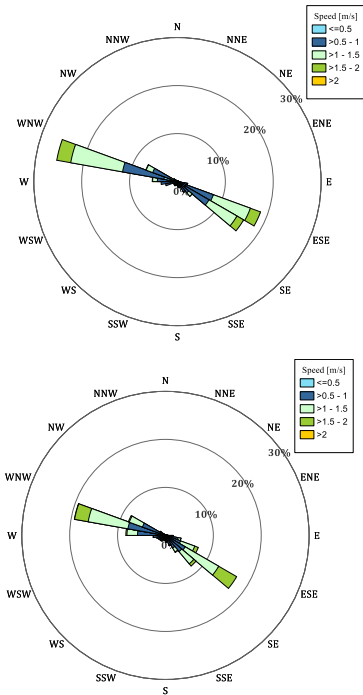
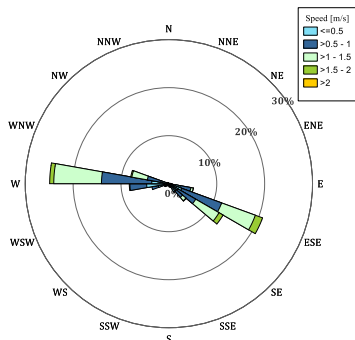


圖 11 代表性距底床 7 m(上), 22 m(中), 32.5m(下) 流速方向玫瑰圖

## 五、結論

針對基隆的海洋能測試場 TANETS，在靠近基隆嶼與和平島之間的水下海檻水域的潮流資源研究，分別應用 POM 數值模式與 ADCP 超音波流速剖面儀進行不同點位二維水深平均速度數值模擬，與單點水深剖面現場量測。結果顯示，數值結果比實測值略大，尤其漲潮時較退潮時差異較明顯，但在趨勢上則相對吻合。不同點位模擬結果發現海檻上點位的流速較遠離海檻的區位之值較大，但在海檻上不同水深處，則是水深越淺反而速度越小。從海檻水域水深 37.5m 實測資料顯示，大潮期間與小潮期間海床上方 15-35 m 間速度幾乎維持一樣，超過 50% 機率流速可大於 0.75 m/s，而超過 30% 時速度可大於 1.0 m/s。不論在平均流速或尖峰流速平均結果，都是退潮時略大於漲潮時。最後不同水層速度方向玫瑰分布結果顯示，雖大小分布略有不同，但在流速方向卻明顯的集中大約相同的兩個方向，分別是漲潮時流向西北西，退潮時流向東南東。

## 謝誌

本論文承蒙台灣明耐洋流發電設備有限公司經



費之補助使得完成研究，謹致謝忱。

### 參考文獻

1. Arakawa, A., and V.R. Lamb, 1977, Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, 17, 174-265.
2. Blumberg, A.F., and G.L. Mellor, 1987, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, edited by N.S. Heaps, Amer. Geophys. Union, Washington DC, pp. 1-16.
3. Egbert, G.D., and S.Y. Erofee, 2002, Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 183-204.
4. Lo, Y.-T., H.-W. Li, C.-H. Tsai, 2012, Modeling the Tidal Current Around the Keelung Sill: A Test Site for Tidal Stream Power Generation, 1st Asian Wave and Tidal Energy Conference (AWTEC), pp. 345-349.

表 1 海檻周遭水域不同點位流速大於 1 m/s 比例

點位	經度	緯度	水深 (m)	流速比例 ≥ 1 m/s
1	121.7696	25.1770	51.98	0.78%
2	121.7704	25.1762	22.86	49.81%
3	121.7714	25.1752	21.64	53.73%
4	121.7724	25.1742	36.40	25.23%
5	121.7732	25.1734	47.20	11.26%
6	121.7744	25.1722	54.86	5.42%
7	121.7680	25.1754	55.40	0.42%
8	121.7686	25.1748	31.94	32.54%
9	121.7696	25.1740	23.30	55.24%
10	121.7704	25.1732	35.25	34.08%
11	121.7716	25.1722	47.02	19.86%
12	121.7732	25.1708	57.28	10.93%

13	121.7668	25.1740	52.83	2.33%
14	121.7672	25.1736	34.11	24.68%
15	121.7676	25.1732	25.25	46.86%
16	121.7690	25.1720	37.45	32.86%
17	121.7696	25.1714	43.29	27.88%
18	121.7700	25.1710	44.78	27.51%
19	121.7706	25.1706	46.99	25.58%
20	121.7718	25.1696	58.09	16.79%
21	121.7660	25.1732	55.67	0.27%
22	121.7666	25.1726	31.50	29.06%
23	121.7672	25.1722	24.67	47.28%
24	121.7680	25.1714	33.77	40.47%
25	121.7690	25.1706	43.59	32.17%
26	121.7696	25.1700	45.96	30.84%
27	121.7710	25.1688	58.51	19.70%
28	121.7650	25.1720	72.50	3.62%
29	121.7658	25.1712	57.22	22.81%
30	121.7668	25.1704	47.34	33.12%
31	121.7676	25.1696	43.61	35.82%
32	121.7680	25.1692	44.41	35.29%
33	121.7686	25.1688	46.07	33.33%
34	121.7700	25.1676	59.60	21.20%
35	121.7634	25.1702	57.18	9.23%
36	121.7652	25.1686	53.70	19.56%
37	121.7682	25.1658	55.80	22.99%
38	121.7680	25.1700	42.73	37.06%
39	121.7684	25.1700	43.19	36.18%
40	121.7692	25.1694	46.50	31.98%
41	121.7672	25.1690	47.02	31.69%

# 以 AI 技術輔助進行水下地貌辨識與 潛在危害分析之可行性研究

曹士亮<sup>1</sup> 林俊宏<sup>2</sup> 田文敏<sup>3</sup> 葉昌鑫<sup>4</sup> 許哲彰<sup>4</sup>

<sup>1</sup>國立中山大學海洋環境及工程學系 博士後研究員

<sup>2</sup>國立中山大學海洋環境及工程學系 助理教授

<sup>3</sup>國立中山大學海洋環境及工程學系 副教授

<sup>4</sup>財團法人金屬工業研究發展中心 工程師

## 摘要

臺灣政府推動「千架海陸風力機」並規劃於 2025 年累計設置量達 5.5 GW，藉此促進能源多元化及自主供應。目前國外對於海中的相關設施與離岸風機基座可能發生的地形侵淤變化與安全性調查，多以水下遙控載具或潛水人員搭配光學設備來進行，然而臺灣西部海域海水濁度高，光學設備或許無法達到預期的結果，本研究藉由聲學探測設備(側掃聲納與多音束測深系統)，收集台灣海峽附近海域海床特徵物以及港灣技術研究中心於臺中港外海所設置的海氣象觀測樁之聲學影像，透過自行研發之影像輔助判別系統進行海床目標物聲學影像之分析與辨識，以及判別可能發生災害區域於影像上之特徵並且描繪其範圍。分析結果顯示，影像輔助判別系統對於海床特徵物以及水中設施基座侵蝕現象之辨識具有良好之成效，其研究成果能提供離岸風機以及相關海上裝置未來監測與維護作業之參考。

關鍵詞：海域監測、聲學影像、地質災害、影像輔助判別系統。

## Applications of AI technology in seafloor characterizations and geohazard assessments

Shih-Liang Tsao\* Chun-Hung Lin Wen-Min Tian Chang-Hsin Yeh Che-Chang Hsu

\* Postdoctoral, Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University

### ABSTRACT

The Taiwan government promotes "Thousand Wind Turbines Project" and plans to set a total of 5.7 GW in 114 years, in order to promote energy diversification and independent supply. The scouring of the underwater foundation and pipeline would be a potential risk. At present, the safety survey of offshore wind turbine bases is mostly carried out with optical equipment. But high resolution acoustic images of the seabed collected by acoustic detection equipment (sidescan sonar and multi-beam sounding system) would be a better solution for underwater structures. Frequently mapping the seafloor with acoustic sonar could trace the condition in seafloor. However, the difficulty in monitoring of the underwater structure with acoustic sonar is the precision and accuracy of the positioning if the difference analysis of the acoustic sonargram between each survey is applied. In order to minimize this problem, an image classification algorithm with AI technology was developed to classify the seafloor. According to the verification of 3 field cases, the algorithm developed can successfully classify the different feature on seafloor. With the manually recognitions at first time to connect the classified group and the seafloor features, the algorithm could trace the space distribution and the change of area

for the specific classified groups at each survey. Rather than difference analysis strongly dependent on positioning, the classified groups tracing analysis based on the proposed algorithm can better applied in the acoustic sonar monitoring tasks. Further study about the fully automatic recognition of the feature of the seafloor is suggested.

Keywords: Seabed monitoring; acoustic image; Geological disaster; Image acquisition and processing techniques

## 一、前言

水下環境由水下靜態目標物(例如：人工魚礁、工程結構物與珊瑚礁等)與水下動態目標物(例如：潛水夫、魚隻、蝦與蟹等)所組成，水下目標物與環境之間的關係經過了時間的變化與內外營力相互作用後，構成了當下的水下的空間分佈狀態。人工結構物一但設置於其環境中，即可能因為內外營力的作用造成非預期狀況甚至災害的發生。

其中，臺灣政府所推動「千架海陸風力機」計劃中所公開的 36 處潛力場址大多位在臺中至雲林一帶，然臺灣海峽中部受地形影響海流強勁，通過直立圓柱樁之流場特徵可由圖 1 所示，即直立圓柱樁前側之水面翻滾(water surface roller)、俯沖流(downflow)、分離流區位內之渦流散發(vortex-shedding)、直立圓柱樁下游側之尾跡(wake)及沖刷坑內所引發之馬蹄形渦流(horseshoe-vortices)等現象均會造成直立圓柱周圍之沖刷(陳等，2012)，風機基座週圍雖然以拋石來加強海床的穩定性，但由過往的水工模型試驗研究可以發現，拋石雖然可以減輕趾部淘刷，但並無法完全消除水流對海床衝擊(薛等，2019)，沖刷現象若持續發生且無對應之改善措施，即可能發生非預期之狀況以及災害。

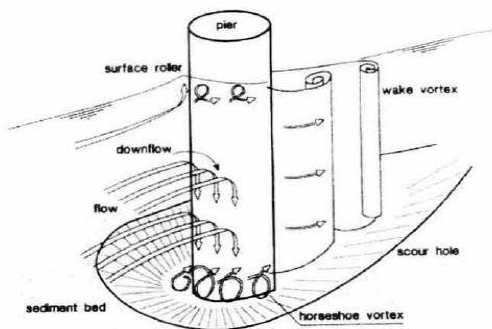


圖 1 直立圓柱附近之流況與沖刷(Melville,1988)

欲監控水下可能之非預期狀況與災害，其儀器、

設備與所收集的資料需要包含：足夠的解析能力(Detectability)與完整的覆蓋面積(Spatial coverage)。其中，技術發展成熟且已經於水下探測領域中運用多年的拖曳式側向掃描聲納系統(Side Scan Sonar 簡稱側掃聲納)以及多音束測深儀(Multi Beam Echo Sounder)分別在開放水域、封閉以及限制性水域中，皆擁有達到上述需求的效能(圖 2)(曹，2020)。

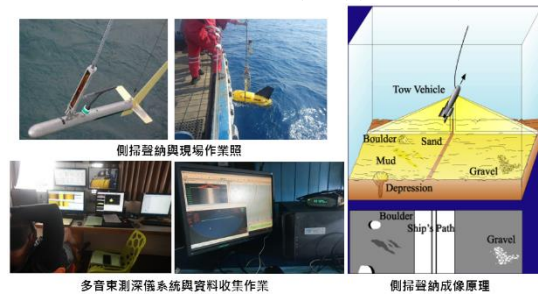


圖 2 側掃聲納與多音束測深儀系統資料收集過程與方式示意圖

目前聲學影像的判讀大多數皆以人工辨識的方式為主，辨識準則依據操作者的經驗、能力與專業背景所製定。該基準會受到辨識者的經驗及主觀意識所影響，因而造成辨識結果的差異。此外，辨識聲學影像的過程中經常消耗大量的人力、物力與時間，疲倦與體能的消耗皆可能會造成辨識與分類的標準不一致或是錯誤。因此，本研究選用灰度共現矩陣法(GLCM)、貝氏分類器(Bayesian classification)與階層式集群分析法(Hierarchical cluster analysis)，開發與設計影像輔助判別系統，在非人為介入下的情況下針對可能發生危害處之聲學影像進行自動化的分析與輔助判別工作。

## 二、系統架構與資料分析

### 2.1 儀器設備

水下可能發生災害處之現況，需要運用聲學儀器進行資料之收集，所收集之聲學資料會以影像之方式呈現，即為聲學影像。本研究所研發之影像輔助

判別系統即為針對水下發生災害處之聲學影像進行影像分析與辨識之用。

本研究使用之聲學設備包括多音束測深系統與側掃聲納系統，多音束測深系統採用 Reson SeaBat 7125，當頻率為 400kHz 時其音束束寬為  $0.5^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，200kHz 時其音束束寬為  $1^{\circ} \times 2^{\circ}$ ，每一次拍發(ping)有 512 筆水深資料，最大資料更新率(max. ping rate)為 50Hz，該設備之規格屬於淺水高解析度高密度的測深聲納。側掃聲納則是採用 EdgeTech 4125，其拖魚之頻率為 300/900 kHz。該側掃聲納規格屬於淺水高解析度，其橫向(across track)解析度在頻率 900 kHz 時為 1.0cm；其水平音束束寬在頻率 900 kHz 時為  $0.28^{\circ}$ 。

## 2.2 資料收集成果

由於目前尚無風力發電機基樁之危害訊息與影像，因此本研究選用側掃聲納系統所收集之位於台灣近海地貌特徵物聲學影像以及臺中港外海所設置的海氣象觀測樁之聲學影像(圖 3)進行分析，驗證影像輔助判別系統之效能。

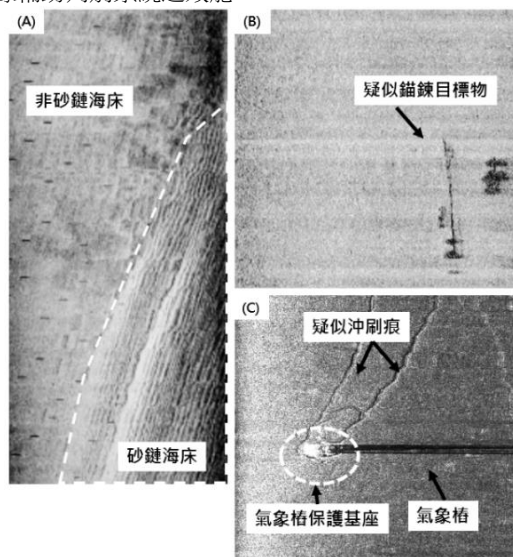


圖 3 側掃聲納所收集之海床聲學影像。其中：圖(A)為疑似砂鏈構造之聲學影像，影像尺度為  $692 \times 1726$  pixels，圖(B)為疑似海床上遺留之錨鍊聲學影像，影像尺度為  $1038 \times 1292$  pixels，圖(C)為氣象觀測樁與其保護基座之聲學影像，影像尺度為  $778 \times 724$  pixels。

## 2.3 資料分析與輔助判別系統

本研究所建置之影像輔助判別系統採用 MATLAB 程式語言(The Mathworks Inc.)作為系統的主要架構(影像特徵值擷取等步驟)與連結不同軟體間的工具，其中分類步驟運用 Autoclass 軟體(Cheeseman and Stutz, 1996, 非監督式分類法 Unsupervised classifier, 貝氏理論 Bayesian theory)進行分類，分類結果屬性歸類則運用 SPSS 統計軟體(IBM Inc.)進行處理。

影像輔助判別系統其內部構成元件主要包含以下部分：

1. 影像前處理(圖 4)：相關技術使用於掃描式聲納影像場景重建以及動態目標物的背景刪除。

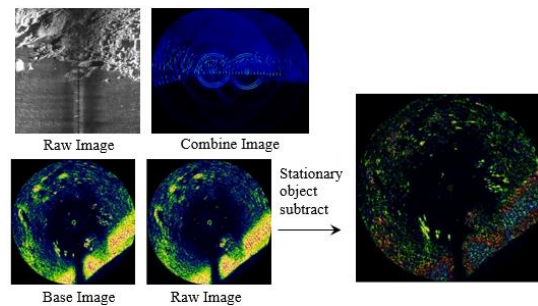


圖 4 影像輔助判別系統影像前處理步驟示意圖

2. 影像特徵值擷取(圖 5)：包含了影像切割(Image segmentation)、視窗滑動(Sliding window)以及運用灰度共現矩陣法(Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM)(Haralick et al., 1973)與其特徵函數進行特徵值的擷取(Feature extraction)。
3. 辨識與分類(圖 6)：本階段選用非監督式分類(Unsupervised class)之貝氏分類器(Baysian classification)進行辨識與分類工作。
4. 分類結果屬性歸屬與驗證(圖 7)：本階段選用階層式集群分析法(Hierarchical cluster analysis)進行分類結果的分析、值域圖(Look-up table)設定門檻值(Threshold Method)濾除非目標物分類以及光學影像用於驗證。

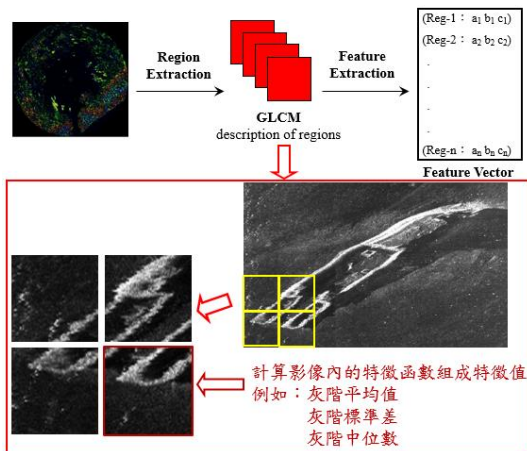


圖 5 影像輔助判別系統影像特徵值擷取步驟示意圖，圖下方為船礁聲納影像影像切割步驟範例

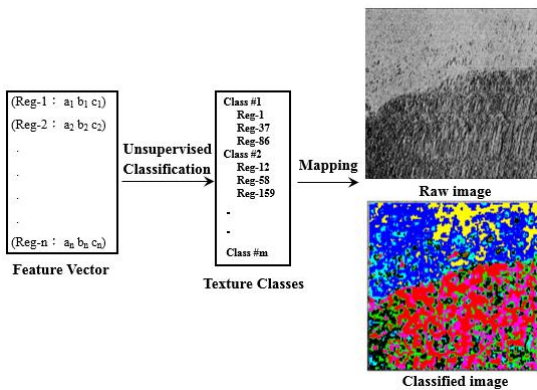


圖 6 影像輔助判別系統影像辨識與分類步驟示意圖，圖右方可見為砂鏈聲納影像影像切割經分類後之成果

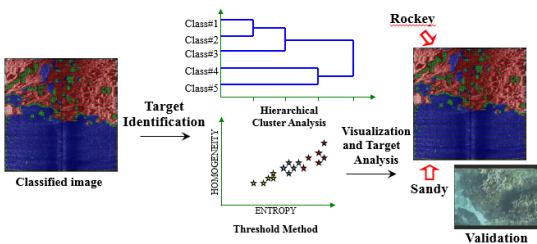


圖 7 影像輔助判別系統分類結果屬性歸屬與驗證步驟示意圖，圖中可見聲納影像經分類後藉由樹狀圖與值域圖可以定義出砂質海床與礁石海床的範圍與差異

### 三、影像輔助判別系統辨識之成果

研究成果顯示，本研究所開發的影像輔助判別系統可以達到水下靜態目標物的辨識與描繪之目的。同時能夠藉由影像的分析結果，量化分類與辨識的標準，使目標物的判別基準一致化，以避免人為因素所產生的問題。圖 3(A)的疑似砂鏈構造之聲學影像經輔助辨識後分類為 7 類(圖 8)，成果顯示其中的第 4 類(綠色)與第 7 類(黑色)為砂鏈結構，其餘五類為非砂鏈海床，由階層式集群分析法所繪製的樹狀圖與特徵值組成的值域圖可知，砂鏈結構與非砂鏈結構被明顯的分為兩類(圖 9)。

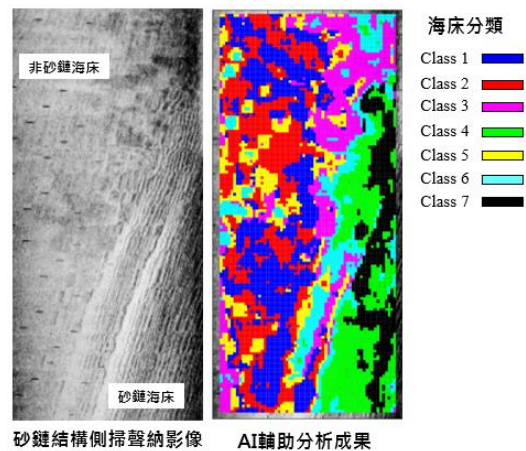


圖 8 砂鏈影像輔助判別成果

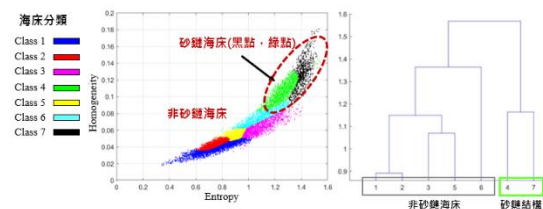


圖 9 砂鏈影像分析後之值域圖與樹狀圖

圖 3(B)的疑似錨鍊之聲學影像經輔助辨識後同樣分類為 7 類(圖 10)，成果顯示其中的第 7 類(黑色)為疑似錨鍊目標物，其餘六類為非目標物海床，由階層式集群分析法所繪製的樹狀圖與特徵值組成的值域圖可知，錨鍊目標物與非錨鍊目標物被明顯的分為兩類(圖 11)。

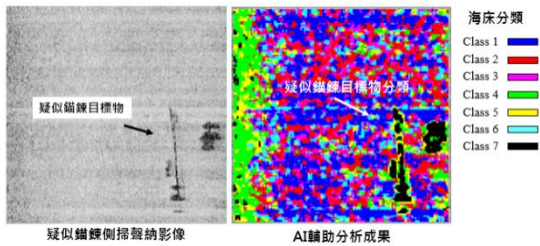


圖 10 疑似錨鍊影像輔助判別成果

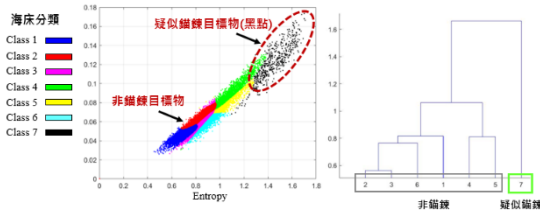


圖 11 疑似錨鍊影像分析後之值域圖與樹狀圖

圖 3(C)的氣象樁與基座之聲學影像經輔助辨識後同樣分類為 7 類(圖 12)，成果顯示其中的第 7 類(黑色)為氣象樁與其基座目標物，第 6 類為海床上之冲刷痕結構，其餘五類為一般海床，由階層式集群分析法所繪製的樹狀圖與特徵值組成的值域圖可知，氣象樁與其基座與冲刷痕優先被樹狀圖所分離出來，而一般海床則為其它的類群，海床所有之目標物大致被分為三類(圖 13)

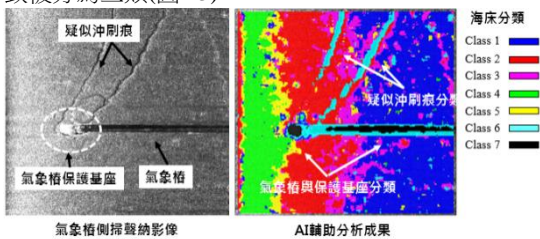


圖 12 氣象樁與基座影像輔助判別成果

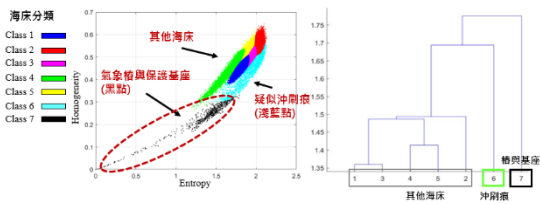


圖 13 氣象樁與基座影像分析後之值域圖與樹狀圖

#### 四、結論

水面聲學之重複性觀測可作為水下構造物尤其是與海床接觸之基礎、管線等之安全性監測技術，但是以聲學儀器進行資料收集時，由於每個航次的天

候、海水濁度、航線設定等因素會導致每次檢測所收集的聲學資料定位無法完全相同，若欲直觀的運用套疊方式檢測海床之變化處較不易達到工程需求之精度，為克服此問題，本研究採用灰度共現矩陣法 (GLCM)、貝氏分類器(Bayesian classification)與階層式集群分析法(Hierarchical cluster analysis)，開發聲學影像輔助判別系統，現場實測資料顯示，本影像判釋系統可有效的區分不同的海床狀態，在應用上，透過本研究開發之客觀化影像分類，將海床特徵進行分類後，藉由專業人員先行針對各分類項與海床狀態的連結關係，後續僅需追蹤具危害之分類項之空間變化，即可達到監測之目的，由此影像判釋系統可將目標海床狀態以區塊之方式圈繪出來，而非透過疊圖的差異值比對，其對於每次檢測時聲學影像之定位精準度容許度可較大，降低因為不同海洋環境差異所可能產生的定位誤差。惟目前本影像判釋系統所獲得之分類結果，在第一次分析結果中仍需透過人員判斷其與海床狀態的關聯性，而無法達到全自動化之目的，後續將再持續收集相關聲學影像，進一步結合類神經網路進行自動化之訊號，以期更進一步擴大本研究成果之應用。

#### 謝誌

本論文部份資料採用國立中山大學海洋科技研究中心相關調查之成果，謹致感謝貴中心所提供之協助。

#### 參考文獻

1. Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein I., (1973) "Texture Features for Image Classification", *IEEE Transactions on System, Vol-SMC-3, No.6 Nor 1973*, pp.610 - 621.
2. Cheeseman, P.C., Stutz, J. (1997). Bayesian Classification (AutoClass) : Theory and Results. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining 1996 Computer Science*.
3. 陳信宏、楊瑞源、黃煌輝、尤上林(2012) 「金門跨海大橋橋墩地形冲刷與保護工安定研究」，*港灣報導*，第 92 期，第 1-9 頁。
4. 薛憲文、曾坤三、黃玉君、吳泓毅、王韋樺、許明蒨、曹士亮(2019) 「以聲學測量進行海氣象觀測樁週圍海床安全性評估」，第 39 屆海洋工程

研討會論文集，台南成功大學，第 357-361 頁。

5. 曹士亮(2020)水下靜態與動態目標物自動化辨識與分類之研究，國立中山大學海洋環境及工程學系博士論文，347 頁。

# 利用計算流體力學方法模擬 NREL 5MW 風力發電機之空氣動力

陳璿光<sup>1</sup> 林宇銜<sup>1</sup> 蔡原祥<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學 系統及船舶機電工程學系

<sup>2</sup> 國立高雄科技大學 海事風電工程碩士學位學程

## 摘要

科技部計畫：MOST 109-2221-E-006 -100 -MY2

現今對風能需求日益增加，為從中提取更多能源，因此風機尺寸隨之增加，於設計時須以一種有效且快速之方式評估其效率。本研究基於計算流體力學之數值方法對流體力學的統御方程式進行求解與模擬，建模並分析 NREL 5MW 大型風力發電機之轉子因空氣動力造成的力學行為以及其流場所型成的效應。以劃分網格將空間離散化後，使用多重參考坐標系、滑移網格模擬風機轉子等速圓周運動之環境，並於其之中以有限體積法求解加入  $k-\varepsilon$  Realizable 紊流模型之 Reynolds Average Navier-Stokes Equation (RANS)，觀察轉子在額定風速 11.4 m/s 下，之穩態及暫態情況扭矩及推力。並以網格收斂指數驗證收斂性，並找出最佳網格尺寸，提供風機模擬參考。最後，計算結果指出扭矩與推力與對照組接近，但是由於葉片元素動量理論未考慮本研究所用之紊流模型的原因，仍存在些誤差。

關鍵詞：計算流體力學、風力發電機、RANS、多重參考坐標系、滑移網格

## Aerodynamic Modeling of the NREL 5MW Wind Turbine Using CFD Simulation

Hsuan-Kuang Chen , Yu-Hsien Lin\*, Yuan-Shiang Tsai

\* Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

Nowadays, the demand for wind energy is increasing. In order to extract more energy from it, the size of the wind turbine is increasing accordingly. It is necessary to evaluate its efficiency in an effective and rapid way during the design. This research is based on numerical methods of computational fluid dynamics to solve and simulate the governing equations of fluid mechanics, model and analyze the dynamics of the rotor of the NREL 5MW large wind turbine due to aerodynamics and the effect of its flow field formation. After the space is discretized by generating grids, multiple reference coordinate and sliding mesh are used to simulate the environment of constant velocity circular movement of the wind turbine rotor. In it, the Reynolds Average Navier-Stokes Equation (RANS) added to the  $k-\varepsilon$  Realizable turbulence model is solved by the finite volume method, observe the steady and transient-state torque and thrust of the rotor at a rated wind speed of 11.4 m/s. The grid convergence index is used to verify the convergence and find the optimal grid size to provide reference for wind turbine simulation. Finally, the calculation results indicate that the torque and thrust are close to those of the control group, But because the blade element momentum theory of the control group did not consider the turbulence model, there are still some errors.

Keywords: Computational fluid dynamics (CFD) ; Wind turbine ; Aerodynamic ; RANS ; MRF ; sliding mesh



# 1. Introduction

Due to the global greenhouse effect and the reduction of fossil fuels, there is an increasing demand for renewable resources in order to solve environmental and energy problems. Wind power has the advantages of free, endless sources and low carbon footprint. Therefore, wind power generation has become the mainstream. In order to enable the wind turbine to extract more energy efficiently, it is necessary to predict the performance of the wind turbine rotor in an effective way in blade design and manufacturing.

In recent years, due to the rapid increase in computer computing power, the improvement and optimization of computational fluid dynamics (CFD) programs, and the empirical parameters that have made simulations increasingly advanced, the use of CFD to calculate aerodynamic performance has considerable credibility and is more reliable than wind tunnel can obtain more subtle fluid phenomena. Therefore, many researchers use different CFD methods to predict and evaluate the aerodynamic performance of wind turbine. Muiruri, et al. [1] used Reynolds Average Navier Stokes (RANS) equations and Single Frame of Reference (SRF) to simulate NREL 5MW wind turbine blades, and compared the effects of using different turbulence models on the results, and finally compared with others reliable simulation results [2]. The torque of different turbulence models is consistent at wind speeds below 20 m/s, providing a suitable turbulence model for simulating wind turbine aerodynamics. Bazilevs, et al. [3] used the NURBS-based method to model the NREL 5MW wind turbine rotor, and solved the RANS equation in a single reference frame. Finally, the aerodynamic torque is the key to evaluating the performance. It is consistent with the results of NREL, and a set of wind turbine simulation templates is established. Sørensen, et al. [4] used EllipSys3D based on the multiple finite volume discretization of the incompressible Reynolds average Navier-Stokes (RANS) equation to study the aerodynamic effects of the three-dimensional NREL Phase VI wind turbine

rotor, except for 10 m/s the rest of the wind speed is consistent with the quantitative values measured by NASA Ames' actual experiments, which proves the advantages of CFD in the simulation of wind turbines. Duque, et al. [7] also used the lift line method and RANS to simulate the NREL Phase VI wind turbine rotor, and compared it with the experimental data of NREL. The results showed that RANS can obtain stall behavior and understand the fluid mechanics of stall behavior in detail.

In order to predict the aerodynamic performance of the NREL 5MW wind turbine rotor, this research uses the geometric parameters published by NREL to model [2], and generates a grid to discretize the space, import the turbulence model to solve the RANS equation by the finite volume method, and finally communicate with NREL Use the blade element momentum method to compare the results, and discuss the physical phenomena produced by the blade.

## 2. Numerical Methods

In this study, the rotor of the NREL 5MW wind turbine was modeled and the size of the watershed was defined. The fluid domain was discretized to simulate the torque generated by the rotor of the NREL 5MW wind turbine at rated wind speed by computational fluid dynamics (CFD). This evaluates the efficiency generated by the fan and observes the physical phenomena generated by the fluid on the blades.

### 2.1 Mathematical model

#### 2.1.1 Multiple reference coordinate system

The numerical method used in this study is a multiple reference frame (MRF). The fluid domain is divided into a rotating domain and a stationary domain according to the relative motion of the grid, and the control equations are

established according to different reference systems. The flux of the entire flow field is converted through the mutual conversion of relative velocity and absolute velocity. The governing equation of the static domain is as follows:

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_a = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_a \otimes \mathbf{u}_a) = -\nabla p + \nabla \cdot (\nu + \nu_t) \nabla (\mathbf{u}_a + (\nabla \mathbf{u}_a)^T) \quad (2)$$

The governing equation of the rotation domain is as follows:

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_r = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_r \otimes \mathbf{u}_r) + 2\Omega \times \mathbf{u}_r + \Omega \times (\Omega \times r) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot (\nu + \nu_t) \nabla (\mathbf{u}_r + (\nabla \mathbf{u}_r)^T) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_a = \mathbf{u}_r + \Omega \times r \quad (5)$$

### 2.1.2 Sliding mesh

In the sliding mesh (SMI) method, the wind turbine physically rotates at each time step; therefore, it is no longer necessary to model the effects of rotation. The governing equation is now only solved in the inertial reference system, as follows:

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_a = 0 \quad (6)$$

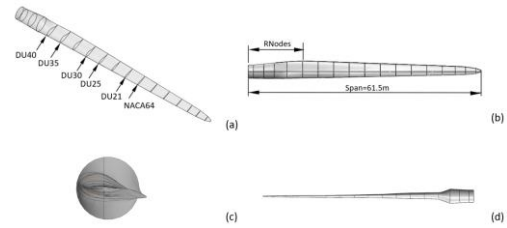
$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_a \otimes \mathbf{u}_a) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot (\nu + \nu_t) \nabla (\mathbf{u}_a + (\nabla \mathbf{u}_a)^T) \end{aligned} \quad (7)$$

Where  $\mathbf{u}_a$  is the absolute speed ;  $\mathbf{u}_r$  is the relative speed ;  $\Omega$  is the rotational angular velocity ;  $p$  is the pressure ;  $\nu$  is the air dynamic viscosity ;  $\nu_t$  is the turbulent flow viscosity

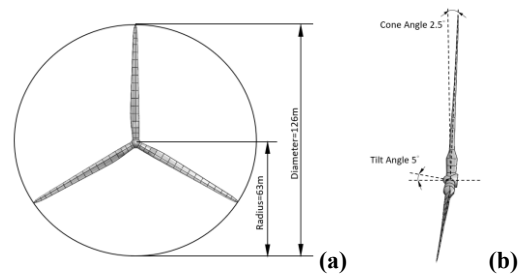
### 2.2 Numerical model

This research proposes a method to establish the geometry of wind turbines, which is a 3D modeling method based on NURBS, which uses mathematical

expressions of spatial curves and curved surfaces to approximate the geometric shape and fluid domain of rotor, thereby defining the contours of spatial discretization, provide accurate control volume for simulation. The geometric shape is based on the 5MW offshore baseline wind turbine described by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) [2], Fig 1. The rotor blades with a 61.5m rotor are connected to a hub with a radius of 1.5m, which makes the total radius 63m, and to prevent the rotor blades colliding with the tower due to deformation and rotating interaction with tower that will affects efficiency, so that 2.5° Cone Angle and 5° Tilt Angle are adopted. Fig. 2 and Fig. 3 the blade base is composed of various airfoils, and it has a three-dimensional shape laid out along the axial direction of the blade. The root is a cylinder. At 11.75 m from the root, the DU (Delft University) airfoil series starts to be smooth with the cylinder. Convergence, 44.5m is defined by the NACA64 airfoil profile, up to the tip.



**Figure 1.** Blade geometry (a) The distribution of the blade airfoil; (b) The top view of the blade; (c) The front view of the blade; (d) The side view of the blade



**Figure 2 .** The geometry and dimensions of the wind turbine rotor (a) diameter (b) rotor side view

## 2.3 Mesh generation

The processing of the grid is an important step in the simulation. If the quality of the grid is not good and the boundary layer does not correspond to the selected turbulence model, it will affect the calculation accuracy and even cause the calculation to diverge.

In this study, a polyhedral mesh is used to discretize the space. The accuracy is between tetrahedral and hexahedral meshes. However, because hexahedral meshes have certain difficulties in the division of complex geometric shapes, this type is selected, while reducing Calculate the load [5, 6]

The grid of the fluid domain is divided into three areas and refined from the outside to the inside as shown in Figure 9. The grid size of area A is 13.5 m, and area B is a sphere with a diameter of 240 m covering area C. Its function is to buffer and refine the grid around area C, with a size of 4.5 m. The area C is 1.5 m. If the grid is too large, the calculation accuracy will be affected. The blade surface is the calculation target, so the most accurate mesh size is required. For the mesh dependence analysis, three sizes of 0.05m, 0.0416m, and 0.0347m are used for verification. In addition, because the air is a viscous fluid, a boundary layer is required around the blade. The mesh is refined to 0.00192 m to reach the turbulence model specification  $30 < y^+ < 300$ . Figure 10 shows the boundary layer around the blade.

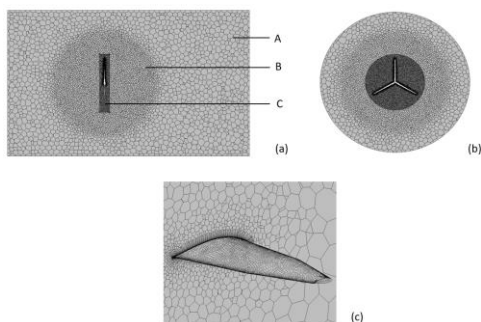


Figure 3. Mesh distribution of fluid domain (a) side view; (b) front view (c) Boundary layer around blade

<b>Element size</b>	Zone A	13.5 m
	Zone B	4.5 m
	Zone C	1.5 m
<b>Inflation Layer</b>	Blade Surface	0.05m, 0.0416m, 0.0347m
	$y^+$	30
	Growth Rate	1.2
	Numbers	15
	First Layer Height	0.00192m

Table 1 Parameters of grid configuration

## 2.4 Boundary condition

In this study, the boundary conditions of the calculation domain are the rotating domain and the static domain, and the inlet is set to Velocity Inlet, the inflow velocity is 9 m/s and 11.4 m/s; the outlet is pressure outlet, the outlet pressure is 0; the static domain The wall is a stationary wall; the blades move with the rotating domain at 1.08 rad/s and 1.267 rad/s, and the surface is set with a non-slip wall; the contact surface between the two flow fields is set to a non-slip Interface , The boundary conditions of the simulation are shown in Figure 4. The fluid is air, the density  $\rho=1.225kg/m^3$  ; the viscosity  $\mu=1.81 \times 10^{-5} kg/(m \cdot s)$  .

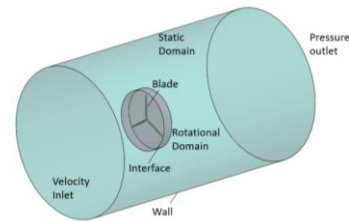


Figure 4. Fluid domain boundary conditions

The size of the fluid domain is based on the diameter of the fan rotor branch (D). The diameters of the static domain and the rotating domain are shown in Figure 5-6. The distance of the far field will be closely related to the performance of the rotor. Refer to [7] fluid domain the size, the rotor is 2D from the inlet and the outlet end 3D, the diameter is 3D; the rotation area is set to a

length of 0.1D before and after the rotor, and the diameter is 1.2D.

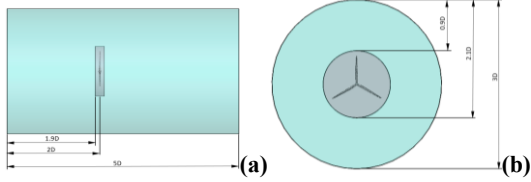


Figure 5. fluid domain size (a) length (b) diameter

### 3. Results and discussion

In this study, the rotor aerodynamics air flow through the blades will generate lift and drive the blades to generate torque, which will directly affect the efficiency of the wind turbine. Therefore, it is the focus of this research. The calculation results and the error of the comparison with NREL, the result It shows that it is consistent with the trend, and the error is different from the analysis method used, as shown in Figure 6:

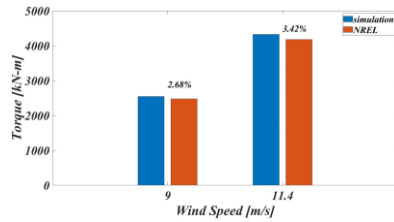


Figure 6. Calculated torque and error with NREL

The pressure coefficient is the dimensionless pressure at the three cross-sectional positions along the blade span of 31%, 60%, and 92%, and the result is quite close to that of Alesbe, et al. [7] as can be seen in Figure 7. The pressure peak is near the leading edge, and the upper edge is positive pressure, and the negative pressure is on the lower edge. This is a reasonable result. The pressure coefficient equation is as follows:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5 \rho_\infty (U_\infty^2 + (r\Omega)^2)} \quad (8)$$

Where  $U_\infty$  is the inflow velocity;  $\Omega$  is the rotational speed;  $r$  is rotor radius;  $\rho_\infty$  is the far-field atmospheric pressure;  $p$  is the blade surface pressure

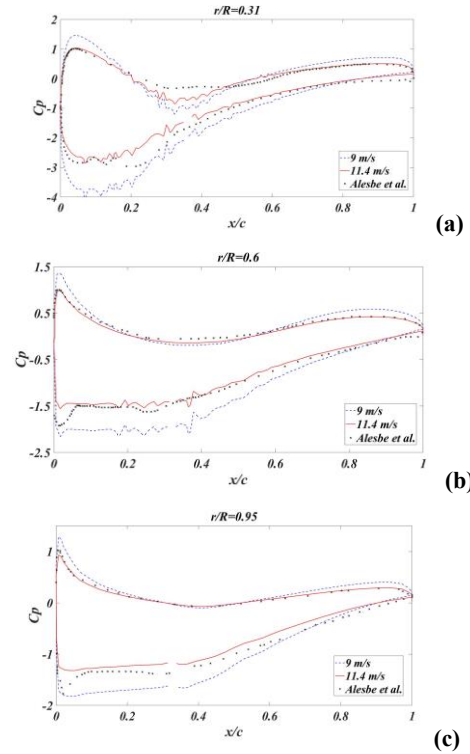


Figure 7. Pressure coefficient of blade section (a) 0.31R; (b) 0.6R; (c) 0.95R

The velocity streamline of the blade section can be obtained as the angular velocity near the tip of the blade increases, and the velocity is also increased. The velocity is close to 130m/s. It can be seen that the fluid passes stably along the surface of the blade without causing turbulence to cause stalls. At the same time, it is also close to Alesbe, et al. [7] result.

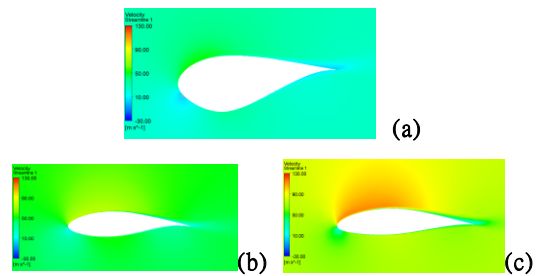
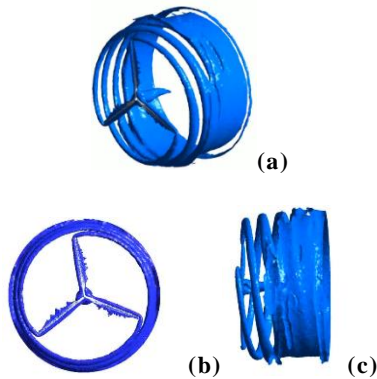


Figure 8 . The velocity streamline of the blade section at a wind speed of 11.4 m/s (a) 0.31R; (b) 0.6R; (c) 0.95R

The wake flow formed by the rotor is one of the important indicators. The wake in this study can develop smoothly, which is a good indicator, indicating that the rotor intercepts wind energy and transmits the air flow backward, as shown in **Figure 9**:



**Figure 9.** The wake of the rotor at a wind speed of 11.4 m/s (a) Isometric view; (b) Front view; (c) Side view

## Conclusion

This study uses CFD to calculate the aerodynamics of the wind turbine to obtain important information about the wind turbine. From the perspective of the calculated torque, although there is an error with NREL, it is caused by different calculation methods, but they are all within the acceptable range. The verification of the pressure coefficient can further confirm that the pressure value of the result is at the leading edge, and the upper edge is positive pressure and the lower edge is negative pressure. This situation is within a reasonable range, and the comparison result is also consistent with Alesbe, et al. [7] Finally, the velocity streamline of the cross-section also clearly shows that there is no airflow separation phenomenon on the blade surface, and the velocity gradually increases with the root, and the maximum value is distributed at the tip of

the blade, and the wake also develops and passes smoothly. The above shows that the results obtained in this study are good, and the performance of the wind turbine can be predicted through numerical methods, laying a foundation for simulation.

## 謝誌

本文係科技部專題研究計畫 (編號 MOST MOST 109-2221-E-006 -100 -MY2)之相關研究成果，承蒙科技部經費補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱

## Reference

- [1] P. I. Muiruri, O. S. Motsamai, and R. Ndeda, "A comparative study of RANS-based turbulence models for an upscale wind turbine blade," *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 3, pp. 1-15, 2019.
- [2] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, "Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development," National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2009.
- [3] Y. Bazilevs *et al.*, "3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part I: Geometry modeling and aerodynamics," *International journal for numerical methods in fluids*, vol. 65, no. 1-3, pp. 207-235, 2011.
- [4] N. N. Sørensen, J. A. Michelsen, and S. Schreck, "Navier-Stokes predictions of the NREL phase VI rotor in the NASA Ames 80 ft × 120 ft wind tunnel," *Wind Energy*, vol. 5, no. 2-3, pp. 151-169, 2002, doi: 10.1002/we.64.
- [5] W. Wang, Y. Cao, and T. Okaze, "Comparison of hexahedral, tetrahedral and polyhedral cells for reproducing the wind field around an isolated building by LES," *Building and Environment*, vol. 195, p. 107717, 2021.
- [6] R. Lanzafame, S. Mauro, and M. Messina, "Wind turbine CFD modeling using a correlation-based transitional model," *Renewable Energy*, vol. 52, pp. 31-39, 2013.
- [7] I. Alesbe, M. Abdel-Maksoud, and S. Aljabair, "Investigation of the unsteady flow behaviour on a wind turbine using a BEM and a RANSE method," *Journal of renewable energy*, vol. 2016, 2016.

# 風洞實驗量測紊流邊界層流作用下前後排列之風力機群尾跡流特性

蕭葆義<sup>1\*</sup> 呂宣翰<sup>2</sup> 曹柏暉<sup>3</sup> 許泰文<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系教授

<sup>2</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士研究生

<sup>3</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士

<sup>4</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系講座教授

## 摘要

本文應用大氣環境風洞模擬近岸或離岸海域之紊流邊界層，量測分析探討紊流邊界層作用下不同間距排列之風力機尾跡流分布特性，包括平均風速與紊流強度。實驗量測尾跡流包含前後兩支與 3 支風力機不同間距之排列，以及風力機布置間距與風能密度比值及下風距離關係。

關鍵詞：紊流邊界層、大氣邊界層風洞、近岸或離岸風力田、風力機、尾跡流、風能密度

## Wind Tunnel Study of Wake Flow of Wind Turbines in Tandem under the Turbulent Boundary Layer Flow

Bao-Shi Shiau<sup>\*</sup>, Xuan-Han Lu, Po-Hui Cao, Tai-Wen Hsu

<sup>\*</sup> Professor, Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

This study employed atmospheric wind tunnel to simulate the onshore or offshore turbulent boundary layer. The wake flow of wind turbines in tandem with different gaps under the interaction of turbulent boundary layer flow were measured and investigated. Results can offer understanding and assess the layout of turbines in offshore or onshore wind farms.

Keywords: Turbulent boundary layer; Atmospheric boundary layer wind tunnel; Offshore or onshore wind farm; Wind turbine; Wake flow; Wind power density

## 一、前言

全球溫室氣體大量排放造成大氣暖化，強烈地影響氣候變遷形成極端氣候。為降低溫室氣體排放，綠色能源是現在也是未來必然趨勢，而風能就是一種自然綠色能源，人類必然要積極開發應用，取代傳統化石燃料能源，避免排放大量溫室體。台灣海峽具有豐沛風力能源，西部沿海岸際(onshore)或離岸(offshore)風電開發，目前政府積極進行。風電產生主要係藉由風力機，而風力機輸出電力能源大小則由風速定。一般開發風力田(wind farm)包含許多風力機布置，後方風力機就會受到前方風力機尾跡

流(wake)效應，進而影響降低後方風力機產生之風能。因此風力機群布置間距之風速分布變化，亦即速度回復性(recovery)探討有其重要與必要性。

風力機尾跡流效應研究方式除了進行實地量測或應用理論分析或數值模擬計算[1~2]之外，使用風洞實驗模擬係方便有效的工具[3]。Schumann *et al.* [4]採用風洞實驗量測探討單支風機後方尾跡流。Chamorro and Porte-Agel [5]進行風洞實驗研究邊界層對風力田內部與外部之紊流特性本影響效應。蕭與藍[6]應用風洞量測風力田錯列式風力機之風場特性。本文研究應用大氣邊界層風洞模擬紊流邊界

層流，並量測研究紊流邊界層作用下兩支與三支不同間距排列之風力機尾跡流特性，藉以提供規劃近岸或離岸海域風力田之風力機群布置評估與參考。

## 二、實驗設置

本研究係於國立台灣海洋大學河海工程系大氣環境風洞實驗室進行。風洞總長 26.5m，實驗段長 12.65m，斷面寬 2m，高 1.4m。空風洞斷面平均風風均勻性誤差 $<1\%$ ，紊流強度在平均風速 5m/s 小於 0.5%。利用三角狀錐板與粗糙元素排列模擬完全發展幾何縮尺 1/500 之近岸或離岸海域之中性紊流邊界層流。

風力機為三葉式模型，考量風力機葉片之氣動力特性，模型風力機葉片翼尖速度比值(tip speed ratio)  $\lambda = (\Omega D/2)/U_{Hub} \approx 3.5$ ， $\Omega$ :模型葉片轉速，D:模型葉片直徑， $U_{Hub}$ :模型風力機葉片軸心高度之平均風速。Segalini and Dahlberg [7] 風力田風洞實驗二葉式風機模型之  $\lambda \approx 5$ 。實驗模擬及量測研究兩支風機與三支風機前後不同間距排列。圖 1 所示為風力機模型布置示意圖與座標。

實驗配合使用 Flow Tracker 700CE 型之高濃度霧化器結合 Dantec Dynamics 公司之 Shell Ondina Oil Type 917 煙流用透明油體，做為煙流產生器(smoke generator)。並以 Wicked-Lasers 之手持式 3.5W 藍光雷射為光源，選擇線形鏡頭形成雷射光切頁(laser light sheet)作為煙流觀測照明，觀察風力機尾跡流現象，配合高解析度之數位單眼相機拍攝。

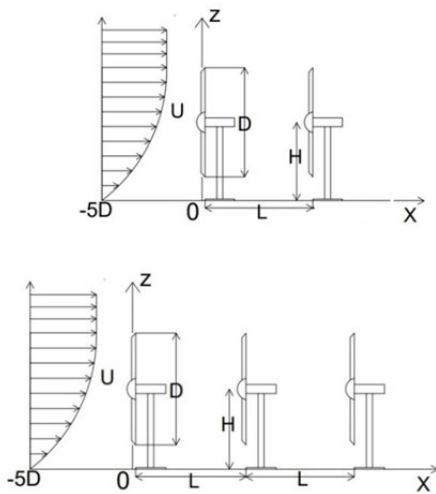


圖 1 風洞中兩支與三支風力機模型布置示意圖

## 三、結果與討論

### 3.1 風力機尾跡流之煙流示現

圖 2 為單支風力機之在紊流邊界層內之尾跡流煙流示現照片，煙流照片呈顯風力機後方之尾跡流現象。圖 3 為二支風力機排列之尾跡流照片，上圖間距 2D，下圖間距 4D。照片呈現間距從 2D 增加為 4D 時，尾跡流之回流現象較為和緩，亦即流速逐漸回復增加。圖 4 則為三支風力機排列，上圖間距 2D，下圖間距 3D。煙流呈現之流速變化結果與圖 3 類似，間距增加使得流速逐漸回復增加。

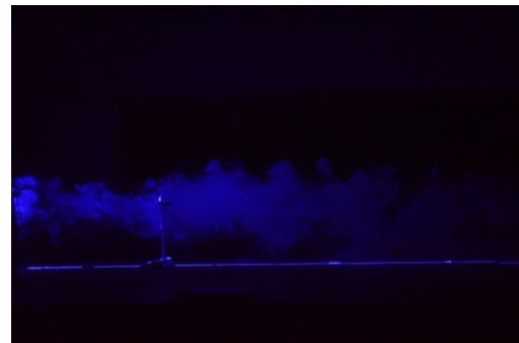


圖 2 雷射光頁照明單支風力機在紊流邊界層內之尾跡流煙流示現



圖 3 雷射光頁照明之風力機尾跡流煙流示現；二支風力機排列，上圖間距 2D，下圖間距 4D

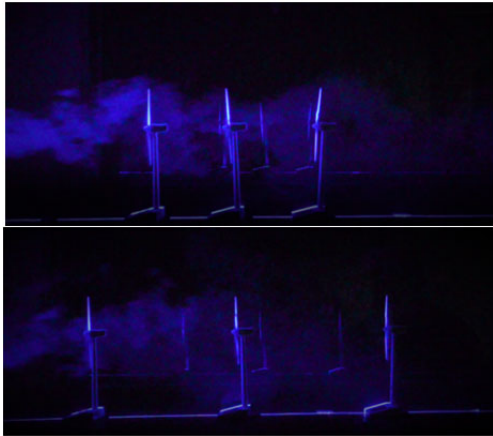


圖 4 雷射光頁照明之風力跡尾跡流煙流示現；三支風力機排列，上圖間距 2D，下圖間距 3D

### 3.2 平均風速剖面

兩支風力機前後間距  $L=2D, 3D, 4D, 5D$  (此處  $D$ : 葉片直徑) 排列之尾跡流包括平均風速剖面結果示如圖 5~圖 8。各圖之平均風速剖面顯示當間距從 2D 增加為 5D 時，第一支風力機與第二支風力機在葉片直徑高度範圍內之尾跡流平均風速剖面回復性(recovery)變得較明顯。

比較兩支風力機不同間距排列在風力機轉子中心高度沿下游之平均速度變化，結果示如圖 9。圖之結果呈現間距為 2D 時，平均速度衰減很快，但隨著間距從 2D 增加至 5D，平均速度衰減趨緩。

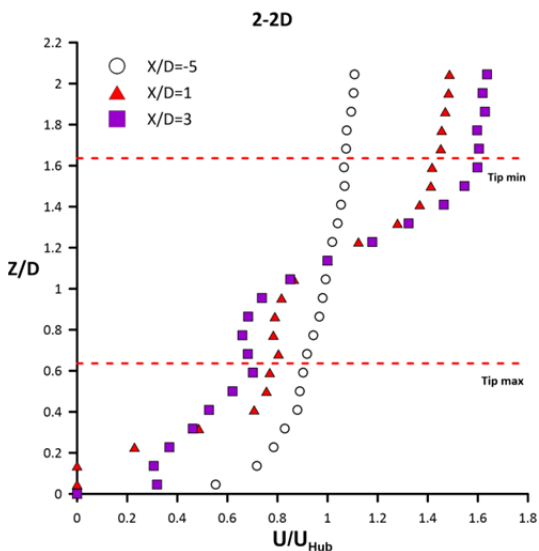


圖 5 兩支風力機在不同下風距離尾跡流之平均流速垂直剖面變化；風力機間距  $L=2D$

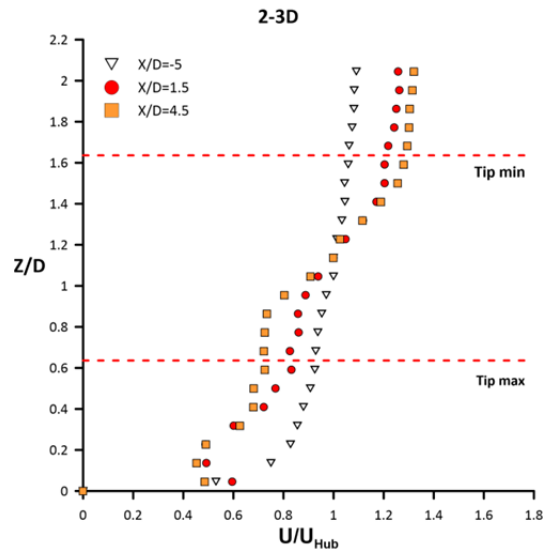


圖 6 兩支風力機在不同下風距離尾跡流之平均流速垂直剖面變化；風力機間距  $L=3D$

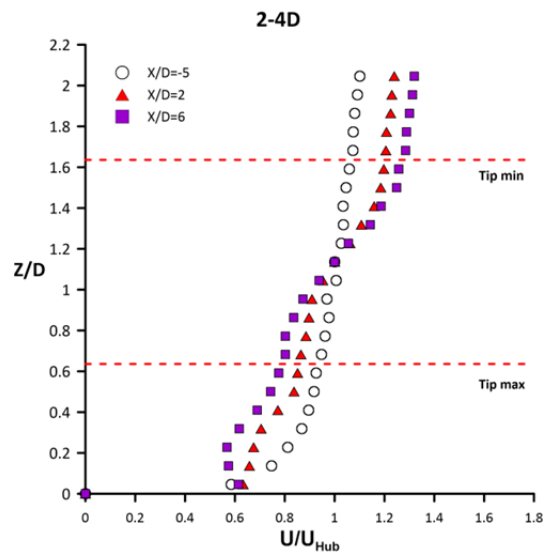


圖 7 兩支風力機在不同下風距離尾跡流之平均流速垂直剖面變化；風力機間距  $L=4D$

此外有關沿單一風力機尾跡流下游距離之風力機轉子中心高度速度衰減(亦即中心速度與風力機上游相同高度之速度差值)Vermeer *et al.*[8]與 Zhang *et al.* [3]等研究均顯示係呈現指數型衰減(power law decay)函數關係，而本文研究兩支風力機不同間距之排列，風力機轉子中心高度速度沿風力跡下游距離之衰減也呈現類似結果。

圖 10 與圖 11 分別為紊流邊界層流作用下，



三支風力機間距  $L=2D$  與  $L=3D$  時，風力機在不同下風距離尾跡流之平均風速垂直剖面。結果也顯示風力機間距增加，尾跡流平均風速之回復性 (recovery) 增加。

### 3.3 紊流強度剖面

圖 12~圖 14 所示為兩支風力機前後間距  $L=3D$ ， $4D$ ， $5D$  (此處  $D$ ：葉片直徑) 排列，風力機上游及下游尾跡流紊流強度剖面之結果。

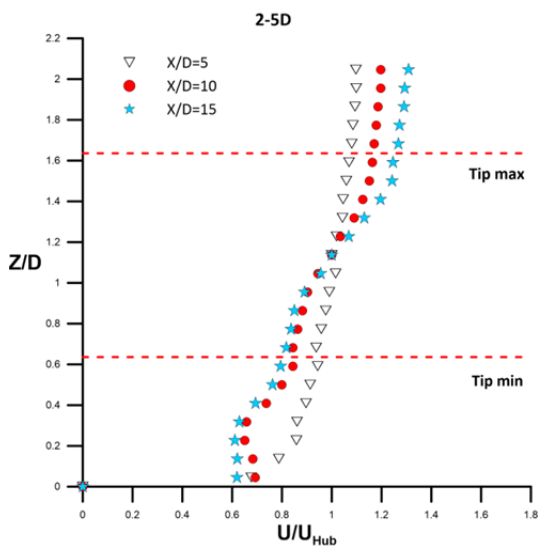


圖 8 兩支風力機在不同下風距離尾跡流之平均流速垂直剖面變化；風力機間距  $L=5D$

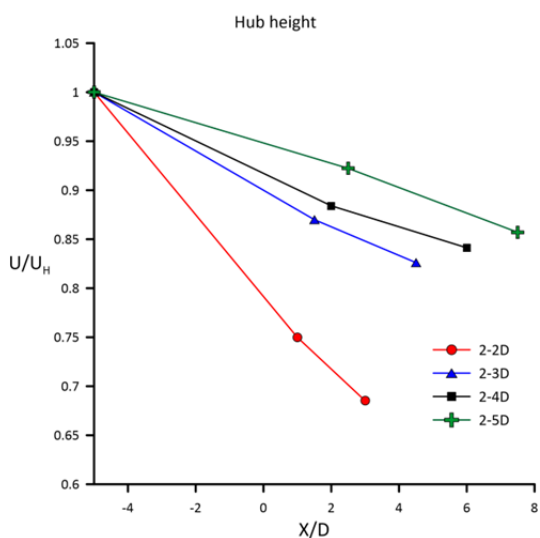


圖 9 兩支風力機不同間距排列沿下游距離之風機中心高度平均流速變化

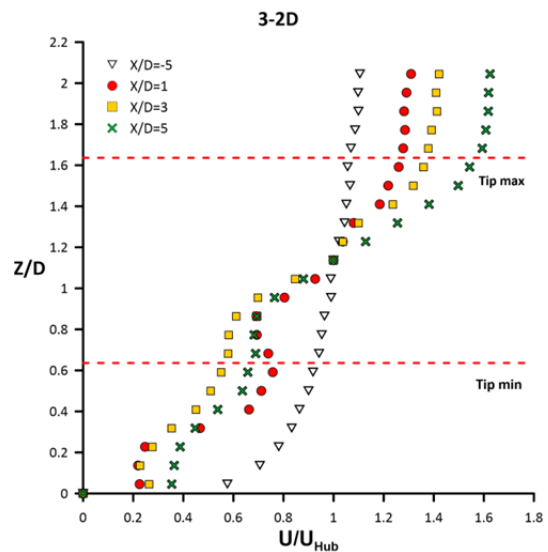


圖 10 三支風力機在不同下風距離尾跡流之平均流速垂直剖面變化；風力機間距  $L=2D$

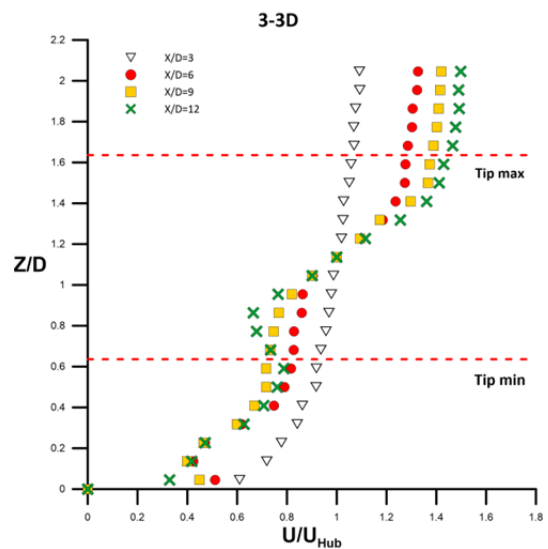


圖 11 三支風力機在不同下風距離尾跡流之平均流速垂直剖面變化；風力機間距  $L=3D$

圖 12~圖 14 所示之紊流強度定義如下： $\sigma/\bar{U}$ ，此處  $\sigma$  為速度擾動之均方根值 (root mean square)， $\bar{U}$  為平均速度。該等圖所示為風力機上游之紊流強度剖面以及第一支風機後方下游及第二支風力機後方下游處之紊流強度剖面，隨著下游距離增加，在風力機葉扇範圍內之紊流強度均有增強的情況。比較兩支風力機間距分別為  $L=3D$ ， $L=4D$ ，及  $L=5D$

時，可發現風力機布置的間距增加時，使得風力機上游之紊流強度剖面以及第一支風機後方下游及第二支風力機後方下游處之紊流強度剖面之差異性逐漸減小，亦即風力機間距增加，前一部風力機尾跡流擾動對於後方風力機之尾跡流影響變小。

三支風力機在不同下風距離尾跡流之紊流強度垂直剖面變化分別示如圖 15 與圖 16，圖 15 為各風力機間距  $L=2D$ ，而圖 16 則為各風力機間距  $L=3D$ 。

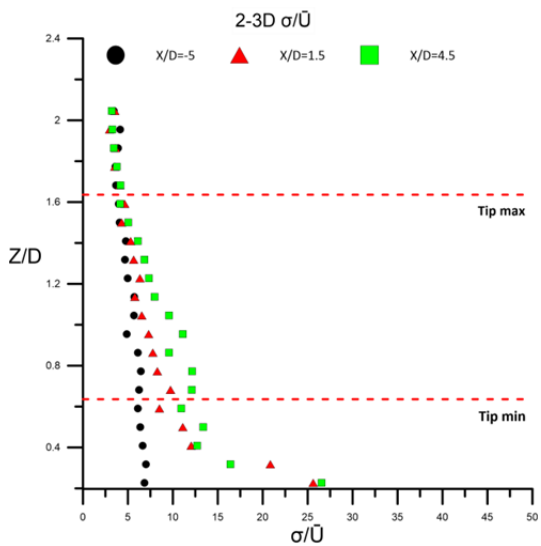


圖 12 兩支風力機在不同下風距離尾跡流變化；風力機間距  $L=3D$

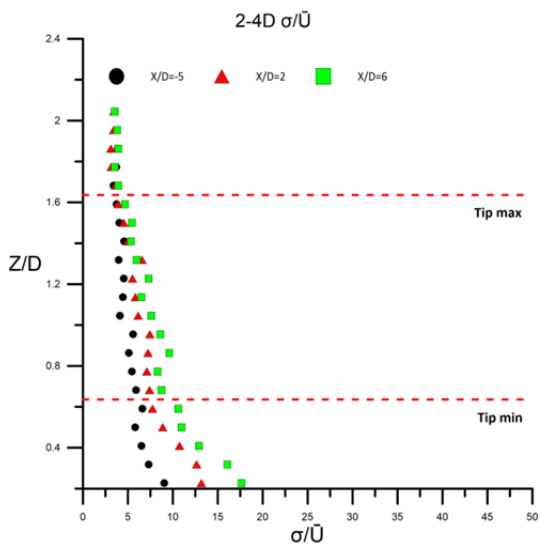


圖 13 兩支風力機在不同下風距離尾跡流之紊流強度垂直剖面變化；風力機間距  $L=4D$

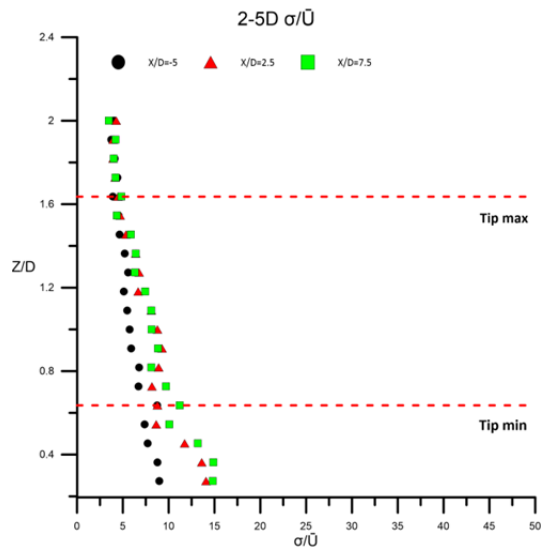


圖 14 兩支風力機在不同下風距離尾跡流之紊流強度垂直剖面變化；風力機間距  $L=5D$

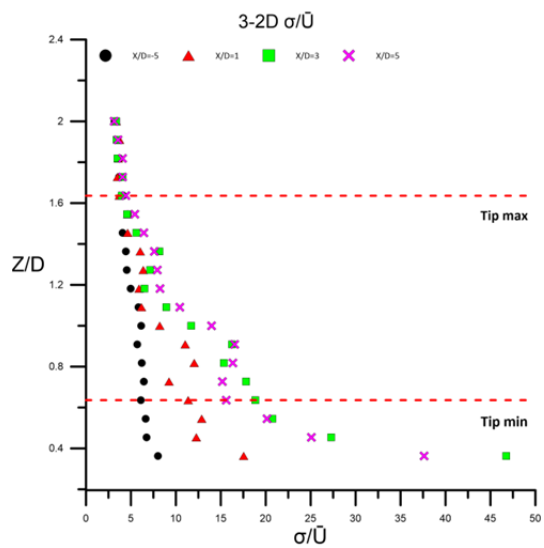


圖 15 三支風力機在不同下風距離尾跡流之紊流強度垂直剖面變化；風力機間距  $L=2D$

圖 15 與圖 16 所示為風力機上游之紊流強度剖面以及第一支風機後方下游及第二支風力機後方下游與第三支風力機後方下游處之紊流強度剖面，結果均呈現隨著下游距離增加，在風機葉扇範圍內之紊流強度均有增強的情況。

比較圖 15 與圖 16 在風力機葉扇範圍內之紊流強度剖面，結果顯示風力機布置間距從  $2D$  增加至  $3D$  時，風力機上游之紊流強度剖面以及第一支風機後

方下游及第二支風力機後方下游處之紊流強度剖面之差異性逐漸減小。

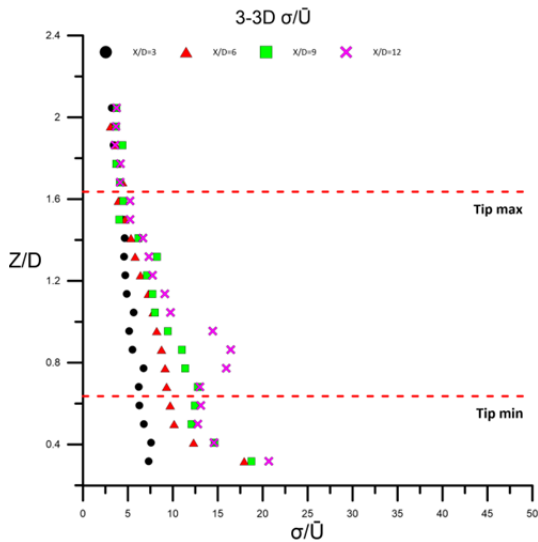


圖 16 三支風力機在不同下風距離尾跡流之紊流強度垂直剖面變化；風力機間距  $L=3D$

### 3.4 風能密度

對兩支風力機不同間距布置之風能密度(power density)與風力機上游端未受干擾處之風能密度二者之比值( $P_{w,d}$ )<sub>R</sub> 進行分析，不同間距之風能密度比值沿風力機下游之函數關係結果示如圖 17。圖中符號:實心圓:2D, 方塊:3D, 三角形:4D, 菱形:5D。結果顯示風力機布置間距增加，尾跡流回復性增強，因此導致在各下游處之風能密度比值均增加。

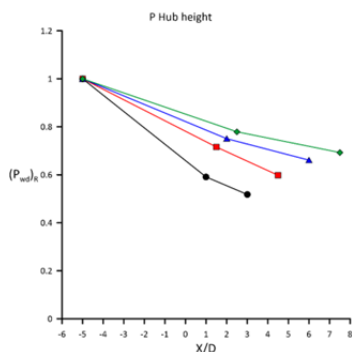


圖 17 兩支風力機風能密度比值與下風距離關係

## 四、結論

兩支風力機布置間距從 2 倍葉片直徑加大為 5 倍時，第一支風力機與第二支風力機在葉片直徑高

度範圍內之尾跡流平均風速剖面以及紊流強度剖面之結果差異性變的不明顯，顯示尾跡流呈現明顯之回復性。三支風力機排列，隨著前後距離增加，在葉片直徑高度範圍內之尾跡流平均風速剖面回復性也有類似結果。當風力機布置間距增大，尾跡流回復性增強，使得各下游處之風能密度比值均增加。

## 謝誌

本文係教育部 109 年高教深耕計畫-特色領域研究中心計畫-海洋工程科技中心：全球變遷下海洋工程科技之創新與運用，提供部分經費協助本文研究，謹致謝忱。

## 參考文獻

1. Tian, L., Zhu, W., Shen, W., Zhao, N., and Shen, Z. (2015) Development and Validation of a New Two-dimensional Wake Model for for wind Turbine Wakes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 137, 90-99.
2. Ishihara, T. and Qian, G. (2018) A New Gaussain-based Analytical Wake Model for Wind Turbines Considering Turbulence Intensities and Thrust Coefficine Effects, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 177, 275-292.
3. Zhang, W., Markfort, C.D., and Porte-Agel, F. (2013) Wind Turbine Wakes in a Convective Boundary Layer: A Wind Tunnel Study, *Boundary Layer Meteorology*, 146, 161-179.
4. Schumann, H., Pierella, F., and Saetran, L. (2013) Experimental Investigation of Wind Turbine Wakes in the Wind Tunnel, *Energy Procedia*, 35, 285-296.
5. Chamorrrp, L.P. and Porte-Agel, F. (2011) Turbulent Flow Inside and Above a Wind Farm: A Wind Tunnel Study, *Energies*, 4, 1916-1936.
6. 蕭葆義, 藍文基, (2016), " 錯列式風力機群之風場特性風洞實驗分析," 第三十八屆海洋工程研討會論文集, 第 588-593 頁
7. Segalini, A., and Dahlberg, J.-A. (2020) Blockage Effects in Wind Farms, *Wind Energy*, 23, 120-128.
8. Vermeer, L.J., Sorensen, J.N., and Crespo, a. (2003) Wind Turbine Wake Aerodynamics, *Progreesive Aero Science*, 39, 467-510.



## E.桃園海岸特輯



# 桃園市河川出海口之生態調查及環境教育推廣

陳柏蘆<sup>1</sup> 王彙喬<sup>2</sup> 陳奕榮<sup>3</sup> 葉翰揚<sup>4</sup> 冉繁華<sup>5</sup> 李孟洲<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣海洋大學水產養殖學系 博士後研究員

<sup>2</sup> 國立臺灣海洋大學海洋觀光學程 助理教授

<sup>3</sup> 國立臺灣海洋大學水產養殖學系 研究助理

<sup>4</sup> 國立臺灣海洋大學水產養殖學系 博士生

<sup>5</sup> 國立臺灣海洋大學水產養殖學系 特聘教授

<sup>6</sup> 國立臺灣海洋大學水產養殖學系 副教授

## 摘要

我國西部海岸線長約 400 多公里，均屬中央山脈大量沈積物堆積之軟底沙質海岸，其中又以桃園市之海岸線蘊藏豐富的生物與景觀多樣性，故極具自然、文化資產之保存價值。隨著全球暖化及氣候變遷等現象頻發，桃園市政府在推進經濟發展的同時，亦尋求與自然環境的平衡，期望能進一步復育生態環境，達到永續經營與發展之目標。為實現桃園市政府「綠色桃園新生活」之市政願景，作者們於 2020 年 7-10 月針對桃園市河川出海口（共六條溪，南崁溪、富林溪、大堀溪、觀音溪、新屋溪及社子溪）進行河川出海口 4 種生態調查，包含魚類、浮游動物、浮游植物及基礎生產力，並以魚苗放流增裕海域資源，最後於配合桃園市政府推廣海岸環境教育訓練課程及海洋環境教育宣導活動。

關鍵詞：河川出海口、生態調查、魚苗放流、環境教育

## ECOLOGICAL INVESTIGATION AND ENVIRONMENTAL EDUCATION PROMOTION OF ESTUARY IN TAOYUAN CITY

Boryuan Chen<sup>\*</sup>, Hui-Chiao Wang, Yi-Lung, Chen, Han-Yang Yeh, Fan-Hua Nan, Meng-Chou Lee

<sup>\*</sup>Postdoctoral Researcher, Department of Aquaculture, National Taiwan Ocean University

## ABSTRACT

The western coastline of Republic of China (Taiwan) is more than 400 kilometers long, all of which are soft-bottom sandy coasts with a large amount of sediment accumulation in the Central Mountain Range. In among, the coastline of Taoyuan City is rich in biological and scenic diversity, therefore it has great value for the preservation of natural and cultural assets. With the frequent occurrence of global warming and climate change, Taoyuan City Government is promoting economic development while seeking a balance with the natural environment in the hope of further restoring the ecological environment and achieving the goal of sustainable management and development. In order to achieve the objective – “Green Taoyuan New Life”, the authors conducted four ecological surveys of estuary (six rivers, Nankan river, Fulin river, Dabori river, Guanyin river, Xinya river, and Shezi river) from July to October 2020, and released fish fry to enhance marine resources, at last we also promoted coastal environmental education training courses and marine environmental education promotion activities in cooperation with Taoyuan City Government. In this project, the ecological investigation of the estuary was divided into fish survey, phytoplankton survey, phytoplankton survey and seawater base productivity survey. According to the results, a total of 19 species of fish, 30 species

of phytoplankton, and 55 species of phytoplankton were found. And the total basic productivity was higher in summer than in autumn, with Guanyin river was the highest. Based on the above results, 20,000 fish fry were released in each of the five releasing events. On the other hand, two 8-hours training courses for coastal ecology interpreters were conducted in conjunction with the above releasing events, and four 16-hours marine environment education and promotion activities were conducted in conjunction with the training courses for coastal ecology interpreters and marine environment education and promotion activities.

Keywords: Ecological investigation; Estuary; Fish fry releases; Environmental education

## 一、前言

我國西部海岸線長約 400 多公里，均屬中央山脈大量沈積物堆積之軟底沙質海岸，其中又以桃園市之海岸線蘊藏豐富的生物與景觀多樣性，故極具自然、文化資產之保存價值。隨著全球暖化及氣候變遷等現象頻發，桃園市政府在推展經濟發展的同時，亦尋求與自然環境的平衡，期望能進一步復育生態環境，達到永續經營與發展之目標。桃園市海岸線北起蘆竹區海湖，西南至新屋區蚵殼港，總長約 46 公里，屬砂質海岸，海岸組成以沙、礫石及碳酸鈣堆積之礁體為主，綿延流長的海岸地區蘊藏豐富的生物與景觀資源，並富含極具保存價值的自然及文化資產，包含許厝港國家級重要濕地、觀新藻礁、草漯沙丘與新屋石滬等。桃園市除了蘊含河、海與埤塘等豐富自然人文景觀，亦肩負著我國第一工業科技大市之職責，工業產值常居我國之冠，海岸生態環境承载力與永續發展成為了桃園市所面臨之艱鉅挑戰。

隨全球暖化及氣候變遷等現象日復嚴峻，桃園市在推展地方經濟發展的同時，亦尋求與自然環境共存共榮，盼能更進一步復育生態環境，達到資源永續、社區經營發展之里海倡議目標。爰此，桃園市政府於 2018 年時率全國之先，成立海岸管理工程處，專責辦理海岸管理事務，以打造自然人文、親水樂活的美麗海岸為願景，以清淨海岸、資源保育及合理利用為目標，可更完整的啟動海岸保育及教育工作，加強保護海岸自然景觀，並結合當地社區，共同推動環境教育，以確保海洋的永續生命力。

為實現桃園市政府「綠色桃園新生活」之市政願景，以魚苗放流增裕海域資源，延續海岸地區生物多樣性之基礎下，配合推廣桃園海岸環境教育，以及推動桃園市沿岸生態旅遊行程，本計畫於 2020 年 7-10 月針對桃園市 6 條河川之出海口（南崁溪、

富林溪、樹林溪、大堀溪、觀音溪、新屋溪與社子溪）進行「1. 河川出海口生態調查」，並比對漁業署公告之「水產動物增殖放流限制及應遵行事項」，進行「2. 魚苗增殖放流」。此外，本團隊另搭配放流活動，進行「3-1. 海岸生態解說員特殊訓練課程」，並將課程分為基礎生物野放與進階戶外實作課程，其內容涵括海洋、河口生態環境概論、生物野放法規規範、魚苗放流介紹、生物野放環境認識、活動注意事項、實際魚苗放流操作及相關案例分享等豐富內容。同時，本團隊亦配合桃園市政府親海、海洋環境教育活動，進行「3-2. 海洋環境教育宣導活動」，盼能帶動桃園海岸地區轉型成為環境教育、生態旅遊、地景旅遊等多元發展的觀光型態。

## 二、執行方法

### 1. 河川出海口生態調查

本計畫欲針對桃園市河川出海口（南崁溪、富林溪、大堀溪、觀音溪、新屋溪與社子溪）（圖 1），於 6 條溪口，進行河川出海口生態調查。



圖 1、河川出海口生態調查位置圖

#### 1.1. 魚類調查

本計畫於 2020 年 7-10 月，針對桃園市河川出海口 6 處河川出海口，各設置 2 處樣站，共計 12 個



樣站，計畫期間共進行 4 次調查，共計 48 個調查樣站，以籠具之誘捕法，利用魚籠進行魚類誘捕，於各樣站施放 2 個蛇籠（長 500 cm×寬 30 cm×高 25 cm），分別使用秋刀魚肉及市售香料誘餌進行誘捕，於放置隔夜後收集籠中捕獲物；或以網具之網捕法，於河口水域挑選魚類較可能聚集之適合棲地進行數次手拋網採集，採集方法得依現場生態特徵及天候因素進行適度調整。採集後於現場進行魚類鑑定後釋放，如無法於現場判別種類則將各樣品分別包裝，標示採樣時間、地點，以 10~15% 福馬林與冰塊保存後，帶回國立臺灣海洋大學實驗室內進行鑑種。

## 1.2. 浮游動、植物調查

本計畫於 2020 年 7、9 月，於 6 處河川出海口，各進行 1 次調查。調查方式依環保署公告浮游動物檢測方法（NIEA E701.20C），於退潮時進行現場採樣。採集浮游動物時，單一樣點取三點具代表性之表層水樣 10L，將水樣混合後，以 100 $\mu$ m 過濾網過濾後再以蒸餾水沖洗網目內浮游動物，並倒入裝有 0.3% 麻醉劑（Procaine chloride）之採集瓶中，隨後將 1 mL 福馬林倒入濃縮液中，加蒸餾水至 20 mL，使溶液達到含有 4% 福馬林，並置冰保存後，帶回實驗室於顯微鏡下進行鑑定與計量。

採集浮游植物之方式為，在單一樣點取三點具代表性的表層水樣混合後，分裝成三瓶 1 公升之廣口塑膠瓶，並各加入 3mL 路戈氏碘液（Lugol's solution）置冰帶回實驗室。浮游植物鑑種前將 3 瓶水樣混合均勻，取 50mL 水樣於 50k Pa 以下，以抽氣幫浦進行過濾。當水樣剩下約 0.5 公分高度時，關掉幫浦，再將壓力降低至 12k Pa 繼續抽氣過濾至水乾。過濾後之濾膜夾起，放入載玻片之油滴上，再加 2 滴顯微鏡用浸油，置於無塵處使其乾燥。待濾紙成透明狀後，再加入 1 滴顯微鏡用浸油用蓋玻片蓋住，以顯微鏡觀察計數。

## 1.3. 海洋基礎生產力調查

基礎生產力調查為 2020 年 7、9 月於 6 處河川出海口，各進行 1 次調查。調查時於退潮時進行現場採樣，以 1L PE 採樣瓶，採取約水下 0-0.5m 處之表層水，置於冰箱後，全程以低溫保存運送回實驗室，水樣皆在採樣後 48 小時內，依環保署公告水中

葉綠素 a 檢測方法—丙酮萃取／螢光分析法（NIEA E509.01C）進行分析。

## 1.4. 分析與統計

將本計畫河川出海口生態調查之物種名錄與數量等資料以 Microsoft Excel 建檔，並進行物種數統計，並依照各樣站不同月份之差異，比對調查月份之物種數變化。

## 2. 魚苗增值放流

整合桃園海岸生態保護白皮書魚類調查資料、許厝港濕地保育利用計畫潮間帶魚類調查，及本次魚種調查結果進行資料比對，確認河川魚類物種及數量變化，針對漁業署公告之「水產動物增殖放流限制及應遵行事項」中建議增殖放流之種類與應遵行事項，進行至少 2 種魚種之增殖放流，並搭配後續海岸生態解說員特殊訓練課程與海洋環境教育宣導活動進行放流活動。

## 3. 海岸生態解說員特殊訓練課程及海洋環境教育宣導活動

本計畫針對野放活動配合漁港辦理之漁民節、桃園市沿海地區生態旅遊路線、小旅行活動、世界海洋日、海客文化活動（如牽罟、石滬等）、淨護海活動、其他政府單位辦理之親海及海洋環境教育活動舉辦 8 小時課程培訓，其中 6 小時為基礎生物野放課程，2 小時為進階戶外實作課程，課程結束後發放學習回饋單給參加學員填寫，並回收回饋單以分析課程效益。其中，基礎生物野放課程包含海洋及河口生態環境概論、生物野放法規規範、魚苗放流介紹及相關案例分享等內容；進階戶外實作課程包含生物野放環境認識、活動注意事項、實際魚苗放流操作等內容，放流之魚苗為本調查工作而得之增殖放流魚苗。

## 三、結果

### 1. 河川出海口生態調查

本計畫調查結果共發現魚類 19 種，最高及最低之各月物種數皆為富林溪，最高為 8 月份，最低為 10 月份（圖 2）。浮游動物共發現 30 種，各月物種

數以7月份觀音溪及富林溪最高，最低為9月份之社子溪及南坎溪(圖3)。及浮游植物共55種，各月物種數以7月份觀音溪為最高，最低為9月份富林溪(圖3)。出海口之總基礎生產力則以夏季高於秋季，其中又以觀音溪為最高(圖5)。

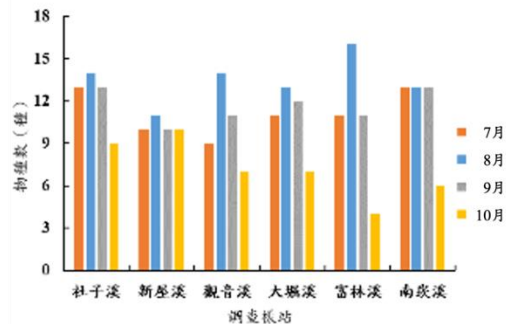


圖 2、調查期間桃園市河川出海口魚類之物種數

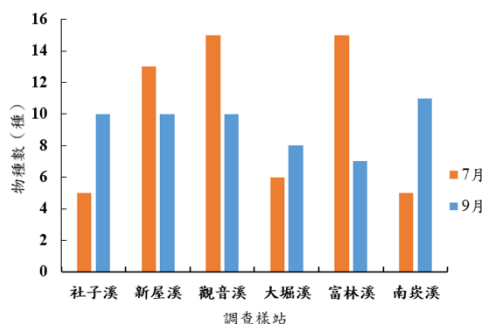


圖 3、調查期間桃園市河川出海口浮游動物之物種數

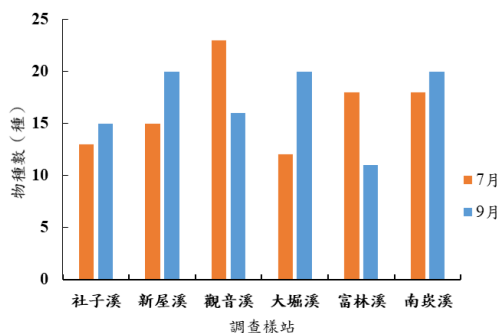


圖 3、調查期間桃園市河川出海口浮游植物之物種數

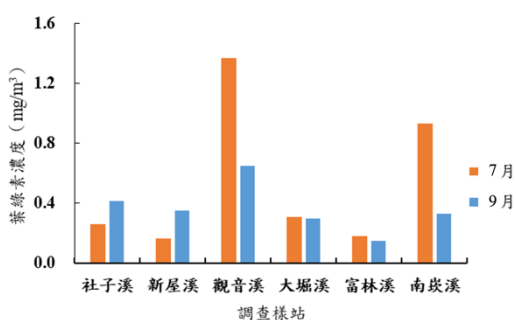


圖 5、調查期間桃園市河川出海口基礎生產力

## 2. 魚苗增殖放流

本團隊整合桃園海岸生態保護白皮書魚類調查、104、105-106、106-107 年度許厝港濕地保育利用計畫、108 年度桃園市海岸地區生物多樣性指標調查計畫及本次魚種調查結果進行資料比對，確認河川魚類物種及數量變化，針對漁業署公告之「水產動物增殖放流限制及應遵行事項」中建議增殖放流之種類與應遵行事項，進行放流物種之評選(表 1)，並以鯛科、笛鯛科、鯔科、馬鮫科、鱸科、石首魚科、鰻科與鮫科之魚類為主，進行 5 場次，共約 10 萬尾之魚苗放流，同時搭配海岸生態解說員特殊訓練課程與海洋環境教育宣導活動辦理。

表 1、建議增殖放流魚種資料比照表

放流種類	水產動物增殖放流限制及應遵行事項	本計畫調查	108 年度桃園市海岸地區生物多樣性指標調查計畫	在地社區、協會與漁民	桃園市府背景資料*
鯛科及笛鯛科	黑鯛、黃錫鯛、黃鰭鯛、嘉鱚、川紋笛鯛、赤鰭笛鯛、銀紋笛鯛	銀紋笛鯛、灰鰭棘鯛、勒氏笛鯛、黃鰭棘鯛	火斑笛鯛、勒氏笛鯛、銀紋笛鯛、黑棘鯛、黃鰭棘鯛、灰鰭鯛、臺灣棘鯛、真鯛	黑棘鯛	黃錫鯛、黃鰭鯛、灰鰭鯛、黑鯛、銀紋笛鯛、勒氏笛鯛、火斑笛鯛
鯔科	鯔科魚類	鯔	鯔	-	鯔
馬鮫科	四絲馬鮫等	-	四絲馬鮫	四絲馬鮫	-
鱸科	尖吻鱸、星雞魚等	-	星雞魚、三線磯鱸、花尾胡椒鯛	-	星雞魚、三線雞魚
石首魚科	鮚、黃金鮚、叫姑魚等	-	大黃魚、鮚	-	-
鰻科	布氏鰻鰤等	-	布氏鰻鰤	布氏鰻鰤	-
鮫科	點帶石斑等	-	青石斑魚、點帶石斑魚、赤點石斑魚、鱸滑石斑魚、寶石石斑魚、瑪拉巴石斑魚	-	點帶石斑
龍占科	青嘴龍占等	-	-	-	-
梭子蟹科	銹斑蟬、遠洋梭子蟹	-	-	遠洋梭子蟹	-

### 3. 海岸生態解說員特殊訓練課程 與海洋環境教育宣導活動

為強化桃園市海岸生態解說員之專業知能，本計畫針對野放活動進行 8 小時培訓課程，其中 6 小時為基礎生物野放課程，內容包含海洋及河口生態環境概論、生物野放法規規範、魚苗放流介紹及相關案例分享等內容；2 小時為進階戶外實作課程，內容包含生物野放環境認識、活動注意事項、實際魚苗放流操作等內容。另外，海洋環境教育宣導活動共舉辦 4 場次，其中 2 場次配合桃園市海管處淨灘、生態旅遊之活動，每場次至少 4 小時，並設計宣導用海報及摺頁(圖 4)，宣導內容為海洋環境教育及正確的魚苗野放觀念。同時，本團隊亦錄製實地野放與海洋環境教育之紀錄影片，以加強紀錄海洋環境教育宣導活動的成果。



圖 4、海洋環境教育宣導活動海報

課程結束後以學習回饋單分析課程效益，統計結果指出(圖 5)，過半數之活動參與者皆能清楚瞭解海洋環境資源的重要性，並能體會魚苗放流、環境保育對於海洋生態資源的正面影響。

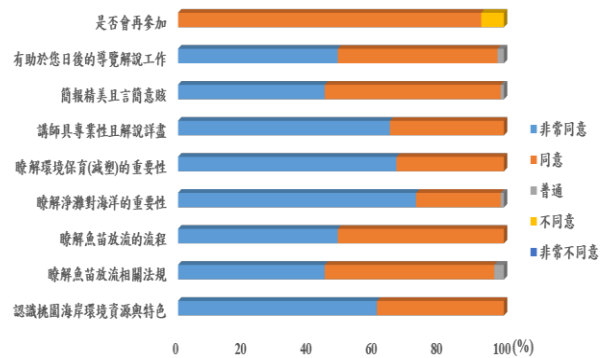


圖 5、109 年桃園市海岸生態解說員培力學習回饋單統計結果

### 四、結論

經由本計畫的執行，針對桃園市 6 處河川出海口進行基礎生態調查，內容包含魚類、浮游動物植物之物種數及出海口之基礎生產力，本計畫之結果可提供未來於桃園市或其他鄰近城市進行他項調查時之參考文獻。另外，關於海岸生態解說員特殊訓練課程，本團隊完成野放活動進行 8 小時培訓，針對其中 6 小時為基礎生物野放課程，2 小時為進階戶外實作課程。本團隊為了解參與課程的解說員對於課程規劃與內容的滿意度及相關回饋，即設計學習回饋單，並於培訓課程結束後發放予生態解說員填寫。就「海岸生態解說員特殊訓練課程」學習回饋單的分析結果得知絕大部分的生態解說員均認同本課程的內容且願意再參與相關課程。

海洋環境教育宣導活動的部分，本計畫團隊配合漁港辦理的牽罟、淨灘、淨海或護海相關活動，辦理海洋環境教育宣導活動，共計辦理 4 場次，每場次至少 4 小時。每回均配合活動宣傳保育課程及實地野放知識，推廣正確野放方式。為有效宣達活動效益，本團隊每回活動均錄製影片且剪輯成影片供桃園市政府日後推廣使用。

### 謝誌

本文係桃園市政府海岸管理工程處之計畫 109 年海洋生物復育暨海洋環境教育宣導計畫(契約編號 109070313)之相關研究成果，在計畫執行中承蒙桃園市政府海岸管理工程處內各級長官的照顧與幫

忙。本團隊在此借本文向委託機關桃園市政府海岸管理工程處致上最高的謝意。

### 參考文獻

1. 行政院環境保護署、水中葉綠素 a 檢測方法－丙酮萃取／螢光分析法（NIEA E509.01C）。
2. 行政院環境保護署、海洋浮游動物檢測方法(NIEA E701.20C)。
3. 桃園市政府、自然樂活 海好有你 桃園海岸生態保護白皮書(2017)。
4. 桃園市政府工務局、104 年度許厝港重要濕地(國家級)基礎調查計畫。
5. 桃園市政府工務局、105-106 年度許厝港重要濕地(國家級)基礎調查計畫暨生態教育推廣。
6. 桃園市政府工務局、106-107 年度許厝港重要濕地(國家級)基礎調查計畫。
7. 桃園市政府環境保護局、108 年度桃園市海岸地區生物多樣性指標調查計畫。

# 草漯沙丘季節性地形變化監測與分析

呂紹平<sup>1</sup> 林宗儀<sup>2\*</sup> 王雅慧<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣師範大學地理學系碩士

<sup>2\*</sup> 國立臺灣師範大學地理學系教授

<sup>3</sup> 桃園市政府海岸管理工程處工程管理科科長

## 摘要

本研究於 2019 年 8 月至 2021 年 4 月間進行草漯沙丘的季節性地形變化監測，在沿岸長約 8.1 公里的範圍規劃六個調查樣區，並使用 RTK-GPS 進行地形測量，調查頻率大約每 4 個月一次。雖然各調查區沙丘剖面短期的地形變化因前面海灘寬度和植被覆蓋狀況而有所差異，但大致上在夏季時會有較明顯的侵蝕地形特徵，像是沙丘前坡腳處形成的沙丘崖。而秋冬兩季則透過丘前斜面的堆積與崖頂的斜坡崩落作用而漸恢復成典型沙丘坡面，沙丘脊則小幅度地朝陸地移動。沙丘前坡人工設置的砂籬，攔截冬季向岸風的輸砂，使周圍的砂面堆高，但也造成沙丘前坡的坡度變陡，當夏季坡腳遭波浪侵蝕形成崖面時，也更容易引起大規模的前坡崩落，減損前列沙丘的砂量，進而使沙丘的脆弱度提高。

關鍵詞：前列沙丘、季節性地形變化、沙丘崖、丘前斜面、砂籬

## Monitoring and Analysis of Seasonal Topographic Changes in Caota Sand Dune, Taoyuan

Shao-Ping Lu, Tsung-Yi Lin<sup>\*</sup>, Ya-Hui Wang

<sup>\*</sup> Professor, Department of Geography, National Taiwan Normal University

## ABSTRACT

Seasonal topographic changes of the Caota sand dune were monitored at six survey areas from August 2019 to April 2021 by using RTK-GPS every four months. Although short-term topographic changes varied among the survey areas, depending on the fronting beach width and dune vegetation cover, the erosional landform, such as the dune scarp at the base of the foreslope, was generally formed in summer. In autumn and winter, with the helps from forming dune ramp and slope slumping, the dune scarp disappeared and the foreslope recovered, while the foredune ridges slightly moved landward. Setting up grid of sand fences at the foreslope may intercept onshore sand transport and result in vertical sand accretion, but it is also to form a steeper foreslope that could be unstable and easily to trigger a large scale slumping. For a long run, this may result in increasing the dune vulnerability.

Keywords: foredune; seasonal topographic change; dune scarp; dune ramp; sand fence

## 一、研究目的

海岸沙丘在海岸帶具有海岸防禦、獨特生態系與美化景觀等功能，但依據 IPCC (2007) 的預估，氣候變遷會使未來的海平面上升，可能會造成海岸沙丘朝陸地後退或砂量減少甚至消失。臺灣海岸沙

丘大多缺乏連續性的地形監測，因此也就沒有足夠的地形高程資料來描述海岸沙丘的動態與氣象、海象因子間的關係。欲描繪短期的地形動態可從季節性尺度著手，海岸沙丘季節性的地形變化受風速、風向、植被與波浪影響，Davidson-Arnott and Law (1990) 在伊利湖(Lake Erie)岸兩個灘幅不同的前列沙丘測

量砂粒堆積量、植被覆蓋率、沉積物粒徑、風力與風速等環境變數，結果指出冬季植被的死亡導致前列沙丘上的飛砂活動增加，向岸風為控制輸砂率的因素，秋季向岸風較強，前列沙丘堆砂率高(Davidson-Arnott and Law, 1990、Ollerhead et al., 2012)。

桃園的草潔沙丘位於大園區與觀音區的西北沿海，長約 8.1 公里，在台灣海岸沙丘中的規模為數一數二者，由於高大的沙丘體、壯觀的美景與其地景價值，被桃園市政府於 2020 年 6 月公告為地方級地質公園，因此了解草潔沙丘的地形動態尤為重要。本研究試圖先從大約每 4 個月一次的地形監測來呈現草潔沙丘的季節性動態，分析氣象與海象因子的作用如何改變季節性的沙丘地形。地形監測的範圍是從草潔沙丘中規劃 6 個地形調查區，包括前列沙丘與前方的沙灘，沙灘地形與沙丘上的植被覆蓋亦為草潔沙丘地形的重要影響因子。

## 二、研究方法

本研究在草潔沙丘上規劃 6 條垂直海岸線的剖面，左右各延伸 250 公尺作為地形調查區，海側以乾潮時的水線為界，陸側則大致以灌木林前緣為界，大體上為前列沙丘與沙灘地形的範圍。RTK-GPS 為本研究所使用的地形測量工具，只要使用者所在的地點可以同時接收到 5 顆衛星訊號，就可與 e-GNSS 建置之地面基站進行解算，即時取得該點的座標與高程資料，操作方法為揹著 RTK-GPS 在調查區內的沙丘與沙灘上以迂迴的方式行走，以 3 秒為時距紀錄一點，在地形特徵處測量點要較密集。接著使用 ArcGIS 裡面 interpolation 功能中的克利金法(Kriging)，將現地測量的點資料轉換成解析度 1x1m 的 DEM，呈現各季節的地形高程。各季節的地形變化使用 ArcGIS 中 Spatial Analyst Tool 的 minus 功能，將各季節取得的地形高程資料相減，即可呈現各季節沙灘與海岸沙丘的侵淤變化。在 DEM 的範圍內使用 3D analyst 的 Profile 功能，在垂直濱線方向上任取一線就可繪製地形高程剖面。並透過剖線的剖面變化來分析向離岸方向沉積物的季節性變動。監測的時間介於 2019 年 8 月至 2021 年 4 月間，約每 4 個月測量一次。

氣象資料收集新屋氣象站 2019 年 9 月至 2021 年 3 月間的風速、風向與雨量資料。海象資料分別收

集新竹浮標站的平均示性波高以及竹圍潮位站的平均高潮位資料，時間從 2019 年 9 月至 2021 年 3 月間。為了配合地形調查時間，將氣象與海象資料根據季節時間尺度分類，整理草潔沙丘附近的氣象與海象的季節性特性。台灣夏季颱風為主要影響海岸沙丘地形變化的因子，因此本研究也同時收集 2019 年 8 月至 2021 年 3 月間有發布颱風警報的颱風相關資料，並觀察颱風侵台期間草潔沙丘鄰近測站的風速、風向、波高與潮位等資料。

## 三、研究區概況

桃園的草潔沙丘位於大園區與觀音區的西北沿海，根據沙丘的位置可分為前列沙丘與第二列沙丘，第二列沙丘由於位於內陸且上方覆蓋植被，如今較不受營力作用影響，因此本研究區範圍為靠海的前列沙丘，其範圍北起老街溪南到大岬溪，長約 8.1 公里，沙丘高度從 8-20 公尺不等。本研究在前列沙丘上規劃六個地形調查區，測量的範圍也包括前方沙灘，調查區由北至南依序編號一-六，調查區一為老街溪口西岸，調查區六為大岬溪口東北側約 880 公尺處(圖 1)。調查區二的沙丘植被覆蓋率達 16%，為調查區中植被覆蓋率最大者，其餘調查區的植被覆蓋率皆小於 4%，以裸露砂面為主。調查區二的沙丘前緣與沙灘之間築有北港海堤，調查區二、五、六的沙丘上另有風力發電機與風機維修道路的修築，其中調查區二的人為設施面積最大。調查區三、四的沙丘高度最高，最高可達 20 公尺以上。在地形調查期間，各調查區沙丘前坡人工設置砂籬的時間並不一致，沙丘前坡上設置的砂籬對於地形變動的影響也是本研究關注的重點之一，調查區三與調查區四的前坡在冬季(2019-2020、2020-2021)都有新設置砂籬，2020-2021 冬季的砂籬設置在 2019-2020 冬季砂籬的陸側，因此調查區三與調查區四砂籬的埋砂高度變化，可協助推測沙灘與沙丘沉積物的移動動態。



圖 1 調查區位置圖

根據新屋氣象站的資料指出，平均風速在 10 月至 12 月間明顯較高，在 5.9-8.2 公尺/秒之間，平均風速在 8、9 月最低，風速為 3.6 公尺/秒。其中 2020-2021 冬季的平均風速為 6.3 公尺/秒，大於 2019-2020 冬季的 5.7 公尺/秒。秋、冬、春三季的風向都以東北風為主，夏季的風向為西南風。雨量在月份的分佈不平均，主要集中在 2019 年 9 月與 12 月、2020 年 3 月、5 月、8 月。新竹浮標站的平均示性波高在秋冬較高，春夏較低，2020-2021 秋冬季的平均示性波高大於 2019-2020 秋冬季。竹圍潮位站顯示平均高潮位在冬季較低、夏季較高。

2019 年 8 月至 2021 年 3 月間侵台的颱風總共有 8 個，颱風大部分從台灣東方海面掠過，向北前進，少部分颱風從巴士海峽通過，颱風大多集中在 8 月接近台灣，近台時最大風速從 23-53 公尺/秒不等。

## 四、結果與討論

### 4.1 草漯沙丘地形的季節性監測

沙灘與海岸沙丘地形的季節性變動牽涉風速、風向、波高等的季節性作用，颱風極端天氣事件的波高與暴潮水位上升會在海岸沙丘與海灘上造成明顯的地形變化。本研究選擇調查區四、調查區五、調查區六與調查區二、來呈現海岸沙丘地形的季節性變化。

#### 4.1.1 調查區四

調查區四的沙丘高度最高可達 21 公尺以上，活動沙丘寬度約 50-90 公尺，海灘寬度約 110 公尺，沙丘間有小溪自西南段入海，在非雨季時呈現沒口溪形態，在局部沙丘脊前緣有數叢植被形成的半圓形草叢沙丘。剖面 4 的前坡坡腳處在 2019 夏季的照片中呈現沙丘崖（崖高低於 1 公尺），2019-2020 冬季的後灘微幅堆積，2020 春季後灘高度降低，二道砂籬範圍內的前坡地形呈現微凸面，2020 夏季 2020 前坡坡腳朝海的方向堆積，2020-2021 冬季坡腳小幅堆積，後灘降低。前灘的地形則沒有明顯的季節性變化。沙丘脊呈現隨時間降低且小幅度朝陸地移動，後坡的高度在 2019 春季有較明顯的增高（圖 2）。

從高程變化圖與現場照片紀錄顯示前坡坡腳僅在 2019 夏季 2019 出現侵蝕形成的沙丘崖，在靠海第一排砂籬前方有明顯的崖面。隨後的 2019-2020 冬

季、2020 春季、2020 夏季與 2020-2021 冬季皆呈現典型的沙丘坡面，2019-2020 冬季沙丘坡腳與後灘大致為堆積，原先的沙丘崖透過丘前斜坡(dune ramp)的堆積與崖頂的斜坡崩落作用，加上於前坡坡腳新設置的兩列砂籬的攔砂、堆砂作用，而逐漸回復成沙丘的前坡面。2020 春季的後灘大致為侵蝕，坡腳處砂籬的堆砂作用持續使砂體堆高，兩列砂籬大致已淤滿，2020 夏季的前坡坡腳高度變化不大，後灘以侵蝕為主。2020-2021 冬季後灘呈現侵蝕，在坡腳處前一年已淤滿的砂籬上又新設置砂籬，坡腳呈現堆積，但仍可觀察到局部小崖的痕跡，但隨後的風砂堆積作用很快使小崖消失。調查區四的小溪大部分時間以沒口溪的形態出現，僅在 2020 春季因五月底梅雨鋒面的即時雨量造成小溪流量大增，在小溪南側凹岸侵蝕出落差約 8 公尺的沙丘崖，溪水將灘砂沖入海中形成出海口。

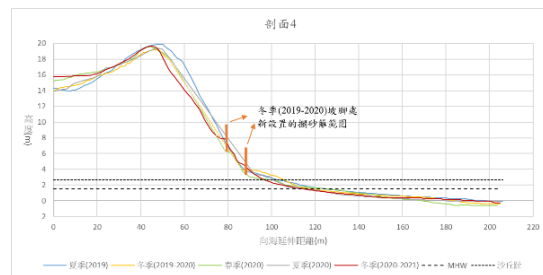


圖 2 剖面 4 變化圖

#### 4.1.2 調查區五

調查區五的沙丘高度介於 6-18 公尺，高度由東北向西南遞減，活動沙丘寬度約為 40 公尺，海灘寬度約為 150 公尺，沙丘後坡上築有風力發電機與風機維修道路。剖面 5 的沙丘前坡坡腳在 2019 夏季 2019 至 2020 春季 2020 間的地形變化不大，僅在 2020 夏季坡腳有往內陸後退的現象，2020-2021 冬季時又向海前進，搭配現場照片的紀錄，顯示前坡坡腳在 2019 夏季與 2019-2020 冬季呈現沙丘坡面特徵，但 2020 春、夏兩季則出現沙丘崖的侵蝕特徵，兩季的崖高分別為 52 公分與 72 公分。後灘高度在 2019-2020 冬季增高，2020 春季後灘向海延伸寬度變寬，夏季高度下降。前灘的高度則沒有明顯的變化。沙丘脊的地形會受砂籬的堆砂而變化，大體上沙丘脊呈現往陸地移動的現象，後坡則在 2019-2020 冬季大幅朝內陸移動，後坡的堆積作用盛行（圖 3）。

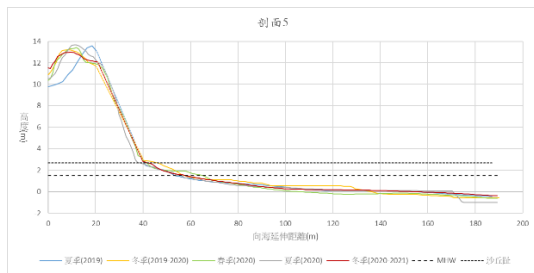


圖 3 剖面 5 變化圖

從高程變化圖與現場照片顯示，2019-2020 冬季後灘和沙丘脊都呈現西南段淤東北段侵的現象，前坡坡腳則呈現侵蝕。2020 春季時後灘整體呈現侵蝕，前坡坡腳亦呈現侵蝕，沙丘脊則大致呈現堆積。2020 夏季時，後灘與前坡坡腳大部分為堆積，沙丘脊也以堆積為主。2020-2021 冬季後灘大部分為侵蝕，但局部東北段與西南段為堆積，前坡坡腳與沙丘脊為侵蝕互現，在西南段有局部沙丘崖成形。

#### 4.1.3 調查區六

調查區六的沙丘高度為 8-12 公尺，活動沙丘寬度約 45 公尺，海灘寬度約為 140 公尺，沙丘脊後側有風力發電機與風機維修道路的人為設施。剖面 6 顯示沙丘前坡坡腳，隨著時間呈現越來越陡的趨勢，後灘高度降低，沙丘趾逐漸往陸地移動。在 2020 夏季剖面 6 的坡腳周圍有明顯的沙丘崖，高度約為 50 公分，沙丘崖前方的砂體堆積可能是由崖頂以上前坡的砂粒因重力順著坡面往下滑落堆積而成。沙丘脊在 2019-2020 冬季有小幅堆積且稍小幅朝陸地移動，到了 2020 春季時因為人工設置砂籬，導致沙丘脊頂部被剷平，高度降低，2020 夏季高度又堆回。2020-2021 冬季時沙丘脊高度明顯增加，從 10.9 公尺增加到 11.9 公尺，沙丘後坡在 2019-2020 冬季與 2020 夏季有明顯向陸地移動的情形，導致風機維修道路常受到砂粒淤埋。剖面向海延伸 88-140 公尺間的前灘，高度在 2020 春、夏兩季持續降低，2020-2021 冬季堆高，其餘區段的前灘則沒有明顯的變化（圖 4）。

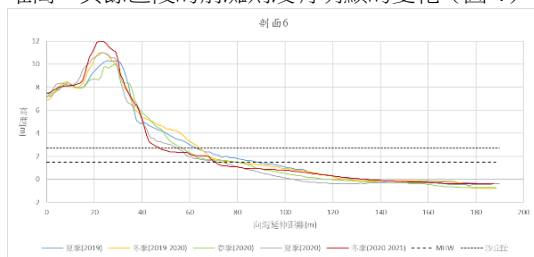


圖 4 剖面 6 變化圖

從高程變化圖與現場照片顯示，2020 夏季有出現沙丘崖，其餘季節為沙丘坡面。2019-2020 冬季後灘呈現侵蝕，坡腳侵淤互現，沙丘脊高度大致呈現堆積，沙丘脊上原本 2019 夏季以前設置的砂籬在 2019-2020 冬季大多已被砂埋，砂粒往內陸方向移動或堆積。2020 春季後灘大致呈現侵蝕，前坡坡腳大體為堆積，沙丘脊為侵淤互現。2020 夏季後灘為東北段淤西南段侵，沙丘前坡與坡腳呈現明顯的侵蝕，在局部沙丘坡腳處形成沙丘崖。沙丘脊則呈現西南段淤東北段侵，沙丘脊上新的砂籬也在此時段完成設置。2020-2021 冬季後灘大致為侵蝕狀態，前坡坡腳為侵淤互現，局部前坡與坡腳可觀察到小崖的形成（崖高約為 44 公分），隨後受到風砂堆積或前坡砂粒的崩落，小崖也逐漸消失。沙丘坡腳有人工堆置的石籠出露，沙丘脊的堆積作用盛行，沙丘脊上局部的砂籬已出現埋砂情形。

#### 4.1.4 調查區二

調查區二的沙丘高度為 10-14 公尺，沙丘脊與前坡上有大面積的植被覆蓋，在少數區域因濱刺麥的固砂形成半圓形的草叢沙丘，草叢沙丘的周圍常伴隨著深度較深的窪地，在前坡的裸砂面上，也出現數個規模較小的淺盆狀風蝕窪地。剖面 2 的前坡可以根據坡度的差異分成兩段，向海延伸 20-40 公尺間坡度較緩，淺盆狀窪地多分布在此，向海延伸 40-60 公尺間坡度較陡，有較多人為廢棄材料如磚塊與石塊的出露。向海延伸 60-94 公尺間為北港海堤、護岸與消波塊等人工結構物的區段，其地形高度通常不隨著時間而變動（圖 5）。剖面 2 的地形高部並沒有明顯的變化，可能有兩個原因，第一為調查區二的沙丘植被覆蓋面積較大，即使冬季植被枯萎，灌木等植被仍可在砂面上方形成遮蔽，風力的作用仍無法將大量砂粒帶走，第二為北港海堤，北港海堤的設置使後灘的乾砂帶消失，前列沙丘缺乏砂源的供給，另一方面北港海堤也對沙丘與沙灘之間沉積物的向離岸輸送造成干擾，沙灘的飛砂無法順著向岸風移動至沙丘上，沙丘上的沉積物也無法受波浪的侵蝕而移動至沙灘或近岸堆積。沙灘高度在 2020-2021 冬季降低，可能是受到冬季較大波高的波浪侵蝕所致。



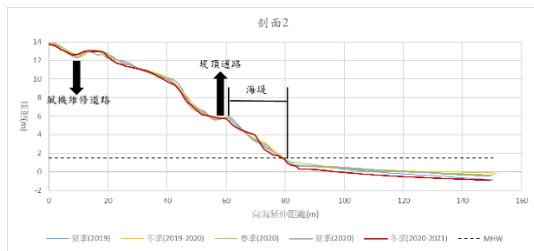


圖 5 剖面 2 變化圖

## 4.2 草漯沙丘地形的季節性變化與環境變數的關係

### 4.2.1 風速與風向

鄰近測站資料指出，本研究區風速在秋末冬初（10-12 月）達最大值，秋冬兩季風向絕大多數是吹東北風，對於這段海岸而言，東北風可視為向岸風，前列沙丘的走向大致平行海岸。局部調查區後灘高度下降，部分原因是向岸風搬運，將後灘乾砂吹往前坡堆積，冬季在前坡下半段近坡腳處新設置的砂籬則有利於飛砂堆積，沙丘脊也隨著向岸風往內陸堆積移動。春季風向仍以東北風為主，但風速較低，局部調查區的前坡坡腳仍持續堆積，使新設置兩列砂籬間幾乎被砂粒淤滿。夏季是風速較微弱的西南風，對於坡腳、後灘與沙丘脊高度的變化影響程度較小。

### 4.2.2 波高與潮位

波高是影響海岸海灘和沙丘地形變化的重要因子，測站顯示草漯沙丘鄰近海域的平均示性波高，秋冬兩季較高，春夏兩季偏低，但草漯沙丘的坡腳大多在夏季侵蝕冬季回復，其主要原因是夏季侵台的颱風的示性波高大增，2019 夏季颱風侵台期間最大示性波高有明顯增加（利奇馬颱風最高可達 2.68 公尺、米塔颱風最高可達 3.61 公尺），颱風暴潮的水位上升加上較大的波高，常造成沙丘坡腳侵蝕，形成沙丘崖，例如調查區四。2020 夏季颱風侵台期間的最大示性波高雖無明顯增加，也仍然在調查區五與調查區六形成沙丘崖，推測原因為颱風侵台路徑雖然距台較遠，但台灣鄰近海域會因為颱風過境所產生的湧浪，在經過長波傳播後抵達近岸產生碎波，並藉在海灘的溯升對沙丘前緣底切形成沙丘崖。冬季的前坡坡腳大致為一般沙丘前坡面的延伸，但在局部調查區內仍可見到崖高較大的沙丘崖、與崖高較小的侵蝕小崖，或是前坡坡度變陡的情形（調查區六），顯示冬季的平均示性波高，仍可侵蝕到沙丘坡腳，但

隨後的向岸風將飛砂搬往坡腳堆積，使小崖也回復成沙丘坡面。春末梅雨季最大的示性波波高沒有增加，但在調查區五的前坡坡腳仍侵蝕出沙丘崖，可能與波浪溯升相關。以上調查區四、五、六出現的沙丘崖高度大多小於 1 公尺，可能與颱風強度與颱風路徑距台較遠相關，波能無法支撐波浪在沙丘前緣切蝕出更大規模的沙丘崖。

潮位使用 2019 年 8 月至 2021 年 3 月間的平均高潮位當作平均高水位線(MHW)，可視為平日海水能在海灘上抵達的平均高度，可將海灘簡易分成後灘與前灘。在沙灘現場可以看到乾溼砂分界明顯的乾溼線，代表上次漲潮時海水在海灘上到達的位置，本研究在 2020 春季、夏季與 2020-2021 冬季現場記錄乾溼線與沙丘趾線的位置與高程，並透過計算乾溼線與沙丘趾線之間的距離可以得知後灘寬度。

### 4.2.3 沙灘地形

在國外的文獻中指出後灘的寬度會影響沙丘崖復原成沙丘坡面的時間(Stéphan et al., 2019)，後灘的寬度可以削減波能，使波浪在到達沙丘前緣時就會消失。剖面 4 的後灘寬度在 13-20 公尺間，剖面 5 後灘寬度在 6-11 公尺間，剖面 6 的後灘寬度在 2-18 公尺間。就剖面 4 與剖面 5 的後灘寬度相比，剖面 5 較狹窄，沙丘崖出現的頻率較高，但剖面 6 在 2020-2021 冬季的後灘寬度才 2 公尺，卻沒有形成沙丘崖，可能與當時記錄到的是大潮時的乾溼線有關。

### 4.2.4 人工砂籬

在監測期間新設置的砂籬主要集中在兩個位置，第一是沙丘脊，第二是沙丘前坡下半段近坡腳處。沙丘脊上的砂籬有明顯的埋砂與傾倒現象，導致沙丘脊上的地形多樣，同時可出現小型沙脊與窪地。前坡坡腳附近新建的格網狀砂籬，最靠海側稱之第一列，其餘往後類推。在調查區四前坡坡腳的兩列砂籬在 2019-2020 冬季與 2020 春季有明顯的堆砂，2019-2020 冬季時第一列砂籬的淤砂高度，已達砂籬高度的二分之一至三分之二，第二列砂籬較少淤砂；而在 2020 春季時，第一列砂籬大多已淤滿，第二列砂籬的堆砂高度也可達砂籬高度的三分之二以上。看似有助於增加沙丘砂量以抵禦波浪，但從調查區四的剖面高程變化圖中顯示，後灘在 2020 春、夏兩季持續侵蝕，高度下降，而前坡坡腳卻因砂籬堆高，導致

坡腳與後灘間的坡度變陡，在未來若波浪侵蝕營力增強，過陡的沙丘前坡可能更容易導致大規模的砂粒崩落到海灘上，減損了前列沙丘的砂量，進而使沙丘的脆弱度增高。

## 五、結論

各調查區季節性沙丘地形變化歷程不盡相同，在調查期間最明顯的地形變化在於沙丘前坡坡腳處的侵蝕與堆積，受天氣因素造成的水位上升及沿岸波能增加的影響，部分波浪可直抵沙丘坡腳產生切蝕作用，形成沙丘崖。調查區內沙丘前面的海灘寬幅在退潮時最大可達 130 公尺，波浪在海灘上移動距離較長，抵達前坡坡腳時波能可能已削減，沙丘崖高度多數不到 1 公尺，相較於草潔沙丘高度大多在 8 公尺以上，在剖面高程的季節性變化圖中，有時不易看出垂直的沙丘崖面，必須借助現場調查照片來呈現。

調查區二由於植被覆蓋面積較高，加上沙丘前緣築有北港海堤，沙丘季節性的地形變化不明顯。其餘調查區的季節性地形變化雖然在時間上有差異，但大體上都呈現夏季侵蝕、冬季堆積的季節性特徵（圖 6）。在 2019 夏季與 2020 夏季在調查區四、調查區五與調查區六皆可觀察到沙丘崖地形，為重要的侵蝕特徵。2019-2020 冬季，原先坡腳處的沙丘崖則透過丘前斜面的堆積與崖頂的斜坡崩落作用而漸恢復成典型的沙丘坡面。沙丘脊季節性的變化亦相當多樣，但大體上沙丘脊呈現小幅度朝陸地移動的趨勢。

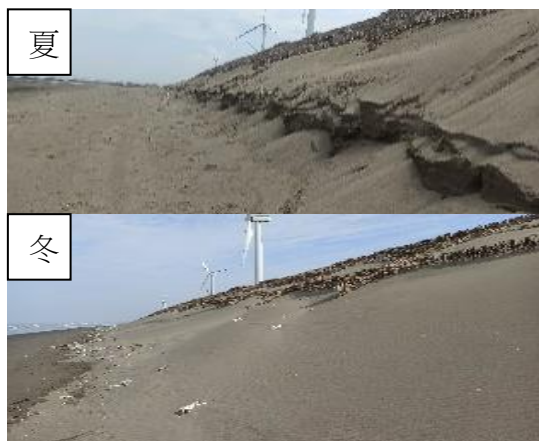


圖 6 沙丘坡腳夏季侵蝕、冬季堆積的季節性特徵  
草潔沙丘的平均風速在秋冬兩季較高，春夏季較低。鄰近海域的平均示性波高在秋冬兩季較高，春

夏兩季偏低；平均高潮位在夏季較高，冬季偏低。海、氣象資料顯示夏季的平均示性波高雖較低，但夏季颱風的暴潮與湧浪在灘面上的波浪溯升可能切蝕坡腳形成沙丘崖；冬季的平均示性波高較高，但強勁的東北風將後灘的乾砂吹往坡腳堆積，且冬季的水位沒有受暴潮影響而上升，海水較無機會抵達前坡坡腳。

在沙丘前坡人工設置的砂籬亦是影響草潔沙丘地形變化的重要因子，砂籬的聚砂、固砂作用使前坡坡度相較天然沙丘陡，尤其近坡腳處的砂籬堆砂作用，也使坡腳與後灘間的坡度變陡，對於沙灘往前坡的飛砂輸送造成某種程度的干擾和阻礙。草潔沙丘為維護其天然沙丘地景並推動生態旅遊，已由地方政府指定為地質公園，人工砂籬的設置與否或設置區位的考量就必須更加的審慎。若在沙丘後方無人環境須防止飛砂的情況下，或可嘗試拆除或不再每年增設砂籬，儘量讓飛砂向陸運移作用不受干擾，使沙丘可以回復其天然坡度，除保育地景、維護遊客安全之外，還可增加向陸側的飛砂量，提高前列沙丘量體的總儲砂量，降低沙丘脆弱度，增強其海岸防禦功能。

## 參考文獻

1. Davidson-Arnott, R. and Law, M.N. (1990) Seasonal patterns and controls on sediment supply to coastal foredunes, Long Point, Lake Erie, In: *Coastal Dunes: Form and Process*, Nordstrom, K.F., Psuty, N.P. and Carter, R.W.G., eds., John Wiley & Sons, 177-200.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007) *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge.
3. Ollerhead, J., Davidson-Arnott, R., Walker, I.J. and Mathew, S. (2012) Annual to decadal morphodynamics of the foredune system at Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(3), 284-298.
4. Stéphan, P., Blaise, E., Suanez, S., Fichaut, B., Autret, R., Flocc'h, F., Cuq, V., Le Dantec, N., Ammann, J., David, L., Jaud, M. and Delacourt, C. (2019) Long, medium, and short-term shoreline dynamics of the Brittany Coast (Western France). *Journal of Coastal Research*, SI 88, 89-109.

# 桃園海岸跨域平台運作機制

巫思佩<sup>1</sup> 蕭瓊茹<sup>2</sup> 王雅慧<sup>3</sup> 林立昌<sup>4</sup>

<sup>1</sup>傳閱工程股份有限公司專案經理

<sup>2</sup>桃園市政府海岸管理工程處工程員

<sup>3</sup>桃園市政府海岸管理工程處科長

<sup>4</sup>桃園市政府海岸管理工程處處長

## 摘要

桃園市海岸管理權責區分複雜，涉及中央與地方單位高達 20 多個，為了配合國家海岸生態保護目標，並展現桃園對海岸管理的重視，桃園市政府於 2017 年 11 月提出「桃園海岸生態保護白皮書」，並於 2018 年 3 月設立海岸專責管理機關－海岸管理工程處。由於海岸事務錯綜複雜，涉及多項不同領域之專業，因而成立海岸管理委員會作為上位政策指導組織，委員會所作之決策及建議，交由跨單位組成的海岸資源保育專案小組落實及推動，並於海岸管理工程處負責相關運作事宜，形成垂直整合的海岸管理機制。藉由這套機制的運作，以期逐步落實階段性目標，達到桃園市「自然樂活 海好有你」的海岸生態保護願景。

關鍵詞：海岸管理、垂直整合

## Cross-Disciplinary Operation Mechanism for Taoyuan Integrated Coastal Management

Ssu-Pei Wu\*, Qiong-Ru Xioa, Ya-Hui Wang, Li-Chang Lin

\* Project Manager, Tranmit Co.(affiliation)

## ABSTRACT

The authorities of Taoyuan coastal zone are complicated, involving more than 20 central and local agencies. To meet the national goal which is protecting the coastal environment, and to demonstrate how the Taoyuan government value the coastal management, the local government has announced the Taoyuan Coastal Environment Protection White Paper in November 2017, and established the Office of Coast Administration Construction as a competent authority in March 2018. However, the affairs of coastal management are various and complex, and involving specialized knowledge from different disciplines. Thus, Taoyuan City Coastal Management Committee has been established to provide suggestions for policy-making, the Coastal Resource Conservation Project team composed of multi-sectors has been responsible for implementation, and the Office of Coast Administration Construction has ensured the functioning of those two organizations. This is how the coastal management mechanism vertically integrated. With operating this mechanism, we hope to gradually achieve the objectives at the stages, and ultimately the vision “harmony between human and nature in coastal zone.”

Keywords: Coastal Management, vertical integration

## 一、前言

桃園市（以下稱本市）海岸線總長 46 公里，呈東北東-西南西走向，自然海岸占比約 45%，擁有得天獨厚-許厝港濕地、草漯沙丘、觀新藻礁、新屋石滬群及海洋客家牽罟文化。但臺灣早期著重在經濟發展，忽略海岸保護的重要性，海岸逐漸變成一個藏污納垢的灰色地帶，而所衍生的海岸問題非單一向議題，而是多面向錯綜複雜的課題。考量海岸管理事務涉及中央與地方的權管單位高達 20 多個，相關法令規範超過百種，故桃園市於 2017 年正式發表國內第一本「海岸生態保護白皮書」，作為桃園市海岸生態及環保的政策白皮書，並依白皮書的建議，於 2018 年成立海岸專責機關-海岸管理工程處（以下簡稱海管處）。

海管處成立之初，因面臨海岸眾多複雜的問題，亟需各領域專家學者的共同參與，以及須協調整合各機關間的資源，故本文以桃園海岸管理專責單位之角度，逐步凝聚相關單位，並透過跨域合作溝通機制落實推動桃園海岸相關業務。

## 二、運作機制推動流程

### 2.1 成立專責單位

為了避免過往相關單位間各行其是，缺乏全面性整合規劃，在執行上容易有多頭馬車的缺點，桃園市率全國之先，在環保局下增設二級機關海管處做為海岸管理專責機關，設有工程管理、設施工程、海岸工程及生態保育等四個業務科，管理範圍北起蘆竹南至新屋，長達 46 公里的海岸線，包括台 61 線以西的海岸地區面積 2 萬 5,014 公頃，負責辦理海岸管理事務。

### 2.2 組織跨領域諮詢團隊

因為海岸事務繁雜，涉及許多不同領域之專業知識，考量處理海岸問題需要專業探討外，也應顧及實務上的變通，故於 2018 年 10 月成立海岸管理委員會，作為整體海岸管理的上位指導組織，由桃園市鄭文燦市長擔任召集人，邀集各領域專家學者、主管機關代表及民間團體代表組成委員會（如圖 1），藉由邀請不同領域之，提供予市府多元及平衡觀點之意見。21 位各領域的委員，委員任期為兩年，每 6 個

月開會一次，藉由這平台溝通每年海岸管理的策略與相關開發計畫，吸取各位委員不同觀點的建言。

今（2021）年海岸管理委員會委員已屬第二屆委員，委員組成涵蓋海洋政策管理領域 2 人、生態保育領域 3 人、環境教育及生態旅遊領域 4 人、景觀規劃及海岸防護領域 2 人等 11 位專家委員，機關委員由海洋委員會、經濟部水利署、行政院環境保護署、桃園市政府等 8 位簡任層級以上人員兼任，民間代表委員 2 人，委員名單符合性別平權，並包含多個專業領域。



圖 1 海岸管理委員會委員涵蓋之專業領域

### 2.3 建立垂直整合之執行團隊溝通平台

為了落實海岸管理委員會決議事項，成立一個跨領域、跨單位的海岸資源保育專案小組，與海岸管理委員會進行垂直整合，海岸管理委員會的決議事項或委員提供之建言，則將向下交由之海岸資源保育專案小組推動及落實。如前所述，海岸管理涉及許多單位，因而海岸資源保育專案小組亦是由多個單位組成，係跨單位的平台組織。藉由小組會議協調整合，可讓各機關間的專業及資源做最有效的利用，達到事半功倍的效果。

海岸資源保育專案小組的前身是觀新藻礁保育專案小組會議，在完成階段性任務後，於 2018 年 8 月 16 日第 180 次市政會議決議改制為海岸資源保育專案小組，並由桃園市觀新藻礁保育專案小組成員進行擴編。2018 年小組成員包含中央機關、市府機關、國營事業等 28 個相關單位，2021 年依推動經驗及業務關聯性調整為 20 個單位。

海岸資源保育專案小組除了作為橫向整合局處之平台，加強機關聯繫，另一項重要任務即是執行及管考海岸管理委員會之重要決策。為提升各單位對

各項決議事項之重視，專案小組由市府祕書長擔任主席，由海管處負責幕僚作業，每季定期召開會議，必要時得召開臨時會，透過定期開會制度，協調整合各單位資源，發揮團體戰力。

## 2.4 以關鍵績效指標做為推動依循項目

海岸管理委員會與海岸資源保育專案小組兩組織的雙向溝通機制，採用規劃(Plan)、執行(Do)、確認與控制(Check)、改善對策的行動回饋(Act)等滾動式品質管理模式，由海岸管理委員會提供海岸策略建言，交由海岸資源保育專案小組擬訂方案。

為了有效掌握海岸資源保育專案小組成員於推動海岸事務之執行進度，並於後續得採用 PDCA 方式持續進行滾動式修正，故 2020 年依據海岸管理委員會之建言，修訂桃園市海岸管理政策及業務推動方向，從海岸保護、海岸永續利用及海岸防護等三大面向盤點出 11 個海岸關鍵議題，研擬相關主要對策如表 1，並由海管處與相關單位召開研商會議，針對各項關鍵議題，提出對應對策，研擬出 36 個永續海岸關鍵績效指標(Key Performance Indicators, KPI)。

各海岸資源保育專案小組成員於原業務範圍內加強 KPI 項目之工作，於每季定期會議上追蹤 KPI 辦理進度，針對落後項目由權責單位補充說明，並於會議上討論需跨機關溝通之工作內容，使業務推展能更加順利，並據以回報到海岸管理委員會，推動流程如圖 2 所示。

透過歷次會議的溝通及檢討，並參採海岸管理委員會建言、中央機關施政方向及聯合國永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)等，滾動式修訂對策及 KPI，2021 時，增加海岸保護與海岸永續利用面向的指標，整體 KPI 項目增加為 56 項，如圖 3 所示，而原本 13 個單位也增加到 14 個單位，加強桃園海岸管理單位承辦人員的互動，使各單位針對海岸管理之關聯性更加密切。

表 1 桃園海岸管理關鍵議題

面向	關鍵議題
海岸保護 面向	近岸監測資料不足，未能及時反應問題
	海岸地區遭受非法行為破壞
	河川水質不佳，流入海洋影響海域水質
	海洋廢棄物破壞環境及景觀
	民眾在地海洋素養不足
	因環境遭受破壞，降低海岸棲地及生態功能
	海岸地區入侵種生物或流浪動物流竄滋擾在地濱海動物
海岸永續 利用面向	海岸土地利用未兼顧資源保育及海岸防護
	遊憩活動仍多以單點式規劃進行推動，缺乏包裝整合
	開發行為造成環境及景觀破壞
海岸防護 面向	因氣候變遷、或海岸災害，導致海岸林退縮或消失，失去海岸防護功能



圖 2 桃園海岸跨域平台運作流程

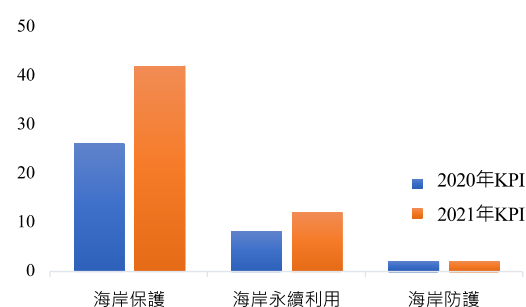


圖 3 歷年永續海岸關鍵績效指標數量變化

## 2.5 導入績效獎勵制度

為了鼓勵海岸資源保育專案小組成員積極推動

海岸事務，市府擬定桃園市政府推動海岸永續發展績優獎勵計畫，依據成員之行政配合度、KPI 執行績效、海岸資源保育執行成果及提案績效等 4 個面向提送績效評核小組審查及評分。而達到標準之成員將予以行政獎勵。

每年除了滾動式修訂 KPI，亦根據各單位之執行情形調整績優獎勵計畫之配分、評分標準等，以期能夠切實展現相關單位於海岸事務的努力與付出，推動初期以鼓勵參與為重點，執行方式相對單純及快速，提供藉此提升小組成員對於海岸事務的參與度及積極度，待各項運作模式建立後，則將配分轉為加強各項推動作業之品質，調整情形如圖 4 所示。

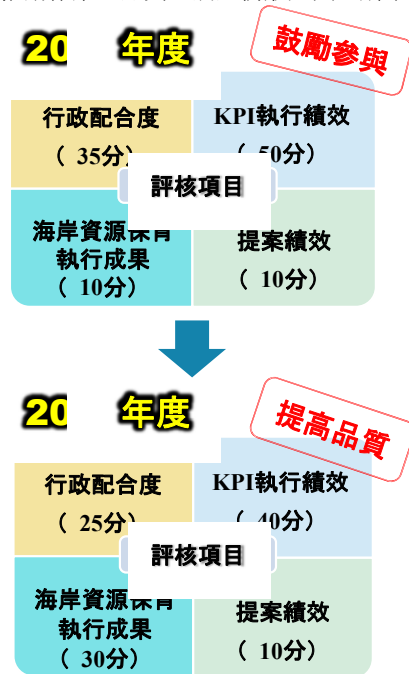


圖 4 桃園市政府推動海岸永續發展績優獎勵計畫  
2020 年及 2021 年調整情形

### 三、結論

以往政府所召開的專家委員會，不免被聯想成找專家替海岸管理政策及重大開發計畫做背書。而桃園市海岸管理委員會的成立，則是市府向專家學者及民間團體代表請益，希望不同領域的委員提出專業建議，讓市府團隊在政策規劃上更能符合永續發展，並貼近民眾需求。

為了避免海岸管理委員會的決議事項或委員建言成員空談，經由海岸資源保育專案小組依據建議，

研擬出實際可行的執行計畫，進行落實與推動。海管處則是負責居中協調，推動 2 個組織如常運作，扮演穿針引線的角色，有效地將 2 個跨領域、跨單位的組織垂直整合在一起，因而形成一套由上而下的海岸管理機制。

歸納桃園海岸跨域平台運作機制重點包括：

1. 運作機制是採以「領導者」為中心的運作模式，因此會議主席層級越高對海岸管理推動力道越高。
2. 定期性的跨領域、跨單位討論會議因提供當面溝通討論的環境，對落實各項海岸管理策略的績效較佳。
3. 為使海岸管理機制順利建立及推動，初期在鼓勵第一線成員參與的措施，故透果績效獎勵制度提供行政獎勵，作法較為迅速且可推動各項管利措施順利進展。

## 桃園海岸治理策略及經驗分享

林立昌<sup>1</sup> 林錫聰<sup>2</sup> 王雅慧<sup>3</sup> 蕭瓊茹<sup>4</sup> 巫思佩<sup>5</sup>

<sup>1</sup>桃園市政府海岸管理工程處處長

<sup>2</sup>桃園市政府海岸管理工程處副處長

<sup>3</sup>桃園市政府海岸管理工程處科長

<sup>4</sup>桃園市政府海岸管理工程處工程員

<sup>5</sup>傳閱工程股份有限公司專案經理

### 摘要

桃園海岸治理自 2017 年出版的「桃園海岸生態保護白皮書」後，於 2018 年由專責單位「海岸管理工程處」開始以整體性及宏觀的角度去推動整合性的海岸管理策略，對於海岸的管理措施也由市府的推動，跨大至偕同其他不同相關部門、專家學者，進行從跨領域的整合、跨單位的協調及互補。考量政府資源有限，更進一步導入企業資源、結合民間團體力量，以陪伴、輔導的角色引導在地發展「海岸生態產業」。本文簡介桃園治理策略及推動現況，最後規納出未來發展建議，期望除提升所有桃園市民海岸知能外，更能提升海岸居民對自我生活環境的自覺性，自發性參與第一線海岸保護行列。

關鍵詞：桃園海岸、治理策略

### Case study: The nine main coastal management strategies of Taoyuan city

Li-Chang Lin, Shi-Tsung Lin, Ya-Hui Wang, Qiong-Ru Xioa, Ssu-Pei Wu\*,

\* Project Manager, Tranmit Co.(affiliation)

### ABSTRACT

Since the Taoyuan Coastal Environment Protection White Paper has been announced in 2017, the Office of Coast Administration Construction established as a competent authority of Taoyuan coast zone in 2018, has promoted integrated coast zone management with a comprehensive and broad perspective. Due to the variety and complexity of coastal management, the Taoyuan government has promoted the measures based on cross-disciplinary integration and multi-sectors' cooperation. In consideration of the insufficient government's budget, the government has drawn support from private sectors, and trained the local to develop Eco-tourism in coast zone. We would introduce the coastal management strategies and the achievements, and provide suggestions for future implementation in this thesis. We hope to raise the citizens' environmental consciousness about coastal area and the local's awareness about everyday life environment, and inspire them to spontaneously participate in protecting the coastal environment.

Keywords: Taoyuan coast; coastal management strategy

## 一、前言

桃園是台灣第一工業科技城市，工業產值常居全國之冠，但隨著經濟發展、人口增加，土地需求增加，為了減少相關的爭議，這時人口稀少、偏遠的海岸土地就成為當時的最佳選擇，包含填海造陸、開發新興工業區、興設工業港、擴建漁港等各種利用形式逐漸佔據海岸土地，而人們避之唯恐不及的鄰避設施，例如垃圾掩埋場、發電等，也往海邊發展。以桃園來說，鄰近海岸地區就有 7 個工業區(海湖工業區、大園工業區、觀音工業區、桃園科技工業區、大園濱海特定工業區、觀塘工業區、永安工業區)、2 個發電廠(蘆竹長生發電廠、台電大潭發電廠)、5 個垃圾掩埋場(蘆竹坑口垃圾場、大園北港垃圾場、觀音保障垃圾場、觀音大潭灰渣掩埋場、新屋永興垃圾場)、以及 57 座沿岸風機，這些設施不但破壞海岸地景、地貌，也直接或間接造成桃園海岸環境的破壞。

除了工業發展造成的污染外，因為海岸土地過度開發，漁港擴建或興建堤防等，台灣的自然海岸逐年被人工建築攻佔，也破壞了海水的自然動態，造成海岸線侵蝕後退，而為了避免侵蝕只能建設越來越多的人工堤防，形成惡性循環。

桃園海岸所面臨的問題亦是臺灣其他處海岸的處境，故本文回顧桃園市如何制定海岸管理策略，亦據以進行各項海岸管理措施或業務，以供其他臨海縣市參考。

## 二、桃園海岸整體治理策略

桃園市於 106 年即正式發表國內第一本「海岸生態保護白皮書」，作為海岸生態及環保的政策白皮書，並依白皮書的建議，於 107 年在環保局下增設海岸專責機關-海岸管理工程處（以下簡稱海管處），管理範圍北起蘆竹南至新屋，長達 46 公里的海岸線，包括台 61 線以西的海岸地區面積 2 萬 5,014 公頃，負責辦理海岸管理事務。

針對面臨海岸眾多錯綜複雜的問題。一方面依循全球永續發展目標 (SDGs)，另一方面依據行政院「向海致敬」4 海策略，滾動式調整海岸治理策略，至今(110)年綜整為 9 海策略，如圖 1 所示，含

淨海、知海、親海、進海、治海、觀海、護海、里海及藍海，摒棄過去以「管」與「擋」為策略的方式，全面性思考。

各項策略之間的關連性及架構如圖 2 所示，優先針對所盤點之海岸危機擬定對應之解決方案，而後發展環境教育，希冀從根本提升民眾海洋素養，最後透過生態旅遊方式串聯環境教育，鼓勵及輔導在地民眾發展成環境教育產業鏈，讓各項推動措施得以自主經營，達成永續發展。



圖 1 桃園海岸 9 海策略

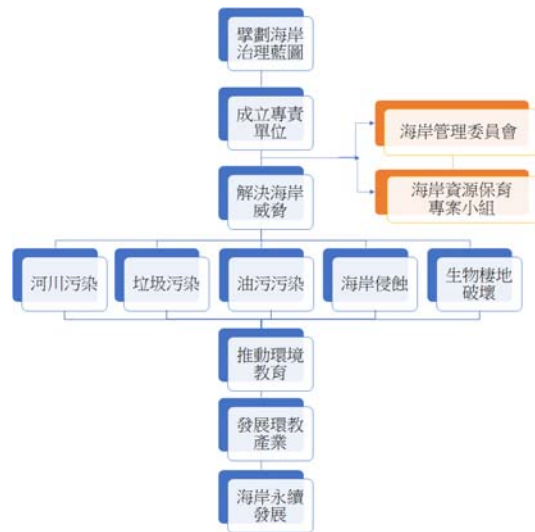


圖 2 桃園海岸治理策略擬定架構

## 三、桃園海岸治理經驗分享

### 3.1 海岸威脅治理策略

綜整桃園市海岸面臨 5 大威脅—河川污染、油污污染、塑膠垃圾污染、海岸加速侵蝕以及海岸棲地破壞，已經衝擊並改變海岸原有的生態環境，以下分別針對各項威脅說明治理經驗。



### 3.1.1 河川污染

河川污染是桃園海岸環境的主要威脅，無論是民生污水、工業廢水、畜牧廢水及農業灌溉回歸水，若沒有經過妥善處理就排入河川，污染物就會順著河水流入大海。受到潮汐及海流的影響，污染物容易累積在出海口，不易擴散與稀釋，就可能造成海岸地區自然生態的嚴重污染。因此，加強河川出海口的水質監控，是防患未然的重要途徑，故市府從 2018 年 9 月開始在重要河川出海口陸續建置水質自動監測站，目前已經成立 3 座。這些測站 24 小時全天候運作，遏止不肖業者非法偷排行為，同時進行長期的觀測記錄，資料回傳至海岸環境監測科技中心保存及分析，建立水質、水量等基礎資料，做為海岸生態復育計畫的擬定之依據。

桃園河川水體污染的主要因為事業廢水排放的時段過於集中，讓河川短時間內匯集過多的污染物，導致總污染量超過河川可以承受的程度。因此，桃園首創於南坎溪、新街溪、埔心溪等河川依水體現況劃定總量管制區範圍、擬定重金屬總量管制，限制工廠每天可以排入這段河川的污染量，並透過持續加嚴標準以推動事業自主管理機制，以防止重金屬物質過高。

民生污水部分，則以污水接管及現地處理方式並行。針對人口密集之範圍，逐年建設污水下水道系統，將生活污水透過用戶接管的方式，引到水資源處理中心淨化處理後，再將相對乾淨的水排放到河川。目前市府已投入 1,300 億元推動 12 處下水道系統，接管率由升格前 5% 至 2021 年已超過 27%。

因污水下水道系統需要較長的時間建設，針對污水下水道系統尚未到達地區，可以先設置污水截流、礫間接觸氧化、人工濕地等現地污水淨化處理的設施，因地制宜以自然淨化的方式改善河川水質。桃園市升格前，只有老街溪流域的新勢公園礫間淨化系統。升格後則增加了 11 座礫間淨化系統，這些水質淨化系統，可以改善生活污水尚未完全接管前的水質污染問題，提升流入海洋的河川水質。

### 3.1.2 垃圾污染

海洋本身不會產出海洋垃圾，海洋垃圾主要來自陸域及海岸被丟棄之固體廢棄物。陸地垃圾如未妥善處理，即易受雨水沖刷及風吹落入海洋，成為海洋垃圾。桃園針對垃圾污染解決方案可概分為減

少源頭處理及末端淨化。

源頭處理主要減少進入海洋的陸源污染物，如輔導民眾成立河川巡守隊，協助巡查河川行水區廢棄物非法棄置或加強清理，並積極辦理河面垃圾的攔截清除作業，包括南坎溪、埔心溪、茄苳溪、新街溪、老街溪、大堀溪、觀音溪、富林溪、新屋溪及社子溪等 10 條河川，架設起 11 道的垃圾攔截網。透過定點、定期的分段攔除，避免垃圾隨水體流入海洋。

針對靠近海岸的垃圾掩埋場可能受海岸侵蝕、海水掏刷下導致垃圾裸露崩塌，污染海洋，故針對桃園 2 座濱海垃圾掩埋場，則規劃封閉復育，在垃圾山尚未清除前，則加強做好海岸防護工作，避免外流。

針對已經被沖刷到海岸或海洋之垃圾，除了僱工清除外，更積極招募志工加入淨海行列，包括成立 16 隊海岸巡護隊、5 隊環保潛水隊及 3 支環保艦隊，全力清除海灘、海底及海漂垃圾，藉由公私夥伴共同提升海岸潔淨度。

### 3.1.3 油污污染

船舶漏油是海洋污染緊急事件，因為季風、洋流、波浪等海象因素，往往造成許多意想不到的狀況發生，而且時間越長、風險越大，故在最短的時間內進行正確的應變策略及防治措施為對應油污污染之關鍵。

市府除定期舉辦海洋污染應變演練、兵棋推演，整備應變時所需要的設備器材外，也必須滾動式修訂本市的海洋油污緊急應變計畫、應變風險地圖，及海污設備地圖等資料，做好萬全的準備工作。

除了人員訓練外，亦透過設備的精進，如採購高性能的海污應變專車，可克服海岸崎嶇多變的地形；採購光學漏油偵測器，可於第一時間得知油品種類，判斷漏油來源；及最新型便攜式攔油索，以便應變人員快速部署。透過科技與設備的提升，讓應變方式得以化繁為簡。

一旦油污發生時，平常整合監測調查資料的「海岸環境監測科技中心」變身為應變指揮中心，在第一時間整合過去經驗，及應變指揮中心對於油污擴散模擬的分析，來預測油污事件發生後，可能會遭遇的狀況及油污的動態，並擬定處理策略，搭配事件發生現場的前進指揮部，將原本漏油後才安排

人員及設備的處理模式，結合預測模式及先進設備進行偵查、預判、縮短應變時間差，防堵油污擴散。

#### 3.1.4 海岸侵蝕

桃園海岸受到人工構造物的影響，產生突堤效應，出現堤前淤積、堤後侵蝕現象，觀音區海岸大部分淤積，新屋區海岸則是侵蝕的現象。

往昔海岸保護設施多採剛性工法，或具防止波浪越波、海水入侵及其後側土地沖失等，未來改採用海堤後撤方式規劃改善，降低既有海堤高度，以拋石緩坡調整斷面，墊高堤後防汛道路，銜接既有土丘及防風林，增加海岸緩衝帶的寬度，讓岸上的砂不被海水帶走，同時導入人文親水空間。

#### 3.1.5 生物棲地破壞

針對生物自然棲息環境遭受破壞部分，採因地制宜方式劃設保護區，包括以濕地法劃設許厝港國家級重要濕地、以文化資產保存法劃設草漯沙丘地質公園、野生動物保育法劃設觀新藻礁生態系野生動物保護區，分別保存了桃園各類型的自然海岸環境，保護長度已達 14.8 公里(佔海岸藻礁保護長度 86.7%)。針對具有保存價值、但尚未劃設保護區的白玉藻礁及大潭藻礁範圍，亦進行調查及保護區劃設作業，沿海 27 公里藻礁生態，已有 86.7%藻礁劃入保護區範圍，希望桃園的每一吋海岸都受到嚴密的保護。

對於已惡化的環境，則積極進行復育。其中老街溪濕地環境惡化的兩大主因，老街溪出口淤沙陸化及遭非法魚塭佔用，則投入新臺幣 4 千萬元預算，展開全國最大的濕地生態復育工程，透過收回被非法佔用 2、30 年的魚塭、土方挖填平衡、控制工程讓海水自然感潮，因此新增約 22 公頃的濕地面積，鳥類種類及數量都較復育工程前增加至少 5 倍以上，今年也迎來第 238 種(輝棕鳥)，成為北台灣最夯的賞鳥聖地，連續兩年獲得內政部營建署評鑑特優。

另針對二級保育類的夏候鳥小燕鷗，由市府和桃園市野鳥學會合作，分別在桃園的竹圍漁港北堤、大潭及許厝港濕地生態復育區這 3 處海岸，營造了約 35 公頃的小燕鷗繁殖棲地，放置假鳥、設置圍籬阻隔賞鳥人士干擾等措施，在公私夥伴的共同保護下進行復育。

## 3.2 環境教育推動策略

除了市府透過各種手段處理桃園海岸威脅外，我們希冀透過環境教育從根本上提升民眾環境素養及海洋素養，環境教育，是一種生態廊道，可以增進人類與環境的良性互動，市府從以下方式建構桃園海洋環境教育環境。

### 3.2.1 海洋教育資源中心提升學童海洋知能

新屋永安國小桃園的「海洋教育資源中心」，因非屬實體機構，而是一個機動性的任務型編制，在推動海洋教育面臨的最大困境就是硬體設備、專業人力的不足，故市府協助導入企業資源，由月光文教基金會支持補助 300 萬元增設「海洋教室」，增添了海洋教育的豐富性，並培訓更多師資至各校進行展出授課，成為市府推動校園海洋教育的最佳幫手。

### 3.2.2 依海岸特色設置環教場所

擁有各種類型的海岸特色，但缺乏固定解說空間及環境，使得民眾或遊客可能陷入霧裡看花的狀況，無法深刻體驗，故市府逐一盤點沿海閒置空間，並重新活化為可以進行環境教育的場所，包括封閉 10 餘年的永興垃圾掩埋場活化為藻礁生態環境教室、閒置多年的觀音濱海遊憩區轉型做為「草漯沙丘地景觀音展示館」及「里海學堂」、新屋區蚵一哨所轉型為「新屋石滬故事館」、新屋區海防基地等老舊建築轉型為「海洋客家牽罟文化館」，透過重新規劃設計、整修改造，成為提供民眾透過實物觀察、感官體驗、多媒體互動等方式的海岸環境教育場域。

目前各場館已陸續開放參觀，並結合在地社區共同經營管理，現正朝向取得環境教育設施場所認證為目標，提升場館經營品質，並凝聚社區力量，共同珍惜桃園海岸線的珍貴資源。

### 3.2.4 里海學堂培訓種子人員

海洋教育最重要的推手還是「老師」，然而大部分學校教師並無海洋專業背景知識，故透過里海學堂辦理課程，教育局邀集老師方式，培育一批種子教師，希望藉由師資人才培訓，將海洋文化真正融入校園環境教育中。

除了提供基本海洋通識教育課程外，「海洋大

師專題講座」將邀請海岸、海洋、環保、地理、生態、文化等領域的專家學者，以深入淺出的方式進行專題演講，讓一般民眾也有機會接觸到全方位的海洋知識。

另外針對合作夥伴，則定期舉辦海洋教育研習班、志工增能訓練班等，依照不同的對象和需求，落實「全齡」海洋教育！為了發展海岸生態旅遊，共同為我們的海洋國家打下深厚的基礎。

### 3.3 環境教育產業發展策略

為吸引民眾前往海邊接受環境教育，故結合觀光資源是目前最常見的做法，結合環境保育的教育意識、有環境責任感的一種旅遊型態，故對於未來推動策略，訂為在發展生態旅遊，也是目前國際上積極推展的旅遊模式。

#### 3.3.1 海岸觀光資源營造

桃園轄區海岸線內涵括了各類型遊憩景點，包括濕地、沙丘、藻礁及石滬等海岸生態亮點、對應之環教場館外，亦打造其他體驗型場域，如後湖溪親水設施、新屋濱海植物園等，提供不同族群多元的體驗，以增加活動豐富度及民眾停留時間。

景點周邊則配合提供服務性設施，如草漯沙丘增設潮音海觀景步道及白沙屯觀景步道，搭配觀景平台、休憩座椅、木質廣場、漂流木入口意象景觀、黃槿步道等設施，並進行固定式廁所及非固定式五星級景觀廁所，提升民眾旅遊體驗。

除景點本身之吸引力外，中間的動線間串連動線規劃亦不可忽略，除了縮短景點之間枯燥的移動時間，甚至使移動過程的路線也能成為規劃行程之一，透過景點的串連，形成海岸觀光資源廊道。

為提供提供民眾更安全的騎乘或步行空間，故進行濱海自行車道護欄改善作業，讓更多遊客以低碳樂活的方式體驗大園海岸生態之美。另外亦同步透過盤點海岸自行車路網，規劃興建橫跨老街溪出海口的「許厝港老街溪自行車景觀大橋」，銜接許厝港重要濕地及草漯沙丘地質公園，透過自行車路網的串聯，讓更多遊客以低碳樂活的方式體驗大園海岸生態之美。

#### 3.3.2 發展生態旅遊產業鏈

單純的觀光旅遊並無法完整達到環境教育的目的，最佳的方式是提升在地民眾的知能，並使在地

民眾感受到保護環境在旅遊上所帶來的附加價值及經濟效益，進而願意自主發展、推動。

初期由市府帶頭，復育、保護在地海岸資源後，並透過適當的宣傳活動吸引民眾前往，接下來則透過輔導民眾自主進行保育及管理工作，互相合作、彼此監督。為使民間團體、產業之合作得以持續推動，故成立海岸生態旅遊產業聯盟，並協助發展電子套票的遊程，使其逐步發展為自主運作之消費經營模式，推動在地經濟。

## 四、結論

本文分享市府團隊將白皮書規劃內容落實到實際執行策略之成果，未來將持續整合相關團隊，達到保護重要海岸資源、合理利用海岸資源、復育劣化生態資源、整建改善海岸景觀、加強海岸災害防護、合理發展海洋產業、建構海岸資源系統、完備海岸管理體制、加強海洋教育訓練、強化公私夥伴關係，確保桃園自然海岸不再損失，避免不當的海岸工程，衝擊自然生態平衡，邁向永續藍海的新未來。

# 海岸巡護隊志工制度提升海岸清理工作績效之探討

林智明<sup>1</sup> 陳政蓉<sup>2</sup> 江佩儒<sup>2</sup>

<sup>1</sup>翔科事業有限公司經理

<sup>2</sup>桃園市政府海岸管理工程處

## 摘要

傳統海岸清理工作主要由政府雇工清理或是不定時辦理大型淨灘活動等兩種方式，自 107 年桃園市政府海岸管理工程處成立後，創新性成立海岸巡護隊志工，導人民間社團、在地社區共同參與海岸清理工作。本文整理 108-109 年海岸巡護隊服勤數據與同期桃園市府海岸清潔與淨灘活動相關績效，透過成本效益的探討志工制度對提升海岸清理工作績效。

關鍵詞：志工、海岸清潔、績效分析

## Discussion on the Coast Guard Team Volunteer System to Improve the Performance of Coastal Cleanup Work

Chih-Ming Lin<sup>1</sup>, Ming-Jer Kao<sup>2</sup>, Ming-Jer Kao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Manager of Hsiangke Business Co., Ltd

<sup>2</sup>Manager of Hsiangke Business Co., Ltd

## ABSTRACT

Traditional coastal clean-up work is mainly by government workers to clean up or from time to time for large-scale beach activities and other two ways, since the establishment of the Taoyuan Municipal Government Coastal Management Agency in 107, the innovative establishment of coast guard volunteers, the introduction of civil society, community participation in coastal clean-up work. In this paper, the service data of the coast guard team from 108 to 109 are collated with the performance related to coastal cleaning and clean beach activities in Taoyuan City Government during the same period, and the performance of coastal clean-up work is improved through cost-effective discussion.

Keywords: Volunteer; Coastal cleanliness; Performance analysis

## 一、前言

傳統海岸清理工作主要由政府雇工清理或是不定時辦理大型淨灘活動等兩種方式，自 107 年桃園市政府海岸管理工程處成立後，創新性成立海岸巡護隊志工，導人民間社團、在地社區共同參與海岸清理工作。

桃園市海岸線長達 46 公里，除蘊藏豐富的生態、自然及人文景觀等資源，包括許厝港濕地、草潔沙丘、觀新藻礁、新屋石滬等，另一面由於過去

歷史因素，沿岸亦是工業區、廢棄物掩埋場林立，包括大園工業、觀音工業區、桃園環保科技園區與大潭濱海特定工業區等，權管與土地所有權人相對複雜。

有鑑於此，桃園市府針對公有土地且較為安全 28.56 公里長之地段招募海岸巡護隊進行認養；剩餘較危險的海岸，因顧及志工的安全考量，則仍由海管處委託專業人力維護。桃園市目前有 16 隻海岸巡護隊隊，人數達 587 人，已完成 25.84 公里長度的海岸線認養工作，約佔可認養長度的 90.5%。

## 二、文獻回顧

往昔在探討淨灘活動時著重於海岸垃圾組成分析對管理政策提供的參考與依據，比如台灣第一篇以海岸廢棄物組成分析的碩士論文(楊宗諭，2008)就是以基隆市長潭里的海岸垃圾組成分析為標的，探討海岸垃圾的豐度、組成分析供政府單位與學術研究參考；或是「旗津海洋廢棄物來源分析探討其管理政策之意涵」(高睿莊，2012)則是藉由探討高雄市旗津的海岸垃圾組成，嘗試建立與陸域廢棄物管理政策之關聯性。近年來，隨著企業社會責任的興起，越來越多企業投入淨灘專案，因此目前也有嘗試以社會投資報酬(Social Return on Investment, SROI)探討淨灘活動價值(高以翔，2012)。

整體而言，不難發現過去的研究主要集中在淨灘活動本身的直接(垃圾組持)或間接效益(對管理制度的幫助)上，缺乏不同淨灘模型活動橫向比較方面的研究。

## 三、問題解析

### 3.1 海岸巡護隊

為推動海岸清潔工作，桃園市政府海岸管理工程處自 107 年底起先後招募在地社團成立海岸巡護隊，新隊伍於次年度初起開始服勤，海管處並每年就各隊執行績效進行評鑑。

第一階段：創立之初，先於 107 年 12 月 29 日招募 11 隊(蘆竹區濱海海岸巡護隊、大園區許厝港海岸巡護隊、大園區內海社區海岸巡護隊、大園區北港海岸巡護隊、觀音區保障海岸巡護隊、觀音區樹林海岸巡護隊、觀音區保生社區海岸巡護隊、新屋區永興海岸巡護隊、新屋區永安海岸巡護隊、新屋區笨港社區海岸巡護隊與新屋區牽苦灣海岸巡護隊等 11 隊)，並於 108 年 1 月 1 日起開始運作。

108 年 7 月 25 日招募(大園區海口海岸巡護隊、觀音區白玉海岸巡護隊、觀音區觀音海岸巡護隊與新屋區蚵間海岸巡護隊等 4 隊)，並依評鑑結果汰除觀音區保障海岸巡護隊。由於保障海岸巡護隊並未實際出動，申請補助經費僅 902 元，故不列入本次研究範圍當中。

109 年 10 月 3 日完成蘆竹區南坎港巡護隊與大園區黃金海岸巡護隊的招募工作，使得巡護隊數量

達到 16 隻海岸巡護隊，志工人數達 587 人，完成 25.84 公里長度的海岸線認養工作，約佔可認養長度的 90.5%。

本研究標的的海岸巡護隊認養資訊與清除積效如下表 3.1 所示。

表 3.1 海岸巡護隊認養長度與服勤績效

隊名	長度(公里)	108 年度垃圾清除量(公斤)	109 年度垃圾清除量(公斤)
蘆竹區濱海海岸巡護隊	1.78	5,501.99	1,728.50
蘆竹區南坎港巡護隊	2.04	n/a	n/a
大園區黃金海岸巡護隊	2.41	n/a	n/a
大園區海口海岸巡護隊	1.87	n/a	10,544.74
大園區許厝港海岸巡護隊	1.07	2,823.38	3,675.08
大園區內海社區海岸巡護隊	1.13	8,307.63	3,316.60
大園區北港海岸巡護隊	1.82	3,848.57	6,686.63
觀音區樹林海岸巡護隊	1.57	7,098.55	8,281.40
觀音區白玉海岸巡護隊	2.52	n/a	1,239.50
觀音區觀音海岸巡護隊	0.98	n/a	6,368.00
觀音區保生社區海岸巡護隊	1.41	6,045.79	7,861.27
新屋區永興海岸巡護隊	1.17	9,610.49	10,561.00
新屋區永安海岸巡護隊	1.46	7,760.39	5,922.56
新屋區笨港社區海岸巡護隊	1.13	3,159.53	3,464.50
新屋區牽苦灣海岸巡護隊	0.82	6,640.00	6,443.50
新屋區蚵間海岸巡護隊	2.66	n/a	6,049.06

n/a 表示尚未成立。

### 3.2 愛淨灘活動

為鼓勵民眾與社會企業投入淨灘活動，桃園市政府以身作則，自 106 年 8 月起桃園市政府便開始辦理愛淨灘活動。如下表 3.2，考量到民眾出入方便，所以歷年辦理地點初步以竹圍漁港北岸、許厝港濕地、觀音海水浴場周圍等桃園市海岸線主要景點為主。後續因著財團法人綠色和平基金會與社團法人中華民國荒野保護協會於 108 年 7 月 11 日公布海岸快篩調查結果，因此於 109 年度起將活動集中至白玉海岸與竹圍漁港北岸辦理淨灘活動。

表 3.2 桃園愛淨灘辦理場地

地點	總計
永安漁港南岸	2
觀音海水浴場兩側	3
竹圍漁港北岸	6
大堀溪出海口/白玉海岸	2
富林溪出海口	1
埔心溪出海口/許厝港濕地	3
新街溪出海口/許厝港濕地	4
小飯壠溪出海口/彩繪風車	1

### 3.3 僱工清理

自 108 年度起桃園市政府便僱工協助清理海岸，特別是針對交通不便或是尚未被巡護隊認養之區域為優先。

## 四、研究成果

本文整理 108-109 年海岸巡護隊服勤數據與同期桃園市府海岸清潔與淨灘活動相關績效，透過成本效益的探討志工制度對提升海岸清理工作績效。在計算原則：

1. 僱工計畫費用(扣除指定事項與活動)加上承辦人事費用
2. 志工計畫納入運作經費、福利費用(如教育觀摩等費用)、評核獎金與承辦人事費用
3. 愛淨灘則只計入活動本身經費。

故相關績效比較如下表 4.1。

表 4.1 各種方式海岸清理績效比較

109 年	僱工	志工	愛淨灘
總清理量(公斤)	170,780	87,273	7105.4
海岸清潔長度(公里)	46	23.43	12.95
人次	2811	13427	2116
直接經費(萬)	800	337	40

進一步分析，各制度的清理效率如下圖 4.1。

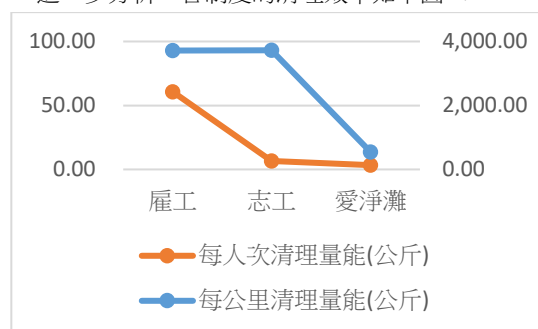


圖 4.1 各制度清理效率比較

綜上所述，各制度的投入產出效益如下圖 4.2 所示：

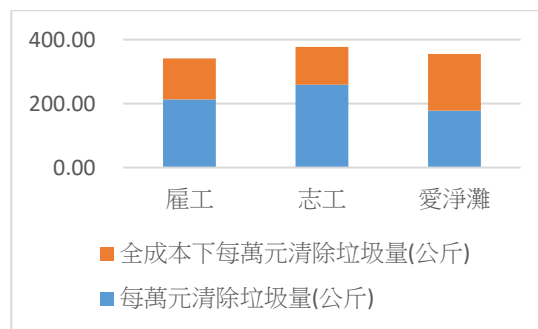


圖 4.2 各制度投入產出效益

## 四、結論

在直接投入產出分析中，巡護隊的成本效率是僱工的 1.2~1.3 倍，端視當地巡護隊運作情形而定，而最便宜則是淨灘活動。

考慮全成本則不然，納入管理成本後，志工制度則成為邊際條件下的最優解。

淨灘活動雖然總執行成本最低，但是產出也是最低，而且標準差極高。

僱工的變異係數最低，執行成果最為穩定，所以相當適合作為補充。

志工制度成本相對低，且產出也有一定水品，維管理成本與外部效益都優，故滿足帕托最適解。

## 謝誌

本文得以完成，感謝桃園市政府海岸管理工程處計畫經費提供，特此謝忱。

## 參考文獻

1. 楊宗諭(2009)，「基隆市長潭里海灘垃圾豐度、組成與來源」，碩士論文，國立臺灣海洋大學環境生物與漁業科學學系。
2. 高睿莊(2012)，「旗津海洋廢棄物來源分析探討其管理政策之意涵」，碩士論文，國立成功大學海洋事務及科技研究所。
3. 高以翔(2012)，「旗津海洋廢棄物來源分析探討其管理政策之意涵」，碩士論文，國立成功大學海洋事務及科技研究所。
4. 桃園市政府海岸管理工程處，「109年桃園市海岸環境清潔維護計畫」期末報告。
5. 桃園市政府海岸管理工程處，「109年度桃園市海岸巡護志工招募培訓暨運用管理計畫」期末報告。
6. 環 保 署 新 聞 ；  
<https://enews.epa.gov.tw/Page/3B3C62C78849F32F/f1744b58-0323-497d-af8d-0ef81e21883b>

# 新屋濱海自然生態環境 APP 推廣之經驗分享

戴好臻<sup>1</sup> 江佩儒<sup>2</sup> 張語珊<sup>2</sup> 張哲岳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>瑄品股份有限公司

<sup>2</sup>桃園市政府海岸管理工程處

## 摘要

主題: E 桃園海岸特輯

通訊作者: 張哲岳

E-mail: 900075@tydep.gov.tw

Tel: 03-3865711#302

## 一、前言

新屋濱海植物園於 109 年 10 月正式開園，前為永安雪森林遊憩區封園迄今已二十餘載，過去由於封園無人看管，濱海林地常遭人為破壞，影響生態圈發展。近年桃園市府重新規畫新屋濱海植物園，與林務局合作維護林地環境，期許透過生態維護，讓濱海生態植物成長茁壯，不僅可維護海邊居民生命財產安全，也成為野生動物的天然庇護所，藉此打造濱海生態圈！

濱海植物園中更有豐富的動植物，包含：木麻黃、黃槿、草海桐、馬鞍藤、蔓荊、林投都是桃園海岸常見的濱海植物，赤腹松鼠、臭鼬、小彎嘴畫眉、黑翅鳶(保育類)、大冠鷲(保育類)、蓬萊草蜥(台灣特有種)、斯文豪氏攀蜥(台灣原生種)、兩傘節(保育類)、中華沙蟹、漢式螳臂蟹、薄翅蜻蜓、紅脈熊蟬等，生態非常豐富多元，儼然成為自然與環境教育的生態場所。

為增加民眾對濱海生態的認識，於 109 年月完成建置園區互動式 APP，內容包含園區知識、互動遊戲、周邊景點、園區小故事及好禮兌換...等功能，透過 APP 帶領民眾體驗不一樣的生態教育，成為旅遊景點新指標。



## 二、推廣園區互動式 APP

為提升桃園濱海植物園的討論透過以下方式執行增加 APP 下載量及園區曝光：

1. Facebook 數位行銷提升 APP 討論度，設定不同的主題文案，例如：活動、生態百科、遊程及在地人文，將貼文主題圍繞在植物園及週邊，提高植物園的曝光度。

### 經營FB粉絲團

做一個持續溝通的平台



植物(生物)百科/在地人文/遊程設計/線上活動

2. LINE LAP 投放，以親子相關為目標族群增加親子旅遊意願。



### 3 以活動刺激 APP 下載量

鼓勵下載並分享 APP 指定任務，透過活動刺激 APP 下載量，預期活動提供限量精美好禮作為活動抽獎贈品，藉此刺激活動參與度。

4.校園宣傳吸引學校規劃校外教學，帶領學生認識園區生態。



## 三、成效與回饋

本次因疫情影響減少民眾外出機會，也減少園區旅遊人次，在社群媒體曝光中至少曝光 30 萬次，透過宣傳增加應用程式之使用截至 110 年 8 月 31 日止，該應用程式於 Android 及 IOS 系統共計有 5000 次下載量，未來預訂於園區完工後加強曝光，提升園區知名度，改善民眾原有印象。



(圖)APP 下載量執行走勢圖

校園宣傳成效中，雖無法進入校園，我們改為提供桃園市所有國中、小學校植物園園區宣傳海報並以電話逐一宣傳，執行此項目中 9 成的學校是同意協助宣傳，並邀請未來可以至校園內與學生分享物園相關活動及園區內資訊來增加學生們的科普知識。

## 許厝港濕地復育成效之探討

林志融<sup>12</sup> 李培芬<sup>12</sup> 曾威捷<sup>12</sup> 江佩儒<sup>3</sup> 張哲岳<sup>3</sup> 林哲宇<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> 社團法人中華民國溪流環境協會

<sup>2</sup> 國立臺灣大學生態學與演化生物學研究所

<sup>3</sup> 桃園市政府海岸管理工程處

### 摘要

許厝港濕地老街溪右岸到新街溪左岸之間的非魚塾收回後，在 108 年進行老街溪口清淤及生態復育區營造，打造為 22 公頃的許厝港生態復育棲地，該工程在 109 年 1 月完工。為了解該生態復育區之成效，在 108 年進行了施工前、施工中與施工後的 3 次調查；從 109 年開始則進行每季 1 次之調查，藉由鳥類種類與數量的變化來評估濕地復育之成效。同時在許厝港生態復育 A 區與 D 區營造為適合小燕鷗繁殖之棲地。109 年 4-8 月與 110 年 5-8 月進行每周 1 次調查，了解小燕鷗是否使用新營造的復育棲地。調查結果，鳥類種類數從 108 年的 21 種上升到最多 33 種，數量從 108 年 216 隻次上升到最多 1,402 隻次，可預期未來可吸引更多度冬鳥類前來棲息。小燕鷗 2 年一共有 770 隻次的紀錄，有 2 巢繁殖窩數並成功繁殖。

關鍵詞：許厝港濕地、棲地營造、鳥類群聚、小燕鷗

## Study on the Ecological Restoration of Xucuagang Wetland

Chin-Jung Lin<sup>1, 2</sup> Pei-Fen Lee<sup>1, 2</sup> Wei-Chieh Tseng<sup>1, 2</sup> Pei-Ju Chiang<sup>3</sup> Che-Yueh Chang<sup>3</sup>  
Zhe-Yu Lin<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Stream Environment Society of the Republic of China

<sup>2</sup>Institute of Ecology and Evolutionary Biology, National Taiwan University

<sup>3</sup>Office of Coast Administration Construction, Taoyuan

### ABSTRACT

We studied the ecological restoration of Xucuagang Wetland in Taoyuan City, Taiwan by using birds as the indicator. The 22 ha site, located in the estuary of Lao-Jie River, was illegally occupied by fish farms in the past and recontrolled by the City Government through a legal process. The restoration began in March of 2019 and completed in January of 2020 with the goal to create tidal pools and ponds that can serve as habitats for migratory and resident birds. To monitor the effectiveness of the restoration, we studied the bird assemblage in the site by using a Before-After Control-Impact design from March 2019 to August 2021. In addition, the City Government also created a nesting habitat for Little Tern (*Sternula albifrons*) in the area near the estuary. We surveyed the occurrence and nesting success of the Little Tern, a protected species, between 2020 and 2021. The results showed that the number of bird species increased from 21 to 33 and the number of individual increased from 261 to 1402 per survey. We found a total of 53 species, including 6 protected species, using the newly created wetland. As for the Little Tern, a total of 723 individuals with 2 nests were found. The results indicate that the ecological restoration of Xucuagang Wetland is successful. Given the initial success, we expect many species and individuals will explore and use the newly created habitats in the near future.

Keywords: Xucuagang Wetland; Habitat recreation; Bird assemblage; Little Tern

## 一、前言

許厝港位於桃園市大園區，一直是桃園市海岸地區的重要賞鳥景點。國際鳥盟（BirdLife International）於 1980 年代中期提出「重要野鳥棲地」（Important Bird Areas，簡稱 IBAs）的概念，許厝港是臺灣地區的重要野鳥棲地之一。在濕地保育法於 104 年 2 月 2 日正式施行，「許厝港重要濕地(國家級)保育利用計畫」107 年 9 月 19 日公告後，地方主管機關桃園市政府海岸管理工程處積極進行濕地保育各項工作。

許厝港濕地範圍內，老街溪右岸到新街溪左岸之間過往被非法魚塭所佔據，桃園市政府海岸管理工程處成功將這些非法魚塭收回後，在 108 年進行老街溪口清淤及非法魚塭之改善，建立感潮濕地，深水池等數個不同水域環境，打造為 22 公頃的許厝港生態復育棲地，該工程在 109 年 1 月完工。

為了解許厝港濕地生態復育區之成效，在 108 年進行了施工前、施工中與施工後的 3 次調查；從 109 年開始則進行每季 1 次之調查，藉由鳥類種類與數量的變化來評估濕地復育之成效。

小燕鷗為 2 級保育類，每年 4 月來臺繁殖，8 月離開返回南半球，近年來在桃園市海岸地帶有穩定的族群量。桃園市政府海岸管理工程處結合桃園市野鳥學會，在許厝港生態復育 A 區與 D 區，擺設小燕鷗假鳥，放置磚瓦等遮蔭處，並在 A 區拉起圍籬，避免人類與流浪犬隻進入，將其營造為適合小燕鷗繁殖之棲地。109 年 4-8 月與 110 年 5-8 月進行每周 1 次小燕鷗調查，藉以了解小燕鷗是否會來使用新營造的復育棲地。

## 二、研究方法

本計畫在許厝港濕地生態復育區一共設立三個監測點位，分別是老街溪口、魚塭 1 與魚塭 2（如圖 1）。108 年進行施工前、施工中與施工後的調查。109 與 110 年則進行每季 1 次的調查。調查時間以一個潮汐時間，每小時在每個樣點調查 10 分鐘。調查方式為三個樣點架設高倍率單筒望遠鏡，記錄鳥類的種類、數量與位置。



圖 1 許厝港濕地生態復育區鳥類調查樣點圖

小燕鷗監測則於 109 年 4 月至 8 月，以及 110 年 5 月至 8 月進行。調查地點則在老街溪口、濕地生態復育 A 區與濕地生態復育 D 區進行（如圖 2）。調查時間以一個潮汐時間，每小時在每個樣點調查 10 分鐘。調查方式為三個樣點架設高倍率單筒望遠鏡，記錄鳥類的種類、數量與位置。



圖 2 小燕鷗監測調查樣點圖

## 三、結果

許厝港濕地生態復育區鳥類調查，108 年到 110 年 8 月，共 10 次調查，由於 108 年的施工中與施工後的鳥類調查皆受到工程影響；110 年調查正在進行中，因此只選取 108 年施工前調查(108 年 2 月)與 109 年的 4 次調查作比較。

以鳥類種類數來看，108 年施工前為 21 種，109

年 4 次調查介於 21-33 種 (如圖 3)；以鳥類數量來看，108 年施工前為 261 隻次，109 年 4 次調查介於 480-1,402 隻次 (如圖 4)，鳥類種類與數量與施工前相比皆有上升。從施工前調查只有 21 種 261 隻次可以看出原本魚塭環境並無法吸引鳥類前來棲息，109 年完工後的 4 次調查，共調查到 53 種 3,763 隻次的鳥類，並記錄到 6 種保育類鳥類。110 年的調查尚在進行中，但記錄到 1 級保育類黑面琵鷺 3 隻次在此休息。桃園市野鳥學會過往雖在許厝港有記錄到黑面琵鷺的紀錄，但都是在外海盤旋，如今在 22 公頃生態復育區發現黑面琵鷺之蹤跡，可樂觀預期未來黑面琵鷺會利用生態復育區做短暫棲息。

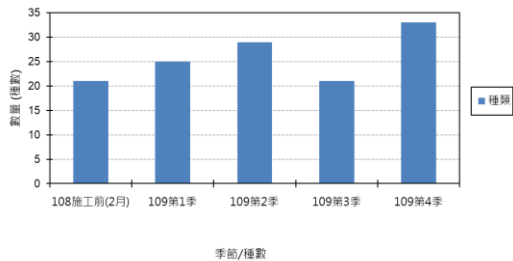


圖 3 生態復育區鳥類調查種類數圖

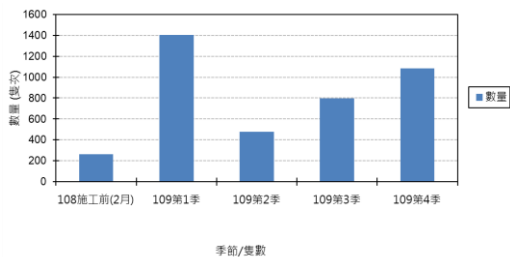


圖 4 生態復育區鳥類調查數量圖

小燕鷗監測調查部分，109-110 年在老街溪口有 723 隻次、A 區有 28 隻次、D 區有 19 隻次的紀錄；109 年在 A 區共有 2 窩的築巢紀錄 (如表 1)，並都成功繁殖。小燕鷗在桃園市過往集中在竹圍漁港與大潭地區進行繁殖，在這兩區域尚未有地景改變影響小燕鷗繁殖，並沒有搬遷到許厝港生態復育區進行繁殖之需求。同時 A 區受到雜草叢生之影響，難以吸引小燕鷗前來繁殖，對此，桃園市政府海岸管理工程處已利用海沙鋪設復育棲地，一方面用以制止雜草生長，另一方面沙地環境也更貼近小燕鷗繁殖棲地環境，未來許厝港濕地生態復育 A 區依然有可能成為小燕鷗在桃園市海岸地帶的繁殖熱區。

表 1 109-110 年小燕鷗監測數量與繁殖窩數表

	老街溪口	A 區	D 區
隻數	723	28	19
窩數	0	2	0

#### 四、討論

候鳥遷移到臺灣的種類與數量受到諸多因數的影響，如原生棲地破壞，不當獵捕壓力，遷移過程中受到不良氣候干擾等皆是可能原因。當然，若臺灣的候鳥棲息地因為各種原因減少或消失，則無候鳥駐足之地，當然種類數量也會減少。只要積極對濕地進行保護與復育，候鳥就會慢慢回來。民國 90 年關渡自然公園成立，91-93 年進行園區內心濕地的各個水池的復育工程，從關渡自然公園累積的 20 年鳥類調查資料中可以看到，鳥類種類與數量雖有波動，但自 97 年起幾乎其趨勢皆是往上，鳥類種類與數量呈現穩定成長的狀態。

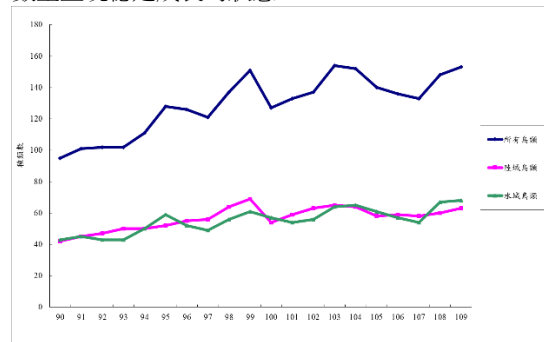


圖 5 關渡自然公園歷年鳥類調查種類數圖

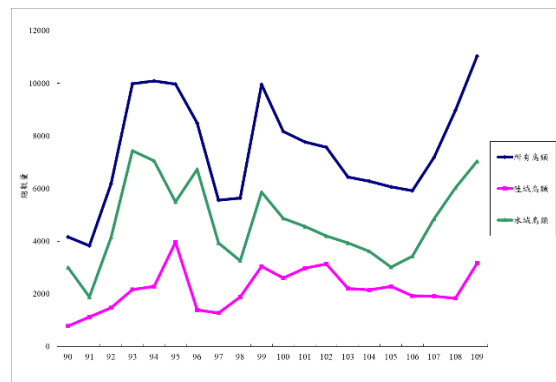


圖 6 關渡自然公園歷年鳥類調查數量圖

由於許厝港濕地生態復育區 109 年 1 月才完全完工，工程期間的干擾，工程後水質與底質擾動，以及底棲無脊椎生物的數量回復皆需要時間，從關

渡自然公園的例子，需 3-5 年才能看出復育成效。然候鳥棲地增加 22 公頃，可預期未來鳥類的種類數量會有提升。

小燕鷗 109-110 年在許厝港濕地老街溪口有 723 隻次的紀錄，然多是在 4 月底剛抵達與 8 月準備要南返時在此地做停整。許厝港濕地生態復育 A 區與 D 區所做的棲地整理，並沒有吸引到小燕鷗前來使用。最主要原因是小燕鷗在桃園市海岸地帶過往使用的育雛區：竹圍漁港與大潭地區，近年來棲地環境保持穩定，小燕鷗沒有搬移之需求。此外許厝港濕地生態復育 A 區由於草本植物生長快速，這樣的地被環境非小燕鷗育雛時所需之環境，桃園市政府海岸管理工程處與桃園市野鳥學會商議後，已經載運海砂到生態復育 A 區覆蓋表土，一是更改表土型態為小燕鷗喜愛之沙地環境，二是藉由海砂覆蓋抑制草本植物生長。若此法成功可行，未來依然可以期待小燕鷗選擇許厝港生態復育 A 區作為育雛之場所。

## 謝誌

本文之調查計畫與相關研究成果，承蒙濕地保育法中央主管機關：「內政部營建署城鄉發展分署」及地方主管機關：「桃園市政府海岸管理工程處」之經費支持，特此感謝。

## 參考文獻

1. 李培芬、陳韋仁、柯佳吟(2019) 108 年桃園市海岸地區生物多樣性指標調查計畫，桃園市政府海岸管理工程處。
2. 李培芬、陳韋仁、柯佳吟(2020) 109 年桃園市海岸地區生物多樣性指標調查計畫，桃園市政府海岸管理工程處。
3. 李培芬(2020) 109 年度臺北市自然保護區域及其周邊環境監測計畫，臺北市動物保護處。

# 開放性模式預報與現場觀測資料之比較— 新竹風浪特性的探討

林峻宇<sup>1</sup> 黃志誠<sup>2\*</sup> 林伯謙<sup>1</sup>

<sup>1</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所專任助理

<sup>2\*</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所副教授

## 摘要

人們時常利用網路上開放性的海氣象預報系統(例如 Windy、Windguru 等)來獲取未來的海氣象資料,以作為活動或研究評估等應用參考;然而這一些預報資料是否準確可靠,目前仍不得而知。本研究透過網路蒐集超過一個月的 Windguru 網站開放性的模式預報資料,並與中央氣象局的實測海氣象資料做一比較與分析。以新竹浮標實測的風速、風向、波高、波浪週期、波向資料為例,比較 1、3、5 日的模式預報與當天現場實測資料,並以 Skill 值量化兩者的差異。研究結果顯示,1 日預報的結果與 3 日及 5 日預報結果相比,1 日預報的結果相當良好且誤差較小,有最高的準確性。在細微的短時間變化上,模式預報資料較為平滑,不易看出如現場觀測資料有較多的震盪。另外可發現在如颱風的劇烈天氣下,雖然開放性預報系統可以預報出海氣象變化趨勢,但是在波高與風速的尖峰值上,預測上仍存在有很大的差異。

關鍵詞: 波浪預測、風預測、開放性資料

## Comparison on Model-Forecasting and Field-observed Open Data for studying Wind and Waves in Hsinchu

Chun-Yu Lin<sup>1</sup>, Zhi-Cheng Huang<sup>2\*</sup>, Po-Chien Lin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Assistant, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

<sup>2\*</sup> Associate Professor, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

## ABSTRACT

People often use open data obtained from web-based weather forecasting systems (e.g., Windy, Windguru) to obtain future information of the weather and ocean. However, it is not clear whether these forecasting data are accurate and reliable enough. In this study, the data of the forecasting systems of Windguru website were collected for more than one month, and compared with the field-observed wind and wave data provided by Central Weather Bureau. Physical parameters of wind speed, wind direction, wave height, wave period, and wave direction were compared. The one-, three-, and five-days forecasting data were compared to the field-observed data of Hsinchu buoy. The differences between the two datasets were quantified using skill values. The results show that the accuracy of the one-day forecasting data are the highest compaing to the three- and five-days forecasting results. It can be seen that the trends of the results predicted by models are smoother than the observated data and short-time variations of the data are missed. The forecasting models predict good trends even under severe typhoon conditions; however, the forecasting models can not accurately predict the peak values of wave height and wind speeds.

Keywords: wave forecast; wind forecast; open data

## 一、前言

人們時常利用網路上開放性的海氣象預報系統(例如 Windy、Windguru)來獲取未來的海氣象資料,以作為活動或研究評估等應用參考。然而這一些預報資料的是否足夠準確可靠,目前仍不得而知。

桃園海岸事逢二級海岸防護計畫擬定規劃時期,並有第三座天然氣接收站的工業港興建,因此需要長期性代表資料作為評估探討,更需要預報資料作為港域與工作船隻活動的參考評估資料。因新竹浮標資料常被認可是桃園海域的海氣象代表性資料,因此本研究擬評估網路開放性模式預報資料與新竹浮標實際觀測資料的差異與準確性,以提供桃竹苗海域的規劃應用參考。

本研究透過網路蒐集 Windguru 網站提供的開放性模式預報資料,並與臺灣海象防災環境資訊平台提供的新竹浮標歷史觀測資料做直接的比較分析,希望能瞭解開放性預報模式資料的準確性。

## 二、資料來源與分析

在實測資料部分,本研究蒐集中央氣象局的新竹浮標歷史觀測資料,蒐集的資料種類包含波浪及海面風。Windguru 網站則使用系集預報(Ensemble forecasting)網站內所有模型預報的加權平均值之資料,蒐集其風速、風向、波浪高、波浪向及波浪週期資料。本研究從 6 月底開始,每天進行網路開放性資料的蒐集,並將其中 7/2 日到 8/17 的資料進行比較與分析。

在模式預報與實測資料比較部分,本研究以 1 日、3 日及 5 日的預報資料,並與當天的實測資料作比較。兩者資料相互比較時,以 Skill 值作為兩者相似度的依據。Skill 值(Willmott 1981)其公式定義如下:

$$Skill = 1 - \frac{\sum |X_{sim} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{sim} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{obs}|)^2}$$

其中  $X_{sim}$  為模式的模擬預報結果,  $X_{obs}$  則是觀測資料,而  $\bar{X}_{obs}$  為平均的觀測資料。相似度的結果會落在 0~1 之間,其相似度越接近 1 代表此模式的結果相當良好,而相似度越接近 0 則表示此模式的結果誤差很多,相當不準確。

## 三、結果與討論

圖 1、圖 2、圖 3、圖 4 及圖 5 為 Windguru 模式預報與新竹浮標實測的時序列比較圖,圖 1 到圖 5 依序為風速、風向、波高、波浪週期、波向的時序列比較圖,其中每一張圖中藍色點為實測資料,紅色、綠色、淺藍色為 1 日、3 日及 5 日的預報值。由圖中的時序列變化趨勢來看,模式預報資料整體大致符合現場觀測的變化趨勢。由圖中也可以看出在細微的短時間變化上,模式預報資料較為平滑,不易看出如現場觀測資料有較多的震盪。

將實測與 1、3、5 日的預報的比較差異 Skill 值列於表 1,其中可發現 1 日預報資料在五種項目(風速、風向、波高、波週期、波向)中 Skill 值與 3 日及 5 日預報相比,明顯較高,其中 1 日預報資料的風速及波高 Skill 值更高達 0.89 及 0.86,其次為風向及波向,其 Skill 值分別為 0.81 及 0.73,最後為波週期 Skill 只有 0.61。並從表 1 也可發現,在風速、波高、波向中,預報天數越長其 Skill 值有越低的趨勢發生。

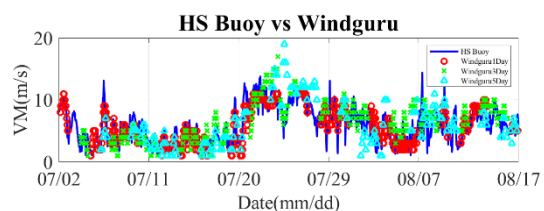


圖 1、風速時序列比較圖

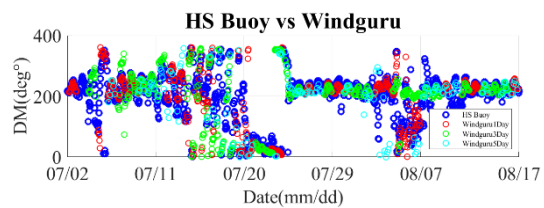


圖 2、風向時序列比較圖

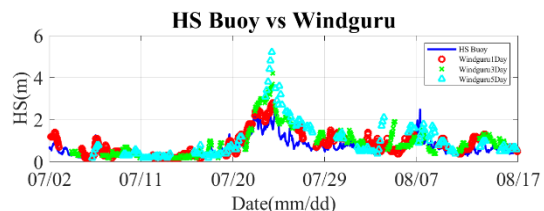


圖 3、波高時序列比較圖

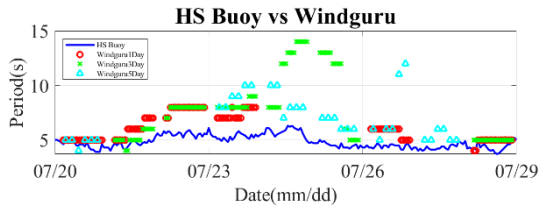


圖 4、波浪週期時序比較圖

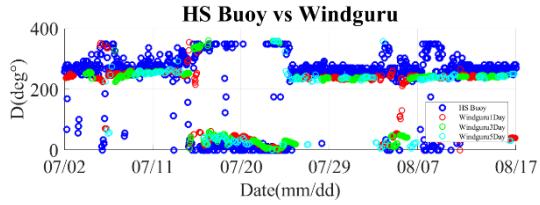


圖 5、波向時序比較圖

表 1、實測與 1、3、5 日預報的比較差異 Skill 值

	1 日	3 日	5 日
風速	0.89	0.82	0.78
風向	0.81	0.69	0.77
波高	0.86	0.83	0.73
週期	0.61	0.51	0.57
波向	0.73	0.73	0.67

另外，在 7/20 到 7/29 有記錄到較大的風速與波高，波浪的週期也較長，此為輕颱尼伯特颱風 (NEPARTAK) 所帶來的強風與湧浪，颱風期間時序列圖，如圖 6~圖 10 所示。並將颱風期間實測與 1、3、5 日預報的比較差異 Skill 值整理表 2。由上述資料可發現，颱風期間還是以 1 日的預報結果 Skill 值較高，並可以更明顯發現預測天數越長 Skill 值越低，其中以 5 日的預報結果最差，其風速與波高 Skill 值僅有 0.5 及 0.58。從圖 6~圖 10 可看出開放性模式可以預報出此颱風帶來的海氣象變化趨勢，但是在波高與風速的尖峰值預測上仍存在有很大的差異。

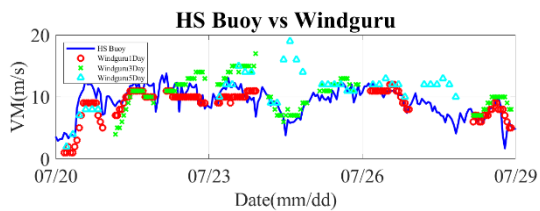


圖 6、颱風期間風速時序比較圖

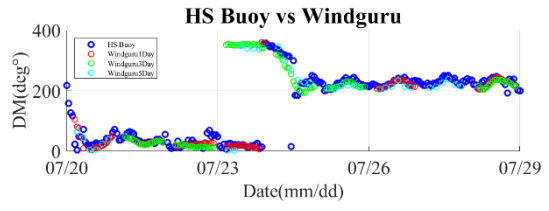


圖 7、颱風期間風向時序比較圖

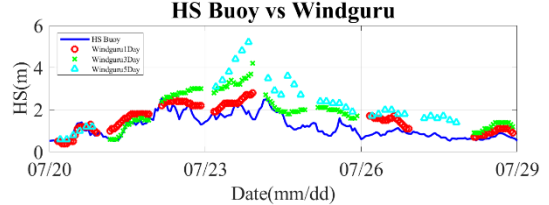


圖 8、颱風期間波高時序比較圖

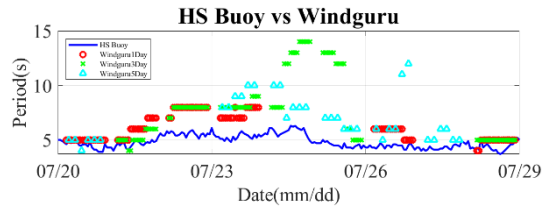


圖 9、颱風期間波浪週期時序比較圖

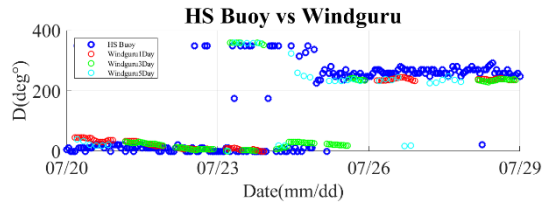


圖 10、颱風期間波向時序比較圖

表 2、颱風期間實測與 1、3、5 日預報的比較差異 Skill 值

	1 日	3 日	5 日
風速	0.82	0.69	0.5
風向	0.93	0.77	0.87
波高	0.79	0.73	0.58
週期	0.54	0.31	0.37
波向	0.83	0.76	0.77

#### 四、結論

本研究利用網路上開放性的海氣象預報系統 Windguru 模式結果與新竹浮標實測資料相比，來瞭解開放性模式預報資料準確性。以新竹浮標實測的風速、風向、波高、週期、波向資料為例，比較 1、3、5 日的預報與當天實測資料的差異性，並以 Skill 值量化兩者的差異。

由結果可發現，以 Windguru 模式 1 日預報資



料與新竹浮標實測資料有最高的 Skill 值，表示說 1 日預報的結果與 3 日及 5 日預報結果相比，1 日預報的結果相當良好且誤差較小，有最高的準確性。並可看出在細微的短時間變化上，模式預報資料較為平滑，不易看出如現場觀測資料有較多的震盪。另外可發現在劇烈天氣下(如:颱風)，雖然開放性預報系統可以預報出劇烈天氣下帶來的海氣象變化趨勢，但是在波高與風速的尖峰值預測上仍存在有很大的差異。

### 參考文獻

1. Willmott, C. J. (1981). "ON THE VALIDATION OF MODELS." *Physical Geography* 2(2): 184-194.
2. 林伯謙(2018)*桃園海岸近岸流四季變化之研究*，碩士論文，國立中央大學水文與海洋科學研究所。
3. 張國棟、蔡錦繡、謝佳紘、張孟勤(2007)「潮汐預測與基礎資料之相關性」，第 29 屆海洋工程研討會論文集，彙編頁碼：213-218。

## 桃園海岸垃圾密度調查之探討

林伯謙<sup>1</sup> 黃志誠<sup>2\*</sup> 沈彥豪<sup>1</sup> 鄧鑄源<sup>1</sup>

<sup>1</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所 研究助理

<sup>2\*</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所 副教授

### 摘要

本文利用國際淨灘行動(International Coastal Cleanup, ICC)所訂定之調查方式進行桃園海岸垃圾調查。桃園海岸垃圾物的組成主要種類為「一般生活及遊憩垃圾」及「寶特瓶」，其次為「漁業與休閒釣魚」，僅有少數的「醫療/個人用品」及「抽菸」所產生的海岸垃圾。由寶特瓶來源國資料可知，桃園海岸皆以無法辨識的寶特瓶居多，剩下能判斷的寶特瓶以中國為主要的來源國，其次為台灣。總共 3 年的現場研究調查成果，發現北桃園(觀音、大園)區域的海岸垃圾較南桃園(新屋)區多。推測可能因素是受到自然環境的風波流及地形影響，因桃園屬於東北季風盛行的區域，而大潭藻礁以北的觀音、新屋在地形幾何上，又屬於迎風面段，因此較易累積北方來的垃圾。加上冬末初春時，此區域會盛行跨海峽海流，帶來中國大陸的垃圾，因此桃園觀音、大園海岸較容易累積「跨海峽漂過來」的垃圾。另外，110 年桃園海岸明顯受到海岸巡護隊、清潔隊及淨灘活動等影響，桃園海岸垃圾量明顯大幅度減少，從 110 年調查結果與 109 年調查結果相比就可以知道調查區域內的平均清理量由原先 3293(個數/次)下降至 177(個數/次)，其影響顯著。

關鍵字：海岸垃圾、桃園海岸

## Survey Coastal Marine Debris (CMD) On Taoyuan

Po-Chien Lin<sup>1</sup>, Zhi-Cheng Huang<sup>2\*</sup>, Yan-Hao Shen<sup>1</sup>, Zhu-yuan Deng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Assistant, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

<sup>2\*</sup> Associate Professor, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

### ABSTRACT

This paper used the survey method developed by International Coastal Cleanup (ICC) to survey coastal marine debris (CMD) in Taoyuan. The main types of marine debris in Taoyuan are "plastic bottles" and "daily life wastes", and then "fishing wastes "; only a small amount of CMD "cigarette butts" and "medical wastes" are found. The source countries of the plastic bottles that can be identified are mainly from China, and then from Taiwan. Summarized results of three-year data, the results show that the amount of CMD in northern Taoyuan (Guanyin District and Dayuan District) is larger than that in southern Taoyuan (Xinwu District). This should be attributed to the monsoon wind and the topography. Taoyuan is the area where the northeast monsoon is prevalent; the topography of the north of Taoyuan coast is geometrically in the windward side. These leads that it is easier to accumulate the marine debris. In addition, in late winter and early spring, cross-strait currents are prevalent in this area, and will transport marine debris from China, resulting the northern Taoyuan coast is more likely to accumulate CMD floating across the strait. In addition, Taoyuan coast was obviously affected by the coastal patrol in 2021. Beach cleaning activities significantly reduce the CMD. Comparing the survey results yearly by yearly, the average amount of trash cleaned in the survey area is significantly decreased from 3293 (pcs/time) to 177 (pcs/time) from 2019 to 2021.

Keywords: Coastal Marine Debris、Taoyuan coast

## 一、前言

桃園海岸線擁有全台灣面積最大、生長最好的藻礁地形，其藻礁分佈範圍乃從大園區下海湖以南至新屋區永安漁港北側之間，南北總長約為 27 公里。藻礁乃由珊瑚藻經年累月所形成的，此特殊的地質環境成為自然野生生物棲地，使得藻礁具有保護與教育研究的價值，桃園海岸並具有石滬以及沙丘等特殊的海岸景觀。根據(陳建志, 2013)於台灣海岸調查藍皮書一書中提及桃園海岸上佈滿海洋廢棄物，臨海許多工業區違規汙水排放、空氣汙染，嚴重破壞海岸生態，由此可知，桃園海岸線深受海漂垃圾及工業汙染甚大。

近年來海洋垃圾一直是世界所重視的環保議題，像是塑膠垃圾對海洋生態系的破壞或是漁網造成海龜繞頸等議題皆為屢見不鮮的例子。世界各國正積極制訂法律來規範海漂垃圾的防治方法及處置方式，目的是要有效防止海漂垃圾對環境的持續破壞，但規範的成效仍有限。目前台灣有許多國環保團體皆發起多場淨灘行動，但淨灘時海漂垃圾的分佈及淨灘後海漂垃圾的置放點及集中管理，仍需一套有效的監測方式及管理策略來因應。

本研究以先前計畫案中 108 年度桃園市海岸水文地理資訊暨海漂垃圾調查評估計畫之調查成果、(林冠宏, 2020)為基礎，本研究利用國際淨灘行動(International Coastal Cleanup, ICC)所訂定之調查方式進行海岸垃圾調查，並進一步釐清桃園海岸海岸垃圾的分布、種類以及寶特瓶來源國等。

## 二、研究方法

### 2.1 研究區域

本研究根據 108 年度桃園市海岸水文地理資訊暨海漂垃圾調查評估計畫之調查成果，如圖 1 所示，經該調查報告可知，發現桃園海岸垃圾大多位於大園及白玉海灘。因此，乃依照先期之執行成果，考量垃圾量、垃圾熱點及區域特性等因素，篩選其中 5 處熱點進行垃圾的調查與分析，其地理位置空間分布圖，如圖 2 所示，點位選擇原因如下：

- (一)埔心溪口以北 3(B3 點位)：108 年度海岸垃圾量排名第一。
- (二)北緩衝區(A5 點位)：108 年度海岸垃圾量排名第二。

- (三)草漯沙丘 1(A15 點位)：108 年度海岸垃圾量排名第四，篩選此點乃因排名第三之 A11 點位容易受清潔活動干擾，而 A15 點位位於草漯沙丘，垃圾多、不易進入，較具代表性。
- (四)大潭工業區 G1(A9 點位)：108 年度海岸垃圾量排名第五，白玉海岸，垃圾多、具代表性。
- (五)後湖溪口以南 3(C3 點位)：由大部分垃圾量多的多分布於大園及觀音海岸，地形幾何上建議在新屋及永安漁港以南亦布置一個點位，故選擇永安漁港以南，垃圾較多之 C3 點位。

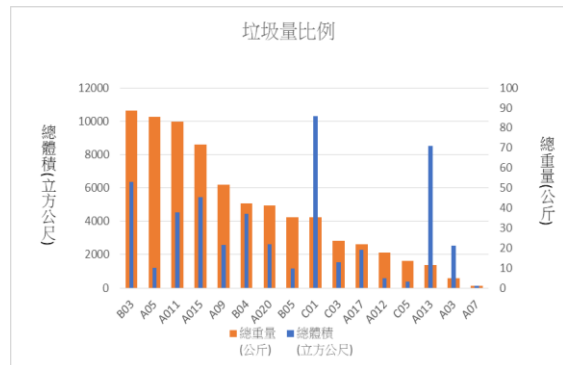


圖 1 108 年 3-10 月桃園海岸垃圾調查前 15 名的區位排名



圖 2 海岸垃圾蒐集分析調查熱區調查點位空間分布圖。紅圈區域為調查區域。

### 2.2 調查方法

#### (一)調查樣框

於擇定海岸線固定監測 100 公尺範圍，包含海岸高潮線之位置進行調查。並將劃定 100 公尺範圍內依垃圾量密度判定監測區域之高低密度區塊，將垃圾量高密度及低密度各取長度 15 公尺(從海岸高潮線向下 5 公尺至海浪前緣，延伸至海岸高潮線向上 10 公尺或至植被或人工設施)乘於寬度 10 公尺的範圍進行監測，接著以營釘在樣框上制定記號，其調查樣框示意圖，如圖 3 所示。

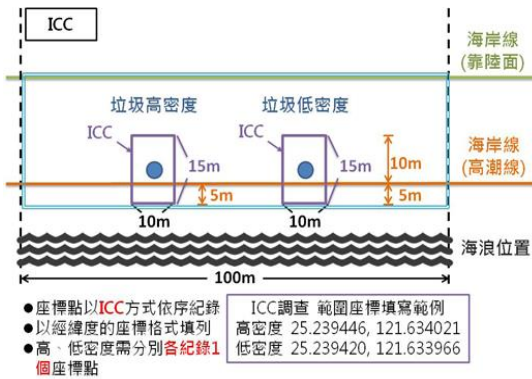


圖 3 樣框範圍示意圖

資料來源:行政院環境保護署 108 年度海岸廢棄物寶特瓶及垃圾組成(ICC)監測工作操作手冊

### (二) 現場採集與分類

桃園海岸海灘組成較多樣性，故本研究會依人力方式進行調查蒐集並進行分類。

垃圾分類的標準依據 ICC 標準初期概分為 5 類，依序是「一般生活及遊憩垃圾」、「漁業垃圾」、「菸具」、「醫療衛生用品」以及「寶特瓶」等五種，之後再將寶特瓶來源國等分門別類進行統計。並記錄於行政院環保署所制定之表格中。

本研究調查頻率為三個月調查一次，分別於 2 月、5 月及 8 月進行調查，每次調查約 3 個工作天。

## 三、結果與討論

本研究為方便討論故將各調查區域的高低密度樣框的海岸垃圾加總後進行討論。

### 3.1 時空間與海岸垃圾熱點分析

由圖 4 可以發現 110 年現場調查成果中，北邊 B3、A15 及 A9 海岸垃圾較多，而南邊的 A5、C3 海岸垃圾較少，其中以草漯沙丘 A15 區域的海岸垃圾最多，總共蒐集 195 個，其中「寶特瓶」數量最多，共蒐集到 80 個，佔整體 47%，其次「一般生活及遊憩垃圾」為及「漁業垃圾」，分別佔整體的 24% 及 23%。而北永績區 A5 區域為最少海岸垃圾的區域，於三次調查中僅收集到 1 個「寶特瓶」。在時間的變化上可知，第二季所蒐集之海岸垃圾為三季中最多，共蒐集 301 個海岸垃圾。而第一季為最少的一個季節，共蒐集 43 個。

由上述結果明顯可知北桃園(觀音、大園)區域的海岸垃圾件數大於南桃園(新屋)區域垃圾件數。

並可發現海漂垃圾物的組成主要以「寶特瓶」垃圾件數最多，佔整體 57%，其次為「一般生活及遊憩垃圾」海岸垃圾，佔整體 23%。

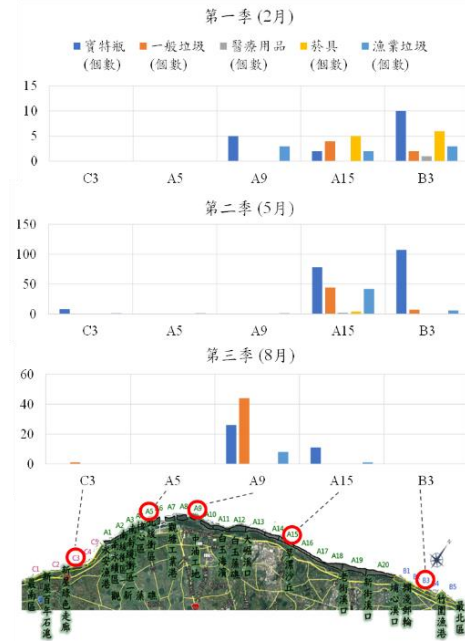


圖 4 110 年三個季節各區域海岸垃圾統計圖

### 3.2 與歷年海岸垃圾調查資料相比

本研究蒐集 108 年 4 月至 9 月及 109 年 2 月至 11 月海岸垃圾調查成果，並選取同樣調查點位進行討論。

由圖 5 可知歷年的調查成果與今年海岸垃圾空間分布現況相同。皆為北邊 B3、A15 及 A9 海岸垃圾較多，而南邊的 A5、C3 海岸垃圾較少。

由統計資料可知，歷年桃園海岸垃圾主要種類為「一般生活及遊憩垃圾」及「寶特瓶」，其次為「漁業與休閒釣魚」海岸垃圾，僅有少數的「醫療/個人用品」及「抽菸」所產生的海岸垃圾。

由平均垃圾量來看，如表 1 所示，桃園海岸垃圾總量明顯由 108 年開始持續下降。108 年每次平均清理量為 3293(個數/次)，109 年每次平均清理量為 391.7(個數/次)，110 年每次平均清理量為 177。(個數/次)，造成此原因可能受到海岸巡護隊、清潔隊及淨灘活動等影響所導致。

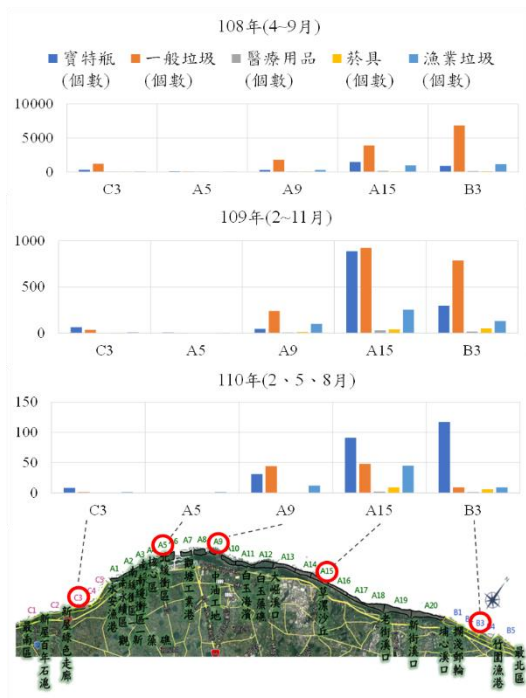


圖 5 108 年~110 年各區域海岸垃圾統計圖

表 1 歷年全區海岸平均垃圾量統計表

平均垃圾量(件/次)	108 年	109 年	110 年
寶特瓶	501.17	129.5	105
一般垃圾	2289.83	198.7	28.5
醫療/個人用品	54.83	4.7	1.5
抽菸	35.67	9.8	7.5
漁業垃圾	411.5	49	29.5
總計	3293	391.7	177

### 3.3 寶特瓶來源國

為 108 年至 110 年的寶特瓶來源國統計圖，由上述資料可以發現桃園海岸三年的寶特瓶來源國皆以無法辨識的寶特瓶居多，約佔各年度整體 43~53%。剩下能判斷的寶特瓶以中國為主要的來源國，約佔各年度整體 29~39%，其次為台灣，約佔各年度 10~17%，其餘皆為少量韓國、日本、越南等來源國，約佔各年度 3.2~6.5%。

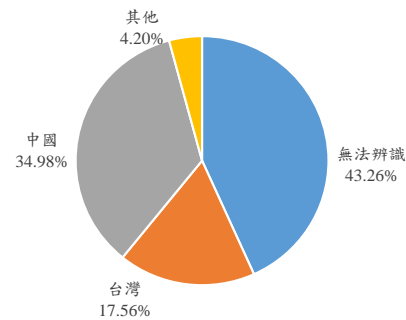


圖 6 108 年 4~9 月寶特瓶來源國統計圖

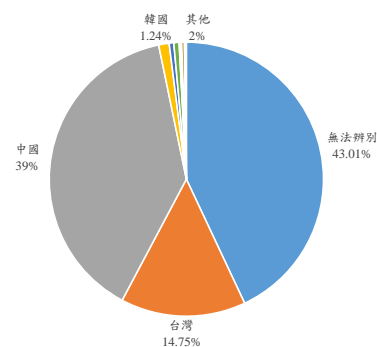


圖 7 109 年 2~11 月寶特瓶來源國統計圖

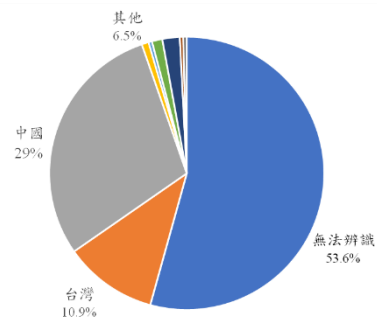


圖 8 110 年第三季寶特瓶來源國統計圖

### 3.4 地形與地貌因素分析






本研究依照 5 個調查點位的海灘型式將所蒐集到的海岸垃圾進行分類，各點位詳細海灘型態彙整於表 2。

圖 9 為 110 年桃園海岸調查樣區之地貌垃圾平均數量統計圖，從上述資料可知，可以發現桃園海岸的沙岸與複合式沙岸的地貌有較多的海岸垃圾，石頭斜坡護岸的海岸垃圾較少。

從三年的調查結果及現場採樣經驗顯示，沙岸與複合式沙岸的地貌環境易於視覺辨識堆積區域，較易使用人工(機具)清理環境，但缺點為容易被沙覆蓋掩埋。石頭斜坡護岸優點是平面整齊光滑面，

垃圾不會沉積被沙堆覆蓋，但缺點為垃圾及漁網容易陷入縫隙位置，不易發現且人工(機具)較不易清除。

表 2 5 個樣區詳細海灘型態

編號	海灘型態	現場照片
B3	複合沙岸 (含有消波塊、礫石)	
A15	沙岸	
A9	沙岸	
A5	石頭斜坡護岸	
C3	複合沙岸 (含有消波塊、礫石)	

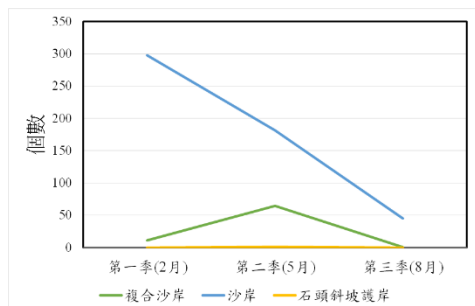


圖 9 110 年桃園海岸之地貌垃圾平均數量統計圖

#### 四、結論

根據(國立中央大學, 2017)的報告, 可知桃園海岸不受結構物影像下, 海流方向主要為東北-西南走向。並搭配桃園海岸示意圖來看, 如圖 10 所示, 可以看出桃園海岸地形結構為一個扇字型, 而大潭藻礁以北的觀音、新屋又屬於迎風面段, 因此較易累積北方來的垃圾。

總和之前的研究調查成果, 顯示北桃園(觀音、大園)區域的海漂垃圾較南桃園(新屋)區域多, 造成此因素很可能受到自然環境的風波流影響。桃園屬於東北季風盛行的區域, 而大潭藻礁以北的觀音、新屋在地形幾何上, 又屬於迎風面段, 因此較易累積北方來的垃圾。加上冬末初春時, 此區域會盛行跨海峽海流 (Ko et al., 2018; Oey et al., 2014), 帶來中國大陸的垃圾, 因此桃園觀音、大園海岸較容易累積”跨海峽漂過來”的垃圾。



圖 10 桃園市海岸地形結構示意圖

另外, 110 年桃園海岸明顯受到海岸巡護隊、清潔隊及淨灘活動等影響, 桃園海岸垃圾量明顯大幅度減少, 從 110 年調查結果與 108 年調查結果相比就可以知道調查區域內的平均清理量由原先 3293(個數/次)下降至 177(個數/次), 其影響顯著。

#### 謝誌

本文係桃園市海岸管理工程處研究計畫「110 年度桃園市海域環境品質調查暨水質監測網佈建計畫 - 海漂垃圾調查」之研究成果, 承蒙桃園市海管處經費之補助使本研究得以順利完成, 謹致謝忱。

#### 參考文獻

1. Ko, C.-Y., Hsin, Y.-C., Yu, T.-L., Liu, K.-L., Shiah, F.-K., & Jeng, M.-S. (2018). Monitoring multi-year macro ocean litter dynamics and backward-tracking simulation of litter origins on a remote island in the South China Sea. *Environmental Research Letters*, 13(4). doi:10.1088/1748-9326/aaaf21
2. Oey, L. Y., Chang, Y. L., Lin, Y. C., Chang, M. C., Varlamov, S., & Miyazawa, Y. (2014). Cross Flows in the Taiwan Strait in Winter\*. *Journal of Physical*

*Oceanography*, 44(3), 801-817. doi:10.1175/jpo-d-13-0128.1

3. 林冠宏. (2020). <20200226 桃園海岸垃圾現場調查分析之研究 *Field survey and analysis of marine debris along Taoyuan coast.pdf*>. Retrieved from
4. 國立中央大學. (2017). 104 年桃園市觀新藻礁生態保育委託專業服務勞務採購案. Retrieved from
5. 陳建志. (2013). 海岸藍皮書. Retrieved from
6. 桃園市政府海岸管理工程處 , 108 年度桃園市海岸水文地理資訊暨海漂垃圾調查評估計畫
7. 桃園市政府海岸管理工程處 , 109 年度桃園市海岸水文地理資訊暨海漂垃圾調查評估計畫

# 桃園新屋石滬無人空拍機調查分析

劉孟樵<sup>1</sup> 黃志誠<sup>2\*</sup> 王雅慧<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立中央大學水海所 研究助理

<sup>2\*</sup> 國立中央大學水海所 副教授

<sup>3</sup> 桃園市政府海岸管理工程處 工程管理科科長

## 摘要

石滬代表沿岸居民獨特的漁業文化，亦為重要的文化資產。位於桃園海岸的新屋石滬，因受到地形、潮汐、波浪等因素而導致毀損崩壞，近年來因其被列為文化資產而備受重視，也因此有許多修滬及維護的工程。文中利用無人空拍機拍攝高解析度正射影像，並藉由影像處理軟體建立三維數值地形模型，將結果與前次計畫分別以橫切剖面及整體高程來分析比較石滬改善情形，最後量化石滬體積的變化來呈現改善的成效。

關鍵詞：石滬、無人機

## Investigation and Analysis of Unmanned Aerial Vehicle in Taoyuan Xinwu Shihu

Meng-Chiao Liu, Zhi-Cheng Huang<sup>\*</sup>, Ya-Hui Wang

<sup>\*</sup> Associate Professor, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

## ABSTRACT

Shihu represents the unique fishing culture of coastal residents and is also an important cultural asset. Xinwu Shihu, located on the coast of Taoyuan, was damaged and collapsed due to terrain, tides, waves and other factors. In this paper, an unmanned aerial vehicle is used to shoot high-resolution orthophotos, and a three-dimensional numerical terrain model is created by image processing software. The results are compared with the previous project and overall elevation respectively to analyze and compare the improvement of Shihu. Finally, Quantify the change in Shihu's volume to show the effect of improvement.

Keywords: Shihu; UAV

## 一、前言

石滬為台灣早期海岸居民順應自然環境所建造而成的傳統漁業捕撈技術，是一種先民以智慧利用自然環境資源而發展出的獨特文化。桃園市政府於 2019 年 4 月 8 日以府文資字第 1080074320 號公告登錄「新屋蚵間石滬群」文化景觀，將其列為文化資產，顯示新屋石滬之文化價值。

為了瞭解桃園海岸地形、潮汐、海流等特性與石滬間的關係，並瞭解石滬經過修滬與維護的成果，分析石滬在自然營力作用與維護保養間的平衡，因此本計畫的執行即是試圖透過空拍設備進行調查，

以建立石滬與海岸環境特性的關係，並呈現維護與修復後的成果。

## 二、方法與資料

本計畫於 2021 年 5 月 26 日執行拍攝，使用大疆公司(DJI)Phantom 4 RTK 無人機與 DRTK2 地面基站進行空拍測量作業，以獲得公分等級定位及高解析度影像。拍攝完成後將影像建模並得到數值地形模型，成果解析度達 2.59 公分，並與前次調查成果作比較，如圖 1 所示。

前次調查於 2019 年 7 月 30 日執行空拍測量，



成果呈現於「108 年探究自然環境對石滬文化形成之影響與教育推廣計畫」中，其解析度達 2.49 公分。



圖 1 左圖為 2019 年石滬建模成果，右圖為 2021 年石滬建模成果

### 三、結果與討論

#### 3.1 資料驗證

在比較 2019 年與 2021 年建模結果，以得到地形變遷的數據資料之前，必須先確認兩次建模的座標系統及地形高程是否一致，以避免系統誤差過大導致數據分析異常。

本計畫兩次空拍作業皆以涼亭作為起始點並在此架設無人機基站，因此利用涼亭作為本次測量的基準，如圖 2 所示。將兩份的資料進行疊圖比對，並在相同位置上繪製黑色測線，透過 ARCGIS 軟體的地形高程剖面分析，得到此條黑線的地形高程剖面圖後進行比較，如圖 3 所示，可發現兩次測量結果的高度平均皆為 5 公尺左右，變化值約為 0.03 公尺，產生此差距的原因，推測可能為系統測量誤差抑或是地形變化的抬升下降所造成。

由於此誤差的變化量在合理範圍內，因此能認定在後續石滬的地形變化比較中所得到的數值，其誤差亦在合理範圍內。



圖 2 左圖為 2019 年涼亭，右圖為 2021 年涼亭

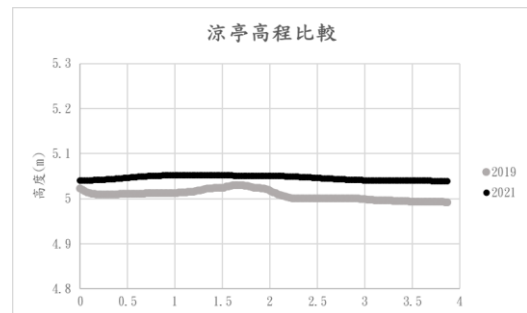


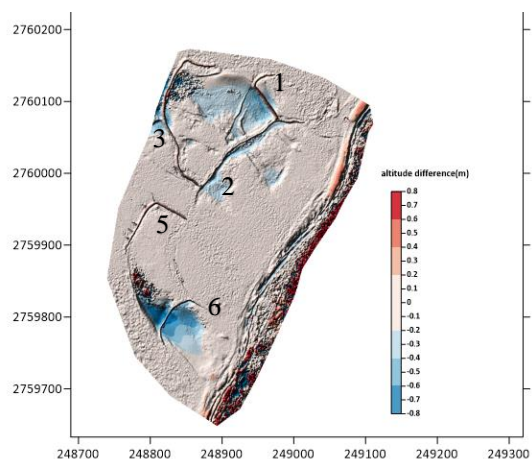
圖 3 涼亭高程比較

#### 3.2 數值地形資料比較

將 2019 年及 2021 年的建模資料使用 surfer 軟體進行高程分析，並將兩份數值地形資料作相減處理(2021 年資料減 2019 年資料)，如圖 4 所示，紅色越深代表地形高度增加越多，反之，藍色越深代表地形高度減少越多，灰白色則表示高度變化較少。

透過相減圖可發現，在 1、3 及 5 號石滬整體線條有較深的紅色，顯示出石滬經修復過後，高度有明顯的增加。2 號及 6 號石滬高度則無明顯變化，惟 6 號石滬將其前後淤沙清理後相對高程有明顯增加。

圖 4 數值地形資料相減圖(2021 年減 2019 年)



#### 3.3 石滬剖面高程變化

為比較石滬修復前後成果以及造成的影響，分別在 2019 年和 2021 年 1、2、3、5 及 6 號石滬的相同位置上繪製橫切剖面測線，同時避開積水位置以減少積水高度所造成的影響，最後計算並得到該黑線之地形高程剖面圖，如圖 5 及圖 6 所示。透過測線可觀察到石滬本身的高度及石滬前後的高程差異，

藉由比對此兩份資料，得知石滬在經過約 2 年的維護及修復後，在整體高度及長度皆有明顯變化，外觀上變得較為立體完整，且改善許多原本中斷不連續的現象。

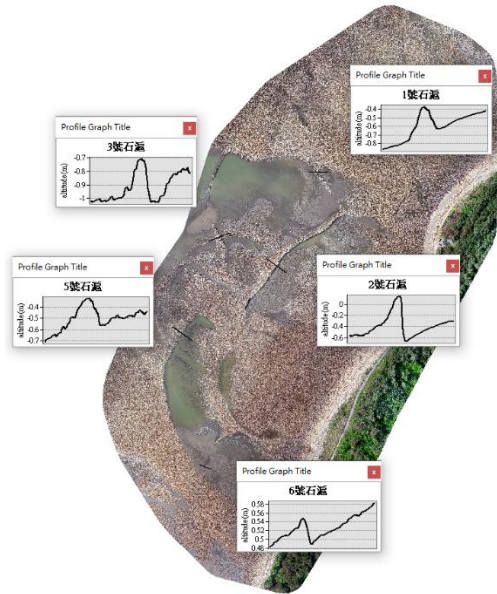


圖 5 石滬剖面高程-2019 年

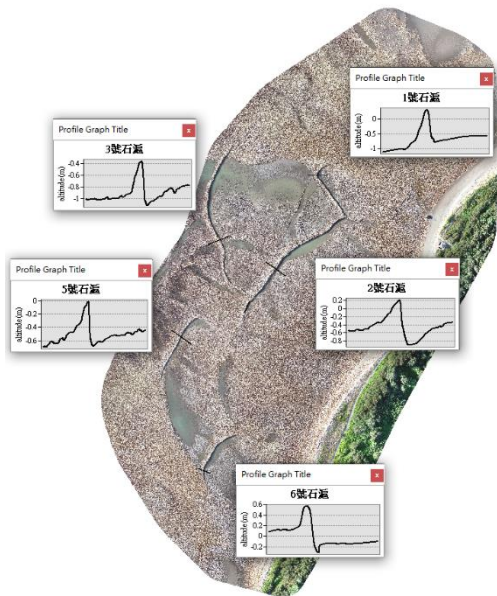


圖 6 石滬剖面高程-2021 年

將兩份地形高程剖面數值進行疊圖比較，黑色線段為 2021 年之剖面，灰色線段為 2019 年之剖面，如圖 7 所示，可發現石滬在 2021 年時，相比於 2019 年高度皆有增加的情形，尤其在 1、3 及 5 號石滬，本身高度有較明顯的提升，1 號石滬高度約增加 60

公分，3 號及 5 號石滬高度約增加 30 公分，相較於 2 號及 6 號石滬，雖然本身高度無明顯的變化，但將其前後淤沙清理之後亦能達到相對高程上升的效果。

藉由疊圖比對，可觀察到石滬在本身高度增加以後，其後方的高度有下降情形，此乃在修補堆疊石滬時也會將後方滬內的石頭搬離，以增加其深度。然而石滬的高度增加也會使石滬後方沖刷力加強而帶走更多泥沙，造成深度加深；相對的，可能在特定風浪與輸沙條件下，也會造成後方滬內淤積，更需長期觀察。

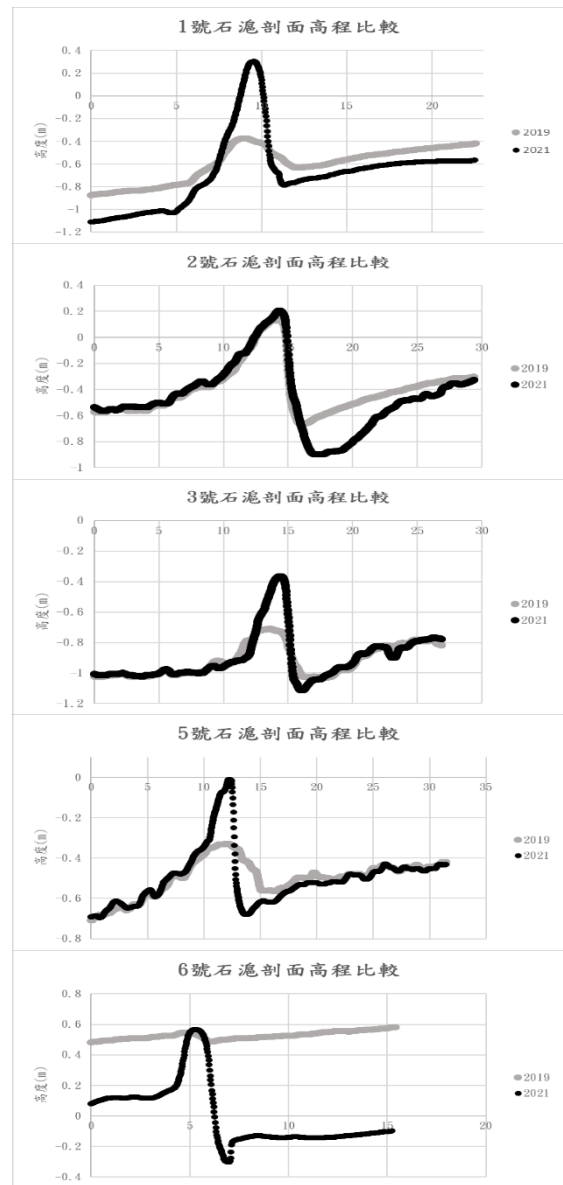


圖 7 石滬剖面高程比較

### 3.4 石滬高程變化

為比較石滬修築與維護過後的整體高程變化，因此在地形圖上繪製一條以 A 點為起點，B 點為終點的測線，計算並繪製出石滬整體的高程連續變化，如圖 8 及圖 9 所示，由石滬外觀及高程變化圖可發現，1、3 及 5 號石滬不僅在外觀上有明顯的改變，在高程變化上亦有顯著的提升。

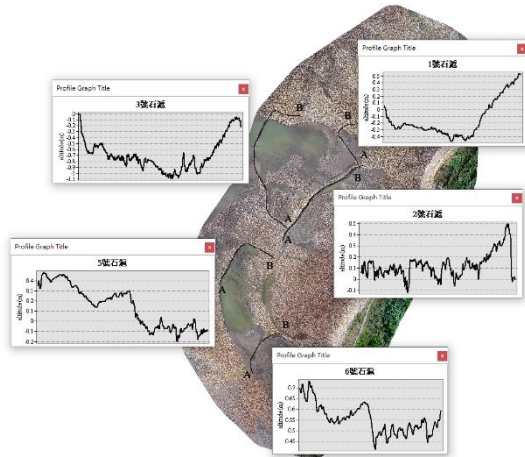


圖 8 石滬整體高程-2019 年

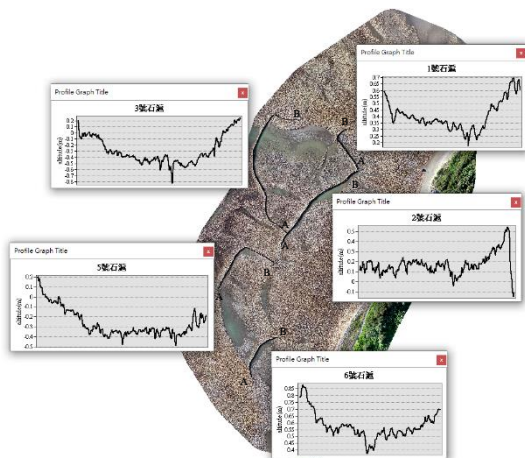


圖 9 石滬整體高程-2021 年

將各石滬兩份高程資料進行比對，灰色線為 2019 年，黑色線為 2021 年，如圖 10 所示，整體而言，石滬高度皆有增加的情形，尤其在 1、3 及 5 號石滬，兩線段幾乎無重疊部分，代表經過維護及修復的工程後，石滬的整體高度均有明顯的增加，其中高度上升幅度最大區段為 1 號石滬，達 80 公分。

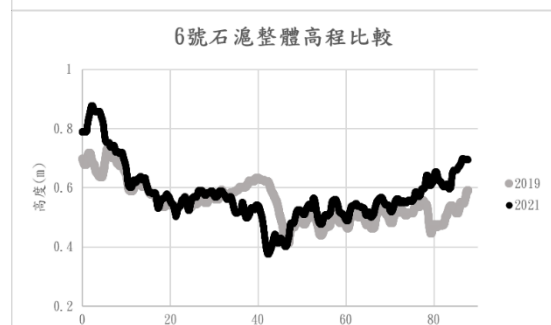
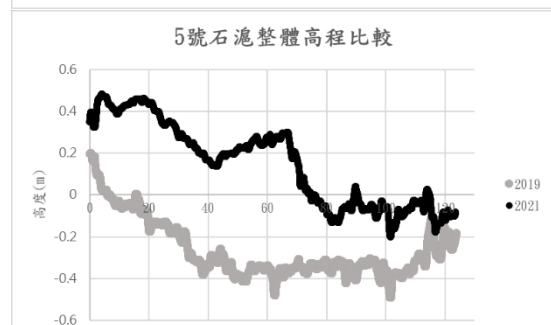
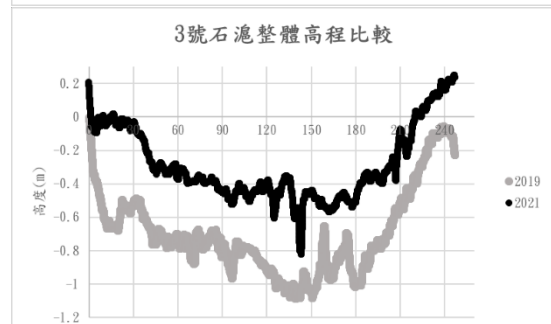
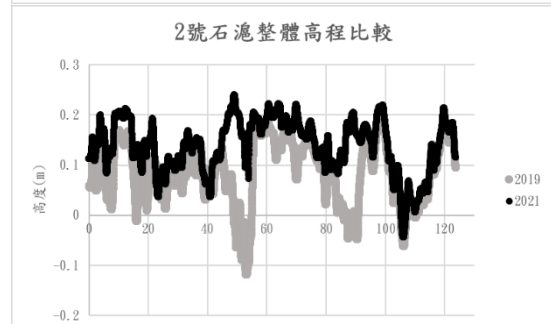
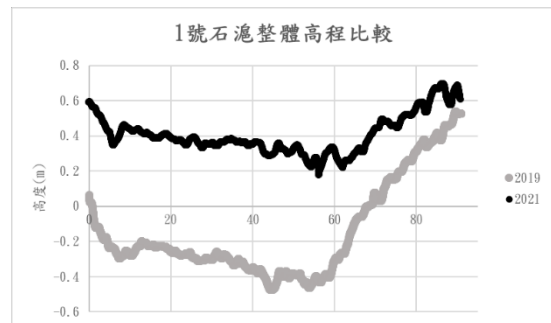


圖 10 石滬整體高程比較

將石滬整體高度作平均比較，如表 1 所示，可清楚看到石滬的高度皆有增加的情形，尤其在 1、3 及 5 號石滬較為明顯，高度提升值約介於 0.40 至 0.55 公尺之間。

表 1 石滬整體平均高度與比較(單位: m)

高度(m)	1 號	2 號	3 號	5 號	6 號
2019 年	-0.14	0.13	-0.70	-0.26	0.55
2021 年	0.40	0.17	-0.29	0.14	0.58
變化量	0.54	0.04	0.41	0.40	0.03

### 3.5 石滬修築體積

比較 2019 年與 2021 年石滬體積，量化並計算修築成果，在 TWVD2001 水準高程系統下，以海平面以下 1.5 公尺作為基準面，計算基準面以上所圈選的石滬體積，計算結果如表 2 所示，可看出 1、3 及 5 號石滬體積有明顯變化，且變化量皆超過 80 立方公尺，其中 3 號石滬變化量達 148.5 立方公尺；2 及 6 號石滬體積變化量較小，分別為 14.9 立方公尺及 2.0 立方公尺。

表 2 石滬整體體積變化(單位: m<sup>3</sup>)

體積(m <sup>3</sup> )	1 號	2 號	3 號	5 號	6 號
2019 年	258.5	525.7	352.8	361.6	225.5
2021 年	338.8	540.6	501.3	445.5	227.5
變化量	80.3	14.9	148.5	83.9	2.0

## 四、討論

一般而言，石滬損壞除了人為的因素以外，海浪的作用力是造成石滬崩壞的主要原因。透過兩次的空拍測量作業所得到的建模成果以及數據的分析，可發現 1、3 及 5 號石滬在 2019 年空拍圖上有較明顯的損壞，甚至出現不連續的中斷情形，在 2 及 6 號石滬本身反而較無明顯損壞狀況，惟石滬前後淤沙的情形較多。因此能驗證出靠近海側的石滬，所受到的海浪衝擊力較大，長期衝擊下而造成明顯的損壞；相反的靠近陸側的石滬，因與海的距離相對較遠且海浪衝擊亦被靠近海側的石滬阻擋吸收，因此較無明顯的損壞情形，取而代之的則是海浪沖刷所帶來的泥沙容易在此淤積。

石滬的高度跟水深相比相去不遠，依照潮汐水深的變化使得石滬有類似離岸堤的作用，在低潮位時可以阻擋波浪，在高潮位時具有類似潛沒離岸堤的作用，可以降低波浪入射率，抵禦海浪作用保護海岸。海浪長期沖刷會導致石滬崩壞，海浪與石滬的結構在作用的同時，會在石滬的前後形成沖刷坑，因為波浪通過石滬時會產生堤後與堤前渦流造成沖刷，若底床為砂質，則較容易形成沖刷坑，如此易造成石滬坍塌。然而桃園海岸因為具有容易生長牡蠣等具膠結力生物的特性，如圖 11 所示，為石滬結構提供黏著力，因此加強了石滬的穩固性。



圖 11 石滬上生長具膠結力之生物

石滬不僅與自然環境、當地居民息息相關，同時擁有豐富的文史背景，藉由持續觀察石滬的變化，取得更完整且不同時間狀況下的自然條件數據，提供石滬修滬與自然營力作用造成的影響，以利於探討石滬與海岸環境的關聯，作為後續評估石滬修復及維護之參考，使石滬在未來能得到更良好的保存及應用。

## 參考文獻

1. Yun-Ta, Wu and Chia-Lin, Yeh and Shih-Chun, Hsiao. (2013) Three-dimensional numerical simulation on the interaction of solitary waves and porous breakwaters.
2. 桃園市政府海岸管理工程處(2019)，「108 年探究自然環境對新屋石滬文化形成之影響與教育推廣計畫」。

# 以非結構性網格模式探討三接港於桃園海岸之影響

藍亦汝<sup>1</sup> 黃志誠<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 國立中央大學水文與海洋科學學系 碩士生

<sup>2\*</sup> 國立中央大學水文與海洋科學學系 副教授 (\*表示通訊作者)

## 摘要

第三天然氣接收站(簡稱三接港)預定建置於桃園市大潭工業區沿岸,其設計以棧橋自陸側延伸,連接三接港於離岸海域。新建的建築物因遮蔽原先水流流向,將使桃園近岸的海流與波浪環境產生改變,從而影響該處的漂沙趨勢及沿岸地形變遷。為了解三接港對近岸流場的影響,本研究使用非結構性網格數值模式 Delft3D FM 模擬桃園近岸流場受海上結構物影響之變化。研究首要確立數值模式於桃園近岸流場的重現能力,並以該具高度重現性的數值模式進行現況模擬以及三接港建置後之情境模擬,環境條件則設定夏季、冬季兩種季節,以討論不同季節環境下,三接港建置前後的流場異同。由模擬結果可知,三接港港形設計使其與陸側所夾之沿岸海域內各處流場變化情形彼此不同:東側鄰近棧橋處因水道收窄而水流匯集、流速增強,最西南側則因遠離棧橋、位居港形開闊處而在平均流速上稍微減緩。除空間上的差異,左右不對稱的港形亦造成漲退潮及夏、冬季節上有不同的流速流向表現。

關鍵詞: Delft3D FM、近岸結構物、水動力模擬、桃園海岸

## Influence of Guantang LNG terminal on the coast based on unstructured-grid numerical model

Yi-Ru Lan, Zhi-Cheng Huang<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Associate Professor, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

## ABSTRACT

The Guantang liquefied natural gas (LNG) terminal is proposed for the Guantang Industrial Area along the coast of Taoyuan. With new structure on coastal area, the adjacent sea areas may evolve differently and result in change of sediment transport and morphological change. To understand the impact of LNG terminal on nearshore current, this study use the unstructured-grid numerical model (Delft3D FM) to analyze the change of flow field through different scenarios, which are original case (without LNG terminal) and LNG terminal case in both summer season and winter season. First, the Delft3D model shows its capabilities in reproducing the flow field around coastal area in this study. As for scenario model, the numerical model simulations show the impact caused by the asymmetrical shape of LNG terminal, making the velocity differ from eastern side of LNG terminal to western side. Beside the velocity varying in spatial, the asymmetric of LNG terminal also make the flow field behave differently during flooding and ebbing periods, varying from summer to winter.

Keywords: Delft3D FM; nearshore; Taoyuan coast; structure

## 一、前言

近岸海流對物質擴散及沉積物傳送相當重要，興建於海岸帶的港灣、海堤等結構物自陸側延伸數十公尺至海域，遮擋原先海流，將使周遭潮流環境發生變化，進而改變沿岸沉積物傳輸情形。

本研究著眼於桃園淺水區域的藻礁海岸，首要使用數值模式 Delft3D FM 重建近岸流場，以了解在複雜的潮流、風應力及波浪之共同作用環境下的台灣海峽淺水區域近岸流系統；繼而以規劃於此區域興建之第三天然氣接收站（以下簡稱三接港）進行結構物影響之模擬，分析結構物對海流、波浪等潮流環境帶來的影響，以利了解第三天然氣接收站興建後的近岸流系統、沉積物傳輸環境。

## 二、研究方法

### 2.1 模式簡介

本研究使用荷蘭 Delft 大學所開發的 Delft 3D 非結構性網格計算來模擬桃園淺水區域藻礁海岸的海流、波浪特性。Delft 3D 具備水動力模組 (Delft3d-Flow) 及波浪模組 (Delft3d-Wave)。

模式網格繪製範圍如圖 1 所示，網格範圍與解析度設計參考自 (林伯謙, 2018)。本研究著眼於三接港建置位址周邊近岸海域，重點研究範圍及其周邊使用解析度約 5 公尺的結構性網格，該網格完整概括了未來將建立於此的三接港；重點研究範圍外側使用較低解析度的結構性網格（解析度約 100 公尺），並以三角形的非結構性網格細化過渡至至重點海岸區，陸側亦使用非結構性網格貼合海岸。

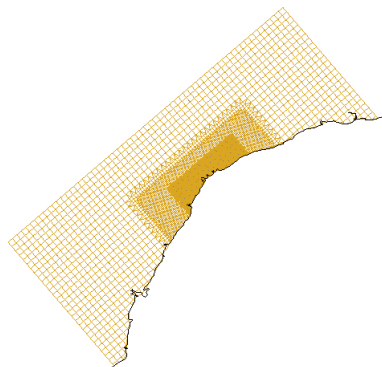


圖 1 網格建置範圍

水動力模組之水位邊界條件使用 TPXO 8.0 的資料作為天文潮邊界；波浪模組則使用中央氣象局

新竹浮標的波高、波向、週期時序資料作為波浪邊界條件。並以中央氣象局新竹浮標的風速、風向時序資料作為模式環境風的邊界條件。

水下地形運用兩種資料：近岸處採用第二河川局海岸地形水深測量成果資料；較離岸處則使用 General Bathymetry Chart of the Ocean (GEBCO08) 地形水深資料庫。研究中所要探討之海域建築物將以不透水結構物形式繪製於模式網格中，如：部份港灣及三接港。以三接港建置前、後分別進行夏季、冬季兩種季節的情境模擬，就模擬結果探討三接港建置前後對周邊海域環境的影響。

### 2.2 模擬規劃

本研究模擬流程首要由現場實測資料進行模式校驗，確立合適桃園海岸之數值模式參數等設定後，進行夏季、冬季兩季節個別的現況模擬與三接港建置後之情境模擬。

現場實測資料由 ADCP 潮波流儀取得，ADCP 設置於圖 2 以三角形標示處，鄰近結構物、水深約 3.5 公尺。現況模擬中，以不透水層繪製的近岸結構物共有四座，於圖 2 中以紅色線段表示；三接港建置後之情境模擬如圖 3，除原先四座結構物，亦使用不透水層繪製三接港預定港型，以模擬三接港建置後的海域環境。模擬值輸出點位均位於重點研究範圍內，現有四座的近岸結構物將該處海域劃分為 G1、G2 及 G3 三處，這三處亦位於三接港面陸側與海岸所夾之海域內，因此，本研究將以 G1、G2 及 G3 水深 5m 位置作為模擬值輸出點，進行潮流空間分佈差異及建港前後變化之討論。

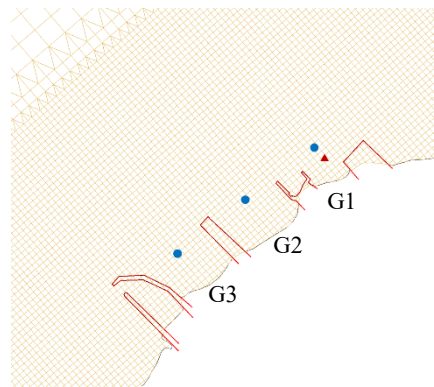


圖 2 現況模擬中近岸結構物之設置與觀測點位 (紅色三角形標示為 ADCP 儀器布放位置；深藍色圓點為 G1、G2、G3 三個區域內水深 5 公尺的模擬值輸出位置)

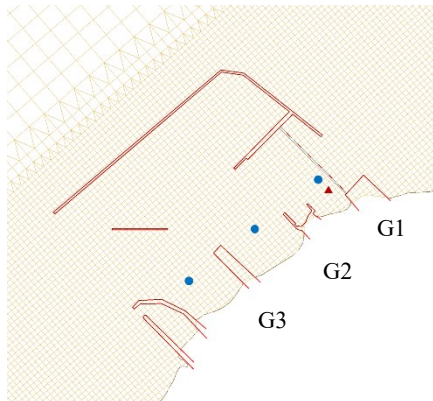


圖 3 三接港建置後之情境模擬中近岸結構物之設置與觀測點位（紅色三角形標示為 ADCP 儀器布放位置；深藍色圓點為 G1、G2、G3 三個區域內水深 5 公尺的模擬值輸出位置）

模式中的風及波浪條件設計了兩種情境，其一為夏季情境；二為冬季情境。夏季情境採用 2021 年 06 月 05 日至 07 月 05 日，共計 30 天內的新竹浮標風速、風向及波浪資料作為模式輸入條件。這段期間內無發生侵台颱風，浮標資料之統計結果如表 1，呈現夏季西南風盛行的典型情況，且波高、波向與長年統計資料特性相近。冬季情境亦使用新竹浮標資料作為風、波浪輸入條件，資料擷取時段為 2019 年 12 月 20 日至 2020 年 01 月 19 日，共計 30 天。期間內資料統計結果如

表 2，呈現冬季東北季風盛行的典型情況，且波高、波向與長年統計資料特性相近。

本研究之模擬規劃為以夏季、冬季條件個別進行現況模擬及三接港建置後之情境模擬，綜合上述共有四種情境。

表 1 夏季浮標資料統計圖表

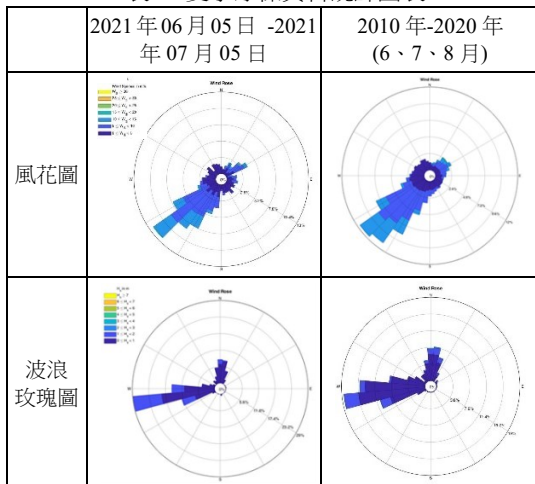
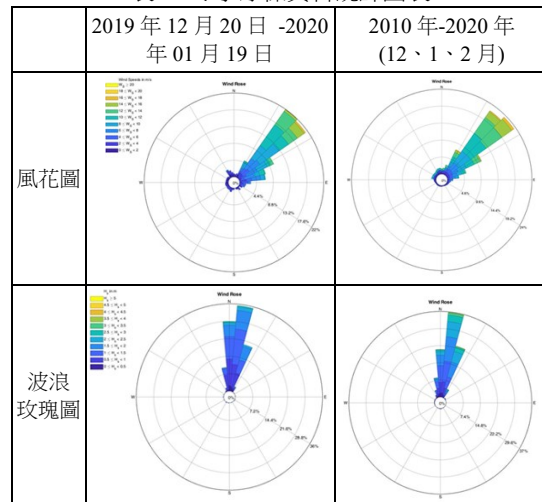


表 2 冬季浮標資料統計圖表



### 三、結果與討論

#### 3.1 模式驗證

為釐清數值模式結果於桃園海域流場之重現能力，透過 2021 年 5 月之實際潮流觀測資料與同一時期模式結果進行相似度比較，以驗證模式。實測資料由 ADCP 潮流儀取得，ADCP 設置點位於圖 2G1 區內鄰近結構物、水深約 3 公尺處；實測值與模擬值的相似度由 Skill 值量化 (Willmott, 1981)，其定義如下：

$$Skill = 1 - \frac{\sum |X_{simu} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{simu} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{obs}|)^2}$$

方程式中  $X_{sim}$  為模擬值， $X_{obs}$  則為觀測值，而  $\bar{X}_{obs}$  為觀測值之平均。計算出來的 Skill 值會落在 0~1 之間，Skill 值愈接近 1，兩者相似度愈高，即模式模擬結果愈好；Skill 值愈接近 0，則兩者相似度愈低，表示模式模擬結果與實際觀測資料相去甚遠。

圖 4 為觀測值與模擬值之水位、流速、波高時序列圖。水位、X 流速、Y 流速及示性波高之 Skill 值分別為 0.99、0.95、0.85 及 0.70，模擬值與觀測值呈高度相似。該校正過之數值模式可準確模擬漲退潮的過程中，受環境風與浪之共同作用而產生的流速變化，亦能大致掌握波浪傳遞至近岸之衰長趨勢。驗證結果顯示本研究之模式具有一定程度能力可重建桃園近岸流場。

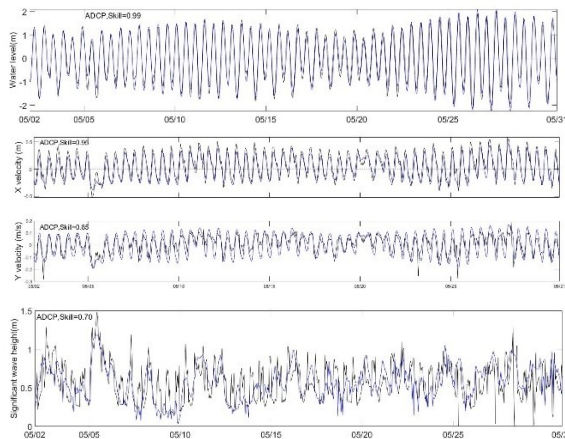


圖 4 潮波流資料時序列圖

由上而下分別為：水位、X 方向流速、Y 方向流速、示性波高（藍色實線為模擬值；黑色實線為現場觀測值）

### 3.2 近岸流場分布特性

5 月份現況模擬結果顯示，因海岸結構物影響，同樣水深區域彼此流速可能相異。以重點區域之模擬值輸出點位為例，即 G1、G2、G3 三處同樣水深 5m 處，如圖 5、圖 6：位於最東北側的 G1 其兩側結構物長度較短，該區域內水深 5m 處受周圍結構物影響最少，擁有相較其他兩處更大的 X、Y 方向流速；位於最西南側的 G3 則因兩側結構物長度較長，該區域內水深 5m 處流場受結構物影響最甚，X、Y 方向流速較其他兩處均小。

近岸水流受結構物阻擋，有機會於結構物下游產生渦旋，此一現象於 G3 處最為明顯。兩側結構物為該處帶來的影響不僅降低流速，更因渦旋的形成，導致流向分布與其他兩處有較大的差異，使得圖 6 中 G3 區域水深 5m 處的 X、Y 方向流速極大值的量值與發生時間與其他兩處有落差。

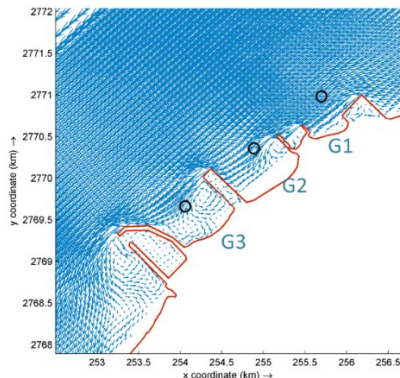


圖 5 近岸流向流速流向分佈圖

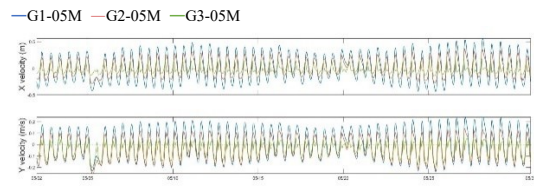


圖 6 X 方向(上)、Y 方向(下)流速時序列圖

### 3.3 夏季模擬

夏季模擬中建港前後 G1、G2 及 G3 水深 5m 處流速模擬值如圖 7，流速流向玫瑰圖及平均流速、漲退潮時期平均流速整理如表 3 至表 5。

三接港棧橋為整體港型開口較狹窄處，水體流經棧橋產生匯聚，導致 G1 區域水深 5m 處 X、Y 方向流速均較建港前增強，漲退潮時期的平均流速於三接港建置後亦有明顯增加；離棧橋一段距離的 G2 之平均流速於建港前後差異不大，漲潮時因水流由港型較窄處流至西南方港型相對開闊處，漲潮時期平均流速減弱，反之退潮時因水流由西南方港型較開闊處匯至較狹窄的棧橋處，退潮時期 G2 平均流速增強；最南側的 G3 區域則因漲潮時離棧橋水體匯聚處較遠，又處三接港型較開闊處，平均流速及漲退潮時期平均流速於建港前後均無太大差異，建港前存在於 G3 處的渦流於建港後也因結構物環境改變而變得較不顯著。

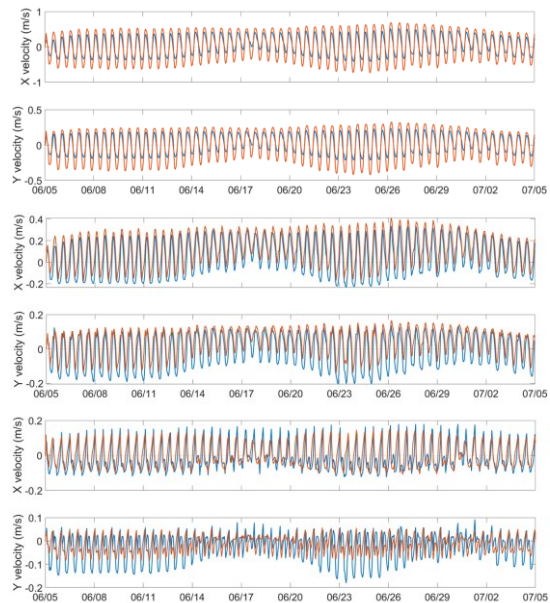


圖 7 夏季模擬 G1(上)、G2(中)、G3(下)三區域水深 5m 處的流速時序列圖（建港前為藍色實線；建港後為紅色實線）



表 3 夏季模擬 G1 水深 5m 處流速統計表

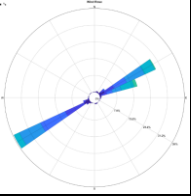
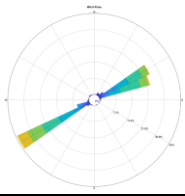
	三接港建置前 (現況)	三接港建置後
流速流向玫瑰圖		
平均流速	0.254	0.437
漲潮時期平均流速	0.257	0.454
退潮時期平均流速	0.237	0.452

表 4 夏季模擬 G2 水深 5m 處流速統計表

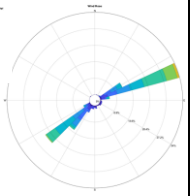

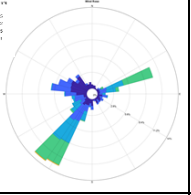

	三接港建置前 (現況)	三接港建置後
流速流向玫瑰圖		
平均流速	0.171	0.183
漲潮時期平均流速	0.152	0.087
退潮時期平均流速	0.117	0.227

表 5 夏季模擬 G3 水深 5m 處流速統計表

	三接港建置前 (現況)	三接港建置後
流速流向玫瑰圖		
平均流速	0.084	0.074
漲潮時期平均流速	0.074	0.082
退潮時期平均流速	0.033	0.063

### 3.4 冬季模擬

冬季模擬中水流遇結構物產生的變化與夏季模擬有著類似的趨勢，惟季風盛行的差異使得 G1、G2、G3 三處於冬季模擬的結果與夏季有所不同。冬季模擬中建港前後 G1、G2 及 G3 水深 5m 處流速模擬值如圖 8，流速流向玫瑰圖及平均流速、漲退潮時期平均流速整理如表 6 至表 8。

盛行東北季風的冬季模擬中，建港前流場受結構物影響較小，大致與風向有相同的趨勢，三處均呈現明顯的西南流；建港後，三接港東側棧橋遮擋了原先的水流，使得位居棧橋西南側一段距離的 G2、G3 平均流速均減弱，且流速流向分布圖不再呈現以西南方向為主的趨勢；三點位中最鄰近棧橋的 G1 模擬結果則與夏季相近，平均流速、漲退潮平均流速均為建港後較強。

G2 區漲退潮時期的平均流速變化趨勢與夏季一致，同為漲潮平均流速減弱、退潮平均流速增強；位處最南側的 G3 於三接港建置後則因西南流向水流大幅減弱，使得漲潮時期平均流速較建港前大幅降低。

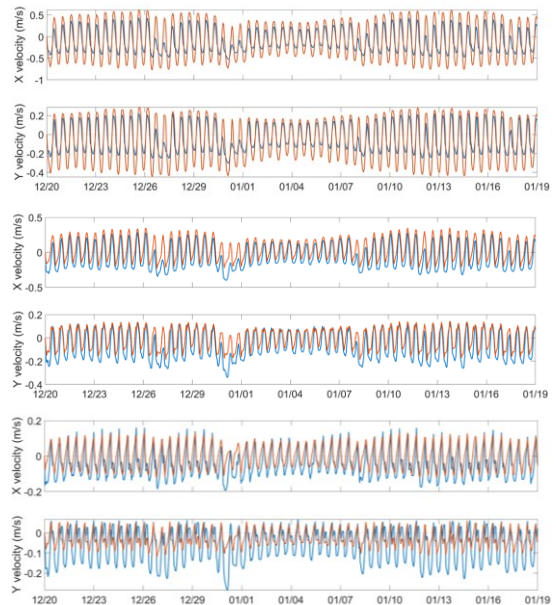


圖 8 冬季模擬 G1(上)、G2(中)、G3(下)三區域水深 5m 處的流速時序列圖 (建港前為藍色實線；建港後為紅色實線)

表 6 冬季模擬 G1 水深 5m 處流速統計表

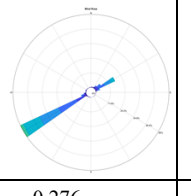
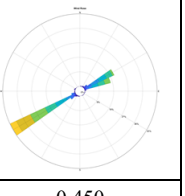
	三接港建置前 (現況)	三接港建置後
流速流向玫瑰圖		
平均流速	0.276	0.450
漲潮時期平均流速	0.379	0.603
退潮時期平均流速	0.176	0.329

表 7 冬季模擬 G2 水深 5m 處流速統計表

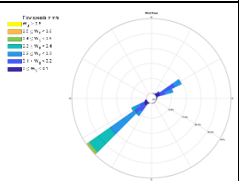

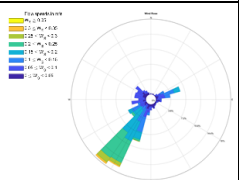

	三接港建置前 (現況)	三接港建置後
流速流向玫瑰圖		
平均流速	0.206	0.161
漲潮時期平均流速	0.268	0.079
退潮時期平均流速	0.103	0.146

表 8 冬季模擬 G3 水深 5m 處流速統計表

	三接港建置前 (現況)	三接港建置後
流速流向玫瑰圖		
平均流速	0.120	0.076
漲潮時期平均流速	0.148	0.048
退潮時期平均流速	0.058	0.081

流增強幅度較冬季退潮時更為強烈；相較之下，因東北季風盛行，原先於漲潮時有著強勁西南流的冬季因棧橋遮擋，使得冬季漲潮時的西南向水流減弱幅度較夏季為多。G2 區平均流速於建港前、後差異雖不如其他兩處多，但港形利於東北向流速增強、西南向流速減緩，使得建港後的 G2 平均流速於夏季略微增加，冬季則減弱。

4. 港型不對稱造成的漲退潮不對稱情形亦表現於 G3 區域。退潮時水體可由開闊的西南方開口進入，並匯集至東北方棧橋處加速，因此 G3 區域的退潮平均流速於夏、冬季皆有些微增加，但因距離棧橋處較遠，流速增加的幅度不如 G1、G2 高；G3 處漲潮時同 G2 情形，西南流在三接港建置後大幅減弱。此差異於東北季風盛行的冬季較為明顯。

### 參考文獻

1. Willmott, C. J. (1981). ON THE VALIDATION OF MODELS. *Physical Geography*, 2(2), 184-194. doi:10.1080/02723646.1981.10642213
2. 林伯謙. (2018). 桃園海岸進岸流四季的變化. (碩士), 國立中央大學, 桃園縣.

## 四、結論

預定建置的三接港型其東北側為開口較狹窄的棧橋，棧橋周圍水流易因水道收窄、水體匯聚而加速；相較於東北側的狹窄棧橋，三接港西南側開口相對開闊，此左右不對稱的港型設計使得三接港面陸側與海岸所夾之海域內（即 G1、G2、G3 三處）的流場呈現漲退潮不對稱及空間差異。

1. G1 區因鄰近棧橋，於夏季、冬季模擬中平均流速、漲退潮時期平均流速皆增強。
2. G2 區呈現了漲退潮的不對稱。三接港左右不對稱的港型使得漲潮時期自東北方流進該 G2 區的水體易為棧橋所阻，水流通過棧橋時加速，並於後方開闊處逐漸趨緩，使得該區西南向水流不顯著；反之退潮時期水體可由西南側開闊開口流入該區，並匯流至東北方棧橋處加速，使得退潮時的東北向水流流速增強。
3. G2 區漲退潮的不對稱於不同季節有著相異的表現。盛行西南季風的夏季其退潮時的東北向水

## 海域水質監測網建構之探討

方天熹<sup>1\*</sup>、戴仕彥<sup>2</sup>、林立昌<sup>3</sup>、許嘉麟<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 海洋大學海洋環境資訊系教授(\*表示通訊作者)

<sup>2</sup> 海洋大學海洋環境資訊系助理

<sup>3</sup> 桃園市政府海岸管理工程處處長

<sup>4</sup> 桃園市政府海岸管理工程處科長

### 摘要

海域水質好壞攸關海域生態永續發展，本研究為初期計畫，主要工作為調查桃園市近岸海域水質狀態，以供日後桃園市政府規劃建立桃園市沿岸海域水質監測網，以利海域生態永續發展。本研究在桃園市重點河川入海口及其離岸約1.5海浬海域共設十六測站，每季調查海域水質計有鹽度與營養鹽等15項基本水質參數，此外亦分析溶解態重金屬元素如鎘、鉻(VI)與汞等9種元素。調查結果顯示基本水質參數濃度變化比較明顯的測站為新南崁溪口、埔心溪口與新街溪-老街溪等測站，水質中以氮磷等營養鹽濃度變化較大，氮與硝酸鹽濃度比一般海域高出50-100倍，而磷酸鹽濃度比一般海域高出約5倍左右，顯示桃園沿海海域污染嚴重。水質重金屬元素濃度差異不是很明顯，各元素濃度遠低於環保甲類海域品質標準值。

關鍵詞：桃園海域、營養鹽、重金屬元素

## The construction of monitoring net of seawater quality

Tien His Fang<sup>1</sup>, Shi Yan Da<sup>2</sup>, Li Chang Lin<sup>3</sup>, Chia Lin Hsu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Marine Environmental Informatics, National Taiwan Ocean, University, Keelung, Taiwan

<sup>2</sup>Research assistant, Department of Marine Environmental Informatics, National Taiwan Ocean, University, Keelung, Taiwan

<sup>3</sup>Director, Office of Coast, Administration Construction, Taoyuan City.

<sup>4</sup>Chief, Office of Coast, Administration Construction, Taoyuan City.

### ABSTRACT

The seawater quality is an important factor determining the substantial development of the marine environment. The purpose of the present study is to understand the seawater quality along the Taoyuan city coast by means of seasonally analyzing the nutrients and trace metal contents in seawater during 2019-2021. The inshore seawaters in each river mouth along the Taoyuan city coast are sampled and totally sixteen stations are monitored. The present study is the pioneering work to establish the marine environmental monitoring network along the Taoyuan city coast in the future. The surveyed results indicate that variations of nutrient concentrations were more profound than the other parameters, especially at the studied stations, such as the NanKan River, the Puhsin River and the Sinje-Laoje River. The ammonium and nitrate concentrations in seawater at these stations are generally 50-100 times higher than the un-contaminated seawater. The concentration of phosphate is about five times higher than the un-contaminated seawater. This phenomenon is more significant at

the NanKan River and the Puhsin River coast. The variations of trace metal concentrations were minor and the concentrations were much lower than the guideline values of the EPA, Taiwan.

Keywords: Taoyuan coast; nutrients; trace metals

## 一、前言

近三、四十年來人口快速增加，土地被大量開發、工業化與都市化造成人口過度集中於大都市，處理及未處理工業與都市污水排入河川再流入河口或近岸海域環境，導致近岸海域環境海洋環境水質逐漸優養化[1,2]，此情形臺灣河川汙染相對較嚴重，因為臺灣地小人稠，都市家庭污水整體處理率仍未達60%，大都為一級處理([www.sso.gov.taipei.tw](http://www.sso.gov.taipei.tw))，例如淡水河口海域在上游新北市板橋華江橋附近處其水中氨氮與磷酸鹽濃度時常超過7mg/L與0.31mg/L，而水中含氧量長期低於3 mg/L，水質狀態往下游逐漸改善，因海水漲潮入侵海水稀釋作用[3-5]，依學者Lemley et al. (2015)分類，海水水中氨氮>1mg/L與磷酸鹽>0.1mg/L，該海域水質屬於重度優養化海域。

桃園市沿海海域有國人屬目的觀新藻礁，桃園市為全臺第一工業科技大市，臺灣五百大製造業有超過三分之一在桃園設廠，工業產值常居全臺之冠，桃園市人口逾二百二十萬，居全臺第五(桃園市政府，2021)，為了保護海域永續發展，桃園市市政府近來積極重視海域管理，成立海岸管理工程處，期望能在桃園市沿海海域建立海域水質監測網，以便時時刻刻能監測境內海域水質，以保護海域達到經濟發展與環境保護平衡之雙贏，本研究為桃園市政府建立海域水質監測網之前驅作業，在桃園市沿海海域重點河川入海口設置監測站，定期檢測監測站之水質，以建立資料庫。

## 二、研究方法

本研究監測站的設置，基本上規劃桃園市重要河川出海口測站及離岸1.5海哩海域測站，河川包括南崁溪、埔心溪、新街溪、老街溪、富林溪、樹林溪、大堀溪、觀音溪、小飯壠溪、新屋溪、後湖溪、社子溪等11條河川，此外在重要設施如海湖電廠與沙崙中油卸油廠亦設測站，另在北端海域設一背景測站，測站位置及座標分別如圖1及表1所示。

本計畫自108年開始執行調查每季調查一次，至110年第二季兩年半共執行十次採樣調查，每次採樣調查時間列於表2，因調查經費及重點每年皆有所變異，因此本研究綜合詮釋這十次採樣調查相同測站與水質資料，相同測站計有背景測站(R)、新南崁溪口(B)、南崁溪(C)、埔心溪(E)、沙崙中油卸油設施一(F)、新街溪-老街溪(G1與G2)等共七個測站。海域水質調查項目計有水溫、鹽度、溶氧量、生化需氧量、酸鹼度、濁度、懸浮固體、酚類、葉綠素甲、矽酸鹽、磷酸鹽、總磷、氨氮、亞硝酸鹽、與硝酸鹽等營養鹽共15項水質參數，此外水質亦分析溶解態重金屬元素如鎘、鉻(VI)、銅、鐵、鎳、鉛、鋅、砷與汞等9種元素，各項水質分析方法參考環保署環檢所所公告方法，水質分析之品保品管則使用標準添加方法來驗證各次採樣實驗室分析數據之品保品管。每季海域水質採樣使用永泰興一號漁船至桃園海域各測站執行採樣作業。



圖 1 桃園海域監測站座標系統及相關參數示意圖

表 1 桃園海域監測站經緯度

地點-出海□	區位	經度(°)	緯度(°)
背景測站	R	121.2689	25.1897
海湖電廠	A	121.2573	25.1256
新南崁溪口	B	121.2457	25.1224
南崁溪	C	121.2362	25.1420
沙崙中油卸油設施二	D	121.2194	25.1304
埔心溪	E	121.2060	25.1104
沙崙中油卸油設施一	F	121.1970	25.1213
新街溪-老街溪	G1	121.1782	25.0960
	G2	121.1701	25.1141
富林溪-樹林溪	H1	121.1150	25.0742
	H2	121.1075	25.0936
後湖溪-社子溪	N1	121.0117	24.9868
	N2	120.9898	24.9886

表 2 桃園海域 108-110 年各季採樣時間

季(次)	採樣時間	季(次)	採樣時間
108 第一季(1)	108 年 3 月 15 日	109 第二季(6)	109 年 5 月 1 日
108 第二季(2)	108 年 5 月 13 日	109 第三季(7)	109 年 7 月 22 日
108 第三季(3)	108 年 8 月 19 日	109 第四季(8)	109 年 10 月 3 日
108 第四季(4)	108 年 11 月 11 日	110 第一季(9)	110 年 2 月 20 日
109 第一季(5)	109 年 2 月 24 日	110 第二季(10)	110 年 5 月 18 日

### 三、結果與討論

108年至110年第二季共十季採樣，調查分析各項水質參數濃度範圍列於表3，各測站各次水質參數濃度顯示於圖2，資料中只有五日生化需氧量在108年第三季資料在新南崁溪口(B)與新街溪-老街溪(G1)二測站有逾越環保署乙類海域品質標準值外，其餘資料均低於品質標準值。水質參數濃度變化比較明顯的測站為新南崁溪口(B)、埔心溪(E) 與新街溪-老街溪(G1)等測站，水質中以濁度、懸浮顆粒、葉綠素甲、氨氮、硝酸鹽與磷等營養鹽濃度變化較大，尤其是新南崁溪口(B)測站之氨氮與磷濃度常逾越環保署甲類海域品質標準值，雖然此海域被歸類為乙類海域，並無管制氮磷等元素濃度。但這些測站之營養鹽濃度過高，顯示家庭汙水流入，造成污染易產生海域優養化現象，值得注意。除此之外，其它測站營養鹽調查濃度與台灣西部沿岸營養鹽濃

度相似，Jiann et al. [6]使用海研二號與三號研究船調查台灣西部從高雄到基隆沿岸海域海水中之磷酸鹽與矽酸鹽濃度，磷酸鹽與矽酸鹽濃度範圍分別為0.003-0.062 mg/L與0.033-1.17 mg/L，大部分海域海水中之磷酸鹽與矽酸鹽濃度分別小於0.03 mg/L與0.50 mg/L，較高濃度出現在出海□處受到河水排入影響。海洋中磷酸鹽及矽酸鹽的主要來源為陸上岩石礦物風化經由河流輸入至海域，而硝酸鹽的主要來源為細菌的固氮作用[7]。雖然矽酸鹽之溶解度低，但因為矽酸鹽為矽酸鹽之主要成份，因此全球河水中之矽酸鹽濃度約介於 4.21-7.02 mg/L之間[8]，矽酸鹽在環境中的污染源極少，因此海水中矽酸鹽濃度的多寡完全取決於河水及海水的混合，與鹽度呈反比。河水中之磷酸鹽含量主要來自於磷灰石礦物之風化，但磷灰石礦物溶解度較低，且易被鐵錳等氧化物吸附，因此未被污染河水中之磷酸鹽濃度大都小於 0.03 mg/L [7]。由於海洋中的營養鹽會被浮游植物利用和與懸浮物質產生吸附及脫附作用，因此在未遭受嚴重污染的自然海域其表層海水中所含的營養鹽濃度範圍如下：磷酸鹽0.0-0.03 mg/L，矽酸鹽0.0-0.282 mg/L，硝酸鹽0.0-0.1 mg/L [7]。海水中之氨氮濃度很低(< 0.03 mg/L)，而且氨氮之分析方法偵測極限較高，不易分析，只有在污染缺氧的河口海域，氨氮濃度才會較高，海水中之亞硝酸鹽濃度通常亦小於0.03 mg/L，在熱力學上，氨氮與亞硝酸鹽為無機氮之不穩定物種，易被氧化成硝酸鹽，因此濃度較硝酸鹽為低。

在水質重金屬元素方面，十季調查的資料差異不是很明顯，各元素濃度遠低於環保署海域品質標準值。海水中溶解態重金屬元素依其濃度含量可分成四組：鐵、錳、鋅及砷濃度範圍為1-10 µg/L，鉻、銅、及鎳濃度範圍為0.1-1 µg/L，鎘、鈷及鉛濃度範圍為0.01-0.1 µg/L，及汞濃度範圍為0.001-0.01 µg/L [9,10]，因此一般污染不嚴重海域之溶解態重金屬元素濃度均遠小於環保署所定之法規標準。

表 3 調查分析各項水質參數濃度範圍

各項水質	溫度 (°C)	鹽度 (ppt)	pH	溶氧量 (mg/L)	生化需氧量 (mg/L)	濁度 (NTU)	懸浮固體 (mg/L)	總磷 (µg/L)	葉綠素 (µg/L)	矽酸鹽 (mg/L)	磷酸鹽 (mg/L)	總磷 (mg/L)
Min	15.99	30.41	7.82	5.29	0.24	0.1	4.2	0.008	0.017	0.001	0.007	15.99
Max	31.15	35.45	8.12	7.8	4.92	107	21492	10.87	1.562	0.404	0.465	31.15
乙類海域、海洋環境品質標準	未定	未定	7.5~8.5	≥ 5.0	≤ 3.0	< 1000	未定	10	未定	未定	未定	未定

各項水質	氨氮 (mg/L)	亞硝酸鹽 (mg/L)	硝酸鹽 (mg/L)	錳 (µg/L)	銻 (µg/L)	銅 (µg/L)	鎘 (µg/L)	銀 (µg/L)	鎘 (µg/L)	銻 (µg/L)	汞 (ng/L)
Min	0.001	0.002	0.003	0.005	0.17	0.22	0.44	0.18	0.30	0.22	1.28
Max	0.999	0.276	1.091	0.194	0.71	1.54	5.57	1.84	0.547	0.87	13.76
乙類海域、海洋環境品質標準	未定	未定	未定	< 5.0	< 30	< 30	未定	< 100	< 10	< 500	< 1000

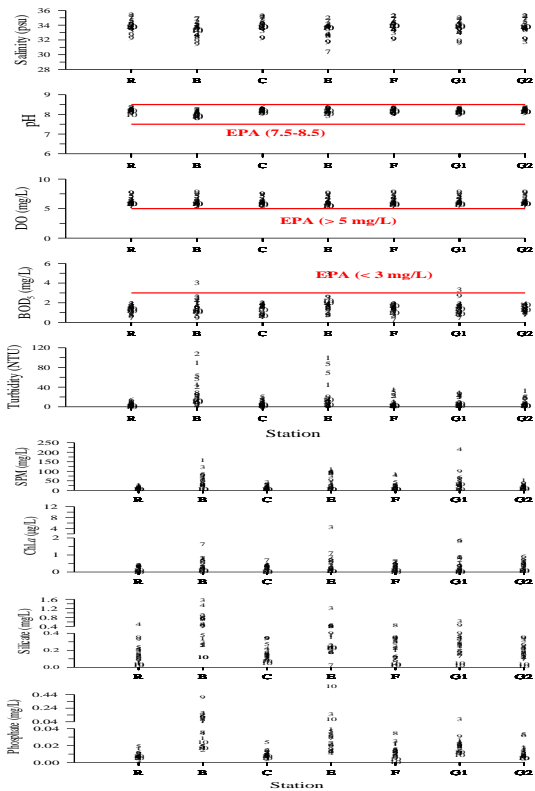


圖 2 桃園海域 108 第一季至 110 年第二季調查各項水質濃度分佈(數字 1 表 108Q1、2 表 108Q2 資料、其餘數字類推共十季)

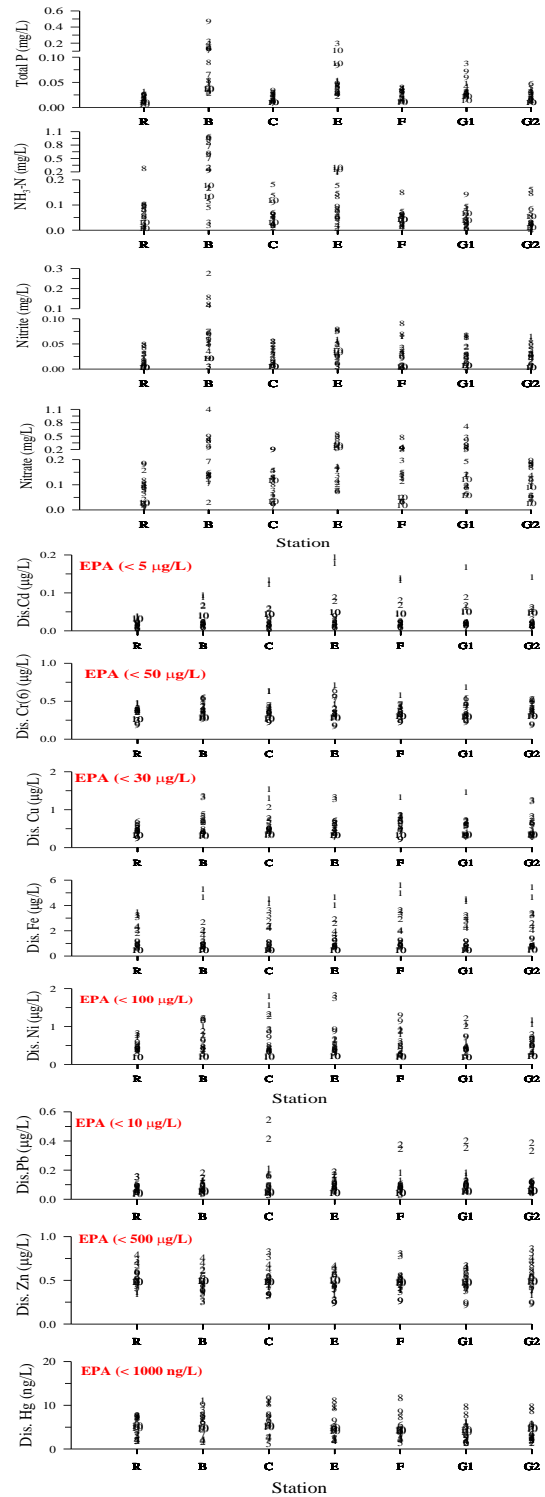


圖 2 桃園海域 108 第一季至 110 年第二季調查各項水質濃度分佈(數字 1 表 108Q1、2 表 108Q2 資料、其餘數字類推共十季)(續)

#### 四、結論

本研究自108年執行調查桃園沿海海域水質濃度，調查海域範圍北自海湖電廠南至後湖溪外海等桃園各主要河川出海口及其外海海域，調查資料顯示桃園海域自海湖電廠外海往南延伸至埔心溪，及較南端後湖溪外海海域，其海水中氮與磷元素濃度相當高，氨氮與硝酸鹽濃度比一般海域高出50-100倍，而磷酸鹽濃度比一般海域高出約5倍左右，顯示桃園沿海海域污染嚴重，因是氮與磷元素，其污染源可能是家庭污水流入所致。因此建議應長期監測桃園沿海海域水質與生態，建立長期資料以了解環境遭受衝擊所產生之影響，海水水質會影響生態，在作海域調查時不應將生態調查排除。

#### 謝誌

本文係110年度桃園市海岸環境品質監測暨水質自動連續監測設施建置計畫之相關研究。

#### 參考文獻

1. Statham, P. J. Nutrients in estuaries - an overview and the potential impacts of climate change. *The Science of Total Environment* 2012, 434, 213-227.
2. Lemley, D. A.; Adams, J. B.; Taljaard, S.; Strydom, N. A. Towards the classification of eutrophic condition in estuaries. *Estuarine Coastal Shelf Science* 2015, 164, 221-232.
3. Wen, L.S.; Jiann, K.T.; Liu, K.K. Seasonal variation and flux of dissolved nutrients in the Danshuei Estuary, Taiwan: A hypoxic subtropical mountain river. *Estuarine Coastal Shelf Science* 2008, 78, 694-704.
4. Fang, T.H.; Wang, C. W. Dissolved and particulate phosphorus species partitioning and distribution in the Danshuei River Estuary, Northern Taiwan. *Marine Pollution Bulletin* 2020, 151, 110839.
5. Fang, T.H.; Chen, W. H. Dissolved and particulate nitrogen species partitioning and distribution in the Danshuei River Estuary, Northern Taiwan. *Marine Pollution Bulletin* 2021, 164, 111981.
6. Jiang, K.T., Wen, L.S., Wei, C.L. (2014) Spatial and temporal distribution of trace metals (Cd, Cu, Ni, Pn, and Zn) in coastal waters off the west coast of Taiwan. *Terrestrial Atmosphere Ocean Science* 25, 655-664..
7. Millero, F.J. *Chemical Oceanography* 2nd ed. (1996). CRC Press, Boca Raton.
8. Edwards, A.M.C., Liss, P.S. (1973) Evidence for buffering of dissolved silicon in fresh water. *Nature* 243, 341-341.
9. Donat, P.A., Bruland, K.W. (1995) Trace elements in the Oceans. In: *Trace elements in natural waters*. Eds. Philos, B.S. and Philos, E.S. CRC Press, pp. 247-282.
10. Bruland, K.W., Lohan, M.C. (2003) Controls of Trace Metals in Seawater. In: *The Ocean and Marine Geochemistry V6, Treatise on Geochemistry*. eds. Holland, H.D., Turekian, K.K., Elsevier Ltd., pp 23-47.

## 桃園海岸地區水域微塑膠調查之探討

邱申富<sup>1</sup> 洪以柔<sup>1</sup> 許嘉麟<sup>2\*</sup> 林立昌<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 點點塑環保科技股份有限公司共同創辦人

<sup>2\*</sup> 桃園市政府海岸管理工程處海岸工程科科長

<sup>2</sup> 桃園市政府海岸管理工程處處長

### 摘要

桃園市政府海岸管理工程處自 2020 年 3、4 月起試辦微塑膠監測計畫，於社子溪出海口及永安漁港，調查微塑膠濃度與成分，並分析可能的來源。調查期間為 2020 年 3 月、4 月，於社子溪出海口及永安漁港使用自行開發之無耗材微塑膠收集器進行採樣，並與直接撈取表層水的採樣方式進行比較。以微塑膠收集器採樣之樣本的數量檢驗結果，社子溪出海口 3 月和 4 月分別為 2.57 和 3.02 item/m<sup>3</sup>，永安漁港 3 月和 4 月則分別為 17.90 和 1.83 item/m<sup>3</sup>。所有樣本中，尺寸以 20 ~ 100 μm 為主的樣本佔相對多數(18.5 ~ 57.1%)，透明色為所有樣本中最主要的顏色(31.4 ~ 67.5%)，而碎片是本調查最多的微塑膠類型(36.0 ~ 50.0%)。成分檢驗方面 3 月並未有明顯特徵，社子溪出海口以 ABS(26.6%)為主要成分，永安漁港則以 PVC(30.0%)為主要成分，而兩調查地點的 4 月成分分析結果皆以 PE 占比最高、PP 次之，為日常生活常用之塑膠。

關鍵詞：桃園、海岸水域、微塑膠、微塑膠收集器

## Investigation of Microplastics in Coast Waters of Taoyuan

Shen-Fu Chiu<sup>1</sup>, Yi-Rou Hung<sup>1</sup>, Jia-Lin Hsu<sup>2\*</sup>, Li-Chang Lin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Co-founder, MicroPC Co., Ltd.

<sup>2\*</sup> Division Chief of Coast Engineering Division, Office of Coast Administration Construction, Taoyuan

<sup>2</sup> Director, Office of Coast Administration Construction, Taoyuan

### ABSTRACT

The concentration and composition of microplastics (MPs) in Shezi river and Yong-an fish harbor was investigated in March and April 2020, the project was funded by Office of Coast Administration Construction, Taoyuan. Microplastics were collected by two methods, one was by steel sampler, the other was by the homemade, membrane-free filter (MFF), which concept is based on the inclined plate used in wastewater treatment plants. The concentration of MPs collected by MFF in Shezi river were 2.57 and 3.02 item/m<sup>3</sup>, and 17.90 and 1.83 item/m<sup>3</sup> in Yong-an fish harbor in March and April, respectively. Dividing four different particle size range, the size range of 20 ~ 100 μm is relative majority which accounts for 18.5 ~ 57.1% in each individual sample. The most dominant color of MPs is transparent (31.4 ~ 67.5%) and the most common type of MPs is fragments (36.0 ~ 50.0%). The composition result of March shows the dominant composition of Shezi river and Yong-an fish harbor is ABS (26.6%) and PVC (30.0%), respectively. And the composition result of April shows the same sequence in two investigation locations, the highest proportion is PE, followed by PP.

Keywords: Taoyuan; Coast Waters; Microplastics; Microplastics Collector



## 一、前言

由於塑膠製品的高便利性，在大量生產與廣泛使用下，塑膠廢棄物的污染問題逐漸放大，其中一項原因是塑膠廢棄物於環境中存在的時間非常持久。環境中的塑膠垃圾，在經由太陽、海浪的作用下，大型的塑膠垃圾會逐漸裂解成小碎片。

美國國家海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 將小於 5mm 的塑膠定義為微塑膠 (Microplastics, MPs)，大多數的微塑膠無法被生物分解，可能經由地下水道、農業灌溉渠道、河川逕流等途徑持續輸入海洋。Andrady (2011)及 Bakir, Rowland et al. (2014)的研究指出，環境中的微塑膠具有吸附、傳輸持久性有機污染物 (Persistent Organic Pollutants, POPs) 的能力，可能對自然環境及生物造成衝擊。雖然目前微塑膠對人體的危害尚不明朗，但如何解決微塑膠之問題已是各國政府須面對當務之急。

桃園市政府海岸管理工程處自 2020 年 3、4 月起試辦微塑膠監測計畫，於社子溪出海口及永安漁港，調查微塑膠濃度與成分，並分析可能的來源。並持續於 2021 年 6 月起擴大調查範圍，對埔心溪、新屋溪、觀音溪及竹圍漁港進行調查。調查之數據，可作為該水域未來長期觀測微塑膠之相關依據。

## 二、研究方法

本調查樣本採樣於桃園地區永安漁港及社子溪出海口地理位置如圖 1 所示，採樣時間為 2020 年 3 月至 4 月止，分別於各區域執行 2 次，共 4 次採樣。

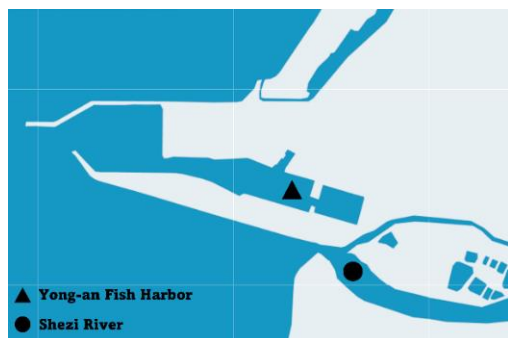


圖 1 永安漁港及社子溪出海口採樣點位圖

採樣方式參考 Kapp and Yeatman (2018)，探討不同採樣方式下微塑膠濃度差異，本調查以微塑膠收集器與直接撈取兩種方式進行，所用微塑膠收集

器為自行開發之無耗材收集器，該收集器之基本原理為斜板過濾，不只保留了該過濾方式中無須更換耗材及無須加壓過濾的特點，更進一步縮小其使用體積，收集器概念如圖 2 所示。

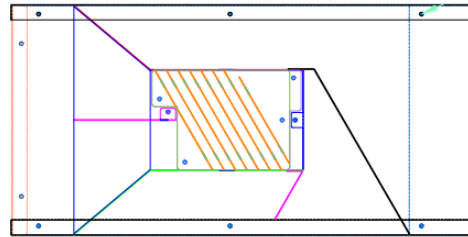


圖 2 微塑膠收集器概念圖

為所用流量資料為德國 HYDRO-BIOS 公司逆止機械流量計測得，其觀測範圍為 0.3-10 m/s，水利梯度 0.3 m 每轉，葉輪直徑 75 mm，流量計安裝在微塑膠收集器入水處。

收集器入流流量可通過計算得知，其算式如下

$$V = Rc(b - a) \times A \quad (1)$$

其中  $Rc$  為水利梯度常數， $b$  及  $a$  分別為流量計的末讀數與初始讀數， $A$  為入流口面積，最終我們可得到單位水體內所收集微塑膠之濃度 (item/m<sup>3</sup>)。

本調查檢驗方式分為數量統計、特徵分析與成分分析。進行檢驗前需執行前置作業，首先，用孔径 1 μm 之玻璃纖維濾紙，把水分排除，由於水樣中會含有泥沙，泥沙與微塑膠皆會留在濾紙上。將濾紙上殘留的物質刮下，加入飽和氯化鈉水溶液 (密度約 1.22 g/cm<sup>3</sup>) 並進行離心，由於泥沙的密度較大會沉在離心管底部，透過密度分選的原理，可將浮於上清液中的微塑膠分離出來。最後使離心後的上清液以氧化鋁濾膜過濾，排除飽和氯化鈉水溶液，樣本即製備完成。

特徵分析使用 KEYENCE 光學顯微鏡 (VHX-6000)，光源種類為直射光、環形光，放大倍率 X100-X1,000，判定原則參考 Norén 的辨識微塑膠標準，另參考微塑膠鑑定指南 (Guide to Microplastic Identification)。本調查將觀察到的微塑膠依尺寸、顏色、種類進行分類。

成分分析採取抽樣方式檢驗進行統計，透過 Perkin Elmer 顯微傅立葉紅外線光譜儀進行分析並比對圖譜來判定微塑膠成分，檢測範圍為 4000 - 700 cm<sup>-1</sup>，掃描次數 64 次。

數量統計需先將待測樣本進行染色，將尼羅紅染料 (Nile Red) 溶於甲醇 (Methanol) 中，得到 1 ppm 濃度之染劑，並將製備好的尼羅紅染劑靜置於暗室，樣品以數滴尼羅紅染劑進行染色，染色後將樣品放入 60°C 的烘箱中烘乾 24 小時並保持樣品處於黑暗環境中，再藉由螢光顯微鏡拍照並利用 ImageJ 軟體輔助統計數量如圖 3-1、3-2 所示。

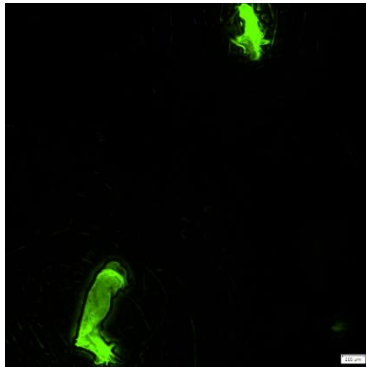


圖 3-1 螢光顯微鏡下的微塑膠圖

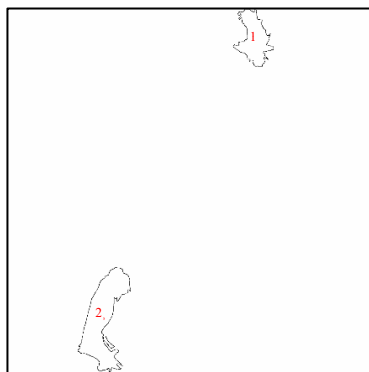


圖 3-2 ImageJ 軟體輔助統計數量圖

### 三、結論

#### 3.1 數量統計

社子溪出海口微塑膠數量檢驗結果如表 1 所示。以微塑膠收集器收集之結果 3 月和 4 月的結果分別為 2.57 item/m<sup>3</sup> 和 3.02 item/m<sup>3</sup>，而 3 月和 4 月撈取表水的結果則分別為 156 item/L 和 120 item/L。

表 1 社子溪出海口微塑膠數量檢驗結果

時間	收集條件	收集時間	微塑膠數量
2020.03.10	收集器	2 小時	2.57 item/m <sup>3</sup>
2020.04.08	收集器		3.02 item/m <sup>3</sup>
2020.03.11	撈取		156 item/L
2020.04.30	撈取		120 item/L

永安漁港微塑膠數量檢驗結果如表 2 所示。以微塑膠收集器收集之結果 3 月和 4 月的結果分別為 17.90 item/m<sup>3</sup> 和 1.83 item/m<sup>3</sup>，而 3 月和 4 月撈取表水的結果則分別為 532 item/L 和 137 item/L。

表 2 永安漁港微塑膠數量檢驗結果

時間	收集條件	收集時間	微塑膠數量
2020.03.09	收集器	2 小時	17.90 item/m <sup>3</sup>
2020.04.09	收集器		1.83 item/m <sup>3</sup>
2020.03.10	撈取		532 item/L
2020.04.30	撈取		137 item/L

在社子溪出海口及永安漁港以撈取採樣的結果顯示，永安漁港兩次的結果(3 月 532 item/L、4 月 137 item/L)均較社子溪出海口(3 月 2.57 item/L、4 月 3.02 item/L)高，而兩次的檢驗中 3 月的數量皆較 4 月來的高。對比環境數據發現 3 月之風速較快，且風向不同，3 月之風向較偏東北風，4 月則偏向西風，研判風向亦為影響微塑膠之因素之一。

綜合上述收集結果和環境數據比對，發現風向若偏東北風，收集到的微塑膠數量較多，若偏西北風則微塑膠數量較少，推測原因為社子溪出海口為朝西北方向，若風向為西北風，會將物質往上游的方向吹，導致收集到的數量較少，反之，東北風可將上游物質往下游帶。表 3 為採樣當天之環境數據。

表 3 環境數據列表

日期	收集條件	收集時		
		累積雨量 (mm)	風速 (m/s)	風向 (360 degree)
2020.03.11	撈取	0	6.1	60
2020.04.30	撈取	0	4.8	270
2020.03.10	撈取	0	7.6	50
2020.04.30	撈取	0	4.8	270
2020.03.10	收集器	0	8.9-9.1	40-50
2020.04.08	收集器	0	6.2-7.4	50
2020.03.09	收集器	0	2.4-2.7	310-330
2020.04.09	收集器	0	6.4-6.6	40

永安漁港方面，檢驗結果可發現 3 月為 17.90 item/m<sup>3</sup>，而 4 月的為 1.83 item/m<sup>3</sup>，兩者相差超過 10 倍，對比環境數據可知收集時之風向 3 月為西北風，4 月為東北風，亦表示風向會將物質往南帶，故於 3 月之靠南側的收集區域可以收集到較多的微塑膠，而 4 月偏北之收集區域的微塑膠數量則較少。

另外，漁港之漁船活躍度將擾動海水，亦為影響結果之因素之一。

此外，比較使用兩種不同的採樣方式之結果，發現用撈取方式所取得的微塑膠數量水平，經單位換算後遠高於用採樣器過濾水體的方式，對於這樣的現象，Kapp and Yeatman (2018)的研究中曾針對此結果進行說明，認為在非均值的情況下利用小體積採樣來推估，容易高估環境之污染水平。

### 3.2 特徵分析

本研究之特徵分析，將微塑膠依尺寸、種類、顏色進行分類，各分類之比例圖如圖 4 所示。

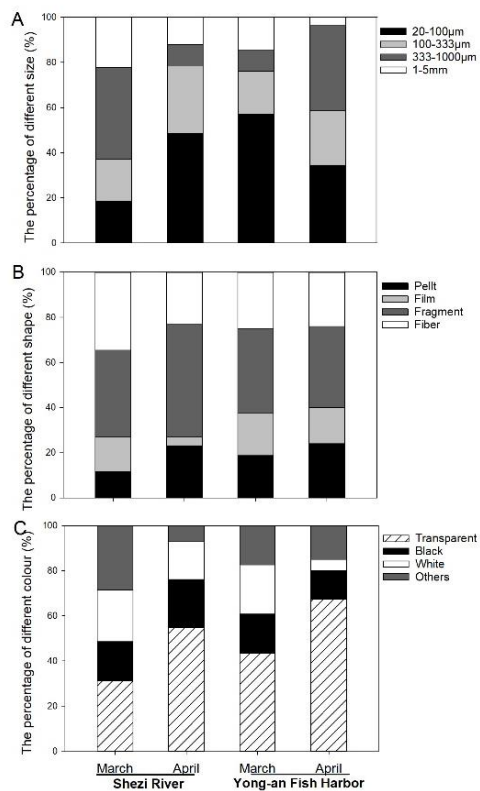


圖 4 特徵分析各分類之比例圖

根據所有收集到的微塑膠之尺寸，將其區分為四個尺寸範圍：20 ~ 100 µm、100 ~ 333 µm、333 ~ 1000 µm、1 ~ 5 mm。尺寸越小的微塑膠更容易成為其他污染物的載體(Alencastro 2012, Kalčíková, Alič et al. 2017, Guo and Wang 2019, Zhou, Wang et al. 2020)，並且更容易被水生生物當成食物攝入，成為污染物轉移的媒介。在本文兩調查區域中，尺寸以 20 ~ 100 µm 為主的樣本佔相對多數，其在各樣本中

所佔比例為 18.5 ~ 57.1%。

根據所有收集到的微塑膠之顏色，將其區分為透明色、黑色、白色、其他顏色，如圖 5 a 至 d 所示。在本文兩調查區域中，透明色為最主要的顏色，於各樣本中佔 31.4 ~ 67.5%，其主要原因可能為帶有顏色之微塑，受到環境而產生的光氧化作用、熱作用、水力作用而導致風化退色。

根據所有收集到的微塑膠之形狀，將其分為四種類型：顆粒、薄膜、碎片、纖維。以光學顯微鏡觀察下四種微塑膠類型的典型樣式如圖 6 a 至 d 所示。在本調查所收集之微塑膠中，碎片是數量最多的微塑膠類型，其佔各樣本的 36.0 ~ 50.0%，其次為纖維類型 23.1 ~ 34.6%。碎片類型之微塑膠，其可能來源為塑膠容器、包裝盒(袋)等，而纖維類型則可能來自一般洗滌廢水及工業產品的分解。

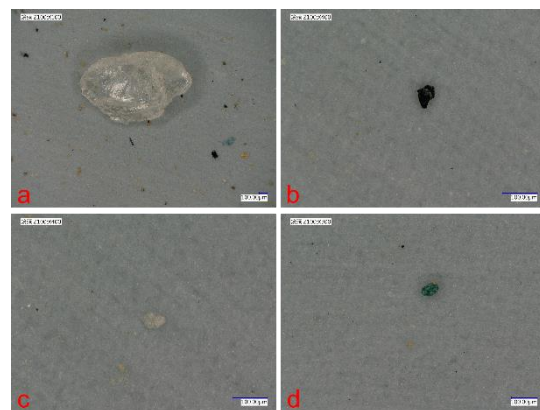


圖 5 a 至 d 各顏色之微塑膠圖



圖 6 a 至 d 各類型之微塑膠圖

### 3.3 成分分析

成分分析採取抽樣方式檢驗進行統計，並以圓餅圖百分比之方式呈現結果。各次收集之微塑膠成分統計結果如圖 7-1 至圖 7-4，3 月成分結果未有明顯特徵，社子溪出海口以佔比為 26.6% 的 ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物)為主要成分，而永安漁港的主要成分為佔比皆為 30.0% 的 PVC(聚氯乙烯)。其中，ABS 的可能來源為手提箱、汽機車組件和家電用品的外殼等，PVC 的可能來源為水管、浮球和保鮮膜等。

別於 3 月份，社子溪及永安漁港 4 月的成分分析結果，皆以 PE(聚乙烯)為主要成分，而 PP(聚丙烯)次之，兩者為日常生活中常用之塑膠，PE 的可能來源包含為塑膠袋、牛奶瓶、餐盒淋膜等，而 PP 的可能來源則為餐盒、瓶蓋、杯蓋等。

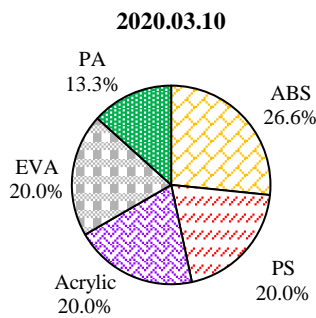


圖 7-1 社子溪出海口微塑膠成分(三月)

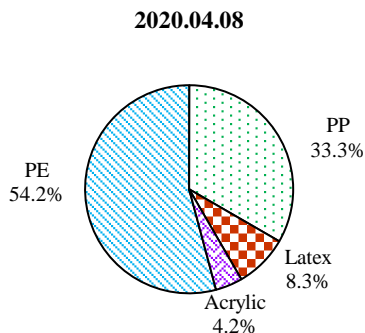


圖 7-2 社子溪出海口微塑膠成分(四月)

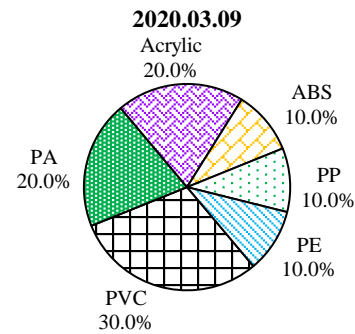


圖 7-3 永安漁港微塑膠成分(三月)

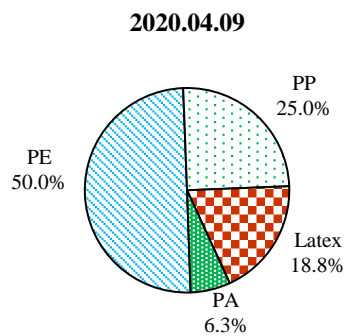


圖 7-4 永安漁港微塑膠成分(四月)

### 謝誌

本文係「109 年度桃園市海岸環境品質監測暨水質自動連續監測設施建置計畫」，附屬「桃園海岸微塑膠監測暨環境教育宣導委託服務」之相關研究成果，承蒙桃園市政府海岸管理工程處及康廷工程顧問企業有限公司於整體調查執行方面的諸多協助，使調查順利完成。

### 參考文獻

1. Andrady, A. L. (2011). "Microplastics in the marine environment." *Marine Pollution Bulletin* **62**(8): 1596-1605.
2. Bakir, A., S. J. Rowland and R. C. Thompson (2014). "Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **140**: 14-21.
3. Kapp, K. J. and E. Yeatman (2018). "Microplastic hotspots in the Snake and Lower Columbia rivers: A

journey from the Greater Yellowstone Ecosystem to the Pacific Ocean." *Environmental Pollution* **241**: 1082-1090.

4. Alencastro, D. (2012). "Pollution due to plastics and microplastics in Lake Geneva and in the Mediterranean Sea." *Arch. Sci* **65**: 157-164.

5. Kalčíková, G., B. Alič, T. Skalar, M. Bundschuh and A. Ž. Gotvajn (2017). "Wastewater treatment plant effluents as source of cosmetic polyethylene microbeads to freshwater." *Chemosphere* **188**: 25-31.

6. Guo, X. and J. Wang (2019). "Sorption of antibiotics onto aged microplastics in freshwater and seawater." *Marine pollution bulletin* **149**: 110511.

7. Zhou, G., Q. Wang, J. Zhang, Q. Li, Y. Wang, M. Wang and X. Huang (2020). "Distribution and characteristics of microplastics in urban waters of seven cities in the Tuojiang River basin, China." *Environmental Research* **189**: 109893.

## 應用無人機空拍技術於桃園海岸帶的調查

林立昌<sup>1</sup>、黃志誠<sup>2\*</sup>、葉正陽<sup>3</sup>、許嘉麟<sup>4</sup>

<sup>1</sup>桃園市政府海岸管理工程處 處長

<sup>2\*</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所 副教授

<sup>3</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所 研究助理

<sup>4</sup>桃園市政府海岸管理工程處 海岸工程科科長

### 摘要

桃園市海岸帶南北長約 40 公里，其中有數個保護區與地景，如許厝港濕地、草漯沙丘、觀新藻礁野生動物保護區、新屋石滬等；也有海岸侵蝕嚴重的二級海岸防護區(新屋事業海堤海岸段)，及台灣前幾名的海廢熱區(白玉海岸段)。為了能有效管理整個桃園海岸段，研究團隊從 2018 年開始利用無人機空拍影像搭配 PIX4D 影像建模技術，來長期監測與建立桃園海岸的長期影像資料。我們建立潮間帶長達 32 公里，解析度在 10 公分/pix 以內的正射影像，此資料用來瞭解藻礁棲地變化及海岸垃圾的分佈調查。我們也在重點區域建立解析度高達 1-2 公分/pix 的數值地形模型(DSM)。DSM 被用來進行新屋事業海堤改善工程規劃、石滬修砌評估等；採用 RTK 技術，垂直均方根高程誤差可達 2 公分左右。本文呈現無人機空拍技術可達到不同計畫目的與需求，是進行海岸調查與環境背景資料建立的有效工具，有助於海岸空間的管理與規劃。

關鍵詞：桃園海岸、無人機、空拍影像、正射影像、數值地形模型

## Surveys on the Taoyuan Coastal Zones using UAV Aerial Photography Technology

Li-Chang Lin<sup>1</sup>, Zhi-Cheng Huang<sup>2\*</sup>, Cheng-Yang Yeh, Jia-Lin Xu

<sup>1</sup> Chief, Office of Coast Administration Construction, Taoyuan City Government

<sup>2\*</sup> Associate Prof., Grad. Inst. of Hydrological and Oceanic Sci., National Central Univ.

<sup>3</sup> Research Assistant, Grad. Inst. of Hydrological and Oceanic Sci., National Central Univ.

<sup>4</sup> Division Chief, Office of Coast Administration Construction, Taoyuan City Government

### ABSTRACT

The coastal zone of Taoyuan City is about 40 kilometers long from north to south. There are protected areas and landscapes such as Xucuoang Wetland, Guanyin Caota Sand Dunes, Guanxin Algal Reef Wildlife Refuge, and Xinwu tidal stone weirs. There are specific zones of second-grade coastal protection areas where beach erosions are severe (coastal section of the Xinwu seadike) and hot areas of Marine debris in Taiwan (Baiyu Coastal Section). In order to effectively manage the entire Taoyuan coastal zones, we began to use drone aerial imagery with PIX4D technology to monitor and establish long-term imagery datasets for Taoyuan coasts since 2018. We establish orthographic images for the intertidal zones with a length of 32 kilometers and a resolution of less than 10 cm/pix. The dataset were used to understand the changes of the algal-reef habitat and the distribution of the coastal debris. We also built digital surface model (DSM) with a resolution of up to 2 cm/pix in key areas. DSMs are used for environmental planning on Xinwu-seadike-improvement-project, and evaluations on the repair of Xinwu tidal stone weirs. Using RTK technology, the root mean square errors of vertical elevation can reach about 2 cm. This paper presents that drone aerial photography technology can achieve different project goals and needs. It is an efficient tool for coastal surveys and establishment of environmental background information, which helps in the management and planning of the coastal areas.

Keywords: Taoyuan coasts; UAV; Aerial imagery; Orthophoto; Digital surface model

## 一、前言

具有 GPS 訊息的遙測圖像可以用來在 GIS 中製作圖層，常被應用於各種製圖和建模的應用。遙測影像被認為是海岸監測和評估的重要工具與手段之一。無人機 (UAV) 所拍攝的圖像，具備有高空空間解析度和拍攝時間彈性等優點，可以更低成本、更高的操作靈活性和更大的多功能性替代傳統衛星或飛機遙測影像。因此，無人機已被廣泛用作各種應用的圖像成象工具。無人機在海岸和環境遙測中的發展和應用可以參考回顧文獻如 Hamylton (2017); Klemas (2015); Wang, Lu, Sheng, and Zhou (2020)。

桃園市海岸在竹圍漁港以南有許厝港濕地、草漯沙丘、觀新藻礁野生動物保護區、新屋石滬等保護區與地景。在新屋區有兩處二級海岸防護區，包含新屋事業海堤及笨港海堤(好客莊園)海岸段，而在白玉海岸段也有海廢熱區。整體海岸帶南北長約 40 公里，幅員廣闊，若以傳統人力進行調查與記錄不容易達成目標，需利用更有效的調查方式記錄海岸帶的現況與改變。然而，若採用以衛星與航照影像監測，則常常有被雲霧遮蔽，或者時間與空間解析度不足的問題，無法滿足需求。因此本研究擬彙整與介紹歷年來在桃園市海岸帶完成與還在進行中的無人機空拍影像技術成果，提供給產官學界及其他學者未來進行海岸監測與調查的參考。

## 二、無人機空拍技術

本團隊從 2018 年 7 月開始執行監測與調查，無人機的種類在初始階段選擇了 DJI Phantom 3 Pro (P3P) 和 DJI Phantom 4 Pro V2.0 (P4P) 進行數位影像數據的拍攝。自 2019 年之後，我們也開始採用了 DJI Phantom 4 RTK (P4P-RTK) 和 DJI Mavic 2 Pro (M2P)。如圖 1 所示為本研究採用的無人機照片。考慮到預算、技能和人力數量、風速、無人機墜毀風險、可用工作時間，執行人員在調查中選擇了不同的無人機。操作員在執行作業的當天決定使用哪種無人機進行實地調查。P4P-RTK 用於 4 級以下 Beaufort 級風況，P4P 用於 5 級以下。M2P 僅用



圖 1 本研究採用的無人機(DJI Phantom 4 RTK)

於 5-6 級大風條件。2018 年至 2020 年期間，大部分航拍使用 P4P 進行。2021 年後，採用的無人機優先順序已更改為 P4P-RTK、P4P 和 Mavic 2 Pro。

P4P 與 P4P-RTK 在機身設計上面幾乎相同，P4P 的機身尺寸軸距為 350 mm，重量: 1388 g，最高飛行速度可達 72 km/h，最遠遙控距離約 3-4 公里，實際操作我們限制遙控距離約 2 公里。相機的空拍鏡頭內置 1 吋 CMOS 感光元件，有效像素為 2,000 萬，P4P 的像素 4864 x 3648，P4P-RTK 為 5472 x 3648。鏡頭視野為廣角 84 度，光圈為 F/2.8 至 F/11。對焦距離為 1 米至無窮遠，可半按快門鍵自動對焦。

取得空拍影像後，使用 UAV 專業影像後製處理軟體 Pix4Dmapper 拼接產製正射影像。處理流程如圖 2 所示。軟體讀取原始影像的 EXIF 資料、獲取 GPS 資料、獲取相機參數、初始化運算、特徵匹配、密集化點雲、正攝影糾正、編修鑲嵌線、產製正射影像、產製精度報表。軟體作業流程如圖 2 所示。計算過程中不需人工介入，軟體自動計算空中三角測量，並來回推內、外方位參數。

可見光影像拼接產製的正射影像技術稱為表面運動 (Surface From Motion, SFM) 技術，用以生成正射鑲嵌影像。一般而言，使用帶有地面控制點 (Ground Control Point) 的商用無人機可以有效地來執行表面運動 (SFM)，並已被認為是構建地圖的可靠方法。研究已經證實，用這種方法構建的馬賽克影像結果與真實物體具有可比性。發現馬賽克影像的位置精度非常高，誤差可以小於 5cm。

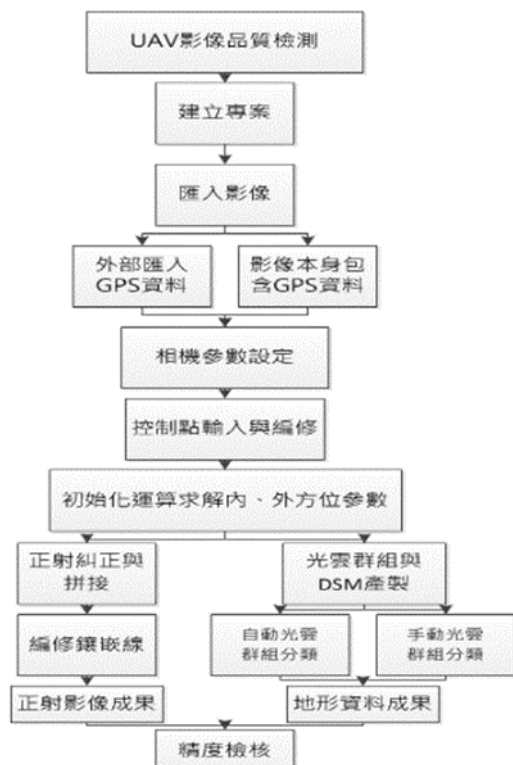


圖 2 Pix4Dmapper 處理軟體作業流程圖

### 三、成果與案列

本文彙整以下幾項在桃園海岸的空拍應用調查案列，並簡介其目的與結果如下：

#### 3.1 桃園市海岸潮間帶正攝影像

研究團隊從 2018 年 7 月開始建立桃園市海岸潮間帶的正攝影像，沿岸範圍長度達 31 公里，建立平均低潮線水深以上的潮間帶範圍，離岸距離約 300-500 公尺左右，其空拍影像解析度約 10 公分/pix 以內。此資料庫的主要目的在協助進行桃園潮間帶藻礁分佈的調查。計算藻礁覆沙率所定義之控制面積為四方形，主要由岸線、平均低潮線及兩個側邊界的向離岸方向的分界線所組成。依照海岸特性劃定沿岸分區，此為岸線分界，再透過海岸地形及竹圍潮位站平均低潮位定義出平均低潮線(TWVD=1.46 公尺以上)，並將岸線分界及平均低潮線畫出側邊界分界線，即可定義出控制面積範圍，故將北起桃園市大園區埔心溪口至桃園市新屋區福興溪口約 31 公里之潮間帶海岸，根據海岸特性分為 23 個區塊，整個監測的面積約 700 公頃。圖 3 為桃園市海

岸潮間帶正攝影像範例圖，其中 A1 到 A12 表示永安漁港以北到從大堀溪以南的海岸潮間帶分區。

取得影像進行處理後以電腦軟體搭配人力的方式進行影像判別，由於海沙常與生物礁體的顏色相近，為減少電腦誤判，故利用人力判讀結合地理資訊系統 ArcGIS 判讀方式，座標系統為 WGS84 zone51N，因礁體及礫石較難區別，故在影像判別時將控制面積內全部非沙區域圈起(包含礁體及礫石)。圖 4 為 2018 年到 2021 年的桃園市海岸潮間帶非沙覆蓋比例平均值分佈圖。由資料顯示整個桃園海岸礁體受海沙覆蓋的比例在空間上呈現相當的差異。最多的區域礁體裸露達 90%，而最少則為零。此潮間帶海岸空拍影像也被應用來進行海岸垃圾的分佈的趨勢研究，例如卞家緯等人(2019)。

#### 3.2 新屋事業海堤數值地形建模

圖 5 為 2021 年新屋事業海堤空拍正攝影像。圖 6 為 2021 年新屋事業海堤空拍數值地形模型，其建模解析度為 1.95cm/pix。本文利用新屋事業海堤建模成果詳述空拍技術之建置過程。該計畫拍攝了 1506 張空拍照片，建模軟體使用其中 1387 張照片於分析，解算後每張照片的特徵點中位數為 51341 個，特徵點數字越大，軟體越能辨識出可以連結的點。解算出來每張照片的連結點中位數為 6327.42，連結點越多，軟體能建立更精細的模型。建模涵蓋 0.774 平方公里，輸出成果像素解析度相當於實際大小 1.95 公分，數值越小建模解析度越高。設置的七個地面控制點都有參與三維建模，方均根誤差為 1.4 公分，顯示出建模結果相當精準。

執行產出的精度檢核表如圖 7 所示。7 個三維地面控制點的方均根誤差皆小於 2 公分。其中紅框處顯示檢核點的誤差，檢核點不參與三維建模，只用於計算模型與檢核點 RTK 測量結果的誤差。x 方向的誤差為 1.35 公分，y 方向的誤差為 2.6 公分，z 方向的高程誤差為 1.35 公分。因為像素解析度為 1.95 公分，顯示其檢核點的總體誤差皆在 2 像素之間。

#### 3.3 新屋石滬數值地形建模

新屋石滬地形建模於 2019 年 7 月 30 日執行第一次，並於 2021 年 5 月 26 日執行第二次拍攝。使用大疆公司(DJI)Phantom 4 RTK 無人機與 DRTK2 地面基站進行空拍測量作業，以獲得公分等級定位



及高解析度影像。拍攝完成後將影像建模並得到數值地形模型，成果解析度達 2.59 公分。圖 8 為 2021 年新屋石滬空拍數值地形模型，此成果用來進行石滬修護成果的評估作業。有了不同時間的高解析度地形模型資料，可以探討石滬經人力修砌後或受自然海流波浪作用導致的高度與地形的侵蝕與淤積變化，可以協助與評估石滬文化資產的保存。

#### 四、結論與建議

本文彙整了桃園市海岸管理工程處從 2018 年至 2021 年間，利用無人機空拍影像建模技術，來進行正攝影像及高解析度數值地形建模的應用，其中包含了(1)桃園市海岸潮間帶正攝影像，用來協助進行藻礁分佈調查及海岸垃圾分佈調查；(2)新屋事業海堤數值地形建模，用來進行該海堤的改善工程規劃；(3)新屋石滬數值地形建模，用來進行石滬修護成果與保護評估。

依據不同作業的需求，影像解析度都在 10 公分以下，而高解析度數值地形模型，最高之解析度可以高達 2 公分/pix。在新屋事業海堤與石滬數值地形模型，採用 RTK 無人空拍機建模技術，垂直均方根高程誤差可達約為 2 公分左右的等級。本文彙整不同計畫的調查與監測結果，證實無人機空拍技術可符合不同計畫的目的，為海岸調查與基礎影像資料提供一有效率的工具，可用於協助海岸空間的管理與規劃。

#### 謝誌

本團隊感謝桃園市海岸管理工程處的研究調查計畫經費的支持，包含「桃園海岸侵蝕與邊坡塌陷改善可行性評估計畫」、「108 年探究自然環境對新屋石滬文化形成之影響與教育推廣計畫」、「109 年度海岸防護設施修繕工程暨監測可行性評估委託技術服務案」、「110 年度桃園市海域環境品質調查暨水質監測網佈建計畫」。此外，中央大學水文與海洋科學研究所近岸泥沙輸送實驗室的助理與學生們，負責進行、協助與完成現場調查與資料的建立。

#### 參考文獻

1. Hamylton, S. M. (2017). Mapping coral reef environments: A review of historical methods, recent advances and future opportunities. *Progress*

- in Physical Geography-Earth and Environment*, 41(6), 803-833. doi:10.1177/0309133317744998
2. Klemas, V. V. (2015). Coastal and Environmental Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. *Journal of Coastal Research*, 31(5), 1260-1267. doi:10.2112/jcoastres-d-15-00005.1
3. Wang, Y. Q., Lu, Z., Sheng, Y. W., & Zhou, Y. Y. (2020). Remote Sensing Applications in Monitoring of Protected Areas. *Remote Sensing*, 12(9). doi:10.3390/rs12091370
4. 卞家緯、林冠宏、黃志誠，桃園地區海岸線海漂垃圾分布情況及管理之研究，第 41 屆海洋工程研討會，(1121-1122, 2019)，台南。

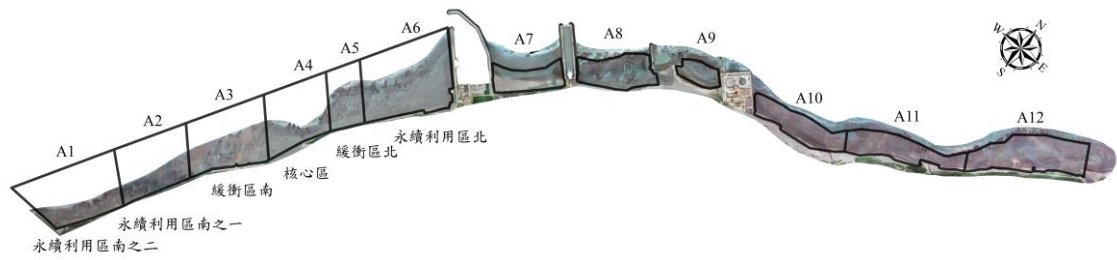


圖 3、桃園市海岸潮間帶正攝影像範例。A1 到 A12 表示永安漁港以北到從大堀溪以南的海岸潮間帶分區。

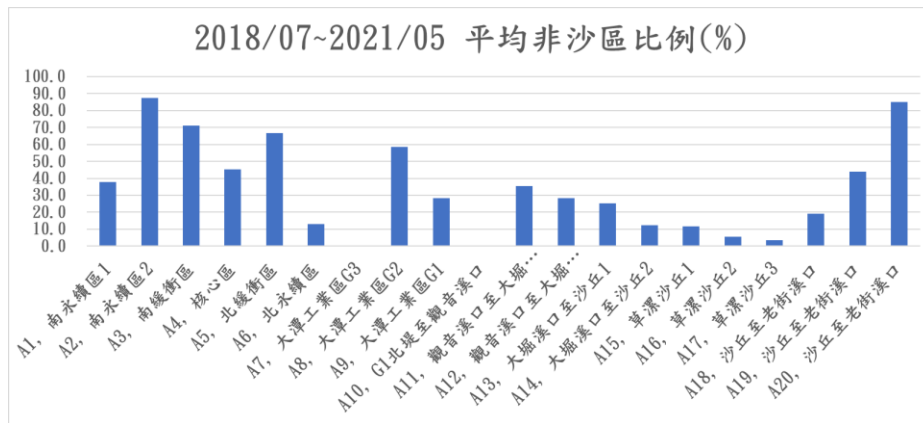


圖 4、桃園市海岸潮間帶非沙覆蓋比例分佈圖。此為 2018 年到 2021 年的平均值。

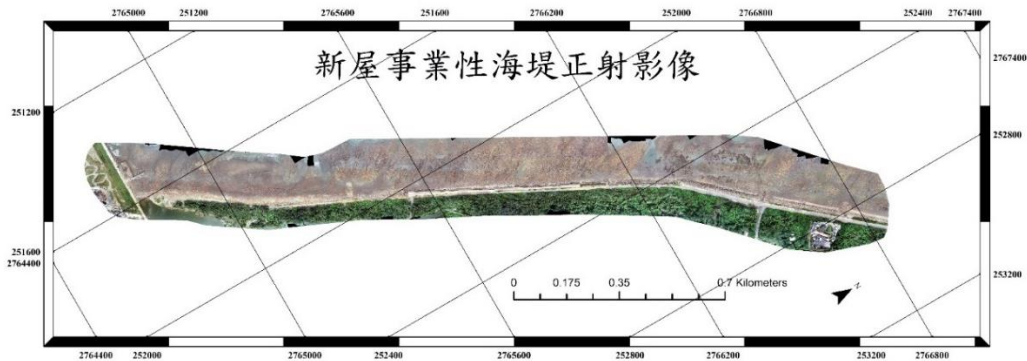


圖 5、2021 年新屋事業海堤空拍正攝影像。



圖 6、2021 年新屋事業海堤空拍正攝影像與數值地形模型。

Ground Control Points



GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
GCP1 (3D)	0.020/ 0.020	-0.006	-0.001	0.001	0.103	4 / 4
GCP2 (3D)	0.020/ 0.020	0.008	-0.022	-0.007	0.321	5 / 5
GCP6 (3D)	0.020/ 0.020	0.016	0.007	0.001	0.245	12 / 12
GCP10 (3D)	0.020/ 0.020	-0.038	0.018	-0.013	0.443	9 / 9
GCP11 (3D)	0.020/ 0.020	0.025	-0.019	0.019	0.577	7 / 7
GCP12 (3D)	0.020/ 0.020	-0.017	0.020	0.004	0.400	4 / 4
GCP9 (3D)	0.020/ 0.020	0.012	-0.001	-0.004	0.116	7 / 7
<b>Mean [m]</b>		0.000096	0.000131	0.000188		
<b>Sigma [m]</b>		0.020191	0.015236	0.009256		
<b>RMS Error [m]</b>		0.020191	0.015237	0.009258		

137 out of 138 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
GCPBASE		0.0135	0.0260	0.0135	0.2212	6 / 6

圖 7、2021 年新屋事業海堤空拍數值地形經度檢核表。



圖 8、2021 年新屋石滬空拍數值地形模型。

# 桃園海岸潮間帶礁體棲地的監測:無人機影像的應用

黃志誠<sup>1\*</sup>、葉正陽<sup>2</sup>、周泊皓<sup>3</sup>、鄧鑄源<sup>2</sup>、劉孟樵<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> 國立中央大學水文與海洋科學研究所 副教授

<sup>2</sup> 國立中央大學水文與海洋科學研究所 研究助理

<sup>3</sup> 桃園市政府海岸管理工程處 海岸工程科科員

## 摘要

無人機空拍成像與地形建模技術具備空間解析度高、機動性高及成本低等優勢，近幾年來已被廣泛使用在海岸沼澤、濕地、珊瑚礁棲地等的成像與現場調查。本研究於 2018 年 7 月開始，利用此空拍技術來監測桃園海岸潮間帶礁體出露海砂的特性。影像監測的時間超過 3 年 14 季，監測沿岸長度超過 24 公里，監測向離岸範圍從平均低潮位線至岸線(高水位線)。本研究也蒐集了近 20 年來農航所的航拍影像進行探討與比較。本研究說明無人機空拍成像技術可以作為海岸棲地長期監測的方法。本研究探討近二十年尺度、年際尺度及季節尺度的礁體與沙地棲地變動，我們發現潮間帶礁體的面積與位置在 2001 年到 2010 年間有很大的差異變化。資料顯示，影響礁體面積變動的主要因素為海岸突堤效應；另外，也發現礁體出露會有季節性的變化；而颱風等因素也可能是影響礁體面積改變的原因之一。

關鍵詞：桃園海岸、礁體、無人機、正射影像

## Monitoring the habitats of intertidal reefs in the Taoyuan coast : Application of UAV aerial images

Zhi-Cheng Huang<sup>1\*</sup>, Cheng-Yang Yeh<sup>2</sup>, Po-Hao Chou<sup>3</sup>, Jhu-Yuan Deng<sup>2</sup>, Meng-Chiao Liu<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Associate Prof., Grad. Inst. of Hydrological and Oceanic Sci., National Central Univ.

<sup>2</sup> Research Assistant, Grad. Inst. of Hydrological and Oceanic Sci., National Central Univ.

<sup>3</sup> Staff, Office of Coast Administration Construction, Taoyuan City Government

## ABSTRACT

Drone aerial imaging and terrain modeling technology has the advantages of high spatial resolution, high mobility, and low cost. In recent years, it has been widely used in the mapping and field surveys of marshes, wetlands, and coral reef habitats in coastal areas. This study uses the aerial photography technology to monitor the characteristics of the intertidal reef habitat in the Taoyuan coast area since July 2018. The image monitoring has been performed for more than 3 years (including 14 seasons), the monitoring length in the alongshore direction is more than 24 - 31 kilometers, and the onshore-offshore monitoring range is from the lines of average low tide to the shorelines (or high water lines). We also collected 20-years aerial images captured by Aerial Survey Office for studying and comparisons. This study shows that drone aerial imaging technology can be used as a method for long-term monitoring of coastal habitats. The changes from reef to sand habitat in the time scales of annual and seasonal scales in the past 20 years were discussed. We found that the area and location of the intertidal reef vary significantly in years from 2001 to 2010. The data shows that the major factor affecting the change of the reef area is the coastal jetty effect. It is also found that the reef area will change seasonally; Factors such as typhoons may also be one of the reasons for the changes in the area of reefs.

Keywords: Taoyuan coasts; Reef; UAV; Orthophoto;

## 一、前言

桃園市海岸擁有全台灣面積最大、生長最好的藻礁地形，藻礁乃由珊瑚藻經年累月所形成的，分布範圍從大園區下海湖以南至新屋區永安漁港北側之間，南北總長約為 31 公里，此特殊的地質環境成為自然野生生物棲地，使得藻礁具有保護與教育研究的價值，不少的生態調查報告指出桃園海岸的藻礁生物分佈受海沙覆蓋變動的影響非常大，在海沙覆蓋持續發生時，藻礁生態棲地將轉變為沙岸棲地，生物種類跟數量也跟著受影響(Yu, Huang, & Lin, 2020)、(Kuo et al., 2020)，故本研究對於桃園市藻礁生態棲地受海沙覆蓋變動影響的範圍進行調查。

繪製和監測沿海生態系統和棲息地對於支持保護區的環境管理至關重要。遙感技術，包括最先進的無人機成像技術，被認為是監測珊瑚礁環境和保護區的有效工具 (Hamylton, 2017; Wang, Lu, Sheng, & Zhou, 2020)。近年來，無人機已被用於繪製沿海生態系統和棲息地的地圖。例如，Murfit et al. (2017) 使用無人機繪製了潮間帶珊瑚礁的藻類和無脊椎動物組合；無人機的分析結果與生物數據的地面樣方調查具有可比性。繪製了棲息地特徵，例如紅樹林的冠層覆蓋（綠葉指數）、岩石海岸的粗糙度和珊瑚礁的珊瑚礁區域 (Castellanos-Galindo, Casella, Mejia-Renteria, & Rovere, 2019)。

無人機空拍成像與地形建模技術具備空間解析度高、機動性高及成本低等優勢，近幾年來已被廣泛使用在海岸沼澤、濕地、珊瑚礁棲地等的成像與現場調查。本研究利用空拍技術來監測桃園海岸潮

間帶礁體出露海砂，作為後續擬定相關藻礁保育及海岸管理策略之參考。

## 二、調查範圍與方法

### 2.1 調查範圍及分區

調查範圍北起桃園市大園區埔心溪口至桃園市新屋區福興溪口約 31 公里之潮間帶海岸，調查範圍及分區如圖 1 之黑框內所示共計分成 23 區。

計算覆沙率所定義之控制面積為四方形，主要由岸線、平均低潮線及兩個側邊界的向離岸方向的分界線所組成。依照海岸特性劃定沿岸分區，此為岸線分界，再透過海岸地形及竹圍潮位站平均低潮位定義出平均低潮線，並將岸線分界及平均低潮線畫出側邊界分界線，即可定義出控制面積範圍，故將北起桃園市大園區埔心溪口至桃園市新屋區福興溪口約 31 公里之潮間帶海岸，根據海岸特性分為 23 個區塊。岸線邊界分區方式主要分為下列三種方式，而 A1~A20 岸線邊界兩點之座標及永安漁港社子溪出海口至福興溪出海口由北至南分成 AS1~AS3 兩點之座標區域，定義控制面積及其岸線邊界兩點示意如圖 2。

依照經濟部水利署第二河川局桃園海岸地形測量資料，測量範圍北至老街溪口、南至永安漁港，搭配中央氣象局桃園竹圍潮位站於 65 年至 106 年期間之每月潮位統計如表 6.1-2 所示。依據每月潮位統計表的全年平均低潮位為-1.427 公尺，其潮高基準使用相對台灣基準(TWVD2001)，並搭配海岸地形資料即可求出平均低潮線的經緯度。依照前述



圖 1、海沙覆蓋率變化調查範圍示意圖



圖 2、定義控制面積示意圖



圖 3、礁體分類範例：控制面積(黑線)、非沙面積(黃線)

獲得的平均低潮線及海岸特性分區方式，再結合海岸線及平均低潮線，即可定義出各分區的控制面積。

## 2.1 海沙覆蓋調查方法

### 一、無人機影像蒐集

因為無人機效率較高，現場影像調查係以無人機的方式進行調查。先以無人機進行空中高解析度影像的取得，並以 GPS 定位系統標示地面控制點。然而桃園海岸地區風速時常超過無人機起飛標準，加上潮間帶的調查需要配合潮汐退潮的時間，故在無人機無法起飛的時候則根據海況及氣象條件，進行機動調整。

本研究從 2018 年 7 月開始執行監測與調查，無人機的種類在初始階段選擇了 DJI Phantom 3 Pro (P3P) 和 DJI Phantom 4 Pro V2.0 (P4P) 進行數位影像數據的拍攝。自 2019 年之後，我們也開始採用了 DJI Phantom 4 RTK (P4P-RTK) 和 DJI Mavic 2 Pro (M2P)。調查範圍涉及多個禁航區，僅 A20 北端一小部分禁航區未取得飛行許可，大部分落於禁航區之調查區域已取得禁航區飛行許可。本研究也蒐集了近 20 年來農航所的航拍影像進行探討與比較。

### 二、影像拼接

傳統使用航照影像進行正射影像產製，必須透過地面控制測量、空中三角測量與立體製圖等方式，才可以取得正射影像與地形資訊，無法滿足快速取得空間資料之需求。因此，使用 Pix4Dmapper 為先進技術軟體，在 UAV 航拍取像後，透過 Pix4Dmapper 進行影像匹配三維點生成地表模型，並快速產出正射影像以及地形資料，並可以不需經

由人工介入的空中三角測量步驟來回推內、外方位參數。透過 UAV 影像品質檢核、建立專案、相機參數設定、控制點輸入及編修、運算模組、鑲嵌線編修、光雲群組分類及空間資料產製等作業，將拍攝的成果進行影像輸出等成果展示。

### 三、影像判別與分類

取得影像進行處理後以電腦軟體搭配人力的方式進行影像判別，由於海沙常與生物礁體的顏色相近，為減少電腦誤判，故利用人力判讀結合地理資訊系統 ArcGIS 判讀方式，座標系統為 WGS84 zone51N，因礁體及礫石較難區別，故在影像判別時將控制面積內全部非沙區域圈起(包含礁體及礫石)計算面積如圖 3，並透過算式計算出區域覆沙率：

$$\text{覆沙率} = \frac{\text{控制面積} - \text{非沙面積}}{\text{控制面積}} \times 100\%$$

## 三、結果與討論

### 3.1 歷年覆沙率的變化

#### (一) 觀新藻礁保護區(A1~A6 區)

如圖 4 所示，A6(北永續區)平均覆沙率 83.4%，為六個區域中最高；A1(南永續區 1)平均覆沙率 69.8%，為六個區域中其次高。A2(南永續區 2)平均覆沙率 22.8%，為觀新藻礁保護區六區中最低，即藻礁在此區域露出最多。觀新藻礁保護區內，A1(南永續區 1)、A4(核心區)及 A6(北永續區)平均覆沙率皆超過一半，顯示出這些區域一半以上被沙覆蓋。

A1(南永續區 1)主要覆沙範圍在控制區域南邊靠近結構物處，非沙區範圍主要在控制區域北側，即遠離永安漁港結構物的區域。在結構物區域大部分時間於沙面積多於非沙區露出面積且覆沙率皆大

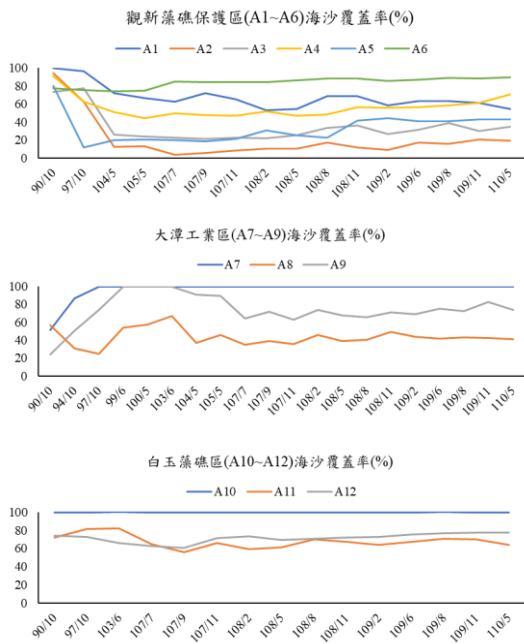


圖 4、觀新藻礁保護區、大潭工業區、白玉藻礁區的海沙覆蓋率趨勢變化圖

於 50%，從 90 年起覆沙率皆大於 50%，顯示出覆沙比例超過一半以上。A2(南永續區 2)藻礁幾乎全部露出，只有某部分季節時，控制面積東側堤防處沙堆積東側靠近陸地邊界堤防處。在 104 年以前覆沙率皆大於 50%，104 年以後覆沙率降低至 20%，顯示 104 年以後覆沙區大幅減少。A3 區域(南緩衝區)在 90 年非沙露出位置在控制區域北側，104 年後非沙面積增加，且平均分佈於控制區域。在 104 年以前覆沙率 60%以上，104 年後降低至 30%，顯示 104 年以後覆沙區大幅減少。A4(核心區)覆沙範圍集中在新屋溪河口區域，顯示新屋溪河口為覆沙主要範圍。除 90 年幾乎被沙掩埋，自 97 年起至 110 年 5 月覆沙率介於 47%至 70.8%之間。本次空拍調查結果覆沙率為 70.8%，相較於上一期結果覆沙比例上升，發現在河口南側覆沙有增加的情況。A5(北緩衝區)覆沙範圍集中在靠近陸地邊界，90 年幾乎被沙掩埋，從 97 年起覆沙率介於 11.6%至 44.5%之間。A6(北永續區)主要覆沙範圍靠近大潭電廠突堤處，且覆沙率介於 74.4%至 89.4%，是觀新藻礁保護區中覆沙率最高的區域。另外，興建大潭發電廠後，北側突堤附近的礁體被沙掩埋，覆沙率約在 83.4%左右。

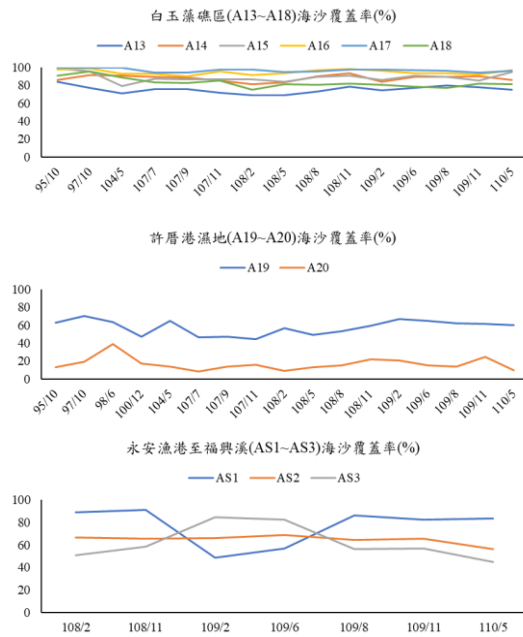


圖 5、白玉藻礁區、許厝港濕地、永安漁港以南的海沙覆蓋率趨勢變化圖

#### (二)大潭工業區(A7~A9)

如圖 4 所示，A7(大潭工業區 G3)平均覆沙率 96.9%，為三個區域中最高，其次為 A9(大潭工業區 G1)平均覆沙率 73.9%，A8(大潭電廠 G2)平均覆沙率 43.5%，為大潭工業區三區中最低，即藻礁在此區域露出最多。大潭工業區內 A7(大潭工業區 G3)及 A9(大潭工業區 G1)平均覆沙率皆超過一半，顯示出這些區域一半被沙覆蓋。A7(大潭工業區 G3)平均覆沙率在 96.9%，在 90 年及 94 年仍有礁體露出，但在大潭發電廠興建完成後覆沙率隨著時間增加，到了 97 年後覆沙率達到 100%，顯示出該區域的覆沙率已經平衡。A8(大潭電廠 G2)覆沙範圍主要靠近控制面積陸側，藻礁露出範圍在控制面積海側。仍擁有一半比例非沙區露出，99 年至 103 年因為地形改變，造成局部地形的積水，造成這三年覆沙率上升，104 年後覆沙率小於 50%，顯示出此區的覆沙面積未達一半。A9(大潭工業區 G1)自 99 年至 110 年覆沙率大於 63%，顯示覆沙面積占該區域一半以上，98 年雖有一個颱風但隨之的夏季堆沙作用，使得 99 年的藻礁被掩蓋，100 年沒有颱風侵襲，藻礁呈現被掩蓋的現象，103 年及 104 年雖有颱風侵襲，但夏季堆沙作用也讓藻礁被漂沙掩蓋。由此結果，

只要一年的堆積型風浪作用就可以使該區域的藻礁被掩蓋。此區域受到波浪及海流特性、颱風歷程、突堤內環流等多種效應影響漂沙特性，但此結果顯示因突堤效應下，冬天的海浪似乎無法有效移除該區域的漂沙，此區域的藻礁若沒有颱風的作用下，很多時間會被漂沙所掩蓋。

### (三)白玉藻礁區(A10~A12)

如圖 4 所示，A10(觀塘工業區北堤至觀音溪出海口)平均覆沙率 99.8%，為三個區域中最高，其次為 A12(觀音溪出海口至大堀溪出海口)平均覆沙率 71.8%，A11(觀音溪出海口至大堀溪出海口)平均覆沙率約 67.8%，為白玉藻礁區三區中最低，即藻礁在此區域露出最多，白玉藻礁區內三區域覆沙率皆超過一半，顯示出這些區域一半被沙覆蓋。

A10(觀塘工業區北堤至觀音溪出海口)為大潭工業區範圍以北第一個區域，平均覆沙率為 99.8%，全區幾乎被沙覆蓋，未因時間演進而有所變化。A11(觀音溪出海口至大堀溪出海口)由 108 年空拍資料顯示，礁體露出範圍平均分布於控制區域海側，覆沙區域集中在控制區域陸側，平均覆沙率為 65.3%，顯示出礁體有一半以上被覆蓋，A12(觀音溪出海口至大堀溪出海口)位於大堀溪河口南側，屬於開放海域和河口交匯處，從分析圖資結果來看，覆沙區域集中在控制範圍河口陸側，平均覆沙率為 71.8%。

### (四)桃園草潔沙丘海岸(A13~A18)

如圖 5 所示，A17(草潔沙丘 3)平均覆沙率 97.2%，為六個區域中最高，其次為 A16(草潔沙丘 2)平均覆沙率 94.8%，A13(大堀溪口至沙丘 1)平均覆沙率約 74.2%，為桃園草潔沙丘海岸六區中最低。桃園草潔沙丘海岸內六區域覆沙率皆超過一半，顯示出這些區域一半被沙覆蓋，A13(大堀溪口至沙丘 1)藻礁分布主要在大堀溪河口北岸，與控制面積陸側，平均覆沙率為 74.2%，顯示出此區覆沙比例大於礁體露出比例。

A14(大堀溪口至沙丘 2)藻礁露出範圍集中在控制區域中間的小溪流兩側，北側富林溪河口南岸靠近水線控制邊界，也有藻礁範圍露出，平均覆沙率為 87.3%，顯示出覆沙比例相當高。A15(草潔沙丘 1)礁體露出範圍集中在富林溪河口北岸，但露出面積相當少，平均覆沙率為 89.5%，A16(草潔沙丘 2)

大部分控制面積也是為沙所覆蓋，藻礁露出範圍在北側靠近水線處，平均覆沙率為 94.8%。A17(草潔沙丘 3)藻礁露出範圍約在靠近海側範圍，平均覆沙率為 97.2%。A18(沙丘至老街溪口)藻礁露出範圍集中在老街溪河口南側與控制面積靠近海側，平均覆沙率為 86%。

### (五)許厝港濕地(A19~A20)

如圖 5 所示，A19(許厝港濕地)平均覆沙率 58.5%，為兩個區域中最高，A20(新街溪口至埔心溪口)平均覆沙率約 16.6%，為桃園草潔沙丘海岸兩區中最低。A19(許厝港濕地)平均覆沙率為 58.5%，覆沙面積大略超過控制面積的一半，覆沙範圍平均分布在控制區域，非沙區域平均分布在控制範圍內，但是在河口區域藻礁面積與範圍隨季節有明顯變化。A20(新街溪口至埔心溪口)平均覆沙率約為 14.8%，顯示出大部分為非沙區域，且非沙區面積比 A19(許厝港濕地)大。新街溪與埔心溪河口處的藻礁面積分布隨時間改變，變動區域主要在河口。

### (六)永安漁港至福興溪(AS1~AS3)

如圖 5 所示，AS3(大坡溪出海口至福興溪出海口 2)平均覆沙率 76.7%，為三個區域中最高，其次為 AS2(大坡溪出海口至福興溪出海口 1)平均覆沙率 64.6%，AS1(社子溪出海口至大坡溪出海口)平均覆沙率 62%，為永安漁港至福興溪三區中最低，永安漁港至福興溪內三區域覆沙率皆超過一半，顯示出這些區域一半被沙覆蓋。AS1(社子溪出海口至大坡溪出海口)為永安漁港南側海岸，大部分為沙所覆蓋，礁體露出範圍靠近永安漁港南側堤防附近。AS2(大坡溪出海口至福興溪出海口 1)為永安漁港南側至新屋石滬前的海岸，礁體露出位置在控制區域中間，控制區域南北兩側大部分為覆沙。AS3(大坡溪出海口至福興溪出海口 2)為桃園新屋石滬範圍至福興溪。此控制面積中間以北礁體平均分布，然而，在福興溪河口處有大量覆沙面積，故呈現北側礁體露出，南側河口淤沙。

## 3.2 颱風對覆沙率的影響

由 A9 區域高解析度航拍圖與颱風事件的關係歷程關係圖，可以得知區域 A9 在第 2 及 3 號路徑颱風的作用下，一兩個颱風事件可以讓該區域的藻礁裸露。如 94 年及 97 年 9 月連續發生兩個颱風事件，隨之的空拍照片為藻礁裸露。104 年夏季也連



續發生兩個颱風事件，雖經過短暫春夏的堆積作用，藻礁亦為裸露，在 105 年及 107 年前和 108 年中也各遇到一個颱風，故藻礁亦為裸露。109 年至 110 年至 A9 區域覆沙率明顯增加。由此結果，我們可以得知颱風等因素也可能是影響礁體面積改變的原因之一。

### 三、結論

本研究結果說明無人機空拍成像技術可以做為海岸棲地長期監測的方法。依照收集到的農航所航拍影像與本計畫執行的空拍影像，本研究探討近二十年尺度、年際尺度及季節尺度的礁體與沙地棲地變動，我們發現潮間帶礁體的面積與位置在 2001 年到 2010 年間有很大的差異變化。資料顯示，影響礁體面積變動的主要因素為海岸突堤效應；另外，也發現礁體出露的面積會有季節性的變化；而颱風等因素也可能是影響礁體面積改變的原因之一。

### 謝誌

本團隊感謝桃園市海岸管理工程處「110 年度桃園市海域環境品質調查暨水質監測網佈建計畫」的研究調查計畫經費的支持。此外，中央大學水文與海洋科學研究所近岸泥沙輸送實驗室的助理與學生們，負責進行、協助與完成現場調查與資料的建立。

### 參考文獻

1. Castellanos-Galindo, G. A., Casella, E., Mejia-Renteria, J. C., & Rovere, A. (2019). Habitat mapping of remote coasts: Evaluating the usefulness of lightweight unmanned aerial vehicles for conservation and monitoring. *Biological Conservation*, 239. doi:10.1016/j.biocon.2019.108282
2. Hamylton, S. M. (2017). Mapping coral reef environments: A review of historical methods, recent advances and future opportunities. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 41(6), 803-833. doi:10.1177/0309133317744998
3. Kuo, C. Y., Keshavmurthy, S., Chung, A. C., Huang, Y. Y., Yang, S. Y., Chen, Y. C., & Chen, C. A. (2020). Demographic census confirms a stable

- population of the critically-endangered caryophyllid coral *Polycyathus chaishanensis* (Scleractinia; Caryophyllidae) in the Datan Algal Reef, Taiwan. *Scientific Reports*, 10(1). doi:10.1038/s41598-020-67653-8
4. Murfitt, S. L., Allan, B. M., Bellgrove, A., Rattray, A., Young, M. A., & Ierodiaconou, D. (2017). Applications of unmanned aerial vehicles in intertidal reef monitoring. *Scientific Reports*, 7. doi:10.1038/s41598-017-10818-9
5. Wang, Y. Q., Lu, Z., Sheng, Y. W., & Zhou, Y. Y. (2020). Remote Sensing Applications in Monitoring of Protected Areas. *Remote Sensing*, 12(9). doi:10.3390/rs12091370
6. Yu, H. Y., Huang, S. C., & Lin, H. J. (2020). Factors structuring the macrobenthos community in tidal algal reefs. *Marine Environmental Research*, 161. doi:10.1016/j.marenver.2020.105119

## 應用全潮測量於感潮濕地管理之探討-以 許厝港濕地為例

黃國文<sup>1\*</sup> 李豐佐<sup>2</sup> 賴進松<sup>3</sup> 楊欣樺<sup>4</sup> 林立昌<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup>國立臺灣大學水工試驗所研究員

<sup>2</sup>國立臺灣大學水工試驗所助理研究員

<sup>3</sup>國立臺灣大學水工試驗所研究員

<sup>4</sup>國立臺灣大學水工試驗所研究專員

<sup>5</sup>桃園市政府海岸管理工程處處長

### 摘要

感潮濕地由於受潮汐影響，其水位及流量變化，為主要影響濕地水文及生態環境之因子。尤其若感潮濕地無上游淡水入流流量時，潮汐週期間之水位及流量特性，更為主導濕地水文生態特性之因子，故需以全潮測量方法進行前述因子調查。本研究以許厝港 22 公頃復育濕地之感潮濕地為例，許厝港感潮濕地為臺灣第一個大尺度之濕地復育營造案例，感潮濕地面積約 11 餘公頃，以兩支管徑為 1.65 公尺之涵管與老街溪河口濕地連通，河口潮汐水流由這兩支涵管進出感潮濕地。本研究於 2021 年 5 月 13 日進行全潮測量，由 7 點至 19 點(約一個潮汐週期)使用聲波都普勒流速儀(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)-River Surveyor M9 進行 13 次全斷面流速及流量量測，並同時調查水位、鹽度等因子。由全潮測量成果得知，感潮濕地之潮汐週期與老街溪口相似，其潮差約 0.6m、最大退潮流量為 1.68cms、最大平均流速約為 0.023m/s、鹽度約為 24ppt。由於感潮濕地之潮差遠小於老街溪口之 1.1m，感潮濕地之最高潮位約 EL. 1.0m 略低於老街溪口之 EL. 1.2m，顯示感潮濕地受兩支涵管管徑及高程限制，無法與老街溪河口潮汐水位同步。運用此水文特性可估算感潮濕地之潮間帶棲地面積等生態特性，做為棲地復育管理應用之參考。全潮測量可作為瞭解感潮濕地水文特性之方法，本研究成果可供類似感潮濕地之水文環境管理參考。

關鍵詞：全潮測量、感潮濕地、ADCP、棲地管理

### The Applications of Tidal Current Investigation in the Wetland Mangement- A Case Study of Xucuoang Important Wetland

Gwo-Wen Hwang<sup>\*</sup>, Fong-Zuo Lee, Jihn-Sung Lai, Hsin-Hua Yang, Li-Chang Lin

<sup>\*</sup> Fellow, Hydrotech Research Institute, National Taiwan University

### ABSTRACT

The water level and flow changes of tidal wetland are the main factors that affect the hydrology and ecology of the wetland. Especially if there is no upstream fresh water inflow in the wet land, the water level and flow characteristics during the tidal cycle are the factors that dominate the hydrological and ecological characteristics of the wetland. Therefore, the aforementioned factors should be surveyed by the tidal current investigation. This study takes the 22 hectares of wetland in Xucuoang Important

Wetland as an example. The restoration wetland of Xucuogang is Taiwan's first large-scale wetland restoration construction case. The area of restoration wetland is about 11 hectares. Two culverts with a diameter of 1.65 meters are connected to the mouth of the Laojie River, and the tidal water flows in and out of the estuary from these two culverts. This study conducted a tidal current investigation on May 13, 2021, from 7 o'clock to 19 o'clock (about one tidal cycle), using Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)-River Surveyor M9 for velocity and flow measurements. According to the results of tidal current investigation, the tidal cycle of the restoration wetland is similar to the mouth of the Laojie River. The tidal range is about 0.6m, the discharge of ebb tide is 1.68cms, the maximum average velocity is about 0.023m/s, and the salinity is about 24ppt. Since the tidal range of the wetland is much smaller than the 1.1m of the mouth of the Laojie River, the highest tidal level of the wetland is about EL. 1.0m lower than the EL. 1.2m of the mouth of the Laojie River. Limited by the diameter and elevation of the two culverts, it cannot be synchronized with the tidal water level of the Laojie River estuary. Using this hydrological characteristic can estimate the ecological characteristics such as the suitability habitat area of the intertidal zone in the wetland, which can be used as a reference for the application of habitat restoration management. The tidal current investigation can be used as a method to understand the hydrological characteristics of wetlands. The results of this research can be used as a reference for hydrological environmental management in similar wetlands.

Keywords: Tidal current investigation; Tidal wetland; ADCP; Habitat management

## 一、前言

桃園市政府 107 年將許厝港濕地遭漁塢佔用之公有地約 12.6 公頃收回，並經桃園市政府規劃營造為感潮濕地，復育為鳥類喜好之棲地環境。此一感潮復育濕地為臺灣第一個大尺度之濕地復育營造案例，為臺灣濕地經營管理之亮點，而目前已進行生態調查及水質監測，但水文環境監測尚未完整進行，尤其是主導感潮濕地水文生態特性之因子，故需以全潮測量方法進行前述因子調查。

若濕地缺少水文環境因子之基礎監測資料，將完全無法了解濕地生態特性(例如地形特性、鹽度分布、水位漲退等特性)及生態變化之原因，為依據科學數據進行適當之濕地管理，透過本研究結果，可瞭解營造後之許厝港感潮濕地水文環境基本特性，以達成濕地生態環境預期規劃目標。

## 二、研究方法

本研究以許厝港 22 公頃復育濕地之感潮濕地為例，許厝港感潮濕地為臺灣第一個大尺度之濕地復育營造案例，感潮濕地面積約 11 餘公頃，如圖 1，以兩支管徑為 1.60 公尺之涵管與老街溪河口濕地連通，河口潮汐水流由這兩支涵管進出感潮濕地。本研究於 2021 年 5 月 13 日進行全潮測量，在許厝港復育感潮濕地之上游、中游、下游及濕地外等 4 處測站(如圖 2)，由 7 點至 19 點(約一個潮汐週期)使

用聲波都普勒流速儀(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)-River Surveyor M9(如圖 3)進行 13 次全斷面流速及流量量測，並同時調查水位、鹽度等因子。



圖 1 許厝港復育感潮濕地範圍圖

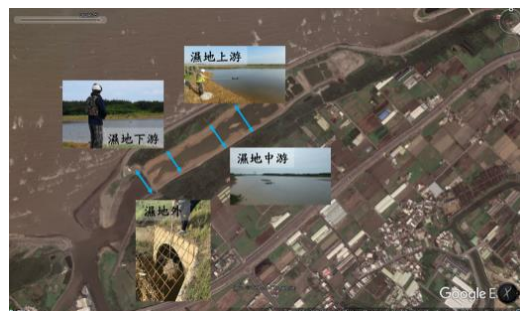


圖 2 全潮測量之斷面位置圖

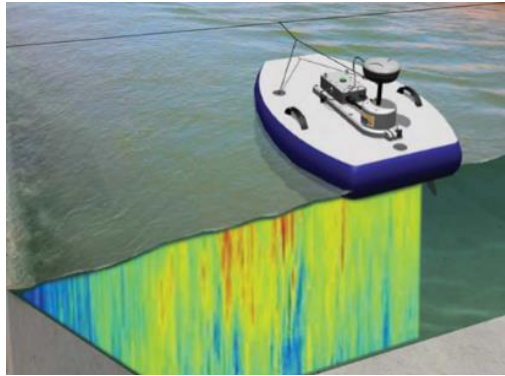


圖 3 拖曳型 ADCP(RiverSurveyor M9)及載具外觀

本計畫使用之聲波都普勒流速儀 M9 係利用聲學都普勒效應進行測流，換能器(transmitter)發射出一定頻率的聲波射入水體中，當水體中之散射子(即懸浮微粒子)以幾近於水體速度通過聲束時，呈運動狀態之懸浮微粒子乃反射聲束，而呈現回聲(echo)，此後散射回波信號會被 M9 接收，量得該回波信號的頻率與發射的頻率之間產生的頻差，即都普勒頻移後，可推算測點流速值，如式(1)。

$$V = \frac{(f_2 - f_1) \cdot C}{2f_1 \cdot \cos \theta} \quad \text{式(1)}$$

上式中，V 為水流速度；f1、f2 分別為發射晶體發射頻率與接收晶體接收頻率；C 為音速；θ 為發射超音波束與水流流向間之夾角。基本上，M9 與傳統量測流速原理相同，但 M9 可在同一剖面(垂向、不同深度)量測多點之流速資料，故較傳統方法具備量測時不擾動流場、耗時少、測速範圍大等優點。

### 三、研究成果

以 ADCP 量測全断面流速之成果，如圖 4 之流速剖面圖，所顯示之逐個顏色區間為施測過程中之瞬時平均流速，因此將受到水中漂浮固體、水面波浪已及施測過程船速等因素之影響，造成數值呈現不連續之現象。人員於断面兩岸以繩索拉動 ADCP 進行量測，如圖 5。

由全潮測量成果得知，感潮濕地之潮汐週期與老街溪口相似，其潮差約 0.6m(如圖 6)、最大退潮流量為 1.68cms(如圖 7)、最大平均流速約為 0.023m/s、鹽度約為 24ppt。由圖分析本次全潮觀測結果，潮位於 5 月 13 日 11 點半至 13 點時最高，5 月 13 日 18 點至 19 點時潮位最低，流量歷線圖顯

示各測站最高潮流量發生時刻為 12 點至 15 點，比較之後發現許厝港濕地之最高潮流量於退潮時段發生，符合感潮水域之物理現象。

由於感潮濕地之潮差遠小於老街溪口之 1.1m，感潮濕地之最高潮位約 EL. 1.0m 略低於老街溪口之 EL. 1.2m，顯示感潮濕地受兩支涵管管徑及高程限制，無法與老街溪河口潮汐水位同步。

運用此水文特性可估算感潮濕地之潮間帶棲地面積等生態特性，做為棲地復育管理應用之參考。全潮測量可作為瞭解感潮濕地水文特性之方法，本研究成果可供類似感潮濕地之水文環境管理參考，亦可作為環境教育之教材，可深化及在地化環境教育之推動。

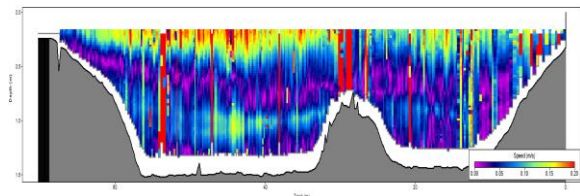


圖 4 全潮測量下游断面 12 點之流速分布圖



圖 5 全潮測量上游断面之施測照片

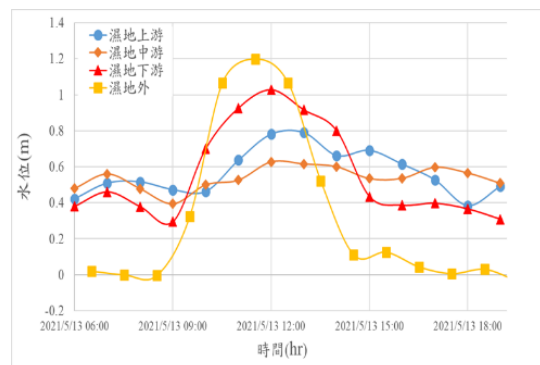


圖 6 全潮測量各測站之水位變化圖

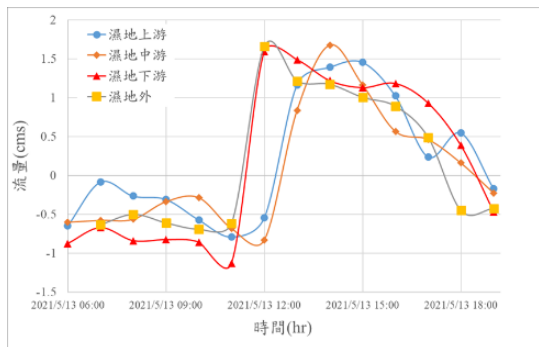


圖 7 全潮測量各測站之流量變化圖

#### 四、結論與建議

1. 許厝港感潮濕地為臺灣第一個大尺度之濕地復育營造案例，經由本計畫初步水文環境調查，後續可配合另案辦理之生態水質調查成果，可作為類似濕地之示範案例。
2. 由於感潮濕地受潮汐週期間之水位及流量影響濕地水文生態特性，故需以全潮測量方法進行前述因子調查。
3. 本計畫完成之濕地環境因子調查評析成果，包括水位、鹽度等資訊，皆可作為環境教育之教材，可深化及在地化環境教育之推動。
4. 後續掌握許厝港濕地水文環境及生態水質特性後，可作為在地團體關心濕地環境之共同關注點，例如桃園市野鳥學會、桃園市水環境巡守隊等團體。
5. 建議後續許厝港濕地應持續進行水文環境長期監測以建立基礎資料，未來可持續進行 111 至 112 年度之水文環境調查研析，包括地形測量、全潮測量、水位紀錄分析、鹽度及水理模擬分析、棲地特性變遷分析及濕地經營管理策略研擬等作業。

#### 謝誌

本研究承蒙桃園市政府海岸管理工程處支持部分經費，特此致謝。

#### 參考文獻

1. Cox, T., Maris, T., De Vleeschauwer, P., De Mulder, T., Soetaert, K., & Meire, P. (2006, Apr). Flood control areas as an opportunity to restore estuarine

- habitat. *Ecological Engineering*, 28(1), pp. 55-63.
2. Fiot, J., & Gratiot, N. (2005, Dec). Structural effects of tidal exposures on mudflats along the French Guiana coast. *Marine Geology*, 228(1-4), pp. 25-37.
3. Hsu, M. H., Kuo, A. Y., Kuo, J. T., & Liu, W. C. . (2014, Oct). Modeling Estuarine Hydrodynamics and Salinity for Wetland Restoration. *Journal of Environmental*, 33(5), pp. 891-912.
4. 社團法人中華民國溪流環境協會. (2019). 108 年度桃園市海岸地區生物多樣性指標調查計畫. 桃園市: 桃園市政府海岸管理工程處.
5. 桃園市政府. (2018). 桃園許厝港濕地景觀整體營造委託規劃設計技術服務成果報告書. 桃園市: 桃園市政府海岸管理處.

# 應用生態工法於濕地復育營造之探討 -以許厝港濕地為例

林立昌<sup>1</sup> 巫秀堅<sup>1</sup> 林庭輝<sup>1</sup> 李冠頡<sup>1</sup> 江正宏<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>桃園市政府海岸管理工程處

## 摘要

許厝港濕地復育工程採「以鳥為本」的生態工法，投入經費 4 千餘萬元，係全國最大的濕地復育工程，主要利用老街溪出海口的淤沙回填魚塢，藉以達到挖填平衡，完全不用外來土方，並利用潮汐變化自然引入海水，新增復育 22 公頃的濕地面積，經實際觀測到訪的鳥種與數量都有顯著成長，2020 年第一季候鳥數量 1,402 隻相較 2019 年同期候鳥數量 261 隻成長幅度大於 5 倍，更首次觀察到稀有冬候鳥冠鷺鷥、禿鼻鴉、黃頭鵪鶉，歷年觀測鳥種紀錄達 231 種，鳥友們驚呼許厝港濕地已回復到 15 年前的盛況。

關鍵詞：許厝港濕地復育工程、以鳥為本、生態工法、挖填平衡

## 一、前言

內政部於 2015 年 1 月將許厝港濕地劃定為國家級重要濕地，濕地範圍北起埔心溪南至富林溪，總面積 961 公頃，海岸線長度 10.5 公里(如圖 1)。2016 年 6 月內政部營建署委託桃園市政府經營管理，並於 2018 年 9 月公告許厝港重要濕地(國家級)保育利用計畫，分為生態復育區、環境教育區、其他分區等 3 區分級管理(如表 1)，允許農、漁業及建物依現況使用，但禁止任何污染水質之行為。桃園市政府接管後調查發現，老街溪出海口泥沙淤積明顯陸化，以及非法魚塢佔用問題，導致濕地生態遭到嚴重的破壞，因為缺乏魚蝦貝類等食物及人類活動干擾，水鳥望之卻步，鳥種及數量一年不如一年，搶救許厝港濕地確實已刻不容緩。



圖 1 內政部劃定許厝港重要濕地(國家級)

資料來源：許厝港重要濕地(國家級)保育利用計畫，詳細資訊可至國家濕地保育計畫網站下載閱覽 <https://reurl.cc/IRvY1d>。

表 1 許厝港濕地功能分區

功能分區	說明	允許明智利用項目及管理規定
生態復育區	老街溪口鳥類聚集地，面積 7.53 公頃。	為復育遭受破壞區域，以容許生態復育及研究使用為限。
環境教育區	分為環境教育一、環境教育二、環境教育三，面積 148.76 公頃。	為推動濕地環境教育，供環境展示解說使用及設置必要設施。
其他分區	分成海洋生態區、亞潮帶生態區、生態緩衝區、環境處理區、一般管理區，維持現況使用，面積 804.29 公頃。	其他供符合明智利用原則之使用。

資料來源：許厝港重要濕地(國家級)保育利用計畫，詳細資訊可至國家濕地保育計畫網站下載閱覽 <https://reurl.cc/IRvY1d>。

深入探究歸納問題有兩點，分別敘述如下：1. 出海口嚴重陸化(如圖 2)，水進不來，濕地無法提供水鳥足夠的食物。2. 魚塢水深平均深度達 1 米以上，超過水鳥的覓食深度(30cm)。因此，老街溪出海口的淤沙必須挖除，利用潮汐將海水引進許厝港濕地，再收回非法佔用魚塢(如圖 3)，回填自老街溪出海口處挖出的淤沙，採挖填平衡方式，形塑濕地原有的地形

地貌，並控制高程讓海水於漲潮時自然進入濕地形成鹹水感潮濕地，海水無法感潮的濕地則以淡水補注形成淡水沙洲濕地，藉此創造多樣性的生態環境，提供足夠的食物及良好棲地，吸引水鳥再度造訪許厝港濕地。



圖 2 許厝港濕地陸化前、後比較圖



圖 3 許厝港濕地復育最佳處理方案

## 二、以生態工法於濕地復育營造

許厝港濕地復育工程採「以鳥為本」的生態工法，投入 4 千餘萬元預算，是全國最大的濕地復育工程，主要利用老街溪出海口的淤沙回填魚塢，達到挖填平衡，完全不用外來土方，並利用潮汐變化自然引入海水(如圖 4)，新增復育 22 公頃的濕地面積。值得一提，原訂 2018 年 12 月開工，但因考量迴避冬候鳥過境期間造成干擾，特別調整工期順延至 2019 年 4 月。此外，為了配合潮汐每天僅 4-5 小時可施工，短時間投入大量人力挖填土方達 9.9 萬立方公尺，並藉由控制高程，無需外加任何動力，讓濕地隨著海水潮汐自然感潮。同時利用土壤晶化處理方式，增加保水力，讓濕地於海水退潮後仍維持 30 公分以下適合水鳥覓食的水深。除此之外，營造生態陸島，提供水鳥自然的棲息育雛空間，並於引水涵管增設攔污柵，除可防止垃圾隨著海水入侵濕地外，同時作為生物廊道，以利生物通行。另再特別引進 1.2 萬方優質沃

土，遍植 5 萬株濱海植物，營造生態多樣性。



圖 4 許厝港濕地復育工程規劃設計構想

## 三、許厝港濕地復育工程七大特色

利用老街溪出海口的淤沙回填，達到挖填平衡完全不用外來土方，並採取「以鳥為本」的生態工法，利用潮汐變化自然引入海水，新增復育大約 22 公頃的濕地面積，具體內容摘要如下：(如圖 5)

- (一) 調整工期：原訂 107 年 12 月順延至 108 年 4 月開工，迴避冬候鳥過境期間 以免造成干擾。
- (二) 挖填平衡：配合潮汐每天僅 4-5 小時可施工，短時間投入大量人力挖除老街溪出海口 5 萬方淤沙及魚塢現地調整 4.9 萬方，以達到工區範圍內挖填平衡。
- (三) 生態陸島：營造生態陸島，提供水鳥自然的棲息空間。
- (四) 控制高程：無需外加任何動力，讓海水隨著潮汐自然感潮。
- (五) 土壤晶化處理：增加保水力，形成 30 公分以下適合水鳥覓食的水深「牛犁田、鳥覓食」。
- (六) 植栽綠美化：引進 1.2 萬方優質沃土，遍植 5 萬株濱海植物 營造多樣化的生態環境。
- (七) 引水攔汙：引水涵管增設攔污柵，防止垃圾隨著海水侵入濕地造成污染。



圖 5 許厝港濕地採用七大特色的生態工法，成功復育 22 公頃

綜觀，過去被佔用 2、30 年的非法魚塭能在短短半年內收回，並順利開工之關鍵原因歸納如下：(如圖 6、7)

(一) 與國產署合作收回土地

國有財產署協助向法院申請阻止土地佔用人執行魚塭回填廢土，並經臺灣桃園地方法院同意依現況還地，無需回填，以免濕地變死地。

(二) 與占用戶溝通搬遷

將心比心給予佔用人緩衝時間，待其漁貨收成後再行搬遷，讓整個拆遷過程平和圓滿。

(三) 爭取民意支持：

接受桃園市野鳥學會建議，為免水鳥過境期間造成干擾，順延至 4 月冬候鳥離開後再開工，並於開工前在大園貴文宮辦理「許厝港國家級重要濕地總體營造社區說明會」，直接向里民說明，爭取民意支持。

(四) 與環團合作：

積極與桃園野鳥學會合作，於許厝港濕地北側選定一處約 1 公頃的裸露灘地，透過設置圍網及放置假鳥，做為二級保育類小燕鷗的育雛棲地。



圖 6 許厝港濕地復育前遭長期佔用興建魚塭



圖 7 許厝港濕地生態復育工程完工後，成功營造出 22 公頃濕地面積

## 四、結論

許厝港濕地生態成功復育後，接下來就要落實管理工作，讓每年來此過境的候鳥，感受我們的熱情與善意。為了阻隔遊客及攝影人士過度靠近，騷擾候鳥棲息及覓食，2020 年 10 月在候鳥最愛老街溪出海口泥灘地設置木樁圍籬。同時委託桃園市野鳥學會，如有發現民眾違規行為，立即勸導制止，如不聽規勸，則通知海巡署北部分署第八岸巡隊派員前來驅離取締。

許厝港濕地生態復育工程於 2020 年 1 月完工後，到訪的鳥種與數量都有顯著成長，經實際觀測 2020 年第一季候鳥單日觀察數量 1,402 隻相較 2019 年同期候鳥單日觀察數量 261 隻成長幅度大於 5 倍，2019 年 11 月更首次觀察到稀有冬候鳥冠鷺鷥、禿鼻鴉、黃頭鵝鵝，歷年觀測鳥種紀錄達 231 種，鳥友們雀躍不已，驚呼許厝港濕地已回復到 15 年前的盛況。

## 參考文獻

1. 內政部(2018)「許厝港重要濕地(國家級)保育利用計畫」，第 56-59 頁。



# 桃園市海岸場館活化轉型為里海環境教育設施場所之地方實踐-以桃園海岸五大環境教育場域為例

林獻祥<sup>1</sup> 江佩儒<sup>2</sup> 徐榮崇<sup>3</sup> 簡雯潔<sup>2</sup>

<sup>1</sup>群威行銷顧問有限公司

<sup>2</sup>桃園市政府海岸管理工程處

<sup>3</sup>臺北市立大學

## 摘要

桃園市具有不少海岸生態亮點，並積極建置海岸環境教育場域。然場域經營除了政府政策推動，更必須結合在地社區、團隊及學校，方能永續經營場館。本文以桃園海岸五大環境教育場館為例，以兩大面向導入社區參與以及生態教育推廣，分別為社區團隊及場館營運輔導、社區及場館的活動行銷，期能提供各地在海洋環境教育場館經營之參考。

關鍵詞: 海岸環境教育

## Program of Local Revitalization and Social Practice in Taoyuan Coastal Environmental Education Institutions

Hsieh-Hsiang Lin Pei-Ru Chiang Jung-Chung Hsu Wen-Chieh Chien\*

\* Section Head, Office of Coast Administration Construction, Taoyuan

## ABSTRACT

Taoyuan City has a wealth of coastal ecological education highlights and is actively establishing a coastal ecological education field. However, venue management, in addition to government policy promotion, must also integrate local communities, teams and schools in order to sustainably operate venues. Based on this article, the large-scale Taoyuan Coastal Environmental Education Center community participates, uses blood-sucking to guide the community and ecological education promotion, respectively for team and venue operation guidance, community and venue marketing, and hopes to provide a reference for the operation of the event center in the marine environmental education venue..

Keywords: Coastal Environmental Education

## 一、前言

### 1.1 場域介紹

桃園海岸擁有獨特景觀及豐富之自然地景生態，包含濕地、沙丘、藻礁、石滬等四大生態亮點，而沿海過去有著許多老舊建物，近年來透過桃園市政府海岸管理工程處的整修，活化為藻礁生態環境教室、

海洋客家牽罟文化館、新屋石滬故事館及草漯沙丘地景展示館，市府並積極經營管理許厝港國家級重要濕地，資分別概述如下：

#### (1)藻礁生態環境教室

位於桃園市新屋區，其前身為封閉 10 餘年的永興垃圾掩埋場，市府重視藻礁保育，於 107 年將掩埋場活化轉型為藻礁生態環境教室，於 108 年 7 月啟

用。館舍以實物觀察、感官體驗、多媒體互動等方式進行藻礁生態教育，提供民眾免費參觀，並配合潮汐時間實地進行藻礁及潮間帶生態觀察，使藻礁生態環境教室成為富有教育意義之海岸環境教育場域。市府亦結合新屋區永興社區發展協會共同經營管理，輔導培育在地生態解說人員進行在地連結。

#### (2)海洋客家牽罟文化館

位於桃園市新屋區，於 109 年 6 月開館啟用，原為軍方的海防基地，其角色歷經「好客莊園」後，107 年桃園市海岸管理工程處接管並投入經費，於 109 年配合推廣海洋客家文化，轉型作為「海洋客家牽罟文化館」兼遊客中心使用。並與海洋客家休閒農業區積極合作，推動各種行銷活動及農事體驗，帶動新屋休閒農業發展。

#### (3)新屋石滬故事館

早期為警察哨所及宿舍的蚵一哨所，經重新改造轉型為新屋石滬故事館，以寓教於樂的方式，傳承新屋百年石滬文化，提供石滬修築體驗，另市府預計於 112 年將現有的 11 座石滬全部修復完成並全數登錄為文化景觀，其場域委託新屋愛鄉協會經營管理，帶動周邊海洋文化產業。

#### (4)草漯沙丘地景展示館

桃園市府依文化資產保存法於 109 年公告草漯沙丘為地質公園，場域為荒廢已久的觀音濱海遊憩區遊客中心重新翻修，活化作為沙丘地景的環教場館，館內有草漯沙丘主視覺模型、大事紀、沙丘生態系知識牆、沙丘地形學、用數字看沙世界、臺灣地質公園介紹、海洋生物保育等 7 大主題展示，另外場館附設廁所、洗腳池及熱水淋浴間提供戲水遊客盥洗。本場域並與桃園市觀音區樹林社區發展協會結合，推動在地發展。

#### (5)許厝港國家級重要濕地

此處為國家級重要濕地，因河流水系發達、河口地形發育良好，包括礫石和沙灘的潮間帶，是冬候鳥、夏候鳥南北遷徙過程中的重要休息站，因此被國際鳥盟評定為重要野鳥棲地(IBA)。已於 109 年 8 月由桃園市大園區環協協會向行政院環境保護署環境保護人員訓練所提出環境教育設施場所認證申請，以觀察濕地鳥類、認識濱海植物、介紹沿岸景觀變化、探索舊港遺跡、鰻苗架地景藝術等主題規劃環境教育課程，希望讓更多民眾認識許厝港國家級重要濕

地的特殊性。並結合區內內海國，成立「許厝港濕地生態教室」。

前述五大場域有以下幾個特點：

- (1)以舊有館舍進行場域活化，藉以節省公帑。
- (2)搭配在地協會組織或學校，齊力推動在地實際與共榮。
- (3)市府積極協助海岸景觀的塑造與海洋文化的保存。
- (4)發展之場域除了海洋旅遊主題，並兼具海岸環境教育，市府並積極協助環境教育場域認證。

## 1.2 里海環境教育

里海(satoumi)概念，是繼里山(satoyama)後在日本被提倡的概念，里山的目標在追求森林和農村的社會與生態的生產地景，里海則追求海岸地區的社會與生態的生產海景。其重要核心精神在人與海的結合，須透過人為的經營管理而使漁業資源及生物多樣性得以恢復並可永續利用。桃園市於 110 起已開始建置「里海學堂」，針對該市海岸生態亮點開設不同主題之海岸環境解說課程，遴選具有取得環境教育人員認證的桃園市民受訓取得海岸生態解說員資格，再由市府安排擔任海岸生態旅遊的專任解說員，提供遊客高品質的解說服務。

## 二、執行策略與方法

由前述可知，桃園市政府近年已積極厚植海岸環境教育之硬體配套，並透過推動里海環境教育之軟體配套，推動環境教育場域之認證，以及在地環境教育人員之綁定。

本文闡述之執行方法目的其一，將以生態旅遊、教育環境、社區參與為重點，橋接現有資源，串連場館空間。其二，透過地方實踐的方式，結合當地社區及業者，同時輔導培力經營場館能力、維護學習環境，以實際真正的保育行動提升民眾的生態意識，作為環境教育永續發展進程之重要里程碑。主要執行策略可參考圖 1。策略分為以下四個階段，(1)紀錄、盤點，(2)分析、輔導，(3)增能、形塑，(4)亮點聯合推廣，如下：

- (1)紀錄、盤點

記錄場域相關的人事管理環境整理、設施維護、教育安全等資料，並分析其可進行之後改善的規劃項目。

### (2)分析、輔導

針對場所分析出需調整的項目，建立專業的顧問群，與社區經營管理團隊共同商討出實質的改善方式，並取得最終環境教育場所認證，及輔導場館通過評鑑考核。過程中會安排社區業務觀摩其他環教場所，於其進行交流和研討活動，累積相關管理的經驗。

### (3)增能、形塑

以雙語培訓導覽人員實際演練的教案之一，以及納入生態遊程開發體驗的項目中，強化場館的能量。加上結合不同類型的在地業者與廠商，發展出不同的環境教育生態遊程主題提供遊客選擇，以及開發新的文創商品。藉由以上方式來形塑各場館獨特的風格。

### (4)亮點聯合推廣

與在地不同產業的業者合作，共同導入資源，例如：提供導入電子套票系統與網頁，協助後續民眾在環境教育生態遊程選購上，能夠方便操作與使用，藉此吸引遊客前來桃園海岸遊玩。加上召開活動記者會、發放文宣品以及製作宣傳影片，強化活動宣傳的力度與曝光。

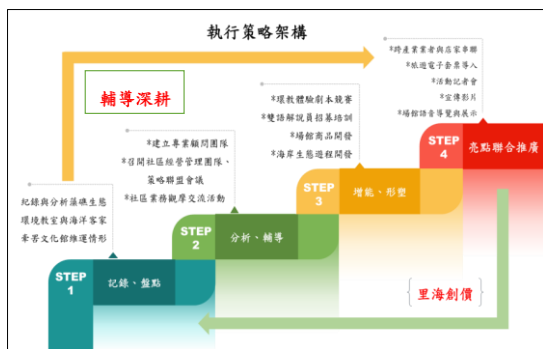


圖 1、執行策略

## 三、執行成果

本研究計畫在 108 年至 110 期間，致力於輔導社區能夠有能力管理與經營場館的能力，自從 108 年度開始，在社區辦理三場次的培力工作坊，再到

109 年度來到六十場次，培力對象以海岸場館及環境教育場域社區經營管理團隊為原則，並輔導各工作坊社區團隊分別完成藻礁、沙丘、石滬、牽罟文化與濕地生態遊程開發，各 1 條線，以及試營運與經營管理，並協助社區團隊完成擬定經營管理公立基金草案並作試營運。另規劃場域介紹影片腳本，建立場館形象與知名度；開發場館伴手禮商品，增加場館社區獨立自主能力；另未來也規劃建置場域語音解說服務或展示，提供參觀的遊客做使用，了解場域的生態環境與人文歷史。

### 3.1 場域遊程開發

在 110 年延續工作坊的任務，強化場域的競爭力與特色，這段期間，替場館規劃增能方案，包括籌備雙語解說員培訓課程，編制英文解說課程教材，培訓出優秀的雙語導覽員，開拓國際市場；生態旅遊電子套票，目前已經設計出 13 種不同場館或場館串聯的遊程內容，而其中每個場域最具代表性的遊程主題如下表，提供遊客多元化的體驗內容。如表 1。

表 1 各場域之體驗遊程設定

場域	遊程名稱	主題
許厝港濕地	許厝港生態&文化之旅	自然環境與歷史文化的深度旅遊
海洋客家牽罟文化館	看海吹風的日子、拾起牽罟	場館客家農事體驗，搭配觀光工廠
草漯沙丘地景展示館	擁抱沙與海、拾起大地	沙丘地質解說，搭配當地熱門體驗。
新屋石滬故事館	百年石滬 綠色踏青	生態環境教育的教案內容
藻礁生態環境教室	藻礁生態、後湖溪獨木舟	場館生態導覽，搭配當地農場和熱門泛舟活動。

### 3.2 環境教育場域認證輔導

市府積極推動環境教育場域認證，並於 108 年 12 月底公開徵選出桃園市大園區環保協會、桃園市觀音區樹林社區發展協會、桃園市新屋區永興社區發展協會、桃園市新屋區海洋客家休閒農業發展協會與桃園市新屋區愛鄉協會為桃園市海岸環境教育

設施場所認證申請夥伴。另為促進海岸場館之活化，並促進地方創生、落實環境教育功能及提升服務品質與效益，擬與各社區簽訂經營管理協議書，以確保雙方合作之權利與義務。

於 110 年 4 月「海洋客家牽罟文化館」已取得環境教育設施場所認證(如圖 2)，成為桃園海岸第一個環境教育設施場所，達成桃園里海環境教育的重要里程碑，其餘四個場域也正等待審查結果。



圖 2 海洋客家牽罟文化館認證證書

另為推動持續性自我管制，桃園市政府海岸管理工程處刻正擬定桃園市海岸場館評鑑計畫，成為受評場館未來在資料準備上的依據，提供評鑑委員在評鑑時的價值參考方向，後依據該計畫執行評鑑考核。定

### 3.3 場館經營輔導

#### (1)紀錄場館維運情形維運情形

依場館實際經營管理方式，紀錄場館營運管理事項，包含環境教育活動成果、場館參觀人數統計、環境清潔維護管理、場館設備與設施維護修繕、安全維護等辦理情形，110 年部分成果如表 2。

表 2 場館參觀人數統計

場館	藻礁生態環境教室	海洋客家牽罟文化館
月份	參觀人次	參觀人次
3月	1159	1750
4月	1456	2301
5月	375	1890
6月	0	0
7月	24	110
8月	458	2000
9月	481	4385
合計	3953	12436

#### (2)安全維護及紀錄

因為場館所辦理的課程無可避免有親水性與 DIY 實作的相關內容規劃，因此依職業安全衛生法第 32 條第 2 款規範，雇主對勞工(本案係指工作人員)應施以從事工作與預防災變所必要之安全衛生教育及訓練。以下分就親水性課程安全措施操作準則與 DIY 課程安全措施操作準則，相關活動示意如圖 3。



圖 3 安全維護訓練

#### (3)場館聯盟會議

辦理海岸場館經營管理聯繫會議 3 場次。參加對象為藻礁生態環境教室、海洋客家牽罟文化館、許厝港國家級重要濕地、草漯沙丘地景展示館及新屋石滬故事館等社區經營管理團隊主要幹部及相關人員，藉由業務聯繫會議，協助各協會建立場館經營管理機制、培育各協會建立場館經營管理能力。並加強各社區經營管理團隊與桃園市海岸管理工程處聯繫機制與溝通管道。

#### (4)輔導場館社區經營管理團隊開發商品

透過與在地團隊開會討論，具體設定開發項目與內容主題，其部分成果如圖 4。



圖 4 商品開發案例

## 四、結論與建議

桃園市在推動海岸環境教育方面已有初步之成效，以下就相關執行經驗進行分享。

- 1.有關閒置空間之活化再利用，其成敗關鍵在於與當地利害關係人之連結，在桃園市的五大海岸環境教育中，均導入相關組織參與運作，以地方實踐出發，方能實踐里海價值。
- 2.在地組織協會的本質學能提升，有助於場域經營的優化，桃園市府導入多項人員培力計畫，分別就場域經營、遊程設計、伴手禮開發等項目進行輔導，讓場域經營者能獲得利益導入，方能永續。
- 3.有關於場域經營的制度化，市府規劃與國家環境教育認證接軌，同時並導入場域經營評鑑制度，佐以經營輔導及考評，有助於場域自我品質管控。
- 4.里海價值在於人與海的尊重與結合，市府並開設里海學堂等課程導入，並以雙語導覽培訓及導覽員菁英培訓為目標，期能使桃園市海岸教育場館經營邁向國際化。

## 謝誌

本文得以完成，感謝桃園市政府海岸管理工程處計畫經費提供，以及各海岸教育場館人員及協會通力協助，特此謝忱。

## 參考文獻

1. 桃園市政府海岸管理工程處網頁，  
<https://www.tyoca.gov.tw/%e6%b5%b7%e6%b4%8b%e6%95%99%e8%82%b2/%e7%92%b0%e5%a2%83%e6%95%99%e8%82%b2%e8%a8%ad%e6%96%bd%e5%a0%b4%e6%89%80/>
2. 桃園市政府海岸管理工程處，「110 年度桃園市社區參與海岸環境教育輔導推廣計畫」期中報告。
3. 桃園市政府海岸管理工程處，「109 年度桃園市海岸場館設施經營管理暨社區參與推廣計畫」期末報告。

# 探討海洋文化景觀傳承與永續經營之策略 -以新屋石滬為例

李悅瑞<sup>1</sup> 林立昌<sup>1</sup> 王雅慧<sup>1</sup> 吳亭<sup>2</sup> 呂蘋恩<sup>2\*</sup> 呂儼展<sup>2</sup>

<sup>1</sup>桃園市政府海岸管理工程處

<sup>2\*</sup>興展創意數位有限公司

## 摘要

新屋石滬存續超過百年，受到現代化漁業影響，石滬漁業逐漸沒落，修滬耆老日益凋零，如何傳承修滬技藝是石滬文化面臨的嚴肅課題。2019 年 4 月 8 日桃園市政府依文化資產保存法將新屋蚵間石滬群 2、3、6 號石滬登錄為文化景觀，2020 年完成新屋蚵間石滬群文化景觀保存維護計畫，2021 年開始執行。自 2019 年起委託桃園石滬協會修復新屋區蚵間里石滬，2020 年起委託桃園市新屋區愛鄉協會修復新屋區深圳里石滬，並委託協會經營管理新屋石滬故事館推廣海岸環境教育，並向行政院環保署申請環境教育設施場所認證。為達到三生(生態、生活、生產)共存共榮亦無損於未來世代需的理想，市府持續在符合聯合國 2030 永續發展目標核心價值下進行新屋漁滬文化推廣與海岸永續經營。

關鍵詞：新屋石滬、文化景觀、傳統漁法、海岸永續經營

## Exploring Marine Culture Landscape Asset Inheritance and the Strategy of Sustainable Management – Taking Xinwu Stone Weirs as an Example

Yue Ruei Li Li Chang Lin Ya-Hui Wang Ting Wu Pin-En Lu\* Yan Chan Lu

<sup>1</sup>Office of Coast Administration Construction, Taoyuan

<sup>2\*</sup>KingSpread Co.

## ABSTRACT

Xinwu Stone Weirs exists for over a hundred years. However, the fishing industry's productivity here is seriously impacted by the modern fishing technology. Thus, the fishing economy declined and those who build and restore stone weirs are missing gradually. Inheritance of stone weirs building techniques is a serious issue. On April 8<sup>th</sup> in 2019, No. 2, 3 and 6 stone weirs in Kejian Village was declared by Taoyuan City government as a cultural landscape heritage based on cultural heritage preservation act. In 2020, a mangement guidelines on the conservations of Xinwu stone weirs was completed and started to be implemented since 2021. Since 2019, Taoyuan City government has commissioned Taoyuan Stone Weirs Association to restore stone weirs in Kejian. Since 2020, Taoyuan City Xinwu District Association was also commissioned to repair stone weirs in Shenzun Village and meanwhile operate Xinwu Stone Weirs Story House to promote coast environment education and even aim to acquire certification of environmental education facilities and venues. To reach co-prosperity of environment, life and economy and not to affect the needs of future generation, Taoyuan City government continues to promote Xinwu stone weirs fishing culture and coast sustainable management in line with UN 2030 Sustainable Development Goals.

Keywords: Xinwu Stone Weirs; Cultural Landscape; Traditional Fishing; Coast Sustainable Operation

## 一、前言

新屋石滬存續超過百年，1960 年代以前，沿海居民大部分靠人力在沿岸捕魚為主，先民取材當地並利用海岸自然條件進行漁獲採集，僅少數以小型動力機械於近海作業。受到現代化漁業之影響，加上工業污染，致使漁業逐年萎縮，看天吃飯的石滬漁業逐漸沒落，因年久失修而難以保存完整，在修滬耆老日益凋零下，修滬技藝如何傳承，是石滬百年文化面臨的嚴肅課題。

在桃園市政府支持之下，經過多方單位的共同努力，自環境及文化保存之面向著手，凝聚地方共識並且本著在地經營的初衷，整合地方團體辦理各式海洋文化與環境教育的體驗推廣活動，本文將探討在符合聯合國「2030 永續發展目標」之核心價值之下，如何兼顧新屋漁滬文化推廣與海岸永續經營，達到三生(生態、生活、生產)共存共榮，得以持續發展活化，帶動地方創生與永續經營的新契機。

本府文化局於 2013 年執行「桃園縣新屋石滬基礎調查研究計畫」，以本市新屋區沿海現存 9 口石滬進行基礎調查研究，蒐集文獻史料及口述歷史等資料，對新屋石滬定義其形態為弧形石堤的畚箕滬，並查閱國史館臺灣文獻館收藏《臺灣總督府公文類纂》，爬梳漁業免許狀與現行石滬使用人之相關性與連結後進行田野調查，尋覓保有修建石滬技術之長者。經比較新屋石滬與澎湖及其他地區(如苗栗合歡、母乃石滬，新北三芝新庄里石滬、石門麟山鼻石滬等)石滬後，定義新屋石滬之價值為：(1)表現人類與自然互動具有文化意義；(2)具紀念性、代表性或特殊性之歷史、文化、藝術或科學價值；(3)具時代或社會意義。

文化部文化資產局於 2017 年完成針對全島石滬之《石滬文化資產普查計畫成果報告書》，將石滬的構造元素、滬堤結構以及集魚功能等 3 個指標作為評估石滬修復再利用的依據，並列出評鑑等級(A 至 D 級)，而新屋蚵間石滬群中的 2 號及 6 號石滬被列為 B 級，為「值得修復」的石滬，屬維持較為完整的構造型態與持續修滬的狀態，3 號雖被列為 C 級，為「暫不修復」的石滬，無法捕魚僅有殘跡，然而其基礎維持了早期傳統構造形式，仍極具

代表性。

桃園新屋石滬幾乎都是家族合作建造的，即「一戶一滬」，由家族成員共同管理，具有形文化資產保存價值，桃園市政府將新屋蚵間石滬群 2、3、6 號石滬於 2019 年 4 月 8 日依據文化資產保存法公告登錄為本市文化景觀，於 2020 年 12 月 29 日完成新屋蚵間石滬群文化景觀保存維護計畫後開始執行保存維護內容。

## 二、執行方法

永續經營與傳承，必定得結合多元單位的專才與智識，包含中央單位與桃園市政府跨局處的整合協調，最重要的地方民間組織投入深化在地經營，並且導入學術團隊與其他組織的專業職能，加以協助地方組織與政府單位共同推動新屋石滬文化景觀的保存活化與修築體驗創生(圖 1)，透過六大循環項目：從石滬群修復、地方共識凝聚、深化在地經營、海洋文化與環境教育推廣、地方創生及生態旅遊到石滬不間斷的保存維護來達到目的。



圖 1 新屋石滬保存活化與修築體驗創生經營策略

### 2.1 石滬修復與保存維護

依據 1984 年航照圖可知，當時蚵間里共有 9 座石滬(圖 2)，經比對 2017 年航照圖後(圖 3)，市府於 2019 年重新繪測得出蚵間里 9 座石滬量測範圍(圖 4)，並自 2019 年起委託桃園石滬協會修復蚵間里 9 座石滬，並將修復過程拍攝記錄。

而新屋區深圳里依據《桃園縣新屋石滬基礎調查研究計畫成果報告書》，僅可辨識出 2 座石滬(圖 5)，因此自 2020 年起委託桃園市新屋區愛鄉協會進行修復新屋區深圳里石滬，亦將修復過程拍攝記錄。



(左)圖 2 1984 年蚵間里石滬群航照圖

(右)圖 3 2017 年蚵間里石滬群航照圖航照圖



(左)圖 4 蚵間里 9 座石滬量測範圍

(右)圖 5 深圳里 2 座石滬分布狀況(來源：桃園縣新屋石滬基礎調查研究計畫成果報告書，頁 74)

## 2.2 海洋文化與環境教育推廣及國際交流

### 2.2.1 辦理教育推廣活動

於 2019 年與桃園石滬協會及桃園市新屋區愛鄉協會合作，分別辦理共 2 場次推廣活動(圖 6 及圖 7)，藉邀請對石滬研究、推廣有興趣的專家、團體、學生共同參與，探討新屋石滬文化之緣起與分佈，讓參與民眾從在地文化著眼，認識漁業陷阱狩獵設施工法，綜觀人類文明歷史發展中的古老智慧—魚滬技藝，同時留存此珍貴的文化遺產與文化景觀如何推廣與永續保存。



圖 6 與桃園石滬協會合作辦理「石滬體驗 GO！」教育推廣活動

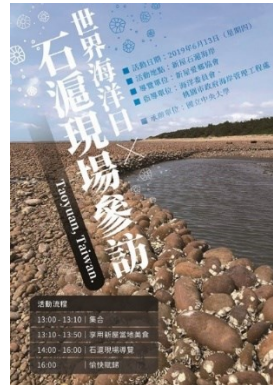


圖 7 與桃園市新屋區愛鄉協會合作辦理「石滬現場參訪」教育推廣活動

於 2020 年與桃園石滬協會合作辦理「新屋石滬捕魚趣」活動(圖 8)，邀請桃園市長鄭文燦與新屋蚵間石滬群 9 座石滬及深圳 2 座石滬代表人祈福祭拜，並請市長於感恩石上簽名落款後，由耆老指導堆疊於石滬堤上，象徵為石滬祈福及奠基；並於活動中安排民眾組成之石滬體驗團與市長不期而遇，營造新屋石滬充滿年輕活力、老少閒宜的戶外休閒形象。



圖 8 與桃園石滬協會合作辦理「新屋石滬捕魚趣」教育推廣活動

於 2021 年與桃園市新屋區愛鄉協會合作辦理 10 梯次「一日石滬修築匠師青年工作假期」(圖 9)，傳承修滬技藝工法解說並結合戶外實作的方式，在過程中加入海岸環境教育解說與體驗，將這些主題融入工作假期內容，將青年能量吸引進入新屋在地，促進地方發展，期許未來青年工作假期能夠成為常態性協助新屋石滬保存維護的能量，啟發青年在地深耕發展的意願，延伸出地方創生的更多可能。





圖 9 與桃園市新屋區愛鄉協會合作辦理「一日石滬修築匠師青年工作假期」教育推廣活動

### 2.2.2. 辦理新屋石滬國際交流研討會

與中央大學合作，於 2019 年辦理 1 場次新屋石滬國際交流研討會(圖 10)，交流各方對石滬之研究與保存、推廣，了解國際上石滬研究的成果與問題。思考石滬文化未來發展以及可以深入研究的領域，促進各團體日後合作推廣石滬的可能。



圖 10 2019 新屋石滬國際交流研討會宣傳海報

### 2.2.3 申請環境教育設施場所認證

為永續經營桃園海岸及推廣海岸環境教育，將早期為警察哨所及宿舍的蚵一哨所，改造轉型為新屋石滬故事館(圖 11)，委託桃園市新屋愛鄉協會經營管理，並向行政院環保署申請環境教育設施場所認證。



圖 11 蚵一哨所轉型為新屋石滬故事館介紹人與石滬產生的漁滬文化

## 2.3 環境資源調查

《桃園縣新屋石滬基礎調查研究計畫成果報告書》透過實地觀察及耆老訪談得知，石滬漁業全年

均有漁獲，惟當季節風強烈或颱風過境後，漁獲種類較多，以鱈仔魚、魷仔魚、白帶魚、斑鱗、赤鯨、雞魚、石狗公、鮑仔、石斑等及其他雜魚為主。2013 年共紀錄到 8 種底棲類生物以及 23 種魚類。

為紀錄現今新屋石滬環境生態現況，市府於 2021 年於新屋石滬群每 3 個月內進行 1 次生物調查(最末次未足 3 個月以 1 次生物調查計)，含附著性藻類、大型無脊椎底棲生物、底棲生物、魚類、兩棲類、軟體動物、浮游生物等，共設置至少 10 個點位。

## 三、結果與討論

### 3.1 修滬成果

桃園石滬協會於在地耆老帶領協會成員、耆老兒孫輩、蚵間里民下，自 2019 年至 2021 年已陸續修復完成蚵間 5 座石滬(圖 12 至 16)及維護 1 座石滬(圖 17)，空拍影像清晰可見其排列方式呈現魚鱗狀(圖 18)。其中 3 號石滬於 2020 年修復期間曾遇魚汛期，退潮時協會成員以牽網方式捕獲達 1000 多斤之石首魚科魚類(圖 19)，2021 年間於 1 號、2 號、3 號石滬亦多次捕獲達上百斤漁獲，顯示蚵間石滬經修築後，其捕魚功能已逐漸恢復。



(左)圖 12 文化景觀 6 號石滬於 2019 年修復完成

(右)圖 13 文化景觀 3 號石滬於 2020 年修復完成(來源：桃園石滬協會)



(左)圖 14 蚵間 1 號石滬於 2020 年修復完成

(右)圖 15 蚵間 5 號石滬於 2021 年 7 月修復完成



(左)圖 16 蚵間 4 號石滬於 2021 年 10 月修復完成  
(右)圖 17 文化景觀 2 號石滬由桃園石滬協會協助維護



(左)圖 18 新屋蚵間石滬群已清晰可見魚鱗狀排列  
(來源：桃園石滬協會)

(右)圖 19 文化景觀 3 號石滬於修復期間捕獲上千斤漁獲

此外，為拍攝青年投入新屋蚵間石滬群之修滬技藝傳承過程、修滬技藝者訪談等畫面呈現石滬文化之深度內涵，2020 年亦完成「新屋石滬修復紀實」紀錄影片(圖 20)，藉由影像紀錄呈現相關知識，讓民眾透過畫面進而瞭解石滬文化之美，將珍貴的在地文化以有溫度的影像持續保留下去。



圖 20 2020 年製作「新屋石滬修復紀實」將修滬技藝以影像方式傳承

蚵間里沿岸具較寬闊之潮間帶地形，其平均低潮線位置距離陸地最遠可達 400 公尺，深圳里石滬量其平均低潮線位置距離陸地最遠僅達 200 公尺，其石滬承受沿岸流能量較蚵間里石滬大，修復難度亦提高許多。桃園市新屋區愛鄉協會亦由在地耆老帶領協會成員進行深圳 1 號石滬修復，已於 2021 年完成修復，並於部分滬堤進行造型變化，塑造成具有祥龍意象之地景藝術(圖 21)。



圖 21 深圳 1 號石滬 2021 年修復完成並於部分滬堤進行造型變化

## 3.2 海洋文化與環境教育推廣及國際交流成果

### 3.2.1 新屋石滬教育推廣活動成果

自 2019 年起至 2020 年，由桃園市政府與地方協會共同策劃辦理之三場石滬體驗參訪活動，主要著重在新屋石滬現地的導覽解說與體驗早期石滬以手拉曳網或手叉網捕魚的過程，總計 367 人次參與，除此之外，地方協會亦自主辦理多場收費性體驗或與鄰近學校合作推出戶外教學，多管齊下不僅凝聚在地學子對石滬之認同，也向外擴及鄰近縣市的國人。

自今年度起，更將體驗活動擴及石滬修築主題，辦理一日石滬修築匠師青年工作假期(圖 21 至 22)，自 2021 年 8 月 5 日起至 2021 年 9 月 18 日止共辦理 10 梯次體驗課程，共計 85 人次參與，並邀請桃園市長鄭文燦與網路知名青年共同擔任體驗師，拍攝宣傳影片(圖 23)，透過市長與青年們社群媒體曝光，總計超過 4 萬人次觀看。



圖 21 辦理一日石滬修築匠師青年工作假期

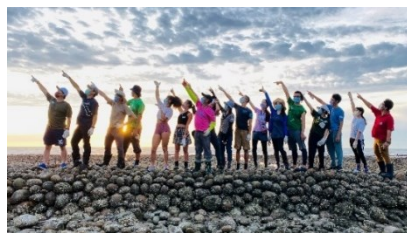


圖 22 辦理一日石滬修築匠師青年工作假期



圖 23 鄭文燦市長與青年合拍宣傳影片

### 3.2.2 2019 新屋石滬國際交流研討會成果

本次以新屋石滬為焦點所舉辦的國際交流研討

會，目的是集結跨國專家，與相關政府機關、學術團體、石滬團體、環教團體及民眾，交流各方對石滬之研究與保存、推廣經驗，瞭解國際間石滬研究的成果與問題，促進整體對日後新屋石滬推廣發展的可能性思考。本場活動總共邀請五位包含台灣、美國與日本三國之石滬研究專家學者進行分享，吸引將近 200 位參與者一同關注石滬文化的存續。

### 3.2.3 申請環境教育設施場所認證

新屋石滬故事館已於 2021 年 3 月 22 日正式開館，除傳承新屋石滬文化核心外，亦融合環境教育意義，場館於 2021 年 4 月 15 日已完成環境教育設施場所認證初審會議，預計於 2021 年底取得環教場所認證。

自開館日起至今年 7 月底止(其中自 5 月 18 日起至 7 月 27 日因新冠肺炎疫情休館)，已累計達 1 萬 2,000 人次參訪，館內 1 樓展示石滬模型及文物，並透過在地青年協助開發的「掌上新屋」APP，民眾可一窺新屋在地特色及石滬知識，結合 AR 科技模擬實際漲退潮時間，體驗石滬捕魚的樂趣；2 樓「海創客」教室以環境永續為主軸，將淨灘的海洋廢棄物經適當處理後，轉化成為珍貴的創作材料，讓民眾 DIY 自製實用物品或具美感的藝術品(圖 25)，從手作體驗引發民眾對於海洋及土地的愛護，將環保行動融入休閒旅遊之中，讓民眾身心都有收穫；頂樓為露天戶外空間，除能在開闊的自然景致中澈底放鬆，還能品嚐由經營團隊結合在地特色所開發的創意料理，如鹹醃飯糰、客家鹹豬肉潛艇堡(圖 26)、蔓荊鮮奶茶、海鹽檸檬等。



(左)圖 24 結合海廢與石滬堆築概念之 DIY 體驗



(右)圖 25 結合新屋客家飲食文化的鹹豬肉潛艇堡

## 四、結論

為達到永續經營，過程中的諸多選擇不免拉扯，沒有足夠誘因、支持與願景，可能缺乏意願，在保存文化景觀與推動環境教育的過程，現實層面，必然需要產業經濟的支持。近年，“創生”是個非常

容易被提及的詞，要達成必須創新、創造，找出在地地方發生的供應與消費新機會，達到共榮共生的目的，投入人力資源在保存石滬文化景觀，也就是三生中的「生態」，將石滬漁業經濟轉化成體驗式經濟，達到「生產」，並結合在地人「生活」，發展地方特有的活動，讓造訪新屋的外地人以休閒遊憩的方式體驗在地生活。

短期內，桃園市政府更朝向建立新屋石滬創生品牌形象，透過 CI 識別系列設計，結合在地故事開發文創商品，包裝生態遊程商品，結合新屋周邊產業鏈，協助生態系內業者改善其經濟模式，從推廣模式轉型成商業模式，讓在地具備自我經營的多元能力。

此外，不僅是與在地匠師合作修復維護石滬、辦理石滬修築匠師體驗，更希望可以將匠師職人化，提升身為石滬修築匠師的榮譽感，打造新屋石滬成為全台第一傳授在地匠技藝的青年國際工作假期，吸引更多青年新進或迴游到新屋此地，不論是從事石滬修築或是經營其他事業，充實「食」「學」「宿」「購」等產業元素，真正開始活絡地方。

回顧整個推廣傳承的過程，不免會有許多困難，時時刻刻提醒投入其中的關係團體，回到文化景觀的初衷，石滬乃人類與自然環境互動所留下的珍貴文化資產，她是過去先民觀察自然潮汐漸漸發展出來的智慧象徵，現在我們也將秉持這樣的智慧，以石滬故事與人情溫度帶領新屋石滬走向下一個里程碑。

## 謝誌

本文獻給所有投身新屋石滬活化創生的相關單位，最重要的是協助修復石滬，奠定整個地方活化創生基石的兩個地方協會團體：桃園市新屋區愛鄉協會、桃園石滬協會，沒有匠師們潮汐間的辛勤汗水，就沒有這個案例分享，此外還要感謝中央單位與桃園市政府跨局處的協助、學術團體及其他組織參與其中，貢獻所長，方能砌築起整個計畫策略。

## 參考文獻

1. 桃園縣城鄉不動產協會(2013) *桃園縣新屋石滬基礎調查研究計畫成果報告書*，桃園縣文化局。
2. 澎湖海洋文化協會(2017) *石滬文化資產普查計畫成果報告書*，文化部文化資產局。

## 近十年來桃園河川與海岸水體品質探討

陳平<sup>1</sup> 周瑋珊<sup>2</sup> 康兆凱<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水工試驗所副研究員

<sup>2</sup> 國立成功大學水工試驗所助理研究員

<sup>3</sup> 國立成功大學水工試驗所副研究員

### 摘要

應用整合性水體品質評估指數分析桃園河川與海岸水質狀況，由河川污染指數(RPI)可知，桃園市 6 條河川水體品質，整體多屬於中度污染(2011.01~2021.08)，其中以南崁溪污染程度相對最高，且 RPI 整體呈現從南崁溪至福興溪，由北往南遞減之分布，此外重金屬銅仍有超出地面水體分類水質標準中，保護人體健康相關環境基準。而桃園沿海水體品質，透過海岸水體品質指數(CWQI)分析，無論於北桃園沿海南崁溪至老街溪海域，以及南桃園沿海接近觀音溪口海域，其 CWQI 於多屬於普通等級，進一步檢視其中以水質指標 DIP 均達紅燈警示可知，桃園沿海水體中磷酸鹽濃度，長期存在偏高現象，需要有整體性的營養鹽管理策略來改善其水質。

關鍵詞：河川污染指數、海岸水體品質指數、營養鹽管理策略

## An Assessment of River and Coastal Water Quality around Taoyuan in the Last Decade

Ping Chen<sup>\*</sup>, Wei-Shan Chou, Chao-Kai Kao

<sup>\*</sup> Associate Researcher, Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

The integrated water quality assessment index is used to analyze the water quality of Taoyuan's rivers and coasts. According to the River Pollution Index (RPI), the water quality of the 6 rivers in Taoyuan City is mostly moderately polluted (2011.01~2021.08), while the pollution level of Nankan River is relatively Highest. The overall RPI shows a decreasing distribution from Nankan River to Fuxing River from north to south. In addition, the heavy metal copper still cannot meet the water quality standards for the classification of surface water relevant environmental standards pertaining to protection of human health. Besides, according to the analysis of the coastal water quality index (CWQI) shows mostly at the fair level. Furthermore, inspection of the coastal water quality indicator DIP reached the red light warning degree. It reveals the concentration of phosphate in the coastal waters of Taoyuan has been on the high side for a long time, and a holistic nutrient management strategy is essential to improve water quality.

Keywords: river pollution index; coastal water quality index; nutrient management strategies

### 一、前言

桃園自然海岸線全長約為 21 公里，而桃園海岸藻礁分布北起大園區竹圍漁港，向南延伸至新屋區永安漁港。現生藻礁主要分佈在三個藻礁海域：由北到南分別為白玉藻礁、大潭藻礁及觀新藻礁，

以觀新藻礁面積為最大。藻礁本身之多孔隙礁體具有極佳的消波功能，再者，藻礁與珊瑚礁交錯成長，乃地質學、氣候變遷研究之好題材，因此藻礁生態系是絕佳的環境教育場域。

影響桃園海岸之藻礁生態系之兩大主要因素

(林、陳，2017)，一為淤沙之掩埋覆蓋；二為污水的排放。另由南桃園藻礁海河水系水生無脊椎動物多樣性與社區保育計畫(邱、陳昭倫，2018)指出，桃園五條水系調查(大堀溪、觀音溪、小飯廳溪、新屋溪及社子溪)，發現河川水體中之有機質偏高造成水質不佳，藻礁生態可能受到影響。藻礁生態系與其棲地環境之水體品質息息相關，當來自河川與海岸之水質污染，例如桃園沿海工業區與畜牧廢水及民生生活污水，倘若未經妥善處理而排放，將嚴重造成桃園海岸藻礁棲地之污染與生態之退化，甚至消失。所以需要透過完善之長期環境水體品質調查，以及整合性資料數據分析評估，方能有效深入進行河川及海域水質對藻礁生態之影響評估，以利檢視人類活動與工業開發在氣候變遷情勢下之可能衝擊，即早提出預警與因應。

## 二、研究方法

本研究主要係透過收集海保署與環保署及桃園市環保局近十年來長期水質人工採樣分析之監測資料，以統計方法及地面水體品質指數評估，進行桃園地區河川與海岸水體品質分析，探討其水體品質狀況與污染程度及其變動趨勢。最後提出桃園海岸藻礁棲地整體水體品質評估結果，並提出後續監測作為之建議。

### 2.1 河川水質評估

桃園河川水質污染程度分析採用「河川污染指數」(River Pollution Index, RPI)，同時分析比較全臺 19 個縣市之河川水質狀況，以瞭解桃園河川水質之特性與其差異。RPI 指數係以水中溶氧量(DO)、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、懸浮固體(SS)、與氨氮(NH<sub>3</sub>-N)計四項水質參數之濃度值，來計算所得之指數積分值，並據此判定河川水質污染程度；河川水質污染程度共可分為未受/稍受污染、輕度污染、中度污染及嚴重污染，此乃目前用來評估河川水質之綜合性指標(表 1)。計算方式如下：

$$\text{河川污染指數(RPI)} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 S_i$$

式中，S<sub>i</sub> 為污染點數，i 為水質項目，RPI 積分值(S) 介於 1~10 間，2.0 以下代表未(稍)受污染，高於 6.0 以上為嚴重污染。

表 1 河川污染指數(RPI)計算及比對基準

水質/項目 濃度 (mg/L)	未(稍)受 污染	輕度污染	中度污染	嚴重污染
溶氧量 (DO)	DO ≥ 6.5	6.5 > DO ≥ 4.6	4.5 ≥ DO ≥ 2.0	DO < 2.0
五日生化 需氧量 (BOD <sub>5</sub> )	BOD <sub>5</sub> ≤ 3.0	3.0 < BOD <sub>5</sub> ≤ 4.9	5.0 ≤ BOD <sub>5</sub> ≤ 15.0	BOD <sub>5</sub> > 15.0
懸浮固體 (SS)	SS ≤ 20.0	20.0 < SS ≤ 49.9	50.0 ≤ SS ≤ 100	SS > 100
氨氮 (NH <sub>3</sub> -N)	NH <sub>3</sub> -N ≤ 0.50	0.50 < NH <sub>3</sub> -N ≤ 0.99	1.00 ≤ NH <sub>3</sub> -N ≤ 3.00	NH <sub>3</sub> -N > 3.00
點數	1	3	6	10
污染指數 積分值 (S)	S ≤ 2.0	2.0 < S ≤ 3.0	3.1 ≤ S ≤ 6.0	S > 6.0

註：表中積分值為點數之平均值

### 2.2 海域水質評估

美國環保署針對國家海岸評估水質指數(National Coastal Assessment Water Quality Index, NCA WQI)，係採用溶解無機氮(Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN)、溶解無機磷(dissolved inorganic phosphorus, DIP)、葉綠素 a(Chlorophyll a, Chl.a)、溶氧量(Dissolved Oxygen, DO)及清澈度(Water clarity, WC)或透明度(Transparency-Secchi disk, SD)此五項參數，每項指標再依門檻值區分為良好(good)、普通(fair)，以及不良(poor)三等級，用以評估美國海域生態資源，其中無機氮(DIN)、溶解無機磷(DIP)、溶氧量(DO)與葉綠素 a(Chl.a)門檻值分級如下(表 2)。

表 2 海岸水體品質指數(CWQI)分級門檻值

USEPA NCA	WQI	點 數	DIN	DIP	DO	Chl.a
			(mg/L)			(µg/L)
良好 <sup>#</sup>	Good	1	< 0.35	< 0.01	> 5.0	< 5
普通 <sup>#</sup>	Fair	2	0.35~0.5	0.01~0.05	2.0~5.0	5~20
不良 <sup>#</sup>	Poor	3	> 0.5	> 0.05	< 2.0	> 20
CWQI(S)積分值為點數之平均值						
良好	1					
普通	>1~<3					
不良	3					

註：<sup>#</sup>參照美國國家海岸情勢報告(National Coastal Condition Report, NCCR VI，美國環保署，2012年)之水質指標門檻值。

桃園海域水體品質係參考美國整合性海岸環境監測與評估方式，以美國環保署自 2005 年起選擇之

5 大指數中之水質指數(Water Quality Index, WQI)，並藉由紅綠燈號交通號誌概念以海岸水體品質指數(Coastal Water Quality Index, CWQI)呈現海岸水體品質之等級。計算方式如下：

$$\text{海岸水體品質指數(CWQI)} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 W_i$$

式中， $W_i$  為水質指標點數， $i$  為水質項目，CWQI 積分值(S)介於 1~3 間，1 代表良好，介於 1~3 之間為普通，等於 3 則代表水體品質不良。

### 三、結果與討論

透過環保署-全國環境水質監測資訊網河川水質監測，以及海保署海洋保育網(iOcean)海域相關水質監測資料查詢下載，桃園地區河川與海域水質長期監測站位置如圖 1，河川流域與海域測站名稱等如表 3，其中河川分布由北往南包含大漢溪、南崁溪、茄苳溪、老街溪、社子溪與福興溪計 6 條，而海域水質 5 處監測站包含介於南崁溪口外與老街溪口外間之海湖電廠、新南崁溪口、沙崙中油卸油設施二與沙崙中油卸油設施一測站，以及南桃園鄰近大潭藻礁北側觀音溪口測站。

#### 3.1 河川水質

桃園地區河川水質依「海域環境監測與監測站設置辦法」規定，氫離子濃度指數(pH)、導電度、溶氧量、生化需氧量、懸浮固體、氨氮，每月監測一次；重金屬每季監測一次。

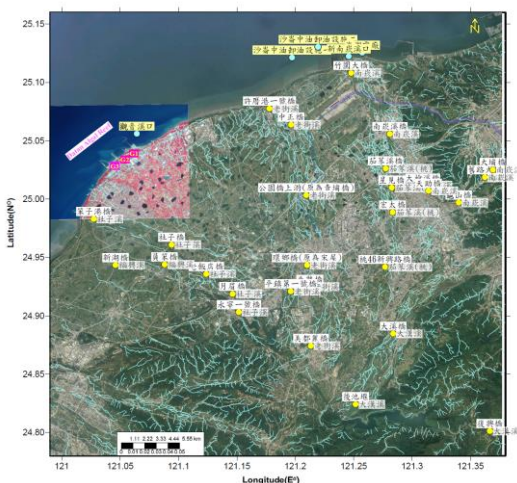


圖 1 桃園地區河川與海域水質監測站分布

表 3 桃園地區河川與海域水質監測站

	採樣分區	河川	測站名稱	分類等級	
桃園河川	1	淡水河流域	大漢橋	乙	
	2		後池堰	乙	
	3	南崁溪流域	舊路大橋	丙	
	4		龜山橋	丙	
	5		大樟溪橋	丙	
	6		南崁溪橋	丙	
	7		竹圍大橋	丙	
	8		大埔橋	丙	
	9	天助橋	丙		
	10	南崁溪流域	茄苳溪	丙	
	11		茄苳溪(桃)	星見橋	丙
	12		茄苳溪橋	丁	
	13		桃 46 新興路橋	丙	
	14	老街溪流域	老街溪	美都麗橋	丙
	15			北勢橋	丙
	16			環鄉橋(原為宋屋)	丙
	17			公園橋上游(原為青埔橋)	丙
	18			中正橋	丙
	19			許厝港一號橋	丙
	20		平鎮第一號橋	丙	
	21	社子溪流域	社子溪	永寧一號橋	丙
	22			月眉橋	丙
	23			老飯店橋	丙
	24			社子橋	丙
	25			笨子港橋	丙
	26	福興溪流域	福興溪	貞茶橋	丙
	27			新湖橋	丙
桃園沿海海域	1	南崁溪流域	南崁溪口外	海湖電廠	乙
	2		新南崁溪口	乙	
	3		沙崙中油卸油設施二	乙	
	4	老街溪流域	老街溪口外	沙崙中油卸油設施一	乙
	5	觀音溪流域	觀音溪口外	觀音溪口	乙

由河川污染指數(RPI)顯示，桃園市大漢溪、南崁溪、茄苳溪、老街溪、社子溪與福興溪 6 條河川水體品質，整體多屬於中度污染(2011.01~2021.08)，各年度間無明顯特定變動趨勢(圖 2)。進一步分析其月份變動(圖 3)可知，每年枯水期 11 月~12 月與隔年 1 月~5 月期間 RPI 相對高於豐水期 6 月~10 月。此外就上述河川流域 RPI 空間分布相比，以相對上游之大漢溪水質較佳，多屬於未(稍)受污染至輕度污染程度，而南崁溪則相對污染程度最高，顯示南崁溪水體受到較多有機污染負荷，且 RPI 整體呈現從南崁溪至福興溪，由北往南遞減之分布(圖 4)，6 條河川平均 RPI 計算結果如表 4 所列。

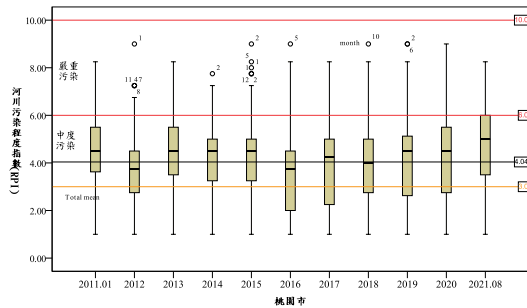


圖 2 桃園地區河川水質污染程度(RPI)年統計分布

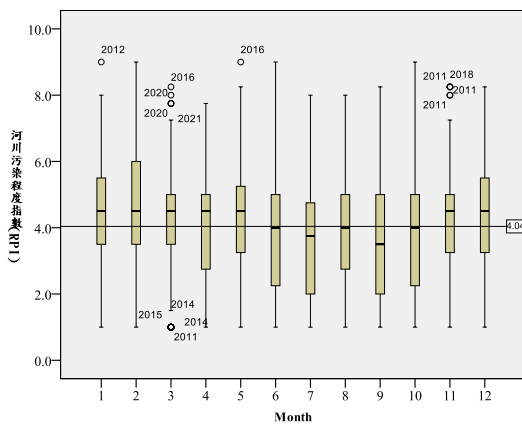


圖 3 桃園地區河川水質污染程度(RPI)月統計分布

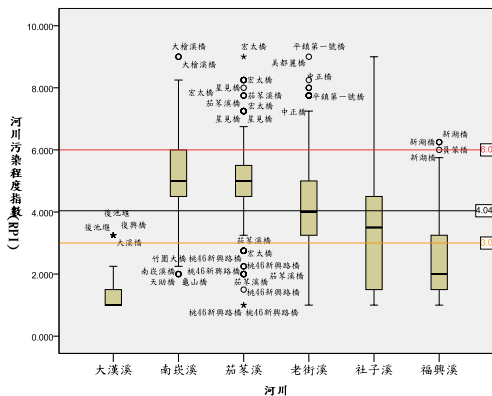


圖 4 桃園地區河川水質污染程度(RPI)統計分布

再者，進一步利用紅綠燈號顏色概念，結合河川污染指數(RPI)與四分項水質指標，依序以綠燈代表未(稍)受污染，黃色燈為輕度污染，橘色燈為應注意之中度污染，紅燈則為嚴重污染方式，呈現桃園市大漢溪至福興溪 6 條河川水質長期平均受污染程度狀況可知，南崁溪、茄苳溪與老街溪水體氨氮濃度偏高導致水質不佳；社子溪以生化需氧量與氨氮

濃度略高；福興溪則呈現生化需氧量濃度略高之污染特性，而 6 條河川整體平均 RPI 顯示中度污染，且以氨氮相對偏高、生化需氧量亦略偏高(圖 5)，應列為改善桃園河川水體品質優先管控之可能污染源，以及檢討削減之污染量。

表 4 桃園地區河川水質 RPI 平均

	2011.01-2021.08		點數				污染情形
	平均	RPI	DO	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	
1 大漢溪	1.309	1	1	3	1	未(稍)受污染	
2 南崁溪	5.276	1	6	3	10	中度污染	
3 茄苳溪(桃)	4.856	3	6	3	10	中度污染	
4 老街溪	4.072	1	6	3	10	中度污染	
5 社子溪	3.345	1	6	3	6	中度污染	
6 福興溪	2.453	1	6	3	3	中度污染	
總平均	4.044	1	6	3	10	中度污染	

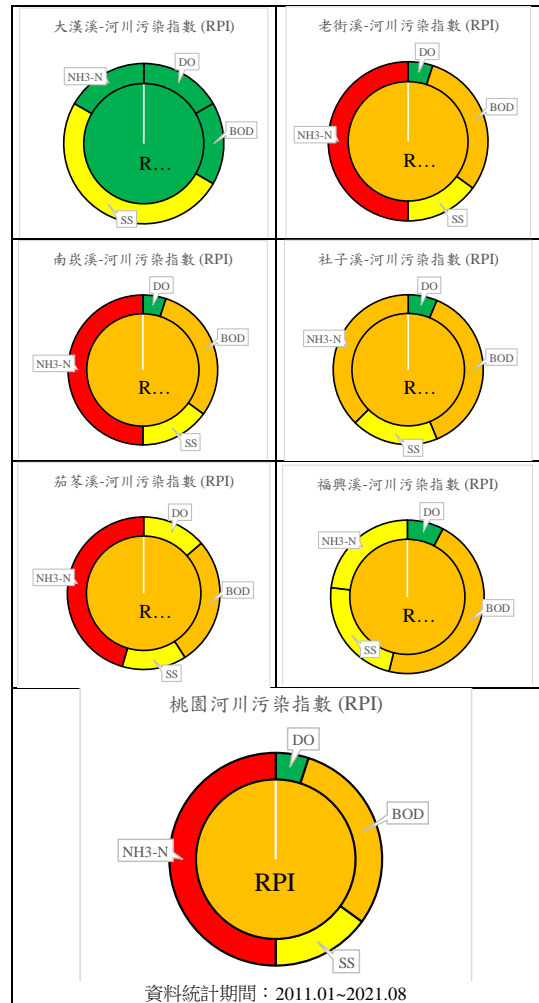


圖 5 桃園地區河川平均污染程度指數與污染指標

重金屬方面以銅而言，桃園地區河川整體雖有改善，但仍有超出地面水體分類水質標準中，保護人體健康相關環境基準(Cu: 0.03 mg/L)，河水中銅之長期平均濃度(0.0371 mg/L 2011.01~2021.08)高於地面水限值(圖 6)。

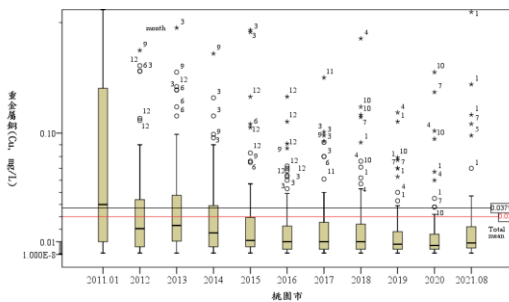


圖 6 桃園地區河川水質重金屬銅年統計變化

### 3.2 海域水質

依「海域環境監測與監測站設置辦法」規定，台灣海域的監測採樣頻率，原則為每季一次，每季監測水溫、pH 值、鹽度、溶氧、懸浮固體、葉綠素 a 與重金屬的汞、鎘、鉛、銅、鋅等 11 項，每年監測氨氮、硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮、磷酸鹽、矽酸鹽、總磷、氰化物、酚類、礦物性油脂、鉻、大腸桿菌群及鋁等 12 項，共計 23 項水質監測項目。

以近 11 年來(2010.01~2021.06)之環保署與海保署海域水質監測數據，除水溫與溶氧量呈現季節性變化外，透過海岸水體品質指數(CWQI)顯示(圖 7)，桃園沿海水體品質無論於北桃園沿海南崁溪至老街溪海域，以及南桃園沿海接近觀音溪口海域，其 CWQI 於多屬於普通等級(Fair: 95.5%)，進一步檢視其中以該指數中之水質指標 DIP 均達紅燈警示可知，桃園沿海水體中磷酸鹽濃度，長期存在偏高之現象，由桃園沿海水質磷酸鹽濃度年變化趨勢(圖 8)顯示，整體海域水質平均濃度( $PO_4\text{-P}$ : 0.0704 mg/L)已高於地面水體分類水質標準與海域環境分類及品質標準中，保護生活環境相關環境基準之總磷總磷上限(TP: 0.05 mg/L)。以鄰近南崁溪之新南崁溪水質正磷酸鹽之磷濃度相對曾出現異常偏高，以正磷酸鹽對鹽度呈現負相關可知(圖 9)，南崁溪口近岸海域水體主要可能來自南崁溪與鄰近河川排水所影響，此亦反映出桃園地區 6 條河川中南崁溪水質總磷濃度相對最高之特性，當陸源河川富含營養鹽淡水大

量流入鄰近沿海時，將導致鹽度降低而營養鹽例如總磷濃度增高。此同樣可呈現在河川總磷濃度與導電度負相關之特徵。

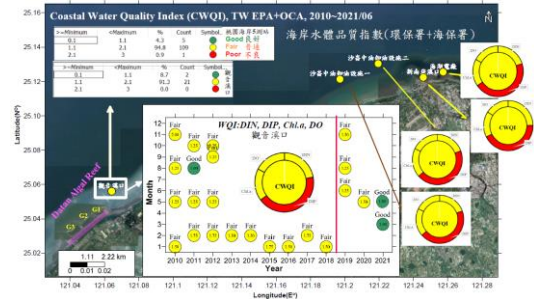


圖 7 桃園海岸水體品質指數(CWQI)

因此若能針對其可能之排放來源藉由河川進入海洋前，加以進一步管控及削減，將能降低近岸水體富營養化之潛勢，同時有助於提升桃園海岸藻礁生態系之水體品質。

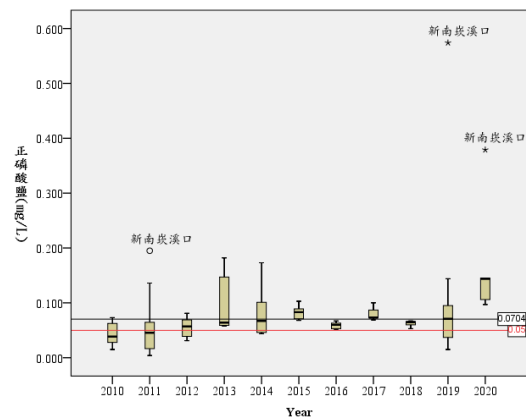


圖 8 桃園海岸水體磷酸鹽濃度年統計變化

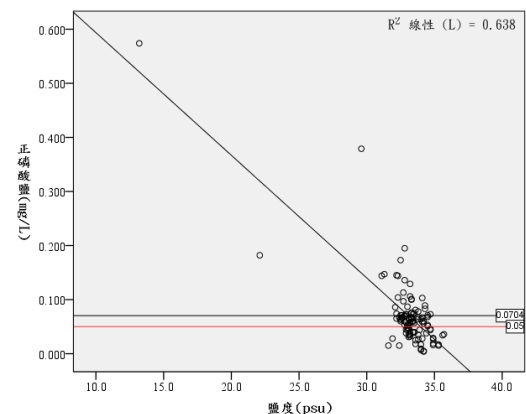


圖 9 桃園海岸水體磷酸鹽濃度與鹽度關係



#### 四、結論

環境水體水質監測為國家水質保護與生態保育之根基，透過長期監測數據統計分析，並採用合適之評估指數，有助於評量環境保護施政作為之成效，並作為政策法規滾動檢討修訂之參據，更能提供環境水質變異之預警功能，以預防水體品質惡化。利用紅綠燈號顏色概念，結合河川污染指數(RPI)與四分項水質指標，以及海岸水體品質指數(CWQI)分級方式，透過水體品質綜合性指數與單項水質指標評估，藉由視覺化圖式可以更清楚展現桃園地區河川與海域水質，長期以來整體之污染程度與沿海水質優劣狀態。桃園海岸水體除水溫(圖 10)與溶氧量主要仍受到大自然變化而呈現週期性變化。

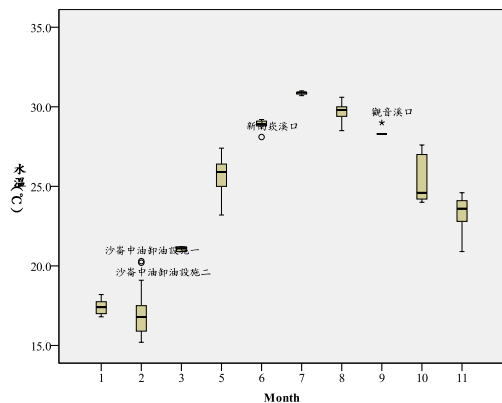


圖 10 桃園海岸水體水溫月變化

此外，受到鄰近河川注入營養鹽類中過多之磷的影響，導致桃園海岸水體品質指數整體屬於普通等級，而其中以 DIN 指標之磷酸鹽濃度，有長期偏高之現象，為避免過量營養鹽排入海岸地區，引發優養化甚至有害藻華之危害，就必須有好的營養鹽管理策略，工程技術的困難可以解決，但若沒有明確的政策支持與配套措施，到最後終將失敗。

因此，成功的營養鹽管理策略或行動計畫應包含以下四個步驟(Andersen, 2012)：

1. 具有標的支持之政策；
2. 可執行之配套措
3. 監測與評估；
4. 適當的反饋迴路至政策階層

最後並透過適性管理(adaptive management, AM)，以及生態系統管理(ecosystem-based management, EBM)，以生態系統方法(ecosystem approach, EA)來管理人類活動。桃園海岸藻礁生態

系統之健康維護非常重要，為求能夠實現可以永續發展利用的生態系統服務功能，以及維護生態系統完整性，面對河川富營養化造成沿海水質污染問題，其優養化管理策略，需以生態系統為出發點，而不單以單一物種或僅侷限在經濟魚種，才能維持生態多樣性的發展，如此的管理策略才能成功。

#### 參考文獻

1. 陳平、劉大綱、陳厚宇 (2013) 「應用綜合評價法與衛星水色葉綠素濃度分析台灣近岸環境優養化潛勢」，第 35 屆海洋工程研討會論文集，國立中山大學，第 453-458 頁。
2. 林幸助、陳章波 (2017) 「有效保育桃園藻礁生態系的宏觀思維」，科學月刊/科技報導，2017 年 11 月號，431 期，第 4-6 頁。
3. 邱郁文、陳昭倫 (2018) 「藻」回南桃園的里山海：南桃園藻礁水圈環境生態對社區生活產業的影響」-計畫四、南桃園藻礁海河水系水生無脊椎動物多樣性與社區保育，第 181-224 頁。
4. Andersen, J.H. (2012) Ecosystem-Based Management of Coastal Eutrophication-Connecting Science. Policy and Society Ph.D. thesis. 54 pp.
5. Chen P. SU B.R. LIU T.K. and KANG C.K. (2017) Established Coastal Environment Condition Assessment off Yunlin, southwestern Taiwan, ICCEE2017, Tainan, Taiwan.
6. Liu T.K Chen P. and Chen H.Y. (2015). Comprehensive assessment of coastal eutrophication in Taiwan and its implications for management strategy, Marine Pollution Bulletin, 97, 440-450.
7. NCCR, (2001) Why Are Coastal Waters Important? National Coastal Condition Report, United States Environmental Protection Agency Press, Washington, D.C., 205 .
8. NCCR, (2012) National Coastal Condition National Coastal Condition Report IV, United States Environmental Protection Agency Press, Washington, D.C., 334.



## F.劉院士榮譽特輯



# 長衝程造波機應用於連續孤立波生成、 演化及溯升之試驗研究

吳昀達<sup>1\*</sup> 劉立方<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系 助理教授

<sup>2</sup>新加坡國立大學土木及環境工程系 特聘教授

<sup>3</sup>國立成功大學水利及海洋工程學系 客座特聘講座教授

## 摘要

科技部計畫：108-2218-E-006-053-MY3

長波於近岸水域之水動力特性，長久以來為海岸工程學者專家所關注，尤以釐清溯升及溢淹過程為重，因其與安全息息相關。本研究意欲以實驗室中之長衝程造波機，探討連續孤立波之生成與演化及其於光滑斜坡之溯升，其中斜坡坡度為 1/10。連續孤立波之生成以單一孤立波造波理論為基礎，並延伸至產生連續六個以特徵波長作為相鄰兩波週期之孤立波，再將實驗量測結果與理論解比較，以釐清如此作法之準確程度。連續孤立波溯升則透過擷取最大溯升高及平均溯升高以探討其差異性，且研析不同波浪非線性孤立波之溯升是否能達穩定。於末，藉由週期波碎波參數以分析其與單一孤立波及週期波之相關性，冀期提出單一化之溯升公式，以整合不同類型波浪溯升之估算。

關鍵詞：溯升、連續孤立波、沖刷互制、水工模型試驗

## Generation, Evolution and Runup of Successive Solitary Waves Using a Long-Stroke Wavemaker – An Experimental Study

Yun-Ta Wu<sup>\*</sup> Philip L.-F. Liu

<sup>\*</sup> Assistant Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

Understanding long-wave induced hydrodynamics in terms of runup and inundation processes are of great importance for coastal engineering community because they are closely related to safety issues. In this study we aim to employ a long-stroke wavemaker to experimentally investigate the generation, evolution and runup of successive solitary waves on a uniform slope. Based on the generation procedure for a single solitary wave, we extend this algorithm to generate six successive solitary waves separated by one effective wave period of the solitary wave tested. Measured data are compared with the theoretical solutions of solitary wave to confirm the accuracy of the generated waves. Both maximum and spanwise-averaged runup heights are analyzed to show the asymptotic runup heights of successive solitary waves. Using the surf parameter originally designed for periodic waves, the runup height data of successive solitary waves is analyzed to correlate with the runup heights of a single solitary wave and periodic waves, aiming to propose an empirical runup formula to unify the runup estimation for different types of waves.

Keywords: Runup; Successive solitary waves; Swash-swash interaction; Experiment

## 一、前言

海嘯溢淹及溯升長久以來為學者專家所關注，因其直接與海嘯防災及減災等安全議題息息相關(e.g., Liu et al., 2005)。自 1990 年代起，孤立波儼然成為探討海嘯於近岸區衍伸水動力特性的代名詞(e.g., Liu et al., 1991)。然而，孤立波並不同於海嘯，主要係海嘯於近岸時將演化成較高的波高水深比且波長仍極長，而根據理論解析，提升孤立波之波高水深比，其特徵波長反而變短，是以無法代表海嘯之長溢淹延時(e.g., Chan and Liu, 2012)。如此一來，是否代表長達近半世紀的孤立波相關研究均是枉然？

上述疑義實則不然，近期研究已指出孤立波及規則波溯升之相似性，意即孤立波溯升量測數據可用予延伸規則波溯升未盡之波浪及地形參數範圍(Wu et al., 2018)。再者，海嘯生成不僅以單一波峰形式存在，根據 2004 年南亞大海嘯及 2011 年日本東北地震引發海嘯之現地證據顯示，海嘯生成與傳播通常伴隨著數個波群，抑或以湧波方式存在(e.g., Madsen et al., 2008)。根據淺水波理論解析，若傳播距離夠長，湧波將會演化成一系列大小或許不等之連續孤立波(e.g., El et al., 2012; Peregrine, 1983)，意即此類型的長波與具波谷的週期性波列在物理意義上或許無法畫上等號。

於實驗室中產生孤立波需具備可瞬間加速及減速之造波機，冀期生成無尾波擾動效應之孤立波(e.g., Wu and Hsiao, 2018)。而產生連續孤立波，除須具備上述特點外，則須仰賴長衝程之造波機，衝程越長可產生之連續孤立波數量則越多(e.g., Wu et al., 2021)。或因需要較高規格之造波機，文獻上迄今僅侷限於探討兩個(e.g., Lo et al., 2013; Pujara et al., 2015)及三個連續孤立波(e.g., Rong et al., 2016)，若延伸探討溯升或沖刷帶等議題，既有實驗量測結果指出兩個及三個孤立波之溯升高均不同，意即尚未覓得連續孤立波溯升之相似性。

本研究透過新加坡國立大學所設置之長衝程造波機，以水工模型試驗的角度探討連續孤立波之生成、演化及於光滑斜坡溯升，意欲有系統地探討連續孤立波在波與波間複雜的沖刷帶互制之溯升高變化、尋覓其相似性並提出單一化溯升經驗公式。

## 二、研究方法

模型試驗於新加坡國立大學水利實驗室的造波水槽進行。該水槽 36.0m 長、0.9m 寬及 0.9m 深，水槽邊壁及底部以不鏽鋼板及玻璃構成，可進行基於光學及影像法之非侵入量測。水槽一端設有造波機，其衝程 5.0m 長，由高精度線性滑軌構成，可用以產生連續孤立波(e.g., Wu et al., 2021)及波長極長之湧波(e.g., Barranco and Liu, 2021)。水槽另一端設有光滑斜坡，由強化玻璃構成，斜坡坡度可調整，本研究以 1/10 坡度為主，詳如圖 1 所示。

連續孤立波的產生係以 Goring (1978)的孤立波造波理論為基礎，並引入高階之孤立波解析解(Grimshaw, 1971)，計算造波板作動軌跡。為簡化問題，本研究僅以一個特徵波長作為週期，以線性疊加單一孤立波造波板運動軌跡的方式，進而產生連續的孤立波列。詳細連續孤立波造波方式及流程可參閱 Wu et al. (2021)。

然當波浪自斜坡反射將會觸及造波板，造成二次反射，干擾後續波浪之產生。若考慮水深 20cm 及波高水深比 0.29 的條件下，摒除二次反射波的影響，在本研究使用的造波水槽內最多可產生九個連續孤立波。本研究主要以六個連續孤立波為主，探討波浪非線性的改變及其相對應溯升高之相關性。

自由液面變化時序列係透過四組電容式波高計及四組超聲波波高計量測，詳細波高計布設位址如圖 1。連續孤立波於 1/10 光滑斜坡之溯升則是透過 full HD 解析度之數位攝影機以 60fps 的頻率拍攝，並透過影像後處理程式的建立，擷取最大溯升高及平均溯升高，以利後續分析。其中，最大溯升高( $R_{max}$ )的定義為波浪於光滑斜坡上爬升至最高點之位置，而平均溯升高( $R_{avg}$ )則定義在最大溯升高的時刻將水槽側向之溯升高進行平均，如此可釐清水槽邊壁所造成之影響程度。因此，以定義上言之，平均溯升高必然小於或等於最大溯升高。

本文所呈現之實驗條件主要係分為兩部分：首先，連續孤立波產生的探討以水深 $h_0 = 30\text{cm}$ 、波高水深比 $H_0/h_0 = 0.30$ 為主，且此時未安裝斜坡，故波浪受斜坡影響造成波浪反射的因素可屏除不計；其二，溯升差異的探討將以水深 $h_0 = 20\text{cm}$ 為主，而波高水深比則介於 $0.19 \leq H_0/h_0 \leq 0.45$ 之間。

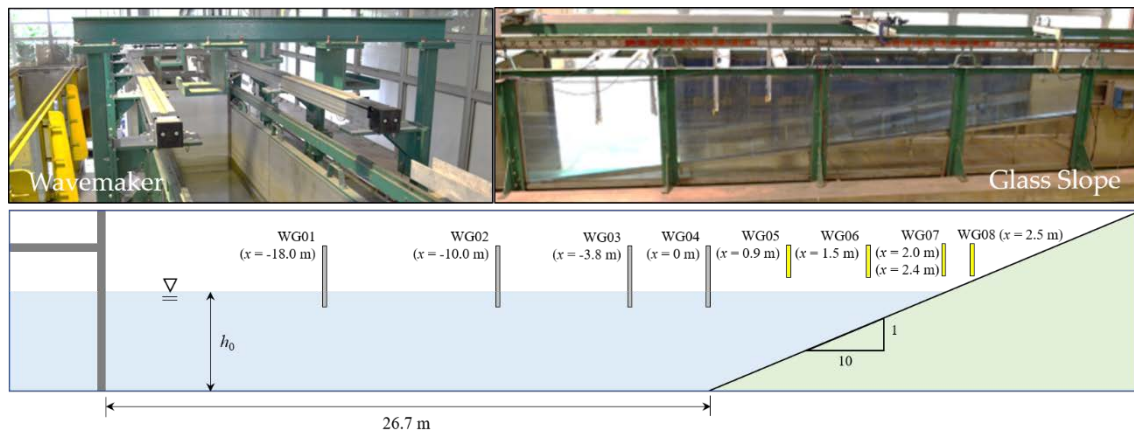


圖 1 長衝程造波機與試驗水槽及波高計布設位置示意圖

為釐清實驗誤差，每組波浪條件在相同的邊界情況下重複進行三至五次，並確認產生之波高差異小於 1.0%，方能使用予後續分析。重複試驗之量測結果則透過整體平均法求得平均之自由液面變化及量化溯升高。

然而，實驗室所生成連續孤立波之各個波高及週期無法全然相同，於此本研究參考 Lo et al. (2013) 之作法，求取連續孤立波各波高及波峰間隔進行平均，以得各實驗條件之平均波高及週期(或波長)，作為後續分析使用。根據所有實驗量測結果，在 WG02 波高計的量測點位上，各波高之最大標準差為 1.8% 之平均波高(同一波列各波高之平均值)，而週期之標準差為 1.6% 之平均週期(同一波列各週期之平均值)，分析結果顯示造波機可於水槽中準確地重現連續孤立波。

### 三、結果與討論

本文首先驗證前節所提之連續孤立波產生機制是否可適切地產生準確的連續孤立波。圖 2 為使用此長衝程造波機所產生連續孤立波之造波板運動軌跡及於水平底床所量測之自由液面時序序列，其中波浪條件為水深  $h_0 = 30\text{cm}$ 、波高水深比  $H_0/h_0 = 0.30$ 。本研究有系統地自單一孤立波逐次增加波浪數量，延伸至連續六個孤立波，探討其造波之準確性。自造波板運動軌跡可見，每欲增加一個波浪數，即在完成一次造波後，再線性疊加一次相同之造波板作動軌跡。此外，亦將實驗量測之自由液面變化與孤立波理論解(Grimshaw, 1971)進行比較。由於在本研究考慮的週期條件，意即任意相鄰兩孤立波之距離，

為一個孤立波特徵波長，於此可簡易地釐清連續孤立波之週期或波長是否準確，而與孤立波解析解比較，亦可釐清波形之準確程度。從圖 2 的比較可見，實驗結果與理論解相當吻合，表示造波機可產生相當準確之連續孤立波，並將用予延伸探討連續孤立波於斜坡上之演化，乃至於研析碎波帶與沖刷帶之水動力特性及最大溯升高與平均溯升高在不同連續孤立波波浪條件下之變化。

同樣地，溯升高的量測亦自單一孤立波逐次增加波浪數量，延伸至連續六個孤立波。連續孤立波的研究複雜之處在於，前一個波浪溯升完成後產生由重力驅使之溯降過程與下一個波浪之溯升過程互制之機制，即波與波間沖刷帶之互制(e.g., Chen et al., 2016)。以兩個連續孤立波言之，Lo et al. (2013) 根據其實驗結果彙整出三種案例，意即第二個溯升被前一個波影響之特性：當相鄰兩孤立波波峰足夠接近時，第二個波溯升會順沿第一個溯升而上，使得第二個溯升高大於第一個溯升高；當相鄰兩個孤立波距離足夠遠時，第一個溯降過程結束後，第二個波的溯升過程才開始，使得兩孤立波之溯升過程不受彼此間影響，而造成兩個溯升高約莫相等，且與單一孤立波溯升高雷同；若當第二個波溯升過程恰好與第一個波溯降過程的時間重疊，此將產生劇烈的沖刷帶互制，使得第二個波的溯升高遠小於第一個波的溯升高。Pujara et al. (2015) 則將其兩個連續孤立波的實驗成果分成兩種互制機制，分別是弱互制(weakly interacting case)及強互制(strongly interacting case)，前者呈現兩孤立波之溯升高相似，後者則顯示第二波造成之溯升高小於第一個溯升高。

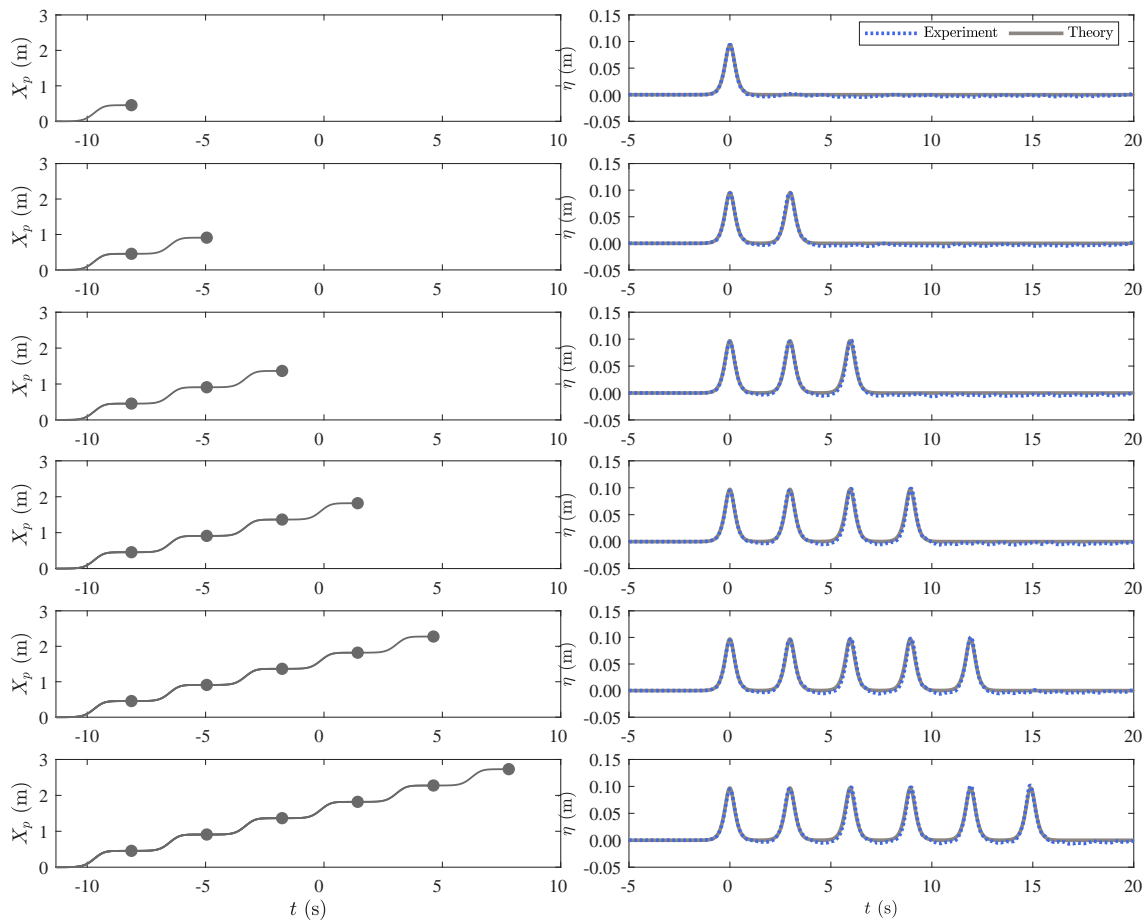


圖 2 連續孤立波之造波板運動軌跡(左欄)及相對應的自由液面變化時序列並與孤立波理論解(Grimshaw, 1971)比較(右欄)。圖由上至下列分別代表單一孤立波、連續兩個至連續六個孤立波，其中此組試驗條件水深 $h_0=30\text{cm}$ 、波高水深比 $H_0/h_0=0.30$

由於本研究考慮連續六個孤立波，為簡化分類冲刷帶互制特性，將根據溯升高之量測結果，僅分類為弱及強互制兩種機制。圖 3 呈現連續孤立波數量及其相對應無因次溯升高之關係，其中無因次溯升高以溯升高( $R$ )及等水深( $h_0$ )比值呈現之，即 $R/h_0$ ，且溯升高以最大及平均溯升高表示，以釐清兩種分析方式之差異性。圖 3(a)-(d)分別呈現不同的波浪條件，其中(a)  $H_0/h_0=0.19$ 、(b)  $H_0/h_0=0.29$ 、(c)  $H_0/h_0=0.39$  及(d)  $H_0/h_0=0.45$ ，而水深設為定值 $h_0=20\text{cm}$ 。從結果可見，逐次增加的波浪數量，在前的孤立波溯升無受到後續溯升的影響。若以波浪非線性分類， $H_0/h_0=0.19$  結果顯示六個孤立波破碎過程均屬洶湧型波碎波(surging breaker)，且溯升高幾乎一致，惟第二個溯升高較其他稍低，而最大及平均溯升高影響幾可忽略，故可分類為弱互制機制。

隨著波浪非線性增大，波浪破碎過程轉換成捲入型碎波(plunging breaker)，且各波的溯升高差異極大，如圖 3(b)-(d)。具體而言，第一個溯升高最大(與單一孤立波溯升無異)、第三個溯升高次之、第四至第六個溯升高幾乎持平、第二個溯升高最低，意即第二個溯升與第一個波的溯降互制強烈，而第四至第六個溯升過程則幾乎達平衡狀態，變化實則有限。因此，呈現於圖 3(b)-(d)的條件，可歸類為強互制機制。最大及平均溯升高的差異僅為 $0.78 \leq R_{avg}/R_{max} \leq 0.98$ ，顯示水槽側向邊界影響有限。

根據圖 3 的結果，所有連續孤立波波浪條件的溯升高在第四個波之後幾乎不變，因此可將此溯升過程視為平衡。若將第四至第六個溯升高進行平均，即可用予代表連續孤立波系統之漸近溯升高(asymptotic runup height)。



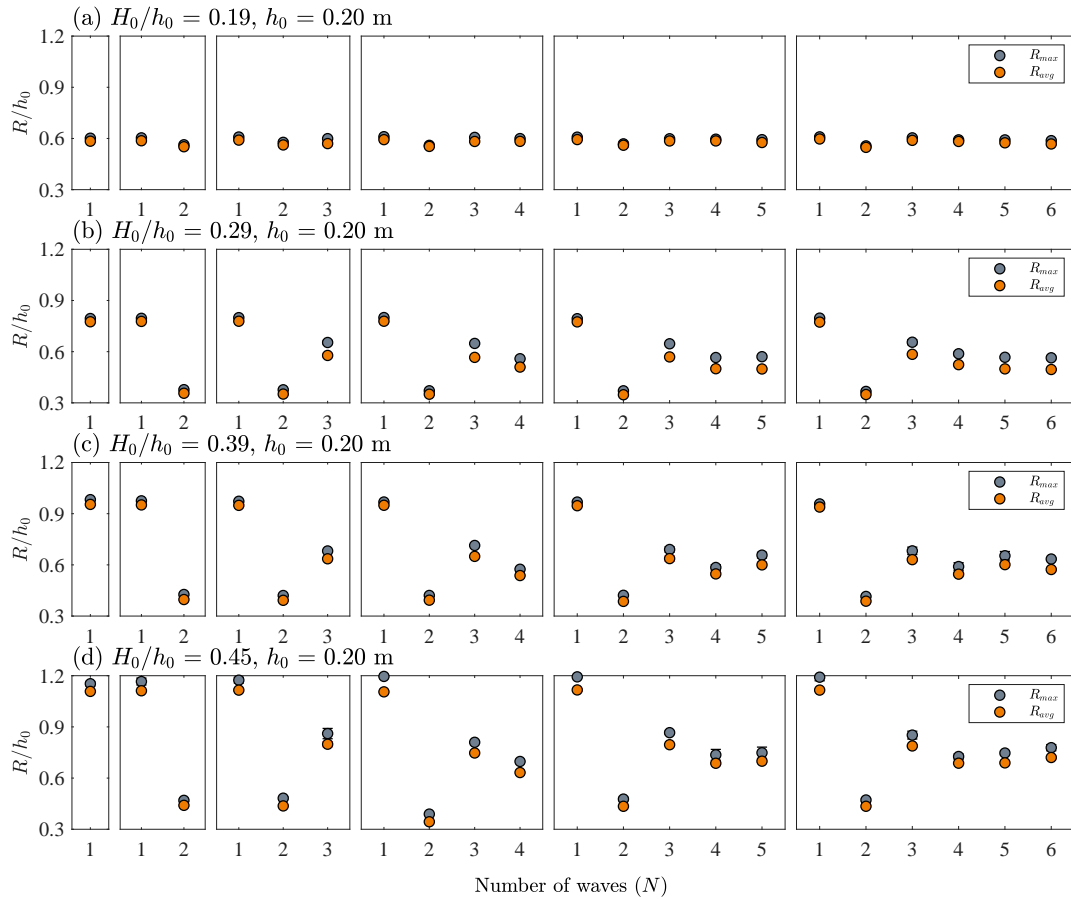


圖 3 無因次溯升高( $R/h_0$ )與連續孤立波數量之關係，其中溯升高以最大溯升高( $R_{max}$ )及平均溯升高( $R_{avg}$ )呈現。圖由左至右欄代表不同連續孤立波數量及其所對應之無因次溯升高，而由上至下列代表不同的波浪條件

Wu et al. (2018)重新定義孤立波及規則波之碎波相似參數，使孤立波及規則波溯升高均可用單一溯升公式(unified runup formula)描述。連續孤立波相鄰兩波之間距定義為週期，意即可將之視為具週期特性的波動。因此，本文以 Wu et al. (2018)之規則波碎波相似參數，以擬合連續孤立波之溯升高，如下式所示：

$$\xi = \frac{1}{\pi} \left[ s \left( \frac{H_0}{h_0} \right)^{\frac{2}{5}} \left( \frac{\omega^2 h_0}{g} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (1)$$

其中 $s$ 為坡度、 $H_0$ 為波高、 $\omega$ 為角頻率(= $2\pi/T$ ， $T$ 為週期)及 $g$ 為重力加速度，而溯升公式可表示為：

$$\frac{R}{H_0} = \frac{4.50\xi^{1.52}}{0.04 + \xi^{1.19}} \quad (2)$$

圖 4 即透過式(1)將本研究之連續孤立波溯升高數據[包含 Wu et al. (2021)所呈現水深 $h_0=0.24\text{m}$ 之量測結果]及 Wu et al. (2018)之單一孤立波與規則波溯升高數據整合，結果顯示吻合程度良好，意即連續孤立波之溯升高亦可透過式(2)描述。

#### 四、結論

本研究以長衝程造波機進行水工模型實驗，探討連續孤立波之生成、演化及於光滑斜坡溯升。基於單一孤立波之造波方式，透過線性疊加多次造波板之作動軌跡，即可於實驗室中產生連續孤立波。

以一個特徵波長作為相鄰兩孤立波之週期並以連續六個孤立波為本研究主軸，根據不同的波浪非線性，可將之分為弱及強沖刷帶互制機制，前者顯示各溯升高幾乎一致，即相互作用有限，後者則具強烈之互制過程，溯升高差異極大。然在第四個溯升之後，所有溯升高趨於平穩。於此，可將第四至六個孤立波溯升進行平均，將之視為漸近溯升高。

連續孤立波漸近溯升高可透過週期波碎波參數擬合，其結果與單一孤立波及週期波溯升高呈高度相關，因此可確認連續孤立波溯升高與單一孤立波及週期波溯升高之估算，適用於相同溯升經驗公式。

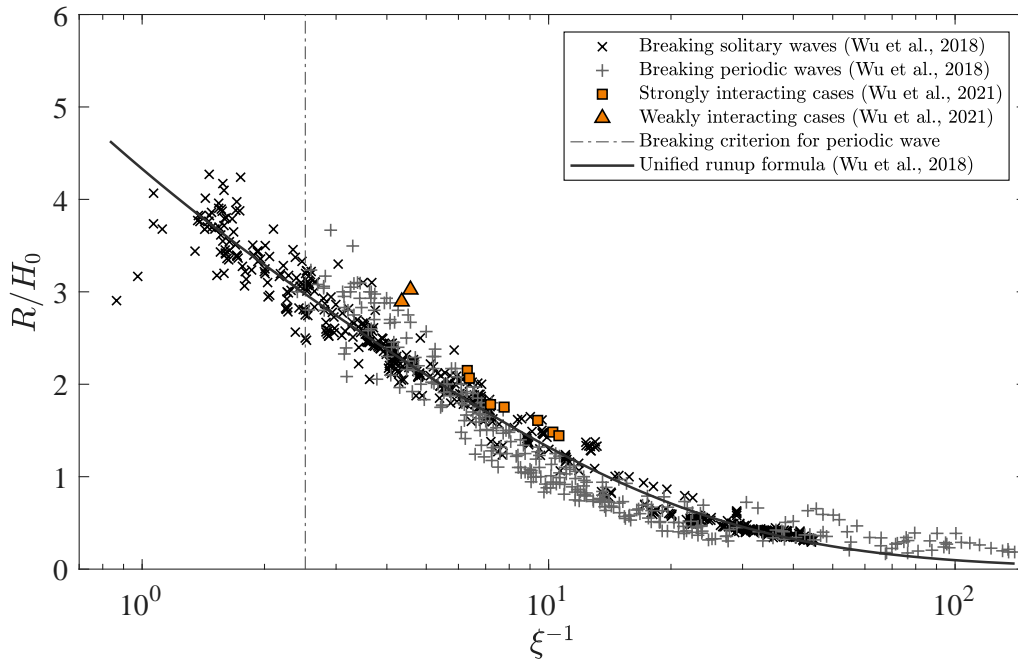


圖 4 以碎波相似參數擬合單一孤立波、規則波及連續孤立波之無因次溯升高( $R/h_0$ )

### 謝誌

本研究相關實驗設備係由 Earth Observatory of Singapore (Award no. RCA-16-162-NUS-EOS) 及 National University of Singapore 補助添購。本文作者感謝科技部專題研究計畫及自由型國際合作加值經費補助 (MOST 108-2218-E-006-053-MY3)，使相關研究得以順利進行，謹致謝忱。

### 參考文獻

1. Barranco, I., Liu, P.L.-F. (2021) Run-up and inundation generated by non-decaying dam-break bores on a planar beach, *J. Fluid Mech.*, 915, A81.
2. Chan, I.-C., Liu, P.L.-F. (2012) On the runup of long waves on a plane beach, *J. Geophys. Res.*, 117(C8), C08006.
3. Chen, B.-T., Kikkert, G.A., Pokrajac, D., Dai, H.-J. (2016) Experimental study of bore-driven swash-swash interactions on an impermeable rough slope, *Coast. Eng.*, 108, 10-24.
4. El, G.A., Grimshaw, R.H.J., Tiong, W.K. (2012) Transformation of a shoaling undular bore, *J. Fluid Mech.*, 709, 371-395.
5. Goring, D.G. (1978) "Tsunamis-the propagation of long waves onto a shelf," Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
6. Grimshaw, R. (1971) The solitary wave in water of variable depth. Part 2, *J. Fluid Mech.*, 46(3), 611-622.
7. Liu, P.L.-F., Lynett, P., Fernando, H., Jaffe, B.E., Fritz, H., Higman, B., Morton, R., Goff, J.,

- Synolakis, C.E. (2005) Observations by the international tsunami survey team in Sri Lanka, *Science*, 308(5728), 1595.
8. Liu, P.L.-F., Synolakis, C.E., Yeh, H.H. (1991) Report on the international workshop on long-wave run-up, *J. Fluid Mech.*, 229, 675-688.
9. Lo, H.-Y., Park, Y.S., Liu, P.L.-F. (2013) On the run-up and back-wash processes of single and double solitary waves — an experimental study, *Coast. Eng.*, 80, 1-14.
10. Madsen, P.A., Fuhrman, D.R., Schäffer, H.A. (2008) On the solitary wave paradigm for tsunamis, *J. Geophys. Res.*, 113(C12), C12012.
11. Peregrine, D.H. (1983) Breaking waves on beaches, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 15(1), 149-178.
12. Pujara, N., Liu, P.L.-F., Yeh, H.H. (2015) An experimental study of the interaction of two successive solitary waves in the swash: A strongly interacting case and a weakly interacting case, *Coast. Eng.*, 105, 66-74.
13. Rong, Y., Wu, W., Liu, H., 2016. An experimental study of runup of several successive solitary waves of same wave height on slope, *Proc. 26th Int Ocean Polar Eng. Conf.*, Rhodes, Greece, 607-610.
14. Wu, Y.-T., Higuera, P., Liu, P.L.-F. (2021) On the evolution and runup of a train of solitary waves on a uniform beach, *Coast. Eng.*, 170, 104015.
15. Wu, Y.-T., Hsiao, S.-C. (2018) Generation of stable and accurate solitary waves in a viscous numerical wave tank, *Ocean Eng.*, 167, 102-113.
16. Wu, Y.-T., Liu, P.L.-F., Hwang, K.-S., Hwang, H.-H. (2018) Runup of laboratory-generated breaking solitary and periodic waves on a uniform slope, *J. Waterw. Port Coast. Eng.*, 144(6), 04018023.

# 山崩海嘯半解析解生成模型及其於 1998 年巴布亞紐幾內亞海嘯之應用

羅弘岳

國立台灣大學工程科學及海洋工程學系助理教授

## 摘要

科技部計畫：108-2218-E-002-075-

本文提出了一個嶄新的半解析解山崩海嘯生成模型，並以 1998 年巴布亞紐幾內亞海嘯為例示範該模型之適用性。此山崩海嘯生成模型結合解析解與數值結果，能透過閉式函式快速輸出於山崩海嘯生成階段結束後之海嘯波型與速度場，海嘯之傳播則使用布氏模式以數值方法計算。由於此山崩海嘯生成模型之參數化特質與使用上之便利性，以及所使用之布氏模式的高計算效率，於數值模擬中可考慮眾多可能的山崩海嘯情境。為了研究山崩相關參數之不確定性或誤差將如何影響山崩海嘯所造成之溯升，本研究透過六組一百例的蒙地卡羅實驗，發現海嘯溯升之不確定性約為山崩相關參數之不確定性的兩倍。

關鍵詞：海嘯、水下山崩、布氏模式、不確定性傳播

## A new semi-analytical landslide tsunami generation model – Applications to the 1998 Papua New Guinea tsunami

Peter Hong-Yueh Lo

Assistant Professor, Department of Engineering Science and Civil Engineering, National Taiwan University

## ABSTRACT

This study proposes a new semi-analytical landslide tsunami generation model and demonstrates its applicability using the 1998 Papua New Guinea tsunami as an example. The landslide tsunami generation model was assembled using a combination of analytical solutions and numerical simulations; it outputs a tsunami profile at the end of the landslide tsunami generation process quickly through closed-form analytical functions. A Boussinesq-type numerical wave model was then used to simulate the tsunami propagation process. Due to the parametrization and ease of use of the landslide tsunami generation model and the efficient computation of the Boussinesq model employed, a large number of simulations can be run. Through six sets of 100-case Monte Carlo experiments, it was found that the uncertainties in tsunami runup are approximately double the uncertainties in the landslide parameters.

Keywords: tsunami; submarine landslide; Boussinesq model; propagation of uncertainty

## 一、前言

山崩有產生海嘯之可能，一些著名的山崩海嘯例子為：1958 年於美國阿拉斯加的 Lituya 海灣海嘯是由地表上之山崩滑落至狹長的 Lituya 海灣中，而

造成了淹水高度超過 500 公尺以上的巨型海嘯（可參考 Fritz et al. 2009）。1998 年巴布亞紐幾內亞海嘯（1998 PNG 海嘯）奪走了超過 2,100 條性命，學者們普遍認為此海嘯是由海底山崩所造成（可參考 Lynett et al. 2003）。近期，許多學者認為近岸山崩

(原本為半淹沒狀態或發生於極淺水區)是 2018 年印尼蘇拉威西島海嘯的生成原因之一 (可參考 Aránguiz et al. 2020)。於 2018 年 12 月 22 日, 印尼的喀拉喀托火山爆發, 造成該火山島大幅崩塌, 砂石進入水中後生成了巽他海峽海嘯, 奪走了超過 400 條性命 (可參考 Omira & Ramalho 2020)。

於台灣小琉球附近有觀測到海底山崩的紀錄 (可參考 Hsu et al. 2018), 於東北角海域 (可參考 Tsai et al. 2018) 及東海岸 (可參考 Doo et al. 2021) 亦有發生海底山崩的可能; Chen et al. (2020) 以台灣西南沿岸為例, 示範了以反格林函數建立山崩海嘯快速預警系統的可能性。更有學者指出南海有海底山崩海嘯之潛在災害 (可參考 Li et al. 2019)。因此, 台灣並非完全沒有山崩海嘯的風險。

儘管山崩海嘯是個漸趨熱門的議題, 現今仍缺乏一個實用的山崩海嘯生成模型。目前最廣為使用的經驗模式是 Watts et al. (2005) 模型, 然而, Watts et al. 模型係以擬合為基礎, 需依賴參數調諧 (tuning) 以達成合理的計算結果, 因此, Watts et al. 模型不適用於沒有實測數據可供調諧的預測性海嘯模擬。若不使用 Watts et al. 模型, 主要的替代方案為以數值模式或者物理實驗完整地捕捉山崩海嘯的生成階段, 但這些較為複雜的手段並不適用於機率性山崩海嘯災害評估, 因機率性質的災害研究需要考慮存在於海嘯災害中大量的不確定性。

此研究欲彌補此缺乏實用山崩海嘯生成模型的缺口, 結合波浪理論與數值測試結果, 提出一個嶄新的半解析解山崩海嘯生成模型, 並以 1998 PNG 海嘯為例, 示範此新模型的可能應用。於實際應用中, 將先以此山崩海嘯生成模型計算出山崩海嘯於造波過程結束時之波形與流速, 再將此些資訊設為數值模式中的初始條件, 以數值方法模擬山崩海嘯的傳播。由於此山崩海嘯生成模型為閉式性質, 可由數學函式快速計算出山崩海嘯, 相當適用於進行山崩海嘯相關參數之敏感性測試並探討其不確定性之傳播 (propagation of uncertainty)。

本文將於第二章介紹此山崩海嘯生成模型、於第三章介紹所使用之海嘯傳播數值模型、於第四章以蒙地卡羅實驗 (Monte Carlo experiments) 探討於山崩海嘯相關參數中之不確定性將如何傳播至海嘯溯升、於第五章提出總結與展望。

## 二、山崩海嘯生成模型

基於 Lo & Liu (2021) 所提出的方法, 本研究提出了一個嶄新的半解析解山崩海嘯生成模型, 此海嘯生成模型接收主要的山崩相關參數為輸入參數, 輸出於海嘯生成階段結束時的完整波形, 同時包含了水面位移與流速。此生成模型之初步建構已紀錄於 Lo (2018), 於此簡要列出最為關鍵的無因次算式:

$$\eta_{IC}(r, \theta) = \sqrt{\pi} A_{acc} v^{\frac{3}{4}} \frac{Fr_* \cos \theta}{2(1 - Fr_* \cos \theta)} r_*^{-\frac{1}{2}} \Omega_2 \left( \frac{r - r_*}{L_{acc} \chi_*^{\frac{1}{2}} v^{\frac{1}{2}}} \right) \tanh(6r) \quad (1)$$

$$U_{IC}(r, \theta) = \eta_{IC}(r, \theta) \cos \theta$$

$$V_{IC}(r, \theta) = \eta_{IC}(r, \theta) \sin \theta$$

其中  $\eta_{IC}$  為水面位移、 $U_{IC}$  為 x 方向之水平流速、 $V_{IC}$  為 y 方向之水平流速; 波形主要由函式

$$\Omega_2(s) = |s|^{\frac{3}{2}} e^{-4s^2} \left[ \frac{I_5(4s^2)}{4} - \frac{I_1(4s^2)}{4} + \frac{1}{8s^2} I_1(4s^2) + \text{sgn}(s) \left( \frac{I_{-1}(4s^2)}{4} - I_3(4s^2) \right) \right] \quad (2)$$

捕捉, 其中  $I_N$  表示 N 階的第一類修改貝索函數、 $\text{sgn}(s)$  回報 s 的正負號; 另外,

$$\left\{ \begin{array}{l} v = \sigma \cos^2 \theta + \frac{1}{\sigma} \sin^2 \theta \\ L_{acc} = 1 + 0.6237s \\ L_{acc}^2 (5.612 - 9.975(L_{acc} - 0.5712t_0) + 6.944(L_{acc} - 0.5712t_0)^2 - 1.277(L_{acc} - 0.5712t_0)^3) \\ A_{acc} = \min[1, \dots] \\ s = t_0 \sqrt{1 + \frac{1}{4} Fr^2 - Fr \cos \theta} \\ Fr_* = Fr \chi_*^{-\frac{1}{2}} \\ \chi_* = 1 + \frac{1}{4} (\chi - 1) \\ \chi = 1 + \zeta \cos \theta t_s + \frac{1}{4} (\zeta \cos \theta)^2 t_s^2 \\ r_* = t_* + \frac{1}{4} \zeta_0 \cos \theta t_*^2 \\ t_* = \frac{1}{2} t_0 + t_s \chi_0^{-\frac{1}{2}} \\ \chi_0 = 1 + \frac{1}{2} Fr_0 \zeta_0 t_0 \\ Fr = Fr_0 \chi_0^{-\frac{1}{2}} \\ \zeta = \zeta_0 \chi_0^{-1} \end{array} \right. \quad (3)$$

其中 $\sigma$ 為山崩之長寬比、 $Fr_0$ 為山崩最大速率、 $t_0$ 為山崩加速時長、 $\zeta_0$ 為底床相對斜度、 $t_s$ 必須以數值方法由

$$\begin{aligned}
 & -L_{acc}^2 \zeta \cos \psi t_s \\
 & + \left( 1 - 2Fr \cos \psi + Fr^2 - \frac{1}{4} (\zeta \cos \psi)^2 \right) t_s^2 \\
 & + \frac{1}{2} \zeta \cos \psi (1 - Fr \cos \psi) t_s^3 \\
 & + \frac{1}{16} (\zeta \cos \psi)^2 t_s^4 - L_{acc}^2 = 0
 \end{aligned} \quad (4)$$

求得，其中 $\psi$ 為重點方向，所求得之海嘯波型在此方位最為精準。以上算式皆為無因次，確切的無因次方法請見 Lo (2018)。

本研究將以 1998 PNG 海嘯為例，示範此山崩海嘯生成模型之使用。以盡量參照前人所提出之數據為前提，本研究所使用之 1998 PNG 山崩海嘯參數列於表 1 中。輸入此些參數至半解析解山崩海嘯生成模型並進行相關的因次轉換後，將能獲得如圖 1 之海嘯波形與流速，此時刻為山崩發生後 83.3 秒，為海嘯生成階段結束之時刻，此時刻之波形與流速將設定為海嘯傳播模式之初始條件，接續以數值方法模擬此海嘯之傳播。

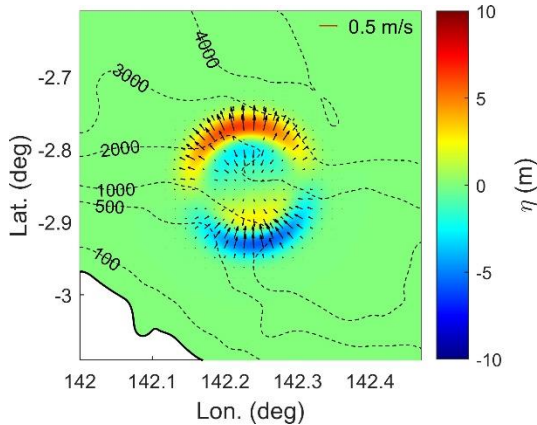


圖 1 半解析解山崩海嘯生成模型所預測之 1998 PNG 海嘯於生成階段結束時（山崩發生後 83.3 秒）之波形與流速。

參數	符號	數值	出處
山崩厚度	$A_b$	760 m	Watts et al. (2003)
山崩長度	$L_b$	4500 m	Watts et al. (2003)

山崩寬度	$W$	5000 m	Watts et al. (2003)
最大速率	$V_{max}$	11.6 m/s	Watts et al. (2003)
初始加速度	$a_0$	0.36 m/s <sup>2</sup>	Watts et al. (2003)
近源水深	$d_0$	1500 m	Watts et al. (2003)
山崩走向	無	100.62°	Lynett et al. (2003)
山崩位置	無	2.855°S 142.235°E	Lynett et al. (2003)
波淺化坡度	$\beta$	3.43°	本研究
重點方向	$\psi$	135°	本研究

表 1 本研究所使用之 1998 PNG 山崩海嘯相關參數。

### 三、山崩海嘯傳播模型

本研究以布新內斯克類型波浪模式 (Boussinesq-type wave model) Celeris 模擬山崩海嘯的傳播階段。Celeris 由 Tavakkol & Lynett (2017) 首度提出，為建立於 GPU 計算之布氏方程 (Boussinesq equations) 求解器，其獨特之處為可互動式的即時計算與顯像，使用者可在圖形介面中，改變水深、波高、邊界條件等設定，並即時於圖形介面中觀察此些調整對於波浪場之影響。

本研究選用 Celeris 作為山崩海嘯傳播模型的原因包含了：Celeris 於設定完成後，能在任何 Windows 作業系統上點擊後直接執行而不需安裝其他程式，於多機台上同時進行模擬時相當便利；Celeris 使用 GPU 做平行計算，能在任何平價電競電腦上進行高效率的模擬；Celeris 求解布氏方程，能捕捉於山崩海嘯中必須被考慮之波頻散；Celeris 能有效率地在計算的同時顯示圖形化之結果，方便使用者做即時的偵錯。

圖 2 為使用圖 1 之波形與流速作為初始條件、由 Celeris 所計算之 1998 PNG 海嘯最大波高與溯升以及實測之溯升數據（取自 Lynett et al. 2003）。經網格收斂性測試後，本研究選用 100 公尺×100 公尺

的網格作為精準度與計算時間的平衡點，此網格大小亦與前人所使用之網格經度類似（例如 Lynett et al. 2003、Watts et al. 2003）。使用此數值設定，本研究得於入門等級之電競桌上(於 2019 年時之售價為新台幣 23000 元)，以 30 分鐘的計算時間模擬 15 分鐘的海嘯傳播。由圖 2 可見，新提出之山崩海嘯生成模型未經任何額外的參數調諧即能達到與實測數據類似之結果，因此，此數值模擬的整體表現相當完滿。

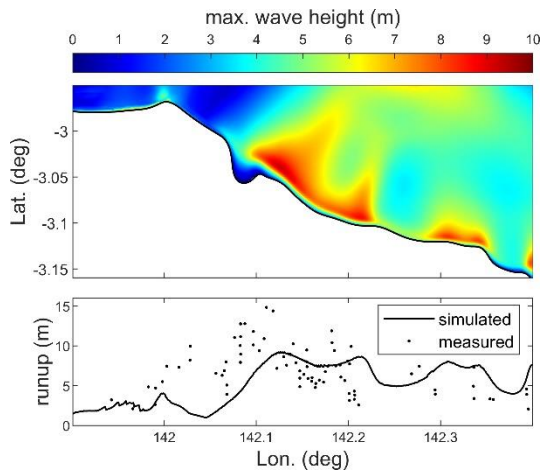


圖 2 使用半解析解山崩海嘯生成模型（圖 1）作為海嘯傳播數值模型之初始條件，以數值方法模擬山崩海嘯傳播後之結果。上：最大波高；下：最大溯升及實測淹水高度。

#### 四、山崩海嘯參數之誤差傳播

在確認此數值模式設定之可信度後，我們以 100 例蒙地卡羅實驗（Monte Carlo experiments）來調查於海嘯生成模型輸入參數中的不確定性將如何傳遞至數值計算結果。以其中一個實例作為示範，我們選擇了五個相關參數：山崩厚度、山崩長度、山崩寬度、最大速率、初始加速度，假設這些參數各自有著 25% 的不確定性，並以變異係數（coefficient of variation）定義：標準差除以均值再乘上 100%，假設此不確定性呈常態分布，產生了 100 組隨機的

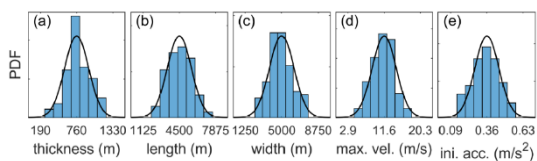


圖 3 假設常態分布、25%變異係數、100 案例數之參數分布情形。

參數組合（如圖 3）以及 100 組不同的海嘯波型初始條件（如圖 4），接著再以數值模式計算此 100 例的海嘯傳播情形。

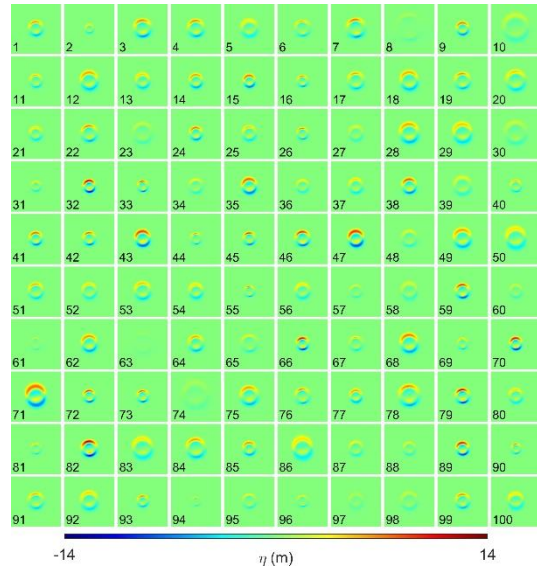


圖 4 將圖 3 中之 100 組參數組合輸入至半解析解山崩海嘯生成模型後所得之 100 例海嘯波型。

此 100 例蒙地卡羅實驗之溯升結果呈現於圖 5。透過統計分析能夠從此類型之大數據萃取出許多資訊，而進行更多的蒙地卡羅實驗更能顯現更多的資訊。本研究總共考慮了 6 組 100 例蒙地卡羅實驗，針對 1998 PNG 海嘯總共模擬了 600 例可能的海嘯生成與傳播結果，詳細資訊列於表 2 中。

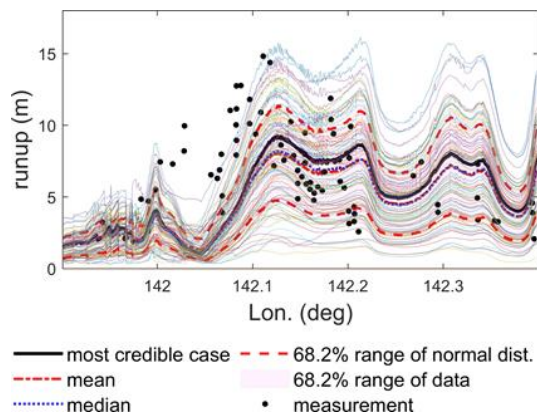


圖 5 假設常態分布、25%變異係數、100 案例數之溯升模擬結果分布情形與其統計量。

藉由分析此 6 組 100 例蒙地卡羅實驗中之溯升變異係數，我們發現溯升結果之平均變異係數與山崩海嘯參數之變異係數成正相關，且此關聯性對於

參數之分布型態不敏感。於進行線性迴歸後(圖 6)，我們發現平均溯升的不確定性約為模型輸入參數的不確定性之兩倍。

不確定性分布	參數變異係數	案例數
常態	10%	100
常態	17%	100
常態	25%	100
均勻	10%	100
均勻	17%	100
均勻	25%	100

表 2 針對 1998 PNG 海嘯所進行之 6 組 100 例蒙地卡羅實驗的詳細資訊。

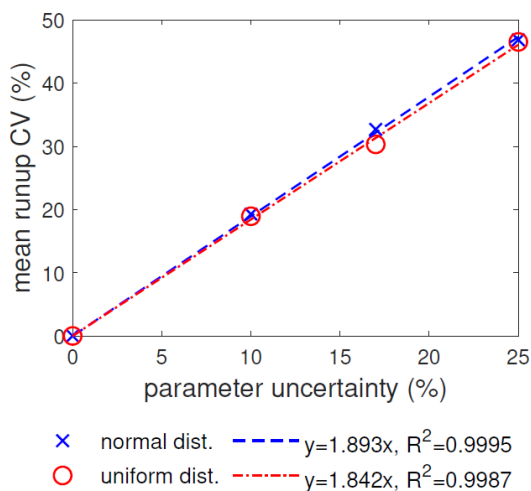


圖 6 對於 6 組 100 例蒙地卡羅實驗之參數不確定性與平均溯升變異係數進行線性迴歸後之結果。

## 五、總結與展望

本研究使用了基於解析解與數值測試所建立之山崩海嘯生成模型，能以閉式的數學式快速計算出山崩海嘯於生成階段結束時之波形與流速，接著再以此波浪場資訊做為初始條件，以數值方法模擬山崩海嘯的傳播。本研究使用建立於 GPU 計算、求解布氏波浪方程的 Celeris 作為海嘯傳播數值模型，並透過網格收斂性測試以及數值結果與實測數據之比較，確立了數值結果的可信度。

以 1998 PNG 海嘯為例，本研究進行了 6 組 100 例蒙地卡羅實驗，藉以探討於山崩海嘯相關參數中之不確定性將如何影響山崩海嘯傳播之結果。於分

析溯升結果後，發現平均溯升變異係數與參數之不確定性成正相關，且此關聯性不受參數分布型態影響。於進行線性迴歸後，我們發現 1998 PNG 山崩海嘯相關參數中之不確定性，於其所造成之溯升中將被放大為約略兩倍的不確定性。此研究為設法量法山崩海嘯之不確定性的前導研究之一，此半解析解山崩海嘯生成模型與海嘯傳播數值模型之結合、以及基於大量情境模擬的蒙地卡羅方法，將可能被運用至其他地點進行山崩海嘯災害分析。

本團隊將持續改善山崩海嘯生成模型與分析手法，以期能提供完善正確的資訊、以更便利易懂的方式，推廣此分析山崩海嘯之不確定性的研究方法，希冀能在領域中豎立新標準。

## 謝誌

本文係科技部專題研究計畫 (編號 MOST 108-2218-E-002-075-)之相關研究成果，作者在此特表誠摯謝意。

## 參考文獻

- Aránguiz, R., Esteban, M., Takagi, H., Mikami, T., Takabatake, T., Gómez, M., ... Nistor, I. (2020) The 2018 Sulawesi Tsunami in Palu City as a Result of Several Landslides and Coseismic Tsunamis, *Coastal Engineering Journal*, 62(4), 445-459.
- Chen, G.-Y., Liu, C.-C., Wijetunge, J. J. and Wang, Y.-F. (2020) Reciprocal Green's Functions and the Quick Forecast of Submarine Landslide Tsunamis, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 771-781.
- Doo, W.-B., Huang, Y.-S., Yen, Y.-T., Wang, H.-F., Wang, S.-Y. and Lo, C.-L. (2021) A Significant Change in Ocean Bottom Pressure Off Eastern Taiwan, Southwestern Ryukyu Subduction Zone, *Pure and Applied Geophysics*, 178, 907-917.
- Fritz, H. M., Mohammed, F. and Yoo, J. (2009) Lituya Bay Landslide Impact Generated Mega-Tsunami 50th Anniversary, *Pure and Applied Geophysics*, 166, 153-175.
- Hsu, H.-H., Dong, J.-J., Hsu, S.-K. and Su, C.-C. (2018) Back Analysis of an Earthquake-triggered Submarine Landslide Near the SW of Xiaoliuqiu, *Journal of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic*

- Sciences*, 29, 77-85.
6. Li, L., Shi, F., Ma, G. and Qiu, Q. (2019) Tsunamigenic Potential of the Baiyun Slide Complex in the South China Sea, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(8), 7680-7689.
  7. Lo, H.-Y. (2018) Modeling Landslide-generated Tsunamis with Long-wave Equations. PhD dissertation. Cornell University.
  8. Lo, P. H.-Y. and Liu, P. L.-F. (2021) On Water Waves Generated by a Bottom Obstacle Translating at a Subcritical Speed, *Journal of Fluid Mechanics*, 923, A26.
  9. Lynett, P. J., Borrero, J. C., Liu, P. L.-F. and Synolakis, C. E. (2003) Field Survey and Numerical Simulations: A Review of the 1998 Papua New Guinea Tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, 160, 2119-2146.
  10. Omira, R. and Ramalho, I. (2020) Evidence-calibrated Numerical Model of December 22, 2018, Anak Krakatau Flank Collapse and Tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, 177, 3059-3071.
  11. Tavakkol, S. and Lynett, P. (2017) Celeris: A GPU-Accelerated Open Source Software with a Boussinesq-type Wave Solver for Real-time Interactive Simulation and Visualization, *Computer Physics Communications*, 217, 117-127.
  12. Tsai, C.-H., Huang, C.-L., Hsu, S.-K., Doo, W.-B., Lin, S.-S., Wang, S.-Y., Lin, J.-Y. and Liang, C.-W. (2018) Active Normal Faults and Submarine Landslides in the Keelung Shelf Off NE Taiwan. *Journal of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 29, 31-38.
  13. Watts, P., Grilli, S. T., Kirby, J. T., Fryer, G. J. and Tappin, D. R. (2003) Landslide Tsunami Case Studies Using a Boussinesq Model and a Fully Nonlinear Tsunami Generation Model, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 391-402.
  14. Watts, P., Grilli, S. T., Tappin, D. R. and Fryer, G. J. (2005) Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case Studies,

*Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 131(6), 298-310.



# Generation and propagation of non-uniform bores and their flooding characteristics

Ignacio Barranco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore

## ABSTRACT

The present work focuses on the generation of tsunami-like bores and the analysis of the influence of their characteristics on the flooding processes. Bores are generated in the laboratory employing a dam-break system and a programmable long-stroke wavemaker. The experimental data points out the influence of the uniform bore characteristics and their combination on the generated inundation. For the given laboratory setup, the dam-break system is more suitable to generate the main bore flow while the wavemaker is best used to generate secondary waves.

Keywords: bore; tsunami; dam-break; inundation

## Introduction

Tsunamis have been observed to reach coastal areas in the form of undulating and breaking long bores. Often times, secondary waves have also been observed to reach the coastal during or after the impact of the leading tsunami wave.

In an effort to simulate more realistic tsunami waves, researchers have employed a large variety of experimental setups. Some examples include the use of wavemakers to generate particular wave shapes such as elongated soliton, N-wave, tsunami wave profiles (Schimmels et al. 2016, Pujara et al. 2020). Other researchers supply a water flow using water pumps to control flows (Goseberg et al. 2013) or by controlling the pressure inside a chamber connected to the flume (Rossetto et al. 2011). The main target of these systems is the simulation of measured tsunami waves. However, most of the free surface records of tsunamis are relatively far from the coast and do not include velocity measurements, obstacles which are usually overlooked due to technical and scaling challenges.

A strategy to overcome these difficulties is directly generating tsunami-like bores reaching coastal areas. The most common mechanism employed to generate

uniform bores is by suddenly releasing a volume of water employing a dam-break system (see e.g., Yeh et al. 1989, Barnes et al. 2009, Barranco and Liu, 2021). Bores are also generated in the literature employing wavemaker systems (Miller 1968, Pujara et al. 2020, Barranco 2021). While bores generated employing dam-break systems are uniform, it has been shown recently that dam-break systems with long enough reservoirs can generate bores long enough to produce quiescent flooding events, similar to the observed during tsunamis flooding. On the other hand, while programmable wavemaker systems provide more freedom to generate bores of different shapes, very long strokes are required to produce long bores.

In order to generate more realistic tsunami-like bores in coastal areas, in this study we investigate the generation of non-uniform bores in the laboratory employing a coupled dam-break/wavemaker system and the generated inundation and runup processes. Different type of non-uniform bores such as riding bores, coupled bores and N-bores are generated by controlling the synchronization between both systems and their contribution in the generation process.

## Methodology

Laboratory experiments have been carried out in the wave flume in the Hydraulic Laboratory at the National University of Singapore. The wave flume is equipped with a dam-break system located at 11.1 m from the the beach toe and a piston-type wavemaker with a 5 m stroke. The closest distance between the wavemaker position and the dam-break gate is 12.6 m. The wavemaker and the dam-break system are synchronized employing the DAQ, which allows to control the trigger time of the dam-break gate with respect to the movement of the wavemaker. The non-linear shallow water equations are employed to calculate the initial water depths at both sides of the gate and wavemaker speed necessary to generate combined bores of target strength.

## Results

Riding bores and combined bores (figure 1) are generated by varying the dam-break gate trigger time. The first are generated by triggering the wavemaker motion and dam-break gate at the same time. The second is generated by lifting the gate at the time when the wavekaer generated bore is about to reach the dam-break. Preliminary results show that, given the same combined bore strength, the maximum inundation depth and runup height are independent of the systems synchronization, as long as both bores reach the slope within the same event (figure 2).

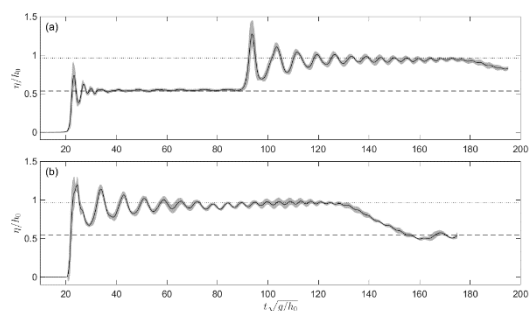


Figure 1 Time histories of dimensionless free surface elevations at the constant water depth for riding bore, on the top panel (a), and the combined bore, on the bottom panel (b).

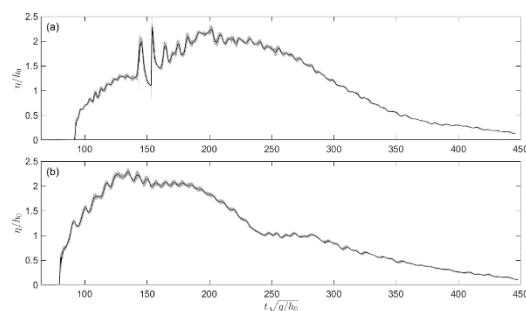


Figure 2 Time histories of dimensionless free surface elevations at the still water shoreline for riding bore, on the top panel (a), and the combined bore, on the bottom panel (b).

In addition, N-bores are generated by setting lower water depths in the upstream region of the dam-break gate, which is lifted at the same time the wavemaker starts to move. This causes the water to retreat in the slope region before it is later flooded by the wavemaker generated bore.

## Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the support from the National University of Singapore (NUS) for the PhD Scholarship support.

## References

1. Barnes, M.P., O'Donoghue, T., Alsina, J.M. & Baldock, T.E. 2009 Direct bed shear stress measurements in bore-driven swash. *Coast. Engng* 56, 853–867.
2. Barranco, I. and Liu, P.L.-F. 2021 Run-up and inundation generated by non-decaying dam-break bores on a planar beach. *J. Fluid Mech.* 915.
3. Barranco, I., 2021 Generation and propagation of tsunami-like bores and characteristics of the produced inundation. PhD thesis.

4. Goseberg, N., Wurpts, A. and Schlurman, T. 2013 Laboratory-scale generation of tsunami and long waves. *Coast. Eng.* 79, 57–74.
5. Miller, R. L. 1968 Experimental determination of run-up of undular and fully developed bores. *J. Geophys. Res.*, 73, 4497–4510.
6. Pujara, N., Miller, D., Park, Y. S., Baldock, T. E. and Liu P.L.-F. 2020 The influence of wave acceleration and volume on the swash flow driven by breaking waves of elevation. *Coast. Eng.* 158, 103697.
7. Rossetto, T., Allsop, W., Charvet, I. and Robinson, D. I. 2011 Physical modelling of tsunami using a new pneumatic wave generator. *Coast. Eng.* 58, 517–527.
8. Schimmels S., Sriram, V. and Didenkulova, I. 2016 Tsunami generation in a large scale experimental facility. *Coast. Eng.* 110, 32–41 .
9. Yeh, H. H., Ghazali, A. and Marton, I. 1989 Experimental study of bore run-up *J. Fluid Mech.* 206, 563–578.

# Comparison between two- and three-dimensional Navier-Stokes modelling for swash flows

Pablo Higuera<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Lecturer, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Auckland, New Zealand

<sup>2\*</sup>Senior Research Fellow, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore

## ABSTRACT

Swash zone hydrodynamics are key to understand the details of sediment transport, which may lead to coastal erosion. One of the swash processes that has been extensively researched using field observations, physical and numerical modelling is runup. Observation highlights the 3D nature of runup, especially when wave breaking is involved. Yet, a majority of runup numerical simulations are performed in 2D. In this work we use a new set of experiments with trains of solitary waves running up a plane slope (1 on 10) to validate numerical modelling performed with olaFlow (developed within the OpenFOAM library). The results of 2D and 3D simulations are compared to evaluate the suitability of each approach. Overall, 2D simulations suffice to provide a reasonable approximation to runup at a low cost, while 3D simulations are able to provide a highly-detailed hydrodynamic description of all the processes at a significantly higher cost.

Keywords: swash hydrodynamics; solitary waves; numerical modelling; olaFlow / OpenFoam

## I. Introduction

The swash zone is the interface between sea and land, an important coastal area where swash flows (oscillatory movements of the shoreline along the beach face) occur. Understanding the wave-driven processes within this area, which include wave breaking and sediment transport, is key to mitigate coastal inundation and protect the coast against a sea level rise scenario.

Traditionally, the swash zone has been studied by field monitoring and laboratory experiments. However, instrument deployments are often costly and complex, and may sometimes be intrusive. Developments in the numerical modelling field, specifically in computational fluid dynamics (CFD), in the recent decade have enabled this approach to study swash flows at a high resolution.

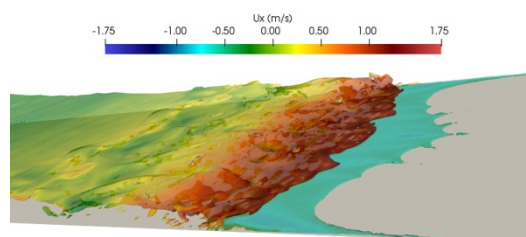


Figure 1. Three-dimensional effects in the swash zone due to wave breaking. Runup phase of the 5<sup>th</sup> wave.

Swash zone processes are often complex, highly nonlinear and three-dimensional (3D), as can be observed in Figure 1. Therefore, ideally 3D CFD modelling should be applied to obtain the most relevant

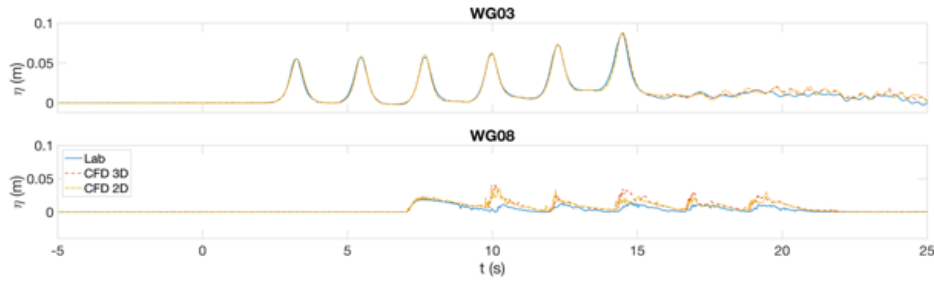


Figure 2. Free surface elevation at wave propagation (WG03) and swash (WG08) zones.

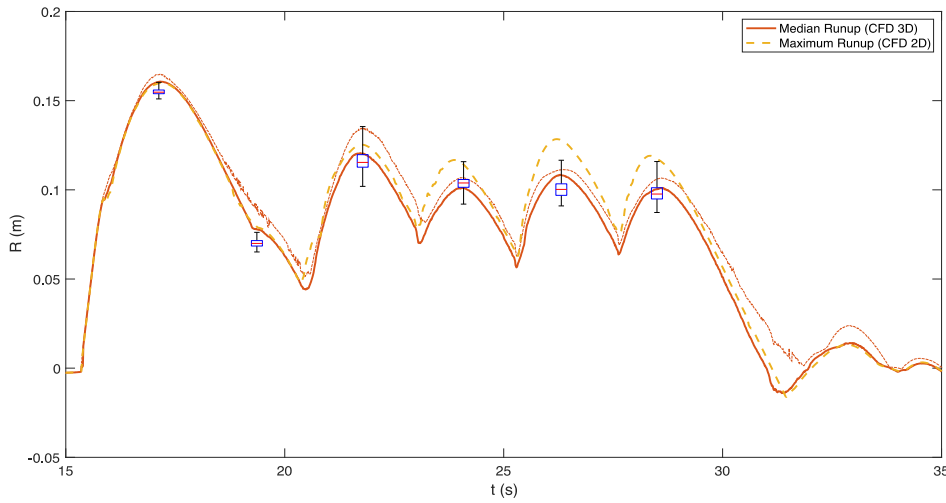


Figure 3. Time series of runup. Experimental data for the maximum runup of every wave shown as a boxplot.

insights. However, 3D CFD modelling is very costly, especially when compared to two-dimensional (2D) modelling. Consequently, exploring the capabilities and limitations of 2D swash hydrodynamics simulations will provide valuable information on under which conditions employing 2D modelling is reasonable.

## II. Physical and Numerical Modelling

In this work we explore the swash flows of a train of 6 solitary waves ( $H/h = 0.29$ ,  $h = 0.20$  m) running up and down a 1 on 10 slope. The physical experiments were performed at the National University of Singapore flume (36 x 0.9 x 0.9 m). Free surface elevation (FSE) gauges were deployed along the flume and over the beach, and video recordings were used to capture the

runup at the beach. Full details of the experimental setup are provided in Wu et al. (2021).

The physical experiments have been replicated numerically using *olaFlow* (Higuera, 2018), a CFD model based on OpenFOAM. Simulations were performed in 2D (1 spanwise cell) and 3D (up to 64 spanwise cells, half of the domain assuming symmetry). The 3D simulation took 15 days and was found to cost 250x core-hours more than the 2D simulation.

## III. Results

The FSE gauges are shown in Figure 2. During wave propagation all processes are approximately 2D, and both simulations present an outstanding agreement with laboratory experiments. In the swash zone (WG08)

there are noticeable differences after the second wave (because the first wave does not break), due to the 3D effects induced by wave breaking. These also cause the deviations on the reflected waves, which can be observed at the end of WG03 time series.

Similar conclusions can be drawn from the runup analysis, shown in Figure 3. The first wave presents mostly a 2D behavior, with almost no differences between the 2D and 3D simulations. The differences between subsequent waves are due to 3D effects arising from wave breaking. Generally, the 2D runup is larger than the 3D curve, and is close to the maximum runup in the experiments. Nevertheless, the 3D simulation produces a median runup which is very close to the experimental value.

The experimental and numerical modelling results support that 2D simulations provide valuable insights on runup and the general flow patterns. However, 3D simulations are required to obtain a more detailed and realistic flow description.

## References

1. Higuera (2018) olaFlow: CFD for waves [Software]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1297013>
- Wu, Higuera & Liu (2021) On the evolution and runup of a train of solitary waves on a uniform beach. *Coastal Engineering*, Vol. 170. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104015>

## A Comparative Study of Coastal Inundation by Typhoon Hato (2017) and Typhoon Mangkhut (2018)

Jie Yang<sup>1\*,2</sup>, Linlin Li<sup>2,3</sup>, Kai Meng Mok<sup>4</sup>, and Philip Li-Fan Liu<sup>2,5,6</sup>

<sup>1\*</sup> Associate Professor, College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University

<sup>2</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore

<sup>3</sup> Professor, Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University

<sup>4</sup> Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Macau

<sup>5</sup> Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University

<sup>6</sup> Professor, Institute of Hydrological and Ocean Research, National Central University

### ABSTRACT

Typhoon Hato (2017) and Typhoon Mangkhut (2018) were both record breaking with respect to their maximum sustained winds, storm tides and affected areas in the Pearl River Delta (PRD), but the leading factors deciding inundation hazardousness are different. We simulate these two real events responding to various meteorological factors, and also use multiple factors, including inundation depth, extent, velocity as well as inundation duration to demonstrate the associated storm-induced inundation hazard in Macau. In this study, a wind–surge–wave numerical modeling package is adopted to simulate storm surge and inundation processes due to these two typhoon events. The models are validated with observing data of winds, storm tides, significant wave heights and surveyed inundation depths. By investigating the sensitivity of storm surge and inundation to tidal phase, storm track and storm size, we confirm that the larger size of Typhoon Mangkhut is responsible for the much larger storm surge and affected areas in the PRD and longer inundation duration in Macau. Although storm size played a major role in damage caused by Typhoon Mangkhut, the rapid intensification of Typhoon Hato prior to landfall, its unexpected intense landfall and coincidence with high tide were main reasons battering Macau with severer flooding.

Keywords: Macau; Storm size; Inundation extent; SCHISM

### Introduction

Typhoon Hato (2017) and Typhoon Mangkhut (2018) were major typhoon events, which devastated the Pearl River Delta (PRD) region. They were both record breaking with respect to their maximum sustained winds (e.g., 234 km/h during Mangkhut; CMA), storm tides (e.g., 6.14 m at Zhuhai station during Hato; HKO, 2017) and affected areas (e.g., severest floodings in Macau since 1925; HKO, 2017; Macau Meteorological and Geophysical Bureau, SMG).

The similar meteorological features (storm intensity, storm track, and forward speed when approaching coasts) between Typhoon Hato and Typhoon Mangkhut provide us a rare opportunity to study the effect of meteorological factors on surge

dynamic mechanisms, which are investigated mostly via synthetic storms (e.g., Peng et al., 2006; Rego & Li, 2009; Sebastian et al., 2014; Thomas et al., 2019; Weisberg & Zheng, 2006). Among them, the significance of storm size on resulting surge has only been recognized since studies of comparable Hurricanes of Katrina (2005) and Camille (1969) (Smith et al, 2007), and Hurricanes of Andrew (1992) and Wilma (2005) (Guillot, 2009; Irish et al., 2008; Needham & Keim, 2014). We simulate these two real events responding to various meteorological factors, and also use multiple factors, including inundation depth, extent, velocity as well as inundation duration to demonstrate the associated storm-induced inundation hazard in Macau.

## Methodology

In this study, the wind–surge–wave numerical modeling package, which includes two-way coupled modules of the hydrodynamic model SCHISM (Zhang et al., 2016) and the third generation spectral wind wave model WWMIII (Hsu et al., 2005; Roland et al., 2009), is adopted to simulate storm surge and inundation processes due to these two typhoon events. To drive above modules over sea surface, the moving wind fields and atmospheric pressure gradient fields are generated from the parametric wind model by Emanuel & Rotunno (2011) and from parametric atmospheric model by Holland (1980). This wind–surge–wave model package has been adopted for the numerical domain of the South China Sea, and the modeling inundation processes are implemented by the wetting and drying algorithm in SCHISM. The models were validated with observing data of winds, storm tides, significant wave heights and surveyed inundation depths (Figure 1).

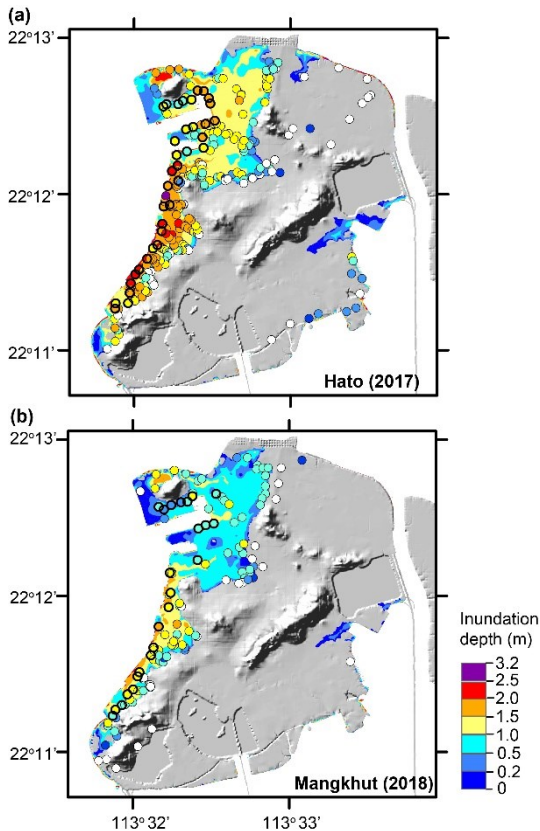


Figure 1. Comparison of inundation maps in the Macau Peninsula from simulations and survey measurements.

## Conclusion

By investigating the sensitivity of storm surge and inundation to tidal phase, storm track and storm size, we confirm that the larger size of Typhoon Mangkhut is responsible for the much larger storm surge and affected areas in the PRD (Figure 2) and longer inundation duration in Macau. The storm current velocity is another contributor for classifying potential hazard risk level.

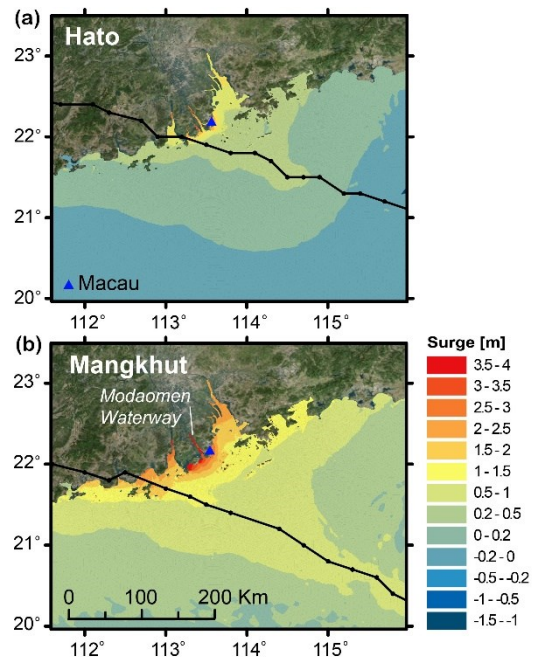


Figure 2. Maximum storm surges for Typhoon Hato and Typhoon Mangkhut, respectively.

Although storm size played a major role in damage caused by Typhoon Mangkhut, the rapid intensification of Typhoon Hato just before landfall, its unexpected intense landfall and coincidence with high tide were main reasons battering Macau with severer flooding. Possible typhoon event combining these unfavorable environmental factors should be paid particular attention.



## References

1. HKO. (2017). *Hong Kong Observatory: Super Typhoon Hato (1713)*. Hong Kong Observatory. <https://www.hko.gov.hk/en/informtc/hato17/report.htm>
2. Peng, M., Xie, L., & Pietrafesa, L. J. (2006). A numerical study on hurricane-induced storm surge and inundation in Charleston Harbor, South Carolina. *Journal of Geophysical Research*, *111*(C8), C08017.
3. Rego, J. L., & Li, C. (2009). On the importance of the forward speed of hurricanes in storm surge forecasting: A numerical study. *Geophysical Research Letters*, *36*(7), L07609.
4. Sebastian, A., Proft, J., Dietrich, J. C., Du, W., Bedient, P. B., & Dawson, C. N. (2014). Characterizing hurricane storm surge behavior in Galveston Bay using the SWAN+ADCIRC model. *Coastal Engineering*, *88*(Journal Article), 171–181.
5. Thomas, A., Dietrich, J., Asher, T., Bell, M., Blanton, B., Copeland, J., Cox, A., Dawson, C., Fleming, J., & Luettich, R. (2019). Influence of storm timing and forward speed on tides and storm surge during Hurricane Matthew. *Ocean Modelling*, *137*, 1–19.
6. Weisberg, R. H., & Zheng, L. (2006). Hurricane Storm Surge Simulations for Tampa Bay. *Estuaries and Coasts*, *29*(6), 899–913.
7. Zhang, C., & Li, C. (2019). Effects of hurricane forward speed and approach angle on storm surges: An idealized numerical experiment. *Acta Oceanologica Sinica*, *38*(7), 48–56.
8. Zhong, L., Li, M., & Zhang, D.-L. (2010). How do uncertainties in hurricane model forecasts affect storm surge predictions in a semi-enclosed bay? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *90*(2), 61–72.
9. Needham, H., & Keim, B. (2014). An Empirical Analysis on the Relationship between Tropical Cyclone Size and Storm Surge Heights along the US Gulf Coast. *Earth Interactions*, *18*(8), 1–15.
10. Zhang, Y. J., Ye, F., Stanev, E. V., & Grashorn, S. (2016). Seamless cross-scale modeling with SCHISM. *Ocean Modelling*, *102*, 64–81.
11. Hsu, T.-W., Ou, S.-H., & Liau, J.-M. (2005). Hindcasting nearshore wind waves using a FEM code for SWAN. *Coastal Engineering*, *52*(2), 177–195.
12. Roland, A., Cucco, A., Ferrarin, C., Hsu, T.-W., Liau, J.-M., Ou, S.-H., Umgiesser, G., & Zanke, U. (2009). On the development and verification of a 2-D coupled wave-current model on unstructured meshes. *Journal of Marine Systems*, *78*, S244–S254.
13. Emanuel, K., & Rotunno, R. (2011). Self-Stratification of Tropical Cyclone Outflow. Part I: Implications for Storm Structure. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *68*(10), 2236–2249.
14. Holland, G. J. (1980). An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes. *Monthly Weather Review*, *108*(8), 1212–1218.

## A semi-analytical model for water waves through suspended canopies

Jie HU<sup>a</sup> Xiaochun TANG<sup>a,b</sup> Pengzhi LIN<sup>b</sup> Philip L-F. LIU<sup>a,c,d</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore

<sup>b</sup>State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Development and Protection, Sichuan University, China

<sup>c</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, USA

<sup>d</sup>Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University, Taiwan, ROC

### ABSTRACT

Small-amplitude water waves passing through a suspended canopy is studied. The area of suspended canopy is modelled by an array of vertical rigid cylinders with periodic spacing. We assume that the diameter of cylinders and their spacing are much smaller than the typical incident wavelength, the homogenization theory (method of multiple-scale perturbation) is applied to create coupled micro-scale (cylinder spacing) and macro-scale (wavelength) problems. The micro-scale problem describes turbulent flows within a unit cell of the cylinder array, being driven by the macro-scale pressure gradients. Employing the concept of averaged energy balance over a wave period, the micro-scale flows determine the eddy viscosity, which damps the waves in the macro-scale flows. Eigenfunction expansions method is used to solve the macro-scale problem, in which a complex frequency dispersion relation is solved numerically by a multiple successive approximation technique. A new set of flume experiments of waves through suspended canopy is conducted and experimental data are used to check present solutions. Very good agreement has been observed. Finally, the effectiveness of suspended canopy, submerged and emergent vegetation on wave attenuation is discussed.

Keywords: Waves and suspended canopy interaction; Eddy viscosity; Drag coefficient; Homogenization theory; Eigenfunction expansion method; Multiple successive approximation

### I. Introduction

As the frequency and intensity of storms increase, a growing need exists for resilient shore protection techniques that have both environmental and economic benefits. The green infrastructure, being recognized as natural barriers against ocean waves, may provide a nature-based solution to counteract the coastal hazards. Examples of the green infrastructure include a variety of wetland plants, aquatic vegetation, kelp beds and oyster reefs, which can mitigate storm damage and erosion while enhancing productive habitat, improving water quality, producing food and adapting to rising sea level.

The green infrastructure can be classified into three forms such as the emergent, submerged, and suspended canopies, respectively, in which the suspended canopies like mussels are often farmed near

the surface on a horizontal type mooring system in a relatively deep water off the shoreline (see Fig. 1 for a cultivate mussel farming), which may act to attenuate wave energy and also produce food at the same time. Comparing to its emergent and submerged counterparts, the suspended canopy has received less attention.

Some studies of hydrodynamics of fluid flows and wave energy dissipation in the mussel farm can be found in Plew (2010), Plew and Stevens (2005), Huai et al. (2012), and Cheng et al. (2019). In these studies, the suspended mussel field was commonly modelled as an array of vertical rigid cylinders.

Object of this study aims at providing a model that can provide insights on the detailed flows in the vicinity of a mussel rope as well as the entire suspended canopy effects on propagating waves with a high computational efficiency. A sketch of normal incident waves being

scattered by a simplified suspended canopy model is depicted in Fig. 2.

## II. Methods

Based on the *homogenization* theory presented in Mei et al (2011), this study provides a semi-analytical model for accessing the process of periodic water waves through suspended canopy. Assuming that the diameter of cylinders and their spacing are much smaller than the typical incident wavelength, two scaled problems (e.g., a micro-scale (cylinder diameter/spacing), macro-scale (wavelength)) are established for the present physical setup. The micro-scale problem, being solved numerically, describes turbulent flows within a unit cell of the cylinder array. While the analytical solutions of the macro-scale problem describe the scattering waves by the suspended canopy. The turbulent flows inside the suspended canopy are parameterized by an eddy viscosity model Liu et al (2015), which is determined by the concept of time averaged energy balance. Moreover, a new set of wave flume experiments have been conducted to check the soundness of the present model.



Fig. 1. Cultivate mussels off Gouqi Island in Shengsi county, Zhoushan, East China's Zhejiang province

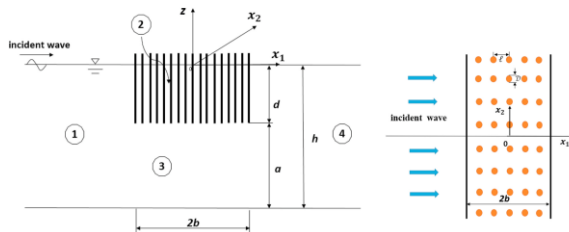


Fig. 2. A sketch of normal incident waves being scattered by a suspended canopy belt model with a draft of  $d$ .

## III. Results

Fig. 3. shows the comparison of the model computed normalized free surface elevations inside the suspended canopy with the experimental data for the test case 'wave0610' (e.g., water depth 0.6 m, canopy draft 0.22 m, wave period 1.0 s, wave amplitude 3.1264 cm). The numerical results are quite satisfactory. The oscillatory patterns in the wave amplitude envelopes are caused by the reflection and re-reflection in the canopy region.

Table 1. documents the wave height decay rates versus relative widths of suspended canopy to incident wavelength. Moreover, Table. 2 lists the wave height decay rates of suspended canopy with different ratios of draft and water depth. Results of the emergent and submerged counterparts are also plotted for references. The two tables quantitatively show the dependency of the magnitudes of reflection and transmission, and of the wave energy dissipation rate on the configuration of the suspended canopy (i.e., the width and draft of the canopy). Since the suspended canopy always interacts with waves near the free surface, it is much more effective than the submerged vegetation as a wave dissipator or scatter, especially for shorter waves.

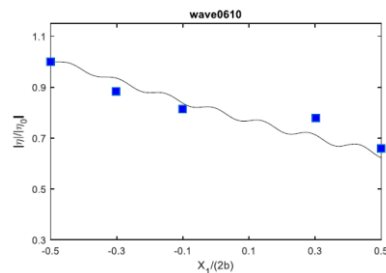


Fig. 3. The spatial variation of normalized dimensionless wave amplitude inside the suspended canopy region for normal incidence. Line (squares) denotes the model (laboratory) results (measurements).

wave0910	1	2	4	6	8
suspended canopy width/ wavelength					
Decay rate	19.7%	33.8%	52.9%	65.8%	75.0%

Table. 1. Wave height decay rates as function of suspended canopy width to incident wavelength.

Immersed part/water depth	Decay rate			
	Suspended canopy		Submerged vegetation	
	wave0910	wave9015	wave9010	wave9015
1/3	46.4%	28.1%	1.24%	6.40%
1/2	49.6%	33.5%	2.79%	10.37%
2/3	51.1%	37.2%	6.64%	15.51%
Emergent vegetation	52.9%	42.3%	52.9%	42.3%

Table. 2. Wave height decay rates of suspended/submerged/emergent canopies.

## Acknowledgments

This work was partially supported by National University of Singapore (NUS). P. L.-F. Liu would also like to acknowledge the support from National Research Foundation, Prime Minister's Office, Singapore under its Marine Science Research and Development Program (Award No. [MSRDP-05](#)). J Hu has been supported by a PhD Research Scholarship at NUS thanks to the Ministry of Education in Singapore.

## References

1. Plew, D.R., 2010. Depth-averaged drag coefficient for modeling flow through suspended canopies. *Journal of Hydraulic engineering*, 137(2), pp.234-247.
2. Plew, D.R., Stevens, C.L., Spigel, R.H. and Hartstein, N.D., 2005. Hydrodynamic implications of large offshore mussel farms. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(1), pp.95-108.
3. Cheng, W., Sun, Z. and Liang, S., 2019. Numerical simulation of flow through suspended and submerged canopy. *Advances in Water Resources*, 127, pp.109-119.
4. Huai, W., Hu, Y., Zeng, Y. and Han, J., 2012. Velocity distribution for open channel flows with suspended vegetation. *Advances in Water Resources*, 49, pp.56-61.
5. Mei, C.C., Chan, I.C., Liu, P.L.F., Huang, Z. and Zhang, W., 2011. Long waves through emergent coastal vegetation. *Journal of Fluid Mechanics*, 687, pp.461-491.
6. Liu, P.L.F., Chang, C.W., Mei, C.C., Lomonaco, P., Martin, F.L. and Maza, M., 2015. Periodic water waves through an aquatic forest. *Coastal*

# 内孤立波作用下海床土体动力响应与 剪切破坏研究

童林龙<sup>1,2\*</sup>

<sup>1\*</sup>河海大学港口海岸与近海工程学院助理研究员

<sup>2</sup>新加坡国立大学土木与环境工程系博士后研究员

## 摘要

本文采用解析理论研究了南海海域内孤立波传播过程中海床土体动力响应特征，分析了海床土体稳定性。研究结果表明南海地区海床土体发生土体剪切破坏可能性较小。增大水体密度差，海床内有效应力相应增大，剪切破坏可能性升高。

關鍵詞：内孤立波、有效应力、剪切破坏、南海

## Internal solitary wave-induced soil responses and shear failure potential

Linlong Tong<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Postdoctoral, College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University

<sup>2</sup> Postdoctoral, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore

## ABSTRACT

Internal solitary wave-induced soil responses, including the pore pressure and effective stresses, and the shear failure potential are studied based on analytical solutions. The results show that the internal solitary wave-induced shear failure is difficult to happen in South China Sea, but the possibility increases by increasing the density difference.

Keywords: Internal solitary wave; effective stress; shear failure; South China Sea

## 一、前言/Introduction

南中国海北部陆坡海域地形复杂，内孤立波频发。近年来，利用卫星遥感、现场观测等研究手段，该海域内孤立波的研究取得了丰硕成果。研究区域从南中国海的东北部(东沙—吕宋海峡)延伸到南海西北部(海南岛南部与东部海域)。观测资料显示南海东沙岛和台湾岛之间海域的内孤立波振幅在 29-142m 之间变化，北部陆坡内孤立波振幅最大可达 240m (Ramp et al., 2004, Jia et al., 2019)。内波运动会引起水底压强的变化，其中一部分由内波波动引起的静压强，另一部分为内波运动产生的动压强 (Moum & Smyth, 2006)。受此压强的作用，海床土体

内孔隙水压力和有效应力会发生变化 (Rivera-Rosario et al., 2017)。

围绕内波与海床相互作用课题，前人做了许多研究。基于亚洲海洋国际声学实验(ASIAEX)和文昌内波实验，许多学者研究了南中国海内孤立波的形成机制和非线性特征(Duda et al., 2004; Liu et al., 2004; Xu et al., 2012)。Droghei et al. (2016)研究了内孤立波运动对近底悬沙浓度的影响。基于物理试验，Tian et al. (2019)研究了内孤立波爬坡破碎时水体的紊动特征和悬沙浓度分布规律。Rivera-Rosario et al. (2017)研究了内孤立波作用下海床内孔隙水压力变化规律，结果显示内孤立波引起的孔隙水压力可能导致海床液化。

前人研究中主要关注内孤立波作用下床面粘性剪切应力或者孔隙水压力的作用，忽略了土体有效应力的影响。因此，本文将结合南中国海内孤立波特征和海床土体特性，研究内孤立波作用下土体动力变化规律，评估海床发生剪切破坏的风险。

## 二、研究方法/Methodology

本文中采用数值计算与解析解相结合的方式研究内孤立波作用下海床动力响应规律和土体稳定性。通过 Biot 固结方程描述海床动力响应特征。在此基础上，假定垂向尺度（海床厚度）远小于水平尺度（内孤立波波长、应力波长），推导内孤立波作用下土体内孔隙水压力和有效应力解析解。采用数值方法求解 Dubreil-Jacotin-Long (DJL) 方程，计算内孤立波引起的密度场和压强。最后，将内孤立波引起的床面压强代入解析解，计算孔隙水压力、有效应力以及应力角，分析海床动力响应规律并评估土体稳定性。

## 三、结论/Conclusion

基于 Laplace 变换方法，推导了内孤立波作用下土体孔隙水压力和有效应力的解析解。为了验证解析解的准确性，将孔隙水压力解析解与乔路正等 (2018) 试验测量结果进行比较，结果如图 1 所示。试验参数见表 1。图中  $p_b$  为内孤立波引起的床面压强测量值， $p$  为海床内不同深度处的孔隙水压力，由图可知，本文所推导的解析解与测量结果整体较为吻合。

表 1 内孤立波与海床相互作用试验参数表

周期	波高	渗透系数	泊松比	孔隙率	饱和度
19s	8.3cm	$5.21 \times 10^{-6}$ m/s	0.33	0.51	0.9975

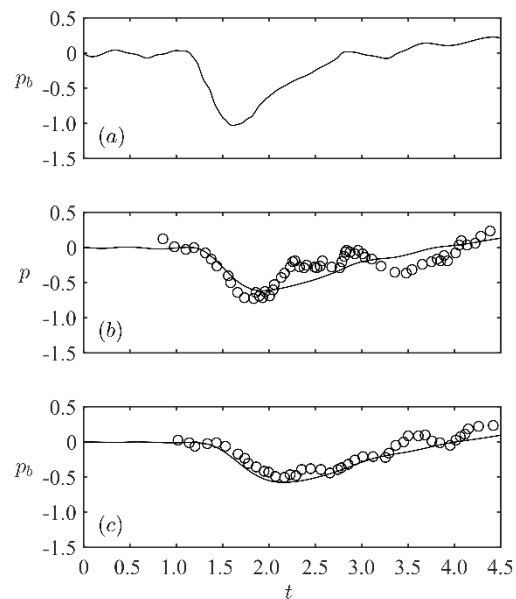


图 1 内孤立波作用下孔隙水压力时程曲线：(a) 床面压强，(b) 8cm 深度处孔隙水压力，(c) 16cm 深度处孔隙水压力。（实线：解析解；圈：测量结果(乔路正等，2018)）

基于验证的解析解计算了南中国海流花海域实测内孤立波作用下海床土体内孔隙水压力和有效应力。据报道 2011 年 4 月流花海域 329m 水深区域观测到波高 80.9m，周期 1440s 的内孤立波，其传播速度为 1.29m/s（石新刚等，2013）。本文中对流花海域实测密度剖面进行拟合并以此为背景密度场，计算了所测内孤立波作用下海床表面动水压强。基于该背景密度场计算的内孤立波波高 81m，周期 1443s，传播速度 1.28m/s，与实测结果基本一致，图 2 (a) 中展示了水体密度等值线分布规律。在此基础上，结合流花海域海床土体参数测量结果(Tian et al., 2019)得到了海床内孔隙水压力和有效应力分布规律，见图 2(b)-(c)。图中  $\varphi$  为移动坐标系 ( $\varphi = x - ct$ )，内孤立波从左向右传播。由图可知，下凹型内孤立波作用下，孔隙水压力为负。在内孤立波锋面下有效正应力为拉应力，受此影响，土体有效重度会降低，土体更加容易发生破坏，而波谷右侧会产生负的有效压应力。波谷下方剪切应力较小，波谷两侧剪切应力值较为接近，方向相反。

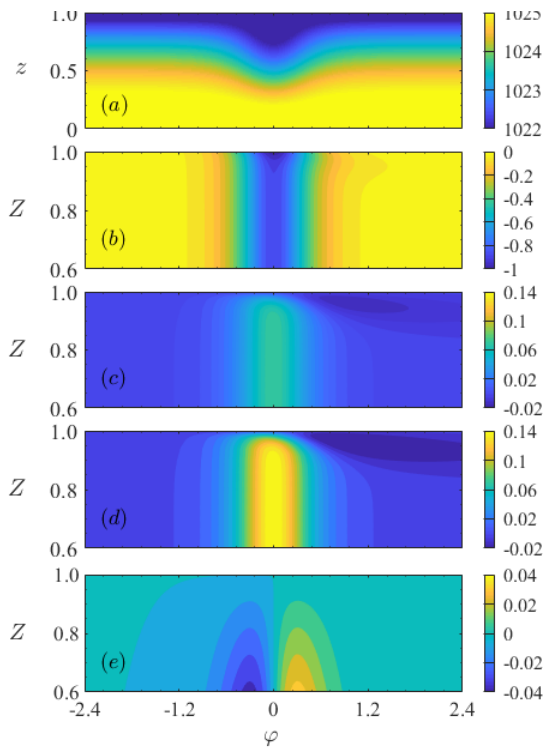


图 2 内孤立波作用下土体内孔隙水压力和有效应力等值线图：(a) 水体密度，(b) 孔隙水压力，(c) 水平方向有效正应力，(d) 垂直方向有效正应力，(e) 剪切应力。

### 致谢/Acknowledgements

本文获得中央高校基本科研业务费专项资金资助(B200202062)和全国博士后创新人才支持计划项目资助(BX20190105)。

### 参考文献/References

1. Ramp, S. R. , Tang, T. Y. , Duda, T. F. , Lynch, J. F. , & Yang, Y. J. . (2004). Internal solitons in the Northeastern China Sea Part I: sources and deep water propagation., IEEE Journal of Oceanic Engineering, 29(4), 1157-1181.
2. Duda, T. F. , Lynch, J. F. , Irish, J. D. , Beardsley, R. C. , Ramp, S. R. , & Chiu, C. S., et al. (2005). Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern south china sea. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 29(4), 1105-1130.
3. [1] Jia, Y. , Tian, Z. , Shi, X. , Liu, J. P. , Chen, J. , & Liu, X. , et al. Author correction: deep-sea sediment resuspension by internal solitary

- waves in the northern south china sea. Scientific Reports.
4. Moum, J. N. , & Smyth, W. D. . (2006). The pressure disturbance of a nonlinear internal wave train. Journal of Fluid Mechanics, 558, 153-177.
5. Rivera-Rosario, G. A. , Diamessis, P. J. , & Jenkins, J. T. . (2017). Bed failure induced by internal solitary waves. Journal of Geophysical Research: Oceans, 122, 5468-5485.
6. Xu, J., Xie, J., Chen, Z., Cai, S. & Long, X. (2012). Enhanced mixing induced by internal solitary waves in the South China Sea. Continental Shelf Research 49, 34-43.
7. Liu, A. K., and M.-K. Hsu (2004), Internal wave study in the South China Sea using synthetic aperture radar (SAR), Int. J. Remote Sens., 25, 1261– 1264.
8. Tian ZC, Chen T., Le C., Guo XJ., & Jia YG., (2019) . Penetration depth of the dynamic response of seabed induced by internal solitary waves. Applied Ocean Research, 90, 101867-101867.
9. 乔路正, 郭秀军, 田壮才, 等(2018) · 内孤立波浅化破碎过程斜坡沉积物孔压响应特征实验分析 · 海洋学报, 40(1):68-76.
10. 石新刚, 刘耀华, 兰志刚, 宋积文, 何琦, & 雷方辉等. (2013). 南海北部流花海域内孤立波特征研究. 热带海洋学报, 32(006), 22-27.

## Turbulence structure during uprush-downwash interaction of consecutive solitary waves

In Mei Sou\*

\* Research Fellow, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore

### ABSTRACT

This study investigated the turbulence structure in terms of the integral length scale during the uprush-downwash interaction of the laboratory-generated consecutive solitary waves on a beach slope. Using a 1000-Hz particle image velocimetry (PIV), the cross-shore velocity fields of six consecutive solitary waves were obtained for two different wave conditions. The integral length scale is calculated using both the wavenumber spectral method and the autocorrelation function method. The wavenumber spectral method is found to be a more robust method to evaluate the integral length scale as the assumption is less stringent than that of the autocorrelation function method. The largest integral length scale occurs when the flow reverses from uprush to downwash for the two wave conditions. The temporal and spatial evolution of the integral length scale are found to be different between the two wave conditions.

Keywords: Surf zone; Solitary waves; Wave-wave interaction; Integral length scale; Fast-speed PIV

### Introduction

Prediction of the beach and coastline erosion requires small-scale flow studies to identify the specific fluid mechanisms that trigger sediment motion in the surf zone. Studies have shown that the current coastal models are inadequate to predict morphological change in the inner surf zone and swash zone due to the preclusion of the effect of the broken bore turbulence on sediment suspension and transport (Masselink et al. 2006; Ruessink et al. 2007). Simultaneous velocity and sediment image measurements showed that the vertical turbulent velocity is directly responsible for the incipient motion and suspension of a mixture of sand and mud in a steady flow without the horizontal pressure gradient (Sou et al. 2014). The results suggest that the broken bore turbulence plays an important role for keeping the sediments suspended in the sediment transport processes. Previous PIV measurements had been made to examine the flow and turbulence structures in the surf zone (Cowen et al. 2003; Sou et al. 2010; Sou & Yeh 2011), but the temporal resolution in these studies is not sufficient to capture the detailed processes during the uprush-downwash interaction.

This study presents the turbulence structure in terms of the integral length scale in the inner surf zone at the sampling rate of 1000 Hz in order to gain better parameterizations for nearshore sediment transport modelling.

### Methodology

A train of six consecutive solitary waves with equal wave height and separation was generated by a 5-m long-stroke piston-type wavemaker in the laboratory. A 1000-Hz particle image velocimetry (PIV) is used to obtain the cross-shore velocity fields during the five uprush-downwash interactions on a 1/10 beach slope. Two different wave conditions have been examined. The first wave is non-breaking for the first case (NB) and the first wave is surging breaking for the second case (SB). We found that the flow and turbulence structures of the uprush-downwash interaction between the fourth and fifth waves reach the quasi-steady state (NB45 and SB45).

The integral length scale is calculated using two different methods. The first one is to evaluate the ensemble-averaged integral length scale  $\langle L_{11} \rangle_{k_1}$



directly from the one-dimensional horizontal turbulent velocity spectra as Equation (1) (Pope 2000)

$$\langle L_{11} \rangle_{k_1} = \frac{\pi \langle S_{uu}(k_1=0) \rangle}{\langle u^2 \rangle} \quad (1)$$

in which  $S_{uu}$  is the horizontal wavenumber spectrum and  $u$  is the horizontal turbulent velocity. The second method is to evaluate the ensemble-averaged integral length scale  $\langle L_{11} \rangle_{a_{11}}$  by integrating the turbulent velocity autocorrelation function from zero to the spatial extent  $l$  at which the autocorrelation reaches zero as Equation (2) (Variano & Cowen 2008)

$$\langle L_{11} \rangle_{a_{11}} = \int_0^l \frac{\langle u(x_c - \frac{1}{2}r)u(x_c + \frac{1}{2}r) \rangle}{\left( \langle u(x_c - \frac{1}{2}r)^2 \rangle \langle u(x_c + \frac{1}{2}r)^2 \rangle \right)^{1/2}} dr \quad (2)$$

in which  $x_c$  is the center point of the spatial measurement length, and  $r$  is the separation distance.

## Conclusion

The separation time between the two consecutive waves and the initial wave height to water depth ratio are the key factors determining the characteristics of the uprush-downwash interaction. Hydraulic jump occurs during the downwash flow for the NB case. The separation time for the SB case between the two waves is too short for the development of hydraulic jump before the next uprush flow arrives. The broken bore due to the hydraulic jump for the NB case has the counterclockwise motion due to the counterclockwise bed-generated eddies. Contrarily, the clockwise motion dominates within the broken bore for the SB case after wave breaking. The results suggest that the hydraulic jump can occur only if the downwash flow has reached supercritical before the flow reverses to the onshore direction.

In order to accurately calculate the integral length scale, both the wavenumber spectral method and the autocorrelation function method require a sufficiently large measurement length to ensure that the largest motions are included. For the autocorrelation function method, Variano & Cowen (2008) suggested that accurate calculations require the spatial distance 3 times

larger than the integral length scale in the flow. Our spatial measurement length in the  $x$  direction should be long enough as it is about 3 times of the maximum water depth captured in the images for both NB45 and SB45, providing that the data points are available across the  $x$  direction. The autocorrelation function method also requires a large region of homogenous turbulence, otherwise, the resulting integral length scale will be biased towards the local turbulent length scale in the center point  $x_c$ .

Figures 1 and 2 show the temporal and spatial evolution of the ensemble-averaged integral length scale  $\langle L_{11} \rangle_{k_1}$  and  $\langle L_{11} \rangle_{a_{11}}$ . We determine that the integral length scale obtained from the wavenumber spectral method is more reliable as the spatial spectra are able to resolve the large-scale region in the energy cascades accurately. The estimates obtained from the autocorrelation function method fluctuate in a wider range because the turbulence is inhomogeneous in the  $x$  direction and the autocorrelation function method is biased towards the local turbulent length scale in the center point  $x_c$ . A closer agreement between  $\langle L_{11} \rangle_{k_1}$  and  $\langle L_{11} \rangle_{a_{11}}$  is observed at  $t/T = 0$  because the hydraulic jump generates a relatively large region of homogeneous turbulence. Therefore, our preferred method is the wavenumber spectral method and the following discussion is based on the integral length scale obtained from the wavenumber spectral method.

There is a distinct difference in the evolution of the integral length scales between the NB45 and SB45 cases. During the downwash flow the integral length scale is larger near the bed and smaller as the elevation increases for the NB45 case. This is because the critical flow starts happening at  $t/T = -0.1137$  and the eddies generated from the bed eventually diffused into the upper water column at  $t/T = 0.1137$ . Contrarily, the integral length scale is smaller near the bed and larger in the water column due to the influence from the next incoming breaking wave for the SB45 case. The largest integral length scale occurs when the flow reverses

from uprush to downwash at  $t/T = 0$  for both NB45 and SB45 cases.

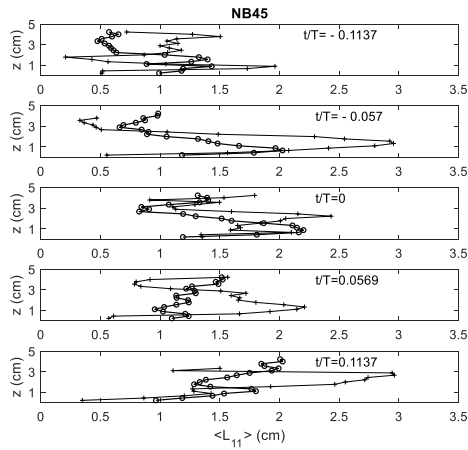


Figure 1. The temporal and spatial evolution of the integral length scale for the NB45 case from the downwash (negative  $t/T$ ) of the fourth wave to the uprush (positive  $t/T$ ) of the fifth wave, (o): wavenumber spectral method; (+): autocorrelation function method.

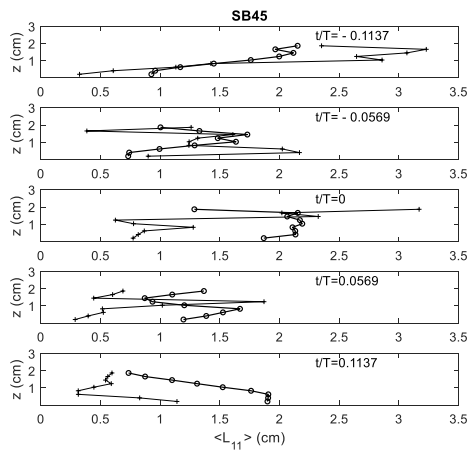


Figure 2. The temporal and spatial evolution of the integral length scale for the SB45 case from the downwash (negative  $t/T$ ) of the fourth wave to the uprush (positive  $t/T$ ) of the fifth wave, (o): wavenumber spectral method; (+): autocorrelation function method.

## Acknowledgements

The author thanks Dr Yun-Ta Wu for conducting the experiments and thanks Dr Ignacio Barranco and Yufei Wang for helping with the experiments. The author would like to express her appreciation to

Professor Philip L.-F. Liu for his invaluable comments and suggestions in this study.

## References

1. Cowen, E. A., Sou, I. M., Liu, P. L.-F. & Raubenheimer, B. (2003) Particle image velocimetry measurements within a laboratory-generated swash zone. *Journal of Engineering Mechanics* 129 (10), 1119-1129.
2. Masselink, G. & Puleo, J. A. (2006) Swash-zone morphodynamics. *Continental Shelf Research* 26 (5), 661-680.
3. Pope, S. B. (2000) *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
4. Ruessink, B. G., Kuriyama, Y., Reniers, A. J. H. M., Roelvink, J. A. & Walstra, D. J. R. (2007) Modeling cross-shore sandbar behavior on the timescale of weeks. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 112 (F3).
5. Sou, I. M., Calantoni, J., Reed, A. H. & Furukawa, Y. (2014) Initiation of erosion in unidirectional flow using a synchronized imaging technique. *Journal of Visualization* 17 (4), 303-305.
6. Sou, I. M., Cowen, E. A. & Liu, P. L.-F. (2010) Evolution of the turbulence structure in the surf and swash zones. *Journal of Fluid Mechanics* 644, 193-216.
7. Sou, I. M. & Yeh, H. (2011) Laboratory study of the cross-shore flow structure in the surf and swash zones. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116 (C3).
8. Variano, E. A. & Cowen, E. A. (2008) A random-jet-stirred turbulence tank. *Journal of Fluid Mechanics* 604, 1-32.

## ISPH Simulation of Wave Breaking with $k-\epsilon$ Turbulence Model

Dong Wang<sup>1\*</sup> Philip L.-F. Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Environmental Sciences and Engineering, Dalian Maritime University, China  
(email: ceewadg@nus.edu.sg)

<sup>2</sup>Department of Civil & Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore  
(email: philip.liu@nus.edu.sg)

### ABSTRACT

Generation and transport of turbulence associated by wave breaking are dynamic, complex and multi-scale processes. An Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (ISPH) method solving the 2D RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) equations with the  $k-\epsilon$  turbulence closure is constructed. In the present model, the concept of “massless ISPH” utilizing the definition of “particle density” (number of computational particles within unit volume) is stressed. The detailed discretization of the equations based on the variable “particle density” is provided for completeness. The skills of this numerical model are tested by laboratory experiments under solitary wave and periodic wave. In the case of periodic wave breaking, the over-production of turbulence beneath surface waves is stressed and the modification for standard  $k-\epsilon$  model proposed by Larsen and Fuhrman (2018) is adopted. The effects of initial seeding of turbulent kinetic energy and stress limiter coefficient  $\lambda_2$  are studied. An adaptive wall boundary condition for  $k-\epsilon$  turbulence model is employed to avoid the unrealistic production of turbulence near the wall boundary. The GC\_DS (Gradient Correction\_ Dynamically Stabilized) scheme proposed by Tsuruta et al. (2013) is adopted to reduce the numerical dissipation. The numerical results, in terms of free surface profile, mean velocity field, vorticity field, turbulent kinetic energy and turbulent shear stress, are compared with experimental data. Very reasonable agreement is observed. This paper presents the first comprehensively validated 2D ISPH model with the  $k-\epsilon$  turbulence closure, which can be applied to transient free surface wave problems.

Keywords: 2D ISPH;  $k-\epsilon$  model; wave breaking; turbulent kinetic energy

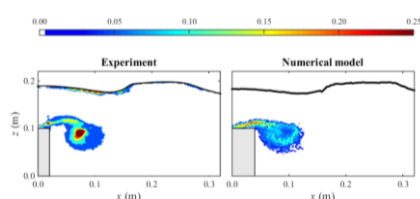


Fig. 1. Comparisons between experimental data (left) and numerical results (right) for turbulence intensity (m/s)

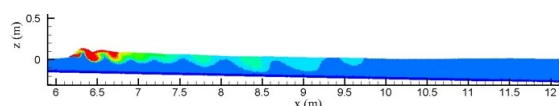


Fig. 2. Evolution of turbulent kinetic energy ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) under a breaking wave.

## Depth-integrated wave-current models

Zhengtong Yang\*

\* Scientist, Technology Centre for Offshore and Marine, Singapore

### ABSTRACT

A set of depth-integrated wave—current models are derived for simulating wave transformation and waves interacting with vertically sheared current. In the present models, horizontal velocities are decomposed into two components. The first part deduces to the prescribed current velocity when waves are absent. And the second part is approximated in a polynomial form. The resulting depth-integrated wave--current models are obtained by applying the weighted residual method. In the absence of currents, the present models are identical to those in Yang & Liu (2020). In the presence of the prescribed current, validations and investigations are then conducted for periodic waves on currents with complex vertical profiles in one-dimensional horizontal (1DH) space. Furthermore, the new models are applied to wave--current interactions in two-dimensional horizontal (2DH) space by considering wave propagation over a vortex-ring-like current.

Keywords: Depth-integrated model; Wave modelling; Wave—current interactions

### Introduction

In the coastal environment, waves and currents are two dominating flow features, engaging various physical processes with different spatial and temporal scales. As ocean waves propagate from deep water to shallow water they evolve through interaction with bathymetry and currents (e.g., reflection, refraction, diffraction, and shoaling). Accurate descriptions of these phenomena are essential for understanding nearshore hydrodynamics and engineering applications. On the other hand, wave—current interaction is a classic oceanic phenomenon that has been studied for several decades. Most previous studies assume irrotational flows and adopt the fully nonlinear potential flow theory (Dommermuth and Yue, 1988). However, currents in the natural environment may contain a certain degree of shear in both vertical and horizontal directions, and the effects of vorticity on ocean surface waves cannot always be ignored.

Yang & Liu (2020) (referred as YL20 herein) presented a hierarchy of depth-integrated wave--current models, in which the vertical profile of the horizontal velocity was approximated as a series of polynomials. Since the total horizontal velocity (the combination of

current and wave velocities) was approximated in YL20, a higher degree polynomial must be used to simulate deeper water waves and/or currents with complex profiles in the water column. To overcome this shortcoming, a new approach is proposed so that the vertical profile of the current can be adopted in the model without further approximation. The new approach decomposes the solutions for the horizontal velocity into two unknown components: the first component adopts the vertical profile of the prescribed steady-state current in the  $\sigma$ -coordinate, which contains the unknown free surface elevation. The constraint on the first solution component is that, in the absence of waves, it reduces to the prescribed steady-state current field. The second component of the horizontal velocity is approximated in the polynomial form in a similar way as shown in YL20. Euler equations and boundary conditions are used to constrain the total solutions.

### Methodology

In this study, we assume that water is incompressible and inviscid, and the free surface flow is governed by the Euler equations. When waves are

absent, a steady-state current field is assumed to exist, with a prescribed velocity field and corresponding free surface elevation distribution. As waves propagate into the current field, the resulting wave—current interaction problem is the solution of the Euler equations and boundary equations. The derivation of the 2DH mathematical model is briefly presented here.

By replacing the pressure term with the vertical momentum equation, the horizontal momentum equation of the Euler equations in the  $\sigma$ -coordinate can be written as

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial \sigma} \sigma_t + u_j \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial \sigma} \sigma_{x_i} \right) + w \frac{\partial u_i}{\partial \sigma} \sigma_z = -g \frac{\partial(H-h)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{\sigma}^1 \frac{1}{\sigma_z} p_{nh} d\sigma + \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_z} p_{nh}, \quad (1)$$

where

$$p_{nh} = \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} \sigma_t + u_j \left( \frac{\partial w}{\partial x_j} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} \sigma_{x_i} \right) + w \frac{\partial w}{\partial \sigma} \sigma_z. \quad (2)$$

And  $u_i$  and  $w$  are the horizontal and vertical velocity components in the  $\sigma$ -coordinate, respectively. The total water depth is denoted by  $H = h + \eta$ . Finally,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_{x_i}$ , and  $\sigma_z$  are the derivatives of  $\sigma$  with respect to time, horizontal and vertical coordinates, respectively.

We seek solutions for the total horizontal velocity and total water depth in the following form

$$u_i(x_i, \sigma, t) = u'_i(x_i, \sigma, t) + u_i^*(x_i, \sigma), \quad (3)$$

$$H(x_i, t) = \eta'(x_i, t) + \eta^c(x_i) + h(x_i), \quad (4)$$

where the total free surface elevation has been decomposed into an unsteady component,  $\eta'$ , and the prescribed current-induced surface elevation,  $\eta^c$ . On the other hand, the horizontal velocity,  $u_i$  has been decomposed into two components,  $u'_i$  and  $u_i^*$ . In the absence of waves (i.e.,  $u'_i = \eta' = 0$ ),  $u_i^*$  becomes the prescribed steady-state current field. Finally, the horizontal momentum equation becomes

$$H_{mtm} = -g \frac{\partial(H-h)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{\sigma}^1 \frac{1}{\sigma_z} V_{mtm} d\sigma + \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_z} V_{mtm} \quad (5)$$

where

$$H_{mtm} = \frac{\partial u'_i}{\partial t} + \frac{\partial(u'_i + u_i^*)}{\partial \sigma} \sigma_t + (u'_j + u_j^*) \left( \frac{\partial(u'_i + u_i^*)}{\partial x_j} + \frac{\partial(u'_i + u_i^*)}{\partial \sigma} \sigma_{x_i} \right) + w \frac{\partial(u'_i + u_i^*)}{\partial \sigma} \sigma_z, \quad (6)$$

$$V_{mtm} = \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} \sigma_t + (u'_j + u_j^*) \left( \frac{\partial w}{\partial x_j} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} \sigma_{x_i} \right) + w \frac{\partial w}{\partial \sigma} \sigma_z. \quad (7)$$

Following YL20, a trial solution with a polynomial structure in terms of the vertical coordinate  $\sigma$  is proposed to approximate  $u_i$  i.e.,

$$\tilde{u}_i(x_i, \sigma, t) = \sum_{k=1}^K U_{ik}(x_i, t) \sigma^{(k-1)}, \quad (8)$$

While the depth-integrated continuity equation can be readily obtained by integrating the continuity equation from bottom to the free surface, the vertical dependence in the horizontal momentum equations, equation (5), is removed by adopting the weighted residual method, i.e.,

$$\int_{c_q}^{c_{q+1}} \left\{ H_{mtm} + g \frac{\partial(H-h)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{\sigma}^1 HV_{mtm} d\sigma - V_{mtm} \left( \frac{\partial h}{\partial x_i} - \sigma \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) \right\} d\sigma = 0, \quad (9)$$

$$q = 0, 1, 2, \dots, (K-1)$$

where  $c_q$  are the free parameters with  $c_0 = 0$  and  $c_K = 1$  (see YL20 for the recommended values). The equations above become the same as those presented in YL20 in the absence of the prescribed steady-state current. However, in the presence of the prescribed current field, many additional terms appear in the forms of derivatives and integrals of  $u_i^*$ .

## RESULTS AND DISCUSSION

The mathematical models are implemented numerically to study various wave transformation and wave—current interactions problems. As an illustration, figure 1 shows the instantaneous free surface elevations at the end of the numerical simulations for irregular wave propagation over a submerged shoal (Vincent and Briggs, 1989), and figure 2 shows the comparisons of significant wave heights between the laboratory

experiments and numerical results at the measurement transect. Very good agreements are obtained for all three different incident wave conditions.

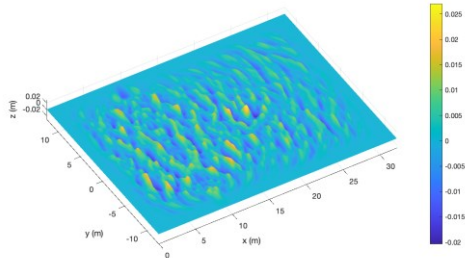


Figure 1 Free surface elevations of broadly spreading irregular wave propagation over a submerged shoal (Vincent and Briggs, 1989).

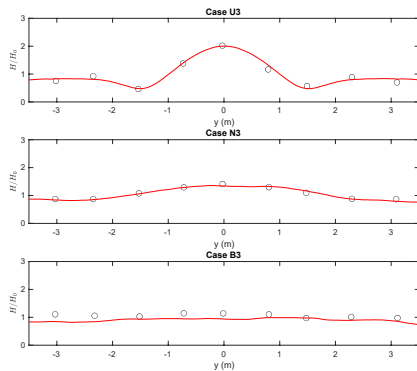


Figure 2 Comparisons of significant wave heights between numerical results (red line) and experiment data (black circles) at transect 4 for three cases.

In terms of wave—current interactions, we consider nonlinear periodic waves with two complex current profiles: the exponential profile and the sinusoidal profile. The normalized current velocity profiles in the water column are shown in figure 3. The incident wave conditions are prescribed as follows: wave amplitude,  $a=0.1$  m; wave period,  $T=2$  s; constant water depth,  $h=1$  m. The corresponding wavelength is 5.306 m, and the dimensionless wave parameters,  $kh=1.18$  and  $ka=0.12$  or  $H/h=0.2$  are obtained based on the third-order Stokes wave theory.

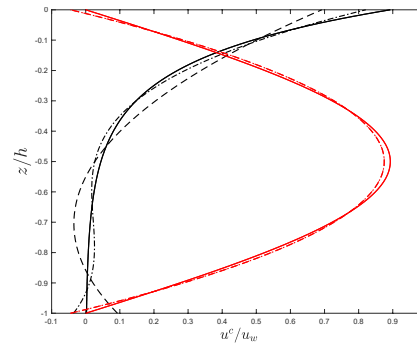


Figure 3 Normalized current velocity profiles. The black solid line denotes the exponential current profile, and the red solid line represents the sinusoidal current. The dashed lines and dash-dotted lines are the quadratic and cubic polynomial fitted results, respectively.

A snapshot of the calculated velocity and horizontal vorticity field for waves propagating against the exponentially sheared current (waves are propagating to the left) is shown in figure 4. Since the current velocity and the wave particle velocity are in the same order of magnitude, the total velocity is almost zero at the wave crest. Moreover, the negative horizontal velocity under the wave trough is enhanced by the presence of the current. As for the vorticity field, when the wave is absent, the vorticity field is uniform in the horizontal direction, but has a maximum value at the still water surface and decays into the water column. With the consideration of waves, the vertical stratification of the vorticity field is stretched or compressed as the wave comes by. This feature is further illustrated in figure 5, where the vertical profiles of the total horizontal velocity and vorticity at five phases, evenly spaced from wave crest to trough, are shown. The total horizontal velocity is normalized by the maximum horizontal velocity estimated from Stokes wave theory without current. In the same figure, the profiles of the horizontal velocity and vorticity for the pure current are also plotted.

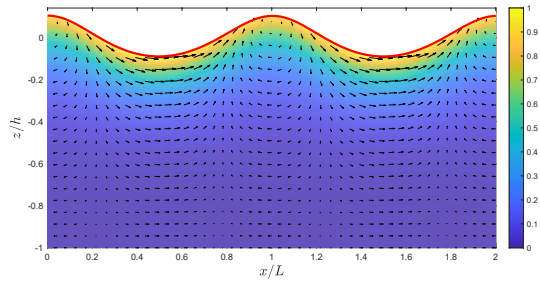


Figure 4 The velocity field (arrows) and vorticity field (color) for waves on opposing current with an exponential profile. Waves propagate to the left, and currents move to the right.

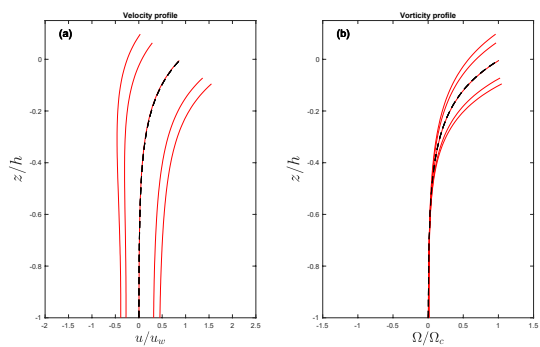


Figure 5 (a) The vertical profiles of horizontal velocity for waves on opposing current with an exponential profile. Red lines represent the total horizontal velocity at different phases from wave crest to wave trough (left to right) with equal increment; Black-dashed line denotes the pure current profile without waves. (b) The corresponding vertical profiles of the vorticity field. Black-dashed denotes the vorticity profile for current without waves.

The new models are applied to wave–current interactions in 2DH. As an illustration, the effects of a vortex-ring-like current (Mapp et al. 1985) on wave transformation are studied using present models by considering both linear shallow water and weakly nonlinear intermediate water waves. In figure 6, spatial distributions of normalized wave heights for the shallow water depth case and the intermediate water depth case are displayed, and the location of the vortex-ring-like current is symbolically represented by two concentric circles. It can be observed that the vortex-ring-like current has stronger refraction effects on shorter waves, resulting in different wave patterns for these two cases, especially on the lee side of the current.

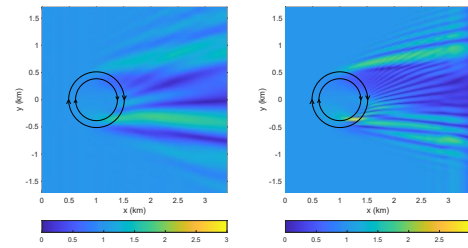


Figure 6 Left panel: spatial distribution of the normalized wave heights for the case of shallow water depth wave. Right panel: spatial distribution of the normalized wave heights for the case of intermediate water depth wave.

The normalized wave heights along six transects for the case of shallow water incident wave are shown in the left panels of figure 7. The results from a Boussinesq-type model (Zou et al. 2013) are also shown (in black dots) in the same panel. These two models have produced similar results with slight discrepancies in the region of  $y > 0$ , where waves follow the currents. Lastly, the wave height variations along the same transects for the case of intermediate water depth are also shown in the right panels of figure 7. At  $x = 1.2594$  km, the maximum wave height is almost three times the incident wave height because of the enhanced nonlinearity. On the other hand, the diffracted waves behind the vortex-ring-like current show much stronger spatial variations for their shorter wavelengths.

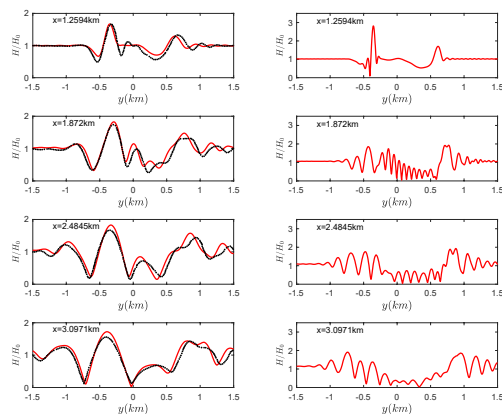


Figure 7 Normalized wave heights along six transects. Left panels: Comparisons between the present model (red lines) and the Boussinesq model (black dots) for the shallow water depth case. Right panels: The present model results for the intermediate water depth case.

## References

1. Dommermuth, D. G., & Yue, D. K. (1988). The nonlinear three-dimensional waves generated by a moving surface disturbance. In Proceedings of the 17th Symposium on Naval Hydrodynamics (pp. 59-71). National Academy Press.
2. Mapp, G. R., Welch, C. S., & Munday, J. C. (1985). Wave refraction by warm core rings. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C4), 7153-7162.
3. Vincent, C. L., & Briggs, M. J. (1989). Refraction—diffraction of irregular waves over a mound. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(2), 269-284.
4. Yang, Z. T., & Liu, P. F. (2020). Depth-integrated wave–current models. Part 1. Two-dimensional formulation and applications. *Journal of Fluid Mechanics*, 883.
5. Zou, Z. L., Hu, P. C., Fang, K. Z., & Liu, Z. B. (2013). Boussinesq-type equations for wave–current interaction. *Wave Motion*, 50(4), 655-675.



# The horizontal velocity component of finite amplitude solitary wave: comparison of theoretical solutions and HSPIV experimental results

Yufei Wang\*

\* PhD Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore

## ABSTRACT

The most popular solitary wave's theoretical solutions have been studied in this paper. It has been found that the surface profiles described in the theories are agreed with each other from lower to higher solitary waves. Meanwhile, the horizontal velocity fields are not. Especially for a higher amplitude solitary wave, when  $\alpha > 0.4$  ( $\alpha$  is defined in equation 1). To verify the velocity field, laboratory experiments for the various amplitude solitary waves have been conducted in the NUS hydraulic lab. The velocity components are measured by an HSPIV system to compare with different theoretical works. The horizontal velocity profile under the wave crest is selected as a critical location and is used for comparison with theories. For a lower amplitude solitary wave, all the theories are agreed with experimental velocity measurements. For a higher amplitude solitary wave, McCowan (1891) and Clamond (1999) give better fits with experimental measurements but not perfect matches. McCowan (1891) gives better estimations near the free surface; Clamond (1999) gives better estimations near the bottom.

Keywords: Solitary wave; Flow visualization; HSPIV;

## I. Introduction

Solitary wave is known as a permanent wave; it does not change shape, while propagating in a constant water depth. It is also called a soliton with enormous applications in coastal engineering and other physical science fields, such as fiber optics, magnets, and nuclear physics (Birse 1990). In particular, in coastal engineering, solitary waves have been used to model tsunami (Wu et al. 2010).

The development of the solitary wave theory has a long history. Dating back to 1834, Russell was the first one who reported observing this permanent wave (Russell 1845). During the last century, many theoretical works have been carried out to find the mathematical expression for solitary wave and to understand the underlying physics for this rather unique phenomenon.

The common assumptions of all the theories are that the wave amplitudes have to be sufficiently small, and the water depth has to be sufficiently shallow.

There is Boussinesq (1871) first introduced the Boussinesq approximation in which the effect of frequency dispersion  $\epsilon$  is as important as that of the nonlinearity  $\alpha$ , associated with the finite amplitude, and derived the well-known Boussinesq wave equation.

$$\alpha = \frac{H}{h}, \quad \epsilon = (kh)^2 \quad (1)$$

Where  $H$  is the water amplitude,  $h$  is the water depth,  $k$  is the wave number.

Grimshaw (1970) applied perturbation theory to Laplace equations and boundary conditions and derived a third-order solution in terms of  $O(\alpha)$  for solitary waves with larger amplitudes. Fenton (1972) presented his solutions up to the ninth order,  $O(\alpha^9)$ . Following the same procedure, Longuet & Cokelet (1976) provided solutions up to the 14<sup>th</sup> order,  $O(\alpha^{14})$ . In Fenton (1990), a fifth order cnoidal wave solution was derived with a different small parameter. And the limiting case solitary wave solution is the same as Wu et al. (2005), whose solitary wave solutions could reach up to the eighteenth order in terms of a different small

parameter  $\epsilon$ . With several restraints of the solitary wave, McCowan (1891) proposed a complex summation-formed function of velocity potential and stream function that satisfied all the conditions. The first approximation are given in the paper. Clamond (1999) developed a new solution of the solitary wave by means of renormalization of the  $KdV$  equation and forcing the free surface to be satisfied the corresponding surface boundary conditions.

For the convergence study of the perturbation theories, most of them focused on the surface elevation or bulk parameters. However, the velocity components convergence has not been studied thoroughly. To fill this gap, the solutions of all the theories have been reproduced and compared with experimental data.

## II. Methodology

The solutions of all the theories have been represented. The horizontal velocity profiles under the wave crest have been explicitly analysed. The convergence of perturbation theories has been checked in terms of horizontal velocity components.

The experiments have been conducted in the NUS hydraulic laboratory. The dimension of the wave flume is 36m\*0.9m\*0.9m. As shown in Figure 1, there is a piston-type wavemaker installed at one end of the wave flume. The wave flume is equipped with six capacitance wave gauges (CG), two Acoustic Doppler Velocimeters (ADV), and a synchronized high-speed particle image velocimetry (HSPIV) system for velocity field measurements with an 800Hz-1100Hz sampling rate. The experiments were conducted in three different water depths. For each water depth, the target  $\alpha$  are 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 and 0.6. For each case, the PIV experiments were repeated 10 times.

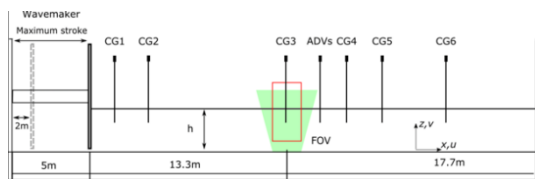
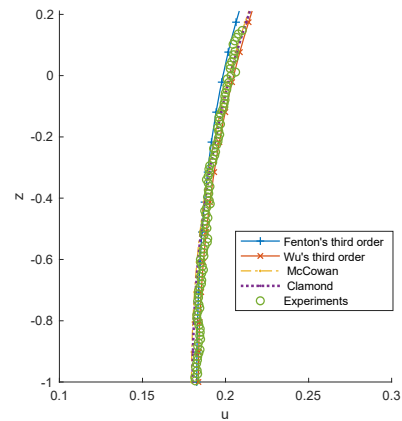


Figure 1. Configuration of the wave flume in the NUS

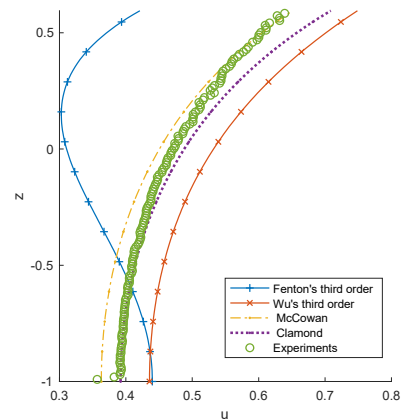
Hydraulic Laboratory. The Field of View (FOV) is marked by the red rectangle. The HSPIV system is located at 18.3m from the paddle's rest position.

## III. Conclusion

In terms of velocity components, the perturbation theory based on  $\alpha$  is going to diverge when  $\alpha$  is large. The experimental data shown in this section is ten-runs ensemble-averaged data. When the solitary wave amplitude is relatively low (see Figure 2.(a) as an example), the experimental measurements match all the theories within a reasonable range. When the solitary wave amplitude is relatively high (see Figure 2.(b) as an example), there are discrepancies between Fenton (1990) (identical with Wu et al. (2005)) theories and experimental data. The Clamond (1999) gives a better description near the bottom. The McCowan (1891) gives a better estimation near the free surface.



(a)  $\alpha = 0.198, h=0.18m$ .



(b)  $\alpha = 0.595, h=0.18m$

Figure 3. The horizontal velocity profile under the wave crest along the water column. Comparison between PIV measurements with Fenton (1972) third order solution in terms of  $\alpha$ , Wu et al. (2005) third order solution in terms of  $\epsilon$ , McCowan (1891), and Clamond (1999) solution.

## Acknowledgements

The author gratefully acknowledges her PhD advisor Professor Philip L-F Liu, for inspiring guidance and great support. The author also thanks Dr. Ignacio Barranco and Dr. In Mei Sou for generous help in experiments.

## References

1. Birse, Michael C. 1990 Soliton models for nuclear physics. *Progress in Particle and Nuclear Physics* 25, 1-80.
2. Boussinesq, Joseph. 1871 Théorie de l'intumescence liquide appelée onde solitaire ou de translation se propageant dans un canal rectangulaire. *CR Acad. Sci. Paris* 72 (755-759).
3. Clamond, Didier. 1999 Steady finite-amplitude waves on a horizontal seabed of arbitrary depth. *Journal of Fluid Mechanics* 398, 45–60.
4. Fenton, John. 1972 A ninth-order solution for the solitary wave. *Journal of Fluid Mechanics* 53 (2), 257–271.
5. Fenton, John D 1990 Nonlinear wave theories. *Ocean Engineering Science* 9, 1–18.
6. Grimshaw, R. 1970 The solitary wave in water of variable depth. *Journal of Fluid Mechanics* 42 (3), 639–656.
7. Longuet-Higgins, M. S. & Cokelet, E. D. 1976 The deformation of steep surface waves on water. i. a numerical method of computation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 350 (1660), 1–26.
8. McCowan, J. 1891 VII. on the solitary wave. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 32 (194), 45–58.
9. Russell, John Scott. 1845 .
10. Wu, Theodore Yaotsu & Murashige, Sunao 2010 On tsunami and the regularized solitary-wave theory. *Journal of Engineering Mathematics* 70 (1-3), 137–146.
11. Wu, Theodore Yaotsu, Wang, Xinlong & Qu, Wendong 2005 On solitary waves. part 2 a unified perturbation theory for higher-order waves. *Acta Mechanica Sinica* 21 (6), 515–530.

# 以波潮耦合模式探討輻射應力對臺灣東北岸風暴潮之影響：以 2015 年蘇迪勒颱風為例

蔡育霖<sup>1\*</sup> 吳祚任<sup>2</sup> 劉立方<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所博士候選人

<sup>2</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所教授

<sup>3</sup>國立新加坡大學土木與環境工程學系特聘教授、國立中央大學水文與海洋科學研究所講座教授、康乃爾大學土木與環境工程學系 1912 級工學講座教授

## 摘要

本研究以波潮耦合模式，探討 2015 年蘇迪勒颱風期間，輻射應力對臺灣東北岸風暴潮之影響。本研究使用之波潮耦合模式，由 COMCOT-SURGE 風暴潮模式、SWAN 近岸風浪模式和 TPX08-atlas 全球天文潮模式建構而成，可完整模擬風暴潮生成、傳播、近岸溢淹等物理過程，並考慮風浪和潮汐效應。耦合模式結果與 2015 年蘇迪勒颱風期間之浮標和潮位站等觀測資料驗證，均有良好比對結果。本研究之數值耦合實驗顯示，輻射應力對臺灣東北岸風暴潮峰值有 30 至 50% 貢獻，其中，以蘇澳測站最為顯著；此外，本研究亦發現臺灣東北岸風暴潮峰值與颱風登陸時間相近。本研究結果顯示，風浪能量消散後之輻射應力對臺灣東北岸風暴潮模擬之重要性，並建議未來風暴潮模擬應考慮輻射應力作用，以避免對於近岸風暴潮峰值之低估。

關鍵詞：COMCOT-SURGE、SWAN、TPX08-atlas、輻射應力、波潮耦合模式、蘇迪勒颱風

## Study of Wave-Enhanced Radiation Stress to Coastal Storm Surges on the Northeast Coasts of Taiwan Using Surge-Wave Coupling Model: Case Study of the 2015 Typhoon Soudelor

Yu-Lin Tsai<sup>1\*</sup>, Tso-Ren Wu<sup>2</sup>, Philip Li-Fan Liu<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Ph.D. Candidate, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

<sup>2</sup>Professor, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University

<sup>3</sup>Distinguished Professor, National University of Singapore;

Chair Professor, Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University;

Class of 1912 Professor in Engineering, Emeritus, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University

## ABSTRACT

This study adopted a surge-wave coupling model to investigate the radiation stress effect on coastal storm surges along the northeast coasts of Taiwan during the 2015 Typhoon Soudelor. The surge-wave coupling model package, consisting of COMCOT-SURGE, SWAN, and TPX08-atlas, simulates storm surges from offshore, nearshore, to inland inundation with the tide and wind wave effects. The surge-wave coupling simulation results compared with the observations from buoys and tide gauges show a satisfactory agreement. Furthermore, the numerical experiments show that the radiation stresses contribute 30–50% of peak surges along the northeast coasts of Taiwan, especially the Suao station. Besides, the results indicate that the maximum surges along the northeast tend to occur near the time of landfall. Thus, the results of this study imply that wave-enhanced radiation stress plays a vital role in simulating coastal storm surges on Taiwan's northeast coasts. Moreover, this study suggests considering the radiation stress effect in storm surge simulations to minimize a possible underestimation of coastal peak surges.

Keywords: COMCOT-SURGE; SWAN; TPX08-atlas; Surge-Wave Coupling Model; Ty Soudelor

## 一、前言/Introduction

在未來全球氣候暖化、海平面上升與極端颱風事件逐漸增加之情境下 (Schiermeier, 2013; Needham et al., 2015)，近岸地區受風暴潮所造成之水位上升和溢淹，已成為現今災害防治之重點。

臺灣位於西北太平洋與南海交界，水氣含量充沛，平均每年約有 3 至 4 個颱風侵襲 (Wu and Kuo, 1999)，其中，不乏強烈颱風或超級颱風襲台，例如，2016 年莫蘭蒂颱風，最低中心氣壓 900 hPa，最大平均風速 60 m/s (中央氣象局颱風資料庫, 2021)。因此，如何準確地計算強烈颱風或超級颱風所造成之近岸風暴潮，已成為科學研究上一重要焦點。

風暴潮為一涵蓋多尺度物理過程之現象，颱風引起之海表面氣壓力梯度和風剪力促使風暴潮生成 (Jelesnianski, 1965)，而風剪力在淺水區域效果更趨顯著，與地形效應相配合，可於近岸地區數倍放大風暴潮波高 (Mori et al., 2014; Tsai et al., 2020)。此外，在風暴潮由開放海洋至近岸傳遞過程中，受科氏力 (Kennedy et al., 2011)、風浪 (Kim et al., 2010) 和潮汐 (Zhang et al., 2007) 等效應之影響。因此，如何完整模擬風暴潮由生成、傳播、溢淹等物理過程，十分考驗數值模式之準確性和穩定度。再者，風暴潮與風浪、潮汐間之交互作用，更加深風暴潮模擬之困難度，使風暴潮模式必須更進一步與全球天文潮模式和風浪波譜模式耦合，方能補全其物理模式之完整性。此外，數值模式所輸入颱風風場之正確性 (Hsiao et al., 2019) 和水深地形之精確度 (Weaver and Slinn, 2010)，亦會直接影響數值模擬結果。

本研究以臺灣東北岸為例，利用波潮耦合模式探討 2015 年強烈颱風蘇迪勒於東北岸 (基隆、宜蘭、蘇澳、烏石等地) 造成之風暴潮，並於數值模擬內考慮風浪和潮汐作用。本研究數值模擬結果均和浮標和潮位站觀測資料進行比對，以驗證耦合之模式準確性。此外，本研究亦透過風暴潮模式與風浪頻譜模式之耦合實驗，探討風浪能量消散後之輻射應力，對東北海岸風暴潮之影響。

## 二、研究方法

本研究使用之波潮耦合模式由 COMCOT-SURGE 風暴潮模式、SWAN 近岸風浪模式和 TPXO8-atlas 全球天文潮模式建構而成。

COMCOT-SURGE 基於劉立方院士團隊所發展之康乃爾大學多重網格海嘯模式 COMCOT (Cornell Multi-Grid Coupled Tsunami Model; Liu et al., 1998)，其擁有非線性項上風法 (Upwind Scheme)、雙向耦合巢狀網格 (Two-Way Grid Nesting) 和移動邊界法 (Moving Boundary Scheme)，可完成模擬風暴潮生成、傳播、近岸溢淹等物理過程。COMCOT-SURGE 之控制方程式，則建構於深度積分之雷諾平均方程式，其質量方程式和動量方程式如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{H} \right) - fQ = \\ -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\rho_a C_d U_{10} U_{10}^x}{\rho_w} \\ - \frac{gn^2}{H^{7/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2} + \frac{F_x}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{H} \right) + fP = \\ -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\rho_a C_d U_{10} U_{10}^y}{\rho_w} \\ - \frac{gn^2}{H^{7/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} + \frac{F_y}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $t$  為時間， $(x, y)$  為空間座標， $\eta$  為自由液面高程， $(P, Q)$  為深度積分之體積通量分量， $f$  為科氏力係數， $P_a$  為海表面氣壓， $U_{10}$  為 10 米風風速， $n$  為曼寧摩擦係數， $A_h$  為水平渦動擴散係數， $\rho_a$  為空氣密度， $\rho_w$  為海水密度， $H$  為總水深， $C_d$  為風阻力係數， $(F_x, F_y)$  為輻射應力梯度。

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) 近岸風浪模式求解波浪作用力平衡方程式 (Wave Action

Density Equation), 控制方程式如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (4)$$

其中， $N$  為波浪作用密度譜 (Wave Action Density Spectrum)， $\sigma$  為波浪相對頻率， $\theta$  為波向角， $(c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$  為波浪作用密度譜在空間域和頻率域之相位速度， $S_{tot}$  為源項和消散項。本研究使用之 SWAN 模式，考慮風浪生成、白沫消散、碎波、底床摩擦、三波和四波交互作用，相關設定可參考 SWAN 手冊 (SWAN, 2019)。

TPX08-atlas 為美國俄勒岡州立大學 (Oregon State University) 所研發之全球天文潮模式 (Egbert et al., 1994; Egbert and Erofeeva, 2002)，可提供天文潮水位或潮流流速，包含 13 個潮汐分潮資訊 (M2; S2; N2; K2; K1; O1; P1; Q1; Mf; Mm; M4; MS4; MN4)。

波潮耦合模式模擬則透過 COMCOT-SURGE 風暴潮模式，耦合 SWAN 近岸風浪模式和 TPX08-atlas 全球天文潮模式進行，於風暴潮模擬內考慮波浪能量消散之輻射應力梯度和潮汐效應 (見圖 1)。氣象場用以驅動風暴潮和風浪頻譜模式，風暴潮模式需同時輸入海表面氣壓和 10 米風場，而 SWAN 風浪頻譜模式僅需 10 米風場為輸入資料。耦合過程中，COMCOT-SURGE 和 SWAN 則使用相對應範圍和網格大小之計算域，而天文潮邊界條件則由 TPX08-atlas 模式產生，並自 COMCOT-SURGE 最外圍網格邊界輸入。

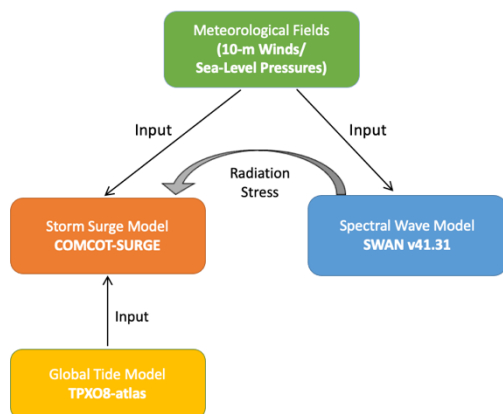


圖 1 波潮耦合模式示意圖，風暴潮模式 (COMCOT-SURGE)、風浪頻譜模式 (SWAN)、全球天文潮模式 (TPX08-atlas)。

本研究所模擬之颱風個案，則由歐洲中期天氣預報中心第 5 代再分析風場 (ECMWF ERA5) 驅動模擬，在進行數值模擬前，ECMWF ERA5 已與浮標觀測海表面氣壓、風速和風向等觀測資料進行驗證，以降低輸入氣象場所帶來之可能誤差。

本研究以 4 層多重巢狀網格模式模擬風暴潮、潮汐、風浪由遠洋至近岸之傳遞過程，解析度分別為 0.1 度、0.02 度、0.004 度和 0.0008 度，輸入地形資料為 ETOPO1、科技部海洋學門 1000 公尺解析度、科技部海洋學門 200 公尺解析度水深資料等。本研究僅考慮單向波潮耦合，即 SWAN 風浪模式所計算之輻射應力梯度導入 COMCOT-SURGE 風暴潮模式內，而水位變化和流速造成之波浪折射效應，則並未考慮於本研究內 (見圖 1)。

### 三、成果與討論

蘇迪勒為 2015 年生成於西北太平洋之強烈颱風，根據統計，颱風期間全臺灣逾 400 萬戶停電，累計降雨量超過 1,000 毫米，並且在馬里亞納群島、臺灣和中國大陸造成嚴重的經濟損失和人員傷亡，因此被提議永久除名。蘇迪勒颱風由臺灣東部登陸，後以西北方向轉往中國大陸，由聯合颱風警報中心所提供之參數所知，颱風最大平均風速超過 51 m/s，並以西北方向朝臺灣接近，且於 8 月 7 日登陸臺灣花蓮一帶，8 月 8 日左右，蘇迪勒颱風由雲林縣離開臺灣，轉往中國大陸前進 (見圖 2)。

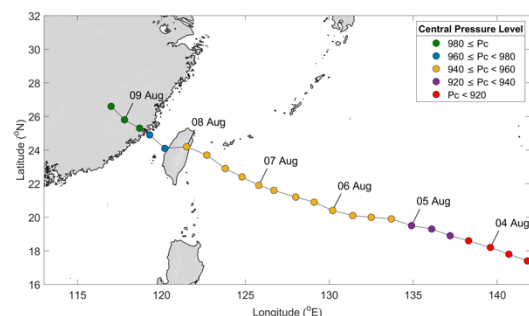


圖 2 蘇迪勒颱風路徑圖，颱風路徑由聯合颱風警報中心 JTWC (Joint Typhoon Warning Center) 最佳路徑資料 (Best-Track Data) 所繪製；颱風中心位置間隔為 6 小時，顏色代表颱風中心氣壓強度。

蘇迪勒颱風於臺灣東部外海時，ECMWF ERA5 10 米風場顯示，最大 10 米風風速約為 38 m/s，且蘇迪勒颱風夾帶強風直襲臺灣東北岸，而颱風風場於颱風中心右側，擁有相對較大之風速，而颱風左側風場受中央山脈影響，風速減弱，而臺灣海峽風場方向由東北風、北風，轉往東南風，風速約有 20 m/s (見圖 3)；蘇迪勒颱風之 ECMWF ERA5 海表面氣壓場顯示，其蘇迪勒颱風中心最低氣壓約為 960 hPa，氣壓線呈現同心圓分佈，氣壓值向外遞增，逐漸接近環境大氣壓力，其颱風壓力分佈於臺灣島大小相似 (見圖 4)。

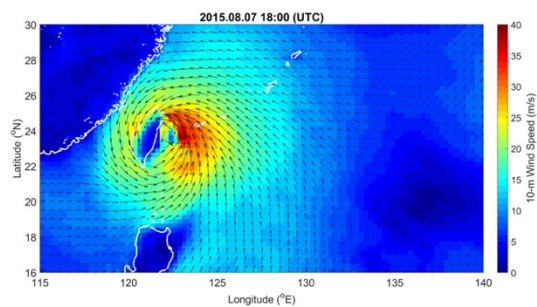


圖 3 2015 年 8 月 7 日 18:00 UTC 時間，ECMWF ERA5 10 米風場，單位為 m/s。顏色表示 10 米風風速，箭頭代表風場方向，白色實線代表 ETOPO1 水深地形之海岸交界。

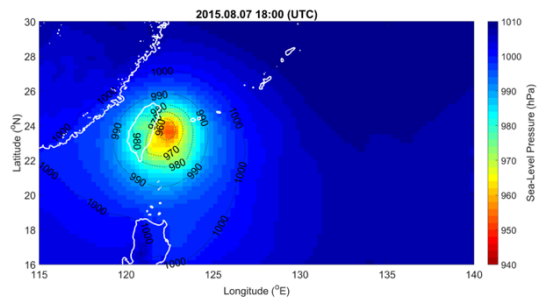


圖 4 2015 年 8 月 7 日 18:00 UTC 時間，ECMWF ERA5 海表面氣壓場，單位為 hPa。顏色表示海表面氣壓，黑色虛線代表等壓線，白色實線代表 ETOPO1 水深地形之海岸交界。

ECMWF ERA5 資料和浮標資料上之海表面氣壓、風速和風向進行驗證。然浮標風速與 10 米風高度不盡相同，因此採用指數律風速公式進行換算 (Hsu et al., 1994)，將浮標風速由 3 米高度，換算至 10 米高度。圖 5 為 ECMWF ERA5 於基隆浮標和龜山島浮標量測資料之比對結果。結果顯

示，龜山島浮標和基隆浮標所記錄之最低海表面氣壓約 970 至 980 hPa 間，而 ECMWF ERA5 結果，與浮標記錄十分吻合，颱風登陸時間恰好與氣壓最低值時間相符 (見圖 5 上)。此外，觀測 10 米風速於颱風登陸時，顯示其風速最大值，所觀測到之 10 米風速最高約為 30 m/s，而 ECMWF ERA5 結果與浮標風速記錄相符，且風速上升和下降之趨勢均和觀測資料一致，風速於 8 月 6 日後開始逐漸遞增，至颱風登陸臺灣時達風速最大值，其後風速逐漸下降，於 8 月 10 日後風速趨近平緩 (見圖 5 中)。在風向之比對，ECMWF ERA5 則與浮標觀測資料趨勢相符合，特別是颱風登陸後之風向轉折處，亦有相當良好之比對成果 (見圖 5 下)。

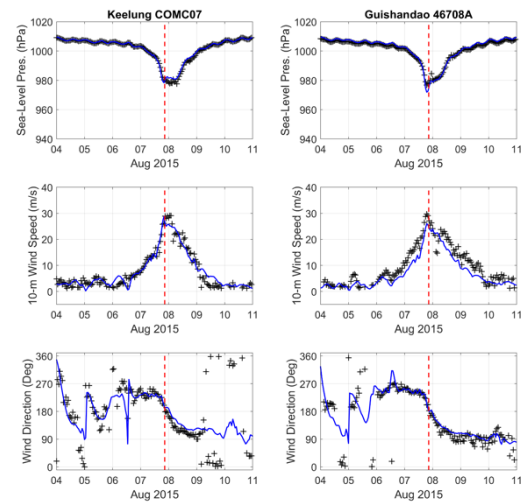


圖 5 ECMWF ERA5 於基隆浮標和龜山島浮標量測資料之比對結果。(上) 海表面氣壓；(中) 10 米風風速；(下) 風向，紅色虛線標明蘇迪勒颱風登陸時間。

2015 年蘇迪勒颱風之浪潮數值耦合模擬結果可見於圖 6。圖 6 所示為基隆、宜蘭沿海一帶於蘇迪勒颱風登陸時之含潮汐效應之總水位模擬結果，最大水位高為 1.0 至 1.3 公尺不等 (見圖 6 左)，可明顯發現水位升高集中於碎波帶 (Surf Zone)；此外，風暴潮於臺灣東北岸之水位抬升與輻射應力梯度強度，在空間上有高度重合性 (見圖 6 右)，在碎波帶範圍內，輻射應力提供額外之向岸動量，並使得近岸水位抬高。由此可知，風浪能量消散後所造成之輻射應力梯度對於長波 (風暴潮)

於近岸之水位抬升，扮演相當重要之角色。

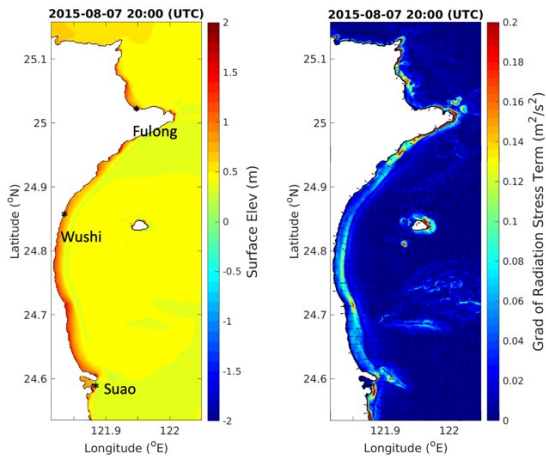


圖 6 (左) 2015 年蘇迪勒颱風登陸時，COMCOT-SURGE 計算之總水位高 (含潮汐效應)，單位為 m，標示處為福隆 (Fulong)、烏石 (Wushi)、蘇澳 (Suao)；(右) 相對應時間下，SWAN 計算之輻射應力梯度，單位為  $m^2/s^2$ 。

本研究亦進行風暴潮模式與風浪頻譜模式之數值耦合實驗，進一步探討輻射應力對於 2015 年蘇迪勒颱風於東北岸引起之風暴潮影響。耦合實驗結果於潮位站之比較，可見於圖 7。圖 7 內所展示之觀測風暴潮資料，由潮位站觀測水位扣除調和分析資料所得，其時間序列間隔時間為 6 分鐘，同時為避免多餘之水位干擾，於觀測資料上進行時間移動平均 (Moving Average) 處理，時間移動平均視窗為 1 小時。圖 7 結果顯示，風浪能量消散後所造成之輻射應力在福隆、烏石、蘇澳等潮位站，有 30–50% 之貢獻 (約 0.35 至 0.5 公尺之水位差異)，其中以蘇澳測站效果最為顯著，但此效應在基隆潮位站並不明顯。此外，本研究亦發現，臺灣東北沿岸風暴潮峰值時間與颱風登陸時間點相近 (見圖 7)。同時，耦合數值實驗結果亦顯示，COMCOT-SURGE 風暴潮模式在與 SWAN 風浪模式耦合之情況下，模擬結果與觀測風暴潮十分吻合，突顯本研究之使用波潮耦合模式準確性。

2015 年蘇迪勒颱風於臺灣東北岸 (基隆、宜蘭一帶) 之研究結果顯示，風浪能量消散後造成之輻射應力，對於臺灣東北岸風暴潮模擬扮演重要之角色，輻射應力約有 30% 至 50% 之水位貢獻。同時，

建議未來風暴潮模擬應考慮其效應，以減低對於颱風期間風暴潮峰值低估之可能性。

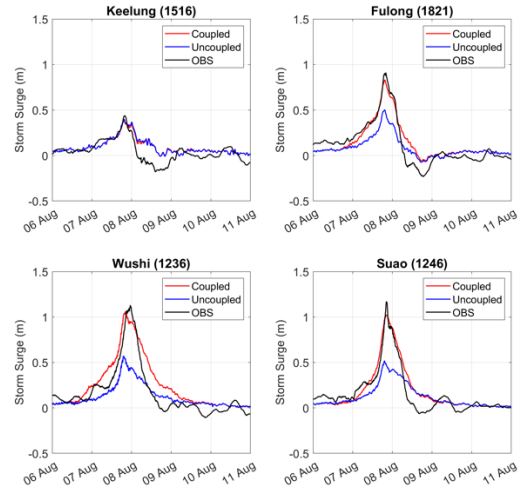


圖 7 2015 年蘇迪勒颱風期間，基隆 (Keelung)、福隆 (Fulong)、烏石 (Wushi)、蘇澳 (Suao) 等潮位站之耦合數值實驗結果比對。紅線為風暴潮模式與風浪模式耦合結果；藍線為風暴潮模式未耦合結果；黑線為觀測風暴潮 (觀測水位扣除調和分析水位)，觀測資料為 6 分鐘 1 筆。

#### 四、結論

本研究以波潮耦合模式，探討輻射應力對臺灣東北岸 (基隆、宜蘭一帶) 風暴潮之影響，並以 2015 年強烈颱風蘇迪勒為例，進行個案分析。本研究使用之波潮耦合模式，建立於 COMCOT-SURGE 風暴潮模式、SWAN 近岸風浪模式和 TPX08-atlas 全球天文潮模式上，此波潮耦合模式可完整模擬風暴潮生成、傳播、近岸溢淹等物理過程。波潮耦合模式結果與 2015 年蘇迪勒颱風期間之浮標和潮位站等觀測資料驗證，均有良好比對結果。此外，本研究進行之數值耦合實驗結果顯示，輻射應力對臺灣東北岸風暴潮峰值有 30 至 50% 貢獻 (約 0.35 至 0.5 公尺之水位)，其中，以蘇澳測站最為顯著。本研究發現，風浪能量消散後之輻射應力對臺灣東北岸風暴潮模擬之扮演相當重要之角色，並建議未來風暴潮模擬應進一步考慮輻射應力效應，以避免對於近岸風暴潮峰值之低估可能性。

#### 謝誌

本文係科技部專題研究計畫 (編號：MOST



108-2917-I-008-001) 和 National Research Foundation of the National University of Singapore (編號: NRF2018NRF- NSFC003ES-002) 經費支持。本研究亦感謝經濟部水利署、交通部氣象局海象測報中心、交通部觀光局所提供之浮標與潮位觀測資料，以及科技部海洋學門資料庫之數值水深地形，供本研究個案分析時使用。

### 參考文獻

- Egbert, G. D. & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183–204.
- Egbert, G. D., Bennett, A. F. & Foreman, M. G. G. (1994). TOPEX/POSEIDON Tides Estimated Using a Global Inverse Model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C12), 24821–24852.
- Hsiao, S.-C., Chen, H., Chen, W.-B., Chang, C.-H. & Lin, L.-Y. (2019). Quantifying the Contribution of Nonlinear Interactions to Storm Tide Simulations during a Super Typhoon Event. *Ocean Engineering*, 194, 106661.
- Hsu, S. A., Meindl, E. A. & Gilhousen, D. B. (1994). Determining the Power-Law Wind-Profile Exponent under Near-Neutral Stability Conditions at Sea. *Journal of Applied Meteorology*, 33(6), 757–765.
- Jelesnianski, C. P. (1965). A Numerical Calculation of Storm Tides Induced by a Tropical Storm Impinging on a Continental Shelf. *Monthly Weather Review*, 93(6), 343–358.
- Kennedy, A. B., Gravois, U., Zachry, B. C., Westerink, J. J., Hope, M. E., Dietrich, J. C., Powell, M. D., Cox, A. T., Luettich, R. A. & Dean, R. G. (2011). Origin of the Hurricane Ike forerunner surge. *Geophysical Research Letters*, 38(8).
- Kim, S. Y., Yasuda, T., & Mase, H. (2010). Wave set-up in the storm surge along open coasts during Typhoon Anita. *Coastal Engineering*, 57(7), 631–642.
- Liu, P. L.-F., Woo, S.-B. & Cho, Y.-S. (1998). *Computer Programs for Tsunami Propagation and Inundation*. Cornell University.
- Mori, N., Kato, M., Kim, S., Mase, H., Shibutani, Y., Takemi, T., Tsuboki, K. & Yasuda, T. (2014). Local Amplification of Storm Surge by Super Typhoon Haiyan in Leyte Gulf. *Geophysical Research Letters*, 41(14), 5106–5113.
- Murty, P. L. N., Srinivas, K. S., Rao, E. P. R., Bhaskaran, P. K., Shenoi, S. S. C., & Padmanabham, J. (2020). Improved cyclonic wind fields over the Bay of Bengal and their application in storm surge and wave computations. *Applied Ocean Research*, 95, 102048.
- Needham, H. F., Keim, B. D. & Sathiaraj, D. (2015). A Review of Tropical Cyclone-Generated Storm Surges: Global Data Sources, Observations, and Impacts. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 545–591.
- Schiermeier, Q. (2013). Did Climate Change Cause Typhoon Haiyan? *Nature*.
- Sheng, Y. P., Paramygin, V. A., Terng, C. T., & Chi-Hao, C. (2016). Simulating Storm Surge and Inundation Along the Taiwan Coast During Typhoons Fanapi in 2010 and Soulik in 2013. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 27(6), 9.
- SWAN. (2019). SWAN User Manual for SWAN Cycle III Version 41.31. Environmental Fluid Mechanics Section, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.
- Tsai, Y.-L., Wu, T.-R., Lin, C.-Y., Lin, S. C., Yen, E. & Lin, C.-W. (2020). Discrepancies on Storm Surge Predictions by Parametric Wind Model and Numerical Weather Prediction Model in a Semi-Enclosed Bay: Case Study of Typhoon Haiyan. *Water*, 12(12), 3326.
- Weaver, R. J. & Slinn, D. N. (2010). Influence of Bathymetric Fluctuations on Coastal Storm Surge. *Coastal Engineering*, 57(1), 62–70.
- Wu, C.-C. & Kuo, Y.-H. (1999). Typhoons Affecting Taiwan: Current Understanding and Future Challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(1), 67–80.
- Zhang, W.-Z., Hong, H.-S., Shang, S.-P., Chen, D.-W. & Chai, F. (2007). A Two-Way Nested Coupled Tide-Surge Model for the Taiwan Strait. *Continental Shelf Research*, 27(10–11), 1548–1567.
- 中央氣象局颱風資料庫. (2021) Website: <https://rdc28.cwb.gov.tw/>

## Modification of Mw 9 Tsunami Wave Impacts due to Dongsha Atoll in South China Sea

Jinghua Wang<sup>1,2,\*</sup> Philip L.-F. Liu<sup>3,4,5,6</sup>

<sup>1</sup>Research Fellow, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University

<sup>3</sup>Distinguished Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore

<sup>4</sup>Distinguished Visiting Chair Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

<sup>5</sup>Class of 1912 Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University

<sup>6</sup>Li Kwoh-Ting Chair Professor, Institute of Hydrological and Ocean Research, National Central University

### ABSTRACT

Tsunamis induced by megathrust in Manila subduction zone impose alarming threats to the coastal cities in northern South China Sea (SCS), and risk assessment of tsunami hazards in this region becomes demanding. One unique geographic feature in this region is the presence of the Dongsha Atoll between the tsunami source zone and China coastline. This study investigated the role of the Dongsha Atoll in modifying the tsunami impacts through simulating a group of synthetic tsunami events with  $M_w=9$ . The results show that the Dongsha Atoll can effectively reduce the tsunami wave heights behind the Atoll and at selected coastal sites. It is concluded that the full model of the topo-bathymetry of the Dongsha Atoll should be employed for future tsunami risk assessments in SCS region.

Keywords: Wave diffraction; Tsunami runup; Coastal flooding

### 1. Introduction

Earthquake in the northern segment of the Manila subduction zone in South China Sea (SCS) can generate potential tsunamis with magnitude  $M_w=9$ . Risk assessment for tsunamis in this region becomes demanding as they impose substantial threats to the safety of many coastal cities in this region, in particular, Hong Kong at the mouth of the Pearl River Delta (PRD) in China (Li, et al., 2016; Li, et al., 2018; Sepúlveda, et al., 2019). The Dongsha Atoll locates between the tsunami source zone and the China coastline (see Figure 1) with a lagoon in the centre enclosed by coral reefs. This unique geological feature gives rise to the science question: whether the Dongsha Atoll has any impact on the tsunamis risk assessment for the coastal cities in the northern SCS region.

In general, offshore island is conventionally believed to protect the coastal communities in its behind against ocean waves. However, this may not be true for tsunamis due to the lack of well-developed

understanding of tsunami wave characteristics (Keen & Lynett, 2019). For instance, numerical simulation of the 2010 Mentawai tsunami event showed that tsunami heights were enhanced behind Sibigau Island (Hill, et al., 2012) (refer to Figure 21 in their paper), indicating that the offshore island may not necessarily protect the residence from tsunami hazards. After the 1992 Flores Island tsunami (Yeh, et al., 1993), many studies have been conducted to gain insight of enhanced runup at the leeside of the offshore island. It was pointed out that the collision of the trapped waves at the leeside is responsible for the increase of runup on the offshore island (Liu, et al., 1995; Briggs, et al., 1995; Kânoğlu & Synolakis, 1998). Some studies also investigated the runup heights on the mainland coast behind the offshore island, and enhanced runup heights were also reported (Stefanakis, et al., 2014; Keen & Lynett, 2019; Han, et al., 2020).

Recently, some numerical studies employed more realistic representations of the geographic and tsunami conditions (Borrero, et al., 2006; Hill, et al., 2012; Kim,

et al., 2015). Keen & Lynett (2019) experimented with different layouts of the island chains and tsunami waveforms, and they concluded that the runup on the coast can either be enhanced or reduced, and the enhancement/reduction depended largely on the waveforms. Therefore, it can be said that the modifications on the tsunami wave characteristics and the resulted runup on the mainland coast are site- and event-specific.

The Dongsha Atoll as the largest atoll reef island in the northern South China Sea (SCS) constitutes a reference site in this study (see Figure 2). This unique geological feature with the urgency for tsunami risk assessment in this region becomes the main driver of this study, and we aim to answer the question: Can Dongsha Atoll enhance/reduce the tsunami impacts on the mainland coastal cities?

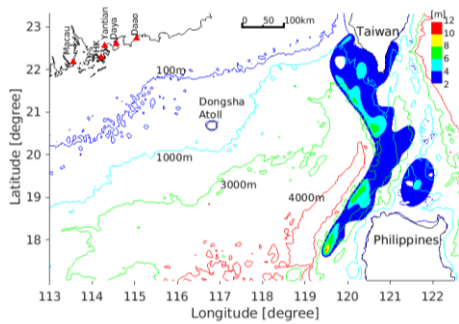


Figure 1. Water depth contours and vertical seafloor displacement (or initial sea surface elevation) of the tsunami wave from the MSL corresponding to the largest earthquake considered in this study.

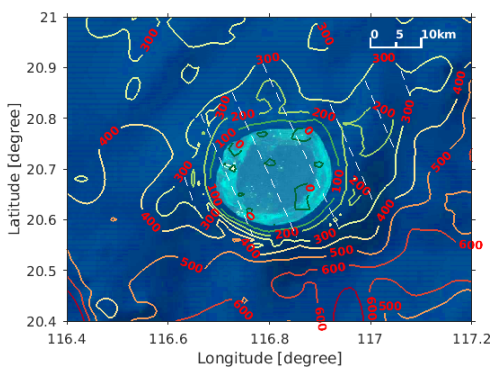


Figure 2. Map of Dongsha Atoll and water depth contours. Texts indicate the water depth in metres.

Credit to Microsoft® Bing Maps® during the production of this figure.

To answer this question, this study will simulate a group of synthetic tsunami events with magnitude  $M_w=9$  in this region by using the Semi-implicit Cross-scale Hydrosience Integrated System Model (short as SCHISM) (Zhang & Baptista, 2008; Zhang, et al., 2016). The obtained simulation results are used to quantify the effects of Dongsha Atoll on modifying the tsunami impacts on the Dongsha Atoll and coastal cities on the mainland.

## 2. Methods

The SCHISM is a derivative product built from the original Semi - implicit Eulerian - Lagrangian Finite - Element model. The details of the model can be found in Zhang & Baptista (2008) and Zhang, et al. (2016) and will not be repeated here. The robustness of this model for simulating tsunami waves has been demonstrated in many studies (Zhang & Baptista, 2008; Zhang, et al., 2011; Zhang, et al., 2015; Wang & Liu, 2021), so details are omitted here.

The model setup is the same with those in Wang & Liu (2021) except that the grid is reduced to 20m~50m in the vicinity of Dongsha Atoll. Two models for representing its presence in the current numerical simulations are described herein:

- Model-1: The whole Atoll is resolved in refined mesh grids. The GEBCO and survey data are used for specifying the bathymetry and topography. Hence, the full interactions between the Atoll and tsunamis can be simulated.
- Model-2: A synthetic scenario is considered where the Dongsha Atoll is not in presence. This is achieved in the numerical simulation by specifying a constant water depth of 300 m within the nearest 300 m water depth contour surrounding the Atoll (area covered by white dash lines in Figure 2), and the mesh is identical with Model-1.

Here we randomly choose 10 earthquake samples with the same condition as described in Wang & Liu (2021). The resulted tsunami wavelength is  $\lambda=95.5\text{km}$  and wavelength to island radius ratio is about 4.8. The

seafloor vertical displacement corresponding to the largest earthquakes is displayed in Figure 1.

### 3. Results

The simulated maximum tsunami height by using Model-2 corresponding to the largest earthquake sample is displayed in Figure 3. It shows that without Dongsha Atoll, the tsunamis can induce a substantial increase of water levels in this region and the maximum water level can reach about 6m~7m. To quantify the modifications on the peak water levels due to the presence of the Atoll, the formula is introduced:

$$R_{\zeta} = (\zeta_p^1 - \zeta_p^2) / \zeta_p^2, \quad (1)$$

where  $\zeta_p^1$  and  $\zeta_p^2$  are the peak water levels corresponding to Model-1 and 2, respectively. Figure 4 shows that  $S_{\zeta} > 0$  on the southeastern side of the Atoll meaning the water levels are enhanced; While  $S_{\zeta} < 0$  in the leeside of the Atoll implying the water levels are reduced. The reduction can be ~50%, and it decreases with increasing distance away from the Atoll.

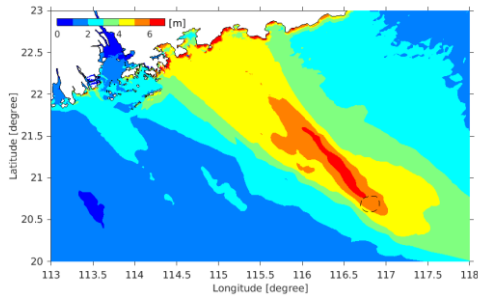


Figure 3. Map of the peak water levels (in metres) measured from MSL based on Model-2 simulation. Black circle indicates the original location of Dongsha Atoll. White colour represents land mask.

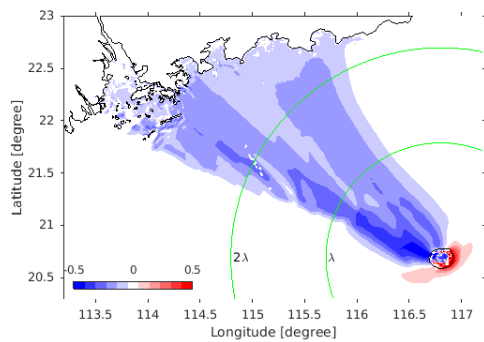


Figure 4. Map of  $R_{\zeta}$  values. Green circles indicate distance from Dongsha Atoll in radius of wavelength.

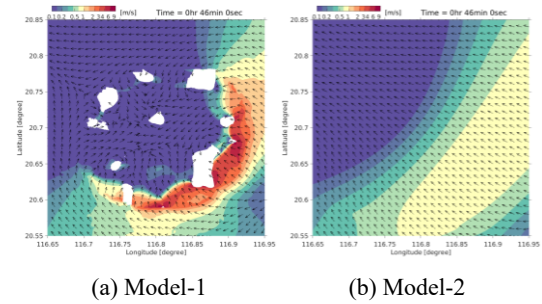


Figure 5. Flow velocity near Dongsha Atoll at 46 minutes after earthquake. Colour indicates the velocity magnitude in m/s, arrows denote the flow direction.

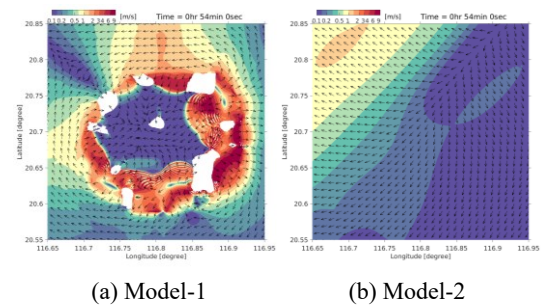


Figure 6. Flow velocity near Dongsha Atoll at 54 minutes after earthquake. Refer to caption of Figure 5.

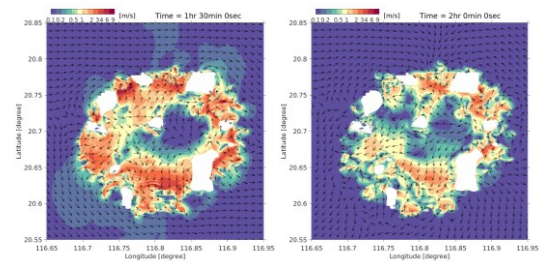


Figure 7. Flow velocity near Dongsha Atoll at 1.5hours (left) and 2hours (right) after earthquake in Model-1 simulation. Refer to caption of Figure 5.

The instantaneous flow velocities in the vicinity of the Atoll are presented in Figure 5~7. At 46 minutes after the earthquake (Figure 5), the leading tsunami wave arrives in the vicinity of Dongsha Atoll. In Model-2 simulation (Figure 5(b)), the flow velocity is about 1m/s moving in the northwest direction. While in Model-1 simulation (Figure 5(a)), the leading tsunami waves have wrapped around the perimeter of the Atoll, and a strong velocity of about 8m/s pointing towards the centre of the lagoon can be seen along the southeastern perimeter of the Atoll.

Figure 6 displays the velocity fields after 54

minutes. In Model-2 simulation (Figure 6(b)), the leading tsunami wave stretches across the original Atoll location. However, the results from Model-1 are very different as shown in Figure 6(a). The flow enters the lagoon with maximum velocity of about 9m/s. Meanwhile, the outgoing flow is observed along the southeastern openings. One distinguishable feature at this moment is the generation of short waves riding on the forefront.

In summary, the Atoll can enhance the flow velocities near the Atoll. During the diffraction, a rapid runup and strong momentum influx through the openings to the lagoon is observed in Model-1 simulation. The trapped wave is found to persist in the lagoon and slowly leak out of the lagoon and dissipate over a long duration (see Figure 7). Therefore, it can be said that the entrapment of the momentum/energy by the lagoon may be the cause for reducing the tsunami heights at the leeside of the Atoll in Model-1.

Next, the water level time histories recorded at selected sites (see their locations in Figure 1) are analysed. The signals corresponding to the smallest and largest earthquakes obtained by using the two models are presented in Figure 8. Only the leading wave is displayed as the tsunami scenarios feature a ‘Maximum First’ pattern (Okal & Synolakis, 2016). In Model-2 simulation, the peak water levels can reach ~7m / 5m at Yantian (Figure 8(c)) / Daao (Figure 8(e)) corresponding to smallest / largest earthquake. They become ~5m / 3.5m at Daya Bay (Figure 8(d)), and ~3.5m / 2.7m at Hong Kong (Figure 8(b)). Macau reports the smallest peak water levels among the five stations, which are ~1.4m / 0.9m. In general, the peak water levels at all stations are reduced and the arrival times of the peaks are delayed in Model-1 simulations.

To quantify the modification of the tsunami wave heights at selected sites, the modification ratios (i.e., Eq. (1)) are calculated and the results are summarized in Figure 9. It shows that the absolute ratios of the reduction are smallest at Yantian (~5%). Meanwhile the maxima of about 7% is observed at Hong Kong.

Relatively large standard deviations are observed at Macau. Based on that, it can be concluded that the presence of the Dongsha Atoll can reduce the peak water levels induced by the tsunamis at these coastal cities.

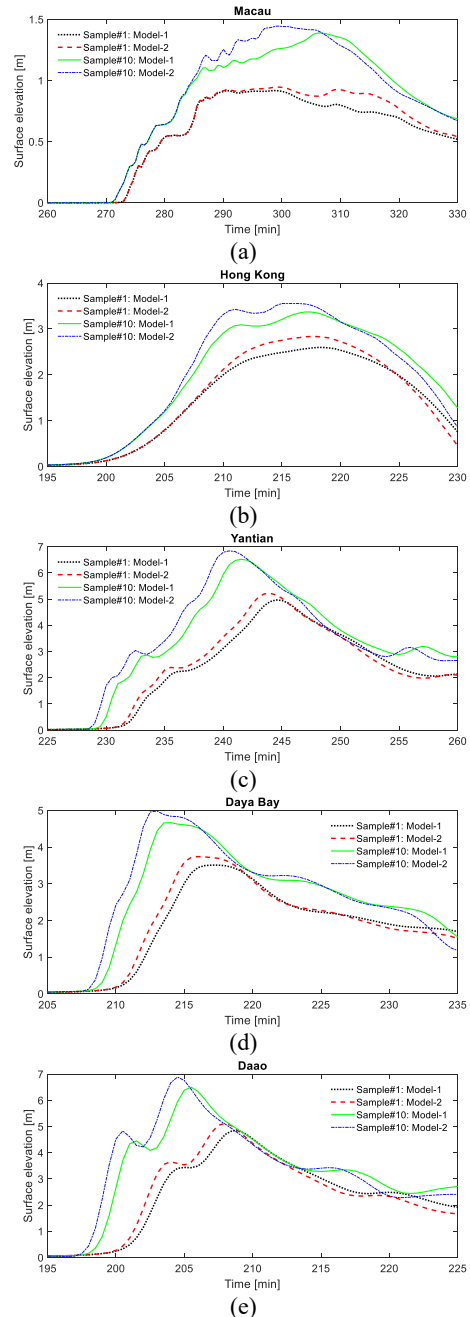


Figure 8. Surface elevation time histories at selected coastal cities.

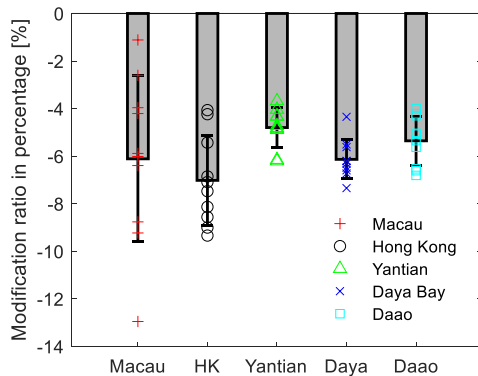


Figure 9. Values of  $R_{\zeta}$  in percentage at selected coastal cities. Grey bars indicate the mean values and error bars represent the standard deviations.

## 4. Conclusions

In this study, the effects of Dongsha Atoll on modifying the impacts of potential tsunami hazards in the northern South China Sea region are investigated. The tsunamis are generated by a  $M_w=9$  earthquake in the Manila subduction zone and a total of 10 samples of earthquakes are considered. The nonlinear shallow water wave model SCHISM is employed to simulate these synthetic events. Two types of representations of the Dongsha Atoll are considered in the numerical simulations. Specifically, i) the bathymetry and topography of the Atoll are fully resolved (Model-1) and ii) the Atoll is removed (Model-2).

The results show that the Dongsha Atoll can effectively reduce the magnitude of the peak water levels behind the Atoll by  $\sim 50\%$ . The results of the velocity patterns in the vicinity of Dongsha Atoll indicate that the tsunami wave momentum/energy can be entrapped by the lagoon and slowly radiated to the ocean. Therefore, it can be said that the entrapment of momentum/energy should be responsible for reducing the tsunami heights at the leeside of the Atoll. In the coastal region, the smallest reduction of the peak water levels is  $\sim 5\%$  at Yantian and the maximum reduction is  $\sim 7\%$  at Hong Kong. Therefore, it is affirmed that the modification on tsunamis impacts due to the offshore island is site-specific, and it is recommended to employ

the full model for the topo-bathymetry of the Dongsha Atoll in future tsunami risk assessment in the SCS region. However, the limitation of this study is that the effects of tidal current are not considered in the present simulations. Future work needs to consider tides, tsunamis and their nonlinear interactions simultaneously. In addition, the conclusions may not hold if the geographic or earthquake conditions are changed.

## Acknowledgements

The authors want to thank Prof. Yang-Yih Chen at National Sun Yat-sen University for providing the bathymetry and topography data for Dongsha Atoll. The authors also show gratitude to Prof. Kai Meng Mok at University of Macau for providing the topo-bathymetry data of Macau. The numerical model used the topo-bathymetry information of Hong Kong that can be requested from Hydrographic Office of the Marine Department of Hong Kong (<http://www.hydro.gov.hk>) and Civil Engineering and Development Department of Hong Kong (<http://www.hyd.gov.hk>). The GEBCO 30 arc sec bathymetry data is freely available at General Bathymetric Chart of the Oceans website (<http://www.gebco.net/>). The authors also want to thank Dr. Ignacio Sepúlveda at San Diego State University for providing the earthquake data for tsunami wave initiation in this study. The authors acknowledge the support of a research grant from the National Research Foundation Singapore to the National University of Singapore (Award number: NRF2018NRF-NSFC003ES-002). PLF Liu would also like to acknowledge the support through the Yushan Scholar Program awarded by the Ministry of Education in Taiwan.

## References

1. Borrero, J. C., Sieh, K., Chlieh, M. and Synolakis, C. E., (2006) Tsunami inundation modeling for western Sumatra, *Proceedings of the National*

- Academy of Sciences*, 103(52), pp. 19673-19677.
2. Briggs, M. J., Synolakis, C. E., Harkins, G. S. and Green, D. R., (1995) Laboratory experiments of tsunami runup on a circular island, *Pure and applied geophysics*, 144(3), pp. 569-593.
  3. Han, S., Kaihatu, J., Lynett, P. and Synolakis, C., (2020) Tsunami runup amplification of breaking and non-breaking error-function waves over a sloping beach in shadow zone by a small island, *Coastal Engineering Proceedings*, Vol. 36v, pp. 13-13.
  4. Hill, E.M., Borrero, J.C., Huang, Z., Qiu, Q., Banerjee, P., Natawidjaja, D.H., Elosegui, P., Fritz, H.M., Suwargadi, B.W., Pranantyo, I.R. and Li, L. (2012) The 2010 Mw 7.8 Mentawai earthquake: Very shallow source of a rare tsunami earthquake determined from tsunami field survey and near-field GPS data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 117, p. B06402.
  5. Kanoğlu, U. and Synolakis, C. E. (1998) Long wave runup on piecewise linear topographies, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 374, pp. 1-28.
  6. Keen, A. S. and Lynett, P. J. (2019) Experimental study of long wave dynamics in the presence of two offshore islands, *Environmental Fluid Mechanics*, 19(4), pp. 941-968.
  7. Kim, K. O., Kim, D.C., Choi, B.H., Jung, K.T., Yuk, J.H. and Pelinovsky, E. (2015) The role of diffraction effects in extreme run-up inundation at Okushiri Island due to 1993 tsunami, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(4), pp. 747-755.
  8. Li, L., Switzer, A.D., Chan, C.H., Wang, Y., Weiss, R. and Qiu, Q. (2016) How heterogeneous coseismic slip affects regional probabilistic tsunami hazard assessment: A case study in the South China Sea, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8), pp. 6250-6272.
  9. Li, L., Switzer, A.D., Wang, Y., Chan, C.H., Qiu, Q. and Weiss, R. (2018) A modest 0.5-m rise in sea level will double the tsunami hazard in Macau, *Science advances*, 4(8), p. eaat1180.
  10. Liu, P. L.-F., Cho, Y.S., Briggs, M.J., Kanoglu, U. and Synolakis, C.E. (1995) Runup of solitary waves on a circular island, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 302, pp. 259-285.
  11. Okal, E. A. and Synolakis, C. E. (2016) Sequencing of tsunami waves: why the first wave is not always the largest, *Geophysical Journal International*, 204(2), pp. 719-735.
  12. Sepúlveda, I., Liu, P. L.-F. and Grigoriu, M. (2019) Probabilistic tsunami hazard assessment in South China Sea with consideration of uncertain earthquake characteristics, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(1), pp. 658-688.
  13. Stefanakis, T. S., Contal, E., Vayatis, N., Dias, F. and Synolakis, C.E. (2014) Can small islands protect nearby coasts from tsunamis? An active experimental design approach, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 470(2172), p. 20140575.
  14. Wang, J. and Liu, P. L.-F. (2021) Numerical study on impacts of a concurrent storm-tide-tsunami event in Macau and Hong Kong, *Coastal Engineering*, Vol. 170, p. 104000.
  15. Yeh, H., Imamura, F., Synolakis, C., Tsuji, Y., Liu, P. L.-F. and Shi, S. (1993) The Flores island tsunamis, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 74(33), pp. 369-373.
  16. Zhang, J., Zheng, J., Jeng, D. S. and Guo, Y. (2015) Numerical simulation of solitary-wave propagation over a steady current, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 141(3), p. 04014041.
  17. Zhang, Y. and Baptista, A. M. (2008) SELFE: a semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation, *Ocean modelling*, 21(3-4), pp. 71-96.
  18. Zhang, Y. J. and Baptista, A. M. (2008) An efficient and robust tsunami model on unstructured grids. Part I: Inundation benchmarks, *Pure and Applied Geophysics*, 165(11-12), pp. 2229-2248.
  19. Zhang, Y. J., Witter, R. C. and Priest, G. R. (2011) Tsunami-tide interaction in 1964 Prince William Sound tsunami, *Ocean Modelling*, 40(3-4), pp. 246-259.
  20. Zhang, Y. J., Ye, F., Stanev, E. V. and Grashorn, S. (2016) Seamless cross-scale modeling with SCHISM, *Ocean Modelling*, Vol. 102, pp. 64-81.

# A Machine Learning Approach for Geometrical Volume of Fluid Methods: Application to Water Waves

Asim Önder<sup>\*</sup>, Philip L.-F. Liu<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Research Fellow, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore

<sup>\*\*</sup> Distinguished Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore

## ABSTRACT

Accurate estimation of the normal and curvature fields of the air-water interface is essential for the accuracy of Volume of Fluid methods simulating water waves. We apply the machine learning paradigm to estimate these geometric features from volume fraction fields. To this end, multilayer neural network architectures that are designed for regular uniform grids are developed and implemented into OpenFOAM. The models are tested against the most established methods in the literature and their superior accuracy is shown.

Keywords: machine learning; gravity-capillary waves; volume of fluid method; surface-tension modelling;

## 一、前言/Introduction

Simulation of water waves is of primal interest in marine engineering and oceanography fields. Very accurate predictions are achieved, when the viscous and rotational effects are negligible. In this idealized regime, nonlinear potential flow equations can be efficiently integrated in large domains for long time periods using high-order numerical methods. However, in some practical scenarios, e.g., generation and propagation of wind waves, the wind shear and turbulence are the main driving force, hence viscous and rotational effects are prevalent. In such complex settings, the full Navier-Stokes equations need to be solved for the coupled air-water system. Despite the ever increasing computational power, it is still a major challenge to accurately simulate the motion of air-water interface under the influence of turbulence and surface tension. Novel algorithms are required to capture the rapidly evolving interface, singular surface forces and large density ratios.

A popular method to simulate immiscible fluids is the Volume of Fluid (VOF) method, which has found widespread use in engineering applications. VOF

methods solve the mass and momentum equations on a fixed grid using single fluid formalism where different phases are separated by a sharp volume fraction field describing the ratio of a selected phase in each cell. The dynamics of the interface is then tracked by advecting the volume fraction field. A major problem in this process is the numerical diffusion leading to a smeared interface. To remedy this issue, modern VOF methods adopt a geometric approach. These methods approximate the segment of the interface in each multi-material cell by Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC) algorithm [1] (see figure 1 below) and subsequently advect the reconstructed interface by mapping the material volumes in time. In PLIC, there are several different approaches to find the normal and position of the linear segment. The overall accuracy of the method heavily depends on the accuracy of these individual sub-algorithms. When the surface tension forces are also important, an additional challenge is the approximation of the local curvature of the interface using the volume fraction field. This has been proven to be difficult, as the volume fraction field inherently has very sharp gradients.

In the current work, a machine learning approach



is developed to approximate the normal and curvature of the fluid-fluid interface. To this end, densely connected neural networks with multiple layers are trained using random wave fields. In this methodology, volume fractions in adjacent Cartesian grid cells fed into a neural network with multilayer perceptron architectures. The developed models are then implemented into the open-source library OpenFOAM [2] and tested on gravity-capillary waves exhibiting parasitic ripples.

## 二、實驗設置/Methodology

Two immiscible phases separated by a sharp interface are considered in a two-dimensional Cartesian coordinate system. We seek two separate feedforward neural networks (NNs) to build functional mappings between interfacial normal/curvature and volume fractions. NNs are comprised of densely stacked layers of artificial neurons, which are the building blocks with designated weights, biases and activation functions [3]. The flexible modular structure allows NNs to capture nonlinear relations with high degree of complexity. To realize this premise NNs have to be trained with a database representative of most practical situations. In this regard, we will utilize a synthetic wave dataset for offline training of NNs since it can cover a wide range of curvature and derivative values. Such data is collected using multiple realizations of irregular wave fields composed of multiple Fourier components in spatially periodic domain. Mathematically, this is expressed by the function

$$\eta(x) = \sum A_n \cos(k_n x + \varphi_n).$$

With the applications of water waves in mind, a natural selection for the wave spectrum is Pierson--Moskowitz spectrum for fully-developed seas,

$$G(\omega) = \alpha_p H_s \omega_p^4 \omega^{-5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right]$$

where  $H_s$  is the significant wave height,  $\omega_p$  is the angular frequency of the peak, and  $\alpha_p$  is the parameter adjusting the energy ( $E$ ) of the spectrum so that  $H_s = 4\sqrt{E}$ . Using the deep-water dispersion relation  $\omega = \sqrt{gk}$ , we can convert the spectrum to wavenumber space, and obtain the amplitude of each component:

$$\frac{1}{2} |A_n|^2 = \sqrt{\frac{g}{k_n}} G(\sqrt{gk_n}) \Delta k$$

where  $\Delta k$  is the spacing in wavenumber space.

As we have a single-valued function for the interface, the expressions for the normal vector and curvature greatly simplify. Assuming a direction convention from bottom fluid layer to the top fluid layer, the normal vector of the wavy interface is given by

$$\mathbf{n}(x) = \frac{1}{\sqrt{\eta_x^2 + 1}} \begin{bmatrix} -\eta_x \\ 1 \end{bmatrix}$$

The signed interface curvature reads

$$\kappa(x) = \frac{\eta_{xx}}{(\eta_x^2 + 1)^{3/2}}$$

The normal vector and curvature of the interface require the knowledge of first and second derivatives of water elevation function which can analytically calculated from Fourier series.

For the training of the machine learning models, we employ a Cartesian grid with uniform spacing  $h = \Delta x = \Delta y$ . The input layers of NNs comprise volume fractions that are defined on a local 5x3 interface block around a given cell (figure 1). The 5x3 stencil has been found to give a good balance between efficiency and accuracy. The output layer of the NN model for the curvature,  $NN_{Curv}$ , contains  $\kappa_{i,j} = \kappa(x_{i,j})$ . To estimate the interface normal vector, only the knowledge of the derivative of water elevation function is required. Therefore, the NN model to estimate the normals,  $NN_{Der}$ , has only the first-order derivative in

its output layer  $[\eta_x]_{i,j} = \eta_x(x_{i,j})$ .

To produce a well-balanced dataset, we consider a wide range of significant wave heights  $H_s = \{1, 2, 4, 8, 16\} m$  on multiple grid resolutions  $h = \{0.125, 0.25, 0.5, 1, 2\} m$ . A single radian frequency is selected  $\omega_p = 0.5 rad/s$  which correspond to a dominant wavelength of  $\lambda_p = 250 m$ . We generate data for each  $(H_s, h)$  pair using a domain of 4000 m length in OpenFOAM v2006. Random wave fields in each realization is obtained by using a different random seed every time for the phases of wave components. Once the phases, hence the water elevation function, are determined, the volume fractions are precisely set by dividing each interface cell into 40 subcells and numerically integrating the water elevation function using midpoint rule. For each  $(H_s, h)$  pair a dataset with  $2.5 \times 10^5$  interface blocks, each containing  $5 \times 3$  volume fraction and the corresponding first derivative and curvature values, is generated. Having  $5 \times 5$  possible pairs, the whole dataset contains  $6.25 \times 10^6$  interface blocks. For training and validation purposes, this dataset is divided into two parts with 0.65 and 0.35 ratios, respectively.

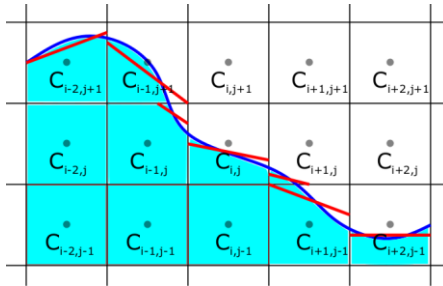


圖 1 Approximation of the air-water interface with piecewise linear segments using Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC) algorithm. A  $5 \times 3$  stencil of volume fractions is employed in the input layer of the neural networks.

Weights and biases of the machine learning models are found by minimizing the mean-square error between the predictions and analytical derivative and curvature expressions. Finding the optimal architecture for NNs is a difficult task. Choices have to be made for

the number of layers, neuron count in each layer, and activation functions. These are the hyperparameters of the NN. Another difficulty in model development is the stochastic nature of the model training. Random initialization of weights and biases lead to a different local optimum every time in large datasets. In this regard, many trials are necessary to find the optimal hyperparameters, weights and biases. In each of these tests, stochastic gradient algorithm with 5000 epochs is used. After about 1000 trials, the most efficient architectures are selected. The resulting NNCurv model has four hidden layers containing 15 neurons each, whereas NNDer model has only two layers with 15 neurons. In these hidden layers, tanh activation function is employed as it performed better than relu activation function. Linear activation function is employed in the output layer.

A gravity-capillary wave exhibiting a train of parasitic ripples is selected to test the models. The capillary ripples are difficult to reproduce with VOF method. The current method in OpenFOAM estimates the curvature by taking second-order derivative of volume fractions [6], a procedure known to be very inaccurate due to discontinuous nature of volume fractions. A much better method is the Height Function method [7] which applies derivatives on height functions that are obtained by columnwise summation. In this process, a  $3 \times 7$  stencil is employed, where the larger column is aligned with the dominant normal direction. A variant of the Height Function method can be adapted to estimate the interface normals as proposed by Aulisa et al. (2007) [8]. Aulisa et al. combined this method with Young's method, and termed Mixed Youngs-Centered (MYC) method. They achieved close to second-order accuracy with the MYC method. Height Function and MYC methods are the main workhorse in popular multiphase CFD solvers such as Basilisk [9]. Therefore, we have implemented these methods also into OpenFOAM to benchmark against our machine learning models.

The problem is initialised with a fifth-order Stokes

wave [4] that has a wavelength  $\lambda = 5$  cm and steepness  $ak=0.25$ . The wave propagates in a horizontally periodic domain of  $x \in [0, 5$  cm] and  $y \in [-7.5$  cm, 7.5 cm]. A Cartesian grid with three successive refinements are prepared, in which the wave sits in a regular-grid zone with 800 cells in horizontal direction, cf. figure 2. The grid spacings are uniform in each grid zone. The reconstructed material volumes is advected using the isoAdvector algorithm [10] and a very low CFL number of 0.002 is employed to minimize the advection errors. Two main cases are NNDer\_NNCurv (NN models both for the normal vector and curvature) and MYC\_HF (MYC for the normal and the Height Function method for the curvature).

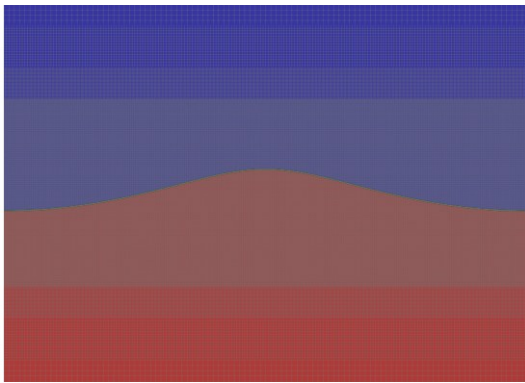


圖 2 Computational grid with three successive refinement zones.

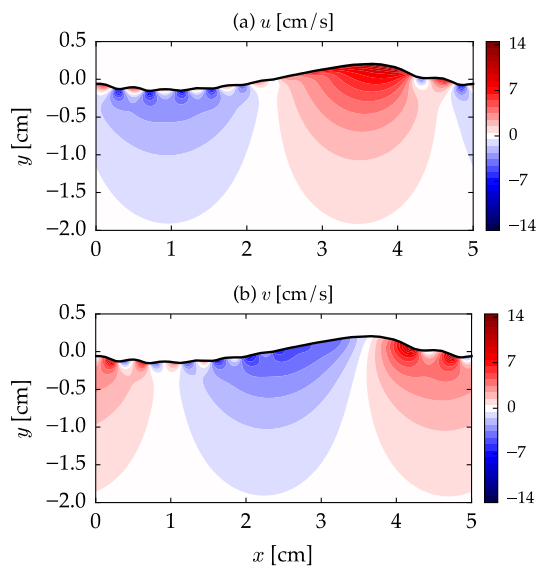


圖 3 Horizontal (a) and vertical (b) velocity fields of the gravity-capillary wave at  $t = 2T_0$ . The data is obtained with machine learning models (case NNDer\_NNCurv).

After approximately one period, the wave develops parasitic ripples and reach rapidly a quasi-equilibrium state afterwards, cf. Hung and Tsai (2009) [5] for details. A snapshot of velocity fields at  $t = 2T_0$  is shown in figure 3 where  $T_0$  is the period according to the linear theory. In figure 4, The water elevations at  $t/T_0 = 2, 4$  and 6 are compared against the data from Hung and Tsai (2009) [5]. We observed slowly increasing phase lags in time that are about  $2^\circ - 3^\circ$  in NNDer\_NNCurv and about  $3^\circ - 6^\circ$  in MYC\_HF. The results in figure 4 are therefore phase adjusted. The numerical simulations in Hung and Tsai (2009) were conducted using a free-surface model in transformed coordinates where they considered only the water phase. Therefore, there was no air friction in their simulations, which might explain the phase lags in our simulations. Both cases perform well initially and capture capillary wave trains very accurately at  $t = 2T_0$  (figure 4a). At later times, MYC\_HF begins separate from the rest, and starts show noticeable discrepancies, especially at the backward slope of the carrier wave, see  $x > 3$  cm in figure 4c. Case NNDer\_NNCurv perfectly matches the reference data at all times. Additional tests combining MYC and NNCurv (MYC\_NNCurv) has shown that the errors in MYC\_HF are due to inaccuracies in height function method. It is remarkable the height function method despite using a larger stencil (3x7) delivers inferior results than NNCurv model (5x3 stencil).

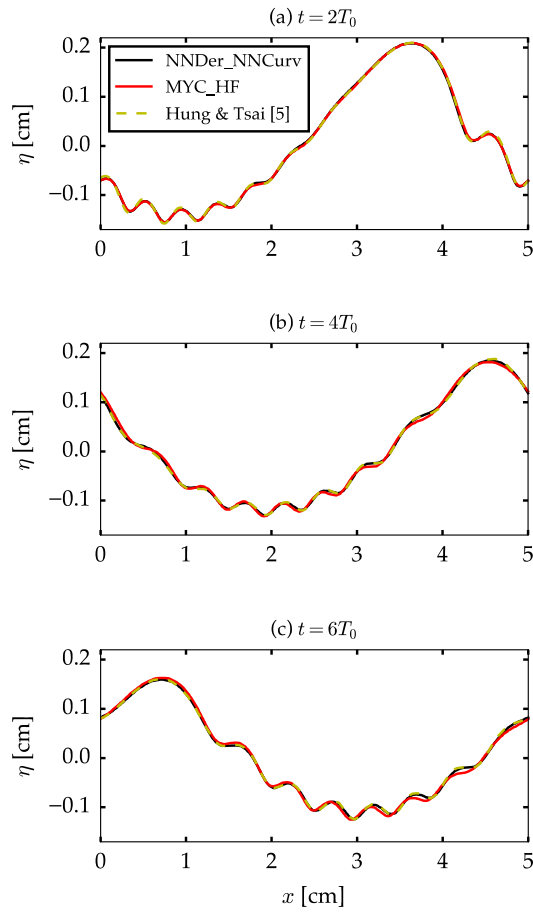


圖 4 The water elevations obtained with machine learning models (NNDer\_NNCurv) and MYC-height function schemes (MYC\_HF) are compared with the data from Hung and Tsai (2009) [5].

### 三、結論/Conclusion

In the present work, deep neural network models are developed to estimate the interface normal vector and curvature using volume fractions in two-dimensional two-phase flows. The models are implemented into OpenFOAM and tested on a gravity-capillary wave problem which exhibits a train of parasitic ripples. Neural network models have superior accuracy compared to the state of the art methods in the VOF literature. These results point to a clear potential for the adaptation of machine learning algorithms into VOF frameworks.

Future work includes the test of models on more challenging cases, e.g., breaking waves. The extension to three dimensions is also in development. The OpenFOAM library containing the neural network models, and height function and MYC implementations can be found online in [11].

### 謝誌/Acknowledgements

The research reported here has been supported by a Tier 2 grant from Ministry of Education of Singapore to National University of Singapore. The computational work for this article was fully performed on resources of the National Supercomputing Centre, Singapore (<https://www.nscg.sg>).

### 參考文獻/References

1. Rider, W. J., & Kothe, D. B. (1998) Reconstructing Volume Tracking. *Journal of Computational Physics*, 141(2), 112–152.
2. OpenFOAM. ESI Group. <https://www.openfoam.com/documentation/overview>
3. Aggarwal, C. C. (2018). *Neural Networks and Deep Learning*. Springer.
4. Fenton, J. D. (1985) A Fifth-order Stokes Theory for Steady Waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 111 (2): 216–34.
5. Hung, L.-P., and Tsai, W.-T. (2009) The Formation of Parasitic Capillary Ripples on Gravity–Capillary Waves and the Underlying Vortical Structures. *Journal of Physical Oceanography*, 39(2), 263–289.
6. Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C. (1992) A continuum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics*, 335–354.
7. Cummins, S. J., Francois, M. M. and Kothe, D. B. (2005) Estimating curvature from volume fractions, *Computers & Structures*, 83(6), 425–434.
8. Aulisa, E., Manservigi, S., Scardovelli, R., and Zaleski, S. (2007) Interface reconstruction with least-squares fit and split advection in three-dimensional Cartesian geometry. *Journal of Computational Physics*, 225(2), 2301–2319.
9. Popinet, S. (2009) An accurate adaptive solver for

- surface-tension-driven interfacial flows. *Journal of Computational Physics*, 228(16), 5838–5866.
10. Roenby, J., Bredmose H., and Jasak H. (2016) A Computational Method for Sharp Interface Advection. *Royal Society Open Science* 3 (11): 160405.
  11. Önder. A. (2021) machineLearningVOF: a VOF library for neural network models in OpenFOAM. <https://github.com/asimonder/machineLearningVOF>

## Recent investigation on the protective function of mangroves against coastal waves

Che-Wei Chang\*

\*Assistant Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan

### ABSTRACT

Mangroves in the tropics and subtropics protect coastal regions from extreme waves. Characterized by the complex and special root systems, mangroves can dissipate wave energy and mitigate sediment erosion, which provides a nature-based approach against climate change. This study aims to seek better quantification of mangrove effects on water waves by conducting laboratory experiments and field surveys. In laboratory tests, 3D-printed tree models were used to replicate the scaled-down root structure of typical mangroves. With direct measurements of wave forces and fluid velocity, the drag and inertia coefficients were estimated and their empirical relationships with flow parameters were proposed. The impacts of mangrove roots on fluid velocity and turbulent kinetic energy were also investigated. In addition to laboratory tests, field surveys were conducted to measure the characteristics of mangrove roots and their variety. A 3D laser scanner was also used to capture the detailed structure of mangroves. The relationships between the representative parameters of mangrove morphology provide a useful dataset for the parameterization of mangroves in numerical simulations.

Keywords: Mangrove; 3D-printed tree; drag coefficient; inertia coefficient; coastal protection

### 1. Introduction

Green infrastructure utilizes ecosystems to provide a nature-based solution for the reduction of coastal disasters. Its capability of adapting to changing climate and cost-effectiveness (IPCC 5th Assessment Report; Reguero et al. 2018) both highlight the promising role of green infrastructure in future coastal management.

Mangroves, as a major type of nature-based approach, were identified for their capability against extreme waves in recent tsunami and storm events (Danielsen et al. 2005; Das and Vincent 2009). The special root system of mangroves can also reduce coastal erosion and stabilize shorelines, counteracting the sea level rise. In addition, their capacity for carbon storage contributes to the mitigation of climate change. Despite growing interests in their function in adapting to future risks, practical implementation of mangroves for coastal protection requires proper quantification of their effects on water waves. Accordingly, many studies were conducted in the past two decades and idealized vegetation, e.g. rigid cylinders in Huang et al. (2011),

was commonly used to investigate wave-vegetation interaction processes and vegetation effects on wave dissipation. The simplified vegetation model may represent coastal trees without complicated structures, yet can underestimate the resistance to water waves induced by mangroves and their complex roots (Tanaka et al., 2007). Recently, a few studies used artificial tree models with prop roots to address mangrove-type of vegetation, e.g. Maza et al. (2019). However, systematic investigation is still needed for better quantification of mangrove effects on wave attenuation to benefit future coastal planning.

Thus, this study aims to investigate mangrove-induced resistance in consideration of the complexity of mangrove root morphology. In laboratory experiments, the root structure of typical *Rhizophora* mangroves was replicated using 3D-printed tree models. In addition, field surveys were conducted to collect the characteristics of mangrove root morphology and their variety. The experimental and field findings will provide a useful tool and dataset for the incorporation

of mangrove effects in numerical models.



Fig 1. Mangrove forests in Iriomote islan, Japan

## 2. Methodology

In laboratory experiments, 3D-printed tree models were used to scale the real root structure of typical mangroves. Considering both regular and solitary waves, mangrove-induced resistance was studied under various incident conditions (i.e. wave periods, wave height, water depths) along with different stem densities. The free surface elevation was recorded by multiple wave gauges along the wave flume to investigate wave attenuation by the model forest. The wave forces on 3D mangrove models were directly measured by a force transducer; fluid velocity was captured by Acoustic Doppler Velocimetry (Chang et al. 2020).



Fig 2. 3D-printed mangroves in the wave flume

In addition to laboratory experiments, field surveys were conducted to investigate the variety of morphological characteristics of mangroves. The representative parameters (e.g. the height and spanning width of mangrove roots, the trunk diameter at breast height) were measured. The detailed root structure of mangroves was captured by using 3D laser scanning technology. The relationships between representative parameters of mangrove root morphology provide a dataset that can be useful for the parameterization of mangrove-induced resistance in coastal hydrodynamic

modeling. The scanned 3D images of mangroves can also be used in 3D numerical simulations or further experiments.



Fig 3. Field measurements (left) and the application of a 3D laser scanner (right)

## 3. Results

Modeling wave-induced forces by the Morison-type equation (Morison et al. 2015):

$$F = \frac{1}{2(\eta + h)} C_D \int_{-h}^{\eta} u|u|dA + \frac{1}{\eta + h} C_M \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial t} dV \quad (1)$$

the drag coefficients  $C_D$  and inertia coefficient  $C_M$  were calculated based on the measured forces and fluid velocity  $u$ . In Eq.(1),  $\eta$  and  $h$  represent the free surface elevation and water depth;  $A$  and  $V$  respectively denote the projected frontal area and the submerged volume of mangroves in which the vertical variation due to the prop roots was included. The empirical formulas of the force coefficients were then proposed as functions of dimensionless flow parameters, i.e. Reynolds number and Keulegan-Carpenter numbers. Fig.4 shows an example of the estimated drag coefficients in terms of Reynolds number, which were defined by using the trunk diameter at breast height ( $D_{BH}$ ) as the characteristic length scale. The proposed formulas can be used to parameterize mangrove effects in numerical simulations. In addition to the empirical formulas, non-negligible inertia force for longer regular waves and solitary waves was observed in measured data, which suggested both drag and inertia components be included to improve the prediction of mangrove resistance. More detailed results, including the behaviors of different empirical formulas, the impacts of mangrove roots on fluid velocity and turbulent kinetic energy, shall be discussed at the conference.

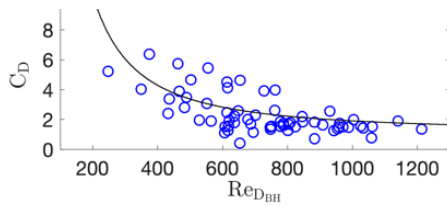


Fig 4. Estimated drag coefficients (circles) and the best-fitting curves (solid lines) for regular-wave tests

Based on the field survey data, the correlations among representative parameters were identified, such as the trunk diameter at breast height, the height of prop roots, and the projected areas of the root system. The relationships between these characteristic factors and tree age also provide a valuable dataset for the parameterization of *Rhizophora* mangroves that can be used in the future development of coastal wave models. Again, more details will be presented at the conference.

## References

1. Chang, C.-W., Mori, N., Tsuruta, N., Suzuki, K. and Yanagisawa, H. (2020) An experimental study of mangrove-induced resistance on coastal waves considering the impacts of typical *Rhizophora* roots (submitted).
2. Danielsen, F., Sørensen, M. K., Olwig, M. F., Selvam, V., Parish, F., Burgess, N. D., Hiraishi, T. et al. (2005) The Asian Tsunami: A Protective Role for Coastal Vegetation, *Science*, 310, 643.
3. Das, S., and Crépin, A.-S. (2013) Mangroves Can Provide Protection against Wind Damage during Storms, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 134, 98-107.
4. Huang, Z., Yao, Y., Sim, S. Y. and Yao, Y. (2011) Interaction of Solitary Waves with Emergent, Rigid Vegetation, *Ocean Engineering*, 38, 1080-1088.
5. IPCC (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
6. Maza, M., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2019) Experimental Analysis of Wave Attenuation and Drag Forces in a Realistic Fringe *Rhizophora* Mangrove Forest, *Advances in Water Resources*, 131, 103376.
7. Morison, J. R., Johnson, J., & Schaaf, S. A. (1950). The force exerted by surface waves on piles. *Journal of Petroleum Technology*, 2, 149-154.
8. Reguero, B. G., Beck, M. W., Bresch, D. N., Calil, J. and Meliane, I. (2018) Comparing the Cost Effectiveness of Nature-based and Coastal Adaptation: A Case Study from the Gulf Coast of the United States, *PLoS ONE*, 13, e0192132.
9. Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood, M. I. M., Jinadasa, K. B. S. N. and Homchuen, S. (2007) Coastal Vegetation Structures and Their Functions in Tsunami Protection: Experience of the Recent Indian Ocean Tsunami, *Landscape and Ecological Engineering*, 3, 33-45.



## An Update for Le Mehaute's Diagram

Kuifeng Zhao<sup>1,2</sup>, Philip L-F, Liu<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore.

<sup>2</sup>Surbana Jurong Consultants Pte Ltd

<sup>3</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University.

<sup>4</sup>Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University, Taiwan

### ABSTRACT

For given periodical wave conditions, it is frequently required by researchers or engineers to identify which type of wave theories is most suitable for application. One simplest way is to refer to Le Mehaute's graph, which provides the applicable range of various wave theories. However, when we tried to reproduce the chart, we found that the curves for separating high order Stokes waves were not well quantified. In this abstract, we prepared an updated Le Mehaute's Diagram with our recently derived Stokes wave solutions up to fifth order.

Keywords: progressive wave; Stokes wave; cnoidal wave; applicable range of periodical wave theories

Funding: This research is supported by the National Research Foundation, PrimeMinister's Office, Singapore under its Marine Science Research and Development Programme (Award No. MSRDP-05)

### Introduction

Le Mehaute's [1] chart has been widely used in coastal community because of its simplicity. Users only need to calculate two parameters from a combination of variables (i.e., water depth  $h$ , wave height  $H$ , and wave period  $T$ ), and find the applicable range of various wave theory solutions based on the chart below. The range of validity of Stokes wave theory was discussed using each order terms of free surface expression in coastal engineering manual. However, these criteria were not implemented in the chart. Moreover, we argue that the parameter  $h/gT^2$  and  $H/gT^2$  may not be the best candidate parameters in the relatively shallow range. Rather we recommend using  $h/L$  and  $H/L$ , where  $L$  is wave length to be obtained using nonlinear dispersions relationship. The purpose of this study is to provide a revised chart for the evaluation of Stokes waves of various order with an updated Stokes wave solution.

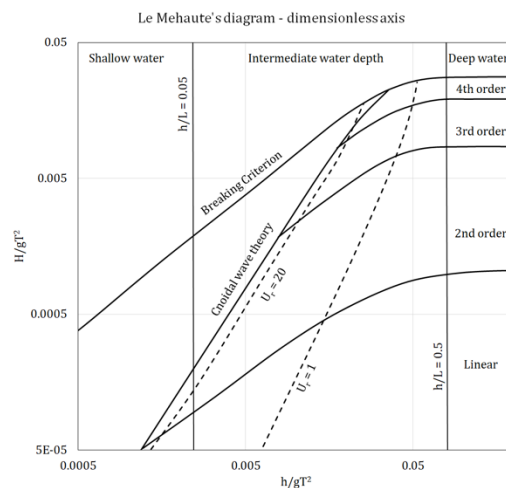


Figure 1. Le Mehaute's diagram redrawn (axis rescaled in terms of dimensionless parameters)

### Periodic Wave Solutions

The two most popular periodical wave solutions are Stokes wave solutions in the intermediate and deep water region, and cnoidal wave solutions for higher Ursell

number (usually in the relatively shallower region). When we were investigating Stokes waves, we noticed that various authors presented different forms of Stokes wave solutions [2,3,4] up to fifth order. Difference starts to appear from third order solutions.

$$\eta/a = \underbrace{\cos \theta}_{A_1} + \underbrace{k\alpha B_{22} \cos 2\theta}_{A_2} + \underbrace{k^2 a^2 (B_{31} \cos \theta + B_{33} \cos 3\theta)}_{A_3} + \underbrace{k^3 a^3 (B_{42} \cos 2\theta + B_{44} \cos 4\theta)}_{A_4} + \underbrace{k^4 a^4 (B_{51} \cos \theta + B_{53} \cos 3\theta + B_{55} \cos 5\theta)}_{A_5} + O[(\pi H/L)^6] \quad 1$$

It makes us wonder what is right and what causes the differences. We derived the solutions for Stokes wave solutions following the methods by Dingemans [2], compared the solutions of various authors carefully, and presented the solutions in a recent manuscript [5]. The free surface expression is shown in Equation 1, where the coefficients can be found in the manuscript separately. In this abstract, we explain how to make use of the expression to update the chart for demarcating the range of Stokes waves of various order. To quantify which order of Stokes wave theory is applicable, we define a ratio parameter as below and suggested a value of 1% as the boundary,

$$\frac{|A_n|_{max}}{|A_{n,prec}|_{max}} = \frac{|A_n|_{max}}{|A_1|_{max} + |A_2|_{max} + \dots + |A_{n-1}|_{max}}, n = 2 \dots 5 \quad 2$$

With the new Stokes wave theory, and the clear definition for quantifying each order's contribution, we have an updated chart as below.

In Figure 2, wave length is obtained using non-linear dispersion relationship for given wave conditions. The blue dashed line indicates wave breaking limit following the equation proposed by Fenton [6]. On the right side, Stokes wave theory is applicable for intermediate and deep water. The limit of  $H/L$  in deep water for each order is shown by the numbers above each line.

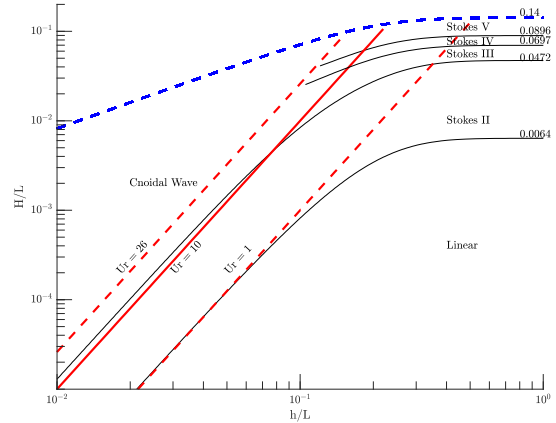


Figure 2. Le Mehaute's diagram updated using new Stokes Wave solutions.

In case users have an even deeper waves than that shown in Figure 2 ( $h/L > 1$ ), users only need to calculate  $H/L$  and find the respective range for applicable order. The wave solutions are lower order compatible, i.e., you can use Stokes V order solution even though the given wave condition falls in the range of linear waves, but not the other way around. We included three lines of Ursell number ( $Ur = 1, 10, 26$ ),

$$Ur = (H/L)/(h/L)^3$$

of which two lines ( $Ur = 10, 26$ ) roughly indicate the boundary between Stokes wave and cnoidal wave theories. In between the two lines, both periodical wave solutions are applicable with similar accuracy [7].

## Summary

In this abstract, we advertise our recently derived Stokes wave solution and update the well known Le Mehaute's diagram using the updated Stokes wave solutions. A comparison of the updated chart and existing chart is shown in the conference presentation. With the recent advancement of Boussinesq type of wave models, a similar chart can be prepared to quantify the non-linearity and dispersiveness to identify which type of wave model is most efficient.

## References

- [1] Le Mehaute B. (1976). An introduction to hydrodynamics and water waves. Springer Science & Business Media.
- [2] Dingemans M. W. (1997). Water wave propagation over uneven bottoms. Vol. 13. World Scientific.
- [3] Skjelbreia L. and Hendrickson J. (1960). “Fifth order gravity wave theory”. In:Coastal Engineering Proceedings 7.
- [4] Fenton J. D (1985). “A fifth-order Stokes theory for steady waves”. In:Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering 111.2, pp. 216–234.
- [5] Zhao K. and Liu P. L-F. (2021) “On Stokes wave solutions” (under review).
- [6] Fenton J. D (1990). “Nonlinear wave theories”. In:Ocean Engineering Science9 (1990), pp. 1–18.
- [7] Holthuijsen, L.H. (2010). Waves in oceanic and coastal waters. Cambridgeuniversity press.

## 滨海断裂带历史大地震海啸影响及警示

李琳琳<sup>1\*, 2</sup> 邱强<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>中山大学地球科学与工程学院

<sup>2</sup>南方海洋科学与工程广东实验室(珠海)

<sup>3</sup>中国科学院南海海洋研究所

### 摘要

我国华南沿海发育的滨海断裂带是南海北部地震最活跃、频度最高、致灾性最强的活动大断层，从东到西总长上千公里，是对华南沿海区域带来潜在地震和海啸威胁的重要发震区域。该孕震带在历史上曾发生 6 级以上的大地震 18 次，7 级以上的强震 4 次，在沿海地区引发了海啸灾害，尤其给发震区域的沿海地带带来重创。然而，由于历史事件年代比较久远，记录资料甚少、不完整，尤其是现代地球物理的观测比较匮乏，因此，滨海断裂带的孕震规律、发震机制尚不清楚。本文将收集和整合滨海断裂带目前在地球物理观测方面所取得的进展和资料，系统性的研究该断层的发震机制和海啸机理，为华南沿海地区的地震海啸灾害评估提供科学数据支撑。本文将 1604 年琼州和 1918 年南澳两种截然不同震源机制大地震为典型案例，展示滨海断裂带在不同区域产生的海啸特征，并讨论这种非典型地震海啸的可能致灾机理。

关键词：滨海断裂带、震源机制、海啸灾害、1918 南澳、1604 琼州地震、COMCOT

## Tsunami impacts and implications from historical earthquakes along the Litoral fault

Linlin Li<sup>1,2\*</sup> & Qiang Qiu<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai, China

<sup>2</sup>Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai, China

<sup>3</sup>South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, China

### ABSTRACT

The Litoral fault was developed along the southeast of coast of China in the northern South China Sea, which is ~1000 km long and is seismically very active, posing a great earthquake and tsunami potential to the southern coast of China. The fault had generated many earthquakes with 18 events Mw >6 and 4 events Mw >7, triggering tsunami waves that brought destructive damages in and around the rupture area. However, most of the earthquakes are old, therefore, information associated with these events including the modern geophysical recordings are poorly and incompletely recorded, consequently, the seismogenic behaviors and rupture characteristics on this fault remain poorly understood. In this study, we collect and compile the available geophysical data and research findings to systematically investigate the seismogenic behaviors and the associated tsunami characteristics. Our results will provide new insights and important data sets for future tsunami hazard preparedness. We take the 1918 Nanao and 1604 Qiongzhou earthquake events as the typical earthquakes with different mechanisms to study the earthquake and tsunami characteristics generated by the Litoral fault at different segments, and finally discuss the possible tsunami hazard along the southeast coast of China.

Keywords: Litoral fault; focal mechanism; tsunami hazard; 1918 Nanao; 1604 Qiongzhou; COMCOT

## 一、前言/Introduction

华南沿海的滨海断裂带是南海北部地震活动强度最大、频度最高的地震带，是对华南沿海地震造成威胁最大的发震区域。历史上曾发生过 6 级以上地震 18 次，7 级以上强震 4 次。7 级以上的事件自西向东包括 1605 年 7.5 级琼州、1600 年 7.0 级南澳、1918 年 7.5 级南澳与 1604 年 8.0 级泉州地震。这一系列历史上已发生的强震表明，未来仍有可能发生强震。那么未来强震如果触发海啸，其影响如何？地震断层参数如何影响其触发海啸的能力？发生在陆架浅水区域的地震所触发的海啸与发生在深海俯冲带区域的地震海啸特点有何不同？

历史资料记载比较明确伴随有海啸发生的地震有 1605 琼州大地震和 1918 年南澳大地震，这两个事件。从震源特征来看，滨海断裂带西段比如 1605 琼州地震，可能是右旋正断裂滑动为主要发震机制，而东部比如 1604 泉州以及 1600、1918 南澳地震区域，可能以右旋逆冲滑动为主。

本文将 1918 年南澳大地震和 1604 年琼州大地震为例，通过海啸数值模拟的手段来定量地回答上述问题，以及讨论这种非典型地震产生海啸的特征与潜在的可能致灾机理。

## 二、实验设置/Methodology

我们基于历史文献记载、震后调查资料和近些年的地球物理探测数据，对 1605 琼州地震和 1918 年南澳大地震的地震参数（震中、破裂范围、断层几何等）进行约束，通过对几组地震参数详细的海啸模拟和对海啸波传播过程、波高分布和典型站点海啸波时序的波谱分析，并且讨论海啸波在海岸带超长周期震荡与大陆架地质构造特点的关系。

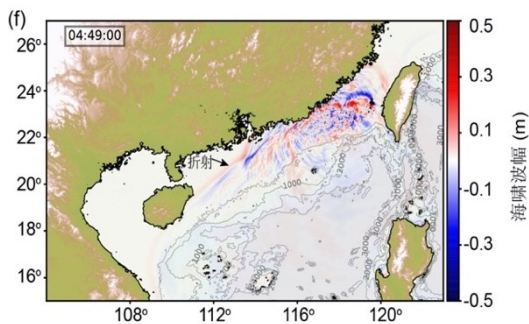


图 1 海啸波在 1918 年震后(a)4 个小时 49 分钟

本文将先采用全球流行的海啸模拟软件 COMCOT(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami)模拟从海啸的产生、传播到海岸带陆侵的整个海啸生命周期的全过程。

## 三、结论/Conclusion

我们的初步研究结果表明，通过对海啸波传播过程、波高分布和典型站点海啸波时序的波谱的详细分析，我们揭示发生在滨海断裂带的地震由于发震位置水深较浅，其所触发的海啸一般仅在局地产产生较大波幅（图 1），但滨海断裂带独特的发震环境使其触发的海啸具有几个危险的特征：1) 滨海断裂带走向大致平行于海岸线和陆架波折带，加上南海北部平坦宽阔的陆架，形成了非常有利的海啸波能捕获环境。海啸波从浅海传播至深海过程中，在陆架边缘区域会发生强烈反射，从而导致绝大部分海啸波被“捕获”在陆架区域，形成边缘波，产生超长时间的震荡（图 2）；2) 陆架边缘的反射作用将会“出乎意料”的将海啸波能量导向距离震源较远的区域，例如陆坡的反射作用会使珠江口西侧沿海遭受的海啸灾害远大于距离震源较近的东侧海岸（图 1）；3) 海啸引发的在沿海各地的强烈退水现象和强流会对沿海重要基础设施产生破坏性影响，强烈退水造成的灾害尤其对港口区域影响最大，可以导致渔船搁浅，锚绳断开，破坏码头桩柱等，同时也会对沿海地区的核电站冷却水取水造成不利影响。

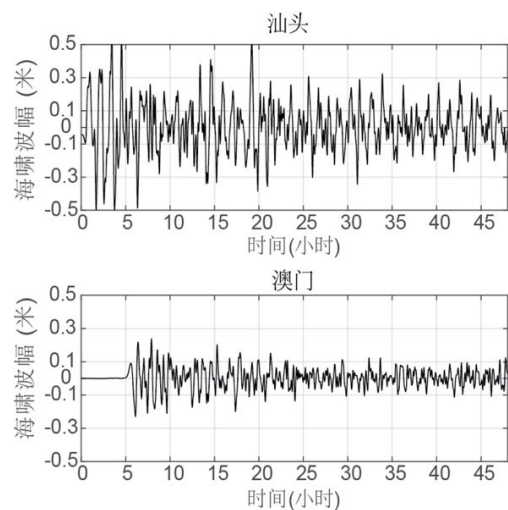


图 2. 1918 年地震触发海啸在华南沿海典型站点的时序图

此外，我们结合结合近些年全球范围内由“非典型海啸源”触发的海啸事件：2017年9月8日发生在墨西哥陆架区域的 M8.2 Tehuantepec 高角度正断层地震海啸事件，2018年9月印度尼西亚 Sulawesi 岛 Mw7.5 级走滑地震在帕卢湾海啸事件，2020年10月30日欧洲东爱琴海 Mw6.9 级 Samos 岛正断层地震海啸事件，这种非典型型地震引发的海啸，通常被忽略，我们强调未来需加强对非俯冲带地震海啸源致灾机制的研究。

## 謝誌/Acknowledgements

非常感谢中国科学院南海海洋研究所夏少红研究员提供 1918 年南澳大地震详细的断层资料。本研究由南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海）创新团队建设项目（311021002），广东省引进人才创新创业团队（2016ZT06N331）-环南海地质过程与灾害创新团队，国家自然科学基金面上基金（41976197，41774049，42076059）和中山大学中央高校基本科研业务费专项资金资助（2021qntd23）。

## 參考文獻/References

1. WANG X M and LIU P. L. F. An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami[J]. Journal of Hydraulic Research, 2006, 44(2):147-154.
2. 李琳琳,李发淳,邱强,李志刚,张冬丽,惠格格.1918 年南澳地震海啸影响模拟及其警示[J/OL].中山大学学报(自然科学版):1-12[2021-10-15].<https://doi.org/10.13471/j.cnki.acta.snus.2021D043>.

# 以影響強度法分析與重建 1845 雲林口湖 風暴潮事件

范子軒<sup>1\*</sup> 許家鈞<sup>1</sup> 吳祚任<sup>1</sup> 林君蔚<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 國立中央大學水文與海洋科學研究所

## 摘要

西元 1845 年雲林口湖發生嚴重之風暴潮事件，造成萬人喪生，為台灣歷史上最嚴重之風暴潮事件。為重建 1845 口湖風暴潮事件，本文發展風暴潮影響強度分析法(SSIIA)。該法以現行於中央氣象局之 COMCOT-SS 風暴潮模式為基礎，進行大量單元颱風之風暴潮模擬，以建立颱風位置對風暴潮與溢淹高程之 SSIIA 敏感關係圖。本研究為重建颱風路徑，發展颱風路徑對風暴潮影響分析法。該法透過 SSIIA 之分析結果，進行風暴潮潮高、溢淹高程與溢淹範圍之綜合評分，以求得可能之颱風路徑組合，並考慮颱風移動速度之差異性，得出最嚴重影響移動速度之路徑，並由該結果建立 1845 年事件之可能情境。透過上述之分析結果，本研究提出對雲林口湖風暴潮生成之颱風情境，以及該路徑所造成之風暴潮和溢淹範圍。本研究所建立之分析方法，可系統性分析沿海低窪地區之風暴潮溢淹潛在災情，有助於進行風暴潮風險評估及災防規劃。

關鍵詞：風暴潮影響強度分析法 SSIIA、颱風路徑、移動速度、口湖風暴潮、COMCOT-SS 風暴潮模式、風暴潮重建

## Developing the Storm Surge Impact Intensity Analysis (SSIIA) and Reconstructing the 1845 Kouhu Storm Surge Event

Zih-Syuan Fan\* Chia-Chun Hsu\* Tso-Ren Wu\* Chun-Wei Lin\*

\* Graduate Institute of Hydrological & Oceanic Sciences, National Central University

## ABSTRACT

In 1845, a severe storm surge occurred at Kouhu, Yunlin, killing about 10,000 people. It was the worst storm surge event in the history of Taiwan's. To reconstruct the 1845 Kouhu storm surge event, this paper develops the storm surge impact intensity analysis method (SSIIA). This method is based on the COMCOT-SS storm surge model of the Central Meteorological Bureau in Taiwan. It carries out many pre-calculated unit typhoon storm surge to establish the SSIIA maps. Based on the results, this research is able to reconstruct the typhoon track and evaluate the effect of typhoon track to the storm surge. The method uses SSIIA's analysis results to perform a comprehensive score of storm surge height, overflow height, and overflow area to obtain possible typhoon path combinations. The typhoon translation speed can also be determined by obtaining the most severely affected path. The possible scenarios of the 1845 event from the results are than reconstructed and proposed. This newly developed SSIIA analysis method can systematically analyze the potential disasters of storm surge, and the flooding situation in the low-lying coastal areas. It is helpful for storm surge risk assessment and disaster prevention planning.

Keywords: Storm Surge Impact Intensity Analysis Method (SSIIA); Typhoon Track; Translation Speed; 1845 Kouhu Storm Surge Event; COMCOT-SS; Reconstruction of Storm Surge.

## 一、前言

風暴潮由颱風、颶風及氣旋之壓力梯度和風剪力驅動，造成海水面異常之抬升，因此有稱作異常潮 (Abnormal Tide)。傳遞過程受潮汐、地形和地表摩擦間之非線性交互作用影響。若颱風來臨時逢天文潮高潮位，其更容易對於沿海低窪地區造成海水倒灌及土壤鹽鹼化之影響。

過去一般重建風暴潮事件多著重於歷史觀測資料以定性推估颱風可能路徑，進而分析各路徑造成災害。有別於過去之研究，本文以中央氣象局之台西測站 (位於雲林縣口湖鄉) 為研究場址進行風暴潮系統性之定量分析。本文發展颱風影響強度分析法 (Storm Surge Impact Intensity Analysis, SSIIA)，該法以現行於中央氣象局之 COMCOT-SS 風暴潮模式為基礎，進行台灣鄰近海域大量單元颱風之風暴潮模擬，以建立單元颱風位置對指定研究場址風暴潮之 SSIIA 敏感關係圖。該法透過 SSIIA 之分析結果，進行雲林縣口湖鄉之風暴潮高影響分析，以求得可能之颱風路徑組合，建立 SSIIA 決定性颱風路徑對指定研究場址之敏感性分析。特別針對可能之路徑提高解析度進行模擬，分析其若於現今發生可能造成之陸上溢淹情形，並合併考慮颱風行進速度之差異性，得出最嚴重影響之颱風行進速度，並由該結果建立 1845 年事件之 SSIIA 分析法可能情境。

台灣研究颱風風暴潮災防已經有多年經驗，本研究以新發展之 SSIIA 分析方法進行系統性之定量分析。以往分析常以颱風路徑常以定性分析為主 (Mori et al., 2019; Yamanaka et al., 2019; Takagi et al., 2014; Mok et al., 2020; Bunya et al., 2020)，而分析方法大多以觀測資料進行颱風路徑重建。本研究發展之 SSIIA 分析方法，則以研究場址為主要考慮對象，系統性分析單元颱風對研究場址所產生之影響強度。此分析結果有助於地方政府進行風暴潮風險評估及災防規劃。

## 二、研究方法

本研究採用之風暴潮模式為蔡育霖 (2014) 開發之 COMCOT-SS 風暴潮模式，其前身為美國康乃爾大學劉立方老師團隊所開發之國際知名海嘯模式 COMCOT (Cornell Mutligrid Coupled of Tsunami Model)，其可於球座標 (Spherical Coordinates) 及卡式座標 (Cartesian Coordinates) 下求解線性及非線性淺水波方程式，利用多重巢狀網格於近岸沿海地區提高計算解析度，並可使用移動邊界法 (Moving Boundary Scheme) 計算風暴潮造成之陸上溢淹。

為了解颱風位置對研究場址之影響程度，本研究發展 SSIIA 法。其方法步驟概述如下：

1. 於研究海域範圍內，設立單元颱風
2. 針對各個單元颱風進行風暴潮計算
3. 求得各單元颱風所造成之最大風暴潮
4. 擷取各單元颱風於研究場址所造成之最大潮位高程、最大溢淹高程及平均溢淹高程
5. 將擷取之最大潮位高程、最大溢淹高程及平均溢淹高程回填至單元颱風所在位置，並完成 SSIIA 圖

在 SSIIA 分析法方面，本研究以雲林縣口湖鄉為原點往東、南、西及北方各延伸 2 經度或緯度為計算域範圍，並於此計算域範圍之海域，以間隔 0.3 度方式，設置 238 個單元颱風源 (如圖 1 所示)，以進行雲林縣口湖鄉之 SSIIA 分析。並參考中央氣象局颱風基本路徑分類，以 SSIIA 之結果進行颱風路徑對風暴潮影響之分析。由於口湖海岸線以及其東側之中央山脈皆屬南北走向，因此在分析上採用南北向與東西向兩大類別進行路徑分析。



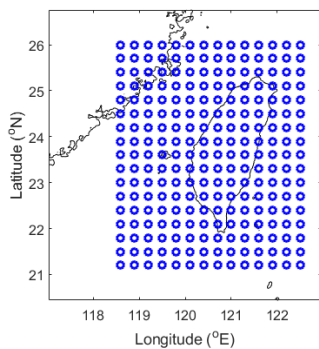


圖 1 SSIIA 之 238 個單元颱風位置圖

### 三、案例分析

為還原 1845 口湖風暴潮事件，本研究以 2016 年莫蘭蒂颱風為單元颱風之藍本，進行 SSIIA 分析，所設定之單元颱風參數為：中心最低氣壓 900 毫巴，最大風速每秒 60 公尺；另，除原本以 2016 年莫蘭蒂颱風為藍本之單元颱風源外，本研究亦以 1986 年中度颱風韋恩為單元颱風源之藍本，所設定之單元颱風參數為：中心最低氣壓 951 毫巴，最大風速每秒 40 公尺。在 SSIIA 以外之地區之颱風則代入 1986 年韋恩颱風及 2016 年梅姬颱風之前段路徑(如圖 8 圖綠線所示)。本研究以扣除 SSIIA 取出之五點連線以前之路徑為前段路徑，最終比較各路徑對口湖影響差異。

在結果驗證方面，則根據史籍記載之風暴潮溢淹情形進行比對。根據記載(李豐楙, 1996; 曾人口, 1978)，西元 1845 年(清道光 25 年)農曆 6 月 7 日，連宵大雨，颶風由西南捲向東北，引起海水倒灌，海浪吞沒沿海九座村莊，分別為下湖街、新港莊、箔仔寮、蚶仔寮、竹苗寮、蝦仔寮、竹達寮等，其中又以竹苗寮、蝦仔寮(今湖口村南、北港溪畔)以及竹達寮(今四湖鄉廣溝村西南處)等地區災情最為嚴重，俱沒入海中，無一倖存。茲將史籍記載之古地名與現今地名進行比對，可吻合之地名如圖 2 及圖 3 所示。透過受災地名之比對，並搭配地表高程，當時受災範圍可大致呈現。

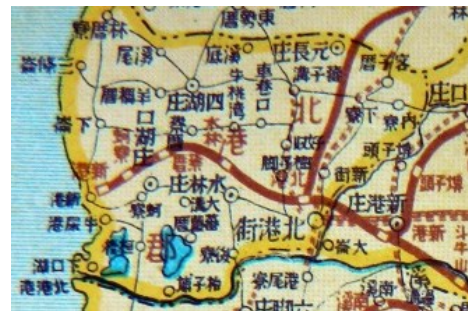


圖 2 日治時期北港郡古地圖，口湖庄、新港庄及口湖等地名標註如圖中紅框所示(截自民報)



圖 3 口湖鄉舊地名相關位置圖，地名標註由北而南依序為廣溝村、蚶寮、下口湖、箔仔寮及蚶仔寮

#### 3.1 颱風位置對口湖風暴潮影響分析

本研究以 SSIIA 法，於台灣海峽建立 238 個單元颱風以了解颱風位置對口湖風暴潮影響。在分析過程中，透過 COMCOT-SS 風暴潮模式求解 238 個單元颱風所造成之風暴潮，並擷取其於口湖地區所造成之最大風暴潮、最大溢淹及平均溢淹高程。

由 SSIIA 之分析結果列示於圖 4、5，比較圖 4(左)與圖 4(右)可見，圖 4(A)之紅色區域略廣於圖 4(右)。為便於討論，茲將圖 4 進行分區，並展現於圖 5。根據圖 5(左)與圖 5(右)可以見於兩種不同颱風強度情境下，各單元颱風源對雲林口湖之高影響位置(圖 5(左)，A 區)皆位於口湖或口湖北部一帶。於強烈颱風情境(圖 5(左)，900 毫巴)中，對口湖影響最大的範圍，大致分布在雲林至苗栗海岸一帶，包含北緯 23.6 度至北緯 24.8 度，東經 119.5 度至東經。而次要影響區域(圖 5(左)，B 區)為嘉義至新北海岸一帶，包含北

緯 23.3 度至北緯 25.4 度，東經 118.60 度至東經 121.4 度，其中粉紅點為口湖鄉所在位置。由圖 5 左圖之 C 區亦可看出風速方向對風暴潮生成之影響。由圖 5(左)C 區可見，在單元颱風源位於 C 區，亦即北緯 22.7 度以南，單元颱風源對口湖風暴潮之影響急速降低，這是由於位於該區域之單元颱風源，在口湖區域為離岸風所致。離岸風導致海水水位被吹離海岸，進而導致風暴潮潮位下降。圖 5(右)為中心最低氣壓為 951 毫巴之中度颱風 SSIIA 之結果，其亦有類似之趨勢。對口湖影響最大的範圍為圖中 A 區，主要分布於雲林至台中海岸一帶。中等影響範圍為圖中 B 區，主要分布於嘉義至桃園海岸一帶。而離岸風的影響區域為 C 區，大致範圍為屏東至台南一帶，其中粉紅點為口湖鄉所在位置。

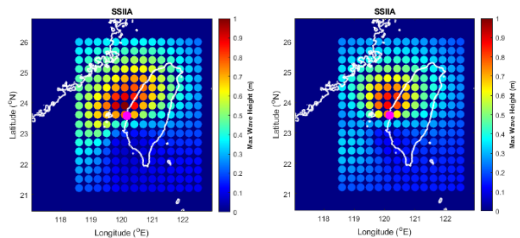


圖 4(左) 颱風中心氣壓 900 豪巴之 SSIIA 圖、(右) 颱風中心氣壓 951 豪巴之 SSIIA 圖，粉紅點為口湖鄉位置

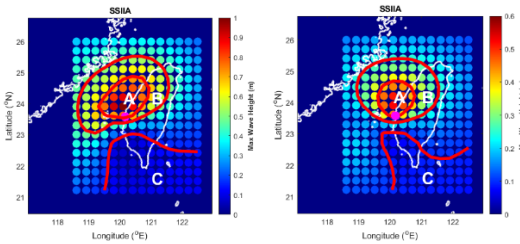


圖 5(左) 颱風中心氣壓 900 豪巴之影響分區圖、(右) S 颱風中心氣壓 951 豪巴之影響分區圖，粉紅點為口湖鄉位置

### 3.2 颱風路徑對口湖風暴潮影響分析

除颱風位置對口湖風暴潮之影響分析外，本研究亦進行颱風移動路徑對口湖風暴潮影響分析。

如前所述，本研究將模擬路徑分成南北向路徑及東西向路徑，並各自分析在同緯度(南北向)或同

經度(東西向)影響口湖之單元颱風移動路徑。

在南北向路徑部分，以氣象局發布之 1911 年至 2019 年侵台颱風分類路徑 7 號及 9 號為模擬基礎，將每東西橫列找出每一經度最糟影響之緯度位置，進行南北向連線(圖 6 紅線)，並參考 1986 年韋恩颱風前段路徑(圖 6(左)綠線)生成 NS-A 情境路徑(圖 6(左))，另，為了解額外導入之路徑對口湖風暴潮之影響，本分析亦產生南北向 NS-B 情境路徑(圖 6(右))。其與 NS-A 情境路徑之差別在於，將 1986 年韋恩颱風前段路徑取代為直向延伸路徑(圖 6(右)藍線)。而為求還原 1845 年雲林口湖風暴潮事件，本研究亦根據文獻回顧之敘述生成 NS-C 情境路徑(圖 7)，將情境路徑之前段路徑以文獻中所提及，通過呂宋海峽為模擬情境(圖 7 黑線)。

於東西向之情境路徑部分，以颱風分類路徑 3 號為模擬基礎，由 SSIIA 單元颱風源之每一直排擷取最大影響點位，以獲得 SSIIA 最糟情境路徑，並且參考近年橫跨臺灣之 2016 年中度颱風梅姬之前段路徑(圖 8(左)綠線)，其路徑由太平洋生成持續向臺灣東部移動，並於花蓮市附近登陸，並於同日於雲林縣麥寮鄉進入臺灣海峽。為求路徑之完整，以此 SSIIA 最糟情境路徑之橫向路徑延伸做為 SSIIA 最糟情境路徑之後段路徑(圖 8 粉紅線)，合成為東西向 EW-A 情境路徑。同樣，為了解額外導入之路徑對口湖風暴潮之影響，本分析亦產生東西向 EW-B 情境路徑。其與 EW-A 情境路徑之差別在於，將 2016 年梅姬颱風之前段路徑以直向路徑延伸取代(圖 8(右)藍線)。

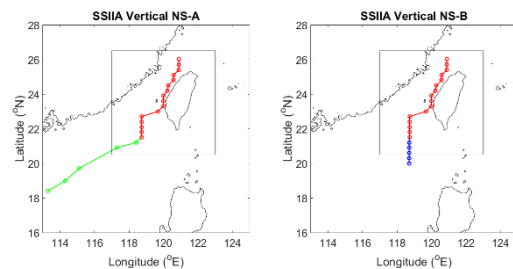


圖 6(左)為南北走向 NS-A 路徑模擬，(右) 為南北走向 NS-B 路徑模擬。紅色路徑為 SSIIA 得出之最大影響路徑(最糟路徑)，左圖綠色路徑為 1986 韋恩颱風之前段路徑，右圖藍色路徑為最糟路徑之直向延伸路徑。黑框為 COMCOT 模式第二層計算域設置位置。

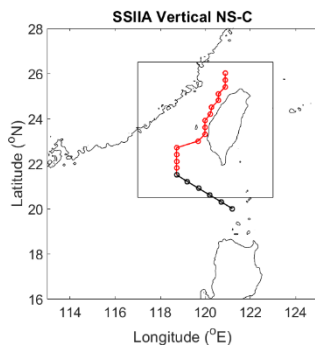


圖 7 為南北走向 NS-C 路徑模擬。紅色路徑為 SSIIA 得出之最大影響路徑，黑色路徑為按文獻中所提及，通過呂宋海峽之模擬路徑。黑框為 COMCOT 模式第二層計算域設置位置。

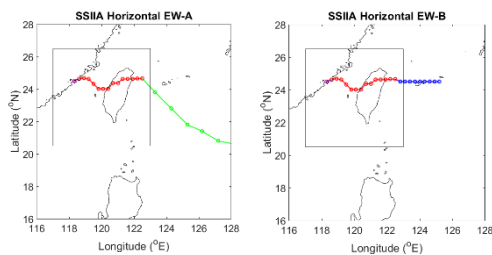


圖 8 (左)為東西走向 EW-A 路徑模擬，(右) 為東西走向 EW-B 路徑模擬。紅色路徑為 SSIIA 得出之最大影響路徑(最糟路徑)，粉紅色路徑為求 SSIIA 之路徑完整性，而延伸之橫向路徑。左圖綠色路徑為 2016 年梅姬颱風之前段路徑，右圖藍色路徑為最糟路徑之橫向延伸路徑。黑框為 COMCOT 模式第二層計算域設置位置。

#### 四、結果與討論

本研究為比較不同颱風強度對於研究場址之影響分析，生成不同單元颱風藍本之 SSIIA 分析法路徑分析，比較其於相同路徑下，颱風強度不同對於研究場址之影響分析，因此使用其單元颱風設置為侵襲臺灣海峽地區最嚴重影響之中度颱風韋恩，其颱風強度為：中心最低氣壓 951 毫巴，最大風速每秒 40 公尺。

本研究將其與情境分析中最佳重建 1845 雲林

口湖風暴潮事件之 NS-C 情境之路徑，經替換 SSIIA 最糟情境路徑之颱風強度，並比較兩者強度不同之單元颱風強度對於雲林縣口湖鄉風暴潮高程之颱風強度敏感性分析。

根據比較兩種颱風強度對於雲林縣口湖鄉之台西測站風暴潮敏感性分析之結果，當單元颱風強度減弱至中度颱風，其壓力場及風速場因其颱風強度較低，故其所造成之風暴潮潮高也較低。其經 COMCOT-SS 風暴潮模式模擬後會對於口湖鄉產生 2.176 公尺之最大風暴潮潮高，如圖 9 所示。於此中度颱風強度情境之最大風暴潮潮高可知颱風於通過臺灣海峽時會導致西南部沿海地區產生約 0.4 公尺之沿海溢淹高程，且當颱風移動至口湖鄉北方會因風暴潮朔上導致其水位較低，如圖 10 所示。並且將其與強度颱風情境之 COMCOT-SS 風暴潮模式之模擬結果比較後可知，其於最大風暴潮峰值抵達時間相似，但其於颱風生命週期初期造成之負暴潮，因中度颱風情境之強度較弱，故其所產生之負暴潮不明顯，如圖 11 所示。

根據比較結果可以得知本研究發展之 SSIIA 分析法其設置之單元颱風強度對於最糟情境路徑生成之影響有其侷限，因此本研究之 SSIIA 分析法設置不同之颱風強度對於最糟情境路徑之路徑雖有不同，但其對於其所產生之最大風暴潮高程，有其相似性。

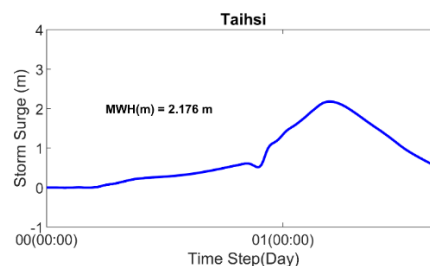


圖 9 為 SSIIA 分析法中度颱風強度最糟情境路徑之 NS-C 情境路徑之台西測站風暴潮潮高時序圖。

(橫軸為模擬時間，縱軸為風暴潮高程，單位為公尺(m)，圖片標題代表台西測站，圖中文字代表本次情境分析於台西測站所造成之最大風暴潮高程。)

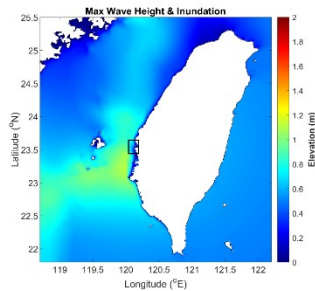


圖 10 為 SSIIA 分析法中度颱風強度最糟情境路徑之 NS-C 情境路徑之最大潮高圖。

(橫軸為經度，縱軸為緯度，色階為水位高程，單位為公尺(m)，黑色實線代表現今數值地形之海岸線。)

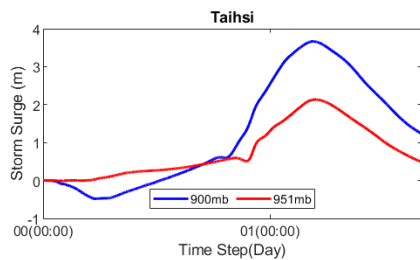


圖 11 為圖 64、SSIIA 分析法強烈颱風強度及中度颱風強度於台西測站風暴潮潮高時序圖。

(橫軸為模擬時間，縱軸為風暴潮高程，單位為公尺(m)，圖片標題代表台西測站，藍線為強烈颱風強度情境於台西測站所造成之最大風暴潮高程，紅線為中度颱風強度情境於台西測站所造成之最大風暴潮高程。)

## 五、結論

本研究發展 SSIIA 風暴潮影響強度法，在台灣四周設立多個單元颱風以大量計算風暴潮，以建立颱風位置對於口湖一帶最大風暴潮高程之 SSIIA 影響強度分析圖。並透過此分析結果，進行颱風位置分析，以求得對口湖影響重大之颱風位置排序。之後即進行颱風路徑對口湖風暴潮生成之分析。由於位於台灣西岸之口湖一帶，颱風主要以南北向或東西向移動，因此在颱風路徑分析上，亦分為南北向與東西向兩類。

透過 SSIIA 之路徑分析可得知，對口湖地區而

言，南北向之颱風移動路徑所產生之最大風暴潮高與溢淹範圍較東西向嚴重，因此颱風由南向北行經台灣海峽，且沿靠台灣西海岸現之颱風路徑，可對口湖造成重大危害。

本研究發展之 SSIIA 分析法其設置之單元颱風強度對於最糟情境路徑生成之影響有其侷限，因此本研究之 SSIIA 分析法設置不同之颱風強度對於最糟情境路徑之路徑雖有不同，但其對於其所產生之最大風暴潮高程有其相似性。

本研究假設 1845 年雲林口湖風暴潮事件為最糟情境事件，因此其颱風強度未考慮衰減因素，而因颱風於實際情況中無法持續維持同一強度，但因目前方法無法討論颱風衰減程度，其會因不同強度衰減幅度產生不同之影響，因此本研究假設颱風強度無衰減，但此假設亦會導致其與實際結果有差異，而於此固定強度亦需颱風於其生命週期前段需有更高強度之出現，使出現本研究所設置颱風之高強度。

風暴潮影響強度分析法 (SSIIA 分析法)，是以地區為主要考慮對象，可系統性分析沿海低窪地區之風暴潮溯上及溢淹潛在災情，有助於地方政府進行風暴潮風險評估及災防規劃，其可用於地方災防，並及早於颱風預報之初，即預先了解其路徑可能造成之災害，有利於地方利用並進行決策。

## 參考文獻

1. 蔡育霖(2014)風暴潮速算系統之建立及 1845 年雲林口湖事件之還原與研究，國立中央大學水文與海洋科學研究所碩士論文。
2. 中央氣象局颱風資料庫(2020)，取自 <https://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/>。
3. Mori, N., Yasuda, T., Arikawa, T., Kataoka, T., Nakajo, S., Suzuki, K., ... & Webb, A.(2019) 2018 Typhoon Jebi post-event survey of coastal damage in the Kansai region, Japan, Coastal Engineering Journal, 61(3), 278-294.
4. Mok, H. Y., Lui, W. H., Lau, D. S., & Wang, C. W.(2020) Reconstruction of the track and a simulation of the storm surge associated with the calamitous typhoon affecting the Pearl River Estuary in September 1874, Climate of the Past, 16(1), 51-64.

# Developing a Three-Dimensional Discontinuous Bi-viscous model to study Landslide Tsunamis

Tso-Ren Wu<sup>1</sup>, Thi-Hong-Nhi Vuong<sup>1\*</sup>, Chun-Wei Lin<sup>1\*</sup>, Chun-Yue Wang<sup>2\*</sup> and Chia-Ren Chu<sup>2\*</sup>

Corresponding author: Professor Tso-Ren Wu (tsoren@g.ncu.edu.tw)

<sup>1</sup>Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University, Taoyuan, Taiwan

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, National Central University, Taoyuan, Taiwan

## ABSTRACT

This paper incorporates Bingham and bi-viscosity rheology models with the Navier–Stokes solver to simulate the dynamics and kinematics processes of slumps for tsunami generation. The rheology models are integrated into a computational fluid dynamics code, Splash3D, to solve the incompressible Navier–Stokes equations with volume of fluid surface tracking algorithm. The change between un-yield and yield phases of the slide material is controlled by the yield stress and yield strain rate in Bingham and bi-viscosity models, respectively. The integrated model is carefully validated by the theoretical results and laboratory data with good agreements. This validated model is then used to simulate the benchmark problem of the failure of the gypsum tailings dam in East Texas in 1966. The accuracy of predicted flood distances simulated by both models is about 73% of the observation data. To improve the prediction, a fixed large viscosity is introduced to describe the un-yield behavior of tailings material. The yield strain rate is obtained by comparing the simulated inundation boundary to the field data. This modified bi-viscosity model improves not only the accuracy of the spreading distance to about 97% but also the accuracy of the spreading width. The un-yield region in the modified bi-viscosity model is sturdier than that described in the Bingham model. However, once the tailing material yields, the material returns to the Bingham property. This model can be used to simulate landslide tsunamis.

Keywords: landslide tsunamis; slumps tsunami; bingham rheology model; bi-viscosity model; VOF; slip surface; tailings dam; mudslide; Navier–Stokes; LES

## I. Introduction

This paper aims to develop a landslide model to simulate slump-type landslide tsunamis. The modified Bi-viscous model can be used to simulate the landslide movements in both the in-land area and ocean area. The model is able to describe the developments of the landslide as well as the slip surface. In addition, the model can be applied to hazard assessments.

## II. Methodology

This study adopted the Splash3D numerical model to solve for the breaking wave problems (Wu, 2004 and Liu et al., 2005). This model solves 3-dimensional incompressible flow with Navier–Stokes equations. The free-surface is tracked by Volume-of-Fluid (VOF)

method. The domain is discretized by finite volume method (FVM).

To solve the rheological behavior of mud material, a modified bi-viscosity model (MBM) is used.

$$\mu(\dot{\gamma}) = \begin{cases} \mu_A > \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}_y} & , if \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_y \\ \mu_B + \frac{\tau_y}{\sqrt{\frac{1}{2}\dot{\gamma}_{ij}:\dot{\gamma}_{ij}}} & , if \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_y \end{cases}$$

where  $\mu_A$  is the viscosity of the un-yield region,  $\mu_B$  is the viscosity of the yield zone,  $\tau_y$  is the yield stress, and  $\dot{\gamma}_y$  is the yield strain rate,  $\dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ . The symbol  $\dot{\gamma}$  is the second invariant of the  $\dot{\gamma}_{ij}$ , which is defined as  $\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\gamma}_{ij}:\dot{\gamma}_{ij}}$ .

In this model, the yield stress  $\tau_y$  and yield

viscosity  $\mu_B$  of the mud material are exponentially dependent on material concentration (Julien, 2010). To present the un-yield behavior,  $\mu_A$  is chosen to be infinite based on the suggestions of Assier Rzadkiewicz et al., 1997; Taibi and Messelmi, 2018; and Yu et al., 2020. In this paper, the infinite number of viscosity  $\mu_A = 10^{10}$  Pa s is chosen by the sensitivity analysis. The yield strain rate  $\dot{\gamma}_y = 0.2 \text{ s}^{-1}$  is adopted by a sensitivity analysis to illustrate the deformation in MBM. To describe the sturdy behavior in the plug zone, a larger  $\mu_A$  and a larger  $\dot{\gamma}_y$  are required. The larger  $\mu_A$  plays a role of keeping the rigid shape. The larger  $\dot{\gamma}_y$  indicates that the material can sustain a large shear stress without deformation.

### III. Validation

Two cases of mudflows are simulated for the model validation. The results are compared with both analytical solutions and laboratory experiment data.

#### ***Bingham Fluid Driven by Pressure Gradients***

Bird et al., 1983 derived analytical solutions for the Bingham flow in a channel, driven by a pressure gradient  $P_0 - P_L$ . The channel was depicted as the length  $L$  and the width  $2B$ . The no-slip boundary condition was applied to the surfaces of the channel.

Figure 1 shows good agreements between the theoretical and numerical results. One of the important features of a Bingham fluid is the plug zone (Figure 1b), which cannot be seen in the Newtonian fluid (Figure 1a). Note that the velocity of a Bingham fluid is constant in the plug region. In this region, the rate of change of velocity (strain rate) is equal to zero. In the liquefied region, the strain rate is greater than zero and the stress-strain relation of the fluid is dependent on the plastic viscosity  $\mu_B$ . These figures demonstrate that the present numerical model can accurately describe the rheological behavior of Bingham fluids.

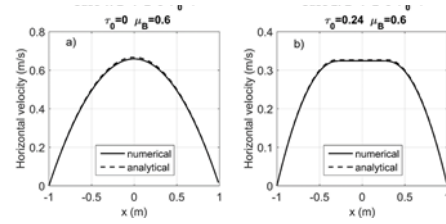


Figure 1. Validation of a) Newtonian fluid b) Bingham fluid between two parallel, fixed plates. (Bird et al, 1983)

#### ***Spreading of Bingham Fluid on an Inclined Plane***

The validation of the spreading of Bingham fluid on an inclined plane is set up based on the experiment of Liu and Mei, 1989. Kaolinite was mixed with tap water to represent the mud. The mud was put in a reservoir. When the adjustable gate was opened, the mud flowed down onto an inclined dry bed with the inclined angle  $\theta = 0.9^\circ$ . In this validation case, the openness of the gate was  $H = 0.0051$  m. The fluid density  $\rho = 1106 \text{ kg m}^{-3}$ , the yield stress,  $\tau_y = 0.875$  Pa, the viscosity of the plug zone,  $\mu_A = 10^{10}$  Pa s, the viscosity of liquefied zone,  $\mu_B = 0.034$  Pa s. A two-dimensional numerical domain was discretized into a regular mesh with grid size  $dx = 2.3$ ,  $dz = 2.0$  mm. Figure 2a shows the spreading of mud on an inclined plane versus time. Figure 2b shows that the numerical result of Bingham model matches well with the theoretical solution as well as the experimental data from Liu and Mei, 1989. The mudflow develops into a self-similar front when time  $t > 8.0$  s. Because of the yield stress, the free surface needs not to be horizontal when the mud fluid is in static equilibrium, nor parallel to the plane bed when it reaches a steady-state. The mud front, like a steady gravity current, eventually advances at a constant speed with the same profile when there is a steady upstream discharge of mud (Liu and Mei, 1989). The numerical results present a similar pattern of analytical solutions to that in Liu and Mei, 1989.

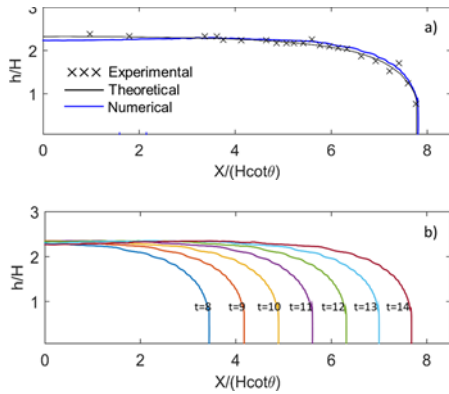


Figure 2. a) Spreading of Bingham fluid on an inclined plane (Liu and Mei, 1989) at  $t = 14$  s, b) Snapshot of spreading shape versus time (unit: sec)

## IV. Results

The present numerical model was applied to simulating the failure of the gypsum tailings dam in East Texas in 1966 (FGT66). The reservoir was a rectangular shape and reached a height of 11 m when the failure took place. The slide was triggered by seepage at the toe of the embankment. An estimated 80,000–130,000 m<sup>3</sup> of gypsum was released in this flow failure. The released material traveled about 300 m before it came to a stoppage, with an average velocity of 2.5–5.0 m/s (Jeyapalan et al., 1983). In this paper, the numerical setup was composed based on the geometry reported by Jeyapalan et al., 1983. The size of the tailings reservoir was 280 × 110 × 11 m, and the breach was 120 m long. The center cross-section of the breach was located at  $y = 220$  m. The computational domain (510 in length, 400 in width, and 12 m in height) was discretized into a uniform mesh with a grid size  $dx = 2.0$ ,  $dy = 2.0$ ,  $dz = 1.0$  m. The number of the grid was 612,000. The bottom boundary (at  $z = 0$  m) was a no-slip boundary condition. The downstream ( $x = 400$  m) and lateral boundaries ( $y = 0$  and  $y = 400$  m) were free-slip walls. The downstream and lateral boundaries would not affect the simulation results because the domain was set to be much larger than the predicted tailing pattern. The gypsum tailings material was expected as a Bingham material. Based on the

parameters reported by Jeyapalan et al., 1983; Pastor et al., 2002; and Chen and Peng, 2006, the yield stress of the tailings was  $\tau_y = 10^3$  Pa, the viscosity of the liquefied zone was  $\mu_B = 50$  Pa s, and the density was  $\rho = 1400$  kg m<sup>-3</sup>. The viscosity of the plug zone was suggested to be infinite (e.g.,  $\mu_A = 10^{10}$  Pa s) by Assier Rzadkiewicz et al., 1997; Taibi and Messelmi, 2018; and Yu et al., 2020.

In this study, two different rheological models, Bingham Model (BM) and Modified Bi-viscosity model (MBM) are employed to simulate the FTG66, as shown in Figure 3. In the result from BM (Figure 3a), the mud thickness reduces gradually from the breach to the downstream toe. A sliding mud body is thicker in the breach center area. BM can simulate the stoppage of the material at about  $t = 90$  s. Compared to the field observation (Jeyapalan et al., 1983), the error of the predicted flood distance was about 27%. The field photo (Figure 3d) shows that the flood boundary was longer and narrower than the simulated results from Bingham model. This might result from the sturdy behavior in the un-yield region. This sturdy behavior can be reached by increasing the un-yield viscosity  $\mu_A$  and yield strain  $\gamma_y$ . In this study, the un-yield viscosity  $\mu_A = 10^{10}$  Pa s was chosen by the suggestion of Assier Rzadkiewicz et al., 1997; Taibi and Messelmi, 2018; and Yu et al., 2020. The yield strain rate was chosen to be  $\dot{\gamma}_y = 2 \times 10^{-1}$  s<sup>-1</sup> by matching the flood distance. Figure 3c shows the simulation of the deposited tailings from MBM. The flood distance at the freezing time  $t = 110$  s was 310 m, which was 97% accurate to the filed data (Jeyapalan et al., 1983). The result from MBM also showed a longer and narrower shape. However, it shall be noted that the white line segments in the aerial photo (Figure 3d) were not the elevation contour lines. The white line segments represent the horizontal displacement of the gypsum tailings. They also indicate that the velocities along the central streamline were faster than those in the other regions. An indirect validation can be seen in the free-surface velocity profile, shown in Figure 5 at  $t = 30$  s. However, the free-

surface velocity will gradually reduce to zero as the freezing time is approaching.

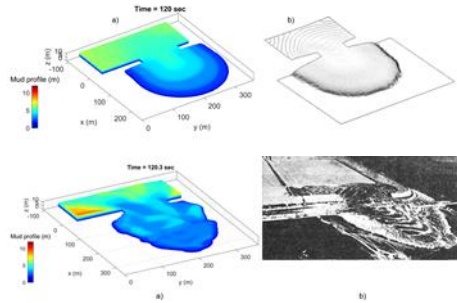


Figure 3. The free-surface profile of tailings. (a) The simulated Bingham model result; (b) The numerical results of Pastor et al., 2004; (c) The simulated modified Bi-viscous model result; and (d) The aerial photo of the FGT66 (Jeyapalan et al., 1983).

Figure 4 and 5 show the time evolution of the free-surface velocity of the mudflows from  $t = 0\text{--}110$  s by using BM and MBM, respectively. The velocity at the early stage (about  $t = 0\text{--}10$  s) of BM was higher than that of MBM. However, the simulated mudflow in BM stopped earlier (around 70–90 s). The surface velocity gradually approached zero from  $t = 70$  s, and the flow came to a full stop at  $t = 90$  s. The gypsum tailings distance was around 220 m, and the mean velocity was around  $2.4\text{--}3.1\text{ m s}^{-1}$  as shown in Figure 4. On the other hand, the flood distance from MBM was 310 m which was much closer to the field observation of 300 m (Jeyapalan et al., 1983). The larger un-yield viscosity and yield strain rate limited the flood velocity at the early stage of the event (Figure 5). The mud started to liquefy and collapse in a small region near the breach in the first 10 s. The spreading shape of the tailings was symmetric along the centerline of the breach during  $t = 0\text{--}20$  s. Because the supply of the tailings from the impoundment was asymmetric, the spreading shape gradually became asymmetric when  $t > 20$  s. The maximum velocity of the released tailings occurred at  $t = 30$  s. Then, the flow velocity gradually decreased. After  $t = 90$  s, the tailings slowed down and stopped moving at  $t = 110$  s. The mean velocity of the tailings flow was estimated at around  $2.8\text{--}3.4\text{ m s}^{-1}$ .

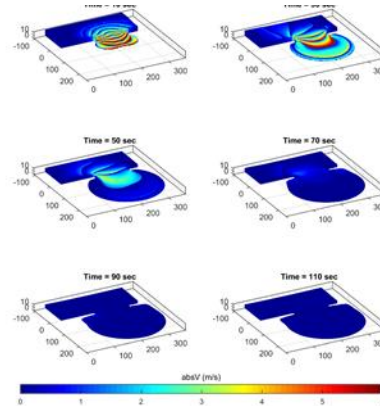


Figure 4. Snapshots of free-surface velocity profiles simulated by BM.

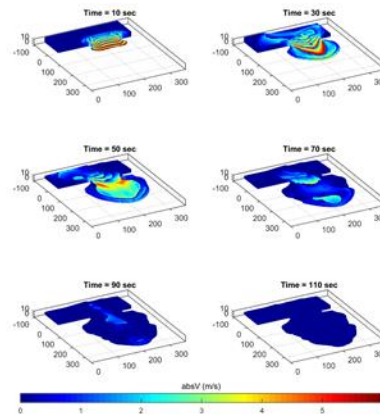


Figure 5. Snapshots of free-surface velocity profiles simulated by MBM.

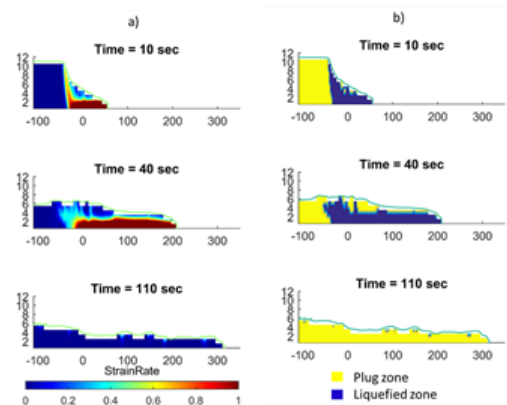


Figure 6. Snapshots on the centerline cross-section of the breach ( $y = 220$  m) predicted by MBM. (a) The profiles of strain rate. (b) The discontinuity of the plug zone and liquefied zone.



## V. Conclusion

This study applied the rheology models, Bingham model (BM) and modified Bi-viscous model (MBM), to the mudslide simulation. The rheology models were integrated into the 3D Navier–Stokes equations coupled with the LES turbulent model to give a detailed description of the vertical acceleration. The free-surface kinematic was described by the VOF method with a PLIC surface tracking scheme.

Figure 6 shows the strain rate and the un-yield/yield zones of MBM results in the center cross-section of the breach ( $y = 220$  m). The vertical axis was ten times exaggerated. The yield strain rate  $\dot{\gamma}_y = 0.2$   $s^{-1}$  was chosen to identify the interface between the un-yield/yield zones. The liquefied zone was located at the breach's front when  $t = 10$  s, due to the large strain rate caused by gravitational force. The liquefied zone gradually shifted to the ground region after  $t = 10$  s, resulting from the large shear stress that occurs near the bottom. However, the neighboring areas remained un-yield. The interface between the un-yield and yield zone was presented during the period of 10–40 s. It was caused by the viscosity's discontinuity of un-yield and yield zones. At  $t = 90$ –110 s, the liquefied zone shrunk gradually and disappeared at  $t = 110$  s, due to the zero velocity in the entire flow field. This zero-velocity phenomenon was very close to the real landslide situation in which the velocity ceases to zero eventually.

The BM was then used to simulate FGT66. The predicted inundation distance was 220 m with accuracy at about 73% of the observed data. To improve the result, a modification to conventional bi-viscous model was raised. A large viscosity number of un-yield region,  $\mu_A = 10^{10}$  Pa s, was applied to representing a more rigid behavior of the material as suggested by Assier Rzakiewicz et al., 1997; Taibi and Messelmi, 2018; and Yu et al., 2020. A series of sensitivity analyses on the yield strain rate  $\dot{\gamma}_y$  was performed by matching the simulated tailings' boundary to the field observation. A larger yield strain rate indicated the tailings with sturdier behavior. The yield strain rate was suggested to be  $\dot{\gamma}_y = 0.2$   $s^{-1}$  in the MBM to simulate the FGT66. By the sensitivity analysis, the material of FGT66 was close to the kaolinite with concentration  $C_v = 0.5$ . The results show that MBM could provide a better prediction than BM in terms of the flood distance and the spreading width. The development of the flood free-surface, velocity, strain rate, and un-yield/yield zone were presented and discussed.

Figure 7 shows the strain rate profiles of BM and MBM. The slip surface (Figure 7b) at  $t = 10$  s) and the interface between the plug/sheared zones (Figure 7b) at  $t = 40$  s can be identified in the results of MBM. The slip surface was relatively sharp in the MBM results compared to the ones in MB (Figure 7a).

## Acknowledgments

The research leading to these results has received funding from the Ministry of Science and Technology (MOST), Taiwan, under the project number: 107-2116-M-008-012, and the Centre of Excellence for Ocean Engineering, National Taiwan Ocean University.

## References

1. Assier Rzakiewicz, S.; Mariotti, C.; Heinrich, P. Numerical simulation of submarine

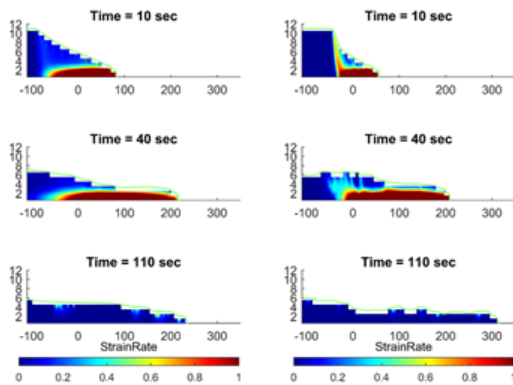


Figure 7. Snapshots of strain rate profile on the centerline cross-section of the breach ( $y = 220$  m).

(a) Bingham model (BM); (b) modified bi-viscosity model (MBM).

- landslides and their hydraulic effects. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 1997, 123, 149–157, doi:10.1061/(asce)0733-950x(1997)123:4(149).
2. Assier Rzadkiewicz, S.; Mariotti, C.; Heinrich, P. Numerical simulation of submarine landslides and their hydraulic effects. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 1997, 123, 149–157, doi:10.1061/(asce)0733-950x(1997)123:4(149).
  3. Byron-Bird, R.; Dai, G.C.; Yarusso, B.J. Rheology and flow of viscoplastic materials. *Reviews in Chemical Engineering* 1983, 1, 1–70, doi:10.1515/revce-1983-0102.
  4. Chen, S.C.; Peng, S.H. Two-dimensional numerical model of two-layer shallow water equations for confluence simulation. *Advances in Water Resources* 2006, 29, 1608–1617, doi:10.1016/j.advwatres.2005.12.001.
  5. Jeyapalan, J.K.; Duncan, J.M.; Seed, H.B. Investigation of flow failures of tailings dams. *Journal of Geotechnical Engineering* 1983, 109, 172–189, doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:2(172).
  6. Julien, P.Y. *Erosion and sedimentation*; 2nd ed.; Cambridge University Press, UK, 2010.
  7. Liu, K.F.; Mei, C.C. Slow spreading of a sheet of Bingham fluid on an inclined plane. *Journal of Fluid Mechanics* 1989, 207, 505–529, doi:10.1017/S0022112089002685.
  8. Liu, P. L. F., Wu, T. R., & Mo, W. School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University.
  9. Pastor, M.; Quecedo, M.; Fernández Merodo, J.A.; Herreros, M.I.; González, E.; Mira, P. Modelling tailings dams and mine waste dumps failures. *Geotechnique* 2002, 52, 579–591, doi:10.1680/geot.2002.52.8.579.
  10. Taibi, H.; Messelmi, F. Effect of yield stress on the behavior of rigid zones during the laminar flow of Herschel-Bulkley fluid. *Alexandria Engineering Journal* 2018, 57, 1109–1115, doi:10.1016/j.aej.2017.01.001.
  11. Wu, T.-R. A Numerical Study of Three-Dimensional Breaking Waves and Turbulence Effects, Ph.D. Thesis, Cornell university, New York, NY, USA, 2004.
  12. Yu, D.; Tang, L.; Chen, C. Three-dimensional numerical simulation of mud flow from a tailing dam failure across complex terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2020, 20, 727–741, doi:10.5194/nhess-20-727-2020.

# Numerical Simulation of Landslide Tsunamis using Bingham Model

Thi-Hong-Nhi Vuong<sup>1</sup>, Tso-Ren Wu<sup>1\*</sup>, Chun-Yue Wang<sup>2\*</sup>, Chia-Ren Chu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Corresponding author: PhD student: Thi-Hong-Nhi Vuong (hongnhi1017@g.ncu.edu.tw)

<sup>1</sup>Graduate Institute of Hydrological and Oceanic Sciences, National Central University, Taoyuan, Taiwan

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, National Central University, Taoyuan, Taiwan

## ABSTRACT

This paper incorporates the Bingham rheology model with the Navier–Stokes solver to simulate the tsunamis excited by a slump-type landslide. The slump is modeled as the Bingham material, in which the rheological properties changing from the un-yield phase to yield phase is taken into account. The volume of fluid method is used to track the interfaces between three materials: air, water, and slump. The developed model is validated by the laboratory data of the benchmark landslide tsunami problem. A series of rheological properties analyses is performed to identify the parameter sensitivity to the tsunami generation. The results show that the yield stress plays a more important role than the yield viscosity in terms of the slump kinematics and tsunami generation. Moreover, the scale effect is investigated under the criterion of Froude number similarity and Bingham number similarity. With the same Froude number and Bingham number, the result from the laboratory scale can be applied to the field scale. If the slump material collected in the field is used in the laboratory experiments, only the result of the maximum wave height can be used, and significant errors in slump shape and moving speed are expected.

Keywords: landslide tsunamis; slumps tsunami; scale effect; Bingham number similarity; Froude number similarity; dimensional analysis; Bingham rheology model; VOF; Navier–Stokes; LES

## I. Introduction

This paper aims to develop a landslide model to simulate the tsunamis generated by slump-type landslides. The Bingham rheology model is integrated into the Navier–Stokes solver to simulate the landslide movements in both in-land and ocean areas. The model developed in this paper can be applied to hazard assessments of both landslides and tsunamis.

## II. Rheological Model and Numerical Algorithm

The fundamental numerical model is Splash3D, which solves Navier–Stokes equations with large eddy simulation (LES) turbulence closure (Smagorinsky, 1963). The two-step projection method (Coussot and Proust, 1996; Griffiths, 2000; and McDougall and Hungr, 2004) is used to solve the pressure Poisson equation and new time-step fluid velocities. The detailed description of the model is presented in the references of Wu et al., 2020; Chu et al., 2020; and Liu et al., 2005. This model considers slump and the ambient materials a volume-averaged mixture. The

conservation equations of mass and momentum of the mixture are given as:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_e \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i$$

where the subscripts  $i, j = 1, 2, 3$  represent the  $x, y, z$  directions respectively;  $t$  is the time,  $u$  is the velocity;  $P$  is the pressure; the over-bar represents the spatially filtered value (Deardorff, 1970);  $g$  is the gravitational acceleration;  $\rho$  is the density; and  $\mu_e$  is the effective viscosity.

In this study, the LES is adopted to address the turbulence effect. The effective viscosity  $\mu_e$  is defined as:

$$\mu_e = \mu(\dot{\gamma}) + \mu_t + \mu_{molecular}$$

where  $\mu(\dot{\gamma})$  is the rheology viscosity of the slump,  $\mu_t$  is the viscosity of the sub-grid scale turbulence, and  $\mu_{molecular}$  is the molecular viscosity.

The Smagorinsky model (Smagorinsky, 1963) relates the residual stress to the rate of filtered strain. Based on the dimensional analysis, the subgrid-scale

eddy viscosity is modeled as:

$$\mu_t = \rho l_s^2 \dot{\gamma} = \rho (C_s \Delta)^2 \dot{\gamma}$$

where  $l_s$  is the Smagorinsky length scale, a product of the Smagorinsky coefficient  $C_s$  and the filter width  $\Delta$ ;  $\dot{\gamma}$  is the second invariant of the  $\dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ .

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\gamma}_{ij} \dot{\gamma}_{ij}}$$

In general,  $C_s$  varies from 0.1 to 0.2 in different flows. The present 3D simulation use a value of 0.15. As for the two-dimensional simulation,  $C_s = 0.3$  is suggested by Liu et al., 2005.  $\Delta$  is the filter width. Infinite volume discretization  $\Delta$  is the grid size.

$$\Delta = (\Delta x_1 \times \Delta x_2 \times \Delta x_3)^{\frac{1}{3}}, \text{ for 3D simulation}$$

$$\Delta = (\Delta x_1 \times \Delta x_3)^{\frac{1}{2}}, \text{ for 2D simulation}$$

where  $\Delta x_1$ ,  $\Delta x_2$ , and  $\Delta x_3$  are the three components of the grid lengths.

In this study, three materials, water, air, and slump, are considered. The interfaces between them are solved by the Volume of Fluid (VOF) method (Hirt and Nichols, 1981). The volume fraction  $f_m$  are used to describe the fraction of different materials in each cell, volume fraction  $f_m$  varies in  $[0,1]$  and should sum to unity everywhere:

$$\sum_m f_m = 1$$

The  $f_m$  is calculated by the VOF equation:

$$\frac{\partial (f_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (u_i f_m) = 0$$

The density used in the momentum equation is calculated from the volume average of all the materials:

$$\rho = \sum_m f_m \rho_m$$

where  $\rho_m$  represents the density of the individual material.

In this study, the Bingham model is used to describe the rheological behavior of the slump. The non-linear stress-strain relation between the shear stress and strain rate is expressed by Christen et al., 2012 and Scheuner et al., 2011:

$$\tau = \tau_y + \mu(\dot{\gamma}) \dot{\gamma}$$

$$\mu(\dot{\gamma}) = \begin{cases} \mu_A = \infty \text{ and } \dot{\gamma} = 0, & \text{if } \tau < \tau_y \\ \mu_B + \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} \text{ and } \dot{\gamma} > 0, & \text{if } \tau \geq \tau_y \end{cases}$$

where  $\mu_A$  is called the un-yield viscosity which is a large viscosity number for keeping the solid behavior in the plug zone,  $\mu_B$  is the viscosity of the yield zone,  $\tau_y$  is the yield stress, and  $\dot{\gamma}_y$  is the yield strain rate.

### III. Model Validation

In this study, the developed slump model is validated by the benchmark case proposed by Assier Rzadkiewicz et al., 1997. In this case, the water waves were generated by slumps in the laboratory. A series of experiments was conducted by allowing a mass of sand sliding down along an inclined plane. The submarine slumps were initially triangular in shape and spanned the width as the channel width, making it a 2D scenario. The dimensions of the slump were 0.65 m  $\times$  0.65 m. In this paper, the numerical setup is as same as the experimental set up of Assier Rzadkiewicz et al., 1997 shown in Figure 1. The computational domain is 4 m long, 0.3 m wide, and 2.0 m high and discretized by 529,000 grids as the grid size  $dx = dz = 4.35$  mm. The water depth is 1.6 m and the top of the slide is initially 10 cm below the water surface. The boundary conditions are free-slip boundary conditions on the domain boundaries, except for the ceiling boundary, which is a pressure Dirichlet ( $P = 0$ ) boundary condition. The dynamic viscosities of water and air are  $10^{-3}$  Pa s and  $10^{-5}$  Pa s respectively, whilst the yield viscosity of the slump is  $\mu_B = 50$  Pa s. The slump un-yield viscosity  $\mu_A$  is  $10^{10}$  Pa s as addressed in Part I (Wu et al., 2020). The yield stress of the slump suggested by Assier Rzadkiewicz et al., 1997 is  $\tau_y = 1000$  Pa. The densities of the slump, (water, and air are  $1950 \text{ kgm}^{-3}$ ,  $1000 \text{ kgm}^{-3}$ , and  $1.2 \text{ kgm}^{-3}$ , respectively. Simulation results are compared with the laboratory experiments and the numerical results proposed by Assier Rzadkiewicz et al., 1997, as well as the numerical results from Ma et al., 2013 and Smith et al., 2016.

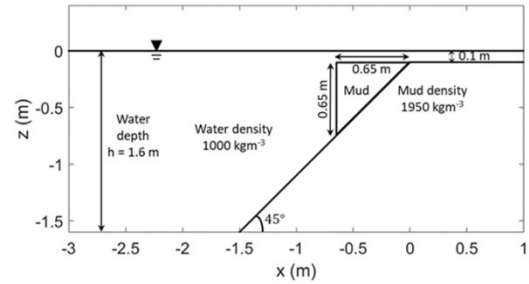


Figure 1. The numerical setup of slump-type tsunami simulations.

In this study, the Splash3D model is coupled with the Bingham model to simulate the slump-type landslide tsunamis. The slump is modeled as a Bingham fluid. The validations are made in terms of free-surface and slump shape. The comparisons of simulated surface elevations at  $t = 0.4$  s and  $t = 0.8$  s are displayed in Figure 2 along with the experimental data (Assier

Rzadkiewicz et al., 1997) and numerical results from NASA-VOF2D Assier Rzadkiewicz et al., 1997), NHWAVE (Ma et al., 2013), and Fluidity (Smith et al., 2016).

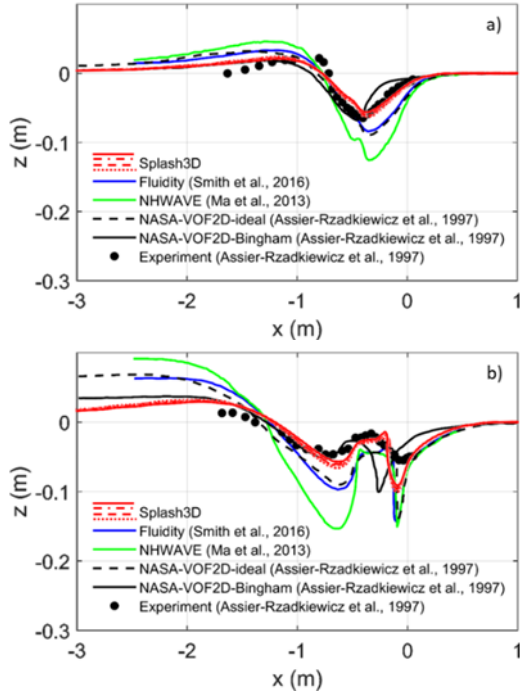


Figure 2. A comparison of free-surface elevations of four numerical models: Splash3D (red lines—different lines indicate different resolutions with  $dx = dz = 4.35\text{--}6.25$  mm, Fluidity (blue lines), non-hydrostatic WAVE (NHWAVE) (green lines), NASA-VOF2D (black lines—the solid line is the ideal model result, the dashed line is the Bingham model result), and the experimental result (black dot) at (a)  $t = 0.4$  s and (b)  $t = 0.8$  s.

The accurate results of slump-induced waves are given by Splash3D with considering the rheological properties of landslide. Different red lines present different resolution results, in which grid size ( $dx = dz$ ) varies in the interval 4.35–6.25 mm. In both panels (a) and (b), the differences between four different resolution results are less than 2% in terms of the wave amplitude. This indicates that the solution has converged when the grid size is less than 6.25 mm. To obtain accurate results, however, the grid size  $dx = dz = 4.35$  mm is used to simulate all of the cases in this study. The Splash3D results match well with experimental data of Assier Rzadkiewicz et al., 1997 at both time intervals, which means that more accurate simulation of the underwater slump would require a more thorough consideration of the rheological behavior of the slide material.

## IV. Scale Effect

The important forces in this study are the inertial, pressure, shear, gravity, and surface tension. A remarkable effort in designing the hydraulic model is to identify the important force ratio and to provide justifications for neglecting the others (Heller et al., 2008 and Hudson, 1979). The key dimensionless parameter in the free surface flows is the Froude number, which is the ratio of the inertia force to the gravitational force. Many clayey flows and sandy flows, that are still within the range of cohesive (more fines) or transitional (less fines, more sand) sediment mixtures, can be scaled in terms of viscosity and yield strength (Elverhoi et al., 2010). The Bingham number, describing the ratio of yield stress and viscous stress, is chosen in this analysis as well.

### *Froude Number Similarity*

In the cases of slump-types landslide tsunamis, the Froude number,  $Fr$ , is defined as the ratio of the slump speed to the wave celerity (Løvholt et al., 2005; Poupardin et al., 2017; and Løvholt et al., 2005),

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$$

where  $V$  is the slump velocity,  $H$  is the water depth, and  $g$  is the gravitational acceleration.

To understand the scale effect regulated by the Froude number similarity, the numerical setup is scaled up 10, 100, and 1000 times corresponding to the laboratory scale ( $H_1 = 1.6$  m), which means  $H_2 = 16$  m,  $H_3 = 160$  m,  $H_4 = 1600$  m. Under the Froude similarity criterion, the slump velocities and the timescales of the scaled-up prototype are calculated as  $V_2 = \sqrt{10}V_1, T_2 = \sqrt{10}T_1$ ,  $V_3 = 10V_1, T_3 = 10T_1$ ,  $V_4 = 10\sqrt{10}V_1, T_4 = 10\sqrt{10}T_1$ . The number of the numerical grid of each prototype is kept the same. For subsequent comparisons, the scaled-up numerical results are normalized according to the Froude similarity criterion.

### *Bingham Number Similarity*

The flows of Bingham plastics exhibit complex behaviors in both geometrical and rheological factors. This is particularly true in the cases of landslides, where un-yield and yield behaviors coexist in an intermittent pattern (Staron et al., 2013). The existence of yield stress implies the existence of an intrinsic length scale and the geometry of the system will play a role (Staron et al., 2013). In addition, viscosity and yield stress may have a significant effect on the slump deformation and the wave height attenuation. It is worth noting that the viscosity and yield stress are considered in the scaling model. Bingham number,  $Bm$  and the normalized

yield stress,  $\bar{\tau}_y$  are defined as (Staron et al., 2013):

$$Bm = \frac{\tau_y H}{\mu V}$$

$$\bar{\tau}_y = \frac{\tau_y}{\rho g H}$$

where  $\tau_y, \mu, \rho$ , and  $V$  are the yield stress, viscosity, density, and velocity of the slump, respectively.

In performing similarity analysis, we assume that the water density, the water viscosity, and the slump density are similar in each scaled-up prototype. Only the rheological properties of slumps are taken into account. Under the same normalized yield stress  $\bar{\tau}_y$ , the yield stresses are magnified 10, 100, and 1000 times corresponding to the laboratory scale ( $\tau_y = 1000 Pa$ ). The slump viscosities are calculated as  $\mu_2 = 10\sqrt{10}\mu_1$ ,  $\mu_3 = 1000\mu_1$ ,  $\mu_4 = 10,000\sqrt{10}\mu_1$  to satisfy the Bingham similarity criterion.

#### Scale Effect of Slump-Type Landslide Tsunamis

Two kinematics are taken into consideration for the scaling analysis. The first one is the slump deformation, and the second one is the wave induced by the slump deformation. Figure 11 shows the calculated results of the slump-type landslide tsunamis at  $T_1 = 1.00 s$ ,  $T_2 = 3.16 s$ ,  $T_3 = 10.00 s$ , and  $T_4 = 31.60 s$ . In Figure 3, with the different geometric scales, the dimensionless wave profiles including the onshore breaking waves and the offshore propagated waves coincide with each other. This indicates that the water waves are dominated by the Froude number. In Figure 3, the dimensionless geometries of the slump profiles are similar to one another. However, the differences in the slump shapes are larger than that in the water free-surface profiles. It is due to the generation of large eddies and strong turbulence in the head area of the slumps, and the behaviors of eddies and turbulence are controlled by the Reynolds number. The conditions of Reynolds number similarity, Froude number similarity, and Bingham number similarity cannot be established simultaneously unless the model scale is the same as the prototype scale.

However, satisfying both Froude and Bingham number similarities is a difficult task. The difficulty comes from the scaling down or scaling up the slump material. In a general situation, the slump sample is collected in the field and used in the laboratory experiments, or vice versa. Therefore, the geometry is scaled down to the laboratory scale and the Froude number similarity is kept. However, using the same slump sample from the field will twist the Bingham number similarity.

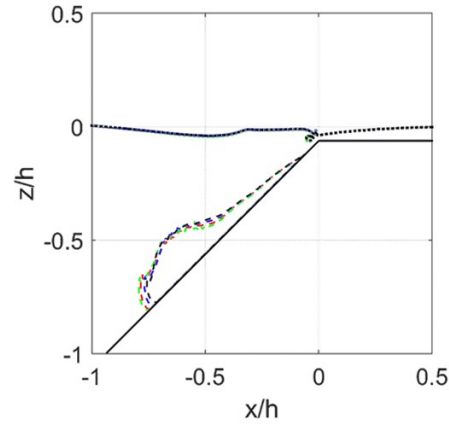


Figure 3. The similarity of water free-surfaces and slump profiles in different length scales, represented by water depth  $H_1$  (black color),  $H_2 = 10H_1$  (blue color),  $H_3 = 100H_1$  (green color), and  $H_4 = 1000H_1$  (red color) at  $t_1 s$ ,  $t_2 = \sqrt{10}t_1 s$ ,  $t_3 = 10t_1 s$ , and  $t_4 = 10\sqrt{10}t_1 s$ , respectively.

#### Tsunamis Excited by 3D Slumps in the Field Scale

The scenario of the three-dimensional slump-type landslide tsunami is designed to present the 3D effect by comparing the result with the 2D case. The geometry and the slump rheology parameters are  $H_4$ . The slump initial width is 650 m and the domain in the lateral direction is 8000 m as shown in Figure 4. From  $t = 0 s$  to  $20 s$ , not only does the slump slide down, but also collapses on the slope. This phenomenon makes the thickness of the slump small, which can be observed from  $t = 20 s$  to  $t = 100 s$ . The slump reaches the bottom between  $t = 40 s$  and  $t = 60 s$ . After reaching the bottom, the slump is decelerated by the bottom friction. Figure 5 shows the snapshots of the free-surface profiles. The results show that the tsunamis excited by the 3D slump propagate in every direction. A large negative wave is formed due to the drag force from the sinking slump. Then, this negative wave rebounds and generates a positive wave with the largest wave height, 49 m, at  $t = 20 s$ . After that, the waves keep on spreading out with a wave height reduced. Higher wave height can be observed in the shallow area around  $x = 0 m$  at  $t = 60, 80$ , and  $100 s$ . This is due to the effect of wave refraction.

From the results of the 3D case, we summarize that the thickness of the slump is much thinner in the 3D case than that in the 2D case, while the sliding speed is similar in both cases. The wave height is generally similar in both cases along the centerline cross-section. This also indicates that the tsunamis generated by slump-type landslide are mainly affected by the initial potential energy. A large rebounding wave is observed

in this 3D case. This result is caused by the waves rebounding from each edge of the slump and concentrated in the central part of the slump.

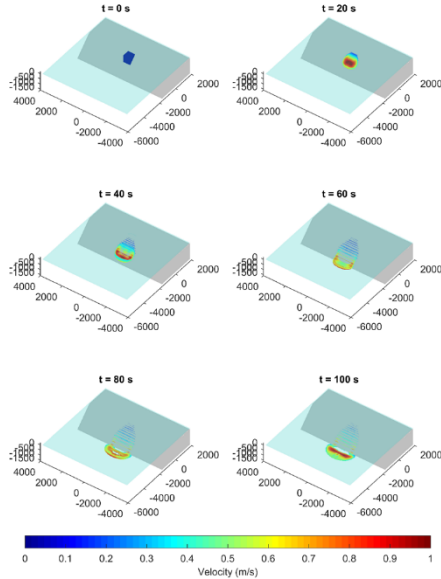


Figure 4. Snapshot of slump shape and velocity profile of 3D  $H_4$  scenario with  $(\mu_A, \mu_B, \tau_y) = (10^{10}, 1.6 \times 10^6, 10^6)$

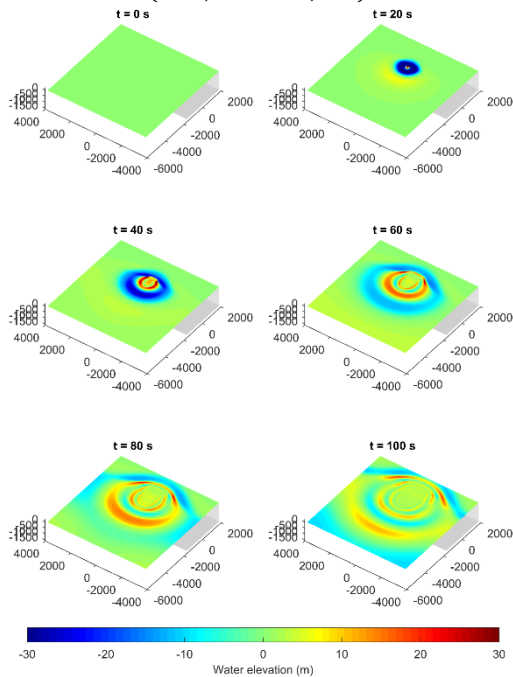


Figure 5. Snapshot of free-surface elevation of 3D  $H_4$  scenario with  $(\mu_A, \mu_B, \tau_y) = (10^{10}, 1.6 \times 10^6, 10^6)$

## V. Concluding Remarks

This study applies the Bingham rheology model to

studying the slump-type landslide tsunamis. The Bingham model is integrated into the Navier–Stokes equations and the LES turbulent model to have a detailed description of the vertical acceleration of the landslides and the induced waves. The free-surface kinematic is tracked by the VOF method. The model results are validated by the laboratory data from Assier Rzadkiewicz et al., 1997 with a good agreement. The sensitivity analysis is conducted to study the effect of three rheology variables, un-yield viscosity  $\mu_A$ , yield viscosity  $\mu_B$ , and yield stress  $\tau_y$  on the wave generation and the profiles of the slumps. The results show that both the tsunami and slump profiles are affected by the rheology parameters while the yield viscosity  $\tau_y$  is the key factor in tsunami generation and slump movement. Faster slump sliding speed will induce larger negative tsunami waves. The analysis of the scale effect is conducted based on the Froude number, Bingham number, and normalized yield stress. The dimensional analysis of four cases with different length scales is performed. When both constraints, Froude number similarity and Bingham number similarity are satisfied; the free-surface and slump profiles are nearly identical in different length scales. The results and conclusions obtained from the laboratory scale can be extended to the field scale by satisfying the Froude number and Bingham number similarity.

## Acknowledgments

This research was funded by the Ministry of Science and Technology (MOST), Taiwan, grant number 107-2116-M-008-012 and the Centre of Excellence for Ocean Engineering, National Taiwan Ocean University.

## References

1. Assier Rzadkiewicz, S.; Mariotti, C.; Heinrich, P. Numerical simulation of submarine landslides and their hydraulic effects. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* **1997**, doi:10.1061/(asce)0733-950x(1997)123:4(149).
2. Christen, M.; Bühler, Y.; Bartelt, P.; Leine, R.; Glover, J.; Schweizer, A.; Graf, C.; Mcardell, B.W.; Gerber, W.; Deubelbeiss, Y.; et al. Integral hazard management using a unified software environment. Numerical simulation tool “RAMMS” for gravitational natural hazards. In Proceedings of the 12th Congress INTERPRAEVENT, Grenoble, France, 23th 26th April; 2012; pp. 77–86.
3. Chu, C.R.; Wu, T.R.; Tu, Y.F.; Hu, S.K.; Chiu, C.L. Interaction of two free-falling spheres in water.

- Physics of Fluids* **2020**, *32*, 033304, doi:10.1063/1.5130467.
4. Coussot, P.; Proust, S. Slow, unconfined spreading of a mudflow. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **1996**, *101*, 25217–25229, doi:10.1029/96jb02486.
  5. Dearnorff, J.W. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics* **1970**, *41*, 453–480, doi:10.1017/S0022112070000691.
  6. Elverhoi, A.; Breien, H.; De Blasio, F. V.; Harbitz, C.B.; Pagliardi, M. Submarine landslides and the importance of the initial sediment composition for run-out length and final deposit. *Ocean Dynamics* **2010**, *60*, 1027–1046, doi:10.1007/s10236-010-0317-z.
  7. Griffiths, R.W. The dynamics of lava flows. *Annual Review of Fluid Mechanics* **2000**, *32*, 477–518, doi:10.1146/annurev.fluid.32.1.477.
  8. Heller, V.; Hager, W.H.; Minor, H.E. Scale effects in subaerial landslide generated impulse waves. *Experiments in Fluids* **2008**, *44*, 691–703, doi:10.1007/s00348-007-0427-7.
  9. Hirt, C.W.; Nichols, B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics* **1981**, *39*, 201–255, doi:10.1016/0021-9991(81)90145-5.
  10. Hudson, R.Y. *Coastal hydraulic models, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Special Report, The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, DC, USA; 1979;*
  11. Liu, P.L.F.; Wu, T.R.; Raichlen, F.; Synolakis, C.E.; Borrero, J.C. Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses. *Journal of Fluid Mechanics* **2005**, *536*, 107–144, doi:10.1017/S0022112005004799.
  12. Løvholt, F.; Harbitz, C.B.; Haugen, K.B. A parametric study of tsunamis generated by submarine slides in the Ormen Lange/Storegga area off western Norway. *Marine and Petroleum Geology* **2005**, *22*, 219–231, doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.10.017.
  13. Løvholt, F.; Pedersen, G.; Harbitz, C.B.; Glimsdal, S.; Kim, J. On the characteristics of landslide tsunamis. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **2015**, *373*, 20140376, doi:10.1098/rsta.2014.0376.
  14. Ma, G.; Kirby, J.T.; Shi, F. Numerical simulation of tsunami waves generated by deformable submarine landslides. *Ocean Modelling* **2013**, *69*, 146–165, doi:10.1016/j.ocemod.2013.07.001.
  15. McDougall, S.; Hungr, O. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. *Canadian Geotechnical Journal* **2004**, *41*, 1084–1097, doi:10.1139/T04-052
  16. Poupardin, A.; Heinrich, P.; Frère, A.; Imbert, D.; Hébert, H.; Flouzat, M. The 1979 Submarine Landslide-Generated Tsunami in Mururoa, French Polynesia. *Pure and Applied Geophysics* **2017**, *174*, 3293–3311, doi:10.1007/s00024-016-1464-z.
  17. Scheuner, T.; Schwab, S.; McArdell, B.W. Application of a two-dimensional numerical model in risk and hazard assessment in Switzerland. In *Proceedings of the International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings, Padua, Italy; January; 2011.*
  18. Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review* **1963**, *91*, 99–164, doi:10.1175/1520-0493(1963)091<0099:gcewtp>2.3.co;2.
  19. Smith, R.C.; Hill, J.; Collins, G.S.; Piggott, M.D.; Kramer, S.C.; Parkinson, S.D.; Wilson, C. Comparing approaches for numerical modelling of tsunami generation by deformable submarine slides. *Ocean Modelling* **2016**, *100*, 125–140, doi:10.1016/j.ocemod.2016.02.007.
  20. Staron, L.; Lagrée, P.-Y.; Ray, P.; Popinet, S. Scaling laws for the slumping of a Bingham plastic fluid. *Journal of Rheology* **2013**, *57*, 1265–1280, doi:10.1122/1.4802052.
  21. Wu, T.; Vuong, T.; Lin, C.; Wang, C.; Chu, C. Modeling the Slump-type Landslide Tsunamis part I : Developing a Three-Dimensional Bingham-type Landslide Model. **2020**, 1–23.



# 三維流固耦合模式開發:空拋浮標入水及 隨波模擬

黃逸軒<sup>1\*</sup> 吳祚任<sup>2</sup> 錢樺<sup>2</sup> 王仲宇<sup>3</sup> 朱佳仁<sup>3</sup> 張煥盟<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所博士生

<sup>2</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所教授

<sup>3</sup>國立中央大學土木工程學系教授

<sup>4</sup>國立中央大學水文與海洋科學研究所

## 摘要

本文發展流固耦合模式以模擬結構物於複雜碎波流場中之運動過程。流體部分以剛性流體法 (RFM) 進行迭代計算,以達成目標速度及壓力於同一時間步內同步收斂,以提高流固耦合之準確度,並搭配投影法求解三維不可壓縮流之 Navier-Stokes 方程式。碎波部分以 PLIC-VOF 法實現自由液面重建。固體運動方面,以向量式有限元素法(VFIFE)求解,其特色為可模擬結構物之大轉動及大變形之過程。流體及固體運動之耦合部分,則透過速度壓力傳輸單元進行,其將固體之運動視為一群獨立節點之組成,結構之變形及破壞行為模擬,則由各承受外力及內力之節點加以描述。相較於傳統非線性結構分析,可避免求解繁瑣之迭代問題及求解複雜之偏微分方程式。而 RFM 法中以隱式法描述固體假想力,於校正步將固體網格中心速度更新為合成速度,再利用投影法求解壓力,此法可使時間步長不受限於有效網格解析度。文末將展示兩組不同模擬成果,第一組為彈性可變形體空拋入水,第二組則為浮標於不同波浪條件下之隨波模擬。

關鍵詞: 剛性流體法 RFM, Navier-Stokes, 流體體積法(VOF), PLIC, 向量式有限元素法(VFIFE)

## Development of Three Dimensional Fluid-Structure Coupling Model: Simulations of Water Entry and Buoys with Various Incident Waves

Yi-Xuan Huang\* Tso-Ren Wu Chung-Yue Wang

Chia-Ren Chu Hwa Chien Huan-Meng Chang

\* Graduate Institute of Hydrological & Oceanic Sciences, National Central University

## ABSTRACT

In this study, a new moving-solid method, named rigid-fluid method (RFM), is developed to describing the solid obstacle moving in the fluid. The RFM controls the fluid velocity to satisfy the velocity in the solid regime by iterating and converging the velocity and pressure at the same time. The solution on the fluid part is obtained by solving the full Navier-Stokes equations with volume of fluid (VOF) method. The piecewise linear interface calculation (PLIC) scheme is adopted for the free-surface reconstruction. As for the solid part, the Vector Form Intrinsic Finite Element, VFIFE method, is used. The VFIFE method analyzes the motion of the solids and structures by modeling the individual object as a group of representative finite particles. The motion of each particle subjected to external and internal forces is used to simulate the large displacements and failures of the whole structure. The VFIFE method based on the intrinsic theories of mechanics avoids the difficulties such as the iterative

and perturbation procedures in solving partial differential equations in the traditional nonlinear structural analyses. In RFM, a fictitious body force is implicitly prescribed in MAC correction step to make the cell-center velocity satisfied with the obstacle velocity. In this way, the time marching step won't be restricted to the smallest effective grid size. At the end, two simulations are presented and demonstrated. The first case is a flexible and deformable body dropping from air to the water. The water splashing, and body deformation can be seen clearly. The second case shows a buoy named Manta moving with various incident water waves. The buoy is moving up and down with non-breaking and breaking waves.

Keywords: rigid-fluid method, Navier-Stokes, Volume of Fluid, , PLIC, VFIFE

## 一、前言

本文發展流固耦合分析模式，以 Splash 3D 模式為基礎 [1]，配合向量式有限元素法(VFIFE) [2][3]，建立出一套柔性固體與流體之耦合模式，其特點是得以處理結構大變形、大轉動之分析，於後文展示模擬成果。此模式流體部分以求解三維不可壓縮流之 Navier-Stokes 方程式為主，藉由投影法(Projection Method)求解速度及壓力，配合流體體積法(VOF)與 PLIC 法進行自由液面之重建；固體部分則採用向量式有限元素法(VFIFE)，將固體結構之運動視為一群獨立節點所組成，整體結構之變形及破壞行為模擬由每個承受外力及內力之節點加以描述，相較於傳統非線性結構分析，可避免求解繁瑣之迭代問題及偏微分方程式。

## 二、模式介紹

### 1.1 數值模式特色：

#### 1.1.1 流體部分

**1.流體體積法 (Volume of Fluid, VOF)：**用於描述自由液面之水躍與跌水等具有複雜表面甚至夾氣現象流況，現今已成功運用於碎波與結構物之交互作用上，對於不同床質之描述亦將由多相 VOF 描述。 [4]

**2.三維大渦紊流模式(Large Eddy Simulation, LES)：**架構直接求解三維 Navier-Stokes 方程，由於 LES 模式對網格之要求較低，因此所需之計算資源較少。 [5]

**3.PLIC 法(Piecewise Linear Interface Construction, PLIC)：**此法假設各網格之交界面由片段線性單元組成，於計算新時間步之各流體 VOF 分布時，求得體積分率場梯度及交界面方程式係數進行迭代計算，

達成收斂條件以完成液面重建。 [6][7]

#### 1.1.2 固體部分

**1.固體節點離散特性：**應用層面可由連續體斷裂後至不連續體之分析，固體元素選用亦不受限，可選用三維杆件、板元素、膜元素、固體元素甚至剛性體離散元素，可視情況進行調整。 [2][3]

**2.可變形固體計算：**使用向量式有限元素法三維固體元素，此法對於大變形、大轉動有良好之分析結果，由於運動方程式以牛頓第二運動定律做為描述方式，無弱分積分函式，無矩陣求解，單以剪斷節點間關聯就可以進行斷裂問題分析。 [2][3]

### 1.2 流固耦合介面程序：

本程序包括流固耦合程式架構建立、流固資料雙向互換，其核心概念是將液體壓力分佈傳遞給固體，而固體之位移、速度資料反向傳回給液體，藉此完成雙向耦合之目的，過程中將諧合兩種程式不同時間步長，並確保程序耦合過程符合穩定條件。

為完成資料互換，本研究建立一介面進行資料互換溝通，此介面主要是諧合固液網格及資料格式描述之差異，經驗証已達良好之穩定性，能應用在真實問題之分析上，下方將詳述程序流程，主要分為七個步驟：

**1.流場程式初始化：**包括建立網格模型、流場壓力及速度等物理資料之建立。

**2.固體取得流場資料：**固體受流體給予正向壓力及剪向壓力，受力後固體產生位移、變形、轉動等運動行為，需將此動態行為回傳至流場，完成雙向資訊之傳遞，因此藉由鋪設壓力積分點來取得固體表面之壓力。

**3.流固資料之處理及轉換：**固體及液體程式有各自之網格及元素，在資料計算及應用上無法直觀且完

整之對應，因此預先將計算固體分解為多個三維四面體元素，可有效地降低轉換資料之難度。透過三維體積座標，可判斷四面體固體佔據六面體流體網格之比例，完成體積分率之計算。

**4. 固體運動分析：**固體接收外力後產生之位移、變形、轉動等運動行為。

**5. 固體對流場影響之計算：**固體所產生之運動行為需回傳給流體進行流場資料更新，透過此步驟才能正確地進行交互影響之計算。

**6. 諧合兩種程序之時間步長：**流體時間步長常見區間為  $10^{-1} \sim 10^{-4}$  秒，而固體則多為  $10^{-4} \sim 10^{-7}$  秒，若涉及大變形或接觸碰撞，將需要更小之時間步長方能穩定計算，確保程序計算時之精確性及穩定性，為求計算過程穩定，本程序建議將 **courant number (CN)** 設為 0.5，此參數定義為容許固體在一個流體時間步程內移動之距離，即固體在一個流體時間步程內至多位移 0.5 個網格。

**7. 完整流程整理：**將固體移動之物理資訊傳遞給流場後，透過流體程式進行流場變化之分析，本法沿用 Truchas 流體程式(3D NS-VOF)為基礎，求解三維不可壓縮流體之 Navier-Stokes 方程，將固體計算結果以流體體積法(VOF)追蹤各向流體運動描述，再利用移動固體法(Moving Solid Algorithm, MSA)計算固體移動後與各流體之互制行為分析。

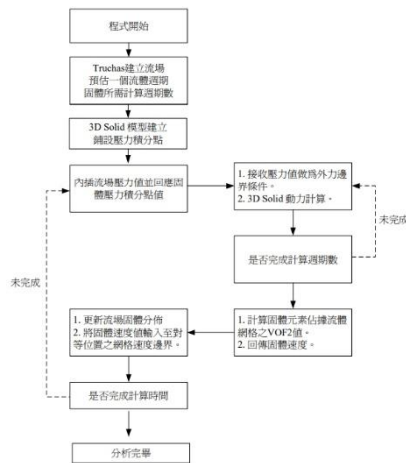


圖 1 柔性體固體流固耦合分析程序

### 三、模式驗證

#### 3.1 柔性塊體浮體試驗：

本算例為一組浮體試驗，實驗配置如表 1 所示，首先假設浮體為剛體，楊氏係數設定為  $1 \times 10^8$  (Pa)，將模擬結果與實驗數據進行比對。試驗模型如圖 2 所示，邊界條件配置如下：面(1)為  $P=0$  之邊界條件設定，面(2)、(3)、(4)、(5)則設定為 Free-slip。數值分析與實驗快照圖之比對如圖 3 所示，不論固體趨勢及流體水花分佈，均呈現高度一致。

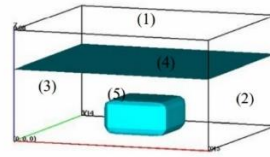


圖 2 浮體試驗示意圖

表 1 浮體試驗模型參數表

網格數目(x, y, z)、網格總數	45, 42, 39 (73710)
計算域大小(m)	(0.15, 0.14, 0.08)
dx, dy, dz	$3.33 \times 10^{-3}$ , $3.33 \times 10^{-3}$ , $3.33 \times 10^{-3}$
出圖秒數, courant number	0.01, 0.85
dt_init, dt_grow, dt_min, dt_max	1.0e-3, 1.20, 1.0e-5, 1.0e-2
water, air, solid density (kg/m <sup>3</sup> )	1000, 0, 800.52
inviscid, turbulence model	true, true
water, air viscosity	defalut, defalut
two_d, Cs, use_NWM	false
porous flow, solid permeability	false
計算時間(cpu time)	1.5 hour
邊界條件	free-slip
計算核心數	CPUs total : 1

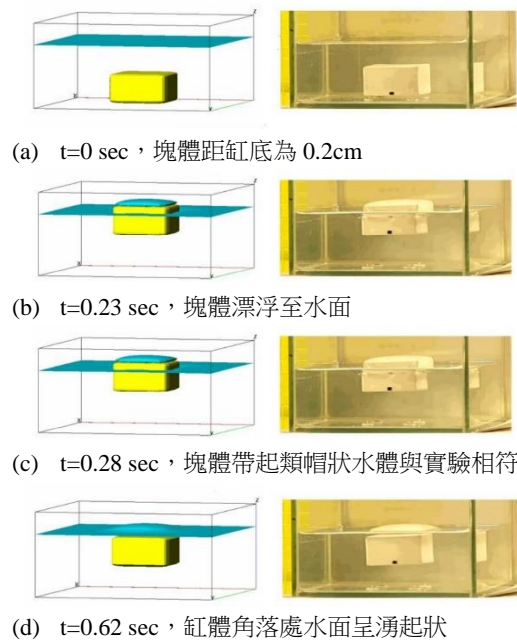


圖 3 浮體數值分析與實驗快照圖比較

圖 4 為實驗浮塊與數值分析浮體歷時位移曲線之比較圖，由圖可見不論週期及頻率皆與實驗結果相近。為確保實驗數據之可信度，亦重覆進行該實驗五次，所得數據仍呈高度一致。

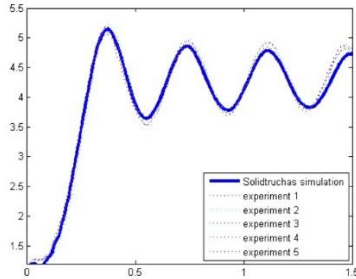


圖 4 浮塊數值分析與實驗歷時比較圖

## 四、模擬成果展示

### 4.1 空拋浮標入水模擬:

以建模軟體初步創建出固體外型，再於上劃分數組節點，使固體結構能由多組四面體所描述，簡易浮標之建模過程如圖 5 所示，由一半球體與圓環相連接所構成，浮標密度設為  $800.52(\text{kg}/\text{m}^3)$ ，並觀察不同楊氏係數對空拋浮標入水之影響，三種楊氏係數分別為  $10^6, 10^5, 10^4$  (Pa)，結果如圖 6 所示，楊氏係數愈大其變形程度愈小，物體愈接近於剛體；而楊氏係數愈小，入水後會產生不同程度之變形，圖 6 中楊氏係數最小者產生大幅度變形。

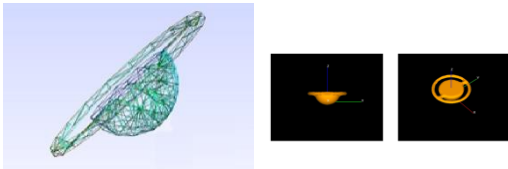


圖 5 簡易浮標建模示意圖

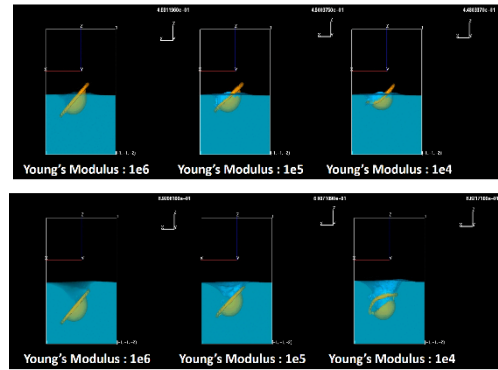
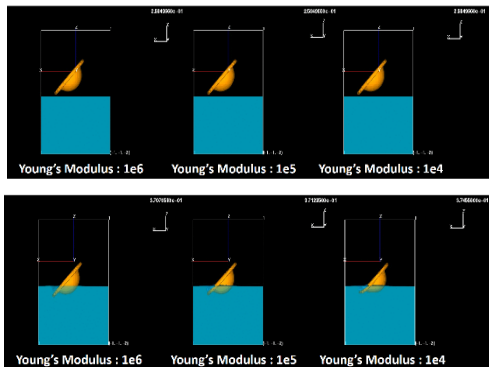


圖 6 浮漂入水模擬快照圖  
楊氏係數由左至右分別為  $10^6, 10^5, 10^4$  (Pa)

### 4.2 浮球隨波模擬:

#### 4.2.1 模擬設置

設置如圖 7 所示，X 方向範圍由 3.0 公尺至 13.0 公尺，Y 方向範圍介於正負 0.5 公尺之間，Z 方向由 -0.4 公尺至 0.3 公尺，Z=0 公尺處為初始水平面，水深為 0.4 公尺。其中 X = 3.0 公尺至 3.5 公尺間為造波區，朝 +X 方向穩定輸送固定振幅、週期二秒之連續波，浮球設立於 X = 6.0 公尺，而 X = 8.0 公尺至 13.0 公尺間則設置海綿層以減少反射波干擾。為觀察浮球隨波情形，提高浮球周圍網格解析度，即將 X = 5.5 公尺至 7.0 公尺、Y = -0.15 公尺至 0.15 公尺、Z = -0.15 公尺至 0.15 公尺間之網格解析度設為最密，每格為 0.0125 公尺。浮球名 Manta，外型如圖 8 所示，密度為  $600(\text{kg}/\text{m}^3)$ ，直徑約為 0.54 公尺，本模擬計算浮球 Manta 於不同振幅之波浪條件下(分別為 0.15 公尺、0.1 公尺、0.05 公尺)其隨波性質變化。

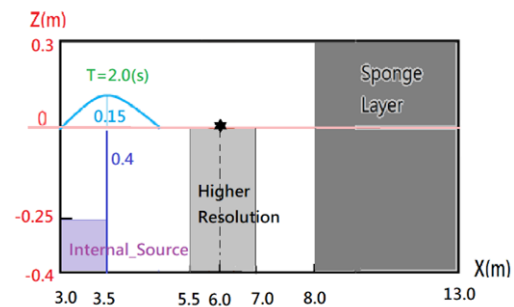


圖 7 浮球隨波模擬設置

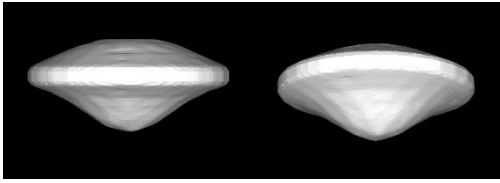


圖 8 浮球 Manta 建模

為確保模式波浪之穩定性，於放入固體前，以相同之網格設置模擬造波情形。水深為 0.4 公尺，波浪參數設定振幅 0.1 公尺、週期 2 秒，並於 X=6.0 公尺處放置波高計以記錄水位變化，測試結果如圖 9 所示。

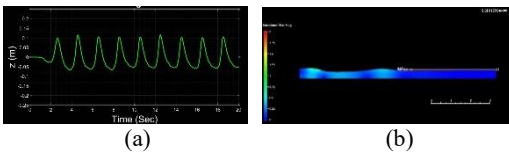


圖 9 造波測試 (a)波高 (b)波浪快照圖

#### 4.2.2 Manta 模擬結果

Manta 浮球涵蓋範圍約為直徑 0.54(m)，不同波高下之模擬情形如圖 10-12 所示，當振幅愈大，浮球傾度變化愈大；振幅愈小，浮球傾度變化則較小，並顯現出較好之隨波性。圖 13 為 X=6.0 公尺處波高計所得水位變化與浮球質點位置垂直變化比較圖，該圖亦體現前述之觀測結果，當振幅愈小，浮球在時序上、位移量上皆反映了良好之隨波性。

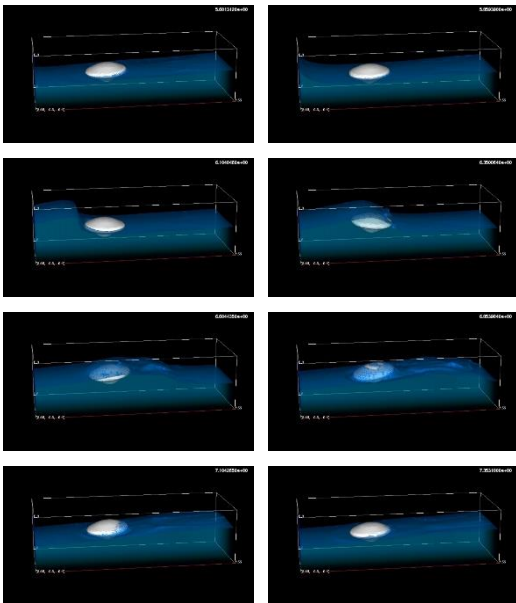


圖 10 Manta 模擬結果 a=0.15(m)

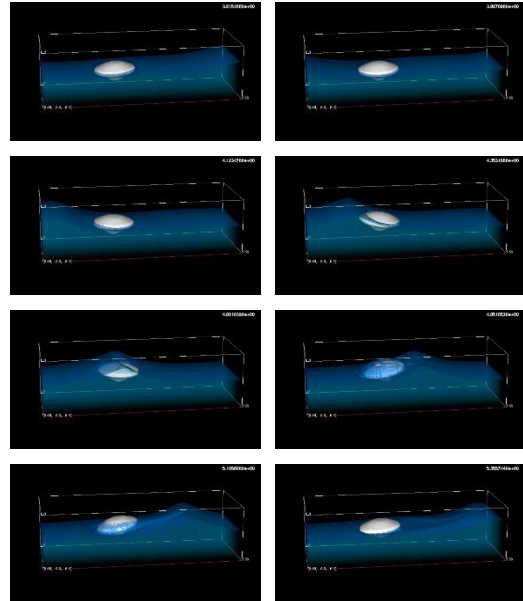


圖 11 Manta 模擬結果 a=0.1(m)

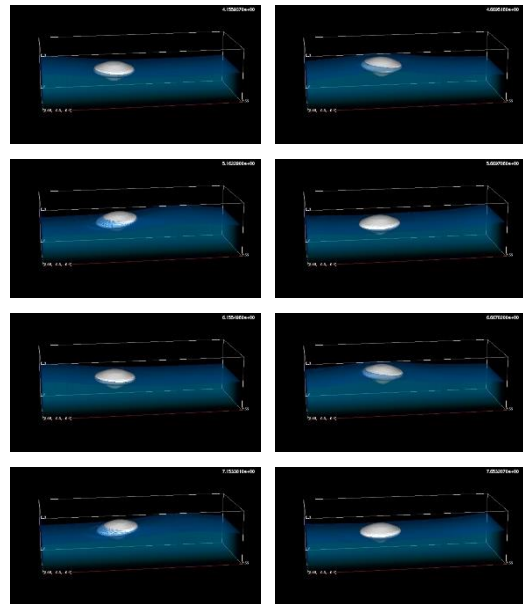


圖 12 Manta 模擬結果 a=0.05(m)

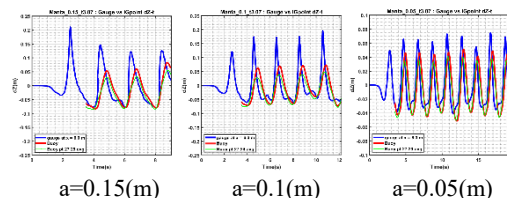


圖 13 Manta 模擬結果：水位變化(藍線)與浮球質點位置(紅線、綠線)比較圖

## 五、結論

本論文開發了一組雙向流固耦合模式，與實驗結果比對良好，能有效預測流體和固體之耦合運動，使用上配合建模軟體創建所需之固體外型，並藉由改變楊氏係數及密度等參數改變固體之物理特性，可針對不同研究調整為適當配置，相較流固耦合商業套裝軟件，本模式最大特點為固體元素的選用以離散理論為主體，選定固體元素必須為節點且相互獨立，其原因為真實世界不乏固體斷裂之不連續變形事件，如橋墩沖刷及掏蝕產生之斷裂問題，於此模式下，相關問題可進行後續研討。此外，本研究流體理論承繼 Splash 3D 程式，可應用多相流體之流固耦合運動分析，波浪碎浪等繁複流場之模擬，於學術或工程領域都能有重大貢獻。

## 參考文獻

- [1] Liu, P.L.-F., Wu, T. R., Raichlen, F., Synolakis, C., and Borrero, J., “Runup and rundown from three-dimensional sliding masses.”, *Journal of Fluid Mechanics*, 536, 107-144, 2005
- [2] 丁承先, 王仲宇, 吳東岳, 王仁佐, 莊清鏞, V-5 研究組, 運動解析與向量式有限元 (2.0 版), 中央大學工學院, 橋梁工程研究中心 (2007)。
- [3] 丁承先, 王仲宇, 向量式固體力學, 中央大學工學院, 橋梁工程研究中心 (2008)。
- [4] Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39(1), 201-225.
- [5] Deardorff, J. W., “A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers.”, *J. Fluid Mech.* 41:453–80, 1970.
- [6] Kothe, D. B., Rider W. J., Mosso, S. J., Brock, J. S., and Hochstein, J. I., “Volume tracking of interfaces having surface tension in two and three dimensions.”, Technical Report, AIAA 96-0859, 1996.
- [7] Rider, W. J. and Kothe, D. B., “Reconstructing Volume Tracking.”, *J. Comp.Phys.*, 141, 112-152, 1998.
- [8] Wu, T. R. , “A numerical study of three-dimensional breaking waves and turbulence effects.” Ph.D. Dissertation, Cornell University, 2004
- [9] Wu, T. R. , Chia-Ren Chu\*, Chih-Jung Huang, Chung-Yue Wang, Ssu-Ying Chien and Meng-Zhi Chen, “A Two-Way Coupled Simulation of Moving Solids in Free-Surface Flows,” *Computers & Fluids*, 100, 347–355, September 2014.

# 作者索引





## 作者索引

- Ahmad Darori Hasan ..... 592  
Asim Önder ..... 810  
Che-Wei Chang ..... 816  
Chia-Ren Chu ..... 831,837  
Chih-Min Hsieh ..... 628  
Chun-Wei Lin ..... 831  
Chun-Yue Wang ..... 831,837  
Dong Wang ..... 789  
Ignacio Barranco ..... 771  
In Mei Sou ..... 786  
Jie Hu ..... 780  
Jie Yang ..... 777  
Jinghua Wang ..... 804  
Kai Meng Mok ..... 777  
Kuifeng Zhao ..... 819  
Linlin Li ..... 777  
Ly Trung Nguyen ..... 172  
Pablo Higuera ..... 774  
Pengzhi Lin ..... 780  
Philip Li-Fan Liu .....  
777,780,789,804,810,819  
Thi To Van ..... 5  
Thi-Hong-Nhi Vuong .....  
831,837  
Tso-Ren Wu ..... 831,837  
Wen-Chang Yang ..... 628  
Xiaochun Tang ..... 780  
Yuan-Shiang Tsai ..... 628  
Yufei Wang ..... 795  
Yu-Hsien Lin ..... 592  
Zhengtong Yang ..... 790  
Zhi-Cheng Huang ..... 5,172
- 三劃**  
于嘉順.... 1,119,242,524,546
- 四劃**  
方天熹 ..... 711  
方惠民 ..... 257,284,325,391  
方聖茶 ..... 213  
王仲宇 ..... 843  
王兆璋 ..... 520  
王星宇 ..... 257,284,325,413  
王昱善 ..... 634  
王柏鈞 ..... 22  
王啟竑 ..... 119  
王敘民 ..... 349  
王博賢 ..... 73,148  
王朝欽 ..... 508  
王雅慧 .....  
.... 665,671,675,700,746  
王順寬 ..... 319  
王彙喬 ..... 659
- 五劃**  
冉繁華 ..... 568,659  
甘翊萱 ..... 367  
田文敏 ..... 640  
石瑞祥 ..... 10,166
- 六劃**  
任一凡 ..... 530  
朱志誠 ..... 219  
朱佳仁 ..... 843  
朱展宏 ..... 313  
朱啟豪 ..... 119  
江文山 ..... 201,207,213,568  
江正宏 ..... 551,738  
江佩儒 ..... 680,684,686,741
- 江宗翰 ..... 391  
江朕榮 ..... 95,355
- 七劃**  
何宗浚 ..... 195  
何宗儒 ..... 125  
何家榮 ..... 213  
何雅惠 ..... 253  
何鎮守 ..... 514  
余昭明 ..... 55,482  
吳立中 ..... 50,268  
吳佳承 ..... 10  
吳昀達 ..... 32,38,759  
吳芬華 ..... 213  
吳亭 ..... 746  
吳昭蓉 ..... 503  
吳恩綺 ..... 616  
吳祚任 ..... 798,825,843  
吳漢倫 ..... 343  
呂宜潔 ..... 301,385  
呂宣翰 ..... 652  
呂晏欣 ..... 284  
呂紹平 ..... 665  
呂蘋恩 ..... 746  
呂儼展 ..... 746  
宋雨霖 ..... 520  
巫秀堅 ..... 551,738  
巫思佩 ..... 671,675  
李永翔 ..... 125  
李育成 ..... 418  
李孟洲 ..... 659  
李孟學 ..... 73,95,355,470  
李宜芳 ..... 73  
李治廣 ..... 580

李芝瑩..... 540  
李芳承..... 476  
李俊穎..... 137,225,274  
李冠頡..... 738  
李政軒..... 367  
李政達..... 137,402  
李昱錡..... 337  
李堉辰..... 77  
李悅瑞..... 746  
李培芬..... 686  
李基毓..... 10,166  
李崧璋..... 44  
李敏豐..... 253  
李翌德..... 22  
李琳琳..... 822  
李賢華..... 418,610  
李豐佐..... 734  
沈宗佑..... 464  
沈彥豪..... 694  
沈煜修..... 343  
**八劃**  
卓可威..... 622  
卓訓杰.... 73,95,201,207,470  
周立翔..... 397  
周佑誠..... 458,508,514  
周姿吟..... 242  
周舶皓..... 728  
周璋珊..... 752  
周嘉銘..... 83  
東佳穎..... 524  
林子凱..... 166  
林大為..... 22  
林世哲..... 476  
林正山..... 428,446

林立昌..... 131,671,  
675,711,716,722,734,738,746  
林宇銜..... 482,598,646  
林伯謙..... 690,694  
林君蔚..... 825  
林呈..... 67  
林志融..... 686  
林志鴻..... 10  
林受勳..... 137,402  
林宗儀..... 665  
林昆毅..... 73,355  
林芳如..... 119,242  
林俊宏..... 423,640  
林彥廷..... 367  
林珂如..... 361  
林哲宇..... 686  
林峻宇..... 690  
林庭輝..... 551,738  
林啟燦..... 274  
林智明..... 680  
林雅雯..... 290,361  
林敬樺..... 16  
林源煜..... 113  
林獻祥..... 741  
林聖哲..... 247  
林鼎傑..... 413  
林演斌..... 101  
林錫聰..... 675  
林騰威..... 290,361  
邱永芳..... 385  
邱永盛..... 452,488,494,499  
邱申富..... 716  
邱啓敏..... 268, 349  
邱強..... 822

## 九劃

姚皓晟..... 574,586  
施孟憲..... 101  
施博泰..... 195  
柯鈞瀚..... 313  
洪以柔..... 716  
洪徐永..... 503  
洪湘詒..... 423  
洪靖唐..... 503  
洪維屏..... 184,219,367  
紀昭銘..... 428,446  
胡介申..... 280  
胡凱程..... 540  
胡聰明..... 373  
范子軒..... 825  
范揚洺..... 148,268

## 十劃

唐宏結..... 568,574  
夏武成..... 397  
徐仕昇..... 580  
徐季玄..... 280  
徐泓璋..... 418  
徐浩然..... 337  
徐堂家..... 55,107  
徐新綸..... 89  
徐璋崙..... 67  
徐榮崇..... 741  
徐誌壕..... 546  
翁文凱..... 10,22,166  
翁健二..... 274  
高明哲..... 67

## 十一劃

康兆凱..... 752  
張元櫻..... 494  
張友力..... 166

張引.....	296,530	許義宏.....	274	陳盈智.....	77,142,331
張旭光.....	520	許嘉麟.....	711,716,722	陳禹儒.....	83
張君名.....	402	郭少谷.....	219	陳美慧.....	89
張志強.....	177	郭榮煉.....	44	陳家昊.....	458
張志華.....	28	郭馨.....	418	陳琪芳.....	503
張育承.....	125	陳子健.....	534	陳琬婷.....	546
張哲岳.....	684,686	陳少華.....	55,107	陳陽益.....	355,604
張家溥.....	520	陳氏玲慈.....	307	陳煥儒.....	634
張家義.....	470	陳世明.....	107	陳聖學.....	148
張珮錡.....	434,440	陳仕元.....	408	陳榮華.....	213
張祐誠.....	503	陳平.....	752	陳維翔.....	242
張崑宗.....	325	陳吉紀.....	373	陳銘誼.....	231
張博涵.....	413	陳沛宏.....	253	陳蔚瑋.....	219,225,319,470
張博維.....	373	陳育鋒.....	284	陳憲宗.....	331
張鈞程.....	32	陳佳琳.....	61	陳璿光.....	646
張煥盟.....	131,843	陳昌生.....	408	陳觀印.....	113
張義偉.....	16	陳玫蓉.....	680	陶瑞全.....	137
張碩軒.....	580	陳俐妤.....	586	黃普源.....	428
張語珊.....	684	陳信宏.....	.....	<b>十二劃</b>	
張憲國.....	225,247,319,470	.....	458,508,514,604,616	傅科憲.....	73,95,148
曹士亮.....	640	陳冠宇.....	16	曾以帆.....	476
曹柏暉.....	652	陳冠甫.....	418,610	曾威捷.....	686
曹勝傑.....	225	陳勇隆.....	634	曾柏興.....	262
梁乃匡.....	373	陳奕光.....	301	曾鈺皓.....	125
莊士賢.....	83,89,268	陳奕榮.....	659	溫辰諺.....	610
莊文傑.....	189	陳威成.....	331	湯智誠.....	604
莊博宇.....	67	陳建中.....	551	程皓.....	10
許文陽.....	379,540,580	陳建宏.....	634	程嘉彥.....	55,107
許弘莒.....	355,604	陳彥睿.....	551	童林龙.....	783
許永城.....	408	陳彥龍.....	343	黃千綺.....	440
許盈松.....	428	陳思樺.....	434	黃子鴻.....	580
許哲彰.....	640	陳柏旭.....	408	黃世任.....	125
許家鈞.....	825	陳柏棋.....	520	黃志誠.....	.....
許泰文.....	160,213,652	陳柏葦.....	659	307,690,694,700,705,722,728	
許國強.....	213	陳盈圻.....	201,207	黃彥儒.....	598

黃春嘉..... 367  
黃茂信..... 225  
黃郁哲..... 38  
黃郁軒..... 55,107  
黃國文..... 734  
黃國書..... 195  
黃清哲..... 101,268,464  
黃勝翊..... 563  
黃翔瑜..... 296  
黃逸軒..... 843  
黃滄介..... 488  
黃煒智..... 418  
黃瑋華..... 219  
黃義傑..... 379  
**十三劃**  
楊一中..... 125,284,325  
楊文昌..... 73,95,148,  
201,207,355,385,4707,452  
楊宗翰..... 524  
楊欣樺..... 734  
楊智傑..... 154,160  
楊傳琮..... 125  
楊瑞源.....  
373,540,574,586,616  
溫志中..... 237,556  
萬竣翔..... 616  
葉正陽..... 722,728  
葉秀貞..... 237,556  
葉昌鑫..... 640  
葉金課..... 274  
葉翰揚..... 659  
葉錦華..... 313  
董東璟.....  
77,142,253,268,331,349  
詹鎮鋒..... 418

鄒宇杭..... 499  
**十四劃**  
廖建明..... 253  
廖為忠..... 446  
廖嘉宏..... 622  
甄亮絮..... 418  
臧效義..... 634  
趙偉廷..... 154,160  
**十五劃**  
劉乃慈..... 391  
劉正千..... 89  
劉立方..... 759,798  
劉孟樵..... 700,728  
劉勁成..... 255,319  
劉建榮..... 428  
劉為朋..... 622  
劉清松..... 361  
劉景毅..... 296  
滕春慈..... 1, 242  
蔡立宏..... 137,534  
蔡育霖..... 798  
蔡明廷..... 452  
蔡秉杰..... 391  
蔡政翰..... 142,349  
蔡原祥..... 646  
蔡涵任..... 237,556  
蔡清標..... 313  
蔡聖德..... 61  
蔣敏玲..... 290  
鄧鑄源..... 694,728  
鄭安..... 113,137  
鄭凱文..... 494  
鄭皓元..... 231  
鄭鈺翰..... 508  
鄭嘉豪..... 125

## 十六劃

盧韋勳..... 201,207  
盧靖元..... 125  
蕭士俊..... 207,343  
蕭兆昇..... 446  
蕭松山..... 391,413  
蕭冠宇..... 195  
蕭毓宏..... 520  
蕭葆義..... 652  
蕭瓊茹..... 671,675  
賴志炫..... 290  
賴明松..... 604,616  
賴彥廷..... 219  
賴堅戊..... 301  
賴進松..... 734  
錢樺.....  
113,131,137,177,231,843  
鮑俊宏..... 73  
**十七劃**  
戴仕彥..... 711  
戴妤臻..... 684  
謝孟璋..... 514  
謝智文..... 237,556  
謝馥蔓..... 434,440  
鍾曉緯..... 89  
韓仁毓..... 367  
**十八劃**  
簡連貴..... 337,622  
簡雯潔..... 741  
藍元志..... 22  
藍亦汝..... 705  
顏辰宇..... 1  
顏厥正..... 540  
顏寧..... 280  
魏世聰..... 131,137

## 十九劃

羅弘岳.....	44,765
羅立芳.....	67
羅冠顯.....	50,379,534,540
羅建明.....	556
羅耀財.....	634

## 二十劃

蘇仕峯.....	397
蘇育弘.....	257
鐘冠閔.....	464
饒國清.....	50



## 關鍵詞索引





## 關鍵詞索引

- 1604 Qiongzhou(琼州地震)  
..... 822
- 1845 Kouhu Storm Surge  
Event..... 825
- 1918 Nanao(南澳)..... 822
- 2D ISPH ..... 789
- 3D-printed tree ..... 816
- A**
- Abrupt drop ..... 148
- Accident ..... 262
- Acoustic image..... 640
- ADCP ..... 5,734
- Aerial imagery..... 722
- Aerodynamic ..... 646
- AHP..... 253
- Air Pollution Detection and  
Sampling..... 274
- Air Pollution from Ships .....  
.....274
- Aircraft ..... 268
- Air-quality Monitoring ... 274
- AIS ..... 540
- Algal reef..... 172
- Anomaly indicators ..... 113
- Applicable range of  
periodical wave theories  
..... 819
- Aquaculture ..... 568
- Aquatic Rescue..... 434
- AQWA ..... 373
- Arrangements and  
design.....160
- Artificial intelligence  
..... 160,331
- Artificial vegetation floating  
island.....22
- Artificially circuitous sand  
supply..... 177
- Asymmetrical parametric  
wind model..... 319
- Atmospheric boundary layer  
wind tunnel..... 652
- Automatic identification  
system ..... 225
- Automatic notification.... 290
- Autonomous surface vehicle  
..... 458
- Autonomous Underwater  
Vehicle ..... 482,508,514
- AUV ..... 482
- AWAC..... 379
- B**
- Back Propagation Neural  
Network..... 154
- Background removal image  
..... 307
- Basic oxygen furnace slag  
..... 418
- Beach safety..... 89
- Beach Transformation .... 189
- Beam Forming (BF)  
algorithm..... 137
- Beamforming ..... 55
- Bearing Capacity ..... 428
- Bedload transport..... 166
- Bingham number similarity  
..... 837
- Bingham rheology model  
..... 831,837
- Biofouling ..... 568
- Bird assemblage ..... 686
- Bi-viscosity model ..... 831
- Blast furnace slag ..... 418
- Block development ..... 622
- Borda function ..... 247
- Bore..... 32,38,771
- Bottle marine debris ..... 307
- Boussinesq model ..... 765
- Breaking wave ..... 592
- Buoyancy engine..... 520
- By-passing outline(外廓防波  
堤) ..... 408
- C**
- CDIO..... 446
- Chloride ion ..... 551
- Chlorophyll ..... 284
- Chlorophyll a ..... 355
- Choshui River ..... 177
- Circular-cylindrical bottom  
..... 28
- Climate change ..... 337,413
- Close-range photogrammetry  
..... 195
- Close-target calibration  
method..... 257
- Cluster Index Analysis .... 284
- Cnoidal wave ..... 819

Coast Sustainable Operation ..... 746	Connection of Multiple Curriculums Knowledge .....446	Diurnal cycle.....628
Coast Waters ..... 716	Construction and maintenance ..... 160	Diver detection.....514
Coastal area ..... 337	Continuous water quality monitoring ..... 113	Diver following.....514
Coastal cleanliness ..... 680	Convolutional neural network .....514	Diving .....148
Coastal Cleanup..... 280	Corrosion factor .....556	Dongjiyu .....148
Coastal engineering ..... 418	Critical conditions for hyperpycnal flow..... 61	Doppler velocity log .....508
Coastal Environmental Education ..... 741	Cultural Landscape ..... 746	Drag coefficient .....780,816
Coastal erosion ..... 313	Current .....355	Drifting Trajectories.....301
Coastal flooding ..... 804	Current Measurement .... 231	Drone .....325
Coastal freak wave ..... 331	Current Profile .....50	Dune ramp.....665
Coastal Management ..... 671	Cut-off .....574	Dune scarp .....665
Coastal management strategy ..... 675	CWB-OCM..... 242	Durability .....551
Coastal Marine Debris.... 694	<b>D</b>	Dynamic mooring model .....598
Coastal protection..... 816	Dam-break ..... 16,32,38,771	Dynamic tension .....373
Coastal structure ..... 413	Damage during typhoon ... 61	<b>E</b>
Coastal topography..... 207	Data analysis..... 77	Earthquake .....563
Coastal water quality index ..... 752	Data augmentation ..... 307	Echo signals .....55
Coastal zone ..... 325	Data Buoy..... 50,73	Eco-engineering .....296
Color feature..... 514	Deep learning..... 89	Ecological investigation..659
COMCOT..... 822	DeepUnet..... 470	Eddy viscosity .....780
COMCOT-SS ..... 825	Delft3D FM ..... 705	Eenergy dissipation.....10
COMCOT-SURGE ..... 798	Deposition..... 166	Effective stress .....783
Communication Buoy..... 580	Depth-integrated model ..790	Eigenfunction expansion method.....780
Competence ..... 440	Digital surface model.....722	Engineering Education....446
Competency..... 434	Dimensional analysis ..... 837	Environmental education .....659
Composites..... 563	DINEOF ..... 125	Environmental impact assessment .....494
Compression wave velocity ..... 423	Direction Finding..... 107	Erosion..... 166,213
Computational fluid dynamics(CFD)..... .....592,646	Directional Spectrum .....231	Estuary .....659
	Dispersion Relationship.. 231	Evaluation factor .....247
		Expendable bathythermograph....476

Experiment .....	759	Geographic Information System.....	337,622	Infrared thermal imager ..	257
Experimental study.....	313	Geological disaster .....	640	Inhibitor .....	551
Extended Kalman Filter..	508	Get lost in harbor .....	530	Integral length scale .....	786
Extreme value analysis...	160	GNSS buoy .....	101	Intelligence.....	482
Extreme Wave .....	119	Gravity.....	616	Internal solitary wave.....	783
<b>F</b>		Gravity-capillary waves..	810	Inundation .....	771
Factors of Typhoon .....	154	Groin Effect .....	189	Inundation extent .....	777
Facility inspections.....	367	Gyro Compass .....	508	Inverse Rouse number....	172
FAHP.....	247	Habitat management .....	734	IOOS .....	379
Fast-speed PIV .....	786	Habitat recreation .....	686	I-P-O model .....	440
Fatigue analysis .....	568	Harbor engineering .....	418	Irregular waves .....	568
Finite Element Method .....	452,499	Harbor environment information system..	361	<b>J</b>	
Fish fry releases.....	659	Harbor structure .....	391	Jacket foundation .....	610
FLAC.....	428	Harbour oscillations.....	397	Jacket-type .....	616
Floating platform.....	586	Headland-Bay Beach .....	189	Jack-up Barge .....	428
Floating sand .....	402	High-Frequency Radar....	137	<b>K</b>	
Floating structure with double slotted barriers .....	10	Himawari-8.....	125	Kaohsiung Port .....	534
Flow visualization .....	795	Histogram Equalization ..	231	Keelung underwater sill ..	634
Flow-3D .....	373	Homogenization theory ..	780	K-means .....	247
Flume tank experiment ...	574	HSPIV.....	67,795	K- $\epsilon$ model.....	789
Focal mechanism.....	822	Hualien Port.....	397	<b>L</b>	
Foredune.....	665	Hydraulic model test .....	402,616	Laboratory experiment.....	38
Freedeacy .....	586	Hyperpycnal flow .....	61	Landslide tsunamis...831,837	
Froude number similarity .....	837	<b>I</b>		Least-Squares methods ...	107
FUNWAVE.....	343	Image acquisition and processing techniques .....	640	LES .....	831,837
FUNWAVE-TVD .....	397	Image detection.....	142,349	Lidar observation .....	628
Fuzzy Delphi .....	253	Image recognition.....	89	Litoral fault .....	822
<b>G</b>		Image technique.....	367	Little Tern .....	686
Gaomei Wetland.....	237	Inertia coefficient.....	816	Low-sulfur Fuel Policy ...	274
Gaoping River .....	61	Infragravity waves .....	397	<b>M</b>	
Gently drive away .....	530			Macau .....	777
				Machine learning .....	307,810
				Mangrove .....	816
				Marine accident.....	225
				Marine Debris .....	280

Marine Environmental Data Statistics.....	385	Multi-temporal comparison and analysis .....	367	Offshore or onshore wind farm .....	652
Marine mammal rescue ..	530	<b>N</b>		Offshore Wind .....	440
Marine meteorological information .....	290	Nan-Ao Fishing Harbor ..	166	Offshore Wind Energy ....	428
Marine spatial planning ..	622	Navier-Stokes .....	843	Offshore Wind Farm .....	494
Marine structure .....	616	Nearshore.....	325,705	Offshore wind power .....	610
Maximum run-up height...	67	Near-surface turbulence.....	5	Offshore Wind Power Industry .....	446
Microbiologically induced calcite precipitation (MICP).....	313	Net cage .....	568,574	Offshore wind turbine foundation.....	592
Microplastics .....	716	New Engineering Education Method Experiment and Construction.....	446	Oil Pollution.....	262
Microplastics Collector ..	716	Northeast monsoon .....	628	Oil spill detection.....	268
Microwave Radar .....	231	NREL 5MW .....	373	OlaFlow / OpenFoam.....	774
MIKE 21.....	219	Numerical simulation .....	142,349	Open data .....	690
Mixing Layer Depths .....	546	Numerical model .....	268	OpenFoam.....	44
Model test.....	574	Numerical modelling .....	774	Operation and Maintanance .....	440
Monopile .....	616	Numerical simulation .....	207,373	Operational model.....	355
Monsoon Waves .....	160	Nutrient management strategies .....	752	Optical image .....	514
Mooring design .....	586	Nutrients .....	711	Orthophoto .....	722,728
Mooring failure .....	586	<b>O</b>		Oscillating Water Column .....	610
Mooring system.....	574	Object detection.....	307	Oyster reef.....	296
Movable bed.....	402	Ocean Current.....	385	<b>P</b>	
Movable-bed hydraulic model test.....	195	Ocean Current Power Generator.....	604	PAM system.....	503
MRF .....	646	Ocean Database .....	385	Parametric Typhoon Model .....	154
Mud bed .....	44	Ocean Lifesaver .....	434	Particle Image Velocimetry .....	10
Mudslide.....	831	Ocean obvservations.....	73	Passive acoustic monitoring .....	503
Multi-angle reflection coefficient .....	488	Ocean spatial vulnerability analysis.....	622	Performance analysis .....	680
Multi-disaster .....	337	Offshore .....	563	Phased Array Radar .....	107
Multiple Signal Classification .....	137	Offshore barrier island....	207	Pile group.....	616
Multiple successive approximation.....	780			PLIC.....	843

POM.....	634	Re-sampling method.....	470	Seasonal topographic change	.....665
Preferred criteria.....	247	Restoration.....	296	Sediment particle size.....	172
Probabilistic Tsunami Hazard		Rigid-fluid method.....	843	Sedimental calculating.....	408
Assessment.....	343	Rip current.....	89,142,349	Sensitivity analysis.....	242
Probability.....	534	Risk Assessment.....	253,337	Settling velocity.....	172
Probability of excess.....	160	Risk factor.....	225	Shear failure.....	783
Probability prediction.....	331	River pollution index.....	752	Shear wave velocity.....	423
Progressive wave.....	819	River surface velocity.....	131	Shihu.....	700
Propagation of uncertainty		Robot operating system..	503	Ship.....	262
.....	765	Rogue waves.....	77	Ship navigation.....	225
Pulse compression.....	499	Rolling forecast.....	268	Shoreline evolution.....	201
<b>Q</b>		Rough slope.....	38	Shoreline Rapid Assessment	.....280
Quadratic transfer function		Runup.....	32,38,67,759	Siamese net.....	470
.....	598	<b>S</b>		Significant wave height...	534
Quality Control.....	379	Sand fence.....	665	Sliding mesh.....	646
Quasi-static mooring model		San-Tiau-Luen sandbar...	177	Slip surface.....	831
.....	598	SAROPS.....	301	Slumps tsunami.....	831,837
<b>R</b>		Satellite.....	268	Smart port.....	247
Radius of maximum wind		Satellite remote.....	125	Smooth particale method	.....476
speed.....	319	Satellite.....	125	Smooth Particle	
RANS.....	646	Scale effect.....	837	Hydrodynamic.....	32
RAO value.....	604	Scale test.....	604	Solitary wave...28,44,67,795	
Rate of discharge.....	1	SCHISM.....	1,777	Sonar array.....	452,499
Real-time monitoring.....	503	Scour protection.....	616	South China Sea.....	783
Real-time whistle detector		Sea creatures attached.....	556	Southwestern Taiwan waters	.....488
.....	503	Sea glider.....	520	Spatial coopetition analysis	.....622
Recognition technology..	470	Sea level rise.....	413	Steel corrosion.....	556
Reconstruction of Storm		Sea surface temperature	.....125,148	Steel slags.....	418
Surge.....	825	Seabed bottom parameters	.....488	Stokes wave.....	819
Recycled material.....	418	.....	488	Storm size.....	777
Reef.....	728	Seabed characterization..	423		
Reflection coefficient.....	464	Seabed monitoring.....	640		
Remotely-operated surface		Seabed morphology change	.....213		
vehicle.....	458	Search and Research.....	301		
Renewable energy.....	610				

Storm Surge.....	154	Synthetic aperture method.....	499	Traditional Fishing.....	746
Storm Surge Impact Intensity Analysis Method (SSIIA).....	825	<b>T</b>		Transducer .....	452
Strategy .....	262	Taichung Port .....	402	Translation Speed.....	825
Structure .....	705	Tailings dam .....	831	Tsunami .....	28,765,771
Submarine cable break .....	61	Taiping Island .....	73,95	Tsunami hazard .....	822
Submarine landslide .....	765	Taiwan Strait.....	546	Tsunami runup .....	804
Submerged conditions.....	16	Tamsui River .....	1	Turbulent boundary layer .....	652
Subsea Cable .....	580	Taoyuan .....	716	Turbulent kinetic energy .....	789
Successive solitary waves .....	759	Taoyuan coast .....	675,694,705,711	Two-Layered Nonhomogeneous Cohesive Soils .....	428
Sulfate .....	551	TELEMAC-MASCARET .....	166	Ty Soudelor.....	798
Support Vector Machine .....	331	Tension Leg Platform(TLP) .....	373	Typhoon .....	1
Surf zone .....	786	Terminal velocity.....	476	Typhoon Track.....	825
Surface Current .....	301	Terrain changes.....	184	Typhoon waves .....	160
Surface flux .....	242	Three-parameter calibration method.....	464	<b>U</b>	
Surface temperature.....	257	Tidal action.....	237	UAS .....	325
Surface wind.....	319	Tidal current investigation .....	734	UAV ....	83,257,307,325,367, 700,722,728
Surface-tension modelling .....	810	Tidal energy test site .....	634	Ultra short baseline .....	508
Surge-Wave Coupling Model .....	798	Tidal reach .....	131	Underwater acoustics .....	452,499
Suspected tsunami boulder .....	16	Tidal wetland .....	734	Underwater ambient noise .....	494
Suspended Sediment concentration .....	172	Tidal Zone .....	189	Underwater positioning...508	
Suspended solids .....	355	Tide .....	101,355,385	Underwater Seismic Refraction Method...423	
SWAN.....	798	Tidel current resources ...	634	Underwater sound wall ...530	
Swash front.....	67	Tomography.....	423	Unit Tsunami Method ....343	
Swash hydrodynamics ....	774	Topographic measurements .....	195	Unmanned Aerial Vehicle .....	284,391
Swash zone .....	83	Topography change .....	201	Unmanned maritime vehicle .....	458
Swash-swash interaction .....	759	Total reflection angle .....	488		
		TPX08-atlas .....	798		
		Trace metals.....	711		

Upwelling.....	546	Wave diffraction .....	804	<b>Y</b>	
Upwelling Index .....	546	Wave Energy Converter .	580	YOLO v2 .....	307
<b>V</b>		Wave force.....	44	Yunjia Coast .....	201
VAP.....	219	Wave forecast .....	690	<b>二劃</b>	
Varriance methods.....	5	Wave group .....	77	二次轉換函數 .....	598
Velocity profile .....	32	Wave load.....	592	人工迂迴供砂 .....	177
Velocity-Azimuth Processing .....	231	Wave modelling.....	790	人工智慧 .....	331
Vertical cylinder.....	44	Wave power conversion .	610	人工智慧方法 .....	160
Vertical integration.....	671	Wave runoff and rundown .....	83	人工植生浮島 .....	22
Vertical plate .....	10	Wave-breaking block		<b>三劃</b>	
VFIFE.....	843	detection.....	391	三參數校正法 .....	464
Visual auxiliary decision-making platform.....	361	Wave-current coupled model .....	119	三條崙沙洲 .....	177
Visual Navigation.....	482	Wave-current coupling .....	142,349	口湖風暴潮 .....	825
VOF.....	831,837	Wave-current interaction .....	119	大氣邊界層風洞.....	652
Volume of Fluid .....	843	Wavelet transform ...	142,349	小波轉換 .....	349
Volume of fluid method .....	810	Waves and suspended canopy interaction .....	780	小燕鷗 .....	686
Volunteer.....	680	Wave-wave interaction ...	786	工程教育 .....	446
Vortices energy .....	10	Wind .....	385	不規則波 .....	568
<b>W</b>		Wind forecast.....	690	不確定性傳播 .....	765
Wake flow .....	652	Wind power density .....	652	<b>四劃</b>	
Water quality monitoring .....	556	Wind speed .....	534	中央氣象局 .....	119
Water Quality Variation .	237	Wind speed profile.....	628	中華白海豚 .....	494
Water quility model.....	355	Wind turbine .....	646,652	內孤立波 .....	783
Water Recreation.....	253	Wind-driven currents .....	5	分散關係式 .....	231
Water-filled impedance tube .....	464	Wind-mooring simulation .....	598	反射係數 .....	464
Waterline detection .....	83	<b>X</b>		太平島 .....	73,95
Wave .....	101,385	XBT .....	476	支撐向量機 .....	331
Wave breaking.....	789	Xinwu Stone Weirs.....	746	文化景觀 .....	746
Wave Breaking Impacts .	189	Xucuagang Wetland .....	686	方向分散參數 .....	142
Wave damping.....	22			方向波譜 .....	231
				方向辨識法 .....	107
				日週期 .....	628
				水(灘)線偵測.....	83
				水下山崩 .....	765
				水下折射震測 .....	423

水下定位.....	508	光達觀測.....	628	志工.....	680
水下背景噪音.....	494	光學影像.....	514	投棄式溫深儀.....	476
水下滑翔機.....	520	全反射角.....	488	沖刷互制.....	759
水工試驗.....	313	全球衛星導航系統浮標		沖刷波前緣端.....	67
水工模型試驗		.....	101	沙丘崖.....	665
.....	38,402,616,759	全潮測量.....	734	牡蠣礁.....	296
水中聲學.....	452,499	再生能源.....	610	防銹劑.....	551
水動力模擬.....	705	合成孔徑法.....	499	<b>八劃</b>	
水域救援.....	434	向日葵 8 號衛星.....	125	事故.....	262
水槽試驗.....	574	向量式有限元素法.....	843	亞重力波.....	397
水質連續監測.....	113	回波訊號.....	55	卷積神經網路.....	514
水質監測.....	556	地形侵淤變化.....	184	季風波浪.....	160
水質模式.....	355	地形量測.....	195	季節性地形變化.....	665
水質變化.....	237	地形變遷... 201,207,213,219		孤立波.....	28,44,67
丘前斜面.....	665	地理資訊系統.....	337,622	岬灣海灘.....	189
<b>五劃</b>		地質災害.....	640	岸線變遷.....	219
以鳥為本.....	738	地震.....	563	底床傳輸.....	166
充水阻抗管.....	464	多角度反射係數.....	488	東北季風.....	628
卡門渦街.....	476	多門學科知識串聯.....	446	東吉嶼.....	148
可加壓充水阻抗管.....	464	多重訊號分類演算法....	137	河川出海口.....	659
可調式平台.....	373	多重參考坐標系.....	646	河川污染指數.....	752
台灣西南海域.....	488	有限元素法.....	452,499	河流表面流速.....	131
台灣海峽.....	546	有效應力.....	783	油污染.....	262
台灣海域三維海流作業化預		自升式平台船.....	428	油污偵測.....	268
報模式.....	242	自主式水下載具		治理策略.....	675
外傘頂洲.....	207	.....	458,482,508,514	波束合成演算法.....	137
布氏模式.....	765	自由衰減.....	586	波束成型.....	55
平滑粒子水動力法.....	32	自動告警.....	290	波流交互作用.....	119
正射影像.....	722,728	自動辨識系統.....	225	波流耦合.....	349
生物附著.....	568	<b>七劃</b>		波浪.....	101,385
生態工法.....	296,738	低硫燃油政策.....	274	波浪力.....	44
生態調查.....	659	作業化模式.....	355	波浪能轉換.....	610
石滬.....	700	即時哨聲偵測.....	503	波浪追算.....	540
<b>六劃</b>		即時聲學監測系統.....	503	波浪荷載.....	592
光滑粒子法.....	476	尾跡流.....	652	波浪減衰.....	22



波浪發電機組.....	580	品質管制.....	379	風-繫纜模擬.....	598
波浪溯升與溯降.....	83	垂直整合.....	671	飛行規劃.....	367
波浪預測.....	690	垂直翼板.....	10	飛機.....	268
波高.....	534	挖填平衡.....	738	<b>十劃</b>	
波潮耦合模式.....	798	施工運維.....	160	倒傳遞類神經網路.....	154
波譜.....	142	柔性驅趕.....	530	剛性流體法.....	843
泥床.....	44	洋流發電機組.....	604	剛架基礎.....	610
物件偵測.....	307	流速剖面.....	32	套管式.....	616
直方圖均衡化.....	231	流量.....	1	展示系統.....	540
直立圓柱.....	44	流體體積法.....	843	桃園.....	716
空污檢測及採樣.....	274	相位陣列雷達.....	55	桃園海岸	
空拍影像.....	722	砂籬.....	665	.....	675,694,705,722,728
空拍機.....	325	突堤效應.....	189	桃園海域.....	711
空氣品質偵測.....	274	紅外線熱顯像.....	257	氣候變遷.....	337,413
空間競合分析.....	622	美國海洋綜合觀測系統		浮力引擎.....	520
花蓮港.....	397	.....	379	浮式翼板結構物.....	10
表面風速.....	319	耐久性.....	551	浮動式平台.....	586
表面海流.....	301	背景去除.....	307	海上事故.....	225
表面溫度.....	257	計算流體力學.....	646	海水淡化.....	524
表層通量.....	242	重力式.....	616	海平面上升.....	413
近岸地區.....	325	重金屬元素.....	711	海生物附著.....	556
近岸或離岸風力田.....	652	重新採樣.....	470	海床底質參數.....	488
近岸結構物.....	705	風力.....	385	海床調查.....	423
近景攝影測量.....	195	風力發電機.....	646	海岸工程.....	418
近體校正.....	257	風力機.....	652	海岸水域.....	716
陀螺儀.....	508	風能密度.....	652	海岸水體品質指數.....	752
非均質互層黏性土.....	428	風速.....	534	海岸永續經營.....	746
非對稱性參數化風場模式		風速剖面.....	628	海岸地區.....	325,337
.....	319	風預測.....	690	海岸快篩.....	280
<b>九劃</b>		風暴潮重建.....	825	海岸垃圾.....	694
侵蝕.....	166	風暴潮影響強度分析法		海岸侵淤.....	213
保護工.....	616	SSIIA.....	825	海岸侵蝕.....	313
前列沙丘.....	665	風機.....	563	海岸清理.....	280
南海.....	783	風險因子.....	225	海岸清潔.....	680
南澳漁港.....	166	風險評估.....	253,337	海岸結構物.....	413

海岸管理.....	671	高爐石.....	418	許厝港濕地.....	686
海岸環境教育.....	741	<b>十一劃</b>		許厝港濕地復育工程.....	738
海表溫度.....	148	剪切破壞.....	783	通訊浮筒.....	580
海洋空間規劃.....	622	動床.....	402	連續孤立波.....	759
海洋結構物.....	616	動床水工模型試驗.....	195	都卜勒流速儀.....	508
海洋資料庫.....	385	動態繫纜模型.....	598	魚苗放流.....	659
海洋廢棄物.....	280	區塊開發.....	622	鳥類群聚.....	686
海洋環境數據統計.....	385	參數化颱風模型.....	154	<b>十二劃</b>	
海洋觀測.....	73	基隆海檻.....	634	單位海嘯法.....	343
海流.....	355,385	基礎承载力.....	428	單樁.....	616
海流剖面.....	50	張緊式.....	373	復育.....	296
海面溫度.....	125	敏感度分析.....	242	循環材料.....	418
海氣象.....	540	淡水河.....	1	換能器.....	452
海氣象環境資訊.....	290	淤積.....	166	智能載具.....	482
海域救助人員.....	434	深度學習.....	89	智慧港.....	247
海域遊憩.....	253	深度學習神經網路.....	470	曾文溪.....	524
海域遊憩安全.....	89	混合層.....	546	最大風速半徑.....	319
海域監測.....	640	瓶裝海洋垃圾.....	307	最小平方法.....	107
海港環境監測.....	367	異重流.....	61	棲地管理.....	734
海嘯.....	28,765	異常巨浪.....	119	棲地營造.....	686
海嘯災害.....	822	異常波浪.....	77	氯離子.....	551
海灘沖刷帶.....	83	異常指標.....	113	渦流能量.....	10
海灘侵淤變遷.....	189	異常海象.....	142	港內迷航.....	530
海纜.....	580	硫酸鹽.....	551	港池共振.....	397
消波塊檢測.....	391	移動速度.....	825	港灣工程.....	418
紊流邊界層.....	652	粒子圖像測速技術.....	10	港灣構造物.....	391
能量衰減.....	10	粗糙底床.....	38	港灣環境資訊系統.....	361
脆弱度分析.....	622	終端速度.....	476	湧升流.....	546
脈衝壓縮.....	499	船舶.....	262	湧升流指標.....	546
陣列式高頻雷達.....	137	船舶空污排放.....	274	湧波.....	32,38
陣列雷達.....	107	船舶航行.....	225	無人飛行載具.....	
高屏溪.....	61	船難.....	142	83,257,284,325,367,391	
高美濕地.....	237	被動式聲學系統.....	503	無人機	
高雄港.....	534	被動式聲學監測.....	503	.....307,325,700,722,728	
高頻雷達.....	107	規劃設計.....	160	策略.....	262

## 十七劃

優選準則群.....	247
壓縮波速.....	423
擬海嘯石.....	16
濱海斷裂帶.....	822
營運與維護.....	440
營養鹽.....	711
營養鹽管理策略.....	752
環境教育.....	659
環境影響評估.....	494
礁體.....	728
縮尺試驗.....	604
績效分析.....	680
聲納陣列.....	452,499
聲學影像.....	640
聲牆法.....	530
臨界條件.....	61
錨碇系統.....	574

## 十八劃

擴展式卡曼濾波.....	508
斷纜.....	574
職能.....	434,440
轉爐石.....	418
顏色特徵.....	514

## 十九劃

離岸.....	563
離岸流.....	89
離岸風力發電.....	610
離岸風力發電機基樁....	592
離岸風能.....	428
離岸風能產業.....	446
離岸風場.....	494,622
離岸風電.....	440
繫纜失效.....	586
繫纜疲勞分析.....	568

繫纜設計.....	856
-----------	-----

譜尖參數.....	142
-----------	-----

鯨豚救援.....	530
-----------	-----

## 二十劃

懸浮固體物.....	355
------------	-----

蘇迪勒颱風.....	798
------------	-----

## 二十二劃

孿生網路.....	470
-----------	-----

灘線變遷.....	201
-----------	-----

## 二十四劃

驟降.....	148
---------	-----

