

港灣季刊

(原港灣報導季刊)

第 120 期

交通部運輸研究所
中華民國 110 年 10 月

「臺灣季刊」第 120 期

刊期頻率：季刊

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：105004 臺北市松山區敦化北路 240 號

網 址：www.iot.gov.tw

電 話：(02)23496789

總 編 輯：林繼國

編輯委員：蔡立宏、柯正龍、蔣家榮、賴瑞應、李俊穎、林雅雯、蔡世璿、施慧敏

出版年月：每年 2、6、10 月

創刊年月：中華民國 77 年 2 月 1 日

定 價：100 元

本次出刊：100 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

印 刷 者：九茹印刷有限公司•電話：(02)29660816

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496887

國家書店松江門市：104472 臺北市中山區松江路 209 號 1F•電話：(02)25180207

五南文化廣場：400002 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：20077000020

ISSN：1019-2603

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

目 錄

一、軌道扣件缺失辨識系統精進研究 1

謝禎岡 大同大學資訊工程系教授
林雅雯 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
謝尚琳 大同大學資訊工程系副教授
黃維信 大同大學媒體設計系教授
洪瑋宏 大同大學資訊工程系研究生
杜宇豪 大同大學資訊工程系研究生
賈漢文 大同大學資訊工程系研究生
徐個雲 大同大學資訊工程系研究生

二、臺中港液化天然氣載運船進出港作業機率探討 9

羅冠顯 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
蔡立宏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
陳子健 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究助理

三、臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討 I ..23

李政達 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
林受勳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
蔡立宏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

四、臺灣附近海域及港區船舶排放量對空氣品質影響預測系統33

吳義林 國立成功大學環境工程學系教授
賴信志 長榮大學科技工程與管理學系副教授
蔡德明 崑山科技大學資訊傳播系助理教授
楊榮元 國立成功大學環境工程學系研究助理
賴力瑋 長榮大學科技工程與管理學系研究助理
蔡立宏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
蔣敏玲 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

五、臺中港單基海洋陣列雷達波浪及海流觀測之分析研究探討
.....40

李政達 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
林受勳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
蔡立宏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

六、港區航行安全之海氣象及應變即時展示系統50

蔣敏玲 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
林騰威 數位地球科技有限公司總經理
賴志炫 臺灣港務股份有限公司工程處助理工程師

七、馬祖海域 AIS 與海氣象資訊整合運用58

蔡世璿 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
林騰威 數位地球科技有限公司總經理
鄭采誼 數位地球科技有限公司駐點工程師
林志豐 連江縣港務處處長
陳登壽 連江縣港務處約僱人員

軌道扣件缺失辨識系統精進研究

謝禎罔	大同大學資訊工程系教授
林雅雯	交通部運輸研究所臺灣技術研究中心科長
謝尚琳	大同大學資訊工程系副教授
黃維信	大同大學媒體設計系教授
洪瑋宏	大同大學資訊工程系研究生
杜宇豪	大同大學資訊工程系研究生
賈漢文	大同大學資訊工程系研究生
徐侗雲	大同大學資訊工程系研究生

摘要

軌道扣件可將鐵軌緊扣在軌道上，對於列車能否平穩及安全的行駛影響至鉅。本研究建立軌道扣件影像的收集設備，依收集之軌道扣件資料，透過影像標記處理，採用 YOLOv4(You only look once)演算法進行深度學習模型訓練，再從測試資料驗證扣件缺失召回率，109 年實驗共錄製 70 公里軌道扣件影像，在 108 年以 YOLO v3 驗證，扣件準確率(Precision rate)為 82.5%，扣件缺失召回率(Recall rate)為 74.5%，109 年計畫採用 YOLOv4，訓練方式由原扣件正常資料，改用扣件缺失資料，扣件缺失召回率提升至 87%，類別平均準確率(mAP)提升為 94.8%，辨識系統速度超過 55 張/秒。為方便軌道巡檢人員尋找扣件，本研究另開發雲端儲存、辨識、與手機 APP 查詢，GPS/陀螺儀定位等功能，可於 Google Map 顯示鐵路里程樁號(每百公尺)，定位缺失扣件位置，方便檢修人員尋修，提升維管效能。

一、前言

人工巡檢目的為確保扣件的正常運作，依據「1067 公厘軌距鐵路長焊鋼軌鋪設及養護規範」[1]所訂內容「軌道扣件之巡查若有其他更有效率之巡檢方式，

得降低人工巡檢頻率，但人工巡檢頻率不得低於二個月一次」。傳統鐵路軌道扣件係採用人工目視方式進行巡檢，受限於巡檢車速及視察角度等問題，無法有效快速進行，因此希望利用人工智慧(Artificial Intelligence, AI)方式協助完成巡檢任務，有效提升巡檢效率，降低巡檢人員視察侷限等問題。

本研究 108 年計畫已透過收集之軌道扣件影像資料，進行影像標記處理，並使用 YOLO v3 進行深度學習模型訓練，再從測試資料驗證扣件缺失召回率，建立一套扣件影像巡檢自動辨識系統，用以檢測軌道扣件是否脫落。本研究持續精進系統功能，影像擷取採用運動型攝影機 GoPro 最新型式進行拍攝，錄製 70 公里軌道扣件影像，扣件辨識率及扣件缺失召回率可達到軌道扣件影像辨識檢測的目的。另開發雲端儲存、辨識、與查詢及定位等功能，可上傳扣件影像進行辨識與查詢結果，方便檢修人員尋找缺失扣件，除在 Google Maps 上顯示鐵路里程樁號(每百公尺)，更利用 GPS 座標及里程定位缺失扣件，方便檢修人員進行維護。

二、文獻回顧

瑞士電子和微技術中心(Swiss Center for Electronics and Microtechnology, SCEM)[4] 採用深度學

習技術，每個月檢查 3,800 公里的軌道，記錄不同天氣條件（如下雨、下雪及結冰）及非軌道物件（如樹葉、泥土等）的影像資料。透過訓練模型檢測影像目標區域（如鐵軌、扣件等），利用「生成對抗網路」（Generative Adversarial Network, GAN）辨識軌道構件，並將約 20 種不同的故障類別濃縮為 5 大類（如焊接、接頭、表面缺陷、踏面擦傷、車輪滑移）。

美國 ENSCO 公司鐵路成像系統，利用高解析度相機系統和先進影像處理演算法，使系統具有圖像採集和處理能力，該檢測設備已成功地應用於一系列軌道構件的檢測^[5]，包括魚尾銼、枕木、扣件、軌面、電車線及軌道通行權（Right of Way, ROW），影像擷取判斷分析系統可以晝夜運行。

加拿大 Pavemetrics 公司的 Laser Rail Inspection System (LRAIL)^[6]全方位軌道檢測系統，可架設在改裝的車輛上或是火車頭前，其全自動鐵路檢查對象包括木枕木、混凝土枕木、扣件檢測、鋼軌踏面缺失、鋼軌接頭檢測等。

德國 bvSys 公司^[7]的鐵路自動檢測系統，可在不影響軌道交通的正常運作下，精確的執行軌道缺陷檢測及影像高速處理，此外，系統亦提供定期的軌道檢查，可用於自動檢測軌道表面可見的異常、扣件遺失、混凝土軌枕破裂或損壞，以及測量道碴輪廓等。高性能線掃描攝影機和雷射測距儀垂直安裝在軌道上方，用於巡檢軌道兩側、軌枕指定區域和道碴。

義大利 MERMEC^[8]公司，其軌道魚尾銼（或鋼軌接頭桿）檢測系統能夠自動檢測任何裂紋、劃痕或任何其他缺陷。該系統能夠達到時速 320 公里下的檢查，其對象包括魚尾銼缺失螺栓及裂紋的自動檢測。

三、扣件缺失辨識系統精進

本研究採用高速影像攝影機搭配足夠輔助照明，透過 HDMI、USB、LVDS 或是無線網路等介面，將攝影機拍攝的影像，傳送到前端系統，進行影像辨識或是儲存，而定位功能，則以 GPS（非隧道段）及陀螺儀（隧道段）方式標示出問題扣件或軌面所在的軌道範圍。

影像辨識的深度學習模型，本研究前期計畫採用 YOLO v3^[9]，雖然 YOLO v3 辨識速度快，可達 155 fps，但會有 mAP 降低及定位不準的問題。109 年計畫採用 YOLOv4^[10]模型，其使用特徵金字塔的多層預測方法，在不同的卷積層上設置前景方框，在不同大小的特徵圖上考慮不同的尺度。回顧影像辨識的發展史，從 R-CNN 到 Faster R-CNN^[11]，再到並駕齊驅的 YOLO 和 SSD^[12]，影像辨識的發展在 2015~2016 年達到了一個巔峰，更在 2020 年 YOLOv4、YOLOv5^[13]亦相繼的出現，因兩者檢測率以 YOLOv4 為最佳，而 YOLOv5 未獲官方承認，在維護上較有疑慮，因此，本計畫採用 YOLOv4。

3.1 平車改進

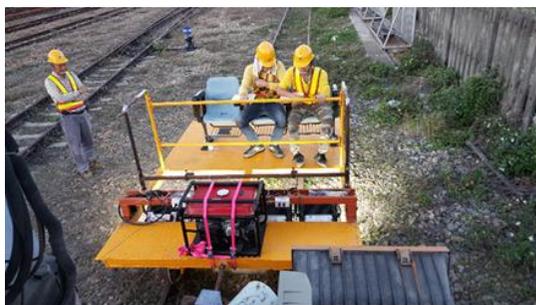


圖 1 第二代平車

使用平車的方式進行軌道扣件拍攝，將來容易複製到其他維護單位使用，本研究將 108 年平車進行改良，第二代的平車如圖 1 所示，將攝影桿架改為四個支柱，每一支柱與平車固定處墊橡皮墊，

以達到減震效果，達到穩定長時間拍攝及即時辨識的目的。

3.2 高速影像攝影機之選用

為了在列車高速行駛的狀況下依然能夠取得清晰的影像資料，故採用高速影像攝影機。相較於傳統攝影機，高速影像攝影機提供每秒 60 張(每秒顯示張數，Frame per Second, FPS) 以上的拍攝速度，以 120km/hr 的行駛速度作為預期的環境狀況，若每張拍攝範圍為 0.5m，則需要每秒拍攝 67 張相片。但若以夜間臺鐵局工程維修車時速約 30km/hr 為使用條件，高速影像攝影機足以達到需求。另外，考量外部環境的狀況，選用的高速影像攝影機須具備防水、防震及可遠端連線控制。

以往對於軌道巡查採用的攝影機以「線掃描相機」(Line Scan Camera) 為主，如高速數位式攝影機 E2V 廠牌之 AViiVA UM4(掃描解析度為 8,192 pixels、資料產生頻率為 160MHz、掃描頻率為 19KHz)，並搭配資料儲存之 DVR (數位錄影機, Digital Video Recorder) 使用。一般而言，此類「線掃描相機」視硬體規格價錢約 3、5 萬至 20 餘萬。

隨著硬體的進步，目前運動型錄影機的功能大幅提昇，只要每秒拍攝的幀數能滿足取樣頻率，影像直接儲存在記憶卡中或是透過無線網路直接回傳，可大幅降低設備費用。



(a)



(b)

圖 2 軌道扣件攝影(a)GoPro7(較模糊)。(b)GoPro8(較清晰)。

由於 GoPro 運動型攝影機是以極限運動的拍攝為主，因此特別強調手持防震技術，並有 GPS 記錄功能，經評估足以進行軌道扣件拍攝。前一期採用是 GoPro Hero7 Black，本研究升級為 GoPro Hero8 Black 機型，官網訊息顯示 GoPro Hero8 Black 的散熱效果比 GoPro Hero7 Black 好。此外，GoPro 周邊配件相當完整，若要將其固定於工程維修車，可依需求選用適當的配件。圖 2(a)和圖 2(b)顯示，GoPro8 拍攝影像較 GoPro7 為清晰。

3.3 即時前端辨識

YOLO v4^[10] 屬於 One-Stage 的 Object Detection 演算法，但是 FPS 及 AP(average precision)都超越 Two-Stage 演算法。目前在 Tesla V100 的 GPU 上，使用 MS COCO 資料集，可達到約 65 FPS 及 43.5% AP，表現較 R-CNN 佳。YOLO v4 與其他 AI 模型之比較，如圖 3 所示。

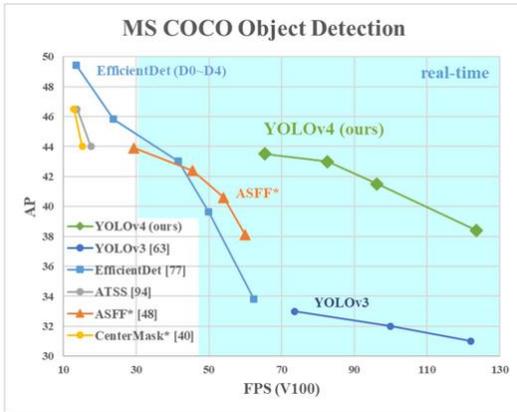


圖 3 YOLO v4 與其他 AI 模型效能比較

假設列車以時速 60 公里進行辨識，則移動距離為 $60 \times 1,000 = 60,000$ 公尺，每秒平均移動 17 公尺，攝影機拍攝長度約為 1 公尺，則至少需每秒完成辨識 17 張圖片。此外，本計畫需同時進行兩個攝影機畫面的同時輸入處理並同步顯示，即為需要兩倍的執行速度，即每秒辨識 34 張照片(或 0.029 秒內完成單張圖片)的處理。

本研究採用執行緒(Thread)改寫程式，為作業系統能夠進行運算排程的最小單位，也就是平行處理。多執行緒可以最有效利用電腦性能，但並非越多越快，如進行執行緒個數實測，發現作業系統與電腦硬體需要透過切換才能存取不同程式的資料 (Context Switching)，在傳輸資料時，等待資料的過程將產生內部延遲。實測結果如圖 4 所示，採取 3 個執行緒處理是效能較佳的作法。

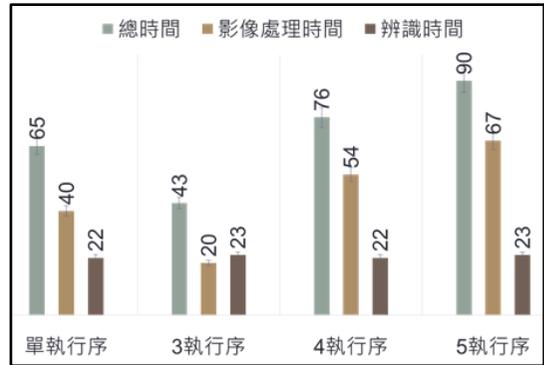


圖 4 執行序個數實驗測試

為達到每張相片 0.029 秒之即時辨識，在不影響辨識結果下，本研究將影像解析度由原本 608x608 降為 416x416，即時辨識效能時間分析，如表 1 所示，辨識部分，建議以 nVidia 人工智慧加速卡為必要配備。加速卡處理資料須將資料自主記憶體複製至顯示卡記憶體內，處理完後再將結果複製回主記憶體，加速卡以批次方式處理資料，在處理大量資料的情況下有優勢，但如將單張圖片依序傳入，則效能優勢則較不凸顯 (仍比 CPU 快)，由此可得知主要耗時於辨識影像上，如欲加快即時模式的影像處理，仍應調整模型，並降低資料傳輸量。

表 1 即時辨識效能時間分析

解析度	608x608	416x416
檢測階段	6.32 秒	6.32 秒
啟動攝影機	2 秒	2 秒
雙攝影影像處理	0.02 秒	0.02 秒
影像辨識(單張)	0.023 秒	0.015 秒
顯示結果	0.001 秒	0.001 秒
完整一次辨識流程	0.05 秒	0.033 秒



圖 5 即時辨識程式流程



圖 6 採 3 個執行緒處理流程

原本辨識程式流程如圖 5 所示，經實測有其使用瓶頸，因此調整前端程式架構與流程，採用 3 個執行緒處理方式，分別為攝影機、辨識與顯示介面，辨識程式流程如圖 6 所示。其中已加入攝影機意外斷線時的糾錯，可避免當機情形。主程式結構優化，現在攝影機控制函數已從中分離至獨立程序，避免因 OpenCV 版本問題造成引用失敗，且增加可讀性。

於攝影機控制功能新增 1 個檢測函數，用於測試使用的影像來源是否可以達到指定的解析度與快門速度，影像來源函式目前可自動依據多線程或一般使用需求解析輸入參數。影像來源函式目前的輸出格式具有 BGR 與 RGB 兩種模式，轉換模式基於記憶體陣列轉換，影像來源函式的縮小函數從雙線性插值改為像素區域關係進行重採樣 (resampling)。監視介面與圖片辨識功能進行拆分，如此，介面不再因辨識速度導致更新緩慢。

程式運行加入了 Signal 檢查，非正常關閉主程式時能自動將多執行緒的其它子程序一併關閉及控制辨識速度，為維持即時結果的呈現速度，系統將在面臨資源不足時套用控制，即略過部分輸入或縮小結果呈現時所顯示的影像。調整影像解析度對於召回率的影響，如表 2 所示。另電腦硬體因為連續運作，導致溫度上升，因此，必須考慮散熱功能。

表 2 調整影像解析度對於召回率的影響

	解析度 416*416	解析度 320*320
FPS	55.77	69.87
準確率	0.948	0.901
召回率	0.87	0.84
TP	130	125
FP	24	22
FN	19	24
閾值	0.5	

四、缺失辨識準則與資料庫建立

軌道扣件缺失分類如表 3 所示，將 e 扣件與道釘分為輕微缺失(X) (如圖 7 所示，e 扣件鬆脫外移)和嚴重損壞(XX) (如圖 8 所示，e 扣件遺失或斷裂)。

軌道扣件缺失分類由 108 年 11 類修正為 6 類，主要原因為滑床板、護軌墊板在實際應用中較少缺失，亦未收集到缺失樣本，故不列入辨識對象，另 e-Clip 斷裂需要改列為嚴重明顯損壞(XX)，而扣件遮蔽亦單獨列為一類。

表 3 軌道扣件缺失分類

編號	扣件分類	圖片	說明
1	e 扣件缺失 X		位置偏離、未定位
2	e 扣件缺失 XX		遺失、斷裂
3	道釘缺失 X		位置偏離、未定位
4	道釘缺失 XX		遺失、斷裂
5	其他錯誤		軌道上其他異物、錯誤
6	元件被遮蔽 X		扣件因線路、道碴、植物等原因遭到遮蔽
7	軌面缺失 X		踏面損傷:軌面中間凹陷、邊緣裂縫
8	軌面缺失 XX		鋼軌裂縫
9	版式 e 扣件缺失 X		扣夾位置偏離、未定位
10	版式 e 扣件缺失 XX		扣夾遺失、斷裂 螺栓遺失

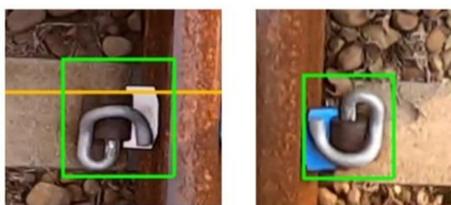


圖 7 扣件較輕微之不明顯損壞 (e 扣件缺失 X)，稍微突出。

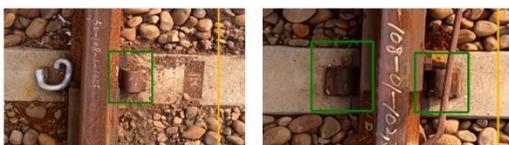


圖 8 扣件較嚴重明顯之損壞 (e 扣件缺失 XX)，完全脫落。

缺失扣件資料集由原本 3,800 張增加為 5,600 張(4,480 張訓練+ 1,120 張測試)，來源為 108 年計畫及本期 109 年 4 月 11、4 月 19 日、9 月 19 日所拍攝相片，取出 GoPro 7/8 所攝得或利用手機

以相同角度與解析度拍攝所有缺失的扣件照片。

軌面缺失辨識種類以鋼軌裂縫及踏面不整(魚鱗剝落現象)為主，並將軌面缺失納入缺失扣件資料庫，如表 3 的第 7 及 8 項，與其它缺失扣件一併進行 YOLO 訓練與辨識。

五、模型訓練與實地驗證

5.1 模型訓練

本研究使用遷移學習(Transfer Learning)，將模型由原本 YOLOv3 改為以最新的 YOLOv4⁽¹⁰⁾來訓練與辨識，一般來說，Two-Stage(R-CNN、Faster R-CNN)AP(Average Precision)較高，但相對的 FPS 表現會較低。實驗顯示模型從 CSPResNet 遷移至 YOLOv4，速度提升約 15%，辨識率維持原先網路等級，雖然 Recall Rate 降低，但是 Over Kill(誤殺)的比率亦降低，如表 4 所示。測試結果，真陽性 TP 為 511 個，偽陽性 FP 為 117 個，偽陰性 FN 為 20 個，正確率為 0.81，召回率為 0.96，平均正確率為 86.8%，顯示有良好辨識效果。

表 4 YOLO v4 Confusion Matrix 與辨識結果

	辨識損毀	辨識正常
Recall rate=TP/(TP+FN)=0.96	實際損毀 511(TP)	20(FN)
Precision=TP/(TP+FP)=0.81	實際正常 117(FP)	X(TN)

- eclip_break_x : AP=99.82% , Precision=96% , Recall=100%
- eclip_break_xx : AP=99.15% , Precision=97% , Recall=100%
- railspike_break_x : AP=91.94% , Precision=68% , Recall=94%
- railspike_break_xx : AP=99.06% , Precision=74% , Recall=100%
- others_break : AP=68.39% , Precision=61% , Recall=58%
- covered : AP=92.99% , Precision=78% , Recall=96%
- rail_break_x : AP=100.00% , Precision=100% , Recall=80%
- rail_break_xx : AP=100.00% , Precision=68% , Recall=100%
- Slab_track_eclip_break_x : AP=28.00% , Precision=25% , Recall=50%
- Slab_track_eclip_break_xx : AP=88.81% , Precision=67% , Recall=100%

5.2 扣件缺失辨識系統實地驗證

實驗區段位於臺鐵局臺中工務段某鐵路軌道區，隨機於路段上製作缺失扣件，於維修車上同時進行人工目視巡檢及 GoPro7/8 錄影 AI 辨識。

人工搭乘工程維修車以時速 5 公里目視檢測，發現有 52 個缺失（平時軌道扣件巡檢時速為 30 公里），AI/GoPro7 系統以時速 30 公里檢測出人工檢測報告中的 46 個缺失，其中額外找出了不在人工檢測報告內的 7 個缺失扣件，此 7 個缺失扣件分類皆為 e-Clip 扣件嚴重缺失(XX)。

本研究 AI 影像辨識出人工目視巡檢 52 個軌道扣件缺失中之 46 個缺失，因此 Recall Rate= $46/52=88\%$ ，但 AI 影像辨識出比人工目視巡檢多 7 個缺失扣件，證實本系統確實可以輔助人工目視巡檢。

實際影片辨識結果，還有 2 個誤報，以及未訓練過的缺失扣件 5 個，為道叉處的扣件，因為鐵板上之 e-Clip 脫落，所以被辨識出來。所謂「未訓練過扣件」，即是本系統未曾訓練過的缺失扣件，但卻能被偵測出是缺失的扣件，因此 AI 針對不同背景之 e-Clip 亦能辨識。

六、結論

本研究採用 YOLO v4，訓練方式由原扣件正常資料改用扣件缺失資料，扣件缺失召回率提升至 87%，類別平均準確率提升為 94.8%，辨識系統速度更高達 55 張/秒，並經實際於鐵路正線上測試驗證其可行性。

AI 人工智慧辨識扣件缺失，可大量減輕道班工作人員之工作負擔，並減少人力支出，節省經濟成本，期望能有效疏解目前基層鐵路巡檢人力不足之問題。建議未來持續改善工作內容包括：

1. 訓練資料建立

持續增加缺失樣本以供訓練使用，可以增強本系統的辨識能力。未來將訓練人員協助進行標記工作，以期能加快資料處理速度，並將現有辨識結果中辨識錯誤者進行探討，若屬 FP 誤殺，則新增此負樣本，若屬 FN 誤放，就必須透過人工將整個影片看過，才找得出來正樣本，譬如鋼軌裂縫等重大軌面缺失，雖須透過大量人力進行影像內容驗證處理並統計目前所錄製路段的缺失扣件，但為維護鐵道行駛安全，必須落實辦理。

2. 軌面缺失的自動化處理機制

軌面缺失的照片相當少，本研究採用方法如下：

- (1) Review 並重新組合或調整 Model 架構。
- (2) 將資料進行正規化。
- (3) 使用 Dropout 技術。
- (4) 使用資料增強(Data augmentation)技術，以補足資料不足而導致的過度擬合(Over-fitting)問題。

一張圖片經過旋轉、調整大小、比例尺寸，或者改變亮度色溫、翻轉等處理後，人眼仍能辨識是同一相片，但對機器來說，是完全不同的新圖像，因此，Data Augmentation 就是將 Dataset 中既有的圖片予以修改變形，以創造出更多的圖片來讓機器學習，彌補資料量不足的困擾，本研究利用 Data Augmentation 方式，增加軌面缺失的資料，經驗證為可行方案，未來將持續擴增與維護扣件缺失資料集。

參考文獻

3. 交通部，「1067 公厘軌距鐵路長焊鋼軌鋪設及養護規範」，交通技術標準規範鐵路類工務部，2018。
4. 林雅雯、謝禎岡、黃維信、謝尚琳、洪瑋宏、李明德，「扣件缺失辨識系

- 統之建置研究」，港灣季刊，第 116 期，交通部運輸研究所，2020。
5. 臺鐵局各種里程標，Blair's 鐵道攝影，取自 http://blair-train.blogspot.com/2011/11/blog-post_8911.html，查詢日期：2019 年 1 月 16 日。
 6. “How Swiss Federal Railways is improving passenger safety with the power of deep learning,” 2018, Forbes.
 7. “Railway imaging systems,” ENSCO, <https://www.ensco.com/rail/track-imaging-systems/>，查詢日期：2020 年 1 月 19 日。
 8. Pavemetrics, “Laser rail inspection system (LRAIL),” 2019, Canada, <http://www.pavemetrics.com/applications/rail-inspection/laser-rail-inspection-system/>，查詢日期：2019 年 1 月 14 日。
 9. “Visual inspection systems for track maintenance,” bvSysBildverarbeitungssysteme, <https://www.railway-technology.com/contractors/track/bvsys/>，查詢日期：2020 年 6 月 18 日。
 10. Mermec, “Leading the way forward,” <http://www.mermecgroup.com/inspect/track-measurement/185/track-geometry.php>，查詢日期：2021 年 2 月 27 日。
 11. Joseph Redmon and Ali Farhadi, “YOLOv3: An Incremental Improvement,” 1804.02767, arXiv, 2018.
 12. Alexey Bochkovskiy and Chien-Yao Wang and Hong-Yuan Mark, “YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection,” eprint=2004.10934, 2004.10934, arXiv, 2020.
 13. Shaoqing Ren and Kaiming He and Ross Girshick and Jian Sun, Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks, 1506.01497, arXiv, 2015.
 14. Liu, Wei and Anguelov, Dragomir and Erhan, Dumitru and Szegedy, Christian and Reed, Scott and Fu, Cheng-Yang and Berg, Alexander C., “SSD: Single Shot MultiBox Detector,” Lecture Notes in Computer Science, pp. 21-37, 2016.
 15. Jacob Solawetz, “YOLOv5 New Version - Improvements and Evaluation,” June 29, 2020, <https://blog.roboflow.com/YOLOv5-improvements-and-evaluation/>，查詢日期：2020 年 7 月 12 日。
 16. Ya-Wen Lin, Chen-Chiung Hsieh, Wei-Hsin Huang, Sun-Lin Hsieh, and Wei-Hung Hung, Railway Track Fasteners Fault Detection using Deep Learning, 2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering, 3-6 Oct. 2019.

臺中港液化天然氣載運船進出港作業機率探討

羅冠顯 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
蔡立宏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
陳子健 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究助理

摘要

近年由於世界能源日漸短缺，天然氣 (Liquefied Natural Gas, LNG) 等新興能源逐漸受到重視，天然氣經低溫液化處理，透過船隻、車輛及天然氣輸送管線等途徑運送至目的地，本研究以台灣中油股份有限公司 (以下簡稱中油) 臺中港液化天然氣廠為研究範疇，並以交通部運輸研究所港灣技術研究中心 (以下簡稱港研中心) 臺中港海氣象資料為分析樣本，分析臺中港液化天然氣載運船 (LNG Carrier, 以下簡稱 LNG 船)，於不同月份、季節及作業時段可進出港作業機率。

研究顯示，12 月作業機率最低，5~8 月機率較高，以 10 時~18 時時段為例，10 月時東北季風逐漸增強，作業機率曲線呈現明顯下降趨勢，作業機率於各延時較 9 月減少約 30%，11 月作業機率小幅上升後於 12 月再降低，直至隔年 2 月東北季風稍微趨緩後，作業機率逐漸增加，於 5~8 月達到作業機率高峰，9 月後再逐漸降低。本研究將各月延時機率分佈採迴歸分析，所求得迴歸公式可用於推估臺中港 LNG 船，於某特定月份及時段欲進出港作業時可能之作業機率，惟仍需經長期驗證，或增加其他變異因素，提升推估準確率。本研究提出 LNG 船在不同月份、季節及時段作業機率，相關研究成果可做為 LNG 船於管理、調度與分析評估應用參採。

一、緣起及目的

臺中港為臺灣主要國際商港，為我國南北交通航線中心，中油於 2003 年 10 月取得台灣電力公司大潭電廠供氣合約，並於 2004 年 7 月開始著手興建臺中港液化天然氣廠，於 2009 年 7 月正式啟用後，開始上線供應予國內天然氣市場。

LNG 船為設計專門用以運送液化天然氣之液貨船，有關 LNG 船卸載、運送及航行條件均有明確相關規定，如「臺中港液化天然氣船進出港與繫泊作業規定」，即依據商港法與商港港務管理規則，明確定義出 LNG 船進出臺中港作業條件及限制，而有關不同海事作業目的與海氣象環境及作業延時相關性分析，以往亦有學者針對此部分提出論述，如朱等人 (2000) 就波浪、風速及過繼時間對可工作日數之個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 0.6 m 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 4 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。

本研究依據「臺中港液化天然氣船進出港與繫泊作業規定」，參考前人相關

研究，分析港研中心臺中港歷年風波流場資料，探討臺中港 LNG 船於不同月份、季節及時段可能之作業機率，做為臺中港 LNG 船管理調度應用參考。

二、港區海氣象觀測系統

臺灣位處歐亞大陸與太平洋交界處，氣候廣受季風影響，我國現有基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港、布袋港、臺中港、臺北港、澎湖港、馬祖港及金門港等商港，各港海氣象受地理位置、季風及颱風影響變化萬千，特性均不相同，港研中心已陸續於前述商港布建海氣象監測設備，做為商港港區施工、工程規劃設計、防災應變、事故釐清及船舶航行安全應用，提升船舶進出港及停泊之航行安全，維持營運航線、垂釣及遊憩區人員安全。

本研究選用臺中港北堤防外底碇式波流觀測儀 AWAC (Acoustic Wave and Current profiler) 及北堤防綠燈塔風速觀測儀所蒐集風波流場資料，並參考「臺中港液化天然氣船進出港與繫泊作業規定」，探討臺中港 LNG 船之作業機率，有關波流與風力觀測系統架設位置，如圖 1 所示。

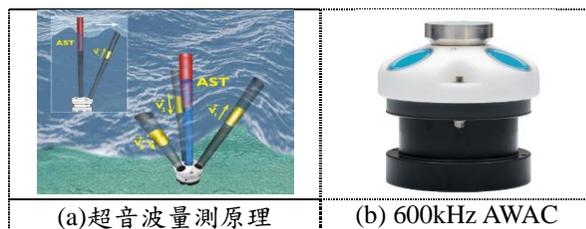


圖 1 臺中港海氣象觀測站位置圖

本研究用於執行波流場監測觀測儀器 AWAC 由挪威 Nortek 公司生產，其原理係透過儀器上方音鼓，量測設置地點波浪及海流粒子運動情形（如圖 2 所

示），臺中港波流觀測儀設置於北防波堤堤頭外約 700~800 公尺處，觀測水深約 30 公尺，並選用 600kHz 型號執行該海域波流觀測作業。

剖面海流量測間距設定為 1 公尺，於每小時第 0 分鐘至 10 分鐘連續量測 600 秒，再將總和平均代表其每一間距層之海流剖面流速及流向等資料，波浪的取樣頻率為 1Hz，每小時取樣 2048 筆（第 10 分鐘至 44 分鐘）資料，量測取得之資料再做整合而得到波高、波向及週期等資料。



（圖片來源：AWACuser manual）

圖 2 AWAC 波流儀觀測原理及儀器示意

風速觀測儀架設於北防波堤堤頭綠燈塔塔頂，觀測儀器採用英國 GILL 公司生產之 WindObserver 二維超音波式風速風向儀，資料擷取頻率為 1Hz，蒐集臺中港海域不同時段平均風速、平均風向、最大陣風及最大陣風時風向等數值，如圖 3 所示。



（圖片來源：GILLuser manual）

圖 3 GILL WindObserver 二維超音波式風速風向儀

三、臺中港 LNG 船進出港作業機率分析

3.1 統計方式

為提升分析資料可信度，本研究定義風波流觀測站每月資料蒐集率至少需達 7 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 1 月 1 日~2020 年 12 月 31 日，其間共蒐集風速 119,471 筆，波浪波高 110,764 筆，海流流速 110,764 筆等資料，做為本次分析主要樣本，資料筆數及蒐集率，如表 1 所示。

本研究風速資料係取整點前 10 分鐘內風速數據加以統計，而得出該區間內平均風速；波浪波高的取樣頻率為 1 Hz，每小時取樣 2,048 筆，而獲得該小時波高數據；海流流速係指觀測期間表層（上層 1/3 海流）海流流速平均值。

表 1 分析資料樣本數及蒐集率統計表

	風速	波高	流速
樣本數 (時)	119,471	110,764	110,764
蒐集率 (%)	85.24	79.03	79.03

依據「臺中港液化天然氣船進出港與繫泊作業規定」，該規定第 3 點針對臺中港 LNG 船進出港口作業海氣象條件及時段均有限制，如進出港海氣象環境或時段不符合此作業條件，原則不開放船舶進出港作業，限制條件如下：

- (1) 平均風速超過 15 公尺/秒。
- (2) 海流流速大於 2.5 節。
- (3) 北防波堤示性波高大於 2.5 公尺。
- (4) LNG 船限於白天且天候良好情況下進出港，並安排以日出後至早上

7 時及早上 10 時至日落前之時段進出港為原則。

本研究參考交通部中央氣象局所發佈臺中地區日出日落時刻表，將日出時間定義為上午 5 時整，日落時間定義為下午 6 時整，每日劃分為 5 時~7 時及 10 時~18 時兩區段分析，探討 LNG 船於不同月份、季節與時段可進出臺中港作業機率，作業機率估算公式如式(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，以此原則執行分析。

$$\text{作業機率} = \left(\frac{\text{符合連續 } N \text{ 小時筆數}}{\text{資料總筆數}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

3.2 工作機率分析探討

本研究將資料分為 5 時~7 時及 10 時~18 時兩區塊分別探討。

3.2.1 5 時~7 時時段機率分析

圖 4~圖 15 為臺中港 12 月份 5 時~7 時時段，不同延時條件下之機率分佈，圖中橫軸代表延時，縱軸代表作業機率，顯示可提供 LNG 船進出臺中港作業機率 (Probability) 隨著作業延時 (Time Lag) 增加而於各月呈現不同程度遞減趨勢，將各月以線性迴歸分析，由各圖斜率發現，10~2 月作業機率變化程度最高，因現場海氣象環境於短時間內急遽改變，導致作業機率呈大幅度下降，以 1~2 月為例，作業延時 3 小時較 1 小時之作業機率低約 10%，即 3 天。4~9 月不同延時變化趨勢較平緩，作業延時 1~3 小時均有約 9 成以上作業機率，如不考慮颱風事件所造成短延時影響，臺中港 LNG 船於 4~9 月間可有相對較佳之作業機率。

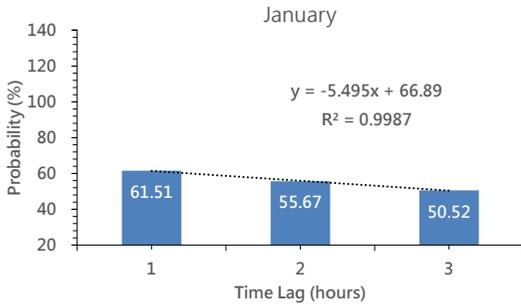


圖 4 1 月不同延時作業機率分佈圖

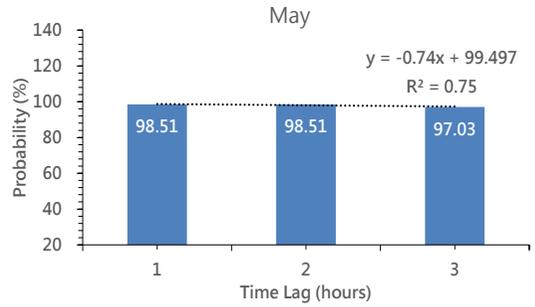


圖 8 5 月不同延時作業機率分佈圖

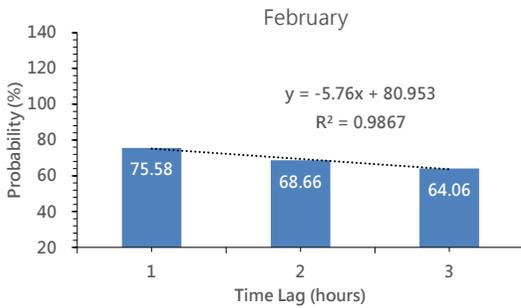


圖 5 2 月不同延時作業機率分佈圖

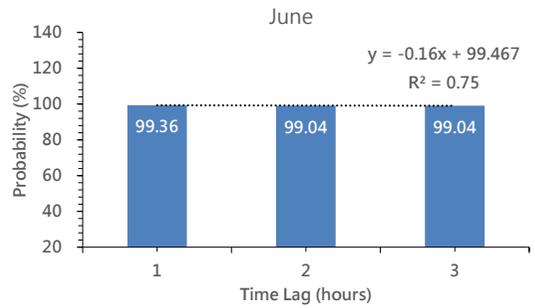


圖 9 6 月不同延時作業機率分佈圖

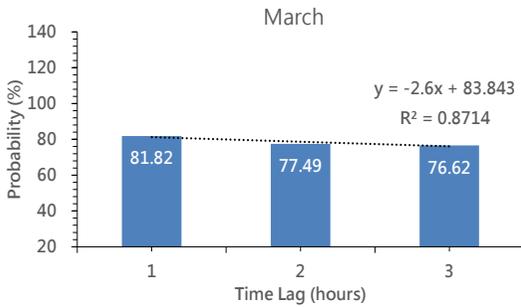


圖 6 3 月不同延時作業機率分佈圖

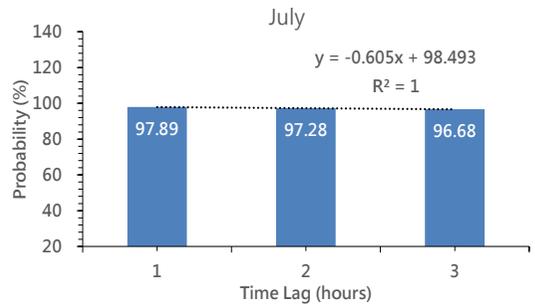


圖 10 7 月不同延時作業機率分佈圖

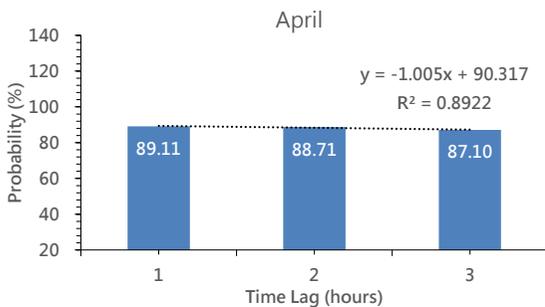


圖 7 4 月不同延時作業機率分佈圖

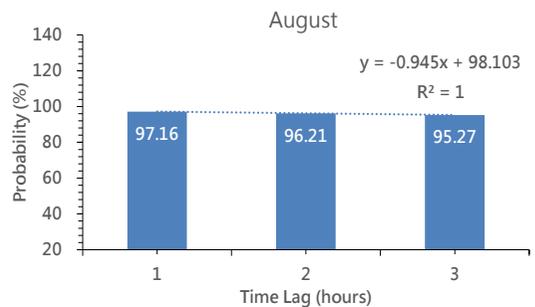


圖 11 8 月不同延時作業機率分佈圖

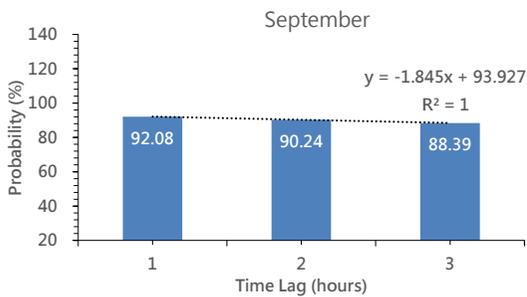


圖 12 9 月不同延時作業機率分佈圖

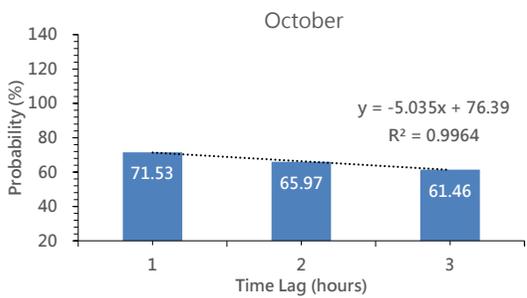


圖 13 10 月不同延時作業機率分佈圖

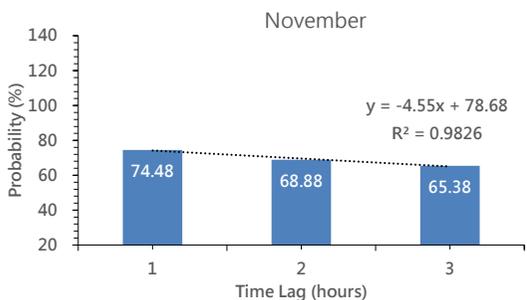


圖 14 11 月不同延時作業機率分佈圖

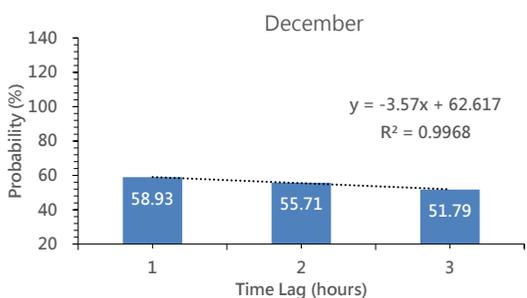


圖 15 12 月不同延時作業機率分佈圖

本研究分析臺中港近 16 年風波流場資料，各月份經線性迴歸，相關係數 R^2 約落在 0.75~1.0。表 2 為各月份迴歸

公式及相關係數 R^2 ，可用於推估臺中港域 LNG 船，於某特定月份欲進出港作業時，該月在 5 時~7 時時段內之可能作業機率，以 2021 年 10 月為例，如有 1 艘 LNG 船約需 1.5 小時作業時間，則該船約有 21 天作業天數，可提供船商或管理調度單位規劃。此方法雖可約略推估某月可能之作業機率，惟仍需經長期驗證，或增加其他變異因素，以提升推估準確率。

表 2 各月迴歸公式及相關係數 R^2 表

月份	迴歸公式	相關係數 R^2
1	$y = -5.495x + 66.89$	0.9987
2	$y = -5.76x + 80.953$	0.9867
3	$y = -2.6x + 83.843$	0.8714
4	$y = -1.005x + 90.317$	0.8922
5	$y = -0.74x + 99.497$	0.75
6	$y = -0.16x + 99.467$	0.75
7	$y = -0.605x + 98.493$	1.00
8	$y = -0.945x + 98.103$	1.00
9	$y = -1.845x + 93.927$	1.00
10	$y = -5.035x + 76.39$	0.9964
11	$y = -4.55x + 78.68$	0.9826
12	$y = -3.57x + 62.617$	0.9968

表 3 及圖 16~圖 19 為本分析時段季節機率分佈情形，橫軸為作業延時，縱軸為作業機率，春季於不同延時條件下均有 85% 以上作業機率，即 78 天以上作業天數；夏季機率最高，於 1~3 小時作業延時分析皆超過 97%，即約 90 天；秋季因受東北季風影響，不同延時作業機率皆未達 80%，作業機率較夏季減少約 20%；冬季因東北季風越發強勁，海氣象環境不利於 LNG 船作業，延時 1 小時之作業機率約 65%，延時 3 小時之作業機率僅餘 55%，即整季僅有約 50 天可供規劃，如將夏季與冬季在 1~3 小時延時條件下比較，兩季作業機率相差約為 1。

5 倍。將各季在不同延時條件下之作業機率，彙整如圖 20，圖中橫軸為季節，縱軸為作業機率，藍色實線為延時 1 小時分析結果，紅色虛線為延時 2 小時，綠色實虛線為延時 3 小時各月份機率分佈情形，可發現作業機率於秋冬季節，呈現較大幅度減少，各作業延時間機率差異也愈加明顯，表示風波流場逐時變化幅度較大，短延時內港域海氣象環境即可能產生劇烈之變動，因而影響船舶操船及調度，相對秋冬兩季，春季及夏季各延時間變化相較為平緩，有利於 LNG 船進出港作業規劃調度。

表 3 四季不同延時作業機率 (%)

季節	1 小時	2 小時	3 小時
春季	89.81	88.24	86.92
夏季	98.14	97.51	97.00
秋季	79.36	75.03	71.74
冬季	65.34	60.01	55.46

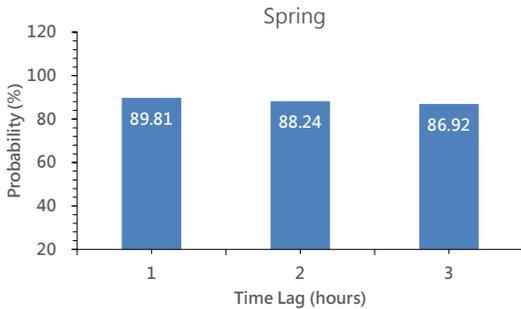


圖 16 春季不同延時作業機率分佈圖

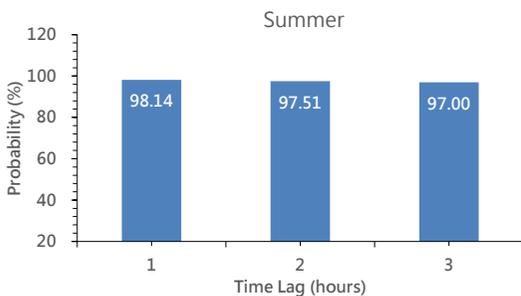


圖 17 夏季不同延時作業機率分佈圖

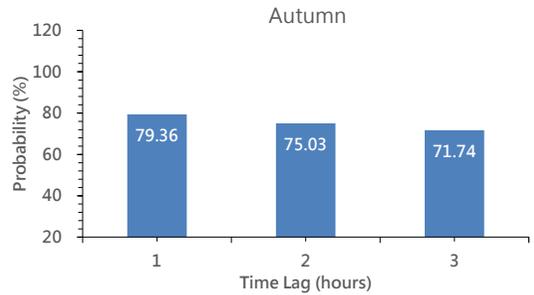


圖 18 秋季不同延時作業機率分佈圖

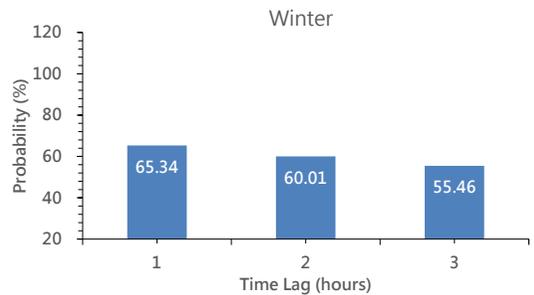


圖 19 冬季不同延時作業機率分佈圖

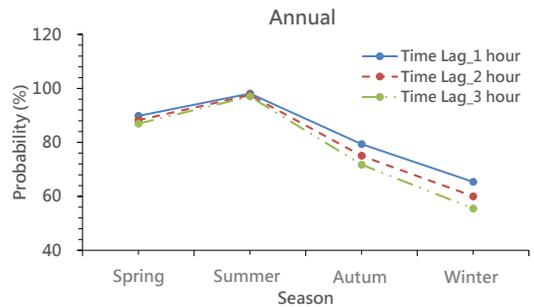


圖 20 四季不同延時作業機率分佈圖

將前述 1~12 月不同延時條件下之作業機率，整理如表 4 及圖 21，圖中橫軸代表月份，縱軸代表每月作業機率，不同曲線代表意義與前述四季相同。

延時 1 小時情況下，12 月作業機率最低，機率為 58.93%，表示該月約 17 天可提供船舶規劃進出港作業，5~9 月機率均逾 9 成，單月可提供 27 天以上作業天數，作業延時增加為 3 小時，各月

作業機率均有明顯減少趨勢，以 10~2 月間減少幅度最多，約 7~12% (2~4 天)，此期間臺中港正處於秋冬季，強勁之東北季風，使港區海氣象環境較不穩定，因而導致作業機率呈現較明顯下降之趨勢。4~8 月降幅較低，約 0.3~2%，少於 1 天，探究其原因，4~8 月臺灣大氣環境屬春夏季，此期間臺中港天氣相較秋冬季穩定，除偶發性颱風所帶來之劇烈海氣象變化，西南季風對臺中港影響較輕微，由於天氣變化相對穩定，因此，長短延時無較明顯之差異，亦表示於 4~8 月期間，在 5 時~7 時時段，臺中港可提供 LNG 船較佳之作業機率，供船商及管理單位第調度規劃。

9~11 月為秋季，由圖 21 可發現，臺中港於 5 時~7 時時段，9 月後機率大幅度下降，而於 11 月呈些微上升，9、10 兩月在不同延時條件下，作業機率相差約 20~30%，此現象係因臺中港海氣象環境大幅度變化所導致，本研究將分析期間 (2005 年 1 月 1 日~2020 年 12 月 31 日) 5 時~7 時時段風速、波高及海流流速加以統計繪製，如圖 22~圖 24，可發現臺中港海域海氣象環境，1~2 月期間因受東北季風影響，現場作業條件嚴苛，於 3 月後，東北季風影響逐漸趨緩，6~8 月期間雖有西南季風，惟季風吹拂至臺中港海域時，吹風能量大幅減低，影響較東北季風弱，而颱風所造成之海氣象環境變化屬短期影響，整體而言，6~8 月作業環境相對較穩定，9 月後逐漸轉入秋季，10 月開始東北季風效應逐漸增強，直接影響海域海氣象環境，直至隔年 2 月才漸漸趨緩。

表 4 12 月份不同延時作業機率 (%)

月份	1 小時	2 小時	3 小時
1	61.51	55.67	50.52
2	75.58	68.66	64.06
3	81.82	77.49	76.62
4	89.11	88.71	87.10
5	98.51	98.51	97.03
6	99.36	99.04	99.04
7	97.89	97.28	96.68
8	97.16	96.21	95.27
9	92.08	90.24	88.39
10	71.53	65.97	61.46
11	74.48	68.88	65.38
12	58.93	55.71	51.79

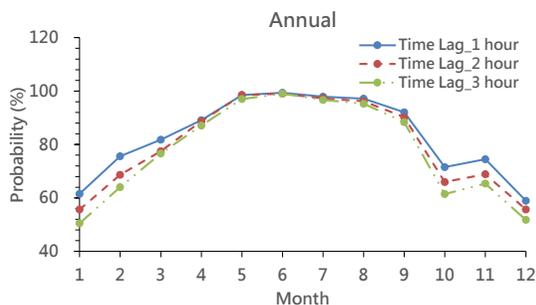


圖 21 歷年各月不同延時作業機率分佈圖

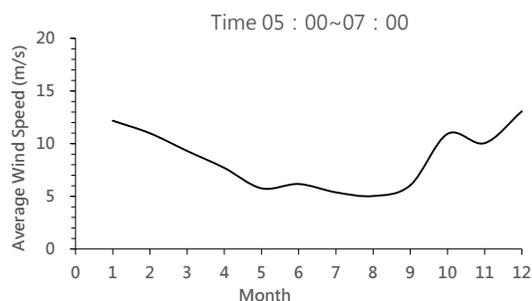


圖 22 5 時~7 時時段風速歷線圖

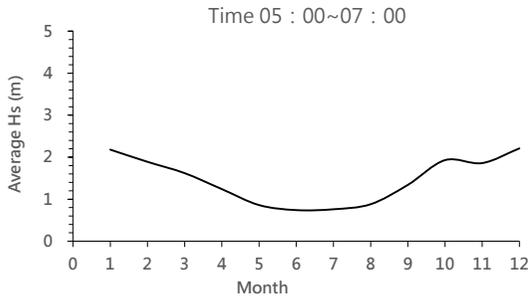


圖 23 5 時~7 時時段波高歷線圖

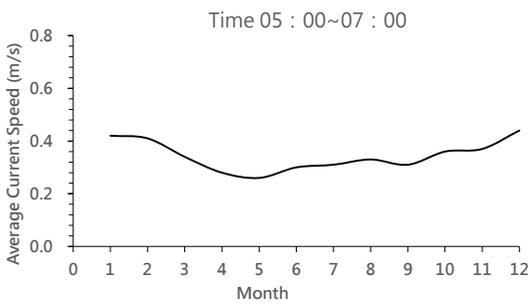


圖 24 5 時~7 時時段流速歷線圖

3.2.2 10 時~18 時時段機率分析

本研究將 1~12 月臺中港 10 時~18 時時段，延時 1~9 小時期間 LNG 船進出港作業機率整理如圖 25~圖 36，縱橫軸分別代表作業機率及延時。4~8 月於不同延時下分析顯示，相較其餘月份有較高作業機率，此分析結果與 5 時~7 時時段一致，臺中港 LNG 船於 4~8 月期間執行進出港作業，將可獲得較高之作業機率。作業延時 4 小時，10~1 月所能提供作業低於 60%（18 天），將作業延時增加至 9 小時，5~8 月份仍有近 90%（28 天）以上作業機率，但 10 月、12 月及 1 月機率僅餘約 30%，兩者機率差約 60%，作業機率分佈相當兩極。

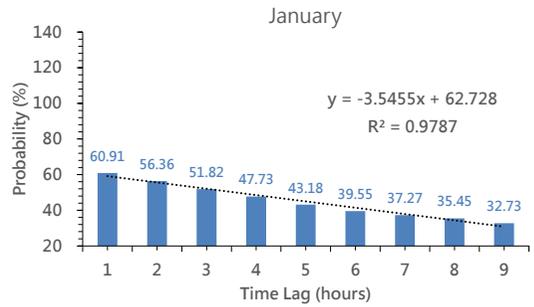


圖 25 1 月不同延時作業機率分佈圖

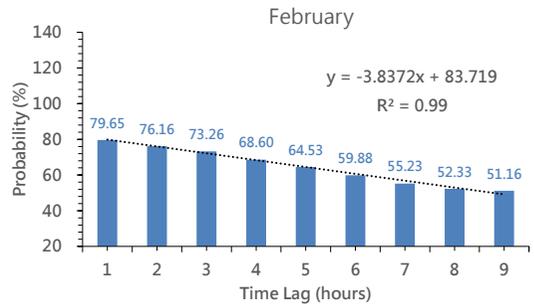


圖 26 2 月不同延時作業機率分佈圖

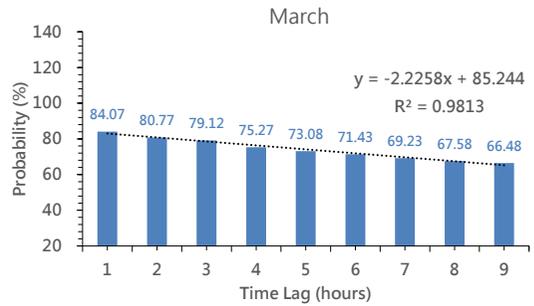


圖 27 3 月不同延時作業機率分佈圖

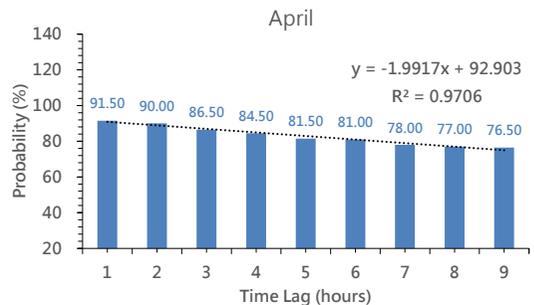


圖 28 4 月不同延時作業機率分佈圖

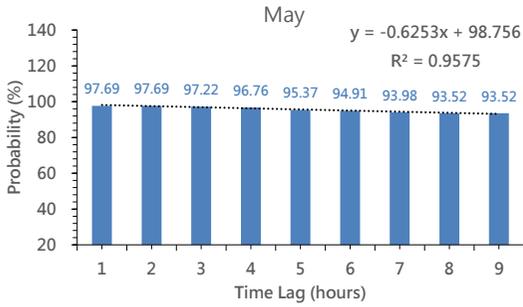


圖 29 5 月不同延時作業機率分佈圖

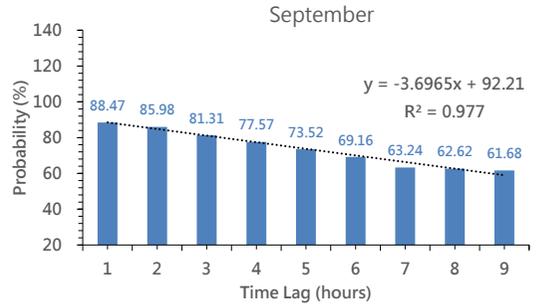


圖 33 9 月不同延時作業機率分佈圖

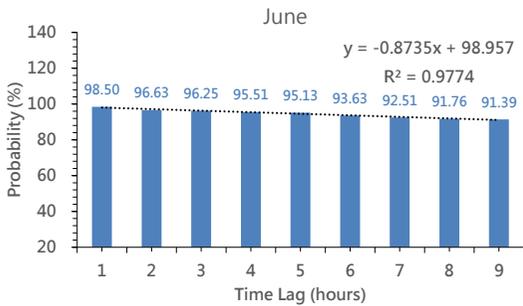


圖 30 6 月不同延時作業機率分佈圖

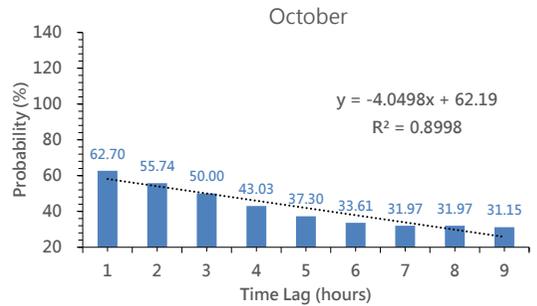


圖 34 10 月不同延時作業機率分佈圖

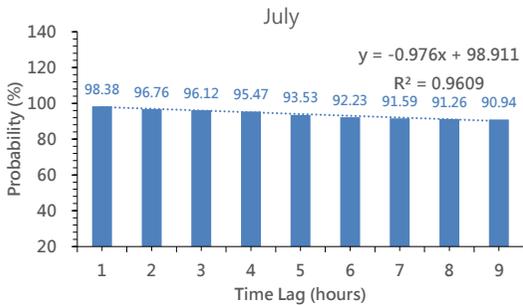


圖 31 7 月不同延時作業機率分佈圖

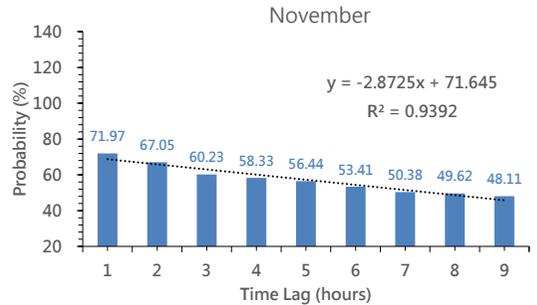


圖 35 11 月不同延時作業機率分佈圖

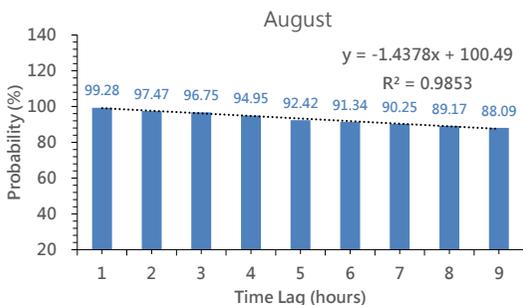


圖 32 8 月不同延時作業機率分佈圖

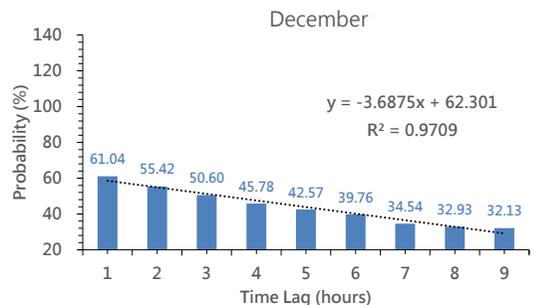


圖 36 12 月不同延時作業機率分佈圖

本研究將各月取線性迴歸，迴歸公式及相關係數 R^2 彙整如表 5，各月相關

係數均大於 0.9，可提供船商或管理調度單位，大約推估 10 時~18 時時段 LNG 船可能之作業機率。

表 5 各月迴歸公式及相關係數 R² 表

月份	迴歸公式	相關係數 R ²
1	y=-3.5455x+62.728	0.9787
2	y=-3.8372x+83.719	0.99
3	y=-2.2258x+85.244	0.9813
4	y=-1.9917x+92.903	0.9706
5	y=-0.6253x+98.756	0.9575
6	y=-0.8735x+98.957	0.9774
7	y=-0.976x+98.911	0.9609
8	y=-1.4378x+100.49	0.9853
9	y=-3.6965x+92.21	0.977
10	y=-4.0498x+62.19	0.8998
11	y=-2.8725x+71.645	0.9392
12	y=-3.6875x+62.301	0.9709

將四季延時 1~9 小時作業機率彙整如表 6~表 8 及圖 37~圖 40，圖中縱軸為作業機率，橫軸為作業延時。圖 41 為四季在不同延時條件下分佈曲線，圖中圓形實線代表延時 1 小時機率曲線，圓形虛線代表延時 2 小時，圓形實虛線代表延時 3 小時，4~6 小時部分以方形代表，7~9 小時則以三角形代表。春季因屬於東北與西南季風轉換過渡期，作業機率僅次於夏季，各延時機率相差約 8~12%，夏季時臺中港海域雖有颱風及西南季風影響，惟颱風侵襲屬短暫之影響，且根據港研中心歷年海氣象統計資料顯示，西南季風對於臺中港海域影響較不顯著，因此，夏季期間各延時仍有 90% 以上作業機率。秋季時季風由西南逐漸轉向東北，東北季風對於臺中港海域影響甚鉅，由圖 41 可發現，因受東北季風影響，作業機率大幅度降低，延時 1 小時作業機率未達 70%，延時 7 小時作業機率已低於 50%。冬季時，東北季風對

臺中港海域影響越明顯，冬夏季作業機率差約 30~50%，延時 1~5 小時機率差約 30~40%，延時 6~9 小時機率差約 45~50%，作業機率差隨延時遞增，延時越久作業機率差約大。

表 6 四季不同延時作業機率 (%) [1~3 小時]

季節	1 小時	2 小時	3 小時
春季	91.09	89.49	87.61
夏季	98.72	96.95	96.37
秋季	74.38	69.59	63.85
冬季	67.20	62.65	58.56

表 7 四季不同延時作業機率 (%) [4~6 小時]

季節	4 小時	5 小時	6 小時
春季	85.51	83.32	82.45
夏季	95.31	93.69	92.40
秋季	59.64	55.75	52.06
冬季	54.04	50.09	46.40

表 8 四季不同延時作業機率 (%) [7~9 小時]

季節	7 小時	8 小時	9 小時
春季	80.40	79.37	78.83
夏季	91.45	90.73	90.14
秋季	48.53	48.07	46.98
冬季	42.35	40.24	38.67

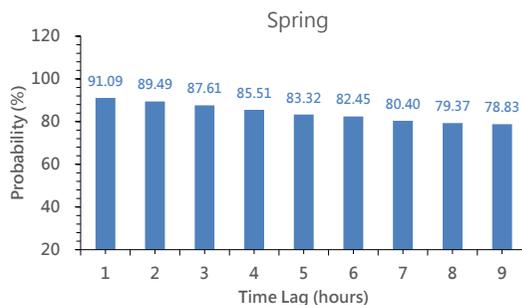


圖 37 春季不同延時作業機率分佈圖

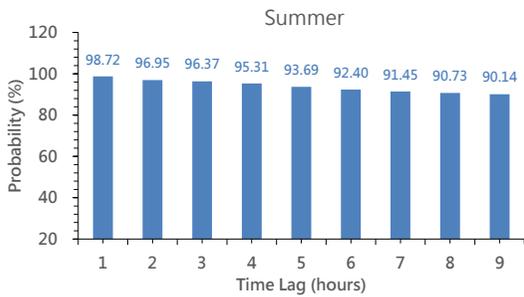


圖 38 夏季不同延時作業機率分佈圖

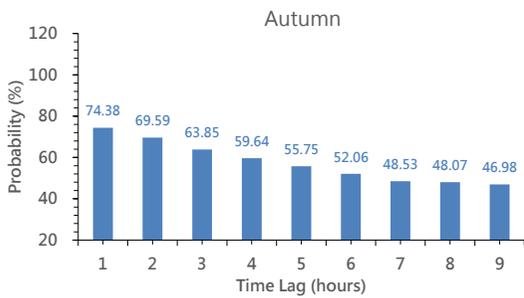


圖 39 秋季不同延時作業機率分佈圖

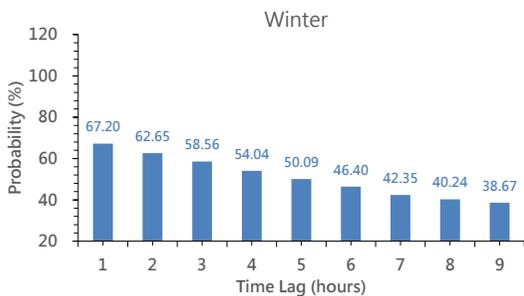


圖 40 冬季不同延時作業機率分佈圖

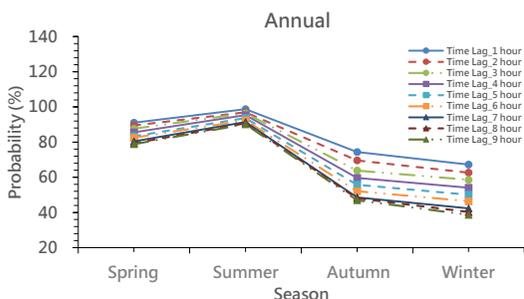


圖 41 四季不同延時作業機率分佈圖

表 9~表 11 及圖 42 為 10 時~18 時時段，不同月份作業延時 1~9 小時，臺中港 LNG 船進出港作業機率分析，各曲線代表意義與前述四季機率分佈圖相同。如比較 5 時~7 時及 10 時~18 時時段之延時 1~3 小時作業機率，可發現 2 月、9 月、10 月及 11 月機率有較明顯差異產生，此 4 個月為東北季風影響初期或較顯著之季節，9~11 月間 5 時~7 時時段於 1~3 小時延時條件，均可獲得較高作業機率，以 10 月差異最大，同延時下較 10 時~18 時時段高出約 8~12%，如 LNG 船商需於 9~11 月間進出港區作業，且作業時間於 3 小時內，則建議選擇於 5 時~7 時時段規劃作業，可獲得較高作業機率。2 月雖同為東北季風好發季，惟其機率差特性與前述 9~11 月呈現截然不同情形，10 時~18 時時段相較 5 時~7 時時段有較佳之工作機率，1~3 小時作業率差約 4~9%，2 時段機率差整理如表 12。

另由圖中可發現，各月機率分佈特性與 5 時~7 時時段相似，將分析期間 10 時~18 時時段風速、波高及海流流速加以統計繪製如圖 43~圖 45，10 月時東北季風逐漸增強，作業機率曲線呈現較明顯下降趨勢，作業機率於各延時平均較 9 月減少約 30% (約 10 天)，11 月作業機率微幅上升後於 12 月在降低，直至 2 月東北季風稍微趨緩後，作業機率逐漸增加，於 5~8 月達到作業機率高峰，9 月後在逐漸降低，如此周而復始，呈現出臺中港海域之海氣象環境與作業機率。

表 9 月不同延時作業機率 (%)

[1~3 小時]

月份	1 小時	2 小時	3 小時
1	60.91	56.36	51.82
2	79.65	76.16	73.26
3	84.07	80.77	79.12
4	91.50	90.00	86.50
5	97.69	97.69	97.22
6	98.50	96.63	96.25
7	98.38	96.76	96.12
8	99.28	97.47	95.75
9	88.47	85.98	81.31
10	62.70	55.74	50.00
11	71.97	67.05	60.23
12	61.04	55.42	50.60

表 11 月不同延時作業機率 (%)

[7~9 小時]

月份	7 小時	8 小時	9 小時
1	37.27	35.45	32.73
2	55.23	52.33	51.16
3	69.23	67.58	66.48
4	78.00	77.00	76.50
5	93.98	93.52	93.52
6	92.51	91.76	91.39
7	91.59	91.26	90.94
8	90.25	89.17	88.09
9	63.24	62.62	61.68
10	31.97	31.97	31.15
11	50.38	49.62	48.11
12	34.54	32.93	32.13

表 10 月不同延時作業機率 (%)

[4~6 小時]

月份	4 小時	5 小時	6 小時
1	47.73	43.18	39.55
2	68.60	64.53	59.88
3	75.27	73.08	71.43
4	84.50	81.50	81.00
5	96.76	95.37	94.91
6	95.51	95.13	93.63
7	95.47	93.53	92.23
8	94.95	92.42	91.34
9	77.57	73.52	69.16
10	43.03	37.30	33.61
11	58.33	56.44	53.41
12	45.78	42.57	39.76

表 12 不同時段 1~3 小時作業機率差異表 (%)

月份	1 小時	2 小時	3 小時
1	0.60	-0.69	-1.30
2	-4.07	-7.50	-9.20
3	-2.25	-3.28	-2.50
4	-2.39	-1.29	0.60
5	0.82	0.82	-0.19
6	0.86	2.41	2.79
7	-0.49	0.52	0.56
8	-2.12	-1.26	-1.48
9	3.61	4.26	7.08
10	8.83	10.23	11.46
11	2.51	1.83	5.15
12	-2.11	0.29	1.19

註：機率差=[5 時~7 時作業機率]-[10 時~18 時作業機率]

四、結論及建議

本研究參考「臺中港液化天然氣船進出港與繫泊作業規定」，該作業規定明確定義進出臺中港 LNG 船所需符合之海氣象條件及作業時段，將作業條件設定為平均風速 15 公尺/秒、海流流速 2.5 節及波高 2.5 公尺，並分為 5 時~7 時及 10 時~18 時兩時段，探討臺中港 LNG 船在不同延時下作業機率，並提出不同月份及季節之作業機率，提供臺中港 LNG 船商與管理調度單位參考應用。

研究顯示，兩時段 10~2 月作業機率變化程度最高，因現場海氣象環境於短時間內急遽改變，導致作業機率大幅度下降，以 1~2 月 5 時~7 時時段為例，作業延時由 1 小時延長至 3 小時，作業機率下降約 10%。4~8 月期間延時分析顯示，不同延時變化趨勢較平緩，相較其餘月份可提供較高作業機率，此分析於 5 時~7 時及 10 時~18 時時段呈現相同現象，臺中港 LNG 船於此期間執行進出港作業，將可獲得較高之作業機率。

本研究將各月延時機率分佈取線性迴歸，各迴歸公式可用於推估臺中港域 LNG 船，於某特定月份欲進出港作業時，該月在 5 時~7 時或 10 時~18 時時段內可能作業機率，此方法可約略推估某月可能作業機率，惟仍需經長期驗證，或增加其他變異因素，以提升推估準確率。

臺中港海氣象特性，東北季風對港域影響較西南季風顯著，分析 5 時~7 時及 10 時~18 時兩時段，12 月作業機率最低，5~9 月機率相對較高，有利於 LNG 船進出港作業規劃調度，以 5 時~7 時時段為例，5~9 月機率逾 9 成，單月可提供 27 天以上作業天數。整體而言，臺中港海域 1~2 月期間受東北季風影響，現場作業條件嚴苛；3 月後東北季風影響

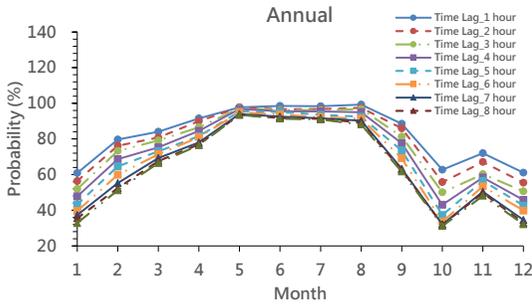


圖 42 歷年各月不同延時作業機率分佈圖

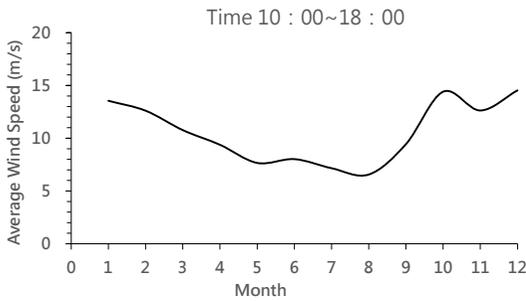


圖 43 10 時~18 時時段風速歷線圖

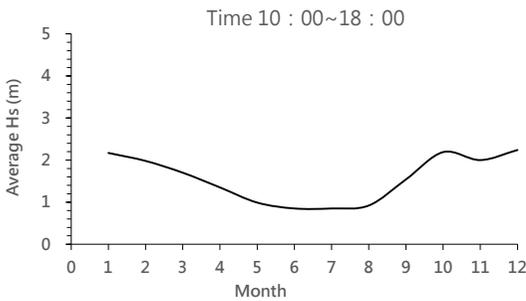


圖 44 10 時~18 時時段波高歷線圖

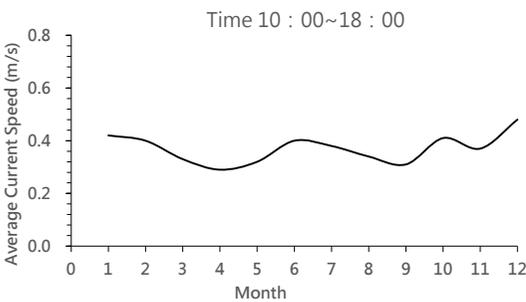


圖 45 10 時~18 時時段流速歷線圖

逐漸趨緩；4~8 月屬春夏季，此期間天氣相較秋冬季穩定，除偶發性颱風所帶來之劇烈海氣象變化，西南季風對臺中港影響較輕微，由於天氣變化相對穩定，因此，長短延時無較明顯之差異；9 月後逐漸轉入秋季；10 月開始東北季風效應逐漸增強，直接影響海域海氣象環境，直至隔年 2 月才漸漸趨緩。

本研究針對臺中港 LNG 船進出港規定，提出 LNG 船在不同月份、季節與不同延時條件下之作業機率，建議未來可將港區能見度納入一併分析探討，研提風波流場及港區能見度作業延時機率統計圖表，做為港區 LNG 船管理、調度及風險評估應用。

五、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，「臺中港液化天然氣船進出港與繫泊作業規定」，108 年 7 月。
5. 交通部中央氣象局，「臺中地區日出日沒時刻表」，110 年 1 月。

臺中港靜穩度水工試驗暨波浪數值水槽之初步探討 I

李政達 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
林受勳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
蔡立宏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

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，探討港區未來保護與維護之建議，並初步探討波浪數值水槽之可行性。

一、前言

隨著中彰地區離岸風電場開發，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 8 年船舶進出統計資料分析，港區進出口船舶運量已由 103 年 1,250 艘次之月平均運量增加至 109 年 1,541 艘次，如圖 1 所示，港內船舶增加，考量海事工程易受自然天候因素影響，僅能在特定的風速與波浪條件下作業，故港池若遭受長波影響，經常發生港內震盪現象，造成港域不靜穩，而有船隻與人員作業時，發生危險之風險。

因此，對於港灣及海岸工程之相關研究中，如何預測波浪行為與模擬港灣之水動力變化極為重要，一般而言，波浪與結構物相互作用之研究，最常以波浪水槽試驗來進行模擬，但建置與準備試驗必須耗費相當人力與物力與成本，經過長時間的發展，物理試驗的研究與技術已臻至成熟，隨著異常天候的情況持續發生，導致保護標準提高，原港灣 50 年迴歸週期之設計標準已無法滿足需求，如需要於試驗室建立大型造波水槽模擬實際波浪，試驗室水槽長度將達數百公尺，相關配套設置要求較高，且不易維護和保養，耗資巨大；反觀近幾年來隨著計算機運算能力提高，數值水槽過去困難之運算問題，已長足進步。基此，如何利用數值水槽模擬水工模型試驗之各種情況，協助物理水槽克服前所遭遇之困難，本研究將進行初步探討。

臺中港務分公司近8年進出船舶統計資料分析

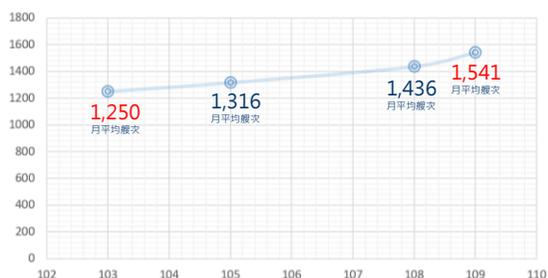


圖 1 臺中港船舶運量分析圖

二、水工模型試驗與規劃

本研究沿襲交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)於

2019-2020 年執行臺中港漂沙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，依相同試驗模擬條件廣續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。

2.1 模型配置與試驗條件

本試驗位於港研中心之平面水槽，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，每組系統由 4 片造波板組成。本研究試驗條件水平比尺選用 1/300 比例，垂直比尺選用 1/75 比例，波高比尺選用 1/25.74 比例，週期比尺選用 5.07 比例，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，試驗相關條件與比尺，如表 1 所示。

表 1 試驗條件與比尺

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	+6.15 ~ +1.19 cm
			颱風	+6.00 ~ +2.76 m	+8.00 ~ +3.68 cm
波高	1/25.74	冬季波浪	2.15 m	8.35 cm	
		夏季波浪	0.87 m	3.38 cm	
		颱風波浪	4.19 m	16.28 cm	
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	
		颱風波浪	8.5 sec	1.68 sec	
潮汐	1/34.6	半日潮	12 hr	20.8 min	

2.2 預備試驗

本研究預備試驗係依據港研中心往昔從事漂沙試驗之經驗與離岸風電區鄰近海岸漂沙機制探討(2/4)研究成果，波浪條件採用臺中港 99 年 11、12 月份，100 年 1、2、3 月份之冬季季風波浪，以及臺中港 100 年 5 月 27 日桑達颱風之颱風波浪資料，並利用 99 年 12 月~100 年 5 月與 99 年 11 月~100 年 8 月現場水深地形資料製作水工模型；此外，夏季季風以臺中港 107 年 5 月~107 年 11 月之現場地形資料，搭配臺中港夏季季

風波浪條件進行試驗，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，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 2 所示。

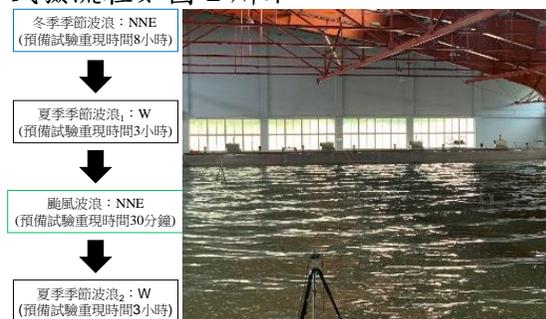


圖 2 試驗流程圖

三、數值水槽初步探討

由於波浪運動具有不規則性和非線性特徵，受到實際地形紛紜變化影響，數值方法要精確模擬波浪折射、繞射、反射、淺水變形等綜合影響難度很大，故前人提出多種關於波浪傳播之研究與計算方法，如射線理論、波能平衡方程式和波作用量守恒方程式、波浪繞射方程式 (Helmholtz 方程)、緩坡方程式 (Helmholtz 方程型、拋物線型、雙曲線型、RCPWAVE 型)，布斯尼斯克方程式 (Boussinesq 方程式) 以及勢流理論。

對多數流體而言，由於黏性不大，可以採用勢流理論來描述。只有在速度梯度很大的區域，黏性應力才有明顯的影響。勢流理論是類比波浪傳播運動的

重要手段之一。基於勢流理論的波浪模式數值實現，主要依靠邊界元法數值求解邊界積分方程式。一些學者如 Ohyama 和 Nadaoka(1991, 1992, 1994)、Driscoll 等人(1992)，採用這種方法進行了波浪對建築物作用方面研究工作。勢流理論本身忽略結構物附近的黏性，因此，當黏性較大而不能忽略時，它就無法模擬準確。由於勢流運動是無旋的前提下，故於波浪破碎之前，可以用勢流理論描述波浪運動。但是當波浪破碎或作用於結構物上產生紊動、渦(eddy)及渦的分離和輸移部分時，勢流理論將無法準確模擬。

早期波浪數值模擬是基於水深平均方程式，如淺水方程式和 Boussinesq 方程式等。在這些方程式中引入由於波浪破碎而引起的能量耗散項。在水深平均方程式中，由於維數減少了一維，計算效率較高，並且這種方法可以模擬波浪傳遞與溯升等問題，目前仍是一個很熱門的研究領域。儘管水深平均方程式具有簡單的優點，但也有很多侷限性，這種方法不能準確預測複雜自由液面位置；而且也不能提供紊流相關訊息。遇到波浪破碎等非線性複雜問題時，無法準確模擬。

3.1 解析 Navier-Stokes 方程式

如果想要擴展模式的模擬對象至任意波浪或複雜的底床地形，以及反應真實流場紊流情況時，須利用完整流場的方程式求解，較能趨近真實流況，因此需求解 Navier-Stokes(簡稱：NS)方程式，目前海岸和海洋工程採用 NS 方程式，做為基本控制方程式的波浪模式大致分三類：(1)直接模擬，直接求解 NS 方程式；(2)大渦模擬；(3)平均運算模式，對 NS 進行平均運算，然後實行模式化，此模式又可分為雷諾應力模式(Reynolds Stress Model, 簡稱 RSM)與渦動滯度概念模式。為探討數值水槽之可

行性，數值方式該如何解析 Navier-Stokes 方程式，詳述如下。

3.1.1 直接模擬(Direct Numerical Simulation, DNS)

直接求解 NS 方程式而不包含紊流模式(Miyata,1986)或在時間和空間上包含紊動黏性。該模式不考慮或部分考慮紊流影響，通常只求解波浪的平均運動。由於電腦計算速度和容量問題的影響，目前還很難達到採用 DNS 去計算波浪紊流運動尺度。Miyata(1986)和 Hino 等人(1983)應用東京大學改良 MAC 方法的 TUMMAC(Tokyo University Modified Marker And Cell)自由液面法，計算微小振幅波在坡度 1/5 斜坡上的波動和孤立波在 1/20 斜坡上的傳播與破碎過程，得到了碎波的速度分佈。Wang 和 Su(1993)計算沿斜坡之波浪碎波流場。因此，直接求解方法可利用 3 組動量方程式與 1 組連續方程式求解未知數，普遍用於一次性求解渦流與紊流情況。

3.1.2 大渦模擬 (Large Eddy Simulation, LES)

求解雷諾平均 NS 方程式(Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, 又稱 RANS) (Lemos 1992, Lin and Liu 1998 a,b, Bradford 2000)。考慮波浪紊動特性，對 NS 方程式進行時間平均後，產生雷諾應力項，再採用紊流模式求解封閉方程式。這類方程式也是從平均的角度求解各物理量，但在求解的過程中，考慮了紊流特徵對平均流場的影響。Lemos(1992)第一個應用模式並配合流體體積法(Volume of fluid method, 又稱 VOF)去求解斜坡上碎波流場。Bradford (2000)利用重整群組(RNG)模式和 VOF 方法去計算斜坡上碎波流場。Lin 和 Liu (1998a) 求解雷諾平均 NS 方程式，並結合 k- ϵ 紊流模式計算碎波帶之碎波，Lin

和 Liu(1998b)則進一步描述碎波帶的溢波(spilling)和捲波(plunging)之狀態。Hsu 等人(2004)利用求解 RANS 數值方法，使用 HF (Height Function)自由液面配合 $k-\epsilon$ 亂流模式，探討波浪通過不透水雙列潛堤之渦流特性。

3.1.3 平均運算模式

解析空間濾波的 NS 方程式 (Zhao and Tanimoto 1998, Wijayaratna and Okayasu 2000, Christensen and Deigaard 2001)，即大渦模擬。該類模式將紊流分為不同尺度，對大渦大尺度量採用數值求解，對小渦小尺度量(網格約 10cm 以下無法分析)以模式化，因此，引入亞網格(Subgrid)進行處理。由於波浪碎波具有紊流特性，碎波與建築物作用時，水流結構相當複雜。其求解的困難主要在於，碎波紊流的非線性特徵難以數值模擬，以及碎波紊流脈動的頻率譜域極寬，數值模擬技術難以模擬出連續變化的各級紊流運動。Watanabe 和 Saeki (1999) 則求解大渦模擬，配合 VOF 自由液面技巧，計算捲波的碎波過程，Zhao 等人(2004)使用 Multi-scale 紊流模式搭配 VOF 來求解碎波問題，或者利用解析 NS 方程式、渦流粘滯係數(Turbulencemodel)與風剪力、底床摩擦剪力與科氏力搭配，以求解複雜流體問題。

四、臺中港遠程外廓堤水工模型試驗

本研究水工試驗主要量測儀器為波高計，共選用 16 只波高計進行實驗，波高計配置情形，如圖 3 所示，圖中符號 ○ 之 1-16 為日本製 KENEK 容量式波高計擺設位置，量取試驗波高、符號 ▲ 為挪威製 NORTEK 超音波式剖面流速儀(ADCP)擺設位置，量取防波堤間航道剖

面流速、符號 ⊙A-D 為英國製 HR 波高計擺設位置，量取試驗波高。



圖 3 臺中港水工模型(含長程外廓堤配置與波高計配置情況)漂沙試驗示意圖

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，於放置消波塊(如圖 4 紅圈位置)後，較不穩靜現象獲得改善並趨於穩定。



圖 4 冬季季風北防波堤試驗情形

冬季季風外廓防波堤模型延伸布置入射條件週期 1.48sec，波高 8.35cm，最後

500m 防波堤堤頭處，於試驗中明顯越堤，堤頭產生紊亂現象，波高計 CH8 量測得 $T_{1/3}$ 為 1.47sec， $H_{1/3}$ 為 6.71cm；冬季季風造波試驗時，外商港區(迴船池)波浪明顯產生紊亂現象，LNG 港池內則為較平靜穩定，波高計 CH9~CH12 量測得 $T_{1/3}$ 為 0.74~1.45sec， $H_{1/3}$ 為 1.44~2.17cm，如圖 5 所示。

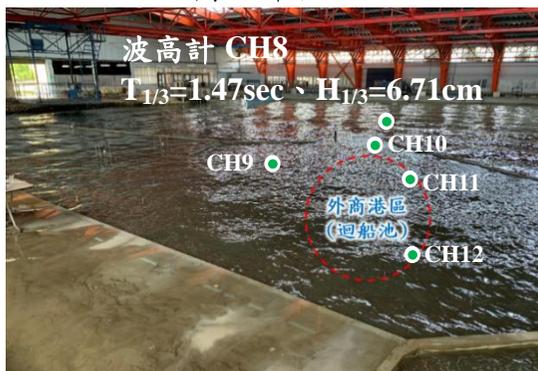


圖 5 冬季季風外商港區試驗情形

夏季季風波浪造波試驗時，入射條件週期 1.28sec，波高 3.38cm，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 偏高外，波高計 CH9~CH11 量測得 $T_{1/3}$ 為 1.25~1.28sec， $H_{1/3}$ 為 1.19~1.47cm 波浪呈現變小趨勢；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，整體普遍呈現水面平穩現象，如圖 6 所示。



圖 6 夏季季風外商港區與 LNG 港池試驗情形

颱風期間波浪試驗之入射條件週期 1.68sec，波高 16.28cm，當時除 LNG 港池波浪(波高計 CH15 量測得 $T_{1/3}$ 為 0.8sec， $H_{1/3}$ 為 3.16cm) 稍小以外，港區內外皆呈現不靜穩情況，其中港外波浪波高計 CH1~CH8 量測得 $T_{1/3}$ 為 1.66~1.67sec， $H_{1/3}$ 為 11.82~14.48cm，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，顯示長程外廓堤配置確實能減少港內不靜穩之情況，如圖 7 所示。

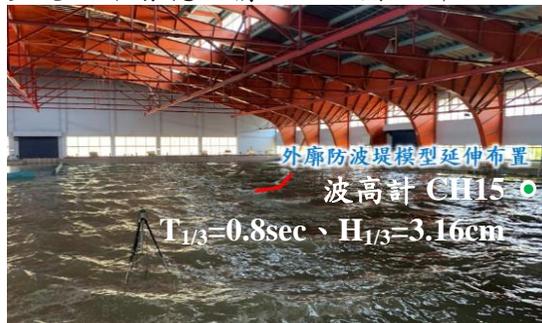


圖 7 夏季季風臺中港區試驗情形

臺中港外廓堤延伸模型試驗第 2 年後，於長程外廓防波堤增建設施內側產生 4 處沉箱趾部地形刷深與淘空現象；因此，有關防波堤基礎之穩固與傾斜程度，須加強監測與維護，確保結構物安全，如圖 8 所示。

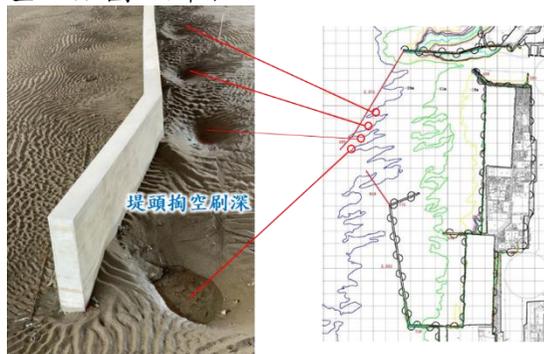


圖 8 臺中港外廓防波堤內側刷深淘空

五、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內側產生 4 處沉箱趾部地形刷深與

淘空現象，以及初步探討波浪數值水槽之可行性，本研究採丹麥水力研究所 (Danish Hydraulic Institute, 簡稱 DHI) 發展之二維數值模式 MIKE21 HD (Hydro-dynamic Module) 模型，用以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。

5.1 起始條件與邊界條件

本研究地形條件延續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，模式建置與臺中港配置合成圖，如圖 10 所示。

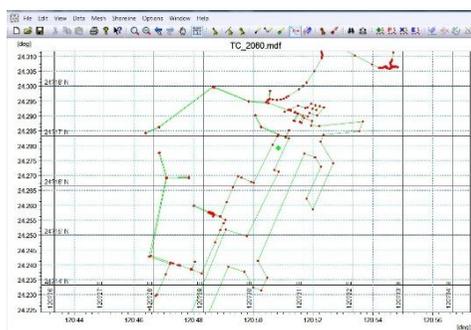


圖 9 MIKE21 HD 建模情形



圖 10 模式建置與臺中港配置合成圖

本研究數值水理條件採用 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(分別為：南側、北側與西側潮時邊界)，如圖 11 所示。

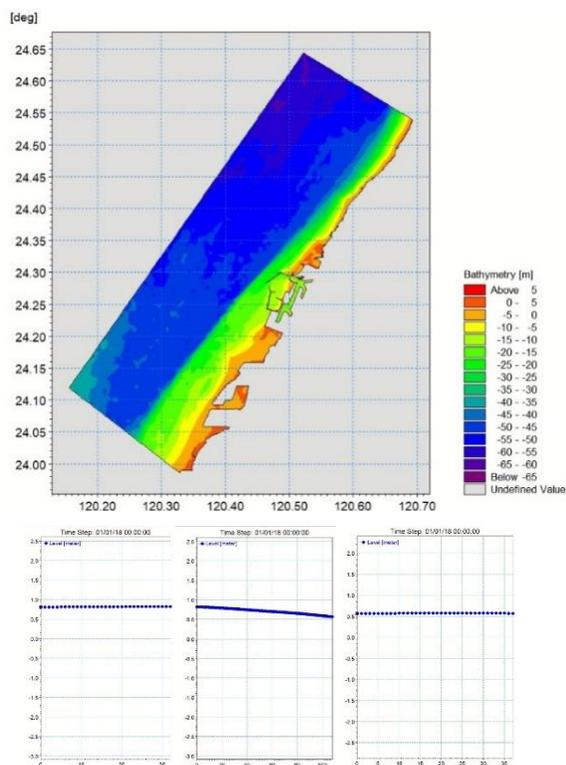


圖 11 模式採用逐時潮位預報資料

本研究後續數值摩擦剪應力分析，利用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，由於格點資料甚多，為簡要解釋流體之水動力行為，僅就剪應力最大發生處進行討論。

5.2 摩擦剪應力分析結果

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，比如模式初期於 2018 年 1 月 4 日 05:00 有最大剪應力發生，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

1.30Nt/m²，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 12 所示。

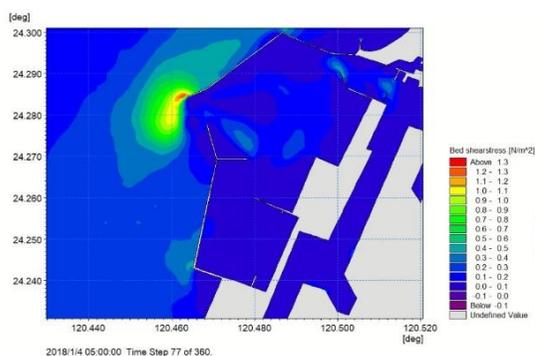


圖 12 長程外廓防波堤北方外側 2018 年 1 月 4 日 05:00 發生最大剪應力情形

模式次日(即模擬之 24 時以後)於 2018 年 1 月 5 日 05:00，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 1.60Nt/m²，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 13 所示。

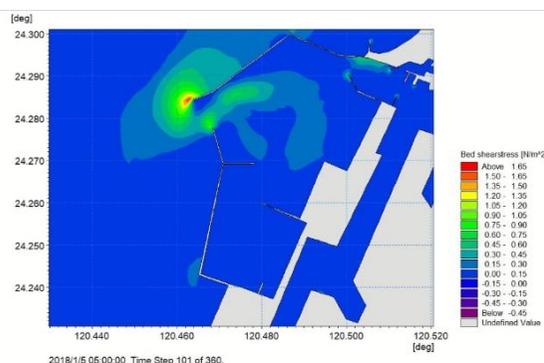


圖 13 長程外廓防波堤北方外側 2018 年 1 月 5 日 05:00 發生最大剪應力情形

數值模式緊接於 6 小時後(即模擬之 30 時以後)，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 1.09Nt/m²，如圖 14 所示。

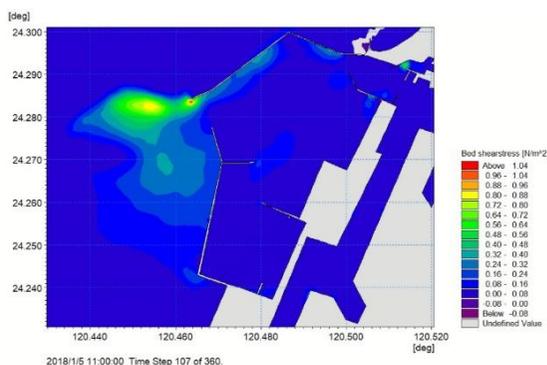


圖 14 長程外廓防波堤外側 2018 年 1 月 5 日 11:00 發生最大剪應力情形

隨後模式再於模擬之 6 小時後(即數值模擬之 36 時以後)，時刻於 2018 年 1 月 5 日 17:00，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 0.56Nt/m²，如圖 15 所示。

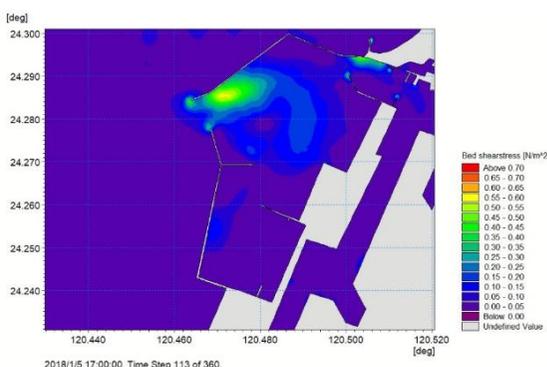


圖 15 長程外廓防波堤內側 2018 年 1 月 5 日 17:00 發生最大剪應力情形

再經歷 12 小時運算後(即數值模擬之 48 時以後)，時刻於 2018 年 1 月 6 日 05:00，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 Nt/m²；此外，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 2.34Nt/m²，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 2.31Nt/m^2 ，如圖 16 所示。

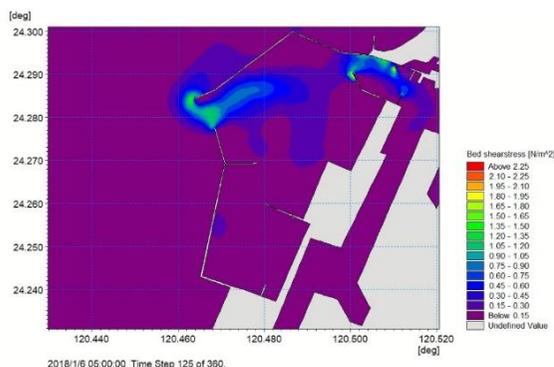


圖 16 長程外廓防波堤內外側 2018 年 1 月 6 日 05:00 發生最大剪應力情形

六、結論與建議

本研究以臺中港長程配置方案進行水工模型試驗，並利用二維數值模式進行水工模型試驗結果驗證；另外，本研究進行三維波浪數值水槽文獻回顧，以及初步探討建立三維波浪數值水槽之可行性，相關結論與建議分述如下：

6.1 結論

經由本研究遠程外廓堤延伸水工模型試驗定性初步結果，顯示長程外廓堤配置確實能阻擋長波進入港池，解決港池不靜穩之情況，因此能增加 LNG 港池之安定性。

此外，本研究水工模型試驗之外廓堤延伸堤內側趾部發生淘刷現象，產生 4 處沖刷坑，此與數值模式潮流影響港灣結構物的剪應力分佈情況之結果比對，模式初期於 2018 年 1 月 4 日 05:00 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 小時之後，剪應力經由港外逐漸向港內擴散；經歷 30 小時之後，剪應力沿著長程外廓堤內側方向傳遞增加；經歷 36 小時，長程外廓堤內側堤頭周邊持續發生影響；經歷 48 小時之

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。

本研究已初步對三維波浪數值水槽進行相關文獻回顧，現階段雖然尚無法完成三維模式建置與 Navier-Stokes 方程式解析，但以二維數值模式配合水工模型試驗，探討港區之水動力行為原則可行；爰此，本研究成果將可做為本所後續研究之基礎與發展三維波浪數值水槽之應用參考。

6.2 建議

建議臺中港務分公司港區日後營運管理，於外廓堤建置之後，需增加堤基保護等相關措施，且為減少基礎淘刷導致傾倒可能，需要長期監測沉箱之傾斜度，並於趾部掏刷產生空隙前預為處置，避免港灣結構物受損而發生災害。

參考文獻

1. 臺灣港務股份有限公司，臺中港 40 年期主計畫，2019 年。
2. 鍾英鳳、張欽森、王嫻文，「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，2021 年，37-43 頁。
3. Driscoll, A. M., Dalrymple, R. A., and Grill, S. T., "Harmonic generation and transmission past a submerged rectangular obstacle," 23rd Coastal Engineering Congress, ASCE, 1992, pp. 1142-1152.
4. Hsu, T.W., Hsieh, C.M. and Hwung, R., "Using RANS to simulate vortex

- generation and dissipation around submerged breakwaters”, *Coastal Engineering* 51(7), 2004, pp.557-579.
5. Ohyama, T. and Nadaoka, K., “Development of a numerical wave tank for a analysis of nonlinear and irregular wave field”, *Fluid Dynamics Research* 8, 1991, pp.231-251.
 6. Ohyama, T. and Nadaoka, K., “Modeling the transformation of nonlinear waves passing over a submerged dike”, *Proceedings of 23th International Coastal Engineering Conference, Venice, ASCE, 1992*, pp.526-539.
 7. Ohyama, T. and Nadaoka, K., “Transformation of a nonlinear waves train passing over a submerged shelf without breaking”, *Coastal Engineering* 24, 1994, pp.1-12.
 8. Peng, Y. F. and Hsieh, C. M., “Study on structured multi-block Cartesian grid method”, *Proceedings of 17th International Offshore and Polar Engineering Conference (EI), Lisbon, Portugal, 2007*, pp.2061-2068.
 9. Rojanakamthorn, S., Isobe, M., and Watanabe, A., “A mathematical model of wave transformation over a submerged breakwater”, *Coastal Engineering in Japan* 32, 1989, pp.209-234.
 10. Rojanakamthorn, S., Isobe, M. and Watanabe, A., “Modeling of wave transformation on submerged breakwater”, *Proc. 22nd Coast., Eng. Conf., ASCE, Delft, Netherlands, 1990*, pp.1060 - 1073.
 11. Stiassnie, M., Naheer, E and Boguslavsky, I., “Energy losses due to vortex shedding from the lower edge of a vertical plate attacked by surface waves”, *Proc. Roy. Soc. Lond. A* 396, 1984, pp.131-142.
 12. Tadeipalli S. and Synolakis, C. E., “The run-up of N waves on sloping beaches”, *Proc. R. Soc. Lond. A* 445, 1994, pp.99-112.
 13. Ting, F. C. K. and Kim, Y. K., “Vortex generation in water waves propagation over a submerged obstacle”, *Coastal Engineering* 24, 1994, pp.23-49.
 14. Ting, F.C.K. and Kirby, J.T., “Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone,” *Coastal Engineering* 24, 1994, pp.51-80.
 15. Ting, F.C.K. and Kirby, J.T., “Dynamics of surf-zone turbulence in a strong plunging breaker”, *Coastal Engineering* 24, 1995, pp.177-204.
 16. Watanabe, Y. and Saeki, H. “Three-dimensional large eddy simulation of breaking wave”, *Coastal Engineering* 41, 1999, pp.281-301.
 17. Wijayarathna, N., and Okayasu, A., “DNS of wave transformation, breaking and run-up on sloping beds”, *Proc. 4th Int. Conf. on Hydrodynamics, Vol. 2, IAHR Yokohama, Japan, 2000*, pp.527-532.
 18. Zhao, Q. and Tanimoto, K., “Numerical simulation of breaking waves by large eddy simulation and VOF method”, *Proc. 26th Int. Conf. on Coastal Eng. ASCE, Copenhagen, Denmark, 1998*, pp.892-905.
 19. Zhao, Q., Armfield, S. and Tanimoto, K., “Numerical simulation of breaking waves by large eddy simulation and VOF method”, *Proc. 26th Int. Conf. on Coastal Eng. ASCE, Copenhagen, Denmark, 1998*, pp.892-905.

- king waves by a multi-scale turbulence model,” *Coastal Engineering* 51, 2004, pp.53-80.
20. Miyata, H., “Finite-difference simulation of breaking waves”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 65, 1986, pp.179-214.
 21. Lemos, C. M., “Wave Breaking over a Submerged Plate-A Numerical Study”, In *Computer Modelling of Seas and Coastal Regions*, 1992, pp.83-95.
 22. Bradford, S.F., “Numerical simulation of surf zone dynamics”, *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, Vol. 126, 2000, pp.1-13.
 23. Lin, P. and Liu P. L. F., “A Numerical Study of Breaking Waves in the Surf Zone”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 359, 1998a, pp.239-264.
 24. Lin, P. and Liu P. L. F., “Turbulence Transport, Vorticity Dynamics Solute Mixing Under Plunging Breaking Waves in Surf Zone”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, 1998b, pp.15677-15694.
 25. Zhao, Q., & Tanimoto, K., “Numerical simulation of breaking waves by large eddy simulation and VOF method”, In *Coastal Engineering 1998*, 1999, pp.892-905.
 26. Christensen, E. D., & Deigaard, R., “Large eddy simulation of breaking waves. *Coastal engineering*”, 42(1), 2000, pp.53-86.

臺灣附近海域及港區船舶排放量對空氣品質 影響預測系統

吳義林	國立成功大學環境工程學系教授
賴信志	長榮大學科技工程與管理學系副教授
蔡德明	崑山科技大學資訊傳播系助理教授
楊榮元	國立成功大學環境工程學系研究助理
賴力瑋	長榮大學科技工程與管理學系研究助理
蔡立宏	交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
李俊穎	交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
蔣敏玲	交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

摘要

本研究使用臺灣海域船舶自動辨識系統(Automatic Identification System, 以下簡稱 AIS), 進行臺灣周遭航行船舶之空氣污染物的影響評估, 依據 AIS 即時船舶排放量和行政院環境保護署(以下簡稱環保署)自動監測設施 CEMS(Continuous Emission Monitoring Systems) 固定污染源的排放, 並搭配預測係數, 針對特殊日期(如農曆新年和颱風期間)進行排放量校正, 以估算未來 48 小時排放量, 並透過三維網格空氣品質模式 CMAQ-ISAM(Community Multi-scale Air Quality model - Integrated Source Apportionment Method) 模擬海域和主要商港船舶排放對臺灣周遭環境空氣品質的影響。空氣品質預測模擬使用的排放量分為海域及陸域兩個部分, 其中預測未來 48 小時內海域船舶排放量的相對誤差和絕對誤差分別小於 10% 和 30%。使用前述建立之 AIS 及 CEMS 排放量, 搭配空氣品質指標使用 CMAQ-ISAM 模組預測未來 48 小時之空氣品質, 其準確率約為 80%。

研究成果可供交通部航港局、臺灣港務股份有限公司(以下簡稱港務公司)或環保署在研擬港埠及沿岸地區空污對策之參考, 使之符合國際海事組織與歐

洲海港組織規範, 以提升港口形象並確保環境永續發展。

一、前言

世界各國經濟活動互動頻繁且合作密切, 船舶肩負貨物在國際間交流的重任, 伴隨而來的空氣污染物排放問題也愈形嚴重, 再加上港內運輸工具船舶、裝卸設備與重型卡車等污染排放問題, 已不容忽視。國內港埠地區空氣污染物排放, 長期以來未被列入環保管制項目重點, 但依據 TEDS(Taiwan Emission Data System)、REAS(Regional Emission inventory in ASia)與 HTAP(Hemispheric Transport of Air Pollution)等國內外研究顯示, 港區空氣污染物排放量對該區域污染排放總量的佔比頗高, 尤其硫氧化物(SO₂)與氮氧化物(NO_x)最為顯著。本研究希望透過船舶排放量對空氣品質影響預測系統, 掌握船舶排放之重要影響因子, 並提供即時排放量與預測資料, 做為交通部航港局及港務公司滾動檢討, 修正空污防制政策及措施之重要依據。

二、文獻回顧

根據環保署全國空氣污染物排放清冊(TEDS10)顯示港埠相關活動於105年之懸浮微粒(PM₁₀)、細懸浮微粒(PM_{2.5})、硫氧化物(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、非甲烷碳氫化合物(NMHC)與一氧化碳(CO)排放量佔全國排放量之比例分別為2.28%、4.26%、26.2%、8.72%、0.21%與0.51%，所以港埠相關活動排放SO₂、NO_x與PM_{2.5}等污染物之比例已有一定程度之影響。

依據TEDS10.0版資料顯示，港埠相關活動排放除了硫氧化物排放比例稍微降低，但依舊佔了全國排放比例約4分之1，而NO_x與PM_{2.5}等污染物排放則皆有增加。

依據「空氣品質模式模擬規範」將空氣品質模式分為高斯擴散模式、軌跡模式及網格式三種，其分類的考量依據與排放量的規模有關係，對於中大型規模排放量，其影響範圍及程度均較大，故需要考慮遠距傳輸的效應及光化學污染物產出對空氣品質的影響，因此必須使用較為複雜的軌跡模式或網格式。

網格式(Models-3/CMAQ)是目前較完整的三維網格式空氣品質模式之一，該模式以One atmosphere的概念模擬分析各種空氣污染物於大氣中的傳輸、反應與沉降等，所以包含原生性與衍生性空氣污染物種，同時也包含氣相、液相與固相的作用程序。

三、研究方法

為建立臺灣周遭海域船舶航行對本島沿岸及港域空污預測模式，本研究採用CMAQ(Community Multi-scale Air Quality model)三維網格式模擬原生性與衍生性污染源影響臺灣之案例解析。其中CMAQ模擬使用之船舶污染物

排放量，透過AIS抓取船舶航行之軌跡訊息，利用AIS所提供之船舶即時動態，如船速、座標、航行狀態等資訊，搜尋勞式資料庫中同一條船的引擎功率及最大船速等參數，最後套用洛杉磯港提供之船舶排放量計算公式，即可建立船舶之排放量資料。研究執行流程如圖1，採用自動化排放量計算模組，加上排放量預測機制以預測未來48小時之船舶排放量，其中臺灣地區排放量以TEDS排放清冊所提供之點源、面源、線源與生物源等本土污染源排放量，搭配每日CEMS之48小時預測資料。

前面兩者所述之污染物預測排放量，搭配三維網格式氣象模式WRF(Weather Research and Forecasting Model)所產生之風場資料，應用CMAQ模式模擬預測未來48小時內臺灣鄰近海域、主要港口以及海域分區船舶污染物排放對臺灣本島的空氣品質影響。

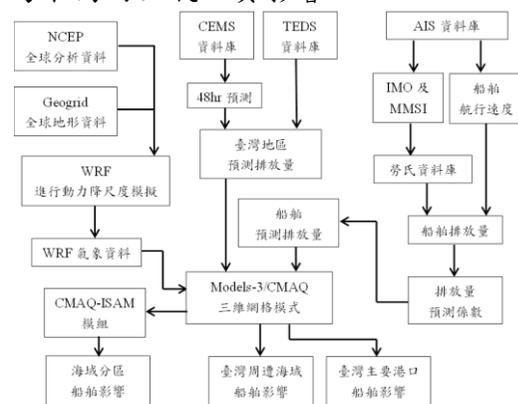


圖 1 研究執行流程

3.1 排放量推估

船舶污染物排放與能量消耗有一定的關係，依據洛杉磯港研究之遠洋船舶排放量推估公式如下：

$$E = \text{Energy} \times \text{EF} \times \text{FCF} \dots\dots (1)$$

推估公式中，E為引擎污染物的排放量(g)；Energy為所需要的能量(kW·

h)；EF 為排放係數(g/kW·h)；FCF 為燃油校正係數(無單位)。

且其中所需要的能量可藉由下列公式推估之：

$$\text{Energy} = \text{MCR} \times \text{LF} \times \text{Act} \dots (2)$$

能量公式中，MCR 為最大引擎動力(kW)；LF 為負載係數；Act 為活動時間(hr)。

船舶航行期間，負載一般介於 20%~80%之間，可藉由以下公式表示之：

$$\text{LF} = \left(\frac{\text{AS}}{\text{MS}} \right)^3 \dots \dots \dots (3)$$

負載公式中，AS 為船舶實際船速(節)；MS 為船舶最大船速(節)。

3.2 排放量預測係數

排放量預測係數為應用 2013 年及 2016 年計算之船舶排放量為基礎，把兩年之逐日排放量依照對應日期逐日平均，若以 n 代表第 n 日之排放量，則 n+1 日之排放係數即為(n+1)/n。

其中，因春節屬於東亞及東南亞重大節日之一，又臺灣位於東南亞華人居多的區域，每年之春節日期不盡相同，依據 2013 年及 2016 年排放量 NO_x 日平均約為 3,000 噸左右，與春節期間排放量約 2,000 多噸，有明顯之落差，故特別挑出並計算春節期間之排放量預測係數。同時，颱風行進路線千變萬化，當大氣條件有些微的變動，便有可能大幅度的改變颱風侵臺路徑，故為了簡化颱風影響排放量推估的諸多不確定性，所以把排放量預測係數定於颱風警報發布時，便同時啟動颱風影響的預測機制。

排放量推估期間為 2018 年 8 月 17 日至 2020 年 10 月 27 日，推估排放量乘上前述之排放量預測係數，即可獲得未來數日之預測排放量，由於預測時間愈

長則誤差愈大，故採用預測天數最長為期 2 日，即 48 小時之預測結果。將預測結果與實際日期推估之排放量比較差異，統計排放量推估期間其誤差百分比以及絕對誤差百分比，統計結果如表 1 及表 2。

由於預測係數為每日全海域船舶排放量之比值，故當全部船舶採用低硫油時，污染物種每日之預測係數將不至於變動。

表 1 海域船舶排放量預測誤差

預測誤差 (%)		第 1 天	第 2 天
NO _x	平均	-2.8%	-4.1%
	標準偏差	24.2%	32.4%
SO _x	平均	-3.1%	-4.8%
	標準偏差	26.2%	35.4%
PM	平均	-3.0%	-4.4%
	標準偏差	25.4%	34.1%

表 2 海域船舶排放量預測絕對誤差

預測誤差 (%)		第 1 天	第 2 天
NO _x	平均	17.7%	23.6%
	標準偏差	16.7%	22.5%
SO _x	平均	18.9%	25.6%
	標準偏差	18.3%	24.9%
PM	平均	18.5%	24.7%
	標準偏差	17.7%	23.9%

四、空氣品質預測系統

4.1 WRF 氣象模式

WRF 氣象模式使用四層網格把影響臺灣天氣的環境條件包含於模擬範圍中，如圖 2，採用設定以及設定基準如表 3，主要設計範圍是採用環保署空氣品質模式模擬規範規定，需要包含臺灣粗網格 9km 解析度和臺灣北部地區、中部地區、雲嘉地區、南部地區及東部地區細網格 3km 解析度的巢狀網格。

WPS Domain Configuration

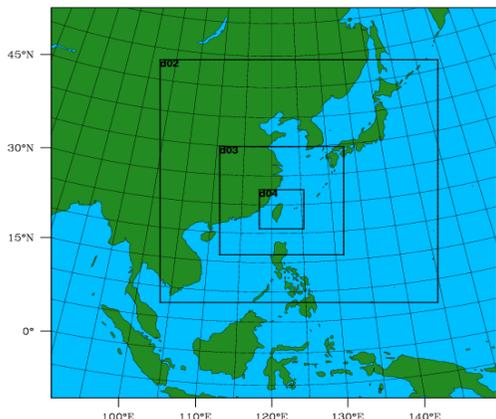


圖 2 WRF 四層網格模擬範圍

表 3 WRF 模式模擬採用的設定基準

	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4
Resolution	81 km	27 km	9 km	3 km
Grid Size	91 X 91	169 X 166	223 X 223	223 X 223
FDDA	Yes	Yes	No	No

4.2 CMAQ 模擬模式

為同時分析原生性與衍生性空氣污染物之影響，本計畫選用之空氣品質模式為 Models-3/CMAQ(Community Multi-scale Air Quality model)，此一模式之最大特色即在「一個大氣」(One-Atmosphere)的觀念，屬於網格模式的一種，此網格模式的特色為使用了多層次網格，模式中各網格之設定基準如表 4，圖 3 則為本研究之 Models-3/CMAQ 模擬分析的區域，其主要的模擬區域為 D4 區(臺灣本島周邊)，網格大小為 3km*3km，而 D3 網格則為 9km*9km，至於 D4 區域的邊界濃度則以 D3 模擬之結果代入，此一網格規劃即為多層次網格。

運用經過美國 NCEP 的初始場建立時，也使用資料四維同化的技術，以期能在更長時間的模擬過程中精確掌握模擬結果，評估模擬結果使用中央氣象局所屬測站觀測值進行評估，並完成 2016 年氣象模式模擬與驗證評估模式性能。

表 4 CMAQ 模式採用的設定基準

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Resolution	81 km	27 km	9 km	3 km
Vertical Layer	6	15	15	15
Grid Size	70×80	70×80	70×80	90×135
Aerosol Mod	Aero6	Aero6	Aero6	Aero6
Chemical	CB05	CB05	CB05	CB05

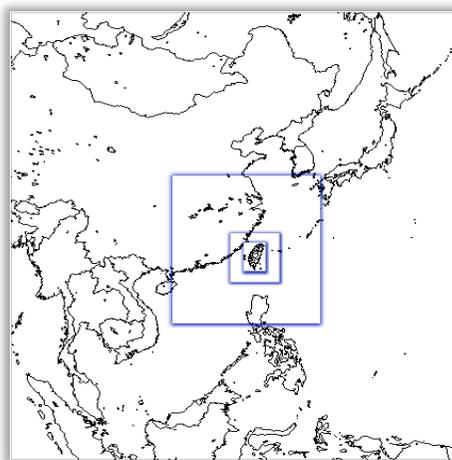


圖 3 Models-3 多層次網格示意圖

4.3 AQI 指標預測結果

統計 2020 年 10 月 8 日至 2020 年 1 月 12 日空氣品質預測期間，空氣品質指標(AQI)預測良好、普通、對敏感族群不健康以及對所有族群不健康之站數加總，預測結果又分為低估、符合及高估的日數，計算符合或高、低估時之百分比。其中低估時總日數為 319 站日，符合日數為 1,962 站日，高估時日數則為 201 站日，百分比率依序為 12.9%、79.0%及 8.1%，預測符合準確率約為 80%，如表 5 所示。

表中顯示空氣品質預測期間，AQI 預測良好時，有較好的結果，而 AQI 預測對所有族群不健康時，則有高估的情形。

表 5 空氣品質預測 AQI 符合比率

AQI 結果	預測第二天				總和	
	良好	普通	對敏感族群不健康	對所有族群不健康		
	0~50	51~100	101~150	151~200		
站數	低估	313	6	0	0	319
	符合	1,252	705	5	0	1,962
百分比	高估	0	141	49	11	201
	符合	20.0%	0.7%	0.0%	0.0%	12.9%
總站數	高估	0.0%	16.5%	90.7%	100.0%	8.1%
	符合	1,565	852	54	11	2,482

使用 2020 年 11 月 11 日的排放量來預測第 2 天的空氣品質狀況，預測空品影響範圍主要為臺南至屏東北部一帶，AQI 預測最高為小港站 158，實際觀測值亦在高屏附近有較高的濃度值，AQI 觀測值最高為屏東站 107；其中 AQI 預測良好的測站有 45 站符合觀測值，4 站低估，AQI 普通的測站有 12 站符合、1 站低估、1 站高估，對敏感族群不健康的測站有 3 站符合、6 站高估，對所有族群不健康的測站則有 1 站高估；其中預測值與觀測值的相關係數為 0.763，空間分布則如圖 4。

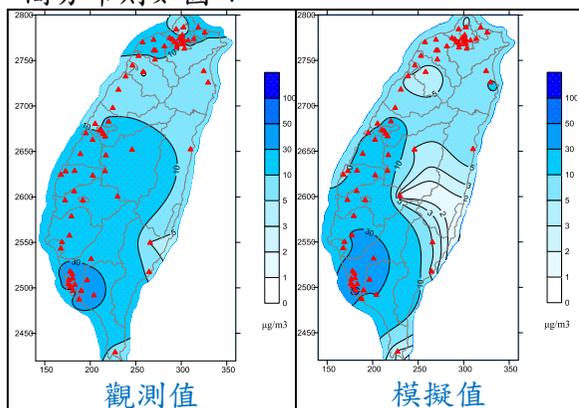


圖 4 2020 年 11 月 11 日空品預測結果

使用 2020 年 11 月 12 日的排放量來預測第 2 日的空氣品質狀況，預測空品影響範圍主要為臺中往南延伸至高雄的臨海區域，AQI 最高為小港站 146，實際觀測值則在高雄、屏東附近以及雲林、嘉義靠近南投部分山區有較高的濃度值，AQI 最高為潮州站 110；其中預

測空氣品質 AQI 指標為良好的測站有 33 站符合觀測值、1 站低估，指標為普通的測站有 32 站符合、1 站低估、4 站高估，對敏感族群不健康的測站則有 2 站高估，對所有族群不健康的測站則為 0 站；預測值與觀測值的相關係數 R 為 0.4822，空間分布則如圖 5。

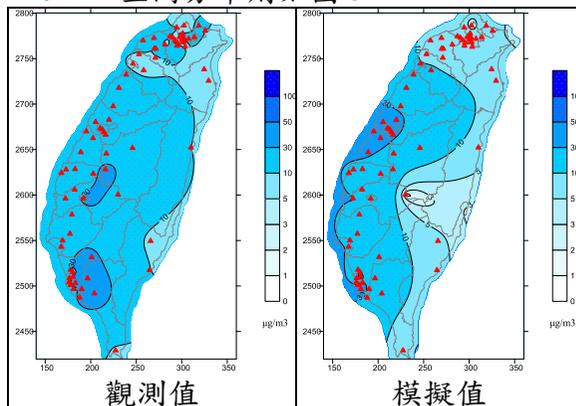


圖 5 2020 年 11 月 12 日空品預測結果

統計空氣品質預測期間，計算模擬值與觀測值的差異(模擬值-觀測值)，逐日把預測第 2 日之全臺 76 個 EPA 測站的誤差值平均，並繪製成如圖 6，期間臺灣本島排放量使用 TEDS 10，模擬值有較接近觀測值的結果，誤差介於 $-13.1 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，平均誤差則為 $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

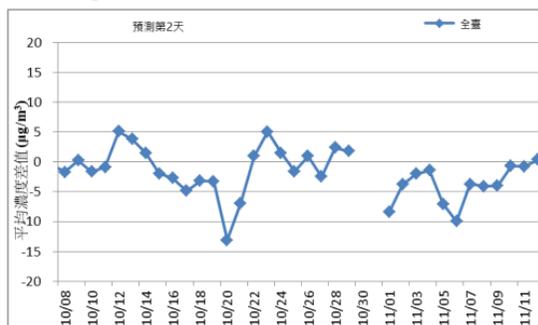


圖 6 2020 年全臺平均模擬值與觀測值的差異

由於預測期間為臺灣地區空氣污染較為嚴重的時期，對於空污嚴重地區之

預測至為重要，因此，未來空品預測將更能有效預測出空污嚴重時的影響狀況。

4.4 海域船舶排放預測

海域船舶污染物排放量依排放量預測機制，預測第 2 日的排放量，並依此排放量使用 CMAQ 模式模擬空氣品質預測情形，再繪出模擬預測之濃度分布情形，以期瞭解污染物擴散情形，如污染物高濃度主要分布區域、或特定區域集中狀況。

圖 7 為 2020 年 11 月 10 日至 2020 年 11 月 12 日海域船舶污染物排放預測第 2 日細懸浮微粒對臺灣本島的影響，3 日預測結果中，影響範圍有由南逐漸往北延伸擴散的趨勢，一直到新竹附近有較高的影響，且高濃度區域由高屏一帶逐漸轉移到臺中地區，此時可進行事先預防的動作，提早因應空污造成的影響。

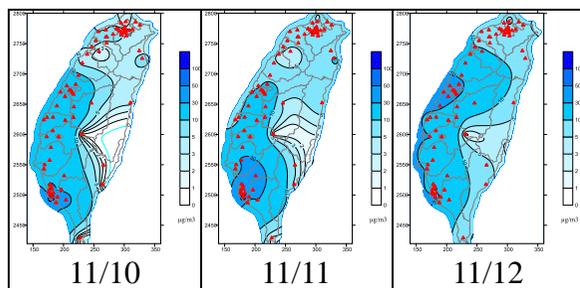


圖 7 海域船舶影響空氣品質預測結果

4.5 區域船舶排放預測

本研究以航港局航政轄區為主，將海域船舶排放量區分為 5 大區域，如圖 8 所示，並使用 CMAQ-ISAM 模組模擬各區域船舶排放對臺灣本島各測站之貢獻比例。

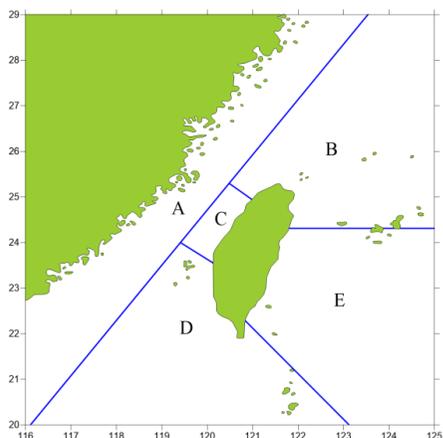


圖 8 海域船舶排放量區域分布

其中預測期間，A 區貢獻比率均為 0%，而 B 區全臺平均貢獻比例介於 0.07% ~ 1.47% 之間，單站貢獻比例最高為 2020 年 10 月 24 日位於三義站的 7.03%；C 區全臺平均貢獻比例介於 0.00% ~ 0.25% 之間，單站貢獻比例最高為 2020 年 11 月 3 日位於臺西站的 1.71%；D 區全臺平均貢獻比例介於 0.00% ~ 2.15% 之間，單站貢獻比例最高為 2020 年 10 月 10 日位於前金站的 8.17%；E 區全臺平均貢獻比例介於 0.01% ~ 0.65% 之間，單站貢獻比例最高為 2020 年 11 月 4 日位於臺東站的 13.57%。

4.6 港口船舶排放預測

同前述區域船舶排放影響，把臺北港、臺中港及高雄港之船舶污染物排放，以 CMAQ-ISAM 模組模擬各港口船舶排放對港口鄰近各測站之貢獻比率，自 2020 年 10 月 8 日以 CMAQ-ISAM 預測未來 48 小時空氣品質與各港區及海域之影響至 2020 年 11 月 12 日期間，結果顯示鄰近臺北港測站之林口、淡水及士林站，其平均貢獻比率依序為 1.62%、0.65%、1.47%，若以淡水站為代表，其貢獻比率介於 0.08% ~ 2.74% 之間，貢獻比率最高發生於 2020 年 11 月 12 日；鄰近臺中港測站之豐原、沙鹿、線西及西屯站，其平均貢獻比率依序為 0.

34%、0.29%、1.33%、0.30%，若以沙鹿站為代表，其貢獻比率介於 0.00% ~ 1.72%之間，貢獻比率最高發生於 2020 年 10 月 13 日；鄰近高雄港測站之前金、前鎮、小港及林園站，其平均貢獻比率依序為 1.72%、3.03%、5.26%、5.37%，若以前鎮站為代表，其貢獻比率介於 0.38% ~ 7.05%之間，貢獻比率最高發生於 2020 年 11 月 12 日。

五、結論

船舶排放量推估期間，預測第 2 日平均誤差 NO_x 、 SO_x 及 PM 依序為 -4.1%、-4.8%及 -4.4%，絕對誤差則依序為 2.3.6%、25.6%及 24.7%。

若以推估之船舶排放量搭配 TEDS 10，使用 CMAQ 結合 ISAM 預測空氣品質細懸浮微粒($\text{PM}_{2.5}$)結果，並統計預測期間之模擬值與觀測值，其誤差平均為 $-2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2020 年 10 月 8 日開始預測之 AQI 指標符合百分比則約為 80%。

本研究建置了臺灣附近海域船舶及臺灣本島固定污染源之排放量資料，並以建置完成之三維網格 WRF 氣象模式及 CMAQ 空氣品質模式，模擬海域以及港口船舶排放量對臺灣地區之影響，其結果將可作為空氣品質污染嚴重時之緊急應變措施的依據。

參考文獻

1. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2015) Port of Los Angeles Inventory Highlights 2015. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
2. Johnson, J., Gauss, M., Shulz, M., Jalkanen, J.-P. and Fagerli, H. (2020) Effects of Global Ship Emissions on European Air Pollution Levels, *Atmos. Chem. Phys.*, 20: 11399-11422.
3. Karl, M., Jonson, J., Uppstu, A., Aulinger, A., Prank, M., Sofiev, M., Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Quante, M., and Matthias, V. (2019) Effects of Ship Emissions on Air Quality in the Baltic Sea Region Simulated with Three Different Chemistry Transport Model, *Atmos. Chem. Phys.*, 19: 7019-7053. .
4. Liu, T., Chen, Y.-S. and Chen Y.-T. (2019). Emission of Air Pollutant from Merchant Vessels in the Port of Kaohsiung, *Aerosol and Air Quality Research*, 19: 2341-2351.
5. Matthias, V., Bewersdorff, I., Aulinger, A., and Quante, M. (2009) The Contribution of Ship Emissions to Air Pollution in the North Sea Regions, *Environmental Pollution*, 158: 2241-2250.
6. US EPA (2020) Methodologies for Estimating Port-Related and Goods Movement Mobile Source Emission Inventories. Office of Transportation Air Quality, EPA-420-D-20-001.
7. Wang, X., Shen, Y., Lin, Y., Pan, J., Zhang, Y., Louie, P., Li, M., and Fu, Q., (2018) Atmospheric Pollution from Ships and its Impact on Local Air Quality at a Port site in Shanghai, *Atmos. Chem. Phys.*, 19: 6315-6330.
8. Zhang, Y., Yang, X., Brown, R., Yang, L., Morawska, L., Ristovski, Z., Fu, Q., and Huang, C. (2017) Shipping Emissions and their Impacts on Air Quality in China, *Sci. Total Environ.*, 581-582: 186-198.
9. 行政院環境保護署(2019)「全國空氣污染物排放量清冊資訊系統」，https://teds.epa.gov.tw/TEDS_10_0.aspx。

臺中港單基海洋陣列雷達波浪及海流觀測之 分析研究探討

李政達 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
林受勳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
蔡立宏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

摘要

本研究以臺中港線性陣列海洋雷達調查港區與鄰近海域之海象，利用雷達產生的電磁波於海水表面所發生的共振與都卜勒頻偏現象，觀測海象波浪波高與週期的時序列變化趨勢，結果顯示與本所臺中港底碇式水下觀測儀器之觀測結果具有一致性，相關研究成果可提供船舶航行與進出港區應用參考。

一、前言

自從雷達發明以來，已廣泛應用於科學研究、無線電探測、軍事定位、沿海地區管理、漏油偵測、海嘯預警等用途，隨著微電子技術發展成熟與遙測技術相繼提升，各項功能與應用範疇亦越發精進；本研究採用交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)2019 年建置之臺中港海洋陣列雷達北側觀測站，進行港區與鄰近海域之海象觀測、波浪與海流之觀測分析，以及風速觀測之可行性研究，研究成果可做為回饋臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司未來擴港計畫之設計規劃使用，另協助交通部建構安全交通環境之應用參考。

本研究引進之雷達系統，係由美國夏威夷大學無線電海洋學實驗室開發，並提供通用相控陣列高頻都卜勒雷達服務。量測原理係依據無線電波頻率能夠將數公里遠的海流與波浪性質傳遞回

來，目前與夏威夷大學合作之國家，先後有義大利(2002~2004 年)、墨西哥(2005 年至今)、菲律賓(2008 年至今)、臺灣(2018 年至今)等。本研究海洋陣列雷達海洋現況，如圖 1 所示。



圖 1 臺中港線性陣列雷達海洋現況

本研究範圍為臺中港朝向臺灣海峽
外海 40km 遠，兩側夾角 120 度之扇形
區域，此範圍涵蓋臺中港船舶進出口要
道，如圖 2 所示。



圖 2 臺中港觀測範圍示意圖

二、研究方法與探討

雷達波具有可在海水與大氣介面間進行傳遞之特性，該介面能量衰減率甚小，可沿著海水表面隨著彎曲的地球表面傳播電磁波，藉由雷達可獲取數平方公里海面的海洋狀態參數分布，探測各項海洋動力學參數，包括海面風速、波高、流速等，本章節將就雷達海象觀測原理、海洋陣列雷達基本資料與雷達電磁理論說明如下。

2.1 雷達海象觀測原理

本研究所採用雷達系統為線性陣列高頻雷達(Linear Phased Array High Frequency Radar)，其陣列之意係指雷達天線排列方式，一般常見的陣列包含：線陣列與方陣列，二者都是常見的陣列型式，高頻之意係指雷達波發射時的頻率，簡要分類包含：高頻(HF)、甚高頻(VHF)、超高頻(UHF)、微波(Micro wave)與毫米波(Millimeter wave)等，如圖 3 所示。不同的頻率引致不同物體將產生反射現象，就像各種顏色的物體經由可見光照射時，反射物體無法吸收波長的光線，再由人類眼睛接收所見，本研究以高頻雷達進行觀測，與物體反射可見光模式類似，當雷達波正好為波浪波長的 2 倍時，雷達回波將攜回海面的共振訊號，因此，可以利用此特性與演算法，求解海面之海氣象特性。

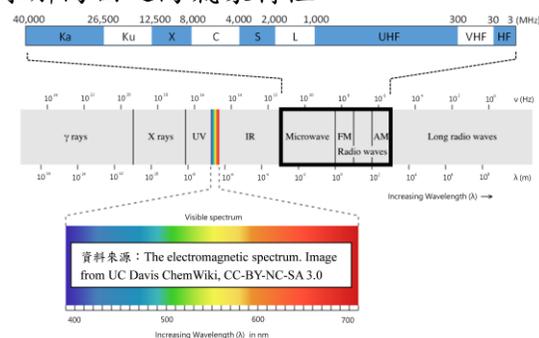


圖 3 訊號分類圖

研究追溯至美國 Barrick, D.E. 任職於國家海洋暨大氣總署(NOAA)研究期間發表之基礎，發展布拉格散射機制的公式與分析與半經驗方法，該方法不僅同時適用於單基或雙基雷達站情況，成功測量海流、風場及表面波，在 Barrick 研究中表面波理論是基於非線性流體動力和水波電磁方程式之攝動理論展開而發展。該文獻已提出許多理論，描述 HF 雷達散射回波的特徵，比如海面雷達回波的都卜勒頻譜 Barrick, D.E. (1972b, 1971b) 提出第一階與第二階的理論，透過計算背景雜訊時，將使用背景散射定律(Background scatter theory)，雷達散射面積(rad/s)等於每單位頻寬分之海表面平均雷達橫截面積，該理論於參數上具有有限的收斂半徑，當雷達空間波數與表面振幅的乘積等於 1 時，該理論將失去效用，基此，存在飽和極限，高頻雷達可獲得最大 Hs (有義波高)，有義波高受到 2 倍雷達空間波數倒數的限制，因此，在極端情況下，當波高大於飽和值時，雷達量測有義波高的結果將被低估，原則上計算背景雜訊並加以濾除，後續應用布拉格能量大於平均能量，以確認都卜勒頻譜的平均能量與布拉格波範圍，最後利用第一階與第二階的邊界條件與權重方程式，在第二階訊噪比要大於 3dB 的情況下，再利用 Barrick, D.E. (1977) 所提出的權重係數，估計波高與估計的平均週期。定位入射角(Direction of arrival)，理論上接收天線量測的雷達回波來自四面八方，所接收到的訊號，包含海面初級回波與陸地結構及地表起伏的多重反射，因此，僅藉由單一天線並無法分析出訊號來源的實際方向，但如接收天線排列成線陣列的型式，就能透過海面回波訊號抵達各接收天線的不同時間，分析彼此訊號間的相位差。波束成形(Beam forming)演算技術便是利用蒐集各接收天線的回波訊號與相位差關係，解算來自不同方向之訊號成分，

配合數學三角函數關係與計算相位差資訊，反算出訊號的方向資訊，達成辨識方位特徵的目的。

2.2 海洋陣列雷達基本資料

本研究雷達採用美國夏威夷大學研製的 LERA(Least-Expensive Radar, 簡稱 LERA)系統，於臺中港北淤沙區設置雷達機房、4 支發射天線與 16 支接收天線。其中，天線模組皆設置於 6m 高擋沙牆頂部，雷達線性調頻發射週期設定為 0.2166sec，最小線性調頻取樣數量 8,192 筆，觀測時距為 29.12mins(約為 30min 每筆)，每小時可發布 2 筆觀測資料，觀測範圍呈現扇形 120°，最遠觀測距離可達 40km，空間中方向解析度為 8°，空間解析度為 500m，有關海洋陣列雷達基本資料，如表 1 所示。

表 1 海洋陣列雷達基本資料

雷達參數	參數值	單位
觀測時距	30	min
雷達頻率	27.75	MHz
頻寬	300	KHz
發射天線數量	4	支
接收天線數量	16	支
方位角	296	度
觀測距離	40	KM
空間解析度	500	m
方位解析度	8	度
線性調頻發射週期	0.2166	sec
A/DC 取樣頻率	740	Hz
線性調頻取樣數量	1,280	個
最小線性調頻數量	8,192	個

2.3 雷達電磁理論

雷達電磁理論先由天線接收之複雜形式的 I/Q 資料開始說明，I/Q 資料其實是 RF(Radio Frequency)通訊中常見的調變型態，該資料可做為頻率調製、混頻與解碼之基礎，本研究所需之回波強度與相位訊息即可透過 I/Q 函數來求得，I 表示電磁場的實部，Q 表示電磁場的虛

部。每個啁啾(Chirp)訊號時間長 0.2166sec，經過 A/DC(Analog/Digital Converter，類比/數位轉換)以 740Hz 頻率取樣，可以取出 160 個時序離散樣本，經由傅立葉轉換，可用傅立葉係數計算相應距離元的振幅與相位，資料處理後將 8,192 個啁啾進行合併，可得到受波浪影響之 I/Q 週期震盪的雷達回波強度圖，同相位頻道 I 第 9 支天線的回波強度圖，如圖 4 所示。

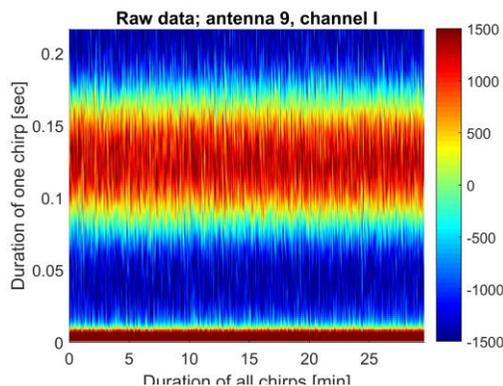
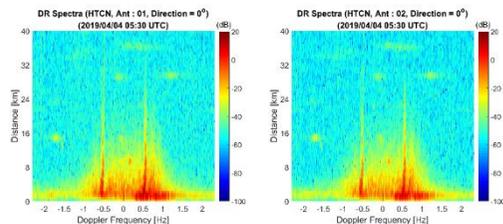


圖 4 雷達回波強度圖

承上，先將雷達回波強度圖縱軸進行第 1 次傅立葉轉換，原縱軸時間可轉換為頻率再轉換為距離；此時，再將橫軸做第 2 次傅立葉轉換，原橫軸的時間可轉換為頻率，即可繪製出都卜勒距離譜圖(或稱 D-R 譜)，由於海洋陣列雷達具指向性，故都卜勒距離譜距離負數部分，表示雷達訊號於天線發射方向之後方，不具有物理的意義，將予以剔除，如圖 5 所示。



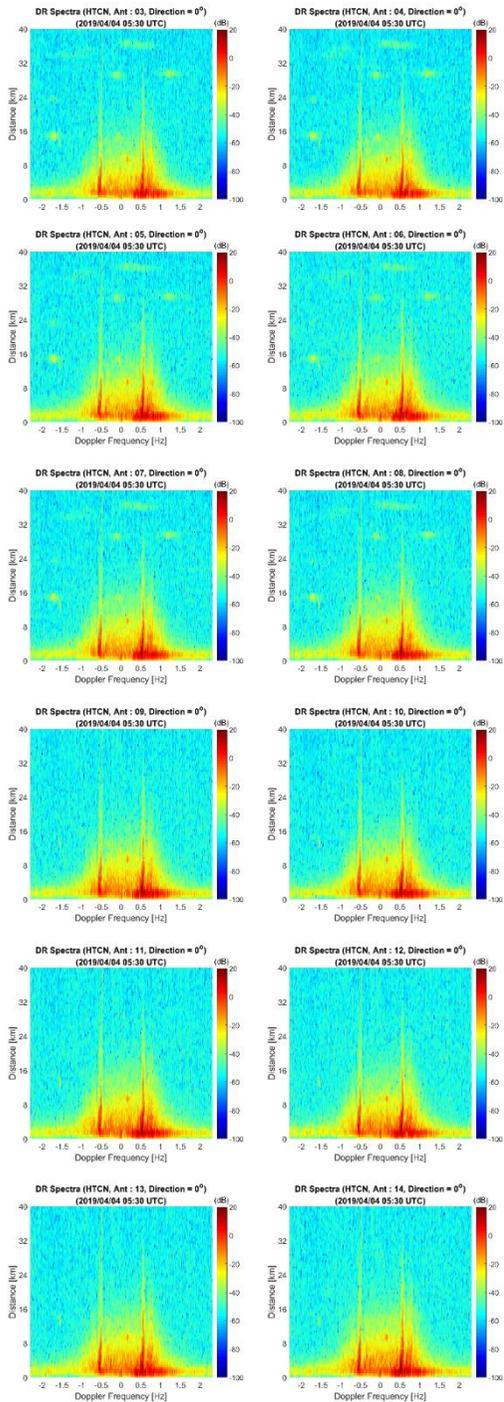


圖 5 都卜勒距離譜(D-R spectrum)

雖然發射天線場型具有指向性發射，但接收天線則係全向性接收，意即來自四面八方的訊號全部接收，利用多天線組的相位差進行波束成形(beam forming)以分析海面流速與波高。

2.3.1 海洋流場之徑向流速(V)

海洋雷達之回波訊號會隨著波浪運動產生都卜勒頻率位移效應，由於布拉格共振波所造成的連續性頻移可紀錄於都卜勒距離譜中，透過分析都卜勒距離譜一階峰頻率位移的差值 $f_{current}$ ，再配合海面波浪波長等於雷達波長的 1/2 之公式(1)，將公式(1)代入電磁波速度公式經過換算，波浪的徑向速度 $V_{radar current}$ ，即可表示為公式(2)所示。

$$\lambda_{wave} = \frac{\lambda_{radar}}{2} \dots \dots \dots (1)$$

$$V_{radar current} = f_{current} \frac{\lambda_{radar}}{2} \dots \dots \dots (2)$$

因此利用高頻雷達蒐集都卜勒距離譜一階峰之頻移，依據公式(2)公式求得海面徑向流速度，將整個海域依序解算各距離元的徑向速度，並標示在雷達範圍圖內可繪製出雷達觀測流場圖，如圖 6 所示。

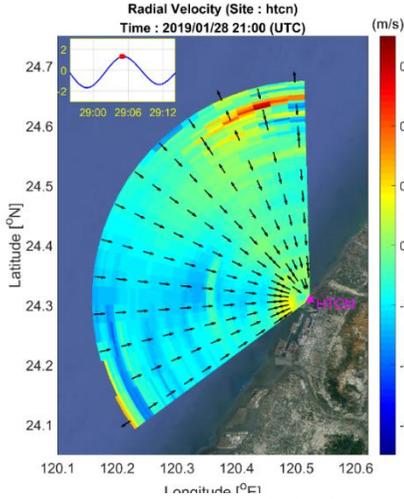


圖 6 雷達觀測流場圖

2.3.2 海面波高(H)與週期(T)

Barrick, D. E.(1972b, 1971b)提出許多海洋雷達的回波理論，有關都卜勒頻譜一階與第二階的理論，如公式(3)與公式(4)所示，計算背景雜訊的時候將使用背景散射定律(Background scatter theory)，雷達散射面積(rad/s)等於每單位頻寬分之海表面平均雷達橫截面積，原則上計算背景雜訊並加以濾除，後續應用布拉格能量大於平均能量，以確認都卜勒頻譜的平均能量與布拉格波範圍，最後利用第一階與第二階的邊界條件與權重方程式，在第二階訊噪比要大於 3dB 的情況下，再利用 Barrick, D. E. (1977) 所提出公式(5)、與公式(6)與權重係數，其中參數 K_0 雷達波的波數、 $w(\nu)$ 雷達波於電磁和流體動力的散射效應總耦合情況下的權重係數、 ω 海面波浪的週波率、 ω_B 雷達布拉格週波率、 T_m 平均週期、 σ_1 第一階都卜勒譜、 σ_2 第二階都卜勒，如圖 7 所示。

$$\sigma^{(1)}(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m=\pm 1} S(-2mk_0) \delta(\omega - m\omega_B) \dots \dots (3)$$

$$\sigma^{(2)}(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1, m_2=\pm 1} \iint_{-\infty}^{+\infty} |F|^2 S(m_1 k_1) S(m_2 k_2) \delta(\omega - m_1 g k_1 - m_2 g k_2) dpdq \dots \dots (4)$$

$$k_0 h_{rms} = 2 \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(2)}(\omega) w^{-1}(\eta) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \sigma^{(1)}(\omega) d\omega} \right]^{1/2} \dots \dots (5)$$

$$\frac{\omega_B T_m}{2\pi} = \frac{\int_{0.1}^{1.0} \sigma^{(2)}(\omega) w^{-1}(\eta) d\eta}{\int_{0.1}^{1.0} |\eta - 1| \sigma^{(2)}(\omega) w^{-1}(\eta) d\eta} \dots \dots (6)$$

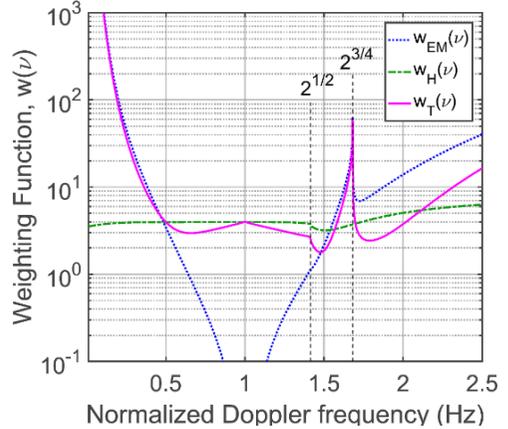


圖 7 權重函數與頻率正規化圖

2.3.3 雷達訊號處理步驟

本研究採用都卜勒距離譜之成分譜，計算電磁理論的第一階分量的總能量與第二階分量的總能量，配合權重函數、比例因子與均方根波高演算法，估算波浪波高與週期，將雷達訊號處理步驟，如圖 8 所示。

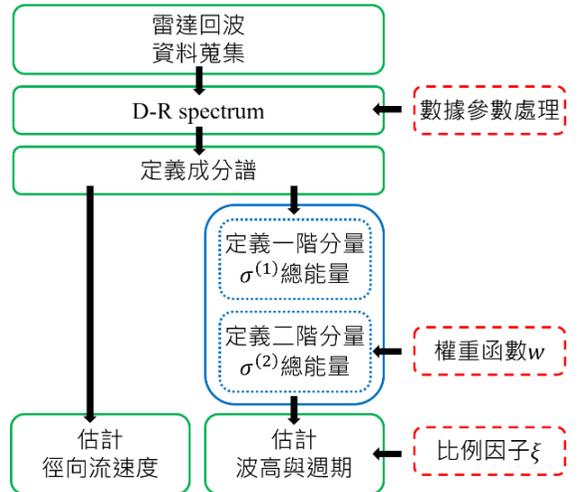


圖 8 雷達訊號處理步驟

三、海氣象觀測成果分析

本研究雷達觀測成果分析，將依據臺中港海氣象之海流流速、波浪波高與週期進行統計分析探討。本研究參與評估之統計項目有：相關係數(r)、均方根誤差(RMSE)、偏誤(BIAS)與散點因子(Scatter Index, 稱為SI)；其中1.相關係數(r)為判斷雷達觀測與實測資料間關聯性之參數，數值越高表示兩數據彼此關聯程度越高；2.均方根誤差(RMSE)表示為統計後之標準誤差，標準誤差量越高，則顯示誤差越大；3.偏誤(BIAS)為數據間的偏差程度，用以衡量雷達觀測與波流儀量測間的偏差，偏誤越小，表示雷達觀測越接近實測值；4.散點因子(SI)為無因次正規化均方根誤差，屬於統計學誤差評估之另種方式，可視為一種誤差百分比，散點因子越接近0，資料品質與觀測成效越好，如散點因子恰好為0，表示與波流儀實測值完全一致。

3.1 海面波高(H)與週期(T)探討

本研究蒐集 109 年度雷達回波頻譜資料與分析海面波浪觀測值，配合港研中心臺中港北堤外海實測資料加以比對，觀測時段介於 109 年 4 月 20 日至 109 年 4 月 25 日期間，雷達觀測波浪有義波高(H_s)與實測資料結果比對，相關係數為 0.87 高度相關，均方根誤差為 0.54，偏誤為 0.389，散點因子為 0.468，如圖 9 所示。

同觀測時段之平均週期與實測資料結果比對一階譜週期(T_{m01})與二階譜週期(T_{m02})， T_{m01} 相關係數為 0.78 高度相關，均方根誤差為 1.28，偏誤為 1.172，散點因子為 1.172，而 T_{m02} 相關係數為 0.74 高度相關，均方根誤差為 0.92，偏誤為 0.76，散點因子為 0.762，如圖 10 所示，由於 T_{m02} 的散點因子小於 T_{m01} ，顯示於存在觀測誤差情形下， T_{m02} 誤差較 T_{m01} 小，此與二者均方根誤差一致

(RMSE： $T_{m02} < T_{m01}$)， T_{m02} 與實測資料更為吻合；惟同觀測時段之尖峰週期與實測資料結果比對， T_p 相關係數為 0.21 低度相關，均方根誤差為 1.38，偏誤為 0.385，散點因子為 0.820，如圖 11 所示，比較週期偏誤值，尖峰週期偏誤值最小，故雷達資料尖峰週期與實測更為吻合。

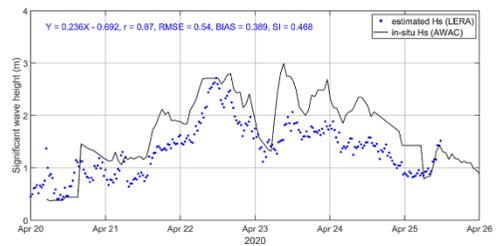


圖 9 波高 109 年 4/20~4/26 比對

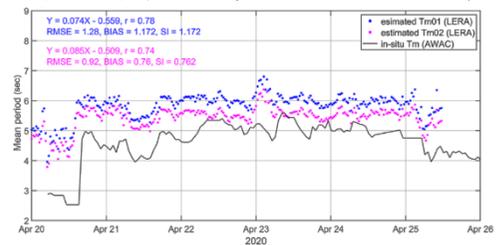


圖 10 週期 109 年 4/20~4/26 比對

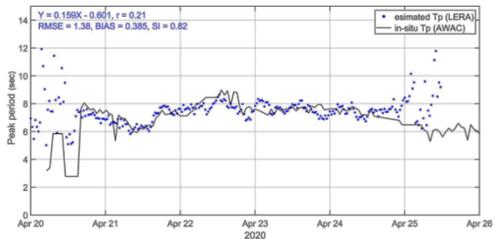


圖 11 尖峰週期 109 年 4/20~4/26 比對

觀測時段介於 109 年 5 月 20 日至 109 年 6 月 29 日期間，雷達觀測波浪有義波高(H_s)與實測資料結果比對，相關係數為 0.55 中度相關，均方根誤差為 0.34，偏誤為 0.389，散點因子為 0.274，如圖 12 所示。

同觀測時段之平均週期與實測資料結果比對， T_{m01} 相關係數為 0.02 微弱相關，幾乎可稱之為無相關，均方根誤差

為 3.08，偏誤為 2.869，散點因子亦為 2.869，而 T_{m02} 相關係數為 0.08 微弱相關，均方根誤差為 2.48，偏誤為 2.301，散點因子亦為 2.301，如圖 13 所示；惟同觀測時段之尖峰週期與實測資料結果比對， T_p 相關係數為 0.01 微弱相關，均方根誤差為 5.99，偏誤為 5.058，散點因子為 5.084，如圖 14 所示。

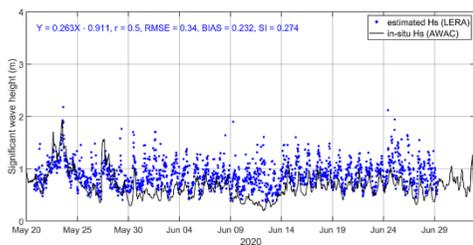


圖 12 波高 109 年 5/20~6/29 比對

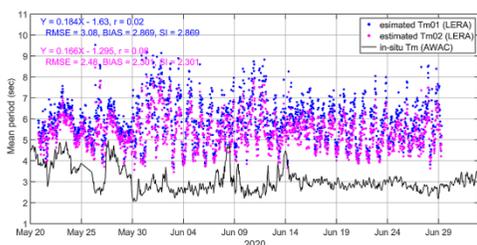


圖 13 週期 109 年 5/20~6/29 比對

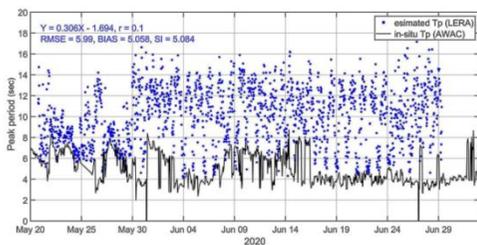


圖 14 尖峰週期 109 年 5/20~6/29 比對

3.2 海流徑向流速(V)探討

由於本雷達系統目前為單基雷達站系統僅能獲取逕向流資料，因此，本研究以臺中港海域流速之成果分析，僅取 109 年 6 月 12 日至 109 年 6 月 14 日於鸚鵡颱風侵擾期間資料進行比對，該颱風路徑係由菲律賓生成，行經南海至廣州，如圖 15 所示。

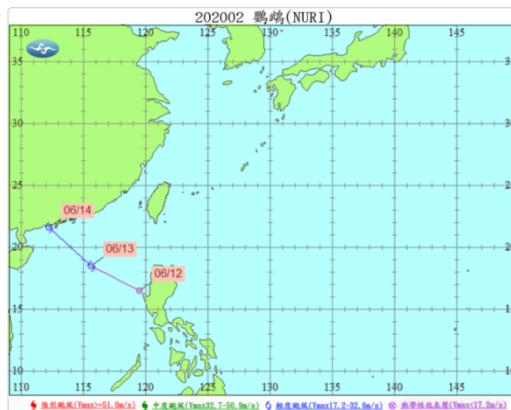


圖 15 鸚鵡颱風路徑圖(資料來源：交通部中央氣象局)

實測海流流速係以港研中心波流儀量測值約 0.135~0.623m/s 之間，如圖 16 所示，將實測流速轉換為逕向速度與雷達逕向流速進行比對，如圖 17 所示，逕向流速較大時，實測值與雷達值較為接近，顯示颱風強度距離遠臺中港甚遠，對雷達干擾程度有限，且速度值較大時，雷達訊號品質較好，分析結果較為準確。此外，本研究於鸚鵡颱風侵襲期間 72 小時內，逕向速度實測與雷達觀測散佈圖比較，相關係數 0.762，如圖 18 所示。

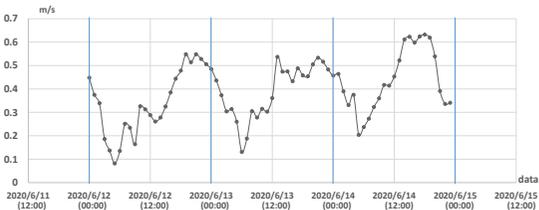


圖 16 海洋實測流速資料

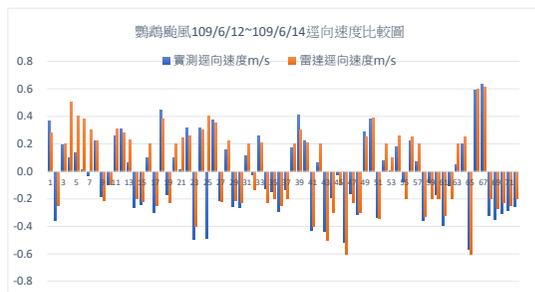


圖 17 海洋逕向速度比較圖

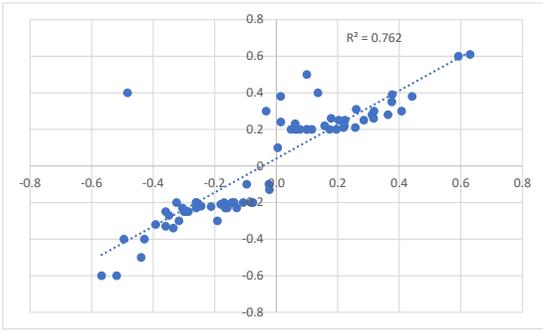


圖 18 逕向速度實測與雷達觀測散佈圖

四、雷達分析之影響成因探討

本研究雷達訊號分析之影響成因，依照影響因素歸納，概可分為 2 類：(1) 設備類型與(2)環境類型，設備類型屬於雷達系統硬體設備方面，期間電力系統無法穩定供電，探討成因主要係臺中港務分公司辦理回填取沙作業、工程廢棄土石拋放與整地工程等人為因素，因機具挖掘未能注意雷達電纜，以致於至少 6 處以上電纜線因挖掘而受損的案例，建議加強港務相關人員與廠商作業時需留意管路，另港研中心後續施工電纜線管道埋設深度至少須 1m 以上，以確保電力之穩定性。

由於無線電頻率、無線電通信、電離層效應等干擾，對雷達觀測品質都有影響，因此，環境類型影響之雜訊影響，需於硬體增加能降低與濾除雜訊之濾波器，藉以除去環境噪音對雷達訊號品質之干擾，有關雷達 D-R 譜背景雜訊，如圖 19 所示。

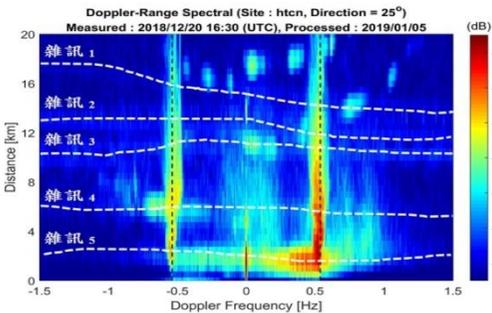


圖 19 雷達 D-R 譜背景雜訊

造成雷達雜訊干擾都卜勒距離譜，而產生之觀測誤差成因，可能源於鄰近雷達站周邊的陸上風力發電機所致，因旋轉葉片可能造成雷達波之反射，另冷氣室外機的金屬外殼與葉片等金屬材質，都有可能直接反射雷達訊號，造成訊號重複反射與接收之雜訊。此外，為了減少都卜勒距離譜演算海氣象參數的不確定性，還需要從海面回波資料識別與刪除船舶之回波訊號，故需利用第一階峰及第二階峰部分之訊噪比 (SNR)，並設置門閾值，將不確定的訊號予以濾除，以提升雷達資料演算海氣象參數之資料品質。

五、結論與建議

本研究採用之雷達係臺灣目前唯一運行中的海洋陣列雷達，港研中心發展運用雷達觀測波浪與海流，並精進其遙測技術，以海面波浪與海流之雷達訊號進行多重處理，將所得海象資料進行蒐集、分析與建檔，研究成果可提供臺中港務分公司完整的海象資訊，協助掌握港區與鄰近海域之海氣象現況。

5.1 結論

本研究運用雷達觀測波浪波高與週期之時序列，顯示漲落趨勢與實測結果，具有一致性。109 年 4 月份雷達觀測分析結果，有義波高相關係數尚達 0.87，相關係數仍呈現高度相關，平均週期介於 0.74~0.78，亦屬高度相關範圍，顯示雷達觀測波浪已具可參考性。此外，本研究量測逕向流速時序列之實測值與雷達觀測值，二者於鸚鵡颱風期間相關係數達 0.76，亦屬高度相關範圍，顯示雷達逕向流速已具可參考性。

雷達背景雜訊探討部分，經測試冷氣室外機風扇可能會產生噪音雜訊，但量值小時，干擾可以忽略不計，而陸上風力發電機葉片旋轉之重複反射干擾較

大，故無法忽略不計。此外，都卜勒譜時常有很強的都卜勒斑點，由於雷達站鄰近臺中港進出港口，該訊號比較像是船舶的反射訊號，可以確定此反射訊號屬於主動噪聲干擾的物體。

5.2 建議

雷達觀測波浪與海流參數觀測，取決於雷達第一階與二階分量值的計算，雜訊是影像訊號計算結果的重要因素，故本研究特別重視控制雷達訊號與數據品質，建議設置數據資料控制平台，並利用控制數據品質之反演方法與資料平台，針對雷達回波訊號進行改善處理。

本研究雷達觀測建議未來能建置可視化介面平台提供查詢表面波高、平均週期、流速、流向等觀測目標，此外，後續期能與船舶自動辨識系統(AIS)進行整合，提供臺中港周遭海域航行船舶之參考，若於海上事故發生時，將有助於監控港區與鄰近區域航行船舶與協助救援或提供海象等資訊。

對於雷達訊號辨識的誤差，可能係雷達訊號重複反射訊號的雜訊造成，建議持續觀察與蒐集長期性的雷達訊號紀錄，以確認訊號來源為海面或者雜訊，長期觀測如確定為固定源訊號，可藉設置濾波器將其剔除，改善都卜勒距離譜之特徵值；此外，雷達資料品管對於高頻雷達的波流參數之評估十分重要，後續應建立雷達品管流程與訊號分類方法，以精進雷達訊號分析技術及解算最佳海氣象資訊。

參考文獻

1.林昆毅、陳少華、楊文昌、梁恩昱、高家俊，「高頻雷達測流系統之建置與天線場型測量之實例探討」，第34屆海洋工程研討會，社團法人臺灣海洋工程學會，2012年，763-768頁。

2.吳立中、湯世燦、黃清哲、高家俊，「SeaSonde 高頻雷達測流演算法之研究」，第34屆海洋工程研討會，社團法人臺灣海洋工程學會，2012年，757-762頁。

3.董東璟、蔡政翰、陳盈智、顏志偉、馬名軍，「應用岸基微波雷達量測近海流空間分布」，航測及遙測學刊，第18卷第3期，2014年，193-204頁。

4.黃郁軒、賴堅戊、吳立中、黃清哲、黃清哲，「集成式高頻雷達波浪與風向量測性能初探」，第40屆海洋工程研討會，社團法人臺灣海洋工程學會，2018年，367-372頁。

5. Duy-Toan Dao、HwaChien、蘇青和、黃茂信、許義宏，「Assessment of phase array HF radar for ocean surface wave monitoring in the Taiwan Strait」，第41屆海洋工程研討會，社團法人臺灣海洋工程學會，2019年，352-356頁。

6.國家實驗研究中心台灣海洋科技中心，103年度台灣四周海域表層海流觀測年報，2014年。

7.交通部運輸研究所，海洋雷達應用於海象觀測之探討-應用案例探討，2018年。

8.交通部運輸研究所，107年國際商港風波潮流觀測與特性分析，2018年。

9.交通部運輸研究所，2018年12港域海氣象觀測資料年報，2018年。

10. Barrick, D. E., "Dependence of second-order Doppler sidebands in HF sea echo upon sea state", IEEE, Antennas and Propagation Society International Symposium, 1971, Vol. 9, p. 194-197.

11. Yuki Haru Hisaki, "Ocean wave directional spectra estimation from an HF ocean radar with a single antenna array: Observation", *Journal of Geophysical Research*, 2011, Vol. 110.
12. Guiomar Lopez, Daniel C. Conley, "Comparison of HF Radar Fields of Directional Wave Spectra Against In Situ Measurements at Multiple Locations", *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7, p. 271.
13. Barrick, D. E., "FM/CW radar signals and digital processing", NOAA Technical report, 1973, ERL 283-WPL 26.
14. Barrick, D. E., "Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra", *Radio Science*, 1977, Vol. 12, No. 3, pp. 415-424.
15. Lipa, B., "Derivation of directional ocean wave spectra by integral inversion of second order radar echoes", *Radio Science*, 1977, Vol. 12, No. 3, pp. 425-434.
16. Lipa, B., D. Barrick, "Methods for the extraction of long-period ocean wave parameters from narrow beam HF radar sea echo", *Radio Science*, 1980, 15 (04), pp. 843-853.
17. Wyatt, L. R., J. J. Green and A. Middleton, "HF radar data quality requirements for wave measurement", *Coast. Eng.*, 2011, 58 (4), pp. 327-336.
18. Roarty, H., Cook, T., Hazard, L., George, D., Harlan, J., Cosoli, S., ... & Grilli, S., "The global high frequency radar network", *Frontiers in Marine Science*, 2019, Science 6, p.164.

港區航行安全之海氣象及應變即時展示系統

蔣敏玲 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
林騰威 數位地球科技有限公司總經理
賴志炫 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 7 大國際商港，在經濟發展上扮演了極重要的角色。為了讓船舶在進出港時，有更多的海氣象環境資訊提供港埠營運單位、航商等各界參考，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，蒐集即時風力、波浪、潮位、海流等資料。

港研中心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展示系統，藉由資訊與通訊科技(Information and Communication Technology, ICT)之技術，將所有資訊收整於地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)，除了透過視覺化的地圖介面，可瀏覽各海氣象測站位置的觀測值外，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主要商港的海氣象資訊，做為決策輔助，提升港埠營運效率與提高船舶航行安全。

一、緒論

臺灣四面環海，國際貿易大多仰賴海上運輸，船舶航行一旦進入淺水區或港區就必須掌握近岸的海氣象資訊，尤其是大型船舶的受風面積大，對於風速

風向的資訊掌握是非常重要的，若資訊不足，船舶航行安全堪慮。

港務公司為提高進出港的安全性，特委託港研中心規劃設計「海氣象及應變即時展示系統」，包含硬體與軟體的建置，以提供業管人員與船舶(航商)所需的海氣象資訊，並建置一套整合性的系統，除了呈現海氣象資訊外，也須達到主動示警的效果。

港研中心於各商港設置了各式的觀測儀器，包含風速計、聲學都卜勒流速剖面儀(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)、潮位計、側向 ADCP(Side-looking ADCP)等，蒐集各港口海域的基本海氣象資料，並分析產製海氣象年報，以利海事工程、海上救援與防災等用途使用。

本研究彙整前述海氣象資訊，建置「海氣象及應變即時展示系統」，系統除了呈現即時觀測的資訊外，也提供各式資料的統計結果，更運用通訊軟體 Line 之聊天機器人(LINE Bot)進行推播告警，當觀測值超過警戒門檻值時，就立即推播告警，讓業管人員收到資訊後，能夠立即做出防災的準備。透過 ICT 的技術，提升航運安全，降低危險發生機率。

二、研究方法

2.1 使用工具

本案系統開發採用三層式網路架構(3-Tier Architecture)，使用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網際網路協定(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。

本系統設計方法與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 Google Maps、Bing Map、及國土測繪中心、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，包含風速、潮位、波流、流速(側向 ADCP)，以及港務公司設置之側向 ADCP，所介接資料如表 1。

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。

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) 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)。 2. 模擬：港研中心提供
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

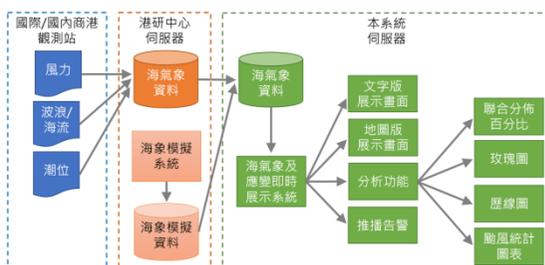


圖 1 系統架構

雷達回波圖與衛星雲圖介接中央氣象局資料；模擬成果圖則介接港研中心資料；各式資訊以 GIS 技術建置「海氣象及應變即時展示系統」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. 可以切換不同的底圖：

- (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，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，不會因使用者的作業系統關係而有無法適用的疑慮。伺服器執行產製「聯合分佈百分比統計表」，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。

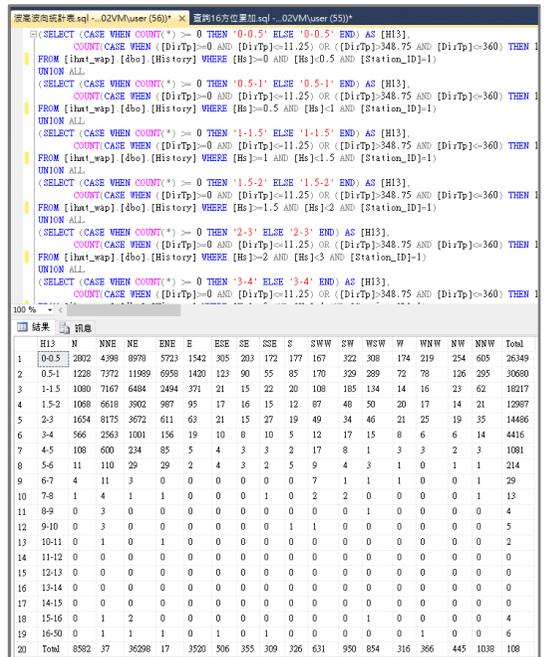


圖 2 以 SQL 內建指令完成聯合分佈百分比統計表

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。本系統在 Line 的應用程式(APP)已經建立一個專屬頻道，使用者可發送註冊碼至本系統的 Webhook 服務進行註冊，對於已註冊的使用者，當觀測值達到警戒值時，就會發出通知，讓使用者無需緊盯系統的畫面，也可以透過 Line APP 的通知機制(聲響或震動)，即時獲得此資訊，以利爭取應變處理時間。

港口	潮位	浪高	浪向	浪速	浪速(一)	浪速(二)	浪速(三)	浪速(四)
日期	11/29 22:00	11/29 22:00	11/29 22:00	11/29 22:00	11/29 22:00	11/29 22:00	11/29 22:00	11/29 22:00
風速	5kn	3kn	2kn	0kn	3kn	2kn	3kn	3kn
風向	東	東	北	北	北	北	北	北
浪高	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
浪向	21	13	17	36	10	10	11	13
浪速	4.5	4.0	4.5	5.4	5.8	5.8	6.1	6.1
浪速	東	東	東	東	東	東	東	東

圖 8 模擬資訊



圖 9 地圖模式

3.1.2 地圖模式

畫面顯示單一港口資訊，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 9。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「2」的左側圖示箭頭為平均風速的來向，右側數字為蒲氏風力級數，可以透過地圖的顯示，了解港區各位置的風力狀況；若使用手機瀏覽，則會顯示如圖 10 所示畫面。

本系統介接中央氣象局「氣象雲圖」與「雷達回波圖」資訊，如圖 11 與 12 所示，可透過地圖了解目前的氣象狀況。

介接港研中心各式模擬圖，並套疊在系統地圖上，包括「風速向量場分佈圖(圖 13)」、「水位分佈圖(圖 14)」、「波高分佈圖(圖 15)」、「波浪週期分佈圖(圖 16)」、「波向分佈圖(圖 17)」、「流速向量場分佈圖(圖 18)」、及「中尺度暴潮模式流速向量場分佈圖(圖 19)」等資料，另外也有各港區小比例尺的模擬成果圖，以提供較精確之推算結果，如「近岸波高分佈圖(圖 20)」與「近岸流速向量場分佈圖(圖 21)」。



圖 10 地圖模式-響應式網頁

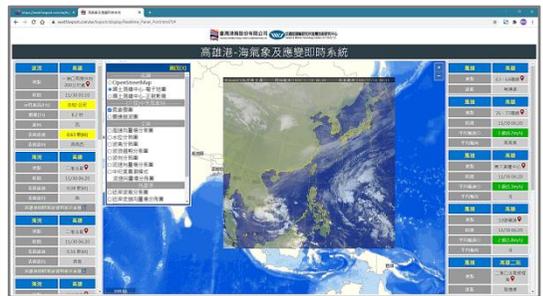


圖 11 系統套疊氣象雲圖



圖 12 系統套疊雷達回波圖

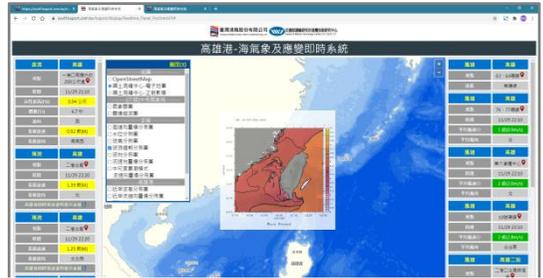


圖 16 波浪週期分佈圖

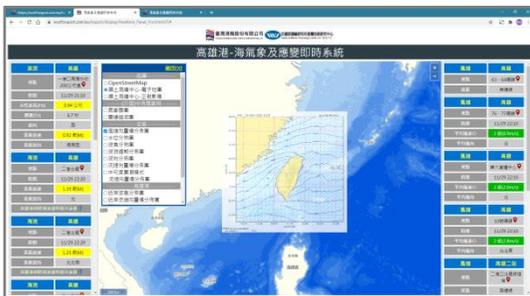


圖 13 風速向量場分佈圖

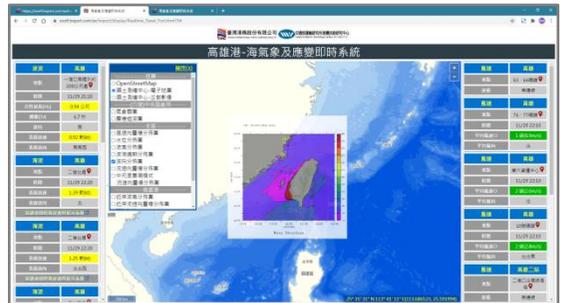


圖 17 波向分佈圖

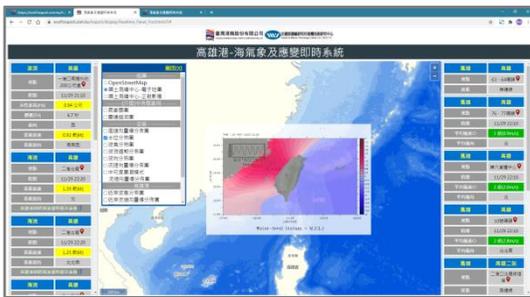


圖 14 水位分佈圖

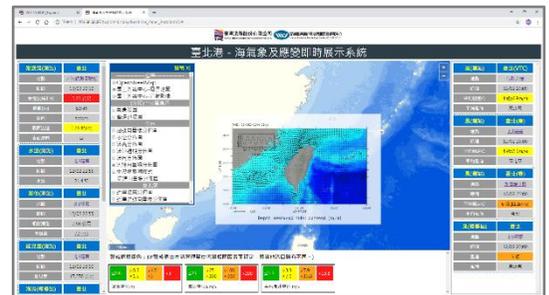


圖 18 流速向量場分佈圖

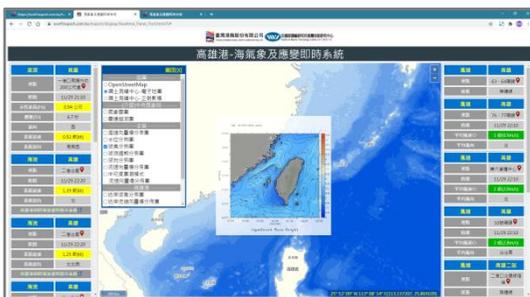


圖 15 波高分佈圖

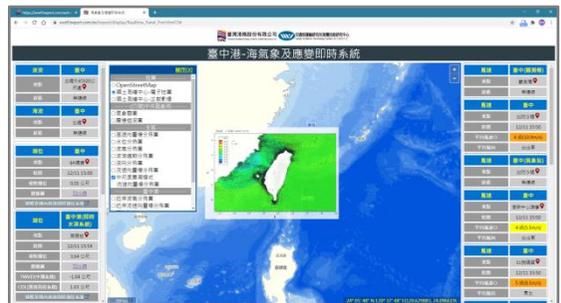


圖 19 中尺度暴潮模式流速向量場分佈圖

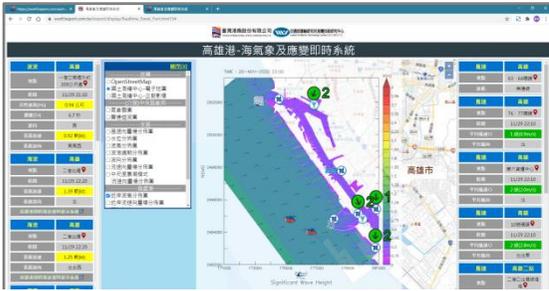


圖 20 近岸波高分佈圖



圖 23 聯合分佈百分比

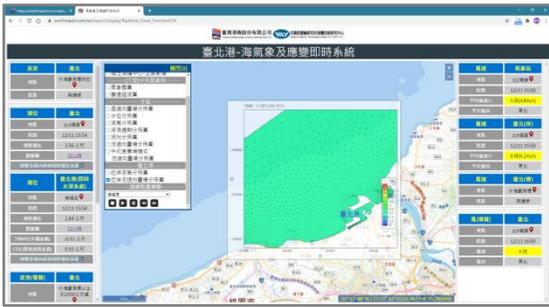


圖 21 近岸流速向量場分佈圖



圖 24 玫瑰圖

本系統在側向 ADCP 的顯示，如圖 22 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。

此外，亦可點擊聯合分佈百分比、玫瑰圖、歷線圖、颱風統計圖表等，即可顯示各項統計報表結果，如圖 23 至 26 所示。

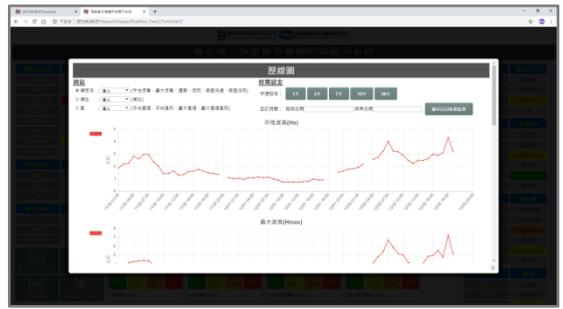


圖 25 歷線圖

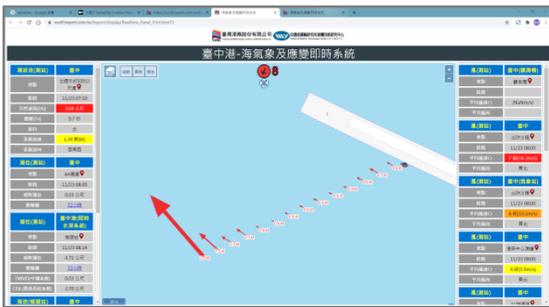


圖 22 側向 ADCP 之展示



圖 26 颱風歷線圖

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 27 之左圖)。同時當測站沒有資料時，也可發送訊息通知管理員(如圖 27 之右圖)。

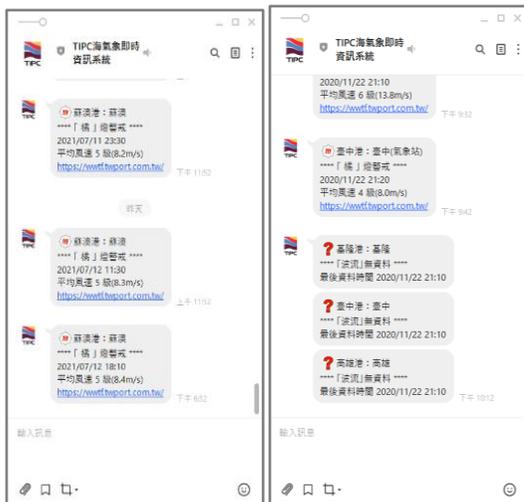


圖 27 Line 推播告警畫面

四、結論

本系統呈現海氣象觀測資料、數值模擬資訊、測站位置圖與相關統計圖表等，另外，也加入高雄港與臺中港的側向 ADCP 監測的資訊，將所有資訊綜合彙整於 GIS 圖台中，透過地圖呈現各測站的物理量，讓使用者可以了解港區各測站的海氣象狀況，並以燈號警示與訊息推播，讓使用者透過行動裝置獲得即時的通知，爭取應變處理時間，強化港務管理及災防應變效率。

此外，系統以地圖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，可以透過資訊樹，列表開啟或關閉所需的圖層，並以滑鼠拖曳、縮放來檢視資料，讓使用者

可以用簡單的方式，透過操作地圖檢視模擬資料，綜合研判未來海氣象變化，以提出防範災害的措施。

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，2019 年港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，2021 年。
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，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，2021 年。
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，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，2021 年。
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，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，2021 年。
5. LINE Corporation, LINE Developers, <https://developers.line.biz/zh-hant/docs/messaging-api/getting-started/#using-console>, 2021 年 5 月。

馬祖海域 AIS 與海氣象資訊整合運用

蔡世璿	交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
李俊穎	交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
林騰威	數位地球科技有限公司總經理
鄭采誼	數位地球科技有限公司駐點工程師
林志豐	連江縣港務處處長
陳登壽	連江縣港務處約僱人員

摘要

馬祖四鄉五島間彼此聯繫的交通仰賴海上藍色公路，除此之外，國內近年興起大型郵輪跳島旅遊，對於船舶航行和港口碼頭靠泊、靜穩安全皆有一定要求，使得港務管理單位對於掌握各項海氣象資訊之需求為之提升。

為使港務管理單位掌握船舶管理及海氣象資訊，本研究「馬祖海情資訊系統」整合船舶自動識別系統(Automatic Identification System, AIS)、海氣象現場觀測即時資訊以及數值模式計算資訊，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)，讓港務管理人員透過視覺化的地圖介面，快速掌握船舶動態、海氣象資訊以及碼頭船席與港外泊船區的即時水深時序變化，無論在管理海上交通船航行或大型郵輪進入港外泊船區的水深變化，都能透過此系統輔助決策，藉此提升海上航行安全。

一、緒論

「馬祖海情資訊系統」應用交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)及交通部中央氣象局的海氣象觀測與模擬資訊，滿足連江縣政府及旅客資訊服務之需求，達成海氣象資訊提供、防災應用、優化管理及航行安全之目標。

海上航行的安全與旅客乘船時的舒適度，與天氣及海況都有密切關係，若於船班航行前能夠掌握海氣象資訊，包含當下發生的即時海氣象觀測資訊與尚未發生的海象狀況(以海象模擬預測)，使旅客與船舶業者能即時準備與應變，如：加強船上貨物固定或提醒旅客服用暈船藥等。航行中，港務管理人員可透過無線電的呼叫，並以船舶 AIS 來監控船舶的動態。上述海氣象資訊若未整合於單一介面，除了旅客須開啟多個網頁才能得知所需資訊，港務管理人員更需要在值勤期間隨時查看好幾個系統畫面，才能完成任務，造成使用者不方便與負擔。

本研究針對馬祖各港區(南竿福澳碼頭、北竿白沙碼頭、西莒青帆碼頭、東莒猛澳碼頭、東引中柱碼頭)，整合即時海氣象觀測、海象模擬、船舶動態(AIS)、港區結構物等基本資料以及船班/公車/(飛機)航班等資訊服務，建置一套馬祖海情資訊系統，將各項資訊根據經緯度標註於 GIS 圖台，並以地圖呈現所有資訊，做為港務管理人員的決策輔助工具，也提供搭乘藍色公路的旅客瀏覽。

二、研究方法

2.1 使用工具

本研究採三層式網路架構(3-Tier Architecture)開發系統，此架構可確保區隔使用者與資料庫，增加主機與資料庫

的安全性；架構中的第一層架構為客戶端(Client)，讓使用者與遠端管控者以網站應用程式透過網際網路協定(TCP/IP)方式來瀏覽網頁。第二層架構為應用程式伺服器(Application Server)，客戶端透過應用程式進行資料查詢，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)等來存取馬祖海情資料庫相關資訊。第三層架構則是資料庫伺服器(Database Server)，依照應用程式伺服器的要求，透過GSN/VPN將馬祖海情資料庫數據，經由TCP/IP協定回應使用者相關資訊。

本案使用設計方法與使用工具及相關技術共分三大層面，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Google Maps、Bing Map以及內政部國土測繪中心、OpenStreetMap的地圖服務。

2.2 資料介接

本研究的系統資料以港研中心代辦設置之測站為主，介接中央氣象局所設置之測站為輔，應用資料如表1。

2.3 系統架構

本研究之海氣象資料經由4G行動通訊服務傳送至港研中心海氣象資料接收主機，再以專線發送至本研究的系統資料庫。此外，系統資料庫介接中央氣象局氣象開放資料平臺(Open Weather Data)海氣象資訊，定時擷取儲存於系統

資料庫。而AIS則是向交通部航港局申請介接，由航港局發送資料到系統資料庫；雷達回波圖與衛星雲圖則介接中央氣象局資料；海氣象模擬成果圖則介接港研中心資料；船班與航班等交通資訊，分別介接連江縣港務處「馬祖智慧港口服務系統」與交通部「公共運輸整合資訊流通服務平台」服務；各項資訊透過GIS技術建置「馬祖海情資訊系統」並呈現，另外也提供「多媒體船班資訊系統」供旅客於候船室觀看，系統架構如圖1。

表 1 資料介接一覽表

資料	來源
風速	1. 即時觀測：港研中心代辦設置(南竿、莒光、東引)、介接中央氣象局資料 OpenData 2. 模擬：港研中心提供(馬祖海域)
潮位	1. 即時觀測：港研中心代辦設置(南竿、莒光、東引) 2. 模擬：港研中心提供(馬祖海域)
波流	1. 即時觀測：港研中心代辦設置(南竿、莒光、東引)、介接中央氣象局OpenData資料 2. 模擬：港研中心提供(馬祖海域)
能見度	即時觀測：港研中心代辦設置(南竿、莒光、東引)
GIS底圖	內政部國土測繪中心、OpenStreetMap(開放源)
港區水深圖	港研中心代辦「馬祖港未來發展及建設計畫」成果
港區正射圖	港研中心代辦「馬祖港未來發展及建設計畫」成果
海圖	購買自海軍大氣海洋局
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
海氣象模擬成果圖	港研中心提供
AIS	介接交通部航港局
船班	介接連江縣港務處「馬祖智慧港口服務系統」
航班	介接交通部「公共運輸整合資訊流通服務平台」

三、研究成果

3.1 馬祖海情資訊系統

馬祖海情資訊系統以地理資訊系統 (GIS) 架構整合各式資訊(如圖 2)，共分為三大區塊，分別為左側各選單功能，中間為地圖(含各圖層)以及右側顯示海氣象觀測、模擬及海氣象資訊等。其中，地圖區塊彙整風速、AIS、即時水深等資訊，讓港務管理單位可從地圖檢視所有資訊，作為輔助決策系統。

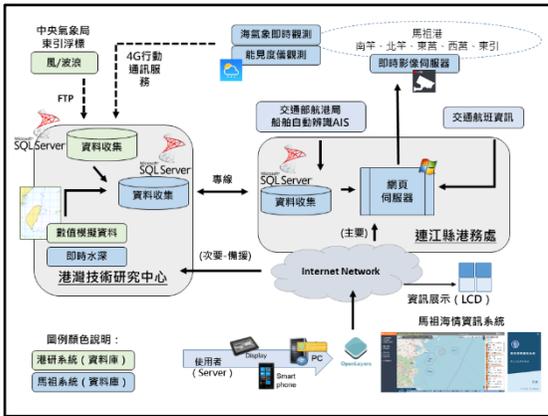


圖 1 系統架構

本系統以 Web GIS-Openlayers 整合展示各項資料，系統各項功能如表 2 所示：

表 2 GIS-Openlayers 系統功能

項次	系統功能		
1	底圖 切換	內政部 國土測繪中心	通用版電子地圖 正射影像混合圖
		OpenStreetMap	
2	海象 觀測 資料	風速計	風速、風向
		AWAC	波高、週期、波向 流速、流向
		潮位計	潮位
3	模擬 資料	風速、風向	
		波高、週期、波向	
		潮位	
4	船舶自動辨識系統(AIS)		
5	中央氣象局氣象雲圖、雷達回波圖		
6	港研中心「港灣環境資訊網」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、近岸流速向量分佈圖等)		



圖 2 馬祖海情資訊系統

中間的地圖區塊的圖層整合，包含即時水深、各式底圖、港研中心代辦執行各港正射影像圖與水深測量海底地形圖成果、海軍大氣海洋局海圖、介接中央氣象局氣象雲圖與雷達回波圖及介接港研中心各海氣象模擬成果等，並提供連續動畫呈現以及介接航港局的船舶動態 AIS。(如圖 3)



圖 3 中間地圖區塊功能

在地圖中可透過各式底圖切換為內政部國土測繪中心電子底圖、正射影像或 OpenStreetMap，其中除顯示地名以外，依經緯度將海氣象觀測儀器標示圖中，而風速風向資訊則在地圖中以圖示「」表示，左邊箭頭為平均風速的來向，右側數字則是蒲氏風力級數，顏色分別以港務管理單位定義的風力級數範圍，界定「綠」、「黃」、「橘」及「紅」不同燈色做為警戒值，如圖 4 所示。



圖 4 風速風向與燈號

本研究亦整合馬祖四鄉五島各碼頭的正射影像，其成果亦以圖塊的方式套疊至地圖區塊中，除陸地上的圖資以外，水底的水深地形測量則以隔年度的方式進行，完成馬祖四鄉五島各碼頭海域的水深測量，並將將水深測量成果展示在地圖上呈現(如圖 5)，使用中潮系統為基準，後續則利用觀測與預測潮位的結果轉化成即時水深資訊，供港務管理單位參考，即時水深在地圖中格式以「d7.5」表示，意思為深度(Depth)7.5 公尺，點擊字樣以後會顯示該處水深歷線圖，歷線圖中可同時顯示預測潮位與實測潮位(如圖 6)。另外，還有一般港務單位較為熟悉的海圖資訊(海軍大氣海洋局)，亦套疊於地圖區塊中供港務管理人員選擇應用。



圖 5 正射影像與水深地形測量成果

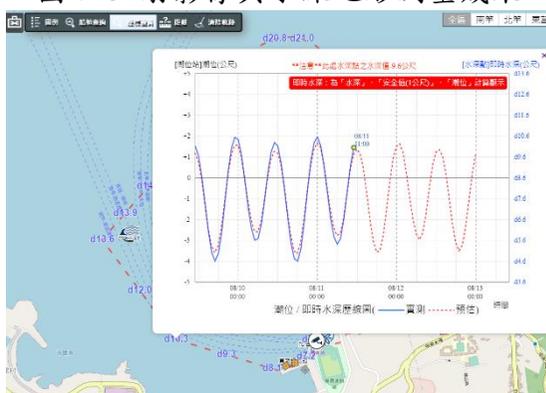


圖 6 即時水深與歷線圖

在大氣觀測與海洋模擬成果部分，則是介接中央氣象局雷達回波圖與衛星雲圖以及港研中心的風速向量分佈圖、水位分佈圖、波高分佈圖、波浪週期分佈圖、波向分佈圖、流速向量分佈圖，以及中尺度暴潮模式流速向量場分佈圖。以上圖資均可透過選單方式，設定連續播放 12 小時動畫成果，如圖 7 所示。



圖 7 圖層選擇清單

由於海上船舶資訊量龐大，為方便港務管理人員針對通勤於馬祖地區的船舶進行管理，特別設定「指定船舶功能」將行駛於馬祖各島與臺灣間的藍色公路優先呈現在地圖上，並依顏色區分不同船舶類型，以及符號呈現船隻是否有在移動，在地圖中除了可直接點擊船舶圖示查看船舶基本資料以外，並能在地圖上的工具列提供船舶查詢與定位、輸入坐標定位以及基本距離量測工具等，如圖 8 所示。

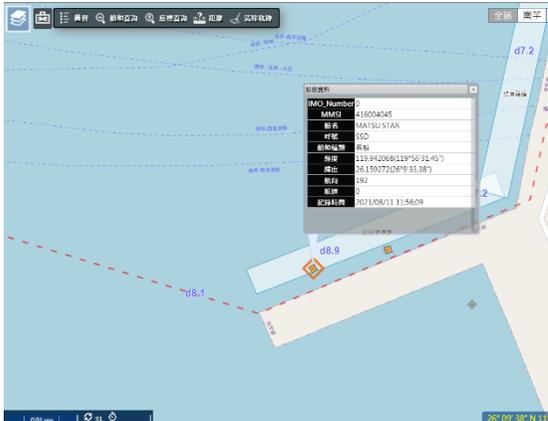


圖 8 船舶基本資料查詢功能

網頁右側資訊欄分別顯示海氣象的觀測、模擬及天氣資訊，其中，觀測與模擬的數值以港務單位設定的警戒門檻值，用綠、黃、橙、紅作為區分，以凸顯現場的海氣象狀況，作為港務管理單

位判斷海氣象狀況用途。觀測資訊包含風、波流、潮位及能見度，並能定位測站與顯示歷線圖。模擬的部分可使用時間軸，瀏覽特定時間後的模擬預測值，如圖 9 所示。

網頁左側的功能欄顯示海氣象觀測、海象模擬、警戒值與燈色、即時影像、新聞直播、交通資訊、藍色公路、船舶動態及港灣構造物。(如圖 10)

而網頁底部的跑馬燈則介接中央氣象局「氣象資料開放平臺」發布服務，顯示今明兩天之漁業氣象預報。



圖 9 右欄海氣象模擬資訊

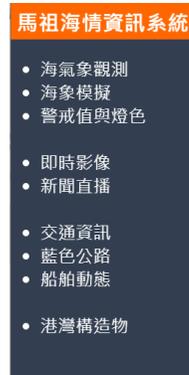


圖 10 左欄各選單

3.2 多媒體船班資訊系統

為了讓旅客在乘坐船舶前，能了解藍色公路目前或未來的海氣象天氣狀況，本研究透過多媒體看板，將海氣象資訊展示於候船室，讓旅客或一般民眾能更簡單的獲取海氣象資訊。多媒體看板左

側展示藍色公路路網，以及連江縣觀光旅遊局所製作的形象廣告，其中，各式客運船舶與港口的相對距離，在計算位置坐標後，標示於藍色公路路網圖上，供民眾與旅客預估船舶到達的時間；右邊則將天氣、海象以及船班時刻表進行輪播，下方則播放漁業氣象跑馬燈，如圖 11 所示。



圖 11 多媒體船班資訊系統

四、結論

「馬祖海情資訊系統」以 GIS 的介面將所有資訊整合在地圖介面上，讓使用者能透過地圖，快速地瀏覽海氣象觀測數據，尤其港區水深地形圖、即時水深以及即時水深歷線圖的加值服務，可了解港區碼頭的水深時間變化，有助於大型郵輪入港泊靠時的管制。而「多媒體船班資訊系統」分別提供南竿與北竿候船室使用，營運路線圖亦整合 AIS 並顯示疏運船舶的位置，讓旅客能了解等待的船班運行狀態。

本研究以 ICT 相關的技術，將海氣象資訊顯示在 GIS 圖台，透過地圖讓資訊更容易取得，並提供港務管理人員使用，強化港務管理與災防應變效率，俾利爭取應變處理時間。

參考文獻

1. 蔣敏玲、蘇青和、李俊穎、傅怡釗、劉清松、陳鈞彥、蔡世璿，「2019 年港灣環境資訊網海氣象觀測資料年

報(馬祖海域風浪潮流觀測資料)」，交通部運輸研究所，民國 110 年。

2. 謝明志、李俊穎、劉清松、林廷燦、林珂如、曾惠君，「108 年港灣環境資訊系統維護--功能提升」，交通部運輸研究所，民國 109 年。

「港灣季刊」徵稿簡訊

1. 本刊為提供國內港灣工程界同仁交換工作經驗與心得之園地，歡迎工程、學術界之同仁提供港灣工程相關之工程動態、實務、工程新聞、技術新知、地工技術、工程材料、營運規劃及其他有關之工程簡介或推動中之計畫等的報告、論著或譯述。
2. 投稿者應保證所投稿件無侵害他人著作權情事，如有違反，願就侵害他人著作權情勢負損害賠償責任，並對中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）因此肇致之損害負賠償責任。
3. 來稿經本刊接受刊登後，作者應附具著作授權同意書，同意非專屬授權予本刊做下述利用：
 - (1) 以紙本或是數位方式出版。
 - (2) 進行數位化典藏、重製、透過網路公開傳輸、授權用戶下載、列印、瀏覽等資料庫銷售或提供服務之行為。
 - (3) 再授權國家圖書館或其他資料庫業者將本論文納入資料庫中提供服務。
 - (4) 為符合各資料庫之系統需求，並得進行格式之變更。
4. 作者應保證稿件為其所自行創作，有權為前項授權，且授權著作未侵害任何第三人之智慧財產權。
5. 稿件每篇以八頁（含圖）（4000~5000字）以內為原則，稿酬從優；請附磁片或 E-mail，並請加註身分證字號及戶籍地址（含鄰、里）。
6. 本刊每年刊行 3 期，分別於 2 月、6 月、10 月出版。如蒙惠稿請於每期出版前 30 日寄交本刊。
7. 聯絡電話：(04)2658-7133 施慧敏
傳真電話：(04)2656-4415
E-mail：savx@mail.ihmt.gov.tw
8. 歡迎賜稿，來稿請寄：
435058 臺中市梧棲區中橫十路 2 號
交通部運輸研究所港灣技術研究中心「港灣季刊」編輯委員會 收