

港灣季刊

(原港灣報導季刊)

第 116 期

交通部運輸研究所
中華民國 109 年 6 月

「臺灣季刊」第 116 期

刊期頻率：季刊

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 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、楊美華、賴瑞應、蘇青和、李俊穎、
蔡世璿、周于楨

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：10485 臺北市中山區松江路 209 號 1F•電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 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、臺灣周遭海域船舶排放量比較1
- 吳義林 國立成功大學環境工程學系教授
楊榮元 國立成功大學環境工程學系研究助理
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
- 二、高頻陣列雷達訊號辨識船舶演算法之應用9
- 錢 樺 國立中央大學水文與海洋科學研究所副教授
陶瑞全 國立中央大學水文與海洋科學研究所博士生
蘇青和 交通部運輸研究所科長
許義宏 交通部運輸研究所副研究員
- 三、軌道扣件缺失辨識系統之建置研究 20
- 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研究員
黃維信 大同大學媒體設計系教授
謝尚琳 大同大學資訊工程系副教授
洪瑋宏 大同大學資訊工程系研究生
李明德 大同大學媒體設計系研究員
- 四、臺東海岸公路浪襲預警系統精進與維運 33
- 陳冠宇 國立中山大學海洋科學系教授
陳鈞彥 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
林欣妮 國立中山大學海洋科學系兼任研究助理
- 五、中彰海域波流數值推算研究 43
- 傅怡釗 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
陳鈞彥 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
張君名 丹麥水利研究所高級工程師
- 六、海洋陣列雷達應用於臺中港海象觀測之探討 53
- 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

七、臺北港港域漂沙機制分析 65

- | | |
|-----|-----------------------|
| 劉勁成 | 國立交通大學土木工程學系博士後研究員 |
| 陳蔚偉 | 國立交通大學土木工程學系博士後研究員 |
| 張憲國 | 國立交通大學土木工程學系教授 |
| 薛憲文 | 國立中山大學海洋環境及工程學系教授 |
| 許弘莒 | 國立中山大學海洋環境及工程學系副教授 |
| 劉明鑫 | 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員 |

臺灣周遭海域船舶排放量比較

吳義林 國立成功大學環境工程學系教授
楊榮元 國立成功大學環境工程學系研究助理
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

本研究採用交通部運輸研究所港研中心介接航港局之船舶自動辨識系統(Automatic Identification System, AIS)資料以推估臺灣周遭海域船舶之排放量，依據 2013 年與 2016 年 AIS 資料顯示，航行於臺灣周遭海域之船舶數每日約 3,000 艘左右，其中以散裝船、貨櫃船與油輪等三種類型為主要船種，而總主引擎功率則約在 35GW ~ 40 GW 之間。

結合 AIS 資料中船舶之船舶識別碼、位置、即時船速與活動時間等資訊與勞氏資料庫，以每艘船舶軌跡線法計算推估臺灣周遭海域船舶之排放量，結果顯示 2013 年臺灣周遭海域船舶之平均每日粒狀物、硫氧化物與氮氧化物排放量分別為 264 噸、1,875 噸與 2,923 噸；2016 年結果則分別為 275 噸、1,943 噸與 2,997 噸。

一、前言

當前世界各國經濟活動互動頻繁且合作密切，遠洋船舶貨運肩負著在國際間交流的重任，因船舶貨運伴隨而來的空氣污染物排放問題也愈形嚴重。因而隨著近年來工業以及經濟快速的發展，經由船舶以及工業發展所排放的空氣污染物，已受到全球日益的關切。

然而國內港埠活動及船舶排放之空氣污染物，長期以來未被列入環保管制項目重點，但依據國內外研究顯示，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，尤其是硫氧化物(SO₂)與氮氧化物(NO_x)最為顯著。本研究目的即在進行 2013 年及 2016 年臺灣周遭海域船舶排放量比較與探討。

二、文獻回顧

根據環保署公告之全國空氣污染物排放清冊(TEDS)9.0 版，顯示港埠相關活動於 2013 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 1.54%、2.66%、29.3%、7.91%、0.26%與 0.56%；又根據最新 TEDS10.0 版顯示，港埠相關活動於 2016 年之懸浮微粒、細懸浮微粒、硫氧化物、氮氧化物、非甲烷碳氫化合物與一氧化碳排放量佔全國排放量之比例依序為 2.28%、4.26%、26.2%、8.72%、0.21%與 0.51%。

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四分之一，而 NO_x與 PM_{2.5}等污染物排放則皆有增加。

為了因應細懸浮微粒之管制，環保署於 2012 年 5 月 14 日增訂細懸浮微粒周界空氣品質標準之 24 小時值與年平均值分別為 35 µg/m³與 15 µg/m³，又於 2015 年 11 月 17 日頒布「空氣品質嚴重惡化緊急防制辦法」部分修正。

三、研究方法

本研究透過臺灣海域船舶自動辨識系統(AIS)抓取船舶當時航行的軌跡訊息，利用該系統提供之船舶即時動態如船速、座標、航行狀態等資訊，應用洛杉磯港研究之船舶排放量計算公式，推估海域船舶之排放量資料。

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：

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

式中 E 為引擎的排放量(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)。

其中，所需要的能量亦可藉由下列公式推估之：

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

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：

$$\text{LF} = (\text{AS} / \text{MS})^3 \dots\dots\dots (3)$$

式中 AS 為船舶實際船速(節)；MS 為船舶最大船速(節)。

3.2 排放係數

主引擎的排放係數與引擎的製造年份、引擎種類以及引擎轉速的快慢有關，如表 1 及表 2。柴油引擎依照引擎的製造年份，由於 2000 年以前國際海事

組織(International Maritime Organization, 簡稱 IMO)並未規範船舶引擎的環保標準，此為 0 期引擎(Tier 0)，以 2000 年至 2010 年間生產的引擎為 1 期引擎(Tier 1)，而 2011 年至 2015 年生產的引擎則為 2 期引擎(Tier 2)，共區分為 3 個期別。

依照引擎的最大轉速又可區分為轉速低於 130 rpm 的慢速引擎(Slow Speed Diesel)以及轉速大於 130 rpm 的中速引擎(Medium Speed Diesel)，一般轉速介於 400~2000 rpm 之間。

另外，亦區分出氣體渦輪機引擎(Gas Turbine)及蒸汽渦輪引擎(Steam Turbine)兩種。一般船舶使用含硫量 2.7% 之重油(HFO)的排放係數，若船舶進港之前即將重油切換為低硫柴油，則需使用低硫油之係數，另外再根據硫含量以不同的油料校正係數以校正之。

表 1 含硫量 2.7% 排放係數(g/kW·h)

引擎種類	期別	出廠年份	NOx	SOx	PM _{2.5}
慢速引擎	Tier 0	≤ 1999	18.1	10.5	1.20
中速引擎	Tier 0	≤ 1999	14.0	11.5	1.20
慢速引擎	Tier 1	2000~2010	17.0	10.5	1.20
中速引擎	Tier 1	2000~2010	13.0	11.5	1.20
慢速引擎	Tier 2	2011~2015	15.3	10.5	1.20
中速引擎	Tier 2	2011~2015	11.2	11.5	1.20
氣體渦輪	-	all	6.1	16.5	0.04
蒸汽渦輪	-	all	2.1	16.5	0.64
輔助引擎	Tier 0	≤ 1999	14.7	12.3	1.20
	Tier 1	2000~2010	13.0	12.3	1.20
	Tier 2	2011~2015	11.2	12.3	1.20
鍋爐	-	-	2.1	16.5	0.64

資料來源：Aldrete et al. (2013)。

表 2 含硫量 0.5% 排放係數(g/kW·h)

引擎種類	期別	出廠年份	NOx	SOx	PM _{2.5}
慢速引擎	Tier 0	≤ 1999	17.0	1.9	0.35
中速引擎	Tier 0	≤ 1999	13.2	2.1	0.35
慢速引擎	Tier 1	2000~2010	16.0	1.9	0.35
中速引擎	Tier 1	2000~2010	12.2	2.1	0.35
慢速引擎	Tier 2	2011~2015	14.4	1.9	0.35
中速引擎	Tier 2	2011~2015	10.5	2.1	0.35

引擎種類	期別	出廠年份	NO _x	SO _x	PM _{2.5}
氣體渦輪	-	all	5.7	3.1	0.01
蒸氣渦輪	-	all	2.0	3.1	0.18
輔助引擎	Tier 0	≤ 1999	13.8	2.3	0.35
	Tier 1	2000~2010	12.2	2.3	0.35
	Tier 2	2011~2015	10.5	2.3	0.35
鍋爐	-	-	2.0	3.1	0.18

資料來源：Aldrete et al. (2013)。

當船舶使用不同的引擎燃油時，其污染物的排放量便會隨之變化，主要係油品含硫量的差異會造成 SO₂ 排放量不同所致；前述之主引擎、輔助引擎及鍋爐的排放係數，均為含硫量 2.7% 的重油或 0.5% 的柴油為基準，故使用低硫燃油時，需乘上燃油校正係數，如表 3 所示。

若計算時採用排放係數表中含硫量 2.7% 的係數，則切換為低硫柴油時，直接乘上校正係數表中相對應的燃油校正係數即可；以含硫量 1.0% 之計算方式為例，如 NO_x 輔助引擎 2.7% 時為 14.7，0.5% 時為 13.8，則換算 1.0% 時即為 14.4；SO_x 輔助引擎 2.7% 時為 12.3，0.5% 時為 2.3，則換算 1.0% 時即為 4.6，此時再乘上燃油校正係數之 NO_x 為 1.0，SO_x 則為 0.370，即為該船舶使用 1.0% 含硫量之排放量。

表 3 燃油校正係數

硫含量(%)	NO _x	SO _x	PM
2.70	1.00	1.000	1.00
1.00	1.00	0.370	0.73
0.50	0.94	0.185	0.25
0.10	0.94	0.037	0.17

資料來源：Aldrete et al. (2012、2013)。

一般來說，柴油引擎在低負載或非常高的負載時，其引擎效率並不好，若船舶引擎負載小於 20% 時，則上述方程式會有少許誤差，故需另外乘上一個低負載係數加以修正。EEIA(Energy and

Environmental Analysis, Inc.)在其研究報告中建置一個計算柴油引擎在低負載運轉時，例如在港區內的移動及調度時引擎的排放係數校正公式。由於柴油引擎在低負載時比較沒有效率，故雖然引擎廢氣單位時間的總排放量在低負載時較低，然而排放係數實際上卻是增加的。

為方便推估時使用，故將此公式推估出 1% ~ 20% 的值，再除以 20% 時的值，以作為低負載時的校正係數(LLA, Low-Load Adjustment foactor)，實際計算時，只要將結果再乘以校正係數即可得到正確的推估值。低負載校正係數如表 4，由於主引擎的負載下限訂為 2%，因此表中僅列出 2% ~ 20% 之間的係數。

表 4 低負載校正係數

Load	NO _x	SO _x	PM	Load	NO _x	SO _x	PM
20%	1.00	1.00	1.00	10%	1.22	1.00	1.38
19%	1.01	1.00	1.02	9%	1.27	1.00	1.48
18%	1.02	1.00	1.04	8%	1.35	1.00	1.61
17%	1.03	1.00	1.06	7%	1.45	1.00	1.79
16%	1.05	1.00	1.08	6%	1.60	1.00	2.04
15%	1.06	1.00	1.11	5%	1.83	1.00	2.44
14%	1.08	1.00	1.15	4%	2.21	1.00	3.09
13%	1.11	1.00	1.19	3%	2.92	1.00	4.33
12%	1.14	1.00	1.24	2%	4.63	1.00	7.29
11%	1.17	1.00	1.30				

資料來源：Aldrete et al. (2013)。

四、排放量比較

本研究預設船舶主引擎使用含硫量 2.7% 之 HFO 重油，輔助引擎及鍋爐則使用 0.5% 之 MDO 柴油，使用 2013 年 365 天及 2016 年 366 天之 AIS 資料，計算臺灣周遭海域船舶污染物之排放量推估。由於大部分漁船均無裝置 AIS 系統，故 AIS 排放量計算部分並未包含無 AIS 裝置之船舶載具。

4.1 船舶種類分布

若將海域船舶種類分成散裝船、貨櫃船、一般貨輪、其他、冷藏船、滾裝滾卸船、油輪、近海船、渡輪及混和船等十個船種，統計 2013 年與 2016 年 AIS 船舶每日平均的船種分布狀態，其結果如圖 1 所示。

在各船舶種類中，2013 年日平均船舶數最高的船舶種類為散裝船 828.6 艘，其次為貨櫃船 706.9 艘，第三高則為油輪 693.8 艘，各船種日平均船舶數總和則為 2,893.4 艘；2016 年日平均船舶數最高的船舶種類為散裝船 831.9 艘，與 2013 年相比船舶數增加百分比 0.4%，其次為貨櫃船 765.7 艘，船舶數百分比增加 8.3%，第三高則為油輪 746.4 艘，船舶數百分比增加 7.6%，各船種日平均船舶數總和則為 3,062.8 艘，船舶數百分比增加 5.9%。

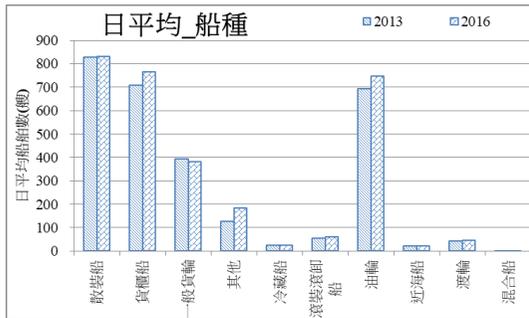


圖 1 船舶種類分布

依據洛杉磯港研究，船舶排放量公式中，船舶引擎功率為排放量計算之主要參數；而船速影響負載，航行距離則影響活動強度，皆於排放量計算式中表現其影響高低。若同前述船種分布，將船舶種類分成散裝船、貨櫃船、一般貨輪、其他、冷藏船、滾裝滾卸船、油輪、近海船、渡輪及混和船等十種，統計 2013 年與 2016 年 AIS 每日船舶的引擎

功率分布狀態，將每日各船種之引擎功率加總並平均，其結果如圖 2 所示。

2013 年日平均引擎功率最高的船舶種類為貨櫃船 19.01GW，其次為散裝船 7.88GW，第三高則為油輪 5.28GW，各船種日平均引擎功率總和則為 35.4GW；2016 年日平均引擎功率最高的船舶種類為貨櫃船 20.83GW，與 2013 年相比引擎功率百分比增加 9.6%，其次為散裝船 8.30GW，船舶數百分比增加 5.3%，第三高則為油輪 5.44GW，船舶數百分比增加 3.0%，各船種日平均引擎功率總和則為 38.2GW，引擎功率百分比增加 8.0%。

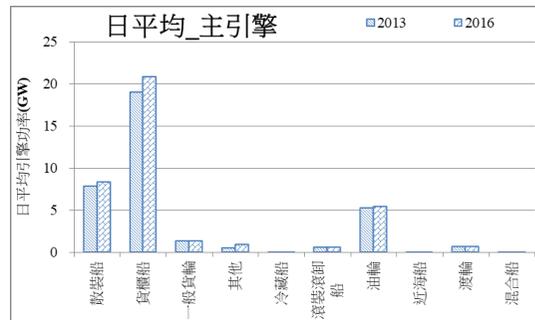


圖 2 主引擎功率分布

4.2 船舶排放量

若船舶於海上航行使用到主引擎時，使用含硫量 2.7%(HFO)之燃油，而於港區行進使用輔助引擎及鍋爐時，則使用含硫量 0.5%(MDO)之燃油，應用洛杉磯港與美國環保署報告中提供之排放係數、負載、燃油校正係數等參數，計算推估 2013 年全年船舶排放 NO_x、SO_x 及 PM 總排放量依序為 1,052,219 噸、675,027 噸及 95,098 噸，日平均排放量則為 2,923 噸、1,875 噸及 264 噸。2016 年資料則依序為 1,088,681 噸、705,843 噸及 99,756 噸，日平均推估排放量則為 2,997 噸、1,943 噸及 275 噸。

依照 2013 年與 2016 年排放量推估結果，統計日平均排放量，顯示 2016 年 NO_x、SO_x 及 PM 排放量依序增加 2.5%、3.6% 及 4.0%，如表 5，各污染物種增加之比例均未超過 5%。

表 5 日平均排放量增加百分比

	NO _x	SO _x	PM
2013 年	2923	1875	264
2016 年	2997	1943	275
增加百分比	2.5%	3.6%	4.0%

4.2.1 逐日排放量

如前述排放量計算方式，計算 2013 年臺灣海域船舶之全年每日排放量，如圖 3 所示，其中 NO_x 推估之排放量介於 798.5 ~ 5,283.3 噸之間，最高為 1 月 29 日之 5,283.3 噸，次之為 8 月 20 日之 4,928.6 噸，第三高則為 8 月 27 日之 4,805.0 噸；SO_x 推估排放量介於 460.3 ~ 3,511.2 噸之間，最高為 1 月 29 日之 3,511.2 噸，次之為 8 月 27 日之 3,179.5 噸，第三高則為 8 月 20 日之 3,160.4 噸；PM 推估排放量介於 67.7 ~ 488.6 噸之間，最高為 1 月 29 日之 488.6 噸，次之為 8 月 20 日之 447.3 噸，第三高則為 8 月 27 日之 438.2 噸。

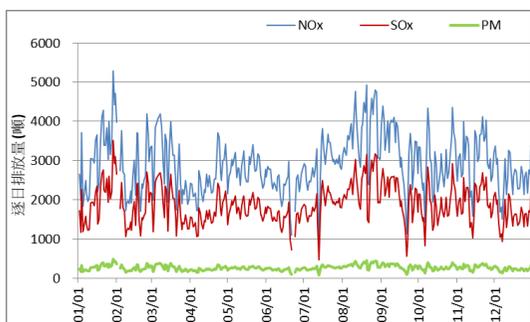


圖 3 2013 年逐日排放量變化

同 2013 年排放量計算方式，計算 2016 年臺灣海域船舶之全年每日排放

量，如圖 4 所示，其中 NO_x 推估之排放量介於 500.7 ~ 5,322.0 噸之間，最高為 11 月 17 日之 5,322.0 噸，次之為 9 月 29 日之 5,098.1 噸，第三高則為 8 月 10 日之 5,030.7 噸；SO_x 推估排放量介於 341.2 ~ 3,474.0 噸之間，最高為 11 月 17 日之 3,474.0 噸，次之為 8 月 10 日之 3,440.6 噸，第三高則為 9 月 29 日之 3,312.9 噸；PM 推估排放量介於 45.1 ~ 494.8 噸之間，最高為 11 月 17 日之 494.8 噸，次之為 9 月 29 日之 474.5 噸，第三高則為 8 月 10 日之 471.3 噸。

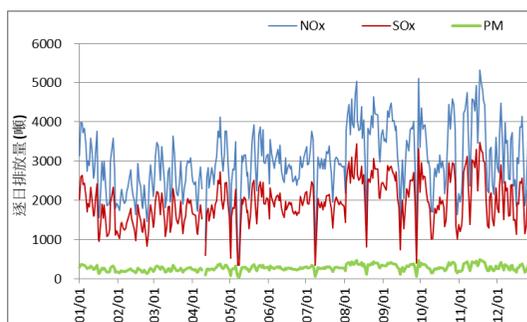


圖 4 2016 年逐日排放量變化

4.2.2 一周每日平均變化

將 2013 年 365 天中所有的星期一數值加總並平均，同理，依序加總並平均一周內每一天的數值，彙整成一周之變化並將一周排放量變化繪製如圖 5 所示。其中 NO_x 推估之排放量介於 2,688.4 ~ 3,180.7 噸之間，最高為星期二之 3,180.7 噸，次之為星期一之 3,082.3 噸，第三高則為星期日之 2,940.6 噸；SO_x 推估排放量介於 1,717.6 ~ 2,045.6 噸之間，最高為星期二之 2,045.6 噸，次之為星期一之 1,977.7 噸，第三高則為星期日之 1,885.9 噸；PM 推估排放量介於 242.5 ~ 288.3 噸之間，最高為星期二之 288.3 噸，次之為星期一之 279.0 噸，第三高則為星期日之 265.3 噸。

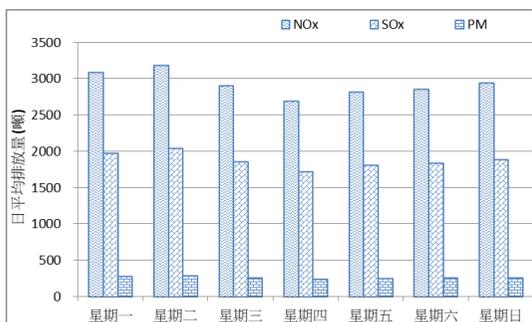


圖 5 2013 年一周逐日變化

如前述，將 2016 年一周排放量變化繪製如圖 6 所示，其中 NO_x 推估之排放量介於 2,915.4 ~ 3,074.9 噸之間，最高為星期四之 3,074.9 噸，次之為星期三之 3,067.6 噸，第三高則為星期五之 3,027.2 噸；SO_x 推估排放量介於 1,906.9 ~ 1,994.3 噸之間，最高為星期四之 1,994.3 噸，次之為星期五之 1,962.1 噸，第三高則為星期三之 1,959.2 噸；PM 推估排放量介於 267.0 ~ 281.6 噸之間，最高為星期四之 281.6 噸，次之為星期三之 279.9 噸，第三高則為星期五之 277.7 噸。

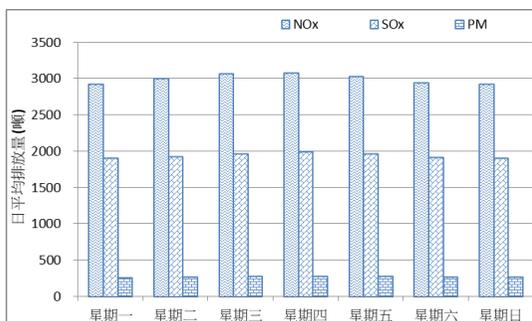


圖 6 2016 年一周逐日變化

4.2.3 逐月日平均變化

將前述兩年之船舶污染物排放量，逐月將每一個月之數值加總並平均，彙整成逐月變化，並將 2013 年逐月排放量變化繪製如圖 7 所示，其中 NO_x 推估之排放量介於 2,362.9 ~ 3,742.5 噸之間，最

高為八月之 3,742.5 噸，次之為九月之 3,241.0 噸，第三高則為一月之 3,181.8 噸；SO_x 推估排放量介於 1,520.9 ~ 2,396.8 噸之間，最高為八月之 2,396.8 噸，次之為九月之 2,066.5 噸，第三高則為一月之 2,038.2 噸；PM 推估排放量介於 212.9 ~ 336.9 噸之間，最高為八月之 336.9 噸，次之為九月之 292.0 噸，第三高則為一月之 288.3 噸。

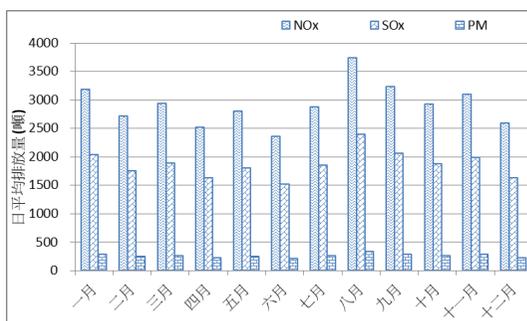


圖 7 2013 年逐月變化

如前述，將 2016 年逐月排放量變化繪製如圖 8，其中 NO_x 推估之排放量介於 2,190.8 ~ 3,786.4 噸之間，最高為八月之 3,786.4 噸，次之為十一月之 3,582.3 噸，第三高則為九月之 3,364.2 噸；SO_x 推估排放量介於 1,392.0 ~ 2,509.3 噸之間，最高為八月之 2,509.3 噸，次之為十一月之 2,311.4 噸，第三高則為九月之 2,209.8 噸；PM 推估排放量介於 198.4 ~ 352.6 噸之間，最高為八月之 352.6 噸，次之為十一月之 328.3 噸，第三高則為九月之 311.7 噸。

綜合兩年資料顯示，12 月、1 月至 7 月期間，NO_x 排放量約低於 3,000 噸，8 月至 11 月則約高於 3,000 噸，有較高之排放量，研判與周遭國家之經濟活動有相關。

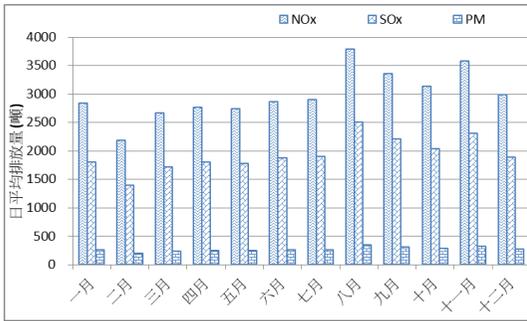


圖 8 2016 年逐月變化

五、結論

經統計 2013 年及 2016 年兩年之船舶數與引擎功率，其增加之比例總合介於 5% ~ 10% 之間，且各污染物種排放量亦有微幅上升之趨勢，但其增加之比例均未超過 5%。

顯示近年來因為經濟發展因素，船舶的噸位相較於先前的船隻有越來越大的趨勢，使航行所需的引擎功率也相對的增加；雖然航行於海上的船舶數增加，但由於新船引擎的燃燒效率更好，故近年來船舶數雖然增加，但船舶污染物排放量並未隨著船舶數等比例增加。

將臺灣周遭海域船舶排放量資料搭配最新之全國空氣污染物排放清冊，建置空氣品質模式，如三維網格 CMAQ 模擬之排放源基本資料，透過排放量預測係數機制，未來將可預測空氣品質的變化情形，以因應事先預防之對策，供交通部、航港局、臺灣港務公司、環保署與縣市政府等機關參考，以改善因船舶及港區活動造成之空污影響，擬定相關長期防制對策與短期因應措施。

參考文獻

1. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2007) Port of L

os Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2005. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.

2. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Kristiansson, J., and Wells, S. (2007) Puget Sound maritime air emission inventory. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
3. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2011) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2010. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
4. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2012) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2011. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
5. Aldrete, A., Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Muller, R. (2012) 2011 PUGET SOUND MARITIME AIR EMISSIONS INVENTORY. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
6. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2013) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2012. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
7. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2014) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2013. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
8. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2015) Port of Los Angeles Inventory of

- f Air Emissions for Calendar Year 2014. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
9. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2015) Port of Los Angeles Inventory Highlights 2014. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
 10. 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.
 11. 葉雨松、林清和、許真瑜(2015),「高雄港區空氣污染擴散與監測系統規畫之研究」,交通部運輸研究所,MO TC-IOT-103-HIEB002。
 12. 環保署(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。

高頻陣列雷達訊號辨識船舶演算法之應用

錢 樺 國立中央大學水文與海洋科學研究所副教授
陶瑞全 國立中央大學水文與海洋科學研究所博士生
蘇青和 交通部運輸研究所科長
許義宏 交通部運輸研究所副研究員

摘要

本研究應用高頻雷達訊號船舶辨識演算法，於臺中港北防沙堤附近建置之海洋高頻陣列雷達系統進行測試與評估。演算法主要使用調適性偵測法(Adaptive Detection method)與調適性船舶偵測法(Adaptive Ship Detection method)，再使用固定錯誤警報率過濾法中的最大平均固定錯誤警報率以及雜訊測試，從偵測法的結果中找出更正確的船舶位置，過濾結果良好。而船舶軌跡辨識使用統計距離門計算，結果則易受雜訊干擾及資料缺漏而影響呈現品質。

根據高頻雷達、微波雷達與整合船舶自動識別系統(Automatic Identification System, AIS)之船舶尺寸、方向、距離等比較，撇除訊號干擾過強的部分，高頻雷達船舶偵測結果良好，未來可將高頻雷達偵測資料與船舶自動識別系統互補，提升船舶監測系統的準確性，加強船舶航行安全管理。

一、前言

雷達早期發展主要應用於目標物探測，一般常用於民用航海的微波(Microwave)雷達，波長為公分等級，其發射電磁波在大氣中傳遞路徑為直線，受地球表面曲率限制，海面目標物探測距離與雷達架設高程有關，因此一般難以探測超越視距外的目標物，僅能進行視距內的探測。高頻(High Frequency)電磁波的傳遞，波長為公尺等級，在海氣

交界面會產生重複性的折射，使電磁波得以沿著海洋表面的曲面前進，探測視距外的目標物。

高頻雷達頻率介於 3~30MHz，觀測距離超過 200 海里(約 370 公里)(Dzvonkovskaya and Rohling, 2006)。高頻雷達之 200 海里觀測範圍特性可應用於多方面領域，包含船隻偵測、救難搜尋、汙染物分布、漁業與海洋學，亦適用於聯合國海洋法公約(United Nations Convention on the Law of the Sea)建立 200 海里之專屬經濟海域(Exclusive Economic Zone, EEZ)的國家，用以偵測與追蹤經濟海域內的船隻活動(Dzvonkovskaya and Rohling, 2007; Ponsford and Wang, 2010)。

臺中港為配合行政院離岸風電發展規劃，預期未來離岸風電的施工與維運都將提升臺中港船隻進出頻度，因此提高航道安全、避免事故與港埠有效管理是必要工作，而船隻動態監測即為首要之務。臺中離岸風電場址海域距離海岸在 20 公里以上，一般微波雷達觀測距離約在 20 公里以內，高頻雷達則可超越此距離限制。另外高頻雷達屬持續發射與接收形式，發射功率遠較一般脈衝式微波雷達為低，本研究採用高頻雷達作為目標物探測的工具。

本研究應用高頻雷達訊號船舶辨識演算法，於臺中港北防沙堤附近建置之海洋高頻陣列雷達系統進行測試與評估，未來可將高頻雷達偵測資料與船舶自動識別系統互補，提升船舶監測系統準確性，加強船舶航行安全管理。

二、雷達資料說明

2.1 都卜勒距離譜

本研究採用高頻陣列雷達觀測系統，都卜勒距離譜 (Doppler-Range Spectrum) 為高頻線性調變雷達最初階的觀測產品，基於都卜勒距離譜，後續可推求包括船舶位置、表面海流、波浪等參數。

都卜勒距離譜計算過程，是將各天線元所接收的回波訊號與發射訊號進行混頻與降頻，得到中頻訊號頻率差值，由於發射頻率為線性調變，因此頻率差值與電磁波傳遞時間有關，從而可用以作為目標物距離之指標。目前的線性調變掃頻頻寬為 300 kHz，對應徑向解析度為 500 m。實際雷達系統中，每一支接收天線元感測之回波訊號經電路混頻之後，以採樣頻率 740 Hz 類比數位轉換器轉為離散時間序列，並以 I、Q 的形式紀錄。

回波強度（振幅）與相位可分別由 I、Q 訊號求得，考慮同一距離元上所反射的訊號呈現時間的週期性震盪，此為目標物影響造成的都卜勒頻偏（單位時間的相位變化）。訊號處理上先將 I、Q 複數訊號進行第一次的傅立葉轉換，由時間域轉換為頻率域，再將頻率找到對應之距離。每一個距離上對應之訊號強度實際上是複數型態的傅立葉係數，據此，進一步再對於各距離元之複數時序列進行第二次的傅立葉轉換，得到對應於都卜勒頻偏上的回波強度之都卜勒譜，代表在不同都卜勒頻偏下的雷達回波強度。每一個接收天線上每一個距離元上都可以計算出都卜勒譜，稱為都卜勒距離譜，是高頻線性調變雷達初階最主要的觀測結果產品。如圖 1 所示，縱軸為頻率對應的距天線元距離，橫軸為都卜勒頻偏，顏色為回波強度，譜上可清楚見到兩個能量的峰值，稱之為一階峰，是海面波浪布拉格背向散射下的結

果。由於每一個接收天線都是全向性的，所得到的都卜勒距離譜並沒有指定方位，要能探測方位，必須利用到多支天線接收的訊號進行波束合成 (Beam forming)，而方位角的解析度與天線陣列中天線的位置與數量有關。

臺中港海洋高頻陣列雷達的天線數目為 16 支，產出的訊號經過傳統波束合成後，方位角的解析度約為 8 度。再從每一個方位角之都卜勒距離譜找出船舶訊號，並提供其船舶位置資訊。

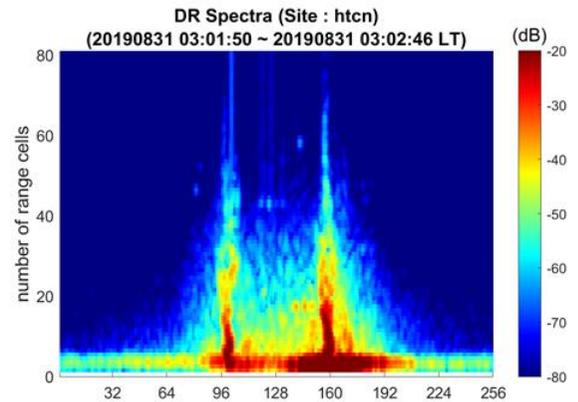


圖 1 都卜勒距離譜

2.2 雷達雜訊特徵

為有效且精準的辨識船舶訊號，過濾船舶訊號以外之雜訊是一項重要工作。高頻雷達訊號因雷達頻率、輻射功率、物體表面特性、物體截面積大小、海面粗糙度與現場環境條件等許多因素而影響 (Ponsford and Wang, 2010)。根據 Fernandez et al.(2001)，解析高頻雷達回波訊號中之船隻訊號，容易因陸地、電離層游離與海面散射等因素所干擾及錯誤辨認。根據 Dzvonnkovskaya and Rohling(2006)，高頻雷達之雜訊水平 (noise level) 主要受外界環境雜訊影響，並根據不同的雜訊特徵對雷達訊號有相對應不同的影響。

將臺中港高頻雷達訊號做長時間繪製如圖 2 所示，時間為 108 年 1 月 17 日至 3 月 9 日，可以發現幾點雜訊特徵：

- (1) 每天白天固定會有大約 6 個小時背景雜訊增加的現象，推估為日照所造成電離層游離化，雷達訊號經過電離層折射後所造成雜訊增加。
- (2) 距離約 2-4 公里處常有強雜訊，推估為天線周邊離岸風力發電之風機葉扇旋轉導致雷達訊號產生都卜勒效應。
- (3) 8、16 公里處也有些固定雜訊，因圖中之距離是由線性調變的頻率去推算，亦有可能受到現實物體外或其他電磁波干擾之因素影響，目前推估可能與附近臺中國際機場通訊影響有關。

以上幾點背景雜訊來源為本研究過濾雜訊過程之重點項目，除了主要的波浪干擾需要過濾外，後續過濾法門檻之選擇、辨識成效的好壞也會以這幾項雜訊做為參考與評估依據。

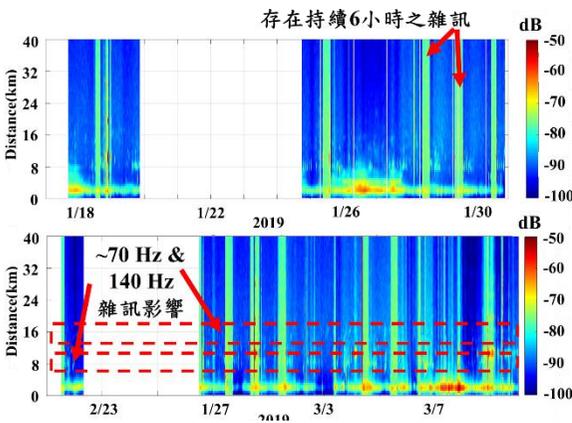


圖 2 臺中港高頻雷達強度時序列圖

三、船舶辨識演算法

本研究第一步驟以 Roarty et al. (2010)的概念為基礎，從較長期的觀測資料中，統計釐清波浪散射訊號特性以及環境背景雜訊在都卜勒距離譜上的分佈特徵，兩者疊加後作為強度門檻值，比較現有觀測的譜值與門檻的差異，當差異達到顯著水準時，辨識為船隻、否

則為海面雜波。此步驟本研究分別使用兩種方法，一是參考 Chuang et al.(2015)之調適性偵測法(Adaptive Detection method)，二是參考 Dzvonkovskaya and Rohling(2006)之調適性船舶偵測法(Adaptive Ship Detection method)用以過濾大部分之背景雜訊。

第二步驟參考 James J. Jen(2011)，同時使用固定錯誤警報率過濾法(Constant False-Alarm-Rate, CFAR)與雜訊測試(Noise testing)，目的為透過設立較準確之門檻值與過濾條件從第一步偵測法的結果中找出更正確的船舶位置。

3.1 調適性偵測法

參考 Chuang et al.(2015)使用之調適性偵測法，先將多幅交叉頻譜(cross-spectrum)使用二維移動平均(2D moving average)，再將交叉頻譜扣除二維移動平均過之頻譜，求得殘餘訊號(Residual signal)，二維移動平均公式如下所示：

$$y(i, j) = \frac{1}{m \times n} \sum_{k=-(m-1)/2}^{(m-1)/2} \sum_{l=-(n-1)/2}^{(n-1)/2} x(i+k, j+l) \dots \dots \dots (1)$$

i 為都卜勒頻偏， j 為距離單元， $x(i+k, j+l)$ 為原始交叉頻譜強度值， $m \times n$ 為計算之二維移動窗(2D moving window)範圍。

求得殘餘訊號後，使用不同倍數的標準偏差值加上平均值做為門檻加以過濾，分別以 1.5、2、2.5、3 倍標準偏差做為調適門檻(Adaptive threshold)嘗試過濾雜訊影響。

3.2 調適性船舶偵測法

調適性船舶偵測法參考 Kendall et al.(1967)與 Dzvonkovskaya et al.(2006、2007、2010)，此方法適用於一階海面背

向散射訊號為主導的強雜訊環境下之船舶偵測。其調適門檻公式如下：

$$T = \max\{T_{\alpha,R}, T_{\alpha,D}\} \dots\dots\dots(2)$$

$T_{\alpha,R}$ 為距離域中曲線回歸 (Curvilinear regression) 之信賴上界值 (Upper confidence bound value) $100(1-\alpha)\%$, $T_{\alpha,D}$ 為頻率域曲線回歸之信賴上界值 $100(1-\alpha)\%$, 若交叉頻譜強度能同時高於距離、頻率域之調適門檻 T , 則視為可能之船舶訊號。此研究分析中所使用之 α 為 0.05, 使信賴上界值為 95%, 此為普遍認定之可信度 (Confident level), 確保以此標準所取得之結果良好。

3.3 固定錯誤警報率過濾法與雜訊測試

固定錯誤警報率過濾法以聶曼-皮爾遜準則 (Neyman-Pearson criterion) 為依據, 設立準確門檻值, 足夠限制大部分的錯誤訊號, 並留下期望探測之目標物訊號, 此方法的優點是可根據不同範圍得到相對應不同的門檻值 (Rohling, 1983; Dzvonkovskaya and Rohling, 2006; Dzvonkovskaya et al., 2010; Dzvonkovskaya and Rohling, 2007; James J. Jen, 2011)。

固定錯誤警報率過濾法設立之門檻值公式如下所示：

$$T = \alpha P_n \dots\dots\dots(3)$$

T 為門檻值, α 為比例因子 (scaling factor), 在這可稱為門檻因子 (threshold factor), P_n 則為雜訊強度。

平均固定錯誤警報率 (Cell-averaging CFAR, CA-CFAR) 的概念為, 欲求之目標單元 (Cell Under Test, CUT), 將其周圍取一範圍, 範圍內之其他單元稱作訓練單元 (Training cell), 並將範圍內之訓練單元做平均得到此範圍之平均強度值 (Local average power level), 若目標單元之訊號強度大於範圍內之雜訊平均強度乘上門檻因子, 則可

視為欲求之目標物訊號, 範圍內之平均雜訊強度 P_n 以下列公式表示：

$$P_n = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_m \dots\dots\dots(4)$$

N 代表訓練單元的數目, x_m 代表每一個訓練單元。

門檻因子 α 則表示為：

$$\alpha = N(P_{fa}^{-1/N} - 1) \dots\dots\dots(5)$$

P_{fa} 為錯誤警報率。錯誤警報率為常數, 而錯誤警報率的決定依據過濾效果可調整以達到過濾最佳效果。

固定錯誤警報率有分不同方法, 其中比較常見的有上述的平均固定錯誤警報率、最大平均固定錯誤警報率 (Greatest-Of-Cell-Average CFAR, GOCA-CFAR)、最小平均固定錯誤警報率 (Smallest-Of-Cell-Average CFAR, SOCA-CFAR) 等, 其最大平均意思為在多個範圍之訓練單元中, 取最大平均訓練單元去計算門檻值, 根據 Dzvonkovskaya and Rohling (2006), 最大平均固定錯誤警報率適合用於此雷達訊號過濾步驟, 故此分析以最大平均固定錯誤警報率做為過濾法。

在使用最大平均固定錯誤警報率過濾雜訊時, 需同時進行雜訊測試, 根據 Dzvonkovskaya and Rohling (2006), 雜訊測試之訊號雜訊水平 (signal-to-noise level) 得確認為至少高於 6dB, 達到以上兩種條件, 才可視為可能之船舶訊號, 否則認定為一般背景雜訊而濾除。

3.4 統計距離門軌跡辨識

以上步驟關鍵是使用適當統計方法的應用及調整, 需要與 AIS 資料相互比對, 利用實際資料逐步調整適當的門檻值設定。然而實際應用時考量雷達斑駁 (Speckle) 必然會產生錯報值, 此時再經由另一步驟進行過濾。此步驟為：得到疑似目標物的訊號時, 經由檢核目標物

位置在時間軸上的變化、目標物速度與航向之一致性，作為確認的依據，由於辨識點可能錯報，必須經由時間序列上位置、速度與航向的一致性作為品質指標。這一部分要發展為自動化軌跡辨識判斷是一挑戰，需要實際的 AIS 資料作為調整。此自動化軌跡辨識步驟參考使用 Dzvovkovskaya et al. (2010)、Dzvovkovskaya and Rohling(2007)、Gurgel et al.(2010)之統計距離門軌跡辨識技術。統計距離門之船舶條件判定公式如下：

$$d < \Delta d ; |V_{Rs} - V_0| < \Delta V \dots\dots\dots(6)$$

d 為預測船舶與原始船舶之距離， Δd 為船舶距離判定門檻， V_{Rs} 為更新之船舶速度， V_0 為原始船舶速度， ΔV 為船舶速度判定門檻。船舶距離與速度門檻依照現實船舶而設定，統計距離門之軌跡辨識條件必須滿足以上兩個條件，一為船舶訊號對應之距離不可相差太遠，二為速度差不可太大，即可視為偵測前後之兩訊號可能為相同之船舶訊號。

四、結果與討論

4.1 船舶辨識演算結果

以下為以 108 年 8 月 31 日 3 時臺中港海洋高頻陣列雷達觀測資料進行偵測演算法測試結果，圖 1 為未經偵測演算處理之都卜勒距離譜，計算之時序列資料時間為 55 秒，距離單元(cell)為 81，距離為 40 公里，頻率單元為 256，頻率為 -2.3Hz 到 2.3Hz。

分別經過調適性偵測法與調適性船舶偵測法後，透過設立較準確之門檻值與過濾條件，更精準地從第一步偵測法的結果中找出正確的船舶位置，於調適性偵測法及調適性船舶偵測法後使用固定錯誤警報率過濾法中的最大平均固定

錯誤警報率過濾，結果如圖 3 及圖 4 所示。

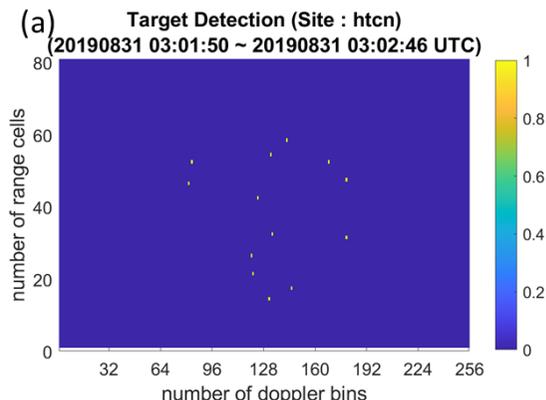


圖 3 調適性偵測法與固定錯誤警報率過濾法處理後之結果

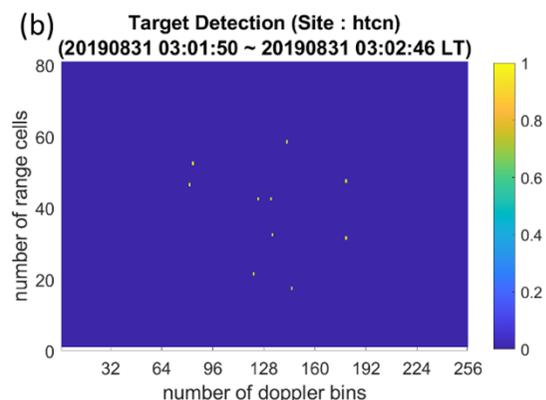


圖 4 調適性船舶偵測法與固定錯誤警報率過濾法處理後之結果

從圖 3 及圖 4 看來使用兩種船舶偵測法可有效的從高頻雷達都卜勒距離譜取得可能之船舶訊號，但兩種方法得到之可能船舶訊號並非完全一致，為確保所有船舶訊號皆被偵測，兩種偵測法之結果合併留存，並與 AIS 資料比對及經過統計距離門軌跡辨識確認所有可能之船舶訊號。

4.2 船舶偵測法與 AIS 比對結果

於固定錯誤警報率過濾法處理後，將結果與 AIS 資料進行比對，結果如圖

5 所示，為確保所有可能之船舶訊號都有被偵測到，將調適性偵測法與調適性船舶偵測法之所有可能船舶位置以黃色點表示，洋紅色點為 AIS 同時間之船舶位置，洋紅色數字為船舶水上識別碼，黑色線條為 AIS 之船舶軌跡。

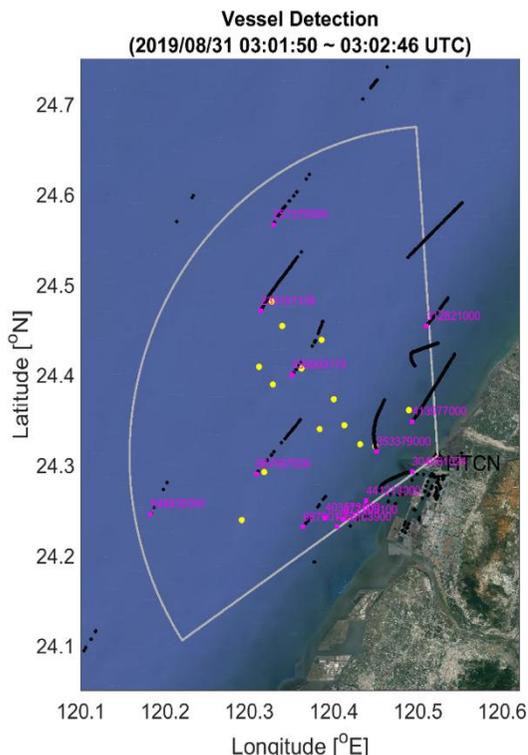


圖 5 高頻雷達資料經船舶偵測法演算結果與 AIS 比對圖

從圖 5 之結果發現，AIS 中的船舶位置大部分是有被高頻雷達之船舶偵測法偵測到的，結果良好，但有一部分 AIS 顯示之船舶未被偵測以及黃色點並未同時被標註在 AIS 中。AIS 船舶卻未被偵測大部分集中在近岸海面雜訊干擾較強的地方及較遠回波訊號較弱的地方，而有黃色點卻沒顯示 AIS 資訊的可能原因為未能確實過濾所有雜訊或船舶並未確實登錄資訊於 AIS 中。

4.3 統計距離門軌跡辨識法測試及 AIS 比對結果

從兩種船舶偵測法之結果經過統計距離門軌跡辨識法再次確認船舶訊號，其結果如圖 6 所示，橘色軌跡(點)即為使用統計距離門軌跡辨識計算之結果，雷達觀測最後時間點之船舶位置以黃色點表示，洋紅色點為 AIS 同時間之船舶位置，洋紅色數字為船舶水上識別碼，黑色線條為 AIS 之船舶軌跡。

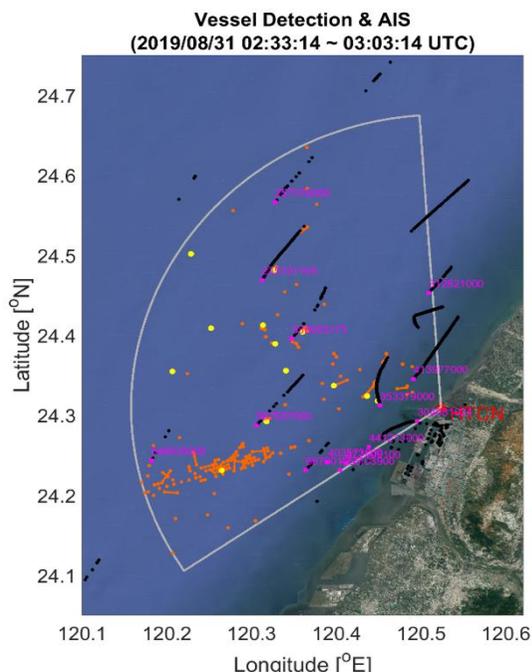


圖 6 統計距離門軌跡辨識計算與 AIS 比對圖

從圖 6 發現，在較低雜訊干擾及無偵測資料缺漏的情形下較能呈現船舶軌跡，大部分軌跡辨識呈現品質受雜訊干擾程度影響大，結果仍有進步與改善的空間。若未來有第二座高頻雷達系統，可根據雙雷達系統之都卜勒頻偏計算出即時之船舶運動狀態，可大幅改善船舶軌跡之品質。

4.4 高頻陣列雷達與 AIS 長時間統計比對分析結果

此節比對高頻陣列雷達與 AIS 之資料，以 AIS 資料為真值來計算雷達的觀測成功率，因此觀測成功率定義為 AIS 紀錄資料中之船舶有被高頻雷達觀測到即表示為成功，反之若沒被高頻雷達觀測到則視為失敗，若高頻雷達有偵測到船舶訊號卻沒有被 AIS 所紀錄，則暫不列入此觀測成功率之統計中。以下分別以觀測距離、船舶大小、船艙向、行進方向等進行比對探討，以了解高頻雷達與 AIS 之船舶觀測特性差異。

4.4.1 雷達與 AIS 船舶位置距離誤差比對

使用船舶偵測法偵測之船舶位置與相同之 AIS 船舶訊號位置做距離誤差比對，比對資料時間為 108 年 7 月 31 日，比對資料長度為 24 小時，比對資料筆數為 28000 筆，比對結果如圖 7 所示。

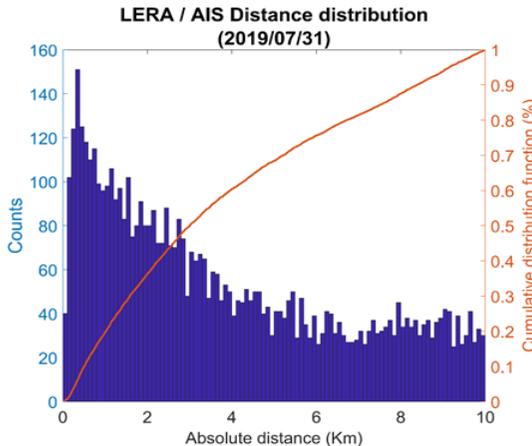


圖 7 高頻陣列雷達與 AIS 船舶位置距離誤差比對圖

目前高頻雷達在近岸海面雜訊干擾較強，而較遠的地方回波訊號較弱，都不利於偵測船舶，高頻雷達觀測範圍之左右兩側有強訊號干擾，亦不易精準偵測船舶位置，根據圖 7 結果顯示高頻雷達偵測船舶位置與 AIS 位置距離差少於

2 公里之機率約為 35%，少於 4 公里之機率約為 60%，此初步分析結果尚佳而存在進步的空間，若撇除上述干擾訊號過強的部分，其船舶偵測結果良好。

4.4.2 分析雷達觀測距離成功率

108 年 7 月於不同觀測距離下高頻陣列雷達資料與 AIS 比對之觀測成功率呈現如圖 8。以下分析以高頻陣列雷達與 AIS 船舶位置低於 4 公里(8 單元)視為相同船舶。圖 8 之左方縱軸(藍字)為觀測成功率，右方縱軸(紅字)為不同距離下之 AIS 紀錄資料筆數，橫軸為觀測距離(單位公里)，使用 7 月 3~31 日資料共 124080 筆。

從圖 8 不同距離之觀測成功率計算結果可以發現，距離 4 公里以下及超過 30 公里有觀測成功率下降的情形，此狀況與高頻雷達近岸受到強海面雜訊影響以及觀測距離較遠則回波訊號較弱有關，於觀測距離 4~30 公里之觀測成功率呈現平穩的趨勢，成功率約為 60%，此成功率尚佳，觀測距離 34 公里以上，成功率也有達到 50%，而觀測距離超過 34 公里以上時，觀測成功率明顯降低，顯示觀測範圍受到限制。

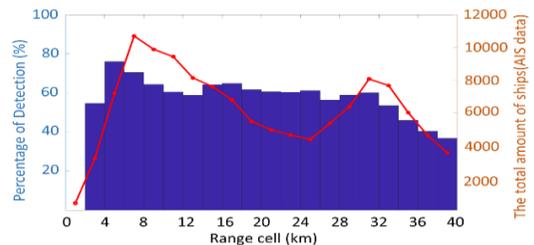


圖 8 108 年 7 月高頻陣列雷達於不同距離之觀測成功率

4.4.3 分析雷達對於船舶尺寸觀測成功率

高頻雷達探測船舶成功率的影響因素包含雜訊及船舶本身狀態，此節先將不同船舶尺寸與都卜勒距離譜之一、二階海面回波訊號作強度比較，以了解海

面布拉格散射與船舶鏡面反射回波訊號強度上的差異，如圖 9 所示，縱軸為雷達回波強度(單位 dB)，橫軸雷達觀測目標物距離(單位公里)，結果發現船舶長度越長回波強度越強，原因為雷達截面積的影響，另外也可發現隨著觀測目標物距離越遠，回波強度也越弱，此結果與雷達方程式表示強度隨著距離的四次方成反比一致。都卜勒距離譜之一、二階回波強度受海面波浪布拉格散射影響，隨著波高增強，透過對一、二階回波強度的統計了解海面波浪之雷達回波的變化，圖 9 使用 2019 年 1 月示性波高 3.8 公尺時之一、二階回波強度做統計，來了解船舶訊號在高波浪干擾情況下之比對結果，從結果顯示船舶回波訊號強度一般而言大於海面波浪之回波訊號，但依然有少部分船舶訊號小於波浪回波強度，尤其一階峰之最大值更容易出現大於船舶訊號強度的情形。雖然回波強度隨著距離增加而下降，船舶訊號依舊大於波浪訊號，此結果與圖 7 的不同距離之觀測成功率呼應。另一方面 8 與 16 公里處有出現 2.2 節提到的雜訊干擾，導致與其它距離的結果不大一致。從圖 9 得知一般而言波浪訊號強度是低於船舶回波訊號，但在強波浪情形下，會有一部分尤其較小尺寸船舶會受到波浪訊號干擾而難以辨識。

圖 10 為高頻陣列雷達與 AIS 比對於不同船舶尺寸下之觀測成功率，觀測成功率之定義一樣為 AIS 紀錄資料中之船舶有被高頻雷達觀測到即表示為成功。圖 10 左方縱軸(藍字)為觀測成功率，右方縱軸(紅字)為不同船舶尺寸之 AIS 紀錄資料筆數，橫軸為船舶尺寸(單位公尺)，與圖 8 使用相同之 AIS 資料。

從圖 10 不同船舶尺寸之觀測成功率計算結果可以發現，300 公尺以上之船舶資料筆數較少，觀測成功率之分析結果起伏較大，除此之外，大部分觀測成功率呈現約為 50~60%，此結果說明

高頻雷達觀測並無明顯受到船舶尺寸而影響成功率，此結果也可從圖 9 不同船舶尺寸之回波訊號基本上大於波浪回波訊號可推論，這表示船舶尺寸大小對於高頻陣列雷達之船舶偵測結果的好壞並非主要影響因素，而複雜的背景環境雜訊干擾也許才是主要影響觀測成功率的關鍵。

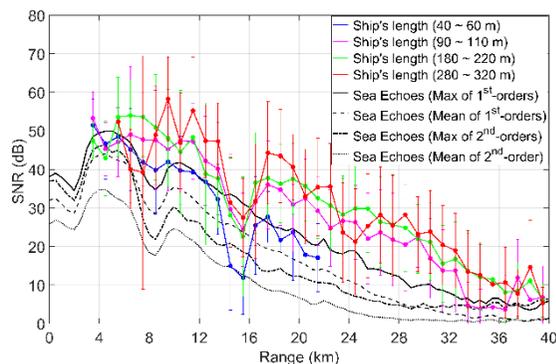


圖 9 108 年 7 月高頻陣列雷達於不同船舶尺寸與一、二階海面回波訊號強度比較

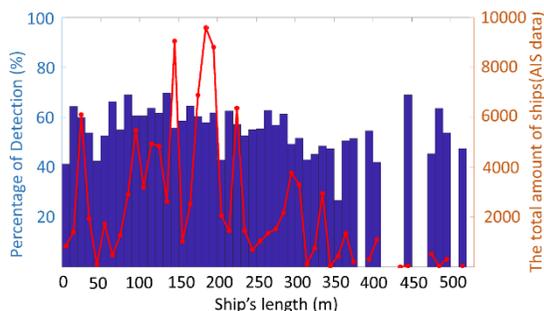


圖 10 108 年 7 月高頻陣列雷達於不同船舶尺寸之觀測成功率

4.4.4 分析雷達對於船艏向與船舶行進方向觀測成功率

船艏向與船舶行進方向會有些微的差異，一般而言船舶行進向量大約等於船艏向量與海表面流向向量的加總，這裡將船艏向與船舶行進方向都進行統計分析，統計之觀測目標海域為垂直海岸線

-30~30 度之間，7 月船艙向分析結果如圖 11，船舶行進方向結果如圖 12 所示，左方縱軸(藍字)為觀測成功率，右方縱軸(紅字)為資料筆數，橫軸為船艙向和船行進方向(單位：度)，0 度為北，180 度為南，大約 120 度為方向朝向雷達，300 度為背向雷達方向。

由圖 11、12 發現，若船艙向或行進方向面向或背向雷達，其觀測成功率較高，反之若平行於海岸線之船艙向或行進方向，觀測成功率較低，此結果可能與船舶不同方向之雷達截面不同有關。由資料顯示在此的船艙向或行進方向較集中在 30 度與 210 度附近，其他行進方向的船舶數量較少，因此這部分的结果還需要更多的資料進行分析驗證。

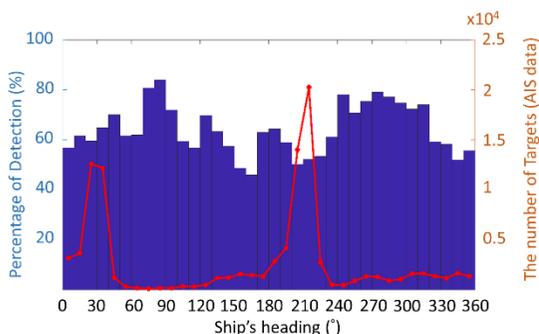


圖 11 108 年 7 月高頻陣列雷達於船艙向之觀測成功率

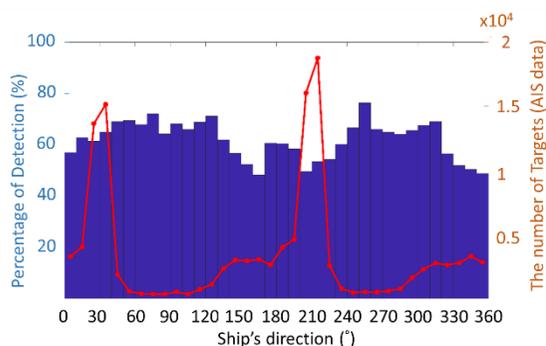


圖 12 108 年 7 月高頻陣列雷達於船舶行進方向之觀測成功率

4.4 AIS 與微波雷達比對結果

本研究應用高頻陣列雷達辨識船舶訊號的演算法，並與 AIS 資訊做比較，了解其演算法之可行性，但於演算法與 AIS 的比較過程中，發現常有高頻雷達辨識之船舶訊號並無出現於 AIS 資訊中，若上述比較以 AIS 資訊為真值，則需確定 AIS 是否能夠完整呈現與代表現實狀況之船舶狀態。

基於以上描述，於 108 年 10 月 16 日架設 X 波段移動式微波雷達觀測站於高頻陣列雷達站旁，以高頻雷達距離解析度 500 公尺其兩站為同一單元內，可視為位於相同位置，觀測結果如下圖 13、14。

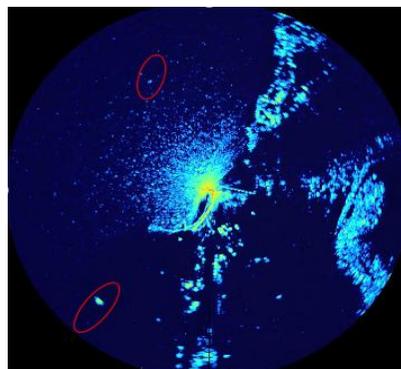


圖 13 108 年 10 月 16 日 13:30 微波雷達觀測圖

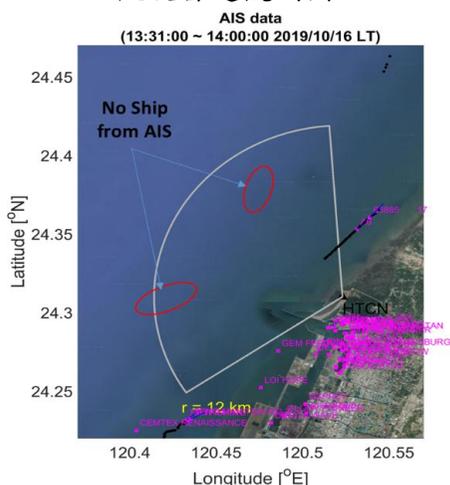


圖 14 108 年 10 月 16 日 13:30 AIS 資料

圖 14 所示，洋紅色字、點為 AIS 資訊紀錄之船舶水上識別碼及其位置，白色扇形半徑為 12 公里約為右圖之微波雷達觀測半徑，10 月 16 日 10:30 觀測之結果顯示，AIS 資料之船舶位置皆清楚的顯示於微波雷達觀測影像中，經過多張微波雷達影像與 AIS 資訊比較，可以確定 AIS 船舶位置能清楚顯示於微波雷達影像呈現，但於圖 13、14 中發現，同日 13:30 時段之 AIS 資訊中，幾乎沒有船舶位於臺中港口外之近岸海域，如微波雷達圖所示，於港口南邊之兩船舶訊號於 AIS 中有紀錄，然而南邊兩船舶位置再離岸約 4 公里處有一明顯之強船舶訊號，此訊號於 AIS 則無紀錄，距離臺中港口北方約 8 公里處亦有一強船舶訊號，同樣並沒有於 AIS 資料中紀錄。

AIS 為被動式船舶動態監測系統，紀錄之船舶資訊必須經由船家主動將船舶資訊回報，若船家未主動進行回報或未裝載 AIS 發報器，則無法透過 AIS 了解船舶資訊，如同圖 13、14 所呈現，會有船舶紀錄與現實狀況不同、消失的情形出現，因此本研究於高頻雷達船舶辨識法的比較過程中，常有觀測到船舶訊號但未出現於 AIS 紀錄，可能是背景雜訊干擾的誤判，亦有很大的機會是 AIS 並未明確紀錄所致。

五、結論

本研究使用高頻陣列雷達觀測訊號進行船舶辨識，其演算法主要使用調適性偵測法與調適性船舶偵測法，兩種偵測法辨識結果並非完全一致，為確保所有船舶訊號皆被偵測，兩種偵測法之結果合併留存。

使用固定錯誤警報率過濾法中的最大平均固定錯誤警報率以及雜訊測試，從第一步偵測法的結果中找出更正確的船舶位置，過濾結果良好。船舶軌跡辨

識使用統計距離門計算，結果易受雜訊干擾及資料缺漏而影響呈現品質。

根據高頻雷達比較 AIS 之不同距離之觀測成功率統計，目前雷達在近岸 4 公里內之海面雜訊干擾較強以及超過 30 公里、回波訊號較弱的地方不易準確偵測船舶，觀測距離 4~30 公里之觀測成功率呈現平穩的趨勢，成功率約為 60%，成功率尚佳。高頻雷達偵測船舶位置與 AIS 位置距離差少於 2 公里之機率約為 35%，少於 4 公里之機率約為 60%，此初步分析結果尚佳而存在進步的空間，若撇除上述訊號干擾過強的部分，其船舶偵測結果良好。

船舶鏡面反射與波浪布拉格散射訊號強度比較，波浪訊號強度低於船舶回波訊號，但在強波浪情形下，會有部分尤其較小尺寸船舶會受到波浪訊號干擾而難以辨識。高頻雷達船舶辨識成功率與船舶尺寸之關係統計結果呈現無明顯受到船舶尺寸而影響，無明顯約為 50~60%，背景環境雜訊干擾也許是主要影響觀測成功率的關鍵，另外船艏向和船舶行進方向與觀測成功率也有其相關性。

本研究顯示了海洋高頻陣列雷達系統進行船舶辨識的結果，未來可與船舶自動識別系統互補，有助於航港單位做為船舶監控應用，提升船舶航行安全。

參考文獻

1. Chuang, L.Z.H., Chung, Y.J., and Tang, S.T., "A Simple Ship Echo Identification Procedure With SeaSonde HF Radar", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12, ,2015, 2491-2495.
2. Dzvonnkovskaya, A.L., and Rohling, H., "Target Detection with Adaptive Power Regression Thresholding for HF Radar", CIE International Conf

- erence on Radar,2006, pp. 1-4.
3. Dzvonkovskaya, A.L., and Rohling, H., "HF radar ship detection and tracking using WERA system", IET International Conference on Radar Systems, 2007, pp. 1-5.
 4. Dzvonkovskaya, A., Grugel, K.W., Rohling, H. and Schlick, T., "HF radar WERA application for ship detection and tracking", European Journal of Navigation, Vol. 7, No. 13, 2009, pp. 18-25.
 5. Fernandez, D.M., Vesecky, J.F., Barrick, D., Teague, C.C., Plume, M.M., & Whelan, C., "Detection of ships with multi-frequency and CODAR SeaSonde HF radar systems", Canadian Journal of Remote Sensing 27, 2001,277-290.
 6. Jen, J. J., "A study of CFAR implementation cost and performance tradeoffs in heterogeneous environments", Doctoral dissertation, California State Polytechnic University, Pomona, 2011.
 7. Laws, K., Vesecky, J.F. and Paduan, J.D., "Using HF surface wave radar and the ship automatic identification system (AIS) to monitor coastal vessels", IGARSS 2009, IEEE Press, Cape Town, South Africa, USA, 2009.
 8. Laws, K., Vesecky, J., & Paduan, J., "Monitoring coastal vessels for environmental applications: Application of Kalman filtering", In, 2011 IEEE/OES 10th Current, Waves and Turbulence Measurements (CWTM), 2011, pp. 39-46.
 9. Laws, K., Vesecky, J., & Paduan, J., "Predicting the capabilities of ship monitoring by HF radar in coastal regions", In, OCEANS'11 MTS/IEEE KONA, 2011, pp. 1-5.
 10. Ponsford, A.M., "1984 Feasibility Study of HF Ground-Wave Radar for Tracking of Ships". In. Final Report British Admiralty by University of Birmingham. 1984.
 11. Ponsford, A.M., "Surveillance of the 200 Nautical Mile Exclusive Economic Zone (EEZ) Using High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR)", Canadian Journal of Remote Sensing, 27, 2001, 354-360.
 12. Ponsford, A.M., & Wang, J. "A review of High Frequency Surface Wave Radar for detection and tracking of ships", Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 18, 2010.
 13. Roarty, H. J., Barrick, D.E., Kohut, J.T. and Glenn, S.M., "Dual-use of compact HF radar for the detection of mid- and large-size vessels", Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, Vol 18, 2010, No 3.
 14. Sid-Ahmed, M.A., "Image processing, theory, algorithms and architectures", McGraw-Hill, 1994.

軌道扣件缺失辨識系統之建置研究

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研究員
黃維信 大同大學媒體設計系教授
謝尚琳 大同大學資訊工程系副教授
洪瑋宏 大同大學資訊工程系研究生
李明德 大同大學媒體設計系研究員

摘要

鐵軌扣夾為軌道扣件系統之重要組件，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。早期由道班工作人員徒步進行軌道巡查與維修，逐步調整為利用軌道巡查車方式進行，但仍依賴人力目視檢查，由於目視巡查受限於巡檢車車速及視察角度侷限，長時間目視可能產生視覺疲勞，導致巡檢效率無法提昇。本研究除蒐集國內外軌道檢測相關研究成果外，亦建立軌道扣件影像的擷取設備，包含攝影及照明設備，再將軌道扣件影像資料，透過影像標記處理，採用 Yolo v3 進行深度學習模型訓練，從測試資料庫驗證正常與缺失扣件檢出率，建立一套扣件影像巡檢自動辨識系統，可用以檢測鐵路軌道扣件是否有缺失。在夜拍實驗中，影像擷取的部份，以兩盞 200W LED 探照燈投射，採用運動型攝影機 GoPro 進行拍攝，時速至少 30km/h 以上，共錄製 70 公里以上軌道扣件影像，經訓練與測試後，可達正常扣件檢出率 82.5%，缺失扣件檢出率 74.5%，達到鐵路軌道扣件影像自動辨識檢測之目的，可輔助軌道巡檢並提昇巡檢效能。

一、前言

依據交通部臺灣鐵路管理局(以

下簡稱臺鐵)所稱，鐵路路線包括軌道 (Track) 及承載軌道的路基 (Roadbed) 與橋涵等構造物。傳統的軌道係由道碴、軌枕、鋼軌及扣件所組成，鐵路路線構造如圖 1 所示 [1]。

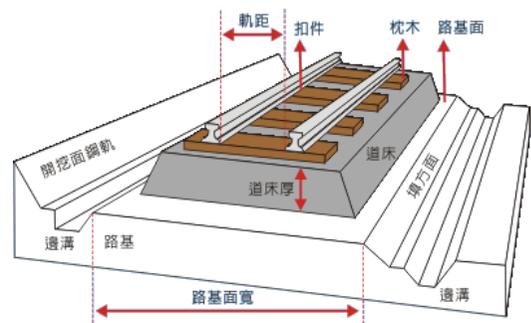


圖 1 鐵路路線構造 [1]

鐵軌扣夾為軌道扣件系統之重要組件，可將鐵軌緊扣在軌枕上。鐵軌承受垂直、縱向、側向等三向力時，須有足夠之扣壓力，避免鐵軌三向變位過大。軌道扣件系統對下部結構具有緩衝作用、並可分散承受重量、抵抗鋼軌側翻擾動、電氣絕緣及吸音減震等功能，讓鐵軌能穩定固定於軌道上，對於列車能否平穩安全行駛影響至鉅。當扣件無法正常發揮作用時，即可能造成火車出軌，為確保扣件正常運作，軌道巡檢人員採用人工目視方式巡檢。

軌道巡查主要於夜間無列車通行時段利用工程維修車進行，仍須依

賴人力目視檢測。軌道目視巡查易受限於巡檢車速及視察角度等問題，長時間目視易能造成疲乏，而易有疏漏的問題。為減輕巡檢人員的工作負擔，提高巡檢效能，實有必要結合科技力，提供更有效的解決方案。

AI發展至今已超過60年以上，近期發展突飛猛進，歸因於資料量遽增、儲存成本降低及電腦運算速度大幅提昇、深度學習技術的突破。其中資料量遽增的部份，主要因為網路、雲端及智慧型手機的普及，每人每日產生的數據資料遽增，因此容易取得大量的資料協助電腦進行訓練。另外，近60年來電腦處理器的運算效能提升了一兆倍以上，再加上雲端儲存成本降低後，代表遽增的資料不但有地方儲存，電腦也有能力去快速消化。最後深度學習技術的突破，讓電腦可以用類似人類思考的類神經網絡進行學習，這讓電腦的視覺、聽覺進步神速^[2]。

AI運作相當依賴訓練資料，當有愈多愈好的資料提供AI進行訓練時，就能提供更準確的判斷。因此本研究首先拍攝軌道扣件AI訓練所需的資料，再調校軌道扣件AI的辨識核心，以達到實務應用。本研究首先蒐集國內外軌道檢測相關之研究成果，然後建立軌道扣件影像的收集設備（包含影像擷取及照明），透過影像標記處理，提供AI深度學習訓練，從訓練結果確認扣件辨識準確率，符合臺鐵軌道扣件自動判釋之需求，用來輔助目前人工目視巡檢工作，俾利軌道扣件及時檢修，提升軌道安全。

二、相關研究

2.1 軌道扣件

市面上常用的軌道扣夾形式種

類繁多，而且外形差異頗大，軌道扣夾用以固定鋼軌於枕木上，防止鋼軌垂直、縱向、側向之三方向變位。目前世界各國軌道所使用的扣夾型式整理如表1所示^[3]。

其中英國 Pandrol International Limited 公司所生產的 Pandrol e-clip，如圖2所示，安裝方便且易於保養維修，廣泛使用於臺鐵環島鐵路路網。

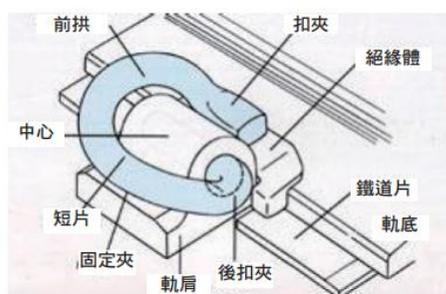


圖2 Pandrol e型扣夾^[3]

除了 Pandrol e型扣夾外，臺鐵還有使用其他類型的扣夾，後續進行AI影像辨識時，須先建立各式扣夾的影像資料庫，以做為判斷分析使用。

表1 各國大廠扣夾種類表^[3]

固定方式	外觀	扣件名稱
螺栓式	鋼條	德國 Vossloh W 型扣夾
	鋼鈑	法國 Stedef Nabla 扣夾、RN 扣夾
		日本 102 型扣夾等
	鋼塊	德國 K 型扣夾
非螺栓式	鋼條	英國 Pandrol e 型扣夾、PR 型扣夾、FastClip
		荷蘭 DE 扣夾
		美國 Sidewinder 扣夾
		瑞士 Fist 扣夾
		瑞典 Hambo 扣夾
	鋼鈑	澳洲 Mc Kay Safelok 扣夾
		英 Pandrol Safelok III 型扣夾
		澳洲 Rex-Lok 扣夾

2.2 軌道自動影像辨識

瑞士電子和微技術中心 (Swiss Center for Electronics and Micro-technology, CSEM) 為了自動診斷軌道，在 2007 年就開始進行自動化系統開發 [4]，因為傳統影像辨識方法易誤判 (False Positives/ Negatives)，致須人力再加以檢查，所以利用深度學習改進缺點。瑞士聯邦鐵路公司 (Swiss Federal Railway, SBB) 使用配備多個高解析度的攝影機及其他感測器的「診斷列車」 (Diagnosis Trains)，以時速 160 公里速度行駛取得分析所需的影像資料。透過深度學習技術，希望達到目的如下：

- (1) 提昇鐵路軌道故障檢測和分類技術
- (2) 減少現場目視檢查的次數
- (3) 減少專家處理誤報的問題

SBB 規劃每個月檢查 3,800 公里的軌道，以記錄不同天氣條件 (如下雨、下雪、結冰) 及非軌道物件 (如樹葉、泥土等) 的影像資料。透過訓練模型以檢測影像之目標區域 (如鐵軌、扣件等)，利用「生成對抗網路」 (GAN) 來辨識異常，並將約 20 種不同的故障類別區分為五大類 (如焊接、接頭、表面缺陷、車輪滑移)。另配合深度學習所需，針對收集到的影像進行標籤化處理，透過反覆不斷的學習與訓練，讓分析模型更為精準 [5]。

加拿大 Pavemetrics 公司的 Laser Rail Inspection System (LRAIL) [6] 推出新式的全方位軌道檢測系統，可加裝架設在車輛上，其檢測結果如圖 3 所示。LRAIL 主要之特點如下：

1. 檢測速度可達 180 km/h
2. 同步 3D 幾何測量和高分辨率成像
3. 白天和夜間操作，不受陰影影響。
4. 全自動鐵路檢查。
5. 自動使用里程點和慣性校正 GPS。

6. 組件安裝在環境密封的外殼中。



圖 3(a) LRAIL 架設方式

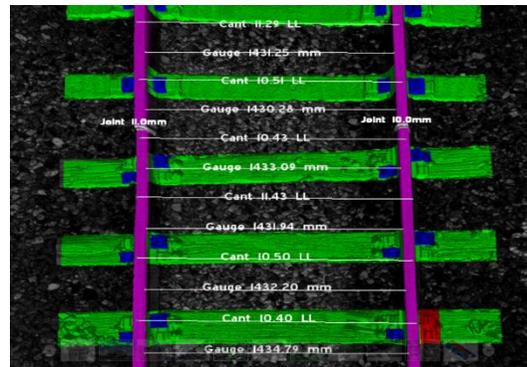


圖 3(b) LRAIL 檢測顯示結果 [6]

印度 Ladola et al. [7] 設計鐵路軌道故障自動檢測的一些組件，如紅外線傳感器，用於檢測裂縫，缺失定位利用全球定位系統 GPS (Global Positioning System)，使用全球移動通訊系統 GSM (Global System for Mobile Communications) 簡訊發送位置，運行系統採用 Arduino，檢測車輛由太陽能電池板和電池供電。

Ritika et al. [8] 以攝像頭結合 GPS，攝像頭以每秒 30 幀左右速度提供穩定的圖像，運用先進圖像分析和深度學習技術，檢測軌道信號，並創建其數據庫。前置攝像頭安裝在引導機車上，實驗了 150 公里，247 個信號的路線，總體準確率為 94.7%。

Karakose et al. [9] 以計算機視覺的監測方法，進行不良軌道偵測，把相機放在火車頂部，拍攝和火車相鄰的軌道圖像。在這些圖像上，應用邊緣偵測並提取特徵來確定軌道，由產

生的軌道之間距判斷是否有故障，試驗結果顯示，所提出的電腦檢驗方法是有效可靠的。

Gibert et al.^[10] 提出利用多重偵測器同時並行運作，得到對軌道和扣件優良的偵測精準度。劉鈺韋^[11] 設計高速影像擷取系統，自動改變線掃描攝影機的取樣率，以便固定檢測物件的影像解析度；枕木定位系統則可以將偵測到的枕木位置傳送給電腦終端機，以便工程人員查修。陳南鳴等人^[12] 提出軌道運輸系統的監控技術，系統利用鋼軌與枕木對扣件的相對位置做為扣件區域定位的依據，鋼軌定位由於需要對整張影像做鋼軌偵測，因此所需運算時間較長，主要由灰階值統計單元、鋼軌位置計算單元、同步動態隨機存取記憶體，因此演算法較複雜。

Fernando et al.^[13] 於 2011 提出以電腦視覺加攝像頭於道叉處檢驗軌道缺失，並整理 1998-2009 年間最常見造成脫軌的原因，使用機器視覺進行道岔部件/缺陷檢查包括開關點磨損或損壞、岔心開關和軌道設備缺陷、轉換岔器磨損或破損、操作桿破損或有缺陷、切換點 開關點和庫存軌道之間的間隙等。

三、系統設計

3.1 系統運作架構規劃

本研究採用高速影像攝影機，將拍攝的影像，傳送到後端的影像辨識深度學習伺服器，配合 GPS 的定位功能，標示出缺失扣件所在的軌道範圍。系統運作架構如圖 4 所示。



圖 4 系統運作架構

影像擷取裝置在檢查期間維持 1080P/60FPS 情況下運作，單筆紀錄最長時間為 5 小時。而影像擷取裝置除記錄影像外，還會記錄時間、速度與 GPS 位置資訊；前端控制系統具控制影像系統的記錄儲存功能，包含手動紀錄輸入、錄影檢視，記錄好之影像資料，透過網路將影像回傳至後端影像辨識深度學習伺服器進行辨識。與後端影像辨識深度學習伺服器連線時，須具備足夠的 I/O 效能與儲存資料能力，方能在適當的時間內完成紀錄的壓縮與傳輸。而後端影像辨識深度學習伺服器，須具有足夠的效能以在最短時間內辨識完影片，並將資料統整分類。系統說明如下：

- (1) 高速影像攝影機（需搭配適當的車外裝載方式），1080P/60fps 錄影，錄影時長 5 小時，抗震，防水、夜間錄影、GPS 座標紀錄
- (2) 後端處理伺服器（接收前端影像與統整，並進行辨識分析與資料儲存），CPU8 核心 5Ghz 以上，記憶體 64G、運算加速卡 Nvidia GTX 2080Ti 兩張、儲存空間：1T 固態硬碟兩顆，2TB 資料硬碟兩顆。

前端控制系統運作時，可選擇「紀錄模式」，待完成紀錄後再將資料傳送到後端伺服器，以取得並顯示辨識結果。在後端伺服器處理的部份，同樣開機時先進行自我檢測，以確定伺服器可正常運作，以接收前端回傳之影像資料。待完成自我檢測後即可進行待機模式，準備接收前端之請求。目前規劃的請求模式有三種：資料查詢、即時模式及紀錄模式。「資料查詢」的部份，係供使用者查詢歷次的分析結果，以做為研析判斷使用。影像採批次上傳，待上傳後透過「影像辨識」服務，萃取出符合需求之結果，同樣回傳辨識結果，並針對異常狀況進行回報。分析結果都會儲

存在伺服器端，供後續「資料查詢」使用。伺服器端處理流程整理如圖 5 所示。

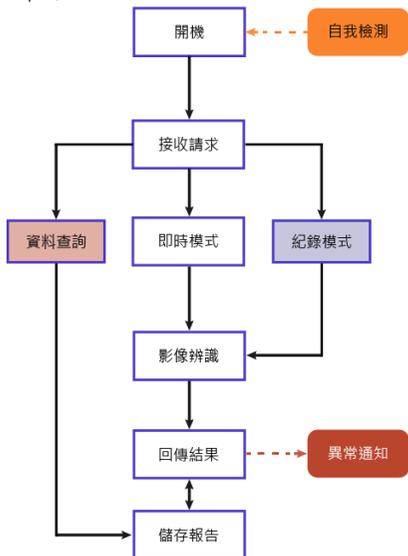


圖 5 處理伺服器系統流程

3.2 軌道扣件影像記錄

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。高速影像攝影機提供每秒 60 幀（每秒顯示張數，Frame per Second, FPS）以上的拍攝速度。若以行駛速度時速 120 公里作為預期的環境狀況，假如需要取得以每 0.5m 作為測量單位的精準度，則需要每秒拍攝 67 張相片的攝影機。本研究臺鐵工程維修車夜間行駛速度時速約為 30 公里，高速影像攝影機符合計畫需求。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為佳。

本研究採用 GoPro Hero7 Black，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，而且有 GPS 記錄，其周邊的配件相當完整，有利於將其固定在工程維修車或平車上。

3.3 平車製作與設備架設

本研究與臺鐵人員討論後，使用工程維修車加平車的方式，俾利未來於其他單位使用，平車由臺鐵人員設計與製作，設計圖如圖 6 所示，平車行駛時速可超過 50 公里。

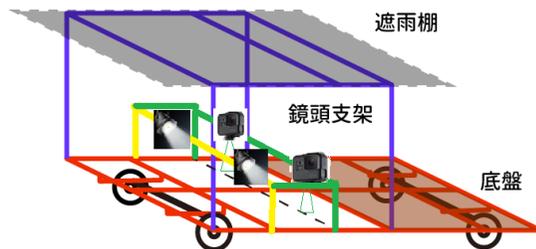


圖 6 平車設計示意圖

GoPro 除具備優異的防震效果外、鏡頭視野廣、GPS 定位、支援即時串流及支援 Python API 等功能，更重要的是周邊可選用的配件種類多元。GoPro 架設位置可視實際拍攝結果，彈性調整架設位置，實際架設結果如圖 7。



圖 7 平車上安裝 GoPro

照明燈具架設的部份，需評估測試不同架設位置的影響，避免陰影產生，支架採用鋁擠型架組立，方便於隨時調整燈具固定位置，架設情形如圖 8 所示。

在照明設備的選用上，希望能獲得清晰的影像，且考慮到光線亮度、方便固定、用電量，經評估決定選用 200W 工程版 LED 白光探照燈，設

備供電使用發電機供電。

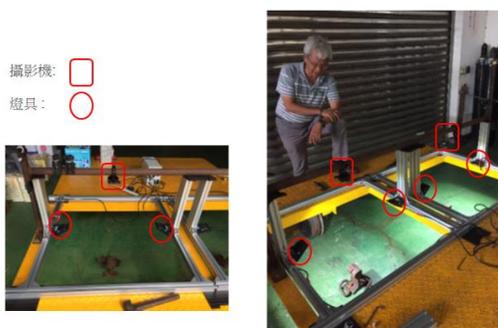


圖 8 燈具以鋁擠型架固定情形

3.4 缺失定位

本研究提出「虛擬偵測點」(Virtual Detection Point)方式協助定位,目前臺鐵內部已有百公尺的里程樁號(如圖 9 所示),針對每一個里程樁號設定半徑 20 公尺(將來可視需求調整半徑值)的「虛擬偵測圓」。當工程維修車行經這些「虛擬偵測圓」時,即可判斷工程維修車所在的位置,當 AI 影像辨識出扣件缺失時,即可快速鎖定扣件缺失的位置。



圖 9 臺鐵百公尺標^[14]

利用 GoPro 拍攝的相片或影片,其儲存格式內含 GPS 資訊,可直接解析使用,可用 Quik Desktop, Dashware, RaceRender 和 GoPro Mobile 應用程式顯示相機所捕獲的 GPS 數據,嵌入在 mp4 檔案中,稱為 GPX (如圖 10 所示),解析後的資料也可直接在任何 GIS 軟體(如

Google Maps)中顯示,本計畫也已完成從影片中解析 GPS 位置,並包含影片紀錄時間(CST)等資訊。

```
<name>../in/87ce4d6fc5d67aa2a3cb/GH010592</name>
<trkseg>
  <trkpt lat="24.3420355" lon="120.6257558">
    <ele>71.257</ele>
    <time>2019-03-28T06:38:36.674Z</time>
    <cmt>GpsAccuracy: 139; GpsFix: 3</cmt>
  </trkpt>
  <trkpt lat="24.3420354" lon="120.6257556">
    <ele>71.254</ele>
    <time>2019-03-28T06:38:36.732Z</time>
    <cmt>GpsAccuracy: 139; GpsFix: 3</cmt>
  </trkpt>
  <trkpt lat="24.3420353" lon="120.6257553">
    <ele>71.27</ele>
    <time>2019-03-28T06:38:36.790Z</time>
    <cmt>GpsAccuracy: 139; GpsFix: 3</cmt>
  </trkpt>
</trkseg>
```

圖 10 GPX 檔案內容

使用實測的 GoPro 影像,解析出的 GPS 資料,誤差大約在 5 公尺左右,已可接近實用程度,實測結果如圖 11 所示。若需再更精準到公分級,需搭配差分訊號,升級為差分 GPS。

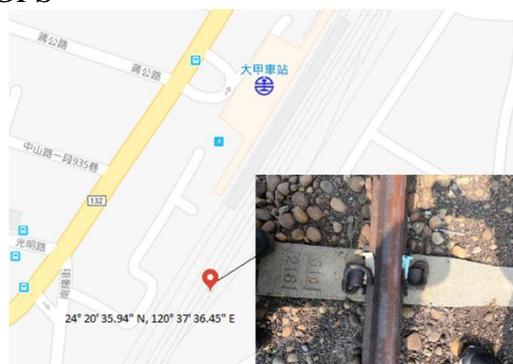


圖 11 大甲分駐所旁軌道側線拍攝軌道扣件定位測試

3.5 影像辨識演算法

本研究計畫採用的是 You Only Look Once (YOLO) v3 演算法,是一種物件偵測的神經網路演算法,優點在於輕量且高效率,追求快速辨識與高準確度,可以即時的產生結果,應用於物體辨識。神經網路的學習需要大量的樣本,樣本量決定神經網路的模型的泛用與準確度,為了辨識物件

的類型，需要盡可能多的訓練資料（包括正常的、故障的、各種情況的資料）。

Yolo v3 主要特點如下：

- (1) 使用 Resnet 網路 (Residual Network): 新的基底網路為 Darknet-53, 有 53 層, 隨著網路層數不斷加深 (數量級從 20~30 層到 ~50 層), 採用了一般類神經網路加深時常用的 ResNet 結構來解決梯度問題。
- (2) 使用特徵金字塔網路 FPN (Feature Pyramid Networks): 使用 FPN 多層級預測架構以提升小物體預測能力, 特徵層從單層 13x13 變成了多層 13x13、26x26 和 52x52, 單層預測 5 種 bounding box 變成每層 3 種 bounding box (共 9 種), 詳見網路結構圖(如圖 12 所示)。使用 FPN 的架構可以讓低層較佳的目標位置和高層較佳的語義特徵融合, 並且在不同特徵層獨立進行預測, 使得小物體檢測改善效果十分明顯。

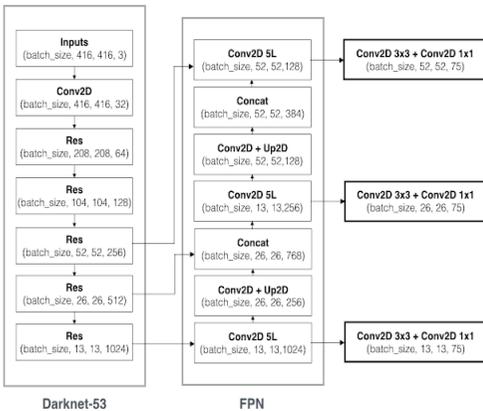


圖 12 Yolo v3 架構圖

四、實驗與討論

4.1 GoPro 安裝實測

本研究於 2019 年 3 月 28 日日間側線進行 GoPro 設備架設與實測，

在完成平車及 GoPro 固定後，即由工程維修車帶動平車在側線往返進行實測，最高行駛時速約 50 公里，影像畫面如圖 13(a)、(b)所示，影像清晰符合需求。

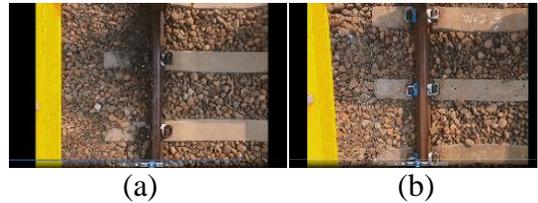


圖 13 實測軌道扣件影像(a)與(b)

於夜間長時間實測時，使用 4K 解析度進行影像錄製，約連續使用 1 小時左右 GoPro 便會因為設備過熱而啟動保護作業，自動關機。代理商建議不要使用內建的電池供電，改由 USB 充電，且調降影像解析度 (1080P 60FPS)，初步改善設備過熱而自動關機之問題。

4.2 扣件分類

AI 訓練資料須有正樣本及負樣本供 AI 模型可以區分正常與有缺失之扣件，各類缺損扣件，整理如圖 14 所示。

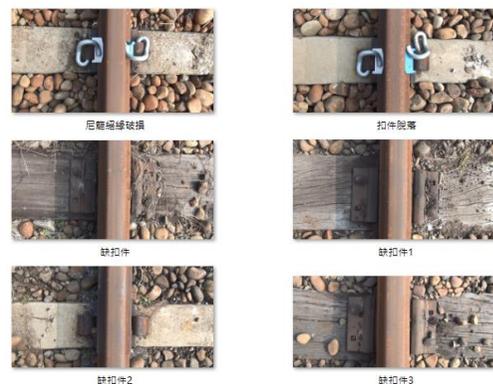




圖 14 軌道扣件負樣本

4.3 AI 模型建立

本研究使用 LabelImg 工具將偵測的扣件 bounding box 標上標籤，即圖片的 Annotation(註釋)。

Yolo 模型評估物件偵測 (Object Detection) 常見的指標:IoU 和 mAP，其定義如下：

1. IoU (Intersection over Union)

預測結果與 ground truth 的聯集分之交集(如下式)。一般預測任務最常用的指標是 0.5 IoU，表示在一次 bounding box 預測中，該 bounding box 算出的 $\text{IoU} > 0.5$ 時為預測成功。

$$\text{IoU}(A,B)=A \cap B / A \cup B(1)$$

2. mAP (Mean Average Precision)

計算各個種類的精確度並平均，這裡的精確度即是使用 IoU 作為判別準則，通常為 0.5 IoU。

- TP(c): True Positive in class c，預測的 proposal 和 ground true 吻合(種類正確且重疊部份夠高)。
- FP(c): False Positive in class c，預測的 proposal 和 ground true 不吻合(種類錯誤或重疊部份不夠高)。

因此由以上步驟可知在 class c 中的準確率為：

$\text{TP}(c)=\text{TP}(c)/(\text{TP}(c)+\text{FP}(c))(2)$
因此每個 class 平均的準確率為：

$$\text{mAP}=1/|\text{classes}| \sum_{c \in \text{classes}} \frac{\text{TP}(c)}{\text{TP}(c)+\text{FP}(c)} \quad (3)$$

3. mAP@[.5:.95]

IoU 取一個 threshold (如 0.5) 可以計算 mAP，因此可以取 0.5 到 0.95 的每 0.05 一個間隔設定 threshold 都算一次 mAP 後將所有數值平均，即為 mAP@[.5:.95]。

4.4 扣件分類結果

由臺鐵人員所提供之正負樣本，本研究定義了如圖 15 的扣件種類，並以 LabelImg 製作訓練資料，總計訓練樣本為 288 張圖片，測試樣本為另外 30 張圖片，測試樣本為影像資料庫中隨機選出。初步分類結果，在各項扣件的類型偵測上取得了約 87% 的準確率，綜合準確率約為 75% (如圖 16 所示)，初步訓練成果整理如表 2。顯示一些照片辨識的結果，經過 5,000 回合，損失函數在 3.75，可以得到 mAP 趨近 75%。

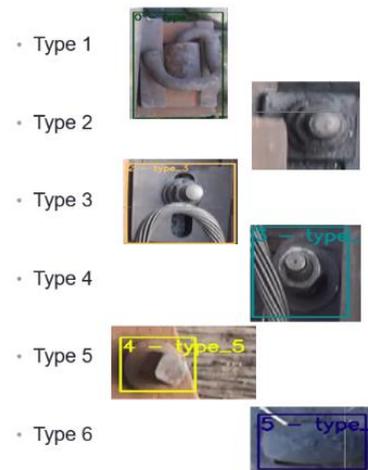


圖 15 台鐵軌道扣件初步分類

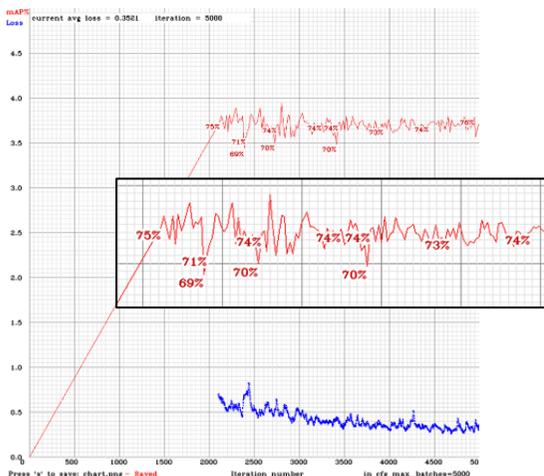


圖 16 YOLO 訓練結果數據(橫座標迭代次數 iteration number, 縱座標 mAP)

表 2、初步訓練成效

類型	偵測率
偵測到的物件個數	325
Type1	92.98%
Type2	95.00%
Type3	95.00%
Type4	74.66%
Type5	79.70%
Type6	85.13%
物件範圍偵測準確率	64.25%
判別準確率(precision)	0.86
捕獲準確率(recall)	0.88
F1-score	0.87
平均準確率(mAP)	75.54%

4.5 側線實測 AI 辨識結果

經過初步驗證後，與臺鐵人員討論後將扣件分類修正為 13 類，如表 3 所示，其中無圖片，均屬尚未蒐集到負樣本。

日間側線測試結果，正樣本 TP = 3,114 個，負樣本 FP = 378 個，誤判個數 FN = 180 個，正確率 Precision = 0.89, 召回率 Recall = 0.95, F1-score = 0.92, 平均正確率 mAP =

84.08%, IoU = 73.4%，顯示效果良好。一些照片辨識結果亦顯示於圖 17，證實本計畫所提方法具可行性。

表 3、修正後軌道扣件分類

編號	扣件分類	圖片	測試800張照片，內含3294個物件 準確率(解析度=1920*1080)
1	e_clip位於木枕(正常)		84.82%
2	e_clip位於木枕(損壞)		無資料
3	e_clip位於混凝土(正常)		88.27%
4	e_clip位於混凝土(損壞)		89.91%
5	e_clip遭到遮蔽		70.68%
6	鐵釘 (正常)		79.52%
7	鐵釘 (損壞)		無資料
8	魚尾板(正常)		84.82%
9	魚尾板(損壞)		無資料
10	滑床板(正常)		86.03%
11	滑床板(損壞)		無資料
12	護軌墊板(正常)		86.18%
13	護軌墊板(損壞)		無資料



圖 17 YOLO 進行側線辨識結果

4.6 正線實測夜拍扣件辨識

夜間試拍 I (6 月 6 日 17:00~21:00 側線夜拍)、夜間試拍 II (6 月 17 日 00:00~3:00 正線拍攝)、正線夜拍 (6 月 24 日 00:00~3:00)，夜間錄影品質尚可(當天下大雨也 OK)，人眼可辨識，但不如白天拍的清晰。進行燈光補強，用 2*200W 燈具，燈具架設於上方，與相機同向斜照。側正線試拍畫面良好，但時速未達 30km。

辨識結果如表 4 所示，扣件檢出率 85%，召回率 97%，辨識範例如圖 18 所示。訓練資料庫共 2850 張相片，測試資料庫共 952 張相片。本次

新增 0625 夜拍中之 879 張穩定清晰相片至訓練與測試資料庫中，驗證資料庫中物件個數 3728。



(a)



(b)

圖 18 進行正線夜拍辨識結果。(a) normal 為正常，(b) break 為損壞或缺失

表 4、新增夜拍軌道扣件辨識結果

eClip 木枕木_正常	85.62%
eClip 木枕木_損壞	50.76%
eClip 混凝土枕木_正常	88.19%
eClip 混凝土枕木_損壞	84.76%
eClip 遭到遮蔽	85.54%
道釘_正常	87.17%
道釘_損壞	50%
魚尾鈹_正常	67.79%
魚尾鈹_損壞	89.71%
滑床鈹_正常	88.23%
滑床鈹_損壞	無資料
護軌墊鈹_正常	87.39%
護軌墊鈹_損壞	無資料
斷軌	資料過少
precision = 0.85, recall = 0.97, F1-score = 0.91, average IoU = 70.52 %, mean average precision (mAP@0.50) = 0.721968, or 72.20 %	

本研究於 2019 年 6 月 24 日、7 月 27 日及 9 月 21 日夜間測試，一邊用 2 盞 200W 的 LED 燈，共 2*200=400 瓦燈，而且燈具降低高度

至平車下，貼近軌面，夜間拍攝影像如圖 19 所示，影像共 58,063 張。



圖 19 夜間實測扣件影像

58,063 張相片可作為訓練資料庫，80%作為訓練，20%做為測試。epoch 次數為 27,000，loss function 已經收斂。辨識結果如表 5 所示，正常扣件檢出率 82.5%及缺失扣件檢出率 74.5%，符合本研究預定目標，辨識結果如圖 20 所示。

表 5、正線 70km AI 模型辨識結果 (資料集 20%為測試集，其餘為訓練集)

類別名	Precision	TP	FP	TP+FN	Recall
e-Clip 木枕木_正常	0.91	590	61	701	0.84
e-Clip 木枕木_損壞	0.86	30	5	34	0.88
e-Clip 混凝土枕木_正常	0.89	6131	762	7824	0.78
e-Clip 混凝土枕木_損壞	0.80	194	47	316	0.61
e-Clip 遭到遮蔽	0.83	39	8	85	0.46
滑床鈹_正常	0.91	82	8	105	0.78
護軌墊鈹_正常	0.87	45	7	50	0.90
Precision = TP/(TP+FP)					
Recall = TP/(TP+FN)					
正常檢出率 = 0.825 損壞檢出率 = 0.745					
Thresh = 0.5					

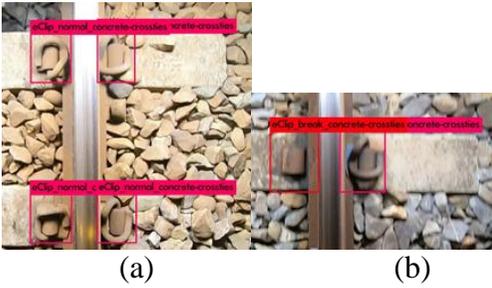


圖 20 進行正線夜拍辨識，normal 為正常，break 為損壞或遺失，(a) 均為 normal 正常，(b)左邊扣件遺失

4.7 扣件影像管理與辨識網站

網站包括四種模式：視頻上傳、扣件分類、扣件查詢和扣件定位，如圖 21 所示。通過使用 GPS 座標，可以在 Google Map 上顯示被識別出有缺陷的軌道扣件，如圖 22 所示。



圖 21 扣件影像管理與辨識網站 - 辨識結果清單



圖 22 扣件影像管理與辨識網站 - 缺失位置顯示

五、結論與建議

5.1 結論

本研究利用高速影像攝影設備，建立影像資料庫並利用 Yolo v3

軟體進行扣件影像辨識，經實際夜間正線拍攝驗證後證明其具可行性。綜合上述做以下結論：

1. 完成應用於軌道影像攝影設備之評估與測試。

因 GoPro Hero7 Black 主打拍攝極限運動及 4K 高畫質，除特別強調手持防震技術、防水防塵且輕巧方便，且周邊的配件完整，有助於將來的設備固定，經本研究評估決定使用 GoPro Hero7 Black，做為軌道影像攝影使用。

2. 照明設備與供電

在照明設備的選用上，為希望能獲得類似白天陽光下清晰的影像，且考慮到光線亮度、方便固定、用電量，經測試評估後最後方案為一邊各用兩盞 200W 燈具，而且光源擺設不只要低，位置還要位於中間，可以避免陰影的產生。電源的部份，使用發電機提供照明、GoPro 等設備使用。

3. 平車製作與設備架設

大甲分駐所代為打造本研究實驗測試用之平車，只要在實驗前利用吊車，即可將平車吊放於軌道上，並由動力火車頭推動。

在光源及 GoPro 設備固定的部份，本研究另利用鋁擠型管製作可放置光源的支架，並將其固定於平車上。經實測，GoPro 及光源在平車快速行駛時，均可牢牢固定在平車上，符合本研究使用需求。

4. 缺失扣件定位

本研究應用 GoPro 內建記錄的 GPS 訊號，可在電子地圖上顯示扣件位置。經測試 GPS 訊號與實際位置誤差約在 5 公尺左右，再結合軌道百公尺里程樁號的「虛擬偵測圓」，在實際定位缺失扣件時，確實可以快速找到目標物。

5. 影像管理與辨識網站建置

本研究已建置影像管理與辨識

網站，使用者可以方便的用行動裝置或個人電腦，以瀏覽器的方式，將前端錄得的影像或影片，上傳至後端網站，除了儲存查詢之外，還包括執行YOLO 扣件辨識，再將結果回傳至前端瀏覽器。

6. 影像辨識演算法

本研究採用的是 You Only Look Once (YOLO)演算法，經實測試，YOLO 的表現能符合本研究所需，目前使用 YOLO V3 版本。

7. GoPro 安裝實測

經多次測試，GoPro 仍有當機情形，原因推測 GoPro 採用電子防震，因實測時震動頻率高，評估購買三軸防震設備，取代 GoPro 電子防震功能。如果測試仍有當機情況，未來即不採用 GoPro 錄影，改評估取像方式為高速攝影，每取一張照片即馬上傳輸與辨識。

8. 扣件正負樣本分類

由大甲分駐所提供扣件分類協助，分類為 11 類，其中滑床板、護軌墊板尚未有缺失樣本。

9. 資料建立

YOLO 訓練資料集，經統計共擷取 58063 張相片可作為資料集。

10. 夜間實測

目前測試結果，扣件檢出率 82.5% 及扣件缺失辨識率 74.5%，可以符合本研究預定目標。

5.2 建議

1. 各種軌道段訓練資料建立

鐵路尚有多種軌道路段，如隧道、版式軌道等，仍需建立訓練資料。

2. 檢測項目種類更新

除扣件缺失外，可擴及軌面缺失等，未來軌面缺失辨識種類建議以斷軌及疲勞裂縫（魚鱗剝落現象）為主。

3. Edge Computing 前端辨識處理

缺失扣件即時辨識，馬上修復，需要前端有辨識功能，須架上工規電腦或是具加速卡之嵌入式系統做即時辨識，如此便須解決在平車上可能面臨防水、防震、防曬等問題。

4. 平車與電源問題

目前使用發電機及不斷電設備各一台，供 Edge Computing 計算所需，未來須再增加發電機及不斷電設備。

六、參考文獻

1. 臺灣鐵路路線建造史，交通部臺灣鐵路管理局，取自 <https://www.railway.gov.tw/tw/CP.aspx?sn=3700&n=6841>，查詢日期：2019 年 1 月 14 日。
2. 人工智慧 (AI) 大衝擊，2017，商業周刊，取自 <https://www.businessweekly.com.tw/article.aspx?id=33196&type=Indep>，查詢日期：2019 年 6 月 19 日。
3. 黃彥賓、王怡華、林安祥、楊子騰、陳嘉昌，“軌道扣件之種類與功能要求”，技術論壇。(http://www.cfwb2b.com/0_magazine/ebook/pdf_download/FW_142_C_101.pdf)
4. Deep Learning of Railway Track Faults using GPUs, 2018, <http://on-demand.gputechconf.com/gtc/2018/presentation/s8944-deep-learning-of-railway-track-faults-using-gpus.pdf>
5. How Swiss Federal Railways Is Improving Passenger Safety With The Power Of Deep Learning, 2018, Forbes.
6. Pavemetrics, Laser Rail Inspection System (LRAIL), 2019, Canada, <http://www.pavemetrics.com/applications/rail-inspection/laser-rail-inspection-system/>, March.

7. Abhi Ladola, Chirag Parekh, Dhaval Patel and Henal Bhagatwala, 2018, Solar Based Railway Track Fault Detection System, International Research Journal of Engineering, Vol. 5, Issue, 5, May.
8. S. Ritika, Shruti Mittal and Dattaraj Rao, Railway track Specific Traffic Signal Selection Using Deep Learning.
9. Mehmet Karakose, Orhan Yaman, Mehmet Baygin, Kagan Murat and Erhan Akin, 2017, A New Computer Vision Based Method for Rail Track Detection and Fault Diagnosis in Railways, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol. 6, No. 1, Jan.
10. Xavier Gibert ; Vishal M. Patel ; Rama Chellapp, "Deep Multitask Learning for Railway Track Inspection," IEEE Transactions on Intellig. Transportation Systems, Volume 18 Issue 1, Jan, 2017.
11. 劉鈺韋，2010，高速影像擷取與枕木定位應用於軌道監視系統，國立臺灣科技大學電機工程系碩士論文，台北市。
12. 陳南鳴、謝翔宇、劉鈺韋，2008，軌道運輸系統之監控技術開發，科技部計畫編號：NSC 97-2221-E011-151-MY3，執行期間：97 年 8 月 1 日至 100 年 7 月 31 日。
13. Luis Fernando Molina Camargo, et al., 2011, Machine Vision Inspection of Railroad Track, Graduate Research Assistant, University of Illinois at Urbana Champaign, Grant No. DT RT07---G---005 of the U.S. Department of Transportation, Final Report, January.
14. 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。

影，取自 http://blair-train.blogspot.com/2011/11/blog-post_8911.html，查詢日期：2019 年 1 月 16 日。

臺東海岸公路浪襲預警系統精進與維運

陳冠宇 國立中山大學海洋科學系教授
陳鈞彥 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
林欣妮 國立中山大學海洋科學系兼任研究助理

摘要

台灣東部海岸長年因異常浪侵襲，影響公路交通，危害用路人安全。本研究旨在預測海浪侵襲狀況，並觀測可能受害之路段以提早進行封路措施，對台灣東部用路安全具重大價值。經觀測發現，於颱風期間的台東海岸，易受浪襲的區段主要為多良站以及南興站，故於此兩站建立浪襲預警系統。系統的資料同化方式參考了歐等人使用的最佳內插法。本研究對溯上模式所需的示性波高輸入來源(SWAN 模式預報值)進行修正，以提高警報燈號的正確性。讓公路單位面對海況不佳的情況時，對於道路通行安全的評估有較佳的參考資料

一、前言

臺灣東部海岸地區與海岸公路可能受到颱風引起的波浪或異常浪等長浪侵襲，而造成危及生命安全的災害。例如 2015 年蘇迪勒颱風威力強大，除了造成台 11 線花東海岸公路路基流失致使道路阻斷，並於台 9 線南興段出現長浪襲擊致使駕駛車輛擋風玻璃破裂的事件。因此在交通部運輸研究所 106 年的「海岸公路異常波浪特性及防災應用技術之研究」計畫中，考量颱風期間在臺東海岸公路較容易受到海浪襲擊的區段，建立了多良段與南興段的浪襲預警系統。系統根據近岸的海況資訊產生不同危險程度的燈號，並以網頁形式呈現，可提供公路單位作為道路通行安全的評估和道路暫時封閉的參考。為了提高系統的

準確度，可利用即時的觀測資料對系統的預報值進行修正，以提高評估危險程度的正確性。

二、海岸公路浪襲預警系統的預報修正

2.1 研究方法

本研究的資料同化方式是參考歐等人(2004)使用的最佳內插法是基於 Gandin (1963)為處理氣象資料所發展的分析方法，其目的是建立觀測資料的統計架構，並決定最佳的權重，再利用各測站的觀測值對數值模式中的各個座標位置進行模式值的同化。最佳內插法的公式如下：

$$H_i^A = H_i^P + \sum_{j=1}^{N_{obs}} W_{ij} (H_j^O - H_j^P) \dots\dots (1)$$

其中 N_{obs} 為觀測站的數量， H_j^O 為觀測波高值， H_j^P 為模式波高值， H_i^A 為模式值經資料同化後的波高值， W_{ij} 為各個測站相對模式各個網格位置的權重，下標 i 和 j 表示第 j 個測站位置對應於第 i 個模式位置的權重。由於實測波高值 H^O 、模式的起始猜測值 H^P 及分析值 H^A 與真值 H^T 之間含有誤差 ε 的存在，如下表示：

$$\varepsilon^O = H^O - H^T \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\varepsilon^P = H^P - H^T \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\varepsilon^A = H^A - H^T \dots\dots\dots (2.3)$$

其中 ε^O 、 ε^P 及 ε^A 分別為實測波高值、模式的起始猜測值及分析值與真

值之間的偏差量，將第(2)式代入第(1)式，可得下式：

$$\varepsilon^A = \varepsilon^P + \sum_{j=1}^{N_{obs}} W_{ij}(\varepsilon_j^O - \varepsilon_j^P) \dots \dots \dots (3)$$

為求得最小化的分析誤差，故以分析誤差之均方誤差 (mean square error) 決定最佳化的權重 W_{ij} ，並定義 $P_{kj} = \langle \varepsilon_k^P \varepsilon_j^P \rangle$ 為起始猜測值的均方誤差矩陣， $O_{kj} = \langle \varepsilon_k^O \varepsilon_j^O \rangle$ 為實測值的均方誤差矩陣。為求最小化，故令其微分結果為零，可得下式：

$$\sum_{j=1}^{N_{obs}} W_{ij}(P_{kj} + O_{kj}) = P_{ik}, \quad k = 1, 2, 3 \dots N_{obs} \dots \dots \dots (4)$$

定義 $M_{kj} = P_{kj} + O_{kj}$ ，進一步將第(4)式展開為聯立方程組，如下：

$$\begin{bmatrix} M_{11} & \dots & M_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{k1} & \dots & M_{kj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{1i} \\ \vdots \\ W_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ \vdots \\ P_{ki} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (5)$$

由第(5)式可知，要計算各測站分配於計算格點的最佳權重，則必須求解 N_{obs} 組的聯立方程。如果觀測站的數量不多，則可使用靠高斯消去法求解出最佳權重。

當真值為已知的條件下，可順利求得觀測值與模式值的均方誤差，但在實際應用上，並無法得知海面上的真實波高，所以在此引用 Lionello(1992)定義的 P_{kj} 和 O_{kj} 計算方式，其表示如下：

$$P_{kj} = \exp\left(-\frac{\gamma_{kj}}{L_{max}}\right) \dots \dots \dots (6.1)$$

$$O_{kj} = \delta_{kj} \left(\frac{\varepsilon_k^O}{\varepsilon_k^P}\right)^2 = \delta_{kj} R_k \dots \dots \dots (6.2)$$

其中 γ_{kj} 為 k, j 二測站的距離， L_{max} 為校正長度(correlation length)，即把 P_{kj} 視為水平距離的空間函數。而 R 為實測值與起始猜測值的均方誤差比。在此假設實測值與起始猜值有相同的均方誤差，即 $R_1, R_2 \dots R_k$ 的值皆為 1，則可將第(5)式改寫如下：

$$\begin{bmatrix} P_{11} + 1 & \dots & M_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{k1} & \dots & P_{kj} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{1i} \\ \vdots \\ W_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ \vdots \\ P_{ki} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (7)$$

由於即時同化只能修正當下的模式預報值，為了修正未來幾小時的預報值，在此使用第(8)式作預報修正，可得預報修正值 H_k^{Pc} 如下：

$$H_k^{Pc} = \frac{H_{now}^A}{H_{now}^P} * H_k^P \dots \dots \dots (8)$$

其中 $\frac{H_{now}^A}{H_{now}^P}$ 為修正係數，即當下的同化值與預報值的比例， H_k^P 為未來第 k 小時的預報值。

2.2 資料同化與預報修正流程

2017 年交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)建立的海岸公路浪襲預警系統輸出警戒資訊的大致流程如圖 1。為提高系統預報的準確性，本研究加入對模式港研中心每日風浪模式(以下簡稱 SWAN)預報作修正的步驟，其大致的流程更改為圖 2。



圖 1 海岸公路浪襲預警系統預警資訊未修正之前的流程



圖 2 海岸公路浪襲預警系統預警資訊修正後的流程

南興站預報修正的細部流程如下：

1. 抓取港研中心每天提供的 SWAN 模式在南興、臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻四個近岸站的示性波高預報值。
2. 抓取交通部中央氣象局(以下簡稱氣象局)網頁提供的臺東(圖 2.3)、蘭嶼和鵝鑾鼻三站浮標的即時示性波高，搭配三站的模式值可對該小時的南興站預報值作同化。
3. 南興站同化後的示性波高除以該小時的預報值可得到一個修正係數。
4. 南興站對該小時起的 6 小時預報值(依欲修正的時數而定)皆乘上修正係數作為預報修正值。
5. 上述流程 1 的 SWAN 模式四個站經緯度和位置圖如表 1 和圖 3 所示，而流程 2 提到氣象局臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等三站的經緯度與 SWAN 模式的臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻相同。如果氣象局三站中，只有其中有兩站有即時資料，則僅使用兩站作同化與預報修正，以此類推。若三站皆無資料則不作修正。

表 1 SWAN 模式的預報點和氣象局波浪浮標的經緯度

站名	經度	緯度
臺東浮標	121.1450	22.7240
蘭嶼浮標	121.5758	22.0719
鵝鑾鼻浮標	120.8314	21.9006
南興	120.9010	22.3170

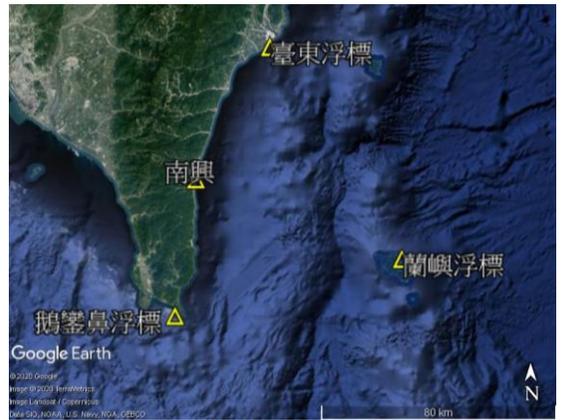


圖 3 SWAN 模式的預報點和氣象局波浪浮標的位置圖

2.3 資料同化與預報修正流程

由於南興站沒有波浪的觀測資料，無法判斷模式值經修正後的預報能否符合實際的情況。故先以有觀測資料的臺東浮標站來評估歐等人(2004)的方法是否適用。使用的資料從 2019 年的 5 月 1 日到 8 月 10 日為期三個多月，包括臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等 3 個浮標的示性波高以及同時期 SWAN 模式在這三個位置的示性波高。

先以當時段蘭嶼站和鵝鑾鼻站的觀測值和模式值對臺東站的模式值作即時同化，由於同化只能修正該時段的值，而無法對預報值，再對臺東站後續幾小時的模式值作預報修正。最後計算臺東站模式值與觀測值的均方根誤差(RMSE)，比較在修正前、後是否有減少的趨勢，藉以判斷此修正方式是否能提高 SWAN 預報的準確度。

臺東站預報值的同化與修正流程如下：

1. 抓取港研中心 SWAN 模式預報的臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等外海 3 個站的示性波高預報值。
2. 抓取氣象局網頁提供的蘭嶼和鵝鑾鼻浮標 2 站的即時示性波高，搭配對應位置的模式值對該小時的臺東站預報值作同化。

3. 臺東站同化後的示性波高除以該小時的預報值可得到一個修正係數。
4. 臺東站對該小時開始 6 小時內的預報值皆乘上修正係數作調整。

流程 2 利用蘭嶼和鵝鑾鼻 2 個站修正臺東站，故可將第(7)式改寫如下：

$$\begin{bmatrix} P_{11} + 1 & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{11} \\ W_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \end{bmatrix} \dots (9)$$

在此假設實測值與起始猜值有相同的均方誤差，即 R_1 、 R_2 的值皆為 1。而 P_{11} 和 P_{21} 各為蘭嶼站和鵝鑾鼻站的空間函數。由於第(6)式的校正長度 L_{max} 為自訂值，為瞭解哪個值有助於較能降低誤差，在此測試當 L_{max} 值在 40 到 340 km 區間時，且臺東站每小時皆作示性波高的同化情況下去計算同化與觀測值的 RMSE，結果如圖 4。圖 4 顯示 R 值等於 1 時，當 L_{max} 值從 40km 增加到 120km，RMSE 從 0.341 降到 0.325 左右。而當 L_{max} 超過在 120km 後的 RMSE 變化不大。圖 4 另外畫出 R 值等於 0 的值作為參考。

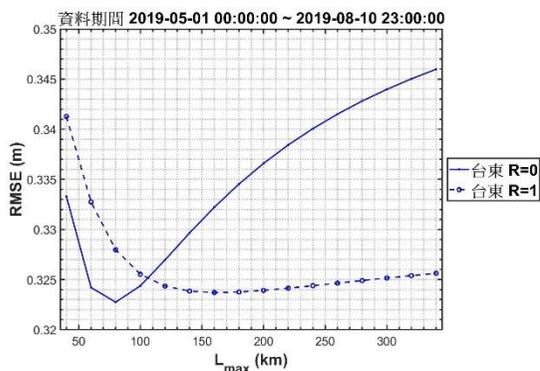


圖 4 臺東站兩種 R 值的每小時同化 RMSE 隨 L_{max} 變化圖

在此選擇 180km 作為校正長度，則蘭嶼站和鵝鑾鼻站的權重 W_{11} 和 W_{21} 可由第(9)式計算而得，其值各為 0.243 和

0.217。由(1)式可知示性波高在臺東浮標點的同化計算如下式：

$$H_{臺東}^A = H_{臺東}^P + 0.243 \left(H_{蘭嶼}^O - H_{蘭嶼}^P \right) + 0.217 \left(H_{鵝鑾鼻}^O - H_{鵝鑾鼻}^P \right) \dots (10)$$

$H_{臺東}^A$: 臺東示性波高同化值

$H_{臺東}^P$: 臺東示性波高模式值

$H_{蘭嶼}^O$: 蘭嶼示性波高觀測值

$H_{蘭嶼}^P$: 蘭嶼示性波高模式值

$H_{鵝鑾鼻}^O$: 鵝鑾鼻示性波高觀測值

$H_{鵝鑾鼻}^P$: 鵝鑾鼻示性波高模式值

圖 5 的單日預報以 2019 年 7 月 4 日為例，修正前的預報值與觀測值 RMSE 為 0.457。對每 6 小時作預報修正後可降至 0.392。每小時作即時同化的 RMSE 與每 6 小時的預報修正相似，圖內 RMSE 為與觀測值作計算結果。對三個多月(2019 年 5 月 1 日至 8 月 10 日)的示性波高資料作同樣的處理得到結果如圖 6 所示，原本的模式值與觀測值 RMSE 為 0.353。而每小時的即時同化與每 6 小時預報修正的 RMSE 各為 0.324 和 0.315，約比修正前 RMSE 下降了 8.2 和 10.7%。圖 7 展示每 3、6、12 與 24 小時所作的預報修正值，其 RMSE 各為 0.319、0.315、0.309 和 0.326，皆低於修正前的 0.353，代表對預報值作同化可降低部分偏差。

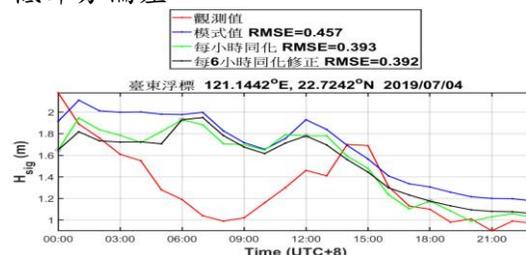


圖 5 臺東站單日示性波高的觀測、預報及同化預報修正

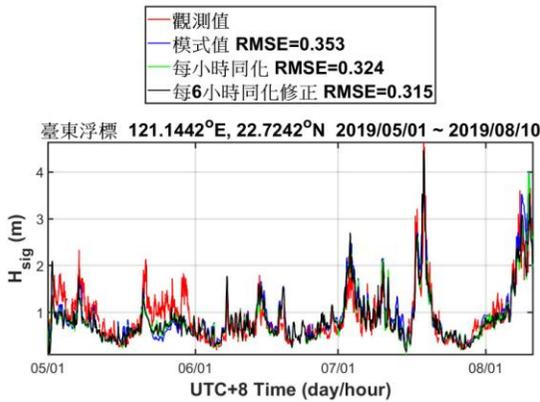


圖 6 臺東站 3 個多月示性波高的觀測、預報、同化預報修正歷線圖

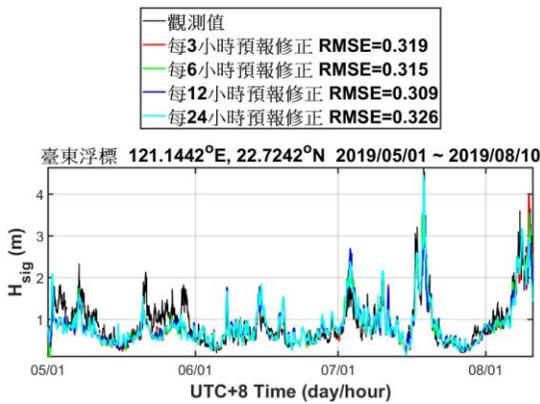
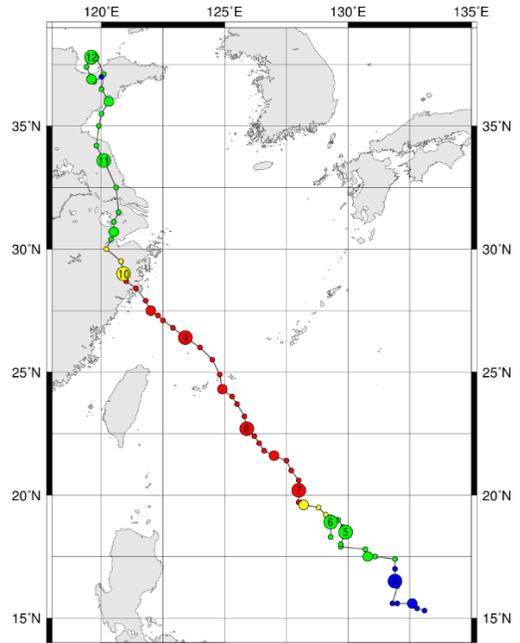


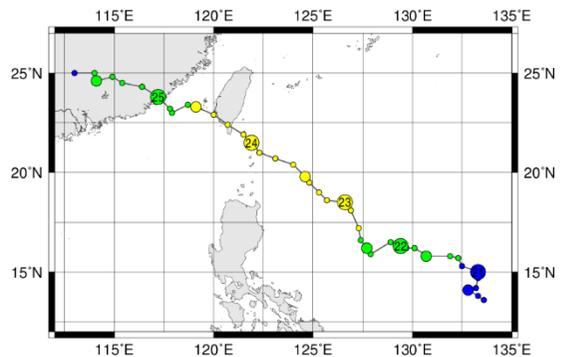
圖 7 臺東站 3 個多月示性波高的觀測及預報修正歷線圖

本研究取 2019 年強颱風利奇馬、輕颱白鹿以及中颱米塔等三個颱風為例，針對颱風期間的模式值作同化修正，並計算 RMSE 來評估修正的影響。根據日本 NII(National Institute of Informatics)網站 <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/> 的資料，其颱風路徑如圖 8、9 以及 10 所示。



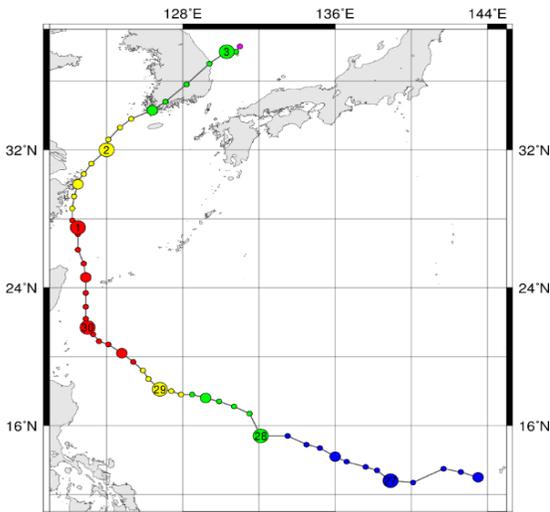
註：2019.08.03 06:00 至 08.10 18:00(UTC+0)

圖 8 日本 NII 強颱風利奇馬路徑圖



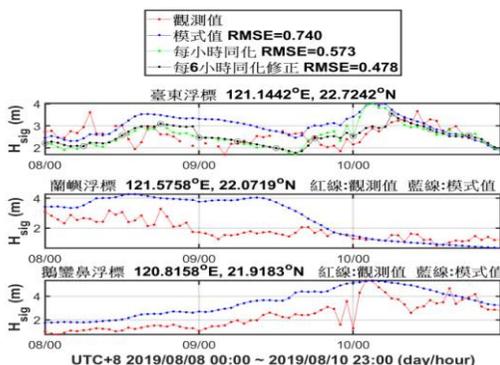
註：2019.08.20 6:00 至 08.25 18:00(UTC+0)

圖 9 日本 NII 輕颱白鹿路徑圖



註：2019.9.26 12:00 至 10.3 6:00(UTC+0)
圖 10 日本 NII 中颱米塔路徑圖

取強颱利奇馬於 2019 年 8 月 8 日到 10 日三天期間的資料作修正，示性波高預報修正的結果如圖 11。未修正的模式值與觀測值 RMSE 為 0.74，而每小時的即時同化與每 6 小時預報修正的 RMSE 各為 0.573 和 0.478，約比修正前 RMSE 下降了 22.5% 和 35.4%。圖 12 展示每 3、6、12 小時所作的預報修正值，其 RMSE 各為 0.555、0.478 和 0.494，皆低於修正前的 0.74，表示此期間的同化修正能讓模式預報獲得部分的改善。



註：中、下圖各為蘭嶼和鵝鑾鼻浮標的模式和觀測值
圖 11 利奇馬颱風期間臺東站示性波高的觀測、預報及同化預報修正歷線圖。

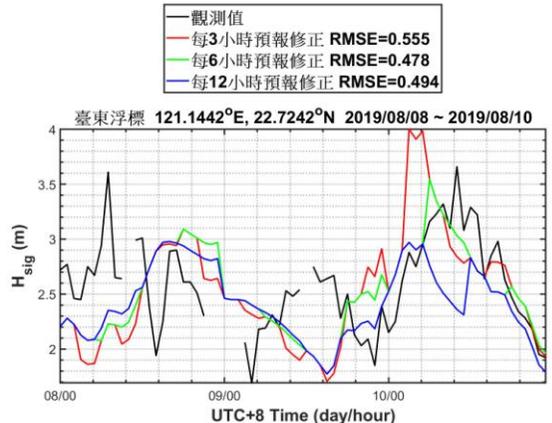
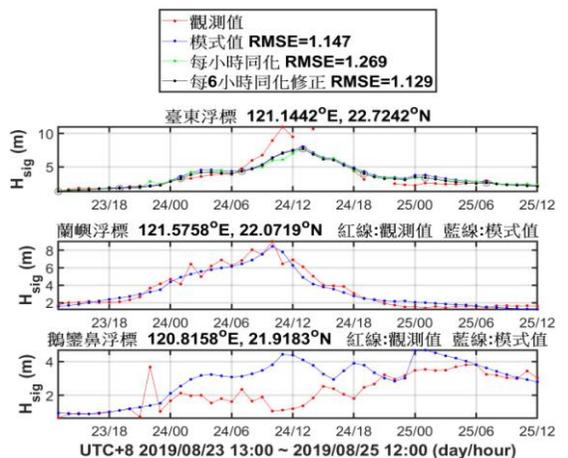


圖 12 利奇馬颱風期間臺東站示性波高的觀測及預報修正歷線圖

輕颱白鹿取 2019 年 8 月 23 日到 8 月 25 日期間的資料作修正，示性波高預報修正的結果如圖 13。未修正的模式值與觀測值 RMSE 為 1.147，而每小時的即時同化與每 6 小時預報修正的 RMSE 各為 1.269 和 1.129，與修正前的 RMSE 差異不大。圖 14 展示每 3、6 與 12 小時所作的預報修正值，其 RMSE 各為 1.231、1.129 和 1.247，同樣與修正前的 RMSE 值相差不大。表示該期間的同化修正無法改善模式預報。



註：中、下圖各為蘭嶼和鵝鑾鼻浮標的模式和觀測值
圖 13 白鹿颱風期間臺東站示性波高的觀測、預報及同化預報修正歷線圖

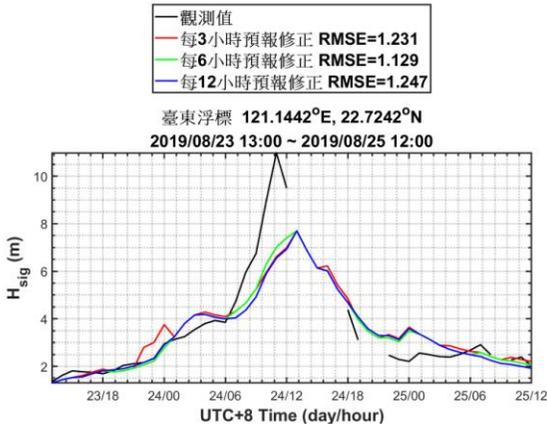


圖 14 白鹿颱風期間臺東站示性波高的觀測及預報修正歷線圖

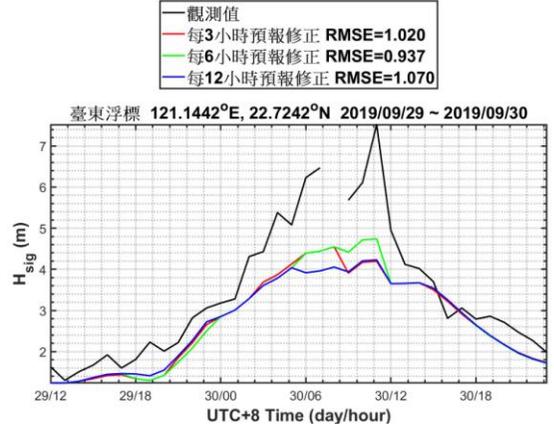
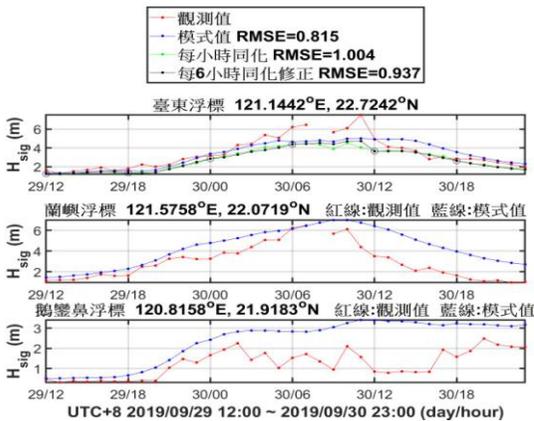


圖 16 米塔颱風期間臺東站示性波高的觀測及預報修正歷線圖

最後取中颱風米塔於 2019 年 9 月 29 日到 30 日期間的資料作修正，示性波高預報修正的結果如圖 15。未修正的模式值與觀測值 RMSE 為 0.815，而每小時的即時同化與每 6 小時預報修正的 RMSE 各為 1.004 和 0.937，約比修正前 RMSE 上昇 23.2% 和 15%。圖 16 展示每 3、6 與 12 小時所作的預報修正值，其 RMSE 各為 1.02、0.937 和 1.07，皆高於修正前的值，表示此颱風期間的預報值經同化修正後，反而加大與觀測值之間的差距。

由(10)式可知當蘭嶼或鵝鑾鼻的觀測值高於模式值時，會讓臺東同化值增加，亦即使臺東模式值上修。在此情況下，如果臺東觀測值低於模式值，由於上修的關係，反而讓同化值與觀測值的差距加大(RMSE 增加)。此情形可從圖 17 的米塔颱風在 29 日 12 時到 30 日 12 時得知跟觀測的差距比起來，同化值比模式值更大。針對此誤差加大的改善方法，除了未來持續改善颱風期間的模式本身準確度之外，增加更多附近的觀測站來加入同化計算亦有助於降低誤差。



註：中、下圖各為蘭嶼和鵝鑾鼻浮標的模式和觀測值。

圖 15 2 米塔颱風期間臺東站示性波高的觀測、預報及同化預報修正歷線圖

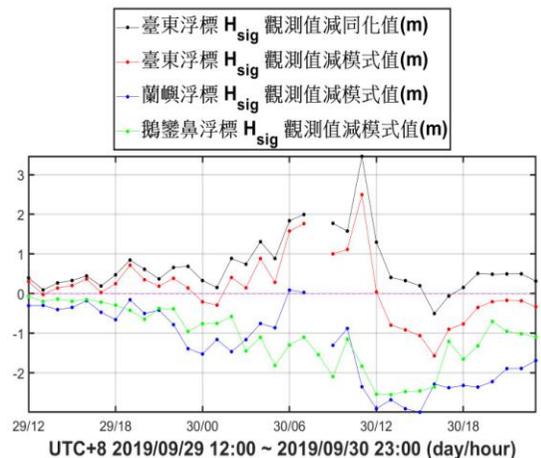


圖 17 米塔颱風期間臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻三站示性波高觀測值減預報值以及臺東站的示性波高觀測值減同化值歷線圖

2.4 南興站資料同化與預報修正

從臺東站例子可知，預報修正可此降低模式與觀測值之間的部分誤差。故本研究對臺東站附近的南興站進行同樣的預報修正處理。同樣使用的 2019 年 5 月 1 日到 8 月 10 日的資料，除了原本氣象局的臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等 3 個浮標的示性波高以及 SWAN 模式在這三個浮標位置的示性波高外，SWAN 模式再增一個南興外海的點位(圖 3)。

以當時段臺東、蘭嶼、鵝鑾鼻三站的觀測值和模式值對南興站作即時同化來修正該時段的模式值，再對南興站後續幾小時的模式值作預報修正，其細部流程參照 1.2 節。流程 2 中利用臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等 3 個站修正南興站，故可將第(7)式改寫如下：

$$\begin{bmatrix} P_{11} + R_1 & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} + R_2 & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{11} \\ W_{21} \\ W_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ P_{31} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

在此假設實測值與起始猜值有相同的均方誤差，即 R_1 、 R_2 、 R_3 的值皆為 1。而 P_{11} 、 P_{21} 和 P_{31} 各為臺東站、蘭嶼站和鵝鑾鼻站的空間函數。校正長度 L_{max} 選擇和臺東站例子相同，其值為 180km。臺東站、蘭嶼站和鵝鑾鼻站的權重 W_{11} 、 W_{21} 和 W_{31} 可由第(11)式計算而得，其值各為 0.245、0.17 和 0.263。由(1)式可知示性波高在南興外海的同化計算如下式：

$$H_{南興}^A = H_{南興}^P + 0.245 \left(H_{臺東}^O - H_{臺東}^P \right) + 0.17 \left(H_{蘭嶼}^O - H_{蘭嶼}^P \right) + 0.263 \left(H_{鵝鑾鼻}^O - H_{鵝鑾鼻}^P \right) \dots\dots\dots (12)$$

$H_{南興}^A$ ：南興示性波高同化值

$H_{南興}^A$ ：南興示性波高模式值

$H_{南興}^A$ ：蘭嶼示性波高觀測值

$H_{南興}^A$ ：蘭嶼示性波高模式值

$H_{南興}^A$ ：蘭嶼示性波高觀測值

$H_{南興}^A$ ：蘭嶼示性波高模式值

$H_{南興}^A$ ：鵝鑾鼻示性波高觀測值

$H_{南興}^A$ ：鵝鑾鼻示性波高模式值

2019 年 7 月 4 日的南興站示性波高的模式值、模式值經每小時同化修正以及每 6 小時的預報修正如圖 18。每六小時的預報修正將當天的 SWAN 預報值下修約 0.2m 左右。而圖 19 為 2019 年 5 月 1 日到 8 月 10 日的模式值、每小時同化修正和每 6 小時的預報修正。

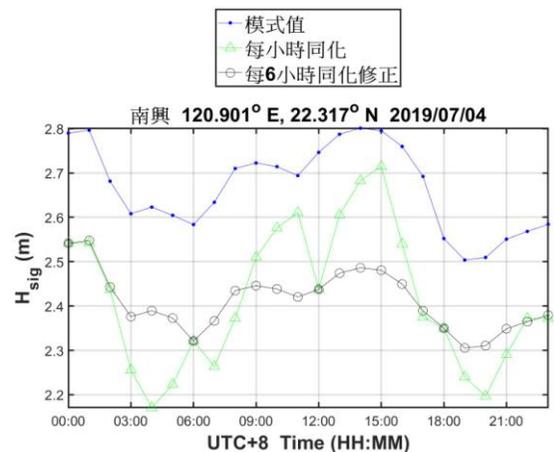


圖 18 南興站單日示性波高的模式預報及同化預報修正歷線圖

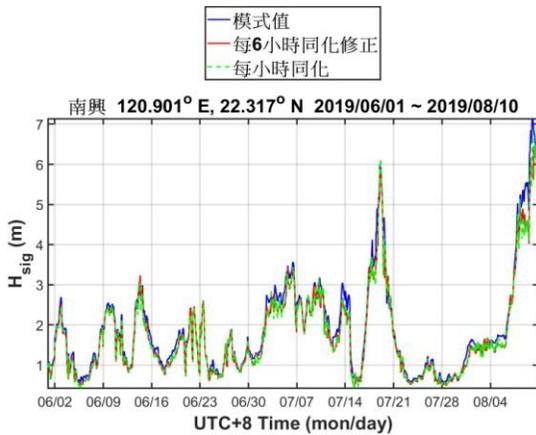


圖 19 南興站 2 個多月示性波高的預報及同化預報修正歷線圖

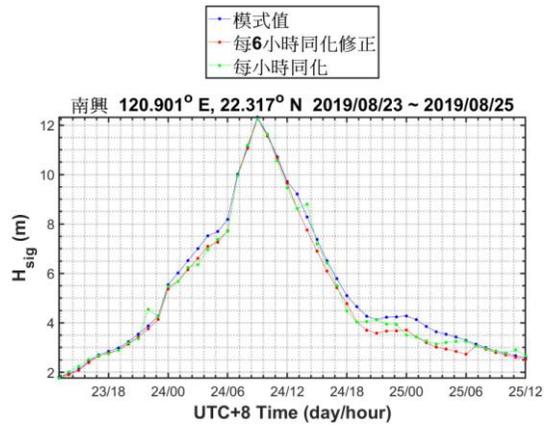


圖 21 白鹿颱風南興站的示性波高預報及同化預報修正歷線圖

同樣的修正也應用到 2019 年的強颱風利奇馬、輕颱白鹿以及中颱米塔三個颱風的預報。利奇馬颱風 8 月 8 日到 10 日的預報值經每 6 小時的修正後，大部分都呈現下修的情況，最大下修值約 1.4m，如圖 20。2019 年 8 月 23 日 12 時到 25 日時輕颱白鹿每 6 小時的預報修正同樣呈現下修的情況，最大下修值約 0.7m，如圖 21。而米塔颱風 2019 年 9 月 29 日 12 時到 30 日 23 時期間的每 6 小時的預報修正亦大致將預報值下修，最大下修約 1.1m，如圖 22。

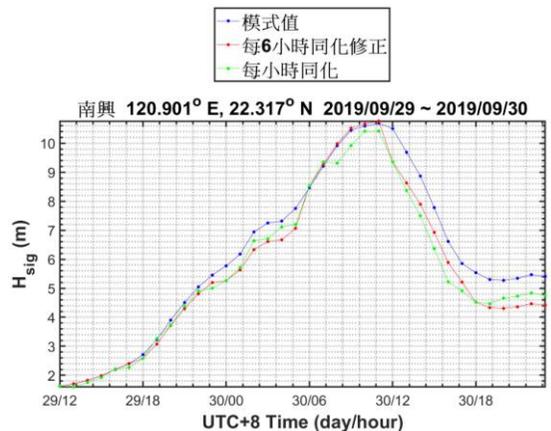


圖 22 米塔颱風南興站的示性波高預報及同化預報修正歷線圖

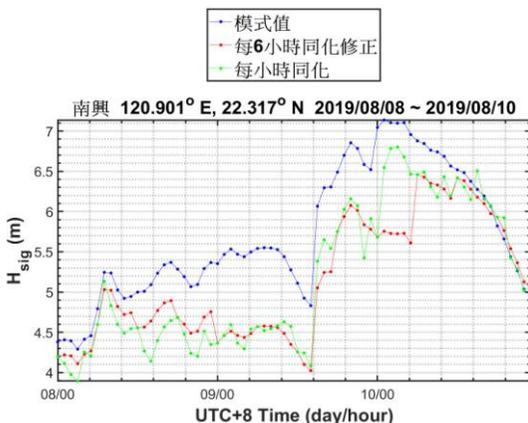


圖 20 利奇馬颱風南興站的示性波高預報及同化預報修正歷線圖

三、結論與建議

3.1 結論與成果

1. 本研究透過中央氣象局蘭嶼和鵝鑾鼻浮標站在 2019 年為期三個多月的示性波高觀測值對臺東浮標站的 SWAN 預報值進行同化並作每六小時修正。修正值與臺東浮標站觀測值比較的結果，可讓預報值的 RMSE 下降約 10%，表示本研究的修正方法可小幅改善預報誤差。至於颱風期間每 6 小時預報修正與未修正前相比，雖

然強颱利奇馬三天期間的 RMSE 下降 35%，但在中颱米塔期間的 RMSE 上升了 15%，表示目前的修正在颱風期間仍存在不穩定性。

2. 南興站的 SWAN 模式所預報的示性波高值在利奇馬颱風三天期間作每 6 小時的修正後，波高皆下修約 0.1 到 1m 左右。

3.2 建議

1. 由於目前氣象局觀測站在台灣東南海域靠近台九線南興段的波浪觀測站僅有臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等三個浮標站。而在南興段外海尚無觀測資料，所以無法利用南興附近的觀測值與預報修正作驗證，僅能透過地理條件鄰近的臺東站來作間接的驗證。如果未來能於颱風發生較頻繁的時期，在南興段外海佈放波浪計進行數個月的實際觀測，將有助於直接驗證預報修正的結果。
2. 歐等人(2004)提到對他們的風浪模式作資料同化時，觀測站的數量增加能讓降低模式與觀測值的相對誤差，直到超過七站時，相對誤差達到穩定。由於南興站的預報值目前僅有附近的三個浮標觀測站可作同化。考慮臺東站的例子，其米塔和白鹿颱風期間的預報值經過同化修正後，無法降低與觀測值之間的誤差，在未來如有新的觀測站加入同化計算，將有助於改善同化的結果。

參考文獻

1. 中央氣象局臺東外海浮標即時觀測資料網站，https://www.cwb.gov.tw/V8/C/M/OBS_Marine_30day.html?MID=WRA007。
2. 日本 NII (National Institute of Informatics)網站 2019 年強颱利奇馬的路

徑，<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/1/201909.html.en>。

3. 日本 NII (National Institute of Informatics)網站 2019 年輕颱白鹿的路徑，<http://agora.ex.nii.ac.jp/digitaltyphoon/summary/wnp/1/201911.html.en>。
4. 日本 NII (National Institute of Informatics)網站 2019 年中颱米塔的路徑，<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/1/201918.html.en>。
5. 陳冠宇、邱永芳、蘇青和、李俊穎、陳鈞彥，民國 106 年，海岸公路異常波浪特性及防災應用技術之研究，交通部運輸研究所合作研究計畫成果報告。
6. 歐善惠、許泰文、廖建明、陳亞嵐、徐立昌，近岸波浪推算資料同化之研究，海洋工程研討會，第二十六屆海洋工程研討會論文集，民國 93 年，第 206-213 頁。
7. Lionello, P., H. Günther and P.A.E. M. Janssen. (1992) Assimilation of Altimeter Data in a Global Third Generation Wave Model, *J. Geophys. Res.*, 97, pp. 14253-14474.

中彰海域波流數值推算研究

傅怡釗 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
陳鈞彥 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
張君名 丹麥水利研究所高級工程師

摘要

本研究在 107 年度完成西北太平洋風浪及水動力模式之大域數值模式研究基礎下，再創建屬局部數值模式性質之中彰海域波流耦合模式，經模擬冬季、夏季期間及 2 場颱風事件與觀測資料驗證，證明模式足以反應中彰海域特性，以確實掌握中彰海域海象變化特性，俾利後續探討研究。

一、前言

臺灣臺中、彰化海域(以下簡稱中彰海域)位於臺灣海峽中段位置，而臺灣海峽處於臺灣與大陸之間，傳遞至臺灣中部海域的風、浪及流均受限於兩岸陸地限制或受中央山脈地形影響，使得海象狀況較其他直接面對大洋之海域更為複雜。且自 107 年度經濟部通過審核之離岸風場多位於中彰海域，爰如能進一步掌握此區域海氣象，有助於後續相關工程計畫執行。

交通部運輸研究所港灣技術研究中心(簡稱港研中心)自 106 年底向丹麥水利研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)採購 MIKE 21 數值分析軟體，於 107 年底初步完成西北太平洋風浪及水動力等 2 數值模式(大域數值模式)，本年度(108 年)則再針對中彰海域範圍創建中彰海域波流耦合數值模式(局部數值模式)，利用前述大域數值模式提供局部模式作邊界輸入資料並以波、流耦合計算方式，推算中彰海域波、流模擬資料。

為驗證本研究建置模式推估波浪、潮流具合理性，分別選取本所港研中心設置臺中港北防波堤波流觀測站(TC)、成功大學近海水文中心之彰濱浮標(CH3)作波浪驗證測站;選取本所港研中心臺中港北防波堤波流觀測站(TC)進行潮位、流速、流向驗證，觀測站位置如圖 1 所示。

模式分別以冬季期間、夏季期間及颱風期間作模式驗證時間，藉由與實測資料比對以證明本研究建置之模式可反應此區域海象變化情形。

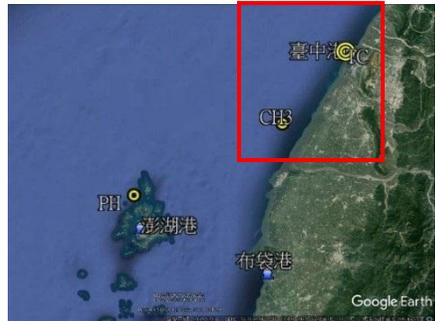


圖 1 驗證測站位置示意圖

二、西北太平洋風浪及水動力模式建立

本研究於 107 年使用 DHI 丹麥水利研究所(Danish Hydraulic Institute) 研發之 MIKE 21 數值模擬軟體，蒐集各相關單位地形水深資料如表 1，建置一大範圍之西北太平洋模型，其模型範圍由東經 105°至 150°、北緯 5°至 40°，共計 6,111 個節點及 10,533 個三角形元素，模型邊界網格大小約 1°，如圖 2 所示。

藉由上述西北太平洋模型，使用 MIKE 21 之波浪(SW)及水動力(HD)等模組，分別建置西北太平洋風浪模式及西北太平洋水動力模式等 2 數值模式(大域模式)，以下分節簡述西北太平洋風浪模式及西北太平洋水動力模式之輸入資料及模式參數。

表 1 模式水深資料彙整

項次	區域範圍	水深資料	資料來源
1	梧棲漁港	92 年刊行之海軍水道圖(臺中港)	海軍大氣海洋局
2	臺中港域	106 年港域測深資料	臺中港務公司
3	臺中沿岸	103 年 10 月海域測深資料	水利署第三河川局
4	彰化王功沿岸 8 km	103 年 10 月海域測深資料	水利署第四河川局
5	臺灣周圍海域	21-26°N, 119-123°E 200m 網格水深	台灣海洋科技研究中心
6	臺灣外海海域	ETOPO1	美國國家海洋暨大氣總署
7	上述地區以外之模式範圍	ETOPO5	

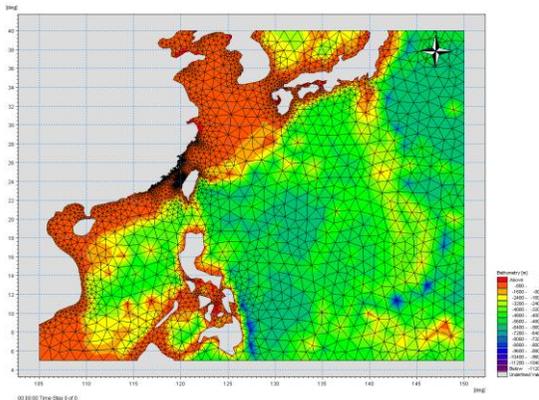


圖 2 西北太平洋模型範圍示意圖

3.1 西北太平洋風浪及水動力模式風、氣壓場資料

本研究模式驗證以 104 年度冬、夏季及颱風為主，西北太平洋風浪及水動力模式所使用之 104 年風場資料，為中央氣象局第四代數值天氣預報系統之區域模式 WRF(Weather Research and Forecasting)風場 M00 成員之第一層數值預報資料，其網格解析度約 45km;另模式模擬 108 年利奇馬颱風所使用的風場資料則為 WRF 風場 M05 之第一層數值預報資料，網格解析度約 15km，每 6 小時發布一次的 84 小時預報資料。

上述 2 類預報資料均擷取其每次發布之第 5 至 11 時、共計 6 小時之風、氣壓場，拼接組合成本研究模式所需之 2 維平面風、氣壓場資料作為西北太平洋風浪及水動力模式驅動力。

3.2 西北太平洋風浪模式參數及邊界設定

西北太平洋風浪模式選用全譜方程式求解，在波浪頻率方面，最小頻率採 0.055Hz，並以 1.1 倍參數的指數型式分割成 25 個頻率帶；在角度領域方面，以 22.5 度為 1 個角度單位，共計分割成 16 個方向角。風浪能量消散機制則考量 4 個波波非線性交互作用、碎波效應、底床摩擦、白帽耗散等物理機制，其中碎波指標 0.8、底床摩擦係數 0.04m、白帽耗散係數 4.5。

模式初始條件由 JONSWAP 經驗譜公式給定，邊界條件分成二種邊界形式，一為陸域邊界，其不考慮入射波浪的能量通量；另一為海域邊界，海域邊界均設定為封閉邊界，即外部無波浪能量進入模式內，內部波浪能量向外擴至邊界時則完全被邊界吸。

至於西北太平洋風浪模式模擬冬季、夏季及颱風期間波浪資料與實測資料驗證比對結果，併入第 4.3 節說明。

3.3 西北太平洋水動力模式參數及邊界設定

西北太平洋水動力模式之控制方程式由 Boussinesq 假設之不可壓縮流之 Reynolds averaged Navier-Stoke 方程式，可同時考慮底床摩擦、科氏力、風、大氣壓力、潮汐水位變化、輻射應力等因素，其中紊流渦度係數設 0.028、底床摩擦係數 $43.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ，水位初始值設 0 m，模式邊界水位使用 MIKE 21 提供的全球潮汐模式資料庫對應之潮汐水位。

至於西北太平洋水動力模式模擬冬季、夏季及颱風期間潮流資料與實測資料驗證比對結果，併入第 4.3 節說明。

四、中彰海域波流耦合模式建立

本年度(108 年)為進一步掌握中彰海域海象變化特性，使用表 1 之第 1~5 項水深資料，創建中彰海域波流耦合模式(局部數值模式，以下簡稱：耦合模式)，模型涵括臺中、彰化沿岸向外海 80 公里範圍，模型網格共計 201,2550 個節點及 401,030 個三角形元素，如圖 3 所示，其中臺中、彰化沿岸及彰化外海所有離岸風電潛力場址及示範場址區域之網格大小邊長約 40~50 公尺，如圖 4 所示，其餘中彰海域網格大小則長約 3 公里。

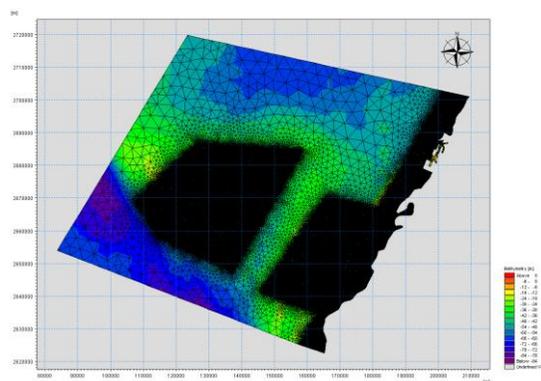


圖 3 中彰海域模型示意圖

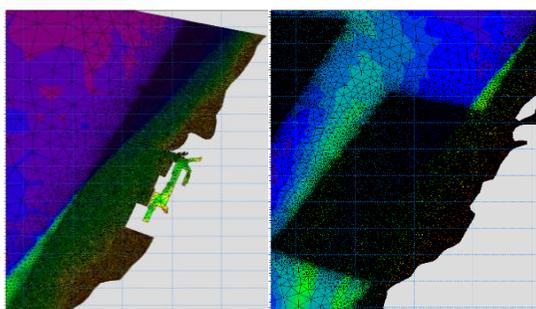


圖 4 中彰海域模型-臺中及彰化段示意圖

4.1 中彰海域波流耦合模式風、氣壓場資料

本研究模式驗證以 104 年度冬、夏季及颱風為主，中彰海域波流耦合模式使用之 104 年風場資料，為中央氣象局 WRF 風場 M00 成員第三層數值預報資料，其網格解析度約 5km 且為每 6 小時發布一次的 84 小時預報資料；另模式模擬 108 年利奇馬颱風所使用的風場資料則為 WRF 風場 M05 之第二層數值預報資料，網格解析度約 3km 且為每 6 小時發布一次的 84 小時預報資料。

上述 2 類預報資料均擷取其每次發布之第 5 至 11 時、共計 6 小時之風、氣壓場，拼接組成本研究模式所需之 2 維平面風、氣壓場資料作為中彰海域耦合模式驅動力。

4.2 中彰海域波流耦合模式參數及邊界設定

耦合模式係結合 MIKE 21 之波浪(SW)及水動力(HD)等 2 模組，模組間採耦合計算方式，即水動力模組內各時刻輸入波浪條件資料來自於波浪模組計算，而波浪模組內輸入之水位、流場資料來自水動力模組計算，如此相互提供計算結果，直至模擬時間結束為止。

耦合模式內之波浪模組，選用全譜方程式求解，各參數設定與西北太平洋風浪模式相同(詳 3.2 節)，初始條件由 JONSWAP 經驗譜公式給定，另將西北太平洋風浪模式(大域模式)模擬結果，取對應中彰海域模型邊界範圍之波浪條件，作為耦合模式內波浪模組的邊界波浪資料。

耦合模式內之水動力模組，底床摩擦係數 $36 m^{1/3}/s$ ，其餘各參數設定與西北太平洋水動力模式相同(詳 3.3 節)，水位初始值 0m，另將西北太平洋水動力模式(大域模式)模擬潮位結果，取對應中彰海域模型邊界範圍之潮位，作為耦合模式內水動力模組的邊界水位資料。

4.3 中彰海域波流耦合模式驗證

為驗證本研究建置耦合模式模擬推估波浪、潮流之合理性，耦合模式分別模擬冬季、夏季及颱風期間，並將模擬結果與臺中(TC)、彰濱浮標(CH3)觀測資料作比對驗證，觀測站位置如圖 1。冬季、夏季及颱風期間模擬結果分小節敘述如下，其中各驗證圖之黑色線(或符號)代表觀測值、藍色線(或符號)代表第三章西北太平洋風浪模式或水動力模式模擬結果、紅色線(或符號)則代表本章中彰海域波流耦合模式模擬結果。

4.3.1 冬季期間波浪及水動力驗證結果

選取臺中測站 104 年冬季期間(1/28~2/17)蒐集之波浪、潮位觀測資料作為模式冬季期間驗證資料，臺中測站(TC)波浪驗證結果如圖 5、示性波高誤差分析如表 2;臺中測站(TC)潮流驗證結果如圖 6、潮位誤差分析列如表 3。

由圖 5 可知，冬季期間臺中測站示性波高模擬結果均小於波高觀測資料，雖波高模擬較觀測值略小，但耦合模式波高模擬結果較西北太平洋風浪模式波高模擬結果佳，其模擬值與觀測值相關性(R^2)為 0.93，2 種模式示性波高模擬值變化趨勢與實測示性波高變化趨勢相近，至於譜峰週期及波向模擬結果大致與實測譜峰週期及波向趨勢相符。

由圖 6 可知，耦合模式在臺中測站潮位模擬值與潮位觀測資料相比，模擬潮差較大，雖潮差模擬較潮位觀測值略大、且與西北太平洋水動力模式潮位模擬比較結果較差，但整體潮位模擬值與觀測潮位相關性(R^2)為 0.83、具良好相關性，2 種模式整體模擬潮位之變化趨勢亦符合觀測潮位變化情形。

比對耦合模式在臺中測站流速模擬結果，在實際流速低時，模擬流速雖較實測流速略高，但與西北太平洋水動力模式流速模擬結果相比，耦合模式較能反應實際流速較高之實況，至於流向模擬大致與觀測流向相符。

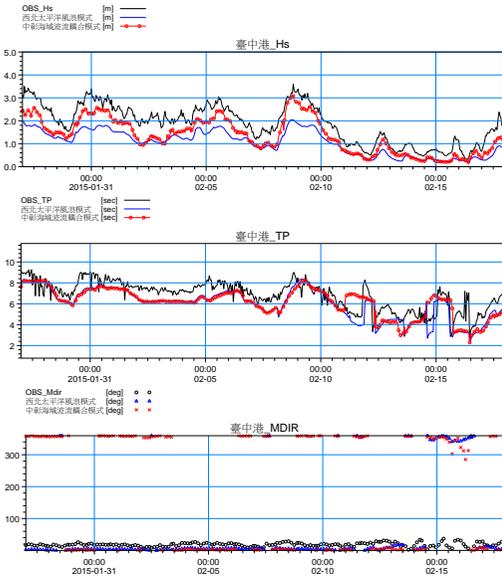


圖 5 冬季期間-臺中(TC)波浪驗證

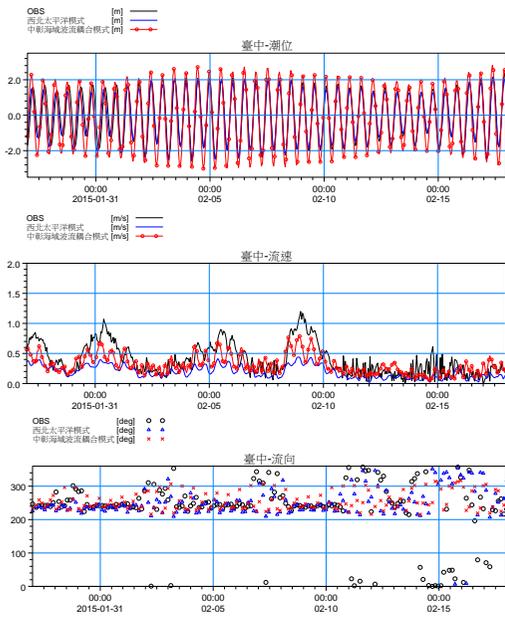


圖 6 冬季期間-臺中(TC)潮流驗證

表 2 冬季期間-示性波高誤差分析

模式	測站	絕對誤差 最大值(m)	絕對誤差 平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋 風浪模式	TC	1.77	0.82	0.89	0.94
中彰海域波 流耦合模式	TC	1.40	0.50	0.56	0.93

表 3 冬季期間-潮位誤差分析

模式	測站	絕對誤差 最大值(m)	絕對誤差 平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋 水動力模式	TC	0.73	0.20	0.25	0.92
中彰海域波 流耦合模式	TC	2.14	0.61	0.75	0.83

4.3.2 夏季期間波浪及水動力驗證結果

選取臺中及彰濱浮標於 104 年夏季期間(7/15~8/5)蒐集之波浪及潮位觀測資料作為模式驗證資料，臺中(TC)及彰濱浮標(CH3)波浪驗證結果如圖 7 及圖 8，示性波高誤差分析如表 4，臺中測站(TC)潮流驗證結果如圖 9，潮位誤差分析列如表 5。

由圖 7 可知，耦合模式模擬臺中之示性波高模擬結果有時略小於示性波高觀測值，耦合模式示性波高模擬結果雖較西北太平洋風浪模式模擬結果略差，但其模擬值與觀測值相關性(R²)為 0.79；由圖 8 可知，耦合模式模擬彰化浮標之示性波高模擬值略高於觀測值及西北太平洋風浪模式模擬值，較西北太平洋風浪模式波高模擬結果略差，但其模擬值與觀測值相關性(R²)為 0.82 具良好相關性。2 種模式模擬臺中及彰化浮標示性波高變化趨勢與實測波高變化趨勢大致相符。

由圖 9 可知，耦合模式在臺中測站潮位模擬值與潮位觀測資料相比，模擬潮差較大，雖潮差模擬較潮位觀測值略大，但與西北太平洋水動力模式模擬近似，其潮位模擬值與觀測潮位相關性(R²)為 0.96 具良好相關性，2 種模式整體模擬潮位之變化趨勢亦符合觀測潮位變化情形。

比對耦合模式在臺中測站流速模擬結果，在實際流速低時，模擬流速雖較實測流速略高，但與西北太平洋水動力模式流速模擬結果相比，耦合模式較能

反應實際流速較高之實況，至於流向模擬大致與觀測流向相符。

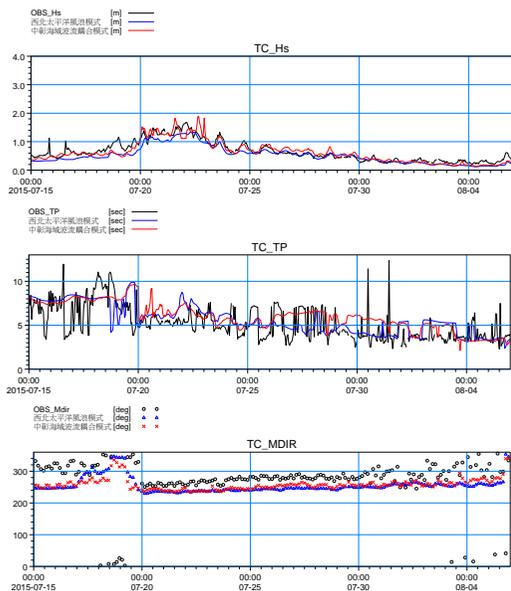


圖 7 夏季期間-臺中(TC)波浪驗證

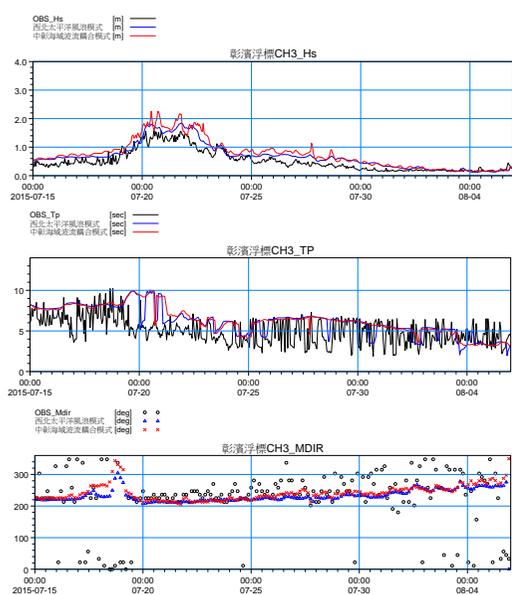


圖 8 夏季期間-彰濱浮標(CH3)波浪驗證

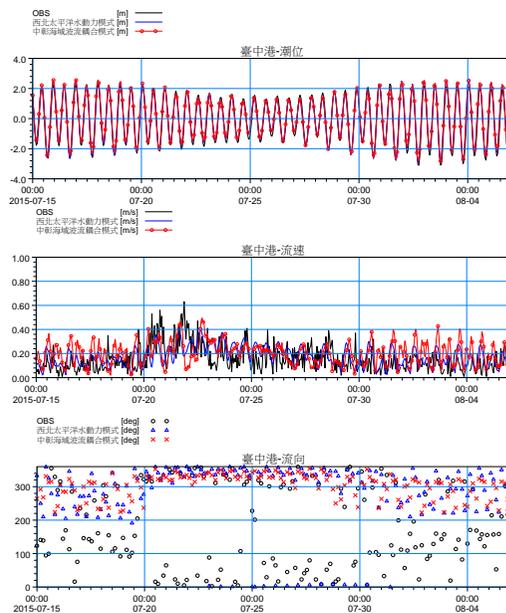


圖 9 夏季期間-臺中(TC)潮流驗證

表 4 夏季期間-示性波高誤差分析

模式	測站	絕對誤差 最大值 (m)	絕對誤差 平均值 (m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋 風浪模式	TC	0.79	0.14	0.19	0.81
	CH3	0.62	0.10	0.14	0.88
中彰海域波 流耦合模式	TC	0.90	0.31	0.19	0.79
	CH3	0.72	0.25	0.32	0.82

表 5 夏季期間-潮位誤差分析

模式	測站	絕對誤差 最大值 (m)	絕對誤差 平均值 (m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋水 動力模式	TC	0.77	0.21	0.26	0.96
中彰海域波流 耦合模式	TC	2.18	0.23	0.30	0.96

4.3.3 颱風期間波浪及水動力驗證結果

選取 104 年侵襲臺灣中部的蘇迪勒颱風(中度颱風, 104 年 8 月 6 日-8 月 10 日)及 108 年未侵襲臺灣的利奇馬颱風(強度颱風, 108 年 8 月 7 日-8 月 10 日)等 2 場颱風事件作模式驗證, 結果如下:

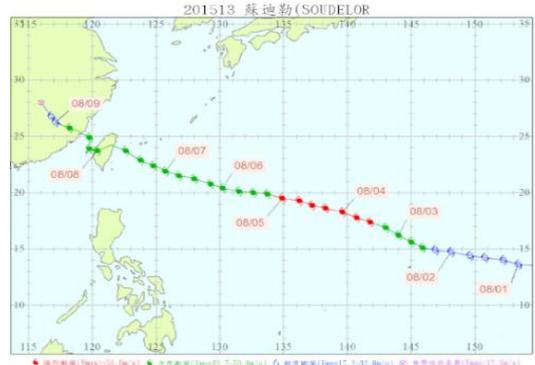
1. 104 年蘇迪勒颱風:

蘇迪勒颱風路徑如圖 10，模擬結果與臺中(TC)、彰濱浮標(CH3)示性波高觀測資料比對如圖 11 及圖 12 所示，示性波高誤差分析如表 6，與臺中(TC)潮位、流速及流向觀測資料比對如圖 13 所示，潮位誤差分析如表 7。

由圖 11 可知，耦合模式模擬臺中港示性波高模擬尖峰值雖小於實測波高尖峰值，但模擬結果較西北太平洋風浪模式模擬結果更接近觀測示性波高值，模擬值與實測值相關性(R^2)為 0.73，整體模擬臺中示性波高、譜峰週期及波向變化趨勢大致與實測示性波高、譜峰週期及波向相符;由圖 12 可知，彰濱浮標示性波高模擬尖峰值雖小於實測波高尖峰值，但模擬結果較西北太平洋風浪模式模擬結果高，模擬值與實測值相關性(R^2)為 0.57，整體模擬彰濱浮標示性波高、譜峰週期及波向變化趨勢大致與實測示性波高、譜峰週期及波向相符。

由圖 13 可知，耦合模式在臺中測站潮位模擬值與潮位觀測資料相比，模擬潮差較大，雖潮差模擬較潮位觀測值略大，但與西北太平洋水動力模式模擬近似，其潮位模擬值與觀測潮位相關性(R^2)為 0.89，2 種模式整體模擬潮位之變化趨勢亦符合觀測潮位變化情形。

比對耦合模式在臺中測站流速模擬結果，耦合模式模擬流速雖較實測流速略低(尤其是實際流速突然升高處)，但與西北太平洋水動力模式流速模擬結果相比，耦合模式較能反應實際流速較高之實況，至於流向模擬大致與觀測流向相符。



資料來源:中央氣象局颱風資料庫

圖 10 104 年蘇迪勒颱風路徑

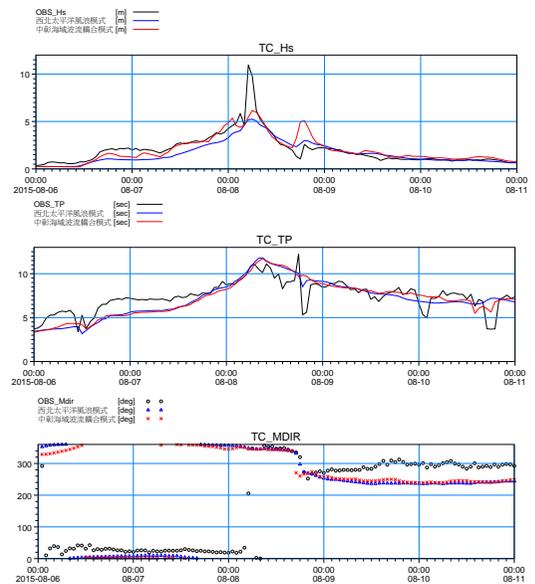


圖 11 蘇迪勒颱風-臺中波浪驗證

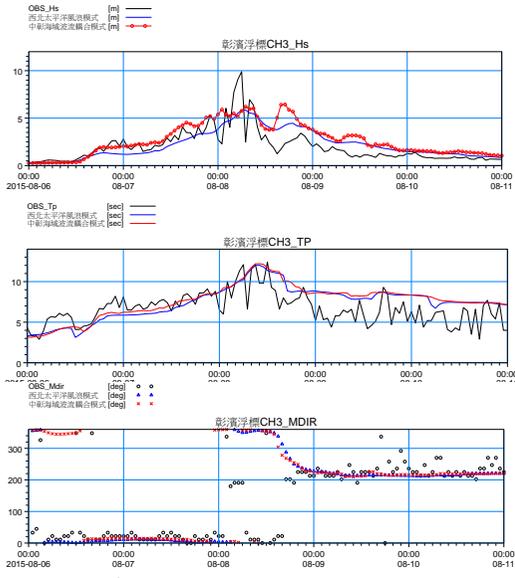


圖 12 蘇迪勒颱風-彰濱浮標波浪驗證

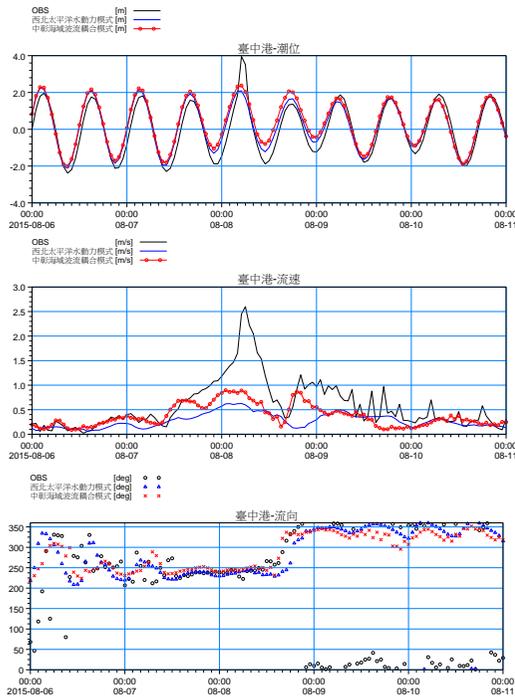


圖 13 蘇迪勒颱風-臺中潮流驗證

表 6 蘇迪勒颱風-示性波高誤差分析

模式	測站	絕對誤差最大值(m)	絕對誤差平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋風浪模式	TC	5.76	0.34	1.00	0.72
	CH3	4.08	0.34	1.23	0.54
中彰海域波浪耦合模式	TC	5.49	0.44	0.84	0.73
	CH3	4.15	1.08	1.42	0.57

表 7 蘇迪勒颱風-潮位誤差分析

模式	測站	絕對誤差最大值(m)	絕對誤差平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋水動力模式	TC	1.87	0.37	0.48	0.89
中彰海域波浪耦合模式	TC	1.58	0.47	0.59	0.89

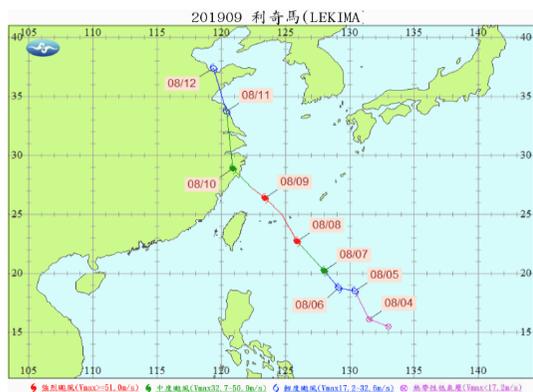
2. 108 年利奇馬颱風:

颱風路徑如圖 14，耦合模式模擬臺中(TC)波浪與觀測波浪資料比對如圖 15、示性波高誤差分析如表 8，耦合模式模擬臺中(TC)潮流與觀測潮位、流速及流向資料比對如圖 16，潮位誤差分析如表 9。

由圖 15 可知，耦合模式模擬臺中波高較西北太平洋風浪模式略高，但較接近實測波高，其波高模擬值與觀測波高相關性(R²)為 0.58，亦優於西北太平洋風浪模式模擬結果。整體模擬臺中港示性波高變化趨勢與實測波高變化趨勢相近；至於模擬臺中站週期及波向變化趨勢亦與實測波浪週期及波向變化趨勢大致相符。

由圖 16 可知，耦合模式模擬臺中站潮位模擬值與潮位觀測資料相比，模擬潮差較大，雖潮差模擬較潮位觀測值略大，但與西北太平洋水動力模式模擬近似，其潮位模擬值與觀測潮位相關性(R²)為 0.97 具良好相關性，2 種模式整體模擬潮位之變化趨勢亦符合觀測潮位變化情形。

耦合模式模擬流速較實測流速值偏低，其流速模擬值偏低除了可能與颱風期間之預報風場之風速值較觀測值低有關外，還與颱風路徑僅從臺灣東北部掠過而未直接影響臺灣中部有關，但整體而言，2種模式模擬臺中流速、流向模擬值之變化趨勢仍符合觀測流速、流向變化趨勢



資料來源:中央氣象局颱風資料庫

圖 14 108 年利奇馬颱風路徑

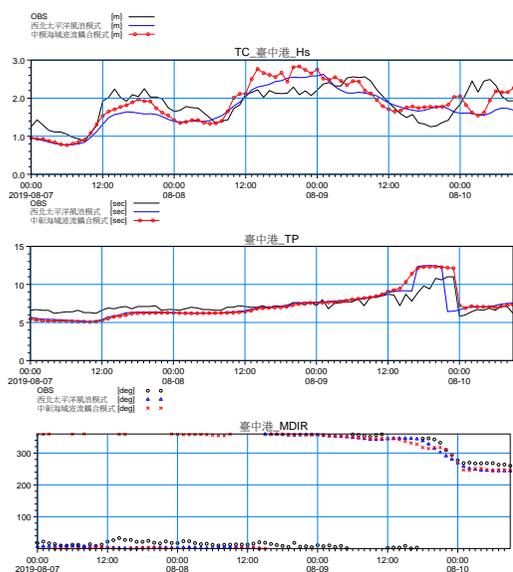


圖 15 利奇馬颱風-臺中波浪驗證結果

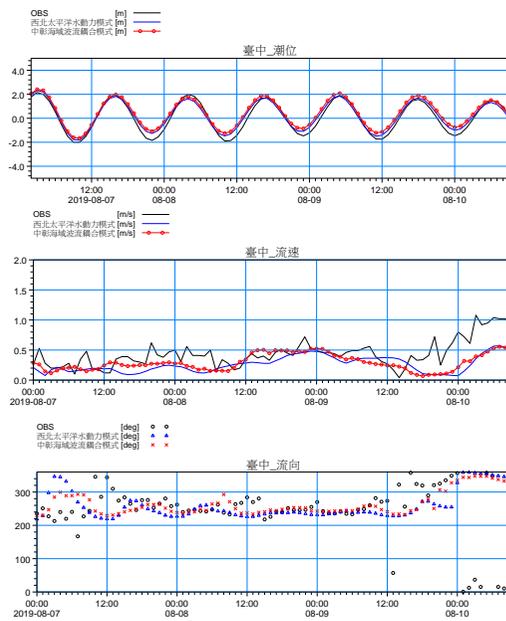


圖 16 利奇馬颱風-臺中潮流驗證結果

表 8 利奇馬颱風-示性波高誤差分析

模式	測站	絕對誤差最大值(m)	絕對誤差平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋風浪模式	TC	0.90	0.32	0.37	0.53
中彰海域波流耦合模式	TC	0.83	0.31	0.36	0.58

表 9 利奇馬颱風-潮位誤差分析

模式	測站	絕對誤差最大值(m)	絕對誤差平均值(m)	RMSE (m)	R ²
西北太平洋水動力模式	TC	0.64	0.25	0.30	0.97
中彰海域波流耦合模式	TC	0.83	0.36	0.43	0.97

五、結論

為能確實反應中彰海域局部海象變化情形，在 107 年度完成大域數值模式基礎下，本(108)年度再創建中彰海域波浪耦合模式，屬局部數值模式性質，並

藉由大域模式提供局部模式數值邊界條件之執行方式作為 2 種不同尺度模式結合。

中彰海域波流耦合模式整體波高模擬值與波高實測值相比結果，耦合模式於冬季、夏季期間之示性波高模擬值略高，颱風期間示性波高模擬值除了發生尖峰波高時，模擬波高值較實測波高小外，其餘時刻模擬波高值略高於實測波高值；與西北太平洋風浪模式波高模擬值相比結果，耦合模式於冬季期間模擬結果較佳、夏季及颱風期間略差。

中彰海域波流耦合模式整體潮流模擬值與潮流實測值相比結果，潮位模擬值與潮位實測值均有良好相關性，耦合模式流速模擬結果較西北太平洋水動力模式流速模擬結果更能反應實際流速。

中彰海域波流耦合模式經模擬冬、夏季期間及 2 場颱風事件與觀測資料驗證，證明模式足以反應中彰海域特性，模式架構設計除了節省數值運算時間，亦提供較細緻局部海象資料，供後續進一步海域海象特性探討。

基本資料調查(2/2)，2015 年。

6. 經濟部能源局，離岸風電推動現況與展望，2019 年。
7. 交通部中央氣象局，颱風資料庫。
8. Danish Hydraulic Institute, Spectral Wave Module Scientific Documentation ,2012.
9. Danish Hydraulic Institute, Spectral Wave Module Scientific Documentation ,2012.

六、參考文獻

1. 許朝敏、林銘崇、楊文榮、曾瓊蓉，「波浪通過離岸風田之變形研究」，第 32 屆海洋工程研討會論文集，社團法人臺灣海洋工程學會，2010 年 11 月，第 375-456 頁。
2. 許弘莒、蔡立宏、楊炳達、郭平巧、李孟學，「臺中港鄰近海域之波流場模擬」，港灣技術季刊，第 1 卷第 10 3 期，2016 年，第 42-63 頁。
3. 張君名、錢樺，「西北太平洋颱風波浪波高推算」，第 39 屆海洋工程研討會論文集，社團法人臺灣海洋工程學會，2017 年 11 月，第 25-30 頁。
4. 經濟部水利署第四河川局，彰化海岸防護基本資料調查(2/2)，2014 年。
5. 經濟部水利署第三河川局，臺中海岸

海洋陣列雷達應用於臺中港海象觀測之探討

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

摘要

全球暖化日益嚴重，為降低二氧化碳的排放量與減少使用石化燃料，我國開始發展國家能源之轉型，行政院於 101 年 2 月鼓勵發展再生能源，推動「千架海陸風力機」計畫，造成海陸交通日益繁忙，交通部基於掌管各式船舶航行安全及維持新能源政策發展，衍生調查基地母港(臺中港)與鄰近周邊海域海氣象之需求，為提供船舶航行與進出港區之參考資訊使用，本所港研中心於 107 年 12 月 18 日於臺中港北淤沙區設置線性陣列海洋雷達，主要研究臺中港與鄰近海域之海象調查與特性分析，以發展雷達遙測。本研究雷達觀測波高、週期、徑向流速的時序列漲落趨勢與實測結果具有一致性，相關係數大於 0.8 以上，研究成果針對海域之波浪與海流等資料進行長期的資料蒐集、分析與建檔，可以提供交通部航港局及港務分公司船舶進出臺中港管理應用，災害發生時能適時提供海面資訊，做為處置對策及預防措施之參考，有助於離岸風電海下工程技術發展。

一、前言

臺灣海峽風力充沛，係世界上少數具有潛力的開發場址之一，基於流體力學之原理，通行斷面越窄流體速越快，新竹南寮漁港到中國福建平潭島為兩岸最短的距離，兩者僅相距 125 公里（約 68 海浬相當於臺北到苗栗的距離），故

由新竹南至中彰地區都為適合的開發地點；依照目前我國離岸風電總體開發策略，由近岸向遠域逐漸發展，因此產業鏈之港埠設施需求與承載量日漸繁重，109 年規劃累計 1,200MW 陸域風場，114 年規劃累計 3,000 MW 離岸風場，兩者併合計共設置 1,000 架以上風力機組，總裝置容量規劃達成 4,200 MW，約可占 30% 以上再生能源總設置目標。

行政院於民國 105 年推動「前瞻基礎建設計畫」興建綠能建設，重新定位臺中港之港埠發展，檢討港區之經營環境運量需求及整體規劃，後，將臺中港重塑配置成離岸風電產業發展母港，整建 5A 碼頭與興建 5B 碼頭及 106 號碼頭做為風電產業組裝與裝卸作業之重件碼頭，後線土地設置風力發電零組件堆儲基地，並開放公民營企業投資土地承載改良與組裝設施，提供港埠腹地作為風機組裝場地，以及風電專用碼頭作為運輸、物流、裝卸、倉儲等服務之用。臺中港條件優渥，距離彰化漁港僅 40 公里的距離，距離岸風場運程適中，且各項條件皆較彰化漁港更為理想，滿足風機零件的運輸與倉儲，依據臺中港務分公司近 5 年進出船舶統計資料 103 年度月平均進出船舶約 1,250 艘次，106 年度月平均進出船舶約 1,316 艘次，108 年度月平均進出船舶約 1,458 艘次，顯示離岸風電確實已經造成臺中港進出船舶日益頻繁，運量有微幅成長之趨勢，如表 1 所示。

隨著科技時代的推陳出新，遙測已逐步發展為現今最舉足輕重的觀測方式之一，不外乎是儀器維護陸域較海域安

全，維護費用較海域儀器低，觀測視距較遠，調查面積大，故自於 20 世紀初海洋雷達逐漸嶄露頭角，科學家們率先嘗試從頻譜中獲取海洋信息，高頻雷達取得了廣泛的響應與豐碩的研究成果，特別是美國 Barrick, D. E. 在國家海洋暨大氣總署(NOAA)研究期間，所發表技術報告之研究成果奠定日後高頻雷達研究的基礎，並由美國逐漸發展至世界各地。本所港研中心期望藉由本雷達系統精進海氣象調查技術，提供臺中港做為進出口船舶航行安全相關資訊使用改進傳統單點底碇式海氣象調查方式，不僅增加海氣象觀測範圍，又能解決海下維護不易等問題。

表 1 臺中港進出港船舶統計

年別	平均艘次	總噸位
103	1,250	2.4325 億
104	1,299	2.5526 億
105	1,349	2.7262 億
106	1,316	2.7144 億
107	1,284	2.7021 億
108	1,458	2.8161 億

二、海洋雷達簡介

海洋雷達發展需要追溯至 100 年前無線電發展的時代，當時科學家認為大氣層中存在一導電層可以反射電磁波，因此無線電傳輸才得以跨越大洋傳遞，為了驗正該導電層是否真實存在，Breit 與 Tuve(1925)發明了一個無線電脈衝發射與接收裝置，這套系稱之為電離層測高儀，透過量測脈衝波的反射距離推算該導電層之高度，最後證明電離層(ionosphere)的存在，與此同時逐漸衍生出多種無線電探測及定位方法：Radio Detection and Ranging，因此雷達就此縮寫為 Radar。無線電波因向天空傳遞因

而稱之天波(sky wave)，然因海水之導電性，科學家注意到某些波段(現已知為高頻波段的無線電電磁波)傳遞過程會在大氣與海表之間反覆折射，並讓訊號沿地球曲面前進，這種海水表面存在的電磁波傳播模式，稱之為地波(ground wave)，而地波雷達能被廣泛應用到氣象調查係 Barrick, D. E. 奠定具體可行的分析方法，嘗試從頻率譜中獲取海洋信息，探測超視距外的海洋特徵，探測距離可達 40~200km，因而逐漸應用於海流和波浪的觀測，雷達波傳遞形式示意圖，如圖 1 所示。

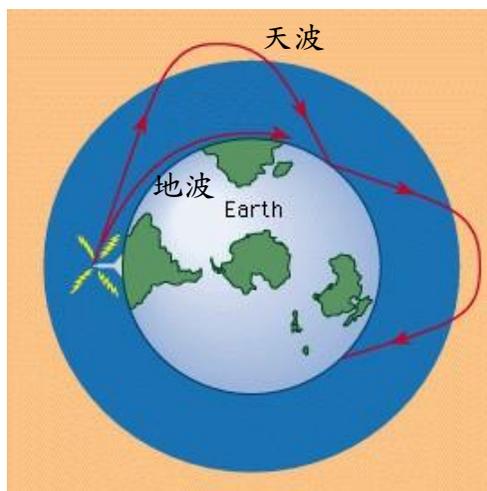


圖 1 雷達波傳遞形式示意圖

2.1 雷達頻率的分類

雷達頻率範圍約為 0.003 ~ 40GHz，分別有 HF 高頻雷達、VHF 特高頻雷達、UHF 超高頻雷達、L 波段雷達、S 波段雷達、C 波段雷達、X 波段雷達、Ku 波段雷達、K 波段雷達、Ka 波段雷達，各雷達波段分類情形如表 2 與圖 2 所示。其中頻率較低的 HF 高頻雷達與 VHF 特高頻雷達朝海面發射時在海水與大氣介面之間的傳遞衰減率甚小，一定程度會將沿著海水表面，並隨著彎曲的地球表面傳播電磁波，可於短

時間連續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（海面風速、波高、流速等），此係其他儀器無法達成之目標，且陸域維護成本較水域維護成本低廉，因此利用高頻雷達觀測海氣象已經成為各國常規化的調查方式。

表 2 雷達波段與頻率

雷達波段	頻率(MHz)
F 高頻雷達	3~30
HF 特高頻雷達	30~300
UHF 超高頻雷達	300~1,000
L 波段雷達	1,000~2,000
S 波段雷達	2,000~4,000
C 波段雷達	4,000~8,000
X 波段雷達	8,000~12,500
Ku 波段雷達	12,500~18,000
K 波段雷達	18,000~26,500
Ka 波段雷達	26,500~40,000
MMW 毫米波雷達	34,000 以上

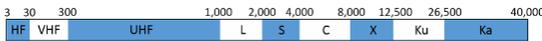


圖 2 雷達波段與頻率分類(MHz)

2.2 雷達工作的原理

雷達工作原理主要係利用都卜勒效應的概念，如圖 3 所示，當雷達發射一頻率於靠近物體，其回波訊號發生改變有頻率變高現象，當雷達發射一頻率於遠離物體，其回波訊號發生改變有頻率變低現象，經驗如同急駛而過的救護車，當車輛接近觀察者時感覺救護車的鳴笛聲越來越急促，當車輛越遠離觀察者時，鳴笛頻率又逐漸變慢，假設雷達發射頻率為 f_0 ，所測得回波頻率差為 f_D ，目標物的徑向觀測速度 v 與光速 c ，就有此關係式(1)，透過回波與發射波的頻率差，藉以測得目標物在雷達徑向上的相對速度，假設目標物於雷達徑向

所在距離位置為 R ，接收訊號時間為 Δt ，目標物體與雷達的間距為 R ，距離公式 R 可表示為關係式(2)，不論雷達形式為何，皆使用相同原理計算，故統稱為都卜勒雷達(Doppler Radar)，但由於該雷達常廣泛應用於氣象，故氣象調查的雷達又稱之為氣象雷達。

$$f_D = \frac{2vf_0}{c} \dots\dots\dots(1)$$

$$R = \frac{c \times \Delta t}{2} \dots\dots\dots(2)$$

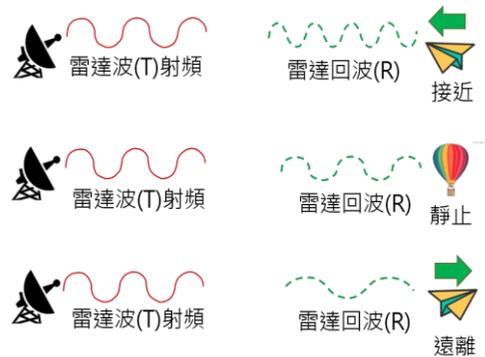


圖 3 都卜勒效應之頻偏現象

2.3 雷達應用的種類

雷達是一個多組複雜的硬體所構成之設備，完整的系統需包含發射機、接收機、發射天線與接收天線與儲存設備，如圖 4 所示，雷達的分類有許多種，其中一種分類方式係依據使用目而區別，當雷達系統搭載不同雷達的使用頻率將被賦予各種不同的功能，前 2.1 小節已簡要分述雷達波的波段與頻率，截至目前為止仍沒有一個完美的雷達波段可以實現所有的目的，現階段使用仍以軍事情用途居多，綜括來說雷達種類有預警雷達、搜索雷達、照明雷達、射控雷達與測候雷達 5 種類型，如後分述。

一般而言雷達頻率越高衰減愈大，係因波長短容易造成電磁波被干擾遮蔽，故如需探測更甚距離者，建議採用頻率較低的雷達系統，另外依據雷達方程式，雷達觀測距離與功率呈現正相關，故增加功率也增加觀測距離的方法之一，能量越強觀測距離則越遠。



圖 4 雷達的實體架構

(1) 預警雷達

設備頻率 300 至 1,000MHz 超高頻(UHF)與 30~300MHz 特高頻(VHF)，發射功率數兆瓦級以上的發射器，訊號不易被大氣吸收，主要用於蒐集海空情報資料，擅長中長、遠程目標監控，缺點為精確度不足。

(2) 搜索雷達

設備頻率 1,000~2,000MHz(L)與 2,000~4,000MHz(S)的雷達頻段，作用距離在 400 公里至 600 公里不等，為常見艦載監控設備之一，目前我國海軍仍使用 2D 機械式雷達居多，包括：康定艦(L)、成功艦(L)。

(3) 照明雷達

設備頻率 4,000~8,000MHz(X)的雷達頻段，平均發射功率 10KW，最大功率 34KW，主要配合船艦之砲射控系統做為自動追蹤目標之用，啟動時雷達將

直接鎖定目標並發射照明波引導飛彈摧毀目標。

(4) 射控雷達

設備頻率 18,000~26,500MHz(K)的雷達頻段屬於窄波範圍，雷達能量集中具有多目標搜索及追蹤功能，主要搭配射擊武器運行，實施瞄準與發射，有效距離約達 17km，此雷達搜索範圍較小，但精確度高，可測定各項參數，有效鎖定範圍內極小的目標。

(5) 測候雷達

設備頻率 2,000~4,000MHz(S)與 4,000~8,000MHz(C)的雷達頻段，有效範圍距離在 300 公里至 500 公里之間，雷達回波可依據特徵分析對流性強的降雨區域，掌握降水的結構，目前臺灣共建置 8 座雷達站，分別於五分山、花蓮、七股、墾丁、桃園機場、綠島、清泉崗與馬公，如圖 5 所示，其中 4 座為中央氣象局雷達站。

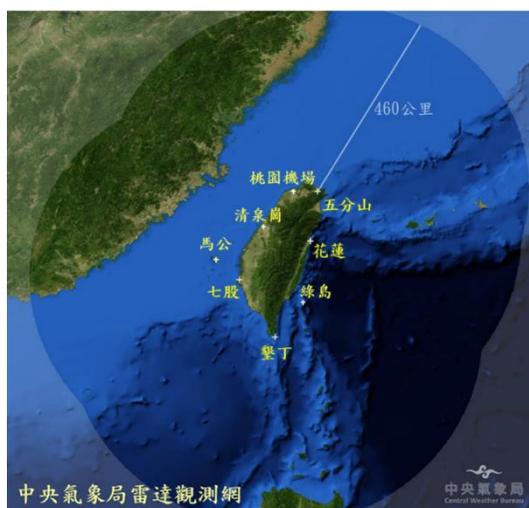


圖 5 臺灣氣象雷達觀測範圍

三、臺中港線性陣列海洋雷達訊號處理與分析

3.1 臺中港線性陣列雷達

本所海洋雷達設置地點之位於臺中港北淤沙區屬於港埠低密度開發區域，主要雷達機房座標：E 120°31'25.82”，N 24°18'39.28”，收發射天線座標：E 120°31'22.66”，N 24°18'33.95”佈設於現地擋沙牆頂部，觀測範圍扇形 120°，觀測距離最遠達 40km，如圖 6 所示，本雷達所使用參數如表 3 所示。

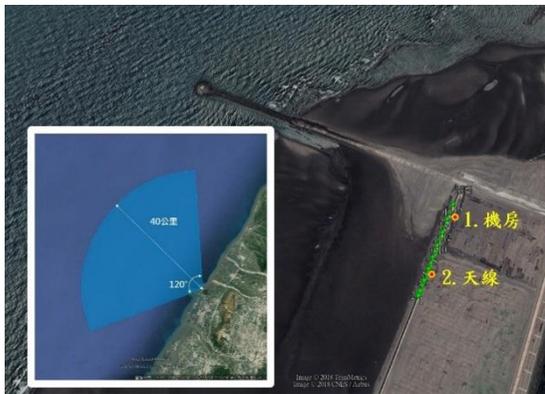


圖 6 本雷達站位置(臺中港北淤沙區)

表 3 本雷達規格與主要設定

本雷達參數	參數值[單位]
觀測時距	30 [min]
達頻率	27.75 [MHz]
頻寬 (Band width)	300 [KHz]
發射天線數量	4 [支]
接收天線數量	16 [支]
方位角 (Main Bearing)	296 [度]
觀測距離	40 [KM]
距離解析度 (Range resolution)	500 [m]
方位解析度 (Azimuthal resolution)	8 [度]
線性調頻發射週期 (Sampling frequency)	0.2166 [sec]
/DC 取樣頻率 (Sampling frequency)	740 [Hz]

線性調頻取樣數量 (Number of samples per chirp)	1,280
小線性調頻數量 (Number of minimum chirps)	8,192

3.2 線性陣列雷達的訊號處理

雷達原始資料紀錄成複數形式之 I/Q 資料，I/Q 資料是 RF 通訊系統中常見的調變型態，適合作為頻率調製、混頻與解碼，回波強度與相位等訊息可以透過 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，如圖 7 所示。

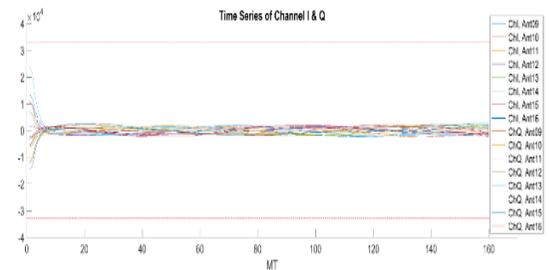


圖 7 雷達 I/Q 訊號序列圖

每個啁啾訊號間隔時間為 0.2166 秒，經過 A/DC 以 740Hz 頻率取樣，可以取出 160 個時序離散樣本，經過傅立葉轉換後可以由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 個啁啾合併，可以得到受波浪影響造成 I/Q 隨時間週期震盪的雷達回波強度圖，再將縱軸進行傅立葉轉換，原縱軸時間將轉換為頻率，頻率值可運算並回推至各距離元位置，縱軸值可轉換為距離，得出橫軸仍為時間之都卜勒譜，圖 8 所示，該譜表示各個不同都卜勒頻偏下的回波強度。

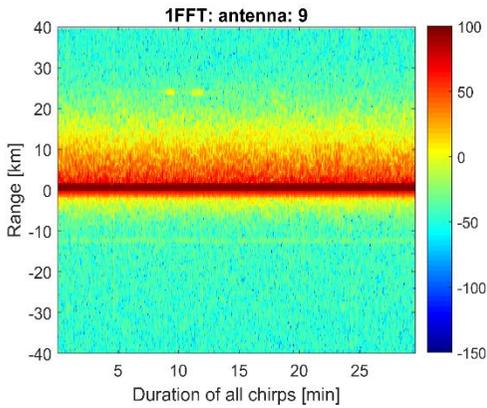


圖 8 雷達都卜勒譜

再將圖 8 時間橫軸進行傅立葉轉換，原橫軸時間將轉換為頻率，縱軸距離值保持不變，即可繪製雷達觀測中最主要的都卜勒距離譜圖，但由於本研究之高頻線性雷達為指向性雷達，故都卜勒距離譜距離為負數的部份表示訊號在天線の後方，因此不具有物理的意義，將予剔除，得出實部之都卜勒距離譜，如圖 9 所示。

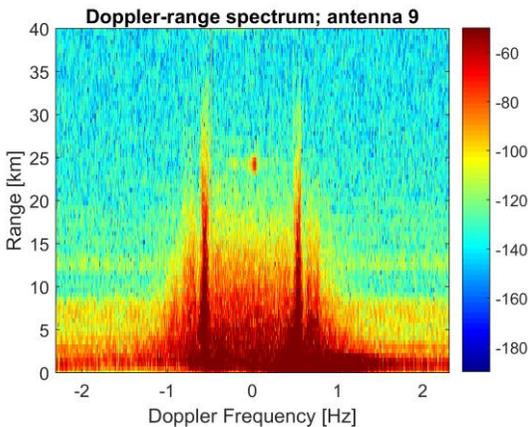


圖 9 雷達都卜勒距離譜

3.3 線性陣列雷達的訊號分析

雖然發射天線場型具有指向性發，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。

(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(3)，將公式(3)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(4)所示。

$$\lambda_{wave} = \frac{\lambda_{radar}}{2} \dots \dots \dots (3)$$

$$V_{radar\ current} = f_{current} \frac{\lambda_{radar}}{2} \dots \dots \dots (4)$$

換句話說即利用高頻雷達蒐集都卜勒距離譜一階峰之頻移，再依據公式(4)公式求得海面徑向流速，將整個海域依序求解各距離元的徑向速度，並標示在雷達範圍圖內即可求出臺中港海域內流場圖，如圖 10 所示。

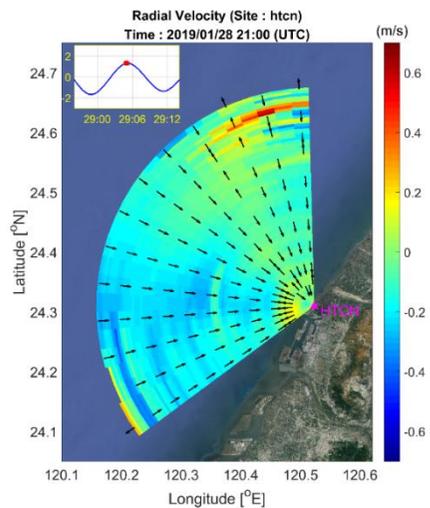


圖 10 臺中港鄰近海域流場圖

(2)海面的波高(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(5)與公式(6)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(7)、與公式(8)與權重係數，如圖 11，求出估計波高與估計的平均週期，分析結果如圖 12 所示。

$$\sigma^{(1)}(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m=\pm 1} S(-2mk_0) \delta(\omega - m\omega_B) \dots \dots \dots (5)$$

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

$$k_0 h_{rms} = 2 \left[\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \sigma^{(2)}(\omega) \omega^{-1}(\eta) d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} \sigma^{(1)}(\omega) d\omega} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (7)$$

$$\frac{\omega_B T_m}{2\pi} = \frac{\int_{0.1}^{1.0} \sigma^{(2)}(\omega) \omega^{-1}(\eta) d\eta}{\int_{0.1}^{1.0} |\eta - 1| \sigma^{(2)}(\omega) \omega^{-1}(\eta) d\eta} \dots \dots \dots (8)$$

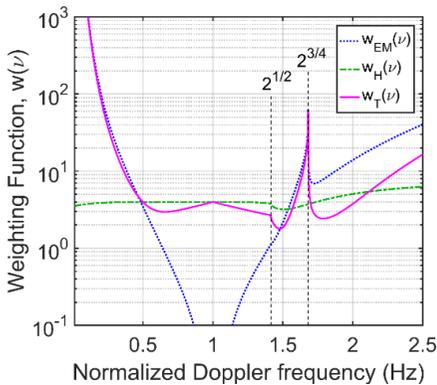


圖 11 雷達權重與頻率正規化

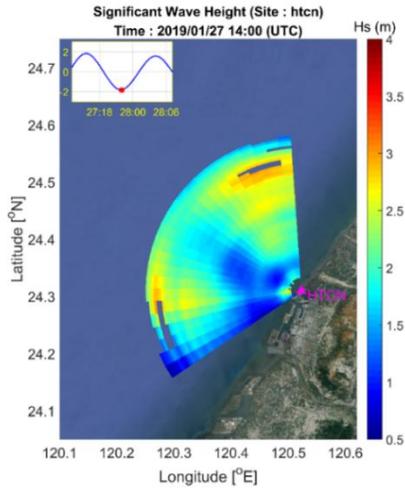


圖 12 計算流程與分析結果

3.4 線性陣列雷達最小啁啾數分析

每個線性調頻代表 1 個啁啾，每個啁啾時間固定為 0.2166 秒，因此取樣時間越久分析的啁啾數量越多，數量決定資料分析的品質，下就最小線性調頻數分別討論 1,024 啁啾、2,048 啁啾、4,096 啁啾與 8,192 啁啾的情況下，雷達的相關係數與誤差變化，以釐清最小線性調頻數量之問題。以 108 年 1 月 17~29 日期間之新竹浮標實測值與本雷達系統觀測值相互比較為例，分別討論不同數量啁啾變化，如圖 13 所示，該圖顯示啁啾數量越高雷達觀測序列與新竹實測資料越趨吻合，特別是 8,192 啁啾的情況下，雷達資料近乎與實測資料重合。

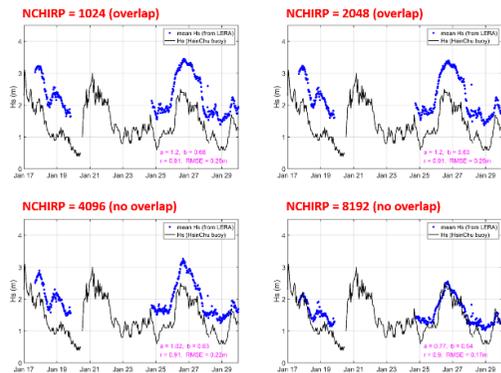


圖 13 最小線性調頻數分析比較圖

進一步分析相關性與散佈圖，縱軸為臺中港陣列雷達觀測波高，橫軸為新竹實測資料，比較觀察 1,024 啣啣、2,048 啣啣、4,096 啣啣與 8,192 啣啣散佈圖情況，顯示不論最小啣啣數量為何，各啣啣數量相關性皆有 9 成以上，以當日成果而言，雷達觀測已取得良好的成果，在各情境相關性比較方面探討均方根誤差(RMSE)情境，1,024 啣啣數、2,048 啣啣數前二種情況下均方根差分別為 0.25 及 0.24，當啣啣數增加至 4,096 時，均方誤差微幅變化有逐漸變小之趨勢，而啣啣數 8,192 時均方根誤差最小，降至 0.17，經分析比較後得出最小啣啣數量越高，數值均方根差越小，雷達散佈偏離最小與實測資料最為接近，有關各情境比較情形，如圖 14 與表 4 所示。

表 4 最小啣啣數量分析表

啣啣數	相關係數 [R]	均方根差 [RMSE : m]
1,024	0.91	0.25
2,048	0.91	0.24
4,096	0.90	0.22
8,192	0.91	0.17

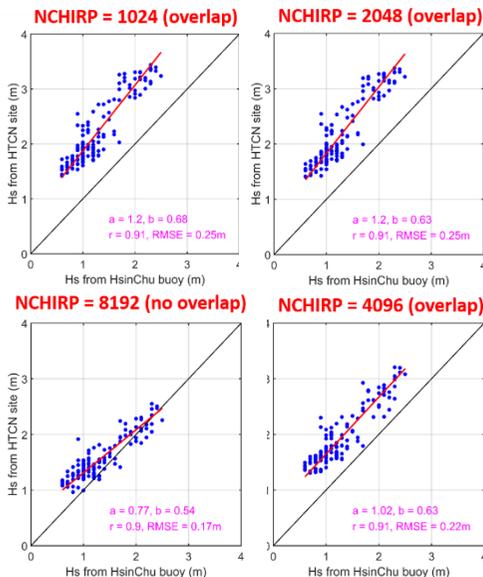


圖 14 各距離元相關性變化圖

四、臺中港線性陣列海洋雷達資料與觀測資料比對的情形

前章已就雷達基本的工作原理與訊號的處理之模式進行說明，本章將就本所觀測蒐集之雷達資料與與台灣海洋科技研究中心(下稱：海科中心)建置的岸基雷達測流系統(TOROS)之下龜殼站(TUTL)，以及本所設置底碇式剖面海流儀(AWAC)選三點實測資料進行比對，由於目前雷達系統為徑向系統，故以下綜合討論均討論徑向物理量。

臺中港線性陣列海洋雷達因採用美國 LERA 系統，為觀測區域紅色範圍，最遠距離自岸基向外海 40 公里，海科中心下龜殼站因採用美國 CODAR 系統，由於下龜殼站(TUTL)雷達屬於長距型雷達其頻率較低，最大測距由岸基向外海可達 180 公里為藍色範圍，另臺中港 AWAC 任選 3 個不同觀測點進行時序列分析，其中點 1 距離 LERA 岸基 11.1 公里，點 2 距離 LERA 岸基 10.9 公里、點 3 距離 LERA 岸基約 18.4 公里，詳細位置座標與位置，如圖 15 所示。

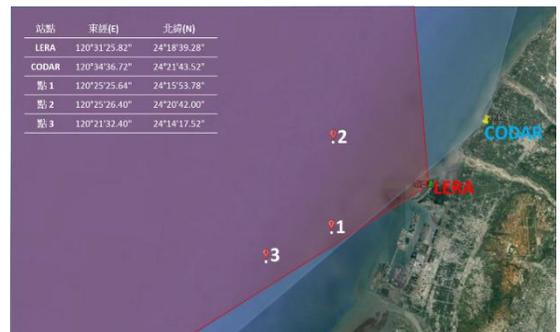


圖 15 本所觀測點與海科中心觀測位置

(1) 徑向流速(V)觀測比較

本雷達觀測資料經分析後徑向流速於 108 年 1 月 25~31 日時序列漲落趨勢有一致性結果，如圖 16 所示，將 LERA

量值與海科中心 CODAR 量值進行相關性分析，點 1 相關性最高達 0.93，點 3 相關性 0.876 次之，點 2 相關性 0.82 為最差，但無論如何本所 LERA 與海科中心 CODAR 相關性皆有 0.8 以上觀測值具有高度相關性；誤差部份探討同樣以均方根差(RMSE)進行分析計算，此三個不同觀測點以點 2 誤差最大達 19.70 cm/s，其於點 1 與點 3 二者誤差較為相近，分別為 15.06 cm/s 與 15.69 cm/s，如表 5 所示。

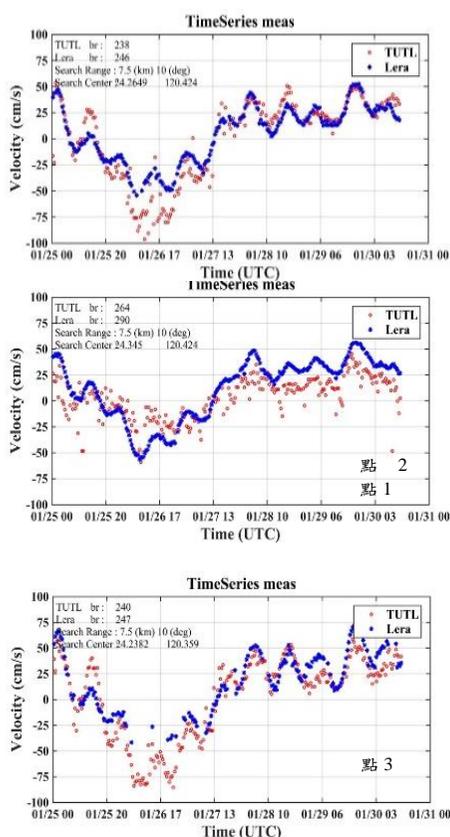


圖 10 徑向流速時序列比較圖

表 5 本所徑向流速觀測分析比較表

觀測位置	相關係數 [R]	均方根差 [RMSE : cm/s]
點 1	0.93	15.06

點 2	0.82	19.70
點 3	0.876	15.69

(2)徑向波高(H_s)觀測比較

將本所 108 年 1 月 17 日至 108 年 4 月 11 日期間 AWAC 觀測資料加以比對，LERA 與 AWAC 波高時序列漲落趨勢有一致性結果，另外將本所臺中港風速站 (Station 6 北堤堤頭)與新竹浮標風速相比，研判斷新竹外海風速較慢，臺中港港區風速較快，因此新竹浮標波浪較臺中港區小屬於合理現象，因此雖然新竹浮標(HsinChu buoy)波高時序列漲落趨勢相同，但仍有些許偏差，其中原因可能係新竹浮標觀測位置距離臺中港距離太遠導致，觀測值無法直接代表中部海域的狀況，如圖 17 所示。

將序列資料分區段處理再進行相關性分析，顯示 LERA 與 AWAC 觀測結果 108 年 1 月 17 日至 108 年 2 月 14 日區段 1 相關性達 0.96，108 年 2 月 14 日至 108 年 3 月 14 日區段 2 相關性係數達 0.81，均方根差(RMSE)而言區段 1 與區段 2 誤差分別為 0.26m 與 0.39，由於二觀測結果相關係數均達 0.8 成以上且均方根誤差均小於 0.4，二觀測結果呈現高度相關。

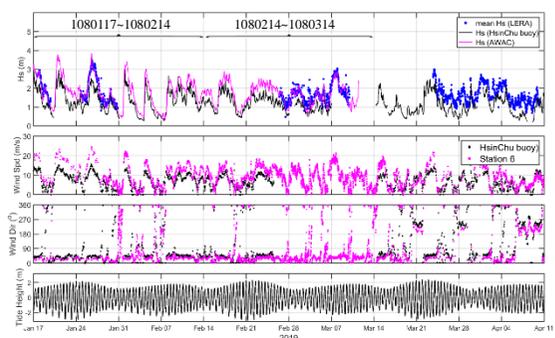


圖 17 徑向流速時序列比較圖

理論雷達在不受吸收、散射與外加因素等干擾情況下，觀測範圍內的誤差

是可以被忽略的，但實際雷達受干擾因素太多，因此只有在雷達波場形指向性密度最高，反射訊號最強位置處，該量測的準確性也相對最高，將區間 1 與區間 2 時間範圍內，各距離元 LERA 與 AWAC 相關係數分別計算並套繪在雷達範圍圖內，可顯見雷達範圍圖中間區域相關性最高達大於 0.9，兩側邊緣區域相關性最低小於 0.1，故可驗證量測相關性的程度與雷達設計場形狀相符，中央量測較為準確並向兩側遞減，如圖 18 所示。

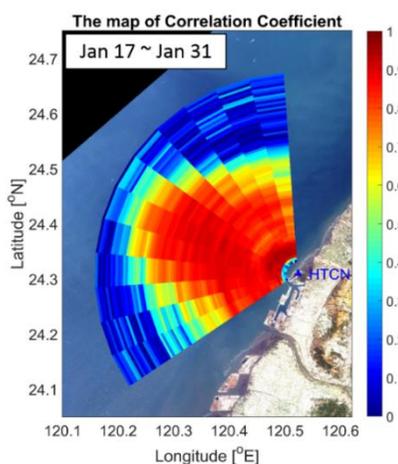


圖 18 各距離元相關係數比較圖

本研究再將 108 年取冬季 1 月、春季 3-4 月、夏季 7-8 月資料進行比較，期間共測得兩場：丹那絲颱風(7/16~7/21)與白鹿颱風(8/21~8/25)，冬季 1 月份觀測結果與其波高(Hs)與週期(Tm)時序列漲落趨勢有一致性結果，相關性部份冬季 1 月份波高(Hs)相關係數達 0.95 與週期(Tm)相關係數達 0.87 時序列漲落趨勢有一致性結果，均方根誤差值部份波高(Hs)均方根差為 27cm 與週期(Tm)均方根差為 0.32sec。

春季 3 月份觀測結果與其波高(Hs)與週期(Tm)時序列漲落趨勢有一致性結果，惟在 3/3 與 3/6 這幾天量測較無吻合，春季 3 月份波高(Hs)相關係數達 0.78 與週期(Tm)相關係數達 0.87，故春季 3

月的量測結果較冬季的量測結果為差，均方根誤差值部份：波高(Hs)均方根差為 31cm 與週期(Tm)均方根差為 0.32sec；春季 4 月份觀測結果與其波高(Hs)與週期(Tm)時序列漲落趨勢有一致性結果，惟在 4/7~4/10 這幾天量測較無吻合，春季 4 月份波高(Hs)相關係數達 0.91 與週期(Tm)相關係數達 0.72，春季 3 月的波高(Hs)量測結果較週期(Tm)為佳，均方根誤差值部份波高(Hs)均方根差為 45cm 與週期(Tm)均方根差為 0.91sec。

夏季 7 月份觀測結果與其波高(Hs)與週期(Tm)時序列漲落趨勢有一致性結果，但反而在丹娜絲颱風侵臺期間中 7/17~7/19 這幾天量測較為吻合，夏季 7 月份波高(Hs)相關係數降至 0.55 與週期(Tm)相關係數更是降至 0.07，故夏季 7 月的量測結果較前者(冬季與春季)量測結果為差，均方根誤差值部份波高(Hs)均方根差為 49cm 與週期(Tm)均方根差為 1.64sec；夏季 8 月份觀測結果與其波高(Hs)與週期(Tm)時序列漲落趨勢有一致性結果，同樣也在白鹿颱風侵臺期間中 8/23~8/25 這幾天量測較為吻合，夏季 8 月份波高(Hs)相關係數較 7 月好，係數值提升至 0.69，但週期(Tm)相關係數較差為 0.42，故夏季 8 月的量測結果較前者(冬季與春季)量測結果亦差，均方根誤差值部份波高(Hs)均方根差為 47cm 與週期(Tm)均方根差為 1.07sec，詳細比較情形，如表 6 所示。

表 6 本所徑向波浪觀測分析比較表

季節	月份	波高 相關 係數	週期 相關 係數	波高 均方 根差	週期 均方 根差	備註
冬	1	0.95	0.87	27 cm	0.32 sec	量測 相關 性高
春	3	0.78	0.87	31 cm	0.32 sec	
	4	0.91	0.72	45	0.91	

				cm	sec	
夏	7	0.55	0.07	49 cm	1.64 sec	丹娜 絲颶 風
	8	0.69	0.42	47 cm	1.07 sec	白鹿 颶風

五、結論與建議

本研究以基地母港與鄰近海域之海象調查為目標，發展雷達遙測，並針對目標海域之波浪與海流之海象資料進行長期的資料蒐集、分析與建檔。本研究結果希冀提供交通部航港局及港務分公司，能作為管理船舶進出臺中基地港參考、提供制定港灣規劃之標準，面對災害發生時能適時提供處置對策及預防措施，或作為相關單位參考應用之標準。

5.1 結論

- (1) 本雷達量測波高、週期、徑向流速的時序列漲落趨勢與實測結果具有一致性，相關係數絕大部分大於 0.8，小部分甚至達 0.95 以上，現階段研究季風觀測結果較好，惟颶風期間相關性較差，尚有改進的空間。
- (2) 雷達量測波高的時序列均方誤差與其量測量級相比，平均誤差約在 10%~20% 間，最佳量測週期為 4 秒~12 秒內範圍，4 秒低頻波與 12 秒以上長波有無法分析量測情形，顯示都卜勒距離譜分析方法尚有改進的空間，建議可以再持續精進。
- (3) 最小啁啾數量探討部分，無論 1,024、2,048、4,096 與 8,192 啁啾數量，散佈圖情況相關性皆大於皆有 0.9，另均方根誤差探討部分，啁啾數量越大

誤差越小，當啁啾數為 8,192 時有最小均方根誤差 0.17，訊號分析建議至少有 8,192 啁啾數量，研究成果較好。

- (4) 目前海洋雷達為單站系統僅能獲取徑向觀測資料，且量測受天線場型影響，盲區由指向性方位向兩側漸增，越靠近場型觀測成果越佳，越遠離場型觀測成果越差。

5.2 建議

- (1) 本海洋雷達站為單站，現僅能獲取徑向資料，尚無法完整分析海流方向，建議增設臺中港南站，如此訊號將能完整涵蓋港區，分析成果可以取得更完整的資料，惟現階段雖已確定適當架設範圍之位置，但卻與港務公司 LNG 新港區工程規劃重疊，需更進一步洽商，以獲得港務公司用地與港工同意。
- (2) 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，取得長期的背景訊號，如為長期固定雜訊將有機會予以濾除，增加觀測的品質。另本研究經測試最小啁啾數量越大均方誤差越小，按目前雷達設定值為 8,192 個啁啾數，此時均方誤差已降至 0.17，建議再增加最小啁啾數，以確認均方誤差是否有降低趨勢。

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、Hwa Chien、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, pp. 194-197.
 11. Yukiharu 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, 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 oceanwave 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. M. Middleitch, “HF radar data quality requirements for wave measurement”, Coast. Eng., 2011, 58 (4), pp. 327-336.

臺北港港域漂沙機制分析

劉勁成	國立交通大學土木工程學系博士後研究員
陳蔚偉	國立交通大學土木工程學系博士後研究員
張憲國	國立交通大學土木工程學系教授
薛憲文	國立中山大學海洋環境及工程學系教授
許弘莒	國立中山大學海洋環境及工程學系副教授
劉明鑫	交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員

摘要

丹麥水力研究所(DHI: Danish Hydraulic Institute)是一個獨立的國際諮詢及科學研究機構，其所研發的 MIKE 21 是模擬水動力、水質、泥沙、波浪的專業工程軟體，主要應用於港口、河流、湖泊、河口海岸和海洋，具有先進的前後處理功能和用戶介面，DHI 研發完成之 MIKE 21 軟體，已被全球廣泛應用於各個研究領域，為研究臺北港區域漂沙之推估，瞭解漂沙移動之特性及計算海域內之侵淤特性，配合實際臺北港及淡水河之現場觀測資料進行驗證，本研究採用 MIKE 21 進行數值模擬分析淡水河輸沙對於臺北港鄰近海域之影響及模擬漂沙潛勢，及分析其漂沙動力機制與地形變遷之模擬。

一、研究方法

1.1 作業流程

本研究以 MIKE 21 數值模擬軟體中之 MIKE 21 SW 波浪模式進行波浪場模擬，此模式主要應用波浪資料為邊界條件，藉以計算模擬海域之波浪場與輻射應力分佈。海岸漂沙以受波浪及潮流之影響為主，但在碎波帶內，由於潮流之強度一般較弱，因此由波浪碎波後而產生之沿岸流即成為影響沿岸輸沙之

主要機制。輻射應力為波浪引起沿岸流之主要動力，且為海域海流模擬計算時之主要波浪特性參數。

另以 MIKE 21 HD 水動力模式進行流場模擬，透過波浪場模擬計算所得之輻射應力，作為流場計算之波浪條件，同時配合 Matsumoto 等人(2000)針對 NAO Tide 提出的 NAO.99b 模式的輸出結果作為驅動 HD 模式進行天文潮推算所需的動力邊界條件。最後以 MIKE 21 ST 輸沙模式模擬受海域之水動力與波浪引起之地形變化特性，將前述所得之波場及流場計算成果，作為模擬計算之輸入條件，可得波浪與潮流共同作用下所造成之侵淤特性，且經由地形的改變重新計算波浪場，整體分析流程圖如圖 1 所示。

模擬過程將先透過風浪推算模式模擬逐時之波浪場，配合風浪推算模式之波浪模擬結果及 NAO.99b 模式之潮位模擬結果，同時考慮淡水河逐時的流量和輸沙量，模擬受到海域水動力與波浪引起之地形變化特性，模擬過程中每個時間步長皆會對地形進行改變，且於下個時間步長重新計算地形改變後之波浪場及流場。

各模式皆以有限體積法(Finite Volume Method)將控制方程式在空間上進行離散，所採用之網格系統為非結構性三角形網格，每一個三角形都代表一個

元素，每一時間步均可解出各元素中心的 N 值(要求解的未知數)。

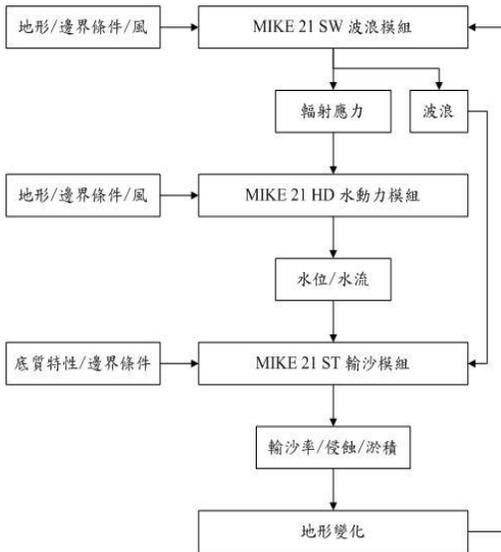


圖 1 地形變遷分析流程圖

1.2 MIKE 21 模式建立

1.2.1 MIKE 21 SW 波浪模式

MIKE 21 SW 主要用於模擬離岸及近岸區，風浪和湧浪的成長、衰減及傳播變形。MIKE 21 SW 包含兩個不同公式：

(一)全譜公式：

全譜公式基於 Komen 等人(1994)和 Young (1999)的波動守恆方程。全譜模式包含下列物理現象：風浪成長、波與波非線性交互作用、白沫消散、底床摩擦消散、水深引起的波浪破碎、水深變化引起的折射和淺水變形、波流交互作用、水深隨時間變化產生的影響、波浪場冰層覆蓋產生的影響。

該模式係模擬波浪在各種外力作用下之波能變化，其求解之方程式為波浪

作用力守恆方程式(Wave action conservation equation)，此方程式為二維時變域之偏微分方程式，表示如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \dots\dots\dots (1.1)$$

其中， $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ 為波力頻譜密度函數(wave action density function)，與波能頻譜密度函數 $E(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ (wave energy density function) 之關係為 $N = E / \sigma$ ； $\vec{x} = (x, y)$ ； t 為時間； σ 為角頻率；而 θ 則為波向角。 $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ 為一個 4 維空間的向量， $(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U}$ ，代表群波在空間上的傳遞速度，其中 \vec{c}_g 為群波速度，而 \vec{U} 則為海流之流速，模式可考量波浪在海流流動狀況下之傳遞情形。 $c_\sigma = d\sigma/dt$ ，代表角頻率 σ 之變化速度。 $c_\theta = d\theta/dt$ ，代表波向角 θ 之變化速度。

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial \sigma}, \frac{\partial}{\partial \theta} \right)$ 為一個 4 維空間的

向量運算子， S 則為源項(Source term)，代表波浪傳遞過程時可能發生之波浪能量成長、消散及非線性交互作用等物理現象，表示如下：

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \dots\dots\dots (1.2)$$

其中 S_{in} 為風浪之成長項， S_{nl} 為波與波非線性交互作用項， S_{ds} 為白沫消散項， S_{bot} 為底床摩擦項，而 S_{surf} 則為碎波消耗項。

(二)方向參數化解耦公式

方向參數化解耦公式基於波動守恆方程的參數化形式，按照 Holthuijsen (1989)理論，參數化在頻率空間內進行，引入波譜的零階和一階矩作為決定

變量，可用於以波浪碎波後而產生之沿岸流的泥沙傳輸計算。參數化的方程式表示如下：

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(C_{gx}m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{gy}m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta m_0)}{\partial \theta} = T_0$$

.....(1.3)

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(C_{gx}m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{gy}m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta m_1)}{\partial \theta} = T_1$$

.....(1.4)

其中 $m_0(x, y, \theta)$ 為波譜 $N(x, y, \omega, \theta)$ 的零次矩， $m_1(x, y, \theta)$ 為波譜 $N(x, y, \omega, \theta)$ 的一次矩， C_{gx} 及 C_{gy} 分別為群波速度 x 、 y 方向之分量， C_θ 為 θ 方向的波浪行進速度， ω 為角頻率， T_0 和 T_1 為 Source Terms，包含風、底床摩擦、碎波等因素。 n 次矩 $m_n(\theta)$ 定義為

$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^\infty \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega \dots (1.5)$$

1.2.2 MIKE 21 HD 水動力模式

MIKE 21 HD 建立在 Boussinesq 和流體靜壓力假設的不可壓縮 Reynolds averaged Navier-Stokes 方程式的基礎之上，其由連續方程式和動量方程式組成。對一般含時間因素之空間上三維的水動力系統方程式，以水深方向積分處理後，簡化為如下含時間變化之二維水動力計算系統

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \dots (1.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = & f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{p_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2p_0} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & + \frac{\tau_{sx}}{p_0} - \frac{\tau_{bx}}{p_0} - \frac{1}{p_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned}$$

..... (1.7)

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = & -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{p_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2p_0} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\tau_{sy}}{p_0} - \frac{\tau_{by}}{p_0} - \frac{1}{p_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned}$$

..... (1.8)

其中 η 為自由液面， d 為靜止水深， $h = \eta + d$ 為總水深， f 為柯氏(Coriolis)力參數， g 為重力加速度， P_a 為大氣壓力， S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} 為輻射應力張量(radiation stress tensor)， τ_{sx} 和 τ_{sy} 為表面風應力， τ_{bx} 和 τ_{by} 為底部應力， T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 為側向應力， S 為點源的排出量， \bar{u} 和 \bar{v} 為水深平均速度，可定義如下式

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz, \dots (1.9)$$

側向應力 T_{ij} 包括黏性摩擦和紊流摩擦，可透過紊流渦度黏滯 (eddy viscosity) 係數 A 估計

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$$

..... (1.10)

1.2.3 MIKE 21 ST 輸沙模式

MIKE 21 ST 主要為計算波浪、潮流或波流共同作用下的非粘性沙傳輸能力及相對的地形變化率。該模式的數值計算是基於給定地形條件下的相應水動力條件進行，透過對地形變化率的回饋機制進行地形變遷計算。MIKE 21 ST 的輸沙量同時考慮底床載輸沙量和懸浮載輸沙量，可表示為

$$q_t = q_b + q_s \dots\dots\dots (1.11)$$

其中 q_t 為總輸沙量， q_b 為底床載輸沙量， q_s 為懸浮載輸沙量。底床載輸沙量採用 Engelund 和 Fredsøe (1976) 的理論，透過瞬時徐爾茲參數 (Shields parameter) 計算而得。懸浮載輸沙量採用 Fredsøe 等人 (1985) 的理論

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{0}^{2d} (uc) dz dt \dots\dots\dots (1.12)$$

其中 u 為瞬時流速， c 為瞬時漂沙濃度， $2d$ 為底床邊界層厚度， D 為水深， T 為波浪周期。

MIKE 21 ST 主要透過網格中心點的地形變化率 $\frac{\partial z}{\partial t}$ 來決定地形變化，其控制方程式可表示為

$$-1(1-n) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} - \Delta S \dots\dots\dots (1.13)$$

其中 n 為底床孔隙率， z 為地形高程， S_x 為 x 方向底床載輸沙量或總輸沙量， S_y 為 y 方向底床載輸沙量或總輸沙量， ΔS 為源項。地形的更新主要基於地形變化率，因此新的地形高程可表示為

$$z_{new} = z_{old} + \frac{1}{1-n} \frac{\partial z}{\partial t} \Delta t_{HD} \dots\dots\dots (1.14)$$

1.2.4 風浪推算數值計算條件

(一) 地形及網格設定

本研究所採用之地形資料，於近岸區利用海軍海洋測量局發行之海圖地形，而遠岸區則採用 National Geophysical Data Center 發布之全球高程資料 ETOPO2v2 (2006)。該地形資料範圍包含東經 180°~西經 180°、北緯 89.967°~南緯 90°，地形格網之解析精度為 2'x2' (約為 4x4 公里)。本研究採用非結構型三角網格方式計算，模擬範圍之邊界南約至北緯 14°、北約至北緯 30°、西約至東經 111°、東約至東經 135°，範圍涵蓋至大陸、臺灣及菲律賓群島，所模擬範圍之地形水深如圖 2 所示。由圖中可知，為於近岸區獲得較高精度之模擬結果，鄰近臺灣、澎湖、金門、馬祖海域之海岸線採用較密之網格，而遠岸區則採用較粗之網格，共計有 5,436 個節點、9,709 個元素，網格之設定如表 1 所示。

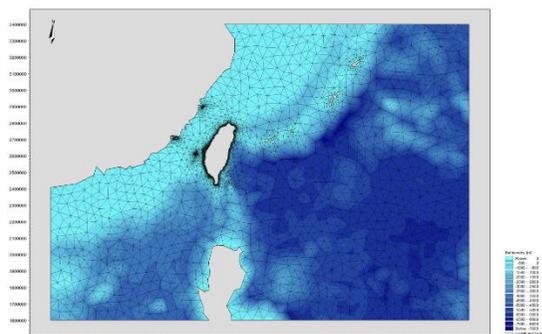


圖 2 風浪推算模擬範圍之地形水深

表 1 風浪推算模擬之網格設定內容

元素個數	9,709
節點個數	5,436
最小元素面積(m ²)	1,984
最大元素面積(m ²)	1.2×10 ⁹

(二)風場模式

本研究風場模式採用高雄海洋科技大學海事資訊科技系暨研究所陳昭銘教授辦理「臺北港區風場數值預報系統之建置研究」計畫之研究成果進行模擬，陳教授的風場主要是將大氣模式的風場資料細化成 2 公里的解析度(以下簡稱 ARW_NFS2 公里)，並依照波浪推算模式的需求逐時輸出風場資料，ARW_NFS2 公里所使用之大氣風場預報模式係以 Weather Research and Forecasting (WRF)模式(e.g., Skamarock et al. 2001)為基礎，經由進階改良之 Advanced Research WRF (ARW; e.g., Skamarock et al. 2005; Skamarock et al. 2008)模式。ARW_NFS2 公里模式之優點為可使用多層巢狀方式，將全球觀測資料所預報之大尺度預報資訊(約為 50 公里解析度)，以動力降尺度方式逐漸內化到各指定小區域，並經由提高網格點之解析度，達到指定區域所需求之高解析度預報資訊。ARW_NFS2 公里以全球預報模式之高解析度($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ，約 50 公里網格點)預報結果為邊界條件，採用三層巢狀系統，以 4 倍放大效率，依序使用 32 公里、8 公里、2 公里解析度，將全球預報資訊降尺度到臺灣鄰近海域與港灣區。

(三)模式參數設定

本研究進行 SW 模組颱風波浪推算所設定之相關參數如表 2 所示。在頻率領域方面，最小頻率採 0.055Hz，並以 1.1 倍參數的指數型式分割成 25 個頻率帶，相當於週期 1.85~18.18 秒。在角度領域方面，以 10° 為 1 個角度單位，共分割成 36 個方向角，計算時距以 1 小時進行計算。風浪能量消散機制則考量 4 個波波非線性交互作用、碎波效應、底床摩擦、白沫消散等物理

機制。計算範圍的邊界條件共分成二種邊界形式，一為陸域邊界，其不考慮入射波浪的能量通量；另一為海域邊界，其考慮波浪通過此邊界時完全被吸收。

表 2 模式參數設定彙整表

相關參數	設定
頻率領域	0.055Hz~ 0.542Hz
角度領域	$0^\circ \sim 360^\circ$ 、 $\Delta\theta=10^\circ$
時距	$\Delta t=1\text{hr}$
碎波指標	$\gamma=0.8$
底床摩擦	$k_N=0.04\text{m}$
白沫消散	$C_{ds}=4.5$ 、 $\delta_{ds}=0.5$

1.2.5 地形變遷數值計算條件

(一)地形及網格設定

本研究於近岸區利用的地形水深資料為現地實測的地形，遠岸區則採用海軍海洋測量局發行之海圖地形，模擬範圍之地形水深如圖 3 所示，由圖中可知，為了於研究區域獲得較高精度的模擬結果，鄰近臺北海域之海岸線採用較密的網格，而離研究區域較遠之外海則採用較粗的網格，網格的設定如表 3 所示。

表 3 地形變遷數值模擬之網格設定內容

元素個數	44,673
節點個數	23,065
最小元素面積(m^2)	141.48
最大元素面積(m^2)	7297.56

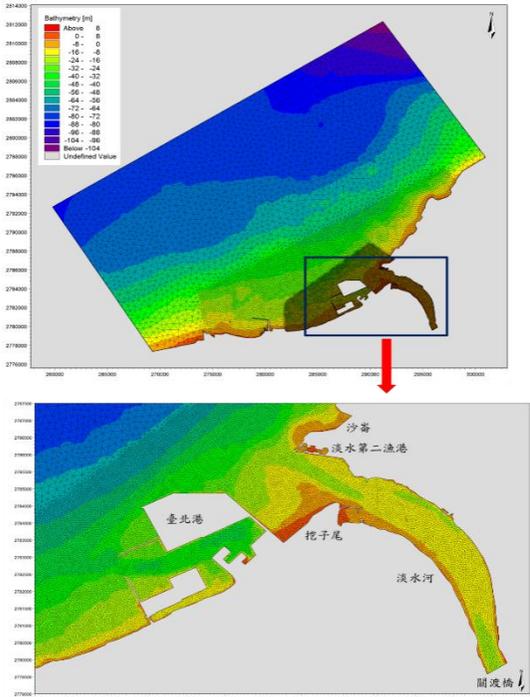


圖 3 地形變遷模擬範圍之地形水深

(二)邊界條件

本研究地形變遷數值模擬的波場邊界條件擷取自風浪模式推算結果作為外海波浪條件，而流場邊界則採用 Matsumoto 等人 (2000) 針對 NAO Tide 提出的 NAO.99b 模式的輸出結果作為驅動 HD 模式進行天文潮推算所需的動力邊界條件。

(三)模式輸入參數

本研究地形變遷數值模擬各模式參數設定如表 4 所示，其中底值粒徑分布採用經濟部水利署第十河川局(2015)「淡水河口輸砂對鄰近海岸之影響評估(2/2)」之現場調查成果，如圖 4 所示。

表 4 地形變遷數值模擬各模式參數設定

模擬時間	2012/12/24~2012/12/29、 2013/6/2~2013/6/7、2013/7/9~2013/7/18、 2013/10/3~2013/10/11
時間間距	1hr
MIKE 21 SW 波浪模式	
波譜公式	方向參數化解耦公式
時間公式	準穩態公式
水位條件	模擬範圍內隨空間和時間變化
水流條件	模擬範圍內隨空間和時間變化
碎波參數	Gamma, 常數 0.8
底床摩擦	Nikuradse roughness, 模擬範圍內隨空間變化
邊界條件	逐時變動波浪條件(波高、週期和波向)
MIKE 21 HD 水動力模式	
渦流黏度	Smagorinsky formulation, 常數 0.28
底床摩擦阻力	Manning number, 模擬範圍內隨空間變化
波浪輻射應力	模擬範圍內隨空間和時間變化
源	淡水河逐時流量
邊界條件	逐時變動潮位
MIKE 21 ST 輸沙模式	
模擬方式	結合波和流
底床孔隙率	0.4
底床中值粒徑	模擬範圍內隨空間變化, D_{50} 介於 0.0251mm 至 0.4922mm 之間
波浪外力	模擬範圍內隨空間和時間變化
最大地形改變量	1m/day, 地形改變量將反饋至波浪、水動力和輸沙模式
邊界條件	Zero sediment flux gradient for outflow, zero bed change for inflow

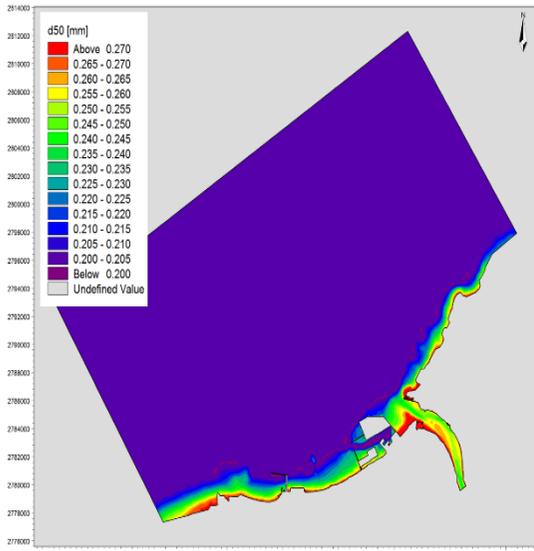


圖 4 底質粒徑分布圖

二、模式驗證

2.1 風浪模式驗證

為確認本模式於研究區內的模擬成效，分別選擇研究區內颱風波浪及季風波浪進行驗證，本研究選用之驗證資料來源為交通部運輸研究所港灣技術研究中心於臺北港之海氣象觀測資料。

2.1.1 颱風波浪

颱風波浪採用臺北港歷年來監測到最大波高 6.94m 的 2013 年蘇力(SOULI K)颱風波浪資料及該年度第二大的菲特(FITOW)颱風波浪資料進行驗證。

(一)模式評估指標

為瞭解模式推算值與觀測值的吻合程度，將採用 4 個指標來評估模式推算結果的優劣，分別為判定係數(R-square, R²)、均方根誤差(RMSE, root mean squared error)、颱風波浪最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 、最大波高發生時間誤差 Δt_p 。

$$R^2 = \frac{\left(\sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs}) ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num}) \right)^2}{\left(\sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs})^2 \right) \left(\sum_m \sum_n ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num})^2 \right)} \quad (2.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - (H_{s,num})_{mn})^2} \quad (2.2)$$

$$\Delta H_{s,p} = MAX(H_{s,num}) - MAX(H_{s,obs}) \quad (2.3)$$

$$\Delta t_p = t_{p,num} - t_{p,obs} \quad (2.4)$$

其中 $H_{s,num}$ 為模式推算颱風波浪示性波高； $H_{s,obs}$ 為測站實測颱風波浪示性波高； $t_{p,num}$ 為模式推算颱風波浪示性波高最大值發生時間； $t_{p,obs}$ 為測站實測颱風波浪示性波高最大值發生時間。由式(2.3)可知，若 $\Delta H_{s,p}$ 為正值，表示模式推算的示性波高過於高估，若為負值則表示低估，由式(2.4)可知，若 Δt_p 為正值，表示模式推算的示性波高最大值發生時間較實測晚，若為負值則表示較實測早。

(二)颱風波浪示性波高的時序列比較

圖 5 為颱風波浪示性波高的時序列比較圖，上圖為蘇力颱風波浪的比較，下圖為菲特颱風波浪的比較，圖中實心圓點為觀測值，實線為 MIKE 21 SW 採用 ARW_NFS 風場的推算結果。由圖中可知，模擬趨勢和觀測值皆非常一致。由颱風資料的驗證可知，MIKE 21 SW 使用 ARW_NFS 風場的波浪推算方式在計畫區內可獲得不錯的推算成果。

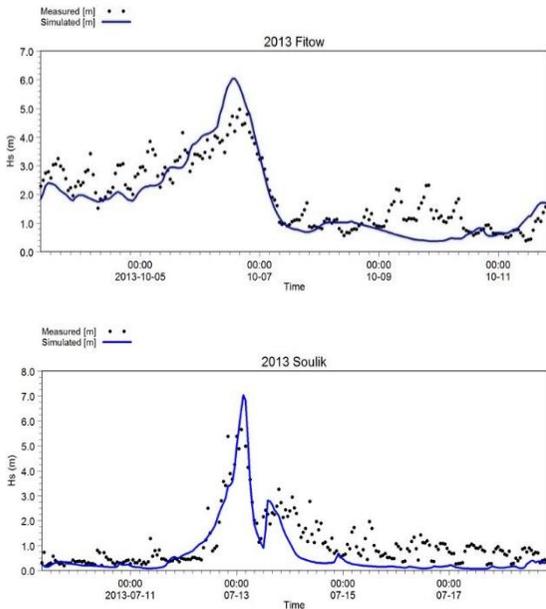


圖 5 颱風波浪示性波高時序列比較

(三) 颱風波浪示性波高的評估指標比較

由 2013 年蘇力颱風在臺北港推算的結果可知，判定係數(R^2)為 0.77，均方根誤差(RMSE)為 0.7m，推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 為 0.11 m，最大波高發生時間誤差 Δt_p 為 0 小時。由 2013 年菲特颱風在臺北港推算的結果可知，判定係數(R^2)為 0.78，均方根誤差(RMSE)為 0.68m，推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 為 1.08m，最大波高發生時間誤差 Δt_p 為-2 小時。由評估指標的比較可知，MIKE 21 SW 採用 ARW_NFS 風場在臺北港有不錯的推算結果。

2.1.2 季風波浪

圖 6 為季風波浪示性波高的時序列比較圖，上圖為冬季季風波浪的比較，下圖為夏季季風波浪的比較，圖中實心圓點為觀測值，實線為 MIKE 21 SW 採用 ARW_NFS 風場的推算結果，由圖中可知，模擬趨勢和觀測值皆非常一致，另由觀測值和推算結果的誤差比較可知，冬季季風波浪均方根誤差(RMSE)

為 0.86m，而夏季季風波浪均方根誤差(RMSE)為 0.41m，顯示 MIKE 21 SW 使用 ARW_NFS 風場的波浪推算方式在研究區域內可獲得不錯的推算成果。

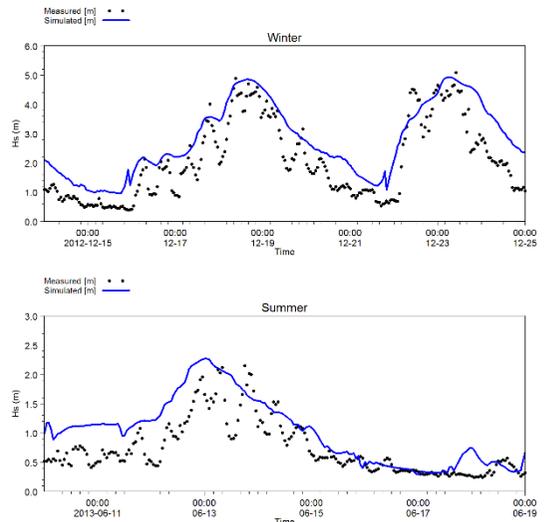


圖 6 季風波浪示性波高時序列比較

2.2 流場模式驗證

2.2.1 颱風時期

2013 年蘇力颱風期間由於無觀測到潮流資料，故僅進行潮位驗證。圖 7 為蘇力颱風期間潮位時序列比較圖，圖中實心點為實測資料，實線為模擬結果，由圖中可知，模擬與實測的潮位非常接近，其均方根誤差(RMSE)為 0.17m。

圖 8 為 2013 年菲特颱風期間流場驗證圖，上圖為潮位時序列比較圖，圖中實心點為實測資料，實線為模擬結果，中圖為流速時序列比較圖，圖中黑色實線為實測資料，藍色實線為模擬結果，下圖為流向時序列比較圖，圖中黑色實心圓點為實測資料，藍色實心方點為模擬結果。由圖中可知，實測與模擬結果於潮位、流速及流向的比對皆相當一致，菲特颱風期間潮位的均方根誤差(RMSE)為 0.28m，流速的均方根誤差(RMSE)為 0.23m/s。

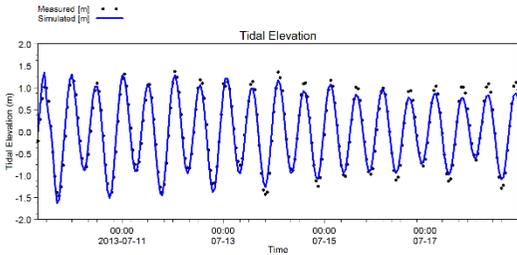


圖 7 2013 年蘇力颱風期間潮位驗證

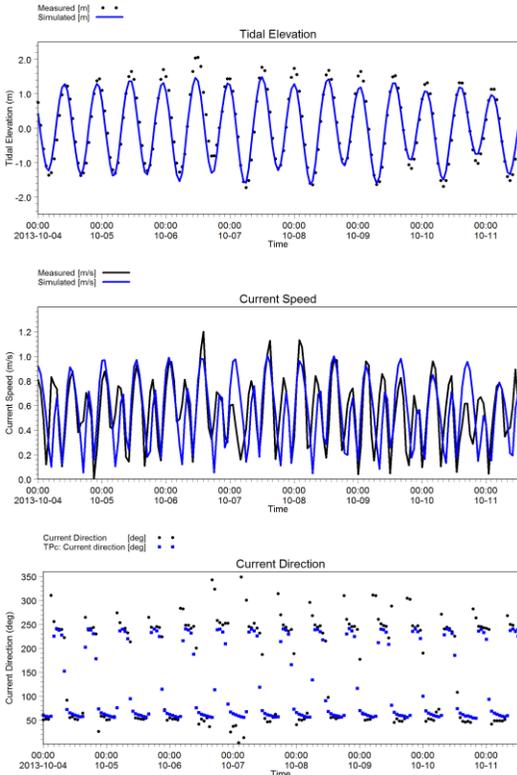


圖 8 2013 年菲特颱風期間流場驗證

2.2.2 季風時期

圖 9~圖 10 分別為冬季季風和夏季季風期間流場驗證圖，上圖為潮位時序列比較圖，圖中實心點為實測資料，實線為模擬結果，中圖為流速時序列比較圖，圖中黑色實線為實測資料，藍色實線為模擬結果，下圖為流向時序列比較圖，圖中黑色實心圓點為實測資料，藍色實心方點為模擬結果。由圖中可知，實測與模擬結果於潮位、流速及流向的

比對皆相當一致，冬季季風期間潮位的均方根誤差(RMSE)為 0.12m，流速的均方根誤差(RMSE)為 0.19m/s，夏季季風期間潮位的均方根誤差(RMSE)為 0.12 m，流速的均方根誤差(RMSE)為 0.17m/s。

由流場模式的驗證可知，應用 MIK E21 HD 水動力模式配合本研究所使用之邊界設定，確實可充分掌握並完整呈現臺北港附近海域潮位與潮時之整體變化特性及分佈趨勢。

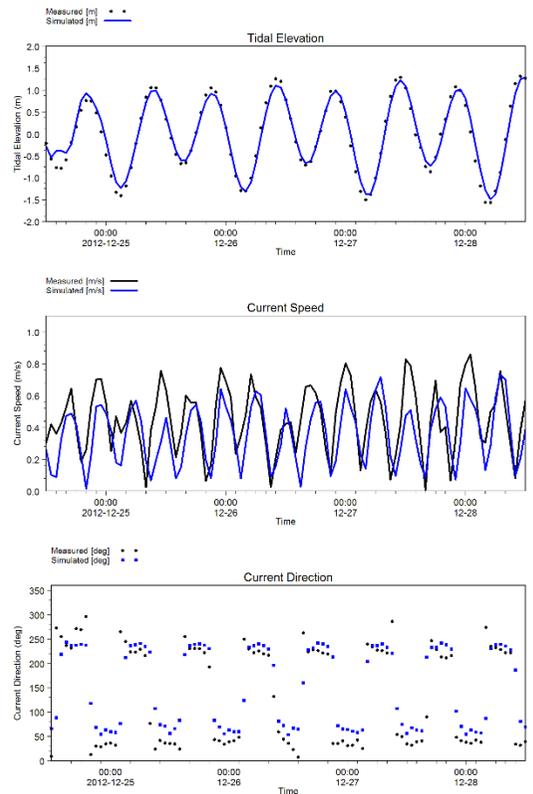


圖 9 冬季季風期間流場驗證

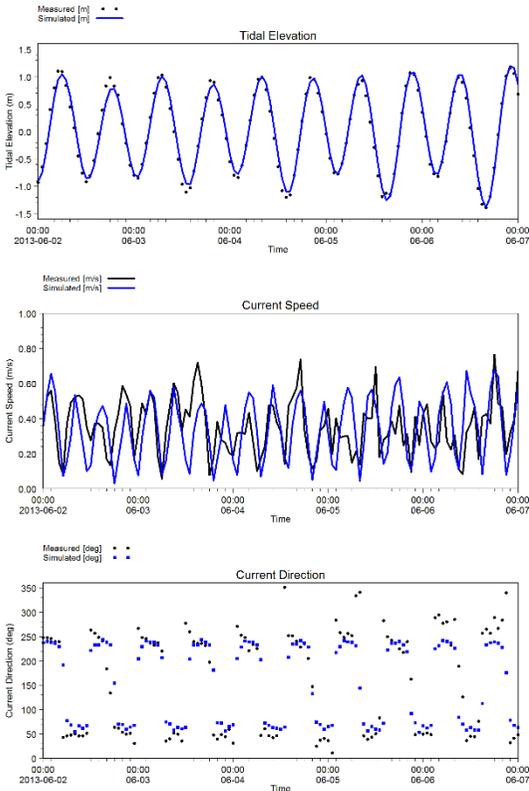


圖 10 夏季季風期間流場驗證

三、模擬案例

本節利用交通部運輸研究所港灣技術研中心在淡水河關渡測站的實測流量與含沙量資料，作為 MIKE 21 數值模式河川上游相關流量、輸沙邊界條件，並以蘇力颱風為實際應用之模擬案例，進行河口輸沙與海岸地形變遷之影響評估。

2013 年 7 月蘇力颱風侵台，臺北港監測到歷年來最大波高 6.94m，因此採用逐時模擬的方式，探討蘇力颱風期間河口輸沙對於臨近海岸變遷之影響。首先透過風浪推算模式模擬 2013 年 7 月 9 日 8 時至 7 月 18 日 20 時之波浪場，其中已包含蘇力颱風完整的影響效應，配合風浪推算模式之波浪模擬結果及 NA O.99b 模式之潮位模擬結果，同時考慮淡水河逐時的流量和輸沙量，模擬受到

海域水動力與波浪引起之地形變化特性，模擬過程中每個時間步長皆會對地形進行改變，且於下個時間步長重新計算地形改變後之波浪場及流場。

由數值模式計算出蘇力颱風期間波浪作用下的沿岸特性(波場、沿岸流場、泥沙擴散分布、底床侵淤變化)如圖 11~圖 16 所示。圖 11 為蘇力颱風期間最大波高發生時的波場分布圖，由圖中可知，近岸波高最大位置發生在臺北港北側防波堤，介於 6.0~7.0m，臺北港港口處介於 3.0~6.0m，臺北港南側近岸則皆介於 1.0~1.5m。圖 12 為蘇力颱風期間最大波高發生時的沿岸流場分布圖，由圖中可知，近岸流速較大的位置為臺北港北側防波堤外海，約為 0.6~0.8m/s，並由西南向東北流動。圖 13 為蘇力颱風期間淡水河最大流量發生時沿岸流場分布圖，由圖中可知，淡水河出海造成的流速變化延伸至淡水第二漁港外側，並受到漲潮的影響，流向轉向西南，同時在挖子尾附近形成渦流。圖 14 為蘇力颱風期間臺北港漲潮時泥沙擴散分布圖，由圖中可知，漲潮時海水由河口進入淡水河，造成河口處懸浮質累積，且由於流場向西南流動，因此部分泥沙出淡水河後由挖子尾外海往西南側擴散，並有些許漂沙進入臺北港。圖 15 為蘇力颱風期間臺北港退潮時泥沙擴散分布圖，由圖中可知，退潮時淡水河水量由淡水第二漁港外側出海，大部分與潮流匯集後向東北側流動，小部分則在挖子尾外側跟臺北港間形成渦流，因此泥沙出淡水河後大部分往東北側擴散，小部分則擴散至挖子尾外側跟臺北港間。圖 16 為蘇力颱風作用後底床侵淤變化圖，由圖中可知，受到蘇力颱風波浪作用後，臺北港與挖子尾間呈現淤積的現象，臺北港港口處亦有些許淤積，臺北港南側則呈現近岸侵蝕遠岸淤積的現象，而外海大致呈現侵淤互現的現象。

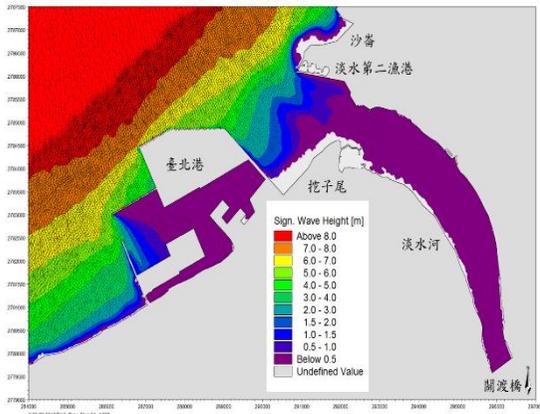


圖 11 蘇力颱風期間最大波高發生時的波場分布圖

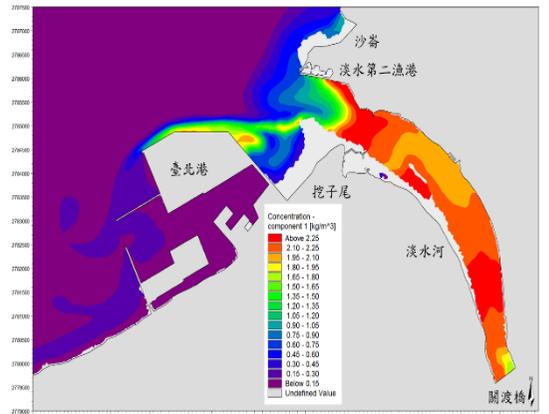


圖 14 蘇力颱風期間臺北港漲潮時泥沙擴散分布圖

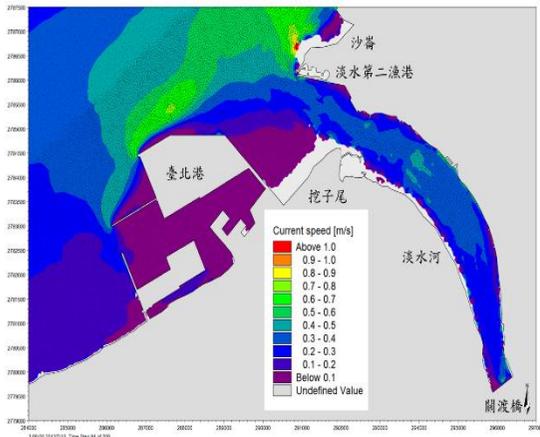


圖 12 蘇力颱風期間最大波高發生時的沿岸流場分布圖

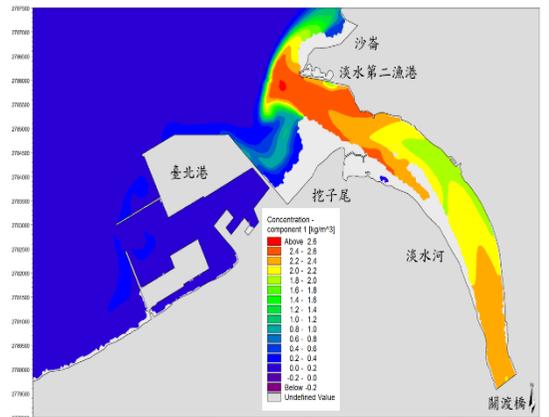


圖 15 蘇力颱風期間臺北港退潮時泥沙擴散分布圖

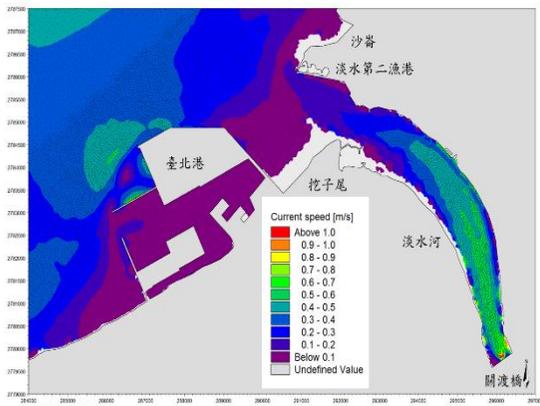


圖 13 蘇力颱風期間淡水河最大流量發生時沿岸流場分布圖

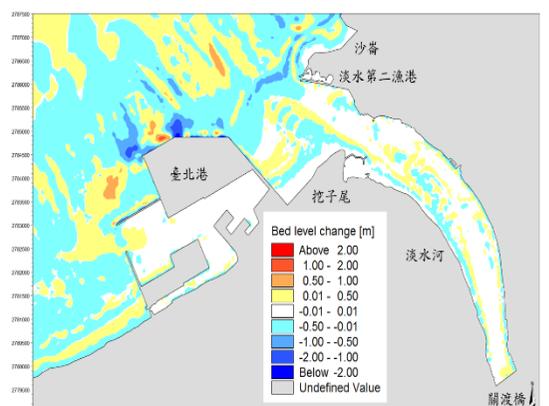


圖 16 蘇力颱風作用後底床侵淤變化圖

四、結論

本研究藉由數值模式 DHI 研發完成之 MIKE 21 軟體，配合實測資料進行模擬驗證，藉由依據臺北港區附近之海象資料、底質分佈特性及淡水河年輸沙量等，作為模式計算之設定依據，建立淡水河河口地區輸沙與臨近海岸地形變遷之數值模式，並完成風浪模式驗證、颱風時期流場模式驗證及季風時期流場模式驗證等模式驗證及模式建置工作。

河口之輸沙行為，與上游河道來水、來沙量密切相關，河口模式所需之上游流量、輸沙量資料，可考慮距離河口最近之河川水文測站，故本研究採用關渡測站港研中心之實測資料，進行河口輸沙與海岸地形變遷之影響評估，透過 MIKE 21 軟體設定海域底質粒徑分佈，模擬研究區域複雜的沙礫特性，以該軟體之 SW 波浪模組模擬波場，HD 水動力模組模擬流場，ST 輸沙模組模擬漂沙潛量，判斷其侵淤特性及地形變化趨勢，而由模擬蘇力颱風期間淡水河口輸沙對於臨近海岸變遷之影響，瞭解臺北港鄰近區域之泥沙擴散分布及底床侵淤變化等沿岸特性。

參考文獻

1. 林銘崇，淡水河系河床穩定性與河口地形變化之研究，臺灣大學水工試驗所，臺北，1989 年。
2. 何良勝、林柏青、廖慶堂、林受勳、陳志弘、蔣敏玲，「臺北港(105 年)海岸漂沙調查及海氣象與地形變遷監測作業」，交通部運輸研究所，2016 年。
3. 廖慶堂、林受勳、陳志弘、蔣敏玲、衛紀淮、羅冠顯、何良勝、蔡立宏，「105 年臺灣國內商港海域海氣象觀測分析研究」，交通部運輸研究所，2016 年。
4. 李忠潘、張憲國、曾以帆、許弘莒、劉勁成、李孟學、陳蔚瑋、劉黃宗隆、莊曜陽、吳泓毅、王韋樺、江朕榮、陳沛宏、李明峯、許城榕、林照川，「臺北港海氣地象資料檢核與分析」，交通部運輸研究所，2018 年。
5. 魏震，「台北港興建對鄰近海岸地形影響之評析」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2001 年。
6. 張苑文，「淡水河河口地區變遷之研究」，國立臺灣大學地理環境資源系碩士論文，2002 年。
7. 蔣華傑，「極端條件下台北港附近海域底床變遷之研究」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2002 年。
8. 莊富凱，「淡水河下游河海工程對河口段地形影響之研究」，國立臺灣師範大學地理研究所碩士論文，2003 年。
9. 賴春婷，「河口短時距地形變動之研究~以淡水河口挖子尾為例」，國立臺灣大學地理環境資源系碩士論文，2003 年。
10. 陳昭銘，「臺北港區風場數值預報系統之建置研究」，交通部運輸研究所，2012 年。
11. 薛憲文、李忠潘、陳陽益、王兆璋、李賢華、劉黃宗隆，「澳底福隆地區海岸地形變遷」，中華民國第二十五屆海洋工程研討會專題，東北角海域海氣象特性與海岸防護，基隆海洋大學，2003 年，pp.59-75。
12. 經濟部水利署第十河川局，「淡水河口輸砂對鄰近海岸之影響評估(2/2)」，2015 年。
13. 港灣技術研究中心「港灣環境資訊網」：<http://isohe.ihmt.gov.tw>
14. Coles, S.G., "An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values", Springer-Verlag, London, 2001.

15. Coastal engineering manual “Hydrodynamic analysis and design conditions,” Chapter 8, 2002.
16. DHI, User guide and reference manual of MIKE 21-coastal hydraulics and oceanography hydrodynamic model, Danish Hydraulic Institute, 2011.
17. Saha, S., and Coauthors: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 2010, pp. 1015–1057.
18. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers: A description of the Advanced Research WRF version 2. NCAR/TN-468+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 2005, pp. 88.
19. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, and Dudhia, J. “Prototype for the WRF (Weather Research and Forecasting) model,” Preprints, Ninth Conf. on Mesoscale Processes, Fort Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc., 2001, J11-J15.

「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)2658-7150 周于楨
傳真電話：(04)2656-4189
E-mail：chou@mail.ihmt.gov.tw
8. 歡迎賜稿，來稿請寄：
43542 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