

波浪數值模擬在作業化海象預報之應用及衍生產品之商業應用

顏厥正¹ 張恆文² 施景峯³ 楊天璋³ 林芳如³ 滕春慈³
工業技術研究院綠能與環境研究所¹ 台灣地球觀測學會² 中央氣象局海象測報中心³

摘要

中央氣象局之波浪數值預報模擬自100年2月1日應用在10條藍色公路對外服務以來，已歷經10年的預報服務，再加上生活休閒旅遊在海水浴場、主要港口、休閒漁港、海釣、浮潛、及衝浪逐三小時海象預報，讓相關業者、漁民、經常登上研究船隻的學者、一般民眾、以及政府單位對該服務的詳細資訊與準確度給予肯定，氣象局與航港局、運研所、台灣港務公司更簽訂合作意向書。透過海象測報中心、台灣地球觀測學會、及工業技術研究院工作團隊的努力，現階段藍色公路海氣象預報航線已增加到33條，並延長預報時間到72小時及增加波浪週期的預報，並建置藍色公路端點驗證系統，而在生活休閒海象預報方面也增加到166個點位，已成為中央氣象局為民服務上不可或缺的重要項目。

本篇論文介紹波浪數值模擬在上述服務的建置與現況，並透過相關的加值研究，說明在商業領域的推動成果，如在離岸風電開發上，利用波浪系集模擬透過機率性預報及風險評估機制，建置離岸風機施工運維船舶派遣與追蹤決策系統。期望經由中央氣象局波浪數值模擬的持續研究，可以提升藍色公路與生活休閒預報的準確度，並廣泛應用於各種商業用途，全力發揮波浪數值模擬的最大功效。

關鍵字：波浪數值模擬、海氣象預報、資訊系統整合應用

一、前言

中央氣象局海象測報中心推動台灣海域波浪模擬預測不遺餘力，自波浪模式的選用、測試、版本更新、特性改善、作業化運轉、藍色公路及生活休閒海象預報、一直到波浪系集作業化預報，在對外服務中已是民眾依賴的關鍵項目。

早在100年11月10日交通部第1483次部務會報中，對於氣象局所開發的藍色公路海象預報系統，在維護海上客輪之安全給予肯定，期勉氣象局要與時俱進，繼續努力。氣象局與航港局、運研所、台灣港務公司簽訂合作意向書，更彰顯波浪數值模擬的重要性及持續更新與功能加強的必要性。透過海象測報中心、台灣地球觀測學會、及工業技術研究院工作團隊的努力，現階段藍色公路海氣象預報航線已增加到33條，並延長預報時間到72小時及增加波浪週期的預報，並建置藍色公路端點驗證系統，而在生活休閒海象預報方面也增加到166個點位，已成為中央氣象局為民服務上不可或缺的重要項目。在波浪系集研究方面已建立標準流程並進行作業化運轉，然而相關研究仍不斷進行，在波浪資料同化技術方面，與NOAA合作移轉建置波浪資料同化平台，引進UMD-LETKF同化法，除運用浮標觀測資料外並使用衛星資料來進行資料同化與結果比較。

海象測報中心的波浪系集預報已經作業化運轉，再加上預報中心的WRF風場系集預報，已經足

以對外提供加值服務，而在此臺灣離岸風力發電開發正如火如荼地展開之時，相關的加值服務應用及衍生物產品之商業應用也已展開。本篇論文除介紹現階段海象測報中心的波浪系集研究外，並將說明利用此作業化海氣象系集預報所建置的離岸風機施工運維船舶派遣與追蹤決策系統。期望經由中央氣象局波浪數值模擬的持續研究，可以提升藍色公路與生活休閒預報的準確度，並廣泛應用於各種商業用途，全力發揮波浪數值模擬的最大功效。

二、波浪系集模擬現況

1. 作業化波浪系集模擬

CWB的波浪系集預報在台灣海域是使用NOAA WAVEWATCH III (WW3) 三層嵌套多網格模型來進行數值模擬[10]。該系集預報系統由24個系集成員組成，其空間解析度為0.25度、0.1度、和0.025度。驅動的風場來自CWB的WRF (Weather Research and Forecasting)系集預報系統、日本氣象廳 (JMA)、和美國國家環境預報中心 (NCEP) 的GFS (Global Forecast System)。CWB的波浪系集預報系統結合了兩個內置的風驅動公式(ST2、ST3)來構成系集成員(每個公式有12個成員)的組合，這樣可以增加平均離散度 (SPRD) 並減小海上觀測值均方根誤差 (RMSE) 和平均SPRD之間的差異。現階段波浪系集成員組成如表 1所示。

表 1 波浪系集成員一覽表

波浪系集成員	風場資料來源*			WW3公式
	0.25 度網格	0.1 度網格	0.025 度網格	
1	WEPS 2.0 15km (EN01)	WEPS 2.0 15km (EN01)	WEPS 2.0 3km (EN01)	ST3
2	WEPS 2.0 15km (EN02)	WEPS 2.0 15km (EN02)	WEPS 2.0 3km (EN02)	ST3
3	WEPS 2.0 15km (EN03)	WEPS 2.0 15km (EN03)	WEPS 2.0 3km (EN03)	ST3
4	WEPS 2.0 15km (EN04)	WEPS 2.0 15km (EN04)	WEPS 2.0 3km (EN04)	ST3
5	WEPS 2.0 15km (EN05)	WEPS 2.0 15km (EN05)	WEPS 2.0 3km (EN05)	ST3
6	WEPS 2.0 15km (EN06)	WEPS 2.0 15km (EN06)	WEPS 2.0 3km (EN06)	ST3
7	WEPS 2.0 15km (EN07)	WEPS 2.0 15km (EN07)	WEPS 2.0 3km (EN07)	ST3
8	WEPS 2.0 15km (EN08)	WEPS 2.0 15km (EN08)	WEPS 2.0 3km (EN08)	ST3
9	WEPS 2.0 15km (EN09)	WEPS 2.0 15km (EN09)	WEPS 2.0 3km (EN09)	ST3
10	WEPS 2.0 15km (EN10)	WEPS 2.0 15km (EN10)	WEPS 2.0 3km (EN10)	ST3
11	WEPS 2.0 15km (EN11)	WEPS 2.0 15km (EN11)	WEPS 2.0 3km (EN11)	ST2
12	WEPS 2.0 15km (EN12)	WEPS 2.0 15km (EN12)	WEPS 2.0 3km (EN12)	ST2
13	WEPS 2.0 15km (EN13)	WEPS 2.0 15km (EN13)	WEPS 2.0 3km (EN13)	ST2
14	WEPS 2.0 15km (EN14)	WEPS 2.0 15km (EN14)	WEPS 2.0 3km (EN14)	ST2
15	WEPS 2.0 15km (EN15)	WEPS 2.0 15km (EN15)	WEPS 2.0 3km (EN15)	ST2
16	WEPS 2.0 15km (EN16)	WEPS 2.0 15km (EN16)	WEPS 2.0 3km (EN16)	ST2
17	WEPS 2.0 15km (EN17)	WEPS 2.0 15km (EN17)	WEPS 2.0 3km (EN17)	ST2
18	WEPS 2.0 15km (EN18)	WEPS 2.0 15km (EN18)	WEPS 2.0 3km (EN18)	ST2
19	WEPS 2.0 15km (EN19)	WEPS 2.0 15km (EN19)	WEPS 2.0 3km (EN19)	ST2
20	WEPS 2.0 15km (EN20)	WEPS 2.0 15km (EN20)	WEPS 2.0 3km (EN20)	ST2
21	NCEP 0.5 度	NCEP 0.5 度	NCEP 0.5 度	ST2
22	JMA 0.5 度	JMA 0.5 度	JMA 0.5 度	ST2
23	NCEP 0.5 度	NCEP 0.5 度	NCEP 0.5 度	ST3
24	JMA 0.5 度	JMA 0.5 度	JMA 0.5 度	ST3

*WEPS 2.0 風場各成員(EN01~EN20)由中央氣象局產生，差分到各層波浪網格所需的解析度。NCEP 及 JMA 風場取得後也是相同的處理程序。

2. 資料同化研究

整個同化系統最重要的三個模組包括觀測資料蒐集品管、forward operator、LETKF等，而在波高分析場完成後，轉成NWW3 restart檔案之轉換程式，已在NWW3 Ver. 6.07版建構完成[16]。

在觀測資料格式轉換及向前因子轉化程式設計方面，衛星觀測資料的觀測間距為1秒，每一觀測點之距離約相隔6.9公里(在中緯度附近)，以JASON-3為例，衛星軌跡掃過面積為11.2 km (Along) x 5.1 km (Across)，以現階段研究0.25°(約25公里)的計算網格而言，約4秒即跨過一個計算網格，不需要去平均網格內的觀測值。品質篩選過的衛星觀測資料，需建置觀測值的obs.nc檔及各個系集成員在觀測點的計算值或觀測增量。

LETKF同化完成後，產生各個系集成員的輸出檔，透過ww3_uprstr的執行將原先的restart.ww3轉換成restart001.ww3，重新命名restart.ww3後再進行後續的預報。

最後在資料同化模式之建置及測試方面，結合上述資料同化三種主要模組之介面轉換程式，進行資料同化的測試，利用單一網格、WRF系集風場(20個成員)及衛星資料進行測試，同時比較未同化及同化後

之差異程度。圖1為同化前後之系集平均波高差異，由於同化之衛星觀測資料都比同化前之波高大，因此同化後之波高即明顯增強，趨近於觀測值。

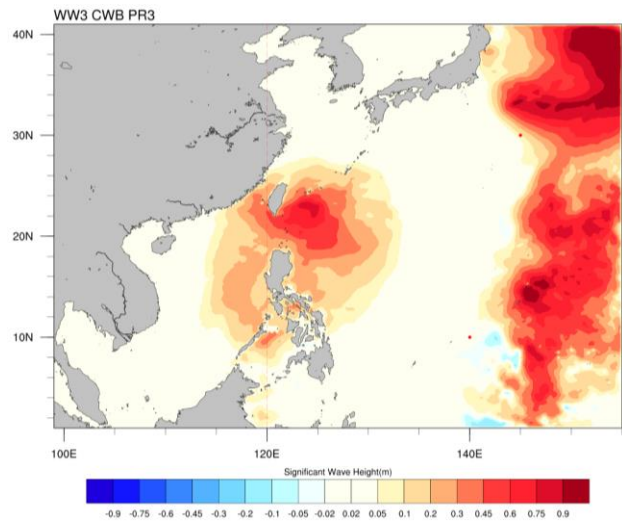


圖1 波高系集平均同化前後差異分布圖(UTC 2021/06/21 1800)

三、系集模擬加值服務商業應用

台灣的離岸風電發展正如火如荼的進行中，Formosa I 第二階段的示範風場已經於2019年10月9日安裝完成20支風機後併聯發電。在2021年台電離岸一期風力發電工程共 21 部風機、容量達 109.2 MW，在8月 27 日完成初始併聯，開始進行試運轉及調校。雖然原定完工的海能及允能一期受到疫情影響延後，預計於2022年完工併網，其餘風場也都將依原訂第2階段潛力場址容量分配作業的5.5 GW，於2025年完成商轉[15]。這些風場在施工時期以及日後在運維時期都將倚重海上作業的順利進行。

工業技術研究院綠能與環境研究所協助能源局利用先前的研究[1][2][3][6] 建置風險評估機制，然後自2017年開始發展與建置離岸風機施工運維船舶派遣與追蹤系統[4][7][8][12]，利用短期海氣象機率性預報及長期氣候窗統計，結合各項海域施工特性及限制、DNV規範的天氣餘裕係數(alpha factor)[19]、AIS (Automatic Identification System) 船舶追蹤技術，船舶派遣機制、與三維地理資訊系統，來計算離岸作業執行機率及管理施工船隊，得到海上施工整體的風險機率，以做為決策判斷之依據。

離岸風機施工船舶派遣與追蹤決策支援系統架構在中央氣象局的海氣象系集預報之上，取得系集成員的預報資料，用以建立關鍵機率性預報資訊，結合web-based三維地理資訊系統與使用者介面，即時算出離岸施工的起訖時間機率分布，並結合自動識別系統來顯示施工船隻的位置，進而進行施工船隻的派遣與掌握。

經過約多年的開發，離岸風機施工運維船舶派遣與追蹤決策支援系統已建置完成(圖2)，系統架構如圖3所示，主要有風險評估及船舶派遣與追蹤功能。系統的主要呈現是利用Cesium的API建置三維地理資訊系統[17]。

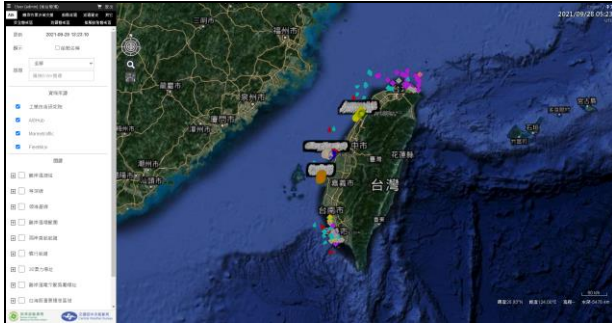


圖2 離岸風機施工船舶派遣追蹤決策系統啟始介面

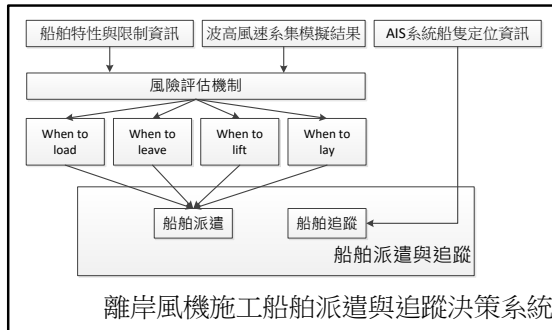


圖3 離岸風機施工船舶派遣與追蹤決策系統架構

離岸風機施工運維船舶派遣與追蹤決策支援系統雛型經由讀入的風速與波高系集預報資料，在設定風速篩選及波高篩選條件與天氣餘裕係數(圖4)後，加上設定連續施工時數及蒙地卡羅模擬次數後，即可算出每小時可以出海作業的可能性。透過介面可以展示風機的標示、計畫區定位、系集預報讀入分析及風險運算、行政區定位、地址定位、指標位置、與展示三維動畫風機及其相關屬性資料等功能。2019年並增加中英文介面、時區設定、環境圖層、安全區警戒、流錨警戒、及船隻動態警戒等功能。三維風機動畫及滑鼠點選後顯示屬性資料的視窗畫面如圖 5所示。

在2020年並對於波浪系集成員進行均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)、平均偏差(Mean Bias, MB)、及正規化平均絕對誤差(Normalized Mean Absolute Error, NMAE)的統計分析來評估系集成員的預報準確度，設計系集成員權重調整機制與介面，在計算風險機率時讓使用者可以透過簡易的介面自行調整各系集成員的權重，以求得更準確的離岸可作業風險機率評估結果[11]。

在設定風速篩選條件及波高篩選條件後，即可讀入最新的系集預報資料，展現每小時24個系集中符合

條件的百分比。圖6及圖7的最右方2個欄位顯示直接計算或是常態分布的計算結果。

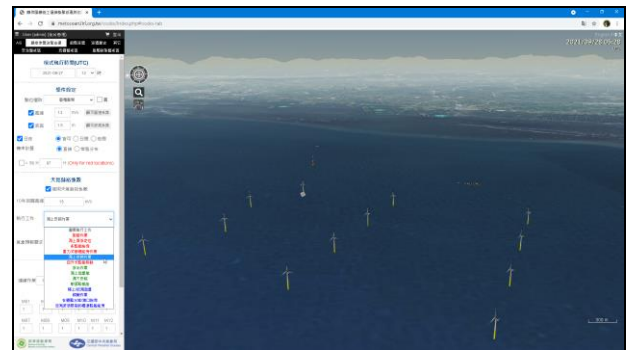


圖4 天氣餘裕係數設定介面

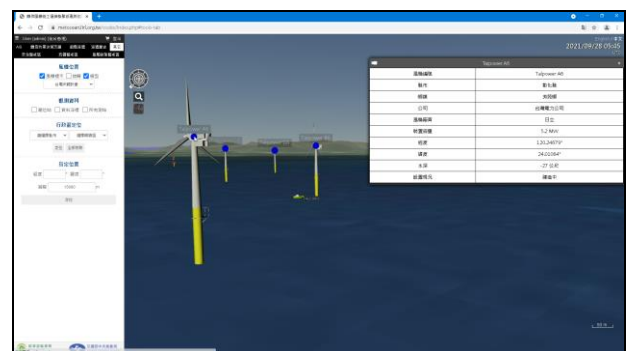


圖5 放大到計畫區可顯示三維動畫風機及屬性

在設定連續作業小時數(例如6小時)及蒙地卡羅模擬次數後，按「開始計算」即可算出每小時符合風速及波高條件及所需連續工作時數的機率風險(圖8)。風險評估結果使用Google Chart為網路繪圖開發工具，除了以圖形展示結果外，可執行機率亦可列表如圖9所示。現階段配合中央氣象局完成的96小時系集預報資料，已增加可預報的風險評估時間到96小時。

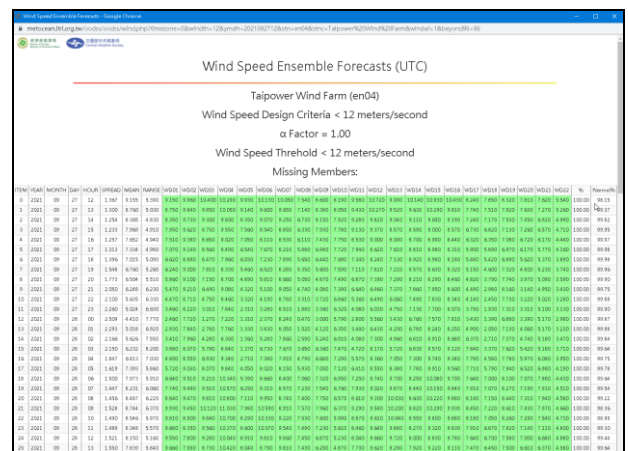


圖6 風速符合作業條件的展示及百分比計算

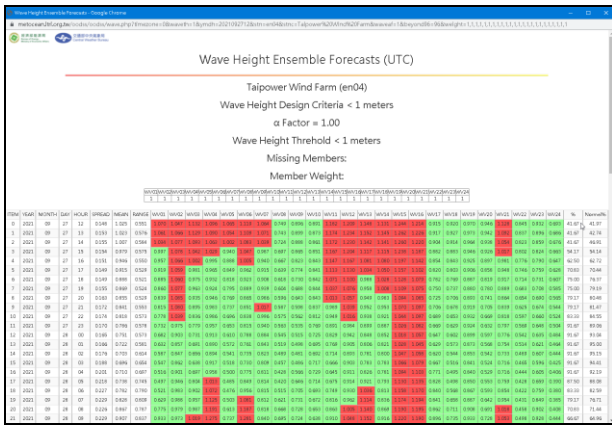


圖7 浪高符合作業條件的展示及百分比計算

可選取欲放大的區域，使用滑鼠右鍵可以恢復原圖大小。

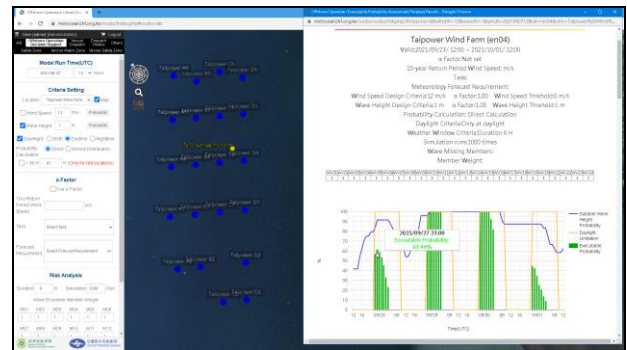


圖10 只設定波浪及日光條件後的機率預測結果

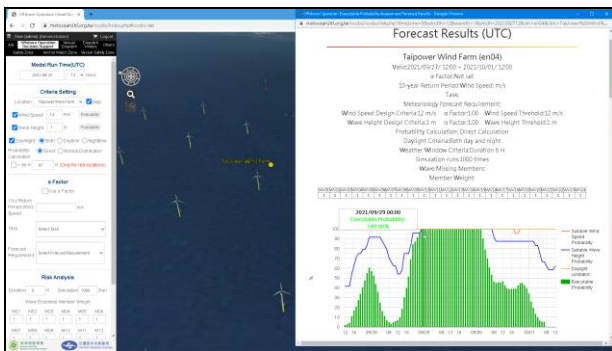


圖8 施工可執行機率預測結果時序列圖

2020年完成系集權重調整功能讓使用者可以根據波浪系集成員準確度排名，自行進行系集成員權重的調整[11]。由於並無足夠研究來定量權重的調整幅度，現階段將只建置相關操作介面(圖11 波浪系集成員權重調整介面)，由使用者自行調整，並無系統自動調整的機制。

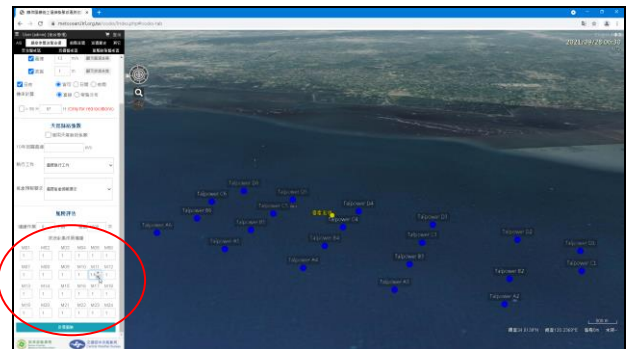


圖11 波浪系集成員權重調整介面

ITEM	YEAR	MONTH	DAY	HOUR	SUN RISE(UTC+8)	SET(UTC+8)	WIND NIGHT	WAVE %	WIND %	YES COUNT	NO COUNT	WINDOW OK %
0	2021	09	27	12	05:48	17:49	Nighttime	100.00	41.67	22	978	2.20
1	2021	09	27	13	05:48	17:49	Nighttime	100.00	41.67	32	968	3.20
2	2021	09	27	14	05:48	17:49	Nighttime	100.00	41.67	47	953	4.70
3	2021	09	27	15	05:48	17:49	Nighttime	100.00	54.17	110	890	11.00
4	2021	09	27	16	05:48	17:48	Nighttime	100.00	62.50	168	832	16.80
5	2021	09	27	17	05:48	17:48	Nighttime	100.00	70.83	211	789	21.10
6	2021	09	27	18	05:48	17:48	Nighttime	100.00	75.00	277	723	27.70
7	2021	09	27	19	05:48	17:48	Nighttime	100.00	75.00	340	660	34.00
8	2021	09	27	20	05:48	17:48	Nighttime	100.00	79.17	407	593	40.70
9	2021	09	27	21	05:48	17:48	Nighttime	100.00	79.17	478	522	47.80
10	2021	09	27	22	05:48	17:48	Daytime	100.00	83.33	452	448	52.20
11	2021	09	27	23	05:48	17:48	Daytime	100.00	91.67	607	393	60.70
12	2021	09	28	00	05:48	17:48	Daytime	100.00	91.67	570	430	57.00
13	2021	09	28	01	05:48	17:48	Daytime	100.00	91.67	527	473	52.70
14	2021	09	28	02	05:48	17:48	Daytime	100.00	91.67	441	559	44.10
15	2021	09	28	03	05:48	17:48	Daytime	100.00	91.67	362	638	36.20
16	2021	09	28	04	05:48	17:48	Daytime	100.00	91.67	250	750	25.00
17	2021	09	28	05	05:48	17:48	Daytime	100.00	87.50	163	837	16.30
18	2021	09	28	06	05:48	17:48	Daytime	100.00	83.33	114	886	11.40
19	2021	09	28	07	05:48	17:48	Daytime	100.00	79.17	72	928	7.20
20	2021	09	28	08	05:48	17:48	Daytime	100.00	70.83	52	948	5.20
21	2021	09	28	09	05:48	17:48	Daytime	100.00	66.67	37	963	3.70
22	2021	09	28	10	05:48	17:48	Nighttime	100.00	62.50	48	952	4.80

圖9 施工可執行機率預測結果列表

離岸風機施工船舶派遣與追蹤決策系統雛型中還增加日光條件設定功能以及各因子開關功能，使用者可以設定工作是否只能在白天或夜晚作業，而所有的條件因子皆可以設定啟用或關閉，如圖 10顯示只考慮波浪因子的評估結果。

繪製的圖除了有mouse on展示數值功能外，並加入了局部放大的功能，使用者用滑鼠按住左鍵拖曳即

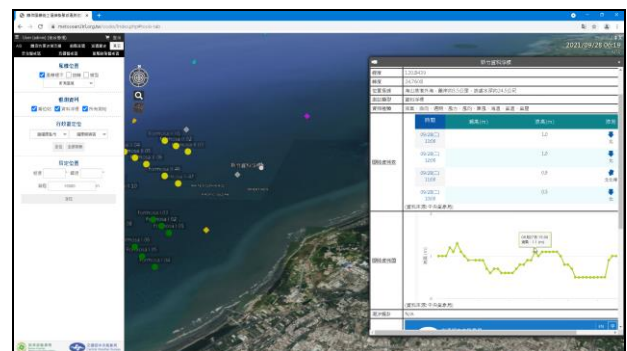


圖12 海氣象測站即時觀測資料展示

離岸風機施工運維船舶派遣與追蹤決策系統初步開發完成後曾經提供試用給宏華營造、伯威海事工程、台灣綠色電力、竹風電力、知洋科技、安能亞太、海洋及水下協會、台船環海風電工程、台電、港務港勤、台灣離岸風機基礎計海事工程協會、天氣風險管理開發、裕民航運、哥本哈根風能開發、英商費舍海洋服務、DNV GL、中國驗船中心、沃旭能源、中央氣象局、大陸工程、Flotation Energy 等離岸風電開發相關廠商及單位，讓海象測報中心全力推動的波浪系集模擬能夠透過加值服務，實際應用在離岸風力發電相關商業應用上。

四、系集模擬後續研究及應用

中央氣象局系集模擬除持續與NOAA同步更新NWW3版本外，另外在工研院的團隊將持續研究利用無人機即時量測風速[13]及後續可能的波高量測研究[21]，期能補足同化技術觀測資料的大量需求。在波浪系集模擬後續應用方面可以參考ECMWF利用波浪系集預報來選定大西洋間航行穩定的最佳化航線[20][22]，該作業是在地圖上繪出經由確定性波浪預報及系集波浪預報結果，將波高資料換算成對航行油耗的經濟因素，依此選定最佳航線及其他次佳的航線範圍，透過50組系集成員預測船隻航行穩定的最佳航線機率分布。另一個波浪系集模擬後續應用是擴大先前建置的離岸作業船舶派遣追蹤決策系統到整個海事作業協調管理系統，甚至於如離岸風場的資產管理系統，將海氣象系集模擬成果在如離岸風力發電商業應用上發揮到極致。

五、結論

中央氣象局海象測報中心歷經多年已成功建置波浪系集作業化預報機制，本篇論文除介紹現階段海象測報中心的波浪系集作業化現況與資料同化研究，並說明利用作業化海氣象系集預報結果建置的離岸風機施工運維船舶派遣與追蹤決策系統於商業化應用，並提供試用給超過20家離岸風電開發相關廠商。論文最後說明波浪系集模擬後續在同化技術及無人機即時量測、最佳航線訂定、及風場資產管理上面的可能研究與應用。期望經由中央氣象局波浪數值模擬的持續研究，可以提升藍色公路與生活休閒預報的準確度，並廣泛應用於各種商業用途如離岸風力發電的開發，全力發揮波浪數值模擬的最大功效。

謝誌

本論文係交通部中央氣象局研究計畫「波浪資料同化系統與菲律賓波浪預報系統建置研究計畫(1/3)」(MOTC-CWB-110-0-01)以及經濟部能源局為執行科技部綠能科技創新研究與服務平台計畫所委託氣象資訊在綠能開發之應用服務計畫(109-D0602)的成果之研究成果，承蒙中央氣象局及過往能源局經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

- [1] 顏厥正、張恆文，2016。“離岸施工運維決策支援系統建置”，台灣風能協會會員大會暨學術研討會，2016年12月1日。
- [2] 財團法人工業技術研究院，2016。千架海陸風力機設置推動及關鍵技術研發計畫(1/3)執行報告，經濟部能源局，中華民國105年12月。
- [3] 財團法人工業技術研究院，2017。千架海陸風力機設置推動及關鍵技術研發計畫(2/3)執行報告，經濟部能源局，中華民國106年12月。
- [4] 財團法人工業技術研究院，2017。氣象資訊在綠能開發之應用服務計畫(1/4)執行報告，經濟部能源局，中華民國106年12月。
- [5] 顏厥正、張恆文、柯昱明，2018。“離岸風機施工船舶派遣與追蹤決策系統建置”，107年天氣分析與預報研討會，中央氣象局，2018年9月11日。
- [6] 財團法人工業技術研究院，2018。千架海陸風力機設置推動及關鍵技術研發計畫(3/3)執行報告，經濟部能源局，中華民國107年12月。
- [7] 財團法人工業技術研究院，2018。氣象資訊在綠能開發之應用服務計畫(2/4)執行報告，經濟部能源局，中華民國107年12月。
- [8] 財團法人工業技術研究院，2019。氣象資訊在綠能開發之應用服務計畫(3/4)執行報告，經濟部能源局，中華民國108年12月。
- [9] 顏厥正、張恆文、胡哲魁、柯昱明、李科豎，2019。“離岸風機施工運維船舶派遣與追蹤決策支援系統”，2019台灣風能學術研討會暨科技部成果發表會，高雄市蓮潭國際會館，2019年12月6日。
- [10] 台灣地球觀測學會，2019。“發展波浪資料同化技術及強化波浪系集預報系統全程總報告”，交通部中央氣象局委託研究計畫成果全程執行總報告，中華民國108年12月。
- [11] 顏厥正、張恆文，2020。“系集預報成員準確性分析與施工運維決策風險評估應用”，第二十

- 二屆水下技術研討會暨科技部、文化部成果發表會，國立高雄科技大學，2020年7月3日。
- [12] 財團法人工業技術研究院，2020。氣象資訊在綠能開發之應用服務計畫(4/4) 執行報告，經濟部能源局，中華民國109年12月。
- [13] 柯昱明、陳宥任、林俊遠，2020。“複雜風場內安全飛行地圖建置”，工業技術研究院技術報告，2020年12月。
- [14] 台灣地球觀測學會，2020。“波浪資料同化系統與菲律賓波浪預報系統建置前期研究計畫期末報告”，交通部中央氣象局委託研究計畫(期末) 成果報告，中華民國109年12月。
- [15] 中華民國經濟部，2021。“全球離岸風電建置皆受疫情影響但台灣的進度將於2022年趕上”，中華民國經濟部網頁本部新聞，https://www.moea.gov.tw/MNS/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=40&news_id=96803。
- [16] 台灣地球觀測學會，2021。“波浪資料同化系統與菲律賓波浪預報系統建置研究計畫(1/3)期中報告”，交通部中央氣象局委託研究計畫(期中) 成果報告，中華民國110年7月。
- [17] Analytical Graphics Inc., 2016. Cesium web site, <https://cesiumjs.org/>.
- [18] Chang, Heng-Wen, Chieh-Cheng Yen, Ming-Chung Lin and Chi-Hao Chu, 2017. “Establishment and performance of the ocean wave ensemble forecast system at CWB”, *Journal of Marine Science and Technology*.
- [19] DNV, 2011. DNV OFFSHORE STANDARD, General Marine Operations, DNV-OS-H101, October 2011.
- [20] Hoffschmidt, Martin, Jean-Raymond Bidlot, Bjorn Hansen, Peter A.E.M. Janssen, 1999. “Potential Benefit of Ensemble Forecasts for Ship Routing”, Technical Memorandum, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, No. 287.
- [21] Huang, Zhi-Cheng, Cheng-Yang Yeh, Kuo-Hsin Tseng, Wen-Yang Hsu, 2018. “A UAV-RTK Lidar System for Wave and Tide Measurements in Coastal Zones”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, American Meteorological Society, Vol. 35, Issue 8. pp. 1557-1570.
- [22] Saetra, O, 2004. “Ensemble Shiprouting”, Technical Memorandum, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, No. 435.
- [23] SeaROC, 2021. “SeaPlanner-Marine Coordination Software for Safe & Efficient Offshore Operations”, <https://www.searoc.com/seaplanner>.