

## 海氣象觀測及預測技術運用於離岸風力發電場址

# Metocean Monitoring and Forecasting Technologies for Offshore Wind Farms

黃清哲<sup>1</sup>、林演斌<sup>1</sup>、范揚洺<sup>1</sup>、薛炳彰<sup>1\*</sup>

國立成功大學近海水文中心<sup>1</sup>

Ching-Jer Huang<sup>1</sup>, Yen-Pin Lin<sup>1</sup>, Yang-Ming Fan<sup>1</sup>, Ping-Chang Hsueh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University  
pchsueh@mail.ncku.edu.tw

### 摘要

離岸風力發電為政府近年推動綠色電力政策的重要電力來源之一。為達成千架海陸風力機之政策目標，政府先後於 2012 啟動「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」及 2015 公告「離岸風力發電規劃場址申請作業要點」，陳列潛力場址，以利業者提早進行規劃及開發。以彰化外海地區潛力場址為例，雖為世界評估最佳風場之一，但該區域缺乏長時間的海氣象觀測資料，因此當強勁的風速所伴隨的惡劣海況，極可能導致風力機施工與維運的風險提高。本研究團隊以開發廠商規劃設計、海上施工及運轉維護等需求為導向，進行離岸風力發電場址的長期海氣象觀測調查及海象條件預測。海氣象資料的收集有助於開發廠商進行個別場址的海洋資料建構並應用於規劃設計及評估施工方式，同時觀測資料即時導入系集波浪模式進行同化修正，提供高準確之海象預測。本研究團隊所發展之海氣象觀測及預測技術將可協助產業界完整釐清發電場址所在海域的波浪特性，進而讓施工單位能透過海域環境條件評估出最佳的施工方式，藉以確保未來海上發電機組施工與結構之安全。

關鍵詞：資料浮標、海氣象資料、系集波浪模式。

### Abstract

Offshore wind power is one of the essential electric power sources for Taiwan government to carry out the renewable energy policy in recent years. Owing to the policy goal of thousand wind turbines, Taiwan government has announced “Regulations of encouragement to the pilot projects of offshore wind power” and “The guidelines for the application of the offshore wind power planning sites” in 2012 and 2015, respectively, for the potential companies to prepare the planning and development. The potential offshore wind farm (OWF) in Changhua, for example, is one of the best offshore wind farms in the world, but the metocean data in this area are scarcity. In other words, the hazardous sea states caused by the strong wind probably increase the risk of the construction and operation of the offshore wind farms. To assist the development of the offshore wind power industry, Coastal Ocean Monitoring Center (COMC) collaborate with several OWF developers to observe the metocean data and to forecast the metocean condition, as a result of the requirement of the design, construction, and operation for the offshore wind farms. The metocean monitoring and forecasting technologies could be used to clarify the wave features in the offshore

area, to evaluate the optimal construction method, and to ensure the safety of the offshore wind turbines.

**Keywords:** Data buoy, metocean data, ensemble wave prediction model.

### I. 前言

政府近年來積極推動綠色電力政策，然而我國能源、高度依賴進口，化石能源依存度高，面對全球溫室氣體減量趨勢與國家非核家園共識，政府規劃新能源政策目標於 2025 年提升再生能源發電比例至 20%，期能在兼顧能源安全、環境永續及綠色經濟發展均衡下，邁向 2025 年非核家園願景。綜觀現金再生能源技術中，以太陽能發電及風力發電的技術成熟度，為最有可能於規劃時間內進行建置並完成上述目標願景。因此經濟部能源局配合前述目標推動「陽光屋頂百萬座」及「千架海陸風力機」等兩項計畫。而為達成「千架海陸風力機」之政策目標，政府於 2012 啟動「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」依據申請業者規劃離岸風場開發計畫之可行性及執行能力，由民營業者(福海、海洋)與國營業者(台電)等 3 家獲選示範業者，開啟我國離岸風電市場發展。隨後於 2015 公告「離岸風力發電規劃場址申請作業要點」，陳列 36 處潛力場址，開始接受開發業者進行申設。藉由政策提早公告及擴大再生能源發展達成 2025 年再生能源占全國發電占比達到 20%之目標，其中風力發電裝置容量目標規劃達 4.2 GW，其中陸域風電 1.2 GW 及離岸風電 3 GW。

臺灣海峽發展離岸風力發電的優勢在於強勁風速的地理條件，尤其是彰化地區因地形之束縮條件形成絕佳之風能發展背景。然而面對位處熱帶與亞熱帶交界之區域，台灣經年需面對夏秋季的熱帶氣旋-颱風，所帶來之極端海氣象條件及冬季東北季風所導致的嚴峻的海象狀況。上述兩種狀況所產生的波浪條件，對於風力機組的支承結構及基礎本身均可能造成不可輕忽的威脅。因此近海水文中心搭配政府部門、國營企業及場域開發商於彰化地區進行海氣象觀測。此外，藉由先前協助台灣電力公司第四核能發電廠建置時，所發展的海況預測模式[1]，將來亦會導入該區域藉由海氣象觀測資料的同化，進行彰化區域的海象波浪預測。

海洋及大氣的各項條件均與離岸風場之規劃、海域環境之工程及船舶航行之安全息息相關，而掌握海洋與大氣環境特性是上述工作必要之途徑。海氣象變化萬千，掌握其特性可運用很多方式探索它，如理論解析、模式及觀測等，但其中最直接的方法就是「調查與觀

測」。由於海岸地區兼具海、陸域之豐富生態體系特性，具有極高經濟生產力，惟因受海流、潮汐及波浪等作用力影響，在極端天候狀況時容易產生環境災害、延誤工程時程進而導致開發廠商損失。為瞭解此海域的海象特性、提供該海域環境的參考資訊及使管理者備有實際數據可進行必要決策，海域環境的調查觀測成為極重要的工作之一。

海氣象觀測的部分，本中心除 2006 年協助台灣電力公司（後簡稱：台電）於彰化縣鹿港鎮彰濱工業區外進行為期一年的離岸風力發電可行性評估海氣象資料觀測外，科技部（原：國科會）委託與國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心合作在彰濱海域於 2012 年進行過一整年的海氣象觀測。隨後在科技部「第二期能源國家型計畫」的支持之下與永傳能源股份有限公司進行產學合作於彰化縣芳苑鄉外海進行為期 15 個月的海氣象觀測。近期則分別協助上緯新能源及台電於彰化潛力場址區域進行海氣象觀測，該項資料除作為開發商後續規劃設計之用途外，亦同步使用於環境影響評估中，提供給多項環評數據進行模擬預估使用。海象波浪預測部分，經過前述的觀測及資料收集之後，本中心具有海氣象觀測及彰化地區系集波浪預測系統之先期成果。

本文第一章除針對我國離岸風力發電的政策進行簡介外，對於彰化地區的海象觀測脈絡亦進行相關背景簡介及海象波浪預測的描述。第二章描述離岸風電場址長期海氣象觀測的部分成果並針對極端氣候所量測之資料進行說明。第三章中呈現系集波浪預測系統運用於彰化地區外海的部分成果。第四章將針對本中心所發展的二項技術進行結論探討及後續建議。

## II. 離岸風電場址長期海氣象觀測

離岸風力發電開發商為能更完整掌握轄區內之海域環境特徵，通常於風力發電場址內會進行海氣象資料浮標之設置，以便有效即時瞭解該區域之海氣象狀況，所獲得的資料亦可以於開發初期使用於設計規劃。海氣象資料浮標是國內外常使用的海氣象觀測工具之一，其主要特點為：(1)設站地點不受水深限制，能廣泛運用於各種海域、(2)大載量可架設多種感測器及能源自主設備，長期自動觀測多種海氣象資料、(3)配備資料傳輸系統能取得即時海氣象資訊。

國立成功大學近海水文中心多年來接受中央氣象局、水利署及觀光局等單位的委託，發展國內自主的資料浮標技術，建立環臺海氣象資料浮標觀測網(圖 1)。過去五年站網平均觀測成功率達 94%，顯示自主觀測技術已然成熟。目前環臺灣海域計有 18 座長期資料浮標，作業水深範圍從約 20 m 到將近 6,000 m，用來觀測海象(波高、週期、波向、頻譜、方向波譜、流速、流向、水溫)與氣象(氣壓、氣溫、風速、風向)等資訊。

由圖 1 可以請清楚瞭解台灣西海岸區域由新竹香山至台南七股區域並無政府機關所布放的長期資料浮標。因此離岸風電開發商才需要自行布放所開發區域的資料浮標以便收集該區域的長期海氣象資料。

本團隊與中興工程顧問股份有限公司(台電委託進行可行性評估)協議資料浮標預定布放地點，位在台電離岸二期(26 號潛力場址)範圍內，所量測到海象資料進行風場開發及環境影響頻估參考。隨後拜訪彰化漁

會，對於資料浮標預定布放地點進行溝通協調，確定資料浮標布放地點不在漁民捕魚區。由於資料浮標為作業化觀測，亦可提供當地漁民即時且準確的海氣象觀測資訊，作為出海安全考量的依據。完成上述資料浮標布放位置的溝通後，隨即著手資料浮標組裝、測試及布放作業。工作團隊於 2016 年 12 月完成海氣象資料浮標的布放(外觀如圖 2)，該位置水深約 28.8 m，與最近的海岸陸地(彰濱工業區)之距離約 23.5 km。



圖 1 環台長期海氣象資料浮標觀測分佈圖



圖 2 台電離岸二期浮標外觀

本團隊已建立資料品管技術與維修能量，以確保即時資料之正確。在提供資料應用前，於資料傳輸流程中置入資料品管作業(圖 3)，當發現觀測資料異常時，具備能量進行海上維修作業(圖 4)。透過即時資料網頁展示(圖 5)，每小時自動更新資料，提供中興工程顧問公司隨時查詢與下載海氣象資料檔案，掌握離岸二期海域的海

氣象資料，作為離岸風電相關工程施工決策之參考，資料亦可作為相關性分析及統計分析使用。從 2016 年 12 月至 2017 年 4 月，離岸二期浮標資料觀測成功率、品管通過率及觀測達成率分別如表 1 所示。顯示此期間觀測達成率達到 76% 以上而海流之觀測達成率更高達 99.7 %。2017 年 1 月即時監控發現資料回傳不佳且監控呈現充電不足，推估為浮標本體可能遭受外力破壞而導致回傳資料訊號品質下降。由圖 6 可以發現浮標主要充電系統大型太陽能板有一片遭受破壞而脫落而上方小型太陽能板則是僅存 2 片，因此安排於 2 月份海況較佳之時間，進行定期維護。2017 年 4 月再度發生資料回傳率偏低之情況，適逢水下自計式潮位計需進行回收，因此安排定期維護。維護人員登上浮標，打開艙蓋檢視控制箱，發現控制箱疑似受到外力撞擊導致內部配件受損，於是更換控制箱，緊接著更換浮標上方設備，包括警示燈、GPS 及風速計支架等，更換後資料浮標的整體觀測恢復正常。之觀測達成率低於 75%，其原因為遭受破壞與儀器故障。海氣象實測資料依照台電招標規範之要求進行資料分析，並將結果彙整提供中興工程顧問股份有限公司應用。



圖 6 台電離岸二期浮標太陽能板遭破壞脫落

表 1 離岸二期浮標(201612-201704) 觀測成功率、品管通過率及觀測達成率

統計項目	觀測項目		
	波高	海溫	海流
觀測成功率(%)	83.9	83.9	99.7
品管通過率(%)	91.2	91.0	100.0
觀測達成率(%)	76.6	76.3	99.7

整體而言，離岸二期 26 號風場於 2016-2017 年冬季期間最大示性波高值達 6.74 m、最大平均週期為 8.3 sec、平均示性波高為 2.17 m、平均週期 5.5 sec。2017 年由於侵台之颱風較 2016 年微弱且數量較少，所以觀察之颱風期間最大示性波高為 3.38 m 而最大平均週期為 12.4 sec 為海棠(HAITANG)颱風由彰化芳苑鄉出海時所測得。

### III. 系集波浪預測系統

瞬變氣象所產生之危險海況對風力發電場址施工可能造成超出預期的傷害，也嚴重威脅人員之生命安全。又以湧浪為例：湧浪一般具有巨大的能量，當它傳到淺海時，波浪底部受海底地形影響，發生變形效應。波浪底部因受海底摩擦停滯不前，而波峰卻以原來的速度前進，這樣就使波長越來越短，波高越來越大，最後發生波峰捲倒和波浪破碎的現象。所以雖然風和日麗、海面平靜，湧浪對身處近岸或港邊從事海上活動的人士與船隻構成威脅。如颱風尚未抵達台灣前，即使岸邊的風浪還不是很大，但因湧浪已逐漸傳遞至近岸。2009 年 9 月 14 日高雄左營軍港外 1.3 哩處發生潛艦艦長落海事件，艦艇受到突然的大浪拍擊，此大浪即有可能是西南氣流引起的湧浪，因此極端的波浪發生頻繁，造成生命財產的嚴重損失，突顯掌握海況對人類生活的重要性。了解海洋環境可從監測與數值波浪預報兩種手段著手，其中數值波浪預報可提供未來海況資訊，對海事工程與海洋活動之規劃與應用有幫助。又為了減少意外災害的發生及生命財產的損失，波浪預測工作刻不容緩。

然而波浪預測模式中存在著許多不確定性，包含初始資料的誤差或模式中的缺陷，皆可能影響波浪預測結果的準確度。目前單一模式決定性的預測方法，無法完全掌握預測過程中的不確定性，同時亦無法提供預測過

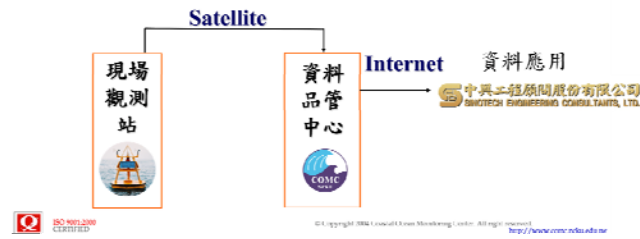


圖 3 資料傳輸流程



圖 4 台電離岸二期浮標維修



圖 5 台電離岸二期即時海象網頁

程中的不確定性資訊，因此目前欲獲得所有可能的海象變化有其困難度。系預測的發展是為了彌補單一模式預測的不足，藉由多個不同的系集成員預測，期望能包含模式預測的不確定性，並且將不確定性量化，以提供未來的預報機率[2]。歐洲中程天氣預報中心(ECMWF)以能量向量為基礎進行初始系集攝動的案例分析[3, 4]。在美國國家環境預報中心(NCEP) 以非線性擴展向量後進行系集分析[5]。Houtekamer et al. [6]使用多樣分析循環(受擾動的觀測數據和不同的標準配方)用於生成初始系集擾動。Pan et al. [7]與 Fan et al. [8] 初步分析波浪系集預測結果顯示實測波浪在成長或衰減過程中的變化趨勢皆在波浪系集預報的上下限內，且尖峰與尖峰時間可更精確的掌握。

根據 2015 年度建立好的系集預測成員，於 2016 年建立波浪機率預測架構，系集預測可以產出多組預測結果。本研究團隊過去研究發現系集波浪預測成員結合的過程中，如果特定一個成員和其他成員相比，總是比較缺乏精確性，則在平均結合這些模式的同時，可能會導致不理想的預測結果，因為這個較差成員所引發的負面影響，或許就勝過了藉由模式平均結合所得到的改善。如颱風期間的案例研究發現特定的系集成員在大波浪時表現較好，小波浪時表現較差，而那些在大波浪時表現較差的成員，反而在小波浪時表現較好，意即系集成員反映在波高預測上的準確度各有優劣。因此將根據預測和觀測比較表現，藉由統計方法求得各成員的權重值再做結合，則較合理而且會有比較好的結果。

2016 年度導入資料同化概念，根據預測和觀測比較表現，藉由統計方法求得各成員的權重值再做結合，則較合理而且會有比較好的結果。系集預測權重擬利用多元線性迴歸方法(multiple linear regression method)進行系集預測成員之權重係數分析，觀測(O)與模式預測(M)間的關係為：

$$O = w_1 M_1 + w_2 M_2 + \dots + w_i M_i - r \quad (1)$$

其中  $M_1$  到  $M_i$  分別表示各個系集預測成員； $w_i$  為個系集預測成員的權重係數； $r$  為預測誤差項。

為了評估預測準確度，本研究將以平均絕對百分比誤差(mean absolute percent error, MAPE)作為檢測指標。此指標用以作為預測模式好壞之評估指標。因為 MAPE 為相對數值，不受預測值與實測值的單位與大小之影響，能夠客觀得獲得預測值與實測值間之差異程度。

$$MAPE = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \left| \frac{x(k) - x'(k)}{x(k)} \right| \times 100\% \quad (2)$$

其中  $x(k)$  為實測資料； $x'(k)$  為模擬資料； $M$  為樣本數。MAPE 值若越接近 0 表示估計效果越佳。

為了提高波浪預測準確度，本中心將進行結合前述的即時波浪觀測資料，發展架構於先前完成的系集波浪預測模式之波浪資料同化預測技術，使其獲得較佳的初始值，進而產出更符合實際海況的預測資訊。

另外，最大波高與尖峰週期相較於示性波高與平均週期來說，最大波高與尖峰週期是影響船舶安全作業的重要參考參數。然而，波浪模式是基於波浪能量變化，並非水位變化，無法直接計算最大波高。雖然有研究指出海上的最大浪高通常是示性波高的 1.6 倍到 2.0 倍，

但此倍率並非定植，且無法適用於所有海域與所有天氣系統引起的海況，因此不建議利用此倍率由預測的示性波高計算出預測的最大波高。為了獲得合理的預測最大波高，本中心團隊擬利用即時波浪觀測資料不間斷的分析最大浪高與示性波高的比值，亦即此比值不是固定值，會隨著不同的天氣系統，再由預測的示性波高乘上此比值後計算出預測的最大波高。

為了調整各系集成員在不同波浪範圍內的權重關係，以致於最後系集預測波浪時的誤差為最小，採用區域加權學習(locally weighted learning [9])方法並應用於波浪預測領域，目前已完成系集權重計算。為了評估系集權重方法的準確性，模擬位於彰化外海的風發電場址之連續兩個月波浪，歷經 2016 年莫蘭蒂颱風(9/12-9/15)、馬勒卡颱風(9/15-9/18)、梅姬颱風(9/25-9/28)及艾利颱風(10/05-10/06)等四個颱風，分析颱風期間系集波浪模擬與實測值比對如圖 7。經由與子計畫一的觀測成果統計誤差分析結果顯示，實測波高小於 2 公尺的均方根誤差 0.24 公尺，實測波高大於或等於 2 公尺的均方根誤差 0.66 公尺，證明系集權重方法不但可精確的模擬平時的海況，更可掌握颱風波浪變化趨勢。

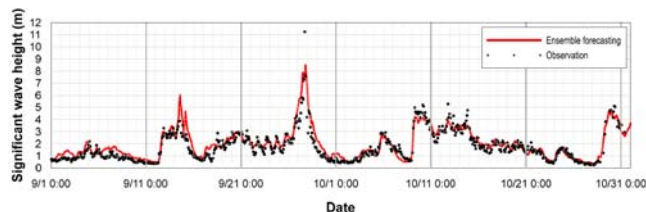


圖 7 颱風期間系集波浪模擬與實測值比對圖

#### IV. 結論

台電離岸二期資料浮標進行現場資料量測，有效釐清當地的海象特徵。2016 - 2017 年度透過資料浮標的布放，量測彰化鹿港外海離岸風力發電廠址施工海域的海象資料，主要包括：波高、週期、波向、流速、流向等，本委託案主要成果為在人為外力因素造成資料浮標故障之情況下，維持資料浮標正常運作。其價值為在離岸約 23.5 km、水深 28.8 m 之處，使用本土研發技術進行作業化海象觀測，觀測獲得連續至少 13 個月(2016/12 ~ 2017/12 預計回收時間)海象資料，提供預測模式校驗、環境影響評估及風場規劃設計所需之基礎資料，作為離岸風場開發設計與施工之用。此外，亦依照委託單位的規劃需求，逐季分析提供中興工程顧問股份有限公司及台灣電力股份有限公司應用。

系集權重方法已完成發展，並成功應用於波浪模式，特別是模擬颱風的準確度已提升。為了實務海上作業使用，本研究後續將進一步發展為作業化系集波浪預測系統，並以資料同化技術結合即時波浪觀測資料，精確掌握未來 72 小時內的浪況，可有效作為施工期規劃、降低營運成本及提高海上作業人員安全。

本研究後續可針對「海氣象即時觀測與波浪預測之建置、整合及實務操作」進行更進一步之技術研發。

#### VI. 誌謝

承蒙台灣電力股份有限公司「離岸風力發電第二期可行性研究」計畫及中興工程顧問股份有限公司提供經

費補助，使本文得以順利完成，謹致謝忱。科技部「離岸風力發電廠址波浪特徵之調查與研究(2/2)」計畫編號 MOST 105-3113-E-006-010-CC2 之部分成果亦使用於本文之發表。

#### 參考文獻

- [1] 高家俊，台灣電力公司第四核能發電廠循環冷卻水出水道工程龍門海域海氣象預報業務，中華民國海下技術協會，台灣台南，2003.
- [2] C. E. Leith, "Theoretical Skill of Monte Carlo Forecasts," *Monthly Weather Review*, vol. 102, pp. 409-418, 1974.
- [3] F. Molteni, R. Buizza, T. N. Palmer, and T. Petroliaigis, "The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 122, pp. 73-119, 1996.
- [4] F. Palmer, R. Molteni, R. Mureau, P. Buizza, P. Chapelet, and J. Tribbia, "Ensemble prediction. ECMWF Research Dept," Tech. Memo. 1881992.
- [5] Z. Toth and E. Kalnay, "Ensemble Forecasting at NMC: The Generation of Perturbations," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 74, pp. 2317-2330, 1993.
- [6] P. L. Houtekamer, L. Lefaivre, J. Derome, H. Ritchie, and H. L. Mitchell, "A System Simulation Approach to Ensemble Prediction," *Monthly Weather Review*, vol. 124, pp. 1225-1242, 1996.
- [7] S. Pan, Fan, Y.M., Chen, J.M., Kao, C. C., "Ensemble forecasting on typhoon wave modeling," presented at the The 6th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, 2012.
- [8] Y. M. Fan, Pan, Shunqi, Chen, J.M., Kao, C. C., "Ensemble forecasting on wave modeling," in *The 10th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST 11)*, Rhodes, Greece, 2011, pp. 809-820.
- [9] C. G. Atkeson, A. W. Moore, and S. Schaal, "Locally Weighted Learning for Control," in *Lazy Learning*, D. W. Aha, Ed., ed Dordrecht: Springer Netherlands, 1997, pp. 75-113.