

海域施工環境分析暨自動預測系統應用 The Application of Offshore Constructional Environment Analysis and Auto Forecasting System in Taiwan

張恆文、陳美蘭*、林勝豐、顏厥正、胡哲魁

¹工業技術研究院 綠能與環境研究所

HENG-WEN CHANG, MEI-LAN CHEN, CHIEH-CHENG YEN, SHENG-FONG LIN,
CHE-KUEI HU

Green Energy and Environment Lab., Industrial Technology Research Institute, Taiwan

Email: MLChen@itri.org.tw

摘要

透過海域施工環境條件與風電開發應用整合，工研院持續建構開發海域施工環境分析暨自動預測系統『OCEANAUT』，提供特定離岸場址風速、波浪、海流未來 120 小時之預測資訊，並以提供全方位離岸風場安全作業環境預測資訊為目標，滿足各個離岸風場開發不同階段之應用需求，本文就此系統架構、資訊整合以及發展應用進行介紹。

關鍵詞：預測、離岸風電、天氣停機標準。

Abstract

ITRI has developed “Offshore Constructional Environment Analysis and Auto Forecasting System” (OCEANAUT) by the integration of wind power technologies and numerical models. ITRI can provide a specific offshore wind farm design conditions and short term forecasting for wind, wave and current information. The final goal of “OCEANAUT” is to build comprehensive offshore safely operating environment forecasting information and apply to the offshore wind farm development demand. This paper introduces the development framework of this system which be combined with a proactive warning function at all times in construction stage of offshore wind farm.

Keywords: Forecasting, Offshore Wind Power, Weather Downtime Criteria.

I. 前言

目前工研院針對離岸風場開發與運維技術投入相關研發與研究，主要就是為了未來離岸風場開發時能夠提供本土在地服務，不需要仰賴國外技術與工具。依據歐洲離岸風電開發經驗，風力機設備估計畫總預算約 30~40%，而維運及海事工程施工則約為 55%，因此維運及海事工程技術能量與成本之掌握，影響計畫投資獲利至鉅。離岸運維技術比起陸域尤其重要的關鍵之處在於如何準時進行例行性的現場維護、維修效率的改善精進、纜線修復、備品供應及維修船隻是否足夠、以及降低風險的策略等。這些不確定性導致許多營運上的困難，也因此造成風場開發商、投資者、貸款銀行、以及承包商的困擾，因為無法確認實際的成本與風險。

而其中維運及海事工程主要風險來自受限於海氣象容許作業時間、吊裝施工船隻之動員成本及風電設備

承受之嚴苛環境，因此離岸風電場之完工時程以及設備妥善率與維運成本常遠高於設計規劃階段之預期。因此，工研院整合既有核心技術建構『OCEANAUT』^[1]，主要目的是提供海域施工環境條件與自動預測資訊，於離岸風場規劃階段可提供氣候窗條件、場址設計條件、施工機具選擇與決策規劃；離岸風場施工階段可提供未來短期施工環境預測、施工機具調度與時程規劃；離岸風場運維階段可提供風險管理、維護作業時程安排、運轉可用率管理以及電場發電量預測。

配合離岸示範獎勵風場/風速塔施工時程，提供示範風場施工規劃、風力機/風速塔運輸、安裝期間所有海域施工環境預測及天氣預警資訊，以切入台灣離岸風電市場服務產業。三年來透過與施工單位合作，建構海域作業環境條件限制，以整合加值能力，期望提供更準確在地化資訊，以提升競爭力。目前已應用的領域除了離岸風場開發外，還有波浪發電佈放、海纜工程、風速塔維護、航線預測以及近岸溫排水工程等應用經驗，透過線上查詢、圖表繪製、E-mail 提供給所需業者進行短期預測資訊。當然所有條件都應該隨施工機具以及技術不同而異，為了掌握施工期間隨時可能突發之劇烈天氣，今年整合預警功能規劃以滿足業者需求，故本文就針對此系統應用於離岸風場施工階段之整體規劃與應用現況進行介紹。

II. 系統架構

『OCEANAUT』系統主要是由兩個元件所建構而成(圖 1)^[2]，一是工研院既有核心技術，包含離岸風速塔觀測系統、數值模式與高速運算設備；一是展示平台以及資料庫(SERVER)。提供離岸風場即時線上查詢未來 120 小時波浪、海流及氣象預測資訊服務，包含單點時序列預測以及二維空間分布場。

因應業者需求，預測預警資訊整合^[3]是今年規劃新增功能，與中央氣象局合作將全台灣有助於離岸風場開發進行風波流資訊整合，包含即時觀測資料、主客觀數值預測以及劇烈天氣監測。

(1) 功能

- 可提供未來 120 小時風波流預測
- 可隨時預警突發劇烈天氣變化
- 可加值施工天候條件限制資訊
- 可應用西部海域施工作業場址

(2) 特色

- 具全台灣最完整風波流預測資訊。
- 依客戶需求客製化不同預測產品。

- 跨領域應用海域環境預測與評估。
- 可被動式查詢或主動式傳遞資訊。

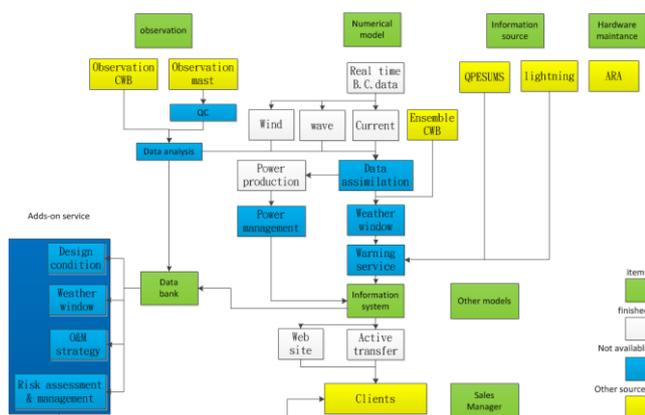


圖 1 『OCEANAUT』整體架構規劃圖

III. 核心技術

(1) 數值模式

主要使用的數值模式包含大氣模式 WRF (the weather research and forecasting modeling system, WRF)^[4]、波浪模式 NWW3 (NOAA wavewatch-III, NWW3)^[5]與海流模式 POM (princeton ocean model, POM)^[6]。

•大氣模式(WRF):WRF 是 NCAR 及國家環境預測中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)等單位所共同研究發展出來的。WRF 是一個完整的三維資料同化系統，主要的功能是在給定的時間區段內，結合所有用以描述大氣狀態之訊息，以產生在分析時間對於真實大氣狀態的最佳預估值。

•波浪模式(NWW3)：NWW3 風浪模式是由美國海洋大氣總署(The National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)研究發展出來的。NWW3 模式是目前最新的數值海象波浪預測系統，其使用顯性法求解弱線性之控制方程式，可高效率地運用於平行計算平台，且適合於跨尺度的範圍應用，從數公里到數千公里級皆可，而多重網格(multi-grid)的計算方法使得模式建置更為簡便。

•海流模式(POM)：POM 是美國普林斯頓大學所發展的三維海洋模式，內含一個紊流閉合模式(turbulence closure model)來處理垂直方向的混合作用。POM 能描述三維的海洋變化物理現象，模式包含熱動力學理論，可輸入或計算熱含量和熱通量，也可輸入邊界水位、邊界流速或大尺度風應力來驅動模式的流場。

(2) 實際觀測

今年陸續將風速塔即時觀測資料納入『OCEANAUT』，包含嘉義外傘頂洲離岸風速塔、力源公司彰化永興風速塔以及宏華宏禹 1 號施工船觀測塔，即時展示過去 5 天每小時 10 m 高風速風向觀測資料並與預測資料做比對展示。此外，已與中央氣象局合作進行風波流資訊整合，由中央氣象局提供 SERVER 讓本系統進行資料前置處理與離岸風場區域化分析，再由本系統工作站透過網際網路接收中央氣象局即時且成品管的風波流觀測資料，以作為上述數值模式之驗證。

(3) 模式驗證

使用平均偏差(BIAS)、均方差(RMS)、相關係數(CR)及分散指數(SI)等指標量化進行每 6 小時預測至 120 小時之誤差分析^[7]。

風場驗證部分，以 2014 年 7 月至 2014 年 10 月期間嘉義外傘頂洲離岸風速塔 120 小時預測值與觀測值進行誤差分析，結果如表 1 所示。**錯誤! 找不到參照來源。**為風速風向之每 6 小時預測至 120 小時之平均偏差、均方差、相關係數及分散指數比較圖，平均偏差大約介於 -0.34 m/s~0.07 m/s、均方差介於 3.2 m/s~3.62 m/s、向量均方差介於 5.14 m/s~5.85 m/s、相關係數介於 0.62~0.63、分散指數則介於 0.55~0.56。由風速平均偏差比較圖顯示嘉義外海地區有低估之現象，從均方差可以得知模式預測誤差隨預測時間越長而越大，相關性也隨之變小、分散指數也很明顯偏大。風向部分，平均而言平均偏差介於 9 度至 14 度之間，其風向均方差為 67 度。

表 1 WRF 風場 120 小時預測驗證指標平均統計表

| 測站名稱 (高度) | 風速 | | | | | 風向 | |
|-----------------|-------|------|-------|------|------|------|-----|
| | BIAS | RMS | RMSVE | CR | SI | BIAS | RMS |
| 嘉義外傘頂 (10 m) | -0.34 | 3.24 | 5.14 | 0.62 | 0.55 | 14 | 67 |
| 嘉義外傘頂 (60 m) | 0.07 | 3.62 | 5.85 | 0.63 | 0.56 | 9 | 67 |

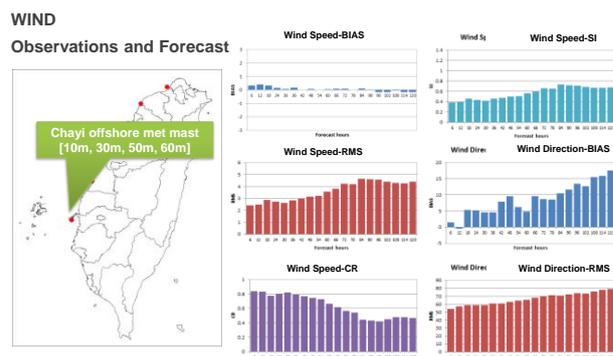


圖 2 預測嘉義外傘頂 60m 風速風向驗證比較圖

波浪驗證部分，蒐集 2014 年 6 月至 2014 年 10 月期間新竹浮標之觀測值與預測值進行分析。**錯誤! 找不到參照來源。**為每 6 小時預測至 120 小時之平均偏差(BIAS)、均方差(RMS)、相關係數(CR)及分散指數(SI)比較圖，在波高方面，BIAS 均小於 0.1m，均方差約介於 0.3~0.5m，且隨著預測時間增加而變大；在相關係數方面，隨著預測時間增長有呈現降低的趨勢，自 0.87 以上逐漸遞減；分散指數之分布亦顯示隨著預測時間增加而變大，其範圍變動約在 0.38~0.62 之間。在平均週期(T_{m02})部分，各參數(BIAS、RMS、CR、SI)呈現與示性波高類似隨著時間變化的趨勢，但其變化的幅度較不規則，且相關性較差。在分析場相關性部分最高僅 0.42。整體而言，波浪模式對於示性波高的預測較佳，而模式預測的精確度隨著預測時間拉長而變差，符合預測之趨勢變化。

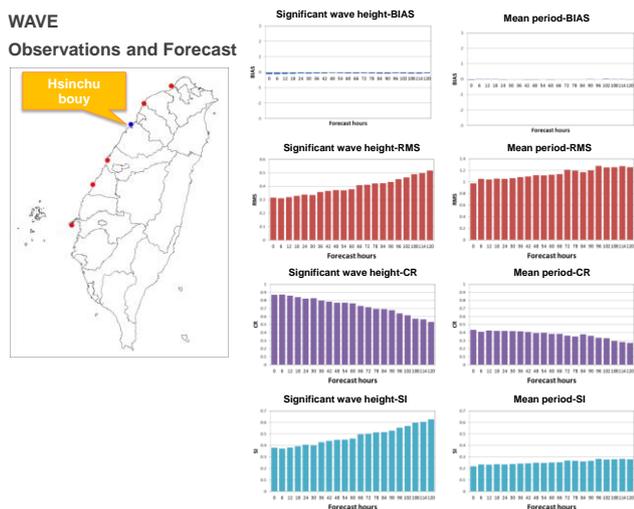


圖 3 預測新竹浮標測站示性波高與週期驗證比較圖

潮位驗證部分，目前離岸的定點長期海流觀測站並不多，因此本研究(簡稱 TWN5T)比對模擬水位與潮位站的觀測資料，作為模式預測的水位驗證。另也收集美國 Oregon State University Tidal Data Inversion TPX08-Atlas，和日本 National Astronomical Observatory NAO99 潮汐模式結果，一起進行比對分析，作為本預測系統驗證的對照。

在時序列分析之結果顯示，將 TPX08 和 NAO99 所提供的分潮潮位調和常數，使用 IOS Tidal Package 分別合成為 2013 年的逐時潮位時序資料，再與 TWN5T 模擬輸出的時序資料，和 36 個潮位站實測資料進行相關係數與潮高誤差的比對分析，其結果如圖 4 所示。在相關係數方面，三個模式在 36 個測站的變化趨勢一致，例如在東北角(基隆、龍洞、福隆)、西南部(永安、高雄、東港、小琉球)、蘭嶼，三個模式與實測資料的時序相關係數均較低，其餘測站的相關係數大多有 0.9 以上。其中，三個模式在基隆的模擬成果都是測站中最不佳(小於 0.76)，而在料羅灣三個模式與實測潮位的相關係數均為最高(大於 0.98)。

潮高誤差均方根的分布，在東北角、西南部與東部相對較小，這與當地測站的潮差變動原本就較小有關。整體而言，TPX08、NAO99 與 TWN5T 三個模式與實測潮位的相關係數以 TWN5T 最高為 0.918，但其餘兩者的平均值與 TWN5T 差異不大。潮高誤差的均方根亦以 TWN5T 較低為 0.226m，其餘兩者則大於 0.230m。

TPX08、NAO99、TWN5T 與 36 個潮位站資料的 2013 年逐時資料，經 IOS Tidal Package 計算出 2013 年的高低潮潮時與潮高，再將高低潮高計算出每次的潮差，進行比對高低潮潮時與潮差的比對，其結果如圖 12 所示。在潮時方面，三個模式在 36 個測站中各有優劣，但在基隆三個模式的潮時成效均不佳，誤差均方根都超過 50 分鐘。潮時誤差均方根較小的測站，於 TPX08、NAO99 和 TWN5T 分別為綠島(9.7 分鐘)、蘇澳(6.5 分鐘)和竹圍(8.4 分鐘)，顯示大範圍模式潮時較正確的地點是在靠大洋水深較深的地方。潮時誤差均方根小於 10 分鐘的測站數，於 TPX08、NAO99 與 TWN5T 分別有 1 站、11 站、6 站。顯示出 NAO99 在潮時上的表現較佳。

在潮差方面，TPX08、NAO99 和 TWN5T 潮差誤

差均方根較大的測站分別為東石(0.319m)、澎湖(0.246m)和箔子寮(0.247m)，較小的測站分別為大武(0.068m)、大武(0.064m)、後壁湖(0.080m)，均方根小於 0.15m 分別有 18 站、21 站和 23 站。

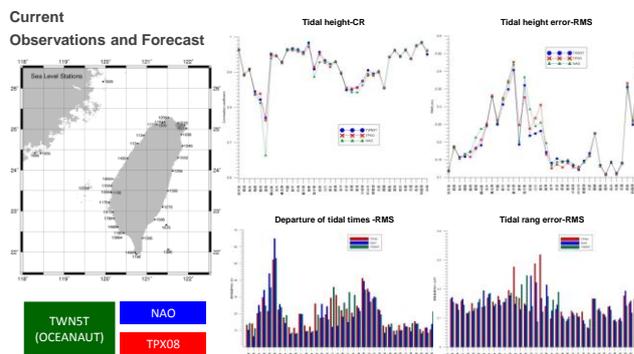


圖 4 預測氣象局潮位站潮位相關係數、潮高誤差均方根、潮時與潮差之誤差均方根比較圖

(4) 預測預警資訊整合

在預測與預警資訊整合的部分以氣象局主客觀數值預測與劇烈天氣監測為主，其中主客觀數值預測未來是作為機率預測的主要產品，包含決定性預測與系集預測、84 小時數值預測；而劇烈天氣監測則是作為發生突發天氣狀況預警的主要工具，提供特定離岸風場 Watch (附近看到)與 Warning (並且靠近)突發天氣的功能，以雷達 MOSAC data 為主要判別依據。未來產品設計與開發，將以預測預警資訊加值為安全作業條件風險指標與主動式即時預警。

IV. 展示平台以及資料庫

因應模擬預測時數進展的成果與使用者的需求，將每日透過此預測技術衍生的產品整合於『OCEANAUT』網站，繪製成圖及表格以方便廠商利用網路查詢(參見圖 5)。未來廠商若有其他場址需求，只要額外擴充所需網格點位，即可立即呈現廠商所需的預測資料。

(1) 展示平台

網站每天提供四次更新預測，目前可即時線上查詢三個離岸示範風場以及兩個區塊風場 120 小時短期預測資訊，包含單點時序列預測以及二維空間分布場，項目如下：

- 風況：10m 高風速(m/s)、輪穀高度風速(m/s)、風向(Degree)
- 波浪：示性波高(m)、波向(Degree)以及平均週期(s)
- 海流：海面流速(m/s)、流向(Degree)、水位(m)以及流場垂直變化

(2) 施工限制條件

因應目前國內離岸風場開發時程，『OCEANAUT』最主要的自動化預測功能是風速塔建置期間可提供離岸風場風波流環境預測，有助於業者進行海事工程調度及安全作業天氣限制評估，例如颱風時期的避險、何時開始啟動、施工規劃及調度等。當然天氣限制的評估應根據使用船隻的具體位置之實際情況和氣候條件，作為現有天候停機標準的限制，而安裝船的大小和類型、波高、潮汐和潮流都是影響安全作業的決定因素。

因應業界合作需求，今年加入以下拉式選單提供預測資訊，包含施工種類以所需時間與風波流條件進行作業限制期間之預測。天候限制條件因不同作業階段的施工項目而異，以風力機安裝為例，大致可以分成下面幾個作業階段：(1)海域運輸的往返，包含交貨、存放以及各元件預組裝運輸；(2)港埠預組裝，包含各場址裝置類別的卸載、處理和預組裝風力發電機組件；(3)風力發電機組安裝，包含施工船裝載、塔架、機艙、葉片等元件吊掛安裝；(4)電氣工程，包含完成電氣以及併聯線路工程；(5)試運轉，從進行運轉發電到任何故障或缺陷的問題均獲得改善，直到風力機組已準備好進行測試；(6)計畫完成，從進行所有的測試到最後確定竣工查驗之人員進出。考量 10 m 高平均風速條件的施工項目有海域運輸、港埠預裝、施工船安裝以及人員運輸；需要輪艙高度平均風速條件的施工項目，除了海域運輸以及人員運輸外，對於其他階段均很重要，尤其是風力發電機組安裝不同元件時考量的風速條件不同。波浪與流速主要是在其他基礎施工承包商以及海底電纜所要考量。

(3) 資料庫規劃

從工作站傳輸至 OCEANAUT 資料採用同樣檔名，在 OCEANAUT 並未有留存機制，為了同步觀測與預測即時展示功能以及未來驗證指標自動化作業，依據檔案、檔案群組、資料檔的大小以及檔案的成長與縮減進行資料庫規劃。

以 SQL Server 建立時，SQL Server 會以 model 資料庫為範本，將其內容複製到新資料庫，因此在所有新建的資料庫中，都會有和 model 資料庫內容一樣的系统資料表和檢視表等資料庫物件。

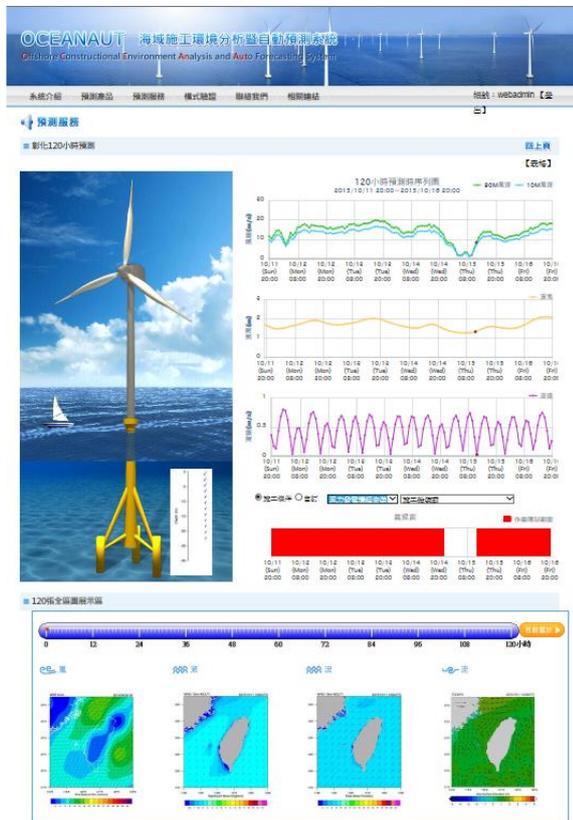


圖 5 『OCEANAUT』網站畫面示意圖

V. 應用案例 (離岸風速塔建置)

今年福海離岸風場風速塔的興建期間，適逢台灣夏季西南氣流旺盛時期，好幾次面臨風浪條件超過施工限制條件，雖然沒有實測資料可供驗證，但根據現場人員使用『OCEANAUT』情況以及現地觀察，突顯施工決策風險的重要性，大致說明如后：

(1) 7/19 運補失敗

當日原預計 13:00 由台中梧棲出海，唯因海況不佳，業者遲未決定，至 15:00 決定出海，因頂浪約 18:00 抵達，當時風速已約 10m/s，且持續增強，在快抵達中途遇台船 5 號已欲返台中港避風，在抵達施工船時，首先二次嘗試與台船 11 號及 12 號進行接駁，因海況不佳均無法如願，宣告任務失敗，折返航抵港約 21:00。

此西南季風約午後即轉強，但浪高都還維持在 1m 以下(接駁人員觀察)，顯然在台船 5 號離開後，連小船的连接都有問題更何況上平台船。顯見風的轉強讓這次的任務失敗，也說明掌握時機對於沒有適當運補船具的重要性。

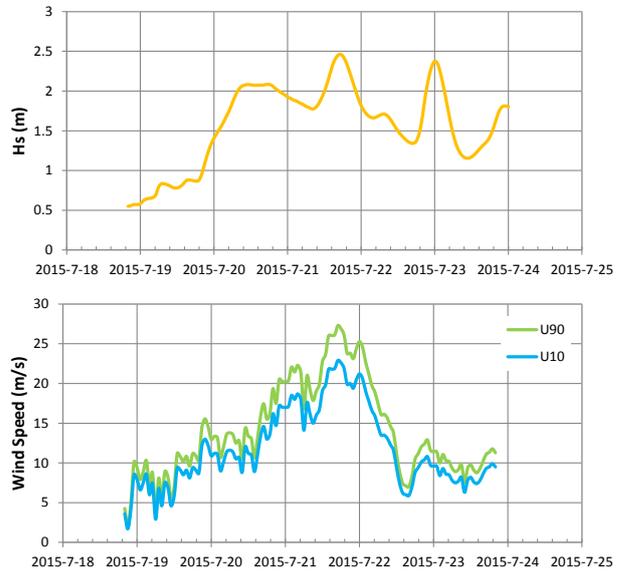


圖 6 7/19 日預測之波高(上)及風速(下，U₁₀、U₉₀)

(2) 7/23 風速塔架吊掛

當日 00:00 開始決定吊掛風速塔架，風速雖呈現向下趨勢，仍只有短暫 6 小時小於 10m/s(此與現場人員觀察趨勢應該十分接近)，但其決議開始施工，當然最後亦完成施工(就結果論而言，決策正確)。唯在施工搶進之後，24 日其實風況較好。顯然當時決策是開發商(進度考量)與施工者(安全考量)二者角力的結果(包含太多資料，無法消化)，但若有氣候窗專業建議，應該可以提升決策品質。

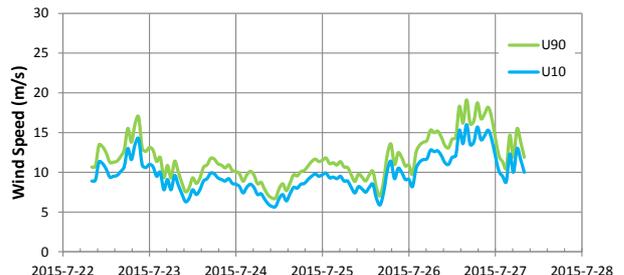


圖 2 7/22 日預測之風速(U₁₀、U₉₀)

(3)8/5 風速儀器安裝(蘇迪勒颱風)

原定 8/5 出海進行風速儀器安裝作業，根據預測資訊，當日海況甚佳，然而漁民根據漁業氣象預測顯示 8/5 為小至中浪，擔心當天出海會無法返回，故當日工作取消。然而漁業預測主要依據蒲福風級之風速訂定，其目的均以防災為主要考量，不至於低估，因此作為海上施工的參考依據常常會過於保守，導致施工期的延長，此亦凸顯出國內海上在使用漁船當交通船時的另一項風險。

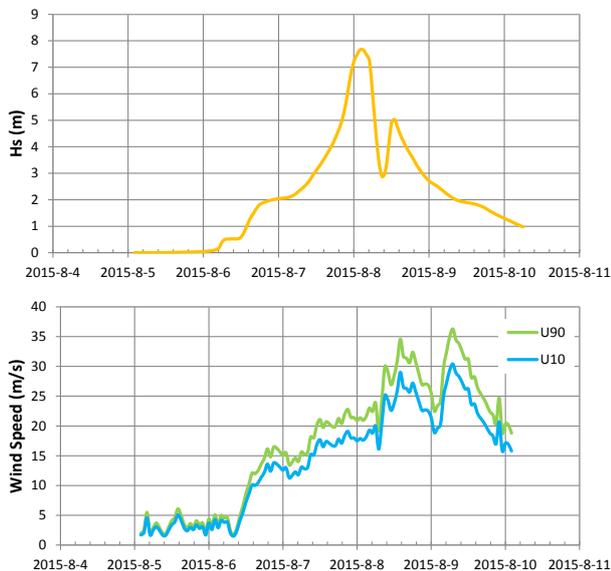


圖 7 8/5 日預測之波高(上)及風速(下, U₁₀、U₉₀)

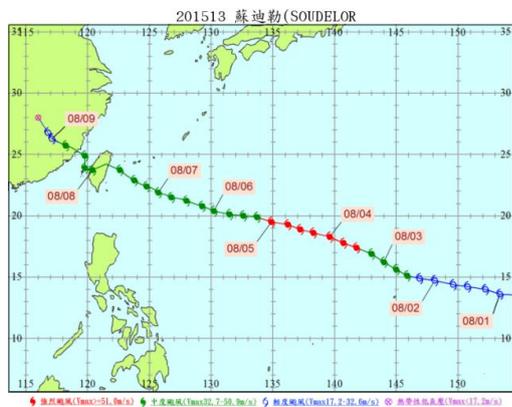


圖 8 蘇迪勒颱風路徑圖

VI. 未來展望

目前正是台灣離岸風電產業發展的關鍵點，工研院針對千架海陸風力機計畫成立推動辦公室，並在離岸示範獎勵辦法的政策下推動離岸示範風場建置，目標是完成離岸示範獎勵辦法 4 架示範機組，並展開包含 1 個國營事業之 3 個示範風場建置，提高風力機國產化比例與自主系統技術。並以區塊開發方式，推動大規模風場開發，使得風電再生能源能夠有大幅的成長，成為具規模經濟之產業，帶動國內經濟成長；同時也根據離岸風電業者之需求開發離岸關鍵技術，提升風電產業的競爭力。

國內目前有國科會、台電綜合研究所、核能研究所、工研院、成大近海水文中心以及其他學術單位等陸續投入進行風能、波浪、海流、發電量各種短期預

測相關研究，也唯有持續研究才能累積經驗，並與施工單位合作，提供更準確的在地服務，更期許未來可以應用於離岸風力機安裝實際案例上。在此非常感謝中央氣象局與工研院合作，得以建構完整之海域施工環境短期預測技術，期望未來可在風場施工、風力機運輸、吊裝期間提供所有海氣象資訊，讓國內團隊可以切入台灣離岸風電市場服務產業，不再仰賴國外技術。

大氣與海洋短期預測技術雖是成熟技術，但仍有其預測誤差，既使至今世界各國仍不斷投入資源進行系統改善，提升預測準確性，在應用面則可透過專業技術的整合，以加值到各種不同產業。未來除了持續改善模式預測能力外，主要目標會集中在施工天候條件與風險預測，提供安全作業條件風險指標預測與決策判斷預測資訊^[8]。

VI. 誌謝

感謝經濟部能源局(計畫編號 104-D0106)支持、中央氣象局合作協議以及離岸風電業者(力鋼公司、台船公司以及宏華營造公司)業界合作，使本系統得以順利開發與應用，特此致上感謝之意。

參考文獻

- [1] 『Offshore Constructional Environment Analysis and Auto Forecasting System』(OCEANAUT) Website <http://wind.itri.org.tw/oceanaut/index.aspx>.
- [2] 陳美蘭、張恆文與林勝豐，“海域施工環境分析暨自動預測系統應用”，機械工業雜誌，379 期，第 154-165 頁，中華民國 103 年 10 月。
- [3] 陳美蘭、張恆文與林勝豐，“離岸施工環境預測與預警系統整合”，機械工業雜誌，391 期，第 84-94 頁，中華民國 104 年 10 月。
- [4] W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, J. G. Powers, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR/TN-475+STR, NCAR Technical Note, June 2008.
- [5] H. L. Tolman, User manual and system documentation of WAVEWATCH-III Version 3.14, NOAA/NWS/AVN/ MMAB TN. 276, 194.,2009
- [6] A. F. Blumberg and G. L. Mellor, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Vol. 4, edited by N. Heaps, 208, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1987.
- [7] 張恆文、陳美蘭、林勝豐，“海氣象預測系統驗證分析報告”，工業技術研究院(技資編號：55-3-A3-0850-01)，中華民國 103 年 12 月。
- [8] 張恆文、陳美蘭、林勝豐、胡哲魁、顏厥正，“海域施工環境預測技術研發”，經濟部能源局(計畫編號 103-D0107)，中華民國 103 年 12 月。