

臺中港風力及波浪之季節變化與預報特性分析

陳昭銘 國立高雄科技大學海事資訊科技系教授
談珮華 國立嘉義大學應用歷史學系教授
蘇青和 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
劉明鑫 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
陳慧珊 國立高雄科技大學海事資訊科技系專任研究助理

摘要

本文分析 2019 年臺中港區觀測風力及波浪之季節變化特性，再運用數值模式分析臺中港區與鄰近離岸風電區風速、波高之預報特性。研究成果顯示，臺中港區 5 個觀測站之風速，自鄰近外海之堤頭 T2 測站依次往鄰港區測站、陸地測站遞減，但各測站全年時間序列關聯性相當高，顯示臺中港區受到風場之均勻影響。風速-波高之關聯性，逐時資料之相關係數以 9 月-2 月最高(0.82-0.90)，3 月-5 月其次(0.68-0.76)，6 月-8 月最低(0.21-0.58)，反映強勁東北季風讓風、波變化特性趨向一致。預報模式對臺中港區風速與波高之預報能力，以 9 月-2 月最佳，3 月-5 月居中，6 月-8 月最低，也反應越強風速時期之預報能力越好。模式預報顯示，離岸風電區之風速強度與臺中港區相近，但預報波高明顯高於臺中港區。臺中港區預報風場與觀測風場之強度相當，但波高預報呈現偏弱誤差。

一、前言

國際間因應全球暖化之調適措施，以節能減碳為主軸，減少燃燒化石燃料，改推綠色能源來替代。臺灣綠能推動先以太陽能發電，再銜接陸上風力發電，近期延伸到離岸風力發電。國際間風力發電所產生的供電量，10 年前就已超過全世界用電量的 1%，且成長速度逐

年增加。影響風力發電的因素包括各級風速的分布，並據以參考設置適當風力發電的機型(邱等，2016)。小型風力發電機的風力切入速度約為 3 m/s 做為基準，臺中港因風力效率較佳(高於 3 m/s 風速達 63.4%)，所以國內將 5 個主要離岸風電場址規劃於臺灣中部海域，並進一步分析附近海域之氣海象特性，做為選址建設、發電供電及後續維修的環境參考指標(傅等，2019; 羅等，2019)。因應離岸風電場域之開發，將有眾多工作船舶進出臺中港與鄰近海域，有鑑於該海域之強風、強浪，在航行安全考量之下，亟需對該海域之海氣象特性進行了解，在無觀測資料之海域，更需借助數值模式預報，提供海氣象資訊，做為船舶施工規劃之參考資訊，期以增進航行安全，提升港灣安全管理。

國際間已普遍運用大氣預報之 WRF(Weather Research and Forecasting) 模式(Skamarock et al. 2001; Skamarock et al. 2005; Skamarock et al. 2008)與波高預報之 NWW3 (NOAA WaveWatch-III) 模式(Tolman et al. 2002)來提供離岸風電場域之海氣象環境資訊，包括風速、風向、波高、波向及週期等，均為掌握未來海面複雜環境動態變化的重要因素(Emmanouil et al., 2020; Seyr et al., 2019)。以歐洲為例，Hasager et al. (2020) 將合成孔徑雷達(SAR)及衛星反演(ASCAT)海表面風場，整合 WRF 模擬結果以評估歐洲地區的 10 個風場區域，範圍從北歐斯堪地那維亞向南延伸至中南歐，及向東涵蓋地中海至土耳其等國的

近岸海域，完成「新歐洲風場堪輿圖」(New European Wind Atlas, 簡稱 NEWA)。Hallgren et al. (2020)採用 LiDAR 剖風儀增加風力觀測精度，將其與 4 種數值模式輸出相比較，發現模式均能模擬波羅的海區域風場特性。北歐地區利用逐時 WRF 重分析資料，配合機率模型，模擬丹麥西部海域風力變化(Koivisto et al., 2020)。亞洲地區利用 LiDAR 剖風儀觀測日本千葉縣南邊海域實際風力，發現該地區海風較陸風強，且 WRF 能模擬出相同的風力變化特性(Goit et al. 2020)。在波浪方面，Sheng et al. (2019)運用 ECMWF 風場及 Holland 颱風模型，結合 NWW3 模式模擬颱風侵襲舟山群島所引起的 5 公尺波高，相較浮球觀測波高，其均方根誤差(RMSE)約為 0.79-1.12 公尺，呈現不錯模擬效果。Merrifield et al. (2019)同樣運用 ECMWF 風場驅動 NWW3 模式，模擬颱風經過帛琉產生湧浪及風浪，兩者最大的示性波高分布均與颱風路徑相符，且 4 公尺以上波高涵蓋範圍(150-200 公里)亦與颱風的暴風半徑一致。NWW3 也被用於模擬及預報颱風(颶風)造成太平洋及大西洋 4 公尺以上巨浪之分布特性(Sampson et al., 2016)。

為增進對臺中港區與鄰近離岸風電區海氣象特性的了解，本文將運用觀測料分析臺中港區變化特性，另外，也將運用 WRF 與 NWW3 模式進行數值預報，診斷數值模式之預報能力，評估模式預報結果做為提供離岸風電區海氣象資訊之適宜性，期以協助無觀測資料之離岸風電區的航行安全指引。

二、臺中港觀測風浪與預報模式

臺中港區建置有完整海氣象觀測系統(圖 1)，觀測位置涵蓋港區四周的堤頭及陸地區域，提供逐時資料，風場觀測站有下列 5 站：

- T2 站：北防波堤綠燈塔觀測站(24.2997°N, 120.4864°E、高度 16.62m)。
- T8 站：北防沙堤觀測站(24.3122°N, 120.5269°E、高度 5.97m)。
- T1 站：防風林觀測站(24.3052°N, 120.5312°E、高度 18.54m)。
- T5 站：31 號碼頭觀測站(24.2744°N, 120.5163°E、高度 9.47m)。
- T6 站：港研中心觀測站(24.2703°N, 120.5289°E、高度 26.17m)。



資料來源：交通部運輸研究所港灣技術研究中心

圖 1 臺中港區海氣象觀測站位置圖

波高觀測為 AWAC 站:北防波堤綠燈塔外海約 700-800 公尺(24.30333°N, 120.48193°E),使用聲波式波向波高與剖面海流儀(Acoustic Doppler Wave and Current Profile),以聲波與波壓監測海面波動(許等 2018),提供逐時示性波高。

本文使用 WRF-3.7.1 版本模式做為臺中港灣區之風場預報系統，使用四層巢狀方式，將全球大尺度預報資訊，以動力降尺度方式，逐次提高網格點解析度，達到臺中港區所需求之高解析度預報資訊。WRF 模式之邊界條件採用美國 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) Global Forecast System (GFS)模式之預報場，未使用資料同化，以 GFS 模式 0.5°x 0.5°(約 50 公里)網格之分析場，經由

WRF 的前置處理系統，將資料內插至 WRF 模式所設定之第一層模式網格點上，做為 WRF 初始場來執行預報。

WRF 降尺度預報採用 4 層巢狀系統，以 3 倍放大效率，依序使用 32 公里，10.8 公里，3.6 公里，1.2 公里等 4 種解析度，將全球預報資訊依序降尺度到：亞洲-太平洋地區(94.9682°-165.0318°E, 0.067°-48.7907°N)、東亞臨海地區(115.8041°-126.3365°E, 18.1860°-30.2649°N)、臺灣鄰近海域(119.0860°-123.6271°E, 20.5260°-26.4717°N)、臺中港鄰近海域(119.7983°-120.8541°E, 23.7655°-24.5547°N)，模式範圍如圖 2 所示。

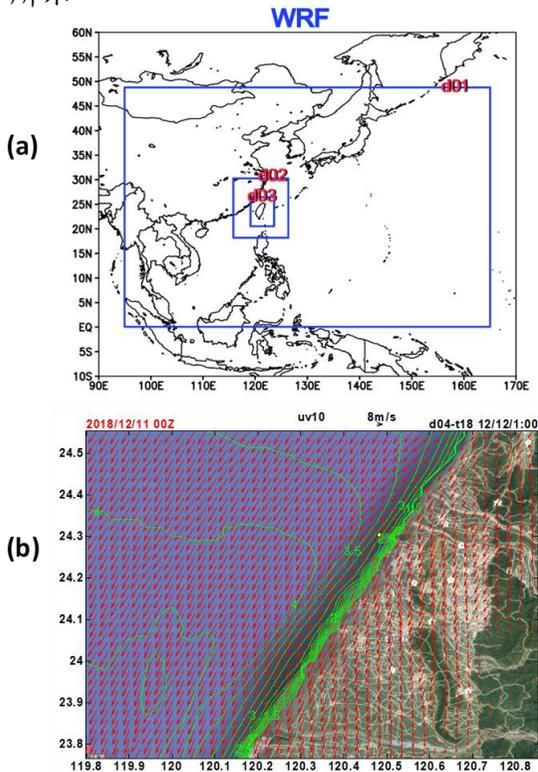


圖 2(a) WRF 模式之第一層到第三層巢狀降尺度空間範圍，(b)臺中港區之 WRF-1.2km 模式風場(箭號)與 NWW3-2km 模式波高(等值線)之預報結果

降尺度過程中，上一層預報結果經由內插到下一層模式之範圍與解析度來做為下一層之邊界條件，每 12 小時提供一次。本研究運用 3.6 公里網格點之第三層模式所預報之 10 米風場，內插成臺中港鄰近海域之 2 公里網格點，以初始場與每 12 小時預報場做為邊界條件，驅動臺中港區 NWW3 模式(119°-123°E, 21°-26°N)執行波高預報。NWW3 為風浪模式，僅由大氣模式表面風場來驅動即可，且以上一個預報結果做為下一個預報初始場之暖起動方式執行。臺中港區之風波預報係由 WRF 第四層 1.2 公里模式與 NWW3 之 2 公里模式的預報結果進行分析，其範圍如圖 2(b)所示。

三、臺中港觀測風浪之季節變化

圖 3 所示為 T1、T2、T5、T6、T8 等 5 站於 2019 年每天 08 時在地時間之風速時間序列，以全年風速平均值而言，T2 為 8.33m/s，T8 為 5.96m/s，T5 為 4.82m/s，T1 為 3.98m/s，T6 為 3.35m/s。越靠近港外，遮蔽越少之測站，風速越大(如 T2 站)，明顯大於陸地上、建物環繞之測站風速(如 T6 站)。取兩兩測站之風速時間序列進行相關係數分析，5 個測站彼此相關係數約在 0.81-0.95 間，呈現高度關聯性，反應臺中港受到均勻風場之影響。

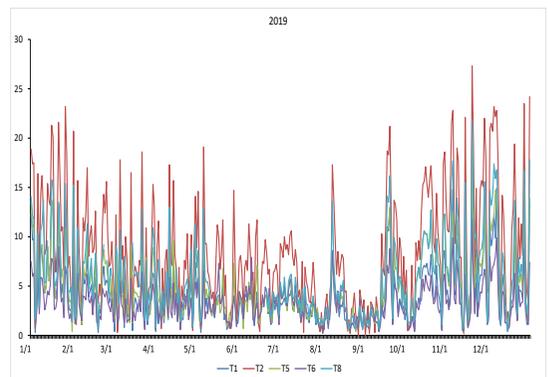


圖 3 2019 年各風速測站歷線圖

臺中港區風場之季節變化特性，以 T2 測站之逐時資料為代表，其 1-12 月逐月風速強度之分布百分比，依蒲伏量表分級，分析結果顯示於表 1，T2 測站強風季節主要分布在 10-1 月，其中 8-9 級強風之百分比，以 11 月之 39% 最高，12 月之 31% 與 1 月之 30% 次之。西南季風時期之 5-8 月，風級主要在 5 級風及以下。T2 測站風向之季節變化特性，以 16 方位分類，每方位 22.5 度，正北方向為 360 度或 0 度，北風方位之角度範圍為 348.75 度到 11.25 度，其餘方位依此類推。T2 測站之逐月風向分布百分比，如表 2 所示，1-3 月以東北風、北北東風為主。4-5 月在東北風、北北東風之外，西南風、南南西風開始明顯。6-8 月則轉以南風、南南西風、西南風為主。9-12 月又轉成東北風、北北東風為主。上述季節變化呈現 9 月到隔年 3 月為東北季風季節，6-8 月為西南季風季節，4-5 月則為中間過渡時期。

表 1 2019 年 T2 站風速百分比分布表

T2風速(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
3級風以下	11	22	34	34	41	32	33	51	38	17	16	20
4級風	11	13	16	23	20	31	21	22	11	14	8	9
5級風	15	17	19	21	15	28	31	13	10	15	11	13
6級風	14	26	16	12	12	8	12	5	14	16	9	16
7級風	19	18	10	8	8	1	2	7	15	21	17	10
8級風	24	3	6	1	3	0	1	3	8	15	21	12
9級風以上	6	1	1	0	0	0	0	0	4	2	18	19
總筆數	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744

表 2 2019 年 T2 站風向百分比分布表

T2風向(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
N	8	9	9	9	4	2	4	6	5	3	2	6
NNE	78	49	33	28	26	6	7	13	46	57	75	67
NE	8	29	28	14	25	8	3	8	21	25	16	17
ENE	1	3	4	3	2	2	1	3	2	2	1	1
E	0	0	3	1	1	1	1	1	1	0	1	1
ESE	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1
SE	0	1	1	1	0	1	1	2	1	0	1	1
SSE	1	1	1	1	1	6	3	8	3	1	1	0
S	0	1	2	8	7	18	17	16	4	2	0	1
SSW	0	1	6	16	10	31	37	22	5	3	1	1
SW	0	0	5	12	10	19	15	6	2	2	0	1
WSW	0	1	1	2	2	3	3	3	1	1	1	1
W	0	0	0	1	1	1	2	2	1	0	0	0
WNW	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
NW	1	1	1	1	4	1	2	4	3	1	1	1
NNW	2	2	4	2	4	1	2	4	4	3	1	2
總筆數	744	672	744	720	744	720	744	744	720	743	720	744

2019 年臺中港 AWAC 測站觀測逐時波高之 1-12 月分布百分比，如表 3，依蒲伏量表分級，東北季風(9-4 月)普遍出現 5 級及以上波高，其中以 11 月-1 月為最強，約佔 43-60%，其中 6 級及以上之波高百分比為 11-20%，對應 T2 風速之最大強度時段。其餘 9 月-10 月與 2 月-4 月較大波高以 5 級為主。西南季風季節(5 月-8 月)之波高明顯減弱，5 月與 8 月為 5 級以下，6 月與 7 月為 4 級以下。

表 3 2019 年逐時波高百分比分布表

AWAC波高(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
3級以下	7	18	26	55	51	85	86	66	28	18	9	14
4級	44	44	53	30	36	15	12	24	49	46	31	44
5級	37	36	21	15	11	0	2	9	19	34	40	27
6級以上	11	2	1	0	2	0	0	1	5	2	20	16
總筆數	736	672	737	715	733	612	617	719	717	729	698	715

為分析風速-波高之關聯性，本文以月為單位，以逐時資料計算 T2 風速與 AWAC 波高之相關係數，表 4 顯示各月逐時資料計算所得之相關係數，分為 3 類，包括全部資料、5 級風以下資料、5 級風(含)以上資料。以全部資料之相關係數而言，大致以 9 月-2 月東北季風發展、強盛時期之相關係數最高，約在 0.82-0.90 之間。在東北季風過渡到西南季風之 3 月-5 月，相關係數略降為 0.68-0.76，但仍在 0.6 以上，具有相當程度之對應關係。而在 6 月-8 月西南季風時期，關聯性最低，相關係數僅有 0.21-0.58，降到 0.6 以下。從 5 級風以下與 5 級風以上之相關係數來看，5 級風以上為主要關聯性來源，相關係數為 0.54-0.91 之間，5 級風以下相關係數為 -0.20 到 0.47 之間，均在 0.5 以下，顯示較強風浪時之風-波關聯性較佳。

表 4 2019 年逐月風速-波高之相關係數

風-波相關係數	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
全部資料	0.84	0.83	0.68	0.68	0.76	0.21	0.58	0.55	0.88	0.82	0.90	0.89
5級風以下	0.25	0.47	0.02	0.12	0.24	-0.20	0.22	0.06	0.34	0.39	0.28	0.29
5級風(含)以上	0.84	0.71	0.78	0.70	0.74	0.62	0.54	0.67	0.83	0.78	0.88	0.91

四、臺中港風波預報特性分析

T2 與 AWAC 為逐時觀測資料，模式預報則是以每天 00Z(在地時間上午 8 點)、12Z(在地時間下午 8 點)為初始時間分別進行 48 小時預報，為與全年逐時觀測資料比對，故每一個預報個案取其第 1-12 小時預報結果，串成全年之逐時預報資料，再與對應時間之觀測資料進行迴歸分析。2019 年逐月之 T2 風速與 AWAC 波高之觀測-預報分析結果，如表 5 所示，包含對應 T2 風速與 AWAC 波高之逐月預報誤差之均方根誤差 (RMSE)、相對均分根誤差 (relative RMSE, RRMSE) 與預報值-觀測值之相關係數。其中， $RRMSE=RMSE/\text{觀測月平均值}$ ，代表誤差對應觀測場強度之比例。

表 5 2019 年觀測風場與波高模式預報誤差之相關係數

2019	T2(WRF)-T2(觀測)			AWAC(NWW3)-AWAC(觀測)		
	相關係數	RMSE	RRMSE	相關係數	RMSE	RRMSE
1月	0.93	2.37	0.18	0.91	0.59	0.29
2月	0.87	2.37	0.24	0.91	0.57	0.33
3月	0.84	2.8	0.33	0.81	0.72	0.49
4月	0.79	2.62	0.35	0.83	0.56	0.51
5月	0.85	2.54	0.36	0.86	0.53	0.46
6月	0.69	2.27	0.34	0.25	0.40	0.56
7月	0.70	2.82	0.40	0.50	0.41	0.54
8月	0.73	3.46	0.57	0.68	0.53	0.53
9月	0.90	2.77	0.30	0.94	0.58	0.38
10月	0.92	2.26	0.20	0.90	0.44	0.27
11月	0.95	2.24	0.16	0.95	0.51	0.23
12月	0.94	2.63	0.21	0.95	0.49	0.25

風場方面，相關係數顯示預報能力依 3 個時期變化，最佳時期為東北季風強盛之 9 月-2 月，相關係數為 0.87-0.95，其次為東北季風轉弱到西南季風過渡時期之 3 月-5 月，相關係數為 0.79-0.85，預報能力最低時期發生在西南季風之 6 月-8 月，相關係數為 0.69-0.73。9 月-2 月之 RMSE 為 2.24-2.77 m/s，RRMSE 為 0.16-0.30，但 6 月-8 月之 RMSE 增為 2.27-3.46 m/s，RRMSE 也增為 0.34-0.57，RRMSE 比 9 月-2 月為高，反映較大之誤差比例。3 月-5 月之 RMSE 與 RRMSE 值大致位於 9 月-2 月與 6 月-8 月之間。波高方面，相關係數於 9 月-2 月最高(0.90-0.95)，3 月-5 月其次 (0.81-0.86)，6 月-8 月最低 (0.25-0.68)。RMSE 於 9 月-2 月為 0.44-0.59m，3 月-5 月為 0.53-0.72m，6 月-8 月為 0.40-0.53m，RRMSE 於 9 月-2 月最低，為 0.23-0.38，3 月-5 月其次，為 0.46-0.51，6 月-8 月最高，為 0.53-0.56，顯示 RRMSE 所反映之誤差比例能合理反映相關係數之變化特性。上述結果反應持續性之強風，如東北季風，其風、波變化情形在穩定強風影響之下，較為單純，因此，也較容易為模式所掌握，誤差較小。但在夏季，雖然風場較為微弱，但西南氣流、颱風、午後雷陣雨等現象常會引發瞬間強風與大浪，模式對這些瞬間變化現象之預報能力常會有所不及，故預報能力較差，誤差值增大。運用模式預報資訊時，宜注意季節性差異，東北季風季節之預報能力與可信度當比西南季風時期為佳。

五、臺中港區與離岸風電區之風浪比較

本節將比較 T2、AWAC(基準點)之預報風、波與外海離岸風電區(目標點)預報風、波，逐月探討預報風、波於離岸風電區與臺中港區之差異與關聯性，

提供離岸風電區域預報風、波變化之概念模式。離岸風電區分析範圍之 4 個邊界點為 (120.091°E, 24.255°N)、(120.284°E, 24.245°N)、(119.822°E, 23.908°N)、(120.030°E, 23.872°N)，離岸風電區之預報值取分析範圍內所有點之區域平均值代表。

臺中港區與離岸風電區之預報風速與預報波高之逐時資料相關係數分析顯示，預報風速相關係數於 6 月-8 月略低，為 0.79-0.82，其餘月分都相當高，為 0.90-0.97。預報波高之相關係數普遍比預報風速為高，6 月-8 月為 0.84-0.87，其餘月份為 0.95-0.98。整體而言，臺中港區與離岸風電區之預報風速與預報波高均呈現高度正相關性，顯示容易受到相同天氣系統之均勻影響，但夏季常有區域性激烈天氣，因此，容易產生臺中港區與鄰近外海之區域性差異，而使相關性略微降低。

在分析模式預報風場與波高後，可將全年逐月之預報風級、波級分布與觀測風級、波級分布進行比對，藉以了解預報場在全年季節變化特性上，其分布特性與觀測場之異同。表 6 所示為 T2 觀測風速、T2 預報風速、離岸風電區預報風速之逐月風級分布百分比，7 級風(含)以上之強風百分比，T2 觀測風場於 10 月、11 月、12 月、1 月分別為 38%、56%、41%、49%，其餘月份為 27% 以下。T2 預報風場於 10 月、11 月、12 月、1 月分別為 33%、52%、38%、42%，其餘月份為 25% 以下。離岸風電區預報風場於 10 月、11 月、12 月、1 月分別為 30%、56%、41%、42%，其餘月份為 20% 以下。顯示 T2 預報風場與 T2 觀測風場之強風分布百分比大致相近，且離岸風電區預報風場之強風分布特性與 T2 預報風場相近，顯示臺中港區與外海離岸風電區之風場，大致呈現強度相近之均勻風場分布特性。

表 6 觀測風速、預報風速及離岸風電區預報風速之風級分佈百分比

T2-觀測(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
7級風	19	18	10	8	8	1	2	7	15	21	17	10
8級風	24	3	6	1	3	0	1	3	8	15	21	12
9級風以上	6	1	1	0	0	0	0	0	4	2	18	19
T2-WRF(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
7級風	21	22	9	8	7	0	1	6	12	24	19	10
8級風	19	3	4	0	0	0	0	1	6	8	23	14
9級風以上	1	0	0	0	0	0	0	0	3	1	10	14
離岸風電-WRF(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
7級風	24	19	11	8	7	0	3	7	10	25	24	14
8級風	18	1	3	0	1	0	0	2	8	5	26	20
9級風以上	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	6	7

表 7 所示為 AWAC 觀測波高、NWW3 對 AWAC 站預報波高、離岸風電區預報波高之逐月波級分布百分比，將 5 級、6 級以上之波高累加，AWAC 觀測波高於 10 月、11 月、12 月、1 月、2 月分別為 36%、60%、43%、48%、38%，其餘月份為 24% 以下。AWAC 之預報波高於 10 月、11 月、12 月、1 月、2 月分別為 19%、48%、36%、30%、16%，其餘月份為 13% 以下。離岸風電區預報波高於 10 月、11 月、12 月、1 月、2 月分別為 49%、71%、51%、56%、41%，其餘月份為 38% 以下。上述結果顯示 AWAC 預報波高比 AWAC 觀測波高為偏弱誤差。離岸風電區預報波高則明顯強過臺中港區 AWAC 觀測波高與預報波高，顯示離岸風電區波高明顯比近岸臺中港區波高來得強烈。

表 7 觀測波高、預報波高、離岸風電區預報波高之波級分佈百分比

AWAC-觀測(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
5級	37	36	21	15	11	0	2	9	19	34	40	27
6級以上	11	2	1	0	2	0	0	1	5	2	20	16
AWAC-NWW3(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
5級	29	16	9	5	3	0	0	5	11	18	40	25
6級以上	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	8	11
離岸風電-NWW3(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
5級風	28	33	11	10	16	0	6	9	24	34	25	18
6級以上	28	8	9	4	3	0	0	3	12	15	46	33

六、結論及建議

為進一步檢驗模式之預報結果，取 2019 年 9 月臺中港浮標資料進行比對，該浮標位於臺中港區與離岸風電區之間 (120.4094°E, 24.2108°N)。比對資料包括臺中港浮標之觀測資料(藍線)、對應臺中港浮標之預報資料(紫線)、離岸風電區之預報資料(綠線)，分別對風速與波高預報結果比對，結果如圖 4 所示。就風場而言，三條時間序列呈現相似之變化特性，但風速則是預報場比觀測場大，特別是較大風速發生之 9 月 14-30 日，顯示外海之預報風場應是比觀測風場為強。在波高方面，三條時間序列之變化特性相近，但強度則是臺中港浮標觀測波高與離岸風電區預報波高相近，且兩者均比臺中港浮標預報波高為強，顯示外海預報波高仍存有偏弱特性，浮標觀測風速與浮標預報風速、離岸風電區預報風速之相關係數分別為 0.91、0.90，浮標觀測波高與浮標預報波高、離岸風電區預報波高之相關係數分別為 0.94、0.94，這些結果顯示預報風場與波高於外海空曠海域具有高度之準確性，足以預報臺中港區外海海氣象環境之變化狀態，唯有其強度仍需進行誤差修正。

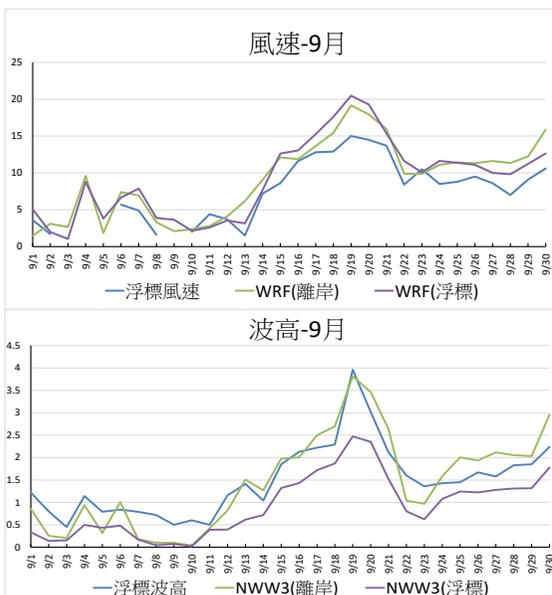


圖 4 模式預報比對結果歷線圖

本研究以 2019 年為分析對象，運用觀測資料分析臺中港區海氣象環境之變化特性與關聯性，再運用數值模式預報臺中港區與鄰近外海離岸風電區之風速與波高，期以提供較具代表性與準確性之離岸風電區海氣象預報資訊，協助航行安全與提升港埠管理績效。主要研究成果陳述如下：

- 臺中港區觀測風場自無遮蔽外海測站(T2)依次減弱到建物環繞之陸地測站(T6)。各測站全年時間序列之關聯性均相當高。
- 風速-波高之逐時資料關聯性以 9 月-2 月東北季風發展、強盛時期之相關係數最高(0.82-0.90)，在東北季風過渡到西南季風之 3 月-5 月略降(0.68-0.76)，以 6 月-8 月西南季風時期最低(0.21-0.58)。
- 對 T2 風速與 AWAC 波高之預報能力依 3 個時期變化，最佳時期為東北季風強盛之 9 月-2 月，其次為東北季風轉弱到西南季風過渡時期之 3 月-5 月，預報能力最低時期發生在西南季風之 6 月-8 月。
- 模式預報風場於臺中港區與離岸風電區強度相近，其關聯性於 6 月-8 月略低，其餘月分都相當高。預報波高於離岸風電區明顯高於臺中港區，兩區預報波高之相關係數普遍為高。臺中港區與離岸風電區之預報風速與波高均呈現高度正相關性，顯示容易受到相同天氣系統之均勻影響。

上述分析結果顯示波浪預報之誤差比風速預報為大，為提高波浪預報之精度，建議可朝下列修正方向進行：

- 本研究所驗證之 AWAC 波高測站位於鄰岸地區，其岸形與水下地形改變最大，不易為模式 2 公里網格所掌握，因此，呈現偏弱之波高預報誤差。未來可藉由置入較高解析度之陸上與海底地形、不同參數設定、提高空間網格解析度等方法來改進預報精度。
- 本研究波浪模式之範圍只限定在臺中港區域，對夏季颱風從遠處引發長浪傳送進來之特性不易掌握，以致波浪預報能力於夏季明顯降低。未來修正方向可考慮將波浪預報範圍擴充為全臺周邊海域，期以掌握長浪之預報，提高波浪預報精度。

參考文獻

1. 邱永芳、黃茂信、李賢華、余聿祥、方鈺淳，「風能應用於臺灣港灣之初步研究」，交通部運輸研究所，港灣季刊，第 104 期，2016 年，第 40-45 頁。
2. 許城榕、許弘莒、李孟學、羅冠顯、李政達、蔡立宏，「AWAC 波浪量測資料分析以金門海域為例」，第 40 屆海洋工程研討會論文集，高雄、臺灣，2018 年。
3. 傅怡釗、李俊穎、蘇青和、謝佳紘，「波浪通過臺灣中部海域離岸風電場址之初步探討」，交通部運輸研究所，港灣季刊，第 112 期，2019 年，第 22-32 頁。
4. 羅冠顯、蔡立宏、曾俊傑，「離岸風電基地母港(臺中港)鄰近海域海氣象特性分析」，交通部運輸研究所，港灣季刊，第 114 期，2019 年，第 50-66 頁。
5. Emmanouil, S., Aguilar, S. G., Nane, G. F., and Schouten, J.-J., “Statistical models for improving significant wave height predictions in offshore operations”, *Ocean Engineering*, 206, 2020, pp.1-10.
6. Goit, J. P., Yamaguchi, A., and Ishihara, T., “Measurement and prediction of wind fields at an offshore site by scanning Doppler LiDAR and WRF”, *Atmosphere*, 11, 2020, pp.442-461.
7. Hallgren, C., Arnqvist, J., Ivanell, S., Körnich, H., Vakkari, V., and Sahlée, E., “Looking for an offshore low-level jet champion among recent reanalyses: a tight race over the Baltic Sea”, *Energies*, 13, 2020, pp.3670-3695.
8. Hasager, C. B., Hahmann, A. N., Ahsbals, T., Karagali, I., Sile, T., Badger, M., and Mann, J., “Europe’s offshore winds assessed with synthetic aperture radar, ASCAT and WRF”, *Wind Energy Science*, 5, 2020, pp.375-390.
9. Koivisto, M., Jónsdóttir, G. M., Sørensen, P., Plakas, K., and Cutululis, N., “Combination of meteorological reanalysis data and stochastic simulation for modelling wind generation variability”, *Renewable Energy*, 159, 2020, pp.991-999.
10. Merrifield, S. T., Schramek, T.A., Celona, S., Bôas, A. B. V., Colin, P. L., and Terill, E. J., “Typhoon-forced waves around a western Pacific Island Nation”, *Oceanography*, 32, 2019, pp.56-65.
11. Skamarock, W. C., and Coauthors, “A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech Note NCAR/TN-4751STR”, 2008, p.125.
12. Sampson, C. R., Hansen, J. A., Wittmann, P. A., Knaff, J. A., and Schumacher, A., “Wave probabilities

- consistent with official tropical cyclone forecasts”, *Weather and Forecasting*, 31, 2016, pp.2035-2045.
13. Seyr, H., and Muskulus, M., “Decision support methods for operations and maintenance for offshore wind farms: a review”, *Applied Science*, 9(2), 2019, pp.1-30.
 14. Sheng, Y., Shao, W., Li, S., Zhang, Y., Yang, H., and Zuo, J., “Evaluation of typhoon waves simulated by WaveWatch-III model in shallow waters around Zhoushan Islands”, *Journal of Ocean University of China*, 18, 2019, pp.365-375.
 15. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., 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.
 16. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., and Powers, J. G., “A description of the Advanced Research WRF version 2”, NCAR/TN-468_STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 2005, p.88.
 17. Tolman, H. L., Balasubramaniyan, B., Burroughs, L. D., Chalikov, D. V., Chao, Y. Y., Chen, H. S., and Gerald, V. V., “Development and implementation of wind-generated ocean surface wave models”, *Wea. Forecasting*, 17, 2002, pp.311–333.