

颱風波浪系集模式預測能力之評估

范揚銘¹

陳家銘¹

Shunqi Pan²

高家俊³

國立成功大學近海水文中心¹

Hydro-environmental Centre, School of Engineering, Cardiff University, Cardiff, UK²

國立成功大學水利及海洋工程學系³

摘要

本研究發展系集方法，並與決定性的預測波浪比較，用以評估波浪系集模式預測能力。傳統的數值波浪預測為單一模式預測，期望由最佳的單一初始資料，獲得最佳之模式預測結果。這種決定性的預測無法掌握預測過程中的不確定性，同時亦無法提供預測過程中的不確定性資訊，以單一模式掌握所有可能的海象變化有其困難度。系集方法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。2013年蘇力颱風在台灣東部外海觀測的示性波高高達8公尺以上，本研究以作業化波浪系集預測系統於颱風期間的預測波浪結果探討颱風波浪的預測能力。由鄰近資料浮標站之波高系集預測結果顯示最大值的發生時間與最大值更可精確的掌握，證明颱風波浪系集預測確實可以彌補單一模式預測的不足。

關鍵字：颱風波浪、系集方法、數值波浪模式

一、前言

監測西北太平洋海象發現，破紀錄之巨浪多發生於近三年，如2007年在台灣東北角海岸測得最大波高高達30公尺之巨浪；處於半封閉海域的台灣海峽於颱風期間多次測得近10公尺之浪高。觀看大部分均已達已開發國家的歐洲，除了開發建設之外，海岸地區也是民眾休閒遊憩之所，隨著全球氣候變遷之加劇，日益頻繁的海岸災害也造成他們相當大的生命財產損失。1998到2004年之間，歐洲大陸共遭受超過了100場的洪水災害，其中包括了海水溢堤或倒灌。根據歐盟洪災風險管理與評估指令的陳述，如何有效減少洪災損失及因應氣候變遷所造成的海洋環境威脅，是近年來歐盟積極尋求解決方案的重要議題。以英國為例，英國本土位於歐洲大陸西北面的不列顛群島，被北海、英吉利海峽、凱爾特海、愛爾蘭海和大西洋包圍，海岸地區也遭遇海岸侵蝕與風暴潮等災害威脅，如英國倫敦曾經發生淹水災害，起因於大浪與暴潮導至泰晤士河口倒灌，經興建防潮閘加以保護未再發生淹水之災；又如2007年受北海風暴影響，英格蘭東部沿海地區遭受1953年以來最嚴重的潮水侵襲，許多村鎮被淹。

極端氣候所產生之極端波浪不僅對海岸工程、海事結構物造成超出預期的傷害，也嚴重威脅濱海居民之生命財產安全。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。民國98年9月14日高雄左營軍港外1.3浬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，極端波浪預報工作刻不容緩。

改進海洋波浪預報，一直是世界各國海洋相關單位所努力的主要目標。為了要改進波浪預報，最直接的方法是改進數值模式的準確度，其中包含改進初始場、提高模式解析度或是引進更複雜的物理參數化過程。但因為波浪具有混沌的特性且數值預報系統中存在著非線性過程，使得誤差在數值波浪預報模式中會累積，任何微小的變化，皆有可能導致預報結果產生巨大的差異，最後導致模式預報的結果失準。另外，預報系統中存在著許多不確定性，包含初始資料的誤差或是模式中的缺陷，皆可

能造成模式預報結果的變化。若數值波浪預報為單一模式預報，期望由最佳的單一初始資料，獲得最佳之模式預報結果。這種決定性的預報無法掌握預報過程中的不確定性，同時亦無法提供預報過程中的不確定性資訊，以單一模式掌握所有可能的海象變化有其困難度。

系集預報的發展是為了彌補單一模式預報的不足，藉由多個不同的系集成員預報，期望能包含模式預報的不確定性，並且將不確定性量化，以提供未來的預報機率(Leith, 1974)。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(Palmer et al. 1992; Molteni et al. 1996)。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(Toth and Kalnay 1993)。Houtekamer 等(1996)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. (2012)與Fan et al. (2011) 初步分析波浪系集預報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，且尖峰值與尖峰時間可更精確的掌握。

二、系集預測方法

系集預測分為參數系集與模式系集兩種：參數系集為改變單一數值模式的參數值後產生的系集預測成員；模式系集為利用不同的作業化數值模式模擬結果做為系集預測成員。由於作業化數值模式已經過校驗與測試，可較合理的模擬波浪，故本研究採用模式系集預測。評估國際上可取得已作業化的風場資料包括美國國家環境預報中心的大氣模式、日本氣象廳的大氣模式與中央氣象局的WRF大氣模式，以此三個作業化預報風場資料分別做為三個數值波浪模式的驅動力，模擬波場資訊。

又本系統以平均值評估系集分歧是否足夠，據以最大程度涵蓋可能的發生機率，由各個成員預報值和預報平均值的差異進行平均計算，可得知系集成員的分佈程度。又為了得知離散程度是否合理，透過預報平均值和真值比較，此分析為標準偏差計算，可得知預報平均值和真值的差異。

三、系集預測颱風波浪

(一)研究案例-蘇力颱風

本研究以蘇力颱風為例，蘇力颱風路徑如圖1所示，依據中央氣象局的資料，蘇力颱風7月8日關島北方海面生成，9日增強為中度颱風並穩定地往西北西移動，10日8時增強為強烈颱風後仍持續往西北西移動，11日20時強度減弱為中度颱風，12日8時移動方向轉為略向西北進行並朝臺灣東北部

海面接近，13日3時於新北市及宜蘭縣交界處登陸並持續往西北移動，8時於新竹附近出海後16時進入大陸，17時減弱為輕度颱風，影響台灣最劇烈的時期是7月12日晚上至7月13日清晨。

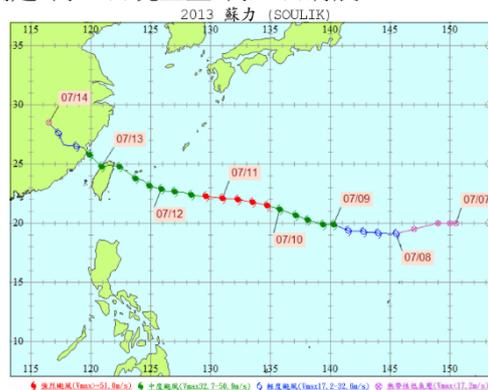


圖1 蘇力颱風路徑圖(資料來源：中央氣象局)

(二)系集預測結果

作業化系集預測系統每天執行四次系集預測，此預測系統以多個作業化預報大氣資料做為作業化波浪預測模式的驅動力，模擬未來72小時的預測波浪，再透過系集方法，進而得到系集預測的波浪資訊。為了評估預測準確度與預測誤差，比較系集預測波浪與實測波浪資料，以蘇力颱風為例，鄰近台東外洋資料浮標站的系集波高預測時序列圖如圖2至圖6所示，系集週期預測時序列圖如圖7至圖11所示，預測間隔時間是6小時。圖2至圖6分別表示2013年7月12日08時、2013年7月12日14時、2013年7月12日20時、2013年7月13日02時、2013年7月13日08時的預測結果，圖7至圖11的預測時間亦同。時序列圖呈現過去48小時及未來72小時內指定格點位置的系集波高、週期預測變化趨勢。圖中紅色虛線所指的時間為最新預測時間，紅色虛線右邊為最新的系集波高、週期預報變化趨勢，紅色虛線左邊為過去48小時的系集波高、週期預測變化趨勢，圖中顯示作業化系集預測的結果顯示不但變化趨勢符合實測波浪，最大值的發生時間與最大值可更精確的掌握。

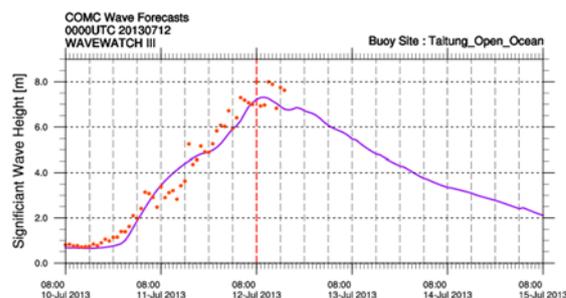


圖2 鄰近台東外洋資料浮標站之波高實測與系集預測比對時序列圖 (2013年07月12日08時)

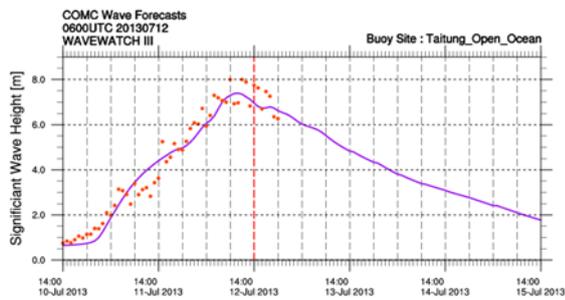


圖 3 鄰近台東外洋資料浮標站之波高實測與系集預測比對時序列圖 (2013 年 07 月 12 日 14 時)

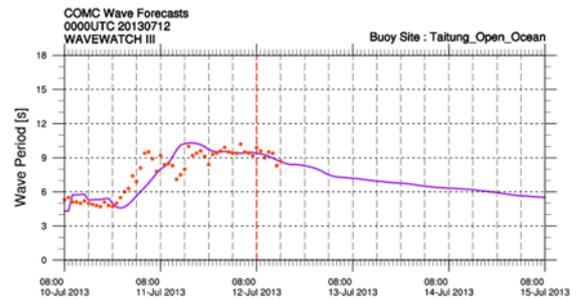


圖 7 鄰近台東外洋資料浮標站之週期實測與系集預測比對時序列圖 (2013 年 07 月 12 日 08 時)

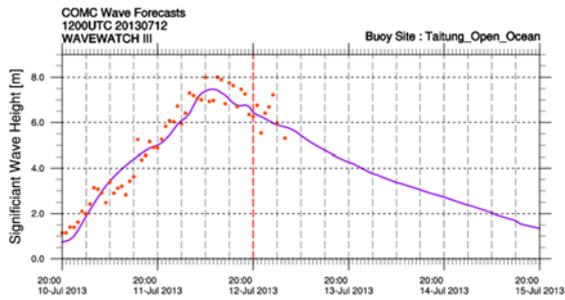


圖 4 鄰近台東外洋資料浮標站之波高實測與系集預測比對時序列圖 (2013 年 07 月 12 日 20 時)

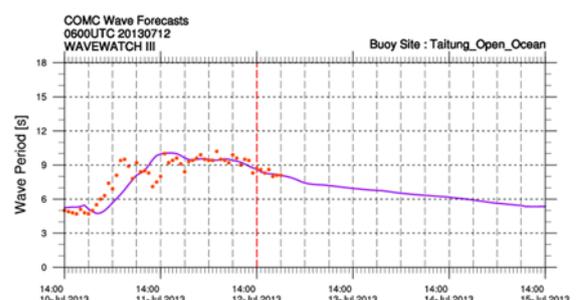


圖 8 鄰近台東外洋資料浮標站之週期實測與系集預測比對時序列圖 (2013 年 07 月 12 日 14 時)

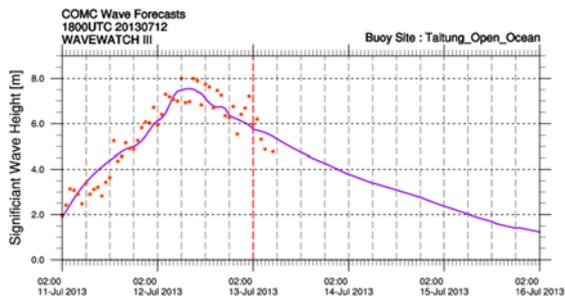


圖 5 鄰近台東外洋資料浮標站之波高實測與系集預測比對時序列圖 (2013 年 07 月 13 日 02 時)

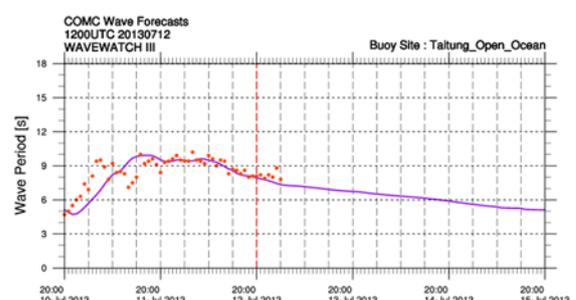


圖 9 鄰近台東外洋資料浮標站之週期實測與系集預測比對時序列圖 (2013 年 07 月 12 日 20 時)

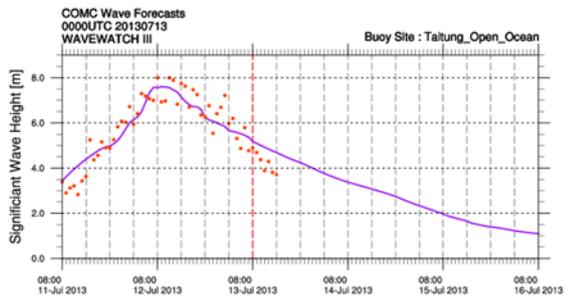


圖 6 鄰近台東外洋資料浮標站之波高實測與系集預測比對時序列圖 (2013 年 07 月 13 日 08 時)

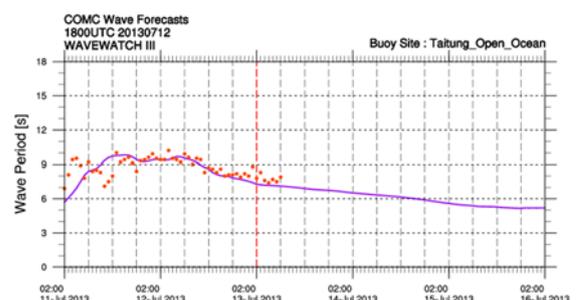


圖 10 鄰近台東外洋資料浮標站之週期實測與系集預測比對時序列圖 (2013 年 07 月 13 日 02 時)

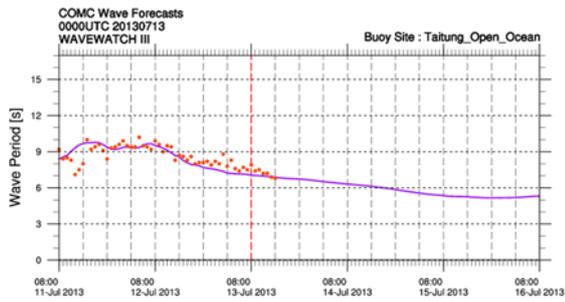


圖11 鄰近台東外洋資料浮標站之週期實測與系集預測比對時序列圖 (2013年07月13日 08時)

進一步以統計誤差來探討預測結果，表1與表2分別為鄰近台東外洋資料浮標站的系集波高與週期的誤差統計結果，表中顯示預測值與實測值的RMSE、BIAS、CR與SI統計誤差分析結果：在最大實測示性波高達到8公尺的海況下，RMSE統計誤差為0.55m、BIAS為-0.07m、相關性(CR)為0.96(高度相關)、SI為0.11；在最大實測平均週期達到9sec的海況下，RMSE統計誤差為0.94sec、BIAS為0.13sec、相關性(CR)為0.91(高度相關)、SI為0.11。又以鄰近馬祖資料浮標站的系集波高與週期的統計誤差分析結果為例，如表3與表4，表中顯示預測值與實測值的RMSE、BIAS、CR與SI統計結果亦呈現可接受的合理範圍。

而單一模式預報結果如圖12所示，以單一預報風場模擬鄰近台東外洋資料浮標站的波浪，紅色直線即為最新的波高預測變化趨勢，其他不同顏色的直線則為過去48小時的系集波高預報變化趨勢，預測結果明顯低估，意即系集預測系統應用於颱風波浪的預測證明可以提升波浪預測的準確度。

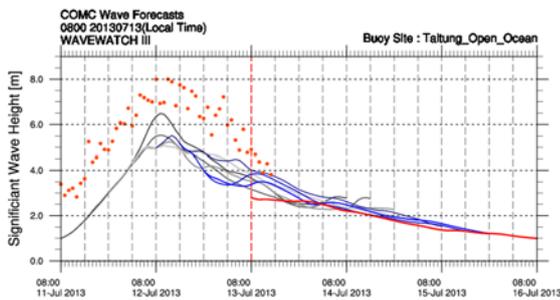


圖12 鄰近台東外洋資料浮標站之波高實測與預測比對時序列圖

表1 鄰近台東外洋資料浮標站之波高系集預測的統計誤差分析

時間	7月12日			7月13日		平均
	08:00	14:00	20:00	02:00	08:00	
RMSE (m)	0.52	0.52	0.55	0.55	0.60	0.55
BIAS (m)	-0.15	-0.12	-0.12	-0.03	0.05	-0.07
CR	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.96
SI	0.14	0.12	0.11	0.10	0.11	0.11

表2 鄰近台東外洋資料浮標站之週期系集預測的統計誤差分析

時間	7月12日			7月13日		平均
	08:00	14:00	20:00	02:00	08:00	
RMSE (sec)	1.11	1.01	0.99	0.91	0.67	0.94
BIAS (sec)	-0.06	-0.09	-0.21	-0.21	-0.09	-0.13
CR	0.91	0.92	0.93	0.89	0.92	0.91
SI	0.14	0.12	0.12	0.11	0.08	0.11

表3 鄰近馬祖資料浮標站之波高系集預測的統計誤差分析

時間	7月12日			7月13日		平均
	08:00	14:00	20:00	02:00	08:00	
RMSE (m)	0.19	0.23	0.43	0.64	0.93	0.48
BIAS (m)	-0.07	-0.09	0.16	0.04	-0.14	-0.02
CR	0.97	0.98	0.96	0.98	0.99	0.97
SI	0.21	0.19	0.26	0.27	0.27	0.24

表4 鄰近馬祖資料浮標站之週期系集預測的統計誤差分析

時間	7月12日			7月13日		平均
	08:00	14:00	20:00	02:00	08:00	
RMSE (sec)	2.38	2.45	4.68	4.63	4.52	3.73
BIAS (sec)	1.36	1.39	3.50	3.41	3.25	2.58
CR	0.88	0.87	0.91	0.81	0.72	0.84
SI	0.40	0.38	0.70	0.64	0.59	0.54

四、結論與建議

以系集方法預測颱風波浪，結果顯示不但變化趨勢符合實測波浪，最大值的發生時間與最大值可更精確的掌握。系集波高與週期的誤差統計結果顯示預測值與實測值的RMSE、BIAS、CR與SI呈現可接受的合理範圍。

而單一模式預測結果明顯低估，系集預測系統應用於颱風波浪的預測證明可以提升波浪預測的準確率。

五、謝誌

感謝中央氣象局提供寶貴的資料浮標資料與大氣資料使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

六、參考文獻

- Fan, Y.M., Pan, Shunqi, Chen, J.M., Kao, C. C., 2011: "Ensemble forecasting on wave modeling", Proceedings of the 10th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST 11), Rhodes, Greece, 2, 809-820.
- Houtekamer, P.L., Lefaiivre, L., Derome, J., Ritchie, H. and Mitchell, H.L., 1996: "A system simulation

approach to ensemble prediction", Monthly Weather Review, 124, 1225-1242.

Leith, C.E., 1974: "Theoretical skill of Monte Carlo forecasts", Monthly Weather Review, 102, 409-418.

Molteni, F., Buizza R., Palmer T. N. and Petroliagis T., 1996: "The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 122, 73-119.

Palmer, T.N., Molteni, F., Mureau, R., Buizza, R., Chapelet, P. and Tribbia, J., 1992: "Ensemble prediction", ECMWF Research Department Tech. Memo. 188, 45 p.

Pan, Shunqi, Fan, Y.M., Chen, J.M., Kao, C. C., 2012: "Ensemble forecasting on typhoon wave modeling", Proceeding of the 6th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, 473-480.

Toth, Z. and Kalnay, E., 1993: "Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations", Bulletin of the American Meteorological Society, 74, 2317-2330.