

波浪系集預報系統之分析研究

張恆文¹ 顏厥正¹ 陳仁曾² 朱啟豪² 滕春慈²
工業技術研究院¹ 中央氣象局海象測報中心²

摘要

系集(ensemble)預報系統建置的目的是為了彌補單一模式預報的不足，同時期望預報能包含模式的不確定性。發展系集預報系統，須提供有效且合理的系集預報成員，以產生足夠的預報系集分歧(SPRD)。本研究利用WRF系集模式提供之20組系集風場(2012/1~2及2012/7~8)，建置2層的多重網格(multi-grid) NWW3波浪模式及引用現在決定性預報的設定參數，利用氣象局設置之波浪浮標觀測資料，檢視其系集成員的分歧度是否足夠以及可否最大程度涵蓋可能的發生機率。

計算結果顯示，使用決定性預報的設定參數對於對深海的系集預報而言，分歧度與均方根(RMSE)的差距較小，但在近域部分，可能受限於網格大小及缺乏近海的物理機制導致差異較大。對此，本研究提出使用不同的風場輸入公式(10個系集使用Tolman公式，10個系集使用WAM4公式)的組合方式來形成系集系統，結果顯示此種方式可以保留各個風場輸入公式在不同風場狀況下的優點，同時亦提高SPRD，拉近RMSE及SPRD的差距，使得系集系統已較能掌握模式的不確定因素。

關鍵字：波浪系集預報、多重網格

一、前言

近年來由於數值預報能力的進步，加上電子計算機運算速度的增進，目前波浪預報已經架構在數值預報產品的應用上，並以此作為波浪預報之主要指引。不過，數值預報受到物理參數化、數值方法等限制下，且在缺乏足夠的觀測資料情形下，數值波浪預報仍然存在著誤差，且與預報時間成正比，而對於使用者或資料提供者而言，單一的數值預報已無法滿足需求，為了彌補單一模式預報的不足，同時期望預報能包含模式的不確定性，可透過系集預報，藉由建立多個不同的系集預報成員，量化預報的不確定性，以期提供波浪模式的機率性預報，除了可提高預報的可信度，更有助於預報員進行預測分析。

風浪傳播屬於弱非線性(weakly)及高消散性(dissipative)的過程，但風浪交互作用及風場非線性的作用卻是能量輸入的重要關鍵，這二者的不確定性使得風浪預報的準確性更不易掌握，往往使得單一的預報指引無法掌握到真實的風浪場，Chen(2006)指出系集預報不僅提供較佳的預報值，同時機率性的預報指引更可符合現代使用者的需求。

在波浪系集預報系統之發展方面，NCEP(National Centers for Environmental Prediction)的作業化系集波浪預報系統GEOWaFS(The Global Ensemble Ocean Wave Forecast System)，係使用

NWW3(NOAA WAVEWATCH III)模式2.22版來建構全球的作業化模式，其網格解析度為 $1.25^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ ，系統包含11個系集及一個波浪初始場，此波浪初始場係使用另一個作業化決定性(deterministic) NWW3模式的計算值，而11個系集則使用不同的11個風場來驅動，以產生11個系集預報成員。這11個風場其中包括1個作業化確定性風場，其餘10個風場則利用該風場使用隨機誤差生成法(breeding method)引入小擾動產生，系集風場預報時間為每日4次、每次126小時的預報，該系統已自2006年3月正式上線，而網站上已有240小時的預報，未來預計加入至20個系集預報成員。

NWW3模式3.14版擁有多重網格計算功能後，有資料顯示該系統於2008年6月被更新，但網站上仍未展示，其修正部分包括網格解析度為 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 、20個系集成員、使用系集轉換技術(ensemble transform)來產生風場、增加1個由GFS驅動之多重網格控制演算(control run)、使用bias-corrected風場、使用前一個run的6小時預報來當浪場的起始值等。

此外NCEP與美國海軍FNMOC(Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)在2011/11/1開始進行跨單位合作，建置40個系集(各20)的波浪預報系統，預計在2014年再加入加拿大20個系集成員。而2個中心所使用的模式及設定均一致，僅風場來源有所差異。

1998年6月ECMWF(European Center for Medium

range Weather Forecasting)已完成大氣模式和波浪模式的耦合模擬，其波浪系集預報系統Wave EPSgram (Wave Ensemble Prediction System meteogram)係使用WAM模式建構全球波譜預報，系統包含1組控制演算及50組系集預報，其中50組系集成員其風場是由初始大氣條件最不穩定的25個奇異向量(singular vector)擾動生成，浪場初始值是使用控制演算分析場作為初始條件(並未擾動)，同時EPS全球波浪模式波譜解析度增至24個方向和30個頻率。2010年Wave EPSgram網格解析度已提升為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，每6小時預報一次，預報時間延長至10天。

氣象局的波浪系集預報系統已在2014年6月建置完成，採用NWW3模式及二層之多重網格計算(0.25° 、 0.1°)，採用二層之20個WRF系集風場(45公里及15公里)，每6小時預報一次，預報時間至72小時。

二、研究方法

足夠的樣本數及夠大的分歧度為系集預報準確的重要條件，本研究主要在檢視其系集成員的分歧度是否足夠，可否最大程度涵蓋可能的發生機率。模式計算範圍如圖1所示，使用NWW3模式3.14版，包括二層多重網格解析度分別為 0.25° 度及 0.1° 度，重要參數包括自 0.04178Hz 起25個頻率及24個方向間隔，使用Tolman之風場輸入公式，計算時間包括2012/01~02東北季風及2012/07~08颱風時期，使用每12小時執行一次的WRF系集風場(包括45公里及15公里二層風場，且分別為二層波浪網格之輸入風場)。波浪起始條件部分，採用前一刻之預報場，除了可避免分歧度為零外，同時可以掌握不同風場所衍生出原始浪的特性(如swell)。在進行分歧度分析時必須要有真值，本研究蒐集計算時段之氣象局觀測站資料當作真值，圖2顯示所使用的觀測站位置。

本研究參考氣象局發展天氣系集的經驗，使用下述之統計指標來評估合適的系集成員，包括Talagrand Rank Histogram、系集分歧與member equallikelihood。以下說明各項指標統計意義(李和洪，2011)：

- Talagrand Rank Histograms(TRH)：針對已知的真值而言，可評估系集預報系統相對於該真值的離散程度，也能了解系集預報的偏差(Bias)。若統計結果圖形呈現U型分布，表示此系統離散程度不足，真值總是落於較大或是較小值的區間，預報無法涵蓋所有可能發生的機率；倘若圖形呈現A型分布，表示離散程度太大，系統擁有的不確定性大於真實情形；當圖形為平坦，表示此系統離散程度為合理的情形。
- 系集分歧(Ensemble Spread, SPRD)：TRH對於離

散程度的評估較為定性判斷，因此透過系集分歧可提供一個定量的數值協助判斷。系集分歧和標準差所代表的意義相同，由各個成員預報值和預報平均值的差異進行平均計算，可算出系集成員的分佈程度。但是SPRD沒有和真值進行比較，雖能計算出離散度，但無法得知離散度是否合理，因此透過預報平均值和真值比較，透過Root Mean Square Error (RMSE)計算，可得知預報平均值和真值的差異。若RMSE和SPRD相等時，表示系集分歧之離散程度合理；當RMSE大於SPRD時，表示離散不足；當RMSE小於SPRD時，表示過度離散。

- The Member Equal-Likelihood(MEL)：以真值和各成員預報值進行比較，若系集成員預報值和真值最接近，則此系集成員累加一次直到統計完所有時間和網格點資料。由於期望每個成員對於真值的預報命中率一致，因此圖形平坦時，為最佳的情形。一般而言，好的系集預報系統，期望每個系集成員對於真值的預報命中率是平均的，而TRH無法得知此訊息，因此透過MEL進行校驗。由於期望每個成員對於真值的預報命中率一致，因此圖形平坦時，為最佳的情形。

計算結果扣除熱機時間，在1~2月共有118筆資料(每個預報時間)。而在7~8月颱風盛行時期之模擬，由於2012年7月30日開始至8月底止陸續有5個颱風經過，故僅分析7/30至8/31的波浪模擬共33天。

三、分析結果與討論

計算結果分別就風場及波浪場部分說明如下：

(一)、風場

圖3為1~2月(左)及8月(右)各浮標測站平均之MEL(上)、TRH(中)、RMSE及SPRD(下)分布，其中RMSE及SPRD圖另包括東沙島及台東外洋的平均、其他氣象局測站之平均。其中MEL圖呈現平坦的分布，顯示每個系集成員對於真值的預報命中率是平均的，為最佳的情形。TRH圖方面，顯示預報值偏大的趨勢較為明顯。RMSE及SPRD圖部分，RMSE均大於SPRD，表示離散稍顯不足，SPRD自 1m/s 緩慢增加至72小時的 1.4 m/s ，RMSE則自 2.2 m/s 增加至 2.8 m/s 。再比較外洋二個測站的平均及其他近岸的測站平均顯示，外洋測站的RMSE明顯小於近岸的平均，可能與其較不受陸地干擾有關，而SPRD則近似並無顯著差異。

8月之MEL亦顯示每個系集成員對於真值的預報命中率是平均的。在TRH方面，預報值呈現偏大的趨勢，類似1~2月的分布情形。RMSE及SPRD圖部分，SPRD自 1.1m/s 緩慢增加至72小時的 2.2 m/s ，

RMSE則自2.8 m/s增加至3.5 m/s，其值均較1~2月之模擬結果大，但RMSE與SPRD的差距則近似。再比較外洋二個測站的平均及其他近岸的測站平均顯示，外洋測站的RMSE與近岸的平均接近，而SPRD亦無顯著差異。

(二)、波高

1. Tolman

圖4為波浪在1~2月(左)及8月(右)各測站平均之MEL(上)、TRH(中)、RMSE及SPRD(下)分布，其中RMSE及SPRD另包括東沙島及台東外洋的平均、其他氣象局測站之平均。

1~2月之MEL顯示，除了第5、11、17個系集成員較為突出外，其餘成員算是平均。TRH圖方面，預報值呈現U型，真值落於較大或較小值的區間。RMSE及SPRD圖部分，RMSE均大於SPRD，表示離散稍顯不足，SPRD自0.17 m增加至0.2 m，RMSE則自0.55 m增加至72小時的0.65 m。再比較外洋二個測站的平均及其他近岸的測站平均顯示，外洋測站的RMSE在預報68小時之前均明顯小於近岸的平均，而SPRD亦大於近岸平均，使得其RMSE與SPRD的差距較小，顯示其較能掌握模式之不確定性，此與風場的結論一致。

在8月之MEL圖並未出現像1~2月次數特別高的系集成員，但也未十分平坦。而在TRH圖方面，呈現L型，表示預報值偏大，但有小部分的預報值偏小，不同於1~2月的U型分布。

RMSE及SPRD圖部分，RMSE均大於SPRD，SPRD自0.2 m些微下降再增加至0.4 m，RMSE則自約0.7 m增加至最高1.0 m，其值亦較1~2月之模擬結果大，且RMSE與SPRD的差距稍大些。比較外洋二個測站的平均及其他近岸的測站平均顯示，外洋測站的RMSE在預報約36小時之前接近於近岸的平均，但在之後即大於近岸的平均，而SPRD均大於近岸平均，使得預報前半段其RMSE與SPRD的差距較小，顯示在外洋二個測站其較能掌握模式之不確定性，但在約36小時之後並未較佳甚至較差。

綜合以上分析，在1~2月每個浪場系集成員對於真值的預報命中率是大概是平均的，但有三個系集成員較為突出，8月則無成員較為突出，但亦未十分平坦。1~2月預報值呈現U型，真值會落於較大或較小值的區間，8月則呈現L型表示預報值偏大較多，但有小部分的預報值偏小。颱風時期之RMSE及SPRD均較1~2月大，且二者之差距較大。而1~2月外洋測站平均之RMSE與SPRD較為接近，顯示其在掌握模式不確定性部分較靠岸測站之平均佳，但在8月，在36小時之前外洋測站平均之RMSE與SPRD較為接近，但在之後二者之差異不大甚且變大。此顯示在1~2月模式於外洋測站之模擬尚佳，但在8月模

式則偏大。

上述結果顯示近岸的計算結果差距較大，而外洋的測站在1~2月的計算結果尚佳，但在颱風時期仍偏大，而外洋的風場並未產生強烈的BIAS(氣象局,2013)，現階段進行bias-corrected的風場修正似乎並不恰當，因此在風場不變的情形下，本研究著手改進外洋測站在颱風時期的計算結果。

2. WAM4

氣象局(2012)研究曾利用相同風場不同的風場公式計算其差異，顯示使用WAM4公式的波高值較使用Tolman公式小，因此本研究使用WAM4公式來進行計算，期改善在颱風時期偏大的趨勢，參考Rascle and Ardhuin (2013)的設定，計算結果如圖5。

1~2月各站之MEL顯示幾個特殊系集成員出現的次數已降低。在TRH方面，由於輸入的能量降低導致計算值偏小，使得預報值大於真值的趨勢趨緩，往計算值偏小方式轉變。RMSE及SPRD圖部分，SPRD自0.17 m增加至0.18 m，RMSE則自0.5 m增加至72小時的0.6 m，較使用Tolman公式略低。而外洋二個測站的平均則變差，但其餘測站則較佳。

在8月之MEL，並未出現像1~2月次數特別高的系集成員，但也較使用Tolman公式平坦。在TRH方面，預報值大於真值的趨勢趨緩。RMSE及SPRD部分，RMSE及SPRD均低於使用Tolman公式，但二者之間的差距亦降低，整體來說，顯示使用WAM4公式在颱風時期較使用Tolman公式為佳，達到本節設定的目標，改善外洋測站在颱風時期的計算結果。

然而使用不同公式分別將外洋測站於1~2月及8月均調整至較合理的階段，顯示可能無法以一套公式涵蓋所有的海況(當然目前仍尚未對WAM4的公式進行全面性的校正)，因此本研究整合二種不同公式的計算結果加以分析，初步選取前10個系集使用Tolman公式，後10個系集使用WAM4公式，計算結果標示使用的風場公式為(10T10W)。

3. 10T10W

圖6分別為1~2月及8月所有觀測站平均的MEL、TRH圖、RMSE及SPRD圖。圖中顯示由於這樣的整合，明顯提高了SPRD，保留了原不同公式在不同風場的優點，拉近了RMSE及SPRD的距離，提高系集系統掌握模式不確定因素的可靠度。

4. 10W10T

選取前10個系集使用WAM4公式，後10個系集使用Tolman公式，計算結果如圖7，標示使用的風場公式為(10W10T)。圖中顯示與前節的組合結果近似，二種組合之差異不大。

四、結論與建議

本研究以外洋二個測站為主要選取系集成員的依據，在風場不變的情形下，分別針對1~2月及8月颱風時期選取適當的風場輸入公式(Tolman及WAM4)進行調整，再利用系集成員各半(10個系集使用Tolman公式，10個系集使用WAM4公式)的組合方式來形成系集系統，此系統可以保留各個風場輸入公式在不同風場狀況下的優點，同時亦提高SPRD，拉近RMSE及SPRD的差距，使得系集系統已較能掌握模式的不確定因素。而對部分靠岸測站而言，是否因為模式解析度不夠或是地形的掌握較差而導致結果較不理想，仍然需要進一步的研究。

系集預報的主要目的是期望預報的SPRD能包含模式的不確定性，故希望讓SPRD愈接近RMSE愈好，依據前面的分析結果顯示，需從二方面著手，拉近風場的SPRD及RMSE，此部分在氣象局的氣象系集團隊正朝向改變邊界層粗糙度的方向進行，將使得陸地的RMSE降低，會影響到近陸域的風場，至於海洋風場的部分則建議需進一步考慮波浪形成的粗糙度進行風波的藕合研究；在波浪方面，未來除了使用改善風場外，近岸模式的建置亦需同步改善，重新調整率定決定性波浪預報在近岸的使用，以降低RMSE。

謝誌

本論文係交通部中央氣象局研究計畫「建構波浪系集預報系統」(編號MOTC-CWB-102-0-01)之研究成果，承蒙中央氣象局經費之補助及洪景山博士之協助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

- 李志昕、洪景山, 2011: “區域系集預報系統研究：物理參數化擾動”, 大氣科學, 39, 95-115
- 交通部中央氣象局, 2012: 建構波浪系集預報系統(1/4), 工業技術研究院
- 交通部中央氣象局, 2013: 建構波浪系集預報系統(2/4), 工業技術研究院
- Alves et al. 2013: “The NCEP-FNMOC Combined Wave Ensemble Product : Expanding Benefits of Interagency Probabilistic Forecasts to the Oceanic Environment”, American Meteorological Society, p1893-1905
- Chen, H.S., 2006: “Ensemble prediction of ocean waves at NCEP”, Proceedings of 28th Ocean Engineering Conference in Taiwan, NSYSU
- Cao, D., H. L. Tolman, H. S. Chen, A. Chawla, V. M. Gerald, :

“Performance of the ocean wave ensemble forecast system at NCEP”,

Cao, D., H. S. Chen and H. L. Tolman, 2007: “Verification of ocean wave ensemble forecast at NCEP”, 10th international workshop on wave hindcasting and forecasting & coastal hazards symposium, Turtle Bay, Oahu, paper G1

Raschle, N. and F. Ardhuin, 2013: “A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization”, Ocean modeling, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.12.001>

Tolman, H. L., 2008: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP MMAB Tech. Note 268

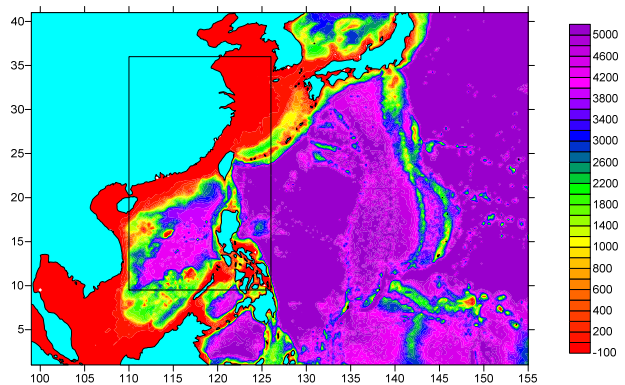


圖1、多重網格之計算範圍

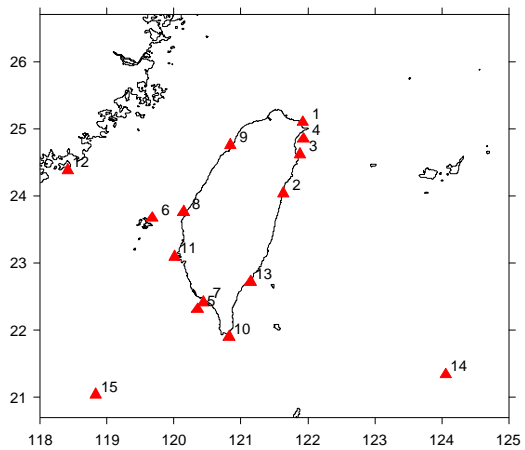
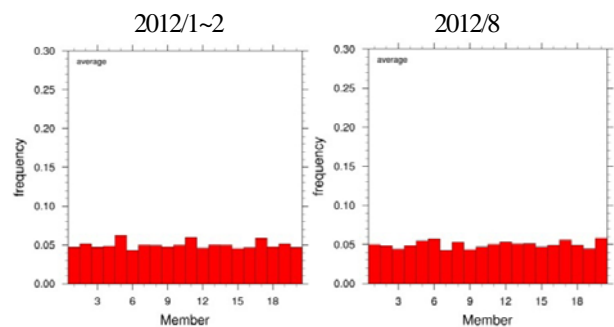


圖2、波浪測站位置圖



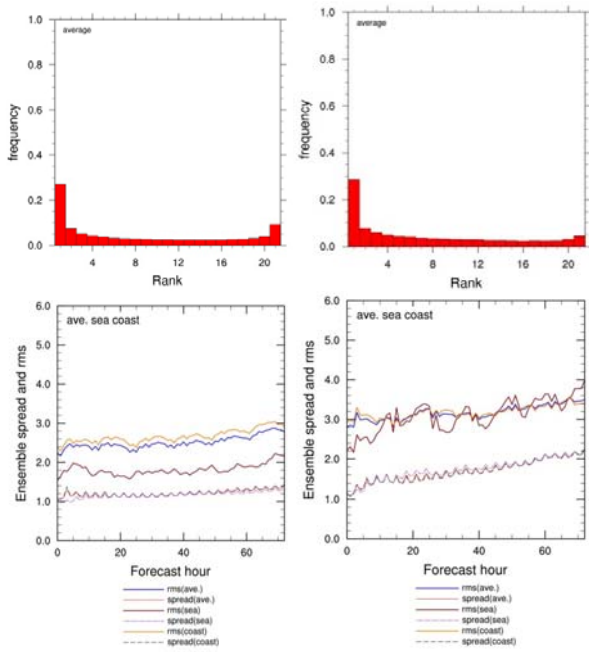


圖 3、U₁₀ 之測站平均系集統計指標(上: MEL 中: TRH 下: RMSE 及 SPRD)

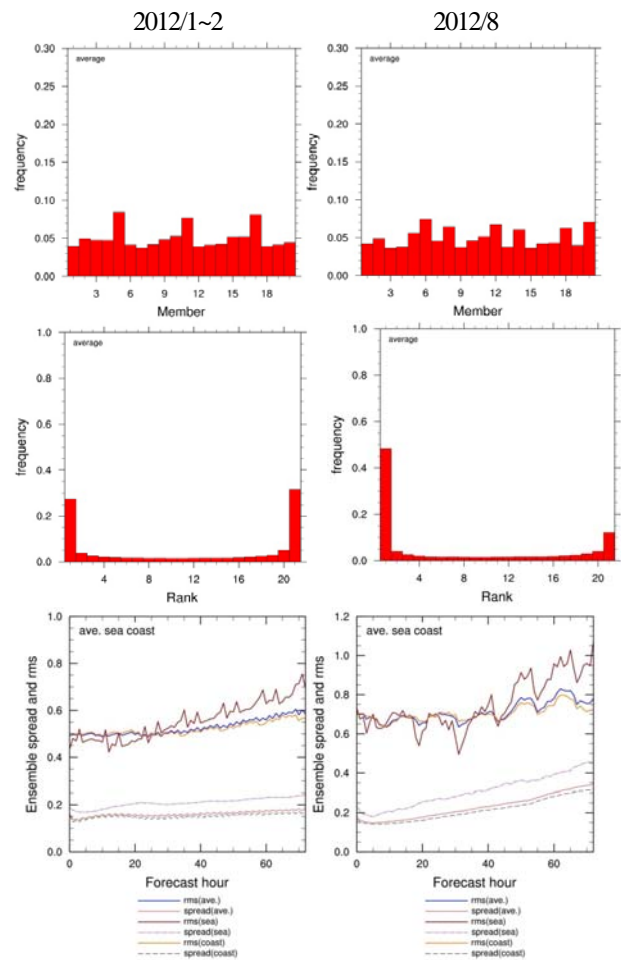


圖 4、示性波高之測站平均系集統計指標(上: MEL 中: TRH 下: RMSE 及 SPRD)(Tolman)

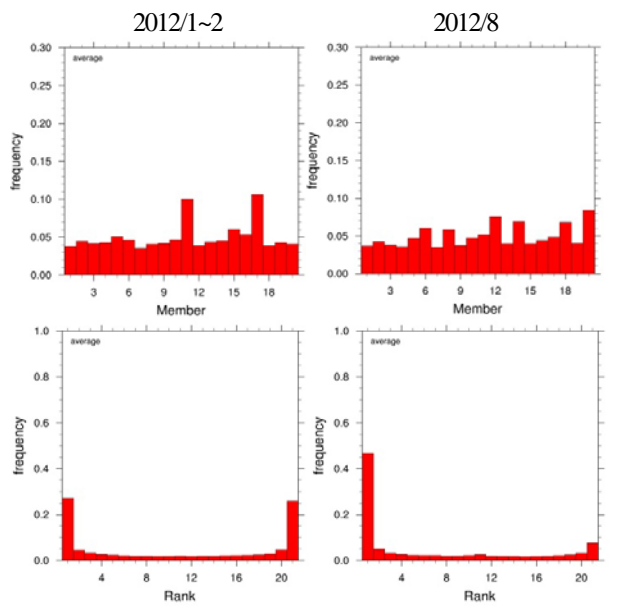


圖 5、示性波高之測站平均系集統計指標(上: MEL 中: TRH 下: RMSE 及 SPRD)(WAM4)

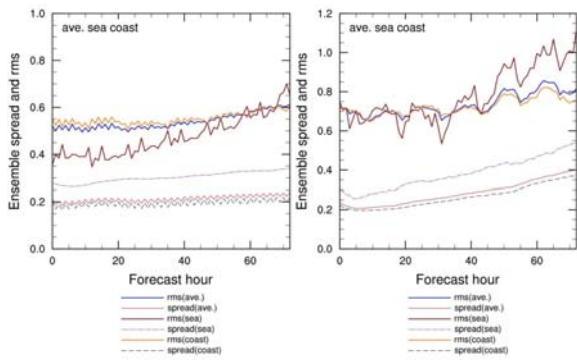


圖2、示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL
中：TRH 下：RMSE 及 SPRD)(10T10W)

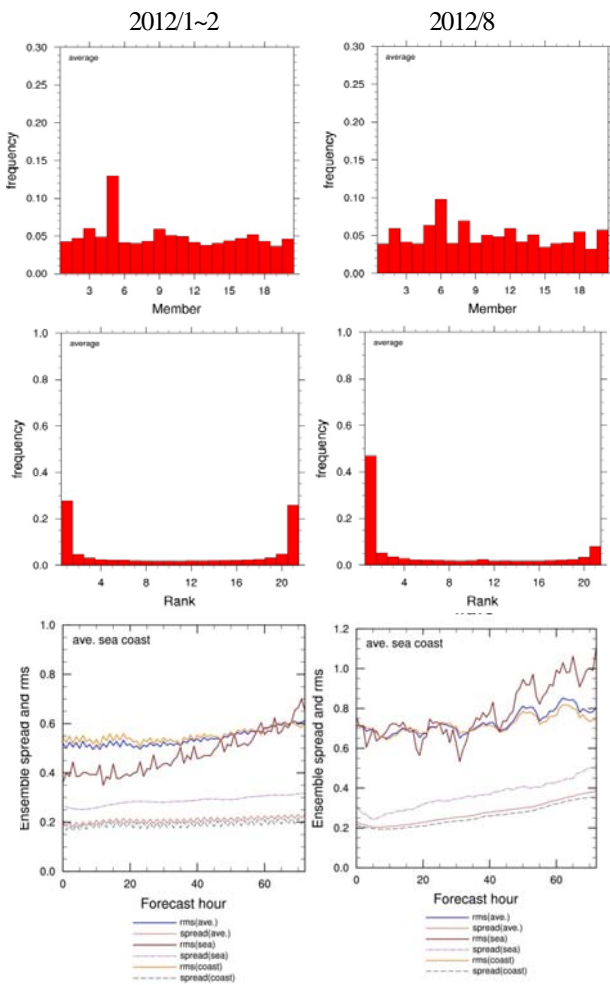


圖7、示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL
中：TRH 下：RMSE 及 SPRD)(10W10T)