

國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系

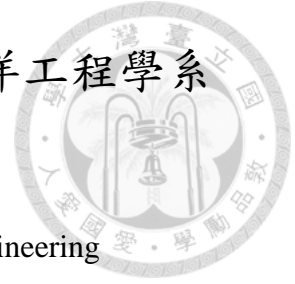
博士論文

Department of Engineering Science and Ocean Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Doctoral Dissertation



區域波浪系集預報系統建立及其應用之研究

Establishment and application of regional wave ensemble  
forecast system

張恆文

Heng-Wen Chang

指導教授：林銘崇 博士

Advisor: Ming-Chung Lin, Ph.D.

中華民國 107 年 1 月

January 2018

國立臺灣大學博士學位論文  
口試委員會審定書



區域波浪系集預測系統建立及其應用之研究  
Establishment and application study of regional wave  
ensemble forecast system

本論文係張恆文君（D94525005）在國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系完成之博士學位論文，於民國 107 年 1 月 3 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

林 銘 崇

（指導教授）

梁乃匡

蔡 清 標

丁肇隆

蕭 松 山

滕春蕊

江允智

系主任

江允智

## 誌謝

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」四年計畫及能源局「千架海陸風力機設置推動及關鍵技術研發計畫」之研究成果，承蒙中央氣象局及能源局經費之補助，與中央氣象局洪景山博士、中央氣象局張惠玲博士、工研院同事馬名軍研究員、顏厥正博士等之協助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。同時感謝船舶中心許朝敏博士之細心叮嚀與氣象局海象測報中心滕春慈主任、朱啟豪課長、施景峰先生之協助。

## 中文摘要

關鍵詞:系集預報、機率預報、系集分歧、氣候窗、運維

系集預報的目的是為了彌補單一模式預報的不足且能包含模式的不確定性，同時能夠提供機率性預報。發展系集預報系統，需提供有效且合理的系集預報成員，以產生足夠的系集分歧，據以最大程度涵蓋可能的發生機率，同時需透過量化系集預報指標，來檢視系集預報系統之預報能力和可信度。本研究引用氣象系集的概念，建置2層的多重網格 NWW3 波浪模式，使用中央氣象局 WRF 系集模式之 20 組系集風場來建置作業化系集預報系統，並利用氣象局設置之波浪浮標觀測資料當作真值，驗證其系集成員的分歧度是否足夠及可否最大程度涵蓋可能的發生機率，並檢視系統是否具備預報能力與區分事件發生及未發生的能力。

研究結果顯示，在系集成員的組成部分，使用風驅動公式 Tolman 之設定參數對於深海測站而言，在季風期有較佳的預報能力，但在颱風時期則呈現偏大的趨勢；而使用 WAM4 公式則剛好相反，顯示無法以一個公式同時滿足二種風況。對此，本研究首創提出之二種風場輸入公式組合方式以涵蓋季風及颱風的波浪特性（10 個系集使用 Tolman 公式，10 個系集使用 WAM4 公式），結果顯示此種方式可保留各個風場輸入公式在不同風場狀況下的優點，同時提高 SPRD，拉近 RMSE 及 SPRD 的差距，使得系集系統已較使用單一公式能掌握模式的不確定性。在系集預報系統的執行力分析部分，透過 Reliability diagram、BSS 及 ROC 分析，顯示系統針對深海測站已具備預報能力及區別事件發生及未發生的預報能力，同時優於氣候平均及單一決定性預報，亦堪與 NCEP 的系集系統相較之，換言之，本研究研發之區域性作業化波浪系集預報系統已具有預報能力，可以提供波浪的機率預報。然而對於近域部分，受限於網格太大導致無法解析近岸複雜地形而導致差異較大的現象，將先以提高網格解析度在下一步進行改善之。

系集預報的應用研究包括作業化系集預報系統的建置及機率預報用於海上施工的決策。系集預報系統已作業化運作，每天四次、每次預報 72 小時產出波浪機率預報，輸出包括點輸出及面輸出，點輸出使用盒鬚圖，並於三天後另產出即時驗證盒鬚圖，面輸出包括系集成員圖、系集平均、系集平均及系集分歧、機率分布圖、Spaghetti 圖、10%超越機率圖等，可供不同的使用需求使用。而機率預報結合蒙地卡羅法，可分析某一施工序在波高、風速及施工所需時間等限制條件下之

機率預報，提供作為施工決策之參考，而使用介面可以更改接收不同的系集預報來源，提供快速的施工延時資訊，便利施工決策參考。



## 英文摘要



Key Words : Ensemble forecast, Probability forecast, Ensemble spread, Weather window, Operation and maintenance,

A wave ensemble forecast system is being developed based on the NOAA WAVEWATCH III (NWW3) two nesting multi-grid model over Taiwan area. The ensemble system consisted of 20 ensemble members and was set with spatial resolutions of  $0.25^\circ$  and  $0.1^\circ$ . The wind forcing is coming from the WRF-based ensemble forecast system (WEPS) 10m wind fields of Central Weather Bureau (CWB) with spatial resolutions of 45km and 15km. The cycle initial condition of each wave ensemble member from the previous run of the same ensemble member is applied to generate a history perturbation of swell. The objectives of this work are to verify the impact of different wind forcing formulas, to find the better composition of ensemble members, and to evaluate the forecast capacity of resulting ensemble forecast system. We first proposed the combination of using two built-in wind forcing formulas to form twenty ensemble members (each for ten members), which can reserve the advantages of different formulas under various wind fields (monsoon and typhoon period), increase the average ensemble spread and decrease the difference between the root mean square error and average ensemble spread based on the truth value at open seas. With Reliability diagram, Brier Skill Score and Relative Operating Characteristic analyses of assessing the quality of forecasts, the ensemble system has good forecast capacity and discriminate between the events and non-events. It also has better forecast skill than the operational deterministic forecast, and can be comparable with NCEP global ensemble system. Consequently, the wave ensemble forecast system is approved to have the skill in terms of probability forecast at open sea and some coast areas around Taiwan.

Nevertheless the overestimation near some coast areas could be improved by increasing the grid resolution and resolving nearshore wave simulation to reduce RMSE. For the underestimation of SPRD we intend to add perturbation at low frequency swell as initial condition to increase SPRD in the near future.

Application of ensemble forecast includes the establishment of operational wave ensemble forecast system and probability forecast on decision making of marine installation. The operational wave ensemble forecast system performs 4 times daily and

72 hours forecast for each time. Products of ensemble forecast system involve point output and gridded output. The point output utilizes boxplot to show ensembles. The gridded output contains ensemble members, ensemble means and spread, 10% exceeding probabilities, probability and spaghetti diagrams at different thresholds every three hours. Ensemble forecast combined with monte-carlo method could provide the probability of operation under the thresholds of wave height, wind speed and duration of operation for decision making.

# 目 錄



口試委員會審定書 .....	I
誌謝 .....	II
中文摘要 .....	III
英文摘要 .....	V
目 錄 .....	VII
圖目錄 .....	VIII
表目錄 .....	XI
符號表 .....	XII
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究動機及研究目的 .....	1
1.2 系集預報 .....	3
1.3 文獻回顧 .....	5
1.4 研究流程 .....	16
第二章 波浪系集預報系統建置 .....	19
2.1 波浪數值模式 .....	19
2.2 觀測資料及系集分析方法 .....	31
2.3 模式建置及計算範圍分析 .....	38
第三章 波浪系集預報系統驗證分析 .....	50
3.1 不確定度分析 .....	50
3.2 波浪系集成員分析 .....	52
3.3 波浪系集預報系統執行力分析 .....	68
第四章 應用研究 .....	77
4.1 波浪系集預報系統應用 .....	77
4.2 結合機率之施工期程判釋 .....	87
第五章 結論與建議 .....	94
參考文獻 .....	97
附件一 系集分析相關繪圖 .....	102

## 圖目錄



圖 1、國內三天漁業氣象預報 .....	2
圖 2、中央氣象局藍色公路預報系統 .....	3
圖 3、PM 波譜之風速與波高、週期之關係圖 .....	7
圖 4、中央氣象局天氣系集預報系統架構圖 .....	10
圖 5、中央氣象局數值天氣系集預報系統計算範圍 .....	11
圖 6、波高的系集平均及系集分歧 .....	12
圖 7、波高 1m 的 Spaghetti 分布 .....	13
圖 8、波高 9m 的 Spaghetti 分布 .....	13
圖 9、波高大於 1m 的機率分布 .....	14
圖 10、波高大於 9m 的機率分布 .....	14
圖 11、盒鬚圖的定義方式 .....	15
圖 12、Wave EPSgram 單點系集預報與單一決定性模式預報比較圖(北海,18 July 2011, 12 UTC) .....	16
圖 13、系集預報之建置流程 .....	18
圖 14、大網格格點・及邊界(實線)與小網格格點。及邊界(虛線)示意圖 .....	24
圖 15、能量波譜切割方式示意圖 .....	25
圖 16、示性波高、波向(左)及主週期(右)分布圖(NCEP 風場) .....	25
圖 17、風浪波高、波向(左)及風浪週期(右)分布圖(NCEP 風場) .....	26
圖 18、主湧波高、波向(左)及主湧週期(右)分布圖(NCEP 風場) .....	26
圖 19、次湧波高、波向(左)及次湧週期(右)分布圖(NCEP 風場) .....	27
圖 20、不同 NWW3 風浪輸入公式之波譜分布 .....	27
圖 21、不同 NWW3 風浪輸入公式之波高、週期歷時分布 .....	28
圖 22、分步法求解流程 .....	30
圖 23、GSE 範例 .....	30
圖 24、波浪觀測站點位分布圖 .....	33
圖 25、Talagrand Rank Histogram .....	34
圖 26、Reliability diagram .....	36
圖 27、區別事件發生及未發生示意圖 .....	37
圖 28、預報與觀測事件發生次數 2×2 列聯表 .....	37
圖 29、ROC 示意圖 .....	38
圖 30、計算範圍水深及巢狀網格範圍 .....	39
圖 31、10 公里網格之地形水深 .....	39
圖 32、島嶼阻隔效應示意圖，・為計算網格點，虛線為網格點邊界 .....	40
圖 33、小琉球島嶼在 Google earth(左)及在 GSHHS(右)的經度偏差(120.35°) ...	41
圖 34、西北太平洋颱風路徑圖(1951-2017) .....	43
圖 35、NOAA 波浪模式 NWW3 北太平洋預報波高分布圖 .....	43

圖 36、未發布颱風警報之彩雲颱風 .....	44
圖 37、72 小時預報(2016/12/03 00)之波高分布及三層巢狀網格計算範圍 .....	44
圖 38、第二層巢網格 72 小時預報之波高比較圖(左：4 層，右：3 層) .....	45
圖 39、第三層巢網格 72 小時預報之波高比較圖(左：4 層，右：3 層) .....	45
圖 40、第四層巢網格 72 小時預報之波高比較圖(左：4 層，右：3 層) .....	46
圖 41、示性波高(上)及週期 $T_{m02}$ (下)在不同位置之歷時比較圖 .....	46
圖 42、第二層巢網格(2015/10/08 00)之波高比較圖(左：4 層，右：3 層) .....	47
圖 43、第二層巢網格(2015/10/08 00)之週期比較圖(左：4 層，右：3 層) .....	47
圖 44、第二層巢網格(2015/10/08 00)之尖峰週期比較圖(左：4 層，右：3 層) ...	47
圖 45、第二層巢網格(2015/10/08 00)之波高比較圖(3 層-4 層) .....	48
圖 46、台東外洋測站之波高及週期比較圖(上:波高，下:週期) .....	49
圖 47、東沙島測站之波高及週期比較圖(上:波高，下:週期) .....	49
圖 48、2012/1~2 月 $U_{10}$ 及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH 下：RMSE 及 SPRD)(Tolman) .....	60
圖 49、2012/8 月 $U_{10}$ 及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH 下： RMSE 及 SPRD)(Tolman) .....	61
圖 50、2012/1~2 月 $U_{10}$ 及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH 下：RMSE 及 SPRD)(WAM4) .....	62
圖 51、2012/8 月 $U_{10}$ 及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH 下： RMSE 及 SPRD)(WAM4) .....	63
圖 52、2012/1~2 月 $U_{10}$ 及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH 下：RMSE 及 SPRD)(10T10W) .....	64
圖 53、2012/8 月 $U_{10}$ 及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH 下： RMSE 及 SPRD)(10T10W) .....	65
圖 54、2012/1~2 月 $U_{10}$ 及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH 下：RMSE 及 SPRD)(10W10T) .....	66
圖 55、2012/8 月 $U_{10}$ 及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH 下： RMSE 及 SPRD)(10W10T) .....	67
圖 56、作業化系集多重網格之計算範圍 .....	70
圖 57、第二層網格之水深分布 .....	71
圖 58、X 方向之障礙物分布 .....	71
圖 59、Y 方向之障礙物分布 .....	72
圖 60、72 小時預報 Reliability diagram(左： $H_s > 3m$ 右： $H_s > 2m$ )(台東外洋及東沙) .....	72
圖 61、72 小時預報 Reliability diagram(左： $U_{10} > 12m/s$ 右： $U_{10} > 10m/s$ )(台東外洋 及東沙) .....	73
圖 62、TRH 分布(左： $H_s$ 右： $U_{10}$ )(台東外洋及東沙) .....	73
圖 63、72 小時預報 Reliability diagram(左： $H_s > 3m$ 右： $H_s > 2m$ )(所有測站) .....	73

圖 64、72 小時預報 Reliability diagram(左： $U_{10}>12\text{m/s}$ 右： $U_{10}>10\text{m/s}$ )(所有測站)	74
圖 65、72 小時預報 Reliability diagram(左： $H_s>3\text{m}$ 右： $H_s>2\text{m}$ )(8 個測站)	74
圖 66、Brier Skill Score (以觀測值當參考指標)	74
圖 67、Brier Skill Score (以 ITRI 的預報為參考指標)	75
圖 68、ROC 曲線( $H_s>3\text{m}$ 及 $H_s>2\text{m}$ )(左：台東外洋及東沙 右：所有測站)	75
圖 69、ROC 曲線( $U_{10}>12\text{m/s}$ 及 $U_{10}>10\text{m/s}$ )(左：台東外洋及東沙 右：所有測站)	75
圖 70、波高及風速之 RMSE(紅色)及 SPRD(黑色)分布圖(台東外洋及東沙測站)	76
圖 71、系集預報系統規劃項目	78
圖 72、台東外洋波高盒鬚圖(上：預報波高 中：預報波向 下：驗證預報波高)	78
圖 73、台東外洋週期盒鬚圖(上：預報週期 下：驗證預報週期)	79
圖 74、台東外洋風速盒鬚圖(上：預報風速 下：預報風向)	79
圖 75、20 個系集成員波高分布(0.25 度網格)	80
圖 76、20 個系集成員波高分布(0.1 度網格)	81
圖 77、波高系集平均分布圖(上：0.25 度網格下：0.1 度網格)	82
圖 78、波高系集平均(等高線)及系集分歧分布圖(上：0.25 度網格下：0.1 度網格)	83
圖 79、波高大於 2m 之機率分布圖(上：0.25 度網格下：0.1 度網格)	84
圖 80、波高 2m 之 Spaghetti 分布圖(上：0.25 度網格下：0.1 度網格)	85
圖 81、10%超越機率之波高分布圖(上：0.25 度網格下：0.1 度網格)	86
圖 82、國內三座離岸風速塔及二座風機(左上：福海彰化風速塔 右上：海洋苗栗風速塔 左上：台電彰化風速塔 右下：海洋苗栗風力機)	89
圖 83、離岸風電的標準風機安裝流程	90
圖 84、離岸作業風險評估蒙地卡羅模擬示範	90
圖 85、離岸施工運維決策支援系統	91
圖 86、離岸施工運維決策支援系統手機介面	91

## 表目錄

表 1、決定性預報與機率性預報之差異 .....	2
表 2、蒲福風級表 .....	6
表 3、相位解析模式及相位平均模式之優缺點比較表 .....	8
表 4、中央氣象局天氣系集預報產品種類表 .....	10
表 5、決定性預報與系集預報之品質特性檢視指標 .....	17
表 6、NWW3 模式風場輸入及能量消散公式 .....	23
表 7、波浪觀測站 .....	33
表 8、大氣及波浪模式不確定性因素比較表 .....	52
表 9、2012/8 颱風一覽表 .....	59
表 10、參加離岸風力發電示範獎勵辦法之工程概述(至 2016 年止).....	89
表 11、波高超過 1.1m 之機率(新竹 2016/7/5 00:00 預報).....	92
表 12、風速超過 15m/s 之機率(新竹 2016/7/5 00:00 預報) .....	93

# 符號表



$B$	蒲福風級數
$V$	風速(m/sec)
$\alpha$	Phillips constant
$f$	頻率(1/sec)
$f_m$	尖峰頻率(1/sec)
$g$	重力加速度(m/sec <sup>2</sup> )
$S$	能量波譜(m <sup>3</sup> /sec)
$N(k, \theta)$	波動密度能譜(m <sup>3</sup> ·sec /°)
$C_g$	波能傳遞速度、群波速度(m/sec)
$\sigma$	波頻(1/sec)
$R$	地球半徑(m)
$\theta$	波向(°)
$\Delta\theta$	波向解析度(°)
$\theta_w$	風向(°)
$k$	波數(1/m)
$\phi$	緯度(°)
$\lambda$	經度(°)
$U$	海流流速(m/sec)
$U_\phi$	海流流速在緯度方向之分量(m/sec)
$U_\lambda$	海流流速在經度方向之分量(m/sec)
$t$	時間(sec)
$\Delta t_d$	波浪傳遞之時間間隔(sec)
$\Delta x$	X 或經度方向計算網格大小
$\Delta y$	Y 或緯度方向計算網格大小
$d$	水深(m)
$m$	垂直波浪前進方向
$s$	波浪前進方向
$D_{\phi\phi}$	在緯度方向之擴散係數(m <sup>2</sup> /sec)
$D_{\lambda\lambda}$	在經度方向之擴散係數(m <sup>2</sup> /sec)
$D_{\lambda\phi}$	在交錯方向之擴散係數(m <sup>2</sup> /sec)
$D_{ss}$	在波浪前進方向之擴散係數(m <sup>2</sup> /sec)
$D_{nn}$	在波峰方向之擴散係數(m <sup>2</sup> /sec)
$\gamma_{a,s}$	在波浪前進方向之長度係數
$\gamma_{a,n}$	在波峰方向之長度係數
$T_s$	湧浪生成開始之傳遞時間(sec)
$E_{l,i}$	大網格之能量
$E_{h,j}$	小網格之能量
$\omega_{i,j}$	權重
$\rho_a$	空氣密度(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_w$	海水密度(kg/m <sup>3</sup> )
$u_*$	風摩擦速度(m/sec)

$u_{10}$	10m 高風速(m/sec)
$G$	過濾函數
$C_{in}(=0.25)$	固定係數
$C_{ds}(=-2.36e-5)$	消散係數
$\beta$	無因次風波交互作用參數
$\beta_{max}$	無因次風成長參數
$\kappa(=0.4)$	Von karman 係數
$c$	相位速度(m/sec)
$P_j$	大於門檻之預報機率
$o_j$	大於門檻之觀測機率
$\bar{o}$	氣候平均機率
$N$	樣本數
$n_k$	每個機率分級之樣本數
$K$	機率分級
BS	Brier Score
BSS	Brier Skill Score
$BS_{ref}$	參考 Brier Score(氣候平均或其他模式)
$BS_{perfect}$	完美 Brier Score
$a$	命中(hits)
$b$	假警報(false alarm)
$c$	錯失(misses)
$d$	觀測無預報亦無(correct rejects)
Hi	命中率
Fi	誤報率



# 第一章 緒論



## 1.1 研究動機及研究目的

近幾年來，台灣四週海域的活動有增加的趨勢，除了海上遊憩活動逐漸增加外，藍色公路亦發展迅速，而離岸風力發電的推動，使得海上施工漸漸頻繁，加上既有航行船隻的管制出港、海上勤務、軍事、海上研究及漁業捕撈行為等，然而海上天候變化迅速，潛藏著許多的危機，依據英國勞氏驗船協會之「海難回顧」(Casualty Return, Lloyd's Registry of Shipping)統計資料顯示，台灣海域被列為中度海上風險環境(Moderate Risk Environment) (林欽隆等，2008)。另根據海巡署之相關統計數據資料(2005-2014)發現，近年台灣海域商船及漁船在海上發生海難事故每年約有一百七十多件，遭難人數平均每年有六百五十人左右(海巡署網站，2017)，因此如何事先掌握海氣象(met-ocean)資訊，以便採取適當因應的避險措施，就顯得十分重要，而這亦凸顯出海氣象預報資訊的殷切需求及重要性。

過去海上的海氣象條件只有漁業氣象可供參考(圖 1)，目前已有氣象局的藍色公路預報系統提供相關資訊(圖 2)，該系統自 2011 年 2 月 1 日開始啟動，相關業者、漁民及經常登上研究船隻的學者反應，對該服務的詳細資訊與準確度給予肯定，2015 年藍色公路海氣象預報航線已增加到 23 條，並延長預報時間到 48 小時及增加波浪週期的預報，2016 年再新增 1 條達到 24 條，顯示藍色公路海氣象資訊系統將會更為社會大眾所使用與依賴，在提升航安及推廣海域活動方面發揮功效。而離岸風力發電需要長期在海上施工，每一項工程有其限制的海氣象條件及工作時間，因此更依賴海氣象預報資料來進行工作的調度，而每一個決定更攸關施工安全及施工成本，與背後龐大的投資行為及社會成本。

然而面對以上如此嚴厲的需求(牽涉到人民生命財產安全、龐大的投資行為等)，數值預報受到物理現象參數化、數值方法等的限制下，且在缺乏足夠的觀測資料情形下，起始值無法正確得知，亦使得數值預報仍然存在著許多誤差，且這些誤差與預報時間成正比(即預報誤差會隨時間而增加)，這就是預報的不確定性，而對於使用者或資料提供者而言，單一決定性(deterministic)的數值預報已逐漸無法滿足需求，取而代之機率性的預報指引給了大眾自我衡量及體驗的空間，也讓一般民眾體會到自然環境多變無法掌握的特性(例如降雨機率，如表 1)，而這樣的需求不僅發生在氣象領域上，在海象領域方面亦是如此。預報改善的方法除了

模式的再精進更新外(例如新版的 NWW3(NOAA WAVEWATCH III®) 5.16 版於 2016 年公開發表, WRF(Weather Research and Forecasting) 3.9.1.1 版於 2017 年 8 月 28 日公開發表), 預報作業常會採取一些措施, 例如結合即時觀測資料的資料同化(data assimilation), 結合多種預報成員的系集預報(ensemble forecast)等。

本研究的目的是在引用氣象系集的概念, 建置作業化(operational)區域性的波浪系集預報系統, 提供機率性的預報, 以強化預報的可靠度, 期能更準確地預報台灣四周海域之實際波浪狀況, 並隨時提供海域觀光遊憩、藍色公路、防救災、海上施工及航行安全之應用, 使預報資訊充分發揮功效。

表1、決定性預報與機率性預報之差異

明確的(Categorical)	機率的(Probabilistic)
是/否	設定0到100%之間的值
驗證一個單一事件	需要很多案例進行驗證, 其中 X%機率的預測被預報出來
例如: 明天台北的最高溫度將在 30°	例如: 明天台北有 30%的降雨

資料來源: Malaquías Peña, 2014

首頁 > 預報 > 漁業氣象 > 3天漁業

發布時間: 08/06 10:30

有效時間: 08/06 12:00~08/08 24:00



圖1、國內三天漁業氣象預報



圖2、中央氣象局藍色公路預報系統

## 1.2 系集預報

系集預報基本上就是二個或以上的預報集合，系集預報源自於數值天氣預報領域，數值天氣預報係根據地球系統運行的原理建立模型，以已知觀測建立起點，利用電腦推算未來天氣的演變，但由於觀測資料的不足，無法真正得知當下實際的天氣是如何，且由於天氣非線性之數值預報過程，一開始的微小誤差(兩個初始狀態的差距)會隨積分時間增加而擴大，有可能進而產生蝴蝶效應(butterfly effect)。為了克服初始微小誤差對數值天氣預報的影響，氣象學家發展出系集的概念。所謂天氣系集預報是先製造一組非常靠近的初始狀態，然後以相同的數值方法和數值模式分別計算各初始值的天氣演變，接著從各預測結果分散(disperse)的情況，估算初始誤差對天氣預報準確度的影響，進而從這些預報的統計平均值(例如算術平均)取代單一決定性預報，作為天氣預報的結果，因此系集預測系統是為了彌補單一模式預報的不足，其目的是藉由整合許多系集數值預測來預測氣象或氣候事件發生的可能性，期望整合後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**機率預報**。1990 年以後，許多國家天氣預報單位，陸續採用系集方法進行天氣預報，相關的研究也顯示系集預報的確可以增進天氣預報的能力(李志昕等，2010，2011)。

系集預報包括許多系集成員，而這些不同系集成員的組成可能由於輕微的起始條件不同、邊界條件不同、不同模式參數設定或是使用不同的模式系統，其中

使用不同模式的系集統稱為多重模式系集預測系統(multimodel EPS)。如果系集預測系統是由單一模式來提供多個系集成員的組成(本研究採用)，而此系集成員的組成係來自於些微不同的起始條件，則這些初始狀態均被視為同等實際可行的(equally realistic)，故每個系集成員對於預報事件的可能性均具有相同的權重。

而多重模式系集預測系統，因其來自不同的模式，自然權重必定來自於不同模式的執行力，同時對於不同的時間及空間尺度有許多決定權重的方法。例如 Casanova & Ahrens(2009)針對短期小範圍天氣及整體季節氣溫變化的系集系統提出簡易執行力權重(simple skill-based weighting)、Bayesian 模式平均(Bayesian model averaging, BMA)等方法，BMA 是一種預報系集後處理的統計方法，主要在建立與氣象相關變數的預報機率密度函數，此預報機率密度函數係利用個別偏差修正後的預測所產生的個別密度方程式來估算權重，此方法的前提係假設氣溫預測為常態分布，而所有模式的誤差變異數是相等的，因此可以用最大概似法(maximum likelihood)來決定權重和變異數。

Chan(2005)利用四個作業化的天氣模式 ECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecasts)、EGRM (United Kingdom Met Office)、JMA(Japan Meteorological Agency)、NCEP(National Centers for Environmental Prediction)等模式，針對多重模式系集預測系統，提出分層(stratified)及不分層(unstratified)權重的方式，討論颱風路徑的預報。不分層權重部分，其比較相同權重、過去最好權重(post-year best weighting, PYBW)、去年最好權重(last-year best weighting, LYBW)等方式，結果顯示，某些系集模式表現很好對於整體預報一直都扮演有較佳的角色，故在利用 PYBW 的權重方式會有較佳的系集預報成果，此亦為最佳的不分層權重方式，而使用 LYBW，其基於模式及全球氣候與去年相同或相似的假設不一定成立，故此種方法在所有作業化系統中都不建議使用。分層權重部分，則採用不同模式在不同時間與觀測值的距離誤差當作權重( $1/\text{距離誤差}$ )，包括 00 及+12 預報時，結果顯示使用 00 時之距離權重對於預測並無任何改善，使用+12 則有些許的改善。其認為颱風路徑的誤差並非僅跟距離有關，跟角度及速率(向量)亦有關係，其提出不同的修正機制，結果顯示僅對初期預測做修正的方式且後續對+12 的位置作修正可以得到較佳的結果。Tebaldi & Knutti (2007)亦使用多重模式系集預測來探討機率氣候預測。



## 1.3 文獻回顧

### 1.3.1 波浪預報

波浪預報的發展已從過去以經驗公式推算的方式，例如蒲福風級(Beaufort scale)、SMB 示性波(significant wave height)法、PM 波譜法、JONSWAP(Joint North Sea Wave Project)波譜法，發展到利用波能傳遞方程式為控制方程式的波浪數值模式(陳炫杉，1994)。

#### (1)蒲福風級

蒲福風級是由愛爾蘭出生的英國海軍少將，同時也是海道測量員及探險家的法蘭西斯·蒲福(Francis Beaufort)於 1805 年所發明。1874 年國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)，聯合國世界氣象組織(World Meteorological Organization, WMO)的前身，也開始採用增加了更多內容的蒲福風級表做為國際間的天氣預報使用。1921 年，喬治·克拉克·辛普森(George Clarke Simpson)開始了蒲福風級與實際風速對應關係的研究，1926 年這項研究在維也納的國際氣象組織會議上得到了認可，蒲福風級從此正式開始有了對應的風速數值標準。1927 年德國一位船長 P·彼得森(P. Peterson)進一步提出了蒲福風級對照開放海域洋面狀況的描述(台灣颱風資訊中心)。實際風速與蒲福風級之經驗關係式為：

$$V = 0.836 * (B^{1.5}) \quad (1)$$

$B$  為蒲福風級數  $V$  為風速(m/sec)。

表 2 為台灣中央氣象局現行的風級標準，中央氣象局採用的標準等同於 1946 年由 WMO 所公布的國際標準。

#### (2)SMB 示性波法

SMB 法係由 Sverdrup-Munk-Bretschneider (1952)所提出之風浪推算經驗公式。SMB 法推算波浪所考量的因素，包括風速、吹風距離及吹風歷時，屬於穩定之波浪推算，其應用範圍可分為有限風域、有限歷時及完全成熟等三種不同的情況。

因風速與風向可能逐時改變，在應用上如何找出具代表性之單一風速及吹風歷時來推算波浪是一大難題。此因素使得 SMB 法僅能應用於較具一般性的風浪推算(如一天的最大或平均波浪)，並不能進行逐時的波浪推算。此外外海風場仍屬未知條件，如何決定吹風距離(風域)之長度亦是一大難題，更使得推

算結果具不確定性(吳南靖等，2005)(郭一羽等，2001)。

表2、蒲福風級表

級數	國際標準 (由 WMO 公布)					香港標準		風浪對照		
	名稱	風速				名稱	風速 km/h	名稱	一般	最大
		m/s	km/h	knot	mph				M	
0	無風 Calm	0 - 0.2	< 1	< 1	< 1	無風	< 2	—	—	—
1	軟風 Light air	0.3 - 1.5	1 - 5	1 - 3	1 - 3	輕微	2 - 6	微波	0.1	0.1
2	輕風 Light breeze	1.6 - 3.3	6 - 11	4 - 6	4 - 7		7 - 12		0.2	0.3
3	微風 Gentle breeze	3.4 - 5.4	12 - 19	7 - 10	8 - 12	和緩	13 - 19	小波	0.6	1.0
4	和風 Moderate breeze	5.5 - 7.9	20 - 28	11 - 16	13 - 18		20 - 30	小浪	1.0	1.5
5	清風 Fresh breeze	8.0 - 10.7	29 - 38	17 - 21	19 - 24	清勁	31 - 40	中浪	2.0	2.5
6	強風 Strong breeze	10.8 - 13.8	39 - 49	22 - 27	25 - 31	強風	41 - 51	大浪	3.0	4.0
7	疾風 Near gale	13.9 - 17.1	50 - 61	28 - 33	32 - 38		52 - 62		4.0	5.5
8	大風 Gale	17.2 - 20.7	62 - 74	34 - 40	39 - 46	烈風	63 - 75	巨浪	6.0	7.5
9	烈風 Strong gale	20.8 - 24.4	75 - 88	41 - 47	47 - 54		76 - 87	猛浪	7.0	10.0
10	暴風 Storm	24.5 - 28.4	89 - 102	48 - 55	55 - 63	暴風	88 - 103	狂濤	9.0	12.5
11	狂風 Violent storm	28.5 - 32.6	103 - 117	56 - 63	64 - 72		104 - 117		11.5	16.0
12	颶風 Hurricane	32.7 - 36.9	118 - 133	64 - 71	73 - 82	颶風	118 - 135		14.0	—
13	—	37.0 - 41.4	134 - 149	72 - 80	83 - 92				—	—
14	—	41.5 - 46.1	150 - 166	81 - 89	93 - 103				—	—
15	—	46.2 - 50.9	167 - 183	90 - 99	104 - 114				—	—
16	—	51.0 - 56.0	184 - 201	100 - 108	115 - 125				—	—
17	—	56.1 - 61.2	202 - 220	109 - 118	126 - 136				—	—

### (3)PM 波譜法

PM 波譜法是由 Pierson and Moskowitz(1964)利用英國氣象船上的加速度計量測波浪，配合船上 19.5m 高的風速計，提出在北大西洋具無限吹送距離下的標準型風浪 PM 波譜，並建立成熟風浪與風速的關係，而波譜型式如式(2)所示。



$$S(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f_m}{f}\right)^4\right) \quad (2)$$

其中 $\alpha$ 為 Phillips constant， $f_m$ 尖峰頻率。而尖峰頻率與風速成反比關係，可以據此推算波高及週期，如圖 3所示。

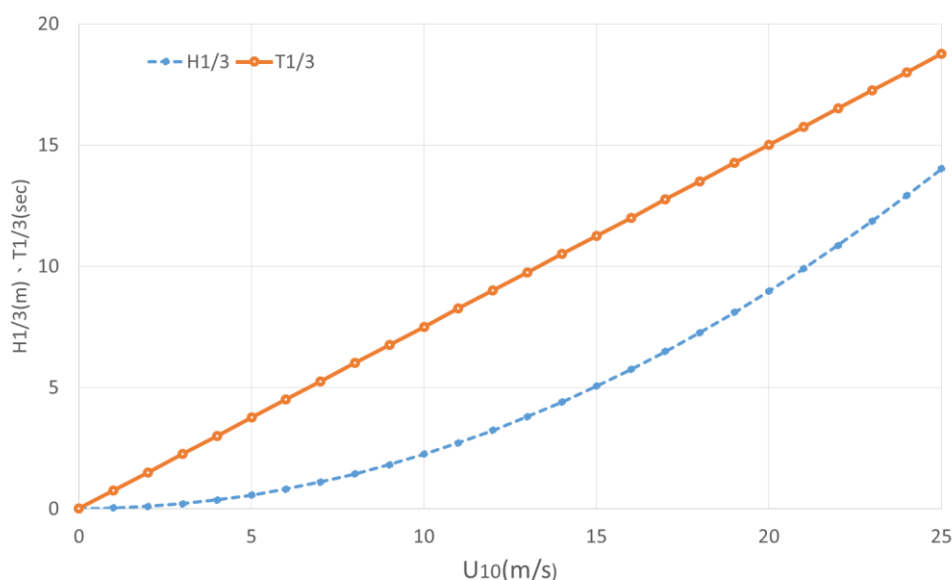


圖3、PM 波譜之風速與波高、週期之關係圖

#### (4) JONSWAP 波譜法

Hasselmann et al. (1973)在北海執行 JONSWAP 觀測計畫時，發現波浪從未是成熟風浪，並且持續在進行波和波的非線性交互作用，因此修正原 PM 波譜型態乘上尖端促進因子，使其較接近量測值，亦使得波譜能量在尖峰頻率上較 PM 波譜高，而尖峰頻率除了與風速有關外，還與風域的大小有關。

#### (5) 波浪數值預報模式

波浪模式可以概分為相位解析模式(phase-resolving)及相位平均模式(phase-averaged)，前者求解逐一波浪(wave-by-wave)之傳遞現象，需要極高的解析度，可以求解波浪的折射及繞射現象，但無法輸入風及只能考慮局部有限的碎波，例如使用深度平均的淺水方程式(Depth averaged shallow water equations)、緩坡方程式(mild slope equation)、Boussinesq equations 等；後者求解方向波譜之傳遞方程式(action density balance equation)，可以考慮風輸入之波浪在大範圍的傳輸行為，但無法解析單一波的現象，表 3 為相位解析模式及相位平均模式之優缺點比較。相位平均模式常被用來當作波浪預報之用，目前

已經發展到第三代的波浪模式，第一代和第二代波浪模式係使用觀察波譜和持續的波譜能級來推斷物理過程的影響，而第三代則使用參數化來解析物理過程，使用任意波譜形式，WAM(Wave Model)、NWW3、SWAN(Simulating Waves Nearshore)均屬於第三代之相位平均模式，其中 WAM 是最原始的波浪模式，NWW3 和 SWAN 為後來衍生的自由下載模式，分別由 NCEP 和 Delft 科技大學(university of technology)發展維護。WAM 和 NWW3 原主要針對大洋波浪的模擬，SWAN 則主要針對近岸波浪的模擬，唯目前呈現互相擴展的趨勢，即原屬於大洋的模式也發展近岸波浪的傳遞機制，例如三波交互作用、反射等，而原屬於近岸模擬則擴展使用機制至大洋模擬等(但因為使用隱式法求解方程式，使得模擬深海區的波浪較缺乏效率)。

表3、相位解析模式及相位平均模式之優缺點比較表

相位解析模式	相位平均模式
優點	優點
<ul style="list-style-type: none"> <li>•可正確代表非線性交互作用</li> <li>•起始值位移問題</li> <li>•可考慮非週期性的空間傳遞過程(例如繞射)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•能量在空間和時間的變化相對較慢，故計算較不密集</li> <li>•可提供海上代表波浪之訊息</li> <li>•許多海上的波浪演變過程的了解僅止於相位平均的統計意義</li> </ul>
缺點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> <li>•計算密集</li> <li>•訊息超載(對隨機海上波浪而言並不實際)</li> <li>•不容易近似深水到淺水之波浪傳遞過程</li> <li>•許多物理過程無法被解析(例如風的作用)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•無法考慮具相位意義的傳遞過程(例如繞射、淺水物理)</li> <li>•對於非週期性之起始值問題並不適用(例如海嘯)</li> </ul>

資料來源: NCEP 與 CWB 2017NWW3 訓練課程

### 1.3.2 波浪系集預報

目前有關波浪系集預報的研究較少，主要集中在美國 NCEP 和歐洲 ECMWF 兩大陣營，而國際上大氣方面的數值天氣系集預報系統發展較為快速，例如 ECMWF、NCEP、UK Met Office、Météo France、Environment Canada、Japan Meteorological Agency、Australian Bureau of Meteorology、China Meteorological Administration、Korea Meteorological Administration、CPTEC (Brazil)等，國內氣象局及國研院台灣颱風洪水研究中心亦有相關發展，以下僅針對中央氣象局數值天

氣系集預報系統，及 NCEP、ECMWF 之數值波浪系集預報系統，分述如下：

(1) 中央氣象局數值天氣系集預報系統

中央氣象局於 1983 年開始進行數值天氣預報(numerical weather prediction, NWP)，2010 年開始進行系集天氣預報的研究(李志昕等，2010，2011)，2012 年建立了一套區域天氣系集預報系統，系統架構圖參見圖 4，此系統使用 WRF 三維變分資料同化技術製造初始場擾動，再搭配邊界擾動和物理參數法擾動，藉由校驗系統產生有效且合理的系集預報成員(ensemble member)以及預報產品(表 4)。使用之 WRF 版本為 WRF v3.1.1 版；WPS(WRF preprocessing system) 版本為 WPS v3.2；WRF 三維變分資料同化系統則使用 WRFDA(WRF Data Assimilation)v3.2 版。系統使用三層巢狀網格(圖 5)，水平解析度設定為 45/15/5 km，垂直解析度設定為 45 層，模式頂層為 30 hPa。此系統每 6 小時會產生 20 個系集預報成員，進行 72 小時預報(每 3 小時輸出一)。其中初始擾動採用 NCEP 之 GFS (Global Forecast System)資料，透過 WRF 三維變分法加入隨機亂數，產生 20 組擾動初始場；而邊界擾動則是由 NCEP 全球系集預報系統(Global Ensemble Forecast System, GEFS)獲得 10 組擾動邊界條件；模式擾動是由不同之模式物理參數法之設定產生 20 組物理參數。

表4、中央氣象局天氣系集預報產品種類表

簡稱	名稱	說明
MN	Mean	系集平均
SD	Spread	離散度
SP	Spaghetti diagram	每個系集成員之某個參考值的等值線
MD	Median Value	每個格點上，所有系集成員的中位數
MDXN	Median Max and Min	中位數的延伸產品
PM	Probability-Matched Mean	結合 PDFs (Probability Distribution Functions) 所計算出來的系集平均
PR	Probability	發生某個事件或到達某個閾值的機率
CPR	Conditional Probability	在某一事件 A 的情況下，發生事件 B 的機率
MAX	Maximum	每個格點上，所有系集成員預報的最大值／最小值
MIN	Minimum	

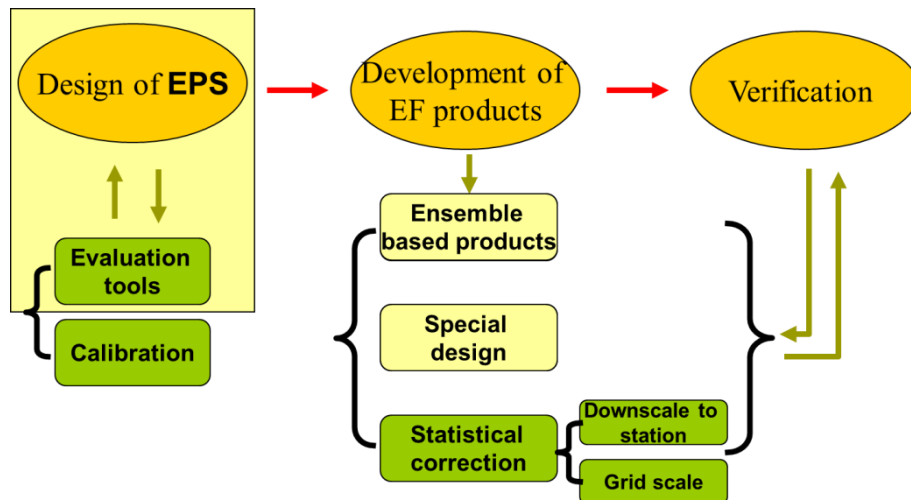


圖4、中央氣象局天氣系集預報系統架構圖

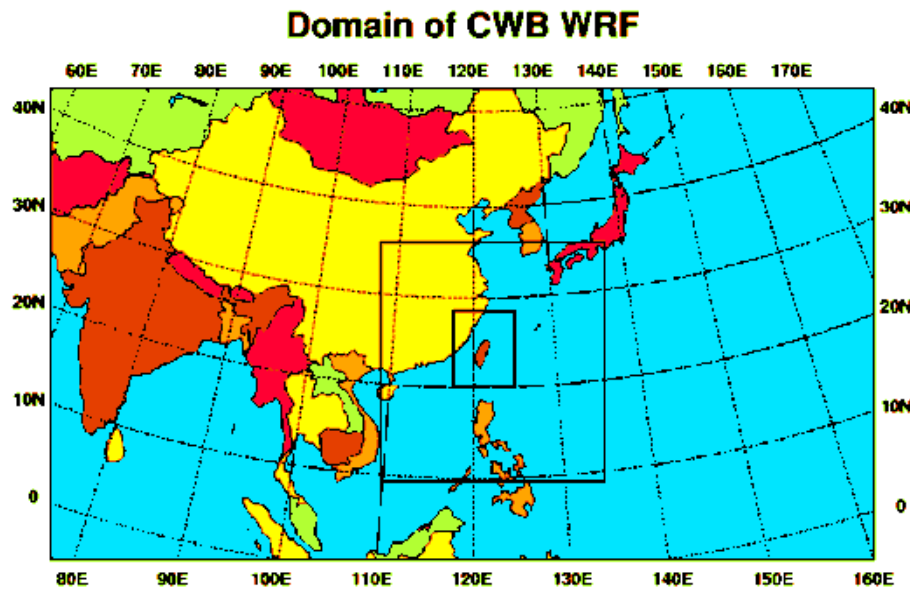


圖5、中央氣象局數值天氣系集預報系統計算範圍

## (2)NCEP

NCEP 的作業化系集波浪預報系統 GEOWaFS(The Global Ensemble Ocean Wave Forecast System) (Chen, 2006)，係使用 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)NWW3 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 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 個風場包括 1 個作業化決定性風場，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(00, 06, 12 及 18Z)、每次 126 小時的預報，該系統已自 2006 年 3 月正式上線。其研究亦指出，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。

後續 NWW3 模式 3.14 版(Tolman, 2009)擁有多重網格計算功能後，該系統於 2008 年 6 月被更新，修正部分包括網格解析度為  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 、20 個系集預報成員、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)、使用偏差修正(bias-corrected)風場、使用前一個 run 的 6 小時預報來當波浪場的起始值等。

目前網站上已有 240 小時的系集預報產品，包括風場及浪場的系集平均

(Ensemble mean)、系集分歧(Ensemble spread, SPRD)、Spaghetti 分布及機率分佈，輸出參數包括風速、示性波高、主頻週期等。圖 6 至圖 10 為主要參數之輸出。

此外 NCEP 與海軍 FNMOC(Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)在 2011/11/1 開始進行跨單位合作(Alves et al., 2013)，建置 40 個系集(各 20)的波浪預報系統，預計未來再加入加拿大 20 個系集成員。而 2 個中心所使用的模式及設定均一致，僅輸入的風場來源有所差異。

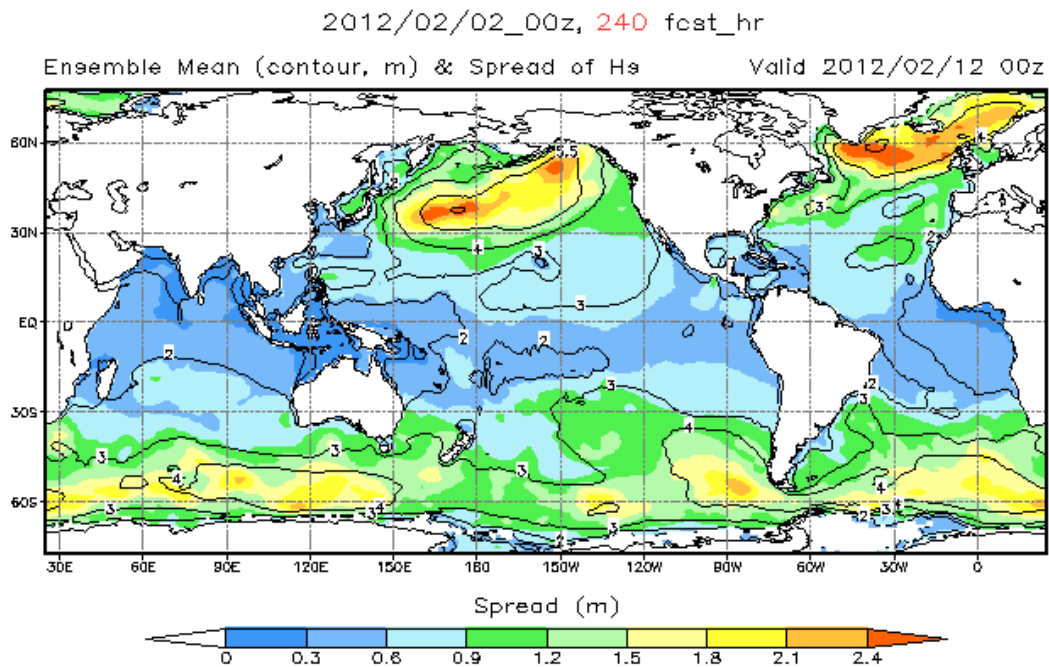


圖6、波高的系集平均及系集分歧

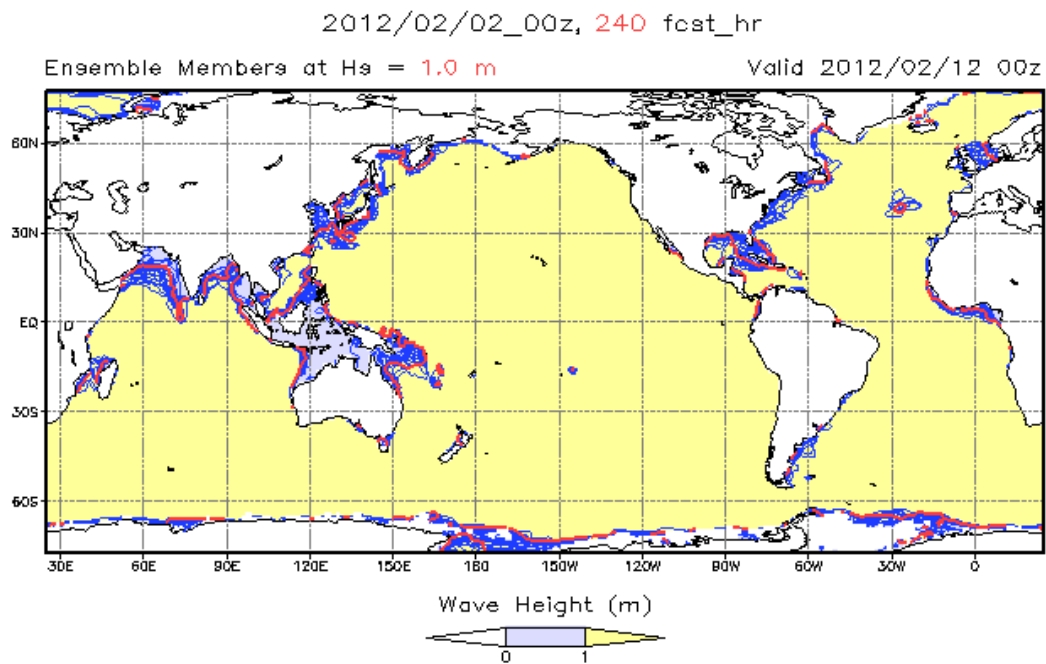


圖7、波高 1m 的 Spaghetti 分布

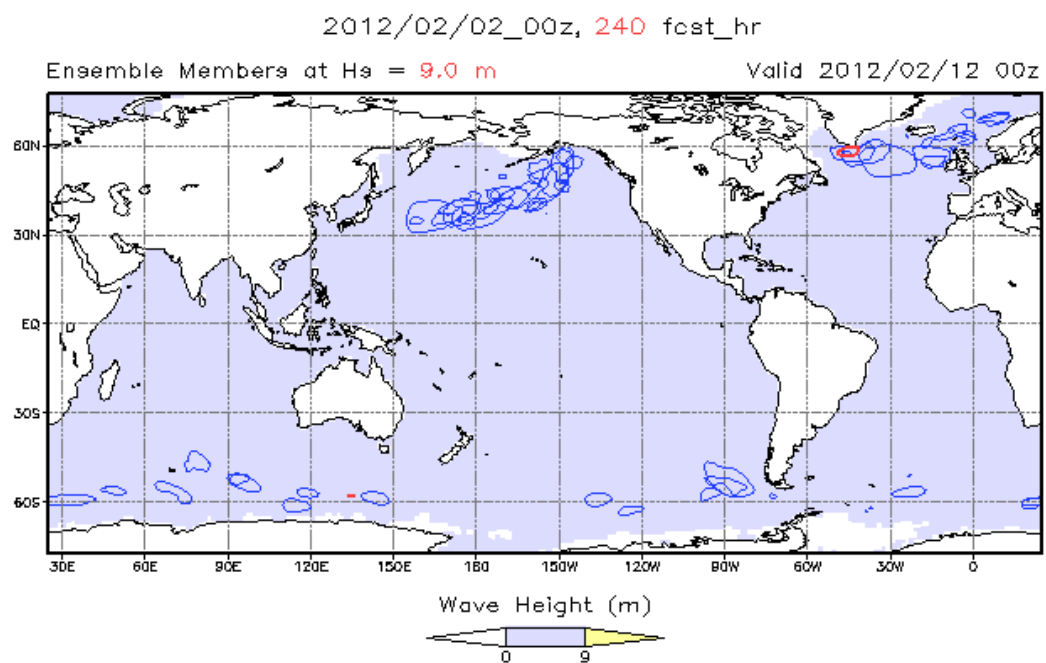


圖8、波高 9m 的 Spaghetti 分布

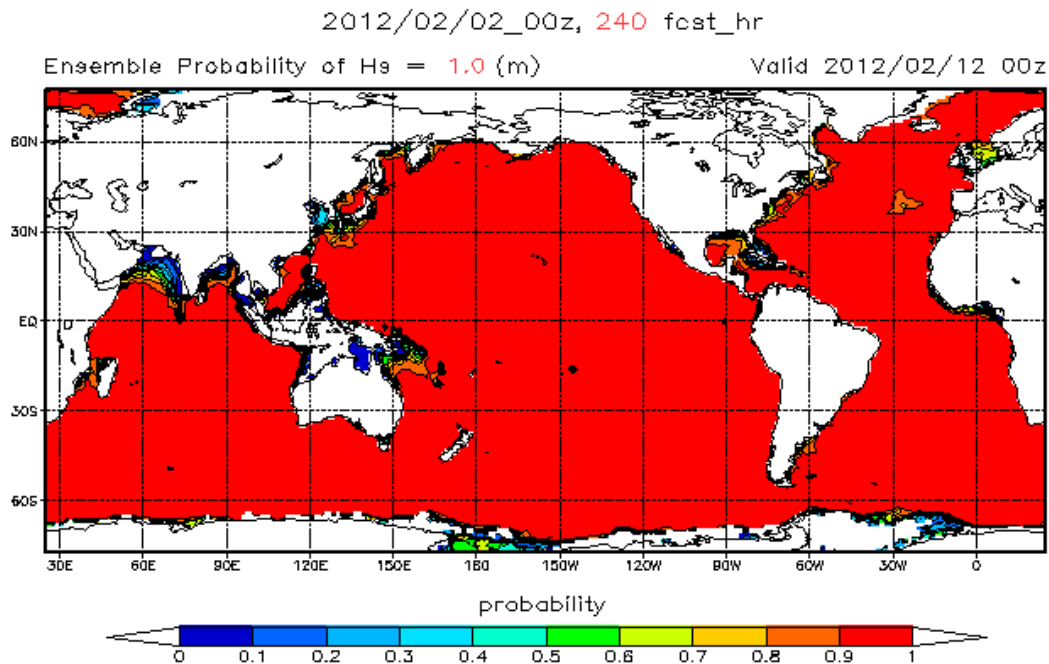


圖9、波高大於 1m 的機率分布

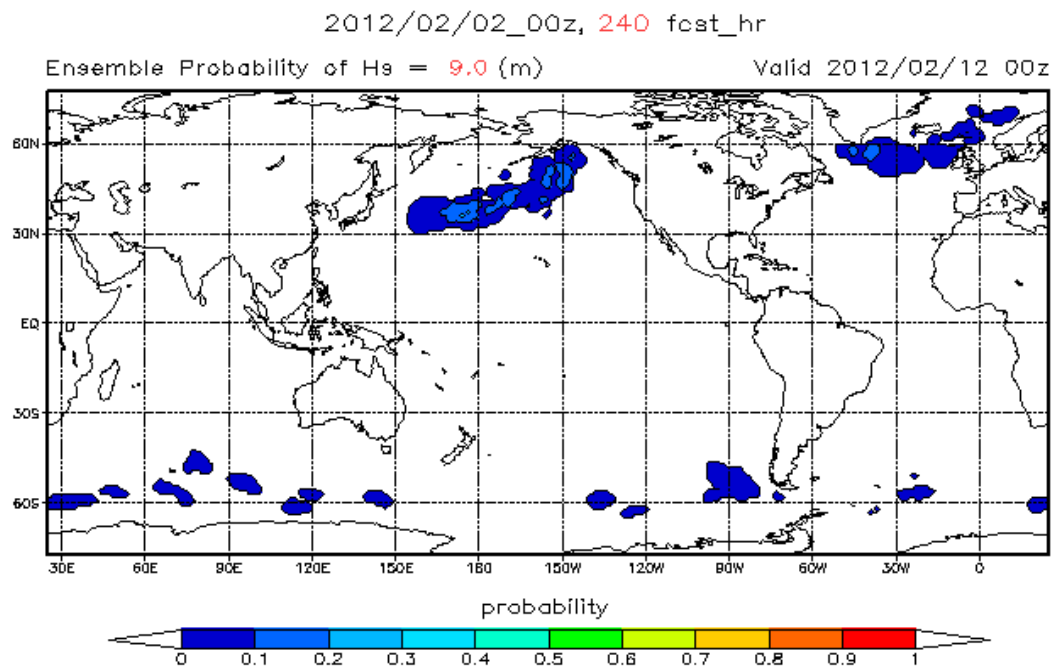


圖10、波高大於 9m 的機率分布

### (3)ECMWF

1998 年 6 月 ECMWF 已完成大氣模式和波浪模式的耦合模擬，ECMWF 之波浪系集預報系統 Wave EPSgram(Wave Ensemble Prediction System meteogram)係使用 WAM 模式建構全球波譜預報(Persson, 2011)，系統包含 1 組控制演算及 50 組系集預報，其中 50 組系集成員之風場是由初始大氣條件最

不穩定向量之平均擾動生成，浪場初始值是使用控制演算分析場作為初始條件，同時 EPS 全球波浪模式之波譜解析度增至 24 個方向和 30 個頻率。2010 年 Wave EPSgram 之網格解析度已提升至  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，每 6 小時預報一次，預報時間延長至 10 天，輸出參數包括 10m 風速、10m 風向、示性波高、平均波向及週期等(限 WMO 會員)，產品的表示方式有各測站盒鬚圖(圖 11)的時間分布及平面等高線圖等方式。圖 12 比較單一數值預報與系集預報之單點 10 天計算，圖中顯示當風速增強時，風向由西逐漸轉向西北，形成較長平均週期的波浪，也形成南向較大波高的波浪分布(其中藍色線為單一決定性預報，紅色為控制演算預報)。此外由於其使用相同的波浪起始條件，故在剛開始的預報時間之系集分歧很小。

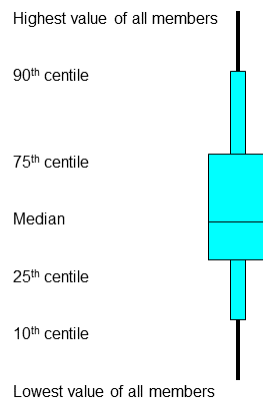
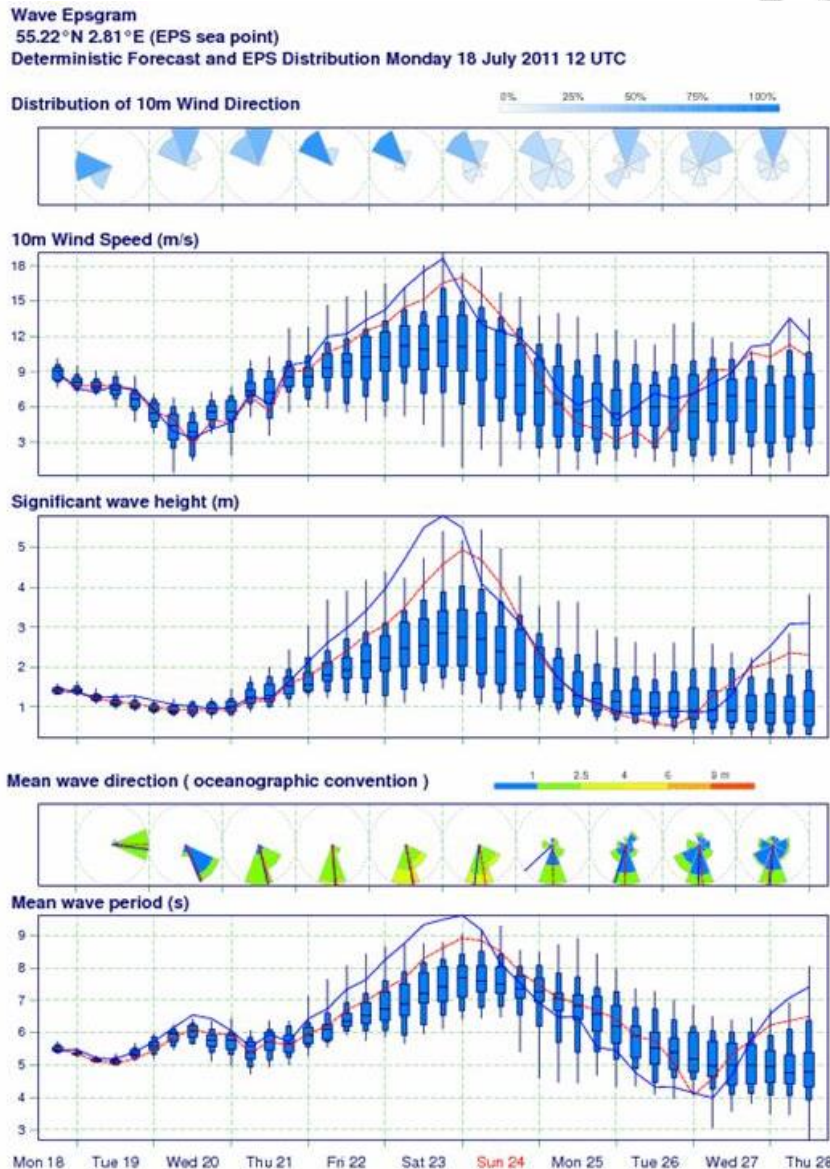


圖11、盒鬚圖的定義方式



資料來源：” User guide to ECMWF forecast products” , Oct 2011.

圖12、Wave EPSgram 單點系集預報與單一決定性模式預報比較圖(北海,18 July 2011, 12 UTC)

## 1.4 研究流程

本研究目的在建立作業化區域性之波浪系集預報系統，研究流程如圖 13所示，首先進行模式的不確定性分析，再進行系集成員的選擇使其能最大涵蓋模式的不確定性，一旦組合確立後，即進行模式的模擬，待累積一定的資料後，蒐集觀測值(真值)分析系統的執行力。若執行力不如預期，即進行改善措施的研擬，重新調整系集成員的組成，再重複流程直到滿足設定的目標。

預報結果需要被檢視以了解預報品質，許多統計指標常被用來檢視單一決定

性預報之預報結果，例如相關係數(correlation)、偏差(BIAS)、均方根誤差(RMSE)、散度(SI, scatter index)等，同樣的系集預報亦需量化的指標來評估系集成員組成的合理性、系集預報的執行力(performance)和可信度(表 5)，而檢視系集預報品質的屬性，包括準確度(accuracy)：是否接近觀測值、信賴度(Reliability)：預報機率與觀測機率的符合程度、解析度(Resolution)：預測與事件的氣候平均概率有多大差異，系統是否正確、銳度(Sharpness)：預測機率與事件的氣候平均概率有多大差異，若系統能提供與氣候平均概率不同的機率預報即代表系統具備銳度、技術能力(skill)：是否較事件的氣候平均概率或其他預報佳等，而檢視系集品質則使用不同的統計指標，例如 ROC、Reliability diagram、Brier Score & Brier Skill Score、TRH、MEL、RMSE&SPRD 等(2.3.3 節)。

表5、決定性預報與系集預報之品質特性檢視指標

決定性預報	系集預報	
統計指標	屬性(attributes)	統計指標
相關係數(correlation)	準確度(accuracy)	Brier Score (BS), Brier Skill Score(BSS)
偏差(BIAS)	信賴度(Reliability)、解析度(Resolution)、銳度(Sharpness)	Reliability Diagram
均方根誤差(RMSE)	區別事件發生能力(Discrimination)	Relative Operating Characteristic(ROC)
散度(SI, scatter index)	離散度評估(定性)(outliers, biases)	Talagrand Rank Histograms
Ps(Performance score)	離散度評估(定量)及不確定性	RMSE & SPRD
	系集成員組成	Member Equal Likelihood

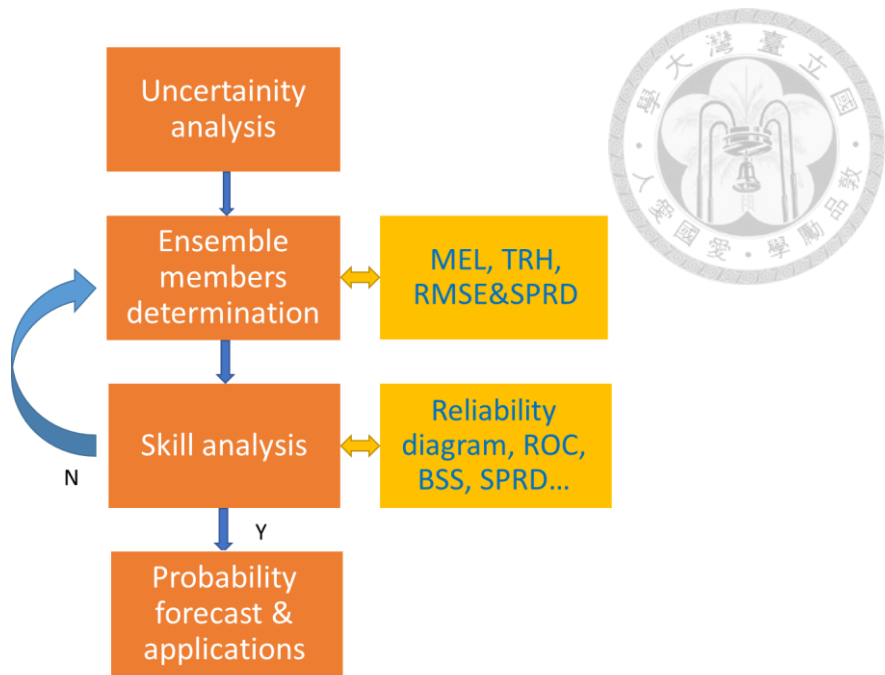


圖13、系集預報之建置流程

本論文的架構說明如下，第一章緒論部分，說明研究動機及目的、概念說明系集預報、文獻回顧簡述波浪預報的發展歷史及波浪系集預報的發展現況；第二章作業化系集預報系統建置部分，包括波浪數值模式、觀測及統計系集指標說明、模式建置等；第三章系統驗證分析部分，包括不確定性分析、系集成員組成、系集系統執行力分析，第四章為系集預報成果之應用，包括作業化系集預報系統之輸出及說明、海上施工決策應用、海上施工之氣候窗分析等，第五章為結論與建議。

## 第二章 波浪系集預報系統建置



### 2.1 波浪數值模式

#### 2.1.1 波浪模式

本研究考慮區域性範圍之模擬，採用 NWW3 模式 3.14 版(Tolman, 2008)進行模擬分析，NWW3 計算波數及方向波譜(wavenumber-direction spectra)之變化，所用之控制方程式為球面座標之波動平衡方程式(wave action balance equation)，如下式：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi} (\dot{\phi} \mathbf{N}) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} \mathbf{N}) + \frac{\partial}{\partial k} (\dot{k} \mathbf{N}) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta}_g \mathbf{N}) - \frac{\partial}{R^2 \partial \lambda} (D_{\lambda\lambda} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial \lambda}) \\ & - \frac{\partial}{R^2 \cos^2 \phi \partial \phi} (D_{\phi\phi} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial \phi}) - \frac{D_{\lambda\phi}}{R^2} \frac{\partial^2 \mathbf{N}}{\cos \phi \partial \lambda \partial \phi} = \dot{S} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{其中 } \dot{\phi} = \frac{C_g \cos \theta + U_\phi}{R} \quad (4)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{C_g \sin \theta + U_\lambda}{R \cos \phi} \quad (5)$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{C_g \tan \phi \cos \theta}{R} \quad (6)$$

$$\dot{S} = \frac{S}{\sigma} C_g^{-1} \cos \phi \quad (7)$$

$$\mathbf{N} = N C_g^{-1} \cos \phi \quad (8)$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial s} \quad (9)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad (10)$$

其中  $N(\lambda, \phi, \theta, k, t) = F / \sigma$  為波動密度能譜(wave action density spectrum)， $\lambda$  經度、 $\phi$  緯度， $\theta, \kappa$  波浪傳遞方向及波數(wave number)， $t$  時間， $F(k, \theta)$  波數方向頻譜， $C_g$  群波速度， $S$  源項定義為波浪能譜(wave energy spectrum)，包括線性風浪交互作用  $S_{in}$ 、風浪交互作用  $S_{in}$  (指數成長)、非線性波浪交互作用  $S_{nl}$ 、能量消散(白沫 whitcapping)  $S_{ds}$ 、底床摩擦力  $S_{bot}$ 、碎波  $S_{db}$ 、三波交互作用  $S_{tr}$  (尚未)、水深引起

之波浪散射  $S_{sc}$  及使用者自行定義的源項  $S_{xx}$ ， $\sigma (=2\pi f_r)$  波浪頻率， $R$  地球半徑， $D_{\phi\phi}, D_{\lambda\lambda}, D_{\lambda\phi}$  擴散係數， $U_\phi, U_\lambda$  為海流平均流速， $d$  水深， $s, m$  波浪前進方向及垂直方向座標。當海流不存在時，式(3)即變成能量密度傳遞方程式，本研究建置的波浪系集預報，暫不考慮海流的影響。

3.14版之NWW3已使用ANSI標準的Fortran90撰寫，利用模組(module)來取代舊有使用COMMON指令之include的程式。同時加入多重網格(multi-grid)之計算，允許大、小網格之雙向(two-way)交互作用，同時可以設定不同之波譜解析度，但在單向巢狀網格則必須一致，而邊界點可以設在多重網格之外圍點位；以前使用單向巢狀網格，無法從細網格中反映出小比尺的物理量及參數變化，且比較耗時計算，而利用多重網格、雙向傳輸形式，考慮能量守恆的一致性，不僅可將細網格之計算值回饋給粗網格使用，亦可避免冗長的計算時間，降低不同網格計算結果之差異性。

在不同網格的計算其計算的時間間距為了滿足數值穩定都會有所差異，小網格必須採取較小的計算時間間距，因此在多重網格的計算中(圖14)，大網格除了如單向巢狀網格計算提供細小網格的邊界條件外，當大、小網格計算的時間吻合時，大網格在小網格範圍內的能量計算值 $E_{l,i}$ 即會被小網格的計算值 $E_{h,j}$ 乘以權重 $\omega_{ij}$ 合成所取代，如下式。權重 $\omega_{ij}$ 則根據大、小網格邊界長度的比值而定：

$$E_{l,i} = \sum \omega_{i,j} E_{h,j} \quad (11)$$

而過去依據水深定義非計算點位(inactive)的方式，現在亦可自行設定非計算點位(mask)；而適用在深水之連續性移動網格亦在功能之內。在波譜輸出方面，使用如集水區切割的方式(圖15)，提供風浪(wind sea)及主湧(primary swell)、次湧(secondary swell)的輸出，如圖16至圖19所示。

在物理意義及數值方法的詮釋上，3.14版增加許多的功能及方法，例如在風浪非線性的交互作用上，修正原有WRT(Webb-Resio-Tracy)的方法；在源項中增加包括線性的風浪交互作用、碎波、WAM4模式使用的輸入及消散、水深引起之波浪散射等，至於淺水域發生的三波交互作用目前仍未建置完成；在風應力的表現上，可以允許利用通量參數化、向量的表現方式，使得風應力的方向並不一定需要與風的方向一致。

NWW3的風場輸入包括線性(linear)成長風浪交互作用及指數(exponential)成長風浪交互作用，線性成長部分採用Cavaleri and Malanotte-Rizzoli(1981)的經驗式及Tolman(1992)設定之門檻值，以避免波浪在頻率低於P-M頻率(Pierson-Moskowitz)的成長。指數成長部分，NWW3共有3種經驗式(built-in)可供選擇，但因其與消散(dissipation)相互關連，NWW3必須一起考慮(如表6，僅摘述使用手冊之部分方程式)，包括WAM-3(1981,1984)、Tolman and Chalikov(1996)、WAM-4(2008)。茲簡述如下(Tolman, 2008)：

#### (1)WAM-3

WAM-3考慮在風向與波向的交角小於90度，且在波浪頻率高於P-M頻率(Pierson-Moskowitz frequency)的條件下，風才有能量輸入給波浪；在消散項部分，依據Hasselmann(1974)提出之Pulse-based模式及Komen(1984)修正的經驗式，不同頻率的衰減為平均波浪尖銳度 $\hat{\alpha}$ 的函數，亦即在不同頻率下會產生共同衰減的現象。

#### (2)Tolman and Chalikov

Tolman and Chalikov(1996)考慮的無因次波風交互作用成長的參數 $\beta$ ，為等同於波長高度的有效風速及該處推力係數的函數，其消散項分別考慮低頻及高頻的消散，並以線性的方式結合，其中低頻消散近似於亂流的能量消散，包括波場高頻能量的混和尺度及不同波浪發展階段的消散經驗式，而高頻消散則與風摩擦速度 $u_*$ 的平方成正比。

#### (3)WAM-4

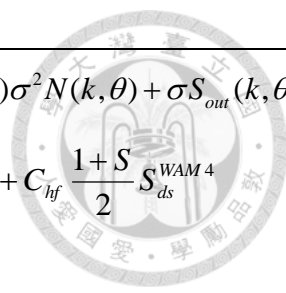
WAM-4(2008)的發展基礎係依據Miles(1957)的半線性(quasi-linear)風浪發展理論及Janssen(1982)的修正，主要考慮大氣邊界層效應及水表面的粗糙度長度，而此粗糙度與波浪剪力有關，此波浪剪力分為波譜解析之波數高頻以下及更高頻的波浪剪力，另其在成長項中另外加入湧浪消散項 $S_{out}$ ，當風與海之邊界層雷諾數小於臨界值時，屬於線性黏滯消散，大於臨界值則屬於非線性亂流消散。白沫消散項的部分，其整合前述WAM-3提出之白沫消散(並修正成 $S^{WAM4}$ ，另乘上飽和頻譜 $S$ 後分為未飽和及飽和部分)，與Phillips提出之飽和消散 $S^{SAT}$ 及波浪亂流交互消散項 $S^{TURB}$ 。參數調整的目的均希望計算結果與ECWAM(ECMWF WAM)模式的計算結果一致，而模式原始設定之代碼為

BAJ。

前述三種內建公式，在決定性預報的應用上，隨著版本的更新似有取代的趨勢，例如公式WAM4取代WAM3，而Tolman and Chalikov及WAM4目前都還有在決定性預報中使用，故本研究僅針對Tolman及WAM4公式探討之。而新版Ver. 4.18以後的NWW3亦提供更多的經驗公式，使用每個經驗式時有必要透過驗證的方式，了解在該海域的適用性。圖20為0.25度的網格解析度、計算範圍涵蓋99°E~155°E、1°N~41°N、吹10m/s東風條件下，NWW3使用不同風場輸入條件(模式設定)之波譜分布，圖21為波高及週期之時序列分布，其中WAM4+係使用WAM-4、但參數參考Ardhuin et al. (2008)(代碼ACC350)之設定，該研究顯示除了在波高大於11m之外，ACC350均較BAJ有更佳的計算結果。圖中顯示Tolman and Chalikov(1996)之波高最大，各公式的差距可達68cm，平均週期則以WAM4+之計算值最大，各公式的差距可達1.2sec。

表6、NWW3 模式風場輸入及能量消散公式

項目	公式
Linear input (Gavaleri and Malanotte-Rizzoli)	$S_{lin}(k, \theta) = 80 \left( \frac{\rho_a}{\rho_w} \right)^2 \sigma g^{-2} k^{-1} \max[0, u_* \cos(\theta - \theta_w)]^4 G$ <p><math>\rho_a</math> 空氣密度 <math>\rho_w</math> 海水密度 <math>G</math> 過濾函數</p>
Input and dissipation (WAM-3)	$S_{in}(k, \theta) = C_{in} \frac{\rho_a}{\rho_w} \max[0, \left( \frac{28u_*}{c} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right)] \sigma^2 N(k, \theta)$ $S_{ds}(k, \theta) = C_{ds} \hat{\sigma} \frac{k}{\hat{k}} \left( \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^2 \sigma N(k, \theta)$ <p>其中</p> $\hat{k} = \left( 1 / \sqrt{k} \right)^{-2} \quad \hat{\sigma} = \left( \sigma^{-1} \right)^{-1} \quad E = \iint F(k, \theta) dk d\theta \quad \hat{\alpha} = E \hat{k}^2 g^{-2}$ $\hat{\alpha}_{PM} = 3.02e-3 \quad c \text{ 相位速度} \quad \overline{\sigma^{-1}} = E^{-1} \iint \sigma^{-1} F(k, \theta) dk d\theta$ $\overline{\sqrt{k}^{-1}} = E^{-1} \iint \sqrt{k}^{-1} F(k, \theta) dk d\theta$
Input and dissipation (Tolman and Chalikov)	$S_{in}(k, \theta) = \sigma^2 \beta N(k, \theta)$ $S_{ds,l}(k, \theta) = -2u_* h k^2 \phi \sigma N(k, \theta)$ $S_{ds,h}(k, \theta) = -a_0 \left( \frac{u_*}{g} \right)^2 f^3 \alpha_n^B \sigma N(k, \theta)$ <p>其中</p> $10^4 \beta = \begin{cases} -a_1 \tilde{\sigma}_a^2 - a_2 & , \quad \tilde{\sigma}_a \leq -1 \\ a_3 \tilde{\sigma}_a (a_4 \tilde{\sigma}_a - a_5) - a_6 & , \quad -1 < \tilde{\sigma}_a < \Omega_1 / 2 \\ (a_4 \tilde{\sigma}_a - a_5) \tilde{\sigma}_a & , \quad \Omega_1 / 2 < \tilde{\sigma}_a < \Omega_1 \\ a_7 \tilde{\sigma}_a - a_8 & , \quad \Omega_1 < \tilde{\sigma}_a < \Omega_2 \\ a_9 (\tilde{\sigma}_a - 1)^2 + a_{10} & , \quad \Omega_2 < \tilde{\sigma}_a \end{cases}$ $\tilde{\sigma}_a = \frac{\sigma u_\lambda}{g} \cos(\theta - \theta_w) \quad u_\lambda \text{ 為在 } \lambda \text{ 高度的風速, } C_\lambda \text{ 在 } \lambda \text{ 高度的推力}$ <p>係數, <math>\lambda = \frac{2\pi}{k  \cos(\theta - \theta_w) }</math>, 而 <math>a_1 - a_{10}</math>, <math>\Omega_1, \Omega_2</math> 為 <math>C_\lambda</math> 的函數, <math>h</math> 為高 頻波高, <math>\phi</math> 是考慮波浪成長階段之經驗方程式, <math>a_0</math>、<math>\alpha_n</math>、<math>B</math> 為 經驗係數</p>

<p>Input and dissipation (WAM-4 and variants)</p>	<div data-bbox="1117 179 1404 470" style="text-align: right;">  </div> $S_{in}(k, \theta) = \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{\beta_{\max}}{\kappa^2} e^Z Z^4 \left(\frac{u_*}{c}\right) \cos^{p_{in}}(\theta - \theta_w) \sigma^2 N(k, \theta) + \sigma S_{out}(k, \theta)$ $S_{ds}(k, \theta) = S_{ds}^{SAT} + S_{ds}^{TURB} + C_{lf} \frac{1-S}{2} S_{ds}^{WAM4} + C_{hf} \frac{1+S}{2} S_{ds}^{WAM4}$ <p>其中</p> $S_{ds}(k, \theta)^{WAM4} = C_{ds} \bar{\alpha}^2 \bar{\sigma} \left[ \delta_1 \frac{k}{\bar{k}} + \delta_2 \left( \frac{k}{\bar{k}} \right)^2 \right] N(k, \theta)$ $S_{ds}^{SAT}(k, \theta) = \sigma C_{ds}^{SAT} \left\{ C_{ds,6} \left[ \max \left\{ \frac{B(k)}{B_r P(kd)} - B_0, 0 \right\} \right]^{p^{sat}} + \left( 1 - C_{ds,6} \right) \left[ \max \left\{ \frac{B'(k, \theta)}{B_r P(kd)} - B_0, 0 \right\} \right]^{p^{sat}} \right\} N(k, \theta)$ $S_{ds}^{TURB}(k, \theta) = -2C_{turb} \sigma \cos(\theta_w - \theta) k \frac{\rho_a u_*^2}{g \rho_w} N(k, \theta)$ $\bar{k} = \left[ \frac{\int k^p N(k, \theta) dk d\theta}{\int N(k, \theta) dk d\theta} \right]^{1/p} \quad \bar{\sigma} = \left[ \frac{\int \sigma^p N(k, \theta) dk d\theta}{\int N(k, \theta) dk d\theta} \right]^{1/p} \quad \bar{\alpha} = E \bar{k}^2$ <p><math>S_{out}(k, \theta)</math> 湧浪消散，<math>p_{in}</math> 能量方向散布係數，<math>C_{lf}</math>、<math>C_{hf}</math> 控制低未飽和及高飽和 WAM4 消散之分佈因子，<math>S</math> 飽和程度，<math>Z</math> 無因次特性長度，<math>p</math>、<math>\delta_1</math>、<math>\delta_2</math>、<math>p^{sat}</math> 權重，<math>C_{ds}</math> 白沫消散係數，<math>C_{turb}</math> 亂流消散係數，<math>C_{ds}^{SAT}</math> 飽和消散係數，<math>B'(k, \theta)</math> 飽和波譜對方向的部分積分，<math>B(k)</math> 飽和波譜對方向的全積分，<math>P(k, d)</math> 模擬從深海到淺海最大波浪尖稅度的變化</p>
---	--

$$u_* = u_{10} \sqrt{(0.8 + 0.065 u_{10}) 10^{-3}}$$

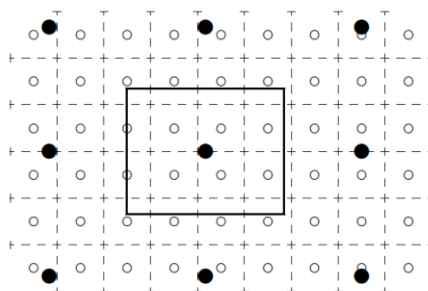
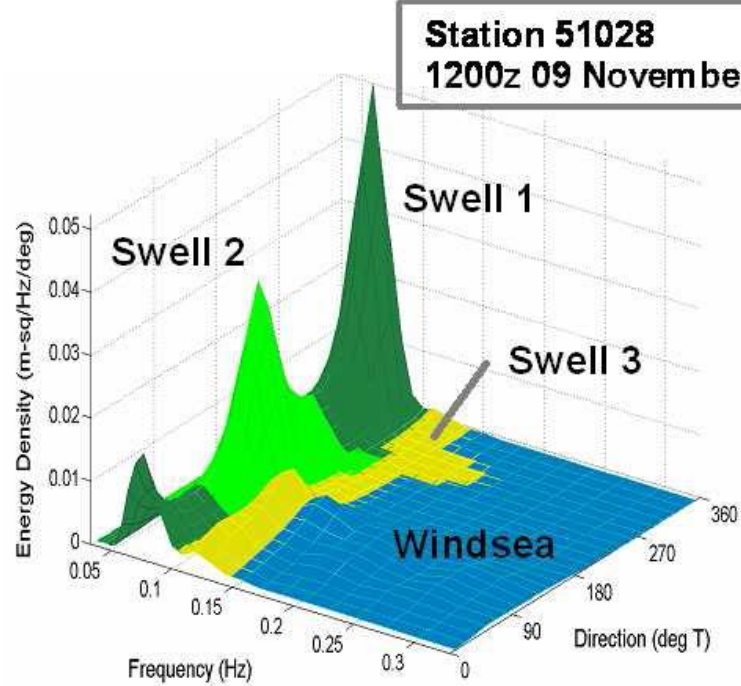


圖14、大網格格點•及邊界(實線)與小網格格點。及邊界(虛線)示意圖



資料來源:Tolman(2008)

圖15、能量波譜切割方式示意圖

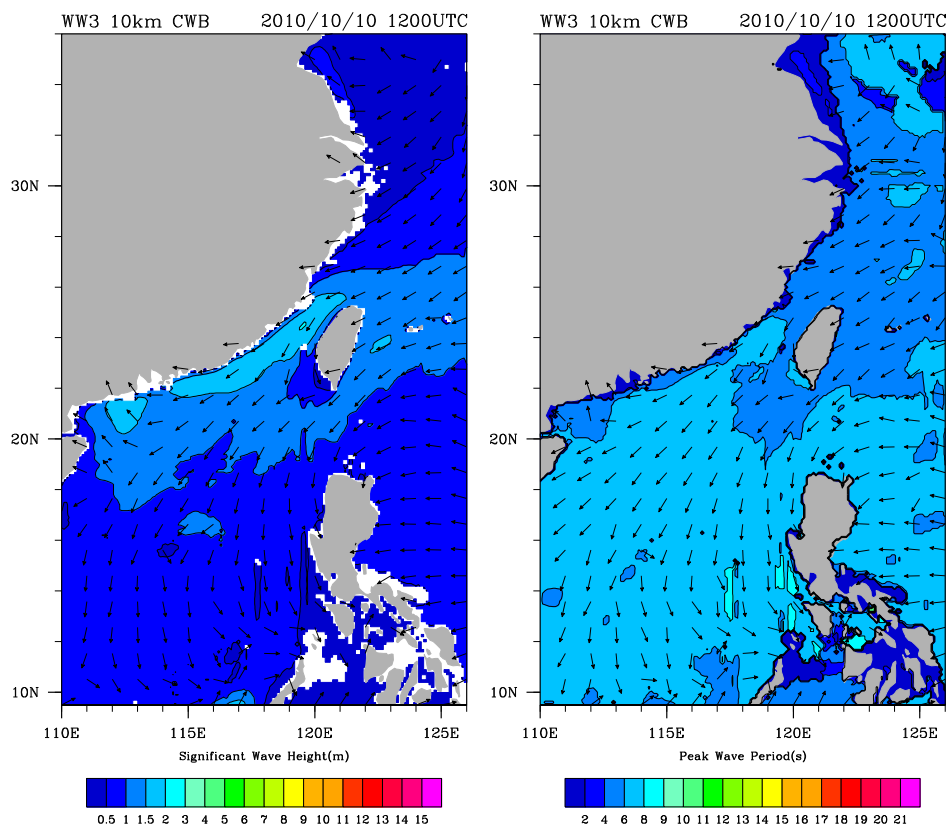


圖16、示性波高、波向(左)及主週期(右)分布圖(NCEP 風場)

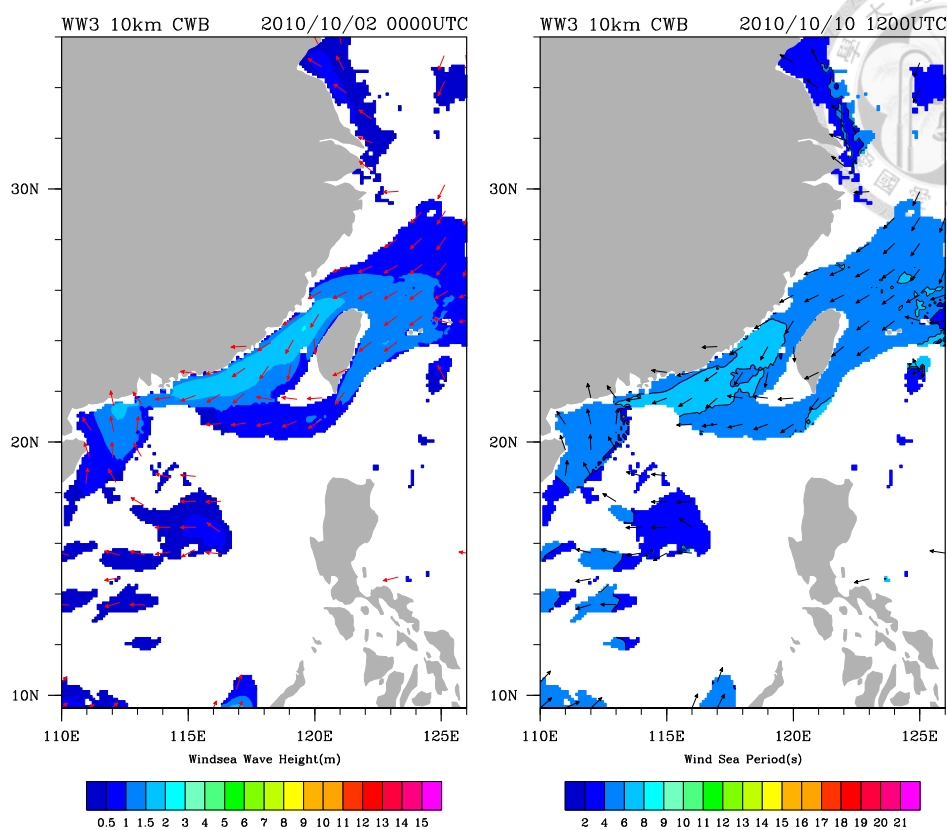


圖17、風浪波高、波向(左)及風浪週期(右)分布圖(NCEP 風場)

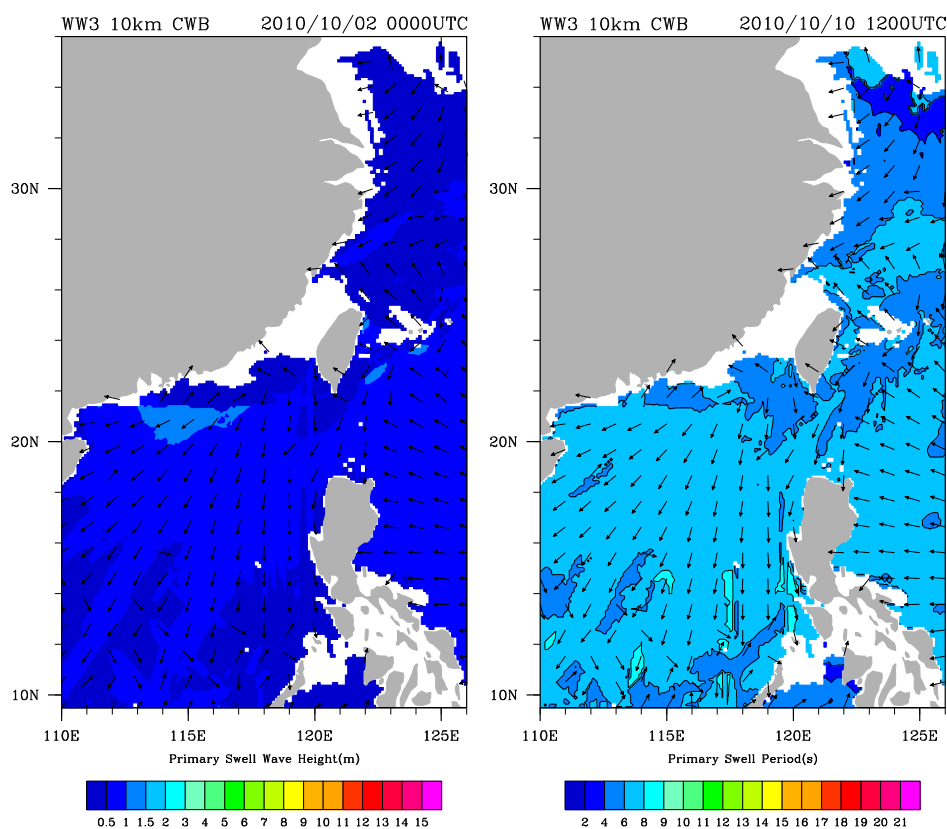


圖18、主湧波高、波向(左)及主湧週期(右)分布圖(NCEP 風場)

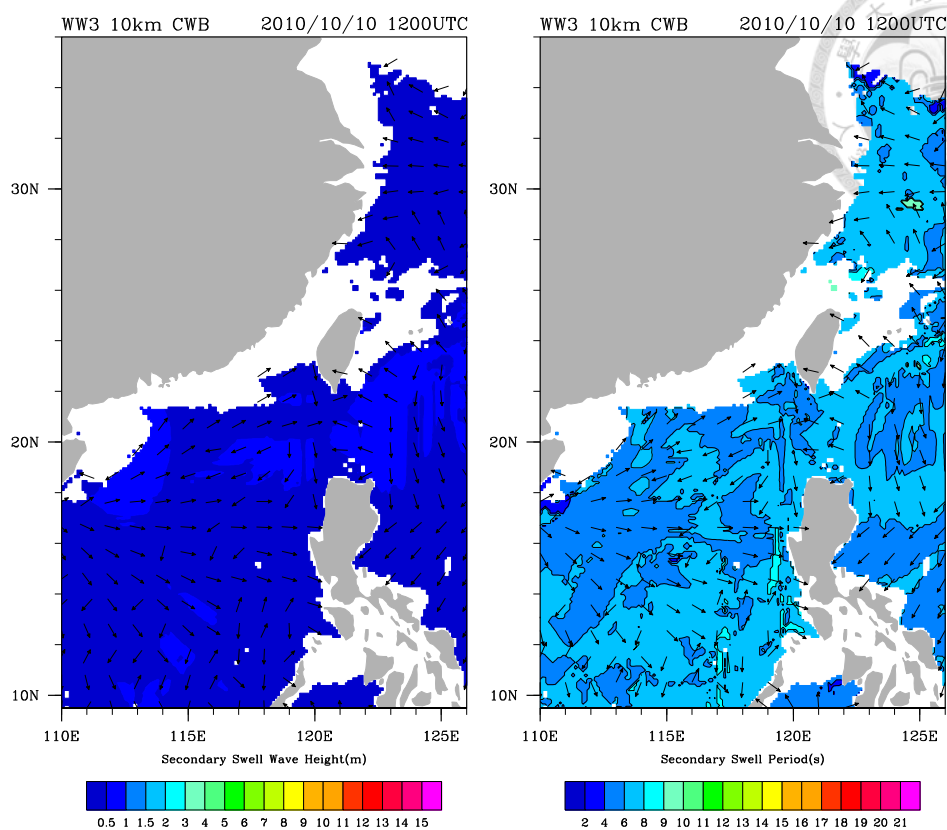


圖19、次湧波高、波向(左)及次湧週期(右)分布圖(NCEP 風場)

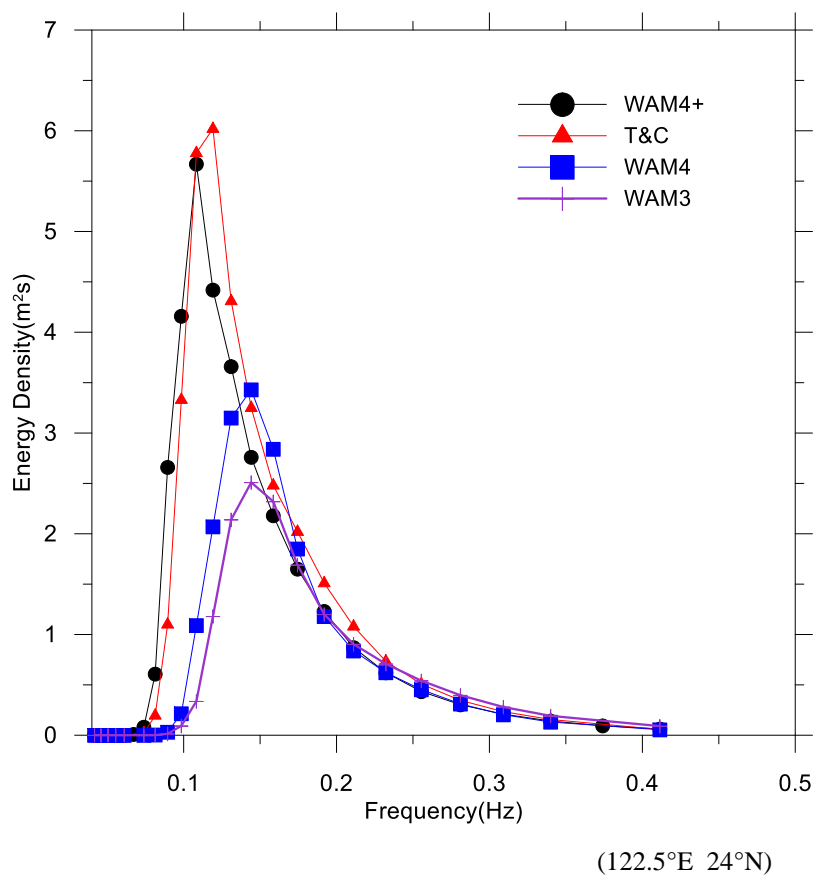


圖20、不同 NWW3 風浪輸入公式之波譜分布

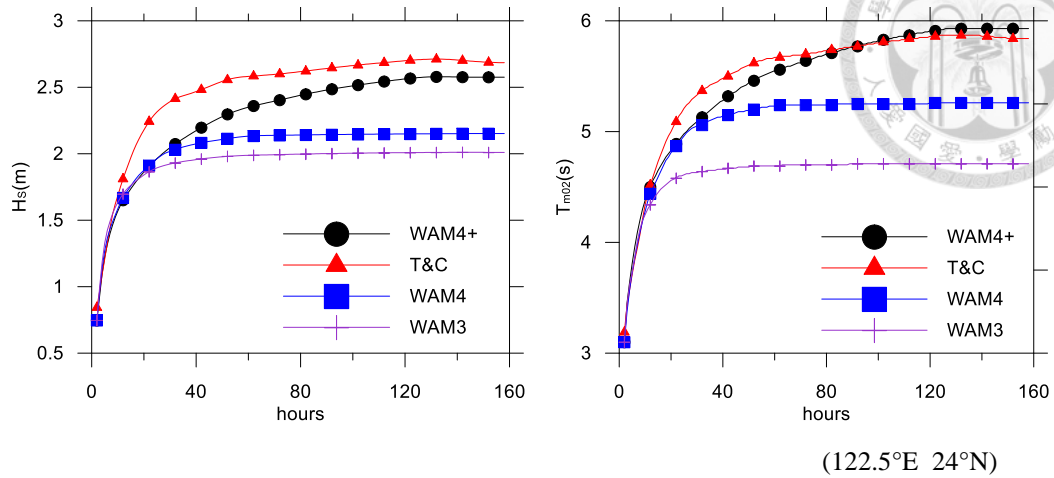


圖21、不同 NWW3 風浪輸入公式之波高、週期歷時分布

### 2.1.2 數值方法

NWW3 使用分步法(fractional step method)求解包含 5 個變數之能量傳遞方程式，優點是可以節省記憶體容量並可使用簡單的數值方法，同時容易向量平行化。其將控制方程式分解成平面傳輸(x-y propagation)、內部波譜傳輸(intra-spectral propagation)、源項(source term)及總能量傳輸，因此相應的時間尺度亦有 4 個，其中內部波譜傳輸即在式(3)中於 $(\theta, k)$ 的變化，包括了地球大圓的方向的改變、水深及流引起的折射(refraction)、與流導致的波數位移(wavenumber shift)等。分步法求解示意圖如圖 22。

NWW3 在求解傳輸的數值方法共有 3 種，包括一階上風法及 2 種三階 ULTIMATE QUICKEST 法。而在波浪非線性交互作用部分，其在深海中與風的輸入及消散同等重要，考慮 Hasselmann(1962)提出四波共振交互作用之 Boltzmann 積分方程式，NWW3 提出 WRT(Webb-Resio-Tracy)法及 DIA(Discrete Interaction Approximation)法求解之，前者精確的求解此 6 個維度的積分方程式，但非常耗時，約為後者計算時間的 1000 至 10000 倍，非常不適用在作業化的波浪計算，後者假設其中二個波的波數相同，雖然較不精確但省時，與 WRT 之正確解比較，其波高偏低、平均週期偏大，並產生較寬的方向散布(directional spread)。

模式計算過程中由於波譜離散化及無法使用過密的解析度，導致產生所謂的花園灑水器效應(Garden Sprinkler Effect, GSE)，此造成原本連續的湧浪場，會產生如花園灑水器的灑水現象(圖 23)，本例正常應該是如內圈等高線之圓型分布，因此在三階的數值方法中衍生出二種人工的方式，包括擴散法(Diffusion)及平均法

(Average)，前者加入擴散項利用湧浪傳遞時間當作擴散參數，如式(12)及式(13)，其中  $D_{ss}$ 、 $D_{nn}$  分別為波浪前進方向及垂直波浪前進方向之擴散係數，與式(3)在經緯度方向之擴散係數  $D_{\varphi\varphi}$ 、 $D_{\lambda\lambda}$ 、 $D_{\lambda\varphi}$  存在角度轉換的關係， $T_s$ (swell age)為可調的係數，同時假設在深海條件下之  $c_g$ 。在滿足穩定的計算條件下，擴散係數與時間間距的關係如式(14)所示，將式(13)代入式(14)中可得式(15)，在決定  $\Delta t_d$  後即可求得  $T_s$ 。而平均法針對能譜在波浪傳遞方向及垂直波浪方向先行進行面積平均以減緩灑水現象的產生，如式(16)之  $\gamma_{a,s}$ 、 $\gamma_{a,n}$ ，分別為徑向和軸向之長度無因次因子，即徑向之長度與軸向長度所形成之面積，Chawla & Tolman (2008)提出擴散法及平均法二者係數之相關性如式(17)。然而不管使用那種減緩 GSE 效應的方法，過大的參數設定均會造成模式在高緯度的不穩定。唯目前模式中對於不管那一種方法均採用固定係數的方式處理，可以預見並不適用在所有的波浪條件模擬，最佳狀況應該是可以動態調整，因此仍然在模擬過程中偶或會發生灑水器現象。

$$D_{ss} = (\Delta c_g)^2 \frac{T_s}{12} \quad (12)$$

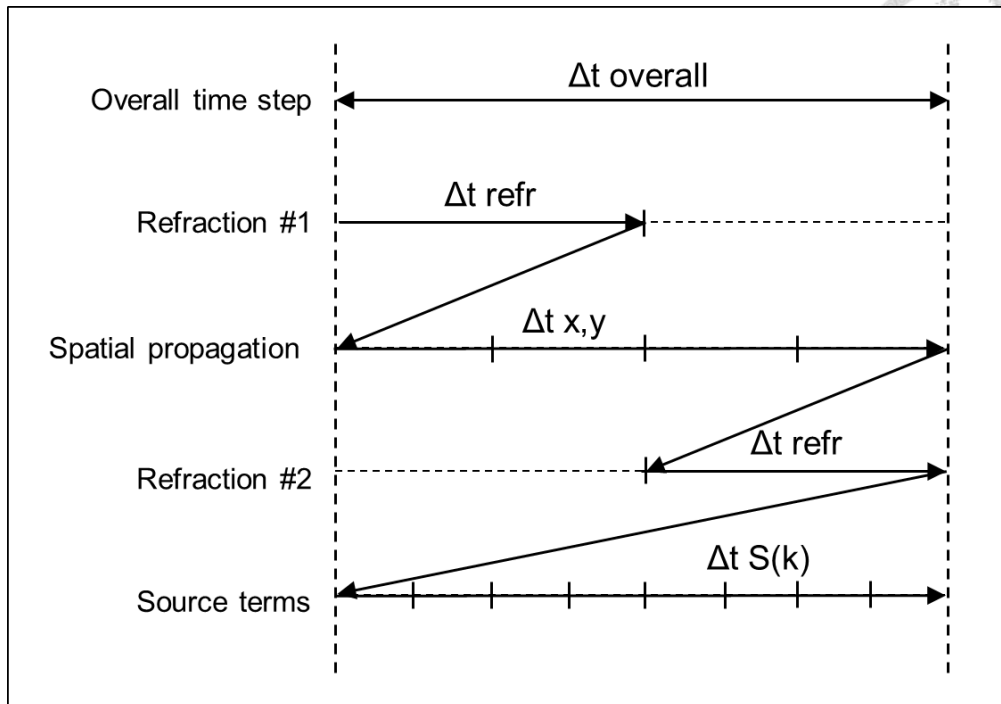
$$D_{nn} = (c_g \Delta \theta)^2 \frac{T_s}{12} \quad (13)$$

$$\frac{D_{nn} \Delta t_d}{\min(\Delta x, \Delta y)^2} \leq 0.5 \quad (14)$$

$$T_s \leq \frac{6}{\Delta t_d} \left( \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{c_g \Delta \theta} \right)^2 \quad (15)$$

$$\gamma_{a,s} \Delta c_g \Delta t \vec{s} ; \gamma_{a,n} c_g \Delta \theta \Delta t \vec{n} \quad (16)$$

$$\gamma_{a,s} = \frac{\Delta c_g T_s}{4 \min(\Delta x, \Delta y)} ; \gamma_{a,n} = \frac{c_g \Delta \theta T_s}{4 \min(\Delta x, \Delta y)} \quad (17)$$



資料來源: NCEP - CWB Wind Waves Winter School 2017

圖22、分步法求解流程

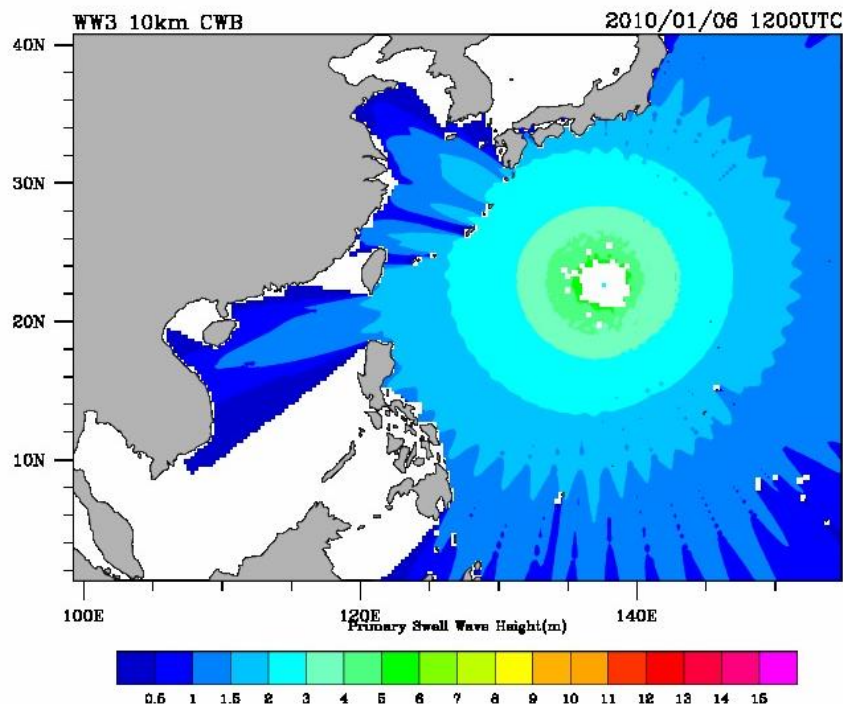


圖23、GSE 範例

### 2.1.3 傳輸邊界條件

NWW3 模式求解能量密度傳輸方程式，在陸地邊界條件部分，當波浪由外海傳遞進來時，經過淺化、碎波後，能量是被吸收且無反射(無特殊結構物)，若反方向時，則設定在陸地點之波浪能量為零。在外海開放邊界部分，當波浪能量由

計算範圍內往計算範圍外傳遞時，能量在邊界同樣是被吸收的；但若是相反方向，模式假設邊界值等於近邊界之網格值(即垂直邊界方向梯度為 0)，故無法得知到底有多少能量是被傳進計算範圍內，因此在設定最外層的計算範圍時，就必須考慮到邊界條件的設定是否會影響到內部的模擬結果。

## 2.2 觀測資料及系集分析方法

### 2.2.1 觀測資料

模式在建立的過程中必須經過校正，就需要有真值(true)比較，一般均以觀測資料當作真值，本研究蒐集中央氣象局之觀測站資料(表7及圖24)當作真值。圖中顯示除了台東外洋浮標及東沙島浮標外，其餘離岸距離都小於5公里，屬於近岸測站，而馬祖浮標位於台灣海峽北側，離東引島約3.3公里，而東引島離大陸海岸約40公里。

### 2.2.2 系集成員分析

系集預報需要選擇適當的系集成員組成，本研究採用Talagrand Rank Histogram (TRH)、系集分歧(Ensemble Spread, SPRD)與Member Equal-Likelihood (MEL)等統計指標來評定選擇合適的系集成員，以評估系集分歧度是否足夠，可否據以最大程度涵蓋可能的發生機率。以下說明各項指標統計之意義(李和洪，2011; Wilks, 2006)：

#### (1) Talagrand Rank Histogram

Talagrand Rank Histogram 能評估系集預報系統相對於該真值的離散程度之合理性，也能了解系集預報的偏差(Bias)情形。在系集預報系統中，假設有  $M$  個成員，因此會有  $M$  個預報結果，接著將預報值由小自大排列，產生  $M+1$  個區間(Rank)，第一個區間為小於最小預報值，第  $M+1$  個區間為大於最大預報值。預報值與真值進行比較，紀錄真值落於哪個區間，即在該區間累加一次。統計完所有時間和網格點上的資料後，便可得到 TRH 圖(如圖 25)。

若統計結果顯示，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，若呈現偏一方，則代表系統偏大或偏小。一個平坦的 TRH 是好的系集的必須條件，但還不足夠證明

系集是可以信賴的(T. Hamill, 2001)。

## (2)系集分歧

Rank Histogram 對於離散程度的評估較為定性判斷，因此透過系集分歧提供一個定量的數值協助判斷。系集分歧(Fortin et al., 2014)定義為各個系集成員預報值和系集平均的變異數(variance)之時間均方根，與標準偏差所代表的意義相同，可算出系集成員的分佈程度。但是系集分歧沒有和真值比較，雖能計算出離散度，但無法得知離散度是否合理，因此利用系集平均值和真值比較，透過均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)計算，可得知系集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。

## (3)Member Equal-Likelihood

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，即可得到此圖。一般而言，好的系集預報系統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。而 TRH 無法得知此訊息，因此透過 MEL 進行校驗。

表7、波浪觀測站

測站代碼	模式代碼	編號	站名	位置	說明
46694A	Sta01	1	龍洞浮標	25°05'48"N 121°55'21"E	東北角龍洞遊艇港外海約 1.0 公里，該處水深約 30 公尺。
46699A	Sta02	2	花蓮浮標	24°02'03"N 121°37'51"E	花蓮七星潭外海約 1 公里，該處水深約 30 公尺。
46706A	Sta03	3	蘇澳浮標	24°37'24"N 121°52'36"E	蘇澳港北方約 5 公里，該處水深約 23 公尺。
46708A	Sta04	4	龜山島浮標	24°50'57"N 121°55'32"E	宜蘭龜山島龜尾端西方 1 公里，該處水深約 25 公尺。
46714D	Sta05	5	小琉球浮標	22°18'55"N 120°21'46"E	屏東小琉球海子口外海約 2 公里，該處水深約 78 公尺。
46735A	Sta06	6	澎湖浮標	23°43'37"N 119°33'07"E	澎湖姑婆嶼北北西方約 1 公里，該處水深 26.6 公尺。
46744A	Sta07	7	大鵬灣	22°25'02"N 120°26'18"E	大鵬灣外海約 2 公里，該處水深約 20 公尺
46748H	Sta08	8	台西平台	23°45'44"N 120°08'39"E	麥寮工業港南防波堤西南方 2 公里，該處水深約 15 公尺。
46757B	Sta09	9	新竹浮標	24°45'21"N 120°50'13"E	新竹海山漁港外海離岸約 3.5 公里，該處水深約 26 公尺。
46759A	Sta10	10	鵝鑾鼻浮標	21°54'02"N 120°49'53"E	墾丁鵝鑾鼻香蕉灣南方外海約 3 公里，該處水深約 40 公尺
46778A	Sta11	11	七股浮標	23°05'44"N 120°00'30"E	七股頂頭額沙洲外海約 1.5 公里，該處水深約 18 公尺。
46787A	Sta12	12	金門浮標	24°22'46"N 118°24'48"E	金門料羅港南方海域約 4 公里，該處水深約 25 公尺。
C6S62	Sta25	14	台東外洋浮標	21°45'59"N 124°04'27"E	臺東東南方外海約 300 公里，該處水深約 5613 公尺。
C6V27	Sta26	15	東沙島浮標	21°02'30"N 118°49'45"E	高雄西南方 230 公里，該處水深約 3000 公尺。
C6W08		16	馬祖浮標	26°22'37"N 120°32'10"E	連江縣東引島東南東方約 3.3 公里，該處水深約 58 公尺

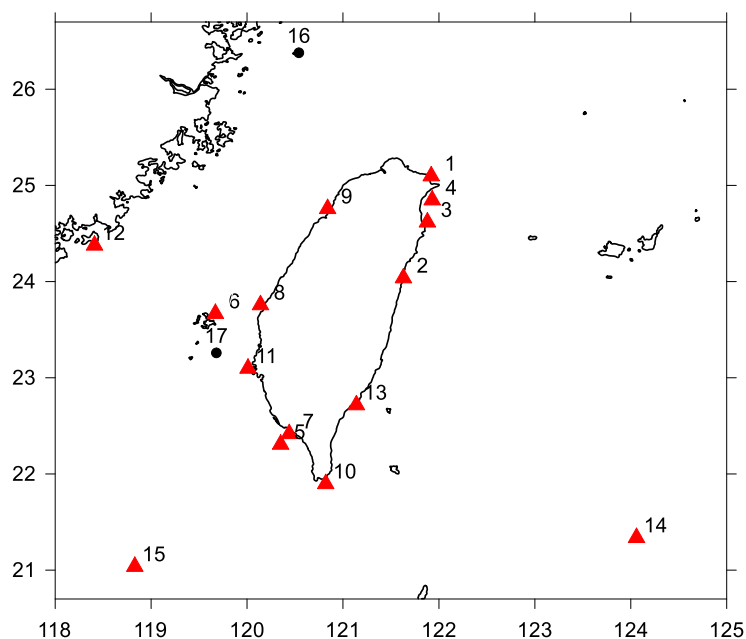


圖24、波浪觀測站點位分布圖

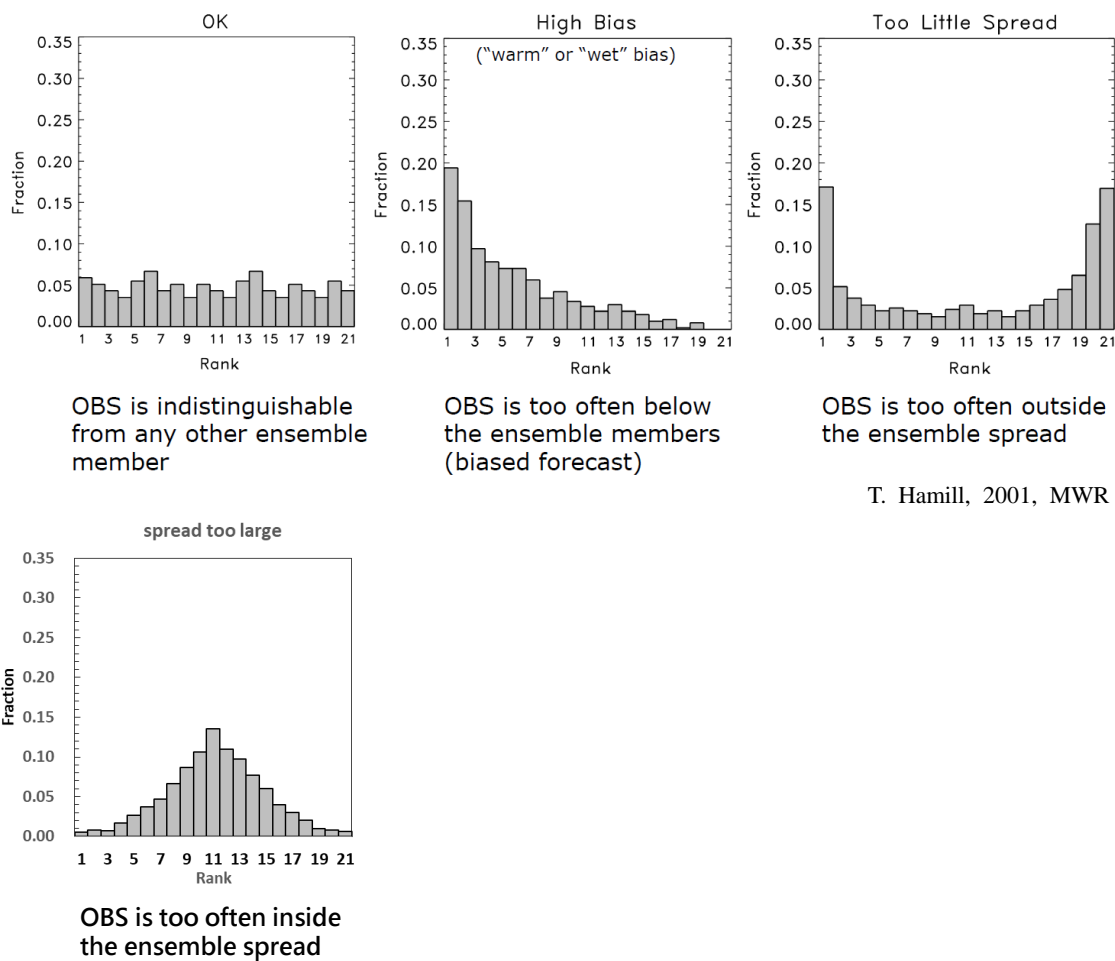


圖25、Talagrand Rank Histogram

### 2.2.3 系集預報執行力分析

本研究使用Brier Score (BS)和Brier Skill Score(BSS)、Reliability diagram及ROC來檢視系統之準確度、預報能力(skill)及區別事件發生及未發生的預報能力(李和洪, 2011; Wilks, 2006)。

#### (1)Brier Score (BS)和 Brier Skill Score(BSS)

BS 主要在計算機率誤差，估算預報值大於門檻值(threshold)(例如： $H_s > 2m$  或  $U_{10} > 10m/s$ )的機率與真值大於門檻值的機率之均方誤差，最好的預報  $BS=0$ ，最差  $BS=1$ ，定義如式(18)。BS 透過代數分解可以表示為式(19)，其中等號右邊第一項即定義為可靠度(reliability)，當所有事件都被預測到時  $P_k = \bar{o}_k$ ，則這個預測被稱為可靠(reliable)，故其值愈小愈好；第二項為解析度(resolution)，即區分具有明顯不同發生頻率情況的預報能力，與氣候平均值的差異程度，其值愈大愈好；第三項為不確定性(uncertainty)，為觀測的變化程



度(variability)，最大值為 0.25。

然而只求 BS 無法得知預報能力，若欲知其預報能力必須有可以比較的數值，此比較值可為氣候平均值或其他的數值模式，BSS 定義如式(20)，為相對於比較數值  $BS_{ref}$  的改善程度或提高準確度的比例，其中  $BS_{perfect}=0$ ； $BSS>0$  代表相對於氣候平均值或其他的數值模式更具有預報能力， $BSS<0$  表示不具預報能力或反而較差。若  $BS_{ref}$  為氣候平均值時，將式(19)代入式(20)，則式(20)變成式(21)，當 Reliability 等於 Resolution 時， $BSS=0$ ，因 uncertainty 一定為正值，故 Reliability 大於 Resolution 時， $BSS>0$ ，反之  $BSS<0$ 。

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (P_j - o_j)^2 \quad (18)$$

其中  $N$  是事件個數， $P_j$  為預報大於門檻值之機率，而觀測大於門檻值時  $o_j=1$ ，否則  $o_j=0$ 。

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K n_k (P_k - \bar{o}_k)^2 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K n_k (\bar{o}_k - \bar{o})^2 + \bar{o}(1 - \bar{o}) \quad (19)$$

Reliability      Resolution      Uncertainty

其中  $K$  是預報機率的分級數(classes)，例如預報機率分為 0、0.1、0.2...、1 等，則  $K$  等於 11， $n_k$  每個機率分級的事件個數， $\bar{o}$  氣候平均機率值， $\bar{o}_k$  每個機率分級下的事件發生個數之平均。

$$BSS = \frac{BS - BS_{ref}}{BS_{perfect} - BS_{ref}} = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}} \quad (20)$$

$$BSS = \frac{Resolution - Reliability}{Uncertainty} \quad (21)$$

## (2) Reliability diagram

主要在檢視預報與觀測相符的程度，即預報機率與觀測機率的對應值，如圖 26，圖中對角線代表完美的可靠度。訂定某一個門檻的條件下，在某個樣本中，統計大於門檻值之系集成員個數，並計算其占總成員數之比例，此為預報機率。在擁有相同預報機率的樣本中，統計觀測值大於門檻值的個數，而此個數占樣本數之比例即為觀測機率。no resolution 代表觀測之氣候平均值(climatological relative frequency)，即觀測大於門檻占所有觀測值的比例，no skill 代表無預報技術或不具預報能力，即 BSS 等於 0 的情形，此時 Reliability

與 Resolution 相等(Murphy, 1973)，而當 Resolution 等於 0 代表觀測機率等於氣候平均機率值，即代表 no resolution，換言之愈接近氣候平均值就代表不需要預報系統，用氣候平均機率即可。圖中灰階的部分代表系集系統具有預報能力，即  $BSS > 0$ ， $Resolution > Reliability$ 。

Reliability diagram 主要在檢視預報機率與觀測機率的相符程度，因為要區分到不同的機率分級中，故有多少樣本就很重要，否則會導致誤判，當然此亦與門檻有關，一般關心的是大於門檻的情況，若門檻太高導致樣本不足，(例如  $H_s > 4m$  以上)，將導致圖形不具代表性，故要視該區的波浪特性或風速特性而定。

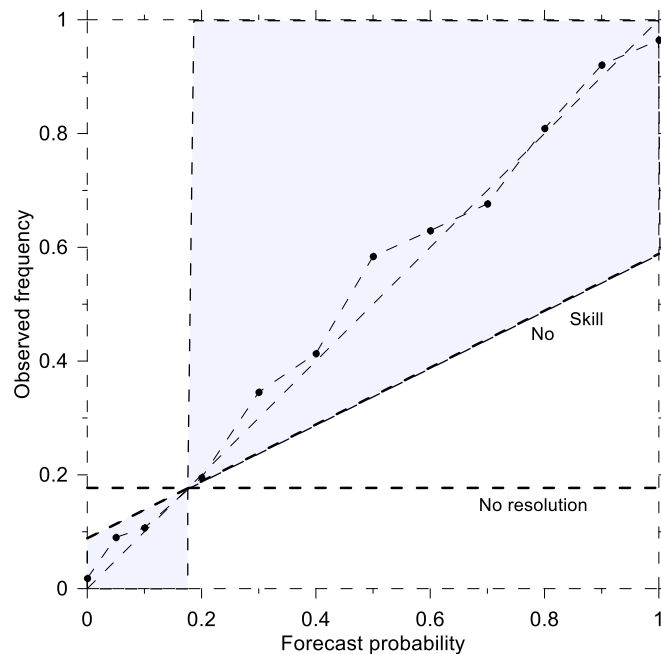


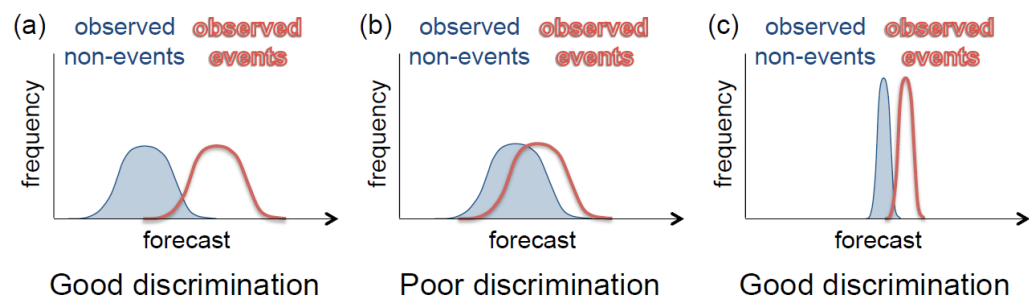
圖26、Reliability diagram

### (3)Relative Operating Characteristics (ROC)

主要在評估系統區別事件發生及未發生的預報能力(discrimination)，如圖 27，可以視為一種潛在有效的評估工具。主要在繪製某一個門檻的條件下，誤報率(false alarm rate)  $F_i$  及命中率(hit rate)  $H_i$  的關係圖，通常橫軸為誤報率或錯誤率，縱軸為檢測概率或命中率，當曲線愈貼近左上角代表命中率高而誤報率低，亦即較高區別事件發生的預報能力。其中命中率为預報命中(hit)除以預報命中及未預報(miss)的和，預報命中代表當觀測中它真實地發生了一個事件，也預測它會發生，未預報代表當一個事件在觀測中發生了，可是沒有預測它的發生，如圖 28之  $2 \times 2$  列聯表(Contingency Table)。故分母為觀測中

發生了大於門檻條件的發生個數，而分子為相對應的預測裡、會發生大於門檻條件的事件個數，如式(22)。而誤報率為誤報(false)除以誤報及無預報(correct rejection 或 correct negative 或 quiet)的和，誤報代表當一個事件在預測了它發生,可是觀測中它沒有發生時，無正確預報為當一個事件在預測和觀測中都沒有發生。故分母為觀測中未發生了大於門檻條件的事件個數，而分子為相對應的預測裡、預測其會發生大於門檻條件的事件個數，如式(23)。ROC 曲線即定義在不同預報機率門檻(threshold)下，前述誤報率  $F_i$  及命中率  $H_i$  的關係圖。

而 ROC 曲線下之面積(area)為衡量系統有無預報技術(skill)的指標，當此為 1 時代表完美預報，此大概在完美的決定性預報才可能發生，若為 0.5 時代表沒有預報技術，即隨機的預報情境，則其衍生在不同門檻下之誤報率及命中率呈現 45 度角之對角線，故當曲線愈貼近左上角代表命中率高而誤報率低，亦即較高的預報技術能力(圖 29)。因此所有的事件均介於左上角之三角形間，一般而言，面積需大於 0.7 以上，才可稱為其具有區別事件發生及未發生的預報能力。

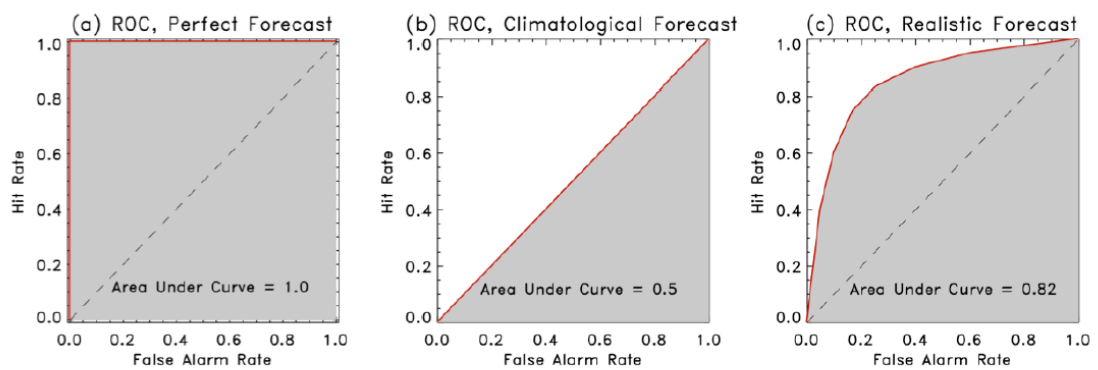


From L. J. Wilson

圖27、區別事件發生及未發生示意圖

		Observed		
		Yes	No	
Forecast	Yes	a (hits)	b (false alarm)	a+b
	No	c (misses)	d (correct rejection)	c+d
		a+c	b+d	

圖28、預報與觀測事件發生次數 2×2 列聯表



- Area under ROC curve (A) used as a single quantitative measure. Area range: 0 to 1. Perfect =1. No Skill = 0.5

資料來源: Malaquías Peña 2014

圖29、ROC 示意圖

$$\text{Hit rate} = \frac{\text{Hit}}{\text{Hit} + \text{Miss}} = \frac{a}{(a + c)} \quad (22)$$

$$\text{False alarm rate} = \frac{\text{False}}{\text{False} + \text{correct rejection}} = \frac{b}{(b + d)} \quad (23)$$

## 2.3 模式建置及計算範圍分析

### 2.3.1 計算範圍、風場及水深

本研究採用NWW3之多重網格波浪模式建構波浪系集預報系統，風場驅動使用氣象局之WRF系集風場，在作業化計算資源限制下規劃2層計算網格，包括第1層之大網格0.25度模式、第2層10公里網格，而不同網格使用網格尺度相近之系集風場。地形水深資料取自美國NOAA國家地球物理資料中心(NGDC) ETOPO1-1分之地形資料，近台灣海域部分再以海科中心500公尺水深資料取代之，最大計算區域範圍內之地形水深及巢狀網格分布如圖30所示，圖31為10公里網格之地形水深。

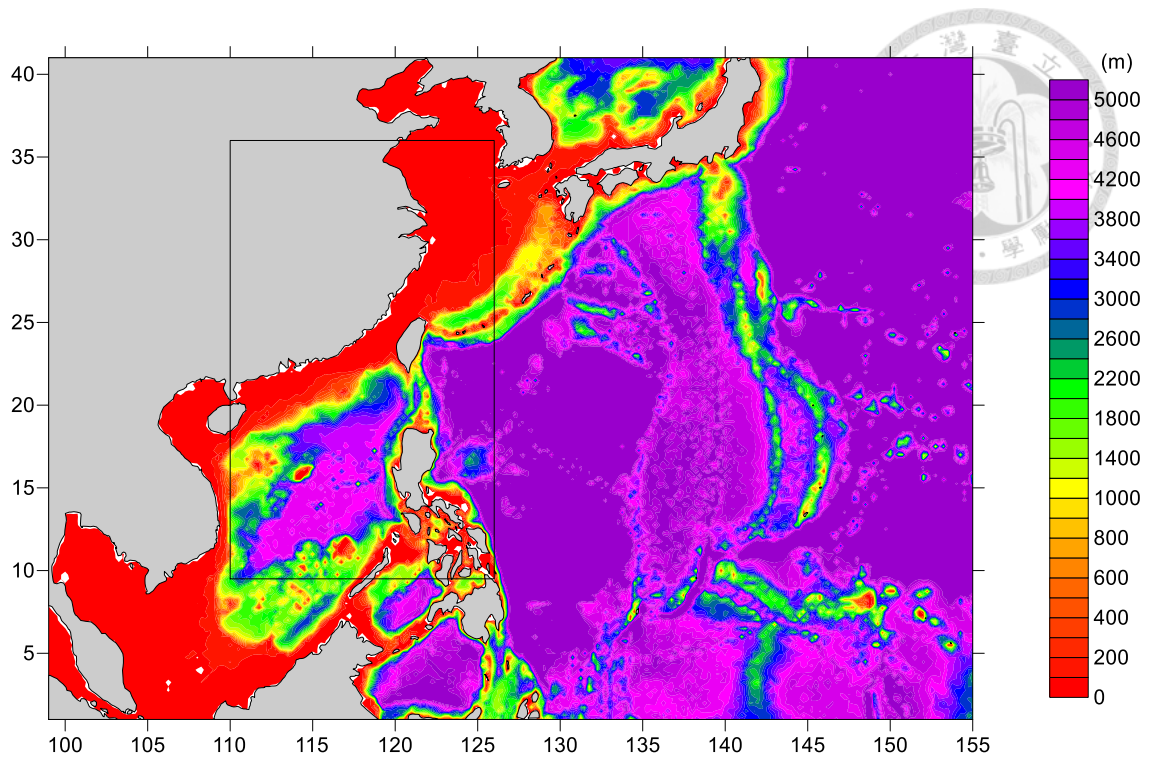


圖30、計算範圍水深及巢狀網格範圍

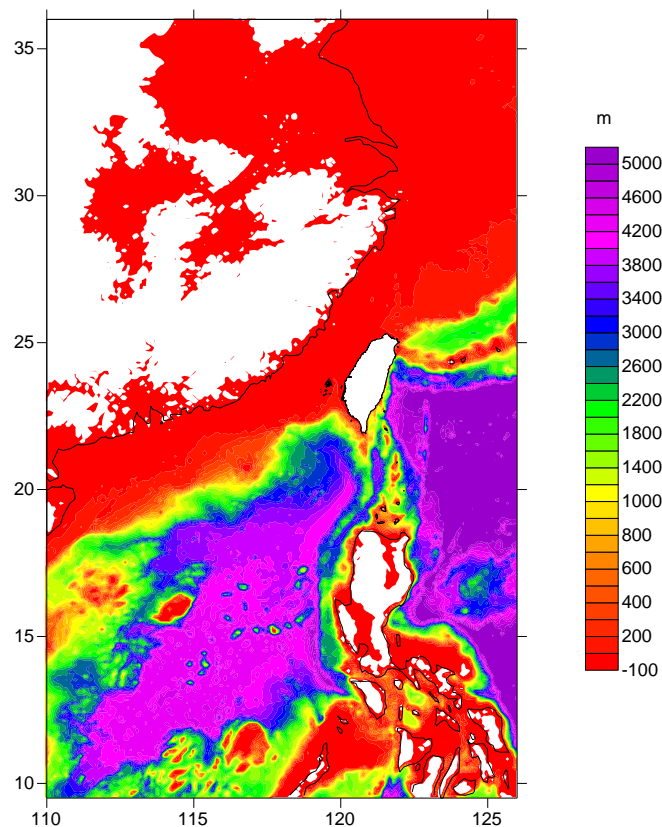


圖31、10 公里網格之地形水深

### 2.3.2 島嶼阻隔效應(unresolved obstacles obstruction)

當網格大小考慮計算時效時，無法小到完全解析出島嶼的效應時，將會造成模擬上很大的錯誤，因此需要特別處理，NWW3採用SWAN的方法，在空間傳遞

的數值方法上考慮網格邊界的阻隔效應，利用透明度(transparencies)來定義島嶼阻隔效應，0代表完全阻隔，1為完全無阻隔，而透明度分別在x及y方向表示，以島嶼的投影長度占網格大小的比例 $S_x$ 及 $S_y$ 換算之(圖32)。由於檢視每個網格的透明度非常耗時，Chawla and Tolman (2007)開發MATLAB軟體工具來產生每個網格的資訊，唯在台灣使用時須特別小心，因其使用GSHHS(Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline)的全球海岸線資訊，但在台灣部分，可能沿用GRS67的座標會有經度約600公尺的誤差，包括澎湖及其他離島，例如圖33可看出小琉球在Google Earth(WGS84)和GSHHS的差異(在東經120.35°的位置)，解決方法是建置台灣及澎湖海岸線資訊(逆時鐘方向)，再用其他程式取代台灣及澎湖等其他離島部分。

儘管島嶼阻隔效應可以有效的阻隔能量的傳遞，但對於陸地不規則地形的效應還是需要更小的網格解析度或非結構性網格以反映真實的地形變化，本研究受限於作業化計算資源，最小網格只有10公里，對於氣象局的觀測站(離岸小於5公里)而言，大部分均不具備解析附近地形的能力，因此本研究之分析主要針對不受陸地地形的洋測站為主，未來再藉由提高解析度的方式改進對近岸地形的解析能力。

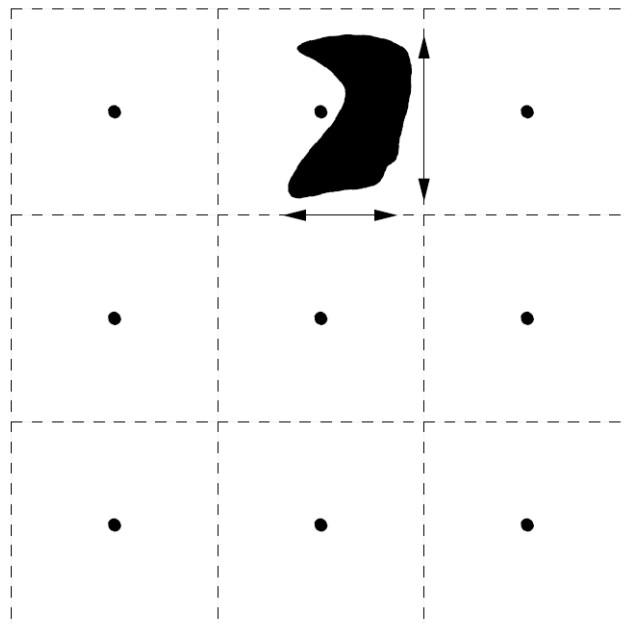


圖32、島嶼阻隔效應示意圖，•為計算網格點，虛線為網格點邊界

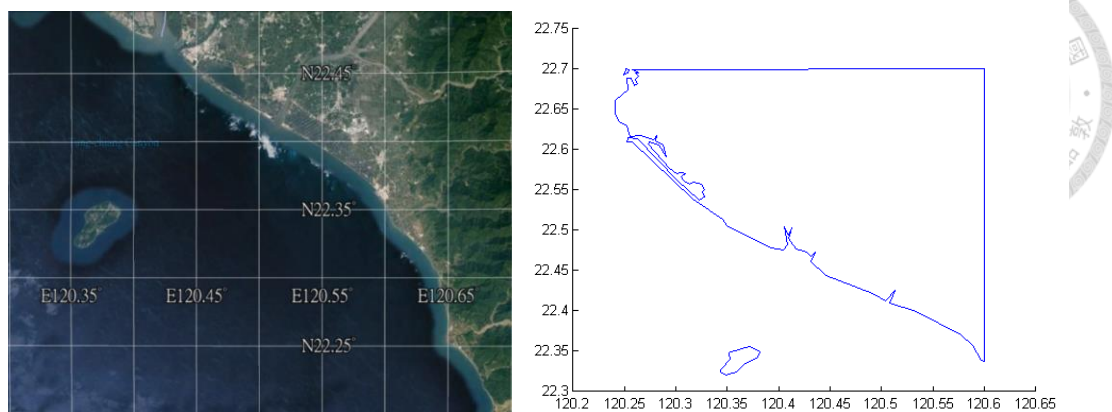


圖33、小琉球島嶼在Google earth(左)及在GSHHS(右)的經度偏差( $120.35^{\circ}$ )

### 2.3.3 計算範圍分析

NWW3模式為求解能量密度傳輸方程式，若最外圍計算網格屬於海域開放邊界，當能量自計算領域傳遞出去時，即被邊界吸收，但當能量自計算領域外傳入時，因其只靠風速轉換成的能量與上一階時域的值積分而成(梯度為0)，若有長週期之能量進入計算領域時，即可能產生低估的現象。受限於系集風場的範圍，波浪模式的東邊邊界訂在東經 $155^{\circ}$ ，而西太平洋影響台灣大部分的颱風都在此西邊生成(圖34)，對於侵台颱風或發布警報颱風的模擬影響較小，然而對於其他時間，整個北太平洋西向的浪往往在此範圍外形成(圖35)，或有未發布警報之颱風但其湧浪可能會產生影響(圖36)，都需進一步探討之，因此本研究採用決定性預報，探討不同最外計算範圍之差異對於計算結果之影響。

#### (1) 北太平洋西向長浪

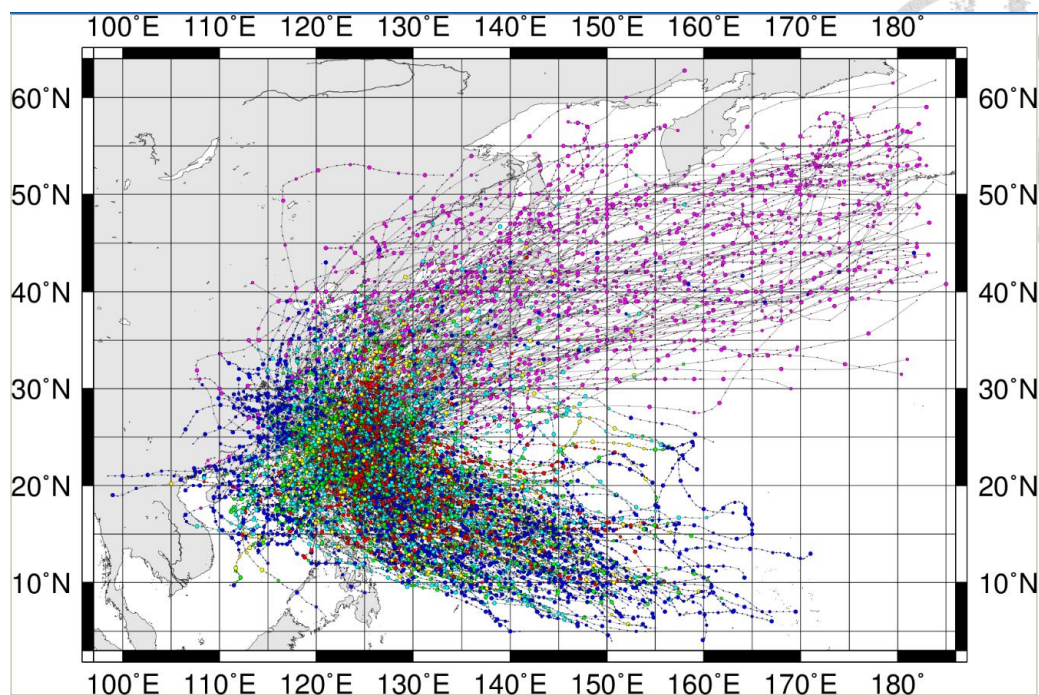
圖37為四層藍色公路預報之計算範圍與2016/12/03 00 第72小時預報波高分布圖，四層之計算解析度分別為 $0.5^{\circ}$ 、 $0.25^{\circ}$ 、 $0.1^{\circ}$ 、 $0.025^{\circ}$ ；前面二層均使用NCEP GFS的風場，後面二層為預報中心提供的風場，其中最外層之水深為ETOP1，近台灣則以海科中心500公尺水深取代之，部分島嶼小於網格長度則以在經緯度方向之投影占比額外設定之。

圖中顯示與NOAA的計算波高分布相近(圖35，使用NCEP GFS風場)。圖38至圖40為第二層至第四層，與原藍色公路三層巢狀網格之波高比較圖，在第二層之右邊邊界有明顯的差異，但在台灣附近的差異已經變小。圖41為台東外洋測站與馬祖測站之波高及週期比較圖，亦顯示東台灣海域受到計算範圍的影響差異較大。此說明計算範圍的選定對於此一波浪型態的差異性。

## (2)彩雲颱風

輕度颱風彩雲2015年10月3日在北太平洋東經約167度、北緯18度生成，路徑朝西北西移動，至東經約150度改向朝北，於10月8日減弱為低氣壓，由於離台灣甚遠並未有颱風警報發布，然而其位在計算範圍外生成，然後進入計算範圍後北上消失。圖42至圖44為2015/10/8 00之波高、週期及尖峰週期之比較圖，圖45為波高的差值(3層-4層)，圖中顯示受到邊界條件的影響，3層計算的颱風波高偏小，導致傳遞到台灣的週期亦偏小，而尖峰週期較長的長波在第4層亦已穿越巴士海峽，顯見雖然颱風仍遠離台灣，但長波對於台灣的影響會受到邊界條件的限制而偏小，波高差距會有1-1.5公尺左右。圖46及圖47分別為台東外洋測站及東沙島測站之波高及尖峰週期比較圖，圖中顯示加入第四層之波高及尖峰週期明顯較接近觀測值。

綜合上述分析顯示，設定東經155°以西之計算範圍，因為大部分侵襲台灣的颱風都在此範圍內發生，故影響不大，但對於北太平洋西向的風浪及短暫進入計算範圍之颱風，其對於台灣附近的海況都有不同程度的影響，尤其在長週期波浪的部分，此乃邊界條件之設定所致，故最佳方法乃將計算範圍加大使其涵蓋北太平洋或設定邊界值(可來自於其他全球模式，例如NCEP全球模式)。但對於系集波浪而言，目前係配合系集風場的計算範圍來訂定系集波浪之計算範圍，可能會產生上述問題，屬於邊界條件的不確定性，解決方法應該是尋求其他更大範圍波浪系集的邊界條件，或是加大原系集風場的計算範圍，唯目前仍暫時以東經155°為東邊邊界範圍。



資料來源：[http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/search\\_geo.html.en](http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/search_geo.html.en)

圖34、西北太平洋颱風路徑圖(1951-2017)

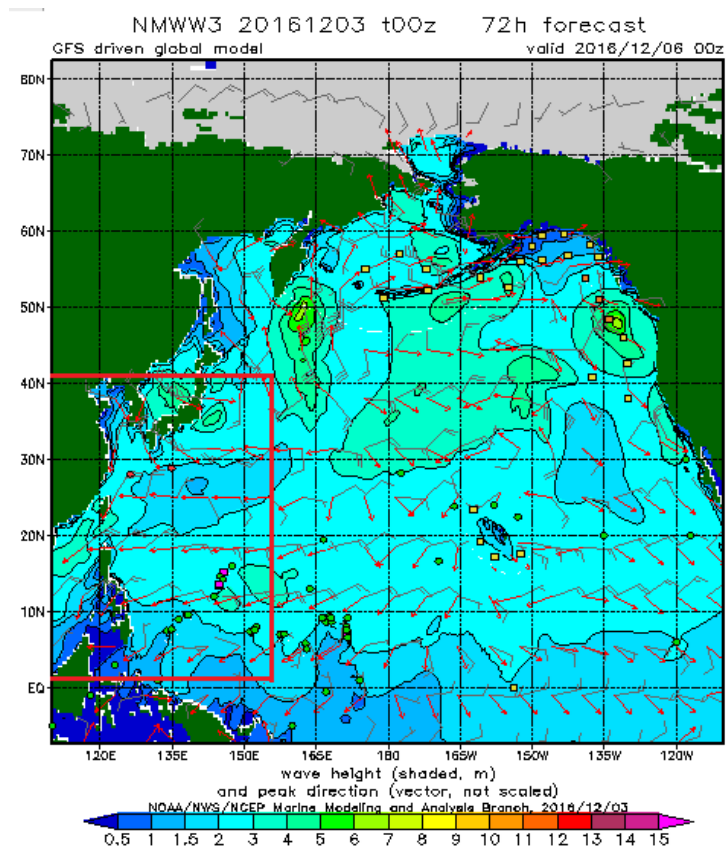


圖35、NOAA 波浪模式 NWW3 北太平洋預報波高分布圖

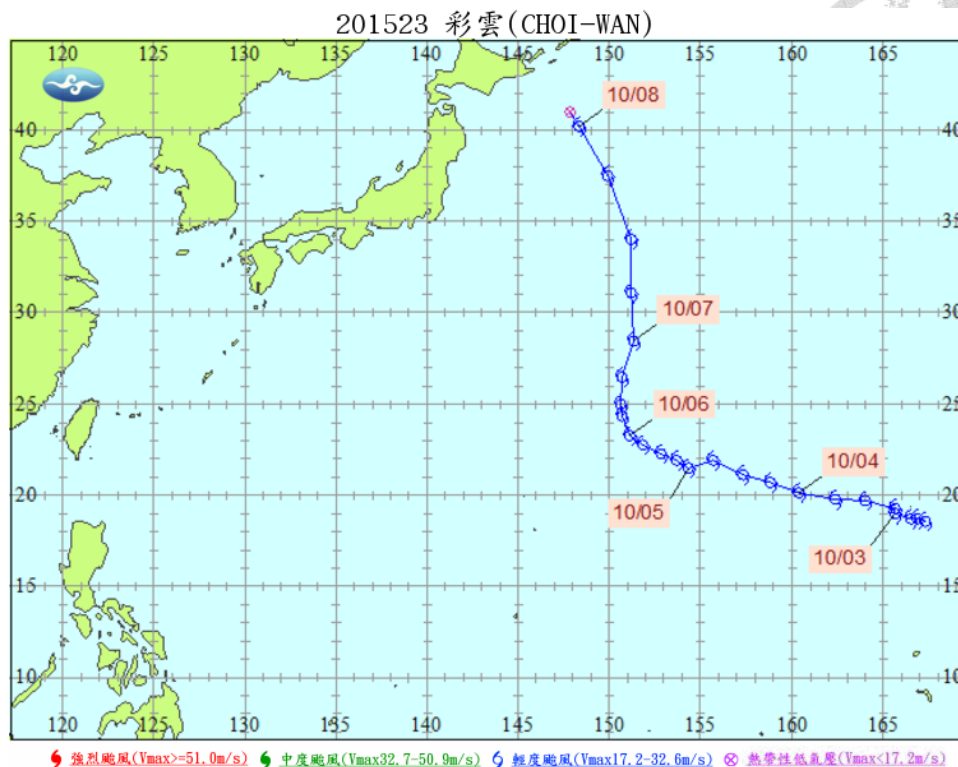


圖36、未發布颱風警報之彩雲颱風

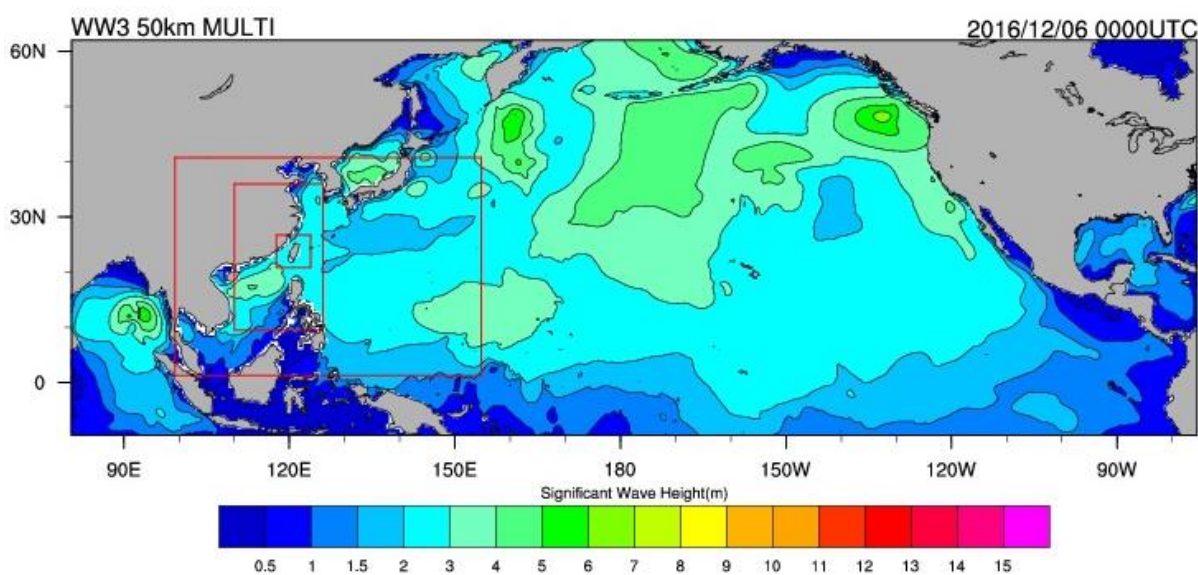


圖37、72 小時預報(2016/12/03 00)之波高分布及三層巢狀網格計算範圍

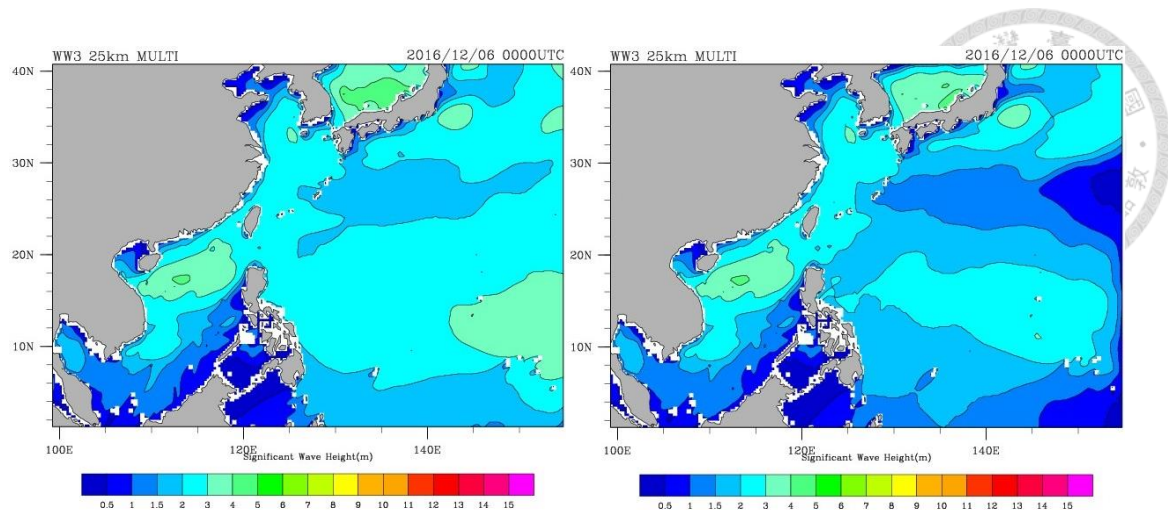


圖38、第二層巢網格 72 小時預報之波高比較圖(左：4 層，右：3 層)

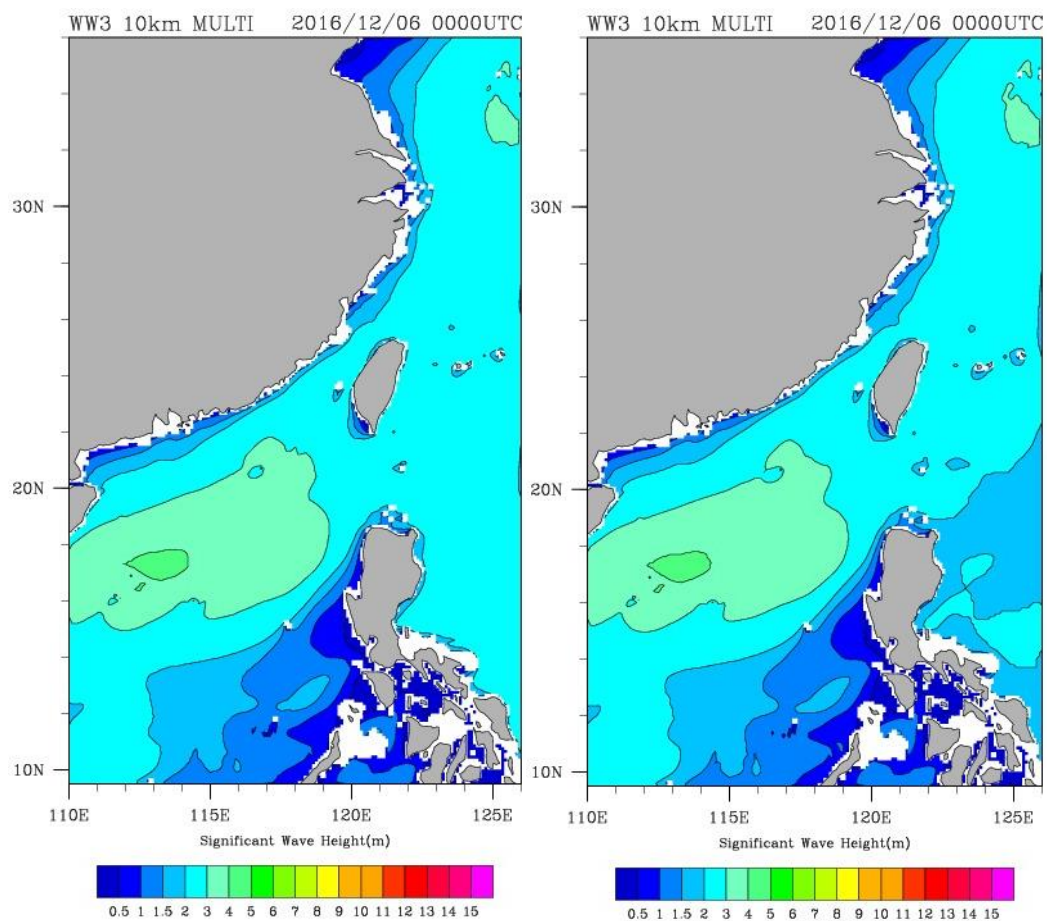


圖39、第三層巢網格 72 小時預報之波高比較圖(左：4 層，右：3 層)

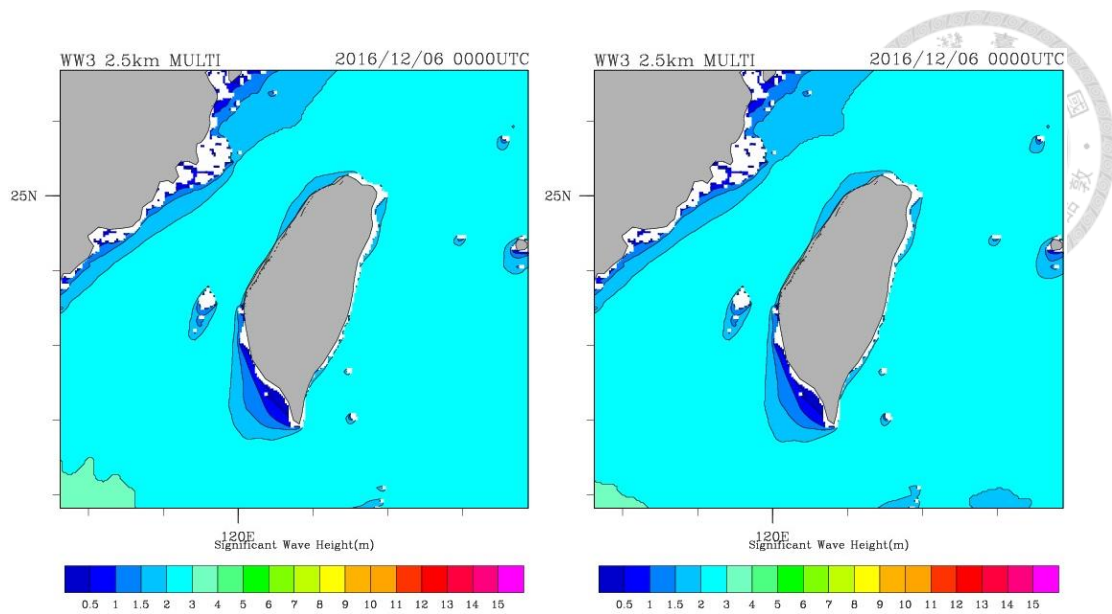


圖40、第四層巢網格 72 小時預報之波高比較圖(左：4 層，右：3 層)

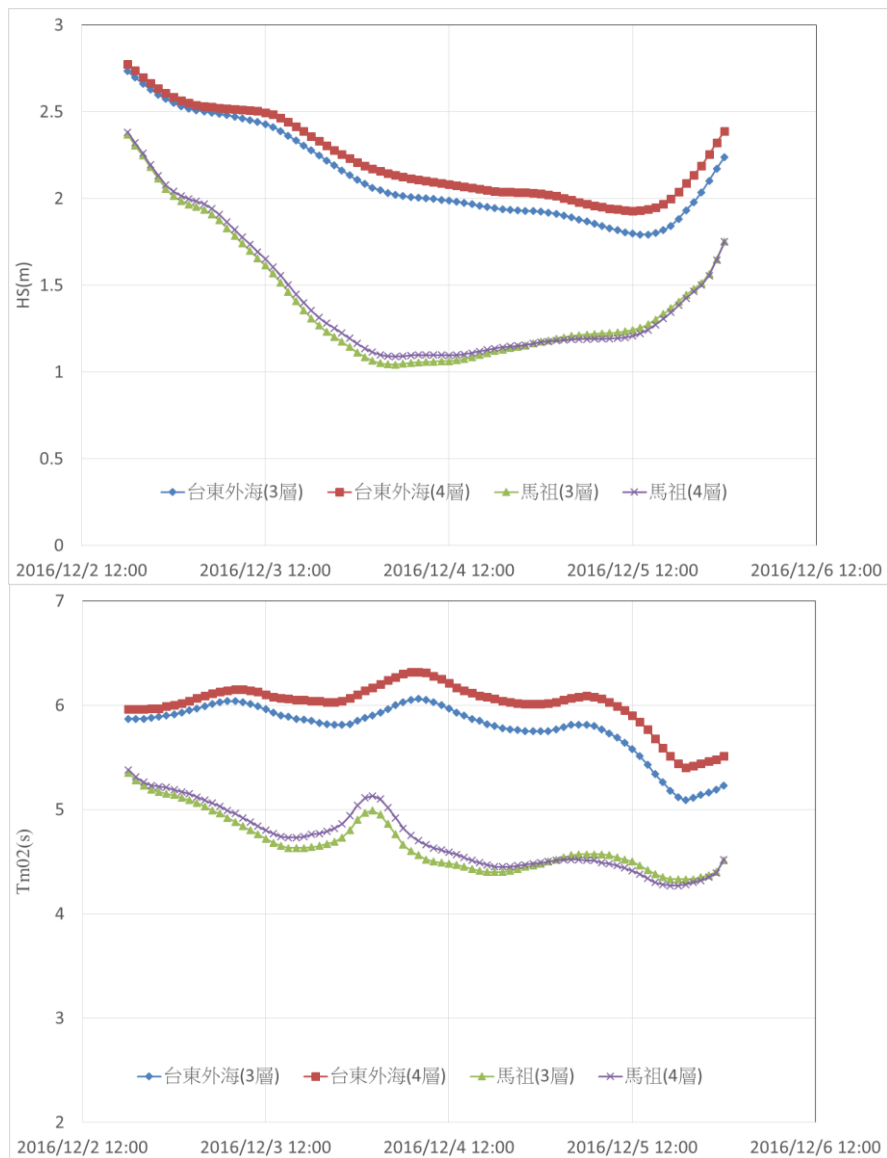


圖41、示性波高(上)及週期  $T_{m02}$ (下)在不同位置之歷時比較圖

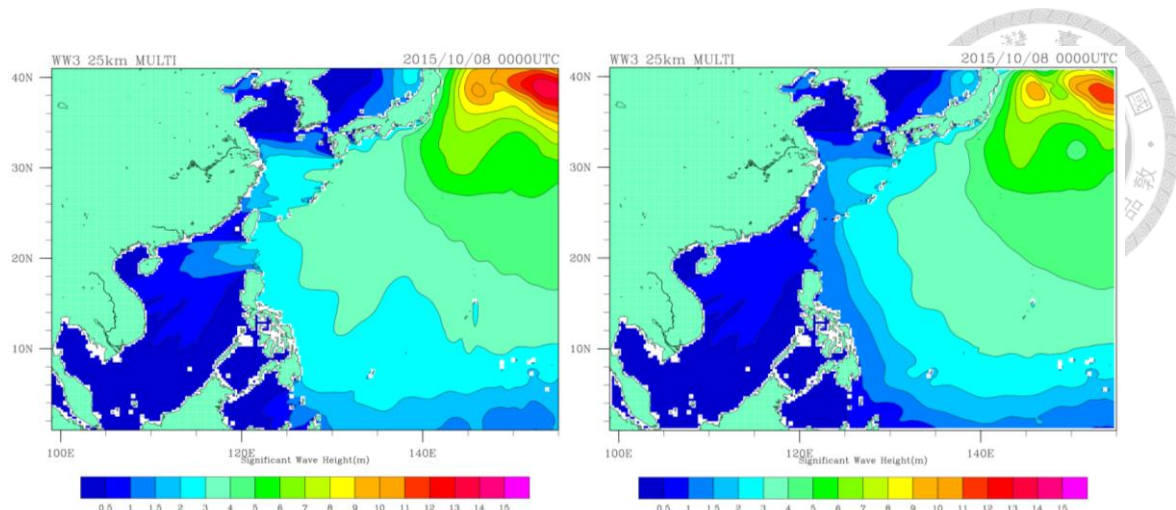


圖42、第二層巢網格(2015/10/08 00)之波高比較圖(左：4層，右：3層)

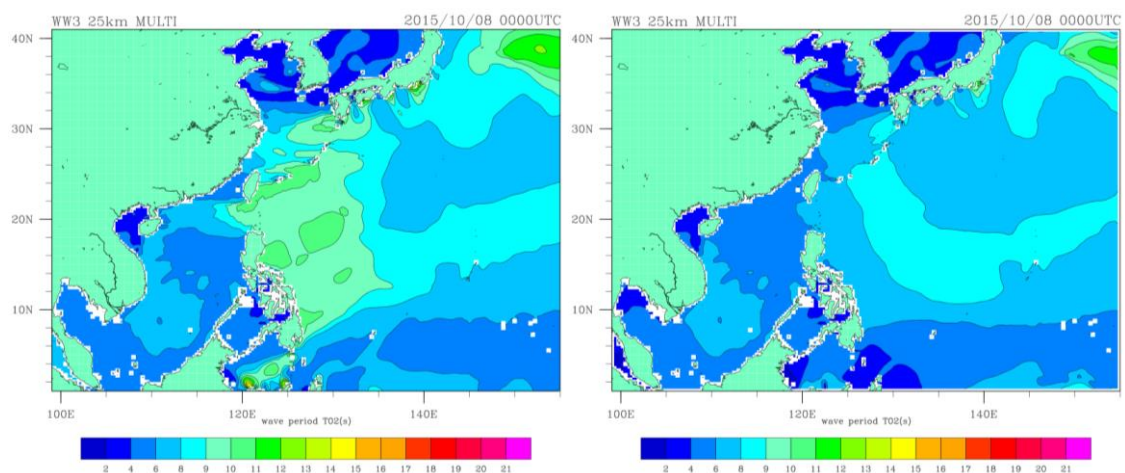


圖43、第二層巢網格(2015/10/08 00)之週期比較圖(左：4層，右：3層)

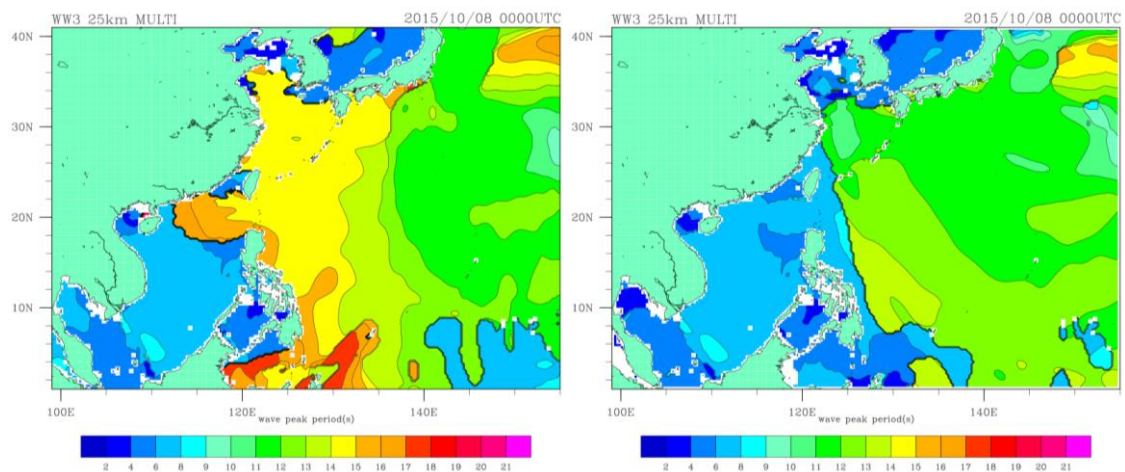


圖44、第二層巢網格(2015/10/08 00)之尖峰週期比較圖(左：4層，右：3層)

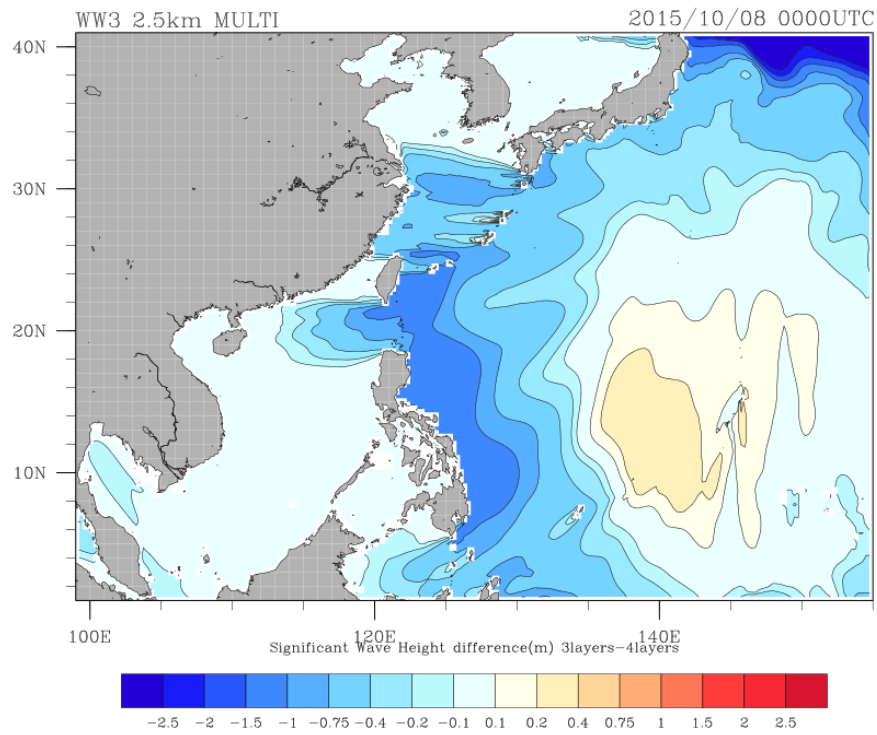
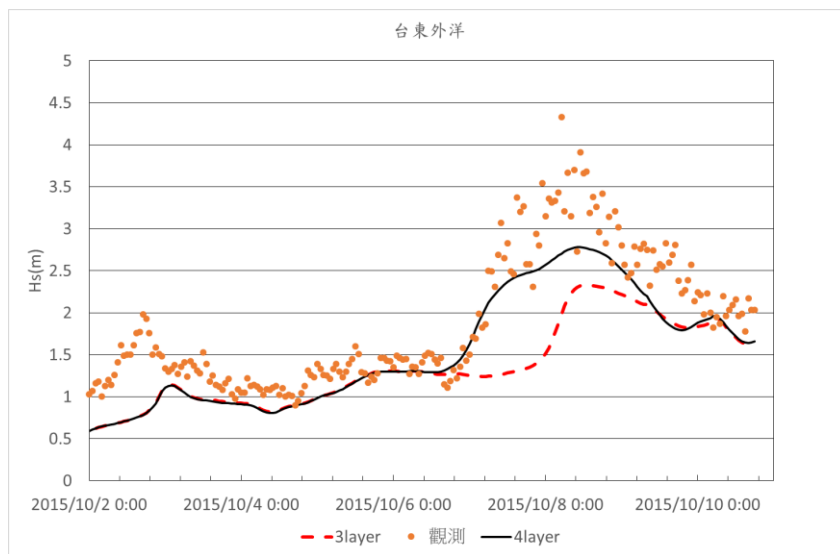


圖45、第二層巢網格(2015/10/08 00)之波高比較圖(3層-4層)



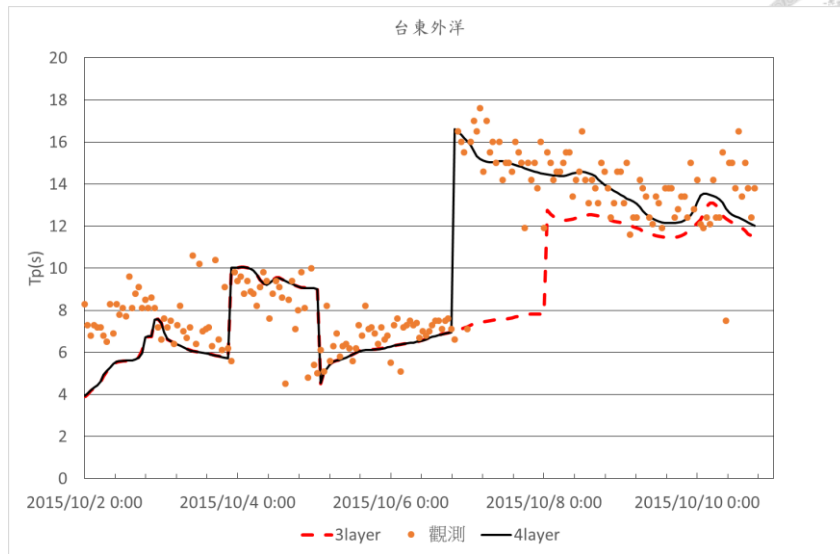


圖46、台東外洋測站之波高及週期比較圖(上:波高，下:週期)

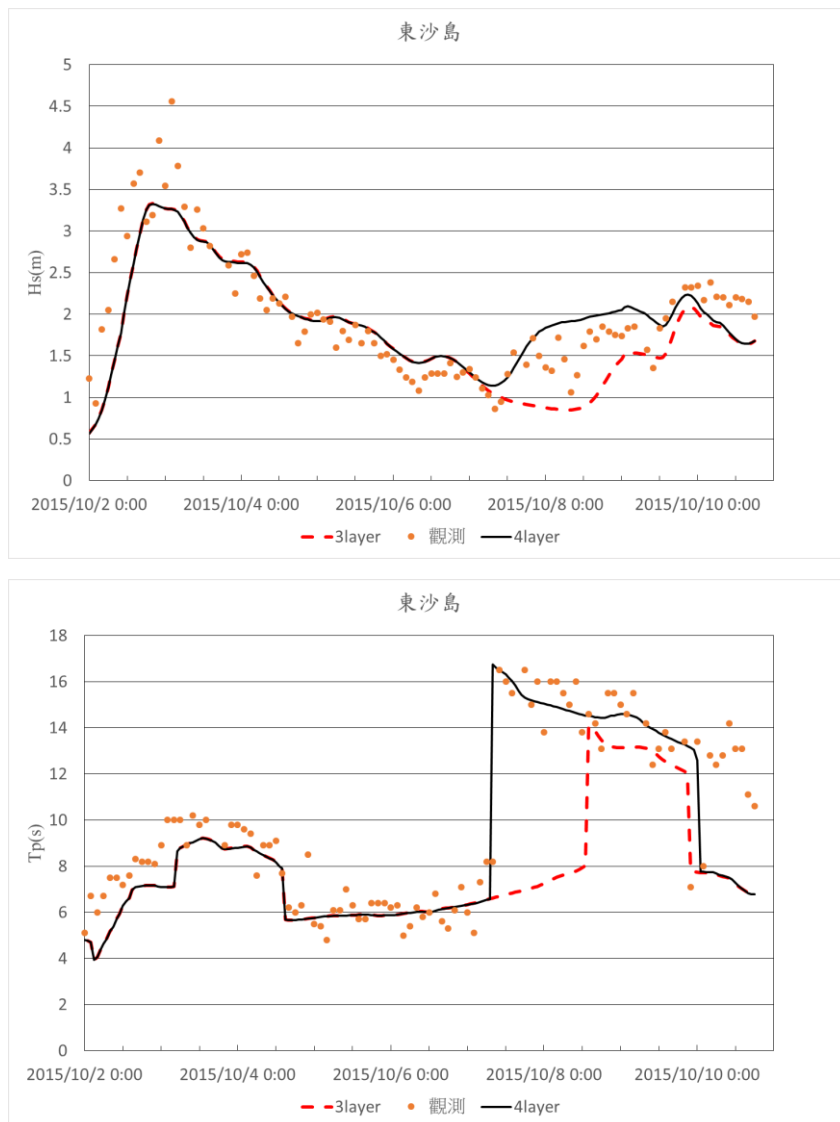


圖47、東沙島測站之波高及週期比較圖(上:波高，下:週期)

## 第三章 波浪系集預報系統驗證分析



### 3.1 不確定度分析

風浪傳播屬於弱非線性(weakly non-linear)及高消散性(high dissipative)的過程(Chen, 2006)，建置波浪數值模擬需考慮許多因素，不同的設定方式會造成數值模擬結果的差異，衍生出模擬的不確定性，而系集預報即是希望可以涵蓋模擬所有的不確定性。一般數值模擬的不確定性可以分為起始條件、邊界條件、模式參數設定等，而波浪模擬特有的水深條件等同於大氣模擬之高山分布，對於模擬的重要性亦需包括在內。以下蒐集相關研究，檢視分析波浪系集預報之不確定因素。

#### (1) 初始條件

波浪模擬求解弱非線性方程式，故起始條件的差異對於模擬的差異不大，Chen(2006)、氣象局(2013)利用 NWW3 模式模擬相同風場輸入、不同起始條件對於計算結果的影響，結果顯示一般在 24 小時以後計算結果即無差異，但當起始條件與對應風場之浪高差距太大時，所需的熱機時間會比較長。

#### (2) 水深及網格解析度

波浪在近岸會產生折射、繞射、反射、淺化等現象，而這些現象皆與水深條件有關，且解析這些現象亦與計算網格點大小有關，因此在近岸需要有準確的水深及足夠的網格解析度始能掌握到近岸的波浪變化，氣象局(2012)比較細網格與粗網格之準確度，顯示較細網格之模擬確實擁有較佳之準確度。

#### (3) 邊界條件

波浪的邊界條件包括計算範圍的邊界條件及風場的驅動。計算範圍邊界的影響如前節所述，當邊界條件若從其他模式取得可能存在模式間的差異性，需要事先評估，以本研究之計算範圍而言，最佳的解決方式為涵蓋整個大洋作為計算範圍，則可自然解決開放邊界條件設定的問題，但目前仍受限於系集風場模式的計算範圍。

風場驅動包括使用的風場來源及波浪模式的風場驅動公式，風場為驅動波浪計算的主要外力，風場的優劣為影響計算結果的主要因素，而風場計算為了解析不同空間尺度的變化，同樣使用巢狀網格計算的方式，部分亦使用雙向的計算模式，而波浪模式亦是如此，且常於不同網格計算時使用對應尺度的風場，氣象局(2012)曾比較在不同網格尺度使用不同風場，結果顯示若不

同尺度風場來源不一致時，小尺度偏差風場將直接導致計算結果的偏差，因此風場來源亦是波浪模擬的重要考慮因素，其準確度將直接影響波浪的計算結果。其次風場驅動公式的差異，由於目前波浪模式均使用經驗公式(empirical formula)，而此公式依據現場觀測資料與實驗迴歸而得，且經過與模擬風場比較驗證，故包含許多參數(如表 6)，因此不同參數設定適用在不同之模式風場來源，然而可調的參數及參數範圍均有限，而過去研究(氣象局，2011)曾針對 Tolman 公式進行參數敏感度分析，並利用 NCEP、JMA、NFS(Non-hydrostatic Forecast System)、WRF 風場進行率定，結果顯示普遍較原設定結果佳，但改善的程度不大。唯目前所有迴歸公式均未參考台灣海域的觀測資料，尤其台灣海峽的獨特性，因此風場公式與風場一樣為波浪模擬的最大不確定性因子。

#### (4)流、潮汐、冰等

海岸附近水深較淺，故潮汐的因素影響較大；流與波同向會造成波高減小，波長增加，逆向則會產生阻絕效應(blocking effect)，波長減小而波高增加，大部分發生在河流出海口及突堤後之渦流區；冰的部分，在模擬高緯度時必須加入，因其會阻礙波浪的生成，前節所述之北太平洋模擬在冬天時必須加入冰的濃度，本研究範圍尚未到達此緯度故不需考慮。

#### (5)其他

例如處理非線性波與波的 4 波交互作用採用省時的 DIA 方法，會導致波高偏低、平均週期偏大與較寬的方向散布。NWW3 使用多重網格(multi-grid)與單向網格(nest-grid)之差異，過去研究發現(氣象局，2012)，在使用相同之風場時，點輸出的差異不大(因點輸出與最小網格的值較為接近)，但多重網格具備雙向回饋機制，面的輸出較為一致，且作業化較為方便。其他相關參數，包括底床摩擦力、碎波條件等參數的影響均較小。

綜合以上分析可知，**波浪的不確定性以風場與風場公式(風浪交互作用)為最主要的來源**，至於空間邊界的影響，取決於邊界條件取得及風場的涵蓋範圍，有可能在部分海況時會產生較大差異；空間解析度的部分，以本研究為例，受限於作業化硬體需求及預報效率的要求，有時無法使用足夠的網格解析度準確解析地形的變化，而導致誤差來源。數值方法在非線性波的交互作用的解析上，因作業化的考量下亦會產生誤差。表 8 為波浪模式與大氣模式之不確定度比較分析。

表8、大氣及波浪模式不確定性因素比較表

	大氣模式	波浪模式
Governing equation	Non-linear	Weakly Non-linear
Initial condition	√	× (Chen, 2006)(CWB, 2013)
Boundary condition	√	√ (CWB, 2017)
Physics	√	× (CWB, 2011)
Numerical method	√	√

### 3.2 波浪系集成員分析

#### 3.2.1 波浪系集預報成員

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，因此需事先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，而分歧度主要來自於擾動，包括起始條件、邊界條件及模式參數。波浪預報屬於外力問題與起始條件較無關聯，模式參數的影響亦小，因此風場邊界條件成為主要的擾動來源。

檢視系集預報成員組成之計算時間包括2012年1~2月東北季風及2012年7~8月颱風時期(當時的系集風場每12小時執行一次)，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(如表9)，故分析7/30至8/31的波浪模擬共33天。WRF系集風場主要透過M00的控制風場經擾動產生，本研究除了比較系集波場的結果，同時計算控制風場M00的RMSE，藉以了解系集的改善程度，而系集的初始場採用12小時前的波浪預報場當作起始條件，依據文獻資料顯示，可採用單一控制波浪場，或由各預報波浪場前一報的預報場。目前Wave EPSgram使用單一控制波浪場當作起始條件，缺點是分歧度剛開始很小，同時會忽略了各個系集

潛在的波浪系統(例如湧浪)，替代方案是將各個系集的上一個起始時間產出的預報場當作各個系集這個時間的起始值，如此可保留各個潛在的波浪系統，同時避免計算一開始的分歧度即為零的情形(GEOWaFS)。預報風場則使用WRF 45公里及15公里二層之系集風場當作計算條件。

本研究使用 Member equal likelihood(MEL)、RMSE及系集分歧(SPRD)、Talagrand Rank Histogram(TRH)等統計指標來評估合適的系集成員。目前在氣象局藍色公路之決定性預報係採用Tolman & Chalikov(1996)公式，其執行力在氣象局(2010, 2011)之研究均曾分析探討之，因此本研究首先使用Tolman & Chalikov(1996)公式來分析評估系統是否能產生合適的系集成員，此外由於最小網格的解析度為10km，雖然模式建置已使用島嶼阻隔效應來考慮島嶼的影響，但對於近岸的地形變化還是有其無法克服的地方，且近岸測站離岸的距離都小於5公里，故所有分析指標主要以外海二個測站為主，其他近岸的分析結果為輔。

### 3.2.2 計算結果分析(Tolman)

模式使用Tolman & Chalikov(1996)的風場輸入公式，標示使用的風場公式為(Tolman)，附件一之圖1至圖6為在各個測站的MEL圖、TRH圖、RMSE及SPRD圖，包含 $U_{10}$ 風場及示性波高。圖48及圖49分別為1~2月及8月所有觀測站平均的MEL圖、TRH圖、RMSE及SPRD圖，其中在RMSE及SPRD圖，另繪出近岸(coast)測站的平均及外海(sea)測站(台東外洋及東沙島測站)的平均。

#### (1)風場

1~2月各站之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，而各站的平均亦顯示相同結果。在TRH圖方面，可以表示風場對於真值的離散程度，圖中顯示在龍洞、花蓮、蘇澳、金門等站呈現明顯L型的分布，表示預報值偏大，台東外洋及東沙島呈現較輕微L型的分布，表示預報值偏大的情形較不明顯。在龜山島、小琉球、澎湖、大鵬灣、新竹等站呈現輕微U型的分布，表示系集的離散度不足，真值總是落於較大或較小值的區間，而在七股測站則呈現「型(反L型)，表示預報值偏小。各站平均顯示預報值偏大的趨勢較為明顯。RMSE及SPRD圖部分，控制風場的RMSE在大部分測站均大於系集平均的RMSE(花蓮及金門測站除外)，顯示系集計算的誤差較小，而RMSE均大於SPRD，表示離散稍顯不足，就所有測站的平均而言，SPRD自1m/s緩慢增加至72小時的1.4m/s，RMSE則自2.2m/s增

加至2.8m/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。

在8月，各站之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，各站加總平均亦是如此。而在TRH圖方面，圖中顯示在龍洞、花蓮、蘇澳、龜山島、小琉球、澎湖、金門、台東外洋等站呈現L型的分布，表示預報值偏大，在台西平台、新竹、東沙島等站呈現不對稱U型或輕微U型的分布，表示系集的離散度不足，真值大部分落於較小值的區間，而在大鵬灣及七股測站則缺乏風場資料。各站平均之預報值則呈現偏大的趨勢，類似1~2月的分布情形。RMSE及SPRD部分，控制風場的RMSE除了花蓮測站外，在大部分測站均大於系集平均的RMSE，而RMSE均大於SPRD，表示離散稍顯不足，就所有測站的平均而言，SPRD自1.1m/s緩慢增加至72小時的2.2m/s，RMSE則自2.8m/s增加至3.5m/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。

綜合以上之分析，每個系集成員對於真值的預報命中率是平均的，普遍預報值較真值大，颱風時期之RMSE及SPRD均較1~2月大，且各測站系集之RMSE大部分小於控制演算之RMSE，顯示系集計算的誤差較小。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月二者之差異不大。

## (2)波高

1~2月各站之MEL圖，有幾個系集成員出現的次數較高，包括第5、11、17，尤其在龍洞、花蓮、蘇澳、龜山島、新竹等測站，其他測站則顯示系集成員的預報命中率較為平均，整體而言，除了第5、11、17個系集成員較為突出外，其餘成員算是平均。在TRH圖方面，可以表示對於真值的離散程度，圖中顯示在龍洞、花蓮、蘇澳、龜山島、新竹等站呈現L型的分布，表示預報值偏大，在小琉球、澎湖、金門、台東外洋、東沙島等站則呈現輕微的U型分布，表示系集的離散度稍嫌不足，真值會落於較大或較小值的區間，而在大鵬灣、台西平台、七股等測站則呈現「J」型(反L型)，表示預報值偏小。若將各站加總平均，預報值呈現U型，真值會落於較大或較小值的區間。

RMSE及SPRD圖部分，控制風場計算產生的RMSE在其中七個測站大於系集平均的RMSE，顯示系集計算的誤差較小，但在龍洞、蘇澳、龜山島測站則有交錯的情形，而新竹測站控制風場所計算的RMSE小於系集平均的RMSE，顯示系集計算的誤差較大，整體平均而言系集計算的誤差仍然較小，但需注意部分測站的表現。而RMSE均大於SPRD，表示離散稍顯不足，就所有測站的平均而言，SPRD自0.17m增加至0.2m，RMSE則自0.55m增加至72小時的0.65m。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，並未出現如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，圖中顯示在龍洞、花蓮、蘇澳、龜山島、澎湖等站呈現L型的分布，表示預報值偏大，新竹及七股亦呈現L型，但有小部分的預報值偏小，小琉球、金門、東沙島、台東外洋則呈現不對稱U，表示預報值偏大較多，而台西平台站則呈現另一種不對稱的U型分布，表示預報值偏小較多，若將各站加總平均，大部分亦呈現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，控制風場計算產生的RMSE均大於系集平均的RMSE，顯示系集計算的誤差較小。而RMSE均大於SPRD，顯示離散稍顯不足，就所有測站的平均而言，SPRD自0.2m些微下降再增加至0.4m，RMSE則自約0.7m增加至最高1.0m，其值亦較1~2月之模擬結果大，此與颱風導致大浪有關，且RMSE與SPRD的差距稍大些。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月每個波浪系集成員對於真值的預報命中率大致是平均的，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，而外洋二個測站，在1~2月

亦是U型，但真值落於較大或較小值的區間的比例較測站平均值小，在8月，呈不對稱U型，顯示預報值偏大較多。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月各測站系集之RMSE大部分小於控制演算之RMSE，8月則所有測站系集之RMSE大部分小於控制演算之RMSE，顯示系集計算的誤差較小。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。

蒐集NOAA過去針對其系集系統所作的評估(Cao et al., 2009)，其使用之波浪起始值為前6小時之預報值，7.5年系集計算與浮標測站的比較結果顯示，其72小時及96小時波浪場之TRH圖呈現輕微的U型分布。風場與浪場控制演算的RMSE均大於SPRD，2008/3/1~2008/6/30風場的SPRD自0.5m/s增加至72小時的1.1m/s，RMSE則自1.1m/s增加至72小時的1.4m/s，浪場的SPRD則自0.19m增加至72小時的0.27m，RMSE則自0.29m增加至72小時的0.35m，另以各個月的平均顯示，風場的SPRD自0.5m/s增加至72小時的0.9~1.5m/s，RMSE則自1.3~2m/s增加至72小時的1.8~2.3m/s，浪場的SPRD則自0.1m增加至72小時的0.13~0.27m，RMSE則自0.32~0.56m增加至72小時的0.38~0.62m。

比較本研究及NOAA之研究顯示，雖然本研究使用風場的SPRD較大但RMSE亦偏大，顯示本研究風場的系集平均的誤差較大，在浪場方面，本研究的SPRD雖然稍小於2008/3/1~2008/6/30的平均值，但在預報起始階段則大於各月的平均值，唯RMSE仍稍大於各月平均值的上限，顯示波浪的模擬誤差仍大，誤差的來源除了部分可能來自於風場的誤差外，起始條件來自於不同小時前的預報場亦會有關(本研究之風場每12小時預報一次，NOAA為每6小時預報一次)。依據氣象局(2012)的分析顯示，使用氣象局2011年10公里風場與衛星推估及ECMWF風場之RMSE，從00的2.7m/s增加至60小時的2.8m/s，而其浪場與衛星資料比較顯示RMSE從00的0.55m增加至60小時的0.7m，在測站部分，除了大鵬灣測站之RMSE小於0.5m外，其餘測站均大於0.5m，此與目前使用WRF系集風場的浪場之RMSE接近。

### 3.2.3 計算結果分析(WAM4)

前節所述模擬的結果在近岸的計算結果差距較大，受到模式最小網格10公里

解析度的影響很大(氣象局, 2012), 而外海測站在1~2月的計算結果尚佳, 但在颱風時期仍偏大, 而外海的風場並未產生強烈的BIAS, 現階段應無需進行bias-corrected的風場修正, 因此在風場不變的情形下, 本研究著手改進外海測站在颱風時期的計算結果。

由於風場經驗公式之參數均透過觀測調整而得, 氣象局(2011)「災害性天氣監測與預報作業建置計畫-改善海象預報作業100年度委外開發設計案」進行NWW3模式之參數敏感度分析時, 係針對Tolman & Chalikov(1996)的風場輸入公式, 顯示各個風場的差異性不大, 故無法藉由調整Tolman & Chalikov(1996)的風場輸入公式來改進外海測站在颱風時期偏高的計算結果。因此本研究使用WAM4(2008)公式來進行計算, 參考Rascle and Ardhuin (2013)的設定, 各站之計算結果如附件一之圖7至圖12, 標示使用的風場公式為(WAM4)。圖50及圖51分別為1~2月及8月所有觀測站平均的MEL圖、TRH圖、RMSE及SPRD圖。

風場的分析結果與使用公式無關, 已如前節所述。在波浪部分, 1~2月各站之MEL圖顯示, 幾個特殊系集成員出現的次數已降低。在TRH圖方面, 由於輸入的能量降低使得計算值偏小(如圖21), 亦使得預報值大於真值的趨勢趨緩, 這也使得原先輕微U型分布的幾個測站往計算值偏小方式轉變(小琉球、澎湖、金門、台東外洋、東沙島等站)。RMSE及SPRD圖部分, 控制風場計算的RMSE在大部分測站均大於系集平均的RMSE, 顯示系集計算的誤差較小, 而新竹測站有交錯的情形出現, 整體而言, 系集計算的誤差仍然較小。就所有測站的平均而言, SPRD自0.17m增加至0.18m, RMSE則自0.5m增加至72小時的0.6m, 較使用Tolman公式略低。而外洋二個測站的平均則變差。

在8月之MEL圖, 並未出現像1~2月次數特別高的系集成員, 但也較使用Tolman公式平坦。而在TRH圖方面, 圖中顯示在龍洞、花蓮、蘇澳、龜山島等站仍然呈現L型的分布, 且較使用Tolman公式之預報值偏大的頻率更高, 顯示這幾個測站在颱風時並非僅降低輸入的能量即可, 需要進一步加以探討, 其他測站則如1~2月的情形, 預報值大於真值的趨勢趨緩, 同樣這也出現在外海測站。RMSE及SPRD圖部分, 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, 尤其改善外海測站在颱風時期的計算結果。

#### 3.2.4 計算結果分析(10T10W)

前二節分別將外海測站利用二種公式，於1~2月東北季風期間及8月颱風時期均調整至較合理的階段，顯示無法以一套風場公式涵蓋所有的海況，而由MEL圖顯示(附件一之圖1及圖10)，各個系集成員在不同風況條件下、使用不同公式對於真值的預報命中率較各站平均一致，代表使用每個系集成員的貢獻度一致，因此本研究提出整合二種不同公式的計算結果加以分析，選取前10個系集使用Tolman公式，後10個系集使用WAM4公式，計算結果如附件一之圖13至圖18，標示使用的風場公式為(10T10W)。圖52及圖53分別為1~2月及8月所有觀測站平均的MEL圖、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。

### 3.2.5 計算結果分析(10W10T)

選取前10個系集使用WAM4公式，後10個系集使用Tolman公式，計算結果如附件一之圖19至圖24，標示使用的風場公式為(10W10T)。圖54及圖55分別為1~2月及8月所有觀測站平均的MEL圖、TRH圖、RMSE及SPRD圖。圖中顯示與10T10W的組合結果近似，二種組合之差異不大。

### 3.2.6 綜合分析

本研究利用多重網格建置波浪系集預報，但由於計算資源及作業化時效性的限制，採用二層網格，最小網格解析度為10公里，使得對於部分近岸測站之模擬較差，因此以外洋二個測站的比較結果作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月季風期及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的組合方式，保留各個風場輸入公式在不同風場狀況下的優點，同時提高SPRD，使得系集系統已較能掌握模式的不確定因素。

假如計算資源足夠的情形下，亦可由20個系集風場驅動40個系集浪場，可能的結果亦不相同；但在固定20個系集成員的條件下，本研究提出各10個系集的做法，由於每個系集成員的貢獻度差異不大，由那10個成員的組成結果應該差異亦不大(由10W10T和10T10W的差異不大獲得驗證)，目前因為選擇二個條件(東北季風及颱風時期)來評估，二個風場輸入公式又剛好被評估較為適合個別的條件，因此採用各半的邏輯應該是合理的，但比重各10是否為最佳，則是未來值得探討的

議題。

而在某些測站幾個特殊系集成員與真值較為接近導致出現的頻率甚高，為未來需重新檢視的部分。後續將以此組合(10T10W)建置作業化波浪系集預報系統，並蒐集足夠模擬資料來進行執行力分析。



表9、2012/8 颱風一覽表

年份	編號	中文名稱	英文名稱	警報期間	近台強度	侵台路徑分類	近台近中心最低氣壓(hPa)	近台近中心最大風速(m/s)	七級風暴風半徑(km)	十級風暴風半徑(km)	警報發布報數
2012	1214	<u>天秤</u>	TEMBIN	08/26 ~ 08/28	中度	特殊路徑	965.0	35.0	180	50	21
2012	1214	<u>天秤</u>	TEMBIN	08/21 ~ 08/25	中度	特殊路徑	945.0	45.0	180	50	33
2012	1213	<u>啟德</u>	KAI-TAK	08/14 ~ 08/15	輕度	--	995.0	20.0	150	--	10
2012	1211	<u>海葵</u>	HAIKUI	08/06 ~ 08/07	中度	--	960.0	35.0	180	50	11
2012	1209	<u>蘇拉</u>	SAOLA	07/30 ~ 08/03	中度	2	960.0	38.0	220	80	31

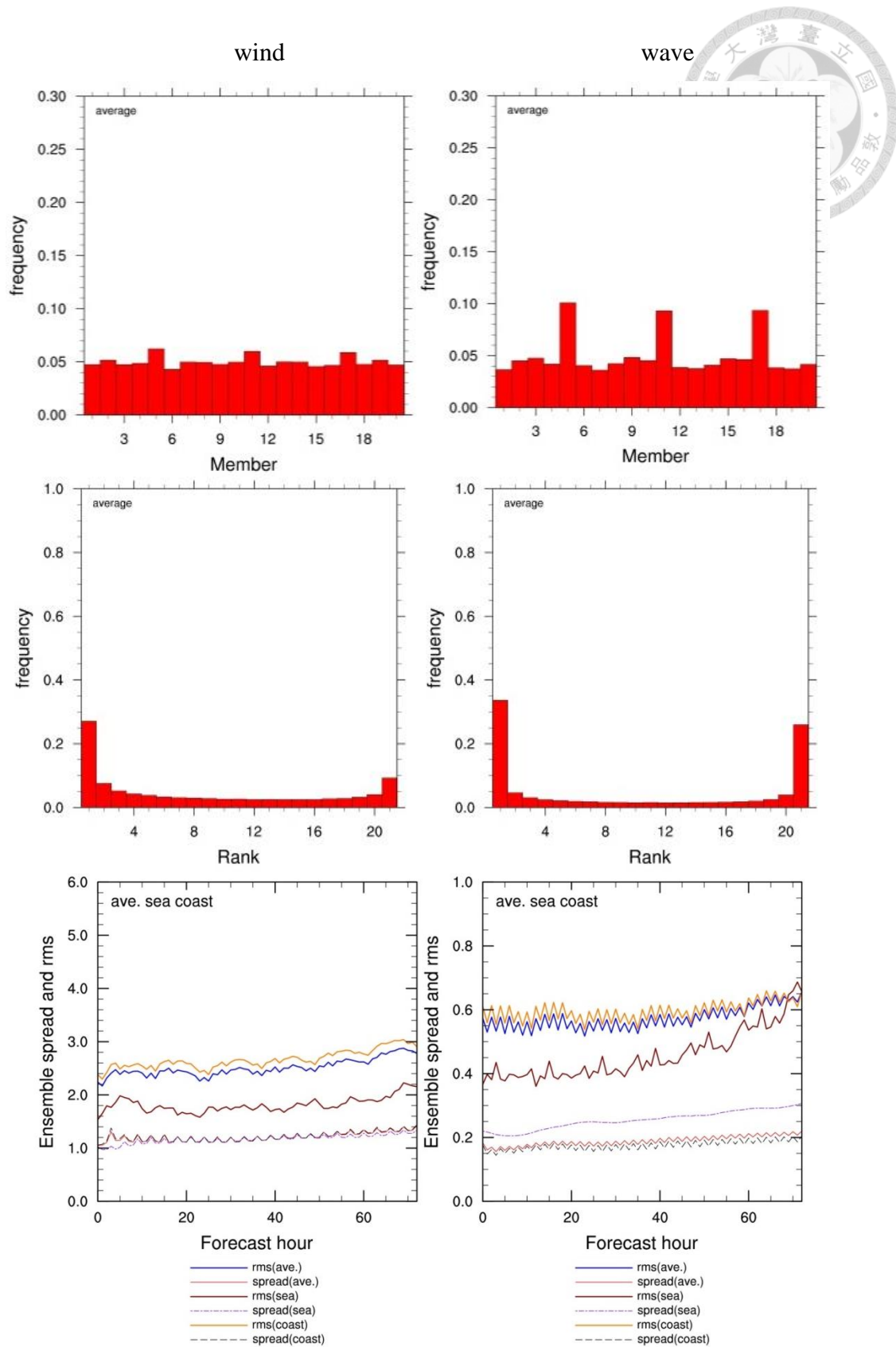


圖48、2012/1~2 月  $U_{10}$  及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH  
下：RMSE 及 SPRD)(Tolman)

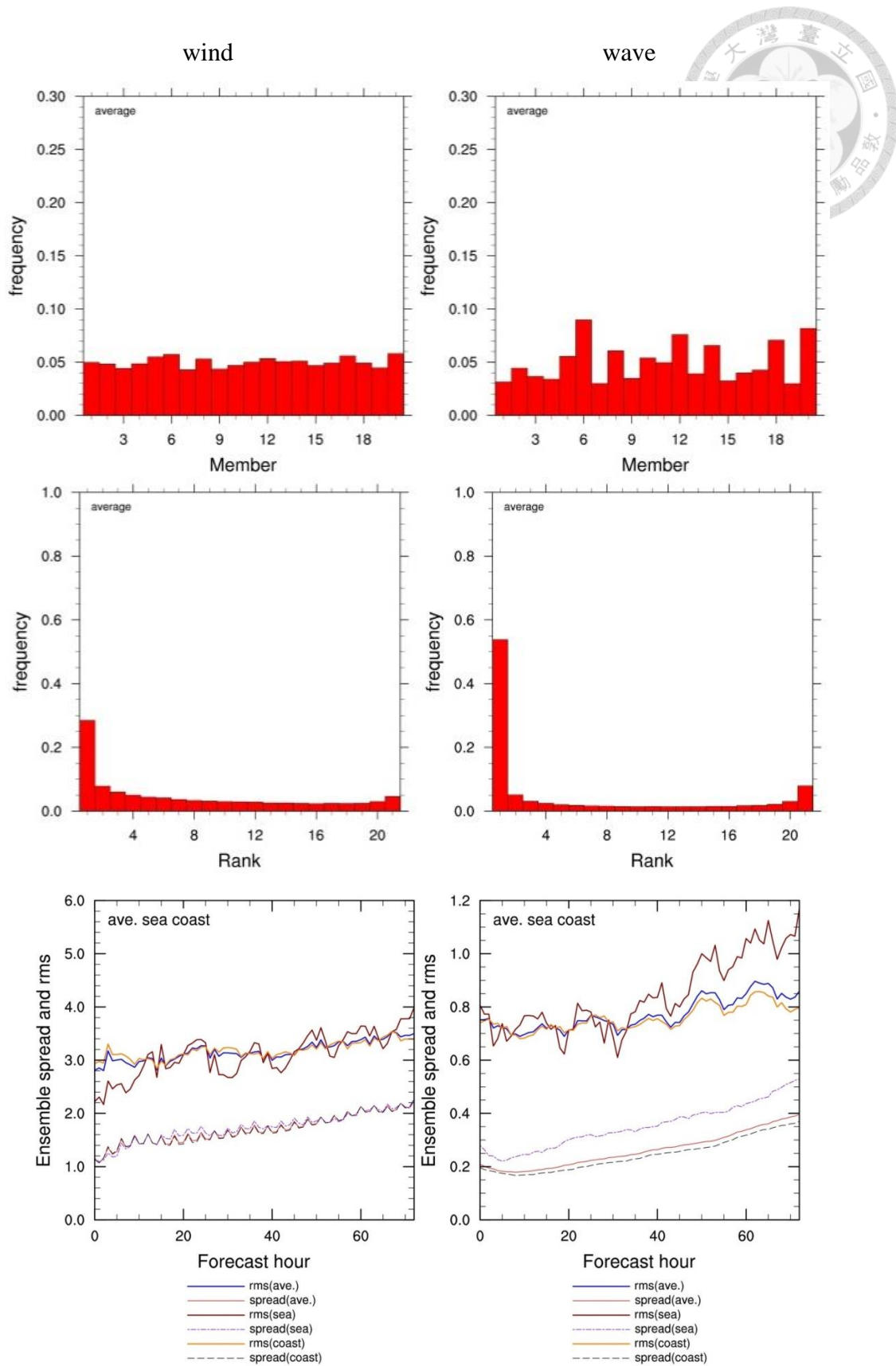


圖49、2012/8月  $U_{10}$  及示性波高之測站平均系集統計指標(上:MEL 中:TRH 下:RMSE 及 SPRD)(Tolman)

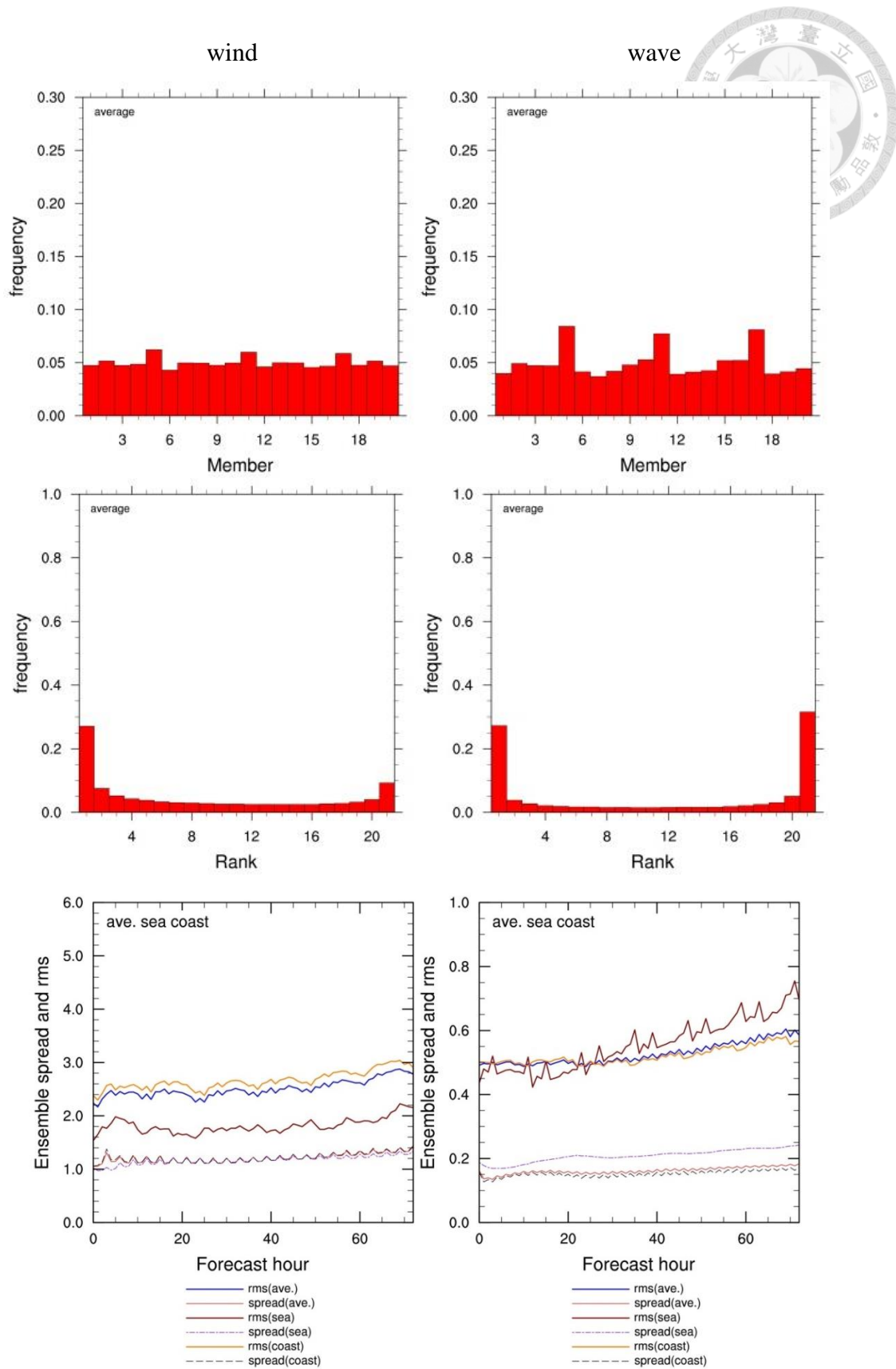


圖50、2012/1~2 月  $U_{10}$  及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH  
下：RMSE 及 SPRD)(WAM4)

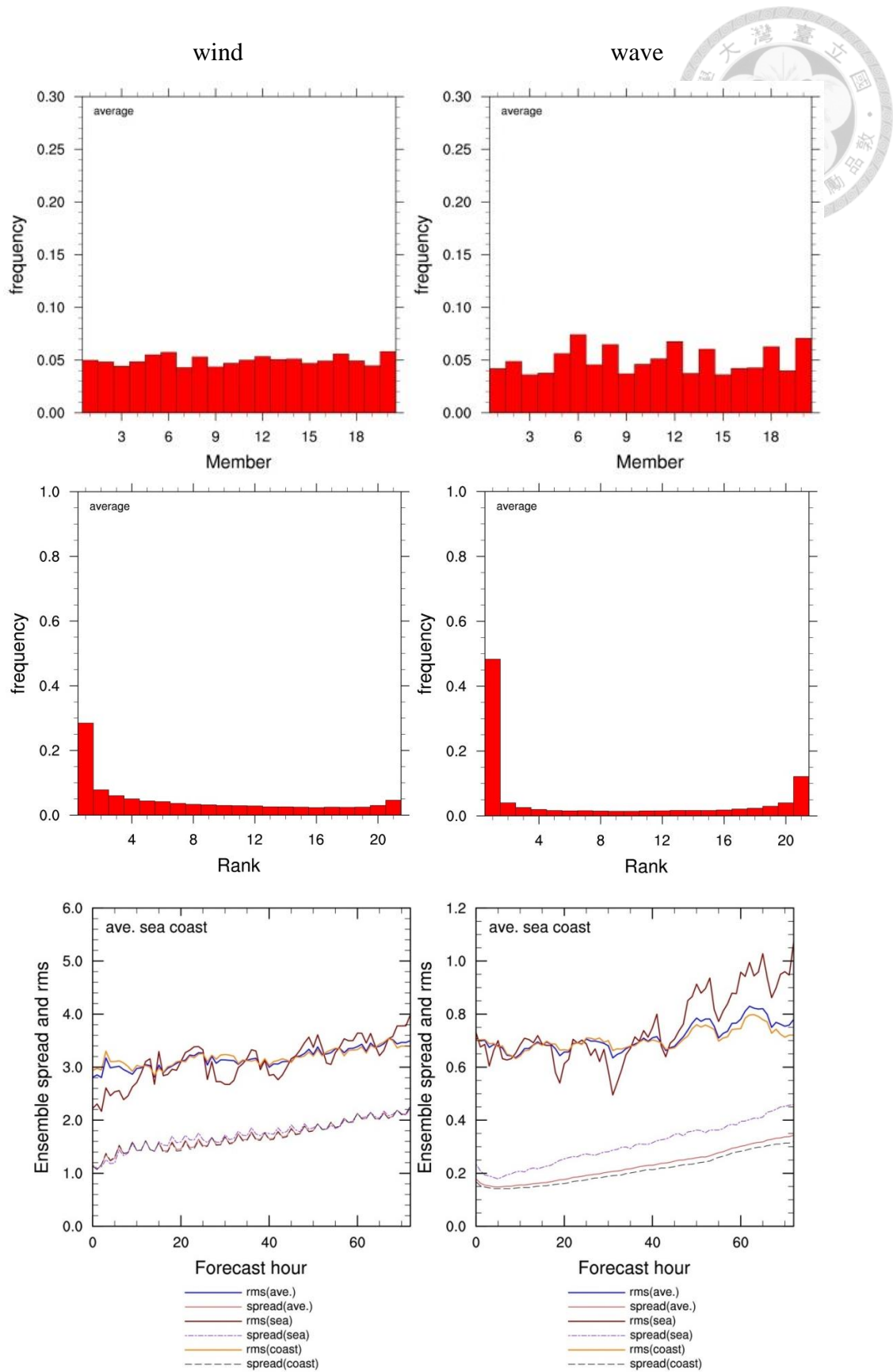


圖51、2012/8 月  $U_{10}$  及示性波高之測站平均系集統計指標(上: MEL 中: TRH 下: RMSE 及 SPRD)(WAM4)

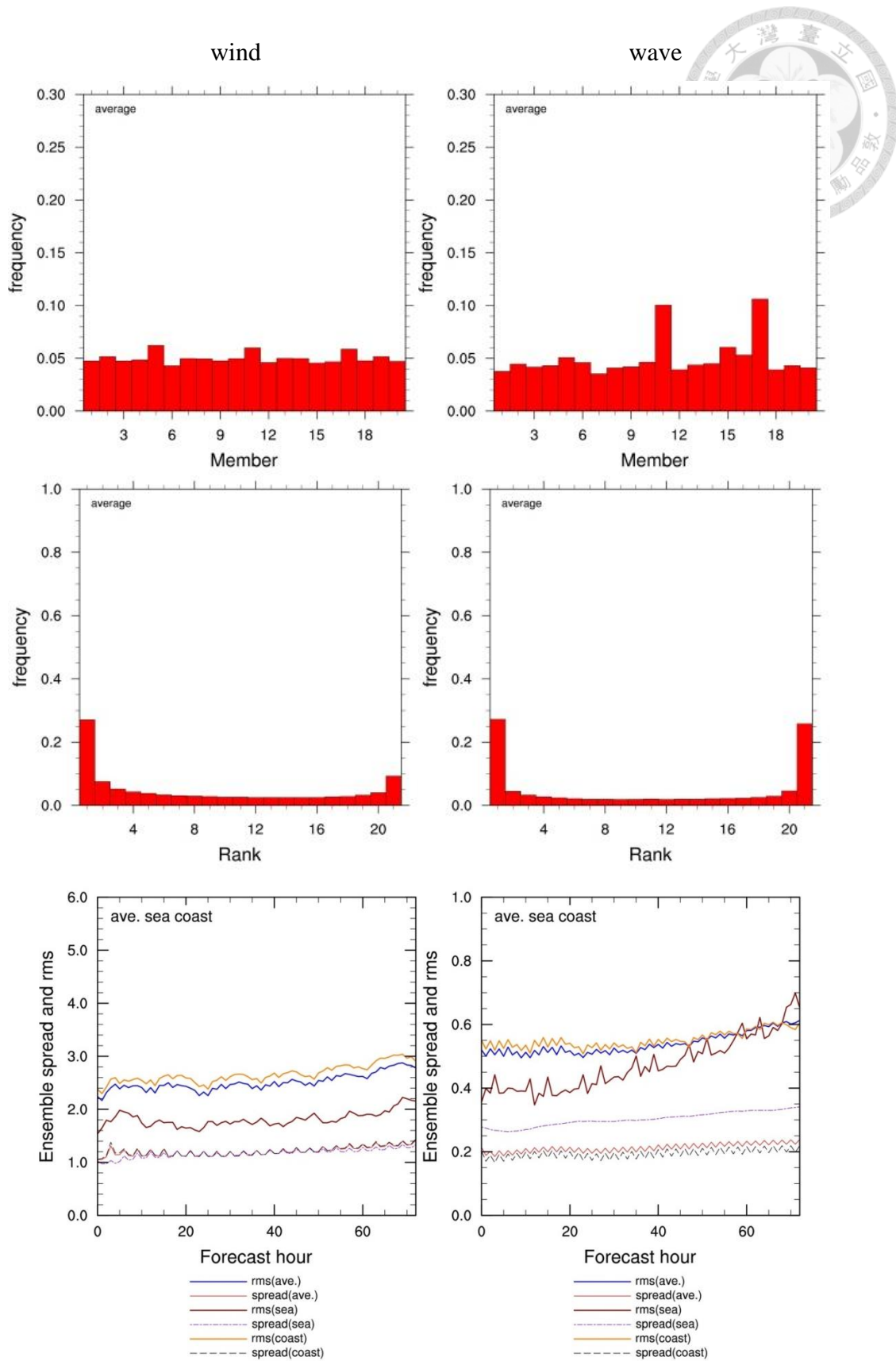


圖52、2012/1~2 月  $U_{10}$  及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH  
下：RMSE 及 SPRD)(10T10W)

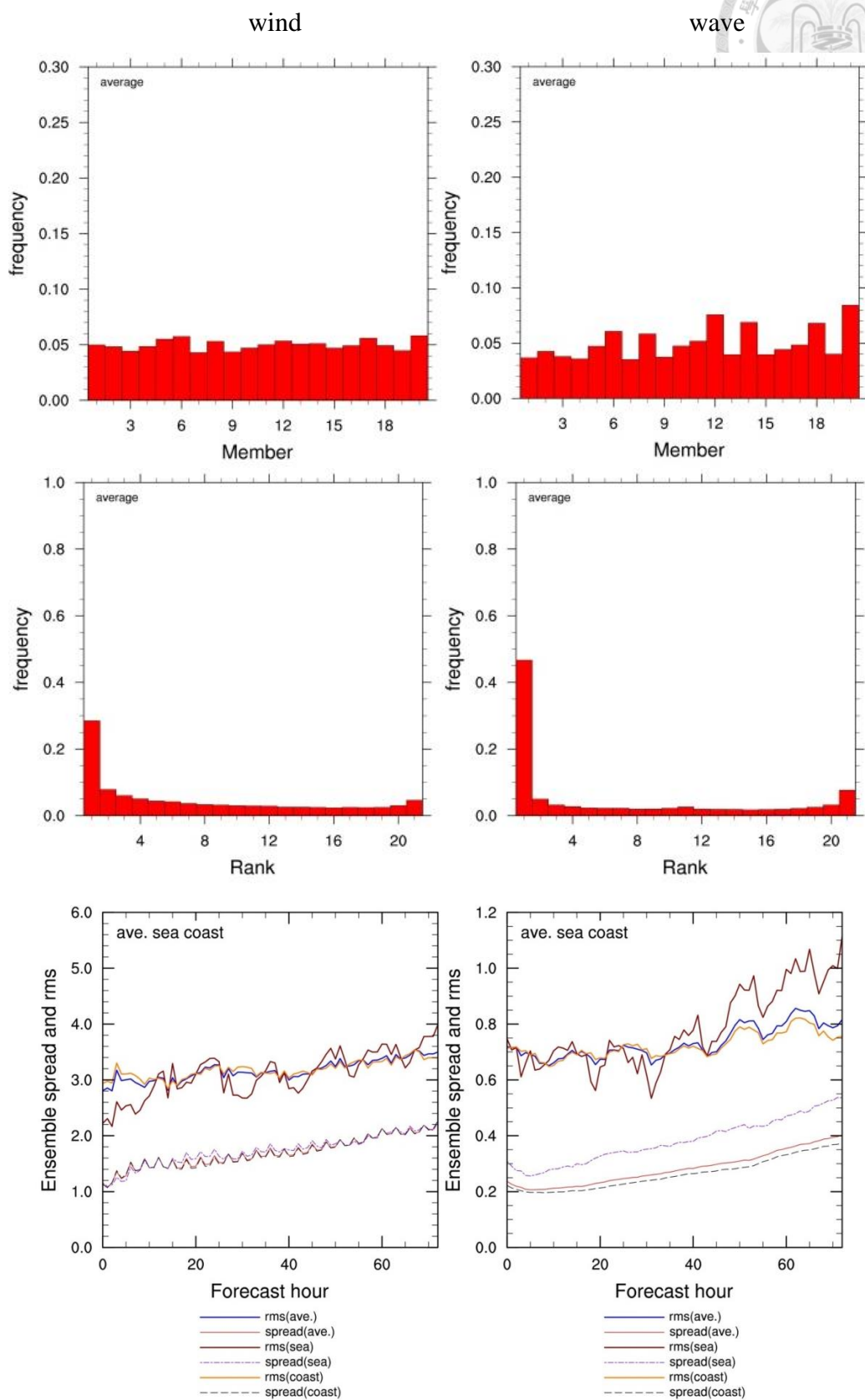


圖53、2012/8 月  $U_{10}$  及示性波高之測站平均系集統計指標(上: MEL 中: TRH 下: RMSE 及 SPRD)(10T10W)

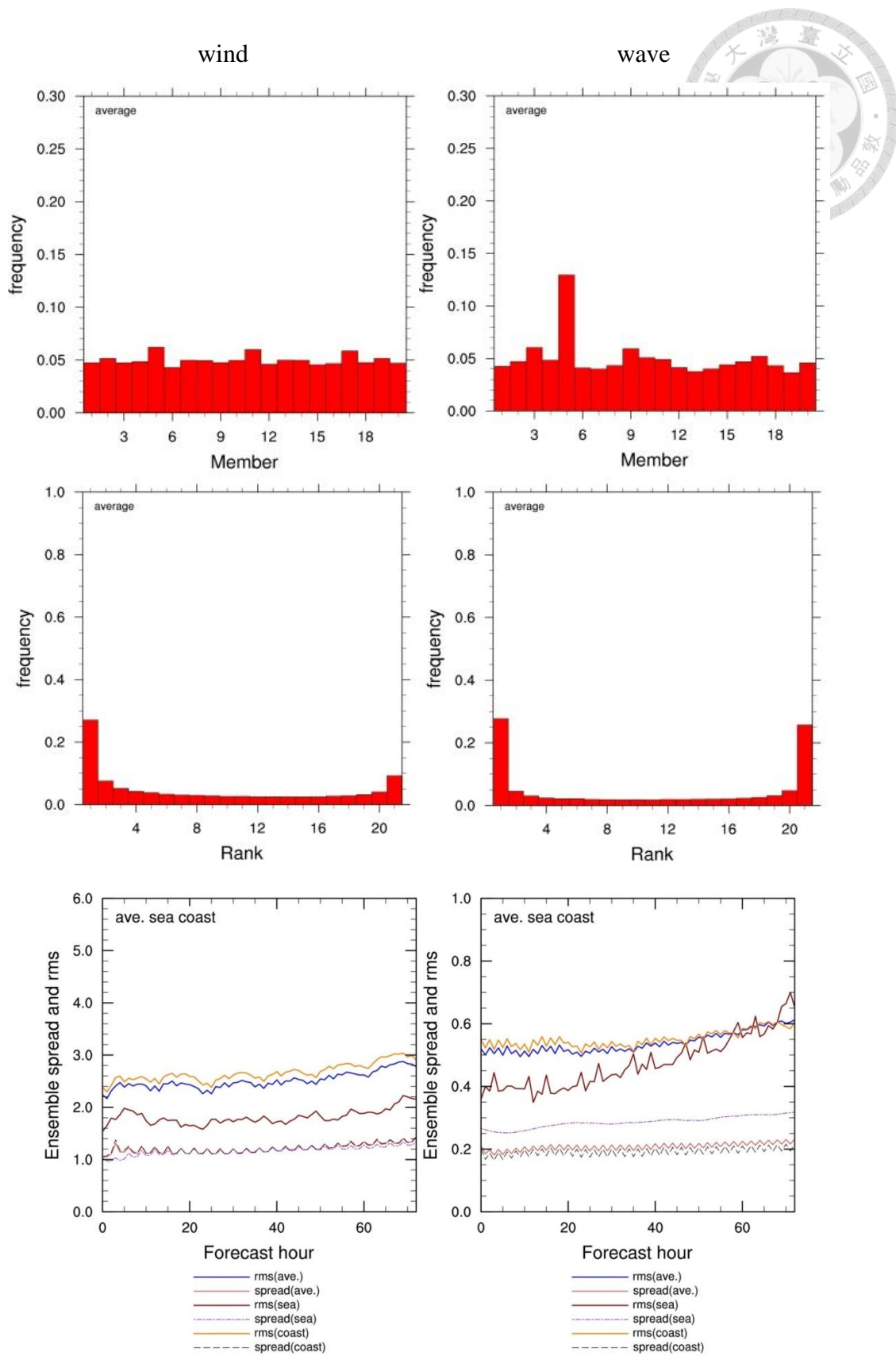


圖54、2012/1~2 月  $U_{10}$  及示性波高之測站平均系集統計指標(上：MEL 中：TRH  
下：RMSE 及 SPRD)(10W10T)

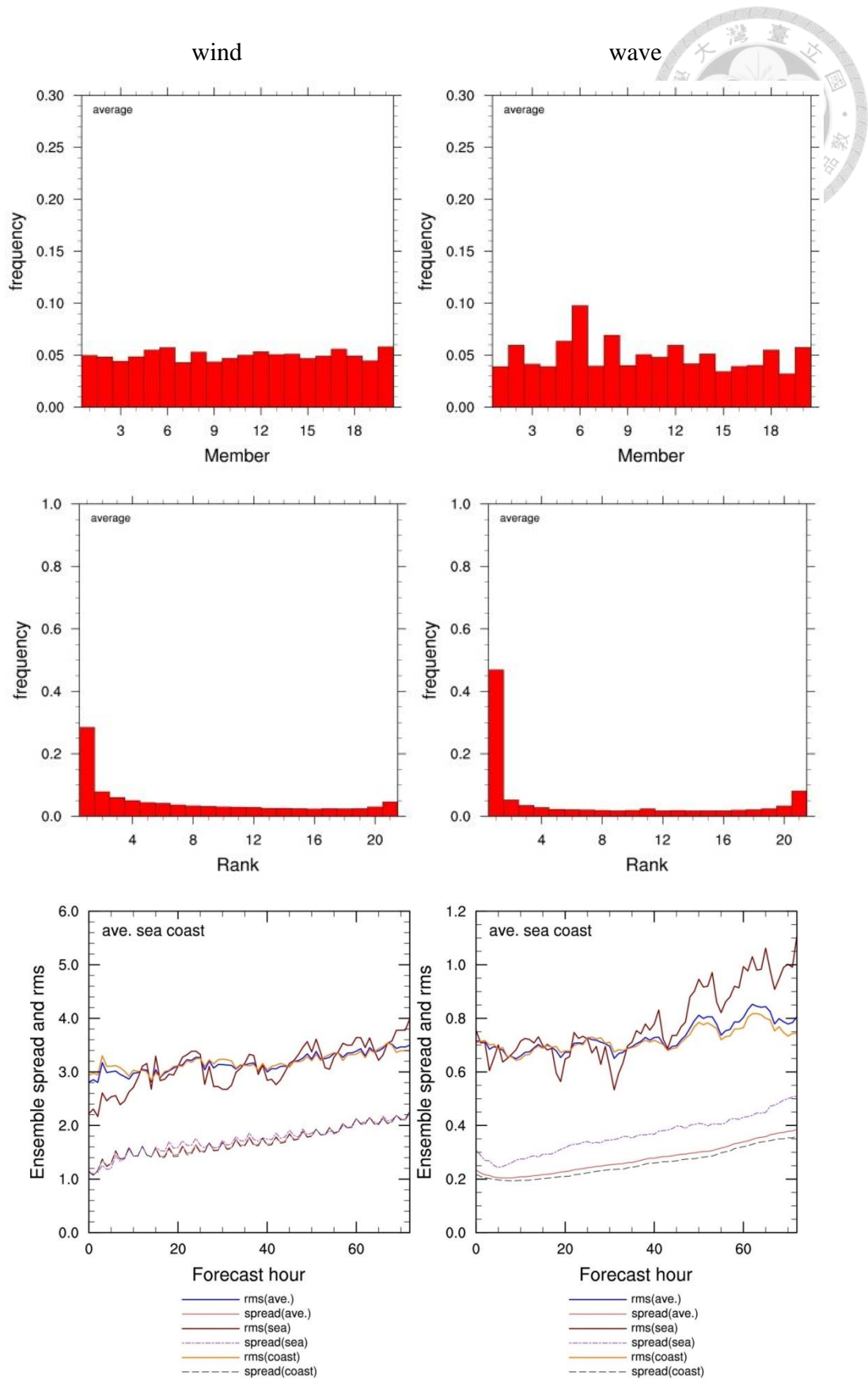


圖55、2012/8 月 U10 及示性波高之測站平均系集統計指標(上:MEL 中:TRH 下: RMSE 及 SPRD)(10W10T)



### 3.3 波浪系集預報系統執行力分析

#### 3.3.1 波浪系集預報系統執行力分析

為了充分配合WRF風場第二層的計算範圍，因此NWW3改變第二層的計算範圍(圖56)，重新建立水深(圖57)、X及Y方向之障礙物分布(圖58及圖59)。如前節所述，在台灣及澎湖的島嶼因GSHHS的海岸線資料有偏移，故需另用正確海岸線資料重新建置Sx及Sy分布，再取代之。

系集預報系統之執行力分析需要足夠的樣本。本研究使用Reliability diagram、Brier skill score、RMSE&SPRD及ROC來檢視系統之預報能力及區別事件發生及未發生的預報能力。因為WRF系集風場在2016/4/20 00改版，因此分析資料期間為2014/6~2016/4/19。但由於資料儲存問題，導致風場的資料期間僅有2015/6~2016/4/19。

##### (1) Reliability diagram

圖60及圖61為針對外海測站之波高及風速進行第72小時預報可信度的校驗分析，波高之門檻值為 $H_s > 2\text{m}$ 及 $H_s > 3\text{m}$ ，風速為 $U_{10} > 10\text{m/s}$ 及 $U_{10} > 12\text{m/s}$ 。圖中no resolution代表氣候平均值之發生機率(climatological relative frequency)，即觀測大於門檻佔所有觀測值的比例，no skill代表BSS等於0的情形，此時Reliability與Resolution相等(Wilks, 2006)，而當Resolution等於0時代表觀測機率等於氣候平均值之發生機率，即代表no resolution，換言之愈接近氣候平均值就代表不需要預報系統，用氣候平均即可。圖中顯示外海二個測站在 $H_s > 3\text{m}$ 時觀測機率約略等於預報機率，且氣候平均值甚低，顯示其預報能力； $H_s > 2\text{m}$ 時模式稍微低估，在預報機率0.3及0.4時較不具預報能力，即對預測能力不具正向貢獻；風速部分，2個測站之風速樣本必較少，呈現上下震盪的現象，但觀測機率約略等於預報機率。而預報機率之樣本分布顯示系統能提供與氣候平均概率不同的機率預報，即代表系統具備銳度(Sharpness)。圖62為外海測站波高及風速之TRH分布，顯示輕微的U型分布，波高預報略為偏低，而風速偏低情形較為輕微。

就所有測站而言(圖63及圖64)顯示模式預報機率偏大，且在部分預報機率 $BSS < 0$ 不具預報能力，顯示許多近岸測站受到地形的影響甚大，而10km解析度之計算網格可能較無法反映出此地形變化，風速亦呈現相同特性，WRF系集風場的研究重點著重在陸上，海上相關資料仍然未被考慮在內，可能是

原因之一。檢視各測站的分布位置，選擇二個外海測站及馬祖測站，加上原先偏差較少的小琉球、澎湖、金門、東吉島、七股等測站進行分析，如圖65，顯示機率分布已趨近對角線，而其他包括東北部測站、東部測站及鵝鑾鼻測站為未來需要改善的地方。

## (2) Brier skill score

圖66為波高及風速在不同門檻值條件下之三天BSS圖，用以校驗系統之預報能力。圖中顯示在三天的預報中BSS均大於0，表示預報機率誤差小於氣候觀測值的誤差，此預報相對於氣候場而言在預報期間內具有預報能力。而2個外洋測站之值均較考慮所有測站高顯示其預報能力較佳，風場亦有同樣趨勢；另與NCEP系集系統(Cao et al., 2007)比較，其 $H_s > 2\text{m}$ 的BSS三天預報均小於0.45，顯示本系統在外海測站之預報能力優於NCEP。圖67為波高與工研院(ITRI)的波浪數值模式比較、在不同門檻值條件下之三天BSS圖，工研院之波浪模式為四層多重網格，最外層為全球模式，使用NCEP GFS風場驅動及Tolman風場公式(經濟部研究機構能源科技專案，2015)，圖中顯示所有BSS均大於0且隨著預報時間的增加而增加，表示預報機率誤差小於決定性預報的誤差，此預報相對於決定性預報而言在預報期間內具有預報能力。

## (3) ROC

圖68及圖69為2個外海測站及所有測站在不同門檻之波高及風速之ROC分布，圖中顯示曲線下面積均達到0.9以上，顯示整個系統具有區別事件發生及未發生的預報能力。

## (4) RMSE&SPRD

圖70為2個外海測站資料的RMSE及SPRD的比較圖，圖中顯示隨著預報時間增加，SPRD皆小於RMSE，表示整個預報期間仍有離散不足的狀況。相較於NCEP系集系統的研究(Cao et al., 2007)，其波高RMSE的分布在預報0時約介於0.32-0.55m、預報72小時約在0.4-0.65m，風速RMSE的分布在預報0時約介於1.3-2m/s、預報72小時約在1.8-2.3m/s，差距並不明顯，且該研究提及包括NCEP及ECMWF的波浪系集預報系統均會有SPRD偏小的趨勢出現，其推測的原因和風場的擾動可能只會影響到風浪，無法在短期內影響湧浪有關，換言之，只會產生風浪的擾動而已。解決方法建議可以直接在浪場的低頻湧浪部分加入系統擾動。而NCEP及ECMWF均為全球模式，故邊界的影響應該不是

導致SPRD降低的主因，對台灣海域而言，邊界的影響是降低RMSE的問題，但可能還無法解決SPRD的問題。

### 3.3.2 綜合分析

綜合以上之執行力分析顯示，本系集預報系統已具備預報能力及區別事件發生及未發生的能力，並優於單一的決定性預報，亦堪與NCEP的系集系統相較之。而對部分靠岸測站而言，可能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SPRD接近RMSE，目前離散不足的現象，擬從二方面著手，首先拉近風場的SPRD及RMSE，此部分在氣象局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，影響到近陸域的風場，至於海域風場部分，擬建議考慮波浪形成的粗糙度進行風波的耦合研究；在波浪方面，未來除了使用改善風場外，將使用高解析度網格來改善近岸的模擬以降低RMSE，同時將測試在系統內針對低頻部分增加擾動以增加SPRD。

在風波交互作用部分，模式中任何一個內建的經驗公式，都是透過實驗迴歸而得，然而各地的風浪特性受限於風域大小、形狀可能會有不同，因此在使用上產生的效益可能也會有不同，而此項為風浪模式影響準確度的主要來源，尤其台灣海峽的地形特殊，秋冬時節常有大陸鋒面出海導致風及浪的成長，而浪會傳遞南向，常造成模擬的誤差(氣象局，2016)，因此由觀測迴歸區域性的風浪成長公式，應該是值得研究的課題，一如Kuznetsova et al. (2016)針對短風域所作的實驗。

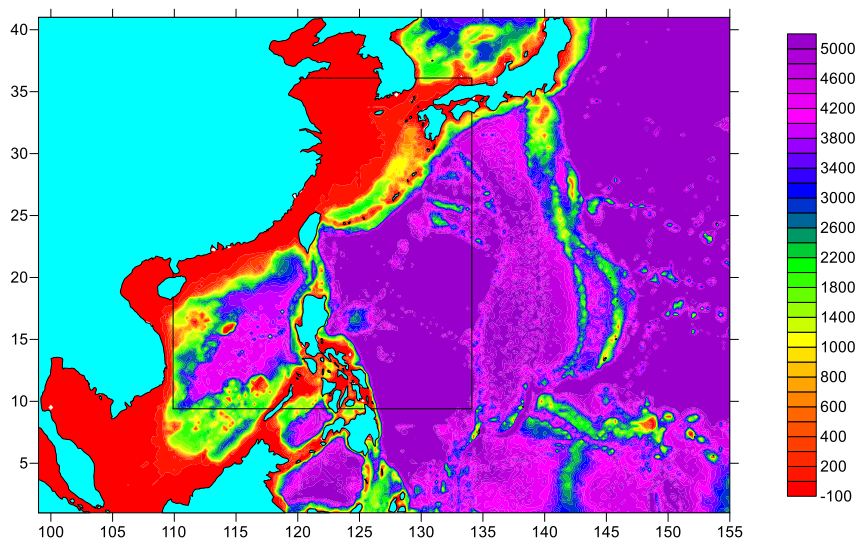


圖56、作業化系集多重網格之計算範圍

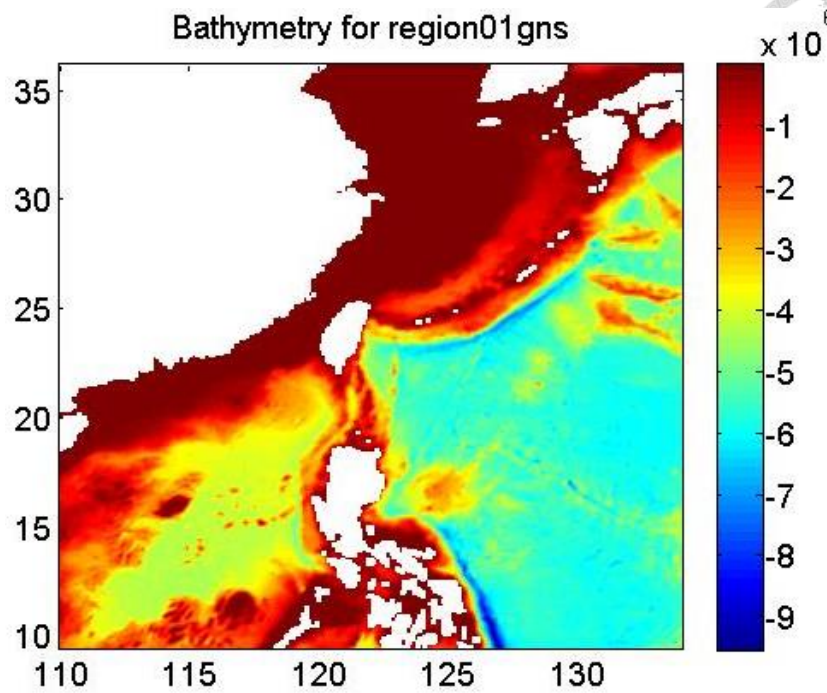


圖57、第二層網格之水深分布

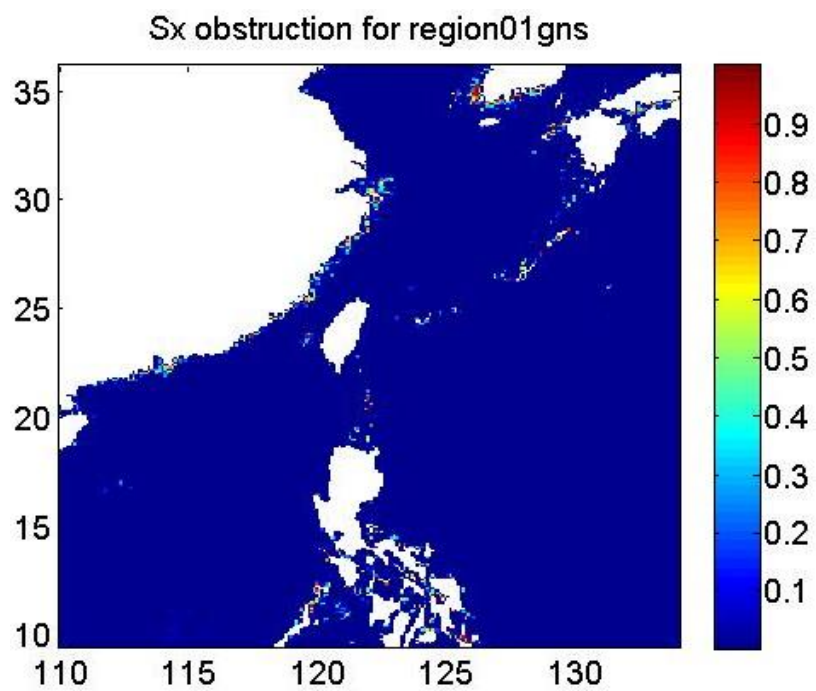


圖58、X 方向之障礙物分布

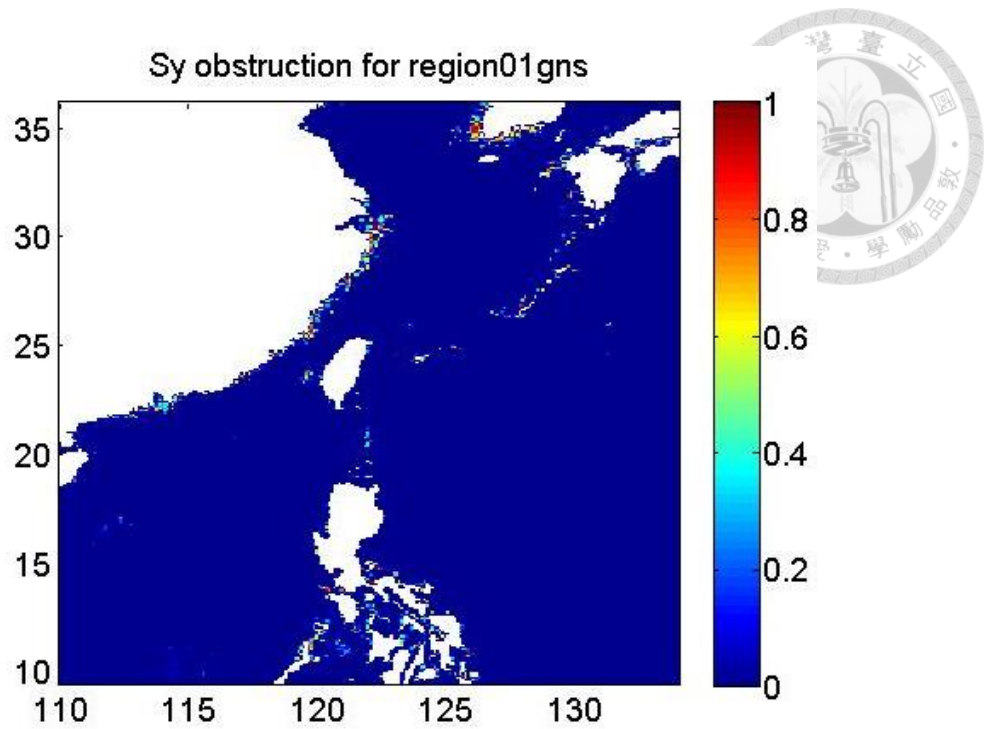


圖59、Y 方向之障礙物分布

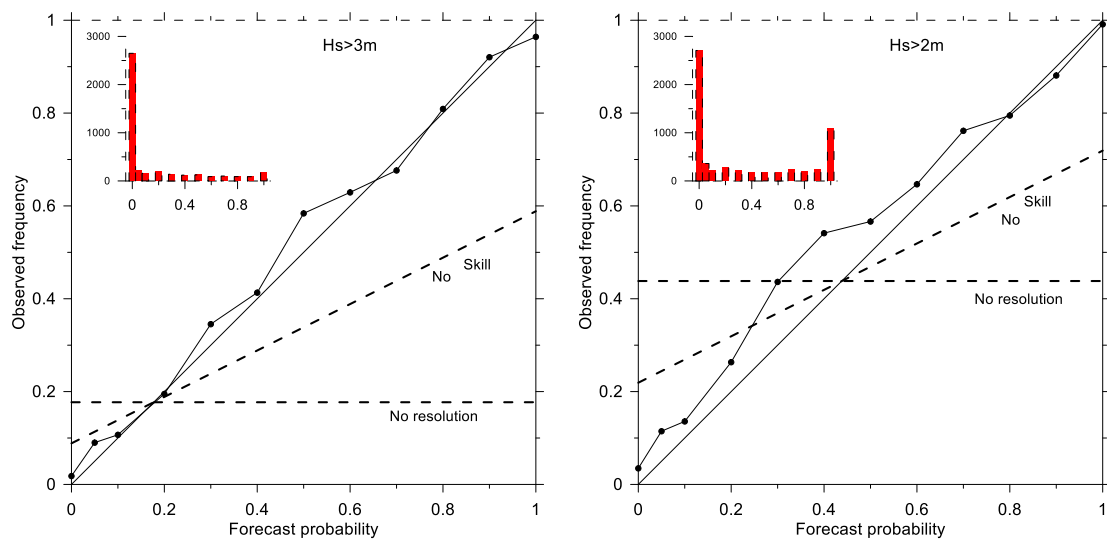


圖60、72 小時預報 Reliability diagram(左：Hs>3m 右：Hs>2m)(台東外洋及東沙)

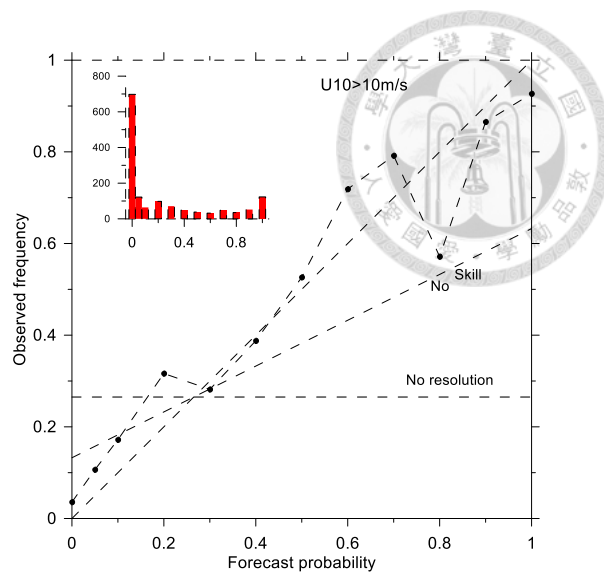
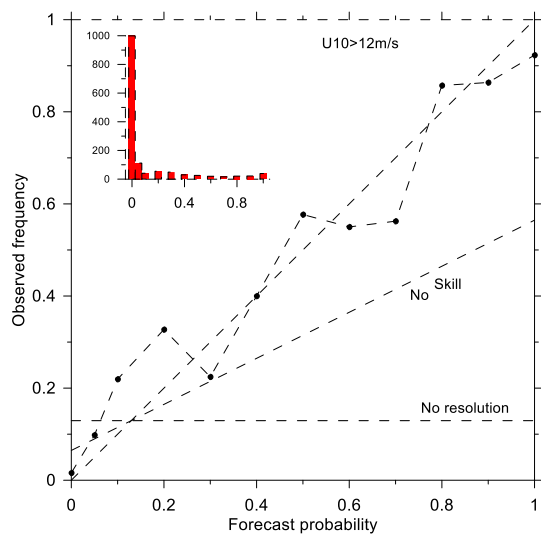


圖61、72 小時預報 Reliability diagram(左： $U_{10}>12\text{m/s}$  右： $U_{10}>10\text{m/s}$ )(台東外洋及東沙)

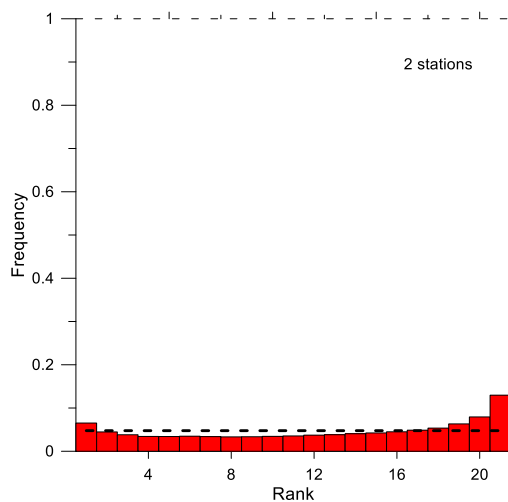
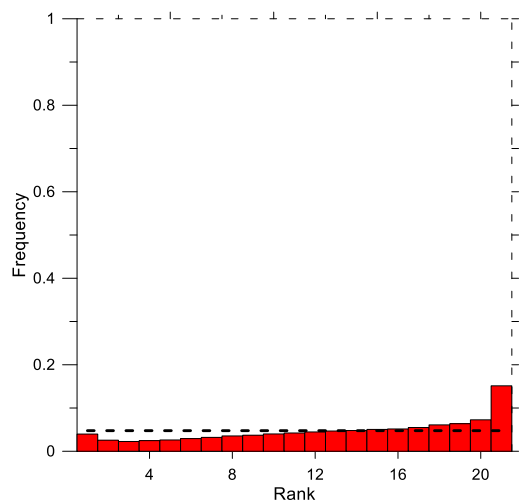


圖62、TRH 分布(左： $H_s$  右： $U_{10}$ )(台東外洋及東沙)

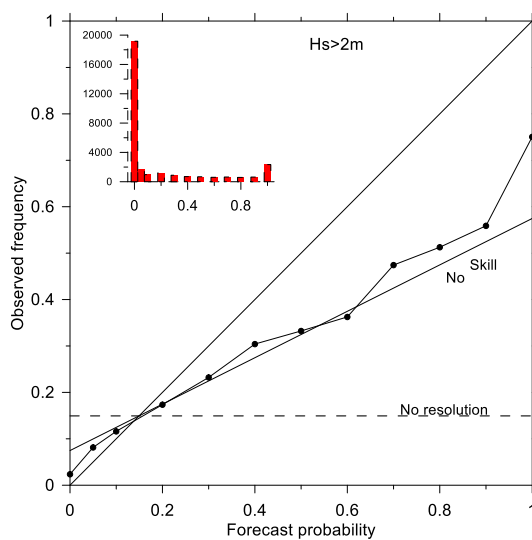
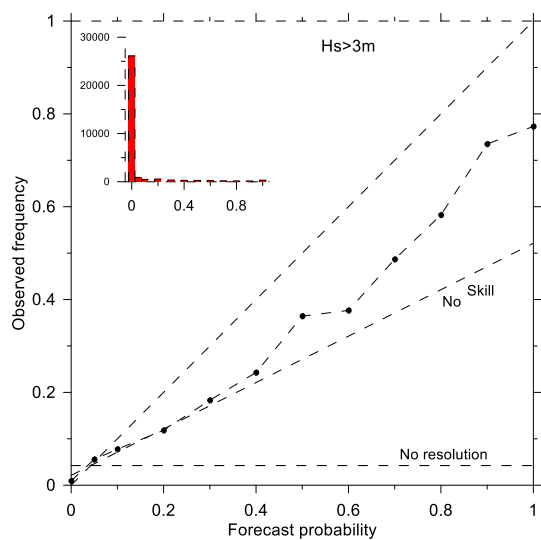


圖63、72 小時預報 Reliability diagram(左： $H_s>3\text{m}$  右： $H_s>2\text{m}$ )(所有測站)

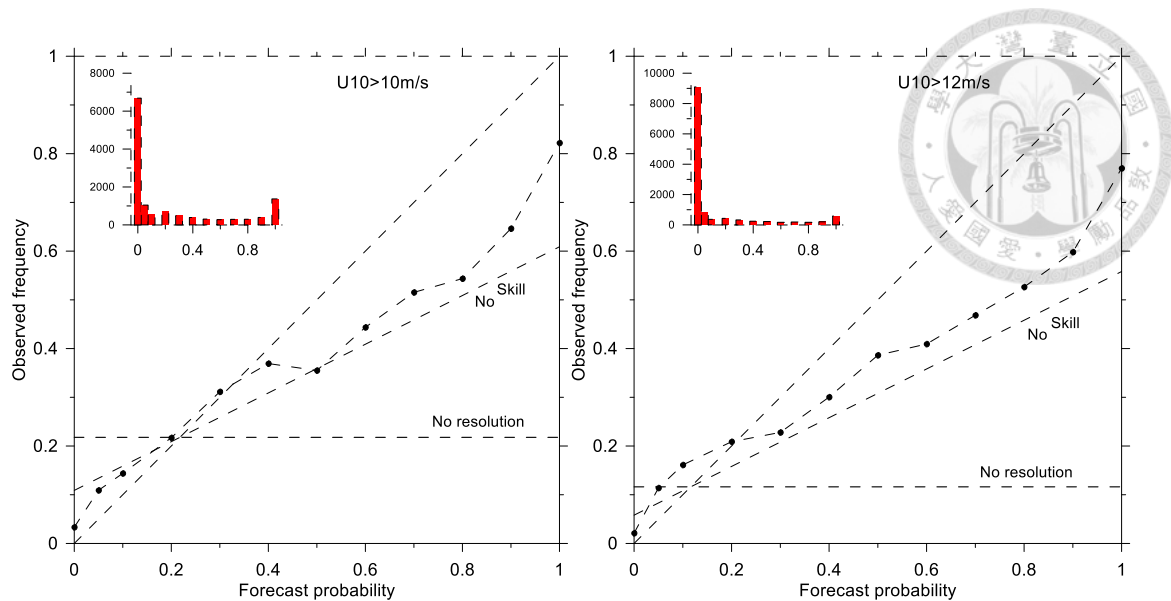


圖64、72 小時預報 Reliability diagram(左： $U_{10} > 12\text{m/s}$  右： $U_{10} > 10\text{m/s}$ )(所有測站)

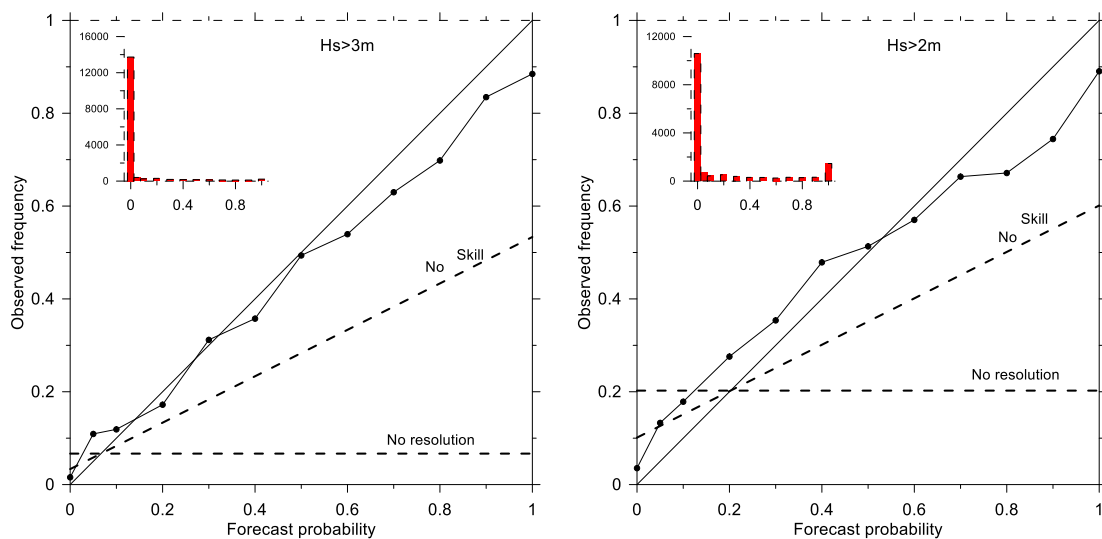


圖65、72 小時預報 Reliability diagram(左： $H_s > 3\text{m}$  右： $H_s > 2\text{m}$ )(8 個測站)

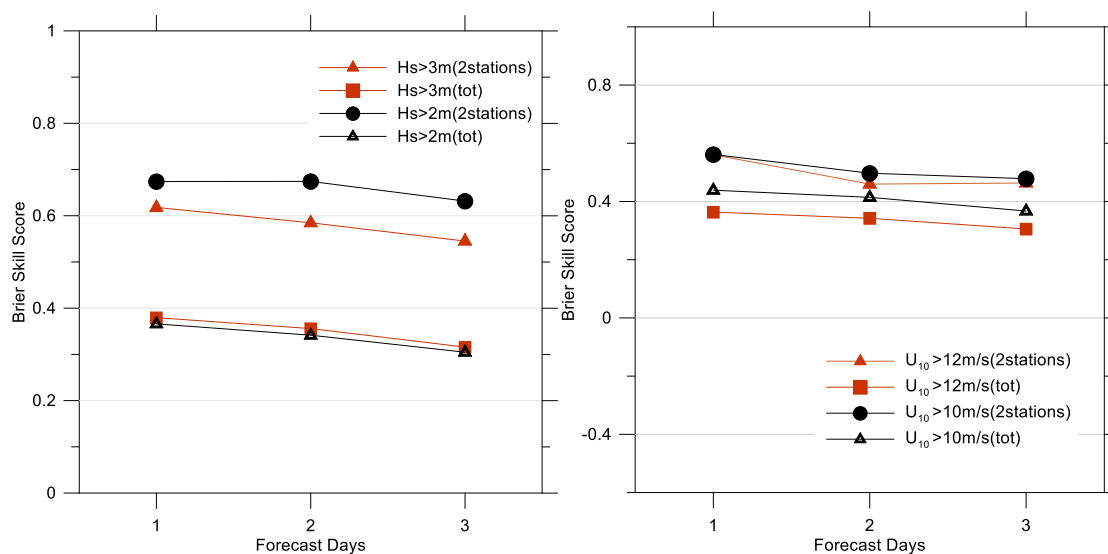


圖66、Brier Skill Score (以觀測值當參考指標)

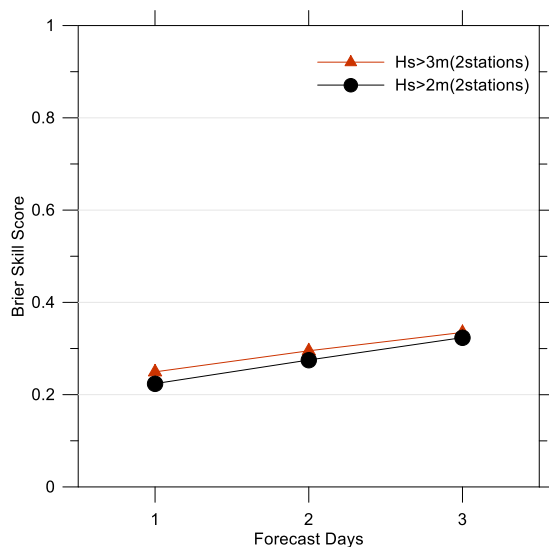


圖67、Brier Skill Score (以 ITRI 的預報為參考指標)

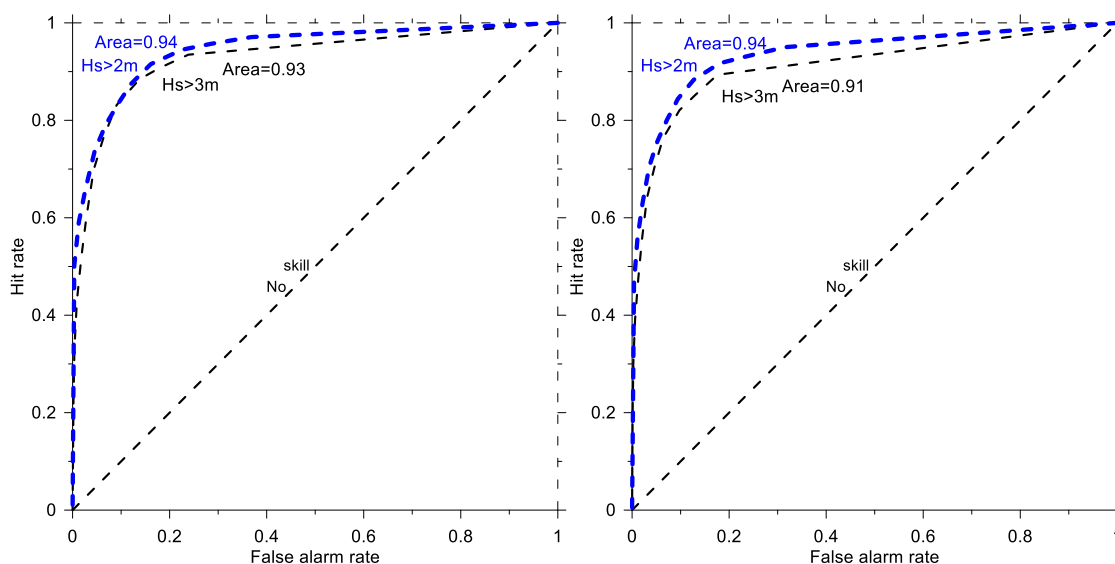


圖68、ROC 曲線( $H_s > 3m$  及  $H_s > 2m$ )(左：台東外洋及東沙 右：所有測站)

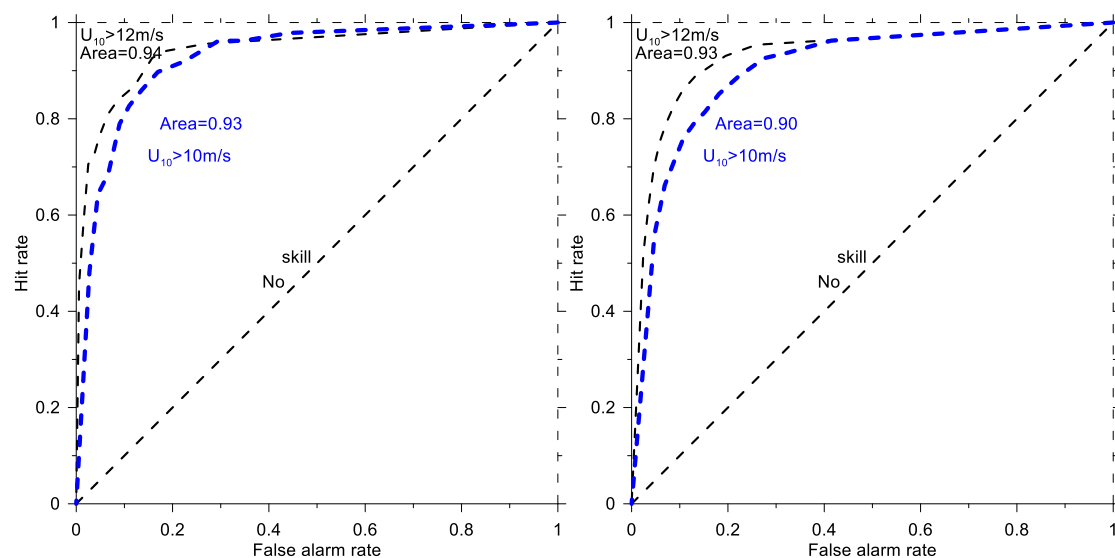


圖69、ROC 曲線( $U_{10} > 12m/s$  及  $U_{10} > 10m/s$ )(左：台東外洋及東沙 右：所有測站)

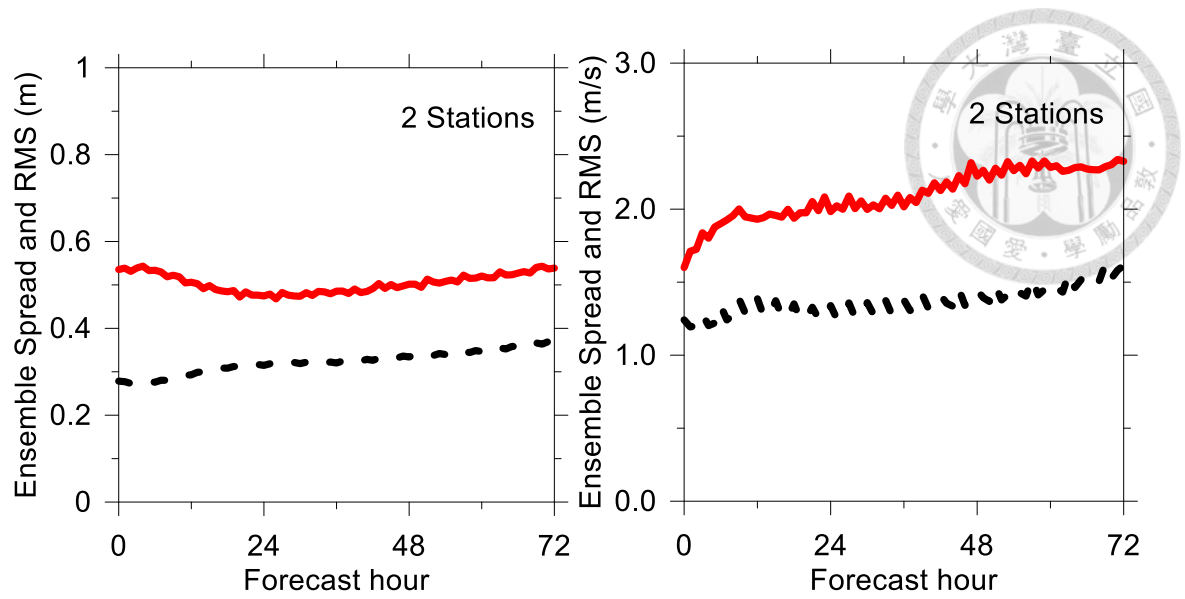


圖70、波高及風速之 RMSE(紅色)及 SPRD(黑色)分布圖(台東外洋及東沙測站)

## 第四章 應用研究



### 4.1 波浪系集預報系統應用

依據前述之波浪系集成員組成建置作業化系集預報系統，作業化系集預報系統規劃需考慮硬體、軟體、不同系集成員的組成架構、後處理流程等(圖 71)，重點在於時效性及作業化問題的掌握。

波浪系集成果的輸出展示包括點輸出及面輸出，點輸出使用盒鬚圖展示，包括未來 72 小時及前 48 小時，前 48 小時展示系集平均，變數包括波高、週期、風速，並與觀測值比對，波向和風向則使用玫瑰圖展示，另波高部分於三天後另產出即時驗證盒鬚圖，可以即時驗證預報的準確度，如圖 72 至圖 74 所示；面的輸出主要包括 20 張系集成員圖(圖 75 及圖 76)、系集平均(圖 77)、系集平均及系集分歧(圖 78)、機率分布圖(圖 79)、Spaghetti 圖(圖 80)、10% 超越機率圖(圖 81)等。其中 20 張系集成員圖可以顯示每一個系集成員的波高分布及對於特徵浪況的掌握程度，前 10 個系集使用 WAM 公式，故在圖中顯示其波高分布較小，後 10 個使用 Tolman 公式，故其值較大；系集平均即為各個系集的平均分布；系集平均及系集分歧，除了系集平均外，還可以看出每個網格點之變異程度，變異愈大代表每個系集的預報差異較大，不確定性亦偏高，當然是必須注意的重點；機率分布圖，首先定義波高的門檻值，例如波高大於 2m，統計每個網格所有系集成員大於此門檻值之機率繪製成圖，可以看出那個位置的風險最高；Spaghetti 圖呈現每個系集成員等高線值的變化，愈亂即代表分歧愈大、不確定性高；10% 超越機率圖代表有 10% 的值是高於圖上代表的值，例如圖上的波高是 3m，即表示約有 10% 的系集是高於 3m，此臨界點特別提醒決策者必須加以注意，是否可以承受 10% 的風險。



圖71、系集預報系統規劃項目

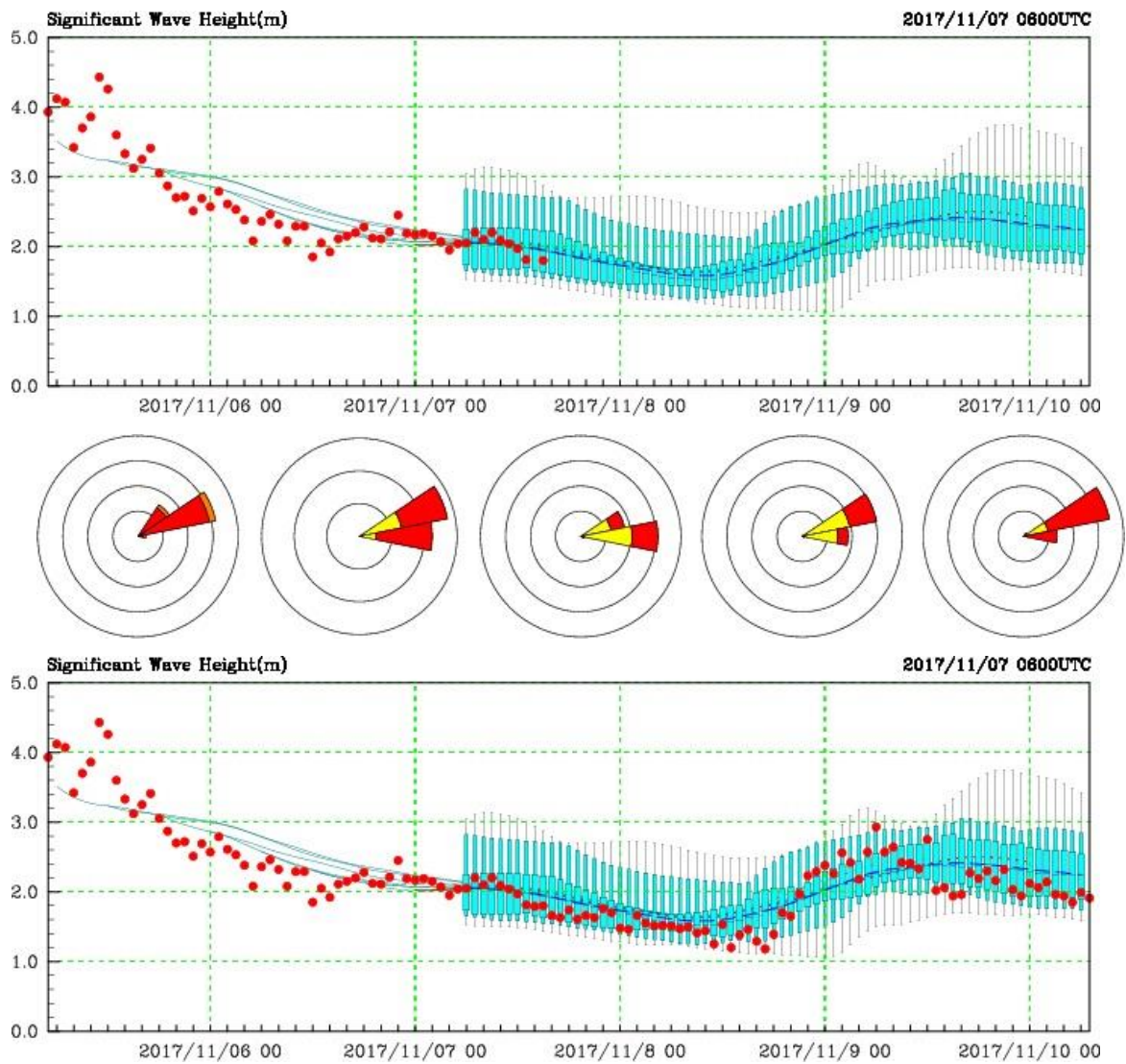


圖72、台東外洋波高盒鬚圖(上:預報波高 中:預報波向 下:驗證預報波高)

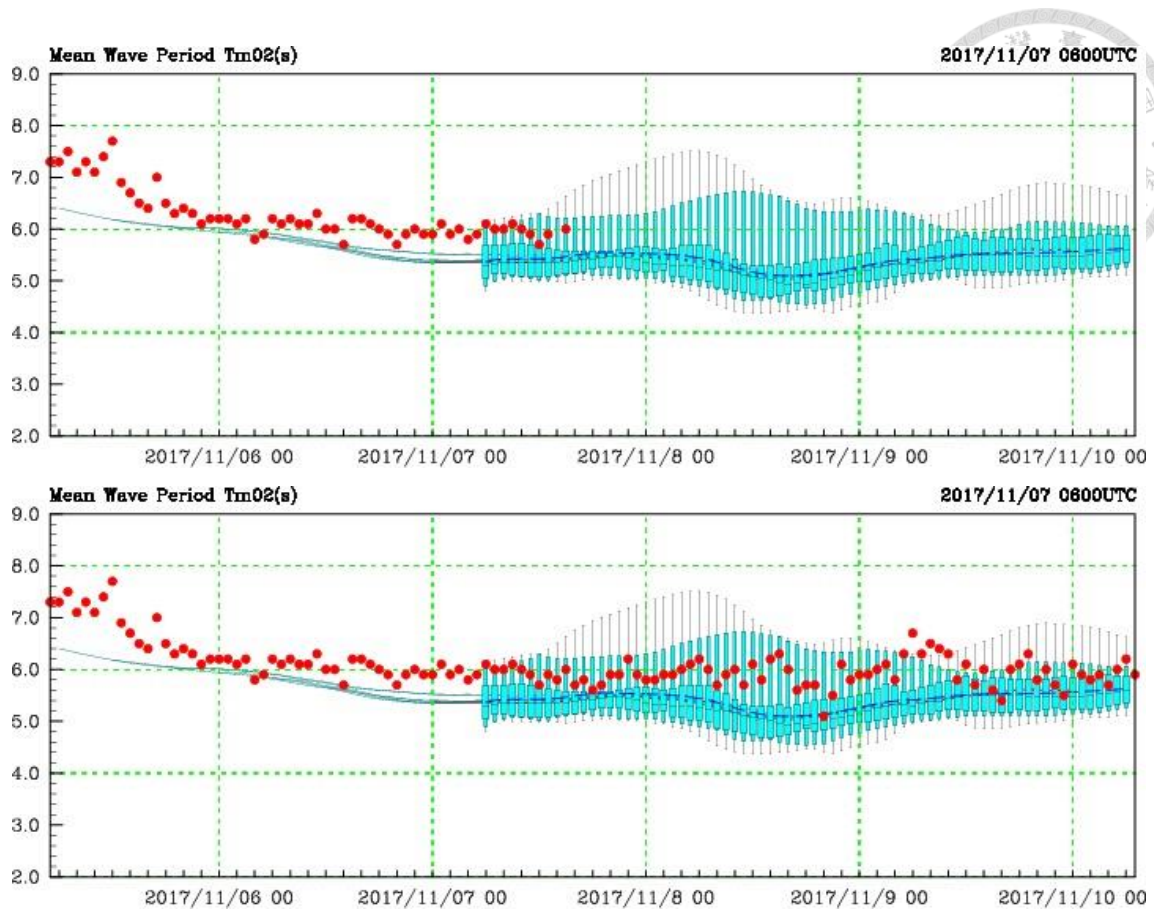


圖73、台東外洋週期盒鬚圖(上:預報週期 下:驗證預報週期)

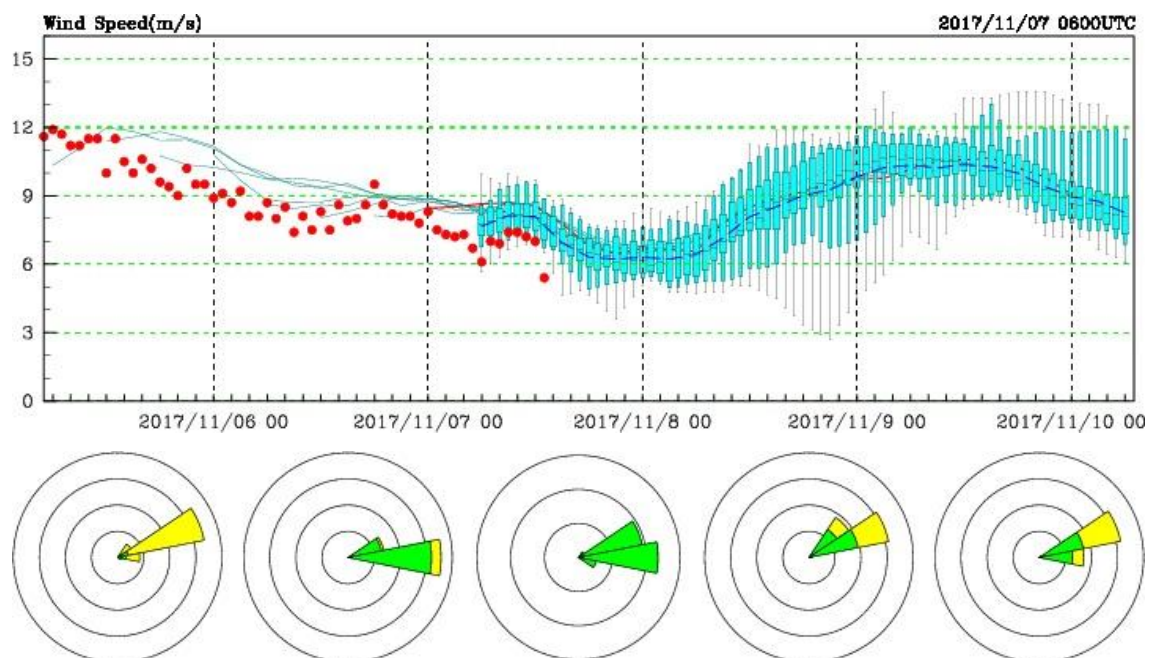


圖74、台東外洋風速盒鬚圖(上:預報風速 下:預報風向)

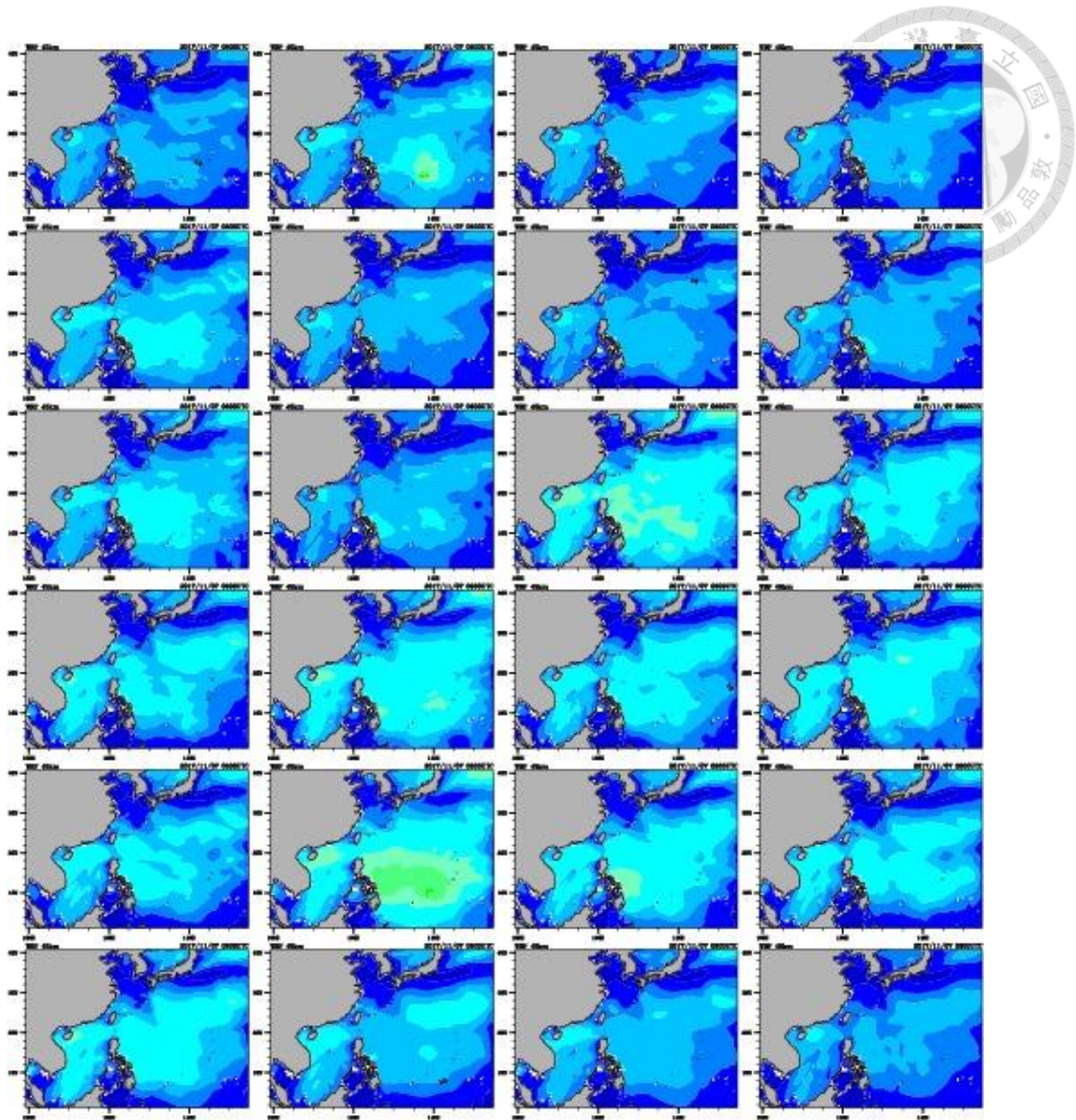


圖75、20 個系集成員波高分布(0.25 度網格)

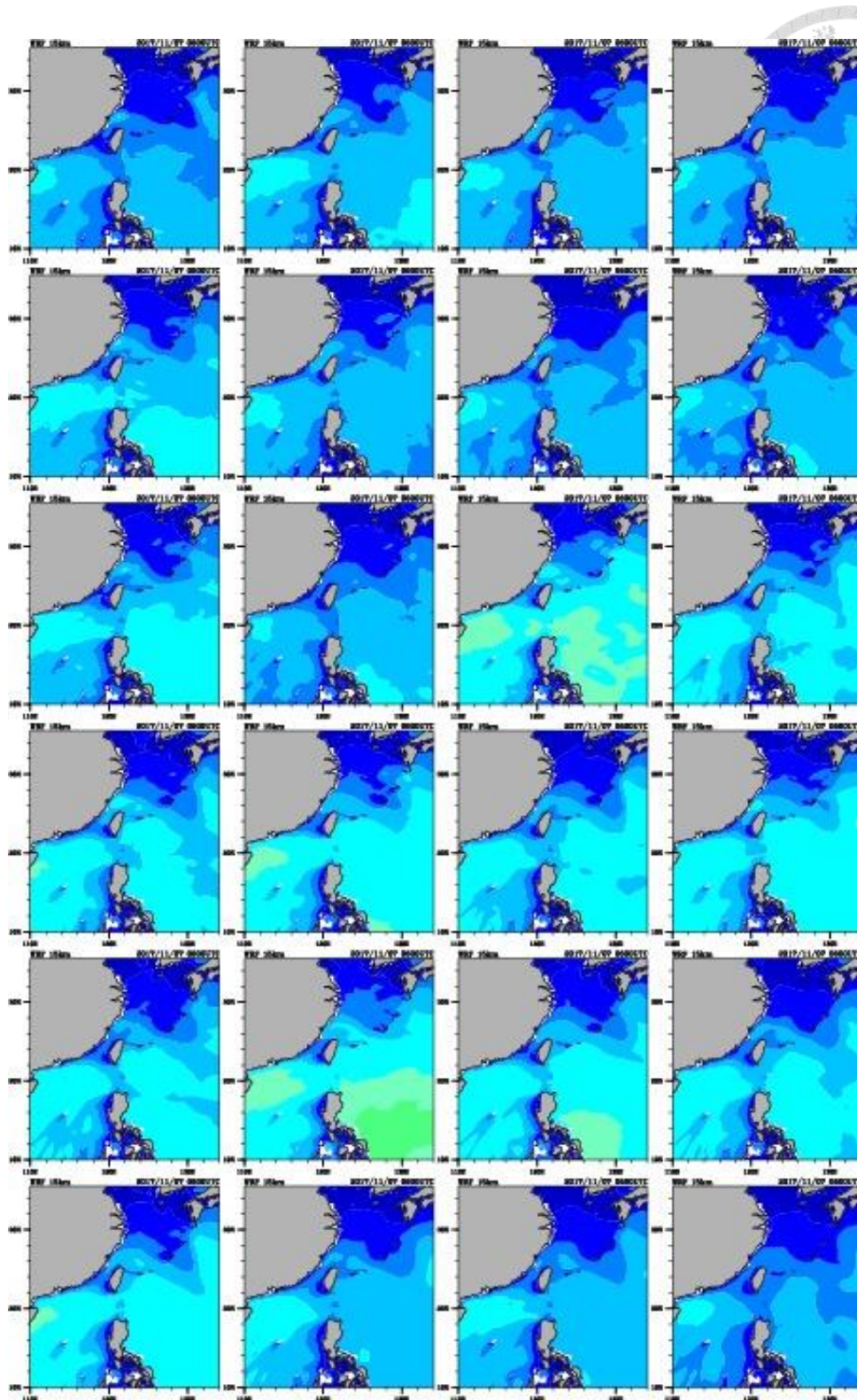


圖76、20 個系集成員波高分布(0.1 度網格)

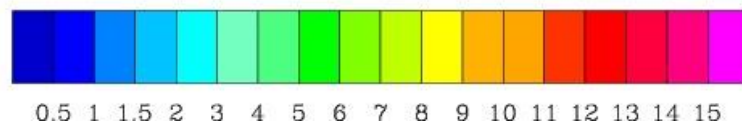
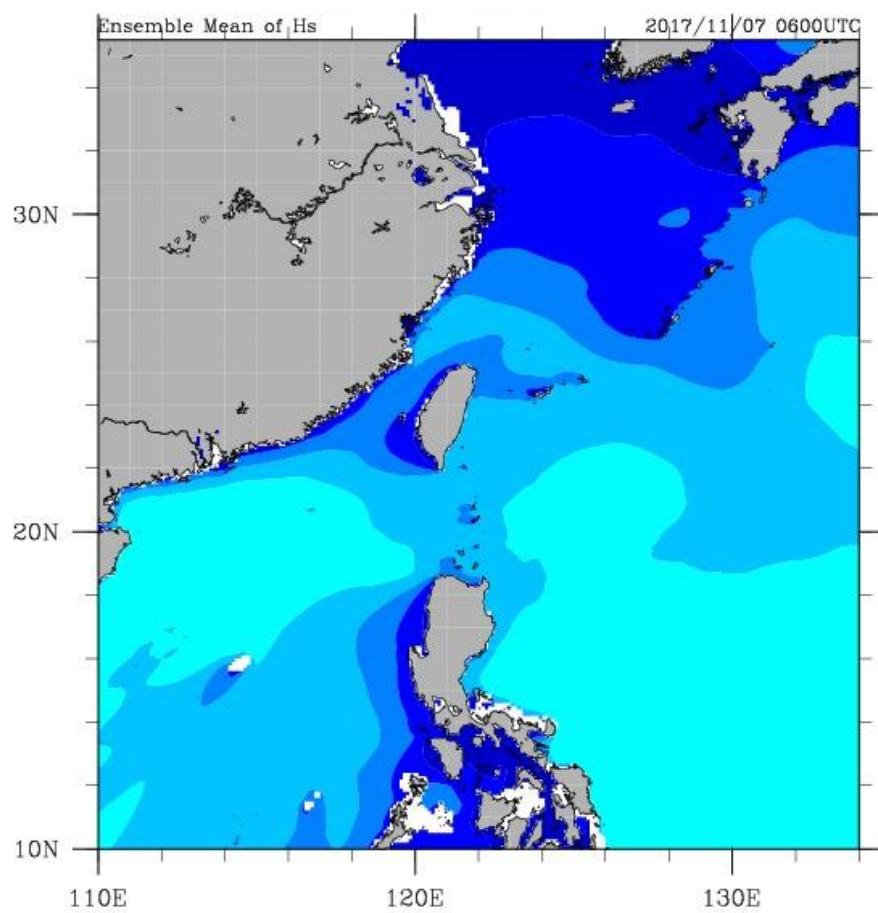
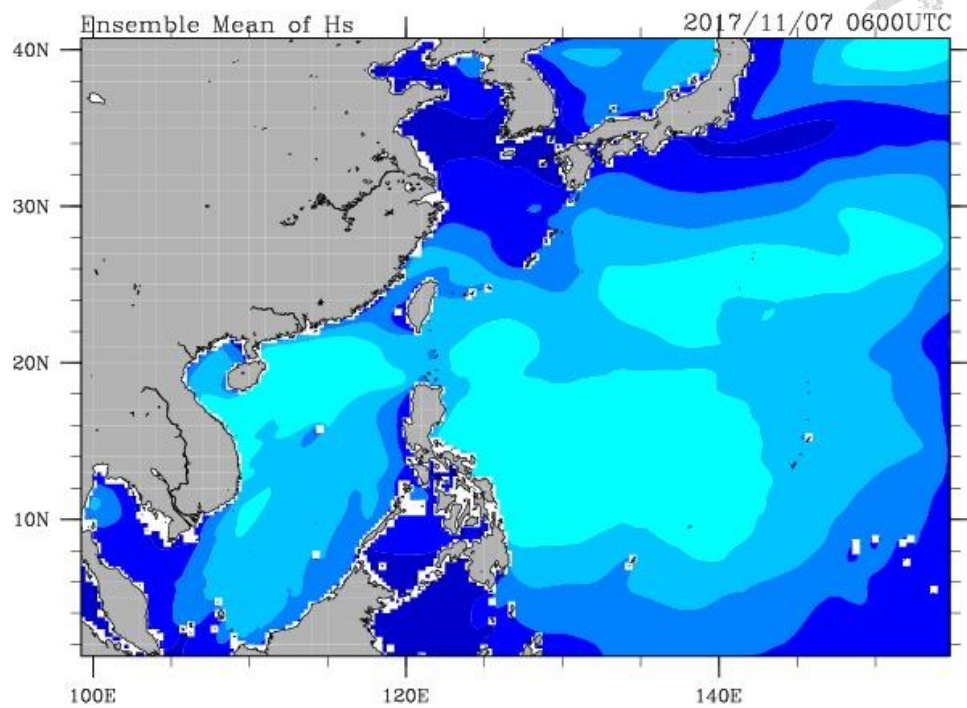


圖77、波高系集平均分布圖(上: 0.25 度網格下: 0.1 度網格)

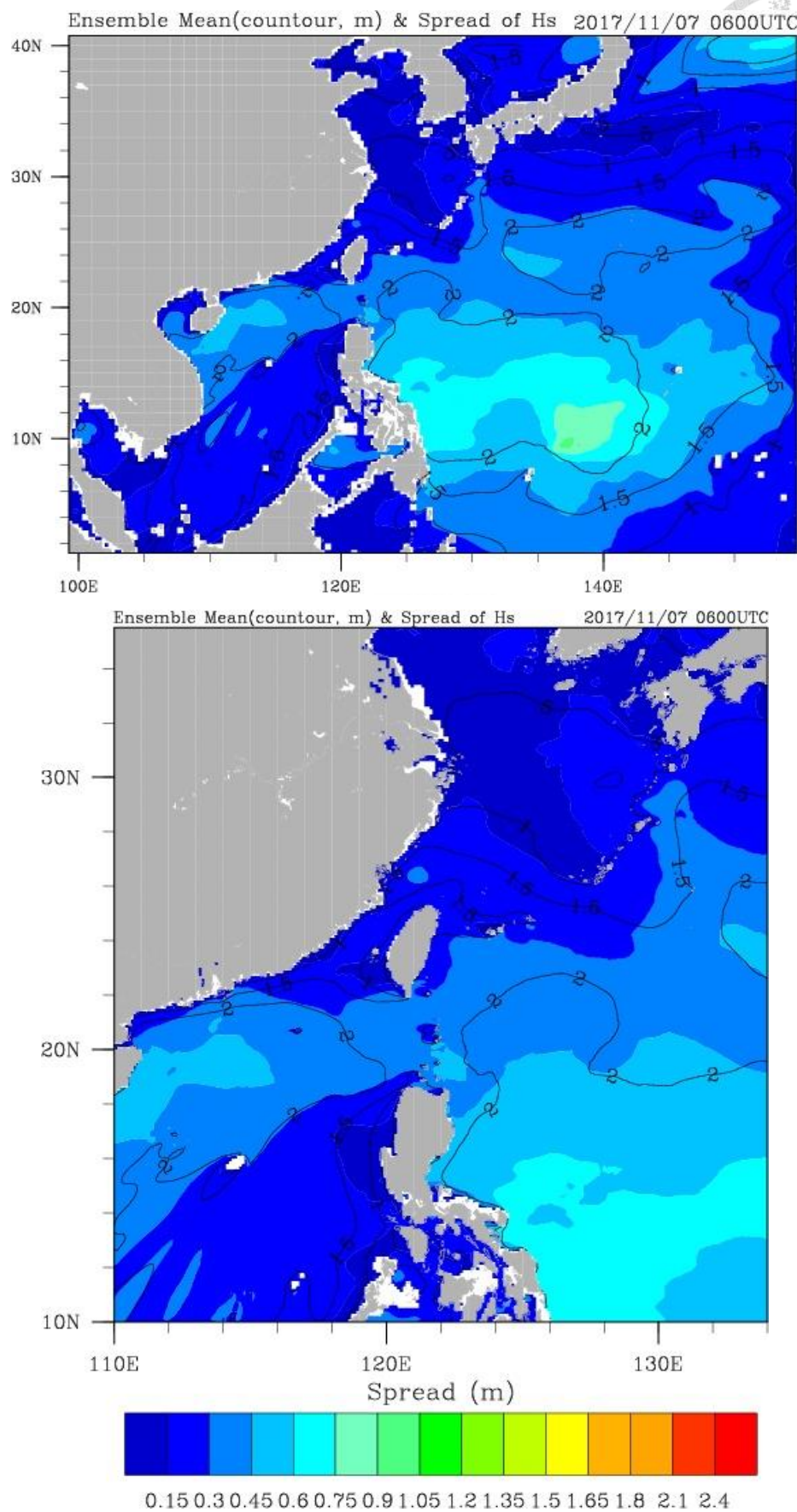


圖78、波高系集平均(等高線)及系集分歧分布圖(上: 0.25 度網格下: 0.1 度網格)

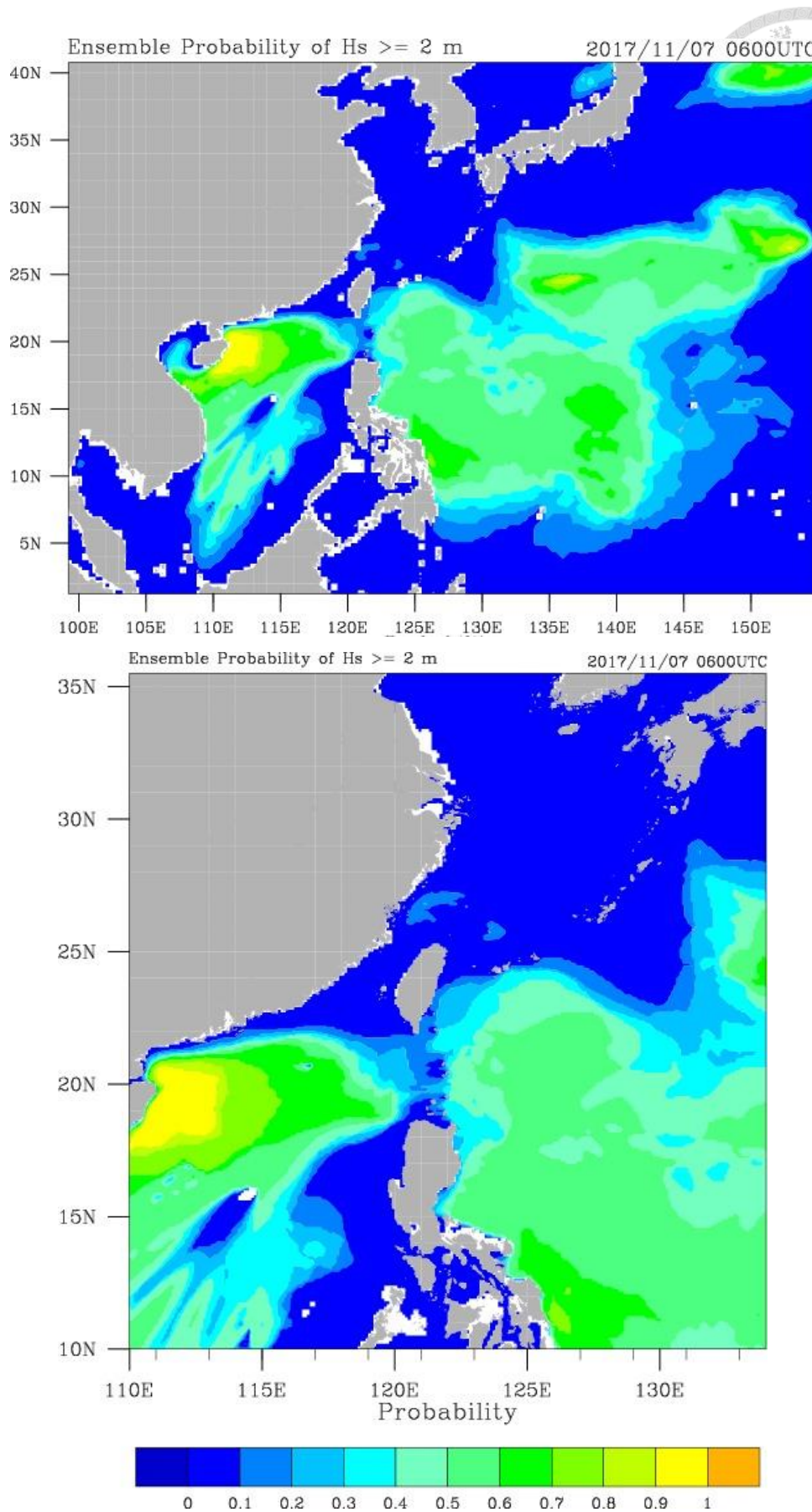


圖79、波高大於 2m 之機率分布圖(上: 0.25 度網格下: 0.1 度網格)

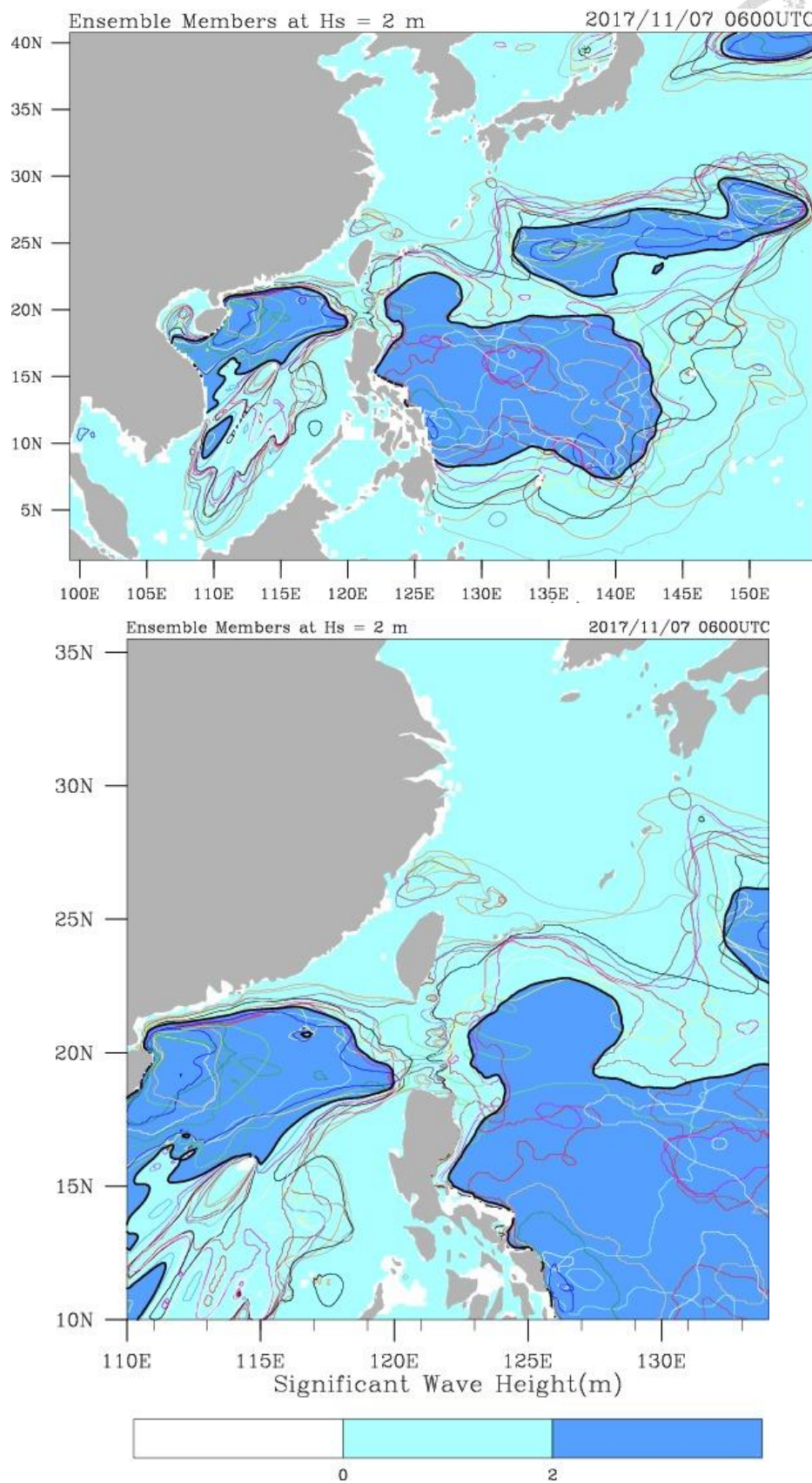


圖80、波高 2m 之 Spaghetti 分布圖(上: 0.25 度網格下: 0.1 度網格)

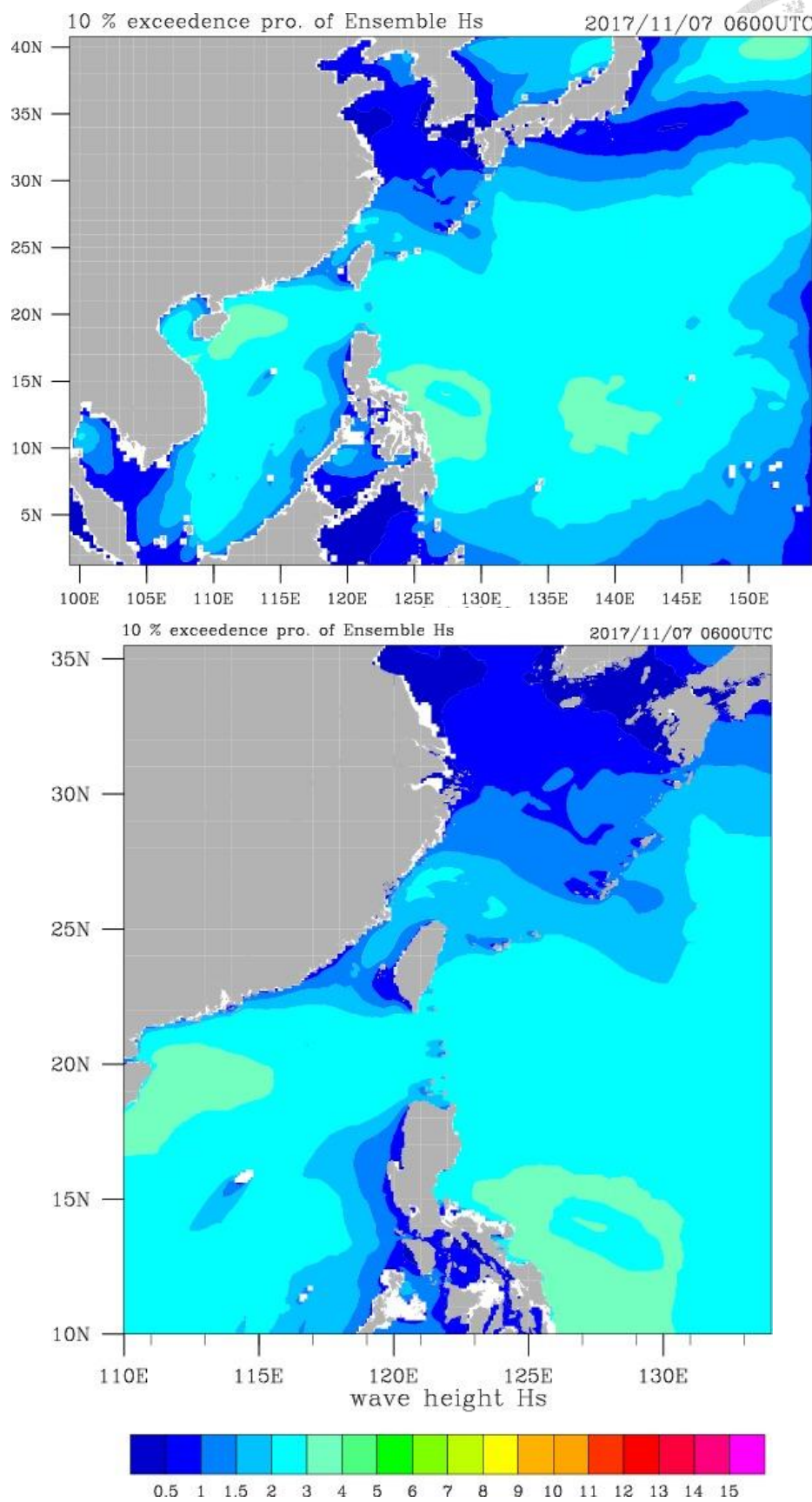


圖81、10%超越機率之波高分布圖(上: 0.25 度網格下: 0.1 度網格)

## 4.2 結合機率之施工期程判釋

離岸風場的開發已是目前我國風力發電發展推動的趨勢，而離岸風場開發之海上作業經費龐大，面對險惡的海上作業環境，海氣象預報資訊已成為離岸風電設置及運維的重要參考資訊，對於海事工程的調度及施工具有重大的影響，例如颱風時期的避險、何時開始啟動、施工規劃及調度等，由於海上作業的前置作業的動員經費及規模都非常龐大，而其反應的時間都較陸地緩慢，故擁有準確的預報資訊對於相關工程的施工調度是非常重要的。以 2015 年示範獎勵辦法補助之三座離岸風速塔興建為例(表 10、圖 82)(經濟部研究機構能源科技專案, 2013、2016)，海上作業經驗為國內以往工程經驗所不及，由於施工方法的不同，導致海上作業的時間亦不相同，唯一的共通性是均極度仰賴海氣象預報資訊，而海上施工的不可預測性亦常造成整體施工的期程延宕及成本的增加，往往一天的成本可達數百萬元。其次有關工程保險問題，由於離岸風電海上施工的風險性相對較高，如何讓銀行有信心申請者是具有還款能力的，一如民間貸款一樣是非常重要的，申請者必須提出證明，其將能夠完成工程、履行合約。另在海上施工牽涉到海事保證鑑定服務(Marine warranty surveying, MWS)，保險公司希望透過第三公證單位確認重要的海上施工作業是安全且符合專業要求。這些都需要海氣象的預測，以提高施工的安全性。

離岸風力發電的施工包含許多船和施工行為，不同的船隻各有其特殊的環境限制，包括調查、基礎施工、塔架及風機安裝、電纜佈放及運維等，而施工範圍涵蓋空中、水面和水下，因此在不同的海上施工流程可能會動用到不同的船隻(例如圖 83為離岸風電的標準風機安裝流程)，故其可工作的期程自然受到環境的限制，必須尋找氣候窗(weather window)來進行施工，當然能力強的施工船隻其海上施工機會自然較長，但每日成本相對較高，所以整體的施工規劃最高指導原則仍在可以如期、如質完成施工。

然而氣候窗的選擇往往成為海上施工的重要因素之一，決定什麼時候可以啟動、什麼時候啟程等，而每種施工均包含許多的工序，例如吊掛塔架作業，起重機的啟動約需花 2 小時的熱機時間，因此正式吊掛作業是在第 3 小時起開始，若施工需要 3 小時的時間，則氣候窗必須是在第 3 小時起開始連續 3 小時必須符合吊掛的環境條件，例如風機輪轂高度(hub height)之風速  $U_{hub}$  必須小於 12m/s，即氣候窗必須在未來第 3 小時起開始連續 3 小時的風機輪轂高度之風速必須小於

12m/s。因此在完成系集預報後，有二種方式可以運用，第一、可以利用系集平均值當作決定性預報的方式使用，因其較單一預報有較佳的預報結果，但同樣需考慮系集平均的誤差；第二、產出機率預報後(表 11及表 12)，針對每一個施工程序所需之限制條件及施工延時，即可透過蒙地卡羅演算法(monte carlo method)計算在第 3 小時開始連續施工 3 小時之機率。顏及張(2016)已利用系集的機率預報建立離岸施工運維決策支援系統，定義每一個施工限制條件(包括波高、風速  $U_{10}$ 、日光時間、施工連續工期)，利用蒙地卡羅演算法計算每個小時開始符合條件的機率，提供給施工決策者參考。

蒙地卡羅演算法與系集預報結合的計算流程摘要如后，一次模擬出每小時各因子是否符合施工條件，再交集出該小時是否符合施工條件，若有一樣因子不符合則該小時即為不符合施工條件，此時再加上特定施工作業所需的連續施工小時數，即可歸納由該小時開始可連續作業所需小時的結果為是或否，如此程序經過多次的蒙地卡羅模擬運算，即可算出從該小時起符合條件可連續作業所需小時的機率風險。圖 84顯示風險評估的運算範例，如 06:00 該小時 4 次模擬中有 1 次可以出去連續作業 5 小時，則代表 06:00 起可連續作業 5 小時的機率是 25%，如此即可算出預測期程內每小時可執行連續 5 小時離岸作業的機率。圖 85及圖 86分別為施工決策系統展示介面及個人使用裝置使用介面，可計算未來符合條件(波高、風速  $U_{10}$ 、日光時間、施工連續工期)之機率，方便作為施工決策之參考。而這樣的一個使用介面建置完成，可以廣納不同的系集預報來源，尤其對於施工期程的判釋提供一個方便的利器。

2016 年苗栗二架離岸風機施工，在當下的施工決策係參考三種不同的預報來源，即是一種系集的概念，然而當下預報來源的可靠度即是最後施工成功與否的重要關鍵，目前採用系集預報概念的施工決策系統正積極推廣試用，絕對是未來施工參考的有效利器。而施工與否之臨界條件往往並非在極端條件，迥異於災害預報的臨界值，因此系集預報的焦點必須轉移至施工的條件預報上，提高該段之預報精度。

表10、參加離岸風力發電示範獎勵辦法之工程概述(至 2016 年止)

工程名稱	施工概要	施工期間
台電示範風場風速塔	中鋼公司結合宏華營造改建 Jack-up 施工平台(投資 7 億)，全數使用國內國內船機及人員	2015 年 10 月 26 日 ~ 11 月 16 日，約 21 工作天
海洋示範風場風速塔	以國內既有施工能量及船隻為設計，採臨時構台搭配陸上吊車施工	2015 年 4 月 20 日 ~ 8 月 15 日，約 4 個月工作天
福海示範風場風速塔	引進大陸籍華電 1001 號專業施工平台，搭配台船公司船機及人員	2015 年 7 月 11 日~7 月 24 日，約 14 工作天
海洋示範風場風力機	歐商 A2Sea Torben 號施工船原訂 105/6/7 動工、7/15 完成風機整體結構安裝，然因施工船之抱樁機翻轉器故障而延宕至 8/31 開始海上施工。	2016 年 6 月 7 日~ 10 月 27 日。

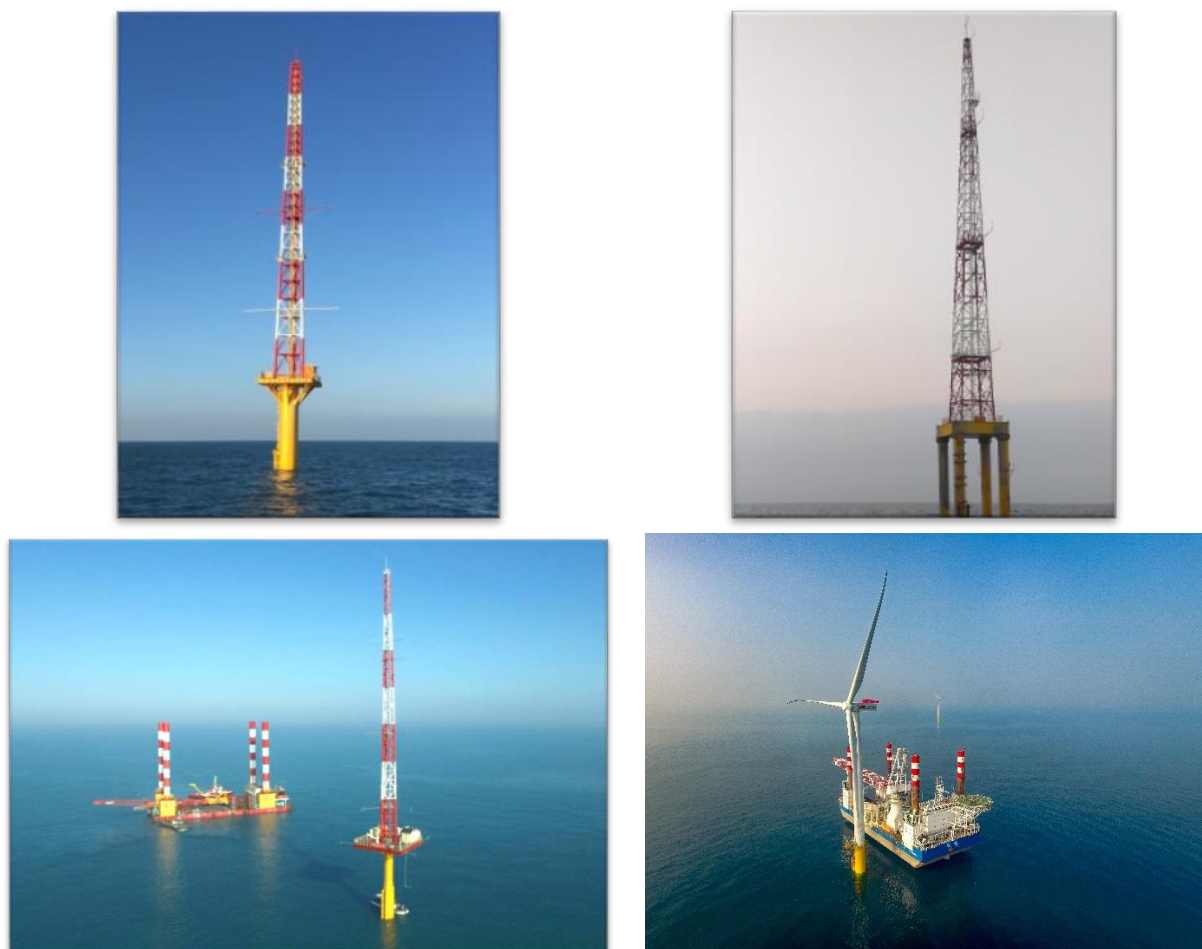
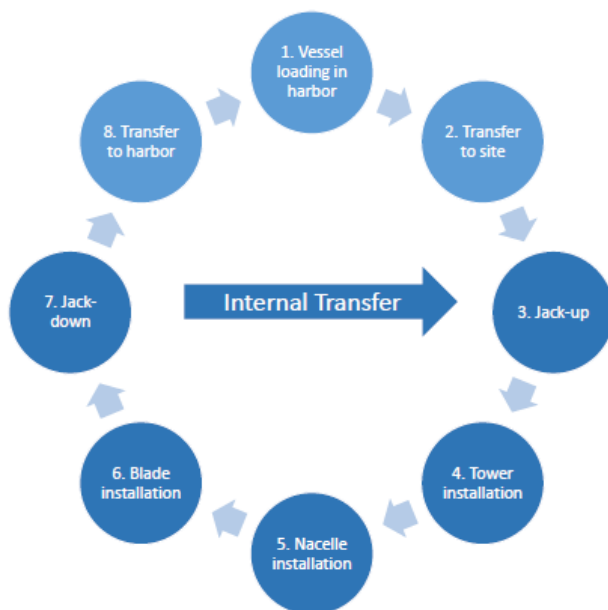


圖82、國內三座離岸風速塔及二座風機(左上:福海彰化風速塔 右上:海洋苗栗風速塔 左上:台電彰化風速塔 右下:海洋苗栗風力機)



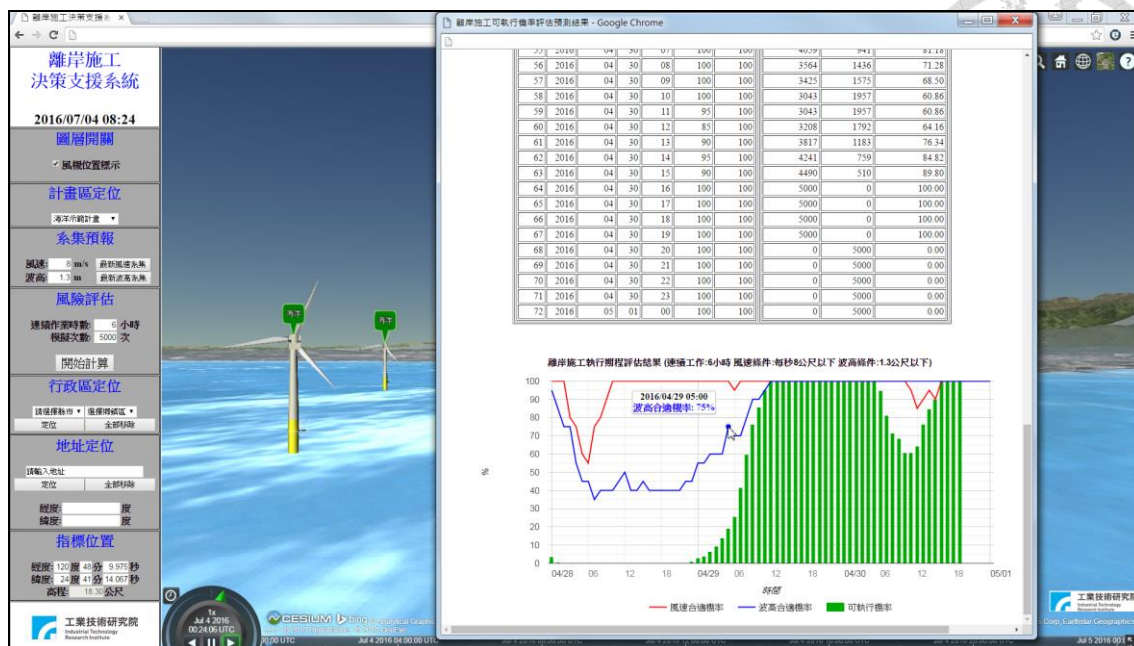
資料來源:ConWx上課課程

圖83、離岸風電的標準風機安裝流程

施工連續 工期		施工船舶							3日逐時預報				歷史資料		
05 小時連續 12 小時連續 24 小時連續 48 小時連續 ⋮		Barge Jack-up barge Wind farm installation vessel Heavy lift vessel Dynamic positioning diving support vessel Air range diving support vessel Offshore support vessel Cable lay vessel Rock dump vessel Flotel							H <sub>s</sub> < 1.1 m % U <sub>10</sub> < 15 m/s % 日出日落 ⋮ (任何組合)				⋮ 4月 H <sub>s</sub> < 1.1 32 % 5月 H <sub>s</sub> < 1.1 34 % 6月 H <sub>s</sub> < 1.1 45 % 7月 H <sub>s</sub> < 1.1 65 % ⋮ 4月 U <sub>10</sub> < 15 15 % 5月 U <sub>10</sub> < 15 22 %		
	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	
H <sub>s</sub> < 1.1	35%	37%	36%	38%	39%	30%	32%	31%	30%	30%	22%	23%	24%	23%	
U <sub>10</sub> < 15	22%	22%	23%	22%	19%	18%	17%	17%	17%	16%	15%	14%	13%	13%	
Sun	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	
1 <sup>st</sup> run	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2 <sup>nd</sup> run	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3 <sup>rd</sup> run	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
4 <sup>th</sup> run	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
⋮	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
可執行 機率	25 %	50 %	50 %	50 %	0 %	0 %	0 %	0 %	25 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	

資料來源:顏厥正、張恆文 (2016) 離岸施工運維決策支援系統建置

圖84、離岸作業風險評估蒙地卡羅模擬示範



資料來源:顏厥正、張恆文 (2016) 離岸施工運維決策支援系統建置

圖85、離岸施工運維決策支援系統

資料來源: 經濟部研究機構能源科技專案 (2017), 千架海陸風力機設置推動及關鍵技術研發計畫(2/3)

圖86、離岸施工運維決策支援系統手機介面

表11、波高超過 1.1m 之機率(新竹 2016/7/5 00:00 預報)

date	member	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	機率%
2016	7 5 0	0.26	0.23	0.21	0.22	0.40	0.12	0.16	0.20	0.38	0.23	0.33	0.17	0.33	0.28	0.13	0.12	0.30	0.35	0.29	0.20	0
2016	7 5 1	0.26	0.24	0.22	0.23	0.40	0.13	0.17	0.21	0.39	0.23	0.33	0.18	0.32	0.28	0.13	0.13	0.30	0.34	0.29	0.22	0
2016	7 5 2	0.26	0.26	0.23	0.23	0.40	0.15	0.18	0.22	0.40	0.25	0.34	0.19	0.32	0.28	0.14	0.14	0.31	0.37	0.30	0.23	0
2016	7 5 3	0.26	0.27	0.25	0.24	0.40	0.22	0.21	0.25	0.40	0.32	0.34	0.21	0.33	0.29	0.16	0.15	0.31	0.96	0.35	0.24	0
2016	7 5 4	0.27	0.29	0.29	0.27	0.40	0.42	0.29	0.36	0.40	0.57	0.35	0.24	0.39	0.31	0.21	0.18	0.31	1.00	0.88	0.26	0
2016	7 5 5	0.28	0.32	0.40	0.43	0.40	0.41	0.42	0.49	0.40	0.56	0.38	0.27	1.09	0.32	0.36	0.24	0.32	0.87	0.99	0.30	0
2016	7 5 6	0.32	0.38	0.46	0.59	0.40	0.37	0.47	0.50	0.39	0.53	0.44	0.32	0.84	0.31	0.93	0.69	0.32	0.74	0.91	0.38	0
2016	7 5 7	0.41	0.41	0.43	0.51	0.40	0.35	0.44	0.46	0.39	0.49	0.86	0.44	0.79	0.31	0.74	0.67	0.32	0.64	0.85	0.83	0
2016	7 5 8	0.43	0.39	0.38	0.42	0.40	0.33	0.40	0.42	0.38	0.47	0.71	0.63	0.65	0.30	0.67	0.66	0.32	0.56	0.80	0.68	0
2016	7 5 9	0.40	0.38	0.36	0.38	0.41	0.32	0.37	0.40	0.39	0.46	0.63	0.61	0.56	0.30	0.57	0.60	0.31	0.48	0.73	0.55	0
2016	7 5 10	0.38	0.38	0.33	0.37	0.39	0.30	0.34	0.37	0.40	0.45	0.55	0.52	0.51	0.30	0.49	0.51	0.31	0.41	0.63	0.46	0
2016	7 5 11	0.36	0.38	0.31	0.36	0.38	0.27	0.31	0.35	0.39	0.43	0.46	0.42	0.45	0.30	0.42	0.45	0.30	0.36	0.52	0.39	0
2016	7 5 12	0.36	0.36	0.29	0.34	0.37	0.24	0.29	0.33	0.38	0.41	0.39	0.34	0.38	0.29	0.36	0.41	0.29	0.31	0.42	0.32	0
2016	7 5 13	0.35	0.35	0.28	0.33	0.36	0.22	0.28	0.31	0.36	0.38	0.33	0.27	0.32	0.29	0.31	0.37	0.29	0.29	0.35	0.29	0
2016	7 5 14	0.34	0.33	0.26	0.31	0.35	0.21	0.27	0.29	0.35	0.36	0.30	0.24	0.28	0.28	0.27	0.32	0.28	0.27	0.31	0.28	0
2016	7 5 15	0.33	0.31	0.25	0.29	0.35	0.20	0.26	0.28	0.34	0.34	0.28	0.22	0.26	0.27	0.24	0.27	0.28	0.26	0.29	0.27	0
2016	7 5 16	0.32	0.29	0.24	0.27	0.35	0.20	0.25	0.27	0.33	0.32	0.27	0.21	0.26	0.27	0.23	0.25	0.27	0.25	0.27	0.26	0
2016	7 5 17	0.31	0.28	0.24	0.26	0.34	0.20	0.25	0.26	0.33	0.31	0.26	0.20	0.25	0.26	0.21	0.23	0.26	0.24	0.26	0.25	0
2016	7 5 18	0.30	0.27	0.23	0.25	0.34	0.19	0.24	0.25	0.32	0.30	0.25	0.19	0.25	0.26	0.19	0.22	0.26	0.23	0.25	0.24	0
2016	7 5 19	0.30	0.26	0.23	0.24	0.34	0.19	0.24	0.25	0.31	0.29	0.24	0.19	0.24	0.26	0.19	0.22	0.26	0.23	0.25	0.24	0
2016	7 5 20	0.31	0.25	0.22	0.24	0.33	0.19	0.24	0.24	0.31	0.29	0.24	0.19	0.24	0.25	0.18	0.21	0.25	0.24	0.24	0.24	0
2016	7 5 21	0.32	0.25	0.22	0.23	0.33	0.18	0.24	0.24	0.30	0.28	0.23	0.18	0.24	0.25	0.18	0.20	0.25	0.24	0.24	0.23	0
2016	7 5 22	0.34	0.24	0.22	0.23	0.32	0.18	0.23	0.23	0.30	0.28	0.22	0.18	0.24	0.26	0.17	0.20	0.25	0.24	0.23	0.23	0
2016	7 5 23	0.36	0.24	0.22	0.22	0.32	0.18	0.23	0.23	0.29	0.28	0.22	0.18	0.24	0.26	0.17	0.19	0.24	0.23	0.22	0.22	0
2016	7 6 0	0.36	0.24	0.21	0.22	0.31	0.18	0.23	0.23	0.29	0.28	0.21	0.18	0.24	0.26	0.17	0.19	0.24	0.22	0.21	0.22	0
2016	7 6 1	0.36	0.24	0.21	0.21	0.31	0.18	0.22	0.22	0.28	0.27	0.21	0.18	0.23	0.26	0.16	0.18	0.23	0.20	0.21	0.22	0
2016	7 6 2	0.35	0.24	0.21	0.21	0.30	0.18	0.22	0.22	0.28	0.27	0.20	0.18	0.23	0.26	0.16	0.18	0.24	0.18	0.21	0.22	0
2016	7 6 3	0.34	0.23	0.21	0.21	0.30	0.18	0.21	0.22	0.27	0.26	0.20	0.18	0.22	0.26	0.16	0.18	0.26	0.17	0.22	0.21	0
2016	7 6 4	0.34	0.23	0.21	0.22	0.29	0.18	0.21	0.22	0.27	0.26	0.19	0.18	0.24	0.26	0.15	0.19	0.31	0.17	0.24	0.21	0
2016	7 6 5	0.34	0.22	0.24	0.24	0.29	0.18	0.23	0.22	0.26	0.25	0.18	0.18	0.32	0.25	0.15	0.21	0.40	0.18	0.30	0.21	0
2016	7 6 6	0.39	0.22	0.44	0.26	0.29	0.18	0.40	0.28	0.25	0.24	0.18	0.19	0.44	0.25	0.15	0.30	0.53	0.20	0.38	0.21	0
2016	7 6 7	0.55	0.22	0.64	0.29	0.30	0.19	0.61	0.37	0.25	0.23	0.18	0.22	0.54	0.24	0.15	0.45	0.65	0.29	0.49	0.21	0
2016	7 6 8	0.73	0.21	0.79	0.32	0.29	0.19	0.81	0.47	0.28	0.22	0.23	0.24	0.60	0.24	0.15	0.63	0.72	0.44	0.60	0.21	0
2016	7 6 9	0.89	0.21	0.91	0.33	0.29	0.19	1.01	0.54	0.36	0.22	0.39	0.24	0.64	0.24	0.16	0.82	0.76	0.61	0.73	0.21	0
2016	7 6 10	0.93	0.22	0.94	0.32	0.28	0.20	1.11	0.58	0.43	0.22	0.53	0.22	0.64	0.26	0.19	0.95	0.78	0.76	0.83	0.22	5
2016	7 6 11	0.90	0.26	0.89	0.30	0.28	0.21	1.14	0.58	0.44	0.22	0.59	0.21	0.63	0.30	0.25	1.00	0.78	0.87	0.91	0.23	5
2016	7 6 12	0.86	0.30	0.82	0.28	0.33	0.22	1.14	0.56	0.42	0.22	0.61	0.21	0.61	0.32	0.34	1.00	0.76	0.95	0.95	0.24	5
2016	7 6 13	0.81	0.31	0.78	0.27	0.38	0.24	1.12	0.52	0.39	0.22	0.60	0.22	0.59	0.33	0.43	0.96	0.72	0.99	0.96	0.25	5
2016	7 6 14	0.76	0.31	0.75	0.26	0.42	0.25	1.08	0.50	0.36	0.22	0.57	0.21	0.57	0.33	0.46	0.90	0.65	0.97	0.93	0.25	0
2016	7 6 15	0.70	0.31	0.75	0.25	0.42	0.26	1.04	0.48	0.33	0.22	0.55	0.20	0.54	0.30	0.46	0.84	0.57	0.92	0.90	0.26	0
2016	7 6 16	0.70	0.31	0.73	0.24	0.40	0.28	1.04	0.48	0.30	0.21	0.54	0.20	0.50	0.27	0.45	0.80	0.49	0.90	0.87	0.27	0
2016	7 6 17	0.74	0.33	0.70	0.22	0.38	0.29	1.06	0.49	0.29	0.20	0.55	0.19	0.46	0.24	0.45	0.79	0.43	0.90	0.84	0.29	0
2016	7 6 18	0.81	0.34	0.67	0.21	0.36	0.30	1.09	0.51	0.27	0.21	0.56	0.17	0.43	0.22	0.46	0.79	0.40	0.92	0.81	0.30	0
2016	7 6 19	0.88	0.36	0.63	0.21	0.33	0.31	1.11	0.57	0.26	0.22	0.56	0.16	0.40	0.21	0.48	0.81	0.38	0.95	0.78	0.31	5
2016	7 6 20	0.94	0.38	0.58	0.20	0.31	0.32	1.11	0.68	0.25	0.25	0.57	0.15	0.38	0.19	0.51	0.83	0.40	0.97	0.75	0.34	5
2016	7 6 21	0.99	0.41	0.53	0.20	0.29	0.33	1.11	0.84	0.24	0.29	0.57	0.15	0.37	0.17	0.53	0.85	0.43	0.97	0.72	0.38	5
2016	7 6 22	1.06	0.47	0.53	0.19	0.28	0.34	1.15	1.00	0.23	0.31	0.60	0.15	0.36	0.16	0.56	0.90	0.49	1.00	0.73	0.44	5
2016	7 6 23	1.14	0.58	0.62	0.20	0.27	0.35	1.21	1.17	0.22	0.34	0.65	0.17	0.36	0.14	0.62	0.97	0.58	1.07	0.77	0.52	15
2016	7 7 0	1.23	0.73	0.76	0.24	0.26	0.36	1.29	1.36	0.21	0.46	0.72	0.22	0.37	0.13	0.72	1.08	0.70	1.17	0.84	0.65	15
2016	7 7 1	1.35	0.89	0.91	0.40	0.26	0.39	1.37	1.51	0.20	0.65	0.82	0.31	0.43	0.12	0.87	1.18	0.86	1.34	0.96	0.81	25
2016	7 7 2	1.49	1.08	1.05	0.67	0.34	0.51	1.46	1.64	0.19	0.86	0.95	0.49	0.58	0.12	1.07	1.29	1.07	1.56	1.12	0.99	30
2016	7 7 3	1.64	1.29	1.18	0.98	0.54	0.77	1.55	1.76	0.19	1.08	1.09	0.73	0.85	0.12	1.30	1.39	1.32	1.81	1.28	1.18	55
2016	7 7 4	1.66	1.46	1.31	1.20	0.76	1.01	1.61	1.85	0.29	1.23	1.17	0.87	1.13	0.14	1.46	1.46	1.54	1.91	1.39	1.34	75
2016	7 7 5	1.63	1.55	1.45	1.35	1.05	1.22	1.64	1.92	0.56	1.32	1.20	0.98	1.35	0.27	1.54	1.50	1.72	1.88	1.45	1.47	80
2016	7 7 6	1.59	1.62	1.59	1.46	1.35	1.42	1.67	1.98	0.89	1.38	1.22	1.07	1.53	0.74	1.61	1.54	1.87	1.79	1.48	1.59	85
2016	7 7 7	1.61	1.64	1.60	1.42	1.47	1.53	1.70	2.08	1.08	1.40	1.26	1.11	1.62	0.90	1.57	1.55	1.99	1.74	1.48	1.64	90
2016	7 7 8	1.65	1.65	1.55	1.33	1.48	1.59	1.73	2.22	1.15	1.39	1.29	1.11	1.64	0.98	1.50	1.54	2.08	1.75	1.48	1.63	95
2016	7 7 9	1.67	1.68	1.47	1.21	1.45	1.63	1.75	2.36	1.17	1.38	1.33	1.10									

表12、風速超過 15m/s 之機率(新竹 2016/7/5 00:00 預報)

date	member	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	機率%
2016	7 5 0	2.97	3	6.45	4.97	3.69	6.18	5.35	5.72	3.68	5.62	3.9	4.38	5.59	4.79	5.48	4.85	3.84	7.37	5.25	3.72	0
2016	7 5 1	4.2	4.53	7.1	6.12	4.5	7.29	6.29	6.79	5.16	7.08	5.1	5.59	6.68	6.07	6.35	5.51	4.49	8.64	6.83	4.85	0
2016	7 5 2	5.43	6.06	7.74	7.27	5.3	8.4	7.23	7.87	6.63	8.53	6.31	6.81	7.76	7.35	7.23	6.17	5.44	9.9	8.42	5.98	0
2016	7 5 3	6.67	7.6	8.38	8.42	6.11	9.51	8.17	8.93	8.11	9.97	7.5	8.02	8.85	8.63	8.1	6.83	6.39	11.16	10.01	7.12	0
2016	7 5 4	7.18	7.49	7.8	8.71	6.28	7.41	7.84	8.07	5.8	8.56	7.71	7.14	9.03	7.03	8.54	7.87	6.1	9.67	9.89	7.52	0
2016	7 5 5	7.69	7.38	7.22	8.99	6.45	5.29	7.5	7.2	3.45	7.14	7.91	6.26	9.2	5.43	8.96	8.91	5.8	8.17	9.76	7.93	0
2016	7 5 6	8.2	7.27	6.63	9.27	6.62	3.19	7.15	6.34	1.41	5.73	8.1	5.37	9.35	3.83	9.36	9.95	5.51	6.67	9.62	8.33	0
2016	7 5 7	6.96	6.19	5.47	7.3	6.36	3.46	5.61	5.59	3.04	2.74	6.3	5.72	7.1	3.71	7.52	8.74	4.89	5.27	7.95	6.07	0
2016	7 5 8	5.71	5.07	4.23	5.23	6.09	3.71	3.89	4.79	4.91	0.76	4.41	6.07	4.65	3.59	5.67	7.52	4.27	3.56	6.3	3.62	0
2016	7 5 9	4.46	3.95	2.98	3.17	5.83	3.93	2.2	3.96	6.65	1.34	2.71	6.41	2.66	3.45	3.91	6.29	3.64	1.87	4.7	1.63	0
2016	7 5 10	4.33	3.45	2.8	3.21	4.66	3.54	2.7	4.09	5.08	1.78	3.35	5.33	2.95	2.64	2.13	3.1	3.07	2.88	2.34	2.89	0
2016	7 5 11	4.18	2.9	2.56	3.21	3.46	3.14	3.14	4.18	3.5	2.51	4.05	4.18	3.4	1.84	1.97	1.95	2.55	3.95	2.65	4.38	0
2016	7 5 12	4.03	2.29	2.27	3.18	2.27	2.72	3.47	4.24	1.92	3.21	4.69	3.01	3.84	1.06	2.86	2.35	1.94	4.97	3.54	5.74	0
2016	7 5 13	3.57	2.02	2.18	3.52	2.78	2.85	3.31	4.3	1.92	2.72	4.37	3.41	3.71	1.46	3.16	2.63	1.86	3.9	3.18	5.36	0
2016	7 5 14	3.11	1.74	2.08	3.86	3.3	2.97	3.15	4.36	1.91	2.23	4.05	3.77	3.58	1.86	3.44	2.89	1.74	2.79	2.82	4.98	0
2016	7 5 15	2.65	1.44	1.96	4.2	3.8	3.09	2.98	4.42	1.9	1.73	3.73	4.09	3.45	2.2	3.71	3.14	1.59	1.68	2.45	4.59	0
2016	7 5 16	1.81	1.59	2.37	3.86	3.54	2.98	2.72	4.03	1.81	1.56	3.64	3.55	3	2.57	3.32	2.68	1.95	1.95	2.12	3.94	0
2016	7 5 17	0.98	1.74	2.78	3.51	3.27	2.85	2.45	3.65	1.72	1.36	3.54	3.01	2.56	2.94	2.93	2.19	2.31	2.05	1.76	3.28	0
2016	7 5 18	0.36	1.87	3.18	3.17	2.98	2.73	2.18	3.26	1.63	1.14	3.44	2.46	2.12	3.31	2.54	1.67	2.66	2.06	1.4	2.63	0
2016	7 5 19	0.61	2.76	3.11	2.84	3.06	2.64	2.2	2.7	1.55	1.14	3.05	2.6	2.03	3.53	2.55	1.55	2.35	1.51	1.41	1.47	0
2016	7 5 20	0.96	3.65	3.04	2.5	3.13	2.54	2.21	2.11	1.46	1.14	2.65	2.73	1.95	3.74	2.53	1.41	2.04	2.15	1.39	0.14	0
2016	7 5 21	1.31	4.53	2.96	2.16	3.19	2.45	2.23	1.51	1.34	1.13	2.25	2.87	1.87	3.96	2.49	1.27	1.72	3.14	1.33	0.25	0
2016	7 5 22	1.65	3.78	2.42	1.95	1.69	2	1.84	1.23	1.34	1.07	1.81	2.37	1.73	3.37	1.92	0.68	1.05	3.21	1.27	0.67	0
2016	7 5 23	1.98	3.03	1.84	1.7	0.55	1.55	1.43	1.22	1.32	1.7	1.34	1.88	1.57	2.76	1.3	0.58	1.03	3.27	1.2	1.12	0
2016	7 6 0	2.3	2.28	1.26	1.41	0.39	1.09	1.02	2.61	1.28	2.94	0.87	1.38	1.4	2.15	0.69	1.09	1.76	3.31	1.12	1.47	0
2016	7 6 1	2.52	2.6	1.9	2.06	1.96	1.72	2.08	2.53	2.27	3.53	0.98	2.05	2.44	2.23	1.37	1.92	1.73	3.55	1.41	2.16	0
2016	7 6 2	2.74	2.92	2.55	2.71	3.87	2.36	3.15	2.44	3.26	4.11	1.91	2.72	3.45	2.29	2.08	2.77	1.59	3.79	1.62	2.84	0
2016	7 6 3	2.95	3.24	3.2	3.35	5.77	2.99	4.19	2.34	4.23	4.69	3.69	3.39	4.41	2.34	2.78	3.59	1.41	4.01	1.71	3.52	0
2016	7 6 4	3.04	4.13	4.02	3.75	6.22	3.35	4.56	2.18	4.46	4.37	3.66	3.99	4.84	3.41	3.03	3.81	3.25	3.87	2.46	3.43	0
2016	7 6 5	2.88	5.01	4.72	4.15	6.67	3.7	4.87	1.82	4.67	4.04	3.63	4.58	5.26	4.47	3.27	3.88	5.36	3.52	3.25	3.34	0
2016	7 6 6	2.42	5.89	5.41	4.54	7.12	4.05	5.18	1.37	4.88	3.71	3.6	5.17	5.68	5.54	3.5	3.85	7.47	3.09	4.08	3.24	0
2016	7 6 7	4.44	5.47	6.49	4.7	6.32	3.73	6.79	1.62	3.35	3.54	4.92	4.91	5.43	3.57	2.71	6.03	7.51	5	5.7	2.75	0
2016	7 6 8	6.75	5.04	7.67	4.86	5.51	3.42	8.54	1.92	2.1	3.36	6.23	4.64	5.09	1.32	1.88	8.35	7.54	6.86	7.59	2.25	0
2016	7 6 9	8.94	4.6	8.8	5.01	4.69	3.1	10.23	2.32	2.09	3.18	7.54	4.38	4.69	0.61	1.28	10.61	7.57	8.47	9.49	1.76	0
2016	7 6 10	8.52	2.4	8.03	3.89	2.97	2.33	10.12	2.4	3.01	3.4	7.5	3.38	4.54	0.99	1.37	10.6	7.51	9.42	10.09	1.45	0
2016	7 6 11	8.1	0.28	7.25	2.75	1.59	1.52	10	2.49	4.54	3.63	7.46	2.37	4.36	1.63	3.08	10.59	7.45	10.37	10.68	1.09	0
2016	7 6 12	7.68	0.34	6.47	1.63	1.84	0.72	9.87	2.56	5.85	3.85	7.4	1.38	4.15	2.15	5.27	10.58	7.36	11.32	11.28	0.71	0
2016	7 6 13	7	0.71	6.75	1.84	2.08	1.28	9.52	2.53	4.66	3.2	7.17	1.48	3.97	1.25	5.13	9.86	6.62	11.02	10.68	1	0
2016	7 6 14	6.33	1.1	7.03	2	2.31	1.8	9.17	2.91	3.41	2.52	6.93	1.57	3.79	0.59	4.93	9.13	5.87	10.73	10.07	1.31	0
2016	7 6 15	5.66	1.51	7.3	2.1	2.48	2.19	8.82	3.25	2.36	1.84	6.69	1.62	3.58	0.6	4.65	8.41	5.12	10.44	9.47	1.64	0
2016	7 6 16	6.67	2.16	7.27	2.42	2.69	2.01	9.03	3.95	1.88	1.53	6.99	1.89	2.79	0.75	4.67	8.64	4.74	10.71	9.15	1.66	0
2016	7 6 17	7.68	3.1	7.24	2.75	2.89	1.84	9.23	4.68	1.35	0.99	7.3	2.16	1.94	1.77	4.69	8.87	4.35	10.99	8.83	1.75	0
2016	7 6 18	8.69	4.04	7.2	3.07	1.67	9.44	5.39	0.77	0.61	7.6	2.43	1.19	2.5	4.71	9.09	3.97	11.27	8.5	1.92	0	
2016	7 6 19	9.15	4.53	6.88	2.72	2.93	1.6	9.46	7.11	0.8	0.63	7.67	2.5	1.31	2.32	5.06	9.38	3.54	11.38	8.35	2.9	0
2016	7 6 20	9.61	5	6.56	2.36	2.76	1.53	9.48	8.82	1.22	0.99	7.74	2.57	1.49	2.14	5.4	9.67	3.09	11.48	8.2	3.8	0
2016	7 6 21	10.07	5.42	6.24	2	2.55	1.46	9.49	10.53	2.21	1.63	7.81	2.64	1.69	1.95	5.75	9.96	2.63	11.59	8.06	4.58	0
2016	7 6 22	10.73	6.74	7.36	2.88	2.67	1.18	10.18	11.6	1.97	3.44	8.27	3.63	2.4	1.88	7.23	10.83	3.13	12.29	9.06	6.39	0
2016	7 6 23	11.38	8.07	8.49	3.72	2.78	1.41	10.87	12.67	1.69	5.29	8.73	4.57	2.98	1.78	8.7	11.69	3.56	13	10.06	8.21	0
2016	7 7 0	12.04	9.41	9.61	4.48	2.85	2.06	11.55	13.74	1.39	6.98	9.18	5.42	3.35	1.66	10.13	12.55	3.92	13.7	11.06	10	0
2016	7 7 1	12.91	10.45	10.35	6.97	4.3	4.33	12.3	14.28	2.15	8.56	10.11	7.24	6.14	2.94	11.72	13.25	5.21	15.28	12.14	11.22	5
2016	7 7 2	13.79	11.49	11.1	9.49	5.75	6.7	13.04	14.82	2.87	10.14	11.04	9.06	9.02	4.21	13.31	13.96	6.51	16.85	13.21	12.43	5
2016	7 7 3	14.67	12.52	11.85	12	7.18	9.09	13.77	15.36	3.49	11.72	11.96	10.89	11.9	5.41	14.9	14.66	7.81	18.42	14.29	13.65	10
2016	7 7 4	14.16	13.17	12.64	12.71	9.27	10.5	14	15.43	5.97	12.21	11.76	11.38	13.25	7.32	15.25	15.02	7.73	17.62	14.44	14.45	20
2016	7 7 5	13.65	13.81	13.42	13.41	11.38	11.91	14.24	15.5	8.52	12.69	11.55	11.88	14.61	9.24	15.6	15.39	7.64	16.81	14.59	15.26	25
2016	7 7 6	13.14	14.46	14.21	14.11	13.48	13.33	14.47	15.57	11.09	13.18	11.34	12.37	15.96	11.16	15.94	15.75	7.55	16.01	14.74	16.06	30
2016	7 7 7	13.12	14.45	13.45	13.25	13.32	13.56	14.53	16.21	11.13	13.15	11.58	12.07	16.18	11.22	15.34	15.27	6.6	16.19	14.57	16.17	30
2016	7 7 8	13.09	14.45	12.69	12.4	13.16	13.79	14.59	16.85	11.17	13.11	11.82	11.76	16.39	11.28	14.73	14.79	5.65	16.36	14.39	16.28	20
2016	7 7 9	13.07	14.44	11.92	11.54	13	14.01	14.65	17.49	11.2	1											

## 第五章 結論與建議



單一決定性預報存在不確定性使得預報指引愈來愈無法滿足需求，而系集預報可包含模式的不確定性，已成為未來的發展趨勢。本研究引用氣象系集的概念，利用 NWW3 二層多重網格模式，建立以台灣海域為範圍之區域性作業化波浪系集預報系統，系統採用 20 個系集成員及氣象局二層之系集風場當作驅動力，而本研究首創提出之二種風場輸入公式組合方式以涵蓋季風及颱風的波浪特性，並以外洋二個測站作為主要選取系集成員的依據(受限於最小 10km 解析度)，透過不確定性分析及相關統計指標，選定系集成員與檢定預報系統的預報能力和準確度。研究成果應用包括完成作業化系集預報及展示系統(每日四次預報)產出波浪機率性預報、完成海上施工決策支援系統，使用決定性預報進行離岸風電位於新竹和彰化之氣候窗分析，作為海上運維決策之參考，並獲致以下結論及建議：

### 結論

1. 波浪模擬的不確定分析顯示，主要的不確定性為風場與風場公式(風浪交互作用)，至於空間邊界的影響，取決於邊界條件取得及風場的涵蓋範圍，在部分海況時會產生較大差異。數值方法在非線性波的交互作用的解析上，因作業化的考量下亦會產生誤差。
2. 分別針對 2012 年 1~2 月季風期及 8 月颱風期選取不同風場輸入公式(Tolman 及 WAM4)進行調整，發現利用系集成員各半(10 個系集使用 Tolman 公式，10 個系集使用 WAM4 公式)的組合方式來組成系集成員，可以保留各個風場輸入公式在不同風況下的優點，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。
3. 利用 Reliability diagram、BSS 及 ROC 等分別檢視系及系統之預報能力，結果顯示本系集預報系統已具備預報能力及區別事件發生及未發生的能力，並優於單一的定性預報，亦堪與 NCEP 的全球波浪系集系統相較之，換言之，本研究研發之區域性作業化波浪系集預報系統已具有預報能力，可以提供波浪的機率預報。而對部分靠岸測站而言，可能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。
4. 使用 NOAA 提供之島嶼效應程式，會因 GSHHS 於台灣、澎湖及附近島嶼之海岸線有約 600m 的誤差而導致計算偏差，本研究以正確的海岸線資料修正之，以

考慮網格無法解析之島嶼效應。

5. 系集預報系統可以產生波浪機率性預報，提供單點及面的輸出，單點部分以盒鬚圖展示，套疊過去 24 小時之系集平均，並可產出三天後之即時驗證盒鬚圖以即時比較模擬結果；面的輸出主要包括 20 張系集成員圖、系集平均、系集平均及系集分歧、機率分布圖、Spaghetti 圖、10%超越機率圖等，以滿足不同目的對於機率預報資訊的需求。
6. 系集預報產出之機率預報，結合蒙地卡羅法，設定海上工作之環境參數門檻(風速、波高等)及作業延時需求，可提供逐時滿足門檻條件之機率預報，作為海上施工期程決策之參考。而決策系統亦可廣納不同來源之系集預報資料，提供便利的機率預報資訊。

### 建議


1. 假如計算資源足夠的情形下，亦可由 20 個系集風場驅動 40 個系集浪場，可能的結果亦不相同；但在固定 20 個系集成員的條件下，本研究提出各 10 個系集的作法，由於每個系集成員的貢獻度差異不大，由那 10 個成員的組成結果應該差異亦不大(由 10W10T 和 10T10W 的差異不大獲得驗證)，目前因為選擇二個條件(東北季風及颱風時期)來評估，二個風場輸入公式又剛好被評估較為適合個別的條件，因此採用各半的邏輯應該是合理的，但比重各 10 是否為最佳，則是未來值得探討的議題。
2. 系集預報的目的是期望預報的 SPRD 能包含模式的不確定性，故希望讓 SPRD 愈接近 RMSE 愈好，目前離散不足的現象，擬從二方面著手，首先拉近風場的 SPRD 及 RMSE，此部分在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，影響到近陸域的風場，至於海域風場部分，擬建議考慮波浪形成的粗糙度進行風波的耦合研究；在波浪方面，未來除了使用改善風場外，將使用高解析度網格來改善近岸的模擬以降低 RMSE，同時將測試在系統內針對低頻部分增加擾動以增加 SPRD。在風波交互作用部分，模式中任何一個內建的經驗公式，都是透過實驗迴歸而得，然而各地的風浪特性受限於風域大小、形狀可能會有不同，因此在使用上的差異是需要被斟酌，尤其當風浪交互作用為模式之主要不確定性來源。
3. 氣候窗的決定不僅是在現場施工階段，在所有離岸再生能源海上運維的規劃上亦扮演非常重要的角色，必須透過長期的海象資料始能進行分析。運用機率於氣候


窗規劃之分析尚在研究階段，而利用優於單一決定性預報之長期系集平均可以進行適當的離岸運維之氣候窗分析。而完整分析離岸風場運維作業之不同作業船隻的可接近條件，方能針對不同的氣候窗採用不同的運維策略，提出完善的作業規劃，爭取維護作業時間，快速保養使設備恢復運轉，提高風機可用率，方能提高離岸風場之經濟效益。

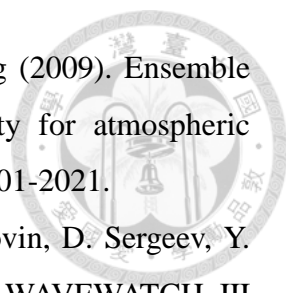
## 參考文獻

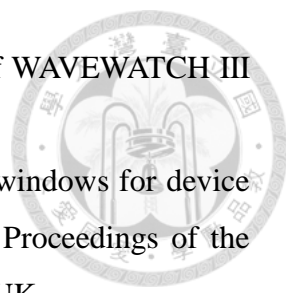


1. 林欽隆、謝文忠、吳嘉弘 (2008)，台灣海域沈船處理與對策研究，行政院海岸巡防署海岸巡防總局自行研究，CGA-COAST-097001。
2. 海岸巡防署網頁，<http://www.cga.gov.tw/interactive/interactive3.html>。
3. 經濟部中央地質調查所 (2007)，10 萬分之 1 海洋地質圖測製及編製作業規範(草案)。
4. 經濟部研究機構能源科技專案 (2013)，離岸風場調查分析及技術研發計畫，財團法人工業技術研究院。
5. 經濟部研究機構能源科技專案 (2016)，千架海陸風力機設置推動及關鍵技術研發計畫(1/3)，財團法人工業技術研究院。
6. 經濟部研究機構能源科技專案 (2017)，千架海陸風力機設置推動及關鍵技術研發計畫(2/3)，財團法人工業技術研究院。
7. 經濟部研究機構能源科技專案 (2015)，千架海陸風力機設置推動及關鍵技術研發計畫，財團法人工業技術研究院。
8. 陳炫杉 (1994)，WAM 模式評介，交通部中央氣象局，氣象學報，第 39 卷，第 2 期，106-115。
9. 吳南靖、廖哲樞、朱志誠 (2005)，WTA 類神經網路在風浪推算之應用，中華技術，第 67 期，第 1 篇。
10. 台灣颱風資訊中心，[http://typhoon.ws/learn/reference/beaufort\\_scale](http://typhoon.ws/learn/reference/beaufort_scale)。
11. 郭一羽等 (2001)，海岸工程學，文山書局。
12. 交通部中央氣象局 (2011)，災害性天氣監測與預報作業建置計畫-改善海象預報作業 100 年度委外開發設計案，財團法人成大研究發展基金會。
13. 李至昕、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。
14. 李至昕、洪景山、曹嘉宏 (2010)，區域系集預報系統設計之初步研究，中央氣象局 99 年度天氣分析研討會。
15. 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。
16. 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。
17. 交通部中央氣象局 (2014)，建構波浪系集預報系統 (3/4)，工業技術研究院。

- 
- 18.交通部中央氣象局 (2015)，建構波浪系集預報系統 (4/4)，工業技術研究院。
  - 19.交通部中央氣象局 (2016)，發展波浪資料同化技術及強化波浪系集預報系統 (1/4)，工業技術研究院。
  - 20.交通部中央氣象局 (2017)，發展波浪資料同化技術及強化波浪系集預報系統 (2/4)，工業技術研究院。
  - 21.交通部中央氣象局 (2011)，發展鄉鎮逐時天氣預報系統—高解析度波浪模式委外開發案，工業技術研究院。
  - 22.交通部中央氣象局 (2010)，發展鄉鎮逐時天氣預報系統-高解析度波浪模式網格分析與預報系統 99 年度軟體委外開發，工業技術研究院。
  - 23.顏厥正、張恆文 (2016). 離岸施工運維決策支援系統建置，2016 台灣風能協會會員大會暨學術研討會，
  - 24.陳美蘭，張恆文，林勝豐，顏厥正 (2014)，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，154-165。
  - 25.黃任生 (2006)，動力氣候預報系統發展計畫實習報告，動力氣候預報系統發展計畫，交通部中央氣象局。
  - 26.氣象局 (2017). <http://www.cwb.gov.tw/V7e/knowledge/encyclopedia/ty015.htm>.
  - 27.Alves, J. -H. G. M., M. L. Banner, and I. R. Young (2003). Revisiting the Pierson-Moskowitz asymptotic limits for fully developed wind waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 1301–1323.
  - 28.Alves, J. -H. G. M., P. Wittmann, M. Sestak, J. Schauer, S. Stripling, N. B. Bernier, J. McLean, Y. Chao, A. Chawla, H. Tolman, G. Nelson, S. Klotz. (2013). The NCEP–FNMOC combined wave ensemble product: expanding benefits of interagency probabilistic forecasts to the oceanic environment. *American Meteorological Society*, 1893-1905.
  - 29.Ardhuin, F., H. Mathieu, C. Fabrice, C. Bertrand, Q. Pierre. (2008). Spectral wave evolution and spectral dissipation based on observations: a global validation of new source functions. *Proceedings, 4th Chinese-German joint symposium on Coastal and Ocean Engineering*.
  - 30.Bretschneider, C. L. (1952). The generation and decay of wind waves in deep water, *Transaction American Geophysical Union*, Vol. 33, No. 3, 381-389.
  - 31.Booij, N. and L. H. Holthuijsen (1987). Propagation of ocean waves in discrete

- 
- spectral wave models. *Journal of Computational Physics*, 68, 307-326.
32. Cao, D., H. L. Tolman, H. S. Chen, A. Chawla, & Gerald, V. M. (2009). Performance of the ocean wave ensemble forecast system at NCEP. The 11th International Workshop on Wave Hindcasting & Forecasting and 2nd Coastal Hazards Symposium.
  33. Cao, D., H. S. Chen and H. L. Tolman (2007). Verification of ocean wave ensemble forecast at NCEP. The 10th international workshop on wave hindcasting and forecasting & coastal hazards symposium, Turtle Bay, Oahu, paper G1.
  34. Casanova S. and B. Ahrens (2009). On the Weighting of Multimodel Ensembles in Seasonal and Short-Range Weather Forecasting, *Monthly weather review*, vol 137, 3811-3822.
  35. Chawla A., H. L. Tolman, J. L. Hanson, E.-M. Devaliere and V. M. Gerald (2009). Validation of a multi-grid WAVEWATCH III modeling system. 11th Waves forecasting and forecasting workshop, Halifax Nova Scotia.
  36. Chawla A. and H. L. Tolman (2007). Automated grid generation for WAVEWATCH III. MMAB Contribution No. 254.
  37. Chawla A. and H. L. Tolman (2008). Obstruction grids for spectral wave models. *Ocean Modeling*, 22, 12-25.
  38. Chen, H.S. (2006). Ensemble prediction of ocean waves at NCEP. *Proceedings of 28th Ocean Engineering Conference in Taiwan, NSYSU*.
  39. Chen, Y. and P. Mukerji (2008). Weather window statistical analysis for off-shore marine operations. ISOPE-I-08-158, the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 6-11 July, Vancouver, Canada.
  40. European Wind Energy Technology Platform (2014). Market Deployment Strategy (SRA/MDS). The European Wind Energy Association (EWEA).
  41. Fortin, V., M. Abaza, F. Anctil, and R. Turcotte (2014). Why should ensemble spread match the RMSE of the ensemble mean?. *J. Hydrometeor.*, 15, 1708–1713, doi:10.1175/JHM-D-14-0008.1.
  42. Hamill, T. M. (2001). Interpretation of Rank Histograms for Verifying Ensemble Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 550–560.
  43. Hasselmann K. et al. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deut. Hydrogr. Z.*, 8, 1-95.
  44. [http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/Wave\\_EPSgrams.html](http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/Wave_EPSgrams.html).

- 
45. Kolczynski Jr., W. C., D. R. Stauffer, S. E. Haupt, and A. Deng (2009). Ensemble variance calibration for representing meteorological uncertainty for atmospheric transport and dispersion modeling, *J. Appl. Meteor. Clim.* 48, 2001-2021.
46. Kuznetsova, A., G. Baydakov, V. Papko, A. Kandaurov, M. Vdovin, D. Sergeev, Y. Troitskaya. (2016). Adjusting of Wind Input Source Term in WAVEWATCH III Model for the Middle-Sized Water Body on the Basis of the Field Experiment. *Advances in Meteorology*, vol. 2016, Article ID 8539127, 13 pages, doi:10.1155/2016/8539127.
47. O'Connor M. (2012). Weather windows analysis of Galway Bay wave data. *Hydraulics & Maritime Research Centre, Sustainable Energy Authority of Ireland*.
48. O'Connor M., T. Lewis and G. Dalton (2013). Weather window analysis of Irish west coast wave data with relevance to operations & maintenance of marine renewables. *Renewable Energy* 52, 57-66.
49. Peña M. (2014). Ensemble Forecasting and their Verification, *Environmental Modeling Center, NCEP/NOAA*. April 16<sup>th</sup>.
50. Persson A. (2011). User guide to ECMWF forecast products, ECMWF.
51. Pierson, W. J. and L. Moskowitz, (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodski, *J. Geophys. Res.*, 69(24), 5181-5190.
52. Rascle, N. and F. Ardhuin (2013). A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: model validation with improved source term parameterization. *Ocean modeling*, 70, 174-188.
53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.12.001>.
54. Salzman D. J, FWB Gerner, A. Gobel and J. Koch (2007). Am-pelmann demonstrator – completion of a motion compensation platform for offshore access. Berlin: European offshore wind, <http://www.eow2007.info/index.php?id=16>.
55. Stanislaw R. M. (2013). *Ocean surface waves, their physics and prediction*, 2nd Ed. Advanced series on ocean engineering (Vol. 36).
56. Tebaldi C. and R. Knutti (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Phil. Trans. R. Soc. A* 365, 2053–2075. doi:10.1098/rsta.2007.2076.
57. Tolman, H. L. (2002). Alleviating the Garden Sprinkler Effect in wind wave models. *Ocean Modeling* 4. 269-289.

- 
58. Tolman, H. L. (2008). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP MMAB Tech. Note 268.
59. Walker, R.T., L. Johanning and R. J. Parkinson (2011). Weather windows for device deployment at UK test sites: availability and cost implications. Proceedings of the 9th European Wave and Tidal Energy Conference, Southampton, UK.
60. Wilks, D. S. (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences. 2nd Ed. (Vol. 91). Academic press.
61. Wilson L. J. Verification of probability and ensemble forecasts. Atmospheric Science and Technology Branch, Environment Canada.

## 附件一 系集分析相關繪圖



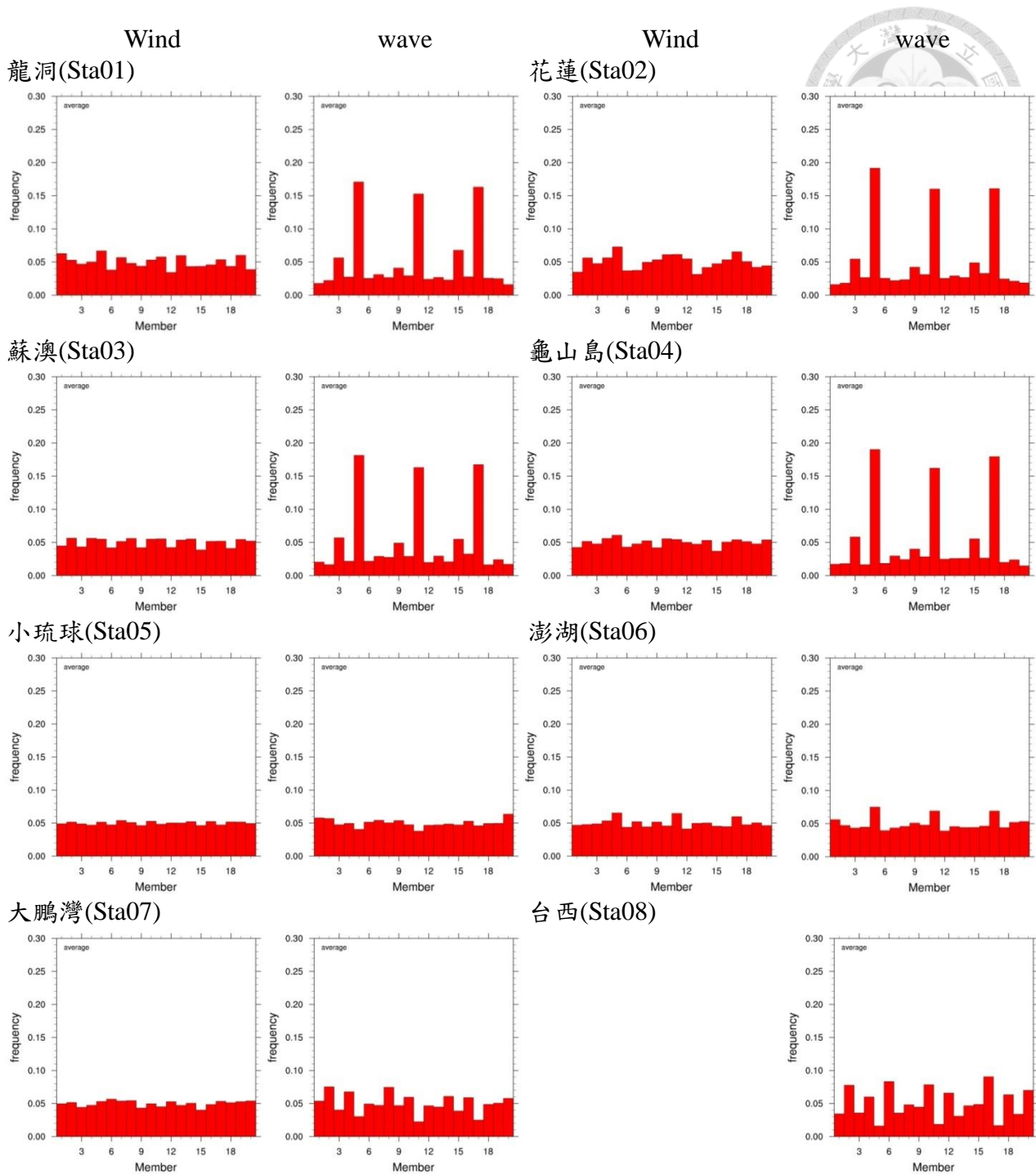


圖 1、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(Tolman)

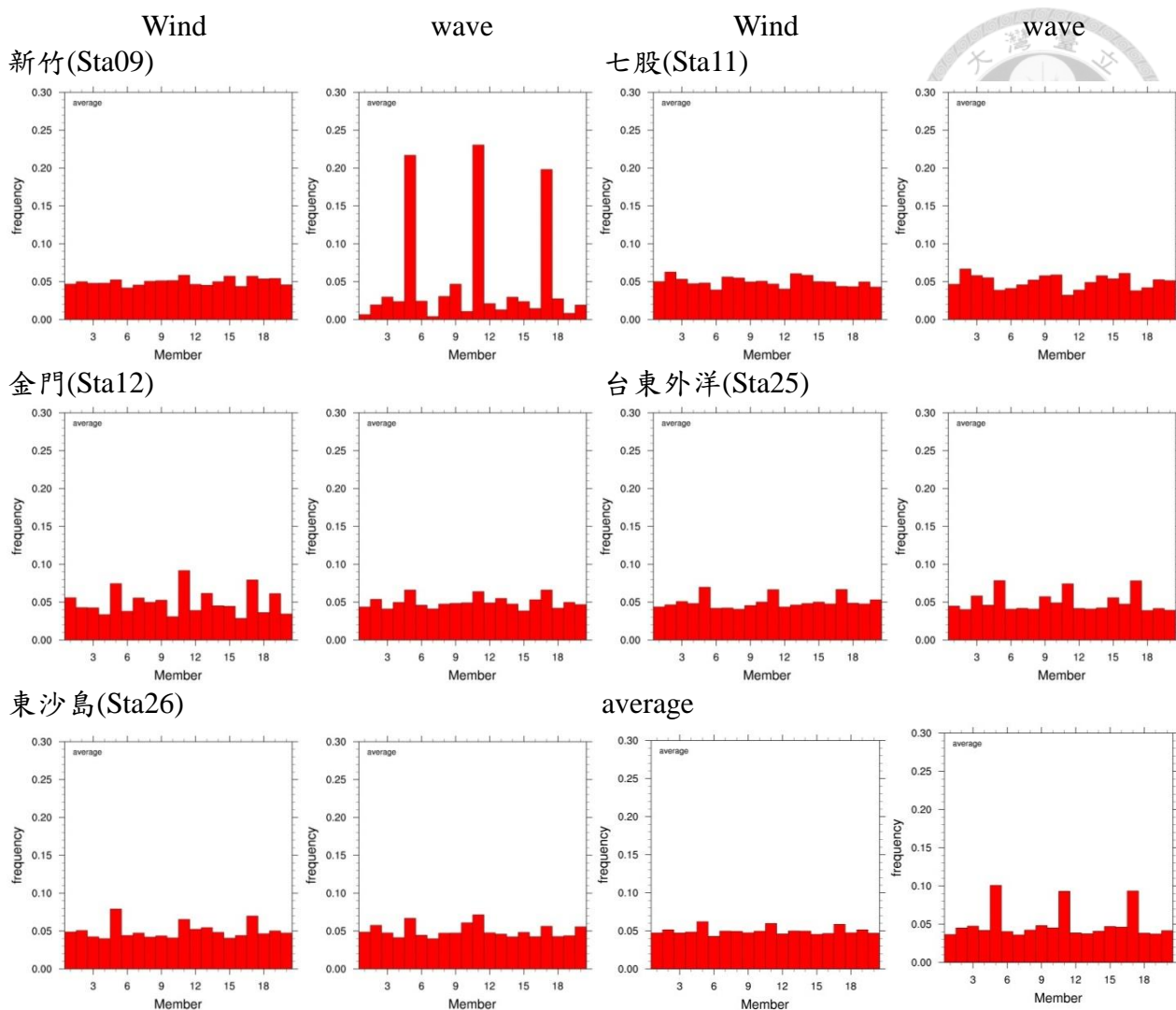


圖 1、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(Tolman)(續)

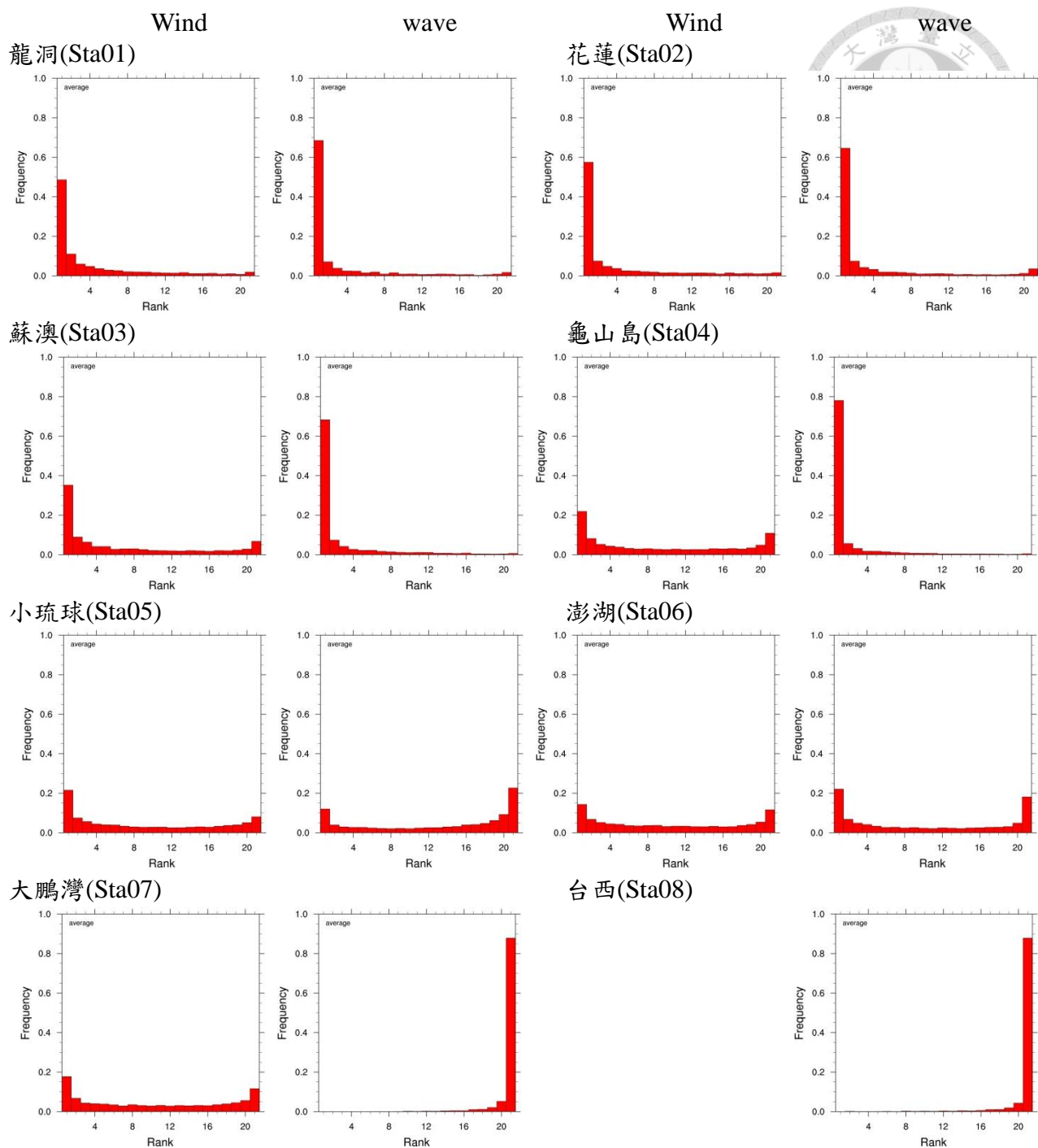


圖 2、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(Tolman)

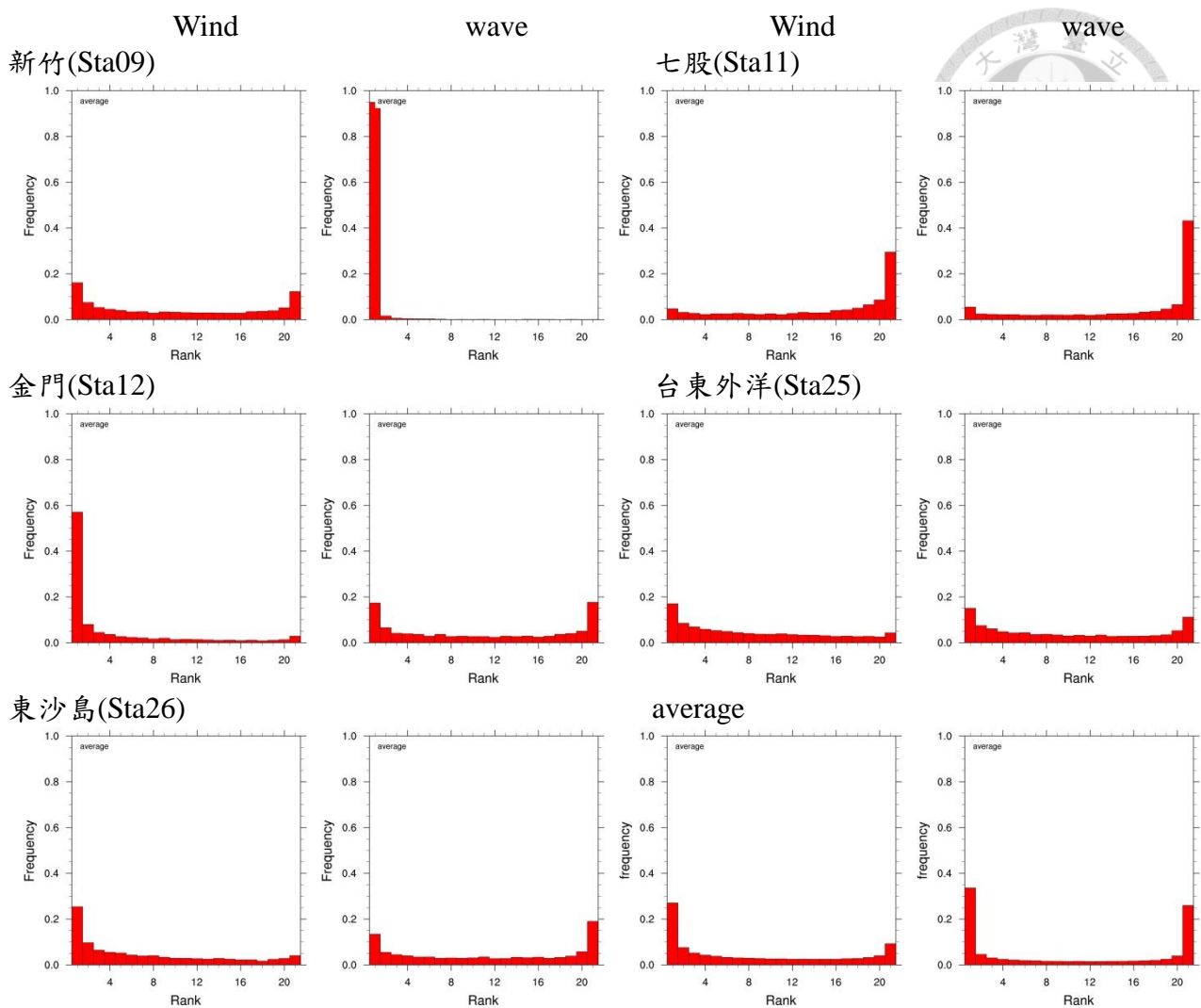


圖 2、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(Tolman)(續)

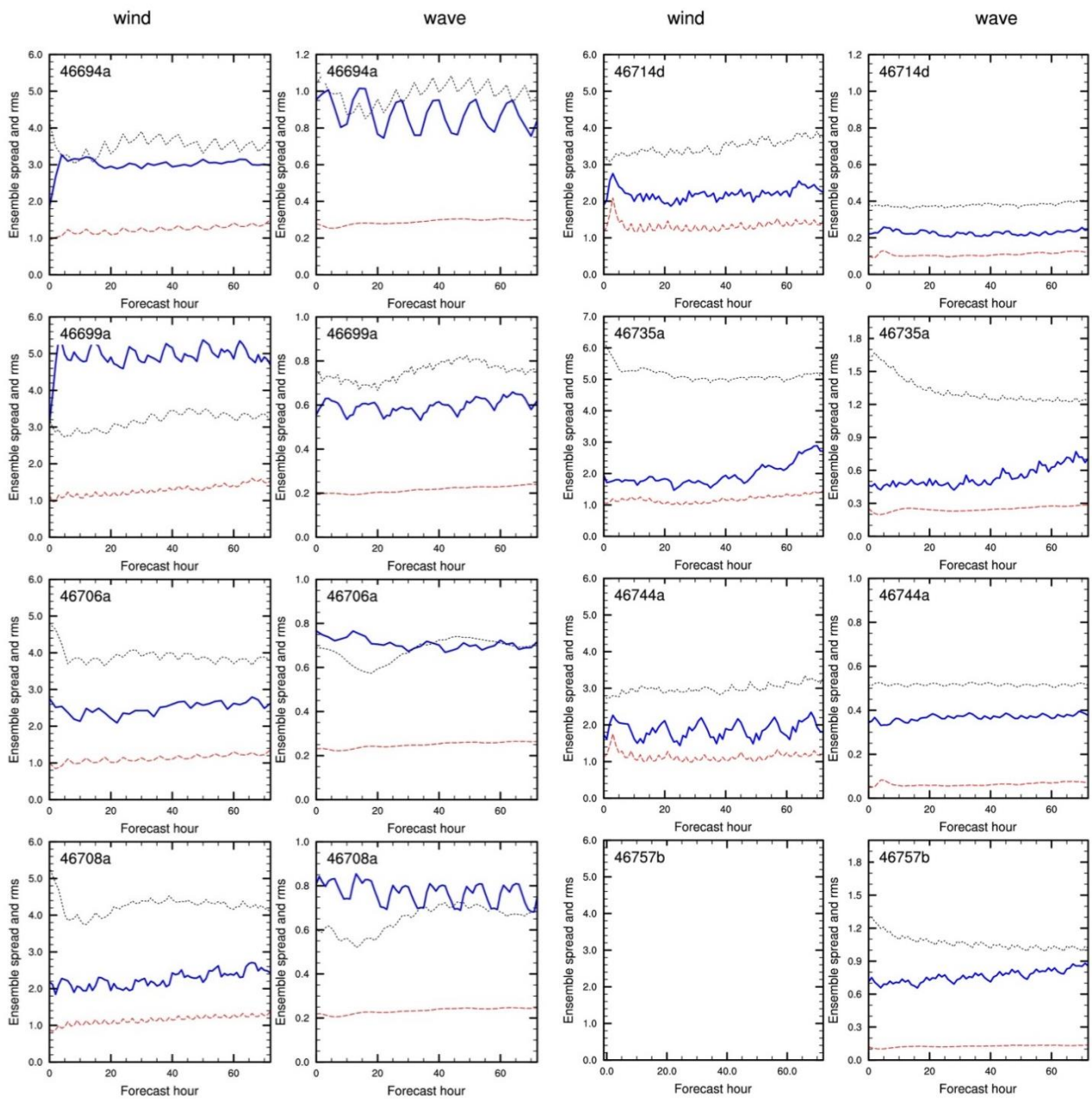


圖 3、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(Tolman)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

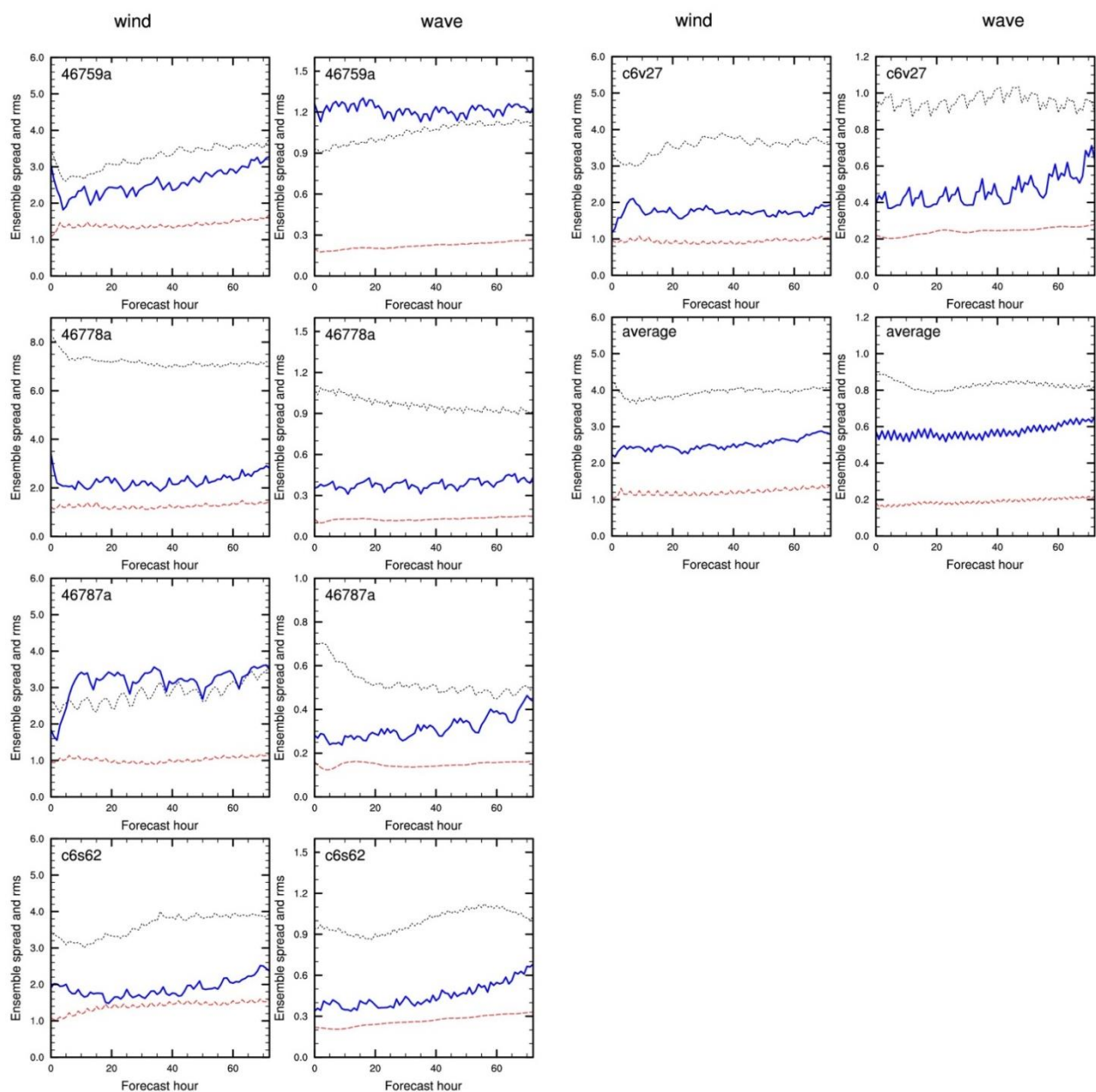


圖 3、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(Tolman)(續)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

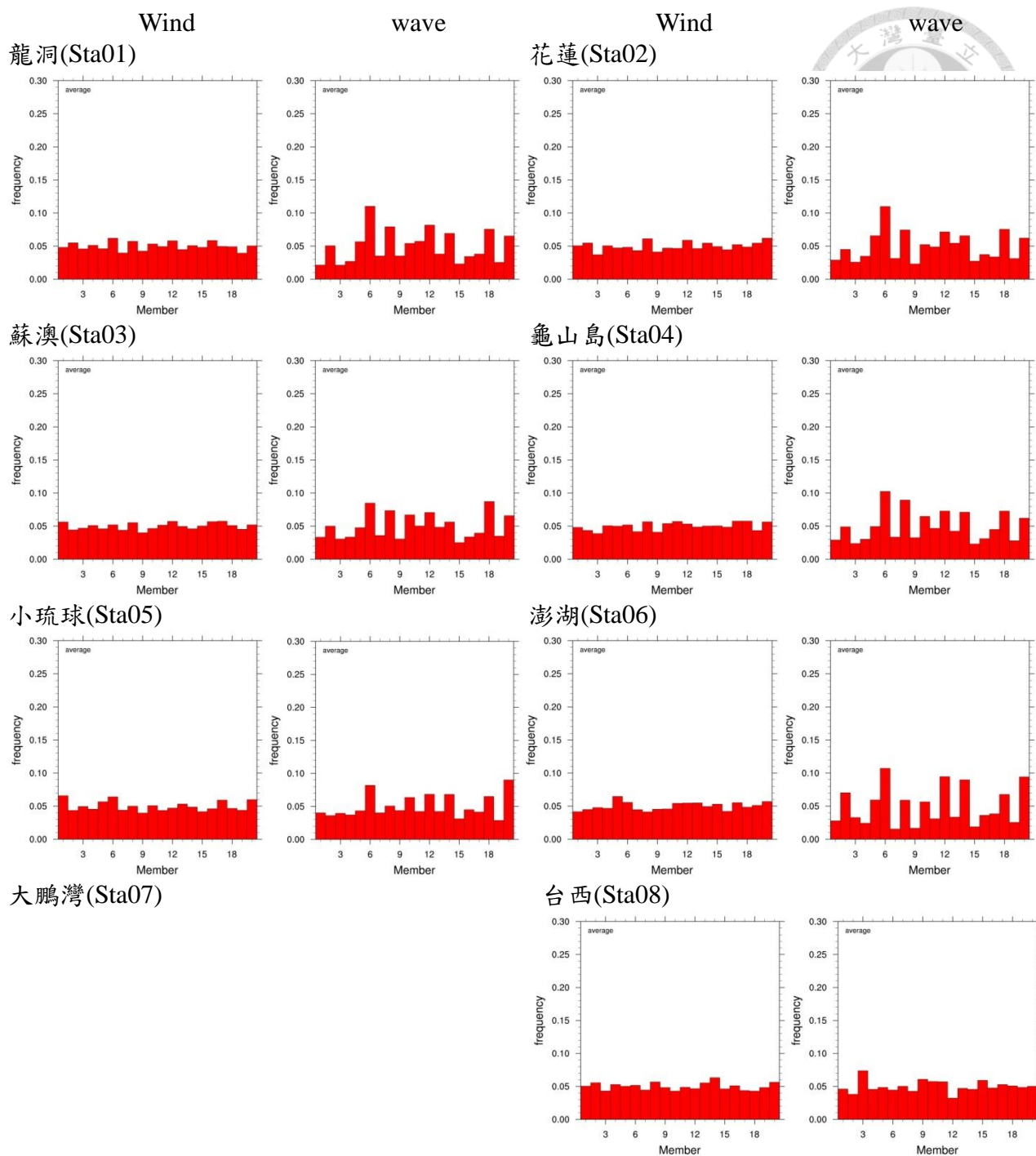


圖 4、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(Tolman)

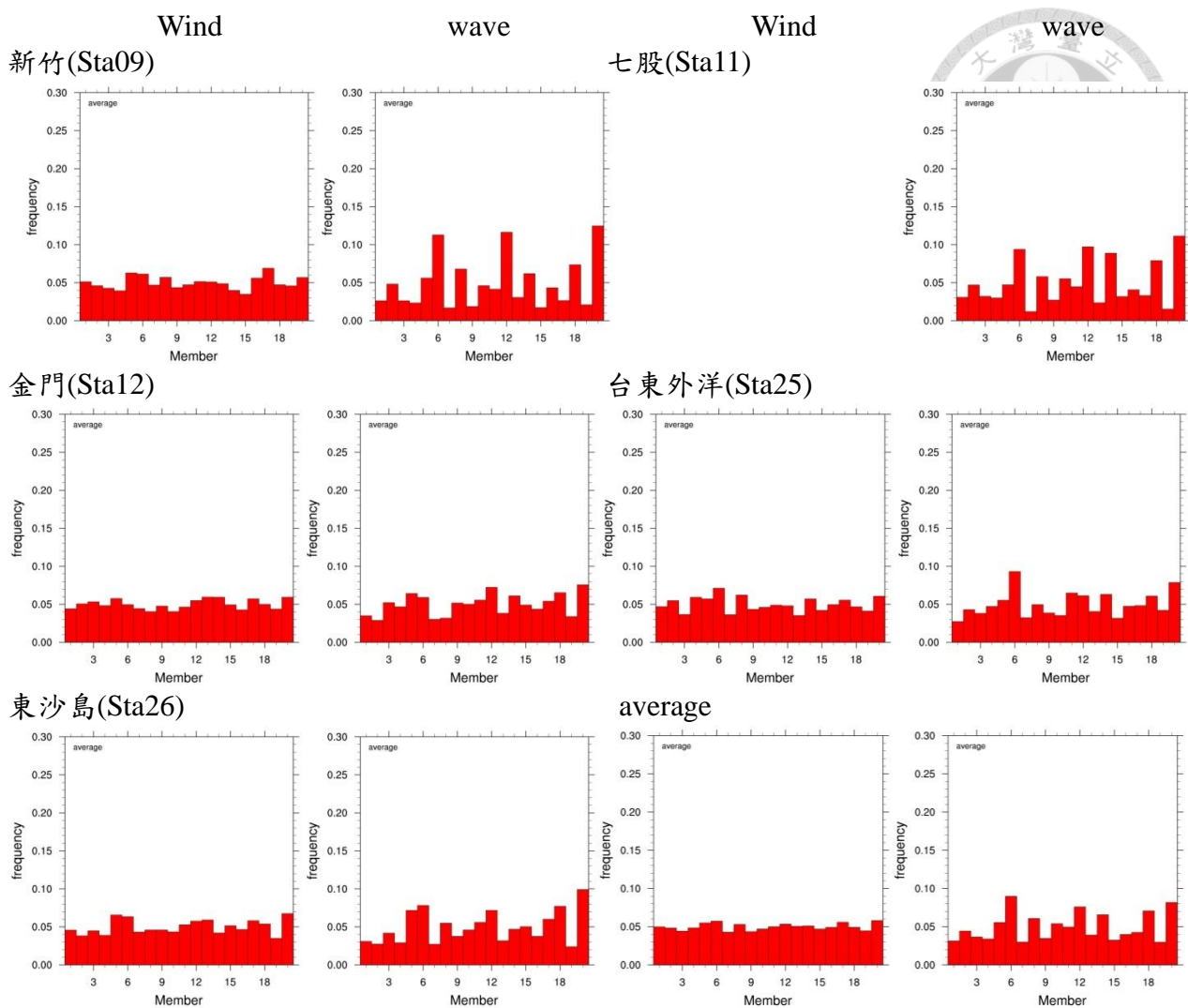


圖 4、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(Tolman)(續)

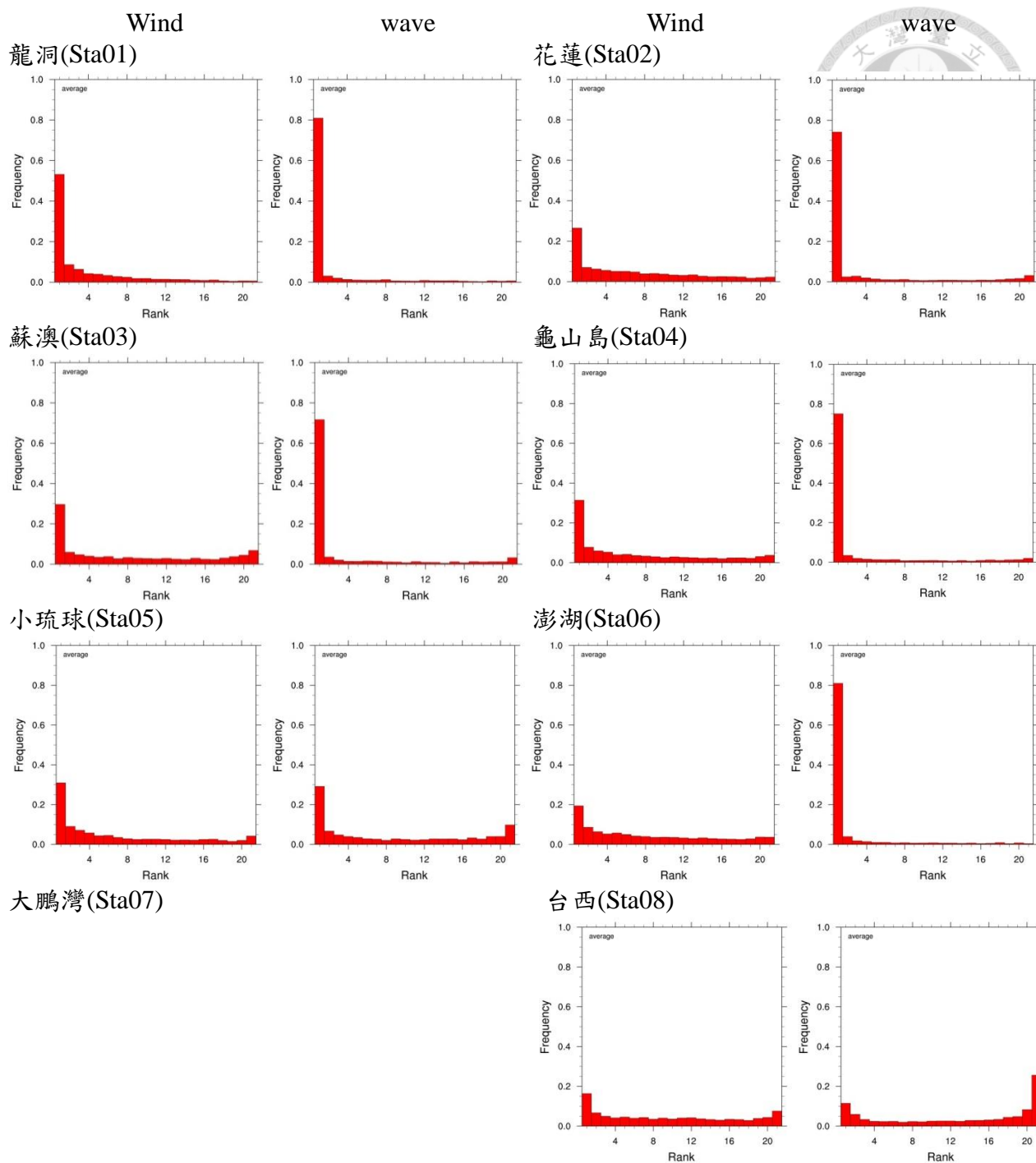


圖 5、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(Tolman)

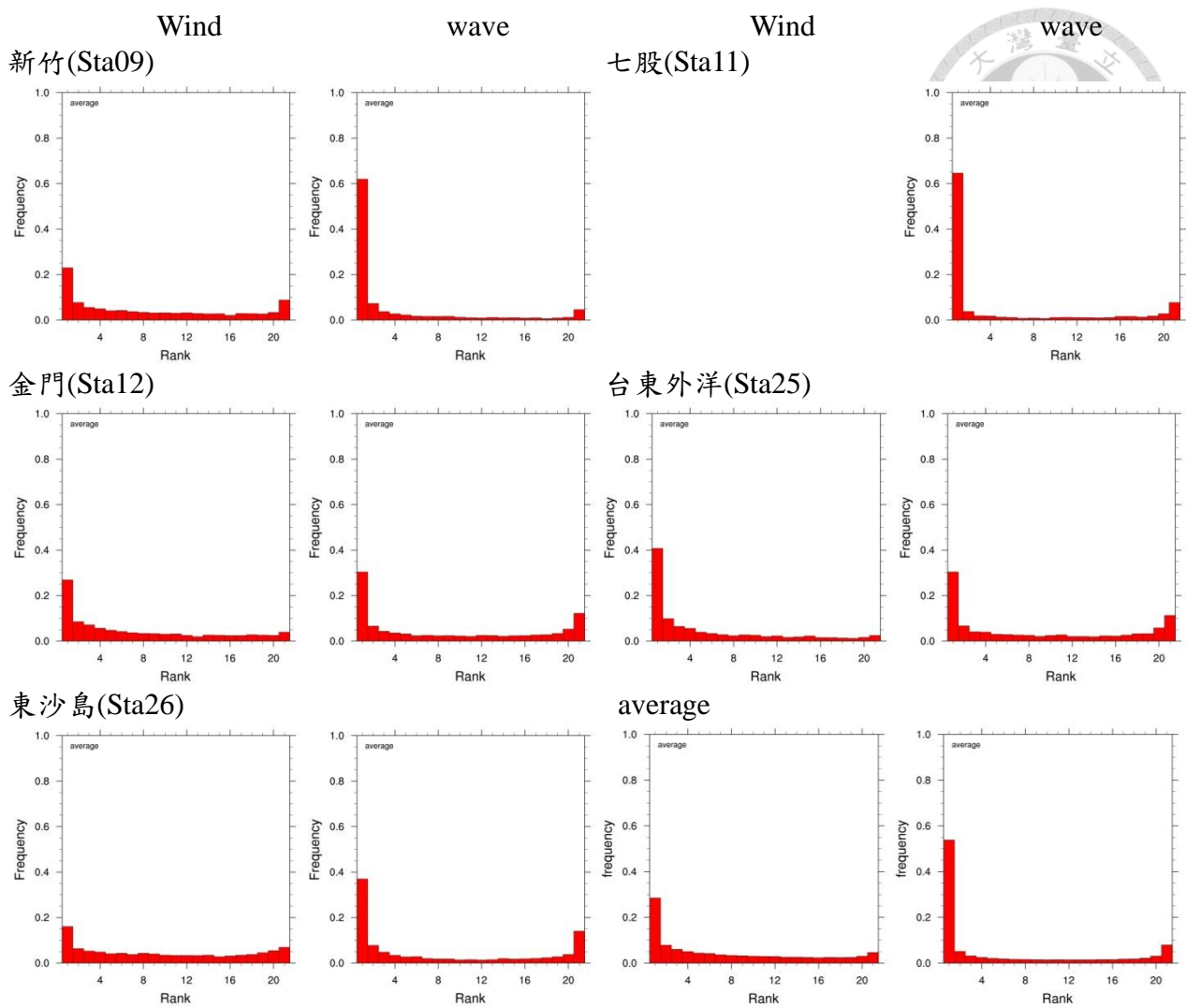


圖 5、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(Tolman)(續)

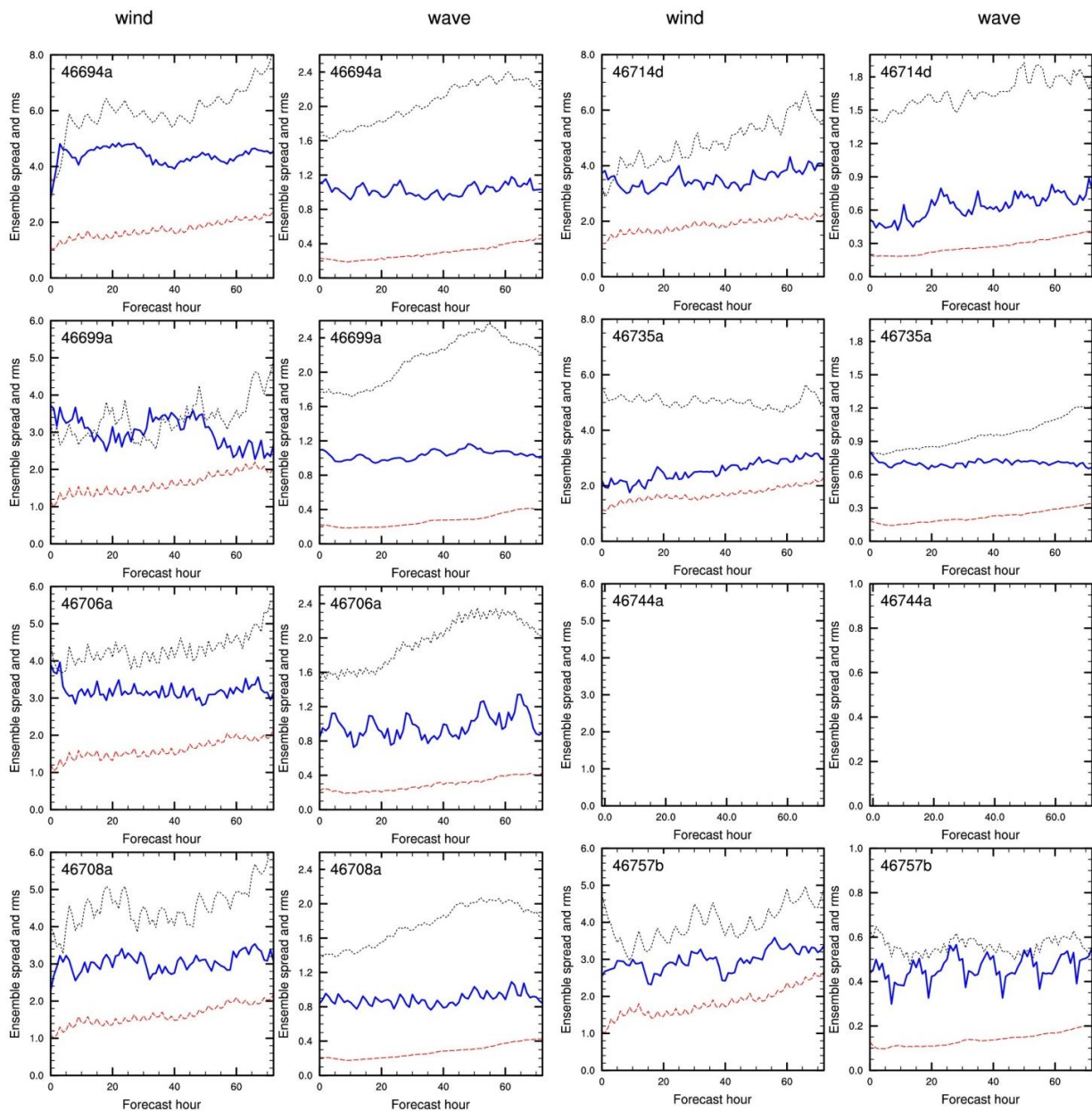


圖 6、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(Tolman)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

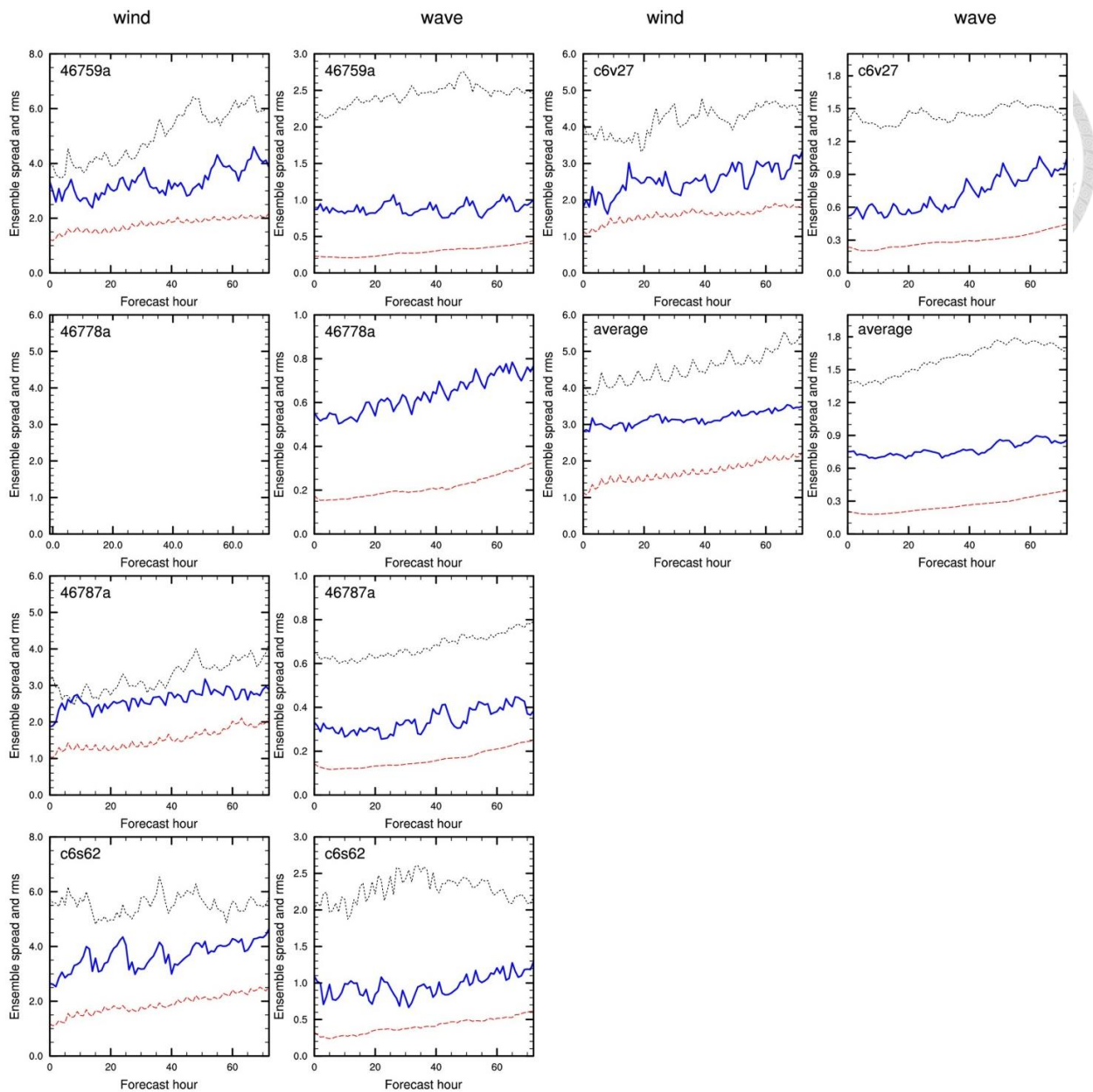


圖 6、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(Tolman)(續)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

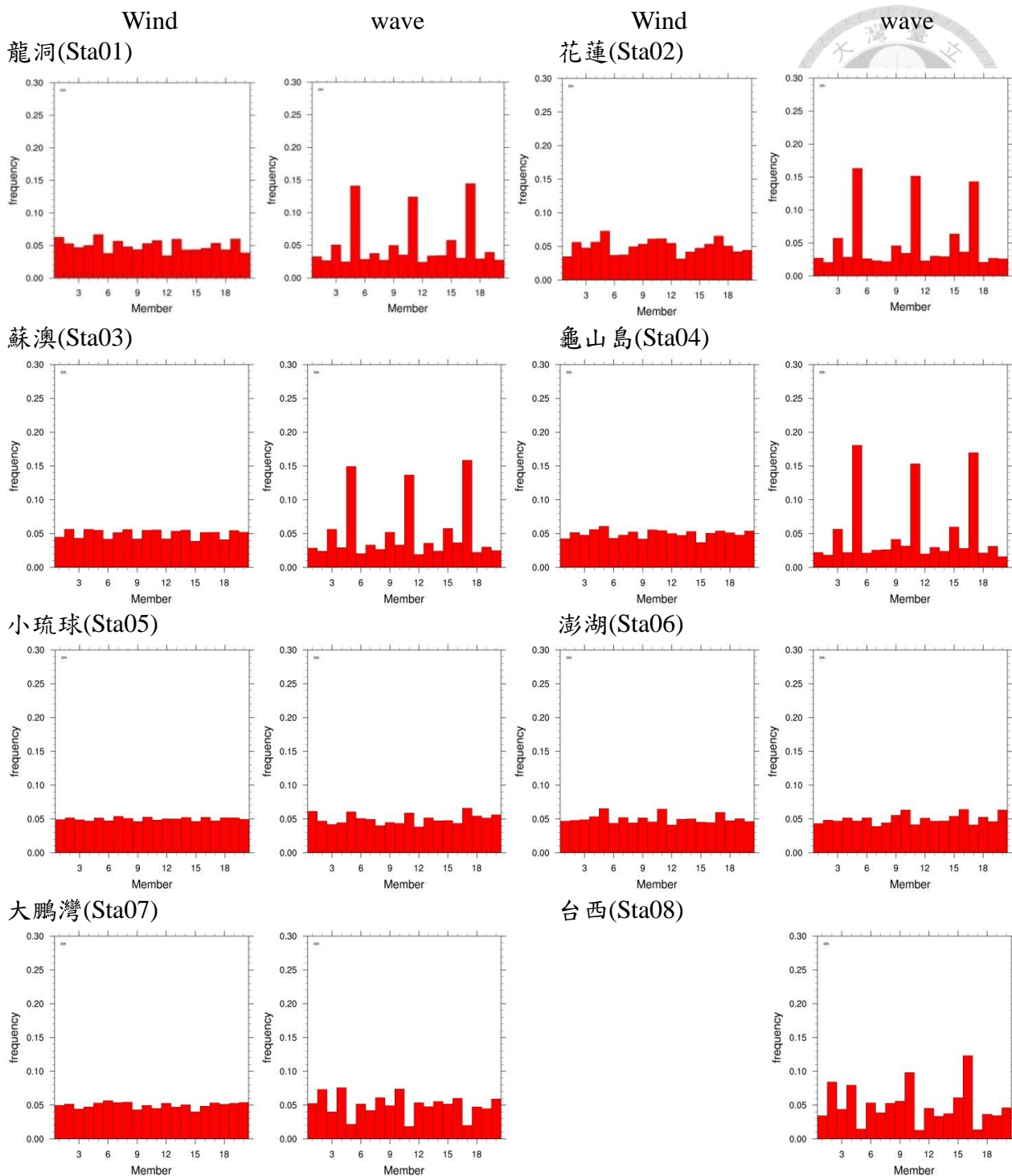


圖 7、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(WAM4)

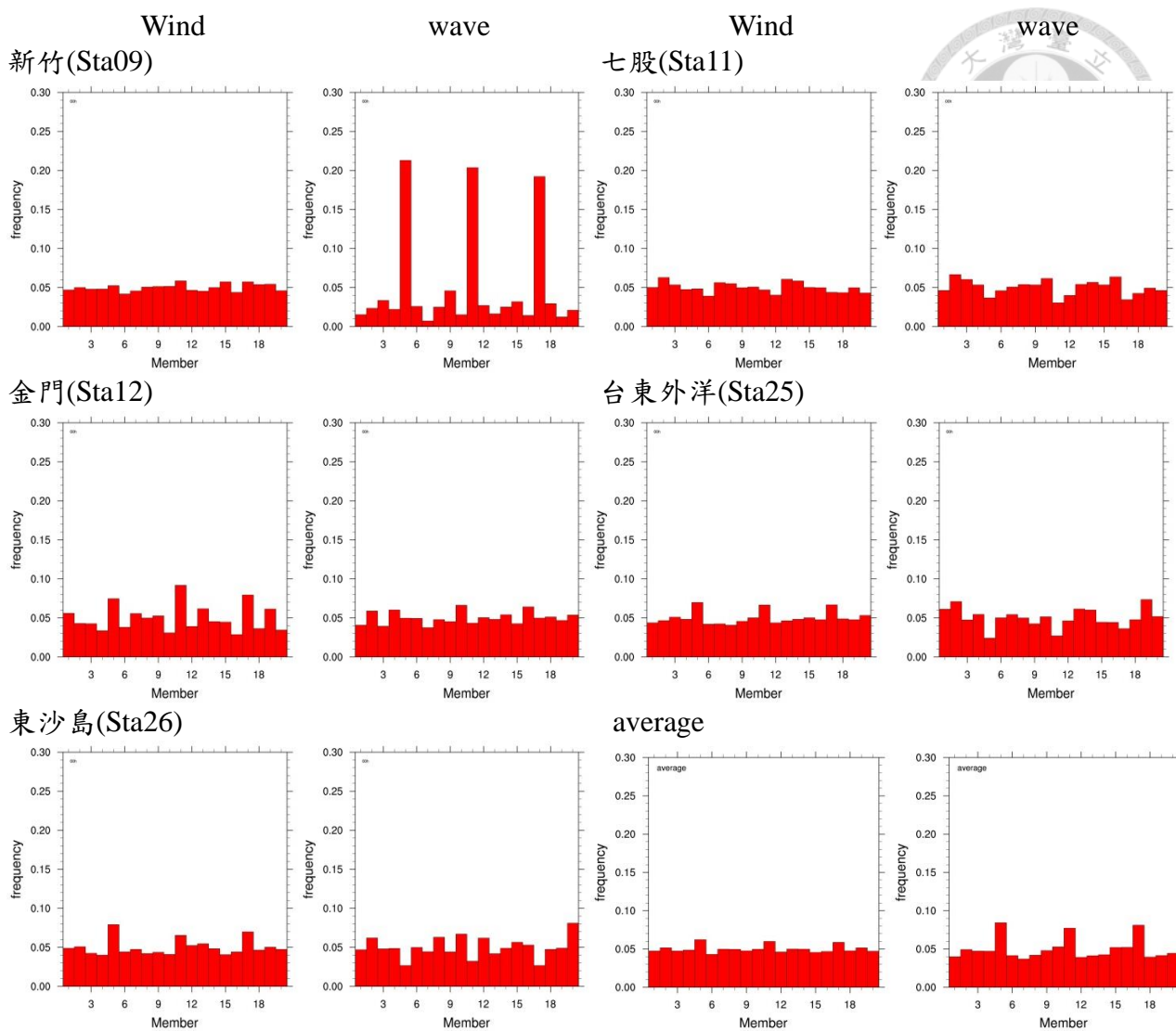


圖 7、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(WAM4)(續)

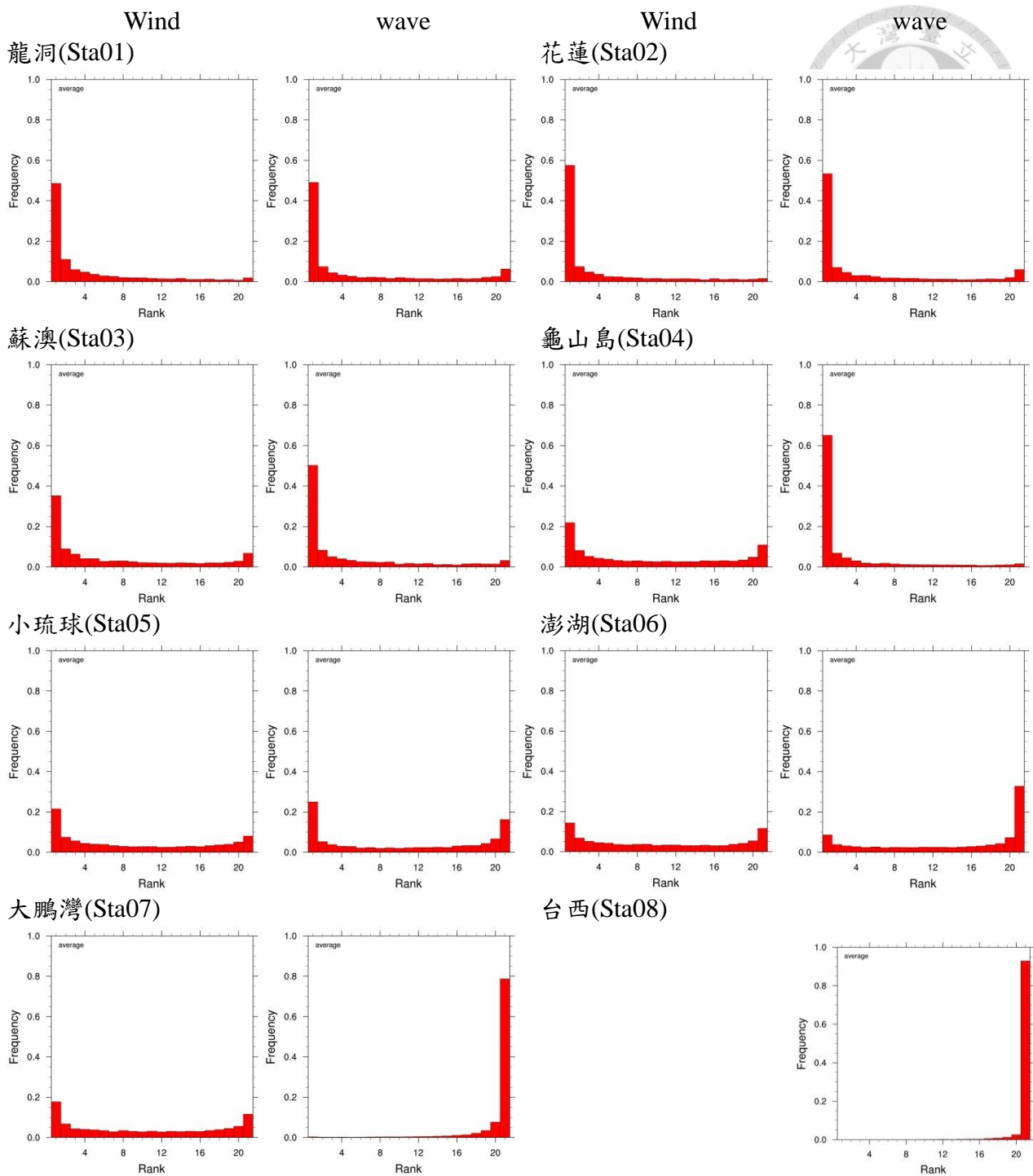


圖 8、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(WAM4)

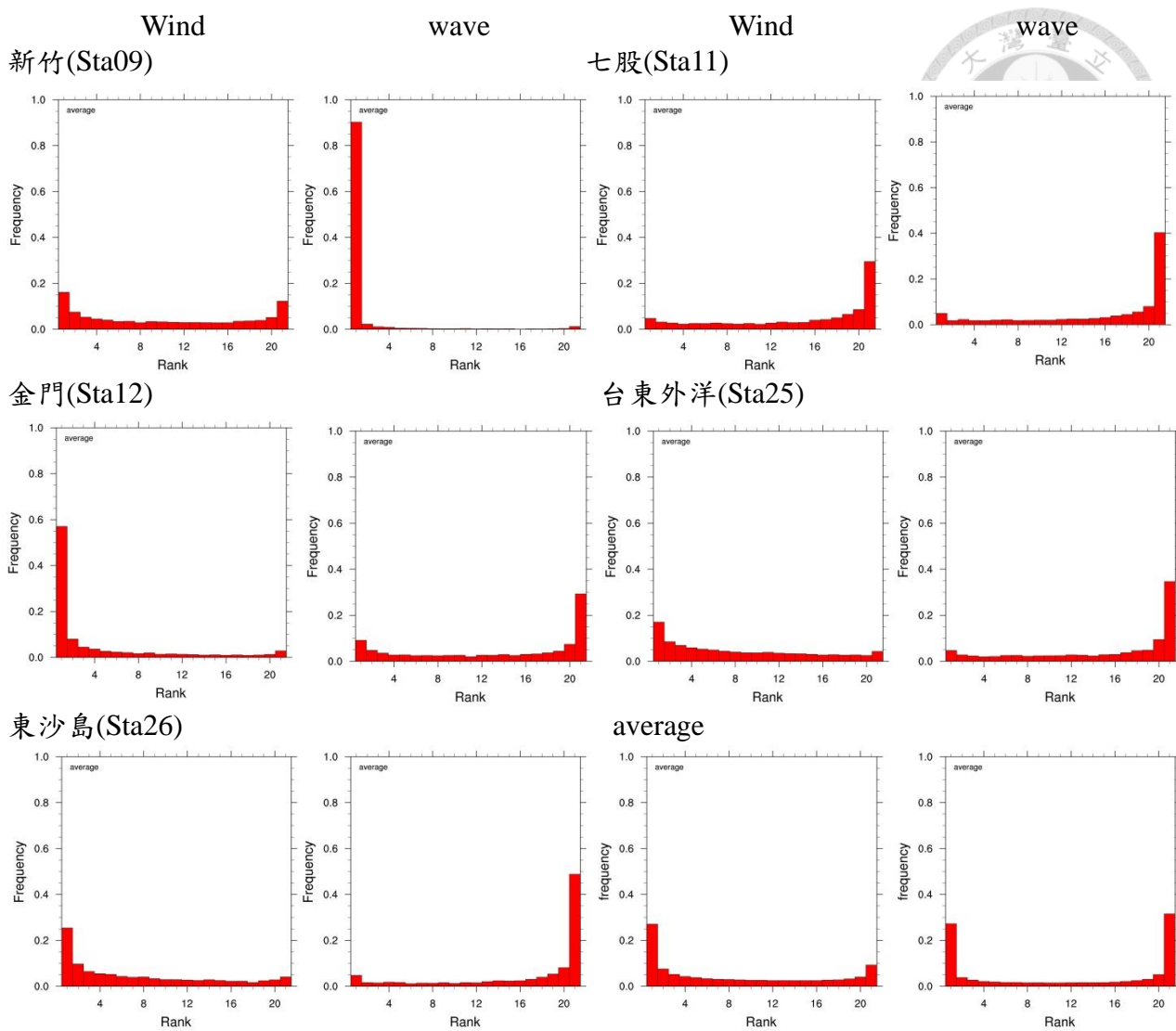


圖 8、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(WAM4)(續)

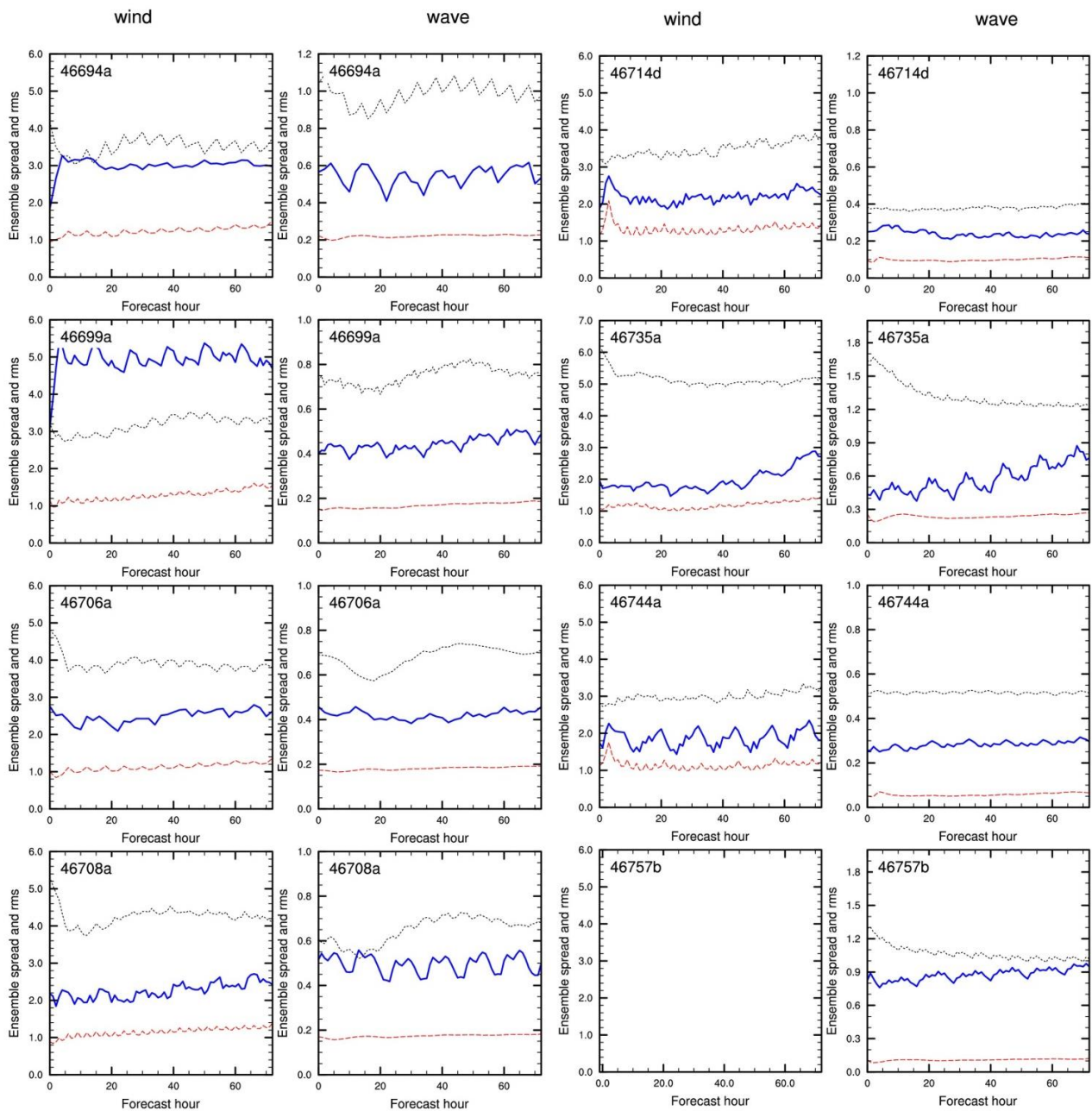


圖 9、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(WAM4)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

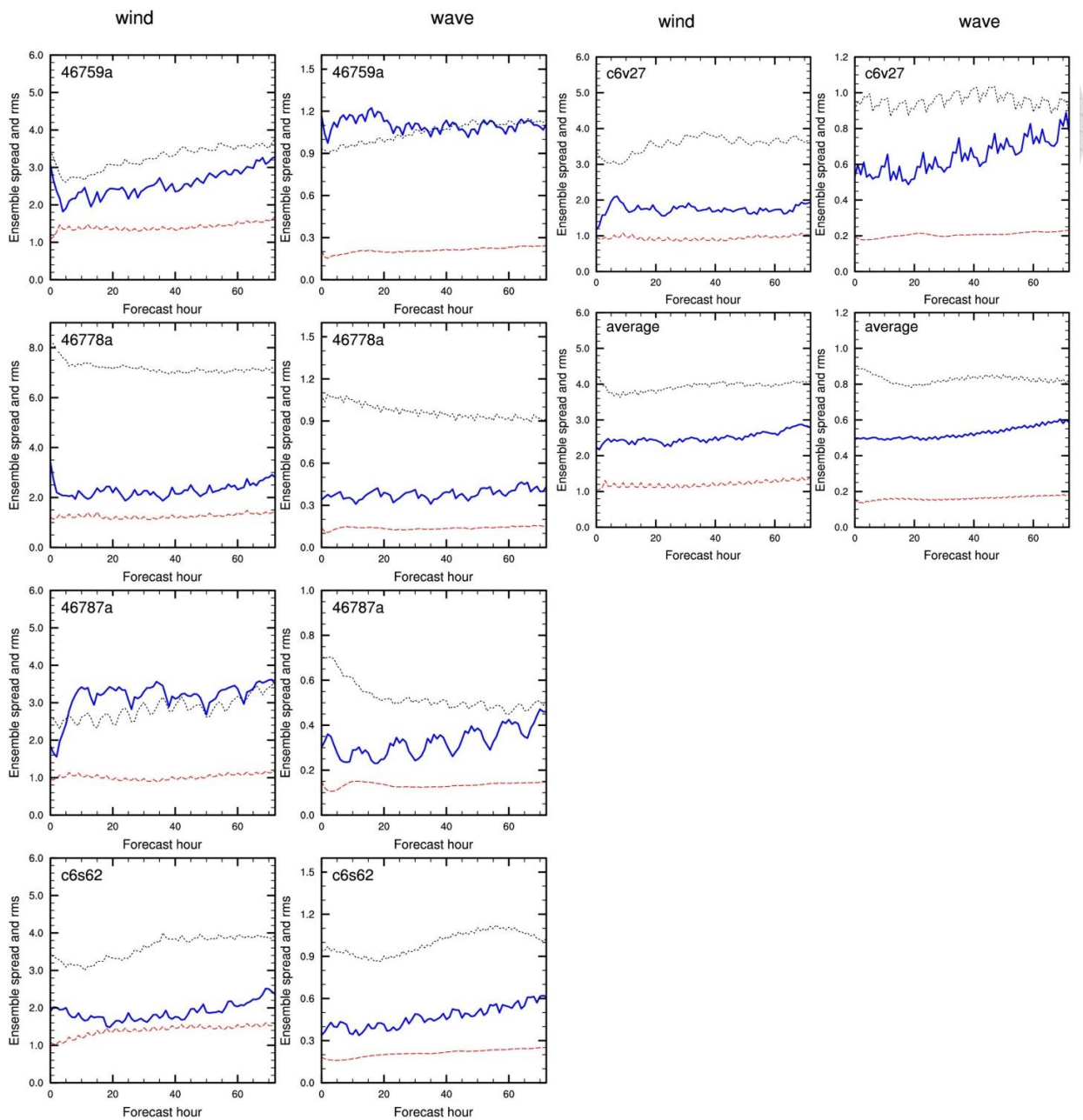


圖 9、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(WAM4)(續)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

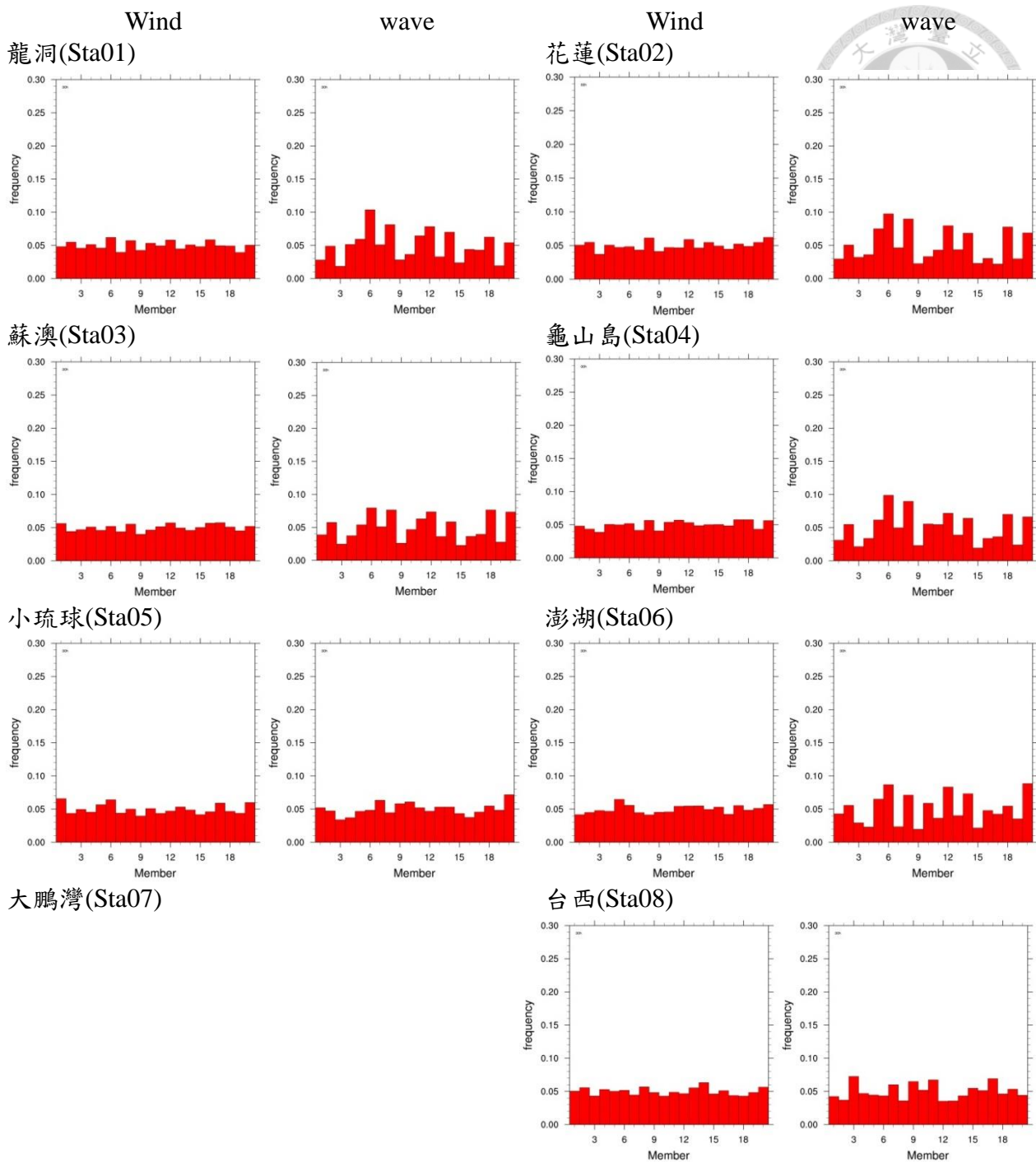


圖 10、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(WAM4)

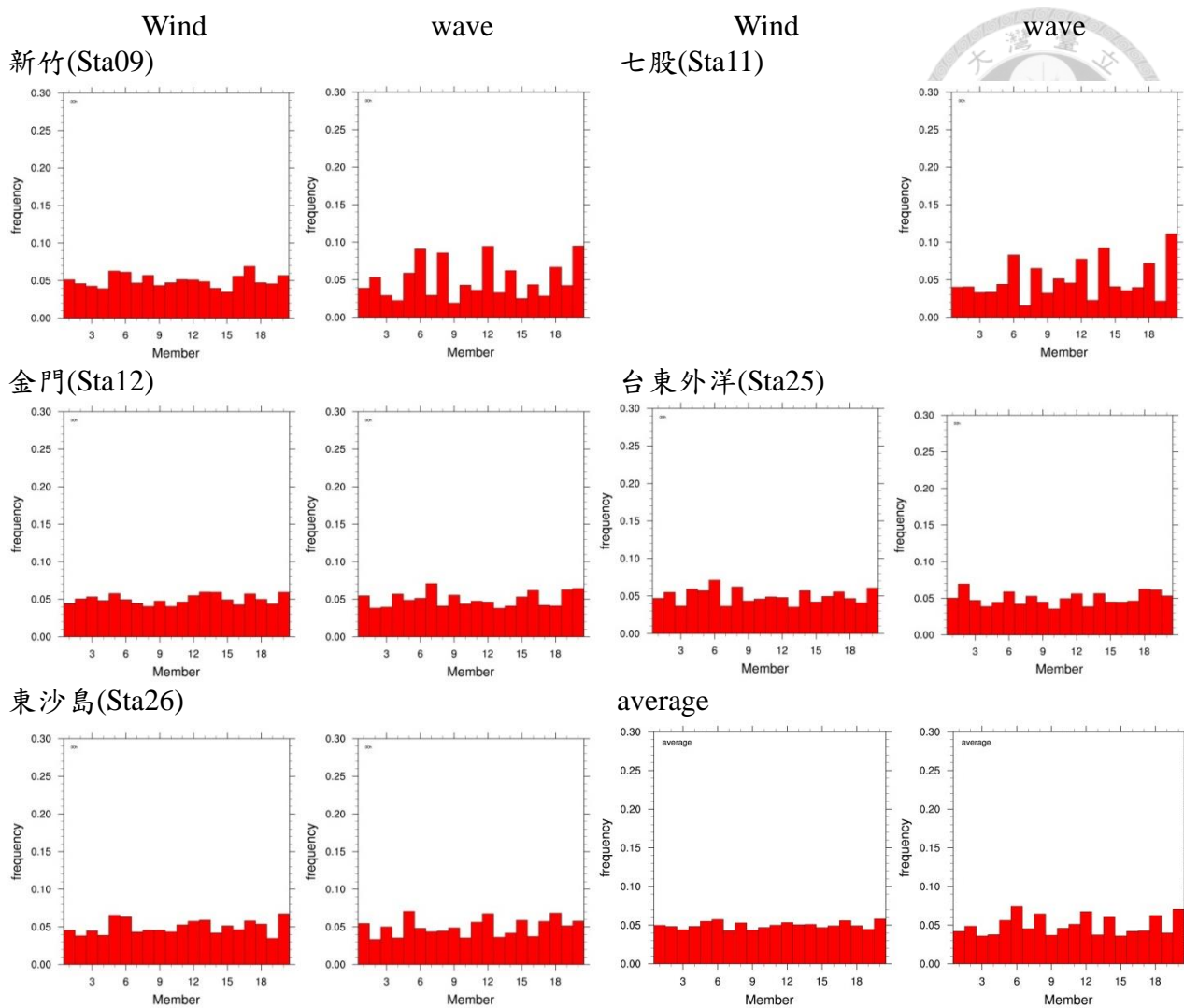


圖 10、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(WAM4)(續)

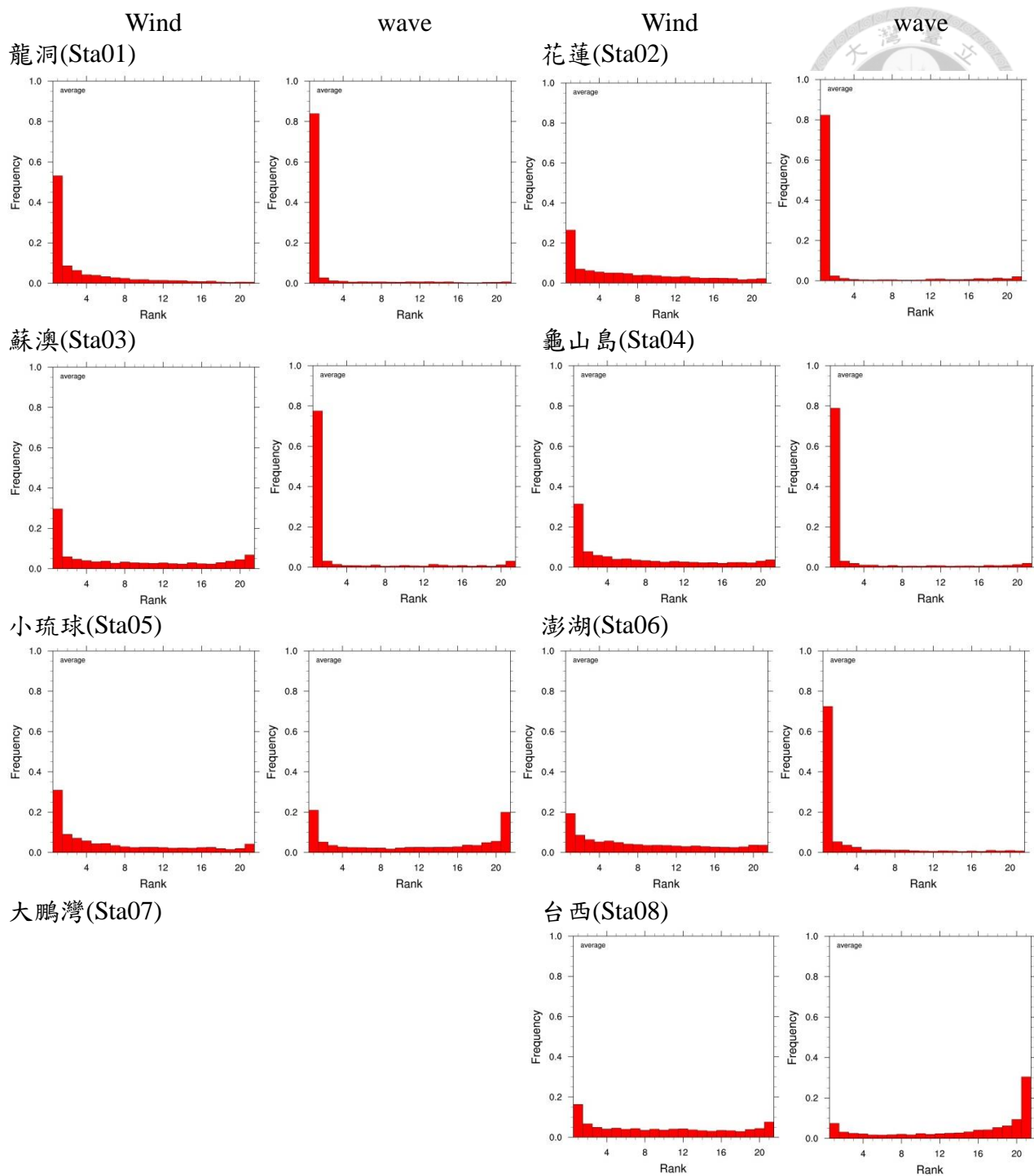


圖 11、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(WAM4)

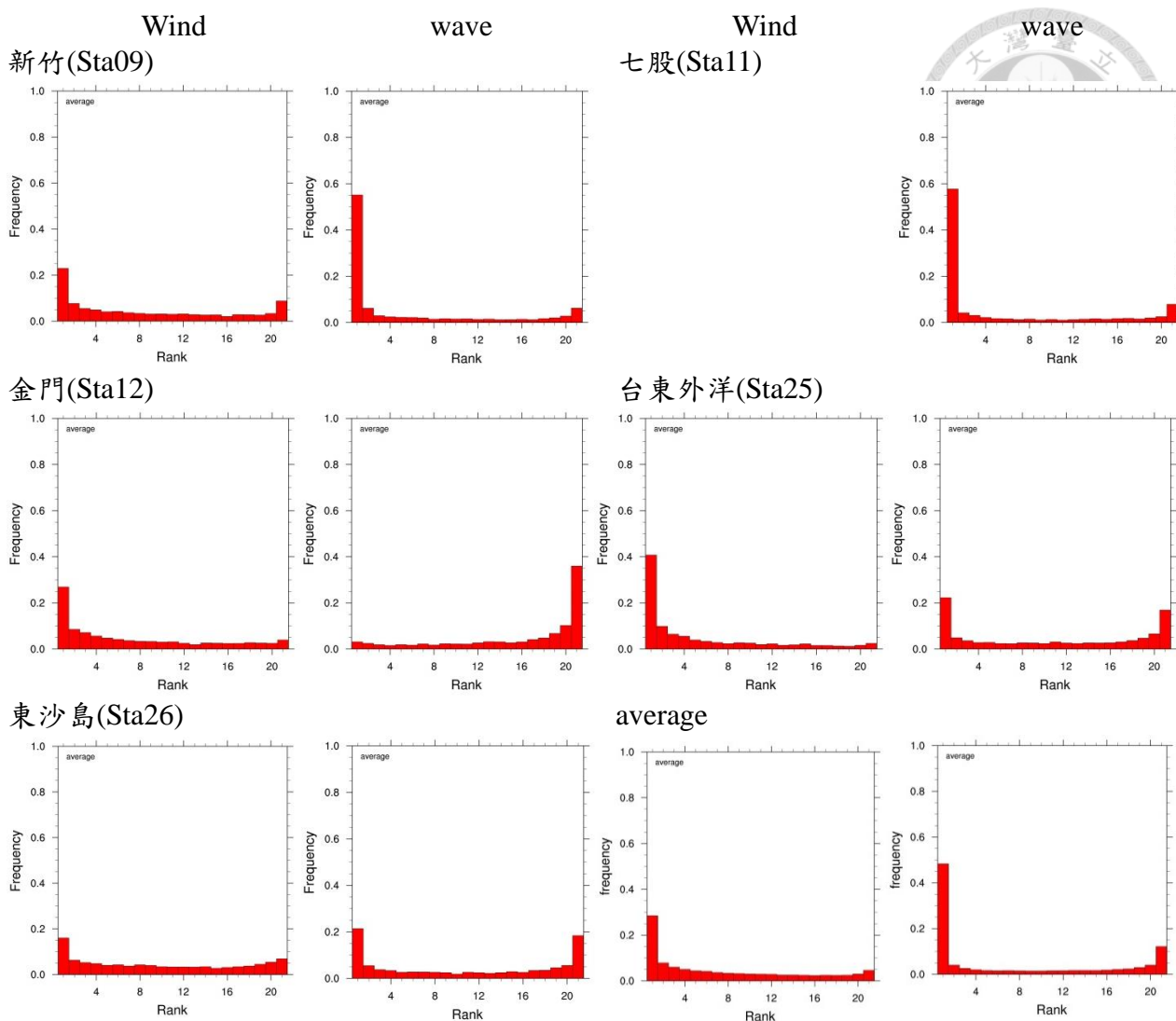


圖 11、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(WAM4)(續)

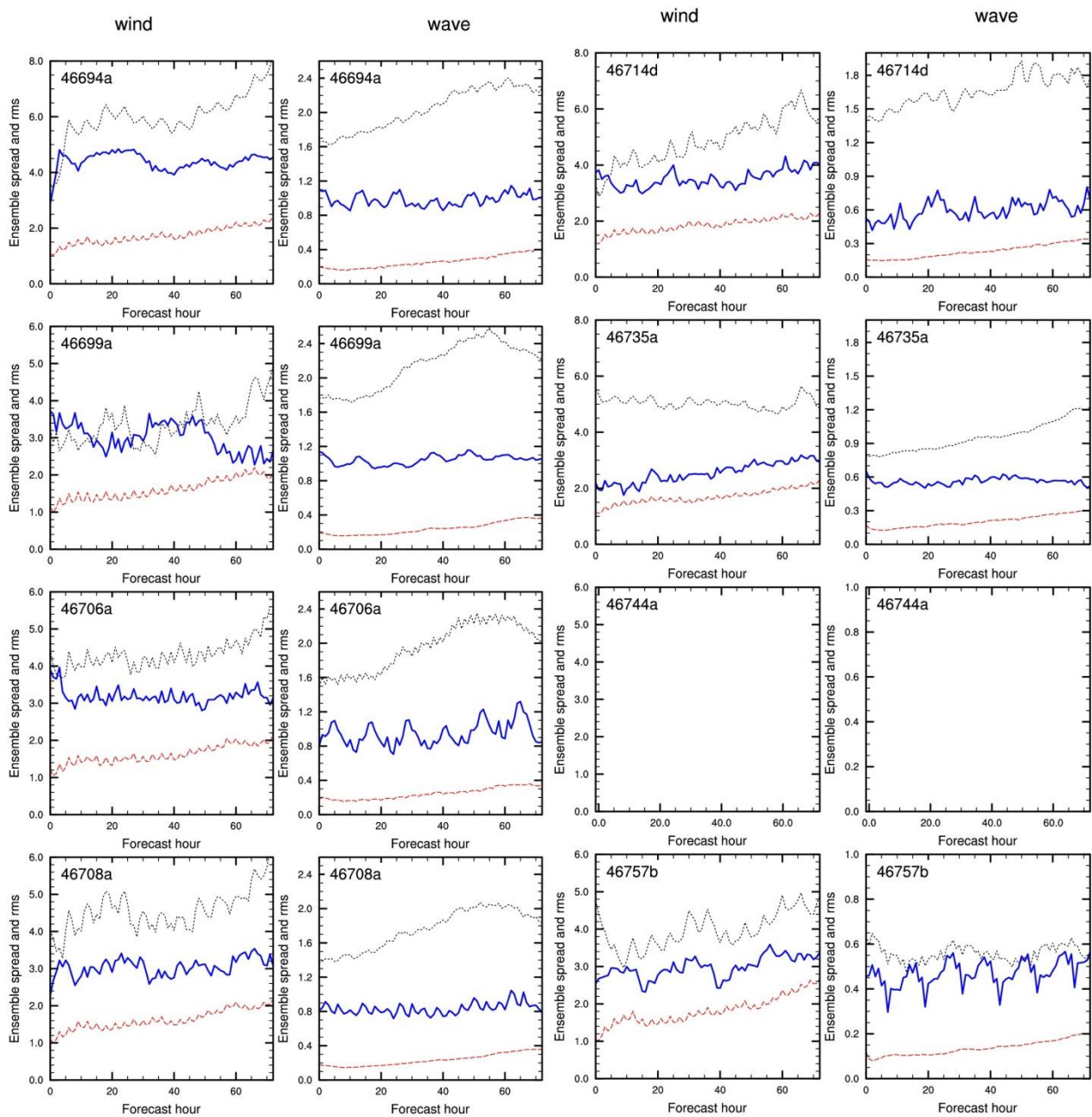


圖 12、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(WAM4)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

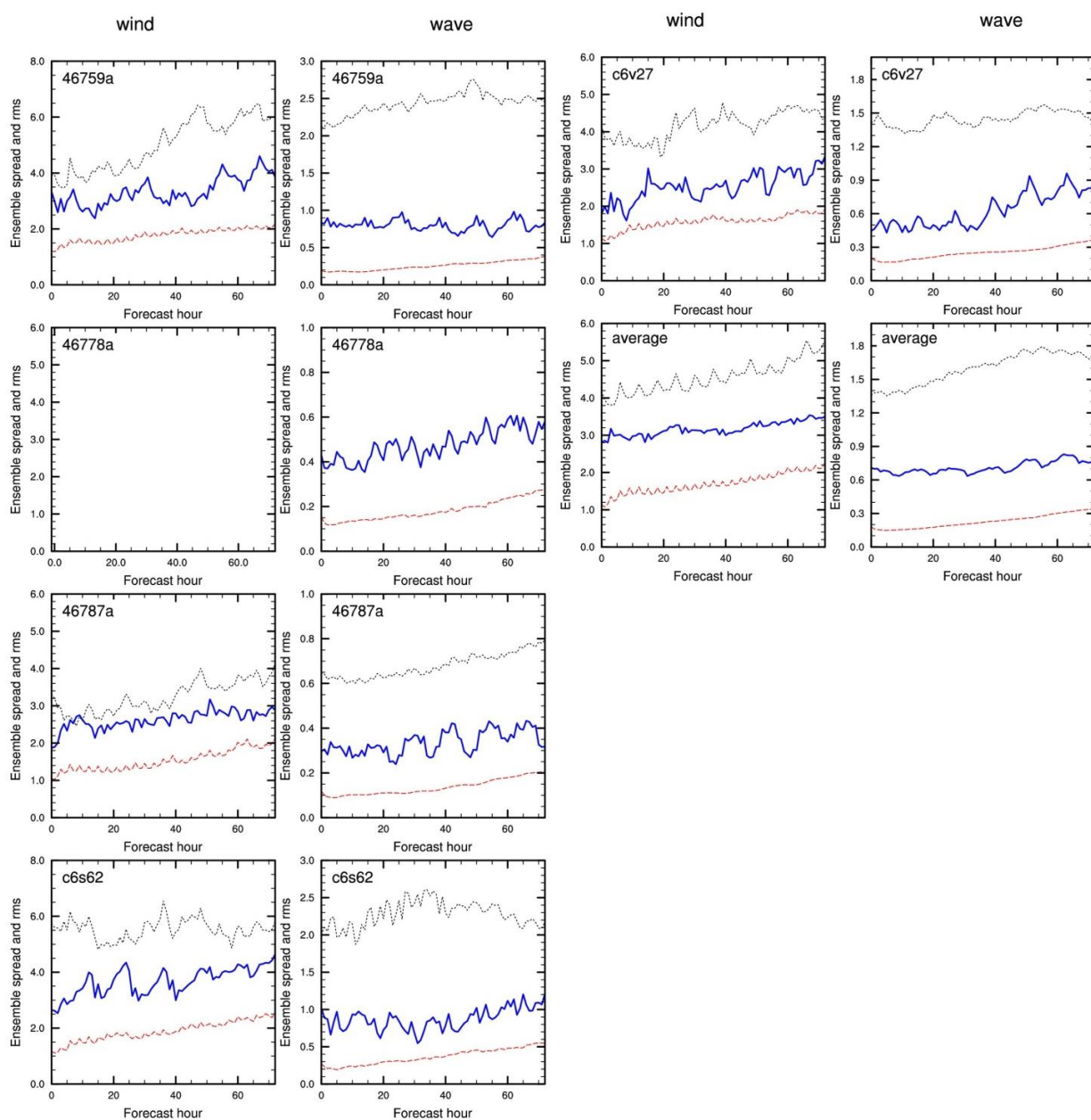


圖 12、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(WAM4)(續)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

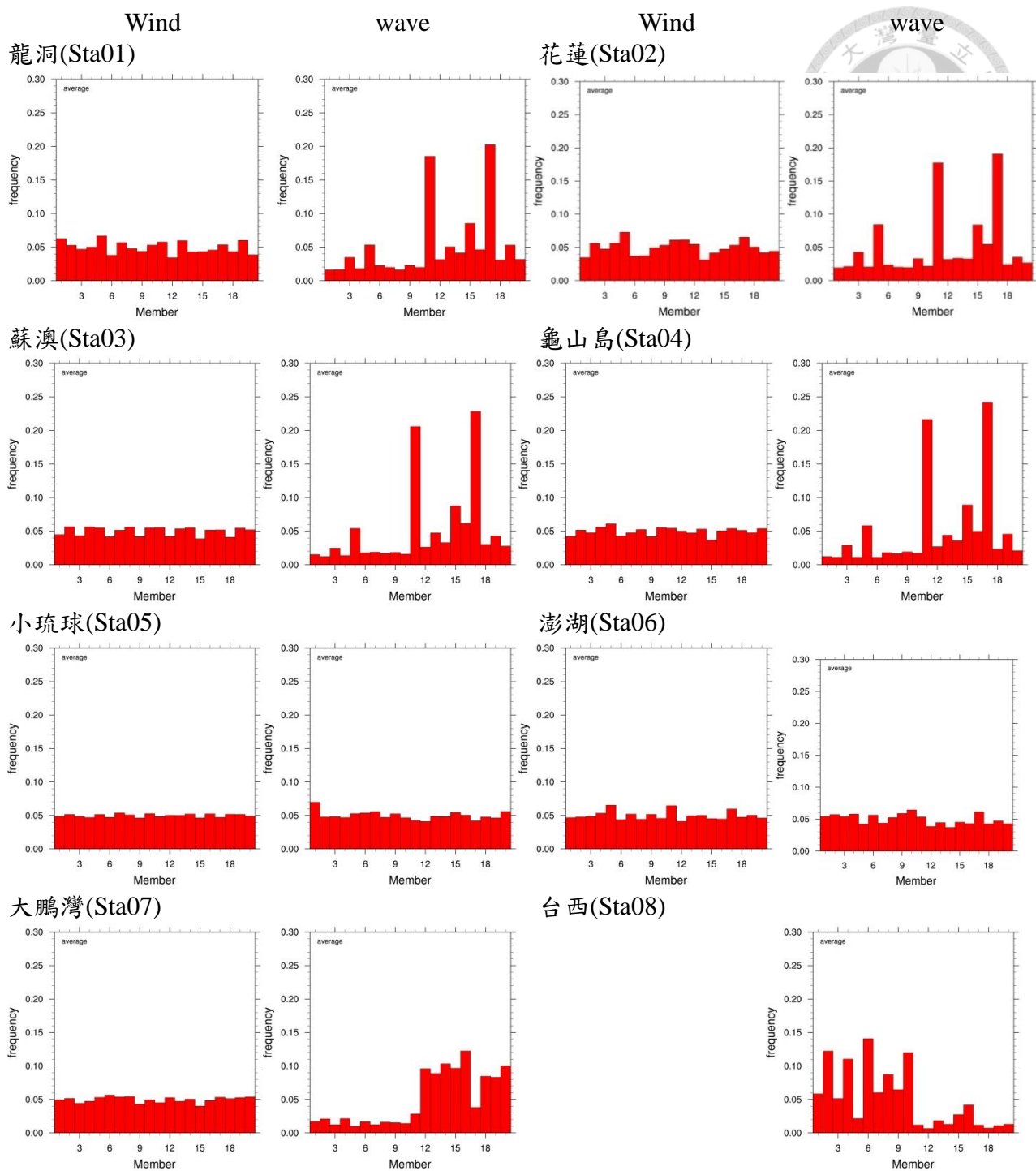


圖 13、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(10T10W)

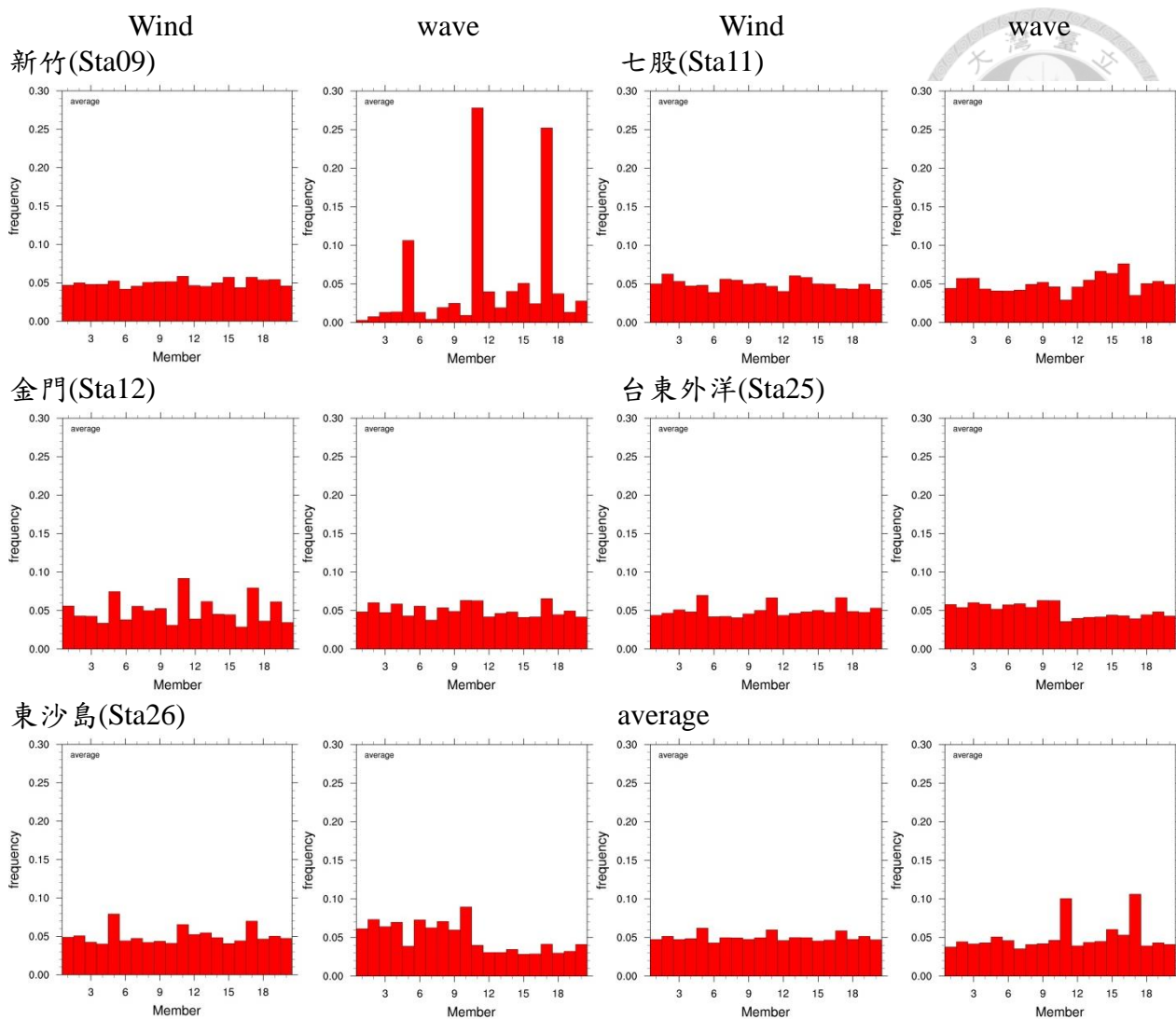


圖 13、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(10T10W)(續)

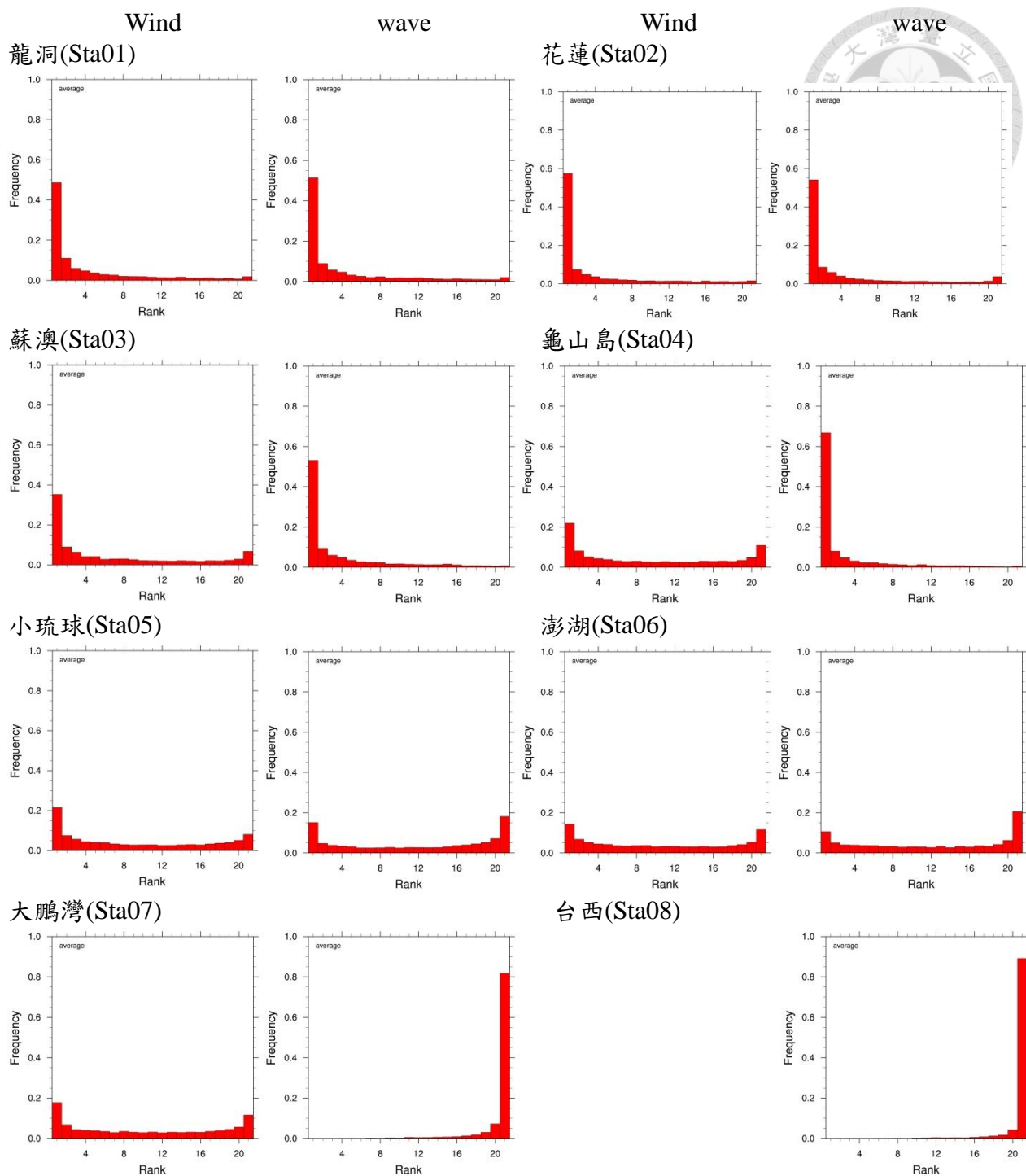


圖 14、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(10T10W)

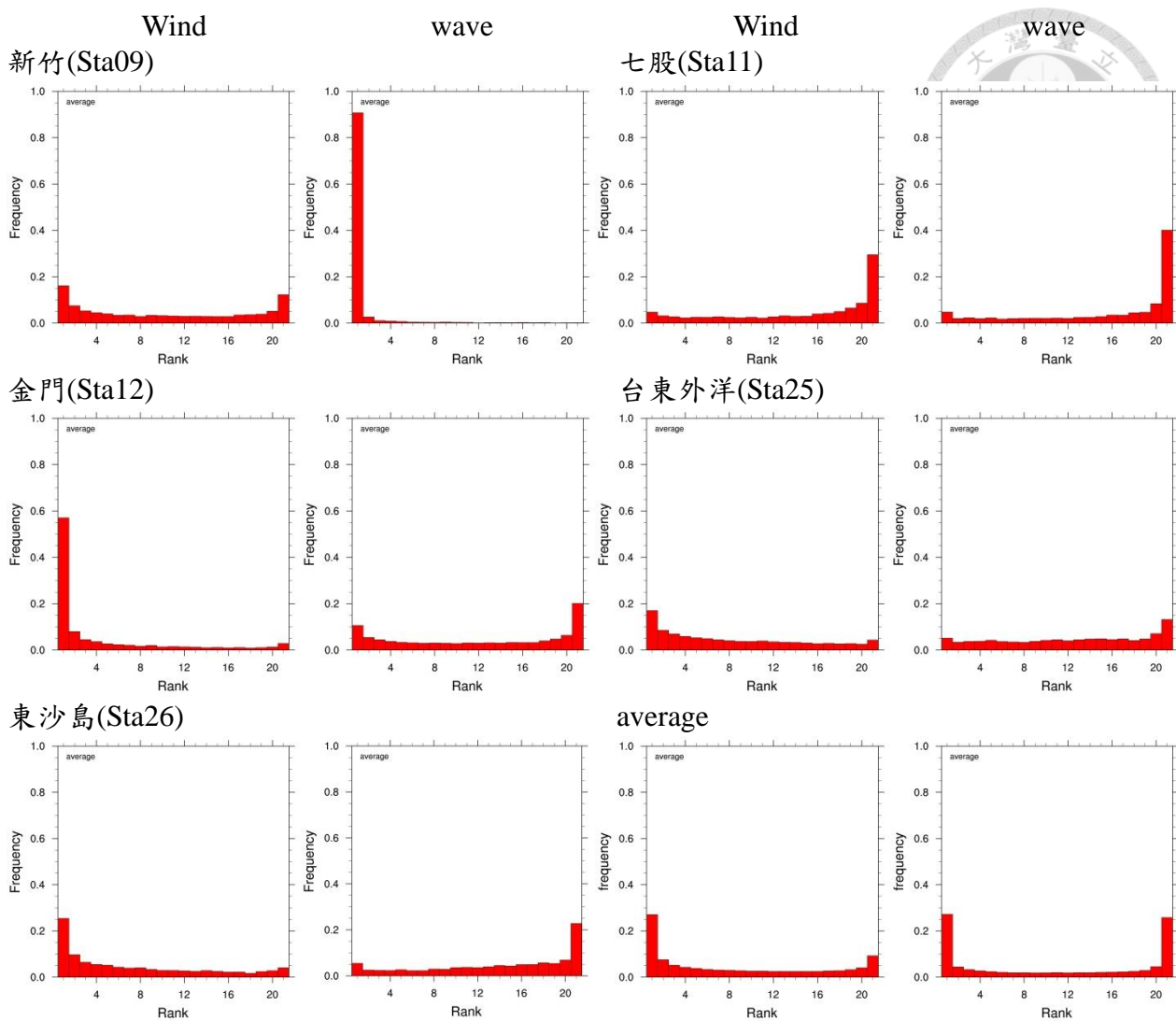


圖 14、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(10T10W)(續)

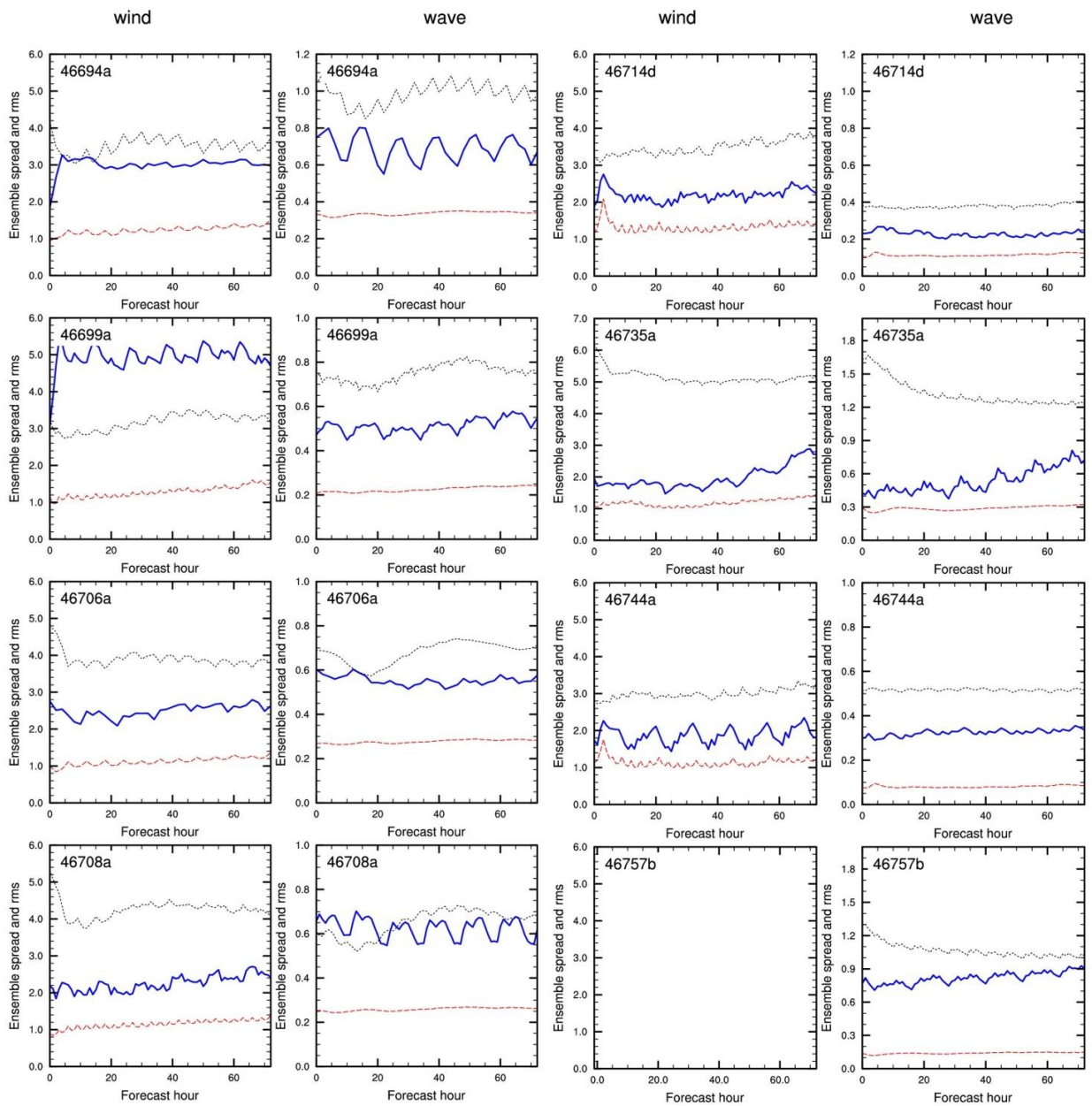


圖 15、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(10T10W)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

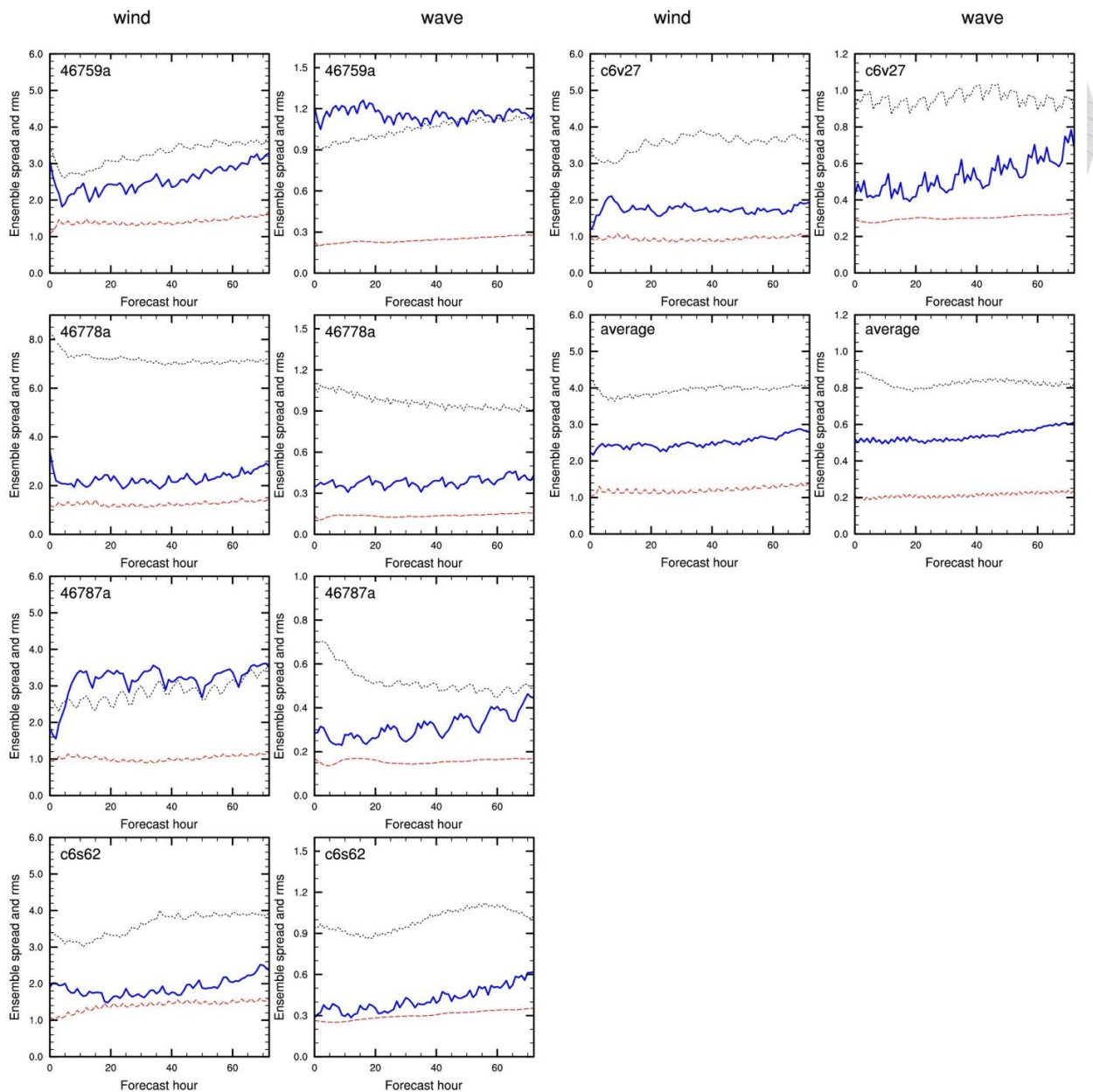


圖 15、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(10T10W)(續)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

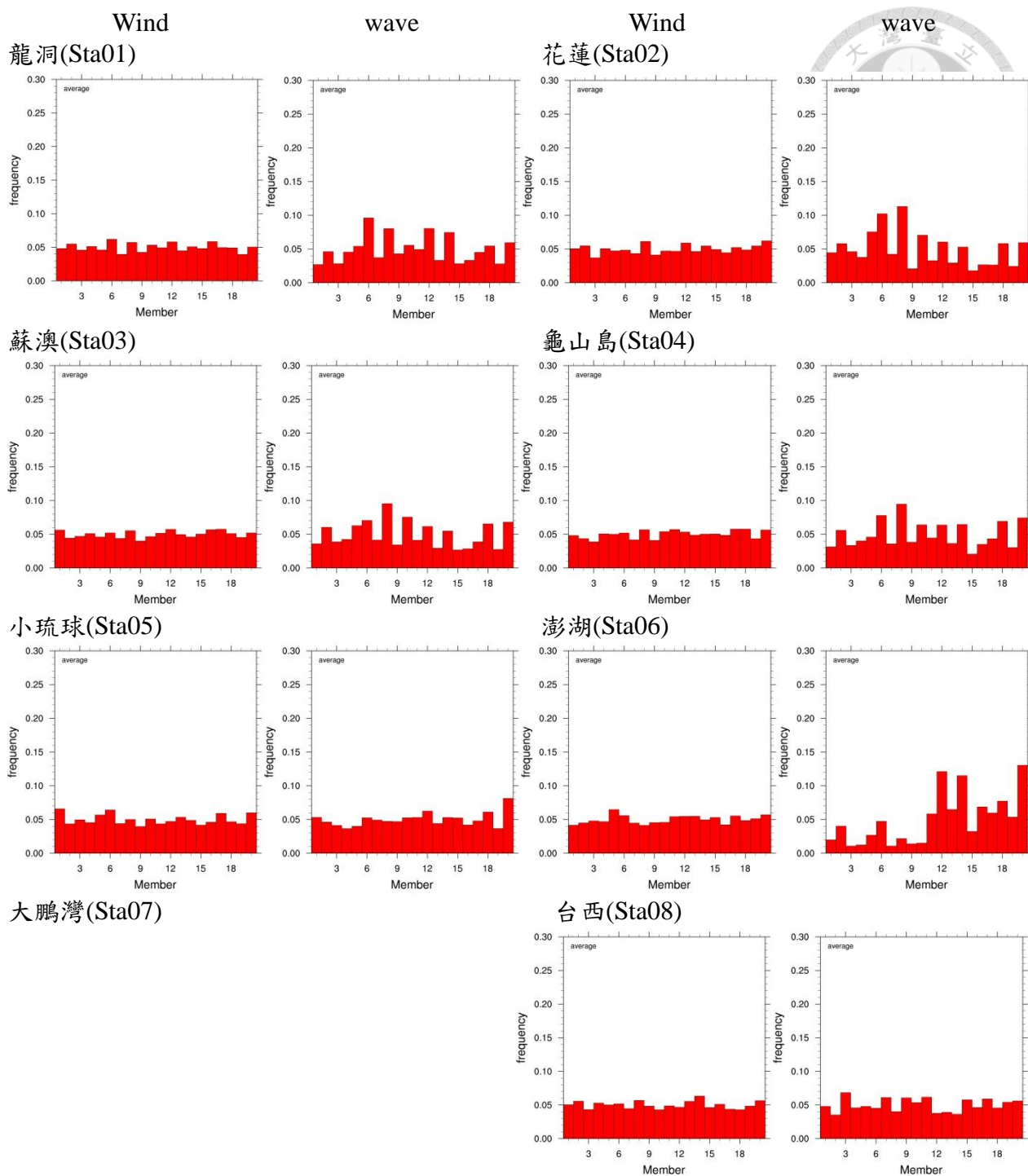


圖 16、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(10T10W)

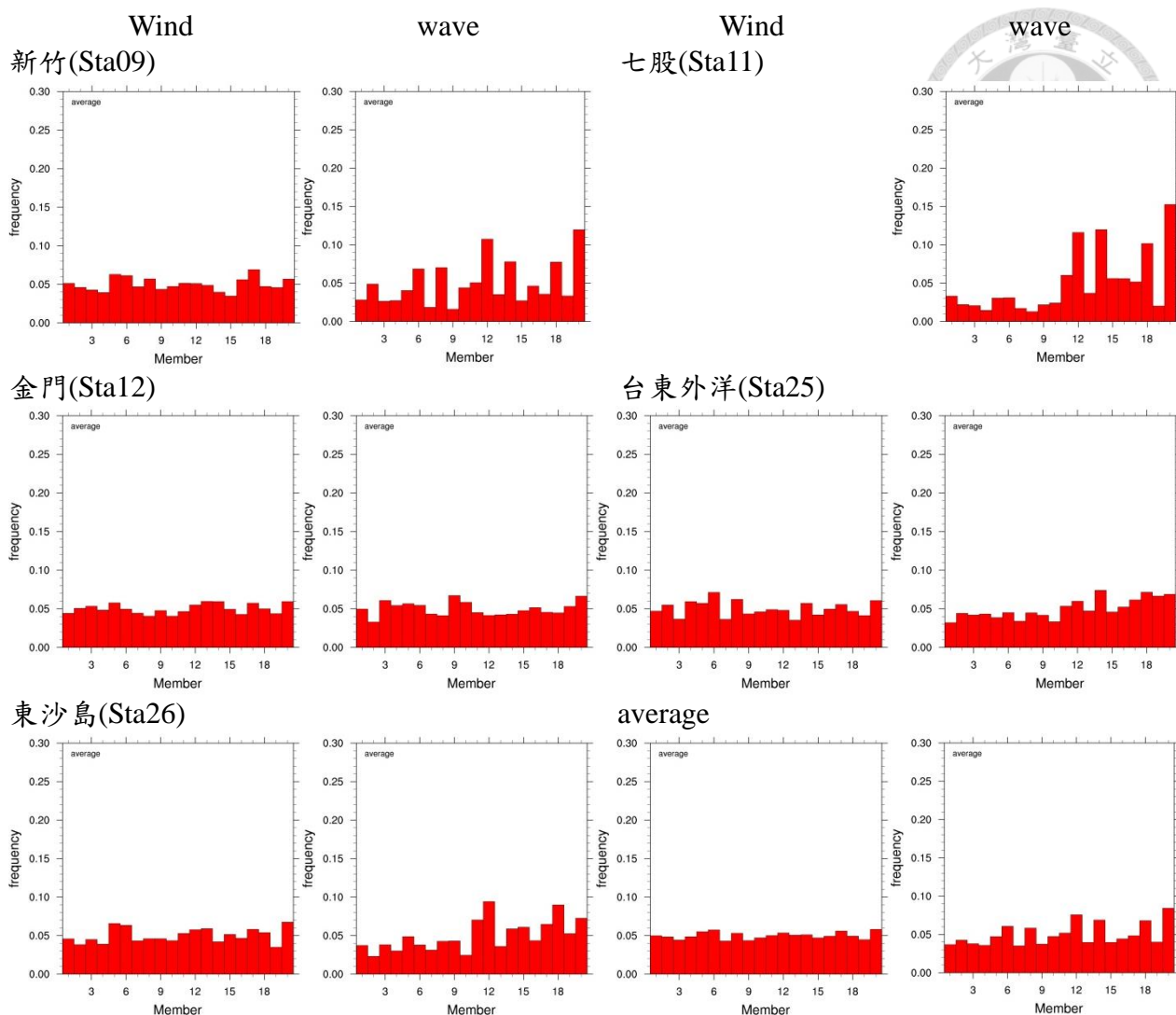


圖 16、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(10T10W)(續)

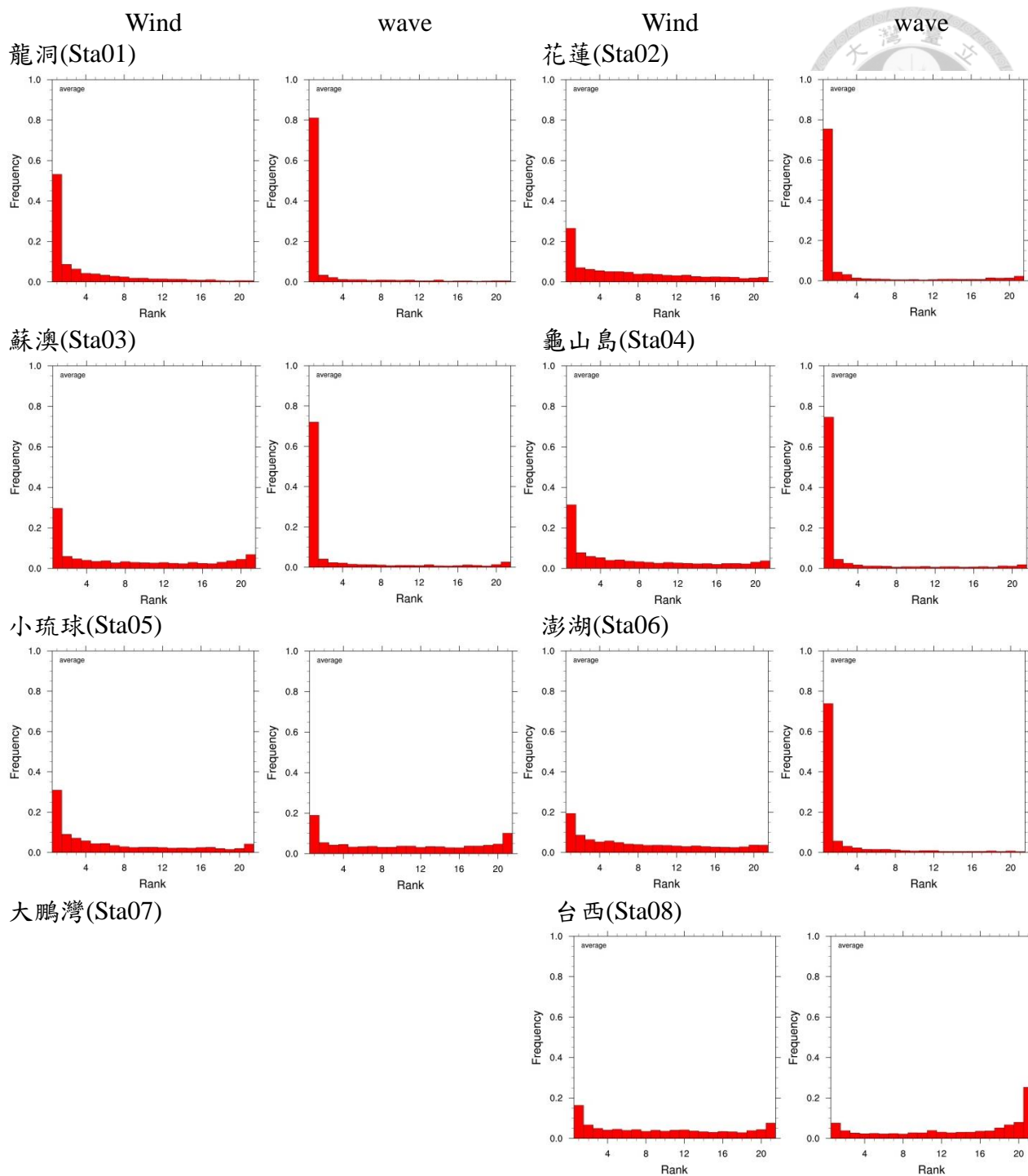


圖 17、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(10T10W)

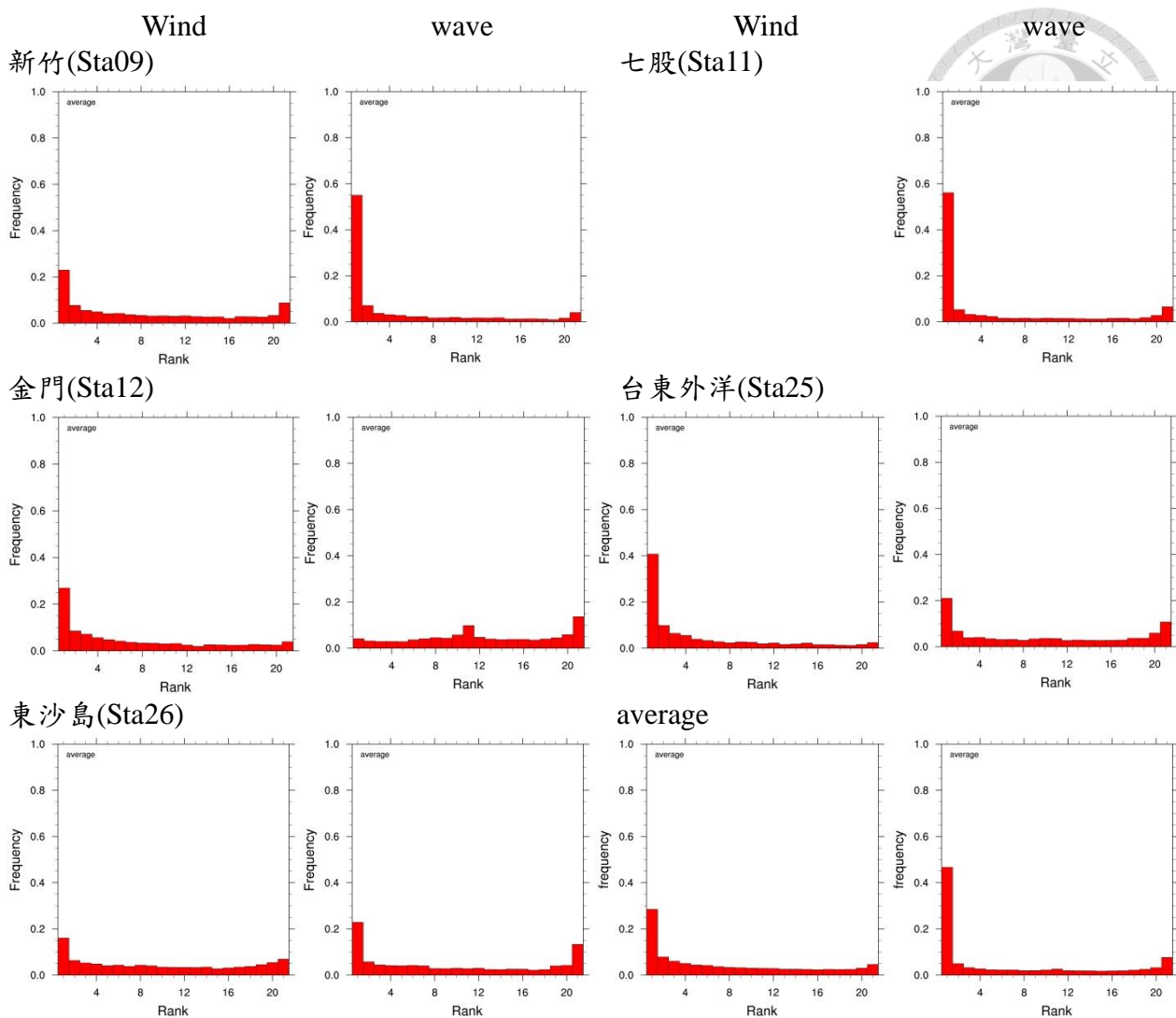


圖 17、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(10T10W)(續)

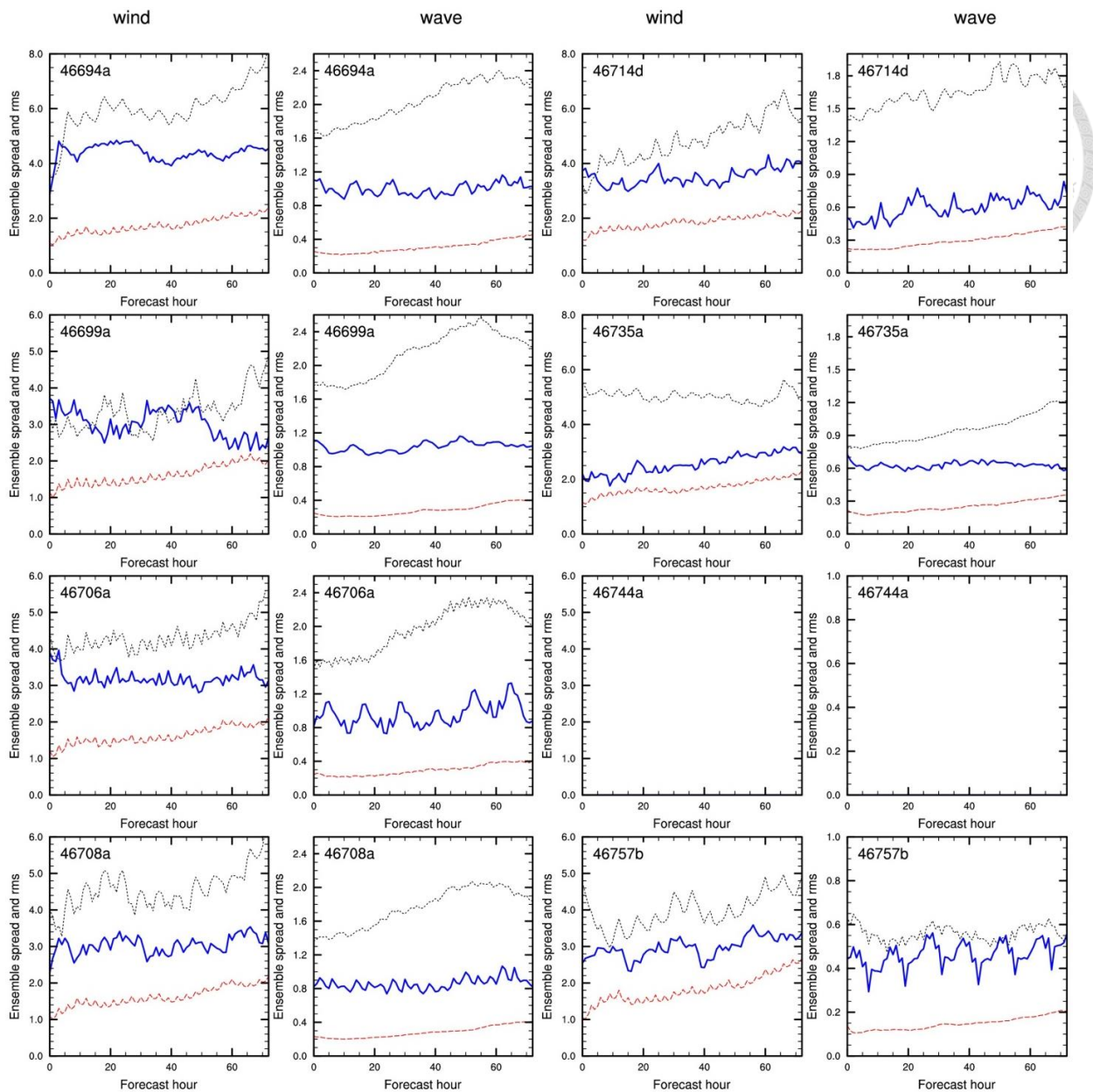


圖 18、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(10T10W)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

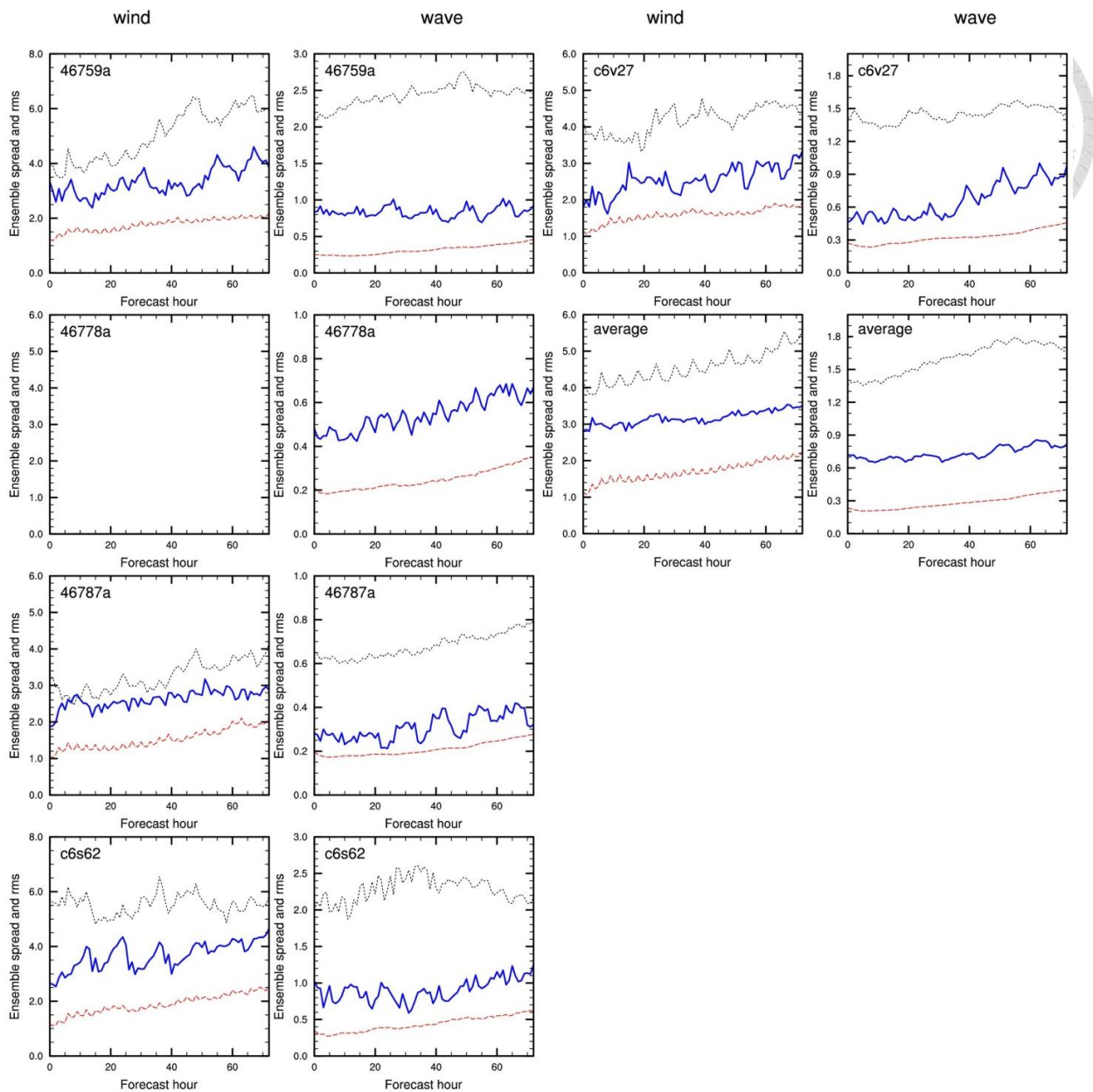


圖 18、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(10T10W)(續)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

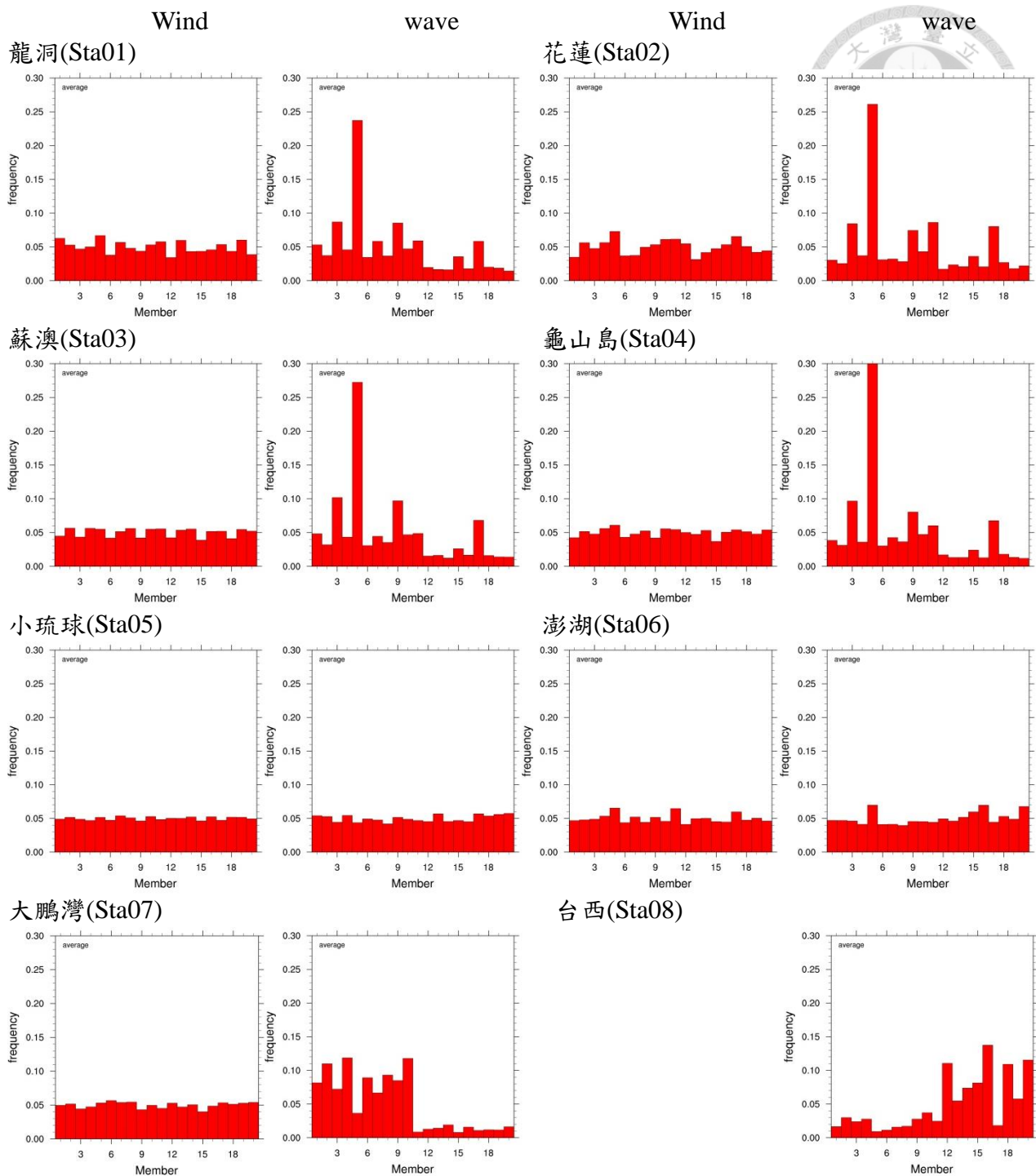


圖 19、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(10W10T)

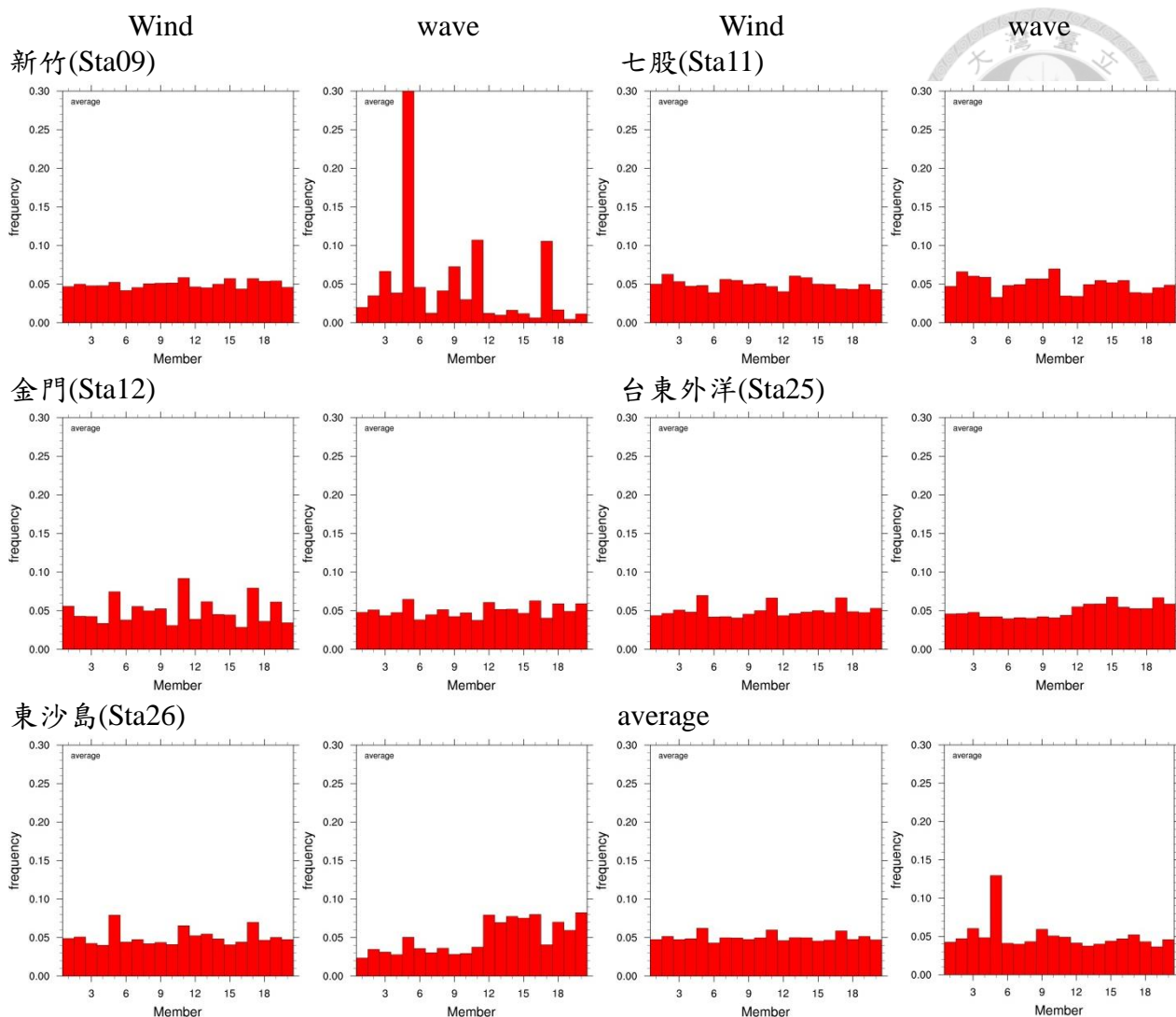


圖 19、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(10W10T)(續)

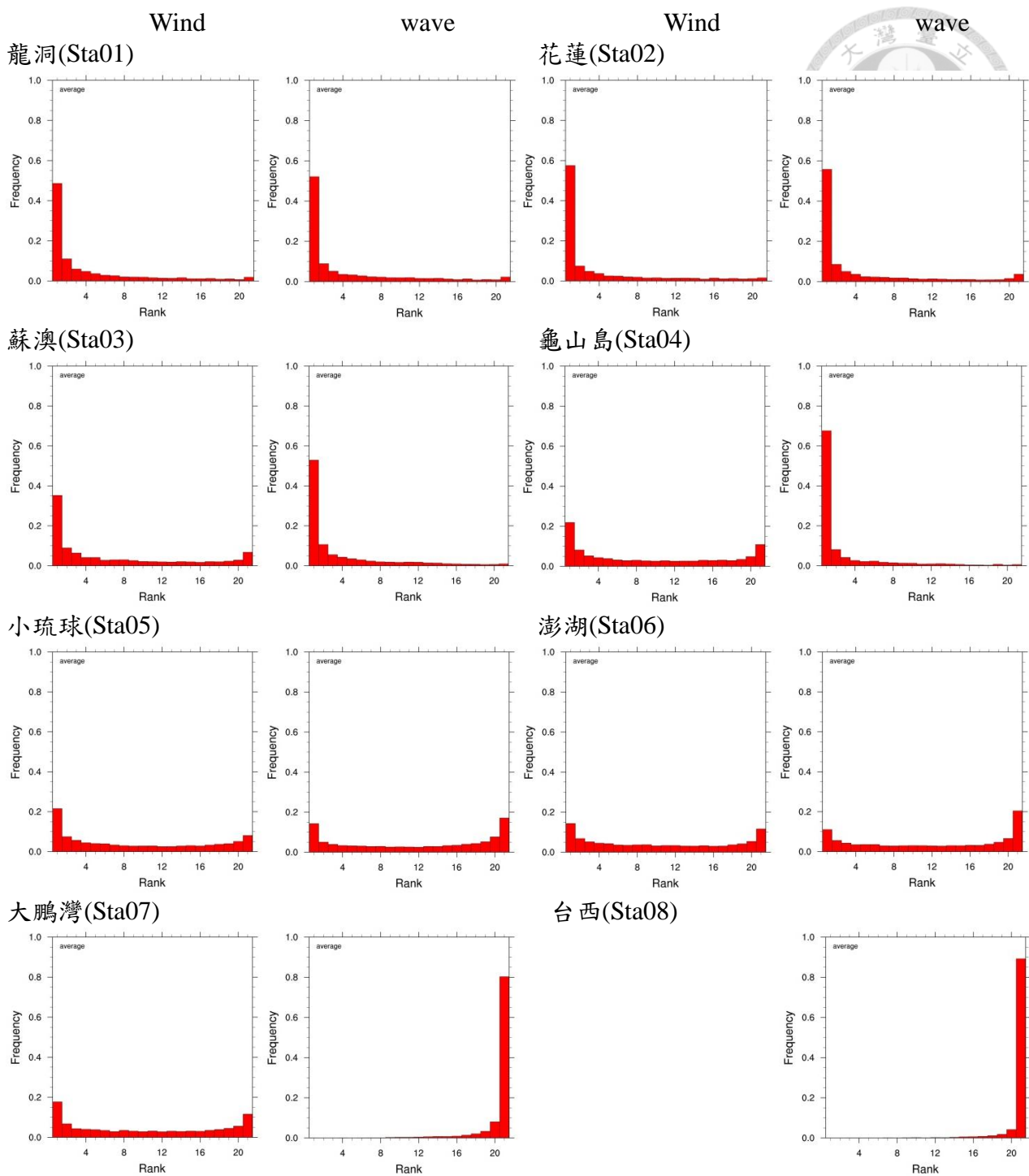


圖 20、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(10W10T)

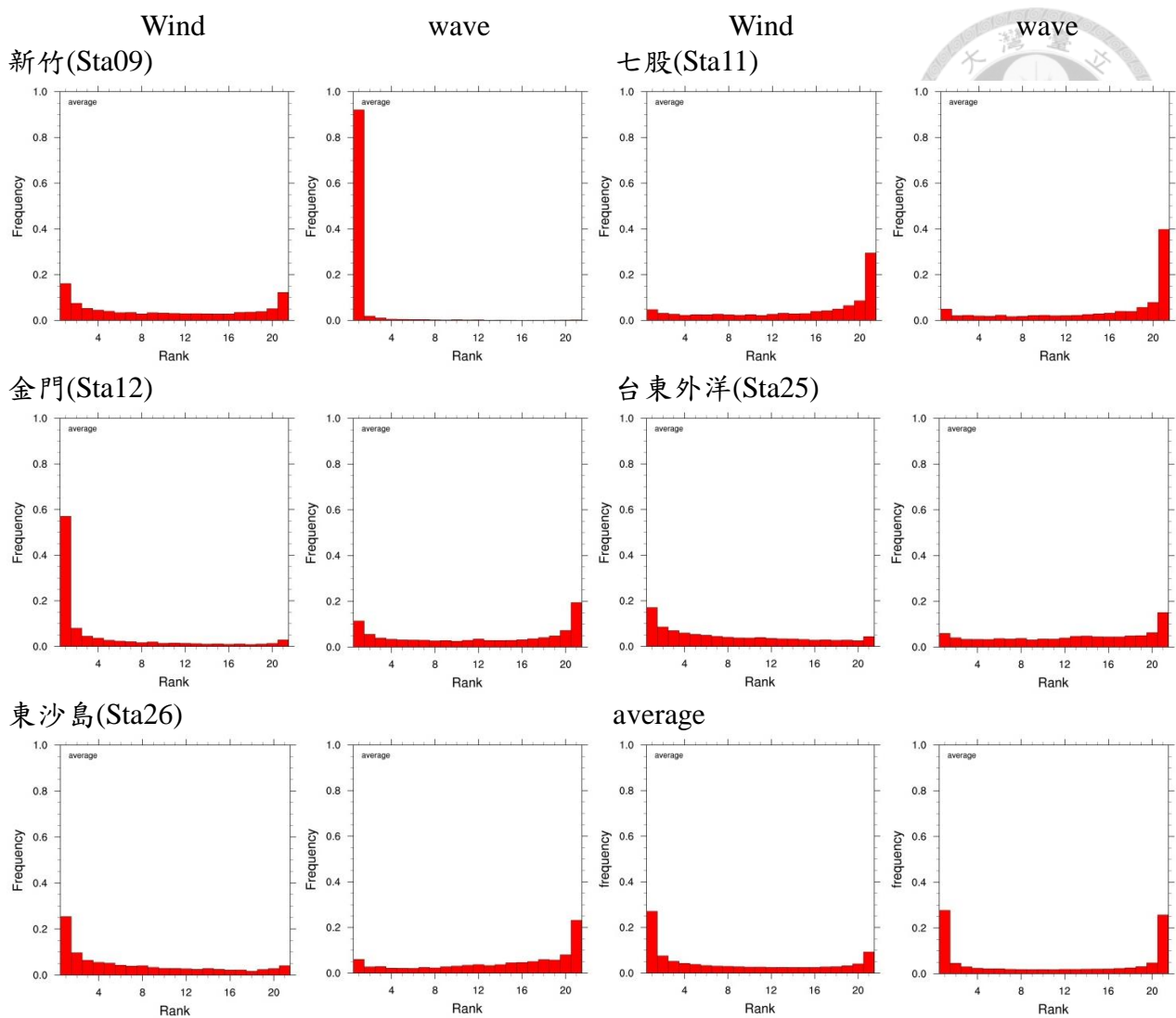


圖 20、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(10W10T)(續)

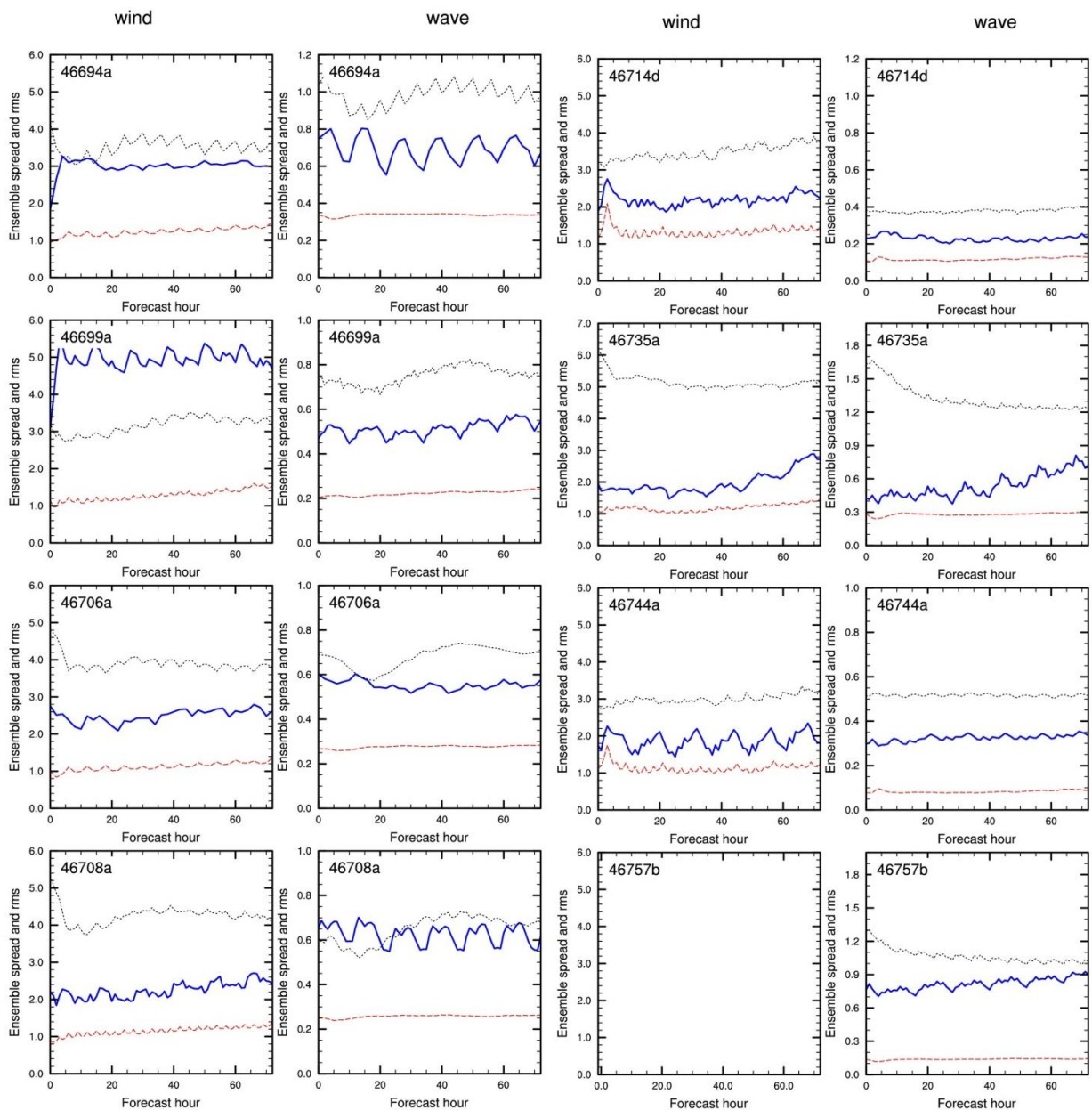


圖 21、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(10W10T)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

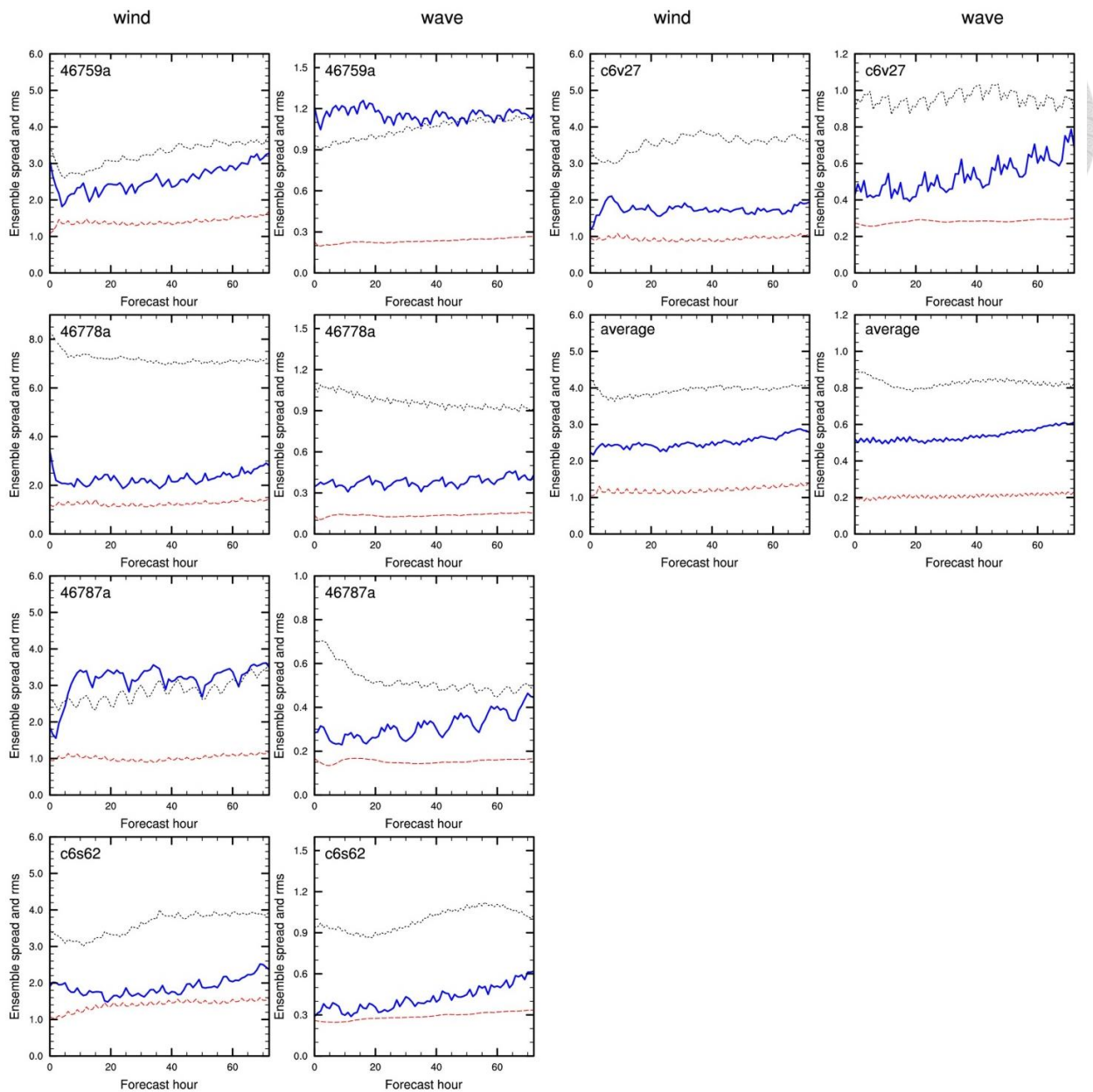


圖 21、2012/1~2 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(10W10T)(續)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

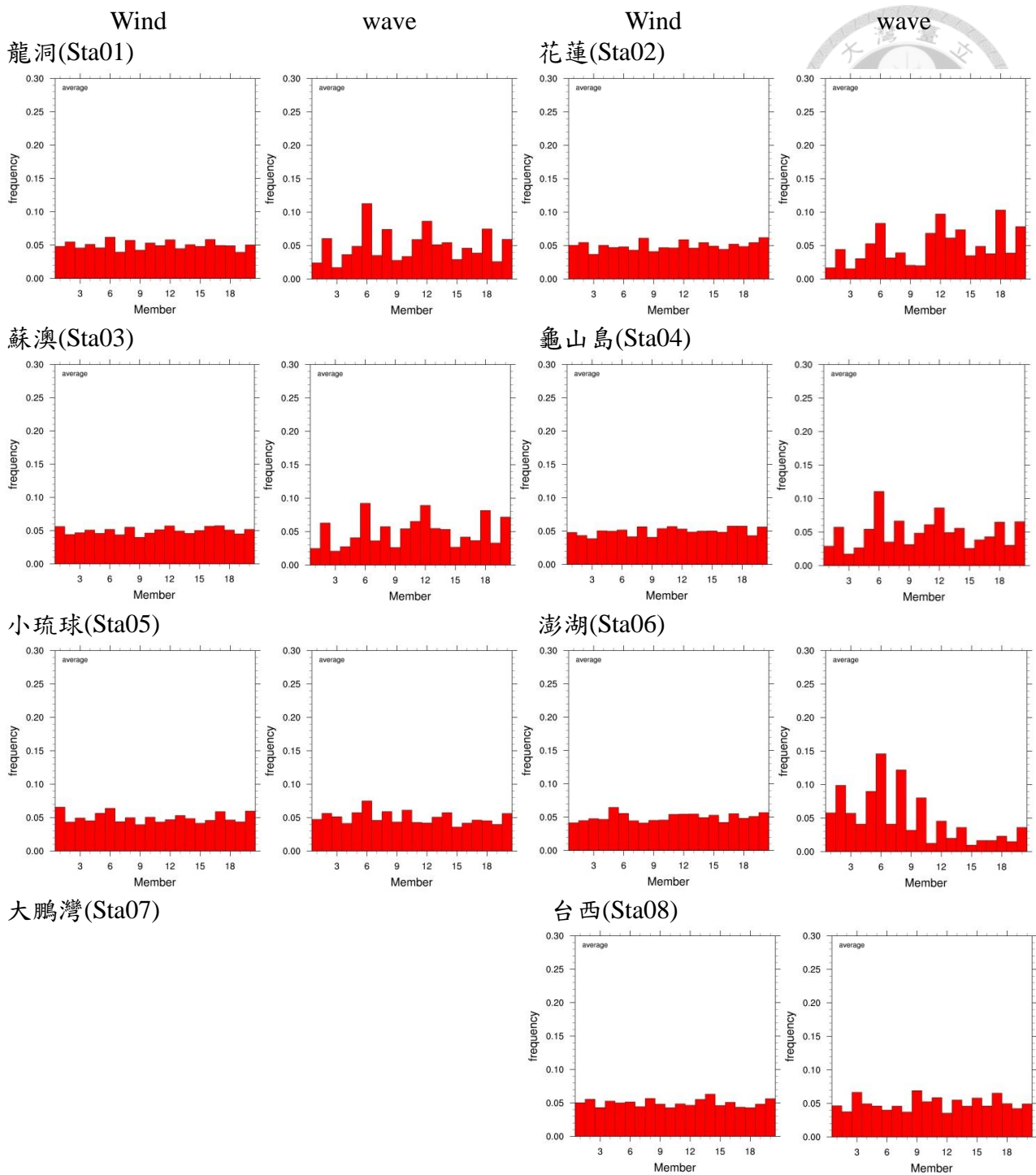


圖 22、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(10W10T)

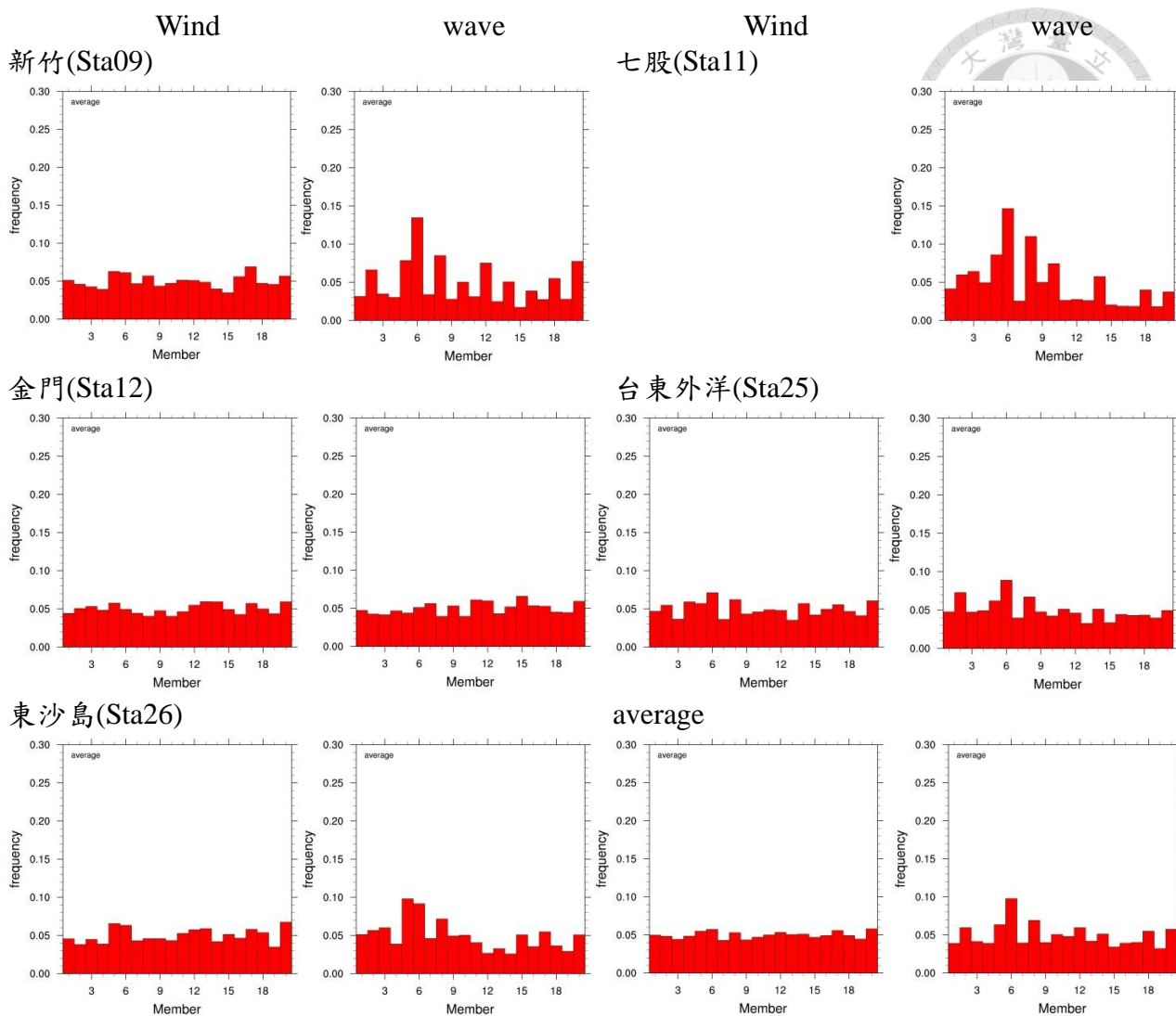


圖 22、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Member equal-likelihood 圖(10W10T)(續)

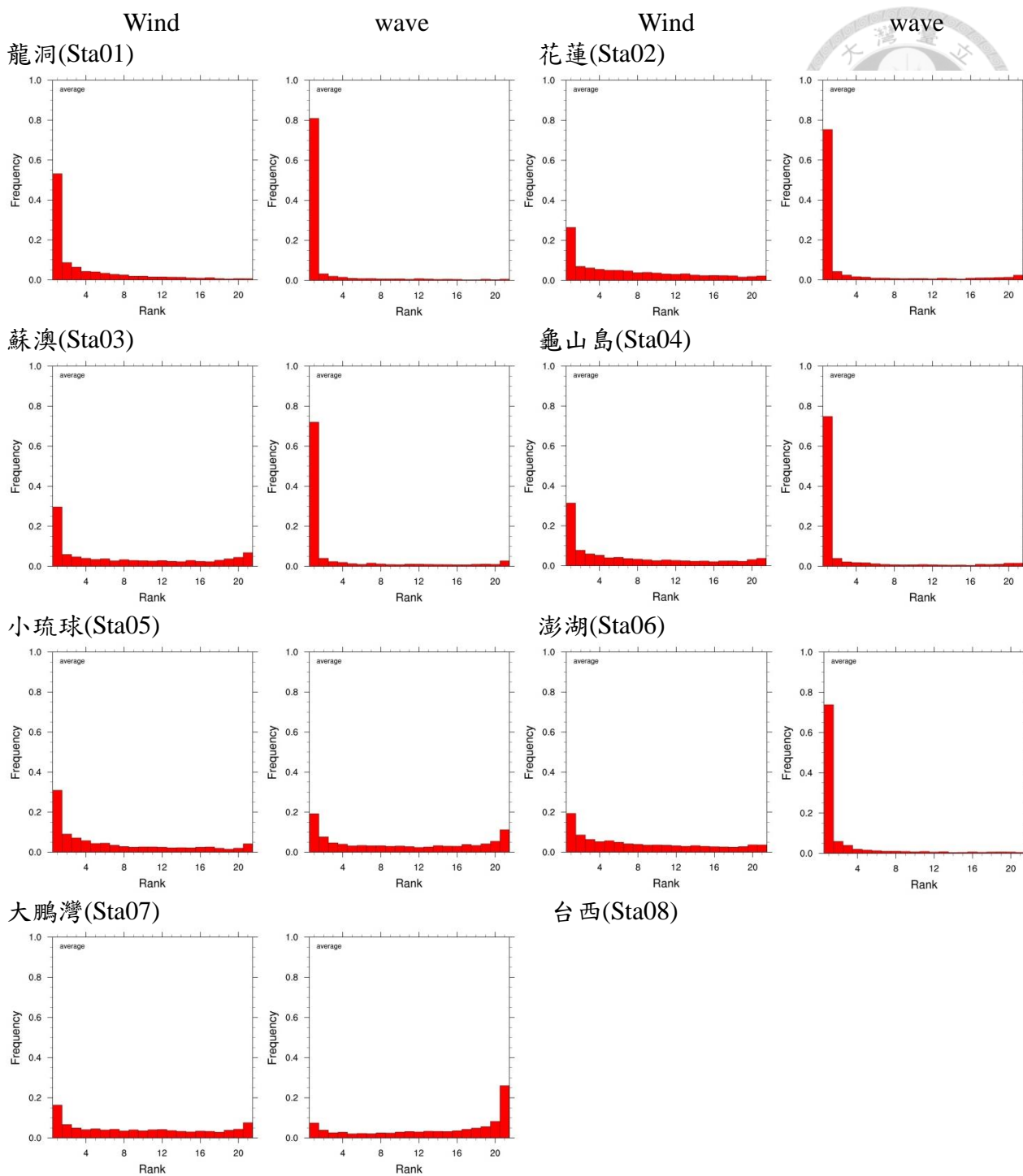


圖 23、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(10W10T)

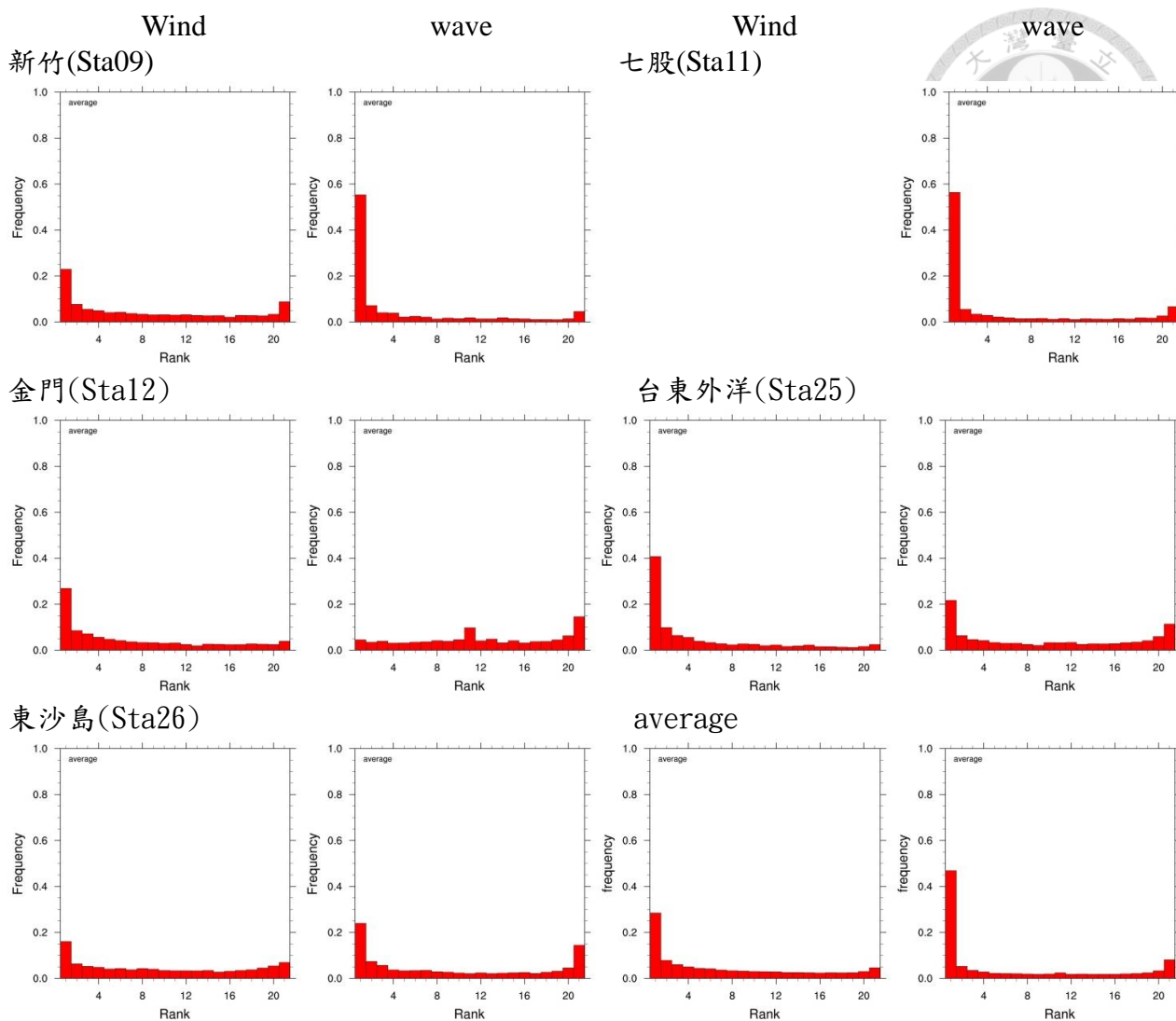


圖 23、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 Talagrand Rank Histograms(10W10T)(續)

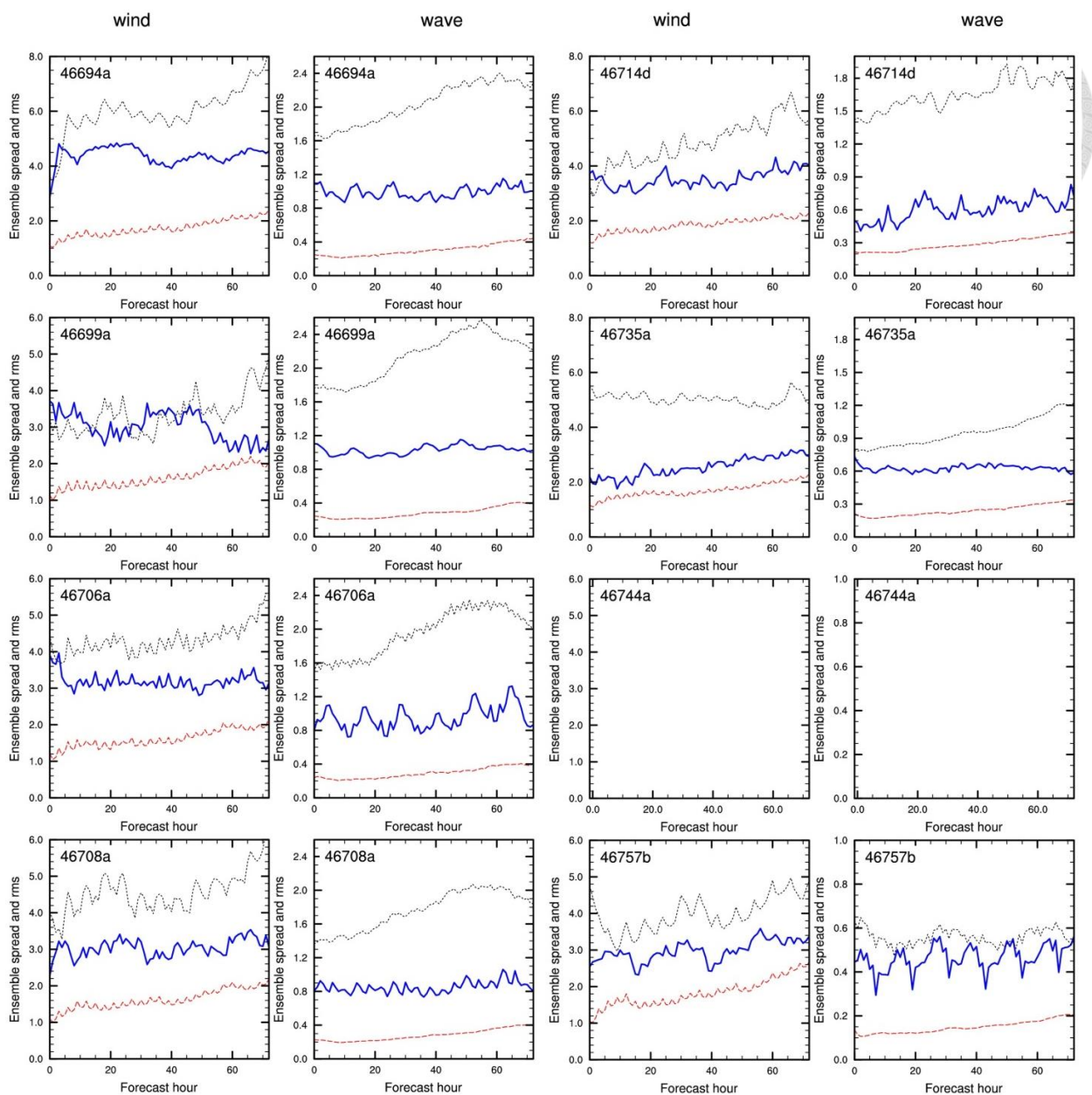


圖 24、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(10W10T)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE

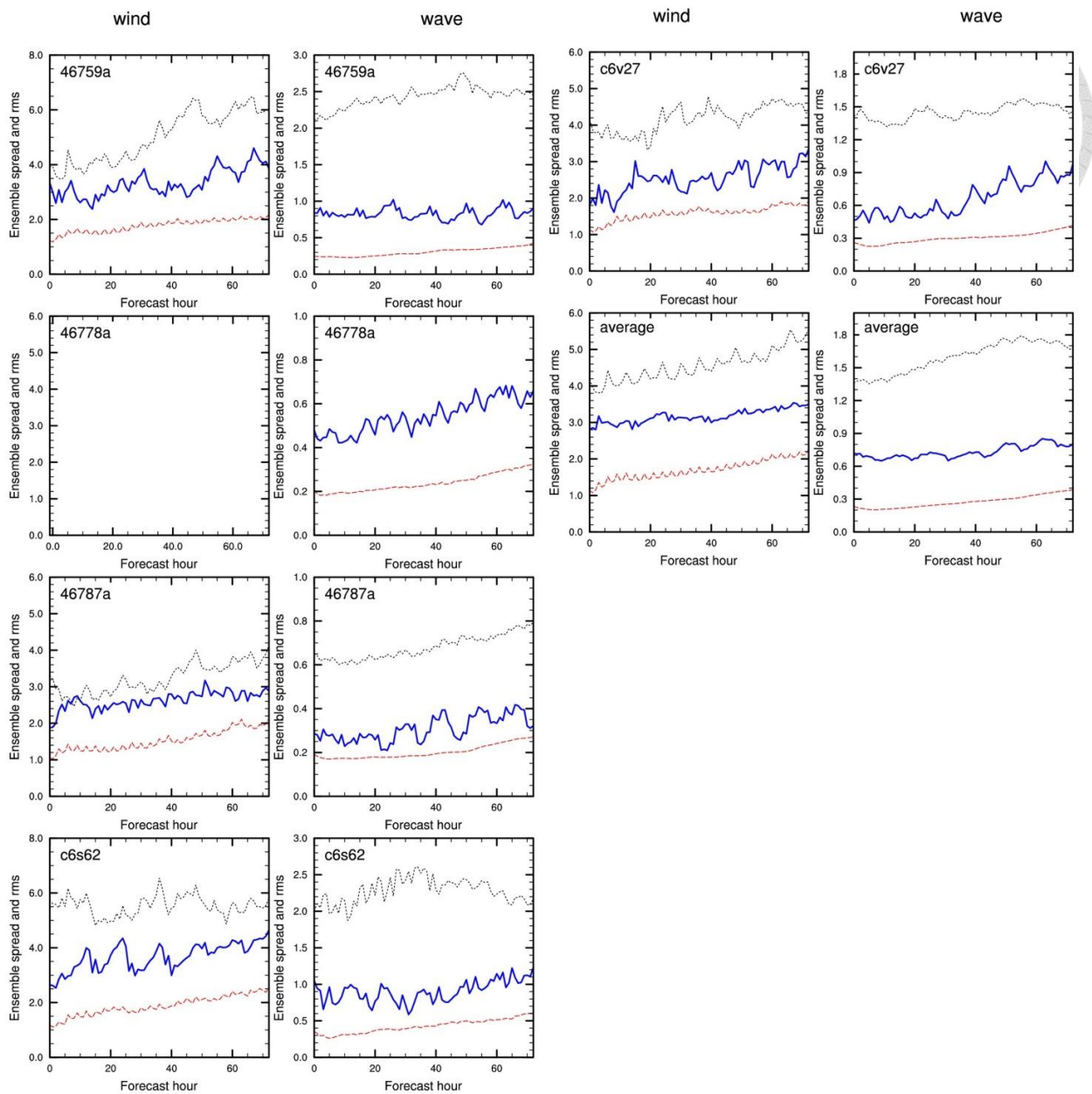


圖 24、2012/8 月各測站  $U_{10}$  及示性波高之 RMSE 及 SPRD 分布圖(10W10T)(續)。藍實線為 RMSE，紅虛線為 SPRD，灰點線為控制演算之 RMSE