

颱風和豪雨分析與預報技術之研發

Research and Development of Typhoon and Torrential Rain Analysis and Forecast Technique

鳳雷¹ 林忠義¹ 陳熾竹¹ 曾吉暉¹
Feng, Lei¹ Lin, Chung-Yi¹ Chen, Yen-Chu¹ Tseng, Chi-Huei¹

¹ 國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心

摘要

台灣地形非常陡峭，以目前預報模式之解析度難以表現其複雜結構，造成數值預報相當困難，此為台灣較特有的現象；而近年幾次重大颱風災害（如民國 93 年敏督利颱風之 72 水災和 98 年莫拉克颱風之 88 水災），其豪雨的產生與西南氣流關係密切。「颱風和豪雨分析與預報技術之研發」分項計畫，預定進行觀測、診斷分析及數值模擬，歸納局部地區豪雨發生時雨帶與流場的特殊配置情形並加以分類，其成果將作為發展颱風豪雨預報概念模式的基礎。

數值模式預報受資料傳輸和運算限制，預報結果可用時間為模擬初始時間 6-7 小時之後；而 0-3 小時即時與 3-6 小時極短時之預報為各級政府防救災緊急應變工作所需的重要資訊，以及洪氾模式預測都市因短延時暴雨產生淹水的重要參考資訊；此為數值預報模式的瓶頸之一，故需藉助其他預報方式。本計畫將利用雷達觀測資料進行定量降雨估計與即時預報技術之研發工作。

本計畫也將利用不同之觀測資料與模式架構，於劇烈天氣影響台灣期間，針對不同時段發展具時效性的極短時定量降雨預報系統（針對未來 3-6 小時）、根據歷史颱風降雨資料之颱風降雨模式（針對未來 0-48 小時）及物理過程較完整之動力統計模式（針對未來 6-72 小時），並利用系集統計技術，整合定量降雨預報結果(QPF)，針對高災害潛勢試驗流域，發展定量降雨整合預報技術。

關鍵詞：數值模式、雷達觀測定量降雨估計、定量降雨整合預報技術

Abstract

The steep topography of Taiwan results in the difficulty in quantitative precipitation forecast (QPF) of numerical weather prediction. Besides, the south-west monsoon also brought significant flood disaster in recent years. This project will accomplish weather observation, diagnostic analysis and numerical simulations. The results would become the basic conceptual model of torrential rainfall predictions.

Numerical model is constrained by data transmission and calculation time, so the prediction available time period is usually 6-7 hours after the simulation starting time. However, 0-6 hour very short term rainfall forecast is the important information of

preventing calamity and dealing with urgent contingency needed by the government. In addition, the river model and urban inundation simulation are also use this short term rainfall forecast as input data. In this project, radar data assimilation technique is utilized to improve very short term quantitative precipitation forecast.

Integration in QPF of different time duration will be developed in this project to focus on those high potential disaster areas using radar data assimilation (3-6 hours), typhoon rainfall model (0-48 hours) and numerical weather model (6-72 hours).

Keywords : numerical weather model, radar observation quantitative precipitation estimation, integrated prediction technique of quantitative precipitation.

一、前言

本計畫之目的在透過觀測資料及數值模式預報結果之診斷分析，發展颱風和豪雨的觀測與預報關鍵技術，並將以山區豪雨事件為測試重點。為使高災害潛勢區豪雨過程有較完整的觀測資料，將建置可移動式C波段偏極化降雨雷達系統乙套，於梅雨季及颱風季進行山區降雨觀測實驗。在定量降雨短時預報技術與預報系統之研發方面，將利用雷達資料分析與同化技術、颱風降雨統計模式及具完整物理過程之動力統計模式，利用統計技術整合定量降雨預報結果(QPF)，針對高災害潛勢試驗流域，發展定量降雨整合預報技術。驗證成熟之定量降雨預報技術將移轉至作業單位，以協助降低颱風災害預警的不確定性。

二、類比法在極短期定量降雨預報之應用

颱洪中心於99年即結合學界及作業單位展開「定量降雨系集預報實驗」，每天可產出四次20組5km x 5km解析度的72小時預報。系集預報實驗提供不只一組的預報結果，且系集預報實驗之設計在使不同模式預報成員的預報結果能有廣大的散佈，希望能涵蓋各種可能的預報趨勢。如何使用系集預報資訊，最單純的作法就是將各組預報結果以相等權重加以平均，以平均值當做預報。當然也可進一步以統計方法提供機率預報的相關訊息。

為使預報結果能應用在極短期定量降雨預報，故利用類比法將中尺度系集預報所產生之大量預報結果及雷達網觀測之即時回波與風場資訊進行比對，以挑選最接近雷達觀測之模式預報結果，進行縣市層級之逐時雨量預報技術研發。雷達觀測資料係使用中央氣象發展之劇烈天氣監測系統(QPESUMS)的整合回波圖(compref)產品。這個產品每10分鐘更新一次，包含中央氣象局所屬的五分山、七股、花蓮及懇丁雷達四座雷達的即時觀測資料，整合回波產品的空間解析度約為1.3km x 1.3km。觀測的雷達回波代表現在的天氣狀況，類比法則是尋找數值模式預報回波場中最接近觀測回波的預報成員。

圖1為觀測回波與模式預報回波比對結果，分別來表示好成員與壞成員的情形。圖中雷達觀測以色階表示，模式預報回波以網線密度表示。這種比對方法用肉眼是可以很容易的區分出好壞，但以自動化方式就不太容易定出一個很好的標準。目前僅以最簡單的回波重疊比例的方法來自動化辨識。

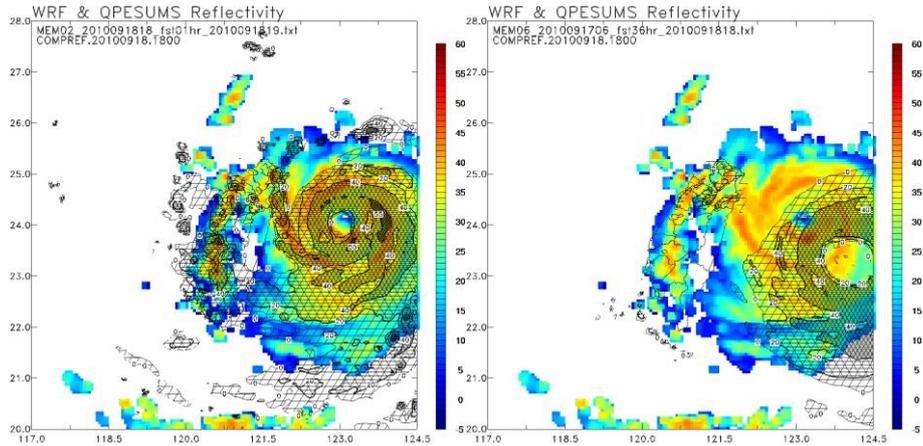


圖1、觀測回波(彩色)與模式預報回波(網線)比對，分別表示好成員(左圖)與壞成員(右圖)的情形

類比法的預報結果如圖2至圖4。圖2是凡那比颱風登陸前，颱風眼剛進入雷達回波觀測範圍之內。此時台灣南部尚未有明顯之降雨發生。圖3是颱風暴風圈接台灣東北部陸地時，颱風眼的結構相當完整。此時高雄及屏東仍未有明顯降雨，但一兩小時後降雨就逐漸增強。

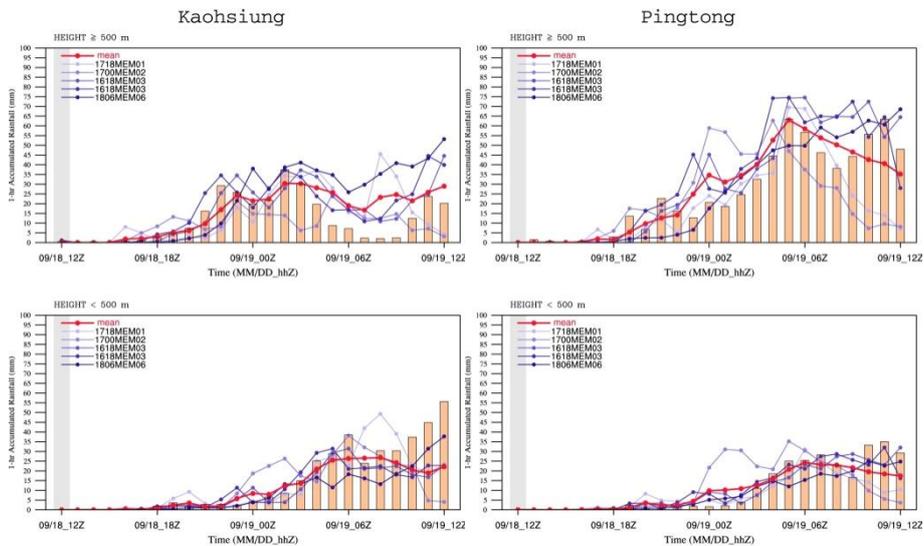


圖2、凡那比颱風9月18日12Z以類比法選出之預報成員對高雄市山區平地及屏東縣山區平地(圖序由上而下)的逐時平均雨量預報。直條圖為觀測平均，折線為不同模式成員預報平均雨量。

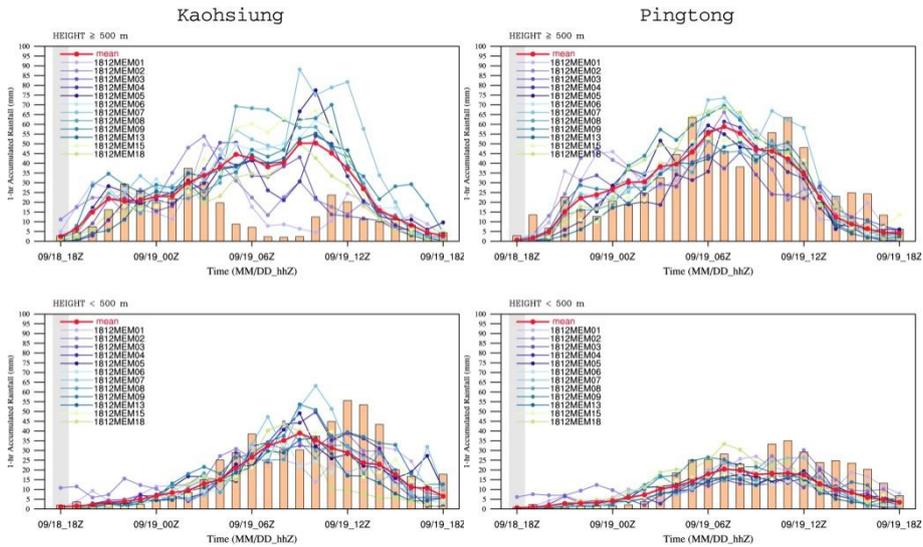


圖3、預報時間為9月18日18Z，其餘圖說同圖2

圖4為颱風登陸的階段，颱風眼牆的結構在颱風中心登陸後就開始消散，颱風中心登陸後就不易由回波來進行定位。由回波圖可見，此時高屏山區已有明顯的降雨回波存在，但在平地區域則未有明顯降雨回波。圖5的雨量觀測(直條圖)及模式預報(折線圖)，在預報的前幾個小時對山區及平地的降雨特性均掌握的相當好。在高雄山區的降雨觀測上，5、6小時後有明顯的減少，屏東山區並未有這種情形。

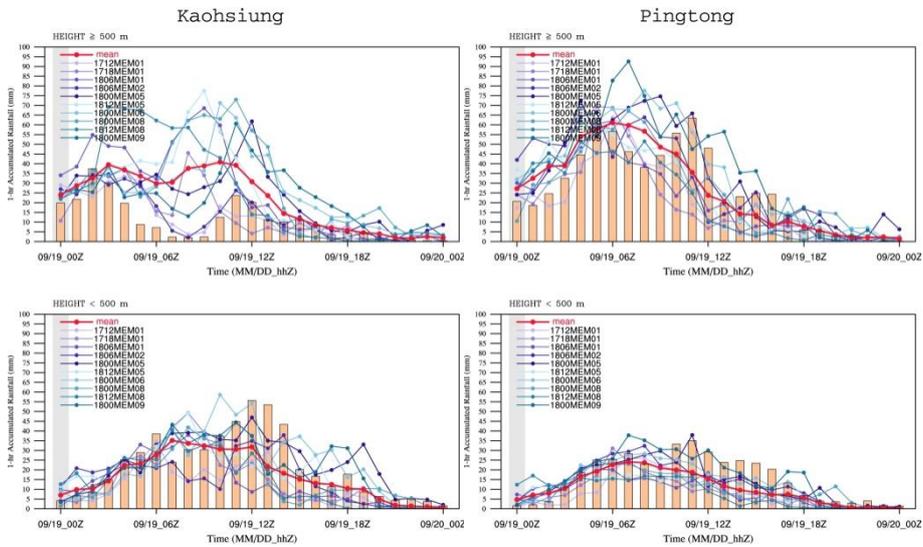


圖4、預報時間為9月19日00Z，其餘圖說同圖2

三、改進雷達資料同化技術

本中心持續進行結合雷達資料之極短期定量降雨預報技術之研發工作，目前可即時取得中央氣象局四座都卜勒雷達之回波及徑向速度場觀測資料，並修正雷達資料處理流程，去除海平面1公里以下資料以及回波值小於10dBZ之觀測資料，以及使用新的觀測誤差變異數。觀測資料經前置處理後，再利用WRF中尺度數值預報之三維資料同化系統，將最新觀測資料融合至模式初始場中，進行0~6小時定量降雨系集預報實驗。修正雷達資料同化參數，並測試數個實際颱風觀測個案，以模擬真實颱風。

風狀況下之降雨預報。目前極短期定量降雨預報系統雛型已開發完成，每日可進行八次(3小時一次)雷達資料同化，並進行30小時的預報作業。

資料同化策略皆為cold start，實驗參數設定為與本中心系集預報實驗中第6個成員MEM06的設定相同，除了同化雷達徑向風和回波觀測資料外，也同化傳統觀測資料及GPS掩星資料，與MEM06的差異僅在於本實驗多同化了雷達觀測資料，同化之雷達觀測資料為徑向風以及雷達回波值。

利用上述雷達資料同化自動化模組，進行101年6月初一場梅雨事件的預報實驗，以6月10日00時開始的預報結果及其與本中心系集預報實驗的比較，如圖5所示。圖中上排為3小時累積降雨，下排為6小時累積降雨，左欄為系集的結果，中間欄是僅同化徑向風，右欄則是同化徑向風和回波值，結果顯示有同化雷達資料的模式預報結果，比系集平均還要接近實際觀測累積降雨。圖6則是6月10日03時開始的預報結果，由於本中心系集並沒有於03時啟動，故圖6中沒有系集的結果，只與觀測降雨做比較，結果顯示只同化徑向風以及同時同化徑向風和回波值的結果，皆能預報出南部山區的降雨，但對於南投縣山區的強降雨則是明顯低估，而同化徑向風及回波值的結果，在預報降雨的位置及方位上比實際觀測降雨偏西，且強度也有過度預報的現象。

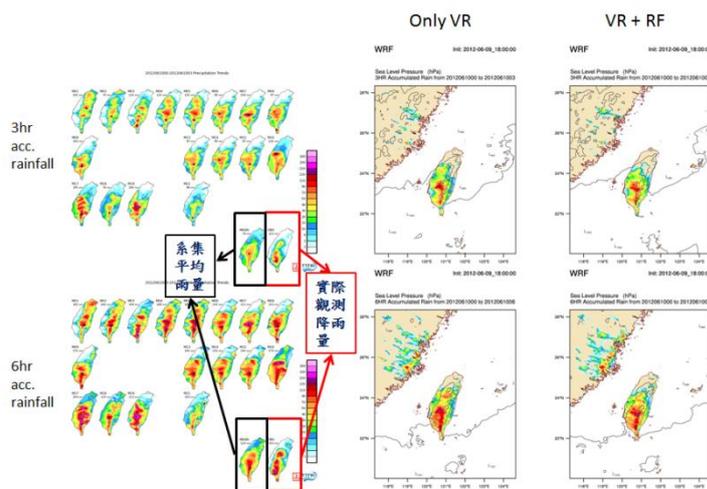


圖 5、預報起始時間為 6 月 10 日 00 時的結果及其與本中心系集預報實驗的比較。圖中上排為 3 小時累積降雨，下排為 6 小時累積降雨，左欄為系集的結果，中間欄是僅同化徑向風，右欄則是同化徑向風和回波值

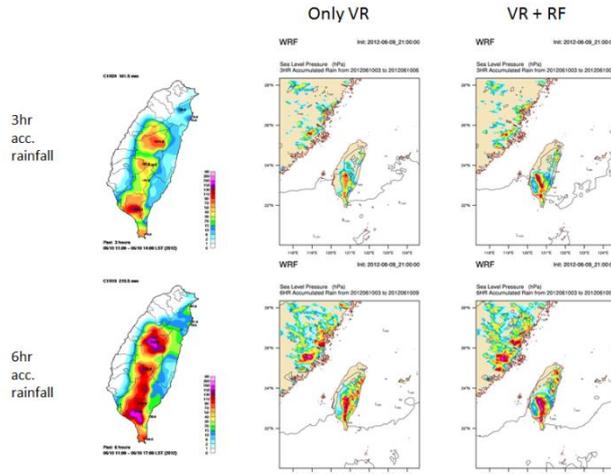
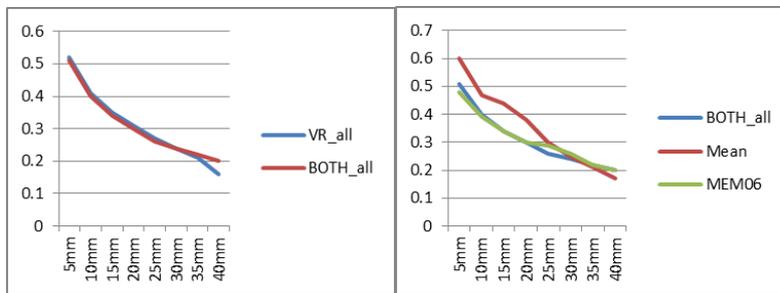


圖6、預報起始時間為6月10日03時的結果，左欄為實際觀測降雨，中間欄是僅同化徑向風，右欄則是同化徑向風和回波值

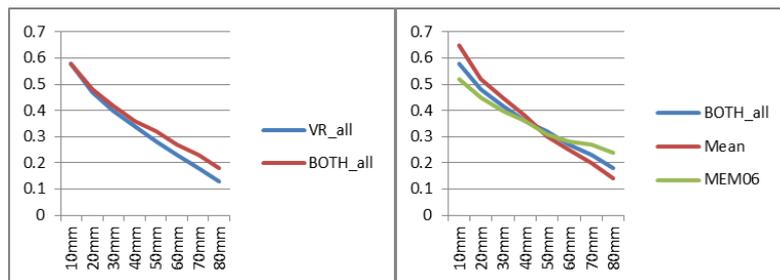
從101年6月9日18時起至6月12日12時止，計算該降雨事件之總預兆得分 Threshold Score(TS值)，結果如圖7及圖8所示。以3小時累積降雨量來看，在不同降雨門檻值的情況下，系集表現略優於MEM06及雷達資料同化的結果，而只同化徑向風和同時同化徑向風及回波表現相當；以6小時累積雨量而言，系集預報平均降雨在小雨表現較佳，大雨則較差，雷達資料同化介於中間，而同時同化徑向風及回波結果，則比只同化徑向風的結果好。



(a)

(b)

圖7、不同降雨門檻值下之3小時累積降雨預兆得分值。圖7(a)為僅同化徑向風與同時同化徑向風與回波值之比較；圖7(b)為同時同化徑向風和回波值之雷達資料同化結果與系集平均和第六個成員之比較。



(a)

(b)

圖8、不同降雨門檻值下之6小時累積降雨預兆得分值。圖8(a)為僅同化徑向風與同時同化徑向風與回波值之比較；圖8(b)為同時同化徑向風和回波值之雷達資料同化結果與系集平均和第六個成員之比較。

四、先進大氣觀測實驗

101年度的汛期本中心再次與中央大學合作，在杰拉華颱風期間於宜蘭佛光大學進行可移動式雷達(TEAM-R雷達)觀測實驗。由於颱風並未登陸，於觀測區域中所觀測到的主要是外圍雨帶所帶進來的回波，而且由於颱風距離較遠，故對流系統並非長時間持續出現在觀測範圍中。對流系統出現在近山區的頻率仍較平原區高，最大對流強度亦較高(可至40dB)，發展的高度則在5公里以下(如圖9)，並且沒有明顯的亮帶產生。

對比五分山雷達站所觀測，發現五分山雷達站觀測蘭陽平原上方最低約是1.5公里水平高程，到蘭陽平原南方山區約是3公里高。Team-R雷達在蘭陽平原區域則可以看到0.5公里高程以下的區域，本事件中五分山觀測到的回波要高於TEAM-R所觀測，如圖10中之圓圈處。

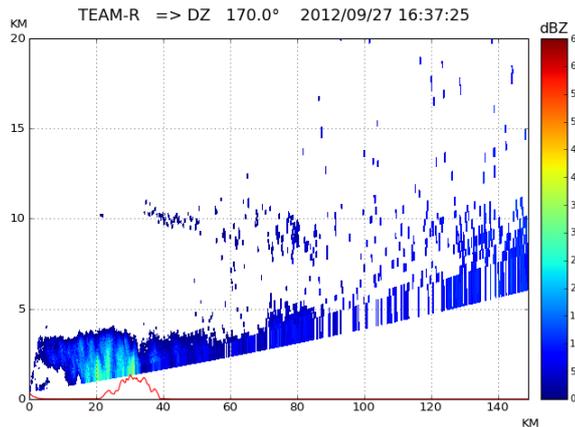


圖 9、TEAM-R 觀測 RHI 剖面圖

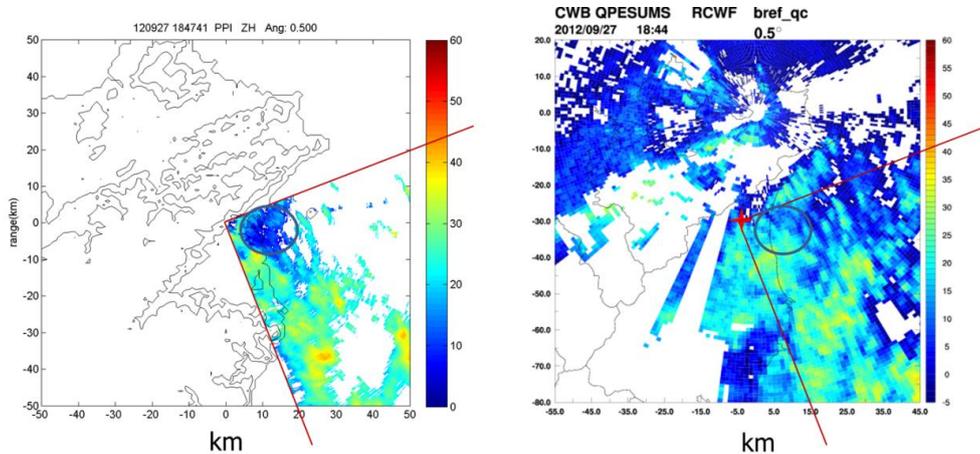


圖10、TEAM-R雷達與五分山雷達觀測回波對照圖

本中心今年同時也利用所購置之雨滴譜儀進行大氣觀測，雨滴譜研究有兩個主要的應用。一是對於特定地區不同時間採取多次降雨過程的雨滴譜資料進行分析研究。這對於瞭解一個地區的降雨特徵與形成機制有重要的幫助。另一是對特定的天氣系統進行分析研究，通常經由相同的天氣系統在不同水平地點的雨滴譜儀觀測資料分析，對於整個系統的微物理變化過程可以有所瞭解。

本中心已於兩年前購置Parsivel及2DVD等新式雨滴譜儀，在配合其他設備進行觀測實驗後，今年大部份的時間都架設於中央大學觀測坪中，同時也收集到鋒面、梅雨、午後雷雨、颱風…等多種不同型態的降水個案資料。針對這些資料，我們比較兩種不同型式的雨滴譜儀，利用幾個物理參數進行分析統計。

在雨滴譜資料(N(D))分析，發現2DVD觀測到的小雨滴數比Parsivel觀測到的多很多，中間粒徑部份的數量類似，大雨滴部份則Parsivel觀測到較多的數量。但在終端落速(Vt)的分析，發現在小雨滴時，Parsivel所觀測到的終端落速較高，而且高於Gunn et. al.(1949)與Atlas et. al(1973)等兩種理論值。2DVD所觀測到的終端落速則較低，而且低於理論值。兩種儀器雨滴譜的差異除了本身觀測機制所造成的雨滴遮蔽與疊合觀測誤差之外，由於終端落速的差異使得兩者所觀測到的雨滴粒徑分佈有著相當明顯的不同，Parsivel由於觀測到的小雨滴終端落速較大，使得單位空間中的雨滴數(N(D))較少。2DVD則由於所觀測到的小雨滴終端落速小，使得單位空間中的雨滴數較多。Parsivel所觀測到的小雨滴數較少，但同時大雨滴的數目通常較多，這可能是使得2DVD與Parsivel觀測得的降雨率相近的原因之一。

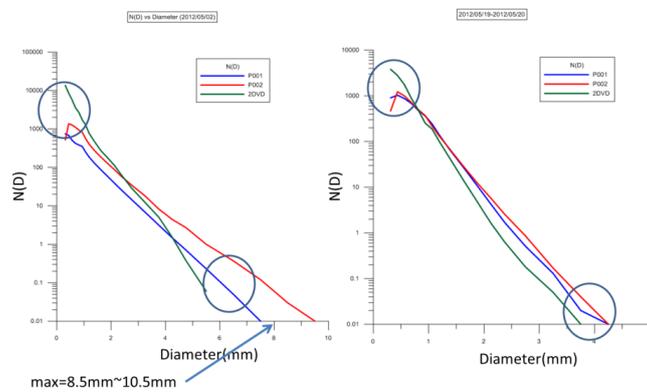


圖 11、雨滴譜(N(D))比較圖

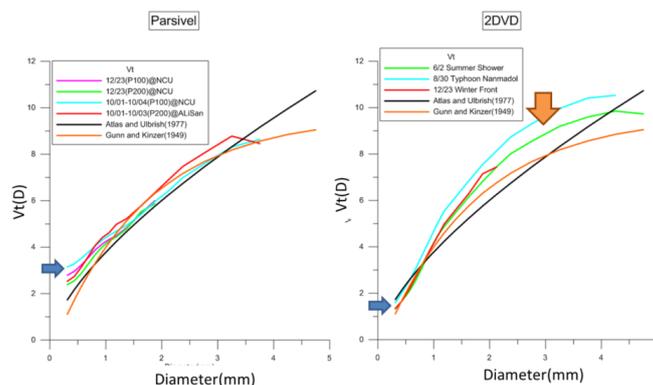


圖12、終端落速(Vt)比較圖

五、定量降雨短時預報技術與預報系統

5.1 颱風定量降雨預報系集預報實驗資訊平台系統

颱洪中心於99年起進行「颱風定量降雨數值模式系集預報實驗」，101年因應防災需求，擴大模擬實驗時間並正式更名「定量降雨系集預報實驗」(Taiwan Cooperative Precipitation Ensemble Forecast Experiment, TAPEX)，其目的在研發測試定量降雨預報技術並增加災防單位應變作業時可參考之資訊，協助提升災害防救效能。本實驗結合學研界(台灣大學、中央大學、台灣師範大學及文化大學)與作業單位(中央氣象局)之研發能量，並結合國家高速網路與計算中心的計算資源及國家災害防救科技中心的實務經驗。於颱風影響台灣期間，每日產出4次即時高解析度台灣地區天氣狀況，並利用系集統計方法與機率預報概念，分析颱風路徑與雨量分布，並提供致災性雨量的機率預報。

實驗期間，所有實驗結果均利用數據專線，即時傳輸至中央氣象局、水利署、災防中心等供參考應用。此外，在颱風侵台期間，本中心並將重要結果整理成簡報檔，每日兩次主動即時提供中央氣象局、災防中心、水利署(含防災應變中心、河川局)及協力單位(台大天災中心、成大水利及海洋工程系)、水保局土石流防災中心、陸軍總部、國研院院部、國科會…等災防相關人員參考之用。透過此實驗平台的模擬，可提升國內定量降雨數值預報的技術，並將研發成果應用在實際作業上，充分達到研發、服務及育才的目標。

此資訊平台系統配合本中心定量降雨預報實驗之數值模式輸出結果，建置模式資料處理與展示介面，透過網頁平台界面即時展示實驗成果予作業與災防單位，提供決策者風險評估參考。

本年度為加強服務防災相關單位應變需求，本中心更新網頁版展示平台資訊系統頁面及功能。新增頁面包括颱風降雨模式、淹水先期潛勢，其中颱風降雨模式結合系集平均路徑以氣候法提供全台降雨型態，淹水先期潛勢結合系集所有成員雨量及水文快速淹水潛勢方法快速展示可能的淹水鄉鎮。新增功能包括颱風強度、單一颱風時期所有路徑、平均累積雨量、成員累積雨量、即時日雨量預報、日雨量圖校驗。

5.2 101年定量降雨系集預報實驗結果校驗 - 蘇拉颱風及天秤颱風

101年共有3個颱風影響台灣，其中對台灣影響較大的是7月的蘇拉颱風及8月的天秤颱風，本報告將針對此兩個颱風個案的系集預報實驗結果進行校驗。

圖13為蘇拉颱風期間，系集實驗各成員及系集平均的路徑誤差。圖中顯示，各成員24小時路徑誤差在70公里到150公里間，其中系集平均(Mean)的24小時路徑誤差為79公里，而48小時以及72小時預報之路徑誤差則分別為124公里以及144.5公里。

在降雨的分布方面，圖14為蘇拉颱風系集平均結果與觀測之日雨量圖，圖中顯示系集平均均可大致掌握降雨趨勢，且越接近當日的模擬(圖中第一排)其結果與觀測越接近。蘇拉颱風雨量校驗部分(圖15)，由預兆得分可看出在50mm、130mm、200mm

以及350mm之24小時雨量門檻值下，系集平均(Mean)的實驗結果大多較單一成員結果好，且在超大豪雨門檻值下(350mm)之預兆得分高達約0.42，顯示系集平均對蘇拉颱風的降雨有相當不錯的預估結果。

另一個對台灣造成較大災情的天秤颱風屬特殊路徑，形成後往北行進，通過鵝鑾鼻東方海面後開始轉向西方移動，在8月24日凌晨於屏東登陸後，在26日晚間至27日凌晨再次轉向，向東北東方向移動，在28日颱風中心通過蘭嶼與綠島中間，造成蘭嶼嚴重災情。圖16為系集實驗於天秤颱風全期之路徑誤差，結果顯示系集成員24小時預報之路徑誤差約在50公里至140公里間。而系集平均(Mean)24小時路徑誤差為79公里，48小時及72小時之路徑誤差分別為160公里及274公里。路徑誤差隨預報時間變化圖(圖17)顯示，在082212UTC~082412UTC及082612UTC~082712UTC兩時段，72小時路徑預報誤差明顯偏大，其原因為該兩時段正好是天秤颱風轉向的時間，因此會有較大的不確定性。

在雨量分布的校驗方面，圖18為天秤颱風系集平均與觀測之日雨量圖，可明顯看出在颱風中心轉向時(8月22日~23日及8月26日)，模式對雨量的掌握能力較不好。進一步，針對所有系集成員在不同降雨門檻值預估結果進行校驗(圖19)，結果顯示系集平均(Mean)在大雨(50mm)門檻值之預兆得分為0.48，豪雨(130mm)門檻值之預兆得分為0.46，大豪雨(200mm)門檻值之預兆得分為0.22，而在超大豪雨(350mm)的預兆得分則僅為0.03，顯示系集平均對天秤颱風大豪雨以下的降雨，掌握程度較佳，而對超大豪雨的預估能力有限。

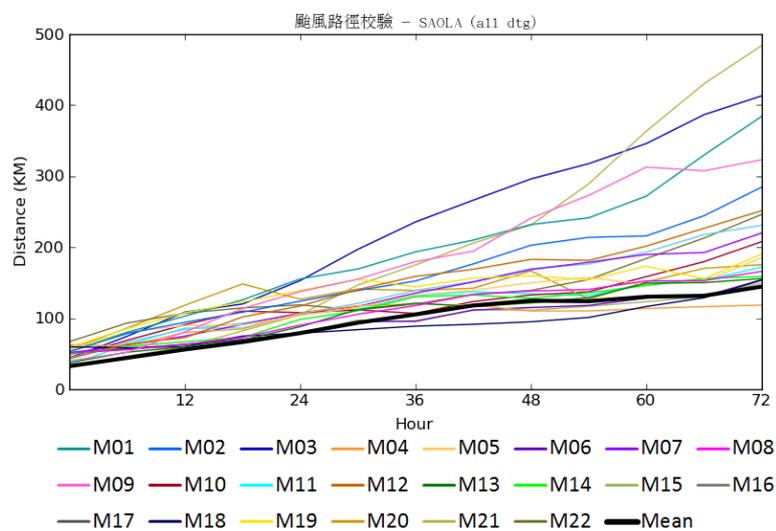


圖 13、蘇拉颱風 D01 路徑校驗

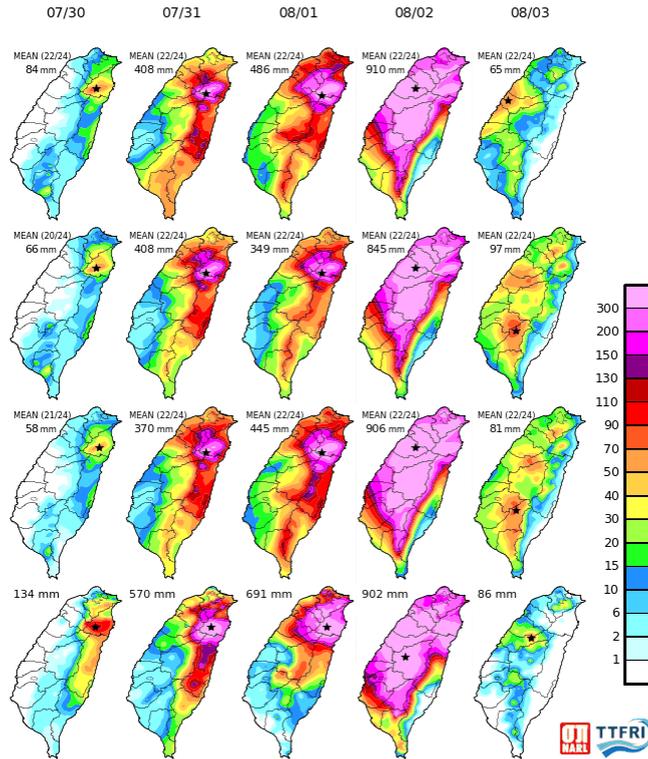


圖 14、101 年蘇拉颱風日累積雨量圖(第一排為最接近當日的模擬結果，第二排為第二個接近當日的模擬結果，第三排為第三個接近當日的模擬結果，第四排為實際觀測結果)

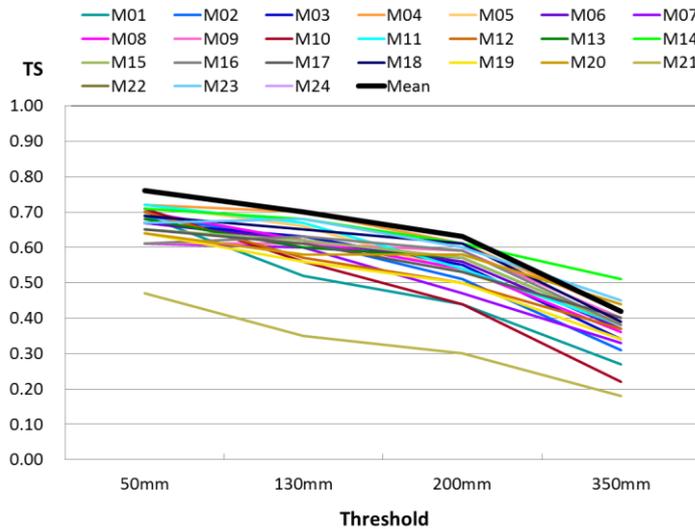


圖 15、蘇拉颱風針對不同降雨門檻值之預兆得分校驗分數

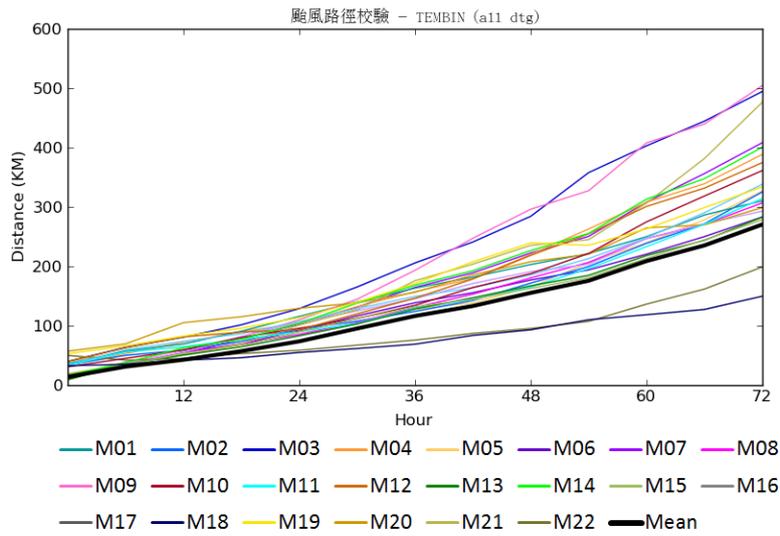


圖 16、天秤颱風 D01 路徑校驗

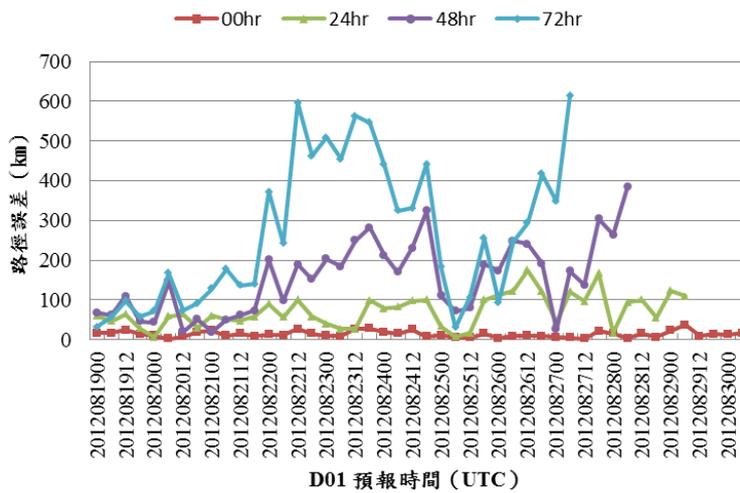


圖 17、天秤颱風 D01 路徑誤差隨預報時間變化

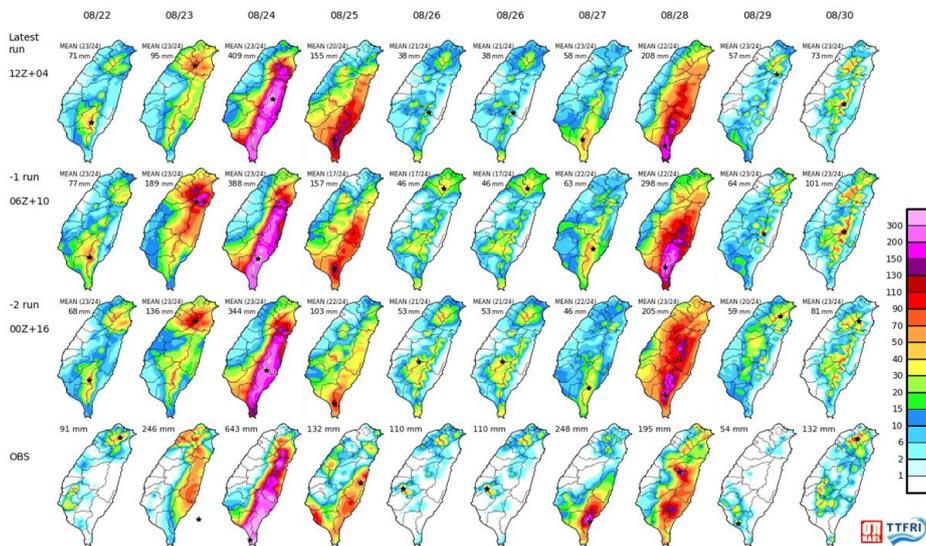


圖 18、天秤颱風日累積雨量圖(第一排為最接近當日的模擬結果，第二排為第二個接近當日的模擬結果，第三排為第三個接近當日的模擬結果，第四排為實際觀測結果)

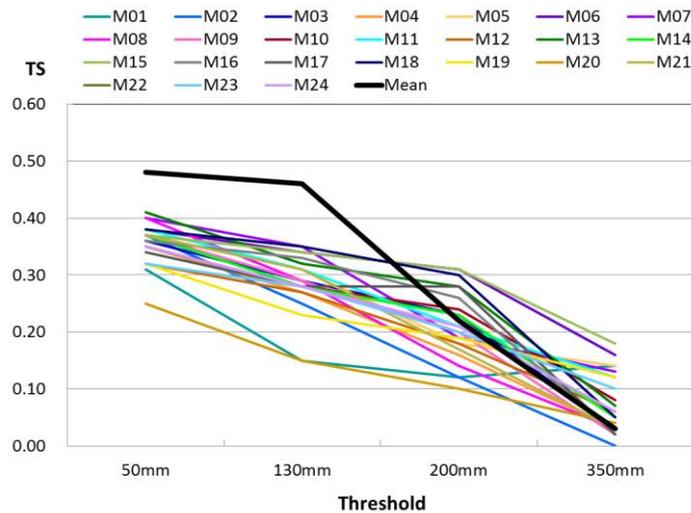


圖 19、天秤颱風針對不同降雨門檻值之預兆得分校驗分數

六、結論與建議

針對99年凡那比颱風進行分析，發現挑選的10個成員平均雨量和觀測雨量，在量值和趨勢上皆相當接近，顯示若系集預報成員數夠多，則透過類比法，可挑選出接近真實條件的預報成員，得到較佳的極短時定量降雨預報結果。

本中心持續進行結合雷達資料之極短期定量降雨預報技術研發工作，同時修正雷達資料之處理流程，以及使用新的觀測誤差變異數。觀測資料經前處理後，利中尺度數值預報模式(WRF)之三維資料同化模組，將最新觀測資料同化至模式初始場中，進行0~6小時定量降雨預報測試。

將本中心購置的兩種新型雨滴譜儀同時架設於中央大學，收集鋒面、梅雨、午後雷雨及颱風等不同天氣系統個案之雨滴粒徑譜資料，進行資料比對分析。結果顯示：在雨滴粒徑分布方面，二維光學式雨滴譜儀高估小雨滴之數量，並有低估大雨滴數量之情形；在雨滴終端速度方面，則有低估小雨滴終端速度，且高估大雨滴終端速度之情形。一維雷射式雨滴譜儀的觀測結果則與其相反。此資料比對分析結果，對未來進行山區雷達定量降雨估計技術研發時，將具重要參考價值；但仍需持續累積個案資料，以確認此特性。

於宜蘭佛光大學架設本中心一維雷射式雨滴譜儀，並配合中央大學TEAM-R雷達，共同執行杰拉華颱風觀測任務。觀測資料顯示：五分山雷達站觀測的回波高度略高於TEAM-R雷達，TEAM-R雷達可分析較低層之觀測結果；雨滴粒徑分布資料則顯示此個案之雨滴粒徑分布有偏向小雨滴的現象。

本中心於100年度建置的「颱風定量降雨系集預報實驗平台」，可透過網頁平台界面即時展示實驗成果予作業與災防單位，提供決策者風險評估參考。101年度配合

防災相關單位之使用需求，更新平台功能以強化服務成效；新增內容包含颱風降雨氣候模式、淹水先期潛勢、颱風強度、單一颱風時期所有路徑、平均累積雨量、成員累積雨量、即時日雨量預報與日雨量圖校驗等功能頁面。

針對101年度顯著降雨個案的系集實驗結果進行校驗，結果顯示：0-24小時的預兆得分均高於0.3（豪雨門檻值日累積雨量達130mm）。系集實驗降雨平均值於豪雨標準下，對於第一天雨量預報有不錯的掌握度，且預報技術之準確度已明顯高於國際水平。然而，隨著預報時段延長和雨量門檻值增加，預兆得分明顯下降，預報的不確定性提高，此為未來持續努力的方向。

參考文獻

1. Radinović, Djuro, (1975) An Analogue Method for Weather Forecasting Using the 500/1000 mb Relative Topography. *Monthly Weather Review*, vol. 103, issue 7, p. 639
2. Xiao, Q., Y.-H. Kuo, J. Sun, W.-C. Lee, E. Lim, Y.-R. Guo, and D. M. Barker, (2005) Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. *J. Appl. Meteor.*, 44,768–788.
3. Zhang, Guifu, Sean Luchs, Alexander Ryzhkov, Ming Xue, Lily Ryzhkova, Qing Cao, (2011) Winter Precipitation Microphysics Characterized by Polarimetric Radar and Video Disdrometer Observations in Central Oklahoma. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1558–1570.
4. Yang, M.-J., H.-C. Kuo, C.-S. Lee, L.-F. Hsiao, L.-Y. Chang, C.-J. Wang, C.-C. Tsai, (2011) TTFRI Ensemble Experiment for Typhoon Quantitatively Precipitation Forecast in 2010, 2011 International Workshop on Typhoon and Flood, Taipei, Taiwan.
5. Lee, C.-S., (2011) Research Highlights of the Taiwan Typhoon and Flood Research Institute. 2011 APEC Typhoon Symposium, Taipei, Taiwan.