交通部中央氣象局

委託研究計畫期末成果報告

颱風投落送觀測資料於實際颱風預報作業上的應用與效益分析

計畫類別：■氣象　□海象　□地震

計畫編號：MOTC-CWB-100-M-14

執行期間：100 年 1 月 1 日 至 100 年 12 月 31 日

計畫主持人：吳俊傑、林博雄、周昆炫

執行機構：國立台灣大學 颱風研究中心

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

□赴國外出差或研習心得報告 1 份

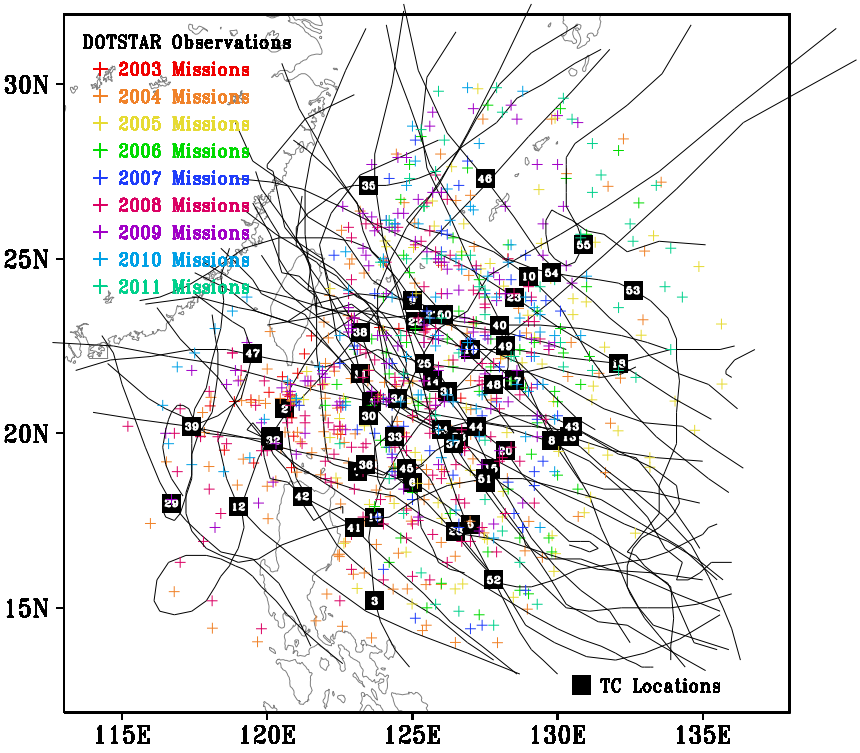
□赴大陸地區出差或研習心得報告 1 份

□出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 1 份

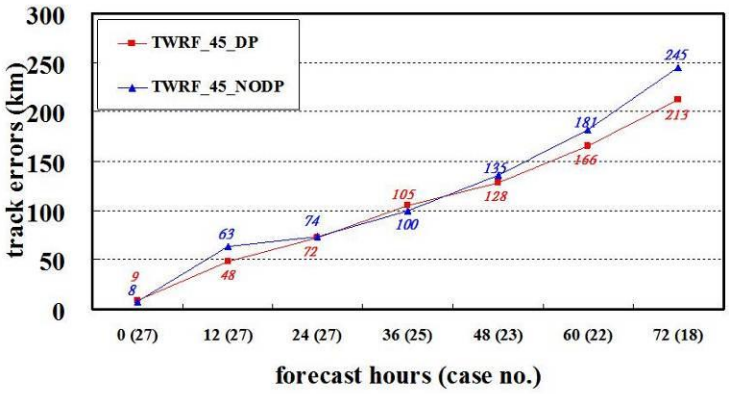
中　華　民　國　100　年　12　月　12　日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	颱風投落送觀測資料於實際颱風預報作業上的應用與效益分析		
計畫編號	MOTC-CWB-100-M-14		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立台灣大學颱風研究中心		
年度	100 年度	執行期間	100.01.01～100.12.31
本期經費(單位：千元)	880 千元		
執行進度	預定（%）	實際（%）	比較（%）
	100%	100%	0%
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率（%）
	880	880	100%
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	吳俊傑	林博雄	
		周昆炫	
報告頁數	110	使用語言	中文
中英文關鍵詞	颱風重點研究(National Priority Typhoon Research)、全球衛星定位式投落送（GPS Dropsonde)、策略性觀測（targeted observation)、颱風偵察飛機觀測實驗[Dropsonde Observation for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR)]、資料同化（data assimilation)		
研究目的(簡述研究計畫之目的及意義，約300字。)	使用 ASTRA 飛機與機載垂直大氣探空系統（AVAPS）設備，以每架次 5-6 小時時間直接飛到颱風周圍 43000 英呎的高度投擲投落送，以取得颱風周圍關鍵區域的大氣環境資料：溫度、溼度、氣壓以及風速等，所取得的資料會即時傳送至中央氣象局、NCEP、FNMOC 以及 JMA，並同化至 CWB、NECP（AVN/GFDL)、FNMOC（NOGAPS/COAMPS/GFDN)、UKMET 以及 JMA 等模式中，以期對於颱風分析與路徑預報上提供可貴的資料；另外本計畫將延續過去追風計畫之成果，持續在投落送颱風觀測、分析及模擬同化的研		

	究上發展，對於颱風資料及颱風模式同化之改進，並協助進行投落送資料分析、影響評估及颱風預報作業上的應用與效益分析。預期在學術界與氣象局的充分合作下，將讓學術界在颱風議題上位於國際研究與作業的前端，成果更可作為我國及各國未來擬定飛機觀測策略的指標，亦有助於推動策略性颱風觀測（targeted observation）。
研究成果（說明研究之具體成果，約800~1000字，並附一張圖說明。）	從 2003 年至今，追風計畫已針對杜鵑等 42 個颱風完成 55 航次之飛機偵察及投落送觀測任務。（今年執行三個颱風，包括米雷、梅花及洛克颱風，共計四次飛行任務），總計在颱風上空飛行 291 小時、並成功投擲 905 枚投落送。在觀測的同時，這些寶貴的投落送資料皆即時進入中央氣象局及世界各國氣象單位之電腦預測系統中，協助預測颱風路徑及分析其周圍結構，如暴風半徑及雨帶結構等。  圖說：2003年至2011年，追風計畫所完成觀測之42個颱風路徑（黑線），及905枚投落送投擲位置（十字標誌）

	追風研究團隊已經發表數十篇與此研究相關之成果論文(計有 Wu et al.（2004）、Wu et al.（2005）、Wu et al.（2006）、Wu et al.（2007a,b）、Chou and Wu（2008）、Chen et al.（2009）、Yamaguchi et al.（2009）、Wu et al.（2009a,b,c）、Chou et al.（2010）、Chen et al.（2011）、Chou et al.（2011）、Harnisch et al. (2010)、Huang et al. (2011)、Liang et al. (2011)、Lin et al. (2011)、Weissmann et al.（2011）、Wu et al. (2011a,b)、Yen et al. (2011)、黃，2006、周，2007、廖，2009、連，2009、陳，2009 等 27 篇)。此外，追風科學團隊在 2006 至 2011 年中參與國際研討會發表之相關論文，總計有 55 篇追風計畫相關研究成果論文發表。並於 2009 年美國氣象學會所發行 Monthly Weather Review 國際著名學術期刊中發表相關十數篇由主持人所主導並衍生之國際性論文專刊（Special Collection on “Targeted Observations, Data Assimilation, and Tropical Cyclone Predictability”）。
具體落實應用情形（說明成果之價值與貢獻、技術移轉、應用推廣等情形，約 300 字。）	由氣象局提供 2008 年至 2011 年共四年統計 17 個颱風 27 個颱風投落送觀測個案所進行之 TWRF(Typhoon Weather Research and Forecasting)颱風預測模式路徑誤差比較圖，可看出這四年加入了追風飛機偵察及投落送觀測資料的數值模擬部份，平均而言使得氣象局 TWRF 數值模式預報改善 7.9 %。因此總體來說，這四年（2008-2011 年）颱風飛機偵察及投落送觀測資料對於氣象局的颱風數值模擬部份，有正面的貢獻。

	Experiment result for 2008, 2009, 2010,2011 17 TCs 27 cases  加入dropsonde資料，TWRF平均誤差改進幅度為7.9% (氣象局陳得松提供) 此外，Chou et al.(2011)進一步分析過去 8 年（2003-2010）投落送資料於 NCEP GFS 模式對路徑模擬的影響，根據 42 個研究個案結果顯示，投落送資料可以改善模式 1-5 天的颱風路徑誤差達 10-20%左右。
計畫變更說明	（若有）
落後原因	（若有）
檢討與建議（變更或落後之因應對策）	

（以下接全文報告）

100 年度政府部門科技計畫期末報告

計畫名稱：颱風投落送觀測資料於實際颱風預報作業上的應用與效益分析

吳俊傑[1]、林博雄[1]、周昆炫[2]

[1]國立台灣大學大氣科學系

[2]私立文化大學大氣科學系

摘　　要

歷年來颱風屢屢造成台灣地區重大災害，颱風研究的重要性不容小覷。氣象局承襲國科會「颱風重點研究」（National Priority Typhoon Research）之「全球衛星定位式投落送」（GPS Dropwindsonde）進行飛機觀測，名為「侵台颱風之飛機偵察及投落送觀測實驗」[Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the TAiwan Region（DOTSTAR）]，又名追風計畫。

颱風投落送觀測資料使用 ASTRA 飛機與機載垂直大氣探空系統（AVAPS）設備，以每架次 5-6 小時時間直接飛到颱風周圍 43000 英呎的高度投擲投落送，以取得颱風周圍關鍵區域的大氣環境資料：溫度、溼度、氣壓以及風速等，所取得的資料會即時傳送至中央氣象局、NCEP、FNMOC(The Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)以及 JMA(Japan Meteorological Agency)，並同化至 CWB、NECP（AVN/GFDL）、 FNMOC（NOGAPS/COAMPS/GFDN）、UKMET 以及 JMA 等模式中。

從 2003 年至今，追風計畫已針對杜鵑等 42 個颱風完成 55 航次之飛機偵察及投落送觀測任務。今年執行三個颱風（米雷、梅花及洛克颱風，共計四次飛行任務），總計在颱風上空飛行 291 小時、並成功投擲 905 枚投落送。在觀測的同時，這些寶貴的投落送資料皆即時進入中央氣象局及世界各國氣象單位之電腦預測系統中，協助預測颱風路徑及分析其周圍結構，如暴風半徑及雨帶結構等。

由氣象局提供 2008 年至 2011 年共四年統計 17 個颱風 27 個颱風投落送觀測個案所進行之 TWRF(Typhoon Weather Research and Forecasting)颱風預測模式路

徑誤差比較圖，可看出這四年加入了追風飛機偵察及投落送觀測資料的數值模擬部份，平均而言使得氣象局 TWRF 數值模式預報改善 7.9 %。因此總體來說，這四年（2008-2011 年）颱風飛機偵察及投落送觀測資料對於氣象局的颱風數值模擬部份，有正面的貢獻。

今年計畫的進展部份為 1 月主持人吳俊傑參加在美國西雅圖舉行的「American Meteorological Society 第 91 屆年會」。會議中主持人口頭提報，題目為「Concentric Eyewall Formation in Typhoon Sinlaku (2008) - Integration of T-PARC Observations Based on EnKF Data Assimilation」，此追風相關結果獲得在場學者相當多的討論與重視。

並於 4 月 1 日於氣象局舉行飛航路線設計策略說明會，討論的議題為(1)飛機觀測(颱風與劇烈天氣)的策略；(2)CWB 參與飛行航路制定的成員與流程；(3)如何於模式中最有效率運用投落送資料。另外 4 月 22 日 0146 至 0334 UTC 追風團隊已完成 2011 年度測試飛行，投擲 4 枚 RD94，功能正常，並第一時間透過衛星電話撥接回傳氣象局。而 5 月 18 日已完成安全講習，參加人數 26 員(CWB 人員 7 名、空軍氣象聯隊 3 員、台灣大學則包含主持人吳俊傑、林博雄等 16 員)。講習內容包括：（1）Astra 飛行安全教育(AIDC 林福璋教官)；（2）颱風與西南氣流飛行觀測作業流程(NTU 林博雄教授)；（3）Aspen 編碼訓練(NTU 助理盧濟明)。

另外飛機觀測任務共計四次，第一次觀測目標為今年第 5 號颱風米雷（Meari），於 6 月 23 日凌晨 5 點起飛，飛行 5 小時 40 分，共投擲 16 枚投落送進行觀測。第二次目標為梅花颱風，並於 8 月 3 日及 4 日共執行兩次觀測任務，此兩次飛行共 11 小時 07 分鐘，投擲 29 枚投落送。今年第四次，也是最後一次觀測，則是針對 9 月 18 日的洛克颱風，投擲 14 枚投落送。因此今年共針對三個颱風執行四次飛機觀測任務，總飛行時數為 21 小時 32 分鐘，總共投擲 59 枚投落送，成功傳回米雷、梅花及洛克颱風各層之氣象相關資料。

總而言之，我們預期在學術界與氣象局的充分合作下，將讓學術界在颱風議題上位於國際研究與作業的前端，颱風之投落送飛機觀測已有具體成果，對於國內及國際皆有相當之貢獻。

關鍵詞：颱風重點研究、GPS 投落送、策略性觀測、颱風偵察飛機觀測實驗、資料同化

Abstract

In light of the heavy damage done by typhoons to Taiwan year by year, the Central Weather Bureau (CWB) of Taiwan places a great premium on typhoon research, and therefore funds the “Dropsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR)”. The DOTSTAR is an international research program conducted by meteorologists in Taiwan partnered with scientists at the Hurricane Research Division (HRD) and the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). This project marks the beginning of a new era for the aircraft surveillance of typhoons in the western North Pacific.

Built upon work pioneered at NOAA's Hurricane Research Division (HRD), the key to the project is the use of airborne sensors -- dropwindsondes, which are released from jet aircraft flying above 43,000 feet in the environment of a tropical cyclone. These sensors gather temperature, humidity, pressure, and wind velocity information as they fall to the surface. Information from the surveillance flights is transmitted in near real-time to the CWB of Taiwan, as well as to the NCEP, FNMOC, and JMA. The data are immediately assimilated into the numerical models of CWB, NCEP (AVN/GFDL), FNMOC (NOGAPS/COAMPS/GFDN), UKMET, and JMA. The DOTSTAR are expected to provide valuable data which can help increase the accuracy of TC analysis and track forecasts, to assess the impact of the data on numerical models, to evaluate the strategies for adaptive/targeted observations, to validate/calibrate the remote-sensing data, and to improve our understanding on the TC dynamics, especially over the TC’s boundary layer (Wu et al. 2005, BAMS).

Up to now, 55 missions have been flown for 42 typhoons, with 905 dropwindsondes released. It has been shown that the dropsonde data improve the 1-5-day NCEP GFS track prediction by about 20% by evaluating the data impact of these missions (Wu et al. 2007a; Chou et al. 2011). The foci of the new DOTSTAR project in the 2011 year are: (1) Realtime analysis of the DOTSTAR data on CWB WINS system; (2) Collaboration of DOTSTAR with the Central Weather Bureau and other agencies; (3) Research on the impact of the DOTSTAR data to numerical models; (4) Research on the tropical cyclone initialization procedure related to dropwindsonde; (5) Analysis of the methodology of targeted observation. It is believed that the DOTSTAR experiments have made a significant contribution to the

typhoon research. The project is expected to yield breakthroughs in typhoon research, forecasting, and observation when it is completed.

Key words: Priority typhoon research, GPS dropsonde, adaptive observation, typhoon surveillance observation experiments, data assimilation

一、前言

基於颱風對於台灣地區的重大衝擊與影響，氣象局今年繼續執行追風觀測任務。並委請台灣大學颱風研究中心延續過去追風計畫之成果，持續在投落送颱風觀測、分析及模擬同化的研究上發展，對於颱風資料及颱風模式同化之改進，並協助進行投落送資料分析、影響評估及颱風預報作業上的應用與效益分析。總而言之，我們預期在學術界與氣象局的充分合作下，將讓學術界在颱風議題上位於國際研究與作業的前端，颱風之投落送飛機觀測已有初步具體成果，對於國內及國際皆有相當之貢獻。

二、研究目的及意義

「颱風偵察飛機投落送觀測實驗」。基於 GPS 投落送的潛在價值，為有效增加颱風周遭環境大氣資料之觀測，我們認為亟需針對有可能侵襲台灣的颱風進行 GPS 飛機觀測實驗之後續研究（follow-up study），以期取得及測試新資料；並透過模式探討對影響模式颱風路徑氣象因子的時空分佈，以形成有效率的機動觀測策略，配合學術界與中央氣象局資料同化能力之提昇，提高預報侵台颱風準確度。此研究乃是台灣及東亞各國進行西北太平洋地區颱風飛機觀測之先驅工作，成果亦將做為未來擬定飛機觀測策略之重大指標。且此研究有助推動策略性觀測（targeted observation）研究及提升資料同化研究，因此可謂扮演颱風基礎及預報研究火車頭之先驅實驗。

而本計畫即在過去追風計畫之成果基礎上，持續在投落送颱風觀測、分析及模擬同化的研究上發展，對於颱風資料及颱風模式同化之改進，並協助進行投落送資料分析、影響評估及颱風預報作業上的應用與效益分析。

三、研究方法

為了使特別的額外觀測發生在影響未來颱風預報最敏感的區域中，以便發揮最大的效用，如此事先選定時間和地點的方法稱為策略性觀測（targeted observations; Langland 2005; Wu 2006）。在有限的飛行資源與觀測時間情況下，以策略性觀測方法制定飛行觀測路線顯得格外重要，近幾年隨著策略性觀測技術

的發展，目前 DOTSTAR 所參考的產品有以下幾種，「系集深層平均風變異」、「系集變換卡爾曼濾波器（ensemble transform Kalman filter, ETKF; Majumdar et al. 2002）」、「奇異向量法」和「颱風駛流敏感共軛向量（adjoint-derived sensitivity steering vector, ADSSV; Wu et al. 2007, 2009a）」。

策略性觀測技術亦應用於闡釋颱風運動與大環境流場間的分析與連結。Wu et al. (2007)以 2004 年的米雷颱風和敏督利颱風利用 ADSSV 來探討影響這兩個颱風駛流之敏感區域，亦檢視 2002 年風神颱風和鳳凰颱風之間的雙颱風交互作用。結合動力模式輸出與系集預報不確定性的 ETKF 策略性觀測技術廣泛應用於探討冬季中緯度氣旋系統之敏感區所表現的特性（Sellwood et al. 2008）。對於這些策略性觀測技術所呈現的敏感區域進行比較亦是一項有趣的議題（Majumdar et al. 2006; Wu et al. 2009b），不但為未來觀測實驗計畫提供參考價值，亦對這些技術有更深一層的物理闡釋及連結。

過去的文獻針對共軛模式線性化假設進行檢驗，但並未有整體性對 ADSSV 敏感性探討與驗證的研究，因此研究第一部分將延續 Wu et al. (2009a)工作，以 2006 年珊珊颱風個案針對敏感與不敏感區域將初始場加以渦度擾動，探討初始擾動對於模式的影響，並與 ADSSV 敏感性的物理意義作連結與驗證。此部分研究成果已發表於 Monthly Weather Review 之專刊"Targeted Observation, Data Assimilation, and Tropical Cyclone Predictability"中（Chen et al. 2011；附錄 5）。研究第二部分則是建立在系集技術的 ETKF 為研究工具，較以往不同的是，此研究提出一套新的 ETKF 計算方式，為了突顯颱風不對稱結構與環境流場對於影響颱風運動的重要性以及降低因颱風系集路徑預報誤差造成風場變異的貢獻，因此以 Kurihara et al. (1993)濾除渦旋的方式將每個系集成員之颱風分量去除，再重新計算 ETKF 敏感性，針對幾項議題探討 ETKF 在熱帶氣旋環境下所呈現的特徵。此部分研究已於「第 29 屆颶風暨熱帶氣象研討會」進行口頭報告（Chen et al. 2010），且已發表於國際著名期刊（Majumdar et al. 2011；附錄 6）。

1 颱風駛流敏感共軛向量（ADSSV）

為探討颱風路徑預報的敏感，設定驗證區域為由第五代中尺度非線性預報模

式（MM5）在驗證時間之颱風中心周圍 600 km × 600 km 的區域，反應函數為驗證區域中緯向與經向深層平均風（σ層 0.875–0.225，約為 850–250 hPa），如(1)式：

$$R_1 = \frac{\int_{0.875}^{0.225}\int_A u\, dxdyd\sigma}{\int_{0.875}^{0.225}\int_A dxdyd\sigma}, \quad R_2 = \frac{\int_{0.875}^{0.225}\int_A v\, dxdyd\sigma}{\int_{0.875}^{0.225}\int_A dxdyd\sigma} \qquad (1)$$

透過上述反應函數的定義，可移除伴隨颱風之軸對稱氣旋式風場，因此（R_1, R_2）向量表示在驗證時間影響颱風移動路徑之背景平均環境駛流。為了讓共軛梯度的敏感結果與物理直覺能有更進一步的連結，綜合 R_1 與 R_2 對於渦度場（ζ）的梯度敏感性，定義出 ADSSV，並以 MM5 共軛模擬系統（Zou et al. 1997）進行計算：

$$\mathrm{ADSSV} \equiv \left(\frac{\partial R_1}{\partial \varsigma}, \frac{\partial R_2}{\partial \varsigma}\right) \qquad (2)$$

因此，其物理意義為在觀測時間任何渦度的擾動可能影響未來驗證時間之颱風駛流方向及大小。

2 系集變換卡爾曼濾波器（ETKF）

理論是建立於系集卡爾曼濾波器資料同化的數學架構，由模式在觀測時間（t_a）的系集資料建立誤差（相對於系集平均）矩陣 $Z^i(t_a)$。為了使誤差特性考慮例行性觀測網絡及資料同化協方差矩陣，藉由 NAVDAS（Naval Research Laboratory Atmospheric Variational Data Assimilation System）分析誤差協方差矩陣解出變換矩陣 P^i_{OPER} 解出變換矩陣 T^r，如(3)式：

$$\mathbf{T}^{r\mathrm{T}}\mathbf{Z}^i(t_a)^{\mathrm{T}}[\mathbf{P}^i_{\mathrm{OPER}}]^{-1}\mathbf{Z}^i(t_a)\mathbf{T}^r = \mathbf{I} \qquad (3)$$

於是假設在有例行性觀測網情況下，例行性分析誤差協方差可由(4)式求出：

$$\mathbf{P}^r(t_a) = \mathbf{Z}^i(t_a)\mathbf{T}^r\mathbf{T}^{r\mathrm{T}}\mathbf{Z}^{i\mathrm{T}}(t_a) \qquad (4)$$

假設傳播至驗證時間（ ），並藉由放入第個額外測試觀測量計算出訊息協方

差，如(5)式：

$$\mathbf{S}^q(t_v) = \mathbf{Z}^r(t_v)\mathbf{Z}^{r\mathrm{T}}(t_a)\mathbf{H}^{q\mathrm{T}} \times$$
$$[\mathbf{H}^q\mathbf{P}^r(t_a)\mathbf{H}^{q\mathrm{T}} + \mathbf{R}^q]^{-1}\mathbf{H}^q\mathbf{Z}^r(t_a)\mathbf{Z}^{r\mathrm{T}}(t_v) \quad (5)$$

ETKF 敏感性代表的意義是由第(5)式所對應的驗證區域內因第個額外觀測量而造成的預報誤差方差減少值，某網格點之觀測量造成預報誤差方差減少值愈多則視為 ETKF 敏感區域。驗證區域設定為系集平均中心周圍 10° × 10°的方形區域，驗證範數為垂直平均之水平風場。

此研究中計算 ETKF 所使用的系集資料為 THORPEX Interactive Grand Global Ensemble（TIGGE）資料庫提供之 National Centers for Environmental Prediction（NCEP）、European Centre for Medium- Range Weather Forecasts（ECMWF）及 Canadian Meteorological Centre（CMC）三種全球模式，資料輸出解析度為 1° × 1°，垂直層為 850、500 及 200 hPa，選取的參數有水平風場、溫度和比溼。這些系集資料用來建立 ETKF 計算中某個時刻下的系集擾動矩陣 $Z^i(t)$。

為了突顯颱風不對稱結構及環境流場對於預報誤差的影響，此研究發展去除颱風分量之系集資料而計算新的 ETKF 敏感性。結果發現新的 ETKF 比原先計算更能突顯環境流場的特徵；ETKF 與其對應的系集變異比較發現兩者之間具有相異的特徵，此外不同系集資料計算的 ETKF 也呈現獨特的結構，主要受 ECMWF 模式資料所主導。ETKF 對於不同觀測量之敏感性則顯示風場的影響較熱力場來得大，且呈現垂直不同層間特有的綜觀特徵。ETKF 亦掌握影響溫帶變性過程預報誤差之中緯度噴流分布特性。

本方法進一步提供策略性觀測理論與綜觀系統連結的瞭解與應用價值，在作業預報或科學研究基礎上，此策略性觀測的研究除可提供飛行觀測計畫之參考，亦為改善颱風可預報度問題的重要一環。

四、研究成果、進展與特殊貢獻

1. 過去成果

到 2004 年底為止，針對追風計畫所得資料的評估結果顯示，投落送資料對於在颱風路徑預報的改進上，在國外三個主要全球模式均有顯著的成效，而根據三者系集平均的結果的路徑誤差修正可達 20%（Wu et al. 2007a）。廖（2009）針對 2004 至 2006 年的 22 個追風計畫觀測個案進行投落送資料研究，發現同化全部的投落送資料在 12-72 小時顯示平均能夠有效的減少路徑誤差達 78.6 公里，並且改善路徑預報達 26.5%。本研究團隊亦使用 MM5 模式與其伴隨三維變分資料同化模式，來進行有效結合虛擬渦旋與投落送資料的渦旋初始化工作，研究結果顯示透過此結合適當渦旋結構與投落送資料的方法，颱風之路徑及強度預報能力將有明顯提升（Chou and Wu 2008）。

此外，Chou et al. (2011)進一步分析過去 7 年(2003-2009)投落送資料於 NCEP GFS 模式對路徑模擬的影響，根據 42 個研究個案結果顯示，投落送資料可以改善模式 1-5 天的颱風路徑誤差達 10-20%左右。另一方面，投落送也已被用來驗證及校正衛星與雷達遙測資料，藉此提升遙測颱風參數的可信度（Chou et al. 2010）。研究使用 2003-2007 年追風計畫所觀測的 457 枚投落送資料進行比對。研究結果顯示在所有可以校驗的資料中，衛星風的風速誤差為 2.6 m/s、而風向誤差為 17°。研究也指出，由於 QuikSCAT 衛星風場在低於 17 m/s 的量測仍有一定的精確度在，因此可以提供作為分析颱風暴風半徑與決定颱風結構之觀測依據。另外，預期這些衛星風場誤差特性可以使用於資料同化系統中，藉以提昇颱風路徑、強度與結構演變之作業預報與模擬研究。

研究團隊亦提出以共軛模式計算出颱風觀測敏感區域之颱風觀測的創新策略理論（Wu et al. 2007b），以預先評估關鍵的敏感觀測位置，配合飛機航程及航管限制以決定投落送的最適當投落位置。目前已被採用作為新一代國際（如美國國家海洋大氣總署所屬颶風研究中心）颱風飛機觀測之參考。

在飛行資源及時間的限制下，如何決定出「策略性觀測（targeted observing strategy）」，為整體觀測任務中十分重要的環節。研究團隊亦使用及發展最新策略性觀測，包括「系集散落[Deep Layer mean （DLM） wind variance, Aberson

2003]」、「系集轉換卡門濾波器[Ensemble-Transform Kalman Filter （ETKF）, Majumdar et al. 2002]」、「奇異向量（Singular Vector, Peng and Reynolds 2006）」、及「共軛敏感度[Adjoint-Derived Sensitivity Steering Vector （ADSSV）, Wu et al. 2007b]」等，以預先評估關鍵的敏感觀測位置，配合飛機航程及航管限制以決定投落送的最適當投落位置。

颱風路徑改進是追風計畫的核心議題，值得注意的是，到目前為止文獻上並沒有任何探討「颱風路徑預報敏感區域」的相關基礎研究。因此上述之「共軛敏感度」方法是我們延續 Wu et al. (2006)中以「觀測系統模擬實驗（OSSE）」探討颱風渦旋初始化的工作，使用 MM5 adjoint modeling system （Zou et al. 1997）所發展一套新的架構來尋找影響颱風駛流的敏感區域（Wu et al. 2007b）。此方法設計「反應函數（response function，R）」為驗證區域（verifying area）之平均風場，由於模式中限制 R 須為純量，故分別定義 R_1 為 u 場之平均，R_2 為 v 場之平均，亦即(R_1, R_2)代表駛流向量。在利用 MM5 模式進行 36 小時的預報後，以其共軛模式往回進行 36 小時之積分，計算出 R_1、R_2 相對於各個控制變數之梯度，即為颱風駛流相對於各變數之敏感程度。為使實驗結果能得到更清晰的物理解釋，我們定義 Adjoint-Derived Sensitivity Steering Vector（ADSSV）以同時代表 R_1、R_2 相對於渦度的敏感性。換句話說，ADSSV 之大小代表其所在區域渦度改變量對於驗證區域駛流的敏感程度，而 ADSSV 之方向則表示渦度改變所造成的駛流改變方向。

2. 過去一年之進展

- 2010 年 8 月至 10 月追風團隊與美、日合作進行 ITOP(Impact of Typhoons on the Ocean in the Pacific;颱風與海洋交互作用研究）國際實驗。此實驗今年共針對兩個個案：9 月凡那比及 10 月梅姬颱風，結合台灣追風團隊的 Astra 及美國的 C130 飛機共同進行四次(9 月 16、17、18 日及 10 月 17 日）颱風相關的大氣聯合觀測資料，加上美、日等國許多船舶、浮標（buoy）等設備觀測颱風期間海洋方面的資料。此獨特寶貴的資料應可有效支援協助許多大氣與海洋交互作用相關研究的論文。

- 2010 年 8/31 12Z、9/1、9/16、9/17、9/18 及 10/17 00Z 成功完成康伯斯、萊羅克、凡那比及梅姬颱風共六次飛機觀測，目前資料分析及研究正持續進行中。
- Chen et al. (2011)針對 ADSSV 策略性觀測方法進行更深入的探討與驗證。
- 2011 年 6/23 00Z 成功完成米雷（Meari）颱風飛機觀測，目前資料分析及研究正持續進行中。
- 每次飛機觀測投落送資料已即時透過氣象局將資料傳送至 GTS，國際各主要作業及研究單位皆能即時使用投落送量測大氣資料。這些單位包括 JMA, KMA, FNMOC, NCEP, UKMO, ECMWF。
- 在分別由台灣中央氣象局、國科會、美國海軍 ONR(Office of Naval Research)相關經費支持下，主持人正領導國際相關研究團隊成員進行一項颱風觀測策略理論比較及資料同化研究，此亦為世界氣象組織於第六屆國際颱風研討會後所宣示之重點議題之一。美國氣象學會所發行 Monthly Weather Review 已於 2009 年發表刊出相關十數篇由主持人所主導並衍生之國際性論文專刊（Special Collection on Targeted Observations, Data Assimilation, and Tropical Cyclone Predictability）。

3. 計畫特殊貢獻

- 2003 年 9 月至今，追風計畫已針對杜鵑、米勒（以上為 2003 年所觀測）、妮妲、康森、敏督利、梅姬、艾利、米雷、納坦、南瑪都（2004 年）、海棠、馬莎、珊瑚、卡努、龍王（2005 年）、碧利斯、凱米、寶發、桑美、珊珊（2006 年）、帕布、聖帕、韋帕、柯羅莎（2007 年）、風神、卡玫基、鳳凰、如麗、辛樂克、哈格比、薔蜜（2008 年）、蓮花、莫拉克、芭瑪及盧碧（2009 年）、康伯斯、萊羅克、凡那比及梅姬（2010 年）、米雷、梅花及洛克（2011 年）等 42 個颱風完成 55 航次之飛機偵察及投落送觀測任務，總計在颱風上空飛行 291 小時、並成功投擲 905 枚投落送。在觀測的同時，這些寶貴的投落送資料皆及時進入

中央氣象局及世界各國氣象單位之電腦預測系統中，協助預測颱風路徑及分析其周圍結構，如暴風半徑與雨帶結構等。(Wu et al. 2005, 2007a,b)

- 到 2004 年底為止，針對追風計畫所得資料的評估結果顯示，投落送資料平均可以改進美國氣象局、美國海軍及日本氣象廳全球電腦模式 24~72 小時颱風路徑預測準確度達 20%（Wu et al. 2007a）。廖（2009）針對 2004 至 2006 年的 22 個追風計畫觀測個案進行投落送資料研究，發現同化全部的投落送資料在 12-72 小時顯示平均能夠有效的減少路徑誤差達 78.6 公里，並且改善路徑預報達 26.5%。

- 而在美國 NCEP 方面對 2003 年至 2010 年追風個案的影響評估結果顯示， NCEP GFS 模式有無使用投落送資料實驗對模式的結果影響甚大，模擬路徑誤差如圖 1 所示（Chou et al. 2011)，根據 42 個研究個案結果，顯示過去 8 年（2003-2010）投落送資料於 NCEP GFS 模式對路徑模擬的影響，投落送資料可以改善模式 1-5 天的颱風路徑誤差達 10-20％左右。平均而言使得數值模式 24 小時路徑預報改善 11 ％，48 小時路徑預報改善 18 ％，72、96 及 120 小時預報改善均為 22 ％。平均而言，2003-2009 年追風飛機觀測資料，對 NCEP GFS 模式颱風路徑誤差平均總改善程度為 19 ％。另一方面，投落送也已被成功用來驗證及校正衛星與雷達等遙測資料，藉此提升遙測颱風參數的可信度（Chou et al. 2010）。

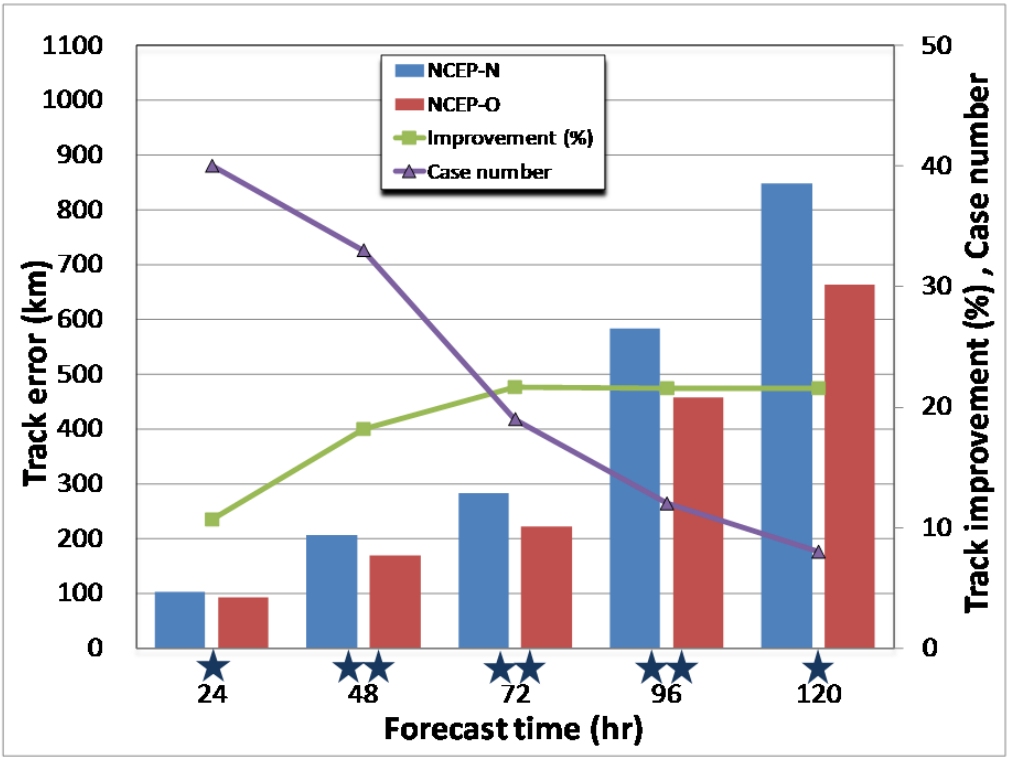


圖 1：2003 至 2010 年追風個案對 NCEP GFS 模式每 24 小時預報路徑誤差比較圖(紫線為觀測個案數；綠線為加入追風觀測資料後模式改善程度）。單（雙）星號表 90 %（95 %）統計顯著性。(引用自 Chou et al. 2011)

➢ 由氣象局提供 2008 年至 2011 年共四年統計 17 個颱風 27 個颱風投落送觀測個案所進行之 TWRF (Typhoon Weather Research and Forecasting)颱風預測模式路徑誤差比較圖（圖 2），可看出這四年加入了追風飛機偵察及投落送觀測資料的數值模擬部份，平均而言使得氣象局 TWRF 數值模式預報改善 7.9 %。因此總體來說，這四年(2008-2011 年）颱風飛機偵察及投落送觀測資料對於氣象局的颱風數值模擬部份，有正面的貢獻。

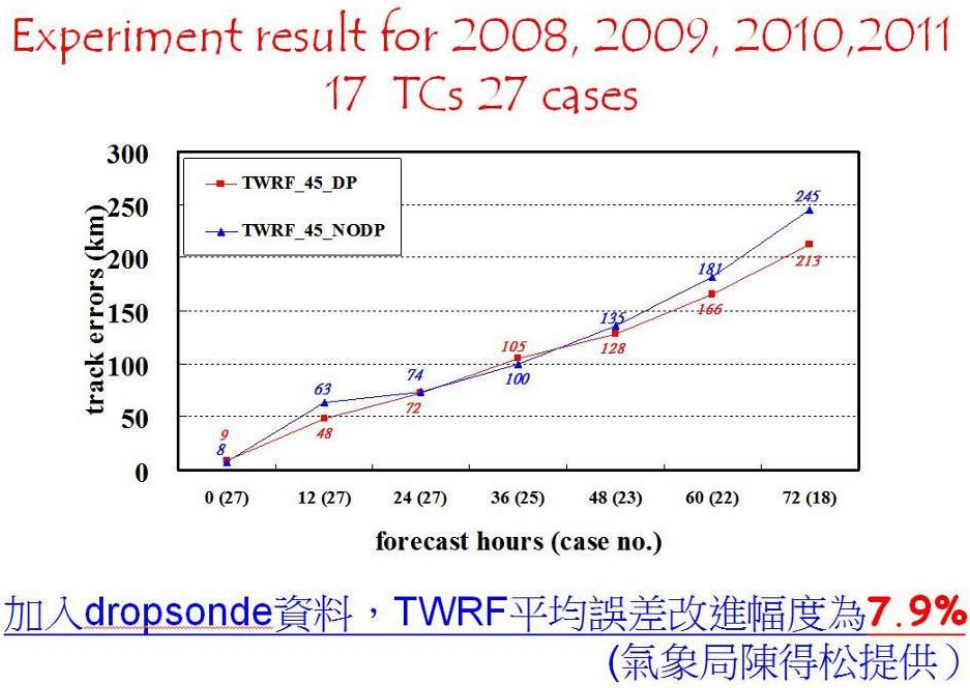


圖 2：中央氣象局統計 2008 年至 2011 年共四年 17 個颱風 27 個個案所進行之數值模式路徑誤差比較圖（紅線為加入追風觀測資料後的誤差，而藍線則為未加入追風觀測資料之對比）。（圖由氣象局陳得松提供）

- 追風研究團隊已經發表數十篇與此研究相關之成果論文(計有 Wu et al.（2004）、Wu et al.（2005）、Wu et al.（2006）、Wu et al.（2007a,b）、Chou and Wu（2008）、Chen et al.（2009）、Yamaguchi et al.（2009）、Wu et al.（2009a,b,c）、Chou et al.（2010）、Chen et al.（2011）、Chou et al.（2011）、Harnisch et al. (2010)、Huang et al. (2011)、Liang et al. (2011)、Lin et al. (2011)、Weissmann et al.（2011）、Wu et al. (2011a,b)、Yen et al. (2011)、黃，2006、周，2007、廖，2009、連，2009、陳，2009 等 27 篇)。此外，追風科學團隊在 2006 至 2011 年中參與國際研討會發表之相關論文，總計有 55 篇追風計畫相關研究成果論文發表。並於 2009 年美國氣象學會所發行 Monthly Weather Review 國際著名學術期刊中發表相關十數篇由主持人所主導並衍生之國際性論文專刊（Special Collection on “Targeted Observations, Data Assimilation, and Tropical Cyclone

Predictability”）。

- 追風計畫深受國際矚目，成功地大幅提昇台灣颱風研究之國際能見度，不僅為西北太平洋颱風飛機觀測先驅，日本亦於 2008 年跟進並與我合作進行突破性觀測，東亞地區台、日兩國飛機同時進行觀測也為颱風之策略性觀測及可預報度研究開創歷史新頁。

- 追風先驅實驗亦成功建置國內使用飛機進行其他特殊天氣/氣候/大氣環境之重要觀測平台，另如：高空閃電（追電計畫；追風計畫觀測同時架設與攜帶低感光攝影器材記錄/量測對流層頂的颱風閃電訊號，此觀測與成功大學之紅色精靈研究團隊合作進行，結果可提供與福爾摩莎二號衛星資料相互比對）、西南氣流（追雨計畫，在中央氣象局與國科會支持下，已於 2007 年 6 月啟動，由台大周仲島教授及中大廖宇慶教授成功完成先期實驗，並於 2008 年 6 月進行國際 TIMREX 實驗）及空氣污染與雲物理觀測實驗之平台等。

- 追風研究團隊提出以共軛模式計算出颱風觀測敏感區域之颱風觀測的創新策略理論（Wu et al. 2007b），已被採用作為新一代國際（如美國國家海洋大氣總署所屬颶風研究中心）颱風飛機觀測之參考，申請人並獲邀針對此颱風觀測策略專題於國際研討會進行回顧演講及論文撰寫。在分別由台灣國科會、美國 NSF 及 ONR 經費支持下，追風計畫主持人吳俊傑正領導國際相關研究團隊成員進行一項颱風觀測策略理論比較及資料同化研究。美國氣象學會所發行 Monthly Weather Review 已於 2009 年發表刊出相關十數篇由主持人所主導並衍生之國際性論文專刊（Special Collection on Targeted Observations, Data Assimilation, and Tropical Cyclone Predictability）。

- 追風計畫受到國際氣象研究單位相當高的評價，為世界氣象組織 T-PARC 實驗 2008 年亞洲觀測實驗重要的一環，並與東亞各國及美國共同合作推動 T-PARC 實驗。T-PARC 實驗針對位於台灣與日本琉球群島附近的颱風，進行同時有四架飛機（台灣的 Astra、日本、韓、德的 Falcon 與美國的 P-3、C-130）的觀測實驗。T-PARC 實驗於 2008 年 8、9 兩月已順利圓滿完成，共針對如麗、辛樂克、哈格比、薔蜜等四個侵台

颱風完成超過 25 架次國際聯合的飛機觀測，而十次的任務中有多達六次參與國際的聯合飛機觀測。

- 2010 年 8 月至 10 月追風團隊與美、日合作進行 ITOP(Impact of Typhoons on the Ocean in the Pacific;颱風與海洋交互作用研究）國際實驗。此實驗今年共針對兩個個案：9 月凡那比及 10 月梅姬颱風，結合台灣追風團隊的 Astra 及美國的 C130 飛機共同進行四次(9 月 16、17、18 日及 10 月 17 日）颱風相關的大氣聯合觀測資料，加上美、日等國許多船舶、浮標（buoy）等設備觀測颱風期間海洋方面的資料。此獨特寶貴的資料應可有效支援協助許多大氣與海洋交互作用相關研究的論文。

- 科普及社會回饋層面：有鑑於追風計畫之學術影響及科普議題性，行政院新聞局於 2005 年以追風計畫為議題之一，拍攝一部名為「台灣 e 化、美麗 e 島」的國家形象紀錄片，此紀錄片於 2007 年 4 月獲得美國休士頓國際影展「科技紀錄片類」之銀牌獎。另外美國國家地理頻道已於 2009 年 6 月起在世界一百多個國家播放長度為一小時之「追風計畫」科學研究紀錄片，對國際社會及科普有重要的宣示及教育影響。

五、今年度計畫進度

今年度本委託計畫目前進度整理如下：

1. 今年（2011）1 月主持人吳俊傑參加在美國西雅圖舉行的「American Meteorological Society 第 91 屆年會」。會議中主持人口頭提報，題目為「Concentric Eyewall Formation in Typhoon Sinlaku (2008) - Integration of T-PARC Observations Based on EnKF Data Assimilation」，此追風相關結果獲得在場學者相當多的討論與重視。

2. 今年 4 月 1 日於氣象局舉行飛航路線設計策略說明會（會議紀錄及簡報如附錄 1），討論的議題為(1)飛機觀測(颱風與劇烈天氣)的策略；(2)CWB 參與飛行航路制定的成員與流程；(3)如何於模式中最有效率運用投落送資料。

3. 今年 4 月 22 日 0146 至 0334 UTC 完成 2011 年度測試飛行（圖 3、圖 4），投擲 4 枚 RD94（圖 5），功能正常，並第一時間透過衛星電話撥接回傳氣象局。機上 3 名台大人員：林博雄、盧濟明及林和駿；3 名漢翔人員：吳經文、曹家祥及徐雲龍。

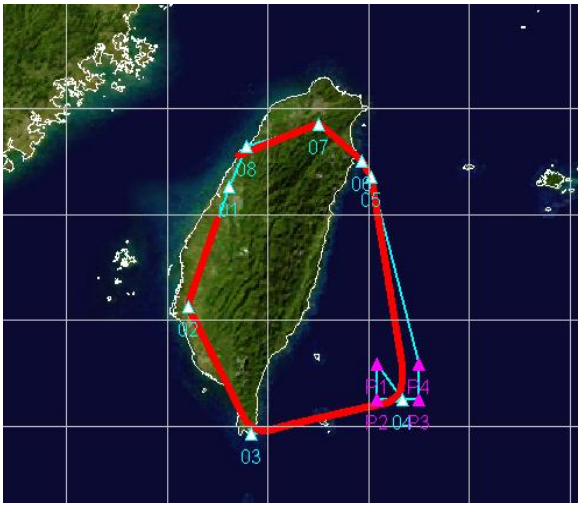


圖 3：測試飛行路線圖

圖 4：2011 年 4 月 22 日 0146 UTC 測試飛行前(左起 AIDC:吳經文、曹家祥及徐雲龍;NTU:林博雄、盧濟明及林和駿)。

Close-up view of the pressure, temperature, and humidity sensors in the RD94 dropsonde

圖 5：2011 年 4 月 22 日 0146 UTC 測試飛行前(左起 AIDC:吳經文、曹家祥及徐雲龍;NTU:林博雄、盧濟明及林和駿)。

4. 今年 5 月 18 日完成安全講習，參加人數 26 員(CWB 人員 7 名,空軍氣象聯隊 3 員,台灣大學則包含主持人吳俊傑、林博雄等 16 員)。講習內容：（1）Astra 飛行安全教育(AIDC 林福璋教官；圖 6、圖 7)；（2）颱風與西南氣流飛行觀測作業流程(NTU 林博雄教授；圖 8；附錄 2)；（3）Aspen 編碼訓練(NTU 助理盧濟明；附錄 3)。

圖 6：飛行安全教育。

圖 7：飛行安全教育。

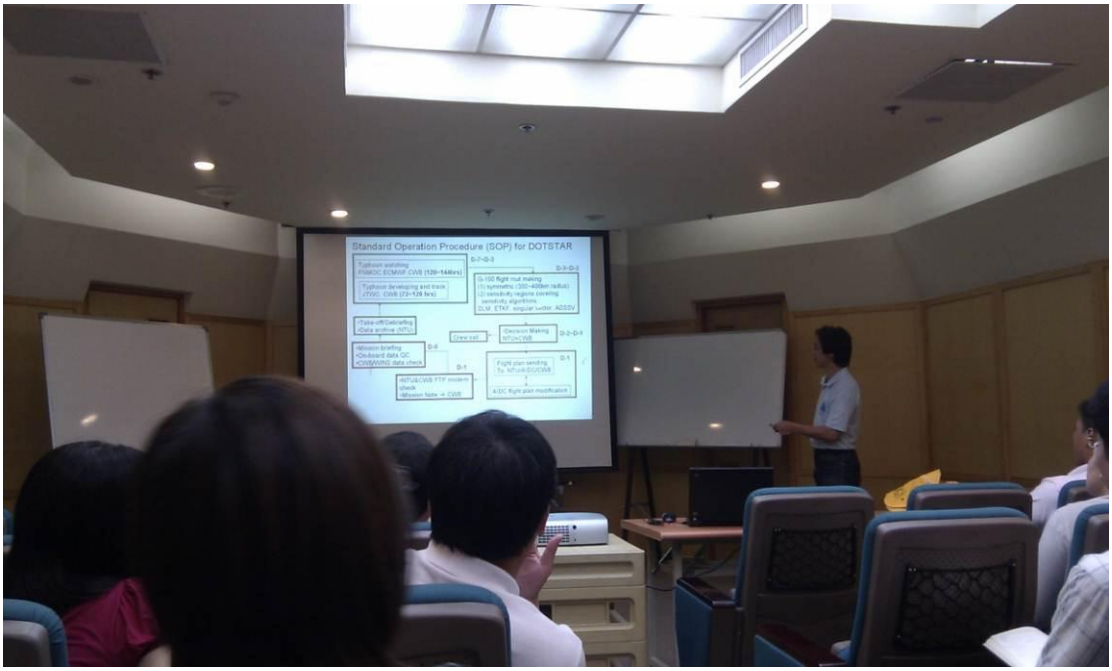


圖 8：颱風與西南氣流飛行觀測作業流程

5. 2011 年 5 月主持人吳俊傑參加在韓國濟州島，由 KORDI(Korean Ocean Research and Development Institute)舉辦的「西北太平洋氣旋與海洋交互作用國際研討會」(International Workshop on Tropical Cyclone-Ocean Interaction in the Northwest Pacific)研討會。會議中主持人口頭提報，題目為「Integrating Atmospheric Observations of ITOP in a High-Resolution Mesoscale Model Based on EnKF Data Assimilation」，與多名知名熱帶氣象學者有熱烈討論，並且會中許多大氣相關各領域的學者均提出相當多的肯定與深具科學性的想法與建議，成果豐碩。

6. 今年正式執行追風任務之前，分別於 5 月 7 日形成今年第 1 號颱風艾利（AERE；圖 9）、5 月 22 日形成第 2 號桑達(Songda)颱風（圖 10）， 6 月 11 日生成今年第 3 號颱風莎莉佳（SARIKA；圖 11），還有 6 月 21 日生成今年度第 4 號颱風海馬(Haima；圖 12)，追風團隊均已事先完成飛行觀測之詳盡規畫，但由於這些颱風均不會對台灣造成直接威脅，因此於每個颱風完成規畫之後，主持人吳俊傑及林博雄均與氣象局預報中心鄭明典主任、科技中心主任程家

平及衛星中心陳嘉榮主任進行意見交流，充分討論之後，決定不對這幾個颱風實施追風觀測。

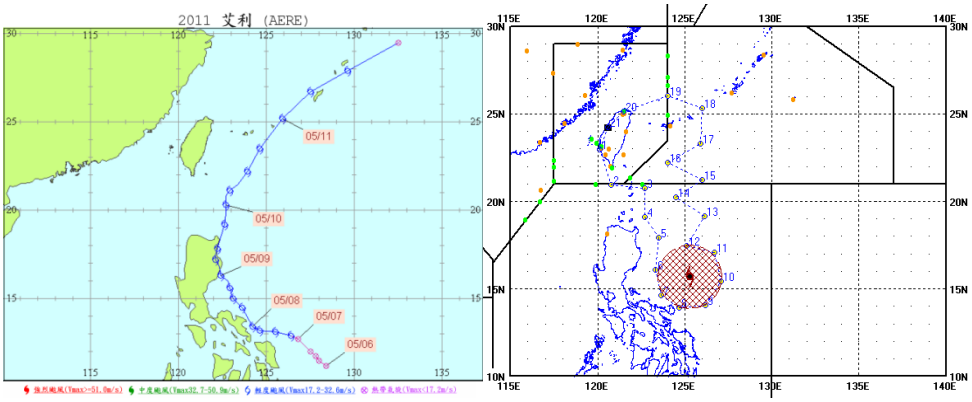


圖 9：艾利颱風路徑圖（引用自 CWB）及觀測規畫圖

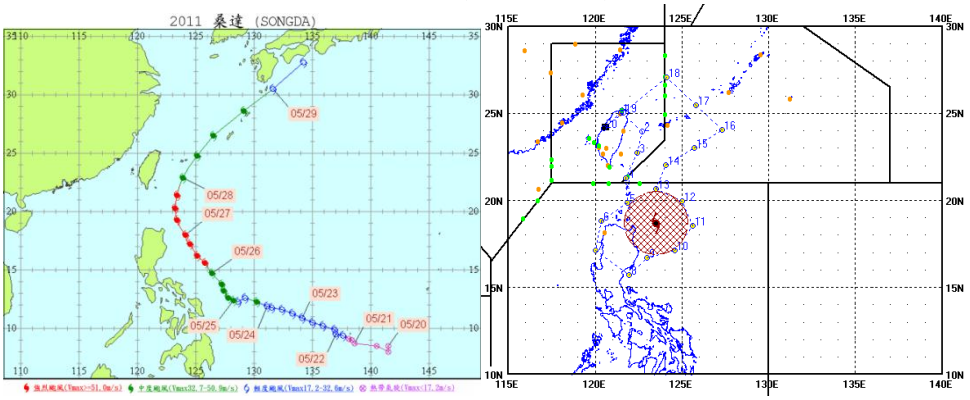


圖 10：桑達颱風路徑圖（引用自 CWB）及觀測規畫圖

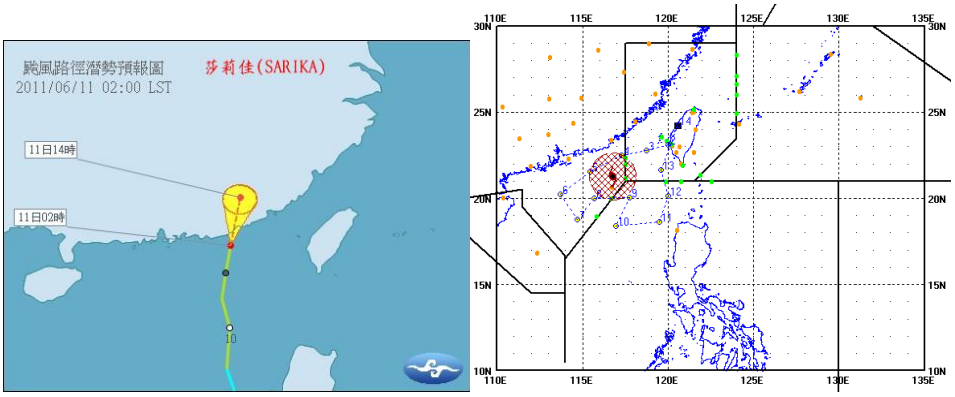


圖 11：莎莉佳颱風路徑圖（引用自 CWB）及觀測規畫圖

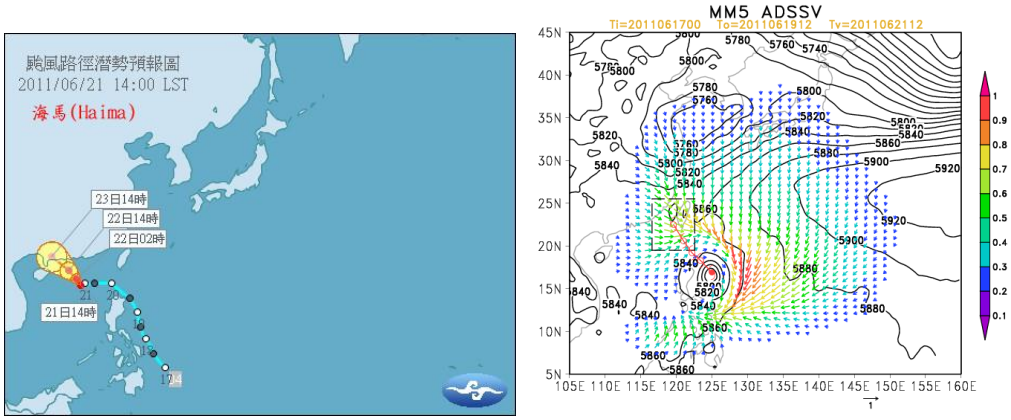


圖 12：海馬颱風路徑圖（引用自 CWB）及 ADSSV 觀測敏感區計算圖

7. 另外 6 月 22 日 14 時鵝鑾鼻東南方 1280 公里海面，今年第 5 號颱風米雷（Meari）生成，並以每小時 19 公里速度朝西北西方向行進，追風團隊與氣象局溝通商討之後，決定於 23 日凌晨 5 時啟動今年首度的追風觀測（圖 13）。參與飛行觀測的人員為氣象局黃康寧及台大盧濟明、吳華富三員（圖 14），共投擲 16 枚投落送，成功傳回米雷颱風各層之氣象相關資料（圖 15、圖 16）。執行米雷颱風飛機觀測相關討論請見附錄 7。

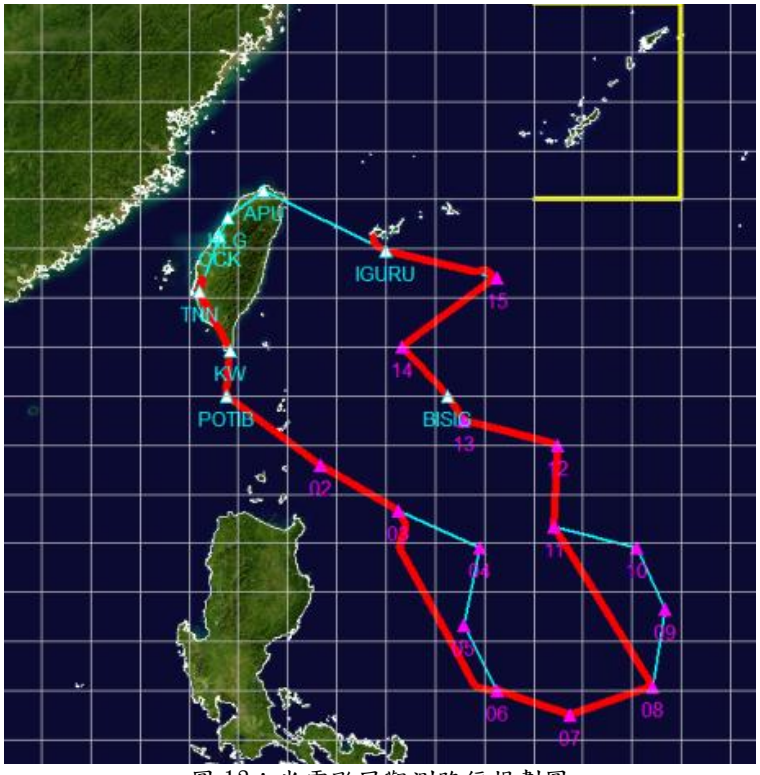


圖 13：米雷颱風觀測路徑規劃圖

圖 14：米雷颱風飛機觀測人員（左起 CWB 黃康寧、台大吳華富）

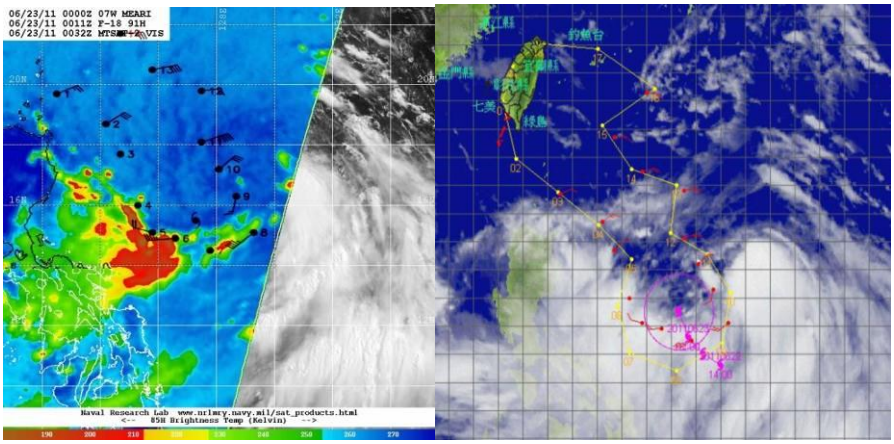


圖 15：DOTSTAR 所觀測之 925 hPa 風場資料疊加 SSMIS 91H 衛星微波資料及氣象局 QPESUMS 系統顯示米雷（Meari）颱風之飛行觀測路徑、投落送投落點及量測風場(925 hPa)，以及紅外線衛星雲圖。

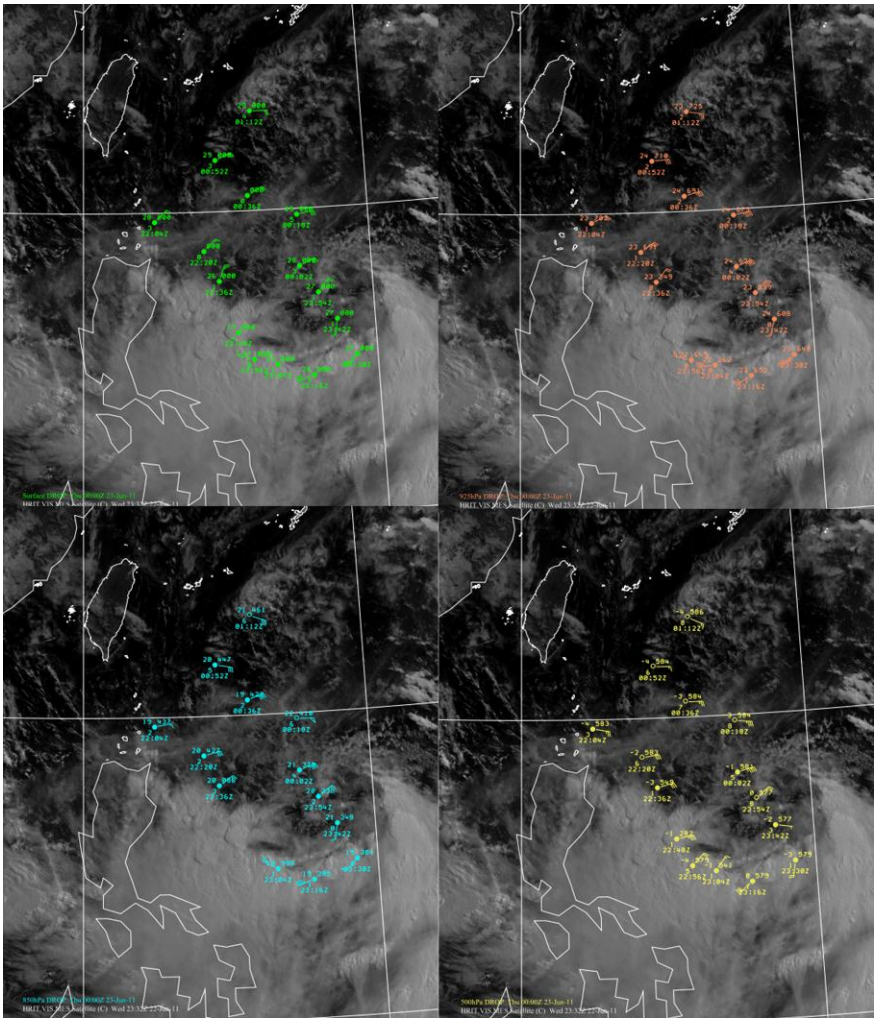
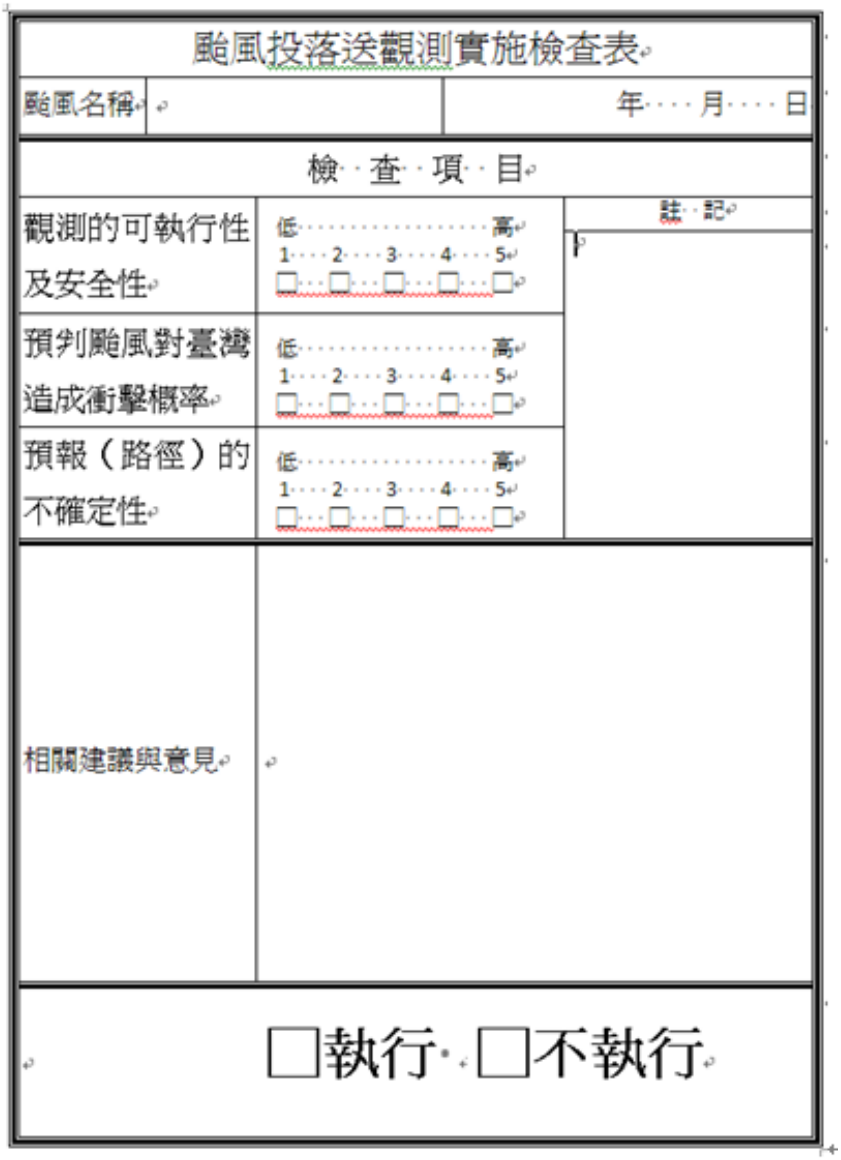


圖16：氣象局WINS系統顯示DOTSTAR所觀測之地面、925、850及500 hPa風場資料疊加可見光衛星雲圖。

8. 7 月 12 日上午 11 時於氣象局二樓會議室進行此計畫之期中提報，報告目前研究計畫之進度，互相討論相關成果，並於會中商討針對接近台灣地區之颱風，計畫執行單位與 CWB 應建立「觀測執行決策參考表」(圖 17；附錄 4) 之商討機制，以決定是否執行飛機觀測之流程與依據。

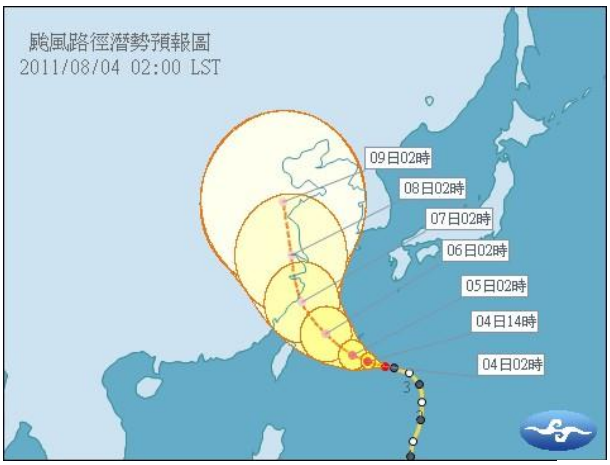


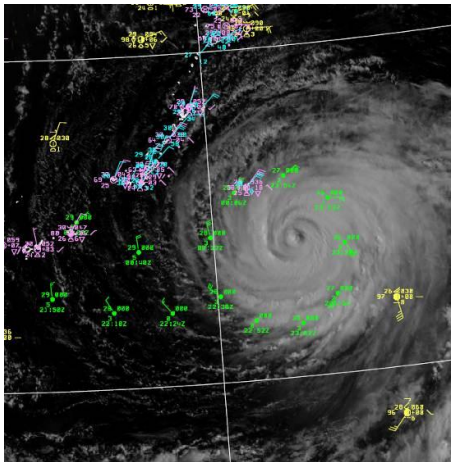
颱風投落送觀測實施檢查表

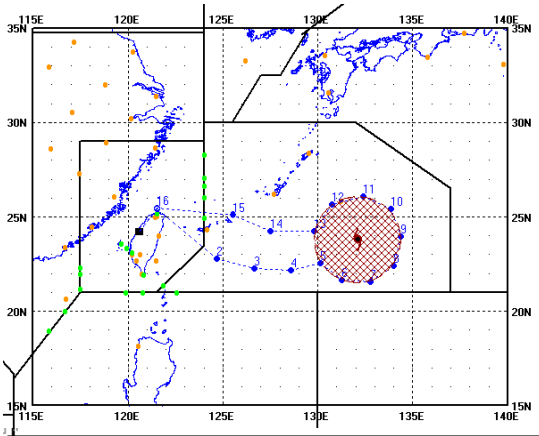
颱風名稱		年 月 日
檢查項目		
觀測的可執行性及安全性	低 高 1 2 3 4 5 □ □ □ □ □	註記
預判颱風對臺灣造成衝擊概率	低 高 1 2 3 4 5 □ □ □ □ □	
預報（路徑）的不確定性	低 高 1 2 3 4 5 □ □ □ □ □	
相關建議與意見		
□執行 □不執行		

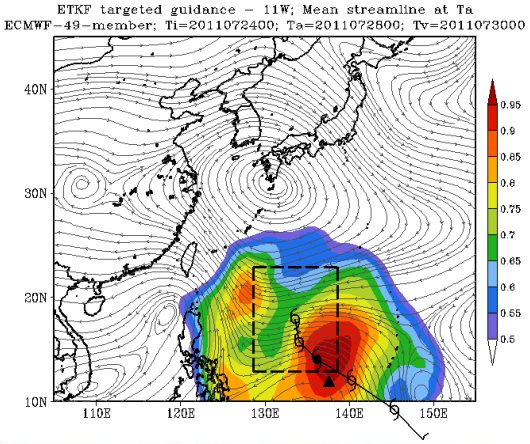
圖17：觀測執行決策參考表

9. 第二次目標為梅花颱風，並於 8 月 3 日 4 點 49 分執行追風觀測，共飛行 5 小時 16 分。參與飛行觀測的人員為氣象局陳得松及台大盧濟明、許誌尤三員，共投擲 14 枚投落送，成功傳回梅花颱風各層之氣象相關資料（觀測規畫及相關觀測人員及結果請見圖 18）。執行梅花颱風飛機觀測相關討論請見附錄 8。









颱風投落送觀測執行決策參考表

颱風名稱	梅花颱風（Muifa）
觀測時間	2011/08/03/0000 UTC, 08/04/0000 UTC, 08/05/0000 UTC

檢查項目	低 1 2 3 4 高 5	註記
觀測的可執行性及安全性(飛行時間< 6hr, 避開呂宋島陸地)	4	目前 ECMWF 模式預測從台灣北部海面通過
預判颱風對臺灣造成衝擊概率	2	
預報（路徑）的不確定性	4	

07/31/1200UTC 各作業單位模式預測

■執行 □不執行

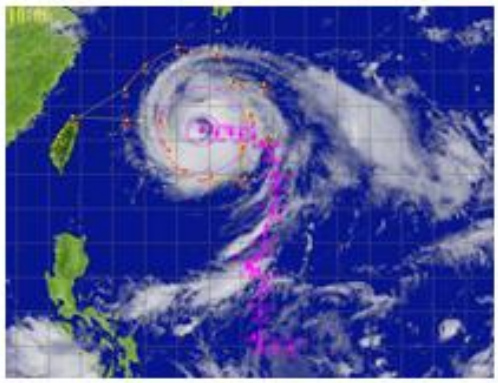


圖18：梅花颱風觀測規畫及相關觀測人員及結果。

10. 8 月 4 日則進行梅花颱風第二次觀測任務，參與飛行觀測的人員為氣象局程家平主任及台大盧濟明、丁嘉雋三員，凌晨 4 點 49 分起飛，共飛行 5 小時 51 分鐘。一共投擲 15 枚投落送，成功傳回梅花颱風各層之氣象相關資料。總計對梅花颱風共執行兩次飛行任務，共 11 小時 7 分鐘，投擲 29 枚投落送。（觀測規畫及相關觀測人員及結果請見圖 19、20 及 21）

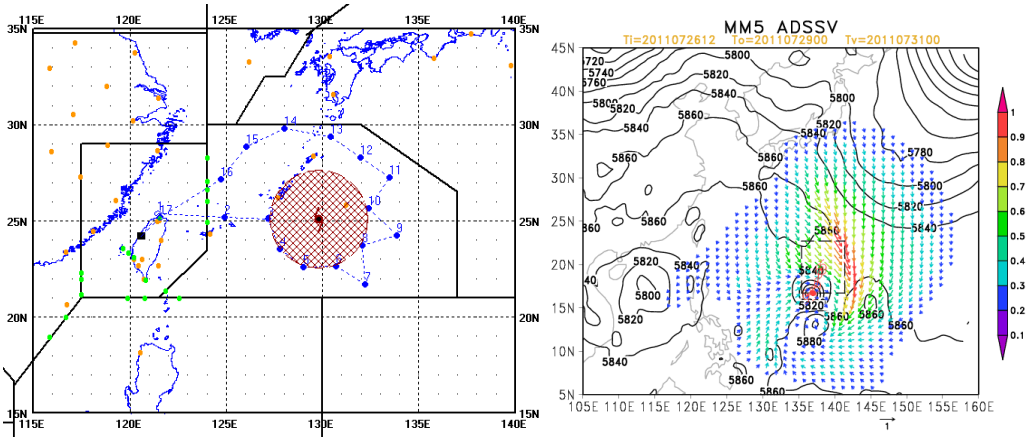


圖19：梅花颱風第二次觀測規畫及ADSSV觀測敏感區分析。

圖20：梅花颱風第二次觀測人員（左起漢翔吳經文、CWB程家平主任）。

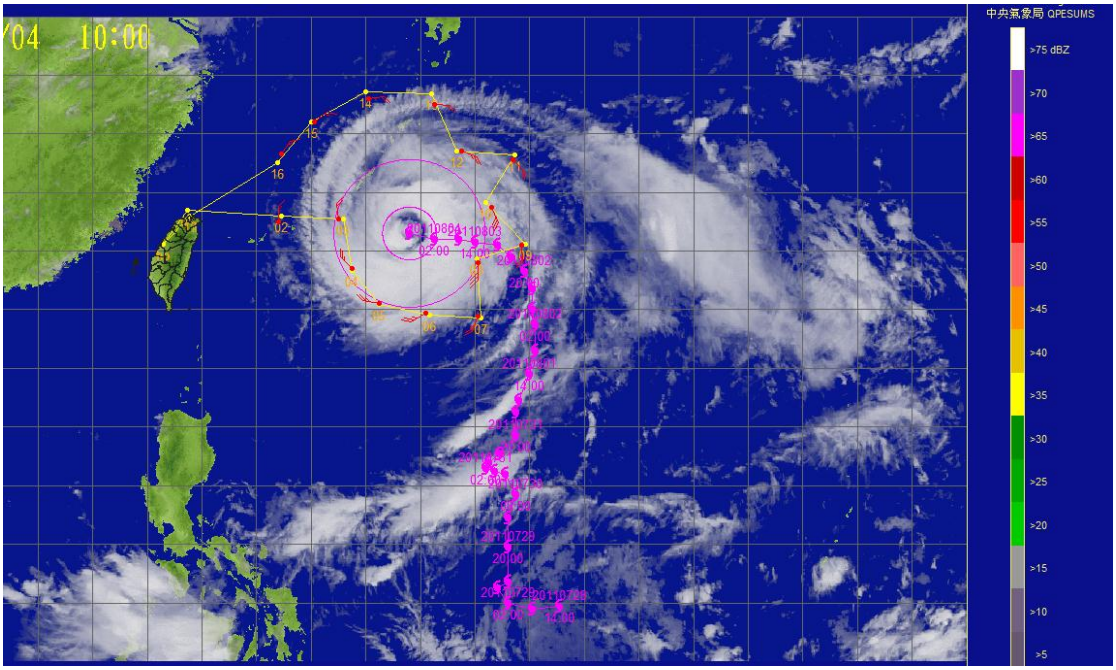


圖21：第二次梅花颱風觀測-Qpesums圖。

11. 今年唯一侵台的颱風南瑪都（Nanmadol）8 月 23 日 20 時於菲律賓東方海面生成，初期往西移動，隨後轉為偏西北移動，27 日其中心通過菲律賓呂宋島東北角邊緣，轉為偏北北西移動。颱風中心於 29 日 4 時 20 分左右由臺東縣大武附近登陸，13 時左右在臺南附近出海，進入臺灣海峽，緩慢向西北移動，31 日 8 時於臺灣海峽減弱為熱帶性低氣壓。

針對此颱風追風團隊與氣象局 24 日上午依照最新預測路徑研判，溝通商討之後，決定於 26 日淩晨及 27 日淩晨分別實施兩次飛機觀測任務，但到了 25 日時卻發現颱風路徑一路偏西，若依照此最新颱風位置（圖 23），則飛機將穿越菲律賓領空且施放投落送的地點會接近菲律賓陸地，有任務執行及飛航安全的疑慮，故與氣象局討論後決定此次任務予以取消。南瑪都颱風飛機觀測相關討論請見圖 24 及附錄 9。

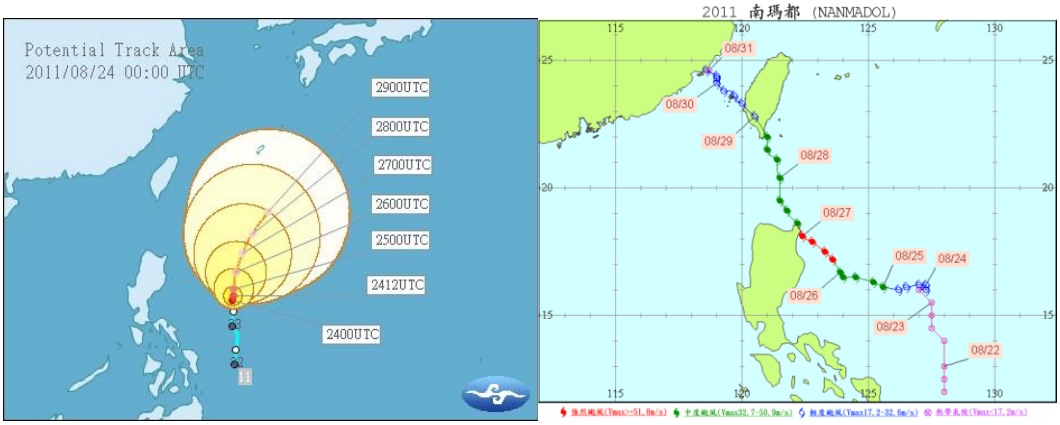
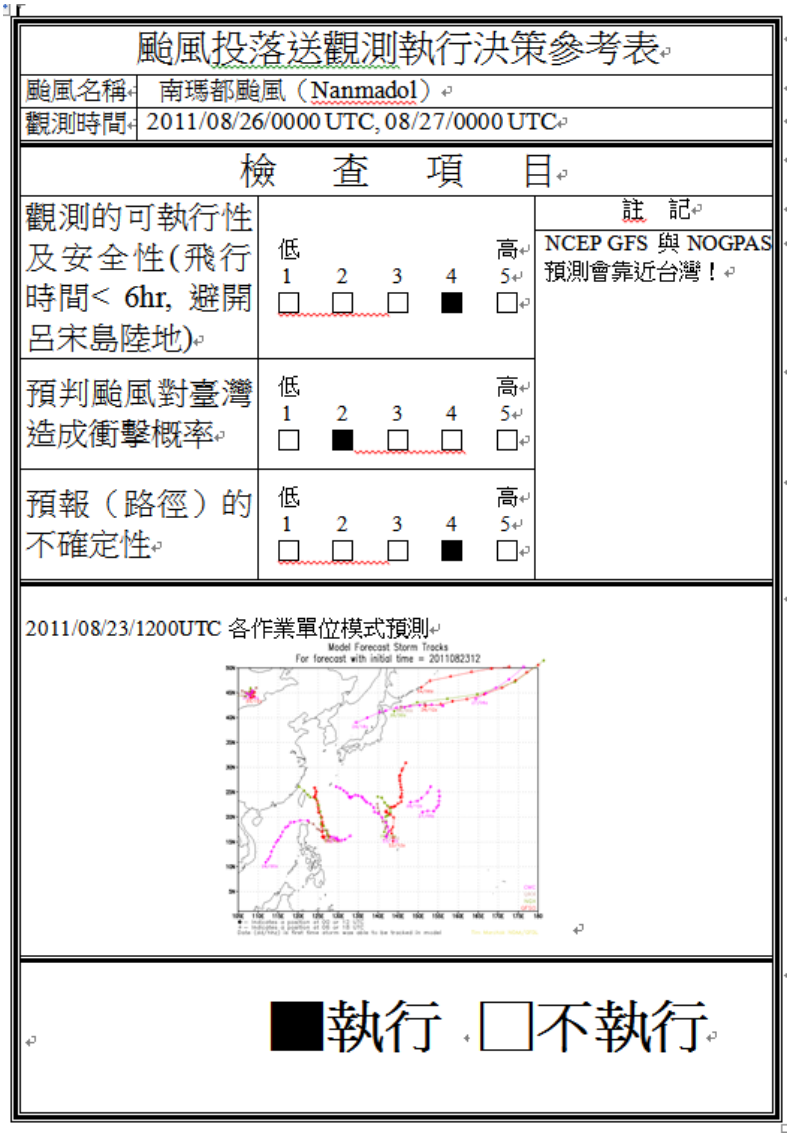


圖23：南瑪都颱風預測與實際路徑。



颱風投落送觀測執行決策參考表

颱風名稱	南瑪都颱風（Nanmadol）
觀測時間	2011/08/26/0000 UTC, 08/27/0000 UTC

檢查項目	低 1 2 3 4 高 5	註記
觀測的可執行性及安全性(飛行時間< 6hr, 避開呂宋島陸地)	□ □ □ ■ □	NCEP GFS 與 NOGPAS 預測會靠近台灣！
預判颱風對臺灣造成衝擊概率	□ ■ □ □ □	
預報（路徑）的不確定性	□ □ □ ■ □	

2011/08/23/1200UTC 各作業單位模式預測

■執行 □不執行

圖24：南瑪都颱風觀測執行決策參考表。

今年第四次，也是最後一次觀測，則是針對 9 月 18 日的洛克颱風，投擲 14 枚投落送。參與飛行觀測的人員為台大盧濟明及張譯心兩員，凌晨 4 點 52 分起飛，共飛行 4 小時 45 分鐘。一共投擲 14 枚投落送，成功傳回颱風各層之氣象相關資料（圖 25、26）。執行洛克颱風飛機觀測相關討論請見附錄 10。

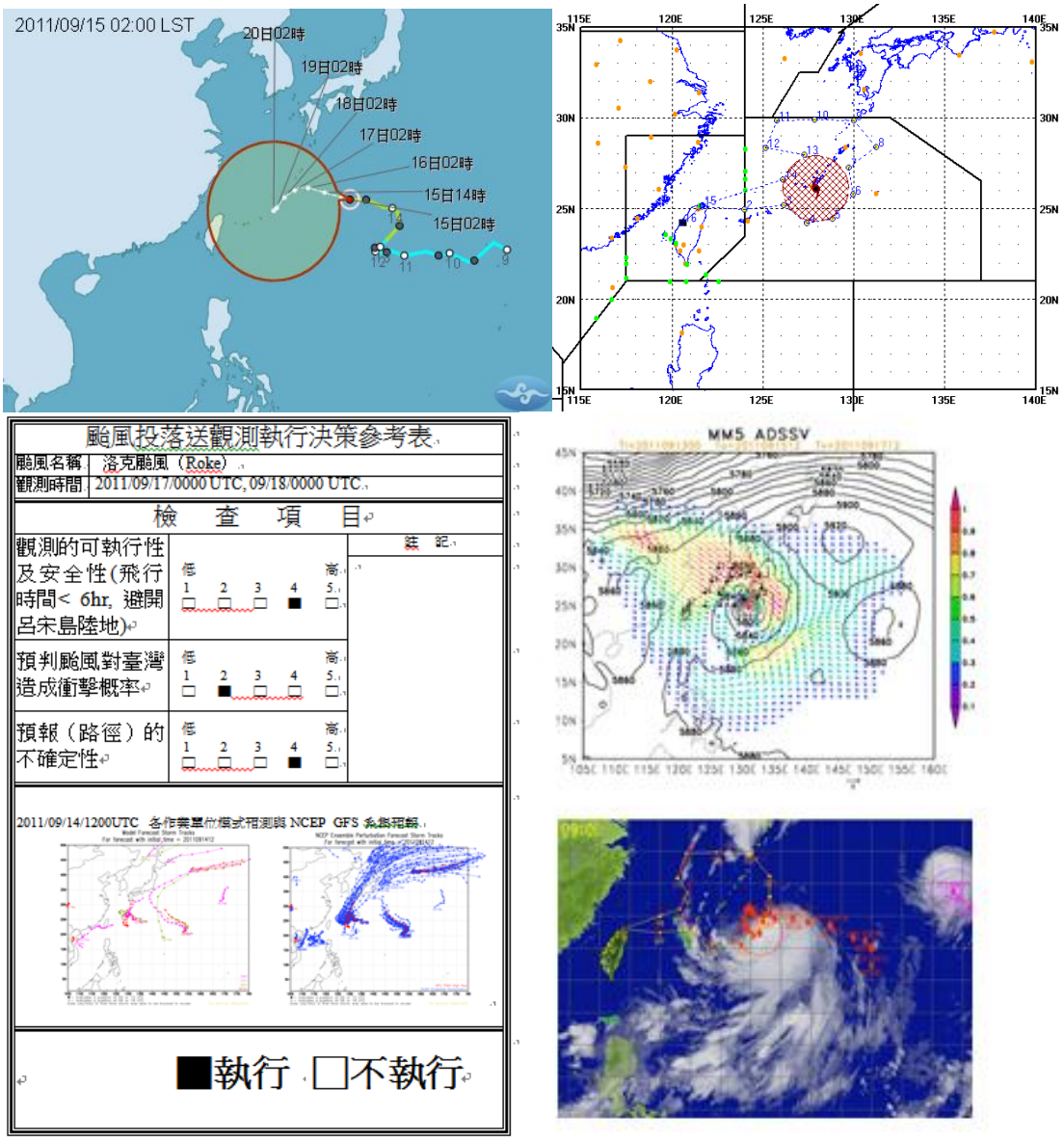


圖25：洛克颱風觀測規畫及相關觀測結果。

圖26：洛克颱風觀測人員。

因此今年共針對三個颱風執行四次飛機觀測任務，總飛行時數為 21 小時 32 分鐘，總共投擲 59 枚投落送，成功傳回米雷、梅花及洛克颱風各層之氣象相關資料。總之，今年度的「追風計畫」已圓滿結束，所有資料也均及時進行氣象局數值模式系統運作，相關資料也正逐步利用於更深入的科學議題探討與後續研究。

六、結論

台大大氣科學系吳俊傑教授所主持的研究「颱風投落送觀測資料於實際颱風預報作業上的應用與效益分析」，首要目標即是以全球衛星定位式投落送進行飛機觀測，又名追風計畫（Wu et al. 2005）所觀測的資料，持續在投落送颱風觀測、分析及模擬同化的研究上發展，對於颱風資料及颱風模式同化之改進，並協助進行投落送資料分析、影響評估及颱風預報作業上的應用與效益分析。追風計畫使用 ASTRA 飛機與機載垂直大氣探空系統（AVAPS）設備，以每架次 5-6 小時時間直接飛到颱風周圍 43000 英呎的高度投擲投落送，以取得颱風周圍關鍵區域的大氣環境資料：溫度、溼度、氣壓以及風速等。在觀測的同時，這些寶貴的投落送資料皆即時進入中央氣象局及世界各國氣象單位之電腦預測系統中，協助預測颱風路徑及分析其周圍結構，如暴風半徑與雨帶結構等。

追風計畫在 2003-2011 年的研究成果中，總共針對 42 個颱風執行 55 次觀測任務，飛機累計飛行時數超過 291 小時並拋投 905 枚投落送。投落送資料對於在颱風路徑預報的改進上，在國外三個主要全球模式均有顯著的成效，而根據三者系集平均的結果的路徑誤差修正可達 20％（Wu et al. 2007a）。廖（2009）針對 2004 至 2006 年的 22 個追風計畫觀測個案進行投落送資料研究，發現同化全部的投落送資料在 12-72 小時顯示平均能夠有效的減少路徑誤差達 78.6 公里，並且改善路徑預報達 26.5%。

此外，Chou et al.(2011)進一步分析過去 7 年（2003-2009）投落送資料於 NCEP GFS 模式對路徑模擬的影響，根據 42 個研究個案結果顯示，投落送資料可以改善模式 1-5 天的颱風路徑誤差達 10-20％左右。

由氣象局提供 2008 年至 2011 年共四年統計 17 個颱風 27 個颱風投落送觀測個案所進行之 TWRF(Typhoon Weather Research and Forecasting)颱風預測模式路徑誤差比較圖，可看出這四年加入了追風飛機偵察及投落送觀測資料的數值模擬部份，平均而言使得氣象局 TWRF 數值模式預報改善 7.9 ％。因此總體來說，這四年（2008-2011 年）追風飛機偵察及投落送觀測資料對於氣象局的颱風數值模擬部份，有相當正面的貢獻。

本委託計畫延續追風計畫過去所累積之研究成果，藉追風觀測所取得颱風周圍最敏感地區的大氣環境詳盡資料，持續在投落送颱風觀測、分析及模擬同化的研究上發展，對於颱風資料及颱風模式同化之改進，並協助進行投落送資料分析、影響評估及颱風預報作業上的應用與效益分析。除可增進對颱風結構的瞭解外，亦能有效改進颱風路徑、強度及風雨分布預報。預期此研究計畫成果將為颱風研究及颱風監測與預報帶來突破。

致謝

感謝中央氣象局支持，此研究計畫得以順利推展。特別感謝氣象局預報中心、衛星中心、科技中心及資訊中心相關配合人員鼎力協助。亦同時感謝國科會等相關單位與計畫的充分支持與配合。追風計畫研究團隊的努力及國內大氣科學界相關研究專家學者的參與合作，乃是此計畫成功之重要推手。

參考文獻

吳俊傑、郭鴻基、林博雄、葉天降、陳台琦、洪景山、劉清煌、林沛練，2003:「颱風重點研究」暨「侵台颱風之 GPS Dropsonde 飛機偵察觀測實驗」。中華民國氣象學會會刊。第四十四期，1-14。

徐光前，2004：侵台颱風之飛機偵察及投落送觀測實驗之資料分析與驗證。國立台灣大學大氣科學系，碩士論文。

黃葳芃，2006：投落送資料對颱風路徑模擬評估研究--康森及米雷颱風個案分析。國立台灣大學大氣科學系，博士論文。

廖苡珊，2009：DOTSTAR 策略性觀測投落送資料對於颱風路徑模擬影響研究。國立台灣大學大氣科學系，碩士論文。

Aberson, S. D., and J. L. Franklin, 1999: Impact on hurricane track and intensity forecasts of GPS dropwindsonde observations from the first-season flights of the NOAA Gulfstream-IV Jet Aircraft. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 421-427.

Aberson, S. D., 2003: Targeted observations to improve operational tropical cyclone track forecast guidance. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1613–1628.

Atlas, R., R. N. Hoffman, S. M. Leidner, J. Sienkiewicz, T. W. Yu, S. C. Bloom, E. Brin, J. Ardizzone, J. Terry, D. Bungato and J. C. Jusem 2001：The effects of marine winds from scatterometer data on weather analysis and forecasting. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **9**, 1965-1990.

Burpee, R. W., J. L. Franklin, S. J. Lord, R. E. Tuleya, and S. D. Aberson, 1996: The impact of Omegadropwindsondes on operational hurricane track forecast models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 925-933.

Chen, S.-G., S. J. Majumdar and C.-C. Wu, 2010: Properties of the Ensemble Transform Kalman Filter adaptive sampling strategy for tropical cyclones. Proc., 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, AZ.

Chen, S.-G., C.-C. Wu, J. H. Chen, and K. H. Chou, 2011: Validation and interpretation of Adjoint - Derived Sensitivity Steering Vector as targeted

observation guidance. *Mon. Wea. Rev.* **139**, 1608-1625.

Chou, K.-H., and C.-C. Wu, 2008: Development of the typhoon initialization in a mesoscale model - Combination of the bogused vortex and the dropwindsonde data in DOTSTAR. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 865-879.

Chou, K.-H., C.-C. Wu, P.-H. Lin, and S. Majumdar, 2010: Validation of QuikSCAT wind vectors by dropwindsonde data from Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance Near the Taiwan Region (DOTSTAR), *J. Geophys. Res.*, **115**, D02109, doi:10.1029/2009JD012131.

Chou, K.-H., C.-C. Wu, P.-H. Lin, S. D. Aberson, M. Weissmann, F. Harnisch, and T. Nakazawa, 2011: The impact of dropwindsonde observations on typhoon track forecasts in DOTSTAR and T-PARC. *Mon. Wea. Rev.* **139**, 1728-1743.

Dunion, J. P., and C. S. Velden, 2002: Application of surface-adjusted GOES low-level cloud-drift dinds in the environment of atlantic tropical cyclones. part I: methodology and validation. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1333–1346.

Dunion, J. P., S. H. Houston, C. S. Velden, and M. D. Powell, 2002: Application of surface-adjusted GOES low-level cloud-drift winds in the environment of atlantic tropical cyclones. part II: integration into surface wind analyses. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1347–1355.

Elsberry, R. L., and P. A. Harr, 2008: Tropical cyclone structure (TCS08) field experiment science basis, observational platforms, and strategy. Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 44, 1-23.

Etherton, B., C.-C. Wu, S. J. Majumdar, and S. D. Aberson, 2006: A comparison of the targeting techniques for 2005 Atlantic tropical cyclones. Preprints, 27th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Amer. Meteor. Soc.

Franklin, J. L., S. E. Fruer, J. Kaplan, and S. D. Aberson, 1996: Tropical cyclone motion and surrounding flow relationships: searching for Beta Gyres in Omega dropwindsonde datasets. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 64-84.

Franklin, J. L., M. L.Black, and K. Valde, 2003: GPS dropwindsonde wind profiles in hurricanes and their operational implications. *Wea. Forecasting*, **18**, 32–44.

Hock, T. F., and J. L. Franklin, 1999: The NCAR GPS dropwindsondes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 407-420.

Huang, W. P., C.-C. Wu, P.-H. Lin, and K.-H. Chou, 2006: The impact of the dropwindsonde data from DOTSTAR on the prediction of Typhoon Conson (2004) in numerical models. Preprint, 27th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, Amer. Meteor. Soc.

Huang, Y.-H., M. T. Montgomery, and C.-C. Wu, 2011: Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008) – Part II: Axisymmetric dynamical processes. *J. Atmos. Sci.* (accepted) (SCI)

Jung, B.-J., H. M. Kim, F. Zhang, and C. C. Wu, 2010: Impact of targeted dropsonde observations on the track forecast for SINLAKU(200813) using Ensemble Kalman Filter. Proc., 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, AZ.

Lin, I-I, M.-D. Chou, and C.-C. Wu, 2011: Warm ocean eddy's impact on Typhoon Morakot (2009) – A preliminary study from satellite observations and numerical modeling. *Terr. Atmos. Ocean. Sci,*. **22**, 661-671. doi: 10.3319/ TAO.2011.08.19.01(TM)

Liang, J., L. Wu, X. Ge, and C.-C. Wu, 2011: Monsoonal influence on Typhoon Morakot (2009). Part II: Numerical study. *J. Atmos. Sci.* (in press)

Lien, G.-Y., C. C. Wu, J. H. Chen, and F. Zhang, 2010: Assimilation of tropical cyclone track and structure based on the ensemble Kalman filter (EnKF). Proc., 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, AZ.

Majumdar, S. J., C. H. Bishop, B. J. Etherton, and Z. Toth, 2002: Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part II: Field program implementation. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1356-1369.

Nakazawa, T., P. Harr, C. C. Wu, and M. Weissmann, 2010: Targeted observation for tropical cyclone during T-PARC 2008. Proc., 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, AZ.

Peng, M. S., and C. A. Reynolds, 2006: Sensitivity of tropical cyclone forecasts as revealed by singular vectors. *J. of Atmos. Sci.*, **63**, 2508–2528.

Powell, M. D., P. J. Vickery, and T. A. Reinhold, 2003：Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclone. *Nature*, **422**, 279-283.

Soden, B. J., C. S. Velden, and R. E. Tuleya, 2001: The impact of satellite winds on experimental GFDL hurricane model forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 835-852.

Tuleya, R. E., and S. J. Lord, 1996: The impact of dropwindsonde data on GFDL hurricane model forecasts using global analyses. *Wea. and Fore.*, **12**, 307-323.

Weissmann, M., F. Harnisch, S. Rahm, T. Nakazawa, C. C. Wu, S. D. Aberson, Y. H. Kim, K. Yamashita, and Y. Ohta, 2010: The influence of special T-PARC observations on typhoon track and mid-latitude forecasts. Proc., 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, AZ.

Weissmann M., F. Harnisch, C.-C. Wu, P.-H. Lin, Y. Ohta, K. Yamashita, Y.-K. Kim, E.-H. Jeon, T. Nakazawa, and S. Aberson, 2011: The influence of dropsondes on typhoon track and mid-latitude forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 908-920. (SCI)

Wu, C.-C., and K. A. Emanuel, 1995a: Potential vorticity diagnostics of hurricane movement. Part I: A case study of Hurricane Bob (1991). *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 69-92.

Wu, C.-C., and K. A. Emanuel, 1995b: Potential vorticity diagnostics of hurricane movement. Part II: Tropical Storm Ana (1991) and Hurricane Andrew (1992). *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 93-109.

Wu, C.-C., and Y. Kurihara, 1996: A numerical study of the feedback mechanisms of hurricane-environment interaction on hurricane movement from the

potential vorticity perspective. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 2264-2282.

Wu, C.-C., and H.-J. Cheng, 1999: An observational study of environmental influences on the intensity changes of Typhoons Flo (1990) and Gene (1990). *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 3003-3031.

Wu, C.-C., and Y.-H. Kuo, 1999: Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 67-80.

Wu, C.-C., M. Bender, and Y. Kurihara, 2000a: Typhoon forecasts with the GFDL hurricane model: Forecast skill and comparison of predictions using AVN and NOGAPS global analyses. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 777-788.

Wu, C.-C., H.-C. Kuo, H.-H. Hsu, and B J.-D. Jou, 2000b: Weather and climate research in Taiwan: Potential application of GPS/MET data. *Terr. Atmos. and Oceanic Sci.*, **11**, 211-234.

Wu, C.-C., 2001: Numerical simulation of Typhoon Gladys (1994) and its interaction with Taiwan terrain using GFDL hurricane model. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1533-1549.

Wu, C.-C., T.-H. Yen, Y.-H. Kuo, and W. Wang, 2002: Rainfall simulation associated with Typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: the topographic effect. *Wea. and Forecasting*, **17**, 1001-1015.

Wu, C.-C., T.-S. Huang, W.-P. Huang, and K.-H. Chou, 2003a: A new look at the binary interaction: Potential vorticity diagnosis of the unusual southward movement of Tropical Storm Bopha (2000) and its interaction with Supertyphoon Saomai (2000). *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1289-1300.

Wu, C.-C., K.-H. Chou, H.-J. Cheng, and Y. Wang, 2003b: Eyewall contraction, breakdown and reformation in a landfalling typhoon. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (17), 1887, doi:10.1029/2003GL017653.

Wu, C.-C., P. H. Lin, K.S. Chou, T. C. Yeh, M. D. Cheng, S. D. Aberson, S. Majumdar, M. Peng, and C. Retnolds, 2004a: Targeted observation strategies

in DOTSTAR. Proc., First THORPEX International Science Symposium, World Meteorological Organization, 5-10 Dec., Montreal, Quebec, Canada.

Wu, C.-C., T.-S. Huang, and K.-H. Chou, 2004b: Potential vorticity diagnosis of the key factors affecting the motion of Typhoon Sinlaku (2002). *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2084-2093.

Wu, C.-C., P.-H. Lin, S. Aberson, T.-C. Yeh, W.-P. Huang, K.-H. Chou, J.-S. Hong, G.-C. Lu, C.-T. Fong, K.-C. Hsu, I-I Lin, P.-L. Lin, C.-H. Liu, 2005: Dropsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR): An overview. *Bulletin of Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 787-790.

Wu, C.-C., K.-H. Chou, Y. Wang, and Y.-H. Kuo, 2006: Tropical cyclone initialization and prediction based on four-dimensional variational data assimilation. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2383–2395.

Wu, C.-C., 2006: Targeted observation and data assimilation in track prediction. Proc. Sixth Int. Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-VI), WMO TMRP 72, San Jose, Costa Rica, WMO, 409 – 423.

Wu, C.-C., K.-H. Chou, P.-H. Lin, S. Aberson, M. S. Peng, and T. Nakazawa, 2007a: The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasting in DOTSTAR. *Wea. and Forecasting*, **22**, 1157-1176.

Wu, C.-C., J.-H. Chen, P.-H. Lin, and K.-H. Chou, 2007b: Targeted observations of tropical cyclones based on the adjoint-derived sensitivity steering vector. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 2611-2626.

Wu C.-C., S.-G. Chen, J.-H. Chen, K.-H. Chou, and P.-H. Lin, 2009a: Interaction of Typhoon Shanshan (2006) with the Mid-latitude Trough from both Adjoint-Derived Sensitivity Steering Vector and Potential Vorticity Perspectives. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 852-862.

Wu, C.-C., J.-H. Chen, S. J. Majumdar, M. S. Peng, C. A. Reynolds, S. D. Aberson, R. Buizza, M. Yamaguchi, S.-G. Chen, T. Nakazawa, and K.-H. Chou, 2009b: Inter-comparison of targeted observation guidance for tropical cyclones in the

North western Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2471-2492.

Wu, C.-C., P. H. Lin, K. H. Chou, S. D. Aberson, S. Majumdar, C. A. Reynolds, M. S. Peng, T. Nakazawa, P. A. Harr, H. M. Kim, M. Weissmann, J. H. Chen, and S. G. Chen**,** 2010a**:** Targeted observation and its impact in DOTSTAR and T-PARC. Proc., 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, AZ.

Wu, C.-C., G. Y. Lien, J. H. Chen, and Y. H. Huang, 2010b: Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008) – Part I: Assimilation of T-PARC data based on the Ensemble Kalman Filter (EnKF). Proc., 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, AZ.

Wu, C.-C., G.-Y. Lien, J.-H. Chen, and Fuqing Zhang, 2010: Assimilation of Tropical Cyclone Track and Structure Based on the Ensemble Kalman Filter (EnKF). *J. Atmos. S*ci., **67**, 3806-3822.

Wu, C.-C., Y.-H. Huang, and G.-Y. Lian, 2011: Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008) – Part I: Assimilation of T-PARC data based on the Ensemble Kalman Filter (EnKF). *Mon. Wea. Rev.* (in revision)

Wu, C.-C., R. Zhan, Y. Lu, and Y. Wang, 2011: Internal variability of the dynamically downscaled tropical cyclone activity over the western North Pacific by the IPRC Regional Climate Model. J. Climate, (accepted)

Yamaguchi, M., T. Iriguchi, T. Nakazawa, and C.-C. Wu, 2009: An observing system experiment for Typhoon Conson (2004) using a singular vector method and DOTSTAR data. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2801-2816.

Yen, T.-H., C.-C. Wu, G.-Y. Lien, 2011: Rainfall simulations of Typhoon Morakot with controlled translation speed based on EnKF data assimilation. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **22**, 647-660. doi: 10.3319/ TAO.2011.07.05.01(TM)