

交通部中央氣象局

委託研究計畫 (期末) 成果報告

99 年颱風投落送飛機觀測

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-99-6M-01

執行期間：99 年 4 月 9 日 至 99 年 12 月 31 日

計畫主持人：林博雄、吳俊傑、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 99 年 12 月 05 日

政府研究計畫（期末）成果報告摘要資料表

計畫中文名稱	99 年颱風投落送飛機觀測		
計畫編號	MOTC-CWB-99-6M-01		
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	99 年度	執行期間	99.04.09~99.12.31
本期經費(單位:千元)	13590 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(%)
	13590	13590	100%
研究人員	計畫主持人	協同主持人	
	林博雄	吳俊傑	
		周昆炫	
頁數	55	使用語言	中文
中英文關鍵詞	<p>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)、T-PARC (THORPEX Pacific Asian Regional Campaign)、颱風與海洋交互作用觀測實驗(ITOP; Impact of Typhoons on the Ocean in the Pacific)</p>		
研究目的(簡述研究計畫之目的及意義,約300字。)	<p>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、FNMOCC 以及 JMA,並同化至 CWB, NECP(AVN/ GFDL), FNMOCC(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;增進對颱風動力,特別是邊界層的了解(Wu et al. 2005, BAMS)。其成果更可作為我國及各國未來擬定飛機觀測策略的重大指標,亦有助於推動策略性颱風觀測(targeted observation)。</p>		

研究成果
(說明研究之具體成果，約800~1000字，並附一張圖說明。)

從民國 92 年至今，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（以上為 2004 年）、海棠、馬莎、珊瑚、卡努、龍王（以上為 2005 年）、碧利斯、凱米、寶發、桑美、珊珊（以上為 2006 年）、帕布、聖帕、韋帕、柯羅莎（以上為 2007 年）、風神、卡玫基、鳳凰、如麗、辛樂克、哈格比、薔蜜（以上為 2008 年）、蓮花、莫拉克、芭瑪及盧碧（以上為 2009 年）、康伯斯、萊羅克、凡那比及梅姬（2010 年）等 39 個颱風完成 51 航次之飛機偵察及投落送觀測任務(圖 1)，總計在颱風上空飛行 270 小時、並成功投擲 846 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 2)。

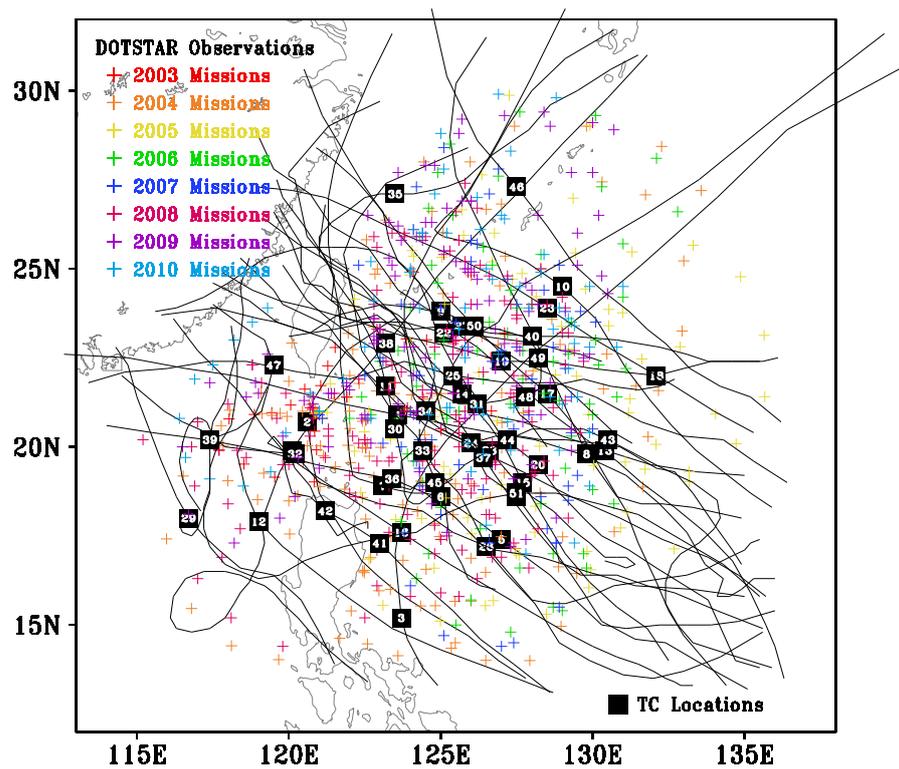


圖 1：2003 年至 2010 年 DOTSTAR 觀測任務圖。

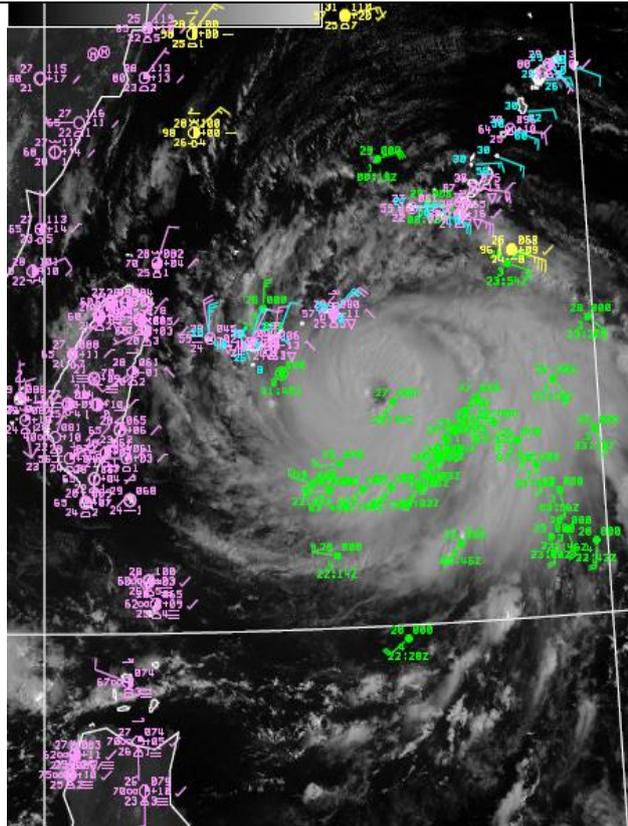


圖 2：氣象局 WINS 系統所顯示凡那比颱風地面之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

Experiment result for 2008, 2009, 2010 14 TCs 23 cases

9.3 % average improvement for track forecast

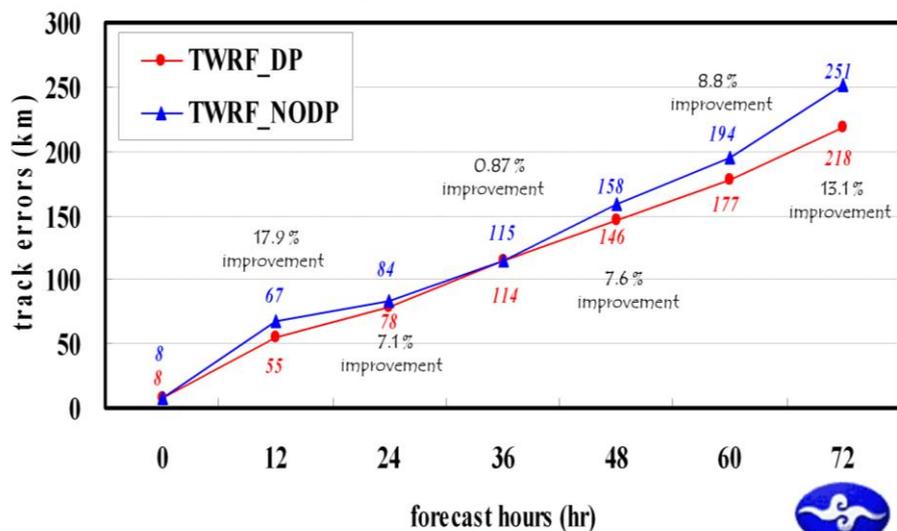


圖 3：中央氣象局統計 2008 年至 2010 年共三年 14 個颱風 23 個個案所進行之數值模式路徑誤差比較圖（紅線為加入追風觀測資料後的誤差，而藍線則為未加入追風觀測資料之對比）。（圖片由氣象局陳得松等提供）

	<p>另外由中央氣象局提供 2008 年至 2010 年共三年統計 14 個颱風 23 個追風觀測個案所進行之 TWRF(Typhoon Weather Research and Forecasting)颱風預測模式路徑誤差比較圖(圖 3)，可看出這三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，平均而言使得數值模式 12 小時路徑預報改善 17.9 %，24 小時預報改善 7.1 %，而 36 小時預報則改善較微，僅 0.87 %，48 小時預報改善 7.6 %，另 60 小時預報為 8.8 %，72 小時路徑預報之平均改善程度為 13.1 %，誤差值由 251 公里降為 218 公里。因此總的來說，這三年（2008-2010 年）加入了追風飛機偵察及投落送觀測資料（14 個颱風、23 個飛機觀測個案）的數值模擬部份，平均而言使得數值模式平均改善為 9.3 %。</p> <p>追風研究團隊已經在國際學術期刊發表十數篇成果論文(計有 Wu et al. (2004) , Wu et al. (2005) , Wu et al. (2006) , Wu et al. (2007a) , Wu et al. (2007b) , Chou and Wu (2008) , Yamaguchi et al. (2009) , Wu et al. (2009a) , Wu et al. (2009b) , Wu et al. (2009c) , Chen et al. (2009) , Chen et al. (2010a) 、Chen et al. (2010b) , Chou et al. (2010a) , Chou et al. (2010b) , Harnisch et al. (2010) , Weissmann et al. (2010) , Wu et al. (2010) 等 18 篇)。此外，追風科學團隊分別於 2006、2008 及 2010 年參加美國氣象學會所舉辦之第 27、28 及 29 屆熱帶氣象與颶風研討會，會中分別有有 8 篇、4 篇及 9 篇追風計畫相關研究成果論文進行發表。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” ）。</p>
<p>具體落實 應用情形 (說明成 果之價值</p>	<p>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前 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</p>

與貢獻、技術移轉、應用推廣等情形，約 300 字。）	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.(2010b)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，投落送也已被成功用來驗證及校正衛星與雷達等遙測資料 (Chou et al. 2010a)。
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)

99 年度政府部門科技計畫期末報告

計畫名稱：99 年颱風投落送飛機觀測

林博雄¹、吳俊傑¹、周昆炫²

¹ 國立台灣大學大氣科學系

² 中國文化大學

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。國科會於 2002 年 8 月起提供相當經費，進行由台大大氣科學系吳俊傑教授所主持的「颱風重點研究」(National Priority Typhoon Research)。首要研究項目是以「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。追風計畫是一跨部會、臺美兩國跨國合作、並由我國研究人員主導的國際研究計畫，並與美國國家海洋大氣總署所屬颶風研究中心 (NOAA/HRD)、國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 等共同合作。此計畫使台灣在國際颱風研究領域中進入新的里程碑，扮演西北太平洋及東亞地區颱風研究的領導角色。

此計畫使用 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，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。以期對於颱風分析與路徑預報上提供可貴的資料；增進對颱風動力，特別是邊界層的了解 (Wu et al. 2005, BAMS)。其成果更可作為我國及各國未來擬定飛機觀測策略的重大指標，亦有助於推動策略性颱風觀測 (targeted

observation)。

另外今年 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。此獨特寶貴的資料相信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，其成效將會在未來一、二年內逐漸呈現出來。

從民國 92 年至今，追風計畫已針對杜鵑、米勒 (以上為 92 年所觀測)、妮妲、康森、敏督利、梅姬、艾利、米雷、納坦、南瑪都 (以上為 93 年)、海棠、馬莎、珊瑚、卡努、龍王 (以上為 94 年)、碧利斯、凱米、寶發、桑美、珊珊 (以上為 95 年)、帕布、聖帕、韋帕、柯羅莎 (以上為 96 年)、風神、卡玫基、鳳凰、如麗、辛樂克、哈格比、薔蜜 (以上為 97 年)、蓮花、莫拉克、芭瑪、盧碧 (以上為 98 年)、康伯斯、萊羅克、凡那比及梅姬 (99 年) 等 39 個颱風完成 51 航次之飛機偵察及投落送觀測任務，總計在颱風上空飛行 270 小時、並成功投擲 846 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 (對颱風停班停課之決策具關鍵性影響)。到民國 93 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前 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%。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.(2010b)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，投落送也已被成功用來驗證及校正衛星與雷達等遙測資料 (Chou et al. 2010a)。

今年 (民國 99 年) 5 月主持人吳俊傑參加在美國亞利桑那州 Tucson 舉行的「第 29 屆颶風及熱帶氣象研討會」，會議主辦單位為 American Meteorological Society。此會議為每兩年舉行一次之全世界主要颶風相關研究會議。此次會議中有相當多的颶風方面獨特議題受到重視，其中針對 DOTSTAR 及 T-PARC 之專題討論，會中學者亦提出許多對 targeted observation 及其對颶風強度、結構影響的看法與建議。

此次主持人吳俊傑共有 16 篇論文發表，其中有 9 篇與追風計畫有關，並在會中進行兩次口頭報告，題目分別為「Targeted observation and its impact in DOTSTAR and T-PARC」及「Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008) – Part I: Assimilation of T-PARC data based on the Ensemble Kalman Filter (EnKF)」。內容為探討在 DOTSTAR 及 T-PARC 中所獲得投落送資料以及用此資料來改進颶風眼牆模擬的研究。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。

在今年 6 月 25 日主持人吳俊傑參加由美國地球物理學會 (American Geophysical Union) 在台北舉辦之「2010 年西太平洋地球物理會議暨臺灣地球科學聯合學術研討會」(2010 Western Pacific Geophysics Meeting)，並在會中發表「Concentric eyewall formation in typhoon Sinlaku (2008) – Integration of T-PARC observant Based on ENKF data assimilateon.」

7 月 05-09 日主持人吳俊傑參加 2010 亞洲大洋洲地球科學學會(AOGS, Asia Oceania Geosciences Society) 在印度海得拉巴(Hyderabad)舉辦之「2010 年 AOGS 年會」，並在會中發表「Concentric eyewall formation in typhoon Sinlaku (2008) – Integration of T-PARC observant Based on ENKF data assimilateon.」

主持人吳俊傑於 9 月 5 日至 7 日參加於中國上海舉行的「兩岸豪雨與颶風合作研究期中成果研討會」報告「Targeted Observation, Data Assimilation, and Tropical Cyclone Predictability」。獲得許多正面肯定與迴響。

11 月 15-20 日主持人參加世界氣象組織 (World Meteorological Organization) 於

非洲法屬留尼島舉行之 IWTC-VII (Seventh International Workshop on Tropical Cyclones) 研討會，並於 16 日會議中報告「Targeted observations for TC trackforecasting」主題。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。

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，而氣象局的付出與投入亦能符合社會大眾最迫切的需求，如此學界與氣象局將創造雙贏的局面。此外，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。我們感謝中央氣象局之充分支持，讓這一個重大的學術及作業研究計畫持續發揚光大，進而造福民生。

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 National Science Council (NSC) of Taiwan places a great premium on typhoon research, and therefore funds the "National Priority Typhoon Research" project for three years (from August 1, 2002 to July 31, 2005), especially including the field experiment, "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, 51 missions have been flown for 39 typhoons, with 846 dropwindsondes released. It has been shown that the dropsonde data improve the 12-72-h NCEP GFS track prediction by about 20% (Wu et al. 2007a). In addition, the field experiment, THORPEX/PARC (The Observation System Research and Predictability Experiment Pacific-Asian Regional Campaign, T-PARC), including TCS08 (Tropical Cyclone Structure 2008), TH08 (Typhoon Hunter 2008) and DOTSTAR, has been completed from August to September in 2008. It is believed

that the DOTSTAR and T-PARC experiments have made a significant contribution to the international typhoon research community. In 2010, DOTSTAR also participated the international collaboration with ITOP (Impact of Typhoons on the Ocean in the Pacific) project. The project is expected to yield breakthroughs in typhoon research, forecasting, and observation when it is completed.

The foci of the DOTSTAR project in the 2010 year are:

Conducting the DOTSTAR observations

Realtime analysis of the DOTSTAR data on CWB WINS system

Collaboration of DOTSTAR with the Central Weather Bureau and other agencies

Research on the impact of the DOTSTAR data to numerical models

Research on the tropical cyclone initialization procedure related to dropwindsonde

International collaboration with ITOP project

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

目 錄

成果報告摘要資料表.....	1
中文摘要.....	6
英文摘要.....	10
目 錄	12
一、前言.....	13
二、研究目的及意義.....	14
三、研究方法.....	15
四、具體成果.....	25
五、結論.....	48
致謝	50
參考文獻.....	51

一、前言

颱風是自然界最具破壞力的天氣系統，也是台灣最重要的災變天氣，但其所帶來的雨量亦是台灣地區最重要的水資源之一。以民國 84 年為例，許多颱風過門而不入，未帶來足夠降水，使得全省水庫貯水量持續下降，因此造成缺水及限水的問題，從而嚴重影響農耕及經濟民生。另一方面，民國 84 年的賴恩颱風於 9 月 22 日掠過恆春半島外海，因為路徑預報的輕微誤差以及暴風半徑的減小，使台灣大部分地區民眾度過一個少風、少雨的停班停課日，也使國家損失一天的經濟生產（近百億台幣損失）。而民國 85 年的賀伯颱風，雖然中央氣象局有相當不錯的路徑預報，但因雨量過大及防災體系運作並未落實，導致台灣承受了近二十年來最大的天然災害（超過三百億台幣的直接損失）。民國 87 年的瑞伯颱風與芭比絲颱風、89 年的象神颱風、90 年的桃芝及納莉颱風也都重創台灣，造成重大人員傷亡及經濟與農業損失，而 91 年台灣地區旱象亦因納克利及雷馬遜颱風侵台而解除、93 年的敏督利（七二水災）及艾利颱風也帶來嚴重災情，另外，94 年連續三個強烈颱風（海棠、泰利、龍王）登陸台灣也造成累計高達百億台幣的農業災害損失。

另外近三年的颱風，如 97 年的卡玫基颱風由於其旺盛的西南氣流而重創南台灣，而 98 年直撲台灣而來的莫拉克颱風，其空前超大豪雨更造成台灣近 30 年來最為慘重的人員傷亡，並且其造成的農業損失則僅次於 85 年的賀伯颱風。今年 10 月的梅姬（Megi）颱風也是個特殊的個案，原先各國的路徑預測均認為不致對台灣造成直接威脅，但兩天後即梅姬通過菲律賓之後一天，其路徑卻突然北轉且直朝台灣海峽而來，此時各數值模式間之路徑預報也呈現相當紛歧的狀況。可見颱風預報之困難度，這也是科學界亟欲解決的重大科學議題。另外梅姬颱風由於與東北季風共伴及移速緩慢共影響台灣地區八天的累積降水（16 日 00 時-24 日 00 時），也造成宜蘭地區大淹水（蘇澳在 10 月 21 日當天的時雨量達到 181 毫米，破設站以來紀錄；單日雨量衝上 939 毫米，刷新去年莫拉克降在台東大武的 808.5 毫米的紀錄）；另外還造成蘇花公路開通 78 年以來最嚴重的坍方事件。

以上實例再再凸顯颱風對台灣地區的重要性；綜合而言，颱風的影響在於：

(1)直接間接的經濟、交通建設、農業災害、社會安定、水利、土木建築…等破壞災害(持續的豪雨、強風和暴潮所導致之淹水、土石流、坍方、海水倒灌…等);
(2)停班停課期(侵台乃至離台後)對經濟面之重大衝擊;以及(3)水資源之管理與規劃。

基於颱風對於台灣地區的重大衝擊,行政院於1996年9月召開的第五次全國科技會議中,決定將防颱防洪列為天然災害防治的國家型計畫中。如何加強對於侵台颱風路徑、結構與風雨分佈之瞭解與研究,進而提昇侵台颱風路徑、風雨的預報能力,且將颱風減災納入整個防災決策系統中,應是颱風研究乃至國內大氣科學界中最重要之課題之一。

二、研究目的及意義

有鑑於2001年桃芝及納莉等颱風重創台灣,造成台灣地區的嚴重災情與損失,颱風基礎及預報改進研究的重要性愈發不容小覷,國科會因此自民國91年起提供相當之經費補助「颱風重點研究」計畫,由台灣大學大氣科學系吳俊傑教授擔任主持人。中央氣象局亦積極參與本計畫,並提供相當的人力及設備支援。研究目標包括提升颱風動力理論與改進颱風預報,特別是結合新的颱風觀測系統及颱風數值模擬與同化,以進行突破性的颱風研究。在延續上述颱風相關基礎科學研究突破及颱風預報改進之前提下,我們提出新的颱風整合研究規劃。期望透過新階段颱風研究的執行,繼續讓過去的研究成果與能量提供更大的貢獻。

由於颱風生命期之絕大部分皆於海面上度過,而西北太平洋島嶼中測站稀少,尤其是在台灣的東—東南方數千公里以上之太平洋地區,幾乎沒有任何觀測站。因此當颱風位於台灣附近時,台灣本島雖有觀測資料,但測站密度仍嫌不足,而台灣周圍海域除衛星和雷達觀測外,幾無任何其他傳統觀測資料;資料的極度匱乏,導致基礎颱風研究和路徑預報之應用研究相當受到限制;其中,路徑預報的準確度則會進一步決定風雨預報能力。是以和其他的氣象研究條件比較,資料缺乏是颱風研究進步的最大致命傷。

颱風路徑預報作業上,除了大尺度駛流場的資料不足外,颱風本身的強度及暴風半徑資料不易掌握,更是決定預報路徑正確性的重要因子。此外,當颱風接近台灣地區時,中央山脈高聳、複雜的地形,對颱風伴隨之對流和環流結構有相

當顯著的影響，且複雜地形會改變靠近台灣之颱風的路徑，也使風雨與路徑預報更為困難；而地形作用導致之颱風結構變化與局部豪雨產生，乃至颱風離台後引入豪雨，皆為學術上與應用上深具挑戰之研究課題（Wu and Kuo 1999; Wu et al. 2000）。為了克服傳統觀測資料不足之困境，加強觀測資料之取得與分析，並透過數值模式進行模擬及同化，以瞭解颱風生成、移動、強度變化、與地形交互作用、海氣交互作用、與大尺度環流及氣候變異之關係，以及預報與防災改進等重要颱風相關議題，乃是颱風研究亟待突破的重要方向。上述研究可望增進對於颱風動力理論之瞭解，改進颱風路徑與降雨量預報準確度，提升我國在颱風研究領域之國際地位，並扮演西北太平洋及東亞地區颱風研究的領導角色。

另外必須強調的是，為解決觀測資料不足之問題，「颱風整合研究」包含一項具指標性的研究議題，即為「颱風偵察飛機投落送觀測實驗」。此計畫為本整合研究之重大議題。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。

三、研究方法

1. 實驗介紹

美國自 1982 年起，便開始執行從 WP-3D 和 C-130 飛機投落 Omega Dropwindsonde 的實驗。利用飛機在距離颶風中心一千公里範圍，由中對流層（pressure level higher than 400 hPa）投擲降落傘探空進行觀測作業，探測 400 百帕以下大氣層之風場、溫度場、和濕度場剖線。結果顯示在增加 Dropsonde 資料後，可以對模式之路徑及強度預報有改善作用（Tuleya and Lord 1997），而 Franklin

et al. (1996) 也顯示使用該資料可以協助印證颱風運動與周圍環境渦度梯度關係的颱風運動理論。依據 Burpee et al. (1996) 研究報告顯示，至 1996 年止，此一觀測資料的增加對於作業之數值模式預報結果以及國家颶風中心官方路徑預報結果都有非常顯著的改進(例如：對於 12-60 小時颶風路徑預報，改進幅度達 16-30% 之多)。1996 年夏天，美國大氣研究中心 (NCAR) 完成新一代 GPS (Global Positioning System) wind finding 的 Dropsonde、接收主機和應用程式，技術轉移給芬蘭 Vaisala 公司製成 AVAPS (Airborne Vertical Atmospheric Profiling System) 商品，配置在 NCAR EC130Q 飛機、NOAA WP-3Ds 以及 Gulfstream IV，後者是 1996 年美國國家颶風中心所增購的高對流層噴射機—灣流四號 (Gulfstream-IV SP jet，簡稱 G4)，來執行颶風和暴風雪天氣系統的投落探空觀測。前後三者的主要差別除了因飛機性能差異，GPS wind-finding 的技術也較先前的 Omega 導航定位方法所導出水平風場數據的誤差由 2 m/s 縮小到 0.5 m/s (Hock and Franklin 1999)。同時，依據 1997~1998 年之間 24 次飛行投擲 Dropsonde 的實驗結果顯示，GPS Dropsonde 資料對於 GFDL 模式大西洋颶風 48 小時路徑及強度預報可分別改進達 32% 及 20% (Aberson and Franklin 1999)。以上結果皆顯示 Dropsonde 資料對於增進颱風環境與結構瞭解及改進颱風數值預報之具體貢獻。

基於上述 GPS Dropsonde 的重要性，以及為有效增加西北太平洋颱風周遭環境大氣資料之觀測，本計畫乃規劃在西北太平洋海面上的 Dropsonde 投擲作業，並透過模式對影響模式路徑之氣象因子時空分佈探討，形成有效率的機動觀測策略，配合氣象局之資料同化能力導入海上探空資料，來提高颱風預報水準。

此重點研究整合了國內學術界及氣象局相當之人力，並與美國 NCEP、HRD (Hurricane Research Division)、FNMOC 及日本 MRI (Meteorological Research Institute) 進行密切的合作，是一個具前瞻性並完全由國內研究人員所主導的國際研究計畫。在國科會及中央氣象局支持下、2003 年至 2009 年為止，投落送觀測實驗 (追風計畫, Wu et al. 2005) 已針對杜鵑、米勒、妮妲、康森、敏督利、梅姬、艾利、米雷、納坦、南瑪都、海棠、馬莎、珊瑚、卡努、龍王、碧利斯、凱米、寶發、桑美、珊珊、帕布、聖帕、韋帕、柯羅莎、風神、卡玫基、鳳凰、如麗、辛樂克、哈格比、薔蜜、蓮花、莫拉克、芭瑪、盧碧、康伯斯、萊羅克、凡

那比及梅姬等 39 個颱風完成 51 航次之飛機偵察及投落送觀測任務，總計在颱風上空飛行 270 小時、並成功投擲 846 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（對颱風停班停課之決策具關鍵性影響）。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.(2010b)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. 2010a）。

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 R1 為 u 場之平均，R2 為 v 場之平均，亦即(R1, R2)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 R1、R2 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 R1、R2 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. 計畫執行進展

本計畫於 2003 年起正式進行颱風的飛機偵察觀測，迄今已成功進行 7 次測試飛行與 35 個颱風、45 架航次的觀測任務。計畫執行各階段進展條列如下：

- 2003 年赴美國颶風研究中心 Gulfstream-IV 飛機偵察觀測過程參與觀摩訓練。
- 2003 年建置完成 ASTRA 飛機觀測平台及投落送設備 (漢翔公司於 2003/3 通過適航驗證)。
- 2003 年完成觀測系統 (飛機、航管、通訊、投落送、機上資料分析、及航路規劃決策) 及資料分析同化系統 (資料接收、即時分析、同化、模擬、協助颱風預報、及資料影響評估研究) 之建置。
- 與中央氣象局、美國大氣海洋總署颱風研究中心、美國海軍氣象中心及日本颱風研究中心建立完整資料分享及研究合作關係。

- 2003 年 5/23、6/13、及 6/24 分別完成三次模擬測試飛行。
- 2003 年 9/1、11/2 成功完成杜鵑及米勒颱風觀測、資料分析、預報及後續研究。
- 2004 年 4/15 新機載軟體及模擬測試飛行。
- 2004 年 5/17、6/8、6/27-29、8/16、8/23、9/25、10/24 及 12/3 成功完成妮妲、康森、敏督利、梅姬、艾利、米雷、納坦、與南瑪都颱風觀測、資料分析、預報及後續研究。
- 2005 年 7/16-17、8/12、8/11、9/9、9/30 及 10/1 成功完成海棠、馬莎、珊瑚、卡努、龍王颱風觀測、資料分析、預報及後續研究。
- 2006 年 7/11、7/23、8/8、8/9 及 9/14 成功完成碧利斯、凱米、寶發、桑美、珊珊颱風觀測、資料分析、預報及後續研究（開始由中央氣象局委託計畫支持觀測飛機租用費用）。除此之外，在 2006 年 THORPEX Pacific Asian Regional Campaign (T-PARC) 的國際會議結論中，日本規劃在 2008 年起亦會使用飛機進行侵日颱風的 GPS 投落送觀測，此國際性研究計畫將與台灣地區的追風計畫相互輝映，預期此藉由飛機量測颱風周圍資料將有更大的影響。另外，追風計畫已成為世界氣象組織所規劃 T-PARC 實驗 2008 年亞洲觀測實驗的重要一環，於八、九兩月與東亞各國及美國共同合作推動 T-PARC 實驗。追風計畫所建立的觀測平台也已為台灣於梅雨期間進行的西南氣流觀測實驗及規劃中的雲物理及空氣污染量測研究奠下紮實根基。主持人於 2006 年 11 月 21 日至 11 月 30 日受邀參與聯合國世界氣象組織所舉辦的「第六屆國際颱風研討會」(WMO's 6th International Workshop on Tropical Cyclones)，並針對颱風之策略性觀測及資料同化給予進行 30 分鐘專題回顧演講。會中追風計畫深受國際矚目並為多次演講所引用。國人所支持及成功推動的追風計畫在國際間已具一席之地。會議結論並正式推薦未來更多國家共同參與相關之颱風飛機觀測研究。
- 2007 年 8/7、8/16、9/17 及 10/4 成功完成帕布、聖帕、韋帕、柯羅莎颱風觀測、資料分析、預報及後續研究（第二年中央氣象局委託計畫支持觀測飛機租用費用）。

➤ 在 2007 年 4 月主持人受邀前往韓國濟州島，參加為慶祝韓國颱風中心成立所舉行的颱風研討會，並針對台灣追風計畫的相關研究成果發表演講。2007 年 6 月 12 日計畫主持人亦在台大舉辦 T-PARC 研究合作規劃研討會，討論及規劃 2008 年國際觀測實驗飛機及 driftsonde 使用及配合細節，與會學者包括：周明達、許晃雄、林博雄、吳俊傑（台大）、鄭明典（中央氣象局），Dave Parsons（NCAR），Simon Chang, Melinda Peng（NRL），T. Nakazawa, M. Yamaguchi（JMA），Dong-In Lee（PNU）。此外，同年 7 月主持人亦前往日本參與 T-PARC 的 ARC（Asian Regional Committee）委員會議，與亞太各國的氣象學者分享台灣追風計畫成果與經驗交流，另外亦與 JMA 及 MRI 多數學者討論 2008 年台灣與日本共同進行颱風飛機觀測實驗的事宜。圖 3.2 即為假想颱風位於東經 127 度、北緯 22 度時，台灣 DOTSTAR 與日本 TH08 共同執行颱風飛機觀測的觀測路徑。

➤ 2007 年 12 月 4-7 日，主持人前往夏威夷參加 T-PARC 所舉辦的 2008 年觀測實驗的規劃會議。美國海軍規劃進行 TCS-08 實驗（Tropical Cyclone Structure 2008），已於 2008 年派遣美國海軍 P-3 與空軍 C-130 飛機於西北太平洋共同參與 T-PARC 觀測實驗，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 P3、C130）的觀測實驗。此外，2008 年 5 月 21 日與 7 月 8 日上午於中央氣象局進行為時約 4 小時的颱風投落送飛機觀測與 WMO T-PARC 國際聯合觀測實驗計畫介紹，並與相關單位討論協助觀測執行之配合事項。於 7 月 28 日 T-PARC 國際聯合觀測實驗開始前，於中央氣象局與相關單位就資料蒐集及模式設定作最後準備工作的確認會議；並於 8 月 22 日、9 月 3 日與氣象局相關單位召開實驗期中檢討會，就資料蒐集情況、如何配合國際聯合觀測及模式運作等議題進行討論。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 2008 年十次的任務中有多達六次參與國際的聯合飛機觀測。這些前所未有的觀測資料預期能對颱風路徑預報、颱風形成、結構演變、路

徑偏轉及變性等相關研究能有重大突破。

➤ 2008 年 6/23、7/16、7/26、8/20、9/10-11、9/16、9/22 及 9/27-28 成功完成風神、卡玫基、鳳凰、如麗、辛樂克、哈格比、薔蜜颱風觀測、資料分析、預報及後續研究。

➤ 成功研發 ADSSV 之策略性觀測理論架構 (Wu et al. 2007b)

➤ 追風計畫已成為世界氣象組織所規劃 T-PARC 實驗 2008 年亞洲觀測實驗的重要一環，與東亞各國及美國共同合作推動 T-PARC 實驗，此實驗已成功針對如麗、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 2008 年十次的任務中有多達六次參與國際的聯合飛機觀測。於實驗期間，取得前所未有的觀測資料，更進一步投落送資料的影響之研究仍在進展中，以期能有突破性的研究成果。

➤ 2009 年 6/20、8/6、10/3 00Z 及 12Z、10/20-22 00Z 成功完成蓮花、莫拉克、芭瑪、盧碧颱風觀測、資料分析、預報及後續研究。

➤ 2010 年 6/20、8/6、10/3 00Z 及 12Z、10/20-22 00Z 成功完成康伯斯、萊羅克、凡那比及梅姬颱風觀測、資料分析、預報並著手進行後續研究。

➤ 另外 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、buoy 等設備觀測颱風期間海洋方面的資料。此獨特寶貴的資料相信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，其成效將會在未來一、二年內逐漸呈現出來。

3. 計畫特殊貢獻

➤ 民國 92 年 9 月至今，追風計畫已針對杜鵑、米勒 (以上為民國 92 年所觀測)、妮妲、康森、敏督利、梅姬、艾利、米雷、納坦、南瑪

都（以上為民國 93 年）、海棠、馬莎、珊瑚、卡努、龍王（以上為民國 94 年）、碧利斯、凱米、寶發、桑美、珊珊（以上為民國 95 年）、帕布、聖帕、韋帕、柯羅莎（以上為民國 96 年）、風神、卡玫基、鳳凰、如麗、辛樂克、哈格比、薔蜜（以上為 97 年）、蓮花、莫拉克、芭瑪、盧碧（以上為 98 年）、康伯斯、萊羅克、凡那比及梅姬（以上為民國 99 年）等 39 個颱風完成 51 航次之飛機偵察及投落送觀測任務，總計在颱風上空飛行 270 小時、並成功投擲 846 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)

➤ 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%。此外，Chou et al.(2010b)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. 2010a)。

➤ 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。另外由中央氣象局提供 2008 年至 2010 年共三年統計 14 個颱風 23 個追風觀測個案所進行之 TWRF (Typhoon Weather Research and Forecasting) 颱風預測模式路徑誤差比較圖，可看出這三年 (2008-2010 年) 加入了追風飛機偵察及投落送觀測資料 (14 個颱風、23 個飛機觀測個案) 對於颱風路徑模擬的影響，整體而言使得數值模式平均改善為 9.3 %。

➤ 追風研究團隊已經在國際學術期刊發表十數篇成果論文(計有 Wu et al. (2004), Wu et al. (2005), Wu et al. (2006), Wu et al. (2007a), Wu et al. (2007b), Chou and Wu (2008), Yamaguchi et al. (2009), Wu et al. (2009a), Wu et al. (2009b), Wu et al. (2009c), Chen et al. (2009), Chen et al. (2010a), Chen et al. (2010b), Chou et al. (2010a), Chou et al. (2010b), Harnisch et al. (2010), Weissmann et al. (2010), Wu et al. (2010) 等 18 篇)。此外，追風科學團隊分別於 2006、2008 及 2010 年參加美國氣象學會所舉辦之第 27、28 及 29 屆熱帶氣象與颶風研討會，會中分別有 8 篇、4 篇及 9 篇追風計畫相關研究成果論文進行發表。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吳俊傑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。

➤ 另外 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、buoy 等設備觀測颱風期間海洋方面的資料。此獨特寶貴的資料相信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，其成效將會在未來一、二年內逐漸呈現出來。

➤ 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。

四、具體成果

1. 今年度本委託計畫具體成果整理如下：今年 5 月 10 日主持人吳俊傑參加在美國亞利桑那州 Tucson 舉行為期 5 天的「第 29 屆颶風及熱帶氣象研討會」，會議主辦單位為 American Meteorological Society。此會議為每兩年舉行一次之全世界主要颶風相關研究會議。此次會議中有相當多的颶風方面獨特議題受到重視，除了颶風氣候研究、路徑強度模擬、颶風（雙）眼牆結構演變、登陸與降水模擬、Extratropical transition(ET)、衛星遙測應用、海洋大氣交互作用等問題外，邊界層及颶風動力問題等研究均有重大進展。另針對 DOTSTAR 及 T-PARC 等重要議題亦有專門開闢之專題討論，會中許多學者提出對 targeted observation 及其對颶風強度、結構影響的看法與建議。此次主持人吳俊傑共有 16 篇論文發表，其中有 9 篇與追風計畫有關（Chen et al. (2010a), Chen et al. (2010b), Chou and Wu (2010), Lien et al. (2010), Nakazawa et al. (2010), Jung et al. (2010), Weissmann et al. (2010), Wu et al. (2010a), Wu et al. (2010b)。

另外主持人吳俊傑在會中進行兩次口頭發表，題目分別為「Targeted observation and its impact in DOTSTAR and T-PARC」及「Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008) - Part I: Assimilation of T-PARC data based on the Ensemble Kalman Filter (EnKF)」。內容為探討在 DOTSTAR 及 T-PARC 中所獲得投落送資料以及用此資料來改進颶風眼牆模擬的研究。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。

2. 6 月 25 日主持人吳俊傑參加由美國地球物理學會 (American Geophysical Union) 在台北舉辦之「2010 年西太平洋地球物理會議暨臺灣地球科學聯合學術研討會」(2010 Western Pacific Geophysics Meeting)，並在會中發表「Concentric eyewall formation in typhoon Sinlaku (2008) - Integration of T - PARC observant Based on ENKF data assimilation.」
3. 7 月 05-09 日主持人吳俊傑參加 2010 亞洲大洋洲地球科學學會(AOGS, Asia Oceania Geosciences Society) 在印度海得拉巴 (Hyderabad) 舉辦之「2010

年 AOGS 年會」，並在會中發表「Concentric eyewall formation in typhoon Sinlaku (2008) - Integration of T - PARC observant Based on ENKF data assimilation.」及「Assimilation of Tropical Cyclone Track and Structure Based on the Ensemble Kalman Filter (EnKF)」兩篇研究。

4. 主持人吳俊傑於 9 月 5 日至 7 日參加於中國上海舉行的「兩岸豪雨與颱風合作研究期中成果研討會」報告「Targeted Observation, Data Assimilation, and Tropical Cyclone Predictability」。獲得許多正面肯定與迴響。
5. 11 月 15-20 日參加世界氣象組織 (World Meteorological Organization) 於非洲法屬留尼島舉行之 IWTC-VII (Seventh International Workshop on Tropical Cyclones) 研討會，並於 16 日會議中報告「Targeted observations for TC trackforecasting」主題。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. 本委託計畫今年度已經完成康伯斯、萊羅克、凡那比及梅姬等 4 個颱風 6 架次的觀測，總共使用 31 個小時的飛行時數，並成功拋投 92 枚投落送。各飛機觀測任務的研究結果將分段列述如下：

a 康伯斯颱風 (Kompasu, 2010/08/31/12 UTC)

康伯斯颱風為今年西太平洋編號第 07 號的颱風，也是第一個較接近台灣的颱風。ASTRA 飛機於 31 日下午 5 點 11 分起飛，飛行時間為 5 小時 35 分，成功拋投 17 枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖 4 所示。另外，17 枚投落送所量測的 1000 hPa 風場則如圖 5 所示，由風場分佈可以發現蓮花颱風南側為較大的風場區域。圖 6 則為氣象局 QPESUMS 系統所顯示的飛機觀測路徑、颱風移動路徑及衛星雲圖分佈情形，此資訊對於研究團隊在觀測過程中提供相當重要的飛航資訊。

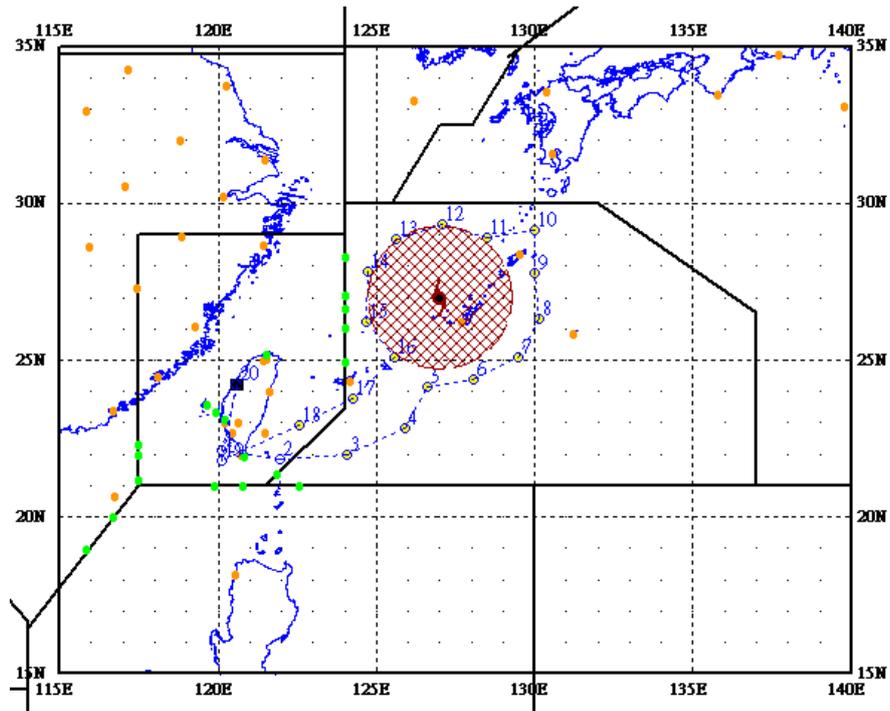


圖 4：康伯斯颱風飛機觀測飛行路徑及 16 枚投落送拋投順序與位置。

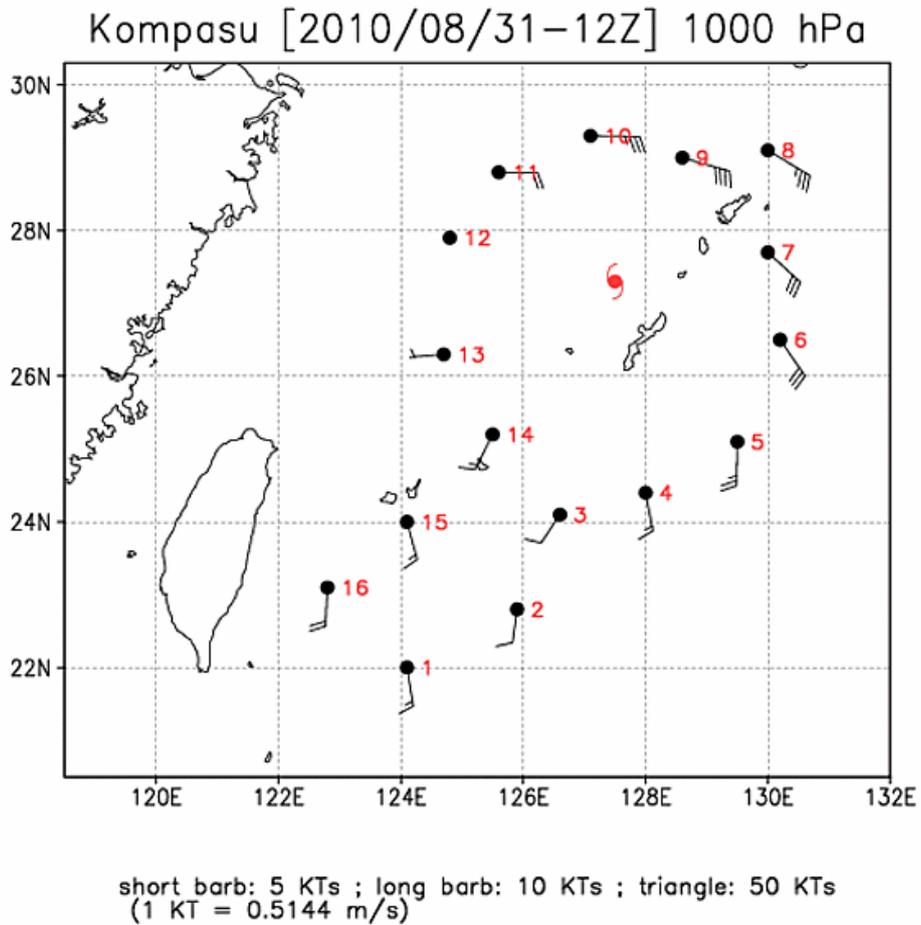


圖 5：投落送所量測之康伯斯颱風 1000 hPa 水平風場 (knots)。

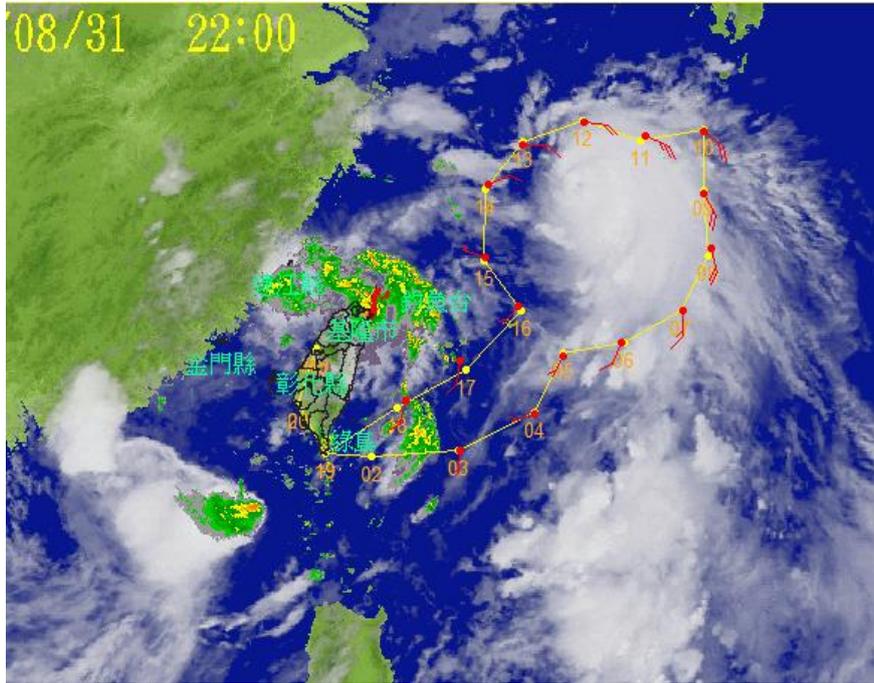


圖 6：氣象局 QPESUMS 系統於 8 月 31 日 16Z 即時顯示之康伯斯颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。

b 萊羅克颱風 (Lionrock, 2010/09/01/00 UTC)

萊羅克颱風為今年西太平洋編號第 6 號的颱風，8 月 31 日上午 8 時中心位置位於北緯 20.5 度、東經 117.5 度，以每小時約 8 公里的速度往東移動(圖 7)。飛機觀測執行的時間為針對 9 月 1 日 0000 UTC (上午 8 時) 的模式預報時間來進行觀測。ASTRA 飛機於 1 日上午 5 點 28 分起飛，於上午 8 點 42 分落地，飛行時間為 3 小時 24 分，成功拋投 16 枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖 8 所示。另外，16 枚投落送所量測的 1000 hPa 風場則如圖 9 所示。另外圖 10 則為氣象局 QPESUMS 系統所顯示的飛機觀測路徑、颱風移動路徑及衛星雲圖分佈情形，此資訊對於研究團隊在觀測過程中提供相當重要的飛航資訊。

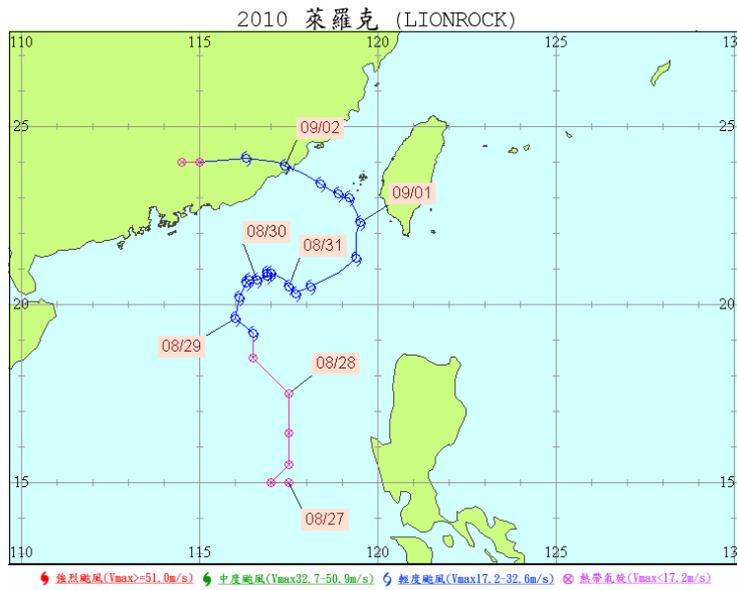


圖 7：氣象局於 9 月 2 日 06Z 所發佈之萊羅克颱風移動路徑。

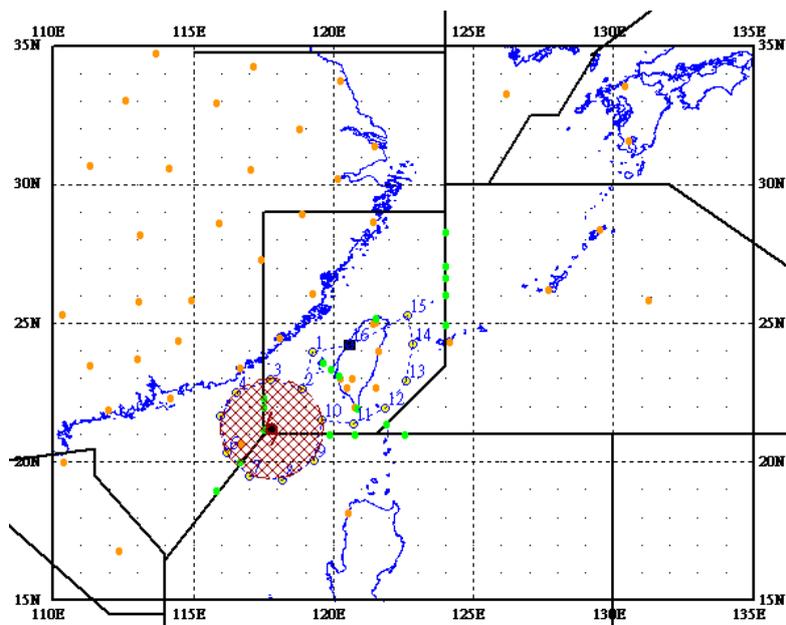


圖 8：萊羅克颱風飛機觀測飛行路徑及 18 枚投落送拋投順序與位置。

於北緯20.5度、東經117.5度，以每小時約8公里的速度往東移動（圖11）。飛機觀測執行的時間為針對9月16日0000 UTC（上午8時）的模式預報時間來進行觀測。ASTRA飛機於16日凌晨4點32分起飛，於上午10點46分落地，飛行時間為6小時14分，成功拋投19枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖12所示。另外，19枚投落送所量測的1000 hPa風場則如圖13所示。於此同時美國的C-130飛機也同步進行穿越颱風的飛行觀測（圖14），兩方合作共同針對同一個案進行觀測，相信將更有助於颱風移動路徑與強度之分析、預報及研究工作。另外圖15則為氣象局QPESUMS系統所顯示的飛機觀測路徑、颱風移動路徑及衛星雲圖分佈情形，此資訊對於研究團隊在觀測過程中提供相當重要的飛航資訊。

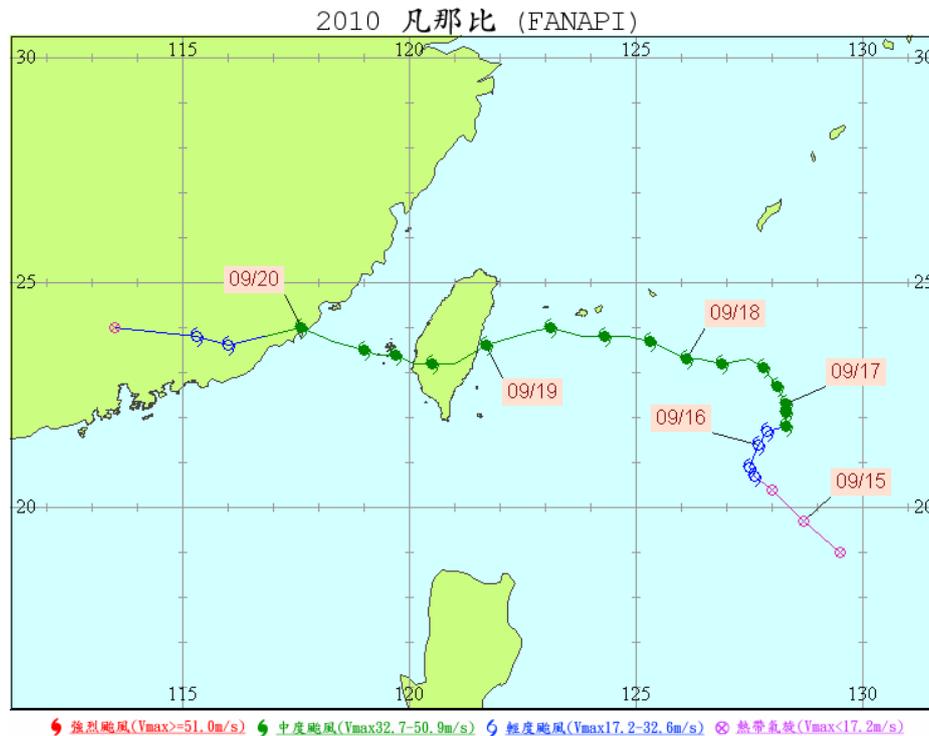


圖 11：氣象局發佈之凡那比颱風移動路徑。

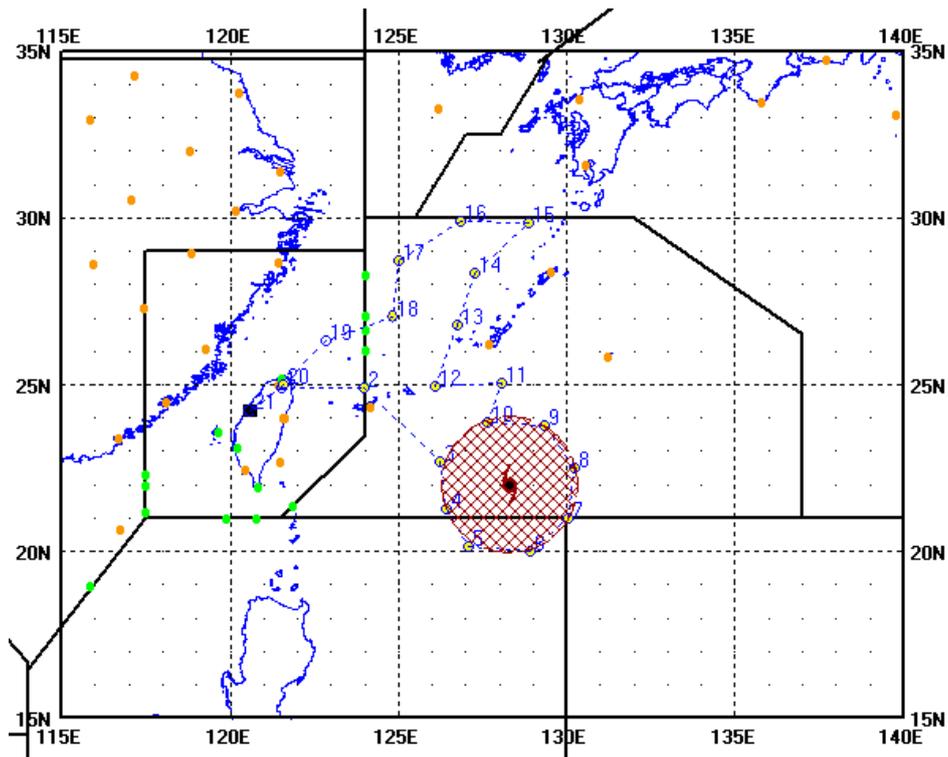


圖 12：凡那比颱風飛機觀測飛行路徑及 18 枚投落送拋投順序與位置。

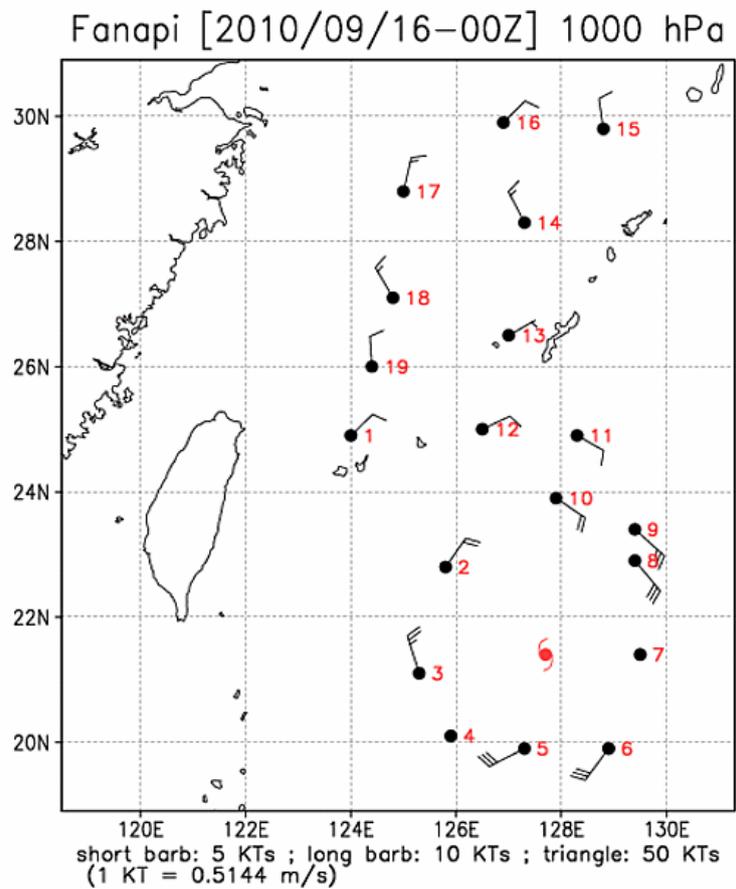


圖 13：投落送所量測之凡那比颱風 1000 hPa 水平風場 (knots)。

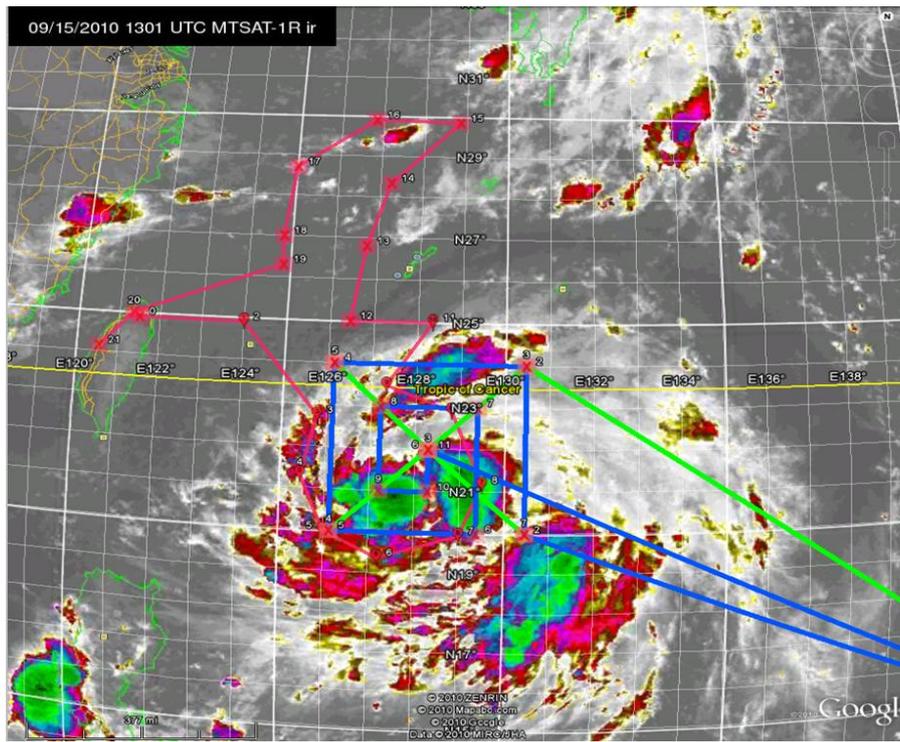


圖 14：9 月 16 日追風團隊與 ITOP 國際觀測實驗之 C-130 共同合作針對凡那比颱風進行聯合觀測。

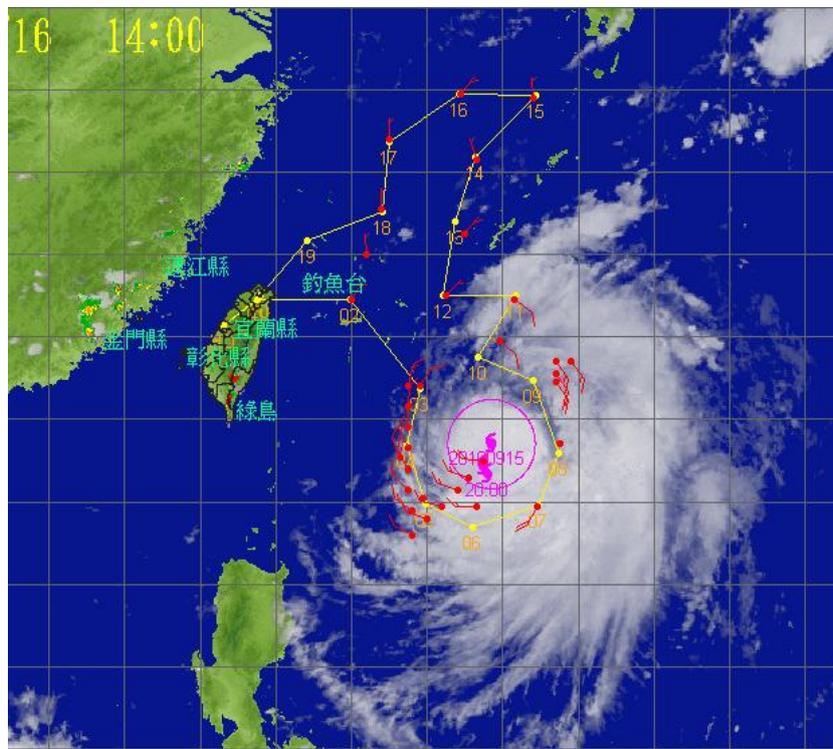


圖 15：氣象局 QPESUMS 系統於 9 月 16 日 06Z 即時顯示之凡那比颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。

d 凡那比颱風第二次飛行觀測 (Fanapi, 2010/09/17/00 UTC)

9月17日追風團隊針對凡那比颱風進行第二次飛行觀測，9月17日上午8時中心位置位於北緯22.3度、東經128.3度，以每小時約3公里的速度往北移動。飛機觀測執行的時間為9月17日0000 UTC (上午8時)。ASTRA飛機於17日凌晨4點29分起飛，於上午9點29分落地，飛行時間為5小時，成功拋投14枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖16所示。於此同時美國的C-130飛機也同步進行穿越颱風的飛行觀測(圖17)，此為今年兩方第二次共同合作針對颱風個案進行聯合觀測作業，將更有助於颱風移動路徑與強度之分析、預報及研究工作。另外圖18則為氣象局QPESUMS系統所顯示的飛機觀測路徑、颱風移動路徑及衛星雲圖分佈情形，此資訊對於研究團隊在觀測過程中提供相當重要的飛航資訊。

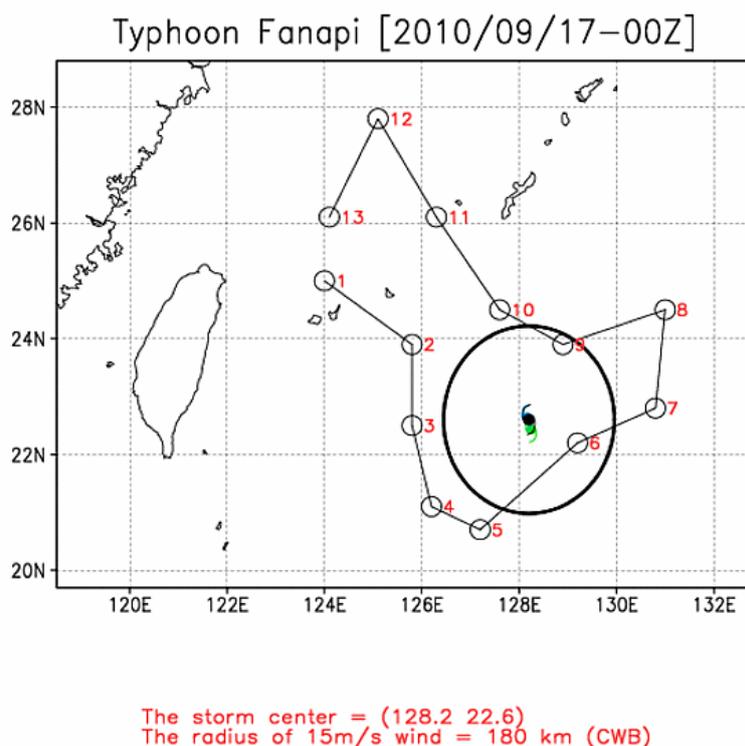


圖 16：凡那比颱風飛機觀測飛行路徑及 14 枚投落送拋投順序與位置。

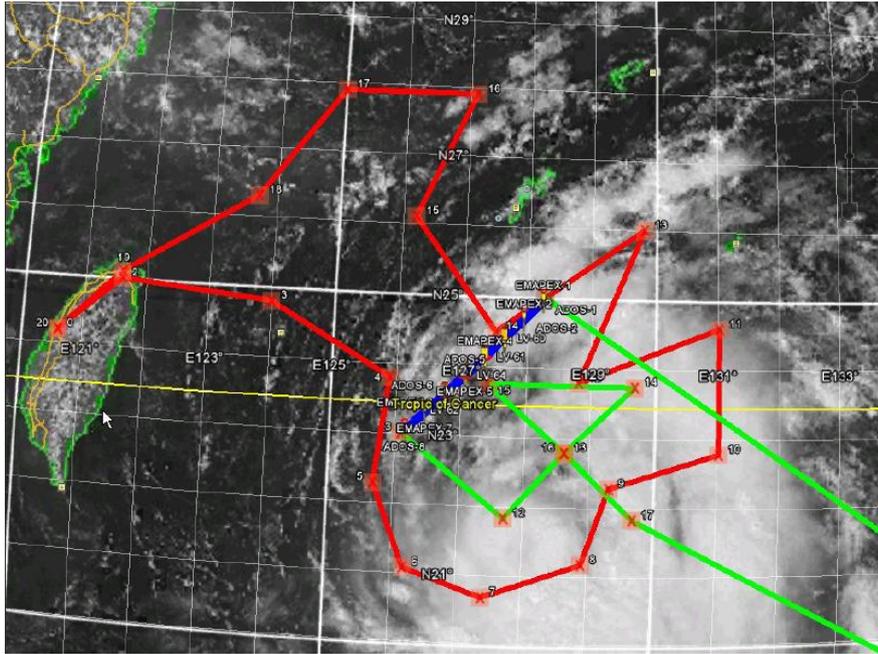


圖 17：9 月 17 日追風團隊與 ITOP 國際觀測實驗之 C-130 共同合作針對凡那比颱風進行聯合觀測。

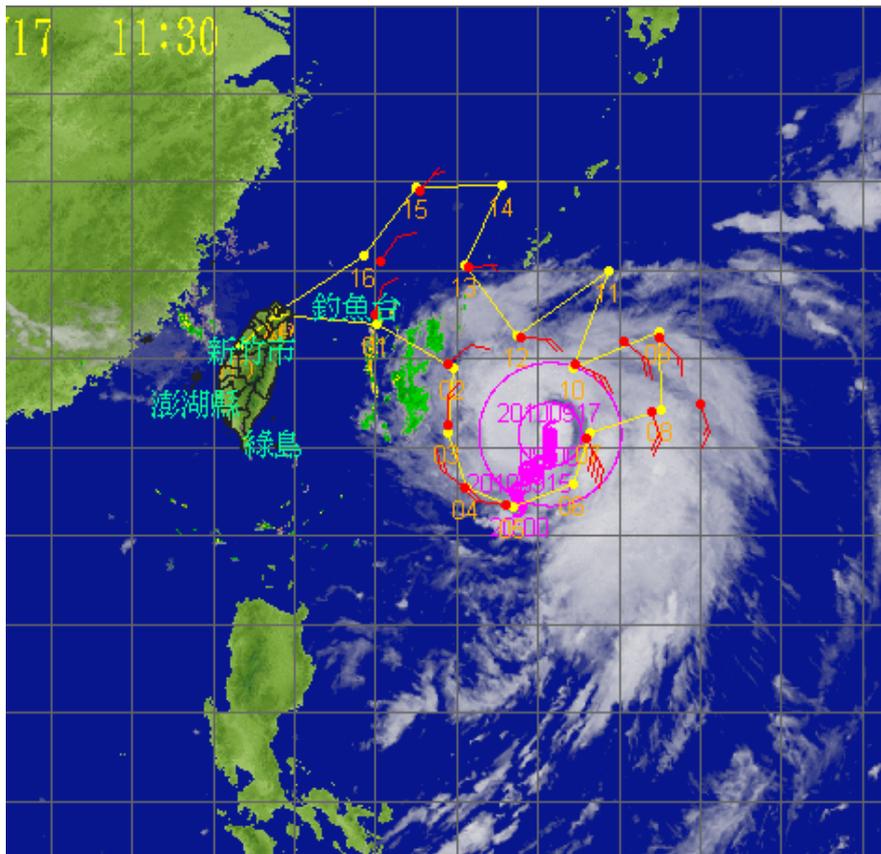


圖 18：氣象局 QPESUMS 系統於 9 月 17 日 06Z 即時顯示之凡那比颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。

e 凡那比颱風第三次飛行觀測 (Fanapi, 2010/09/18/00 UTC)

9月18日針對凡那比颱風進行第三次飛行觀測，9月18日上午8時中心位置位於北緯23.3度、東經126.1度，以每小時約15公里的速度往西移動。飛機觀測執行的時間為9月18日0000 UTC(上午8時)的模式預報時間來進行觀測。ASTRA飛機於18日凌晨4點57分起飛，於上午9點33分落地，飛行時間為4小時36分，成功拋投13枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖19所示。另外，13枚投落送所量測的1000 hPa風場則如圖20所示。於此同時美國的C-130飛機也同步進行穿越颱風的飛行觀測(圖21)，此為今年兩方第三次共同合作針對颱風個案進行聯合觀測作業，將更有助於颱風移動路徑與強度之分析、預報及研究工作。另外圖22則為氣象局QPESUMS系統所顯示的飛機觀測路徑、颱風移動路徑及衛星雲圖分佈情形，此資訊對於研究團隊在觀測過程中提供相當重要的飛航資訊。

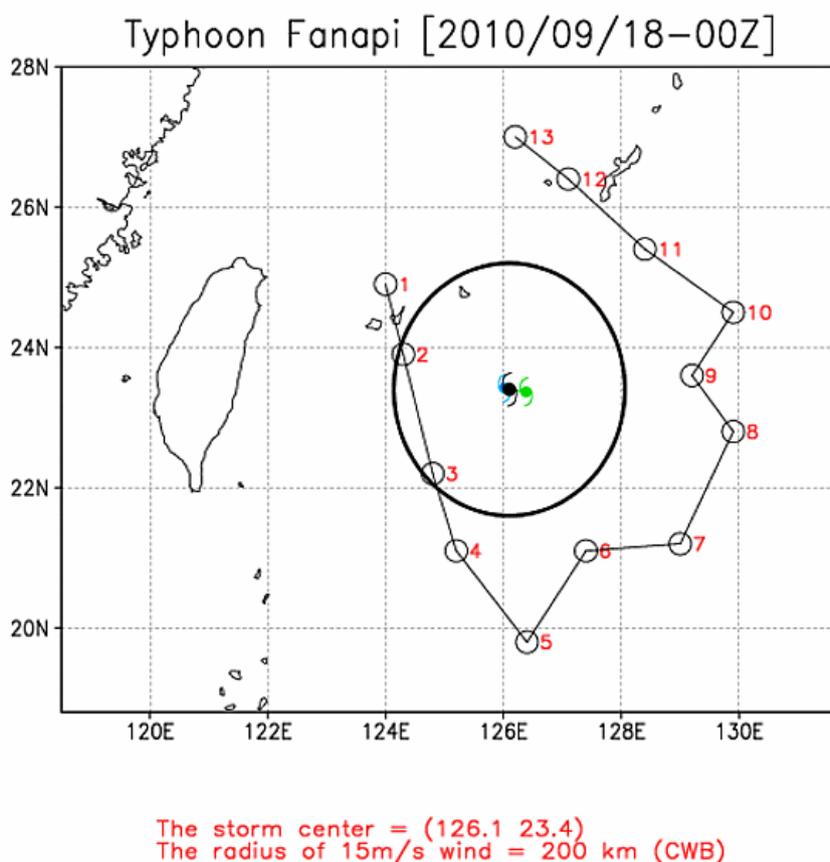
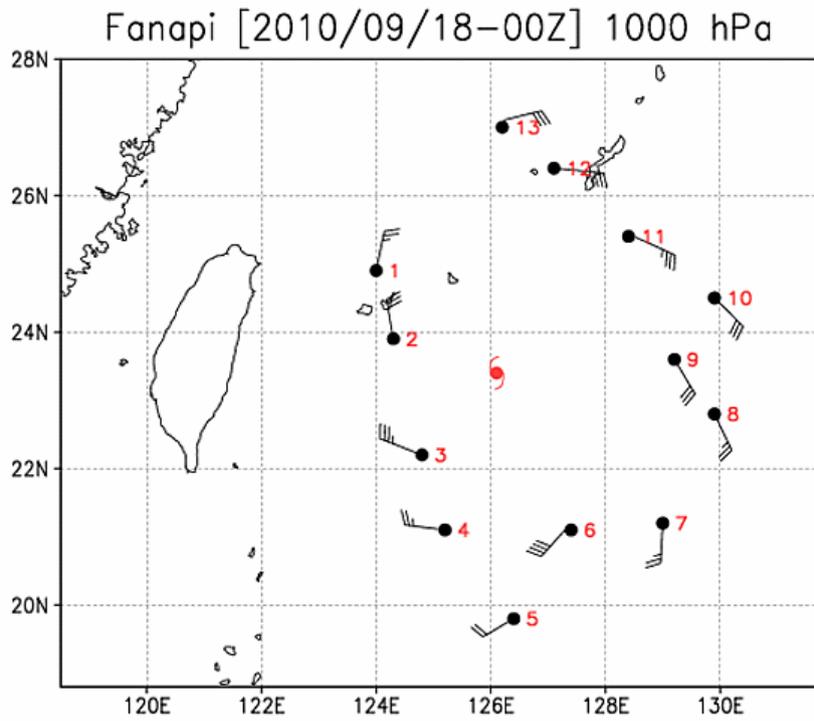


圖 19：凡那比颱風飛機觀測飛行路徑及 13 枚投落送拋投順序與位置。



short barb: 5 KTs ; long barb: 10 KTs ; triangle: 50 KTs
 (1 KT = 0.5144 m/s)

圖 20：投落送所量測之凡那比颱風 1000 hPa 水平風場 (knots)。

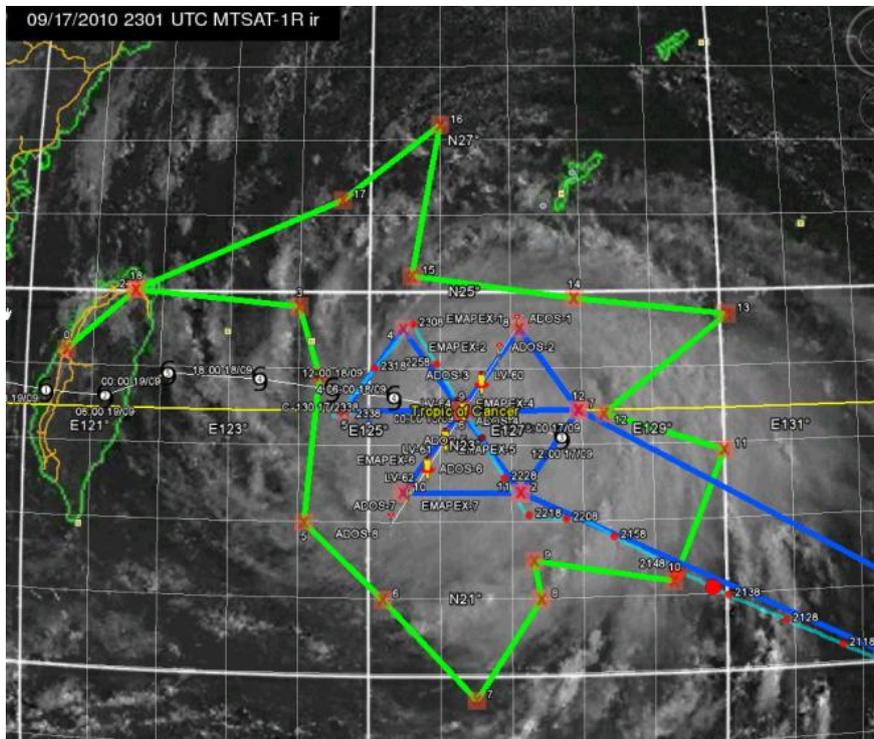


圖 21：9 月 18 日追風團隊與 ITOP 國際觀測實驗之 C-130 共同合作針對凡那比颱風進行第三次聯合觀測。

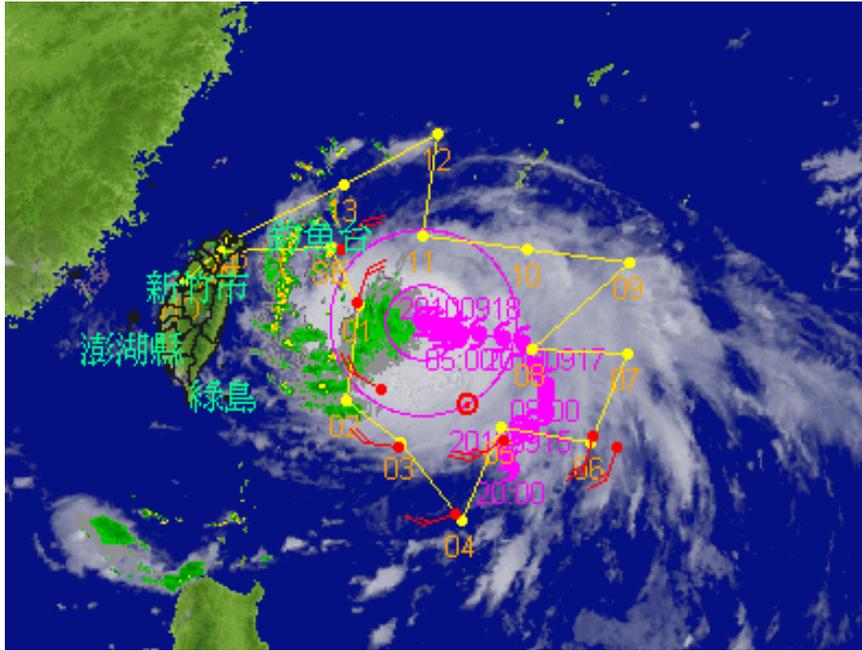


圖 22：氣象局 QPESUMS 系統於 9 月 18 日 06Z 即時顯示之凡那比颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。

f 梅姬颱風 (Megi, 2010/10/17/00 UTC)

梅姬颱風為今年西太平洋編號第 13 號的颱風，10 月 17 日上午 8 時中心位置位於北緯 18.7 度、東經 127.5 度，以每小時約 6 公里的速度往西移動(圖 23)。飛機觀測執行的時間為針對 10 月 17 日 0000 UTC (上午 8 時) 的模式預報時間來進行觀測。ASTRA 飛機於 17 日凌晨 5 點 00 分起飛，於上午 11 點 01 分落地，飛行時間為 6 小時，成功拋投 16 枚投落送，針對颱風中心周圍以及台灣東南部海面進行投落送觀測，觀測飛行路徑與拋投位置如圖 24 所示。另外，16 枚投落送所量測的 1000 hPa 風場則如圖 25 所示。於此同時美國的 C-130 飛機也同步進行穿越颱風的飛行觀測 (圖 26)，此為今年兩方第二度共同合作針對颱風個案進行聯合觀測作業 (上一次合作個案為凡那比颱風)，將更有助於颱風移動路徑與強度之分析、預報及研究工作。另外圖 27 則為氣象局 QPESUMS 系統所顯示的飛機觀測路徑、颱風移動路徑及衛星雲圖分佈情形，此資訊對於研究團隊在觀測過程中提供相當重要的飛航資訊。

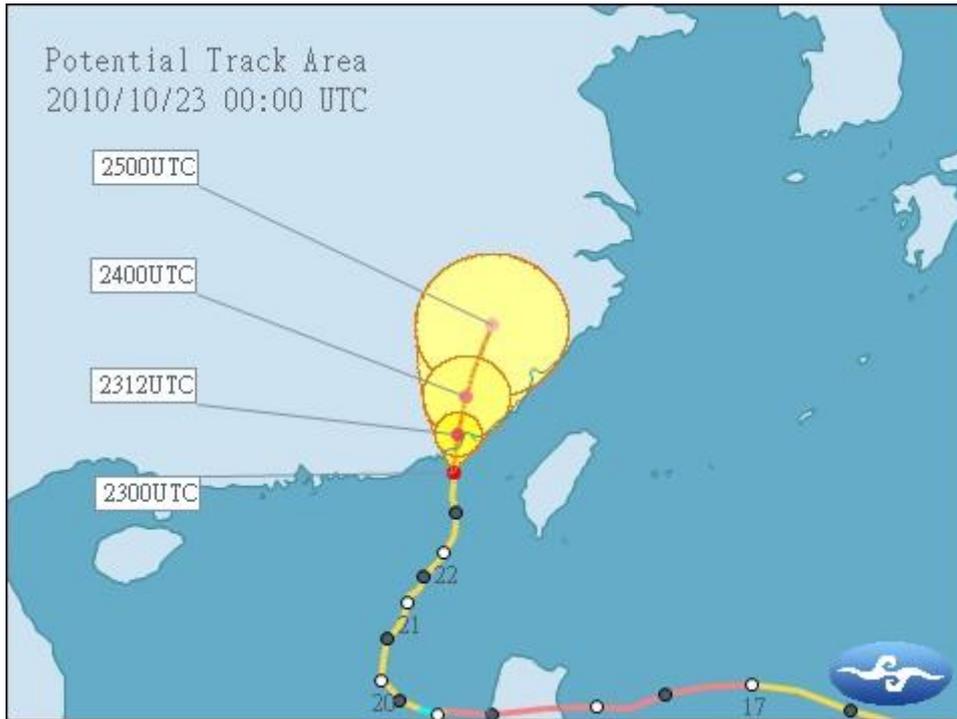


圖 23：氣象局 23 日 00 UTC 發佈之梅姬颱風移動路徑及預報路徑。

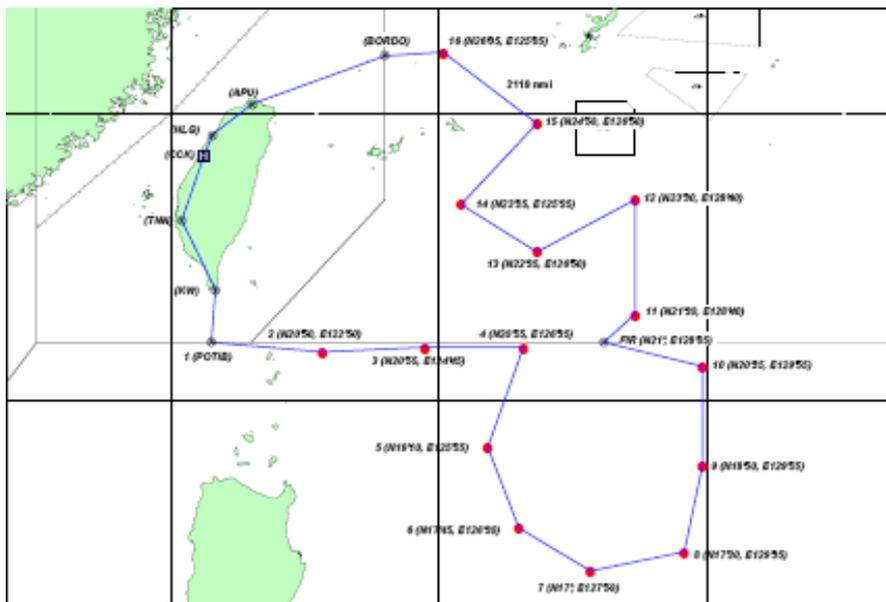


圖 24：梅姬颱風飛機觀測飛行路徑及 16 枚投落送拋投順序與位置。

Megi [2010/10/17-00Z] 1000 hPa

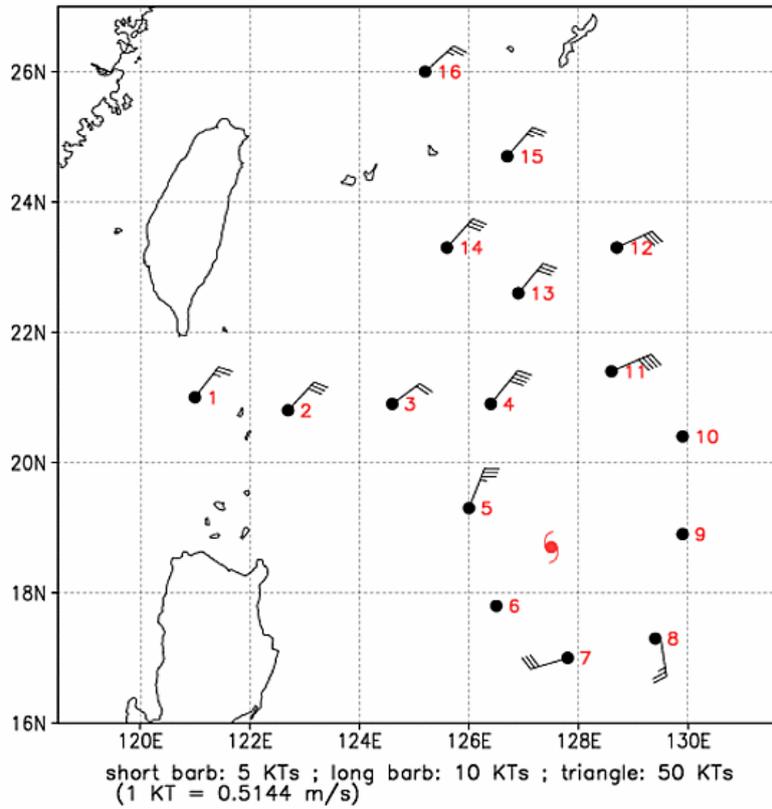


圖 25：投落送所量測之凡那比颱風 1000 hPa 水平風場 (knots)。

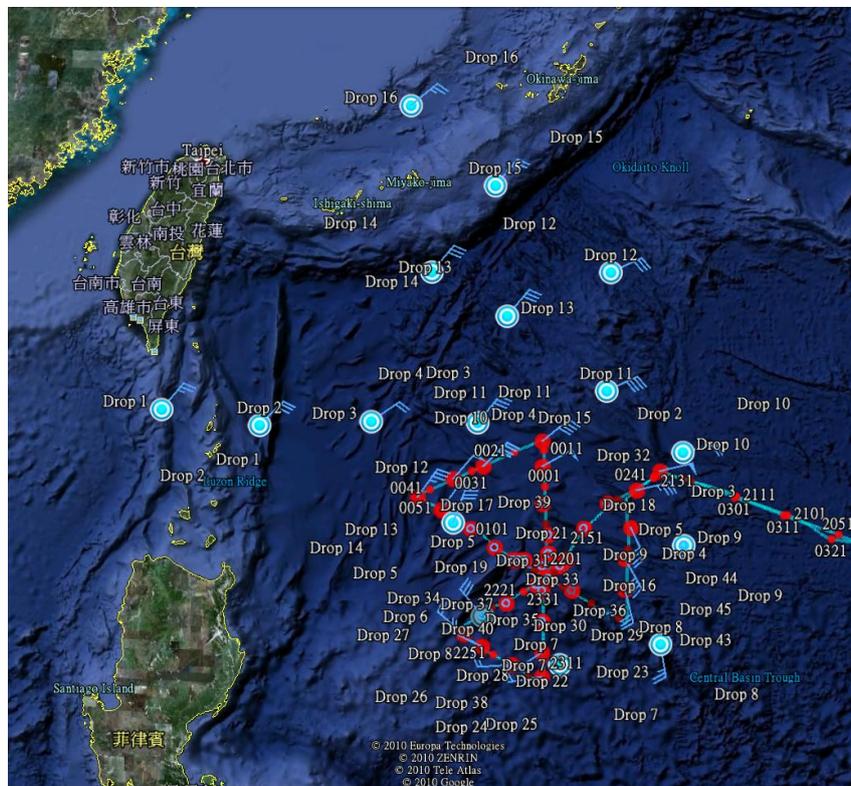


圖 26：10 月 17 日追風團隊與 ITOP 國際觀測實驗之 C-130 今年第四次合作，共同針對梅姬颱風進行聯合觀測。

7. 追風計畫對今年颱風數值模式之影響

今年（2010 年）追風團隊共針對 4 個颱風（康伯斯、萊羅克、凡那比及梅姬颱風）進行 6 次飛機觀測作業，以下則分別敘述其對中央氣象局 TWRF 颱風預測模式及美國 NCEP（National Centers for Environmental Prediction）之 GFS（Global Forecast System）數值模式的影響程度。

a 萊羅克颱風

(1) 中央氣象局

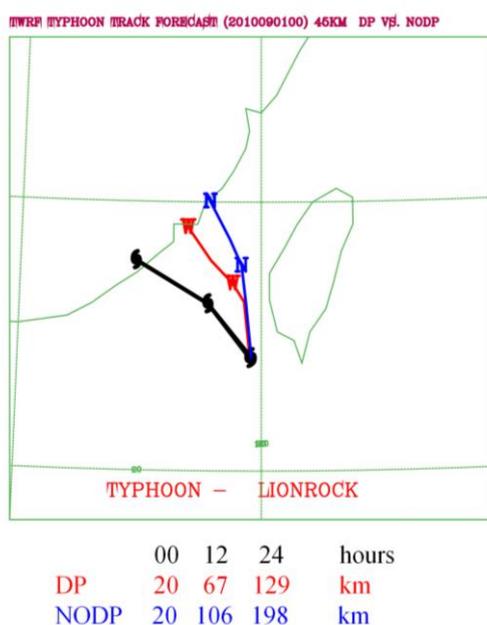


圖 29：中央氣象局萊羅克颱風數值模式路徑模擬比較圖（黑線為觀測資料；紅線 W 為加入 2010 年 9 月 01 日對萊羅克颱風之追風觀測資料後的模擬結果，而藍線 N 則為未加入追風觀測資料之對比）。（圖片由氣象局陳得松等提供）

因此由圖 29 可看出在萊羅克颱風的數值模擬部份，追風資料對模擬結果影響甚大，可將 24 小時模擬誤差由 198 公里降為 129 公里。在今年度對萊羅克颱風的飛機觀測，其有無使用投落送資料對中央氣象局數值模式的模擬路徑如圖 30 所示。平均而言使得數值模式 12 小時路徑預報改善 36.8%，而 24 小時預報則改善 34.8%。平均總改善程度為 35.8%。

(2) 美國 NCEP

Tracks of Typhoon Lionrock (2010)

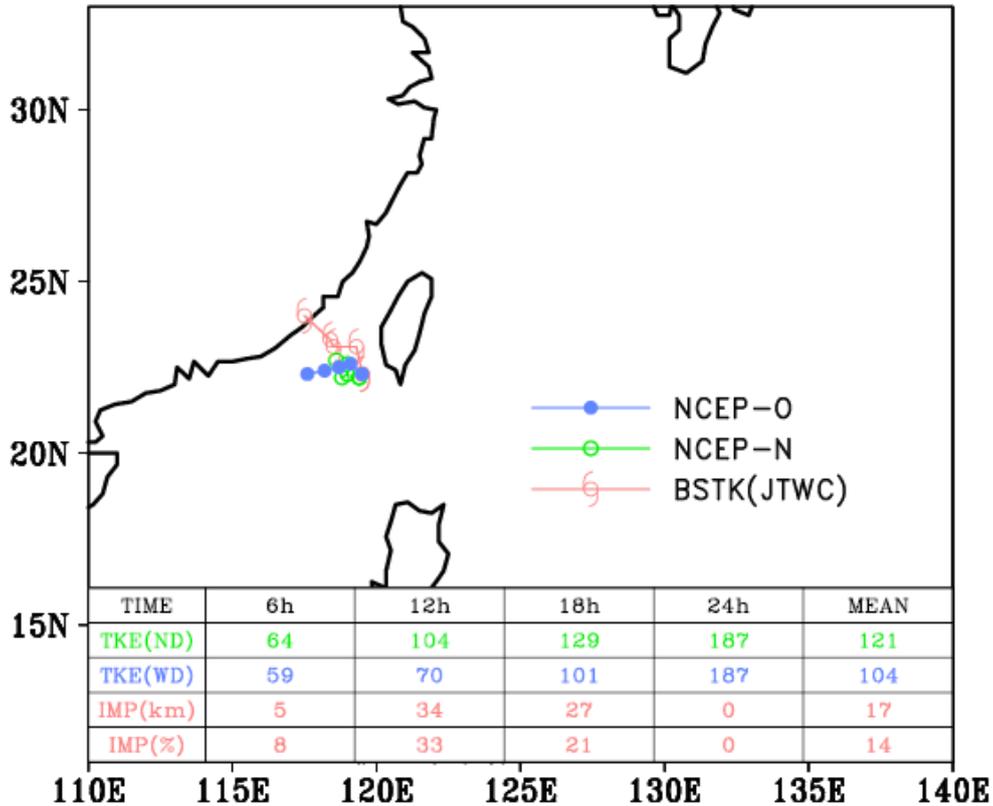


圖 30：NCEP GFS 模式對萊羅克颱風數值模式路徑模擬比較圖（紅線為觀測資料；藍線為加入 2010 年 9 月 01 日對萊羅克颱風之追風觀測資料後的模擬結果，而綠線則為未加入追風觀測資料之對比）。

NCEP GFS 為美國 NCEP 作業單位所使用的全球模式，目前每 6 小時進行一次作業預報。目前本研究所使用的 GFS 模式為 T254 的波譜模式，即水平方向約有 55 公里的解析度，而垂直方向從地表至模式頂層 2.7 hPa 共有 64 層不等間距的 sigma 座標垂直分層。模式使用 GDAS 系統來同化投落送資料，然後再將同化後的資料作為 GFS 模式的初始條件及邊界條件。GDAS 系統的運作程序包括觀測資料的品質管制、3DVAR 資料同化、渦旋 relocation 程序、以及 GFS 模式本身。

在今年度對萊羅克颱風的飛機觀測，NCEP GFS 模式有無使用投落送資料實驗的模擬路徑如圖 30 所示。平均而言使得數值模式 6 小時路徑預報改善 8 %，12 小時路徑預報改善 33 %，18 小時預報改善 21 %，而 24 小時預報則改善 14 %。平均總改善程度為 15.2 %。

b. 凡那比颱風

(1) 中央氣象局

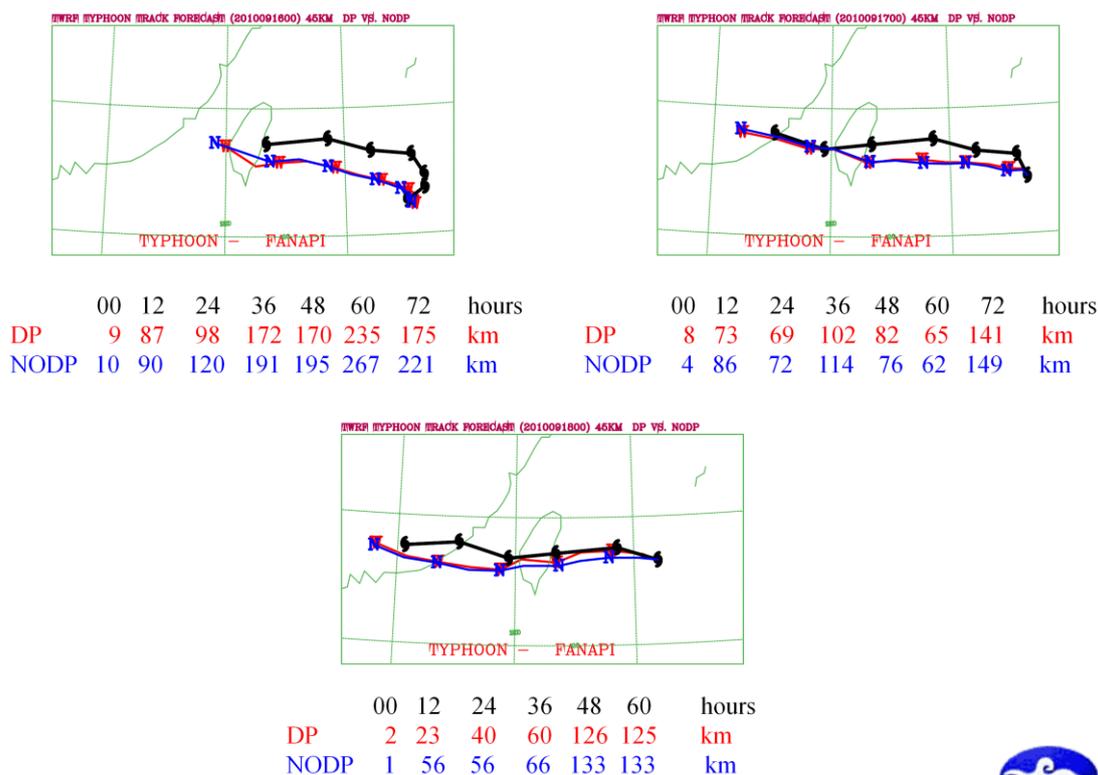


圖 31：中央氣象局凡那比颱風數值模式路徑模擬比較圖（黑線為觀測資料；紅線 W 為加入 2010 年 9 月 16、17 及 18 日對凡那比颱風之追風觀測資料後的模擬結果，而藍線 N 則為未加入追風觀測資料之對比）。（圖片由氣象局陳得松等提供）

因此由圖 31 可看出在凡那比颱風的數值模擬部份，加入了追風資料對模擬結果有正面影響，可將 24 小時模擬誤差由 133 公里降為 126 公里，而在 60 小時預報則由 133 公里誤差減為 125 公里。

在今年度對凡那比颱風的飛機觀測有三次，第一次為 9 月 16 日的飛機觀測資料，平均而言使得數值模式 12 小時路徑預報改善 3 %，24 小時預報改善 18.3 %，而 36 小時預報則改善 10 %，48 小時預報改善 12.8 %，另 60 小時預報為 12 %，72 小時路徑預報之平均改善程度為 20.8 %。平均總改善程度為 12.8 %。

第二次為 9 月 17 日的飛機觀測資料，平均而言使得數值模式 12 小時路徑預報改善 15.1 %，24 小時預報改善 4.2 %，而 36 小時預報則改善 10.5 %，48 小時預報改善 7 %，另 60 小時預報為 5 %，72 小時路徑預報之平均改善程度為 5.3 %。平均總改善程度為 8 %。

第三次為 9 月 18 日的飛機觀測資料，平均而言使得數值模式 12 小時路徑預報改善 59 %，24 小時預報改善 29 %，而 36 小時預報則改善 9 %，48 小時預報改善 5.3 %，另 60 小時預報改善程度為 6 %。平均總改善程度達 21.7 %。

(2) 美國 NCEP

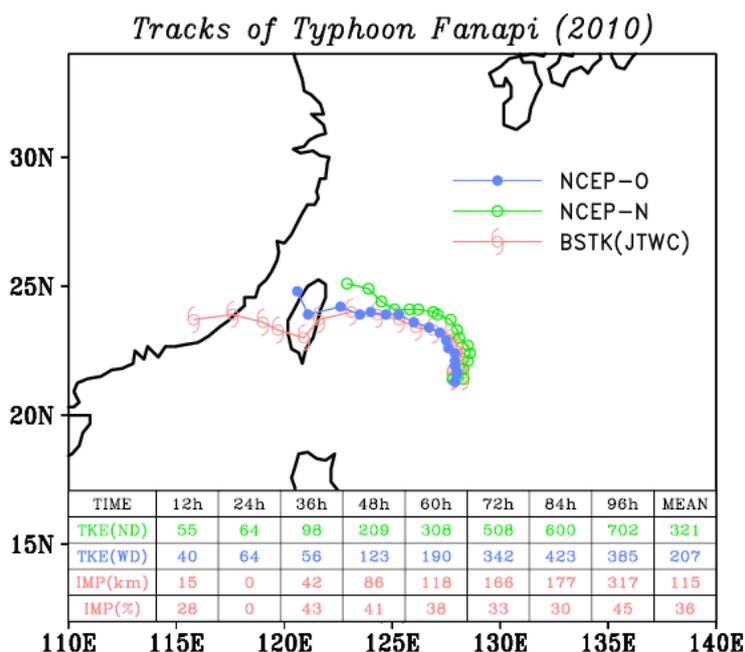


圖 32：NCEP GFS 模式對 9 月 16 日凡那比颱風數值模式路徑模擬比較圖（紅線為觀測資料；藍線為加入追風觀測資料後的模擬結果，而綠線則為未加入追風觀測資料之對比）。

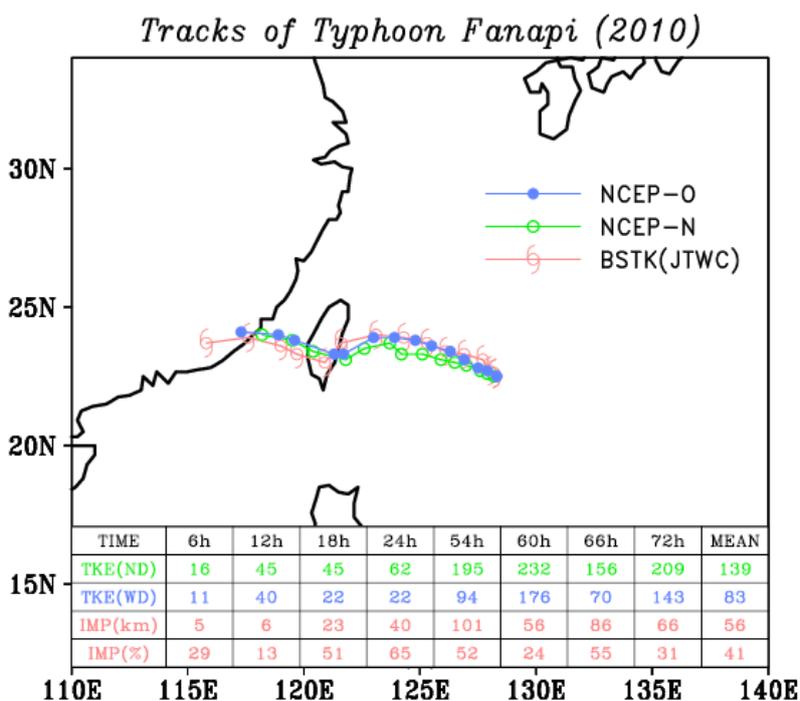


圖 33：NCEP GFS 模式對 9 月 17 日凡那比颱風數值模式路徑模擬比較圖（紅線為觀測資料；藍線為加入追風觀測資料後的模擬結果，而綠線則為未加入追風觀測資料之對比）。

觀測資料之對比)。

在今年度對凡那比颱風前二次(9月16日及17日；而第三次18日的評估結果 NCEP 尚未公布)的飛機觀測，NCEP GFS 模式有無使用投落送資料實驗的模擬路徑如圖 32 (16日)、圖 33 (17日) 所示。平均而言使得數值模式 12 小時路徑預報改善 28 % 及 13 %，24 小時路徑預報改善 0 % (16日) 及 65 % (17日)，對 16日之 36 小時預報改善 43 %、48 小時預報改善 41 %，而對 17日之 54 小時預報改善達 52 %，60 小時預報改善 38 %、24 %，對 17日之 66 小時預報改善達 55 %，72 小時預報改善 33 %、6531 %，84 小時預報改善 30 %，而 96 小時預報則改善 45 %。

綜合而言，今年度對凡那比颱風前二次(9月16日及17日)飛機觀測，對 NCEP GFS 模式平均總改善程度達 36 % (16日) 及 40 % (17日)，改善程度相當明顯。

c. 梅姬颱風

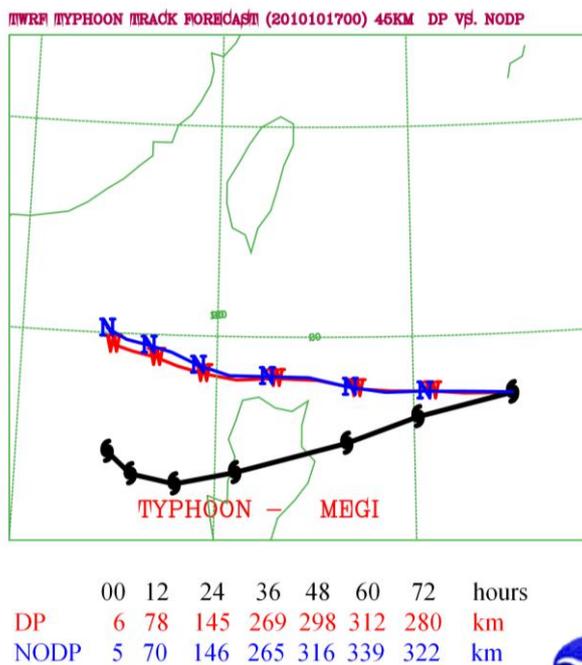


圖 34：中央氣象局梅姬颱風數值模式路徑模擬比較圖（黑線為觀測資料；紅線 W 為加入 10 月 17 日對梅姬颱風之追風觀測資料後的模擬結果，而藍線 N 則為

未加入追風觀測資料之對比)。(圖片由氣象局陳得松等提供)

由圖 34 可看出在梅姬颱風的數值模擬部份，加入了追風資料對模擬結果仍有正面影響，在 48 小時模擬後路徑誤差開始明顯由 316 公里減少為 298 公里。而在 72 小時預報誤差則由 322 公里誤差減為 280 公里。

另外在圖 3 時已顯示由中央氣象局提供 2008 年至 2010 年共三年統計 14 個颱風 23 個追風觀測個案所進行之 TWRP 颱風預測模式路徑誤差比較圖，可看出這三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，平均而言使得數值模式 12 小時路徑預報改善 17.9 %，24 小時預報改善 7.1 %，而 36 小時預報則改善較微，僅 0.87 %，48 小時預報改善 7.6 %，另 60 小時預報為 8.8 %，72 小時路徑預報之平均改善程度為 13.1 %，誤差值由 251 公里降為 218 公里。因此總的來說，這三年（2008-2010 年）加入了追風飛機偵察及投落送觀測資料（14 個颱風、23 個飛機觀測個案）對於颱風路徑模擬的影響，整體而言使得數值模式平均改善達 9.3 %。

五、結論

台大大氣科學系吳俊傑與林博雄教授所共同主持的國科會颱風重點研究計畫及氣象局委託研究計畫，首要研究項目是以全球衛星定位式投落送進行飛機觀測，名為侵台颱風之飛機偵察及投落送觀測實驗，又名追風計畫（Wu et al. 2005）。此計畫將使用 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 英尺的高度投擲投落送，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 2003-2010 年的研究成果中，總共針對 39 個颱風執行 51 次觀測任務，飛機累計飛行時數超過 270 小時並拋投 846 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%。本研究團對亦使用 MM5 adjoint modeling system 所發展一套新的架構來尋找影響颱風駛流的敏感區域，此一方法以即時運用於每次的飛機觀測中（Wu et al. 2007b）。另一方面，研究團隊亦使用 MM5 模式與其伴隨的 3DVAR 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.(2010b)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。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（Chou et al. 2010a），藉此提升遙測颱風參數的可信度。

本委託計畫延續追風計畫過去所累積之研究成果，繼續執行使用 GPS 投落送進行颱風飛機偵察之觀測任務，拋投投落送進行颱風周遭大氣資料量測，透過衛星電話撥接回傳中央氣象局，並即時顯示於氣象局 WINS 系統。

總之，此研究將進行西北太平洋地區颱風偵察飛機觀測實驗。研究人員將直

接飛行到接近台灣的颱風周圍上空，投擲 GPS 投落送（GPS Dropsonde），藉此取得颱風周圍最敏感地區的大氣環境詳盡資料。此資料將即時傳輸至中央氣象局資料處理中心，與電腦預報模式相結合，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重大突破。

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，而氣象局的付出與投入亦能符合社會大眾最迫切的需求，如此學界與氣象局將創造雙贏的局面。總之，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。我們感謝中央氣象局之充分支持，讓這一個重大的學術及作業研究計畫持續發揚光大，進而造福民生。

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、中研院環境變遷研究中心、美國海軍 ONR、美國 TCS08 計畫、日本 TH08 計畫、T-PARC 及 ITOP 實驗計畫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與奉獻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, J.-H., M. S. Peng, C. A. Reynolds, and C.-C. Wu, 2009: Interpretation of tropical cyclone forecast sensitivity and dynamics from the NOGAPS singular vector perspective. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 3383-3400.
- Chen, J.-H., M. S. Peng, C. A. Reynolds, and C.-C. Wu, 2009: Interpretation of tropical cyclone forecast sensitivity and dynamics from the NOGAPS singular vector perspective. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 3383-3400.
- Chen, S.-G., C.-C. Wu, J.-H. Chen, and K.-H. Chou, 2010 a: Validation and interpretation of adjoint-derived sensitivity steering vector as targeted observation guidance. *Mon. Wea. Rev.* (under review)
- Chen, S.-G., S. J. Majumdar and C. C. Wu, 2010 b: Properties of the Ensemble Transform Kalman Filter adaptive sampling strategy for tropical cyclones. Proc., 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, AZ.
- Chou, K.-H., and C.-C. Wu, 2008: Development of the typhoon initialization in a mesoscale model - Combination of the bogus 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 2010a, 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, 2010b: The impact of dropwindsonde observations on typhoon track forecasts in DOTSTAR and T-PARC. *Mon. Wea. Rev.* (accepted)
- Dunion, J. P., and C. S. Velden, 2002: Application of surface-adjusted GOES low-level cloud-drift winds 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.
- Harnisch, F., and M. Weissmann, 2010: Sensitivity of typhoon forecasts to different subsets of targeted dropsonde observations. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 2664–2680.
- 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.
- 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.
- 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, 2010: The influence of dropsondes on typhoon track and mid-latitude forecasts. *Mon. Wea. Rev.* (accepted)
- 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., S.-G. Chen, J.-H. Chen, K.-H. Chou, and P.-H. Lin, 2009: Reply to comments on “Typhoon-trough interaction from both Adjoint-Derived Sensitivity Steering Vector (ADSSV) and Potential Vorticity (PV) perspectives.” *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 4425-4432.
- 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. Sci.*, **67**, 3806-3822.
- Wu, C.-C., 2010: Targeted observations for TC trackforecasting. *Proc.*, The Seventh WMO International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-VII). World Meteorological Organization, Saint-Gilles les bains, La Reunion, France. Nov. 15-20.
- Wu, C.-C., 2010: Targeted Observation, Data Assimilation, and Tropical Cyclone Predictability. Workshop on Cross-Strait Typhoon and Heavy-Rainfall Research Collaboration Program. Shang-hai, China. Sep. 05-07.
- 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.