

# 追風十年回顧 - 中年 Wu & LinPo 的奇幻歷程

吳俊傑

國立臺灣大學大氣科學系

(本文刊登於 102 年 3 月 21 日中華民國氣象學會第五十四期會刊)

## 一、前言

1996 年，電影「龍捲風」描述一群科學家到處追風，把探測儀捲進龍捲風以完成研究的冒險故事；2003 年，我們創建了「追風計畫」，搭乘飛機追逐颱風投擲投落送探測儀，期待更具開創性的研究成果；就在追風十年後的 2012 年，電影「少年 Pi 的奇幻漂流」敘述了一則信仰與冒險的故事，大自然的壯麗與無情、主人翁的信仰與經歷，使追風十年卻已屆中年的我們，重新體會我們所走過的一段奇幻歷程。感謝國科會、中央氣象局及大氣學界的支持，我們於過去十年(2003 至 2012)得以順利完成「侵台颱風之飛機偵察及投落送觀測實驗」[Dropwindsonde Observation for Typhoon Surveillance near the TAIwan Region (DOTSTAR)，代號為追風計畫]。

DOTSTAR 計畫在國科會及氣象局經費支持下，由我國研究人員[個人為計畫主持人，台灣大學大氣科學系林博雄教授與中央氣象局葉天降主任(現為副局長)為共同主持人]所主導的跨部會、台、美、日三國跨國合作的國際研究計畫，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(NCEP)、日本氣象廳/氣象研究所(JMA/MRI)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。

DOTSTAR 計畫乃是西北太平洋地區自 1987 年以來，首次以飛機及投落送偵察颱風環境結構的觀測實驗，研究人員直接飛行到接近台灣的颱風周圍 43000 英尺上空，投擲 GPS 投落送(Dropwindsonde)，藉此取得颱風周圍最敏感地區的大氣環境資料。此資料能即時傳輸至中央氣象局資訊中心，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、強度及風雨分布的預報。

DOTSTAR 計畫使用 ASTRA 飛機與機載垂直大氣探空系統(AVAPS)設備，以每架約五至六小時飛行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，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/GFDL)、UKMET 以及 JMA 等模式中 (圖 1)，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，特別是颱風邊界層的了解 (Wu et al. 2005, *BAMS*)。其成果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)、提昇資料同化 (data assimilation) 研究能力，可說是颱風基礎及預報研究的火車頭先驅實驗。

### Dropwindsonde Observations for Typhoons near the Taiwan Region (DOTSTAR)

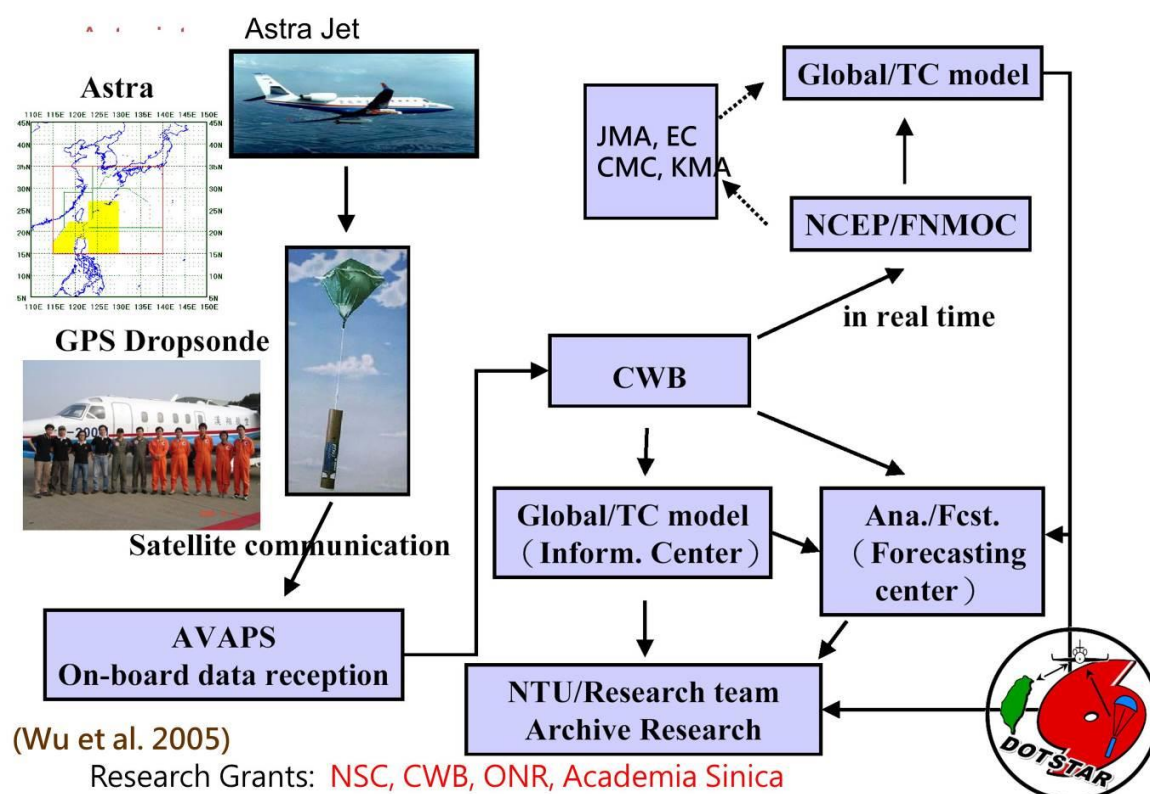


圖 1: DOTSTAR 資料傳輸作業流程圖。

## 二、 參與單位及人員

參與單位：臺灣大學、中央氣象局、漢翔航空公司、民用航空局、中央大學、中國文化大學、中央研究院、HRD/NOAA (Hurricane Research Division/ National Oceanic and Atmospheric Administration)、NCEP (National Centers for Environmental Prediction)、GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)、NCAR (The National Center for Atmospheric Research)、ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)、FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and

Oceanography Center)、MIT (Massachusetts Institute of Technology)、IPRC (International Pacific Research Center)、JMA/MRI (Japan Meteorological Agency/ Meteorological Research Institute)、KMA (Korea Meteorological Administration)、DLR (德國航太中心)、Univ.of Miami、Univ. of Wisconsin-Madison 等

- 台灣大學：吳俊傑、林博雄、周仲島、林依依、徐仲毅、盧濟明、顏自雄、張承傳、謝旻耕、李佳穎、王翔儀、郭崑皇、徐光前、陳占慧、黃葳芃、黃怡瑄、廖苡珊、連國淵、陳新淦、李宗翰、林詩潔、魏閻萱、鄭元銘、王品翔、吳舜楠、官欣平、許誌尤、陳英浩、林和駿、周婉婷、黃培育、蕭鋒、劉志益、李亞衡、王璿璋、鍾吉俊、吳華富、張譯心、丁嘉雋
- 中央氣象局：葉天降、鄭明典、程家平、林秀雯、洪景山、馮欽賜、藤春慈、陳雯美、黃麗玫、林淑卿、呂國臣、黃葳芃、黃椿喜、陳得松、黃康寧、艾寧靜
- 中央大學：林沛練、黃清勇
- 漢翔：曹家祥、尹禮雄、徐雲龍、陳健、吳經文、林惠龍、朱泰樺
- 文化大學：周昆炫、劉清煌、遲正祥、葉峻銘
- 美國：Frank Marks、Sim Aberson (HRD)、Hua-Lu Pan (NCEP)、Morris Bender (GFDL)、Melinda Peng、Carolyn Reynolds (NRL)、Pat Harr (NPS)、Sharan Majumdar (U. Miami)、Kerry Emanuel (MIT)、Yuqing Wang (IPRC)、W.-C. Lee (NCAR)、C. Velden (U. Wisconsin)
- 日本：T. Nakazawa、M. Yamaguchi (JMA/MRI)
- 英國：R. Buizza (ECMWF)
- 德國：Martin Weissmann (DLR)

### 三、研究歷程與成果

有鑑於歷年颱風屢屢重創台灣地區造成重大災害，颱風研究的重要性不容小覷 (Wu and Kuo, 1999)，國科會自 2002 年 8 月起 (2008 年起由氣象局支持後續經費) 提供相當之經費補助筆者所主持的「颱風重點研究」。

此重點研究與美國國家大氣及海洋總署所屬颶風研究中心 (HRD) 及環境預報中心 (NCEP) 進行密切合作，2002 年 8-9 月個人帶領四位研究人員 (林博雄、劉清煌、洪景山、林沛練) 赴美國颶風研究中心，進行為期兩個月的大西洋颶風偵察飛機觀測訓練任務。在經過一連串的準備工作後，於 2003 年 5 月 23 日、6 月 13 日和 6 月 24 日完成了三次測試飛行，

並且進而在 2003 年 9 月 1 日完成了歷史性的杜鵑颱風首航任務。

2003 年 9 月至 2012 年底，追風計畫已針對杜鵑、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、梅姬、米雷、梅花、洛克、以及 2012 年之泰利、杜蘇芮、蘇拉、啟德、天秤、布拉萬及杰拉華等 49 個颱風完成 64 航次之飛機偵察及投落送觀測任務，總計在颱風上空飛行 334 小時、並成功投擲 1051 枚投落送（圖 2），其中 2008 及 2010 年均加入國際觀測實驗，與日、德的 Falcon、美國的 P3、C130 等飛機進行颱風聯合觀測。圖 3 顯示 2008 年 T-PARC 實驗的示意圖，實驗期間針對如麗、辛樂克、哈格比、薔蜜等 4 個颱風進行聯合觀測；2010 年則參與了 ITOP 實驗（圖 4），執行凡那比及梅姬颱風的聯合觀測任務。

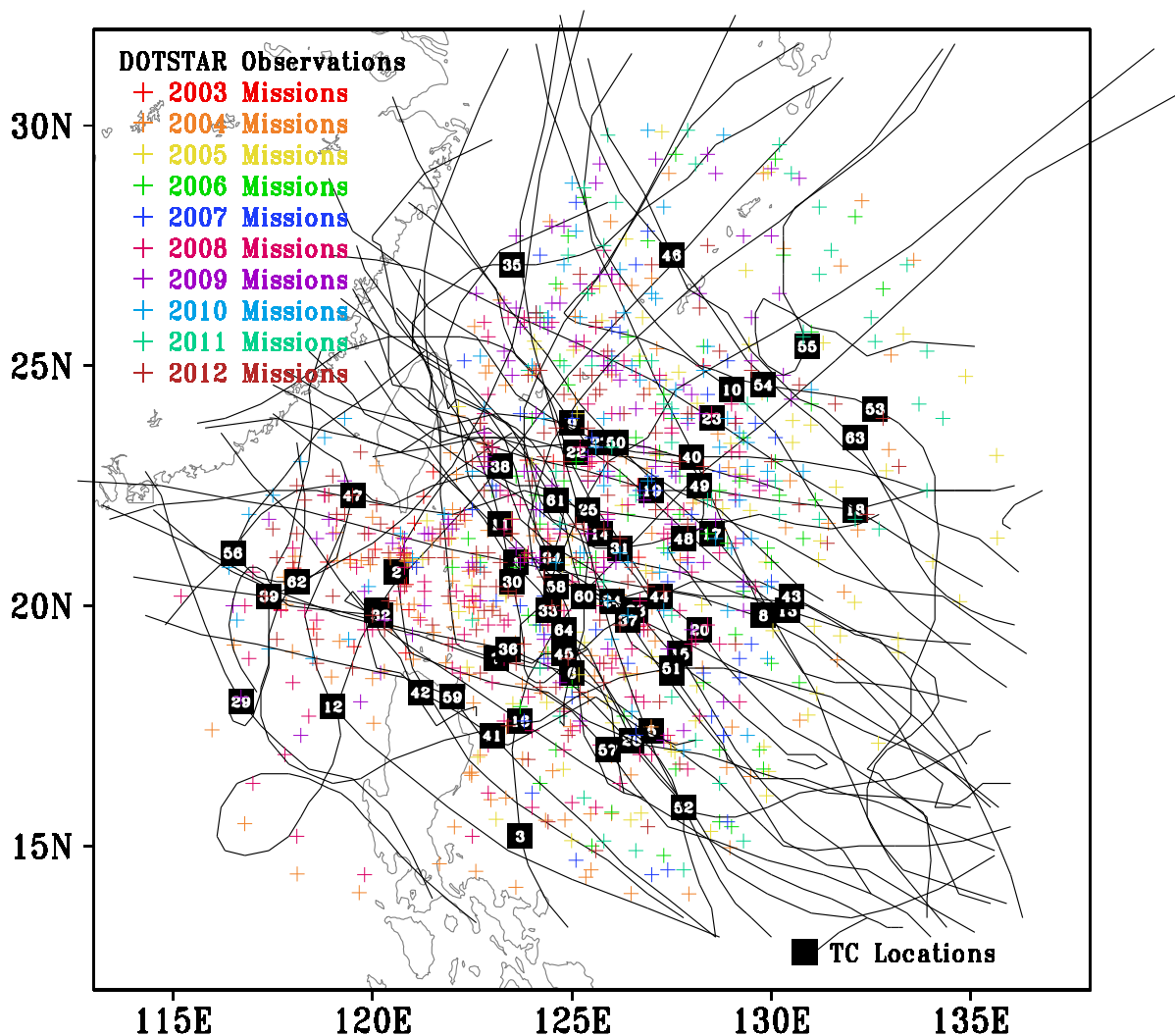


圖 2:2003 年至 2012 年追風計畫完成偵察之 49 個颱風路徑(黑線)，以及所投擲 1051 枚投落送位置(十字標誌)。



## THORPEX-PARC Experiments (2008) and Collaborating Efforts

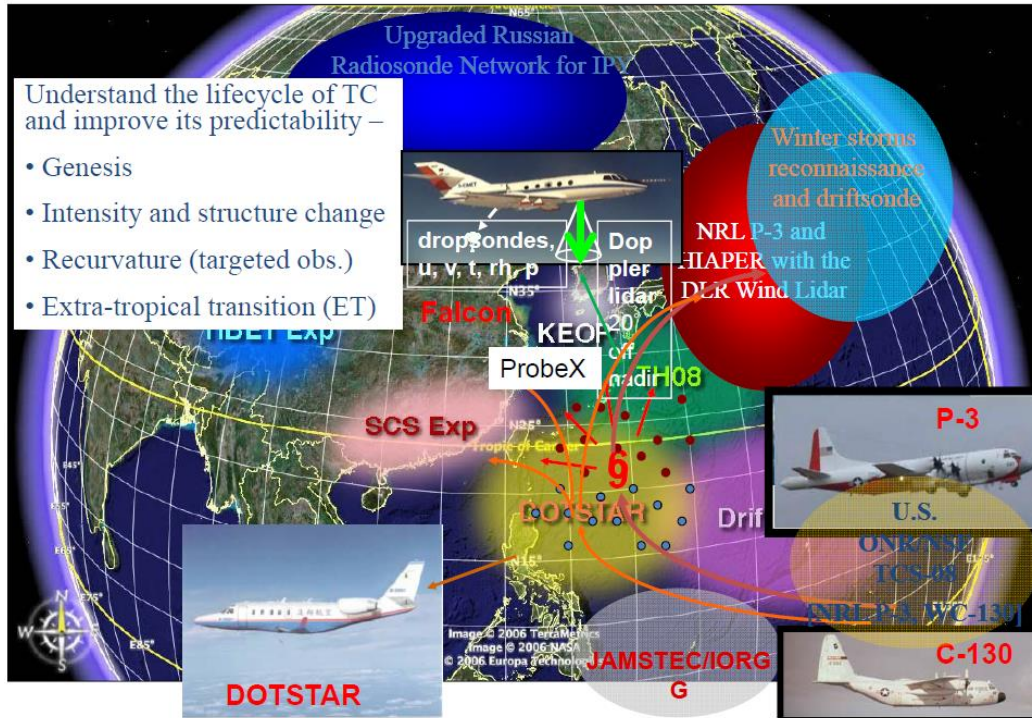


圖 3: 2008 年 T-PARC 實驗之聯合觀測示意圖。

## ITOP ensemble reanalysis based on EnKF (ITOP\_EnKF)

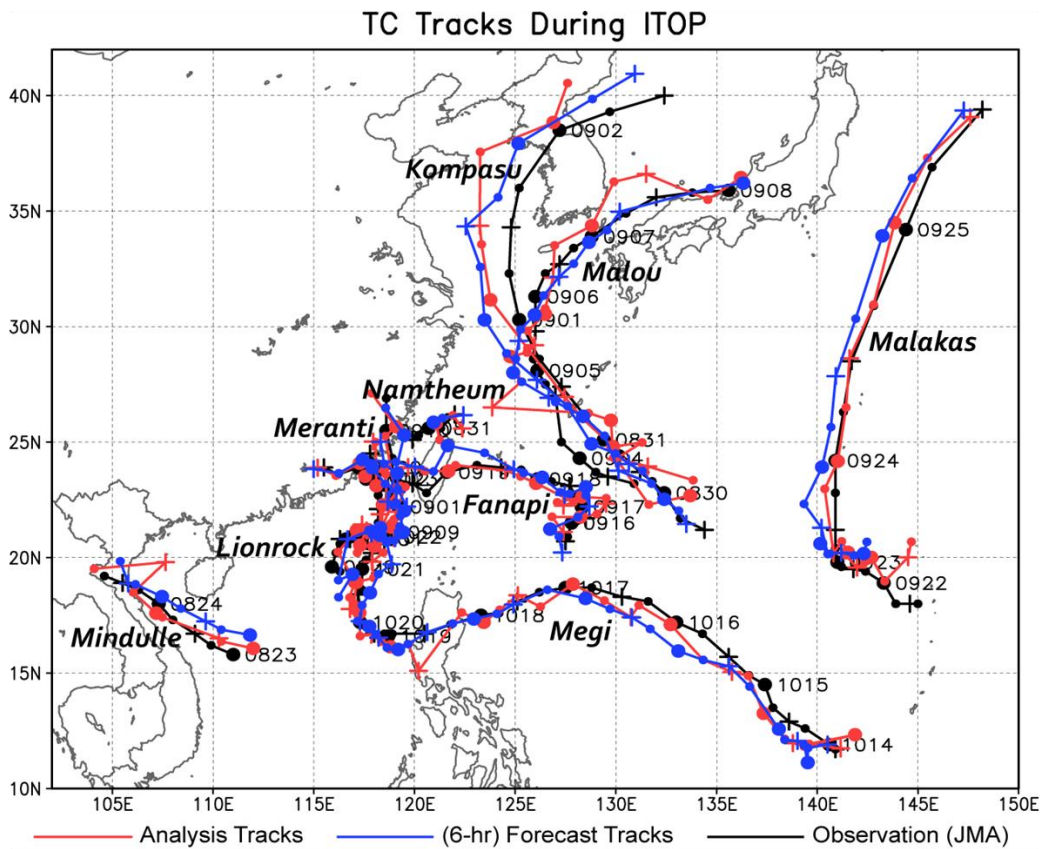


圖 4: 2010 年 ITOP 實驗期間的颱風路徑。

為充分掌握飛行資源及時效，如何規畫「策略性觀測(targeted observing strategy)」為整體觀測任務中相當重要的環節。研究團隊使用及發展最新策略性觀測方法，包括「系集深層平均風變異 [ ensemble deep-layer mean (DLM) wind variance, Aberson 2003]」、「系集變換卡爾曼濾波器 [Ensemble-Transform Kalman Filter (ETKF), Majumdar et al. 2002]」、「奇異向量 (Singular Vector, Peng and Reynolds 2006)」、及「颱風駛流敏感共軛向量 [Adjoint-Derived Sensitivity Steering Vector (ADSSV), Wu et al. 2007a]」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。

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颱風外圍結構，如暴風半徑與雨帶結構特徵等 (Wu et al. 2005, 2007a,b)。研究團隊發展以共軛模式計算出颱風觀測敏感區域的創新策略理論 (Wu et al. 2007a)，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。目前亦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。

研究結果顯示，美國氣象局、美國海軍及日本氣象廳全球電腦模式加入追風計畫的投落送資料後，對於颱風路徑預測準確度的改進平均可達 20% (Wu et al. 2007b)。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平均能夠有效地減少 12-72 小時路徑預報誤差達 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) 42 個個案，探討投落送資料於 NCEP GFS 模式對路徑模擬的影響，結果顯示投落送資料可以改善 NCEP GFS 模式 72-120 小時的颱風路徑誤差達 19% 左右。另一方面，投落送也已成功用來驗證及校正衛星與雷達等遙測資料 (Chou et al. 2010)。研究使用 2003-2007 年追風計畫所觀測的 457 枚投落送資料與衛星反演風場進行比對，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 度。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。

DOTSTAR 研究團隊已經發表數十篇相關之論文(計有 Wu et al., 2004, *AS*; Wu et al., 2005, *BAMS*; Wu et al., 2006, *JAS*; Wu et al., 2007a, *JAS*, b, *Wea. Forecasting*; Chou and Wu, 2008, *MWR*; Chen et al., 2009, *JAS*; Yamaguchi et al., 2009, *MWR*; Wu et al., 2009a, b, c, *MWR*; Chou et al., 2010, *JGR*; Wu et al., 2010, *JAS*; Chen et al., 2011, *MWR*; Chou et al., 2011, *MWR*; Majumdar et al., 2011, *QJRM*; Weissmann et al., 2011, *MWR*; Huang et al., 2012, *JAS*; Jung et al., 2012, *Tellus A.*; Wu et al., 2012a, b, *MWR*; Ito and Wu, 2013, *JAS*; 吳等, 2003; 徐, 2004; 陳, 2005; 黃, 2006; 周, 2007; 陳, 2009; 廖, 2009; 連, 2009; 宋, 2010; 陳, 2011; 林, 2012; 黃, 2012 等 34 篇)。此外, DOTSTAR 科學團隊在 2006 至 2012 年參與國際研討會發表之相關論文, 總計有 58 篇 DOTSTAR 計畫相關研究成果論文發表。並於 2009-2010 年期間在美國氣象學會所發行的國際著名學術期刊 *Monthly Weather Review* 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”; 圖 5)。

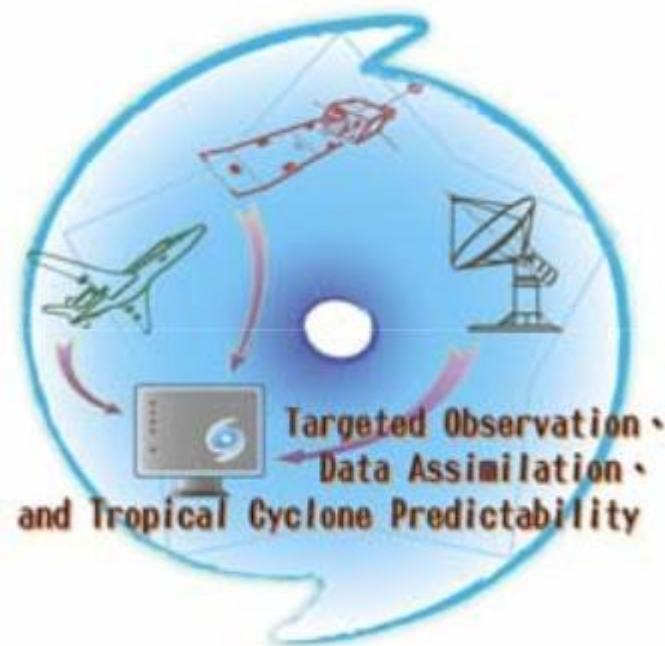


圖 5: 國際學術期刊 *Monthly Weather Review* 之論文專刊 LOGO



### 以下摘要簡述研究之重要成果：

Wu et al. (2009a) 以 MM5 共軌模式敏感駛流向量 (ADSSV) 的觀點探討影響 2006 年珊珊颱風運動的敏感區域及大尺度系統，並進一步運用位渦診斷分析這些系統對於颱風駛流的貢獻，與 ADSSV 的敏感性結果作驗證 (圖 6)。這是以位渦動力詮釋策略性觀測理論的創新工作。

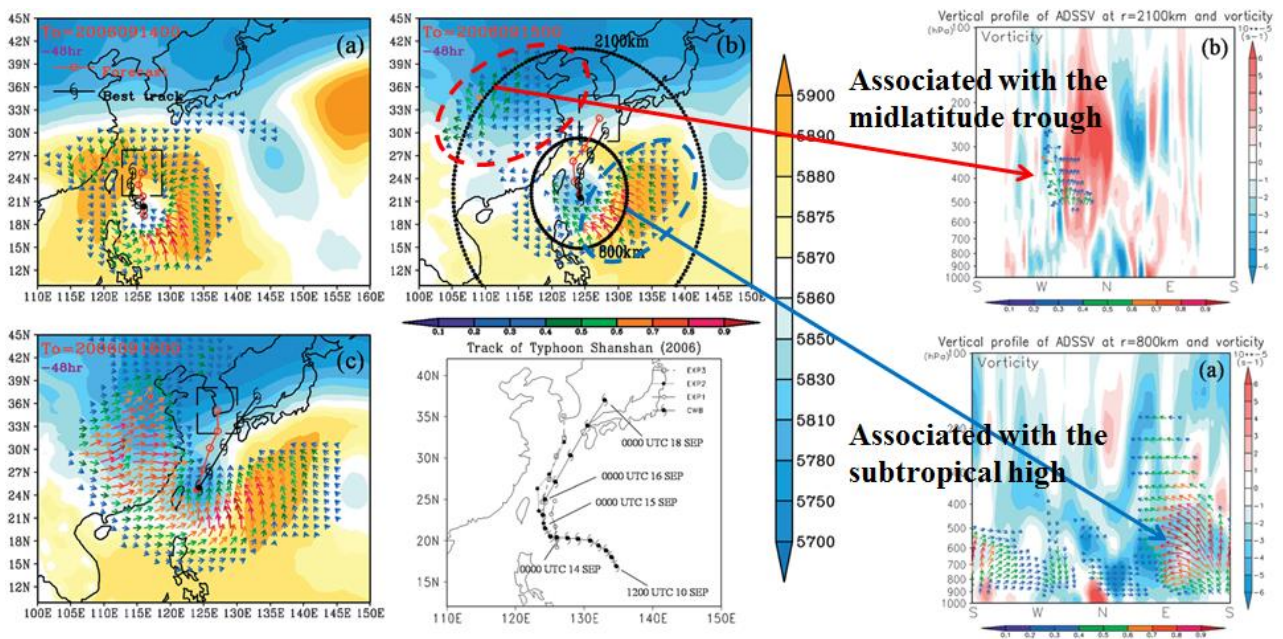


圖 6: MM5 ADSSV 圖(Wu et al. 2009a)

Wu et al. (2009b) 為個人領導國際一流相關研究團隊成員進行颱風觀測策略理論比較之獨特研究，分別由台灣國科會、美國 NSF (National Science Foundation) 及 ONR (Office of Naval Reserach) 經費支持下所完成。此研究為國際合作，共有 11 位共同作者，結合世界最先進作業中心與研究單位 (NTU, NRL, JMA/MRI, NCEP, ECMWF, NOAA/HRD, Univ. of Miami) 針對颱風之觀測策略理論進行系統性的分析與動力比較 (圖 7)，以瞭解各個觀測策略理論方法之異同 (包括 JMA SV, NOGAPS SV, ECMWF SV, NTU ADSSV, ETKF, NCEP Variance) 及其動力特徵，作為實質策略性觀測之重要指標。此論文於 2009 年 9 月的 WMO 3<sup>rd</sup> THORPEX Science Workshop 的 “Session on Targeted observation” 為主持人兼引言人 (Prof. Istvan Szunyogh and Dr. Rolf Langland) 加以引述為有關觀測策略理論最新的指標成果。此論文同步於 ECMWF Research Department 以 Technical Memoranda #582 刊印於 ECMWF。



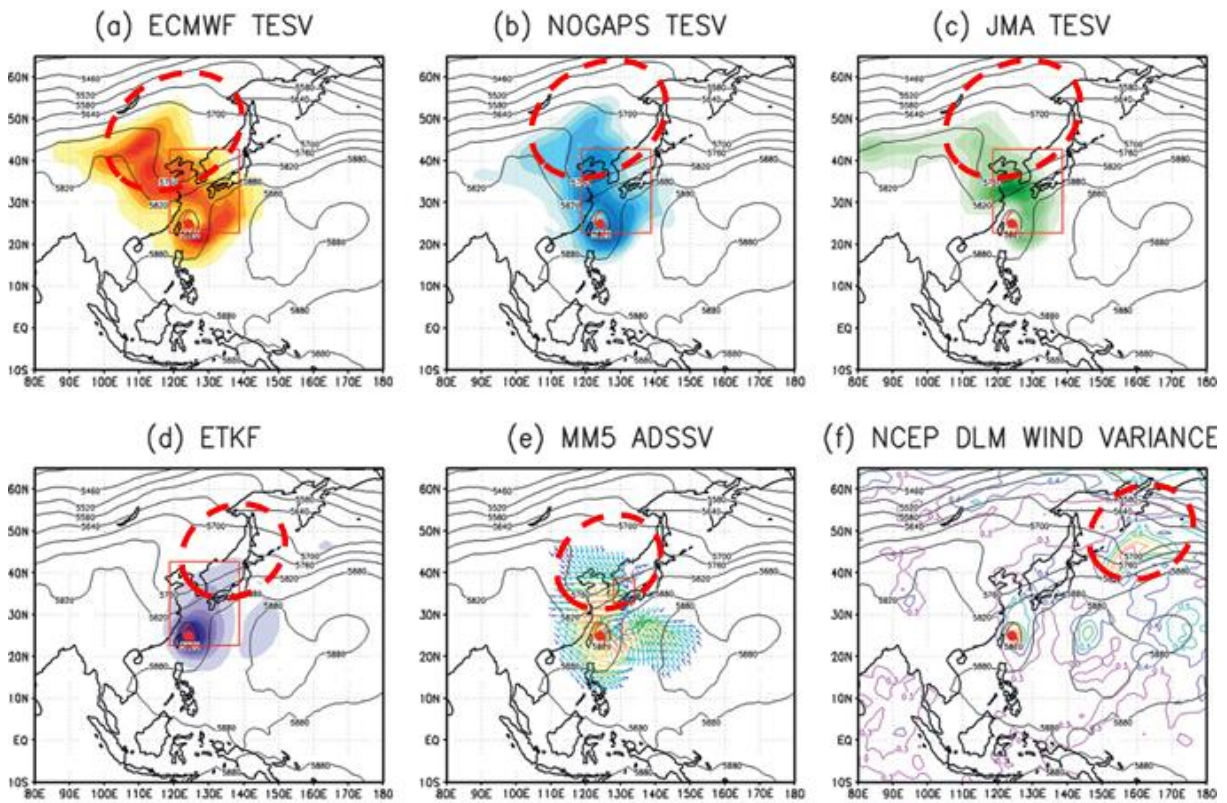


圖 7: 不同模式策略性觀測方法之敏感區比較，2006 年珊珊颱風個案  
(Wu et al. 2009b)

Chou et al. (2010) 為第一篇以投落送資料系統性驗證颱風環境 QuikSCAT 海面風場資料的論文。運用投落送資料高垂直解析度特性，此研究發展出全新的投落送海面風場估計值，經由 DOTSTAR 超過 400 筆資料，得以找出針對不同風場大小流域、QuikSCAT 海面風場的最新誤差統計特性。加上使用微波衛星資料，此研究提出 QuikSCAT 現有 rain flag 不夠完整之修正建議。

Chou et al. (2011) 探討 DOTSTAR (2003-2009) 及 T-PARC (2008) 期間所獲得的投落送資料對颱風路徑預報的影響(圖 8)，結果突顯 T-PARC 及 DOTSTAR 期間投落送資料對於 NCEP 模式模擬颱風路徑的重要助益。其中投落送資料改善 NCEP 模式 1 到 5 天的路徑模擬結果，平均改善程度為 10%-20%。

## GFS Impact from 2003 to 2009 (DOTSTAR)

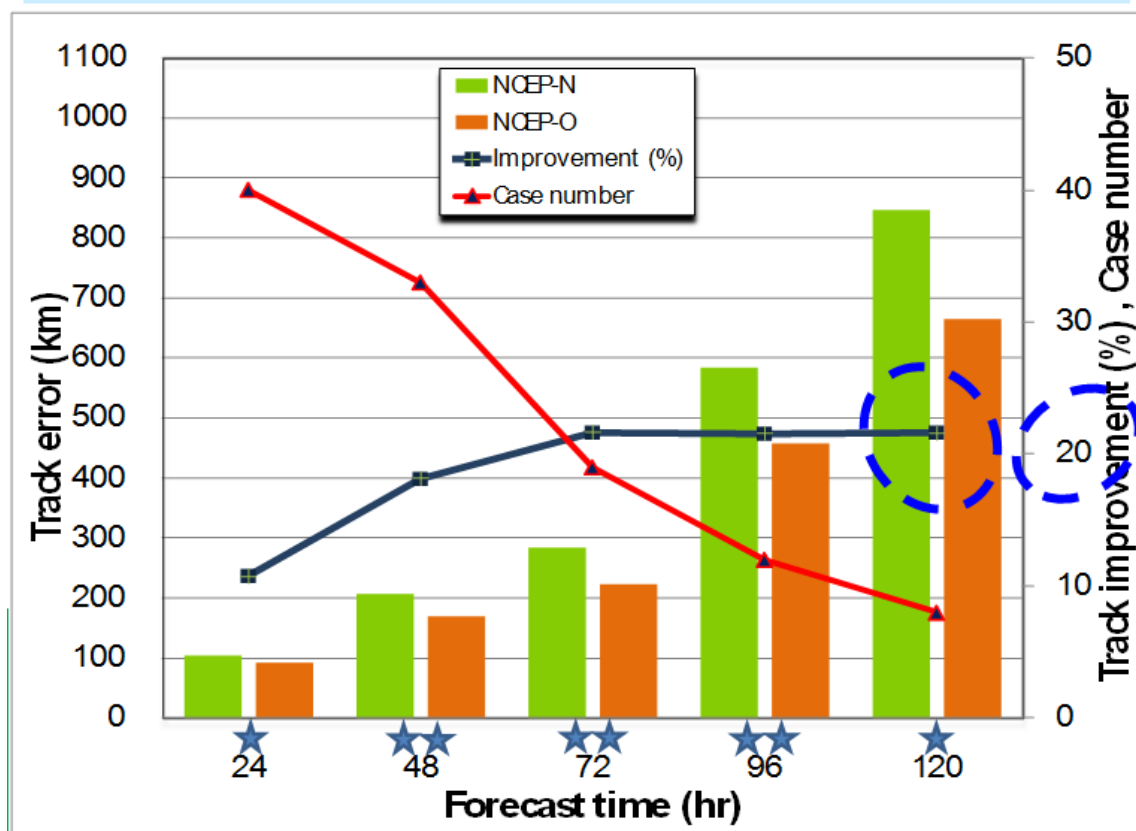


圖 8: DOTSTAR (2003-09) 及 T-PARC (2008) 期間所獲得的投落送資料對颱風路徑預報的影響(Chou et al., 2011)

Weissmann et al. (2011) 針對 T-PARC (2008) 期間所獲得的投落送資料，探討此珍貴資料對不同模式 (ECMWR、JMA、NCEP、及 WRF) 模擬颱風路徑預報的影響，結果顯示 T-PARC 期間所獲得的投落送資料對於上述所有模式模擬颱風路徑均有相當及不同程度的改善，其中對於 NCEP 及 WRF 模式之平均改善程度達 20%-40%。

Wu et al. (2012a) 使用 Wu et al. (2010) 發展之颱風初始化方法，並運用 2008 年 T-PARC 追風觀測資料 (尤其是 4 趟 C-130 之完整穿越颱風中心觀測所得颱風內核的飛機觀測資料)，進行辛樂克 (Sinlaku) 颱風之同化與模擬。數值模擬結果有效掌握辛樂克的演變過程，包含其路徑、強度及結構的變化 (圖 9)。其中特別受到矚目的研究議題為辛樂克之雙眼牆的形成及演變，數值模擬與資料同化的結果顯示，颱風外圍風場的增強與擴張為辛樂克颱風雙眼牆形成前的重要特徵。透過深入的動力分析，進一步提出一個新的雙眼牆形成之關鍵動力機制 (Huang et al., 2012)。

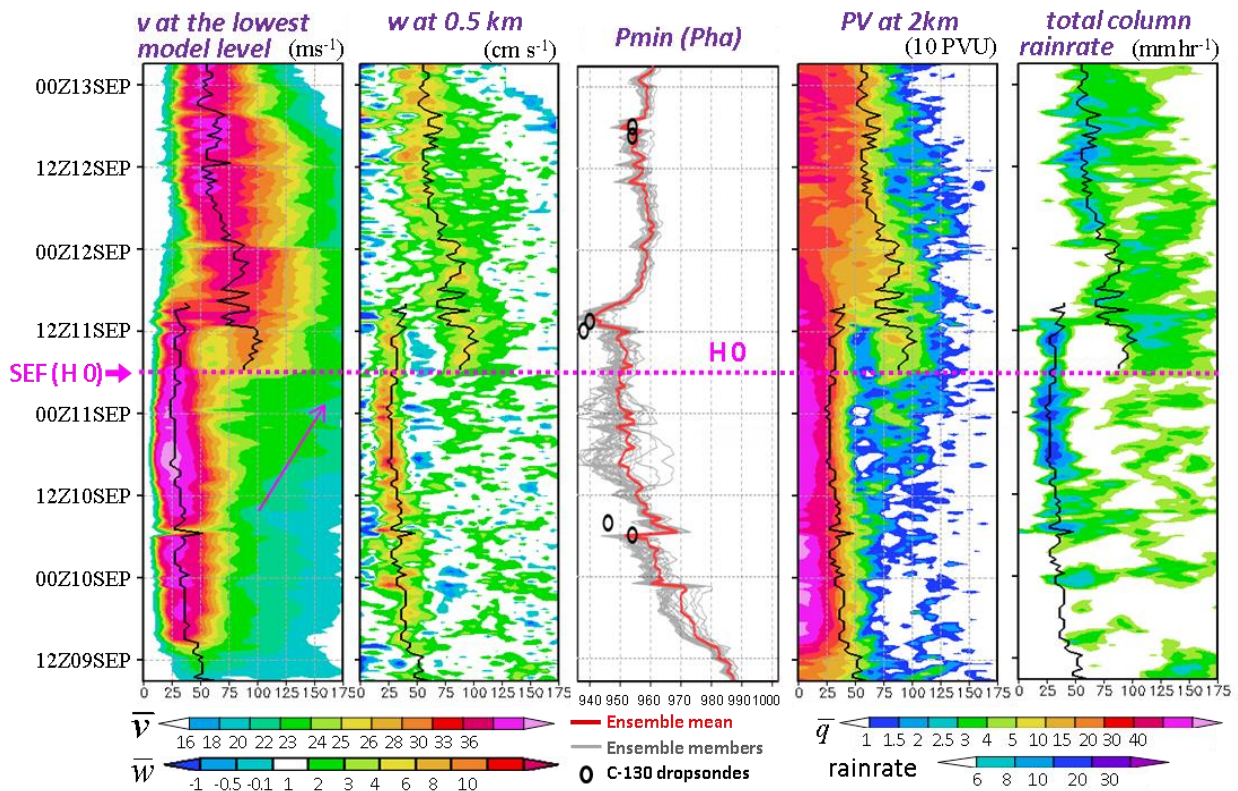


圖 9: 辛樂克颱風雙眼牆的形成及演變模擬結果(Wu et al., 2012a)

Huang et al. (2012) 透過 Wu et al. (2012a) 同化模擬辛樂克颱風的數值資料，此研究針對雙眼牆的形成進行一系列的動力分析（圖 10），探討雙眼牆形成之關鍵動力機制。此研究檢驗了邊界層內及附近的環流變化，發現在雙眼牆形成的區域偏離地轉風平衡之情況特別顯著，伴隨而來的主、次環流變化過程會進一步增強此不平衡之狀態，此持續的正回饋過程與雙眼牆之形成有密切關係。此研究提出一個全新的雙眼牆形成動力機制。此研究乃是雙眼牆動力的全新架構與熱門議題，國際上已有多個研究團隊（如 UCLA、SUNY Albany、Univ. of Washington、Univ. of Miami、Pennsylvania State Univ.、Naval Postgraduate school、Melbourne Univ.、Nanjing Univ.）廣泛引用此理論於後續研究中。



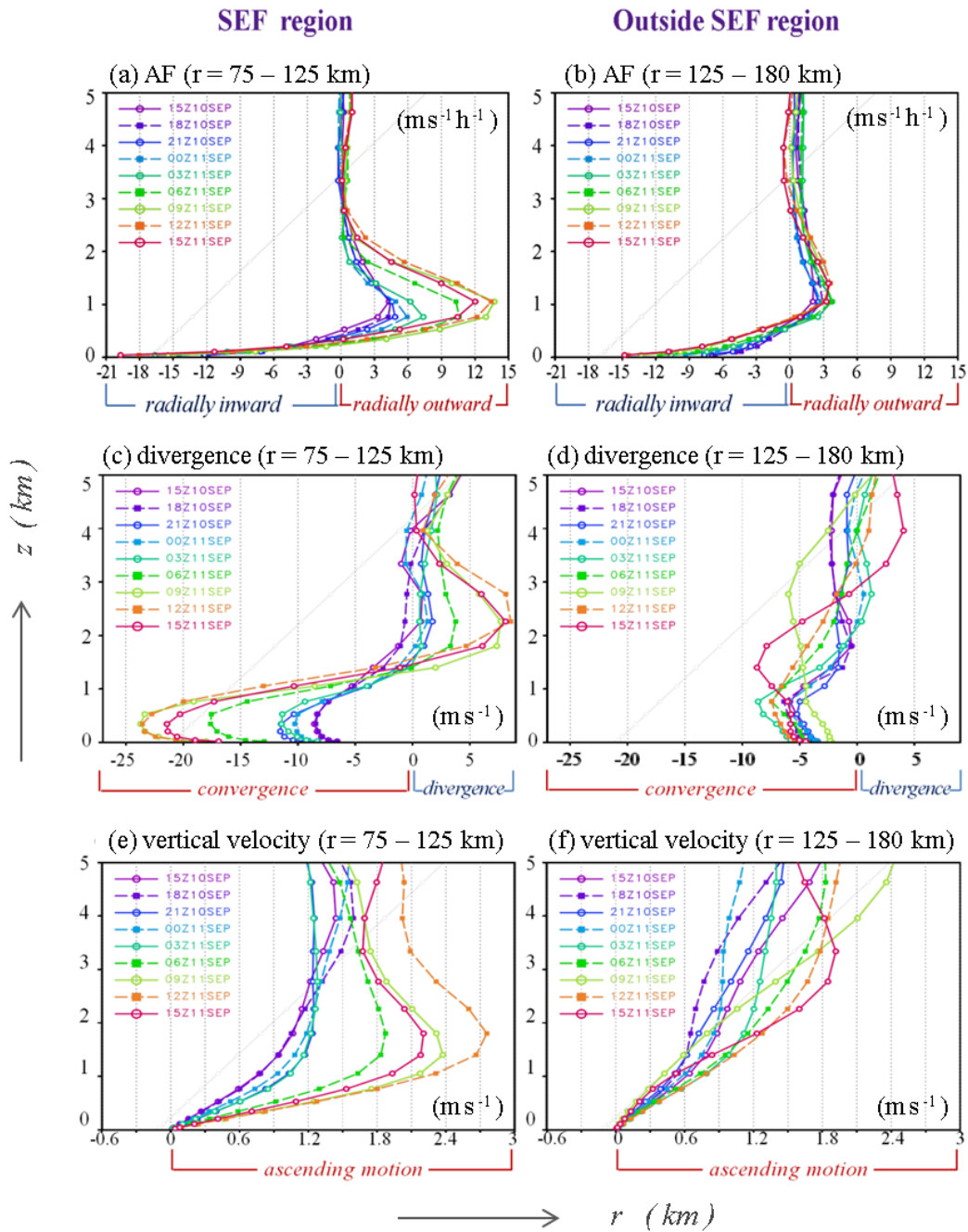


圖 10: 辛樂克颱風眼牆動力分析(Huang et al., 2012)

Wu et al. (2012b) 使用位渦診斷方法定量分析辛樂克颱風駛流場，結果顯示位於颱風東邊之太平洋高壓為導引辛樂克向西北移動的主要因子，另外也突顯 T-PARC 期間 DOTSTAR 投落送資料對於 NCEP GFS 模式模擬颱風的重要助益 (圖 11)。



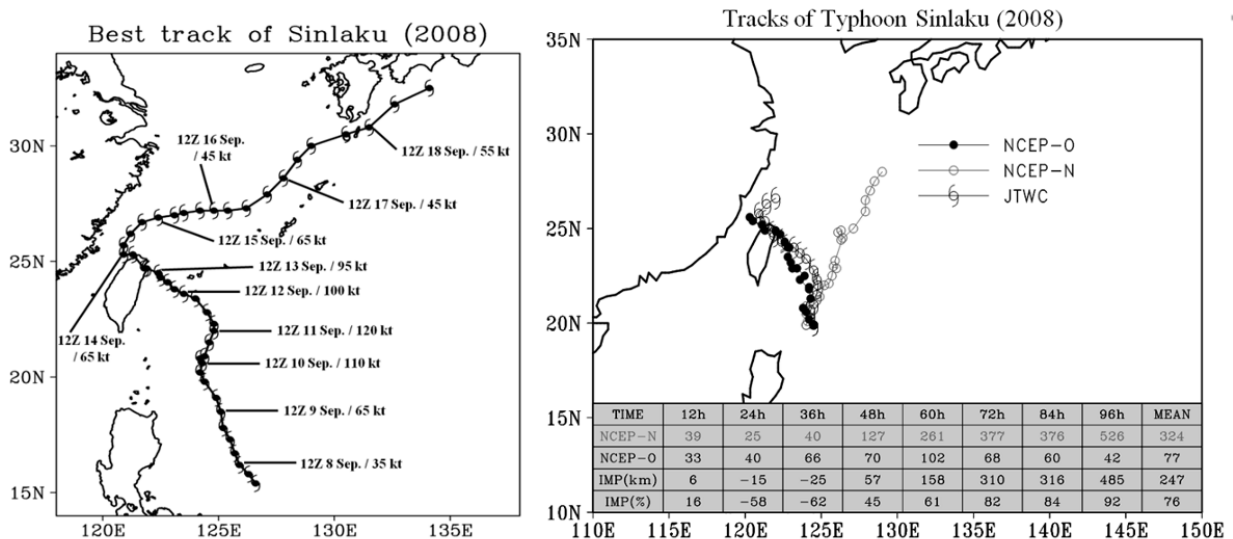


圖 11: 辛樂克颱風最佳路徑圖及 DOTSTAR 投落送資料對於 NCEP 模式模擬颱風路徑的影響程度圖(Wu et al., 2012b)

#### 四、 總結

基於颱風資料的缺乏，為求突破，個人過去十年積極主導國際颱風觀測實驗，獲得許多珍貴颱風資料，並使用及發展高解析度的數值模擬及同化技術，讓模式能夠與觀測資料充分結合，深入地探討出各種颱風結構、運動、移速及雨量等等科學議題，也發表了多篇重要且具開創性的科學期刊論文，並在國際颱風研究議題上扮演先驅的角色，成功地為台灣的颱風研究做出具體貢獻。期望後續透過追風計畫所獲得颱風附近寶貴的觀測資料，讓我們對於颱風移動、強度演變、降雨及颱風-環境流場、地形/颱風-海洋交互作用、颱風-氣候等等重要的科學議題，持續在颱風動力原理和應用上探索新的知識與突破。

過去十年追風計畫研究團隊與國內外各學術、作業單位完美合作，並在國科會及中央氣象局的支持與經費支援下，成功開創並完成許許多多的觀測任務與重大科學進展論文發表，目前追風研究團隊已完成在台灣追風任務的開創、技術研發及理論應用等階段性使命。2013年起，研究團隊已完整將追風計畫相關標準作業流程、技術與理論移轉給中央氣象局，以中央氣象局眾多專業人才以及過去十年與追風團隊豐富的合作經驗，相信今年（2013）起，中央氣象局及相關團隊必能在此良好基礎上接續此飛機觀測重任，成功進行未來的颱風飛機觀測作業。

## 致謝

感謝過去十年國科會、中央氣象局、中央研究院及美國 NCEP、HRD/AOML/NOAA、海軍研究中心 (NRL 及 ONR)、日本氣象廳之支持與協助，以及追風計畫研究團隊 (DOTSTAR & COOK) 的努力與奉獻，國內外大氣科學界先進的加持與指點、相關研究專家學者的參與合作，及中央氣象局、民用航空局與漢翔公司的全力配合協助，使得這極具開創性的先驅研究計畫得以順利進展，並圓滿完成這十年共 64 次颱風飛行觀測任務，且在觀測作業應用及科學論文都有突破的重大成果。

眾多單位及個人於經費、物資、人才及精神上的期許與鼓勵，在追風十年中都扮演了舉足輕重的角色，這段奇幻歷程，參與者得到了寶貴的經驗與豐碩的成果，身為核心主持人員的 Wu & LinPo 涉入得最深、收穫也最為深刻。能有此機會，一路將「追風計畫」從籌畫、執行到交付給可以永續經營的中央氣象局，是整個工作團隊的榮幸，也是我們最珍貴的歷程。少年 Pi 上岸後開啟了人生的新篇章，中年 Wu & LinPo 在奇幻歷程告一個段落之後，也將開創其他更多更新的研究領域，繼續為科學界貢獻一己之力。至於追風計畫，或許就像一路與 Pi 相互陪伴的威猛老虎，即使分離，在彼此的生命中都已佔有不可取代的一席之地。

## 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。
- 陳占慧，2005：策略性颱風觀測 - 共軛模式之颱風駛流敏感向量。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。
- 周婉婷，2007：DOTSTAR 投落送資料與其他衛星觀測資料對颱風路徑模擬影響之探討—梅姬與卡努颱風個案研究。國立台灣大學大氣科學系，碩士論文。
- 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。
- 連國淵，2009：颱風路徑與結構同化研究—系集卡爾曼濾波器。國立台灣大學大氣科學系，碩士論文。
- 陳占慧，2009：策略性颱風觀測理論之動力探討。國立台灣大學大氣科學系，博士論

文。

宋紹良，2010：上層海洋熱力結構對颱風強度變化之影響－海氣耦合模式實驗研究。

國立台灣大學大氣科學系，碩士論文。

陳新淦，2011：颱風策略性觀測理論之特徵分析與驗證-駛流敏感共軛向量及系集變

換卡爾曼濾波器。國立台灣大學大氣科學系，博士論文。

林詩潔，2012：辛樂克颱風(2008)降雨系集模擬與分析-卡爾曼濾波器資料同化。國立

台灣大學大氣科學系，碩士論文。

黃怡瑄，2012：颱風雙眼牆形成之邊界層非平衡動力機制 (2012)。國立台灣大學大氣

科學系，博士論文。

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.

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

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.

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.

Chou, K.-H., and C.-C. Wu\*, 2008: Development of the typhoon initialization in a mesoscale model – Combination of the bogus vortex with 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.

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.

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

Huang, Y.-H., M. T. Montgomery, and C.-C. Wu\*, 2012: Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008) – Part II: Axisymmetric dynamical processes. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 662-674.

- Ito, K. and C.-C. Wu\*, 2013: Typhoon-position-oriented sensitivity analysis. Part I: Theory and verification. *J. Atmos. Sci.* (accepted)
- Jung, B.-J., H. M. Kim, F. Zhang, and C.-C. Wu, 2012: Effect of targeted dropsonde observations and best track data on the track forecasts of Typhoon Sinlaku (2008) using an ensemble Kalman filter. *Tellus A.*, **64**, 1-19. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.14984.
- Lin, I.-I., W. T. Liu, C.-C. Wu, J. C. H. Chiang, and C.-H. Sui, 2003a: Satellite observations of modulation of surface winds by typhoon-induced ocean cooling. *Geophys. Res. Lett.*, **30** (3), doi:10.1029/2002GL015674.
- Lin, I.-I., W. T. Liu, C.-C. Wu, G. Wong, C. Hu, Z. Chen, W.-D. Liang, Y. Yang, and K.-K. Liu, 2003b: New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone. *Geophys. Res. Lett.*, **30** (13), 1718, doi:10.1029/2003GL017141.
- Majumdar, S. J., S. -G. Chen, and C.-C. Wu, 2011: Characteristics of Ensemble Transform Kalman Filter adaptive sampling guidance for tropical cyclones. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **137**, 503-520.
- Tuleya, R. E., and S. J. Lord, 1997: The impact of dropwindsonde data on GFDL hurricane model forecasts using global analyses. *Wea. and Fore.*, **12**, 307-323.
- 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.
- Wu, C.-C.\*, Y.-H. Huang, and G.-Y. Lien, 2012a: Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008) – Part I: Assimilation of T-PARC data based on the Ensemble Kalman Filter (EnKF). *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 506-527.
- Wu, C.-C. \*, S.-G. Chen, C.-C. Yang, P.-H. Lin, and S. D. Aberson, 2012b: Potential vorticity diagnosis of the factors affecting the track of Typhoon Sinlaku (2008) and the impact from dropwindsonde data during T-PARC. *Mon. Wea. Rev.* **140**, 2670-2688.
- Wu, C.-C. \*, G.-Y. Lien, J.-H. Chen, and F. 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. \*, 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. \*, S.-G. Chen, J.-H. Chen, K.-H. Chou, and P.-H. Lin, 2009c: 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, P.-H. Lin, and K.-S. Chou, 2007a: Targeted observations of tropical cyclones based on the adjoint-derived sensitivity steering vector. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 2611-2626.



- Wu, C.-C. \*, K.-H. Chou, P.-H. Lin, S. D. Aberson, M. S. Peng, and T. Nakazawa, 2007b: The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR. *Weather and Forecasting*, **22**, 1157-1176.
- 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. \*, 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: Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR): An overview. *Bulletin of Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 787-790.
- Wu, C.-C. \*, P.-H. Lin, I-I Lin, and T.-C. Yeh, 2004: A review on "Dropsonde Observation for Typhoon Surveillance near the TAIwan Region (DOTSTAR)" and "Typhoon-ocean-bio-geochemistry interaction" research projects. *Atmos. Sci.* ( in Chinese with an English abstract) , **32**, 275-292.
- Wu, C.-C., and Y.-H. Kuo, 1999: Typhoons affecting Taiwan: current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 67-80.
- 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.