

交通部中央氣象局委託研究計畫成果報告

98 年颱風投落送飛機觀測

計畫類別：☒國內 ☐國外

計畫編號：MOTC-CWB-98-6M-01

執行期間：98 年 4 月 9 日 至 98 年 12 月 31 日

計畫主持人：林博雄、吳俊傑、周昆炫

協同研究人員：徐仲毅、陳占慧、廖苡珊、

陳得松、黃康寧

執行單位：國立台灣大學 大氣科學系

中 華 民 國 98 年 11 月 30 日

98 年度政府部門科技計畫期末摘要報告

計畫名稱： 98 年颱風投落送飛機觀測

審議編號：	x	部會署原計畫編號：	MOTC-CWB-98-6M-01
主管機關：	交通部中央氣象局	執行單位：	台灣大學大氣科學系
計畫主持人：	林博雄	聯絡人：	林博雄
電話號碼：	02-3366-3916	傳真號碼：	
期程：	98 年 4 月 9 日至 98 年 12 月 31 日		
經費：(全程)	10920 仟元	經費(年度)	10920 仟元

執行情形：

1.執行進度：

	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
當年	100	100	0
全程	100	100	0

2.經費支用：

	預定	實際	支用率 (%)
當年	100	100	100
全程	100	100	100

3.主要執行成果：

- 本計畫今年度至今已完成蓮花、莫拉克、芭瑪及盧碧颱風等七次飛機觀測。其中莫拉克颱風飛機觀測經費由國科會計畫支用；芭瑪颱風的兩次飛機觀測經費由中央氣象局西南氣流計畫結餘款項支用；蓮花颱風與盧碧颱風等四次飛機觀測則由本計畫經費支用。
- 截至 11 月 30 日，在蓮花、莫拉克、芭瑪及盧碧颱風等七次飛機觀測中，累計的飛行時數已達 32 個小時，並成功使用 102 具投落送。
- 七次颱風觀測的投落送資料均已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。
- 投落送資料之模式影響實驗持續進行中。

4.計畫變更說明：

5.落後原因：

6.主管機關之因應對策（檢討與建議）：

98 年度政府部門科技計畫期末報告

計畫名稱：98 年颱風投落送飛機觀測

林博雄、吳俊傑、周昆炫

國立台灣大學大氣科學系

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。國科會於 2002 年 8 月起三年內提供相當經費，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 (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；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)。

從 2003 年至 2009 年，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、哈格比及薔蜜（以上為 2008 年）、蓮花、莫拉克、芭瑪及盧碧（以上為 2009 年）等 35 個颱風完成 45 航次之飛機偵察及投落送觀測任務，總計在颱風上空飛行 239 小時，並成功投擲 751 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 6-72 小時顯示平均能夠有效改善路徑預報達 24%。本研究團隊亦使用 MM5 模式與其伴隨之 3DVAR 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）。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. 2009），藉此提升遙測颱風參數的可信度。追風研究團隊也已經在主要國際學術期刊發表數篇研究成果。

Wu et al. (2009a) 中運用 MM5 ADSSV 方法成功發現影響 2006 年珊珊颱風運動主要的高敏感區域為中緯度槽線以及太平洋高壓邊緣，並以位渦反演方法得到驗證。Yamaguchi et al. (2009) 則利用 JMA SV 方法驗證 DOTSTAR 2004 年的康森個案，指出運用 JMA SV 方法有效同化位於敏感區域的投落送資料可以掌握康森颱風往東北方向移動的訊息。Wu et al. (2009b) 則進一步針對 2006 年 84 個西北太平洋颱風個案的 6 種不同策略敏感性方法進行分析比較，包括 3 種奇異向量法 (total-energy singular vectors, TESVs)、系集轉換卡門濾波器 (ETKF)、系集散落 (DLM)、共軛敏感度 (ADSSV)，並探討其對颱風路徑影響的動力特徵與比較。

國科會所推動的追風計畫相當圓滿成功，第一期計畫已經在 2005 年 7 月結束，追風研究團隊亦已完成第二期追風計畫（2005 至 2008 年）研究。目前在以中央氣象局為主、加上國科會的合作支持下繼續推動，一方面對國內科技、民生

與防災有重大貢獻，另一方面則期望做出具突破性的研究成果，並在國際學術研究領域佔有一席之地。本委託計畫延續追風計畫過去六年所累積之研究成果，繼續執行使用 GPS 投落送進行颱風飛機偵察之觀測任務。在氣象局與國科會的經費聯合支持下，氣象局主要是提供飛機觀測所需要的飛機租賃費用，而國科會則提供購買投落送及其他研究所需之相關經費。

在 2008 年夏天，由主持人吳俊傑教授與林博雄副教授共同主持的追風計畫參與由聯合國世界氣象組織(World Meteorological Organization, WMO)所屬「觀測系統研究及預報實驗(The Observing System Research and Predictability Experiment, THORPEX)」中的「亞太區域聯合颱風觀測計畫(Pacific-Asian Regional Campaign, PARC)」，與美、日、韓、德、加、法等各國共同合作，使用四架飛機與氣球飄落送針對西北太平洋地區颱風之生成、結構改變、路徑轉折、溫帶變性及消散等科學與預報議題進行密集性策略性觀測。在 T-PARC 實驗期間，其中如麗、辛樂克、哈格比、薔蜜等 4 個侵台颱風並與日、德的 Falcon、美國的 P3、C130 等飛機完成超過 25 架次國際聯合的飛機觀測。觀測所獲得之資料，如對辛樂克颱風連續三天的完整觀測，已被充分應用於颱風資料同化研究中，這些新的結果將為颱風及策略性觀測研究帶來嶄新的突破。

本計畫今年度(2009)至今已完成蓮花、莫拉克、芭瑪及盧碧颱風等七次飛機觀測。在此七次飛機觀測中，累計的飛行時數已達 32 個小時，並成功使用 102 具投落送。此外，七次颱風觀測的投落送資料已透過衛星電話撥接回傳中央氣象局，並即時顯示於氣象局的 WINS 系統。另外，投落送資料模式影響實驗亦已開始進行中。

在 2009 年 9 月主持人吳俊傑受邀前往至美國 Monterey，由 WMO 所舉辦的第三屆 THORPEX 科學研討會，針對台灣追風計畫參與 T-PARC 實驗後之經驗分享以及與參加 T-PARC 實驗的學者進行科學議題探討，並在會中發表運用 EnKF 有效改善颱風渦旋初始化的新方法，並獲得廣大迴響。

2009 年 10 月主持人吳俊傑前往上海參與 WMO 所舉辦的第二屆國際熱帶氣旋登陸過程研討會(IWTCLP-II)，會中與各國科學家報告 2008 年追風計畫參與 T-PARC 實驗的最新成果介紹。並在 10 月底受邀至美國 Monterey 參與由 Naval Postgraduate School 所舉辦 2008 年熱帶氣旋結構研討會，會中針對 EnKF 方法與

2008 年 T-PARC 實驗期間獲得多架次國際聯合觀測的辛樂克颱風的雙眼牆結構演變發表演說，並與多位國際知名熱帶氣旋研究學者在此議題上進行熱烈討論。

在分別由台灣中央氣象局、國科會、美國海軍 ONR 經費支持下，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，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 期刊的總編輯 (Editor in Chief) 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)。

最後，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。

目 錄

中文摘要.....	1
目 錄	5
圖表說明.....	6
一、前言.....	10
二、「颱風重點、整合研究研究」說明.....	11
三、「颱風偵察飛機觀測實驗（追風計畫）」.....	12
四、觀測個案.....	25
五、結論.....	54
致謝	58
參考文獻.....	59

圖表說明

表 1：Monthly Weather Review 期刊發表之專刊 “Special Collection on Targeted Observations, Data Assimilation, and Tropical Cyclone Predictability”之詳細論文列表。.....	16
圖 3.1： (a) 2004 年艾利颱風觀測風場。黑色風標為 Quikscat 地面風；投落送量測之地表 10 公尺風場(原始位置為綠色風標；颱風相對位置為藍色風標) (b) 2004 年 8 月 23 日 0924 UTC 艾利颱風 TRMM/TMI 85-GHz 亮度溫度影像。紅色點圈為 Quikscat 與投落送風場差異超過 10.0 m/s 處。.....	23
圖 3.2：2008 年 9 月 10 日 0000 UTC 辛樂克颱風的 JTWC 最佳路徑與 GFS 有無投落送資料實驗的模擬路徑。TKE(ND)為無投落送實驗路徑誤差，TKE(WD)為有投落送實驗路徑誤差，單位為公里。IMP(km)代表有投落送實驗相較於無投落送實驗之路徑誤差改進，單位為公里。IMP(%)代表誤差改進率，單位為百分比。.....	23
圖 3.3： 2008 年鳳凰颱風實驗海表面風場與軸對稱平均風速結構的變化。上、中、下圖各為 7 月 25 日 15 時、26 日 0 時、26 日 12 時。(a)皆為系集平均。色階為海表面風速量值(單位：m/s)，等值線為海平面氣壓(單位：hPa)，黑色粗線為初始化時段起始時間至當時的觀測路徑 (同化至模式中的資料)，藍色粗線為同一時段的模式颱風路徑。(b)黑色粗線為觀測的颱風海表面軸對稱風速剖面 (同化至模式中的資料)，紅色粗線為模式系集平均的海表面軸對稱風速剖面，灰色細線為個別系集成員的風速剖面 (單位：m/s)。.....	24
圖 4.1：氣象局於 6 月 20 日 00Z 所發佈之蓮花颱風移動路徑。.....	29
圖 4.2：蓮花颱風飛機觀測飛行路徑及 13 枚投落送拋投順序與位置。.....	29
圖 4.3：投落送所量測之蓮花颱風 925 hPa 水平風場 (knots)。.....	30
圖 4.4：氣象局 QPESUMS 系統於 6 月 20 日 02Z 即時顯示之蓮花颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。.....	30
圖 4.5：氣象局 WINS 系統所顯示蓮花颱風 925 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。.....	31
圖 4.6：氣象局 WINS 系統所顯示蓮花颱風 250 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。.....	31
圖 4.7：台大研究團隊根據高垂直解析度的蓮花颱風投落送資料所分析之地面風	

場，單位 m/s。.....	32
圖 4.8：氣象局於 8 月 6 日 00Z 所發佈之莫拉克颱風移動路徑。.....	32
圖 4.9：莫拉克颱風飛機觀測飛行路徑及 17 枚投落送拋投順序與位置。.....	33
圖 4.10：投落送所量測之莫拉克颱風 925 hPa 水平風場 (knots)。.....	33
圖 4.11：氣象局 QPESUMS 系統於 8 月 6 日 03Z 即時顯示之莫拉克颱風路徑、 衛星雲圖、雷達回波資訊。.....	34
圖 4.12：氣象局 WINS 系統所顯示莫拉克颱風 925 hPa 之投落送量測風場，陰影 區為可見光雲圖。.....	34
圖 4.13：氣象局 WINS 系統所顯示莫拉克颱風 925 hPa 之投落送量測風場，陰影 區為可見光雲圖。.....	35
圖 4.14：台大研究團隊根據高垂直解析度的莫拉克颱風投落送資料所分析之地面 風場，單位 m/s。.....	35
圖 4.15：氣象局於 10 月 3 日 00Z 所發佈之芭瑪颱風移動路徑。.....	36
圖 4.16：芭瑪颱風第一次飛機觀測飛行路徑及 19 枚投落送拋投順序與位置。.....	36
圖 4.17：投落送所量測之芭瑪颱風第一次飛機觀測 925 hPa 水平風場 (knots)。	37
圖 4.18：氣象局 QPESUMS 系統於 10 月 3 日 03Z 即時顯示之芭瑪颱風路徑、衛 星雲圖、雷達回波資訊。.....	37
圖 4.19：氣象局 WINS 系統所顯示芭瑪颱風第一次飛機觀測 925 hPa 之投落送量 測風場，陰影區為可見光雲圖。.....	38
圖 4.20：氣象局 WINS 系統所顯示芭瑪颱風第一次飛機觀測 250 hPa 之投落送量 測風場，陰影區為可見光雲圖。.....	38
圖 4.21：台大研究團隊根據高垂直解析度的芭瑪颱風第一次飛機觀測投落送資料 所分析之地面風場，單位 m/s。.....	39
圖 4.22：氣象局於 10 月 3 日 12Z 所發佈之芭瑪颱風移動路徑。.....	39
圖 4.23：芭瑪颱風第二次飛機觀測飛行路徑及 14 枚投落送拋投順序與位置。.....	40
圖 4.24：投落送所量測之芭瑪颱風第二次飛機觀測 925 hPa 水平風場 (knots)。	40
圖 4.25：氣象局 QPESUMS 系統於 10 月 3 日 14Z 即時顯示之芭瑪颱風路徑、衛 星雲圖、雷達回波資訊。.....	41
圖 4.26：氣象局 WINS 系統所顯示芭瑪颱風第二次飛機觀測 925 hPa 之投落送量	

測風場，陰影區為可見光雲圖。.....	41
圖 4.27：氣象局 WINS 系統所顯示芭瑪颱風第二次飛機觀測 250 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。.....	42
圖 4.28：台大研究團隊根據高垂直解析度的芭瑪颱風第二次飛機觀測投落送資料所分析之地面風場，單位 m/s。.....	42
圖 4.29：氣象局於 10 月 20 日 00Z 所發佈之盧碧颱風移動路徑。.....	43
圖 4.30：盧碧颱風第一次飛機觀測飛行路徑及 14 枚投落送拋投順序與位置。.....	43
圖 4.31：投落送所量測之盧碧颱風第一次飛機觀測 925 hPa 水平風場（knots）。.....	44
圖 4.32：氣象局 QPESUMS 系統於 10 月 20 日 02Z 即時顯示之盧碧颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。.....	44
圖 4.33：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第一次飛機觀測 925 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。.....	45
圖 4.34：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第一次飛機觀測 250 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。.....	45
圖 4.35：台大研究團隊根據高垂直解析度的盧碧颱風第一次飛機觀測投落送資料所分析之地面風場，單位 m/s。.....	46
圖 4.36：氣象局於 10 月 21 日 00Z 所發佈之盧碧颱風移動路徑。.....	46
圖 4.37：盧碧颱風第二次飛機觀測飛行路徑及 19 枚投落送拋投順序與位置。.....	47
圖 4.38：投落送所量測之盧碧颱風第二次飛機觀測 925 hPa 水平風場（knots）。.....	47
圖 4.39：氣象局 QPESUMS 系統於 10 月 21 日 02Z 即時顯示之盧碧颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。.....	48
圖 4.40：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第二次飛機觀測 925 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。.....	48
圖 4.41：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第二次飛機觀測 250 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。.....	49
圖 4.42：台大研究團隊根據高垂直解析度的盧碧颱風第二次飛機觀測投落送資料所分析之地面風場，單位 m/s。.....	49
圖 4.43：氣象局於 10 月 22 日 00Z 所發佈之盧碧颱風移動路徑。.....	50
圖 4.44：盧碧颱風第三次飛機觀測飛行路徑及 6 枚投落送拋投順序與位置。..	50

圖 4.45：投落送所量測之盧碧颱風第三次飛機觀測 925 hPa 水平風場 (knots)。	51
圖 4.46：氣象局 QPESUMS 系統於 10 月 22 日 02Z 即時顯示之盧碧颱風路徑、 衛星雲圖、雷達回波資訊。	51
圖 4.47：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第三次飛機觀測 925 hPa 之投落送量 測風場，陰影區為可見光雲圖。	52
圖 4.48：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第三次飛機觀測 300 hPa 之投落送量 測風場，陰影區為可見光雲圖。	52
圖 4.49：台大研究團隊根據高垂直解析度的盧碧颱風第三次飛機觀測投落送資料 所分析之地面風場，單位 m/s。	53

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 1995 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。另外，同年的賴恩颱風於 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 1996 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，導致台灣承受了超過三百億台幣的直接損失。1998 年的瑞伯颱風與芭比絲颱風、2000 年的象神颱風、2001 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，然而 2002 年台灣地區旱象亦因納克利及雷馬遜颱風侵台而解除、2004 年的敏督利（七二水災）及艾利颱風也帶來嚴重災情，另外，2005 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。在 2008 年的卡玫基颱風由於其旺盛的西南氣流而重創南台灣，而今年直撲台灣而來的莫拉克颱風，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 1996 年的賀伯颱風。

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的課題之一。

二、「颱風重點、整合研究」說明

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不容小覷，國科會因此在過去六年內（自 2002 年 8 月 1 日至 2008 年 7 月 31 日止），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。此研究計有台灣大學、中央大學、文化大學、中央研究院、中央氣象局等五個研究單位，十八位博士級研究人員共同參與。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；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，提昇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」。

三、「颱風偵察飛機觀測實驗（追風計畫）」

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 Dropwindsonde 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 Dropwindsonde、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 Dropwindsonde 的實驗結果顯示，GPS Dropwindsonde 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 Dropwindsonde 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 Dropwindsonde 的重要性，與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 Dropwindsonde 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、FNMOC 及日本 MRI 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、芭瑪及盧碧等 35 個颱風完成 45 航次之飛機偵察及投落送觀測任務，總計在颱風上空飛行 239 小時、並成功投擲 751 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 6-72 小時顯示平均能夠有效改善路徑預報達 24%。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）。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. 2009）。

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。整體而言，投落送飛機觀測實驗深受國際矚目。

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，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。

Wu et al. (2009a)中運用 MM5 ADSSV 方法成功發現影響 2006 年珊珊颱風運動主要的高敏感區域為中緯度槽線以及太平洋高壓邊緣，並以位渦反演方法得到驗證。Yamaguchi et al. (2009)則利用 JMA SV 方法驗證 DOTSTAR 2004 年的康森個案，指出運用 JMA SV 方法有效同化位於敏感區域的投落送資料可以掌握康森颱風往東北方向移動的訊息。Wu et al. (2009b)則進一步針對 2006 年 84 個西北太平洋颱風個案的 6 種不同策略敏感性方法進行分析比較，包括 3 種奇異向量法 (total-energy singular vectors, TESVs)、系集轉換卡門濾波器(ETKF)、系集散落 (DLM)、共軛敏感度(ADSSV)，並探討其對颱風路徑影響的動力特徵與比較。

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。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。主持人吳俊傑於 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 12 月 4-7 日，主持人吳俊傑前往夏威夷參加 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 6 次參與國際的聯合飛機觀測。這些前所未有的觀測資料在各國科學家努力研究之下，預期將對颱風路徑預報、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。

目前追風團隊針對 2008 年 T-PARC 期間所獲得豐富的投落送觀測資料已展開相關研究，在 2009 年 9 月主持人吳俊傑受邀前往至美國 Monterey，由 WMO 所舉辦的第三屆 THORPEX 科學研討會，針對台灣追風計畫參與 T-PARC 實驗後之經驗分享以及與參加 T-PARC 實驗的學者進行科學議題探討，並在會中發表運用 EnKF 有效改善颱風渦旋初始化的新方法，並獲得廣大迴響。

2009 年 10 月主持人吳俊傑前往上海參與 WMO 所舉辦的第二屆國際熱帶氣

旋登陸過程研討會(IWTCLP-II)，會中與各國科學家報告 2008 年追風計畫參與 T-PARC 實驗的最新成果介紹。並在 10 月底受邀至美國 Monterey 參與由 Naval Postgraduate School 所舉辦 2008 年熱帶氣旋結構研討會，會中針對 EnKF 方法與 2008 年 T-PARC 實驗期間獲得多架次國際聯合觀測的辛樂克颱風的雙眼牆結構演變發表演說，並與多位國際知名熱帶氣旋研究學者在此議題上進行熱烈討論。

在分別由台灣中央氣象局、國科會、美國海軍 ONR 相關經費支持下，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，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* 期刊的總編輯(Editor in Chief)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)。此專刊之標誌與前言如附錄 1 所示，詳細論文資訊如表 1 所示。

表 1：Monthly Weather Review 期刊發表之專刊 “Special Collection on Targeted Observations, Data Assimilation, and Tropical Cyclone Predictability” 之詳細論文列表。

#	paper
1	Mu Mu, Feifan Zhou, and Hongli Wang, 2009: A Method for Identifying the Sensitive Areas in Targeted Observations for Tropical Cyclone Prediction: Conditional Nonlinear Optimal Perturbation. <i>Monthly Weather Review</i> , Vol. 137, Iss. 5, pp. 1623–1639.
2	Hyun Mee Kim and Byoung-Joo Jung, 2009: Singular Vector Structure and Evolution of a Recurving Tropical Cyclone. <i>Monthly Weather Review</i> , Vol. 137, Iss. 2, pp. 505–524.
3	Carolyn A. Reynolds, Melinda S. Peng, and Jan-Huey Chen, 2009: Recurving Tropical Cyclones: Singular Vector Sensitivity and Downstream Impacts. <i>Monthly Weather Review</i> , Vol. 137, Iss. 4, pp. 1320–1337.
4	Hyun Mee Kim and Byoung-Joo Jung, 2009: Influence of Moist Physics and Norms on Singular Vectors for a Tropical Cyclone. <i>Monthly Weather Review</i> , Vol. 137, Iss. 2, pp. 525–543.
5	Fuqing Zhang, Yonghui Weng, Jason A. Sippel, Zhiyong Meng, and Craig H. Bishop, 2009: Cloud-Resolving Hurricane Initialization and Prediction through Assimilation of Doppler Radar Observations with an Ensemble

	Kalman Filter. <i>Monthly Weather Review</i> , Vol. 137, Iss. 7, pp. 2105–2125.
6	Chun-Chieh Wu, Shin-Gan Chen, Jan-Huey Chen, Kun-Hsuan Chou, and Po-Hsiung Lin, 2009: Interaction of Typhoon Shanshan (2006) with the Midlatitude Trough from both Adjoint-Derived Sensitivity Steering Vector and Potential Vorticity Perspectives. <i>Monthly Weather Review</i> , Vol. 137, Iss. 3, pp. 852–862.
7	Munehiko Yamaguchi, Ryota Sakai, Masayuki Kyoda, Takuya Komori, and Takashi Kadowaki, 2009: Typhoon Ensemble Prediction System Developed at the Japan Meteorological Agency. <i>Monthly Weather Review</i> , Vol. 137, Iss. 8, pp. 2592–2604.
8	Ryan D. Torn and Gregory J. Hakim, 2009: Ensemble Data Assimilation Applied to RAINEX Observations of Hurricane Katrina (2005). <i>Monthly Weather Review</i> , Vol. 137, Iss. 9, pp. 2817–2829.
9	Munehiko Yamaguchi, Takeshi Iriguchi, Tetsuo Nakazawa, and Chun-Chieh Wu, 2009: An Observing System Experiment for Typhoon Conson (2004) Using a Singular Vector Method and DOTSTAR Data. <i>Monthly Weather Review</i> , Vol. 137, Iss. 9, pp. 2801–2816.
10	Chun-Chieh Wu, Jan-Huey Chen, Sharanya J. Majumdar, Melinda S. Peng, Carolyn A. Reynolds, Sim D. Aberson, Roberto Buizza, Munehiko Yamaguchi, Shin-Gan Chen, Tetsuo Nakazawa, and Kun-Hsuan Chou, 2009: Intercomparison of Targeted Observation Guidance for Tropical Cyclones in the Northwestern Pacific. <i>Monthly Weather Review</i> , Vol. 137, Iss. 8, pp. 2471–2492.
11	Rolf H. Langland, Christopher Velden, Patricia M. Pauley, and Howard Berger, 2009: Impact of Satellite-Derived Rapid-Scan Wind Observations on Numerical Model Forecasts of Hurricane Katrina. <i>Monthly Weather Review</i> , Vol. 137, Iss. 5, pp. 1615–1622.

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

昇資料同化研究，因此可謂扮演颱風基礎及預報研究火車頭之先驅實驗。此研究將整合國內學術界及中央氣象局相當人力，並與美國 NCEP、HRD、FNMOCC 及日本 JMA/MRI 進行研究合作，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。此計畫亦將協助整體颱風重點整合研究之推動。

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 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、預報並著手進行後續研究。
- 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、預報並著手進行後續研究。
- 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、預報並著手進行後續研究（開始由中央氣象局委託計畫支持觀測飛機租用費用）。
- 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、預報並著手進行後續研究（第二年中央氣象局委託計畫支持觀測飛機租用費用）。
- 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、預報並著手進行後續研究。

- 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。
- 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。
- 進行 6 種不同策略敏感性方法進行分析比較。
- 成功研發運用 EnKF 有效改善颱風渦旋初始化的新方法。
- 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、預報並著手進行後續研究。

3. 計畫特殊貢獻

- 自 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（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）等 35 個颱風完成 45 航次之飛機偵察及投落送觀測任務，總計在颱風上空飛行 239 小時、並成功投擲 751 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）。(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 6-72 小時顯示平均能夠有效改善路徑預報達 24%。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. 2009)，如圖 3.1。
- Wu et al. (2009a) 中運用 MM5 ADSSV 方法成功發現影響 2006 年珊珊颱風運動主要的高敏感區域為中緯度槽線以及太平洋高壓邊緣，並以位渦反演方法得到驗證。Yamaguchi et al. (2009) 則利用 JMA SV 方法驗證

DOTSTAR 2004 年的康森個案，指出運用 JMA SV 方法有效同化位於敏感區域的投落送資料可以掌握康森颱風往東北方向移動的訊息。Wu et al. (2009b)則進一步針對 2006 年 84 個西北太平洋颱風個案的 6 種不同策略敏感性方法進行分析比較，包括 3 種奇異向量法(total-energy singular vectors, TESVs)、系集轉換卡門濾波器(ETKF)、系集散落(DLM)、共軛敏感度(ADSSV)，並探討其對颱風路徑影響的動力特徵與比較。

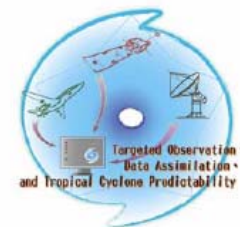
- 另外，Wu et al. (2009c) 針對 2008 年的投落送資料對於辛樂克颱風的路徑預報影響研究發現，在 GFS 模式中，同化投落送資料可以有效地改善路徑預報達 77%，如圖 3.2。
- Wu et al. (2009d) 成功研發運用 EnKF 有效改善颱風渦旋初始化的新方法，如圖 3.3。
- 追風研究團隊已經在頂尖國際學術期刊發表第 7 篇成果論文。此外，追風科學團隊分別於 2006、2008 年參加美國氣象學會所舉辦之第 27、28 屆熱帶氣象與颶風研討會，會中分別有 8 篇與 4 篇追風計畫相關研究成果論文進行發表。
- 國科會所推動的追風計畫相當圓滿成功，第一期計畫已於 2005 年 7 月結束。追風研究團隊除持續進行具關鍵性的後續研究外，亦已完成由中央氣象局與國科會共同合作支持的後續追風及追雨計畫（2005 至 2008 年），一方面對國內科技、民生與防災有重大貢獻，另一方面則期望做出具突破性的研究成果，並在國際學術研究領域佔有一席之地。
- 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，日本亦確定於 2008 年跟進並與我合作進行突破性觀測。
- 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，此觀測正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，主持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（Wu 2007）。
- 追風計畫受到國際氣象研究單位相當高的評價，並已列為世界氣象組織所規劃 T-PARC 實驗 2008 年亞洲觀測實驗重要的一環，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。

- 追風團隊針對 2008 年 T-PARC 期間所獲得豐富的投落送觀測資料已展開相關研究，在 2009 年 9 月主持人吳俊傑受邀前往至美國 Monterey，由 WMO 所舉辦的第三屆 THORPEX 科學研討會，針對台灣追風計畫參與 T-PARC 實驗後之經驗分享以及與參加 T-PARC 實驗的學者進行科學議題探討，並在會中發表運用 EnKF 有效改善颱風渦旋初始化的新方法，並獲得廣大迴響。
- 2009 年 10 月主持人吳俊傑前往上海參與 WMO 所舉辦的第二屆國際熱帶氣旋登陸過程研討會(IWTCLP-II)，會中與各國科學家報告 2008 年追風計畫參與 T-PARC 實驗的最新成果介紹。並在 10 月底受邀至美國 Monterey 參與由 Naval Postgraduate School 所舉辦 2008 年熱帶氣旋結構研討會，會中針對 EnKF 方法與 2008 年 T-PARC 實驗期間獲得多架次國際聯合觀測的辛樂克颱風的雙眼牆結構演變發表演說，並與多位國際知名熱帶氣旋研究學者在此議題上進行熱烈討論。
- 在分別由中央氣象局、國科會、美國 ONR 經費支持下，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 期刊的總編輯（Editor in Chief）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）。
- 國科會「颱風重點研究」有助國內深奠國際級颱風研究中心之基礎，台灣的颱風研究團隊具實力扮演亞太地區颱風研究與觀測之領導角色。
- 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，美國國家地理頻道於 2007 年 7 月正式通過，利用一年半的時間(2007 年夏至 2008 年底)，拍攝一部以追風計畫故事背景為主、THORPEX/PARC 國際實驗為輔，長度為一小時的科學紀錄片。此紀錄片已於 2009 年 6 月在世界一百多個國家播放，期許對於國際社會及科普有重要的教育意義。

附錄 1：美國氣象學會所發行 Monthly Weather Review 期刊於 2009 年發表主持
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）之標誌與
前言

**Preface for the Special Collection on Targeted Observations, Data
Assimilation, and Tropical Cyclone Predictability Monthly Weather Review**



Chun-Chieh Wu¹, Sharanya J. Majumdar², Sim D. Aberson³, Tetsuo Nakazawa⁴, Carolyn Reynolds⁵

¹ Department of Atmospheric Science, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

² RSMAS Division of Meteorology and Physical Oceanography, University of Miami, FL

³ NOAA/AOML Hurricane Research Division

⁴ Meteorological Research Institute, JMA, Japan

⁵ Naval Research Laboratory, Monterey, CA

Corresponding author: Chun-Chieh Wu, cwu@typhoon.as.ntu.edu.tw

Accurate tropical cyclone track forecasts are of foremost importance to the increasing population of coastal residents worldwide, necessitating advances in all facets of the numerical prediction process. These include the observational network, the data assimilation schemes that blend these observations with the numerical ‘first guess’ field, the vortex initialization schemes and the dynamics, physics and resolution of the models themselves, and methods to “target” observations in order to optimize the reduction in forecast error. During the past 30 years, tropical cyclone track forecast skill has increased steadily due to the improvements of all these. In particular, advances have been made in targeted observations and data assimilation over the past decade. This special issue collects a series of timely papers on these topics, many of which have resulted from multi-national collaborations.

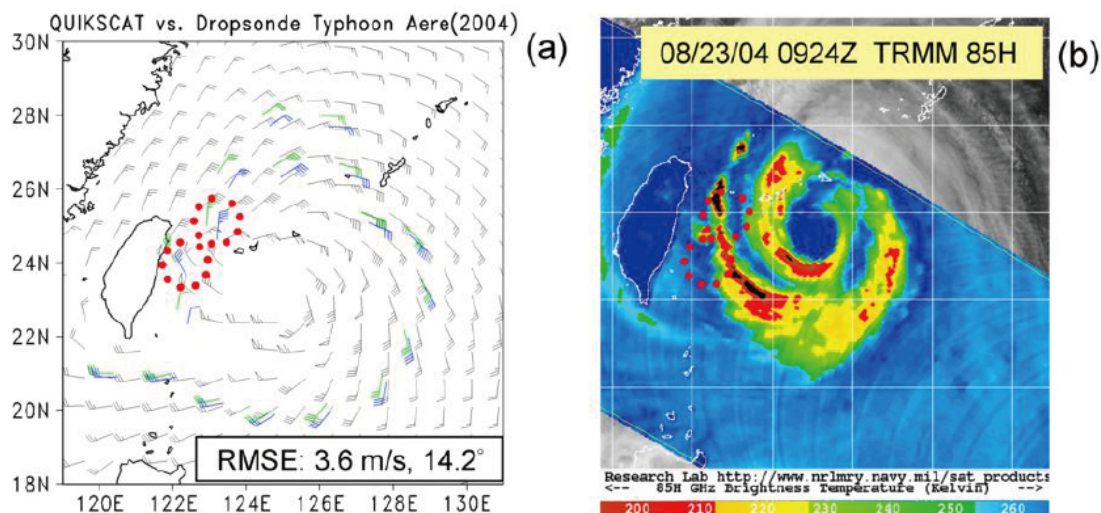


圖 3.1： (a) 2004 年艾利颱風觀測風場。黑色風標為 Quikscat 地面風；投落送量測之地表 10 公尺風場(原始位置為綠色風標；颱風相對位置為藍色風標) (b) 2004 年 8 月 23 日 0924 UTC 艾利颱風 TRMM/TMI 85-GHz 亮度溫度影像。紅色點圈為 Quikscat 與投落送風場差異超過 10.0 m/s 處。

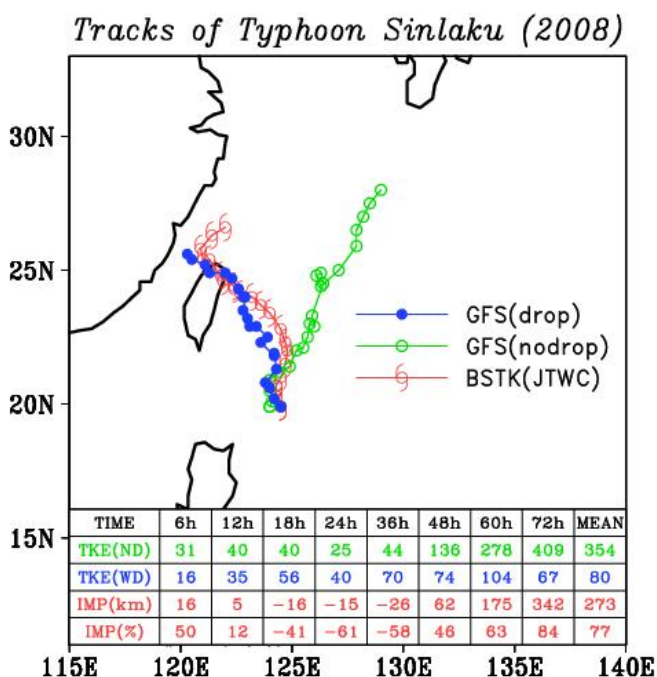


圖 3.2：2008 年 9 月 10 日 0000 UTC 辛樂克颱風的 JTWC 最佳路徑與 GFS 有無投落送資料實驗的模擬路徑。TKE(ND)為無投落送實驗路徑誤差，TKE(WD)為有投落送實驗路徑誤差，單位為公里。IMP(km)代表有投落送實驗相較於無投落送實驗之路徑誤差改進，單位為公里。IMP(%)代表誤差改進率，單位為百分比。

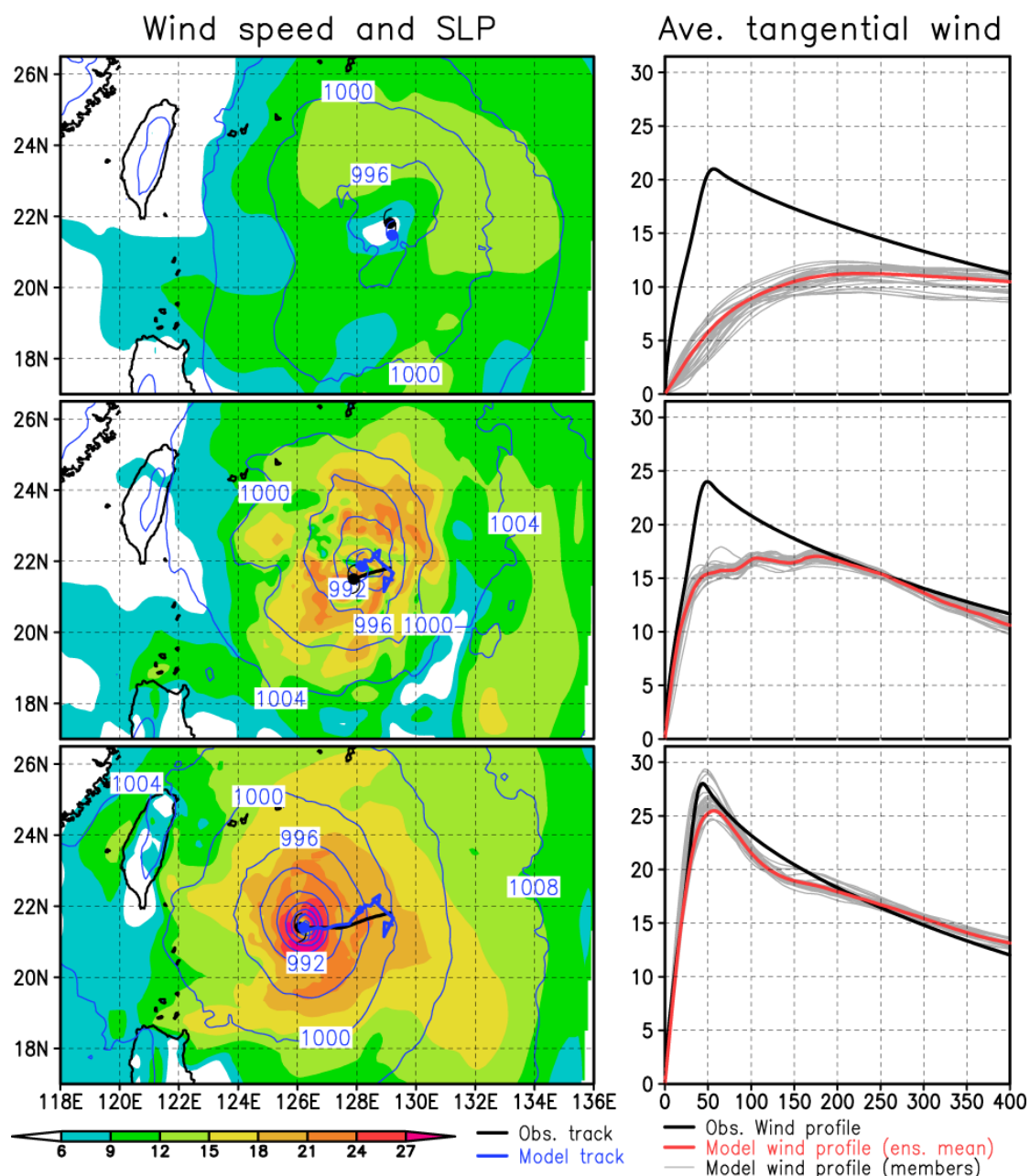


圖 3.3：2008 年鳳凰颱風實驗海表面風場與軸對稱平均風速結構的變化。上、中、下圖各為 7 月 25 日 15 時、26 日 0 時、26 日 12 時。(a)皆為系集平均。色階為海表面風速量值(單位：m/s)，等值線為海平面氣壓(單位：hPa)，黑色粗線為初始化時段起始時間至當時的觀測路徑(同化至模式中的資料)，藍色粗線為同一時段的模式颱風路徑。(b)黑色粗線為觀測的颱風海表面軸對稱風速剖面(同化至模式中的資料)，紅色粗線為模式系集平均的海表面軸對稱風速剖面，灰色細線為個別系集成員的風速剖面(單位：m/s)。

四、觀測個案

本委託計畫今年度已經完成蓮花、莫拉克、芭瑪及盧碧颱風等 4 個颱風 7 架次的觀測，總共使用 32 個小時的飛行時數，並成功拋投 102 枚投落送。各飛機觀測任務的研究結果將分段列述如下：

1、 蓮花颱風 (Linfu, 2009/06/20/0000UTC)

蓮花颱風為今年西太平洋編號第 3 號的颱風，也是第一個可能侵襲台灣的颱風。氣象局於 6 月 20 日早上 8 點所分析的颱風路徑如圖 4.1 所示，圖中顯示蓮花颱風可能在 21-22 日期間影響澎湖、金門、馬祖與台灣地區。氣象局於 6 月 19 日下午 8 時 30 分發布海上颱風警報，飛機觀測執行的時間為針對 6 月 20 日 0000 UTC（早上 8 時）的模式預報時間來進行觀測。

ASTRA 飛機於 20 日清晨 5 點 7 分起飛，於早上 8 點 53 分落地，飛行時間為 3 小時 46 分，成功拋投 13 枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖 4.2 所示。另外，13 枚投落送所量測的 925 hPa 風場則如圖 4.3 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 4.4 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。

觀測過程中，GPS 投落送的量測結果已即時透過衛星電話傳送至氣象局，並正確顯示於 WINS 系統中，圖 4.5、圖 4.6 所表示的即為投落送量測蓮花颱風的 925、250 hPa 在 WINS 所顯示的風場分佈。另外，台大研究團隊針對蓮花颱風所分析的地表 10 公尺風場則如圖 4.7 所示。

2、 莫拉克颱風 (Morakot, 2009/08/06/0000UTC)

莫拉克颱風為今年西太平洋編號第 9 號的颱風，氣象局於 8 月 5 日下午 8 時 30 分發布海上颱風警報。氣象局於 8 月 6 日早上 8 點所分析的颱風路徑如圖 4.8 所示。飛機觀測執行的時間為針對 8 月 6 日 0000 UTC（上午 8 時）的模式預報時間來進行觀測。ASTRA 飛機於 6 日上午 5 點 2 分起飛，於上午 10 點 38 分落地，飛行時間為 5 小時 36 分，成功拋投 17 枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖 4.9 所示。另外，17 枚投落送所量測的 925 hPa 風場則如圖 4.10 所示。圖 4.11 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。

觀測過程中，GPS 投落送的量測結果已即時透過衛星電話傳送至氣象局，並正確顯示於 WINS 系統中，圖 4.12、4.13 所表示的即為投落送量測莫拉克颱風的 925、250 hPa 在 WINS 所顯示的風場分佈。另外，台大研究團隊針對莫拉克颱風所分析的地面風場則如圖 4.14 所示。

3、 芭瑪颱風 (Parma, 2009/10/03/0000UTC)

芭瑪颱風為今年西太平洋編號第 19 號的颱風，氣象局於 10 月 3 日上午 5 時 30 分發布海上颱風警報。氣象局於 10 月 3 日早上 8 點所分析的颱風路徑如圖 4.15 所示。追風計畫針對芭瑪颱風總共執行二次的飛行觀測，第一次飛機觀測執行的時間為針對 10 月 3 日 0000 UTC (上午 8 時) 的模式預報時間來進行敏感區域觀測。ASTRA 飛機於 3 日上午 5 點 2 分起飛，於上午 10 點 36 分落地，飛行時間為 5 小時 34 分，成功拋投 19 枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖 4.16 所示。另外，19 枚投落送所量測的 925 hPa 風場則如圖 4.17 所示。圖 4.18 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。

觀測過程中，GPS 投落送的量測結果已即時透過衛星電話傳送至氣象局，並正確顯示於 WINS 系統中，圖 4.19、4.20 所表示的即為投落送量測芭瑪颱風的 925、250 hPa 在 WINS 所顯示的風場分佈。另外，台大研究團隊針對芭瑪颱風第一次飛機觀測所分析的地面風場則如圖 4.21 所示。

4、 芭瑪颱風 (Parma, 2009/10/03/1200UTC)

氣象局於 10 月 3 日晚上 8 點所分析的颱風路徑如圖 4.22 所示。追風計畫對於芭瑪颱風第二次飛機觀測執行的時間為針對 10 月 3 日 1200 UTC (下午 8 時) 的模式預報時間來進行敏感區域觀測。ASTRA 飛機於 3 日下午 4 點 59 分起飛，於下午 9 點 13 分落地，飛行時間為 4 小時 14 分，成功拋投 14 枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖 4.23 所示。另外，14 枚投落送所量測的 925 hPa 風場則如圖 4.24 所示。圖 4.25 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。

觀測過程中，GPS 投落送的量測結果已即時透過衛星電話傳送至氣象局，並正確顯示於 WINS 系統中，圖 4.26、4.27 所表示的即為投落送量測芭瑪颱風的

925、250 hPa 在 WINS 所顯示的風場分佈。另外，台大研究團隊針對芭瑪颱風第二次飛機觀測所分析的地面風場則如圖 4.28 所示。

針對芭瑪颱風的兩次飛行觀測採影響芭瑪颱風移動路徑最大的敏感區域作投落送觀測，由於芭瑪颱風處於鞍型場中，世界各國主要作業模式對於芭瑪颱風的預測不易，因此這兩次飛機觀測資料對於芭瑪颱風外圍環境與敏感區域應有後續研究價值。

5、 盧碧颱風 (Lupit, 2009/10/20/0000UTC)

盧碧颱風為今年西太平洋編號第 22 號的颱風，氣象局未對盧碧颱風發布海上颱風警報。氣象局於 10 月 20 日早上 8 點所分析的颱風路徑如圖 4.29 所示。追風計畫針對盧碧颱風總共執行三次的飛行觀測，第一次飛機觀測執行的時間為針對 10 月 20 日 0000 UTC (上午 8 時) 的模式預報時間來進行敏感區域觀測。ASTRA 飛機於 20 日上午 5 點 4 分起飛，於上午 10 點 12 分落地，飛行時間為 5 小時 8 分，成功拋投 14 枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖 4.30 所示。另外，14 枚投落送所量測的 925 hPa 風場則如圖 4.31 所示。圖 4.32 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。

觀測過程中，GPS 投落送的量測結果已即時透過衛星電話傳送至氣象局，並正確顯示於 WINS 系統中，圖 4.33、4.34 所表示的即為投落送量測盧碧颱風的 925、250 hPa 在 WINS 所顯示的風場分佈。另外，台大研究團隊針對盧碧颱風第一次飛機觀測所分析的地面風場則如圖 4.35 所示。

6、 盧碧颱風 (Lupit, 2009/10/21/0000UTC)

氣象局於 10 月 21 日早上 8 點所分析的颱風路徑如圖 4.36 所示。追風計畫對於盧碧颱風第二次飛機觀測執行的時間為針對 10 月 21 日 0000 UTC (上午 8 時) 的模式預報時間來進行觀測。ASTRA 飛機於 21 日上午 4 點 33 分起飛，於上午 10 點 06 分落地，飛行時間為 5 小時 33 分，成功拋投 19 枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖 4.37 所示。另外，19 枚投落送所量測的 925 hPa 風場則如圖 4.38 所示。圖 4.39 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。

觀測過程中，GPS 投落送的量測結果已即時透過衛星電話傳送至氣象局，並正確顯示於 WINS 系統中，圖 4.40、4.41 所表示的即為投落送量測盧碧颱風的 925、250 hPa 在 WINS 所顯示的風場分佈。另外，台大研究團隊針對盧碧颱風第二次飛機觀測所分析的地面風場則如圖 4.42 所示。

7、 盧碧颱風 (Lupit, 2009/10/22/0000UTC)

氣象局於 10 月 22 日早上 8 點所分析的颱風路徑如圖 4.43 所示。追風計畫對於盧碧颱風第三次飛機觀測執行的時間為針對 10 月 22 日 0000 UTC (上午 8 時) 的模式預報時間來進行敏感區域觀測。ASTRA 飛機於 22 日上午 6 點 30 分起飛，於上午 9 點 20 分落地，飛行時間為 2 小時 50 分，成功拋投 6 枚投落送，觀測飛行路徑與拋投位置如圖 4.44 所示。另外，6 枚投落送所量測的 925 hPa 風場則如圖 4.45 所示。圖 4.46 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。

觀測過程中，GPS 投落送的量測結果已即時透過衛星電話傳送至氣象局，並正確顯示於 WINS 系統中，圖 4.47、4.48 所表示的即為投落送量測盧碧颱風的 925、300 hPa 在 WINS 所顯示的風場分佈。另外，台大研究團隊針對盧碧颱風第三次飛機觀測所分析的地面風場則如圖 4.49 所示。

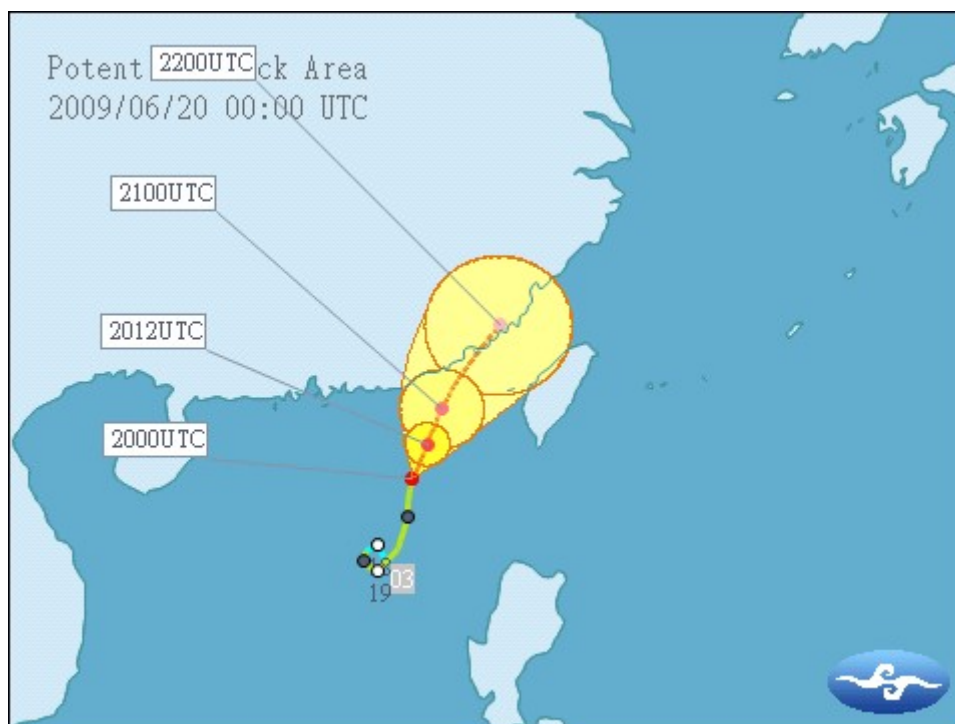


圖 4.1：氣象局於 6 月 20 日 00Z 所發佈之蓮花颱風移動路徑。

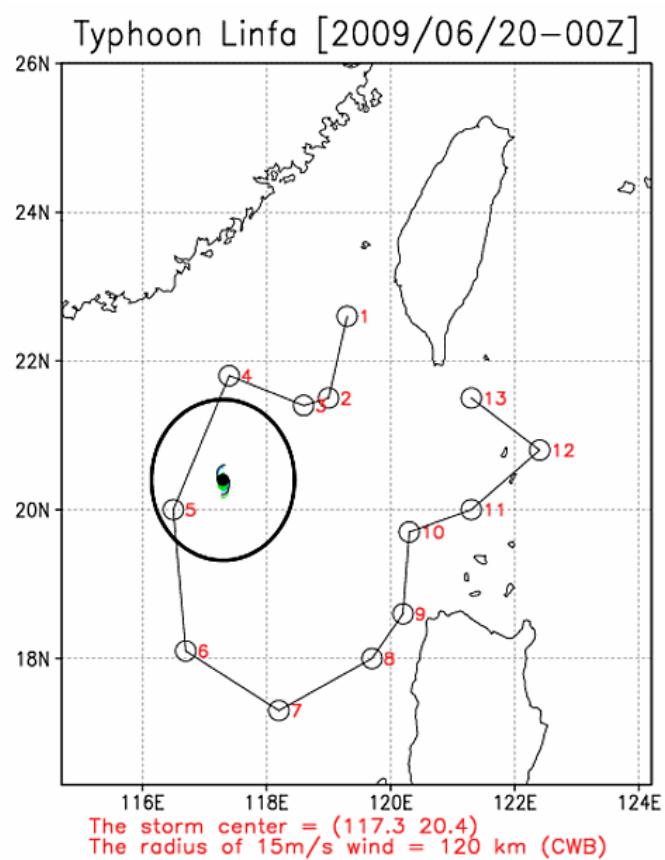


圖 4.2：蓮花颱風飛機觀測飛行路徑及 13 枚投落送拋投順序與位置。

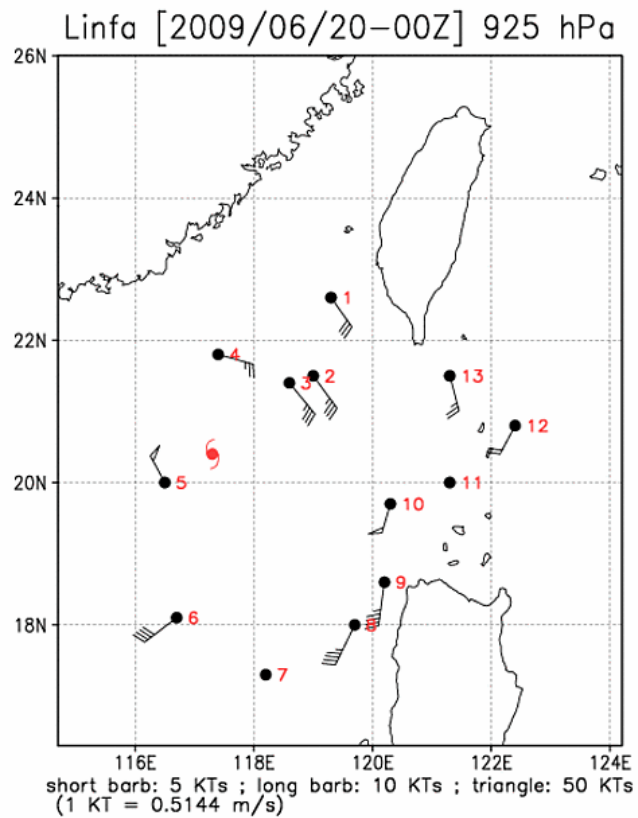


圖 4.3：投落送所量測之蓮花颱風 925 hPa 水平風場 (knots)。

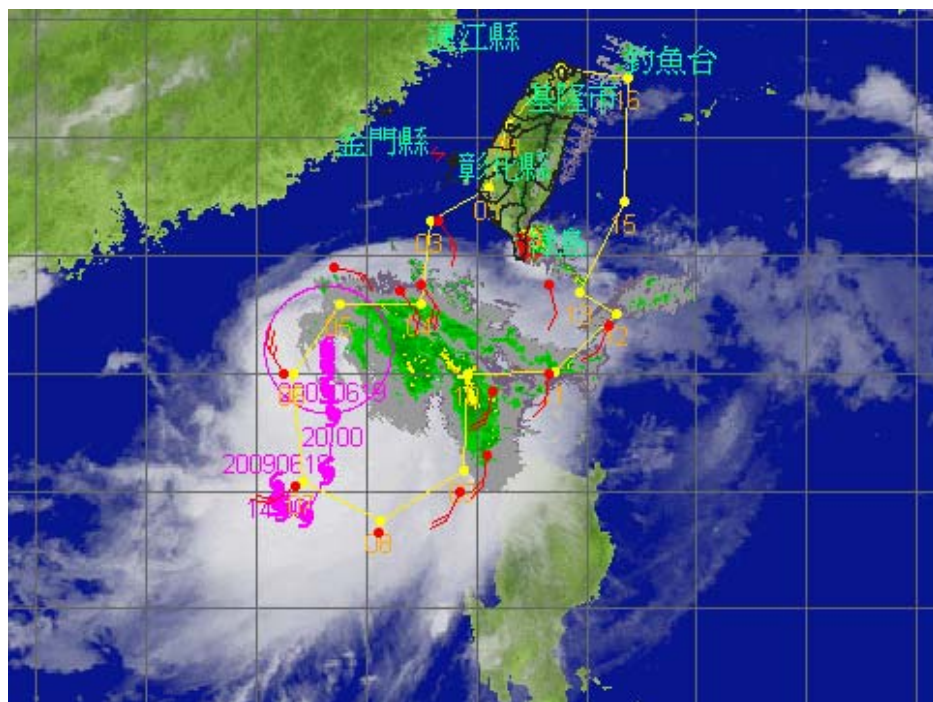


圖 4.4：氣象局 QPESUMS 系統於 6 月 20 日 02Z 即時顯示之蓮花颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。

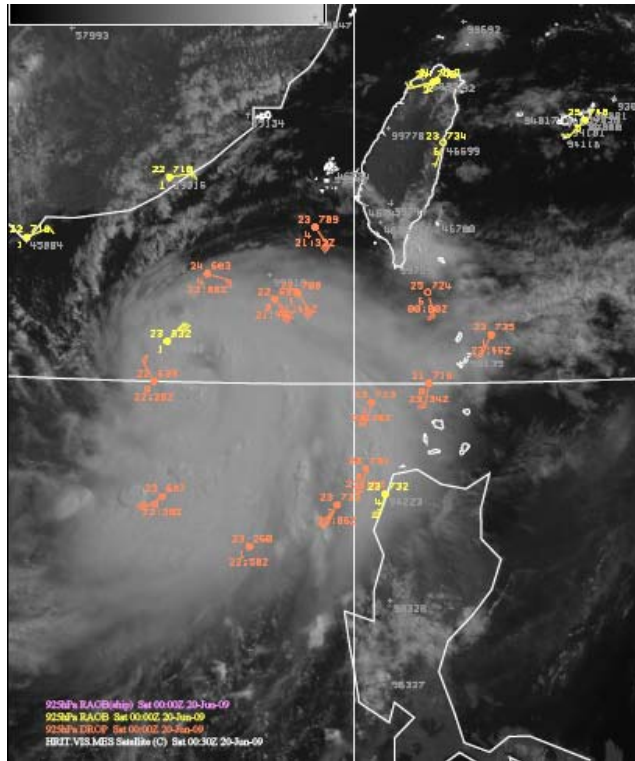


圖 4.5：氣象局 WINS 系統所顯示蓮花颱風 925 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

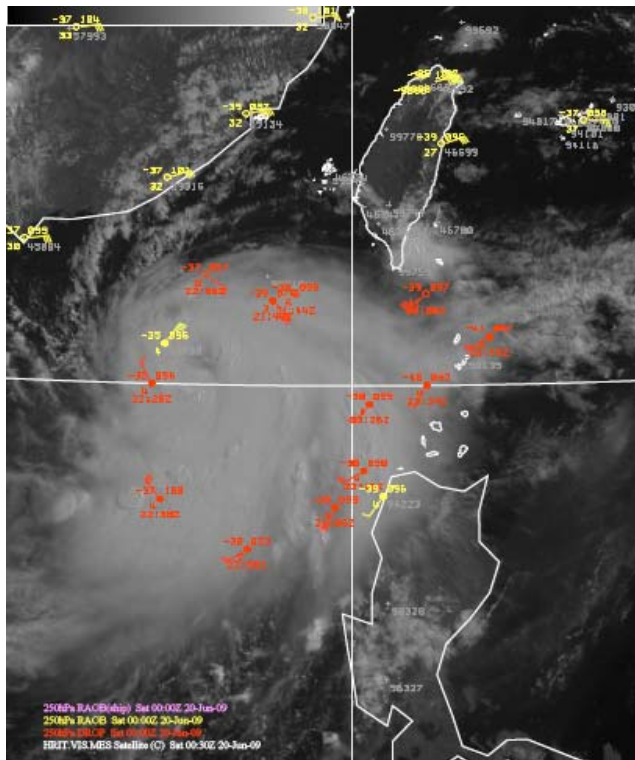


圖 4.6：氣象局 WINS 系統所顯示蓮花颱風 250 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

編號	落海時間 (UTC)	經度	緯度	DIST	WD	WS	MBL	WL150
1	2009/06/19 21:46:28	119.3	22.6	327	135	11.1	9.1	8.9
2	2009/06/19 21:53:11	119.0	21.5	225	128	---	12.7	---
3	2009/06/19 22:03:44	118.6	21.4	185	105	13.0	11.4	11.0
4	2009/06/19 22:16:13	117.4	21.8	158	084	13.1	11.5	11.0
5	2009/06/19 22:34:14	116.5	20.0	89	---	---	20.0	---
6	2009/06/19 22:55:02	116.7	18.1	256	240	---	11.7	11.7
7	2009/06/19 23:06:10	118.2	17.3	353	---	---	---	---
8	2009/06/19 23:21:47	119.7	18.0	363	203	10.7	13.1	11.0
9	2009/06/19 23:30:48	120.2	18.6	360	176	11.7	11.0	9.9
10	2009/06/19 23:40:01	120.3	19.7	318	169	13.8	14.6	12.2
11	2009/06/19 23:48:56	121.3	20.0	417	165	---	6.4	6.1
12	2009/06/20 00:00:05	122.4	20.8	531	177	---	4.8	4.1
13	2009/06/20 00:14:51	121.3	21.5	431	173	10.7	8.3	8.4

DIST：各投落送與其對應的颱風中心的距離。(km)

WD：海表面風向。(度)

海表面風速：(單位：m/s)

(1) **WS**：直接由投落送測量到的海表面 (10 公尺高度) 風速。

(2) **MBL** (Franklin 2003)：0~500 公尺高度層的平均風速乘以 0.80。

(3) **WL150** (Franklin 2003)：0~150 公尺高度層的平均風速除以 1.229。

圖 4.7：台大研究團隊根據高垂直解析度的蓮花颱風投落送資料所分析之地面風場，單位 m/s。

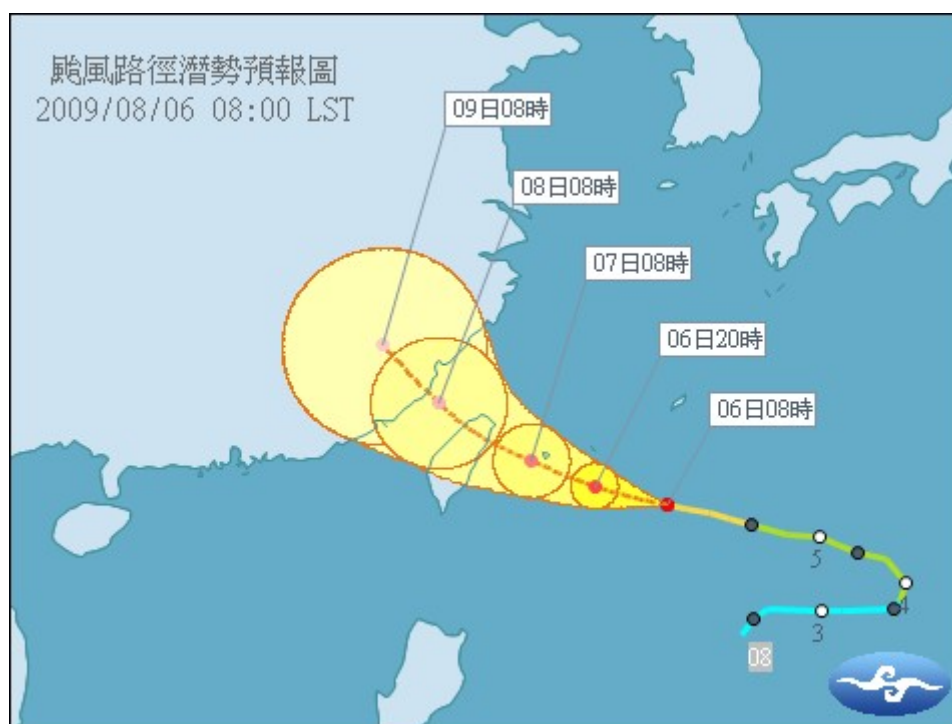


圖 4.8：氣象局於 8 月 6 日 00Z 所發佈之莫拉克颱風移動路徑。

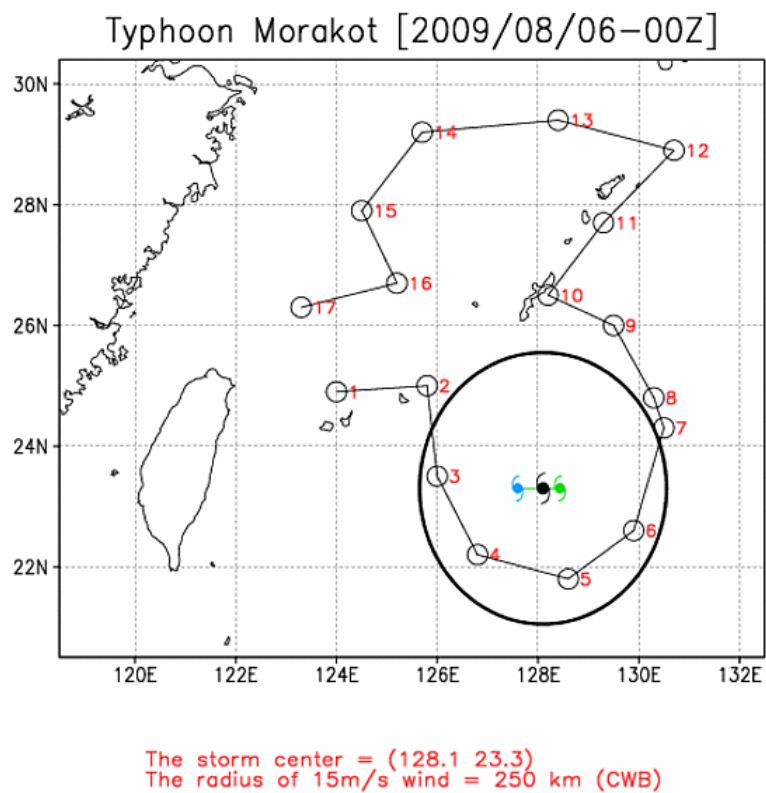


圖 4.9：莫拉克颱風飛機觀測飛行路徑及 17 枚投落送拋投順序與位置。

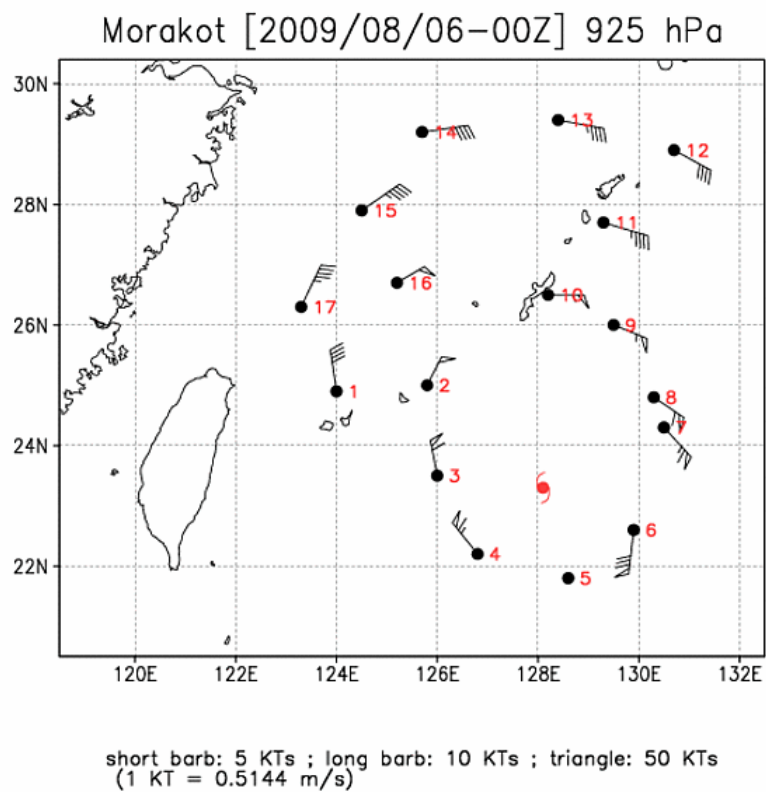


圖 4.10：投落送所量測之莫拉克颱風 925 hPa 水平風場 (knots)。

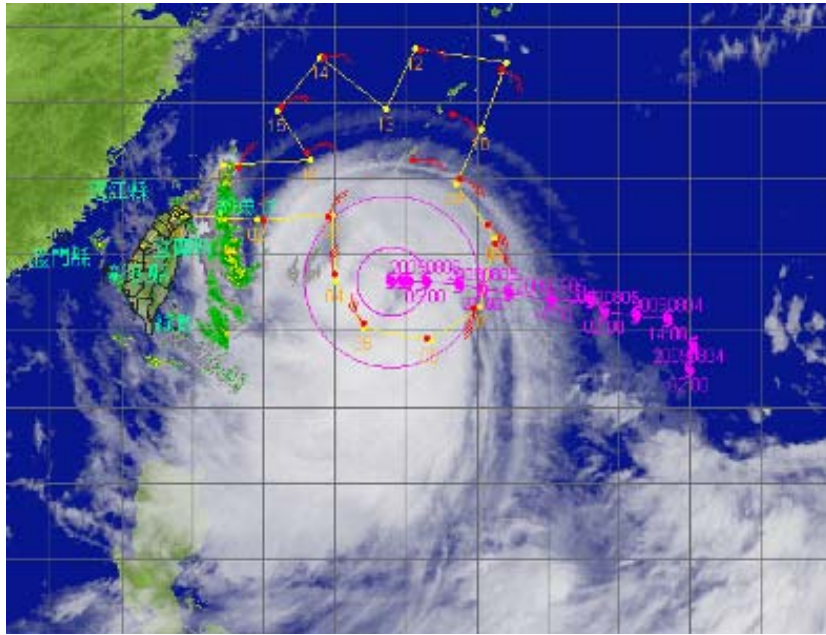


圖 4.11：氣象局 QPESUMS 系統於 8 月 6 日 03Z 即時顯示之莫拉克颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。

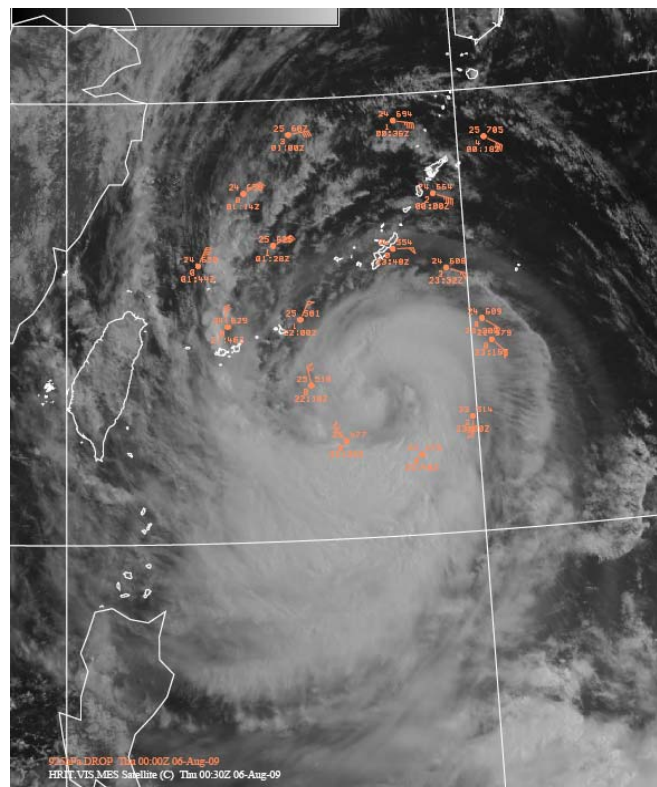


圖 4.12：氣象局 WINS 系統所顯示莫拉克颱風 925 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

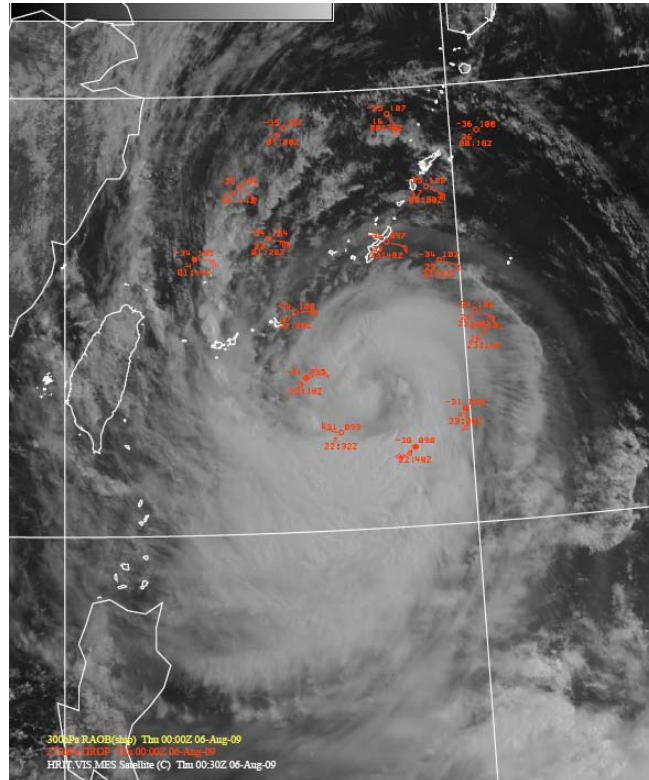


圖 4.13：氣象局 WINS 系統所顯示莫拉克颱風 925 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

編號	落海時間 (UTC)	經度	緯度	DIST	WD	WS	MBL	WL150
1	2009/08/05 21:58:42	124.0	24.9	484	358	---	14.2	12.8
2	2009/08/05 22:15:51	125.8	25.0	323	011	---	17.3	15.1
3	2009/08/05 22:31:23	126.0	23.5	240	343	22.2	21.9	19.4
4	2009/08/05 22:45:55	126.8	22.2	197	300	---	22.8	18.9
5	2009/08/05 23:02:07	128.6	21.8	170	---	---	---	---
6	2009/08/05 23:15:48	129.9	22.6	188	174	---	30.4	27.6
7	2009/08/05 23:30:08	130.5	24.3	260	132	22.8	23.0	19.4
8	2009/08/05 23:34:42	130.3	24.8	273	114	20.7	22.4	19.3
9	2009/08/05 23:50:18	129.5	26.0	331	112	17.5	19.1	16.9
10	2009/08/06 00:01:35	128.2	26.5	356	150	8.2	16.4	13.1
11	2009/08/06 00:16:16	129.3	27.7	505	095	17.0	15.8	14.9
12	2009/08/06 00:32:07	130.7	28.9	678	110	---	15.0	12.8
13	2009/08/06 00:52:18	128.4	29.4	680	081	14.1	14.5	13.0
14	2009/08/06 01:13:52	125.7	29.2	689	059	16.3	15.7	14.0
15	2009/08/06 01:29:43	124.5	27.9	606	033	14.0	15.1	13.9
16	2009/08/06 01:42:22	125.2	26.7	453	051	---	16.6	14.4
17	2009/08/06 02:00:15	123.3	26.3	547	015	---	15.8	14.2

DIST：各投落送與其對應的颱風中心的距離。(km)

WD：海表面風向。(度)

海表面風速：(單位：m/s)

(1) **WS**：直接由投落送測量到的海表面 (10 公尺高度) 風速。

(2) **MBL** (Franklin 2003)：0~500 公尺高度層的平均風速乘以 0.80。

(3) **WL150** (Franklin 2003)：0~150 公尺高度層的平均風速除以 1.229。

圖 4.14：台大研究團隊根據高垂直解析度的莫拉克颱風投落送資料所分析之地面風場，單位 m/s。

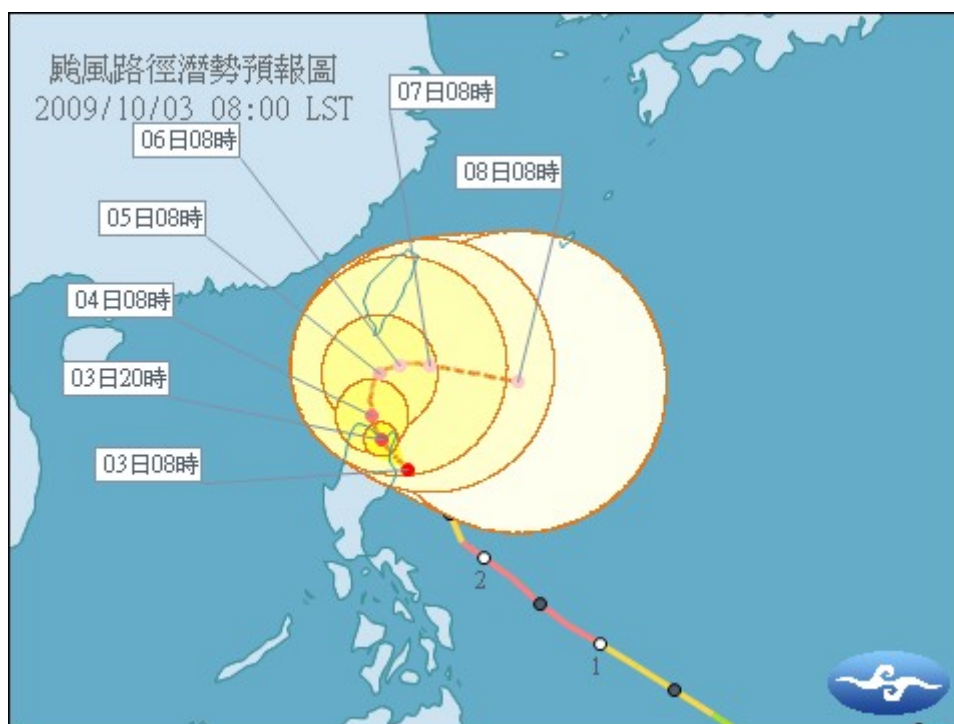


圖 4.15：氣象局於 10 月 3 日 00Z 所發佈之芭瑪颱風移動路徑。

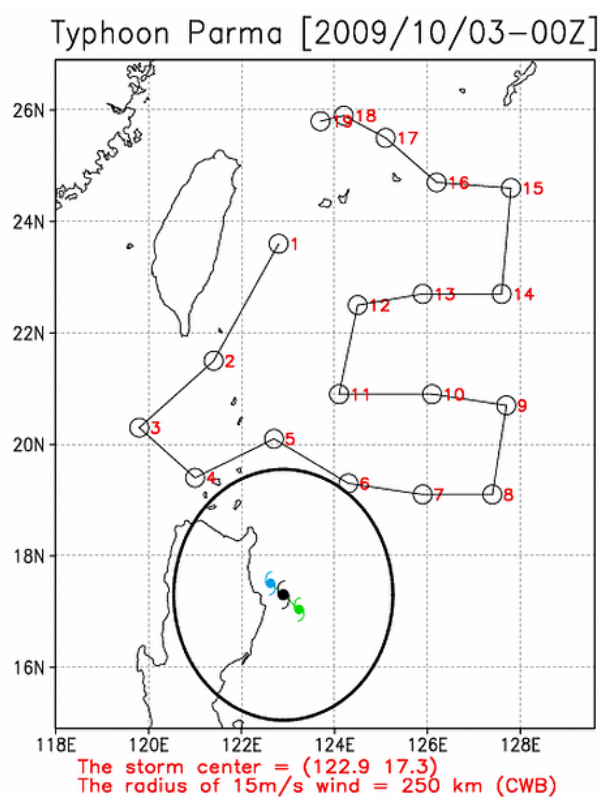


圖 4.16：芭瑪颱風第一次飛機觀測飛行路徑及 19 枚投落送拋投順序與位置。

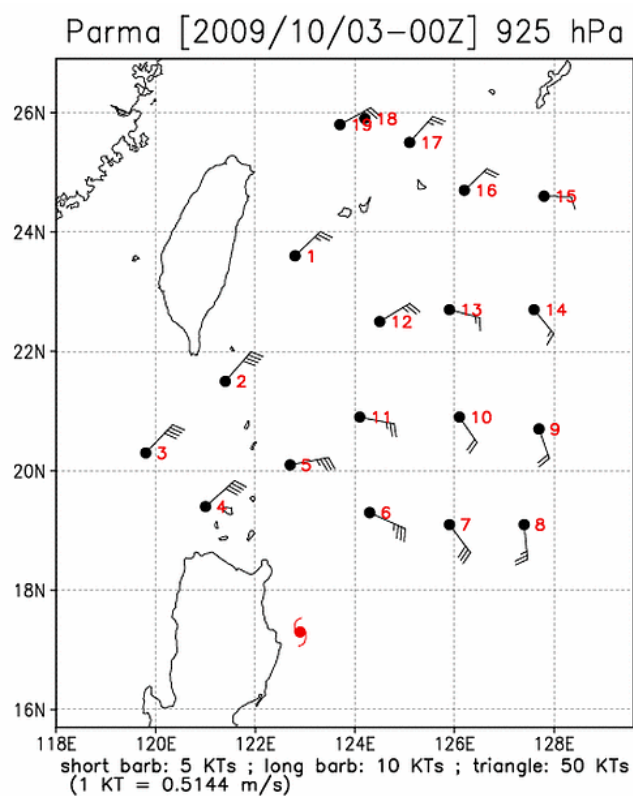


圖 4.17：投落送所量測之芭瑪颱風第一次飛機觀測 925 hPa 水平風場（knots）。

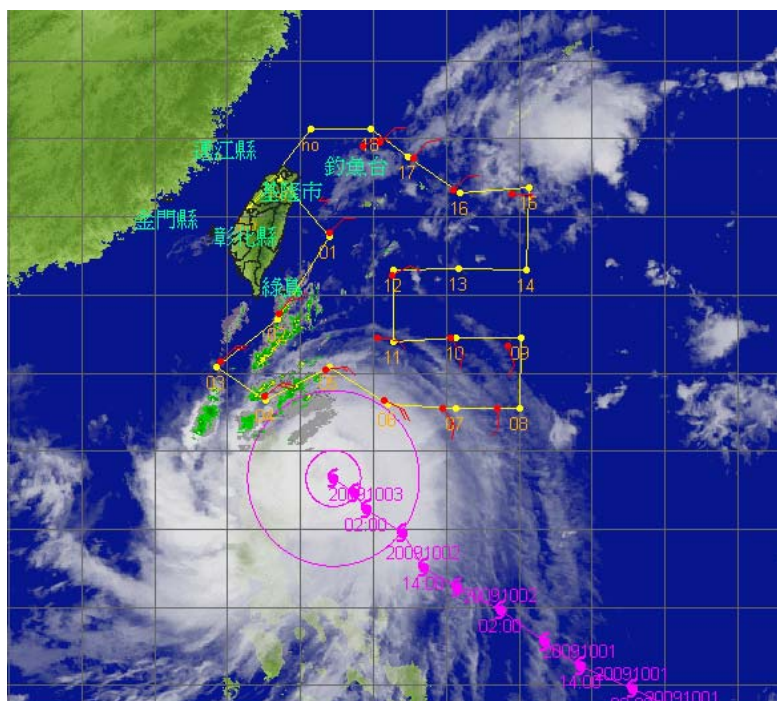


圖 4.18：氣象局 QPESUMS 系統於 10 月 3 日 03Z 即時顯示之芭瑪颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。

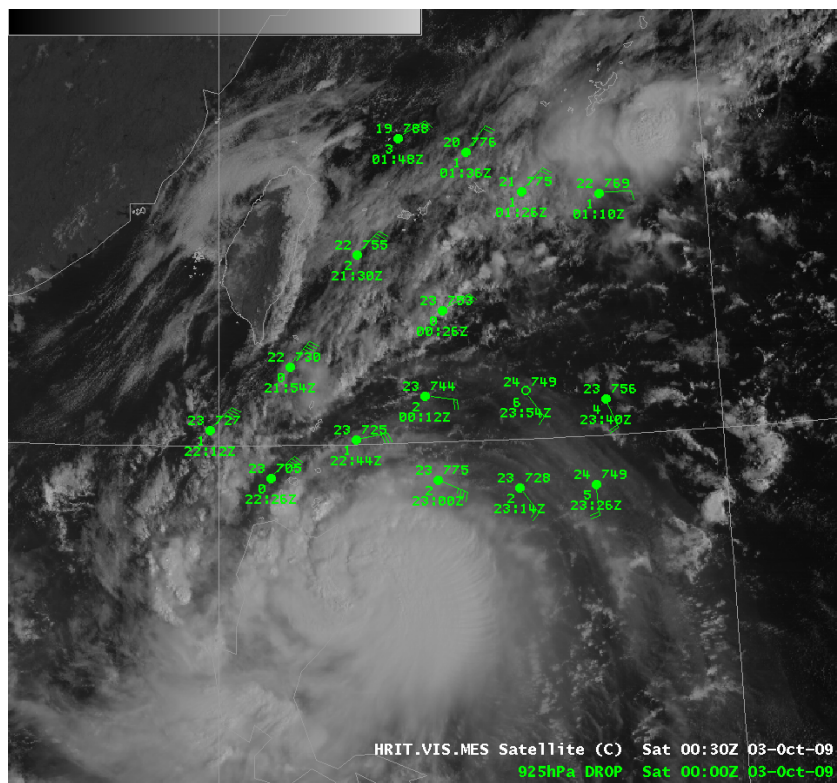


圖 4.19：氣象局 WINS 系統所顯示芭瑪颱風第一次飛機觀測 925 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

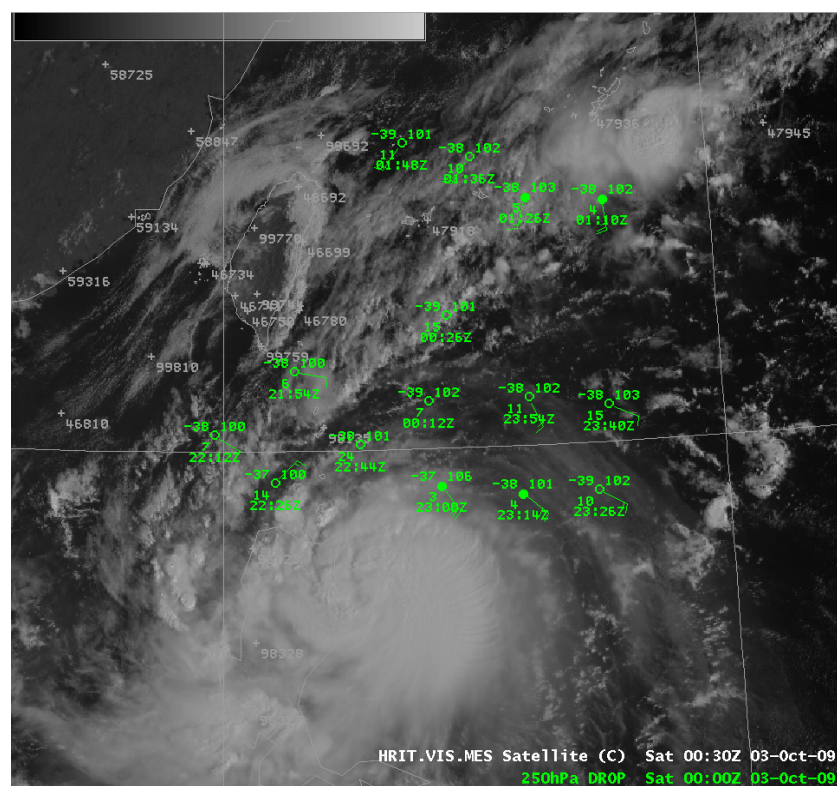


圖 4.20：氣象局 WINS 系統所顯示芭瑪颱風第一次飛機觀測 250 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

編號	落海時間 (UTC)	經度	緯度	DIST	WD	WS	MBL	WL150
1	2009/10/02 21:44:33	122.8	23.6	728	042	---	12.1	11.7
2	2009/10/02 22:09:36	121.4	21.5	518	035	16.4	15.0	14.5
3	2009/10/02 22:26:32	119.8	20.3	493	034	16.2	14.7	14.4
4	2009/10/02 22:40:43	121.0	19.4	334	038	---	15.1	15.1
5	2009/10/02 22:58:15	122.7	20.1	327	058	---	11.9	12.0
6	2009/10/02 23:14:30	124.3	19.3	267	---	---	13.2	---
7	2009/10/02 23:27:50	125.9	19.1	368	127	---	11.4	11.6
8	2009/10/02 23:40:19	127.4	19.1	513	144	8.4	8.3	7.9
9	2009/10/02 23:55:54	127.7	20.7	626	137	---	7.4	6.6
10	2009/10/03 00:09:54	126.1	20.9	526	133	9.1	7.6	7.6
11	2009/10/03 00:26:36	124.1	20.9	423	085	10.6	8.7	8.7
12	2009/10/03 00:41:19	124.5	22.5	600	037	---	10.9	10.6
13	2009/10/03 00:54:34	125.9	22.7	675	083	---	5.8	5.8
14	2009/10/03 01:08:28	127.6	22.7	777	113	5.4	5.1	4.7
15	2009/10/03 01:26:01	127.8	24.6	960	052	8.2	5.7	6.3
16	2009/10/03 01:39:43	126.2	24.7	886	067	---	8.5	8.9
17	2009/10/03 01:50:52	125.1	25.5	934	038	---	10.1	9.7
18	2009/10/03 01:59:08	124.2	25.9	966	---	---	9.1	---
19	2009/10/03 02:04:03	123.7	25.8	951	053	11.5	9.8	9.6

DIST：各投落送與其對應的颱風中心的距離。(km)

WD：海表面風向。(度)

海表面風速：(單位：m/s)

(1) **WS**：直接由投落送測量到的海表面 (10 公尺高度) 風速。

(2) **MBL** (Franklin 2003)：0~500 公尺高度層的平均風速乘以 0.80。

(3) **WL150** (Franklin 2003)：0~150 公尺高度層的平均風速除以 1.229。

圖 4.21：台大研究團隊根據高垂直解析度的芭瑪颱風第一次飛機觀測投落送資料所分析之地面風場，單位 m/s。

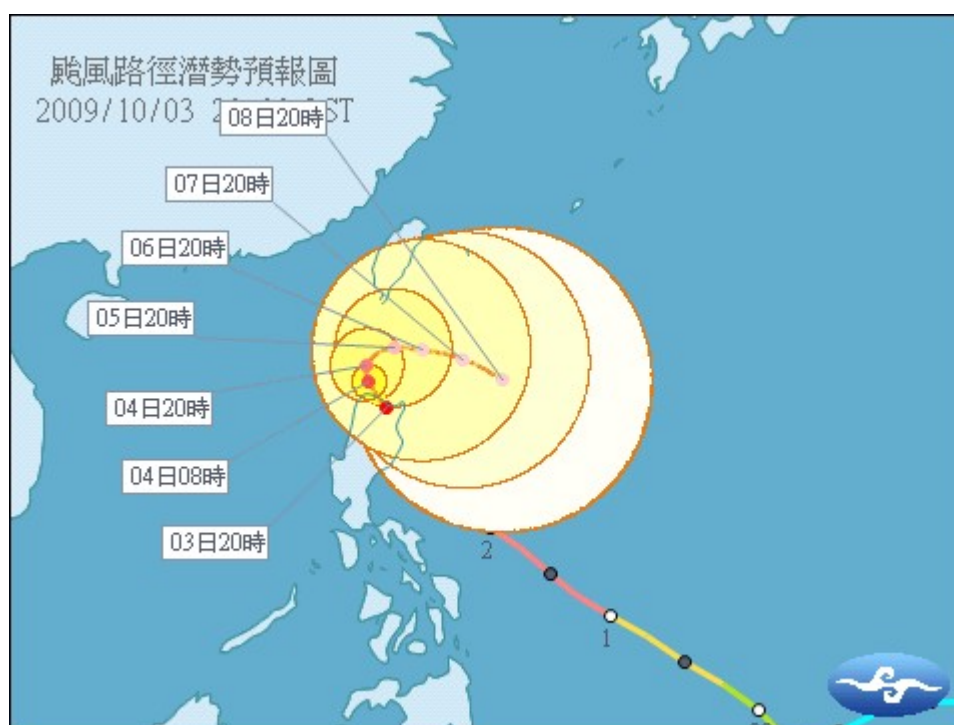


圖 4.22：氣象局於 10 月 3 日 12Z 所發佈之芭瑪颱風移動路徑。

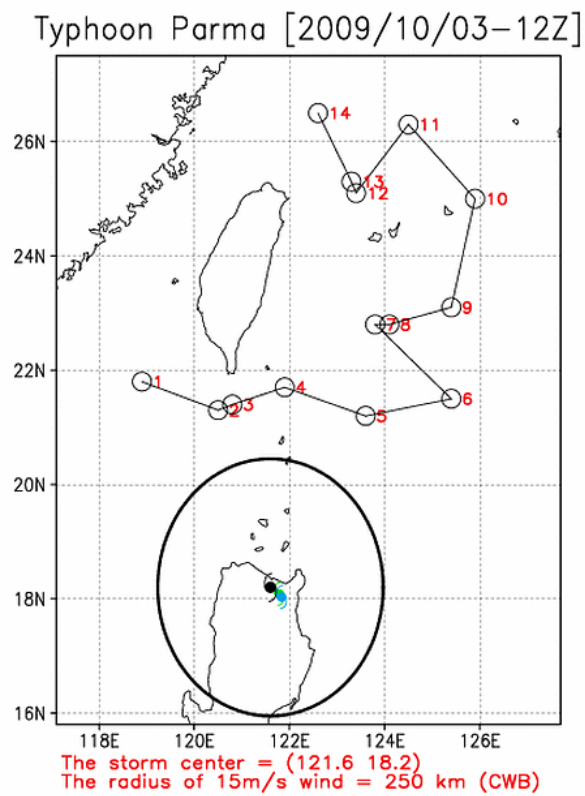


圖 4.23：芭瑪颱風第二次飛機觀測飛行路徑及 14 枚投落送拋投順序與位置。

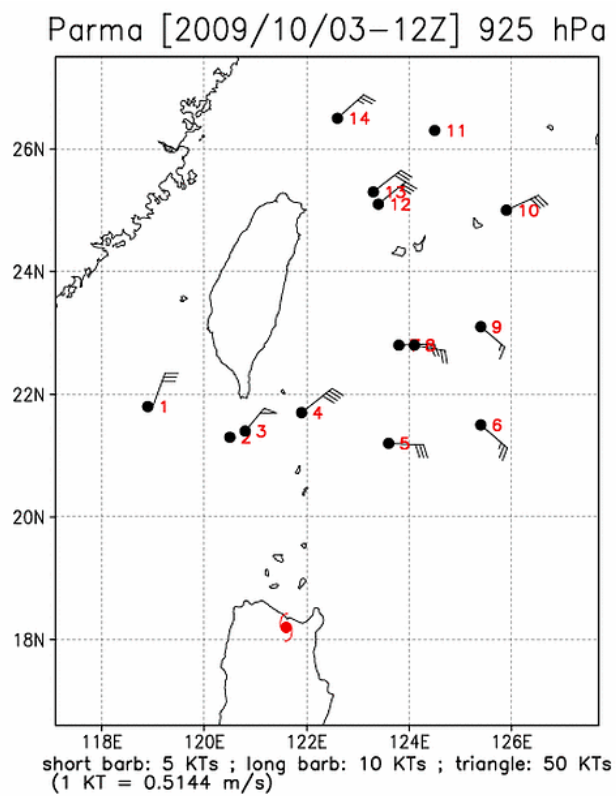


圖 4.24：投落送所量測之芭瑪颱風第二次飛機觀測 925 hPa 水平風場（knots）。

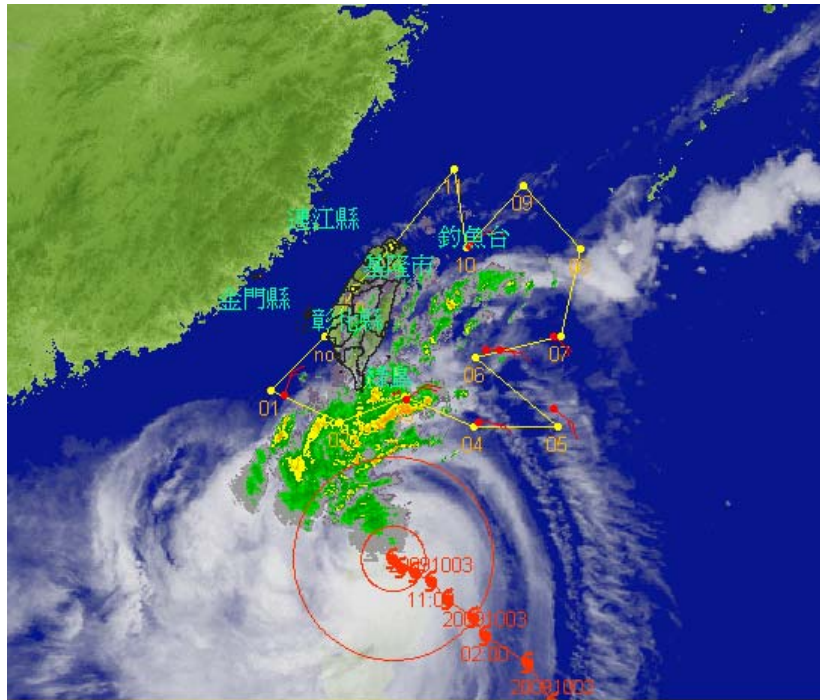


圖 4.25：氣象局 QPESUMS 系統於 10 月 3 日 14Z 即時顯示之芭瑪颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。

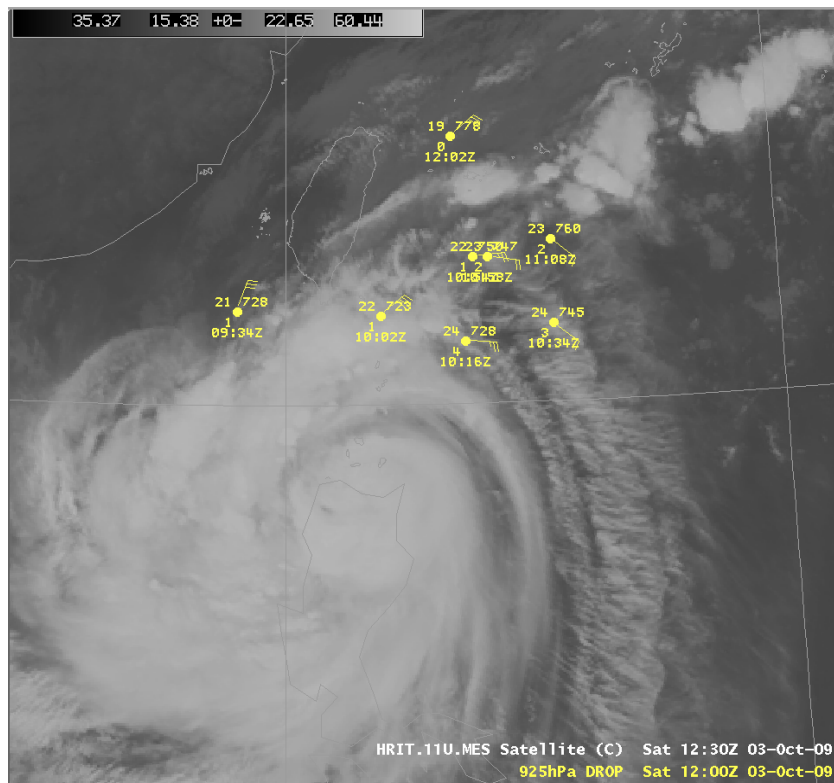


圖 4.26：氣象局 WINS 系統所顯示芭瑪颱風第二次飛機觀測 925 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

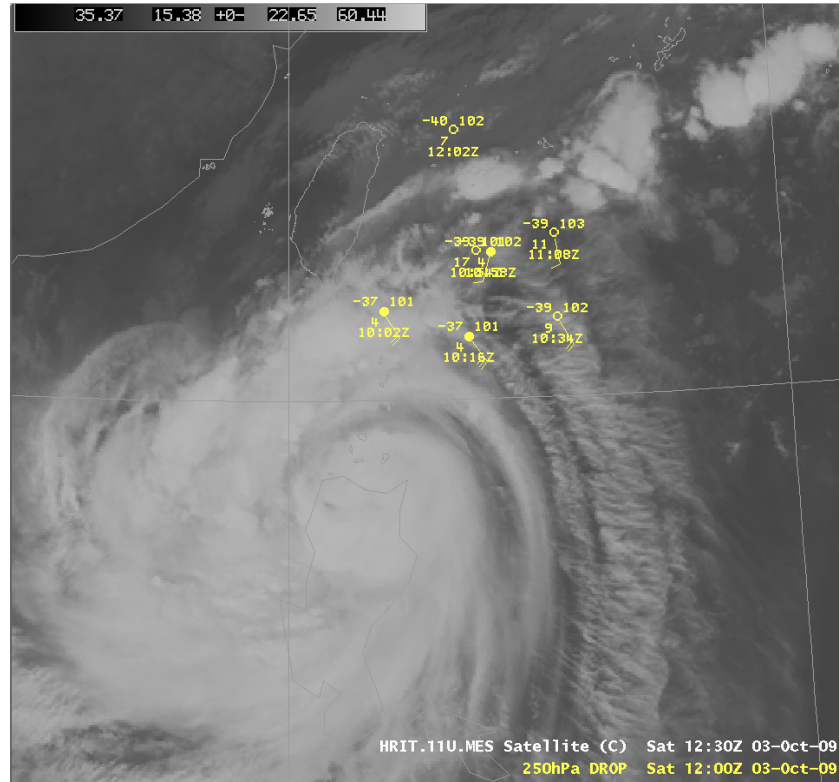


圖 4.27：氣象局 WINS 系統所顯示芭瑪颱風第二次飛機觀測 250 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

編號	落海時間 (UTC)	經度	緯度	DIST	WD	WS	MBL	WL150
1	2009/10/03 09:47:12	118.9	21.8	509	012	15.7	13.2	13.1
2	2009/10/03 10:02:55	120.5	21.3	377	270	---	---	---
3	2009/10/03 10:06:25	120.8	21.4	381	043	---	18.0	18.4
4	2009/10/03 10:16:03	121.9	21.7	402	026	---	17.3	16.4
5	2009/10/03 10:31:28	123.6	21.2	393	085	11.0	11.2	10.3
6	2009/10/03 10:49:17	125.4	21.5	532	119	---	9.9	9.2
7	2009/10/03 11:09:26	123.8	22.8	559	055	12.5	9.9	9.8
8	2009/10/03 11:12:19	124.1	22.8	575	059	8.9	8.7	8.6
9	2009/10/03 11:23:13	125.4	23.1	672	101	7.0	6.0	5.8
10	2009/10/03 11:40:52	125.9	25.0	879	050	---	10.9	10.4
11	2009/10/03 11:56:30	124.5	26.3	950	---	---	---	---
12	2009/10/03 12:14:52	123.4	25.1	787	037	14.5	12.7	12.2
13	2009/10/03 12:18:10	123.3	25.3	804	058	10.8	11.9	11.4
14	2009/10/03 12:38:11	122.6	26.5	931	055	10.0	9.6	9.4

DIST：各投落送與其對應的颱風中心的距離。(km)

WD：海表面風向。(度)

海表面風速：(單位：m/s)

(1) **WS**：直接由投落送測量到的海表面 (10 公尺高度) 風速。

(2) **MBL** (Franklin 2003)：0~500 公尺高度層的平均風速乘以 0.80。

(3) **WL150** (Franklin 2003)：0~150 公尺高度層的平均風速除以 1.229。

圖 4.28：台大研究團隊根據高垂直解析度的芭瑪颱風第二次飛機觀測投落送資料所分析之地面風場，單位 m/s。



圖 4.29：氣象局於 10 月 20 日 00Z 所發佈之盧碧颱風移動路徑。

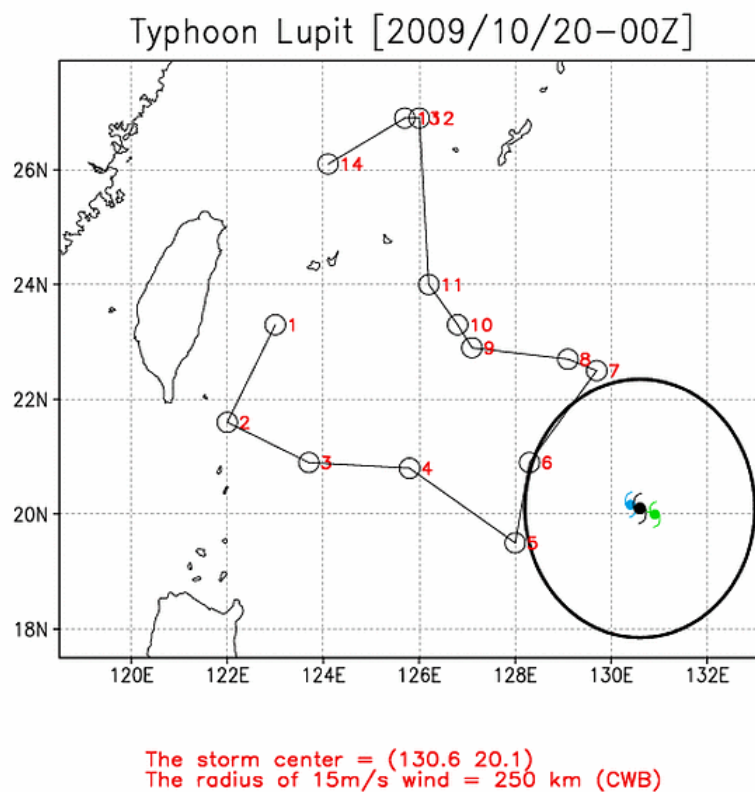


圖 4.30：盧碧颱風第一次飛機觀測飛行路徑及 14 枚投落送拋投順序與位置。

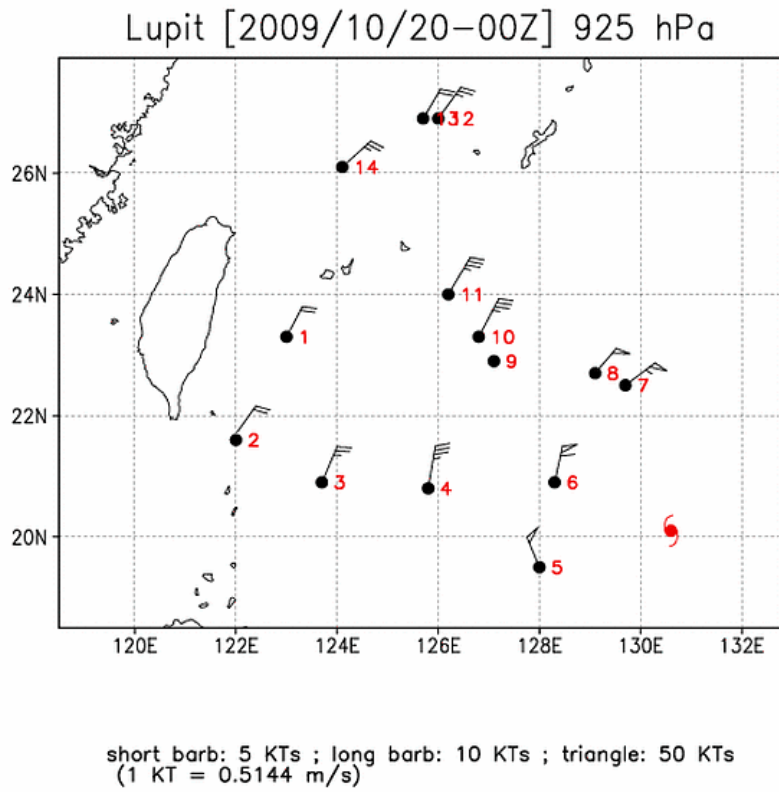


圖 4.31：投落送所量測之盧碧颱風第一次飛機觀測 925 hPa 水平風場（knots）。

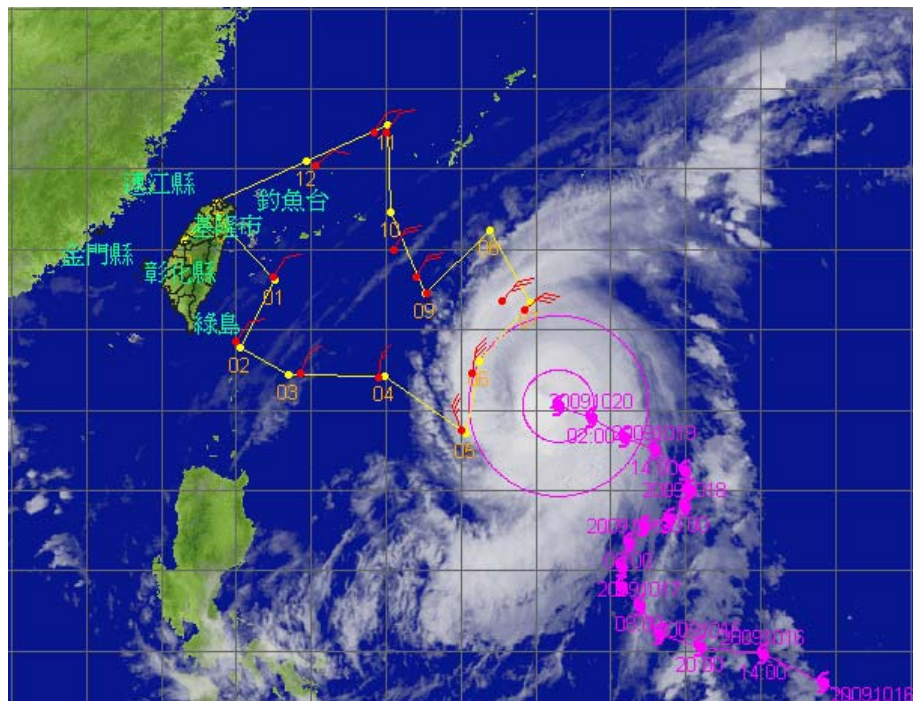


圖 4.32：氣象局 QPESUMS 系統於 10 月 20 日 02Z 即時顯示之盧碧颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。

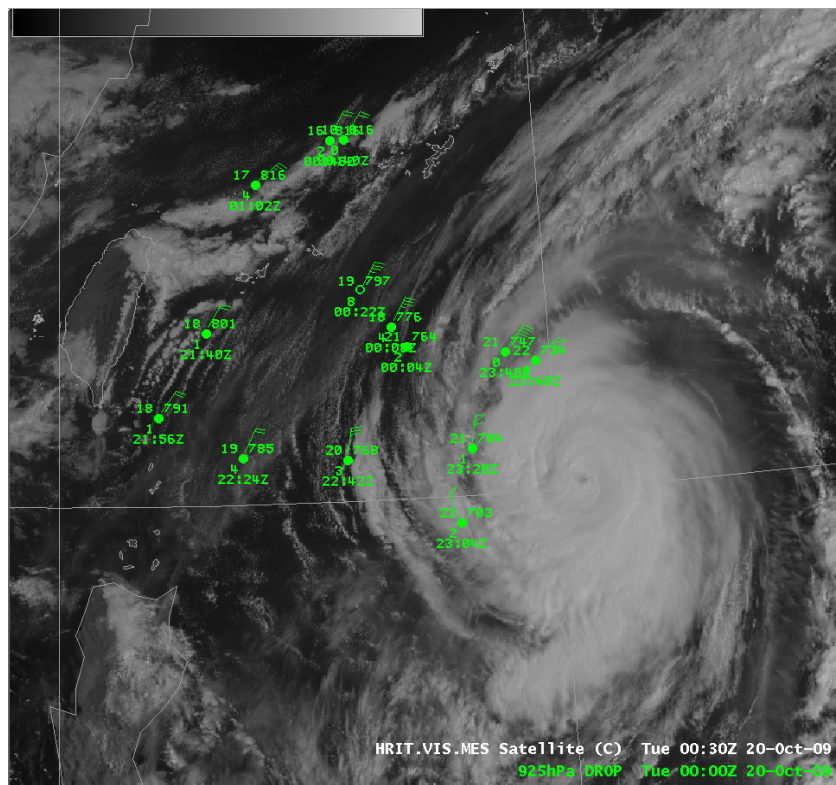


圖 4.33：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第一次飛機觀測 925 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

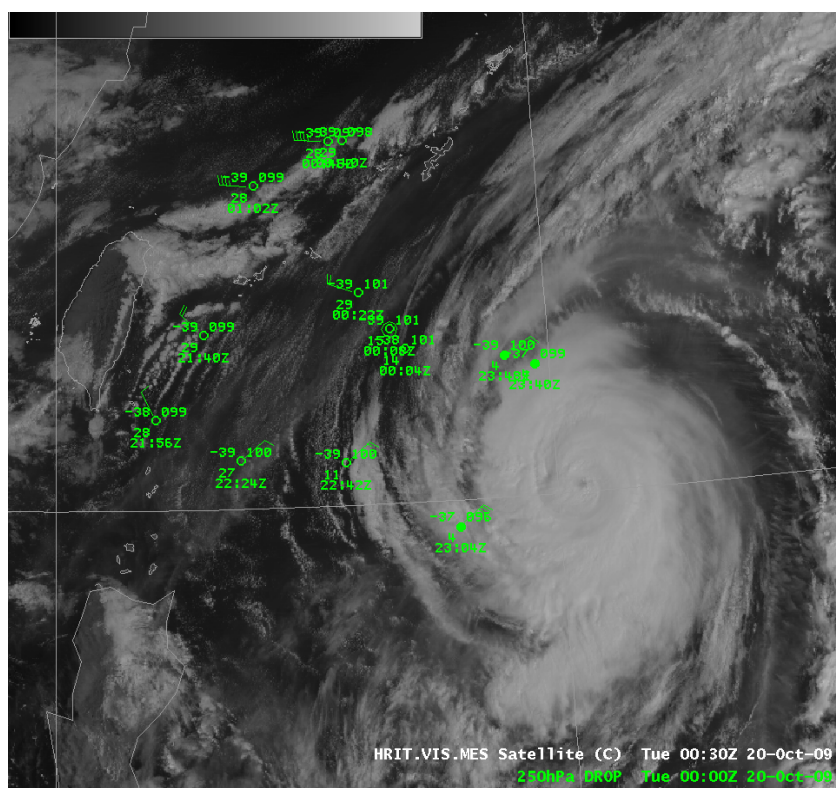


圖 4.34：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第一次飛機觀測 250 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

編號	落海時間 (UTC)	經度	緯度	DIST	WD	WS	MBL	WL150
1	2009/10/19 21:54:52	123.0	23.3	898	037	---	7.7	7.9
2	2009/10/19 22:12:48	122.0	21.6	935	045	---	8.8	8.9
3	2009/10/19 22:39:08	123.7	20.9	749	018	---	9.2	9.1
4	2009/10/19 22:57:43	125.8	20.8	528	004	13.3	12.4	11.7
5	2009/10/19 23:20:48	128.0	19.5	291	317	---	17.9	17.9
6	2009/10/19 23:34:44	128.3	20.9	262	352	22.9	22.1	19.8
7	2009/10/19 23:54:52	129.7	22.5	283	041	20.5	20.0	18.9
8	2009/10/20 00:02:26	129.1	22.7	327	023	20.6	18.9	18.2
9	2009/10/20 00:18:57	127.1	22.9	472	---	---	---	---
10	2009/10/20 00:23:26	126.8	23.3	524	020	15.9	14.7	14.3
11	2009/10/20 00:37:28	126.2	24.0	618	031	13.8	13.0	12.6
12	2009/10/20 00:56:30	126.0	26.9	877	016	---	11.3	11.3
13	2009/10/20 01:00:54	125.7	26.9	894	029	12.9	10.6	10.6
14	2009/10/20 01:17:44	124.1	26.1	920	038	12.9	10.3	10.7

DIST：各投落送與其對應的颱風中心的距離。(km)

WD：海表面風向。(度)

海表面風速：(單位：m/s)

(1) **WS**：直接由投落送測量到的海表面(10公尺高度)風速。

(2) **MBL** (Franklin 2003)：0~500公尺高度層的平均風速乘以0.80。

(3) **WL150** (Franklin 2003)：0~150公尺高度層的平均風速除以1.229。

圖 4.35：台大研究團隊根據高垂直解析度的盧碧颱風第一次飛機觀測投落送資料所分析之地面風場，單位 m/s。

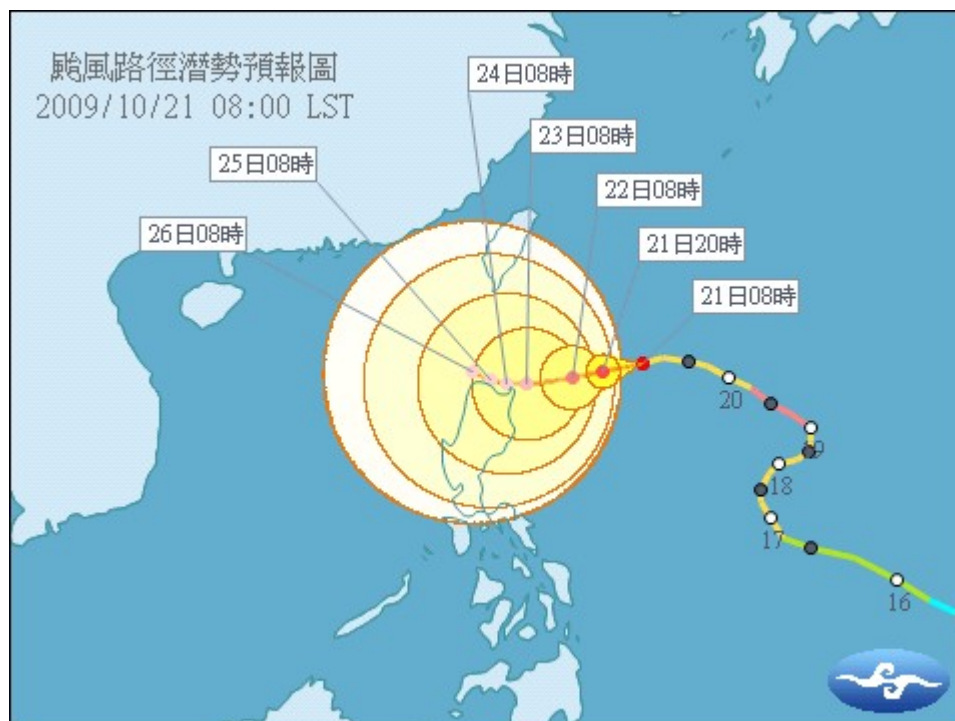


圖 4.36：氣象局於 10 月 21 日 00Z 所發佈之盧碧颱風移動路徑。

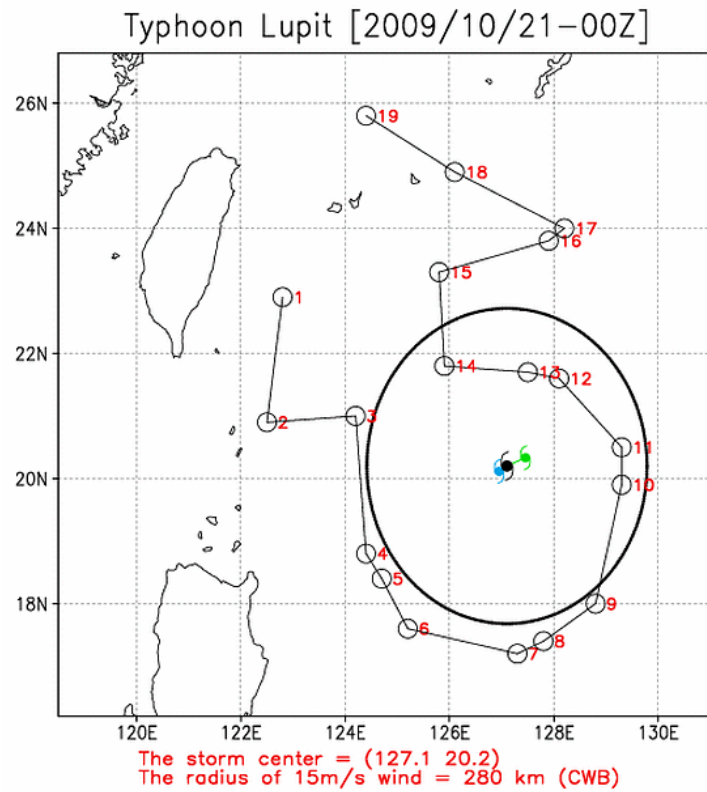


圖 4.37：盧碧颱風第二次飛機觀測飛行路徑及 19 枚投落送拋投順序與位置。

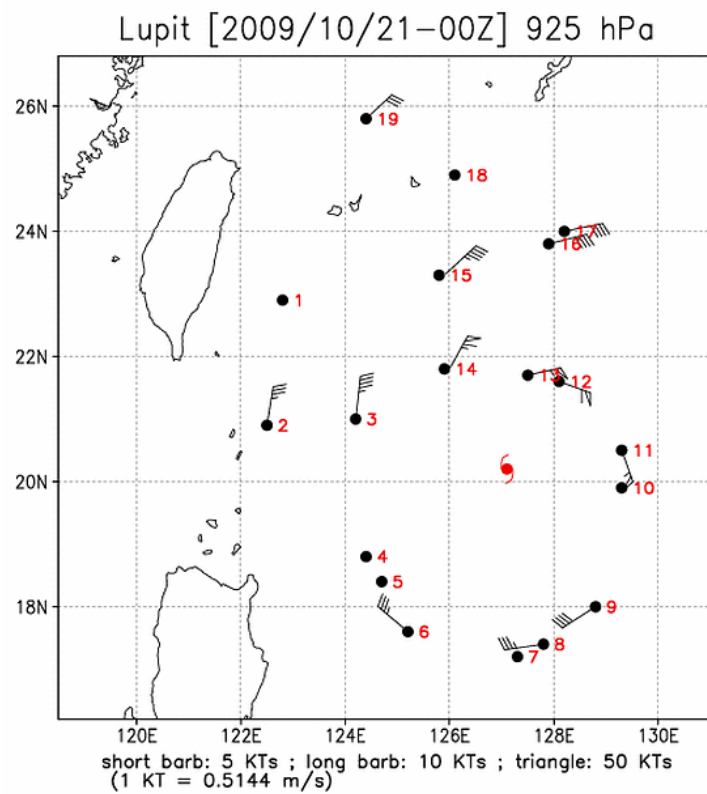


圖 4.38：投落送所量測之盧碧颱風第二次飛機觀測 925 hPa 水平風場（knots）。

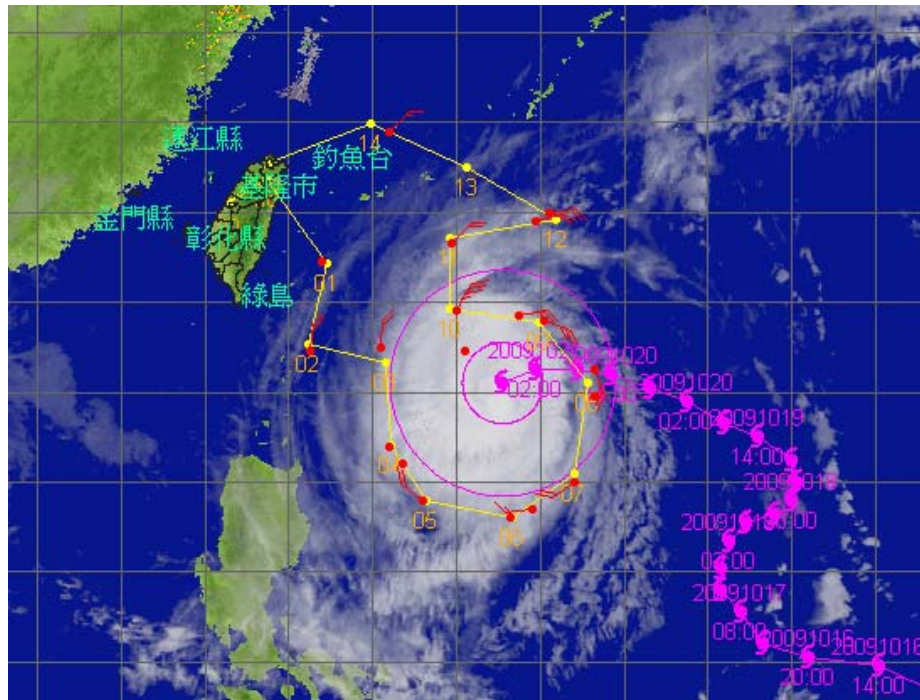


圖 4.39：氣象局 QPESUMS 系統於 10 月 21 日 02Z 即時顯示之盧碧颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。

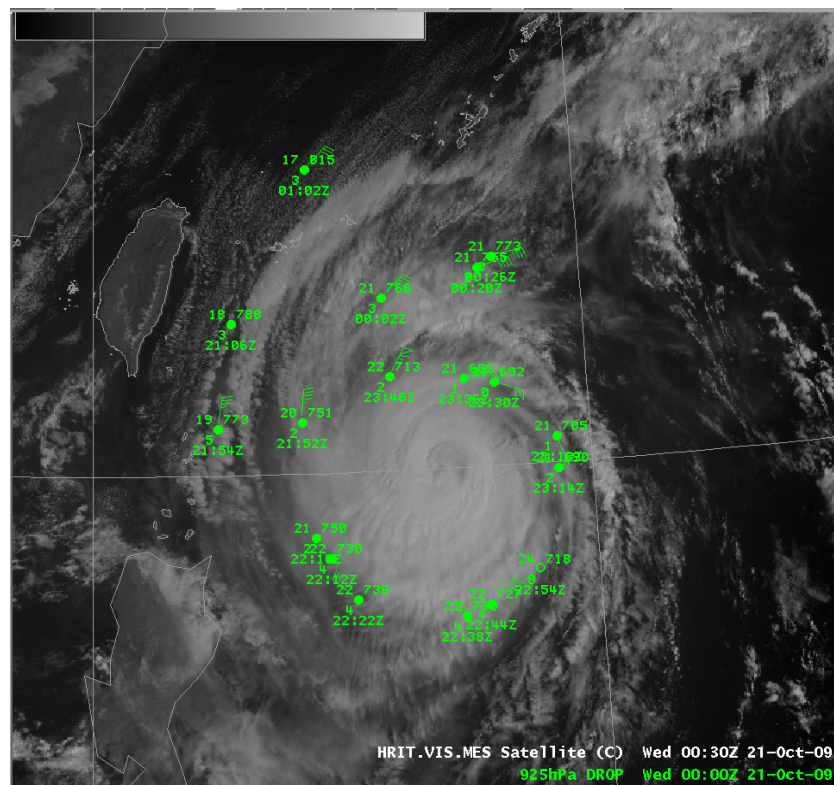


圖 4.40：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第二次飛機觀測 925 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

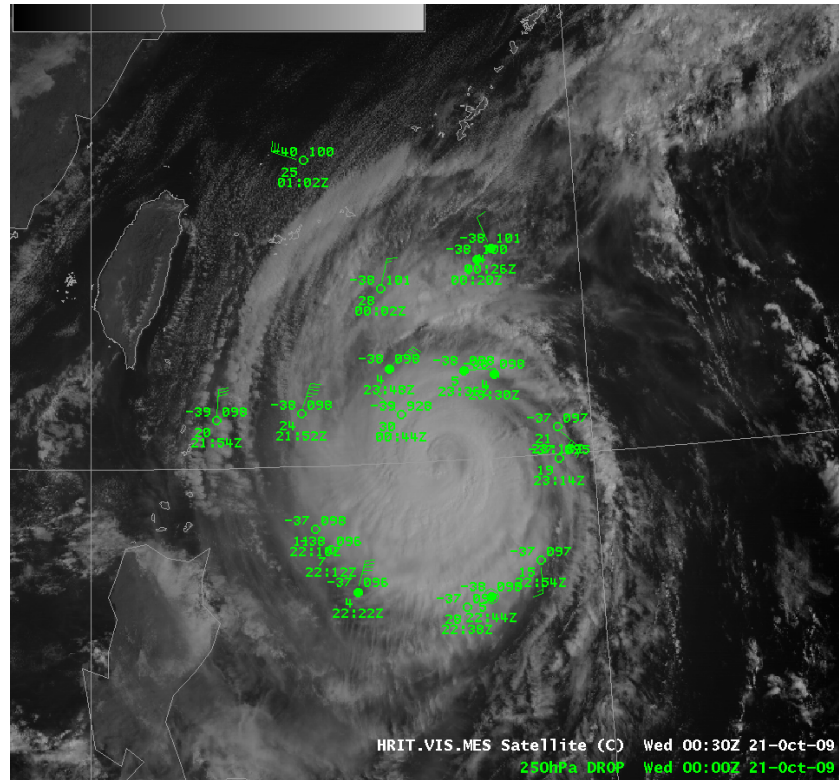


圖 4.41：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第二次飛機觀測 250 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

編號	落海時間 (UTC)	經度	緯度	DIST	WD	WS	MBL	WL150
1	2009/10/20 21:20:06	122.8	22.9	558	---	---	---	---
2	2009/10/20 21:51:08	122.5	20.9	516	008	16.7	13.9	14.0
3	2009/10/20 22:06:27	124.2	21.0	340	351	---	15.9	15.3
4	2009/10/20 22:17:24	124.4	18.8	345	---	---	---	---
5	2009/10/20 22:21:26	124.7	18.4	347	310	---	15.3	13.8
6	2009/10/20 22:36:16	125.2	17.6	367	308	15.2	13.0	12.5
7	2009/10/20 22:54:07	127.3	17.2	337	---	---	---	---
8	2009/10/20 22:59:21	127.8	17.4	322	243	---	13.4	12.5
9	2009/10/20 23:09:43	128.8	18.0	298	239	12.0	12.7	11.2
10	2009/10/20 23:27:25	129.3	19.9	227	---	---	---	---
11	2009/10/20 23:32:10	129.3	20.5	223	150	---	19.2	16.2
12	2009/10/20 23:45:59	128.1	21.6	186	085	---	20.2	18.7
13	2009/10/20 23:50:48	127.5	21.7	172	059	---	21.2	---
14	2009/10/21 00:03:00	125.9	21.8	218	018	---	24.4	23.2
15	2009/10/21 00:16:49	125.8	23.3	367	---	---	---	---
16	2009/10/21 00:29:02	127.9	23.8	408	057	---	15.8	14.1
17	2009/10/21 00:40:06	128.2	24.0	443	052	---	13.9	12.8
18	2009/10/21 00:56:50	126.1	24.9	537	---	---	---	---
19	2009/10/21 01:16:36	124.4	25.8	687	051	12.9	12.3	12.2

DIST：各投落送與其對應的颱風中心的距離。(km)

WD：海表面風向。(度)

海表面風速：(單位：m/s)

(1) **WS**：直接由投落送測量到的海表面(10 公尺高度)風速。

(2) **MBL** (Franklin 2003)：0~500 公尺高度層的平均風速乘以 0.80。

(3) **WL150** (Franklin 2003)：0~150 公尺高度層的平均風速除以 1.229。

圖 4.42：台大研究團隊根據高垂直解析度的盧碧颱風第二次飛機觀測投落送資料所分析之地面風場，單位 m/s。

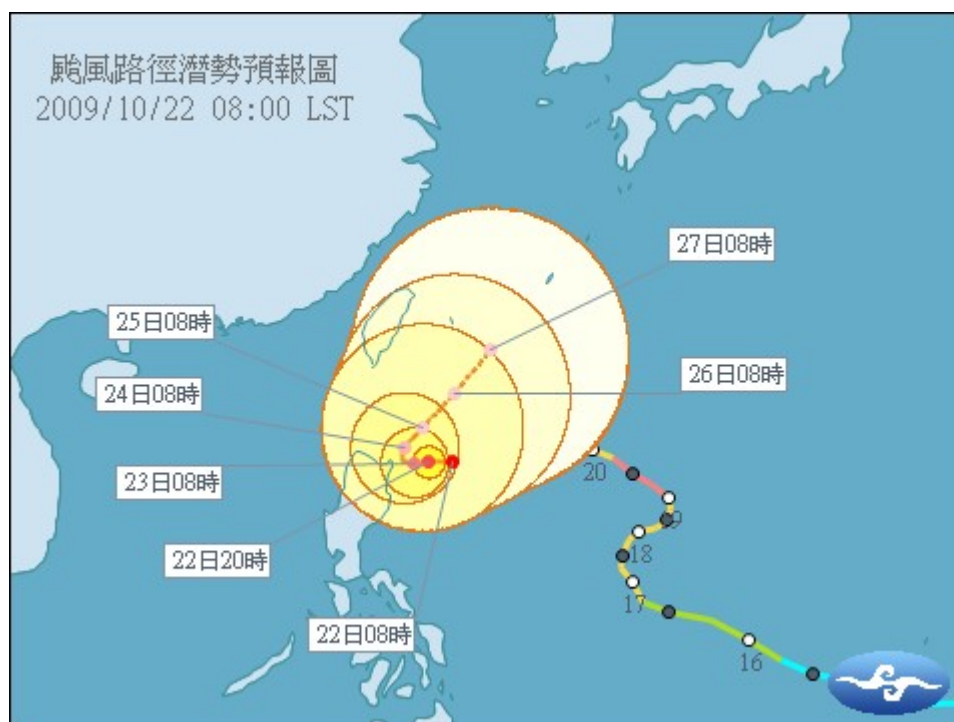


圖 4.43：氣象局於 10 月 22 日 00Z 所發佈之盧碧颱風移動路徑。

Typhoon Lupit [2009/10/22-00Z]

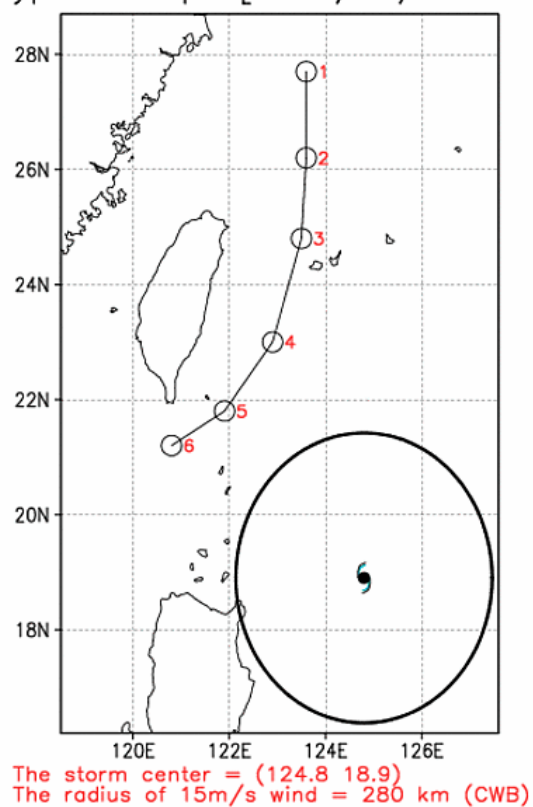


圖 4.44：盧碧颱風第三次飛機觀測飛行路徑及 6 枚投落送拋投順序與位置。

Lupit [2009/10/22-00Z] 925 hPa

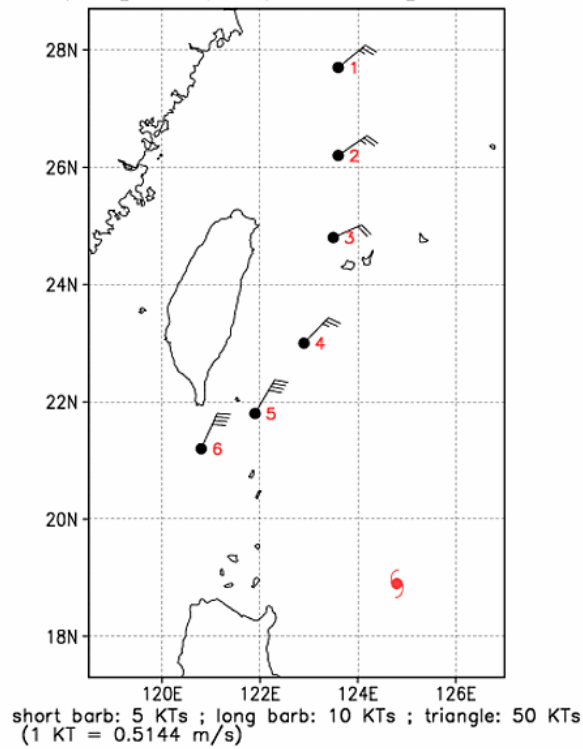


圖 4.45：投落送所量測之盧碧颱風第三次飛機觀測 925 hPa 水平風場（knots）。

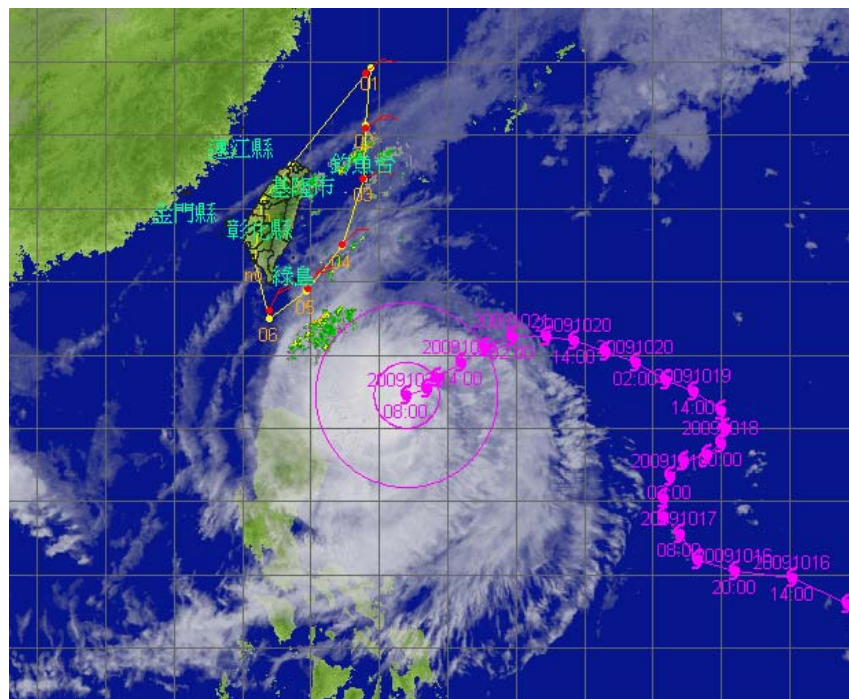


圖 4.46：氣象局 QPESUMS 系統於 10 月 22 日 02Z 即時顯示之盧碧颱風路徑、衛星雲圖、雷達回波資訊。

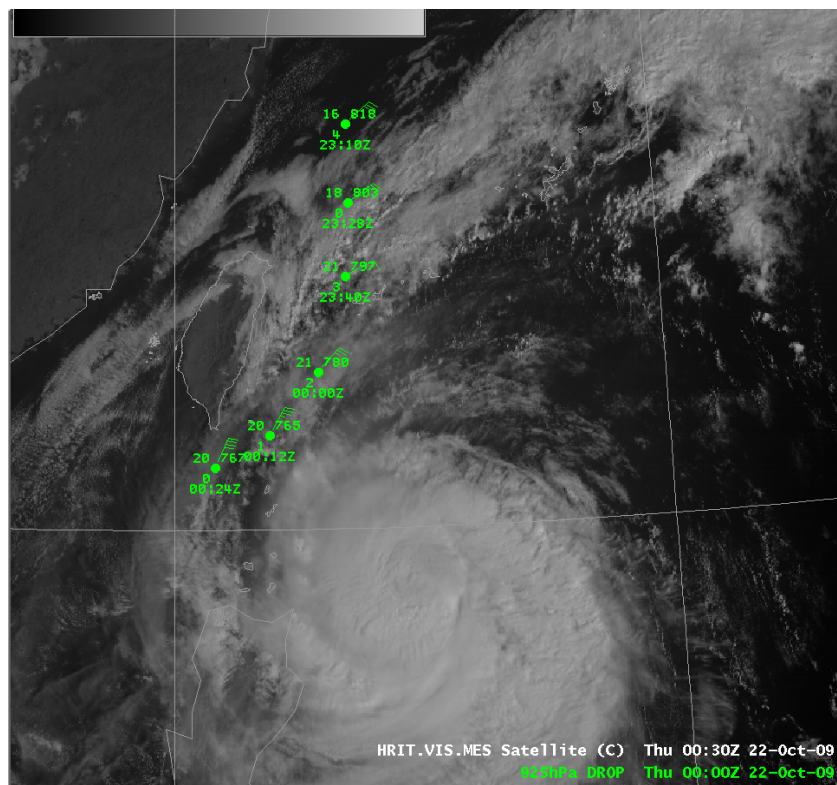


圖 4.47：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第三次飛機觀測 925 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

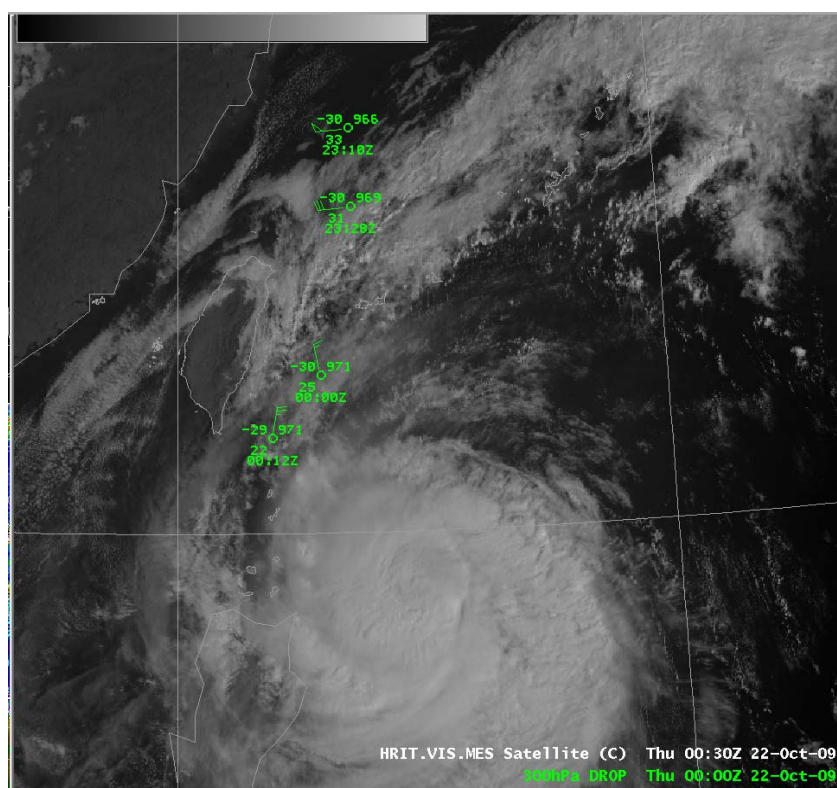


圖 4.48：氣象局 WINS 系統所顯示盧碧颱風第三次飛機觀測 300 hPa 之投落送量測風場，陰影區為可見光雲圖。

編號	落海時間 (UTC)	經度	緯度	DIST	WD	WS	MBL	WL150
1	2009/10/21 23:25:56	123.6	27.7	986	057	---	10.3	10.2
2	2009/10/21 23:41:40	123.6	26.2	821	039	13.5	11.7	12.2
3	2009/10/21 23:54:29	123.5	24.8	669	074	6.6	7.3	5.6
4	2009/10/22 00:13:03	122.9	23.0	496	030	13.6	10.9	10.8
5	2009/10/22 00:26:41	121.9	21.8	443	013	---	17.2	17.4
6	2009/10/22 00:36:58	120.8	21.2	488	024	---	13.1	13.5

DIST：各投落送與其對應的颱風中心的距離。(km)

WD：海表面風向。(度)

海表面風速：(單位：m/s)

(1) **WS**：直接由投落送測量到的海表面(10公尺高度)風速。

(2) **MBL** (Franklin 2003)：0~500 公尺高度層的平均風速乘以 0.80。

(3) **WL150** (Franklin 2003)：0~150 公尺高度層的平均風速除以 1.229。

圖 4.49：台大研究團隊根據高垂直解析度的盧碧颱風第三次飛機觀測投落送資料所分析之地面風場，單位 m/s。

五、結論

國科會於 2002 年 8 月起三年內提供相當經費，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。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（對放颱風假與否具關鍵性影響）。

追風計畫在 2003-2009 年的研究成果中，總共針對 35 個颱風執行 45 次觀測任務，飛機累計飛行時數超過 239 小時並拋投 751 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 6-72 小時顯示平均能夠有效改善路徑預報達 24%。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）。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. 2009），藉此提升遙測颱風參數的可信度。

Wu et al. (2009a) 中運用 MM5 ADSSV 方法成功發現影響 2006 年珊珊颱風運動主要的高敏感區域為中緯度槽線以及太平洋高壓邊緣，並以位渦反演方法得到驗證。Yamaguchi et al. (2009) 則利用 JMA SV 方法驗證 DOTSTAR 2004 年的康森個案，指出運用 JMA SV 方法有效同化位於敏感區域的投落送資料可以掌握康森颱風往東北方向移動的訊息。Wu et al. (2009b) 則進一步針對 2006 年 84 個西北太平洋颱風個案的 6 種不同策略敏感性方法進行分析比較，包括 3 種奇異向量法 (total-energy singular vectors, TESVs)、系集轉換卡門濾波器 (ETKF)、系集散落

(DLM)、共軛敏感度(ADSSV)，並探討其對颱風路徑影響的動力特徵與比較。

本委託計畫延續追風計畫過去六年所累積之研究成果，繼續執行使用 GPS 投落送進行颱風飛機偵察之觀測任務。本計畫於今年 2009 年至今已完成蓮花、莫拉克、芭瑪及盧碧颱風等七次飛機觀測。此七次飛機觀測累計的飛行時數達 32 個小時，並成功使用 102 具投落送。另外，七次颱風觀測的投落送資料均已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。此外，2008 年 T-PARC 國際觀測實驗資料之後續研究與今年度投落送資料之模式影響實驗亦持續進行中。

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。研究人員直接飛行到接近台灣的颱風周圍上空，投擲 GPS 投落送（GPS Dropwindsonde），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。

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 飛機觀測實驗之先期及後續研究（pilot and follow-up studies），以期取得及測試新資料；並透過模式探討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）研究及提昇資料同化研究，因此可謂扮演颱風基礎及預報研究火車頭之先驅實驗。此研究將整合國內學術界及氣象局相當人力，並與美國 NCEP、HRD、FNMOC 進行研究合作，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。

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。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。主持人吳俊傑於 2006 年 11 月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 12 月 4-7 日，主持人吳俊傑前往夏威夷參加 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在各國科學家努力研究之下，預期將對颱風路徑預報、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。

目前追風團隊針對 2008 年 T-PARC 期間所獲得豐富的投落送觀測資料已展開相關研究，在 2009 年 9 月主持人吳俊傑受邀前往至美國 Monterey，由 WMO 所舉辦的第三屆 THORPEX 科學研討會，針對台灣追風計畫參與 T-PARC 實驗後之經驗分享以及與參加 T-PARC 實驗的學者進行科學議題探討，並在會中發表運用 EnKF 有效改善颱風渦旋初始化的新方法，並獲得廣大迴響。2009 年 10 月主持人吳俊傑前往上海參與 WMO 所舉辦的第二屆國際熱帶氣旋登陸過程研討會 (IWTCLP-II)，會中與各國科學家報告 2008 年追風計畫參與 T-PARC 實驗的最新成果介紹。並在 10 月底受邀至美國 Monterey 參與由 Naval Postgraduate School 所舉辦 2008 年熱帶氣旋結構研討會，會中針對 EnKF 方法與 2008 年 T-PARC 實

驗期間獲得多架次國際聯合觀測的辛樂克颱風的雙眼牆結構演變發表演說，並與多位國際知名熱帶氣旋研究學者在此議題上進行熱烈討論。

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、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、美國海軍 ONR 及 T-PARC 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.

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. J. Majumdar, 2009: Validation of QuikSCAT wind vectors by dropwindsonde data from DOTSTAR. *J. Geophys. Res.* (in press)

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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, and K.-H. Chou, 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., 2009c: Targeted Observation for Improving Tropical Cyclone Predictability - DOTSTAR and T-PARC. Proc., 3rd THORPEX Science Workshop, WMO, Monterey, CA.
- Wu, C.-C., K.-Y. Lien, F. Zhang, 2009d: A new approach for tropical cyclone initialization based on EnKF. Proc., 3rd THORPEX Science Workshop, WMO, Monterey, CA.
- 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.