

由SOWMEX/TiMREX和DOTSTAR實驗 探討劇烈天氣研究之飛行觀測策略

林博雄

(臺灣大學大氣科學系)

摘要

如何兼顧航空管制安全以及劇烈天氣的科學探索需求，是全球大氣科學學界飛行觀測所急迫解決的實務議題。本文透過國內外大氣科學飛行觀測需求與現況，以及 2008 年臺灣地區 SOWMEX/TiMREX(西南季風_追雨計畫)實驗和 DOTSTAR(侵臺颱風_追風計畫)兩項科學實驗的飛行觀測案例，說明我們在飛機航務管理與科學研究的合作過程。經由這些逐年累積的實務經驗，期冀共創劇烈天氣研究與航空氣象飛行安全應用的豐碩成果。本文也將說明臺灣大氣科學學界對於飛行觀測之未來規畫。

一、前言

現今全球各種常態性的氣象觀測平台(platform) (測站、船舶、浮台、汽球探空、飛機、雷達到衛星)當中，以衛星、雷達和飛機才能有效進行立體的空間監測，衛星和雷達遙測的空間涵蓋範圍最為廣大，但是電磁波監測大氣的準確度和被大氣衰減的效應，一直需要大量的現場(in situ)觀測資料的確認驗證程序才有具體效益。相對地，飛機是最直接、最有空間和時間彈性的四度空間氣象觀測平台。飛機平台運用於大氣科學研究和應用的議題計有(林，2004)：

- 雲與降水物理過程 (人造雨效率和豪大雨發生機制)
- 大氣化學 (城鄉空氣污染)
- 劇烈天氣系統結構 (豪大雨和閃電發生機制)
- 海氣交互作用 (海溫和大氣擾動的生成和維持)

美國是全球使用飛機進行科學活動最活躍的國家，包括國家科學基金會、海軍、能源部、太空航空研究總署和各大學，除了 NOAA 的 LongEZ 是實驗機機種，其餘都是商用和軍用飛機所改裝，其中又以 NOAA Aircraft Operation Center (AOC)運作的機群最為齊全，從四螺旋槳反潛飛機改裝的 P3 飛機，到水上飛機和雙座直昇機，提供了多樣的科學研究之需求。NASA 的 DC-10 以及 NCAR 的 C130 飛機，則能提供多重設備和多人科學家登機，經常出現在全球各地的天氣實驗密集觀測活動。歐盟八個國家和歐洲科學基金會在 2003 年成立「歐洲空載研究平台艦隊(European Fleet for Airborne Research, EUFAR)」，來協商調度歐盟三十一架研究專用飛機。其中法國和德國所轄屬的飛機數量和種類大於其他參與國家，英國早期使用的 C130 退役，改由 BAe-146 取代其科學任務。此外，滑翔機和超輕機也都被歐洲人用來作為科學觀測的飛行平台。亞太地區目前以澳洲 ARA(Airborne Research Australia)、日本 Diamond Air Service (DAS)以及臺灣漢翔航空工業公司(AIDC)則有提供飛機平台和設備租賃服務的科學量測業務。中國在 2003 年改裝一架美國 Piper Cheyenne 輕航機，首次做為人造雨

的專用飛機；2008年改裝「運八」運輸機，擬於2009年之後進行劇烈天氣觀測。

台灣在1987年之前，空軍動用C119和C130運輸機支援省水利處進行人造雨作業(劉，1991；中央氣象局，1995)，以及農業委員會林務局航空測量所BEECH八人座螺旋槳小飛機的例行性航照與GPS定位任務為主。人造雨空中灑乾冰和清水的實務飛行，曾在1980年有著109架次密集作業，然而相關的雲物理機制研究工作並未同步展開(柳，1986)。1987年國科會中尺度天氣實驗計劃(TAMEX)期間，曾邀請美國NOAA P3飛機來台參與實驗觀測，由於政治生態情勢，該飛機是由琉球起降再飛臨台灣近岸進行天氣觀測，當時國內科學家曾登機參與觀測飛行。1990年3月15日到4月30日環保署以專案計劃方式，租用荷蘭大氣環境顧問公司Piper Chieftain雙引擎螺旋槳飛機，針對台灣都市與特定工業區進行空氣品質調查(行政院環保署，1991)。1991年5月若干氣象學者曾建議政府應該購置專用氣象觀測飛機進行學理研究以應人造雨實務需求，但未獲舉體回應而作罷。1992年氣象局與省府建設廳租用「北美洲氣象諮詢顧問公司」的Cessna-421飛機，於曾文水庫與石門水庫集水區進行人造雨作業之評估。1992年國內學者亦曾前往所羅門群島登上NOAA P3飛機了解海上邊界層觀測和大氣輻射觀測過程(周與何，1993)。1998年4~7月南海季風實驗(SCSMEX)，國科會在國防部支持下，前後以12航次C130專機搭載科學儀器與人員前往東沙島進駐觀測，SCSMEX期間台灣大學與中央氣象局也開始進行遙控無人飛機(Aerosonde)進行海上低空大氣飛行觀測(林等，2002)和颱風穿越觀測(林等，2006；Lin and Lee，2008)。

二、2008年SOMWEX/TiMREX和DOTSTAR飛行觀測回顧

由中央氣象局與臺灣大氣科學系所共同進行的SOWMEX(South West Monsoon Weather Experiment)，以及美國國家大氣研究中心所進行的TiMREX(Terrain-induced Monsoon Rainfall Experiment)，是透過增加南中國海和台灣海峽大氣探空(機載投落送和船舶探空)，針對台灣梅雨季(東亞夏季西南季風肇始)探討南中國海西南氣流的熱動力性質，並利用環島都卜勒雷達，國科會新增車載X波段雙偏振雷達，美國NCAR S-波段雙偏振雷達，文化大學測雨雷達，以及自動氣象測站和地面GPS測站等儀器，進行西南季風環境下豪雨個案密集觀測和分析診斷研究，深入了解西南氣流引發之豪大雨天氣系統的激發機制，中尺度對流系統(MCSs)的內部雲微物理和雲動力結構，以及大氣邊界層過程對MCSs的發展與維持等機制，同時進行高解度定量降雨預報數值模擬與雷達資料同化實驗，以改進現有定量降雨預報的精確度(<http://sowmex.cwb.gov.tw/>)。

DOTSTAR則是由中央氣象局委託臺灣大氣科學系所進行的「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)」，以每架次約五小時時間直接飛到颱風周圍42000英尺的高度投擲投落送，取得颱風周圍關鍵區域的大氣環境資料，作為颱風預報及颱風研究的參考(<http://typhoon.as.ntu.edu.tw/DOTSTAR/tw/>) (Wu et al.,2005)。

上述兩項實驗的飛行觀測，均以漢翔航空工業公司ASTRA噴射飛機所籌載的AVAPS(Airborne Vertical Atmospheric Profiling System，圖1)，在42000呎高度拋投芬蘭Vaisala公司出品的RD-93 dropsonde(投落送，圖2)；飛行過程中由臺灣大學設計的Madonna軟體系統，由圖形介面監控飛航位置、拋投點位置與時間、dropsonde空中即時資訊(林等，2004)，並將每一份dropsonde所探測的大氣剖面資料(溫度濕度，風速風向和高度，~15分鐘落海)在飛機上立即分析和編列氣象TEMP電碼，以

衛星電話撥接上網傳回中央氣象局。表 1 和表 2 分別列出兩項實驗的飛行個案時數和 dropsonde 數量，共計執行了 90 小時 361 份 dropsonde。圖 3 顯示 SOWMEX/TiMREX 6 類飛行航路。DOTSTAR 則針對颱風位置和數值模式的初始場敏感區，設計的航路不盡相同，但不直接飛越颱風中心，圖 4 就是辛樂克(Sinlaku)颱風以及薔蜜(Jangmi)颱風侵襲臺灣前的 ASTRA 航路與 dropsonde 拋投點示意圖。

三、科學探索與飛航管制

飛機所承載的大氣科學觀測儀器和量測參數可區分為四大類別：

- 基本氣象(general meteorology)：氣溫、溼度、風速、風向與氣壓。
- 雲物理(cloud physics)：雲滴譜、雲水含量、雲凝結核數量。
- 遙測與輻射(remote sensing and radiation)：降水回波、海溫與長短波輻射量。
- 氣體與懸浮微粒(gas and aerosol)：光化污染氣體、追蹤氣體、沙塵。

各種設備依其特性通常安裝在機翼、機鼻、機艙頂部、側邊、機腹和機尾等不同部位，以不受或遠離螺旋槳週遭氣流干擾為主要考量。為了裝載這些裝備，國外的科學觀測飛機大都以「實驗性飛機(experimental aircraft)」法規加以安全考核。此外，由飛機拋投筒拋出的 dropsonde (淨重 420g)由降落傘以~10m/s 速度下墜，根據實際觀測資料顯示，dropsonde 空中到落海的平均飄移位置約 10 公里半徑。

飛機拋投 dropsonde 的空中管制有二，一是不在航道上拋投，二是拋投前先告知航管確認鄰近有無航空器接近。科學實驗機為了達成實驗指揮中心的科學目標需求，經常在特定雲系周遭進行水平與垂直觀測，並無特定航路，圖 5 是常見的科學觀測風暴系統的各種航空器航路之設計概念。表 3 和表 4 分別整理出 SOWMEX/TiMREX 和 DOTSTAR 飛行觀測的作業程序，為了確實配合空中管制的安全，我們在實驗前夕與民用航空局航管組以及飛航服務總台會商，討論表 3 和表 4 內容和實際作業細節。2008 年實驗期間幾項航管作業聯繫共識為：

- 實驗目標、作業期間與飛航計畫先經民航局以及空軍總部認可。
- 每日中午前 AIDC 將隔日飛航計畫提報飛航服務總台。
- 每日起飛前 AIDC 向飛航服務總台再確認當日飛航計畫。
- 每週五需申請週六到週一的飛航計畫。
- 在臺北 FIR 在空進行 dropsonde 作業拋投前，需向航管口頭告知和接獲許可。
- 臺灣海峽中線南北穿越在 7:00am 之前以及 7:00pm 之後飛行。A1 航道到 FIR 南邊界的活動範圍(圖 6)在 11:00am 前完成。

颱風環流場觀測飛行(DOTSTAR)的航路都在航道密度低的低緯度太平洋洋面上，航管安全考量比較輕微；西南氣流劇烈天氣飛行觀測(SOWMEX/TiMREX)則在航道密度高的香港-臺灣之間(A1，M750，G86，G581 航道)，航管安全考量相當謹慎。在飛航服務總台和空軍戰管的努力配合下，一次又一次引導 ASTRA 飛機完成 38 小時、14 架次科學飛行觀測活動，締造高難度的航空與氣象聯合行動合作模式。

四、結論與展望

本文簡略回顧國內外的大氣科學飛機觀測需求、發展與現況，以及 2008 年動用 AIDC 的 ASTRA

進行 SOWMEX/TiMREX 以及 DOTSTAR-2008 兩項科學實驗，總計執行了 90 小時 24 航次的劇烈天氣飛行觀測，並在航管的全力協助下完成科學目標。

2008 年 7 月卡玫基颱風引發的颱風水災和土石流民生問題之後，交通部責成氣象局積極規畫日後常態性的飛機氣象觀測，包括 AIDC 的 ASTRA 飛機在梅雨季和颱風季的 dropsonde 拋投，以及 C130 加入颱風穿越觀測的可行性評估。國家實驗研究院颱風研究中心籌備處，也在策畫重新啓動 Aerosonde 無人飛機飛行觀測計畫。此外，國家科學委員會針對「暴雨」和「颱風」兩項主題，規畫為臺灣和中國兩岸學術交流的重點主題之一。學術界和 AIDC 討論中的 AE270-P5 單螺旋槳引擎飛機，納入一般天氣的環境化學與雲觀測的計畫構想。因此，我們預見未來幾年臺灣臨近空域的科學觀測的飛行活動頻率將會是有增無減。

筆者呼籲，臺灣民航界需要儘快進行「實驗飛機」的適航規範與管理，以及「無人飛機」航空管制與安全等相關法令或增訂條文之行動，以符合氣象四度空間觀測趨勢之需求，追上先進國家的腳步。

參考文獻

- 中央氣象局，1995：台灣地區人造雨實地作業及評估報告。
- 行政院環境保護署，1991：台灣地區空氣品質及固定污染源排放航空測定。EPA-80-F102-09-51。
- 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「侵台颱風之飛機偵察觀測實驗」。《氣象學會會刊》，**43**, 7-22。
- 林博雄，李清勝，鄭文通，林民生，2000：南海季風實驗期間無人飛機探空之資料診斷。《大氣科學》，**28**, 243-262。
- 林博雄，2004：飛機與大氣科學研究應用。2004 年航空氣象與飛航安全研討會，台北。
- 林博雄，陳英浩，鄭文通，吳俊傑，2004：ASTRA 飛機與 Dropsonde 探空動態資料即時繪圖與分析系統建置與成果。第八屆全國大氣科學研討會，桃園龍潭。
- 林博雄，鄭文通，蘇世顯，2006：滯留鋒面對流不穩定天氣個案之飛航觀測。2006 年海峽兩岸航空氣象與飛航安全研討會，台北民用航空局。
- 林博雄，黃培育，2006：無人飛行載具空中人造雨技術先驅實驗。2006 遙控系統技術應用研討會，桃園龍潭。
- 林博雄，李清勝，顏泰崇，李憲乾，2006：龍王颱風穿越飛行觀測與初步成果。《氣象學會會刊》，**47**, 1-15。
- 林博雄，黃培育，盧濟明，2007：利用超輕飛機進行大氣邊界層熱力場與太陽輻射量垂直剖面觀測。第九屆全國大氣科學研討會，桃園龍潭。
- 林博雄，鄭文通，李亞衡，2007：2007 年西南氣流天氣實驗期間之飛航天氣觀測與雷暴移行特徵。2007 年航空氣象與飛航安全研討會，台北。
- 林博雄，2007：UAV 在天氣與氣候觀測應用的最近發展。2007 遙控系統技術應用研討會，桃園龍潭。
- 林博雄、何慶雄，2007：降低危害天氣對航空器之危脅研究－航空器遭遇晴空亂流之飛航性能研究。《提昇我國飛航事故調查能量及改善飛航安全研究成果發表會》，台北新店。
- 周仲島，何台華，1993：參加「海洋大氣耦合反應實驗」(TOGA-COARE)飛機觀測紀要。《氣象學會會刊》，**34**, 53-58。
- 柳中明，1986：空中人工造雨。《氣象預報與分析》，**106**, 1-10。
- 劉廣英，1991：空軍氣象部隊的最近 15 年。《氣象預報與分析》，**129**, 1-12。
- Lin, P. H., W. S., Sun and J. P. Chen, 2001: Inventory of Aircraft Emissions over the Taiwan Area. *J. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, **12**, 41-62.
- 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. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **86**, 787-790.
 Lin, P. H. and C.S. Lee, 2008: The eyewall-penetration reconnaissance observation of typhoon Longwang (2005) with unmanned aerial vehicle, *Aerosonde. J. Atmos. Ocea. Tech.* **25**,15-25.

表 1: SOWMEX/TIMREX 實驗期間飛行個案一覽。Flight patterns 參見內文與圖 3。

Mission	Date	Operation time (LST) (+ 10 min. taxi in/out)	Dropsonde launched	Flight pattern
1	2007/05/21	05:02~08:12 (3 hr ,20 min)	12	C
2	2007/05/29	05:00~07:25 (2 hr ,35 min)	13	D
3	2008/05/30	05:00~07:33 (2 hr ,43 min)	15	Cn
4	2008/05/31	05:00~07:45 (2 hr ,55 min)	13	Cn
5	2008/06/03	17:57~19:16 (2 hr ,29min)	13	Cn
6	2008/06/04	05:00~08:37 (3 hr ,47 min)	14	C
7	2008/06/04	12:55~14:53 (2 hr ,08 min)	12	E
8	2008/06/05	05:00~08:15 (3 hr ,25 min)	15	C
9	2008/06/05	12:56~15:09 (2 hr ,23 min)	10	E
10	2008/06/06	05:00~07:25 (2 hr ,35 min)	12	D
11	2008/06/16	16:48~18:53 (2 hr ,15 min)	10	E
12	2008/06/17	05:15~07:30 (2 hr ,15 min)	12	E
13	2008/06/17	12:10~14:29 (2 hr ,15 min)	14	E
14	2008/06/25	17:02~19:25 (2 hr ,33 min)	13	E
total		38 hr 02 min	188	

表 2: DOTSTAR-2008 實驗期間飛行個案一覽。

	Date	Typhoon	Operation time (LST) (+ 10 min. taxi in/out)	Dropsonde launched
1	2008/06/23	Fenshen	16:33~19:43 (3hr, 10min)	10
2	2008/07/16	Kalmaegi	16:32~21:55 (5hr, 23min)	17
3	2008/07/26	Fungwong	16:30~22:11 (5hr, 51min)	2
4	2008/08/20	Nuri	16:43~21:25 (4hr, 52min)	17
5	2008/09/10	Sinlaku	05:00~10:31 (5hr, 31min)	19
6	2008/09/11	Sinlaku	04:32~10:42 (6hr, 10min)	19
7	2008/09/16	Sinlaku	05:43~10:05 (4hr, 22min)	14
8	2008/09/22	Hagupit	05:00~11:00 (6hr, 00min)	22
9	2008/09/27	Jangmi	04:45~10:15 5hr30min	18
10	2008/09/28	Jangmi	04:44~09:42 (4hr, 58min)	16
total			51hr 47min	173

表 3: SOWMEX/TIMREX 飛航作業程序簡表。H(0)代表起飛時間，(H-21)代表起飛前 21 小時。

階段	負責單位	內容	備註
1	守視與警戒 氣象局實驗作業指揮中心	1. 每日上午 10:00 進行綜觀天氣分析 2. 各觀測平台現況回報 3. 當日與隔日觀測策略討論，飛行路徑傳送漢翔申請飛行計畫 4. 通報民航局隔日之飛行觀測計畫 5. 每日下午 3:00 隔日觀測策略定案 6. 空勤與地勤作業與組員再確認	H(-21) H(-12)
2	起飛前 台灣大學 漢翔	1. 機務準備 2. 天氣與任務提示 3. 與指揮中心二次確認	H(-2) ~H(0)
3	飛行中 氣象局實驗作業指揮中心 台灣大學 漢翔	1. 航線天氣狀況回報 (briefing) 2. 作業概況回報 3. 降落機場天氣詢問	H(0) ~H(3)
4	降落後 氣象局實驗作業指揮中心 台灣大學 漢翔	1. Debriefing 2. dropsonde 資料上傳實驗網站 3. flight report 上傳實驗網站	H(4)

表 4: DOTSTAR 標準作業程序簡表。D(0)代表起飛當日，(D-5)代表起飛前 5 天。

階段	負責單位	作業內容	備註	
1	守視	氣象局預報中心	守視西北太平洋熱帶氣旋發展潛勢	5~11 月
2	警戒	1. 氣象局預報中心 2. 台灣大學	1. 颱風中心 72 小時預報進入警戒區域(經度 124~135 度、北緯 14~25 度)，預判侵襲台灣之機率與可能路徑類型 2. 氣象局與台灣大學相互聯繫研判各國的颱風路徑預報	D(-5) ~D(-3)
3	飛行觀測決定	1. 氣象局預報中心 2. 台灣大學 3. 4. 漢翔	1. 颱風中心進入警戒區，啟動飛行路徑製作和討論 2. 決定作業日、預備日和組員名單(2 組) 3. 飛行路徑傳送漢翔申請飛行計畫 4. 通報氣象局預報中心	D(-3) ~D(-1)
4	確認飛行觀測	1. 氣象局預報中心 2. 台灣大學 3. 漢翔	1. 漢翔追蹤日本和菲律賓航管是否允許 2. 17:00 前決定是否放棄飛行觀測 3. 航路上傳氣象局 QPESUMS 系統，每小時監看航路與颱風雲系相對位置 4. 在航管允許和機師同意下微調飛行路徑	D(-1)
5	作業		1. 第一組組員起飛前 4 小時集結出發，起飛前 2 小時抵達台中機場，起飛前 1 小時 Briefing 2. 起飛作業 3. 空中地面通訊討論飛航天氣與資料回傳品質 4. 降落和 Debriefing 5. 決定 D(1)是否如期進行	D(0) ~D(-1)
6	檢討		1. 結束觀測	解除海陸颱風警報



圖1: (左)AIDC ASTRA噴射飛機拋投dropsonde實景。(右)ASTRA機艙內的AVAPS和RD93。



圖2: (左) Vaisala RD93實體大小(右) RD93空中降落示意圖。

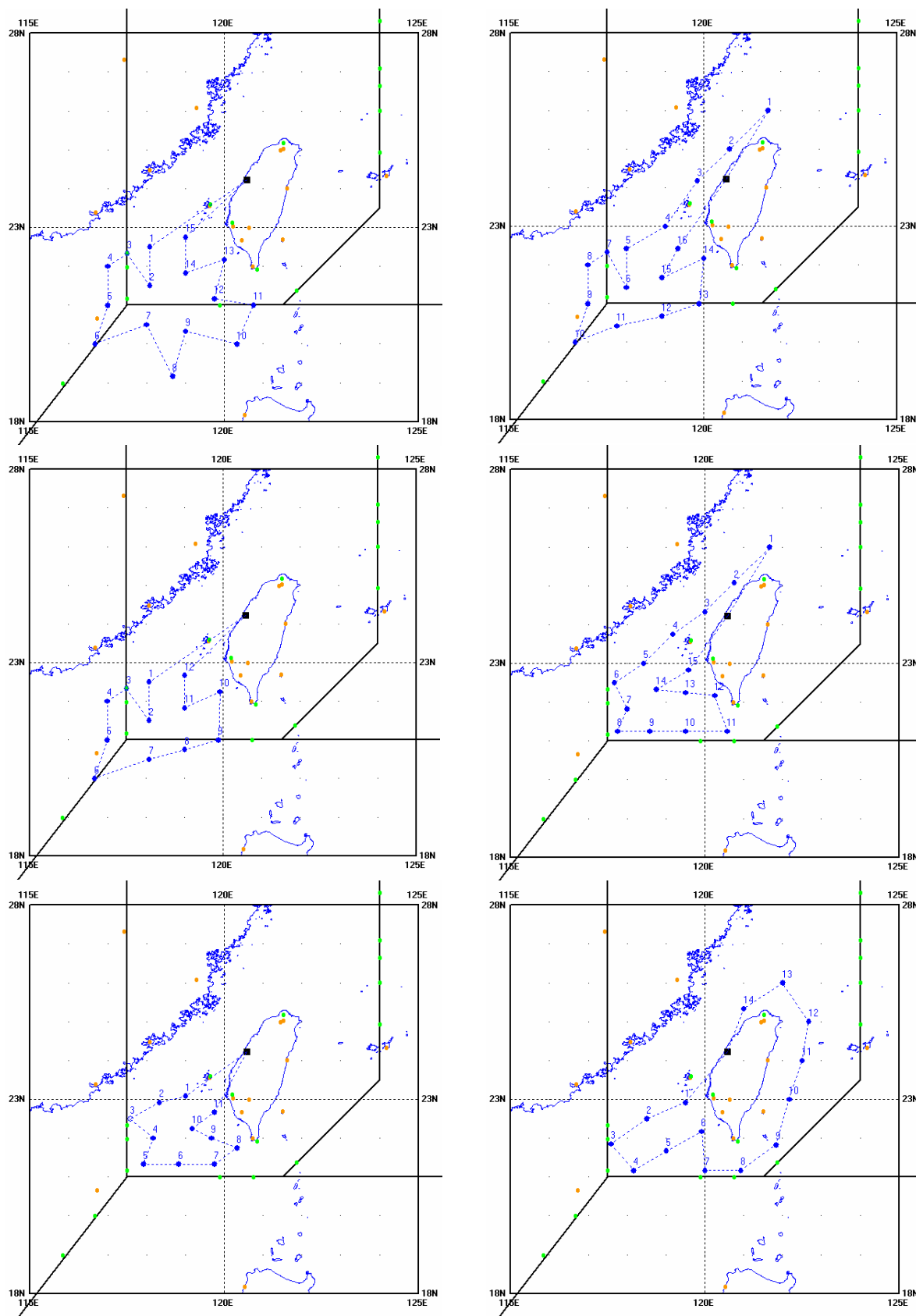


圖3: SOWMEX/TiMREX 6種A-B-Bn-C-Cn-D飛行航路(順序, 由上而下由左而右)。

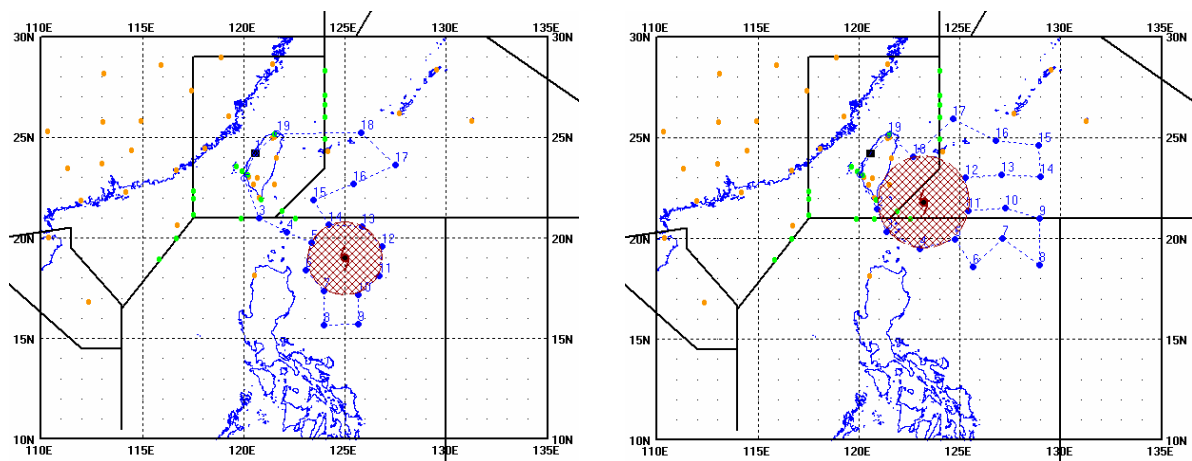


圖4: 辛樂克(Sinlaku)颱風以及薔蜜(Jangmi)颱風侵臺前的ASTRA航路與dropsonde拋投點。

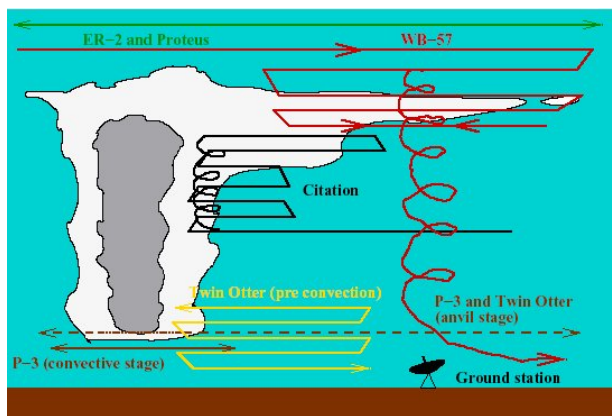


圖5: 各式飛機進行風暴觀測的示意圖(摘自Tropical Warm Pool International Cloud Experiment, TWPICE)
<http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/research/twpiice.htm>

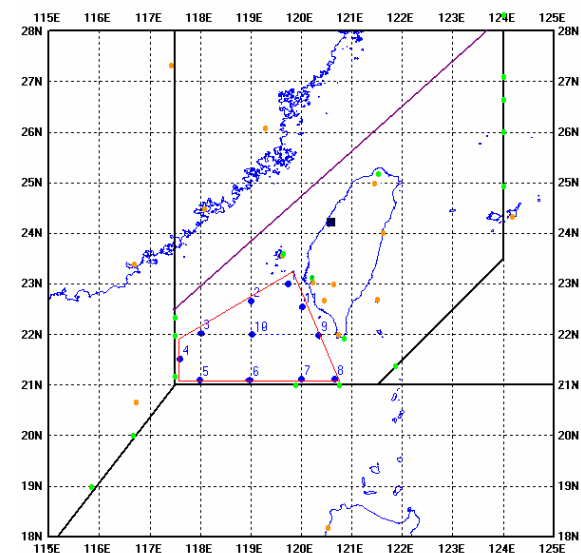


圖6: SOWMEX/TiMREX期間ASTRA固定空域與航路報告點編號。