

交通部中央氣象局委託研究計畫成果報告

氣象用無人飛機觀測研究

計畫類別：國內 國外

計畫編號：MOTC-CWB-94-6M-07

執行期間：94年1月31日至94年12月31日

計畫主持人：林博雄

執行單位：國立台灣大學

中華民國九十四年十二月

中文摘要

為達成中央氣象局進行無人飛機(UAV)觀測颱風與豪雨劇烈天氣之研究和作業應用目標，本計畫以澳洲 Aerosonde Pty Ltd.生產之 Aerosonde Mark-III 飛機，進行颱風以及劇烈天氣個案之飛行觀測。TAT 團隊(Taiwan Aerosonde Team)自製的自動平衡 GPS 導航飛行 Jack-1.0 UAV 平台，則用以評估自製 UAV 的天氣觀測能力。UAV 起降地點以民航局核定的宜蘭舊機場和恆春五里亭機場為準，進行台灣東北角以及巴士海峽等海上天氣系統觀測研究。Aerosonde 以 UHF 無線電進行短程通訊，氣象資料經由地面導控站電腦以陸地的網路通訊系統回傳台北工作站主機，長程長時通訊則以 Iridium 衛星通訊，直接在中央氣象局進行飛行導控。UAV 時空位置和溫度-溼度-氣壓與風場等氣象資料，均由 MySQL 資料庫管理和網頁方式準即時呈現在中央氣象局，做為天氣診斷參考。

2005 年 Aerosonde 分別針對海棠颱風與龍王颱風進行颱風環流穿越觀測，二架次分別執行 12hr 與 11hr 飛行；前者因 Iridium 衛星通訊失效，僅獲取墾丁—蘭嶼之間的颱風外圍環流 1000m 氣象資料，後者完成穿越颱風環流並抵達颱風中心進行垂直探空，締造全球氣象界以 UAV 進行颱風觀測成功的里程碑，所獲得的颱風環流由外向內的溫度和風速剖面現場觀測資料，將可做為學術與作業數值模式的颱風植入(BOGUS)模擬實驗的參考範本。計畫團隊所自行開發的 Jack UAV，已在 7 月 21~22 日於墾丁半島完成 12 架次 365 分鐘實際飛行測試與氣象資料解讀分析，驗證了 UAV 進行海陸風環流觀測之可行性。

關鍵詞：無人飛機，自動導航，衛星通訊

英文摘要

In order to evaluate the researching and operational usability of unmanned aerial vehicle (UAV) on typhoon and heavy rainfall severe weather conditions, this program will use Aerosonde MARK-III to reach the objectives. Jack-1.0 UAV made by Taiwan Aerosonde Team (TAT) has GPS navigation and autopilot performance, and be tested in the field for weather observing mission. The UAVs' ground bases, Ken-Ting and I-Lan airports, are legal under Civil Aviation Administration agreement. Severe weather cases existed in the northeastern coast of Taiwan and Bachi channel are the main targets for UAV flights. Aerosonde uses UHF radio communication for short-range flight, and the real-time meteorological data was sent back through internet network into the computer server at Taipei. Long distance flight of Aerosonde uses Iridium satellite communication solution. Flight-level data, including geo-location, temperature, humidity, pressure and wind field, was managed by MySQL database and be displayed as web-format in. This quasi-real-time observing information provides unique in-situ information of typhoon structure for Central Weather Bureau.

Two reconnaissance flights with Aerosonde in Typhoon Haitang and Longwang had processed in 12 and 11 hours individually. Caused by the satellite communication failure, the flight in Typhoon Haitang only collected the outer band of typhoon circulation between Ken-ting and Lan-yu Island. But the flight in Typhoon Longwang penetrated the typhoon circulation well and made a vertical sounding observation in the eye. It made the first record around the world by using UAV for typhoon reconnaissance flight well. The unique in-situ typhoon-crossing data could be the reference sample for vortex bogus factors used in the numerical models. TAT also designed a cheaper UAV, called Jack 1.0, and had 365-minute 12 test flights completely around Ken-ting Peninsula. Preliminary data analysis shows this Jack 1.0 UAV could play well for the land-sea circulation study.

Key words: unmanned aerial vehicle, autopilot, satellite communication

一、前言：

颱風與劇烈天氣研究是近年來台灣地區大氣科學所面臨的民生議題巨大壓力。2002 年 12 月於澳洲召開的 5th WMO International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-V)，認為衛星觀測對於 24 小時以上颱風警報仍有許多改進和善用之處，如何善用 NASA 的 TRMM, QuikSCAT 和 Terra/MODIS 衛星影像和水氣風場反資料，即為未來颱風觀監測趨勢的重點發展。國內中央大學劉振榮教授領導之國科會「衛星觀測預報技術發展」整合計劃(2004-2005 年)，是在探討衛星平台資料應用於颱風登陸前後的降水空間分布觀測和預報。雷達觀測颱風技術方面，中央氣象局衛星中心也積極運用雷達回波和都卜勒風場，交由雷達站進行颱風中心自動定位。氣象局第四期計劃 Local Analysis and Prediction System, LAPS; Jian et al., 2003) 的 QPE-SUMS(丘, 2003)，都是透過雷達回波資料快速得知颱風或劇烈降水系統在台灣週遭 400 公里以內的風雨分布情況。這一方面的研究是以中央大學陳台崎教授領導之「雷達觀測預報技術發展」整合計劃(2004-2005 年)為主。

飛機觀測則是一種非傳統(非例行性)的氣象觀測平台，西北太平洋飛機現場觀測颱風與劇烈天氣方面，首推美軍聯合颱風警報中心(JTWC)在 1987 年 9 月之前的 40 年，從關島起降 C130 所進行之颱風偵察任務，在颱風飛臨觀測和預報作業警報發布扮演非常重要的角色。JTWC 停止飛機偵查觀測之後，西北太平洋地區從此沒有例行颱風飛機觀測 (直到 2003 年 9 月 1 日國科會贊助的追風計劃；吳等，2004)。有關颱風在海上的中心位置、強度和暴風範圍之直接觀測極為欠缺，嚴重影響颱風觀測與預報作業。西元 1982 年起，美國颶風中心和 NOAA 颶風研究部門(HRD)持續利用 P3 機載都卜勒雷達和 Dropsonde，進行大西洋洋面和墨西哥灣颶風的穿越觀測(Franklin et al., 1996)；1997 起更增加一部 Gulfstream-400 飛機進行颶風的環境偵查觀測(Aberson and Franklin, 1999)。2003 年~2004 年，國科會自然處「颱風重點研究」項下的「GPS dropsonde 觀測系統之建置規劃及測試實驗」，透過和 NOAA/HRD 的合作關係和技術指導下，租用漢翔航空工業公的 ASTRA 噴射飛機，進行 10 個颱風 191 個 Dropsonde 環境偵查(surveillance)觀測，雖然成功地蒐集颱風海上環流的垂直探空剖面資料，減小數值模式(美國 NCEP AVN) 6~72 小時路徑預報誤差約 20%，但是也付出近 1500 萬元/年的高額飛航觀測代價。

有鑑於飛機觀測颱風的實質效果，部分科學家開始投入利用無人飛機(Unmanned Aerial Vehicle, 以下簡稱 UAV)進行颱風飛臨觀測飛行之研究(Bluth et al., 1996)，其中由澳洲 Dr. Greg Holland 和美國 Dr. Tad McGeer 所領導的工作團隊，成功研發出 Aerosonde (Holland, et al., 1992)。Aerosonde 為可應用於洋面之大氣觀測工具，不但低成本且可回收；聯合國世界氣象組織強烈建議應積極發展並應用於颱風觀測，且已將 Aerosonde 列為 International Decade for Natural Disaster Reduction 主要計畫之一(Holland et al., 2001; Holland, 2002)。Aerosonde 也於 2001 年夏天參與美國東岸 CAMEX 4(Convective And Moisture EXperiment)的大西洋颱風觀測。有鑑於 Aerosonde 應用於颱風觀測的潛力，本計畫協同主持人李清勝教授在國科會支助下，於 1996 年 12 月率團遠赴澳洲觀摩 Aerosonde 飛行操作。

評估認為 Aerosonde 對於 4 公里以下之局部地區氣象觀測已可發揮極高效益。經過 1998 年 SCSMEX 東沙島 1 個月 Aerosonde 飛行實地觀摩與觀測(林等,2000), 1999 年成立 TAT(Taiwan Aerosonde Team), 並於 2000~2004 年期間推動颱風機動觀測, 其中的海燕颱風(2001 年 10 月 16 日)和康森颱風(2004 年 6 月 9 日), 都是台灣大氣科學界創新全球氣象史「利用無人飛機成功進行颱風飛臨觀測」的紀錄。[圖 1](#) 是 Aerosonde 於 2004 年 6 月 9 日 Aerosonde(#30)以 1500 公尺高度飛臨康森(Conson)颱風環流觀測的飛行路徑和風場, 我們以颱風眼中心為相對距離所推算的風速變化如[圖 2](#), 風速變化與墾丁雷達風場反演比較([圖 3](#))顯示, 兩者風速相關係數高達 0.91, 風速差異 RMS 值為 2.6 m/s。

綜合以上科學背景說明, 台灣地區在西北太平洋颱風的觀測和研究之投入(Wu and Kuo, 1999), 勝過日本、南韓、香港和大陸, 尤其我們在有人飛機觀測平台 dropsonde 拋投和 Aerosonde 飛臨颱風實務經驗, 深受美國颱風研究實驗室(HRD)的重視和支持。如何延續 Aerosonde 硬體和技術? 如何有效整合 Aerosonde 和 Dropsonde 資源? 如何有效結合這兩觀測平台和雷達、衛星觀測資源和相互驗證? 如何將即時飛行觀測資料回傳中央氣象局參考使用? 如何將這些非傳統的多重時空尺度觀測資源融入天氣數值模式資料同化? 觀測與模式資料同化如何平行並進? 這些問題都是氣象資源整合的具體討論事項, 也正是 2004 年 12 月 15~16 日中央氣象局業務發展討論會議的焦點。

本計劃主持人同時也擔任國科會自然處「颱風重點研究--GPS dropsonde 觀測系統之建置規劃及測試實驗」計劃之共同主持人, 兼負 Aerosonde 和 Dropsonde 觀測平台之串聯工作。在 UAV 平台發展與應用方面, 早於 2003 年即啟動國內自製的氣象觀測 UAV 先驅工作, 透過 TAT 人才和實務經驗進行(1)EUAV(Environmental UAV)規格規劃、(2)自動飛行和 GPS 導航模組製造、(3)自製壓力-溫度-溼度-風場感測單元、(4)數位相機拍照, 並於 2004 年完成第一代 UAV (簡稱 Jack-1.0)試飛。下一節我們將具體說明第三代 Aerosonde (MARK-III) 和 Jack-1.0 如何達成氣象局擬定的四項目標。

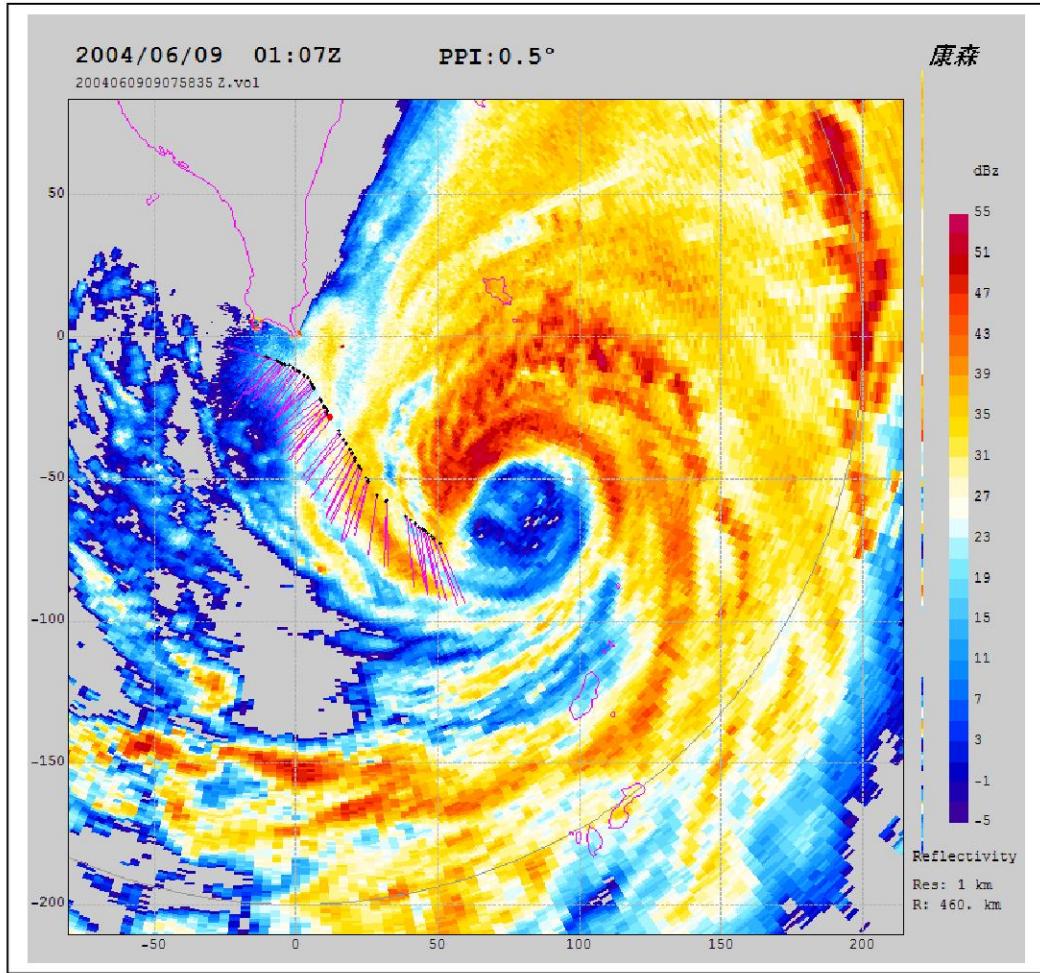


圖 1: 2004 年 6 月 9 日 01:07 UTC Aerosonde Mark-I 飛行路徑和沿途風場標示在中央氣象局墾丁雷達 0.5° 掃描仰角 PPI 回波圖。

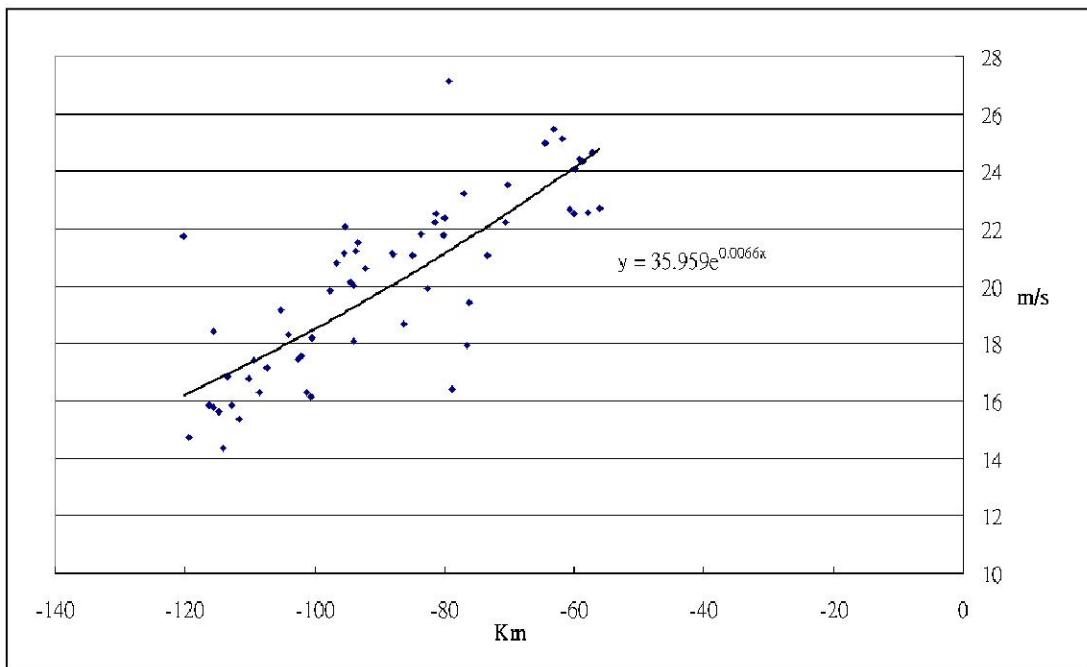


圖 2: Aerosonde 實測風速(m/s)與其距離颱風中心(km)的函數分布。

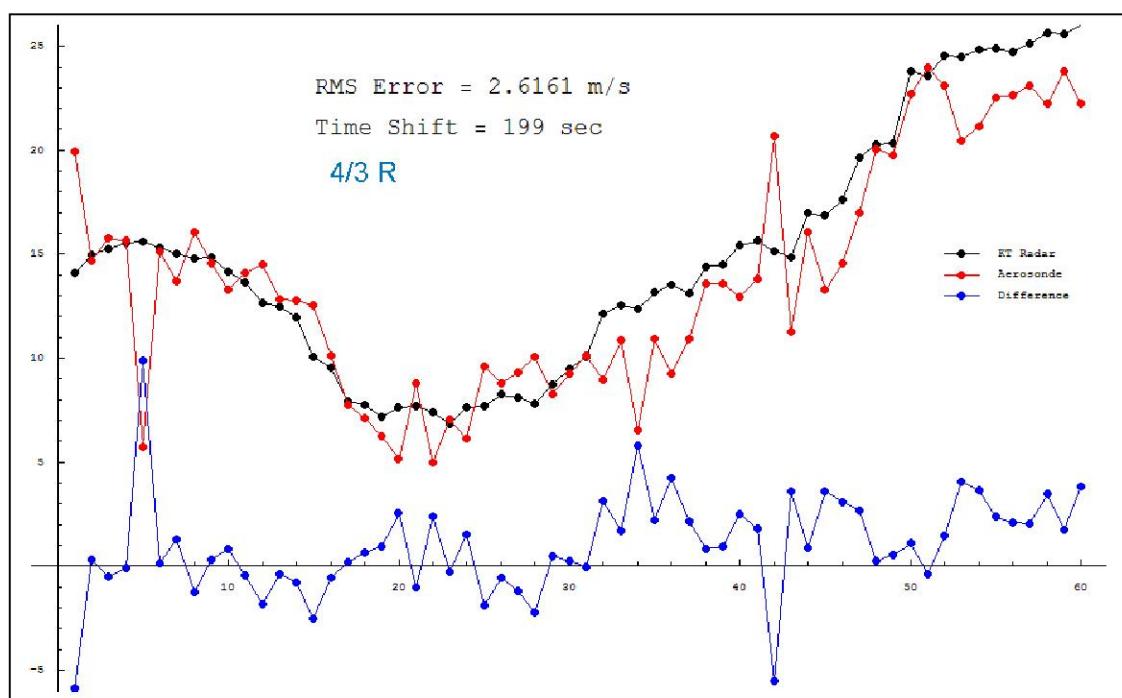


圖 3: Aerosonde 實測風速(紅線)與墾丁雷達反演風場(黑線)比較圖，藍線為兩者之差異(m/s) (李等，2005)。

二、研究方法及進行步驟：

本計畫擬定的四項目標計有：

- (1) 利用現有 UAV 針對年度內侵襲台灣的颱風及豪雨等劇烈天氣系統進行觀測。
- (2) 改善現有遙控訊號交鏈系統。
- (3) 進行氣象儀器資訊與 UAV 資料鏈整合構裝及觀測氣象性能測試。
- (4) 發展製作一套遙感載具氣象資料顯示平台，結合已發展成功之 Aerosonde UAV 網控系統，使其在中央氣象局預報中心能清晰呈現 UAV 作業狀況及即時氣象資料。

各分項目標的研究方法及進行步驟詳述如下：

(1)利用現有 UAV 針對年度內侵襲台灣的颱風及豪雨等劇烈天氣系統進行觀測：最新一代 Aerosonde MARK-III 於 2004 年 12 月 29 日運抵台北，MARK-III 最新的性能如表 1 所示，其與 MARK-I 的最重要差別在於改進引擎性能的穩定性與機載衛星通訊功能的增添。TAT 技術團隊於 2004 年 11 月 9~12 日造訪原廠進行四天技術學習，並於 2005 年 4 月於恆春機場進行戶外飛行測試及 Iridium 衛星通訊測試，操控作業程序於 [附錄 A](#) 詳細記載。配合 Aerosonde 發射所需 400m 跑道設施，TAT 繼續以恆春機場為基地，結合墾丁雷達站掃描颱風眼位置進行颱風穿越觀測。巴士海峽上空以及蘭陽平原外海則為 Jack UAV 近岸觀測的飛行空域，前者滯空時間 30 小時，後者則為 2 小時。兩種 UAV 的飛行路徑都依據墾丁或五分山雷達所標示的對流系統為觀測目標加以導航設定，由於 Aerosonde Pty Ltd. 新版操控程式具有 heading hold 邏輯程式，預期 Aerosonde 將能以最簡要逆時針螺旋路徑方式穿越颱風環流接近中心。[圖 4](#) 是以墾丁和五分山雷達站 30 公里半徑間距同心圓的 UAV 空域示意圖。兩架 Aerosonde 飛行觀測以侵台颱風個案為首要觀測目標，Jack-1.0 則以運用於一般天氣型態飛行觀測平台而作準備。Jack-1.0 以台灣雷虎公司生產之 MK-II 模型飛機為主體，搭載 TAT 設計的飛行控制模組和氣象感測系統([圖 5](#)，每架造價約 10 萬元)。Jack-1.0 的硬體特性再簡述如下：

- 外觀特徵：

機體採用雷虎公司 MK-II 定翼型模型飛機，其機翼長度與寬度各是 155cm 和 4355cm²，機身長度 130cm。GP46 引擎提供 1.4 匹馬力，燃料方面是模型飛機慣用的木精(Wood Spirit)。

- 飛行特性：

Jack 1.0 的巡航速度範圍是 15~20m/s，受限於油箱容積，因此其滯空時間約 90 分鐘，飛行最大安全半徑則是 40km。2004 年一次東北季風環境下，Jack 1.0 曾經盤旋到達 12000 英呎(4 公里)高度。

- 酬載量測：

Jack 1.0 的酬載單元計有兩大類，一是大氣環境變數，包括氣壓、氣溫、濕度、風向、風速、太陽輻射量；另一類是環境拍照，又可區分為(1)定時(1~10 秒)靜態拍攝以及(2)連續動態攝影兩種環境偵查功能，影像解析度是 400 萬像素。

- 飛行模式：

Jack 1.0 沒有即時資料或是影像下傳的功能，使用者首先在電子地圖預先設定一群飛行點(waypoint)，然後輸入飛控微型晶片；當飛機由滾輪滑行(或滑撬彈射)手控起飛盤旋後，由地面駕駛員透過遙控器將飛機切換進入自動駕駛(autopilot)組態，Jack 1.0 接著由自身酬載的 GPS 天線擷取地理位置和高度資訊，開始進行「上下盤旋飛行」或是「固定飛行高度巡航飛行」。降落時，Jack 1.0 先回到地

面駕駛員目視範圍內，將飛機切換進入手控組態進行手動降落。

■ 資料擷取系統：

Jack 1.0 系統目前並未酬載通訊模組，因此飛航資訊(機體姿態、飛行動力參數)、氣象觀測資訊以及相片或影片，均紀錄於兩片 MMC 記憶卡上，降落取出後於地面上的電腦存取與分析。

(2)改善現有遙控訊號交鍊系統

Aerosonde Mark-III 所配備的 Iridium 衛星通訊模組，預期能提供更大的飛行範圍，超越原有 MARK-I 的 150 公里空間限制。惟 Iridium 衛星通訊費價格不斐(每分鐘 NT\$ 76 元)，24 小時飛行需要近 NT\$ 74000 元通話費用。Aerosonde 現有無線電通訊模組為 Dataradio Inc. 生產的 T-96SR 型號，應用於 Jack 1.0 時會有酬載空間不足的困擾，進口台灣也需要電信總局核定許可，因此 Jack 1.0 飛行觀測資料暫時由抽取式記憶卡儲存，當 UAV 安全回收後再由個人電腦連線下載。

(3)進行氣象儀器資訊與 UAV 資料鏈整合構裝及觀測氣象性能測試

鑑於芬蘭 Vaisala 公司的 radiosonde RD90 系列的 RSS901 PTU (壓溫濕)sensor 的全球使用廣泛性，Aerosonde 直接採其 PTU sensor package。Jade and McGuffie (2004) 曾發表 Aerosonde 和 radiosonde 的探空資料品質吻合程度文獻，TAT 已備存 20 份 Vaisala RSS901 PTU package (每架次 2 份)。由於 Vaisala 公司不願釋出 RSS901 sensor package AD 轉換與輸出規格說明，因此 TAT 著手發展自製的 PTU sensor package (以下簡稱 J-PTU)；壓力計是 Motorola -MPX4101A，溫度溼度感測計則是 Sensirion SHT-15，GPS 接收機是長天公司 Holux-211，各種感測器規格整理於表 3。J-PTU 功能已於 2004 年 6 月 15 日假恆春機場以及中科院天隼 UAV，進行其和 Vaisala RS80 探空儀的低空盤旋實測比對，初步結果證實 J-PTU 的可用性。

(4)發展製作一套遙感載具氣象資料顯示平台，結合已發展成功之 Aerosonde UAV 網控系統，使其在中央氣象局預報中心能清晰呈現 UAV 作業狀況及即時氣象資料。

台灣大學大器測計實驗室為 DOTSTAR 計畫即時所設計和製作的 Madonna (management of airplane and dropwindsonde data and analysis，林等，2004；Lin et al., 2005) 介面，透過筆記型電腦、電子地圖和 Microsoft Windows-2000 作業系統，來即時監看 ASTRA 飛機飛航動態資料，以及 dropsonde 拋投過程中的斜溫圖繪製。這一技術經驗將轉移成網頁格式來呈現 Aerosonde 和 Jack UAV 的海上飛行過程和觀測蒐集之氣象資料。我們將轉化 TAT 過去做為 Aerosonde data post-processing 單機版軟體(Visual Basic 撰寫)畫面，改用 Java 和 perl 語法重新發展一套 UAV 準即時飛行動態資料顯示系統，預定由起飛基地導控車內的筆記型電腦，或是架設於氣象局接收 Iridium 衛星通訊筆記型電腦的模組，經由 GPRS (General Packet Radio Service) 或是 ADSL 寬頻網路將 Aerosonde 資料回傳台灣大學大氣科學系伺服器主機 MySQL 資料庫，再由該主機軟體執行彈性化的網頁畫面讓有權限的使用者(如氣象局預報中心)登入觀看，這一流程如圖 6 所示，所需時間約 30 分鐘。

表 1 : Aerosonde Mark-III 特徵與性能

機翼長度	2.85m
重量	14 kg (airframe: 9 kg, fuel: 5 kg/max.)
引擎/油品	24 cc / 95 unleaded Petrol
對空巡航速度	18~32 m/s
定位	GPS
操控範圍	150 km / 2880km
有效高度	6000m
滯空時間	30 hours
資料傳輸	UHF / Iridium
觀測變數	氣壓、氣溫、溼度、風向、風速 位置經緯度、飛機姿態變率 紅外線與可見光影像(150km 範圍)

引自 http://www.Aerosonde.com/downloads/the_Aerosonde_system.doc

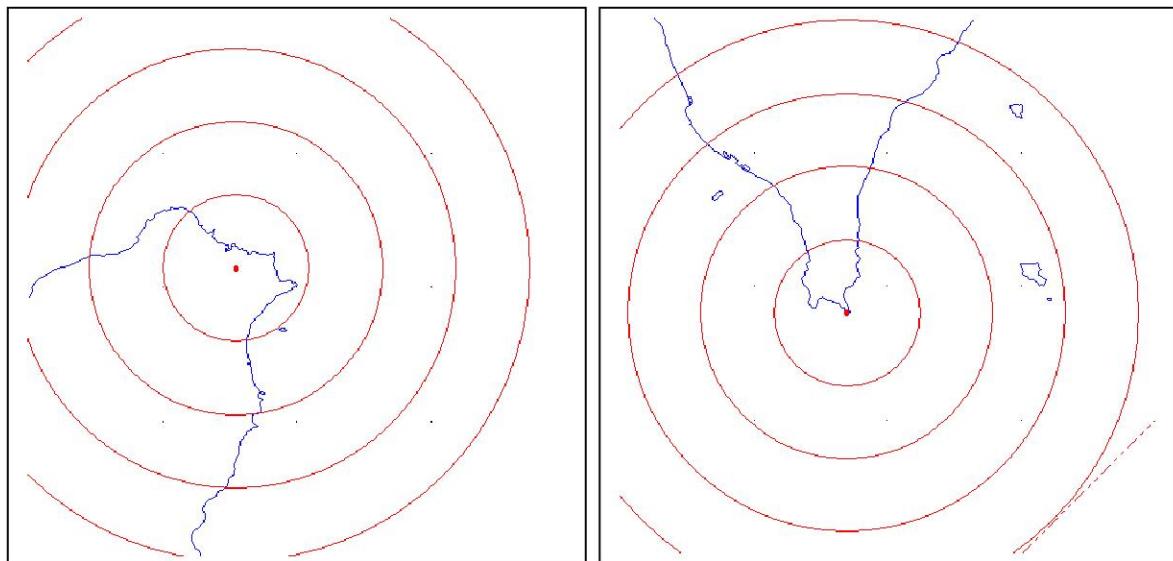


圖 4: 中央氣象局五分山雷達站與墾丁雷達站 30 公里間距同心圓所涵蓋之空間範圍。



圖 5：EUAV JACK 1.0 外觀。

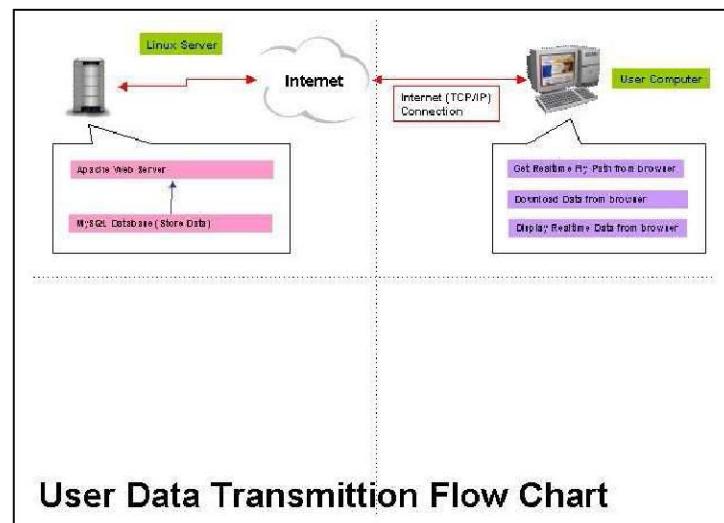
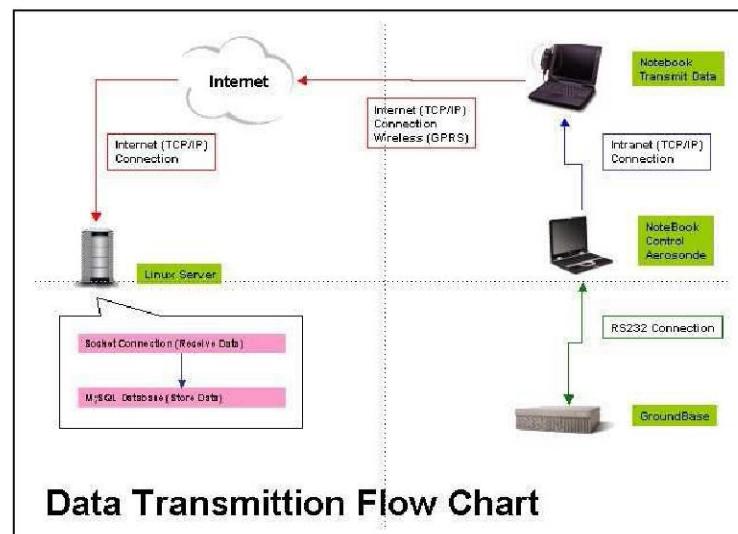


圖 6: Aerosonde 飛航資料即時下載、回傳台北與登錄網頁的流程。

三、研究成果

本計畫將以 Aerosonde Mark-III 和 Jack 1.0 等兩種無人飛機平台，來分別說明上一節所述的四項具體目標。

3-1 Aerosonde 部分：

2005 年 4 月 27~30 日 TAT 技術團隊首先完成 Mark-III Aerosonde 系統地面測試和起飛降落等操控程序驗證。試飛重點是複習 2004 年 11 月 11~14 日團隊在澳洲墨爾本 Aerosonde 原廠所接收的技術，包括組裝與引擎運轉測試，在起飛前兩天的地面上測試相當謹慎並數度與澳洲原廠技師電話聯繫討論。我們發現其中一架 Aerosonde(編號#138)的抽油幫浦疑似故障，另一架 Aerosonde (編號#136)則完全正常，因此我們針對#136 Aerosonde 進行起降飛行驗證，繼續進行操控軟體的指令上傳與資料下載連線測試；UHF 通訊狀況良好，但是 Iridium 模組的連線一直失敗。5 月上旬台灣籍澳洲原廠技師回到台灣探親，我們請其更換#138 Aerosonde 抽油幫浦並在台灣大學測試確認完成修復，2 套 Iridium 模組單元則委請該技師帶回澳洲原廠進行檢查，並要求原廠提供確切的 Iridium 模組安裝和軟體連線啟動的程序文件。恆春機場實地試飛活動均透過民用航空局航管組與飛航服務總台飛航業務室，完成機場場地使用和空域申請，並獲得 5~11 月颱風侵襲期間機動申請場地和空域的許可(民用航空局站務場字第 09400069620 號)。

Aerosonde 飛行路徑與墾丁雷達回波影像重合製圖程式部份，本計劃使用 Visual Basic 軟體撰寫 Aerosonde 飛行路徑軟體介面(Interface)，這一軟體在筆記型電腦 Windows 2000 作業系統環境下執行。氣象局雷達站 460km 與 230km 即時雷達回波由中央氣象局周思運博士以 ftp 方式直接提供本計劃指定硬碟，我們透過網路擷取這些雷達回波影像圖檔來做為 VB 飛行路徑介面的背景圖，來即時調整 Aerosonde 飛行路徑。[圖 7](#) 是以 4 月 23 日雲圖為例，假想颱風侵襲個案中的 Dropsonde 和 Aerosonde 同步進行飛行觀測的路徑設計示意圖。Aerosonde 飛航資料網頁動態顯示的架構，也在龍王颱風穿越飛行個案獲得驗證([圖 8](#))，這一網頁內容已經和中央氣象局預報中心林秀雯副主任討論其適用性。

Aerosonde 在海棠(Haitang)颱風和龍王(Longwang)颱風三個個案的飛行觀測過程，分別簡述如下：

■ 海棠(Haitang)颱風

7 月 18 日 4:54pm Aerosonde(#136)於恆春機場起飛，進入巴士海峽空域，由於衛星通訊模組失效，Aerosonde 持續於巴士海峽颱風環流範圍內，以 UHF 無線電通訊方式將資料回傳墾丁雷達站，原定於 19 日上午返降恆春機場，惟颱風強度範圍擴大，強風將逆風飛行的 Aerosonde 推出通訊範圍(160 公里)而失聯([圖 9](#))。本個案獲取颱風中心 250 公里左方象限 1000 公尺高度的氣溫溼度的時間序列資料。這一個案由於墾丁雷達導波管損壞，因此沒有雷達資料可供比較；氣象局 NFS 颱風模式已將同一時間同一地理位置和高度的模式預報場輸出，做為本個案的分析討論資料來源之一。

■ 龍王(Longwang)颱風

由於龍王颱風在登陸前 24 小時速度加快，TAT 於 10 月 1 日緊急在 3 小時內完成 Aerosond 地面起飛準備工作，於終昏前(5:50pm)自恆春機場起飛。這一架次衛星通訊功能正常，因此 Aerosonde 於 8:00pm(12UTC)自鵝鑾鼻外海以 3000 公尺高度飛往颱風中心；TAT 團隊於墾丁雷達站持續引用雷達回波的颱風中心定位資料，來修正 Aerosonde 飛行策略。Aerosonde 首先遭遇颱風外圍反時針環流被推向蘭嶼東南海面，然後進入颱風環流西南風象限前往颱風中心，沿途穿越強烈回波降水區，並造成右翼的氣象感測棒失效；當夜 15:00UTC~16:00UTC 風速快速

上升並超過 50m/sec；16:20UTC 風速突然減弱低於 10m/s，我們等到 Aerosonde 完成一圈 5*5km 的盤旋飛行，確認飛機處於微風狀環境並再度確認氣象雷達颱風眼定位數據，才正式宣布 Aerosonde 已經成功穿越颱風眼牆周遭的強風暴雨區並抵達颱風眼內，締造全球氣象界首度以無人飛機成功穿越颱風環流的世界紀錄，然而所剩的濕度感測元件也宣告失效。Aerosonde 於 16:20~17:15UTC 期間進行颱風中心垂直探空觀測（圖 10），當 Aerosonde 高度低於 1200 公尺時，衛星通訊連結斷訊，因此 Aerosonde 自動回復巡航高度，我們接連進行兩次 1200 公尺下探，都因衛星通訊失敗而作罷。根據 Willoughby(1998)對於 1994 年美國東岸颱風 Oliva 颶風中心的 Dropsonde 探空剖面分析颱風中心結構（圖 11），我們認為 Aerosonde 垂直探空所觀測的溫度剖面尚未到達近地面的沉降逆溫層高度。17:20UTC Aerosonde 開始脫離颱風中心，仍以逆時鐘方向朝颱風外圍飛出，期間並測量到接近 70m/s 的強風。對應中央大學廖宇慶教授利用花蓮雷達對於龍王颱風所進行的 EGBVTD 方法反演出的 18:36UTC 切向風速，我們預期雷達反演推估的風速偏低 5~10m/s（圖 12）。為了避免飛機在回程中被強風推上台灣陸地，TAT 團隊乃在 19:00UTC 控制飛機由 3000 公尺爬昇到 4300 公尺，並再次朝向颱風中心飛行，擬於推送到颱風左象限時再右轉返回恆春。Aerosonde 於接近綠島上空時，引擎開始異常並宣告停轉（尚有 5 小時飛行油料），最後 Aerosonde 於 4300 公尺滑行到 270 公尺而終止訊號，墮落於恆春東北方公里外海處，功成身退。圖 13 是完整飛行路徑和 10 月 1 日 16UTC (Aerosonde 抵達颱風中心時刻)雷達回波合成圖疊合圖，所有資料均透過 ADSL 由墾丁雷達站回送台灣大學伺服器並以網頁格式(<http://aerosonde.cook-team.org realtime realtime.php>)提供預報中心參考（圖 8）。圖 14 是氣溫、濕度、氣壓、高度的時間序列，我們捨去變異度過大的風速資料，再根據颱風中心與 Aerosonde 經緯度資料和颱風移速，換算出進入颱風中心過程的切向風場與溫度（圖 15），發現近中心 50km 處有顯著的暖心現象之外，我們推算出切向風速隨距離颱風中心的指數遞減函數關係 $V/V_m = (R/R_m)^{-\alpha}$ 的係數是：

V_m : 最大切向風速(m/s) ~ 55m/s

R_m : 最大切向風速的暴風半徑(km) ~ 30km

$\alpha \sim 0.6$

這一結果（圖 16）可做為數值模式重新進行渦旋植入(BOGUS)驗證的參考數據。同時，我們根據 2842m~1416m 之間的剖面斜率推算颱風中心氣壓約是 921hPa，與中央氣象局發布的中心氣壓 950hPa 有出入。10 月 2 日 01:15am Aerosonde 開始向外脫離颱風眼，再次面臨穿越颱風眼牆周遭強風與降水區的嚴苛挑戰；02:00~02:45am 之間 Aerosonde 遭遇更大的強風吹襲（最大切向風速 55~66m/s），和中央氣象局花蓮都卜勒雷達風場之估計值相當（圖 17）。然而，此時 Aerosonde 位置逐漸接進台灣陸地，為防止 Aerosonde 登上陸地有墜毀損及山林房舍的發生，我們下達 Aerosonde 爬升高度到 4300 公尺，並之後又決定轉向颱風眼，以讓飛機處於海洋上空。03:10am Aeroosnde 引擎開始有轉速降低跡象，我們嘗試放開油門來保持轉速，無奈引擎轉速持續降低並終告停止運轉(03:35am)，Aerosonde 於空中滑翔 16 分鐘後於 03:51am 墜入綠島東北方海面，距離恆春機場約 150 公里，尚有 6 小時油料足以返航到墾丁。TAT 原定在 10 月 2 日 08:00am 降落 Aerosonde，雖然功虧一簣，但是這趟穿入和穿出颱風環流的大氣觀測飛行案例，已經完全證實 13 年前起造 Aerosonde 的工藝與科學夢想，也讓我們得知颱風環流越接近陸地的不對稱性結構特徵。

除了氣象參數之外，我們繼續探討 Aerosonde #138 飛行過程中的姿態與引擎參數，以間接了解無人飛行載具在劇烈天氣條件下的機械反應程度，期待能做為

國內日後進行無人飛行載具設計與製作之參考。圖 18 是 Aerosonde 的不平衡態 DE (disequilibrium) 和空速的標準差時間序列圖，DE 的定義為：

$$DE = q^2 - r g/V$$

其中 q 是 pitch rate， r 是 yaw rate， g 是重力加速度以及 V 是飛機空速；進入颱風中心之前(10:30~11:00pm 之間)，首先遭遇第一波眼牆外部對流區域的風雨襲擊，第二波強烈亂流發生在 02:00~03:00am 之間 Aerosonde 穿越飛出颱風中心之際，對照雷遡回波都可發現 Aerosonde 處於颱風眼的東南-東-北等處的強降水區域，在 03:00~04:00am 之間 Aerosonde 位於颱風眼行進方向的前方，也是一段亂流飛行區域。我們評估這些亂流程約是 1G (中等程度)，較大強降水回波區大都分布於颱風眼行進方向的前方，Aerosonde 以逆時鐘方向由颱風後方較弱亂流區進入，但是脫離颱風中心時則無法避免地進入較強亂流區。圖 18 也呈現 Aerosonde 位移速度在東西和南北分量的變率(標準差)，代表飛機瞬間晃動的程度，它們和 DE 在時間軸上有相同的變化特徵。不過我們也發現飛行過程中的大部分時間，Aerosonde 的 pitch rate 和 yaw rate 都維持在 $\pm 0.4r/s$ 之間，顯示其自動平衡的控制邏輯沒有發散，因此我們預期若能將 UAV 飛行控制順著颱風環流風勢飛行，除非通過強降水對流胞，否則大氣紊流不至於對 UAV 產生失控風險。圖 19 是引擎轉速、油門、引擎汽缸溫度(CTH)和高度的時間序列分析，我們發現 Aerosonde 飛行的前 10 小時，轉速和 CHT 相當正常，10 月 2 日 03:10am 之後 Aerosonde 引擎異常的原因可能來自火星塞積碳現象，由於 Aerosonde Mark-III 目前所使用的火星塞自清的能力較差，若 CHT 因故降低，則火星塞積碳會相對升高，如果加上引擎「空燃比」是富油(rich)狀態，引擎轉速降低時，機油更容易進入燃燒室更會造成積碳加速。當 Aerosonde 在 03:10am 之後，油門處於 1.0 到 0.4 擺盪，引擎室溫度由 140°C 下降到 80°C ，雖然我們試圖加大油門挽救危機，但是積碳已讓引擎轉速無法回到 6000rpm 以上，最後火星塞點火失敗造成引擎熄火，Aerosonde 由 3:35am 開始從 4300 公尺高空向下滑翔，由其 -5m/s 下降速度和 Aerosonde 機體流力特徵，我們估計當時它處於降雨區下方 -2m/s 的下沉區域，3:51am 高度 270m 之後就完全斷訊，壯烈墜海完成颱風觀測任務。

3-2 Jack 1.0 部分：

除了 Aerosonde 飛行載具的颱風觀測，TAT 也積極籌畫和驗證國人自製 UAV(Jack 1.0)的天氣觀測能力，以下幾項日期時間和驗證進度說明 Jack 1.0 的軟硬體功能發展概況：

- (a) 2005 年 1 月上旬完成 12000 英呎自動盤旋飛行測試(宜蘭舊機場)。這一飛行驗證 Jack 1.0 未來進行海陸風環流觀測的水平 30km、垂直 3km 垂直剖面觀測策略的可行性。
- (b) 2005 年 1 月中旬完成新版航空電路板。這一電路包含大氣參數的直接量測(氣壓、溫度、溼度、太陽輻射量)和間接換算(風速風向)，以及攝影等功能。
- (c) 2005 年 2 月 15 日完成第二代 Jack (v2.0) 機體繪圖設計。
- (d) 2005 年 4 月 27~30 日完成恆春機場範圍之定點自動飛行測試完成。本計劃利用 Aerosonde 起降測試的空檔時間，進行 Jack 1.0 自動飛行和導航能力，發現部分硬體和程式瑕疵並繼續改進。
- (e) 2005 年 6 月 17 日完成短場彈射起飛測試(圖 20)。為了因應 Jack 1.0 的中長程發展，我們必須考慮未來在任何海邊或陸地空曠地點發射 Jack 1.0 的便利性，而不用透過機場借用的行政程序。這一構想決定未來 UAV 是否能夠在台灣狹窄地形機動進行大氣觀測的落實程度。
- (f) 2005 年 7 月 16~18 日海棠颱風侵襲台灣，TAT 在恆春機場進行 Aerosonde 飛行觀測後，持續於 21~22 日進行 Jack EUAV 飛行驗證，表 2 整理了兩天的實

驗飛行概況，詳細的氣象飛行觀測資訊解析和空照初步成果描述如下：

3-2-1 7月21日個案

TAT 選擇恆春半島關山西側白沙灣公路進行 Jack 1.0 起降，進行 3 次小範圍上下盤旋自主飛行測試後，開始進行較大範圍的定點飛行，16:30 LST 左右 Jack 1.0 進行 40 公里長程飛行驗證。首先，Jack 1.0 盤旋爬升到 3000 英呎高度，然後保持飛行高度往南飛抵後壁湖港上空，接著跨越南灣飛往東南方的鵝鸞鼻燈塔公園，抵達後轉向西北北飛往墾丁青年活動中心/青蛙石，再左轉折返後壁湖港以及回到白沙灣上空，最後盤旋下降高度到目視範圍並順利降落，[圖 21](#) 說明這次 84 分鐘飛行路徑。我們分析每 5 秒鐘的空照照片，確認 Jack 1.0 完全按照預定路徑完成預定航路的自主飛行案例。[圖 22](#) 是 Jack 1.0 在墾丁青年活動中心/青蛙石上空 3000 英呎，相機鏡頭朝下拍攝之畫面和局部放大圖，照片品質為 640*480 pixels (~700Kb)，停車格數量可以清楚辨識出來，我們欣見一部價格低廉的國產數位相機能有令人滿意的環境監視用途的影像品質。

氣象資料方面，[圖 23](#) 是這次飛行的高度氣溫相對溼度以及太陽輻射量的時間序列圖。前段 10 分鐘的盤旋爬升，氣溫由 28°C 下降到 24°C，溫度垂直遞減率為 -4°C/km，相對溼度顯示在起飛後 8~33 分鐘期間，Jack 1.0 處於較為乾燥之大氣環境(80% 轉為 60%)。根據其他個案資料判斷，溼度感測器並無故障跡象，應是當時大氣的真實狀態。16:15 到 17:00 LST 期間 Jack 1.0 飛行於 3000 英呎高度，太陽輻射量由 300W/m^2 降到 240W/m^2 ，當日 16:00 到 17:00 LST 期間太陽天頂角由 56.5° 偏移到 70.1° (大氣路徑長度由 1.8 放大到 2.9)，雲量約 7/10 到 8/10，因此地表輻射量估計值應是 189 W/m^2 (16:00)到 116 W/m^2 (17:00)，這顯示當時 1 公里厚度之洋面大氣水氣衰減了太陽輻射量約 110 W/m^2 。

3-2-2 7月22日個案

TAT 轉移到墾丁聯勤活動中心北方的龍磐公園公路進行 Jack 1.0 起降，進行 6 次墾丁半島空照測試飛行，以及 1 次離岸 10 公里厚度 1 公里的 X-Z 剖面海陸風環流飛行測試。墾丁半島空照測試飛行的目標，在於調整數位攝影機的景觀角度，[圖 24](#) 是飛航路徑示意圖。Jack 1.0 起飛後一路爬升到風吹沙風景區上空 1500 英呎，然後左轉飛越墾丁國家到達西岸的墾丁青年活動中心，之後左轉沿著屏鵝公路到達鵝鸞鼻燈塔公園，再轉到東岸龍坑保護區上空(阿瑪狄斯貨輪油污事件發生處)，最後回到龍磐公園降落，飛行時間約 27 分鐘。當飛機平台處於同一飛行高度的巡航狀態，原本固定於機身的鏡頭垂直向下拍攝無法有良好的景深效果，因此這一航路我們改將攝影機固定於左輪支架，讓攝影機鏡頭處於~30 度傾斜拍攝角度，提高景物或地形海岸線等的立體辨識效果([圖 25](#))。

當日 16:28 LST 天空晴朗，雲量 1/10，Jack 1.0 進行海陸風環流觀測驗證飛行，陸地與海上的定位點如[圖 26](#) 所示。Jack 1.0 在 500 英呎高度飛往外海耗費 6 分鐘，環境風場是東南風~5 m/sec，接著以近 4 個迴圈向上盤旋到達 3200 英呎(10 分鐘)，環境風場是西南西風~7 m/sec，而 MM5 中尺度天氣數值模式(Chen et al., 2002) 1km 空間解析度在墾丁半島東方海面到 1km 高度的風場模擬是西風 4~6m/sec，兩者相當吻合；之後 Jack 1.0 固定高度飛返陸地(8 分鐘)，再盤旋下降回到 500 英呎高度，最後改以手動控制降落，飛行時間約 39 分鐘。[圖 27](#) 整理了這段 X-Z 飛行的氣象參數時間變化，氣溫方面我們量測到外海 500 到 3200 英呎的溫度垂直遞減率為 -3.3°C/km ，相對溼度則遞減了 10%，500 英呎和 3200 英呎高度的太陽輻射量都比晴空地面理論值大了 80 W/m^2 和 200 W/m^2 ；由於當地空氣品質良好，無人為懸浮微粒排放現象，因此太陽輻射量衰減效果應全部由大氣低層水氣所貢獻，這一結果和 7 月 21 日有雲覆蓋個案的估計相當接近(1 公

里厚度約衰減 100 W/m^{-2})。

表 2: Jack 1.0 墾丁實驗飛行概要

日期	時間間距(分)	航次目標	路徑型態	高度(feet)
7月21日	27	自主飛行測試	小範圍 X-Z 剖面	1500
	20	自主飛行測試	小範圍 X-Z 剖面	1500
	17	自主飛行測試	小範圍 X-Z 剖面	1500
	47	自主飛行測試	X-Z 剖面,定點巡航	3000
	84	跨海長程飛行	X-Z 剖面,定點巡航	3000
7月22日	18	自主飛行測試	相機拍照角度測試	1500
	15	自主飛行測試	相機拍照角度測試	1500
	27	自主飛行測試	相機拍照角度測試	1500
	17	自主飛行測試	相機拍照角度測試	1500
	28	自主飛行測試	相機拍照角度測試	1500
	27	自主飛行測試	相機拍照角度測試	1500
	38	跨海長程飛行	X-Z 剖面,定點巡航	3200

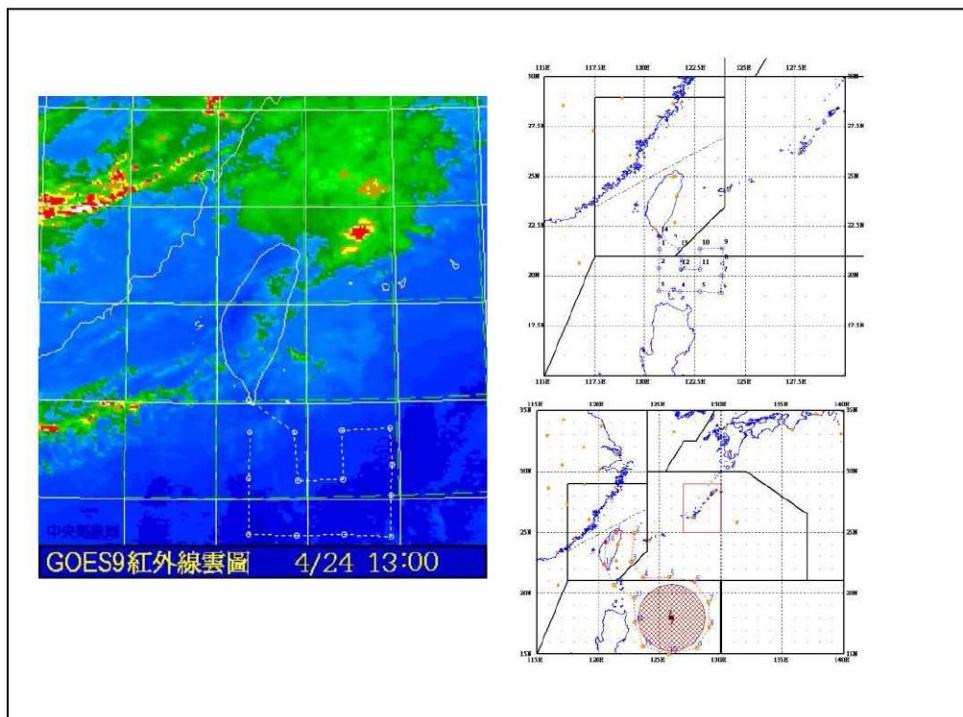


圖 7: Dropsonde(右下)與 Aerosonde(右上)同步進行颱風觀測的假想個案飛行路徑，左側是氣象局公佈的 2004 年 4 月 24 日 03:00UTC GOES-9 紅外雲圖。

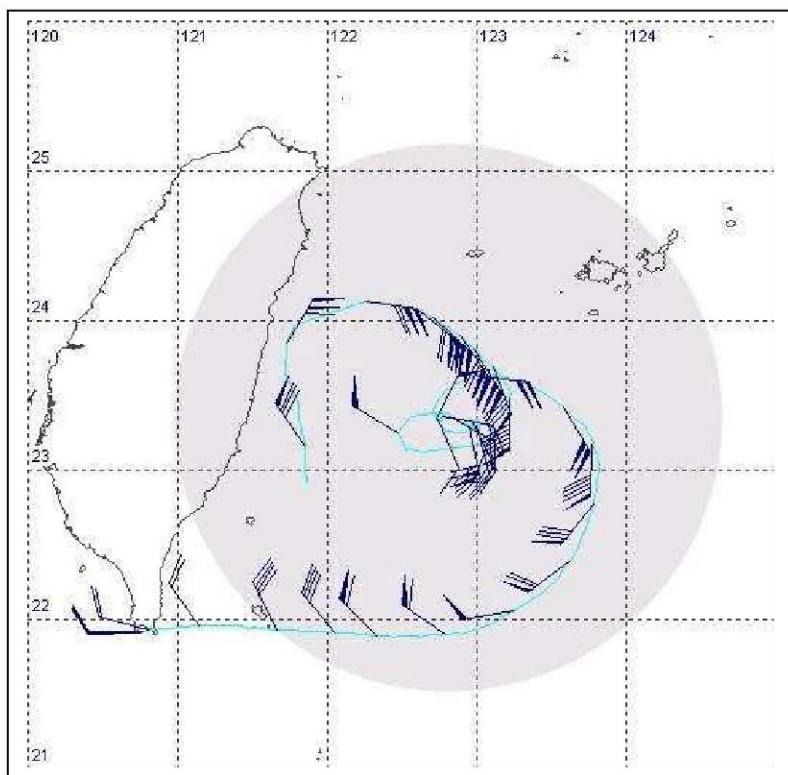


圖 8: Aerosonde 在 2005 年 10 月 1 日龍王颱風個案之飛行軌跡與風場網頁即時顯示圖。

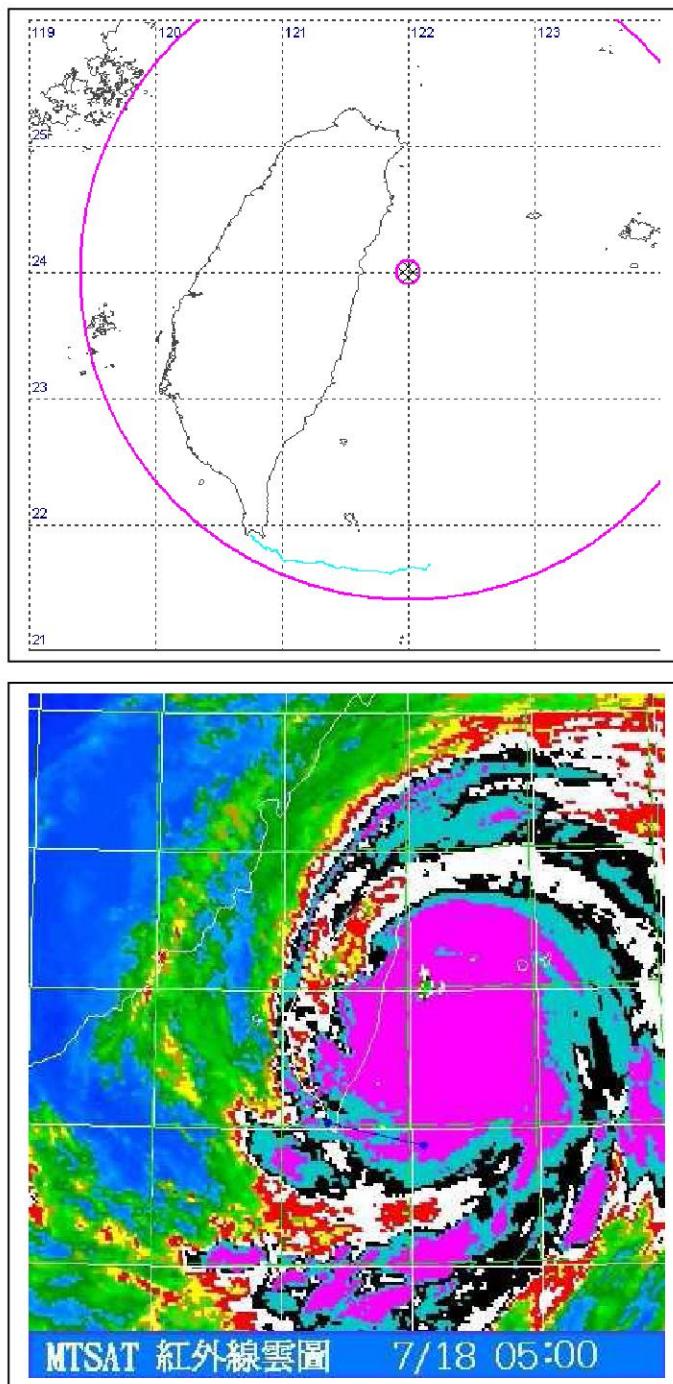


圖 9: Aerosonde 在 005 年 7 月 16 日海棠颱風個案之飛行軌跡(上)與墜海時之衛星雲圖(下)。

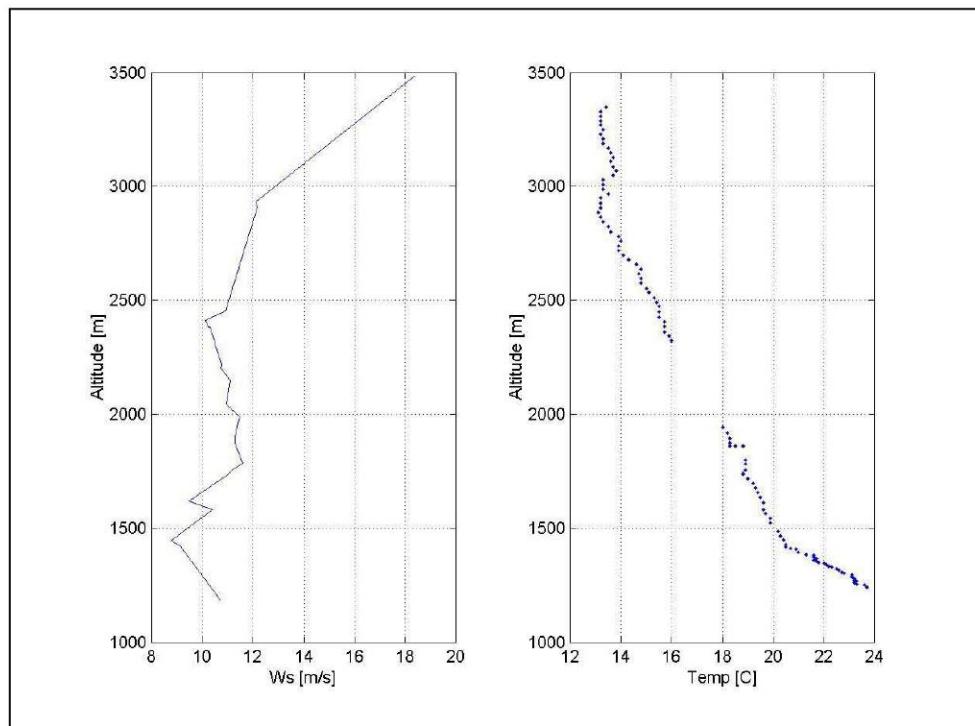


圖 10: Aerosonde 在龍王颱風個案颱風中心垂直探空之風速(左)與溫度(右)之高度剖面圖。

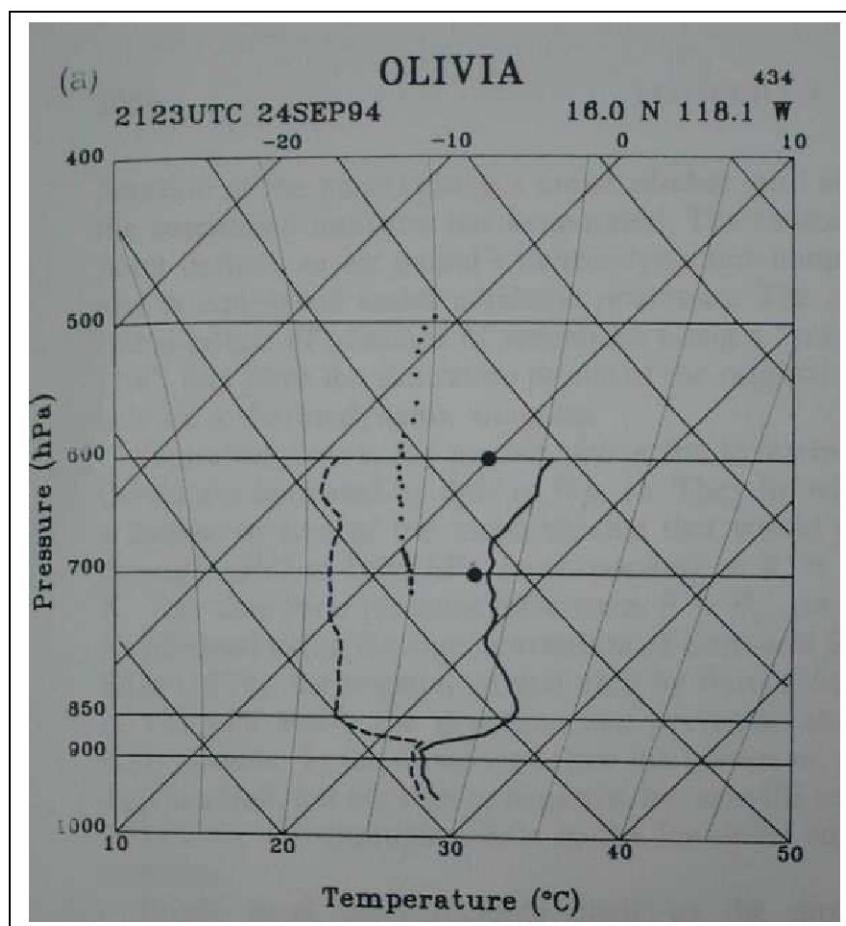


圖 11: 1994 年 9 月 24 日 21:23UTC Olivia 颶風中心的溫度與溼度剖面圖 (Willoughby, 1998)。

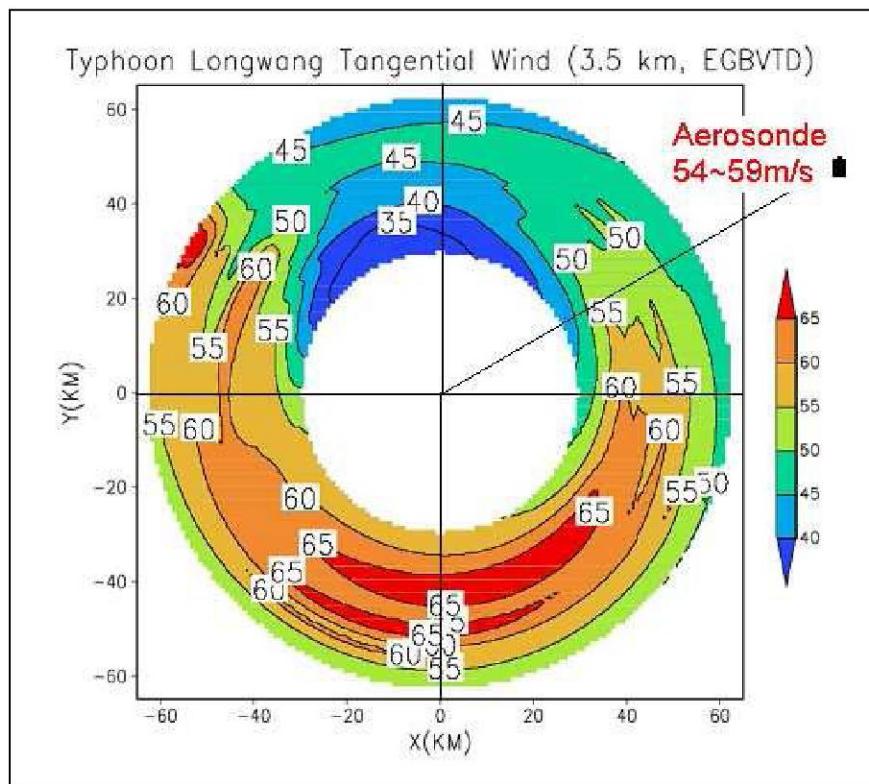


圖 12: EGBVTD 反演 2005 年 10 月 2 日 18:36UTC 花蓮雷達切向風場與 Aerosonde 所在位置與切向風速量測值。

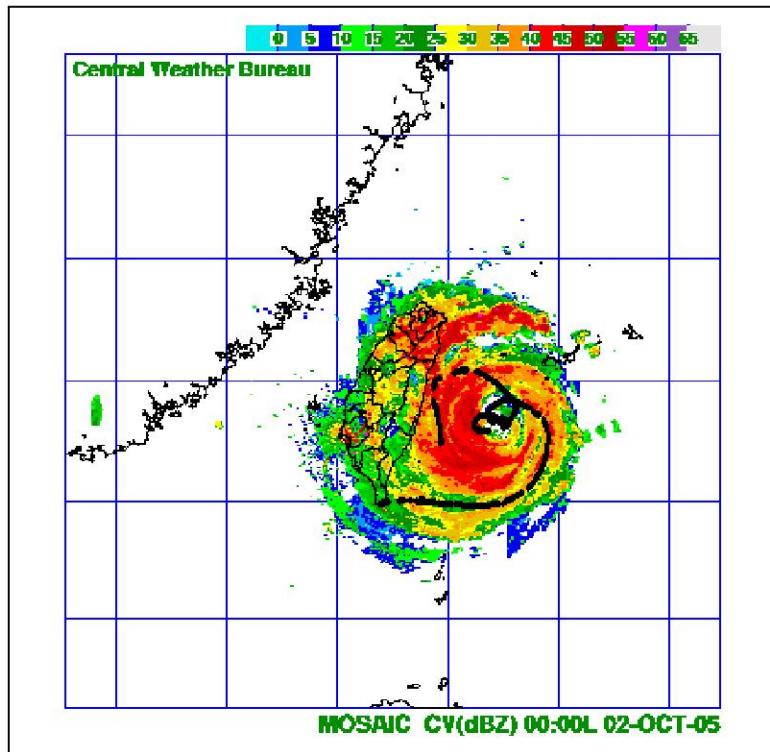


圖 13: 2005 年 10 月 1 日 12:00~19:51UTC Aerosonde 飛行軌跡與 16:00UTC 台灣地區雷達影像合成圖。

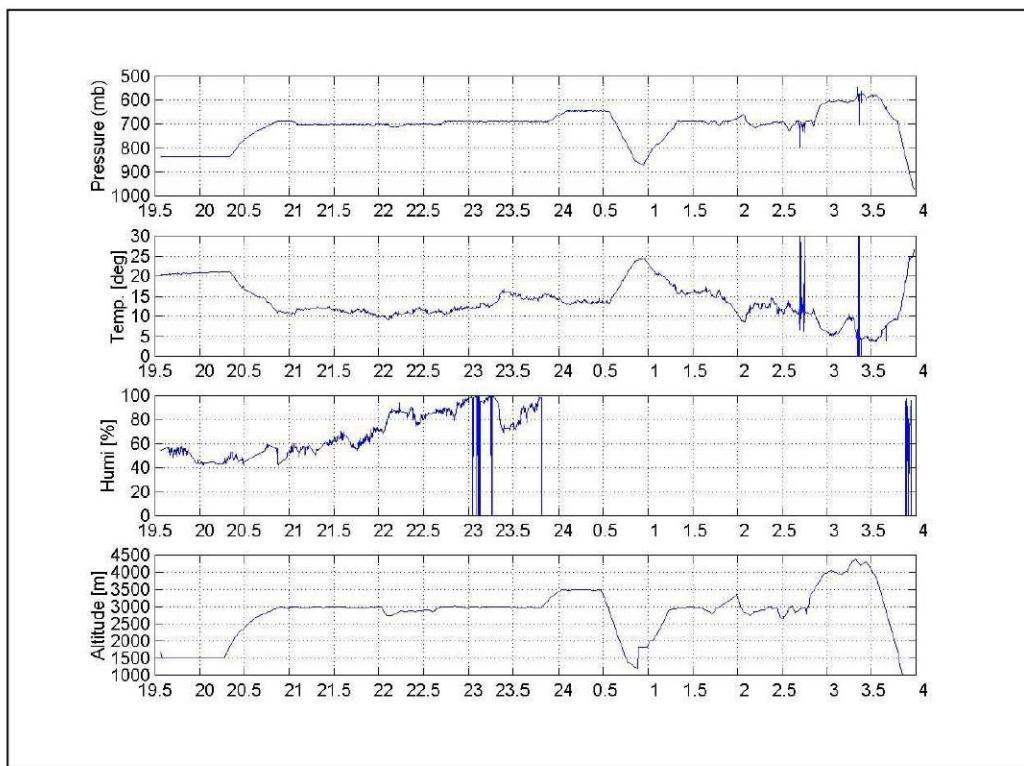


圖 14: 2005 年 10 月 1 日 19:30 LST ~ 10 月 2 日 03:51 LST Aerosonde 飛行過程之氣壓、氣溫、溼度與高度時間序列圖。

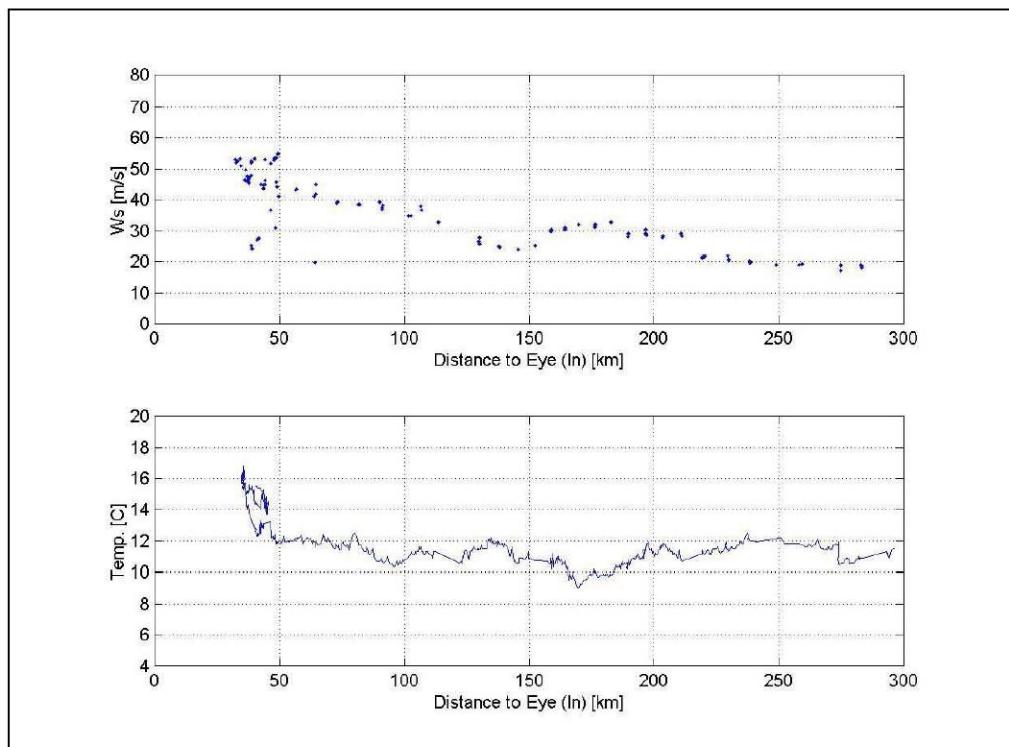


圖 15: 2005 年 10 月 1 日 19:30 LST ~ 10 月 2 日 00:20 LST Aerosonde 飛行過程之風速、氣溫與颱風中心相對距離之相關圖。

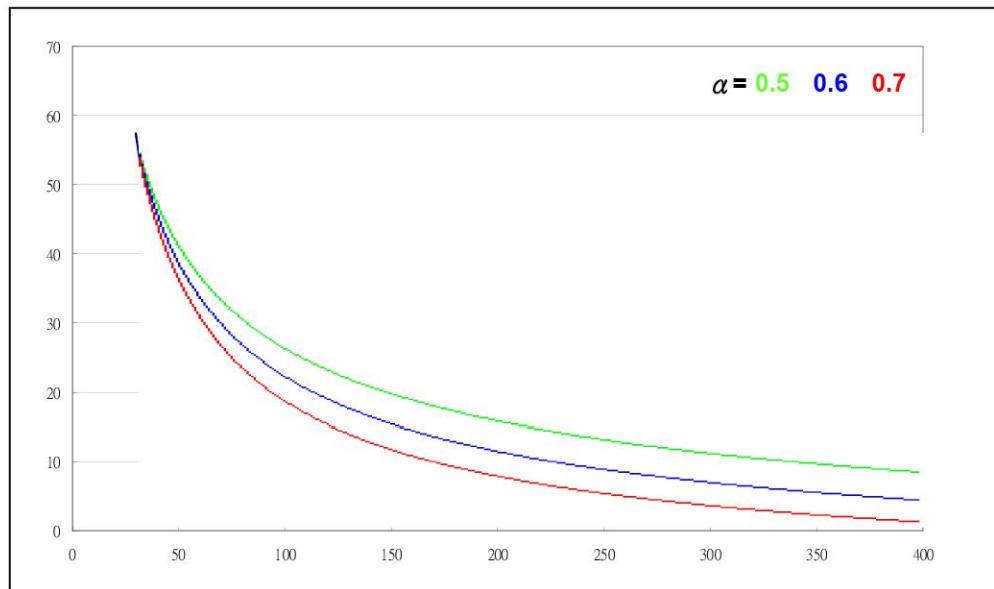


圖 16: 2005 年 10 月 1 日 19:30 LST ~ 10 月 2 日 00:20 LST Aerosonde 穿越颱風環流進入颱風中心之切向風速與颱風中心相對距離之相關圖。其中的 α 值參見內文說明。

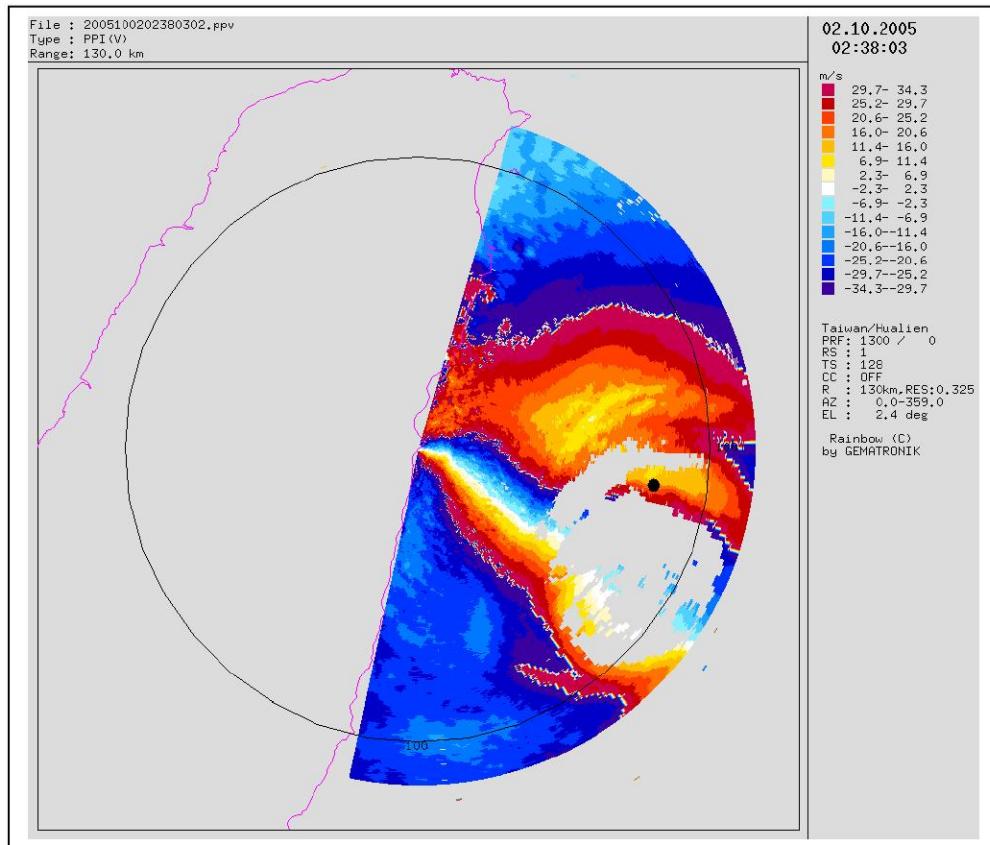


圖 17: 2005 年 10 月 1 日 18:36 UTC 花蓮雷達回波 2.4 度仰角掃描之都卜勒風場與 Aerosonde 空間位置(黑點)，雷達風速未經反折處理。

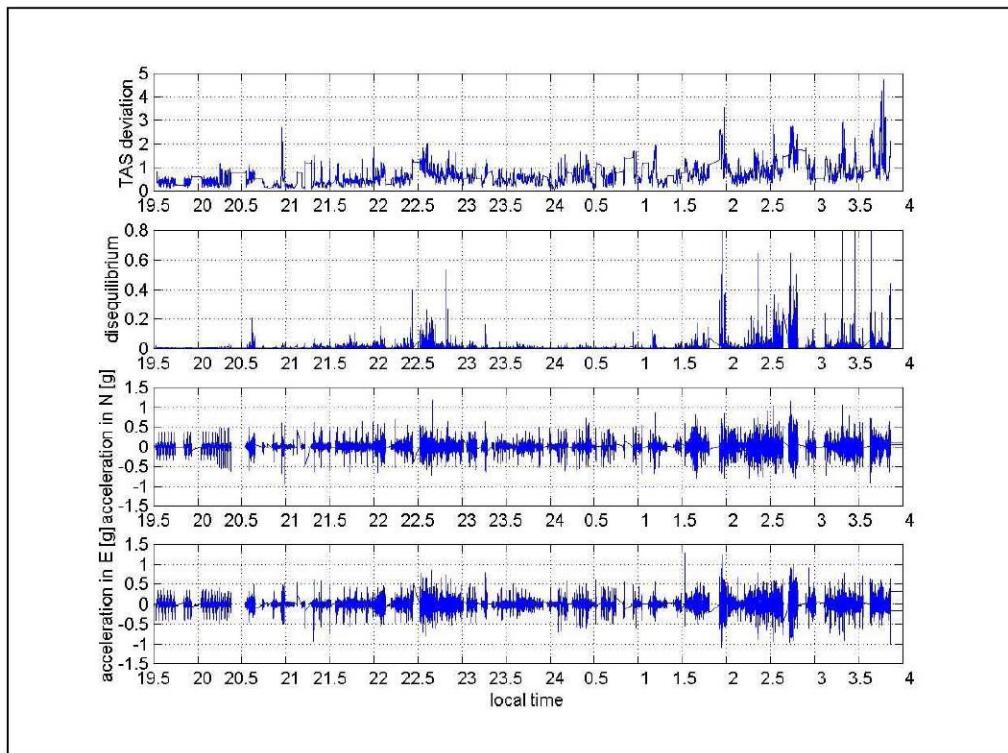


圖 18: 2005 年 10 月 1 日 19:30 LST ~ 10 月 2 日 03:51 LST Aerosonde 飛行過程之空速、不平衡態、南北和東西方向加速度的時間序列圖。

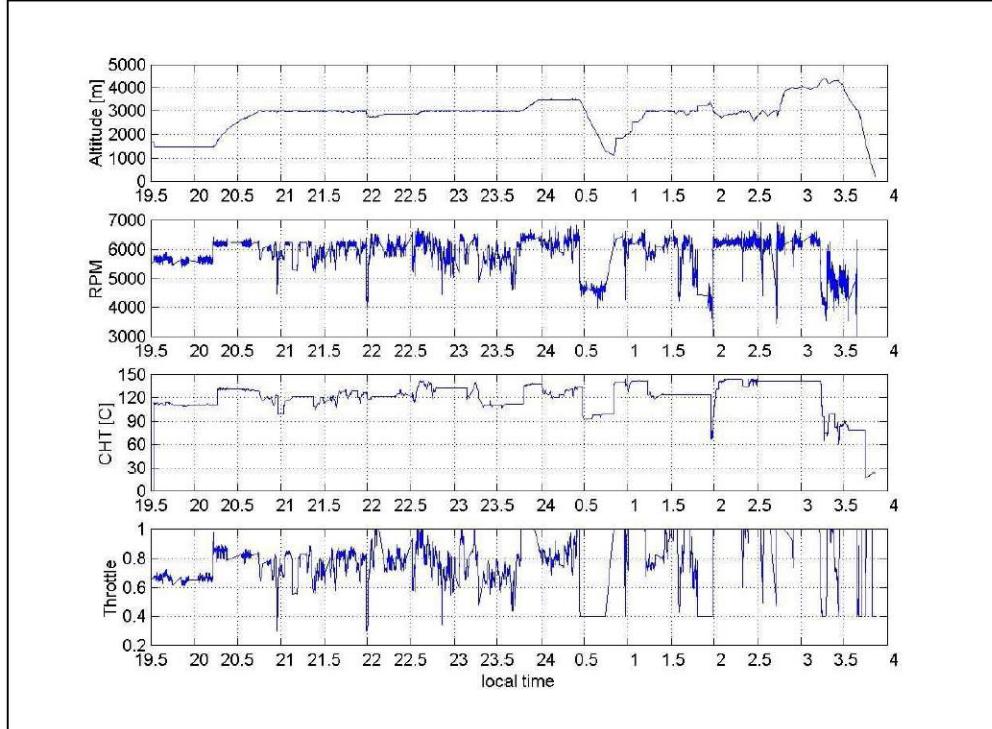


圖 19: 2005 年 10 月 1 日 19:30 LST ~ 10 月 2 日 03:51 LST Aerosonde 飛行過程之高度、引擎轉速、引擎溫度與油門的時間序列圖。

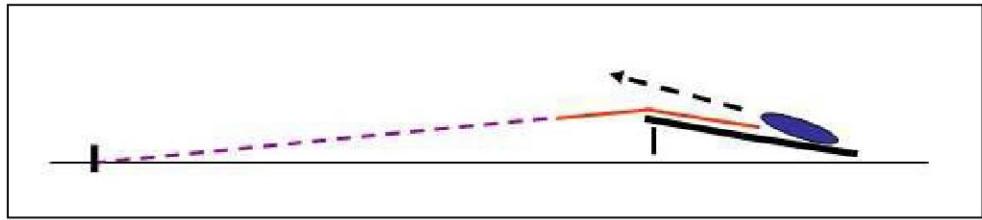


圖 20: 2005 年 6 月 17 日 Jack 1.0 短場彈射起飛架構、實際測試以及木架摺疊。



圖 21: 2005 年 7 月 21 日 Jack 1.0 的 84 分鐘 3000 英尺高度不落地飛行路徑。



圖 22: 圖 21 的墾丁青蛙石飛航轉折點(青年活動中心)上空 3000 英尺空照圖。

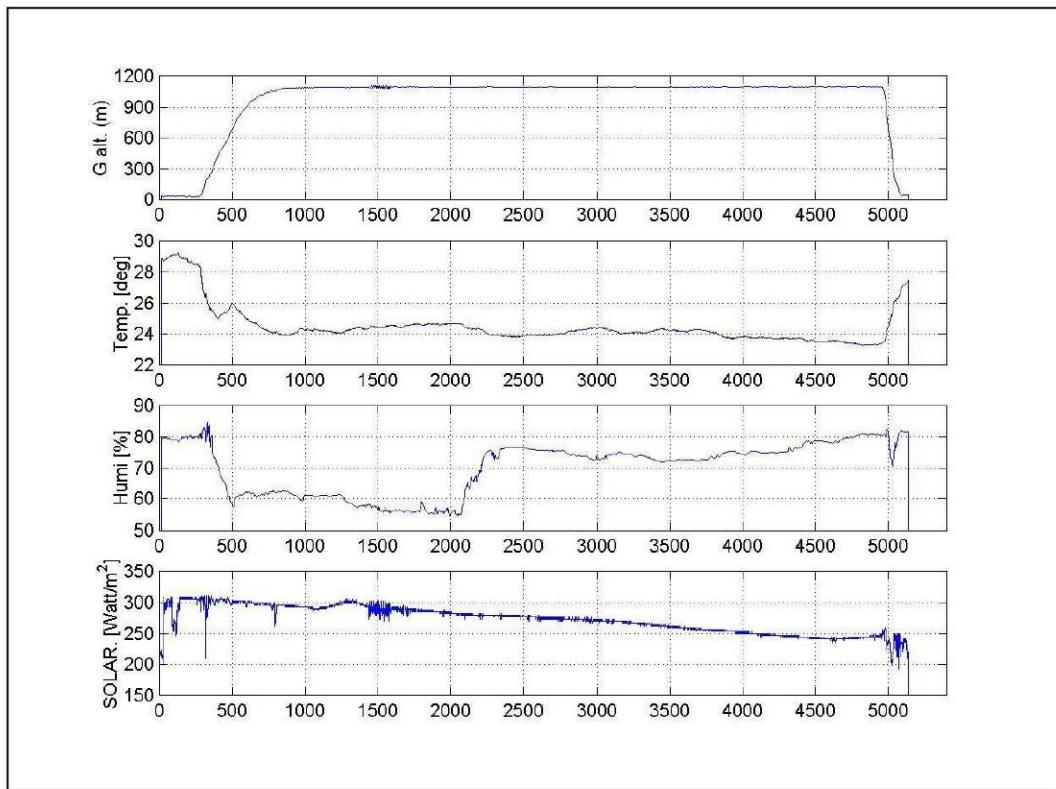


圖 23：圖 21 飛行過程的高度、氣溫、相對溼度與太陽輻射量之時間序列。



圖 24：2005 年 7 月 22 日 Jack 1.0 在墾丁半島的 1500 英尺高度不落地飛行路徑。



圖 25: 2005 年 7 月 22 日 Jack 1.0 在墾丁半島上空 1500 英尺高度的斜角攝影影像。



圖 26: 2005 年 7 月 22 日 Jack 1.0 在墾丁半島東側海面進行的 500~200 英尺高度的 X-Z 剖面飛行路徑。

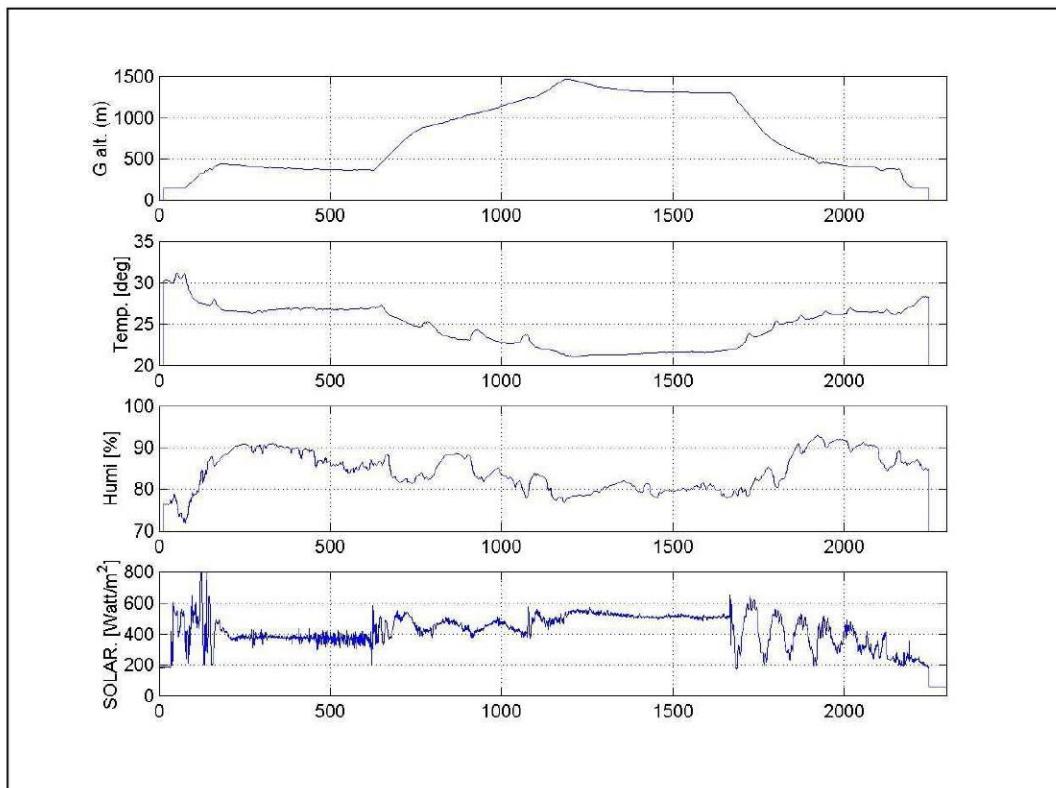


圖 27: 圖 26 飛行過程的高度、氣溫、相對溼度與太陽輻射量之時間序列。

四、結論與展望

Aerosonde 飛行觀測部分，雖然兩架次新款 Mark-III 飛機均於觀測最後階段墜海，然而氣象資料已經完整回傳，龍王颱風個案並創下世界氣象史觀測新紀錄，首度證明無人飛機能穿越颱風強陣風和暴雨環流，進入颱風中心進行垂直探空觀測的概念。TAT 團隊也超越台灣航太領域進度，首度發表國人自製的自動平衡飛行與 GPS 導航 2 小時的氣象與環境無人飛機平台 Jack 1.0。

2005 年 9 月和 10 月，Aerosonde Mark-III 分別在美國東岸繞行 Ophelia 颱風(圖 28)和太平洋西岸穿越龍王颱風成功，對於無人飛行載具在軍事用途之外的科學應用寫下輝煌紀錄，也為 UAV 在「大自然風洞」的實際表現提供參考性的個案數據。可惜的是 Aerosonde 是一架舶來品無人飛機，因此以下兩項議題值得我們加以討論：

- (1) 氣學領域是否要繼續採購 Aerosonde 進行颱風穿越觀測？
- (2) 台灣產官學界有無能力製造類似 Aerosonde 功能的人飛行載具？

第一項問題雖然學術界還未有所定論，但是經過 7 年的 TAT 團隊合作模式和經驗累積，團隊有信心足以進行更多次的颱風穿越觀測飛行；我們深信，龍王颱風個案的成功不是僥倖，而是 7 年心血所換來的美麗成果，它不僅是 Aerosonde 無人飛行載具新的里程碑，也是台灣氣象界的榮耀；這一份寶貴資料將做為颱風強度模擬數值實驗的參考，也是雷達風場反演理論的重要驗證參考。第二項問題的答案應該是正面肯定的，但即使是研發經費充裕無虞，主持人認為這種特殊 UAV 平台的研發時程必將長達數年之久，因為 UAV 必須結合航太、機電、通訊和應用等四種領域的人才團隊，才能畢盡全功。在了解 Aerosonde 的優缺點和特性之後，TAT 團隊自 2003 年起嘗試建造簡易版本的 Aerosonde，並以執行「海陸風環流觀測」的氣象主題為目標；首先，我們套用現有模型飛機來跳過「飛行載具開發設計」的議題，直接進行「自動平衡飛行」與「GPS 導航」的小型飛控電腦的設計和試飛，酬載感測元件選定微型的溫度、濕度、氣壓、太陽輻射計以及數位相機。經過 2 年測試，終於在 2005 年 7 月於墾丁地區完成 12 架次 365 分鐘的飛航攝影和海陸風氣象觀測測試(林，2005)。我們評估這一造價低廉(新台幣 10 萬元)的 Environment UAV，將能提供盤旋高度和水平往返距離各是 3 公里和 40 公里的 2 小時飛行觀測，應用在海陸風環流和近岸與河道的災害拍照功能。

美國海洋大氣總署(NOAA)於 2005 年分別進行兩種無人飛行載具的氣象觀測測試，一是在美國東岸使用 Aerosonde 進行颱風環流穿越觀測，一是在美國西岸使用美國軍用中程戰術 UAV 改裝的 Altair 進行海面大氣遙測測試飛行(圖 29)；美國空軍也在 2005 年 11 月在關島進行一序列的 Aerosonde 热帶風暴觀測飛行任務(圖 30)；美國加州州立大學 San Diego 分校主導的 Global Albedo Project，則嘗試製造「雲輻射」觀測專用的 UAV(圖 31)，來建構雲對氣候影響的概念模式；歐洲方面，德國 Braunschweig 科技大學製作了小型無人飛行載具 M²AV (Meteorological Micro Aerial Vehicle, 圖 32)，目標是進行大氣邊界層紊流分析。美國喬治亞理工學院 UAV 地球觀測資源中心，更是全方位地介紹美國各大學以及全球各地航太中心投入 UAV 應用的資訊；這些事實都顯示 UAV 在大氣科學觀測應用的趨勢，TAT 團隊有義務繼續為台灣氣象界推動 UAV 天氣觀測，並拓展 UAV 在環境監測上的應用。

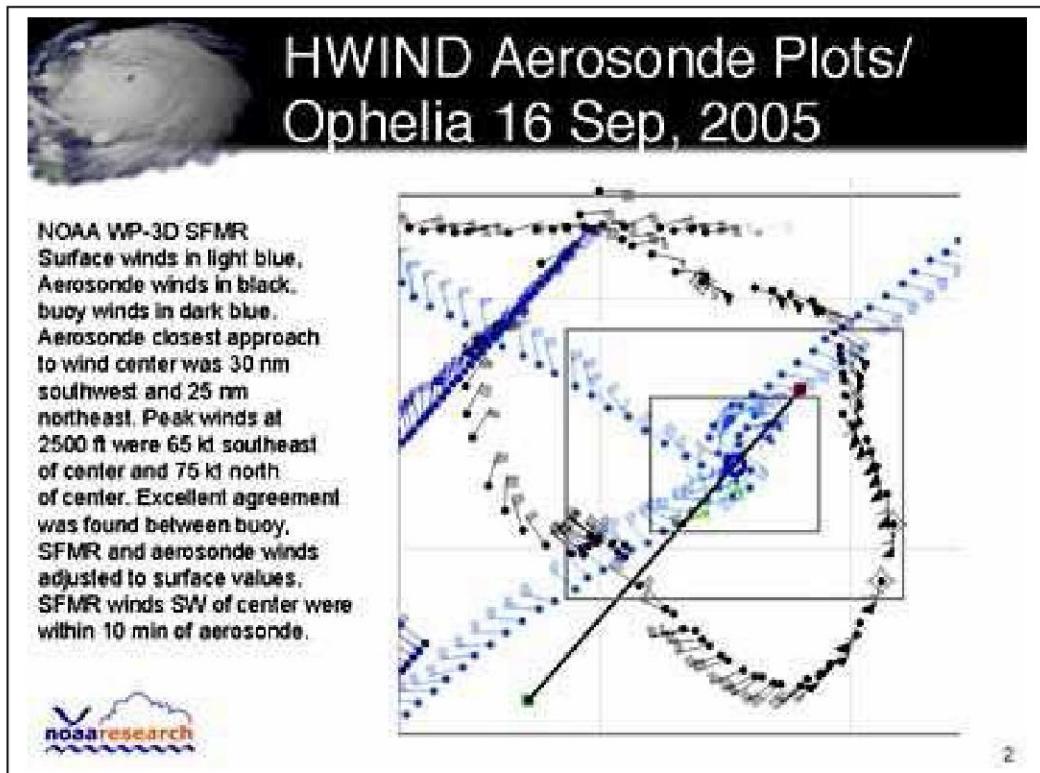


圖 28: NOAA NewsLetter 公佈 2005 年 9 月 16 日 Ophelia 颱風的 WP-3D(藍色)和 Aerosonde(黑色)軌跡和觀測風速值。



圖 29: 美國 NOAA 與 NASA 共同執行的 Altair Integrated System Flight Demonstration Project 計畫(<http://uav.noaa.gov/altair/index.html>)。



圖 30: Aerosonde at Guam for AFOTEC Weather Scout trials (<http://www.aerosonde.com/drawarticle/128>)。

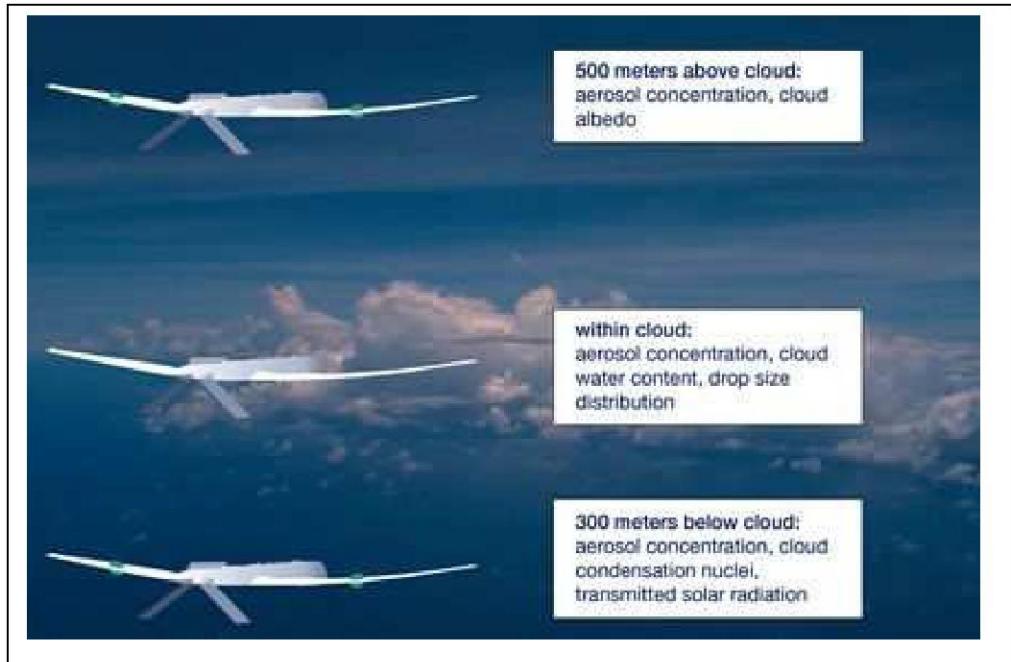


圖 31: Global Albedo Project (GAP)proposal 假想數架 UAV 同步進行不同高度的輻射觀測構想。

(<http://www.ucar.edu/communications/quarterly/summer05/reflective.html>)



圖 32: 德國 Braunschweig 科技大學設計的氣象觀測飛機 M²AV
(<http://www.m2av.de>)。

五、參考文獻：

- 丘台光，2003：應用多重觀測工具之定量降雨估計與分類技術(QPESUMS)系統。海峽兩岸颱風與中尺度天氣預報作業研討會，台北。
- 吳俊傑，林博雄，葉天降，2004：侵台颱風之 GPS dropsonde 飛機偵查觀測實驗——「追風計劃」追求颱風科學與預報突破。科學發展，**373**。
- 李冠賢，秦新龍，林博雄，2005：以加入徑向速度場資訊的 TREC 技術反演颱風風場。天氣分析與預報研討會，中央氣象局，台北。
- 林博雄，1998：無人遙控載具在氣象上的應用。無人遙控載具/儀電技術研發成果發表暨應用研討會，中華民國自動控制學會，18-25。
- 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，李清勝，顏泰崇，李憲乾，2002：無人飛機探空：一種用於探測大氣環境之特殊無人飛行載具。第二十一屆測量學術及應用研討會，新竹。
- 林博雄，2003：三種颱風環流海上現場觀測平台的測試和初步成果。海峽兩岸颱風與中尺度天氣預報作業研討會，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，2005：無人飛行載具在軍事氣象上的應用。21 世紀軍事氣象與戰場管理研討會，高雄左營。
- 林博雄，2005：無人飛行載具探空應用實戰經驗，2005 無人飛行載具技術與應用研討會，台北。
- 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.
- Chen, C. S., C. Y., Lin, Y. J. Chuang and H. C. Yeh, 2002 : A study of afternoon heavy rainfall in Taiwan during the mei-yu season. *Atmospheric Research. (in press)*.
- 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.
- Holland, Greg, Tad McGeer and Harold Youngren, 1992: Autonomous Aerosonde for Economical Atmospheric Soundings Anywhere on the Globe. *Bull. Amer. Meteor.* **73**, 1987-1998.
- Holland, G. J., Webster, P. J., Curry, J. A., Tyrell, G., Gauntlett, D., Brett, G., Becker, J., Hoag, R., Vaglienti, W. 2001: The Aerosonde Robotic Aircraft: A New Paradigm for Environmental Observations. *Bull. Amer. Meteor.* **82**, 889-902.
- Holland, G.J., 2002: Tropical cyclone reconnaissance using Aerosonde UAV. *Bull. W.M.O.*, **51**, 235-246.
- Jade, R. S.,2003: Assessment and capabilities of the Aerosonde robotic aircraft for use as an atmospheric observer. P.h. D. thesis, Department of applied physics, University of Technology, Sydney, Australia.
- Jade, R. S and K. McGuffie,2004: Intercomparison of atmospheric soundings from the Aerosonde and radiosonde. *J. Appl. Meteor.* **43**, 1260-1269.
- Jian, G. J., S. L. Shieh and J. A. McGinley, 2003: Precipitation simulation associated

- with typhoon Sinlaku (2002) in Taiwan area using the LAPS diabatic initialization for MM5. *J. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, **14**, 261-288.
- Lee, K. H., H. L. Chin and P. H. Lin, 2005: Tropical cyclone wind retrieval using modified TREC method with radial velocity data added. *32nd Radar Meteorology Conference*. Albuquerque, New Mexico.
- Lin, P. H. and W. T. Jeng, 1998: Aerosonde data acquired during SCSMEX. *IX Pacific Science Inter-Congress*, p49.
- Lin, P. H., C. S. Lee, W. D. Jeng and M. S. Lin, 2001: The diagnosis of Aerosonde data acquired from the South China Sea Monsoon Experiment. *The Scientific Conference on the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX)*, 17-20 April, Shanghai, China, p73.
- Lin, P. H., C. S. Lee, T. C. Yen and H. C. Lee, 2002: Flying into Typhoon Haiyan with UAV Aerosonde. *International Conference on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall/Snowfall in East Asia*, 29-31 October, 2002, Tokyo, Japan.
- Lin, P. H., C. S. Lee, T. C. Yen and H. C. Lee, 2003: Flying into Typhoon Haiyan with UAV Aerosonde. *12th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*. 83rd AMS Annual Meeting at Long Beach, California.
- Lin, P. H., Y. H. Chen and C. C. Wu, 2005: The Development of Real-time Airborne and Dropwindsonde Data Acquisition System on Laptops. *21th International Conference on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography and Hydrology*. 85rd AMS Annual Meeting at San Diego, California.
- Lau, K. M. Y. Ding, J. T. Wang, R. Johnson, T. Keenan, R. Cifelli, J. Gerlach, O. Thiele, T. Rickenbach, S. C. Tsay and P. H. Lin, 2000: A report of the field operations and early results of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1261-1270.
- Wu, C.-C., and Y.-H. Kuo, 1999: Typhoons affecting Taiwan: current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 67-80.
- Willoughby, H. E., 1998: Tropical cyclone eye thermodynamics. *Mon. Wea. Rev.* **126**, 3053-3067.

附錄 A: Aerosonde 操控運作流程

(a) 運送

首先，TAT 為了符合颱風觀測的機動要求，整套無人飛機探空設備必須有運送方便與架設簡易的特性，因此在運裝過程中，TAT 使用九人座客貨車來裝載貨物，到達觀測地點並將飛機組裝完成，再充當臨時野外控制平台。在運送過程中，為了妥善保護 Aerosonde 與相關儀器設備，所有的裝備按照列表清點與打包裝箱，並用保利龍填塞空隙，以避免在長途跋涉過程中震壞儀器。Stage box 以及個人電腦尤其留意不能任意置放。

(b) 飛機組裝與檢查

到達基地臨時工作廠房，重新組裝 Aerosonde，並做飛機檢測、起飛前之各項準備工作。Aerosonde 之組裝分為三大部分，一是燃料及潤滑油之裝填，二是飛機之機翼組裝，三是加掛 RS90-PTU 以及整架飛機重心點平衡量測與通訊測試。

(c) 確認起飛程序

Aerosonde 由發射車載往跑道，跑道發射端技術人員與駕駛透過無線電對講機與地面操控端的電腦操控員與手動駕駛員，雙方覆誦檢查起飛程序最後確認單各項目，包括：

1. Aerosonde 引擎啟動，滅火器在一旁戒護，螺旋槳兩側不可有人。
2. 檢查飛機舵面反應。
3. 檢查引擎轉速與溫度。
4. 檢查無線電通訊狀況。
5. 檢查空域使用許可時間。
6. 跑道及其兩側再次確認人員淨空，發射架安全插梢拔除。
7. 領隊下達起飛。

(d) 起飛降落與空中監控

Aerosonde 並無起落架，起飛時必須使用小客車與發射架來加速，由地面操控站監看電腦程式資料來告知手動駕駛員飛機空速。一旦 Aerosonde 空速超過 20m/s (時速 72km/hr) 即有足夠的浮力脫離發射架，由手動駕駛員決定拉升動作，完成起飛脫離發射車。起飛後手動駕駛員以遙控器手動操控 Aerosonde 盤旋與爬昇，目視檢查與電腦資料確認 Aerosonde 飛行姿態機械反應以及通訊頻率是否穩定，最後切換成電腦遙控模組，開始執行規劃的飛行任務，最後再切換成 TDMA 模組進行長程飛行。降落程序則反相操作，即先從 TDMA 模組回到 local 模組，再切換成手動控制並以滑翔機腹著地方式降落。TDMA 遠端資料上傳下載有兩種通訊方法，一是 UHF 無線電(~150km 範圍，免費)、一是 Iridum 衛星通聯(全球範圍，每分鐘 NT\$76 元通話費)。

(e) 飛行路徑

Aerosonde 的飛行路徑設定有兩種方式，一是預先規劃輸入，二是即時線上輸入。前者操作員藉由一已知的固定點(比如基地位置)輸入偏移量，由此求得另一點，再輸入長寬值，經由這些輸入值可以得到一個長方形的導航路徑。其次，必須指定飛行高度的上下限，並可使導航路徑變化由方形轉成蝴蝶形狀的交錯路徑。若是二點直線飛行，我們先以基地為圓心，輸入兩份半徑值以及一份方位角度，Aerosonde 直線路徑即是沿著這方位角從內圓到外圓。即時線上輸入航線方面，Aerosonde 導控程式先讀入一份指定格式之文字檔，每一列有位置點編號、經緯度以及高度上下限；飛行路徑為一封閉路徑，即文字檔最後一列與第一列內容相同。為求飛行安全與任務達成，飛行路線設定都事先在其他電腦模擬驗證確

認後才植入現場作業電腦中。

(f)資料回傳網頁

經由 Iridium 或 UHF 下載的飛機位置和氣象資料，定時透過有線或無線網路回傳台灣大學大氣科學系電腦伺服器 MySQL 資料庫，然後藉由 PHP 或是 Perl 語法將上述資料以 1~10 分鐘時間間距自動更新電子地圖畫面上的飛機位置；最新氣象資料則顯示在獨立框架，查詢過去資料時則以時間序列方式呈現，使用者可以用滑鼠控制圖表放大縮小。我們將以預報員觀點來設計這一互動需求，來即時觀察颱風環流飛行觀測的過程。