

飛上天空觀測氣象

黃紹欽

唯有觀天，才能知天！飛上高空探索未知向來是氣象學家的夢想，早期只能利用簡單的人工方法取得高空氣象資料，觀測項目少且準確度不足。拜科技進步之賜，現今已有不少可以一窺天空神祕面目的方法。

測風與探空氣球應用廣

地球上的各種天氣現象主要發生在對流層內（從地面向上延伸至 12 ~ 16 公里高處），若想完全了解造成天氣變化的原因，除了要有密集的地面觀測及雷達網外，高空觀測是不可或缺的一環。高空觀測就是利用氣象觀測儀器取得從地面至 30 公里高處之間的大氣資料，進而得到大氣的穩定度及天氣系統內部垂直結構的特性。早期的高空觀測都是利用風箏等人工方法，但隨著科技的進步，陸續發展出各種觀測技術。

在地面進行高空觀測時，測風氣球或探空氣球是常見的方法。測風氣球成本較低，氣球升空後，觀測人員以經緯儀目視觀測，藉由經緯儀提供不同時間的仰角及方位角，計算出不同高度的風向與風速。但人工觀測無法完美獲得氣球位置，且計算時假設氣球上升速度是固定值，因此，特別是氣球剛升空時風場精確度較差。

(a) 測風氣球



(b) 探空氣球



測風氣球與探空氣球

探空氣球則是把探空儀綁在氣球下，氣球約以每分鐘 350 公尺的速度上升，氣象感應器包括氣壓、氣溫及相對溼度，風向與風速則是透過全球衛星定位系統（GPS）

探空氣球是把探空儀綁在氣球下，約以每分鐘 350 公尺的速度上升，每 1 ~ 2 秒便會經由無線電把觀測的基本氣象要素即時傳輸到地面接收系統。



豪大雨的天氣系統往往來自海面上，像是颱風、梅雨鋒面、西南氣流等，特別是颱風。（圖片來源：種子發）

或追蹤式的方法取得。追蹤式與測風氣球觀測原理相近，但已改由天線自動追蹤。GPS 式則是由探空儀接收到的 GPS 位置訊號反推風向及風速。探空儀所觀測的 5 種基本氣象要素，每 1 ~ 2 秒便會經由無線電即時傳輸到地面接收系統。

台灣的高空觀測從日據時期就開始了，但直到 1949 年才在台北氣象站使用無線電探空儀觀測。迄今全台共有 8 個探空站，其中 6 個是常規站，分別由中央氣象局（板橋、花蓮及東沙）與空軍氣象聯隊（馬公、屏東及綠島）負責維護及進行每日兩次的高空觀測，若有致災性天氣可能影響時則增加到每日 4 次。另，永康及南沙太平島則是有劇烈天氣系統影響時才進行觀測。

在高空觀測資料接收系統方面，台灣曾採用過 Vaisala（芬蘭）、Meisei（日本）及 GRAW（德國）3 種系統。Meisei 是中央氣象局早期的作業系統，但自 2010 年起已陸續由 Vaisala 系統取代；陸軍及海軍移動式高空觀測系統使用 GRAW；空軍與學

術界都使用 Vaisala 系統。因為各接收系統的編碼與解碼方式不一樣，所以探空儀無法互通使用。而不同廠牌的探空儀所蒐集到的氣象資料特性明顯不同，特別是相對溼度，某些探空儀所探測到的相對溼度甚至比實際值乾 10% 以上。因此，在使用探空資料前需更加謹慎。

探空資料目前廣泛應用在數值模式或個案診斷分析。雖然探空氣球能讓預報人員掌握大氣穩定度與天氣系統的垂直結構，但因探空儀可能有乾偏差，所以在使用探空資料前，宜有適當的品質控管及相對溼度校正程序，才能獲得大氣中最接近真實的水氣含量，以提高預報的準確度。

投落送提升路徑預報準確度

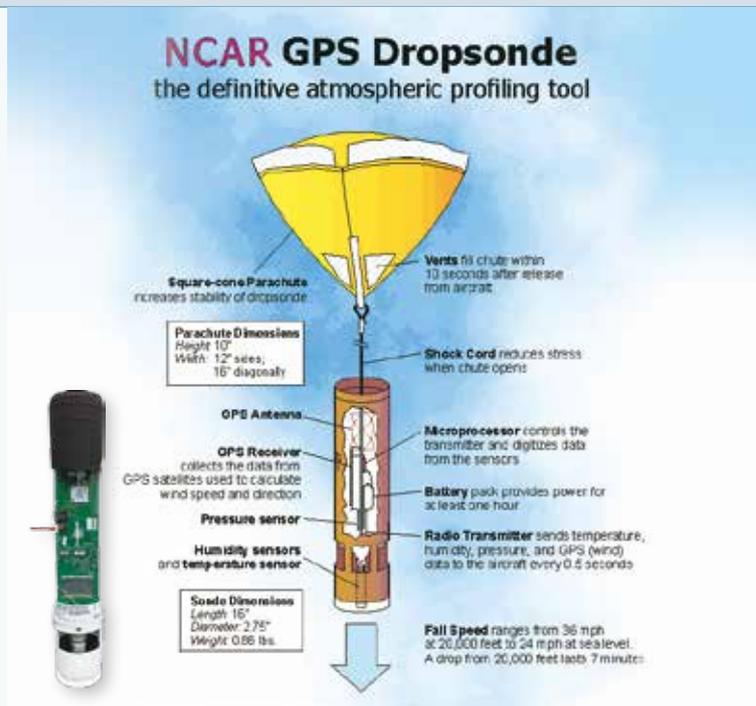
但為台灣帶來致災性豪大雨的天氣系統往往來自海面上，像是颱風、梅雨鋒面、西南氣流等，特別是颱風。台灣位於西北太平洋颱風轉向的關鍵區域，每年平均約

有 3.6 個颱風影響台灣。颱風雖然會帶來豐富的水資源，但也常造成嚴重的生命財產損失。因此，如何及早掌握颱風動態成了氣象學家急需解決的課題。

目前世界各國對於颱風的預報仍有一定程度的誤差，最主要原因還是海面上觀測資料缺乏，尤其是大氣垂直剖面。氣象學家只好透過衛星遙測方式推估颱風的強度和暴風半徑，但常有顯著的誤差，導致數值模式的初始場不夠完備，增加模式預報的不確定性。台灣自 2002 年 8 月起，由前國科會提供經費補助颱風重點研究，利用全球衛星定位式投落送對颱風周圍的大氣環境進行觀測實驗，稱為「颱風飛機投落送觀測」或「追風計畫」，主要是藉由投落送蒐集颱風 7 級風暴風半徑附近的大氣垂直剖面資料。

投落送是一種從飛行器上拋投至地面的氣象觀測儀器，上面裝載氣象感測器、GPS 接收器、無線電傳輸器與降落傘，可提供的參數包含氣壓、氣溫、相對溼度、風向及風速。降落傘在投落送拋出飛機後會自動拉出，維持下降速度以確保氣象資料的準確性。

追風計畫目前由中央氣象局、國研院台灣颱風洪水研究中心（颱洪中心）、臺灣大學大氣科學系及漢翔航空公司（漢翔）共同合作。當西北太平洋有颱風生成時，中央氣象局與颱洪中心負責密切守視颱風動態，在颱風可能影響台灣前 1~2 天，決定是否進行觀測任務。飛行觀測作業由颱洪中心與漢翔航空執行，採用 ASTRA 雙引擎噴射機，約沿著估計的颱風 7 級風暴

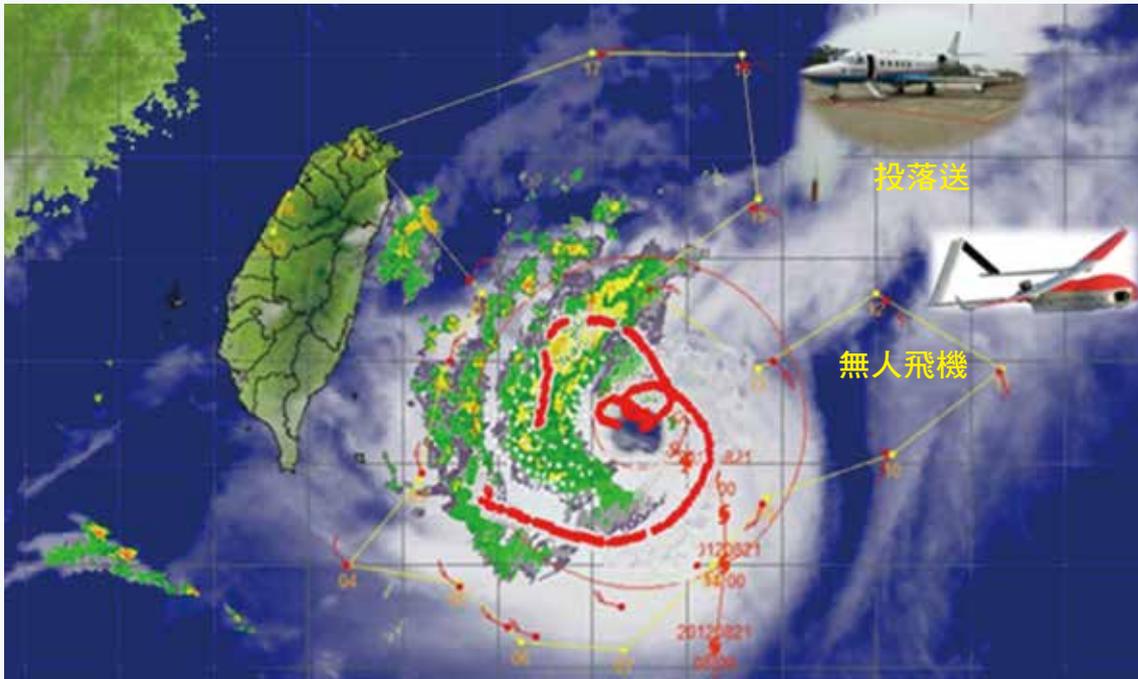


GPS 投落送內部裝置包含氣象感測器（氣溫、氣壓及相對溼度）、GPS 接收器、無線電傳輸天線及降落傘。（圖片來源：美國國家大氣研究中心）



投落送任務起飛前的簡報（上）與位於颱洪中心台北辦公室的作業指揮中心（下）。

追風計畫自 2003 年迄今邁入第 14 年，期間共針對 59 個颱風完成了 75 次飛行觀測，成功投擲 1,163 個投落送。



追風計畫與無人飛機聯合觀測示意圖，黃色及紅色粗實線分別代表追風計畫與颱風中心無人飛機的飛行路徑。

風半徑（距離颱風中心 250 ~ 350 公里）以逆時鐘方式環繞一圈，自離地 14 ~ 15 公里高空處向下投擲投落送，飛行時間約 4 ~ 6 小時，拋投 13 ~ 20 個投落送。

執行任務的成員包含機上與地面作業兩組。機上人員有正副駕駛、投放作業人員與研究團隊共 6 員，負責飛行操控、投落送拋投作業、機載接收系統的維運及原始資料擷取。地面人員則在颱風中心台北辦公室作業指揮中心進行原始資料下載及編碼，並把經過處理的資料即時上傳至中央氣象局與世界各國氣象作業中心供預報人員使用。

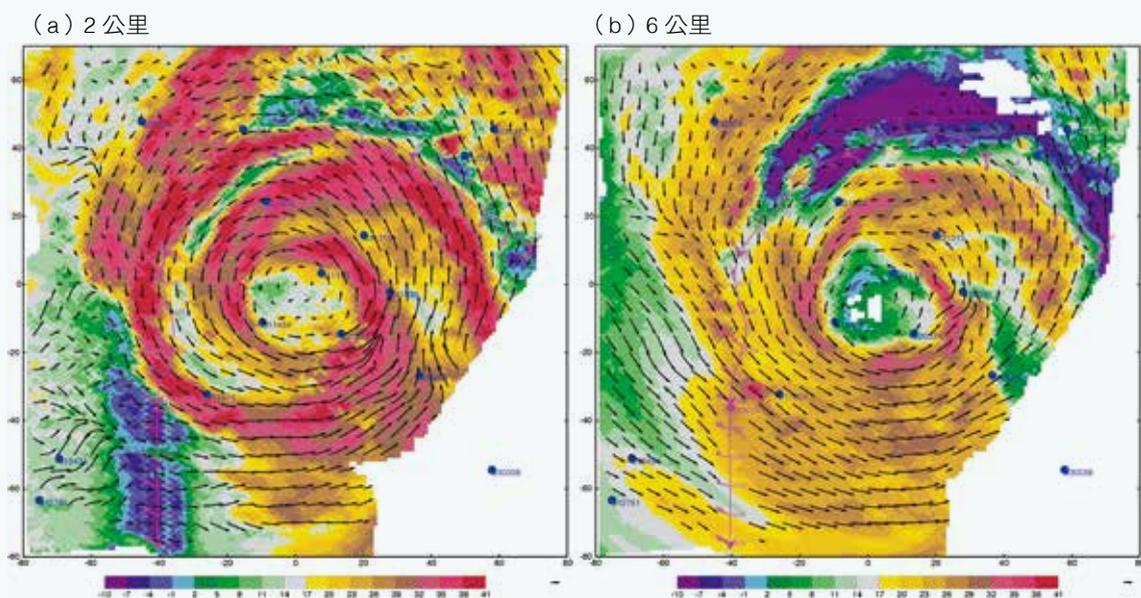
追風計畫自 2003 年迄今邁入第 14 年，期間共針對 59 個颱風完成了 75 次飛行觀測，成功投擲 1,163 個投落送。未來仍會繼續針對每個可能影響台灣的颱風進行觀測任務，所蒐集的資料除可協助氣象預報

人員重新估計颱風強度及暴風半徑外，如 2015 年把蘇迪勒颱風的暴風半徑自 250 公里上修至 280 公里，更可提供數值模式較好的初始場，以降低颱風預報誤差，減少人民生命及經濟損失。

無人飛機改善強度估計

追風計畫對於颱風強度與暴風半徑的重新評估及路徑預報準確度，已有相當不錯的改進。但美中不足的是，僅能提供 7 級風暴風半徑外的資料，還是無法取得近中心的即時觀測資料。因此，在颱風預警與防災應變作業上仍可能出現盲點。

台灣自 1998 年起就曾購入可在劇烈天氣（如颱風、梅雨等）中蒐集氣象資料的無人飛機，更在 2005 年飛進龍王颱風中心，可惜的是未能成功返航。這計畫在 911 恐怖



2008 年辛樂克颱風在 (a) 2 公里及 (b) 6 公里的機載雷達合成圖，紫色實線是飛機飛行路徑，黑色向量是機載雷達觀測到的風場，藍色圓點是投落送。颱風眼及眼牆結構在雷達回波與水平風場中都清晰可見，這是衛星資料較難辦到的。

攻擊後，因美國嚴格管制無人飛機出口而終止，但氣象學家們仍不斷思考如何安全地取得颱風近中心的觀測資料。颶風中心從 2015 年起重新建置無人飛機探空系統，建立本土科學實驗飛機觀測團隊，發展劇烈天氣直接觀測的技術與能力。

無人飛機可蒐集的氣象資料包含氣壓、氣溫、相對溼度、風向、風速及海表面溫度。這團隊曾在 2016 年尼伯特颱風小試身手，進入颱風 7 級風暴風半徑後成功返航。希望自 2017 年起，可順利執行進出颱風中心的觀測任務，並與追風計畫密切配合，蒐集最關鍵區域的氣象資料，做為防災應變、氣象數值預報或模式研發的重要參考資訊。

機載都卜勒氣象雷達

除了前述幾種方法外，是否能再藉由其他方法取得高空的觀測資料呢？1993 年，美國國家大氣研究中心與法國物理暨行星地球環境研究中心合作，發展出「機載氣象都卜勒雷達」(electra doppler radar, ELDORA)，儀器的敏感度與時空解析度都有很大的改善。ELDORA 當時安裝在美國國家科學基金會及國家大氣研究中心的 P-3 飛機上，成為颶風及龍捲風觀測的最佳平台。但這架飛機於 2001 年退役，ELDORA 轉移至美國海軍研究實驗室的 P-3 上，同時增加投落送觀測，持續針對劇烈天氣進行大氣邊界層的觀測。

颶風中心建置的無人飛機探空系統曾在 2016 年尼伯特颱風時進入颱風 7 級風暴風半徑後成功返航。

ELDORA 是全世界唯一的機載、雙波束的氣象研究雷達，飛機機尾處裝載兩片 X 波段（波長是 3 公分）陣列氣象雷達，可解析對流尺度的天氣現象，相當適合用來監測在海面上發展的天氣系統。其觀測原理是飛機在飛行過程中可獲得兩組圓錐狀的觀測資料，因飛行路徑周圍 50 ~ 100 公里範圍內的任何一個位置都有兩個風分量，所以可經由兩波束交會處的徑向速度場，使用雙都卜勒雷達合成技術得到 3 維風場資訊。

機載雷達的空間解析度取決於雷達旋轉速度及飛機飛行速度。一般進行氣象觀測時，飛機的飛行速度約為每秒 130 公尺，而雷達旋轉速度約為每秒 2 ~ 3 圈。因此，空間解析度可高達 300 公尺，已接近地基雷達的標準。

2001 年以後，ELDORA 在劇烈天氣系統監測上提供非常高解析度的雷達與投落送資料。為了蒐集低邊界層的雷達回波與風場的觀測資料，飛機的最佳巡航高度約為 2 ~ 3.5 公里，這也代表僅能蒐集 3 ~ 4 公里高度以下的投落送資料，但已足夠進行劇烈天氣資料的分析與預報。

可惜的是，美國海軍研究實驗室的 P-3 螺旋槳飛機也在 2013 年 1 月退役，ELDORA 暫時失去了表現的舞台。然而，有鑑於過去 20 年間機載雷達對於監測遙遠海面上生成及發展的天氣系統有很大貢獻，美國氣象研究人員都強烈建議儘快找到飛機來維持機載雷達的觀測能量，甚至不排除重新設計新一代的機載雷達。

儘管機載雷達系統的研發相當昂貴且飛機機體改裝不易，但經過數年的討論，美國仍決定發展新一代的機載雷達—機載相位雷達，預計花 7 ~ 10 年的時間，把雷達及其他氣象觀測儀器安裝到 C-130 運輸機上。雖然氣象無國界，我們仍可從美國的機載相位雷達取得資料進行天氣診斷分析，但還是希望未來有機會可建立屬於台灣自己的多功能空中觀測平台。

黃紹欽

國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心
