

運用定體積氣球飛行 進行南台灣低層氣流軌跡分析

林博雄¹ 賴信志² 林清和³ 簡國基⁴

¹台灣大學大氣科學系

²長榮大學通識教育中心

³輔英科技大學環境工程衛生系

⁴中央氣象局

(中華民國九十三年二月三日收稿；中華民國九十三年十月二十七日定稿)

摘 要

本文說明利用一種結合 Vaisala RS80-15G 全球定位衛星無線電導航探空儀的定體積氣球探空載具(CPB)，透過 CPB 所提供之經緯度和高度資料，解析低層大氣氣流軌跡線之方法與觀測實驗結果。本研究在 2002 年冬天到 2003 年春天於南台灣地區空氣污染事件日期間，共進行 26 次有效之 CPB 施放，其中追蹤時間超過 2 小時的樣本計有 15 份，追蹤時間超過 6 小時之樣本計有 6 份，單一個案最長追蹤時間和最遠距離分別是 8.4 小時和 81 公里。在冬季高壓迴流天氣類型之追蹤個案中，CPB 軌跡追蹤觀測顯示南高屏地區 1400~1900 公尺逆溫層以上之氣流場，可以是西北或是東南向，有時此兩種反向氣流場在南高屏地區形成鞍形場而造成短暫靜風之現象，但是逆溫層以下之盛行風則是以西北風為主。在春季鋒面徘徊天氣類型之個案中，南高屏平原地區的低層風場逐日變化相當劇烈，亦曾觀測到西風氣流行經山地引發山岳波之現象。在春季暖濕氣流天氣類型之個案中，可見行經高雄林園石化工業區之低層氣流循高屏溪河道北上，飄移至高屏溪中游之美濃內陸地區，或往東南沿岸地區飄移，並進入中央山脈南端山區等情況，此觀測結果與先前利用地面污染物觀測網資料推估氣流傳輸擴散之研究結論一致。比較 CPB 氣流追蹤觀測資料和 MM5 中尺度天氣模式軌跡資料，發現 CPB 觀測結果比數值模式產品能更合理反應地形效應。

關鍵詞：定體積氣球、氣流軌跡、中尺度數值模式

一、前言

現階段的中尺度數值天氣模式的精度和時空解析度，已經大幅提昇學術研究深度和作業應用層面，比如都市污染空氣長程傳輸軌跡判斷，以及劇烈天氣系統三度空間結構和時間演化之分析等方面，但是數值模式產品仍然需要觀測個案資料加以驗證其物理參數化的細節。傳統的地面氣象監測變數和氣球探空都是以尤拉(Eulerian)座標來驗證模式產品，這類資料也比較容易植入數值模式的資料同化程序。相對而言，跟隨大氣環流移動的拉格朗日(Lagrangian)觀測資料對於數值模式資料同化引用較為困難，但是對於大氣環流的四度空間結構則有直接的觀測證據。

二次世界大戰末期(1944 年 11 月到 1945 年 4 月)，日本曾經釋放約 9000 份熱氣球炸彈，由東京起飛利用冬季西風噴流橫越北太平洋攻擊美國本土，其中約有 1/9 的熱氣球成功抵達北美洲境內。1960 到 1970 年代，美國和歐洲也開始嘗試利用定體積氣球(Tetroon)，來進行綜觀尺度的大氣環流觀測 (Lally et al., 1966; Morel and Bandeen, 1973)。1973 年美國科學委員會在美國德州建立國家科學氣球部門(National Scientific Balloon Facility, NSBF)，專門提供和操作 400 英尺高度巨型塑膠氣球協助科學界進行高層大氣化學和電離層研究探測平台(platform)。NSBF 自 1987 年後改由美國太空航空總署(NASA)繼續運作。Tetroon 平台也被應用在低層大氣環流觀測，1955 年起一些學者分別利用飛行船、WSR-57 雷達在美國洛杉磯城市進行空氣污染流場追蹤實驗，1969 年秋天美國環境保護署首度利用定體積氣球搭載航空器詢答機(transponder)，配合該城市北方山丘 760m 高度的 M-33 雷達進行一個月 105 次

的 Tetroon 觀測實驗，雷達以 10 秒鐘間距紀錄氣球的方位角和仰角來推算其移動軌跡，氣球則在城市 5 處地點施放來探討都市尺度海陸風環流的日夜變化(Angell, et al., 1972)。1975 年夏天法國設計的 45 份直徑 2 公尺 Tetroon 在印度洋非洲東岸赤道 Seychelles 島嶼施放，結合 Nimbus-6 衛星進行熱帶海洋大氣邊界層研究(Cadet and Ovarlez, 1976)；1990 年法國和西班牙合作的 PYREX(Koffi et al., 2000)製作 7 公尺高、直徑 0.6 公尺條狀定體積氣球，進行氣團軌跡追蹤觀測；類似研究也在 1999 年阿爾卑斯山中尺度實驗計劃(MAP; Bénéch et al., 2000)，以及印度洋實驗計劃(INDOX)再度被引用於印度西岸都市空氣污染長程傳送的問題 (Ethe, et al., 2002)。近十餘年來，美國海洋大氣總署(NOAA) Air Resources Laboratory 的 Field Research Division 持續發展所謂的 Smart Balloon，分別在大西洋 ASTEX / MAGE (1992)，ACE-1(1995)以及 ACE-2(1997)等觀測實驗進行低層大氣氣團傳輸觀測 (Businger and Johnson., 2000; Johnson et al., 2000)。

1990 年代之前台灣軍方利用每年 5~10 月期間合適之綜觀天氣條件，在金門、馬祖、苗栗和韓國漢城等空飄大隊基地，進行大陸地區空飄傳單和物質的心理作戰(王與劉，1978；葉，1984；梁等，1985)。根據曾經參與空飄作業的官兵描述，這類空飄透明塑膠氣球均由高雄榮民塑膠工廠製作，酬載重量由 50 磅到 400 磅不等，他們依據探空氣球得知當天的大氣垂直環境條件，利用入夜時刻操作施放空飄氣球，飄行高度則在 6000 英尺以下或 30000~100000 英尺之間。這一空飄作業單位和氣球成品都因為海峽兩岸關係舒緩而宣告中止。

綜觀以上所述的 Tetroon 觀測實驗或軍事作業，我們得知定體積氣球觀測平台之耗材和價格優勢遠大於飛機觀測平台，然而定體積氣球的無自主飛行方向、酬載設備呈現上下不穩定搖晃狀態、水平高度控制、回收困難以及氣球研發製作等，都是定體積氣球在學術研究應用層面的瓶頸。1994 年全球定位衛星(Global Positioning Satellite, 簡稱 GPS) 24 顆衛星就位後，衛星群集導航定位體系已經被廣泛應用在生活與科技諸多層面。Vaisala 公司於 1997 年推出的 RS80-15G 系列無線電導航測風(Navigation aid)電探空儀在 2001 年擁有全球 54% 氣球探空市場使用率(Ondras, 2002)，這一平價、輕便又可拋棄式的高時間空間解析度探空設備，解決了過去即時追蹤氣球軌跡所需的雷達目標追蹤設備和定位準確度問題，因此如何利用目前國內幾所大氣科學系現有的 Vaisala 無線電探空設備，來進行定體積氣球軌跡追蹤實驗，就只剩下定體積氣球來源問題尚待解決。

本文利用高雄縣環境保護局「本縣周邊及沿海縱向尺度氣象及探空資料、污染物濃度分析及模式模擬境外移入對本縣空氣品質之影響」研究計劃，規劃國內首次的定體積氣球軌跡學術研究實驗。我們選擇 2002 年冬天和 2003 年春天在南高屏平原地區的微風晴朗天氣條件，假台南郊區長榮大學、高雄郊區第一科技大學、輔英科技大學和高雄林園工業區，進行定體積氣球軌跡施放實驗，並用來探討南高屏地區低層大氣環流特徵。第二節我們將先說明本文個案中的定體積氣球之特徵和操作流程與資料接收，第三節透過三種天氣類型個案來分析這些定體積氣球個案資料，第四節比較討論觀測之氣球軌跡和 MM5 中尺度天氣數值模式等 σ 面軌跡的差異，最後是這

一觀測平台效能之檢討和其應用在劇烈天氣觀測的展望。

二、定體積氣球特徵和操作

傳統探空氣球採用有彈性的橡膠材質充灌氫氣或氦氣，氣球內外的壓力和溫度幾乎一致(又稱之為 zero-pressure balloon)，上升過程中氣球體積隨著空氣密度降低而膨脹，保持著相同的上升浮力，直到氣球球壁厚度無法承受體積膨脹之張力而漲破為止。相對地，定體積氣球採用不透氣無彈性的聚乙烯(Polyethylene)材質製作，地面充灌氫氣後使其淨舉力大於零而上升，氣球內的壓力和環境氣壓差距隨著氣球高度增加而增加(又稱之為 super-pressure balloon)，到達某一高度後因為氣球體積固定無法持續擴大，使得氣球淨浮力和氣球毛重與酬載重量相等而停止上升，維持在同一高度水平飄行。聚乙烯由於其來源充足、成本低廉和張力強度足夠，是製作定體積氣球的常見材質，球型立體裁剪和聚乙烯氣球球壁膠合是製作定體積氣球的困難之處，同時其體積大小和毛重兩種因素是決定該定體積氣球可達高度的重要因子，因此不同高度的研究作業需求就要有不同尺寸的聚乙烯氣球。

Hoecker (1981)曾針對球皮 0.05mm、體積 1.05m³ 的 Tetroon，藉由「地面和平移高度的氣壓和溫度已知」的條件下，提供一套 Tetroon 氣體充灌量估計方法來控制 Tetroon 到達高度。通常當 Tetroon 淨浮力 ~ 0 時，我們得知它已經到達最大之平衡高度 H (m)之時，此時的大氣密度約是：

$$\rho_e = \frac{1.295W}{(\rho_a - \rho_g)V} \quad (1)$$

W (kg)是氣球毛重和酬載物品重量總合， ρ_a 和 ρ_g

分別是地面空氣平均密度(1.295 kg/m^3)和充灌氣體密度, V 則是 Tetroon 體積。如果無法事前得知當時大氣垂直探空剖面, 而直接套用美國 1976 年版的標準大氣剖面, 則大氣密度和高度的對應關係是:

$$H = 44329 \times (1 - \text{Exp}(\ln(\rho/1.225)/4.256)) \quad (2)$$

H 的調整需要在 W (反比)和 V (正比)兩參數之間取得平衡。為了操作現場安全, Tetroon 都是採用惰性氣體氮氣(密度 0.179 kg/m^3)來充灌, 因此經由公式(1)和公式(2)我們可以預期 Tetroon 如果要停留在 2000 公尺高度, 則在地面施放時的總重(W)和體積(V)的比例要控制在 0.86。

根據以上的 Tetroon 的特徵和操作方法分析, 作者無法說服台灣本地廠商以合理價錢另闢生產線提供這類型式和尺寸特殊的聚乙烯氣球, 因此本研究經過市場搜尋、飛行測試和成本考量下, 決定改採 TK Innovations Inc.(玩具氣球公司)生產的 Bubble Balloon 來做為定體積氣球的最小單位, 並經由實地施放實驗方式來測試 Bubble Balloon 氣球個數和可達最大高度的關係。每份 Bubble Balloon 淨重 10 克並呈扁平狀, 正面直徑為 54 公分, 側面厚度為 20 公分, 體積約為 30 公升, 以氮氣充填到幾近漲破之前約有 25g 的淨浮力(拉力計測量所得)。一份裝填電池的 Vaisala RS80-15G 全球定位衛星無線電導航探空儀(以下簡稱 GPS-sonde)則有~380g 重量。每一份 Bubble Balloon 充灌不到 10 秒鐘, 三個 Bubble Balloon 繫綁成一束, 再上下串聯數束成為 GPS-sonde 酬載飛行平台(如圖 1), 我們將這些 Bubble Balloon 的群集結構簡稱為 Cluster Polyethylene Balloon(以下簡稱 CPB)。簡而言之, 本研究以 CPB 概念來取代單一大型定體積氣球, 同時根據公式(1)、(2)來推估 Bubble Balloon 數量和預定可達高度之

估計(圖 2)。由該圖中我們預期 14 顆以上的 Bubble Balloon 所構成的 CPB 平台就有足夠升力進行水平飄移。表一每一樣本實際到達最大高度和平移高度仍然變異很大, 這種高度不確定性的原因來自於(1)Bubble Balloon 充填氮氣量(2)繫綁牢靠程度(3)氣球氣閥閉合的品質(4)飛行過程中環境風場造成 Bubble Balloon 彼此的碰撞摩擦而破裂, 等四項因素造成氣球脫離而降低高度, 因此表一的氣球數量都是 14 份以上, 眾數為 18 份。其中的 #7、#11、#15 三份氣球數量偏少的樣本和 #25 氣球數量樣本偏多之樣本, 都是作者原擬進行圖 2 線性函數兩端點的測試, 但是上述四項高度不確定因素之影響和有限經費, 而無法增加樣本數來達成驗證目的。

CPB 所酬載的 GPS-sonde 在地面釋放前先和參考氣壓計、水銀溫度計和乾燥劑盒進行感測器校驗(所謂的 Ground Check), 電力啟動後以每 2~10 秒鐘時間間距經由 $403 \pm 3 \text{ MHz}$ 無線電頻率, 將大氣環境的氣壓、溫度、溼度和風速風向, 即時回傳到 Vaisala GPS-sonde 接收機並解碼產生數位資料; 風速和風向資料是藉由 GPS-sonde 的 Codeless 技術先儲存 GPS Doppler frequency shift 資訊, 下傳給地面接收機再經由 code-correlation 和內建 GPS 衛星軌道資訊來計算求得(Wahrn, 2001), 地面接收機資料顯示軟體顯示 GPS-sonde 和施放點的極座標相對位置, 我們另外也撰寫軟體將 GPS-sonde 的經緯度資料直接標示在地圖的地理座標之上(目前 GPS-sonde 的空間解析度是 100 公尺)。為了延長觀測時間, 我們串聯六份 Ultralife 公司 U9VL-FP 方形 9V 鋰電池取代 Vaisala 原廠泡水化學電池, 以便延長 GPS-sonde 原有的 2 小時電力到 4 倍之多。同時為了增強地面接收機和空中飛行的 GPS-sonde 無線電通聯效果, 接

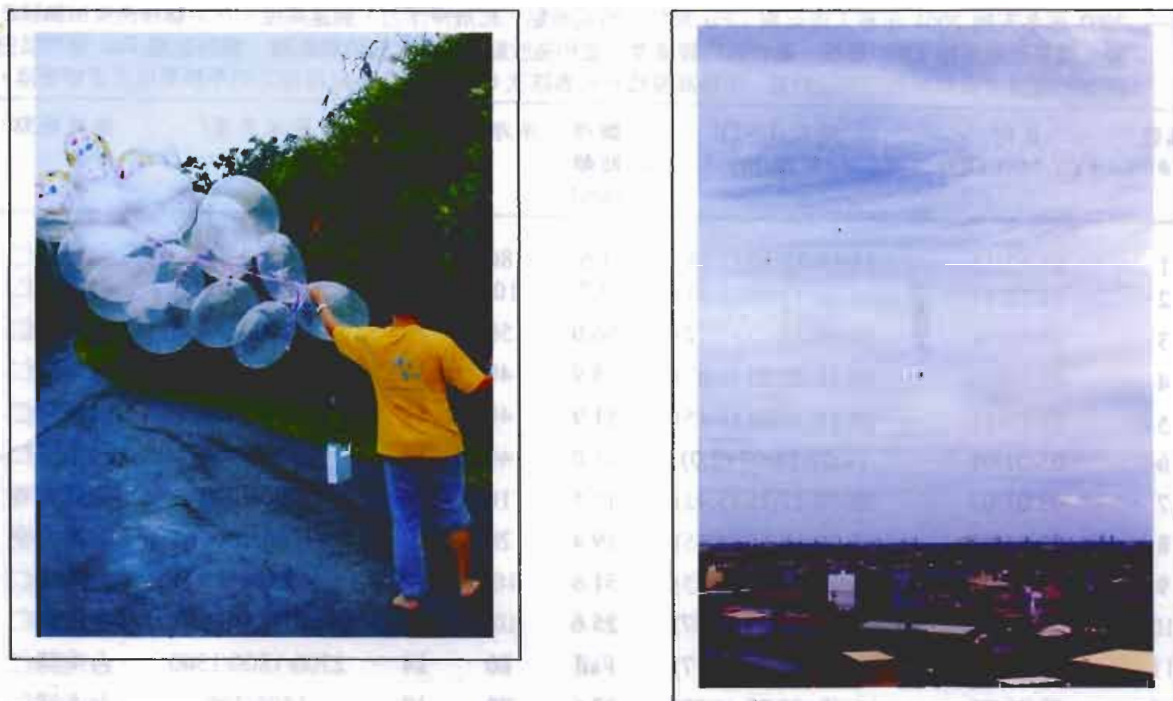


圖 1 (左)Bubble Balloon 和吊掛 Vaisala RS80-15G GPS-sonde 施放情形(2003 年 4 月 23 日墾丁雷達站)。(右)CPB 空中飛行(2003 年 5 月 4 日高雄林園鄉)。

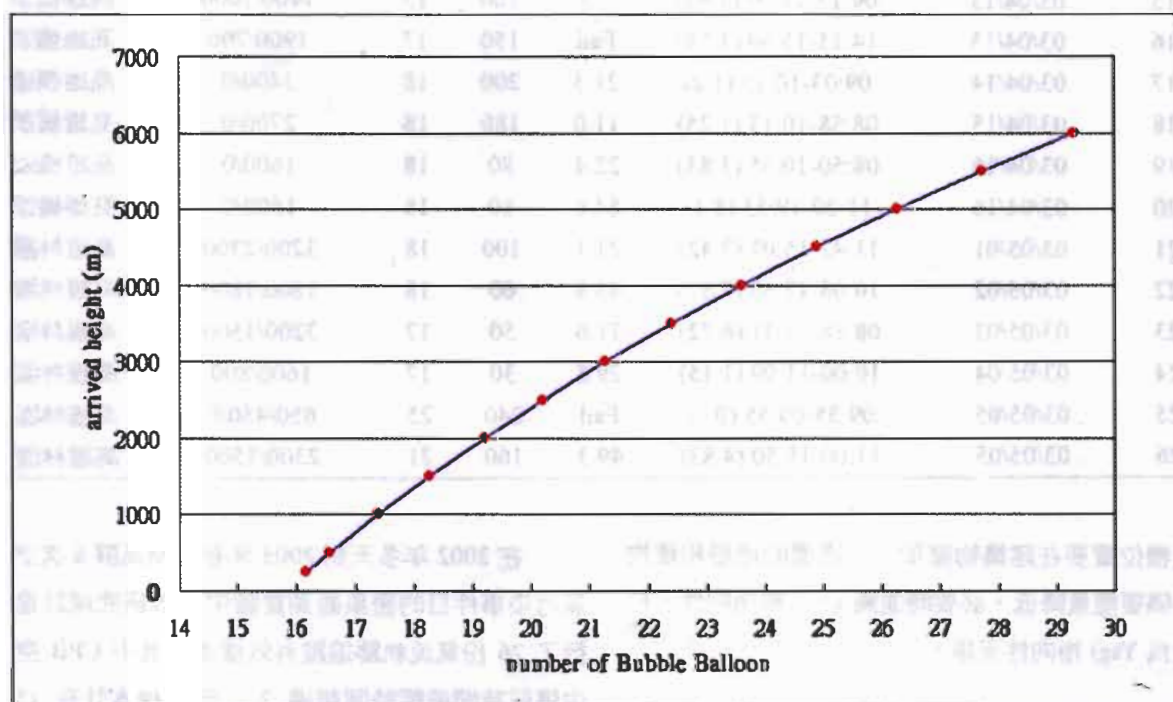


圖 2 Bubble Balloon 個數和可達高度的對應關係。

表一 2002 年冬天到 2003 年春天南台灣 CPB 施放之時間地點、起飛淨浮力、到達高度、水平飄移高度與飄移距離；飄移距離是指 CPB 最後一筆有效的經緯度位置和施放點之間的大圓直線距離，飄移距離 Fail 是指該份探空的經緯度資料無效而無法計算。平移高度為 0 代表該次 CPB 沒有達到保持穩定的平移高度而直接墜落。

編號 #	日期 (YY/MM/DD)	時間(LST)/ 間距(hr)	飄移 距離 (km)	浮力(g)	氣球 個數	最大高度/ 平移高度(m)	施放地點
1	02/12/13	11:15-12:50 (1.58)	1.6	80	19	6000/0	台南歸仁
2	02/12/13	14:20-17:00 (2.67)	3.7	100	21	2800/0	台南歸仁
3	02/12/14	10:10-12:17 (2.12)	56.0	50	20	2800/0	台南歸仁
4	02/12/14	14:51-21:55 (7.07)	75.9	40	18	3500/2000	台南歸仁
5	02/12/15	09:15-16:24 (7.15)	51.9	40	18	2500/1000	台南歸仁
6	03/01/01	14:07-16:07 (2.0)	81.0	40	18	3500/3500	台南歸仁
7	03/01/02	08:50-12:15 (3.42)	15.5	10	15	1000/1000	高雄大寮
8	03/01/02	17:30-18:57 (1.45)	19.4	20	17	1500/1500	高雄大寮
9	03/03/27	16:00~18:45 (2.75)	51.6	100	18	2800/0	台南歸仁
10	03/03/28	12:40~14:20 (1.67)	25.6	100	17	1000/800/1400	台南歸仁
11	03/03/29	08:20~12:30 (4.17)	Fail	80	14	2700/1800/1500	台南歸仁
12	03/03/29	13:58~18:21 (4.38)	27.6	70	17	1500/400	台南歸仁
13	03/04/12	09:20-10:30 (1.17)	9.7	40	19	1200/700	高雄橋頭
14	03/04/12	13:30-20:30 (7.0)	20.6	90	18	1800/200	高雄橋頭
15	03/04/13	09:13-11:09 (1.93)	7.3	100	15	1400/1000	高雄橋頭
16	03/04/13	14:15-15:50 (1.58)	Fail	150	17	1900/700	高雄橋頭
17	03/04/14	09:03-10:15 (1.2)	21.3	200	18	3400/0	高雄橋頭
18	03/04/15	08:58-10:13 (1.25)	11.0	180	18	2700/0	高雄橋頭
19	03/04/16	08:50-10:35 (1.83)	22.4	80	18	1600/0	高雄橋頭
20	03/04/16	11:29-19:53 (8.4)	64.6	80	18	1600/0	高雄橋頭
21	03/05/01	11:42-15:07 (3.42)	21.1	100	18	3200/2300	高雄林園
22	03/05/02	10:08-17:30 (7.37)	43.8	60	18	1800/1800	高雄林園
23	03/05/03	08:58-15:41 (6.72)	71.6	50	17	3200/1500	高雄林園
24	03/05/04	10:00-11:09 (1.15)	29.8	30	17	1600/800	高雄林園
25	03/05/05	09:35-09:55 (0.5)	Fail	240	25	650/450/0	高雄林園
26	03/05/05	11:00-15:50 (4.83)	49.3	160	21	2300/1500	高雄林園

收機位置要在建築物屋頂上，周遭的地形和建物阻隔要儘量降低，必要時並將 Omi 無指向性天線改為 Yagi 指向性天線。

三、個案觀測分析

在 2002 年冬天到 2003 年春天南高屏 6 次空氣污染事件日的密集觀測實驗中，本研究總計進行了 26 份氣流軌跡追蹤有效樣本，其中 CPB 空中停留時間追蹤時間超過 2 小時的樣本計有 15 份，超過 6 小時飛行的樣本則有 6 份，這些個案

施放的細節參見表一，單一個案最長追蹤時間和最遠距離分別是 8.4 小時(樣本#20)和 81 公里(樣本#6)。本節以表一之中三種造成南高屏地區空氣污染事件日的天氣個案，簡要描述每一個案之天氣環流型態以及透過 CPB 施放所進行低層大氣環流軌跡分析的細節，至於邊界層的氣象與污染物濃度變化的垂直剖面，Lin et al. (2004)已經有詳細分析，本文不再贅述。

(一) 冬季高壓迴流天氣型態

2002 年 12 月 13 日到 15 日綜觀地面天氣圖顯示，這三天屬於大陸冷高壓自東海北部東移出海、強度逐漸減弱的綜觀天氣型態，台灣附近地面風場變化，隨著高氣壓東移由東北風(13 日)轉為偏東風(14 日)再轉為偏東至東南風(15 日)。雲層集中在迎風面之台灣北部及東半部海面，嘉南地區則處於中央山脈地形之背風面側，天空疏雲並且地面乾燥。850hPa 高空資料顯示，反氣旋天氣系統主宰著台灣附近風向之轉變，溫度場分布也因風場由東北風轉為偏南至西南風而出現回暖趨勢。地面測站觀測資料則顯示南高屏地區三天都無降雨現象，日夜溫差也逐日擴大。

12 月 14 日 14:51 LST (樣本#4)CPB 在台南市東南方郊區長榮大學釋放後以順時針方向盤旋上升，1700~1900 公尺高度出現顯著性沉降逆溫現象；通過這一邊界層後台南東方丘陵地形迴流將 CPB 往海面推出，到達 3100 公尺高度再度遇到海峽吹來的西北風而轉向陸地飄移，CPB 並繼續上升到 3500 公尺，大氣相對溼度降到 10% 以下。之後，CPB 逐漸開始下降高度，並且一度停滯在路竹上空 3000 公尺高度處，隨著天黑陸地氣溫開始下降，2000~3000 公尺高度東南風增強，CPB 轉向向北飄移到台南市區上空後，高度逐漸下降到 1800 公尺並加速朝向台灣海峽飄移，到

達東吉島附近因電力消失而傳輸訊號中斷(圖 3)，距離施放點約是 76 公里之遙。

12 月 15 日 CPB 再度於 09:15 LST 釋放(樣本#5)，首先朝向南方飄移上升，近地層 300 公尺高度有一顯著輻射逆溫和水汽梯度，CPB 呈現 Ekman spiral 的順時針盤旋上升現象，在離地 1400 到 1800 公尺高度之間探測到第二道溫度逆溫層，CPB 通過逆溫層後被顯著的向岸風(西風)加速吹往東方山區。CPB 飄移到達台南縣新化鎮丘陵山區上空後可能因為某一 Bubble Balloon 破裂或掙脫，再度以逆時鐘方向由 2500 公尺下降高度回到 1000 公尺，之後 CPB 持續以 1000 公尺高度緩慢向台南高雄海岸方向飄移；13:00LST 左右 CPB 到達路竹鄉海岸線進入台灣海峽，飄移高度持續下降，最後在 16:00LST 左右落海，距離施放點約是 52 公里之遙。值得注意的是，當 CPB 距離台南七股峽角經度線(東經 120.2 度)西方約 10 公里處，海上北風分量顯著增強而轉向南方，顯示陸地地形對於台灣海峽海上低層東北風風場的影響範圍(圖 3)。

綜觀言之，這一個案前後兩天綜觀天氣條件類似，南高屏平原上午時段近地面 300 公尺先有輻射逆溫和水氣顯著垂直梯度，第二層逆溫層發展在 1400~1900 公尺之間。台南高雄測站地面風場呈現北風轉東風的趨勢，第二層逆溫層之下的風場是西北—東北風場，第二層逆溫層之上的風向可以西北風或東南風的反向風場。由 12 月 14 日下午 CPB 一度在路竹上空停滯不動的現象，我們懷疑經由台灣海峽南下的氣流和繞行中央山脈折向往北的迴流，構成台南高雄上空短暫的鞍形風場，隨後因為東南風強度增強、逆溫層高度下降而驅駛 CPB 飄向東吉島。上述現象在 12 月 15 日下午的低空並未出現，因此我們推測東北季風

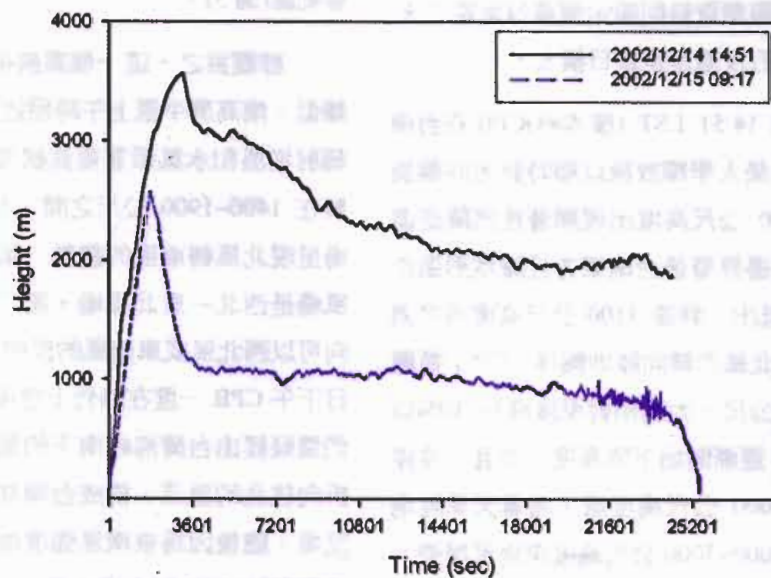
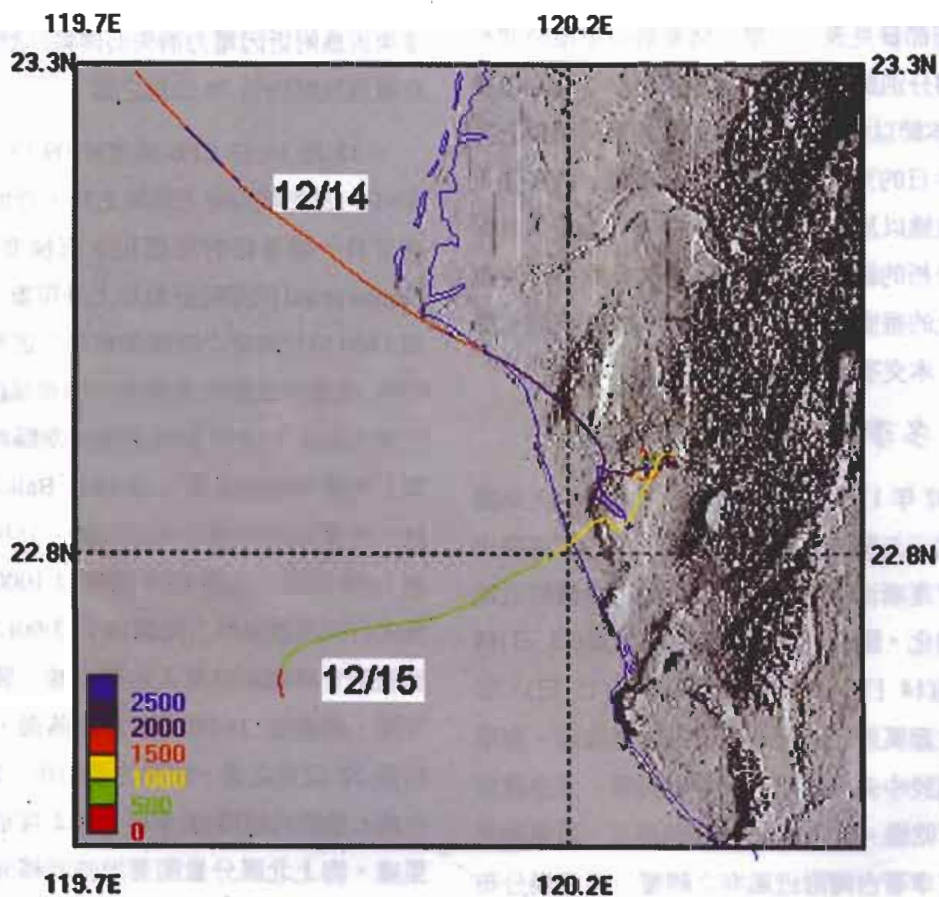


圖 3. 2002 年 12 月 14~15 日 CPB#4 和 CPB#5 的水平軌跡(上)和時間-高度變化圖(下)。

行經台灣東岸的高壓迴流僅出現在 1400~1900 公尺逆溫層之上，而行經台灣海峽抵達南高屏平原的流場反應在西風帶高度到地面的空間，但是南高屏平原地區西風帶到逆溫層之間有可能出現東南風的高壓迴流或鞍形場靜風現象。

(二) 春季鋒面徘徊天氣型態

這一個案由 850hPa 綜觀天氣圖分析的觀點來看，南高屏地區在 3 月 27 日位於福建廣東沿海低層風切線擾動之東南側，3 月 28 日風切擾動系統在台灣北部海面形成微弱鋒面系統，並在 29 日北移或消失，台灣地區低層風場全面轉為西南風系。3 月 27 日 16:00LST(樣本#9)我們觀測到 CPB 由台南長榮大學釋放後，低層北風分量先將 CPB 推向南方，隨著 CPB 高度增加出現西北風風場，將 CPB 推向高雄縣阿蓮鄉大岡山山脈；CPB 翻越這一山丘地形後下降高度到 1800 公尺，然後順延南北向丘陵地形往南飄移並逐漸下降高度；氣流在高雄市澄清湖北方轉為北風，當 CPB 飛越澄清湖時高度約在 1200 公尺，通過高雄市東側市區後翻越鳳山水庫山丘，並於當日 18:45LST 降落在林園鄉高屏溪出海河口處(圖 4)，距離施放點約是 52 公里之遙。3 月 28 日中午 12:44LST(樣本#10)CPB 仍然由台南長榮大學釋放，低層氣流將 CPB 由西往東直接吹向台南縣關廟和龍崎丘陵山區，我們從 CPB 高度的時間序列得知氣流軌跡呈現類似邊界層氣流爬越山丘的上下起伏震盪現象；CPB 在第一小時有一次 700~1100 公尺落差的上下震盪，第二小時有二次 300~800 公尺落差的上下震盪，在進入高雄縣六龜鄉中央山脈西側時 CPB 隨著地勢升高到 1500 公尺後再度下降，最後因無線電訊號阻隔而在 14:20LST 訊號中斷(圖 4)。3 月 29 日南高屏地區全面吹拂南風，CPB 在 13:54LST(樣本#11)首先朝北方飄移上升到 1500

公尺，二小時之後因不明原因下降高度到 400 公尺，到達台南縣烏山頭水庫一帶受到西北風氣流導引折向台南縣玉井鎮山區飄移，最後於 18:20LST 喪失浮力而掉落(圖 4)。

綜觀上述三天南高屏平原地區的低層風場逐日變化相當劇烈，首先 3 月 27 日台灣南部可能位於福建地區東西走向鞍形場東南側而有北風分量，3 月 28 日鞍形場移到台灣北部而有西風分量，之後鞍形場消失而轉為南風。三天三種完全不同 CPB 軌跡型態顯示中小尺度地區性低層氣流走向的複雜變化，同時我們更在 3 月 28 日獲得一次寶貴的氣流穿越南北縱向山丘而呈現山岳波上下震盪的現象(圖 4)。

在邊界層的溫濕剖面探測上，3 月 27 日黃昏 CPB 飄移通過大高雄地區時，溫度和水汽剖面在 400 公尺高度都有顯著的混合層頂部現象；3 月 29 日 08:30LST 台南地區則在 600~800 公尺之間出現溫度逆溫和劇烈水汽垂直梯度。至於 3 月 28 日中午時刻，逆溫和水汽垂直梯度發生高度可能升高超過 850 公尺以上，由於 CPB 往東爬越山丘到達 840 公尺左右後就開始下降高度，因而這段垂直探空剖面並未發現逆溫和水汽劇烈梯度。彭(1994)利用 1987 年 TAMEX 期間的氣球探空曲線資料和 Holzworth 法推估台灣地區混合層高度的日夜變化，從 439 公尺(8:00LST)、870 公尺(14:00LST)到 536 公尺(20:00LST)不等，我們在這三天的清晨、中午和黃昏時刻所觀測到的溫度或水汽混合層高度數值，也呈現類似的結果。

(三) 春季暖濕西南氣流天氣型態

5 月 2 日大陸微弱高壓環流東移出海，5 月 3 日高壓脊線由日本東方海面延伸到台灣，大陸華中冷鋒系統呈現滯留，台灣東方海面風場逐日由偏東風轉變為偏西南風，地面氣溫回升，華南

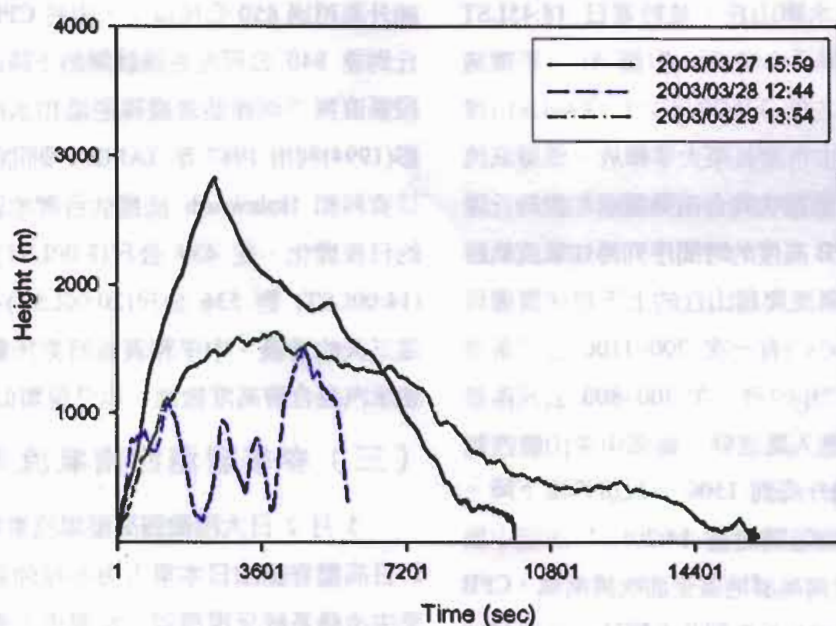
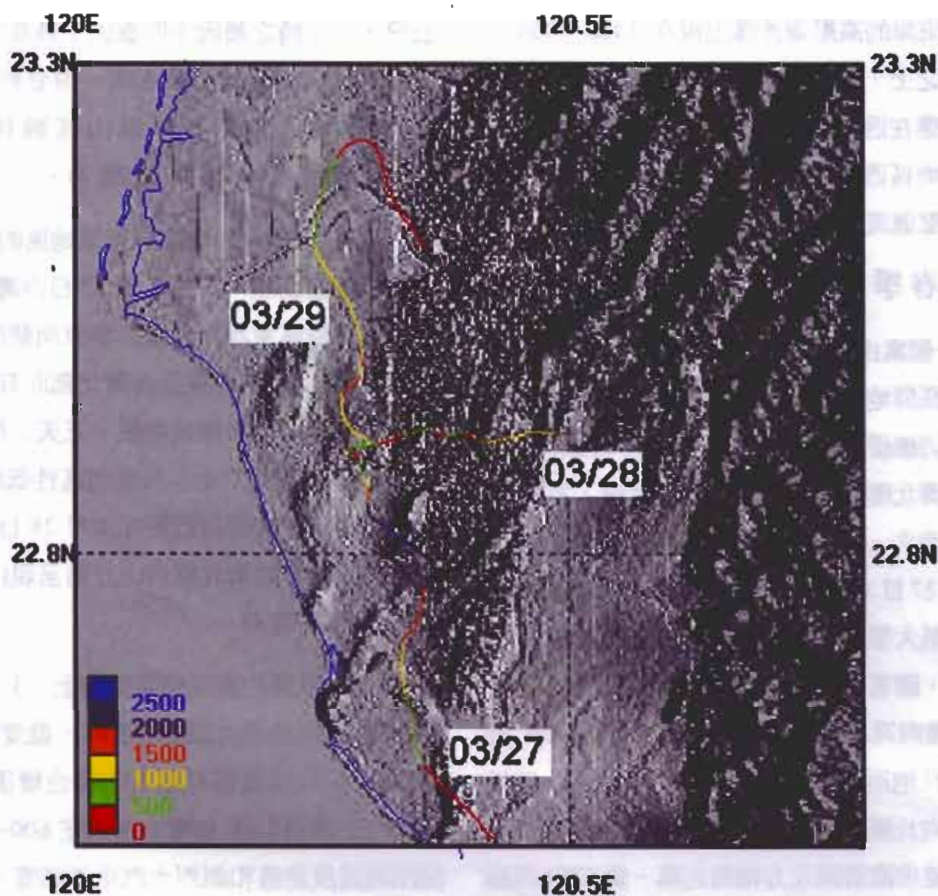


圖 4 2003 年 3 月 27~29 日 CPB#9、CPB#10 和 CPB#12 的水平軌跡(上)和時間-高度變化圖(下)。

低層大氣西南風低層噴流伴隨潮濕暖舌，由南海延伸到南高屏地區上空。5月2日10:08 LST (樣本#22)CPB 由高屏溪河口的林園鄉升空後直接朝向西北方的高雄市區攀升到 1700 公尺，這段溫度和水汽垂直剖面都在 500 公尺有一不顯著垂直梯度，顯示清晨形成的地表輻射逆溫層即將消失。當日白晝 500~2000 公尺之間東南風風速都維持在 2 m/sec 微風狀態，大氣穩定，造成 CPB 保持在 1600~1800 公尺高度之間穿越高雄市區，由壽山上空出海緩慢岡山西方外海飄移，直到當日 17:30LST 電力消失而中斷觀測(圖 5)，距離施放點約是 44 公里之遙。

5月3日地面風向轉為南風，CPB 在 08:58LST(樣本#23)升空後 1200~1400 公尺之間觀測到溫度逆溫和水汽混合頂部的現象；CPB 上升到 3000 公尺最高點後再度因為部分 Bubble Balloon 脫離而造成 CPB 迅速下降到 1500 公尺。當 CPB 通過高雄縣大寮鄉山丘地形時有短暫低層西風將 CPB 吹往屏東市區上空，西風風力減弱後再度沿著高屏溪河床往北飄移，接著由高雄縣旗山、旗山之間穿越山丘地形飛向台南縣左鎮南化一帶，15:41LST 可能因為電力或地形阻擋而訊號中斷(圖 5)，距離施放點約是 72 公里之遙。

5月4日的 CPB 飛行觀測失敗(樣本#24)，5月5日 11:00LST (樣本#26)CPB 五度由林園鄉釋放，這一天低層氣流西風分量異常增強，由每小時的衛星雲圖得知一些無組織性的海上對流雲簇持續由巴士海峽移向高雄、屏東陸地。CPB 起飛後隨即轉向東南朝東港方向飄移，首先攀升到 2300 公尺高度隨後下降到 1400 公尺左右高度穩定飄移，在垂直升空 1200 到 1500 公尺之間 CPB 再度觀測到溫度逆溫現象，而且水汽混合頂部也出現在 1200 公尺。CPB 通過屏東縣東港後稍微

偏東飄向中央山脈南端的枋寮鄉山區；13:00LST CPB 到達了山脈邊緣，氣流受到南北向的山脈地形阻擋而轉向南方海岸線，這段期間 CPB 的 GPS-sonde 氣壓計失靈而喪失高度資料，但是從 GPS 資訊我們持續追蹤到 CPB 往南飄移到屏東縣枋寮海邊，再順轉飄離海岸；從 11:00LST 到 13:00LST 期間，我們由 GOES-W 可見光雲圖(圖未示)觀察到南台灣海上到陸地的對流系統位置演變，預期位於屏東縣中央山脈的對流系統引發的小尺度氣旋環流，首先造成 CPB 軌跡呈現上述東南走向。13:00LST 到 14:00LST 的短暫一小時期間，則是對流胞之間的時間隙時段，屏東海陸交界地區的低層氣流呈現微弱反氣旋走向；14:10LST 左右 CPB 逆向折返朝陸地飄移，起因於另一波對流低壓系統再度抵達海岸線，造成 CPB 由離岸飄移的軌跡突然反向再度折回陸地；15:50LST CPB 深入中央山脈南端山區，訊號受到地形阻隔而觀測中斷(圖 5)，距離施放點約是 49 公里之遙。

總結上述 5月2日到 5月5日西南氣流在南高屏地區的低層風場變化型態，5月2日由於太平洋高壓脊線消退，由巴士海峽吹向高雄屏東陸地的海風風場逐日增強，接近中午時刻的混合層高度已經向上抬升超過 1000 公尺高度，空氣污染警報也隨之解除。白晝海風環流有時受到海上對流擾動系統移入而有劇烈風向變化。我們經由 CPB 軌跡觀察到低層氣流如何循經高屏溪河道，吹向中游的旗山、美濃內陸地區(5月3日)。類似軌跡也發生在 4月16日 11:29~19:53LST(樣本#20)的另一次風切綜觀環境的 CPB 個案(圖未示)，我們發現由高雄縣大寮鄉大發工業區出發的氣流軌跡，可以循著 2000~3000 公尺的西南風抵達中央山脈的屏東縣高樹地區，氣流再由山脈阻隔導引往北進入到高雄縣甲仙山區。5月5日低層氣流則是轉向東南方向的東港、潮州和中央山脈南端

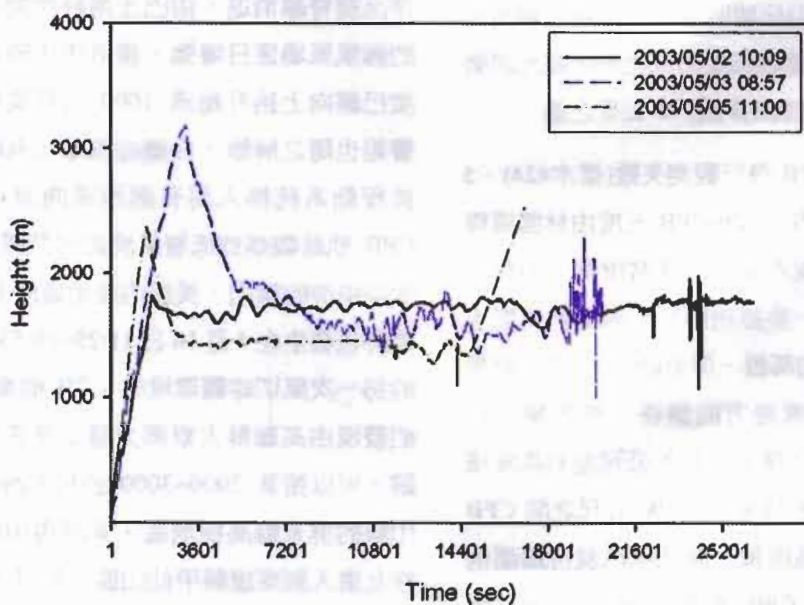
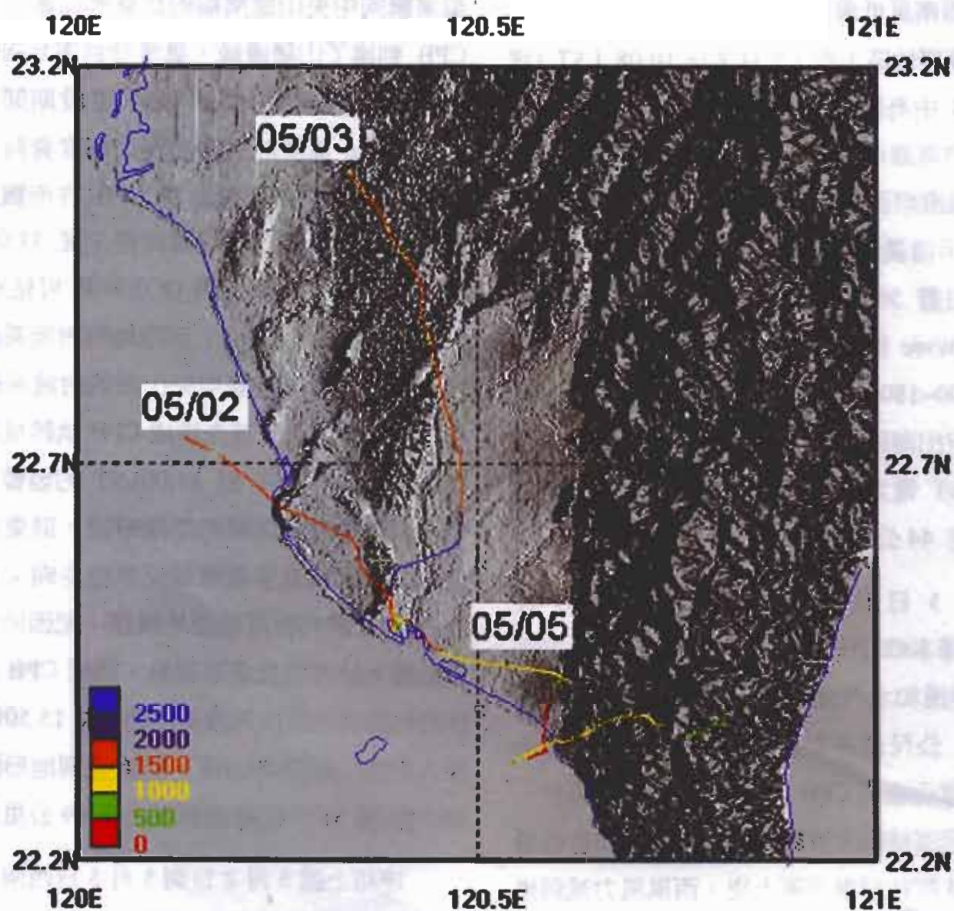


圖5 2003年5月2~5日CPB#22、CPB#23和CPB#26的水平軌跡(上)和時間--高度變化圖(下)。

山區。袁(1999)和鄭(1999)分別於環境保護署「南高屏空氣污染總量管制計劃」群體計劃的密集觀測期間，討論林園工業區、屏東市、美濃和潮州等四處的 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 懸浮微粒濃度變化和污染物成份分析，他們發現污染物成份含有水泥工業排放物，因此推論美濃和潮州兩地的高污染現象應是由高雄和屏東市區傳送現象所造成，這一地面污染物分析和本研究 4 月 16 日、5 月 3 日和 5 月 5 日的氣流軌跡觀測結果不謀而合，甚至我們預估大發和林園工業區空氣污染物可以傳送到中央山脈東南端甲仙地區，以及中央山脈南端高雄台東交界山區。

四、氣流軌跡觀測和數值模式預報場之比較

為了進一步探討 CPB 觀測平台的氣流軌跡觀測方法的可用性，本文利用中央氣象局和美國 NOAA 預報技術實驗室(FSL)合作的有限區域模式所產生的 2003 年 5 月 2~5 日四天的 00:00UTC 初始場資料，來啟動 PSU-NCAR MM5 Version 3.5 的非靜力中尺度天氣數值模式(以下簡稱 MM5)，然後以模式每小時預報場來獲得 12 分鐘時間間距的 Forward 氣流軌跡線，以便和 CPB 觀測軌跡進行比較分析。MM5 模式採用水平解析度分別為 9 公里與 3 公里之二層巢狀網格，垂直為 30 層沿地形起伏之 σ 座標層，地形資料引用美國地質調查資料庫的全球 2' 經緯度解析度資料(約 3.6 公里)，模式外層和內層的網格點配置分別是 $153 \times 141 \times 30$ 及 $151 \times 151 \times 30$ ，積分時間步長(time step)各為 27 秒與 9 秒，內外層網格採用 Two way nesting 功能，使積分結果相互回饋。模式的邊界條件方面，側邊界使用 relaxation/inflow-outflow 計算法；下邊界海溫部分使用 NCEP 日海溫資料；

上邊界則應用輻射邊界條件，以減少波動能量反射回模式內部(Jian et al., 2003)。2003 年 5 月 2~5 日四天南高屏地區都無降雨現象，因此 MM5 模式積分過程不採用積雲參數化，直接使用 Schultz 微物理過程(Schultz, 1995)，積分過程並利用淺積雲對流參數化，模擬不降雨之淺對流系統。行星邊界層參數化採用 MRF 法，其為改良自 NCEP MRF 模式中之邊界層參數化(Hong and Pan, 1996)，適合進行高解析之 PBL 模擬。地面層使用五層土壤模式(5-layer soil model)，輻射參數化則使用較高效率之 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model, Mlawer et al., 1997)計算。

圖 6 是 MM5 模式分別在 5 月 2、3、5 日三天之中，針對 CPB 觀測時段和飄移高度的氣流軌跡模擬結果，5 月 2 日模式推估的氣流軌跡在林園工業區 20 公里範圍內和 CPB 實際觀測軌跡有明顯差異，但是模式對於高雄外海的東南風場特徵仍然有正確掌握。5 月 3 日數值模擬氣流軌跡和 CPB 觀測大體吻合，兩者主要差異在於 CPB 行經鳳山市區東方的軌跡轉折現象，模式風場對於高雄大寮鄉鳳山水庫地區高度 200 公尺以下、寬度約 1 公里的山丘地形顯然反應不足。5 月 5 日數值模式掌握了高雄屏東外海低層西風特徵，但是對於氣流抵達中央山脈地形的氣流轉折和枋寮海邊的風向突變轉折等現象則沒有模擬出來。

林等(1999)曾經在環境保護署「南高屏空氣污染總量管制計劃」群體計劃的密集觀測期間，利用 MM5 模式探討南高屏地區的中尺度環流的數值模擬掌握程度，來檢視這一全台灣空氣污染最嚴重地區的氣流軌跡型態，並評估該模式做為「台灣空氣品質模式(TAQM)」氣象背景場的適切性。他們的局部氣流模擬研究工作結論認為，雖然 MM5 模式已經可以模擬出邊界層氣流的主

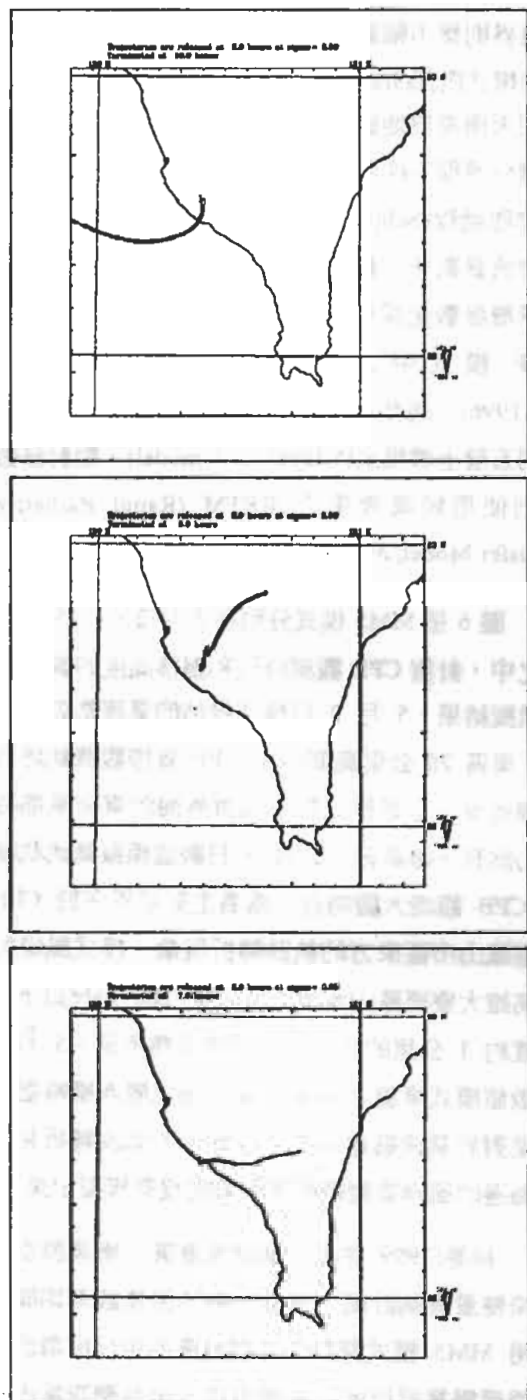


圖6 MM5 中尺度數值模式 Forward 軌跡圖(模式設定參見內文)。(上)2003 年 5 月 2 日 10:00~18:00LST, $\sigma = 0.8$ 。(中)2003 年 5 月 3 日 08:00~16:00LST, $\sigma = 0.9$ 。(下)2003 年 5 月 5 日 11:00~16:00LST, $\sigma = 0.85$ 。

要特性，但也承認由於複雜地形之影響使得該地區局部環流模擬顯得紊亂無序。經由本研究同一地區所進行的氣流軌跡數值模擬和實際觀測比較，我們認為 MM5 數值模式必須將第二層細網格地形解析度 2' 經緯度解析度提高到 30" 經緯度 (約 0.92 公里)，還必須克服數值模式的高頻波頻散問題，才能逼近 CPB 的觀測結果。

五、總結和討論

綜觀以上三節的 CPB 定體積氣球觀測載具之描述和實際個案的氣流軌跡分析，本文是繼軍方心戰空飄氣球作業之後，首度以學術觀點和低成本方法(一次探空耗材含人事成本約新台幣 20000 元)，利用冬季和春季期間南高屏地區空氣污染事件日的綜觀天氣條件，自行發展出 CPB 定體積氣球平台，並驗證其在大氣邊界層研究和空氣污染流場傳送追蹤的實務應用性。經過 26 份有效樣本測試，58% 的 CPB 在空中停留時間追蹤時間超過 2 小時，超過 6 小時飛行完整樣本則有 23%，其中最長追蹤時間和最遠距離個案分別是 8.4 小時和 81 公里。經由 MM5 中尺度模式低層等 σ 面軌跡推算之個案比較，都證明了 CPB 平台結合 GPS-sonde 的現場(in situ)觀測確實有潛在發展之價值。如何更有效和更定量來控制 CPB 平台穩定飄移之高度，克服四項誤差來源(第二節)，是 CPB 平台下一階段應用的焦點，如果我們能獲得經費來向台灣本地廠商訂購特殊尺寸的聚乙烯氣球，則 CPB 高度控制問題和高度不確定性等問題也都可以迎刃而解。美國 NOAA 發展的 Smart Balloon 是透過小型時間控制器與壓力閥等裝置來有效控制氣球飄移之高度，這一做法必須將探空所有設備總重量控制在 2 公斤以下，以避免民航單位飛航安全管制的種種作業限制。相對地，本

文所提出的 CPB 平台連同 GPS-sonde 和氣球毛重總計僅約 500g，因此可以比照一般無線電氣象探空氣球管制方法，事前向民航局提出施放地點和作業過程描述計劃書，施放時向最近的塔台報備即可通過飛航安全干擾考量。

我們預期 CPB 平台和 GPS-sonde 的結合概念所進行的氣流 Lagrangian 追蹤，能有效應用於蘭陽平原、嘉南平原與高屏等地區之海陸風環流觀測，用以驗證各地區空氣污染擴散數值模式之模擬結果。此外，同時若能每隔 100~150 公里距離安排一 Vaisala 接收機，並鎖定相同頻率，則 CPB 亦可應用於台灣西部沿海工業區污染氣團中長程傳輸軌跡之追蹤，此一觀測陣列將有助於台灣西部平原空氣污染物跨區長程傳送問題之澄清。

致 謝

本研究在高雄縣環境保護局「本縣周邊及沿海縱向尺度氣象及探空資料、污染物濃度分析及模式模擬境外移入對本縣空氣品質之影響」研究計劃，以及國家科學委員會防災國家型計劃「利用無人飛機探空進行颱風環流之海上限場觀測(II)」(NSC92-2625-Z-002-012)贊助完成，在此一併致謝。

參考文獻

- 王時鼎，劉廣英，1978：心戰空飄氣象手冊。空軍氣象中心研究報告 015 號。
- 林沛練，黃清勇，盛揚帆，1999：南高屏地區空氣污染總量管制規劃—D2 子計畫「MM5 氣象模式模擬及四維同化」。EPA-88-FA21-03-0012。
- 袁中新，1999：南高屏地區空氣污染總量管制規劃—B1 子計畫「PM_{2.5} 及 PM₁₀ 之濃度與組成特徵」。EPA-88-FA21-03-0012。
- 鄭蔓婷，1999：南高屏地區空氣污染總量管制規劃—E2 子計畫「受體模式空氣污染事件之應用與解析」。EPA-88-FA42-03-F5。
- 彭啓明，1994：台灣北部地區混合層高度的觀測與模擬。中央大學大氣物理研究所碩士論文。
- 葉文欽，1984：台灣垂直區域環流特徵與心戰空飄之關係。空軍氣象中心研究報告 026 號。
- 梁瑞禎，俞川心，張儀峰，葉文欽，1985：心戰空飄作業氣象因素之研究分析。空軍氣象中心研究報告 033 號。
- Angell, J. K., D. H. Pack, L. Machta, C. R. Dickson and W. H. Hoecker, 1972: Three-dimensional air trajectories determined from Tetroon flights in the planetary boundary layer of the Los Angeles basin. *J. App. Meteor.*, **11**, 451-471.
- Bénech B., Berger H., Attié J L., Lothon M., Dartiguelongues B., Terliuc B., Ezcurra A., (2000): First Analysis of the Constant Volume Balloon Data During the Intensive Observation Periods of MAP. *MAP Newsletter*, **13**, 84-85.
- Businger, S. and R. Johnson, 2000: Evolution in the design of a smart balloon for Lagrangian air mass tracking. *Preprint, 11th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the Air & Waste Management Association, January 9-14, 2000, Long Beach CA, American Meteorological Society*, 321.
- Cadet, D. and H. Ovarlez, 1976: Low-level air flow circulation over the Arabian Sea during the summer monsoon as deduced from satellite-tracked superpressure balloons. Part I—balloon trajectories. *J. R. Met. Soc.*, **102**, 805-816.
- Ethe, C., C. Basdevant, R. Sadourny, K. S. Appu, L. Harenduprakash, P. R. Sarode and G. Viswanathan, 2002: Air mass motion, temperature and humidity over the Arabian Sea and western Indian Ocean during INDOX intensive phase, as obtained from a set of superpressure drifting balloons. *J. of Geo. Res.*, **107**, 8023-8026.
- Hoecker, W. H., 1981: A computer program for calculating Tetroon inflation-factor nomographs. *J. App. Meteor.*, **20**, 949-954.
- Hong, S. -Y., and H. -L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322-2339.

- 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.
- Johnson, R., S. Businger and A. Baeman, 2000: Lagrangian air mass tracking with smart balloons during ACE-2. *Tellus*, **52B**, 321-334.
- Koffi, E. N., M. Georgelin, B. Benech, and E. Richard, 2000: Trapped Lee Waves Observed during PYREX by Constant Volume Balloons: Comparison with Meso-NH Simulations. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 2007-2021.
- Lally, V. E., E. W. Lichfield and S. B. Miller, 1966: The southern hemisphere GHOST experiment. *W. M. O. Bulltin*, **15**, 124-128.
- Lin, C. H., Y. L. Wu, C. H. Lai, P. H. Lin, 2004: Experimental investigation of ozone accumulation effects on a wintertime ozone episode at south Taiwan. *Atmospheric Environment*, **38**, 4267-4278.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102(D14)**, 16663-16682.
- Morel, P. and W. Bandeen, 1973: The EOLE experiment: early results and current objectives. *Bull. Amer. Met. Soc.*, **54**, 624-640.
- Ondras, M., 2002: Report by the Rapporteur on Radiosonde Compatibility Monitoring WMO CIMO-XIII/Doc. 5.2.
- Schultz, P., 1995: An explicit cloud physics parameterization for operational numerical weather prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3331-3343.
- Wahrn, J., 2001: Launch of RS90-AG Radiosonde. *Vaisala News*, **155**, 29-31.

Low-level Trajectories Analysis with Constant Volume Balloon Flights at Southern Taiwan

Po-Hsiung Lin¹ Hsin-Chih Lai² Ching-Ho Lin³ Guo-Ji Jian⁴

¹National Taiwan University

²Chang Jung Christian University

³Fooyin University

⁴Central Weather Bureau

(Manuscript received 03 February 2004 ; in final form 27 October 2004)

ABSTRACT

This study describes the diagnosis of low-level wind field with the special sounding platform which is the combination of Vaisala RS80-15G GPS-sonde and the special constant volume balloon (called CPB). During the high-polluted events in Southern Taiwan from 2002 wintertime to 2003 springtime, the geographic position and altitude of CPB were treated as the trajectory of the low-level wind flow. In the 26 tracking cases, 15 cases which had been tracked time over 2 hours were obtained and six of them had over 6-hour flights.. The longest duration and the maximum distance of CPB observations were 8.4 hours and 76 km. CPB trajectories in the cold surge case showed that airflow above the inversion layer (1400~1900m) may change the direction from northwest to southeast. Calm weather can happen temporarily caused by the anti-directional convergent wind, but the northeastern wind below the inversion layer were always significant. In the case of stationary frontal system, the airflow direction changed a lot day by day, and one mountain wave-like trajectory was recorded when westerly wind forced CPB over the mountain region. CPB trajectories during southern warm air flow in springtime showed that polluted air from Kao-hsiung petroleum plants might transport into Meinung mountain region. It might transport along the southeastern beach region and arrived to the end of Central Mountain, too. The previous studies according to ground air-sampling measurements expected the same trajectories CPB had in this study. The forward trajectory produced from MM5 meso-scale model was used to compare with CPB trajectories measurements. We found CPB trajectories had reasonable features to response the terrain effect than model products.

Key words: Constant volume balloon, Flow trajectory, Meso-scale model