

# 應用全球衛星定位導航探空儀探討低層大氣氣團傳輸特性

林博雄<sup>1</sup> 賴信志<sup>2</sup> 林清和<sup>3</sup> 簡國基<sup>4</sup>

<sup>1</sup>台灣大學大氣科學系

<sup>2</sup>長榮大學通識教育中心

<sup>3</sup>輔英科技大學工業安全衛生系

<sup>4</sup>中央氣象局

## 摘要

本文說明 2002 年冬天到 2003 年春天，在台灣地區首度使用串列塑膠汽球(Cluster Polyethylene Balloon, 簡稱 CPB)探空載具，結合 Vaisala RS80-15 GPS 無線電探空儀進行南高屏地區空氣污染事件日的氣團傳輸追蹤觀測。在 34 次氣團追蹤探空個案之中，追蹤時間超過 2 小時、高度維持在 2000 公尺以下的有效樣本個案計有 19 次，單一個案最長追蹤時間和最遠距離分別是 8.5 小時和 76 公里，CPB 飛行之最高高度由當時大氣條件和汽球個數所決定。實驗觀測和 MM5 中尺度天氣模式軌跡分析比對顯示，CPB 觀測方法確實能有效做為低層大氣氣團傳輸之追蹤工具。2003 年 8 月 20 日梵高颱風通過台灣北部近海期間，CPB 由石門鄉海邊施放來測試其在劇烈天氣條件下的觀測能力；觀測實驗顯示，CPB 也能做為劇烈天氣系統之三度空間大氣環境觀測平台。我們認為這種觀測工具將可用來驗證中尺度天氣數值模式的模擬結果。

## 一、前言

1960 到 1970 年代美國和歐洲盛行利用定體積定高度平移汽球，來進行綜觀尺度大氣環流觀測(Lally et al.,1966; Morel and Bandeen, 1973; Sommeria and Cadet, 1974)，類似的水平汽球探空概念也曾應用在美國洛杉磯城市空氣污染流場追蹤(Holzworth et al.,1963; Angell, et al.,1972)；這一觀測方法仍然持續被引用在 1992 年 ASTEX/MAGE 1995 年 ACE-1 和 1997 年 ACE-2 等實驗計劃(Johnson et al.,2000)以及 1999 年印度洋實驗(INDOX)之中的都市污濁氣團長程傳送的探討(Ethe, et al.,2002)。美國海洋大氣總署(NOAA) ARL/ Field Research Division 自從 1992 年以來持續發展所謂的 Smart Balloon 來進行氣團傳輸觀測(Businger and Johnson.,2000)。然而這些定體積汽球都止於實驗性質，雖然其耗材低價優勢遠大於飛機觀測平台，相對地，平移汽球的無自主飛行方向、酬載設備呈現不穩定搖晃狀態、回收困難，以及定高度定體積的汽球高成本研發製作等，都是平移汽球在學術研究應用層面的缺點。

現階段的中尺度數值模式已經大幅昇了其對空氣污染氣團傳輸和劇烈天氣現象時空分布和演變的精度和時空解析度，讓學術研究深度和作業應用層面拓展許多；然而，數值模式產品仍然需要個案式的觀測資料加以驗證。傳統的地面氣象監測變數都是以尤拉(Eulerian)座標來驗證模式產品，這種資料容易植入數值模式的資料同化程序。不過，對於跟隨大氣環流流動的拉格朗日(Lagrangian)觀測資料的詮釋，則能提供大氣環流直覺式的觀察。過去台灣從未嘗試使用平移汽球進行大氣觀測，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，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下，測試運用平移汽球探測南高屏區低層大氣環流的可行性。第二節先說明本文個案中的平移汽球特徵和操作，第三節透過三種天氣類型個案來分析平移汽球資料，第四節比較分析觀測的汽球軌跡和 MM5 中尺度天氣數值模式軌跡分析的差異，最後是這一觀測平台效能檢討和應用在劇烈天氣觀測的展望。

## 二、平移汽球特徵和操作

傳統探空汽球採用有彈性的橡膠材質，汽球體積隨著氣壓降低而膨脹，因此雖然氣球內外氣體密度差異隨高度減小，但是汽球仍有浮力可以持續上升，直到汽球漲破為止。由於聚乙烯(Polyethylene)來源充足、成本低廉和強度足夠，是製作定體積汽球的常見材質。然而國內廠商在市場供需因素下，並無意願生產科學觀測的大型塑膠汽球，本研究購買 TK Innovations Inc.生產的 Bubble Balloon (簡稱 PBB)，每顆汽球呈扁平狀，正面直徑為 56 公分，側面厚度為 25 公分，淨重 15 克，以氦氣充填飽滿後有 20g 淨浮力。一份裝填泡化化學電池的 Vaisala RS80 全球定位衛星(GPS)無線電導航探空儀(以下簡稱 GPS-sonde)則有 350g 重量，因此 18 顆 PBB 才能懸掛浮起一份 GPS-sonde。我們將這些群集 PBB 取名為 Cluster Polyethylene Balloon (簡稱 CPB)，每三個 PBB 為一束，上下串聯六束後再繫綁 GPS-sonde (圖 1)。GPS-sonde 釋放前先用參考氣壓計水銀溫度計和乾燥劑盒進行感測器校驗，繫綁在 CPB 下方後以每 2~10 秒鐘間距經由  $403\pm 3\text{MHz}$  無線電頻率將大氣環境的氣壓溫溼度和風速風向，即時回傳到地面接收機並解碼產生數位資料；風速風向資料是藉由 RS80-15G 內建的 GPS 模組，連續兩筆經緯度資訊(解析度為 100 公尺)換算出 CPB 水平移動速度而求得。

在 2002 年冬天到 2003 年春天南高屏 6 次高污染事件的密集觀測實驗中，總計了進行 34 份氣團追蹤探空個案，其中 CPB 空中停留時間追蹤時間超過 2 小時、高度維持在 2000 公尺以下的有效樣本個案計有 19 次，單一個案最長追蹤時間和最遠距離分別是 8.5 小時和 76 公里。CPB 飛行之最高高度則由當時大氣條件和汽球個數所決定，目前我們並無定量方法可以事前精確決定 CPB 釋放後之平移飛行高度。

## 三、個案觀測分析

### (1) 冬季高壓迴流天氣型態 (12/14~12/15,2002)

民國 91 年 12 月 14 日~15 日 00Z 綜觀地面天氣圖顯示，大陸高氣壓自東海東移並且強度減弱，台灣附近低層大氣風場變化隨高氣壓之東移，由偏東風

(14 日)轉為偏東至東南風(15 日)。南高屏地區處於地形背風面側，天氣疏雲晴朗乾燥。14 日 14:51 LST 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 到達最高高度 3500 公尺，這一高度的大氣相對溼度在 10%以下。CPB 之後開始逐漸下降高度並且在一度停滯在岡山路竹市鎮上空 3000 公尺高度，隨著天黑陸地氣溫開始下降，2000~3000 公尺高度氣流轉為南風和東南風，CPB 先緩慢向北飄移到台南上空後，接著加速朝海峽移動，到達東吉島附近因電力消失而傳輸訊號中斷(圖 2a)。隔日 CPB 再度於 09:15 LST 釋放，首先朝高雄方向飄移上升，近地層 300 公尺高度有一顯著輻射逆溫和水汽梯度；在離地 1400 到 1800 公尺高度之間出現第二道溫度逆溫層，CPB 由下而上呈現順時針盤旋(Ekman Effect)直到通過邊界層後才被顯著的向岸風(西風)加速將 CPB 吹往東方山區。CPB 飄移到達關廟龍崎丘陵山區上空後因為某一 PBB 破裂或掙脫，以逆時鐘方向由 2500 公尺下降高度回到 1000 公尺，之後 CPB 持續以這一高度緩慢向岡山海岸線移出，13:00LST 左右飄移到海岸線並在 16:00LST 左右落海(圖 2b)。在遠離七股峽角約 10 公里的海上我們發現北風分量顯著地增強，顯示了地形對於低層東北風風場的影響範圍。這一個案前後兩天綜觀天氣條件雖然類似，並且在 1500 公尺上下都有溫度逆溫現象，但是下午時段的低層氣流軌跡卻有東南和東北 90 度的差異。

### (2) 春季鋒面通過天氣型態(03/27~03/29,2003)

這個案的雲圖顯示二道鋒面雲系分別在 3 月 27 日黃昏和 29 日清晨快速通過台灣，但都沒有在觀測區產生降水現象。由 27 日 16:00LST 到 18:45LST 的 CPB 軌跡資料來看，鋒面系統後緣的北風綜觀天氣環流配合丘陵山脈地形特徵，導致 CPB 軌跡由台南長榮大學釋放後，向東南方大岡山山脈飄移，接著順延南北向丘陵地形持續南下，並在穿越高雄鳳山市鎮後降落在林園鄉高屏溪出海口溪地上(圖 3a)。28 日在綜觀天氣環流不顯著的條件下，中午 CPB 釋放後是由

西往東直接移入關廟龍崎丘陵山區，軌跡並呈現上下起伏震盪，在進入內門六龜一帶山丘時 CPB 隨著地勢升高到 1500 公尺後再度下降，最後因無線電訊號形阻隔而中斷連線(圖 3b)。29 日上午鋒面前緣條件下 CPB 首先朝北方升高到 1500 公尺，二小時之後因某些 PPB 脫離而下降高度到 400 公尺，到達烏山頭水庫一帶因為風場轉為西北風風系而轉向玉井山區飄移，最後喪失浮力而掉落(圖 3c)。綜觀這三天的嘉南平原風場邊界層風場變化，由於二道微弱鋒面系統通過前後風場的驟變，我們得到三種完全不同的 CPB 軌跡。在邊界層的溫濕剖面探測上，27 日黃昏 CPB 落地前通過大高雄地區時，溫度和水氣剖面在 400 公尺高度都有顯著的混合層頂部現象；29 日 08:30LST 台南地區則在 600~800 公尺之間有溫度逆溫層和水氣集結現象，這可能是鋒前地面輻射逆溫昇高的邊界層殘留跡象。

### (3) 春季暖濕西南氣流天氣型態 (05/02~05/05,2003)

5 月 2 日到 5 日期間大陸高壓環流東移出海，台灣附近風場由偏東風轉為偏西南風，氣溫回升，華南低層大氣有西南風噴流伴隨潮濕暖舌由南海延伸到台灣上空。2 日 10:08 LST CPB 由高屏溪河口的林園鄉升空後朝西北方的高雄市區攀升到 1700 公尺，這段溫度溼度垂直剖面並沒有發現逆溫或混合現象。當日白晝 CPB 持續受到微弱東南風吹拂，緩慢朝岡山外海飄移，直到 7 小時後電力消失而中斷觀測(圖 4a)。3 日風向轉為南風，CPB 在 08:58LST 升空後 1200~1400 公尺之間觀測到溫度逆溫和水氣混合頂部的現象；CPB 上升到 3000 公尺最高點後才再下降到 1500 公尺。在 CPB 在通過大寮鄉山丘地形時有低層西風出現，使得 CPB 往東飄移到屏東市區上空後才再度沿著高屏溪河床往北飄移。15:41LST 可能因為電力或地形阻擋而訊號中斷(圖 4b)。4 日的 CPB 飛行觀測失敗，5 日 11:00LST CPB 再度由林園鄉釋放後，因為西風吹拂而直接飄向大武山脈南端的枋寮山區；在前段垂直升空的 1200~1500 公尺之間仍然觀測到溫度逆溫，水氣混合頂部也出現在 1200 公尺。13:00LST CPB 到達山脈邊緣突然轉向南方飄移直到枋寮海岸線出海，並有地形迴流跡象再轉為離岸飄向外海，約在 02:10LST 左右海風再起，CPB 逆向折返

陸地山區偏移，15:50 進入到山區內陸因訊號阻隔而觀測中斷(圖 4c)。

## 四、數值模式氣流軌跡驗證

為了證明 CPB 這一種觀測平台的可用性，我們透過 FSL/CWB 有限區域模式的 2003 年 5 月 2、3、5 日三天的 00UTC 初始場資料，來啟動 MM5 中尺度天氣數值模式，並以模式每小時輸出值執行 12 分鐘時間間距的 Forward 氣流軌跡分析。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  $\sigma$  座標層，模式外內層的網格點配置為 153·141·30 及 151·151·30，積分時間步長各為 27 秒與 9 秒，二巢狀層間是 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、阻止波動的能量反射回模式內部。本研究 MM5 預報場以晴天無降水的中尺度天氣系統環流演變探討為目標，因此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 5 是模式分別在 5 月 2、3、5 日三天之中的 CPB 觀測時段和高度的模擬結果 比較圖 4a 到圖 4c 我們發現模式在 5 月 2 日釋放點的 20 公里範圍內和 CPB 實際觀測有差異，但是模式對於高雄外海的東南風場特徵充分掌握。5 月 3 日模擬和觀測的主要差異在於大寮鄉的軌跡轉折程度；5 月 5 日模擬結果雖然掌握了西風中尺度特徵，但是對於氣流進入山區的風場小尺度轉折和迴流現象則沒有模擬成功。

## 五、檢討和展望

綜觀以上三節的 CPB 平移汽球觀測載具描述、實際個案的氣流軌跡和邊界層溫濕度的垂直剖面分

析，以及其低成本(一次探空成本在新台幣 10000 元)的優勢，我們相信 CPB 方法能有效應用在大氣邊界層研究和空氣污染流場傳送追蹤的實務應用，但是如何定量控制每一探空觀測個案可以到達最大高度、維持飄移高度，以及延長觀測時間，仍然有待戶外實驗的持續驗證。CPB 是否也可能應用在劇烈天氣(如颱風)環流的飄移觀測？今年夏天我們數度利用颱風通過台灣近岸的時機進行 CPB 觀測的必要改進，主要的問題發生在強風和降雨會使得 PBB 掙脫繫繩和沾水變重而影響浮力，因而造成觀測提早結束。8 月 20 日清晨我們針對梵高(Vamco)颱風通過台灣北部海域時，在石門鄉濱海公路以極輕尼龍漁網(圖 6)來框連所有 PBB，讓 CPB 飄移過程的浮力保持穩定；利用漁網將 CPB 框罩的方法測試結果十分理想，我們相信 CPB 方法將能推廣到劇烈天氣的流場軌跡觀測。

- Angell, J. K., D. H. Pack, L. Machta, C. R. Dickson and W. H. Hoecker, 1972: Three-dimensional air trajectories determined from tethered flights in the planetary boundary layer of the Los Angeles basin. *J. App. Meteor.*, **11**, 451-471.
- 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.
- 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.
- Holzworth, G. C., E. K. Kauper and T. B. Smith, 1963: Some observed low-level air trajectories over Los Angeles, California. *Mon. Wea. Rev.*, **91**, 387-392.
- 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.
- Johnson, R., S. Businger and A. Baeman, 2000: Lagrangian air mass tracking with smart balloons during ACE-2. *Tellus*, **52B**, 321-334.
- Lally, V. E., E. W. Lichfield and S. B. Miller, 1966: The southern hemisphere GHOST experiment. *W. M. O. Bulltin*, **15**, 124-128.
- 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.
- Schultz, P., 1995 : An explicit cloud physics parameterization for operational numerical weather prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3331-3343.
- Sommeria, G. and Cadet, D., 1974: Constant-level balloon flights in the boundary layer: pre-GATE tests and plans for GATE. Int. Trop. Met. Meeting, Nairobi. *Bull. Amer. Met. Soc.*, **2**, 79-83.

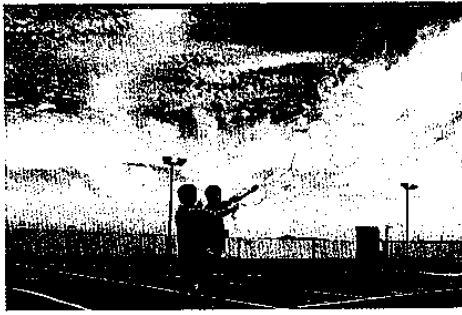


圖 1: CPB 施放 (2003/05/04, 高雄林園)



圖 6: CPB 施放 (2003/08/20, 台北石門)

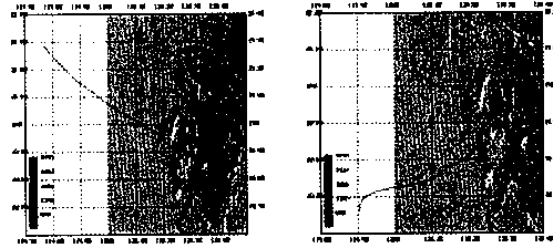


圖 2: CPB 軌跡 (左): 2002/12/14 14:51~20:55LST, 右:2002/12/15 09:15~16:24LST)

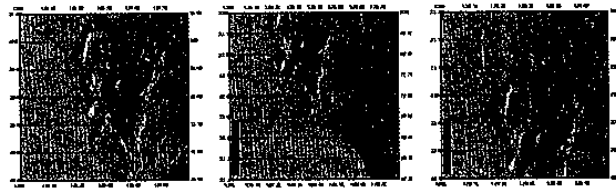


圖 3: CPB 軌跡 (左: 2003/03/27 16:00~18:45LST, 中:2003/03/28 12:40~14:20LST, 右:2003/03/29 08:20~12:30LST)

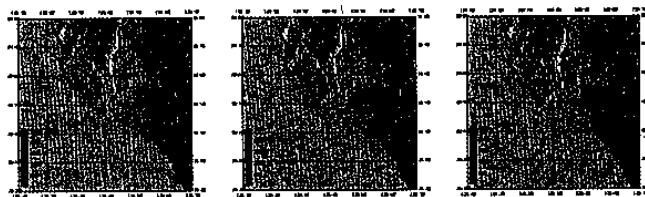


圖 4: CPB 軌跡 (左: 2003/05/02 10:08~17:30LST, 中:2003/05/03 08:58~15:41LST, 右:2003/05/05 11:00~15:50LST)

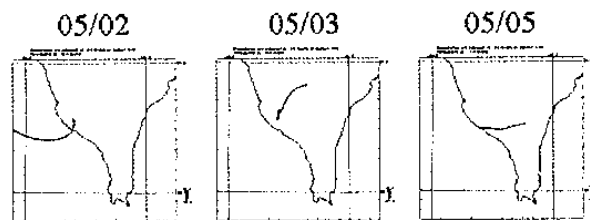


圖 5: MM5 前軌跡分析 (左: 2003/05/02 10:00~18:00LST,  $\sigma=0.80$ 。中:2003/05/03 08:00~16:00LST,  $\sigma=0.90$ 。右:2003/05/05 11:00~16:00LST,  $\sigma=0.85$ 。)

# Air Mass Transportation Tracking in the Lower Atmosphere by GPS

## Balloon Sounding

Po-Hsiung Lin<sup>1</sup> Hsin-Chih Lai<sup>2</sup> Ching-Ho Lin<sup>3</sup> Guo-Ji Jian<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Taiwan University

<sup>2</sup>Chang Jung Christian University

<sup>3</sup>Fooyin University

<sup>4</sup>Central Weather Bureau

### Abstract

This study describes a new air-mass tracking system testing in the high polluted events in southern Taiwan plain from the wintertime of 2002 to springtime of 2003. The authors initiated the idea of cluster Polyethylene balloon (called CPB) which is consisted of 18 or more small commercial Japanese Polyethylene balloons and it lifts one Vaisala RS80-15 GPSsonde. During 34 tracking cases, 19 enhanced cases defined as tracking time over 2hours and its altitude keeps below 2000m height was obtained. The longest time and the maximum distance of CPB observations are 8.5 hours and 76 km away. The maximum height that CPB can reach was controlled by the weather condition and the number of balloon. The experimental data comparing with the trajectory analysis of MM5 numerical model showed that CPB could be used as the tracking tool for lower atmospheric circulation study. During Typhoon Vamco passing the northern coast of Taiwan on August 20,2003, CPB was launched at Shyrmen beach to test its performance in severe weather condition. The result also showed its potential capability in severe weather case. This new platform could be used to validate the simulation of mesoscale numerical model in the future.