

台灣南部地區局部環流之觀測與分析

賴信志¹ 林博雄² 吳義林³ 林沛練⁴ 林清和⁵ 賴進興⁵

¹長榮大學環境資訊研究中心 ²臺灣大學大氣科學系 ³成功大學環境工程系
⁴中央大學大氣科學系 ⁵輔英科技大學環境工程與科學系

摘要

台灣南部地區的空气污染是全國最嚴重的區域，尤其是臭氧污染的問題更是嚴重。以往的研究顯示，此區域之臭氧污染多發生於 10 月至隔年 3 月，臭氧事件日發生時，在綜觀天氣尺度上是屬於微弱的天氣系統，夜間整個區域受大尺度天氣系統主控，多為北風或東北風，白天有海陸風環流之發展，多為西風或西南風，此局部環流對於污染物之傳輸及擴散有重要的影響。

本研究針對台灣南部空氣污染嚴重之高屏地區，於 2005 年 10 月 25 日~11 月 6 日進行海陸風環流之觀測，觀測儀器包含探空、地面測站、測風氣球(Pibal)、剖風儀等，並結合空氣品質之量測，來探討高屏地區海陸風特性與其對於空氣污染傳輸之影響。觀測結果顯示高屏地區之海陸風現象甚為顯著，海風環流之厚度可達 1200m，但是夜間陸風環流厚度僅約為 600~800m。海風轉換成陸風之時間約在晚間 19 LST 點左右，明顯的海風轉換則要到 10~11 LST 之間才發生。而伴隨海風鋒面之入侵，於林園地區有顯著的內部邊界層(ABL)，於中午時之高度約為 400m，此內邊界層之混合作用會造成臭氧濃度之快速上升。

關鍵字：海陸風環流，空氣污染，內邊界層

一、前言

空氣污染之形成機制相當複雜，尤其是臭氧與二次氣膠之形成機制更是一非線性問題，因此造成高濃度臭氧累積與二次氣膠之形成機制至今仍未精準掌握，臭氧污染與懸浮微粒仍是世界各地主要之空氣污染問題(Hindy, 2000)。這些實場研究的結果，讓相關的研究者能更深入的了解光化學反應、前驅物排放與氣象等因素如何造成高濃度臭氧之累積。

過去有關本土臭氧與懸浮微粒特性與成因解析之研究亦相當之豐富，目前對於臭氧污染之特性已有相當程度之掌握，例如南部臭氧污染較北部嚴重，臭氧污染多發生於 9~11 月與 3~5 月(Yu and Chang, 2000)，常伴隨出現於微弱的綜觀天氣系統，尤其是高壓迴流的天氣，此時位於中央山脈背風處的西部與南部地區因通風與擴散能力較差，因此臭氧污染嚴重(Cheng, 2001; Yu and Chang, 2000; 林清和等, 2003, Lin and Chang, 2002)，空氣品質模式已顯示臭氧與其前驅物之跨區傳送也相當重要(張長輝, 2003)。儘管對於污染特性已有相當程度之掌握，但是國內臭氧與懸浮污染之問題並未完全改善，近幾年來呈現停滯，甚至有惡化之趨勢，顯示對於臭氧與懸浮微粒污染之主控機制仍未準確掌控，本土空氣污染之成因仍有待探討。

高高屏地區過去以來，空氣污染嚴重的狀況高居全台首位，因而引起各界之注意。然而造成高屏地區

臭氧與懸浮微粒污染控制成效不顯著之原因相當多，包括：(1) 排放量之問題，例如 VOCs 排放源、排放量與成分之掌握不充分；(2) 缺乏高空之氣象與空氣品質資料，致使氣象與空氣品質模式無法進一步之驗證與率定；根據林等人(2005)之初步研究，高屏地區局部環流對於空氣品質有重要之影響，例如海風環流之發展，可能導致午後混合層高度下降、污染氣團分層等現象。另外，海風與山風可能結合為單一環流，並促使沿海地區排放之污染物可直接傳送到內陸山區形之幅合區，導致內陸地區嚴重之空氣污染；且環流迴流層往往具有相當高的二次污染物，可累積至隔日，此可能是高屏地區形成區域性空氣污染之重要因素。以上問題之初步發現，突顯南高屏地區局部環流對於空氣污染傳輸之重要影響。

然而過去台灣對於南部地區局部環流的型態以及發展並沒有太多的認識，僅靠地面觀測資料並無法完全解析南部地區的氣流特性與熱力環流特徵，因此本研究進行了南部地區的觀測實驗，期盼由三維的空間觀測資料加上連續的時間監測，能解析南高屏地區的環流特性。

二、研究方法

本研究之目標為解析台灣南部地區海陸風之時空結構，並結合氣象與空氣品質觀測數據，來探討高屏地區海陸風特性與其對於空氣污染傳輸之影響，解析高屏地區局部環流與空氣污染關係之結果，可用來探討高屏地區嚴重空氣污染之成因，並以研擬該地區

未來空氣污染之防制策略及具體可行管制措施。

觀測實驗的範圍與配置如圖 1 所示，設計之重點區域主要在於高屏溪出口的林園地區，因為過去林園空氣品質監測紀錄中，發現經常於午前發生高濃度之臭氧污染事件，此事件可能與海風之傳輸有關。本研究於 2005 年 10 月中至 11 月中進行了海陸風環流與空氣品質之觀測。觀測重點內容包括：(1) 利用大氣剖風儀(915 MHz wind profiler)進行垂直剖面之風向與風速之逐時觀測，(2) 每日 4-6 小時進行氣象探空觀測一次，(3) 4 個測風氣球 (pibal) 觀測站，日間每 3 小時觀測一次，觀測地點設計原則，係以高屏溪為海風觀測之縱軸，沿途包括琉球國中、林園工業區、社皮國小與海豐國小等四處，(4) 4 個地面氣象觀測站進行 24 小時連續觀測。而空氣品質之觀測內容包括：(1) 利用臭氧探空儀與氣膠粒徑分析儀進行大氣垂直剖面之臭氧與懸浮微粒濃度之連續觀測，(2) 利用繫留氣球進行垂直剖面空氣污染物之連續採樣分析，(3) 利用飛行器載監測儀器於高屏地區，每日進行三維之空氣品質監測，(4) 進行光化指標污染物 NO_x 、 NO_y 、 HCHO 、 H_2O_2 、 HNO_3 之連續採樣分析。



圖 1 實驗地區之地理位置圖與觀測地點

三、分析與討論

● 地面天氣變數特徵

2005年秋季的觀測時間從10月10日開始，地面觀測與剖風儀觀測一直持續一個多月。在觀測期間南高屏地區的空氣品質狀況經歷了多日的不良狀態，由觀測區域鄰近的四個環保署測站的臭氧監測統計平均圖來看，南部地區大約有一半的時間是處於空氣品質不良的情況。而這段期間，台灣最常出現的天氣狀況，是處於大陸性高壓出海後的環境。由於要與空氣品質觀測結合，所以實驗期間總共進行了三次的密集觀測(IOPs)，其中以IOP2所觀測到的資料最為齊全，故本文以此次密集觀測來進行南部地區局部環流的解析。

IOP2從2005年10月31日開始一直到11月6日為

止，綜觀天氣的特徵為大陸高壓伴隨鋒面於10月30日深夜通過台灣，10月31日起台灣受到高壓迴流的影響，南部地區高溫炎熱。綜觀此IOP2期間之地面風場，近海測站(林園)之日夜變化相當明顯，海風開始發展的時間均為11:00LST以後，夜間風速平均約為1.2~1.5 m/s，日間則為4m/s以上，海風盛行之時間依舊是IOP初期較長，到20:00LST才轉換風向，但是此IOP後期約在18:00LST即轉為離岸風之型式。(圖3)

在溫度方面，林園站在IOP2期間的溫度日夜與地面風場一樣變化明顯。非常特別的是，在每天1030LST之後，都會有一個溫度下降，濕度增高的變化，維持的時間相當短暫，但是配合風場的轉變來看，可以看出海風侵入的證據。尤其在觀測期間，後期(11月4日)溫度超過30C，當日12:00LST風向轉變時，溫度略為下降，溼度上升，亦為明顯海風影響之證明。

Time series of averaged Max. O₃ Concentration by 4 stations (Ping-Dong, Lu-Yuan, Da-Liao, Chao-Chou)

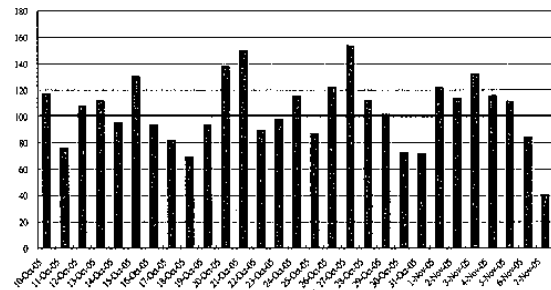


圖2 觀測期間環保署所屬屏東、林園、大寮、潮州四個測站之臭氧監測平均值。

至於靠近內陸的海豐站社皮站之風速，11月1日~5日之間夜間風速不超過0.5m/s，風向初期大約在1100LST轉成向岸風，而後期到1200LST以後才轉變，與林園站不同的是，其海風環流可以持續到2000LST以後，在整個IOP2期間，日間最高風速為2.5m/s。而內陸的測站自11/1日後，量測到之氣溫均超過30°C，甚至到達32°C，因而相對之溼度亦相當低(40%~50%)，日夜溫差高達9°C，配合風向變化的過程，其溫、溼度相對之變化不若海岸林園站明顯。IOP2出海的綜觀條件下，海陸風非常顯著，近岸之測站風速較大，愈往內陸風速愈小，海風開始影響的時間依環境條件的不同而有變化(0900LST~1200LST)，影響間亦有不同，而風場轉變的過程中，溫度降低，溼度升高的情形，顯示有海風鋒面(sea breeze front)的經過，對於邊界層的調節應有一定的影響。

● 海陸風環流垂直結構

大氣剖風儀自2005年10月10日起，架設於林園工業區附近開始展開一個月之觀測，剖風儀依發射功率之不同，觀測資料分成兩種類別：(1) high mode，垂直空間解析度較低，間隔均為235m，但能觀測之高度較高，約可達10km左右。(2) low mode，垂直空間解

析度高，間隔約為105m，但僅限於低層大氣，約5km以下。由於海陸風環流是由邊界不同所引發，要解析垂直的結構需要比較精密的空間解析度，因此本研究以使用low mode資料為主。圖4為IOP2期間量測垂直風場所得之時序圖，配合密集觀測階段的進行，可以得到下列之特性：(1).1500m~2000m之間有一個非常明顯的風向轉折區，轉折區下方在日間多為偏西風，其上則為西風或東風依環境系統而有所不同。

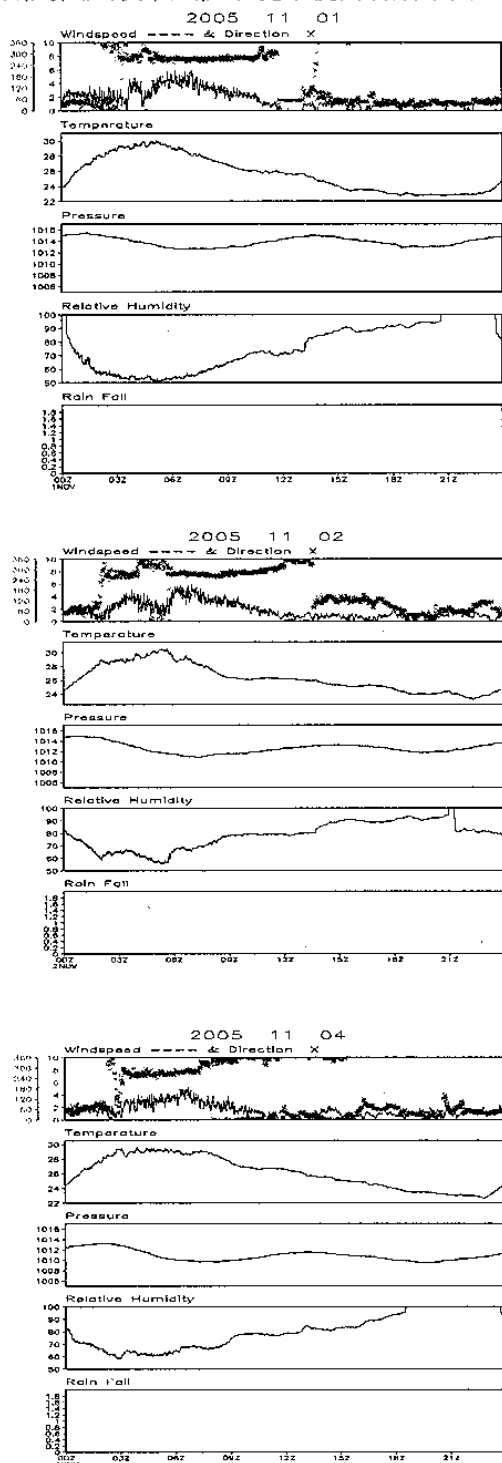


圖 3 密集觀測 IOP2 期間，海邊測站(林園)所量測之地面天氣變數。

(2).1000m以下有明顯之日、夜間環流變化顯示1000m以下為海陸風環流主控之區域，而與環流之上偏西風的情形就形成了三層風場轉折的情況。(3).局部環流盛行時，大氣中溼度偏低，造成較高處之電波回訊不佳，無法求得風場資料。。綜合剖風儀在觀測期間所觀察局部環流(ie海陸風)的垂直演化過程，從圖4來分析，可得到下列之特性：(1) 海風環流約從 0900 LST 開始發展，高度約在500m左右，隨著地表溫度增高，環流發展的高度漸次發展到約800m~1000m左右，下午 15:00LST~16:00LST發展到最強盛。(2) 夜間環流與日間在垂直分布上剛好相反，低層為離岸風，高層為向岸風，環流厚度約只有250m，從18:00LST開始形成，隨溫度之下降漸次向上發展到約500m之高度至次日清晨為最高。

● 海陸風環流的空間演變

高空風(pibal)氣球量測之結果，可以提供海陸風環流空間演化與時序轉變之間非常清楚的結果，此次實驗共計3次IOP，每日施放時間為05:30、08:00、11:00、14:00、17:00LST，架設四個站，地點分別與地面測站相同，圖5為11月03日於實驗觀測區域日間高空風之時空分布情形。

從地面觀測資料分析可知，IOP2高屏地區之溫度相當高(>30°C)，因此可檢視由於地表加熱差異效應，所產生之局部環流的發展。在IOP2中，陸地上之測量發現，岸邊之陸風環流發展較高，林園站為500m，社皮與海豐站則只有300m左右，同樣0800LST時，海風勢力正在建立，200m以下(小琉球與林園站)還是呈現離岸風的形態，但是社皮與海豐則呈現微弱之向岸風，1100LST時，小琉球站之海風環型態尚未建立完全，而林園至海豐等內陸站海風環流已然成形，當天1100LST海風之厚度約為700m(林園)，600m(社皮)，500m(海豐)，隨時間慢慢向上延伸，最後發展之厚度約為800m，而迴流之高度約在1200m左右。

測風氣球量測海陸風環流的結果發現，高屏地區海風的厚度會隨地表溫度的增加而增高，且會隨著離岸邊的距離而在時間演化上有延遲現象。海風環流的厚度約在500m~800m之間，迴流高度可達1200m環流轉變的時間在0800LST到1100LST到之間，1700LST/後才轉換成陸風環流。

陸風環流的厚度約在200m~400m之間，且陸地上之環流厚度較低，迴流約可達600m~800m，由測風氣球觀測之結果，可清楚看出高屏地區環流變化的基本架構，若能配合模式模擬，應可將局部地區的環境氣流場描述得非常清楚。

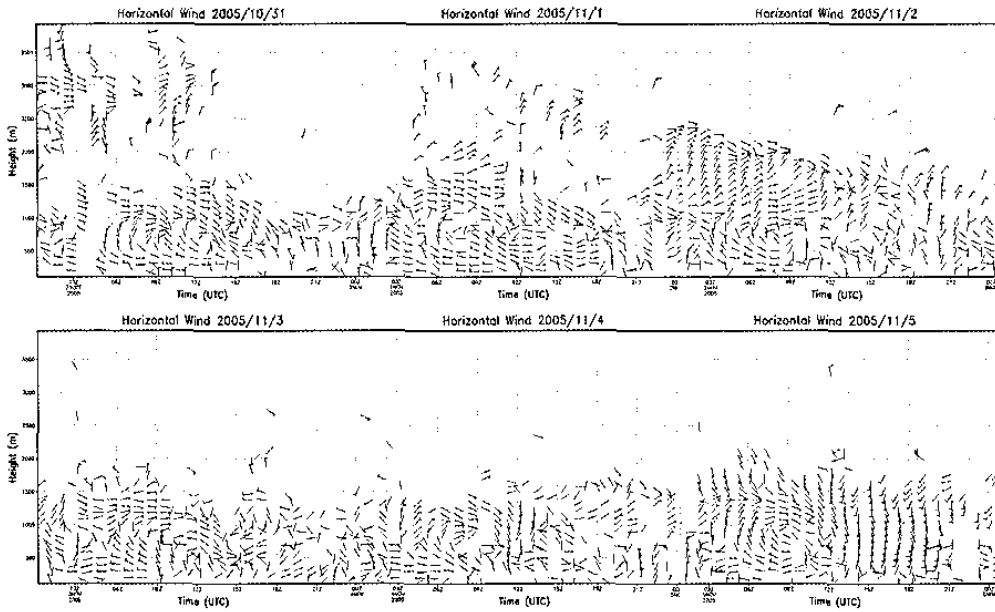


圖 4 剖風儀於 2005 年 10/31-11/5 low mode 之風場觀測結果

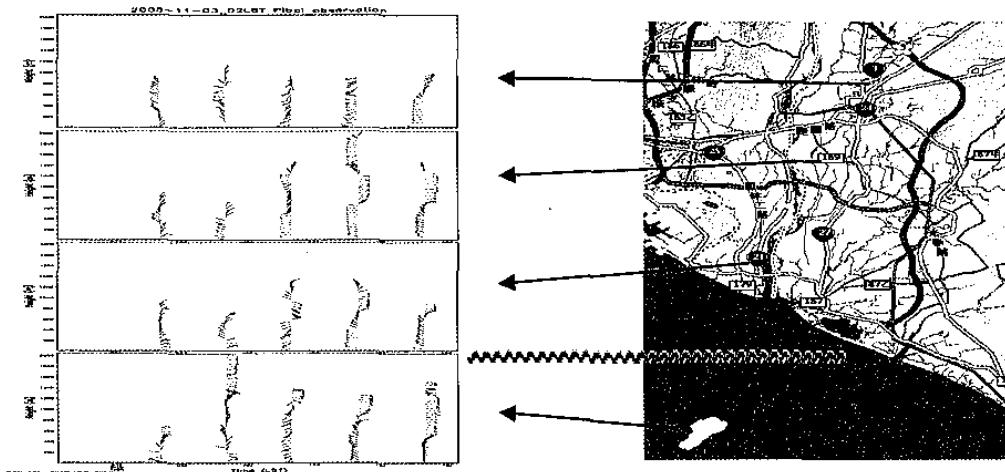


圖 5 高空風氣球觀測低層高空風場於 11/3 日之時間變化

● 海陸風環流與臭氧濃度變化

由以上的分析可以發現，局部環流在南部地區即使是大陸性高壓影響下，地面東北來向的風場並無法完全掌控局部地區的流場。但是局部環流如何與環境風場進行交互作用，並影響空氣污染物的傳輸與擴散過程，需要有垂直的觀測，才能進一步解析。在 2005 年秋季的觀測實驗中，由於有 Ozone sonde 的觀測，提供一個機會來解析台灣南部海陸風環流影響污染物傳輸的過程。

首先以 11 月 3 日屏東機場 2000LST 之探空解析環境氣流的狀況，500-1500 m 及 2400-4800 m 為東北風，地面至 500 m、1800-2400m 及 4800m 以上為西北

風。繫留氣球氣象探空儀顯示，夜間由北風順時針轉向東北風，直到 4 日日出再逐漸由東北風轉向西北，午後氣象探空儀顯示，600 m 以下為西南風，隨高度上升以逆時針轉向轉為東北風，由 600-3000 m 皆為東北風，3600 m 則為西北風為主。這個現象顯示，南高屏地區在日間由於邊界層環流的影響，低層流場的分布有明顯的日夜變化；中層則一直維持東向氣流，顯示氣流過山所造成的影響。

3 日凌晨(01:29-02:28 LST, 最大觀測高度 1561 m) 觀測結果顯示，高度 0-400 m 範圍內，氣流方向由偏東風順時針轉為偏西風，臭氧濃度變化由 40 ppb 隨高度上升增加至 80 ppb，400-1100 m 臭氧濃度穩定維持在 80 ppb，整層氣流逆時針方向由偏西逐漸轉為偏北向。另外，在臭氧濃度 1100-1561 m 逐漸下降至 30-50

ppb 之間。3 日清晨(05:10-06:17 LST, 最大觀測高度 1711 m)觀測結果顯示, 相對濕度於 1400 m 以下維持在 100 %, 顯示有雲層產生在此高度。1400-1711 m 迅速降低至 25 %。整層氣流逆時針方向由偏東逐漸轉為偏北向, 高度 0-400 m 範圍內, 臭氧濃度變化由 5 ppb 隨高度上升增加至 60 ppb。在高度 400-1000 m 範圍內有一臭氧消耗層, 層內臭氧濃度幾乎完全消耗, 最低接近 5 ppb。另外, 在高度 1000-1400 m 範圍內臭氧穩定維持在 60 ppb, 1400-1711 m 臭氧濃度逐漸降低至 40-50 ppb 之間。上午(07:25-08:35 LST, 最大觀測高度 1702 m)觀測結果顯示, 風場、相對濕度與臭氧濃度變化皆大致維持前次觀測特性。在高度 0-400 m 範圍內穩定維持在 60-65 ppb, 在高度 400-900 m 範圍內有一臭氧消耗層, 層內臭氧濃度最低為 40 ppb。900-1300 m 臭氧濃度逐漸上升至 60-80 ppb 之間, 1300-1702 m 臭氧濃度則逐漸降低至 50 ppb。

上午觀測持續進行(10:06-10:50 LST, 最大觀測高度 1300 m), 觀測結果顯示, 相對濕度隨高度上升維持在 60-80 %之間, 臭氧濃度變化在高度 0-400 m 範圍內由 75 ppb 下降至 60 ppb, 400-800 m 臭氧濃度逐漸上升至 90-100 ppb 之間, 900-1300 m 臭氧濃度則持續降低至 50 ppb 左右。3 日中午(12:32-13:19 LST, 最大觀測高度 1676 m)觀測結果顯示, 相對濕度在高度 1300 m 以下維持在 60-80 %之間, 1300 m 以上迅速下降至 20 %。臭氧濃度變化在 0-600 m 高度範圍內由 120 ppb 上升至 150 ppb。另外, 在 600-800 m、800-1200 m 高度範圍內, 臭氧濃度剖面明顯呈現二個消耗層之現象, 600-800 m 濃度最低接近 75 ppb、800-1200 m 濃度最低接近 50 ppb。1200-1676 m 臭氧濃度則持續降低至 45 ppb 左右。

依據觀測林園地區垂直剖面臭氧濃度之分佈結果顯示, 臭氧事件日期間, 林園地區在事件日上午臭氧濃度迅速發展, 於午後 12-15h 呈現下列現象: 在高度 400 m 範圍以下, 臭氧濃度約在 100-140 ppb 左右, 最高值可達 160-170 ppb, 層內風場特性皆以西北偏西風為主。而高度 400 m 以上之風場變化非具一致性, 有時逐漸轉為偏北風, 高臭氧濃度大多維持在高度 400-1200 m 範圍內, 濃度在 162-108 ppb 之間; 有時亦為偏東南風, 高臭氧濃度維持在高度 400-800 m 之範圍, 臭氧濃度為 120-150 ppb, 而高度 800 m 以上臭氧濃度則逐漸被消耗。

由繫留氣球的觀測中, 發現當海風環流勢力開始建立後, 在 400m 高度左右, 不論是位溫、相對濕度都有明顯的轉折形成一個邊界, 此即海風環流所形成之內邊界層(Internal Boundary Layer)。此內邊界層之發展直接影響到空氣污染物在局部地區傳輸與擴散的過程, 以 11 月 3 日為例, 夜間為綜觀風場與陸風主導的環境氣流, 臭氧在夜間並不會因光化作用而增加, 反而只會受到氮氧化物的滴定作用而消失。因此夜間的高空所形成之臭氧高濃度值應為前一日由海風環流所傳輸到高空的殘留所形成。而在岸邊量到高空臭氧

值在不同高度有變化, 尤其在 600-1000m 之間形成相當“乾淨”(clean)的微臭氧區域, 顯示該高度的向岸氣流(陸風環流迴流或環境風場繞流)沖刷的效應。而到了日間, 該高度區的臭氧值反倒比上下高度更高, 尤其是內邊界層之上的區域, 亦顯示海風環流前緣的上昇氣流將污染物往高空傳輸的效應。

四、結論

2005 年秋季在台灣南部地區實施的局部環流觀測實驗, 運用了地面觀測、高空風觀測、剖風儀以及臭氧探空的觀測資料發現, 台灣南部地區的局部環流現象有下列之特性:

1. 高屏空品區在大陸高壓出海的綜觀條件, 地面氣象分析顯示海陸風非常顯著, 而且近岸測站之風速較大, 越往內陸風速越小;
2. 海陸風之影響顯著而且以 700~800m 為分界, 近地層受海陸風與季風之作用於日間與夜間分別為西北風與東北風, 而 800m 以上之東南風則是為海陸風迴流或背風之渦漩作用所致;
3. 海風的厚度隨地表溫度的增加而上升, 約為 500~800m, 而迴流高度可達 1200m; 環流轉變的時間在 9~11am 之間, 而 5pm 後轉換成陸風環流。陸風環流之厚度約為 200~400m 之間, 且陸上之環流厚度較低, 迴流高度可達 600~800m;

而由這項首次在南台灣進行的天氣觀測中, 可以發現台灣空氣污染最嚴重的區域的大氣環境, 深受局部環的影響。從這項觀測結果亦可提供許多研究影響台灣南部地區天氣系統發展的參考, 例如梅雨季的豪大雨、夏季的局部性午後雷雨等。不論是劇烈天氣現象或與空氣品質有關的觀測研究, 本研究以這次的觀測經驗提出以下建議:

1. 觀測發現小琉球之氣象場與污染物濃度變化與林園站等本地內陸站有時間差異, 顯示小琉球的觀測資料可提供海面上之分析, 應設置長期觀站;
2. 由於高屏地區之垂直氣象場相當複雜, 因而應建置連續自動監測網。
3. 由於海陸風環流在海岸地區非常顯著, 而與內陸地區之山谷風環流之交互作用應進行更大規模之觀測。

五、參考文獻

林清和、吳義林、賴進興、林博雄、賴信志，2003：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，高雄縣政府環境保護局專案計劃，九十二年十一月

林清和、吳義林、賴進興、林沛練、賴信志、宋偉國，2005：空氣品質分析監測，高雄縣政府環境保護局專案計劃，九十三年三月。

張良輝、張能復、莊秉潔、陳王琨、林沛練、蔡俊鴻、劉國棟、曠永銓 (2003) 空氣品質模式支援中心運作及建立(二) EPA-92-FA11-03-D038, 行政院環境保護署專案計畫，九十二年八月

Cheng, W-L., 2001: Synoptic weather patterns and their relationship to high ozone concentrations in Taichung Basin. *Atmos. Environ.*, 35, 4971-4994.

Lin, C-H., Chang, L-F. W., 2002. Relative source contribution analysis using an air trajectory statistical approach. *Journal of Geophysical Research*, 107, 4583-4592

Yu, T. Y., and L. F. W. Chang, Selection of the scenarios of ozone pollution at southern Taiwan area utilizing principal component analysis, *Atmos. Environ.*, 34, 4499-4509, 2000.

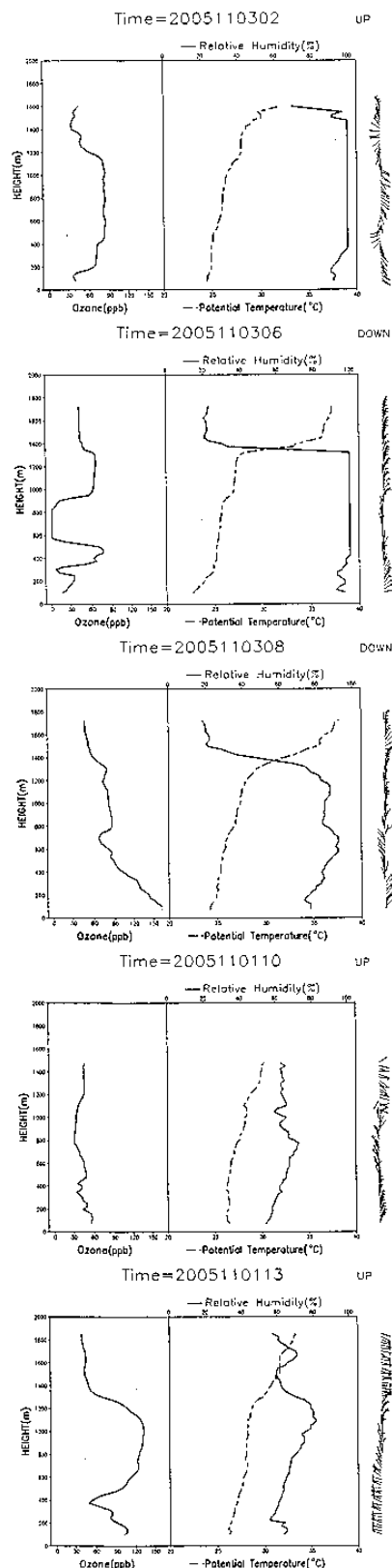


圖 6 臭氧探空於 11/3 日之觀測結果，其中左圖為臭氧隨高度之變化，右圖為位溫(虛線)及溼度(實線)，風場則標示於右側。