

南海季風實驗期間無人飛機探空之資料診斷

林博雄¹ 李清勝¹ 鄭文通¹ 林民生²

¹國立台灣大學大氣科學系

²中央氣象局

(中華民國八十九年三月八日收稿；中華民國八十九年七月十五日定稿)

摘 要

本文分析無人飛機探空(Aerosonde)在南海季風實驗期間東沙島上空所觀測的低層大氣剖面資料特性，首先討論 Aerosonde 攜帶的三套壓濕探空儀的穩定性，再透過與整合探空系統(ISS)三種探空儀器觀測資料之比較分析，評估 Aerosonde 探空資料的可用性。此外，透過二次飛行個案之資料分析結果，探討海上大氣邊界層高度之日夜變化，以及海上對流系統內部環流。

相關係數計算結果顯示，Aerosonde 兩側機翼與機艙的三套壓濕壓氣象元件的環境反應一致性甚高，氣壓數值的相關係數更高達 0.999，機艙內部氣象元件比兩翼下方元件合理地反應出較乾燥與較高溫之現象。Aerosonde 與 ISS 觀測資料差值的均方根(RMSD)比較方面，由於兩者在空中的觀測點和時間並非完全相同，因此兩者測值存在一定程度差異；平均而言，Aerosonde 與 GPS-based 無線電探空儀的溫度與比濕 RMSD 各是 0.25°C 與 0.55g/kg。與聲波雷達的虛溫 RMSD 將近 2°C。Aerosonde 與 GPS-based 無線電探空儀和 915MHz 剖風儀的風場 RMSD 數值，可從晴朗天氣的 0.81m/s 到劇烈天氣的 2.71m/s。從 Aerosonde 25 小時不落地的虛位溫與比濕剖面分析結果顯示，在輕微擾動天氣型態之下，南海海上大氣邊界層白晝高度可到達 1100 公尺，清晨則低於 400 公尺。一次劇烈天氣個案析結果顯示，Aerosonde 的高度、溫度與比濕通量的時間序列可以合理的描述對流系統低層風場特徵之轉變，以及對流胞內部的多胞上升氣流的移動。

關鍵詞：南海季風實驗，無人飛機探空，整合探空系統，海上邊界層

一、前 言

洋面上的大氣觀測一直是天氣研究與作業上較弱的一環，但其重要性則是與日俱增的。比如近年來有關海氣交互作用、氣候變遷與聖

嬰等之研究，常需利用海水表面溫度與風速等兩項因子。此外，颱風生成、發展與路徑的模擬與預報，也極需要洋面上大氣的觀測資料做為模式之初始場；颱風中心的定位以及強度和

暴風半徑的估計，在颱風研究和預報上皆具相當高的重要性。決定颱風中心位置、強度和暴風半徑最有效與最直接方法，仍然是飛機的現場(in situ)觀測；然而，自 1987 年 9 月關島 JTWC (Joint Typhoon Warning Center) 停止西北太平洋颱風觀測飛行任務後，颱風之觀測僅能藉助衛星觀測。衛星觀測雖然可以在颱風眼明顯時提供颱風中心位置(李和吳，1989)、颱風伴隨環流雲系外貌(可推估颱風強度)以及高低層的衛星雲導風(cloud-drift wind)；但當颱風眼不明顯時，颱風中心位置就很難由衛星雲圖來決定；此外，利用衛星雲圖估計颱風強度常有顯著誤差，而衛星資料估計暴風半徑的技術則仍有待開發。

近年來由於電子儀器的迷你化趨勢與通訊科技的進步，輕巧且機動性高的無人遙控飛機開始被積極開發為洋面巡曳的儀器載具。由美國海軍研究辦公室、海軍研究學校、加州理工學院及普林斯敦大學於 1996 年共同成立的 CIRPAS (the Center for Interdisciplinary Remotely-Piloted Aircraft Studies)，評估了三款無人飛機載具，分別是 Pelican、Altus 及 Aerosonde；其中又以 Aerosonde 功能最簡單、明確且造價最便宜(Bluth et al., 1996)。Aerosonde (中文譯名無人飛機探空)設計之主要考慮是如何將探空氣球所使用的無線電探空儀(以下簡稱 Radiosonde)的氣象元件，帶進颱風暴風圈中進行現場觀測(Holland et. al., 1992)；換言之，Aerosonde 是介於飛機與氣球探空兩種探空設備的折衷方案，具備了長程飛行以及可能勉強拋棄的經濟考量特色。Aerosonde 攜帶的觀測設備是三套重量僅有 190 克的溫度、溼度及氣壓感應元件(芬蘭 Vaisala 公司出品之 RS90；以下簡稱 RS90-PTU)。

1995 年 Aerosonde 首次參與 MCTEX (Maritime Continent Thunderstorm Experiment) 在澳洲北部外海的實地飛行試驗，1996 年 11 月首度飛行滯空超過 24 小時。1998 年初的北澳海岸任務，Aerosonde 曾觀測到伴隨劇烈天氣系統之下衝流(downburst) (Hanstrum and Holland, 1998)；此外，Aerosonde 並飛入 Tiffany 颱風外圍進行觀測。肆架 Aerosonde 於 1998 年 5 月前往東沙島(北緯 20°42'15"，東經 116°43'48")參與南海季風實驗(South China Sea Monsoon Experiment，以下簡稱為 SCSMEX; Lau et al., 2000)觀測活動。本文將討論 Aerosonde 參與 SCSMEX 第一次密集觀測(以下簡稱 IOP-1)期間，在東沙島海域飛行所獲取的探空資料特徵，藉以評估 Aerosonde 資料的可用性，並探討應用 Aerosonde 觀測資料診斷天氣個案的結果。

本文第二節首先簡述 SCSMEX IOP-1 期間東亞天氣型態之演變和 Aerosonde 運作概況；第三節分析 Aerosonde 三套 RS90-PTU 個別記錄之氣象參數間的相關程度，並比較 Aerosonde 觀測資料與整合探空系統(ISS, Integrated Sounding System)的三種大氣剖面儀器之觀測結果。第四節應用 Aerosonde 資料探討東沙島海域的海上大氣邊界層高度，Aerosonde 所觀測到的對流系統兩胞之結構特性則於第五節中討論；最後是總結以及未來展望。

二、SCSMEX IOP-1 期間南海綜觀天氣特徵與 Aerosonde 航次概要

整體而言，SCSMEX IOP-1 期間，南海地區綜觀天氣型態之演變可區分為三階段。第一階段是 5 月 5 日至 5 月 14 日，此一期間南海處

於梅雨鋒面前緣暖濕氣團中，東沙島天氣晴朗炎熱。第二階段是 5 月 15 日至 21 日鋒面南下到達南海北部，受鋒面系統激發，南海北部有頗多中尺度對流系統形成並向東移動通過東沙島。第三階段是 5 月 22 日至 5 月 25 日鋒面減弱消失後，南海北部存在眾多淺對流的天气型態。圖 1 顯示 5 月 10 日、16 日及 23 日的 00:00UTC 地面天氣圖，分別代表這三階段的主要地面天氣型態特徵。根據 Hsu (1996) 和林與林 (1997) 之分析，亞洲夏季季風系統建立會經歷數次瞬變期(transient period)，而 1998 年 5~6 月東亞區域環流特徵分析顯示(Lin et al.,1999)，該年 5 月 20 日至 30 日南海地區處於第一次亞洲夏季季風系統瞬變期，亦即 SCSMEX IOP-1 第一與第二階段東沙島天氣型態仍舊是中緯度天氣系統的影響範圍，而第三階段開始籠罩在東亞夏季季風環流。

Aerosonde 於 1998 年 5 月 9 日開始第一航次的飛行，5 月 25 日結束在空中飛行活動，前後共計 18 航次、92.3 飛行小時，本文第一與第三作者實際參與協助 Aerosonde 觀測之任務。表一列出了各航次飛行起降時間、空域範圍以及天氣概況。平均每航次之飛行時間約 5 小時，除了 5 月 12 日及 16 日曾將飛行半徑擴及離岸 40 公里海域外，其餘飛行均在島上北側海面上空的 1000 公尺 × 750 公尺區域內進行(圖 2)。初步分析顯示，5 月 16 日 Aerosonde 在飛離東沙島 40 公里處所觀測的溫濕剖面，與島嶼北側海岸線區域的觀測結果十分雷同，意即東沙島陸地效應甚小；因此，在相同綜觀特徵下，於東沙島北側海面的觀測資料，可代表鄰近海域的大氣特徵。表一的第 8 與第 17 航次的資料分析是本文的重點之一，在第 8 次飛行中，Aerosonde 飛入對流系統中進行觀測，第 17 次飛行則是

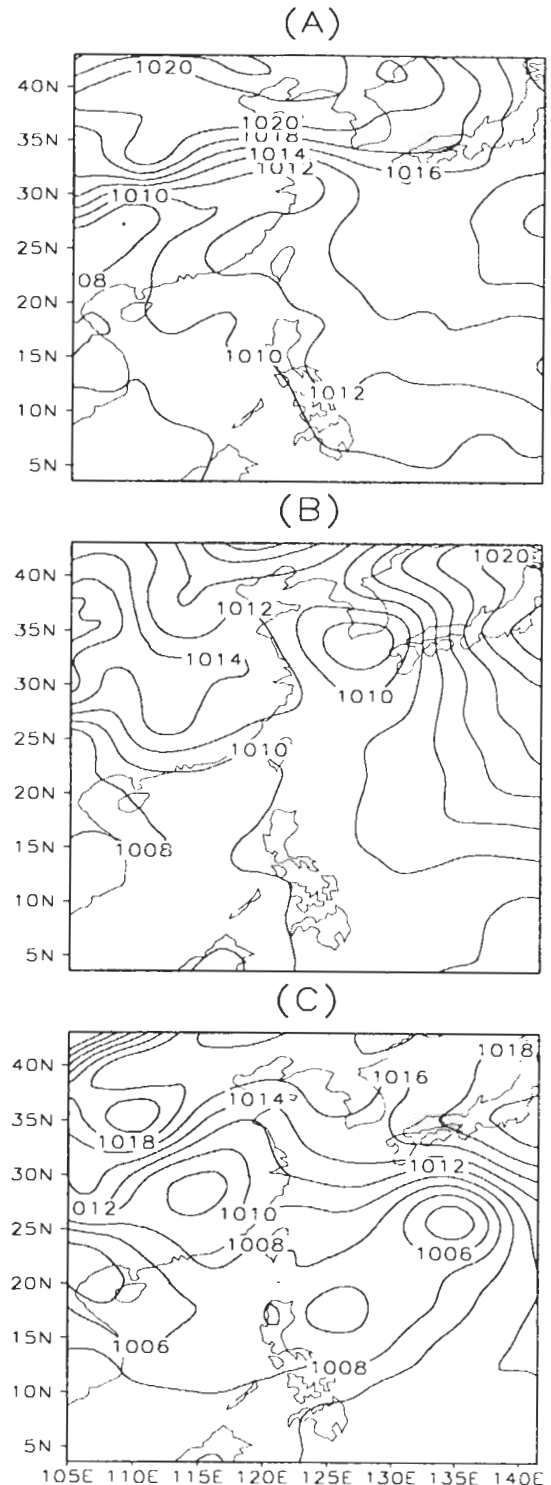


圖 1 (A)1998 年 5 月 10 日 00:00UTC 東亞地面天氣圖，氣壓等值線間距為 2hPa。(B)同圖(A)，但為 5 月 16 日。(C) 同圖(A)，但為 5 月 23 日。

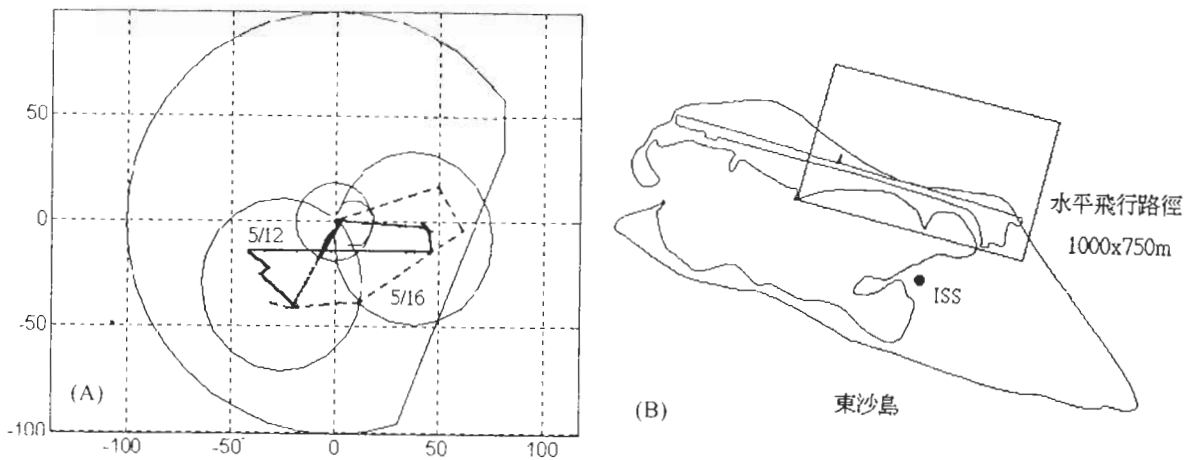


圖 2 (A) Aerosonde 在 SCSMEX IOP-1 期間的飛行路徑圖(左圖)。圖中方格間距是 50 公里，原點是東沙島位置，兩小圓分別是 C-Pol 雷達與 TOGA 雷達的雙都卜勒觀測範圍。不規則外圍是 Aerosonde 核准的飛行範圍。圖中蝴蝶狀實線是 5 月 12 日 Aerosonde 飛行軌跡，虛線是 5 月 16 日 Aerosonde 飛行軌跡；(B)右圖則為東沙島放大圖，方塊區域是 Aerosonde 飛行路徑水平投影，圓點則是 ISS 架設位置。

表 1 Aerosonde 東沙島飛行操作，以及與 NCAR/ISS 三種探空設備(radiosonde, RASS, WP-915，詳見內文)比較的觀測航次(*符號表示)。每日天氣概況以三階段的大氣環流演變型態區分之(詳見內文)。起飛與落地時間都是當地時間(LTC)，飛行時數時間單位是小時分鐘。

編號	日期	起飛時間	落地時間	飛行時數	radiosonde	RASS	WP-915	天氣概況
1	5月9日	11:30	18:00	06:30				1
2	5月10日	11:55	17:50	05:55				1
3	5月11日	08:00	08:00	00:00				1
4	5月11日	16:55	17:40	00:45				1
5	5月12日	08:20	15:25	07:05				1
6	5月12日	16:30	17:55	01:25				1
7	5月13日	11:50	18:00	06:10				1
8	5月15日	09:15	16:20	07:05	*	*	*	2
9	5月16日	09:15	15:20	06:05		*	*	2
10	5月17日	17:10	18:00	00:50				2
11	5月18日	08:20	17:50	09:30				2
12	5月19日	09:30	12:30	03:00				2
13	5月20日	08:30	09:30	01:00				2
14	5月20日	16:10	17:40	01:30				2
15	5月22日	10:05	14:30	04:25	*			3
16	5月22日	15:45	17:50	02:05				3
17	5月23日	09:20	不落地		*	*	*	3
	5月24日	接續前一天	10:30	25:10:00	*	*	*	3
18	5月25日	11:30	15:20	03:50				3

Aerosonde 連續滯空 25 小時觀測個案；在第四與第五節將分別詳細討論此 2 次飛行觀測結果，藉以具體闡述 Aerosonde 探空資料特性以及其所呈現的科學探索價值。

SCSMEX IOP-1 期間，Aerosonde 爲了遵守民航機飛航安全管制之要求，飛行高度設定在 300 至 2000 公尺海拔高度上下盤旋飛行。一次上升或下降過程大約歷時 18 分鐘，換言之，其平均升降速度約爲 1.25 ms^{-1} ；相較於無線電探空氣球的 $3\sim 5 \text{ ms}^{-1}$ 上升速度，Aerosonde 有更佳之垂直解析度及更大的空間彈性。至於 Aerosonde 的航電硬體特性與操控技術細節，已有另文撰述(McGeer, 1994; 林, 1998; 鄭, 1999)，本文不再重覆。

三、Aerosonde 承載之氣象元件特性與資料品質評估

Aerosonde 所承載的三套 RS90-PTU 氣象元件，二套位於左右兩側機翼下方直接曝露於大氣環境，第三套則置放於機體前艙內部，氣流由機體側邊導孔流入導管通過感應元件後再排出。RS90-PTU 是 RS80-PTU 元件的新一代產品，後者是現今全球大氣垂直剖面觀測使用率最高的 Radiosonde 氣象元件。Aerosonde 採用 RS90-PTU 的理由有二，一是其採樣率可高達 10Hz，二爲避免空盒氣壓計因 Aerosonde 重複升降的氣壓變化造成空盒金屬彈性疲乏，而無法正確反應氣壓的問題。RS90-PTU 之氣壓元件採用一種新型微小壓力晶片，該晶片置放於溫度補償控制下的鉛盒之中；經 Aerosonde 實際飛行反覆使用結果，證實原廠設計頗爲理想。RS90-PTU 的 THERMOCAP 溫度元件與 RS80-PTU 相同，但是 HUMICAP 濕度元件又與

RS80-PTU 有些微差別；RS90-PTU 同時有二組濕度感測晶片傳送出二份濕度資料，但是其內建之儀器邏輯將指示何者爲較佳之濕度值。每套 RS90-PTU 於安裝在 Aerosonde 上之前，都與地面的參考標準氣象元件進行比對；Aerosonde 回收後再被取下妥善保存。

風向及風速數值的計算方面，是先透過 Aerosonde 最前端的靜壓導管及皮托管(pitot tube) 取得靜壓與動壓數值，得知飛機相對於空氣之速率；再配合飛機對地速度、航向，求得沿該航向之風場。其次，透過一次 10 秒鐘的 S 形飛行軌跡（飛行距離約 200 公尺）獲得三組航向之風場後，求得空氣的流速與流向(鄭, 1999)；因此，Aerosonde 的風場資料的時間間距比氣壓、溫度及濕度等參數來得大。

Aerosonde 所有觀測資料下傳至地面控制站於電腦螢幕顯示之同時，也以二進位格式即時儲存於電腦硬碟中。當飛行觀測完成後，上述的二進位格式資料必須透過 Aerosonde 地面操控軟體再重新執行一次，才將飛行時間、經緯度、高度、氣壓、溫度、相對濕度、風場、機體水平傾角度變率及上下擺動角度變率等參數，以 ASCII 格式另存爲新檔案。

(一) RS90-PTU 氣象元件穩定性分析

爲了評估 Aerosonde 氣象參數資料之品質，首先分析三套 RS90-PTU 所觀測的氣象參數之時間序列，並計算彼此的相關係數。圖 3 顯示 SCSMEX IOP-1 期間，針對氣壓、氣溫及相對濕度，三套 RS90-PTU 氣象元件觀測值間的相關係數。結果顯示，就觀測氣壓值而言，任意兩組元件間的相關係數一直維持在 0.999 以上，遠高於氣溫或溼度的相關係數。一般而言，相對濕度的相關係數值相對較低，但左右兩翼

間之相關係數都在 0.9 以上，顯示了 RS90-PTU 氣象元件有甚高的穩定性。整體而言，機艙內部有溫度偏高而濕度偏低的現象，但兩翼的觀測值則相當接近。由於兩側機翼下方的 RS90-

PTU 直接裸露於大氣環境，因此，其觀測值具較高之代表性。本節以下的氣象參數剖面特性討論，都是採用 Aerosonde 兩翼 RS90-PTU 氣象元件觀測值之平均，機艙內部 RS90-PTU 觀測之數值僅保留供參考用。

(二) Aerosonde 與 ISS 垂直剖面氣象資料比對

整合探空系統 (ISS) 包含全球衛星定位系統測風導航探空儀 (GPS-based Radiosonde)、射頻 915MHz 剖風儀 (wind profiler, 以下簡稱 WP-915) 及無線電聲波雷達 (Radio Acoustic Sounding System, 以下簡稱 RASS) 等，其詳細硬體功能參見林等 (1994)。SCSMEX 期間，ISS 放置於東沙島機場跑道南側陸地上，與 Aerosonde 同地同時觀測，因此可詳細比較 ISS 與 Aerosonde 資料之相關性。表一 中標註了 ISS 之三種大氣剖面資料與 Aerosonde 資料進行比較的個案日期，兩者差值之均方根 (root mean square, 或 rms) 則整理在表二。以下分別討論 Aerosonde 與 ISS 不同大氣剖面儀器觀測資料的比較結果。

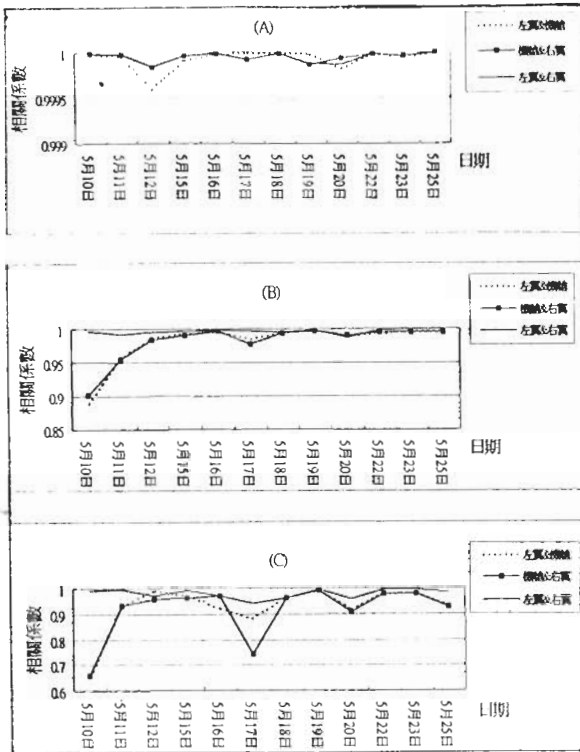


圖 3 (A) Aerosonde 三份 RS90-PTU 感測器的氣壓觀測值之間的相關係數。(B) 同圖(A)，但為氣溫。(C) 同圖(A)，但為相對濕度。

表二 Aerosonde RS90-PTU 探空之氣象參數與 NCAR/ISS 三種探空設備(見內文)的均方根誤差數值 (IOP-1 期間平均, 5 月 15 日, 5 月 23 日)。T 是氣溫, q 是比濕, U 是東西風分量, V 是南北風分量, T_v 是虛溫。

		GPS-radiosonde				RASS	WP-915	
		T	q	U	V	T_v	U	V
	IOP-1	0.25	0.55	1.94	1.86			
Aerosonde	5 月 15 日	0.28	0.28	0.81	0.86	2.02	2.71	1.75
	5 月 23 日	0.16	0.37	1.10	0.89	1.88	1.92	1.10

(1) Aerosonde 與 GPS-based Radiosonde

資料之比較

ISS 施放的 GPS-based Radiosonde 為芬蘭 Vaisala 公司 RS80-15G 探空儀，其提供了 10 秒鐘時間間距的氣象參數資料，包括氣壓、高度、溫度、露點溫度、相對濕度及風向、風速。ISS 的 GPS-based Radiosonde 施放時間為 02:00LTC 與 14:00LTC；東沙島海軍氣象中心東沙氣象台則負責執行 08:00LTC 與 20:00LTC 的探空氣球觀測，採用的是日本 MIESEI 1680Hz Radiosonde。GPS-based Radiosonde 與 Aerosonde 觀測重疊的時間不多，只有 5 月 15 日、22 日、23 日與 25 日的 14:00LTC 及 24 日的 02:00LTC 等 5 個時間。由於探空氣球上升速度約為 $3\sim 5\text{ms}^{-1}$ ，穿越 2 公里厚的低層大氣僅需 8 到 9 分鐘，為便於比較，本文乃取 Radiosonde 施放前後半小時內的 Aerosonde 資料，將其內插為 10hPa 高度等間距格式；同樣地，GPS-based Radiosonde 探空資料亦整理成相同格式，以便進行比較。因此，兩種資料比較時需要注意的是，Aerosonde 的探空剖面為一小時間的大氣平均狀態，ISS 資料則反應汽球由地面升空時大氣瞬間狀況，而且後者的觀測垂直剖面並非垂直於汽球施放點的上空。

圖 4 顯示 Aerosonde 與 GPS-based Radiosonde 的氣溫、濕度、東西風分量及南北風分量的線性相關散布情況，其中氣溫的線性相關程度最好，5 月 15 和 23 日差值之 rms 分別僅有 0.16°C 和 0.28°C 。在濕度方面，Aerosonde 觀測值顯著偏高，兩天差值之 rms 分別為 0.28g/kg 和 0.37g/kg 。至於風場，IOP-1 期間兩者差值的 rms 都接近 2ms^{-1} ，反應了實際大氣中，小尺度風場擾動比溫度與濕度場來得顯著

之特性。此外，Aerosonde 資料時間長度是 Radiosonde 資料的數倍，而探空氣球施放後會隨風飄移，(假設水平風速為 3ms^{-1} ，汽球上升速度是 4ms^{-1} ，則當氣球上升至 850hPa 時，已自原點飄移 1500 公尺之外)，但 Aerosonde 一直固定在相同空域持續上下盤旋飛行；因此，觀測點不同亦為造成兩者風場差值偏大的可能原因。結果同時顯示(圖未示)，於較低層，Aerosonde 觀測上東西風分量顯著偏小，而較高層則相反；至於南北風分量，兩者之差異則無明顯規律。導致上述現象之原因，可能原因之一是 Aerosonde 設定的飛行路徑(圖 1 所示)的南北航向 750 公尺距離過短，並且該數值並非 200 公尺的整數倍，因此在 Aerosonde 進行轉彎時刻又要執行 S 形飛行風場取樣，兩種過程可能導致程式運算衝突的發生。

1995 年 11 月 30 日 MCTEX 實驗期間，Aerosonde 與 Radiosonde 的量測溫度差距小於 1°C ，溫度差異的平均值是 0.2°C 。至於東西風分量與南北風分量兩者觀測值差異較大且變化亦較大，差值的標準差高達 1.17ms^{-1} (Tyrrell et al., 1996)，與本文分析結果接近。

(2) Aerosonde 與 RASS 資料之比較

RASS 是以 2000Hz 頻率發射電磁波到大氣之中，利用大氣氣溫與濕度分層效果所造成的聲波反射特性來推算虛溫(virtual temperature, T_v)；因此，將 Aerosonde 的溫度與濕度資料換算成虛溫，以便與 RASS 資料進行比對分析。此外，RASS 剖面資料的高度間距是 105 公尺，觀測高度範圍是 139 至 1054 公尺，時間解析度則是 30 分鐘；故將較高垂直解析度的 Aerosonde 資料，化成 RASS 資料格式再行分析。

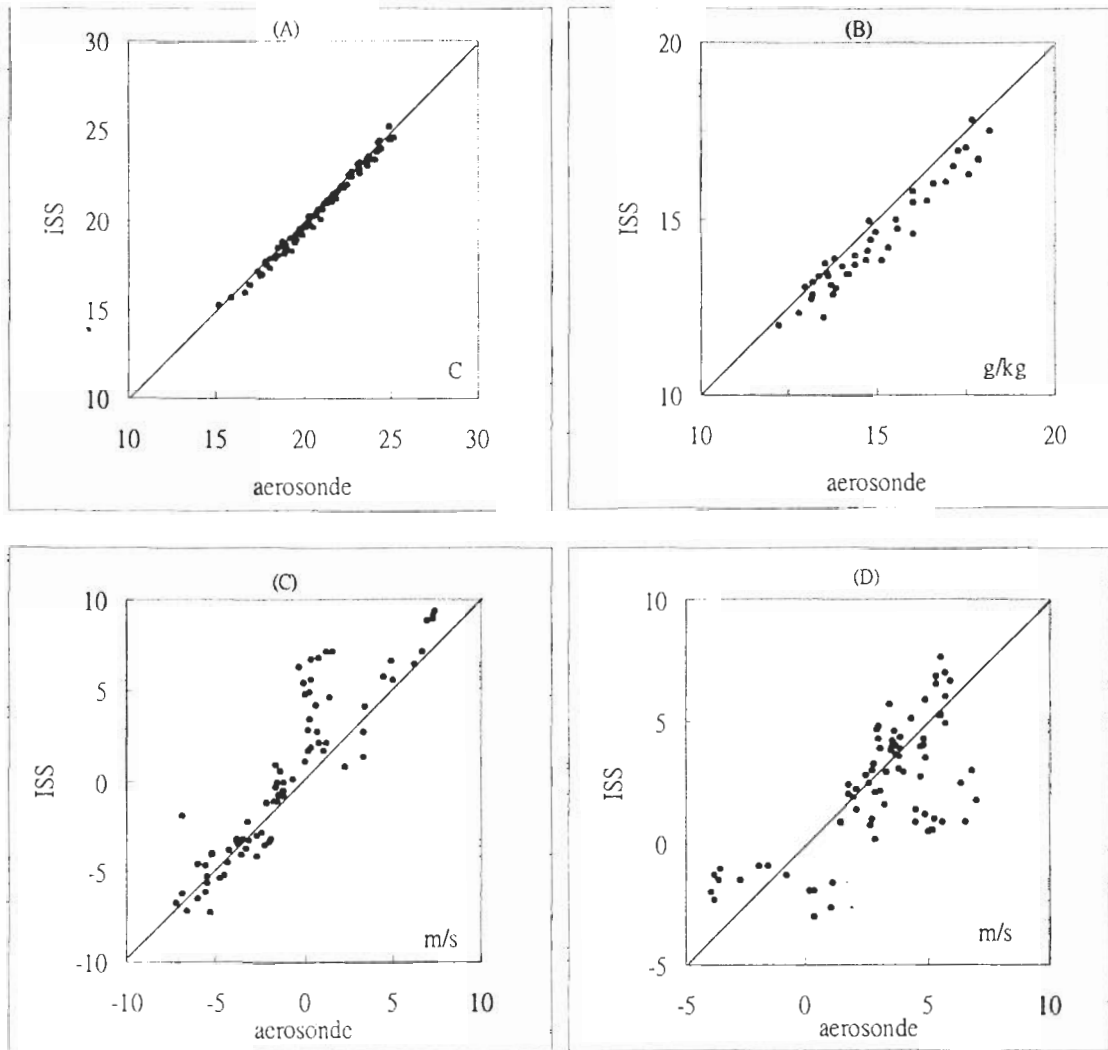


圖 4 Aerosonde(橫軸)與 GPS-based radiosonde(縱軸)觀測值之線性相關散布情況。(A)氣溫(°C)。(B)比濕(g/kg)。(C)東西風分量(m/s)。(D)南北風分量(m/s)

RASS 提供的較高層資料相當不連續，與 Aerosonde 重疊最為完整的時間只有 5 月 15 日、16 日與 23 日，兩者樣本個數集中在高度 454~874 公尺之間。由於 5 月 15 日與 16 日兩天之天氣型態相當接近，因此表 2 中的差值均方根只列出 5 月 15 日與 23 日兩天個案。圖 5 之散佈圖清楚顯示兩種探空設備觀測結果的不一致性，

差值均方根接近 2°C 。May et al.(1989)曾比較 NCAR 300 公尺高鐵塔所直接觀測的溫、濕度與 RASS 這類聲波探測設備之測值，得出 RASS 虛溫數值有偏高趨勢，差值均方根也高達 1°C 以上。

(3) Aerosonde 與 WP-915 資料比較

WP-915 資料結構特徵如同 RASS，但氣象

參數為風向與風速，其高度間距在 Low-mode 輸出是 56 公尺。WP-915 訊號易受降水干擾，即使是小雨也有所影響。由於 5 月 15 日東沙島有降水系統經過，16 日島上雖無降水但周圍海

域有顯著對流與龍捲風，而 23 日則是穩定晴朗的好天氣；因此，前二天個案有效資料筆數總合，不及第三個個案的一半。表 2 顯示，Aerosonde 與 WP-915 測值的差值均方根，不管是東西風

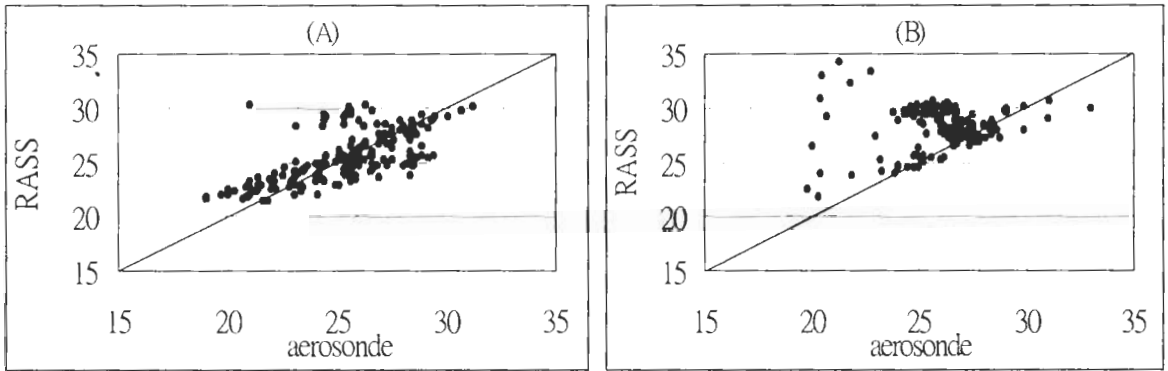


圖 5 Aerosonde 與 RASS 之虛溫(°C)線性相關散布情況，(A)5 月 15~16 日。(B)5 月 23 日。

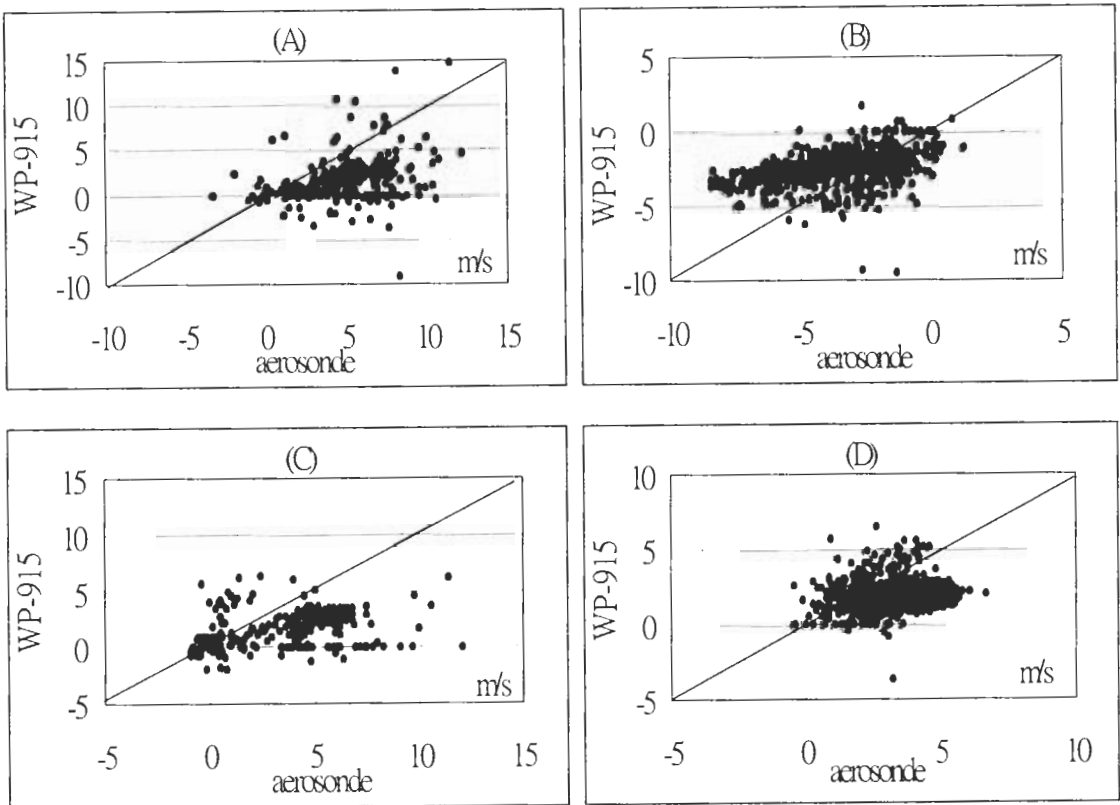


圖 6 Aerosonde 與 WP-915 之東西風分量(A、C)以及南北風分量(B、D)，在 5 月 15~16 日(A、B)與 5 月 23 日(C、D)之線性相關散布情況。

分量或南北風分量，在晴天微風狀況下，其值均遠較雨天大風狀況下者為小。然而，即使是 5 月 23 日穩定有利觀測的天氣條件下，Aerosonde 與 WP-915 觀測差值的均方根仍超過 1 ms^{-1} 。此外，圖 6 顯示，Aerosonde 所觀測之東西風與南北風分量，也都較 WP-915 觀測者為小。

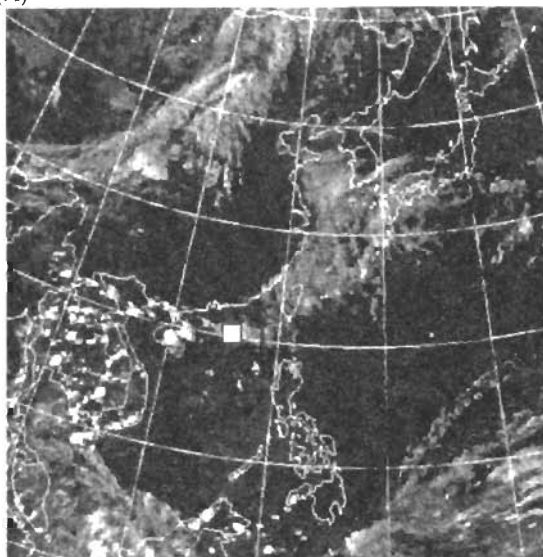
四、海上大氣邊界層特徵個案分析

Wyngaard et al.(1978)利用 AMTEX (Air Mass Transformation Experiment, 1975) 實驗期間位溫與比濕垂直剖面資料，分析東海海上對流不穩定狀態下的海上邊界層特徵。結果顯示，高度 1200 公尺以下的位溫值幾為常數，或大氣已充分混合；高度 1200 公尺處有 4°C 的顯著增溫，而 1200 公尺以上的大氣位溫往上遞增，顯示上層大氣環境相當穩定。比濕垂直剖面亦顯示 1200 公尺高度處有顯著梯度，而其下之大氣水汽均勻混合。Nicholls and LeMone (1980)利用 GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment, 1974) 實驗期間飛機觀測資料，分析實驗第 253 天及第 258 天大西洋洋面上的大氣位溫與比濕垂直剖面，這兩天的大氣狀態都為微弱不穩定。結果顯示，位溫與比濕垂直剖面在 600 公尺高度有顯著梯度，他們認為這是海上大氣邊界層頂部之所在。為瞭解南海北部海面大氣邊界層特徵，本節分析 Aerosonde 的第 8 航次(5 月 15 日)與第 17 航次(5 月 23 日)之觀測資料，探討這二天不同天氣型態下，位溫與比濕垂直剖面有無顯著梯度存在，做為海上大氣邊界層高度變化的判定。

(一) 5 月 15 日個案

地面天氣圖與紅外線衛星雲圖(圖 7a)顯示，5 月 15 日南海北部位於由中緯度南下的鋒面前緣，大氣具對流不穩定度，東沙島西側與北側有對流系統不斷消長。當日中午之後，東

(A)



(B)

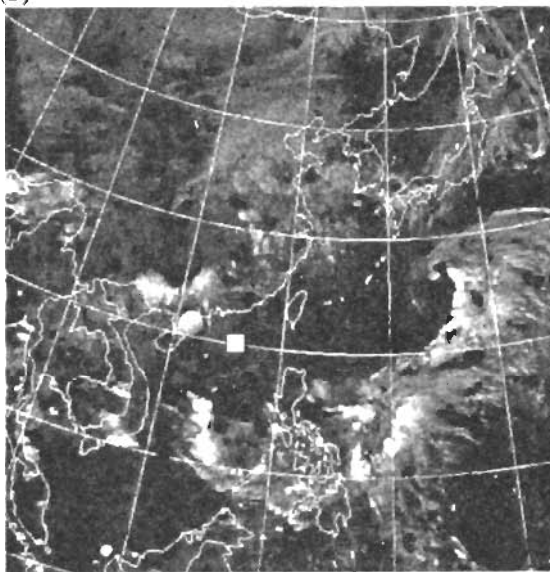


圖 7 (A)1998 年 5 月 15 日 0733UTC 紅外線衛星雲圖。白色方塊為東沙島地理所在。(B) 1998 年 5 月 23 日 0633UTC 紅外線衛星雲圖。

沙島天空烏雲密布並有陣雨，15:32LTC~15:36LTC 及 16:02LTC~16:15LTC 各有 50mm/hr 的強降水出現。圖 8 是 5 月 15 日 14:46~15:05LTC 與 15:29~16:05LTC，Aerosonde 觀測之位溫與比濕的垂直剖面，兩者分別代表對流系統通過東沙島前和通過時的低層大氣結構變化。在對流系統通過前，底層比濕往上些微遞減但位溫則稍微增加，在 1200 公尺高度則有顯著的位溫梯度，且其上比濕近似常數，顯示 1200 公尺高度為邊界層頂部或雲層底部高度。在鋒面通過時，比濕與位溫剖面中，上下均勻混合之特徵更趨顯著，但 1200 公尺高度以

下對流系統下沉氣流所帶來的冷空氣，形成顯著的位溫垂直梯度。

Wyngaard et al.(1978)所分析的是東海地區冬季中緯度鋒面通過的邊界層特徵，故其上層空氣較為乾燥。本個案顯示的是在春夏季節轉換期間，熱帶南海鋒面過境特徵，故底層較潮濕且比濕垂直遞減率變化較小，顯示 5 月期間南海地區的低層水汽含量比冬季東海地區來得多，且潮濕層亦較為深厚。

(二) 5 月 23~24 日個案

紅外線衛星雲圖顯示，5 月 23 日到 24 日

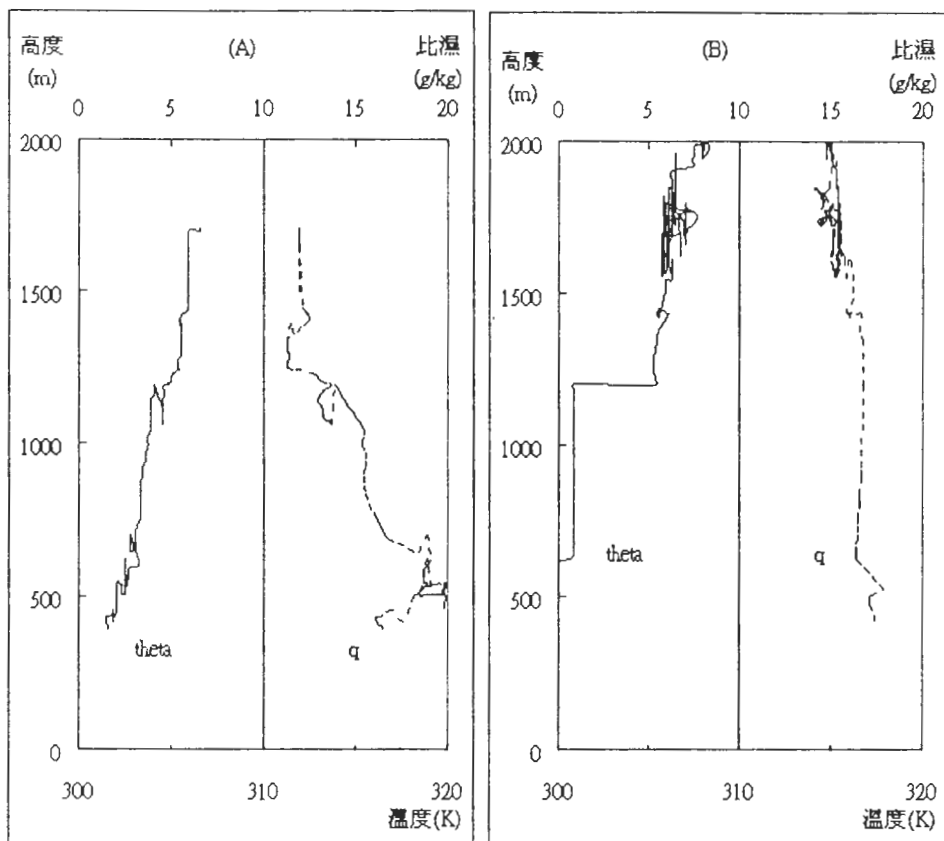
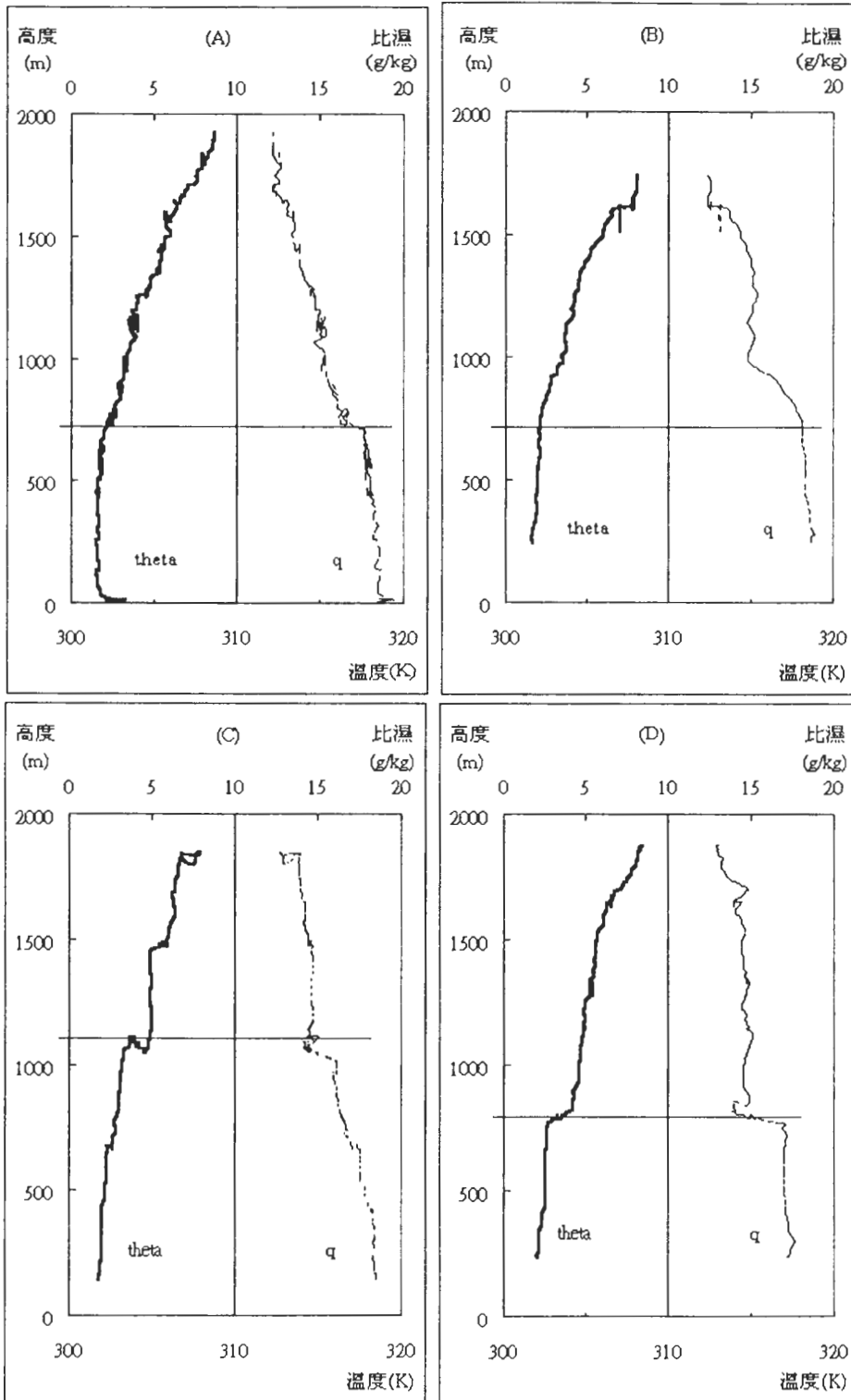


圖 8 (A)1998 年 5 月 15 日雨胞通過東沙島前(14:46~15:05LTC)之海上邊界層大氣之位溫與比濕垂直剖面。(B)同(A)，但為 15:29~16:05LTC。



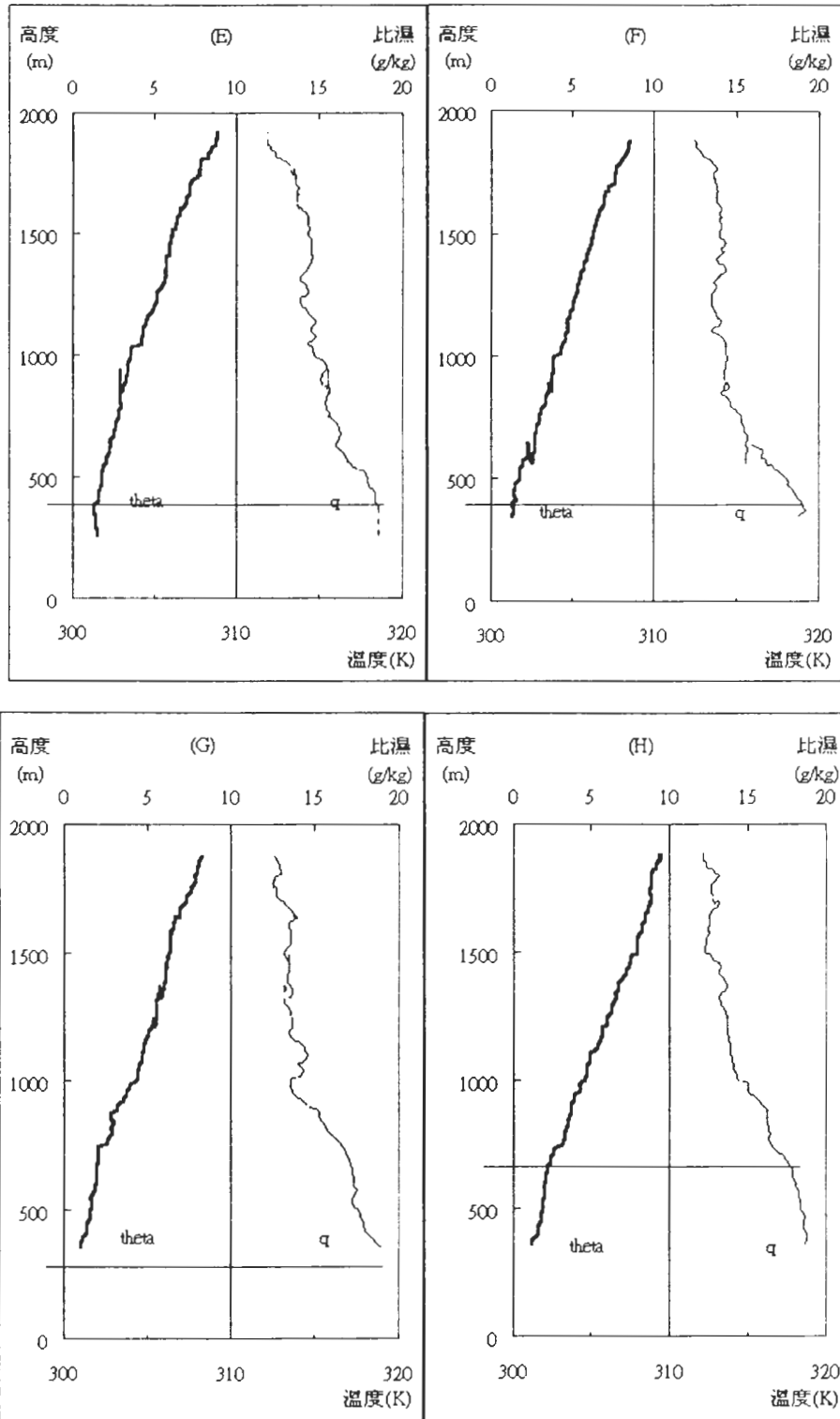


圖 9 1998 年 5 月 23 日至 24 日海上大氣的位置溫與比濕垂直剖面 (A)09:00LTC (B)14:00LTC (C)15:00LTC (D)18:00LTC (E)22:00LTC (F)00:00LTC (G)04:00LTC (H)07:00LTC。各小圖之中的橫線標示邊界層高度所在。

間南海北部僅有零星對流胞短暫消長，東沙島附近沒有顯著的對流系統發生(圖 7b)。東沙島上的澳洲 C 波段極化雷達與中國大陸實驗三號研究船上的 TOGA 雷達，所構成的雙都卜勒雷達範圍之內也沒有顯著對流跡象發生，此種海上淺對流的輕微擾動夏季天氣型態與上面所述之鋒面擾動個案呈顯著對比。Aerosonde 於 5 月 23 日 09:00LTC 起飛，在圖 1 的空域連續上下盤旋，直到 5 月 24 日 10:10LTC 降落，滯空時間長達 25 小時，因此這一個案提供了海上淺對流天氣型態下，大氣邊界層日夜變化的實際觀測資料。

圖 9 顯示此次 Aerosonde 飛行中，不同時段底層大氣位溫與比濕垂直剖面，大氣邊界層高度(位溫與比濕垂直梯度顯著發生高度)時間變化依序為 5 月 23 日 09:00LTC(700 公尺)、14:00LTC(700 公尺)、15:00LTC(1100 公尺)、18:00LTC(750 公尺)、22:00LTC(450 公尺)與 5 月 24 日 00:00LTC(400 公尺)、04:00LTC(低於 400 公尺)及 07:00LTC(700 公尺)。綜合言之，這一個案所顯現的海上邊界層高度於白天可達 1100 公尺(15:00LTC)，但凌晨時分(04:00LTC)則可下降到 400 公尺以下。由於 Aerosonde 的最低安全飛行高度設定在 300 公尺，因此無法得知 5 月 24 日清晨之前的大氣邊界層確實的最低高度。

五、對流系統低層結構分析

自從 Browning and Foote (1976)與 Zipser (1977)發表中尺度對流系統的水平與垂直結構概念模式 (conceptual model)後，二十餘年來的雷達與飛機觀測陸續證實了對流系統前緣上升、

後緣下沉的環流特徵，並解釋了對流系統正回饋性的移動動力機制 (Lemon and Jorgensen, 1991; Keenan and Carbone, 1992)。若 Aerosonde 可在中尺度對流系統中順利飛行並進行觀測，則未來 Aerosonde 應用於颱風觀測的可行性將大為提高。

1998 年 5 月 15 日，Aerosonde 在上午 09:15LTC 起飛後，於島上北側盤旋飛行。當日梅雨鋒面橫亙於台灣海峽至南海北部，南海北部海面陸續有對流胞形成後向東移行，並於下午時段陸續通過東沙島，中尺度的對流系統範圍可以由東沙島上澳洲氣象局 C 波段極化雷達仰角 1.8 度的回波平面位置顯示圖(圖 10)概括出來，該雷達的正上空即為 Aerosonde 飛行所在位置。圖 11 是 Aerosonde 在當日飛行中，所觀測之 15:00LTC 到 16:00LTC 的飛行高度、氣溫、風場、水汽通量以及地面雨量的時間序列圖。圖中顯示 Aerosonde 在 15:20LTC 到 15:25LTC 之下降過程中，飛行下降高度一度停滯，亦即遭遇到對流胞前緣的上升氣流，並且其上升氣流速度應與 Aerosonde 下降速度相當(約 1.25 ms^{-1})，因而將 Aerosonde 托浮在空中。隨著對流胞向東移動，15:25LTC 之後，Aerosonde 已經位於對流胞後緣下沉區，Aerosonde 開始加速下降；此時近地面的氣溫較 18 分鐘前下降 4°C ，低層風場亦由西南風轉為偏西北風，水汽通量由 $160 \text{ m} \cdot \text{g} / \text{kg} \cdot \text{sec}$ 驟減成 $20 \text{ m} \cdot \text{g} / \text{kg} \cdot \text{sec}$ 。15:30LTC 之後，Aerosonde 繼續盤旋上升，但是在 8 分鐘之內，Aerosonde 迅速從 970hPa 爬升到 820hPa 高度，上升速度由原設定的 1.25 ms^{-1} 增加到 3 ms^{-1} ，顯示另一波對流胞前緣的上升氣流再度作用於 Aerosonde 上。此段期間，地面觀測站記錄顯示有強降水

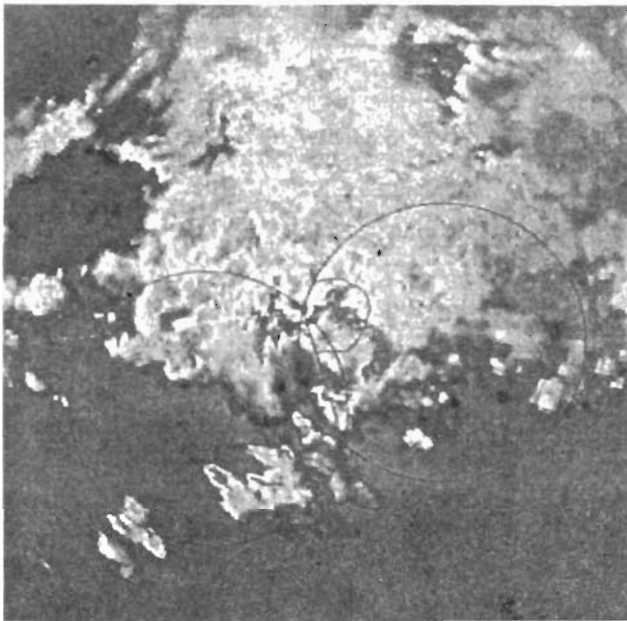


圖 10 1998 年 5 月 15 日 15:51LTC 東沙島 C-波段極化雷達回波 PPI 圖(仰角 1.8 度)。東沙島位於圖中兩圓交集之北方端點，南方端點是 TOGA 雷達位置。

出現，15:32LTC 到 15:36LTC 之間五分鐘間，雨量為 4.5 mm。

當 Aerosonde 於 15:41LTC 上升到達最高設定高度時(1700 公尺)，觀測之風場為西南西風，水汽通量也回升到 $192 m \cdot g / kg \cdot sec$ ；此時 Aerosonde 已完全進入對流胞之降水區中。依照操控程式設計，Aerosonde 隨後應處於下降狀態，但因上升氣流的不斷抬升而造成其下降速度相當緩慢。由水汽通量時間序列的突增現象得知，15:42LTC 至 15:52LTC 間又有兩簇對流胞接連通過；而 Aerosonde 則被抬升超過預先設定的最大安全高度以上，到達 2100 公尺。16:03LTC 時，另一波對流系統抵達東沙島上空，地面降水強度驟升，到 16:28LTC 總共降下了 17.5mm 雨量。Aerosonde 在地面操作人員強制運作下，於傾盆大雨之低能見度狀況下迫降回收。

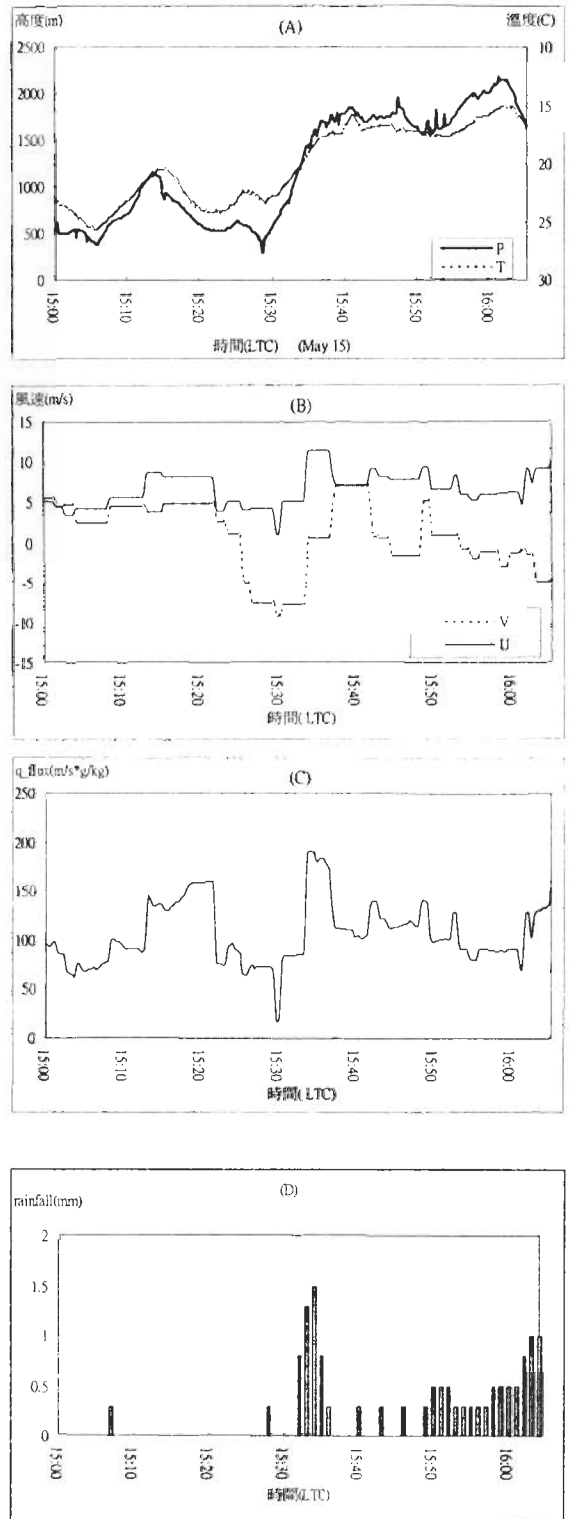


圖 11 (A)1998 年 5 月 15 日 15:00~16:00LTC Aerosonde 之高度(由粗實線氣壓 P 所換算)與氣溫(虛線, T)之時間序列。(B)同(A)，但為東西、南北向風場。(C)同(A)，但為東西向的水汽通量。(D)同(A)，但為地面雨量圖。

綜合以上 Aerosonde 在這次對流系統中飛行過程中所觀測的氣壓、氣溫、水氣與風場的起伏變化，我們可以構思出以下場景：Aerosonde 首先是在對流系統前緣的南來暖濕氣團中盤旋上升飛行，接著在下降過程中遭遇到對流系統前緣上升運動舉升，隨後 Aerosonde 貼近低空進入對流系統下方的乾冷西北氣流環境場。當 Aerosonde 再度爬升進入對流系統內部時，多胞的上升氣流柱不斷地抬升 Aerosonde，顯著的西風分量反應了對流系統持續向東移動。從 15:22LTC 到 16:07LTC 的 45 分鐘內，Aerosonde 經歷了數波對流系統強烈擾動的考驗，同時也成功地即時下傳各種觀測氣象因子；此結果，增加了未來應用 Aerosonde 於颱風環流觀測之可行性。

六、討論與結語

本文首先就 Aerosonde 發展及其在 1998 年 5 月期間參與 SCSMEX 的 IOP-1 觀測活動做一簡要介紹，並評估這段期間 Aerosonde 在東沙島北側上空飛行、所蒐集的大氣垂直剖面資料品質與個案診斷分析結果。文中首先分析 Aerosonde 所酬載於兩側機翼下方與機艙內部的 RS90-PTU 氣象元件間的相關程度，以評估 Aerosonde 飛行過程中這些感測器的穩定性與可用性。結果確認機翼下方的兩套 RS90-PTU 氣象元件量測平均值，可以合理反應大氣環境；而機艙內部的 PTU 元件的測值有溫度偏高、濕度偏低的現象，因此這套氣象感測器的資料應保留做為備用參考。

其次，本文利用東沙島與 Aerosonde 同地同時運作的 ISS GPS-based Radiosonde、RASS 與

WP-915 剖風儀等三種大氣垂直剖面資料，評估比較這四種觀測儀器所觀測資料間之相關程度。整體而言，Aerosonde 與 GPS-based Radiosonde 的溫度與濕度相關性最佳，這兩者都是採用 Vaisala RS 系列的 PTU 元件；所不同得的是探空氣球會飄離施放點，並非如同 Aerosonde 上下盤旋的準一維垂直剖面，因此兩者在風場有較大差異性的現象是可預期的。RASS 與 WP-915 剖風儀都是全球少見的研究用大氣觀測設備，如同本文採用之 Aerosonde 設備，其精確度的評估都是大氣觀測研究議題之一，因此彼此的相關分析止於相對性的差異討論，而無法提出明確的定量誤差數值。結果顯示，Aerosonde 與 RASS 的虛溫差值之均方根可達 2°C ，越往高空兩者差異越大。Aerosonde 與 WP-915 的風場比較，其差異的均方根值都在 $1\sim 3\text{ ms}^{-1}$ ，且 Aerosonde 所求得的風速都低於 WP-915。這些設備應在未來繼續共同參與其他大氣觀測實驗，持續相互進行相關性分析。

應用 Aerosonde 資料於個案之診斷分析時，本文分析了 5 月 15 日對流系統觀測航次及 5 月 23 日連續 25 小時滯空的航次個案，以探討對流不穩定與輕微不穩定等不同的大氣狀態下，東沙島海域的大氣邊界層垂直剖面特徵與邊界層頂部高度的變化情形。分析結果顯示，南海的梅雨鋒面擾動個案中，1200 公尺高度有顯著位溫梯度，該高度以下水氣均勻混合。結果同時顯示，日間大氣邊界層高度可上移至 1100 公尺高度附近，夜間到凌晨時刻則下降到 400 公尺以下，與 GATE 實驗在大西洋海上所觀測到的大氣邊界層高度相符。此外，Aerosonde 在 5 月 15 日下午對流系統通過東沙島時，所觀測的溫度、濕度與風場時空分佈上，也能合理反應對流胞的中尺度結構特徵。

目前，由國人組成的Aerosonde地面操控團隊，在1999年夏天進行二次戶外飛行試驗，已經確定組員的航電與機械維修能力可以正常運作Aerosonde飛行；同時透過本文的Aerosonde資料分析經驗，也掌握了Aerosonde資料下傳的分析診斷流程。總括言之，應用Aerosonde進行颱風觀測的構想已經進行了一半，預估未來二年內，Aerosonde可望獲取第一筆颱風環流觀測資料，這對於台灣大氣科學界大氣觀測與研究能力的提升上，將有莫大的鼓舞。

致 謝

作者要感謝審查者的意見，使得本文的文字與圖表表達更趨完整，同時要向SCSMEX計畫辦公室、東沙島駐地官兵，以及澳洲Aerosonde Robotic Aircraft 公司Mr. Jon Becker、Mr. David Hobby、Mr. Maurice Gonella的行政與技術協助致謝，我們也要感謝國科會貴儀中心、中央大學ISS探空資料的提供。本文在國科會NSC87-2621-P002-056計畫下贊助完成。

參考文獻

- 李清勝、吳鳳娥,1989：利用衛星紅外線資料分析颱風中對流之特性。大氣科學，17，331-354。
- 林沛練、劉振榮、陳台琦，1994：台灣先進氣象觀測儀器與相關研究。大氣科學，22，479-522。
- 林博雄、林和，1997：東亞夏季季風與梅雨鋒(一)：季風雲型指標。大氣科學，25，267-288。
- 林博雄,1998: 無人飛機探空與氣象觀測應用。無人遙控載具/儀電技術研發成果發表暨應用研討會論文集,18-24
- 鄭文通,1999: 南海季風實驗期間利用 Aerosonde 觀測資料分析海上邊界層特性。國立台灣大學大氣科學研究所碩士論文, pp69。
- Bluth, R. T., P.A. Durkee, J.H. Seinfeld, R.C. Flagan, L.M. Russell, P.A. Crowley and P. Finn, 1996: Center for interdisciplinary remotely-piloted aircraft studies (CIRPAS). *Bull. Ameri. Meteor. Soc.*, 77, 2691-2699.
- Browning, K. A. and G. B. Foote,1976: Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 102,499-534
- Hanstrum, B. N., G. J. Holland, 1998: Aerosonde autonomous aircraft observations of a severe microburst. The 3rd Symposium on Integrated Observing Sysms....
- Holland, G. J., T. McGeer and H. Youngren, 1992: Autonomous Aerosondes for economical atmospheric soundings anywhere on the globe. *Bull. Ameri. Meteor. Soc.*, 73, 1987-1998.
- Hsu, H. H.,1996: On the onset of the east Asian summer monsoon. *Symposium on Global Ocean-Atmosphere-Land System*,181-184.
- Keenan, T. D. and R. E. Carbone, 1992: A preliminary morphology of precipitation systems in northern Australia. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 118, 283-326.
- Lin, P. H., C. H. Shiao, and Y. C. Yu, 1999: Diagnosis of NCEP/RSM performance during SCSMEX. *The 1st International RSM Conference, MHPCC, Maui, August 9-13, 1999, U.S.A.*
- Lau, K. M., Y. H. Ding, J. T. Wang, R. Johnson, T. Keenan, R. Citell, 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. Ameri. Meteor. Soc.*, 81, 1261-1270.
- Lemon, M.A. and D. P. Jorgensen, 1991. Precipitation and kinematic structure of an oceanic mesoscale convective system. Part II:

- momentum transport and generation. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2638-2653.
- May, P. T., K. P. Moran and R. G. Strauch, 1989 : The accuracy of RASS temperature measurements, *J. Appl. Meteor.* **28**, 1329-1335.
- McGeer, T., 1994: Very small autonomous aircraft for economical long-range deployment of lightweight instruments. *The first international airborne remote sensing conference and exhibition. Strasbourg, France.* 11-15
- Nicholls, S., and LeMone, M. A., 1980 : The fair-weather boundary layer in GATE : The relationship of subcloud fluxes and structure to the distribution and enhancement of cumulus clouds. *J. Atmos. Sci.* **37**, 2051-2067.
- Tyrrell, C., G. Holland and T. McGeer, 1996 : Aerosonde data acquired during the maritime continent thunderstorm experiment (personal communication).
- Wyngaard, J. C., W. T. Pennell, D. H. Lenschow and M. A. LeMone, 1978. The temperature-humidity covariance budget in the convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 47-58.
- Zipser, E. J., 1977: Mesoscale and convective-scale downdrafts as distinct components of squall-line circulation. *Mon. Wea. Rev.*, 1568-1589.

The Diagnosis of Aerosonde Data Acquired from the South China Sea Monsoon Experiment

Po-Hsiung Lin¹ Ching-Sheng Lee¹ Wen-Dong Jeng¹ Ming-Seng Lin²

¹Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

²Central Weather Bureau

(Manuscript received 8 March 2000 ; in final form 15 July 2000)

ABSTRACT

The data acquired from Aerosonde, which had been operated above Dungsha coral island during the South China Sea Monsoon Experiment, was diagnosed in this study. We discussed the correlation of sensor packages on-board to evaluate the stability and consistence of Aerosonde data. The comparison between Aerosonde and three sounding components of NCAR Integrated Sounding System provides the usability of Aerosonde in the mission of atmospheric sounding. Furthermore, two cases was discussed to diagnose the diurnal variation of atmospheric boundary layer and the internal structure of multi-cell convective system.

The correlation of the same meteorological parameters from three sensor packages, which are mounted under the wings and in the fuselage of Aerosonde, was discussed first. We found that the correlation coefficients in the pair comparisons among these sensor packages are greater than 0.9. The correlation of pressure is up to 0.999. The sensor located in the fuselage detected higher temperature and less moisture than the others under the wings, which suggests that the performance of sensors on-board were stable and reasonable. The root mean square of difference (RMSD) between Aerosonde and ISS soundings, was computed to examine the usability of Aerosonde. It showed that the RMSD of temperature field with GPS-based Radiosonde was 0.25°C and 0.55g/kg for specific humidity. RMSD of virtual temperature with Radio Acoustic Sounding System was near 2.0°C. RMSD of wind field with GPS-based Radiosonde and 915 MHz wind profiler both presented obvious degree from 0.81m/s to 2.71m/s in calm and severe weather conditions. These results are expected owing to the fact that their sounding process, geo-location and time interval are all different.

From the time evolution of the specific humidity and virtual potential temperature profiles in a case of 25-hour nonstop flight, it was found that the height of atmospheric boundary layer varied from less than 400m in the early morning to 1100m afternoon. A storm case showed that the windshift pattern in the lower atmosphere and multi-cell upward motions could be described well by the time evolution of Aerosonde altitude, environmental temperature and moisture flux.

Key words : South China Sea Monsoon Experiment, Aerosnde, Integrated Sounding System.
Marine boundary layer