

# 南海季風實驗期間無人飛機探空資料之分析

林博雄 鄭文通  
國立台灣大學大氣科學系

林民生 張忍成 曾俊二  
中央氣象局

## 摘要

無人飛機探空(aerosonde)是氣象界未來用以直接進入颱風環流內部觀測的實驗性工具，在南海季風實驗第一次密集觀測期間於東沙島進行 19 次海上大氣邊界層剖面資料蒐集。本文選出兩組觀測資料分析研究，一是 aerosonde 在雷雨胞中飛行一小時的案例，一是 aerosonde 連續滯空 25 小時的案例；前者用以診斷 aerosonde 在劇烈環境中飛行過程中資料的可信度，後者用以診斷亞洲季風肇始之前，南海海上大氣邊界層的若干特徵。資料初步分析發現，aerosonde 在雷雨胞中飛行所蒐集的溫濕度與風場，可以呈現雷雨胞移行與低層結構特徵，aerosonde 在劇烈雲雨區飛行能力是肯定的，但是無線電通訊會被雨勢強力干擾。此外，比較 aerosonde 的水汽觀測以及飛機本體的振動幅度發現，海上邊界層高度白晝時間可高達 1400 公尺，而夜間可降到 400 公尺以下。

## 一、前言

由於近幾年來電子儀器的迷你化趨勢，以及通訊科技的進步，科學研究者樂意捨棄租用大型飛機，改用輕巧機動性高的無人遙控飛機做為儀器載具。美國海軍研究辦公室(Office of Naval Research)，海軍研究學校(the Naval Postgraduate School)、加州理工學院(California Institute of Technology)、普林斯敦大學(Princeton University)共同成立了 the Center for Interdisciplinary Remotely-Piloted Aircraft Studies (CIRPAS)，目的是以便宜的造價提供科學界另一種空中觀測載具的選擇；1996 年 CIRPAS 正式向外界介紹了三款無人飛機載具，分別是 Pelican、Altus、Aerosonde (Bluth et. al., 1996)。其中以 aerosonde(無人飛機探空)造價最便宜，它的設計出發點，是考慮如何將無線電探空儀(radiosonde)的感應儀部份帶進颱風暴風圈之中進行環流結構的現場(in situ)觀測(Holland et. al., 1992)。由於颱風發展於熱帶洋面上，而海上的大氣探空資料極為貧乏，使用飛機接近颱風進行雷達掃描或是投入探空儀的成本耗費相當可觀。衛星觀測雖然可以提供颱風中心位置(當颱風眼清楚時)、颱風伴隨雲系外貌(可以估計颱風強度)、高層和低層衛星雲導風(cloud-drift wind)，可是當颱風眼不明顯時，颱風中心位置很難由衛星雲圖決定。過去美國空軍在關島的颱風飛機觀測在颱風預報作業中扮演非常重要的角色，但自 1987 年 9 月因經費不足以更新 C-130 機隊，而停止飛機颱風偵察任務後，因此西北太平洋地區急需另一種觀測工具，進行颱風在海上的中心位置、強度和暴風範圍

的直接觀測。第一款颱風觀測任務導向的無人飛機 Perseus，構想是遙控無人飛機由 15 公里高空進入颱風環流範圍，但是其動力設計與載具安裝所需的成本與運作經費依舊高昂(Langford and Emanuel, 1993)。1991 年美國 Insitu 公司開始投入 aerosonde 這種低空飛行 輕巧可拋棄式的飛機主體研發工作，該公司的企業標章即以颱風及飛機圖形來表達他們的理念與目標。1993 年澳洲氣象局加入贊助行列，並由澳洲 SENCON 公司協助開發與生產。1995 年 11~12 月 aerosonde 首次參與了澳洲 Maritime Continent Thunderstorm Experiment，開啓它在大氣科學研究領域的觀測任務。

中央氣象局於 1998 年 4 月取得 4 架 aerosonde，同年 5 月 2 日在宜蘭機場舉行說明會，會後隨即與澳洲技術團隊前往東沙島參與南海季風實驗(South China Sea Monsoon Experiment，以下簡稱為 SCSMEX; Lau, 1995)觀測活動。aerosonde 參與 SCSMEX 參與的科學目標有二，一是台灣工作團隊藉以了解與學習 aerosonde 操作流程，二是觀測南海海上大氣低層結構。由於人力物力之限制，aerosonde 僅參與 SCSMEX 第 1 次密集觀測實驗(以下簡稱 IOP-1)。aerosonde 於 1998 年 5 月 5 日抵達東沙島，5 月 9 日第 1 次起飛，隨後每日均進行 1 至 2 次飛行觀測。由於島上電源供應不甚穩定，除了 5 月 12 日與 16 日的飛行半徑擴及 50 公里，其餘飛行案例均在島上北側海上上空，進行離地 300 公尺到 1800 公尺的上下盤旋(如圖 1)。表 1 整理了前後 19 次的飛行概要，其中的第 8 次與第 18 次是

兩組較為特殊的天氣觀測任務，前一案例包含了一段 aerosonde 在雷雨胞中飛行的過程記錄，可用以診斷 aerosonde 在劇烈環境中飛行過程中資料蒐集的能力。後一案例是 aerosonde 連續滯空 25 小時的案例，可用以診斷亞洲季風肇始之前，南海海上大氣邊界層的若干特徵。第三節將分別探討這兩案例資料的分析初步結果，以下先說明 aerosonde 飛機主體與氣象感應器(sensor)特性。

## 二、aerosonde 硬體特性

aerosonde 飛機是一種較大尺寸的雙尾桿無機輪遙控模型飛機(圖 2)，展翼 2.9 公尺，翼寬 0.55 公尺，低轉速(小於 7000rpm)的後推式引擎可產生近 20m/s 的空速。機體淨重 8 公斤，低燃航空油油箱容量 5 公斤，最大航程是 2500 公里，飛行高度極限約 4 公里。機身採用抗壓性之輕玻璃纖維材質，起飛時由汽車承載於車頂，加速到時速 80 公里時起飛升空。降落時先停止引擎運轉，固定螺旋槳片為水平橫向，以機腹著地。機腹下方端視場地狀況貼上膠布減少摩擦損耗。機體有相當良好的流線曲率與對稱，以保持機身平衡。其所攜帶的 403MHz UHF 與全球定位系統(GPS)天線與通訊模組的航電系統，所需電力係利用螺旋槳轉動以皮帶帶動發電機，產生 12 至 24 伏特之直流電(依轉速而定)，供給航電系統使用。過剩之電流以 8 顆 1.5V 的串聯電池儲存，當發電機失效時，電池能提供 30 分鐘(高壓電模組)至 80 分鐘(低電壓模組)之電源，以利長程距離與長時間的飛行需求。

地面遙控系統是由一套無線電收發組件以及 Pentium-100 以上的個人電腦 組成，即時監控飛機姿態並傳收指令與氣象感測資料。操控軟體係以 DOS interactive mode 呈現於電腦螢幕，可由鍵盤隨時輸入航線路徑，各種回傳資料也可以用圖形顯示出來，並利用電腦內建警響警告各項飛行參數是否超越安全範圍。地面與 aerosonde 的通訊是以 TDMA (Time Difference Multi-Access)方式溝通，所有資料即時載入電腦硬碟中儲存；當原儲存檔大小超過 1Mb 容量時，程式將自動產生新檔儲存之。新一代 aerosonde 將利用全球衛星電話系統(比如 Motorola Iridium)做為通訊傳輸管道，以解決現階段無線電通訊半徑受制於地球曲率的極限。換言之，aerosonde 飛行體本身續航能力雖然可達 2500 公里巡弋空間，但是單一無線電通訊半徑不及 200 公里，再加上失速墜毀於地面的可能性，現階段 aerosonde 應用於海上中尺度天氣現象研究較為恰當，尤其是海上大氣邊界層之觀測，更能突顯其特色。

氣象感應元件方面，aerosonde 共攜帶 3 組芬蘭 Vaisala 公司出品之 RS90 溫度、溼度及氣壓感應元件，其重量僅有 190 克。表 2 是該元件的精確度一覽表，最高採樣頻率為 10Hz。2 組 RS90 分別位於左

右兩側機翼下方，另一組位於機體前艙之中，氣流由機體側邊導孔流入導管通過感應元件後再排出。每個感應元件於起飛前均與地面校驗箱內的參考元件進行比對校驗。aerosonde 使用 3 組氣象感應元件的目的，是為了防止某一元件突然失效以及各元件之間的交叉校驗之用。表 3 是 aerosonde 在第 8 次與第 18 次飛行任務中，3 組氣象元件的相互相關係數，每一變數在各元件之間均有 95~99% 以上的正相關，因此以下的資料分析即是以 3 組元件的平均值計算處理之。至於風向及風速數值的取得，是先透過 aerosonde 最前端的靜壓導管以及畢托管(pitot tube)取得靜壓與動壓數值，得知飛機相對於空氣之速度，再配合飛機的航向，對空速度與對地速度以及航向等數據，求得空氣的流速與流向。詳細的 aerosonde 機電與控制程序與應用參見 McGeer(1994)與林(1998)。

## 三、Aerosonde 天氣觀測

### (一) 雷雨胞觀測

1998 年 5 月 15 日，梅雨鋒面橫亙於台灣海峽，鋒面南端於南海北部激發了對流雲胞群並向東移行通過東沙島(圖 3a)。aerosonde 當日上午 09:15 起飛後，一直於島的北方進行原地上下盤旋。雷雨胞群在 7:20UTC 之後接續通過東沙島，低層西南風場於在 7:22~7:34UTC 轉為西北偏北的風場，近地面氣溫下降了 4 度，水汽通量由 160m<sup>3</sup>g/kg/sec 驟減到 20 m<sup>3</sup>g/kg/sec。7:34~7:37UTC aerosonde 再度到達最高點(~1700 公尺)，風場轉回西南偏西風，水汽通量也快速回升到 192m<sup>3</sup>g/kg/sec。之後 aerosonde 已經被上升氣流抬升而減緩下降速度，從 7:42~7:52UTC 每隔 5 分鐘一波波雷雨胞(水汽通量突增)接連通過 1500 公尺高度。7:52UTC 開始 aerosonde 被持續抬升超過 2100 公尺，地面工作人員於 08:85UTC 決定強迫 aerosonde 下降進行回收。08:07UTC 雨勢驟大，此時 aerosonde 訊號傳輸干擾甚為嚴重，另一波雷雨胞正通過島上上空，操作人員站在傾盆大雨低能見度目視下操控 aerosonde 落地。綜合以上敘述，aerosonde 在雷雨區內滯留將近一個小時。由風場、水汽以及飛機高度等資料顯示，第一波雷雨胞到達前夕，1800 公尺以下整層大氣有潮濕的西南風流場(鋒面對流線前緣)，接著有西北風流場的乾冷空氣到達地面(雷雨胞前緣下沖流)。雷雨胞群相距約 5 分鐘，較大的對流胞出現在第 4 波雷雨胞(圖 4)。這一個案顯示了 aerosonde 在雲雨區內的穩定飛行能力，但也突顯了無線電通訊電波會被較大降雨現象干擾的事實。

### (二) 海上邊界層結構

aerosonde 在 IOP-1 期間的飛行平均時數約 5 小時，其中最長的滯空飛行時間長度是第 18 次觀測的

25 小時又 10 分鐘。5 月 23 日天氣疏雲晴朗，由衛星雲圖研判東沙島附近海域無顯著對流系統，綜觀天氣環境平靜(圖 3b)。aerosonde 工作團隊決定進行一次連續 24 小時的大氣邊界層探空剖面資料蒐集。aerosonde 油箱滿載在當日上午 01:20UTC 起飛，之後一直保持在 500~2000 公尺的高度內上下盤旋 36 次，直到隔日上午 02:30UTC 降落。在這段期間大氣的厚度幾乎沒有變化，飛行最高點與最低點氣壓數值都維持在 800mb 與 950mb。同一時段內東沙島有 4 筆無線電探空觀測，其中的 0600UTC 與 1800UTC 探空是由中央大學探空整合系統(Integration Sounding System)的 Vaisala GPS-sonde 飛行取得，其感應元件與 aerosonde 的 RS90 為同一廠商製作，圖 5 是這 2 種觀測儀器同在 2000 公尺高度以下的溫度與溼度的線性迴歸分析。圖中顯示，氣溫的線性迴歸相當理想，而溼度則有較大差異。0600UTC aerosonde 溼度感測幾乎沒有垂直方向的變化，GPS-sonde 感測溼度是向上遞減的，但是 1800UTC 兩者的線性迴歸又較為明顯，其原因可能是下午時刻空中有零散積雲分布，深夜時刻島上空晴朗無雲，這兩時段大氣低層水汽分布狀況的差別所造成。由比溼的時間—高度分布圖(圖 6)的 0.015kg/kg 等值線高度隨時間的高度變化，可以大略得知大氣邊界層厚度日夜變化約有 100mb(~1000 公尺)的幅度，下午 3 點鐘可達 1400 公尺，深夜則僅達 400 公尺。

aerosonde 下傳的變數之中，包含了飛機本體的左右搖晃角度(yaw angle)與上下顛簸角度(pitch angle)，扣除 aerosonde 周期性的轉彎動作之後，這兩種角度顯著的振幅是代表大氣之中存在亂流，雲底、雲頂、邊界層頂部都是造成亂流的可能機制。圖 7 列出了 aerosonde 較大振動角度數值以及其出現的高度所在，相當合理地顯現白晝時段亂流出現的高度是在 400~1400 公尺之間，夜間 9 點鐘到隔日清晨 4 點鐘 aerosonde 則飛行相當平穩。清晨 5 點到 8 點鐘亂流出現高度快速升高，這似乎隱含著東沙島海域的邊界層高度白晝高達 1400 公尺，而夜間可降到 400 公尺以下，與圖 6 的訊息解釋可相互配合。

#### 四、總結與討論

本文就 aerosonde 的設計理念、硬體特徵以及其在 1998 年 5 月期間參與 SCSMEX 的 18 次觀測行動做一簡要介紹，並對 5 月 15 日雷雨胞觀測以及 5 月 23 日的大氣剖面連續 25 小時觀測，進一步分析資料的可信程度與涵意。初步結果顯示，aerosonde 在雷雨胞中飛行所蒐集的溫濕度與風場，可以呈現雷雨胞移行與低層結構特徵。aerosonde 在劇烈雲雨區飛行能力是肯定的，但是無線電通訊會被與雨勢強力干擾，對於 aerosonde 未來應用於颱風環流觀

測任務之達成效果造成隱憂。雖然 aerosonde 本身的續航能力以及平衡性相當高，通訊導航與資料傳輸能力仍需進一步改進，然而 aerosonde 應用於海上平靜大氣邊界層觀測有其潛力。資料診斷發現，海上邊界層高度白晝時間可高達 1400 公尺，而夜間可降到 400 公尺以下，這一數值範圍是與以往諸多大氣邊界層厚度變化調查是一致的。

aerosonde 未來新增功能改進的重點包括：(1)起飛和降落改為自動操作程序(2)採用低軌衛星通訊網路，以伸展 aerosonde 應用於中尺度以外的大氣觀測研究(3)克服雨水滲入機體以及引擎空中熄火兩項機械問題。一次的 aerosonde 觀測任務的達成，包括了飛行航道申請、產物以及第三人責任險、aerosonde 起降前後的機械檢查調整。換言之，所有載人飛機的各種程序對於 aerosonde 也是必要的。雖然 aerosonde 空中遙控載具的大氣觀測應用，對於台灣海島以及颱風侵襲有其特殊運用價值，但同時也需要航電、機械、以及氣象專才人士的同心合作，才能發揮 aerosonde 長處，達成科學目標。東沙島觀測實務以及 19 組資料分析經驗，對於台灣 aerosonde 工作團隊已經踏出了第一步。

#### 參考文獻：

- 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 P.18-24
- 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.
- Holland, G.J., T. McGeer, H. Youngren, 1992: Autonomous aerosondes for economical atmospheric soundings anywhere on the globe. Bull. Ameri. Meteor. Soc., 73, 1987-1998.
- Lnaford, J. S. and K. Emanuel, 1993: An unmanned aircraft for dropwindsonde deployment and hurricane reconnaissance. Bull. Ameri. Meteor. Soc., 74, 367-375.
- McGeer, T., 1994: Very small autonomous aircraft for economical lanfrange deployment of lightweight instruments. The first international airborne remote sensing conference and exhibition. Strasbourg, France.
- Tyrrell, G., G. Hofland and T. McGeer: Aerosonde data acquired during the Maritime Continent Thunderstorm Experiment. Sencon Environmental Systems Report. Melbourne, March 1996.

表 1: aerosonde 東沙島飛行記錄一覽表

編號	日期	起飛時間	落地時間	飛行時數
	5月8日	15:20	15:20	00:00
1	5月9日	11:30	18:00	06:30
2	5月10日	11:55	17:50	05:55
3	5月11日	08:00	08:00	00:00
4	5月11日	16:55	17:40	00:45
5	5月12日	08:20	15:25	07:05
6	5月12日	16:30	17:55	01:25
7	5月13日	11:50	18:00	06:10
	5月14日	off	off	off
8	5月15日	09:15	16:20	07:05
9	5月16日	09:15	15:20	06:05
10	5月17日	17:10	18:00	00:50
11	5月18日	08:20	17:50	09:30
12	5月19日	09:30	12:30	03:00
13	5月20日	08:30	09:30	01:00
14	5月20日	16:10	17:40	01:30
	5月21日	off	off	off
15	5月22日	10:05	14:30	04:25
16	5月22日	15:45	17:50	02:05

圖 1: SCSMEX aerosonde 於東沙島飛行的常態路徑。左圖是東沙島海岸線。

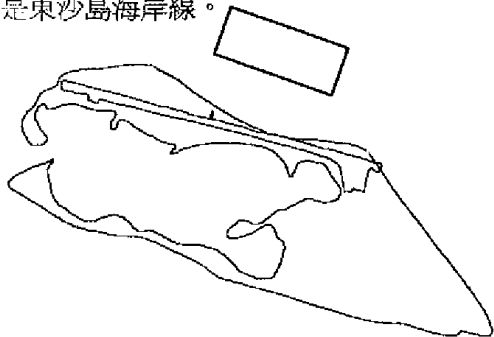
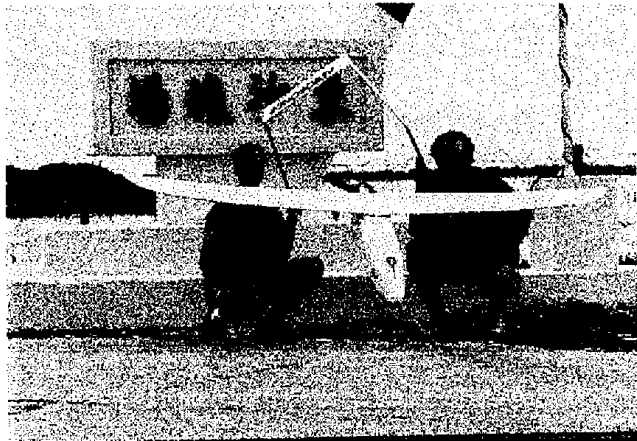


圖 2: aerosonde 實體(攝於東沙島機場, 1998 年 5 月)。



17	5月23日	09:20	不落地	
18	5月24日	接續前一天	10:30	25:10:00
19	5月25日	11:30	15:20	03:50

表 2: RS90 氣象元件規格

	氣壓 (空盒氣壓計)	溫度 (PT100)	濕度 (HUMICAP)
範圍	1070~3hPa	-90~55°C	0~100%
精確度	0.5hPa	±0.1°C	±2%

表 3: 三組氣象元件變數之間的相關係數

日期: 5/15, 1998	氣壓	溫度	濕度
左翼 & 機艙	0.999	0.991	0.975
機艙 & 右翼	0.999	0.988	0.961
左翼 & 右翼	0.999	0.997	0.987
日期: 5/23, 1998	氣壓	溫度	濕度
左翼 & 機艙	0.999	0.996	0.981
機艙 & 右翼	0.999	0.995	0.978
左翼 & 右翼	0.999	0.999	0.996

圖 3a: 日本 GMS-5 氣象衛星雲圖水汽頻道 (07Z, 05/15, 1998)

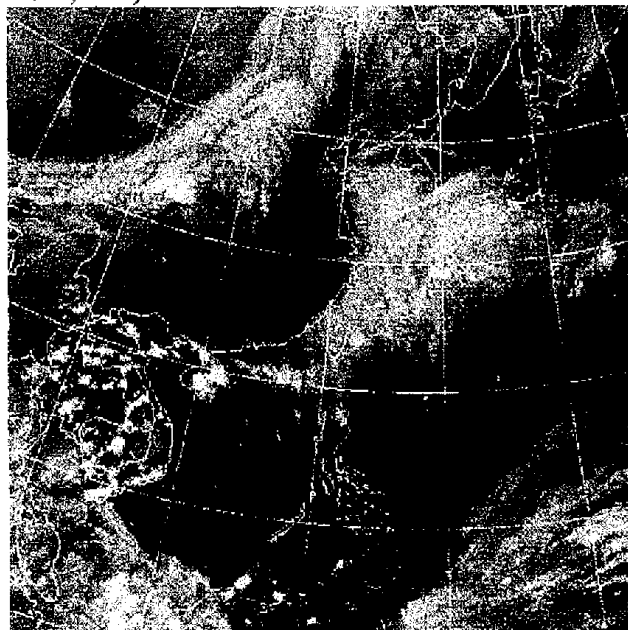


圖 3b: 日本 GMS-5 氣象衛星雲圖水汽頻道 (06Z, 05/23,1998)

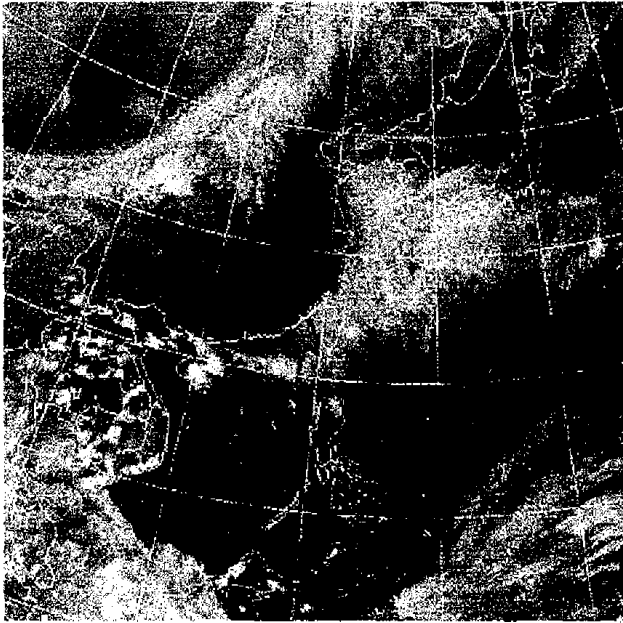
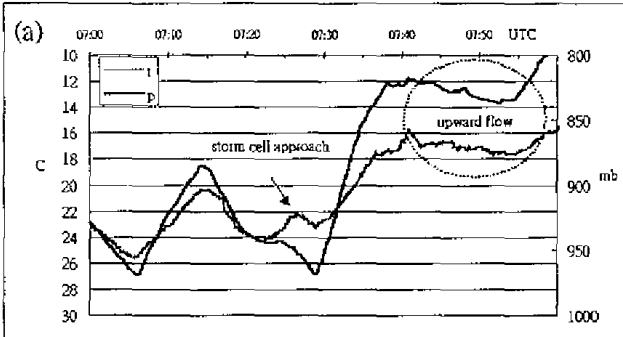


圖 4: (a) aerosonde 氣壓與氣溫的時間變化圖。橫軸是時間 (UTC, 5/15, 1998), 縱軸左方標示氣溫 (°C), 間距 2 °C 縱軸右方標示氣壓 (MB), 間距 50mb。



(b) aerosonde 東西向風速 南北向風速以及東西向水汽通量的時間變化圖。橫軸是時間 (UTC, 5/15, 1998), 縱軸左方標示風速 (m/sec), 間距 5m/sec。縱軸右方標示東西向水汽通量 (m\*g/kg/sec), 間距 50m\*g/kg/sec。

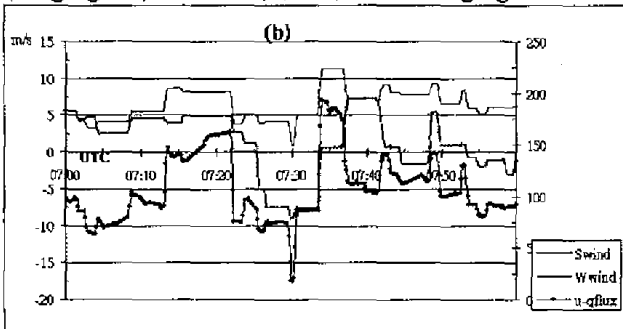


圖 5: aerosonde 與 radiosonde (ISS)的溫度與濕度迴歸圖, 橫軸與縱軸意義均標示於圖上。

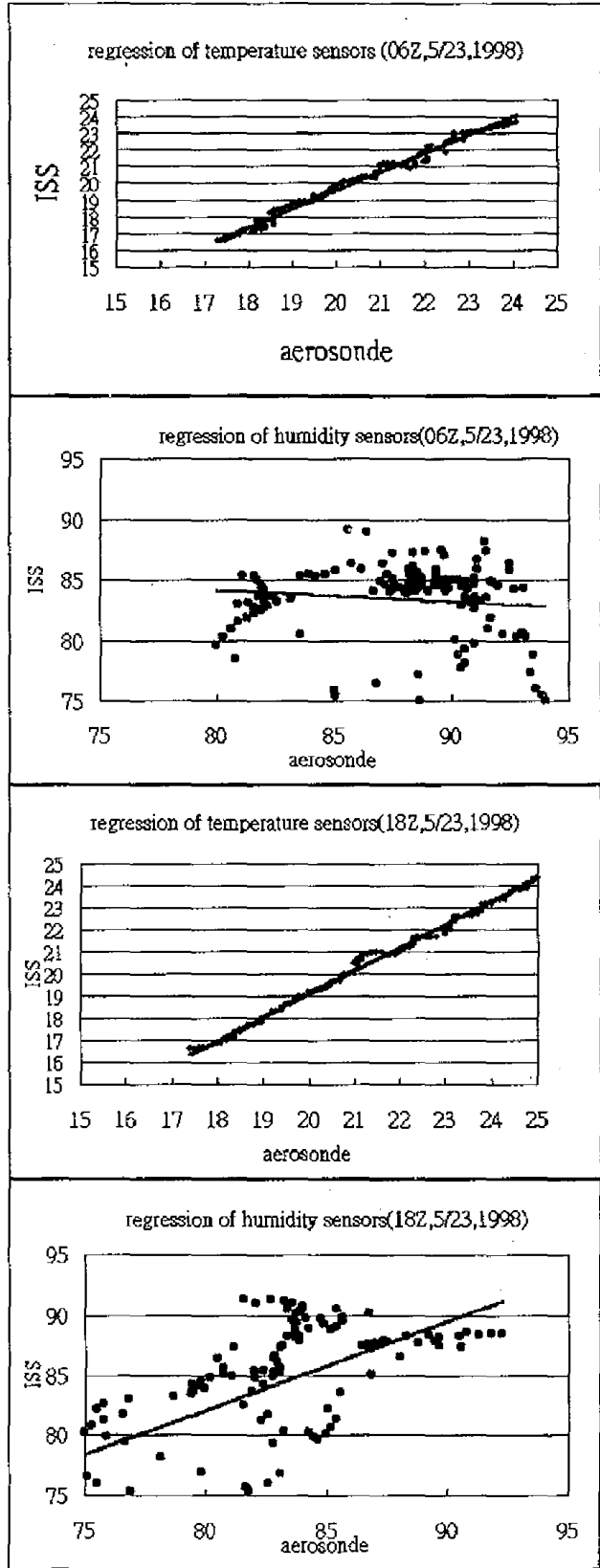


圖 6: aerosonde 水汽剖面時間序列圖。橫軸是時間 (02:00Z, 5/23, 1998~02:00Z, 5/24, 1998)，縱軸是氣壓 (單位是 mb)，等值線是比濕 (單位是 kg/kg)，間距是 0.003kg/kg。

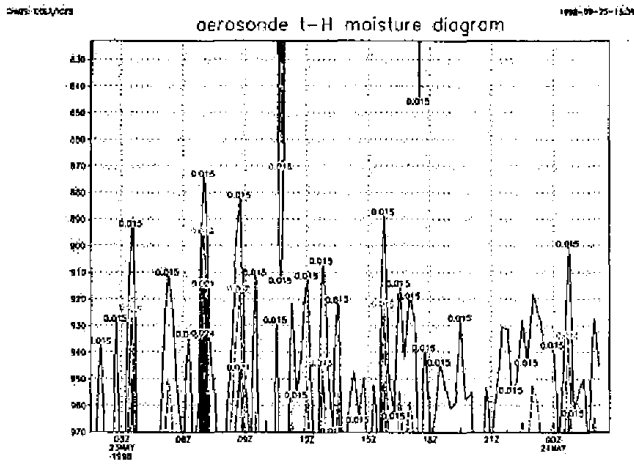
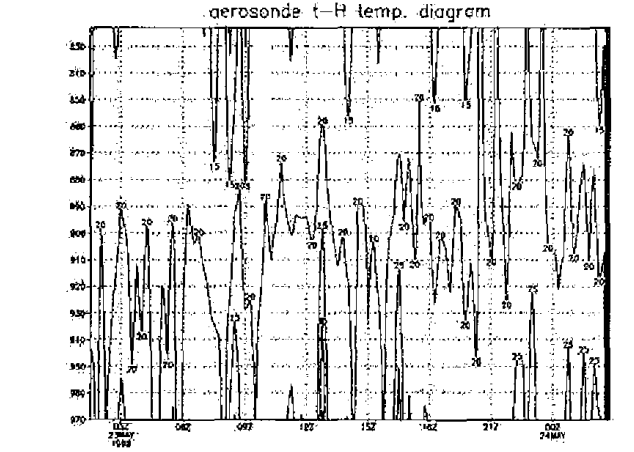
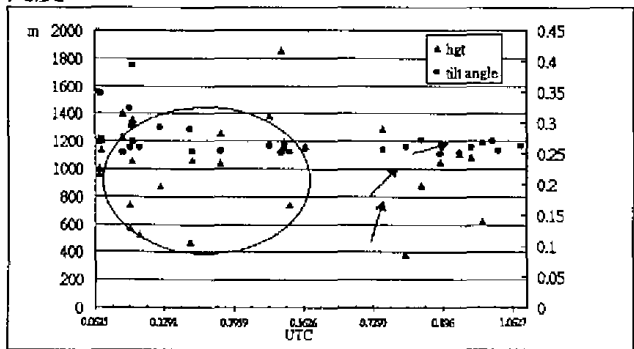


圖 7: aerosonde 機體振動角度與高度之時間序列圖。橫軸是時間 (01:30Z, 5/23, 1998~01:30Z, 5/24, 1998)，縱軸左方標示高度 (單位是 m)，縱軸右方標示振動角度。



## AEROSONDE DATA ACQUIRED DURING SCSMEX

Po-Hsiung Lin, Wen-Tung Jeng

Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

(linpo@atmos.as.ntu.edu.tw, r6229020@ms.cc.ntu.edu.tw)

### Abstract

An efficient unmanned aircraft vehicle (UAV) combined with atmospheric sounding capability, called aerosonde, had testing trial at Dungsha coral island during South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX). Nineteen flights were done during the first intensive observation period (IOP-1). The flights were restricted in the 50 kilometer radius around Dungsha in case of the radio communication and the safety requirement from civil aeronautic control. Aerosonde data quality was checked first with comparing radiosondes. Then a near clear sky all-day sounding case are used to understand the diurnal variation of ocean boundary layer structure. Another flight record in thunderstorm is used to check aerosonde performance in 1999 typhoon observation.

**Key words:** SCSMEX, aerosonde, ocean boundary layer