

# 南海大氣邊界層之觀測與分析

林博雄

國立台灣大學大氣科學系

## 摘要

1997-1998 年南海季風實驗計劃(SCSMEX)，將針對 5 至 6 月春夏季節轉變期間南海地區的大氣與海洋環流特徵，進行密集觀測的資料蒐集與數值模擬。本文討論 1997 年 4 月中旬的國科會海研一號研究船南海航次，以及 5 月上旬東沙島密集探空觀測的資料蒐集與分析，配合美國國家環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)區域波譜模式(Regional Spectral Model, RSM)的數值模擬，探討 1997 年東亞夏季季風肇始前的南海大氣邊界層特徵。

透過船舶以及東沙島高解析度探空資料，海上的大氣邊界層高度被加以標示。此外，利用探空資料與 bulk formula 方法所估算的可感熱與潛熱通量比值，和船舶超音波風速計與精密溫、溼度計依據慣性消散法方法所估量的海面熱通量數值、以及 NCEP/RSM 的海面熱通量數值模擬，彼此加以相互驗證。

## 一、前言

行星邊界層觀測已經在歐洲與美國進行三十餘年，觀測技術由早期的鐵塔多層平台的風速與溫濕度觀測、無線電探空(rabos)或繫留汽球(tethred balloon)的大氣垂直剖面觀測等之類的現場(in situ)觀測方式，發展到雷達、飛機與衛星等的遙測方式(Lenschow, 1986)；相關的科學主題則從地區性的環境污染紊流擴散問題，到全球性的氣候變遷問題。自從 1968 年美國 Kansas 實驗開始迄今，陸地上的大氣邊界層觀測所獲得的資料分析，與紊流理論或是數值模擬都有高度的重合性(Stull, 1988)；相對而言，洋面上的行星邊界層特性，一直沒有大量的觀測資料來佐證理論，主要原因是全球氣象研究船數量甚少，船舶平台狹小空間及晃動；此外，海上鹽份污染感測元件(Katsaros et al., 1994)，海上風應力引起海浪白沫、碎花或是波浪的不同的邊界條件(Bortkovskii, 1983)，也是海上邊界層觀測不可忽略的難題。因此海上的大氣邊界層觀測，通常選擇海島或是鑽油平台來進行。台灣氣象界近年來開始進行規模性大氣邊界層特性的觀測與數值模擬(吳, 1994)。海洋界也開始進行港灣海面氣象觀測，並擴及到近海地區的海面觀測(曾與李, 1995)。後者是利用安裝在船桿上的超音波風速計與精密溫、濕度計(以下簡稱海面通量觀測系統)，透過慣性消散法(inertial dissipation)來估算海面的動量通量、熱通量與水汽通量數值。

近年來國內開始著重於東亞夏季季風與南海的相關研究，但是海上大氣邊界層結構觀測與分析依然是空白，1998 年 SCSMEX 密集觀測任務之一即是調查南海海氣交互作用過程。目前對於海上大氣邊界層垂直剖面的資料蒐集，有三種常見方式，一是利用飛機現場觀測，二是船舶搭載雷達進行遙測，但是這二者的成本十分高昂；三是利用無線電探空技術，由汽球牽引無線電探空儀(radiosonde)緩慢上升飛行，成本低廉但誤差較大。Smith et al.(1991)利用慢速升空的無線電探空資料，取得較高垂直解析度的相當位溫與比溼垂直變化，兩數值的相對變化指引著當時大氣的熱力結構，並據以辨識近地層、混合層的高度所在，同時利用 bulk formula 概念估算當地的地表可感熱與潛熱通量比值(Bowen ratio)。

作者與台灣大學大氣測計實驗室學生利用 1997 年 4 月中旬的國科會海研一號研究船南海航次，以及 5 月上旬進入東沙島訪問 5 天機會，由船舶甲板與海島進行慢速升空探空觀測，一則蒐集南海海上低層大氣結構資料，二則測試 Smith et al. 的 Bowen ratio 估計方法，與同船的中山大學海面通量觀測系統量測資料的差異，同時也執行 NCEP/RSM 區域數值模式(Juang and Kanamitsu, 1994)來取得以上兩時期的大氣環流與海面熱通量模擬數值。第二節說明觀測資料的取得過程，至於 NCEP/RSM 模式的基本架構與測試，參見作者博士論文(林, 1996)，本文不再贅述。第三節分析海上大氣邊界層特徵，以及三種不同來源的海面熱通量彼此異同，最後是 1998

年南海季風實驗海上大氣邊界層觀測的展望。

## 二、南海海域大氣邊界層觀測

### (1) 1997年4月15日到20日海研一號南海航次

1997年4月15日上午09:00L海研一號於高雄出海，沿著既定航行路線(圖1)西南航行，並於東沙島西南側約100公里處(三角航線的最南端)佈放Atlas海上氣象與波浪觀測繫留平台。航行前段時間中山大學海面通量觀測系統因海面風浪損及儀器而運作失靈，直到4月18日才開始正常收錄資料，中山大學對於該航次資料可信度有所保留。台灣大學大氣科學系使用Vaisala MARWIN-12 Omega/LORAN-C探空機組，每隔一個緯度或世界標準時00Z與12Z進行慢速升空的低層大氣剖面觀測。航行途中Vaisala RS-80L探空儀一直是待機狀態，以了解Loran-C導航訊號接收情況。Loran-C導航訊號接收強度測試是這航次中的附帶任務，原因是1987年台灣中尺度天氣實驗計畫(TAMEX)期間，曾購入NCAR CLASS(Cross Loran Chain Sounding System)系統在台灣海峽觀測梅雨鋒面系統的重任，卻因大陸沿海地面發射站遲未建站而放棄。圖2標示了1997年東亞地區Loran-C導航訊號地面發射站位置，大陸雖然建置了三處地面發射站，但是對於台灣地區僅有西北局部地區位於通訊鏈(chain)邊界，比如中央氣象局板橋測站每月2次的臭氧探空觀測可以接收得到Loran-C導航訊號，台南七股沿海地區已經無法接收到Loran-C導航訊號。依據圖2所示，南海地區完全不在Loran-C通訊鏈之內，這航次實地證實了Loran-C導航訊號是無法在南海海域中使用。因此這次航行途中汽球探空測風資料改以Omega導航訊號求得。船舶探空觀測總計14筆，其中9次觀測剖面資料被完整收錄起來(表1)。同一時間的東沙島海軍氣象台探空資料亦被加以蒐集，以利相互比對。

### (2) 東沙島邊界層觀測

東沙島位於東經116.43度，北緯20.42度，隸屬國防部管轄。作者於97年3月受邀登上東沙島進行SCSMEX觀測場地勘查，認為當地條件適合進行大氣邊界層觀測試驗，返台後立即再度申請於5月上旬(東亞夏季季風肇始之前)進行島上的探空與繫留汽球觀測。4月下旬台灣大學先將儀器委託海軍運補船艦送往東沙島，由於經費短缺與時間限制，台

灣大學觀測隊伍僅在東沙島停留5天，其中的5月3日到5日進行6小時時間間距的密集探空觀測，凌晨2:00與下午2:00由台大師生負責操作，而常態性的觀測作業(上午8:00與晚上8:00)仍由氣象台海軍官兵負責。每日清晨5:00與下午5:00並於東沙島機場停機坪進行繫留汽球低空大氣邊界層觀測。5月6日人員與器材一同搭乘空軍運輸機返回台灣。

## 三、南海海域大氣邊界層特徵

大體而言，陸地行星邊界層特性遠比洋面上來得複雜，主要因素來自於陸地地形地物的表層特徵比海洋洋面來得崎嶇，土壤與海水比熱的差異也高達4000倍；此外，海水溫度的日夜起伏很小。因此我們可以預期海上大氣邊界層特徵較無明顯的日夜變化，除非有明顯的天氣系統影響洋面(Steven and Weller, 1986)。首先說明上述二個觀測期間的海上天氣型態。

### (1) 天氣背景

4月份的東亞天氣系統最明顯的特徵，是中緯度鋒面間歇性地南下到達台灣，南海北部海域偶也受到鋒面系統的擾動。1997年4月15、16日鋒面滯留於台灣北部海面，全省陰雨。15日研究船出航當時天氣惡劣，甚至偶有雷雨，海面風浪於4月17日凌晨才轉為平靜。太平洋高壓脊線在往後二日伸入南海，海上天氣趨於穩定。5月份的東亞天氣系統開始呈現季節轉變特徵，中緯度鋒面滯留時間延長，同時南海海域風場偶有大範圍的暖溼西南風場特徵出現。1997年5月3日到5日，鋒面接近台灣北部，台灣與南海北部雲量偏多，但是天氣系統環流微弱，東沙島探空也顯示了800hPa高度有數日持續的沈降乾燥現象。東沙島白晝與夜間地面氣溫溫差僅有4度，整日溼度都很均勻，風向是穩定的南偏西風系，風速無日夜變化，數值在1到4m/s之間。

### (2) 邊界層高度

圖3是4月16到18日中午時刻2000公尺以下的相當位溫探空剖面，17與18日的邊界層高度約在500公尺高度，而16日是沒有明顯的邊界層，這結果顯然與當時天氣的穩定度有關。但是圖4又顯示另一種有趣的訊息；4月18日凌晨03:30海研一號結束拋放Atlas buoy開始向正北方向全速航行200公里，船與大陸陸地距離拉近一半，海水深度由3000公尺驟減到500公尺左右，海上的大氣邊界層高度也明顯地由500公尺(14:30L)到完全消失(20:00L)，海上天氣並無明顯變化，因此海洋

混合層與大氣邊界層是否有如此劇烈的對應關係，值得再次查證。5月4、5日有4次完整的日夜探空觀測，圖5說明了東沙島當時白晝邊界層高度在750公尺左右，夜間則稍下降到500公尺，的確不如陸地上的劇烈日夜變化。

### (3)海面熱通量

NCEP/RSM 模擬4月16到18日南海海上海面潛熱與可感熱每6小時時間演變，顯示了由早期明顯的南北向空間梯度，逐漸減小到全面均勻化，確實定性掌握了該地區海面熱通量受到天氣鋒面系統影響的事實，但是若以模式網格點數值與船測或探空估計數值比較，仍有相當誤差(表2)。探空資料的 Bowen ratio 估計值與船舶海面通量觀測系統，或是與 NCEP/RSM 模擬數值三者相互比較，都不甚吻合。5月4、5日兩天，NCEP/RSM 的南海潛熱與可感熱通量計算，合理地隨著日夜變化地呈現微小振幅，但是若與探空資料的 Bowen ratio 估計值比較，兩者仍是不吻合的。由於這三種熱通量都是間接計算得來，我們缺乏一組可以代表真值的數據，做為這三種方式估計海面熱通量的優劣仲裁，但是 NCEP/RSM 可以提供合理的區域天氣環流特徵，以及海面熱平衡數量的因次，這對於我們用來搭配區域天氣密集觀測計劃的資料詮釋有莫大幫助。

## 四、結果與展望

本文透過簡易的無線電探空資料，探討了1997年4月南海航次以及5月東沙島所表徵的南海海上大氣邊界層垂直結構，以及比較數種資料來源的海面熱通量(比值)估算結果。資料顯示，海上大氣邊界層高度明顯與否與當時天氣系統的影響程度有關。4月17、18日中午，鋒面遠離南海，大氣邊界層高度大約500公尺。5月4、5日東沙島下午邊界層高度在750公尺左右，夜間則稍下降到500公尺，證實海洋大氣邊界層日夜變化幅度不若陸地明顯。1997年4月18日天氣雖無明顯變化，但是大氣邊界層高度的探測卻隨著船舶由深海航向大陸棚而逐漸模糊，是否意味著海洋混合層與大氣邊界層有劇烈的對應，值得再次查證。海面熱通量估計方面，三種資料沒有明確交集，因此無法有具體結論，但是 NCEP/RSM 對於大氣環流特徵的掌握，以及其影響海洋洋面熱量平衡的數量級都是可接受的。

由於 SCSMEX 密集觀測期間(IOP)安排海研一號船舶探空觀測作業，本文也強調了 Loran-C 無線電導航訊號無法在南海地區使用

的事實。由於 Omega 全球導航系統已在1997年10月1日起關閉，因此1998年南海的大氣探空觀測需要引用 GPS 探空系統，否則將無法獲得海上風場垂直剖面資料。

東沙島將於1998年南海季風實驗計劃作業期間，晉升為台灣科學家觀測活動的重要據點；目前已安排澳洲氣象局 C-pol 雷達、中央大學 NCAR ISS (Integrated Sounding System) 系統，中央氣象局 aerosonde(無人飛機探空)，以及美國 NASA 地面輻射站的架設。除此之外，日本地球同步氣象衛星資料也將被用以反演南海海面輻射通量計算(Chou, 1994)。這些先進的觀測器材都將提供更周詳的海上大氣邊界層資料，並可彼此校驗。本文所取得與分析的南海大氣現場觀測資料，雖然資料品質需要進一步確認，資料數量也不算充足，但這些觀測作業經驗與資料分析心得，將在1998年 SCSMEX IOP 時期派上用場。

## 致謝：

本文在國科會 NSC 86-2111-M-002-016-T 計劃贊助下完成，並感謝中山大學曾若玄教授、海軍氣象中心、中央氣象局的資料提供。

## 參考文獻：

- 吳清吉，1994：西北台灣局部環流。國家科學委員會研究報告 NSC83-0202-M0002-012。
- 林博雄，1996：東亞夏季季風與梅雨鋒。國立台灣大學大氣科學研究所博士論文。
- 曾若玄，李文鴻，1995：利用慣性消散法估算海面風應力及熱通量的研究。台灣海洋學刊，34，53-70。
- Bortkovskii, R.S., 1983: Air-Sea Exchange of Heat and Moisture During Storms. D. Reidel Publishing Company.
- Chou, M. D., 1994: Radiation budgets in the western tropical Pacific. *J. Climate*, 7, 1958-1971.
- Juang, H. M. and M. Kanamitsu, 1994: The nested regional spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 3-26。
- Katsaros, K. B., J. R. Lind, R. J. Anderson, S. D. Smith, R. Kraan, W. Osst, K. Uhlig, P. G. Mestayer, S. E. Larsen, M. H. Smith, and G. DeLeeuw, 1994: Measurements of humidity and temperature in the marine environment during the HEXOS main experiment. *J. Atmos. & Oce. Technology*,

11, 964-981。

Lenschow D. H., 1986 : Probing the Atmospheric Boundary Layer. *American Meteorological Society*, pp269.

Smith, E. A., H. J. Cooper, W. L. Crosson and D. D. Delorey, 1991 : Retrieval of surface heat and moisture fluxes from slow-launched radiosondes。 *J. Appl.*

*Meteor.* 30, 1613-1626。

Steven, A. S. and R. A. Weiler, 1986 : The frontal air-sea interaction experiment (FASINEX), part II: experimental plan。 *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 67, 16-20。

Stull, R. B., 1988 : An Introduction to Boundary Layer Meteorology. *Kluwer Academic Publisher*, pp 666.

	日期時間	經度	緯度	劇烈天氣	探空儀高度(公尺)	導航系統	備註
1	970416/0500	119.07	20.54	霧	5000	Omega	成功
2	970416/0800	118.49	20.41	雷雨		Omega	失敗
3	970416/0830	118.4	20.33	雷雨		Omega	失敗
4	970416/0900	118.36	20.3	雷雨		Omega	失敗
5	970416/1100	118.27	20.22		4500	Omega	成功
6	970416/1400	118.05	20.06		350	Omega	成功
7	970417/0700	116.07	18.17			Loran-C	失敗
8	970417/1100	115.36	18.06			Omega	失敗
9	970417/1130	115.36	18.06		5500	Omega	成功
10	970418/0330	115.36	18.36	霧	5500	Omega	成功
11	970418/1430	115.36	20.06		5500	Omega	成功
12	970418/1800	115.36	20.43		7500	Omega	成功
13	970418/2000	115.36	20.43		17000	Omega	成功
14	970418/2300	115.36	21.1		7800	Omega	成功

表 1 : 1997 年 4 月 16 日至 18 日海研一號 14 次探空觀測一覽表。

日期	慣性消散法	汽球探空Smith法	NCEP/RSM
97/04/16/08:00L	0.167		0.08
97/04/16/20:00L	0.016		0.047
97/04/17/08:00L	0.029		0.02
97/04/18/14:00L	0.092	0.228	-0.045
97/04/18/18:00L	0.57	0.32	
97/04/18/20:00L	0.33	0.45	-0.098
97/04/18/22:00L	0.178	0.161	
97/04/19/02:00L	0.065		-0.182
97/04/19/14:00L	0.24		-0.091
97/04/20/22:00L	0.186		0.056
97/05/04/02:00L		-0.013	-0.051
97/05/04/14:00L		0.228	-0.056
97/05/05/02:00L		0.225	0.051
97/05/05/14:00L		0.7125	0.051

表 2 : 1997 年 4 月 18 日與 5 月 4、5 日, 中山大學海面熱通量量測系統的慣性消散法、汽球探空資料反演的 Smith 法, 以及 NCEP/RSM 數值模擬的可感熱與潛熱比值(Bowen ratio)比較表。

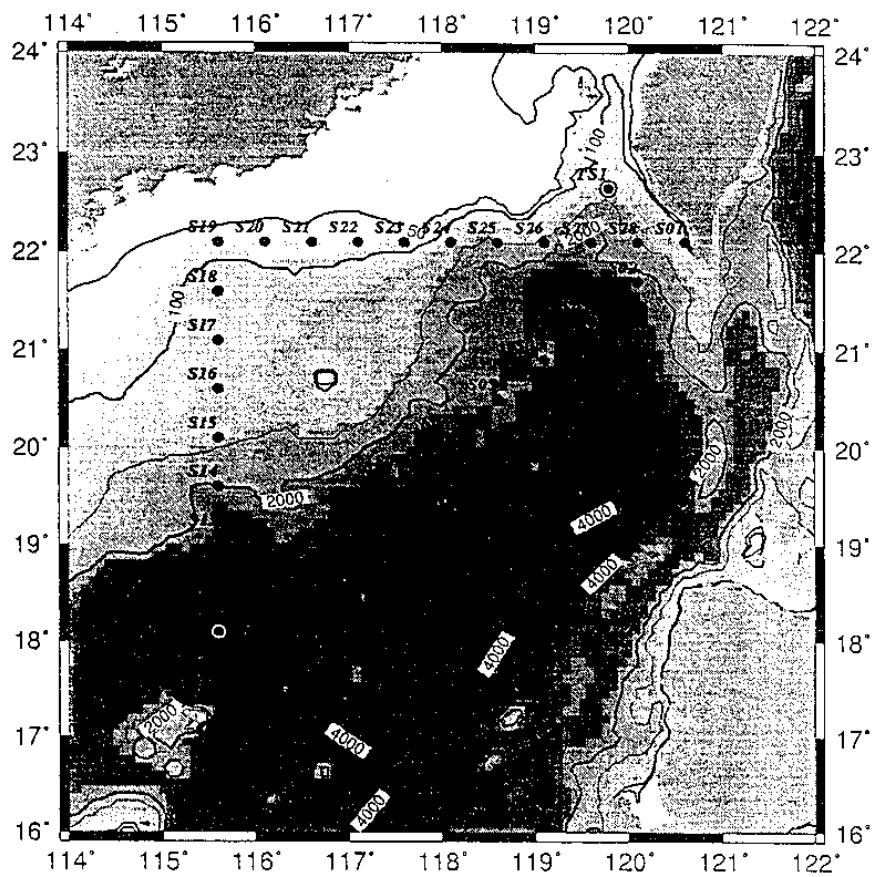


圖 1：海研一號 1997 年 4 月 15 日到 21 日南海航次航線，航行過程是由 S1 到 S22。

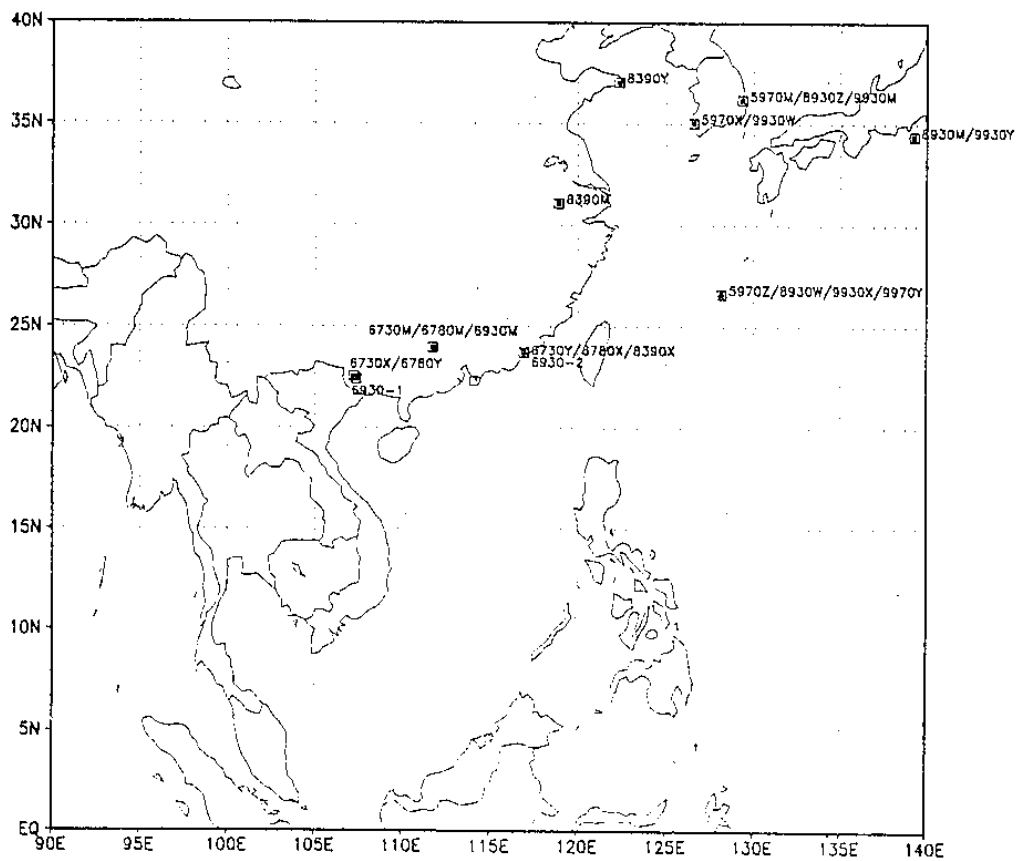


圖 2：東亞沿海地區 Loran-C 等航訊號發射站位置。

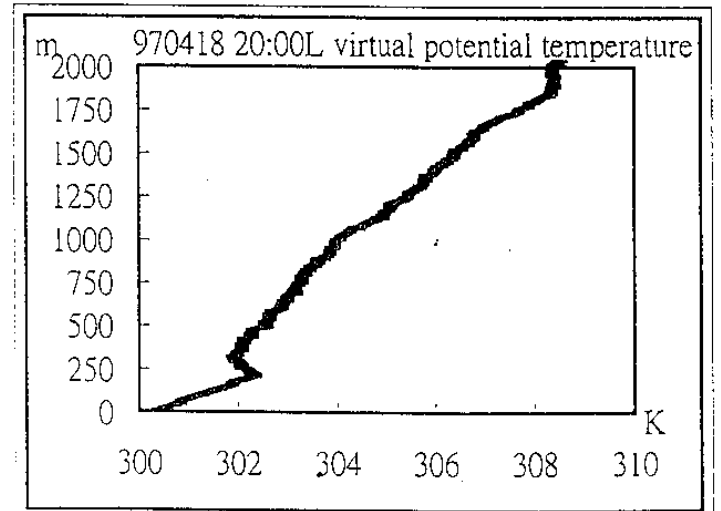
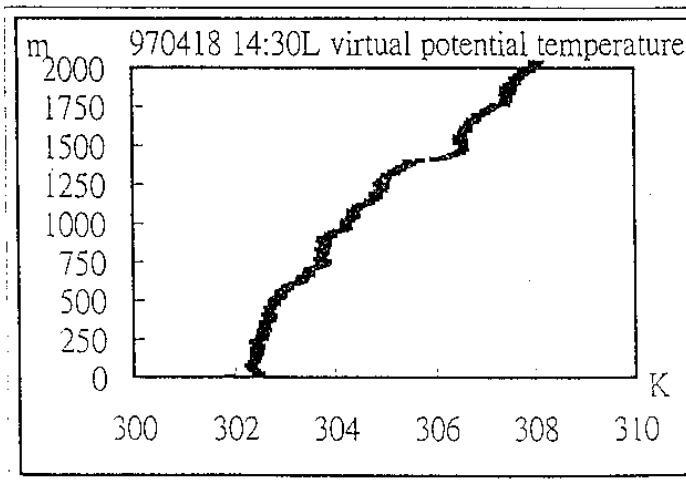
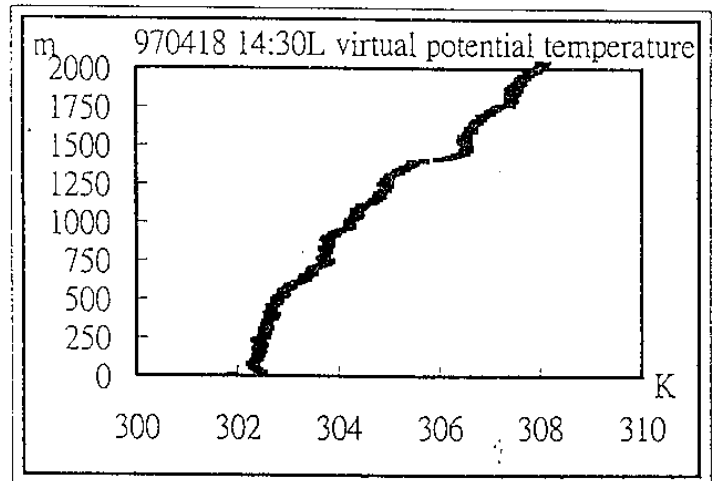
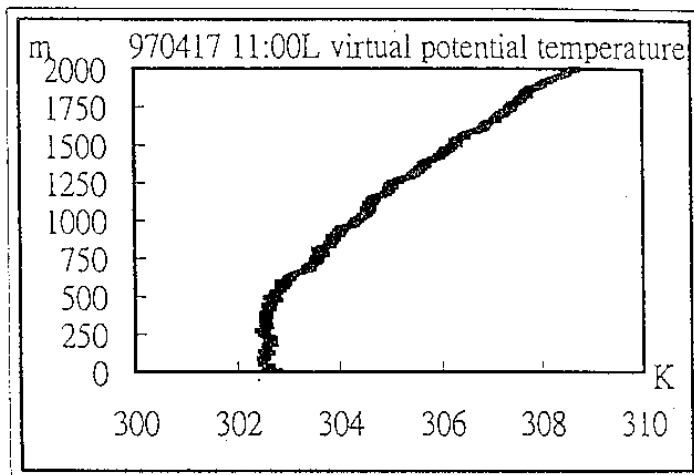
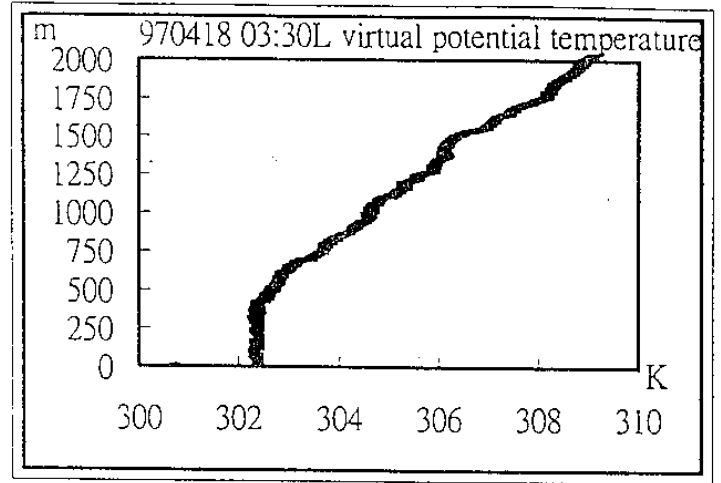
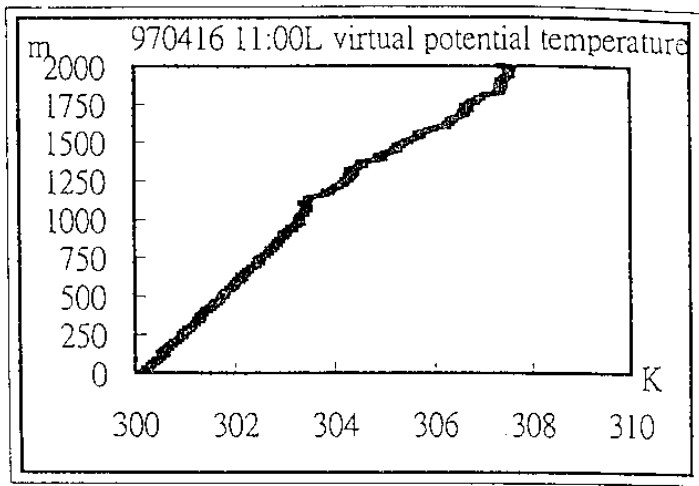


圖 3：1997 年 4 月 16、17、18 日三天中午，2000 公尺以下的大氣相當位溫剖面圖。

圖 4：1997 年 4 月 18 日 03:30L、14:30L、20:00L 三段時間上，2000 公尺以下的大氣相當位溫剖面圖。

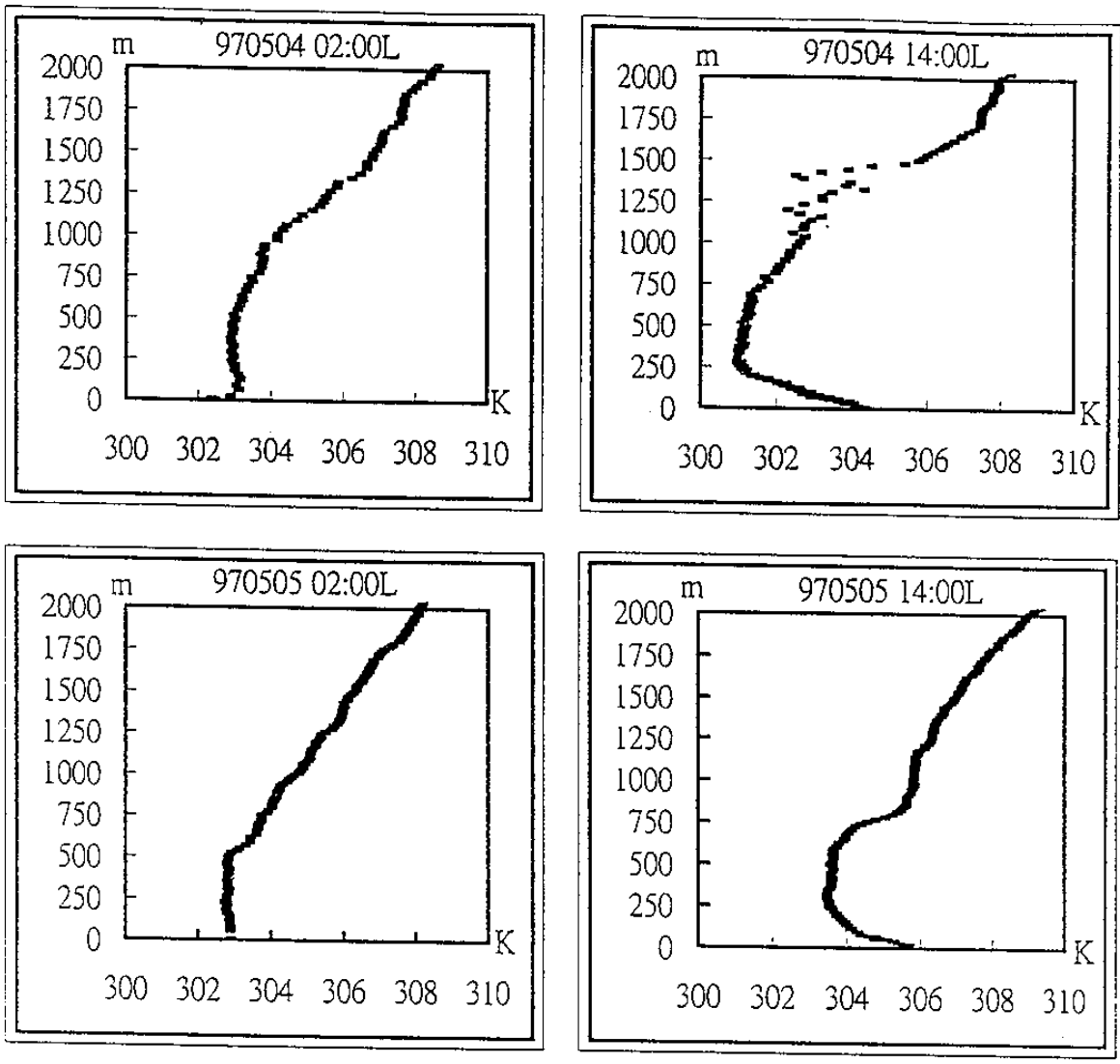


圖 5：1997 年 5 月 4 日與 5 日 02:00L 與 14:00L，東沙島 2000 公尺以下的大氣相當位溫剖面圖。