

梅雨期南海北部與台灣東部大氣邊界層與對流之觀測研究

林沛練、林欣弘

中央大學大氣大氣物理研究所

摘要

本研究利用 1998 年南海季風實驗計劃以及 2001 年綠島實驗計劃，分別架設於南海北部東沙島與台東成功測站上的「整合探空系統」之觀測資料進行分析研究，由於整合探空系統的剖風雷達在低層大氣內有很好的解析能力，因此再配合強化型地面觀測站及探空氣球資料，在邊界層特性分析上有很大的助益。本研究重點在於分別探討梅雨季期間南海北部海洋邊界層及台灣東部兩者不同地區的邊界層特性，並且分析討論季風肇始前後邊界層特性的演變、邊界層風場垂直分布的變化特性、水氣輸送和大氣水氣含量的改變以及對流的發展與演變等物理特徵，企圖了解以往缺乏觀測資料的南海北部以及台灣東部的邊界層物理特性。

一、前言

台灣的梅雨季和南海季風之肇始期大約在同一時期發生，當南海季風肇始後，伴隨著的梅雨鋒面，經常造成豪大雨的發生，因此了解缺乏觀測的南海及台灣東部的季風發展與區域環流發展機制，有助於更進一步掌握災害的預防。而整合探空系統在 1998 及 2001 年分別支援了南海季風實驗計劃與綠島實驗計劃，強化了這兩個實驗計劃的觀測與分析能力。

整合探空系統(Integrated Sounding System, ISS)之 915MHz 晴空剖風雷達的回波強度取決於大氣亂流的活動及溫度與溼度的梯度，因此可以用剖風儀的觀測結果決定對流邊界層的高度。邊界層頂是大氣亂流活動的明顯界線，其上為均勻大氣，下方邊界層內則有明顯的亂流活動，而且由於亂流充分的混合會造成邊界層頂的逆溫層，因此在邊界層頂亂流活動、溫度以及溼度的梯度均相當大，也因此觀測低層大氣結構方面，晴空剖風雷達將可解析出邊界層的特性。在低層大氣中，折射指數梯度常出現在近地面的邊界層、逆溫層(Rogers et al., 1993)、雲的邊界等處(Knight and Miller, 1993)，研究結果亦指出：通常折射指數的空間變化是由溼度梯度所造成，而非溫度梯度；當雨或雪下落通過晴空大氣的反射區，會修飾該處的溼度結構，並且可能影響小尺度的大氣紊流，因而改變反射率。晴空剖風雷達可提供高時間及空間解析度的降水資訊：由於超高頻晴空剖風雷達對降水的雷氏散射較為敏感(Rogers et al. 1993; Ralph, 1995)，垂直速度的觀測常被降水的雷氏散射所干擾，因此在較大的降水時，常常只會得到降水粒子的強回

波。

二、觀測分析

南海季風實驗由 1998 年 5 月 1 日開始，至 6 月 30 日，由 ISS 地面觀測站觀測雨量資料得知(圖 1)，在實驗期間的降雨分布型態上，密集的降雨由 5 月 15 日開始，5 月 15 日之前除了在 5 月 2 日及 4 日曾出現較強的局部降水事件，從 5 月 4 日至 14 日皆為晴天。5 月 15 日之後可分為兩波密集的降水期，分別為 5 月 15 日至 5 月 20 日的第一波密集降雨以及 5 月 30 日至 6 月 8 日第二波密集降雨。第一波密集降水共持續六天，平均日雨量為 18.5 公厘；第二波密集降水持續 10 天，平均降雨量 29.4 公厘。在溫度趨勢上，在晴天期大部分呈現穩定的日夜變化，但在第一波密集降雨之後 5/26 日三天晴天期溫度呈明顯下降趨勢，這是受到北方冷空氣南下的影響。

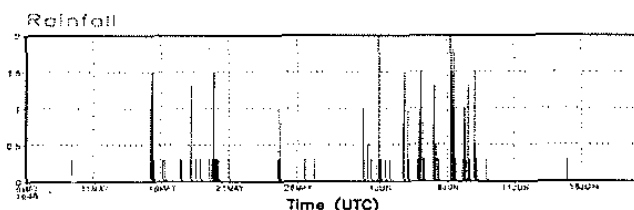


圖 1 ISS 地面站東沙島觀測降雨量時序圖。

比較綠島實驗期間 5、6 月的降雨分布(圖 2)，可區分兩個降雨時段，在 6 月 1 日之前為較零散的降雨，在這期間的連續晴天日數最多只有五天。6 月 1 日至 13 日為一晴天時期；13 日至 22 日為第二降雨期，這時期的降雨強度明顯較第一降雨期強且密集。22 日之後則為第二晴天時期。同樣在溫度趨勢上，在第一降

雨期結束 6 月 1 日附近的晴天期，同樣受到北方冷空氣南下的影響溫度呈現明顯的下降情形。

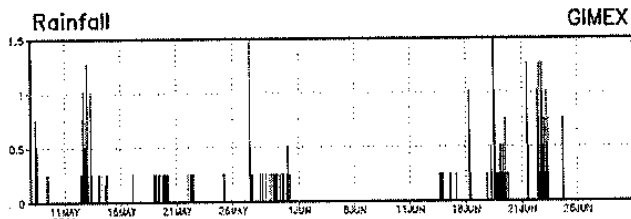


圖 2 ISS 地面站成功測站觀測降雨量時序圖。

在地面混合比的時序趨勢上，兩個實驗期的混合比大致上都可區分成兩個區段，圖 3 為東沙島 ISS 觀測之地面混合比時間序列圖，從混合比的時間趨勢分布，可區分出兩個水氣量差異很大的時期：5 月 20 日之前及 6 月 1 日之後，如果暫時略過肇始擾動期 5 月 21 日至 6 月 1 日的水氣劇烈擾動時期，則可以分成 5 月 20 日之前的低水氣量與 5 月 30 日之後的高水氣量時段段；在 5 月 20 日之前不論是密集降雨期或晴空期，在水氣量上，呈現的是均勻一致的水氣含量，平均約在 20g/kg，也就是在這段期間並沒有南方大量水氣傳輸至南海北部，尤其對第一波密集降雨而言，所受到南海北部低緯度的豐富水氣傳輸的影響非常小。在 5 月 30 日之後，第二波密集降雨開始，在水氣混合比上，於 6 月 1 日水氣量突然增高至 24g/kg，但是在密集降雨期後期的 6 月 6 日至 6 月 8 日平均卻降至 20g/kg，而 6 月 8 日密集降雨結束之後，混合比又升高至 24g/kg，如果不考慮 6 月 6 日至 6 月 8 日的水氣量下降的時段，6 月之後的混合比平均約為 24g/kg，比 5 月 20 日之前的平均混合比增加 4g/kg，此結果很清楚的顯示 6 月之後低緯度豐富水氣傳輸至南海北部，造成平均水氣量的增高。

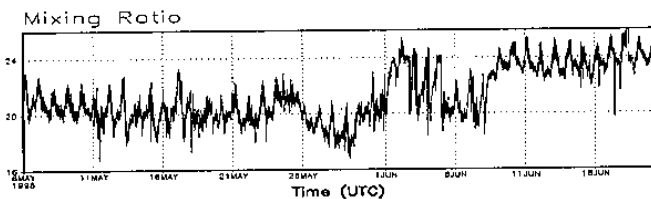


圖 3 ISS 地面站東沙島觀測混合比時序圖。

綠島實驗計劃期間混合比(圖 4)並沒有如南海計劃期間的水氣急遽增加的情況，但仍可大致區分兩個區段。6 月 5 日之前為水氣混合比變化劇烈時期，在這時期因為常受到北方冷空氣的影響，因此只要一遇到北方冷空氣南下，水氣就明顯減少，尤其在 6 月 1 日的混合比降低最為明顯；而在 6 月 5 日之後，混合比趨勢則變的較穩定，這是受到西南氣流完全主導台

灣附近氣流走向，因此在南方暖濕空氣的影響下，水氣並不會如前一時期受到北方冷空氣影響而大幅降低。

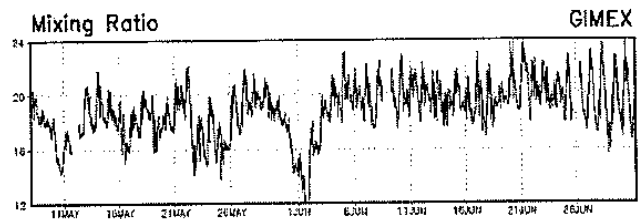


圖 4 ISS 地面站成功測站觀測混合比時序圖。

由剖風儀觀測得之各高度風向統計來看，圖 5 為南海實驗 5 月 26 日及 6 月 8 日的 24 小時統計圖。由 5 月 26 日第二波密集降雨期之前的晴天風向來看，由於受到北方冷平流的影響，因此在 2 公里以下呈現北風、東北風的型態，然而在第二密集降雨期過後，由西南季風主宰風向，因此在統計上各高度層次著很均勻的西南風風向。

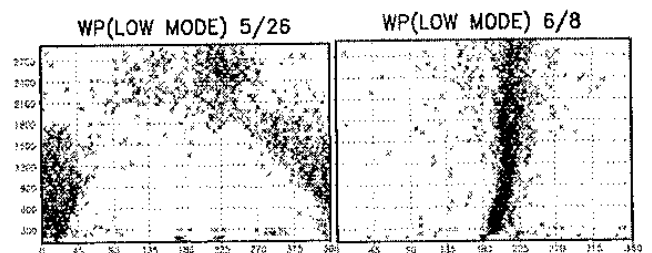


圖 5 ISS 剖風儀東沙島觀測各高度風向統計圖。

而在綠島實驗的各高度風向統計(圖 6)，在 6 月 5 日的風向統計可以區分成兩個風向，一為整層西南—西風，另一在高度 1 公里以下的西北風，這是受到海陸風的影響所致，由剖風儀的時序風場得知(略)，海風發展是在 08Z 至 18Z 期間，發展高度則隨時間而不同。另外在密集降雨之後 6 月 23 日，風向則轉為穩定的西南風，且海陸風發展並不明顯，完全受到西南季風的影響。

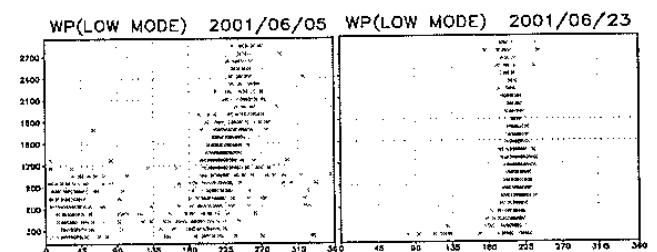


圖 6 ISS 剖風儀成功測站觀測各高度風向統計圖。

在邊界層的發展方面，圖 7 分別為季風肇始前 5 月 6 日至 14 日以及季風肇始後 6 月 10 至 21 日東沙島探空一天四次觀測的探空位溫統計圖，在季風肇始前

的晴天時期邊界層發展統計特性較為紊亂，在邊界層發展的日變化中，並沒有較穩定的邊界層高度，但在下午 14 時(06Z)的位溫統計尚可大致定義高度約在 500 公尺的對流混合層，以及有明顯的地面加熱增溫情形，其他的三個時間的探空位溫統計則很難定義出較相似的邊界層高度發展特性。而在季風肇始之後的晴天邊界層發展統計，則有很好的相似性，可以明顯的定義出邊界層發展的高度，除了近地面受到地表加熱作用之外有明顯的變化，四個觀測時間位溫垂直分布皆可清楚看出邊界層一直保持在 500 公尺附近，因此在季風肇始之後的南海北部邊界層內一直處於均勻混合特性。

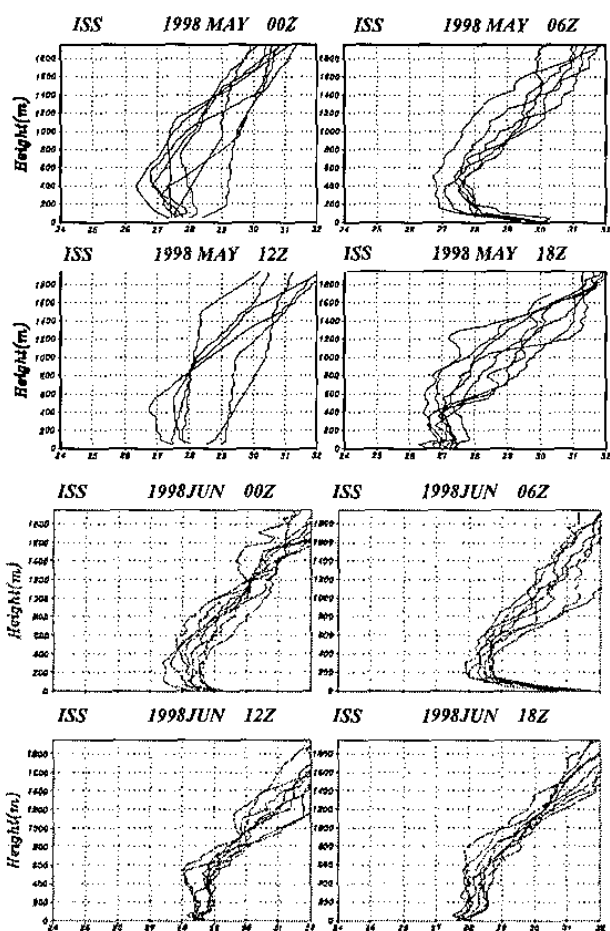


圖 7 南海實驗 5 月 6-14 日及 6 月 10-21 日之東沙島探空位溫剖面圖，為每日 LST 8 時(00z)、14 時(06z)、20 時(12z)與 2 時(18z)的統計。

綠島實驗期間，由於密集觀測計劃為 5 月 15 日至 6 月 15 日，因此無法選取季風肇始前後的時期做特性分析。在探空位溫剖面分析上分別選取了第一降雨期間的 5 月 24 日加密觀測的晴天個案，以及 6 月 4 至 7 日的晴天時期。

在 5 月 24 日一天 8 筆由台東成功測站施放的探空觀測，由其位溫剖面顯示，白天位溫分布(實線)，近地層高度在 100 公尺以下，受到地表加熱增溫，以及

夜間(虛點線)地面降溫的情形，而混合邊界層的高度約在 600 公尺左右。在 6 月 4 至 7 日的每天兩筆探空觀測位溫剖面，在 2 公里的高度，白天位溫(實線)比 5 月 24 日高出約 5 度左右，而邊界層的發展高度約在 600-800 公尺之間，夜間邊界層(虛點線)內則因輻射降溫的影響，近地面溫度日夜變化較大。

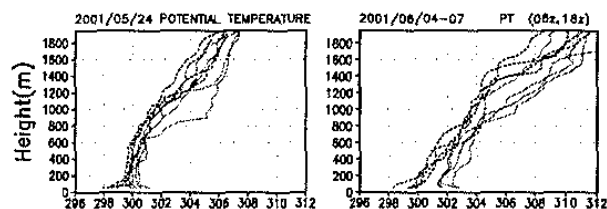


圖 8 綠島實驗 5 月 24 日一天八筆探空及 6 月 4-7 日每日 LST 14 時(06z)與 2 時(18z)的探空統計。

兩個實驗計劃的邊界層發展比較上，由於南海季風實驗東沙島位於廣大的南海北部海洋上，因此受到陸地影響非常的小，因此不但沒有海陸風的產生，甚至在季風肇始之後的混合邊界層日夜變化仍然維持在均勻混合的情況；而綠島實驗成功測站緊鄰於台東海岸線，因此不但受到海洋的調節，亦受到海陸風環流的影響，因此在邊界層的發展高度僅略高於南海北部的邊界層高度，但由於亦受陸地的影響，因此在日變化上的特性不像海洋邊界層穩定。

ISS 剖風儀在降水的觀測上由於有很好的解析能力，因此對於對流降水個案特性分析亦有很好的表現。南海季風實驗期間密集降雨由 5 月 15 日開始，從剖風雷達的回波強度上(圖 9)，可以發現有三波對流降雨，分別為世界標準時 03z 短暫降雨以及 06z-09z 與 10z-12z 長降水，其中第一波長降水末期可以發現在 4.5 公里的回波有增強的現象，這是層狀降水的融解層對電磁波產生的強回波現象，但在第二波長降水前期，並沒有這情形，因此判斷第二波長降水前期屬於對流性降雨，後期則是層狀降雨，另外在第三波強降水則完全屬於層狀降雨現象。當天的地面各氣象要素的趨勢(略)中顯示，03z(LST 11 時)開始降雨之前，風向呈現均勻的正南風，03z 開始風速加強，風速也開始變化，在 04z 時，風速瞬間急遽增加至 6.4m/s，並且造成了短暫降雨，累積雨量在 5 分鐘內降下了 2.9 公厘，溫度則由 01:56z 的 31.5°C 降至 03:15z 的 27.6°C，在短短一小時內急速下降約 4°C，之後風速減緩，風向則由 03z 之前的南風轉至西風，05:20z 之後轉至北風。06:30z 第二波降雨開始，溫度前後一小時亦急速下降 2.9°C，風速也增高至最大 10.1m/s，第二波降雨結束後，風向則由北風持續順轉至 23z 時的北風，其中經過第三波層狀降水時期並沒有出現風速增

強或風向突然轉變的情形，溫度也呈現穩定狀態，降雨量也呈現微弱的層狀降雨。

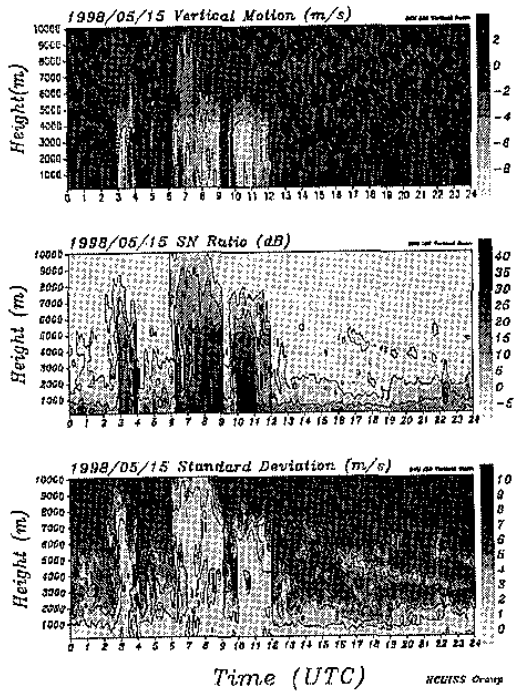


圖 9 1998 年 5 月 15 日剖風雷達高觀測模式垂直波束雷達原始資料所計算出的垂直速度、訊號-雜訊比(回波強度)與速度標準差的時序變化。

5 月 15 日的無人飛機觀測(鄭, 1999)顯示在第二波降雨期間觀測雷雨胞到達前夕, 1800 公尺以下整層大氣水平風場為西南風, 風暴通過之後轉為西北風, 此為降水過程中下衝氣流外流所造成。由剖風雷達的垂直剖面的水平風場圖(圖 10)顯示, 在 8 時至 9 時之間的水平風場為西北及北風, 高度約在 1500 公尺左右, 再往高層, 風向則轉回原來之西南風, 因此在 ISS 觀測到的水平風場和無人飛機觀測得之下衝氣流外流情況吻合。

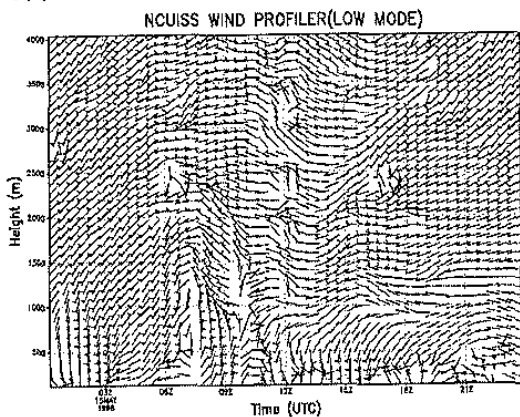


圖 10 5/15 剖風儀觀測之各高度水平風場時序圖。

在綠島實驗期間的 5 月 17 日的降雨個案中, 剖風儀的雷達回波強度(圖 11)在世界標準時 12Z 左右開始

變強, 且強回波高度達 7000 公尺附近, 此為對流降雨系統接近時, 對流性降雨所造成回波, 降雨時間持續約六至七個小時。此系統結構上並無層狀性降雨系統融解層所造成的強回波, 且在垂直速度分佈上, 在對流發展的初期, 3000 公尺以下有強烈的上升運動, 隨之在 7000 公尺亦有一高層的強上升運動, 低層伴隨強烈降雨造成的下降運動結構。

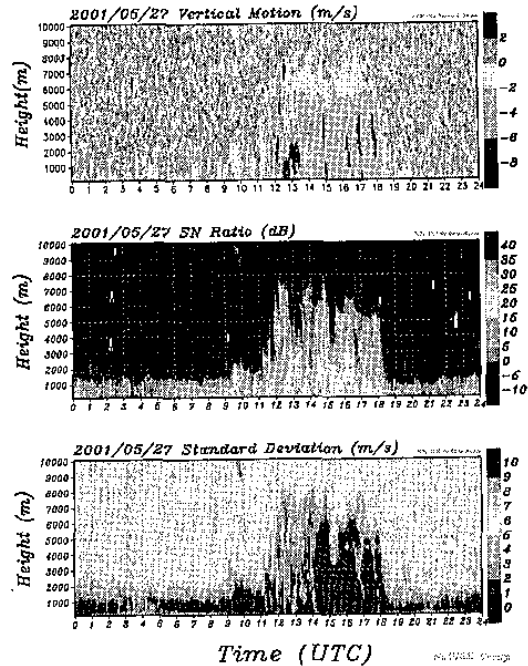


圖 11 2001 年 5 月 27 日剖風雷達高觀測模式垂直波束雷達原始資料所計算出的垂直速度、訊號-雜訊比(回波強度)與速度標準差的時序變化。

由剖風儀雷達觀測而得之 5 月 27 日水平風場分析(圖 12), 在時間 12z 之前 2000 公尺以下的水平風向為南風至西南風為主, 當對流降雨開始之後, 在 1500 公尺以下風向轉為東北風, 1500 公尺以上仍為南風或西南風, 且降雨結束後仍一直維持著低層東北風風向。

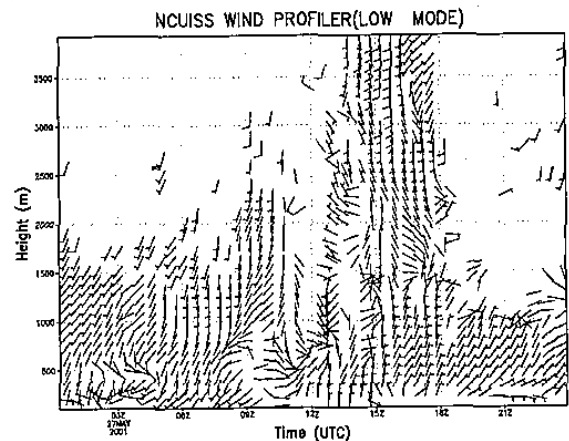


圖 12 5/27 剖風儀觀測之各高度水平風場時序圖。

另外綠島實驗期間，在東部地區設置著數站追風氣球 (Pibal) 的觀測，目的在瞭解東部台東縱谷複雜山谷地形與東部靠海的海陸複雜的地形型態下，其局部環流的發展結構變化。圖 13 為 5 月 24 日 06z 與 18z 兩個時間上，台東縱谷內四追風氣球觀測站的風場隨高度變化情形，四追風氣球觀測站位置與海拔高度分別為霧鹿 (882m, WL) — 池上 (275m, CS) — 鹿野 (172m, LY) — 台東 (10m, TT)，可以發現日夜兩個時間的風場變化，在霧鹿站白天距地表 1500 公尺以下為東南風，以上則為西北風，而夜間 1500 公尺以下風向則轉成與高層相同的西北風。另外池上、鹿野、台東在低層皆有明顯風向轉變情況，池上低層風向由白天西南風轉為夜間的東北風，環流發展高度約 1000 公尺；鹿野由白天南風轉為北風，發展高度 800 公尺左右，台東則在高度兩三百公尺以下由東北風轉為東南風。

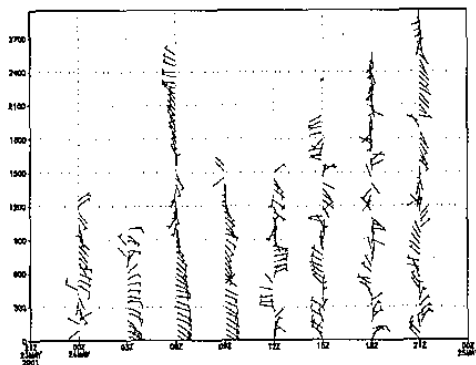


圖 13 綠島實驗期間 5 月 24 日 06z 與 18z 追風氣球觀測之風場隨高度變化。

圖 14 為霧鹿追風氣球觀測站 5 月 24 日一天觀測結果，在白天地面低層風吹西南風，隨著時間環流高度可發展至 1500 公尺左右，到晚上由熱力造成的上坡風減弱，風向開始轉為西風分量。

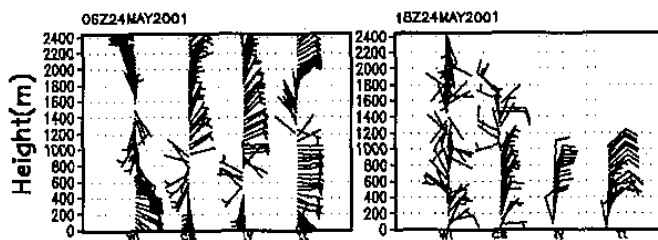


圖 14 綠島實驗期間 5 月 24 日 24 小時霧鹿追風氣球觀測站之風場隨高度變化。

三、結論

在南海季風實驗期間時間時序圖中顯示 5 月 21

日之後因北移之降雨雲帶移至南海北部，因此造成東沙島觀測得水氣量急遽增加的現象，與 5 月 20 日之前的平均混和比增加約 4g/kg 以上。在邊界層的發展，季風肇始前之晴空時期，邊界層的可發展高度日際間變化較大，在季風肇始後則變化小而一致，平均高度維持在 500 公尺左右。水氣垂直混合程度隨著對流混合邊界層的發展，充分地均勻混合於邊界層之內。在降水個案中，地面觀測資料明顯的顯示乾冷空氣下降到地面時溫度急遽降低 4°C 以上以及溼度驟降趨勢。降水個案水平風場的垂直剖面上亦可呈現出下衝氣流發生前後的風向轉變情形，其特性與無人飛機 5 月 15 日觀測得之結果，1800 公尺由西南風轉成西北風的結果一致。

綠島實驗結果顯示水氣的變化與南海實驗類似，可以區分兩個時段，包含受到北方冷空氣影響的水氣量變動較大的時期，以及西南季風主導之後穩定的水氣分布情形。在邊界層的發展，則不像東沙島的海洋邊界層特性般均勻，邊界層高度約在 600 公尺附近，而水平風的垂直分布，因受到海陸分布影響，在密集降雨期之前的晴天時期，有明顯的海陸風環流發展，海陸風的高度可發展至 1 公里左右。

這兩個實驗時期皆顯示了在梅雨季節中，西南季風發展的同時，首先由於西南暖濕氣流的影響，水氣量會開始增加，等到梅雨鋒面一到，水平風場的垂直分布開始受到西南季風的主宰，而完全轉變成均勻的西南風。

四、參考文獻

- 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。國立台灣大學碩士論文, 69 頁。
- Knight, C. A., and L. J. Miller, 1993: First radar echos from cumulus clouds. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **74**, 179-188.
- Ralph, F. M., 1995: Using radar-measured radial vertical velocities to distinguish precipitation scattering from clear-air scattering. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 257-267.
- Rogers, R. R., W. L. Ecklund, D. A. Carter, K. S. Gage, and S. A. Ethier, 1993: Research application of a boundary-layer wind profiler. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 567-580.