

2008 年西南氣流實驗 IOP8 雷達折射指數場特性之研究

陳薇鈞 陳台琦 林沛練 馮雅茜

國立中央大學 大氣物理研究所

摘要

本篇論文使用 SoWMEX 2008 年 NCAR(National Center of Atmospheric Research)SPOL(10cm 波長偏極化雷達)雷達折射指數資料與台灣西南部氣象站的溫度、氣壓反演得到水氣壓(e)與相對溼度(RH)來討論 6 月 14 日(IOP8)的水氣分布與變動特性以及其與對流發展、移動之關係。

針對高雄測站與繁華自動氣象觀測站所反演的相對濕度，與實際觀測到的相對濕度的比較，可發現觀測與反演兩者有相當好的一致性，因此本研究進一步利用客觀分析方法將氣象站的氣壓與溫度場內插至網格點上與折射指數做反演，可得到水氣壓與相對濕度場的水平分布。本文探討水氣壓場、相對溼度場的變化情形，並討論其與回波場的關係。由於目前傳統濕度量測的缺乏，本研究藉由折射指數水氣場之反演，可增加水氣與降水系統交互作用之了解。

一、前言

氣象雷達在中小尺度天氣現象的觀測扮演著非常重要的角色。台灣地區面積三萬六千平方公里，就有八套雷達可觀測中小尺度天氣現象，雷達的觀測資料可提供我們許多降水系統強度變化的資訊。不同於都卜勒雷達只提供回波與徑向風場，雙偏極化雷達提供了更多偏極化參數的資訊，使我們能更加瞭解對流胞內粒子的分類與分布，但是對於引發對流的水氣場觀測卻十分缺乏。

2008 年的台美合作的國際大型西南氣流實驗計畫 SoWMEX / TiMREX (SouthWest Monsoon Experiment / Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment)，從 2008 年 5 月 15 到 2008 年 6 月 30 日，進行為期一個半月的觀測。主要的觀測儀器有：探空(包含地面、船舶與機載探空)、NCAR 之 S 波段雙偏極化雷達(SPOL)、X 波段雙偏極化雷達(Team-R, Taiwan Experimental Atmospheric Mobile-Radar)、作業單位與學術單位之 C 波段都卜勒雷達、二維雨滴譜儀與撞擊式雨滴譜儀、整合探空系統(ISS, Intergrating Sounding System)等設備。其中 SPOL 雙偏極化雷達除了觀測降水回波、徑向速度與偏極化參數之外，亦可藉由觀測場與參考場的電磁波相位差，反演出折射指數變化以了解近地面水氣場水平分布的變化。

美國中西部地區使用折射指數的梯度可提早預報風暴的生成，但是由於台灣和美國中西部的大氣環境不同，美國中西部的折射指數值為 270N-320N，而台灣的溼度較大，折射指數值分布區間則為 350N 至 420N，因此折射指數的應用方式也會有所不同。

本研究將使用 SPOL 的折射指數場來研究 SoWMEX IOP8(2008 年 6 月 14 日-6 月 15 日)期間，雨帶經過台灣西南部地區時的水氣場的變化特性。

二、研究方法

Bean and Dutton 在 1968 年提出(1)式，其第一項為乾項，第二項為濕項。其中，N 為折射指數，P 為氣壓， T_k 為凱氏溫度。

$$N = 77.6 \frac{P}{T_k} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T_k^2} \quad (1)$$

Fabry 1997 年提出折射指數、溫度與相對溼度之間的關係圖可知，在濕度較高的地方，濕項的影響較乾項顯著。同樣溫度為 20-30°C 的情況下，當相對溼度越高，其所對應到的折射指數值也會越高且越敏感。由於美國中西部的大氣環境較乾，其折射指數的範圍大約是 270N-310N，而在台灣，由於水氣較多，折射指數的範圍大約是 370N-420N(Fabry, 1997)。

本研究使用測站所量測到的氣壓、溫度與雷達的折射指數，利用(2)式，求出水氣壓。飽和水氣壓可

利用溫度，經由(3)式求得:

$$e = \frac{(N - 77.6 \times \frac{P}{T_k}) \times T_k^2}{3.73 \times 10^5} \quad (2)$$

$$es = 6.112 \times \exp\left(\frac{17.67 \times T}{T + 243.5}\right) \quad (3)$$

將求出的水氣壓與飽和水氣壓代入(4)式求出相對濕度:

$$RH = \frac{e}{es} \times 100\% \quad (4)$$

單一測站的反演驗證是使用高雄氣象站、繁華自動觀測站、九如自動觀測站(圖一)。氣溫與壓力的水平分布是使用全台灣海拔高度低於 250 公尺之氣象站做內插。大致資料處理流程如圖二。由於折射指數受到地面目標物的限制，僅適用於陸地上，因此溫度與氣壓場只用陸地上的資料，未將海上的資料納入計算。

從折射指數公式(1)式，去做以下三個運算，以了解各項數量級及變數之間的關係。由圖三可看到，在溫度固定為 30°C 且水氣壓固定為 30hPa 下，當氣壓變化 10hPa，折射指數只變化 1-2N，可知(1)式中的乾項貢獻很小。因此將氣壓假定為不變(1013hPa)的情況下，圖四顯示在實驗期間的溫度範圍內，折射指數與水氣壓的關係約為 dN/de 接近 3，亦即當折射指數增加 3N 時，水氣壓會增加 1hPa。圖五則顯示在折射指數為常數時，每升高 5°C 時，水氣壓會增加 2hPa，且當溫度增加時，水氣壓增加越快。

三、研究結果

(一)測站觀測與雷達反演之比較

圖六顯示，折射指數(圖六 a)與反演之水氣壓(圖六 b)有相同的趨勢，兩者於 13 日的變化較 14 日明顯。圖七為測站觀測之相對濕度與雷達反演之相對濕度的比較。圖七顯示，在高雄觀測站，雷達所反演的相對濕度與測站觀測有相當好的一致性，其 13 日的平均誤差為 2.3%，14 日的平均誤差為 2.5%。而雷達反演的相對濕度在繁華自動觀測站有低估的狀況，而九如自動觀測站則反之，有較明顯的高估的情

形。而九如自動觀測站量測之相對濕度在 14 日似有一量測極限，故吾人傾向相信 14 日時，九如站經由雷達反演之相對濕度值。而圖八顯示，氣壓(圖八 a)在 13、14 日兩天皆有明顯的日變化，其三站所量測到的氣壓值整體來說為高雄站最高，繁華站次之，九如站最低，從地理位置來看，高雄站位於沿海地區，其海拔高度最低，為 2.3 公尺，而九如與繁華站之海拔高度相近，因此這兩所量測之氣壓相近，而繁華站位於山腳下，由於中央山脈的阻擋，氣流在山前的移速變慢而在山前產生相對高壓，使得繁華站的氣壓較九如站高。溫度(圖八 b)在 13、14 日這兩天持續的下降，其中高雄在 14 日的溫度量測皆較九如與繁華站高，而由於繁華與九如的地處內陸地區，且降水系統不斷通過此二站，當降水吸收潛熱使得環境溫度降低，若溫度的量測有些許的偏差，從圖九中可看到，在氣壓固定為 1000hPa，折射指數固定為 390N 下，溫度若差 1 度，會使得相對濕度的反演有 5% 的變化。

從繁華與九如站反演得之相對濕度與測站觀測到的相對濕度有所偏差，推測有兩個相依的原因：第一個原因為由於折射指數的反演方法，是利用觀測場與參考場的相位差所反演得。造成折射指數誤差可能有兩個原因，(1)當小時雨量超過 15 公釐時，由於水會覆蓋掉目標物的相位而使得折射指數值產生偏差。(2)當大氣垂直的折射指數梯度太大時，影響電磁波傳遞的速度而造成相位的延遲，使得所反演的折射指數產生誤差。

另一原因是從溫度與相對濕度的關係圖中可以看到，在氣壓固定為 1000hPa，折射指數固定為 390N 下，當溫度變化 1°C 時，相對濕度會變化 5%。而降雨時，因水滴蒸發吸收潛熱而使得近地面的溫度偏低，造成所反演之相對濕度升高，但若是測站所測得的溫度有所偏差，則可能是得反演的相對濕度超過 100%。

(二)不同降水系統下濕度場之變化情形

在美國中西部地區，折射指數梯度的變化與降水系統的初生有相當好的一致性，故吾人欲探討台灣的雷達回波與折射指數場之關係。14 日 01-12UTC

的雷達回波圖(圖十)顯示，對流胞不斷地自南方與西南方海面移入，但是在這段期間的折射指數場(圖十一)最大值皆盤踞在西南沿海區域。

其中 02-03UTC 時(圖十二)，對流胞快速的自西南方海面上移入，但是此時折射指數最大值仍位於西南沿海地區。但是 03-04UTC，可看到一對流胞自南方海上移入，但是其移動速度緩慢，使得該處之折射指數值升高。

6 月 14 日主要可分為兩種降水系統型態，第一種為對流胞自海面上不斷移入(圖十三)，但是由於對流胞的移速較快(約 50km/hr)，折射指數最大值依舊位於西南沿海地區。而由於降水系統的移入使得內陸溫度降低，所反演之相對濕度受溫度影響而升高。使得相對溼度於內陸地區有極大值。即在此刻，絕對溼度的水氣壓場和相對濕度場的水平分布主要受到溫度的控制而呈現反相位的狀態。第二種降水型態為雨帶的移入。由於雨帶大範圍的影響，可看到折射指數場、水氣壓場與相對溼度場的極值皆位於雨帶處，而溫度則由於雨帶經過，降水蒸發冷卻而在反演區域的西北方有極小值。

四、結論

本篇研究吾人利用測站溫度與氣壓與雷達的折射指數所反演之相對濕度與實際觀測的相對濕度進行比較分析。高雄測站在晴天(6 月 13 日)時的平均誤差為 2.3%，雨天(6 月 14 日)的平均誤差為 2.5%。觀測與反演之相對濕度有相當好的一致性。而繁華與九如自動雨量站的相對濕度反演方面，繁華站反演的相對濕度低估於觀測值，而九如站反演的相對濕度則是略高估於估測值，

本文亦利用折射指數方程計算以下兩種大氣情況：(一)假設氣壓固定為 1013hPa，溫度介於 25-35°C 的情況下，當折射指數變化 3N 時，水氣壓會改變 1hPa。(二)假設折射指數固定為 390N 下，當溫度升高 1°C 時，水氣壓會增加 0.4hPa。從上兩項因素可知，水氣壓的變化趨勢主要是受到折射指數與地面溫度所影響，當折射指數的變化較大時，水氣壓的變化會受到折射指數較大的影響，但是當折射指數的變

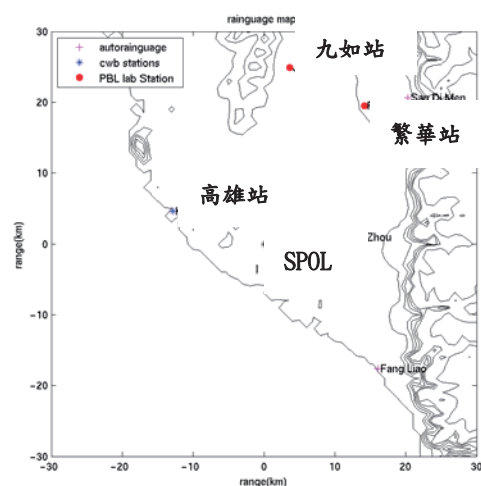
化不劇烈時，溫度對水氣壓影響就會顯現出來。

在水平分布方面，折射指數在台灣西南沿海的數值相較於內陸之下，常有 5-10N 的差異，甚至在 14 日 08UTC 時，折射指數西南沿海與內陸的差異可達 15N，此時水氣壓場的差異最大可達 5hPa。

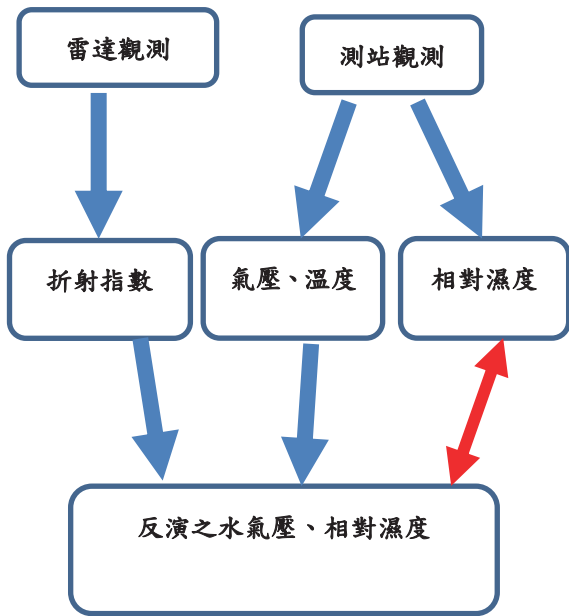
而折射指數的小時變化約為 5N，當回波移動的速度較快(50km/hr)時，折射指數場受降水系統的影響較小，但若是回波移動速度較慢(15km/hr)時，在回波影響的區域，折射指數場的變化半小時內可達 7N。而在溫度的水平分布則是明顯受到降水系統的影響，當降水系統通過後，使得溫度降低，其相對濕度亦會增高。

由於選擇 6 月 14 日的個案，降水系統是由外海移入，雖然觀察到西南沿海水氣壓場較高，而相對溼度場主要與溫度有關，但是大部分的相對濕度都超過 80%。因此快速移動的零星降水強度改變會逐漸的擴大高水氣壓的區域。而當降水系統移動較緩慢的時候，水氣壓及相對溼度場皆會增加。由於水氣蒸發吸收潛熱與凝結釋放潛熱對於大氣熱力有一定的影響，亦影響著對流胞的發展，至於本篇所反演的的水氣壓場與相對溼度場的水平分布對於後續移入的降水系統的熱力條件以及其生命期的影響，值得再繼續深入的探討。

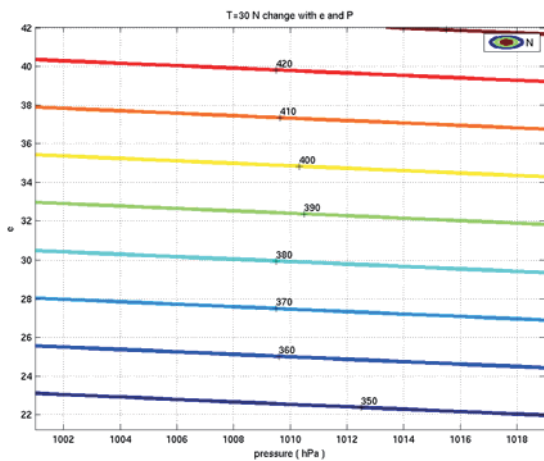
五、圖表說明



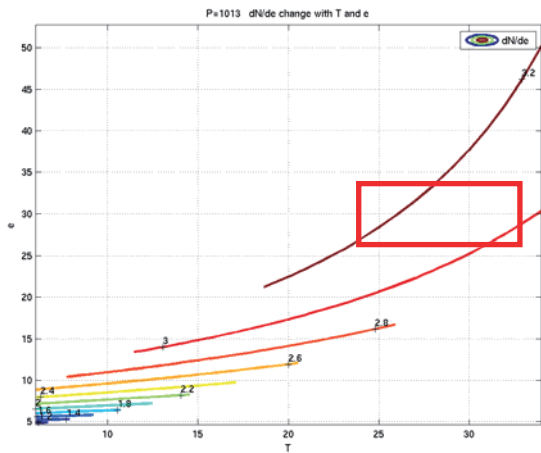
圖一、SPOL 折射指數反演範圍內所使用之地面氣象站，等值線為海拔高度 50 公尺以上。本篇使用高雄站、九如站與繁華站等三站做驗證。



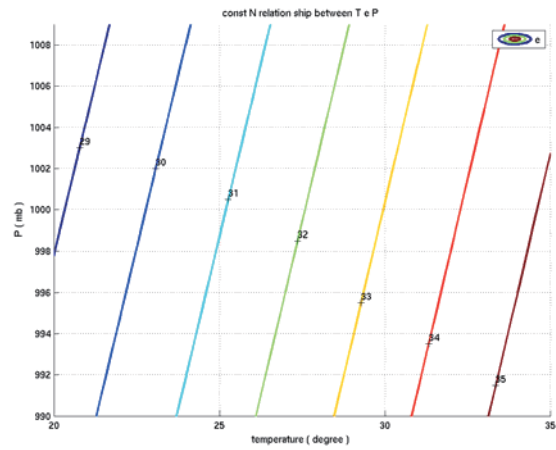
圖二、水氣壓與相對濕度之反演流程。



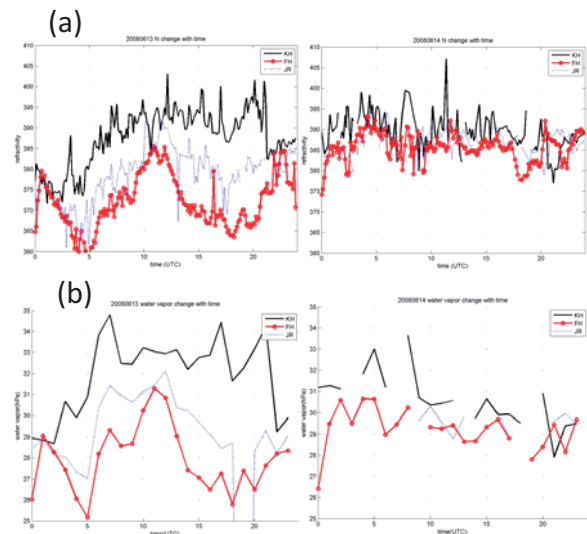
圖三、溫度固定為 30 度下，利用折射指數(1)式，計算出氣壓、水氣壓與折射指數(N)之間的關係。橫軸為氣壓，縱軸為水氣壓，等值線為折射指數。



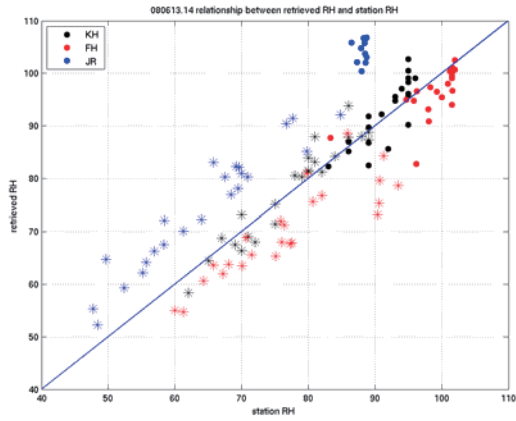
圖四、在氣壓固定為 1013hPa 下，利用折射指數(1)式，計算出溫度、水氣壓與 dN/de 之間的關係。橫軸為溫度，縱軸為水氣壓，等值線為 dN/de 的值。方框為研究的溫度與水氣壓分布範圍。



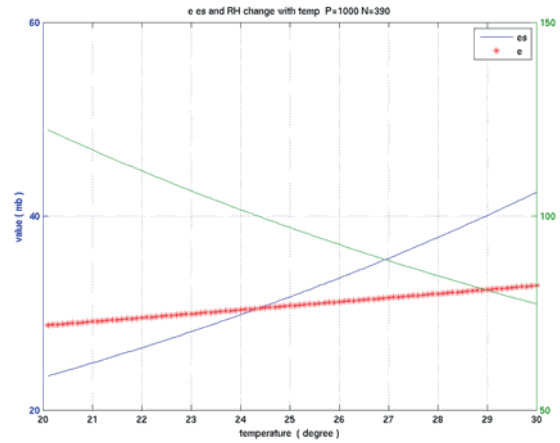
圖五、在 N 固定為 390N 下，溫度、氣壓與水氣壓之間的關係。橫軸為溫度，縱軸為氣壓，等值線為水氣壓。



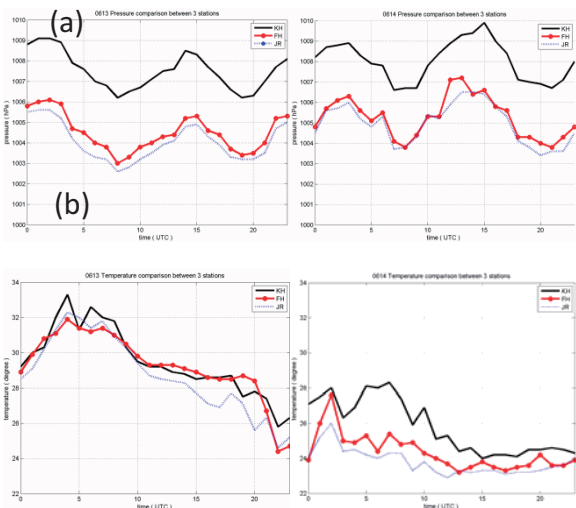
圖六、高雄站(實線)、繁華站(點實線)與九如站(虛線)之(a)折射指數與(b)反演之水氣壓的時間序列。由左至右行分別為 6 月 13 日與 6 月 14 日。



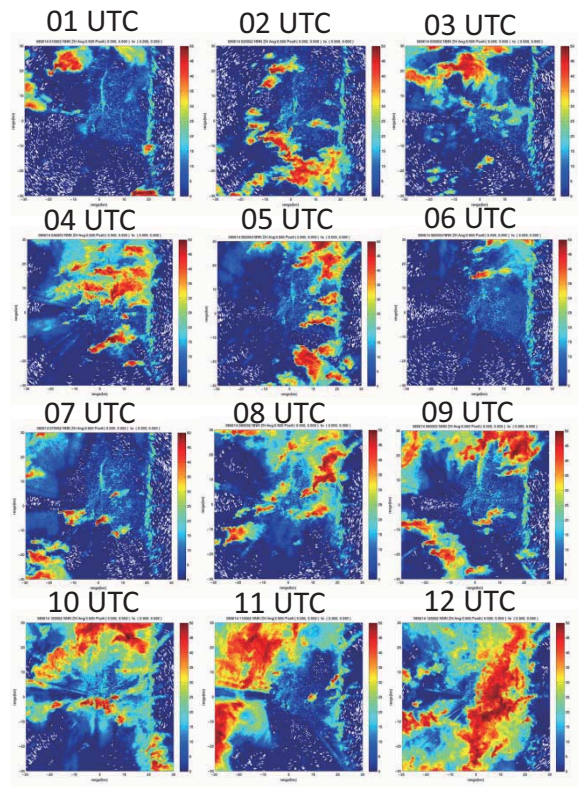
圖七、6月13日(*)與14日(●)，高雄站(黑)、繁華站(紅)、(c)九如站(藍)，測站觀測之相對濕度(橫軸)與反演之相對濕度(縱軸)的散佈圖。斜線為當觀測之相對濕度值與反演值相同時的斜線。



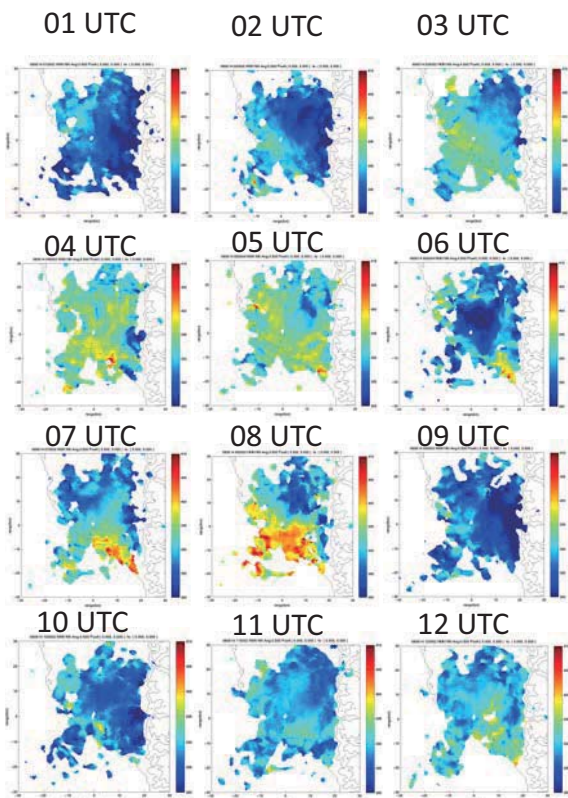
圖九、當氣壓為 1000hpa，折射指數為 390N，溫度、水氣壓、飽和水氣壓與相對溼度之間的關係。



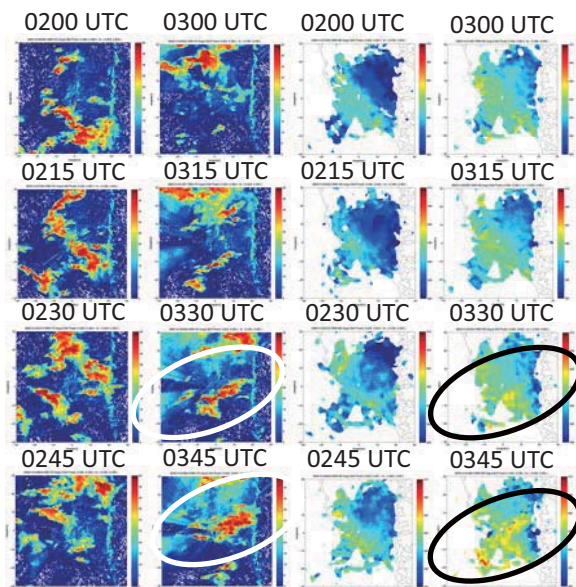
圖八、高雄站(實線)、繁華站(點實線)與九如站(點線)之 (a) 氣壓時序圖、(b) 溫度時序圖。由左至右行分別為 6 月 13 日與 6 月 14 日。



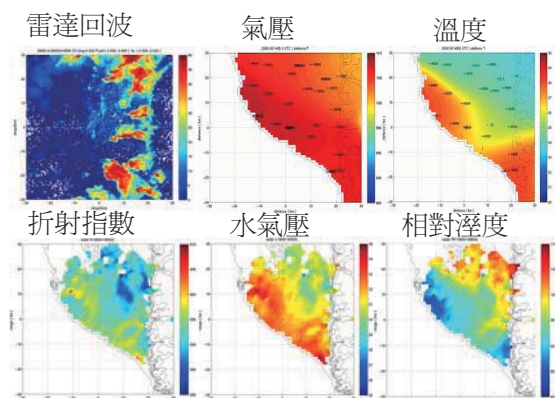
圖十、01 到 12UTC，SPOL 0.5 度 PPI 之雷達回波圖。SPOL 為中心，範圍為-30 公里至 30 公里。色階為 0dBZ-50dBZ。



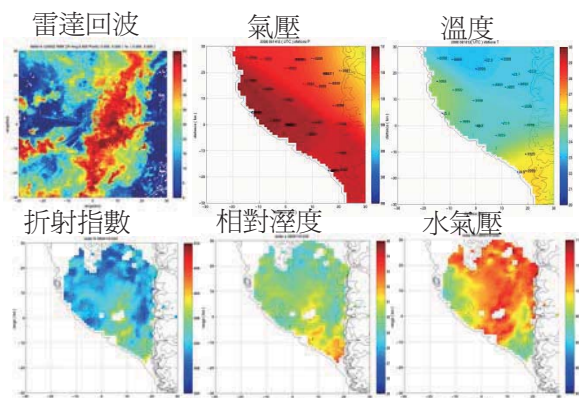
圖十一、01-12 UTC，SPOL 0.5 度 PPI 之折射指數水平分布圖。以 SPOL 為中心，範圍-30 公里至 30 公里。色標為 380N-410N。為無因次參數。



圖十二、第一、二行為 0200-0345UTC，每 15 分鐘一張雷達 0.5 度 PPI 之回波圖，第三、四行為 0200-0345UTC，每 15 分鐘一張雷達 0.5 度 PPI 折射指數。



圖十三、05UTC 由左至右，上至下分別為:雷達回波、氣壓、溫度、折射指數、相對溼度、水氣壓。



圖十四、12UTC 由左至右，上至下分別為：雷達回波、氣壓、溫度、折射指數、相對溼度、水氣壓。

六、參考文獻

- Fabry, C. Frush, I. Zawadzki, and A. Kilambi, 1997: On the extraction of near-surface index of refraction using radar phase measurements from ground targets. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 14, 978 - 987.
- Feng, Y-C and T. M. Weckwerth, 2009: S-Pol radar refractivity in TiMREX/Sowmex Part I: Data processing and quality assurance. The Second SoWMEX/TiMREX Science Workshop, Taipei, Taiwan, 20-22 Oct.
- Weckwerth T. M., R.P. Craystalyne, 2005: Radar Refractivity Retrieval: Validation and Application to Short-Term Forecasting, *J. Appl. Meteor.*, 44, 285-300