

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

(中華民國一〇二年六月四日收稿；中華民國一〇二年九月二十六日定稿)

摘 要

本篇論文使用 SoWMEX 2008 年 NCAR(National Center of Atmospheric Research)SPOL 雷達折射率(N) 資料與台灣西南部氣象站的溫度、氣壓反演得到二維水平近地面的水氣壓(e)與相對溼度(RH)來討論 6 月 14 日(IOP8)的水氣分布以及其與對流發展、移動之關係。

比較高雄測站與繁華自動氣象觀測站，折射率反演的相對濕度與實際觀測的相對濕度有相當好的一致性，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，並配合雷達觀測的折射率反演得到近地面的水氣壓與相對濕度場。由於目前傳統濕度量測的缺乏，本研究藉由折射率反演水氣分布，討論濕度場與回波場的變化關係，增加水氣與降水系統交互作用之了解。

關鍵字：折射率

一、前言

水氣的多寡與分布位置，對於對流風暴系統的動力與熱力有相當程度的影響。過去許多研究中指出，對流降雨預報的極限主要是因為現有的地面量測儀器無法提供有效之水氣的空間與時間解析度，傳統大氣水氣的測量方法是使用無線電

探空儀，但其時間與水平空間的解析度不夠。

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, Integrating 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，反演出折射率(N, Refractivity)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率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，美國中西部的折射率值為 270N~320N (折射率無單位，以 N 表示)，而台灣的溼度較大，折射率值分布區間則為 350N 至 420N，因此折射率的應用方式也會有所不同。

本研究將使用 SPOL 的折射率場來研究 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及相對濕度場的變化特性。

二、資料來源

本篇研究使用 2008 年西南氣流實驗之雷達資料與中央氣象局局署氣象站及中央大學大氣邊

界層暨空氣污染實驗室之移動式氣象觀測站之資料。其中西南氣流實驗全名為「西南氣流觀測與豪雨預測實驗」，英文縮寫為 SoWMEX (Southwest Monsoon Experiment)，又稱 TiMREX (Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment)。實驗時間為 2008 年 5 月 15 日至 6 月 30 日，實驗地點為南中國海北部和台灣本島及臨近海域。此實驗計畫有許多來自各國的觀測儀器，其中包括 NCAR(National Center for Atmospheric Research)的 SPOL (10 公分波長之雙偏極化都卜勒雷達)，並與中央氣象局之七股雷達和國科會之 TEAM-R (Taiwan Experimental Atmospheric Mobile – Radar)協同觀測。

2-1 觀測儀器

本研究主要使用美國國家大氣研究中心 (NCAR, National Center for Atmospheric Research) SPOL 雷達所反演的折射率場(refractivity field)與地面觀測站的氣壓與溫度做水氣壓與相對溼度的反演，並與七股雷達(都卜勒雷達)進行風場合成，探討風場對對流胞的影響。

2-1-1 SPOL 偏極化雷達簡介

SPOL 雷達為 NCAR 地基式 S 波段雙偏極化雷達，波長為 10.7 公分，實驗期間位於東經 120.4335 度，北緯 22.5267 度，高度為 45 公尺，其掃描策略有 PPI、RHI 與 sector 等三種，可觀測到雷達回波(ZH)、徑向速度(VR)與波譜寬(SW)與其他偏極化參數，並利用電磁波的相位差可反演出折射率。

2-1-2 七股都卜勒雷達簡介

七股雷達為氣象局所屬 S 波段都卜勒雷達，位於東經 120.086 度，北緯 23.1467 度，波長為 10.58 公分，高度為 53 公尺，共有九個掃描仰角，

分別為:0.5°、1.4°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°、19.5°、可觀測到雷達回波(ZH)、徑向速度(VR)與波譜寬(SW)，最大折錯速度(Nyquist Velocity)為 21.6 ms^{-1} 。

2-1-3 地面觀測站簡介

中央氣象局於全台灣共佈署了 421 個觀測站，其中有 34 個人工觀測站與 387 個自動雨量站。本文所討論的區域為以 SPOL 為中心半徑為 30 公里處。在本區域內共有 20 個自動雨量站，本文中單站反演驗證所需參數為：氣壓、溫度與相對溼度，在 13、14 日兩天中，可供驗證使用之地面觀測站為：高雄觀測站、繁華自動氣象觀測站、九如自動氣象觀測站。其中高雄氣象站為中央氣象局局屬觀測站，位於東經 120.3080 度，北

緯 22.5679 度，高度為 2.3 公尺；繁華站與九如站皆為中央大學大氣物理所大氣邊界層暨空氣汙染實驗室之移動式氣象觀測站，繁華站位於東經 120.5723 度，北緯 22.7022 度，高度為 64 公尺，九如站位於東經 120.4687 度，北緯 22.7587 度，高度為 53 公尺。各觀測站與 SPOL 雷達之相對位置圖見圖 1。

本文亦使用全台高度低於 250 公尺之氣象局屬氣象觀測站的氣壓與溫度，使用客觀分析方法內插至網格點中進行水氣壓與相對溼度的反演，並探討水氣場的水平分布。

2-2 個案分析

本研究分析之期間為 2008 年 6 月 14 日 00 至 12UTC (Coordinated Universal Time, 世界標

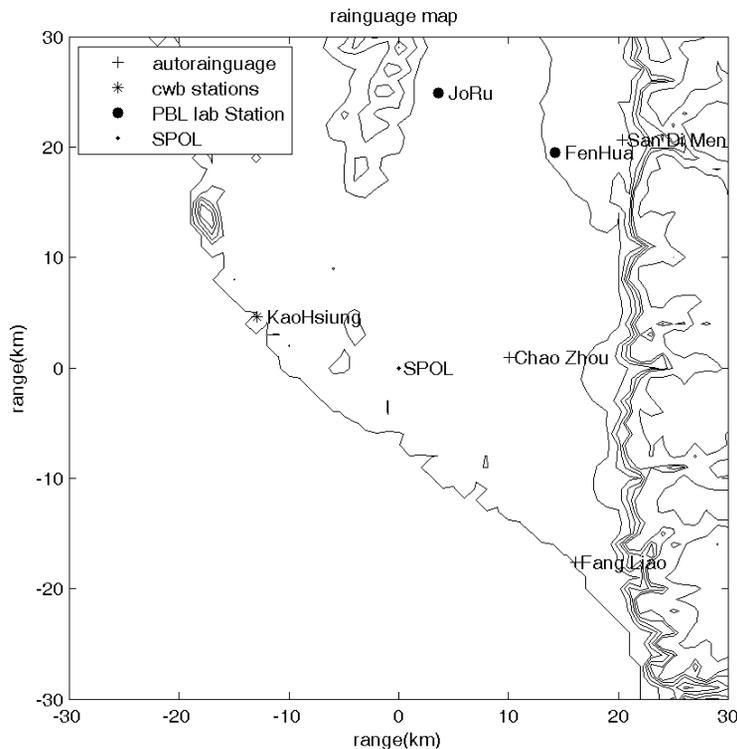


圖 1 SPOL 折射率反演範圍內所使用之地面氣象站，等值線為海拔高度 50 公尺以上。本篇使用高雄站、九如站與繁華站等三站做驗證。

準時間)，西南氣流實驗計畫 IOP 8 (Intensive Observation period 8) 觀測期間。6 月 14 日 00UTC 的地面綜觀天氣圖(圖 2a)顯示台灣陸地主要是吹西南風，此時的紅外線衛星雲圖(圖 3a)顯示，在台灣上空被高雲系覆蓋，但是在南部地區尚無明顯的對流出現(圖 4a)。06UTC 時，有一低壓位於中國華中地區(圖 2b)，此時雲帶所覆蓋的區域開始變少，而在南部地區的有較多的對流雲系所覆蓋(圖 3b)，SPOL 的雷達回波圖中可以看到，有零星的對流胞自南邊海上移入(圖 4b)。12UTC 時，低壓移出中國，台灣附近主要都是吹西南風。12UTC 的地面天氣圖(圖 2c)顯示，低壓移出中國華東地區，而從此時之紅外線雲圖(圖 3c)可知西南部地區有大量的雲系所覆蓋，且在台灣西南部山區之雲頂溫度較低，表示在此區域的對流雲系發展旺盛，從雷達回波圖(圖 4c)可以清楚的看到，有一條雨帶呈北北東-南南西走向，自台灣海峽移進台灣南部地區，且在高雄站降下 30 mmhr^{-1} 的雨量。6 月 14 日一整天，雨帶主要在台灣南部降下大雨，其日雨量超過 200mm (圖 5)，已達大豪雨的標準。

從 6 月 14 日 00、06、12UTC 七股雷達 0.5 度徑向風場(圖 6)可以明顯地看到，台灣西南部主要吹著西南風，低層風速達 15 ms^{-1} 。從屏東機場的探空圖(圖 7)中可知，風向由低層到高層為順轉，有暖平流。在 00UTC 時，最大風速發生在 300hPa，達 40 ms^{-1} ，風向隨高度的變化為東南風轉西南風到高層轉成西北風，風速約在 $20 \sim 30 \text{ ms}^{-1}$ ，LCL (Lifting Condensation Level) 為 169 公尺，LFC (Level of Free Convection) 為 1190 公尺，其 CAPE (Convective Available Potential Energy) 值為 999 Jkg^{-1} 。到了 06UTC 時，主要為吹西南風，風速大約為 $10\text{-}20 \text{ ms}^{-1}$ ，LCL 為 79 公

尺，LFC 為 872 公尺，CAPE 值為 1004 Jkg^{-1} 。這兩組探空資料顯示，大氣環境相當的潮濕與不穩定。12UTC 時，風向主要為西南風隨高度順轉成西北風，約 900hPa 以上的風速皆超過 25 ms^{-1} ，此時的 LCL 為 107 公尺，LFC 亦為 107 公尺，CAPE 值為 0 Jkg^{-1} 。在 12UTC 時，雖然 CAPE 值小，但由於 LCL 低，且 LFC 也低，表示此時的環境若是有適當的舉升能力(例如地形，或是有輻合帶)，對流即很有可能維持或加強。

三、研究方法

3-1 折射率反演原理

雷達電磁波的傳遞受到大氣折射的影響，大氣的折射指數(Refractivity Index, n)為

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

其中， c 為真空下的光速， v 為電磁波在大氣中傳播的速度。又大氣折射率(Refractivity, N)如下：

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (2)$$

折射指數與折射率皆為氣象參數(如：氣壓、溫度和濕度)的函數。Bean and Dutton 在 1968 年提出折射率之計算公式(3)式，其第一項為乾項，第二項為濕項。

$$N = 77.6 \frac{P}{T_k} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T_k^2} \quad (3)$$

其中 P 為氣壓， T_k 為凱氏溫度， e 為水氣壓。在濕度較高的地方，濕項的影響較乾項顯著。

Fabry 等人(1997)利用雷達電磁波的相位變化來反演折射率。電磁波在大氣中傳播的速度(v)受到傳播路徑上的大氣折射指數(n)的影響，故雷

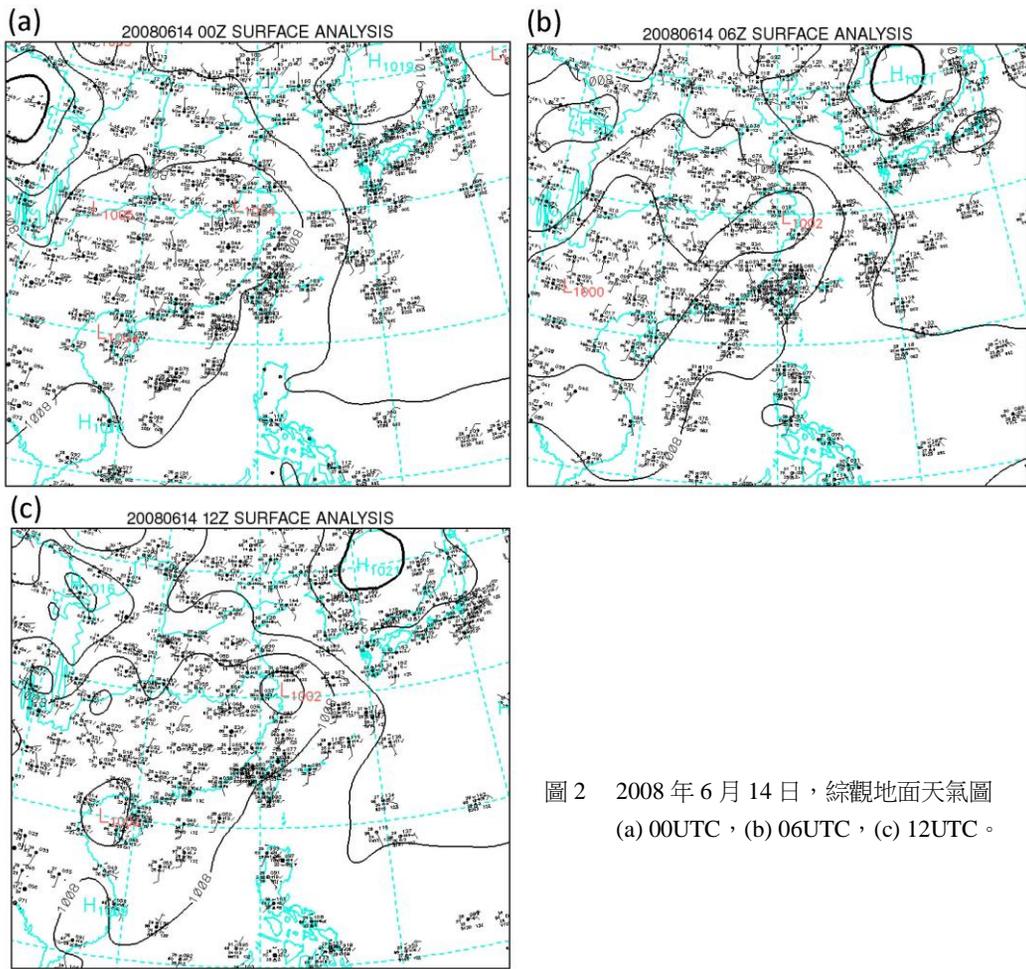


圖 2 2008 年 6 月 14 日，綜觀地面天氣圖 (a) 00UTC，(b) 06UTC，(c) 12UTC。

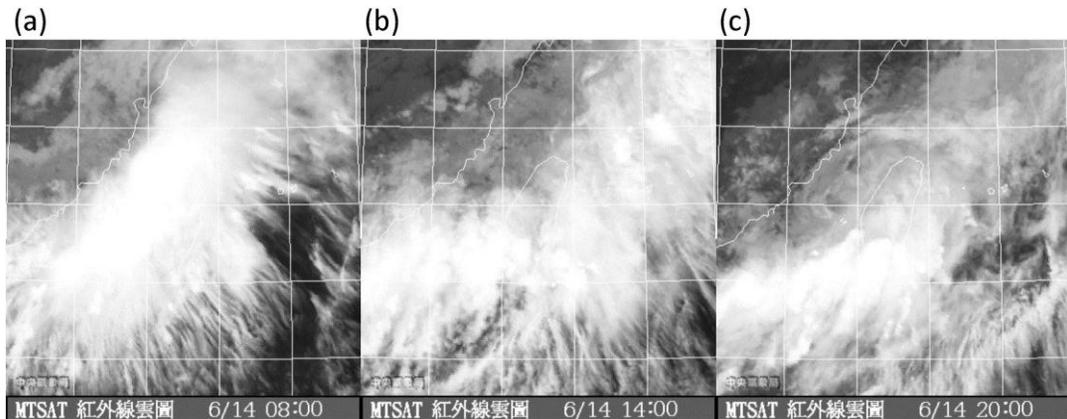


圖 3 2008 年 6 月 14 日，紅外線衛星雲圖(a) 00UTC，(b) 06UTC，(c) 12UTC。

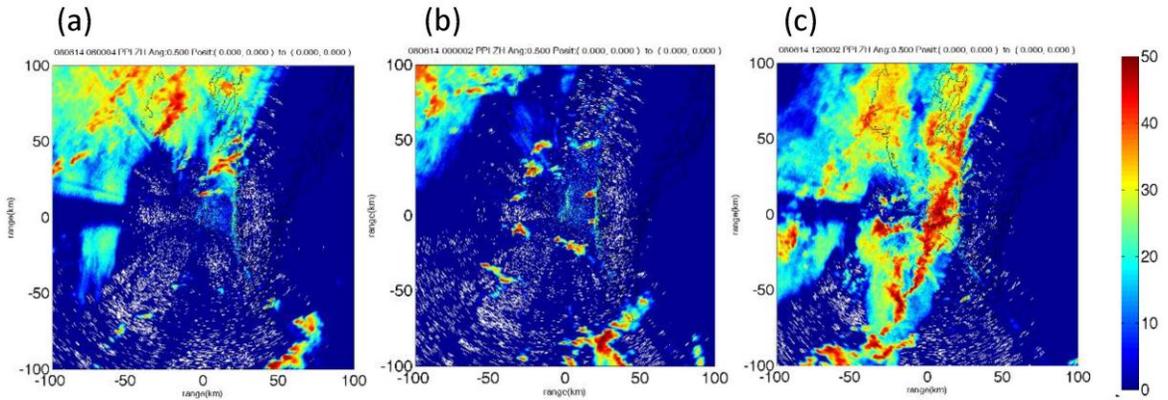


圖 4 2008 年 6 月 14 日 12UTC 之 SPOL 雷達回波圖(a) 00UTC , (b) 06UTC , (c) 12UTC 。

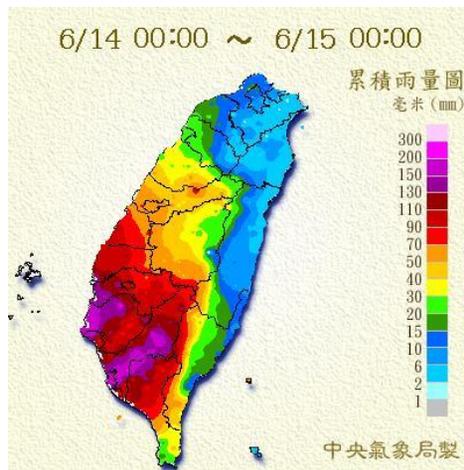


圖 5 2008 年 6 月 14 日 (台灣時間) 累積雨量。

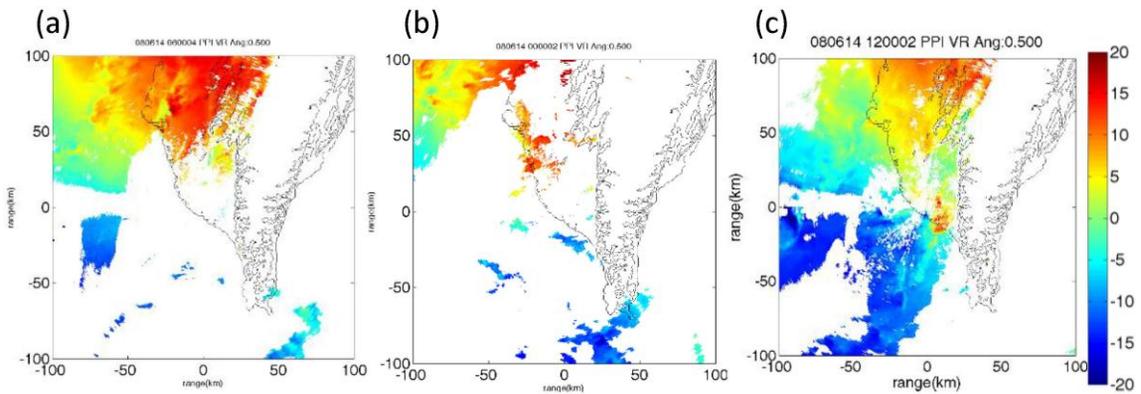


圖 6 2008 年 6 月 14 日, SPOL 徑向風場。負值為吹向雷達的風, 正值為吹離雷達的風, 等值線為地形。(a) 00UTC , (b) 06UTC , (c) 12UTC 。

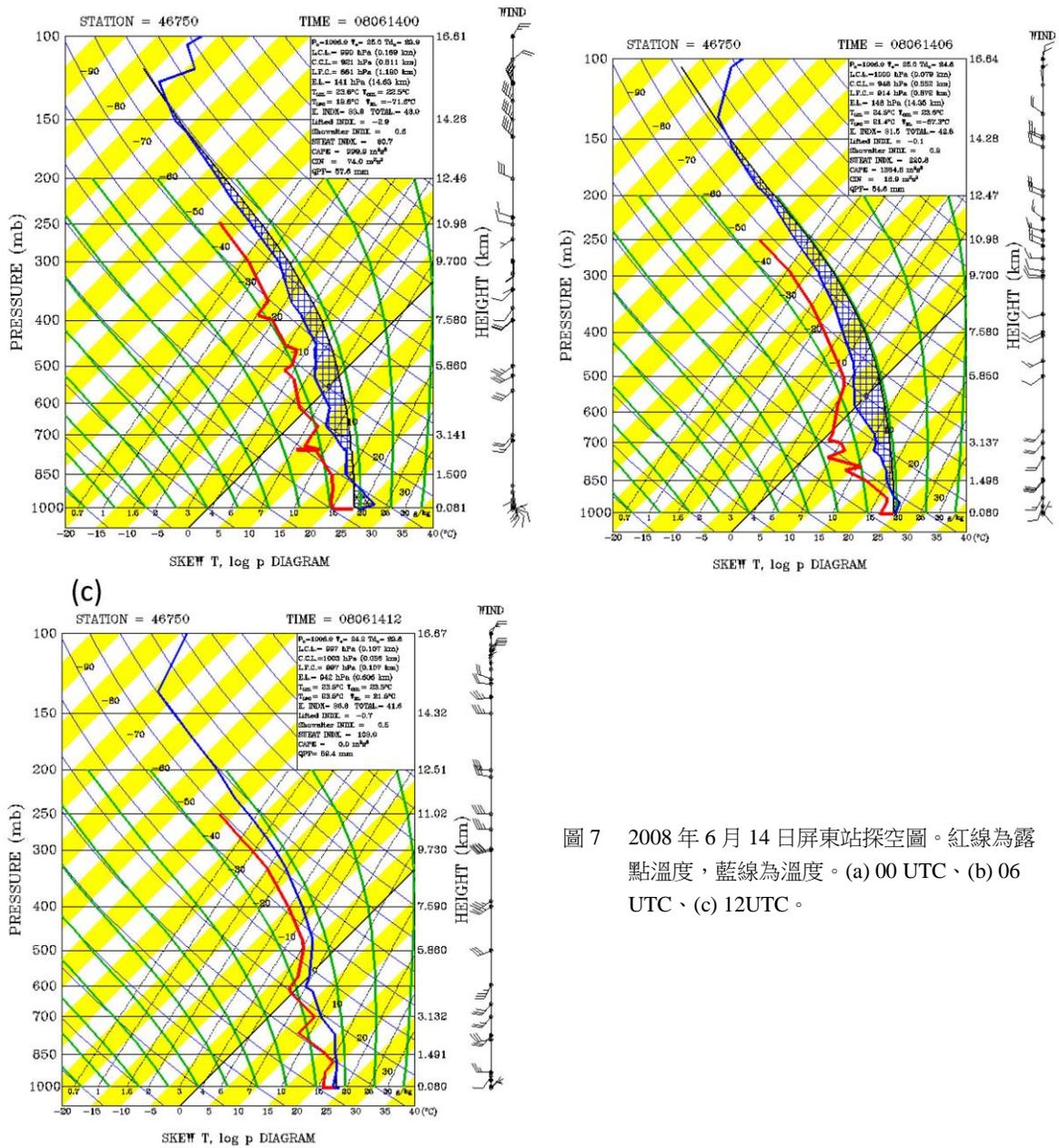


圖 7 2008 年 6 月 14 日屏東站探空圖。紅線為露點溫度，藍線為溫度。(a) 00 UTC、(b) 06 UTC、(c) 12UTC。

達電磁波從天線發射到地面目標物（與雷達距離 r ）後反射回到雷達所需的時間(t)亦隨大氣折射指數(n)改變

$$t = \frac{2r}{v} = \frac{2rn}{c} \quad (4)$$

其中， c 為真空下的光速。

觀測固定地面目標物(ground targets)的相位(φ ，5 式)隨時間的變化($\Delta\varphi$)，便可得知從雷達至固定目標物之間電磁波路徑的平均折射率變化。

$$\varphi = 2\pi ft = \frac{4\pi frn}{c} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \varphi(t_1) - \varphi(t_0) = 2\pi f\Delta t \\ &= \frac{4\pi f}{10^6} \int [N(x, y, z, t_1) - N(x, y, z, t_0)] dr' \quad (6) \end{aligned}$$

$\varphi(t_1)$ 為觀測時雷達接收到的相位， $\varphi(t_0)$ 為參考場的相位， $N(x, y, z, t_0)$ 為已知的參考場折射率值，此參考折射率值在環境中水氣近乎均勻分布時，由地面觀測站計算而得。圖 8 為地面目標物之電磁波相位與折射率之間的關係。圖 8a 為環境溫濕度均勻分布時，亦即大氣折射率為常數 ($n = n_0$)，雷達電磁波所接收到各個目標物的相位，並將該相位紀錄為某個目標物的參考相位。當大氣環境的水氣增加時（圖 8b），折射率增加，量測到的相位會隨之增加，此時的相位與參考場會有其相位差，利用(6)式，即可由觀測的相位差($\Delta\varphi$)與已知的參考場的折射率求得觀測即時的折射率值(Fabry,1997)。

固定地面目標物，如建築物、高架橋等所反射回來的相位較穩定且訊號雜訊比(SNR)強，為信賴權重較高的目標物。而樹木會搖晃或移動的物體，使得電磁波在反射回來後的相位變化較不穩定，故不會使用其相位變化來反演折射率。由

訊號雜訊比及相位的穩定性為條件，選擇適當可用來反演折射率的目標物如圖 9 其為 2008 年西南氣流實驗期間地面目標物的信賴權重分布狀態(Feng et al,2009)。而電磁波傳遞會隨著水平距離的增加，垂直距地高度亦會增加（圖 10），因此使用最低仰角（0.5 度）的相位觀測來反演大氣折射率(Feng et al, 2009)。

3-2 由折射率反演相對溼度與水氣壓方法

折射率隨大氣參數變化而改變（(2)式），同樣溫度下，當相對溼度越高，其所對應到的折射率值也會越高且變化越多（圖 11）。美國中西部的大氣環境較乾，其折射率的範圍大約是 270N ~ 310N，而台灣水氣較多，折射率的範圍大約是 370N ~ 420N（圖 12）。

本研究使用測站所量測到的氣壓、溫度與雷達反演的折射率，利用(7)式，求出水氣壓(e)。並可利用溫度，經由(8)式(Bolton et al,1980)求得飽和水氣壓(e_s)：

$$e = \frac{(N - 77.6 \times \frac{P}{T_k}) \times T_k^2}{3.73 \times 10^5} \quad (7)$$

$$e_s = 6.112 \times \exp\left(\frac{17.67 \times T}{T + 243.5}\right) \quad (8)$$

8 式中， T 為攝氏溫度。將求出的水氣壓與飽和水氣壓求出相對溼度：

$$RH = \frac{e}{e_s} \times 100\% \quad (9)$$

從折射率公式(3)式，討論折射率與大氣參數變數之關係。由（圖 13）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，折射率只變化 1-2N，可知氣壓變化對於

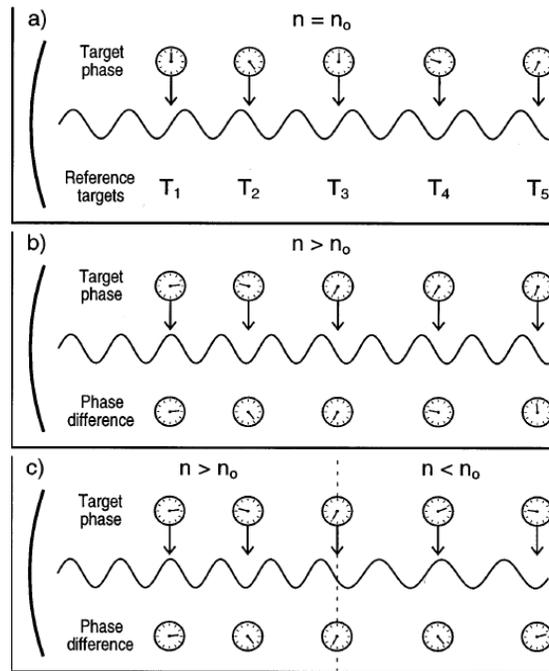


圖 8 雷達與地面目標物之間折射率變化會影響固定地面目標物的觀測相位。左邊為雷達發射電磁波之位置，T1-T5 分別為任意的五個地面目標物，(a)基本場的狀態($n = n_0$)。(b)當在雷達與地面目標物之間，折射率值的增加($n > n_0$)與相位之間的關係；(c)雷達與地面目標物之間，折射率的增加與減少($n > n_0$ 、 $n < n_0$)和相位之間的關係。其中每個時鐘的刻度為每個地面目標物的相位，上層為當時所量測到的相位，下層為當時量測到的相位減去參考場的相位之相位差（採自 Fabry, 1997）。

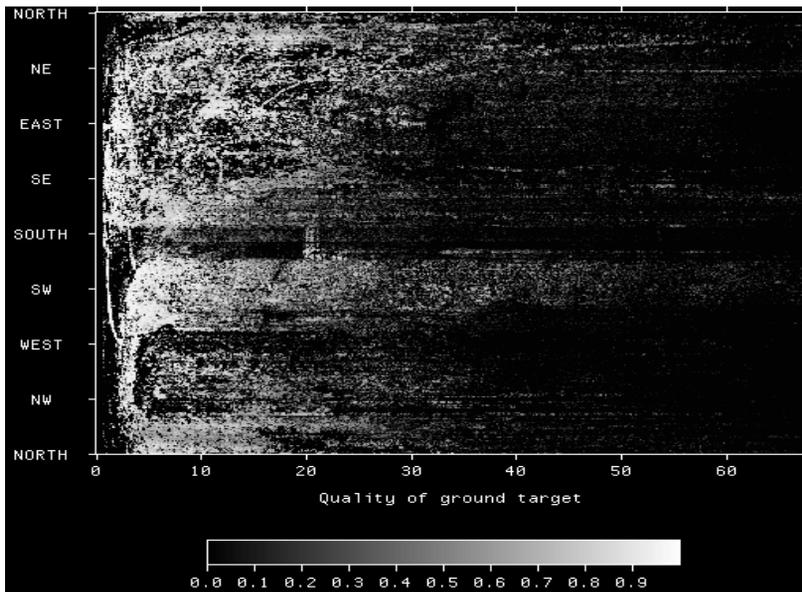


圖 9 地面目標物的權重，高權重值代表固定地面目標物(Feng et al, 2009)。

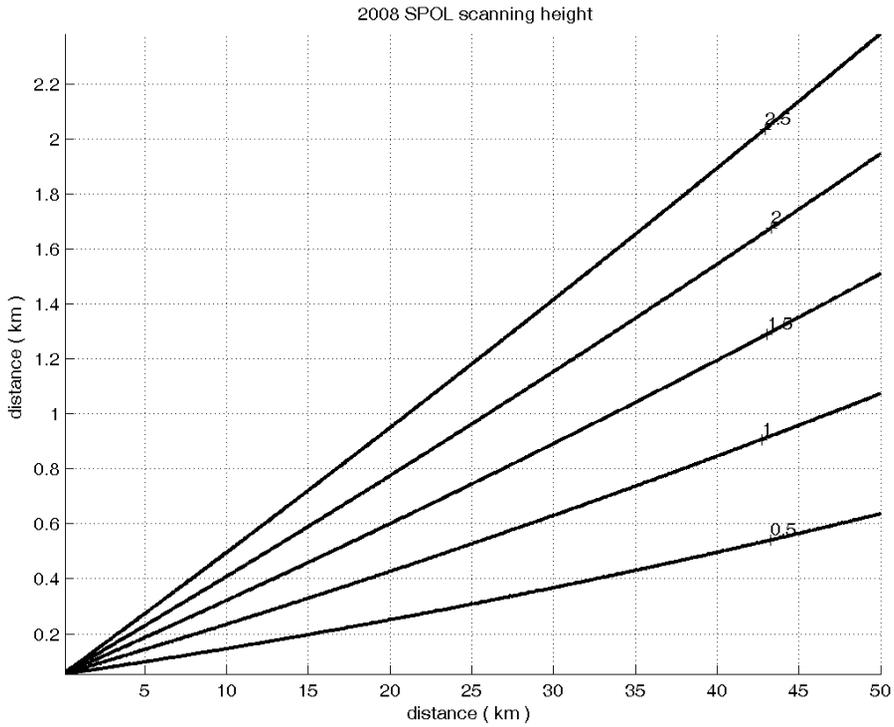


圖 10 SPOL 掃描高度隨水平距離變化，垂直高度變化情形。單位：公里

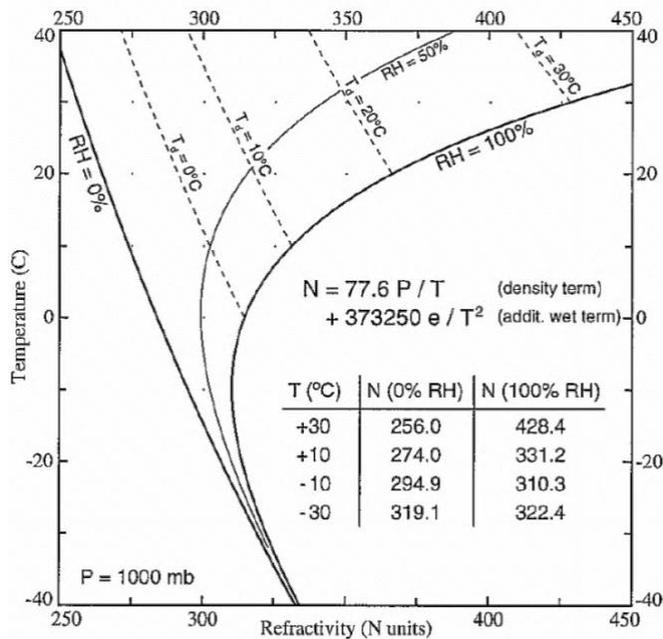


圖 11 折射率、溫度與相對溼度三者之關係圖。橫軸為折射率，縱軸為溫度，曲線為相對溼度，虛線為露點溫度（採自 Fabry, 1997）。

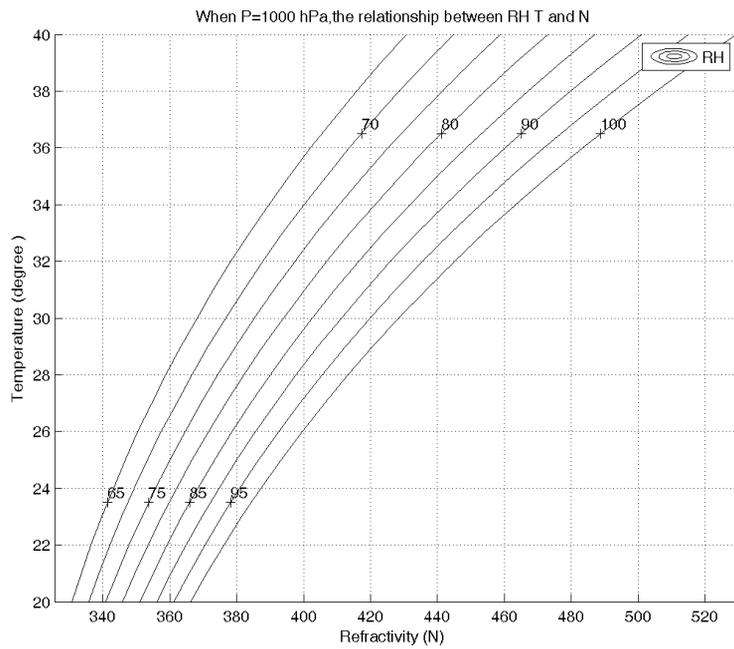


圖 12 當氣壓為 1000hPa 時，折射率、溫度與相對溼度三者之關係圖。縱軸為溫度，橫軸為折射率，曲線為相對溼度。

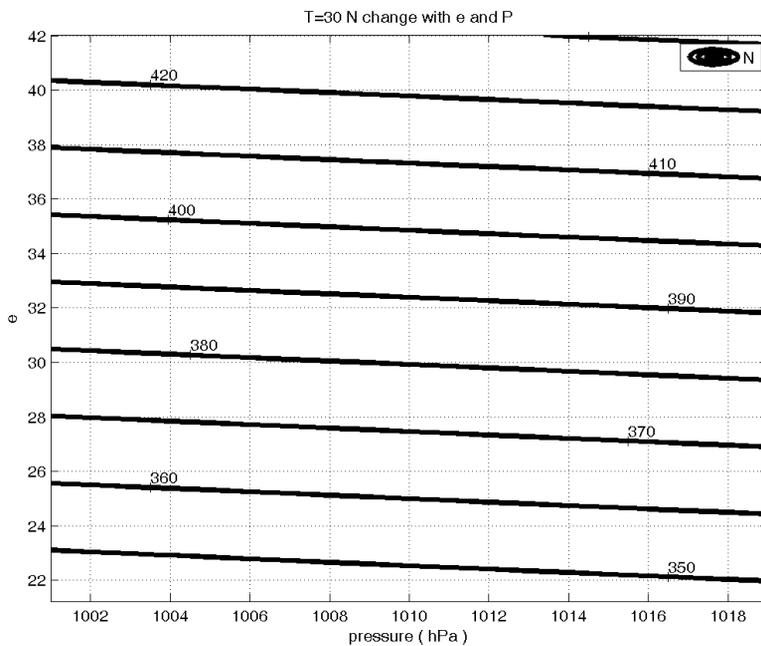


圖 13 溫度固定為 30 度下，利用折射率(3)式，計算出氣壓、水氣壓與折射率(N)之間的關係。橫軸為氣壓，縱軸為水氣壓，等值線為折射率。

折射指數改變貢獻很小。因此將氣壓假定為不變 (1013hPa)的情況下，(圖 14) 則顯示在折射率及氣壓固定時，測站溫度每升高 5°C 時，反演得之水氣壓會增加約 2hPa，且當溫度增加時，反演得之水氣壓增加越快。因此在利用折射率及測站溫度反演相對濕度時，不論是折射率抑或是測站溫度，皆會影響水氣壓的反演結果。因此折射率及溫度觀測皆相當重要。

單一測站的反演驗證是使用高雄氣象站、繁華自動氣象觀測站、九如自動氣象觀測站之溫度、氣壓與 SPOL 原始 PPI (Plane Position Indicator) 0.5 度仰角掃描的資料，取最接近測站上空的四個格點，內插得測站上空之折射率，利用 7 式反演求得該測站之水氣壓，進而反演出相對濕度，再與該測站所量測到之相對濕度做比較，資料處理流程見圖 15。水氣壓與相對溼度的水平分布反演則是使用全台灣海拔高度低於 250 公尺之氣象站的溫度與氣壓做內插至卡式座標之網格點上，再將雷達掃描平面上之折射率值內插至卡式座標網

格點上，利用 7 式即可求得水氣壓與相對溼度之水平分布，資料處理流程如圖 16。由於折射率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。

四、結果討論

(一)測站觀測與雷達反演之比較

圖 17 顯示，折射率 (圖 17a) 與反演之水氣壓 (圖 17b) 有相同的趨勢，兩者於 13 日的變化較 14 日明顯。圖 18 為測站觀測之相對濕度與雷達反演之相對濕度的比較。圖 18 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%。雷達反演的相對濕度在繁華自動觀測站有低估的狀況，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

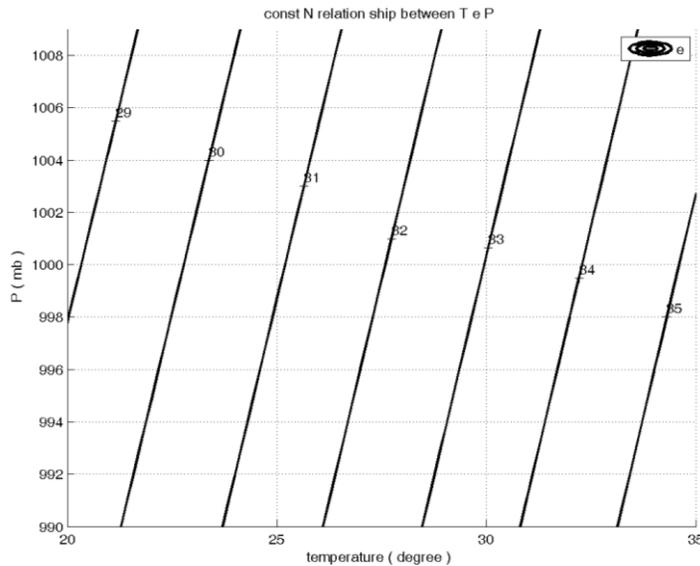


圖 14 在 N 固定為 390N 下，溫度、氣壓與水氣壓之間的關係。橫軸為溫度，縱軸為氣壓，等值線為水氣壓。

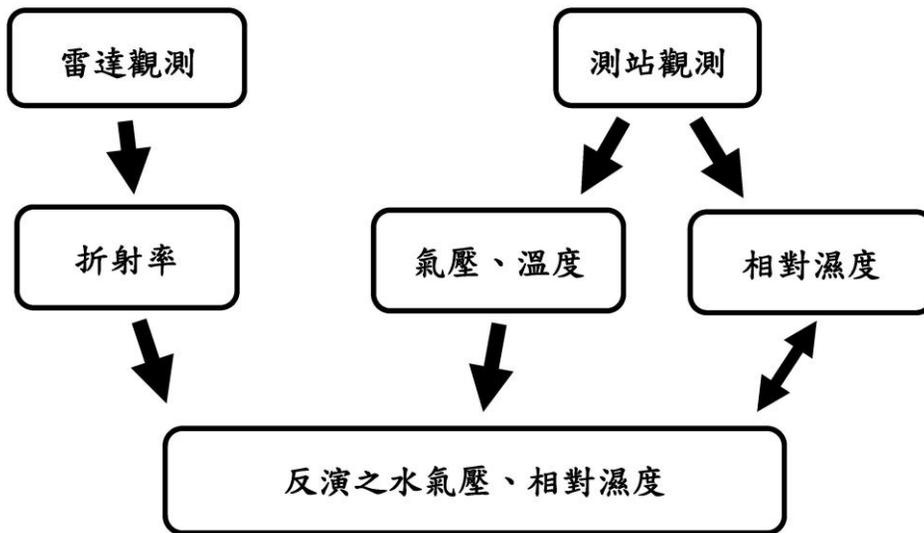


圖 15 測站單點之水氣壓與相對溼度反演流程。

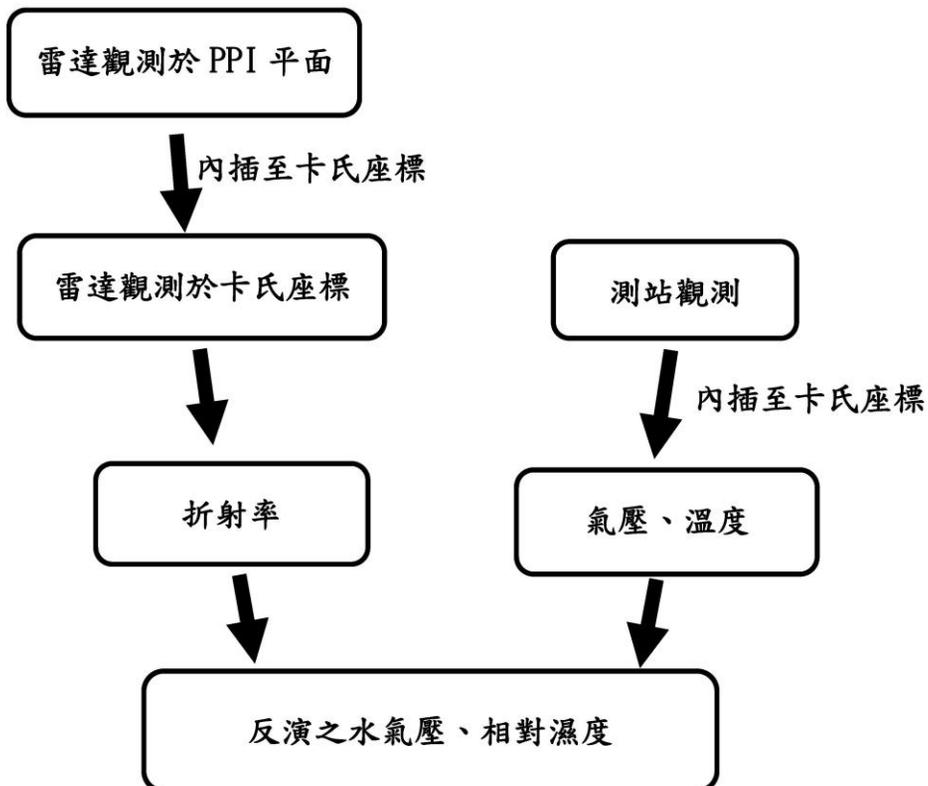


圖 16 水氣壓與相對溼度之水平分布反演流程。

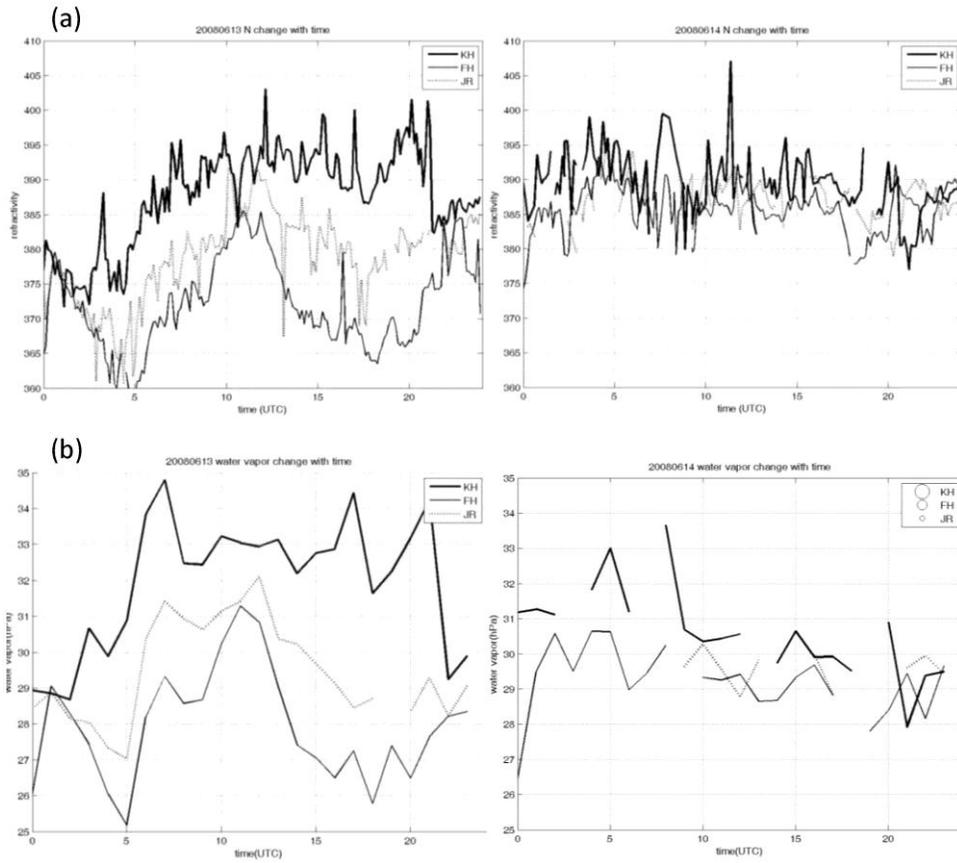


圖 17 高雄站（粗線）、繁華站（細線）與九如站（虛線）之(a)折射率與(b)反演之水氣壓的時間序列。由左至右分別為 6 月 13 日與 6 月 14 日。

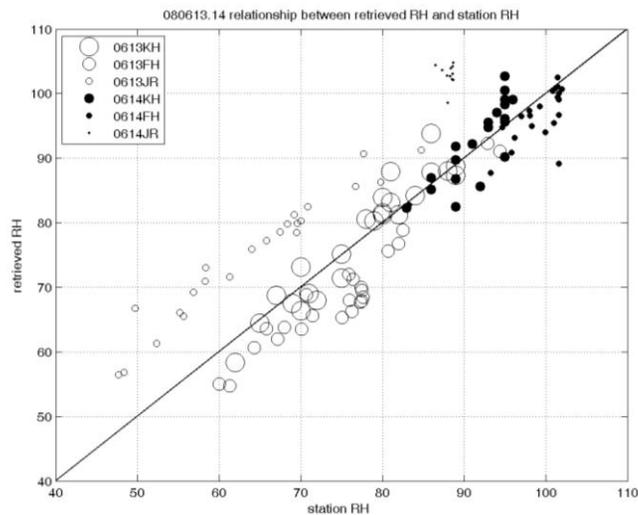


圖 18 6 月 13 日(○)與 14 日(●)，高雄站（大點）、繁華站（中點）、九如站（小點），測站觀測之相對濕度（橫軸）與反演之相對濕度（縱軸）的散佈圖。斜線為當觀測之相對濕度值與反演值相同時的斜線。

傾向相信 14 日九如站經由雷達反演之相對濕度值。吾人亦比較測站所觀測到之相對濕度、溫度，並利用 9 式反演得測站之水氣壓。同時利用雷達觀測到之折射率、測站之溫度及氣壓，經由 3 式反演得之水氣壓。爾後將兩者反演出的水氣壓相比較（圖 19）。從圖 19 中可看到，水氣壓的反演結果與相對濕度結果相似。13 日的水氣壓反演結果較 14 日好，而九如站的反演結果較高雄及繁華站的結果差。由於從 9 式及 3 式反演得之水氣壓皆會受到相對濕度及溫度的影響，因此相對濕度及溫度的量測準確性將會影響到水氣壓反演的結果。而圖 20 顯示，氣壓（圖 20a）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，高雄站位在沿海地區，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 20b）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 21 中可看到，在氣壓固定為 1000hPa，折射率固定為 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率的反演方法，是利用觀測場與參考場的相位差所反演得。造成折射率誤差可能有兩個原因：(1)當大氣垂直的折射率梯度太大時，影響電磁波傳遞的速度而造成相位的延遲，使得所反演的折射率產生誤差；(2)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率值產生偏差。

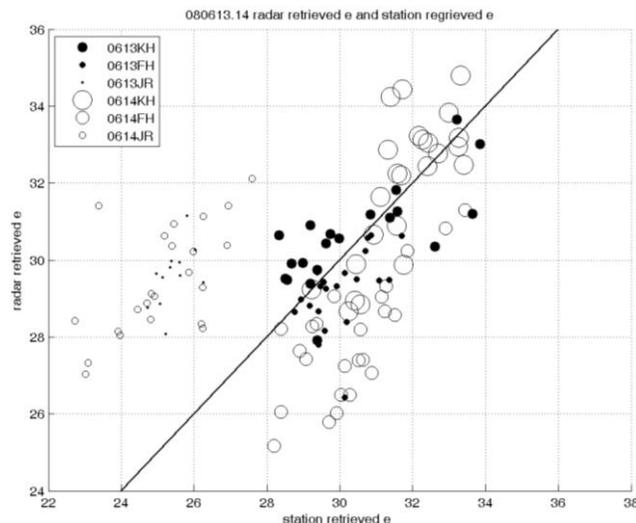


圖 19 6 月 13 日(○)與 14 日(●)，高雄站(大點)、繁華站(中點)、九如站(小點)，利用測站相對濕度及溫度反演得之水氣壓(橫軸)與雷達反演之水氣壓(縱軸)的散佈圖。斜線為當觀測之相對濕度值與反演值同時的斜線。

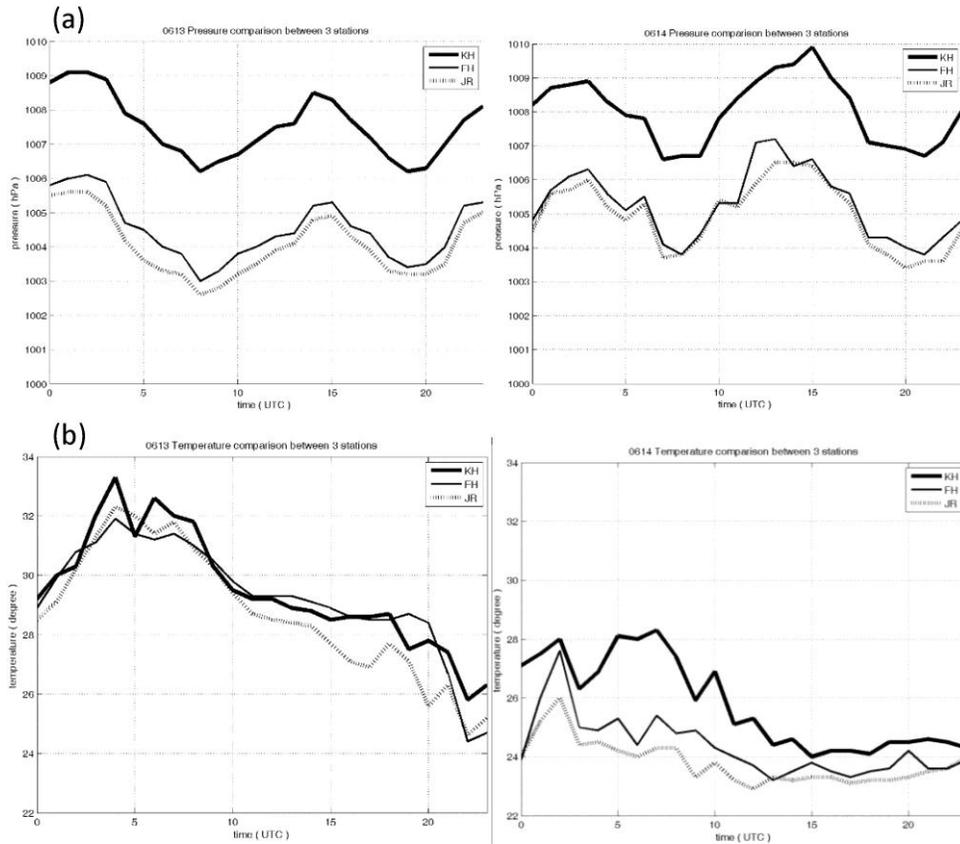


圖 20 高雄站（粗線）、繁華站（細線）與九如站（虛線）之(a)氣壓時序圖、(b)溫度時序圖。由左至右分別為 6 月 13 日與 6 月 14 日。

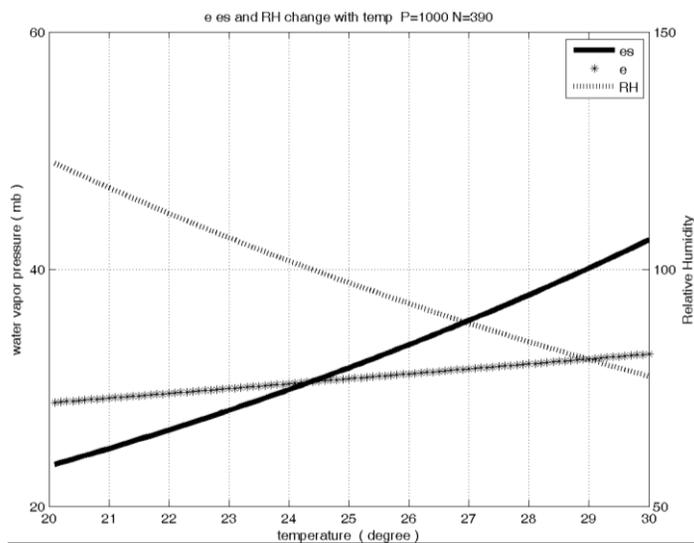


圖 21 當氣壓為 1000hpa，折射率為 390N，溫度、水氣壓、飽和水氣壓與相對溼度之間的關係。

另一原因是從溫度與相對溼度的關係圖中可以看到，在氣壓固定為 1000hPa，折射率固定為 390N 下，當溫度變化 1°C 時，相對溼度會變化 5%。而降雨時，因水滴蒸發吸收潛熱而使得近地面的溫度降低，造成所反演之相對濕度升高，且若是測站所測得的溫度有所偏差，也會使得反演的相對濕度產生誤差。

由於折射率是利用雷達電磁波的相位差反演所得，此方法解析度受限於地面目標物的密度，且雷達本身的解析度與地面站單點量測範圍也有所不同，因此以上皆有可能是造成相對溼度反演結果偏差之原因。

(二)不同降水系統下濕度場之變化情形

在美國中西部地區，折射率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率場之關係。14 日 01-12UTC 的雷達回波圖（圖 22）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率場（圖 23）最大值皆盤踞在西南沿海區域。

其中 02-03UTC 時（圖 24），對流胞快速的自西南方海面上移入，但是此時折射率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，使得該處之折射率值升高。

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 25），但是由於對流胞的移速較快（約 50 km hr^{-1} ），折射率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（圖 26）。由於雨帶大範圍的影響，可看到折射率場、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。

五、結論與未來展望

本篇研究吾人利用測站溫度與氣壓與雷達的折射率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。而水氣壓反演結果亦與相對濕度相似，高雄測站反演結果亦較繁華及九如自動雨量站好。

本文亦利用折射率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)假設率指數固定為 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率與地面溫度所影響，當折射率的變化較大時，水氣壓的變化會受到折射率較大的影響，但是當折射率的變化不劇烈時，溫度對水氣壓影響就會顯現出來。

在水平分布方面，折射率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 08 UTC 時，折射率西南沿海與內陸的差

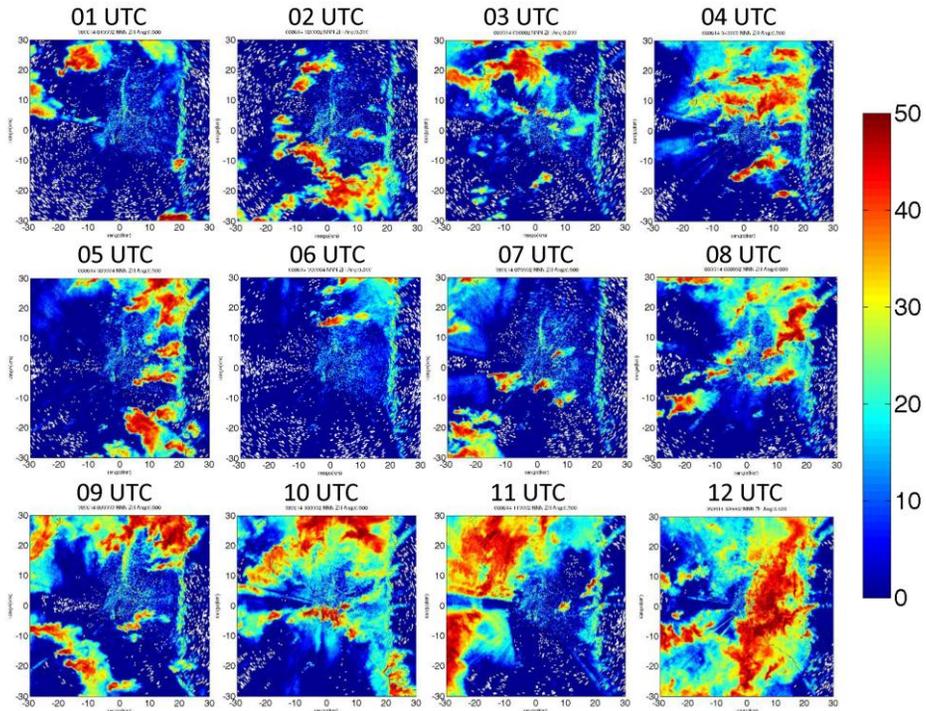


圖 22 01 到 12 UTC，SPOL 0.5 度 PPI 之雷達回波圖。SPOL 為中心，範圍為-30 至 30 公里。色階為 0dBZ-50dBZ。

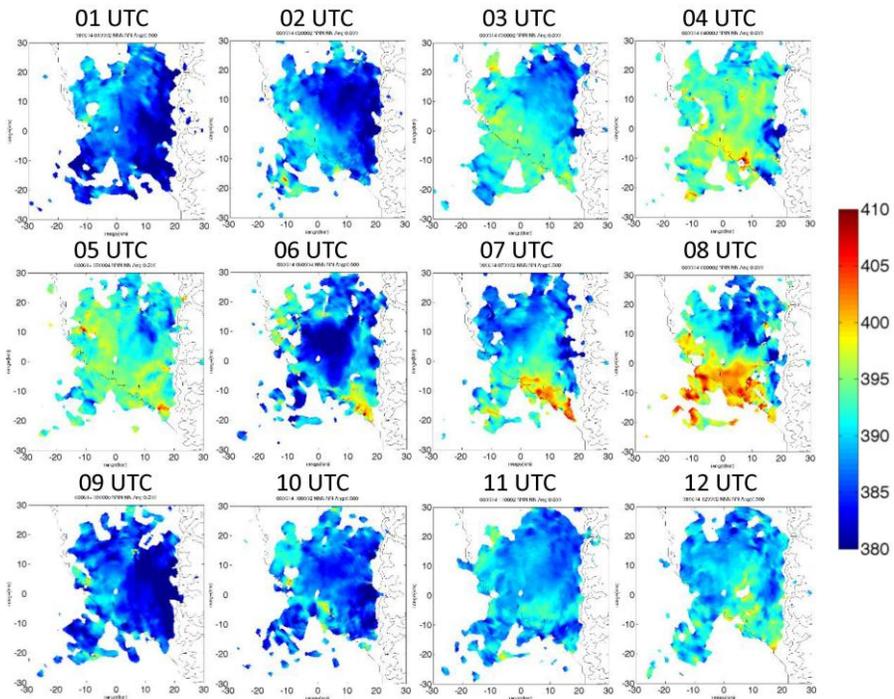


圖 23 01-12 UTC，SPOL 0.5 度 PPI 之折射率水平分布圖。以 SPOL 為中心，範圍-30 公里至 30 公里。色標為 380N-410N。為無因次參數。

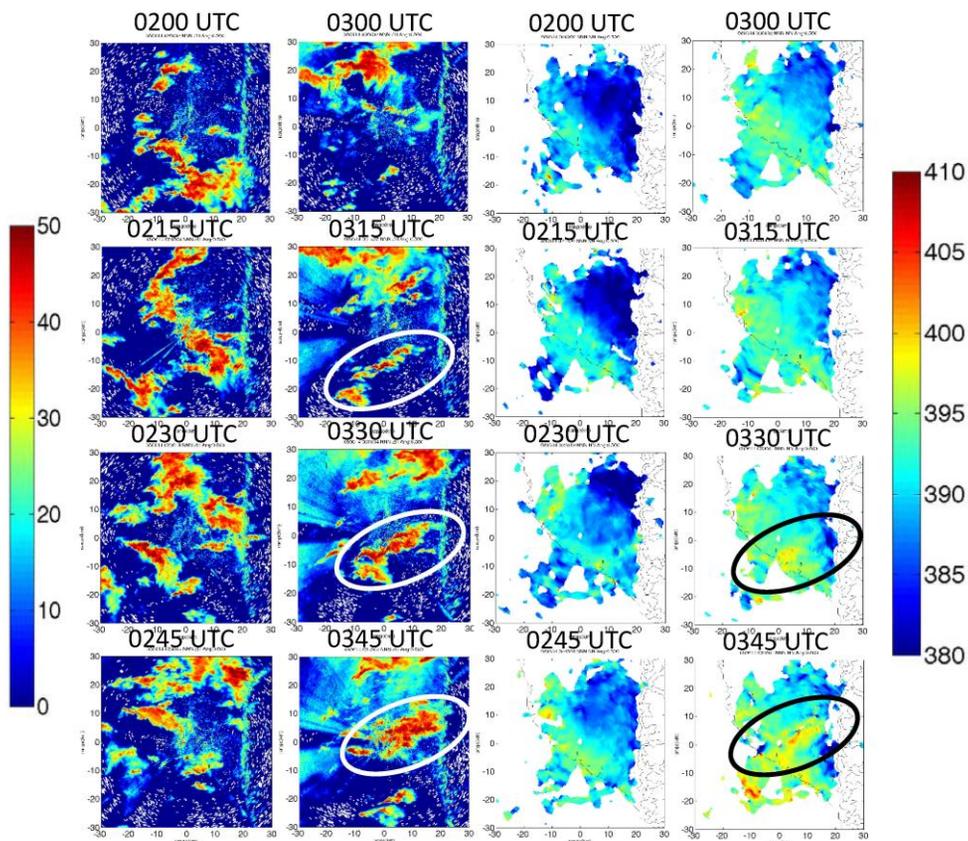


圖 24 第一、二行為 0200-0345 UTC，每 15 分鐘一張雷達 0.5 度 PPI 之回波圖（色標見左列色標尺），第三、四行為 0200- 0345 UTC，每 15 分鐘一張雷達 0.5 度 PPI 折射率（色標見右列色標尺）。

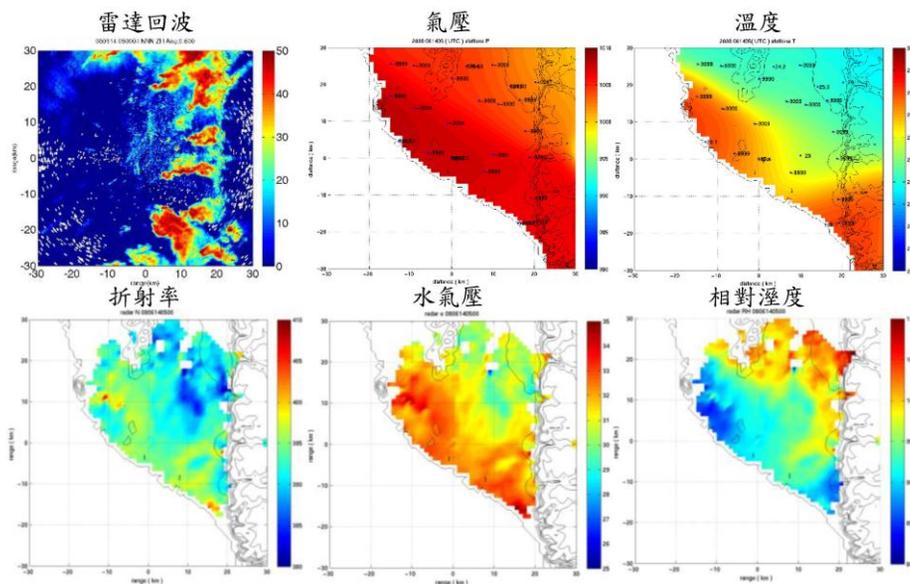


圖 25 05 UTC 由左至右，上至下分別為：雷達回波、氣壓、溫度、折射率、水氣壓、相對溼度。

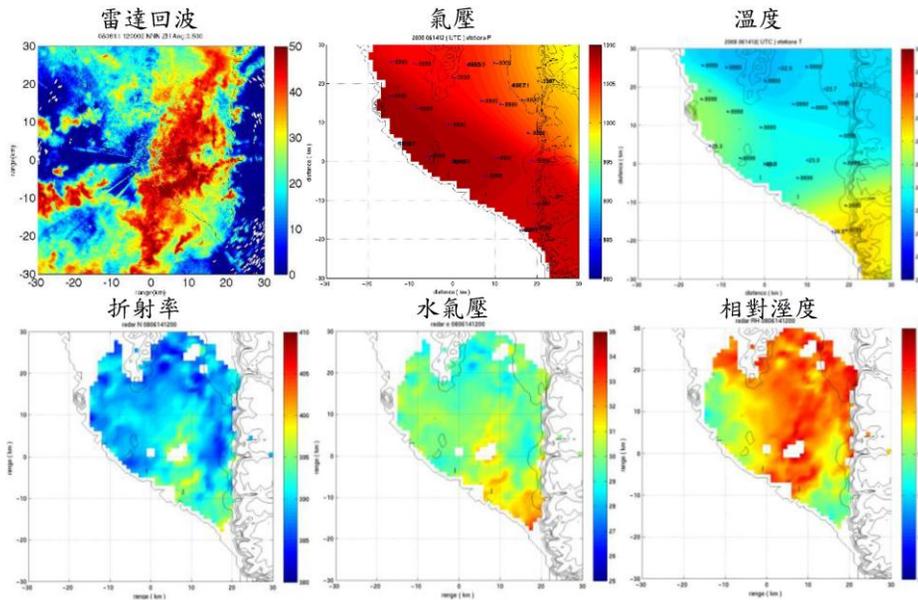


圖 26 12 UTC 由左至右，上至下分別為：雷達回波、氣壓、溫度、折射率、水氣壓、相對溼度。

異可達 $15N$ ，此時水氣壓場的差異最大可達 $5hPa$ 。

而折射率的小時變化約為 $5N$ ，當回波移動的速度較快($50 km hr^{-1}$)時，折射率場受降水系統的影響較小，但若是回波移動速度較慢($15 km hr^{-1}$)時，在回波影響的區域，折射率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 的個案，降水系統是由海外移入，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。

台灣地區量測水氣水平分布的儀器仍不足。水氣的水平分布狀況與大氣環境之間的關係仍為未知。未來將針對風場與水氣場的關係再進一步的分析，並尋找其他在 2008 年西南氣流實驗計畫期間，陸地上之對流新生的個案探討水氣場所扮演的角色。

折射率反演區域受限於地面目標物，反演範圍大約為 $30km$ ，而風場合成會受到基線(baseline)的影響，因此未來將利用 Liou(2009)的風場反演方法，反演出在基線上的風場，以期更加了解濕度場的變化與風場之間的關係。水氣場的變化對於對流胞的熱力發展條件有一定程度的影響，未來可透過模式更進一步的探討。

當折射率的垂直梯度變化大時，易使得反演的折射率產生誤差，因此將使用探空資料反演折射率，並探討折射率的垂直梯度對於折射水平分布反演的影響。

致謝

本研究得以順利完成，要特別感謝 SoWMEX/TiMREX 實驗團隊包括：NCAR SPOL 實驗小組、中央氣象局以及中央大學大氣邊界層暨空氣汙染實驗室提供寶貴的氣象資料。並感謝兩位審查委員提公諸多寶貴的意見以及 NCAR EOL 的 Tammy Weckwerth 以及 McGill 大學的 Frederic Fabry 給與馮雅茜的指導使得本篇論文更加完整且具有參考價值。同時感謝國科會 NSC 100-2119-M-008-041-MY5、NSC 99-2119-M-008-019 及氣象局 MOTC-CWB-99-2M-03 的支持。

參考文獻

- 陳尉豪，2011：同化多部都卜勒雷達資料以提升模式降水預報能力之研究-2008 SoWMEX IOP8 個案分析,國立中央大學碩士論文，90 頁。
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T.a., Rocken, C., Anthes, R.A., and Ware, R.H., 1992: GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Position System. *J. Geophys. Res.*, 97: 15787-15801.
- Bolton, D., 1980: The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Mon Wea. Rev.*, 108, 1046-1053.
- Demoz, B., and Coauthors, 2006: The dryline on 22 May 2002 during IHOP_2002: Convective-scale measurements at the profiling site. *Mon Wea. Rev.*, 134, 294-310.
- Ho, S.P. and M. Goldberg, Y.H. Kuo, C.Z. Zou, and W. Schreiner, 2009: Calibration of temperature in the lower stratosphere from microwave measurement using COSMIC radio occultation data: Preliminary result. *Atmos. Oceanic. Sci.*, 20, 87-100.
- Fabry, F., C. Frush, I. Zawadzki, and A. Kilambi, 1997: On the extraction of near-surface index of refraction using radar phase measurement from ground target. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 14, 978-987.
- _____, 2004: Meteorological value of ground target measurement by radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21, 591-604.
- Feng, D. D. and B. M. Herman, 1999: Remotely sensing the Earth's atmosphere using the Global Positioning System (GPS)-The GPS/MET data analysis. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 16, 989-1002.
- 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.
- Soden, B., and J. Lanzante, 1996: An assessment of satellite and radiosonde climatologies of upper-tropospheric water vapor. *J. Climate*, 9, 1235-1250.
- Straka, J.M., E.N. Rasmussen, and S.E. Fredrickson, 1996: A mobile mesonet for finescale meteorological observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20, 117-132.

Wang, J., H.L. Cole, D.J. Carlson, E.R. Miller, K. Bieerle, A. Paukkunen, and T.K. Laine, 2002: Corrections of humidity measurement errors from the Vaisala RS80 radiosonde – Application

to TOGA COARE data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 981-1002.

Characteristics of Radar Refractivity During 2008 SoWMEX/TiMREX IOP8

Wei-Jiun Chen Tai-Chi Chen Wang Pay-Liam Lin Ya-Chien Feng

Graduate Institute of Atmospheric Physics, National Central University

(manuscript received 4 June 2013 ; in final form 26 September 2013)

ABSTRACT

The major goal of this research is to understand the relationship between low-level moisture derived from radar refractivity and precipitation in a frontal system during SoWMEX/TiMREX 2008 IOP8.

Low-level horizontal moisture fields are obtained from the near-surface refractivity retrieved from NCAR SPOL radar and the temperature and pressure data from surface stations. The newly obtained moisture fields are verified and show consistency with the surface observations at KaoHsiung and FenHua stations. In this study, the retrieved horizontal distributions of water vapor pressure and relative humidity fields during 00 to 12 UTC on June 14 are illustrated and compared with radar reflectivity fields in order to study the relationship between moisture evolution and convections.

Key Words: Radar Refractivity