

2003年7月3日異常回波之個案分析

陳啓南¹ 朱昌敏² 汪建良¹ 呂芳川²

¹國防大學理工學院、²南榮技術學院

摘要

2003年7月3日夜間，在五分山氣象雷達站西北方約120 km之台灣海峽北部，觀測到強度高達45 dBZ的線狀回波，寬度約100公里，長度約300公里。回波從出現到消散都是同一地區，且近似滯留長達12小時以上。雷達回波顯示有柱狀的高回波帶與對流系統結構類似。然而，其垂直結構顯示出上下層的不連續，以及有均勻的頻譜寬，表示該區沒有對流系統與顯著亂流的存在。

由於回波尺度相當大且停留時間長，對水平解析度為五公里的紅外線衛星而言，應該是有能力觀測到相當範圍的雲帶。然而，這些觀測系統在這段期間都沒有出現像雷達回波那樣大範圍且持續數小時的雲帶。即便是水平解析度5 km的熱帶降雨觀測計畫(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)或水平解析度1 km的中解析度影像光譜儀(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)等衛星，也都有能力觀測到類似的對流系統，但其觀測資料顯示台灣地區當時是晴空無雲的好天氣，也沒有充足的水氣可以形成對流系統。

每六小時之全球分析場(National Center of Environment Prediction/ Final Analysis, NCEP/ FNL)亦顯示出，這段期間台灣海峽鄰近地區的天氣型態屬於微弱高壓沉降的天氣，且自由對流層的高度遠高於600 hPa，對流可用位能(convective available potential energy, CAPE)值也相當的微弱。就綜觀天氣的趨勢而言，大氣環境是相當穩定的。從分析場的大氣折射效應診斷中，在台灣北部地面有超過30 m的超折射層，海峽低層大氣則有厚度約500 m之超折射層。因此，大氣折射效應是造成雷達回波異常的主因，亦即雷達波偏折到海表面而形成假回波。

1. 前言

台灣位於太平洋西側且隔著台灣海峽與中國大陸的福建省相鄰，境內有高聳的南北向山脈且四面環海，致使台灣天氣具有多變性的特徵。從乾、濕季節的特徵來看，冬季降水量較少、春夏季較多。造成雨季大量降水的系統主要有鋒面、梅雨、颱風與午後對流，當這些系統影響台灣地區時，常會帶來豪雨造成局部性的災害，而成爲氣象界與一般社會大眾所共同關切的氣象問題(涂與余1997)。近年來，中央氣象局發展短期定量降雨估計及預警系統(丘與陳2003)，並積極使用氣象雷達所提供的即時回波觀測資料，以提高降水預報能力。因此，雷達觀測資料的正確與否，對短期天氣預報是相當重要的。

爲隨時監控來自海面的降雨系統，中央氣象局在台灣北部五分山等四個地區建立氣象雷達觀測網(如圖1a)，以便提供防範豪大雨先期準備時間。根據五分山氣象雷達降水回波觀測，2003年7月3日07 UTC於雷達站東南方海面開始出現明顯降水回波。藉由雷達回波隨時間之動態變化，該回波由雷達站之東南側向西北方向移動。7月3日16 UTC至7月4日00 UTC，於台灣西北隅距五分山雷達站100-180 km海面，出現強度達45dBZ的大範圍明顯降水回波。之後，該回波逐漸減弱，直到至7月4日06 UTC才消失(僅顯示7月3日18 UTC，如圖1b)。

由氣象雷達守視標準作業程序而言，上述時間雷達降水回波明顯，最強回波達45dBZ狀況下，就雷達回波與降雨量關係(Z-R Relation)推論，以夏季較常出現對流性降雨 $Z = 300R^{1.6}$ 估計，應導致 28mm hr^{-1} 的降水量(Rinehart, 1997)，然而檢驗當時台灣地區累積雨量，北部地區陸地沒有降雨紀錄(圖未示)；又由2003年7月3日18 UTC紅外線衛星雲

圖觀察(圖1c)，台灣地區僅於北部上空飄有薄雲，且雲層移動方向係由北向南，與地面風場恰好相反，顯示該雲層並非氣象雷達所觀測到的降水回波。

周與李(2001)對五分山雷達非天氣回波型態進行分類，提出下列五種類別：(1)地形雜波、(2)海面回波、(3)非正常傳播、(4)干擾回波及(5)不明回波等五種類型，其中非正常傳播指的是大氣折射效應。大氣是由許多氣體、液體、固體懸浮微粒所組成，大致按著空氣中粒子重量成層狀排列，而形成疏密介質不同的架構，基本上是密介質在下，疏介質在上，亦即是靜力穩定的標準大氣結構，這個架構會受到天氣演變而有所改變(Patterson et al., 1994)。一般而言，電磁波在對流層的傳播可藉由大氣折射指數 n (Atmospheric Refractive Index)來界定其傳播的路徑。然而，大氣折射指數是溫度、壓力及水氣的函數，會隨時間與空間的變化，產生不同的傳播路徑。因爲大氣折射指數通常介於1.0001~1.0004之間，不易突顯其變化程度。故改以折射率 N (Refractivity)來詮釋(Bea and Dutton, 1968)，其方程式如下：

$$N = (n-1) \times 10^6 \approx \frac{77.6}{T} \left(p + \frac{4810e}{T} \right) \quad (1)$$

其中 T 是空氣溫度(K)， p 是大氣壓力(hPa)， e 是水氣壓(hPa)。依據Babin(1996)、Babin et al.(1997)之海上觀測實驗結果，頻率在1~100 GHz之間的無線電波會受到大氣導管效應的影響。目前廣泛應用於中尺度天氣觀測之氣象雷達，工作頻率介於3~10 GHz(C-Band 波長5cm，S-Band 波長10cm)(Rinehart, 1997、張2001)，正好是在這個範圍之內。因此，當溫度逆溫層的存在或水氣分布不連續時，空氣密度達到顯著的垂直向不連續時，雷達就有可能觀測到異常的回波。

爲了考量電磁波傳播路徑與地球曲率之關係，

於是 Bean and Dutton(1968)提出修正折射率(Modified Refractivity, M)，定義為下式：

$$M(h) = \left[(n-1) + \frac{h}{a} \right] \times 10^6 = N(h) + \frac{h}{a} \times 10^6 \quad (2)$$

其中 a 為地球曲率半徑，若修正折射率垂直梯度(dM/dh)為 0，同時也意謂著電波射線路徑(Ray Path)相對於地球表面將為直線。將實際地球半徑(約 6400 km)代入式(2)中，且對 M 作隨高度 h 的微分，可以得到

$$\frac{dM}{dh} \approx \frac{dN}{dh} + 157 \quad (3)$$

可利用 M 隨高度變化的曲線(M -Profile)來判斷大氣是否有折射效應存在，並將折射效應分為次折射(sub-refraction, $dM/dh > 157 M km^{-1}$)、正常(standard, $79 < dM/dh \leq 157 M km^{-1}$)、超折射(super-refraction, $0 < dM/dh \leq 79 M km^{-1}$)及陷捕(trap, $dM/dh \leq 0 M km^{-1}$)等四類。根據式(4)，就可了解為什麼當 $dM/dh \leq 0$ (即 $dN/dh \leq -157 N km^{-1}$)，由於電波射線之曲率將大於地球表面之曲率，電波將會向地球表面彎折而被陷捕。換言之，此時大氣將形成所謂的導波層(trapping layer)，導致大氣導管(atmospheric duct)的產生，此一層狀結構就像導波管(Waveguide)，電磁波將可能被侷限在導管層中向無限遠處傳播，直至導管層消失為止。

由於本個案發生在夜間且位於海面上，同時也不在高空觀測的時間附近，舉證相當不容易。因此，擬從第二節雷達的原始觀測資料著手，亦即分析雷達回波、徑向風場及頻譜寬，嘗試找出不合理之處。第三節則從熱帶降雨觀測計畫(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)及中解析度影像光譜儀(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)等衛星的觀測資料計算，推估環境場的水氣與降水分布，來說明環境場沒有對流系統。第四節利用美國國家環境預報中心全球分析場(National Center of Environment Prediction/ Final Analysis, NCEP/ FNL)，計算綜觀環境之大氣折射效應。最後，氣象觀測資料分析與折射效應計算結果與討論，會在最後一節說明。

2. 雷達觀測資料分析

五分山雷達於個案發生期間是採用 VCP21(Volume Coverage Patterns)策略，共有 9 個掃描仰角，大約六分鐘完成一完整體積掃描(林與謝 1997)。由圖 1 之雷達回波圖可以知道，南北兩端有高回波值，由其型態及空間尺度判斷，應該是屬於中尺度對流系統。張(1998)認為台灣地區的中尺度對流型態可簡單分為多胞型與超大型，其中，以線狀形態發展者幾乎佔全部 MCS 的一半。依據陳等(1996)針對線狀對流不同層狀區型態，本個案雷達回波與「無層狀降水區」最為類似。但由於雷達與衛星之觀測資料差異懸殊，需對雷達的回波結構作深入的剖析。

以 7 月 3 日 18 UTC 的回波觀測為例(圖 2a)，在仰角 0.5°、1.5°及 2.4°的資料中，海峽北部有回波存

在且最大強度為 40 dBZ，如圖 2b~c 所示。0.5°仰角的回波位置較偏北方，1.5°仰角的回波較偏南方且較寬。2.4°的仰角中，偏南的回波範圍較大而偏北的回波範圍狹小。若以垂直剖面分別分析南北兩個回波，如圖 3 所示，在 AB 剖面中，距雷達站約 130 至 200 km 之回波發展高度較高，約 2000~10000 m，如圖 3a 所示。在 AC 剖面中，距雷達站約 100 至 130 km 處之回波發展高度較低，約 2000~6000 m，且 2.4°仰角以上沒有任何回波出現，如圖 3b 所示。由於兩個剖面的回波沒有明顯的平整回波頂部及亮帶，此回波結構與層狀性降水特性不相符(Houze 1997、張等 2000)。若由圖 2 之強回波推估，該天氣系統的垂直發展高度應超過對流層頂。然而，在圖 3a 的 AB 剖面圖中，0.5°與 1.45°仰角回波出現了位置上的垂直不連續。圖 3b 的 AC 剖面圖中，1.45°仰角回波與上下兩個仰角回波亦是出現了位置上的垂直不連續。這個現象與深對流性回波的結構明顯不同，則意味著雷達資料的異常。

圖 4 為 7 月 3 日 18 UTC 3 及 5 km 高度之回波、徑向風場(radial velocity)及速度頻譜寬(spectrum width)之平面顯示。一般而言，成熟的線狀對流系統在垂直剖面上會有明顯的回波且呈連續性的分布。然而，從圖 4a 與 4e 來看，回波的位置在垂直方向並沒有連續性。在 3 km 高度的徑向風場中(圖 4b)，由於零值線與實際風向正交的特性(張等 2000)，可以判斷出當時環境風場的風向是西南風，依據雷達回波觀測，此雷達回波僅稍微向西北方移動，近似停滯在同一地點停留長達 12 小時以上。此外，3 km 高度的徑向風場顯示出，風速是由西南向東北逐漸增強達到 10 m s⁻¹。在 5 km 高度的徑向風場中(圖 4e)，距雷達站西北方 100~125 km 處出現速度場的不連續。零值線位於方位角 270°及 295°之間且距雷達站 125 km。在零值線區南北兩側均有正值的徑向風場，此一徑向風場分布，雖然徑向風場值介於 -0.25~5 m s⁻¹，僅能推論 5 km 平面高度之風場狀況不穩定，顯示該區域之水粒子運動應有相當差異。

由 3 km 高的頻譜寬來看(圖 4c)，回波區之數值相當均勻且均小於 2 m s⁻¹，顯示出本層回波粒子各方向運動速度相當平均。亦即，本層上下之垂直方向上的風切變很小也沒有顯著的亂流。在由 5 km 高的頻譜寬來看(圖 4f)，在雷達站西北方 100 km 處有強度高達 10 m s⁻¹的頻譜寬，顯示出該層回波粒子有垂直方向上的風切變且有顯著的亂流可能，但是，回波強度卻不到 10 dBZ。另外，該區的頻譜寬分布也顯示水平與垂直向的不連續與線狀對流特徵不吻合(Doviak and Zrnicek, 1993; Bluestein and Jain, 1985; Fang et al., 2004)。

3. 衛星觀測資料分析

為確認五分山氣象雷達觀測結果，並不是正常的天氣回波。除了有先前的紅外線衛星雲圖的說明外，再加上 TRMM 與 MODIS 兩個繞極衛星的觀測資料作為佐證。雖然，衛星的解析度不像雷達這麼高，但長約 300 km、寬約 100 km 的大範圍雷達回

波，仍然可以被衛星觀測到。陳等(2006)利用微波資料計算海上水氣含量的公式，反演台灣鄰近地區 2002 至 2004 年 7~10 月間的資料。他們發現在海上晴空無雨的情況下，由 TRMM/TMI 求得水氣含量 (water content) 大約是介於 $37\sim 49\text{ g m}^{-2}$ 之間。由通過台灣地區上空三個時段(3 日 04、22 UTC 及 4 日 03 UTC) 的資料分析，相對於地面雷達回波(長約 300 km、寬約 100 km) 出現位置上空的水氣含量介於 $34\sim 38\text{ g m}^{-2}$ 之間。以 7 月 3 日 22 UTC 為例，如圖 5 所示。圖 5a 為雷達回波，當時仍有高達 40dBZ 的觀測值。圖 5b 中紅點代表 TMI 觀測資料，方塊為雷達回波出現位置。衛星資料位於雷達回波區內共有資料 184 點，水氣含量介於 $27.5\sim 34.0\text{ g m}^{-2}$ 之間(平均為 29.95 g m^{-2})，這表示該區域屬於晴空無雨的環境。上述三個時段之水氣頻道資料計算可知，在最低 14 層降水觀測中，該區的降水粒子含量 (precipitation water content) 都是 0 g m^{-3} 。又依據 TMI 通過台灣地區位置，掃描寬度 (swath) 為 878 km，在海面上的 14 層降水粒子含量均為 0 g m^{-3} 。

個案發生期間，MODIS 的 Terra 衛星通過台灣時間為 7 月 3 日 0320 UTC、1415 UTC 及 7 月 4 日 0225 UTC 等三時段，AQUA 衛星則在 7 月 3 日 0450 UTC 及 7 月 4 日 0530 UTC 通過台灣。以氣象雷達回波位置區塊在 850 hPa 高度的溫度及露點溫度差分析，其平均值介於 7.5 到 8.8°C 之間。以 7 月 4 日 02 UTC 為例，如圖 6 所示，在海峽北部有觀測到 20 dBZ 的回波值，長 120 km，寬 50 km (如圖 6a)。MODIS 通過台灣地區的觀測範圍如圖 6b，在台灣海峽中線取溫度露點差垂直剖面，相對位置如圖 6b 左下角，從圖 6c 溫度露點差垂直剖面圖中可以發現，在 920 hPa 以下海峽南部較北部為潮濕，但全區的溫度露點差都在 8 K 以上。在 850~400 hPa 之間的溫度露點差都在 12 K 以上，海峽北部甚至高達 24 K。所以在這段時間台灣海峽上空非常乾燥，沒有充分的水粒子可以形成降水系統。

4. 綜觀天氣分析

根據 2003 年 7 月 3 日 12 UTC 之日本氣象廳地面天氣分析圖，滯留鋒面系統位於北緯 32 度以北，離台灣甚遠且對台灣天氣影響不大。此時，太平洋副熱帶高壓 1012 hPa 等壓線相交於台灣東部，台灣位於副熱帶高壓脊的天氣型態。地面風場以東南風和南風為主，暖平流明顯。於 7 月 4 日 00 UTC 時，副熱帶高壓西伸的等壓線 1012 hPa 已東退，但仍是高壓籠罩的天氣型態，且台灣附近風速均小於 10 m s^{-1} 。850 hPa 等壓面上，於 3 日 12 UTC 在台灣東部海域之 1530 m 等高線，也於 4 日 00 UTC 時東退。在台灣地區的風速有增強的趨勢，風向由原有的西南風轉為南南西風，風速仍小於 10 m s^{-1} 。另外，3 日 12 UTC 在台灣海峽之 700 hPa (3180 m) 等高線，也於 4 日 00 UTC 時東退(圖未顯示)，風速同樣有增強的趨勢，風向由原有的南風轉為東南風。而以上兩時間

之雷達回波觀測狀況，3 日 12 UTC 時，五分山東側陸地及海面有明顯的回波。而 4 日 00 UTC 時，在台灣海峽北部則有 35 dBZ 的回波值。

Houze (1997) 指出層狀性降水較常伴隨鋒面出現，但此時期北方鋒面系統距台灣至少 700 km，應不致對台灣造成影響，以下將進一步分析個案期間台灣地區是否具有對流系統發展的環境特徵。鄧與陳(1990)的個案分析中存在有不同高度之噴流，而在上述兩個綜觀天氣分析期間，僅在 30°N 以北、 107°E 以西的 850 hPa 有超過 20 kts 的風速，但距台灣北部 (25°N 、 121°E) 都在 500 km 以外，而 700、500 hPa 均無明顯噴流存在，在鄧與陳(1990)的個案中，850 hPa 的噴流軸係位於台灣上空(以上圖均未示)。

由於個案發生期間正好位於兩個高空觀測時間 (00 和 12 UTC) 之間且位於台灣海峽北部海面上，因此，利用水平解析度為 $1^\circ\times 1^\circ$ 經緯度、垂直 28 層、時間間隔 6 小時的 NCEP / FNL 資料。選取相對於線狀回波之位置單一格點 (24.8°N 、 120.3°E)，並依據分析場所計算出的散度、渦度及風速剖面如圖 7 所示。由圖 7a 之散度來看，3 日 12 UTC 低層至 300 hPa 為弱輻散區平均約 $0.2\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ 。在 200 hPa 有明顯的輻合區，最大值为 $-1.5\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ ，之後，180 hPa 處又轉為輻散。3 日 18 UTC 及 4 日 00 UTC 地面至 400 hPa 同樣是弱輻散，且其平均值約在 $0.1\sim 0.2\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ ，400 hPa 以上方轉為輻合且其最大值約 $-0.6\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ 。這種環境不具有低層輻合、高層輻散之特徵，且與 Mapes and Houze (1995) 分析之個案特徵值差異達 2 個量級，而與陳與沈(1996)的個案特徵值差 1 個量級。由於全球分析場並未包含垂直速度，故以平面風場所推算之渦度，來診斷大氣垂直運動，由圖 7b 之渦度來看，三個時段的值大部分為負值且平均在 $-1.0\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ ，故大氣應為向下沉降運動，雖然 4 日 00 UTC 時在 250 hPa 處有 $0.5\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ ，但整體而言，海峽北部的大氣環境不利於對流系統的發展。

由圖 7c 之風速剖面圖來看，三個時段低層最大風速大致位於 925 hPa，其中 3 日 18 UTC 的風速最大約 11 m s^{-1} ，於 4 日 00 UTC 時降低至 8 m s^{-1} 。平均而言，250 hPa 以下的風速平均約在 6 m s^{-1} ，而 250 hPa 以上風速隨高度增加變大，最大風速 24 m s^{-1} 約在 100 hPa 處，但 700 及 500 hPa 的風速並沒有明顯的變化，這個變量遠小於鄧與陳(1990)的個案研究的風速變量(約 50 kts)，且風場向量變化不大(大致由西南南轉西南風)。在垂直風切分析方面，僅 850 hPa 與地面之垂直風切較大約為 $3.1\times 10^{-3}\text{ s}^{-1} (\partial V/\partial z)$ ， V 為風場 m s^{-1} ， z 為高度 m ，其餘中低層垂直風切值均很小，介於 $0.5\sim 1.6\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 。此處的垂直風切量相較於鄧與陳(1990)的研究結果，也有明顯偏弱。且由圖 12c 中亦可發現，最大風速多出現於 950-925 hPa，故地面至 850 hPa 之間包括有位於最大風速層以上和以下的部分，以上部分為負風切，而以下部分的厚度則相當淺薄。所以中低層為弱風切、風速小且為微弱下沉環境，應該不致有強的線狀對流系統生成。

圖 8 為相對於圖 7 位置的位溫 θ 、相當位溫 θ_e 及飽和相當位溫 θ_e^* 垂直剖面時間序列圖。圖 7 顯示各時段 700 hPa 以下之大氣為對流不穩定 ($\partial\theta_e/\partial z < 0$)，且自由對流高度(LFC)平均在 500 hPa 附近，近地表不穩定的空氣塊不易抬升到自由對流層而產生對流系統，僅在 4 日 00 UTC 有 238 J Kg^{-1} 的 CAPE 值。這個結果和鄧與陳(1990)個案研究 1176 J Kg^{-1} 的對流可用位能(convective available potential energy, CAPE)明顯不同，也遠小於林與陳(1997)個案 CAPE 值。此外，其他熱力因子諸如 LI、KI、TT 等，也都未達發展深對流之指標。對於雷達回波圖中發展超過 8 km 之線狀對流系統而言，在明顯回波出現前、中及後的動力與熱力場環境分析，均無法顯示台灣海峽北部有不穩定的大氣環境。

個案期間氣象雷達觀測結果具有高回波值、且出現時間長等特性，但經過數個衛星資料、雷達原始資料，以及動力與熱力的大氣環境比對，都指向雷達的回波是異常。因此，進一步探討大氣折射環境的可能性。假如雷達的回波是異常現象，則大氣折射效應最有可能出現的位置應該是在雷達所在位置的附近，以及回波與雷達站之間。利用分析場計算台灣北部通過五分山之綜觀大氣折射效應剖面圖，如圖 9，五分山雷達站相對位置如紅色箭頭所示。於 7 月 3 日 12 UTC 時(圖 9a)，可以診斷出陸地有 80 m 以上的超折射層，海陸交界地帶則有次折射層。在近海面處有較大的相當位溫垂直梯度且向上遞減，表示綜觀環境近地層溼度之垂直變化較明顯，且由 dM/dh 的計算可知，在海面上則有高度 500 m 以上的超折射層，甚至在部分海面亦可以診斷出陷捕層。3 日 18 UTC 時(圖 9b)，五分山附近的超折射層超過 120 m，雷達西側陸地的次折射層明顯減少，台灣海峽上的陷捕層已消失，而雷達站東側陸地及海面仍有明顯的次折射及陷捕。7 月 4 日 00 UTC 時(圖 9c)，五分山附近陸地仍有超折射層，東部海面仍有陷捕層，且超折射層高度仍維持在 500 m 以下。西部海面之陷捕層雖已消失，但仍有 100~400m 之超折射層存在。這也就是說，本個案期間造成雷達回波異常的原因，應該是雷達站附近之低層大氣有連續及大範圍的陷捕層或是超折射層的出現。且雷達波傳播路徑中，也受到大氣折射效應影響，致使雷達波偏折到達海面，形成假回波。在綜觀環境資料分析中，雖然解析度不足，但仍可以診斷出低層大氣有折射效應的存在。如果可以利用中尺度數值模式增加低層垂直解析度，勢必將能夠突顯陷捕層的存在。

5. 結論與未來研究方向

2003 年 7 月 3 日夜間，五分山(RCWF)氣象雷達(NEXRAD WRS-88D)觀測到強度高達 45 dBZ 的回波值。回波位於雷達站西北方約 120 km 之台灣海峽北部，且停留數小時之久。然而，從現有的觀測資料中發現有不吻合的現象：

1. 雷達回波具有柱狀的高回波帶且無均勻的回波頂

及亮帶，與對流系統結構類似。然而，垂直向的回波卻顯示出不連續。由徑向風場判斷出環境風場為西南風，但主要的線狀回波則近似停滯不動，僅稍微朝向西北方移動。此外，整個回波之頻譜寬相當均勻且為 2 m s^{-1} 以下，顯示該區無顯著對流系統存在。

2. 從紅外線衛星雲圖並未發現雷達觀測到的對流系統，又從 TRMM 的衛星資料觀測結果，可以說明當時是晴空無雨的天氣狀況，而在地面也沒有觀測到降水。另外，從 MODIS 的觀測資料中，台灣地區在個案期間高空的溫度露點差都在 4 K 以上，顯示高空是相當乾燥，並無充分的水粒子可以形成對流系統。
3. 從 NCEP/FNL 的觀測資料分析，不具有低層輻合、高層輻散之特徵，也不容易產生對流。而高度大部分為負值，整體而言，海峽北部為沈降，不利於對流系統的發展。低層最大風速大致位於 925 hPa，中低層為弱風切，風速小且為微弱下沉環境，應該不致有強的線狀對流系統生成。700 hPa 以下之大氣為對流不穩定，且自由對流層平均高度在 500 hPa 附近，近地表不穩定的空氣塊不易抬升到自由對流層而產生對流系統。CAPE 值僅 238 J Kg^{-1} ，對於雷達回波圖中發展超過 8 km 之線狀對流系統而言，在回波出現前、中及後的動力與熱力場環境分析，均無法顯示台灣海峽北部有不穩定的大氣環境趨勢。

分析場雖可診斷出有 400 m 以上的超折射層，但是導管強度不夠。若是能夠利用中尺度數值模式增加低層垂直解析度，勢必將能夠突顯陷捕層的存在。

誌謝

本文感謝中央氣象局提供的五分山雷達資料，以及美國大氣科學研究中心免費提供之 WRF 數值模式。此外，本研究在國推會 NSC 93-2623-7-014-023、NSC 94-2623-7-232-001、NSC 95-2623-7-014-016 計畫經費補助下完成，在此一併感謝。

參考資料

- 丘台光與陳嘉榮，2003：短時預報系統產品校驗。天氣分析與預報研討會論文彙編，63-68。
- 周仲島、李文兆，2001：台灣地區都卜勒雷達資料發展應用計畫(I)。中央氣象局委託計畫，90 頁。
- 林宏聖與謝信良，1997：五分山雷達特性簡介。天氣分析與預報研討會論文彙編，119-121。
- 涂建翊與余嘉裕，1997：台灣地區降水之時空氣候特徵。氣象預報與分析，152，23-33。
- 張培昌、杜秉玉、戴鐵丕，2000：雷達氣象學，氣象出版社，499 頁。
- 張泉湧，2001：中尺度氣象學。國立編譯館，360 頁。
- 張茂興，1998：台灣中部山區中尺度對流系統之雷達分析。中正理工學院國防科學研究所博士論

文，262頁。

鄧仁星與陳景森，1990：台灣地區颶線之環境分析。大氣科學，18，149~158。

陳泰然、周鴻祺、林宗嵩、楊進賢，1996：台灣海峽北部及鄰近地區春夏中尺度對流系統之氣候特徵。大氣科學，24，145~164。

陳泰然與沈里音，1996：台灣梅雨季海峽北部與鄰近地區線狀對流之環流條件。大氣科學，24，233-247。

陳萬金、胡仁基、劉振榮、張茂興，2006：利用TMI微波頻道反演海上颶風定量降水之研究。大氣科學，34，67-88。

Babin, S. M., 1996: Surface duct height distributions for Wallops Island, 1985-1994. J. Appl. Meteor., 35, 86-93.

Babin, S. M., G. S. Young, and J. A. Carton, 1997: A new model for the oceanic evaporation duct. J. Appl. Meteor., 36, 193-204.

Bean, B. R., and E. J. Dutton, 1968: Radio Meteorology. Dover Publications, 435 pp.

Bluestein, H. B. and M. H. Jain, 1985: Formation of mesoscale lines of precipitation: Server squall lines in Oklahoma during the spring., 42, J. Atmos. Sci., 1711-1732.

Doviak J. R. and D. S. Zrníc, 1993: Doppler Radar and Weather Observation, 2nd Edition, Academic Press, 410 pp.

Fang, M., J.R. Dovia, V. Melnikov, 2004: Spectrum Width Measured by WSR-88D: Error Sources and Statistics of Various Weather Phenomena, J. Atmos. Oceanic Technol., 21,888-904.

Houze A. R. Jr., 1997: Stratiform Precipitation in Regions of Convection: A Meteorological Paradox?, Bull. Amer. Meteor. Soc., 78, 2179-2196.

Mapes, B. E. and R. A. Houze Jr., 1995: Diabatic divergence profiles in western Pacific mesoscale convective systems. J. Atmos. Sci., 52, 1807-1828.

Patterson, W. L., C. P. Hattan, G. E. Lindem, R. A. Paulus, H. V. Hitney, K. D. Anderson and A. E. Barrios 1994: Engineer's Refractive Effects Prediction System(EREPS). Technical Document 2648., 154pp.

Rinehart E. R., 1997: Radar for Meteorologists, Third Edition, Rinehart Publications, 418pp.

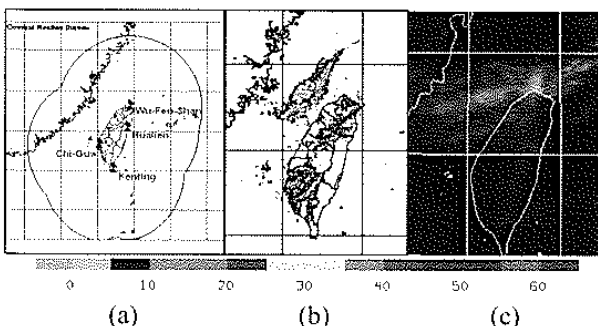


圖 1 中央氣象局雷達觀測網及 2003 年 7 月 3 日 18 UTC 觀測資料，由左至右分別為台灣地區氣象雷達觀測網，紅線表示監控範圍、雷達回波圖，紅外線雲圖(資料來源：中央氣象局)

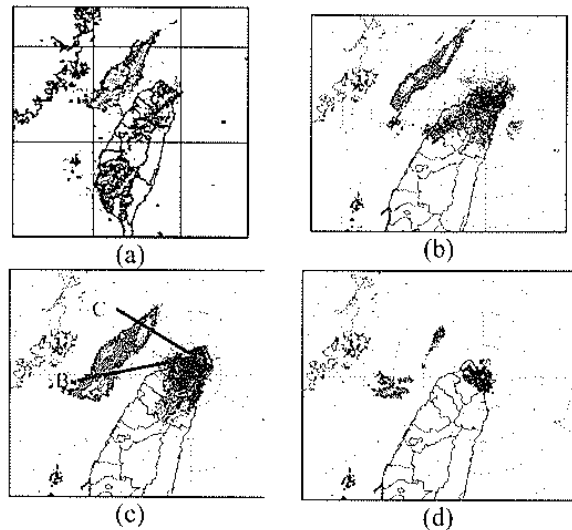


圖 2 2003 年 7 月 3 日 18 UTC 五分山雷達觀測資料：(a)雷達回波合成圖，(b) 0.5 度，(c) 1.45 度，(d) 2.4 度仰角回波。回波值色階如圖 1，間隔為 5 dBZ，距離標示每一圈為 50 公里。AB 與 AC 線段代表圖 6 的垂直剖面位置。(資料來源：中央氣象局)

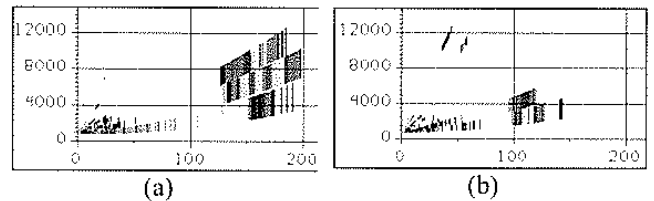


圖 3 圖 2 之雷達回波剖面圖：(a) AB，(b) AC 剖面。垂直軸為高度(m)，水平軸為與雷達站距離(km)，回波值色階如圖 1，間隔為 5 dBZ。

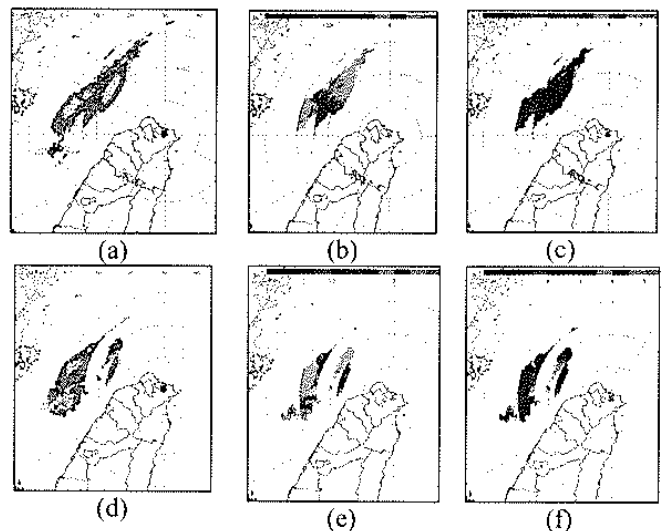


圖 4 003 年 7 月 3 日 18 UTC五分山雷達觀原始觀測資料：(a)、(b)、(c)別為高度 3 公里之等高面(CAPPI)的回波強度、徑向風場與頻譜寬；(d)、(e)、(f)同(a)、(b)、(c)但為高度 5 公里。回波場色階間隔同圖 1，徑向風場色階間隔 2.5 m s⁻¹，頻譜寬色階間隔 0.5 m s⁻¹，色標值如各圖所示，距離標示每一圈為 50 公里。

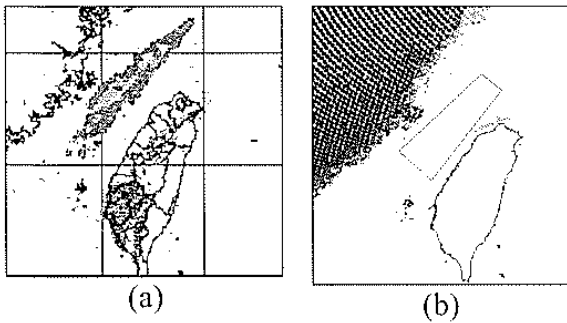


圖 5 2003 年 7 月 3 日 22 UTC TRMM 觀測資料，(a) 為五分山氣象雷達降水回波合成圖，(b) 為由水氣頻道推算所得水氣含量，紅點代表 TMI 觀測資料，方塊為雷達回波出現位置，黃點為位於雷達回波位置之觀測點。

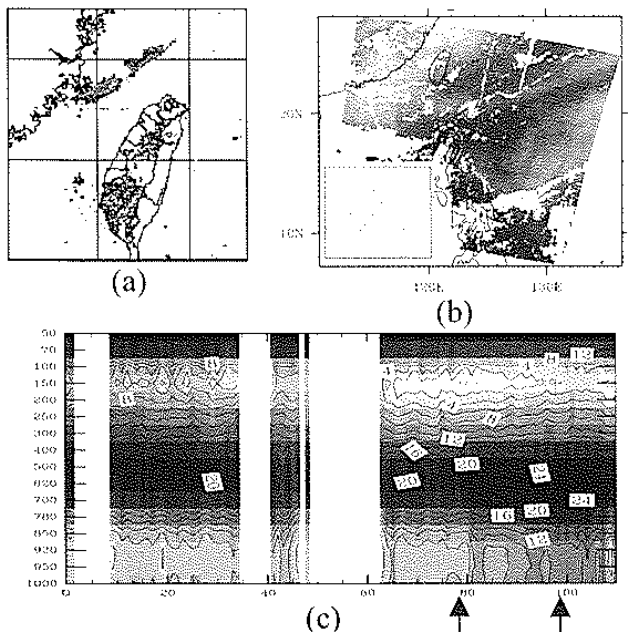


圖 6 2003 年 7 月 4 日 02 UTC 觀測資料。(a)五分山雷達回波合成圖，回波值色標如圖 1，間隔 5dBZ，(b) 為 MODIS 觀測資料範圍，左下角為圖(c)切線位置，(c)剖面之溫度露點差(K)，等值線間隔為 2 K，垂直軸為高度(hPa)，橫軸為觀測資料點數，每一點間隔約 5 km，回波出現概略位置標示於紅色箭頭範圍內。

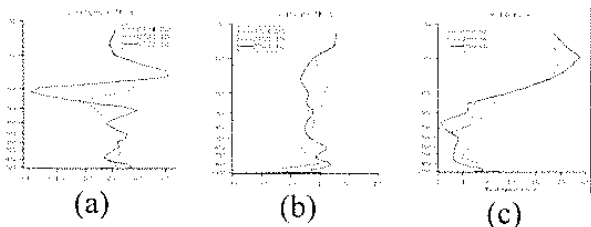


圖 7 回波位置動力場剖面圖，(a)散度、(b)濕度及(c)風速，濕度及輻度為 $10^{-6} s^{-1}$ ，風速單位為 $m s^{-1}$ ，線條類型代表不同時間，實線為 7 月 3 日 12 UTC，虛線為 7 月 3 日 18 UTC，點線為 7 月 4 日 00 UTC。

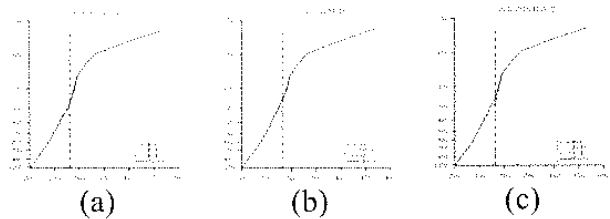


圖 8 回波位置熱力場剖面圖，由左至右分別為 7 月 3 日 12、18 UTC 及 4 日 00 UTC 之位溫 θ 、相當位溫 θ_e 及飽和相當位溫 θ_e^* 。實線為位溫，虛線為相當位溫，點線為飽和相當位溫，點線段為地面相當位溫參考線，單位為 K。

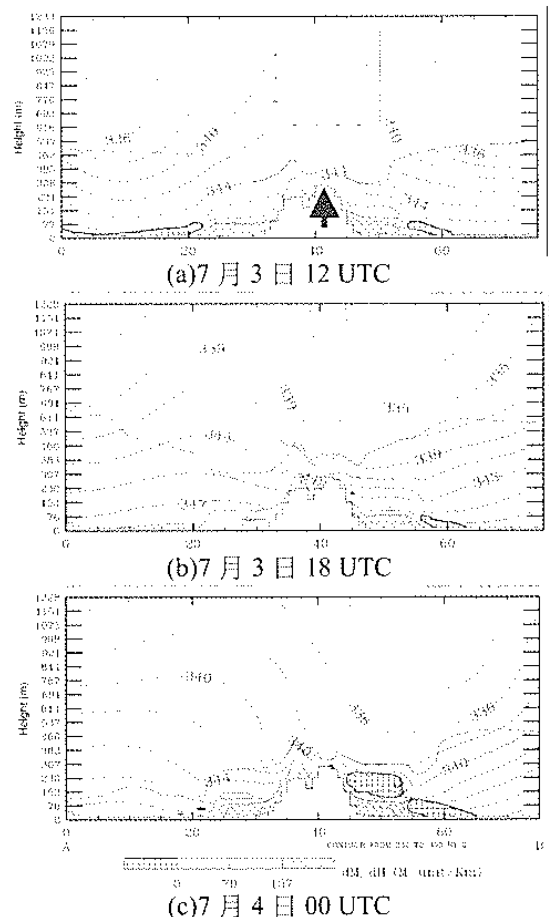


圖 9 2003 年 7 月 3、4 日台灣北部大氣折射效應，(a) 7 月 3 日 12 UTC，(b) 7 月 3 日 18 UTC，(c) 7 月 4 日 00 UTC。次折射為 $dM/dh > 157 M km^{-1}$ 、正常為 $79 < dM/dh \leq 157 M km^{-1}$ 、超折射為 $0 < dM/dh \leq 79 M km^{-1}$ 及陷捕為 $dM/dh \leq 0 M km^{-1}$ ，藍色線為相當位溫(K)，間隔為 2 K。垂直軸為高度(m)，橫軸為格點數，每一格點 5 km，圖中空白無資料部分為地形，五分山雷達站相對位置為紅色箭頭所示。