

2003 年 7 月 3 日台灣海峽北部異常回波之個案研究 (二) 數值模擬

朱昌敏¹ 陳啟南^{2,3} 呂芳川¹ 汪建良²

¹ 南榮技術學院 ² 國防大學理工學院 ³ 陸軍官校

(中華民國九十五年十二月二十八日收稿；中華民國九十六年九月二十八日定稿)

摘 要

朱等(2007)已說明 2003 年 7 月 3 日夜間，在五分山氣象雷達觀測到的回波並不是真的天氣系統。同時，綜觀天氣分析也顯示在台灣地區是屬於穩定的大氣環境而且沒有降水。本研究利用 WRF 數值模式重建個案當時之大氣環境且著重在導管的時間與空間演變。此外，藉由資料的後處理與視覺化繪圖技術，吾人可以清楚呈現大氣導管的位置。

WRF 之數值模擬結果顯示：(1)夜間來自西側且伴隨西南氣流的暖濕空氣與來自東側的南來氣流在雷達站附近聚集，導致低層垂直水氣梯度的增加。在此情形下，修正折射指數之垂直梯度增加而形成陷捕層。(2)當異常回波出現在五分山東南方時，21 m 高且強度 3 M-unit 的陷捕層正好位於雷達站所在之處。(3)當雷達回波停留在五分山的西北方時，近海岸地區的空中導管高度變化介於 230~623 m 之間、厚度變化為 185~350 m、強度則介於 4.7~11.2 M-unit 之間。(4)由於雷達站東側水氣到達的時間較西側早，故雷達站東南方異常回波較早發生。(5)台灣西側向北輸送的水氣平行於台灣海峽，致使該異常回波可維持數小時之久。

關鍵字：WRF 模式、修正折射指數、陷捕層

一、前言

台灣的地理位置在太平洋西側，隔著台灣海峽與中國大陸的東南方相鄰。又因四面環海且有高聳的中央山脈呈南北走向，使台灣天氣具有多變性的特徵。於夏季期間，台灣地區受太平洋高壓之下沉氣流影響，低層水氣不易向上傳遞。這樣的天氣型態，易造成低層大氣之空氣密度垂直向顯著的不連續，進而導致低空域電磁波傳播路徑的偏折。

根據中央氣象局五分山氣象雷達觀測，2003年7月3日07 UTC，於五分山氣象雷達站東南方開始出現明顯回波，如圖1a所示。由雷達回波隨時間之動態變化分析，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01 UTC，於台灣西北隅距五分山雷達站100~180 km海面，出現強度達45 dBZ的大範圍明顯回波，寬度約100 km，長度約300 km，如圖1b所示。之後，該回波逐漸減弱，直到至7月4日06

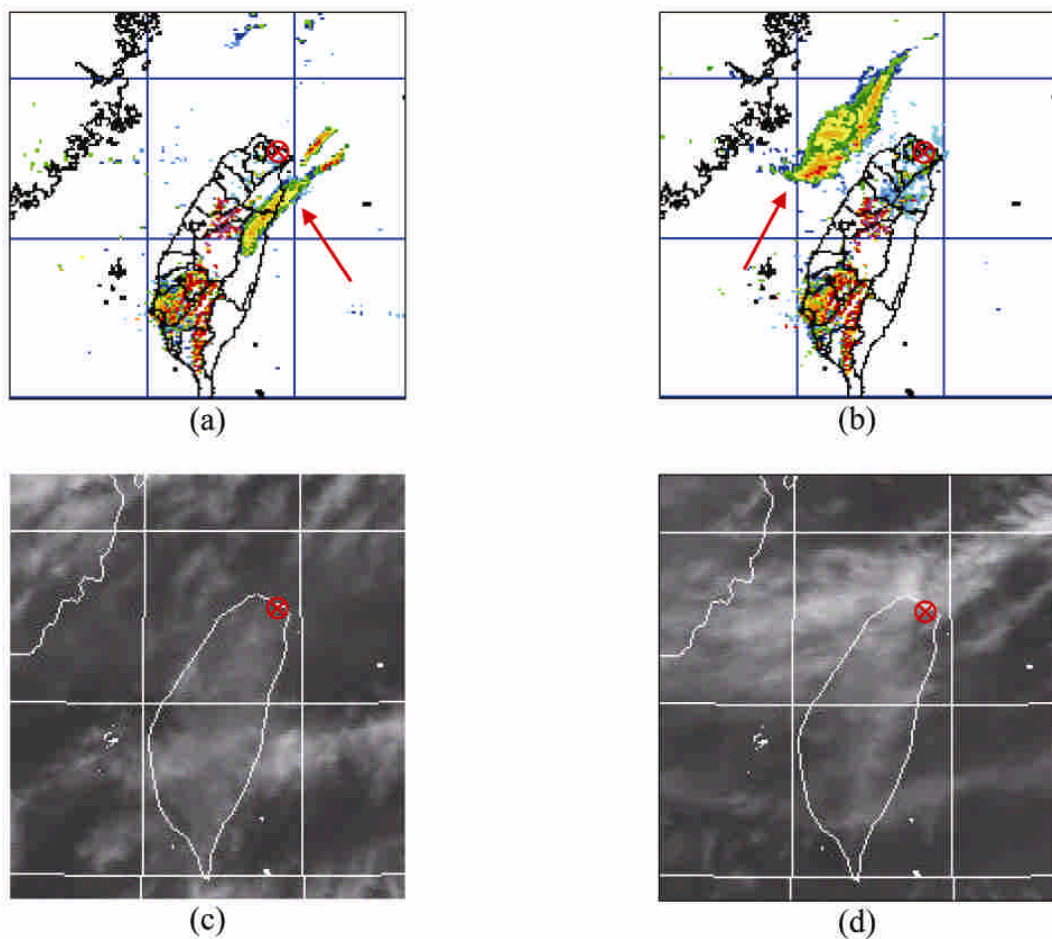


圖1 2003年7月3日氣圖台灣地區氣象觀測圖(a)10 UTC 雷達回波合成圖，(b)18 UTC 雷達回波合成圖，(c)10 UTC 紅外線雲圖，(d)18 UTC 紅外線雲圖，紅色箭頭指示異常回波位置，紅色標記位置為五分山雷達站。(資料來源：中央氣象局)

UTC 才消失。由紅外線衛星雲圖分析，如圖 1c 與 1d，台灣海峽北部鄰近區域，天空晴朗僅有薄雲，雲層移動方向大致是由東北向西南方向，大氣中也沒有顯著及足以導致降水之雲層聚積，此與雷達觀測結果呈現不一致的現象，故推論造成此一現象之主要原因為大氣折射效應所造成。周與李 (2001)、張與王 (2003)對五分山雷達非天氣回波型態進行分類，因為大氣折射效應所造成的非天氣回波，其特徵經常維持數小時以上，並具有準靜止性，除了出現在大陸東南沿海外，雷達站東南東方的日本島嶼（如宮古島）也時常出現。

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，它會隨時間與空間的變化，產生不同的傳播路徑(Patterson et al. 1994)。因為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 Bean and Dutton (1968) 改以折射率 N (Refractivity) 來詮釋，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 (K)是空氣溫度， p (hPa)是大氣壓力， e (hPa)是水氣壓。另外，為了考慮地球曲率半徑的效應，Bean and Dutton (1968)提出修正折射率 M (Modified Refractivity)以取代折射率 N ，其方程式如下：

$$M = N + \frac{h}{a} \times 10^6 \approx N + 0.157h \quad (2)$$

其中 a 為地球半徑(m)， h 為高度 (m)。

在討論電磁波傳播狀況時，修正折射率在垂直方向的梯度變化(dM/dh)，比電磁波所在位置的

M 值來的重要(Battan, 1973)，正常的 M 值是隨高度增加而遞增，並可依據 dM/dh 將折射狀況分為次折射(Sub-refractive, $dM/dh > 157 \text{ M km}^{-1}$)、正常(Standard, $79 < dM/dh \leq 157 \text{ M km}^{-1}$)、超折射(Super-refractive, $0 < dM/dh \leq 79 \text{ M km}^{-1}$)及陷捕(Trap, $dM/dh \leq 0 \text{ M km}^{-1}$) 等四類。當 $dM/dh \leq 0$ (即 $dN/dh \leq -175 \text{ N Km}^{-1}$)時，電波射線之曲率將大於地球表面之曲率，且會向地球表面彎折，而形成所謂的陷捕層(Trapping Layer)。此一層狀結構就像導波管(Waveguide)，電波將被侷限在導管層中向無限遠處傳播，直至導管層消失為止。Babin et al. (1997)根據導管發生的位置不同，利用 M 在垂直方向的梯度變化，將大氣導管分為六類，如圖 2 所示。其中，圖 2a 至 2c 分別為次折射大氣、正常大氣和空中導管，其中虛線代表導管層厚度。圖 2d 與 2e 同為地面導管，但在圖 2e 中，負的垂直梯度值非常明顯，導管層由地面向上展延。圖 2f 為蒸發導管，通常出現在水面上。陸地上發生的大氣導管，可分為空中導管及地面導管，與大氣逆溫層和水氣位置有關，在海面上發

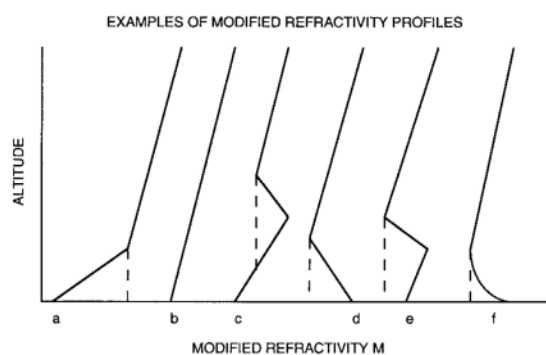


圖 2 修正折射率之垂直剖面圖：(a)次折射，(b)正常，(c)空中導管，(d)地面導管，(e)強的負垂直梯度值向上展延造成地面導管，(f)蒸發導管，虛線為導管層厚度。（摘自 Babin et al. 1997）

生的大氣導管稱作蒸發導管，與海面上的相對濕度變化有關。

Battan (1973)指出產生大氣導管現象時，其水氣、溫度等氣象因子隨高度分布狀況如圖 3。在圖 3 的 A 類型中，水氣由地面向上遞減，由於逆溫層的出現則容易產生導管。例如，在無雲的夜晚有微風吹拂的時候，地面迅速釋放出日間所吸收的熱能，結果產生逆溫層，並增加靠近地面的溼度。因此，大氣環境就開始形成導管，容易使得電磁波發生偏折的現象。在圖 3 的 B 類型中，低空有逆溫層存在，而水氣也有明顯的梯度，導管底部與地面連接且向上延伸則產生地面導管。如當暖乾的空氣平流通過冷海水表面時，海水蒸發則將會增加水氣量，水面上所產生的導管，會使得船艦雷達波產生異常傳播。在圖 3 的 C 類型

中，逆溫層及水氣明顯梯度位置較高，則容易產生空中導管。例如當有明顯沉降的天氣型態，接近地面的空氣比較潮濕時，也容易形成導管。以上 A、B 兩類型的導管是對地面雷達觀測有顯著的影響。C 類型的空中導管雖然對地面雷達不致產生明顯影響，但電磁波傳播過程中如果進入該導管中，其傳播路徑亦將受到影響。其餘導致導管效應的環境特徵，可參閱 Battan (1973)、黃 (1974)、Bean and Dutton (1968)的討論。

為了解溫度、壓力及水氣在高度變化對折射率改變之影響程度，可由 Eq. (1)對高度(h)微分，可以得到

$$\frac{dN}{dh} = \frac{a}{T} \cdot \frac{\partial p}{\partial h} + \left(-\frac{ap}{T^2} - \frac{2be}{T^3} \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial h} + \frac{b}{T^2} \cdot \frac{\partial e}{\partial h} \quad (3)$$

其中 $a=77.6$ 、 $b=373000$ 。

由氣象因子高度梯度前之係數，即可判斷出溫度、壓力、水氣對 dN/dh 所扮演之重要性。在呂等 (1998)的觀測實驗中， $\partial e / \partial h$ 項的絕對值比 $\partial T / \partial h$ 項大三倍以上，而 Bean and Dutton (1968)也有類似的實驗結果。台灣地區夏季主要受到西南氣流帶來暖濕空氣的影響，易使 $\partial e / \partial h$ 負值增大。而冬季受到大陸冷高壓及東北季風影響， $\partial e / \partial h$ 負值變化不大， $\partial e / \partial h$ 也不易產生地面導管。又如颱風的外圍氣流有較強的下沉氣流，且低層有豐沛的水氣，會導致溫度及水氣梯度過大，也容易有大氣導管的產生，由此可說明為何台灣地區夏季導管較常發生的原因。

朱 (1984a)統計 1969 至 1981 年板橋探空資料，指出台北地區地面大氣折射率變化以夏季最明顯，冬季最小，但由於解析度有限，只能得出巨觀基本特性，無法看出微觀變化。朱等 (1994)利用板橋探空資料及海洋研究船實驗結果，得知

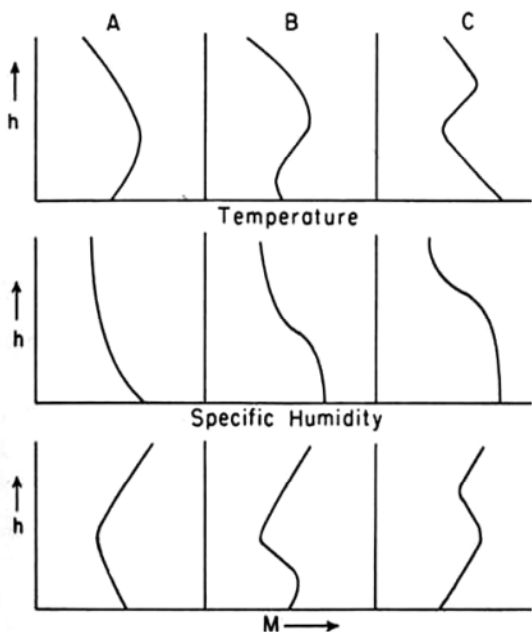


圖 3 產生大氣導管的典型環境特徵氣象因子高度分布圖，垂直軸為高度，上圖為溫度、中間為水氣，下圖則為修正折射率。（摘自 Battan, 1973）

台灣海峽北部地區蒸發導管高度變化大約在 50 ~250 m 間，但在東部海面卻只有 3~60 m，顯示大氣導管與地理位置、天氣系統型態有密切關係。呂等 (1998)針對台灣地區大氣導管的季節、日夜間變化方面之統計特性，以及丁等 (1994)對不同季節、不同天氣系統的大氣導管特性作相關研究，黃 (2004)及黃等 (2004)針對大陸冷高壓不同出海路徑，統計大氣導管發生高度、位置等特性，並進一步探討因大氣導管造成之角度、高度與距離之誤差。呂與朱 (2004)於台灣東南海域進行海上蒸發導管實驗發現，於強烈太平洋高壓籠罩之天氣系統，天空晴朗無雲、風速小之狀況下，海面上之導管高度達到 120 m，使得船艦及反潛機雷達搜索範圍更為擴大。

傳統大氣折射指數的計算大多是利用探空儀量測壓力、溫度及溼度等氣象因子，再加以推算大氣折射指數隨高度變化與分布狀況。朱(1984b)分析台灣地區 21 個地面氣象測站自 1969~1981 年之地面大氣折射率日統計值，並建立一套能預估台灣地區任一月份、任一高度之地面大氣折射率發生機率與月平均值的預測模式。Babin (1995)則是透過直昇機之觀測以探討大氣次折射的環境。Brooks et al. (1999)是利用 C-130 氣象研究飛機對波斯灣(Persian Gulf)地區進行地面導管觀測。Falodun and Ajewole (2006)則在奈及利亞西南部建立 100 m 之觀測塔，長期觀測低邊界層之折射指數氣候變化狀況。然而，上述氣象資料之取得是需要耗費龐大財力、物力與人力。同時，也僅能就小區域、短時間作觀測，無法掌握大氣折射狀況的時空變化。

近年來，由於電腦科技的快速發展，數值模式已逐漸成為氣象研究之主要工具。Atkinson et al. (2001)利用模式探討波斯灣之海洋邊界層

(Marine Internal Boundary Layer, MIBL)內，導管在強、弱風條件下的演變。模式對於導管發生、位置與地面狀況均有不錯的表現，但對導管厚度及強度的預報方面，稍嫌不足。Zhu and Atkinson (2005)利用中尺度模式(Mesoscale Model Version 5, MM5)對波斯灣之大氣折射氣候特性進行模擬與統計，認為大氣折射會受到海陸地域、季節及日夜變化所影響。Haack and Burk (2001)利用美國海軍中尺度海氣耦合預報系統(Coupled Ocean-Atmosphere Mesoscale Prediction System, COAMPS)，對夏季期間，加州海岸地區海陸邊界層大氣折射狀況進行模擬與預報。其模擬結果顯示出模式是有能力掌握地面導管 82% 的正確預報率，但是，模式也顯示出海陸邊界層高度過低，及導管強度過弱等現象。

整體而言，上述的研究大多集中在垂直剖面的探討，並沒有對四度空間的導管資訊作詳細說明。朱等 (2007)採用美國環境預報中心(National Center of Environmental Prediction, NCEP)的全球分析場，診斷個案發生期間台灣北部地區之大氣折射效應（如圖 4），可以解析出在陸地有超過 30 m 及海面超過 500 m 的超折射層。但要造成五分山雷達觀測到明顯異常回波的大氣折射效應，勢必要有更明顯的陷捕層存在。由於分析場的時間與空間解析度限制，僅能解析出超折射。若能藉由數值模式提高空間解析度，則在中尺度的預報模擬中，陷捕層出現的可能性極高。因此，本研究將著重於導管在空間及時間演變的特性，並利用後處理繪圖技術，呈現大氣導管現象與應用，以利雷達異常回波現象之探討。第二節則以全球分析場說明個案期間綜觀天氣概況，第三節說明實驗設計，第四節為模式之模擬結果與討論，總結將於最後一節說明。

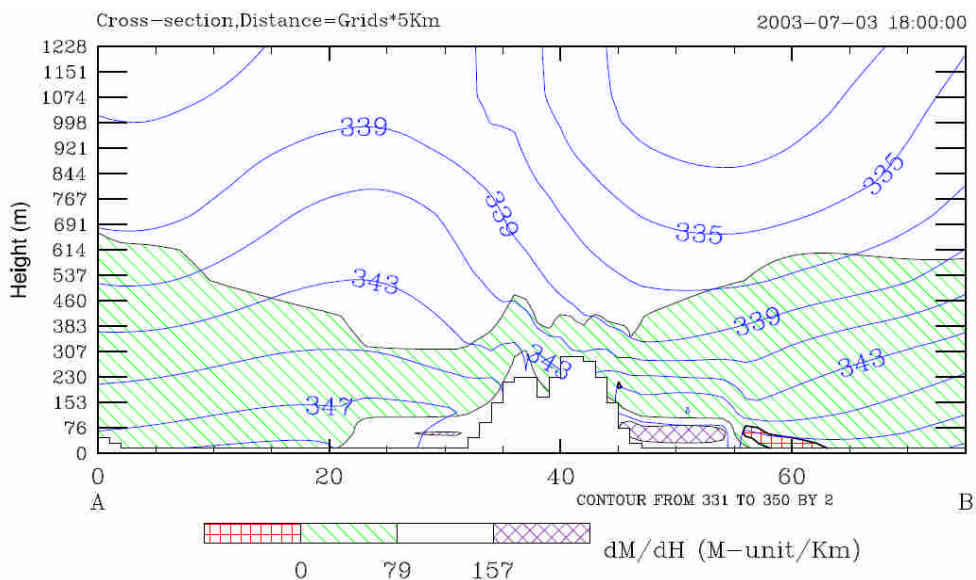


圖 4 2003 年 7 月 3 日 18 UTC 全球分析場繪製台灣北部大氣折射效應，折射效應閾值如色標所示，次折射為 $dM/dh > 157 \text{ M km}^{-1}$ 、正常為 $79 < dM/dh \leq 157 \text{ M km}^{-1}$ 、超折射為 $0 < dM/dh \leq 79 \text{ M km}^{-1}$ 及陷捕為 $dM/dh \leq 0 \text{ M km}^{-1}$ ，藍色線為相當位溫(K)，間隔為 2 K。切線位置如圖所示，垂直軸為高度(m)，橫軸為網格點數，每一格點 5 km，圖中空白無資料部分為地形，五分山雷達站相對位置為紅色箭頭所示。

二、觀測資料分析

為了解當時大氣環境狀況，採用 NCEP 全球分析場進行綜觀天氣探討。圖 5a 為 2003 年 7 月 3 日 18 UTC 之地面天氣分析圖，1012 hPa 等壓線位於台灣東部，地面主要受到太平洋副熱帶高壓脊勢力影響。台灣東部為南風，而台灣海峽以偏南至西南風為主，當時雷達觀測出現明顯回波（圖 1b）。位於日本海之低壓系統中心氣壓為 995 hPa，但離台灣甚遠，海峽地區之氣壓梯度不明顯。由 850 hPa 之相當位溫及風場（圖 5b）分析，台灣附近之風場狀況與地面風場類似，且風速均小於 7.5 ms^{-1} (15 kts)，低層噴流位於 32°N （由西向東）。相當位溫強梯度位置（高空鋒）與鋒前暖（濕）區位於低層噴流北方，惟該系統距離台灣地區甚遠，不致產生影響。

由 500 hPa 之高度及溼度場分析（圖 5c），台灣地區及附近海面均在太平洋高壓（5880 m）勢力籠罩範圍，台灣上空溫度露點差均在 2 K 以上，高空槽線位 30° 至 35°N 。台灣東部風場轉為東風，而台灣海峽則為東風及東南風，惟風速較低層更小。例如，台灣海峽上空風速為 2.5 ms^{-1} ，台灣東部亦僅為 5 ms^{-1} 。在 200 hPa 的風場中（圖 5d），台灣海峽之風速大約為 12.5 ms^{-1} ，台灣北部為東北風，南部則為東北東風，顯示出高空風速弱，且垂直風切亦不強。此時期台灣附近海面主要受西太平洋副熱帶高壓系統西伸與東退影響，南方氣流所帶來的暖濕水氣，配合當時大氣環境，在台灣海峽北部是否形成明顯的大氣導管，造成氣象雷達觀測中顯示明顯回波，則是本研究主要探討的內容。

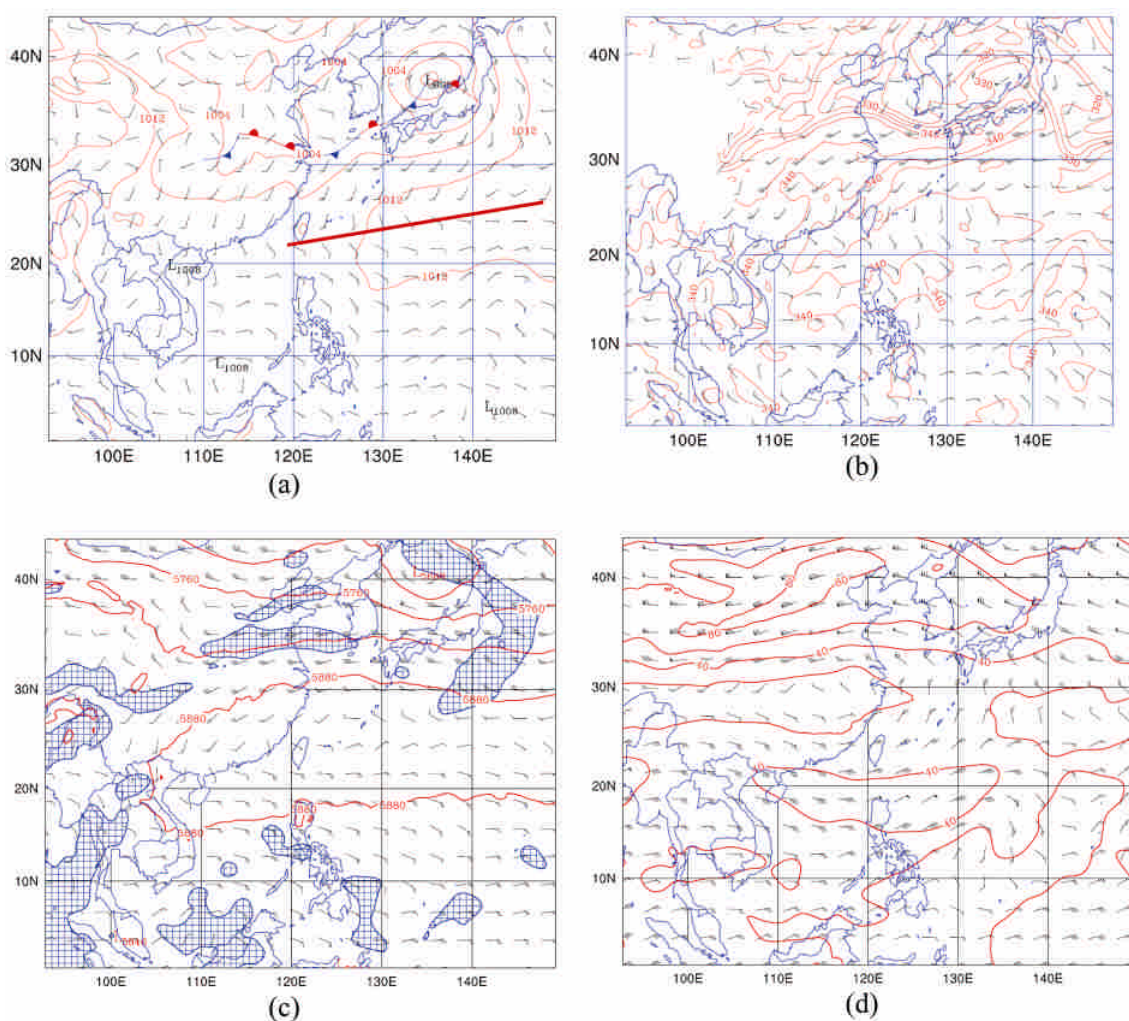


圖 5 2003 年 7 月 3 日 18 UTC 全球分析場天氣圖，(a)地面天氣圖，紅色粗線為高壓脊，(b)850 hPa 相當位溫及風場，等值線間隔 5 K，(c)500 hPa 高度、溫度露點差及風場，陰影區為溫度露點差小於 2 K，等值線間隔 60 m，(d)200 hPa 風場，等值線為風速，間隔 20 kts。

朱等(2007)已證明本個案期間台灣地區高空是相當乾燥，並無充足的水粒子可以形成對流系統。因此，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。大氣折射效應主要受水氣變化及逆溫層影響，而

導管層的時空演變與雷達回波觀測結果之相關性，可以借助於氣象數值模式之模擬，來重建 7 月 3 日 12 UTC 至 4 日 12 UTC 之大氣環境，藉此了解大氣折射層的存在的可能性。因此，透過氣象模式之物理過程，進一步了解及探討個案發生之環境場變化，以便對未來發生導管的天气進行預報。

三、模式結構與實驗設計

本研究所採用的數值模式是美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)研發之天氣研究與預報(Weather Research and Forecast V2.1.2, WRF)氣象模式(Skamarock et al. 2005)。模式的垂直座標是採用追隨地勢座標系統(η)，僅固定上邊界壓力面為 50 hPa。爲了強化低層大氣的垂直解析能力，採用了垂直 35 層的實驗設計。1.5 km 高度以下約有 17 層，詳如表 1 模式的參數設定。其中最靠近地表層離地面約 4 m 高 (WRF 垂直向亦爲交錯網格，故顯示半 η 層高度)，其次離地面約 26 m，主要目的是要求得靠近雷達位置高度的大氣折射率垂直變化情形。爲考量天氣尺度的概念，以三層巢狀網格設計，網格水平解析度分別爲 45、15 與 5 km，並

採用麥卡脫投影，其相對應的範圍以經緯度座標繪製，如圖 6 所示。地表模式採 Monin-Obukhov 參數法，邊界層是用 YSU 參數法。15 km (含) 以上網格解析度模擬採用靜力模組，同時使用 Kain-Fritsch (New Eta)的積雲參數法計算次網格尺度對流或積雲的效應，及積雲對溫度及溼度場所產生的改變。15 km 以下的網格解析度模擬則採用非靜力模組，同時使用 WSM 5-Class 的雲微物理過程計算水相與冰相變化。此外，對於不同網格水平解析度，積分時間間隔分別爲 90、30 與 10 秒。模擬的起始時間自 7 月 3 日 00 UTC 至 7 月 4 日 12 UTC，共積分 36 小時。模式之初始場是採用 NCEP 全球分析場，水平解析度爲 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 經緯度，垂直有 28 層，時間間隔爲 6 小時，而分析場亦提供模式側邊界條件。

表一 模式設定

網格編號	D01	D02	D03
網格範圍	130*110	130*127	180*180
網格距離	45 km	15 km	5 km
積分間隔	90 sec	30 sec	10 sec
積分時間	36 小時，2003 年 7 月 3 日 00 UTC~ 7 月 4 日 12 UTC		
垂直層數	35 層， $\eta=1.000, 0.999, 0.995, 0.990, 0.979, 0.968, 0.957, 0.946, 0.935, 0.924, 0.913, 0.902, 0.890, 0.878, 0.866, 0.854, 0.842, 0.839, 0.816, 0.791, 0.764, 0.736, 0.707, 0.677, 0.645, 0.612, 0.577, 0.540, 0.500, 0.456, 0.408, 0.354, 0.289, 0.204, 0.000$		
地圖投影	橫麥卡脫投影，各網格範圍以經緯度座標繪製於圖 6。		
動力核心	Eulerian mass		
靜力模式	Hydrostatic		Non-hydrostatic
積雲參數	Kain-Fritsch(New Eta)		不採用
微物理	WSM 5-Class scheme		
邊界層	YSU scheme		
長波輻射	rrtm scheme		
短波輻射	Dudhia scheme		
地表—大氣	Monin-Obukhov scheme		
地表—土壤	Noah scheme		

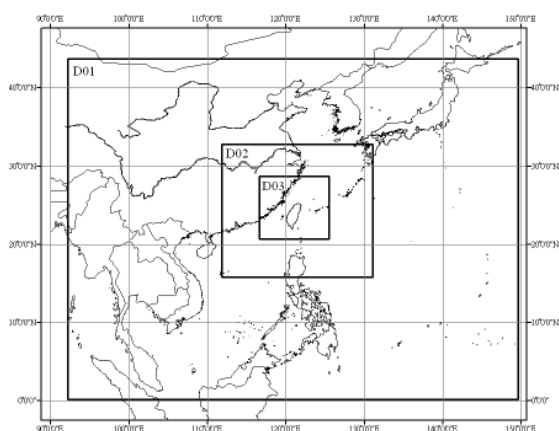


圖 6 模式三重網格設計，採用橫麥卡脫投影，以各網格範圍經緯度座標繪製而成。

四、模式模擬結果與討論

如圖 7 所示，本研究以五分山雷達站（標號 1）為起點，向異常回波之方向選取台灣西北隅陸地（標號 2）、臨近海面（標號 3）、異常回波前緣（標號 4）、中心（標號 5）與後方（標號 6）等六點繪製修正折射率垂直剖面，各點距離約 35 km。於 7 月 3 日 18 UTC 時，五分山雷達站（標號 1）之近地面為超折射且 300~400 m 為弱陷捕層($dM/dh < 0$)，故屬於高空導管，同圖 2 之 c 剖面所示。西北隅陸地（標號 2）除了地面導管外，其餘高空部分皆為正常狀況，屬於典型的地面導管，同圖 2 之 d 剖面所示。由標號 3~6 之臨近海面、異常回波前緣、中心與後方等數個位置中顯示，愈往外海愈有明顯的陷捕層存在。標號 3~5 之導管層頂高度均達 400 m 以上，且導管底部與海面連接，而形成深厚度大導管層，類似圖 2 之 c 與 e 剖面之組合。雖然蒸發導管發生高度較低，且本研究並未深入探討近海面之邊界層模組，但是，藉由修正折射率垂直剖面分析，標號 2~5 海面上仍然可以分析出蒸發導管的現象，即類似

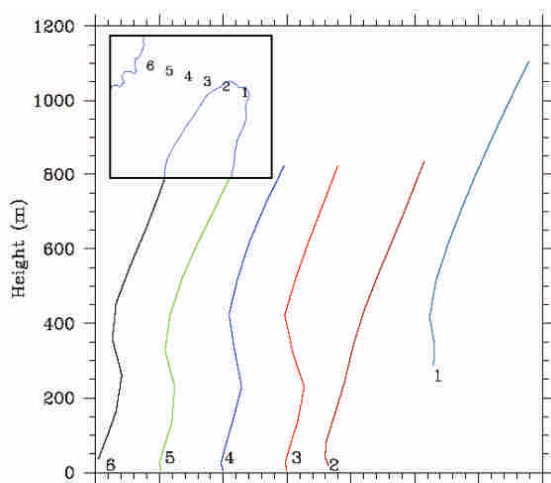


圖 7 7 月 3 日 18 UTC 修正折射率垂直剖面圖，五分山(1)，台灣西北隅陸地(2)、臨近海面(3)、異常回波前緣(4)、中心(5)與後方(6)，垂直座標為高度(m)，取樣位置如圖中所示。

於圖 2 之 f 剖面的導管型態。由以上陸地及海面之修正折射率垂直剖面分析中，我們除了可模擬出 Babin et al. (1997)所提出之導管類型（如圖 2）外，也顯示出數值天氣模擬的可行性。

圖 8 為 7 月 3 日 18 UTC 大氣導管剖面圖，(a)為通過五分山雷達站的剖面圖，(b)平行北台灣西岸的剖面圖，相關位置如(a)與(b)之左上角圖示。圖 8a 顯示出五分山位於超折射區內，而其上空有陷捕層。雷達波向西北方向射出後，在距離 50 km 處，遭遇到一個發展高度達 460 m 之超折射層。在距離 60 km 處，陷捕層之頂部高度為 320 m、厚度 194 m、強度為 10.3 M-unit, dM/dh 為 -53 M km^{-1} 。此外，相當位溫垂直梯度最明顯處位於陷捕層內。相當位溫梯度在高度 400 m 之導管層頂處，突然向上急遽降低。在這種情況下，有導管層出現且雷達波傳播路徑向下偏折至海面。透過相當位溫的變化狀況，可以知道大氣折射率與水氣分布有密切的相關性，這個結果與朱

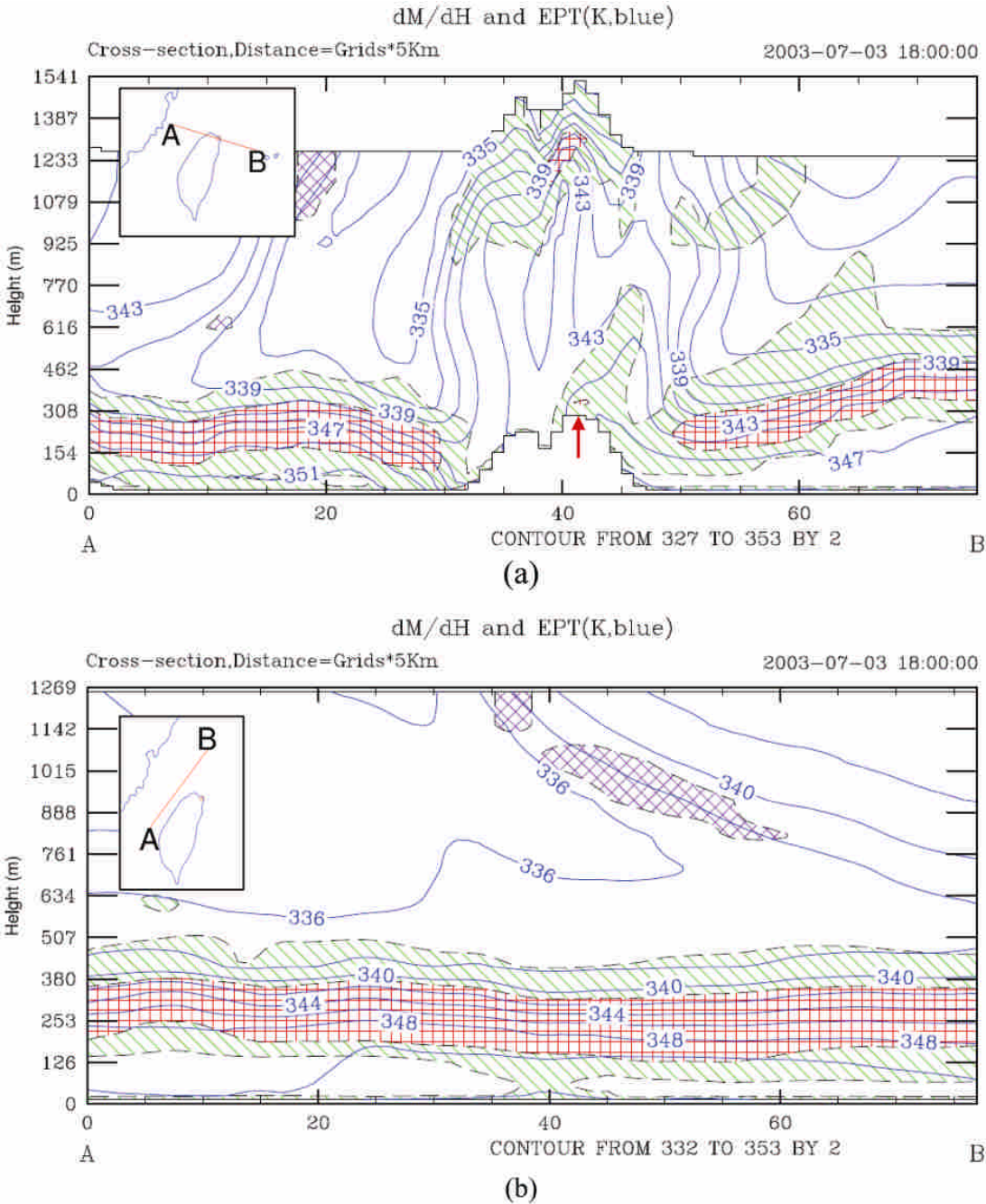


圖 8 7 月 3 日 18 UTC 大氣導管剖面圖，(a) 方位角 282°，紅色箭頭表示五分山雷達站位置。(b)平行台灣西側海岸線，大氣折射效應顏色同圖 4，藍色等值線為相當位溫，間隔 2 K，剖面地理位置如各圖所示。

(1984a)、Babin (1996)和 Haack and Burk (2001)等多位學者的研究類似。圖 8b 顯示出在 200~420 m 高度，有一厚度為 150 m 之陷捕層平行於北台灣西岸，且範圍相當長。圖 4 為採用分析場初步診斷結果，與圖 8a 比較之後，可以發現藉由提高近地層垂直解析度，數值模式可以模擬出陷捕層，亦即更細部、更顯著的大氣折射效應變化。

為了有效提供三度空間所有的折射效應資訊於平面地理分布圖上，參考雷達掃描回波合成圖的製作，取 dM/dh 最小值繪製陷捕效應圖。由於模式近地層垂直解析度較密(4 m、26 m)，且水氣及溫度變化較大，同時也考量雷達站之高度大於 4 m， dM/dh 的計算從 $\eta_{0.995}$ (約 26 m) 開始。此外，700 hPa 以上之水氣含量通常較少，不會產生導管現象、以及考慮雷達低仰角的特性， dM/dh 的計算僅取至 $\eta_{0.736}$ (約 2400 m)。圖 9 為 7 月 3 日 06、09、12 和 18 UTC 鄰近台灣之陷捕效應圖。於 06 UTC (圖 9a) 在台灣西部沿岸由北到南，幾乎都有導管層的出現，但東部沿岸大都無此現象 (除了台東附近)。於 09 UTC 時 (圖 9b)，由於伴隨太平洋副熱帶高壓之環流，東北部有導管層向台灣東北角靠近，且台灣海峽北部也出現大範圍導管區。於 12 UTC (圖 9c) 台灣四周海域大多為導管區，僅基隆外海狹窄區沒有陷捕現象。這個區域正好位於中央山脈兩側氣流之合流區，且部分氣流因過山沉降增溫，因此沒有陷捕現象的發生。於 18 UTC (圖 9d) 台灣西部與東北部海域有導管區，但東南方之導管區，伴隨太平洋副熱帶高壓的東退而減弱。台灣海峽北部的導管區維持數小時之久，且隨著風場平行台灣海峽。這種陷捕層之分布與雷達觀測結果一致，且與 Atkinson et al. (2001) 對波斯灣地區模擬結果類似，也就是說在海峽上隨時存在著不同高度的

大氣導管。圖 9 之陷捕效應圖除了提供五分山雷達站可能存在的導管分布圖，也提供其他各地雷達站可能出現的大氣折射效應。

為了解氣象因子對折射率之影響程度，可藉由 Eq. (3) 進行計算。以五分山地面之折射率、溫度、溼度與氣壓之垂直梯度時序圖為例，如圖 10 所示。折射率梯度 (dN/dh , $N\ m^{-1}$) 介於 $-0.853 \sim -4.406 \times 10^{-1} N\ m^{-1}$ 之間、壓力梯度 ($\partial p/\partial h$, $hPa\ m^{-1}$) 介於 $-1.112 \sim -.079 \times 10^{-1} hPa\ m^{-1}$ 之間、溫度梯度 ($\partial T/\partial h$, $^{\circ}C\ m^{-1}$) 介於 $0.719 \sim -0.545 \times 10^{-1} ^{\circ}C\ m^{-1}$ 之間與水氣梯度 ($\partial e/\partial h$, $hPa\ m^{-1}$) 介於 $-0.418 \sim -4.38 \times 10^{-1} hPa\ m^{-1}$ 之間。由各曲線的變動特徵來看，水氣與折射率梯度關係密切，亦即水氣梯度對折射率梯度的影響最大，其權重約為 4.1。其中，溫度權重約為 -1.58、壓力權重約為 0.26，與呂等(1998)、Bean and Dutton (1968)有類似的結果。

由雷達回波動態圖 (圖 1) 得知，異常回波之行進方向，是由雷達站之東南方向雷達站移動，接近雷達站後隨即消失。之後，又在雷達站西北方出現，亦即，雷達站東南側的回波較雷達站西北側的回波早出現。此外，雷達站西北側的回波與台灣海峽平行且維持 12 小時之久。藉由圖 11 之 2003 年 7 月 3 日 06、09、12 和 18 UTC 地面相當位溫，及風場演變圖，說明個案發生期間水氣的變化情形。於 06 UTC 時 (圖 11a)，水氣分布於台灣南部、西部海域及台灣東部花東縱谷。此時，雷達站附近尚未有較多的暖濕空氣，也沒有異常回波。隨著太平洋副熱帶高壓的環流，中央山脈東側吹南風，外海處則為東南風或南風。山脈西側與台灣海峽則以西南風為主。這樣的風場分布已顯示出，南方暖濕的水氣受地形

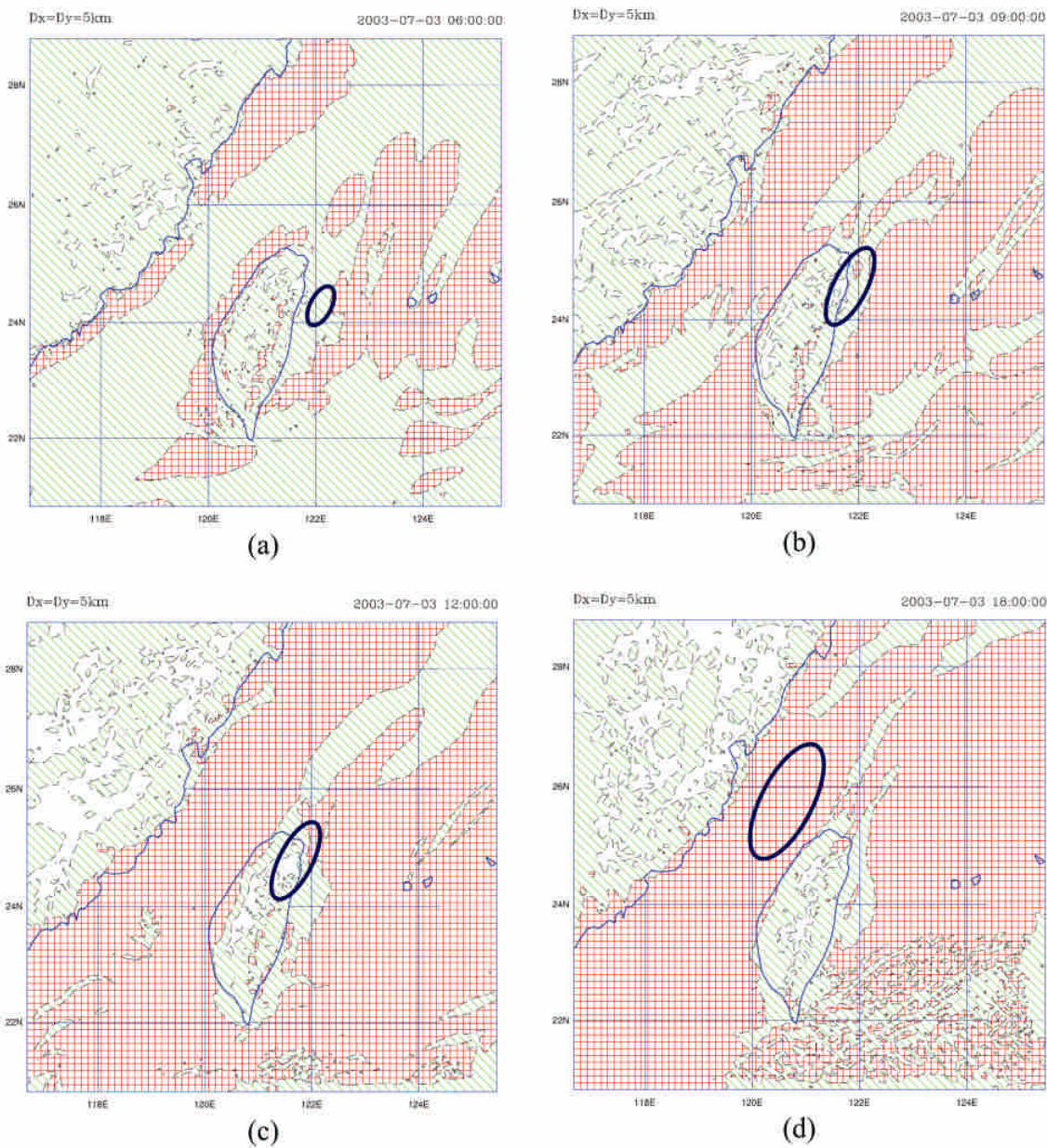


圖 9 2003 年 7 月 3 日氣折射效應合成圖。(a)06 UTC、(b)09 UTC、(c)12 UTC 和(d)18 UTC。
色標值相對應於四種 dM/dH 的閾值同圖 4，藍色區塊標示當時雷達回波出現位置。

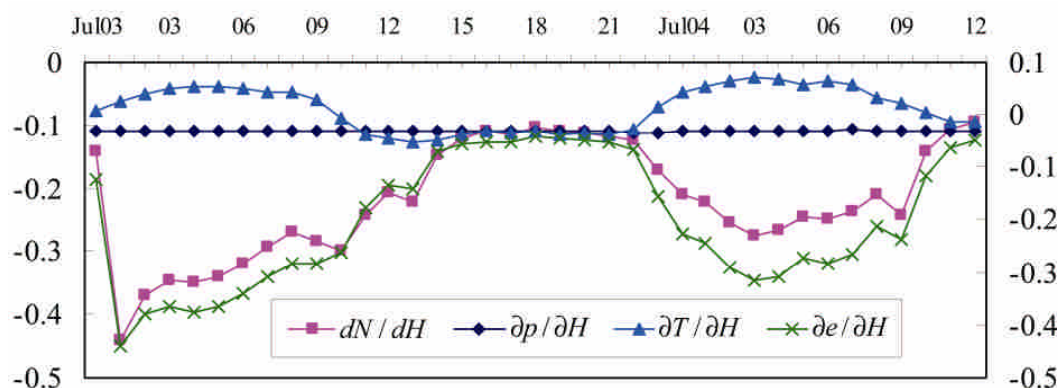


圖 10 五分之山之折射率、溫度、溼度與氣壓之垂直梯度時序圖，左側刻度為氣壓梯度 ($\partial p / \partial H$, hPa m^{-1})及折射率梯度(dN / dH , N-Unit m^{-1})，右側則為溫度梯度 ($\partial T / \partial H$, $^{\circ}\text{C m}^{-1}$)及水氣壓梯度($\partial e / \partial H$, hPa m^{-1})

阻擋，而沿著東部山坡向北輸送。09 UTC 時（圖 11b），暖濕空氣移動至雷達站東南側及外海處。風場的分布顯示出山脈東側吹東南風，它與西側風場不同，代表著水氣有受地形阻擋平流至五分山附近。這就是為什麼在雷達站東南側先出現回波的原因。此時台灣西側海面雖有水氣，但仍距離雷達站有 100 km 以上，不會產生超折射現象。12 UTC 時（圖 11c），雷達站東側水氣減少，但西側海面上的水氣向雷達站靠近，此時雷達站西北側有回波出現。此時，台灣海峽吹西南風且一直持續數小時不變。之後，台灣海峽之水氣與風場分布近似維持不變，直到 21 UTC 後水氣才逐漸減少。此處僅顯示 18 UTC 水氣分布，如圖 11d 所示。由上述說明中，異常回波在雷達站東南及西北側出現時間的先後，推論應該是受到水氣輸送的時間先後差異所造成的。

圖 12a~c 分別為雷達站位置、雷達站東南方外海、與雷達站西北方外海處之大氣折射效應變化時序圖，藉由本圖可以瞭解在不同位置時，導

管層高度隨時間演變的情形。以正常折射狀況為例，五分山雷達以 0.5° 低仰角掃描，當電波射線傳播 50 km 時，射線位置大約升高 430 m。配合五分山在模式中的高度 288 m，若有異常回波出現，導管層的高度則在 718 m 以下。若近地層已出現導管層，則電波於水平 50 km 處之高度將會明顯降低，且小於 718 m。

在圖 12a 中，於 3 日 12 UTC 之前，五分山之近地層幾乎是明顯的陷捕。由於電波在陷捕狀況下，雷達波射線會很快偏折到達地面。圖 12b 雷達站東南方外海處，於 3 日 07~12 UTC 時，在 100~300 m 高度處出現導管層。這段時期，五分山雷達站 21 m 高度以下都是處於陷捕的環境，導管強度由 3.1 降到 1.2 M-unit 之間。由於雷達站距東南方海岸約 20 km，且該方向無地形阻擋，從雷達站射出的電波受到近地層的導管作用，迅速向下偏折到達海面。此時海面上的導管高度雖在 230 m 以下，雷達波仍受到影響。西北方海岸距離雷達站約有 50 km 遠，在雷達波射出

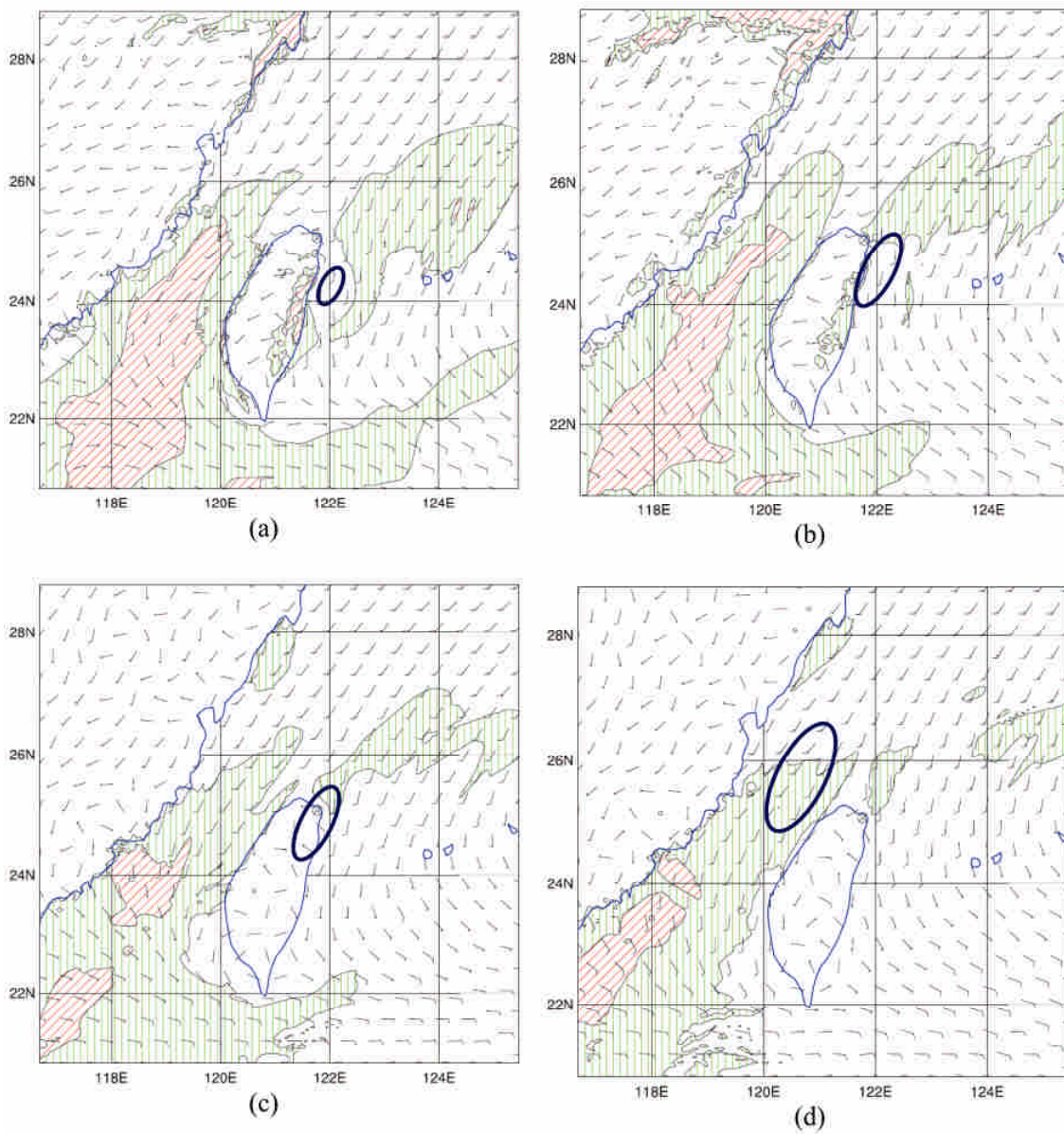


圖 11 2003 年 7 月 3 日地面相當位溫及風場演變圖。(a)06 UTC、(b)09 UTC、(c)12 UTC 和(d)18 UTC。綠色陰影區為相當位溫 352~354 K 的範圍，紅色則為 >354 K。黑色圓圈處代表五分山雷達所在的位置，藍色區塊標示當時雷達回波出現位置。

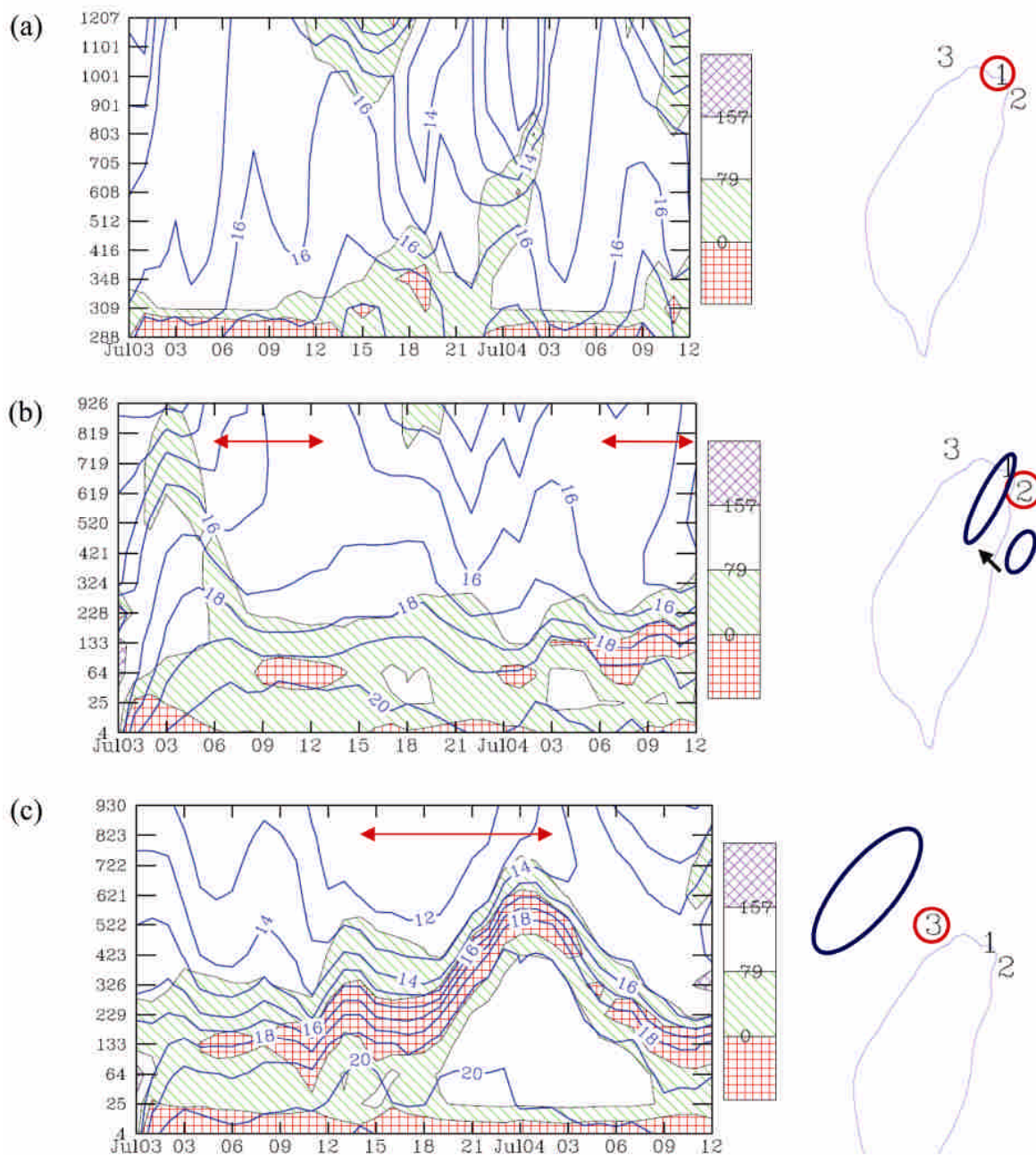


圖 12 2003 年 7 月 3 日 00 UTC~7 月 4 日 12 UTC 大氣折射效應與水氣時序圖。(1)為雷達站位置，(2)為東南方外海，雷達回波出現時間為 3 日 06~13 UTC，逐漸向雷達站靠近，在 4 日 06 UTC 又再次出現(3)為西北外海，雷達回波出現時間為 3 日 14 UTC~4 日 02 UTC，位置稍向西北方移動，但近似停滯。色標說明同圖 4 之說明。1~3 點的地理位置如各圖右側，藍色區塊標示雷達回波出現概略位置，紅色線條表示異常回波出現時段。

後受到雷達站近地層的陷捕層作用，以及大屯山地形的阻擋，電波迅速偏折到地面沒有回波出現。

於 3 日 13~22 UTC 期間，五分山因夜間地表降溫，形成近地表空氣溫度遞減率較其他時間大($\sim 0.04\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$)。同時，在該時段中模式計算之潛熱通量平均僅約 5.2 W m^{-2} ，致使水氣凝結量少且水氣壓變化小。根據折射率計算公式 Eq. (1)，五分山的環境轉為超折射，如圖 12a 所示。雷達站上空 128 m 以下有超折射層，電波的偏折較為緩和。雷達站東南外海處低空雖有導管層且隨時間逐漸升高，其導管高度約在 230~400 m 之間仍低於雷達波到達時的所在高度，如圖 12b 所示。

因此，這段期間雷達站東南方沒有回波出現。反觀雷達站西北外海處之導管層，如圖 12c 所示，導管高度由 300 m 逐漸升高達到 624 m 以上。因此，電波可在導管層與海面間全反射，致使 16 UTC 以後雷達異常回波狀況越來越明顯，且持續數小時之久。

至於 18 UTC 之後導管層高度升高的原因，經分析台灣海峽北部風場與水氣之垂直剖面圖可以知道，部分西南氣流經由武夷山，轉成西風或西北風後吹送至海峽上空，這股氣流與海峽南部之西南氣流相遇而形成輻合所致，如圖 13 所示。圖 13 為通過五分山垂直剖面的風場及水氣分

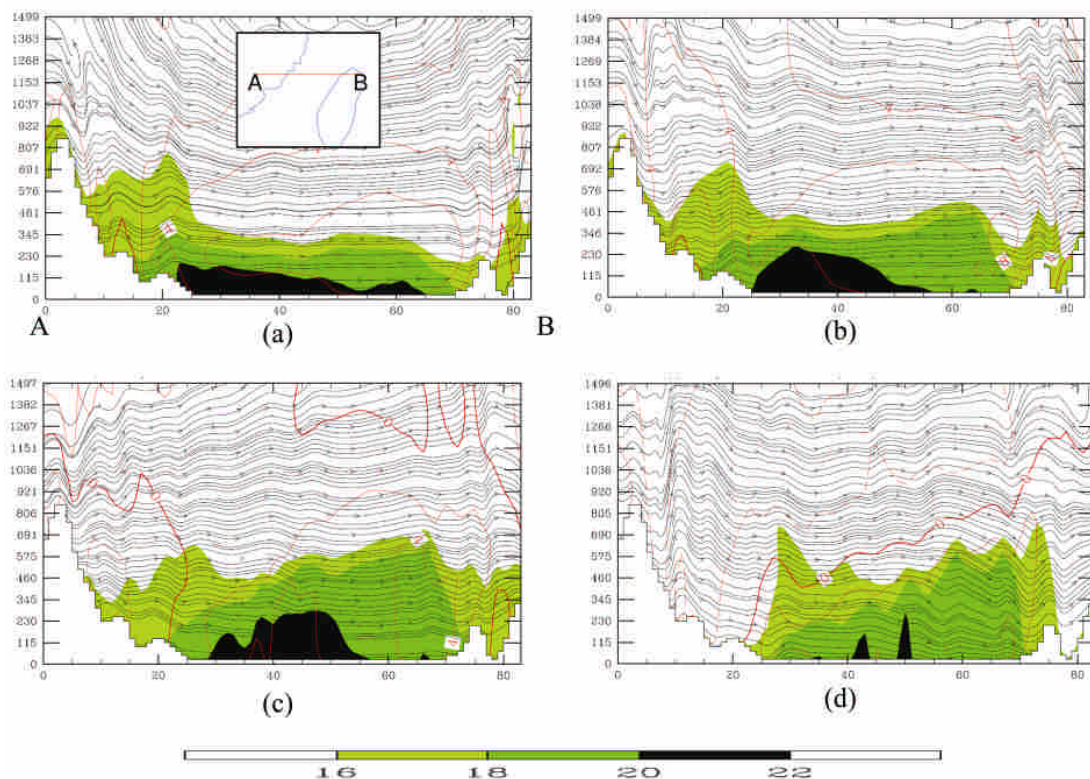


圖 13 通過五分山同一緯度切線之氣流場與水氣剖面。(a)3 日 18 UTC·(b)3 日 21 UTC·(c)4 日 00 UTC·(d)4 日 03 UTC，切線位置標示於(a)中，五分山位於最右側，各圖垂直軸為高度(m)，橫軸為格點數，每一點為 5 km，紅色等值線為風場南北分量(v)，間隔為 2 ms^{-1} ，負值為虛線，黑線則為東西風場分量(u)與垂直風場(w)的氣流線，顏色表示混合比(g kg^{-1})，標示如圖。

布。3 日 18 UTC 時 (圖 13a)，氣流通過武夷山後，部分氣流向東，但大部分氣流則由西向東吹向海峽，此時台灣西側風場南北分量(v)最大值超過 6 m s^{-1} ，而水氣($18 \sim 20 \text{ g kg}^{-1}$)高度約 300 m，此時導管高度約 300 m (如圖 12c)。21 UTC 時 (圖 13b)，氣流仍持續由西往東吹送，但台灣西側 v 增強為 8 m s^{-1} ，水氣高度亦升高至 450 m，相對的導管高度也提升。直到 4 日 00 UTC 時 (圖 13c)，台灣西側 v 降至 6 m s^{-1} ，水氣高度達到最大。4 日 03 UTC 時 (如圖 13d)，武夷山東側因氣流下沉增溫致使水氣變乾。台灣西側水氣高度雖然沒有明顯下降，但折射效應計算後之大氣導管高度已逐漸降低且厚度也減少。整體而言，由圖 13 各時間台灣西側的 v 均為正值，顯示南方水氣長時間向北輸送，而台灣山脈地形對低層水氣具有阻擋的現象 (如圖 13c、d)，致使水氣高度的垂直抬升與長時間之維持。

於 3 日 23 UTC 之後，雷達站因地表增溫致使近地層溫度遞減率增加。4 日 04 UTC 地面潛熱通量達到 443 W m^{-2} 且近地面水氣變化量增大，雷達站又再度轉為陷捕層。此時期東南方海面上之導管層高度逐漸降低，且低於 300 m 以下，故沒有異常回波出現。反而是西北外海導管高度仍有 500 m 高，對電波仍有影響。於 4 日 05 UTC 之後，西北方海面導管層高度已降至 326 m 以下，且強度平均為 1 M-unit，回波逐漸消失，如圖 12c 所示。雖然雷達站仍持續有陷捕或超折射現象，但受限於地形阻擋與外海導管層太低，而沒有異常回波的出現。上述的模擬結果，可以了解當時環境場的確有大氣折射效應的存在，也說明了大氣折射效應的預報可行性。

五、結 論

本研究利用 WRF 數值模式重建 2003 年 7 月 3~4 日五分山氣象雷達之異常回波的個案，模擬結果顯示出的大氣環境電波折射之特徵如下：

1. 鄰近雷達站之低層大氣有陷捕層的存在。夜間西南氣流引進南方暖濕的水氣且受地形影響，致使雷達站附近水氣增多且造成修正折射率之垂直梯度變大而形成陷捕現象。
2. 個案發生初期 (7 月 3 日 07~12 UTC)，雷達站位於陷捕層內。陷捕層自地面垂直向上達 21 m，且導管強度由 3 M-unit 降至 1.2 M-unit。由於地面導管厚度涵蓋雷達站，所以雷達波很快偏折到 20 km 外的海面而形成回波。同時期，因雷達站西北方 50 km 內均為陸地山區，雷達波僅偏折到達地面，故尚未形成異常回波。
3. 當雷達站西北方出現明顯回波時 (7 月 14 UTC~4 日 01 UTC)，雷達站處於超折射環境。此時雷達波射線軌跡應較陷捕時為高，而不受到地形影響可以到達海上。同時，該區之空中導管高度變化介於 230~522 m 之間，厚度變化為 185~350 m，強度則介於 4.7~11.2 M-unit 之間。雷達波此時可緩慢偏折到達海面而形成回波。同時期，因東南方導管高度僅為 230 m，且低於雷達波到達時的高度，雷達波經陷捕層直接反射至大氣中，沒有回波出現。
4. 由於受到地形影響，台灣東西兩側水氣到達台灣北部的時間不同。陷捕層位置與高度隨時間的變化會導致異常回波出現的時間與位置也有不同。

5. 因為台灣海峽上的西南風與通過大陸武夷山後之西風分量輻合，持續將水氣往台灣推送，而南方水氣長時間向北輸送，台灣山脈地形對低層水氣具有阻擋的現象，致使水氣高度的垂直抬升與長時間之維持。
6. 藉由雷達觀測資料與 WRF 模擬結果之分析比較，我們可以了解異常回波的生成機制、維持與消散。同時，WRF 模式可以掌握導管層之生成時間、高度與位置變化，可以彌補氣象觀測在時間與空間上的不足。
7. 利用後處理繪圖技術，除提供傳統之修正大氣折射率之特性外，更可顯示大氣折射效應在時間及空間之演變情形，供雷達守視人員參考與運用。當雷達站附近有明顯的大氣導管現象時，必須尋求其他觀測資料以確認雷達之觀測結果。

最後，從大氣折射效應合成圖中發現在台灣東南部、西南部鄰近海面與台灣北部基隆外海處，幾乎為正常折射環境。經由風場與熱力場之初步分析，這些地區的正常折射環境似乎與台灣地形有明顯的相關性。至於台灣本島與大陸武夷山之間的台灣海峽對長時間導管層的貢獻為何，有待進一步的探討。

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。最後也向審查委員提供鉅細靡遺的審查意見致上最高謝意。

參考文獻

- 丁珏、呂芳川、朱延祥、江火明、張石軍，1994：不同天氣系統內大氣導管特性之研究。中央氣象局天氣分析與預報研討會，493-501。
- 朱延祥，1984a：台北地區地面大氣折射率之特性研究。交通部電信研究所研究報告彙編，第 14 卷第 2 期，191-200。
- 朱延祥，1984b：台灣地區地面大氣折射之特性分析與預測。交通部電信研究所研究報告彙編，第 14 卷第 3 期，321-340。
- 朱延祥、許舜清、呂芳川、丁珏、江火明，1994：台灣地區大氣導管特性之研究。第三屆國防科技研討會論文集，917-925。
- 朱昌敏、陳啓南、呂芳川、汪建良，2007：2003 年 7 月 3 日台灣海峽北部異常回波之個案研究（一）環境場分析。大氣科學，已接受。
- 呂芳川、朱延祥，2004：台灣地區蒸發導管效應實驗及偵蒐效益分析(II)。國防科技合作研究報告，國防大學中正理工學院，75 頁。
- 呂芳川、朱延祥、江火明、陳曉華，1998：台灣海域大氣導管效應與雷達傳播。國防科技學術合作技術報告，中正理工學院應用物理系，162 頁。
- 周仲島與李文兆，2001：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。
- 黃崇展，2004：大氣導管效應影響雷達偵蒐定位之個案研究。國防大學中正理工學院應用物理所碩士論文，113 頁。

- 黃崇展、陳啟南、呂芳川、陳文定，2004：春季台灣地區受高壓迴流影響期間大氣導管特性之個案研究。第八屆全國大氣科學學術研討會暨 2004 年中央氣象局天氣分析與預報研討會論文集，843-848。
- 黃鐘洺，1978：電波傳播。聯經出版社，1-20。
- 張保亮與王碧霞，2003：網連雷達雜波之氣候特性統計，天氣分析與預報研討會，306-311。
- Atkinson, B. W., J.-G. Li, and R. S. Plant, 2001: Numerical Modeling of the Propagation Environment in the Atmospheric Boundary Layer over the Persian Gulf. *J. Appl. Meteor.*, 40, 586-603.
- Babin, S. M., 1995: A case study of subrefractive conditions at Wallops Island, Virginia., *J. Appl. Meteor.* 34, 1028-1038.
- 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.
- Battan, L. J., 1973: Radar Observation of Atmosphere. University of Chicago Press, 1-28.
- Bean, B. R., and E. J. Dutton, 1968: Radio Meteorology, Dover Publications, 435 pp.
- Brooks, M. I., A. K. Goroch, D. P. Rogers, 1999: Observations of Strong Surface Radar Ducts over the Persian Gulf. *J. Appl. Meteor.*, 38, 1293-1310.
- Falodun, S. E. and M. O. Ajewole, 2006: Radio Refractive index in the lowest 100-m layer of the troposphere in Akure, South Western Nigeria. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68, 236-243.
- Haack, T. and S. D. Burk, 2001: Summertime Marine Refractivity Conditions along Coastal California. *J. Appl. Meteor.*, 40, 673-687.
- 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.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, J. G. Powers, 2005 : A description of the advanced research WRF version 2. NCAR/TN-468+STR, National Center for Atmospheric Research technical note, 88pp.
- Zhu, M. and B. W. Atkinson, 2005: Simulated Climatology of Atmospheric Ducts over the Persian Gulf. *Bound.-Layer Meteor.*, 115, 433-452.

Case Study of Abnormal Radar Echoes in the Northern Taiwan Strait on July 3rd, 2003

Part II: Numerical Simulation

Chang-Min Chu¹ Chi-Nan Chen^{2,3} Fang-Chuan Lu¹ Jian-Liang Wang²

¹ **Nan-Jeon Institute of Technology**

² **Chung-Cheng Institute of Technology, National Defense University**

³ **Republic of China Military Academy**

(Manuscript received 28 December 2006; in final form 28 September 2007)

ABSTRACT

Chu et al.(2007) have demonstrated that the echoes observed by weather radar at Wufensan are not the real weather system during the night on July 3rd, 2003. Meanwhile, the synoptic weather analysis also shows a stable environment around Taiwan area with no precipitation. In this study, the WRF (Weather Research and Forecasting) model is used to reproduce the atmospheric environment of that day and focus on the temporal and spatial evolutions of ducted layer. Besides, with the assistance of post-processing and visualization techniques, one can clearly identify the location of the atmospheric ducts.

The simulation results are shown below: (1) During the night, the warm and moist air associated with the southwesterly flow from the west and the southerly flow from the east are cumulated near Wufensan and increase the vertical moist gradient in the low layer. Under this situation, the vertical gradient of the modified refractivity index increase and the trapping layer occurs. (2) As the abnormal radar echo appeared to the southeast of Wufensan, there just exists a trapping layer with 21 m height and 3 M-unit intensity at the radar station. (3) During the radar echo stay still in the northwest of Wufensan, the height of the elevated ducts near coastal area changes between 230 and 623 m and the thickness varies from 185 to 350 m. Also, its modified refractivity index changes between 4.7~11.2 M-unit. (4) Since the arriving moist air from the east of Wufensan is earlier than that from the west, the abnormal echoes at the southeast of radar station occur first. (5) In the west of Taiwan, the water vapor transported northward is parallel to the Taiwan Strait and maintains the radar echo for several hours.

Key words: WRF model, Modified refractivity index, Trapping layer