

# 以雙都卜勒雷達分析臺灣近海線狀對流回波之結構

何台華<sup>1</sup>、魏志憲<sup>2</sup>、李文兆<sup>3</sup>、張茂興<sup>4</sup>

1龍華科技大學通識教育中心

2空軍航空技術學院

3美國國家大氣研究中心

4 國立臺灣大學大氣科學系

## 摘 要

臺灣地區梅雨季經常出現自華南沿海移入之大範圍的中尺度對流系統，為臺灣陸地和周遭海域帶來強風與豪雨，但其細部結構卻欠缺有效方法進行瞭解。直至中央氣象局墾丁與七股都卜勒氣象雷達站先後建構完成後，始逐步將此問題進行深入研究。2003年6月6~7日自華南移入台灣南部近海之中尺度對流系統，其前緣之降水回波呈現準線狀對流系統的型態，其中並伴隨彎曲狀的對流雨帶。本文藉由雙都卜勒雷達分析技術，以瞭解此海上線狀對流系統之結構特徵，探究其伴隨強風與豪雨之關聯性。

研究發現，此副熱帶地區線狀對流回波之生命期達七小時以上，從地面到700 hPa之環境垂直風切約為15 m/s，與熱帶海洋地區研究個案 (~13 m/s) 相似。從雷達回波發現此系統前導線位置出現彎曲的波狀類型，前導線後方存在著後方噴流、後方入流凹區及氣旋式的中尺度渦旋等中尺度特徵，其中噴流強度約在25至30m/s之間，渦度強度則小於 $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 數量級，均較中緯度地區所觀測的弓狀回波個案為弱，而且此後方入流凹區的空氣不如中緯度地區乾燥，氣旋式的中尺度渦旋只在此降水系統北邊出現，而反氣旋式渦旋結構並不明顯。

關鍵詞：中尺度對流系統、線狀回波、後方噴流、中尺度渦旋

## 一、前言

2003年臺灣地區梅雨季期間，6月6~7日有一連串中尺度對流系統 (Mesoscale Convective Systems, 簡稱MCSs) 於華南和南海北部生成，之後朝台灣移動，影響南台灣地區並造成豪大雨事件。中央氣象局墾丁與七股都卜勒氣象雷達均可觀測到此劇烈的降水系統之演變過程。藉由長距離掃描之降水回波，與衛星雲圖等資料，可發現在中尺度對流系統的移行方向前緣呈現圓弧狀，其強降水回波區之分布類似弓狀回波系統。本研究即蒐集台灣南部雷達觀測網與地面中尺度觀測網等資料，分析此對流系統以及所伴隨之中尺度渦旋的結構特徵，並與中緯度弓狀回波系統進行比較，以期了解東亞副熱帶地區有無弓狀回波的結構。在梅雨季節（每年5至7月）東亞地區的滯留鋒面前緣常存在強烈的中尺度對流系統，而這些對流系統大部份是從大陸東南沿海及南海北部形成，向東移入台灣中南部地區。過去礙於觀測資料的缺乏，對於這些系統的動力結構及演變過程所知有限。近年來藉由南部都卜勒氣象雷達網的建立，可發現這些系統移行前緣存在線狀強對流帶，其中不乏彎曲如弓狀之強降水回波區。

## 二、綜觀條件與中尺度特徵之分析

從2003年6月7日0000 UTC地面天氣圖，顯示有

一滯留鋒面於大陸東南沿海與台灣中北部區域持續徘徊。同時間的850 hPa高空天氣圖上，台灣中部至大陸東南沿海出現明顯之風切帶，其上存在一低壓中心，特別在其南側出現西南氣流，風速可達 $15 \text{ m s}^{-1}$ ，而海南島與南海北部亦存在一暖區，由於暖濕空氣受強盛氣流之輸送，使台灣海峽南部至南海北部成為有利中尺度對流系統發展之環境。然而低壓與鋒面系統週遭環境之溫度梯度甚小，約在 $1^\circ\text{C}/100 \text{ km}$ 以下，說明此天氣系統不具備明顯之斜壓環境。500 hPa的氣流呈緯流的形勢，帶動中尺度對流系統持續向東移動。6月7日0600 UTC後，低壓中心從陸地移出，並且強風軸隨之移至琉球群島一帶。

在6月6日1200 UTC屏東測站所觀測之探空資料中，其CAPE值達到 $2000 \text{ J kg}^{-1}$ 以上，顯示有利於中尺度對流系統的維持與發展；同時間馬公測站的CAPE值亦可達到 $2000 \text{ J kg}^{-1}$ ，說明鋒前的大氣存在強烈不穩定度的熱力環境。仔細檢視6月6日1200 UTC與6月7日0000 UTC兩測站地面的溫度與露點差值，可發現在7日0000UTC時，兩測站的溫度露點差值僅在0.3度，而6月1200 UTC時還有2度以上的差異，顯示在7日0000 UTC時，地面已相當潮溼。而單就屏東的累積雨量來看，早在7日0000 UTC之前，台灣西南部一帶已累積可觀的降雨量。此一現象說明在弓狀回波系統通過台灣南部之前，西南部地區的大氣環境已經過降水系統的調整，恢復為較穩定的狀態。因此，在未發生降水前的台灣南部大氣環

境是具有高度CAPE，其值大小接近在中緯地區發生弓狀回波的環境。

紅外線衛星雲圖顯示於2003年6月6日時南海北部與大陸東南沿海均存在發展旺盛之雲系，其中位在大陸東南沿海之對流雲系不僅發展的勢力較為強盛，雲頂面積亦持續擴張，其水平尺度東西方向約達到12個經距，南北向則約4個緯距，東側的雲系向東移出，並逐漸影響台灣南部地區。6月7日0000 UTC時，該雲系中心出現一亮度溫度較高的帶狀區，將其分割成兩個主體。對照強化色階後可發現，此兩個雲系之雲頂溫度約在-64至-80°C，並參考同時間馬公測站之探空資料，可推測對流系統發展高度約在14至15公里之間；而西半部對流系統的移向前緣具有明顯呈弧狀的型態。之後因著北方鋒面系統逐漸向南移動，在6月7日0700 UTC之後，整個中尺度對流系統則向南退至巴士海峽與南海北部一帶。

在七股雷達仰角0.5度長距離掃描的平面位置顯示圖中，2003年6月7日0003 UTC時（圖未顯示），在雷達站西南方150至250公里外海則有數個降水回波胞正在組織發展中，約1小時後南側的部分首先組織成線狀系統，並具有明顯的彎曲形狀，以14至16  $\text{m s}^{-1}$ 之速度持續向東移動。此彎曲狀對流系統是由弱組織性對流胞所合併而發展起來，而同一時間其北端另有一對流胞正發展中，在0203 UTC時，該強降水回波區亦形成彎曲狀，兩者構成線性波狀類型(Linear Echo Wave Pattern, 簡稱LEWP)，由北向南分別賦予系統A與B的名稱；而A系統和B系統一樣，顯然也是由弱組織性對流胞發展而成的。同樣約1小時後，此LEWP系統呈現逗點回波(Comma Echo)型式，A系統的組織逐漸消散，此時B系統的北端開始接觸陸地，該處的降水回波強度逐漸減弱，其餘部分則仍維持原有的強度。從壟丁雷達0307 UTC的降水回波則顯示B系統的南端連接著另一個強對流胞，而此對流胞在隨後演變為彎曲狀對流系統，稱為C系統。0435 UTC之後，B系統與C系統亦呈現出LEWP之形勢，並且移速加快，而B系統逐漸朝東北方移出。至0603 UTC時，B系統的勢力呈現減弱的趨勢，而0700 UTC之後LEWP的整體勢力才逐漸減弱，較強的強降水回波區退至巴士海峽中部。整體而言，所有彎曲狀對流系統的生命期以A系統最短，約2小時，而B與C系統則可維持達4小時以上。

當此中尺度對流系統移入陸地期間，台灣南部地區累積大量的降水，其中屏東瑪家測站的24小時累積雨量最大，達到379.5 mm。至於LEWP通過台灣西南陸地前後的階段（6月7日0300 ~ 0400 UTC），則以枋寮的時雨量最多，可達60 mm，因此可得知在此對流系統內部所含之降水量甚為豐沛，一旦停留在陸地上空，極易造成豪大雨事件。

### 三、波狀回波之結構與演變

在上節中將觀測之LEWP依演變過程分為A、B與C三個波狀回波系統，因A系統的全貌與B系統的北端均可同時由七股與壟丁雷達觀測到，故可將這兩個雷達的都卜勒風場合成來獲得運動場特徵，亦可藉由單一都卜勒風場進行分析，並與雙都卜勒合成風場的結果相互比較。

七股與壟丁雙都卜勒風場合成的起始時間為2003年6月7日0116 UTC，在2公里的高度上（圖1a）顯示A系統起初為一缺乏組織性之對流胞，伴隨明顯的水平風切，若扣除系統移行速度（以約16  $\text{m s}^{-1}$ 的速度向東移動），可發現對流胞西側風場呈現氣旋式環流，將此渦旋稱之為渦旋 $V_A$ 。渦旋 $V_A$ 與A系統相互演變之關係，在2公里高度上可發現（如圖1a~圖11），0116至0124 UTC時對流胞的強回波區開始集中，並自0140 UTC時，A系統的線狀結構逐漸組織起來，0204至0212 UTC時呈現彎曲且非對稱型態(Houze, et al., 1989)，並且在系統後方出現後方入流(Rear Inflow)，風速小於10  $\text{m s}^{-1}$ ，所伴隨的降水回波的強度較微弱，類似後方入流凹區的特徵。值得注意的是，此時在A系統南端強回波區的後端，開始出現反氣旋式環流，稱之為渦旋 $V_A'$ ，範圍小於 $V_A$ 氣旋式渦旋。此種氣旋與反氣旋式環流正好位於A系統兩端，運動場結構可視為存在於弓狀回波內部之書夾渦旋。此形勢僅維持約30分鐘，0236 UTC時系統勢力稍微減弱，0244 UTC後分裂成兩部分，北端「頭」的部分朝偏東北的方向移動，其餘部分向東移動。

當渦旋與對流系統發展至成熟階段時，在0220 UTC氣旋式渦旋的E-E' 垂直剖面上，如圖2(a)所示，強降水回波區位於渦旋移行方向一側，並且伴隨旺盛的上升氣流，垂直速度可達5  $\text{m s}^{-1}$ ，此處大於30 dBZ的降水回波垂直方向可達7公里高度。此外渦旋中心(X=20~30 km)至渦旋西側則存在微弱的下沉運動。

藉由E-F的垂直剖面，如圖2(b)所示，分析A系統南端強降水回波區之垂直結構。此剖面顯示對流發展至高度15公里以上，後方入流的厚度在高度5公里以下，前方向後之氣流也具有相同的厚度，並與後方入流在強對流區輻合後被舉升至高度6公里以上。比較美國地區弓狀回波與中尺度渦旋實驗(Bow Echoes and MCVs Experiment, 簡稱BAMEX)在2003年6月10日所觀測之中緯度弓狀回波個案研究結果(Davis et al., 2004)，發現兩者在結構或是運動場特徵上均存在顯著差異，特別是在於風速的大小、後方入流與下沉氣流的勢力與位置。BAMEX所觀測個案之風速，無論是垂直或水平，均比本研究個案強勁，大部分可達10  $\text{m s}^{-1}$ 以上。此外，該個案之下沉氣流位於強對流區的後緣，風速大於10  $\text{m s}^{-1}$ ，並在地面至2公里高度形成前方向後的氣流，然而本研究觀測之下沉氣流則位於強對流區和後方層狀降水區之間的過渡地帶，並且風速相當微弱，約在4  $\text{m s}^{-1}$ 以下，在對流區底層未出現下衝流。

然而若與TOGA COARE熱帶海洋地區之個案相比則發現兩者之間具有許多相似點，其中氣流與降水回波均呈現向後傾斜的現象，因此下沉氣流均出現在對流區的後方。然而傾斜的程度則有些不同，在TOGA COARE的個案中前導線對流胞與氣流均呈現35度的傾斜，而在本研究對流的傾斜角度約15度，垂直結構的傾斜程度較小。整體而言，A系統的垂直結構比較類似熱帶地區的個案。

#### 四、結論

本文重要的結果歸納如下：

- (1) 本研究探討之中尺度對流系統所處的周圍環境，估算屏東探空發現其CAPE大於 $2000 \text{ J kg}^{-1}$ ，有利於中尺度對流系統在台灣南部地區的維持與發展，並且與中緯度適合弓狀回波發展的環境條件類似。然而，藉由探空或模式初始場估算低層風切強度則介於 $10$ 至 $15 \text{ m s}^{-1}$ ，比中緯度陸上地區微弱，但與熱帶海洋地區相似。
- (2) 發現LEWP存在於西風與西南風所形成之水平風切帶中，並可分成數段突出狀對流系統，有些具有弱回波管道、後方入流與後方入流凹區等發生於中緯度地區陸上的弓狀回波特徵。但後方入流強度比中緯度弓狀回波的後方噴流（大於 $40 \text{ ms}^{-1}$ ）為弱，且無明顯乾燥現象。另外也發現，有些線狀對流系統雖不具備上述的中尺度特徵，然而其前導線亦可形成彎曲狀態，可視為第二類型的弓狀回波。

(3) 彎曲形線狀回波的北端均伴隨氣旋式中尺度渦旋，部分渦旋最強的垂直渦度約在 $1.5$ 至 $3.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 之間，略低於中緯度同類型渦旋，而渦旋現象在高度 $3$ 至 $5$ 公里之間最明顯。並且當渦旋勢力逐漸增強時，在其環流南側形成由後向前氣流。而伴隨於第二類弓狀回波的氣旋式渦旋與線狀回波本身的尺度近乎相同，且較強的渦度發生於底層。

#### 參考文獻

- Houze, Jr. R. A., Biggerstaff, M. I., Rutledge, S.A., and Smull, B. F., 1989: Interpretation of Doppler Weather Radar Displays of Midlatitude Mesoscale Convective Systems. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 70, pp. 608–619.
- Davis, C., Atkins, N., Bartels D., Bosart, L., Coniglio M., Bryan, G., Cotton, W., Dowell, D., Jewett, B., Johns, R., Jorgensen, D. P., Knievel, D. J., Knupp, K., Lee, W.-C., Mcfarquhar, G., Moore, J., Przybylinski, R., Rauber, R., Smull, B., Trapp, R., Trier, S., Wakimoto, R., Weisman, M., and Ziegler, C., 2004: The Bow Echo and MCV Experiment: Observations and Opportunities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 85, pp. 1075–1093.

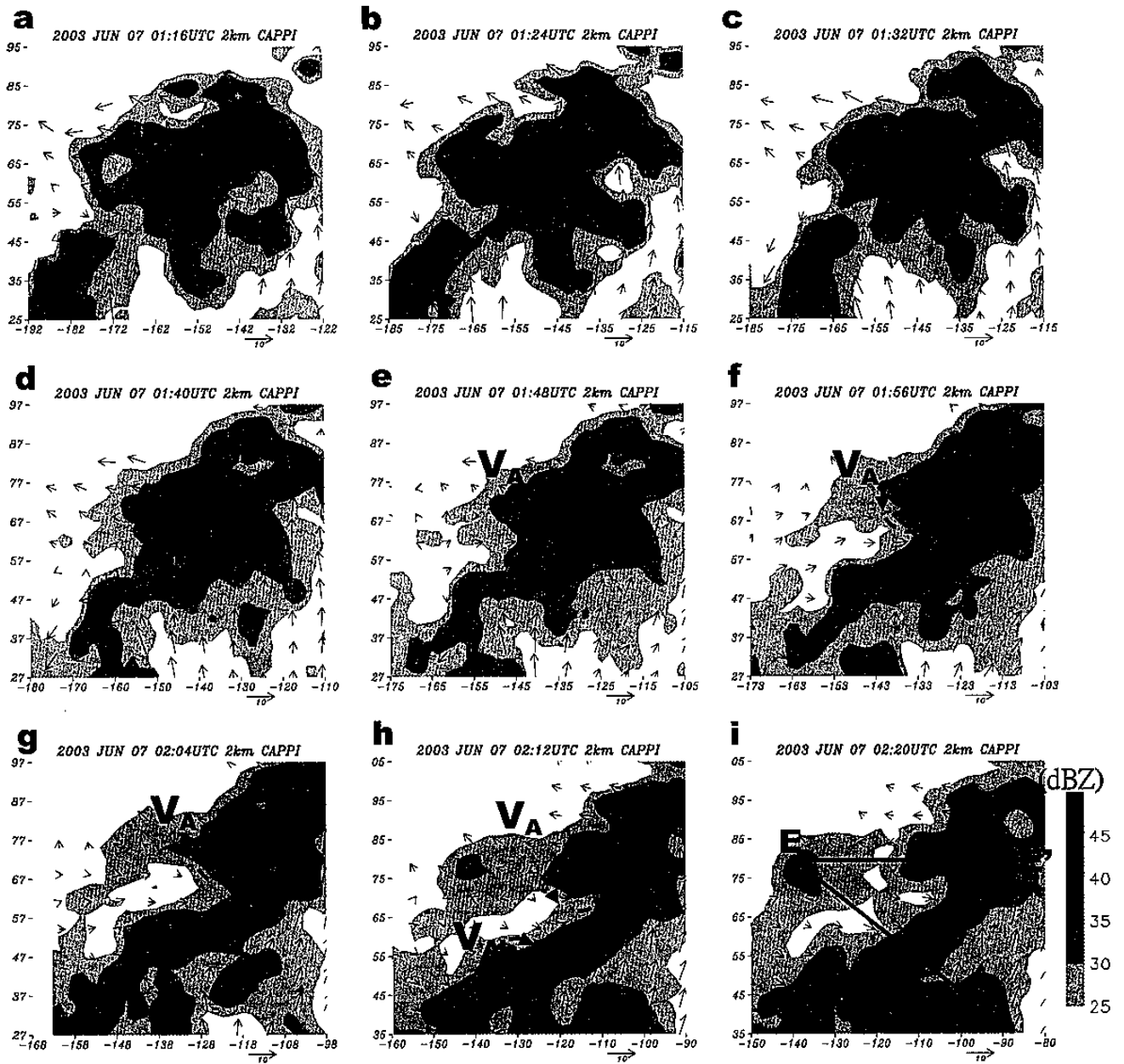
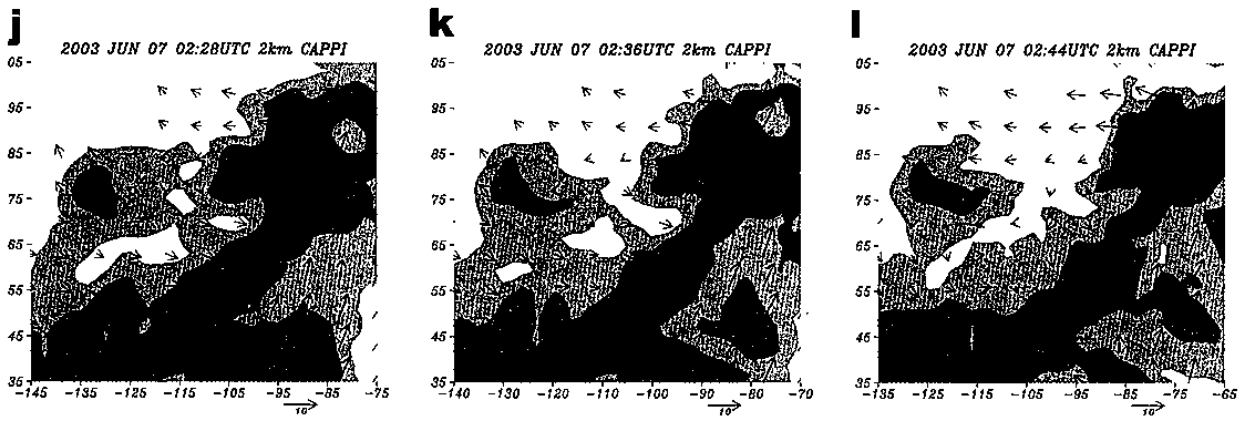


圖1 墾丁與七股雷達合成之高度2公里，且相對於A系統的水平風場與降水回波場分布圖。時間為2003年6月7日(a)0116，(b)0124，(c)0132，(d)0140，(e)0148，(f)0156，(g)0204，(h)0212，(i)0220，(j)0228，(k)0236，(l)0244 UTC。陰影區為降水回波強度，橫軸與縱軸分別為相對於墾丁雷達的東西向及南北向距離，圖(i)上的粗黑實線為圖2所呈現之垂直剖面的位置，圖(e)至(h)環狀虛線代表渦旋 $V_A$ 的位置，圖(h)環狀虛線代表反氣旋式渦旋 $V_A$ 的位置。



續圖1。

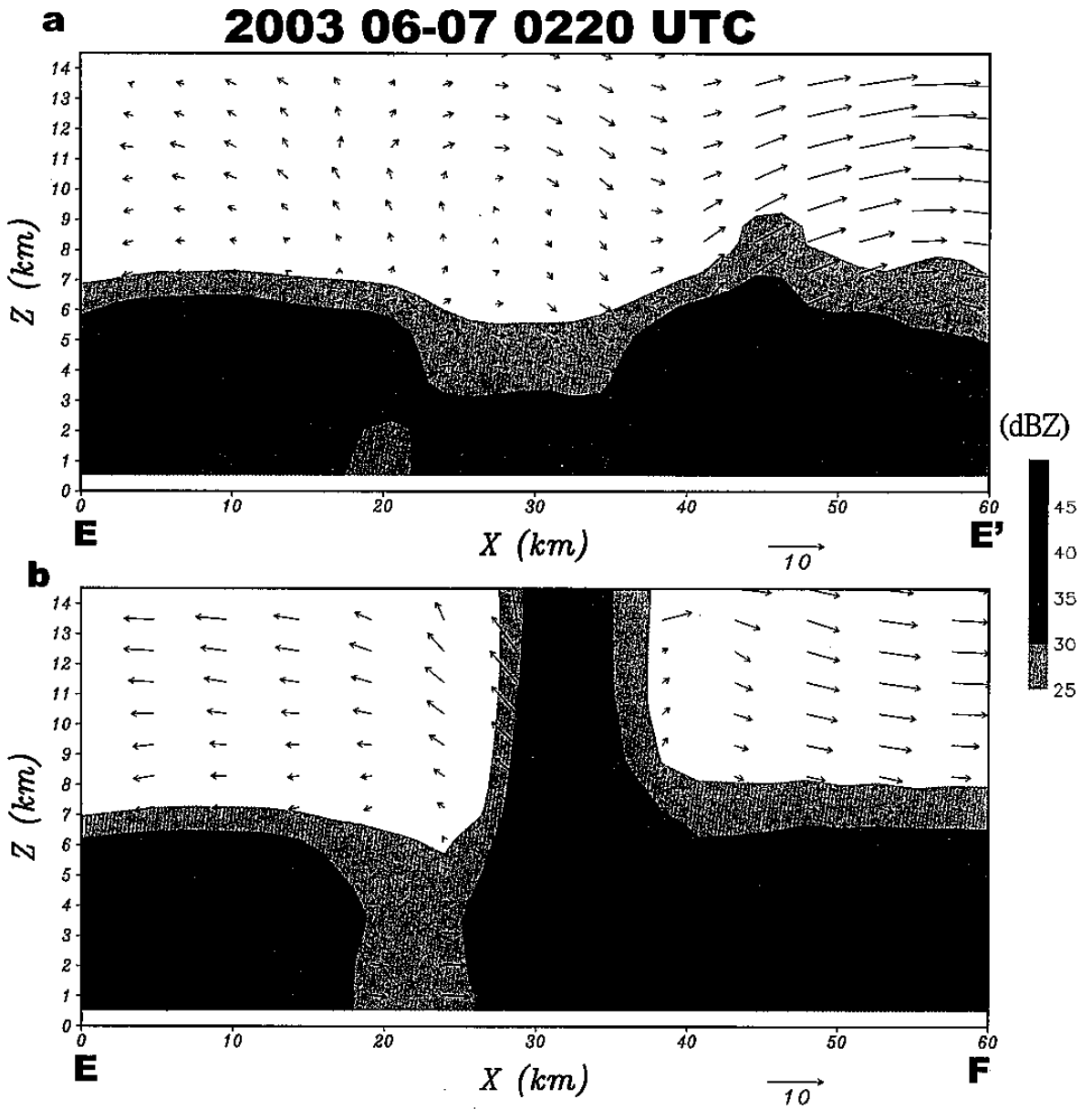


圖2 墾丁與七股雷達合成之相對於A系統的風場與降水回波場垂直剖面圖。時間為2003年6月7日0220 UTC，各剖面位置如圖1i所示。陰影區為降水回波強度，橫軸為剖面之水平距離，縱軸則為垂直高度。