

梅雨季台灣南部近海準線狀對流系統的特性分析

魏志憲¹ 何台華² 張茂興³ 李文兆⁴

¹ 國防大學中正理工學院應用物理系

² 龍華科技大學通識教育中心

³ 國立臺灣大學大氣科學系

⁴ 美國國家大氣研究中心

(中華民國九十五年一月二十日收稿；中華民國九十五年三月二十二日定稿)

摘要

2003年6月7日自華南和南海北部移入台灣南部近海之中尺度對流系統，其前緣強降水回波區呈現準線狀對流 (quasi-linear convective system) 的型態，其中並伴隨彎曲狀的對流雨帶，外型與發生在美國中西部地區的弓狀回波相似。本研究利用中央氣象局墾丁與七股都卜勒氣象雷達觀測資料進行分析，以瞭解此海上準線狀對流系統之結構特徵，並與美國地區之陸上弓狀回波系統進行比較，以期探究兩者之間結構特徵的異同。

初步研究發現，此副熱帶地區準線狀對流系統生命期達七小時以上，從地面到 700 hPa 之環境垂直風切約為 10 ms^{-1} ，與熱帶海洋地區研究個案 ($\sim 13 \text{ ms}^{-1}$) 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 (rear-inflow jet)、後方入流凹區 (rear-inflow notch) 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 30 m/s 之間，渦度強度則小於 10^{-3} s^{-1} 數量級，都比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沒有發生。

關鍵字：準線狀對流系統、後方噴流、後方入流凹區、中尺度渦旋

一、前言

弓狀回波 (bow echoes) 與飆線等劇烈對流系統係為準線狀對流系統 (quasi-linear

convective systems, 簡稱 QLCS) 的一部分，其中弓形對流系統的動力過程至今仍有極大的研究空間。弓狀回波最先是由 Fujita (1978) 所提出，係指氣象雷達所觀測之對流系統，強降

水回波區呈現如弓狀之彎曲形勢。此種劇烈天氣現象常發生於美國中部，集中在春夏兩季。弓狀回波移行前緣的近地面區域常伴隨強風，風速常可達 40 ms^{-1} 以上，可在地面造成不小的災害。Fujita (1979) 藉由許多個案的蒐集、分析及整理，將弓狀回波的演變定義成三個階段 (圖 1)。初期僅是單一的強對流胞，可以是孤立、或是飈線的一部分。當強勁的地面風正在發展時，強對流胞演變為弓狀的線對流系統，此時最強的地面風出現在弓形前緣的突出部。系統達到最強盛時，弓狀回波的中心可形成前導線型態的強降水回波區。在衰退期，弓狀回波系統則演變為逗點形狀的降水回波。

Fujita 推測典型的弓狀回波應具有下述特徵。第一，由系統後方向前緣移行的強勁氣流，稱為後方噴流 (rear-inflow jet)，並伴隨危害性的下暴氣流，其軸心的位置在弓形的突出部位。其次，則是存在於弓狀回波南北兩端的環流場。北端為氣旋式環流，南端則為反氣旋式環流，其中氣旋式環流要比反氣旋式來得顯著，並且經常演變為中尺度渦旋。然而除此之外，Fujita 並未釐清有利於弓狀回波生成與發展的綜觀與中尺度環境特徵。

自 80 年代之後，氣象雷達開始廣泛且大量的應用於天氣監測，開始有更多的觀測用以驗證 Fujita 的概念模式。Przybylinski and Grey (1983)、Przybylinski and DeCaire (1985) 首先強調在弓狀回波的後方出現「弱回波管道」(weak echo channel) 現象，象徵該區出現下暴氣流，並具有引發龍捲風的可能性。此弱回波區亦指示出後方噴流的位置 (Smull and Houze 1985)。「弱回波管道」伴隨後方噴流所形成的現象統稱「後方入流凹區」(rear-inflow notch, Przybylinski 1995)。Burgess and Smull (1990) 則發現後方噴流存在於回波的凹區內，強度可超過 40 m/s 。而在噴流的南北兩側，氣流明顯流向系統的後方，說明在弓狀系統的南北兩端出現氣旋與反氣旋之垂直渦度 (Funk et al. 1999)。Jorgensen and Smull (1993) 利用機載都卜勒雷達觀測資料，研究沿乾線發展的弓狀回波，其結果進一步驗證後方噴流存在於弓形的突出部位，以及回波兩端存在渦旋。

Johns and Hirt (1987) 則是針對產生弓狀回波之大型中尺度對流系統進行氣候研究，對於了解有利弓狀回波系統發展的環境場有重要的貢獻。該研究從伴隨雷達降水回波的型態中，定義出兩種基本的對流胞形勢。第一種是

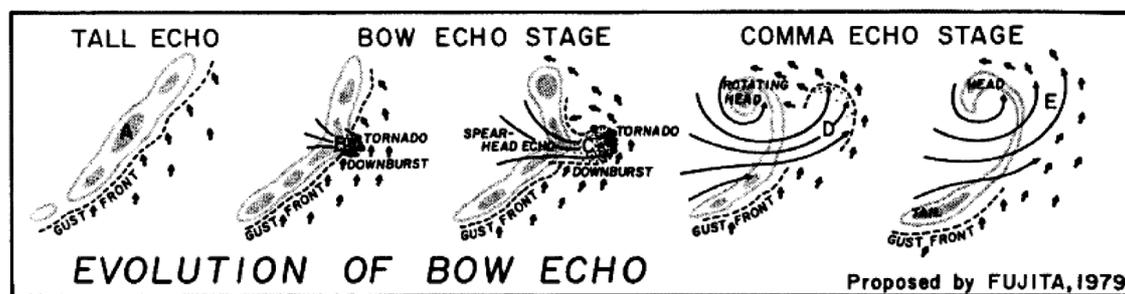


圖 1 弓狀回波演變示意圖 (Fujita 1979)。

單一的弓狀對流胞，通常在微弱的滯留鋒面的冷區中發展，移動方向與鋒面平行。第二種是由長形的飊線所組成，通常演變成序列形態的弓狀回波，或是線狀回波的波動型式（line echo wave pattern，簡稱 LEWP），並隨著飊線移動。Johns and Hirt 同時發現弓狀回波的環境特點是強烈的對流不穩定度與低層濕度。地面的露點溫度通常大於攝氏 20 度，平均的舉升指數為攝氏 -9 度。

有關對流胞在特定的環境場中演變為弓狀回波的趨勢，最早是藉著數值模式的結果來探討。當垂直風切增強。並且風切侷限於 2-3 公里的高度，新對流胞沿著弧型前導線上激發的機會則急遽增加。Weisman et al. (1988) 則發現當對流可用位能（convective available potential energy，簡稱 CAPE）為 2400 J kg^{-1} 時，配合 2.5 公里高度以下垂直風切強度為 25 m/s，並且方向與飊線系統垂直時，在此環境條件下所產生的飊線系統勢力強盛，生命期長，呈現準二維方向的型式。當模式時間到達 220 至 300 分鐘時，50 公里長的弓狀對流胞帶在飊線的南段發展，並且在其北端存在氣旋渦旋，南端存在反氣旋渦旋，稱之為書夾渦旋 (bookend vortex)。此外強勁的後方噴流同時存在於弓狀回波中心點的後端，強度可達 20 m s^{-1} 以上。Weisman and Trapp (2003) 利用數值模式探討渦旋的形成條件與環境垂直風切之間的關係，發現在高度 5 公里以下風切值大於 20 m s^{-1} 時，有利氣旋式渦旋的生成。而 Trapp and Weisman (2003) 則發現渦旋的生成是肇因於水平渦度的傾斜效應，並藉由行星渦度垂直拉伸的作用使其發展。

然而針對美國本土之外所發生之弓狀回波系統，相關的研究與文獻甚少。Jorgensen et al. (1997) 利用熱帶海洋—全球大氣耦合海氣反應（TOGA COARE）實驗之飛機雷達觀測資料，發現熱帶海洋對流系統亦呈弓狀之彎曲型式。然而卻不若中緯度的弓狀回波劇烈，且所伴隨之大氣環境，對流可用位能為 1440 J kg^{-1} ，地面到 850 hPa 的垂直風切為 13 ms^{-1} ，其不穩定度雖不如中緯度強勁，然而在熱帶地區乃屬於強盛的環境特性。此對流系統從一對稱的線狀體，演變為弓狀的型態，並伴隨後方入流凹區，北端同時存在氣旋式渦旋，生命期維持 3 小時，如同中緯度之弓狀回波。除此之外，Businger et al. (1998) 針對夏威夷海域伴隨副熱帶氣旋之弓狀回波進行初步觀測分析。總括而言，迄今有關熱帶或副熱帶海洋上觀測之弓狀回波之研究實在有限。

2003 年 6 月 6 日至 6 月 7 日中尺度對流系統於華南和南海北部生成，之後朝台灣移動，在南台灣地區造成豪大雨事件。中央氣象局新架設之墾丁與七股都卜勒氣象雷達，同時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移行方向的前緣呈現圓弧狀，其強降水回波區之分布極似弓狀回波系統。以往受限於台灣地區觀測網不夠密集之緣故，國內類似之相關研究甚少。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，分析此對流系統之結構，並與中緯度弓狀回波系統進行比較，以期瞭解東亞副熱帶地區弓狀回波之特徵，以及與中緯度弓狀回波系統之間的異同。

二、資料來源

(一)氣象雷達資料

如前言所述，本研究主要是分析中央氣象局墾丁與七股都卜勒氣象雷達觀測資料，包括 460 公里長距離掃描之降水回波場，與 230 公里都卜勒掃描之徑向風場與降水回波場。兩雷達各項性能諸元詳如表一。在掃描策略設定上，墾丁雷達每 8 分鐘執行一組都卜勒與非都卜勒模式之體積掃描，並且低仰角掃描時採用扇形空白 (sector blanking) 之策略，即在北側中央山脈地形處，劃分一方位角範圍之扇形區域不執行資料擷取 (圖 2)，故其低仰角的資料並非為全方位分布。七股雷達則每 10 分鐘執行一組都卜勒與非都卜勒模式之體積掃描。兩雷達的仰角設定均一致。在資料處理過程上，所有雷達資料均轉為通用格式 (universal format, Barnes 1980)，而後進行資料編輯、修正，再將之加入地理資料而予以視覺化，製作成平面位置顯示 (plan position indicator, 簡稱

PPI) 之影像。此外藉由網格資料內插方式，將雷達掃描之球面座標轉換為卡式直角座標，同樣加入地形予以視覺化，製作成等高面平面位置顯示 (constant altitude plan position

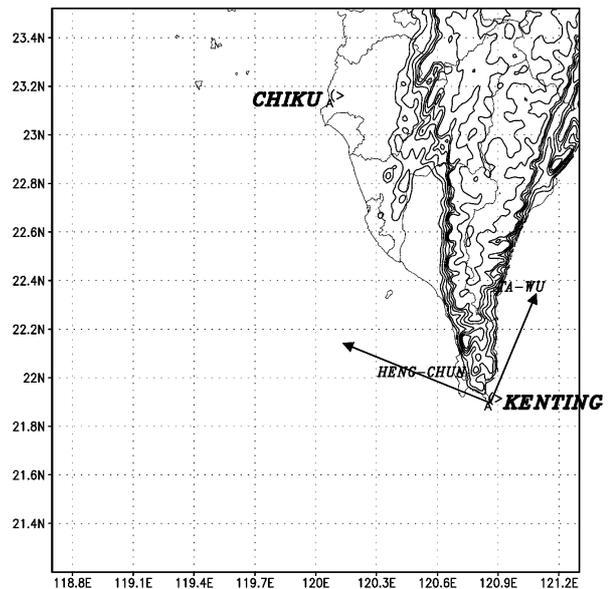


圖 2 台灣南部都卜勒氣象雷達網區域圖，包含七股 (Chiku)、墾丁 (Kenting) 等兩座雷達，其中墾丁雷達位置上兩線交角處為扇形空白 (sector blanking) 區。

表一 七股雷達與墾丁雷達各項性能諸元表。D 代表都卜勒模式，ND 代表非都卜勒模式。

雷達名稱 項目	七股雷達	墾丁雷達
地理位置	120.07°E, 23.15°N	121.85°E, 21.90°N
標高 (公尺)	38 (MSL)	29 (MSL)
製造廠商	Gematronik	
形式	Meteor-1000S	
最大掃描距離 (公里)	230 (D), 460 (ND)	
角度解析度 (度)	1°	
距離解析度 (公里)	0.25 (D), 1 (ND)	
取樣數目	131 (D), 32 (ND)	
天線轉速 (度/秒)	11.36	
最大不混淆速度 (公尺/秒)	± 32.51	± 49.51
脈波寬 (μs)	0.4 (D), 10.0 (ND)	

indicator, 簡稱 CAPPI) 與垂直剖面 (vertical cross section) 之影像, 用以分辨雷達資料之三維分布。

(二)其他氣象資料

本研究所分析之資料尚包括美國 GOES-9 地球同步衛星所觀測之紅外線雲圖, 以色階強化方式掌握雲系的變化與動向。綜觀天氣圖採用日本氣象廳東亞地面與高空天氣圖, 其中地面天氣圖每三小時分析一次。地面觀測則囊括中央氣象局所屬各地面測站、自動觀測與雨量站整點觀測資料。除分析氣壓、溫度、露點溫度、降水、風向與風速等氣象因子的時間序列變化, 並繪製台灣地區中尺度主觀地面分析圖, 以 1 hPa 之等間距分析地面等壓線之配置與鋒面位置。此外, 由於該時期東沙探空站因故暫停實施觀測, 因此探空資料採用屏東 (46750) 測站之觀測, 繪製成斜溫圖, 並計算出各項熱力參數。而當天氣系統在海上時無探空資料可供參考, 藉由美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction, 簡稱 NCEP) 再分析資料計算海上之各項氣象參數。

(三)綜觀天氣概述

2003 年 6 月 7 日 0000 UTC 地面天氣圖 (圖 3a) 顯示一滯留鋒面於大陸東南沿海與台灣中北部之區域持續徘徊。同時在 850 hPa (圖 3b) 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, 特別在其南側西南氣流風速達 15 m s^{-1} , 而海南島與南海北部亦存在一暖區, 因此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, 說明此天氣系統之綜觀環境不具備明顯之斜壓性。6 月 7 日 0000 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。

此外, 在 6 月 6 日 1200 UTC 中尺度地面分析圖中 (未附圖), 鋒面位置正位在台灣中部地區, 此時中尺度對流系統還在台灣海峽南部, 應以東沙島探空是最佳的觀測資料, 但因當時停止探空作業, 故無相關資料可供運用,

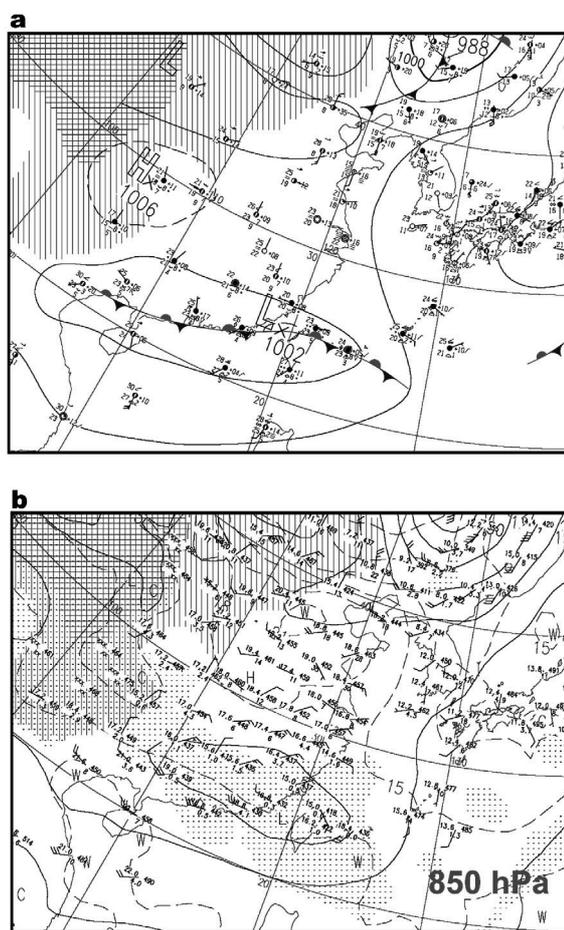


圖 3 2003 年 6 月 7 日 0000 UTC 天氣圖。(a) 地面分析圖, (b) 850 hPa 高空分析圖。(來源: 日本氣象廳)

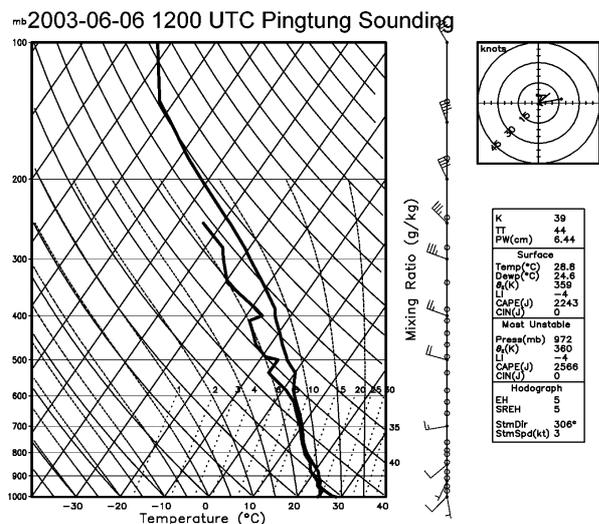


圖 4 2003 年 6 月 6 日 1200 UTC 屏東探空測站之斜溫圖。

僅以屏東探空站所觀測之探空資料，來分析鋒面前緣的大氣熱力結構。在 6 月 6 日 1200 UTC 屏東測站所觀測之探空資料(圖 4)中，其 CAPE 值達到 2000 J kg^{-1} 以上，顯示有利於中尺度對流系統的維持與發展。而 700 hPa 與地面之間的垂直風切則為約 10 ms^{-1} ，略接近 Jorgenson et al. 研究熱帶海洋個案的環境場 ($\sim 13 \text{ ms}^{-1}$)。藉

由 NCEP 再分析資料，發現在此中尺度對流系統發展的階段，700 hPa 以下之垂直風切約為 15 ms^{-1} ，也驗證與熱帶海洋地區研究個案的環境垂直風切值相近。

四、降水系統演變過程

(一) 衛星雲圖

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，而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，南北則約 4 個緯距，東側的對流系統向東移出並逐漸影響台灣南部地區。6 月 7 日 0000 UTC 時(圖 5)，該雲系中心部份的雲頂出現一亮度溫度較高的帶狀區，將其分割成兩個主體，其中西半部對流系統的前緣明顯呈弧狀的型態。及至 6 月 7 日 0700 UTC 之後，整體中尺度對流系統因著北方鋒面系統的移動，向南退至巴士海峽與南海北部一帶。

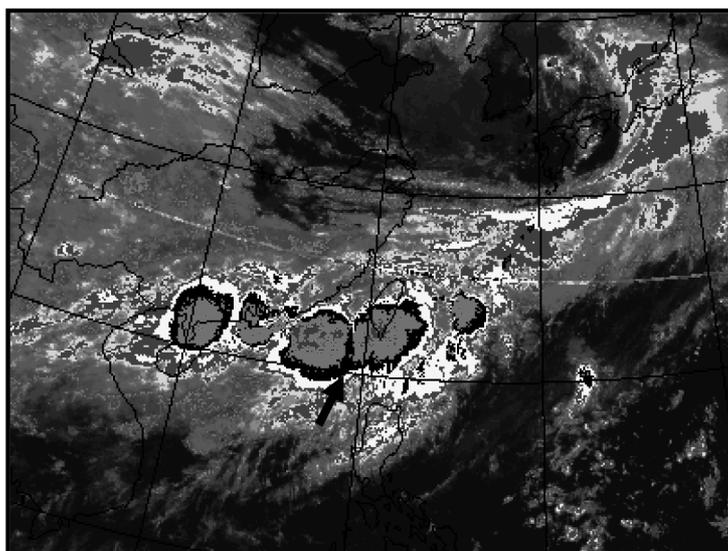
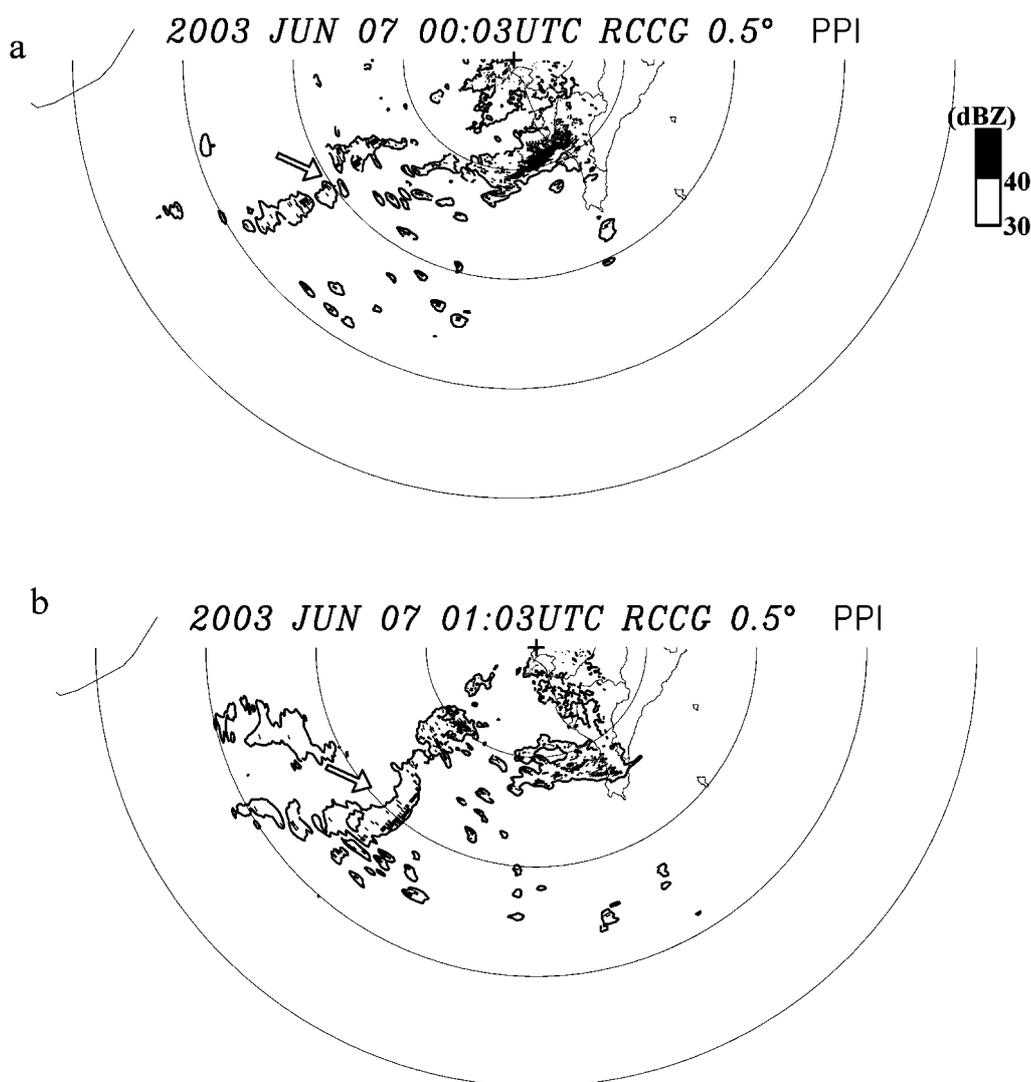


圖 5 2003 年 6 月 7 日 0000 UTC 東亞地區 GOES-9 紅外線加強色階衛星雲圖，圖中粗黑箭頭標示亮度溫度較高的帶狀區。

(二)雷達降水回波

此處雷達回波演變的描述，乃採用七股雷達長距離掃描在仰角 0.5 度的平面位置顯示圖做說明。在 2003 年 6 月 7 日 0003UTC 時 (圖 6a)，除了位於西南沿海之強降水回波區較為明顯之外，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 (如同中箭號所示之處)。1 小時後 (0103UTC，圖 5b)，強降水回波區組織成線狀系統，並具有明顯的

弓形，以 $14\sim 16\text{ ms}^{-1}$ 之速度持續向東移動。0203 UTC (圖 6c) 時，除原有弓形的線性對流系統外，在其北方的強降水回波區亦呈彎曲狀，兩者形成線狀回波的波動型式。到了 0303 UTC (圖 6d) 時，此對流系統呈現逗點回波 (comma echo) 型式，當北端部分接觸陸地時，降水回波強度逐漸減弱，而弓狀回波部分則仍維持著，至 0700 UTC (圖未示) 之後弓狀回波的勢力才逐漸減弱，整體系統生命期達 7 小時以上。



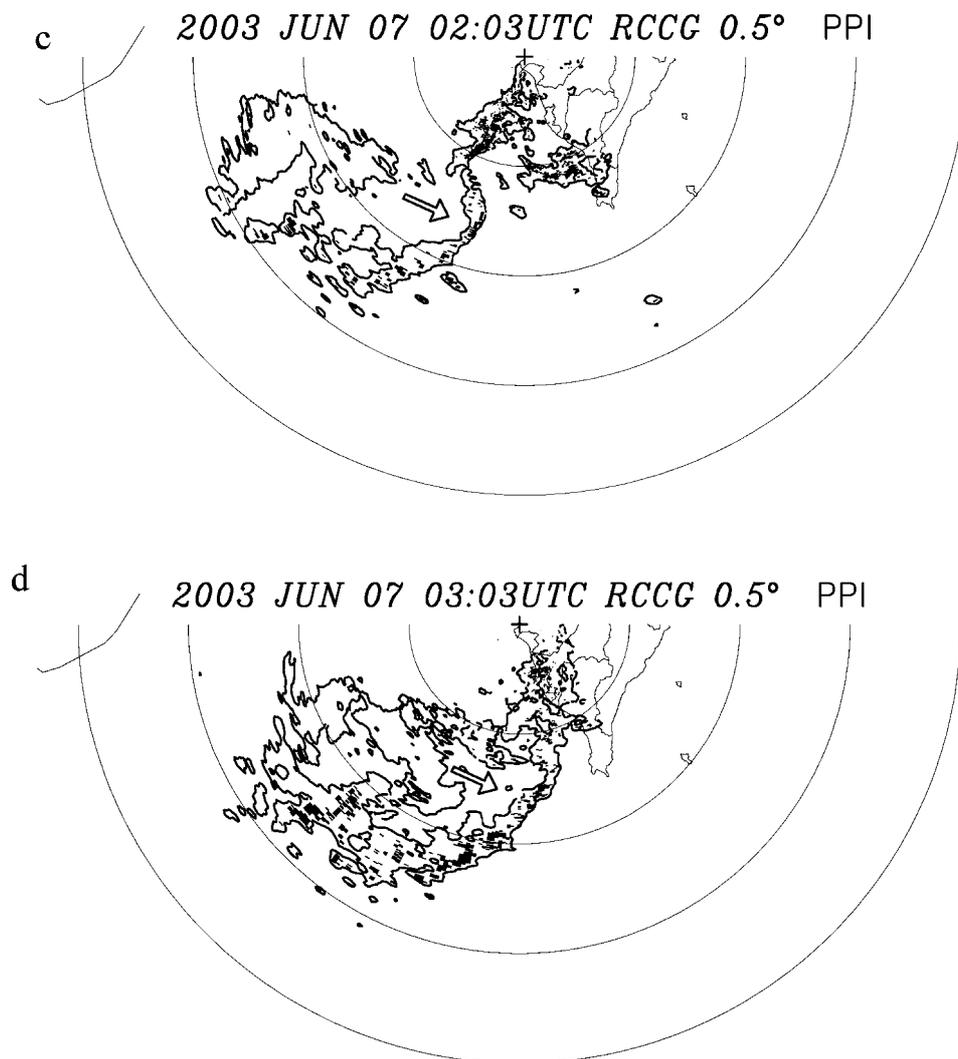


圖 6 2003 年 6 月 7 日七股雷達仰角 0.5 度長距離 (460 公里) 掃描降水回波之平面位置顯示圖。(a) 0003 UTC, (b) 0103 UTC, (c) 0203 UTC, (d) 0303 UTC。其中陰影區分別代表回波強度大於 40 與 30 dBZ 的降水回波區, “+”代表七股雷達站的位置, 圓圈間距為 50 公里。

五、中尺度特徵

由於此一線狀回波所呈現的彎曲形勢, 類似常發生於美國中西部的弓狀回波系統, 故此處藉由弓狀回波系統的概念模式, 來釐清本研究中準線狀對流系統所具有的中尺度特徵。2003 年 6 月 7 日 0204 UTC 時 (圖 7) 為例,

此一對流系統後緣出現一狹長的弱回波區, 呈明顯的 V 形凹槽, 存在於高度 4 公里以下, 伴隨其上之都卜勒風速可達大於 24 ms^{-1} , 風向朝向雷達站, 顯示在此弓狀回波系統後方存在強風軸, 其方向是由系統的後方向前緣吹送。隨著系統持續向東移動, V 形凹槽的現象更加明顯, 強風軸亦存在其間, 這些現象即代表弱回

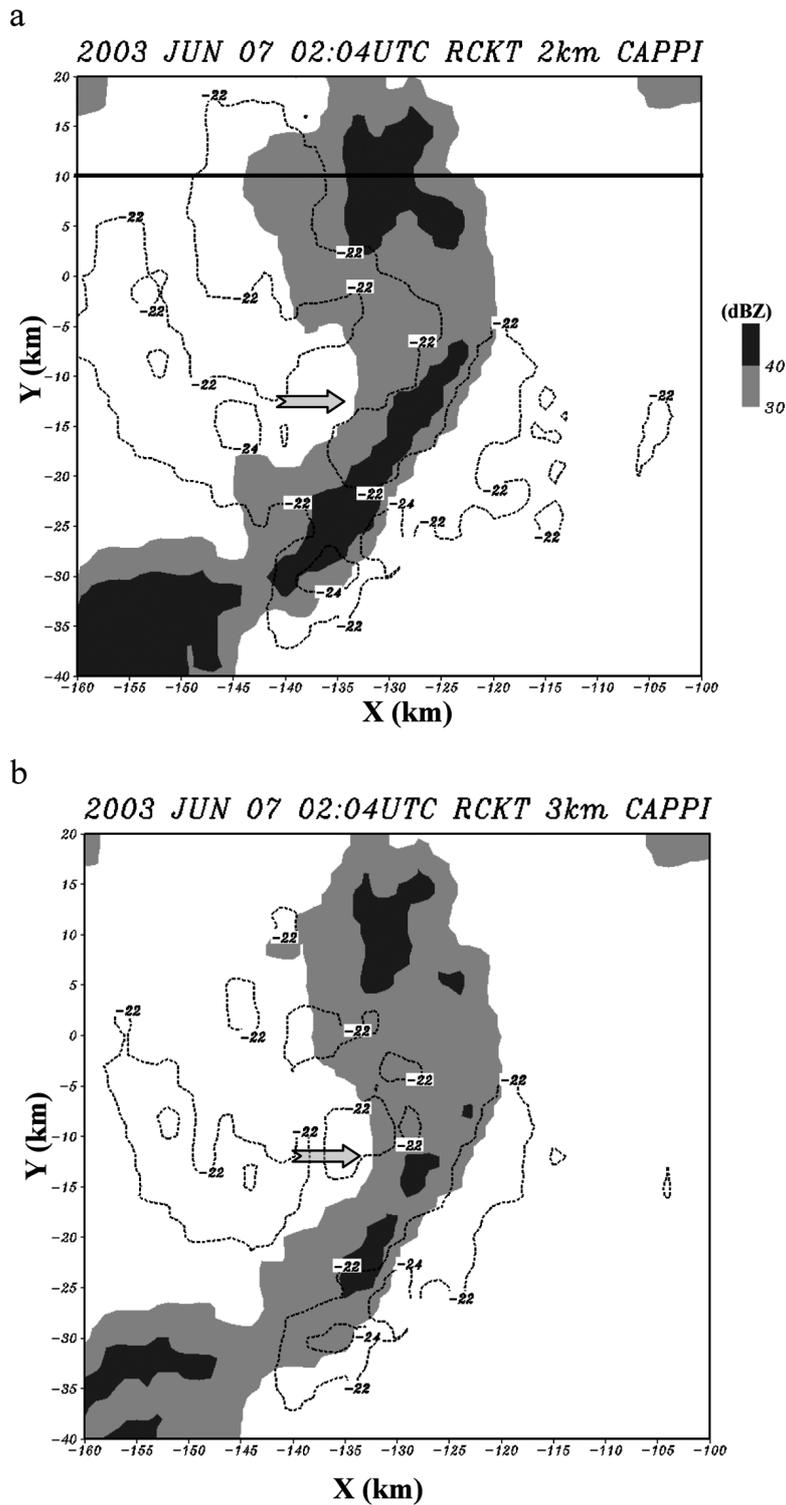


圖 7 2003 年 6 月 7 日 02040 UTC 墾丁雷達的等高面平面位置顯示圖。(a) 高度 2 公里，(b) 高度 3 公里。等值實線為強度 30 dBZ 之降水回波，虛線為 -22 ms^{-1} 與 -24 ms^{-1} 之都卜勒風場，陰影區分別為強度大於 30 與 40 dBZ 之降水回波區。箭矢所指之處為後方流入凹區 (rear-inflow notch)，粗實線為垂直剖面位置 (圖 9a)。

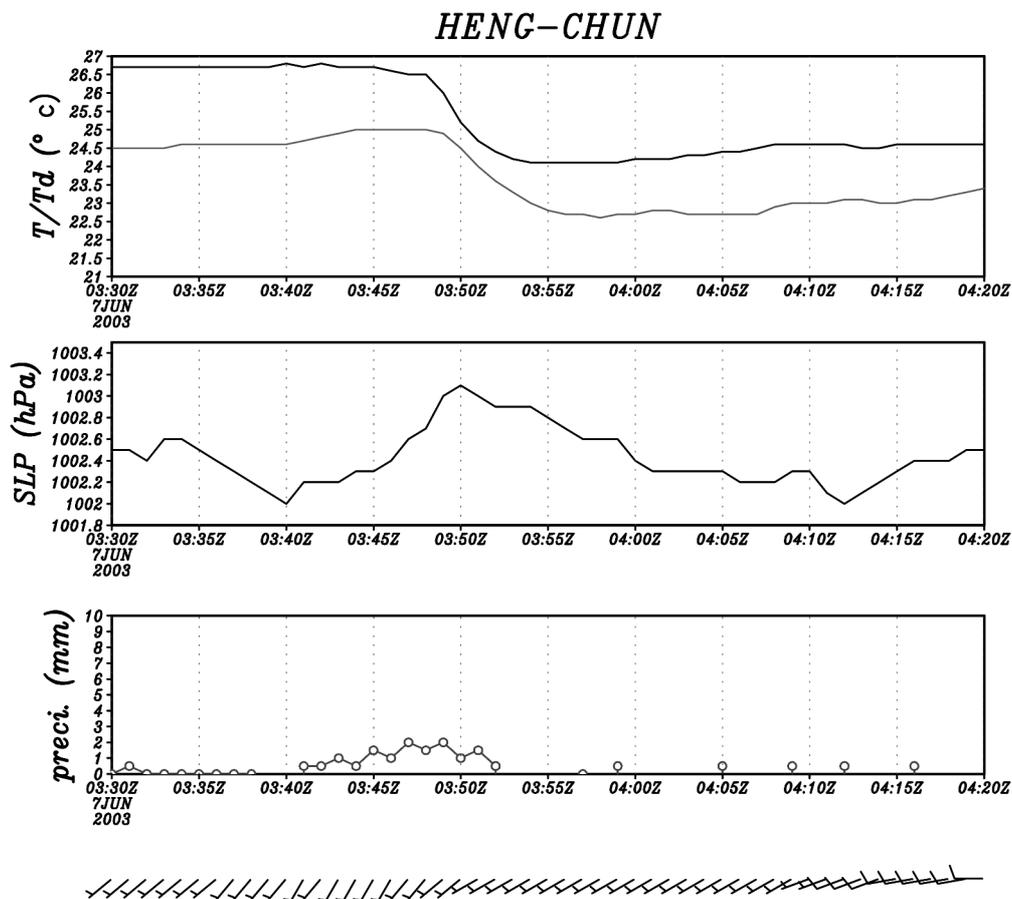


圖 8 2003 年 6 月 7 日 0330 至 0420 UTC 恆春測站每分鐘溫度、露點、海平面氣壓與降水等氣象因子時間序列圖。(資料來源：中央氣象局)

波管道、後方入流凹區與後方噴流等伴隨弓狀回波特有的中尺度特徵。與發生於美國陸地的弓狀回波稍有不同的，一般的弓狀回波所伴隨的後方噴流，風速可達 40 m/s 以上 (Burgess and Smull 1990)，然而本研究所觀測之後方噴流，強度約在 25~30 m/s 之間，勢力明顯微弱，但與發生在夏威夷附近海域之個案相似(約 26 m/s, Businger et al. 1998)。

過去的研究發現後方噴流是屬於乾冷的氣流，具有較高的動量 (Smull and Houze 1985, 1987)，因此所經之處使降水回波減弱，形成狹

長的弱回波區。本研究探討之準線狀對流系統，其北端於 2003 年 6 月 7 日 0348 至 0356 UTC 之間通過恆春測站。故分析氣象局恆春測站每分鐘之密集觀測資料 (圖 8)，以說明本研究中線狀對流系統後方是否具有乾冷的特徵。在系統通過此測站前後共 8 分鐘的時段中，各項氣象參數均有明顯的變化，溫度場反應出對流系統後方的空氣溫度，較前方空氣低約 2 至 3°C，並且氣壓場也明顯上升，顯示後方空氣已出現偏冷的現象，然而溫度露點差在系統通過前約為 2°C，通過後則約為 1.5°C，說明後方空氣的

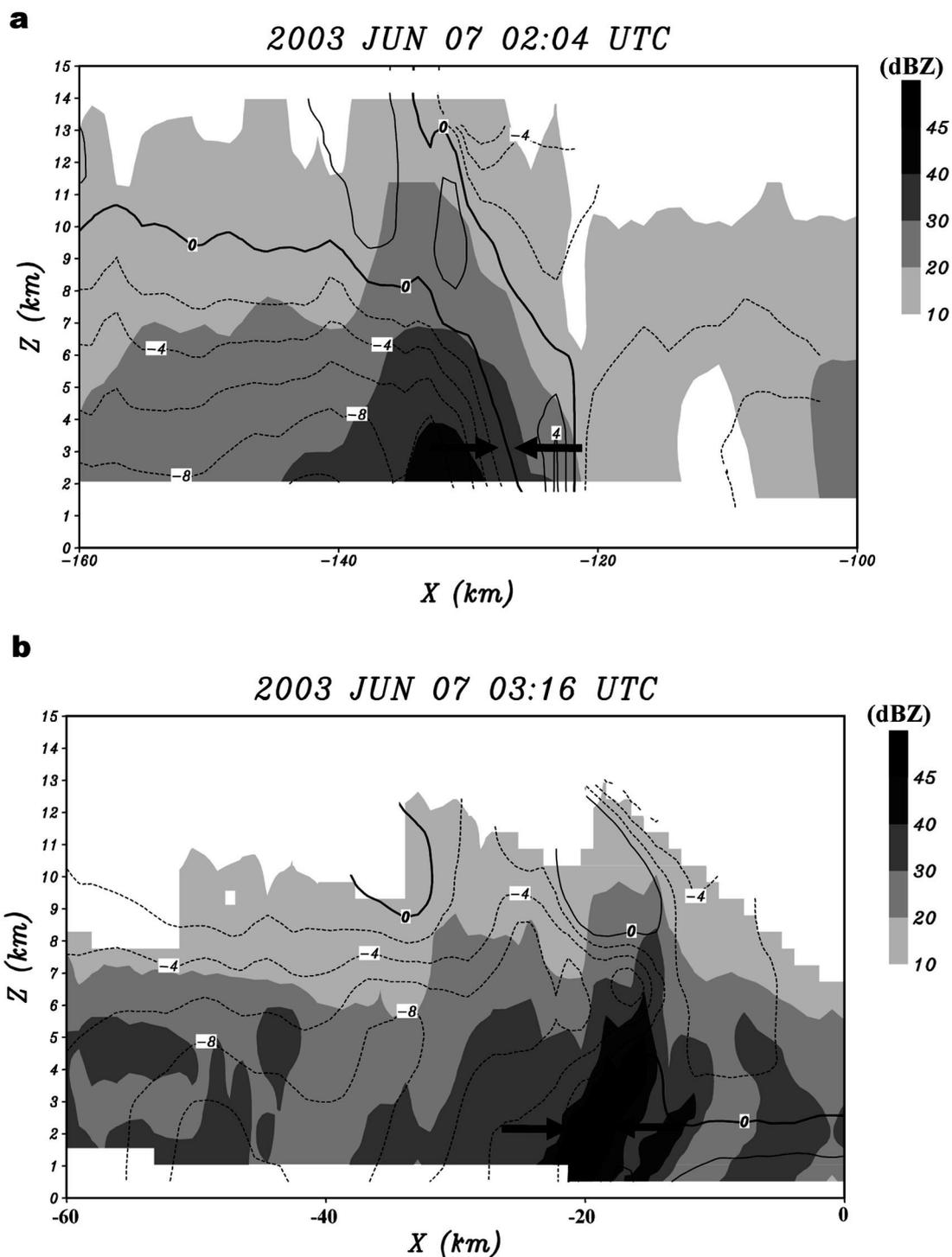


圖 9 2003 年 6 月 7 日墾丁雷達垂直剖面圖，(a) 0204 UTC，(b) 0316 UTC。箭號代表徑向風輻合區，剖面位置如圖 7a 與圖 11a 之粗實線所示。X 軸為相對於雷達位置 (0, 0) 之東西向距離 (km)，Z 軸為高度，等值線為濾除系統移速後之都卜勒風場 (間距為 2 m/s)，陰影區為降水回波 (dBZ)。

相對溼度稍高於系統前緣的空氣，因此在本個案系統後方的空氣並未顯得特別乾燥，與中緯度所觀測之結果相異。至於此一結論是否可延伸詮釋系統中段後方噴流的特徵，有待進一步的研究。

而在垂直剖面分析上，在系統發展初期（0204 UTC，圖 9a），大於 30 dBZ 之對流區垂直高度約 7 公里，結構呈直立狀。徑向風場濾除系統移速時，發現兩處風速零值線位於強回波區前緣，其中靠近對流區的零值線說明該處低層（3 公里高度以下）的後方入流與對流前緣的氣流形成輻合，由前向後的氣流可達 10 公里的高度；而強對流區的前緣出現另一處的零值線，則反映出低層的輻散現象，此處似乎存在下沉氣流。在 0316 UTC 時（圖 9b）同樣有一處風速零值線位在強對流區位置上，顯示後方入流與對流前緣的氣流輻合，使對流系統持續發展，此時對流系統垂直結構向著移行方向傾斜。在此時間之後，對流帶的水平結構逐漸由彎曲狀轉為直線狀（未附圖），此一轉變的過程是否亦影響垂直結構的變化，則需有更密集之觀測或是藉由數值模式方能更深入探討。

六、中尺度渦旋

Weisman（1992）利用數值模式結果發現中尺度渦旋是弓狀回波中一種重要的系統尺度現象，能加強後方噴流的強度。Weisman and Davis（1998）利用數值模式更進一步證實，在一個較大尺度的弓狀回波系統內部，可產生尺度較小的弓狀回波及中尺度渦旋。就本研究個案而言，整體系統亦可分為數段尺度較小的類似弓狀之彎曲狀回波，其中以北段的彎曲最明顯，在先前也討論其伴隨顯著的後方噴流，藉

由 Atkins et al.（2004）分析之方法，探討本個案所存在之中尺度渦旋特徵。2003 年 6 月 7 日 0116 UTC（圖 10）時，在相對於系統移速的徑向風場中，可清楚分辨弓狀回波北端存在一零值線圍成之區域，其中徑向風的風向是遠離雷達站，零值線南側之徑向風向則是向著雷達站，兩者的最大值分別為 $+5.5 \text{ ms}^{-1}$ 及 -7.2 ms^{-1} ，顯示該處環流場呈氣旋式切變，此一特徵可達到 7.0 公里高度。利用正負極大值的平均，與兩點極值之間的距離，可概估此切變約為 10^{-4} s^{-1} 的數量級。隨著時間的演進，零值線兩側的徑向風場之梯度則逐漸增強，正負極大值的偶極區同時逐漸明顯。以 0316 UTC（圖 11）為例，徑向風場正負區極值分別大於 $+10 \text{ ms}^{-1}$ 和小於 -10 ms^{-1} ，此偶極現象同樣在 7 公里高度以下較為明顯，然而，在此段弓狀回波南端的都卜勒風場，並未呈反氣旋之偶極形勢，故在該處可能並未存在反氣旋式的環流。

此外藉由七股雷達資料，交叉驗證渦旋的存在與可能強度。由於七股雷達有效的資料範圍僅 120 公里。故此，弓狀回波北端約在 2003 年 6 月 7 日 0230 UTC 之後完全進入七股雷達觀測區域內。0254 UTC（圖 12）時，在雷達站南側有兩處都卜勒風場偶極區，正負值中間的風速梯度明顯集中，顯示此二處均具有明顯的風切變現象，其中位於 $Y = -80$ 公里處之偶極區，與墾丁雷達所觀測之渦旋位置相當，故亦可證實本研究個案中，弓狀回波北端的確伴隨著氣旋式中尺度渦旋，而藉由此一都卜勒風場資料概估其渦度約在 10^{-3} s^{-1} 數量級左右，比利用墾丁雷達所估算之結果高約一數量級，故此渦旋的強度應在 10^{-4} 至 10^{-3} s^{-1} 之間，而在 0314 UTC（圖 13）時，在雷達站東南方約 100 公里處，亦出現一範圍較大之正負風速極大值對稱

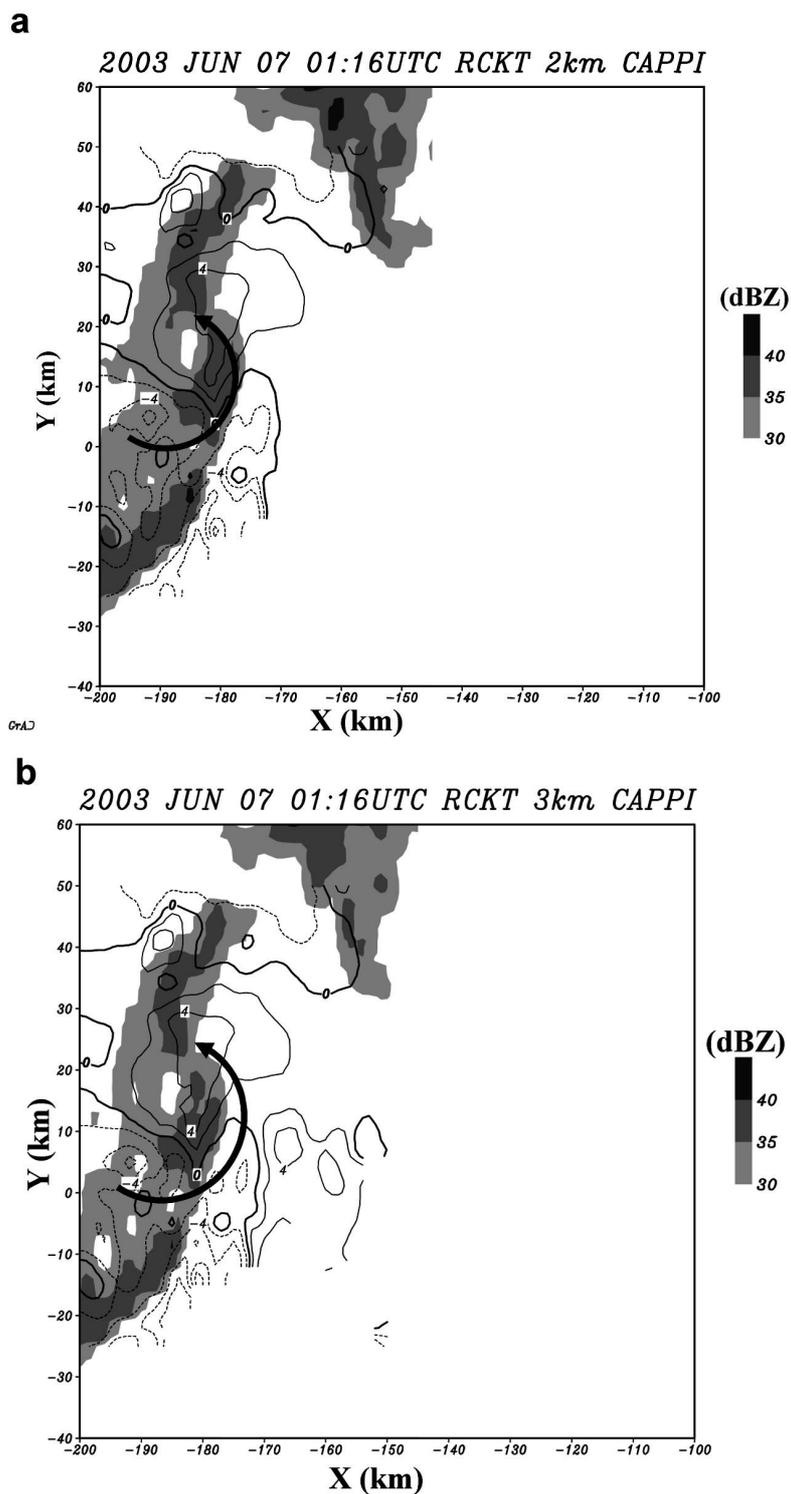
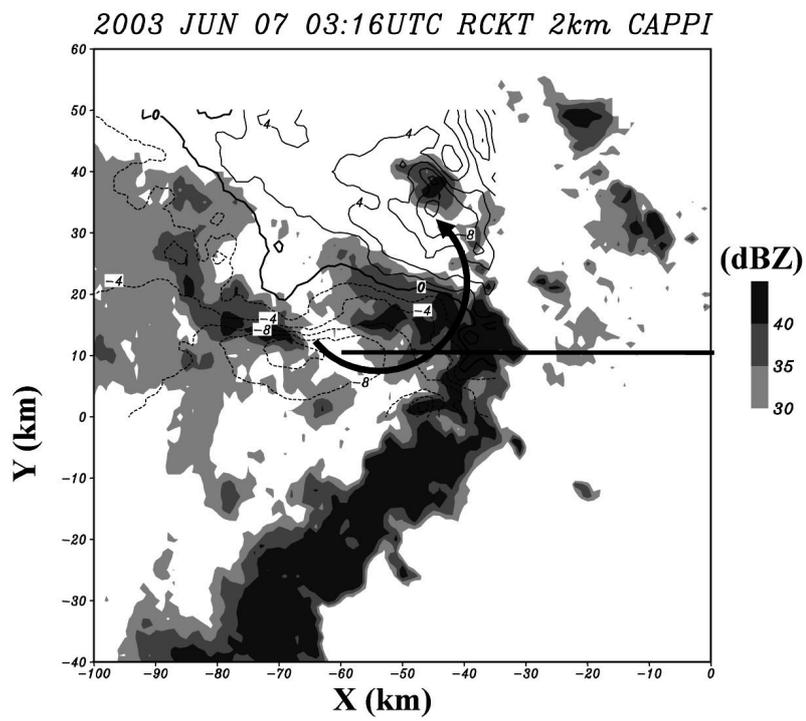


圖 10 2003 年 6 月 7 日 0116 UTC 墾丁雷達等高面平面位置顯示圖。(a) 高度 2 公里，(b) 高度 3 公里。等值線為濾除系統移速後之都卜勒風場（間距為 2 m/s），陰影區為降水回波（dBZ）。箭矢曲線所指之處為都卜勒風場偶極區，代表渦旋的位置。X 與 Y 軸分別為相對於雷達位置 (0, 0) 之東西向與南北向的距離 (km)。

a



b

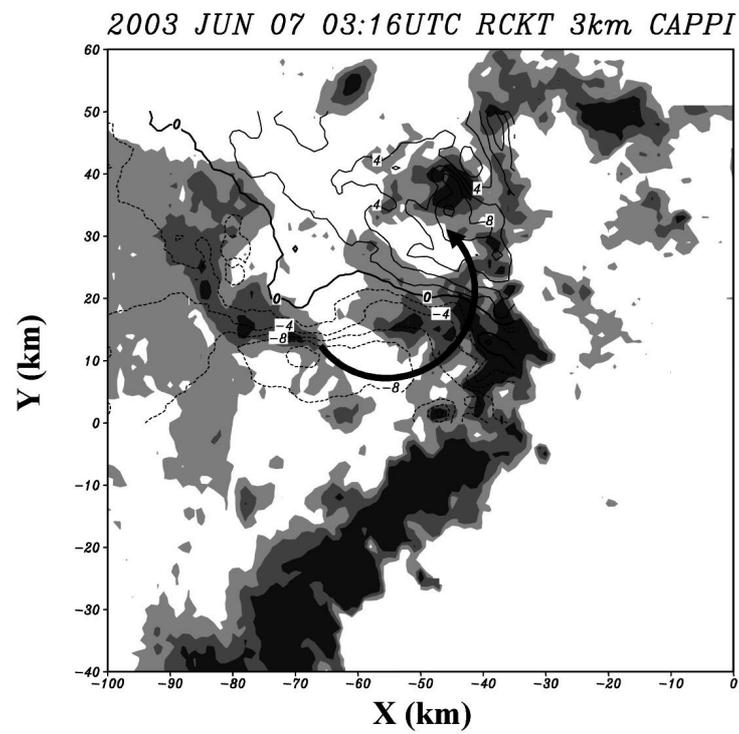
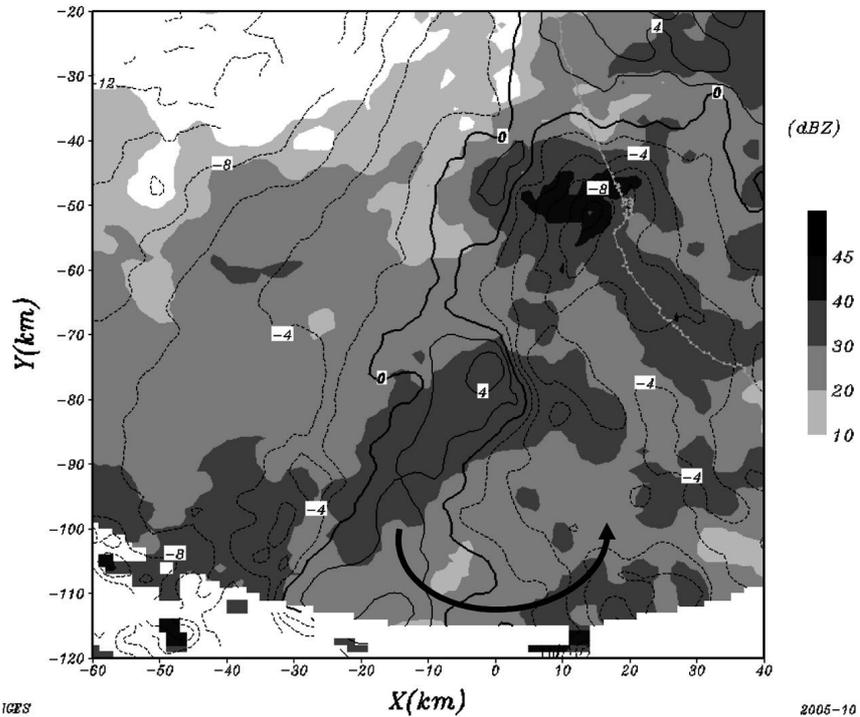


圖 11 同圖 10，但時間為 2003 年 6 月 7 日 0316 UTC，粗實線為圖 9b 之垂直剖面位置。

a

2003 JUN 07 02:54UTC RCCG 2km CAPPI



b

2003 JUN 07 02:54UTC RCCG 3km CAPPI

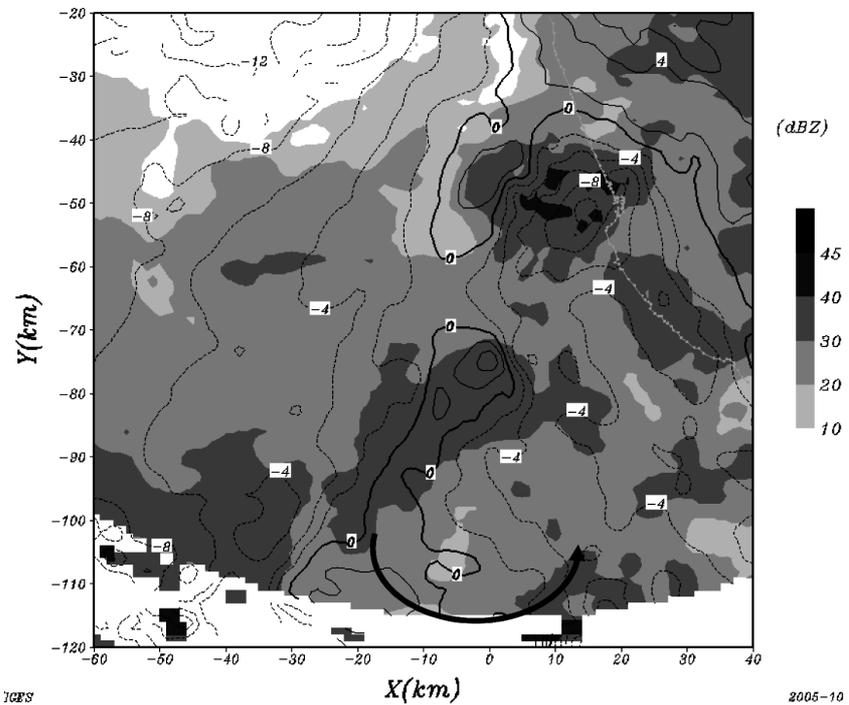


圖 12 2003 年 6 月 7 日 0254 UTC 七股雷達的等高面平面位置顯示圖。(a) 高度 2 公里，(b) 高度 3 公里。等值線為都卜勒風場強度（間距為 2 m/s），陰影區為降水回波（dBZ）。箭矢曲線所指之處為都卜勒風場偶極區，代表渦旋的位置。X 與 Y 軸分別為相對於雷達位置（0, 0）之東西向與南北向的距離（km）。

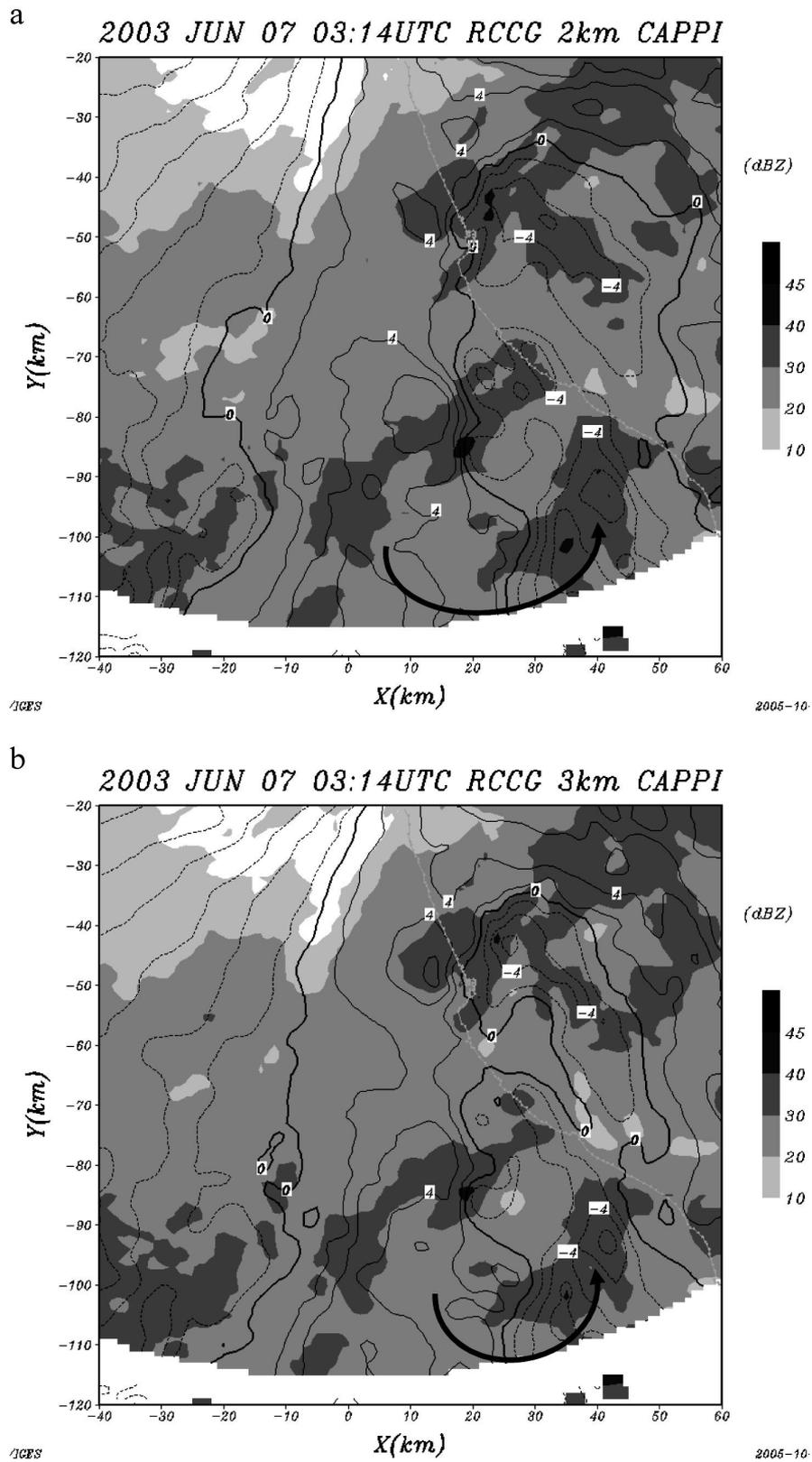


圖 13 同圖 12，但時間為 2003 年 6 月 7 日 0314 UTC。

之區域，大於 30 dBZ 之強降水回波則伴隨於風速極大與極小值之區域上，而其渦度大小也約為 10^{-4} s^{-1} 數量級。上述渦旋較為明顯的高度在 2 至 3 公里之間，在 5 公里以上的高度則不明顯。

由上述的分析可得知，本個案所觀測之弓狀回波北端亦存在氣旋式渦旋，其渦度小於 10^{-3} s^{-1} 。Lee et al. (1992) 觀測發生於美國科羅拉多州某個案的氣旋式渦度為 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，而 Weisman and Trapp (2003) 利用數值模式模擬之渦度為 $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。因此，無論是藉由觀測或是模式估算中緯度陸上地區伴隨弓狀回波之氣旋式渦度，均高於本研究所得之強度。

七、地面天氣現象探討

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。至於準線狀對流系統通過台灣西南陸地前後的階段（6 月 7 日 0300UTC 與 0400 UTC），則以枋寮的時雨量最多，可達到 60 mm，若就恆春測站密集的觀測資料來看（圖 8），在系統通過該測站的時段中（0342 UTC 至 0354 UTC），累積雨量就已達到 12 mm。因此可得知在此對流系統內部所含降水量甚為豐沛，一旦停留在陸地一段時間，極易造成豪大雨事件。

就風場的變化而言，當系統通過恆春測站時，風向明顯由西南風轉為西風，但就風速來說並沒有太大的變化，僅增加至 5 ms^{-1} ，並未觀測到如下暴氣流等級之強風。然而由於弓狀回波的主體並未通過陸地，是否在弓狀的突出部位之下有下暴氣流產生，則需進一步的觀測

資料來驗證。

八、結 論

藉由中央氣象局新架設之七股與墾丁都卜勒氣象雷達所觀測之資料，可對於在南海和大陸東南沿海一帶生成，並且移入台灣南部地區的中尺度對流系統展開進一步的分析。本研究針對 2003 年 6 月 7 日造成南部豪大雨之中尺度對流系統，探討其結構特徵。首先是從雷達降水回波的分佈上，發現具有彎曲狀之準線狀對流系統，類似於弓狀回波。故此，對照過去文獻所獲得之結果，用以比較本研究探討之準線狀對流系統所具有之中尺度特徵，並探討兩者之間的異同，所獲之初步結果如下：

- (1) 發生於中緯度地區陸地上的弓狀回波所處之環境特徵都較為明顯，其 CAPE 值可超過 2000 J kg^{-1} ，低層風切（低於 2.5 公里）為 25 ms^{-1} 。然而本研究探討之準線狀對流系統所處環境的附近並無合適的探空資料以供估算 CAPE 值，但估算屏東探空發現其 CAPE 大於 2000 J kg^{-1} ，有利於準線狀對流系統在台灣南部地區的維持與發展，而低層風切強度為 10 至 15 ms^{-1} ，與熱帶海洋地區研究個案的環境垂直風切值相似。
- (2) 本研究觀測之準線狀對流系統具有弱回波管道、後方入流凹區與後方噴流等中尺度特徵，然而就後方噴流的風速強度而言，約在 25 至 30 ms^{-1} 之間，與夏威夷附近海域的個案相似，但比起中緯度的弓狀回波伴隨之後方噴流（大於 40 ms^{-1} ），勢力顯得較弱，並且噴流區未具有乾燥的特性。

- (3) 典型的弓狀回波伴隨有書夾渦旋，位於系統南北兩端，北端為氣旋式環流，南端則為反氣旋式環流，其中氣旋式環流比反氣旋式環流來得明顯且強盛。本研究探討之準線狀對流系統北端亦存在氣旋式渦旋，相對渦度約為 10^{-4} 至 10^{-3} s^{-1} 之間，略低於中緯度同類型渦旋，然而在此一準線狀對流系統的南端並未發現反氣旋式環流的存在，因此本個案之準線狀對流系統僅伴隨氣旋式的中尺度渦旋。
- (4) 在準線狀對流系統通過陸地時，帶來可觀的降水量，然而地面風速僅增強至 5 ms^{-1} ，並未觀測到近似下暴氣流的強風，是否此對流系統的主體未通過陸地，則需進一步的觀測來驗證。

本文是首次利用兩個都卜勒氣象雷達針對台灣地區準線狀對流系統之中尺度特徵進行交插分析與比較驗證，但礙於作業用雷達掃描策略無法隨意調整，不能對特定的天氣現象實施細部觀測，未來可考慮進行臺灣西南地區密集的野外觀測實驗，類似美國的弓狀回波與中尺度渦旋觀測實驗 (Bow echoes And Mesoscale convective vortex Experiment, 簡稱 BAMEX, Davis et al. 2004)，將可更進一步探討相關議題。

誌 謝

感謝大氣科學主編廖宇慶教授及兩位未具名的審查委員提供許多寶貴之修訂意見，使文章的結構和內容更加嚴謹，在此致謝。本文在國科會專題研究計劃 NSC 94-2625-Z-262-001 部份經費支援下完成。

參考文獻

- Atkins, N. T., J. M. Arnott, R. W. Przybylinski, R. A. Wolf and B. D. Ketcham, 2004: Vortex Structure and Evolution within Bow Echoes. Part I: Single-Doppler and Damage Analysis of the 29 June 1998 Derecho. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 2224-2242.
- Barnes, S. L., 1980: Report on a meeting to establish a common Doppler radar data exchange format. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 61, 1401-1404.
- Burgess, D. W., and B. F. Smull, 1990: Doppler radar observations of a bow echo associated with a long-track severe windstorm. Preprints, *16th Conf. on Severe Local Storms*, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc., 203-208.
- Businger, S., T. Birchard Jr., K. Kodama, P. A. Jendrowski, and J. J. Wang, 1998: A bow echo and severe weather associated with a Kona Low in Hawaii. *Wea. Forecasting*, 13, 576-591.
- Davis, C., N. Atkins, D. Bartels, L. Bosart, M. Coniglio, G. Bryan, W. Cotton, D. Dowell, B. Jewett, R. Johns, D. Jorgensen, J. Knievel, K. Knupp, W.-C. Lee, G. Mcfarquhar, J. Moore, R. Przybylinski, R. Rauber, B. Smull, R. Trapp, S. Trier, R. Wakimoto, M. Weisman and C. Ziegler, 2004: The Bow Echo and MCV Experiment: Observations and Opportunities. *Bulletin of the American Meteorological Society*: 85, 1075-1093.
- Fujita, T. T., 1978: Manual of downburst identification for project Nimrod. Satellite and Mesometeorology Research Paper 156, Dept. of Geophysical Sciences, University of Chicago, 104 pp. [NTIS PB-286048.]
- , 1979: Objective, operation, and results of Project NIMROD. Preprints, *11th Conf. on Severe Local Storms*, Kansas City, MO,

- Amer. Meteor. Soc., 259–266.
- Funk, T. W., K. E. Darmofal, J. D. Kirkpatrick, V. L. Dewald, R. W. Przybylinski, G. K. Schmocker, and Y.-J. Lin, 1999: Storm reflectivity and mesocyclone evolution associated with the 15 April 1994 squall line over Kentucky and Southern Indiana. *Wea. Forecasting*, 14, 976–993.
- Jorgensen, D. P., and B. F. Smull, 1993: Mesovortex circulations seen by airborne Doppler radar within a bow-echo mesoscale convective system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74, 2146–2157.
- Jorgensen, D. P., M. A. LeMone and S. B. Trier, 1997: Structure and evolution of the 22 February 1993 TOGA COARE squall line: Aircraft observations of Precipitation, Circulation, and Surface Energy Fluxes. *J. Atmos. Sci.*, 54, 1961–1985.
- Johns, R. H., and W. D. Hirt, 1987: Derechos: Widespread convectively induced wind-storms. *Wea. Forecasting*, 2, 32–49.
- Lee, W.-C., R. M. Wakimoto, R. E. Carbone. 1992: The evolution and structure of a “bow-echo-microburst” event. Part II: The Bow Echo. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 2211–2225
- Przybylinski, R. W., 1995: The bow echo. Observations, numerical simulations, and severe weather detection methods. *Wea. Forecasting*, 10, 203–218.
- Przybylinski, R. W., and W. J. Gery, 1983: The reliability of the bow echo as an important severe weather signature. Preprints, *13th Conf. on Severe Local Storms*, Tulsa, OK, Amer. Meteor. Soc., 270–273.
- Przybylinski, R. W., and D. M. DeCaire, 1985: Radar signatures associated with the derecho, a type of mesoscale convective system. Preprints, *14th Conf. on Severe Local Storms*, Indianapolis, IN, Amer. Meteor. Soc., 228–231.
- Smull, B. F., and R. A. Houze Jr., 1985: A midlatitude squall line with a trailing region of stratiform rain: Radar and satellite observations. *Mon. Wea. Rev.*, 113, 117–133.
- Smull, B. F., and R. A. Houze Jr., 1987: Rear inflow in squall lines with trailing stratiform precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 2869–2889.
- Trapp, R. J. and M. L. Weisman, 2003: Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: Their genesis and implications. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 2804–2823.
- Weisman, M. L., 1992: The role of convectively generated rearinflow jets in the evolution of long-lived mesoconvective systems. *J. Atmos. Sci.*, 49, 1826–1847.
- Weisman, M. L. and C. Davis, 1998: Mechanisms for the generation of mesoscale vortices within quasi-linear convective systems. *J. Atmos. Sci.*, 55, 2603–2622.
- Weisman, M. L. and R. J. Trapp, 2003: Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part I: Overview and dependence on environmental shear. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 2779–2803.
- Weisman, M. L., J. B. Klemp, and R. Rotunno, 1988: Structure and evolution of numerically simulated squall lines. *J. Atmos. Sci.*, 45, 1990–2013.

Case Study on the Characteristics of Quasi-linear Convective System off the Southern Coast of Taiwan in the 2003 Mei-yu Season

Chih-Hsien Wei¹ Tai-Hwa Hor² Mou-Hsiang Chang³ Wen-Chau Lee⁴

¹ **Department of Applied Physics, Chung Cheng Institute of Technology,
National Defense University**

² **General Education Center, Lunghwa University of Science and Technology**

³ **Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University**

⁴ **Earth Observing Laboratory, National Center for Atmospheric Research**

(Manuscript received 20 January 2006; in final form 22 March 2006)

ABSTRACT

On 7 June 2003, an eastward propagating mesoscale convective systems (MCSs) was captured by the Taiwan Doppler weather radar network after initiating in the northern part of the South China Sea and exhibited the features of quasi-linear convective system (QLCS) that several bowing segments embedded in it. Therefore, it's applicable to compare the characteristics of QLCS in the subtropical ocean area with those of bow echoes in the mid-latitude continental area during spring season.

Preliminary studies show that the vertical wind shear (10 ms^{-1} between surface and 700 hPa) had a similar magnitude as that in tropical area ($\sim 13 \text{ ms}^{-1}$). The radar reflectivity collected by Chiku and Kenting Doppler radars characterized its bend-shaped convective line in the leading edge and widespread stratiform precipitation in the rear area. The system lasted more than 7 hours. Moreover, between the convective rainband and the stratiform cloud, there was a region of weak echo. The maximum Doppler velocity in the rear of convective line went up to 25 and 30 m/s as a rear inflow jet embedded in the stratiform area with features of rear inflow notch. A mesovortex in the cyclonic flow was observed at the northern tip of the convective system and its intensity in vorticity was less than 10^{-3} s^{-1} , which was weaker than the mid-latitude continental case. However, the mesovortex in the anti-cyclonic circulation wasn't well identified in the southern tip of the system.

Key words: Quasi-linear convective system, Rear inflow jet, Rear inflow notch, Mesovortex