

# 台灣北部冬季弓狀回波之個案分析

陳泰然

國立台灣大學大氣科學系

王重傑

私立中國文化大學大氣科學系

周鴻祺

交通部民航局中正航空氣象台

## 摘要

1997年11月26日凌晨，一東北東—西南西走向之冷鋒移經台灣北部外海，其上並形成一颶線系統，隨鋒面緩慢向台灣北部接近。該颶線系統的部份線狀回波，隨後向前凸出而演變為「弓狀回波」(bow echo)，並於清晨在台灣北部登陸。由於弓狀回波在東亞副熱帶地區相當罕見，本文主要使用桃園國際機場之單都卜勒雷達觀測資料，分析探討此個案之環境條件、系統結構、以及隨時間之演變。結果顯示，本弓狀回波個案之發展環境，低對流層具有非常大的垂直風切(在0-3 km達到 $28 \text{ m s}^{-1}$ )，而鋒前之對流可用位能(convective available potential energy; CAPE)則為 $1288 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ，因此不穩定度屬於中等。本個案中，冬季冷鋒不僅扮演將對流組織為線狀之角色，其接近亦提供強垂直風切與不穩定度等適宜弓狀回波發展之環境條件。本形成於副熱帶海洋地區(台灣附近)之個案與北美中緯度大陸地區常見者相較，至少有兩點明顯差異：第一、本個案發生於冬季，而北美者大多出現於暖季；第二、本個案由於移速(約 $16 \text{ m s}^{-1}$ )較北美大多數個案為慢，因此伴有台灣北部至西北部的豪雨發生；而北美者移速大多較快，且災害主要導因於地面具破壞力的直線型強烈陣風而非降水。

本弓狀回波之長度約為60-90 km，生命期約4 h。弓狀回波形成後，沿颶線向東移動。在約0615 LST時，系統通過桃園國際機場並在地面造成達 $18.5 \text{ m s}^{-1}$ 之強西北陣風。單都卜勒雷達觀測顯示，本個案之結構具有許多弓狀回波之典型特徵，包括前方之凸出前緣(apex)、後方回波凹陷區(notch)、中層達 $25 \text{ m s}^{-1}$ 之後向前(rear-to-front)內流(inflow)、以及低層一對氣旋式與反旋式之書夾式渦旋(bookend vortices)。當弓狀回波成熟時，系統前緣之對流上衝流具有向上風切(up-shear)傾斜之結構，而後方內流噴流之高度則上升(在3-4 km達最強)直到非常接近陣風鋒面，其分支始快速下降至地面附近。至於弓狀回波所伴隨的一對書夾式渦旋偶，則持續約2-3 h且在2 km高度最為明顯。

## 一、前言

弓狀回波(bow echo)為具有弓狀前緣突起之雷達降水回波，多由線狀對流的部分演變而來。其生命期約數小時，尺度約20-120 km，並具許多與典型颶線(squall line)相似之特徵，包括傾斜之上、下衝流、低層前方內流、中層後方內流、冷池、陣風鋒面、以及拖曳層狀降水區...等。當對流發展環境具強不穩定度[對流可用位能(CAPE)約 $2000 \text{ J kg}^{-1}$ ]與強低層垂直風切(約 $\geq 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )時，後方內流噴流(rear-inflow jet; RIJ)可非常強並保持高架，直到十分接近陣風鋒面始快速下沉至地面，造成破壞性直線型陣風，亦為其主要的災害(如Pryzbylinski 1995; Weisman 2001)。除了RIJ造成的凸起前緣與後方回波凹洞，弓狀回波的另一獨有特徵，為後方兩側中低層的一對「書夾式」(bookend)渦旋偶，主要乃由扭轉系統上下衝流間的水平渦度而來(Weisman and Davis 1998)。

雖弓狀回波最常見於美國大平原區與中西部的暖季，它們也可在其他地區、冷季、或CAPE較小(約 $\geq 800 \text{ J kg}^{-1}$ )的環境中發展，但相關研究尚十分少見。1997年11月26日凌晨，一東北東—西南西走向

之冷鋒伴隨颶線，由台灣北部外海向台灣緩慢接近。該颶線的部份隨後向前凸出演變為弓狀回波，並以 $16 \text{ m s}^{-1}$ 的速度沿颶線東移，之後於清晨在台灣北部登陸。本文即針對此發生於東亞副熱帶地區之罕見個案，分析探討其環境條件、系統結構、以及隨時間之演變。

## 二、使用資料

本文主要使用桃園國際機場之民航局(CAA)單都卜勒雷達每15或30 min之觀測，包括VMI、PPI、CAPPI及RHI。由於雷達在26日0845 LST以後遭到雷擊，導致電腦當機而停止觀測。為討論環境條件，本文使用日本氣象廳(JMA)各標準層每12 h之天氣圖與板橋探空資料；為分析地面天氣現象與降水，則使用26日桃園國際機場與各地面測站之逐時觀測資料。

## 三、綜觀環境

11月25日1200 UTC(2000 LST)之JMA天氣圖(圖1a)顯示，由北方接近之地面冷鋒，前後溫差約達 $8^{\circ}\text{-}10^{\circ}\text{C}$ ，各層均伴有槽線且隨高度向西傾斜，故

為深厚之斜壓系統。鋒前在 850 與 700 hPa 均有  $15 \text{ m s}^{-1}$  以上之西南低層噴流 (LLJ)，輸送暖濕空氣至鋒區，高層亦有噴流 (ULJ，達  $55 \text{ m s}^{-1}$ ) 接近並在台灣海峽北部附近造成分流。板橋探空之水平風與相當位溫 ( $\theta_e$ ) 高度—時序圖 (圖 1b) 顯示，低層由於 LLJ 在 25 日 1200 UTC 前明顯變得暖濕，中層則略變冷乾，不穩度增大，CAPE 值由 203 增至  $1288 \text{ J kg}^{-1}$  (圖未示)。另一方面，因 LLJ 與 ULJ 的出現，0-3 km 之西南西垂直風切可達  $28 \text{ m s}^{-1}$  (約  $9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )，有利弓狀回波發展。這些條件，實乃由具深厚結構與強斜壓性之冷鋒接近所提供。

#### 四、弓狀回波結構與演變

當地面冷鋒伴隨飈線，於 11 月 26 日凌晨以約  $7 \text{ m s}^{-1}$  的速度逐漸接近台灣時 (圖未示)，其西南端部分回波於 0400 LST 開始在海峽北部逐漸向前凸出，並演變為弓狀回波 "A"，以  $16 \text{ m s}^{-1}$  的速度東移。0500 LST 時，弓狀回波長度約 80 km，主對流移至雷達站西北西方約 48 km 處，最大回波 VMI 在 50 dBZ 以上，並具前緣凸起與後方凹洞等特徵 (圖 2a)。2-km 徑向風 CAPPI 顯示最大負中心 (接近雷達) 為後方內流之位置，回波後方兩側則有相對正中心 (遠離雷達)，故顯示有一對書夾式渦旋出現。0530 LST 時弓狀回波距雷達僅約 18 km (圖 2b)，此時 RIJ 亦達最強的  $25 \text{ m s}^{-1}$ ，顯示系統已成熟，書夾式渦旋偶亦仍明顯。弓狀回波約在 0600 LST 登陸台灣北部，其前緣在 0800 LST 時由東北部出海，隨後減弱消失 (圖未示)。因此，本個案長度約 60-90 km，生命期約 4.5 h。

沿圖 2 中虛線之回波與徑向風 RHI 示於圖 3。0500 LST 時， $>30 \text{ dBZ}$  回波達 12 km 以上，主對流線後方並有顯著的層狀降水區，在融解層 (約 4.7 km) 的附近與下方，其強度可達 20 dBZ (圖 3a)。在徑向風 RHI 圖中，由於此期間系統約為移向雷達，徑向風小於  $16 \text{ m s}^{-1}$  (灰色) 者，相對於系統可視為後向前、大於  $16 \text{ m s}^{-1}$  者則為前向後。因此，0500 LST 時，圖 3b 中可見系統低層具前方內流，主對流線伴隨略向後傾之上衝流，高層前方則為外流；後方內流噴流最強約在 4.5 km 處，屬高架形式，由後向前至接近上衝流處始下沉，並與前方內流造成強烈低層輻合。稍後在 0530 LST 時，層狀降水區進一步發展，並達 30 dBZ 以上 (圖 3c)；上衝流此時向上快速向後傾斜，RIJ 增強且較地面處明顯為強，近地層 (於冷池後側) 並出現相對系統的前向後外流 (圖 3d)。此時在上下衝流的交界面，約 4 km 高度處，系統所引發的水平渦度 (如紅色所示) 估計在  $7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  以上，即與環境低層風切相近，故系統得以維持近似平衡 (Rotunno et al. 1988)。

#### 五、地面天氣現象與降水

弓狀回波在 0600 LST 登陸後至 1400 LST 之累積雨量分佈 (圖 4a) 顯示降水主要集中於台灣西北部沿岸並向內陸減少，故弓狀回波在登陸後有所減弱。此

8 h 之累積雨量最大處 (91 mm) 位於淡水，亦為回波前緣凸起之登陸處，其他西北沿岸多處測站亦在 50 mm 以上，即已達氣象局之豪雨標準。由於本個案移速較多數北美個案為慢，應為累積雨量較大之主因，而移速快之北美個案所伴 RIJ 亦強 (可達  $40 \text{ m s}^{-1}$ )，故災害主要為地面強陣風而非如本個案之豪雨。

本個案所伴之地面陣風鋒面約在 0600 LST 通過桃園國際機場，當日之逐時觀測示於圖 4b。通過後出現達  $18.5 \text{ m s}^{-1}$  之強陣風，並伴隨溫度突降約 5 K、氣壓突升約 4 hPa，隨後並出現強度約  $12 \text{ mm h}^{-1}$  之對流性降水。

#### 六、結論

1997 年 11 月 26 日清晨出現之罕見弓狀回波個案，其環境具中等不穩度 ( $\text{CAPE} = 1288 \text{ J kg}^{-1}$ ) 且低層具極強之垂直風切 (約  $9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )。本個案中深厚且強斜壓性之冬季冷鋒，不僅組織對流，其接近亦提供強垂直風切與不穩度等有利之發展條件。本形成於副熱帶之個案，與北美中緯度大陸常見者相較，第一點明顯差異為本個案發生於冬季而後者多在暖季，第二點差異則是本個案因移速較慢故登陸後伴有豪雨；而北美者因移速快，主要災害為地面直線型強陣風。

本弓狀回波尺度約 60-90 km，生命期約 4.5 h，形成後沿飈線向東移動，移速約  $16 \text{ m s}^{-1}$ 。雷達觀測顯示其結構具許多弓狀回波之典型特徵，包括凸出前緣、回波凹洞、中層達  $25 \text{ m s}^{-1}$  之後方內流、以及後方兩側低層之書夾式渦旋偶。當弓狀回波成熟時，其前緣之對流上衝流具有向上風切傾斜之結構，而後方內流噴流則為高架式，直到非常接近陣風鋒面，其分支始快速下降至地面附近。

#### 參考文獻

- Przybylinski, R. W., 1995: The bow echo: Observations, numerical simulations, and severe weather detection methods. *Wea. Forecasting*, **10**, 203-218.
- Rotunno, R., J. B. Klemp, and M. L. Weisman, 1988: A theory for strong, long-lived squall line. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 463-485.
- Weisman, M. L., 2001: Bow echoes: A tribute to T. T. Fujita. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 97-116.
- Weisman, M. L., and C. A. Davis, 1998: Mechanisms for the generation of mesoscale vortices within quasi-linear convective systems. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 2603-2622.

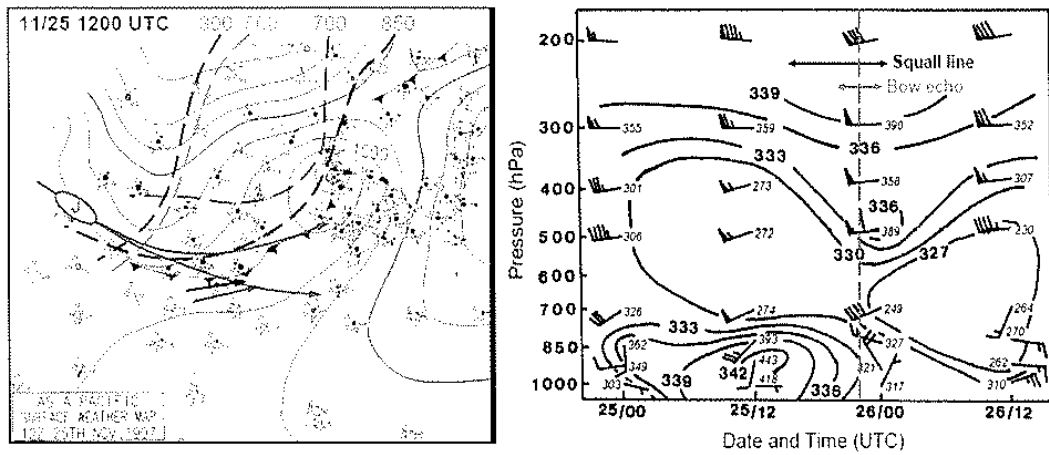


圖 1 (a) 1997 年 11 月 25 日 1200 UTC 之 JMA 地面天氣圖，各層槽線、低層噴流 ( $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ )、200 hPa 噴流心與氣流方向亦示於圖中。(b) 板橋探空所得 25 日 0000 UTC 至 26 日 1200 UTC 高空風 (kts) 與相當位溫 ( $\theta$ ) 之高度-時序圖。圖中數字取至小數下一位並略去百位數與小數點，虛線為弓狀回波登陸時間。

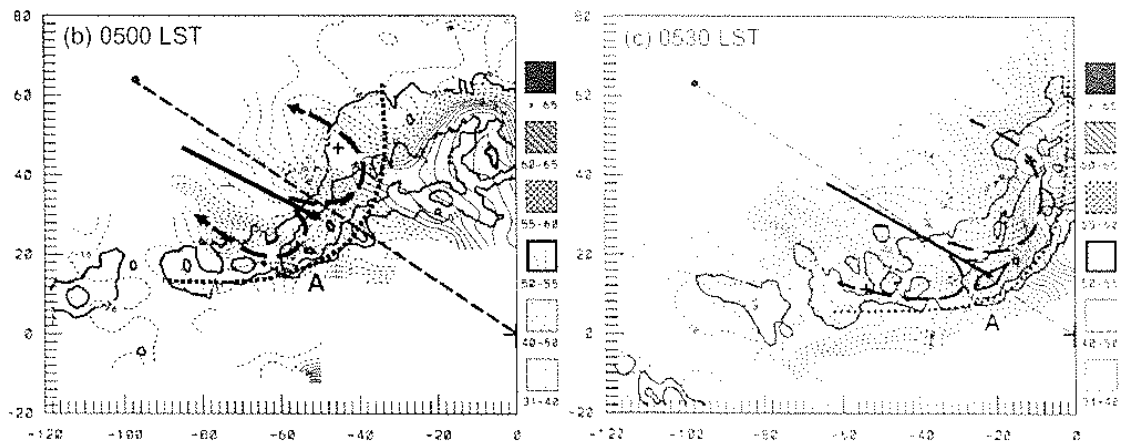


圖 2 1997 年 11 月 26 日 (a) 0500 與 (b) 0530 LST 之 CAA 雷達回波 VMI (dBZ) 與 2-km 徑向風 CAPPI ( $\text{m s}^{-1}$ )。粗點線為弓狀回波前緣，矢線表系統相對氣流。

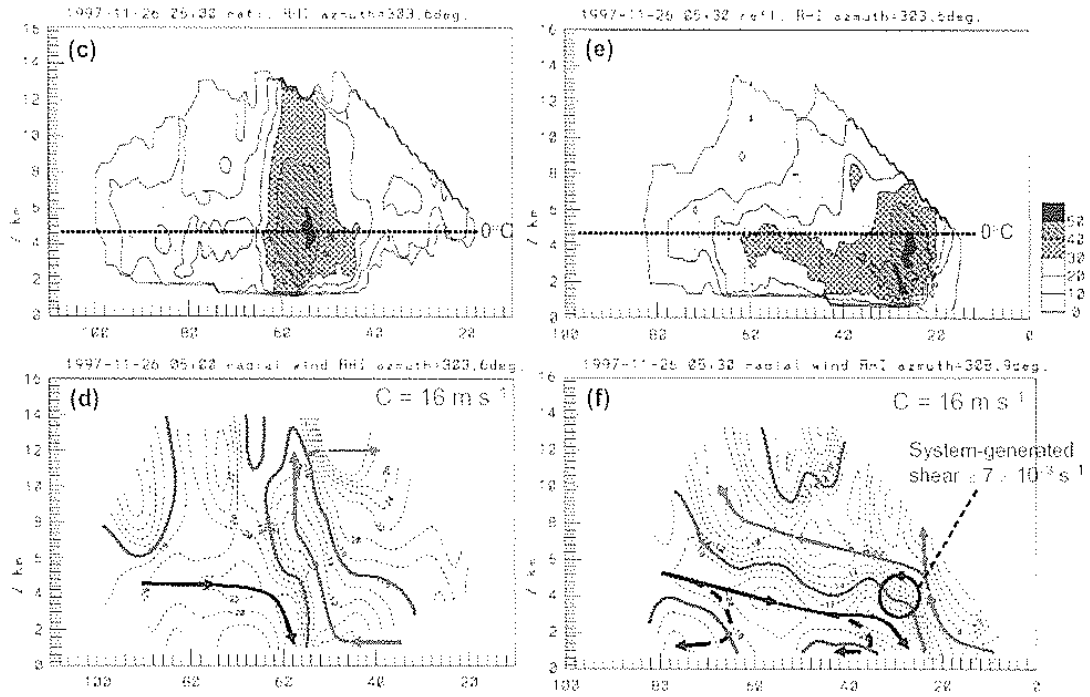


圖 3 1997年11月26日0500 LST沿圖2a虛線之 (a) 回波 (dBZ) 與 (b) 徑向風 ( $m s^{-1}$ ) 之RHI。(c),(d) 同 (a),(b) 但為0530 LST且沿圖2b虛線。

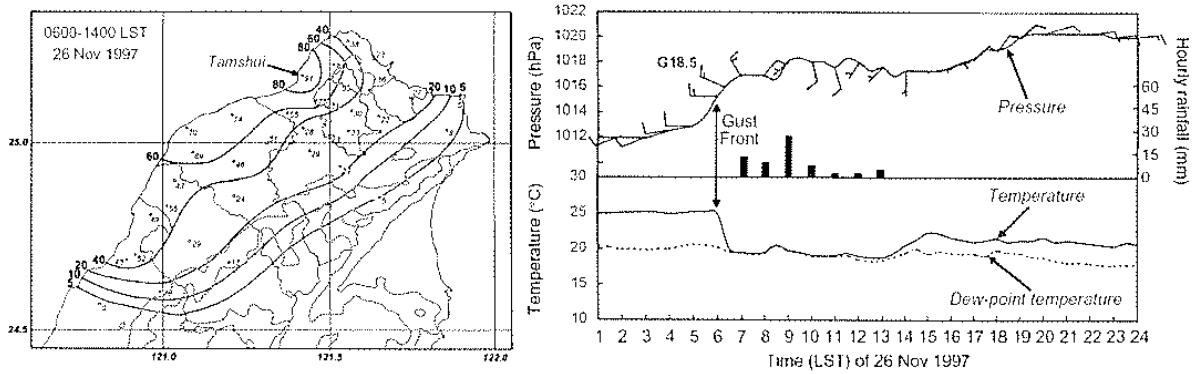


圖 4 1997年11月26日 (a) 0600-1400 LST之累積雨量 (mm) 分佈與 (b) 桃園機場之地面逐時觀測，上為氣壓 (hPa) 與降水 (mm)、下為溫度與露點 ( $^{\circ}C$ )。