

梅雨季台灣南部海域中尺度對流系統之個案研究

陸華白¹ 何台華² 朱昌敏³

¹空軍氣象聯隊 ²龍華科技大學 ³南榮技術學院

摘 要

2003 年 6 月 7 日伴隨梅雨鋒面的移動在台灣南部海域引發顯著的中尺度降水現象。自 0000 UTC 開始，墾丁雷達首先觀測到數個零星的對流胞發展且逐漸形成線狀系統。在線狀系統形成後，回波逐漸呈現彎曲的型態。隨著時間的發展，該回波更進一步形成波型線狀回波 (Line Echo Wave Pattern, LEWP)。在整個降水過程中，共觀測到三個波型回波。整個降水系統持續超過六小時以上且生命期波型回波最長的達四小時。

觀測資料發現三個波型回波類似美國地區常發生的弓狀回波，使用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式進行對尺度 20~100 km 的三個波型回波進行模擬研究，模擬結果的顯示出與弓狀回波有不同特徵：(1)扣除系統移速後，於 2 km 定高面上波型回波的北側有逆時針渦旋出現，但南側卻無順時針渦旋。(2) 0-4 km 之水平風速差平均為 11 ms^{-1} ，也較中緯度伴隨弓狀回波之上下層風速差小。(3)在這些波型回波的垂直結構上，系統後方高空有出現相對較乾冷的空氣。該氣流從 3-5 km 高度向系統前方移動並通過降水區下沉接近地面。然而，卻沒有出現由前往後的氣流(Front to Rear Flow)。波型回波北側之渦旋強度大約為 10^{-3} s^{-1} ，較中緯度地區伴隨弓狀回波的渦度小。(4)整體而言，個案模擬的特徵與中緯度地區典型的弓狀回波(Bow Echo)或飆線結構不同。

關鍵字：波型線狀回波、弓狀回波

一、前言

中尺度對流系統(Mesoscale Convective System, MCS)包含多種天氣現象，例如：雷暴、暴雨、冰雹、大風等。依據 Orlandi (1975) 尺度的區分，有 α 尺度的中尺度對流複合體 (Mesoscale Convective Complex, MCC)， β 尺度的飆線(Squall Line)、海陸風環流(Sea-Land Breeze)， γ 尺度的龍捲風(Tornado)等，均為中尺度對流系統中常發生的天氣現象。其中天氣現象為 α 尺度的 MCC 在台灣比較不常見，較常出現的多是介於 β 及 γ 尺度的天氣現象。弓狀回波(Bow Echo)的天氣現象是介於 β 及 γ 尺度的天氣現象之一，在台灣地區不常被觀測到，但在美國地區經常被觀測到。此現象最早是由 Fujita (1979)所提出的(如圖 1 所示)。它會出現於線狀或多胞對流的天氣系統中，主要特徵為雷達降水回波圖中呈現弓狀，進而不對稱性的發展成逗點狀。此類天氣現象大多發生於春夏兩季的美國中部及東部地區。在系統發展形成前，由

強烈的下暴氣流(Downburst)引發弓狀回波，待發展成熟後再變成逗點狀回波。在系統移行的前緣且靠近地面之處可產生 40 ms^{-1} 以上的強風，進而在弓形前緣會伴隨有龍捲風的生成，造成地面不小的災害。

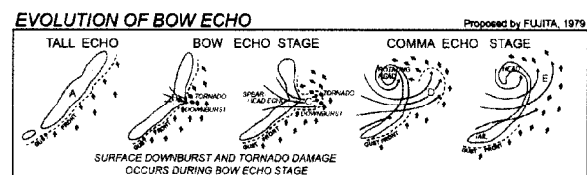


圖 1：Fujita (1979)針對強而大的下衝氣流在雷達回波圖上的演變形式，弓狀回波為圖中生命期 B 至 C 的現象，其後再轉變成逗點狀。圖中實線雷達回波範圍內深色陰影區域。

在台灣地區伴隨弓狀回波的天氣現象不常受到探討，主要原因是這種天氣現象不容易被儀器觀測到。在災害統計上，也沒有這類天氣的報導。相對於飆線系統，過去以來一直有相當多的研究。飆線非但與弓狀回波有著類似的結構特徵，同時也是台灣地區

梅雨季常見的一種劇烈天氣現象。飈線這個名詞，在上一個世紀就已提出，其定義也經過多次沿革。在 1950 年代，美國氣象學會 (American Meteorology Society) 在氣象字彙 (Glossary of Meteorology) 中，即定義飈線為與鋒面不相關的線狀，或呈現狹窄帶狀的中尺度強對流系統。1980 年代，則定義為線狀的中尺度對流系統。在過去幾十年的研究中，對飈線的結構特徵有了相當多的瞭解。例如：Smull (1985) 觀測到飈線內部結構，主要為由前向後的氣流 (Front to Rear Flow) 及由後往前的氣流 (Rear to Front Flow)。由前向後的氣流從低層前緣流入，提供前區的暖濕空氣進入對流降水區，並將對流區頂層的冰晶粒子帶到系統後方再透過冰相微物理過程轉換成廣大的層狀雲區。由後往前的氣流則從系統後方中高層流入，將中高層較乾冷的空氣帶入飈線系統前緣低層，加強低層的蒸發冷卻作用。這種情形有利於地面冷池 (Cold Pool) 的維持，也是讓系統能夠持續發展的因素之一。

在 Nolen (1959) 針對雷達回波定義了「波型線狀回波」 (Line Echo Wave Pattern, LEWP) 後，Fujita (1981) 才依型態學對雷達回波圖案正式定義了弓狀回波的概念模式。其後，才有更多弓狀回波的各種特徵研究。Fujita 提出弓狀回波應有由系統後方往前的內流噴流 (Rear Inflow Jet, RIJ) 致使雷達回波變成弓狀。Jorgensen and Smull (1990) 利用飛機觀測到這種現象。在弓狀回波的南北兩側，分別有北側氣旋式與南側反氣旋式渦旋產生。北側渦旋會逐漸發展形成中尺度渦旋，但南側則會逐漸減弱。此外，弓狀回波也有一些其它特徵，例如：在弓狀回波的後方有「弱回波凹區」 (Weak Echo Notch)，是由後往前之內流噴流所造成的。另魏等 (2006) 針對本個案利用單都卜勒雷達資料做了特性分析。他們發現熱帶地區適於波型系統發展的環境 CAPE 較低，內流噴流速度為 25 至 30 ms^{-1} ，與夏威夷附近海域觀測到的個案相似。相對渦度的數量級約為 10^{-3} s^{-1} ，略低於中緯度同類型渦旋。

本研究針對 2003 年 6 月 7 日發生在台灣南部海域伴隨梅雨鋒附近產生之中尺度對

流降水系統進行生成機制的探討。此對流系統於鋒面附近不斷生成，影響台灣南部地區且系統生命期超過六小時以上。當日 0000 UTC 在屏東縣西方海域產生的中尺度對流降水系統於發展成熟後，在台灣南部陸地區域造成大量降水。透過墾丁與七股雷達觀測資料，顯示在整個中尺度對流系統中，有類似飈線特性的線狀回波在台灣西南部海域產生，且逐漸形成類似弓狀回波的波型回波形式。由於弓狀回波在結構上與飈線相似，同樣在近地面會產生較大的強風，可能會影響飛航安全，故使用具高解析度網格資料及模擬能力的 WRF 模式，希望能夠在台灣南部海域觀測資料不足的情況下，試圖了解產生的波形回波與美國地區弓狀回波是否有所不同。

二、觀測資料分析

由 6 月 7 日 0000 UTC 地面天氣圖來看 (如圖 2 所示)，地面滯留鋒面由台灣東部外海經台灣中部地區，向西南延伸至海南島一帶。台灣地區位於滯留的梅雨鋒面帶上。由於梅雨鋒面移動緩慢，故全台大部分地區均受其影響。

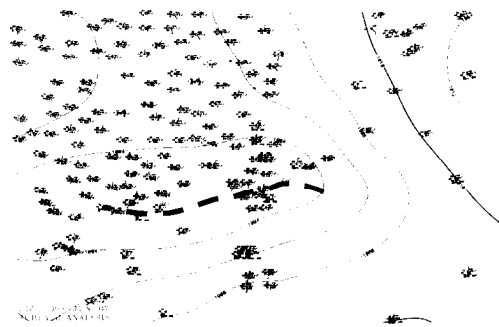


圖 2：中央氣象局 2003 年 6 月 7 日 0000 UTC 之地面天氣圖。

從 925 及 850 hPa 高空天氣圖來看 (如圖 3 所示)，梅雨鋒面低壓中心位於大陸福建外海。海南島附近有暖區，鋒面南緣有很明顯的低層噴流 (10 至 15 ms^{-1})。由於低層噴流具有傳送南方較溫暖潮濕水汽的能力，有利於組織性對流的發展。由 925 (圖 3) 及 850 (圖略) hPa 天氣圖可以看到屏東測站具有西偏北的風系。這在整個低層噴流中，具有很不一樣的風向，且探空資料亦顯示 0-4 km 有風速切變。在 700 及 500 hPa (圖略)

天氣圖上可以看到台灣西部有短槽存在，位置與低層風切帶相同，顯示台灣地區正位於對流系統發展的區域。

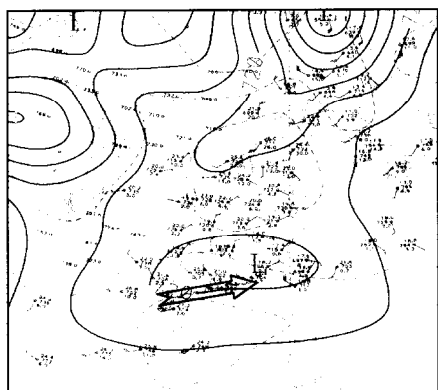


圖 3：2003 年 6 月 7 日 0000 UTC 925 hPa 0000 UTC 高空天氣圖，斜條紋及橫條紋箭頭所指為低層噴流之方向，圓圈處為屏東測站探空資料，虛線為等溫度線，粗點線為鋒面位置，W 表溫度暖區。

由墾丁雷達回波圖分析，0011 UTC 時回波場尚只是數個零星對流胞獨自發展，於圖 4 顯示 0131 UTC 墾丁雷達降水回波場已形成弓形的波形回波 B，而此時北側區域也有另一尺度較小的波型回波 A 逐漸生成(圖未示)。

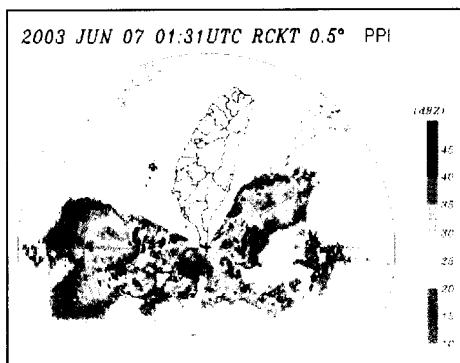


圖 4：由 2003 年 6 月 7 日墾丁雷達仰角 0.5 度降水回波圖，紅色階為 40 dBZ 以上，表示強對流胞，此時回波由線狀轉變成波型。0051 UTC 後對流逐漸增強成線狀對流結構。

持續到 0243 UTC 回波彎曲的更加明顯，但由於受雷達掃瞄策略影響，波型回波北側無法看到是否有逆時針旋轉的趨勢。其後，回波逐漸接近台灣南部，並於 0307 UTC 時變成逗點狀回波且逐漸靠近墾丁測站。在 0345 UTC 到 0400 UTC 之間，波型回波通過

墾丁測站，通過後逐漸減弱，0507 UTC 回波圖顯示，波型回波逐漸有消散減弱的趨勢，但南緣逐漸發展增強，其後再形成另一個波型回波。整體來看，從 0051 UTC 線狀對流形成，漸變成波型回波並通過台灣陸地區域。之後，北緣波型回波 B 逐漸減弱，南緣仍持續發展再形成另一波型回波 C，整個系統有近六小時以上的長生命期。

三、研究結果與結論

由 WRF 模式模擬出來水平解析度 3 km 網格的結果，首先在波型前緣出現了高約 $2000 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 以上的對流可用位能，達到 Weisman (1993)針對中緯度地區產生長生命期弓狀回波理想性模擬結果的低標。在典型弓狀回波南北兩側，可形成線尾式渦旋偶，其中北側逆時針渦旋會逐漸發展成中尺度渦旋，南側順時針渦旋通常較快減弱。圖 5 雷達回波模擬場顯示模式解析出個案雷達觀測的回波 A 及 B 後續亦於 B 南側出現回波 C。由模擬的波型回波北側，可看到如同弓狀回波相同的逆時針氣旋式渦旋，不過南側並未出現順時針渦旋，僅有負渦度產生。

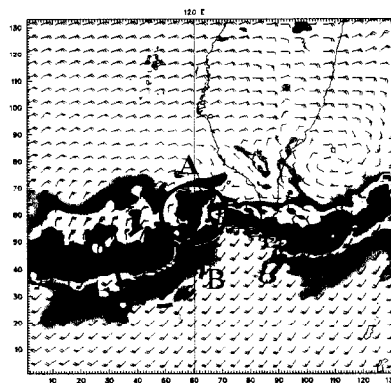


圖 5：2003 6/6 23:30 UTC(11.5 hour)2km 高度雷達回波模擬及相對系統移速風場圖

在環境垂直風速變化上，由魏等(2006)針對本個案運用墾丁及七股雙都卜勒雷達計算三維風場，得到垂直方向風速差平均為 10 ms^{-1} 。由模式結果統計表 1 回波 B 在

表 1 模式 0-4 km 垂直方向風速差列表

時間(小時)	11	12	13	14	15	16
風速差(ms^{-1})	13	10	10	11	9	15

地面至 4 km 高度的垂直風速差平均約 11 ms^{-1} ，觀測與模擬兩者結果相近。然而根據 Weisman (1993) 的模擬結果，產生弓狀回波所需要的對流可用位能與風速差的組合，匹配本個案的對流可用位能需要要有 20 ms^{-1} 以上的風速差才能形成弓狀回波，顯示出與典型弓狀回波確有所不同。

由圖 6 顯示，模式執行 13 小時後，回波 B 波型頂端移動方向剖面看其垂直結構，剖面圖為相對系統移速 11.9 ms^{-1} 的風場向量分布，自系統後方 3 至 5 km 高度有內流 (Inflow) 接近系統並在系統後方 60 km 附近逐漸下降。達於低層後，再分別產生向後遠離系統及向前進入系統前緣的結構，此與颶線及弓狀回波類似。但在強度上，後方內流及系統前緣附近對流尺度的下降氣流 (Downdraft) 則相對較中緯度地區的弓狀回波弱，另外系統並沒有類似颶線內部有由前向後的氣流 (Front to Rear Flow) 存在，整個系統後緣均是西風，此與颶線及弓狀回波剖面結構均不相同。

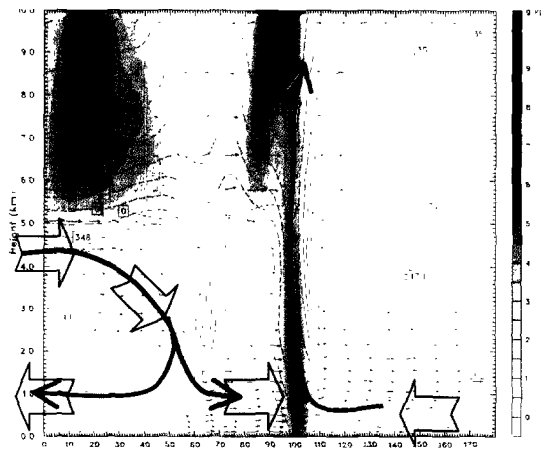


圖 6：2003/6/7 模式第 13 小時輸出回波 B 波型頂端移動方向剖面圖，圖中相當位溫 (虛線)、相對系統移速風場 (箭頭指向)、 0°C (5 km 高度附近點線) 位置及雨水混合比 (漸層色階)。

其次，在回波 B 北側渦旋的最大渦旋強度隨時間變化情形，最大渦度約分布高度為 2.5 km。波型結構形成初期渦度高達 $400 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，形成後強度略減並穩定維持在 250 至 $400 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 之間。在模擬 16 小時後，回波逐漸減弱，此時最大渦度下降至低層。在模擬第

13.5 至 14.5 小時間，渦度並未隨高度降低，但仍減弱至 $250 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，此時渦旋正通過台灣，故研判應是受地形影響使強度減弱所致。整個時間序列上渦度的強度，比起 Lee et al. (1992) 觀測發生於美國科羅拉多州個案 (渦度強度為 $500 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) 相對較弱。另外，Weisman and Trapp (2003) 利用數值模式模擬得到最大渦度為 $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，與本個案模擬結果高出很多，故北側渦旋渦度的結果也顯示出與中緯度典型弓狀回波的不同。

四、結論及展望

本研究使用 WRF 模式，針對 2003 年 6 月 7 日梅雨季期間，受鋒面影響出現三個波型回波的天氣系統，透過模式模擬結果，可以歸納以下結論：

- 可以模擬出相似實際雷達回波的三個波型回波。
- 波型前緣有高於 $2000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 的對流可用位能，符合 Weisman (1993) 針對弓狀回波理想性模擬的最低標準。
- 0~4 km 高度上水平風速平均差為 10 ms^{-1} ，遠小於中緯度地區所觀測到弓狀回波的風速差 ($> 20 \text{ ms}^{-1}$)。
- 模擬的波型回波，中層有由後往前的氣流，但沒有由前往後的氣流出現，不同於中緯度地區弓狀回波及颶線的結構，應屬於 Nolen (1959) 所定義「波型線狀回波」。
- 在渦度分析上，回波所產生的最大渦度，數量級與美國地區弓狀回波個案強度較低。

此結果顯示個案出現的三個波型回波與典型的弓狀回波不同，故在產生的機制上亦會將有所不同。由本個案模擬結果顯示，WRF 模式對個案 36 小時內模擬有相當精確的表現，個案中尺度 20 km 的回波 A 及大於 100 km 的回波 B，可以在利用 3 km 解析度的網格，成功模擬出現，由於本研究針對的各項模式測試，僅為單純個案，未來希望能夠針對不同季節找出最佳物理參數，提供最佳預報參數，進一步提高模式預報的準確度，希望未來能為空軍發展數值模式，提供有價值的參考方向。

五、參考文獻

- 魏志憲、何台華、張茂興、李文兆，2006：
“梅雨季台灣南部近海準線狀對流系統
的特性分析”，大氣科學，34 期，第二
號，157-176 頁。
- Atkins, N. T., Arnott, J. M., Przybylinski, R.
W., Wolf, R. A. and Ketcham, B. D., 2004:
“Vortex Structure and Evolution within
Bow Echoes. Part I : Single-Doppler and
Damage Analysis of the 29 June 1998
Derecho,” *Monthly Weather Review*, Vol.
132, pp. 2224-2242.
- Businger, S. T. Birchard Jr. K. Kodama, P. A.
Jendrowski, and Wang, J. J., 1998: “A
bow echo and severe weather associated
with a Kona Low in Hawaii,” *Wea.
Forecasting*, Vol. 13, pp. 576-591.
- Fujita, T. T., 1979: “Objective, operation, and
results of Project NIMROD. Preprints,
11th Conf. on Serve Local Storms, Kansas
City, MO, Amer. Meteor. Soc., 259-266.
- Fujita, T. T., 1981: “Tornadoes and Downbursts
in the Context of Generalized Planetary
Scales,” *J. Atmos. Sci.*, Vol. 38, pp.
1511-1534.
- Jorgensen, D. P., LeMone, M. A., and Trier, S.
B., 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.*, Vol. 54, pp. 1961-1985.
- Lee, W. C., Carbon , R. E., and Wakimoto, R.
M., 1992: “The evolution and structure of
a ‘bow-echo-microburst’ event. Part II:
The bow echo,” *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 120,
pp. 2211-2225.
- Nolen, R. H., 1959: “A Radar Pattern Associated with
Tornadoes,” *Bull. Amer. Meteor. Soc.*,
Vol.40, pp.277-279.
- Orlanski, I., 1975: “A rational subdivision of
scales for atmospheric processes,” *Bull.
Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 56, No. 5, pp.
527-530.
- Smull, B. F. and Houze, R. A., 1985: “A mid
latitude squall line with a trailing region
of stratiform rain: Radar and satellite
observations,” *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 113,
pp. 117-133.
- Weisman, M.L., 1993: “ The genesis of severe,
long-lived bow echoes,” *J. Atmos. Sci.*,
Vol. 50, pp. 645-670.
- Weisman, M. L. and Trapp, R. J., 2003:
“Low-level mesovortices within squall
lines and bow echoes. Part I: Overview
and dependence on environmental shear,”
Mon. Wea. Rev., Vol. 131, pp. 2779-2803.

A Case Study of Mesoscale Convective System over Southern Taiwan Area during the Mei Yu Season

¹Hua-Pai Lu ²Tai-Hwa Hor ³Chang-Min Chu

¹*Weather Center, Weather Wing, CAF*

²*Longhua University of Science and Technology* ³*Nan Jeon Institute of Technology*

ABSTRACT

A mesoscale convective system induces a heavy rainfall event while propagating to southern Taiwan area on 7 June 2003. The precipitation at Ma-chia station accumulates 379.5 mm rainfall per day, which reaches extremely torrential rainfall level defined by Central Weather Bureau. A line echo organized by several convective cells was observed by Ken-Ting radar since 0000 UTC. The line system bends and evolves into a line-echo wave pattern (LEWP) gradually. In LEWP, there existed three wave-like echoes during the evolution of the system. The longest lifetime of these wave-like echoes is over 4 hours while whole system sustains over 6 hours.

Three LEWPs are similier to bow echo in American. Some characteristics of WRF model simulation are listed as below(1) A cyclonic vortex appears at the northern end of those wave-like echoes from system-relative speed at 2 km level, but it can't find the anti-cyclonic vortex at the southern.(2) The average vertical shear between 0 and 4 km in altitude is $2.75 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, which is also weaker than that in mid latitude environment. Consequently, the characteristics of the simulated case study show that the present wave-like echo is different from the bow echo and a squall line existed in mid latitude.(3) A rear-inflow in the vertical structure of the wave-like echo, which is colder and dryer, propagates from 3 or 5 km level behind the system, and descends to ground inside the convective zone. However, the front to rear flow is absent.(4) Consequently, the characteristics of the simulated case study show that the present wave-like echo is different from the bow echo and a squall line existed in mid latitude.