

台灣地區颱線系統之診斷、監測與預報能力探討

林定宜 陳柏榮

氣象預報中心

中央氣象局

摘要

中尺度對流系統是影響台灣地區重要的天氣過程，而颱線是常受矚目的系統，本研究主要目的是探討近年來較新發展並應用於作業上，有關於診斷、監測與校驗高解析度數值模式預測颱線之短時預報能力。研究之中重要的診斷及監測工具包括：對流分析即時預報系統 (SCAN)，雙偏極化雷達、超解像及數據分析系統(GR2Analyst)，四維風暴對流胞研究系統(FSI ; The Four-dimensional Storm cell Investigator)，自動即時預報系統(Auto-Nowcaster System ; ANC)。而在數值模式對於颱線雨型校驗方面，採用的是「天氣研究預報」(WRF)系列模式以及日本名古屋大學「雲解析風暴模式」(CReSS)進行颱線雨型探討。在個案選擇方面，主要是對近三年發生的16次颱線個案進行研究，落雷及短時降雨強度資料也納入本研究之中。具體的研究途徑包括：襲台颱線類型分析研究，以SCAN、雙偏極化雷達、FSI、GR2Analyst資料進行監測研究、颱線垂直剖面圖之繪製及診斷、颱線附近閃電資料及降雨資料之相關分析、自動即時預報系統個案研究分析，試以找出較具診斷及預報參考價值之氣象因子，並探討目前模式對颱線診斷和短時預報之可行性和限制。

關鍵字：颱線(Squall line)，自動即時預報系統(Auto-Nowcaster System; ANC)，對流分析即時預報系統(SCAN)，四維風暴對流胞研究系統(FSI ; The Four-dimensional Storm cell Investigator)，超解像及數據分析系統(GR2Analyst)，雙偏極化雷達(Dual linear polarization radar)

一、颱線的定義與分類

參考美國氣象學會之氣象字彙(Glossary of Meteorology, AMS 2000)之定義，颱線是由任何線狀對流胞側向排列而形成活躍的狹窄帶狀組織系統，是活躍雷暴帶，生命期較一般單一對流胞長。

Parker and Johnson(2000)依照層狀雲區在颱線的分布位置，將線狀或弧狀的對流類型分為三種：分別是「拖曳層狀型」為 TS 型(Trailing stratiform)、「前弓層狀型」為 LS 型(Leading stratiform)以及「平行層狀型」為 PS 型(Parallel stratiform)。此外，Bluestein 與 Jain(1985)，根據美國奧克拉荷馬州 11 年 40 次颱線歸納出四種類型，分別為斷線型(broken line)後部擴建型(back building)、碎塊型(broken areal)和嵌入型層狀雲區型(embedded areal)。

颱線是一種線狀多胞型(multicell) 風暴，前緣有

發展良好的陣風鋒面，通常沿著冷鋒和乾線的前方形成，能帶來劇烈天氣型態，如：豪(大)雨、強風、大冰雹和密集閃電。

二、生成環境、觸發機制與維持

颱線常發生在具有潛在不穩定、條件不穩定性或絕對不穩定潮濕條件之中，常見於南支槽前、短波槽環境，可提供良好的高層輻散、有組織的對流。而中尺度的地形或機械強迫，熱力強迫，重力波與垂直風切均會造成不穩定。大氣中可以觸發颱線的機制除鋒面以外，海風鋒(sea-breeze front)、海陸風輻合效應(台灣西南部沿海晨間)、乾線(露點鋒)、地形抬升、熱力抬升、低空噴流、弧狀雲線(老的雷暴外流)、中小尺度系統以及大氣對稱不穩定性。環境風切和冷池在颱線和對流雲的發展中扮演重要作用。

颱線易生成的區域是在中緯度的某些大陸地

區和主要的熱帶大陸和熱帶海洋地區。中緯度地區的颱線常發生在春夏之交的季節，常出現在沿著冷鋒和乾線的前方，或氣旋波的暖區，有的在冷鋒後的冷區裏，還有的在冷暖鋒上或風切線或輻合線附近生成。其屬於線狀中尺度對流系統，能帶來劇烈天氣型態，如：豪大雨、強風、大冰雹和密集閃電。臺灣地處副熱帶，春季至梅雨季時常有鋒面前方之中尺度線狀對流，或是MCS前緣的颱線系統從華南移至台灣（圖1），是一種重要的中尺度天氣現象。

有關重要的颱線維持的理論方面，包括Ludlam (1963) 提出強上升氣流向上游傾斜，降水落於上游處，使得系統可以維持本身的環流；Thorpe等 (1982) 提出長生命期的颱線之維持與低層有強的風切關係密切；Rotunno, Klemp, 與 Weisman (1988) 共同提出的低層風切渦度與陣風鋒面(gust front)兩側浮力差異造成之渦度兩者之平衡，亦即RKW理論。

三、資料收集及研究方法

在監測資料方面，包括了傳統監測資料（地面氣象觀測、衛星、探空、氣象雷達如WSR88D等資料），並採用近年氣象預報中心較新而常用之監測工具，如：雙偏極化雷達、即時天氣預報系統(ANC)、SCAN、落雷及短時降雨強度資料。在高解析模式資料分析探討方面，主要是採用WRF系列及日本名古屋大學雲物理(Cress)模式，討論高解析模式之校驗和可預報性。

研究方法還包括：襲台颱線之類型歸納研究、傳統觀測資料、SCAN、WSR系列雷達、雙偏極化雷達(Dual linear polarization radar) 資料之分析、颱線剖面圖製作與解析等，藉以應證颱線理論與實際結構是否相符。另外，本研究亦分析了自動即時預報系統(Auto-Nowcaster System；ANC) 於颱線通過期間較具相關性的物理因子。

此外本研究並針對颱線附近閃電資料及降雨資料進行了分析。所使用的閃電資料來自於台灣電力公司綜合研究所，台灣電力公司因其業務需要，自1989年6月建置了第一套落雷檢測系統(Lightning Location System, LLS)，偵測台灣地區雲對地的落雷資訊。在2002年11月起更新為整合型落雷偵測系統(Total Lightning Detection System, TLDS)，增加了偵測雲中及電間閃電的能力。因此閃電資料可以分

成雲對地閃電(CG)及雲中間閃電(IC)兩種。但在次數統計上使用總閃電，為CG及IC的總和。雨量的資料來源則是由中央氣象局所佈建的自動雨量站觀測所得。

四、研究發現及結論

本研究針對近三年所發生的16次颱線個案進行基本研究，並重點針對其中9次颱線個案進行較詳細的診斷分析，獲得之綜合結果歸納如下：

(一) 颱線以「拖曳層狀型」(TS型)居多。台灣位於副熱帶地區，本研究之16例個案，有來自中緯度區域之颱線，也有來自熱帶地區之颱線，研究發現「拖曳層狀型」(TS型)較「前弓層狀型」(LS型)為多(69%:31%)（圖2）。台灣地區春夏之際大氣中(700hPa)層及低(850hPa至地面)層開始盛行西南季風，中層的西南風有時較強，因此也有約三成的LS型颱線。研究結果常見襲台颱線系統在主要對流區內有許多強對流胞，在前方有上升運動，下降氣流則發生在強對流胞的中間及其後方，並將對流層後部內流(rear inflow)較冷的空氣向下傳輸到低層形成「冷池」(cold pools)，一部份並朝颱線前緣推進形成陣風鋒面，與成熟對流胞之環境邊界層的暖濕空氣相遇產生輻合帶，使新的對流胞在此處生成與發展。此外，研究發現襲台颱線約三成（圖1）是來自華南地區，大氣中低層(500hPa或700hPa)存在短波槽系統。在發生颱線之綜觀環境方面，850hPa等相當位溫(0e)線，其脊軸通常指向台灣（圖3），周圍環境有足夠暖濕空氣供應，並伴隨低層噴流。颱線強度在通過嶺南丘陵時常會減弱(個案2012年5月10和2014年3月29日)，但跨過海峽後接近台灣陸地前又再增強，並可能觸發出颱線。而觀測資料也顯示，襲台颱線多個個案是平行或接近平行於地面冷鋒，當颱線過境時，地面氣象站可觀測到強烈的天氣變化現象，有劇烈降水、快速的風向轉變、強陣風、氣壓走升和氣溫突降等。一般颱線過境時，風向轉變隨高度減小。在850hPa上風的變化已很弱，700hPa上已看不出風的變化。

(二)研究個案顯示，颱風亦可能伴隨颱線（如2014年7月23日MATMO（麥德姆）颱風伴隨的LEWP颱線）。以此個案以自動即時預報系統(Auto-Nowcaster System；ANC)所獲致的初步結果為：

在多種產品中，發現較具有參考價值之氣象物理因子包括：60 分鐘對流初始機率(Initiation Likelihood)、都卜勒雷達變分分析系統(Variational Doppler Radar Analysis System；VDRAS) 之 vdras DBZ、Temperature、Divergence、vdras cape、vdras W Wind、vdras U Wind、vdras V Wind 和 vdras dwmag，上述氣象物理因子經本研究實際驗證結果對颱線結構診斷及預報，是比較適用的產品。

(三)對流分析與即時預報系統(SCAN)、FSI (The Four-dimensional Storm cell Investigator)及雷達超解像及數據分析系統(GR2Analyst)對颱線做診斷、監測是目前較有效率之作業工具，在研究之中發現：

1、以 SCAN CELL Table 與 DMD(Digital Mesocyclone Detection)Table 可以偵測颱線系統中許多對流胞有高值的 mdaSR, posh, poh, hSize, vil, dbz, top, pPos, cgRate, totRate, llDiam, llVr, llShr, llgtg。

2、利用 FSI 系統分析徑向風場 2D 剖面圖，有能力分析出龍捲風母雲影像(圖 4)。

3、應用雷達超解像及數據分析系統(GR2Analyst)可清楚展示出 3D 對流胞，在研究之中並觀察到連結颱線的中尺度對流渦旋(MCV)屬於較淺對流。

4、橫跨颱線剖面圖診斷之解析：

(1)由 2014 年 05 月 15 日 0600UTC WRF_D_5 觀察 ω (-ubar/s)場：成熟階段的颱線在中層以上有 ω 第二高值區(圖 5)，此是由上升空氣帶著低層入流區的動量上升達對流層中上層而致。說明了深對流的發展與大氣中上層的 ω 高值出現有明顯關係。 θ_e (相當位溫)主要特點是：低層颱線後部的比環境溫度低甚多，這說明中層因為從後部有乾空氣流入，由於水滴的蒸發而被冷卻。此個案 500hPa 以上的層次 θ_e 基本是隨高度升高的，850hPa 以下是隨高度顯著降低。

(2)由 2014 年 7 月 23 日 橫越馬公颱線 23 日 1105 UTC 橫跨颱線之 VDRAS dwmag(垂直風切風速量) 2D 垂直剖面及徑向風流線圖，顯示在颱線右側上空有強垂直風切，風速達 18m/s(圖 6)。而在垂直剖面(temperature)可觀察到：低層颱線後部比環境溫度低(冷池現象)，中層因從後部有後部內流(rear inflow)乾空氣流入，加上水滴的蒸發而被冷卻，700hPa 形成冷心現象(圖 7)。而 500hPa 以上的層次 θ_e 值基本隨高度升高，700hPa 以下則是隨高度顯著降低，有強的對流不穩定。

5、利用 SCAN CELL Table 觀察到颱線之許多對流胞同時擁有高的 CAPE 及 SRH(風暴相對螺旋度)值通常 $SRH > 200\text{m}^2/\text{s}^2$ 、EHI 值亦高。SRH、CAPE 及 EHI 對於多數天氣系統可作出簡易而準確的定性判斷。EHI 指數反映了在強對流天氣出現時，對流可用位能(CAPE)與風暴相對螺旋度(SREH)之間的相互平衡特徵。而 EHI 數值越大，強對流天氣的潛在程度越大。根據林 (2012) 之研究，當臺灣北部地區 $EHI \geq 0.75$ 時，即有利於對流風暴發展。而由 2013 年 5 月 16 日個案，可見組成颱線之許多對流胞同時擁有高的 CAPE、SRH 及 EHI 值，所偵測之眾對流胞，計算其 EHI 值分別是 4.6, 3.3, 3.9, 3.1，因此經本研究計算台灣地區颱線系統中之諸多強對流胞基本上 EHI 約達 3.0 以上。

6、由 2014 年 8 月 10 日 2100UTC 個案最大的啟示是，清晨臺灣西南沿岸的陸風與來自熱帶海洋的西南氣流(綜觀環境風)當兩者風的風速等級相當時，交會輻合時亦可形成線狀對流的颱線，在個別的案例中可造成豪(大)雨等級以上之降雨。

7、關於高解析模式之校驗和可預報性：由 WRF 系列定量降水模式與 Cress 雨量預報驗證結果顯示，由 MCS 前緣所造成之颱線雨型較可掌握，一般台灣海峽上初始既有之對流系統降雨也較能持續掌握；但高解析模式目前的限制是，生命期短的獨立的線狀颱線或接近陸地時才被觸發生成之颱線降雨就不容易準確預測掌握。

8、由於颱線造成的天氣災害並危害國民生命財產安全，美、日等國對與颱線之研究起步較早，而國內以往作業上限於觀測和電腦軟硬體條件等，對發生於台灣地區附近颱線的規律並未能完全掌握，仍有諸多問題有待深入研究。例如台灣地區天氣受季風背景條件影響，主要特點是在季風背景條件下之颱線活動，其結構及機理與美國(無明顯季風影響)、歐洲等地不盡相同。因此建議在作業及研究上，一方面需繼續應用大量觀測資料，衛星資料、各種雷達等遙測資料和各種加密觀測資料，對颱線的演變、結構、機理進行深入診斷分析。另一方面，也要利用中尺度高解析模式的資料同化及物理過程，以進一步提高對颱線的預測能力。

9、颱線系統內閃電資料暨與降水資料間關係分析：雖然從雷達回波中，可以看到颱線系統具有強的雷達回波，但從閃電的觀測記錄，發現並非每個個案

都會有頻繁的閃電發生，例如2014年5月15日的個案，其閃電次數就很少。但是透過閃電資料的時序分佈，可看到颶線系統強度趨勢的變化及移動方向等，並且也發現對流系統在接近陸地時，閃電將有較為明顯增加的現象。而從閃電與降水的分析結果，可以發現閃電與降水具有時間上延遲相關的特性(圖8及圖9)，並且不僅是時間上，閃電及降水的區域也具有空間上的偏差，但此部份仍有待更多的個案來做更進一步的研究。

五、參考文獻：

- 王重傑，CReSS 模式簡介，網址：
<http://web.ntnu.edu.tw/~cwang/cress.html#a15>
- 張杰,2006年2月:中小尺度天氣學,氣象出版社，74~85。
- 壽紹文、勵申申、壽亦萱、姚秀萍,2009年2月:普通高等教育“十一五”國家級規劃教材,中尺度氣象學第二版,氣象出版社,北京,83~90。
- Alexander, G. D., J. A. Weinman, V. M. Karyampudi, W. S. Olson, and A. C. Lee, 1999: The effect of assimilating rain rates derived from satellites and lightning on the forecasts of the 1993 superstorm. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 1433–1457.
- Biggerstaff, M.I., and R.A. Houze, Jr., 1991: Kinematic and precipitation structure of the 10-11 June 1985 squall line. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 3034-3065.
- Bluestein, H. B., and M. H. Jain, 1985: Formation of mesoscale lines of precipitation: severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1711-1732.
- DeMaria M., R. T. DeMaria, J. A. Knaff and D. A. Molnar, 2012: Tropical cyclone lighting and rapid intensity change. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 1828-1842.
- Fovell, R. G. and P.-H. Tan, 1998: The temporal behavior of numerically simulated multicell-type storms. Part II: The convective life cycle and cell regeneration. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 551–577.
- Fujita, T. T., 1979: Objectives, operation, and results of Project NIMROD. *Preprints, 11th Conf. on Severe Local Storms*, Kansas City, Amer. Meteor. Soc., 259-266.
- Glossary of Meteorology, Second Edition*, American Meteorological Society (AMS) 2000.
- Houze, R. A. Jr., S. A. Rutledge, M. I. Biggerstaff, and B. F. Smull, 1989: Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **70**, 608-619.
- Lin, Y.-L. and L. E. Joyce, 2001: A further study of the mechanisms of cell regeneration, propagation, and development within two-dimensional multicell storms. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 2957–2988.
- Lilly, D. K., 1979 : The dynamical structure and evolution of thunderstorms and squall lines. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **7**, 117-171. 27.
- Ludlam, F. H., 1963 : Severe local storms: a review. *Meteor. Monogr.*, **5**, Amer. Meteor. Soc., 1-30.
- Markowski, P. And Y. Richardson, 2010: Mesoscale meteorology in midlatitudes. Wiley-Blackwell, 2010. ISBN: 978-0470742136. 430 pp.
- Parker, M.D. and R.H. Johnson, 2000. Organization modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3413–36.
- Ray, P. S., 1986: Mesoscale Meteorology and Forcasting. *American Meteorology Society*, Boston, 793pp.
- Rotunno, J. B. Klemp and M. L. Weisman, 1988 : A theory for strong, long-lived squall lines. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 463-485.
- Robert A. Maddox, 1980: Mesoscale Convective Complexes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **61**, 1374–1387.
- Thorpe, A. J., M. J. Miller and M. W. Moncrieff, 1982 : Two-dimensional convection in non-constant shear: a model of mid-latitude squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 739-762.
- Rui, H. and B. Wang (1990) Development characteristics and dynamic structure of the tropical intraseasonal convective anomalies. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 357-379.
- Schultz, C. J., W. A. Petersen, and L. D. Carey, 2011: Lightning and Severe Weather: A Comparison between Total and Cloud-to-Ground Lightning Trends. *Wea. Forecasting*, **26**, 744-755.
- Tapia, T., Smith, J. A., and Dixon M., 1998: Estimation of Convective Rainfall from Lightning Observations. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 1497-1509.
- Yang, M.J., and R. A. Houze, Jr., 1995: Multicell

squall-line structure as a manifestation of vertically trapped gravity waves. *Mon. Wea. Rev.*, 123.

Weisman, 1993: The genesis of severe, long-lived bow-echoes. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 645–670.

六、附圖：

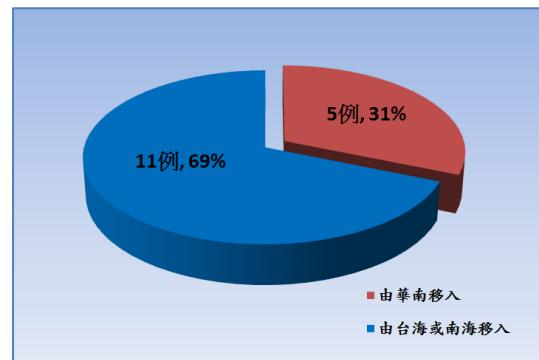


圖 1：襲台颱線發源地個案數及所占比例圖。

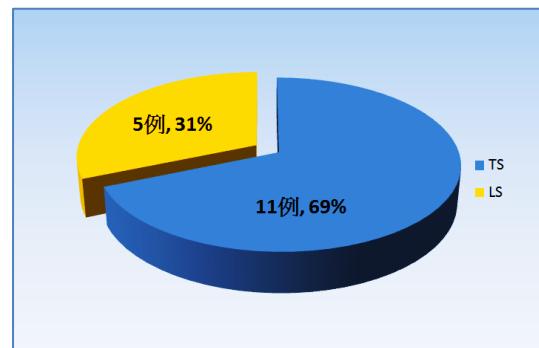


圖 2：襲台颱線之 TS 與 LS 類型個案數及所占比例圖。

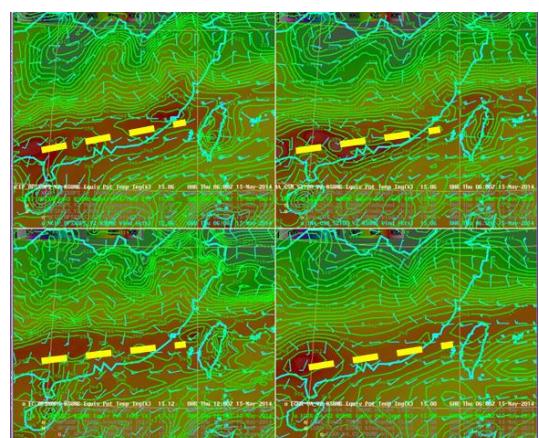


圖3、2014年5月15日 850hPa θ_e 與風場圖。左上是NCEP，右上是JMA，左下是EC，右下是UA。各模式 θ_e 脊軸均指向台灣。

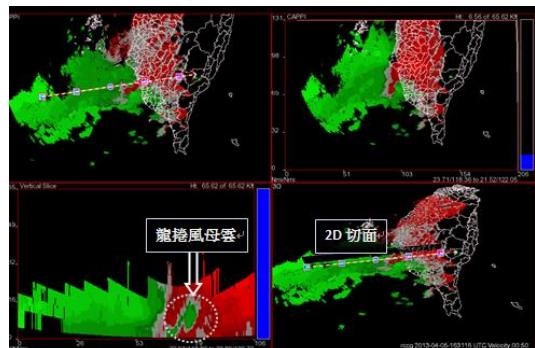


圖 4:20130405.1631UTC 利用FSI系統分析RCCG 徑向風場 2D 剖面圖，分析出罕見的龍捲風母雲影像。

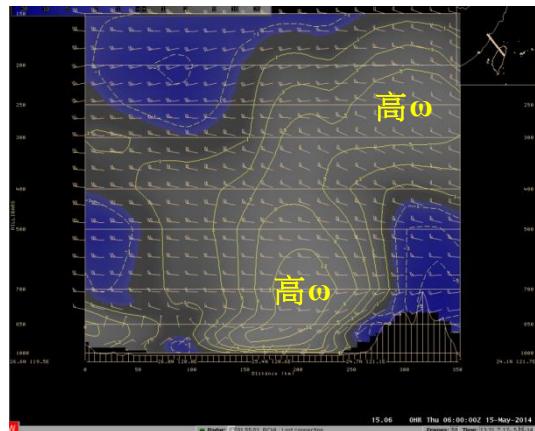


圖 5：2014年05月15日 0600UTC ω (-ubar/s)場：成熟階段的颱線，在中層以上有另一 ω 高值區，診斷分析是由上升空氣帶著低層入流區的動量上升達對流層中上層而致。此說明深對流的發展與大氣中上層的 ω 高值出現有明顯的關係。

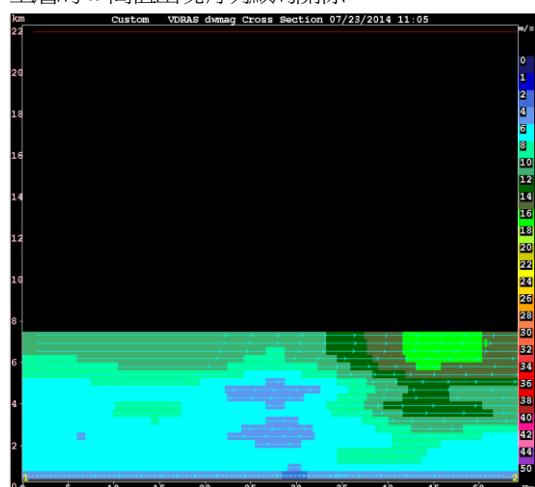


圖 6：2014年7月23日 1105 UTC 橫跨颱線之 VDRAS dwmag(垂直風切風速量) 2D 垂直剖面及徑向風流線圖，顯示在颱線右側上空有強垂直風切，風速達 18m/s。

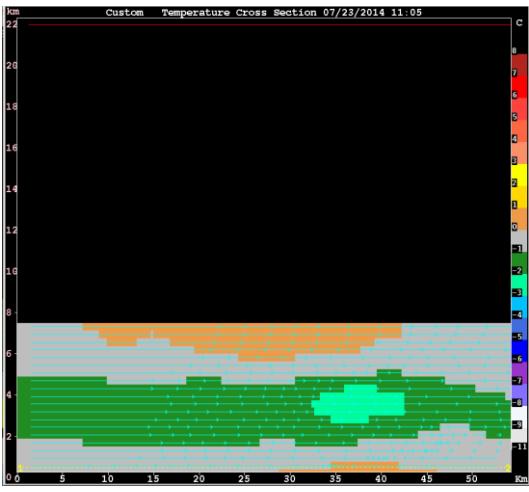


圖 7：2014 年 7 月 23 日 1105 UTC 橫跨颱線之 Temperature 2D 垂直剖面及徑向風流線圖，顯示在颱線 3 至 4km 上空有冷空氣，這是中層的後部內流 (rear inflow)注入冷空氣與下衝氣流(down draft)的例證。

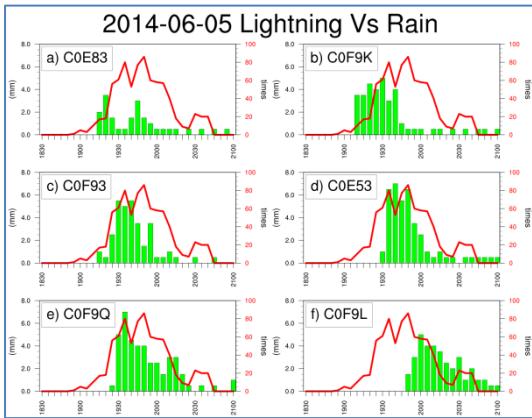


圖 8：各雨量站(綠色柱,左軸)與閃電資料(紅色線,右軸)。C0E83(苑裡)、C0F9K(大安)、C0F93(大甲)、C0E53(三義)、C0F9Q(外埔)及C0F9L(后里)。

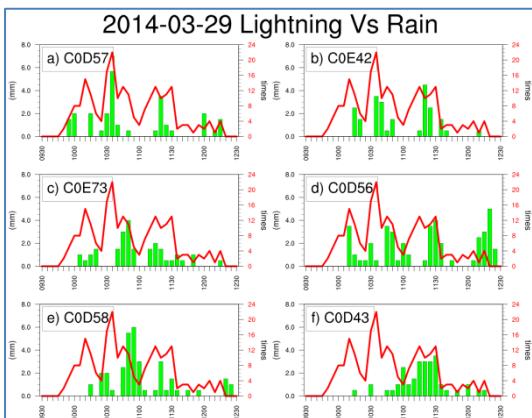


圖9：各雨量站(綠色柱,左軸)與閃電資料(紅色線,右軸)。C0D57(香山)、C0E42(竹南)、C0E73(頭份)、C0D56(竹東)、C0D58(寶山)及 C0D43(峨眉)。