

臺灣春季中尺度對流系統之探討：線狀對流系統為例

趙竑 曾昭誠 王凱群

中央氣象局預報中心

摘要

臺灣暖季時有中尺度對流系統影響，伴隨短時強降雨、冰雹、雷擊、強陣風亦可能出現龍捲風，除了強降水外，下衝流所造成的強陣風亦會產生明顯災害；預報作業雖可利用對流監測平台系統（SCAN）偵測個別對流胞的強度、發展及移動，若欲完全掌握大環境及中尺度對流系統內部結構並藉此判斷系統未來趨勢及影響卻相當困難。本研究以 2019 年 04 月 19 日臺灣海峽線狀對流個案為對象，依照 Fujita 弓形回波之演變歸納成三個階段，蒐集不同觀測（包含衛星、測站觀測及雷達）及模式資料分析此個案三個階段的各變數場特徵及其造成環境場之變化。最後分析 SCAN 內移向、移速及垂直液態水含量參數並進行校驗，希能成為未來線狀對流系統即時預報之參考。

本研究分為二部分，一是使用對流胞位置（由 SCIT 演算法預測）計算每 20 分鐘之方均根誤差；二是分析系統發展過程中，每 8 分鐘的垂直液態水含量（由 SCAN 計算得出）變化。結果顯示，弓狀回波系統於階段轉換時，SCIT 預測之對流胞位置存在明顯誤差。此外，強陣風發生時，伴隨垂直液態水含量（VIL）明顯下降之現象。

一、前言

飈線形成在不穩定的大氣環境下，由帶狀的雷暴群所構成的風向、風速突變的一種中至小尺度強對流天氣現象。中緯度大陸地區、熱帶大陸及熱帶海洋地區是其容易生成的區域。中緯度地區的飈線通常發生於春夏交替的季節，其生成位置大致在中尺度對流系統的下游，亦可能在冷暖鋒上、風切線或輻合線附近。臺灣在春季至梅雨季間，鋒面上亦常有線狀對流系統從華南一帶移至臺灣，其水平尺度特徵，長度約 150~300 公里，寬度 0.5~20 公里，高度約 10 公里，時間尺度一般為 2.5 至 7 個小時，預報較為困難，需藉由即時監測輔助提供預警。

Thorpe (1982) 則認為長生命期的飈線之維持與低層有強的風切關係密切；Weisman (1988) 發現強烈且深厚的環境垂直風切，有利於後方內流噴流的產生，使中層乾空氣得以由後方進入對流帶，形成下衝氣流，形成冷池；Weisman (1992) 研究進一步指出，由冷池前產生的水平渦度及環境垂直風切會和後方內流噴流

所具有的水平渦度平衡，導致系統前緣舉升作用得以維持，冷池前上衝流造成上風切傾斜產生後方內流噴流，亦即對流系統後方的水平浮力梯度使中層空氣從後方進入系統內。

綜合上述研究，飈線系統若要發展成弓狀回波，環境風切、不穩定大氣及環境中層具有乾空氣亦扮演重要作用。若飈線出現弓狀的特徵，將會以極高的速度通過大範圍區域，不會在單點上停留太久；由於結構上是由若干個雷暴單體所組成的，因此所產生的天氣變化可以是非常劇烈。

陳等人(2012)統計臺灣附近弓狀回波個案，發現 1991~2009 年僅有三個，由此可知，弓狀回波特徵的飈線在臺灣地區並不常見且皆由海上移入，但由於海上缺乏測站觀測資料，僅能以雷達、衛星等遙測資料分析對流型態、移動方向及速度，預測並不容易且預警時間短，對臺灣地區威脅極大。2019 年 04 月 19 日清晨，臺灣海峽有飈線系統移入南臺灣，並有弓狀回波的特徵，因此本文欲以此個案為分析對象，利用七股及馬公兩個都卜勒雷達觀測了解其發

展過程中各項雷達參數的變化，並使用 The System for Convection Analysis and Nowcasting (SCAN，詳細請見第三章節)分析結果與實際觀測校驗，以作為未來即時預報技術進步之參考。

二、使用資料

本研究使用的觀測儀器有部署在七股的 S-band 都卜勒雷達、馬公 C-band 雷達，地面自動氣象站、馬公探空觀測。七股掃描範圍大致涵蓋臺灣海峽南部及中南部陸地。雷達掃描策略為水平掃描(PPI)。PPI 掃描仰角有 0.5, 1.4, 2.4, 3.4, 4.3, 6.0, 8.8, 14.6, 19.5 共九個仰角，完成一次體積掃描約占 7.5 分鐘，七股雷達的 Nyquist velocity 為 21.5 m/s；本研究中採用 0.5, 1.4, 2.4 三個仰角統計徑向風強度，資料時間為 2019 年 04 月 19 日清晨 0 點至 5 點，品管過程將資料點徑向風小於 2 m/s、回波值大於 30 dBZ 視為地面雜波濾除，完成後再對徑向風場去摺疊。

綜觀環境分析是使用美國國家環境預測中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的模式資料，其解析度為 0.5 度，並針對主要辨別飆線的大氣參數加以說明。

三、SCAN 系統

中央氣象局在監測劇烈天氣系統，主要是採用美國國家劇烈風暴實驗室(National Severe Storm Laboratory, NSSL)所發展之對流監測平台系統，System for Convection Analysis and Nowcasting (文後簡稱 SCAN)，搭配臺灣氣象雷達資料。SCAN 系統中對於辨識及追蹤對流胞套件為 Storm Cell Identification and Tracking algorithm (SCIT, Johnson et al. 1998)，依此取得對流胞短時外延路徑預報，增加預報員對於劇烈對流未來移動及影響範圍判斷信心度，進而減少發布告警訊息的前置作業時間。

SCAN 系統子套件 SCIT 演算法係利用單雷達觀測，依照一個徑向方向尋找對流胞位置，再擴展至各方位角尋找，最後再以各雷達仰角尋找定義出對流胞位置，最後計算至少有掃描二次以上的所有對流胞的運動方向(由前幾次對流胞位置的線性最小方差計算而得)。在參數上的設計，大致分為對流胞編號、經緯度、冰雹發生機率、垂直液態水含量及對流胞移向移速

等，詳細參數請參照 Guide for Users, Tom et al. 2009。SCAN 系統能有效的追蹤對流演變，但因 SCAN 系統設定未必適合臺灣的複雜地形及環境，在多胞系統時仍存在誤差(蔡, 2011)。本個案利用七股、馬公及清泉崗雷達 SCAN 分析資料，依其經緯度、垂直液態水含量及 SCIT 演算法所得對流胞移向移速進行探討。

四、事件經過及大氣環境概述

(一) 事件經過

本個案出現時間為 2019 年 04 月 19 日清晨 0 點臺灣海峽上觀測到飆線系統，比對實際雷達觀測，發現約 02 時 36 分左右，中層後方內流噴流及下衝流明顯，回波轉為弓狀回波，回波形狀發生變化；03 時 30 分後，弓狀回波轉為逗點狀回波，回波再次發生變化且回波即將接觸到臺灣本島。綜合以上，本文將本個案分成三階段，00 時至 02 時 30 分為強回波階段，02 時 30 分至 03 時 30 分為弓狀回波階段，03 時 30 分至 05 時 00 分為逗點狀階段。

如前言所說，弓狀回波會發生是因為大氣不穩定，容易激發中、小尺度對流系統，這種對流系統對於臺灣地區的影響明顯。本研究將利用當時的地面天氣圖、模式分析圖及探空來分析綜觀環境。

(二) 地面天氣圖及探空圖

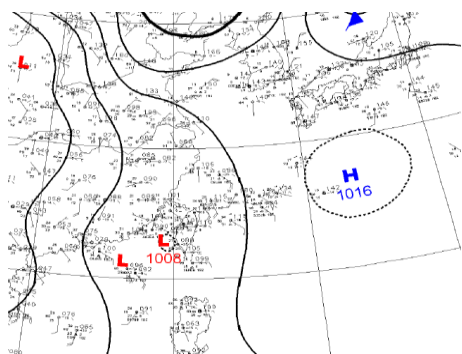
2019 年 04 月 19 日清晨 2 點的地面天氣圖，如圖(1)所示，西南部外海有低壓系統並伴隨較強對流發展，這些在海峽上的對流隨著時間逐漸向臺灣南部地區移動。圖(2)為 2019 年 04 月 18 日晚上 8 點汕頭探空圖，環境為對流不穩定大氣，垂直風標及風徑圖也顯示，垂直上環境風切大，環境風場隨高度順轉，中低層暖平流情況明顯。

(三) 模式層場分析圖

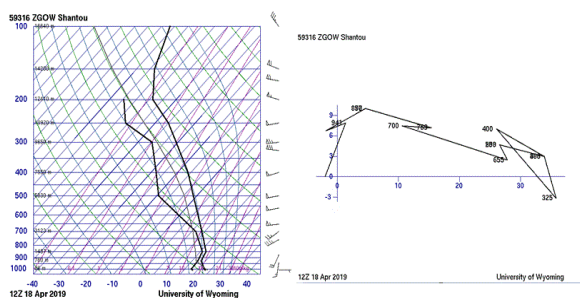
850 百帕的相當位溫及風場，如圖(3)，透過相當位溫及風場，此時臺灣海峽南有明顯的暖濕平流，其軸線大致呈西南至東北走向。代表中低層潮濕，增加垂直上對流不穩定度。200

百帕輻散場，如圖(4)，也顯示當時高空具有良好輻散環境，支持對流系統發展。

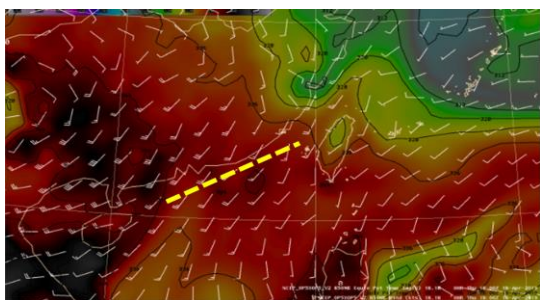
雖然臺灣地區目前的降雨雷達已經有很完整的雷達監測網，但是對於劇烈的飆線系統仍較難預測，因此可以提前預報的時間並不長；所以當有劇烈天氣系統發生時，「即時預報」程序顯得極為重要，利用衛星、雷達等資料即時監測資料，掌握「對流系統」的變化及發展並加以防範，並使用雷達觀測補足海上測站資料的不足。



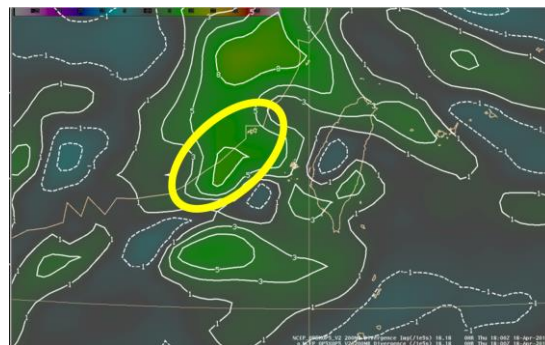
圖(1) 2019年4月19日清晨2點地面天氣圖(資料來源：中央氣象局)。



圖(2) 2019年4月18日晚上8點汕頭探空圖



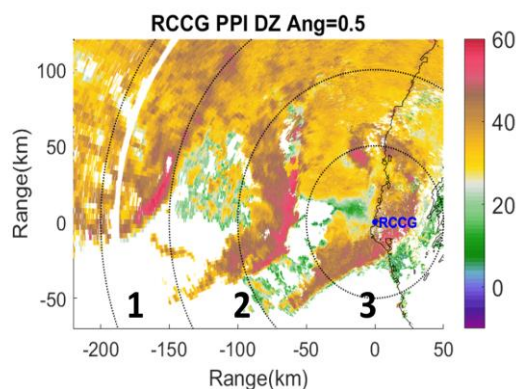
圖(3) 2019年4月19日清晨2點 NCEP 850 百帕風場和相當位溫圖。



圖(4) 2019年4月19日清晨2點 NCEP 200 百帕輻散場圖。

五、結果

依照先前所敘述，將此個案生命分為三階段，為強回波、弓狀回波及逗點狀回波，分別標示為圖(5)中 1、2、3。此期間七股雷達 SCAN 共抓到 402 筆資料，統計起來共有 151 個對流胞資訊；馬公雷達 SCAN 則是抓到 692 筆對流資料，統計起來共 260 個對流胞資料。

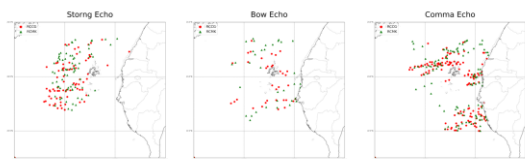


圖(5) 七股雷達低仰角(0.5度)之飆線系統生命期。

由圖(6)為七股及馬公雷達 SCAN 所計算出系統各個生命週期間的對流胞位置，二者比較後發現在弓狀及逗點狀回波期間，馬公雷達 SCAN 對其附近對流掌握度和七股雷達有差距，判斷原因為系統移經馬公雷達附近時，馬公雷達仰角無法完全掃描到當時對流胞回波垂直結構導致，但整體來說二者對流胞位置掌握度大致相似。

校驗 SCIT 演算法，首先資料先扣除僅有一筆的對流胞資料，使用當前時間的對流胞經緯度及其預測移向、移速去預測下一筆時間對流

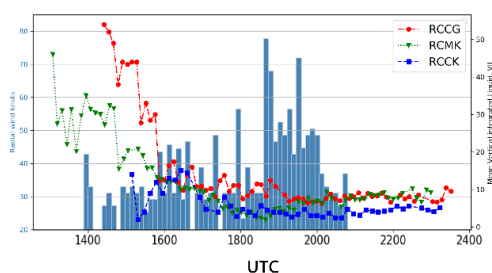
胞位置，再利用預測的位置和新一筆 SCAN 算出來的對流胞位置進行計算。



圖(6) 系統生命期間七股、馬公雷達對流位置圖。

(一) 垂直液態水含量 (Vertically Integrated Liquid Water) 及最大徑向風

垂直液態水含量(後稱 VIL)在 SCAN 中參數為 VIL，如圖(7)，直接利用各時間點去做平均畫出折線圖，陳等人(2011)也利用低仰角雷達徑向速度場，判斷下衝流形成後，其後方內流噴流發展，故將七股雷達低仰角(0.5、1.4、2.4)徑向風每 7.5 分鐘為一區間取出最大值做出長條圖。長條圖顯示，強回波階段時風速逐漸上升，最大值約 45 knots，弓狀回波階段風速最大可達 78 knots，逗點狀回波時，風速逐漸下降，但仍有 40 到 55 knots 的最大風速。由折線圖顯示，VIL 在清晨 00 時開始有明顯下降的情況，徑向風風速也顯示此時開始最大徑向風速逐漸提升，大約 45 knots；在 02 時 00 分左右也有另一 VIL 下降階段，也伴隨著徑向風增強。原因為下衝氣流將水帶往下層，使 VIL 值下降、強風向低層移動，過程中除了降雨外，亦有中層乾空氣進入造成下降氣流速度進一步增強，使線狀回波轉為弓狀回波，由圖中也可發現 VIL 下降的 02 時 00 分左右與此個案弓狀回波特徵出現的時間 02 時 36 分相近。

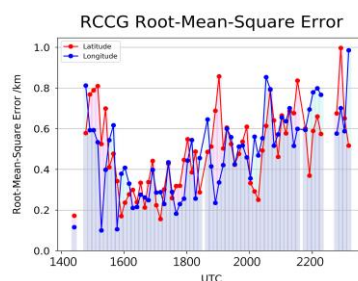


圖(7) RCCG, RCMK, RCCK 分析的 VIL 與 RCCG 最大徑向風時序圖，時間為晚上 10 點至隔日清晨 8 點。

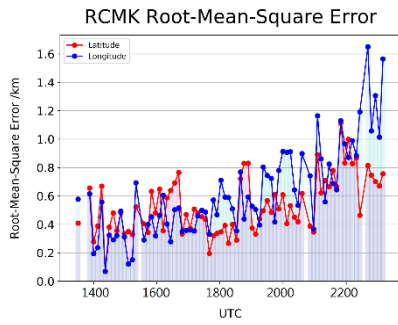
(二) 方均根誤差(Root-Mean-Square Error)

圖(8)及圖(9)分別為七股及馬公雷達所計算方均根誤差時序圖。在強回波生命週期間，結果顯示在馬公及七股 SCAN 表現上無論經緯度方均根誤差皆小於 0.5 公里，此期間利用二者雷達皆能對此颶線有良好的預測；在弓狀回波生命週期間，二者 SCAN 開始方均根誤差逐漸增加，七股經緯度方均根誤差誤差約為 0.6 公里，馬公則約為 0.8 公里，馬公之所以較為明顯，可能來自系統在此時間通過馬公雷達，馬公雷達對於其附近對流胞定位易有偏移，離散程度較大。在逗點狀回波生命週期間，二者方均根誤差最為明顯，皆約 0.8 公里，七股較馬公誤差略高一些，原因跟前述相同，然而二者誤差皆偏大為地形造成結果；馬公資料也顯示經度方均根誤差比緯度方均根誤差大，原因來自於此階段系統其後方西風內流噴流及下衝流強度較強，整體離散程度明顯，依照 SCIT 演算法，外延法及最小平方方法可能無法跟上西風內流及下衝流增強的趨勢。

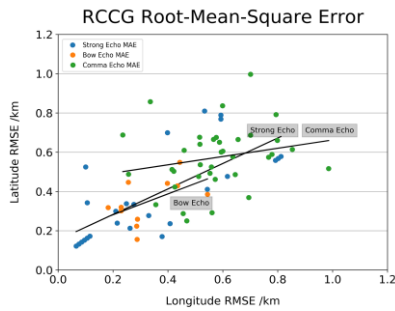
圖(10)及圖(11)為七股 SCAN 及馬公 SCAN 方均根誤差散佈圖，七股雷達 SCAN 顯示，方均根誤差最大，是出現在逗點狀回波階段，亦可以看到在弓狀回波及逗點狀回波期間，緯向方均根誤差較經向方均根誤差大，和其後方西風內流噴流及下衝流強度相關。馬公雷達 SCAN 大致狀況和七股類似。



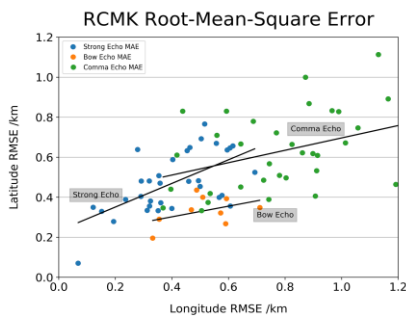
圖(8) 七股雷達經度、緯度 RMSE 時序圖，時間為晚上 10 點至隔日清晨 8 點。



圖(9) 馬公雷達經度、緯度 RMSE 時序圖，時間為晚上 10 點至隔日清晨 8 點。



圖(10) 七股雷達經度、緯度 RMSE 散佈圖。

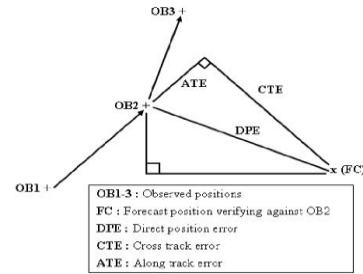


圖(11) 馬公雷達經度、緯度 RMSE 散佈圖。

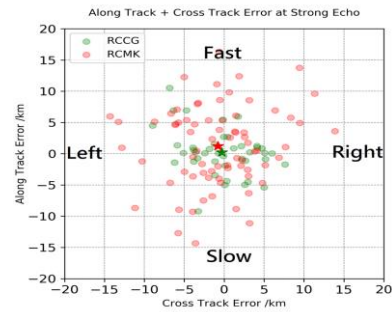
(三) 徑向路徑誤差(Along Track Error)及橫向路徑誤差(Cross Track Error)

徑向路徑誤差(Along Track Error, 後稱 ATE)及橫向路徑誤差(Cross Track Error, 後稱 CTE), 計算如圖(12), 一樣利用前者計算誤差方式, 再利用經度、緯度的誤差算出 ATE、CTE, 以散佈圖表示。結果如圖(13~15), 圖(13)在強回波生命週期間, 七股及馬公表現皆良好, 僅有馬公預測結果整體稍快稍偏左; 圖(14)在弓狀回波生命週期間, 誤差表現上偏大, 並且預報結果二者皆有偏左的趨勢, 馬公 CTE 顯示有明顯偏慢, 七股則無, 原因來自於此階段系統其後方西風

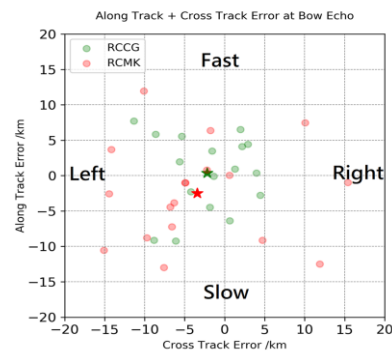
內流噴流及下衝流強度最強, 依照 SCIT 演算法, 外延法及最小平方法可能無法跟上後方內流噴流及下衝流增強的趨勢, 亦有可能是對流資料數不足; 圖(15)逗點狀回波期間, 七股 SCAN 整體偏左, 馬公 SCAN 則是偏快, 七股 SCAN 偏左原因和其書夾式渦旋形成並產生向左速度分量導致; 馬公 SCAN 偏快, 則和西風內流噴流及下衝流強度相關。



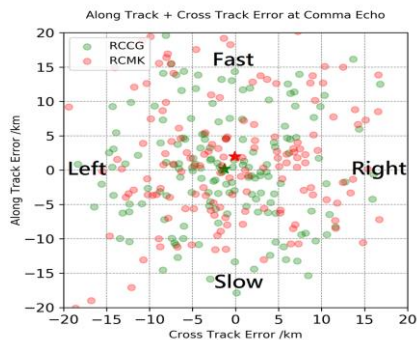
圖(12) 徑向路徑誤差 ATE、橫向路徑誤差 CTE。



圖(13) 強回波期七股、馬公雷達 ATE, CTE 散佈圖。



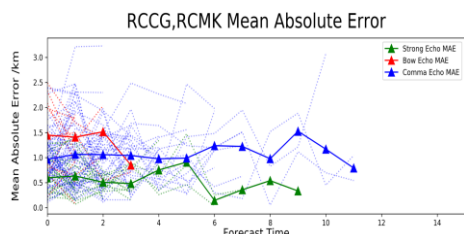
圖(14) 弓狀回波期七股、馬公雷達 ATE, CTE 散佈圖。



圖(15) 逗點狀回波期七股、馬公雷達 ATE, CTE 散佈圖。

(四) 對流胞平均絕對誤差

平均絕對誤差計算方式是利用三個不同系統生命期間，同一編號對流胞預報誤差結果，結果如圖(16)，顯示三個生命期間，平均絕對誤差最大是弓狀回波期間，其次是逗點狀回波，最小則是強回波，和系統結構產生變化時，誤差明顯增加。



圖(16) SCIT 預測對流胞位置之 MAE。

六、結論

本研究顯示 SCAN 系統能有效的掌握到對流胞整體的位置及移動方向，但多胞系統的個別對流胞辨識能力仍有誤差，判斷海面移入的飊線或線狀對流的強度及移速為即時預報作業的要務，研究也著重在預報此類似系統時，能更準確判斷其未來變化，並能即時且精準發布天氣即時告警。本個案 SCAN 對於系統初期移向、移速表現佳，但隨著系統後方內流噴流及下衝流的出現，對流系統強度產生變化，此後對流胞移向移速的預報掌握度較低，整體來看各系統生命期間緯向方均根誤差皆比經向方均根誤差還大，且隨著後方內流噴流出現，SCAN 預測對流移動偏快偏左的情況越明顯，尤其在觀測到最強風速期間，平均絕對誤差是最大的，平均下來有接近 1 至 1.5 公里的誤差，單顆對流

胞最大亦有 2.5 公里以上的絕對誤差。綜合以上在強回波期對流和預報掌握度最佳，當後方內流噴流出現，弓狀回波期絕對誤差明顯偏大，並且有向左偏快的趨勢，在逗點狀回波期，雖然平均誤差較弓狀回波期小，但其誤差離散程度較大，尤其是緯向特別明顯，對於預報掌握度最差。在垂直液態水含量上，當後方內流噴流出現，且增強期間，垂直液態水含量有明顯下降的情況，比較當時實際雷達回波情況，對流強度在後方內流噴流增強期間沒有明顯減弱的現象，SCAN 中 VIL 值和實際現況有差距，尤其是當中層風速增強時最明顯。

七、參考文獻

- Johns, R.H., 1993: Meteorological conditions associated with bow echo development in convective storms. *Wea. Forecasting*, **8**, 294-299.
- Przybylinski, R.W., 1995: The bow echo: Observations numerical simulations, and severe weather detection methods. *Wea. Forecasting*, **10**, 203-218.
- 陳泰然，2012：臺灣與其他地區暖季弓形回波之特徵與環境條件。
- 陳泰然，2011：臺灣梅雨季弓形回波(Bow Echo)之結構與演變。
- 陳泰然，2003：TAMEX IOP-13 飊線個案特徵之觀測研究。
- 魏志憲，2017：颱風外圍雨帶內部波形線狀回波之特徵
- 魏志憲，2006：梅雨季臺灣南部近海準線狀對流系統的特性分析。
- 鍾高陞，2019：臺灣地區 SCAN 即時預報系統之對流胞路徑誤差統計分析
- 蔡甫甸，2011：中央氣象局即時預報之發展-使用 SCAN 追蹤分析 2011 年新店龍捲風所伴隨之風暴個案。
- 張保亮，2006: QPESUMS 系統對流胞偵測與預報路徑校驗。

Study of The Mesoscale Convective System in Taiwan During The Spring Season: A Case of Squall Line in Southern Taiwan in 2019

Hung Zhao¹, Zhao-Cheng Zeng¹, Kai-Chun Wang¹
Weather Forecast Center for Central Weather Bureau¹

ABSTRACT

In the early spring, Taiwan is often affected by mesoscale convective systems (MCS). It contains heavy precipitation, hail, frequent lightning, strike by lightning, strong straight-line winds, and possibly tornadoes. Strong straight-line winds occur where the squall line is in the shape of a bow echo. Based on the squall line case in the Taiwan Strait on April 19, 2019, it was summarized into three stages according to the evolution of Fujita bow echoes. The three stages of this case are analyzed with different observations (including satellite, observations by districts, and radar) and model data. The characteristics of each variable and changes in the environment were analyzed. Then use the above analysis to verify the motion and vertically-integrated liquid (VIL) obtained from System for Convection Analysis and Nowcasting (SCAN) to provide a better guidance for nowcasting of linear convective system in the future.

This study is divided into two parts. First, the root-mean-square error between the position of the convective cells is detected at present and predicted 20 minutes before by the Storm Cell Identification and Tracking (SCIT) algorithm was analyzed. Second, check and discuss the change of vertically-integrated liquid (VIL) from SCAN in the whole period of this case. As a result, the root-mean-square error increases significantly when stage (of bow echo) transits. Besides, strong straight-line winds are accompanied by vertically-integrated liquid (VIL) decreases rapidly.

Keyword: System for Convection Analysis and Nowcasting (SCAN), Squall line