

梅雨季劇烈降水個案之探討

李昌運¹ 廖杞昌²

¹ 空軍氣象聯隊第三基地天氣中心

² 國防大學理工學院環境資訊及工程學系

摘要

本文利用 2008 年西南氣流觀測與豪雨預測實驗，簡稱西南氣流實驗 (Southwest Monsoon Experiment; SoWMEX) 期間的密集觀測資料與 Weather and Research Forecast model (WRF 模式) 模擬資料，針對其中 IOP6 個案中，梅雨鋒面所伴隨之中尺度對流系統，當其移近台灣時，系統演變的過程，進行診斷分析。

個案綜觀環境資料顯示，台灣附近及南海地區受到滯留鋒面影響，低層風場呈現一風場切變的狀況，配合水氣與低層風場輻合加強，形成有利環境，致使中尺度對流系統於發展過程中持續發展；在 Mesoscale Convective System；中尺度對流系統 (MCS) 發展過程中發現其結構呈正負渦對偶的特徵，配合中高層的槽線系統移入，更在 MCS 發展過程中促進其發展，並使對流系統生命期延長，進而移入台灣南部，在短時間形成劇烈降水。

關鍵字：MCS、SoWMEX

一、前言

隨著台灣經濟發展與科技的日新月異，也使現今氣象災害影響的層面與以往不同，根據內政部 1985 年至 1996 年的統計資料，台灣地區因氣象災害所造成的直接損失，平均一年將近 185 億元，而梅雨造成災害所佔的比例即接近 16% (涂等，2007)，而台灣地區四面環海，缺乏有效而密集的海上觀測資料，因而無法對造成劇烈降水的中尺度對流系統有效掌握與預報，因此於 1983 年起進行為期 10 年 (1983~1992) 針對台灣梅雨季豪雨研究的「台灣地區中尺度實驗」(Taiwan Area Mesoscale Experiment; TAMEX)，在之後的二十年，國際上針對梅雨的研究有明顯增加的情形 (陳，2007)，對台灣地區的豪大雨預防亦有明顯改善，而為更精進現今的預報技術，於 2008 年進行了西南氣流觀測與豪雨預測實驗，簡稱西南氣流實驗 (Southwest Monsoon Experiment; SoWMEX)，本文即利用 SoWMEX 期間的觀

測資料，結合數值模式模擬發生於台灣之劇烈降水事件，透過個案模擬分析結果，探討造成劇烈降水之中尺度對流系統的結構與動力過程，進一步用以解釋及驗證中尺度對流系統的發展機制，並可提供民生防洪救災之預報參考。

二、文獻探討

東亞地區為全球季風系統最活躍的地區，主因其位於全球最大的陸塊 (歐亞大陸) 與全球最大海洋 (太平洋) 之交界區域，冬季受到蒙古高壓所伴隨的大陸冷氣團影響，天氣寒冷，為東北季風的型態，夏季則受太平洋副熱帶高壓所伴隨的熱帶海洋暖氣團影響，高溫炎熱，且主要為西南風場；在春末夏初冷暖季節交替時，大陸冷氣團勢力逐漸消退，影響範圍也逐漸北退，而在此時，太平洋副熱帶高壓則逐漸增強並向西伸展，與

從南海及孟加拉灣北上的暖濕氣流，其低層大範圍的西南風涵蓋了東南亞、華南以及西太平洋副熱帶地區，與北方系統成一低層輻合帶，常有鋒面反覆生成與消散，形成後多半於台灣地區呈滯留狀態，並提供舉升條件而形成雲帶，導致連續性降水或對流性降水，而連綿細雨是我們所熟悉的特徵，但期間梅雨鋒面所伴隨的豪（大）雨常因短時間的劇烈降水導致嚴重災害（陳與紀，1978）。

陳(2004)指出在台灣地區降水量氣候值之季節分布，顯示5月中旬至6月中旬存在一顯著的相對極值，此期間即為台灣的梅雨季，在此期間，大陸冷氣團勢力已逐漸轉弱，雖仍不時可達華南、台灣一帶，但南方系統也漸漸北抬，同時副熱帶高壓勢力也正逐漸成長，使得台灣、華南地區成為冷暖空氣交界區，加以南方提供暖濕水汽，增加了這一區域的不穩定度。

Chen (1992)指出梅雨鋒面是一個綜觀尺度的現象，但造成豪大雨的主要天氣系統卻是其伴隨的中尺度對流系統；梅雨季期間可以藉由衛星雲圖上發現鋒面系統的位置上呈現一由東北向西南延伸的帶狀雲系，而其中並挾帶著強烈的中尺度對流系統，這些中尺度對流系統隨著梅雨鋒面向台灣地區移動，造成台灣地區連續性降水亦或強烈的對流性降水。Chen and Tasy (1978)發現梅雨鋒面及鄰近低層具有大尺度強烈氣旋式渦度、水平輻合、上升運動及含有豐富水氣等等現象。而 Chen et al. (1998)提出梅雨鋒面南側的低層噴流是暖、濕空氣的輸送帶，也是促使豪雨發生的重要因子，由上可知梅雨鋒面提供有利於對流系統發展的環境條件，亦提供中尺度強迫機制以激發對流生成。

Smull and Houze (1985)指出在組織性對流系統的發展過程中，中尺度對流系統易形成於條件不穩定的區域上，且中尺度對流系統在發展增強期間，會有數個對流胞合併成

組織性對流系統的狀況，生命期約12小時，當主要對流胞消退之後，該系統即進入消退期。在 Houze et al. (1989)提出一概念模式，總結其所觀測到組織性中尺度對流系統內部結構與特徵，該對流系統前側有一上升氣流，由系統前緣低層大氣進入，將暖濕空氣帶入主對流胞區，此道氣流在進入主對流胞區後，將主對流胞區之冰晶粒子往後輸送，於主對流胞區後方形成層狀雲系；另一道氣流則是對流系統後側的下沉氣流，將中層的冷乾空氣帶入對流系統後側低層，加強蒸發冷卻作用，增強對流系統後側冷池強度，加強舉升作用，以利於對流系統持續發展。在 Biggerstaff and Houze (1991b)的研究中亦顯示出中尺度對流系統(Mesoscale Convective System; MCS)與中尺度對流渦旋(Mesoscale Convective Vortex; MCV)之間的相互關係，發展成熟的MCS，其主對流區為一正相對渦度區，利於上升運動，主對流區後方層狀降水區為負相對渦度區，配合層狀降水所帶來的拖曳作用，加強冷池強度，如此正負渦對偶的情形，加強系統舉升作用，使對流系統持續發展。

由上述的內容可知，梅雨鋒面的水氣主要來自於南海一帶的暖濕氣流，因此本研究將運用 SoWMEX 實驗計畫的海上觀測資料，來印證數值模式所模擬之結果，並探討個案中 MCS 演變過程。

三、模式簡介及實驗設計

本文使用 Weather and Research Forecast model (WRF) V2.1.2 版，以美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) Global Final Analyses $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ (簡稱 FNL) 解析度的全球模式分析場為初始場進行數值模式模擬，每1小時輸出一筆資料。網格設定中心為東經 121° 北緯 23.55° ，並設定為兩層巢狀網格，其中

Domain1(D1)解析度 15 km，網格數 150×115；Domain2(D2)解析度 5 km，網格數 184×130；垂直風向為追隨地勢的 η 座標，共 31 層，且對流層頂為 50hPa。

本文中希望藉由數值天氣模式解析 IOP6 之中尺度對流系統之生成機制與其結構特徵，模式設定如表 1。簡等(2006)提出數值模式會因其物理參數設定不一、網格解析度、與預報時間長度，進而產生不同的結果；其中又以物理參數法設定影響最為明顯，在本文中所研究之方向為探討東亞地區在梅雨鋒面的綜觀環境下，所產生之中尺度對流系統的結構與機制，因此參考洪等(2006)統計分析的結果，在本文所採用 WRF 模式設定之微物理參數法為 WSM5 scheme，積雲參數法為 Kain-Fritsch scheme，邊界層參數法為 YSU scheme(表 2)。

表1 數值模式參數法設定

	Domain1	Domain2
邊界層參數法	YSU scheme	YSU scheme
微物理參數法	WSM5 scheme	WSM5 scheme
積雲參數法	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch

表2 數值模式設定

數值模式版本	WRF V2.1.2
初始場資料	NCEP Global Final Analyses 1.0°×1.0°解析度的全球模式分析場
網格解析度	D1：15 公里 D2：5 公里
模式網格設定中心	東經 121° 北緯 23.55°
模式區域設定	D1：150×115 D2：184×130

四、個案環境綜觀分析

此次個案綜觀天氣分析顯示，鋒面低壓中心位於日本南方洋面一帶，鋒面系統自此向西南延伸，經台灣南部至南海一帶，於個案期間，鋒面系統於台灣南部與巴士海峽一帶徘徊；由 850 hPa 等高圖可發現低層噴流位於鋒面系統南側，配合南海一帶豐沛的水氣，將水氣輸送至台灣海峽南部一帶，提供有利於中尺度對流系統發展的不穩定環境；配合雷達回波圖與衛星雲圖顯示出，對流雲系在鋒面系統上持續生成、發展，並逐漸東移至台灣南部一帶，由上可知低層噴流及豐沛水氣分布的綜觀環境條件，顯著影響梅雨鋒面中尺度對流系統的空間分布，致使對流系統在水氣豐沛和具有明顯低層噴流分布之區域有明顯發展的現象，而個案中在台灣海峽南部低層風場切變所形成的風場輻合，亦是利於中尺度對流系統發展的大氣環境。個案中亦顯示中對流層(500hPa)槽線系統的移入效應，對個案中對流系統提供有利發展之環境場，本文中對流系統在利於發展的環境下，進而影響台灣地區一帶，而該低壓系統移進台灣南部時，造成明顯降水。

由 6 月 4 日及 5 日單日累積降水可發現，降水主要集中於台灣南部一帶，在 5 日降水最強區，並非在山區，而是位於高雄沿海地區，可發現該降水事件並非由地行舉升作用，主要為系統雨帶所形成之降水，由左營逐時降水更可發現在單一小時降下 50.5 mm，該劇烈降水事件主要是由位於滯留鋒面上的中尺度對流系統移入所造成；由衛星雲圖可發現該對流系統原本已逐漸轉弱並呈現消散的狀態，但後又轉強，並進而影響台灣南部地區形成明顯降水，在台灣南部地區形成豪大雨事件，明顯較一般中尺度對流系統為長，可知該對流系統之演變過程與發展結構較利於中尺度對流系統發展。因此在下文

利用數值模式模擬資料探討該中尺度對流系統的演變過程。

五、模擬結果分析

藉由上述綜觀天氣分析與個案數值模式模擬資料進行定性比較。此次數值模式所模擬之資料顯示，自太平洋西北部向西南延伸經台灣南部地區至南海一帶為一呈帶狀分布的高相對溼度區，且相對位置上有一明顯水平風切，與綜觀天氣分析中鋒面系統位置相符。由綜觀分析與數值模式資料比較，槽線系統位置時間分布圖(圖 1)中則可發現，數值模式模擬之槽線系統較實際分析偏南；且個案中於台灣南部形成強降水之對流系統，利用數值模式資料中 850 hPa 氣流場中心與 500 hPa 槽線系統進行定位，並將定位與七股雷達資料徑向風場與及雷達回波研判 MCV 位置(圖 2)，進行對流系統位置比對，可發現數值模式資料中，系統軌跡明顯較實際系統位置偏南。以 500 hPa 槽線系統與 MCV 位置時間分布比較，數值模式資料皆較實際分析資料偏南。但整體而言，在鋒面位置與低壓系統的發展上，綜觀天氣分析與模擬結果大致相符。

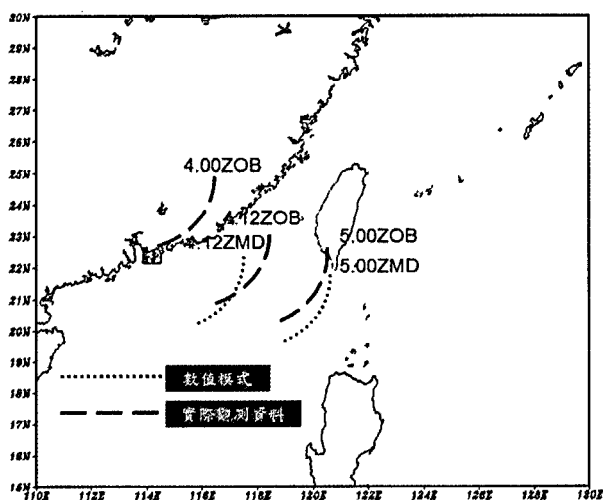


圖 1 綜觀分析與數值模式資料槽線系統位置分布時序圖。

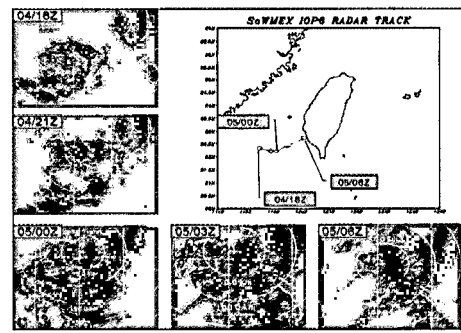


圖 2 MCV 系統位置分布時序圖。

由上述說明此一氣環境為有利中尺度對流系統發展的環境，而下文即利用數值模式 Domain 2 模擬資料更進一步解析該對流系統由弱轉強之大氣環境。由 4 日 1200 UTC 850 hPa 輻合輻散場圖(圖 3)可發現台灣海峽南部一帶低層呈現明顯的風場輻合；由 700hPa 垂直速度分布圖(圖 4)發現在台灣海峽南部一帶可發現有明顯的上升運動，850hPa 的水氣含量及低層噴流分布(圖 5)亦顯示出該區水氣含量逐漸上升，風場強度亦逐漸增加，由相當位溫剖面圖(圖 6)中可以發現於海峽南部北緯 21° 東經 119° 附近之相當位溫較週邊有明顯升高的情形，且由該區相當位溫線的垂直分布趨勢，表示在該區有明顯的對流運動，將能量進行垂直方向的傳送。本文將數值模式中 SoWMEX 中南船活動海域(圖 4 中的黑框部份)的網格資料進行平均運算，並計算出該區 Domain 2 的數值進行比較，由 Domain 2 平均風場強度與水氣含量時序圖(圖 7)中可發現在 4 日 0900 UTC 風場強度逐漸增加，至 1200 UTC 產生一極值，且由水氣含量時序也可發現自 0300 UTC 起即逐漸增加的情況，受到風場輻合的影響，該區水氣含量累積，700 hPa 上升速度亦有明顯增加(圖 8)，由 4 日 700 hPa 相當位溫時序圖(圖 9)可發現相當位溫亦有一極值發生於該時段，因此可知水氣於該區域累積，後質量累加，強迫水氣向上抬升，在上升過程中，釋放潛熱，使大氣溫度上升，加強其低壓系統強度，進而增加風場輻合強度。

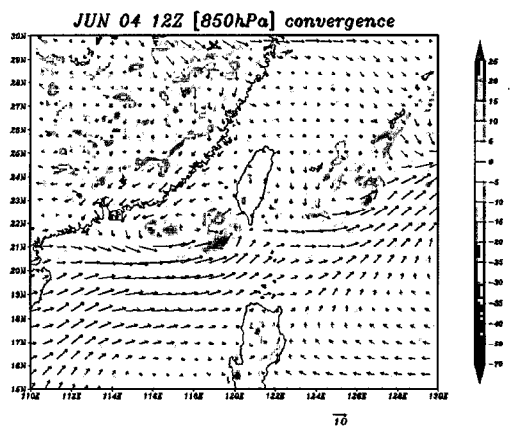


圖 3 2008 年 6 月 4 日 1200 UTC 850 hPa 模式輻合輻散分析圖。

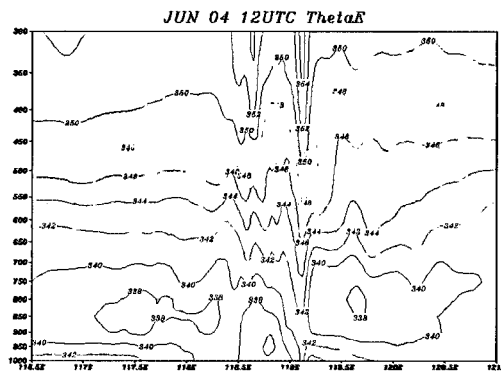


圖 6 模式模擬 6 月 4 日 1200 UTC 北緯 21° 相當位溫剖面分布圖；實線為相當位溫等值線，單位為 K。

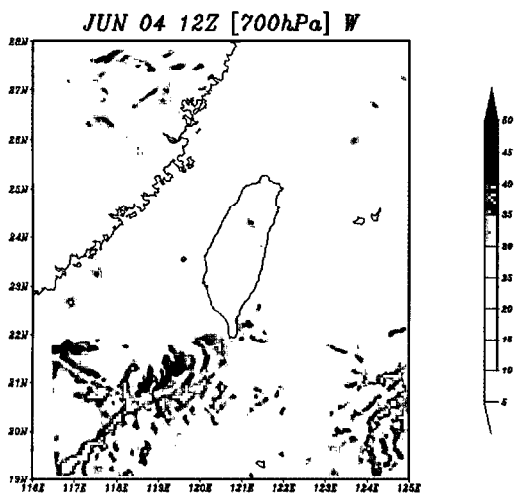


圖 4 模式模擬 6 月 4 日 1200 UTC 700 hPa 上升速度圖。色階部分為上升速度，單位為 cm/s。

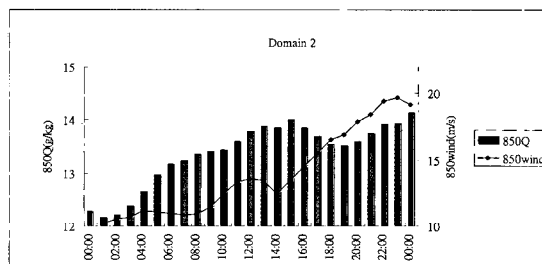


圖 7 數值模式 6 月 4 日 0000 UTC 至 6 月 5 日 0000 UTC 850hPa 風場強度與水氣含量時序圖。

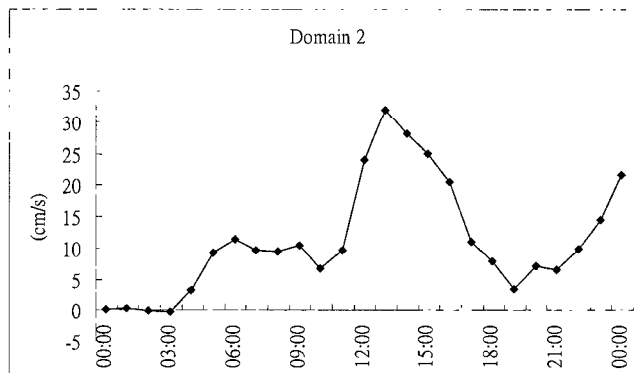


圖 8 數值模式 6 月 4 日 0000UTC 至 6 月 5 日 0000 UTC 700hPa 垂直速度時序圖。

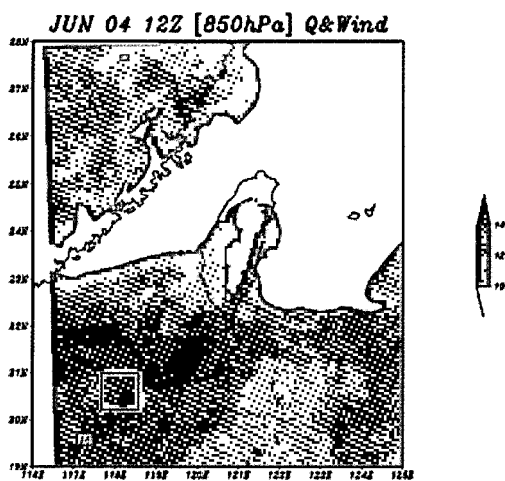


圖 5 模式模擬 6 月 4 日 1200 UTC 850 hPa 水氣含量與低層噴流分布圖。

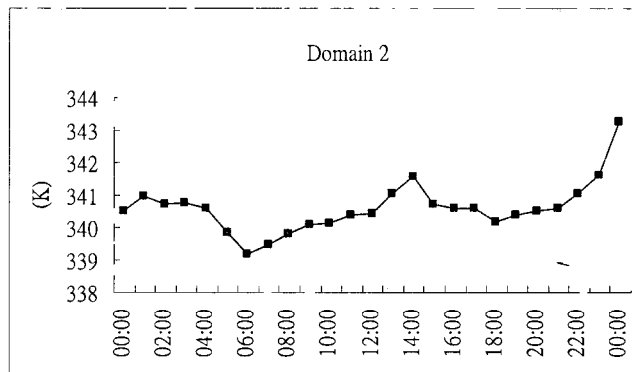


圖 9 數值模式 6 月 4 日 0000 UTC 至 6 月 5 日 0000 UTC 700hPa 相當位溫時序圖。

由上述現象可描述出本個案中尺度對流系統發展環境，6月4日1200 UTC 鋒面系統位置在臺灣南部一帶，呈東北-西南走向，低層風場發現一風場切變的情況，而鋒面南側為西南風場的低層噴流，低層噴流持續將系統南側的水汽往北傳送，在多项有利的條件配合下，梅雨鋒面及低層噴流間容易生成 MCS。因梅雨鋒面的南方為暖區且水氣含量多，相對濕度達 80% 以上，提供不穩定的條件易使空氣抬升，近地面處的風場輻合作用，將水氣於該區集中，低層水氣隨氣旋式環流進入輻合區，當水氣不斷往內進行質量累積後，便往上抬升，於中心附近產生上升運動，上升過程中因為冷卻作用使得水氣產生凝結，將水氣中潛熱釋放，導致中心附近大氣環境溫度上升，環流中心氣壓下降，致使向內氣壓梯度增大，增強低層氣旋式環流強度，使得輻合作用愈加增強，水氣輻合作用更為增強，對流系統之中心氣壓不停降低，持續進行此質量調節的循環，如可發現在本個案中 MCS 的生成發展，與潛熱釋放、風場變化三者間的關係十分密切。MCS 在發展過程中因對流潛釋放造成強烈的輻合作用，質量調節的過程中加速西南風場的分量，增強環境風場並生成 LLJ。而風場南風分量的增加也使得梅雨鋒面北退至臺灣南端，同時又會帶來南方海面上豐沛的水氣，強外力作用下更易使得大氣不穩定，易有上升輻合的作用，因此易形成利於中尺度對流系統發展之環境。

六、結論

此次個案之中尺度對流系統其演變過程，主要由風場切變提供風場輻合作用，低層水氣隨氣旋式環流進入輻合區，水氣於風場輻合中心輻合累積之後，產生舉升作用，並於上升過程進行潛熱釋放，導致中心附近中高層溫度升高，環流中心氣壓下降，致使

向內氣壓梯度增大，增強低層氣旋式環流強度，使得輻合作用愈加增強，水氣輻合作用更為增強，致使氣壓持續降低，維持低壓系統的強度，形成此次個案利於中尺度對流系統發展的大氣環境。

數值模擬資料顯示，綜觀大氣環境為鋒面系統滯留於台灣南部與南海一帶，低層噴流位於鋒面系統南側，配合南海一帶豐沛的水氣，低層噴流將水氣輸送至該地區，有利於對流系統的發展，提供有利於中尺度對流系統發展之不穩定環境，使對流系統在此鋒面系統上持續生成、發展，由此證明伴隨梅雨鋒面之中尺度對流系統的發展與低層噴流的位置及強度變化密切相關。低層噴流及水氣分布的合成環境條件，顯著影響梅雨鋒面中尺度對流系統的空間分布，致使降水區域與低層噴流軸方向及水氣較高區域有重合的現象。模擬結果亦顯示，台灣海峽南部低層風場切變，所提供之風場輻合，亦是利於中尺度對流系統發展的大氣環境。

本文中所探討之個案為 SoWMEX 中個案，但實驗計畫期間尚有數個個案皆達豪大雨標準，是以後續希冀能繼續針對其他個案進行探討，以增進對對流系統之瞭解；且本文所探討之個案為一非對稱性對流系統，但因研究個案數過少，對於非對稱性發展的 MCS 之機制尚未明確，希冀能進行其他相關個案模擬，進行結果的比較與驗證，同時探討對稱性發展的機制過程。

參考文獻

- 洪景山、林得恩、簡芳菁、劉素屏、周仲島、林沛練、張文錦、繆璿如、陳致穎、雷銘中，“WRF 模式之敏感度測試第一部分：探空測站上的校驗”，大氣科學，第 34 期，第 1 號，第 241-260 頁，2006。
- 涂建翊、余嘉裕、周佳，“台灣的氣候”，遠足文化，台北，第 116-125 頁，2003。

- 陳泰然， “最近之梅雨研究回顧” ，大氣科學，第 35 期，第 4 號，第 261-286 頁，2007。
- 陳泰然與紀水上， “台灣梅雨季之中幅度降水與中幅度低壓研究” ，大氣科學，第 7 期，第 39-48 頁，1978。
- 陳泰然， “近期梅雨鋒面研究之回顧” ，大氣科學，第 32 期，第 3 號，第 225-245 頁，2004。
- 簡芳菁、洪景山、張文錦、周仲島、林沛練、林得恩、劉素屏、繆璿如、陳致穎， “WRF 模式之敏感度測試第二部份：定量降水預報校驗” ，大氣科學，第 34 期，第 1 號，第 261-276 頁，2006。
- Biggerstaff, M. I. and R. A. Houze, 1991b “Midlevel vorticity structure of the 10-11 June 1985 squall line,” *Mon. Wea. Rev.*, 119, 3066-3079.
- Chen, G. T.-J., “Mesoscale features observed in the Taiwan Mei-Yu season,” *J. Meteor. Soc. Japan*, vol. 70, pp. 497-515, 1992.
- Chen, G. T.-J., and Tsay, C.-Y., “A synoptic case study of Mei-Yu near Taiwan, ” *Papers Meteor Res.*, Vol. 1, pp.25-36, 1978.
- Chen, C., Tao, W.-K., Lin, P.-L., Lai, G. S., Tseng, S.-F., and Chen Wang T.-C., “The intensification of the low-level jet during the development of mesoscale convective systems on a Mei-Yu front,” *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 126, pp. 349-371, 1998.
- Houze, R.A., Rutledge S.A., Biggerstaff M.I., and Smull B.F. , “Interpretation of Doppler weather radar displays of mid-latitude mesoscale convective systems,” *Bull. Amer.Meteor. Soc.*, 70, pp.608-619, 1989.
- Smull, B. F., and Houze R. A., Jr. “A midlatitude squall line with a trailing region of stratiform rain: Radar and satellite observation,” *Mon. Wea. Rev.*, 113, pp.117-133, 1985.

A Case Study of Severe Rainfall during the Mei-Yu Season

¹Chang-Yun Li ²Chi-Chang Liao

¹ *The Third Weather Squadron of CAF, ROC*

² *Department of Environmental Information and Engineering, National Defense University*

ABSTRACT

The purpose of this paper is to utilize intensive observation data in the period of 2008 SoWMEX (Southwest Monsoon Experiment) and the WRF model (Weather and Research Forecast model) simulation data to analyze the evolution, structure, and characteristics of MCS (Mesoscale Convective System) for IOP6 case (June 4 to 6), which was associated with a Mei-Yu front.

There was a stationary front affecting Taiwan and the South China Sea area in this case. It formed an environment with strengthening low-level wind convergence and increasing water vapor, favorable for MCS to grow. During the development of MCS, there was a vorticity dipole. At the same time, as a middle-high level trough moved in, MCS became stronger. It then moved into southern Taiwan and brought severe rainfall in a short time.

Keyword : MCS, SoWMEX