

# 颱風外圍中尺度對流系統與其降雨特性之研究回顧

陳柏孚

空軍氣象中心

## 摘要

本文將回顧一系列關於“外圍中尺度對流系統”(OMCS)之研究論文。OMCS 為一類伴隨西北太平洋地區熱帶氣旋，並常在颱風與西南季風交互作用時，由外圍雨帶所發展、且伴隨大範圍冷雲頂之線狀對流系統。本研究首先回顧 1999 年至 2009 年共 109 個 OMCS 之氣候特性 (Lee et al. 2012)；接著回顧一透過 WRF 模式對伴隨風神颱風(2008)之 OMCS 所進行之模擬分析研究，及其所提出之 OMCS 形成與維持之概念模式(Chen et al. 2014)；最後回顧 Chen et al. (2015) 所分析 80 個 OMCS 個案之環境特徵之結果及 Chen et al. (2015)之 OMCS 降雨概念模式。

**關鍵詞：**颱風降雨、颱風雨帶、中尺度對流系統、西南季風

## 一、前言

侵襲台灣的颱風均來自西北太平洋或南海。民前 14 年(1897)至 103 年(2014)共有 412 個颱風侵台，平均每年達 4.3 個颱風侵襲台灣。根據中央氣象局(侵台颱風資料庫)統計 1985-2011 年台灣因氣象因素導致各項災害損失統計，其中有 79% 的損失係由颱風災害所造成；依內政部消防署統計近 10 年因颱風、水災造成人員死亡計有 876 人，並對農漁業、建築、水利、交通及電力等設施之損壞災情，並嚴重影響社會和經濟活動。造成台灣嚴重災情的颱風很多，其致災原因和情況亦有所不同，例如民國 85 年賀伯颱風的超大豪雨引發台灣首見的大規模土石流；民國 90 年路徑怪異的納莉颱風中心登陸時間長達兩天，造成各地重大損失並癱瘓台北捷運系統。民國 90 年之潭美和 97 年之卡玫基兩個弱颱風，在毫無預警情況下，其伴隨之中尺度對流系統(Mesoscale Convective System, MCS)分別引發高雄市區和台中市區嚴重水

患。民國 76 年之琳恩、87 年之瑞伯和芭比絲、89 年之象神及 99 年之梅姬等與東北季風共伴的秋颱，中心雖未登陸，卻導致北部、東北部、甚至全台嚴重水患。民國 93 年敏督利颱風及其離台後引進的西南氣流，造成中南部的嚴重災情(七二水災)；至於民國 98 年侵臺的莫拉克颱風，帶來大範圍且持續之破紀錄雨量，更是重創南台灣。

整體而言，侵臺颱風所導致之災害，主要肇因於其所伴隨之豪雨或暴雨。局部性之暴雨常導致山崩或土石流、而豪雨則可能導致河水暴漲與淹水，因此，加強對侵臺及臨台颱風之研究，藉以提供正確之預報指引，進而改進定量降雨預報與提高災害預警能力，是台灣地區颱風防災課題中的重要工作。然而，由於颱風為一快速轉動的渦旋(伴隨有強烈對流和降雨)，故侵臺颱風之路徑和結構常受台灣複雜地形影響而有相當大變

化；地形的作用，更常造成局部豪雨而導致嚴重災情，並增加降雨預報的困難度。因此，侵台颱風的防災課題，最重要的是路徑預報，尤其是針對路徑怪異(如打轉)的颱風，其預報困難度更高；此外雨量及結構的預報亦同樣重要，尤其是持續性強降雨。而對颱風外圍環流和環境場交互作用導致之遠距強降雨而言，則交互作用及其所伴隨之長生命期對流系統之重要性，又高於路徑預報。中央氣象局的颱風路徑預報早就採用一致性預報法(JUNE)，準確度已達國際一流水準；而近年由中央氣象局、災防中心、學界以及國研院颱洪中心所共同進行的系集實驗(TAPEX)，更顯著提升颱風路徑的預報能力。因此就颱風路徑預報準確度之提升而言，除關鍵時刻的路徑預報準確度外，其他可再突破的空間相較於定量降雨預報技術之提升，其急迫性較低。

目前中央氣象局的颱風預報作業，一般先參考動力數值模式之預報產品(包含其他主要預報中心之預報)，並進行必要之評估和統計分析，做出 72 小時(以至 120 小時)之颱風路徑(包含雨量)預報。之後，參考歷史颱風特徵，採用類比法、氣候統計法(如謝等, 1998; Yeh, 2002; Lee et al., 2006)、系集實驗、及 ETQPF(Hong et al., 2014)，進行未來 24 小時(以至全部颱風期間)之風、雨預報；此外預報員亦會參考概念模式之結果，進行主觀之判斷及修正。目前，此套作業過程對大部份颱風的路徑和伴隨風雨，大致可合理掌握，尤其路徑預報誤差大都在可接受範圍；但對一些特殊路徑的颱風(如 2005 年的海棠颱風、2008 年辛樂克颱風)，則可能因路徑預報誤差較大而可能使風雨預報誤差增加。就另一角度而言，由於對流的隨機特性，很難利用單一動力模式而做到「物理決定性」(deterministic)之預報，這也是國內氣象界推動 TAPEX 系集實驗(Hsiao et al., 2013)之原

因。目前系集預報實驗對於颱風降雨分佈的掌握能力和穩定度較單一模式有明顯提升；但對於較小區域和特殊颱風個案，則仍具一定程度之不確定性，而有顯著提升空間。

在颱風降雨預報技術的改進方面，如果颱風路徑預報正確，臺灣地形將決定臺灣地區的降雨的大致分佈特徵，因此有「颱風降雨氣候模式」(Lee et al., 2006; Lee et al., 2013)之發展。評估颱風降雨氣候模式之預報結果顯示，以歷史資料統計為主的氣候模式對於颱風期間總累積雨量之預估已具一定能力，且因此氣候模式之計算非常快速，故其實用價值非常高；此模式更可針對假設之颱風路徑快速評估降雨分佈，對應變決策具相當高參考價值。然而，氣候模式的平均概念，常導致極值顯著低估；而受限於有限的颱風歷史個案與臺灣地區降水觀測資料，加上每個颱風都具有獨特的環流特徵，氣候模式對特定颱風個案的預報仍有限制，尤其是針對伴隨異常降水之颱風個案，此模式尚有相當大的改善空間，如 2001 年之桃芝、納莉、2004 年之敏督利、2008 年之卡玫基及 2009 年之莫拉克等。為增進對颱風降雨之了解(尤其是特殊降水現象)，以發展概念模式提供作為預報員主觀修正之參考，李等(2011)利用颱風雨量資料庫(1989~2009 年)與颱風降雨氣候模式進行統計分析，挑選出伴隨異常降水之颱風個案。結果顯示，這些個案可約略分為兩類，一為颱風本身結構紮實，二為颱風環流與綜觀尺度環境產生交互作用而導致劇烈降雨者。

許多颱風在台灣近海時與環境產生交互作用並於颱風外圍導致強降雨發生。如：敏督利颱風(2004)與卡梅基颱風(2008)皆在颱風中心外於台灣東側時，於台灣西南部產生長生命期之中尺度對流系統(圖一)。此類系統隨西南風移入台灣陸地後，進一步與地形

產生交互作用，導致 24 小時內超過 800mm 降雨並造成嚴重災情。莫拉克颱風(2009)亦與環境產生交互作用，一長生命期中尺度對流系統於颱風中心 300 公里外產生，在 12 小時內降下 1200—1500mm 降雨，此大範圍且持續之破紀錄雨量更是重創南台灣(Lee et al., 2011, Lee et al., 2012)。2013 年之潭美颱風亦於台灣海峽南部產生中尺度對流系統(圖一右上)，此系統雖未直接影響台灣陸地，但雷達降雨估計顯示，12 小時內有超過 300mm 降雨量發生(圖一右下)。

李等(2013)與 Lee et al.(2012)使用了一套客觀方法，挑選 1999 年至 2009 年間 109 個由颱風與環境交互作用而導致之發生在颱風外圍環流中的中尺度對流系統(稱為 OMCS)。OMCS 必須為一獨立於颱風內核區對流外之對流系統；此類系統通常具有線狀對流胞結構，並且發展出厚實且大面積的層狀降水區。此成熟且厚實的層狀降水區對持續的強降水可能有重要貢獻。由於此類系統所伴隨之特殊颱風降雨現象，為現行颱風降雨預報作業方式難以掌握者，本文目的在回顧一系列關於 OMCS 之研究論文，以期協助增進預報員對此類系統之瞭解，並提供概念模作為預報員主觀修正之參考。第二章將先回顧 Lee et al. (2012)針對 1999 年至 2009 年共 109 個 OMCS 之氣候特性研究，包含整合紅外線衛星雲圖(IRI)與微波頻道衛星(PMW)觀測辨識 OMCS 之方法。第三章將回顧 Chen et al. (2014)透過 WRF 模式對伴隨風神颱風(2008)之 OMCS 所進行之模擬分析研究，此研究亦針對 OMCS 之形成與維持提出概念模式。第四章與第五章分別回顧 Chen et al. (2015)之研究結果，包括分析 1999~2009 年間 80 例 OMCS 之環境特徵，檢驗 Chen et al. (2014)所發展之雨帶形成概念模式的適用性(第四章)，以及此類雨帶(如莫拉克颱風所伴隨者)導致強降雨之概念模式及預報指引(第五章)。

## 二、外圍中尺度對流系統 (OMCS)

針對颱風環流與綜觀尺度環境產生交互作用而導致劇烈降雨的颱風，本章將回顧 Lee et al. (2012)所發展之整合紅外線衛星雲圖(IRI)與微波頻道衛星(PMW)觀測辨識 OMCS 之方法，並介紹其針對 1999 年至 2009 年共 109 個 OMCS 之氣候特性研究。Lee et al. (2012)使用了一套客觀方法，挑選 1999 年至 2009 年間 109 個由颱風與環境交互作用而在颱風外圍環流中出現之 OMCS；這套方法共分為兩個階段。由於紅外線衛星雲圖的觀測在時間上與空間上都能提供連續的資料，過去常被用以追蹤中尺度對流系統 (Maddox, 1980; Mapes and Houze, 1993; Williams and Houze, 1987)，因此該法第一階段即利用紅外線衛星雲圖，追蹤伴隨颱風之有組織且長生命期的對流系統；條件如下：

- (1) 起始條件：當有一小於 198K 且面積超過 36000km<sup>2</sup> 冷雲頂時，即為一長生命期對流系統之起始，並開始追蹤。
- (2) 發展條件：當系統起始後，若一「小於 198K 且面積超過 36000km<sup>2</sup> 冷雲頂」或「小於 208K 且面積超過 72000km<sup>2</sup> 冷雲頂」與該系統上一次出現之「小於 198K 且面積超過 36000km<sup>2</sup> 冷雲頂」面積重疊超過 50%，則定義為該系統持續發展。
- (3) 若系統持續發展超過 6 小時，則挑選該系統進入第二階段的個案篩選。

第二階段挑選方法則利用能解析對流結構之微波頻道影像，進一步篩選由颱風外圍雨帶(distant rainbands)組織發展而成的 OMCS。一 OMCS 必須為一獨立於颱風內核區對流外之線性對流系統。此類系統通常具有線狀對流胞結構，並且發展出厚實且大面積的層狀降水區。Houze (2004)指出，成熟且厚實的層狀降水區對持續的強降水可能有重要貢獻。

利用 1999~2009 共 11 年的衛星觀測資料，Lee et al. (2012)挑選了 109 個 OMCS，

建立資料庫並用以進行後續的統計分析。所挑選的109個OMCS個案共分佈在77個颱風中，佔西北太平洋颱風總數的22%。OMCS分布區域以東經140度以西為主，6月至9月在南海與台灣附近較為活躍(圖2a)。若在跟隨颱風中心移動之座標上檢驗OMCS之運動(圖2b)，可發現OMCS一般以遠離颱風中心之方向運動。6月至9月時，OMCS多發生在颱風之西南側；其他月份時OMCS多發生在颱風之北側。因此Lee et al. (2012)進一步比較發生在颱風中心南側之85個OMCS個案(南側型OMCS)與發生在颱風中心北側之24個OMCS個案(北側型OMCS)之綜觀環境顯示，南側型OMCS常在颱風與偏西南風之低層流場(多與東亞夏季季風系統相關)交互作用時形成，而北側型OMCS則與颱風與東北季風或信風(trade wind)交互作用有關。另外，OMCS傾向在颱風之下風切偏右側發展(圖2c)，且以發生在6至9月之南側型OMCS最具此傾向。結果亦顯示，不少颱風個案在接近台灣陸地時，都伴隨有此類系統的發展(圖2a)，如鳳凰颱風(2008)、碧利斯颱風(2006)、莫拉克颱風(2009)、卡玫基颱風(2008)、敏督利颱風(2004)等。這些靠近台灣的MCS若直接對陸地造成影響，往往會帶來強且集中的暴雨，並導致非常嚴重的災害，因此進一步了解外圍型中尺度對流系統的形成原因，並用以改進降雨預報技術是刻不容緩的。

### 三、OMCS之形成與維持(風神颱風OMCS個案研究)

本章將回顧Chen et al. (2014)透過Weather Research and Forecasting model (WRF) 模式對伴隨風神颱風(2008)之OMCS所進行之模擬分析研究。受限於觀測資料之不足與網格資料解析度較差的限制，有關OMCS的物理機制與中尺度動力問題必須藉由分析模式模擬資料加以釐清，WRF模式

是目前全世界最被廣泛使用的中尺度氣象模式，其動力過程已被廣泛的測試過，並能掌握較完整的雲微物理過程(如：對流、沉降、逸入作用等等)，精確程度值得信賴。

風神颱風在2008年6月21~23日於其外圍產生兩個OMCS，其中第二個OMCS個案約於6月22日0600z開始發展，1300z進入消散期，此個案即為Chen et al. (2014)所模擬研究之OMCS個案。處於成熟期之OMCS(圖3a)為一獨立於颱風內核區對流外之線性對流系統。此系統具有線狀排列的對流胞結構，與相當厚實且大面積的層狀降水區於對流線南側。Lee et al. (2012)根據QSCAT 衛星觀測之海表面風場資料分析指出，OMCS常伴隨低層噴流的出現，並推測這些發生在對流系統層狀降水區之下低層噴流，會藉由風切產生相當大的垂直渦度，並經由邊界層內正渦度區之摩擦輻合效應導致新對流胞的形成，進而使對流系統維持並延長其生命期。根據QuikSCAT 衛星觀測之海表面風場資料分析顯示，風神颱風之OMCS亦伴隨低層噴流(圖3b)，且對流胞亦分佈於低層噴流左側、水平風切渦度極大值處。

在WRF模式實驗設計方面，Chen et al. (2014)使用高解析度分別為36公里、12公里、4公里、與1.33公里之四層巢狀網格，於2008年6月21日00時(UTC)開始積分60小時。整體而言，WRF模式對風神颱風之路徑、強度、及所伴隨outer-OMCS之降雨與對流特徵皆有合理掌握。因他們利用模式模擬資料，進一步探討有利颱風外圍OMCS形成之環境條件與物理機制，並發展了OMCS形成之概念模式。比對模式模擬資料與可見光衛星雲圖顯示，WRF模式除對風神颱風之路徑、強度、及所伴隨outer-OMCS之降雨特徵有合理掌握外，亦能模擬出OMCS形成前颱風中心西側北方環流中一偏南北向之淺對流帶與一偏東西向之深對流帶交互作用的過程。分析模式模擬大氣柱中之冰、雪、及電之混和比(圖4a、b、與c)及觀測之可見

光衛星雲圖(圖4d、e、與f)皆顯示，伴隨西南氣流之偏東西向深對流帶(圖4，紅虛線)於2008年6月22日02時(UTC)已經存在；隨後於2008年6月22日05時(UTC)，偏南北向之淺對流帶(圖4，紅圈)在颱風中心西側形成；最後在6月22日08時(UTC)，有劇烈對流(即OMCS)在此淺對流帶與深對流帶交會處形成(圖4c與f，紅箭頭)。分析2008年6月21日23時(UTC)與6月22日05時(UTC)0至1公里高度之平均水氣混和比(圖4g與h)顯示，此南北向淺對流帶亦為一邊界層水氣帶，且為整個颱風環流中水氣最豐沛處；圖12i則顯示，於OMCS形成前(2008年6月22日5時)，此南北向淺對流帶下游(南端)之地表對流可用位能(convective available potential energy)為3600至4000 J kg<sup>-1</sup>而自由對流高度(level of free convection)小於400公尺。綜合以上結果可歸納：(1)底層西南氣流與颱風環流之輻合提供了OMCS所需的舉升機制，故西南氣流與颱風環流的合流區為有利OMCS形成的環境條件；(2)OMCS形成與發展所需之水氣並非由系統南側直接補充，而由系統北側之南北向水氣帶輸入。故Chen et al. (2014)進一步分析南北向水氣帶之成因，嘗試了解其為何沒有直接旋入颱風中心而在與西南氣流交會處形成OMCS，並探討此水氣帶與西南氣流所提供水氣間之關係。上述研究包含了模式敏感度實驗、垂直風切與渦度診斷、水氣收支與後軌跡分析等；在此以概念模式圖(圖5)簡述研究成果。

圖5為風神颱風(2008)外圍OMCS之雷達回波示意圖(圖5a)與外圍OMCS之形成概念模式(圖5b)。其中OMCS(星形標誌)在低層西南氣流與颱風北風環流中之水氣帶(淺綠色色塊)相交處形成；灰色實線(或灰色虛線)為受(或若不受)呂宋島地形影響之颱風低層流場；紅色虛線標示邊界層頂波數一之不對稱正渦度區，此區位於200至850百帕平均(距颱風中心200至800公里半徑範圍)垂直風

切(右上角黑色箭頭)之下風切偏右側；粗藍色曲線與箭號標示中層乾空氣旋入颱風環流之軌跡；黃色色塊為海表面水氣通量較高之區域。此OMCS約在颱風中心西南方約250至300公里半徑範圍內發展，生命期約為7小時。研究結果顯示，風神颱風低層環流因呂宋島地形所導致之偏移使位於颱風西側邊界層中南北走向的水氣帶亦向外圍偏移。此南北向水氣帶因而能與西南氣流合流(而非旋入內核區)並導致OMCS形成。深入分析顯示，垂直風切與颱風交互作用使颱風渦旋傾斜並將導致邊界層頂有波數一之不對稱正渦度分佈於下垂直風切方向之左側，此渦度距平所導致之邊界層摩擦輻合則對颱風西側南北走向水氣帶之形成扮演重要角色，故水氣帶之對流可用位能亦在OMCS形成前因水平水氣通量輻合而不斷增加。另一方面，水氣收支分析與後軌跡分析顯示，雖然西南氣流導致之颱風南側高風速區提供了較大之海表面水氣通量，但此水氣源(source)仍須經由颱風渦旋與垂直風切交互作用造成之水平水氣通量輻合方能以颱風(西側)環流中之水氣帶型式注入OMCS中。

在OMCS維持方面，比較2008年6月22日09時(UTC)與2008年6月22日12時(UTC)之模式模擬大氣柱中之冰、雪、及電之混和比與對應之微波頻道衛星觀測91GHz PCT亮度溫度顯示(圖略)，WRF模式合理掌握了OMCS的對流特徵包括：(i)此OMCS為一獨立於颱風內核區對流外之線性對流系統；(ii)此OMCS北部具有線狀排列的對流胞結構而南部有相當厚實且大面積的層狀降水區；(iii)此OMCS之對流線(convective line)有隨時間以逆時鐘方向旋轉的趨勢。分析模式模擬2008年6月22日11時(UTC)之地表溫度與OMCS雲區範圍顯示(圖略)，受低層西南氣流與中層颱風北風環流之影響，成熟時期之OMCS於其南半部層狀降水區下有一顯著的冷池( $\Delta\theta < -3$  K)，而深對流胞則排列在冷池之北方邊界上。此OMCS向南移動，並具有後

方(北方)內流與前方(南方)層狀降雨區。南北向水氣帶中、低層具高對流可用位能之空氣，不斷隨後方內流進入系統，並在伴隨層狀降雨區之冷池北方邊界、連續形成新對流胞，有利 OMCS 生命期之延長。Chen et al. (2014) 亦詳細探討了(i)何種環境條件導致此 OMCS 形成一系統北部有對流線而南部有層狀降水區並伴隨冷池的結構配置；(ii)伴隨層狀降水區之冷池對新對流胞產生與系統移動之影響；(iii)OMCS 對局部風場與低層噴流(圖三b)形成之影響；以及(iv)發展有關 OMCS 維持之概念模式。

#### 四、檢驗風神 OMCS 概念模式適用性

Chen et al. (2015) 進一步分析 1999~2009 年間 80 例南側型 OMCS，檢驗 Chen et al. (2014) 所發展之兩帶形成概念模式(見第三章)之適用性，並發展此類兩帶(如莫拉克颱風所伴隨者)導致強降雨之概念模式及預報指引。考慮風神颱風 OMCS 形成概念模式中，颱風北風環流內之邊層水氣帶與低層西南氣流之交相互作用為導致 OMCS 之關鍵因素，故 Chen et al. (2015) 之研究利用 NCEP Climate Forecast System Reanalysis(CFSR) 網格資料，分析 OMCS 發生期間伴隨颱風之 950hPa 風場與絕對溼度(specific humidity)，並對具有不同特徵之 OMCS 類進行分類，並發展對應之降雨概念模式。分類依據包含 (i) OMCS 發生位置在 950hPa 颱風與季風合流區之北側、合流線(confluence line)100 公里範圍內、或南側；以及(ii)此 OMCS 所伴隨之 950 hPa 水氣帶是位於颱風暖心渦旋北風環流中，亦或位於西南季風盛行風區域內。

以伴隨約克颱風(1999，圖六 a-c)與碧利斯颱風(2006)為例(圖六 d-f)，分析伴隨此二颱風之 OMCS 發生期間之 950 hPa 水氣混和比與 950 hPa 流線場顯示，此二 OMCS 在颱風西側南北向水氣帶與西南氣流合流處(南北向水氣帶中)形成，與風神颱風 OMCS 形

成概念模式一致。Chen et al. (2015) 將此類 OMCS 系統稱做 Intersection-type OMCS (交會型 OMCS, I-type OMCS)。值得注意的是，Chen et al. (2015) 進一步將 I-type OMCS 分為兩個子類別：南側型  $I_s$ -subtype OMCS 與西側型  $I_w$ -subtype OMCS。其分類依據為：若一 OMCS 發生在 225 度方位角之西側(北側)，則將其分類為南側型  $I_s$ -subtype OMCS(西側型  $I_w$ -subtype OMCS)。因為南側型  $I_s$ -subtype OMCS 與西側型  $I_w$ -subtype OMCS 有截然不同的降雨分佈特性(詳見第五節)，在預報其所伴隨之強降雨時需特別注意。在 Chen et al. (2015) 所分析之 80 個 OMCS 個案中，共有 56%(43 個)的 I-type OMCS，與風神颱風之 OMCS 概念模式最為相似；而  $I_s$ -subtype OMCS 與  $I_w$ -subtype OMCS 之個數分別為 18 個與 23 個。

伴隨凱薩納颱風(1999)之 OMCS(圖六 g-i)則在颱風北風環流中之水氣帶發展，與低層西南氣流合流區無直接關聯。Chen et al. (2015) 將此類 OMCS 系統稱做 Upstream-type OMCS (上游型 OMCS, U-type OMCS)。分析結果顯示，此類系統所伴隨之颱風通常處於東西延伸之季鋒槽中，颱風南北側同時有兩個強風速區(分別與西南季風與信風有關)(圖六 h)。而伴隨柯洛奇颱風(2000)之 OMCS(圖六 j-k)在西南季風中形成，則與概念模式有明顯差異。Chen et al. (2015) 將此類 OMCS 系統稱做 Monsoon-type OMCS (季風型 OMCS, M-type OMCS)。在 Chen et al. (2015) 所分析之 80 個 OMCS 個案中，共有 31%(25 個) U-type OMCS、及 13%(12 個) M-type OMCS。值得注意的是，I-type OMCS 與 U-type OMCS 合計占所有 OMCS 之 87%，故於颱風北風環流中水氣帶之發展與否對此類長生命期兩帶系統之行程相當重要。

Chen et al. (2015) 分析  $I_w$ -subtype、 $I_s$ -subtype、U-type、M-type 四類 OMCS 之氣候特性(圖七)。結果顯示，I-type OMCS 好

發生於南海北部與大陸東南沿岸(圖七 a)，而在台灣附近發生的 OMCS 以  $I_s$ -subtype(圖七 a，金色標示)為最多。在 OMCS 好發月份分析方面(圖七 b)， $I_w$ -subtype 與  $I_s$ -subtype OMCS 皆在七、八月最常發生。而 U-type OMCS 好發生於北緯 10~20 度間，東西分部範圍廣，包含南海中部與菲律賓以東分線冰之太平洋洋面(圖七 a，綠色標示)；好發月份則已九月以後為最多。Chen et al. (2015) 亦指出，I-type OMCS 與 U-type OMCS 之地理與季節分部特性與東亞夏季季風之演變有關，I-type OMCS 常發生在颱風與七、八月沿大陸沿海北上之強西南季風交互作用時，而 U-type OMCS 則好發於晚季向東延伸之季鋒槽中。

#### 五、OMCS 降雨概念模式

Chen et al. (2015) 在跟隨颱風中心移動之座標上檢驗四類 OMCS ( $I_w$ 、 $I_s$ 、U、M) 之運動合成圖(圖八)，須注意已將四類 OMCS 之位移向量(箭頭)平移至各類 OMCS 之平均形成位置，而四類 OMCS 發生時之平均颱風移速則標示在颱風符號上。 $I_s$ -subtype 與 M-type OMCS 通常在颱風向北移動分量較大時，於颱風南側形成並向颱風外圍(向南)移動，但有些  $I_s$ -subtype OMCS 亦具較明顯之東移分量。 $I_w$ -subtype 通常在颱風向西北移動分量較大時，於颱風西南西側形成並向颱風外圍(向西南西)移動。而 U-type OMCS 通常在颱風向西移動分量較大時，於颱風西側形成並向颱風外圍(向西)移動，形成位置最接近颱風中心，並且有最快之 OMCS 外移速度。Chen et al. (2015) 根據統計所得之概念模式及預報指引(圖九)。

圖九為四類 OMCS ( $I_w$ 、 $I_s$ 、U、M) 之降雨概念模式。黑色(紅色)颱風標記與虛線分別表示 OMCS 形成(消散)時之颱風中心

與 OMCS 對流線位置；灰階陰影示意 OMCS 造成之雨量大小與分佈區域；黑色流線標示 OMCS 形成時之 950 百帕流線流線。結果顯示  $I_w$ -subtype(圖九 a) 通常在颱風向西北移動時，於颱風西南西側形成並向颱風外圍(向南)移動，造成兩區通常分佈在颱風西南西側。 $I_s$ -subtype(圖九 b) 通常在颱風向北移動時，於颱風南側形成並向颱風外圍(向南)移動，因此會導致 OMCS 滯留在原地，最易導致致災性降雨發生。而 U-type OMCS(圖九 c) 通常在颱風向西移動時，於颱風西側形成並向颱風外圍(向西)移動，因此 U-type 具有最快之移動速度，降雨範圍大，但雨量不似  $I_s$ -subtype 集中。

#### 六、總結

OMCS 為一類伴隨西北太平洋地區熱帶氣旋，並常在颱風與西南季風交互作用時，由外圍兩帶所發展、且伴隨大範圍冷雲頂之線狀對流系統。本研究首先回顧 1999 年至 2009 年共 109 個 OMCS 之氣候特性(Lee et al. 2012)；接著回顧一透過 WRF 模式對伴隨風神颱風(2008)之 OMCS 所進行之模擬分析研究，及其所提出之 OMCS 形成與維持之概念模式(Chen et al. 2014)；最後回顧 Chen et al. (2015) 所分析 80 個 OMCS 個案之環境特徵之結果及 Chen et al. (2015) 之 OMCS 降雨概念模式。Lee et al. (2012) 定義 OMCS 為西北太平洋地區熱帶氣旋與季風環境交互作用所導致之一類長生命期兩帶，由熱帶氣旋外圍兩帶發展而來、且伴隨大範圍冷雲頂之線狀對流系統，分析紅外線衛星雲圖與微波頻道衛星資料顯示，在 1999 年至 2009 年間，西北太平洋之熱帶氣旋分別有 22% 伴隨有 OMCS 形成；分析發生於熱帶氣旋南側之 85 個 OMCS 顯示，OMCS 常在距中心 200 至 700 公里處發展，且向外移動。

Chen et al. (2014) 針對伴隨有 OMCS 之風神颱風(2008)，利用 WRF 進行模擬與分



析，結果顯示 WRF 可合理模擬風神颱風所伴隨 OMCS 之形成與發展過程，唯因模擬之颱風外圍環流較大，而導致系統往南偏移約 100 公里。分析模擬結果顯示，風神颱風低層環流受呂宋島地形影響，颱風中心西側邊界層中之南北走向水氣帶向外圍區偏移；此南北向水氣帶因而能與西南氣流合流(而非旋入內核區)，並導致 OMCS 之形成。颱風西側之水氣帶形成則因西南季風所夾帶水氣以氣旋式軌跡繞過颱風中心，並受颱風與垂直風切交互作用影響所導致；換言之，颱風渦旋受垂直風切影響而傾斜，導致下風切方向之邊界層因不對稱渦度產生摩擦輻合；而摩擦造成之水平水氣通量輻合使水氣帶形成。在 OMCS 維持方面，受低層西南氣流與中層颱風北風環流之影響，此 OMCS 向南移動，並具有後方(北方)內流與前方(南方)層狀降雨區。南北向水氣帶中、低層具高對流可用位能之空氣，不斷隨後方內流進入系統，並在伴隨層狀降雨區之冷池( $\Delta\theta < -3\text{ K}$ )北方邊界、連續形成新對流胞，有利 OMCS 生命期之延長。

Chen et al. (2015)則進一步分析 1999 年至 2009 年 80 個 OMCS 形成時之環境特徵顯示，共有 56%(43 個)的 I-type OMCS 在颱風西側南北向水氣帶與西南氣流合流處形成，與風神颱風之 OMCS 形成過程相似。另有 31%(25 個) U-type OMCS 之形成與颱風西側南北向水氣帶有關但形成位置颱風環流與西南氣流合流處之上游；及 13%(12 個)與風神颱風概念模式最不相似之 M-type OMCS。Chen et al. (2015)分析此四類 OMCS 之氣候特性，並發展此類雨帶導致強降雨之概念模式及預報指引。結果顯示 I<sub>s</sub>-subtype 通常在颱風向北移動時，於颱風南側形成並向颱風外圍(向南)移動，因此會導致 OMCS 滯留在原地，最易導致致災性降雨發生；而 U-type OMCS 通常在颱風向西移動時，於颱風西側形成並向颱風外圍(向西)移動，因此 U-type 具有最快之移動速度，降雨範圍大，但雨量

不似 I<sub>s</sub>-subtype 集中。

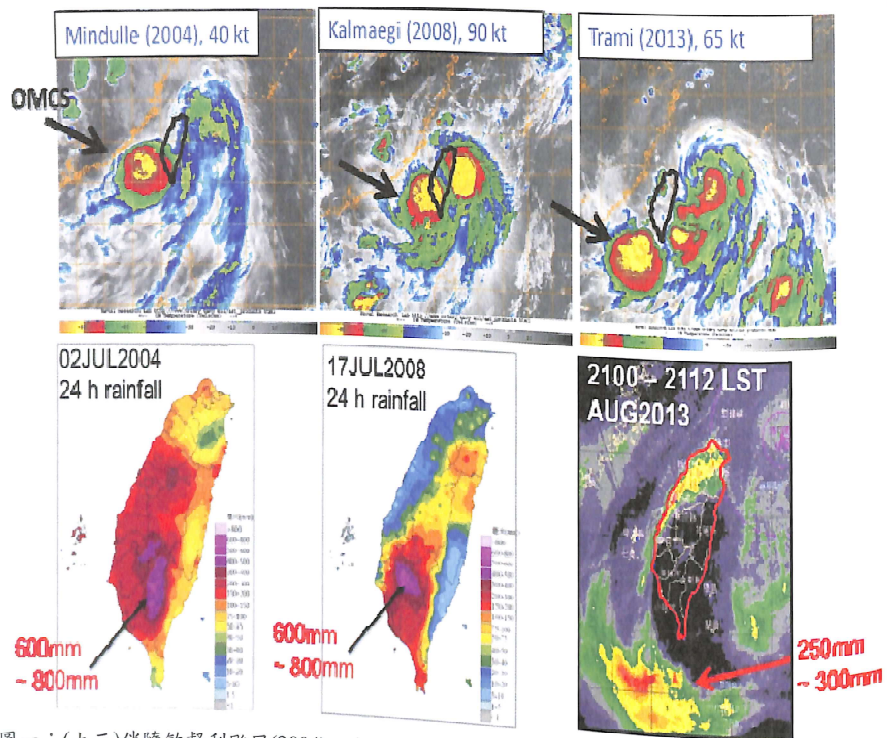
## 七、參考文獻

- 謝信良、王時鼎、鄭明典與葉天降, 1998: 百年侵台颱風路徑圖集及其應用。中央氣象局專題研究報告, CWB86-1M-01, 共 497 頁。
- 李清勝, 2011: 颱風路徑與侵台風與預報之發展-子計畫: 颱風結構及與環境交互作用之影響 (I)。99 年國科會自然處永續學門防災科技研究計畫期末報告, NSC 99 - 2625 - M - 002 - 013 - MY3, 共 42 頁。
- 李清勝, 2013: 颱風路徑與侵台風與預報之發展-子計畫: 颱風結構及與環境交互作用之影響 (III)。102 年國科會自然處永續學門防災科技研究計畫期末報告, NSC102 - 2625 - M - 002 - 013 - MY3, 共 69 頁。
- Chen, B.-F., R. L. Elsberry, C.-S. Lee, 2014: Origin and maintenance of the long-Lasting, outer mesoscale convective system in Typhoon Fengshen (2008). *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 2838-2859.
- Chen, B.-F., R. L. Elsberry, C.-S. Lee, 2015: Synoptic control of long-lasting outer mesoscale convective systems in western North Pacific tropical cyclones. *Asia-P. J. Atmos. Sci.*, accepted
- Hsiao, L.-F., M.-J. Yang, D.-S. Shih, C.-S. Lee, C.-C. Tsai, C.-J. Wang, L.-Y. Chang, Y.-C. Chen, L. Feng, J.-S. Hong, C.-T. Fong, W.-D. Guo, and G.-F. Lin, 2013: Ensemble Forecasting of Typhoon Rainfall and Floods over a Mountainous Watershed in Taiwan. *J. of Hydro.* **506**, 55-68.
- Hong, J.-S., C.-T. Fong, L.-F. Hsiao, Y.-C. Yu, and C.-Y. Tzeng, 2014: Ensemble

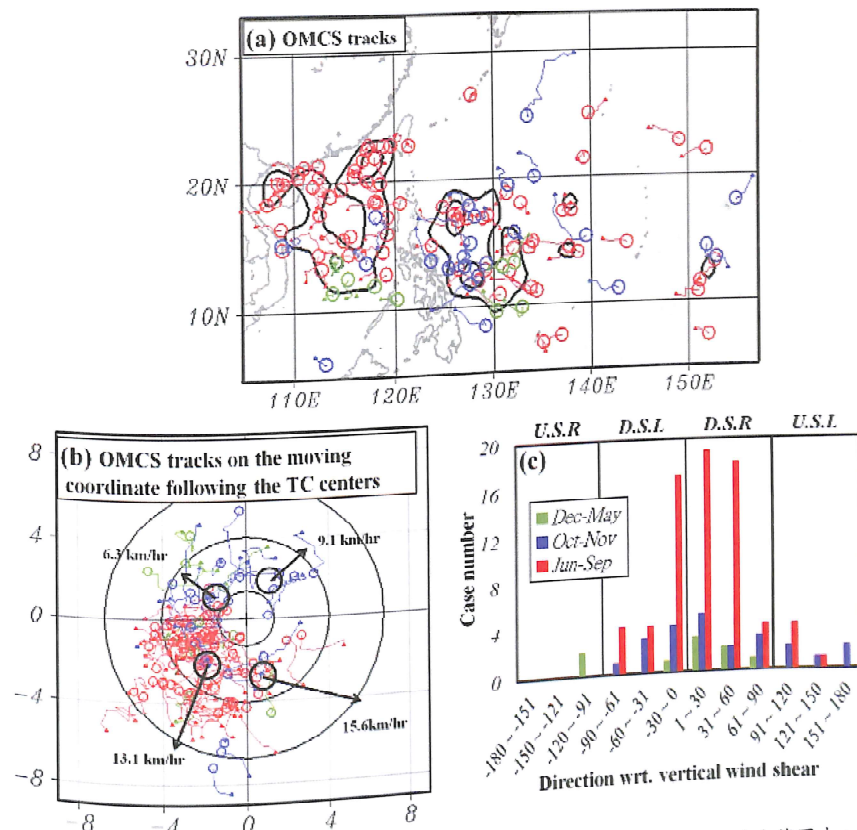
- typhoon quantitative precipitation forecasts model in Taiwan. *Wea. Forecasting.* (in press)
- Lee, C. -S., L. -R. Huang, H. -S. Shen, and S. -T. Wang, 2006: A Climatology Model for Forecasting Typhoon Rainfall in Taiwan. *Natural Hazards*, **37**, 87-105.
- Lee, C.-S., B.-F. Chen, and R. L. Elsberry, 2012: Long-lasting convective systems in the outer region of tropical cyclones in the western North Pacific, *Geophys. Res. Lett.*,

**39**, L21812.

- Lee, C.-S., L.-R. Huang and D. Y.-C. Chen, 2013: The Modification of the Typhoon Rainfall Climatology Model in Taiwan. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **13**, 65-74.
- Yeh, T.-C., 2002: Typhoon rainfall over Taiwan area: The empirical orthogonal function modes and their applications on the rainfall forecasting. *TAO*, **13**, 449-468.

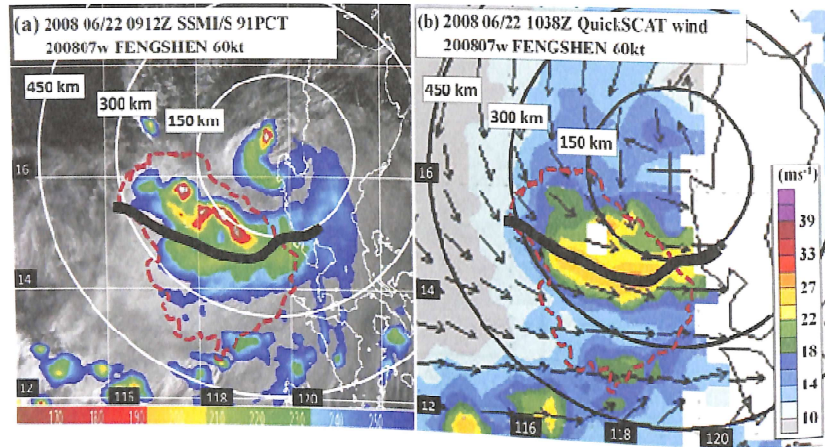


圖一：(上三)伴隨敏督利颱風(2004)、卡梅基颱風(2008)、與潭美颱風(2013)之 OMCS 紅外線衛星色調強化雲圖，黑色箭頭指出 OMCS 之位置。(下三)伴隨敏督利颱風(2004)、卡梅基颱風(2008)、與潭美颱風(2013)之 OMCS 發生當日(右下為 12 小時)期間之雨量圖或雷達估計雨量圖(右下)。

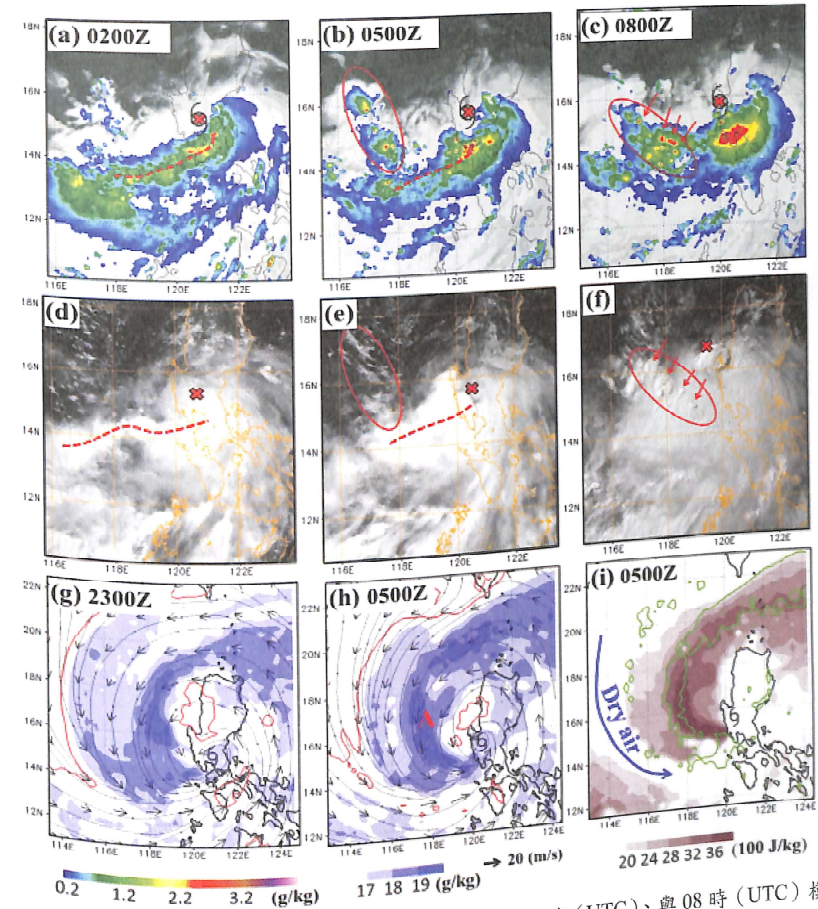


圖二：(a)1999~2009 年所有 OMCSs 之路徑與發生頻率(等值線代表在  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  經緯度範圍中之發生頻率，單位為  $0.1 \text{ } 12\text{hr/yr}$ )。(b)在跟隨颱風中心移動之座標上之 OMCS 路徑與發生頻率，單位為  $0.1 \text{ } 12\text{hr/yr}$ )。(c)OMCS 在相對於風切方向不同方位在不同象限之 OMCS 平均移動速度(粗黑箭頭)。(c)OMCS 在相對於風切方向不同方位之發生次數。圖(a)與圖(b)中之紅色路徑表發生在 6 月至 9 月的 OMCS，藍色路徑表發生在 10 月至 11 月的 OMCS，綠色路徑表發生在 12 月至 5 月的 OMCS。(本圖取自 Lee et al. 2012, Fig.2)



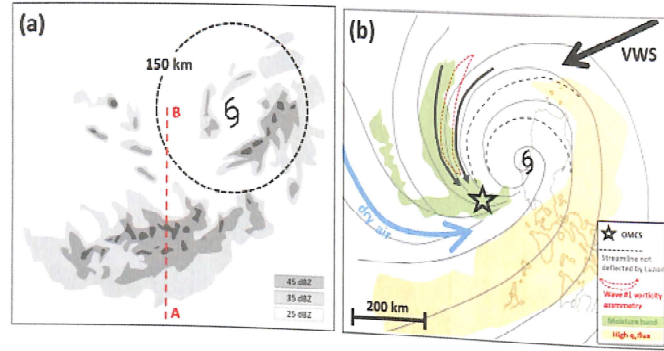


圖三：(a) 2008 年 6 月 22 日 0912z SSM/I/S 微波頻道衛星觀測 91GHz PCT 亮度溫度。(b) 2008 年 6 月 22 日 1038z QSCAT 衛星觀測之海表面風場。圖中棕色虛線代表 208K 之冷雲頂分佈範圍，粗黑色實線為由 QSCAT 海表面風場計算之相對渦度零值線。(本圖取自 Chen et al. 2014)

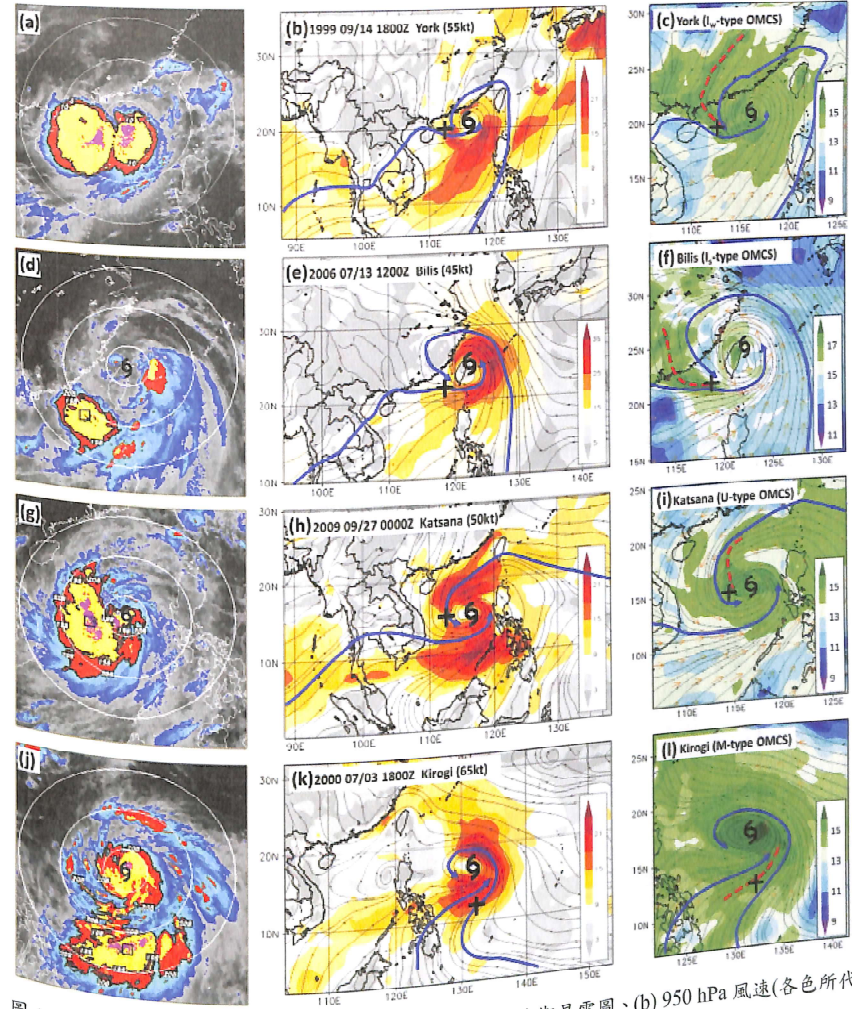


圖四：(a、b、與 c) 2008 年 6 月 22 日 02 時 (UTC)、05 時 (UTC)、與 08 時 (UTC) 模式模擬大氣柱中之冰、雪、及雹之混和比，各色所代表之數值如圖左下角之色條所示。(d、e、與 f) 同圖 a、c、與 e，但為相同時段之可見光衛星雲圖。紅色 "X" 為颱風中心，紅虛線標示一偏東西向之深對流帶，紅圈則標示一偏南北向之淺對流帶。(g 與 h) 2008 年 6 月 21 日 23 時 (UTC) 與 6 月 22 日 05 時 (UTC) 小於 15 gm kg<sup>-1</sup> 之區域均水氣混和比。各色所代表之數值如圖下方中間之色條所示，小於 15 gm kg<sup>-1</sup> 之區域以紅色等值線表示。(i) 2008 年 6 月 22 日 5 時之地表對流可用位能 (convective available potential energy, 102 J kg<sup>-1</sup>，如圖右下角色條所示) 及自由對流高度 (level of free convection) 小於 400 公尺之區域 (以綠色等值線表示)。(本圖取自 Chen et al. 2014)

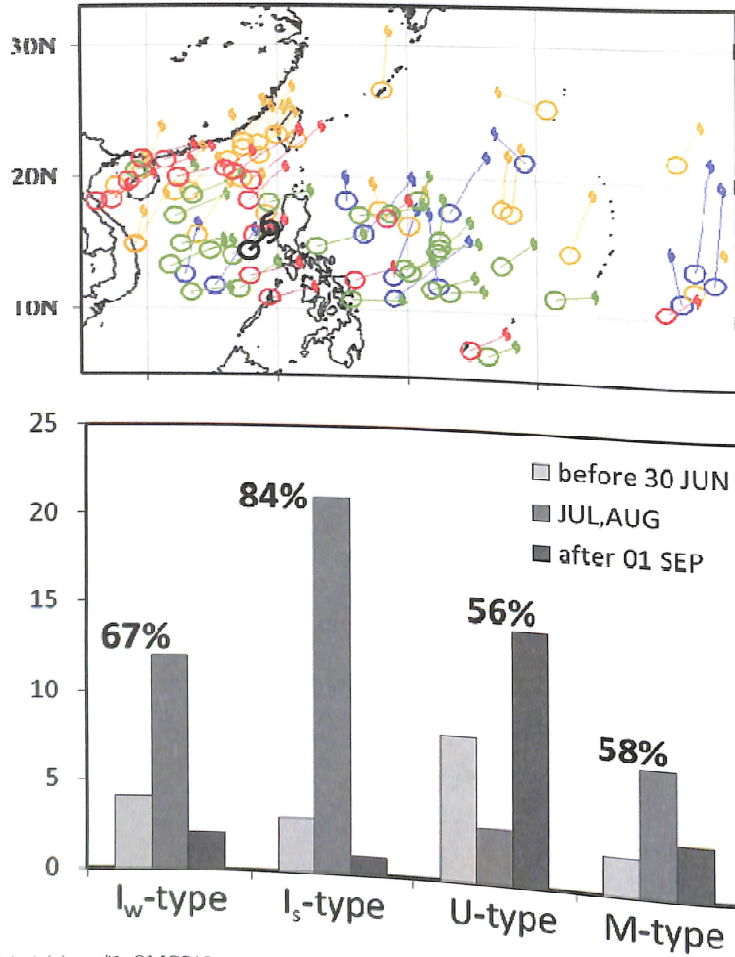




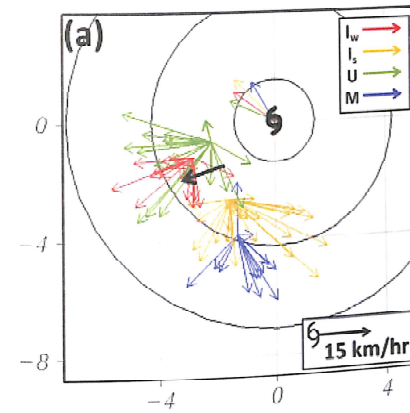
圖五：(a)風神颱風(2008)外圍 OMCS 之雷達回波示意圖。(b)風神颱風(2008)外圍 OMCS 之形成概念模式。OMCS(星形標誌)在低層西南氣流與颱風北風環流中之水氣帶(淺綠色色塊)相交處形成；灰色實線(或灰色虛線)為受(或若不受)呂宋島地形影響之颱風低層流線場；紅色虛線標示邊界層頂波數一之不對稱正渦度區，此區位於 200 至 850 百帕平均(距颱風中心 200 至 800 公里半徑範圍)垂直風切(右上角黑色箭頭)之下風切偏右側；粗藍色曲線與箭號標示中層乾空氣旋入颱風環流之軌跡；黃色色塊為海表面水氣通量較高之區域。(本圖取自 Chen et al. 2014)



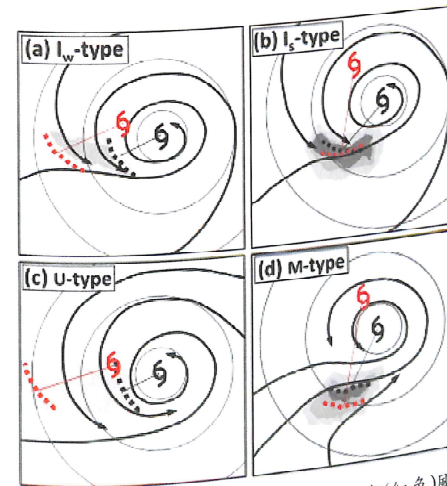
圖六：伴隨約克颱風(1999)之 OMCS 發生期間(a)紅外線衛星雲圖、(b) 950 hPa 風速(各色所代表之數值如圖右下方色條所示)與流線場、(c) 950 hPa 水氣混和比(各色所代表之數值如圖右下方色條所示)與流線場。紅色粗虛線表示低層水汽帶之位置；十字標記表示圖右下方色條所示)與流線場。紅色粗虛線表示低層水汽帶之位置；十字標記表示 OMCS 之位置；颱風標記表示颱風中心位置。(d-f) 同圖(a-c)，但時間為伴隨碧利斯颱風(2006)之 OMCS 發生期間。(g-i) 同圖(a-c)，但時間為凱薩納颱風(2009)之 OMCS 發生期間。(j-l) 同圖(a-c)，但時間為柯洛奇颱風(2000)之 OMCS 發生期間。



圖七：(a) 四類 OMCS (I<sub>w</sub>、I<sub>s</sub>、U、M) 之發生月份分布圖。(b) 四類 OMCS (I<sub>w</sub>、I<sub>s</sub>、U、M) 之地理分布，圓圈標記表示 OMCS 之位置，颱風標記表示對應之颱風中心，粗黑色標記為伴隨風神颱風(2008)之 OMCS 個案。(本圖取自 Chen et al. 2015)



圖八：四類 OMCS (I<sub>w</sub>、I<sub>s</sub>、U、M) 在跟隨颱風中心之移動座標上的合成位移圖。須注意已將四類 OMCS 之位移向量(箭頭)平移至各類 OMCS 之平均形成位置，而四類 OMCS 發生時之平均颱風移速則標示在颱風符號上，座標軸為經(緯)度。粗黑色箭頭為伴隨風神颱風(2008)之 OMCS 個案。(本圖取自 Chen et al. 2015, Fig.4)



圖九：四類 OMCS (I<sub>w</sub>、I<sub>s</sub>、U、M) 之降雨概念模式。黑色(紅色)颱風標記與虛線分別表示 OMCS 形成(消散)時之颱風中心與 OMCS 對流線位置；灰階陰影示意 OMCS 造成之雨量大小與分布區域；黑色流線標示 OMCS 形成時之 950 百帕流線流線、灰色同心圓分別代表距颱風中心 150、450、750 公里半徑範圍。(本圖取自 Chen et al. 2015, Fig.9)

## Outer Mesoscale Convective Systems in the western North Pacific Tropical Cyclones

Buo-Fu Chen

Weather Center Weather Wing of C.A.F., R.O.C

### ABSTRACT

This article reviews a series of papers related to outer mesoscale convective systems (OMCSs) in the outer region of western North Pacific tropical cyclones (TCs). An OMCS is a long-lasting linear convective system with large cold cloud shield that develops from TC distant rainbands and is associated with TC-environment interactions. First, this review paper presents the climatology study of OMCSs from Lee et al. (2012). Then, the development and maintenance of OMCS based on the case study of OMCS embedded in TC Fengshen (2008) is described, which is from Chen et al. (2014). Last, the analyses of 80 OMCSs and the rainfall conceptual models of four OMCS types from Chen et al. (2015) are presented.

**Keywords:** Typhoon rainfall, Rainbands, mesoscale convective systems, southwest monsoon