

2009 莫拉克颱風雷達觀測熱塔特性研究

唐玉霜¹ 陳台琦¹

國立中央大學¹

摘 要

在 2009 年 8 月 8 日下半年，於莫拉克颱風中有一條東西走向的對流雨帶在台灣西南部南北推移，並且在雨帶中有數個強對流胞不斷在雨帶上風處生成，然後自西北西往東北東快速向陸地移動。本研究利用馬公和七股兩個雷達進行雙雷達合成風場分析，建構出雨帶內風場的三維結構，分析時間為 1754-1831LST。合成風場顯示，颱風環流的西北風和西南氣流在台灣海峽造成強輻合，進而形成強對流雨帶，而且在對流雨帶中，常會伴隨強風速(30m/s)的情形。在本研究中定義「熱塔」為在 10 公里高度等高面上，其回波大於 25dBZ 的對流胞。經由計算渦度收支，來說明颱風中的對流發展與噴流之間的關係，發現熱塔內的強上升運動，會增強中低層渦度，進一步增強噴流的強度。最後利用馬公雷達的雙偏極化參數分布，來說明在熱塔中的雲物理結構分布。

關鍵字：莫拉克颱風、熱塔、偏極化雷達

一、前言

莫拉克颱風在 2009 年 8 月 6 日到 8 月 10 日影響臺灣，雖然在東部外海已減弱成輕度颱風，但是莫拉克颱風通過台灣上空時移動速度慢，而且具有非常不對稱的結構，特別是在 8 月 7 日登陸台灣以後，南側存在發展旺盛且範圍寬廣的低溫對流帶，北側眼區則對流微弱，兩側對流發展極不對稱。造成台灣西南部驚人的累積降雨，從 8 月 5 日到 8 月 10 日的阿里山測站颱風總雨量可達 3059mm，導致南部地區許多鄉鎮市淹水，嘉義、高雄山區也有大規模的坍方和土石流災情，除了造成嚴重的人員傷亡和受困外，農林漁牧的經濟損失也十分慘重。

在陳等(2010)中，將 8 月 7 日到 8 月 8 日細分為 4 個階段，分別是：

- (1) 8 月 7 日 00-12 時：颱風中心減速期
- (2) 8 月 7 日 12-24 時：颱風環流中心東部外海滯留期
- (3) 8 月 8 日 00-12 時：颱風環流中心登陸期
- (4) 8 月 8 日 12-24 時：颱風環流中心西部外海滯留期

在本研究中，將著重討論第(4)階段。此時有一東

西走向雨帶在七股雷達站附近南北徘徊移動或滯留，此時正是高雄、嘉義山區降下超大豪雨的時段，由於雨帶的生命期長，且位置利於使用七股與馬公雷達做詳細的雙雷達分析，助於了解雨帶和強對流胞內部的形成機制和動力特徵，並且還利用了馬公雷達的偏極化參數分布，來了解此時對流胞內部的雲物理過程，增加對於強對流系統內部結構的了解。

二、資料來源與處理

本研究使用七股都卜勒雷達和馬公雙偏極化雷達在 2009 年 8 月 8 日 1754-1831LST 進行雙雷達分析，以圖一中黑框表示雙雷達合成範圍，以七股雷達為中心，於七股雷達西邊 100 公里，南邊 60 公里的範圍，而在七股雷達左上方約 45°角位置為馬公雷達位置。

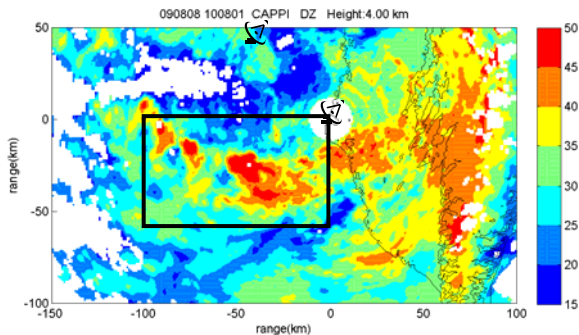
由於在合成時必須考慮系統的移速，所以用 REORDER 內插得到時間場，並與 SPRINT(Sorted Position Radar Interpolation)內插得到的參數場做結合，然後利用 CEDRIC(Custom Editing and Display of Reduced Information in Cartesian space)對資料作平滑和修補，最後將處理好的資料進行合成。

而在馬公偏極化參數修正上，回波和 Z_{DR} 觀測值分別減去系統偏移量：-7.04dBZ 和 0.382dB，然後再使用單係數衰減修正法(Bringi et al., 1990)進行修正，方程式如下：

$$A_H = \alpha \Delta K_{DP}$$

$$A_{DP} = \beta \Delta K_{DP}$$

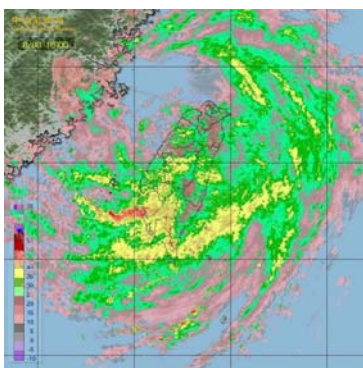
其中 A_H 是回波單向衰減量， A_{DP} 是差異單向衰減量，此研究用的理想修正係數分別為： $\alpha=0.054$ 、 $\beta=0.01$ 。



圖一、黑框為雙雷達合成範圍，此圖中心為七股雷達，左上角約 45 度角處為馬公雷達。

三、 雨帶特徵分析

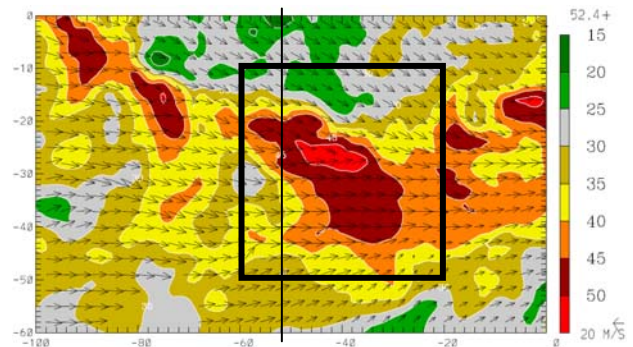
莫拉克颱風帶來的豪雨重創南台灣，除了造成道路坍方、橋樑崩塌等，其中傷亡最嚴重的莫過於高雄縣甲仙鄉的小林村，豪雨造成土石流、滅村的慘劇，而從甲仙和新發自動雨量站的小時累積雨量可知，高雄縣山區在莫拉克颱風侵襲期間，最大降雨都出現在 8 月 8 日的下半天，此時颱風環流中心在台灣西北外海，而台灣西南部則有一東西走向的強對流雨帶在這附近南北徘徊(圖二)，造成持續性降雨，而且雨帶內有許多發展十分旺盛的對流胞不斷在雨帶上風處新生，然後從外海攜帶強降雨進入陸地，當對流胞移動受到山的阻擋，就在山前累積，甚至有些對流被地形抬升、加強而產生驚人的降雨，另外，這些不斷移入的對流胞，也使得甲仙的雨時延長，造成重大的災害。由此可知，這條 8 月 8 日下午這條對流雨帶的確是造成高雄山區強降雨的原因之一。



圖二、
2009 年 8 月 8 日 1800LST 的全台雷達回波圖。

在 8 月 8 日 1809LST，此時在雙雷達分析範圍內有一寬度約 50 公里(30dBZ)的對流雨帶，雨帶內包含數個對流胞。由雙雷達合成得到的 2 公里水平風場分布(圖三)，發現此強對流雨帶位於颱風環流引起的西北風、西風和西南氣流所形成的輻合帶上，而在 3 公里時，水平風場為西風和西北風，到了 4 公里以上，風場只見颱風環流引起的西北風。由此可知，此時的環境平均風場，主要是由颱風環流所主導，西南氣流的勢力僅在低層，整層的平均氣流可用來解釋對流胞快速地從西北西向東南東移動的情形，另外，在低層西南氣流和颱風環流形成的強烈輻合帶，也可用來說明排列在雨帶北側的強上升運動。

此強對流雨帶的北側(靠近颱風眼側)有較大的回波梯度，還有大的上升速度和輻合區呈現線狀分布，而在相對風場則可看到旋轉的情形。從水平風速圖上，可發現此時有一強風速區(30m/s)，其位置伴隨雨帶位置移動，而在強風區的邊緣，常有強的正渦度和強輻合出現。



圖三、2009 年 8 月 8 日 1809LST 雙雷達分析 2 公里高度等高面，底圖為七股雷達回波，向量為雙雷達合成水平風場，圖內黑方框表下節對流胞之討論區域。直線表南北垂直剖面位置。

四、 對流胞特徵分析

本研究將「熱塔」定義為在 10km 高度的水平面上，其回波大於 25dBZ 的對流胞。在 1600LST 時，雨帶內部大致呈現一個帶狀強對流的形態，較難辨識其中對流胞的行為，而從 1700LST 到 1831LST 則可

以看到對流胞開始在雨帶上風處生成、組織，並且以西北向東南的形式，快速移向陸地，最後減弱的過程，其中發展最強的對流胞，生命期接近三小時。

利用 1754-1831LST 的雙雷達分析結果，得到每間隔 7.5 分鐘最強的對流胞之變化，在這六個體積掃描中，雨帶內數個對流胞皆符合「熱塔」的定義，且對流胞型態變化快速而劇烈，從 1754-1809LST 對流胞沿著雨帶北緣發展，形狀呈現西北—東南走向，1816LST 對流發展到最強，在 10 公里的水平面回波可超過 40dBZ，接下來到 1831LST 這個時段，雨帶中的對流胞開始變形、各自組織和發展，本節將討論熱塔與垂直速度、噴流之間的關係。最後，則是用偏極化參數的分布，得到對流內的微物理特徵，進而與前述動力結構相配合，幫助了解熱塔行為。

(一) 三維風場特性

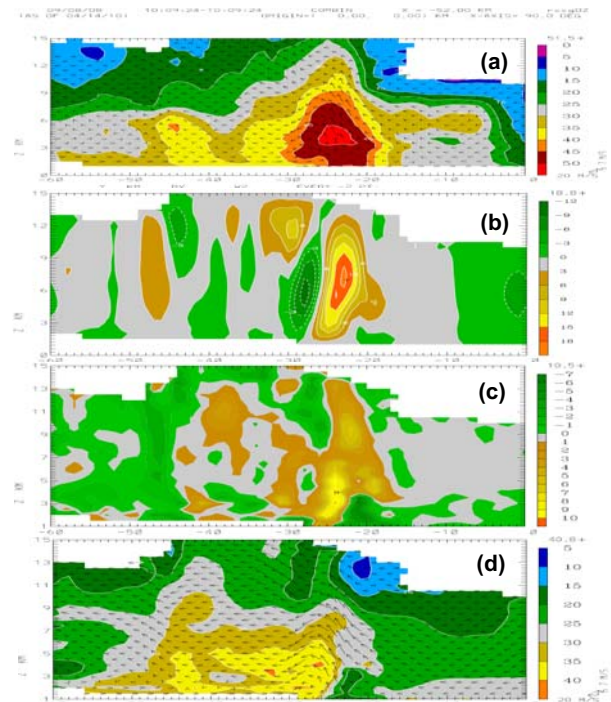
這六個時間的回波水平剖面可以發現，此最強的對流胞長寬約 20 公里，可視為一個對流系統，內部包括數個發展很深的對流塔，在本研究中，將取出最強的對流塔作特性討論，在本文將討論在 1809LST 之熱塔特性，以下討論將以水平範圍為 40kmx40km 內的場量變化進行討論，範圍見圖三粗黑框所示。

(1) 熱塔回波三維結構與垂直運動關係

利用 REORDER 內插得到的時間場將回波的位置做過偏移修正後，從七股雷達水平回波分布，發現強回波梯度都集中在雨帶北側(靠近颱風眼的一側)，且比較各層水平回波剖面後，則發現強對流都向西方，也就是向系統行進方向的後方傾斜，而強上升運動集中在雨帶的北側，並且呈現線狀分布(圖五 c)。

此時從 8 公里水平面挑選最強回波處作一南北剖面(X=-52km)，如圖三黑線所示，從圖四發現在低層的強回波與高層強回波的位置一致，略為向颱風中心外側傾斜，此時 40dBZ 的回波高度可達 9 公里，此結構與 Barnes et al. (1983)雨帶中的垂直概念結構一致，此時在回波靠近颱風中心側有一傾斜的強上升氣流，最大強度接近 20m/s，高度位在 6-8 公里，寬度約 7 公里，高度可達 13 公里。將 8 公里回波的水平剖面疊

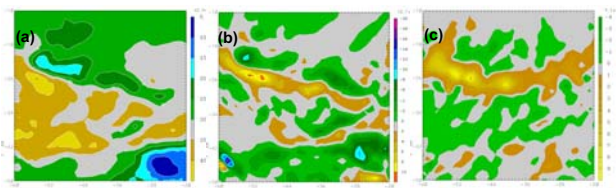
合垂直上最大上升速度，以此來表示回波高度與上升氣流強度的關係，在 1809LST 強上升運動都位在深對流上，顯示兩者密切相關。



圖四、1809LST(X=-52km)垂直南北剖面。(a)底圖是七股回波場，風標為系統相對風場。(b)垂直運動場。(c)垂直渦度場。(d)底圖為水平風速，風標為此剖面上的合成風場。

(2) 強風帶與渦度的關係

在 1809LST 存在一寬度大於 10 公里的低層強風(大於 30m/s)，勢力可延伸到達陸地，最大風速強度位在 4 公里處。而比較低層等風速圖(圖五 a)和高層回波圖，可知深對流伴隨大的風速梯度，其最強風速通常位在對流胞西南側，並且在強風側會出現大的正渦度(圖五 b)，弱風處出現負渦度。從低層相對系統水平風的流線圖，除了可以看到西北風和西南風的輻合，還可看到輻合帶上水平風切產生的氣流旋轉。



圖五、1809LST2 公里高度等高面 (a)水平風速。(b)垂直渦度。(c)垂直速度

(3) 渦度收支

根據 Hence and Houze (2008) 的理論，說明強對流的強上升運動會將環境產生的水平渦度傾側成垂直渦度，並會將垂直渦度向上平移到中層，增強噴流的強度。在 1809LST 的南北垂直剖面(圖四)中也符合這樣的情形，從相對系統移速的風場可看到在 2 公里下有一南來的入流，在對流胞的正下方、前側和颱風環流提供的北風分量產生輻合，而在低層強輻合的正上方為強上升運動，從三維風場可以看到，當氣流流經強上升氣流時，會出現繞流。此強上升運動的位置和分布型態和垂直渦度場的正渦度分布近似，並且渦度場的最大值位在 4 公里處，與風速最大值的位置一致，說明對流會增強渦度，進一步增強噴流強度。

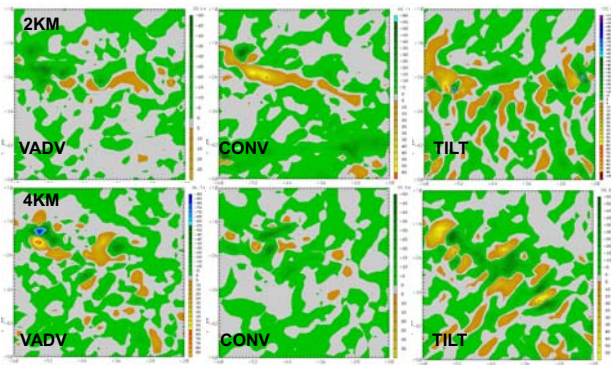
接下來使用 Eastin and Link(2009) 計算渦度收支的方法，來討論垂直運動對於垂直渦度的關係。利用高解析度的雙都卜勒合成風場計算出三維的渦度場 ω ，其中又分為 ξ 、 η 、 ζ 三個分量，可以寫成：

$$\omega = \xi i + \eta j + \zeta k$$

其中，影響垂直渦度隨時間變化的來源，可以以下式表示：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\left(u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}\right) - \left(w \frac{\partial \zeta}{\partial z}\right) - \zeta \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

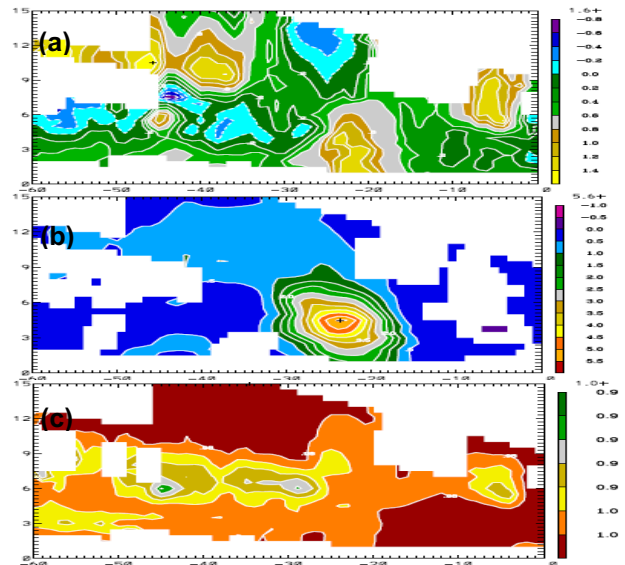
左式表垂直渦度隨時間變化率，可視為局地垂直渦度變化項(GENR)，右式第一項為水平平流項(HADV)，第二項為垂直平流項(VADV)、第三項為抽拉項(CONV)、第四項為傾側項(TILT)，以下討論將著重在垂直運動對於垂直渦度的影響，所以不討論水平平流項的貢獻，僅討論其他三項對於局地垂直渦度變化項的貢獻量，其值越大表示對下個時間的正渦度增加越有利。



圖六、第一列為 1809LST 2 公里高度等高面的渦度收

支項分布，第二列則為 4 公里高度等高面分布。由左至右分別為垂直平流項、抽拉項和傾側項。

從 1809LST 三項在各層的等高面貢獻量的分布(見圖六)，在 2 公里等高面，在上升運動的南緣抽拉項正貢獻呈現帶狀分布，在此區傾側項也有部分正貢獻，分布在上升氣流的南側，到 3、4 公里中層等高面，在對流胞西北角、上升氣流南側的氣流繞流處，傾側項和垂直平流項都有較多的貢獻，而到了中高層，此時上升運動仍強，所以在對流胞內的垂直平流項有較大的正貢獻。



圖七、1809LST 馬公雷達偏極化參數分布剖面。

- (a) Z_{DR} 差異反射率
- (b) K_{DP} 比差異相位差
- (c) ρ_{HV} 相關係數

(二) 微物理特徵

在此節為了方便與前述的合成風場比較，所以所使用的馬公偏極化雷達資料，均變成以七股雷達為中心的座標。在 1809LST 高度 2 公里水平面上，大的 Z_{DR} 值大致分布在雨帶的北緣，而在最強對流胞上 Z_{DR} 、 K_{DP} 和回波值的位置一致。圖七同樣是從 8 公里水平面挑選最強回波處得到的偏極化參數南北剖面 ($X=-52\text{km}$)，此時，上升氣流軸向雨帶北側傾斜，而在上升氣流的下方有大的 Z_{DR} 值。大體而言，回波、 Z_{DR} 和 K_{DP} 三者的最大值是重合的，表示在強對流中有聚集了許多大的水滴。

另外 1809LST 的強對流中，可明顯看到 Z_{DR}

column 和 K_{DP} column 的結構，而 K_{DP} 的最大值可達 5.6，位在高度約 4.5 公里處，若以 $K_{DP}>3.5$ 區域來看，大的 K_{DP} 值並不是落在地面上，顯示此時的強上升氣流，可以將較大量的水滴帶至高處，並且提供足夠的浮力，使水滴不會馬上落至地面。若以 $K_{DP}>1$ 的等值線來看，可以發現 K_{DP} column 在上升氣流附近有一明顯的突起，表示過冷水被強上升氣流往上帶至 9 公里高，而在此處 K_{DP} column 上方的 ρ_{HV} 較小，則表示此處開始出現冰水混相的情形。

五、 結論與未來展望

在 8 月 8 日下午半天，由於莫拉克颱風環流與西南氣流在台灣海峽產生強輻合，形成一條東西走向、長生命的強對流雨帶。由於這條雨帶南北推移，且在雨帶內不斷新生的強對流胞，發展旺盛且快速地往陸地傳遞，並在山區與地形作用，是造成山區驚人降雨的原因之一。

雨帶內的強回波略為向颱風中心外側傾斜，此結構與 Barnes et al. (1983) 雨帶中的垂直概念結構一致。此熱塔在 2 公里高度等高面，其 45dBZ 回波長寬約 20 公里，而且 40dBZ 的回波高度可達 9 公里，此時上升運動接近 20m/s。而從偏極化參數得到的微物理垂直結構可知，對流內的強上升氣流，可將過冷水帶至較高的位置，且在高層有冰晶的分布，在熱塔內冰晶和過冷水交互作用下會釋放的大量潛熱，對於維持熱塔生命期有很大幫助，可從本文研究的熱塔生命期接近 3 小時得以證實。

經由計算渦度收支的結果，發現對流內的強上升運動，會增加對流內的正渦度，進一步增強噴流的強度。而雨帶內噴流的加強，會加速傳遞對流胞和動能往陸地的傳遞，加上在山區受地形抬升、加強，造成山區上驚人的累積雨量。

由於此次事件，在台灣南部和南海地區缺乏探空資料，所以對於強對流內部的熱力結構分析很困難，未來希望能透過熱動力反演，配合數值模擬結果，幫助了解熱塔內部的熱力特徵。

六、 參考文獻

- Barnes, G. M., D. P. Jorgensen, and F. D. Marks Jr., 1983 : Mesoscale and convective scale structure of a hurricane rainband. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 2125-2137
- Bringi, V. N., V. Chandrasekar, N. Balakrishnan, and D.S. Zrnic, 1990: An examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 829-840.
- Eastin, M. D., and M. C. Link, 2009: Miniature supercells in an offshore outer rainband of hurricane Ivan (2004). *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2081-2104.
- Hence, D. A., and R. A. Houze Jr., 2008: Kinematic structure of convective-scale elements in the rainbands of Hurricanes Katrina and Rita (2005). *J. Geophys. Res.*, **113**, D15108, doi:10.1029/2007JD009429.
- 陳台琦, 魏志憲, 林沛練, 廖宇慶, 唐玉霜, 張偉裕, 周鑑本, 紀博庭, 林忠義 2010: 莫拉克颱風雷達觀測中尺度雨帶特徵, 莫拉克颱風科學報告, 53-81.