

莫拉克颱風雷達觀測中尺度雨帶特徵

陳台琦¹ 唐玉霜¹ 魏志憲² 林沛練¹ 廖宇慶¹
張偉裕¹ 周鑑本³ 紀博庭¹ 林忠義⁴

¹中央大學大氣系

²國防大學

³氣象局

⁴國家實驗研究院颱風洪水研究中心籌備處

(中華民國九十九年五月四日收稿；中華民國九十九年六月三十日定稿)

摘 要

莫拉克颱風造成嚴重的水災，在整個颱風侵襲台灣期間，全台氣象雷達網包括 6 部都卜勒雷達及 4 部偏極化雷達，均全程觀測此移動非常緩慢的颱風，從觀測結果顯示颱風本身的環流與西南氣流共伴，並受地形影響後產生了一個延時很長、近似滯留的降水系統，因此透過雷達網資料可以詳細分析此強降水事件之風雨分布，並進一步了解其內部雲物理、雲動力特徵及致災的原因。

從雷達觀測可以明顯的看到此颱風結構有非常明顯的不對稱性，與典型颱風眼牆、雨帶的概念模型有很大差異：颱風眼區對流相當的微弱；對流旺盛的主要雨帶在台灣巴士海峽近似滯留；最重要的是來自颱風環流由台灣海峽南下的西北風與西南氣流輻合產生的致災雨帶，在台灣西南部重複形成或滯留，並與地形作用造成高雄、嘉義及南投山區破紀錄的累積雨量。在本研究中，將莫拉克颱風雨帶分為四區，討論對流區與層狀區的分布與颱風雨帶概念模式的異同之處，並將莫拉克颱風降水特徵分為四個階段，著重討論在 8 月 8 日 00-24 時，在台灣西南部的雨帶特徵，例如：雨帶的新生及發展與風場的關連性，以及雨帶南北來回移動的情形等，除了利用反演的雙雷達風場分析，可以分析雨帶內的風場輻合及上升運動的特徵，另外還利用馬公偏極化參數資料，了解對流胞內部的微物理結構。

關鍵字：莫拉克颱風、雷達

一、前言

在莫拉克颱風侵襲台灣期間，氣象局全省都卜勒雷達網；空軍馬公、清泉崗雙偏極化雷達、綠島都卜勒雷達；民航局機場都卜勒雷達；中央大學雙偏極化雷達、TEAM-R 均保持觀測狀態，聯合起來可以提供這個颱風在台灣附近的降水特徵，包括風雨分佈、形成災害雨帶的生命週期、重複生成的頻率、移動的速度，與地形的交互作用。並有機會透過多都卜勒雷達合成、反演熱動力場，進一步了解這些致災雨帶的動力機制；同時，位於馬公的偏極化雷達可提供雨帶中雲物理的特徵，本研究內容主要擷取至中央大學大氣物理所唐玉霜碩士論文。

從衛星及雷達資料顯示此颱風結構與典型颱風眼牆、雨帶的概念模型有很大差異，具有非常明顯的不對稱性(Willoughby, 1988, Houze et al., 2006, Elsberry et al., 1985)，也就是處於颱風眼南方與西南氣流共伴產生的強烈雨帶對流系統如何與颱風眼核心區域交互作用(Ritchie et al., 1999)，在地形影響下對於颱風路徑移速以及強度的影響，值得透過將雷達資料同化與數值模擬再深入研究。

本文將全部採用本地時間(LST)。從 8 月 6 日到 8 月 9 日的紅外線衛星雲圖可看出莫拉克颱風在整個侵襲台灣的時間內，颱風眼區整個南側均存在一範圍很大的低溫強對流區，圖 1(a)為莫

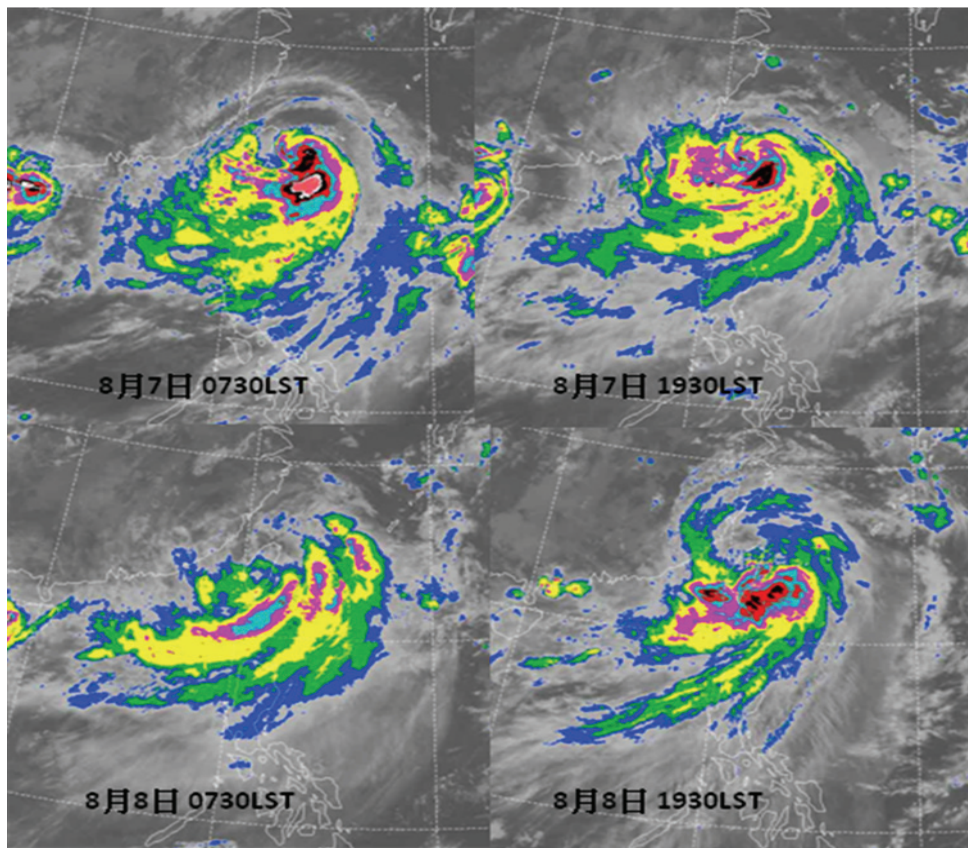


圖 1(a) 莫拉克颱風紅外線加強影像衛星雲圖，時間為 8 月 7 日 0730LST、1930LST、8 月 8 日 0730LST、1930LST。
(氣象局衛星中心提供)

拉克颱風紅外線色調強化衛星雲圖，時間為 8 月 7 日 07:30LST、19:30LST、8 月 8 日 07:30LST、19:30LST，圖 1(b)為採自周等(2010)文中所示 8 月 7 日 12 時、8 月 8 日凌晨、8 月 9 日凌晨、8 月 9 日 12 時附近時間微波頻道可降水量，單位為 (kg/m^2)。從這兩種圖可以看出深對流的不對稱性，而極大範圍豐沛的水氣則環繞整個台灣鄰近的海面。

如果比對一般颱風對於雨帶的定義 (Willoughby, 1988, Houze et al., 2006)，颱風結構大致可分為眼牆區(Eyewall)、主要雨帶區(Principal band)及次要雨帶區(Secondary bands)。以 8 月 7 日 09 時為例 (圖 2(a))，在台灣東部以眼為中心，半徑約 120 公里，本文定義為 A 區；從半徑 120 到 400 公里，大片夾雜數個對流、層狀降水的雨帶，本文定義為 B 區，從半徑 400 公

里以外，有明顯的氣旋式旋轉雨帶，內邊界有許多強對流胞，並配合向南延伸的層狀區，此區稱為 C 區，A 區是眼牆區，B 區是次雨帶，而 C 區向東北延伸則為主要雨帶。A 區大致符合 Anthes (1974)定義的內核區(core regime)，B、C 區屬於交互作用區(interactional envelope regime)，在衛星雲圖上可看到 C 區更南邊的外核區(outer regime)對流，已處於雷達觀測範圍之外。

莫拉克颱風在強盛的西南氣流影響下，眼牆區對流微弱 (A 區)，在登陸後，眼牆內無降水區半徑長達 100 公里以上，地面風場顯示此區風速在繞過臺灣北角時可高達 45m/s，南側持續範圍極大的寬廣深對流區 (C 區只是此對流區的一小部分)，與典型颱風結構的概念模型有相當大的差異，其異同之處值得深入研究。在 8 月 7 日 03 時到 8 月 8 日 03 時 24 小時之內，雖其中有許多

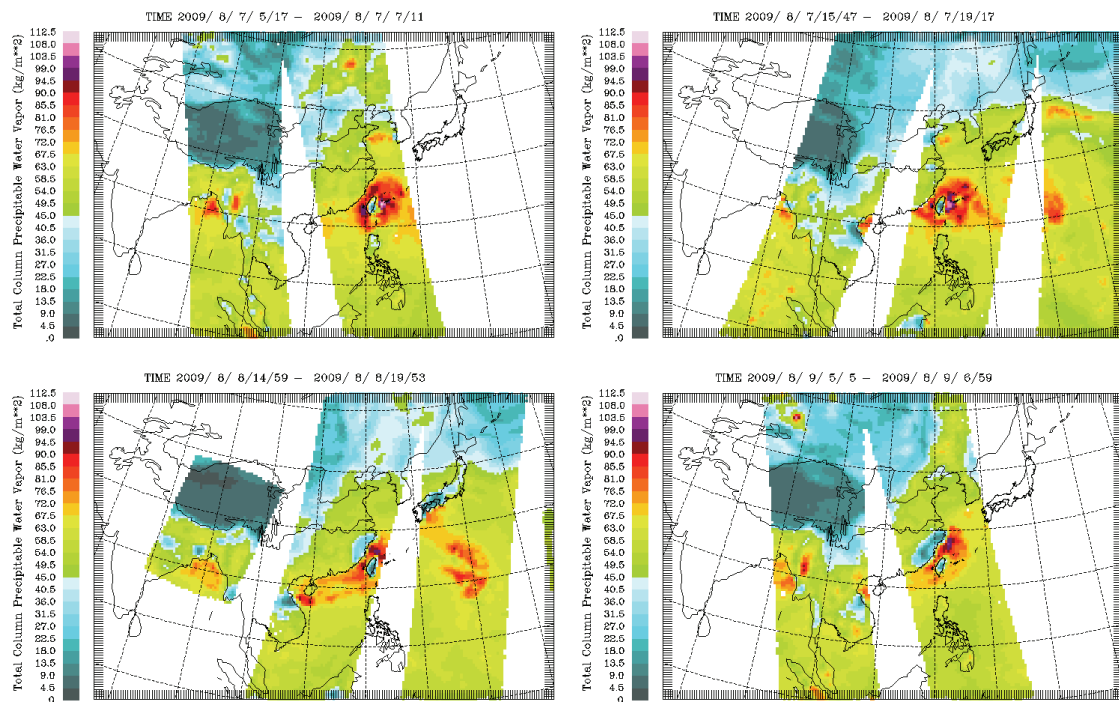


圖 1(b) 8 月 7 日 12 時、8 月 8 日凌晨、8 月 9 日凌晨、8 月 9 日 12 時附近 時間微波頻道可降水量，單位為(kg/m^2) (周等，2010)。

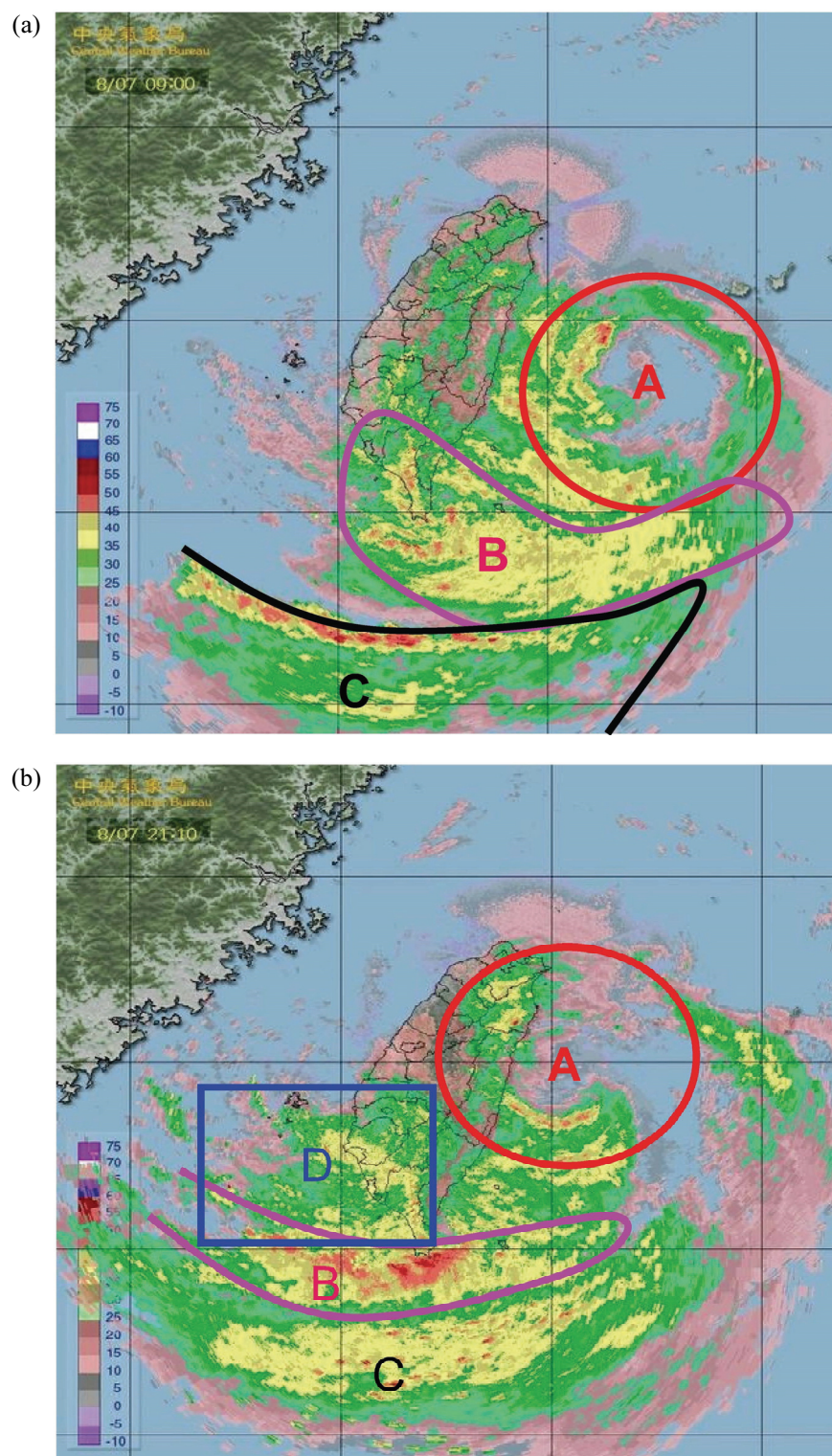


圖 2 氣象局全台雷達網最大回波圖(a)8 月 7 日 09 時降水特徵分區。(b)8 月 7 日 21 時降水特徵分區。

小尺度的變化，此三區的結構一直維持。在 8 日當天在台灣的西南側不斷的有雨帶在台南附近重複生成後南移或滯留，並與地形交互作用造成中央山脈西麓強降水，此區稱為 D 區（圖 2(b)）。本文會針對以上的這些特徵再詳細的討論。

二、莫拉克颱風降水系統在不同階段的回波分佈特徵

圖 3 為從 8 月 7 日到 8 月 9 日雷達全省最強回波分佈圖（約每三小時一張），可大致將降水特

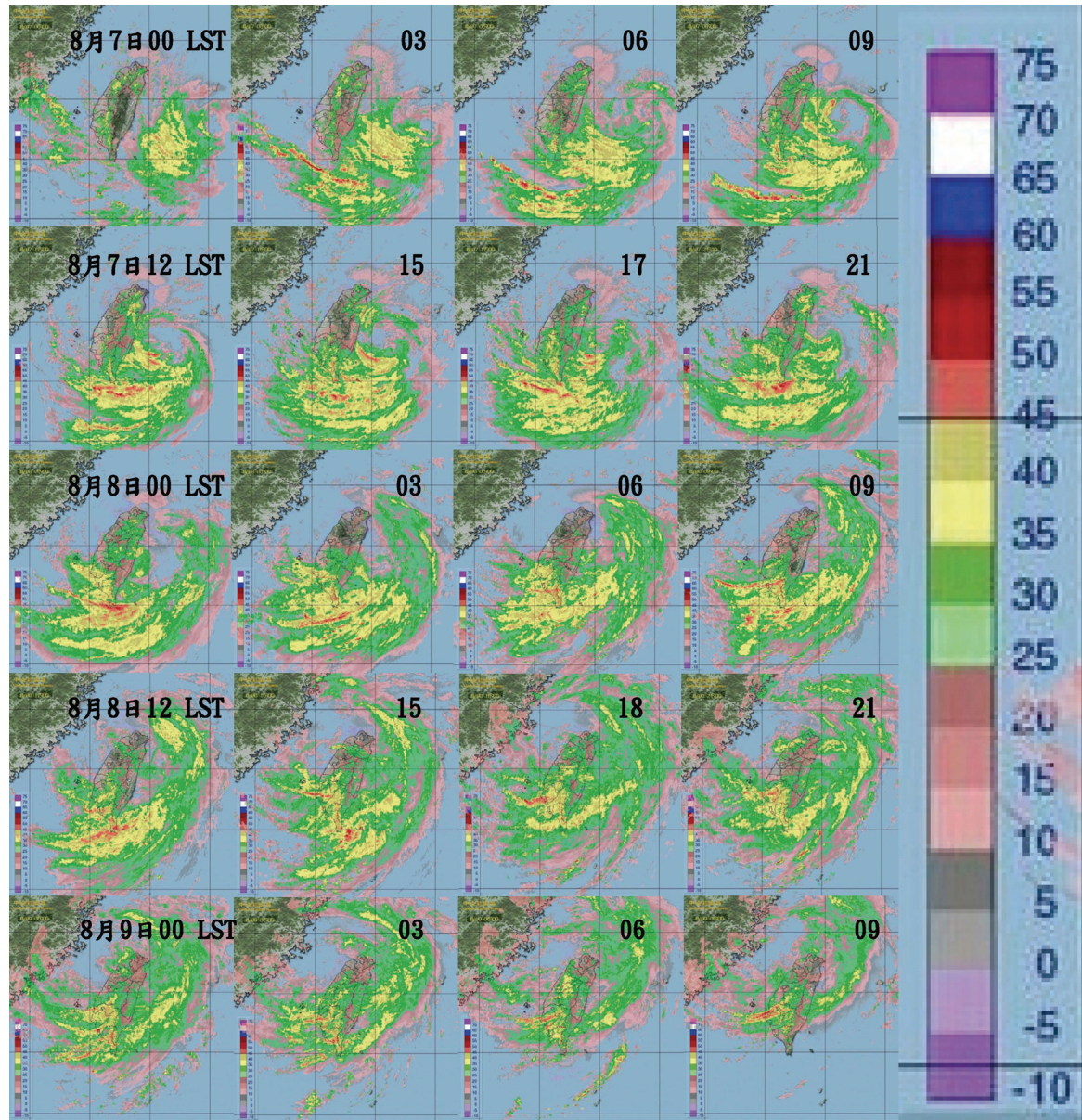


圖 3 氣象局全台雷達網最大回波圖時間序列，第一列為 8 月 7 日 00、03、06、09，第二列為 8 月 7 日 12、15、17、21，第三列為 8 月 8 日 00、03、06、09，第四列為 8 月 8 日 12、15、18、21，第五列為 8 月 9 日 00、03、06、09。每張時間都是 LST。

徵分為以下幾個階段，分別為：

- (1) 8月7日 00 到 12 時：颱風減速期
- (2) 8月7日 12 到 24 時：颱風東部外海滯留期
- (3) 8月8日 00 到 12 時：颱風登陸期--台灣西南區重複新生雨帶
- (4) 8月8日 12 到 24 時：颱風西部外海滯留期--致災雨帶南北推移、近似滯留
- (5) 8月9日 00 到 12 時：颱風遠離期--雨帶北移

以下則針對各期討論由雷達回波場顯示的降水特性。

(1) 8月7日 00 到 12 時：颱風中心減速期

颱風移近花蓮外海約 120 公里從 06 時開始減慢、近似滯留。從雷達回波及颱風環流特徵可分成三個區域（圖 3(a)）。在這個時期已經可以清楚看出主要雨帶從東經 118 度到東經 122 度左右，東西的延展約 600 公里，其北側有非常深的對流，層狀區寬度超過 100 公里，從 7 日 0 時隨著颱風環流（A 區）緩慢西進，主要雨帶（C 區），逐漸向南擺盪。而 A 區附近的眼牆對流很弱，直到 09 時左右方可看到一個完整的環狀回波（眼的半徑約為 100 公里），在靠陸地的西側眼牆較為明顯，東側最強回波約為 30dBZ 左右。介於眼牆與主要雨帶間有寬達 200 公里的次要雨帶區（B 區），其中包含了多重的東西走向弧狀雨帶，其最強的回波約為 35~40dBZ。在這個時期已可看出此颱風降水系統特殊的不對稱結構。

(2) 8月7日 12 到 24 時：颱風東部外海滯留期

這個時期颱風緩慢向西北移動（見圖 2(a)及圖 3），A 區眼牆特徵在回波圖上可以辨識，但北側十分微弱。此時，B 區也形成東西走向的明顯雨帶，在這 12 小時之內，12 到 16 時此雨帶位於台灣正南方，大於 45dBZ 範圍東西長度為 200 公

里介於 120 到 122 經度之間，並且向東移動，15 到 16 時強對流減弱，形成大片夾雜對流的層狀區，17 到 24 時再度形成東西走向雨帶，大於 45dBZ 等值線最西邊的端點移到 119 經度附近，在這個時段，此雨帶在不同的生命階段中，其強對流區曾出現在雨帶北緣、中間或南緣。在這十二小時的區間內，B 區南側的 C 區始終存在，由於 C 區已距離墾丁雷達 200 公里以上，無法觀測其低層的回波強度及風場，因此，C 區與 B 區的交互作用較難分析，應該經由單都卜勒風場判別 B 區低層水氣的來源。

(3) 8月8日 00 到 12 時：颱風環流中心登陸期—台灣西南區重複新生雨帶

在 8 月 8 日 00 時前後，中心已在花蓮附近登陸台灣。沿著颱風切線風環流方向，從 C 區向北方及西北方延伸大片的層狀降水區，進入 A 區的東北象限（圖 3 第 3 列），此層狀區寬達 200 公里，空洞區寬達 300 公里。移動式雷達 TEAM-R 在台灣北部持續觀測，整個北部降水十分微弱，圖 4(a)是全省最強回波，圖 4(b)為 TEAM-R 觀測到的距離雷達中心 120 公里外的弧狀微弱回波區，最強回波約 25dBZ，回波頂約 8 公里左右（圖 4c）。02 時彭佳嶼測到的風速高達 40m/s，顯示此區雖然對流微弱，但颱風環流的切線風場仍十分強勁。

在台南、嘉義和高雄外海已開始有一些對流開始組織成東西方向線狀對流，這種特徵在颱風中心處於此相對位置時常發生，包括泰利颱風、海棠颱風等。為方便之後的討論，稱此區為 D 區，在 8 月 8 日 00 到 03 時中，綜觀全圖（包括 D、B、C 區）可以看出波長間隔約 100 公里的四個雨帶。在 D 區不斷有雨帶在台南附近重複生成後南移，在 03 到 05 時，以及 09 到 11 時雨帶南移速度非常緩慢，近乎滯留，其位置就在重災區上

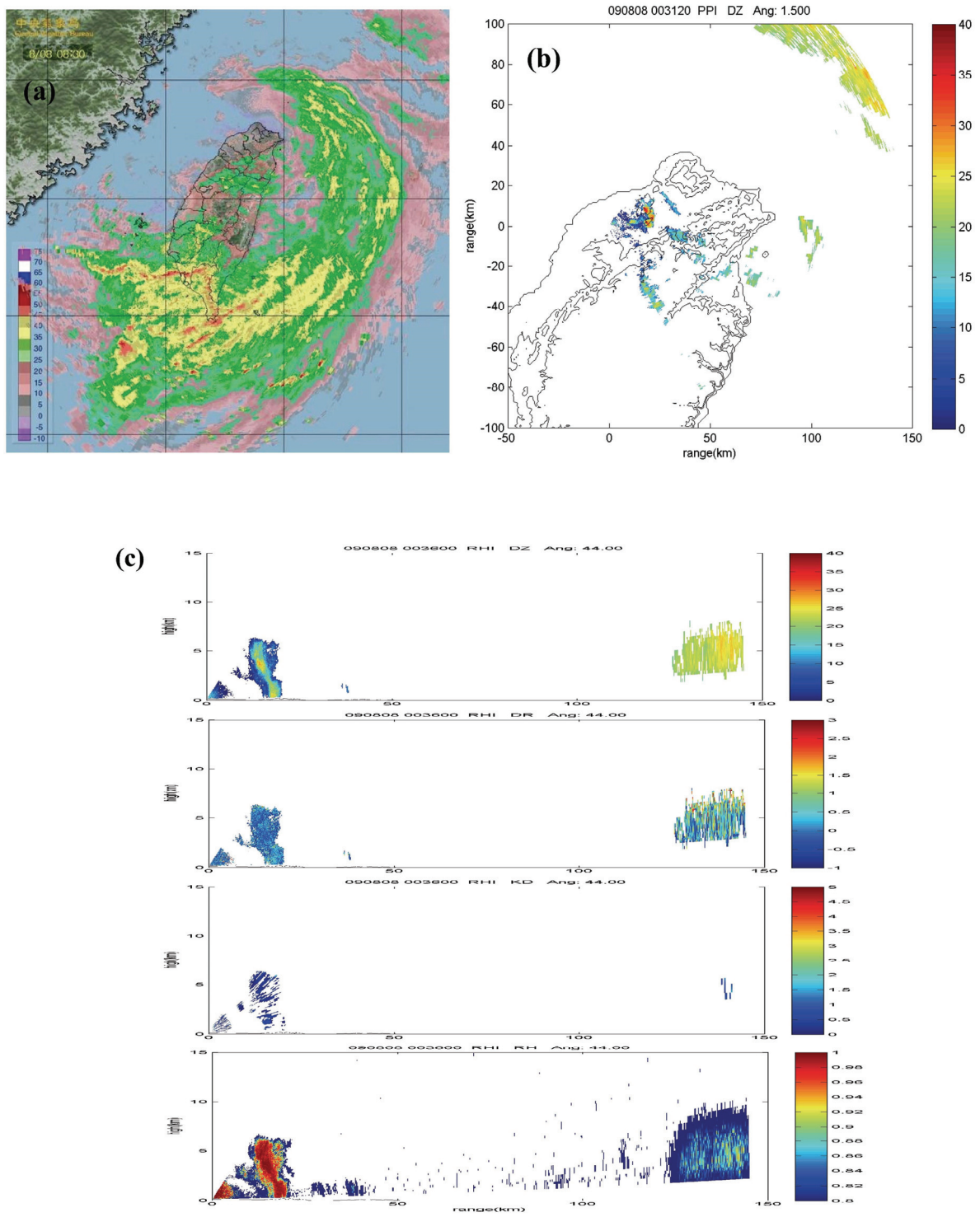


圖 4 (a) 8 日 8 時全台最大回波，(b) TEAM-R 8 日 8 時 30 分仰角 1.5 度 PPI 回波圖。
 (c) TEAM-R 8 日 8 時 36 分 RHI，由上而下分別為 Z_{HH} 回波強度(dBZ)， Z_{DR} (dB)， K_{DP} (°/km)， ρ_{HV} 。

方。在後面小節中，雨帶生成及移動機制將以剖面時序圖來分析，並以單都卜勒風場來顯示此西南氣流與颱風環流輻合帶的推移進行深入探討。此時段高屏溪上游平均降雨率約為 40mm/hr。

(4) 8 月 8 日 12 到 24 時：颱風環流中心西部外海滯留期—一致災雨帶南北推移、近似滯留

8 月 8 日 12 到 24 時，颱風轉為輕度颱風，從圖 2 第四列可看出颱風從台灣西部出海，移動非常緩慢，須要將所有雷達的單或多雷達的都卜勒風場詳細分析此時風場結構，可用清泉崗機場及中正機場的單都卜勒風場訂出颱風中心及採用馬公、七股和墾丁雷達分析 D 區風場結構。如果從所有雷達的最強回波合成圖連續播放，可觀察到颱風中心附近的對流很弱，強的對流雨帶距離颱風中心約 200 到 300 公里，其中的對流胞仍以氣旋式方式移動。此時段也是高雄縣山區高屏溪流域及嘉義山區降雨率最高的時段，平均超過 60mm/hr，南投山區在此時段雨量也達到最高，在這階段的 D 區，雨帶的行為和上半天類似，但是雨帶中出現更強的對流胞沿著雨帶向下游（東方）移動，在後面的小節將透過馬公和七股的雙都卜勒風場合成，以及偏極化參數來討論這些熱塔的行為。由於七股雷達受到地形的阻擋，雖無法觀測到高屏溪溪谷低層的情況，但可以看到對流胞滯留於中央山脈附近，此流域降雨應是造成小林災區的主要雨量來源。僅能由較高高度角所觀測的回波來判斷這些雨帶的確穿越高山，但是無法得知在溪谷內或高山後近地面最強的回波強度，如太麻里山區，花蓮、墾丁以及七股雷達均無法觀測到，且山區又無法設雨量站，在未來應將綠島雷達資料再做分析，了解該地降水情形。

(5) 8 月 9 日 00 到 12 時：颱風中心遠離期—雨帶北移

從 8 月 9 日 00 時開始，B 區雨帶逐漸北移，在 D 區與 B 區間，有許多複雜中尺度對流系統互相推移變化，D 區東西向的雨帶在 05 時左右，在台南、高雄交界附近重新組織，變成東北-西南走向的雨帶，和 8 月 8 日 D 區雨帶移動方向十分不同，變成由南向北移動，在這整個時段，高雄、嘉義、南投山區持續籠罩在強降水下。這個對流區應該是西南氣流直接與颱風環流輻合的最南緣，可研究西南氣流與颱風內降水系統的交互作用。

三、雨帶重生頻率及移動

比較泰利颱風在 2005 年 9 月 1 日 00 到 12 時的累積雨量圖（圖 5(a)），與莫拉克在 8 月 8 日 00 到 12 時的累積雨量圖（圖 5(c)），無論在總雨量或雨區分布的位置都十分類似，如果詳細看泰利颱風當時的雨帶也有重生及南北推移的情況，也同樣的在雨帶東側，也就是高屏溪山區，產生降雨率十分接近的強降水（大約是 40 mm/hr），但是由於泰利颱風的移速是莫拉克颱風的四倍左右，但如比較 2005 年 9 月 1 日 00 到 24 時的累積雨量圖（圖 5(b)），與莫拉克在 8 月 8 日 00 到 24 時(LST)的累積雨量圖（圖 5(d)）可發現莫拉克颱風，因為颱風環流中心移動緩慢而造成全天累積雨量是泰利颱風的兩倍以上，因此莫拉克颱風在 8 日下半天的的高屏溪山區許多測站每小時降雨率高達 70 至 90mm/hr。以下則會詳細討論造成這些高屏溪強降水時段雨帶的行為。

從 8 月 7 日到 8 月 9 日可以看到雨帶多重尺度的波狀結構，在本文中，將專注討論 8 月 8 日整天造成災害雨帶的行為。為了了解雨帶新生頻

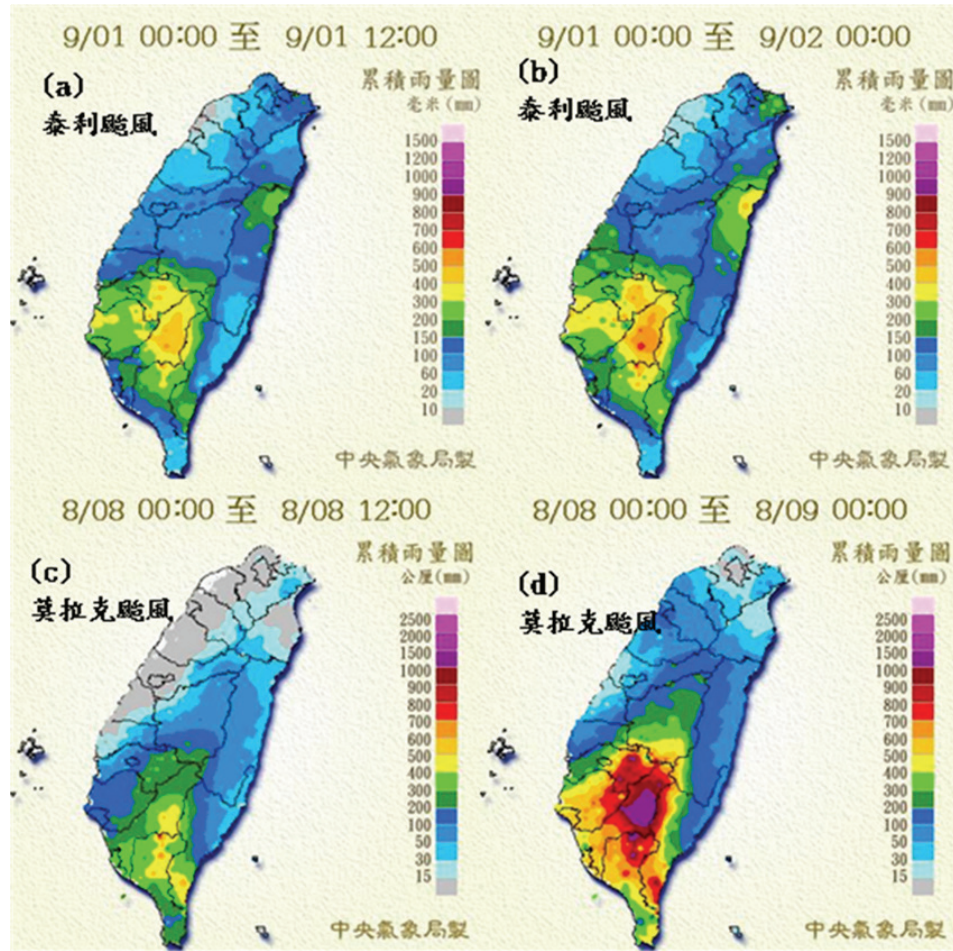


圖 5 (a)泰利颱風 9 月 1 日 0000~1200LST 累積雨量, (b)泰利颱風 9 月 1 日 0000~2400LST 累積雨量, (c)莫拉克颱風 8 月 8 日 0000~1200LST 累積雨量, (d) 莫拉克颱風 8 月 8 日 0000~2400LST 累積雨量

率及移動情況,我們採取七股雷達為原點,圖 6(a)為 8 月 8 日 1600LST 七股 0.5 仰角的回波圖,其中黑線為圖 9 的剖面位置,6(b)及 6(c)則為 4 公里及 6 公里等高面上的回波強度圖。從圖中可看到除了東西方向的多重雨帶外,在嘉義山區到高雄縣山區均有南北走向的降水回波分佈。為方便討論東西方向雨帶的形成與南北推移,此時利用從 (-50,-150)到(-50,100)也就是七股外海 50 公里處全長 250 公里的南北剖面時序圖,可以推知影響高屏溪主要災區雨帶的移動。

圖 7 為 8 月 8 日 00 到 11 時的雷達剖面時序圖,綜觀全圖可觀察到波長間距約 100 公里的兩組雨帶 D1、D2,從圖 7 可看出此 WNW-ESE 走向的雨帶 D1 在七股外海,以時速約 20 公里向南移動,在這段期間,約每 2 到 3 小時有一個新的雨帶在台南七股站以北附近組織,D2 從七股站北邊 50 公里一直南移到七股以南 100 公里,移速保持每小時 20 公里,D2 生命期長達 9 小時,這種東西走向的雨帶中,對流持續沿著雨帶向東傳遞、移向陸地。

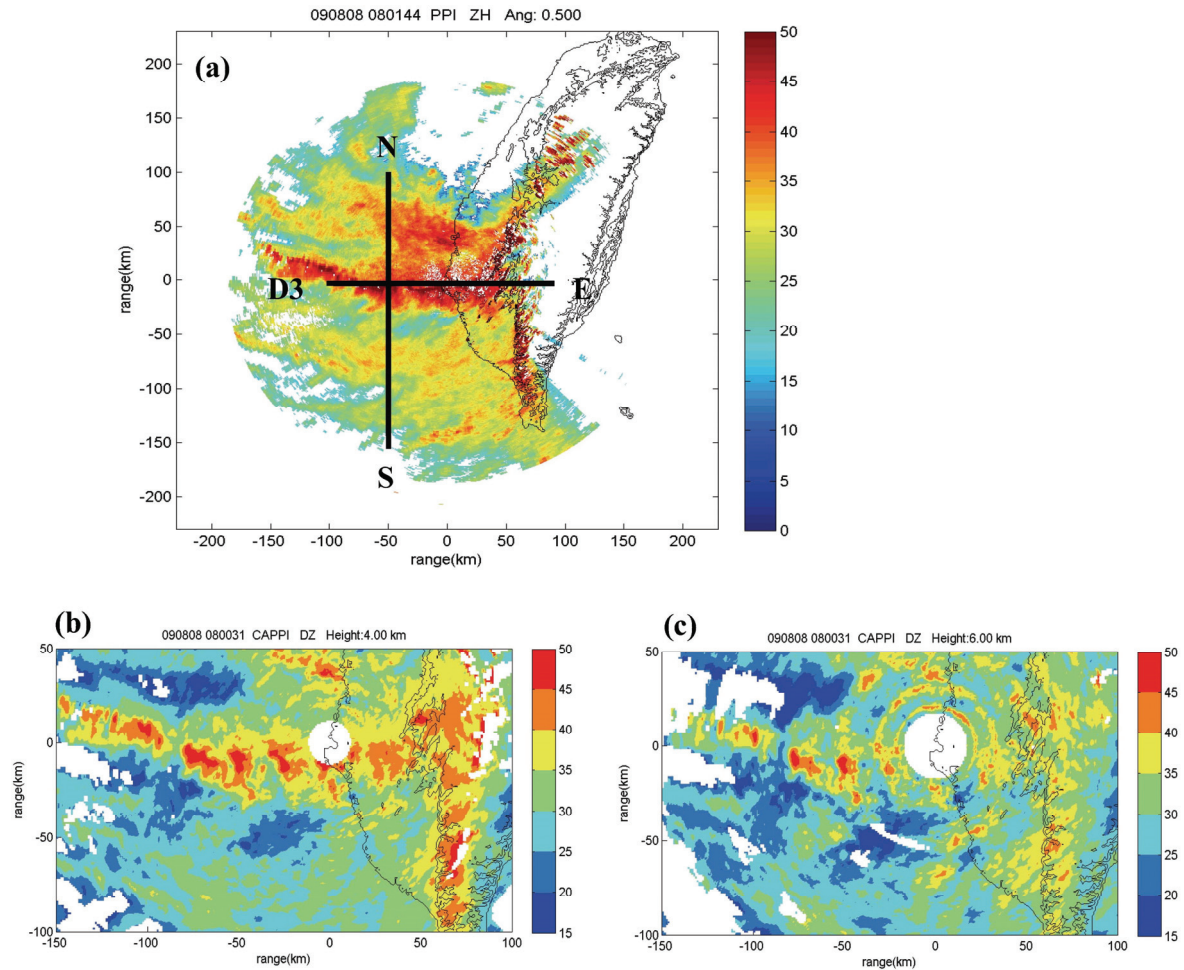


圖 6 8 月 8 日 1600LST (a)七股 0.5 仰角的回波圖，其中黑線為圖 7 與圖 8 的剖面位置；(b) 4 公里等高面回波圖；(c) 6 公里等高面回波圖。

8 月 8 日 11 時此時在台南外海又新生一條 D3 雨帶，到了 8 月 8 日下午半，也就是整個莫拉克颱風高屏溪上游降雨率最高的時段，圖 8(a)為 8 月 8 日 12 到 23 時的雷達南北剖面時序圖，從剖面時序圖可看到與上半天非常不同的雨帶特徵。從 8 月 8 日 12 時開始徘徊於台南外海的 D3 雨帶在十二小時之內，以六小時為週期南北震盪，從 12 到 14 時雨帶北抬，15 到 17 時雨帶南移，17 到 18 時幾乎靜止不動，18 到 20 時再次北抬，21 到 23 時再度南移，這兩波的南北震盪中，

雨帶中包括了這兩天海上最強的對流胞，雨帶內大於 45 dBZ 等值線南北寬度可以達到 20 公里以上，顯示在這個時段，從北來的颱風環流與西南氣流勢力相當，輻合強烈，對流旺盛，這些對流在移到山區後，12 小時內每小時降下超過 60mm 的降雨，也是災區承受最大降雨衝擊的時段。圖 8(b)為通過七股雷達站與甲仙雨量站的東西剖面 2101LST~2331LST 時間序列圖，可以看到深對流胞快速移入地形（圖 8(b)），在高屏溪谷受到地形阻檔移動變緩持續降水，保持強降水約兩小時，

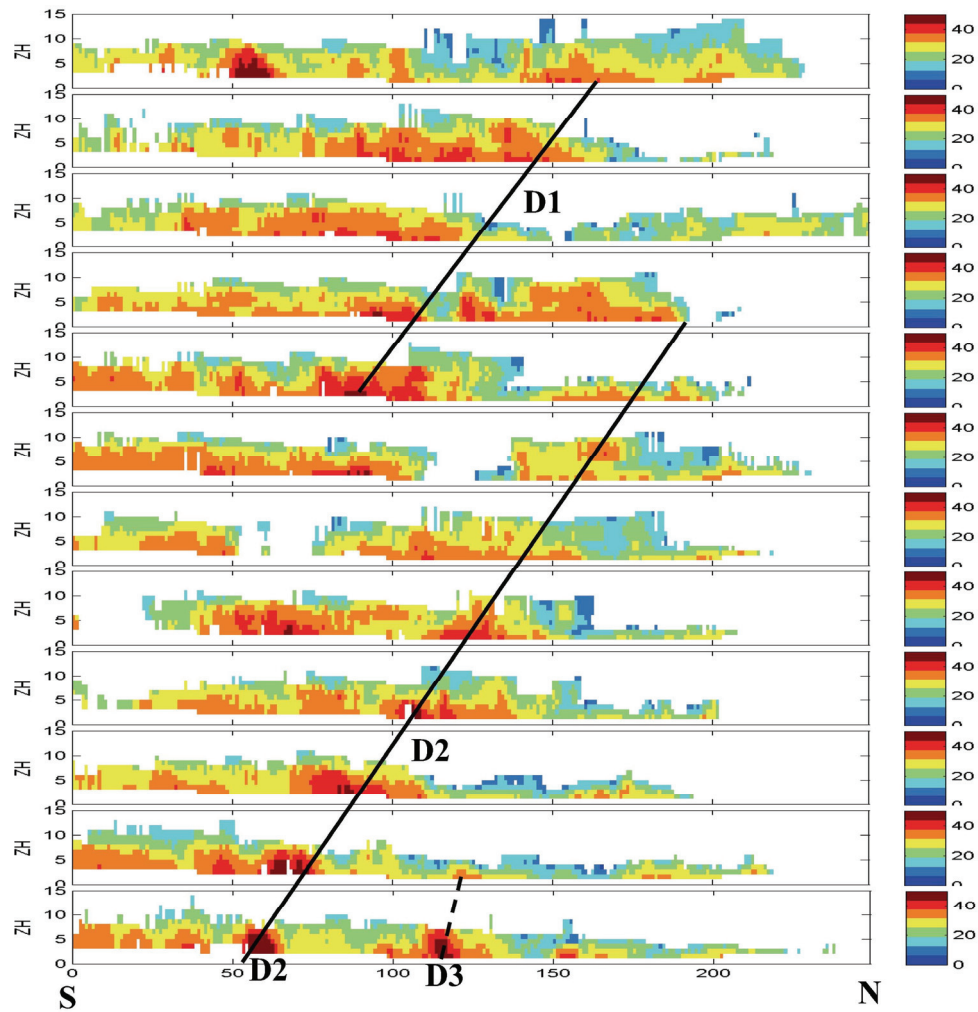


圖 7 8 月 8 日 00LST~11LST 通過七股外海 50 公里處南北方向的回波剖面圖時間序列（請參考圖 6(a)），每一張間隔一小時，其中黑線為對流雨帶 D1 及 D2 的連結線，圖中標示的 0 公里為圖 6(a)南北剖面最南端，150 公里的正東方 50 公里為七股雷達站。圖中可看出來雨帶會在北側距離剖面原點約 200 公里處新生，往南移動。

阻檔移動變緩持續降水，保持強降水約兩小時，這些對流胞的回波強度 35dBZ 可以到 10 公里以上，是非常深的對流，但無法觀測到近地面回波絕對強度。至於造成地形西側包括嘉義到高雄縣山區最大致災區的原因，需要進一步仔細分析沿雨帶移入的對流胞及伴隨雨帶的強風在地形上造成之上坡風對於此區總累積雨量所扮演的角色。

此區造成對照 8 月 8 日 00 到 24 時的雨量站累積雨量圖（圖 5(c)），最強的降水發生在高屏溪上游，在台東太麻里附近，僅有一個很小區域的強降水區。可能因雷達的高山的遮蔽無法觀測到完整的雨帶（可參考圖 2 第 4 列全台最強回波）。

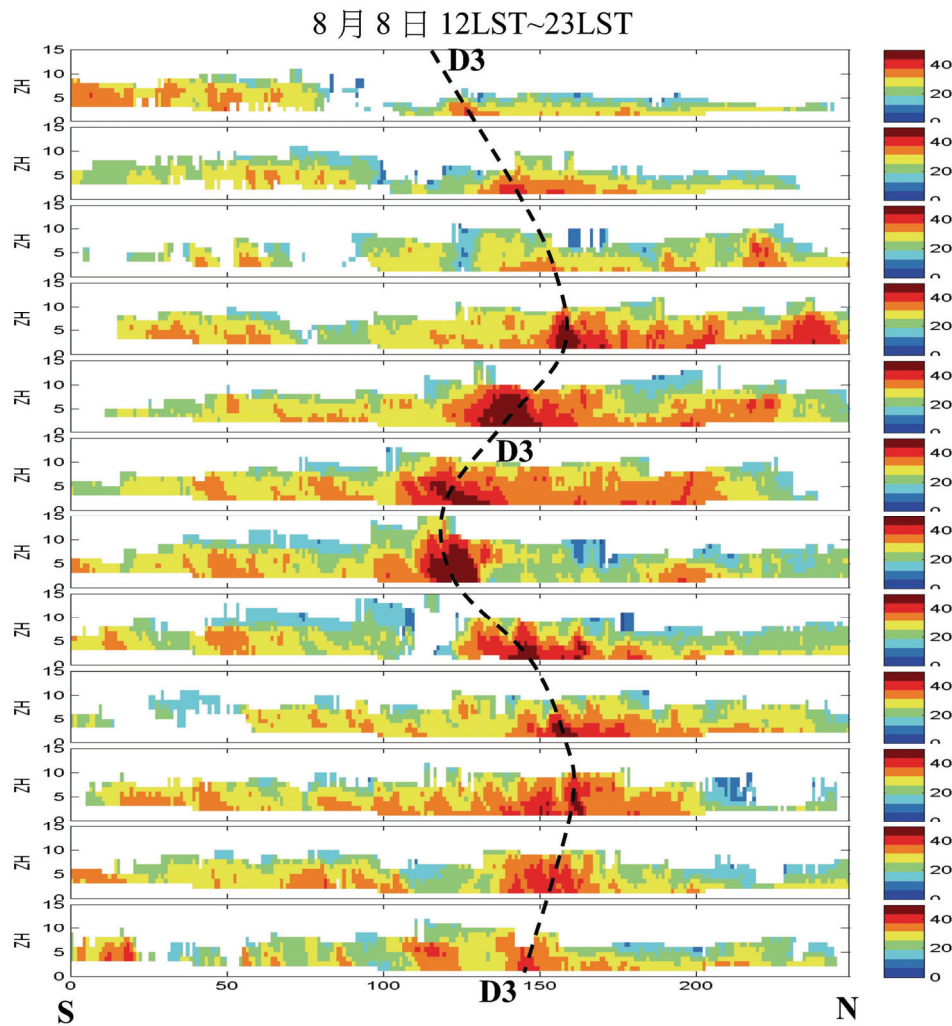


圖 8(a) 同圖 7 的配置，8 月 8 日 12LST~23LST 的七股外海 50 公里的南北回波剖面圖時間序列，每一張間隔一小時，其中黑線為對流雨帶 D3 的連結線。此 D3 東西走向雨帶在 12 小時內南北震盪推移，影響的緯度即為南部山區最大雨量的位置。

四、台灣西南部雨帶系統風場輻合特徵（單雷達分析）

從前面回波分布了解莫拉克的降水最主要受到強烈西南氣流與颱風環流在台灣西南沿海附近（D 區）輻合形成一個持續時間很長、範圍廣大的雨帶系統，因此針對不同時間階段，先透過原始的單都卜勒風場了解輻合帶的分布來分析，首先，選取墾丁雷達站在 8 月 7 日下午 17:00 兩公

里高度的雷達回波及單都卜勒徑向風場（圖 9），非常清楚可看到 B 區雨帶有從颱風外圍環流偏 WNW 與西南氣流的輻合，其中對流胞在雨帶中快速的移動，8 月 8 日上午主要引起災害的 D 區可以看到非常類似的特徵，值得注意的是颱風此時已登陸台灣，D 區重複形成雨帶，七股雷達站在 8 月 8 日 03 時的單都卜勒風場可以看到七股以南 50 公里有東西方向的明顯輻合帶（WNW-WSW）（圖 10）。

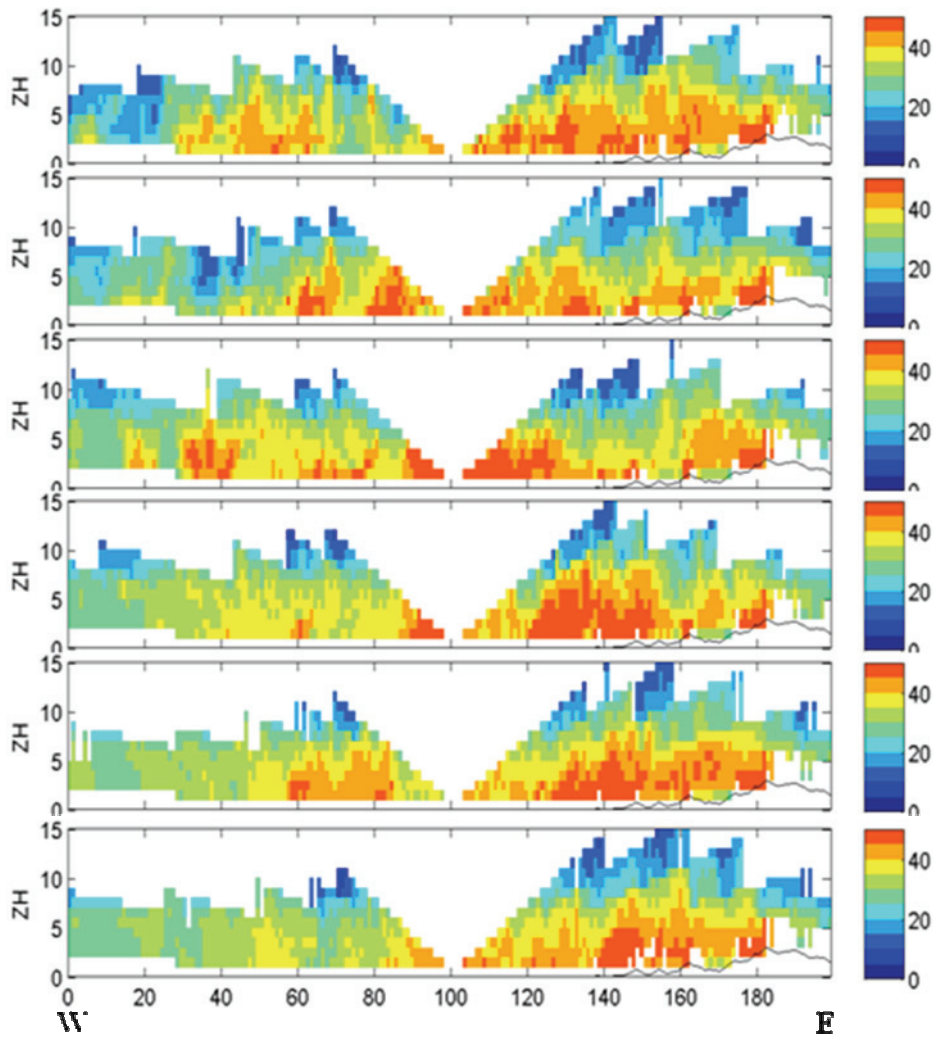


圖 8(b) 8 月 8 日 2101LST~2331LST 的通過七股雷達站及甲仙雨量站的東西回波剖面圖時間序列，每一張間隔 30 分鐘。圖中座標 140 到 160 公里處為高屏溪上游山區位置。圖中可看出強對流胞自外海移入山區附近後滯留造成強降雨延時較久的現象。

五、雨帶中熱塔的特性（雙雷達反演風場及雙偏極化雷達分析）

在 8 月 8 日 16 到 18 時 D3 雨帶緩慢向南邊移動，雨帶中，包含許多深對流胞，最後在七股雷達站南邊滯留，從單都卜勒風場可看到此時輻合帶上有明顯、急遽的風場變化（圖未示）。雖然雨帶此時移動十分緩慢，但仔細觀看雨帶中的對流時會發現，雨帶內部存在有強對流，其回波

強度 25dBZ 超過 10 公里的高度、50dBZ 達到 5 公里高度，且以每秒 25 公尺的速度移向陸地 (WNW-ESE)。8 月 8 日 17 時左右，雨帶移入馬公雷達和七股雷達資料雙都卜勒風場合成區，在 17:54 到 18:09 時，雨帶內強對流胞排列呈現線狀的分布，圖 11(a)為 18:09 的雙都卜勒反演水平風場、圖 11(b)垂直運動場及圖 11(c)南北剖面風場回波的結構，此時雨帶的移動近似滯留，上升氣流區位在雨帶靠近颱風眼內側（北緣），從兩公里

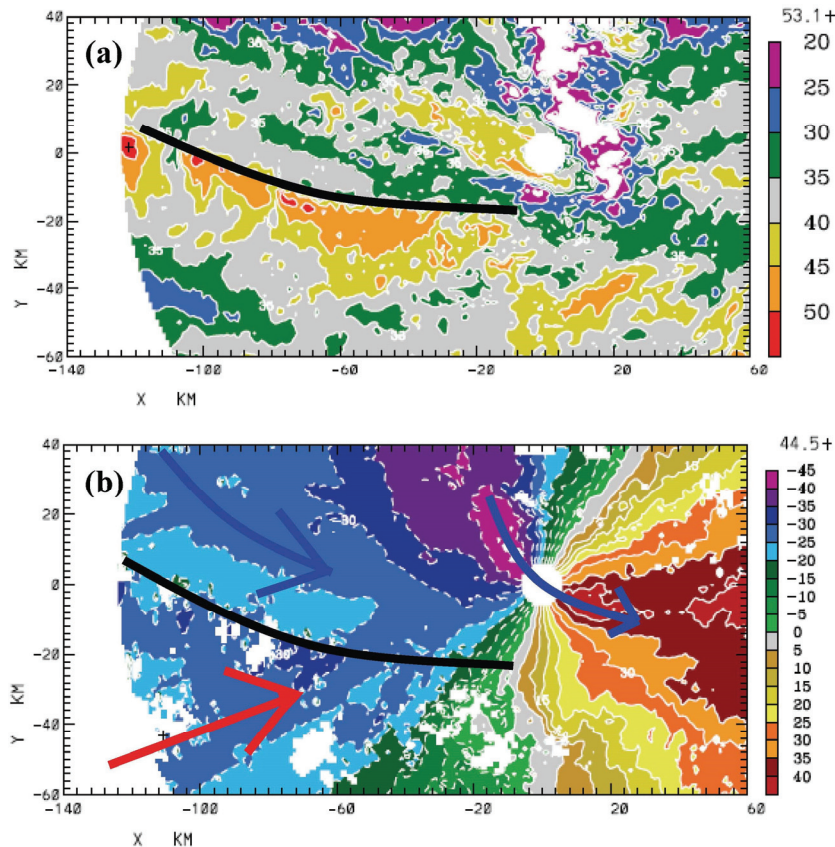


圖 9 8 月 7 日 1700LST 墾丁雷達站 B 區雨帶單都卜勒(a)回波場分布, (b)單雷達徑向風場, 其中黑線代表雨帶對流區前緣, 也是伴隨颱風的西北西環流 (藍色箭頭) 與西南氣流 (紅色箭頭) 輻合區。

等高面上的水平風分布可以看出, 這個雨帶是處於西北風、西風、西南風的輻合區, 三公里等高面的水平風南側吹偏西風、北側吹西北風, 四公里以上整個環境均是西北風, 中低層從雨帶兩側入流造成深厚的輻合所引發強烈上升運動可以解釋對流胞發展的高度。整層的平均偏西風說明了對流胞快速的向東移動(WNW-ESE)。在莫拉克颱風期間, 有多次可以觀測 D 區雨帶的三維風場, 可與 Barnes et al.1983 透過飛機與雷達觀測的雨帶結構概念模式互相比較。但在沒有探空的資訊狀況下, 如何了解兩側入流及中高層出流的熱力條件, 是一個很困難的問題。

在 1816 時, 對流胞達到最強 (40dBZ 的回波

強度超過十公里), 且對流胞開始呈現個別胞狀的發展, 氣流呈現三維的結構。選擇這個時間來做初步偏極化參數的討論, 以下的資料均為經過資料品管: 包括系統偏差、衰減修正及偏極化參數約束條件的驗證。圖 12 為 1817 馬公雷達仰角 1.4 度的回波強度(Z_{HH})、差異反射率(Z_{DR})、比差異相位差(K_{DP})。其中 Z_{DR} 可反演雨滴粒徑大小、 K_{DP} 則可計算出液態水含量, 總和這三個參數, 可以得到這個對流系統內的雨滴粒徑分布, 並透過其垂直剖面 (圖 13、左圖為原始資料、右圖為經過資料品管), 了解強對流中的雲物理過程, 根據最初步的分析可看出 (圖 13), 在對流胞內, Z_{HH} 可達 50dBZ (與七股雷達互相校驗), 在 K_{DP} 大於

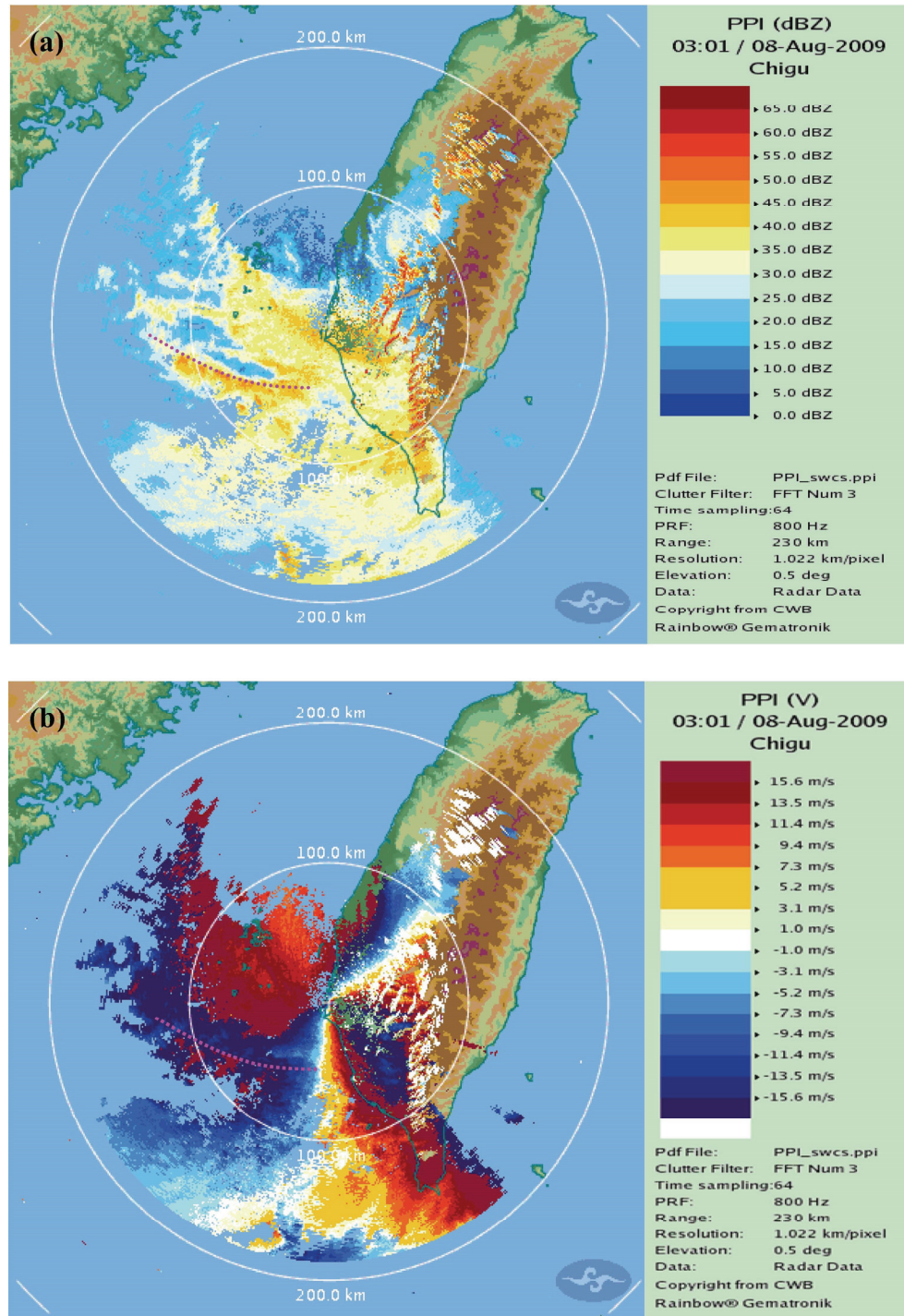


圖 10 8 月 8 日 0300LST 七股雷達站 D 區雨帶單都卜勒(a)回波場分布，(b)單雷達徑向風場，其中桃紅色虛線代表雨帶對流區前緣，也是伴隨颱風的西北西環流與西南氣流輻合區。

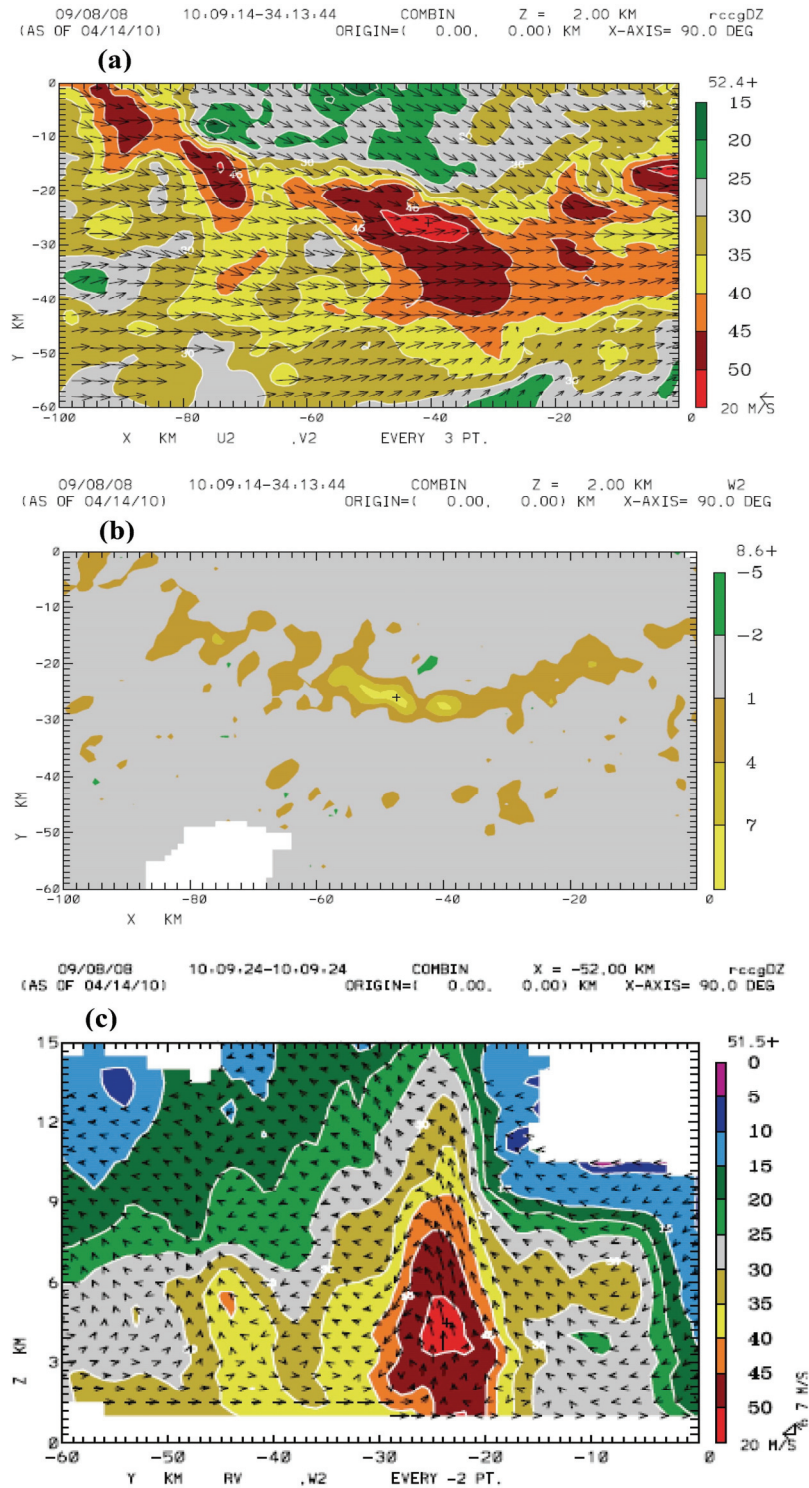


圖 11 8 月 8 日 18:09LST 馬公與七股雷達的雙都卜勒風場合成(a)箭頭為 2 公里高度的水平風，背景為回波等值線，其中紅色大於 50dBZ，(b)垂直風場，(c)垂直剖面風的箭頭代表是垂直運動與水平相對運動（扣除對流胞的運動）的向量。

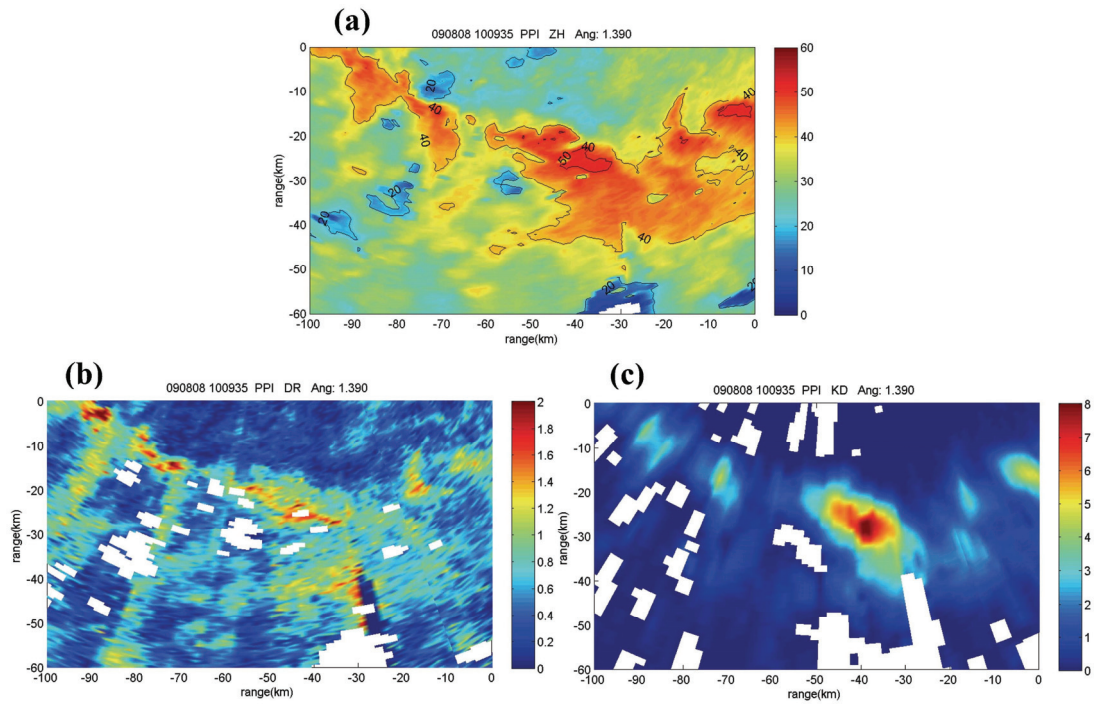


圖 12 8 月 8 日 18:09LST 馬公雙偏極化雷達(a) Z_{HH} 回波強度(dBZ) , (b) Z_{DR} (dB) , (c) K_{DP} ($^{\circ}/\text{km}$)。

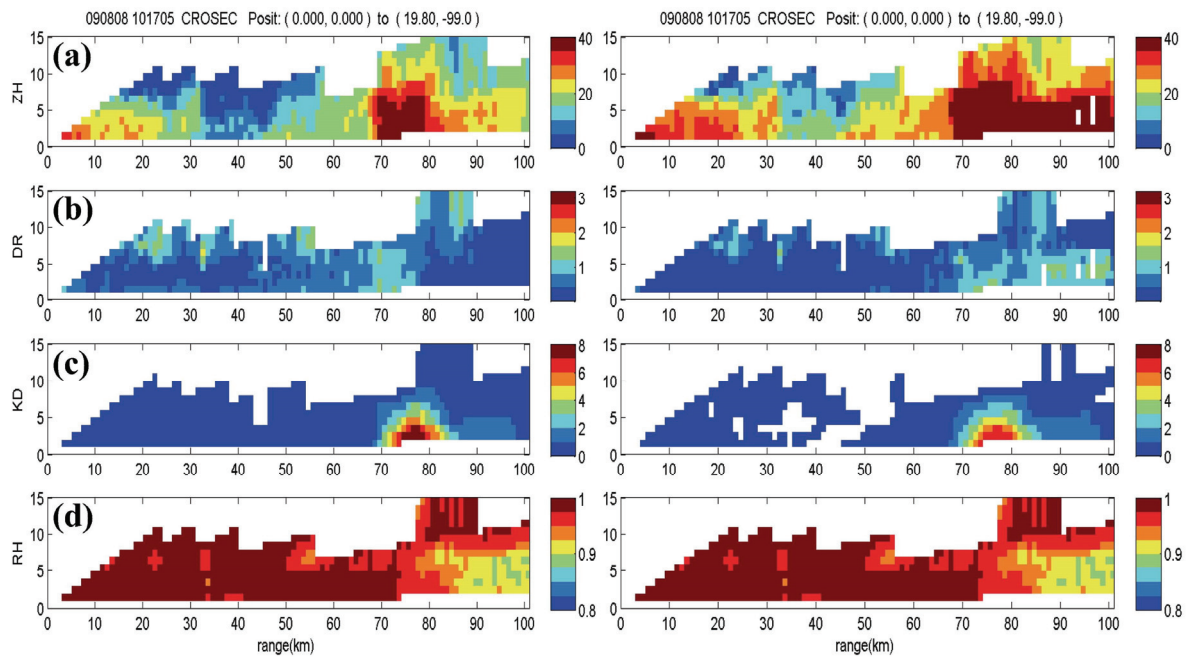


圖 13 8 月 8 日 18:17LST 馬公雙偏極化雷達(a) Z_{HH} 回波強度(dBZ) , (b) Z_{DR} (dB) , (c) K_{DP} ($^{\circ}/\text{km}$) , (d) ρ_{HV} 。左圖為原始資料、右圖為經過資料品管。

$7^{\circ}/\text{km}$ 處 Z_{DR} 值約 1 到 2dB，顯示此強對流胞中，雨滴中值粒徑約為 1.5 到 1.8mm，降雨率約 120mm/hr，液態水含量約 $10\text{g}/\text{m}^3$ 左右，強對流上方有較低的相關係數(0.8)，顯示冰水混相的區域。如進一步的詳細分析，應可提供雨滴粒徑分布的演化及水象粒子分類，增加對此降水效率極佳的系統雲物理及雲動力機制的了解，並可提供給數值模擬各種水象含量結果互相比對驗證。

六、莫拉克雨帶形式特徵

由於此颱風結構相當特殊，並因雨帶造成重大災害，利用全省雷達網資料分析可針對此颱風與歷史颱風眼牆及雨帶形式特徵比較(Elsberry et al., 1985)，並參考 Gall et al. 1997 對雨帶特徵統計的方式，進行莫拉克颱風雨帶初步的分析：

A 區是颱風環流核心區，在颱風登陸前，此區可以觀測到類似眼牆環狀回波帶，其北側回波強度較南側弱、高度淺，與傳統的眼牆有很大的差異，登陸後，在空洞區西南側持續有新生的強對流雨帶形成，東北側則圍繞著寬廣的層狀區，此弧狀回波所圍繞的空洞區半徑從登陸前小於 100 公里，登陸後持續擴大，半徑接近 200 公里。

(1) B、C 區雨帶近似滯留，其中的對流胞仍然是以氣旋式方式移動，由於範圍已超過雷達觀測範圍，尤其是 C 區是颱風與西南氣流共伴所產生之對流系統的一部分，所以與許多颱風典型雨帶會螺旋向外行為不相同。如依據(1)的建議，在南側眼牆位置持續新生雨帶向南傳遞進入 D 區，這些雨帶持續向南移動，或呈現南北震盪、近似滯留的行為。B 和 C 區雨帶生命期皆很長，約十小時以上，D 區多重雨帶有的生命期可達十小時以上。

(2) B 與 C 區雨帶是相當寬廣的，C 區寬度超過 100 公里；B 區寬度大約 100 公里，其中對流區寬度約 20 公里，大部份出現在北緣；D 區雨帶寬度約 30 到 50 公里。而在雨帶長度方面，C 區雨帶東西向長度超過雷達觀測範圍，從衛星雲圖看來，至少 600 公里；B 區雨帶約 400 公里；D 區雨帶可超過 200 公里以上。

(3) 在 8 月 8 日以前，所有的雨帶能顯示一個隨颱風切向風方向的移動，但是到 8 日 D 區雨帶從北向南或南北震盪，與切線風有很大的交角。雨帶與以颱風為中心的圓弧交角可以從 0 到 60 度，圖 14 則為雨帶與颱風中心對稱圓弧交角。在 D 區的多重雨帶走向多變，與各雨帶間的交互作用有關。

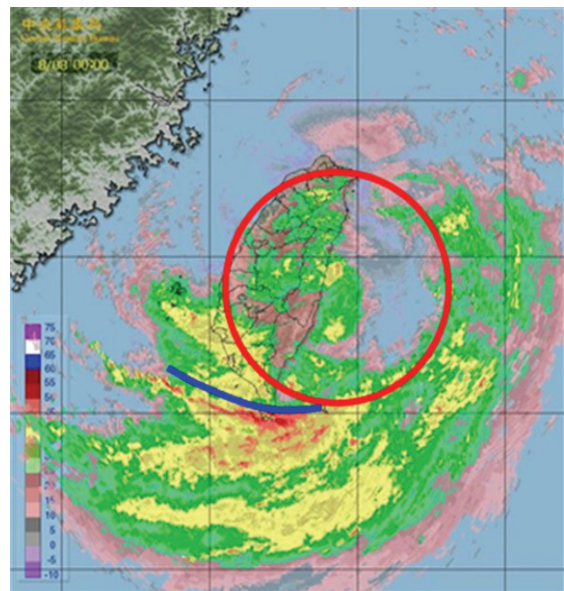


圖 14 為 8 月 8 日雨帶與颱風中心對稱圓弧交角。

(4) D 區雨帶的向南移動速度約每秒 6 公尺到 12 公尺，但在某些時段雨帶近乎滯留，或向北移，因此對雨帶而言，不論是颱風環流帶入的西北風或西南氣流都是入流，造成強烈的輻合和上升運動，以及非常高聳可稱為熱塔的深對

流胞，其強回波 50dBZ 超過 5 公里高度，25dBZ 高過十公里，自西向東移動，其速度約每秒 25 公尺，值得深入研究其移速、傳播速度與雨帶三維風場的關係，這些熱塔的雲物理作用可利用偏極化雷達資料深入分析。

七、結論與未來科學目標建議

衛星和雷達提供了此次莫拉克颱風對流降水系統的大量資料，由於這個颱風南側龐大旺盛的對流雨帶比颱風核心區的對流強許多，與典型颱風核心區對流強且較對稱的外圍區動力機制有很大的差異，未來首先應該進行此颱風不對稱結構的成因研究。

此颱風的移動速度極為緩慢，與其他類似路徑颱風相較，是造成破紀錄降水的主因，而其中大尺度綜觀天氣西南氣流與受地形影響之颱風環流的共伴效應造成台灣西南區持續的雨帶機制，未來應該進行颱風外圍的非軸對稱加熱與颱風內核(core)的交互作用對颱風移速的影響。應增進對此颱風多尺度交互作用事件的了解，此研究應該包括了不同尺度的水氣與能量收支的診斷分析，詳細的理想及真實個案之數值模擬，以及衛星雷達資料同化的影響。強烈建議應該進行大量的衛星、雷達資料同化模擬研究(re-run)。

從墾丁、七股都卜勒雷達及馬公偏極化雷達的資料分析結果，有下面幾個重要中尺度特徵：

- (1) 8 月 8 日從雷達觀測到東西向雨帶在北緯 22 到 24 度間，有雨帶重覆新生、向南移動，而新生雨帶的北邊是弱回波區。到了 8 日下午半，此時颱風環流中心已移入外海，由於台灣中北部沒有雷達降水回波，形成一個空洞區，其中也沒有任何探空資料，此新生雨帶的成因

可能需借助數值模擬提供詳細的熱動力場及風場，進一步驗證。在圍繞全省水氣皆很充沛的情況下，降水系統北側可能僅有切線方向的颱風環流，但缺少輻合，是此對流十分不對稱的原因，應透過模擬尋找是否有其他熱動力的因素。

- (2) 8 月 8 日 12 時開始，在台灣西南部有一東西走向的強降水雨帶生成，並在災區上空緩慢移動、南北震盪或滯留，是造成災區驚人雨量的主因。從都卜勒風場的分析可知這個雨帶的成因主要是來自於勢力均衡之颱風環流與深厚西南氣流的輻合帶，此雨帶中有許多強對流胞快速向東移動、移向陸地，受到地形影響，並在地形附近滯留，形成山區南北延伸的強降雨帶，須仔細分析沿雨帶移入的對流胞及伴隨雨帶的強風噴流在地形上造成之上坡風對於此區總累積雨量所扮演的角色可深入研究這些雨帶的降雨機制。

- (3) 此次觀測的帶狀降水中，其對流區很多時間是出現在北緣，也就是靠近颱風環流中心的一側，而層狀區在南側。雙都卜勒的分析也可看到上升運動出現在北緣，這個現象是符合一般颱風雨帶的特徵。但是也有觀察到對流區在雨帶的中間位置，或甚至移到雨帶的南緣。因此在這種多重雨帶互相交互作用下，其對流區與層狀區的成因，需要詳細作更高時間解析度的分析來研究。

透過以上初步的分析發現致災雨帶的許多重要特性，如低層噴流的成因，雨帶中強對流胞（熱塔）鎖對整個雨帶的熱動力機制的影響及致災雨帶在山區強降水的原因，都仍須進一步做更深入的熱動力場反演及各種診斷分析，並應加強偏極

化雷達資料的雲物理分析，配合都卜勒雷達得到的三維風場及熱動力場來了解此強降水系統的雲動力機制：

- (1) 應透過雨帶中渦度收支的計算，探討深對流的上升與下降運動與雨帶中強風噴流的成因。
- (2) 目前的雷達網無法完整看到這些致災雨帶中的對流胞在陳有蘭溪、高屏溪山區溪谷中的狀況，比較山區的累積雨量遠高於西南平原，在未來應加強山區的雷達觀測，並且加強綠島雷達對台東山區的降水分析，了解這些雨帶東西方向延展的變化。
- (3) 由於此次事件，南部及南海都沒有探空資料，對於降水系統的熱力結構分析很困難，雙都卜勒雷達風場及熱力場的反演，配合數值模擬研究熱力結構及降雨效率，是很有挑戰性的題目。在未來如何增加颱風季節的探空，是氣象界應該要積極規劃的方向。
- (4) 此次颱風的8月8日到8月9日致災雨帶有多次機會，處於馬公空軍偏極化雷達觀測範圍內，由於這是一個剛架設好的作業用雙偏極化雷達，在經過審慎的資料品管後，進行雲中水象粒子分類及各種水象粒子的質量估計，應可提供此劇烈降水事件中雲物理現象的了解，並建議在台灣山區建立可讓移動式雷達，或是雨滴譜儀安全觀測的穩固平臺，在未來深入了解山區降水的特徵。
- (5) 加強利用雷達的產品，如：(a)VAD 觀測範圍平均風速、風向、輻合場，與該區降雨量的相關，(b)單都卜勒風場反演輻合帶位置，輻合的強度，移動的速度，(c)全台多都卜勒雷達的合成（圖 15）等，(d)偏極化雷達降雨率，來加強雲物理以及雲動力的了解。

- (6) 比對敏督利、卡玫基、泰利、海棠、莫拉克等颱風的降水分佈，都發現因颱風與西南氣流共伴產生的滯留雨帶，但累積降雨量的大小與颱風移速與水氣的分布特性有密切關係，建議應廣泛進行中尺度氣候統計，如開發衛星可降水量等氣候統計應用方法。

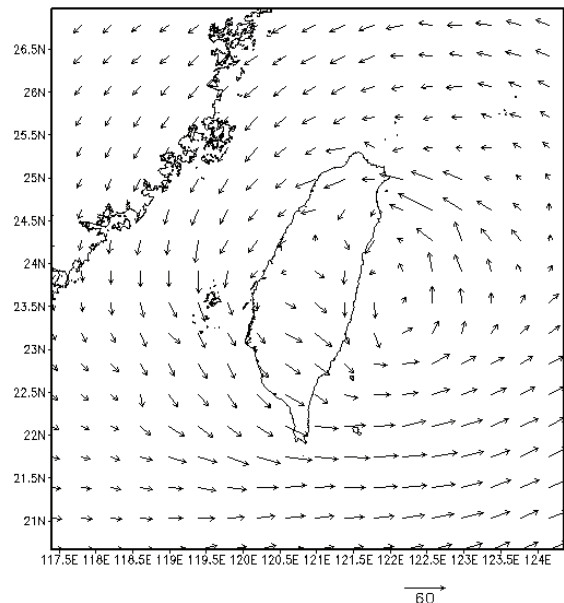


圖 15 利用墾丁、花蓮、五分山雷達與模式背景場變分得到的一公里高度風場結構。

- (7) 以上所有的項目都與定量降水預報有直接的關係，由於這些資料也需要放入模式資料同化，至於如何產生合理的基本資料及開發同化方法，國際上已有若干研究論文指出可行的方向，如 Xiao et al. (2005)，Xiao et al. (2007)與 Zhang et al. (2009)等，但如欲應用在台灣，則需要考慮本地所處的自然環境，以及氣象觀測的條件，建議國內投資大量人力，進行這方面長期的基礎研究，才能解決每個環節會遭遇到的問題。

致謝

感謝中央氣象局衛星中心周鑑本先生及吳倩雯女士提供衛星可降水量資料及加強影像紅外線雲圖，並感謝齊祿祥科長從衛星觀點有關莫拉克大尺度環境的討論。同時感謝空軍氣象中心馬公偏極化雷達站提供寶貴的資料，最後謝謝氣象局長期維護環島雷達站網，保持高品質的雷達資料供應，方有可能完成此篇論文。

參考文獻

- 周鑑本，吳倩雯，齊祿祥，張拱祿，廖美慧，2010：應用衛星反演資料分析颱風劇烈降水個案與其在預報颱風降水的可行性探討，氣象學報審查中。
- 唐玉霜，2010：2009 莫拉克颱風雷達觀測中尺度雨帶特性研究，國立中央大學大氣物理碩士論文。
- 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。
- Anthes, R. A., 1974: The dynamics and energetics of mature tropical cyclones. *Rev. Geophysics and Space Physics*, **12**, 495-522
- 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
- Elsberry, R. L., Frank W. M., Holland G. J., Jarrell J. D., Southern R. L., 1985: A global view of

tropical cyclones., *Naval Research Marine Meteorology Program*, 185pp.

- Gall, R., Tuttle, J., Hildebrand, P., 1998: Small-scale spiral bands observed in Hurricanes Andrew, Hugo, and Erin, *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1749-1766.
- Houze, R. A., JR., S. S. Chen, W.-C. Lee, R. F. ROGERS, J. A. Moore, G. J. Stossmeister, M. M. Bell, J. Cetrone, W. Zhao, and S. R. Brodzik, 2006: The hurricane rainband and intensity change experiment. *BAMS*, **87**, 1503-1521.
- Ritchie, A. E., and R. L. Elsberry, 1999: Simulated Impact of a Mesoscale Convective System on a Track of Typhoon Robyn during TCM-93. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2232-2251.
- Willoughby, H. E., 1988: The dynamics of the tropical cyclone core. *Aust. Meteor. Mag.*, **36**, 183-191.
- Xiao, Q., Y. H. Kuo, J. Sun, W. C. Lee, E. Lim, Y. R. Guo, and D. M. Barker, 2005: Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR System: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 768-788.
- Xiao, Q., Y. H. Kuo, J. Sun, W. C. Lee, D. M. Barker, and E. Lim, 2007: An approach of radar reflectivity data assimilation and its assessment with the inland QPF of typhoon Rusa (2002) at landfall, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 14-22.

Zhang F., Y. Weng, J. Sippel, Z. Meng and C. Bishop, Cloud-resolving hurricane initialization and prediction through assimilation of Doppler

radar observations with an Ensemble Kalman filter, *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2105-2125.

The precipitation characteristics of typhoon Morakot (2009) from radar analyses

**TaiChi Chen Wang¹ Yu-Shuang Tang¹ Chih-Hsien Wei²
Pay-Liam Lin¹ Yu-Chieng Liou¹ Wei-Yu Chang¹
Chien-Ben Chou³ Bo-Ting Ji¹ and Chung-Yi Lin⁴**

¹ National Central University

² National Defense University

³ Central Weather Bureau

⁴ Taiwan Typhoon and Flood Research Institute (Preparatory Office)

(manuscript received 4 May 2010 ; in final form 30 June 2010)

ABSTRACT

The record breaking torrential rainfall of typhoon Morakot (2009) had caused serious landslide, flooding and casualty in southern Taiwan. Under a weak steering environmental flow condition, the rather complicate scale interaction between the strong southwestern flow, the relatively large size typhoon circulation and the Taiwan topography may cause a phase locked precipitation pattern. The weather radar network which consists of six Doppler radars, and four dual polarization radars had observed this slow moving typhoon during the whole episode of its influence. The unique structure of this enormous precipitation system can be vividly illustrated from the reflectivity distribution and three dimensional Doppler synthesis wind field. The convection and wind near the eye wall were relatively weak comparing with the principal rain band near the Bashi strait. On the day of Aug. 8, a few strong west-east oriented rain bands near southwestern Taiwan repeatedly formed along the convergence zone of typhoon circulation and southwesterly. These rain bands evolved near the southern edge of the circulation core and propagated southward or oscillated between lat. 23.5° and 22.5°. Many hot towers were embedded in these rain bands moving quickly toward island.

These deep convection cells and the strong wind associated with the rain bands had caused the heaviest rainfall accumulation in the hazard mountain area. The vorticity and momentum budget studies together with thermodynamic retrievals of these rain bands may provide more understanding of the precipitation mechanisms. The polarimetric radar further provided the microphysical information of the convective and stratiform regions of these devastation rain bands.

The detailed 3-D Doppler synthesis wind field revealed that the typhoon northwest wind circulation in Taiwan strait encountered the southwestern flow to cause a strong convergence zone and form the rainband. Many fast moving hot towers were embedded in these rainband, very strong and persistent updraft may explain the long life time of these deep convections. These hot towers had casted their landfall and moved into mountain area like a train. The jet like flow associated the rainband may reach 40 m/sec at lower levels. These fast strands of wind also were a major source of the upslope enhancement of the convections along mountain slope and ridge.

Key Words: Morakot Typhoon, radar observation

