

颱風中尺度動力場變化的個案探討

徐天佑¹ 翁進登² 劉廣英³

¹ 中國文化大學地學所

² 國家防災科技中心

³ 中國文化大學大氣科學系

摘要

莫拉克颱風形成後在2009年8月8日登陸台灣地區，雖然僅為一個中度颱風，且登陸地區的降雨量並非最大，但因西南氣流與颱風的交互作用，卻造成台灣中南部地區近50年來最大的水患。

由衛星雲圖及雷達回波顯示，莫拉克颱風的雲系在登陸台灣後，雲系發展呈現不對稱分布，台灣北部雲係發展不顯著，但在台灣中南部卻特別明顯，且颱風眼離開台灣地區後，中南部地區仍然大雨不斷。因而莫拉克颱風導致中南部河川暴漲及山洪暴發，並引發強烈土石流，造成的損失為歷年來所僅見。

本研究針對西南氣流的發展與台灣中南部地區雨量的關連做進一步的探討，並比對地面觀測資料、雷達回波及衛星雲圖加以分析，探討風場變化與地形降雨的關係，研究發現莫拉克颱風的強降雨過程中，受中尺度天氣變化影響甚大，而西南氣流進入中南部口袋型峽谷，為莫拉克颱風產生強降水的另一重要相關因素。

關鍵字：颱風、西南氣流、共伴效應、口袋效應

一、前言

莫拉克颱風不對稱的風場分布及雲係發展，使得台灣中南部地區產生強烈水災。由衛星雲圖及雷達分析均顯示莫拉克颱風降雨的不對稱性（陳台琦2010），並可發現嘉義台南外海不斷有周期性波動向台灣本島傳送。而周仲島(2010)進一步分析雷達垂直風場變化，發現中南部大雨時間與低層強風有密切關聯。許晃雄(2010)經過不同尺度分離的探討研究，則發現10至30天擾動為此次綜觀尺度水氣供應的主要來源。

本文透過傳統觀測資料及雷達衛星資料進行分析探討，以了解天氣系統變化與降雨

變化的關聯性。

二、颱風移動路徑概述

莫拉克颱風在2009年8月4日02時形成，距離恆村東南方海上1,500公里，後以時速20公里向西北西方向移動。7日03時暴風半徑逐漸接近台灣陸地，7日23時50分在花蓮登陸，8日14時在桃園出海，莫拉克颱風受到西側柯妮颱風的影響，出現藤原效應（吳俊傑、黃清勇、楊明仁、簡芳菁、洪景山2010），因而緩慢向北北西移動，一直到9日19時台灣地區始脫離暴風半徑。莫拉克颱風前後影響台灣地區達64小時，各地累積雨量相對增加，

也因而成為影響災害的主要原因，而莫拉克颱風的路徑如圖1所示。

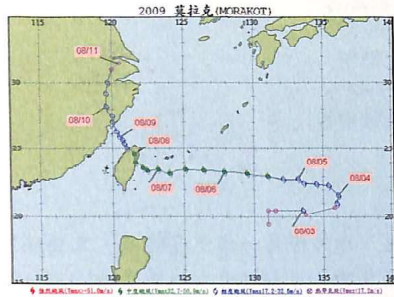


圖 1 莫拉克颱風路徑圖

三、莫拉克颱風強降雨的相關因素探討

莫拉克颱風所造成的災害，以台灣中南部為主，降雨分布不對稱性，且強降雨地區非颱風中心登陸地點，因此本文將影響颱風降雨的各項因素分析如下：

(一) 水氣來源

莫拉克颱風在台灣東部登陸，卻在台灣中南部地區形成豪大雨現象，各地降雨成非對稱性，強降水區域偏颱風南側，而非颱風中心。陳台琦等(2010)、周仲島等(2010)、許晃雄等(2010)均認為水氣為西南氣流所引導，另外在海南島四周打轉的柯尼颱風，其強度減弱後，環流所衍生的水氣及雲系，受西南氣流輸送，對莫拉克颱風的雨量有甚大影響。由圖2-1、圖2-2衛星雲圖顯示，圖中之柯尼颱風雲系與莫拉克颱風雲系幾乎相連接，兩雲系中的空隙無雲處為兩颱風間所形成的鞍形場，因此柯尼颱風的水氣，加上西南氣流向台灣地區輸送，豐沛的水氣移向莫拉克颱風，因而成為加強莫拉克颱風降雨的重要因素之一。而另外颱風本身環流形成的西北氣流與由南海而來的西南氣流，在台灣

海峽相會，形成強烈的輻合帶，其所造成的對流雲系，在台灣西南部外海不斷移向台灣中南部地區，更由於中央山脈地形效應，成為強烈降水的另一重要影響因素，致使中南部地區豪大雨及土石流不斷，造成五十年來台灣地區最嚴重的水災。



圖 2-1 2009年8月7日08時衛星雲圖。



圖 2-2 2009年8月8日08時衛星雲圖。

(二) 風場與氣壓場變化

風場及風速的改變與各地降雨的相關是本研究所欲探討的重點，圖3-1至圖3-8為莫拉克颱風期間台灣地區地面天氣圖，圖中顯示颱風由台灣東部外海向台灣地區接近時，台灣各地的風場受到颱風環流的影響，風場亦隨之逐漸改變，台灣東部地區與西部地區之風場變化，也有明顯的不同。

8月7日颱風接近台灣地區時，颱風外圍環流逐漸影響台灣，7日09時颱風半徑靠近台灣東部地區，台灣東部各地的面風速除蘭嶼外並不大，但台灣西部地區的面風速較強，中央山脈以西的中南部地區風速大致超過每秒20公尺，且西部地區風向為偏北的風向，而東部地區風向受局部地形影響，風向較不一致，再由於同時受西南氣流的影響，並受中央山脈阻擋形成分流，在台灣東部地區，尤其在蘭嶼和台灣東南部之間，由於地形效應形成一繞流低壓（潘大綱、戴志輝、蔡晉東、顏自雄2004），因此蘭嶼受(1)西南氣流：圖4-1至4-4為6日20時、7日20時、8日20時及9日20時之東亞地面天氣圖，圖中顯示南海地區之西南氣流相當旺盛，西南氣流如圖4-1至4-4中橢圓紅線所示。(2)颱風外圍環流：颱風逐漸移進花蓮地區，颱風環流外圍風場與西南氣流風場在蘭嶼地區相一致，蘭嶼地區同時受以上兩風場效應的影響，致使蘭嶼地區風速超過每秒50公尺，且在颱風侵襲台灣期間風向一直維持西南風。

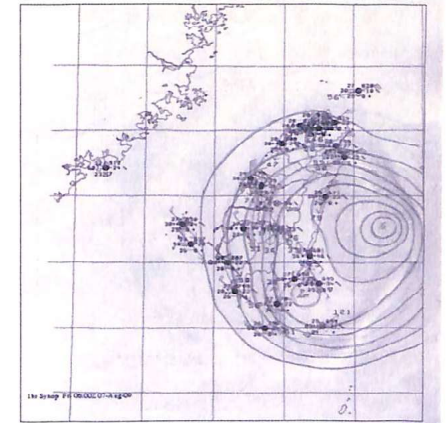


圖 3-2 2009年8月7日14時台灣地區地面天氣圖。

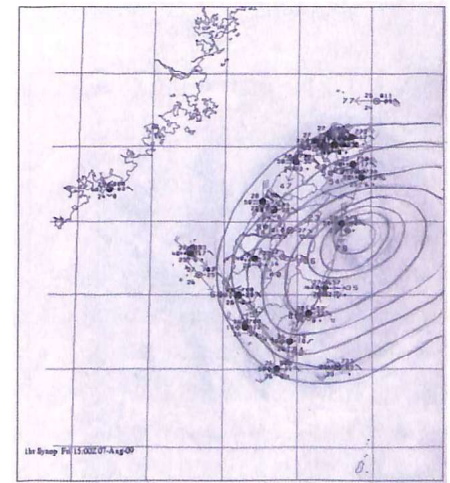


圖 3-3 2009年8月7日23時台灣地區地面天氣圖。

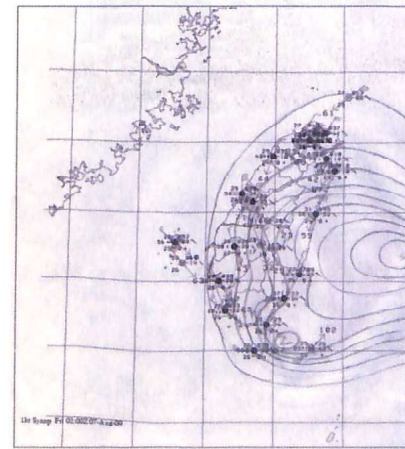


圖 3-1 2009年8月7日10時台灣地區地面天氣圖。

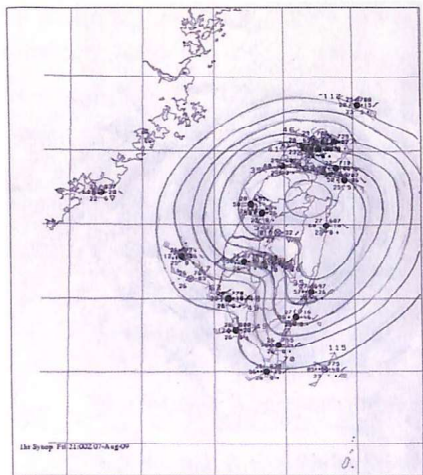


圖 3-4 2009年8月8日05時台灣地區地面天氣圖。

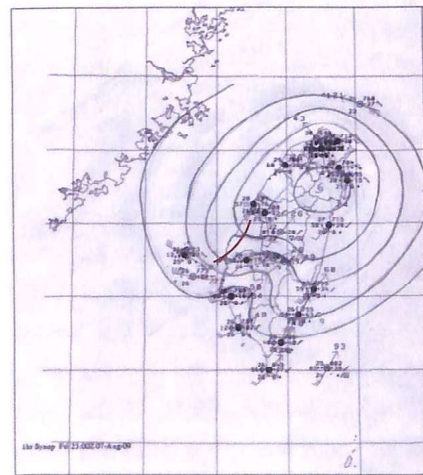


圖 3-5 2009年8月8日07時台灣地區地面天氣圖，圖中棕色細短線為新生氣壓槽所在位址。

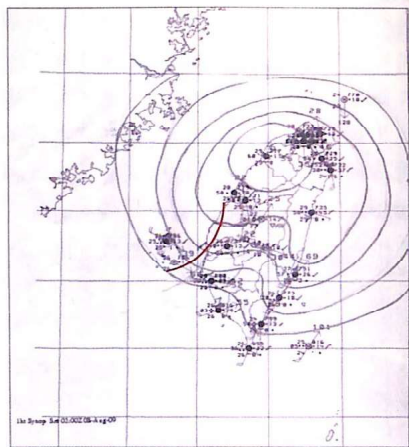


圖 3-6 2009年8月8日10時台灣地區地面天氣圖。棕色細短線為氣壓槽所在之位址。

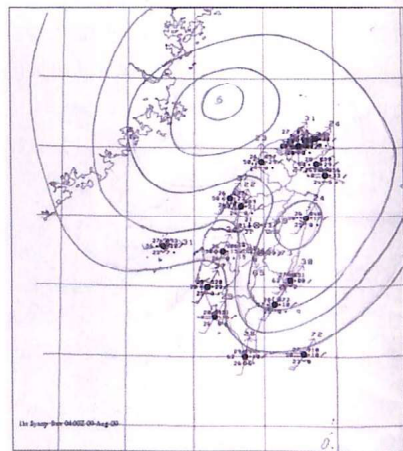


圖 3-7 2009年8月9日12時台灣地區地面天氣圖。

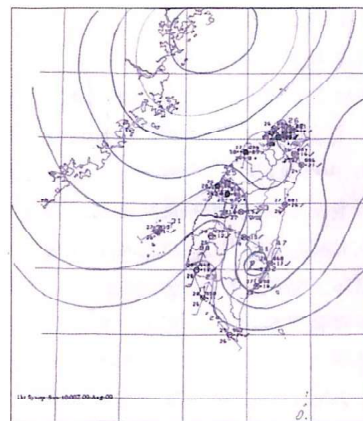


圖 3-8 2009年8月9日18時台灣地區地面天氣圖。

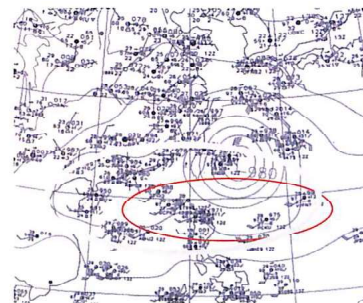


圖 4-1 2009年8月6日20時地面圖。

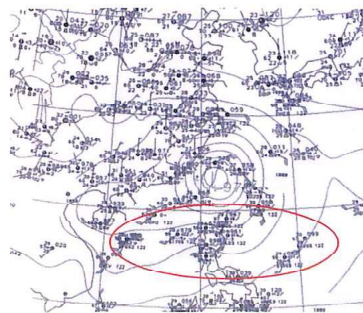


圖 4-2 2009年8月7日20時地面圖。

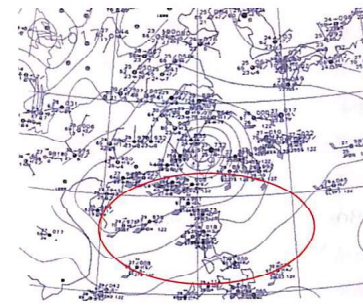


圖 4-3 2009年8月8日20時地面圖。

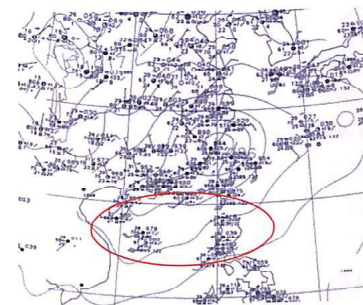


圖 4-4 2009年8月9日20時地面圖。

由圖3-1至圖3-3顯示8日05時台灣西南部除恆春外均為偏北方向的風場，風向幾乎與中央山脈平行，或風場與中央山脈交角甚小。8日03時恆春風向由西北西風轉為西南西風，8日05時高雄風向由西北西風轉為西南西風，在南台灣中央山脈西南地區近山區處，山前向風處之氣壓脊開始建立，如圖3-4所示。當颱風登陸花蓮之後往西北移動，中南部地區風場逐漸出現與中央山脈垂直或交角甚大的風向，氣壓脊也逐漸加深加強，而台灣地區西部沿海及東部沿海在氣壓脊兩側則變成明顯的氣壓槽，氣壓分布出現兩槽一脊的現象，與顏自雄(2003)分析及模擬賀伯颱風通過台灣地區時，台灣中南部地區出現兩槽

一脊現象相類似。此氣壓脊的生成，主要由於當台灣西南部地區之風場轉為有偏西方向之風時，西風受中央山脈阻擋，或風向與山脈交角較大時，質量在山前向風處受阻堆積，無法及時過山，在山前因而形成氣壓脊。Bell、Bosart (1988)探討美國東部Appalachian山的冷高壓壘 (cold-air damming)現象，認為由於氣壓梯度力、科氏力、摩擦力三者之合力指向山脈，當風場穿過等壓線，冷空氣在山前堆積，因而形成山前的冷高壓壘。莫拉克颱風期間在台灣中南部地區形成的氣壓脊現象，一直維持至颱風離開台灣地區，仍然存在，如圖3-8所示。

台灣東部陸地風速在颱風登陸前不大，直到7日22時花蓮風速開始增強，風速超過每秒20公尺，至7日23時50分登陸。登陸花蓮後颱風強度明顯減弱。但8日07時台東大武地區風速開始增強，風速超過每秒20公尺，爾後東部地區風速逐漸增強。

陳台琦等(2010)認為西南氣流與颱風環流的共伴效應，導致台灣中南部地區產生強烈對流及豪雨成災。葉文欽(1977)探討颱風與大陸冷高壓的共伴效應，導致台灣地區秋季豪大雨。Wu et al. (2009)模擬芭比絲颱風所帶來的雨量，發現颱風與東北季風所產生的共伴效應是台灣東北部地區產生豪大雨的主要原因。圖5(a)至圖5(d)為500Hpa天氣圖，其中太平洋高壓5865重力公尺等高線，6日明顯由菲律賓東方遠海，迅速向西擴展，9日5865重力公尺等高線已到達菲律賓群島，因太平洋高壓不斷向西伸展，而8日颱風移動緩慢，致使颱風外圍環流的東南方亦即台灣東南部氣壓梯度增強，因此雖然颱風逐漸向西北移動，已遠離台灣東部地區，但8日01時至02時開始台灣東部地區風速卻明顯增強。因此台灣東部風速的增強，主要由於颱風與其東南方的太平洋高壓之間，兩者形成共伴效應所致。

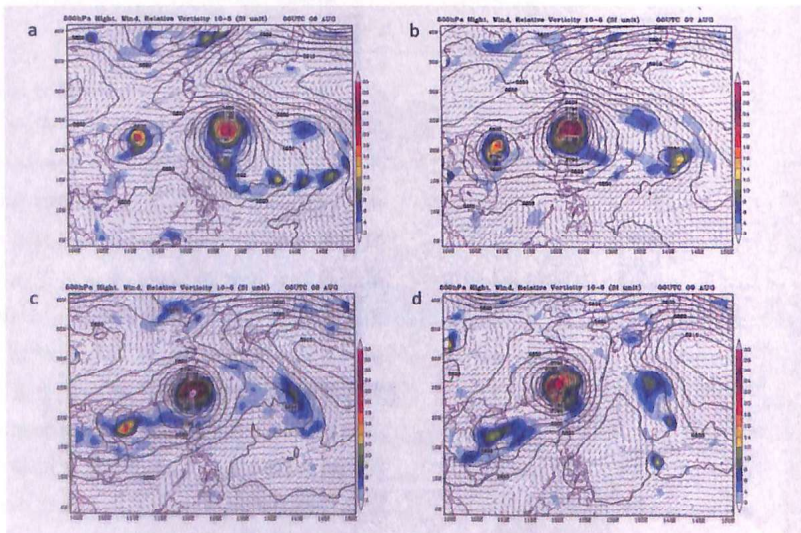


圖5 500hpa天氣圖(a)2009年8月6日08時，(b)2009年8月7日08時，(c)2009年8月8日08時，(d)2009年8月9日08時 (摘自周仲島等2010)。

周仲島等(2010)分析雷達回波，發現台灣西部外海，在颱風環流的外圍處，出現低層噴流，其伴隨的強對流雲系一波波移入台灣陸地，當其通過南部沿海低窪地區時，變成淹水的主要原因。而陳台琦等(2010)發現在台灣西部外海形成東西走向的對流雲帶，由雷達所觀測到的強回波區，回波值大於50dBZ之高度，大致在5公里左右。且8月8日00時至11時之間，每2到3小時台灣海峽有新雨帶產生，並向東移動及向南移動，8月8日12時之後生成的雨帶，以6小時週期南北振盪。鳳雷等(2009)由雷達分析指出，海上對流高度可達10公里，而強輻合區局限近海面2公里處。進入陸地後對流高度升高達14公里，強輻合區抬昇至近地面4公里處。周仲島等(2010)分析雷達之VAD徑向風場垂直剖面的時間序列變化，如圖6所示，檢視圖6中4公里高度處，從8日03時至9日09時，風速有6小時的週期變

化，風速出現強弱、強弱規律變化，應與陳台琦等(2010)分析強降水雨帶中的對流雲系統，其生成週期有關連性。由以上雷達資料分析顯示，台灣西南部海上一波波對流雲系生成後，在移入陸地時，尤其當台灣西南部地面風場變為西南風時，對流系統受中央山脈地形抬昇的關係，使得對流雲發展變得更旺盛，山區降水情況更為強烈。徐天佑(2006)探討颱風風場與降雨關係時，指出當颱風環流風向轉變成與山脈垂直或有大交角時，兩者成正相關，即該地區之降雨量會會迅速增加，或是當山谷成口袋形狀，而風的方向從口袋口進入時，水氣隨風場在山谷中爬升及打轉，更加強山區的雨勢 (徐天佑2006)。莫拉克颱風所伴隨的西南氣流，將水氣灌入中南部山谷之中，由於山谷相對風場形成的口袋效應，對中南部山區降水有加乘效應。

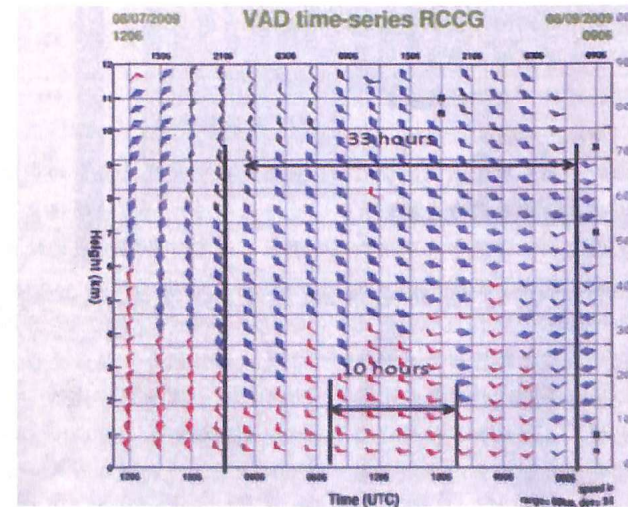


圖6 七股雷達VAD徑向風場剖面圖，觀測時間2009年8月7日1206時至8月9日0906時 (摘自周仲島等2010)。

莫拉克颱風影響及侵襲台灣期間，台灣北部降雨量遠低於中南部，降水分布相對於颱風結構非常不對稱。由8日03時至9日20時，阿里山以南之山區平均時雨量超過20mm，其中有10個小時，平均時雨量更達40mm以上，如圖6所示。強烈降水波動系統大部分由東西帶狀雲系中的對流胞所產生，此強烈東西條狀對流雲帶皆在颱風半徑的外圍地區，且中南部強降水區域，不在一般所定義的颱風主要雲雨帶範圍內(Houze et al. 2006, Elsberry et al., 1985)。Ritchie、Elsberry (1999)探討颱風環流與其外圍的天氣系統產生較互作用，導致交互作用的地區降水增強，係颱風降水不對稱的主要原因之一。

由圖3-5的8日07時地面天氣圖，顯示當台灣西南部地區之風向已逐漸由北北西風轉為西南風，而由雙都卜勒雷達反衍的風場中可以明顯看出，當颱風中心出海後，中南部地區及其沿海的風場由原來平行海岸的風向，逐漸轉為垂直海岸的風向(張保亮、林品芳、陳嘉榮2009)。當風場轉變後，中南部靠山區氣壓脊開始增強，東部地區氣流過山的動力槽也逐漸加深，而另由颱風環流的西北氣流及由南海的西南氣流，兩股氣流在台灣海峽的澎湖與嘉義兩地之間會合，形成一甚短的氣壓槽，由澎湖地區的西北西風與嘉義地區的西南西風，配合等壓線形態，此氣壓槽明顯可見，如圖3-5中之棕色短槽。而強對流雲系不斷在此氣壓槽地區發展並向東移動。本島中南部風場由8日7時從西北風轉為西南風，風速加強，且風場與等壓線交角甚大，尤其在氣壓脊的左側，靠近中央山脈的西南地區，偏地轉風現象甚明顯，由雷達回波顯示在南部靠近中央山脈之左側地區，另有一條南北帶狀的強回波對流雲系，且維

持甚久時間，對中南部山區降雨影響甚大。

四、中尺度波動現象探討

Haltiner、Williams (1980)探討輻散方程時，利用尺度分析將綜觀天氣系統的輻散方程簡化成

$$\nabla^2\Phi - f\xi = 0 \dots\dots\dots(1)$$

Φ : 重力位高度場 f : 科氏參數 ξ : 渦度

方程式(1)中為綜觀尺度簡化後的輻散方程式，式中地轉渦度($\nabla^2\Phi$)與氣流場渦度乘以柯氏參數($f\xi$)相平衡，本文後續簡稱($f\xi$)為氣流場渦度。而葉篤正等(1996)探討輻散方程時，認為中尺度系統因空間尺度較綜觀尺度小一個數量級，在發展過程中輻散項的局地變化，數量級可達 10^{-10} 至 $10^{-9}(s^{-2})$ ，因此在中尺度系統變化時，此局地變化項成為相當重要的機制，而陳秋士(1963)經由尺度分析後，則保留局地變化項，因此輻散方程式變為

$$\partial D / \partial t = -\nabla^2\Phi + f\xi \dots\dots\dots(2)$$

D : 輻散輻合項

並指出在中尺度天氣系的調節過程中，由偏地轉風所造成的非地轉現象，大氣將會自動調節，即當質量場形成的地轉渦度場與風場形成的氣流場渦度場，兩者值大小不相等時，即方程式(2)等號的右方兩項不相等時，會導致輻散輻合，並產生垂直運動，再由重力波一波一波的對外傳送(陳秋士1987)，將能量散布出去，藉以恢復地轉平衡(Holton 2004)。莫拉克颱風在台灣中南部生成的強對流波動，與陳秋士所述的重力波調節機制有相類似處。

而由地面觀測資料隨時間的變化，也可

以檢查是否有波動傳遞現象的變化。圖7為經由Excel方式處理後，繪出澎湖、嘉義、阿里山、日月潭、玉山等五個觀測站的時間變化圖，主要因測站位址幾乎呈帶狀直線排列，容易檢查是否有波動經過，觀測資料包括降雨量(圖7上半部、降雨量單位mm)及風速(圖7下半部、風速單位M/S)的變化，由圖7可以發現各測站降雨量及風場皆有波動現

象，且雖時間逐漸緩慢向東傳送，但波動強弱變化不等，8月7日波動變化幅度較小，但8月8日以後波動振幅逐漸增大，尤其當台灣中南部風場由西北風轉為西風及西南風時，降雨量及風速變化的幅度均增強，且降雨量與風場之波動相位大致成180度反相位，即當風速變強，則降雨量減小，當風速到達波峰時，降雨量則變成波谷狀態。

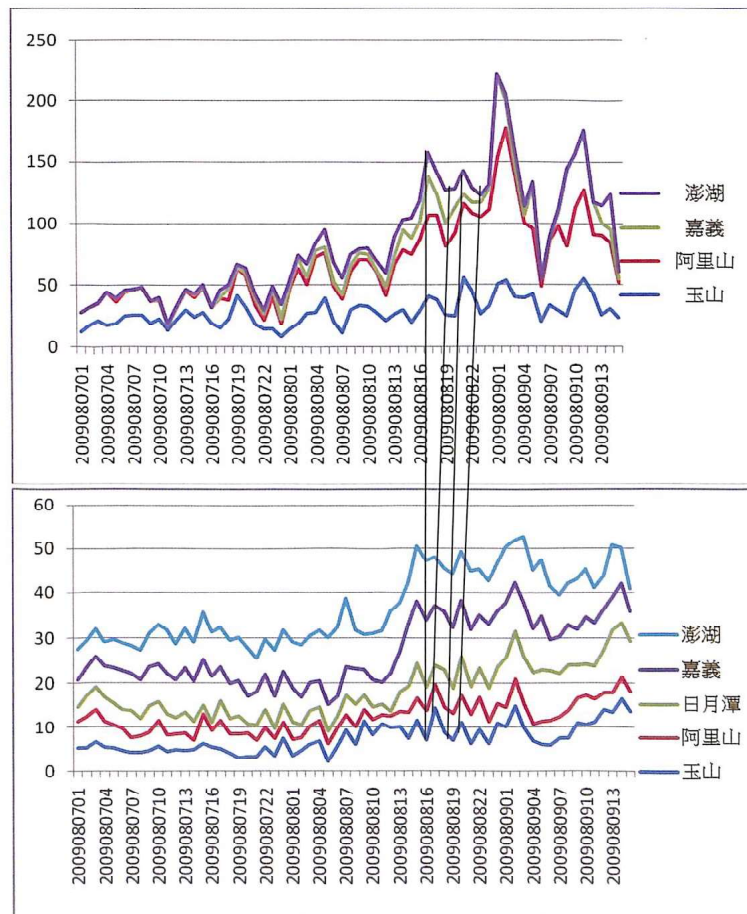


圖7 澎湖、嘉義、阿里山、日月潭、玉山等測站的降雨量(6圖上)與風速(6圖下)時間變化圖，上下兩圖中的連線為等相位連線，降雨量與風速大致成反相位。

圖7中顯示當風速變弱，則降雨量增強，當風速值位於波谷時，降雨量則變成波峰狀態，與丁一匯(2005)所述當重力波通過時，地面風速越強則雲量越少，當地面風速越弱則雲量越多，相一致。圖7中降雨量與風速變化的連線，為波動變化的相關連線，圖7中僅繪出兩個波動的傳遞現象，其餘波動現象未繪出，且此兩波動周期大約3小時，與陳台琦、魏志憲、林沛練、廖宇慶等(2010)由雷達所觀測到的部分波動周期相類似，此波動現象明顯表現出中尺度天氣現象的特徵，此乃由於不同系統的交互作用，破壞地轉平衡，產生不穩定，因而激發出重力波，並一波波對外傳送，藉以調整天氣系統，使大氣逐漸恢復地轉平衡。當重力波通過颱風產生的降雨系統時，在重力波輻合處，降雨量增加，而在重力波輻散處，降雨量減少，另外地形的加乘效應則更增強降雨的效果。

參考文獻

- 丁一匯，2005：高等天氣學。北京，氣象出版社。
- 周仲島、李清勝、鄭明典、鳳雷、于宜強，2010：莫拉克颱風綜觀環境與降雨特徵分析。行政院國家科學委員會，莫拉克颱風科學報告，1—26。
- 吳俊傑、黃清勇、楊明仁、簡芳菁、洪景山，2010：颱風數值模擬之現況與挑戰—2009年莫拉克颱風。行政院國家科學委員會，莫拉克颱風科學報告，151—189。
- 徐天佑，2006：地形影響颱風降雨的研究以—2004年台灣颱風為例。文化大學碩士論文。

五、結論

莫拉克颱風形成之後，先向東移短暫北移，再轉向西移動，並於台灣花蓮登陸，颱風強度由中度颱風減弱為輕度颱風，雖然颱風8日逐漸遠離台灣地區，但台灣東部地區由於太平洋高壓西伸與颱風環流形成的共伴效應，風速增強。而台灣西部則由於颱風本身環流的西北氣流與南海形成的西南氣流相會於台灣海峽，形成一顯著的條狀輻合帶，並在澎湖與嘉義之間形成一氣壓槽，由於輻合帶上的偏地轉效應，其所造成強烈的對流，藉由地轉調節過程，將所產生的波動一波波不斷向東傳送，另外當對流雲系進入台灣西部地區之後，受中央山脈及太平洋高壓向西移動的影響，再加上水氣隨西南氣流進入中南部的口袋形山谷，更加強山區水氣供應及對流雲系的發展，使得莫拉克颱風的降雨現象明顯增強，也造成中南部地區近五十年來罕見的水災。

- 陳台琦、魏志憲、林沛練、廖宇慶，2010：莫拉克颱風雷達觀測中尺度雨帶特徵。行政院國家科學委員會，莫拉克颱風科學報告，53—81。
- 陳秋士，1963：簡單斜壓大氣中熱成風的建立和破壞(一)。氣象學報，33，51—63。
- 陳秋士，1987：天氣和次天氣系統的動力學。科學出版社。
- 張保亮、林品芳、陳嘉榮，2009：莫拉克颱風雙都卜勒雷達峰場合成初步分析。2009年海峽兩岸災害性天氣分析與預報研討會，4—8。
- 鳳雷、鄭兆尊、周仲島，2009：莫拉克颱風西南部豪雨事件分析。2009年海峽兩

- 岸災害性天氣分析與預報研討會，30—35。
- 葉文欽，1977：熱帶氣旋與極地高壓共伴效應對台灣天氣的影響。氣象預報與分析，第70期，33—39。
- 葉篤正、李崇銀、王必魁，1996：動力氣象學(繁體字版)。明文書局。
- 許晃雄、周佳，2010：莫拉克颱風的大尺度背景環流。行政院國家科學委員會，莫拉克颱風科學報告，27—52。
- 潘大綱、戴志輝、蔡晉東、顏自雄，2004：西南氣流影響下台灣東南部局部環流個案分析。大氣科學，第32期，第1號，73—93。
- 顏自雄，2003：賀伯颱風(1996)及其受台灣地形影響之數值模擬研究。台灣大學博士論文。
- Bell, G. D., L. F. Bosart, 1988：Appalachian cold-air damming. *Mon. Wea. Rev.* 116, 137—161.
- Elsberry, R. L., W. M. Frank, W. M. Holland, J. D. Jarrell, R.L. Southern., 1985：A global view of tropic cyclones. *Naval Research*

Marine Meteorology Program, 185PP.

- Haltiner, G. J., R. T. Williams, 1980：Numerical prediction and dynamic meteorology. JOHN WILEY & SONS
- Holton, J. R., 2004：An introduction to dynamical meteorology. ELSEIVER ACADEMIC PRESS.
- 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, S.R. Brodzik, 2006：The hurricane rainband and intensity change experiment. *BAMS*, 87, 1503—1521.
- Ritchie, A. E., R. L. Elsberry, 1999：Simulated impact of a mesoscale convective system on a tract of typhoon Robyn during TCM-93. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 2232—2251.
- Wu, K.K., W. Cheung, Y. Y. Lo, 2009：Numerical study of the rainfall event due to interaction of typhoon Bobs and northwesterly monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 2049—2064.

A Investigation of Mesoscale Dynamic Process Associated with Typhoon System

Tian-Yow Shyu Ching-Teng Weng Koung-Ying Liu

Abstract

Typhoon Morakot landed Taiwan at 8 August 2009. It is not a strong typhoon, because of the interaction between typhoon and southwest flow that caused the biggest damage of Taiwan area in recent 50 years.

In this study, we analysis the variation of wind field associated with the heavy rainfall. Comparing with radar and satellite map and traditional observation, we try to find out the factors that made the flash flood. In our result, the ageostrophic wind is one of an important factor; the other is terrain effect such as pocket effect that cause the strong convergent belt generates heavy rainfall at central and south Taiwan.

Keywords: Typhoon, Southwest Flow, Combination Effect, Pocket Effect