

利奇馬颱風降雨結構之特徵

劉人鳳 周仲島
台灣大學大氣科學系

摘要

本研究利用墜丁雷達觀測資料分析侵台期間共 34 小時，經由連續且長時間之觀測資料，顯示利奇馬颱風在登陸前觀察其降雨結構有明顯之雙眼牆現象及非軸對稱分量存在，針對其回波隨時間空間之演變做進一步探討與分析，亦顯示在長時間高解析度之雷達資料分析下，利奇馬颱風其降雨強度隨時間變化有氣旋式旋轉現象且四象限降雨強度分布情形有明顯強弱之區分。

關鍵字：利奇馬颱風、雙眼牆、非軸對稱分量、降雨結構

一、前言

(一)雙眼牆相關論文回顧

Black and Willoughby(1992)利用六次飛機偵測資料，分析 Gilbert(1988)颶風雙眼牆期間之變化情形，初始時外眼牆直徑 130km，內眼牆直徑 14 km，雙眼牆剛形成時氣壓急速下降，之後外眼牆內縮，內眼牆不變，此時氣壓維持不變；當外眼牆持續內縮，內眼牆開始外擴，氣壓開始急速上升，最後內眼牆消失，外眼牆內縮至 30km，中心氣壓由 891 hPa 上升到 944 hPa 升，歷時約 120 小時之久；在 Gilbert(1988)颶風雙眼牆期間，由飛機雷達回波顯示，內眼牆先形成，外圍的螺旋雨帶形成完整的對流圈，形成外眼牆，之後外眼牆逐漸內縮，並伴隨內眼牆的減弱，最後形成單眼牆結構。

(Willoughby et al. 1982; Willoughby 1990; Black and Willoughby 1992) 根據以往觀測分析顯示，指出在一些較強的颶風發展期間，內眼牆先形成，而外圍的螺旋雨帶形成完整的對流圈，之後外眼牆逐漸內縮，並伴隨內眼牆的減弱，最後形成單眼牆結構；發生同心眼大部分是在強烈的颶風或是颱風 (Kossin et al. 2000)，但此時也象徵強度發展的極限，之後的颶風或颱風，不是開始減弱便是維持原有強度 (Willoughby, 1990)。

過去雙眼牆研究分析往往是利用飛

機雷達偵測在海上雙眼牆變化，但由於飛機飛行次數有限且觀測時間不連續，也就是在兩次飛機觀測間其眼牆之變化情形皆無細密觀測資料可分析之，而利用墜丁雷達觀測資料分析侵台期間共 34 小時，經由高時空解析度之觀測資料，有利於本文之分析與探討利奇馬颱風之雙眼牆現象及非軸對稱分量之變化情形。

(二)颱風降雨之非軸對稱性特徵回顧

早期利用雷達研究熱帶氣旋的特徵(例如眼牆及雨帶等結構)，80 年代左右，美國大氣暨海洋總署(NOAA)利用機載雷達(airborne radar)觀測熱帶氣旋之結構特徵，因此 Willoughby (1984)提出颱風的雨帶分為駐留與移動性對流雨帶；其中特別針對駐留複合雨帶(stationary band complex, SBC)作進一步討論，將駐留複合雨帶分為主雨帶，位於颱風東側呈半圓形，包含活躍的對流運動；連接雨帶為氣流線交會之處，延伸主雨帶的末端與眼牆連接，包含層狀降水或是弱的對流運動；次雨帶介於主雨帶與眼牆之間，通常包含弱回波。由墜丁雷達 0.5 度仰角 PPI 降雨回波圖顯示利奇馬颱風於侵台期間有雙眼牆現象，亦清晰顯示駐留複合雨帶主要特徵。

Corbosiero and Molinari(2003)分別對熱帶氣旋移動方向與垂直風切來探討

對流的分佈及何者影響較大，研究結果歸納出，當颱風移動速度大於 3ms^{-1} 且環境垂直風切大於 5ms^{-1} 之下，只考慮移動方向之影響顯示，不論內外圈，其對流主要集中於移動方向右前方，若只考慮風切之影響顯示，在內圈時，對流主要分布在垂直風切方向之左側，在外圈時，對流主要分布在垂直風切方向之右側；大部分熱帶氣旋由於移動方向與風切兩者的角度相當近，無法區分兩者影響差異性，而當兩者角度差異大時，垂直風切影響對流分布較為明顯，但移動方向影響對流分布較不明顯；此結果支持在對流不對稱下，強風切影響對流分布情形較移動方向顯著。

Bender(1997)利用地物流體動力實驗室(GFDL)之高解析三層可移動巢狀網格模式模擬分析之，顯示當在 $f=\text{const.}$ 與沒有基本流時，由時間平均分析渦度結構接近軸對稱；當 f 為可變動時，Beta-gyre 增強且隨高度減弱，相對氣流由風暴東南側進入，而由西北側出；並利用渦度方程診斷，在風暴後方有累積降雨之最大值且中層有向上運動，此區為產生對流胞與氣旋式旋轉趨勢且當旋轉至風暴西北側時則降雨較弱，此結果支持有許多不同因素影響熱帶氣旋發展不對稱性，但當環境駛流不明顯時，beta gyre 可能成為一重要因素。

二、資料分析與結果

(一)利奇馬颱風之概述

利奇馬颱風(Lekima, 2001)是中央氣象局 2001 年編號第 19 號颱風，利奇馬颱風於 9 月 22 日 0000UTC 於菲律賓呂宋島東北方海面形成，之後緩慢偏西移動；23 日 1800UTC 利奇馬增強為中度颱風，且轉向偏北和北北西方向，直撲台灣東南部地區。

根據聯合颱風警報中心(Joint Typhoon Warning Center: JTWC)分析

風中心登陸前後之強度變化結果顯示利奇馬在登陸台灣前，最大風速和中心最低氣壓均有明顯的轉變。9 月 24 日 1800UTC 至 9 月 25 日 1200UTC 利奇馬颱風中心最低氣壓持續下降及最大風速持續增強，9 月 25 日 1200UTC 後最大風速及中心最低氣壓變化減緩，在 9 月 26 日 0000UTC 颱風中心於登陸台灣前 12 小時，中心最低氣壓從 949hPa 持續上升，而最大風速由 95kt 持續減弱；在颱風中心登陸後強度持續減弱，導致颱風登陸台灣後，台灣地區雨勢及風勢皆無預期中之強烈。

分析利奇馬颱風之平均移速，除 26 日 0000UTC 移速大於 4m/s 以外，其於時間移速均相當小，利用 Hanley et al.(2001)利用 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)數據資料計算垂直風切大小，分析結果顯示除 25 日 0600UTC 風切較大一些以外，其他時間所計算之垂直風切大小均小於 5m/s ，依據 Corbosiero and Molinari (2003)研究而言，利奇馬颱風為一個移動緩慢且垂直風切為弱風切之颱風；由於利奇馬侵台期間其垂直風切並不明顯，分析主要降雨分布在颱風後方，故與 Bender(1997)利用 GFDL 之模擬所提出結果相似，即是當垂直風切較小時，颱風之非對稱結構主要受到 Beta-gyre 影響，而呈現颱風後方有較強上升運動與最大累積降雨存在。

(二)環狀平均回波之時空變化

針對利奇馬颱風之侵台期間降雨結構作初步分析，使用墾丁雷達之 0.5 度仰角回波資料，利用弱回波中心定位，訂定颱風中心，並利用定位之颱風中心為座標軸的原點，取固定半徑資料點做平均，得到所謂環狀平均回波值。再利用哈莫圖 (Hovmöller diagram, 縱軸為時間，每 8 分鐘一組資料，橫軸為相對颱風

中心距離，單位為公里)顯示颱風平均降雨結構隨時空變化之特徵(圖1)。

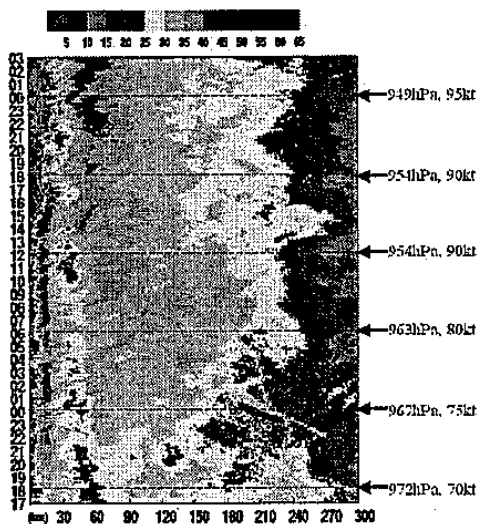


圖1 利奇馬颱風(Lekima 2001)隨時間隨颱風中心距離的墜丁雷達0.5度仰角之環狀平均回波哈莫圖。X軸為距颱風中心之距離(Km);Y軸為登陸前之時間序列(hr),期間為24日1703UTC到26日0258UTC。

由環狀平均回波顯示，利奇馬颱風環狀平均強回波主要集中在90公里左右，颱風中心弱回波區半徑寬約為10公里，在25日0800UTC以前有明顯內眼牆強回波特徵及較弱之外眼牆回波特徵，之後外眼牆回波特徵趨於明顯增強，內眼牆回波特徵趨於減弱且有向外擴之現象並與外眼牆強回波區合併，此外內外眼牆間的moat存在主要約有三個期間，分別是24日1700UTC至25日0400UTC、25日1000UTC至1400UTC與25日1800UTC至2100UTC，此三期間有較明顯moat存在。

由JTWC所分析資料顯示，9月24日1800UTC至9月25日1200UTC利奇馬颱風中心最低氣壓持續下降及最大風速持續增強，9月25日1200UTC後中心最低氣壓及最大風速變化減緩，在9月26日

0000UTC颱風中心於登陸台灣前12小時，中心最低氣壓從949hPa持續上升，最大風速從95kt持續減弱，故本研究分析時間為利奇馬颱風由強度加強狀態轉為強度減弱之過程分析，其轉變過程是否與期間發生雙眼牆及明顯非軸對稱現象相關值得進一步探討與研究分析。

為更加清楚瞭解環狀平均回波與風場隨距中心距離與隨時間變化之特徵，故將觀測時間分為五個階段作分析，由圖2及圖3顯示風場在70公里左右有一次最大風速值，之後持續增強且往中心內縮，此時原先最大風速已逐漸減弱，最後又剩下一最大風速值。而在平均環狀回波場亦在外圍有一強回波值處，隨時間有增強且內縮之現象，而中心附近之強回波亦逐漸縮弱且外擴，最後兩強回波區結合，而弱回波區(moat)亦趨於不明顯。

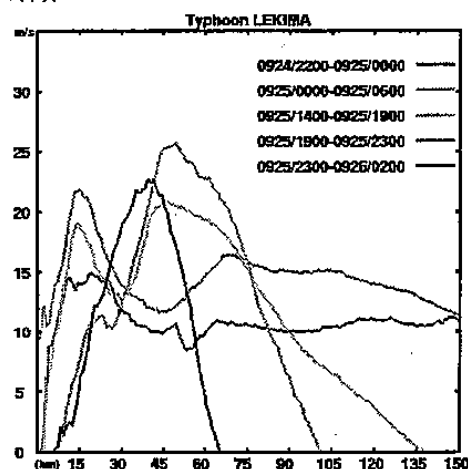


圖2 利奇馬颱風(Lekima, 2001)分五階段之環狀平均風場隨中心距離之變化情形。

(三)降雨強度之時空變化

依據周(2004)分析降雨強度之時空變化，利用回波-降雨關係式 $Z=300R^{1.4}$ 將回波換算成為降雨強度來做分析。

(1)大範圍降雨強度分區之時空變化(100km-200km-300km)

分析利奇馬颱風侵台期間大範圍降

雨強度之時空變化，由移動方向、環境垂直風切與各象限離颱風不同距離的平均降雨率合成圖，以垂直風切方向為分四象限之依據；顯示利奇馬於登陸前34小時其垂直風切與移動方向變化不大，由利奇馬颱風侵台期間100km(A區)、100-200 km (B區)與200-300km (C區)降雨總量佔有率分布之變化，橫軸為時間由2001年9月24日1700UTC至26日0300UTC，縱軸佔有率，0.7表示70%。由圖4分析顯示24日22UTC開始A區之降雨強度開始減弱，而B區之降雨強度持續增強，25日0700UTC之後A區之降雨強度再度持續增強，而B區降雨強度持續減弱，在此期間C區降雨強度所佔有率皆不高，顯示平均降雨率隨時間有往中心內縮之趨勢。

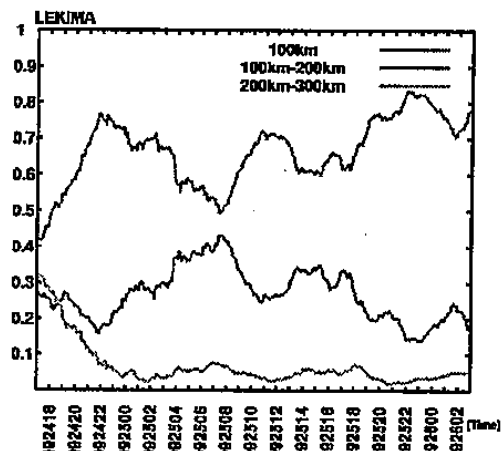


圖4 利奇馬颱風登陸前100公里、100-200公里與200-300公里降雨總量佔有率分布特徵。橫軸為時間期間為24日1703UTC到26日0258UTC，共34小時。

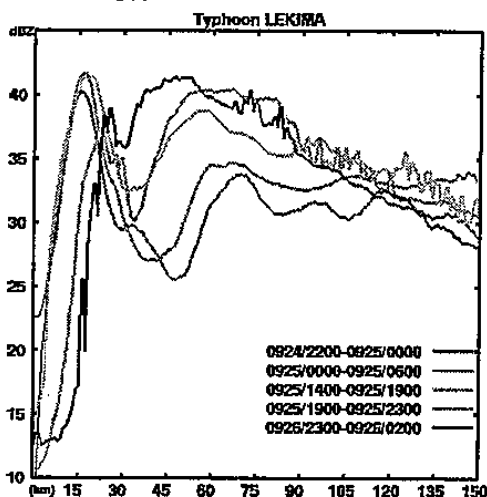


圖3 利奇馬颱風 (Lekima, 2001)分五階段之環狀平均回波隨中心距離之變化情形。

(2)小範圍降雨強度分區之時空變化 (30km-60km-90km)

由於降雨強度集中於100km以內，故進一步分析，距中心30、60與90公里之降雨總量佔有率分布之變化；利奇馬颱風侵台期間30km(D區)、30km-60km(E區)與60km-90km(F區)降雨總量佔有率分布之變化；由圖5分析顯示24日1800UTC開始D區之降雨強度開始緩慢減弱，E與F區之降雨強度變化不大，25日1200UTC之後D區之降雨強度迅速減弱，而E與F區之降雨強度增強，分析一開始降雨強度集中在30km區域，之後60km及90km區域有較強降雨強度，顯示降雨強度有向外擴趨勢。故由大範圍分區降雨強度之時空變化顯示24日2200UTC開始100至200公里範圍之降雨強度增加，25日0700UTC之後強降雨大多集中在100公里以內，其30至90公里降雨強度皆有增強，中心30公里以內回波強度持續減弱，此降雨強度變化由中心30公里以內有較強回波強度轉變為30至90公里間有強回波強度。

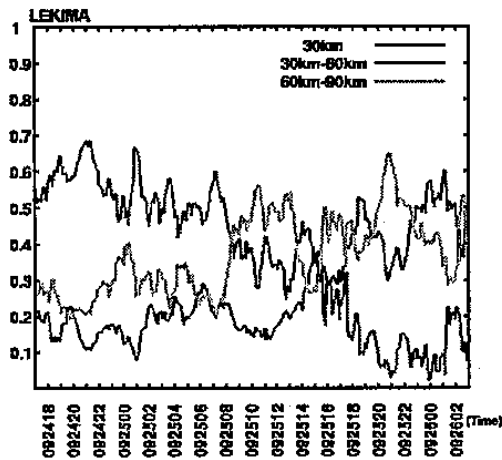


圖5 利奇馬颱風登陸前30公里、30-60公里與60-90公里降雨總量佔有率分布特徵。橫軸為時間期間為24日1703UTC到26日0258UTC，共34小時。

(3) 四象限降雨強度分區之時空變化

由距中心100km以內四象限降雨分布比例分析顯示(圖6)，四象限回波所佔比例隨時間有明顯變化情形，24日2200UTC第二象限回波所佔比例增加，之後為第三象限回波所佔比例增加且最為明顯，最後第四象限回波所佔比例增加，25日1400UTC第二象限回波所佔比例再度增加，之後為第三象限回波所佔比例增加且較為明顯，最後第四象限回波所佔比例增加，其特徵為強降雨分布成氣旋式旋轉，在第三象限佔有最大比例，而第一象限佔比例較少；此觀測分析結果與Bender(1997)利用GFDL所模擬颱風非對稱結構之結果類似，在科氏參數為可變動狀態下且無明顯環境風切存在時，則在風暴後方有輻合與最大累積降雨，前方有輻散，而強降雨以氣旋式旋轉旋轉至颱風移動方向之西北側時，最大累積降雨有減弱趨勢，另外觀測氣旋式旋轉週期與模式分析氣旋式旋轉週期大致一致，此時配合隨時間隨颱風中心距離的四象限平均回波哈莫圖(圖未示)顯示，當第四象限之降雨強度開始增強時，內眼牆波波強度亦增強，

這些非對稱結構以氣旋式方向旋轉且因象限之不同而有所消長，是否與內眼牆增強有相關，需進一步分析。

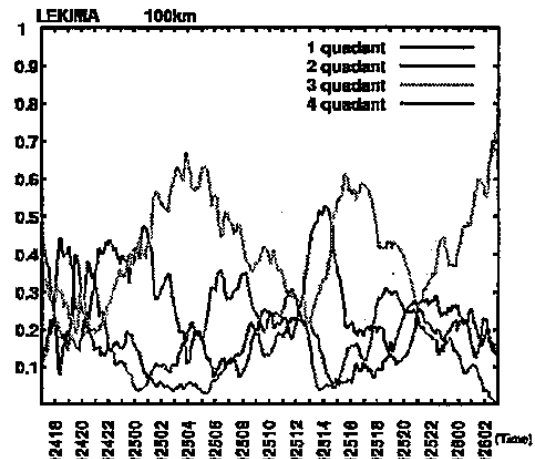


圖6 利奇馬颱風100公里內四象限降雨總量佔有率分布特徵。橫軸為時間期間為24日1703UTC到26日0258UTC，共34小時。

三、結論與討論

Willoughby(1992)利用六次飛機偵測資料，分析 Gilbert(1988)颶風雙眼牆期間之切向風剖面變化情形，大致分析出眼牆至換過程，歷時約為50小時，而由高時空解析度之觀測資料，分析利奇馬之風場變化亦有眼牆至換過程，歷時約20小時，故較 Gilbert(1988)颶風眼牆至換過程時間短，亦有可能是由於兩次飛機觀測期間資料之缺乏所導致有些現象無法觀測到。

在長時間高解析度之雷達資料分析下，利奇馬颱風其降雨強弱隨時間變化有相當戲劇性變化，但卻又能由其中找出一些規律性，由四象限降雨分布比例分析顯示，降雨比例往往是由第二象限開始增加其降雨強度，皆下來是第三象限，最後是第四象限，在此過程以第三象限變化最為明顯，其降雨強度比例增加情形較其他象限顯著；這與 Bender(1997)利用 GFDL 所模擬颱風非對稱結構之結果類似，在風切較弱情形下，颶

風非對稱結構主要受到 Beta-gyre 影響，使得颱風後方有較大之上升運動及最大累積降雨，且最大累積降雨有氣旋式旋轉趨勢，並且當旋轉至颱風移動方向之西北側時其最大累積降雨有減弱趨勢；Bender(1997)亦計算平均時間其四象限各佔比例多寡，第一象限降雨只有 8%，第二、第三與第四分別為 28%，37% 及 27%；故經由本研究四象限分析，更能清楚觀測到此種趨勢，即第一象限降雨比例最少而第三象限降雨比例較多，且更能高解析度描述四象限降雨變化，而非時間平均值，因此由本研究實際觀測各象限變化，皆較為劇烈變化，第三象限比例最多則佔 65% 以上，而第一象限比例最小則佔 5% 以下，這是以往研究少有連續且高解析度觀測到之現象，亦是模式需要增加其解析度以更加準確分析颱風非對稱之結構。

在實際觀測中在形成同心眼牆時，有明顯非軸對稱化降雨回波趨於軸對稱化降雨回波之過程，與 kuo et al (2004) 利用非軸對稱之非線性正壓模式模擬同心眼牆形成，提出雙眼牆結構是由非軸對稱轉為軸對稱化的過程類似，但同心渦旋結構在 kuo et al (2004) 的正壓數值實驗中相當強且當形成後可以維持 24 小時以上，且沒有眼牆置換之過程；但實際觀測之利其馬颱風在形成雙眼牆後，同心眼牆維持時間卻較 Kuo et al (2004) 所模擬的時間短許多。

致謝

本研究在國科會專案研究計畫編號 NSC92-2111-M-002-020-AP2 支持下完成，謹此衷心致謝。

四、參考資料

周仲島、顏健文、趙坤，2004：登陸颱風降雨結構之雷達觀測，投稿氣象學會 80 週年大氣科學特刊。

- Bender, M. A., 1997: The effect of relative flow on the asymmetric structure of the interior of hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 703-724.
- Black, M. L., and H. E. Willoughby, 1992: The Concentric Eyewall Cycle of Hurricane Gilbert. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 947-957.
- Corbosiero, K. L. and J. Molinari, 2003: The Relationship between Storm Motion, Vertical Wind Shear, and Convective Asymmetries in Tropical Cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 366-376.
- Hanley, D. E., J. Molinari, and D. Keyser, 2001: A composite study of the interactions between tropical cyclones and upper tropospheric troughs. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2570-2584.
- Kossin, J. P., W. H. Schubert, and M. T. Montgomery, 2000: Unstable interaction between a hurricane's primary eyewall and a secondary ring of enhanced vorticity. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3893-3917.
- Kuo, H.-C., L.-Y. Lin, C.-P. Chang and R. T. Williams, 2004: The formation of concentric vorticity structures in typhoons. *J. Atmos. Sci.*, in press.
- Willoughby, H. E., J. A. Clos, and M. G. Shoreibah, 1982: Concentric eye, secondary wind maxima, and the evolution of the hurricane vortex. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 395-411.
- Willoughby, H. E., F. D. Marks, and R. J. Feinberg, 1984: Stationary and moving convective bands in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 3189-3211.
- Willoughby, H. E., 1990: Temporal Changes of the Primary Circulation in Tropical Cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 242-264.