

杜鵑(2003)颱風雙眼牆與似擺線路徑 之都卜勒雷達分析

張保亮 洪景山

中央氣象局

(中華民國九十四年二月三日收稿；中華民國九十五年三月十日定稿)

摘 要

本研究利用中央氣象局墾丁雷達之回波與風場資料，分析 2003 年杜鵑颱風路徑以及眼牆結構與演變。分析顯示，當杜鵑颱風進入墾丁雷達觀測範圍後，出現明顯的雙眼牆結構，且內眼中心路徑有明顯的週期性擺動現象，在觀測期間總共出現了四次擺盪，週期約 3.0-4.0 小時，振幅約 10-15 公里。

此颱風內眼中心的擺動現象可能受到垂直風切的影響，而使得內眼牆偏移颱風中心，加上受到颱風環流導引下而導致逆時鐘的旋轉路徑，疊加大環境往西北方向的駛流後，產生了類似擺線的振盪路徑。

分析結果也顯示，杜鵑颱風內眼中心擺動的現象導致其移動速度也呈現週期性的振盪，最大和最小的移動速度分別為 14 與 4 m/s。此一擺動現象也使得最大徑向風場和路徑出現同相位的振盪，且遠離雷達和接近雷達方向之最大徑向風場的振盪呈現相反的相位關係，其最大風速差可達 23 m/s。本研究針對杜鵑颱風此種擺盪路徑所導致風場的不對稱結構特徵的研究成果，將有助於增進未來類似路徑颱風之即時風雨分布的掌握。

關鍵詞：都卜勒雷達、颱風中心、似擺線、雙眼牆

一、前 言

颱風路徑經常有振盪、搖晃，或者是所謂的擺盪運動出現(Jordan and Stowell 1955；Jordan 1966；Lawrence and Mayfield 1977；Muramatsu 1986；Roux and Viltard 1995)。Muramatsu (1986)曾利用地面雷達分析指出，

颱風中心擺盪路徑的出現與雙眼牆的存在有密切的關聯，且此種擺盪路徑形成的原因可能是在某些因素的影響下，颱風眼偏移了颱風的環流中心，並在颱風環境中進行逆時鐘的旋轉運動。Jordan (1966)分析 Hurricane Calra (1961)曾指出兩個週期的擺盪運動，其擺盪週期與振幅分別為 8-10 小時及 23 公里，Muramatsu (1986)

則發現 Wynne (1980) 颱風中心路徑有 5-8 小時的振盪現象，在 36 小時內最大振幅達 23 公里。

Jones (1977) 與 Abe (1987) 利用正壓模式模擬颱風路徑的擺盪現象指出，由於垂直風切的存在，可能在近地表與接近平流層產生符號相反的位渦擾動，此高低層的位渦擾動會相互環繞而出現低層中心路徑的擺盪運動 (Reasor and Montgomery 2001)。Nolan et al. (2001) 則以波數一不穩定度的機制來解釋此現象發生的可能原因，此不穩定度將導致渦旋中心的偏離，並產生中心路徑小振幅的擺盪，其最終的結果將導致近中心渦度與角動量的重新分布，進而影響渦旋強度的發展。

眼牆結構的變化除了與颱風強度息息相關外，更與其暴風半徑、螺旋雨帶以及外圍環流的互動密不可分。其中雙眼牆現象，則是在颱風結構變化過程或生命期中可能出現的重要特徵。Willoughby et al. (1982) 曾統計 1969-1971 年的西太平洋同心眼牆颱風結構指出，當颱風最強風速達 65 m/s 時，雙眼牆現象發生的頻率高達 50%，對於強度較弱的颱風，其發生的頻率則明顯降低。他們的研究同時指出，同心雙眼牆現象經常出現在強烈且高度軸對稱的颱風中，且典型的同心眼牆其內眼牆存在深厚的對流，週遭為弱回波或無回波，通常稱為壕溝區 (moat)，其外側則由大範圍的外眼牆對流所環繞 (Willoughby et al. 1982； Jorgensen 1984； Willoughby 1990； Willoughby and Black 1996)。而外眼牆雨帶可能由螺旋雨帶組織而成，或由最大眼牆外遠處之渦旋羅世培波 (Vortex Rossby Wave) 激發而形成 (Montgomery and Kallenbach 1997)。Kossin et al. (2000) 曾對同心眼牆的穩定度問題進行研究並指出兩類的不同

穩定度，第一類為中心渦旋與外渦度帶無直接的交互作用時，在壕溝區徑向方向提供很強的渦度差異，使小振幅渦度擾動往內的混合與渦度帶的重新安排受到抑制。第二類則是中心渦旋與外渦度帶較為接近，兩者間將產生混合與渦度帶的重新分布作用，並使渦度帶形成不同的變化型態。這對於多邊形颱風眼牆形成問題的探討，提供了一個思考方向。此外，雙眼牆颱風經常存在週期性的眼牆取代過程 (Willoughby et al. 1982； Willoughby 1990； Black and Willoughby 1992； Blackwell 2000)，內眼牆的減弱與消散常導因於外圍眼牆環狀對流阻隔了內眼牆角動量與水氣的供應、外眼牆在內眼牆區產生的下降運動以及颱風內流的熱力特性受到外眼牆降水影響等因素，而不利於內眼牆對流發展 (Samsury and Zipser 1995)。而在內眼牆消失後，颱風強度將可能透過內縮過程再度增強，但大部分個案已無法達到雙眼牆取代過程前的颱風強度 (Willoughby et al. 1982； Willoughby 1990)。因此，此一眼牆取代過程被認為是抑制颱風強度持續發展的重要機制 (Camp and Montgomery 2001)。

台灣地區在都卜勒雷達網陸續建置後，觀測到許多雙眼牆颱風個案。周 (2001) 曾分析侵台颱風碧利斯 (2000) 個案指出，其內、外眼牆具有相同的環流中心，為同心眼牆的個案，在颱風登陸後，同心圓眼牆結構消失，移出陸地後颱風眼出現，但雙眼牆結構已不復見。隨後的利奇馬 (2001) 颱風個案，其由巴士海峽往東南部進入陸地，在進入墾丁雷達觀測範圍時，呈現單眼牆分布，其週遭伴隨範圍廣闊的螺旋雨帶，在接近陸地過程中，開始出現幾近同心圓的雙眼牆結構，內眼牆在數小時後逐漸接近

外眼牆邊緣，最後消失，在過程中外眼牆有內縮的現象發生(劉與周 2004)。2003 年杜鵑颱風由東南方海面接近台灣南端，在進入墾丁雷達觀測範圍時，同樣出現了雙眼牆的特徵，其眼牆與眼的結構較利奇馬颱風更加顯著，且內眼中心路徑有擺動的現象發生(Hong and Chang 2005)。本研究利用中央氣象局墾丁雷達資料回波與風場資料，針對杜鵑颱風路徑的擺動現象與環流強度變化進行分析，希望對於雙眼牆颱風中心路徑擺動及近中心風力分布有更一步的瞭解。

二、資料與分析

本研究使用之墾丁都卜勒雷達資料為德國 Gematronik 公司製的氣象雷達，觀測資料包含基本回波、徑向風場以及頻譜寬。其回波的觀測範圍設定為 460 公里，徑向解析度則為 1 公里，而徑向速度及頻譜寬資料範圍則為 230 公里，徑向解析度為 250 公尺。此外，此雷達採

用雙來復頻(Dual PRF)的操作，如此可提高折錯速度 (Nyquist velocity) (Frush 1991; Lee et al. 2000)以增加都卜勒風速的觀測上限。其它相關之雷達基本參數如表一所示。

由當時墾丁雷達觀測之原始都卜勒速度場可發現，眼牆區域仍出現明顯的折錯現象，特別是內眼牆區域，顯示當時該區域之最大風速仍超過折錯速度值(49.2 m/s)。因此，需對於都卜勒速度場資料進行反折錯處理，以正確表達杜鵑颱風實際之風速值。由於採雙來復頻的操作可能產生相對之雜訊，加上雷達設定之折錯速度較高，因此，採 Rankine -Like Vortex (RLV)的速度分布來進行的反折錯處理，是相對有效率並可確保都卜勒速度場反折錯的正確性。其處理步驟首先利用雷達弱回波中心進行颱風中心定位 (周 2003)，並作為 RLV 之參考中心，由原始都卜勒速度場估計颱風之最大風速半徑與風速後 (Wood and Brown 1992)，計算 RLV 相對應之雷達都卜勒速度場，在與實際雷

表一 墾丁都卜勒雷達掃描策略一覽表

Pulse peak power	≥ 750 kW	
Frequency range	2700 to 3000 MHz	
Mechanical angle span	-2 deg to +183 deg	
Rotation rate	0.5 rpm - 6 rpm	
	Non-Doppler mode	Doppler mode
Pulse repetition frequency	250 - 550 Hz	250 - 1300 Hz
PRF stagger ratios	N/A	5/4, 4/3, 3/2 selectable
Unambiguous range	460 km	230 km
Unambiguous velocity	N/A	± 49.2 m s ⁻¹
Range resolution	1 km	0.25 km
Pulse length	3.3 μs	0.53 μs
Elevation angles	0.5, 1.5	0.5, 1.5, 2.4, 3.3, 4.3, 6.0, 9.9, 14.6, 19.5

達之都卜勒速度觀測值進行比對後，針對兩者間之速度差大於折錯速度時，便進行反折錯處理。

此外，「侵台颱風之 GPS Dropsonde 飛機偵察觀測實驗」(DOTSTAR) (Wu et al. 2005) 針對杜鵑颱風的外圍環流進行了 12 個投落送的觀測，其觀資料時間(9 月 1 日 06:33 ~ 08:12 UTC) 與本文選取之分析時間相差約 6-8 小時。因此在本研究中，此資料可用來探討雷達分析之颱風移動速度與大環境駛流場的相關與垂直風切對於杜鵑颱風內眼擺盪路徑的影響。

三、結果與討論

杜鵑颱風於 2003 年 8 月 29 日在菲律賓東方海面形成後，於 31 日朝西北西方向往台灣南方海面移動(圖 1)。利用投落送觀測資料計算之 850-300 hPa 的平均氣流為 8.2 m/s，朝 302 度方向，平均氣流方向約偏離杜鵑颱風中心路徑約 20 度，此與數值模式(Neumann 1979)與觀測研究(Marks et al. 1992)的結果類似，顯示杜鵑颱風整體的移動，主要受大環境駛流場的駛流作用所導引。

當杜鵑颱風進入墾丁雷達觀測範圍後，其雙眼牆與眼結構相當顯著(圖 2)，內眼牆區域大於 55 dBZ 的回波主要發生於半徑約 10 公里的環狀帶上，而外眼牆則為相對較為寬廣的對流區。在颱風接近台灣南端過程中，內眼中心路徑出現了四次的擺盪現象(圖 2)，其週期隨颱風接近台灣南端有些微縮小的現象，週期分別為 3 小時 52 分、3 小時 44 分、3 小時 36 分、3 小時 20 分，振幅約 10-15 公里。此週期與振幅皆較 Jordan (1966) 與 Muramatsu (1986) 的分析結果

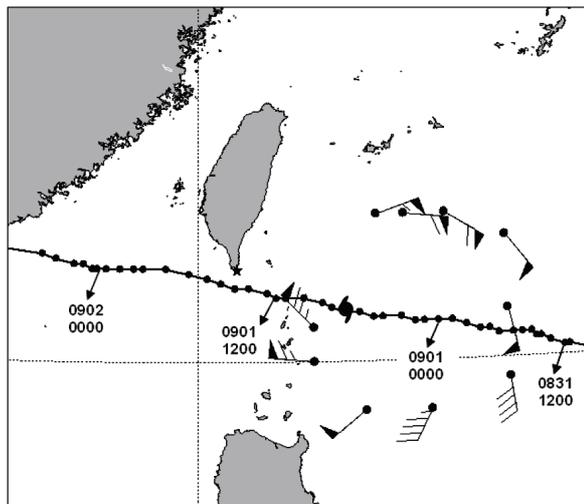


圖 1 中央氣象局杜鵑(2003)颱風最佳路徑圖。圖中之風標為 2003 年 9 月 1 日 06:33 ~ 08:12 UTC 投落送 925 hPa 之風場觀測資料，當時之颱風中心位置亦標示於圖中。

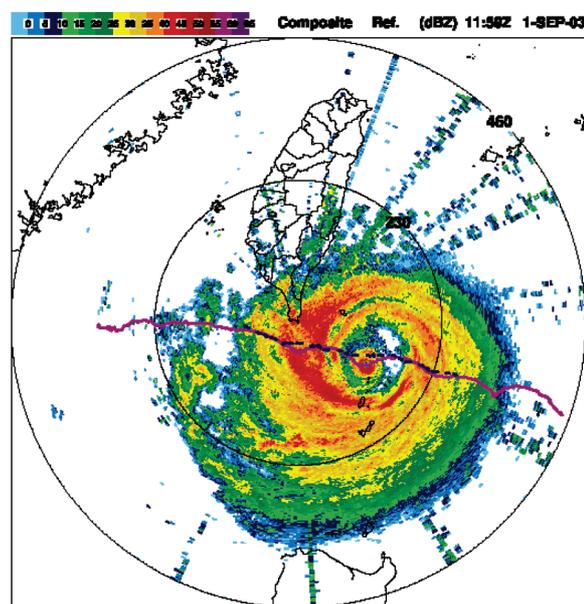


圖 2 杜鵑颱風於 2003 年 9 月 1 日 11:59 UTC 之墾丁雷達最大合成回波圖。桃紅色線為內眼中心路徑，藍色線為外眼中心路徑，回波強度分析半徑為 460 公里。

為小。由圖 2 中也可看出內眼中心路徑有顯著的擺盪現象，而外眼中心路徑則呈相對穩定的西北西方向移動路徑。而在杜鵑颱風通過台灣南方近海過程中，雙眼牆結構並無取代過程的現象出現，且在 9 月 2 日 05:00 UTC 登陸香港前仍存在雙眼牆的降水回波特徵，雙眼牆生命史達 20 小時以上。圖 3 為與圖 2 同時間之都卜勒速度場分布，圖中顯示在內眼牆與外眼牆區域均呈現相當顯著的偶極型態，此時間之最大接近(Maximum Inbound Radial Velocity, *MIRV*)與遠離雷達(Maximum Outbound Radial Velocity, *MORV*)方向的徑向速度，於內眼牆分別為 65.6 與 61.0 m/s，於外眼牆則分別為 62.8 與 56.6 m/s。此外，內眼牆都卜勒速度偶極型態明顯偏離外眼中心，顯示杜鵑颱風具有非同心的雙眼牆的結構。

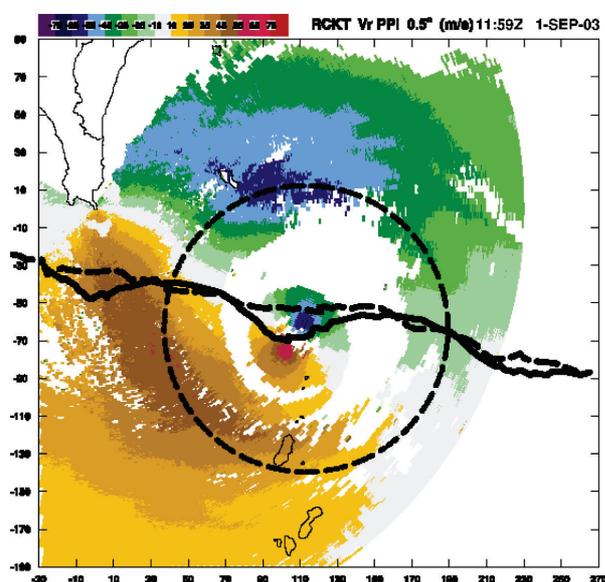


圖 3 同圖 2，但為都卜勒速度場分布圖。黑色實線為內眼中心路徑、黑色虛線為外眼中心路徑，圓形虛線為最大風速半徑，分析範圍為 300 公里×280 公里。

圖 4 及圖 5 顯示兩個完整的擺盪週期之回波圖，可見外眼牆隨著颱風靠近陸地有持續增強且變寬的現象，外眼牆與內眼牆並無顯著的交互作用產生。Kossin et al.(2000)指出的第一類不穩定，外眼牆與內眼牆之間在徑向方向因存在大的旋轉差異，此旋轉差異將會抑制外眼牆和內眼牆的混合，從而維持內眼牆之獨立性，並且導致外眼牆變的寬廣，雖然本研究無法取得足夠之風場資料以驗證第一類不穩定度是否存在，但本個案之觀測結果和 Kossin et al.(2000)的研究結果非常接近。此外，在杜鵑逐漸接近台灣南端時，外眼牆半徑由 120 公里逐漸內縮至 50 公里左右，而內眼牆半徑幾乎沒有變化。一般而言，眼牆半徑隨高度增加而變大，因此，當颱風靠近雷達時，使用雷達固定仰角資料進行分析時，有可能因觀測高度的降低而出現眼牆半徑變小的錯覺，但此因素所產生的半徑變化估計應不超過 10 公里，此內縮的現象應有其物理上的意義。

圖 6 為外眼牆半徑隨時間的變化，圖中顯示眼牆半徑的變化約略可區分為兩個階段，在第一階段中，外眼牆半徑由 120 公里內縮至 70 公里左右(三角線)，同時間雷達都卜勒速度值則在兩小時內由 48 m/s 增加至 60 m/s，此種眼牆內縮而最大風速增強的現象，在 10:40 至 12:24 UTC 期間最為顯著，也與颱風與台灣地形間的活躍對流出現時間接近。Shapiro and Willoughby (1982)指出，在颱風最大風速半徑內側加入熱源，可以造成渦旋中心氣壓的降低，進而導致眼牆半徑的內縮與環流強度的增強。因此，在本個案中，當颱風靠近陸地時，可能因地形的作用導致對流的加強，並透過潛熱釋放加強切線風速，最後導致眼牆的內縮。

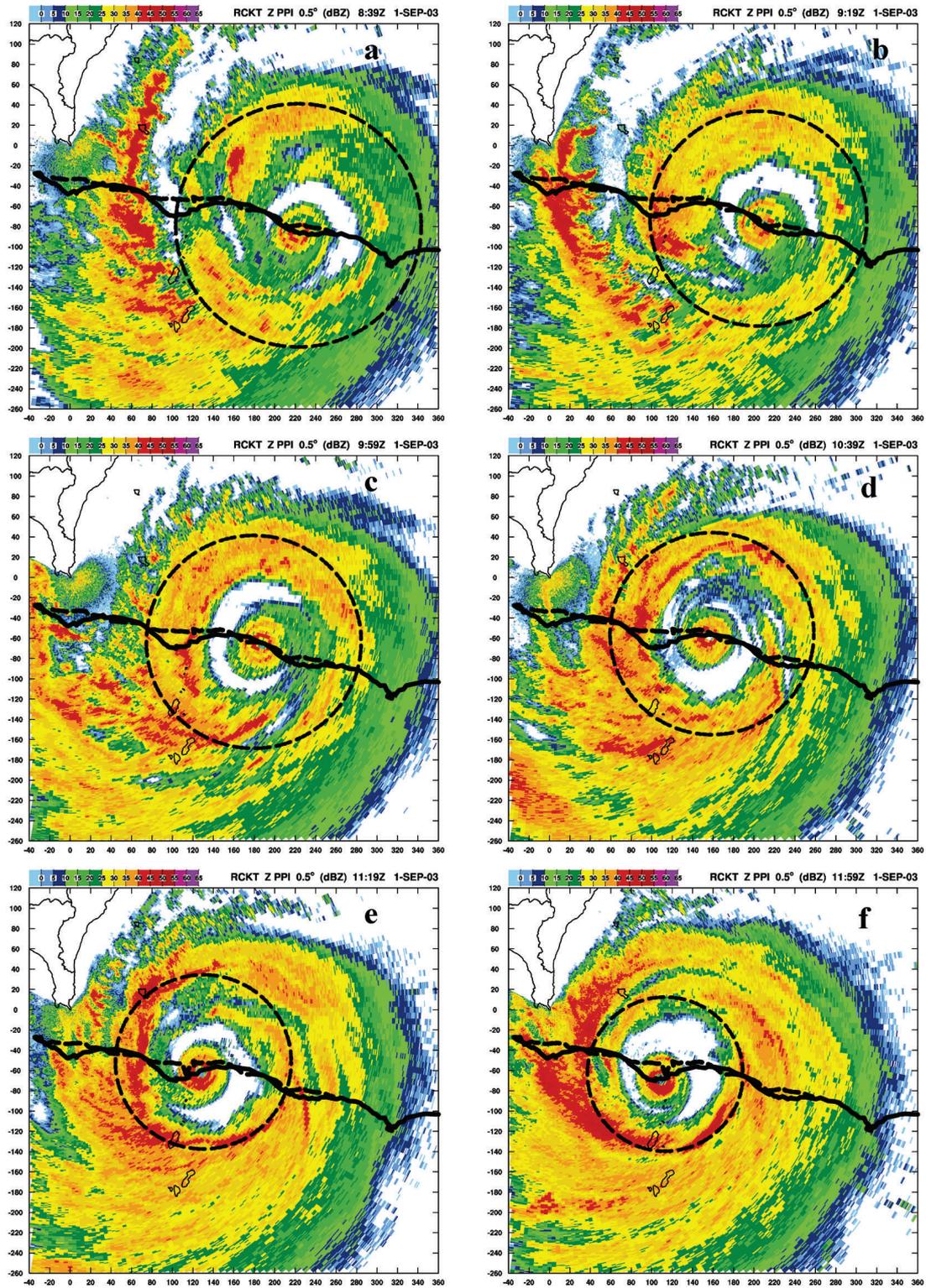


圖 4 同圖 2，但為 2003 年 9 月 1 日 08:39 到 11:59 UTC 間隔 40 分鐘之墾丁雷達 0.5 度回波圖。圖中分析範圍為 400 公里×380 公里。

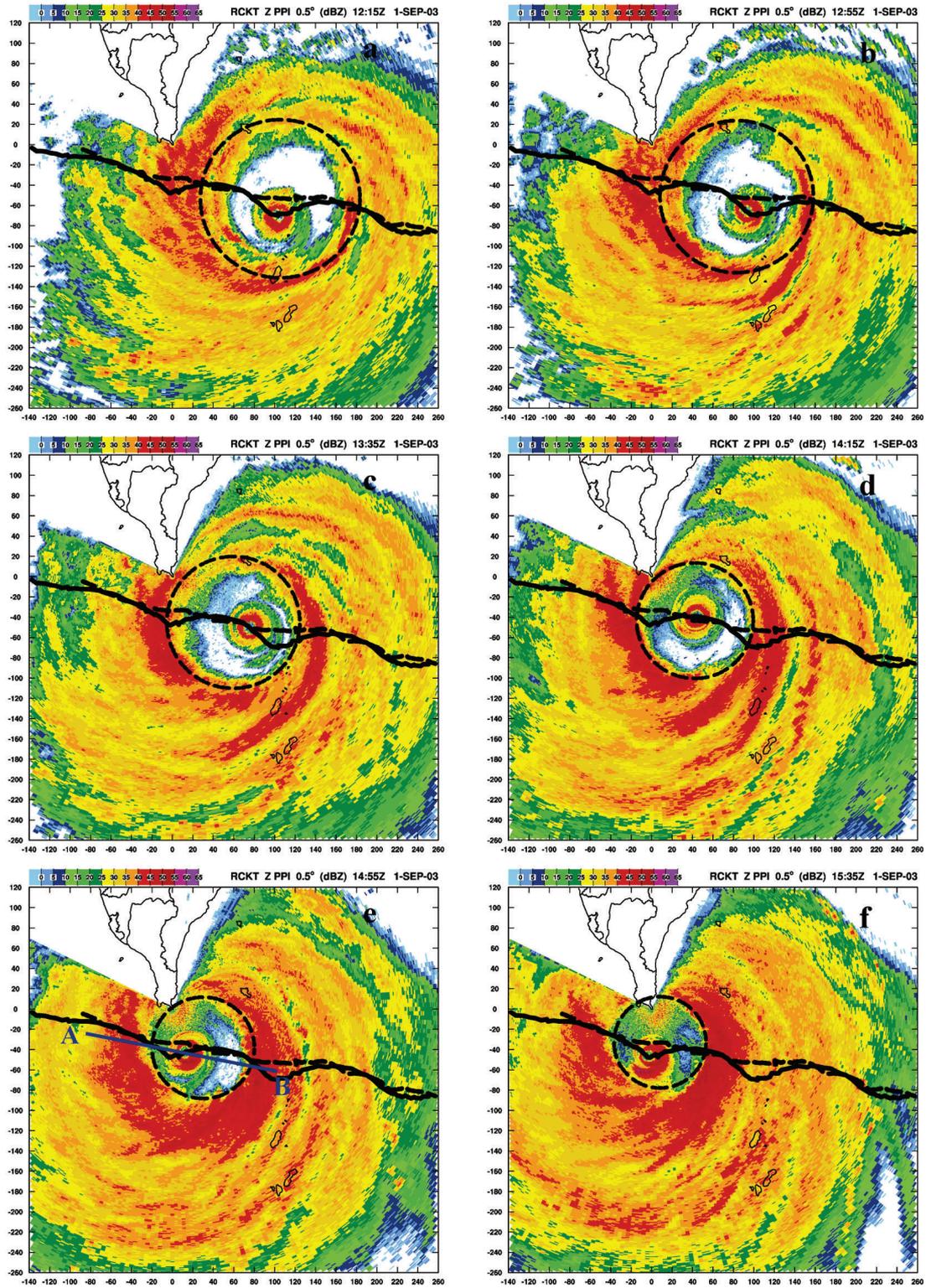


圖 5 同圖 4，但為 2003 年 9 月 1 日 12:15 到 15:35 UTC 之墾丁雷達 0.5 度回波圖。

而在第二階段中，外眼牆半徑接近線性地由半徑 75 公里縮減至 50 公里左右(方塊線)，而最大風速則只有些微的變化。這個階段外眼牆已非常接近陸地，由於地形的存在可能直接破壞颱風環流，使得切線風速減弱，若以梯度風平

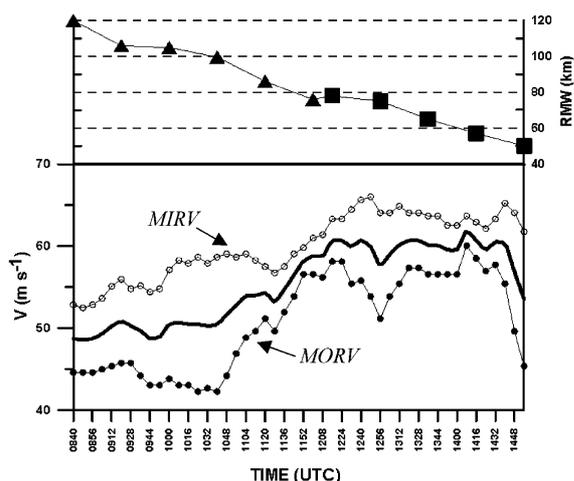
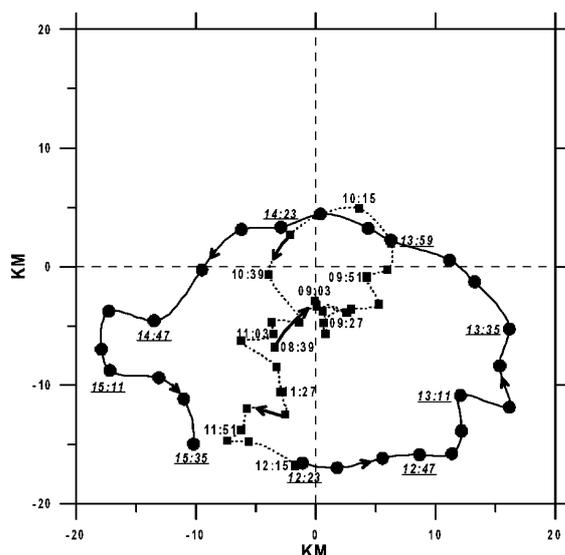


圖 6 杜鵑颱風外眼牆半徑(上圖)，最大接近(MIRV, 取正的速度值)與遠離雷達方向之都卜勒速度(MORV)及平均都卜勒速度(實線)時間序列圖(下圖)。



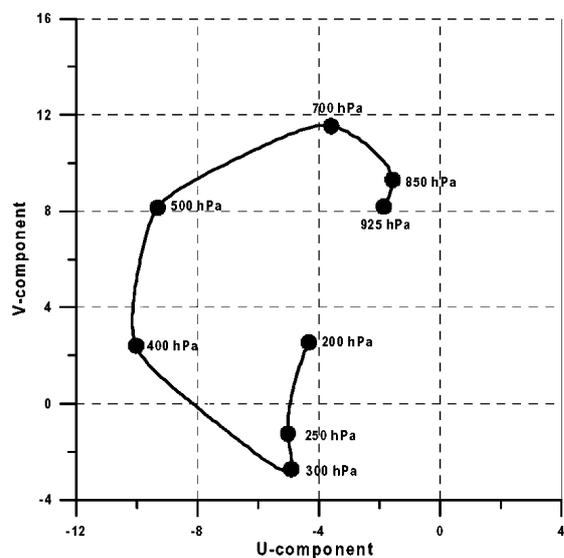


圖 8 利用圖 1 中投落送觀測資料計算之風徑圖。

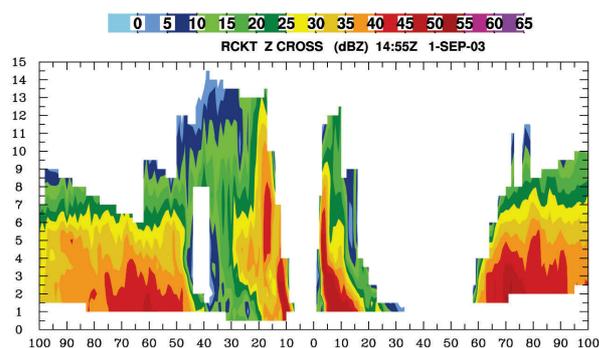


圖 9 圖 5e 中 AB 線段之回波垂直剖面圖。

他們發現在垂直風切大於 5 m/s 的條件下，有超過 90%的閃電發生於垂直風切的下風切 (down shear) 方向，因而加強了颱風眼牆與螺旋雨帶對流的非軸對稱性，而相關的觀測與模擬研究也指出類似的重要特徵 (Franklin et al. 1993 ; Jones 2000 ; Reasor et al. 2000)。

如前所述，由於杜鵑颱風為非同圓的雙眼牆結構，內眼因為偏離了颱風中心而導致環

繞颱風中心旋轉的現象，疊加颱風本身的移動速度之後，內眼不只在中心路徑呈現出擺線的運動，同時也產生許多重要的運動場特徵。數學上擺線的定義為當一個輪軸在一直線上作不滑的滾動時，輪軸上的點所描繪之軌跡 (Wagon 1991)。如將杜鵑颱風外眼牆視為轉動的輪軸，而內眼視為輪軸上的一點，則內眼之移動路徑將出現類似擺線的軌跡。為進一步描述內眼的移動，我們定義內眼和外眼的移動速度分別為 \bar{c}_i 和 \bar{c}_o ，內眼環繞颱風中心的移動速度表示為 \bar{c}_{oi} ，則三者的關係式可寫成：

$$\bar{c}_i = \bar{c}_o + \bar{c}_{oi} \quad (1)$$

其中 \bar{c}_i 和 \bar{c}_o 可以由雷達中心定位所計算之中心位移來估計，但 \bar{c}_{oi} 則無法從觀測中直接求得。假設 \bar{c}_o 是固定往西北西方向， \bar{c}_{oi} 是旋轉向量，因此 \bar{c}_i 因向量疊加之故，勢必會隨著內眼的位置改變而產生振盪。圖 10 為內眼和外眼由中心定位所計算出來的移速，由圖中可見，內眼之移動速度隨時間有明顯的振盪現象發生，而移動速度的振盪與中心的擺動路徑具有很高的相關性，相關係數值達 0.92。

此外，由於內眼環繞颱風中心旋轉，因此可以預期當內眼環繞到其移動方向和外眼的移動方向相同時 (此時正好位於擺線的頂部或底部)，內眼有最大 (最小) 的移速，也就是

$$C_{imax} = |\bar{c}_o| + |\bar{c}_i| \quad (2)$$

$$C_{imin} = |\bar{c}_o| - |\bar{c}_i| \quad (3)$$

圖 10 中也顯示，當內眼移至擺線之頂端和底部時有最大和最小的移速，分別為 14 m/s 和 4 m/s， $|\bar{c}_o|$ 可由觀測得知約 8 m/s，利用 (2) 式可推估出內眼的移動速度 $|\bar{c}_i|$ 約為 5 m/s。此外，內眼中心路徑的擺盪現象不僅反映在其移

動速度的振盪上，同時也導致內眼牆 *MIRV* 與 *MORV* 隨時間的振盪(圖 12)。考慮類似本個案的情況，內眼相當於自轉，而其環繞颱風中心旋轉相當於公轉，示意圖如圖 11 所示，所以內眼之風場可表示為：

$$\vec{V} = \vec{V}_T + \vec{V}_M + \vec{V}_m \quad (4)$$

其中 \vec{V}_T 是內眼的切線風場， \vec{V}_m 是壕溝區穿越內眼中心之駛流，亦即帶動內眼公轉的駛流， \vec{V}_M 則是綜觀環流場的駛流，其導致整個颱風往西北西方向移動。對於軸對稱渦旋而言，其最大切線風速可以雷達觀測之都卜勒速度場 *MIRV* 和 *MORV* 的平均值來近似，而兩者偏差值則可用來代表穿透旋轉流場之平均氣流(駛流)在雷達觀測方向上的分量(Wood and Brown 1992)。考慮簡化的情形下，假設雷達位於渦旋無限遠處的西方，則雷達所觀測到的都卜勒速度 *MIRV* 與 *MORV* 可表示如下：

$$MIRV \approx |\vec{V}_T| + |\vec{V}_M| + |\vec{V}_m| \times \sin \theta \quad (5)$$

$$MORV \approx |\vec{V}_T| - |\vec{V}_M| - |\vec{V}_m| \times \sin \theta \quad (6)$$

因此，依(5)及(6)式當內眼旋轉時，*MIRV* 和 *MORV* 將會隨時間出現振盪，由於兩者所在之方位角 θ 差值接近 180 度，因此將出現相反相位的震盪，如圖 12 所示。圖中也顯示最大接近雷達方向之分量則高達 83 m/s，遠離雷達方向的分量則接近 60 m/s，兩者差值達 23 m/s。此 *MIRV* 和 *MORV* 隨時間振盪的現象，在作業上至少提供二種應用的價值，第一，內眼的切線最大風速當移至特定位置時(如擺線的頂端)在短時間內風速將會迅速增強，杜鵑個案中顯示(圖 12)，雷達觀測之最大風速即在 1-2 小時(12:08~13:44UTC)內增加 15 m/s 到達 80m/s，Wakimoto and Black(1994)在 Andrew(1992)颶

風中也發現類似的現象，但其為颶風眼附近中尺度渦旋環繞颱風中心旋轉所致，而本個案則是雙眼牆，兩者雖然現象不同，但卻因類似的機制產生風速劇變的結果。第二，由於 *MIRV* 和 *MORV* 出現反向的振盪，因此在局部地區將會短時間內產生旋轉差異，此一差異將可能會

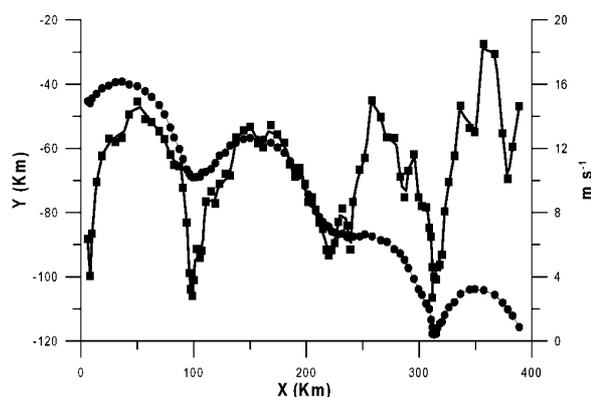


圖 10 杜鵑颱風內眼中心路徑(黑點線)與移速(方塊線)時間序列圖。x 與 y 為相對於墾丁雷達之座標。

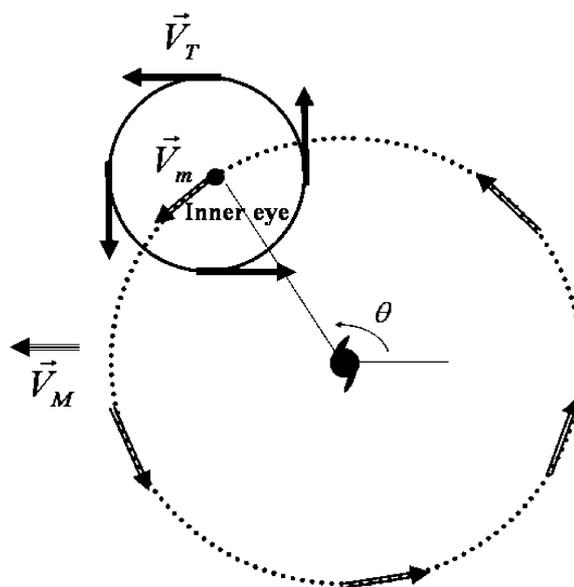


圖 11 杜鵑颱風內眼中心環繞外眼中心移動之示意圖，圖中符號詳見內文。

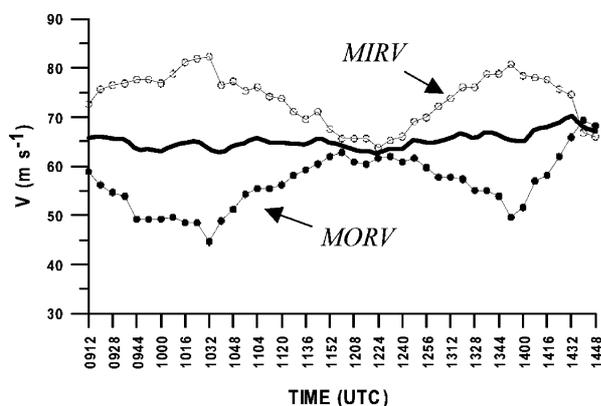


圖 12 同圖 6 下圖，但為內眼牆。

抑制外眼牆和內眼牆的混合作用，從而延長內眼牆之生命期(Kossin et al. 2000)。因此，爾後當相似結構特徵之颱風接近台灣地區時，杜鵑颱風的分析結果將有助於數小時內颱風路徑與中尺度降水與環流結構變化的掌握。

四、結 論

本研究利用中央氣象局墾丁雷達資料回波與風場資料，分析 2003 年杜鵑颱風路徑及其伴隨之颱風降水與環流強度變化。分析結果顯示，當杜鵑颱風進入墾丁雷達觀測範圍後，出現明顯的雙眼牆結構特徵，且內眼中心路徑有明顯的週期性擺動現象，觀測期間總共出現了四次擺盪，週期約 3.0-4.0 小時，振幅約 10-15 公里。

杜鵑颱風內眼中心路徑週期性的擺動現象，其性質相當類似擺線具有的特性，即杜鵑颱風內眼偏移了颱風的環流中心，並在颱風環境中進行逆時鐘的旋轉運動，在疊加大環境駛流後，形成了似擺線的移動路徑。就本研究的結果發現，颱風內眼中心偏移颱風環流中心，

可能是受到垂直風切影響的結果，即內、外眼牆垂直發展高度的差異，在顯著的垂直風切影響下，內眼牆因承受較大之風切力而偏離颱風環流中心。由於缺乏足夠之分析資料驗證上述的論點，未來如能配合理論與模擬研究來進行探討，相信將有助於對於非同心眼牆與似擺線颱風路徑形成的過程的了解。

此外，此一內眼中心路徑的擺動，伴隨中心移動速度同相位的振盪，也同時導致內眼牆遠離雷達和接近雷達方向之都卜勒速度場的振盪現象，且兩者呈現相反的相位關係。分析期間，最大接近雷達方向之分量則高達 83 m/s，遠離雷達方向的分量則接近 60 m/s，兩者差值達 23 m/s。此種擺盪路徑所導致風場的不對稱結構，將有助於增進未來類似路徑颱風之即時風雨分布的掌握，特別是在防災應用上。

致 謝

本文得以完成，首先要感謝中央氣象局提供墾丁雷達資料以及中心定位資料，同時要感謝審查者提供的寶貴建議。本文在國科會 NSC 93-2119-M-052 -002 -AP1 及 NSC 94-2625-Z-052-007 及計劃經會補助下完成，在此一併致謝。

參考文獻

- Abe, S., 1987: The looping motion and asymmetry of tropical cyclone. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 247 – 257.
- Black, M. L., and H. E. Willoughby, 1992: The concentric eyewall cycle of Hurricane Gilbert. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 947 – 957.
- Blackwell, K. G. 2000: The Evolution of

- Hurricane Danny (1997) at Landfall: Doppler-Observed Eyewall Replacement, Vortex Contraction/Intensification, and Low-Level Wind Maxima. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 4002 – 4016.
- Camp, J. P., and M. T. Montgomery, 2001: Hurricane maximum intensity: Past and present. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1704 – 1717.
- Corbosiero, K. L., and J. Molinari, 2002: The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2110–2123.
- Franklin, J. L., S. J. Ford, S. E. Feuer, and F. D. Marks Jr., 1993: The kinematic structure of Hurricane Gloria (1985) determined from nested analyses of dropwindsonde and Doppler radar data. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2433–2451.
- Frush, C. L., 1991: A graphical representation of the radar velocity dealiasing problem. Preprints, *25th Int. Conf. on Radar Meteorology*, Paris, France, Amer. Meteor. Soc., 885 - 888.
- Hong, J. -S., and P. -L. Chang, 2005: The trochoid-like Track in Typhoon Dujuan (2003). *Geophys. Res. Lett.* **32**, L16801, doi:10.1029/2005GL023387.
- Jones, R. W., 1977: Vortex motion in a tropical cyclone model. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1518 – 1527.
- Jones, S. C., 2000: The evolution of vortices in vertical shear: III: Baroclinic vortices. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 3161–3185.
- Jordan, C. L., 1966: Surface pressure variations at coastal stations during the period of irregular motion of Hurricane Carla of 1961. *Mon. Wea. Rev.*, **94**, 454 – 458.
- Jordan, H. M., and D. J. Stowell, 1955: Some small scale features of the track of Hurricane Ione. *Mon. Wea. Rev.*, **83**, 210 – 215.
- Jorgensen, D. F. 1984: Mesoscale and Convective-Scale Characteristics of Mature Hurricanes. Part I: General Observations by Research Aircraft. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1268 – 1286.
- Kossin, J. P., W. H. Schubert, and M. T. Montgomery, 2000: Unstable Interactions between a Hurricane's Primary Eyewall and a Secondary Ring of Enhanced Vorticity. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3893 – 3917.
- Lawrence, M. B., and B. M. Mayfield, 1977: Satellite observations of trochoidal motion during Hurricane Belle 1976. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1458 – 1461.
- Lee, W. C., B. J. -D. Jou, P. -L. Chang, and F. D. Marks, 2000: Tropical cyclone structure retrieved from single Doppler radar observations. Part III: Evolution and structures of Typhoon Alex (1987). *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3982-4001.
- Marks, F. D. Jr., R. A. Houze Jr. and J. F. Gamache, 1992: Dual-aircraft investigation of the inner core of Hurricane Norbert: Part 1: Kinematic structure. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 919-942.
- Muramatsu, T., 1986: Trochoidal motion of the eye of Typhoon 8019. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 259-272.
- Montgomery, M. T., and R. J. Kallenbach, 1997: A theory for vortex Rossby-waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 435 – 465.
- Neumann, C. J., 1979: On the use of deep-layer-mean geopotential height fields in statistical prediction of tropical cyclone motion. *Sixth*

- Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Sciences*, Banff, Alberta, AMS, 32-38.
- Nolan, D. S., M. T. Montgomery, and L. D. Grasso (2001), The wavenumber-one instability and trochoidal motion of hurricane-like vortices, *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3243–3270.
- Reasor, P. D., M. T. Montgomery, F. D. Marks Jr., and J. F. Gamache, 2000: Low-wavenumber structure and evolution of the hurricane inner core observed by airborne dual-Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1653–1680.
- Reasor, P. D., and M. T. Montgomery, 2001: Three-dimensional alignment and corotation of weak, TC-like vortices via linear vortex Rossby waves. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 2306 – 2330.
- Roux, F., and N. Viltard, 1995: Structure and evolution of Hurricane Claudette on 7 September 1991 from airborne Doppler radar observation. Part I: Kinematics. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2611 – 2639.
- Samsury, C. E., and E. J. Zipser, 1995: Secondary wind maxima in hurricanes: Airflow and relationship to rainbands. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3502 – 3517.
- Shapiro, L. J., and H. E. Willoughby, 1982: The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 378–394.
- Wagon, S., 1991: *Mathematica in Action*. New York, 419 pp.
- Wakimoto, R. M., and P. G. Black, 1994: Damage survey of Hurricane Andrew and its relationship to the eyewall. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 189-200.
- Willoughby, H. E., J. A. Clos, and M. G. Shoreibah, 1982: Concentric eye walls, secondary wind maxima, and the evolution of the hurricane vortex. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 395–411.
- , 1990: Temporal changes in the primary circulation in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 242–264.
- , and P. G. Black, 1996: Hurricane Andrew in Florida: Dynamics of a disaster. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 543-549.
- Wood, V.T., and R.A. Brown, 1992: Effects of radar proximity on single-Doppler velocity signatures of axisymmetric rotation and divergence. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 2798-2807.
- Wu, C.-C., P.-H. Lin, S. Aberson, T.-C. Yeh, W.-P. Huang, K.-H. Chou, J.-S. Hong, G.-C. Lu, C.-T. Fong, K.-C. Hsu, I-I Lin, P.-L. Lin, and C.-H. Liu, 2005: Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR): An Overview. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 787-790.
- 周晉民, 2001: 登陸中颱風之中尺度特徵分析。台灣大學大氣科學研究所碩士論文, 92 頁。
- 周仲島, 2003: 台灣地區都卜勒雷達資料應用作業系統發展(三)。中央氣象局委託計畫, 227 頁。
- 劉人鳳與周仲島, 2004: 利奇馬颱風降雨結構之特徵。第八屆全國大氣科學學術研討會論文集編, 2004 年 5 月, 桃園龍潭。283-288。

Double Eyewall and Trochoid-like Track of Typhoon Dujuan (2003): Doppler Radar Analysis

Pao-Liang Chang Jing-Shan Hong

Central Weather Bureau

(Manuscript received 3 February 2005; in final form 10 March 2006)

ABSTRACT

The present study examines a prominent double eyewall case, namely, typhoon Dujuan (2003) as it neared the island of Taiwan. This typhoon was unusual in that its double eye was not concentric. It has been suggested that vertical wind shear caused the inner eye to drift away from the typhoon circulation center. Thus, the inner eye tended to circulate due to the steering of the rotational flow in the moat with a period of 3.5~4 h. The orbited inner eye motion superimposed on the typhoon motion as a whole resulted in a substantial oscillation, or wobble, and eventually manifested itself as a trochoid-like track.

This study documents the phenomena of orbited inner eye which contributed to the oscillation of motion speed of the inner eye and the observed maximum inbound/outbound radial velocity in the vicinity of Taiwan. The maximum difference of velocity is up to 23 ms^{-1} between the oscillated maximum inbound/outbound radial velocity, and has been noted to be an important issue for nowcasting and hazard mitigations.

Key words: Doppler Radar, Typhoon center, Trochoid-like, Double eyewall