

# 似擺線路徑颱風之近中心風力分布特徵分析

張保亮 洪景山

中央氣象局

## 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，且內眼牆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，周期約 3.0-4.0 小時，振幅約 10-15 公里。

進一步分析顯示，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。此外，此一擺動也導致最大徑向風場和路徑呈現同相位振盪的現象，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。由分析中也顯示，颱風內眼牆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，疊加大環境西北風主導之駛流場後，產生了類似擺線的振盪路徑。杜鵑颱風之似擺線路徑，同時也伴隨著移動速度的振盪與風場的不對稱結構，這對於應用都卜勒雷達資料於詮釋類似之颱風結構與移動特性，將有很大的助益。

## 一、前言

由過去觀測研究可發現，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)曾指出兩個周期的擺盪運動，其擺盪周期與振幅分別為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)則利用正壓模式模擬颱風路徑的擺盪現象並指出，由於垂直風切的存

在，可能在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 and Montgomery (2001)則提出的波數一不穩定度的機制來解釋可能的原因，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，並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。研究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，其外側則由大範圍的外眼牆對流所環繞(Willoughby et al. 1982; Willoughby 1990; Willoughby and Black 1996)。其中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激發而形成(Montgomery and Kallenbach 1997)。研

究同時也指出雙眼牆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)，而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，而不利於內眼牆之對流發展(Samsury and Zipser 1995)。而內眼牆的減弱也將使中心氣壓、最大風速半徑的變寬與寬廣風速剖面的發展。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，此一眼睛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)。

2003年杜鵑颱風由東南方海面接近台灣南端，在其進入墾丁雷達觀測範圍時，出現了雙眼牆的特徵，且其眼牆與眼的結構較利奇馬颱風更加顯著，且內眼牆中心路徑有擺動的現象發生(Hong and Chang 2005; 張與洪 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進一步的瞭解。

## 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。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。由於墾丁雷達採雙來復頻(Dual PRF)(Lee et al. 2000)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，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，計算RLV相對應之雷達都卜勒速度場，在與實際雷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，為進一步比對雷達分析之颱風移動速度與大環境駛流場之相關，並探討垂直風切對於杜鵑颱風內眼牆擺盪路徑的影響，本研究利用「侵台颱風之GPS Dropsonde 飛機偵察觀測實驗」(DOTSTAR)(Wu et al. 2005)觀測之投落送資料進行環境駛流場分析，DOTSTAR對於杜鵑颱風的外圍環流進行共12個投落送觀測，其觀測資料時間(9月1日06:33 ~ 08:12 UTC)相當接近本研究之分析時間，因此可以提供本個案環境駛流場有用的資訊。

## 三、結果與討論

杜鵑颱風2003年8月29日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移約20度，類似結果在數值模式(Chan 1986)與觀測研究(Marks et al. 1992)均有提及，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。

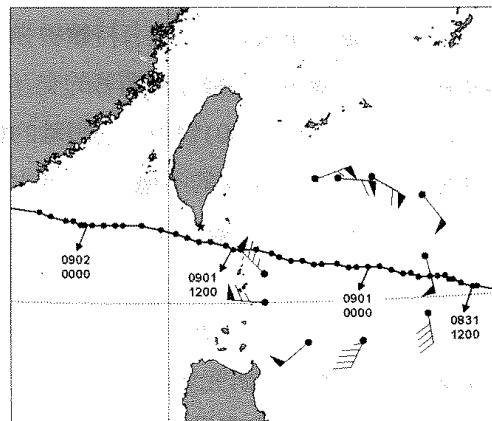


圖1 中央氣象局杜鵑(2003)颱風最佳路徑圖。圖中之風標為2003年9月1日06:33 ~ 08:12 UTC投落送925 hPa之風場觀測資料，當時之颱風中心位置並標示於圖中。

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上，而外眼牆則為相對較為寬廣的對流區，主要發生區域集中於颱風的北方與東方。在颱風接近台灣南端過程中，內眼牆中心路徑出現了四次的擺盪現

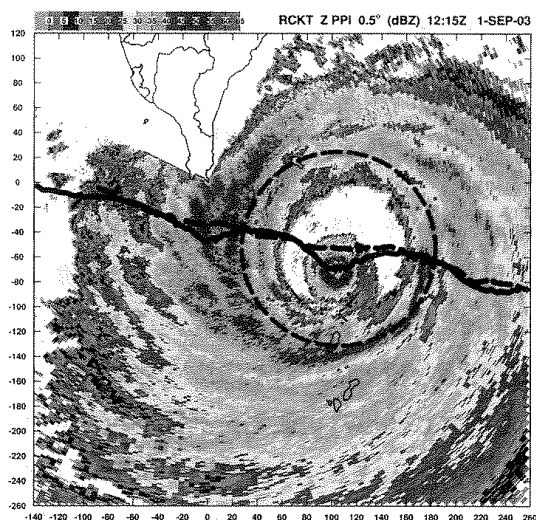


圖2 2003年9月1日12:15 UTC之墾丁雷達0.5度回波圖。圖中分析範圍為400公里×380公里。

象(圖 2)，其週期隨颱風接近台灣南端有些微縮小，周期分別為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)的分析結果為小。而在杜鵑颱風通過台灣南方近海過程中，非同心雙眼牆結構並無取代過程的現象出現，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。此外，由在颱風接近台灣端時之回波變化可發現(張與洪2005)，外眼牆隨著颱風靠近陸地有持續增強且變寬的現象，而外眼牆與內眼牆並無顯著的交互作用產生。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穩定度，其中第一類不穩定為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。

圖3為都卜勒速度場分布圖，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)方向的分量分別為65.6與62.8 m/s及61.0與56.6 m/s，外眼牆最大風速半徑大約76公里。圖中也清楚顯示，內眼牆都卜勒速偶極型態

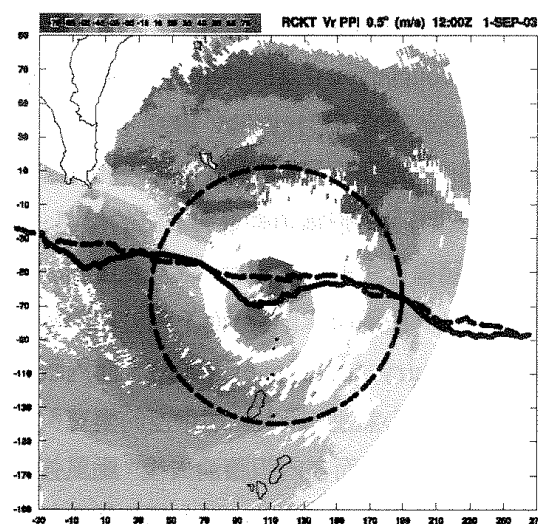


圖3 2003年9月1日12:00 UTC之墾丁雷達0.5度都卜勒速度場分布圖。圖中黑色粗線為內眼牆之中心路徑、黑色粗點線為外眼牆之中心路徑，圓形粗點線為最大風速半徑，分析範圍為300公里×280公里。

顯偏向外眼牆中心南方，清楚顯示杜鵑颱風具有非同心雙眼牆的結構。由圖中也可看內眼牆中心路徑有顯著的擺盪現象，而外眼牆中心路徑則呈相對穩定的西北西方向移動路徑。

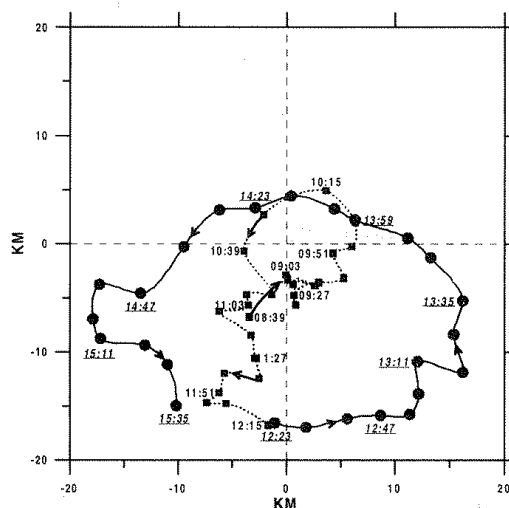


圖4 杜鵑(2003)颱風內眼中心相對於外眼中心之位置，圖中時間並標示於位置下方。

由於內眼牆在外眼牆內旋轉，因此本研究進一步比較兩者間移動的相關。圖4為內眼相對於外眼的移動軌跡，圖中顯示兩個完整的旋轉週期，分別為08:39~12:15 UTC 及 12:15~15:35 UTC，旋轉週期分別為3小時36分 及 3小時20分。由圖4中可發現，內眼氣旋式旋轉的振盪自08:39 UTC開始，振幅約10公里，在第一週期時結束時，內眼往南偏

移，而後開始第二個週期。第一週期較小的振盪振幅有部分原因可能是導因於內、外眼接近同相位的振盪，進而導致兩者間的環繞關係較不顯著。第二週期的振幅則比第一週期來的顯著，東西方向振幅達30公里，南北方向則約20公里，但有明顯南偏的現象，雖然由於外眼牆在中心定位上有其精確度上限制，但路徑往南的偏移現象相當顯著且在時間上有一致性。由投落送觀測求得之風徑圖顯示在700到300 hPa之間出現顯著的南向風切(圖未示)，由14:55 UTC的回波垂直剖面顯示(圖5)，內眼牆大於20 dBZ的回波發展高度可達10~12公里，而外眼牆發展高度則只有7公里，因此，內眼牆可預期承受更多的風切力。這種因為內、外眼牆發展高度的差異，受垂直風切影響後，將使內眼偏離颱風中心，加上受壕溝區旋轉氣流的導引，而進一步導致內眼的旋轉。

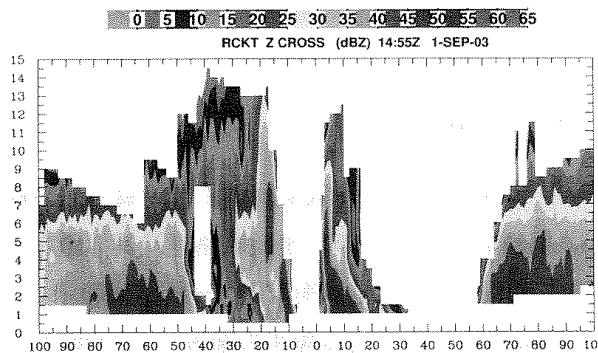


圖5 通過杜鵑颱風(2003)內眼中心之回波垂直剖面圖。分析時間為2003年9月1日12:15 UTC。

如前所述，由於杜鵑颱風為非同心的雙眼牆結構，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。數學上的擺線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。擺線具有有很好的幾何性質，且有等時性(亦即週期與振幅無關)、最速下降曲線等力學的性質(曹 1984)。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

$\vec{C}_i$  和  $\vec{C}_o$ ，內眼環繞颱風中心的移動速度表示為  $\vec{C}_{oi}$ ，則三者的關係式可寫成：

$$\vec{C}_i = \vec{C}_o + \vec{C}_{oi} \quad \text{-----}(1)$$

其中  $\vec{C}_i$  和  $\vec{C}_o$  可以由雷達中心定位所計算之中心位移來估計，但  $\vec{C}_{oi}$  則無法從觀測中直接求得。由於  $\vec{C}_o$  是固定往西方向， $\vec{C}_{oi}$  是旋轉向量，因此  $\vec{C}_i$  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6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，進一步分析發現，移動速度的振盪與中心的擺動路徑具有很高的相關性，其相關係數值達0.92。

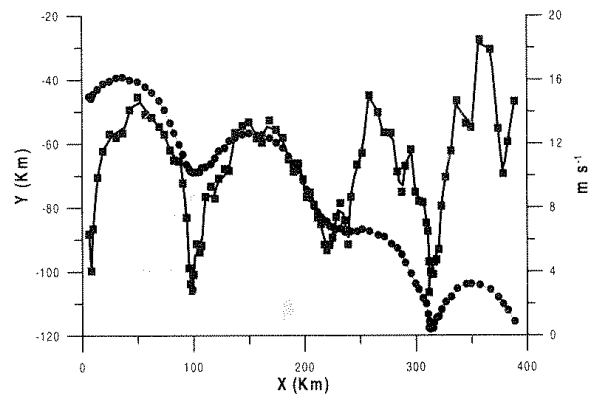


圖6 杜鵑(2003)颱風內眼中心路徑與移速時間序列圖。圖中圓黑點線段代表中心路徑，x與y為相對於墾丁雷達之座標，方塊線段代表該路徑上之移速。

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

$$C_{i\max} = |\vec{C}_o| + |\vec{C}_i| \quad \text{-----}(2)$$

$$C_{i\min} = |\vec{C}_o| - |\vec{C}_i| \quad \text{-----}(3)$$

圖6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， $|\vec{C}_o|$  可由觀測得知約8 m/s，利用(2)式可推估出內眼的環繞速度 $|\vec{C}_i|$ 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。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7所示，所以內眼之風場可表示為：

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

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以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，假設雷達位於距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：

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

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

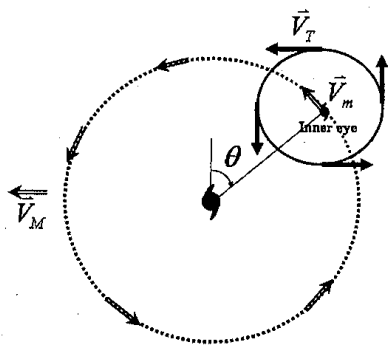


圖7 杜鵑(2003)颱風內眼中心環繞外眼中心移動之示意圖，圖中符號詳見內文。

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 $\theta$ 差值接近180度，因此將出現相反相位的震盪，如圖8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，相者差值達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8)，雷達觀測之最大風速即在1-2小時內增加15 m/s 到達80 m/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之颱風路徑與中尺度降水與環流結構變化的掌握。

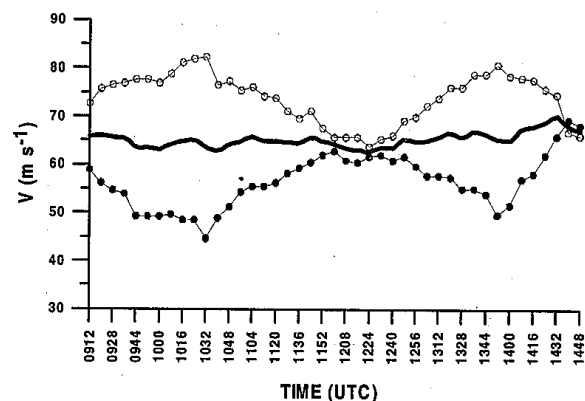


圖8 杜鵑(2003)颱風內眼牆最大接近(取正值)與遠離雷達方向之都卜勒速度時間序列圖。

#### 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中尺降水與環流結構與演變。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，且內眼中心路徑與有明顯的週期性擺動現象，觀測期間總共出現了四次的擺盪現象，周期約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，颱風內眼中心的偏移颱風環流中心可能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，分析結果同時也發現，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，相者差值達23 m/s。此種因颱風移動所產生局部區域風速劇變的結果，對於利用單都卜勒雷達資料進行短時間內之颱風路徑振盪與近中心之風力分布的詮釋時，具有很高的參考價值，特別是在防災應用上。

## 致謝

本研究要特別感謝中央氣象局提供墾丁雷達以及中心定位等相關資料。本文在國科會 NSC 92-2111-M-052-002-AP2 及 NSC 93-2119-M-052-002-AP1 計劃經會補助下完成，在此一併致謝。

## 參考文獻：

- 張保亮與洪景山，2005：杜鵑(2003)颱風雙眼牆與似擺線路徑之都卜勒雷達分析。投稿大氣科學，審查中。
- 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.
- 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.
- 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.
- Kossin, J. P., Schubert, W. H., Montgomery, M. T., 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., and R. A. Houze, and J. 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.
- 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, 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.
- , and -----, 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.
- 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.
- 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.