

賀伯颱風(1996)中尺度分析： 第一部份：眼牆環流結構

張保亮¹ 周仲島² 李文兆³

¹中央氣象局

²台灣大學大氣科學研究所

³美國國家大氣研究中心

(中華民國九十年七月三十一日收稿；中華民國九十一年二月一日定稿)

摘 要

本研究利用中央氣象局五分山都卜勒雷達及民用航空局中正機場都卜勒雷達觀測資料，分析賀伯颱風(1996)登陸台灣北部時，其眼牆區域環流結構的演變與特性。

雷達回波顯示，賀伯颱風登陸前，颱風眼牆呈橢圓狀，颱風眼則為顯著弱回波區，颱風眼長軸約 35-45 km，短軸則為 25-35 km，並以約 140-150 分鐘的周期呈逆時鐘轉動。由地基速度軌跡顯示(Ground Based Velocity Track Display, GBVTD)方法分析眼牆環流顯示，眼牆區切線風場呈現波數 2 為主的非對稱結構，同時存在周期性的轉動現象，與眼牆回波的橢圓形分布和轉動特性一致。當賀伯颱風接近台灣東北海域時，眼牆長軸區切線風速明顯增強至 70ms^{-1} ，離開後則風速逐漸減弱。此階段，最大風速半徑並無明顯變動，高度 2 公里之最大風速半徑約 35-45 km，隨高度有明顯增加的現象，最大風速半徑相對於垂直方向之平均傾斜角可達 40-50 度，眼牆回波也存在類似的傾斜特性。颱風登陸時，波數 1 之非軸對稱環流結構明顯增強，大風速區位於颱風移動方向後方(東南至東北象限)，強回波區也出現在颱風移動方向後方。在颱風登陸過程中，高度 2 公里處之最大風速半徑逐漸縮減為 30 km，且隨高度往外側傾斜的現象更為顯著，其最大傾斜角可達 80 度。

關鍵詞：都卜勒雷達、賀伯颱風、眼牆環流結構、橢圓形眼牆、GBVTD

一、前言

(飛)機載都卜勒雷達開始加入颱風觀測以來，藉由高解析度雷達都卜勒速度場與回波場資料的提供，使我們對於颱風中尺度環流與降水結構有更嶄新的認識(Marks and Houze 1984; Marks et al. 1992; Dodge et al. 1999)。颱風雲雨區範圍通常涵蓋廣達數百公里，甚至上千公里，不論使用機載都卜勒雷達或地面都卜勒雷達設備，在短時間內要同時進行如此大範圍的觀測，都有相當的困難性存在。在觀測現實的考量下，通常將具有不同動力調節過程的眼牆與螺旋雨帶區域分開討論(Willoughby 1984)，對於現階段颱風中尺度觀測研究而言，是相當實際且可行的做法。

Marks and Houze(1987)首先利用機載都卜勒雷達觀測資料分析指出：眼牆區存在很大的水平回波梯度，且對流尺度上衝流沿眼牆邊緣上升，並隨高度有往颱風外側傾斜的現象，而最大上升氣流則位於最強回波區的上方，其下方則存在對流尺度下衝流。Jorgensen (1984)則利用飛機飛行高度資料分析指出，眼牆對流與最大風速半徑隨高度往外的傾斜現象，是滿足角動量守恆的結果。Emanuel (1986)則利用理想化的模式探討指出，當空氣塊於邊界層內混合均勻且達飽和時，在對稱中性穩定的大氣環境條件下，位於邊界層之空氣塊將可沿著等角動量(相當位溫)面上升，促使眼牆傾斜對流的形成。在眼牆對流降水對於颱風強度的影響方面，Shapiro and Willoughby(1982)曾探討眼牆內縮現象，他們的理論探討中指出，在最大風速半徑內側加入熱源，將造成渦旋中心氣壓的降低，進而使得環流的強度增強。Willoughby et al. (1982) 進一步利用飛機觀測資料印證了 Shapiro and Willoughby(1982)的想法。他們並指出，颱

風眼內縮的現象相當普遍，最常發生於增強中的高軸對稱颱風系統，當颱風內部有活躍的環狀結構出現(如眼牆)時，透過對流潛熱加熱效應，最大風速半徑內緣風速將快速增強，使得最大風速半徑因而內縮。

另一方面，有關眼牆形狀與其轉動現象，是近來相當重要的研究主題。自然界中，圓形眼牆的結構普遍存在，但不同形狀的眼牆型態仍經常被觀測到。Lewis and Hawkins(1982)利用地面及飛機雷達觀測指出，雷達回波中經常可以發現多邊形眼牆的存在，且具有氣旋式轉動的特性，其出現並非颱風接近陸地時的特有的現象。他們曾推論此種多邊形眼牆，可能是源於不同波速與與不同頻率的內重力波干涉的結果。Schubert et al. (1999) 則利用正壓非輻散模式模擬指出，多邊形眼牆可能是源於正壓不穩定的過程所產生。Guinn and Schubert(1993)綜合 Thomson (1880)的(位)渦度波的線性理論指出，在眼牆區位渦波的波速可表示為 $C=V/m$ ，朝反氣旋式方向傳播，其中 m 為眼牆之位渦波波數， V 為最大平均切線風速。郭等(1998)與 Kuo et al.(1999)以此線性理論，利用正壓波譜模式探討賀伯颱風(1996)橢圓形眼的轉動現象，他們研究顯示兩者結果均與實際雷達觀測的轉動周期相當一致。

颱風是台灣地區最主要的天氣災害來源，由於洋面上觀測資料的缺乏，加上颱風環流受地形影響產生諸多複雜的現象，這都使得侵台颱風的研究與預報面臨極高的挑戰(Wu and Kuo 1999a)。台灣地區高聳地形，除了對於颱風路徑與強度產生影響外(王 1980；Lin et al. 1999)，更使得台灣地區各地的風力與降水產生截然不同的分布(謝等 1996；Wu et al. 1999b)。台灣地區登陸中颱風環流與降水變化的研究，

過去主要藉助於密集地面測站的中尺度分析(王 1980)，以及理論與個案的模擬研究(Chang 1982; Lin et al. 1999)。近年來，隨台灣地區都卜勒雷達網逐漸建置完成，雷達提供的觀測資訊，除在預報作業中日益受到倚重外，其提供的回波與風場資料，更是颱風研究相當重要的資料來源。

賀伯(Herb)颱風(1996)於7月31日登陸台灣東北角，所帶來的強風和豪雨，造成台灣地區近二十年來最嚴重的災情。賀伯颱風具有轉動的橢圓形眼牆，同時伴隨範圍相當廣闊的螺旋雨帶，在其接近台灣陸地過程中，民用航空局中正機場(CAA)都卜勒雷達與中央氣象局五分山雷達(RCWF)，均位於相當好的觀測位置，兩者收集的資料並可互補觀測上的不足。本文將使用賀伯颱風登陸前後的雷達觀測資料，利用周等(1994)與 Lee et al.(1999)提出的 GBVTD (Ground Based Velocity Track Display, GBVTD) 方法，對於其眼牆環流的結構和演化進行分析，並探討最大風速半徑與眼牆對流的變化對於颱風強度的影響。

二、資料來源與分析

(一)資料處理

本文使用之雷達資料時間為1996年7月31日，資料來源包括中央氣象局五分山雷達與民航局中正機場雷達。五分山雷達與美國 WSR-88D 型雷達同型，包含基本回波、徑向風場以及頻譜寬觀測資料。其中回波資料觀測範圍為460 km，徑向解析度為1 km，徑向速度及頻譜寬資料範圍則為230 km，徑向解析度均為250m。在此種硬體設定下，觀測範圍較小的徑向速度與頻譜寬資料，極可能出現二次回波的

問題。為解決此問題，此型雷達採用低層不同 PRF(Pulse Repetition Frequency)的雙次掃描策略，透過不同觀測範圍的回波觀測比對，決定徑向速度與頻譜寬資料的擺放位置。當相對應位置之回波強度接近，以致雷達無法分辨時，資料區將以距離折錯表示。決定速度場資料擺放位置後，其相對應位置亦以折錯區表示。因此，速度場觀測範圍在設計上雖為230 km，但在去除折錯區域後，最大可供分析的資料長度約130-150 km，也就是當時速度場觀測設定之 PRF 的最大觀測距離。由於本文只針對颱風環流與降水進行分析，並未觸及亂流的探討，因此，頻譜寬資料在文中並未使用。

雖然，五分山雷達站風場資料的徑向風場解析度達250公尺，但約1度的方位解析度，相對而言較為不足。為配合在等高面上的網格資料處理，本文中將徑向資料解析度降為1 km，以便與中正機場雷達具有相同的解析度。由於本研究之分析，主要建立於等高面之直角座標上，網格解析度設定為1 km，因此，五分山雷達徑向解析度的降低，並不至於對分析結果造成重大影響。此外，五分山雷達最大的折錯速度(Nyquist Velocity)隨仰角不同有些微差異，約25 m/s-30 m/s 左右，當實際風速達50-60 m/s 以上時，將產生三次以上的速度折錯問題，在處理上頗為不易。此外，由於二次回波問題是利用不同觀測距離回波比對來解決，在颱風眼弱回波區可能造成速度場觀測資料的缺乏。為確保分析結果的正確性，原始資料均需配合人工檢視方式加以處理。中正機場雷達採用雙 PRF 的處理技術，增加了最大風速的量測範圍，其折錯風速達48 m/s，速度折錯問題相對較易處理，但低層仰角資料受地形雜波及山脈的遮避效應(大屯山系、雪山山脈、中央山脈)，本文採

客觀配合人工方式將不合理的資料予以去除。

(二)GBVTD 分析

由原始之都卜勒速度場分析可以發現(張 2000)，都卜勒速度場除可對於颱風的強度提供初步的估計，並可應用於中心定位，但受限於雷達只能觀測徑向速度，因此無法從都卜勒速度場中獲得完整的颱風環流資訊。為此周等(1994)及 Lee et al.(1999)利用幾何的觀點，以及過去研究颱風的基本特性，提出的 GBVTD 方法來解析颱風眼牆的環流特徵。雖然此方法，無法對於實際颱風環流結構達到接近真實的反演，但對於颱風中尺度環流結構特徵的描述，仍可提供相當的幫助(Lee et al. 2000b)。

GBVTD 方法可分析之環流分量包括：軸對稱切線、徑向分量、非軸對稱切線分量以及平均風分量。其中當固定半徑上連續資料點少於 30 點時，該半徑上所有環流分量均不分析，當資料點大於 30 點少於 45 點時，只分析軸對稱切線環流分量。此外，在考量不同時段颱風中心的移動情形下，為使收集之雷達資料對於眼牆環流結構有較好的掌握，本研究針對 GBVTD 方法所選取的分析時間為：賀伯颱風登陸前，五分山雷達十個間隔約 6 分鐘之體容掃描(Volume Scan)資料(19:02LST-19:57LST)，中正機場雷達則選取登陸時間隔 15 分鐘的六個分析時間(20:46LST-22:01LST)。本文進行 GBVTD 方法分析之相關處理程序可參閱周等(1994)。

三、眼牆中尺度降水結構及環流特徵

(一)降水回波分析

圖 1 為賀伯颱風 30 分鐘之最大回波合成圖，圖中顯示賀伯颱風颱風眼及眼牆為橢圓形結構，周遭並伴隨範圍廣大的螺旋雨帶。在分析時間內，颱風眼區域(定義為回波值小於 10dBZ)橢圓長軸約 35 - 45 km，短軸則為 25 - 35 km。圖 1 同時可見，賀伯颱風眼牆區域主要強降水出現在橢圓長軸的兩端，且眼牆區回波隨時間有持續性逆時鐘方向轉動的現象，眼牆轉動週期約 140-150 分鐘。Kuo et al.(1999)曾利用線性理論及正壓波譜模式探討此一眼牆轉動的機制，並說明其可能與順時鐘傳播之位渦波有關。圖 2 為利用弱回波中心定出之颱風中心。此處弱回波中心定義為：眼牆涵蓋範圍內回波小於 10dBZ 區域資料點座標之幾何平均，其運算程序可參考張(2000)。圖 2 中顯示，颱風進入五分山雷達 200km 觀測半徑後，呈現西北的移動路徑，在颱風接近陸地時(距陸地約 100km)，路徑逐轉為西南西的走向。此分析階段，颱風路徑呈現出氣旋式的移動路徑，此特性在 Brand and Blelloch (1974)的統計分析，以及 Chang(1982)的模擬結果中均曾提及。

圖 3 為賀伯颱風登陸前通過颱風中心之西北、東南方向(眼牆長軸方向)垂直剖面。圖中顯示，高度 2 km 處兩側眼牆位於半徑 45-50 km，隨高度並有往颱風外傾斜的現象，其傾斜角相對於垂直軸約 40-50 度。其大於 40dBZ 回波垂直發展達高度 4 km 以上。西北側眼牆回波頂高度較東南側高，大於 10dBZ 的回波發展高度可達 13 km。圖 4 為颱風登陸時通過颱風中心之東北、西南垂直剖面。圖中顯示，西南側眼牆半徑約 30 km，隨高度有往颱風外側傾斜的現象，在高度 4km 以下，其相對於垂直軸的最大傾斜角達 70-80 度，在高度 6km 以上，其傾斜

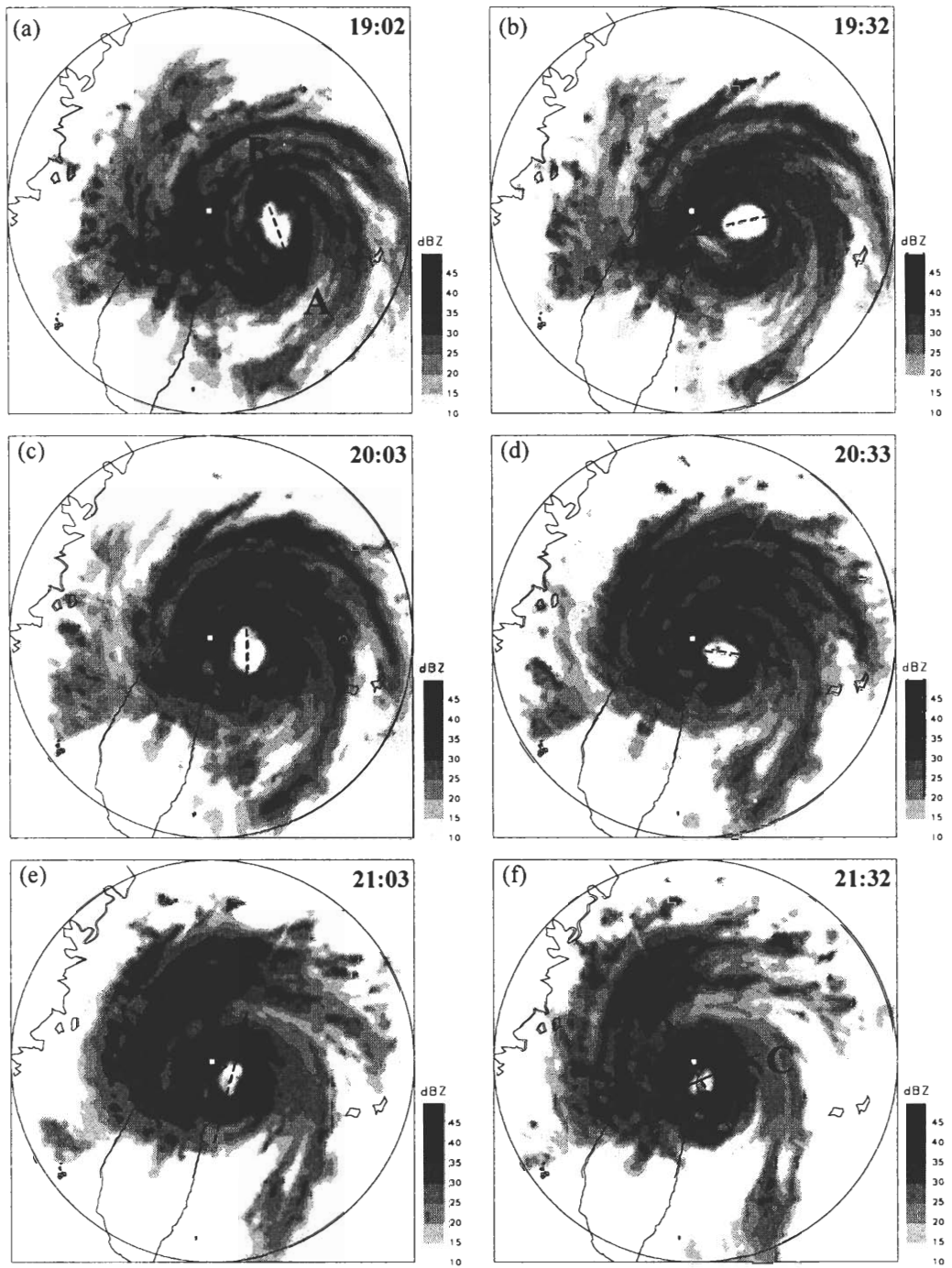


圖 1 1996 年 7 月 31 日賀伯颱風間隔約 30 分鐘之最大回波合成圖。分析範圍 $600 \times 600\text{km}$ ，圖中之箭頭為追蹤橢圓形眼牆轉動的方向，AB 及 CD 線段為圖 3 及圖 4 垂直剖面選取的位置。

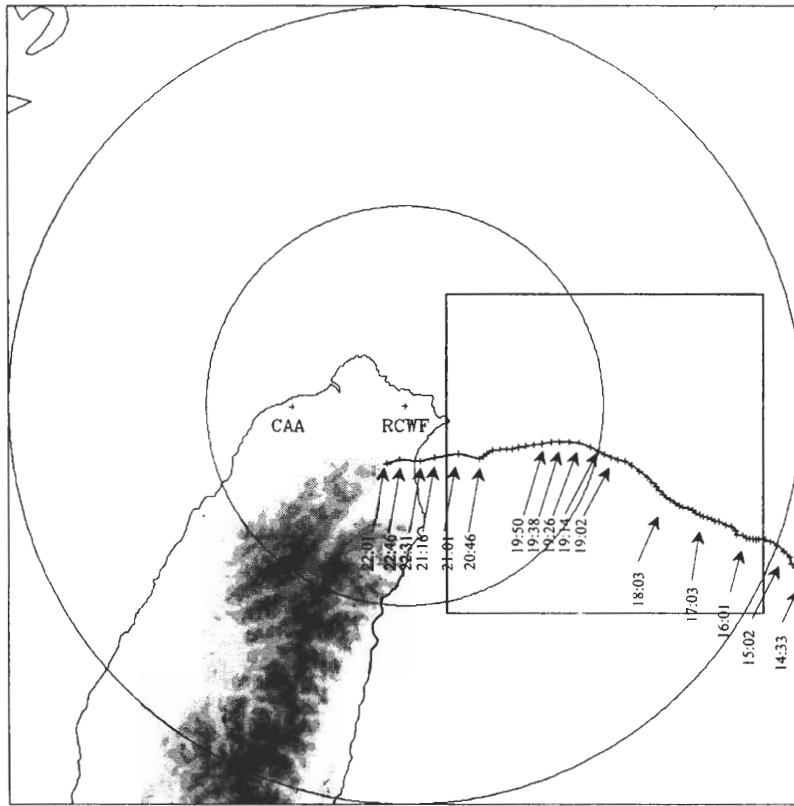


圖2 利用雷達回波數值小於 10dBZ 之弱回波幾何中心所定出之賀伯颱風路徑圖。圖中最後6個中心位置為利用中正機場雷達，時間間隔15分鐘，其餘時間為利用五分山雷達，時間間隔約6分鐘，圖中分析範圍為400km x 400km，正方形為GBVTD方法於19:02LST時的涵蓋區域區域(160km x 160km)。

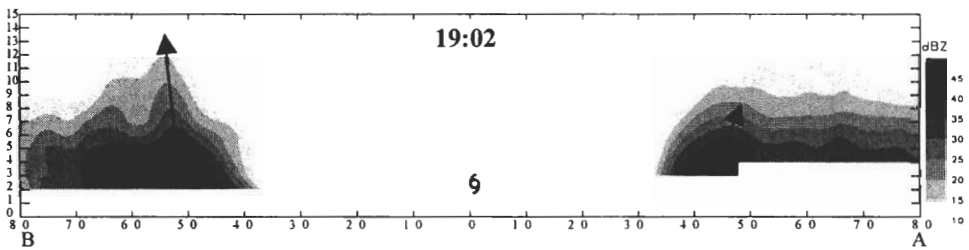


圖3 圖1中之AB垂直剖面。水平與垂直範圍分別為距離160km及15km。圖中箭頭為標示回波隨高度之傾斜方向。

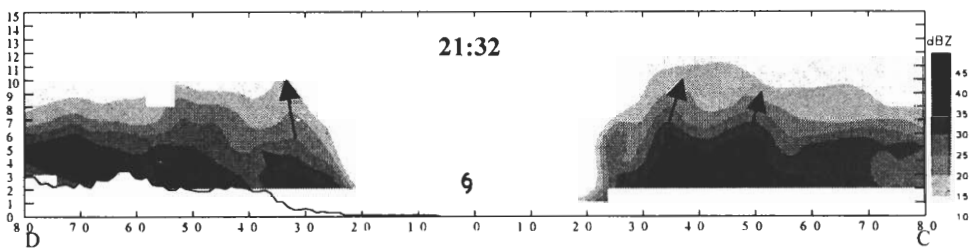


圖4 同圖3，但為CD剖面，圖中並標示地形高度線。

角則降至 40-50 度，與颱風登陸前相當接近。在半徑 50-55km 及 65-70km 處的眼牆外側對流區，其低層的回波傾斜特徵與眼強牆相當類似。反觀位於海面上的東北側眼牆，其回波強度較位於地形區的眼牆為強，最大回波強度達 40dBZ 以上，高度在 2-6km 間，眼牆半徑隨高度存在往內傾斜的現象，高度 6km 以上則轉為往外傾斜。此外，位於半徑 45-50km 的外側對流區，其回波的分布與傾斜的現象，則相當類似於颱風登陸前(圖 3)位於東南側眼牆的分布特性。

上述登陸前與登陸時的垂直剖面分析顯示，登陸前眼牆半徑隨高度往外側傾斜的現象，與開放洋面上颱風的研究類似(Marks and Houze 1987; Dodge et al. 1999)，但在颱風登陸時，低層眼牆隨高度往地形方向傾斜的分量明顯被加強。除位於地形區的西南側眼牆，其相對於垂直軸的最大傾斜角達 70-80 度外，位於東北側的眼牆則出現往颱風內側傾斜的現象，而在高度 6km 以上的眼牆傾斜特性則與登陸前類似。颱風登陸時高、低層具有不同的傾斜特性，可能與地形的影響有關。

(二) 颱風眼牆環流特徵

利用 GBVTD 方法進行颱風環流反演分析時，颱風中心定位是首要且重要的步驟。一般來說，利用雷達資料進行颱風中心定位處理時，主要分為回波及速度場兩大部分，其中，回波主要利用弱回波中心加以定義(張 2000)，速度場則利用軸對稱的基本假設，以幾何方式進行環流中心的定位(Wood and Brown 1983; Lee and Marks 2000a)。賀伯颱風個案中，由於其波數 1 及波數 2 非軸對稱結構相當明顯，這使得建構在以軸對稱環流為基礎的都卜勒速度場定位方法，在定位結果

中出現了路徑劇烈的擺盪，由每 6 分鐘的觀測解析度資料分析可發現，部分分析時間甚至有倒退的現象發生(張 2000)。此外，進一步根據都卜勒速度場資料所定出之中心，進行 GBVTD 反演分析時發現，其軸對稱與非軸對稱環流結構，在時間上缺乏連續性(圖未示)。反觀回波場的應用，由於賀伯颱風眼具有清楚的封閉結構特徵，可以相當清楚定義出弱回波中心，加上其定位路徑具有很好的連續性，其估計之颱風登陸時間及登陸位置，與謝等(1997)由地面氣壓逐時變化分析之結果也相當接近。由謝等(1997)之宜蘭站地面氣壓逐時變化分析可發現，中心氣壓於 21:30-21:40LST 達到最低，而由弱回波中心定位的結果顯示(圖 2)，賀伯颱風中心於 21:31-21:46LST 間登陸宜蘭地區，顯示兩者決定之登陸時間相當吻合。在路徑連續性以及與地面觀測一致性的考量下，本文採用弱回波中心定位做為定義颱風中心的主要依據。

1、軸對稱切線環流

(1) 登陸前

登陸前之階段(1902-19:57LST)，賀伯颱風位於五分山雷達東方近海約 60-120 km，此距離相當適合 GBVTD 方法分析，可供分析之都卜勒速度場資料半徑達 150 km。圖 5 為透過 GBVTD 方法處理後之颱風眼牆附近的平均切線風速分布。由於此階段切線環流特徵並無顯著改變，因此，本文選取 19:26LST 的時間來進行描述。圖中顯示，高度 2km 處之最大平均切線風速達 56 m/s 以上，位於半徑約 40 km 處，此最大風半徑隨高度並有往外傾斜的現象，在高度 2-8 km 間之傾斜角達 40-50 度。此傾斜角度與開放洋面上的觀測相當接近，Marks and

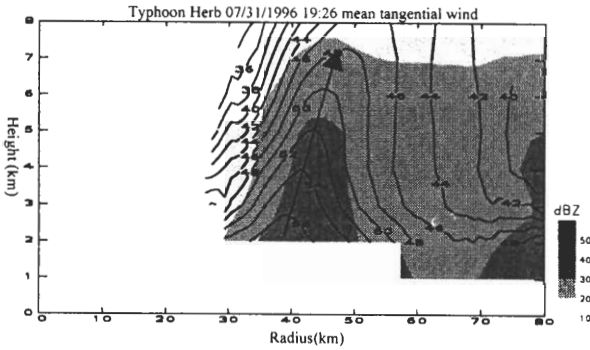


圖5 賀伯颱風眼牆附近平均切線風速垂直剖面，資料來源為五分山雷達，分析時間19:26LST，分析半徑80km，等值線間隔為 2ms^{-1} 。圖中陰影區為平均回波分布，色階如圖所示。

Houze(1987)分析 Hurricane Allica 發現其眼牆回波及最大風速半徑隨高度之傾斜角約 46 度。Jorgensen(1984)曾利用飛機觀測資料研究指出，此切線風速往外傾斜的現象，為滿足角動量守恒的結果。此外，圖 5 中也顯示，位於半徑 70 km 外側之雨帶區，在高度 2km 處仍存在相對的大風速區，但高度 2-4km 間，風速值隨高度快速遞減。由圖中平均回波分布則顯示，高度 2km 處之眼牆回波半徑約以 45km 為中心，隨高度亦有傾斜的現象發生，但傾斜程度較最大風速半徑緩和。

(2)登陸時

賀伯颱風在登陸時，由於颱風中心相當接近五分山雷達站(距離約 30-40 km)，在此幾何條件下並不適合進行 GBVTD 方法分析，因此改以中正機場雷達資料來接續分析，分析半徑則因中正機場雷達觀測範圍的減小而縮減為 60 km。此外，由兩個雷達之回波比對中可發現，中正機場雷達回波強度有明顯偏低的現象，為求回波強度在探討上的一致性，平均回波的計

算採用五分山雷達的觀測結果。圖 6 為登陸時的軸對稱切線環流分布，圖中顯示，低層最大風速半徑維持在 30-35 km 左右，最大平均切線風速增強至 50 m/s 以上。此外，位於半徑約 40 km 以外之低層存在一明顯弱風速區，最弱風速值在 38 m/s 左右。最大風速區明顯隨高度有往外傾斜的現象，高度 2-5 km 間之傾斜角達近 75-80 度，明顯較登陸前及過去洋面上的觀測研究為大(Marks and Houze 1987; Dodge et al. 1999)。在平均回波分布方面，於圖 6 中可發現，最大回波出現在高度 1km，半徑 35km 處，最大回波值達 40dBZ。此外，位於距颱風中心約 15km 的颱風眼區，有相對較為微弱的回波出現，最大回波約 20-30dBZ，大於 10dBZ 的回波發展高度只達高度 2-3km。

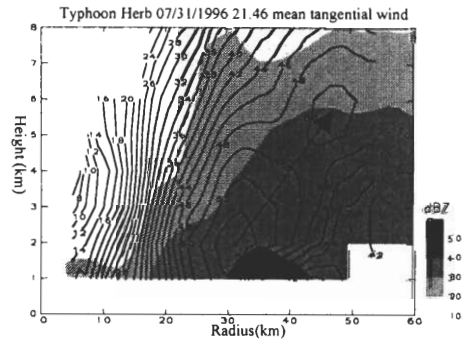


圖6 賀伯颱風眼牆附近平均切線風速垂直剖面，資料來源為中正機場雷達，分析時間21:46 LST，分析半徑60km，等值線間隔為 2ms^{-1} 。圖中陰影區為平均回波分布，色階如圖所示。

2、非軸對稱切線環流

(1)登陸前

GBVTD 方法除求出軸對稱分量外，並可進一步獲得切線風波數 1 及波數 2 的分量。由

於雷達圓錐掃描的觀測特性，在離雷達較遠的距離，低層觀測資料明顯不足，加上登陸時地形對雷達資料的影響，本文選定 4 km 高度分析結果為探討重點。圖 7 為高度 4 km 非軸對稱切線風速分布圖，19:02LST 時，風速分布呈現出波數 2 的結構，且位於橢圓長軸兩端處，最強風速約 50-55 m/s。19:14LST 時，波數 2 結構仍相當明顯，最強風速增強至 55 m/s 以上，強風速區與回波隨時間有朝逆時鐘方向轉動的現象。

19:26LST 時，近台灣陸地的長軸端，最強切線風速明顯增加至 70 m/s，位於台灣東北角正東側約 15 km 處，長軸另一端風速強度仍無明顯改變。19:38LST 時，長軸兩端之最強風速值持續降至 55 m/s。由上述分析結果可發現，在 19:02LST-19:26LST 期間，靠近台灣陸地長軸端的切線風速一度增強，在 24 分鐘內(19:02LST -19:26LST) 切線最大風速增強約 20 m/s。由 19:26LST 高度 2、6、8km 處之切線風速分

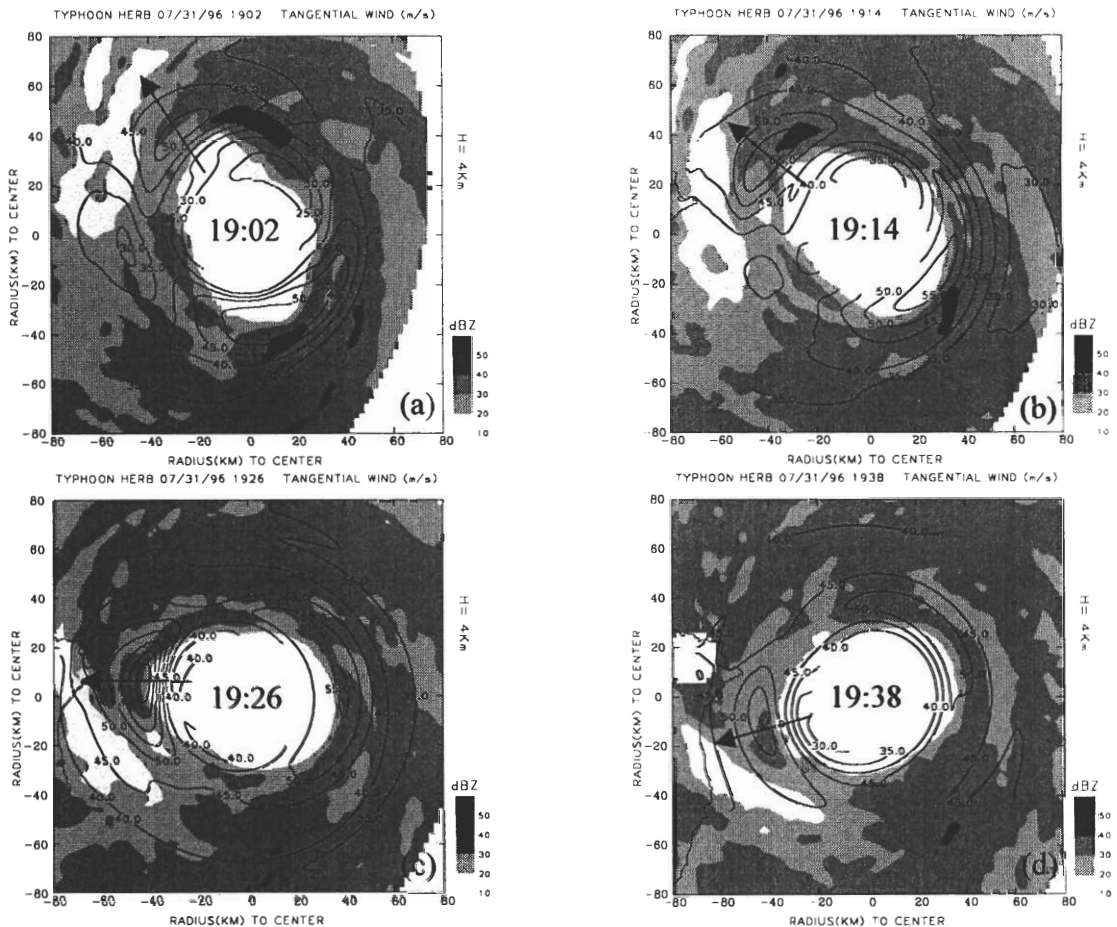


圖7 賀伯颱風4公里高度處之水平切線風速分布，分析資料來源為五分山雷達。等值線間距 5ms^{-1} ，分析範圍 $160 \times 160\text{km}$ ，陰影區為回波分布。圖中之箭頭為追蹤牆風速區轉動的方向。圖(a)-(d)分析時間分別為 1996 年 7 月 31 日 19:02、19:14、19:26及19:38LST。

布(圖未示)可發現,在不同高度切線環流仍存在類似的波數 2 結構特徵,其最大風速區出現的方位,在高度上並無顯著改變(張 2000)。在波數 2 之切線環流結構轉動特徵方面,由追蹤近陸地長軸端之強風區可發現,此區域在 30 分鐘內(19:02LST-19:32LST)轉動約 70 度(由 315 度由逆時鐘方向轉至 245 度),估計其轉動週期約 154 分鐘,此與回波的轉動週期相當接近。

(2)登陸時

圖 8 為 21:01-21:46LST 高度 4 km 之切線

風速分布圖。21:01LST 時(圖 8a)可發現,登陸前(圖 7)之切線風速波數 2 的結構已不明顯,取而代之的是最大風速區出現於東北象限的波數 1 結構,其最強風速則在 50 m/s 左右,此時回波強度同時逐漸增強,且強回波區與大風速分布位置接近。21:16LST 時(圖 8b),波數 1 結構更趨明顯,主要最大風速區位於東南至東北象限,最強風速值增至 55 m/s 左右,回波強度則持續增強。21:31LST 時(圖 8c),最大風速區移至東南,最強風速增至 60 m/s 左右,位於西北側則存在一局部之大風速區,最大風速值達 50 m/s

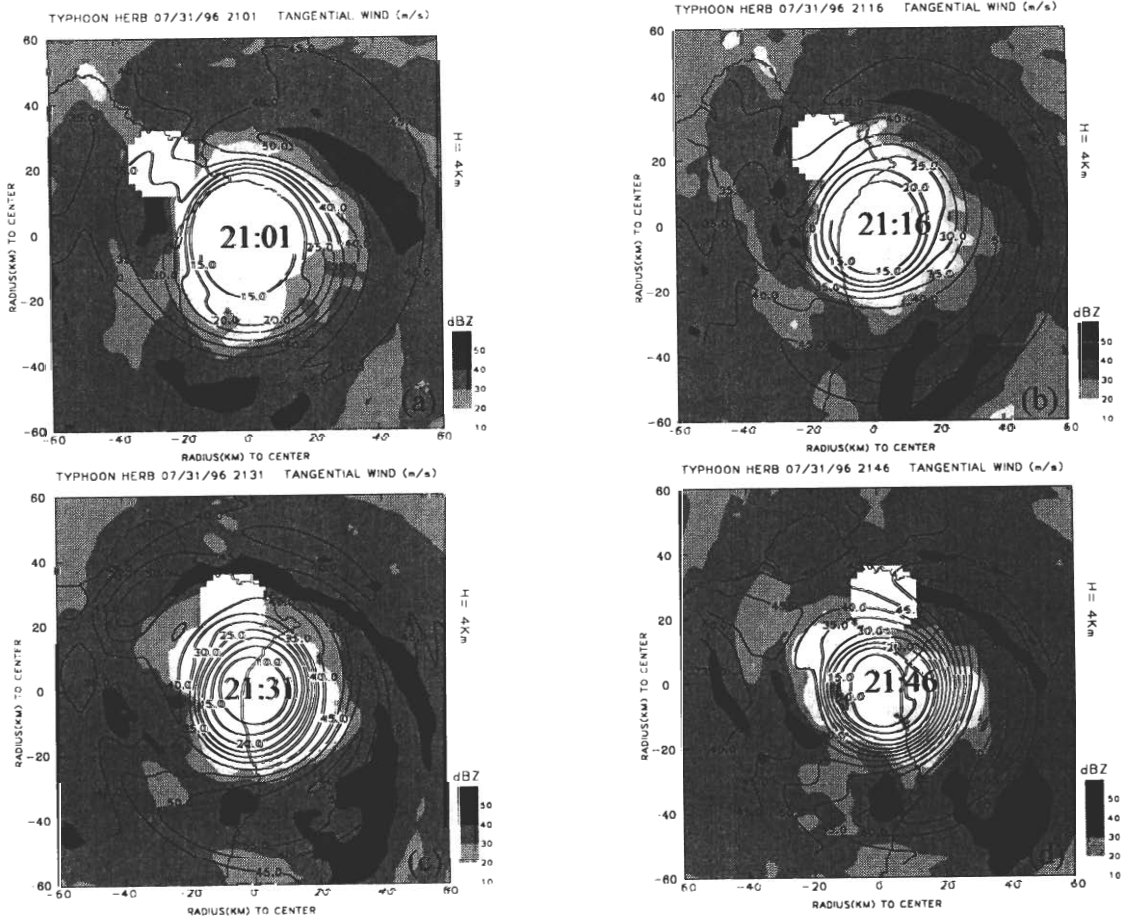


圖8 賀伯颱風4公里高度處之水平切線風速分布,分析資料來源為中正機場雷達。等值線間距 5ms^{-1} ,分析範圍 $120 \times 120\text{km}$,陰影區為回波分布。圖(a)-(d)分析時間分別為1996年7月31日21:01、21:16、21:46及22:01LST。

以上，此時回波發展達到最大強度。21:46LST時(圖 8d)，最強風速持續增至 70 m/s 左右，最大風速區仍位於東南象限，其切線風速之徑向梯度則有明顯增強的情形，此時回波強度有開始減弱的現象。高度 2、6、8km 處之切線風速分布(圖未示)則顯示，賀伯颱風登陸時環流波數 1 的結構，在不同高度仍有類似的特徵出現，且大風速區出現方位亦無明顯改變。

四、綜合討論

(一)眼牆之轉動現象

透過 GBVTD 方法的分析發現，在賀伯颱風登陸前約 1.5-2.5 h，以波數 2 為主的切線環流結構相當明顯，隨時間並有朝逆時鐘方向轉動現象，周期約 140-150 分鐘，這個轉動的現象在高度上具有一致性。由前述分析可知，根據雷達都卜勒速度場資料，推估眼牆平均風速後，透過簡單的數學關係(Kuo et al. 1999)，即可獲得與眼牆回波轉動週期相當接近的結果。不過 Kuo et al.(1999)也指出，正壓理論用來解釋颱風眼轉動的現象，必需在位渦的水平混合與非絕熱效應改變基本位渦結構的時間尺度，遠大於眼牆轉動周期的假設情況下，才能正確描述颱風眼(牆)的轉動現象。

圖 9為以 GBVTD 方法求得切線風場後，所估計之眼牆轉動的周期。圖中可發現，理論預期之轉動周期，與眼牆回波轉動周期(140-150 分鐘) 在高度 2 公里處較趨於一致，特別是 19:26LST 時，轉動周期在 150 分鐘以下，但高度 3km 以上則有明顯差距產生，且隨高度增加而周期逐漸增加，高度 6 km 以上所有分析時間，轉動周期更達 200 分鐘以上。由於颱風具

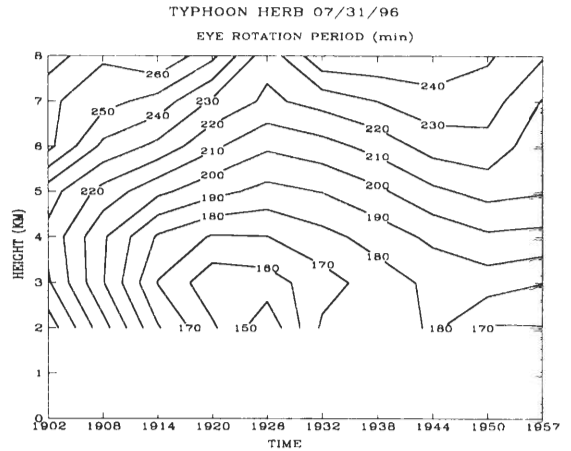


圖9 線性位渦波理論預期之賀伯眼牆旋轉週期。

有暖心結構的特徵，在熱力風平衡的約束條件下，切線風速隨高度具有逐漸減小的特性，如以正壓線性或非線性理論計算不同高度之位渦波的波速時，將產生位渦波波速在高度上的一致性，這是可以預期的結果。假如此情形發生於實際大氣中，將因不同高度的轉動周期不同，而使得眼牆的轉動現象無法被長時間維持(數小時以上)。此外，由不同高度之過度時間平均也可發現(圖 10)，過度隨半徑增加有明顯減小的趨勢，並不存在顯著的梯度變化，顯然並不符合類阮肯渦旋的過度分布特性。此與架構在類阮肯渦旋分布型態的探討(Kuo et al. 1999)，確實有顯著差異存在。

(二)眼牆內縮與颱風強度

由賀伯颱風登陸前之平均環流結構可發現，其最大風速半徑隨時間變動並不顯著，但颱風中心隨高度則有傾斜的現象發生，其整體分布與過去洋面觀測之特性相當類似。由於五分山雷達資料在高度 2 km 以下缺乏分析資料，對於颱風強度的分析可能產生影響。雖然最大

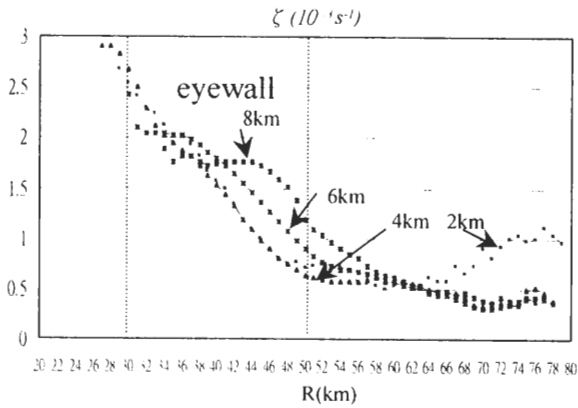


圖10 賀伯颱風相對濕度($\times 10^{-3}$) 時間平均圖。圖中之橫軸為相對於颱風中心距離，計算時間為19:02~19:57LST。

風速發生的高度可能隨對流之發展而改變，但由飛機觀測研究顯示(Shea and Gray 1973; Marks and Houze 1987)，高度 2 km 處應能反應颱風軸對稱環流強度隨時間的改變。由圖 11 可發現，在颱風登陸過程中，其高度 2 km 處的最大風速半徑隨時間逐漸縮小，而環流強度在颱風登陸後約 5-15 鐘內(21:45LST)達到最強。由高度 4km 眼牆區(距颱風中心半徑 60km 範圍內)回波大於

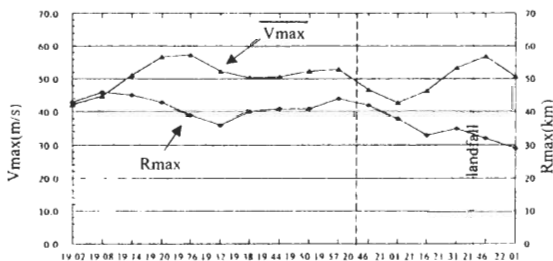


圖11 賀伯颱風最大風速半徑與最大平均切線風速時間序列圖。圖中含三角形之線段為高度2km之最大平均切線風速，含四邊角形之線段為高度2km之最大風速半徑。圖中長虛線為左方時間為利用中正機場雷達的分析結果，右方(含)為五分山雷達分析結果，點虛線為颱風登陸時間。

40dBZ 之面積隨時間之變化(圖 12)可以發現，雷達回波於登陸前(20:51LST)持續增強至登陸時(21:33LST)。在 21:45LST 時，其雷達回波大於 40dBZ 的面積大幅減小。由此時間的風場分析則可發現，其軸對稱切線風速則於此時(21:45LST)達到最強，顯示回波之演變時間明顯超前風場約 10-15 分鐘。由平均徑向風分布也可發現，此階段之低層內流明顯增強，在眼牆附近之內流層由高度 1-2 km，逐漸上升至高度 6 km 以上，低層最大內流值同時由 6 m/s 增強至 10 m/s。Chang(1982)在其模擬中曾指出，颱風登陸時，地形引發之對流，使得颱風強度產生短暫增強的現象，並指出在颱風登陸後，由於水汽的來源受到限制，無法克服因地形摩擦所造成的能量耗散，使得颱風強度迅速減弱。賀伯颱風個案中，其對流強度與環流強度在登陸時的短暫增強，似乎與 Chang(1982)描述之過程相當類似。

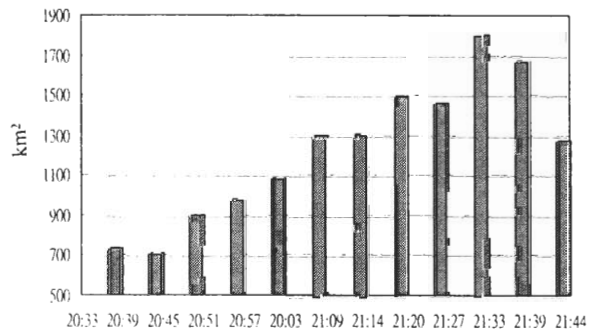


圖12 賀伯颱風眼牆區回波大於40dBZ之面積時間續列圖。

此外，Schubert et al.(1999)以位渦的觀點來探討眼牆內縮的問題，他們利用正壓無輻散模式模擬指出，當徑向的位渦梯度發生變號時，預期會有正壓不穩定度形成，其結果將產生位渦在徑向上的重新分布；位渦重新分布過程中，

颱風眼區的較小位渦將會逸入眼牆，產生混合作用，使颱風眼牆內縮並使颱風進一步增強。由颱風中心西側之絕對渦度值隨半徑分布可發現(圖 13)，其最大渦度值位於半徑 35 km 附近，最大渦度值達 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，且其徑向方向之梯度，在半徑 35 km 處，出現了正、負變號的特性，最大/小梯度值近 $10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，此種渦度在半徑上的劇烈改變，滿足了正壓不穩定發展的必要條件。而颱風眼牆內縮與增強現象在颱風登陸前(19:02-19:57LST)並不明顯，但在颱風登陸時眼牆內縮現象則相當顯著，此過程不確定是否與正壓不穩定過程有關。

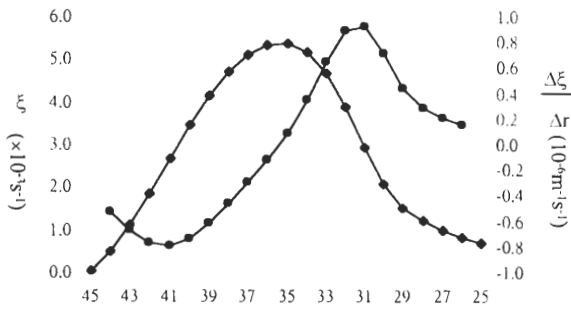


圖13 高度4km賀伯颱風絕對渦度($\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，方塊)與其梯度($\times 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，圓點)分布。分析範圍為颱風中心西側半徑25-45km區域，分析時間為19:26 LST(圖7c)。

五、總結與建議

本研究主要使用台灣北部兩座都卜勒氣象雷達資料，並配合地面觀測分析結果，探討賀伯颱風(1996)接近台灣陸地時中尺度環流結構特徵與變化。經由分析與討論後，我們列出以下幾項主要的分析結果：

(一) 賀伯颱風登陸前，颱風眼牆呈橢圓狀，颱風眼為顯著弱回波區，颱風眼長軸距離約 35-45

km，短軸則為 25-35 km，並以約 140-150 分鐘的逆時鐘周期轉動。颱風登陸時，眼牆回波明顯增強，且其半徑有逐漸減小的現象。由 GBVTD 方法分析環流顯示，賀伯颱風登陸前，其切線環流呈現明顯的波數 2 的非對稱結構，並存在周期性的轉動，此與眼牆回波的轉動現象相當一致。在利用線性位渦波理論(Kuo et al. 1999)估計眼牆環流的轉動周期時可發現，其估算周期與實際的計算周期在低層較為接近，但兩者差異隨高度逐漸增加。

(二) 賀伯颱風接近台灣東北角時，長軸區風速明顯增強，在長軸區旋轉通過台灣東北角後切線風速逐漸減弱。颱風登陸階段，波數 1 之非對稱環流結構相當明顯，大風速區位於颱風移動方向後方(東南至東北象限)，強回波區也有類似的特徵出現。

(三) 賀伯颱風登陸前，最大風速半徑的變動並不明顯，低層之最大風速半徑約 40-45 km，隨高度並有往颱風外側傾斜的現象，眼牆降水回波也具有相同的特性，兩者相對於垂直方向之平均傾斜角可達 40-50 度，此傾斜現象相當程度滿足了角動量守恆。颱風登陸後，最大風速半徑隨時間逐漸縮減為 30 km，且最大風速半徑隨高度往颱風外側傾斜較登陸前更為顯著，其最大傾斜角高達 70-80 度，降水回波結構也有一致的分布特性。

本文嘗試將雷達資料做最大的利用，但其它觀測分析資料來源的不足，對於分析結果的物理變化過程詮釋，僅能止於初步的推論。因此，眼牆的內縮現象、眼牆的轉動現象，以及非軸對環流結構的增強等過程，在登陸中颱風環流變化的研究探討上，仍留有很大的探討空間。隨台灣地區都卜勒雷達網的建立完成，未

來如能在相關觀測資料的取得上有所突破，相信將可大幅提昇我們對於侵台颱風環流與降水結構變化過程的認識，進而提昇颱風風力與降水預報上的準確度。

致 謝

首先要感謝中央氣象局與民航局飛航服務總台所提供的都卜勒雷達資料，另外也要感謝周思運博士、鄧秀明博士與林宏聖主任在雷達資料解碼的幫助。作者特別感謝洪景山博士與兩位審查者提供的寶貴建議與細心指正。本文在國科會 NSC90-211-M-002-022-AP4 計畫經費補助下完成，在此一併感謝。

參考文獻

- 王時鼎，1980：台灣及其附近地區颱風強度及路徑之預測。行政院國家科學委員會研究報告第108號，100頁。
- 周仲島、張保亮與李文兆，1994：都卜勒雷達在颱風環流中尺結構分析的應用。大氣科學，22，163-187。
- 郭鴻基、林宗賢、陳建河與吳佳純，1998：賀伯颱風眼轉動可能機制探討。大氣科學，26，249-264。
- 張保亮，2000：登陸中颱風環流變化分析：賀伯(1996)個案研究。國立台灣大學大氣科學研究所博士論文，155頁。
- 謝信良、王時鼎、鄭明典與葉天降，1996：台灣地區颱風預報輔助系統建立之研究，第二階段：侵台颱風路徑、強度、風力預報之應用研究(二)。中央氣象局氣象科技研究中心，專題研究報告CWB85-1M-01，382頁。
- 謝信良、丘台光、徐辛欽，1997：民國八十五年賀伯颱風侵台期間豪雨原因分析。天氣分析與預報研討會論文彙編(85)，336-345。
- Brand, S., and J. W. Blelloch, 1974: Changes in the characteristics of typhoons crossing the island of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 708-713.
- Chang, S. W.-J., 1982: The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1255-1270.
- Dodge, P., R. W. Burpee, and F. D. Marks Jr., 1999: The kinematic structure of a hurricane with sea level pressure less than 900mb. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 987-1104.
- Emanuel, K.A., 1986: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 585-604.
- Guinn, T. and W. Schubert, 1993: Hurricane spiral bands. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 3380-3404.
- Jorgensen, D. P., 1984: Mesoscale and convective-scale characters of mature hurricanes. Part II: General observations by research aircraft. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1268-1285.
- Kuo, H. -C., R. T. Williams, and J. -H. Chen, 1999: A possible mechanism for eye rotation of Typhoon Herb. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1659-1673.
- Lewis, B. M., and H. F. Hawkins, 1982: Polygonal eye walls and rain bands in hurricanes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **63**, 1294-1300.
- Lee, W. C., B. J. -D. Jou, P. -L. Chang, and S. M. Deng, 1999: Tropical cyclone structure retrieved from single Doppler radar observations. Part I: Interpretation of Doppler velocity patterns and the GBVTD technique on analytic tropical cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2419-2439.
- , and F. D. Marks, 2000: Tropical cyclone structure retrieved from single Doppler radar observations. Part II: The GBVTD-simplex center finding algorithm. *Mon. Wea. Rev.* **128**, 1925-1936.
- , B. J. -D. Jou, P. -L. Chang, 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.

- Lin, Y. -L., J. Han., D. W. Hamilton and C.-Y. Huang, 1999 : Orographic influence on a drifting cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 534-562.
- Marks, F. D. ,Jr., and R. A. Houze, Jr., 1984 : Airborne Doppler radar observation in Hurricane Debby. *Bull. Amer. Metero. Soc.*, **65**, 569-582.
- ,and -----, 1987 : Inner core structure of hurricane Alicia from airborne Doppler radar observations. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1296-1317.
- ,-----, and J. F. Gamache 1992 : Dual-aircraft investigation of the inner core of Hurricane Norbert. Part I : Kinematic structure. *J. Atmos. Soc.*, **49**, 919-942.
- Schubert, W. H., M. T. Montgomery , R. K. Taft, T. A. Guinn, S. R. Fulton, J. P. Kossin, and J. P. Edwards, 1999 : Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1197-1223.
- 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.
- Shea, D. J., and W. M. Gray, 1973 : The Hurricane's inner core region. Part I : Symmetric and asymmetric structure. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1544-1564.
- Thomson, W., 1880 : Vibrations of columnar vortex. *Phil. Mag.*, **10**, 155-168.
- Willoughby, H. E., J. A. Closs and M. G. Shoreibah, 1982 : Concentric eye walls, secondary wind maxima, and the evolution of the hurricane vortex. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 395-411.
- ,F. D. Marks, Jr., and R. J. Feinberg, 1984 : Stationary and moving convective bands in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 3189-3211.
- Wu, C. -C, Y. -H. Kuo, 1999 : Typhoons affecting Taiwan : Current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Metero. Soc.*, **80**, 67-80.
- , T.-H. Yeh, and K. -S. Chou , 1999 : Numerical simulation of Typhoons Herb (1996) and Zeb (1998) using a non-hydrostatic mesoscale model. Third Workshop on Recent Development of Radar Meteorology. Taipei, 18-25.

Mesoscale analysis of Typhoon Herb(1996): Part I : Eyewall Structure

Pao-Liang Chang¹ Ben J. -D. Jou² Wen-Chau Lee³

Center Weather Bureau, Taipei¹

Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University²

National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA³

(Manuscript received 31 July 2001 ; in final form 01 February 2002)

ABSTRACT

In this study , the evolution and structure of eyewall circulation of the landfalling Typhoon Herb in 1996 was documented.

The elliptical eye , as revealed by the radar reflectivity ,had a long axis of 35-45km and a short axis of 25-35km. The eye rotated counterclockwise with a period of 140-150 minutes. The mean tangential wind was retrieved via GBVTD method and had a structure of wave number two. The elliptical eye that revealed by the radar reflectivity had a period of the rotation same as that revealed by the wind field.

The tangential wind increased up to 70 m/s as Typhoon Herb approached the northern Taiwan. Before landfall, the radius of maximum wind (RMW) at 2-km height was about 35-45 km and tilted outward at about 40-50 degrees. The radar reflectivity associated with the eyewall also had similar structures. During landfall , the asymmetric structure characterized by wave number one for the tangential wind was found within regions of the maximum wind speeds. The radius of maximum winds decreased to ~30 km and tilted at about 80 degrees from the vertical.

Key words : Doppler radar 、 Typhoon Herb 、 Eyewall circulation 、 Elliptical eyewall 、 GBVTD