

應用單都卜勒雷達觀測進行颱風渦旋初始化之研究

台灣大學土木工程所
博士候選人江家慧

台灣大學土木工程系
副教授李天浩

中國文化大學大氣科學系
助理教授楊明仁

台灣大學大氣科學系
教授吳俊傑

摘要

本研究嘗試利用 GBVTD (Ground-Based Velocity Track Display, Lee et al., 1999 and 2000)法分析五分山雷達之都卜勒風速觀測資料，未來擬作為初始化中尺度 (meso- α) 數值模式颱風渦旋的同化方法，以期改進極短時(3-12)定量降水的預報。在都卜勒風場資料的分析上，首先應用軸對稱颱風環流概念，發展一套颱風環流之都卜勒風速摺疊校正 (dealiasing) 法，以此都卜勒風速摺疊校正法，處理中央氣象局五分山雷達之都卜勒風速觀測資料。其次利用 GBVTD 法解析颱風渦旋動力最強的核心部分的分層水平風場。第三步驟將分析得到的颱風渦旋植入 MM5 的 6.67 公里解析度風場數值解中，先以九點移動平均的方式內插平滑化植入颱風風場和模式風場解之間的差異；再採用斜壓方程式演算使風場達到質量平衡。未來計畫再將植入 MM5 之颱風渦旋以反覆迭代的方式，產生動力平衡的初始場，之後再進行 3~6 小時的定量降雨預報，期望透過雷達資料同化改進數值模式之初始場，增進數值模式預報 3~6 小時颱風定量降雨分佈的能力。

一、前言

根據王 (1980, 1989) 的分析顯示，受到中央山脈的影響，颱風的中尺度降雨與風場分佈具有相位鎖定的現象。Kuo and Wang (1997) 利用 6.7 公里解析度之 MM5 模式模擬賀伯颱風之降雨分佈，雖然模擬 24 小時累積最大降雨 818mm 為觀測值 (1700 mm) 的一半，但能夠正確的模擬降雨分佈情形。Wu and Kuo (1999) 指出由於海洋觀測資料稀少及颱風與台灣之間複雜的交互作用，透過資料同化的方式，利用衛星資料、都卜勒雷達觀測、偵察 (Omega Dropwindsonde 投落送)、無人飛機及 GPS/MET 觀測改進初始場，加上高解析度的數值模擬，可增進預報颱風動力及降雨分佈的能力。

當颱風接近台灣時，都卜勒雷達可提供即時定量的回波及都卜勒風速觀測資訊，具有高空間及時間解析度。分析雷達觀測颱風之回波場及都卜勒風速，可解析颱風之降雨及三維風場分佈情形。本研究主要為分析五分山雷達之都卜勒風速觀測資料，研究應用單都卜勒雷達風場資料改進颱風期間集水區尺度定量降水預報的方法。首先，在都卜勒風速資料的分析上，應用軸對稱颱風環流概念，發展一套不需要觀測資料，適用於即時作業的颱風環流之都卜勒風速摺疊校正法。利用前述都卜勒風速摺疊校正法，分析中央氣象局五分山雷達之即時都卜勒風速觀測資料。利用 GBVTD (Ground-Based Velocity Track Display, Lee et

al., 1999 and 2000) 解析颱風渦旋的垂直分層水平風場，以初始化方法將即時的雷達解析之颱風渦旋植入集水區尺度之 MM5 模式初始場內，以迭代的方式產生新的平衡初始場，再以此新的平衡初始場進行 3~6 小時的定量降雨預報。期望利用此初始化方法，於颱風接近台灣時，透過雷達觀測資料改進數值模式之初始場，增進數值模式預報 3~6 小時颱風定量降雨分佈的能力。

二、校正都卜勒風速之摺疊

位於北台灣的中央氣象局五分山雷達，為型號 WSR-88D 之都卜勒雷達，其都卜勒風速觀測距離為 230 公里，徑向解析度為 250 公尺。賀伯颱風期間，五分山雷達觀測之最大的無模糊都卜勒速度 V_u (maximum unambiguous velocity) 為 26.55 m/s。根據地面風場觀測資料顯示，雷達之都卜勒風速觀測資料具有 1~2 次的摺疊現象。本研究採用 VAD-based determination of the Nyquist interval number (Yamada and Chong, 1999) 的概念，將雷達觀測資料的座標系統轉換為以颱風中心為原點的極座標系統，再以兩階段的軸向(radial)與方位角方向(azimuthal)二維檢測方式，進行颱風環流之都卜勒風速觀測資料的摺疊校正 (dealiasing)。

第一階段是在颱風軸向上檢驗都卜勒風速的一致性。根據 Donaldson (1970) 及 Brown et al. (1978) 的研究顯示，在任意半徑 r 之環帶狀上颱風渦旋軸對稱的切線風(tangential wind)及軸向風(radial wind)在雷

達波束上之都卜勒風速分量為正弦或餘弦函數，可由一維傅立葉函數擬合。首先，由雷達回波圖簡單決定颱風中心位置，將雷達的都卜勒速度場觀測資料，轉換至以颱風中心為原點的極座標系統。以颱風中心為原點，自軸向往外逐一取兩公里寬之環帶狀，並找出落於每一個環帶狀內之雷達都卜勒風速觀測為一組資料，擬合一階傅利葉級數 $F(\theta) = a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta$ 。由於颱風眼牆內部多為微弱風場，其都卜勒風速觀測之摺疊機率較小，因此自颱風眼開始處理。利用較內側環帶狀的傅利葉級數擬合結果，作為相鄰外側環帶狀都卜勒速度觀測摺疊校正的參考值。將落於半徑 $r-1$ 之環帶狀內的都卜勒風速觀測資料，以一階傅利葉級數擬合，將擬合結果 $V_{r-1}(\theta) = a_{0,r-1} + a_{1,r-1} \cos \theta + b_{1,r-1} \sin \theta$ ，作為校正半徑 r 之環帶狀內都卜勒風速觀測資料 $V_r(\theta)$ 之參考值。逐一檢測落於半徑 r 之環帶狀內的都卜勒觀測值，若某一個方位角 θ_i 之軸向相鄰的雷達觀測值 $V_r(\theta_i)$ 與 $V_{r-1}(\theta_i)$ 間誤差超過某一個門檻值，則初步判斷此都卜勒風速觀測值 $V_r(\theta_i)$ 有摺疊的可能性。進一步檢測 $V_r(\theta_i)$ 之 n 次摺疊校正風場值 $V_r^n(\theta_i)$ 為 $V_r(\theta_i) + 2nV_a$ ，若 $V_r^n(\theta_i)$ 與 $V_{r-1}(\theta_i)$ 之間誤差小於門檻值，則認為此都卜勒風速觀測值 $V_r(\theta_i)$ 確實具有摺疊現象，並以 n 次摺疊校正風場值 $V_r^n(\theta_i)$ 取代之。但若 $V_r^n(\theta_i)$ 與 $V_{r-1}(\theta_i)$ 之間的誤差大於門檻值，代表利用此參考值無法肯定的判斷觀測值具有摺疊現象，乃於此階段暫時保留原觀測值。

第二階段再利用同一環帶的都卜勒風速資料具有連續性，檢驗單一環帶內都卜勒風速觀測值於方位角方向上的一致性，進一步對於前一階段無法判斷是否具有摺疊之都卜勒風速觀測值進行檢測。方位角方向上都卜勒風場觀測值的一致性檢測必須從都卜勒風速不會發生摺疊的方位角開始。於颱風中心與雷達的連線，颱風環流之切向風分量在雷達波束方向上的觀測分量為零，都卜勒風速觀測反映的是指向或遠離颱風中心的軸對稱軸向風分量。由於颱風環流風場的切向風分量遠大於軸向風，且由歷史觀測顯示，颱風軸向風風速大於五分山雷達觀測之最大無模糊都卜勒速度 V_a 的機率不大，因此假設落於此連線上的都卜勒速度觀測值之摺疊機率為最小。定義通過此連線之雷達波束掃描方位角 θ_1 ，假設落於此方位角之都卜勒速度觀測值為正確的，沒有摺疊誤差，由此觀測值開始進行順時鐘及逆時鐘方向之資料檢測。同一環帶方位角方向上相鄰的都卜勒風速觀測值應具有連續性。若兩者數值的差異大於門檻值，則初步判斷此都卜勒風速觀測值具有摺疊現象，乃進一步檢測此都卜勒風速觀測值的 n 次摺疊校正值與相鄰都卜勒風速觀測值之誤差小於門檻值者，則判斷此都卜勒風速觀測值確實具有摺疊現象，並以其 n 次摺疊校正值取代之；若其 n 次摺疊校正值與前一都卜勒風速觀測值之誤差皆大於門檻值，代表無法確定此觀測值具有摺疊

現象，則仍然保留原觀測值。

利用以上兩階段檢測，由颱風中心往外逐一環帶進行摺疊校正，得到摺疊校正後的颱風環流都卜勒風速觀測。以 1996 年賀伯颱風侵台期間 7 月 31 日 11 時至 13 時之五分山雷達觀測資料為例，檢視颱風環流都卜勒風速摺疊校正法的校正效果。圖一為賀伯颱風期間 1996 年 7 月 31 日 11:02 之五分山雷達最低層仰角 (0.48 度) 都卜勒風速原始觀測資料。由圖一可知原始觀測資料中具有地形遮蔽效應，並且有資料遺失。由於校正方法中假設都卜勒風速具有連續性，因此在進行都卜勒風速摺疊分析之前，必須先去除地形遮蔽效應，並且補遺缺漏資料。首先，利用分析數值地形資料與雷達波束掃描間的關係，找出受到地形遮蔽影響的雷達資料，再以抬高仰角至不受地形影響的雷達觀測資料取代之。結果如圖二所示，與圖一比較顯示第三象限中受到地形遮蔽影響的部分，原接近零值之都卜勒風速觀測值，在利用高層仰角觀測值取代後風場仍具有一致性。圖一及圖二中缺漏的雷達都卜勒風速觀測資料以黑色斜紋表示之，研究中利用高層仰角之正確都卜勒風場觀測資料進行資料補遺的工作，結果如圖三所示。

在雷達都卜勒風場觀測資料進行地形遮蔽效應的去除及資料的補遺後，進行颱風環流都卜勒風場的摺疊校正，校正結果如圖四。圖四顯示賀伯颱風期間五分山雷達都卜勒風場的觀測具有一次至兩次的摺疊，整個颱風環流之都卜勒風速摺疊皆可透過本研究中兩階段的二維摺疊檢測法自動校正之。唯於第二階段中，若雷達波束掃描方位角 θ_1 上的無都卜勒風速觀測值，則以相鄰掃描方位角 θ_1' 雷達波束的都卜勒風速觀測值取代之。當方位角 θ_1' 遠離都卜勒風速摺疊機率最小之雷達波束掃描方位角 θ_1 時，位於雷達掃描波束方位角 θ_1' 之都卜勒風速觀測值的摺疊機率越大。目前方法的開發測試階段暫時以人工檢驗的方式再次確認此觀測值是否具有摺疊現象。

三、反演颱風擬三維風場

GBVTD (Ground-Based Velocity Track Display, Lee et al., 1999 and 2000) 為利用單一地面都卜勒雷達之風場觀測，解析颱風垂直分層之二維環流風場的方法。方法中假設熱帶氣旋的都卜勒風速觀測可由切線速度、軸向速度、垂直速度、雨滴的終端速度及平均流計算而得，其中雨滴的終端速度可利用回波-終端速度關係式，由雷達回波觀測估計之，並假設垂直速度遠小於雨滴終端速度而忽略之。將都卜勒風速觀測、切線速度及軸向速度利用一維傅立葉級數展開，並將平均流以沿通過颱風中心之雷達波束 (along-beam mean flow, 簡稱沿波束平均流) 及正交通過颱風中心之雷達波束 (cross-beam mean flow, 簡稱正交波束平均流) 兩分量表示之。假設颱風環流中軸向速度的非軸對稱項遠小於切線速度的非軸對稱項，及正交

波束平均流遠小於沿波束平均流，對應等號左右兩邊正弦與餘弦之係數，得到一組聯立方程式，反演 GBVTD 環之沿波束平均流、軸對稱的軸向風 (axisymmetric radial flow) 及軸對稱和非軸對稱之切向風。由於幾何關係定義的緣故，GBVTD 法所能反演的 GBVTD 環之最大半徑為颱風中心與雷達之距離。

本研究利用 GBVTD 法分析五分山雷達都卜勒風速觀測資料，反演颱風擬三維風場。圖五為利用 GBVTD-simplex (Lee et al., 2000a) 分析 1996 年賀伯颱風期間，7 月 31 日 10:56 至 12:21 之五分山雷達都卜勒風場觀測資料，方法所得到的颱風環流中心位置路徑圖。以 7 月 31 日 11:02 之結果為例，由分析近地層（一公里及兩公里 CAPPI）之雷達都卜勒風速觀測資料結果顯示 GBVTD-simplex 所定義的颱風環流中心位置偏離雷達回波圖顯示之颱風中心位置，較為靠近台灣陸地（圖六）。檢測原始都卜勒風場觀測值發現近地層受到地形增強風場的效應影響（圖四），在第三象限沿地形有最大遠離雷達中心之都卜勒風速觀測區，與第一象限之眼牆內部觀測最大吹向雷達中心，都卜勒風速區形成一最大軸對稱切線風 GBVTD 環，因此 GBVTD-simplex 數值程序找到的颱風中心會偏離雷達回波顯示的颱風中心。當仰角抬高雷達都卜勒風速觀測之地形增強風場效應漸弱；或是颱風逐漸向陸地靠近，地形構成遠離雷達中心之最大都卜勒風速區和颱風眼牆合併時，GBVTD-simplex 所決定的颱風中心與雷達回波圖顯示之颱風中心逐漸趨於一致。

圖六為利用 GBVTD 法解析 7 月 31 日 11:02 兩公里高之都卜勒風場觀測得到的颱風渦旋水平風場，網格解析度為 1 km × 1 km。由 GBVTD 法所解析的最大風速為 76.14 m/s，與地面所觀測到的最大風速值接近。此時的颱風行進方向為向左移動，而整個颱風環流風場於前進方向的右前方有最大風速區，左後方為最小風速區，此風場分佈型態與理論上颱風環流風場的分佈型態相同。

四、反演平衡質量場

Wu 等人(2001)利用 MM5 模式模擬賀伯颱風接近台灣時影響降雨的主要因子。研究中首先利用初始化方法在 7 月 29 日 1200 UTC 之初始時間，於 MM5 模式之 60 公里及 20 公里之巢狀網格中植入一個 Rankine vortex，並預先模擬 12 小時（7 月 30 日 0000 UTC）颱風發展成熟後，透過 MM5 模式積分 48 小時。研究中進行 6.67 公里 (E6.7) 及 2.22 公里 (E2.2) 兩種不同網格解析度的降雨分佈模擬實驗，實驗結果顯示在 E2.2 模式解析較好的台灣中央山脈地形特徵，降雨分佈型態與實際觀測一致。

本研究利用前述 GBVTD 反演之颱風擬三維風

場，植入上述研究 E6.7 模擬結果內插至 2.22 公里網格解析度之初始風場 (I2.2) 中。首先將利用 GBVTD 法和雷達都卜勒風速觀測反演等高面上的颱風擬三維風場，植入 MM5 模式之初始風場 I2.2 中，並利用靜力平衡關係將等高面上之擬三維風場內差至等壓面上之擬三維風場。以 1996 年 7 月 31 日 11:02 之五分山雷達觀測為例，將等壓面上一公里網格解析度擬三維風場內插至 2.22 公里解析度，並且直接放入 MM5 模式模擬結果颱風中心位置與雷達觀測較為接近之 1996 年 7 月 31 日 06:00 初始風場 I2.2 中。且假設雷達解析颱風擬三維風場範圍內及邊界上的風速保持不變，以九點二維濾波器濾除兩倍格距波，直至兩者間的風速達到平衡。經由以上分析得到的 850mb、850mb 和 250mb 水平風場 (IB2.2) 如圖七至圖九所示。

利用 初始時間水平風場與質量場的平衡關係反演與上述水平風場 IB2.2 平衡的質量場。此水平風場與質量場的平衡關係可由斜壓方程，定義大尺度運動之特徵尺度，進行無因次化分析，可得尺度化斜壓方程組。並且應用 The bounded derivative method (Kreiss, 1980 and Browning et al., 1982) 對尺度化斜壓方程組進行二階近似分析，而得

$$\nabla^2 \Phi - f\zeta = - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 - 2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} - \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 - \beta u$$

上式與準地轉理論中推導的平衡方程相同。利用超鬆弛法 (over-relaxation method) 透過平衡方程，給定初始時間的水平風場，以求解勢能高度場 (geopotential field)，再利用靜力平衡關係式，得到溫度場，為初始時間與水平風場平衡的質量場。

圖十至圖十二為對應圖七至圖九之水平風場 IB2.2 的平衡質量場。由於雷達反演之颱風擬三維風場植入模式初始場時，為避免雜訊產生而採用九點二維濾波器濾除兩倍格距波，將使得原 MM5 模式模擬的初始風場 I2.2 所具有的地形效應被平滑化，此現象可由 850mb 之平衡質量場（圖十）看出。本研究擬利用 MM5 模式以迭代的方式預先模擬，使得此組平衡初始場與模式物理條件及地形影響達到近似平衡的狀態後，再進行 3~6 小時的定量降雨預報。

五、結語

在雷達都卜勒風速分析上，本研究發展以軸對稱颱風環流為基礎之颱風環流都卜勒風速摺疊校正法。經過賀伯颱風期間五分山雷達觀測資料的檢測分析，顯示此方法可正確的校正颱風環流都卜勒風速的摺疊現象。而且此方法不需使用到地面風場觀測資訊，較為簡單且計算負荷小，能符合即時作業的需求。但在分析中發現當颱風中心呈現橢圓形狀時，由於颱風中心的定位不易，且颱風環流的非軸對稱項較明顯，會增加摺疊校正的困難度。未來將研擬颱風中心

自動定位法，使得此都卜勒風速摺疊校正法能夠更準確的解決觀測風場摺疊的現象。

Lee et al. (2000)利用理想的雷達都卜勒風場觀測資料進行測試，若颱風中心位置誤差在兩公里以內，則 GBVTD 所解析的水平風場誤差不超過 20%。由於賀伯颱風期間並無飛機觀測資料，因此無法驗證由 GBVTD-simplex 分析得到的颱風中心位置。但由於近地層颱風環流中心定位明顯受到地形增強風的影響，未來擬測試其他颱風中心定位法，以解析更佳品質的颱風環流近三維風場分佈情形。

在此階段研究中，完成將雷達解析之颱風環流近三維風場植入 MM5 模式之初始場中，並透過平衡方程求得與風場平衡的質量場。本研究未來將進一步測試利用 MM5 模式，以此達質量平衡條件之風場與質量場為初始場，模擬 3~6 小時之定量降雨分佈情形。

謝誌

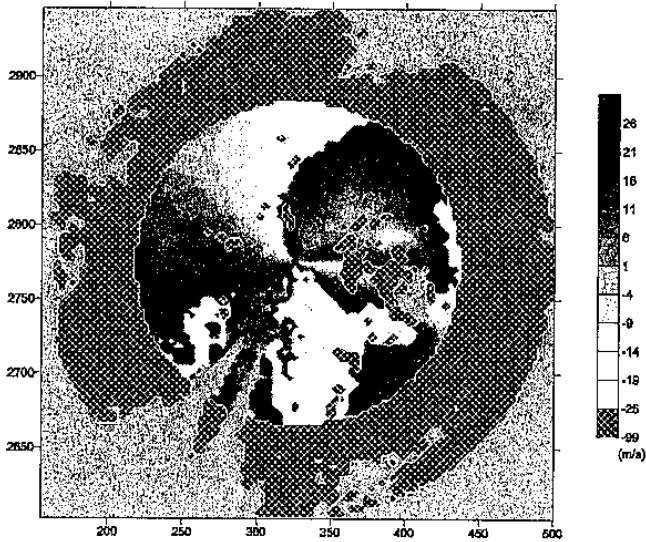
本研究中所採用的 MM5 模式模擬賀伯颱風結果資料，均為台大大氣所博士候選人顏自雄之研究成果，感謝其研究提供資料與熱心的協助。

七、參考文獻

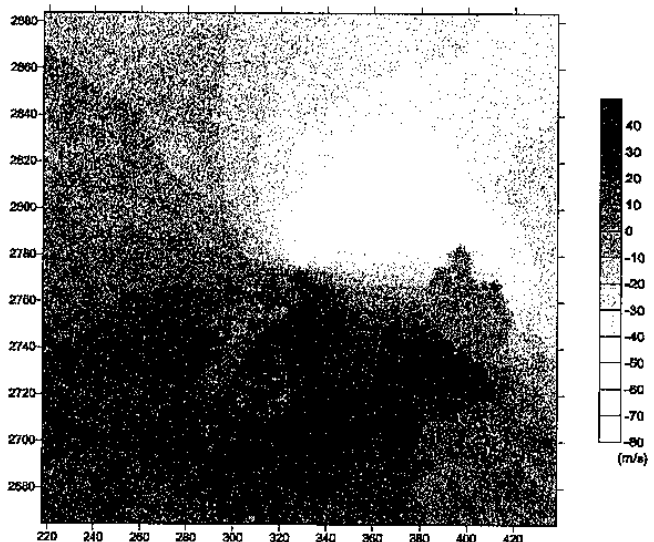
1. Kuo, Y., -H., and W. Wang, 1997: Rainfall prediction of Typhoon Herb with a mesoscale model. Workshop on Typhoon Research in the Taiwan Area. Boulder, CO, National Science Council, 35-45.
2. Lee, W. -C., B. J. -D. Jou, P. -L. Chang, and S. -M. Deng, 1999: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part I: Interpolation of Doppler velocity patterns and the GBVTD technique. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2419-2439.
3. Lee, W. -C., and F. D. Marks, 2000a: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part II: The GBVTD-simplex center finding algorithm. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1925-1936.
4. Lee, W. -C., B. J. -D. Jou, P. -L. Chang, and F. D. Marks, 2000b: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part III: Evolution and structures of Typhoon Alex (1987). *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3982-4001.
5. Wang, S. -T., 1980: Prediction of the behavior and strength of typhoons in Taiwan and its vicinity. Res. Rep. 108, National Science Council, Taipei, Taiwan, 100 pp.
6. —, 1989: Observational analysis of the

orographically induced disturbances during TAMEX. Workshop on TAMEX Preliminary Scientific Results, Taipei, Taiwan, National Science Council, 279-286.

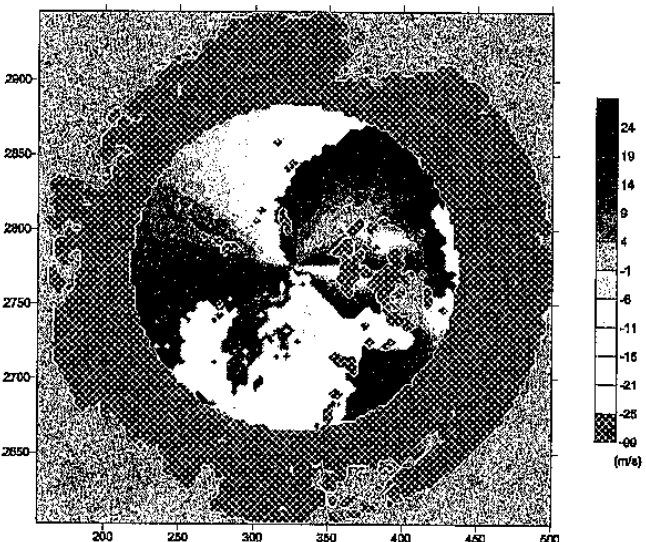
7. Wu, C. -C., 1999: Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 67-80.
8. —, T. H. Yen, Y. H. Kuo and W. Wang, 2001: A numerical study of the primary factors affecting the rainfall prediction associated with Typhoon Herb (1996) near Taiwan. Submitted to *Weather and Forecasting*.
9. Yamada, Y. and M. Chong, 1999: VAD-based determination of the nyquist interval number of Doppler velocity aliasing without wind information.



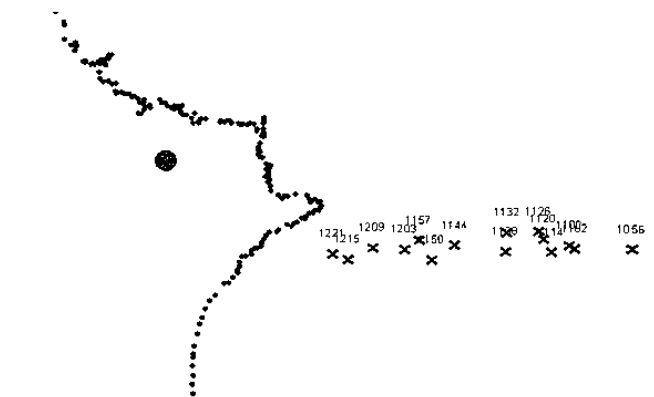
圖一 1996年7月31日11:02五分山雷達最低仰角(0.48度)之原始都卜勒風場觀測資料(m/s)



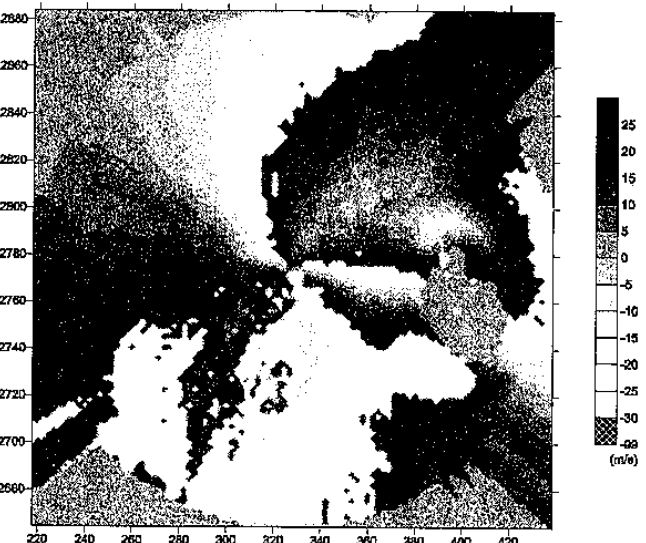
圖四 同圖一 經過颱風環流都卜勒風速摺疊校正法校正之五分山雷達都卜勒風場(m/s)



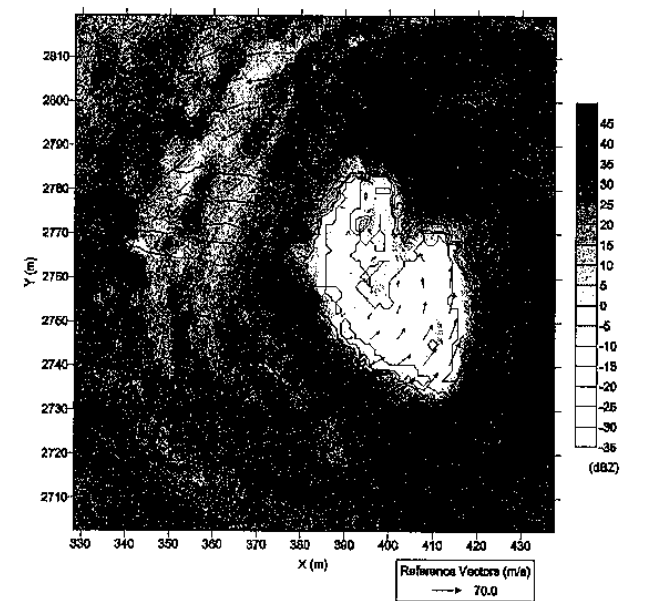
圖二 同圖一去除地形遮蔽效應之五分山雷達都卜勒風場(m/s)



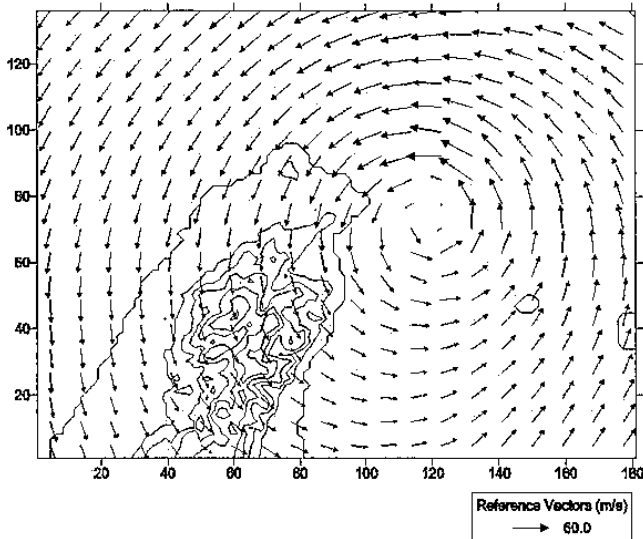
圖五 利用 GBVTD-simplex 法推求 1996年7月31日10:56至12:33兩公里高之每十二分鐘一筆的颱風環流中心路徑圖



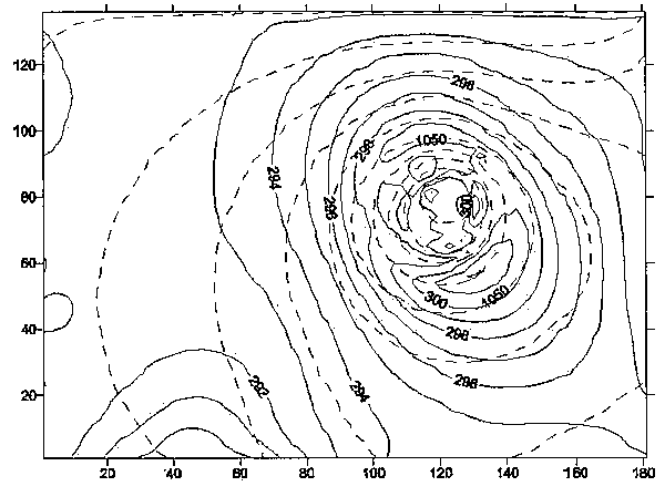
圖三 同圖一經過資料補遺之五分山雷達都卜勒風場(m/s)



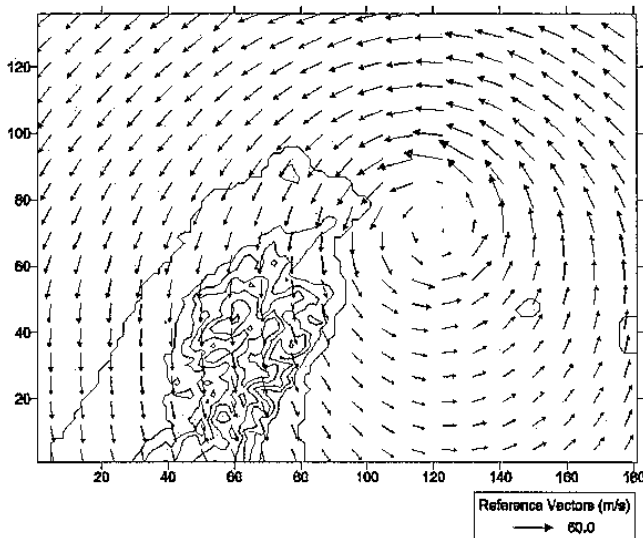
圖六 利用 GBVTD 法解析 19960731_11:02 兩公里高的颱風渦旋水平風場(箭號)。圖中等值圖為雷達回波圖，等值線為雷達都卜勒風速觀測。



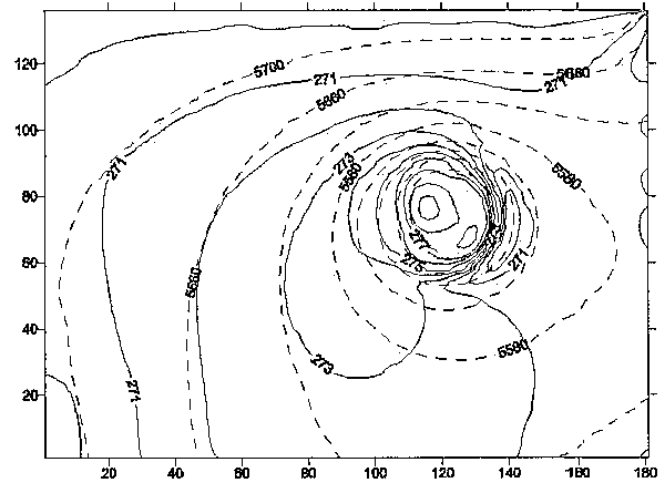
圖七 雷達解析颱風渦旋植入 MM5 模式模擬賀伯颱風 19960731_06:00 之初始場的 850 mb 水平風場



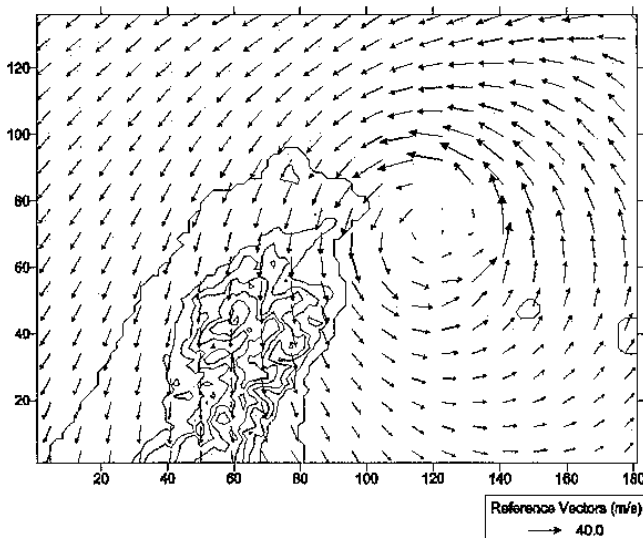
圖十 與圖七 850 mb 之水平風場平衡的質量場，實線為等溫線(K)，虛線為等高線(m)



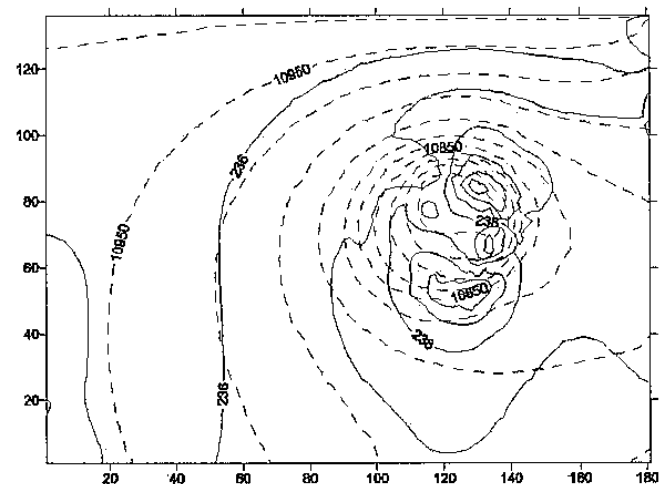
圖八 同圖七 之 500 mb 水平風場



圖十一 同圖十之 500 mb 平衡質量場



圖九 同圖七之 250 mb 水平風場



圖十二 同圖十之 250 mb 平衡質量場