

應用單都卜勒雷達風速觀測進行颱風渦旋初始化

李天浩

江家慧

楊明仁

台灣大學土木系副教授

台灣大學土木所博士

中央大學水文所助理教授

摘要

本研究利用單都卜勒雷達風速觀測，以 Ground-Based Velocity Track Display (Lee et al., 1999, 簡稱 GBVTD) 反演的多層水平風場；再利用 Wu et al. (2002) 的 6.67 公里空間解析度 MM5 模式之風場模擬結果填補無雷達觀測資料之區域，應用濾波器對於兩組風場資料的不連續介面予以平滑化處理；其次，透過平衡方程求得與風場平衡之質量場之粗解。最後，將此組平衡風場及質量場放入 MM5 模式中，以數值模式積分迭代的方式求得與反演風場動力平衡之初始場，包括垂直速度場及其他無法由雷達直接觀測的參數場。此方法是應用單都卜勒雷達風速觀測進行颱風渦旋初始化的程序，用以改善颱風靠近台灣時數值天氣預報模式之模擬氣象場中颱風的位置及動力結構；並且選擇 1996 年侵台的賀伯颱風為案例，進行程序應用可行性研究。利用此方法初始化賀伯颱風渦旋的成果顯示，當數值天氣預報模式之模擬颱風中心位置與實際觀測有一百多公里的誤差時，仍然可以有效改善颱風渦旋的初始條件及數值模式對於颱風強度的描述能力，從而增進定量降雨預報的能力。

關鍵詞：都卜勒雷達、GBVTD 法、颱風、渦旋初始化、定量降雨預報

一、緒論

本研究擬在颱風靠近台灣時，利用單都卜勒雷達觀測資料反演颱風環流的擬三維風場結構（三維空間中垂直分層的水平風場），進行中尺度數值天氣預報模式的初始化，以改進模式中對於颱風位置及動力的描述，期望能藉以提高高空間解析度中尺度數值天氣預報模式的即時定量降雨預報能力。由於數值模式中初始場的變數中除了單都卜勒雷達觀測資料能夠反演的水平風場外，還包含了垂直風場、溫度場、壓力場及水汽場等未知變數。因此，參考 Kuo and Wang (1997) 及 Wu et al. (2002) 研究中所採用的颱風渦旋初始化方法，由雷達反演風場導出其他氣象變數場粗估結果，再加上數值模式積分迭代的過程得到與植入之颱風渦旋動力平衡的各種氣象變數初始場，完成數值模式的初始化。本研究與 Wu et al. (2002) 不同的是採用單都卜勒雷達觀測資料反演真實颱風環流的擬三維風場，取代理想渦旋風場，且植入時間為颱風靠近台灣，即颱風環流受到台灣地形影響的時間。此外，本研究所發展的積分迭代初始化過程，透過數值天氣預報模式的數學化物理機制，得到與真實颱風動力平衡之初始場，可以縮短植入颱風渦旋的旋起 (spin-up) 時間。期望透過植入雷達反演颱風渦旋後的初始場與高空間解析度數值天氣預報模式的模擬，提高颱風接近台灣時的即時定量降雨預報能力。

二、颱風渦旋初始化

(一) 風場的反演

Ground-Based Velocity Track Display (簡稱 GBVTD, Lee et al., 1999 and 2000) 為利用單一地面都卜勒雷達之徑向風速 (Radial velocity) 觀測，解析颱風等高面之二維環流風場的方法。首先，將徑向風速之體積掃描內插等高面上，給定颱風中心，以颱風中心為原點向外，每兩公里取一帶狀環，稱為 GBVTD 環。取出落於每個 GBVTD 環內的徑向風速觀測資料，利用 GBVTD 法分析可反演每個 GBVTD 環之沿波束平均流、軸對稱的徑向風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 (R_r)，即僅能反演以 R_r 為半徑的圓以內的颱風二維環流風場。同時，根據 20% 誤差的反演品質，若 GBVTD 環的半徑與颱風和雷達距離之比值 (R/R_r) 小於等於 0.7、0.5 及 0.33，則定義 GBVTD 反演非軸對稱切向風至波數 1、2 及 3。另外，由於 GBVTD 法反演颱風等高面上之二維環流風場的品質受到颱風中心定位的影響，因此，本研究採用 Lee and Marks (2000) 之 GBVTD-simplex 法決定最佳的颱風中心位置。

(二) 反演風場的置入

由 GBVTD 法分析五分山雷達都卜勒風場所反演的颱風環流風場，其垂直座標為海平面上高度，欲置入之 MM5 模式採用的垂直座標為 σ 。在雷達反演颱風環流風場置入模式之前，必須先反演颱風渦旋的壓力場分佈。由於 GBVTD 法所反演的颱風環流風場中，缺少垂直速度分量，無法利用動力方程反演颱風渦旋的壓力場分佈，本研究採用軸對稱壓力場近似之。在 GBVTD 法

所反演的颱風環流分量中，軸對稱切向風為最主要的分量。而颱風環流的軸對稱切向風可由梯度風平衡近似之，

$$\frac{\bar{V}_T^2}{R} + f\bar{V}_T = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}'}{\partial R} \quad (1)$$

其中， \bar{p}' 為軸對稱擾動壓力。利用 GBVTD 所反演的軸對稱切向風代入(1)式，可推求颱風渦旋的軸對稱擾動壓力分佈場。同時，本研究採用 GBVTD 反演範圍外的探空資料作為等高面上的壓力參考值，反演等高面上雷達反演颱風渦旋範圍內每一個網格點上的壓力值，並且假設水平風場與壓力呈線性關係，將等高面上的反演二維颱風環流風場內插求得模式等 σ 面之網格點上的風向量，並取代原初始風場中反演颱風範圍內的風速，得到新初始風場。

(三) 風場不連續介面的平滑處理

由於模式的原初始風場中具有颱風環流分量，且與雷達反演的颱風渦旋不一致，使得置入雷達反演颱風渦旋後的新初始風場中存在一不連續介面。為避免模式迭代模擬過程中因為不連續介面的存在造成數值的不穩定，乃根據 Shapiro (1970, 1975) 所提出簡單一維三點平滑濾波器的概念，推導一個考慮垂直空氣密度差異的三維平滑濾波器 (Three-dimensional smoothers)，以濾除新初始風場中的不連續介面。

(四) 平衡質量場的反演

根據 Kuo and Wang (1997) 之颱風渦旋初始化方法，針對都卜勒雷達並無法直接測得溫度場，利用平衡方程 (balance equation, 即(2)式) 及靜力平衡方程 (hydrostatic equation, 即(4)式)，以新初始風場調整質量場的方式，求得滿足綜觀尺度 (synoptic scale) 平衡條件之平衡質量場，並以平衡質量場中的溫度場，取代原初始場變數中的溫度場，作為積分迭代的初始估計溫度場。同時，由於新初始風場採用 σ 垂直座標系統，為避免氣象變數之動力平衡關係，受到垂直座標系統轉換之內插動作所破壞。故針對 MM5 的 σ 垂直座標系統，將水平動量方程 (horizontal momentum equation) 取散度 (divergence) 得到散度方程 (divergence equation)，並以綜觀尺度進行散度方程的尺度分析，推導 σ 垂直座標系統中，描述風場與質量場平衡關係的平衡方程：

$$\hat{k} \times \nabla f \cdot \mathbf{V} - f\zeta - 2 \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right] = -\nabla^2 \Phi - \nabla \cdot (\alpha \sigma \nabla p^*) \quad (2)$$

其中， $\mathbf{V} = u\hat{i} + v\hat{j}$ 為水平速度向量， Φ 為重力位 (geopotential)， $\alpha = 1/\rho$ 為比體積 (specific volume)， $p^* = p_s - p_i$ ， $f = 2\Omega \sin \varphi$ 為科氏參數 (Coriolis parameter)， $\zeta = \hat{k} \cdot \nabla \times \mathbf{V}$ 為渦度之垂直分量。

將新初始風場中各 σ 面上的水平風場代入(2)式中，且假設任意水平層的重力位邊界條件 Φ 可由模式模擬範圍的邊界條件 p_0 計算得到：

$$\Phi = - \left[\frac{RA}{2} \left(\ln \frac{p_0}{p_{s0}} \right)^2 + RT_{s0} \ln \frac{p_0}{p_{s0}} \right] \quad (3)$$

其中， R 為氣體常數， p_{s0} 為參考海平面壓力， T_{s0} 為參考海平面溫度， A 為參考溫降傾率， $p_0 = (p_s - p_{top}) \times \sigma + p_{top}$ 為等 σ 面的邊界壓力值，為已知值。由已知的邊界條件和超鬆弛法 (successive over-relaxation method, SOR) 解(2)式可得各 σ 面上的水平平衡重力位場，再利用靜力平衡方程

$$T = - \frac{p}{Rp^*} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \quad (4)$$

可求得各 σ 面上的平衡溫度場，作為開始利用 MM5 模式積分迭代求取各氣象變數動力平衡的初始溫度場。

(五) 積分迭代初始化過程

由置入雷達反演颱風環流之新初始風場，和由(6)式所求得的新初始溫度場，以及 MM5 模擬原初始場中的水汽混合比與壓力擾動場，且假設初始垂直速度場為零等條件共同組成新初始場。由於新初始場中的動力不平衡，在模式模擬過程中將產生大的假慣性重力波。在一連續系統中的地轉調整 (geostrophic adjustment)，透過風場與質量場的重新分佈過程將這些大的假慣性重力波以頻散 (dispersion) 及消散 (dissipation) 的方式移除初始場中的不平衡現象。但在數值模式中這些假慣性重力波無法局部的消散，且可能造成模式的不穩定。初始化程序 (initialization procedure) 的目的在移除初始場中的不平衡現象，使得模式模擬過程中噪音最小，模擬結果準確度最高 (Haltiner, 1980)。

本研究提出透過 MM5 模式向前積分迭代模擬的方式，進行颱風渦旋初始化程序，其概念為在模擬範圍內，颱風渦旋本身為一個強的旋轉渦旋動力系統，透過颱風核心動力的強制驅動來帶動整個模擬範圍內的動力調整，同時透過邊界條件引入大尺度天氣系統對於颱風移動的影響。由前幾節得到時間 t_0 的粗估初始場，假設一個很短的迭代時步為 Δt 。採用時間 t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 的邊界條件以 MM5 模式模擬積分至時間 $t_0 + \Delta t$ ，以帶動雷達反演渦旋範圍外之風場調整及質量場的調整。將積分到時間 $t_0 + \Delta t$ 模擬風場中雷達反演颱風渦旋範圍內等 σ 面上的水平風場置換回原有的反演風速值，其餘無雷達直接反演風場的區域則維持時間 $t_0 + \Delta t$ 之模式調整後的模擬風場結果不變，即

$$V_i' = W_i \cdot V_i^{radar} + (1 - W_i) \cdot V_i^{mm5} \quad (5)$$

其中， V_i^{mm5} 為時間 $t_0 + \Delta t$ MM5 模式中之水平風速， V_i^{radar} 為雷達反演範圍內之颱風環流水平風速， W_i 為風場調整係數，於雷達反演颱風渦旋範圍內 $W_i = 1$ ，雷達反演颱風渦旋範圍外 $W_i = 0$ 。而其他氣象變數場則使用時間 $t_0 + \Delta t$ 之模擬結果。

將調整過後的時間 $t_0 + \Delta t$ 之模擬場假設為初始時

間 t_0 的新初始場，再利用初始時間 t_0 至時間 $t_0 + \Delta t$ 的邊界條件進行積分模擬。上述過程稱為颱風渦旋初始化中的一次積分迭代。如此反覆進行多次積分迭代，以兩次積分迭代模擬結果的地面氣壓平均變化量代表颱風動力平衡調整量：

$$B = \frac{1}{nx + ny} \sum_{i=1}^{nx} \sum_{j=1}^{ny} (p_{s,i,j}^{n+1} - p_{s,i,j}^n)^2 \quad (6)$$

其中， p_s^{n+1} 及 p_s^n 分別為第 $n+1$ 、 n 次迭代模擬之地面氣壓， nx 及 ny 為等 σ 面上水平 i 及 j 方向上的網格總數。當颱風動力平衡調整量逐漸變小且趨於一致時，代表模式之動力調整趨緩且達到平衡，此時的迭代模擬結果即為與模式動力一致之平衡初始場，此平衡初始場中的颱風強度及颱風的低壓中心位置皆調整至與雷達觀測較為一致。利用此達到動力平衡的初始場於初始時間 t_0 開始，利用 MM5 模式進行 1~6 小時的定量降雨預報。

三、賀伯颱風渦旋初始化

本研究選擇賀伯颱風個案為單都卜勒雷達觀測資料進行颱風渦旋初始化方法之應用測試。在賀伯颱風登陸前，於時間 11:02 UTC 始能較完整的觀測到包括颱風眼之都卜勒風速觀測資料。本研究僅利用 11:02 UTC 之五分山雷達觀測資料進行賀伯颱風渦旋的反演，同時選擇吳俊傑等人 (Wu et al., 2002) 針對賀伯颱風個案利用 MM5 模式的模擬結果作為初始場，將雷達反演颱風渦旋植入初始場中，並且利用 MM5 模式以積分迭代的方式進行颱風渦旋初始化，探討改進數值模式預報定量降雨量的能力。

(一) 雷達反演颱風渦旋風場

首先，將五分山雷達都卜勒風場觀測資料中受地形遮蔽影響的資料予以去除，並且利用颱風環流都卜勒速度摺疊修正法，得到正確的都卜勒風速體積掃描觀測資料。將此觀測資料內插至水平及垂直解析度為一公里的網格上。由於三公里以下之 CAPPI 觀測範圍較小，無法觀測到 7 月 31 日 11:02 UTC 之完整颱風眼結構，其 GBVTD 的分析結果誤差較大。因此，僅進行三公里以上的颱風環流風場的反演。由內插至等高度上的都卜勒風速觀測資料，以 GBVTD-simplex 法推求此高度之最佳颱風中心，結果如表 1。分析結果發現颱風中心在垂直方向上有向東南傾斜的現象，而最大風速半徑隨著高度的增加變大，傾斜角度約 35 度左右。反演之軸對稱切向風亦隨著高度的增加而減弱。以上結果與張保亮 (2000) 對於賀伯颱風登陸前之颱風環流分析結果一致。再由 GBVTD-simplex 法所推求的最佳颱風中心，利用 GBVTD 法反演等高面上的水平風場。圖 1 為高度四公里之颱風環流水平風場反演結果，顯示最大風速區位於颱風行進方向之右後方，颱風眼內部多為微弱風場。

由上述 GBVTD 法所反演的軸對稱切向風代入(1)式

反演颱風渦旋之軸對稱擾動壓力場，再利用 7 月 31 日 12:00 Z 之板橋探空站的壓力觀測作為環境場之壓力參考值，即可推求每一個等高面上每個計算點的壓力值。並以此軸對稱壓力分佈近似颱風渦旋之真實壓力分佈，利用線性內插方法將等高面上的水平風場內插至 MM5 模式之 σ 面上。

(二) 模式的設定與實驗設計

為探討本研究所提出的颱風渦旋初始化方法改進數值模式定量預報降雨之能力的影響，選擇 Wu et al. (2002) 模擬賀伯颱風時間序列中，分別在 1996 年 7 月 31 日 06:00 UTC 及 04:00 UTC 的兩組時間氣象變數場，前者模擬結果之颱風中心最接近 1996 年 7 月 31 日 11:02 UTC 欲植入之雷達反演颱風渦旋位置，及兩組水平解析度 6.67、2.22 公里的模擬結果為初始場，進行颱風渦旋初始化測試，並模擬 1 至 6 小時的定量降雨分佈情形。各組實驗方法的條件設定如表 2。

同時，本研究沿用 Wu et al. (2002) 的研究中對於 MM5 模式的設定，採用非靜力假設，使用非巢狀的單層網格模擬，進行兩組測試應用。分別為網格解析度 2.22 公里範圍為 396km×297km 的 D04 及網格解析度為 6.67 公里範圍為 1206km×905km 的 D03 (如圖 2)。模擬時分別由外層的 D03 及 D02 之模擬結果提供側邊界條件。

(三) 颱風渦旋初始化結果

1. 雷達反演颱風渦旋的植入

由單都卜勒雷達徑向速度觀測資料以 GBVTD 法反演颱風等高面之二維環流風場的水平解析度為 1 公里。圖 3a 為實驗 ES4_06 已植入雷達反演颱風渦旋後之新初始風場中通過颱風中心南北垂直剖面的水平風場等值圖 (尚未進行積分迭代)，對照颱風渦旋植入前之初始水平風場的垂直剖面圖 (圖 3b)，顯示由雷達資料所反演之颱風環流強度 (最大風速 65 m/s) 較原初始場 (最大風速 55 m/s) 為強。另外，雖然原初始場中所具有的颱風環流分量和植入颱風渦旋後的風場在植入介面有不連續的問題，但是透過三維平滑濾波器的處理使得兩組資料的不連續面較為平滑化。在數值模式模擬過程中亦顯示此植入颱風渦旋後之初始場並未造成數值不穩定的現象；實際應用時，若發生數值不穩定的問題時，則需作進一步的平滑化。

2. 初始場範圍的選擇

實驗 ES4_06 及實驗 ES3_06 中，選擇相同的植入初始場時間及迭代時步的長度，但兩組實驗的模擬範圍及水平解析度不同，前者為模擬範圍 D04、水平解析度 2.22 公里，後者為模擬範圍 D03、水平解析度 6.67 公里。圖 4 為兩組實驗模式在積分迭代初始化過程中颱風動力平衡調整量的變化情形。圖中顯示實驗 ES4_06B 在第 4 次積分迭代後颱風動力平衡調整量有逐漸變大的趨勢，代表颱風渦旋植入此模擬範圍之初始場中，模式的調整動

力無法達到平衡狀態。而實驗 ES3_06 則隨積分迭代次數的增加颱風動力調整量逐漸趨於平緩，顯示模式的動力逐漸達到平衡狀態，其逼近值大致為颱風渦旋由時間 t_0 到時間 $t_0 + \Delta t$ 的地面氣壓變化差值平方的平均值。由實驗 ES4_06B 及實驗 ES3_06 中積分迭代之地面氣壓變化等值圖，實驗 ES4_06 在經過 7 次積分迭代後，位於地形及颱風中心附近有較大的地面氣壓變化，經過積分迭代的方式逐漸變小。但受到邊界的影響，有數值噪音反射回模擬區域範圍內的現象，且逐漸增強而影響整個區域內的動力平衡，並且不會隨積分迭代次數的增加而逐漸遞減。此一問題可能隱含反演颱風動力與邊界條件不協調，無法透過單層網格積分迭代模擬的方式達成一個動力平衡的初始場，需待進一步研究深入瞭解。而實驗 ES3_06 雖然在初始迭代中位於左邊界處有明顯的數值噪音存在，但是由於模擬區域較大，在後續的積分迭代過程中此數值噪音並未往內傳遞，而且有逐漸消失的趨勢。在經過 20 次的積分迭代後，區域內地面氣壓變化趨於平緩，此時模式的動力調整趨於平衡。理論上，在本研究中採用很短的積分迭代時步 Δt ，因為在時間 t_0 至時間 $t_0 + \Delta t$ 的積分過程中，天氣系統本身也會隨時間變化。因此在數值積分不發散的狀況下，颱風動力平衡調整量會逐漸遞減至天氣系統在時間 Δt 內的變化量。因此，在達成積分迭代時步的颱風動力平衡調整量後，可以減少積分迭代時步 Δt ，如 $\Delta t/3$ 再進行迭代積分調整，以次第減少天氣系統時變差異的方式，使系統趨近於在初始瞬間動力平衡的狀態。

圖 5a、b 及 c 則為實驗 ES3_06 置入雷達反演颱風渦旋風場後，積分迭代達收斂標準之初始場。圖中顯示透過模式積分迭代的方式，將原初始場中的颱風強度由 938 mb 調整至 928 mb，且植入颱風渦旋後初始風場與溫度場中具有的不連續現象亦予以調整轉為合理。

3. 初始場的影響

實驗 ES3_04 中選擇植入初始場為 1996 年 7 月 31 日 04:00 UTC 之模擬結果，其颱風中心位置與雷達反演實際颱風渦旋之中心位置相距較遠。圖 6 顯示在透過模式積分迭代調整動力平衡之過程中，由於實驗 ES3_04 較實驗 ES3_06 中植入颱風渦旋環流風場與初始風場之間有較大的差異性，因此需要較多的積分迭代次數才能達到動力平衡狀態。在實驗 ES3_04 中迭代第 51 次之平衡初始場的地面氣壓分佈，顯示經過颱風渦旋初始化之颱風中心位置與雷達觀測較為一致。且颱風中心最低氣壓由原初始場中的 940 mb 調整至 932 mb。本實驗顯示在原初始場中對於颱風位置及強度模擬不佳的情況下，透過本研究所提出的應用單都卜勒雷達觀測資料初始化颱風渦旋的方法，仍然可以有有效的改進初始場中的颱風位置與強度。

四、數值模擬與敏感度分析

在未植入雷達反演颱風渦旋之實驗 EN3_06，與植

入後的實驗 ES3_06、ES3_04 及 ES3_04new 中，利用積分迭代達到動力平衡的初始場作為模式的初始條件，以 MM5 模式進行 1 至 6 小時之模擬，並且探討模式的定量降雨模擬狀況。其中，實驗 EN3_06 與 ES3_06、ES3_04new 之邊界條件為模擬範圍 D02、水平解析度 20 公里於 1996 年 7 月 31 日 06:00 UTC 至 12:00 UTC 之模擬結果所提供。而實驗 ES3_04 之邊界條件則為模擬範圍 D02、水平解析度 20 公里於 1996 年 7 月 31 日 04:00 UTC 至 10:00 UTC 之模擬結果所提供。

(一) 颱風移動路徑與強度

圖 7 為各組颱風渦旋初始化實驗之模擬路徑與中央氣象局 (CWB) 之最佳路徑比較圖。圖中顯示實驗 ES3_06 之模擬路徑與 EN3_06 相近，其颱風移動速度皆較中央氣象局所推估結果為快。同時，在實驗 ES3_06 植入颱風渦旋後之平衡初始場中颱風強度較 EN3_06 未植入颱風渦旋前之初始場為強，故颱風受到地形偏折的效應可能較不明顯，且颱風過山的移動速度較快。在颱風強度方面，有植入颱風渦旋的實驗 ES3_06 之模擬強度皆較未植入颱風渦旋的實驗 EN3_06 為強。而實驗 ES3_04 之模擬颱風路徑與其他各組路徑於模擬第 3 小時開始有明顯的差異。由於模式在模擬過程中邊界條件為綜觀尺度環流對於颱風系統的牽引作用，而實驗 ES3_04 所採用的邊界條件與其他兩組實驗不同。為探討邊界條件對於颱風移動路徑的影響，於實驗 ES3_04 中採用與實驗 ES3_06 相同之邊界條件，進行 1 至 6 小時之模擬 (實驗 ES3_04new)。由圖 7 中實驗 ES3_04new 之模擬路徑顯示在採用相同的邊界條件後，對於第 3 小時之後的颱風路徑誤差有改善，代表此時的綜觀尺度環流系統對於颱風系統的移動具有影響力。

(二) 降雨量

圖 8 為實驗 ES3_06、ES3_04 及 ES3_04new 之模擬累積 6 小時定量降雨量之等值圖，與雨量站實際觀測結果之比較。顯示模擬期間在台灣地區有兩個最大降雨區，分別為北部的雪山山脈及中部的阿里山。在降雨分佈的模擬方面，三組實驗模擬結果皆與實際觀測一致。但實驗 ES3_06 模擬結果之最大定量降雨中心仍然位於北部雪山山脈。於實驗 ES3_04new 中最大定量降雨中心移至中部阿里山，而實驗 ES3_04 則兩者並列最大定量降雨中心。由圖 7 之颱風中心模擬路徑圖中，實驗 ES3_04new 之模擬結果颱風中心移動路徑與 CWB 之最佳路徑最為接近，其定量降雨模擬結果為三組實驗中最接近實際觀測。由降雨量的模擬結果顯示，受到台灣地形的影響，當模擬颱風移動路徑與實際觀測越接近，則定量降雨模擬結果亦較為準確。

(三) 初始場之水汽混合比

由 3-3 節的分析顯示，本研究提出的積分迭代初始化方法可使初始場中的各氣象變數和雷達反演風場達到動力平衡，且與 MM5 模式的預報方程動力一致，但實

驗 ES3_06 及實驗 ES3_04 中在分別經過 60 分鐘及 120 分鐘的積分迭代累積時間得到的平衡初始場中，水汽混合比在地形的背風面及颱風中心附近明顯較未植入颱風渦旋前之初始場減少 10 至 20% (圖 8)。地形背風面的水汽混合比減少的原因是由於颱風強度增強，較大的颱風環流受到地形舉升效應，在地形迎風面有較大的地形增量降雨，使得過山氣流較為乾燥，故地形背風面的水汽混合比較少，此部分與颱風降雨機制相符合。同時，在逐步增強颱風強度的同時，颱風環流周圍的水汽含量卻逐漸減少，顯示模式中地表與海面的水汽供應速度可能較動力調整積分迭代過程中降雨損失水汽的速度為慢。此一現象的隱含意義是若積分迭代的次數增加，在降雨損失大於模式自地表、海面和邊界補充水汽速度慢的狀況下，模擬範圍內颱風環流及其周圍的水汽會逐漸遞減，積分模擬 1 至 6 小時的颱風降雨量也可能會隨著積分迭代次數的增加而遞減。

五、結論與建議

1. 利用 GBVTD 法反演颱風環流風場，受到幾何關係的限制，其反演颱風環流之最大範圍為雷達至颱風中心的距離。當颱風越靠近雷達，則由 GBVTD 法所能反演的颱風環流風場越小。若無法反演颱風渦旋主要核心動力的部分，則可能無法應用本方法初始化颱風渦旋。利用單都卜勒雷達觀測資料進行颱風渦旋初始化，能夠應用的有效範圍將受到此一條件的限制。
2. 在雷達反演颱風渦旋植入的部分，針對雷達反演颱風渦旋與初始場之間資料不連續性的平滑化處理和利用平衡方程粗估溫度場，能夠減少數值噪音產生，避免模式發生數值發散的問題。
3. 本研究提出的積分迭代初始化過程，經由賀伯颱風個案的實驗結果顯示，即使在實驗 ES3_04 中數值模式模擬氣象變數場中，颱風位置與實際觀測相差 100 多公里，仍然能夠透過積分迭代初始化過程調整至與雷達觀測颱風位置及強度一致。表示只要有合理的邊界條件，透過次數足夠的積分迭代都可以調整到與植入雷達反演颱風渦旋動力一致的平衡初始場。本初始化方法可有效的縮短植入雷達反演颱風渦旋的旋起 (spin-up) 時間，達到熟啟動的目標。
4. 在積分迭代初始化過程中，受到植入反演颱風渦旋與邊界條件動力不一致的影響，初始場範圍的大小將影響積分迭代初始化中數值積分的穩定性。而迭代時間步幅的選擇不影響積分迭代初始化達到動力平衡的結果，唯選擇的迭代時間步越小，則達到動力平衡之初始場較趨近於初始瞬間動力平衡的狀態。邊界條件的選擇亦不影響積分迭代初始化達到動力平衡後，颱風的中心位置及強度。
5. 由實驗 ES3_04new 之模擬結果顯示，造成實驗 ES3_04 之颱風路徑模擬結果與實驗 ES3_06 及

EN3_06 有較大差異的原因，為採用不同的邊界條件進行積分迭代初始化過程及進行定量降雨模擬。且實驗 ES3_04 之模擬結果顯示，邊界條件的影響在模式開始進行模擬一段時間後，將影響到模擬範圍內的颱風移動。本研究提出之應用單都卜勒雷達觀測資料初始化颱風渦旋，在於改善模擬範圍內部對於颱風描述的初始條件。對於採用相同邊界條件之實驗 ES3_06 及 ES3_04new 的模擬結果，顯示此颱風渦旋初始化方法確實能夠透過單都卜勒雷達觀測資料改善初始場中的颱風動力，進而增進颱風的定量降雨預報。同時，由實驗 ES3_04new 的模擬結果顯示，當原初始場中對於颱風位置及強度的描述有極大的誤差時，本研究之颱風渦旋初始化方法仍然能夠透過單都卜勒雷達觀測資料，以積分迭代初始化過程調整初始場中的颱風強度及位置，使其與實際觀測較為接近，且 1 至 6 小時的颱風模擬結果與實際觀測相近。

6. 由定量降雨的模擬結果顯示，正確的描述水汽含量及其分佈情形，才能提升模式模擬降雨量的定量準確度。而本研究之颱風初始化方法中由於積分迭代過程中颱風動力增強，在地形迎風面的降雨量超過地面、海面與邊界條件所提供的水汽量，造成水汽供應的不足的問題產生乾化現象，影響在定量降雨預報上的準確度。未來擬調整模式中海面水汽供應的參數，使模式在積分迭代的過程中能夠提供充足的水汽，改善平衡初始場中的乾化現象，提升定量降雨預報的能力。
7. 本研究利用單都卜勒雷達觀測資料初始化颱風渦旋改進了初始場中的颱風動力，能夠改進數值模式的颱風模擬。由實驗 ES3_04new 的模擬結果驗證了邊界條件對於颱風移動路徑的影響，而其初始場中所具有的水汽混合比，及植入雷達反演颱風渦旋與邊界條件動力的組合與實驗 ES3_06 不同，是否造成颱風移動路徑及定量降雨模擬的差異，則需要進一步的探討。
8. 若欲減低邊界條件對於模擬結果的影響，可增加模擬範圍的大小。但是，當模擬範圍擴大時，欲達到動力平衡的積分迭代次數也必須增加，即颱風渦旋初始化過程所需的時間亦較長。

致謝

本研究感謝台大大氣系吳俊傑教授的協助指導。且本研究中所採用的 MM5 模式模擬賀伯颱風結果資料，均為吳俊傑教授及台大大氣所博士候選人顏自雄之研究成果，感謝其提供研究資料與熱心的協助。

參考文獻

- [1] 張保亮、周仲島、李文兆, "賀伯颱風 (1996) 近中心環流分析", 第二屆國際海洋大氣會議論文集, 2000年, 第424-429頁。
- [2] 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.
- [3] Lee, W. -C., B. J. -D. Jou, P. -L. Chang, and S. -M. Deng. 1999. Tropical cyclone kinematical structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part I: Interpolation of Doppler velocity patterns and the GBVTD technique. *Mon. Wea. Rev.* **127**: 2419-2439.
- [4] Lee, W. -C., and F. D. Marks. 2000. Tropical cyclone kinematical structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part II: The GBVTD-simplex center finding algorithm. *Mon. Wea. Rev.* **128**: 1925-1936.
- [5] Lee, W. -C., B. J. -D. Jou, P. -L. Chang, and F. D. Marks. 2000. Tropical cyclone kinematical structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part III: Evolution and structures of Typhoon Alex (1987). *Mon. Wea. Rev.* **128**: 3982-4001.
- [6] Shapiro, R., 1970. Smoothing, filtering, and boundary effects. *Rev. Geophys. and Space Phys.*, **8**: 359-387.
- [7] Shapiro, R., 1975. Linear filtering, *Math. Comp.*, **29**: 1094-1097.
- [8] Wu, C. -C, T. H. Yen, Y. H. Kuo and W. Wang. 2002. Rainfall simulation associated with Typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: Topographic effect. *Wea. and Forecasting*, in press.

表 1 賀伯颱風期間 1996 年 7 月 31 日 11:02 UTC 由 GBVTD-simplex 推求颱風中心及最大風速半徑

高度 (km)	最大風速半徑 (km)	颱風中心		軸對稱切向風 (m/s)	標準偏差 (km)	個數
		經度	緯度			
3	50.0	122.5064	24.8639	47.16	0.31	11/16
4	50.0	122.5471	24.8627	46.18	0.55	8/16
5	49.0	122.5660	24.8805	46.10	0.87	13/16
6	51.0	122.6212	24.8607	45.78	0.55	15/16
7	51.0	122.6262	24.8619	44.34	0.39	10/16
8	53.0	122.6386	24.8412	42.27	0.09	11/16
9	58.0	122.6381	24.7891	40.87	0.42	14/16
10	58.0	122.6443	24.7868	38.37	0.96	13/16

表 2 颱風渦旋初始化實驗設計

實驗名稱	網格解析度 (km)	模擬範圍	初始場之時間	迭代時間步 (min)	邊界條件之初始時間
EN3_06	6.67	D03	7月31日 06:00 UTC	—	7月31日 06:00 UTC
ES4_06	2.22	D04	7月31日 06:00 UTC	3	7月31日 06:00 UTC
ES3_06	6.67	D03	7月31日 06:00 UTC	3	7月31日 06:00 UTC
ES3_04	6.67	D03	7月31日 04:00 UTC	3	7月31日 04:00 UTC
ES3_04new	6.67	D03	7月31日 04:00 UTC	3	7月31日 06:00 UTC

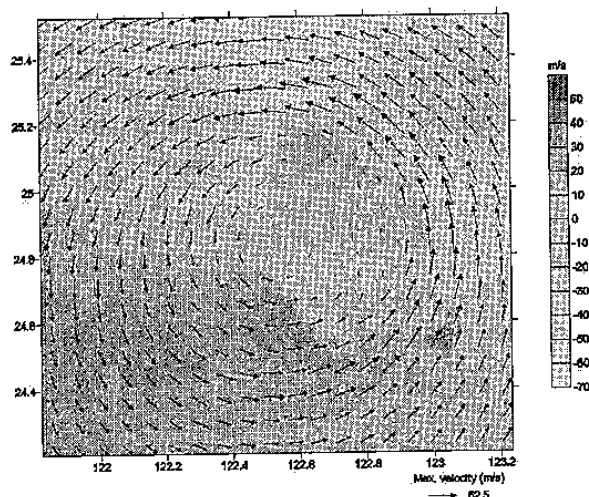


圖 1 賀伯颱風期間 1996 年 7 月 31 日 11:02 UTC 四公里高之 GBVTD 反演水平風場 (向量圖), 等值圖為都卜勒速度觀測值。

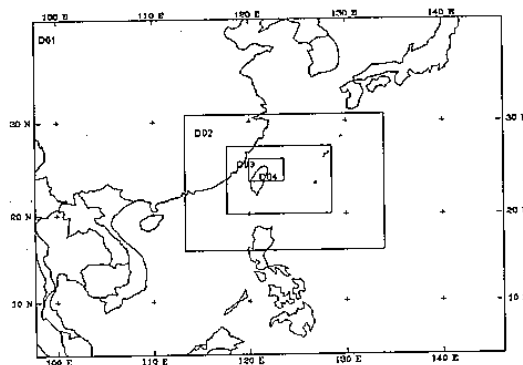


圖 2 吳等人 (2001) 利用 MM5 模式模擬賀伯颱風之中尺度風雨分佈分析中, 模式模擬的區域。

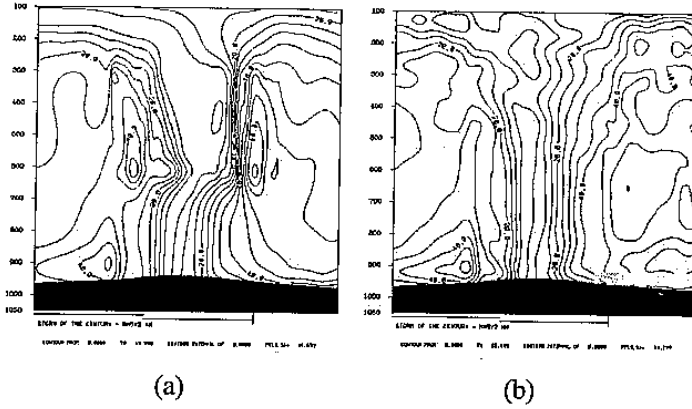


圖 3 實驗 ES4_06 之通過颱風中心南北垂直剖面的水平風場等值圖。(a)為植入雷達反演颱風渦旋後之新初始風場(尚未進行積分迭代初始化)，(b)為植入雷達反演颱風渦旋前之原初始風場。

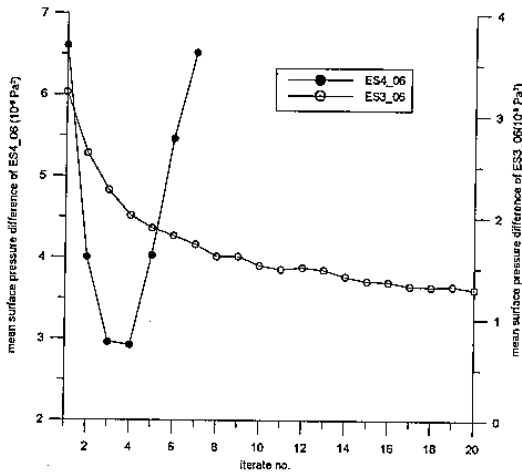
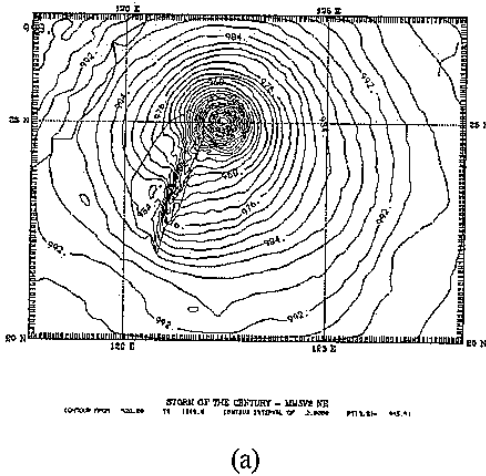
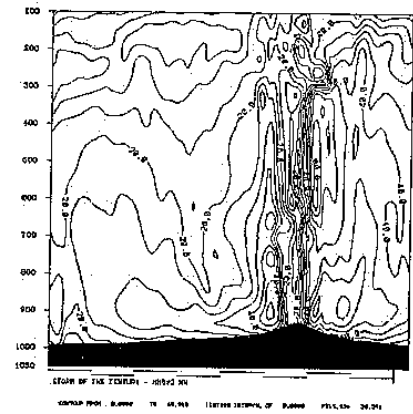


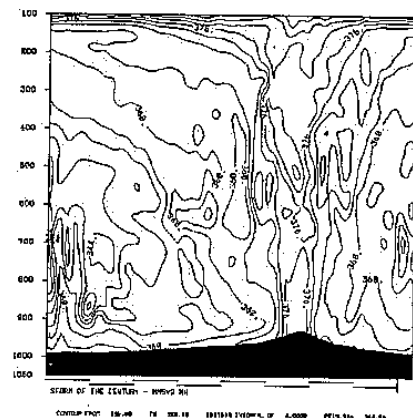
圖 4 颱風渦旋植入不同模擬範圍之初始場中，模式積分迭代過程之地面氣壓差值平方的平均值隨積分迭代次數變化情形



(a)



(b)



(c)

圖 5 (a)、(c)及(e)分別為實驗 ES3_06 之積分迭代達動力平衡時之初始場中的地面氣壓場、通過颱風中心之水平風場及相當位溫垂直剖面圖。

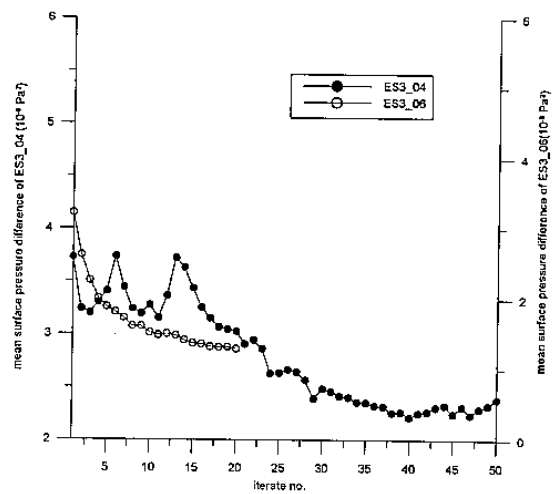


圖 6 颱風渦旋植入不同模擬時間之初始場中，模式積分迭代過程兩次積分迭代間之地面氣壓差值平方的平均值變化情形

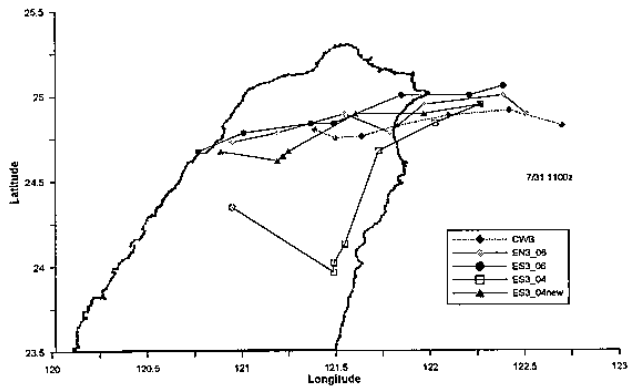
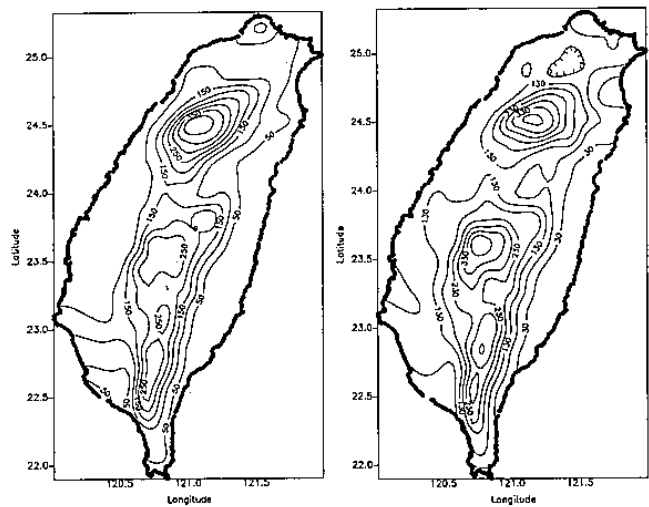
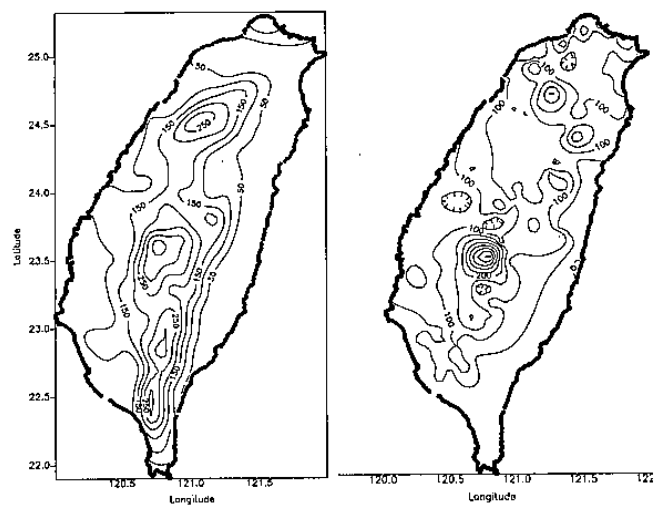


圖 7 颱風渦旋初始化實驗之模擬路徑與中央氣象局 (CWB) 之最佳路徑比較圖



(a)

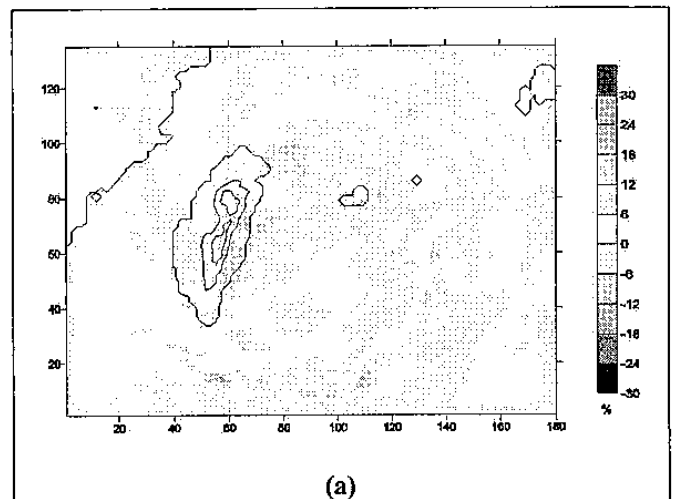
(b)



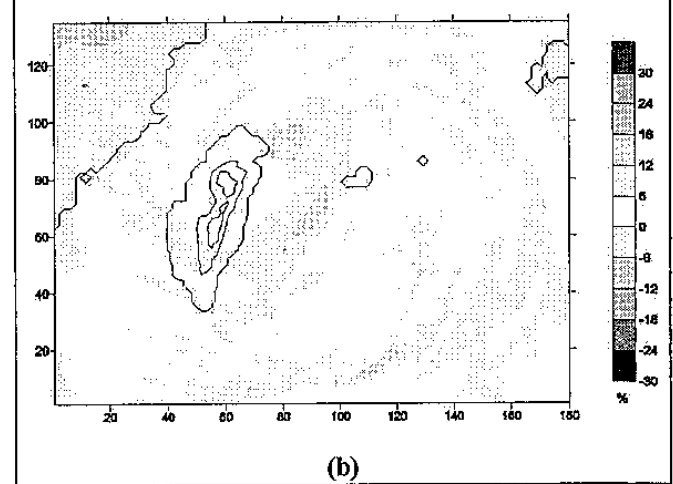
(c)

(d)

圖 8 累積六小時之定量降雨等值圖。(a)、(b)及(c)分別為實驗 ES3_06、ES3_04 及 ES3_04new 之模擬結果，(d) 為雨量站之觀測結果。等值線間距為 50 mm。



(a)



(b)

圖 9 (a)實驗 ES3_06，(b)實驗 ES3_04 經過積分迭代初始化後之初始場中的水汽混合比與實驗 EN3_06 之差異等值圖。(以實驗 EN3_06 之初始場中最大水汽混合比正規化表示)