

MM5 模式及其颱風模擬與渦旋植入

吳俊傑

顏自雄

國立台灣大學大氣科學研究所 空軍氣象聯隊

摘要

颱風研究由於受限於觀測資料的不足（尤其是在海上地區），導致傳統的分析工作進行不易。而模式卻可以提供在時間解析度及空間解析度上精細的模擬資料，因此運用模式來探討颱風問題，乃是颱風研究的重要方向。MM5 中尺度模式（Fifth-generation Penn. State/Ncar Mesoscale Model）由於物理參數化過程較為完整，可以依照需要選擇採用靜力或非靜力模式，且可根據研究對象之尺度，自行設計多重巢狀網格，可適用性相當廣泛，因此成為廣為應用的模式之一。

另外，在運用模式模擬颱風時，由於初始場的解析度過粗，致模式所解析的颱風渦旋過弱，是所有颱風模式所要解決的首要問題。因此本文即針對 MM5 中尺度模式，說明解決颱風模擬時，解決初始場過弱問題所採用的渦旋植入法。

初步發現在經過渦旋植入處理後，颱風渦旋風場明顯增強至接近實際觀測值，而植入的颱風渦旋中心氣壓亦與觀測值接近。在垂直結構方面，經過渦旋植入後的初始結構較未進行渦旋植入前結實，如垂直速度場可由 0.2ms^{-1} 增強為 2ms^{-1} 。整個颱風中心暖心結構亦較為明顯，水汽梯度也明顯增加，由此可見渦旋植入確實有助於改善颱風模擬之初始場。

一、前言

台灣所有的氣象災害中，以颱風的影響最大。西北太平洋是全球熱帶氣旋活動最旺盛的地區，平均每年約有 25.7 個颱風生成；台灣位處西北太平洋之濱，颱風路徑之要衝，平均每年約有 6 個颱風會影響台灣（葉等，1998）。又中央山脈涵蓋台灣約 2/3 的面積，且有許多山峰超過 3,500 公尺，致河流短小且坡度大，因此颱風來襲所帶來之強風暴雨，使台灣在短時間之內累積大量雨水，加上強風破壞，常造成山洪爆發、房屋倒塌、農作物嚴重受損，甚至民衆生命受到威脅。如 1996 年賀伯

颱風在 7 月 31 日登陸台灣，造成 70 人死亡，財產損失達近十億新台幣。因此颱風研究乃是台灣地區大氣科學界最大的挑戰之一，而防颱工作亦是國家型防災計畫的重點。但颱風研究工作受限於觀測資料在空間及時間尺度上解析度的不足（尤其是海上地區），導致颱風內部許多中小尺度天氣現象的分析工作相當困難。由於模式可以提供在時間解析度及空間解析度上相當精細的模擬資料，因此運用模式來探討颱風問題，乃是颱風研究的重要方向。

Willoughby et al. (1984) 及 Lord et al. (1984) 使用具雲微物理方法之非靜力模式進行模擬，結果已模擬出颱風之結構特徵。

Anthes et al. (1972) 使用解析度為 30 公里之三維靜力模式模擬颱風不對稱的外流及螺旋雨帶。而 Jones (1977) 建構三重巢狀網格式來模擬颱風動力及颱風與環流之交互作用。Kurihara and Bender (1982) 則使用多重可移動網格的靜力模式模擬細微的颱風眼結構。此外, Tripoli (1992) 使用非靜力平衡三維模式, 模擬出較真實的颱風雨帶結構。

Liu et al. (1997) 使用 MM5 (解析度 6 公里) 模擬 Andrew 颶風 (1992), 發現模式成功地掌握其移動路徑及迅速增強之強度變化。且模擬較細微結構部份發現, 模擬之可見光雲結構之大小、形態及強度, 均與衛星及雷達資料相符。且針對颱風眼、眼牆深對流及螺旋雨帶的胞狀對流及其外緣淺對流做雷達反照率計算, 發現也與觀測值相近。Kuo and Wang (1997) 使用 MM5 (解析度設為 6.67 公里) 模擬賀伯颱風登陸之降水分佈, 發現模式模擬降水量的能力隨著解析度降低而降低, 且模擬之降水及中尺度結構與解析之中央山脈高度有相當密切的關係。此外 Wu and Kuo (1999) 6.67 公里解析度之模擬結果顯示, 90% 以上的降水是由於網格式度降水物理過程所造成, 因此在中央山脈造成豪雨是因為深層大氣的舉升作用所造成。由此亦得知颱風環流與地形的交互作用在研究颱風的問題上, 扮演相當重要的角色。

吳與顏 (1999) 使用 MM5 針對賀伯颱風 (1996) 採用不同解析度 (60、20、6.667、2.22 公里) 設定, 進行一系列模擬實驗。其目的在於檢驗 MM5 是否具有模擬賀伯颱風侵台時所造成大量降水現象的能力。結果顯示雨量模擬的優劣與模擬時採用解析度之高低有很大的關係, 而且模擬時所選用之雲微物理過程對模擬結果也有相當程度的影響。

由上述可知, 模式對於研究颱風問題的助益相當大, 不但有助於掌握颱風的基本結構特

徵, 亦可增進對颱風基礎問題的瞭解。且目前模式已逐漸朝向海氣耦合及四維資料同化的方向發展, 模式中物理參數化過程也逐漸完備, 加上計算機能力大幅提升, 模式不可避免地將是未來學術研究及作業應用上的重要工具。

目前用來研究颱風問題的數值模式相當有限, 其中 GFDL 颱風模式是較著名的例子 (Kurihara et al. 1998; Wu et al. 1999), 目前也是美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction; 即 NCEP) 的作業模式。另外由 PSU/NCAR 所發展出的第五代中尺度數值模式, 簡稱 MM5 (Fifth-generation Penn. State/Ncar Mesoscale Model), 亦是目前較為普及的模式之一。MM5 中尺度模式由於物理參數化過程相當完整, 可依照研究需要選擇採用靜力或非靜力模式, 且可依研究現象之尺度, 設計不同之多重巢狀網格式, 適用性相當廣泛, 因此有許多國內外學術單位或作業單位亦採用 MM5 中尺度模式作為研究及預報模式。

目前許多國內外學術、作業單位為適應本身不同的需求, 積極從事 MM5 模式的研究與改進, 致 MM5 模式不斷發展, 在各種中尺度天氣問題的研究上, MM5 模式的使用者有增加趨勢。本文即針對此數值模式做一介紹, 並以 1996 年賀伯颱風為例, 說明我們以此模式進行颱風模擬時所遇到的初始場問題, 及解決此問題所用之渦旋植入法, 本文第二段將介紹 MM5 模式與模擬颱風所遇到的初始場問題, 第三段介紹渦旋植入法與結果, 第四段為結語。

二、MM5 模式簡介

MM5 中尺度模式 (Fifth-generation Penn. State/Ncar Mesoscale Model) 最早是根據 Anthes 與 Warner 兩位學者在賓州州立大學所發展出的模式為依據 (Anthes 與 Warner,

1978; Anthes 等人, 1987), 目前屬於三度空間有限區域的靜力與非靜力中尺度模式。MM5 模式使用 σ 座標為垂直座標, 並具多重巢狀網格式功能, 對不同尺度間之交互作用有較好的解析及模擬。對於複雜的中尺度天氣系統而言, 藉 MM5 的模擬可以彌補因觀測資料不足而無法充分掌握中尺度天氣系統在時間與空間上變化情形的缺憾。

原先所發展出的中尺度模式僅適用於超級電腦 (Cray), 之後因工作站的計算速度已提高許多, 因此在研究便利性的考量之下, 遂有工作站版的 MM5 模式。而 PC 版的 MM5 模式, 也已發展完成, 處於測試階段。由此可見, MM5 模式的普及層面將會越來越廣, 對於未來中尺度現象的研究, 將扮演一定的角色。

(-) MM5 的架構:

MM5 是個高度模組化的程式, 它由許多輔助系統 (模組) 所構成, 其系統之架構如圖 1 所示。MM5 中尺度模式系統可以分為前處理系統 (pre-processing, 模式初始場之建立), 模擬系統 (MM5 model), 及後處理系統 (post-processing, 模式之輸出繪圖, 診斷分析)。在前處理系統中 (pre-processing) 中, 是由 Terrain, Datagrid, Rawins 及 Interp 所組成。

MM5 初始場建立之步驟為: 先由 Terrain 處理模擬之地圖投影部份, 此地圖投影的方式包括極座標投影法、藍伯特保角投影法及麥卡托投影法, 並將所選定積分範圍內的地形及地表特徵建立且內差至模式之網格式中, 再引進低

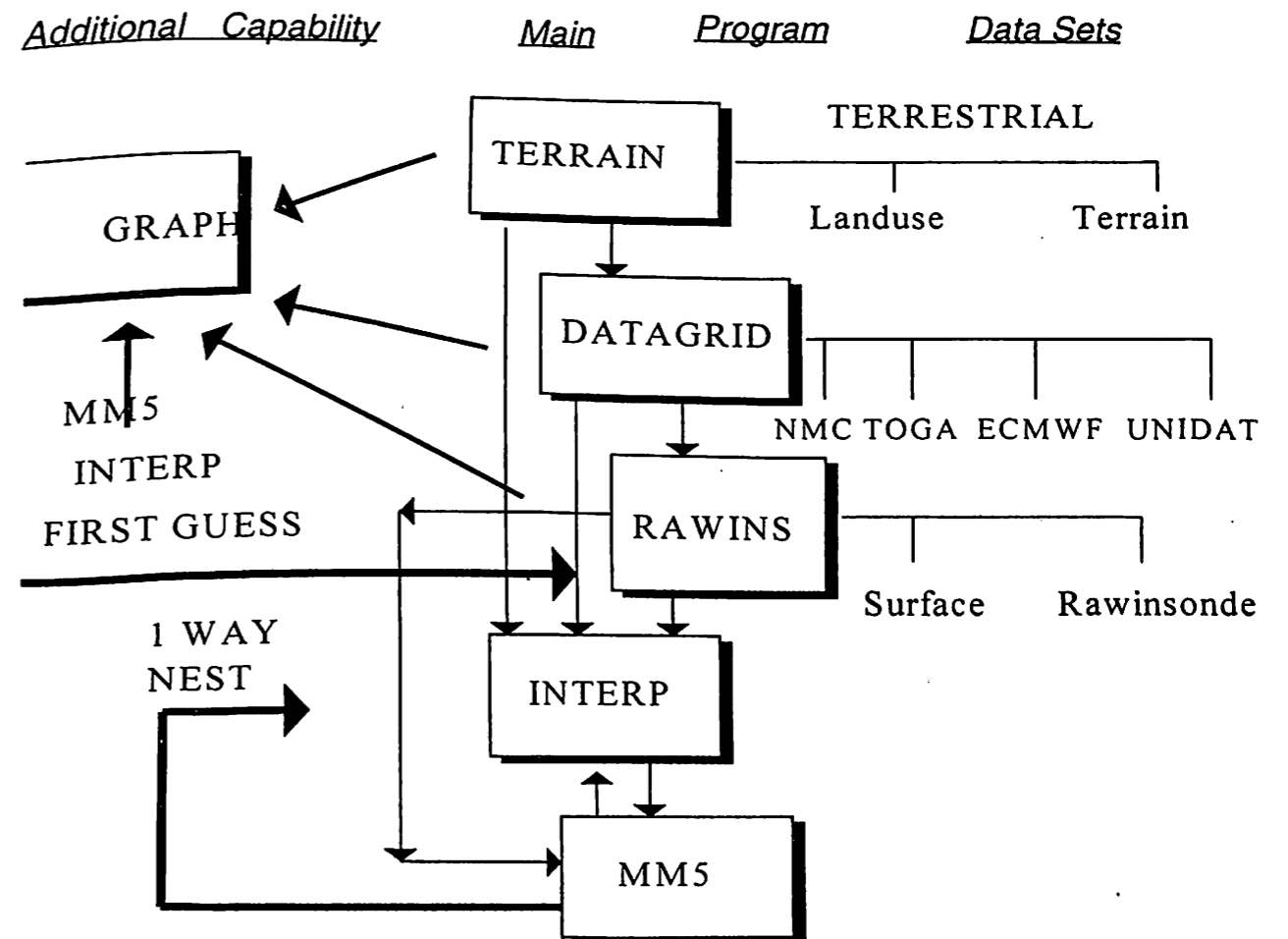


圖 1 MM5 模式系統流程圖

解析度之全球觀測分析資料，如 NMC、EC/TOGA、ECMWF 或 UNIDATA，甚至是中央氣象局所產生的全球分析資料。本實驗中所使用資料為 EC/TOGA 2.5° × 2.5° 經緯網格點資料，以 Datagrid 產生模式中網格初始場。由於 Datagrid 所產生之網格資料是經由低解析度的分析場計算所得，因此對某些中小尺度之天氣現象可能無法充分掌握，因此 MM5 中 Rawins 可用客觀分析將地面及高空觀測資料加入網格資料，以提高模式初始資料對中小尺度現象之解析（但由於觀測資料大部份均位於陸地上，對於改進位於海面上的颱風效果不大，因此本實驗未加入 Rawins 的作用）。最後再經由 Interp 將由 Datagrid 及 Rawins 所產生之資料內差至模式所使用的 σ 座標系統上。前處理系統所產生之初始場內差至 MM5 模式網格系統後，經積分運算所獲得之結果透過後處理系統（post-processing），如 Graph（或 RIP）繪圖軟體將結果加以分析並進行各種氣象場之繪製。

MM5 三度空間巢狀靜力/非靜力中尺度模式為一三維之原始方程模式，而靜力和非靜力模式之差別在於非靜力模式中增加了氣壓擾動場及垂直速度場的預報。由於非靜力模式使用可壓縮流體之連續方程，聲波是被允許存在的，因此需要以分割積分時間來處理（time splitting）（即時間的微分需分成快慢二種不同的過程以增加運算效率與增加穩定度），所以壓力項，動量項以及其間的交互作用項使用較小的時間間隔，而平流、擴散、科氏力及水汽過程則使用較大之時間間隔。另外 MM5 中尺度模式對於不同之大氣物理過程也提供許多不同的參數化選擇，包括降水的物理過程、地表能量收支、地表邊界層的處理和大氣輻射過程。因此使用此模式時，對於不同的天氣現象可以採用適當之物理參數化過程加以模擬。

MM5 所使用的是完整的預報方程式並可

做多層巢狀網格設計。在本實驗中我們以非靜力的數值模式為主。模式中預報的變量有水平風場、溫度、水汽混合比、雲水混合比、雨水混合比以及冰和雪等。至於模式在上邊界部份採用輻射邊界條件（upper radiative boundary condition），允許能量向上傳遞而無反射。在側邊界部份則採用鬆弛逼近的邊界條件（nudging boundary condition），使模式的預報變數接近大尺度的分析場，以減低因邊界反射所造成的誤差。

(二) MM5 的控制方程：

以下介紹非靜力版本之 MM5 模式之控制方程。定義參考狀態及擾動值如下：

$$p(x, y, z, t) = p_0(z) + p'(x, y, z, t)$$

$$T(x, y, z, t) = T_0(z) + T'(x, y, z, t)$$

$$\rho(x, y, z, t) = \rho_0(z) + \rho'(x, y, z, t)$$

垂直座標為 σ 座標， σ 的定義為

$$\sigma = \frac{p_0 - p_i}{p_0 - p_1}$$

其中 p_0 及 p_1 分別為參考狀態之地表及頂層氣壓，其值不隨時間變動。網格點上之總氣壓為

$$p = p^* \sigma + p_1 + p'$$

其中

$$p^*(x, y) = p_0(x, y) - p_1$$

p' 為預報量，表三維之氣壓擾動。

模式使用之方程（Dudhia 1993）如下：

水平動量方程

$$\frac{\partial^* u}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial^* w/m}{\partial y} \right] \frac{\partial^* u \sigma}{\partial \sigma} + u \text{DIV} - \frac{np^*}{\rho} \left[\frac{\partial^* \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma \partial^* \rho'}{\partial x \partial \sigma} \right] + p^* f_v + D_u$$

$$\frac{\partial^* v}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial^* w/m}{\partial x} + \frac{\partial^* w/m}{\partial y} \right] \frac{\partial^* v \sigma}{\partial \sigma} + v \text{DIV} - \frac{np^*}{\rho} \left[\frac{\partial^* \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma \partial^* \rho'}{\partial y \partial \sigma} \right] - p^* f_u + D_v$$

垂直動量方程

$$\frac{\partial^* w}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial^* w/m}{\partial x} + \frac{\partial^* w/m}{\partial y} \right] \frac{\partial^* w \sigma}{\partial \sigma} + w \text{DIV} + p^* g \frac{\rho_0}{\rho} \left[\frac{1}{p^*} \frac{\partial^* \rho'}{\partial \sigma} + \frac{T_v}{T} - \frac{T_0 \rho'}{T \rho_0} \right] - p^* g [(q_c + q_r)] + D_w$$

氣壓方程

$$\frac{\partial^* p}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial^* p/m}{\partial x} + \frac{\partial^* p/m}{\partial y} \right] \frac{\partial^* p \sigma}{\partial \sigma} + p \text{DIV} - m^2 p^* \rho \left[\frac{\partial^* u/m}{\partial x} - \frac{\sigma \partial^* u}{\partial x \partial \sigma} + \frac{\partial^* v/m}{\partial y} - \frac{\sigma \partial^* v}{\partial y \partial \sigma} \right] + \rho_0 g p \frac{\partial^* v}{\partial \sigma} + p^* \rho_0 g w$$

熱力方程

$$\frac{\partial^* T}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial^* v/m}{\partial y} \right] \frac{\partial^* T \sigma}{\partial \sigma} + T \text{DIV} + \frac{1}{\rho c_p} \left[p^* \frac{D_p}{D} - \rho_0 g p^* w - D_p \right] + p^* \frac{\dot{Q}}{c_p} + D_T$$

其中

$$\text{DIV} = m^2 \left[\frac{\partial p^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v/m}{\partial y} \right] + \frac{\partial p^* \sigma}{\partial \sigma}$$

且

$$\dot{\sigma} = -\frac{\rho_0 g}{p^*} w - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v$$

非靜力過程中，不可壓縮之連續方程假設不再成立，因此在 p^* 為常數的情形之下，DIV 代表地表氣壓趨勢，下標 0 表參考值，prime 表擾動值， ρ 為密度， m 為地圖投影比例， Q 表非絕熱加熱作用，次網格亂流項以 D_u 、 D_v 、 D_w 及 D_T 表示，而 g 、 f 、 T_v 、 C_p 及 γ 分別表示重力加速度、科氏參數、虛溫、定壓比熱及定壓比熱和定容比熱之比值， q_c 及 q_r 分別表示雲水和雨水。

(三) 物理過程的處理：

MM5 模式對大氣物理過程提供許多選擇，包括降水物理、地表能量收支、地表邊界層處理和大氣輻射物理過程。為控制非線性不穩定和混淆現象（aliasing），水平擴散採用 $F_{H2a} = p \cdot K_H \nabla^2 \alpha$ 與 $F_{H2a} = p \cdot K_H \nabla^4 \alpha$ 兩種形

式，其中 α 為預報的變量， $K_H = \Delta S^2 K_H$ 為水平擴散係數， ΔS 為格點距離。二階形式用於粗網格範圍接近側邊界格點所組成的行列上，而四階形式則用於內部格點。降水物理過程中包含顯性與隱性處理方式，除網格點上的直接解析方法外還包括次網格積雲參數化。目前可使用的次網格積雲參數化方法有修正過的郭氏積雲參數化法（Anthes, 1977），Arakawa-Schubert（1974），Grell（1993），Fritsch 與 Chappell（1980），Kain 與 Fritsch（1993）和 Betts 與 Miller（1986）。可解析尺度的降水參數化法則有簡單的非對流降水（Asai, 1965），暖降水法（warm-rain, Hsie 與 Anthes, 1984），simple ice（Dudhia, 1989）以及混合法（mixed-phase）（Reisner 等人, 1993）。此外，邊界層亂流交換作用所使用的參數化法有總體空氣動力參數化（bulk-aerodynamic parameterization）法（Deardorff, 1972）與高解析度的邊界層參數化法（Blackadar's PBL model, 1979）。輻射參數化（Dudhia, 1989）則考慮在雲和水汽的日變化情況下處理較複雜的大氣輻射效應。

(四) MM5 模式模擬颱風所遇到的問題：

1. 模式邊界值的問題：

由於模式運算上的需求，積分前須給予模式初始場及邊界條件。邊界條件的處理方式是由 EC/TOGA 資料提供。舉例而言，當模擬 1996 年 7 月 30 日 00UTC 到 1996 年 8 月 01 日 00UTC 的賀伯颱風時，須給予模式同一時段的 EC 資料，MM5 會將 1996 年 07 月 30 日 00 UTC 資料當做初始場，而把 1996 年 07 月 30 日 12UTC 至 08 月 01 日 00UTC，每 12 小時一筆的資料當做模式積分時所需之邊界條件。這種方式僅適用於研究單位，在作業單位，我們可以用以當時最新觀測資料當做初始場，再用全球模式的結果來提供積分所需之邊界條件進行預報。

2.結果：

圖3為未經植入過程，直接以EC/TOGA (2.5°×2.5°)資料進行模擬所產生之初始場。我們可以看到其中心氣壓約為971 mb，且風速最大值也僅達25 ms⁻¹左右，相較於實際觀測值(表一)弱了許多。而圖4則為我們經過植入之後的初始場，其中心氣壓明顯達到929.72 mb，最大風速也增強到50 ms⁻¹左右。

圖5則為颱風中心垂直速度之垂直剖面圖，圖5(a)為未經植入過程之初始場，圖5(b)則為經過植入後的初始場。可見經過植入之後的初始場，其垂直速度明顯增強，且明顯呈現出不對稱的結構。圖6為颱風中心絕對渦度之垂直剖面圖，圖6(a)為未經植入過程之初始場(極大值為4.2×10⁻⁴S⁻¹)，圖6(b)則為經過植入過程之初始場(極大值為2.1×10⁻³S⁻¹)。可見經過植入後的初始場，其絕對渦度明

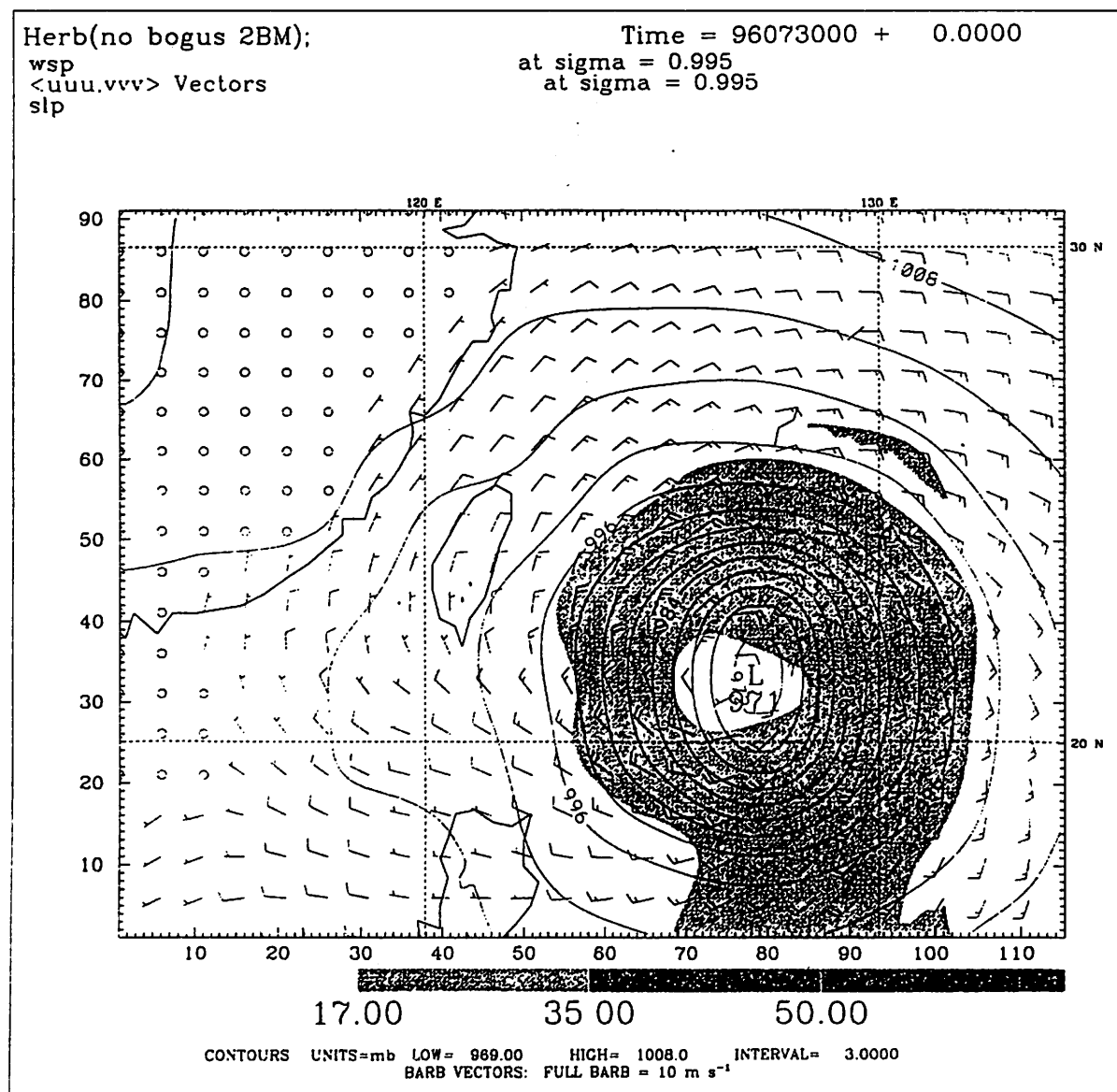


圖3 未經渦旋植入過程，直接以EC/TOGA (2.5°×2.5°)資料進行模擬所產生之海平面氣壓及風場之初始場，陰影區為風速大於17ms⁻¹之區域

表一 賀伯颱風最佳路徑、強度變化及動向資料表(1996)

時間 (UTC)			中心位置 (度)		中心氣壓 (百帕)	移動方向 (DEG)	移動速度 (km/hr)	近中心最大風速 (m/s)		暴風半徑 (km)	
月	日	時	北緯	東經				平均	瞬間	七級風	十級風
7		26 00	20.7	140.8	980	280	31	28	35	180	—
		06	20.8	139.2	975	275	28	30	38	200	—
		12	20.7	137.8	970	265	24	33	43	220	50
		18	20.2	136.8	962	250	20	38	48	250	100
		27 00	19.6	135.6	950	240	24	43	53	250	120
		06	19.4	134.6	925	255	19	51	63	300	150
		12	19.0	134.0	920	235	13	51	63	300	150
		18	18.8	133.1	920	255	17	53	65	300	150
		7 28 00	18.6	132.4	920	255	13	53	65	300	150
		06	18.4	131.8	920	250	11	53	65	300	150
		12	18.3	131.0	920	265	15	53	65	300	150
		18	18.3	130.4	920	270	11	53	65	300	150
		29 00	18.6	130.0	920	310	9	53	65	350	150
		06	19.3	129.4	920	315	17	53	65	350	150
		12	19.8	128.7	920	310	15	53	65	350	150
		18	20.3	128.2	930	315	13	53	65	350	150
		7 30 00	21.0	127.9	930	330	15	53	65	350	150
		06	21.9	127.2	930	330	20	53	65	350	150
		12	22.4	126.4	930	315	17	53	65	350	150
		18	23.2	125.9	930	320	17	53	65	350	150
		31 00	23.9	124.7	930	305	24	53	65	350	150
		06	24.1	123.8	930	290	15	53	65	350	150
		12	24.9	122.4	930	300	28	53	65	350	150
		18	24.9	121.1	950	270	22	45	60	300	100
8	1	00	25.3	120.3	965	300	15	40	53	300	100
		06	25.9	118.9	968	295	26	38	48	300	100
		12	26.3	117.4	972	280	26	33	43	300	100
		18	26.6	116.0	980	290	24	23	33	200	—
		2 00	27.2	115.2	990	310	17	20	28	200	—
		06	27.5	114.2	990	290	17	20	28	180	—

顯較強。圖7為位溫剖面，顯示植入動作使颱風中心的暖心結構增強。圖8則顯示植入動作也明顯使得颱風中心附近出現較大之水汽梯度。

由上述比較大致得知：渦旋植入是相當技術性的過程，在改善模式的初始場資料上，確實有不錯的效果，不但使模式初始場更接近觀

測值，也使模式較能掌握颱風內部許多中小尺度現象。另外初步研究亦顯示初始化過程對於颱風的模擬有很大之影響，如何改進颱風之初始化方法將是我們未來研究的重點。有關進一步的模擬結果分析，將在未來另外撰文探討。

四、結語

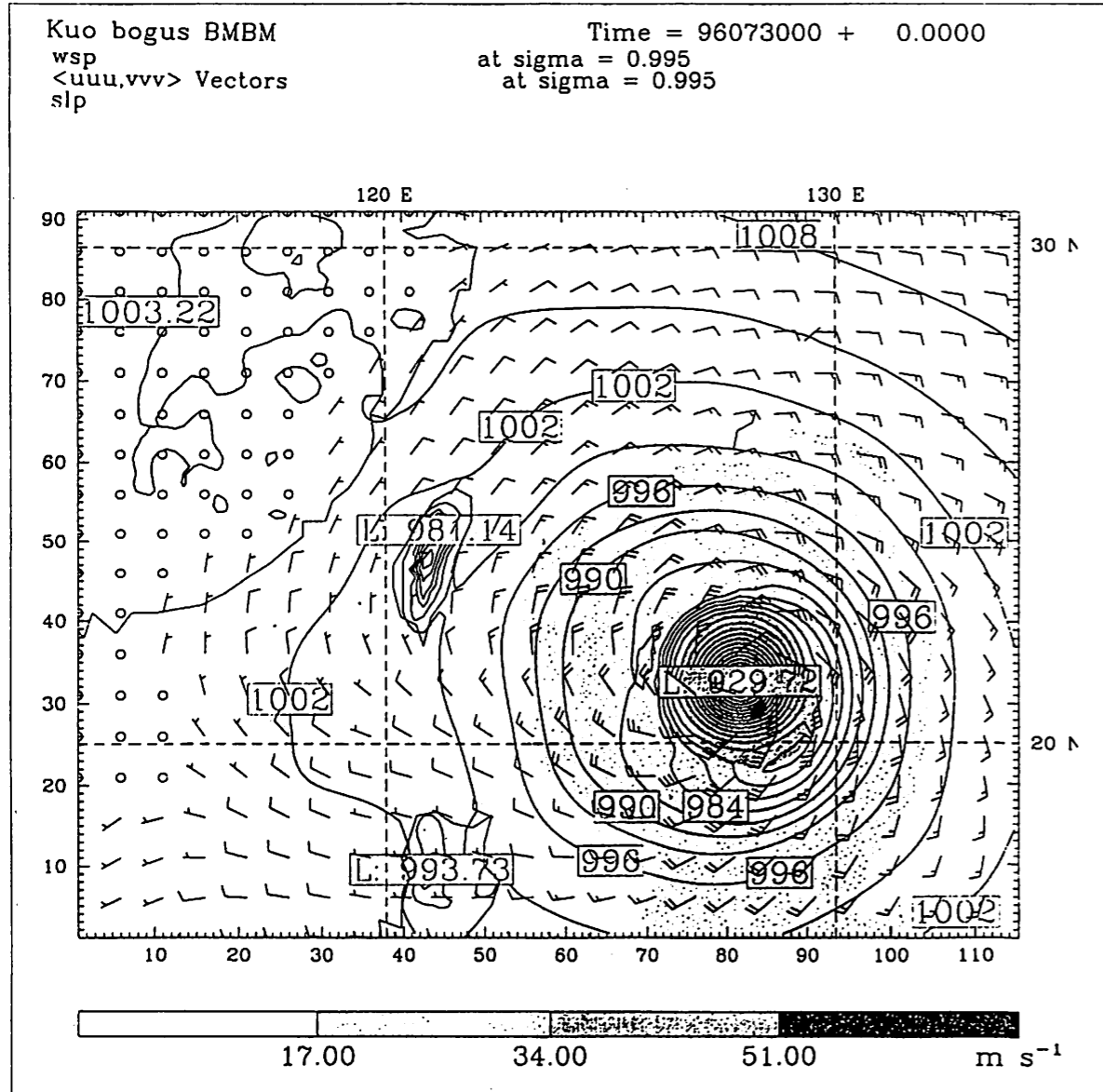


圖4 經過渦旋植入過程之後的海平面氣壓及風場之初始場，陰影區為風速大於17ms⁻¹、35ms⁻¹、51ms⁻¹之區域。

本文簡單地介紹有關 MMS 模式，以及 MMS 模式模擬颱風所會遇到的一些初始場的問題，及目前模式處理此初始場問題的解決方法（渦旋植入法）。這些都是從事數值模式模擬颱風時常見的問題。對於台灣地區颱風預報的問題，首要工作在於瞭解颱風環流動力、颱風與地形之間的交互關係、與中尺度風場和降雨分佈（Wu and Kuo, 1999）。西太平洋氣象資料的缺乏以及台灣中央山脈地形與颱風環

流間強烈的交互作用這兩個問題仍是台灣預報颱風之最大瓶頸與挑戰。如何有效結合觀測資料與數值模式，以增強我們對於地形與颱風交互作用動力過程之瞭解，進而改進颱風預報，將是台灣地區颱風研究的重要方向。

參考文獻

黃葳芃、吳俊傑，1999：芙蘿颱風（1990）的數值模擬研究。第六屆全國大氣科學學

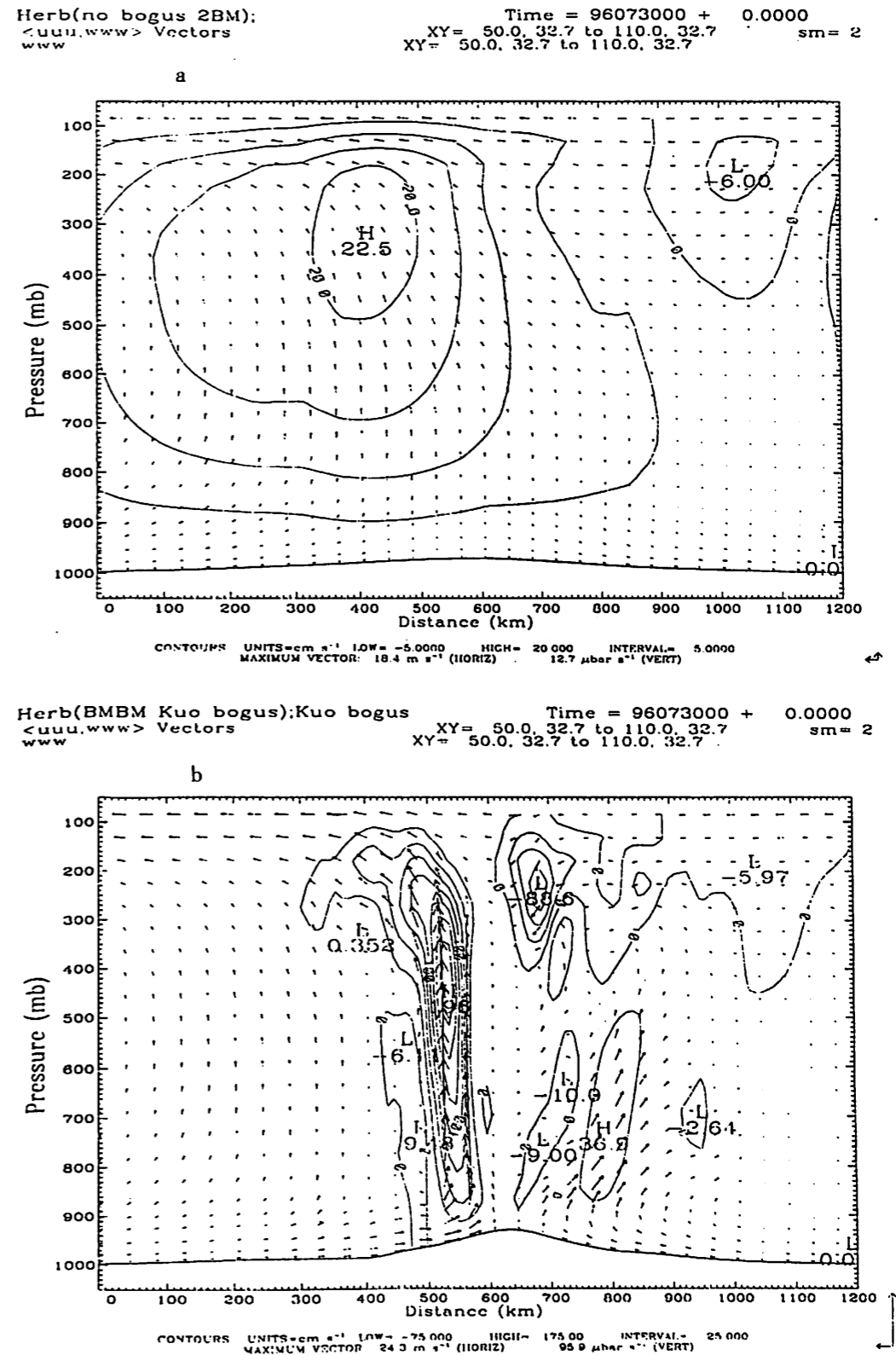
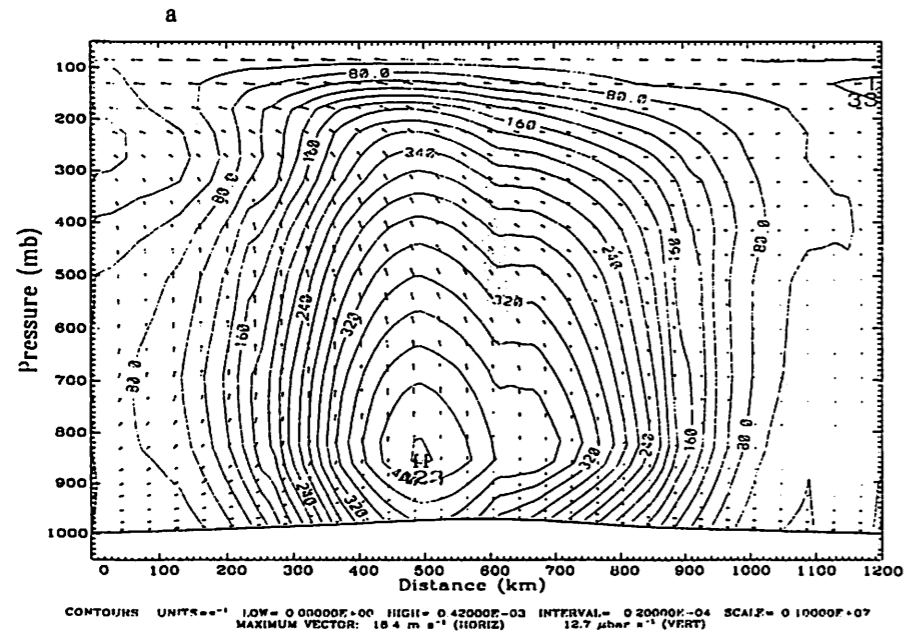
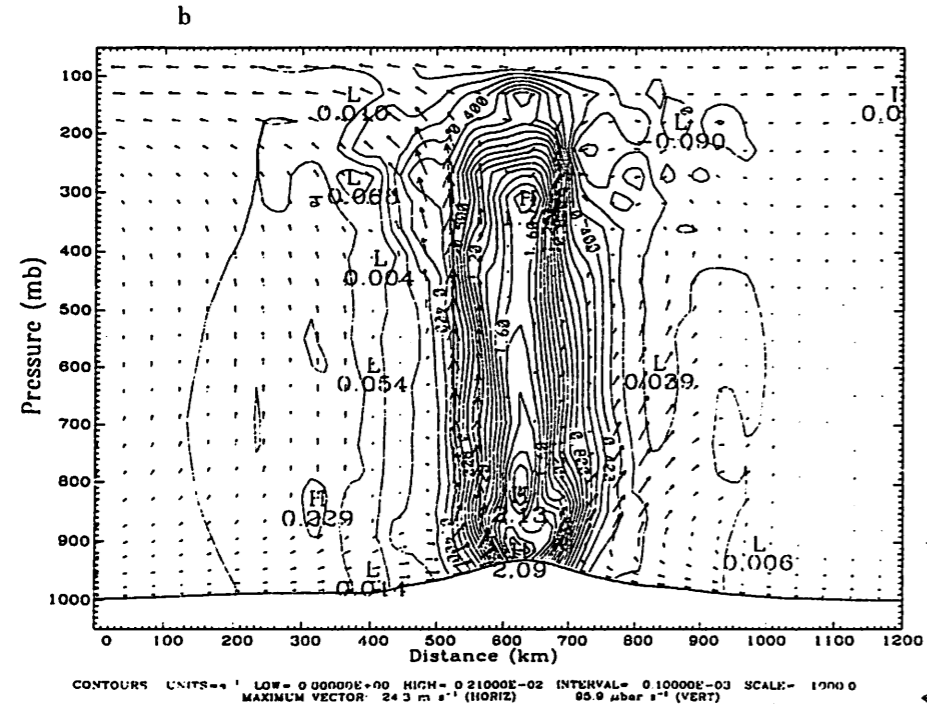


圖5 為通過颱風中心垂直速度之垂直剖面圖，圖5(a)為未經植入過程之模擬，圖5(b)則為經過渦旋植入過程之模擬初始場。

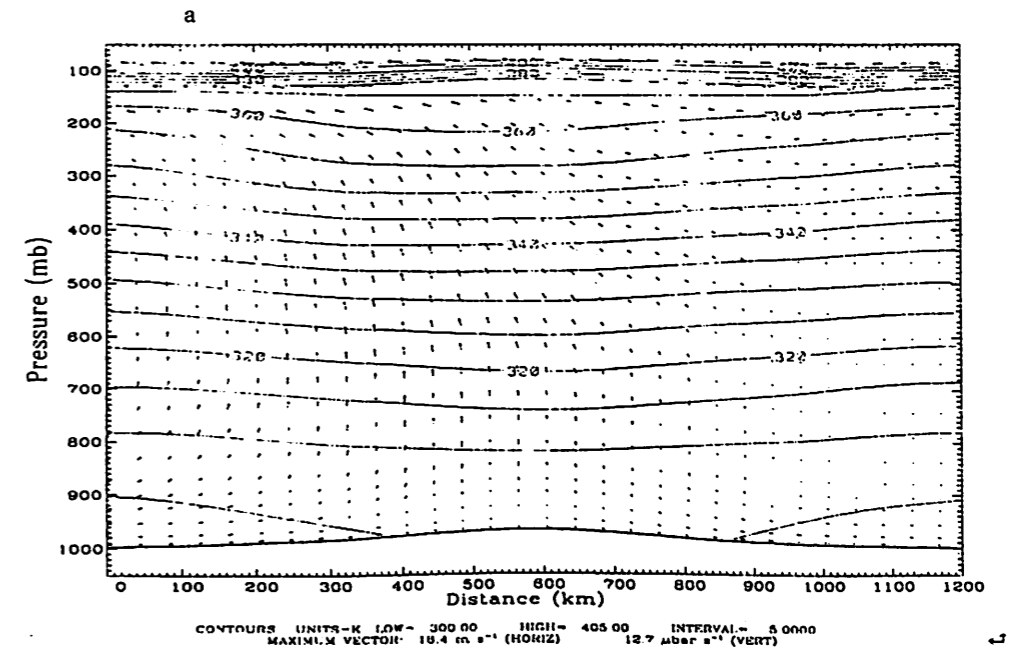
Herb(no bogus 2BM):
 <uuu.www> Vectors
 avo
 Time = 96073000 + 0.0000
 XY= 50.0, 32.7 to 110.0, 32.7 sm= 2
 XY= 50.0, 32.7 to 110.0, 32.7



Herb(BMBM Kuo bogus):Kuo bogus
 <uuu.www> Vectors
 avo
 Time = 96073000 + 0.0000
 XY= 50.0, 32.7 to 110.0, 32.7 sm= 2
 XY= 50.0, 32.7 to 110.0, 32.7



Herb(no bogus 2BM):
 <uuu.www> Vectors
 the
 Time = 96073000 + 0.0000
 XY= 50.0, 32.7 to 110.0, 32.7 sm= 2
 XY= 50.0, 32.7 to 110.0, 32.7



Herb(BMBM Kuo bogus):Kuo bogus
 <uuu.www> Vectors
 the
 Time = 96073000 + 0.0000
 XY= 50.0, 32.7 to 110.0, 32.7 sm= 2
 XY= 50.0, 32.7 to 110.0, 32.7

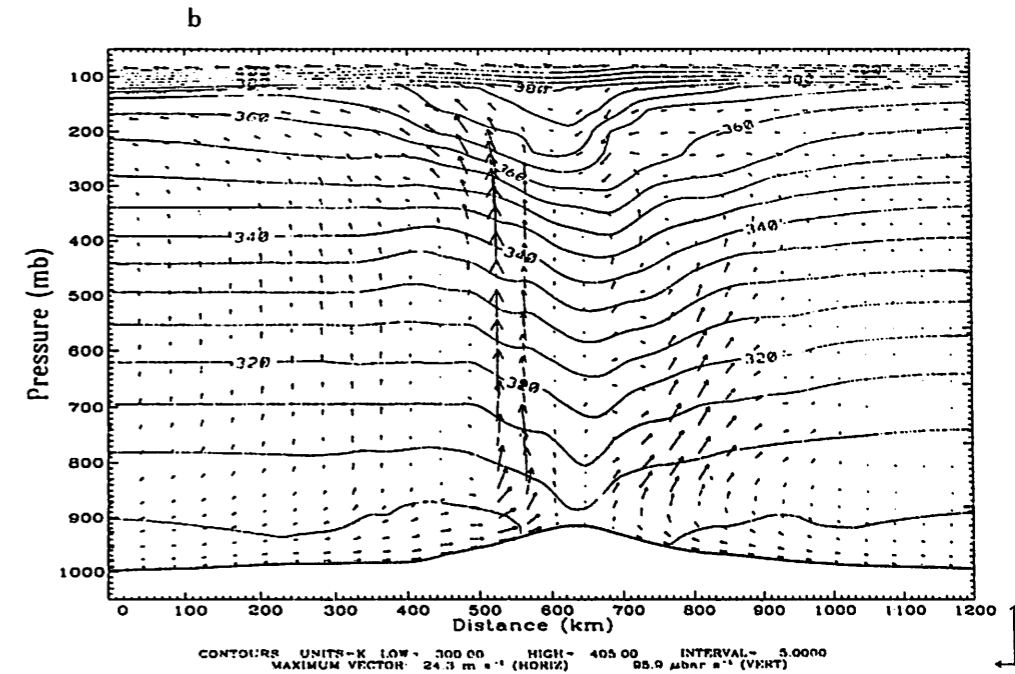


圖 6 為通過颱風中心絕對渦度之垂直剖面圖，圖 6(a)為未經植入過程之模擬（極大值為 $4.2 \times 10^{-4} S^{-1}$ ），而圖 6(b)則為經過植入過程之模擬初始場（極大值為 $2.1 \times 10^{-3} S^{-1}$ ）。

圖 7 為通過颱風中心位溫之垂直剖面圖，圖 7(a)為未經植入過程之模擬，圖 7(b)則為經過渦旋植入過程之模擬初始場。

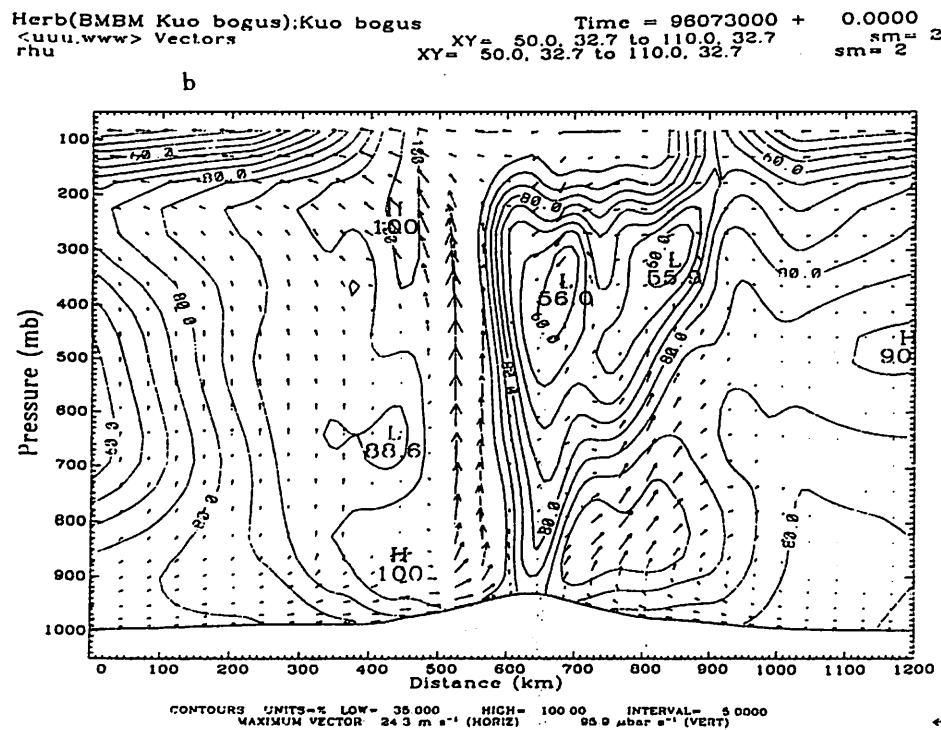
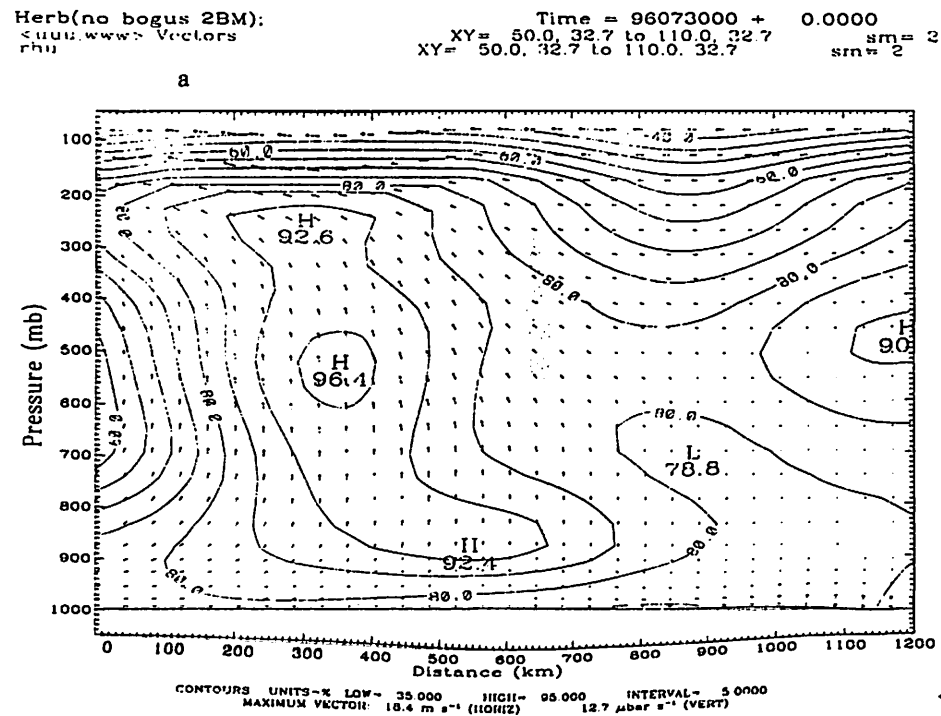


圖 8 為通過颱風中心水汽之垂直剖面圖，圖 8(a)為未經植入過程之模擬，圖 8(b)則為經過渦旋植入過程之模擬初始場。

術研討會論文彙編。175-180。

黃葳芃，1999：芙蘿颱風(1990)的數值模擬研究。台灣大學大氣科學研究所，碩士論文。

葉天降、吳石吉、謝信良，1998：台灣附近颱風路徑預報校驗與統計方法之應用。大氣科學，第26期3號，227-248。

吳俊傑、顏自雄，1999：賀伯颱風(1996)之MM5數值模擬。第六屆全國大氣科學學術研討會論文彙編，155-160。

Anthes, R., 1972: Development of asymmetries in a three-dimensional numerical model of the tropical cyclone. Mon. Wea. Rev., 100, 461-476。

Anthes, R. A., and T. T. Warner, 1978: Development of hydro-dynamical models suitable for air pollution and other mesometeological studies. Mon. Wea. Rev., 106, 1045-1078。

Anthes, R. A., 1977: A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimension cloud model. Mon. Wea. Rev., 105, 270-286。

Arakawa, A., and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large scale environment. Part I. J. Atmos. Sci., 31, 674-701。

Asai, T., 1965: A numerical study of the air-mass transformation over the Japan Sea in Winter. J. Meteor. Soc. Japan, 43, 1-15。

Blackadar, A. K., 1979: High resolution models of the planetary boundary layer. Advances in Environmental Science and Engineering, Vol. 1, No. 1, J. Pfafflin and E. Ziegler, Eds., Gordon and Breach, 50-85。

Bender, M. A., R. E. Tuleya, and Y. Kurihara, 1987: A numerical study of the effect of island terrain on tropical cyclones. Mon. Wea. Rev., 115, 130-155。

Betts, A. K., and M. J. Miller, 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and Arctic air-mass data sets. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 112, 693-709。

Chen, X. A., S. Low-Nam, and Y.-H. Kuo., 1996: On the initialization of typhoon in a mesoscale model (personal communication)。

Deardorff, J. W., 1972: Parameterization of the planetary boundary layer for use in general circulation models. Mon. Wea. Rev., 100, 93-106。

Dudhiam, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale twodimensional model. J. Atmos. Sci., 46, 3077-3107。

_____, 1993: A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. Mon. Wea. Rev., 121, 1493-1513。

Elsberry, R. L., 1995: Tropical cyclone motion. Chapter 4, Global Perspectives On Tropical Cyclones. Technical Document Report No. TCP-38, WMO, 106-197。

Fritsch, J. M., and C. F. Chappell, 1980: Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. J. Atmos. Sci., 37, 1722-1733。

Grell, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization.

- Mon. Wea. Rev. 121, 764 - 787 °
- Jones, R. W., 1977: A nested grid for a three - dimensional model of tropical cyclone. J. Atmos. Sci., 34, 1528 - 1533 °
- Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain - Fritsch in numerical models, K. A. Emanuel and D. J. Raymond, Eds., Amer. Meteor. Soc., 246 pp °
- Kurihara, Y., and M. A. Bender, 1982: Structure and analysis of the eye of a numerically simulated tropical cyclone. J. Meteor. Soc. Japan, 60, 381 - 395 °
- _____, _____, and R. J. Ross, 1993: An initialization scheme of hurricane models by cortex specification. Mon. Wea. Rev., 121, 2030 - 2045 °
- _____, _____, R. E. Tuleya, and R. J. Ross, 1998: The GEDL hurricane prediction system and its performance in the 1995 hurricane season. Mon. Wea. Rev., 126, 1306 - 1322 °
- _____, _____, _____, and _____, 1995: Improvements in the GFDL hurricane prediction system. Mon. Wea. Rev., 123, 2791 - 2801 °
- Kuo, Y. H., and W. Wang, 1997: Rainfall prediction of Typhoon HERB with a mesoscale model. Proc., Workshop on Typhoon Research in the Taiwan Area. Boulder, CO., National Science Council, 35 - 45 °
- Liu, Y., D. - L. Zhang, M. K. Yau, 1997: A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification. Amer. Meteor. Soc., 125, 3073 - 3093 °
- Lord, S. J., H. E. Willoughby, and J. M. Piotrowicz, 1984: Role of a parameterized ice - phase microphysics in an axisymmetric, nonhydrostatic tropical cyclone model. J. Atmos. Sci., 41, 2836 - 2848 °
- Reisner, J., R. T. Brintjes, and R. M. Rasmussen, 1993: Preliminary comparisons between MM5 NCAR/Penn State Model generated icing forecasts and observations. Preprints, 5th Int'l Conf. on Aviation Weather Systems, Vienna, VA, 2 - 6 August, Amer. Meteor. Soc., Boston, 65 - 69 °
- Tripoli, G. J., 1992: An explicit three - dimensional nonhydrostatic numerical simulation of a tropical cyclone. Meteor. Atmos. Phys., 49, 229 - 254 °
- Willoughby, H. E., H. L. Jin, S. J. Lord, and J. M. Piotrowicz, 1984: Hurricane structure and evolution as simulated by an axisymmetric, non - hydrostatic numerical model. J. Atmos. Sci., 41, 1169 - 1186 °
- Wu, C. - C., M. A. Bender, and Y. Kurihara, 1999: On the performance of the GFDL Hurricane Prediction System in the western North Pacific and a comparison using the NOGAPS and AVN global analysis. Weather and Forecasting (in revision) °
- _____, and Y. H. Kuo, 1999: Typhoons affecting Taiwan - current understanding and future challenges. Bulletin of Amer. Meteor. Soc., 80, 67 - 80 °
- Zou, X., and Q. Xiao, 1999: Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. Submitted to J. Atmos. Soc. °