

中央氣象局全球預報模式植入平衡渦旋之路徑預報

陳建河 賴姿伶

中央氣象局氣象科技研究中心

摘要

利用颱風觀測報告數據，如颱風中心現在位置、中心氣壓值、近中心最大風速、七級風暴風半徑等僅有資訊，用疊代法求取 Ring King vortex 公式中之參數如近中心最大風速距離(rvm)及外圍風速曲率(b)，其基本作法是以 Ring King vortex 公式計算颱風的水平風場，以此風場帶入非線性平衡方程並配合靜力方程而得到颱風中心氣壓估計值，再與實際觀測報告之颱風中心氣壓及七級風暴風半徑相比較來修正 rvm 及 b 值，經過重複的計算與比較以求得做近似之 rvm 及 b 值。如此，用來計算颱風水平風場結構的 Ring King vortex 公式中的各個參數均用實際的觀測報告來決定。最後，颱風環流的風場是由渦度場（由 Ring King vortex 決定）加上環境的渦度場與輻散場所反演的風場而得，而相對應的高度場、溫度場及海平面氣壓場是解非線性平衡方程及靜力方程而得。至於 σ 面上的垂直結構，則假設颱風是相當正壓結構，設定渦度隨高度遞減，至於植入颱風至何種高度則參考實際觀測的颱風強度（強、中、弱）來決定。

在渦旋植入之前，要先移除初始場的颱風環流以取得環境的風場，移除的方法是在模式的波譜空間，依颱風的強度不同，對溫度場、渦度場、輻散場及海平面氣壓場以 Lanczos filter 做不同次數的修勻，至於植入或移除颱風的範圍是以初始場中的颱風中心向外尋找其渦度值小於

$1.0e-5$ 的距離為颱風的大小。

以中央氣象局 T120 全球預報模式為工具，直接在預報模式垂直 30 層的 σ 面上植入渦旋，以 Imbudo(2003)颱風為例，從模式初始化(nonlinear normal mode initialization)的結果顯示模式並不會強烈排斥植入的颱風環流。同樣方式亦分別對 dujuan(2003)與 maemi(2003)颱風進行測試。由模式 72 小時路徑預報顯示，此方式與原有的植入方法（將植入颱風當作觀測資料去分析）相比較，顯示本植入方法的確對颱風路徑的預報有所改進。

關鍵詞：全球預報模式、渦旋植入

一、前言

目前人為植入颱風的方式大概有兩種，一種是將颱風直接植入預報模式中如 GFDL 模式，另一種方式是將植入的颱風以觀測資料的形式經由模式的分析模組來植入，例如中央氣象局全球波譜預報模式（簡稱 CWBGFS）。在 2003 年 6 月以前，CWBGFS 使用最佳內差分析方法(optimal interpolation method 簡稱 OI)，而 2003 年 6 月以後則使用 3 維變分分析方法(3 dimensional variational analysis method 簡稱 3-D VAR)來植入颱風。根據 Kurihara et al (1973) 對 GFDL 模式植入颱風的測試結果顯示，一個良好的人為植入方法能夠使預報模式很容易接受所植入的颱風，並且可以避免產生初始場的調整及錯誤的 sipping up 問題，進而降低預報模式對於颱風路徑的預報誤差及有助於颱風

強度改變的預報。葉等(1999)使用 CWB TFS 模式，以改變人為加入颱風之大小、強弱、最大風速所在半徑、中心位置等颱風初始場參數及不同大尺度場、不同模式垂直加熱分佈等 13 種不同處理，來研究模式預測路徑對初始場改變的敏感性，結果顯示，這些初始場參數之改變都對模式預測路徑有相當明顯的影響；另外，所使用的濾波方法如未能有效的去除初始場所含不完整之颱風環流時，也可能使模式颱風的路徑預測誤差增大。因此，一個好的人為植入颱風方法不僅僅要能夠正確地表示實際颱風的結構，而也還要能與預報模式具有一致性，才能準確地掌握颱風的各種動態。

作業中的 CWB GFS 其水平解析度為 T120， σ 垂直解析度有 30 層，2003 年 6 月之前，使用 OI 分析方法，是在 16 層的標準等壓面上進行分析，之後再內差至 σ 面上，而目前的 3-D VAR 分析是在 σ 面上直接分析，兩者有很大的不同，根據測試的結果，整體而言，3-D VAR 分析比 OI 分析更具有良好的預報成績。就 CWB GFS 對於颱風的預報而言，目前是將所計算出的人為颱風（在網格點上）當成觀測資料，經由分析模組植入颱風。我們嘗試以直接植入預報模式的方式，將颱風植入於預報模式的 σ 分析面上。在想法上，我們希望用來計算颱風水平風場結構的 Ring King vortex 公式中的各個參數均能夠用實際的觀測報告來決定，同時，人為植入颱風的風場與質量場之間能夠滿足非線性平衡條件，同時質量場之間（高度場、溫度場、海平面氣象場）亦滿足靜力平衡關係，如此不僅要能夠正確地表示實際颱風的結構，而且能夠與預報模式具有一致性，不會因為質量場與風

場之間的不平衡而使模式的預報產生重力波造成嚴重的不穩定 (instability) 現象。

本文共分四節，第一節為前言，簡單介紹人為植入颱風的背景及我們的想法，第二節將詳細介紹我們所用的人為植入颱風方法，第三節則敘述使用該方法於本局全球預報模式 (GFS) 的測試結果（以 Imbudo(2003)、maemi(2003)、dujuan(2003) 颱風為例，最後第四節為結論。

二、植入方法介紹

在移除或植入颱風之前，必須要先決定初始場颱風環流的大小 (r_0)，以實際颱風觀測報告的颱風位置為中心，尋找 ± 8 度範圍內渦度值最大的位置，如果該渦度值小於 $1.0e^{-4}s^{-1}$ ，我們認為初始場並沒有颱風的環流存在，此種情況下，設定 $r_0 = 3.5r_7$ (r_7 : 實際觀測之七級風暴風半徑)，如果颱風的環流存在，則以颱風中心向外尋找 $1.0e^{-5}s^{-1}$ (Liu and Chan, 1999) 的距離的 1.5 倍為 r_0 。找到 r_0 之後，接著就要：

(一) 移除颱風

為了得到代表環境的氣流場，必須要把初始場的颱風環流過濾掉，使用的方法是在波譜空間上，使用 Lanczos filter (1956)

$$X_R = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^M \sigma_n X_n^m P_n^m(\mu) e^{im\lambda} \quad (1)$$

其中

$$\sigma_n = \frac{\sin(n\pi/M)}{n\pi/M}$$

X_R : 任意變數

X_n^m : 任意變數的波譜係數

依照觀測報告上的颱風強弱，對初始場的渦度、溫度、海平面氣壓做不同

程度的修勻。為了將颱風環流區域獨立出來，以下式為全重函數：

$$W(r, \gamma) = \begin{cases} 1 & \text{for } r=0 \\ 1 - \exp\left[\frac{\gamma}{r} \exp\left(\frac{1}{r-1}\right)\right] & \text{for } 0 < r < r_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\gamma=30$ ，與原初始場 (X) 合成而得最後的環境場 (X_E)，即

$$X_E = (1 - W(r, \gamma))X + W(r, \gamma)X_R \quad (3)$$

(二) 植入颱風

以 ring king vortex 公式：

$$V(r) = V_m \left(\frac{r}{r_m}\right) \exp\left\{\frac{1}{b} \left[1 - \left(\frac{r}{r_m}\right)^b\right]\right\} \quad (4)$$

其中

V_m ：最大風風速

b ：外圍風速曲率

來表示颱風的水平風場，(4) 式中參數 r_m 及 b 從實際的颱風觀測報告中所沒有，我們利用觀測報告中的颱風中心氣壓 (P_{dp}) 及七級風暴

風半徑 (r_7) 來決定，先假定

$r_m = 1$ 個網格點距距離去計算

$V(r)$ ，之後再解非線性平衡方程

(Holton, 1992)：

$$\nabla^2 \left[\phi \frac{1}{2} (\nabla \psi)^2 \right] = \nabla \cdot [(f + \nabla^2 \psi) \nabla \psi] \quad (5)$$

其中

ϕ ：geopotential

f ：coriolice parameter

ψ ：stream function

得到 ϕ 之後利用靜力方程 (Kurihara et. al. 1993)：

$$\ln P_s \approx \ln P_s - \frac{\phi_*}{RT_a} \quad (6)$$

其中

$\phi_* : \phi$ at $\sigma = 30$

P_s ：颱風中心氣壓估計值

P_s ：相對應於 ϕ 的氣壓估計值

T_a ：海溫

R ：氣體常數

如果 $P_s > P_{dp}$ (實際颱風觀測之中心氣壓值) 則

$$r_m = r_m + 1$$

$$P_s = P_s - 1$$

重複 (4)、(5)、(6) 式之計算，直到 $P_s \approx P_{dp}$ 為止，如此最大風速半徑 (r_m)

及風速曲率 (b) 就可以由觀測報告所提供的資訊來決定，而不是使用主觀的猜測值。

最後，颱風的環流風場以 (4) 得到 (此時 (4) 式的所有參數均已知)，渦度場則由風場計算得來。

至於颱風環流的垂直結構，假設颱風是相當正壓結構，其渦度隨高度遞減，垂直 σ 層上的全重 (從第 30 曾至第 20 層) 分別為 0.981、0.9805、0.979、0.977、0.974、0.97、0.965、0.96、0.95、0.94、0.89、0.85、0.81、0.77、0.73、0.67、0.58、0.4、0.3、0.2，第 1 至 9 層設為 0。

我們以颱風觀測報告為參考依據，對於強、中、弱的颱風，有不同的植入高度。計算出各層渦度值之後，反演渦度得到各層風場分佈，在 σ 座標係中，從 30-12 層，利用全重函數對全區域加入前六小時風速值，方式如下：

$\bar{V} = \bar{V} * (1 - W) + (\bar{V} + \bar{V}_6) * W$

\bar{V} ：植入颱風後，由渦度反演的風速值

\bar{V}_6 ：前六小時觀測風速

W ：全重函數

高度場則同樣是以 (5) 式計算得來。因為是在 σ 層上植入颱風，因此必須要先決定地面氣壓場 (terrian pressure)，才能由靜力方程式

$\frac{\partial \theta}{\partial P} = -C_p \theta$ (8)

其中 $P = (p/p_0)^{\kappa}$ ，得到溫度場。因此

先以(6)式決定地面氣壓場之後在以(8)式得到溫度場。至於水汽場的植入是以同樣的方式但用不同的權重函數，分別是 1.0、0.995、0.99、0.985、0.98、0.975、0.97、0.96、0.95、0.94、0.9、0.85、0.8、0.75、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2。

三、模擬結果

圖 1a 是 Imbudo 颱風從 19 日 00z 至 22 日 12 日共 8 個個案的 72 小時路徑預報圖，紅色線為颱風的實際路徑，紫色線為控制組(即作業模式之預報)之路徑預報，藍色線為人為植入颱風之路徑預報，圖上顯示，對於這個颱風而言，模式都有偏北的誤差，但是就路徑方向而言，本方法要比作業版來的好一些，圖 1b 是作業版 GFS、GFS 植入颱風、舊版 TFS、新版 TFS 就這 8 個個案的路徑平均誤差值比較，圖上顯示新版 TFS 的誤差值最小(72 小時預報誤差在 400 公里以下)、舊版本 TFS 次之、第三是本方法、最後是作業版 GFS。圖 2、圖 3 分別為杜鵑及柯羅旺颱風的模擬結果。對杜鵑颱風而言，本方法與作業版的路徑預報結果都相當的接近(圖 2a)，路徑誤差值(圖 2b)也顯示本方法的誤差值最小(24、48 小時的誤差都在 200 公里以下，72 小時的誤差也在 300 公里左右)，而 TFS 對這個個案的預報誤差最大。對柯羅旺颱風而言，由於颱風太弱，作業版無法顯示其路徑預報，而本方法在前面 2 個預報有嚴重偏北的誤差(圖 3a)，但隨後的幾個個案預報就有顯著的改進，24、48、72 小時的路徑預報誤差都在 200 公里左右，顯然優於其他模式。由此三個颱風路徑測試結果，此人為植入颱風方式不僅不會破壞颱風結構，對路徑預報上亦有所改善。

植入颱風的結構不但與實際觀測接近，本植入方法更重要的是風場與質量場滿足平衡條件，以 imbudo、dujuan、krovanh 颱風為例，從非線性初始化(nnmi)後的海平面氣壓場與溫度場與風場的垂直結構及各等壓面的渦度場及風場分布圖，nnmi 方式並沒有排斥所植入的颱風。

四、結論及討論

利用颱風觀測報告數據，如颱風中心現在位置、中心氣壓值、近中心最大風速、七級風暴風半徑等僅有資訊，用疊代法求取 Ring King vortex 公式中之參數如近中心最大風速距離(rvm)及外圍風速曲率(b)，基本作法是以 Ring King vortex 公式計算颱風的水平風場，以此風場帶入非線性平衡方程並配合靜力方程而得到颱風中心氣壓估計值，再與實際觀測報告之颱風中心氣壓及七級風暴風半徑相比較來修正 rvm 及 b 值，經過重複的計算與比較以求得做近似之 rvm 及 b 值。如此，用來計算颱風水平風場結構的 Ring King vortex 公式中的各個參數均用實際的觀測報告來決定。至於 σ 面上的垂直結構，則假設颱風是相當正壓結構，設定渦度隨高度遞減，至於植入颱風至何種高度則參考實際觀測的颱風強度(強、中、弱)來決定。決定各層渦度直之後，反演各層渦度場(由 Ring King vortex 決定)會得到各層風場，再加入前六小時風場，計算出人為植入颱風之環流風場值。最後，模式所需之相對應的高度場、溫度場及海平面氣壓場是解非線性平衡方程及靜力方程而得。

植入颱風的結構不但與實際觀測接近，同時風場與質量場滿足梯度風平

衡，溫度場與高度場及地面氣壓場均滿足靜力平衡，非線性初始化 (nnmi) 並沒有排斥所植入的颱風，可以從預報模式的平均地面氣壓擾動隨時間分布很清楚地顯示出來，從個案顯示 72 小時的颱風路徑預報與原有的植入方法相比較，顯示本植入方法的確對颱風路徑的預報皆有所改進，尤其在前 24 小時更顯示出此模式對路徑預報之改進。

在植入颱風之前，要先移除初始場的颱風環流以取得環境的風場，移除的方法是在模式的波譜空間上，依颱風的強度不同，對溫度場、渦度場、輻散場及海平面氣壓場以 Lanczos filter 做不同次數的修勻，我們發現此種濾波方式會造成相位偏差問題，會影響到模式的路徑預報，未來濾波方式可能使用差值 (difference value) 來處理 (Kurihara et al 1993)。另外，由於模式的解析度為 t120，相當於 100km 的解析度，對於颱風的解析程度並不是很好，例如，颱風觀測報告中的 7 級風暴風半徑為 250km 而言，只有 2.5 個網格而已，如果主觀的選用 1 個網格間距 (100km) 作為最大風速半徑植入颱風，也與實際情況相差甚遠，因此本方法中使用相當多的主觀參數，例如颱風範圍大小決定之後，乘以 1.6 倍作為移除與植入颱風的範圍，我們認為當模式的解析度提高至 t180 時 (約 60km 解析度) 會獲得相當程度的改進。

五、參考文獻

葉天降、黃康寧、陳德松，1999：颱風模式初始場不確定性對路徑預測影響初步研究。大氣科學，27，215-233
Hawkins, H. W., and D. T. Rubsam, 1968:

Hurricane Hilda, 1964. II. Structure and budgets of the hurricane on October 1 1964. Mon. Wea. Rev., 96, 617-636.

Kurihara, Y., M. A. Bender, R. J. Ross, 1993: An initialization scheme of hurricane model by vortex specification. Mon. Wea. Rev., 121, 2030-2045.

Liu, K. S., Johnny C. L. Chan, 1999: Size of tropical cyclone as inferred from ERS-1 And ERS-2 data. Mon. Wea. Rev., 127, 2992-3001.

六、致謝

本文在中央氣象局氣象科技研究中心支持下完成，特別感謝馮欽賜科長、陳雯美助理研究員之協助資料及作業模式提供。

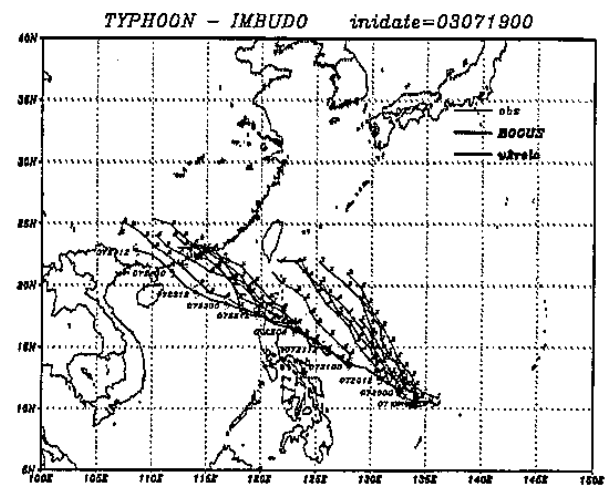


圖 1a：IMBUDO 颱風之路徑預報圖，紅色線為實際路徑，藍色線為植入颱風路徑預報，紫色線為作業版之路徑預報。個案時間為 071900Z 至 072200Z 每隔 12 小時共 8 個個案之模擬。

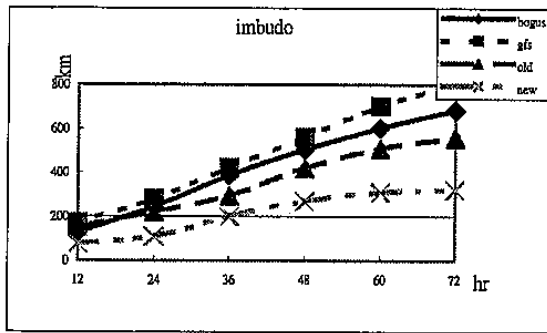


圖 1b：不同模式對 IMBUDO 颱風之路徑預報誤差比較，紅色方塊線為作業版 GFS，綠色菱形線為植入颱風 GFS，藍色三角形線舊版本 TFS，橘色 X 線為新版 TFS。個案時間為 071900Z 至 072200Z 每隔 12 小時共 8 個個案模擬之平均誤差值。

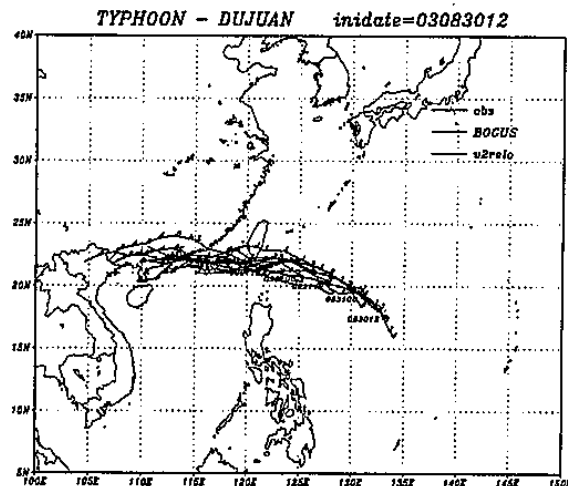


圖 2a：DUJUAN 颱風之路徑預報圖，紅色線為實際路徑，藍色線為植入颱風路徑預報，紫色線為作業版之路路徑預報。個案時間為 083012Z 至 090100Z 每隔 12 小時共 6 個個案之模擬。

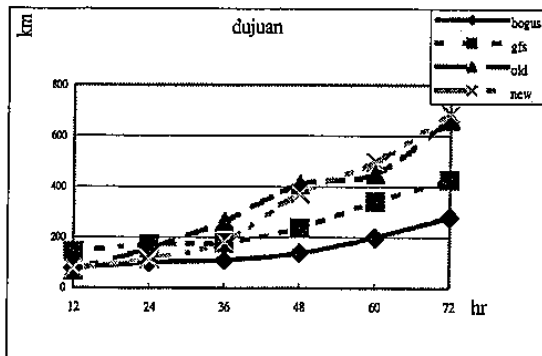


圖 2b：不同模式對 IMBUDO 颱風之路徑預報誤差比較，紅色方塊線為作業版 GFS，綠色菱形線為植入颱風 GFS，藍色三角形線舊版本 TFS，橘色 X 線為新版 TFS。個案時間為 083012Z 至 090100Z 每隔 12 小時共 6 個個案之模擬之平均誤差值。

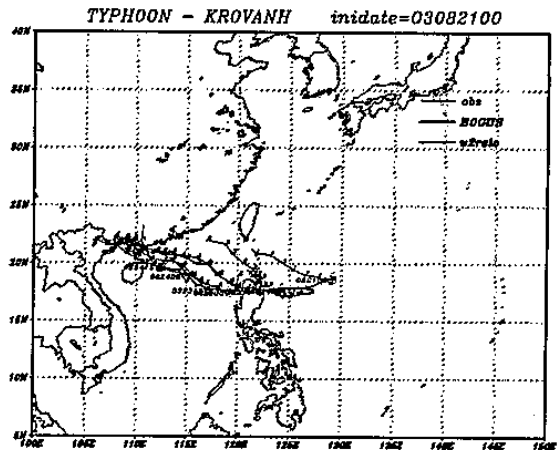


圖 3a：KROVANH 颱風之路徑預報圖，紅色線為實際路徑，藍色線為植入颱風路徑預報，紫色線為作業版之路路徑預報。個案時間為 082100Z 至 082300Z 每隔 12 小時共 7 個個案之模擬。

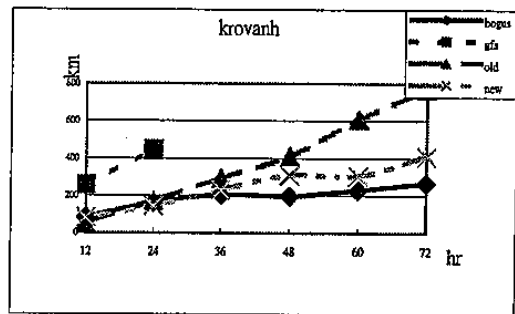


圖 3b：不同模式對 KROVANH 颱風之路徑預報誤差比較，紅色方塊線為作業版 GFS，綠色菱形線為植入颱風 GFS，藍色三角形線舊版本 TFS，橘色 X 線為新版 TFS。個案時間為 082100Z 至 082300Z 每隔 12 小時共 7 個個案之模擬。