

# 正壓颱風路徑預報之數值方法比較

## COMPARISON OF NUMERICAL SCHEMES ON THE BAROTROPIC TYPHOON TRACK FORECASTING

1. 統計預報法 Analog  
① 類風  
U.S. NOAA NWS/NHC

HURRAN  
GPANL G

U.S. NAVY PWC/PWC/  
TYFU 75

蔡清彥 CHING-YEN TSAY

國立台灣大學理學院大氣科學系

② 模擬類風  
CLIPER  
GPCLPR

③ 統計動力法  
U.S. NWS  
NHC-73  
MOHATT

④ 統計-天氣法  
王榮岳  
NHC-67

⑤ 最佳預報法 摘要  
SANBAR  
MFM movable Final track

本文乃以相當正壓模式預報垂直平均流線函數的方法預報颱風侵襲台灣的路徑。本文先討論預報公式、數值方法、綜觀尺度及颱風資料的處理，以及初始流線函數的計算等。然後討論以1975年至1977年的十四個颱風路徑為對象的預報結果。因為颱風的尺度較小，空間差分方法容易在平流方程式中產生計算分散的問題，因而嚴重影響颱風路徑的預報。數值方法的選擇也因此成為重要的研究課題之一。我們發現，採用四點內插的準拉格郎基平流法是相當正壓模式預報颱風路徑的最佳數值方法。採用這種方法的平均預報位置誤差24小時約為157公里，48小時約為308公里。其平均直角誤差24小時約為74公里，48小時約為175公里。採用這種方法似能大幅改進中央氣象局及關島颱風警報中心的颱風路徑預報。

### 一、前言

侵襲台灣的天氣系統以夏季的颱風破壞力最強，改進颱風路徑的預報可以減小許多無謂的損失。因此颱風路徑的預報是目前國內急待研究的問題之一，目前美國國家颶風中心(National Hurricane Center)採用NHC-72, HURRAN, CLIPER及SANBAR等四種颱風路徑的客觀預報方法(Simpson, 1974; Hope and Neumann, 1977)。NHC-67及NHC-72( Miller and Chase, 1966; Miller et al, 1968)利用選擇

迴歸法(screening multiple regression method)從1000, 700及500mb上的觀測要素選擇預報因子並導出迴歸方程式，作為颱風路徑的預報公式。HURRAN(Hope and Neumann, 1970)則是一種類比法，利用電子計算機從八十幾年的颱風資料中選擇日期、位置、移動方向及速度等與當前颱風接近的所有資料，然後將這些颱風置於當前的位置為共同的起點，利用這一組相似颱風的平均位移來預報當前颱風的未來位置。CLIPER(Neumann, 1972)是氣候持續法，利用颱風的日期、位置和移動方向及速度作為預報因

子，以這些預報因子組成的高次迴歸方程式預報颱風的未來位置。以上三種方法都是利用統計的步驟找出颱風最可能的位置。SANBAR ( Sanders and Burpee, 1968; Sanders et al, 1975; Sanders and Gordon, 1977 ) 則是唯一有動力氣象根據的颱風路徑預報方法。先分析 1000 ~ 100 mb 共十層的平均風，計算流線函數 (stream function )，然後利用相當正壓模式 (equivalent barotropic model ) 的原理預報流線函數的變化，以預報颱風中心的位移。目前這四種方法的預報能力很接近，平均預報位置的誤差約 24 小時為 210 ~ 230 公里，48 小時為 430 ~ 500 公里 ( Hope and Neumann, 1977 )。Sanders et al (1975) 認為若能更完善的利用現有資料做初始資料的分析以及改進颱風的處理方法，則以相當正壓模式預報颱風位置的向量誤差可減小至 24 小時為 140 公里，48 小時為 280 公里。因此改進 SANBAR 方法中的初始資料分析成為美國改進颱風路徑預報的研究主題之一 (例如：Sanders and Gordon, 1977; Jarvinen, 1977) 另外，以局部細網格 (fine mesh) 原始公式預報颱風路徑的研究也在多處進行中 (例如：Hovermale and Livezey, 1977; Hinsman, 1977)。

作者從 1975 年開始從事颱風路徑之數值預報研究工作，嘗試以相當正壓模式預報流線函數的方法來預報颱風侵襲台灣的路徑 (蔡清彥, 1976, 1977)。本文利用準拉格郎基平流法 (quasi-Lagrangian advective scheme) 改進颱風路徑之預報。我們仍先介紹此模式的預報公式及數值方法。再詳細說明資料處理方法及計算步驟。最後比較各種數值方法的預報結果。

## 二、預報公式

颱風在大氣中是屬於中範圍的擾動，其位移受著綜觀尺度 (synoptic-scale) 氣流的控制。所以颱風路徑的預報可以說是綜觀尺度天氣系統變化的預報，由渦旋度及輻散方程式的幅度分析 (例如：Haltiner, 1971; 蔡清彥, 1975, 1976)，我們知道適用於低緯度與中緯度的最精簡渦旋度方程式完全相同。但適用於中緯度的地轉關係，亦即流線函數值與等壓面高度值成正比的關係，不適用於低緯度地區。因此直接以觀測風場計算流線函數，

再代入最精簡的渦旋度方程式中，以求取流線函數的預報，是適用於低緯度地區的最精簡預報步驟。

渦旋度方程式在垂直 p-coordinate 上最精簡的形式如下：

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \vec{V}_\phi \cdot \nabla (\xi + f) - f_0 \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (1)$$

其中  $\xi$  為相對渦旋度， $\vec{V}_\phi$  為風的旋轉部份， $f$  為科氏參數， $f_0$  為其區域平均值， $\omega$  為垂直 p-速度。在低緯度地區，風隨高度的變化較大，不宜用一特定等壓面上的氣流代表大氣垂直平均狀態。在垂直方向不希望用多層模式的話，應採用垂直平均渦旋度方程式。對公式(1)取垂直平均可得

$$\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial t} + \overline{\vec{V}_\phi \cdot \nabla \xi} + \overline{\vec{V}_\phi \cdot \nabla f} - f_0 \frac{\omega_0}{p_0} = 0 \quad (2)$$

其中  $\bar{(\quad)} \equiv \frac{1}{p_0} \int_0^{p_0} (\quad) dp$ ,  $p_0 = 1000 \text{ mb}$ ,  $\omega_0 = \omega(p_0)$

$$\text{由於 } \overline{\vec{V}_\phi \cdot \nabla \xi} = \overline{\vec{V}_\phi \cdot \nabla \bar{\xi}} + \overline{\vec{V}'_\phi \cdot \nabla \xi'} \quad (3)$$

其中  $\gamma \equiv (\quad) - (\quad)_0$  在低緯度地區，雖然不能假設風不隨高度改變方向，而將公式(3)簡化，得到相當正壓模式。但若擾動渦旋度平流較小，且與平均渦旋度平流成正比，即

$$\overline{\vec{V}'_\phi \cdot \nabla \xi'} = e \overline{\vec{V}_\phi \cdot \nabla \bar{\xi}} \quad (4)$$

則公式(2)可以改寫為

$$\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial t} + (1+e) \overline{\vec{V}_\phi \cdot \nabla \bar{\xi}} + \overline{\vec{V}_\phi \cdot \nabla f} - f_0 \frac{\omega_0}{p_0} = 0 \quad (5)$$

又由垂直靜力平衡關係 (hydrostatic approximation) 可得

$$\omega_0 = g \rho_0 \left( \frac{\partial Z_0}{\partial t} + \vec{V}_0 \cdot \nabla Z_0 - \vec{V}_0 \cdot \nabla Z_g \right) \quad (6)$$

其中  $g$  為重力加速度， $\rho_0$  為 1000 mb 之空氣密度， $Z_0$  為 1000 mb 之高度， $Z_g$  為地形高度， $\vec{V}_0$  為 1000 mb 風速。公式(6)中第一項一般稱之為 Helmholtz term，第二項為偏地轉風 (ageostrophic wind) 的影響，第三項為地形斜坡所造成的垂直加速度。我們不考慮二、三項的影響，而且簡化第一項用下式表示之

$$\omega_0 = \frac{p_0}{f_0} H \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (7)$$

其中  $H$  為經驗常數， $\Psi$  為垂直平均流線函數。若將公式(7)代入公式(5)，且以垂直平均流線函數表示各

變數，則公式(5)可以寫成

$$(\nabla^2 - H) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -(1+e) J(\Psi, \nabla^2 \Psi) - J(\Psi, f) \quad (8)$$

其中  $J(A, B) = \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial x}$ ，一般稱之為

Jacobian。公式(8)預報垂直平均流線函數  $\Psi$  的變化，是我們預報颱風位移的基本方程式。其中常數  $e$  可以利用觀測資料代入公式(4)中求得。我們曾經計算  $e$  的區域平均值，大約為 0.05 ~ 0.10 左右。但我們未曾考慮此項的作用，因此，公式(8)可寫成

$$(\nabla^2 - H) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -J(\Psi, \nabla^2 \Psi + f) \quad (9)$$

至於 Helmholtz term 中的經驗常數  $H$ ，作者(蔡清彥, 1977) 曾針對太平洋副熱帶高壓系統的位移，以嘗試錯誤的方法，找出最恰當的數值為  $3 \sim 6 \times 10^{-18} \text{m}^{-2}$ 。我們採用  $H = 6 \times 10^{-18} \text{m}^{-2}$ 。預報結果顯示，颱風的預報路徑對於  $H$  值的變化並不十分敏感。

### 三、網格點結構及預報範圍

本文所採用的水平網格點結構與蔡清彥(1975, 1976) 所用者完全相同。選擇割於  $30^\circ \text{N}$  及  $60^\circ \text{N}$  的藍伯特角錐保角投影圖(Lambert conic conformal projection)，在此圖上取直角座標，以  $120^\circ \text{E}$  經度為  $y$  軸，以  $(120^\circ \text{E}, 30^\circ \text{N})$  為原點，經過原點切於  $30^\circ \text{N}$  的切線為  $x$  軸。網格點距離  $d$ ，在投影圖上為 240 公里。預報範圍大小在東西方向為 38 格點，南北方向為 28 點。從西邊邊界至  $120^\circ \text{E}$  的網格點數為 19，而從南邊邊界沿  $120^\circ \text{E}$  至  $30^\circ \text{N}$  的網格點數為 12。

### 四、資料分析

#### (一) 綜觀尺度資料

King(1966) 曾經比較各種求取垂直平均風速的方法。發現利用 1000 至 100 mb 共 10 層的平均風資料，預報颱風路徑的效果最佳，而只利用 500 mb 資料的預報結果最不理想。在東亞大陸，面積大而高的青康藏高原缺乏低層大氣的風場觀測。所以我將採用 700, 500 及 300 mb 三層資料以求取平均風。

資料的獲取以主觀分析為主。首先分析各層等壓面上的高度值，利用地轉風關係檢查各測站風向和風速的可靠性，並在海洋及青康藏高原資料缺乏的區域加虛擬風(bogus wind)。然後求取各測站以及各虛擬測站的三層平均風。將所得的平均東西及南北風速分別填於兩張圖上。另外在颱風影響範圍內以颱風過去 6 小時的位移速度取代由上述步驟所得的風速，Pike(1972) 發現採用颱風位移速度來修正資料可以減小颱風移動方向的誤差。有了各測站及虛擬測站的平均東西及南北風速，就可以主觀分析各風速等值線。由各等值線圖可以讀得各網格點之東西及南北風速。

其次，我們必須將東西風速， $U$ ，及南北風速， $V$ ，換算為投影圖上  $x$  軸方向風速， $U'$  及  $y$  軸方向風速， $V'$ 。

$$U' = U \cos(n\lambda') - V \sin(n\lambda') \quad (10)$$

$$V' = U \sin(n\lambda') + V \cos(n\lambda') \quad (11)$$

其中  $\lambda' = \lambda - 120^\circ$ ， $\lambda$  為任一網格點的經度， $n = 0.7156$ 。

有了各網格點上的風速  $U'$  及  $V'$  之後，各格點上的相對渦旋度可以求得。

#### (二) 颱風的處理

因為颱風與基本氣流的範圍尺度不同，因此也造成颱風路徑預報的困擾。早期的研究(如 Kasahara, 1957) 將颱風與基本氣流分離，並明確計算此兩種尺度氣流的交互作用。Sanders and Burpee(1968) 首先預報颱風與基本氣流的合成流線函數的變化，兩種尺度氣流的交互作用的計算隱含在渦旋度平流非線性線中。Gaertner(1973) 及 Sanders et al(1975) 以軸對稱的經驗式表示颱風環流。颱風的切線風速， $V$ ，及渦旋度可分別由下兩式求得

$$V = 0.72 V_{\max} (\sin \theta)^{1.5} \quad (12)$$

$$\xi = 0.72 V_{\max} \left[ \frac{1}{R} (\sin \theta)^{1.5} + 1.5 \frac{\theta}{\pi R} \frac{\log 0.5}{\log(R_{eyo}/R_{\max})} (\sin \theta)^{0.5} (\cos \theta) \right] \quad (13)$$

其中  $\theta = \pi \left( \frac{R}{R_{\max}} \right) \left[ \log 0.5 / \log(R_{eyo}/R_{\max}) \right]$

$V_{\max}$  為觀測之颱風最大風速

$R$  為颱風中心至網格點的距離

$R_{max}$  為颱風的最大影響半徑

$R_{eyo}$  為颱風中心至最大風速圈的距離

$V_{max}$  及  $R_{eyo}$  均為觀測值， $R_{max}$  可以利用觀測之 30 kt 暴風半徑及  $V_{max}$ ，由公式(12)求得。

### (三) 流線函數之求取

Sanders et al (1975) 曾經以先求颱風風場與基本氣流之和，再求渦旋度及流線函數的方法預報颱風路徑，結果預報速度稍慢，後來採取先獨立計算颱風範圍內渦旋度，流線函數及導流速度的方式預報颱風路徑。並假設颱風範圍內的所有流線函數僅隨時間共同改變一常數值。由於無法證明這種方法的收斂性，而且此種方法會引起颱風邊緣流線函數值的不連續及不平滑。為避免這些缺點，我們將採用下述方法求取流線函數值。

若以  $\xi_1$  代表基本氣流的渦旋度，以  $\xi_2$  代表颱風渦旋度。則採用下式求取流線函數

$$\nabla^2 \Psi = \xi_1 + \xi_2 \quad (14)$$

若  $V_n$  為垂直於邊界往外的風速， $\bar{V}_n$  為所有  $V_n$  的平均值， $S$  為沿著邊界的距離，反時針為正，則流線函數的邊界值可由下式求得 (Hawkins and Rosenthal, 1965)

$$\frac{\partial \Psi}{\partial s} = -V_n + \bar{V}_n \quad (15)$$

## 五、數值方法

因為颱風的尺度較小，空間差分方法容易在平流方程式 (advection equation) 中產生計算分散 (computational dispersion) 的問題 (參考 Mesinger and Arakawa, 1976)，因而嚴重影響颱風路徑的預報。數值方法的選擇也因此成為重要的研究課題之一，我們 (蔡清彥, 1976, 1977) 曾經採用 Arakawa (參考 Haltiner, 1971 或蔡清彥, 1975) 及 Shuman and Vanderman (1968) 的方法計算 Jacobian。這兩種空間差分方法的預報結果均因計算分散，造成颱風分裂成幾個中心的問題。茲以 1975 年 8 月 1 日 00Z 妮娜颱風的預報為例說明之。圖 1 為妮娜颱風初始渦旋度分佈圖，此時僅一個颱風渦旋度中心位於  $132.2^\circ E, 18.0^\circ N$ 。

圖 2 為 Shuman and Vandaman 方法的 24 小時預報渦旋度分佈圖，此時颱風已分裂出兩個副渦旋度中心，位於主中心的東方。

為了消除計算分散的問題，本文將採用準拉格郎基平流法 (quasi-Lagrangian advective

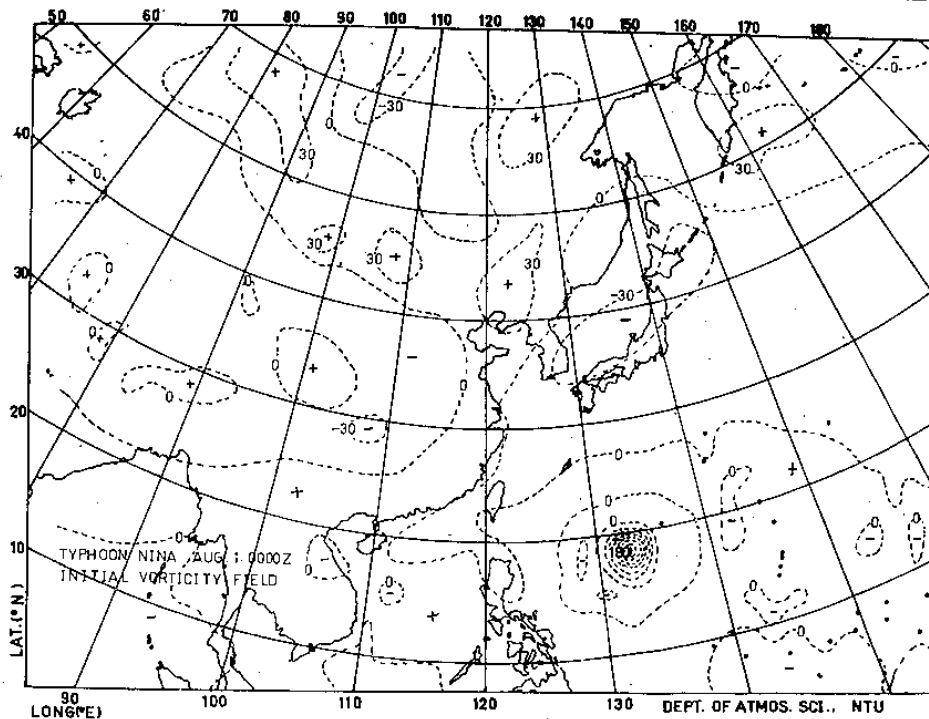


圖 1 妮娜颱風初始時間 (1975 年 8 月 1 日 00Z) 渦旋度分佈圖。單位為  $10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ 。

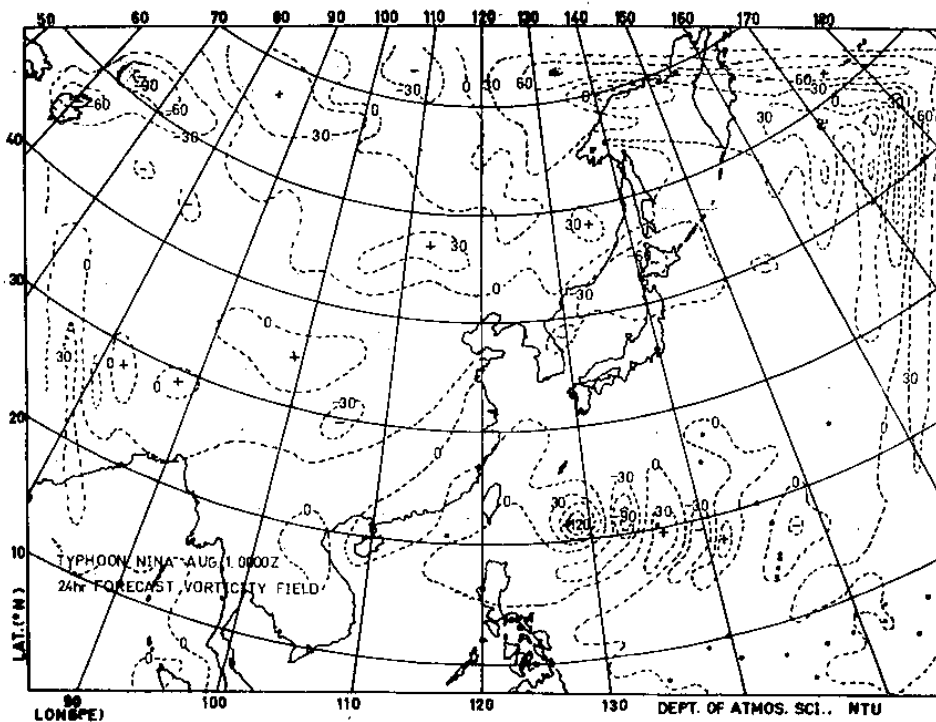


圖 2 妮娜颱風的 24 小時預報渦旋度分佈圖。數值方法採用 Shuman and Vanderman Jacobian。單位為  $10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ 。

scheme) 及簡易駛引法 (simple steering method) 預報颱風路徑。我們將在下兩小節中分別介紹這兩種方法。另外，我們也將在結果討論中比較 Shuman and Vanderman 方法的預報結果。

### (一) 準拉格郎基平流法

(quasi-Lagrangian advective scheme)

準拉格郎基方法的基平原理是追蹤空氣移動軌跡，若要求任何一網格點 Q 上的預報值，則先求出在時間  $t + \Delta t$  將會到達 Q 點的空氣在時間 t 的位置 P。然後令 Q 點在時間  $t + \Delta t$  的預報值等於 P 點在時間 t 的數值，假如所預報的變數不具時間保守性的話，則需要考慮變數從 P 點到 Q 點的改變量 (參考 Haltiner, 1971; Mathur, 1970)。

我們首先將公式(9)改寫成渦旋度形式

$$\frac{d}{dt}(\xi + f) = H \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (16)$$

其中  $\xi$  為垂直平均渦旋度，由公式(16)知，絕對渦旋度在空氣移動軌跡上的改變只受 Helmholtz term 的控制。因此只要考慮此項的作用，我們可以利用準拉格郎基平流法預報絕對渦旋度在各網格點上的

變化，然後求取流線函數的預報值。計算步驟如下：

步驟一：初次估計 P 點座標

$$x_p^0 = -\Delta t U_{q,t}$$

$$y_p^0 = -\Delta t V_{q,t}$$

其中  $U = -\partial \Psi / \partial y$ ,  $V = \partial \Psi / \partial x$

步驟二：內插求 P<sup>0</sup> 點的相對渦旋度及風速

步驟三：求取 Q 點 絕對渦旋度的初次預報值

$$(\xi^0 + f)_{q,t+\Delta t} = (\xi + f)_{p^0,t} + \Delta t \left( H \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right)_{p^0,t}$$

步驟四：以漸近法 (relaxation method) 求取各網格點上流線函數的初次預報值

$$\nabla^2 \Psi_{t+\Delta t}^0 = \xi^0_{t+\Delta t}$$

步驟五：求 P 點的修正座標

$$x_p^1 = -\frac{\Delta t}{2} [U_{p^0,t} + U_{q,t+\Delta t}^0]$$

$$y_p^1 = -\frac{\Delta t}{2} [V_{p^0,t} + V_{q,t+\Delta t}^0]$$

其中  $U_{t+\Delta t}^0 = -\partial \Psi_{t+\Delta t}^0 / \partial y$

$$V_{t+\Delta t}^0 = \partial \Psi_{t+\Delta t}^0 / \partial x$$

步驟六：內插求 P 點的相對渦旋度

步驟七：求 Q 點絕對渦旋度的修正預報值

$$(\xi^1 + f)_{q, t + \Delta t} = (\xi + f)_{p^1, t} + \Delta t \left( H \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right)_{q, t + \Delta t}$$

步驟八：求取各網格點上流線函數的修正預報值

$$\nabla^2 \Psi^1_{t + \Delta t} = \xi^1_{t + \Delta t}$$

如此反覆計算，則可以預報 48 小時的颱風位移。我們採用的時距 (time step,  $\Delta t$ ) 為 30 分鐘。在步驟四及八中，以漸近法求解流線函數時，其允許誤差 (tolerance) 為  $5 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 。

在步驟二及六以內插法求取 P 點的數值時，我們曾採用九點內插法 (Mathur, 1970)。但在其渦旋度預報圖中，我們也發現颱風分裂成幾個中心的不合理現象。Mathur (1977) 曾證明採用九點內插的準拉格郎基平流法相當於採用二次空間差分的預報法，故採用九點內插者類似採用 Arakawa 或 Shuman and Vanderman Jacobian 的方法會造成計算分散而影響颱風路徑的預報。為了避免此問題，本文均以四點內插法求取 P 點的數值，採用四點內插的準拉格郎基平流法相當於採用一次空間差分的預報法。故此方法沒有計算分散的問題。但計算消弱 (computational damping) 却是相當嚴重的 (參考 Mesinger and Arakawa, 1976)。我們需在 24 小時的預報渦旋度場中再次加入颱風渦旋。準拉格郎基方法的另一主要優點是沒有非線性計算不穩定 (nonlinear computational instability) 的問題 (參考 Haltiner, 1971)。

## (二) 簡易駛引法

(simple steering method)

在這方法中求取初始流線函數值時，我們以下式

$$\nabla^2 \Psi = \xi_1 \quad (17)$$

取代公式(14)。亦即，颱風的相對渦旋度不包含在計算中。我們然後求解公式(9)以預報流線函數的變化，而颱風路徑的預報是由預報流場計算軌跡得到的。在計算 Jacobian term 時，我們採用 Shuman and Vanderman (1968) 的方法。利用公式(9)求解  $\partial \Psi / \partial t$  時，其允許誤差 (tolerance) 為  $0.01 \text{m}^2 \text{s}^{-2}$ 。時間積分是用跳蛙法 (leapfrog scheme)，時距是 30 分鐘。

由這方法預報颱風路徑中，我們只計算大範圍 (large-scale) 流線函數的時間變化。因此，計算分散的問題也不會產生。

如前所述，我們也曾經採用 Arakawa 及 Shuman and Vanderman 的方法計算 Jacobian。但那時，我們將颱風的相對渦旋度包含在初始流線函數的計算中。因此，產生前述的計算分散問題。我們也將那些 Shuman and Vanderman Jacobian 的預報結果放在颱風路徑預報圖中，以作比較。

## 六、預報結果

我們從 1975 至 1977 年登陸台灣或當時預報登陸台灣的七個颱風中選擇十四個初始資料時間作預報，預報路徑以及觀測路徑均繪於圖 3a~3n 中。除了準拉格郎基平流法及簡易駛引法的預報路徑外，四個初始資料包含颱風而採用 Shuman and Vanderman Jacobian (簡稱 Shuman and Vanderman) 的預報路徑也繪於圖 3a~3n 中。這種預報法與簡易駛引法只有初始資料的差別。為了比較，關島聯合颱風警報中心 (Joint Typhoon Warning Center, Guam; PGTW) 及中央氣象局 (CWB) 的當時預報颱風位置亦點在圖上。中央氣象局沒有保留 1975 年及以前的預報資料，故僅比較 1976 年以後的七個個案。另外，我們分別計算了 24 小時和 48 小時的預報位置向量誤差 (position error) 以及預報位置直角誤差 (right-angle error)。直角誤差的定義是預報位置垂直於觀測路徑的距離，我們分別用正負號表示預報位置在觀測路徑之右方或左方 (面對颱風之去向)。每個個案的位置誤差及直角誤差均列在表 1 及表 2 中。茲分別討論十四個個案的預報結果於后。

(一) 妮娜 (Nina) 颱風，初始資料時間為 1975 年 7 月 31 日 12GMT

從圖 3a 可以發現，準拉格郎基平流法及簡易駛引法均能相當準確的預報此颱風路徑。但在 24 及 48 小時之間，簡易駛引法的預報颱風移動速度稍慢。從表 1 及表 2 得知，兩種方法的預報誤差均不大。

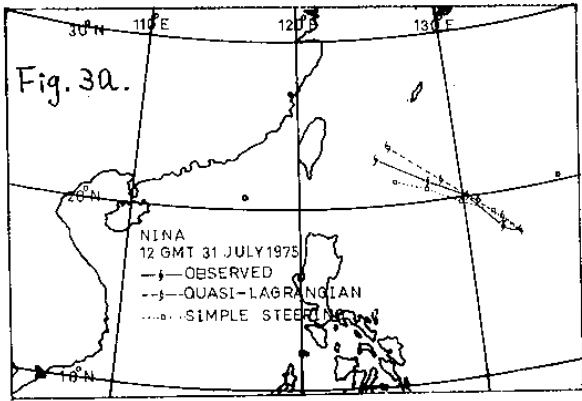


圖3a 妮娜颱風的觀測及預報路徑。初始時間為1975年7月31日12 GMT  
 (○)妮娜(Nina)颱風，初始資料時間為1975年8月1日00 GMT

如圖3b所示，準拉格郎基平流法能夠相當準確的預報此颱風路徑。簡易駛引法的第一天預報路徑也相當接近觀測路徑，但第二天的預報路徑則不佳。準拉格郎基平流法的48小時位置誤差為189公里，而簡易駛引法為331公里(表1)。另外，由表2知，準拉格郎基平流法的直角誤差為負而簡易駛引法為正。

這個個案初始資料包括颱風而採用Shuman and Vanderman Jacobian的預報路徑也示於圖3b中。從簡易駛引法預報路徑與此路徑之比較可以得知，在採用這種數值方法時，除去初始資料中的颱風渦旋度可以得到較準確的預報路徑。

關島颱風警報中心的當時預報路徑及預報誤差也分別填在圖3b及表1和表2中，由這些圖表可知，關島當時的預報不如準拉格郎基平流法的預報接近實際颱風路徑。

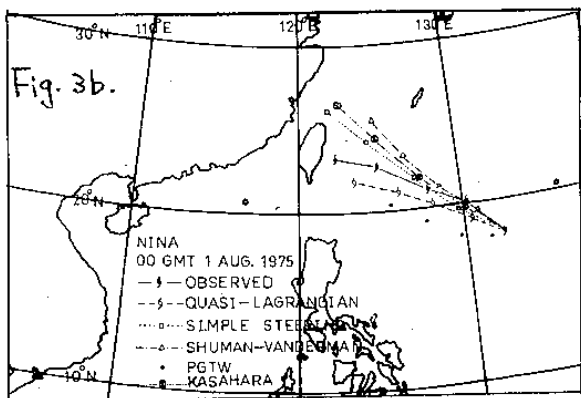


圖3b 妮娜颱風的觀測及預報路徑。初始時間為1975年8月1日00 GMT  
 (○)貝蒂(Betty)颱風，初始資料時間為1975年9月21日00 GMT

表1 每個個案的位置誤差，單位為公里。

Methods		S.S.	Q.-L.	CWB	PGTW
Cases	Hours				
Nina	24	76	76		
(7/31 12Z)	48	189	113		
Nina	24	113	113		387
(8/01 00Z)	48	331	189		481
Betty	24	539	132		208
(9/21 00Z)	48	1172	123		274
Elsie	24	256	303		284
(10/10 00Z)	48	443	447		529
Elsie	24	38	208		161
(10/10 12Z)	48	72	387		548
Billie	24	189	242		66
(8/07 00Z)	48	472	378		127
Billie	24	113	95		76
(8/07 12Z)	48	454	85		274
Billie	24	268	53	302	327
(8/08 00Z)	48	478	178	741	832
Thelma	24	132	217	113	161
(7/23 00Z)	48	378	397	406	484
Thelma	24	132	227	327	321
(7/24 00Z)	48			567	646
Vera	24	227	66	170	208
(7/29 12Z)	48	397	189	217	217
Vera	24	132	236	132	246
(7/30 12Z)	48			284	544
Babe	24	66	113	113	113
(9/06 12Z)	48	104	567		397
Babe	24	57	113	132	189
(9/07 12Z)	48	227	642		813

表2 每個個案的直角誤差，單位為公里。

Methods		S.S.	Q.-L.	CWB	PGTW
Cases	Hours				
Nina	24	-64	13		
(7/31 12Z)	48	-97	104		
Nina	24	22	-74		-178
(8/01 00Z)	48	301	-105		-183
Betty	24	370	7		109
(9/21 00Z)	48	712	-23		200
Elsie	24	85	-28		189
(10/10 00Z)	48	130	-66		376
Elsie	24	30	-99		135
(10/10 12Z)	48	-5	-215		527
Billie	24	105	-167		-49
(8/07 00Z)	48	452	57		120
Billie	24	53	-68		62
(8/07 12Z)	48	151	19		226
Billie	24	250	41	299	333
(8/08 00Z)	48	487	174	680	735
Thelma	24	-55	-28	-38	-102
(7/23 00Z)	48	-242	-232	-343	-309
Thelma	24	-110	-193	-312	-308
(7/24 00Z)	48			-472	-518
Vera	24	-2	-5	-48	23
(7/29 12Z)	48	-340	-132	-148	-123
Vera	24	-95	-95	-41	-113
(7/30 12Z)	48			132	-329
Babe	24	41	-132	-125	-115
(9/06 12Z)	48	9	-576		-391
Babe	24	44	-89	-121	-185
(9/07 12Z)	48	30	-397		-542

準拉格郎基平流法也能相當準確的預報這個颶風路徑(圖 3c)。而簡易駛引法的預報結果相當差，預報路徑很不合理的往北偏向。故簡易駛引法的位置誤差及直角誤差均甚大(表 1 及 2)。在這個個案中，Shuman-Vanderman 的預報結果較簡易駛引法好，但誤差仍然相當大。關島的當時預報亦較簡易駛引法的預報為佳，但遠不如準拉格郎基平流法的預報接近實際路徑。

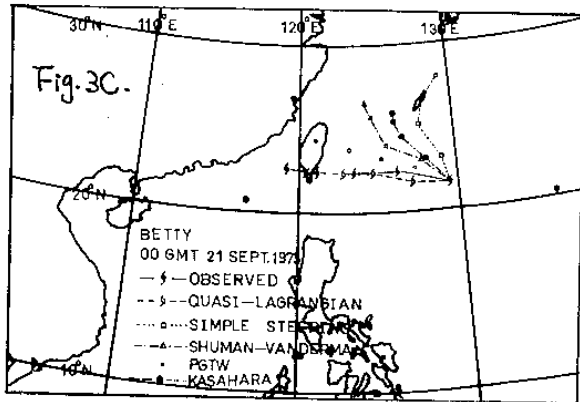


圖 3c 貝蒂颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1975 年 9 月 21 日 00 GMT

(四) 艾爾西 (Elsie) 颱風，初始資料時間為 1975 年 10 月 10 日 00 GMT

兩種數值方法均能相當準確的預報颱風的移動方向，但預報颱風移動速度均太慢(圖 3d)。因此，直角誤差都很小(表 2)，而位置誤差却很大(表 1)。準拉格郎基平流法的直角誤差為負而簡易駛引法為正，關島的當時預報較兩數值方法的預報均差。

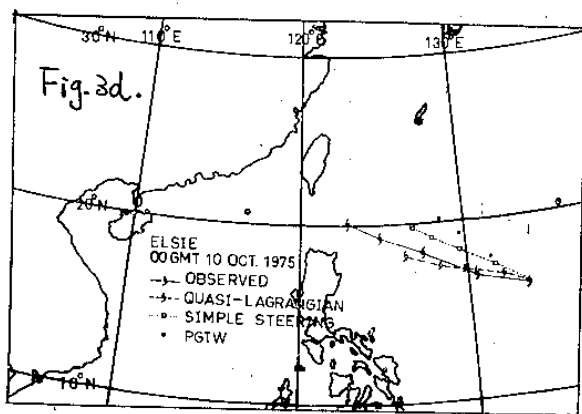


圖 3d 艾爾西颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1975 年 10 月 10 日 00 GMT

(五) 艾爾西 (Elsie) 颱風，初始資料時間為 1975 年 10 月 10 日 12 GMT

兩種數值方法也都能相當準確的預報颱風的移

動方向(圖 3e)。但準拉格郎基平流法的預報颱風在 24 至 48 小時之間移動太快。一般而言，簡易駛引法的預報路徑在實際路徑之右側而準拉格郎基平流法則在左側，而關島的當時預報也較兩種數值預報路徑差。

另外，如同第二個案，Shuman-Vanderman 的預報路徑較簡易駛引法差。

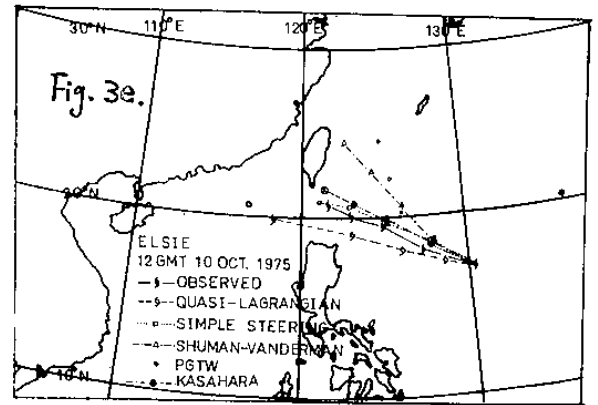


圖 3e 艾爾西颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1975 年 10 月 10 日 12 GMT

(六) 畢莉 (Billie) 颱風，初始資料時間為 1976 年 8 月 7 日 00 GMT

準拉格郎基平流法的預報颱風移動方向很接近觀測路徑，但預報移動速度則較快(圖 3f)。簡易駛引法的預報路徑則相當差。一般而言，前者的預報路徑在觀測路徑之左側，後者則在右側。這個個案的關島當時預報相當接近實際路徑。

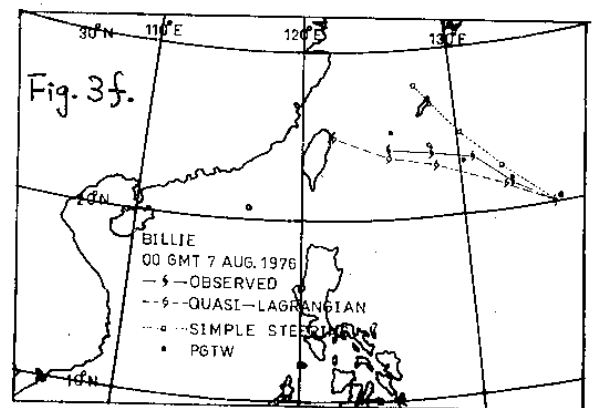


圖 3f 畢莉颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1976 年 8 月 7 日 00 GMT

(七) 畢莉 (Billie) 颱風，初始資料時間為 1976 年 8 月 7 日 12 GMT

準拉格郎基平流法能夠很準確的預報此颱風路徑，其位置誤差及直角誤差都很小(圖 3g)。簡易



駛引法的預報路徑在實際路徑的右側，而預報颱風移動速度則太慢。在這個個案中，Shuman-Vanderman 的預報結果也較簡易駛引法的結果差。

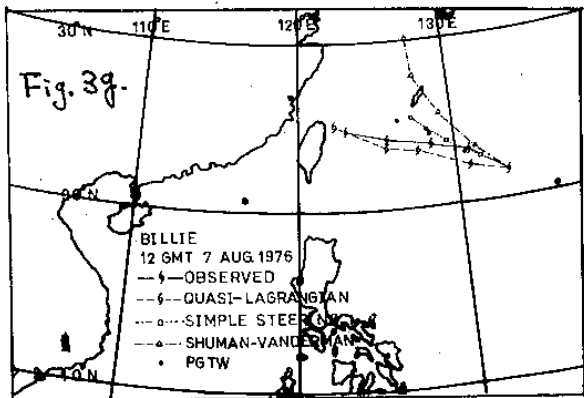


圖 3g 畢莉颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1976 年 8 月 7 日 12 GMT

(A) 畢莉 (Billie) 颱風，初始資料時間為 1976 年 8 月 8 日 00 GMT

此個案中，準拉格郎基平流法也能準確預報颱風路徑，簡易駛引法的預報結果不佳，中央氣象局及關島的當時預報均不如兩種數值預報接近實際颱風路徑 (圖 3h)。

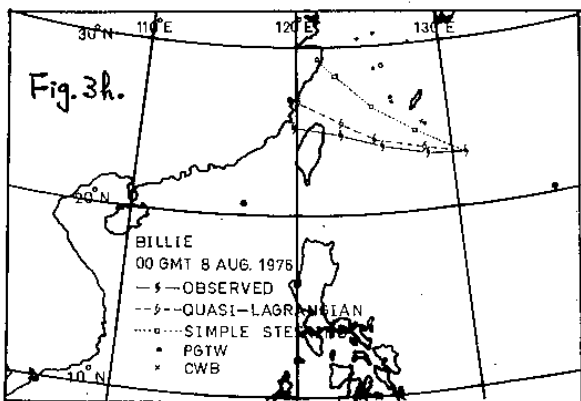


圖 3h 畢莉颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1976 年 8 月 8 日 00 GMT

(B) 賽洛瑪 (Thelma) 颱風，初始資料時間為 1977 年 7 月 23 日 00 GMT

賽洛瑪颱風於 1977 年 7 月 25 日 00-01 GMT 登陸高屏重工業區，造成嚴重的損失。颱風移動方向由原先的西北轉向北，再轉東北。在登陸兩天內，即 7 月 23 日 00 GMT，兩種數值方法及兩個作業單位均無法預報颱風的轉向 (圖 3i)

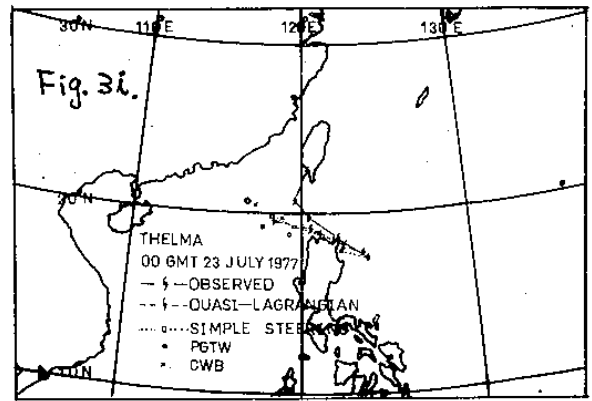


圖 3i 賽洛瑪颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1977 年 7 月 23 日 00 GMT

(+) 賽洛瑪 (Thelma) 颱風，初始資料時間為 1977 年 7 月 24 日 00 GMT

賽洛瑪颱風登陸前 24 小時，兩個作業單位仍然無法預報颱風的轉向。而兩種數值方法的預報結果均顯示颱風將轉向的跡象，雖然仍然不能預報颱風將登陸高屏地區 (圖 3j)。數值預報的位置誤差及直角誤差比較中央氣象局及關島聯合颱風警報中心的預報誤差小甚多。

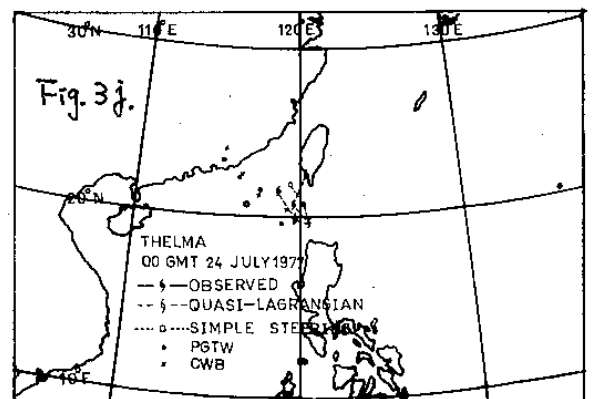


圖 3j 賽洛瑪颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1977 年 7 月 24 日 00 GMT

(-) 薇拉 (Vera) 颱風，初始資料時間為 1977 年 7 月 29 日 12 GMT

賽洛瑪颱風登陸高屏地區以後約六天，薇拉颱風於 7 月 31 日 09-11 GMT 侵襲北基地區。它所造成的損失也相當嚴重，颱風移動方向從 7 月 29 日 12 GMT 開始先往西南，轉向西、西北，再轉向西。準拉格郎基平流法，中央氣象局及關島均能預報上述颱風路徑彎曲的趨勢，雖然都無法預報颱風將登陸台灣北端 (圖 3k)。這三種方法的 48 小時直角誤差約在 123~148 公里之間。簡易駛引法的

預報結果則較差。

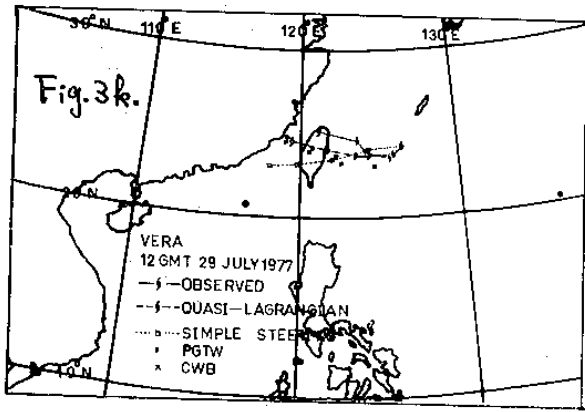


圖 3k 薇拉颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1977 年 7 月 29 日 12 GMT

(ㄅ) 薇拉 (Vera) 颱風，初始資料時間為 1977 年 7 月 30 日 12 GMT

二十四小時以後，兩種數值方法及中央氣象局均能相當準確的預報颱風路徑 (圖 3l)。這三種預報的 24 小時直角誤差均小於 100 公里。

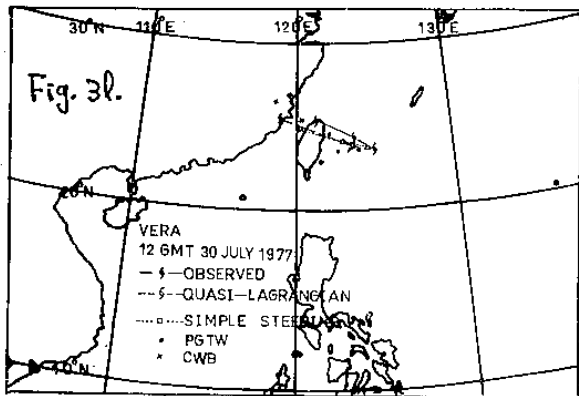


圖 3l 薇拉颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1977 年 7 月 30 日 12 GMT

(ㄆ) 寶佩 (Babe) 颱風，初始資料時間為 1977 年 9 月 6 日 12 GMT

寶佩颱風在 9 月 6 日 12 GMT 至 9 月 8 日 12 GMT 之間大致往西北移動，簡易駛引法能夠相當準確的預報颱風路徑。但準拉格郎基平流法，中央氣象局及關島的預報結果均不理想 (圖 3m)。

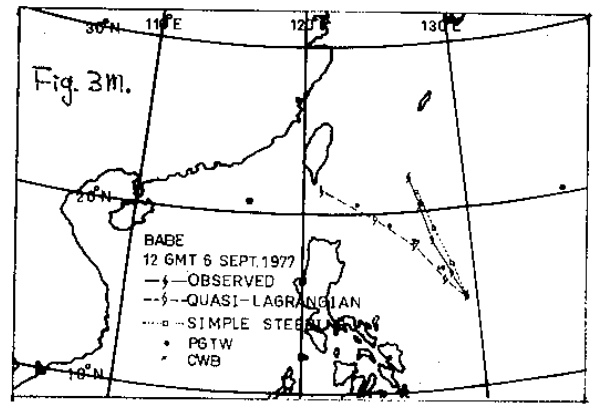


圖 3m 寶佩颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1977 年 9 月 6 日 12 GMT

(ㄇ) 寶佩 (Babe) 颱風，初始資料時間為 1977 年 9 月 7 日 12 GMT

寶佩颱風在 9 月 7 日 12 GMT 至 9 月 8 日 12 GMT 之間大致往西北移動。但在 9 月 8 日 12 GMT 之後轉向東北移動。簡易駛引法能夠相當準確的預報颱風移動方向，但速度稍慢。而準拉格郎基平流法，中央氣象局及關島均無法預報颱風的轉向 (圖 3n)。

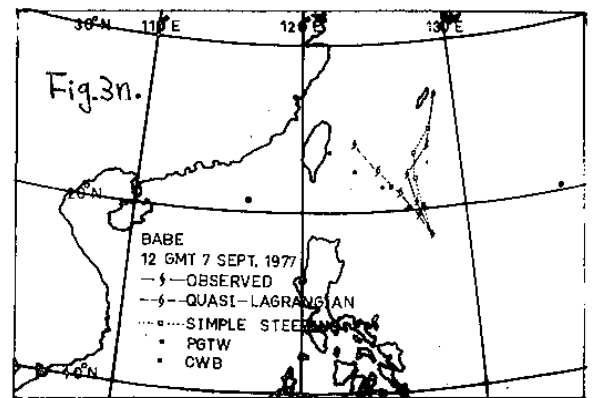


圖 3n 寶佩颱風的觀測及預報路徑。初始時間為 1977 年 9 月 7 日 12 GMT

## 七、結 論

平均位置誤差及平均絕對直角誤差分別列於表 3 及表 4 中。從表 3 a 得知，準拉格郎基平流法的平均位置誤差 24 小時為 157 公里，48 小時為 308 公里；而簡易駛引法則 24 小時為 167 公里 48 小時為 393 公里。從表 4 a 得知，準拉格郎基平流法的平均絕對直角誤差 24 小時為 74 公里，48 小時為 175 公里；而簡易駛引法則 24 小時為 95 公里，48

小時為 246 公里。故準拉格郎基平流法預報颱風路徑較簡易駛引法準確，當然較採用 Arakawa 或 Shuman - Vameran Jacobian 預報颱風位移的結果改進更多。

表 3 平均位置誤差，單位為公里

Methods	Hours (Number of cases)	
	24 (14)	48 (12)
S.S.	167	395
Q.-L.	157	308

Methods	Hours (Number of cases)	
	24 (13)	48 (11)
S.S.	174	412
Q.-L.	163	326
PGTW	211	452

Methods	Hours (Number of cases)	
	24 (7)	48 (3)
S.S.	145	418
Q.-L.	147	254
PGTW	<b>224</b>	<b>511</b>
CWB	184	455

表 4 平均絕對直角誤差，單位為公里

Methods	Hours (Number of cases)	
	24 (14)	48 (12)
S.S.	95	246
Q.-L.	74	175

Methods	Hours (Number of cases)	
	24 (13)	48 (11)
S.S.	97	260
Q.-L.	79	181
PGTW	146	339

Methods	Hours (Number of cases)	
	24 (7)	48 (3)
S.S.	85	356
Q.-L.	83	179
PGTW	168	389
CWB	141	<b>390</b>

數值預報與關島聯合颱風警報中心當時預報的誤差比較列於表 3b 及 4b 中。這些個案的關島 48 小時平均位置誤差為 452 公里，平均絕對直角誤差為 339 公里。上述這些個案的 48 小時平均誤差與 Brand and Brelloch (1975) 所提的長期平均關島預報誤差接近，其位置誤差為 452 公里，絕對直角誤差為 269 公里。數值預報，尤其是準拉格郎基平流法，誤差較關島的預報誤差小甚多。數值預

報與中央氣象局及關島當時預報的誤差比較則列於表 3c 及 4c 中。我們也發現準拉格郎基平流法的預報比較中央氣象局及關島的預報改進甚多。對於這些個案，準拉格郎基平流法的平均位置誤差為 24 小時 147 公里，48 小時 254 公里；而中央氣象局則為 24 小時 184 公里，48 小時 455 公里。準拉格郎基平流法的平均絕對直角誤差為 24 小時 83 公里，48 小時 179 公里；而中央氣象局則為 24 小時 141 公里，48 小時 390 公里。

表 5 代數平均直角誤差，單位為公里

Methods	Hours (Number of cases)	
	24 (14)	48 (12)
S.S.	48	132
Q.-L.	-66	-116

表 6 預報與觀測颱風移速之比值

Methods	Hours (Number of cases)	
	0-24 (14)	24-48 (12)
S.S.	102	83
Q.-L.	93	115

為了瞭解數值預報中有規則的誤差，我們曾經計算直角誤差的代數和以及預報颱風移速與實際值之比，結果分別列於表 5 及 6 中。由表 5 得知，準拉格郎基平流法的預報位置平均偏在實際颱風路徑左方，而簡易駛引法則偏向右方。由表 6 得知，在 24~48 小時之間，簡易駛引法預報的颱風移速太慢，而準拉格郎基平流法的預報移速則太快。

從第六節的討論中，我們知道在採用 Shuman - Vanderman Jacobian 的預報時，在初始資料中包含颱風渦旋度的預報結果較差。另外，從第五節的討論中，我們知道在準拉格郎基平流法中採用九點內插法較四點內插法的預報颱風路徑誤差為大。而且我們瞭解這些都是因為颱風水平尺度較小，容易在二次以上空間差分方法的結果中產生計算分散的問題，造成颱風分裂成幾個中心的現象，因而影響颱風路徑預報。

綜合前述結果，我們可以得到幾點結論。首先，採用四點內插的準拉格郎基平流法是相當正壓模式預報颱風路徑的最佳數值方法。採用這種方法似能大幅改進中央氣象局及關島颱風警報中心的颱風

路徑預報。在這些個案中，這種數值預報的平均誤差也較美國國家颶風中心各種客觀方法預報大西洋颶風路徑的誤差為小。這種方法的預報結果有兩種規則誤差，其一是，若面對颶風移往方向，預報位置偏向左邊。另外是，24~48小時颶風平均速度太快。若能研究減小這兩種規則誤差，則更能改進颶風的路徑預報。在此之前，我們可以利用統計的平均誤差值修正預報結果。另外，這種數值模式的初始資料客觀分析也是我們以後工作的目標之一。

## 八、後 記

本研究是在國科會研究計劃 NSC-67M-0202-01(01) 輔助下完成的。本系陳泰然副教授曾參與資料分析及結果的討論，特此致謝。計劃進行中曾有多人參加工作，計算機程式主要是由陳富美小姐設計完成的。資料分析主要是由王文傑、陳富美、黃火金、張丕紅、張仲勳、黃鴻榮、許晃雄、許武榮、孫紀榮、黎志一、譚秀淇、蕭萌區、郝雲德、周世英、高治平及陳濤等人共同完成的。另外，我們感謝國防部中山科學院及行政院主計處兩計算機中心，給予使用計算機的方便及協助。

## 九、參考資料

- Brand, S. and J. W. Blalock, 1975: Cost effectiveness of typhoon forecast improvements. Bull. Amer. Meteor. Soc., 56, 352~361.
- Gaertner, J.P., 1973: Investigation of forecast errors of the SANBAR hurricane track model. MS thesis, Dept. of Meteor. MIT.
- Haltiner, G.J., 1971: Numerical weather prediction, Wiley, New York.
- Hawkins, H.F., and S.L. Rosenthal, 1965: On the computation of stream functions from the wind field. Mon. Wea. Rev., 93, 245~252.
- Hinsman, D.E. 1977: Tropical storm forecasts during 1977 using the Fleet Numerical Weather Central tropical cyclone model. Postprint Volume, Eleventh Technical Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, December 13-16, 1977, Miami.
- Hope, J.R. and C.J. Neumann, 1970: An operational technique for relating the movement of existing tropical cyclones to past tracks. Mon. Wea. Rev., 98, 925-933.
- Hope, J.R. and C.J. Neumann, 1977: A survey of worldwide tropical cyclone prediction models. Postprint Volume, Eleventh Technical Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, December 13-16, 1977, Miami.
- Hovermale, J.B. and R.E. Livezey, 1977: Three-year performance characteristics of the NMC hurricane model. Postprint Volume, Eleventh Technical Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, December 13-16, 1977, Miami.
- Jarvinen, B.R., 1977: Comparison of initial analysis schemes on the barotropic hurricane model (SANBAR). Postprint Volume, Eleventh Technical Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, December 13-16, 1977, Miami.
- Kasahara, A., 1957: The numerical prediction of hurricane movement with the barotropic Model. J. Meteor., 14, 386-402.
- King, G.W., 1966: On the numerical prediction of hurricane trajectories, MS thesis, Dept. of Meteor., MIT.
- Mathur, M.B., 1970: A note on an improved quasi-Lagrangian advective scheme for primitive equations. Mon. Wea. Rev., 98, 214-219.
- Mathur, M.B., 1977: Higher order quasi-Lagrangian prediction schemes. Tech. Rept., National Meteorological Center, NWS, NOAA.
- Mesinger F. and A. Arakawa, 1976: Numerical methods used in atmospheric

- models. WMO/ICSU Joint Organizing Committee, GARP Publication Series No. 17, 64 pp.
- Miller, B.J. and P.P. Chase, 1966: Prediction of hurricane motion by statistical methods. Mon. Wea. Rev., 94, 399-406.
- Miller, B.I., E.C. Hill and P.P. Chase, 1968: Revised technique for forecasting hurricane motion by statistical methods. Mon. Wea. Rev., 96, 540-548.
- Neumann, C.J., 1972: An alternate to the HURRAN tropical cyclone forecast system. NOAA Tech. Memo., NWS SR-62.
- Pike, A.C., 1972: Improved barotropic hurricane track prediction by adjustment of the initial wind field. NOAA Tech. Memo., SR-62.
- Sanders, F. and R.W. Burpee, 1968: Experiments in barotropic hurricane track forecasting. J. Appl. Meteor., 7, 313-323.
- Sanders, F. and N.J. Gordon, 1977: A study of forecast errors in a barotropic operational model for predicting paths of tropical storms. Postprint Volume, Eleventh Technical Conference on Hurricane and Tropical Meteorology., December 13-16, 1977, Miami.
- Sanders, F., A.C. Pike and J.P. Gaertner, 1975: A barotropic model for operational prediction of tracks of tropical storms. J. Appl. Meteor., 14, 265-280.
- Simpson, R.H., 1974: Hurricane prediction skill: progress and prospects. International Tropical Meteor. Meeting, Nairobi, Kenya, Jan. 31-Feb. 7, 1974, Amer. Meteor. Soc. reprint, 145-150.
- Shuman, F.G. and L.W. Vanderman, 1968: Operational methods of truncation error control. Lectures on Short-Range Weather Prediction, Leningrad, Hydromet-  
eoizdat, 178-187.
- 蔡清彥, 1975: 數值天氣預報在台灣地區的應用。國立台灣大學大氣科學系, 研究報告NWP-01號。
- 蔡清彥, 1976: 颱風路徑之數值預報。國立台灣大學大氣科學系, 研究報告NWP-02號。
- 蔡清彥, 1977: 颱風路徑之數值預報實驗。國立台灣大學大氣科學系, 研究報告NWP-04號。

# COMPARISON OF NUMERICAL SCHEMES ON THE BAROTROPIC TYPHOON TRACK FORECASTING

Ching - Yen Tsay

Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

Predictions of typhoon tracks in the area of Taiwan and its vicinity by numerically predicting the vertically averaged stream function have been studied. We first present the vertically averaged vorticity equation, numerical method, analysis of synoptic network data, representation of a typhoon vortex, and computation of the initial stream function. Predicted results of fourteen tracks in 1975 - 1977 are then presented. Due to the relatively small size of typhoon vortex, the problem of computational dispersion arises and the typhoon movements are seriously affected. Therefore, it is essential to choose a proper numerical method. We find that the quasi-Lagrangian advective scheme with a four-point linear interpolation is the best numerical method in the barotropic typhoon track predictions. Its average position errors are about 157 km for 24 hours and 308 km for 48 hours; while its average right-angle forecast errors are about 74 km for 24 hours and 175 km for 48 hours. It seems that this method can tremendously improve the typhoon track predictions by the Central Weather Bureau, Taipei and by the Joint Typhoon Warning Center, Guam.