

颱風路徑之數值預報

Numerical Prediction of Typhoon Tracks in the Area of
Taiwan and Its Vicinity

蔡清彥

台灣大學大氣科學系

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少許多無謂的損失。因此颱風路徑的預報是目前國內急待研究的問題之一。蔡清彥(1976)首次嘗試以數值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。本文繼續研究改進此模式，希望得到更好的預報結果。本文特別着重改進風場資料分析的正確性，研究 Helmholtz term 對副熱帶高壓移動速度的影響，網格點距離以及空間差分方法對於颱風移動速度的影響等

因為篇幅限制，本文僅扼要的討論預報公式，數值方法，資料分析以及初步預報結果等。詳細公式的推導，數值方法的介紹以及其對波速的影響的討論，資料分析步驟以及結果的詳盡討論請參考前文(蔡清彥，1976)以及作者下期的研究報告。

三預報公式

颱風在大氣中是屬於中範圍的擾動，其位移受著綜觀幅度氣流的控制。所以颱風路徑的預報可以說是綜觀幅度天氣系統變化的預報。蔡清彥於 1975 年曾經針對中緯度天氣系統，於 1976 年又針對低緯度天氣系統討論渦旋度及輻散方程式的幅度分析。我們知道適用於低緯度與適用於中緯度的最精簡渦旋度方程式完全相同。但是由輻散方程式的幅度分析知，適用於中緯度的地轉關係，亦即流線函數值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，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。

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預報模式的話，應採用垂直平均渦旋方程式如下（參考前文）。

$$(\nabla^2 - H) \frac{\partial \psi}{\partial t} = -(1+e) J(\psi, \nabla^2 \psi) - J(\psi, f) \dots\dots\dots (2.1)$$

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。又

ψ 為垂直平均流線函數。H 為經驗常數值用以模擬垂直平均輻散效應，該項一般稱為 Helmholtz term。e 為擾動渦旋度平流的垂直平均與垂直平均渦旋度平流之比值。前文首次嘗試颱風之路徑預報時，忽略了 Helmholtz term。我們發現太平洋高壓不合理的迅

速往西移動。研究此項的效果是本文的重點之一。另外我們曾經計算 e 的區域平均值，大約為 0.05 - 0.10 左右。但本文及前文均未考慮此項的作用。

三 數值方法

對平流方程式 (advection equation) 作數值分析後，可以得知任何空間差分方法均會產生不真實的波速 (phase speed) 及群速 (group velocity)。一般而言，預報的波速及群速均較實際值為小。波長愈短，網格點距離愈大或空間切斷誤差 (space truncation error) 的次數 (order) 愈低，則誤差愈嚴重。對於群速而言，預報值甚至會與實際值反方向。因為颱風的幅度較小，為了得到較真實的預報移動速度，我們需要採用較高次的空間差分方法以及較小的網格點距離。這數值方法的改進也是本文的重點之一。

對於 Jacobian 的計算，我們採用 Shuman and Vanderman (1968) 的方法。這種方法的效果與四次空間差分法相同，但是其所需計算步驟較四次空間差分法少許多。我們也採用屬於兩次空間差分法的 Arakawa Jacobian (參考蔡清彥，1975 及 1976) 作為比較。

對於網格點距離，首先我們採用 240km。此值為蔡清彥 (1975

) 作中緯度數值預報時所採用。我們發現預報颱風有分裂成幾個中心的不合理現象。這也許就是數值方法產生不真實群速，因而造成計算能量分散 (computational energy dispersion) 的結果。因此我們又進一步採用較小的網格點距離，即 160km。

四資料分析

我們採用與前文完全相同的步驟計算垂直平均流線函數。首先以 700, 500 及 300mb 三層平均風計算各網格點的綜觀幅度渦旋度。此時在海洋及青康藏高原等資料缺乏的區域，我們以地轉關係加虛擬的風。又在颱風範圍內以颱風過去 6 小時的位移速度取代觀測風速。有了綜觀幅度渦旋度後，我們採用 Sanders et. al. (1975) 的經驗公式計算各網格點的颱風渦旋度。其公式如下：

$$\xi = 0.72 V_{\max} \left[\frac{1}{R} (\sin \theta)^{1.5} + 1.5 \frac{\theta}{\pi R} \frac{\log 0.5}{\log (R_{\text{eye}}/R_{\max})} (\sin \theta)^{0.5} (\cos \theta) \right] \dots \dots \dots (4.1)$$

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

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_{eye} 為颱風中心至最大風速圈的距離

若以 ξ_1 代表綜觀幅度渦旋度，以 ξ_2 代表颱風渦旋度。我們利用下式求取各網格點的流線函數值， ψ 。

$$\nabla^2 \psi = \xi_1 + \xi_2 \dots\dots\dots (4.2)$$

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條件可由下式求得：

$$\frac{\partial \psi}{\partial S} = -V_n + \bar{V}_n \dots\dots\dots (4.3)$$

五、預報結果之討論

茲選擇 1975 年的三個颱風，包括妮娜 (Nina)、貝蒂 (Betty) 和艾爾西 (Elsie) 以及 1976 年的比莉 (Billie) 颱風為研究對象。將於下列各小節中分別討論妮娜、貝蒂及艾爾西颱風的預報結果。因為部份工作未完成，我們不在本文中討論比莉颱風的預報。

(一) 妮娜颱風 (1975 年 8 月 1 日 00Z 至 8 月 3 日 00Z)

妮娜中度颱風在 8 月 3 日 06Z 左右登陸台灣東岸中部。我們選擇 8 月 1 日 00Z 資料為初始值作 48 小時的預報。首先討論預報公式中 Helmholtz term 對太平洋副熱帶高壓的移動速度的影響。因為在低緯度地區無法以正確的數學式子表示 Holmholtz term

。我們以嘗試錯誤的方法，希望找出最佳的經驗常數值。茲分別以 $H = 0, 6, 13 \times 10^{-13} \text{m}^{-1}$ 的常數值代入 (2.1) 式中作預報。圖 1 為 $H = 0$ 及 $6 \times 10^{-13} \text{m}^{-1}$ 的 48 小時預報圖。因為沒有分析 48 小時的觀測垂直平均流線函數，我們僅能以觀測的 500mb 等高線分佈作為粗略比較的依據。太平洋高壓中心的初始位置 (參考圖 2) 約位於 $140^\circ - 150^\circ \text{E}$, $35^\circ - 40^\circ \text{N}$ 附近，亦即位於日本本州東方海面上空。由觀測的 500mb 天氣圖估計，此高壓中心在 48 小時內移往西移動了 12 小時個經度。當 $H = 0$ 時，預報高壓系統迅速往西移動，48 小時後 (圖 1) 已移至中國北方上空，大約移動了 35 個經度。當 $H = 13 \times 10^{-13} \text{m}^{-1}$ 時，預報高壓系統幾乎滯留不動，48 小時後仍位於日本東方海面上空。由這兩個預報結果可以推論，對於夏天副熱帶高壓系統的預報而言，在預報公式中必須加 Helmholtz term 而且 H 值必須小於 $13 \times 10^{-13} \text{m}^{-1}$ 我們再選擇 $H = 6 \times 10^{-13} \text{m}^{-1}$ 作預報，48 小時後副熱帶高壓系統約往西移動了 5 個經度。顯然此 H 值仍大了些，可能 $H = 3 \times 10^{-13} \text{m}^{-1}$ 最恰當的數值。到目前為止，我們僅做了上述三個 H 值的預報。並將以 $H = 0$ 及 $6 \times 10^{-13} \text{m}^{-1}$ 作對於颱風路徑預報的討論。

圖 2 為妮娜颱風的觀測和各種預報的路徑以及初始流線函數的分佈圖。首先如前文 (蔡清彥，1976) 所述，採用 Arakawa Jacobian ， $d = 240 \text{km}$ 及 $H = 0$ 的預報颱風位速度太慢而且

36-48 小時的預報移動方向有偏差。下述三個預報路徑均為採用 Shuman and Vanderman Jacobian 的預報結果。若採用 $d = 240\text{km}$ ， $H = 0$ ，則預報速度非常接近於實際速度。可見 Shuman and Vanderman Jacobian 能夠較 Arakawa Jacobian 更正確的預報颱風位移速度。再進一步考慮 Helmholtz term，以 $H = 6 \times 10^{-13}\text{m}^{-1}$ 及 $d = 240\text{km}$ 作預報。此時預報颱風路徑相對於 $H = 0$ 的路徑往北偏了約 15° 角度。部份可能是因為 Helmholtz term 太大造成副熱帶高壓往西移動太慢的結果。另外我們採用縮小的網格點距離 $d = 160\text{km}$ ， $H = 6.0 \times 10^{-13}\text{m}^{-1}$ 作預報。此時的預報速度顯然太快。在第三節中曾經討論縮小網格點會增加颱風的移動速度，但此預報速度太快的原因仍待研究。

(二) 貝蒂颱風 (1975 年 9 月 21 日 00Z 至 9 月 23 日 00Z)

貝蒂中度颱風約於 9 月 22 日 10Z 登陸台灣東岸南部。此個案以 9 月 21 日 00Z 為初始時間，預報颱風路徑。圖 3 為貝蒂颱風的觀測和預報的路徑以及初始流線函數的分佈圖。因為其他的預報工作未完成，本節只討論採用 Shuman and Vanderman Jacobian $d = 240\text{km}$ ， $H = 13 \times 10^{-13}\text{m}^{-1}$ 的預報路徑。此個案的預報速度與觀測值很接近，證明 Shuman and Vanderman Jacobian 的採用能夠正確的預報颱風移動速度。預報方向在前 12 小時與觀測值很接近，但 12 小時後預報颱風往西北移動而實際颱風往

西北西移動。由上節知， $H = 13 \times 10^{-1} \text{m}^{-1}$ 值太大，因而造成副熱帶高壓滯留不移動的不合理現象。這可能是預報方向不正確的主要原因之一。雖然如此，肯定的解釋有待進一步的研究。

(三) 艾爾西颱風 (1975 年 10 月 10 日 12Z 至 10 月 12 日 12Z)

強烈颱風艾爾西約於 10 月 12 日 18Z 通過台灣南端。此個案以 10 月 10 日 12Z 為初始資料時間。圖 4 為艾爾西颱風的觀測和預報路徑以及初始時間的流線函數分佈圖。同前節一樣本節僅討論以 Shuman and Vanderman Jacobian, $d = 240\text{km}$ 及 $H = 13 \times 10^{-1} \text{m}^{-1}$ 的預報路徑。此個案與貝蒂颱風的預報成果相似，即預報位移速度與觀測速度接近而預報方向的偏差為偏北 30° 角度左右。另外貝蒂及艾爾西颱風的預報位移速度及方向均較前文接近事實。位移速度的改進的主要原因可能是 Shuman and Vanderman Jacobian 的採用，而位移方向的改進主要是因為本文修正了部份前文的初始資料。

六 結 論

本文僅為研究颱風路徑的數值預報的初步結果。主要討論 Helmholtz term 數值方法及網格點距離等的影響。一般而言採用 Shuman and Vanderman Jacobian $d = 240\text{km}$ 的預報結果良好。所得的颱風位移速度與觀測值接近。但是加了 Helmholtz term 後的預報方向都往北偏差。這可能部份是因為所採用的 H 值太大，部份也許是因為初始資料不正確。又颱風不合理的分裂成幾個中心的

預報誤差仍未改進。這可能也是造成不正確預報方向的主因之一。因此尋求避免颱風分裂的預報誤差的方法及找到最佳 H 值等以改進颱風路徑的預報是我們繼續努力的下一個目標。

七後記

本計劃是在國科會研究計劃 NSC-66M-0202-01(01) 輔助下完成的。計劃進行中會有多人參加工作，包括陳台琦、陳富美等小姐及李清勝、隋中興、戴金生等先生。

八參考資料

Sanders, F., A.C. Pike and J. P. Gaertner, 1975: A barotropic model for operational predictions of tracks of tropical storms. *J. Appl. Meteor.*, 14, 265-280.

Shuman, F. G. and L. W. Vanderman, 1968: Operational methods of truncation error control. *Lectures on short-range weather prediction, Leningrad, Hydrometeoizdat, 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。

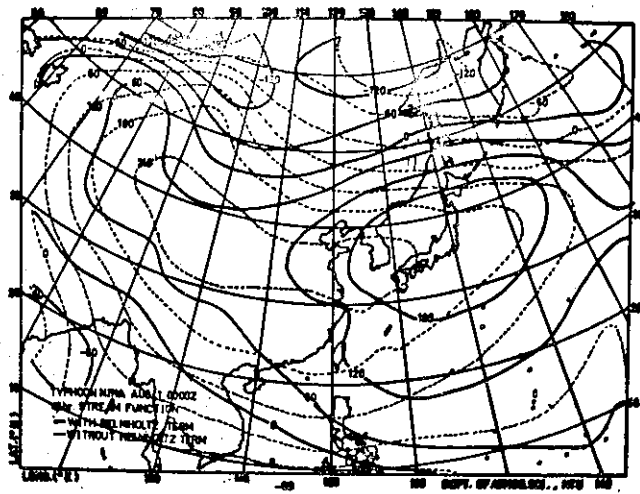


圖 1 妮娜颱風 $H = 0$ (虛線)， $6 \times 10^{-13} \text{m}^{-1}$ (實線) 的 48 小時預報流線函數，初始時間為 8 月 1 日 00Z。等值線標示之單位為 $10^5 \text{m}^2 \text{sec}^{-1}$ 。

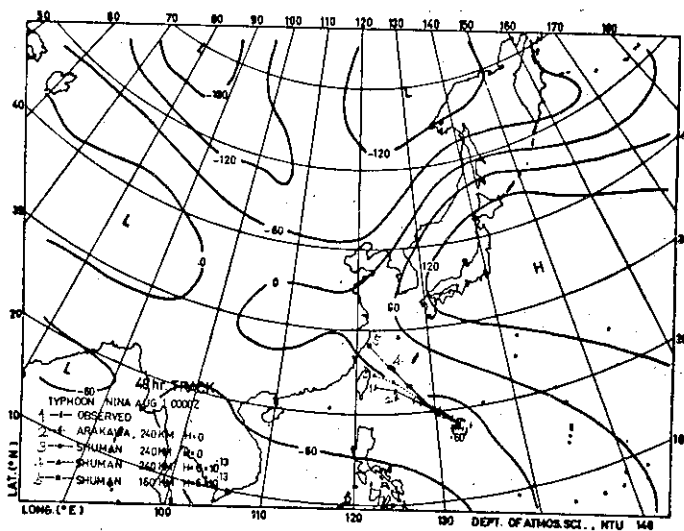


圖 2 1975 年 8 月 1 日 00Z 妮娜颱風初始流線函數分佈圖及五種颱風路徑。等值線標示之單位為 $10^5 \text{m}^2 \text{sec}^{-1}$ 。

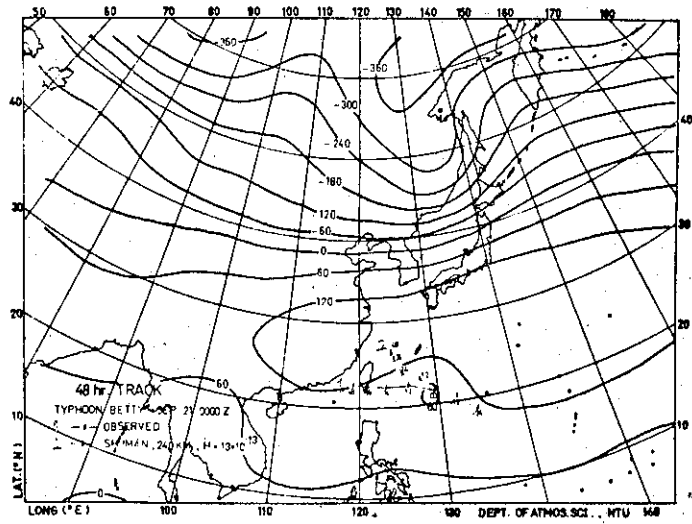


圖 3. 1975 年 9 月 21 日 00Z 貝蒂颱風初始流線函數分佈圖及二種颱風路徑。等值線標示之單位為 $10^5 \text{m}^2 \text{sec}^{-1}$ 。

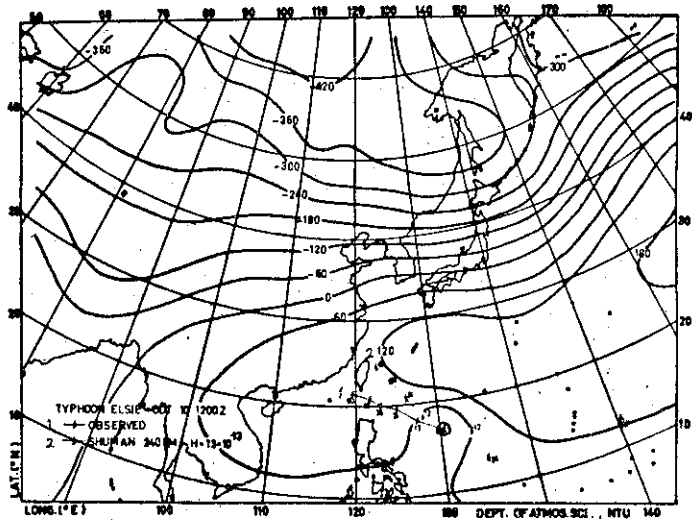


圖 4. 同圖 3. 但為艾爾西颱風。初始時間為 1975 年 10 月 10 日 12Z。

NUMERICAL PREDICTION OF TYPHOON TRACKS IN THE
AREA OF TAIWAN AND ITS VICINITY
CHING-YEN TSAY

ABSTRACT

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 discussed the vertically averaged vorticity equation, numerical method, analysis of synoptic network data, representation of a typhoon and computation methods of initial stream function. Tracks of Nina, Betty and Elsie typhoons in 1975 have been selected to study the effects of Helmholtz term, grid size and numerical methods. In the computation of the vorticity advection, Shuman and Vanderman's Jacobian has been used. This method, which is essentially fourth order space differencing method, is better in predicting the phase speed and group velocity of a small-scale system. Predictions by using Arakawa's Jacobian are also presented for comparison. The average forecasting position errors for 240 KM grid size are 200KM/24HR and 380KM/48HR respectively. In these cases, We found typhoons unrealistically splitted into several centers after 24 hours. We believe this phenomenon is resulted from the computational dispersion. Predictions with grid size of 160 KM show improvements.