

關於颱風運動的幾個小問題

劉廣英

On the Minor Problems of Typhoon Movement

Koung-Ying Liu

Abstract

Some factors which may influence the movement of Typhoons are discussed. The purpose of such a discussion is to make clear that what kind of phenomena may be found, if possible, on Typhoons which are affected by these factors. The results are very interesting.

一、前言

在日常預報颱風動態時，首先要考慮的是駛流（steering）場的情形，也就是說：基本上我們認定颱風移動是外力作用的結果。當然，除駛流外有些條件我們也經常討論到，譬如說梯度風對圓形渦旋運動的問題，颱風之渦旋內力對其本身的作用，以及地形影響等，都是常見的討論主題。本文就是要對以上幾種影響颱風運行的因素，提出一些初步的看法，尚祈學者先進不吝指正。

二、梯度風與颱風動向

如等壓線間隔為 δn ，則 δz 厚度內之大氣比輸量（transport capacity）[1]， δF ，可寫成

$$\delta F = \rho v \delta n \delta z \dots\dots\dots(1)$$

式中 ρ 為空氣密度， v 為梯度風速。

同時，

$$\frac{dv}{d\phi} = - \frac{v \Omega \cos \phi}{v k + \Omega \sin \phi} \dots\dots\dots(2)$$

(2)式中 ϕ 為緯度， Ω 為地轉角速度， k 為等壓線曲率。此式說明梯度風隨緯度增高而減小。根據此種關係，當颱風移至較高緯度時有三種可能運行方式：

(一)軸對稱的颱風：

對於一個軸對稱的圓低壓中心（如圖1）而言，中心南邊的梯度風速較北邊的大，亦即

$$\delta F > \delta F'$$

致使低壓中心東側為輻合區氣壓升高而西側為輻散區氣壓下降，如此則低壓及其渦旋（vortex）將向西移，並因受到地轉偏向力的作用而逐漸向北偏

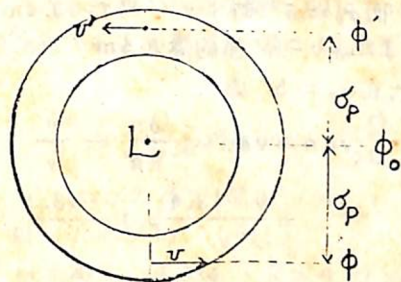


圖1：軸對稱低壓示意圖。

Fig1: Low with circular concentric isobars

。同時，由上述關係我們可以知道，除非它的中心正在北極，一個發展到大氣層頂的軸對稱圓型渦旋，即使無任何外力作用，也不可能駐留不動。

(二)偏心的颱風：

根據公式(1)，假定 ρ 及 δz 為常數，則 δF 與梯度風 v 及等壓（高）線寬度 δn 的乘積成正比，而由

$$v = - \frac{f}{2k} \pm \left(\frac{f^2}{4k^2} - \frac{1}{\rho k} \frac{\delta p}{\delta k} \right)^{1/2}$$

知 v 與 δn 並非一對一的關係，所以如果颱風中的等壓（高）線如圖2所示，其向西移動的趨勢可以部份或全部抵消，甚至有形成向東移的可能。

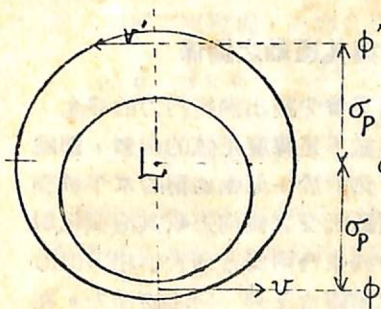


圖2：南北不對稱之低壓示意圖。

Fig2: Low with circular eccentric isobars

在此種偏心圓低壓中心而言，如果

$$\partial F = \partial F' \Rightarrow kv + 2\Omega \sin \phi \\ = k'v' + 2\Omega \sin \phi' \dots \dots \dots (3)$$

則其中心即可維持駐留的狀態。

設C為低壓渦旋之移速，公式(3)可推演出[1]以下關係：

$$v - v' - 2C \cong 4\Omega a \sigma_p^2 \cos \phi \dots \dots \dots (4)$$

式中a為地球半徑， ϕ_0 為低壓中心的緯度， $\sigma_p = (\phi' - \phi) / 2\phi$ 。由此關係式可知，一駐留低壓(C = 0)南北梯度風速之差隨緯度差半數(σ_p)之平方而變，是以在結構上愈近中心其等壓(高)線愈近於同心圓，亦即愈向外偏心愈大。例如當 $\phi_0 = 20^\circ N$ ，而 $\sigma_p = 5^\circ$ 時， $v - v' \cong 13.4 \text{ m/sec}$ ，而 $\sigma_p = 1^\circ$ 時 $v - v'$ 僅約為 0.5 m/sec 。

∴在 $\sigma_p = 5^\circ$ 處

$$v \partial n = v' \partial n' \Rightarrow \frac{\partial n}{\partial n'} = \frac{v'}{v} \\ = \frac{v - 13.4}{v} = 1 - \frac{13.4}{v}$$

在 $\sigma_p = 1^\circ$ 處

$$v \partial n = v' \partial n' \Rightarrow \frac{\partial n}{\partial n'} = \frac{v'}{v} = \frac{v - 0.5}{v} \\ = 1 - \frac{0.5}{v}$$

設 $v = 26.4 \text{ m/sec}$ ，則得

$$\sigma_p = 5^\circ \text{ 處，} \partial n = 0.5 \partial n' \\ \sigma_p = 1^\circ \text{ 處，} \partial n = (1 - 0.5 / 26.4) \partial n' \\ \therefore \partial n \cong \partial n'$$

如低壓中心偏心狀況超過了公式(4)的臨界條件，則其中心會向東偏南移動。

就颱風而言，常見的狀況是北方等壓(高)線密度較大，亦即中心向北偏，使 $\partial n > \partial n'$ ，在此狀況下，低壓東方之輻合及西方之輻散均將增強，即低壓及其渦旋將向西偏北移動，且較同心圓低壓為快。

三、颱風渦旋內力與其運動之關係

三十多年前羅斯貝曾先提出渦旋內力的概念。他指出，因為地轉參數f是緯度正弦的函數，即隨着緯度增加而變大，則對於一個軸對稱的水平渦旋而言，其中心北邊質點所受之偏向力較其南側相對質點所受者為大，而其東西兩側者則大小相等但方向相反。因此，渦旋整體會受到一向北的淨力。在預報颱風路徑時，我們難免會想到此種內力的作用

，甚至於會把颱風偏離駛流北移歸因於它。李爾(Riel) [2]也認為，此一內力對於一般大小颱風，雖然每天只能造成一天偏北一個緯度的影響，但累積的結果仍是不可忽視的。

為了推導颱風內力的數學式，我們首先引用一個颱風風速分佈的模式如下 [2]：

1 在最大暴風半徑以外： $v_\theta r^x = \text{常數}$

2 在最大暴風半徑以內： $v_\theta = cr$

式中 v_θ 為颱風之切線風速，在軸對稱情況下 $v_\theta \cong v$ (颱風風速)；r為離開颱風中心之距離，c為常數，而x則在0.4至0.6之間，此一模式曾經 [3] 以統計方法，引用台灣地區颱風資料加以驗證。根據此一模式，颱風中心風速為零，而後風速隨距離而迅速增大，至最大風速後又隨距離而減小。如此，在最大暴風半徑內其風速分佈如同旋轉剛體，在以颱風中心為原點之水平極座標中，此風速分佈可以 $v_\theta = r\omega$ 表之。

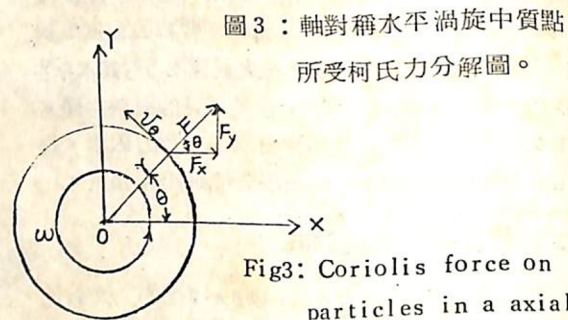


圖3：軸對稱水平渦旋中質點所受柯氏力分解圖。

圖3為一軸對稱水平渦旋中質點所受柯氏力之分解示意圖。圖中F為柯氏力， ω 為角速度。由圖可知，颱風環流內單位質量空氣所受之柯氏力的東西(F_x)及南北(F_y)分量分別為

$$F_x = 2\Omega r \omega \sin \phi \cos \theta \dots \dots \dots (5)$$

$$F_y = 2\Omega r \omega \sin \phi \sin \theta \dots \dots \dots (6)$$

式中 Ω 為地球自轉之角速度， ϕ 是空氣質點所在緯度。根據三角關係及級數展開式可得

$$\sin \phi \cong \sin \phi_0 + \frac{r}{R} \cos \phi_0 \sin \theta \dots \dots \dots (7)$$

式中 ϕ_0 為颱風中心所在之緯度，R則是地球的半徑。將公式(7)代入公式(5)後再對近似剛體旋轉($r = a$)的部份積分，則得

$$\int_0^a \int_0^{2\pi} F_x r dr d\theta = 0$$

即在軸對稱的條件下，颱風東西向方向的內力總和為零。但在南北方向，即將(7)式代入(6)式後做同樣

的積分，則得出內力總和為

$$\int_0^a \int_0^{2\pi} F_y r dr d\theta = \int_0^a \int_0^{2\pi} 2\Omega r \omega [\sin \phi_0 + \frac{r}{R} \cos \phi_0 \sin \theta] \sin \theta r dr d\theta \\ = 0 + \frac{\Omega \pi a^4}{2R} \omega \cos \phi_0$$

或該部份單位面積所受之南北向渦旋內力為 $\frac{\Omega}{2R}$

$a^2 \omega \cos \phi_0$ 。此一結果告訴我們軸對稱颱風在南北方向單位面積上所受之渦旋內力與中心所在緯度之餘弦成正比，即愈在高緯度所受內力愈大；亦與 $a^2 \omega \cong a v_{\max}$ 成正比，此處a為颱風最大風速($V_{\max}$)圈距中心之距離。這也就是說，當颱風位置相同時，有兩個因素左右其所受內力，那就是最大風速($V_{\max}$)與該風速圈離開颱風中心之距離(a)。

以上是颱風渦旋內力的簡單推導。根據牛頓運動定律，物體受淨力作用時就會產生位移。由上段可知，軸對稱的颱風會受一個向北的內力，此力使其中心向北位移，此時我們要記住，只要颱風向北移，它就會受到向東的偏向力，是以它的軌跡應該是逐漸右偏。為了更清楚的瞭解內力對颱風運動的影響，我們有進一步分析的必要。

(一)僅受渦旋內力作用下之運動：

根據前面的分析，在此條件下，颱風之運動可以下述微分方程示之：

$$\dot{u} - fv = 0 \\ \dot{v} + fu = \frac{\Omega}{2R} a^2 \omega \cos \phi_0 \dots \dots \dots (8)$$

式中u及 $\dot{u}$ 分別為東西方向之颱風移速及加速度，v及 $\dot{v}$ 則為南北方向者。為了簡化起見，解(8)式時我們假定柯氏參數f為常數(f_0)，而且南北方向的內力也假定它不改變(以 Am 表之)。同時設在開始($t = 0$)時，颱風中心在座標原點($x = y = 0$)，且其加速度為零。如此由公式(8)可解得

$$x = \frac{Am}{f_0^2} (f_0 t - \sin f_0 t) \\ y = \frac{Am}{f_0^2} (1 - \cos f_0 t) \dots \dots \dots (9)$$

這表示，軸對稱颱風在只有渦旋內力作用時，其中心是沿着 $y = Am / f_0^2$ 的一條直線，以擺線的形式向東移動。此一擺線的振幅為 Am / f_0^2 ，週期則為 $2\pi / f_0$ ，也就是如圖4所表示的樣子。

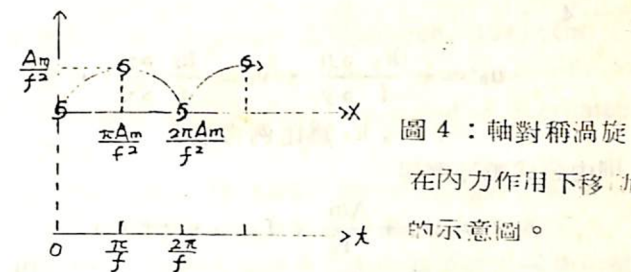


Fig4: The track of an axial symmetric vortex under the influences of its inner force

進一步我們也可以估計一下內力作用下颱風移動的詳情。假定有一個中等的颱風中心位於北緯20度，其最大風速為100哩/時 $\cong 50 \text{ m/sec}$ ，此最大風速圈距中心之半徑為30哩 $\cong 55 \text{ 公里}$ 。在此條件下

$$\frac{Am}{f_0^2} = \frac{\Omega}{2Rf_0^2} a^2 \omega \cos \phi \cong \frac{\Omega}{2Rf_0^2} a V_{\max} \cos \phi \\ \therefore a V_{\max} \cong 2.75 \times 10^6 \text{ m}^2 / \text{sec} \\ \Omega = 7.29 \times 10^{-5} / \text{sec} \\ \cos 20^\circ = 0.934 \cdot R = 6.37 \times 10^6 \text{ m} \\ \therefore Am \cong 1.5 \times 10^{-5} \text{ m} / \text{sec}^2 \\ (\text{單位質量所受內力}) \\ \frac{Am}{f_0^2} \cong 6 \times 10^3 \text{ m} \cong 3.3 \text{ 哩}$$

由以上的數字顯示，渦旋內力會使颱風在行進中擺動，但擺動的振幅很小，很難觀測得出來。同時，由公式(9)可知，在渦旋內力作用下，颱風移速為

$$\frac{Am}{f_0} \cong 0.3 \text{ m/sec} \cong 0.6 \text{ 哩/時}$$

就颱風的平均移動速率而言，此一速率也是相當小的。

(二)直線型穩定氣壓場作用下之情形：

為了比較渦旋內力與駛流對颱風移動之影響，下面再討論一種簡單的狀況，即假定駛流場為直線形式的穩定氣壓場，此時公式(8)可改寫為

$$\dot{u} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \dot{v} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + Am \dots \dots \dots (10)$$

仍假設我們的座標原點就在颱風中心，且颱風是以駛流場風速的固定百分比移動，即初始條件訂為

$$t = 0 \text{ 時 } x = y = 0$$

$$u_0 = -\frac{k_1}{f} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad v_0 = \frac{k_2}{f} \frac{\partial p}{\partial x},$$

(k_1, k_2 為比例常數)

則由公式(10)可解得

$$x = u_0 t + \frac{Am}{f_0^2} (f_0 t - \sin f_0 t) \quad \dots\dots(11)$$

$$y = v_0 t + \frac{Am}{f_0^2} (1 - \cos f_0 t)$$

這表示當有駛流場存在時，颱風是沿着駛流移動，但同時亦發生擺動。不過，將公式(10)的第二條式子做一下各項大小的分析 (scale analysis)，由

$$\frac{\partial p}{\partial x} \sim \frac{10^{-5} \text{ mb}}{\text{m}} \sim 10^{-5} \text{ gm/cm}^2 \text{ sec}^2$$

而在海平面高度上空氣之密度 $\rho \approx 1.2 \times 10^{-3} \text{ gm/cm}^3$ ；在 100mb 高度時 $\rho \sim 10^{-4} \text{ gm/cm}^3$ ，即在 100mb 以內空氣之平均密度可視同二者的平均，即 $\bar{\rho} \sim 6 \times 10^{-4} \text{ gm/cm}^3$ 。

$$\therefore \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \approx \frac{10}{6} \text{ cm/sec}^2 \sim 1.7 \times 10^{-2} \text{ m/sec}^2$$

即較 Am 項約大三級 (order)。由此可見，駛流對颱風運動的作用要較渦旋內力大的多。同時，即使考慮到此種內力，颱風亦不是向北直進而是擺動。

四、山隅效應 (corner effect)：

地形對於大氣運動的影響極為明顯，要者如山岳波，其影響及於全球。在颱風而言，此種影響亦大，因而研究者甚多，此處僅討論其中的一個小因素，即所謂山隅效應。山隅效應對於溫帶氣旋而言，以非絕熱作用較大，即由於地表對氣旋供熱的不均勻會導致氣旋某一部分的加強或減弱，但對颱風來說，應以環流被阻擋或破壞的程度較為重要，是以本文僅討論此種效用。

颱風環流為旋流 (rotational flow) 及駛流兩部份所合成。當颱風自東向西接近南北走向之地形時，旋流之西邊部份將漸被阻，致東西方向的對稱會遭到破壞，產生偏北的運動。而在駛流場而言，風是自東向西穿過障礙物，此時迎風面距障礙物某一距離處會產生 (或增強) 氣旋式彎曲 [5]，使地形高度內之駛流方向偏南，可導致受低層氣流導引之颱風路徑向南偏，但此種作用會因駛流場的輻合作用所促成之氣壓升高而減小，僅使移速緩慢者的路徑向北偏。(見圖 5)

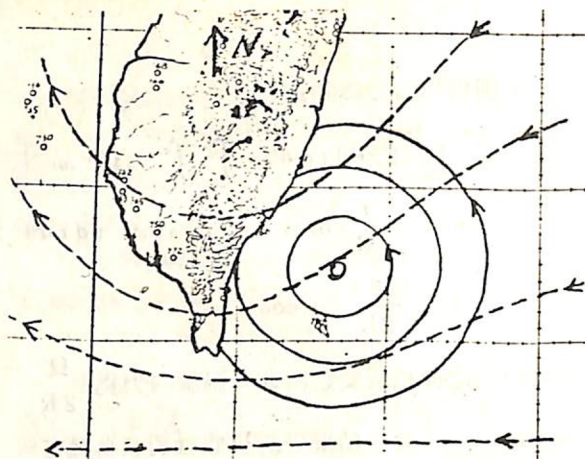


圖 5：經台灣南部西進颱風之流場示意圖。
Fig5: A schematic diagram of the stream flow of a westward moving typhoon near south part of Taiwan

在同一情況下，如颱風經過南北向地形之北端時，旋流部份對路徑之影響如前者同，駛流部份除前述作用外，更加上分流 (separation) 現象 (見圖 6)，此一部份亦使颱風北移，是以當西進颱風接近台灣及非島北端時，其路徑會發生明顯之北偏現象。

圖 6：經台灣北部西進颱風之流場示意圖。

Fig6: A schematic diagram of the stream flow of a westward moving typhoon near north part of Taiwan

以下我們再討論一下自西向東行進颱風的情形。此時駛流為西風，它於爬山中逐漸南偏，即逐漸生成或增強反氣旋曲率，而後在背風面生成槽線，所以駛流亦為向南偏，可導致受低層氣流導引之颱風行動偏南，此一作用如發生於南北向地形之北端，會因分流作用而減小，而在南端時則會因分流作用而加大。在旋流部份來說，此種情況下是颱風東側環流受到破壞，產生向南的運動。由以上二者合併可知，東進颱風經過本省南北兩端時路徑有偏南的趨勢而以經過南端者偏向較明顯。

上述討論相當粗略，實際的現象要複雜的多，因為地形對颱風運動的影響，不但與地形本身的大小及其他特性有關，與颱風本身的特性有關，亦與駛流的狀況有著密切的關係，均有待進一步研究之。再者，一般而言 [4] 颱風移過台灣時，低層約

4000—5000 呎以下具有繞山現象的特徵。但在該層空氣以上，氣流與山脈走向間的夾角大時就會發生越山運動。此種氣流運動垂直方面的變化亦將影響颱風的移動，亦有進一步探討之必要。

五、結語

本文討論了影響颱風運動的小問題，主要之目標有二：(1)對這些小問題的內涵加以說明，(2)探討其對颱風運動路徑的可能影響。由於受到學識能力的限制，本文不但可能沒有達到上述目標，錯誤恐亦在所難免，尚祈學者先進不吝指正。

致謝：本文插圖由李紀恩氣象官繪製，謹致謝意。

參考文獻

- (1) Bjerknes, J., and J. Hombøe, 1944: On the theory of cyclones. Journal of Meteorology. Vol. 1. no.1 and 2. September, 1944.
- (2) Riehl, H.,: Tropical meteorology. Chapter 11. 民國 58 年，台北市大學圖書出版發行。
- (3) 胡三奇：台灣各地區風速與颱風位置之關係。氣象預報與分析，57 期。民國六十五年五月，空軍氣象聯隊氣象中心出版。
- (4) 曲克恭、林則銘、俞家忠、王時鼎：台灣破壞性風力之研究。空軍氣象聯隊氣象中心研究報告 006 號。民國 63 年七月出版。
- (5) Holton, J., 1972: New York, U. S. A. An introduction to dynamic meteorology. Academic Press, Inc.

「泰山戴帽，短工睡覺」

是流行在山東省泰安縣農民間的氣象諺語，對於盛夏午後陣雨有很好的短時預報性。這句話包含着綜觀形勢以及地形的影響。

東嶽泰山是我國名山之一，歷史上與它有關的軼事很多，而對局部性天氣來說，由於它是魯中平原，汶河流域唯一的高山，且距海不遠（東北去渤海灣，東南去膠州灣，都不足兩百里），影響頗大。首先我們看看綜觀上的條件：當對流性不穩定之大氣，因地形抬升而成雲，並由而導致陣雨或雷陣雨，是「泰山戴帽」現象產生，進而促使工人停工休息的原因，要發生這一連串事件，在泰山來說需要東來風，所以綜觀條件與河北定海的「雨後東風雨更凶」者相似，而以氣壓場呈東高西低配置時現象最顯。其次，在地形上來說，泰山主峯乃平原中突起之獨立山頭，坡甚峻直，所以當東風吹到時，受阻抬升迅速，如空氣中水份充沛，即可生成對流雲，此時在迎風面山下工作的農夫就會看到泰山像戴了帽子一般，連南天門都看不見了！

夏季當大陸變性高壓中心東移至渤海或以東時，午後最易發生「泰山戴帽」的現象，此時一場暴雨常可使田埂漫水，打零工的又怎能不睡覺呢！

「雨後東風雨更凶」

是流傳在河北省保定地區的一句諺語。要運用此一諺語預報天氣，還要參考另外兩句才行，那就是「東風吹冷，大雨登門」，「東風吹乾，有雨不來」。結合這三句話可知，保定地區陰雨需要三個條件：濕度升，氣溫降，吹東風。

在綜觀上，該地區吹東風的型可歸納如下：

- 1 高壓控制下的東風，此時要滿足上述三個條件高壓中心應在其東北方，氣流自東北經海面迴流至保定地區。
- 2 低壓控制下的東風，此時如低壓中心在其北方，亦有冷空氣自東北方吹來，有利於降水。如果此時保定地區位於高空槽前，第二天下雨的可能性達 70% 以上。

只要配合上正確的綜觀形勢，這條諺語的實用性很大。我們可以說，大氣不會給我們毫無徵兆的突變天氣，只是大家沒注意觀察，來不及觀察，或功力不夠！