

# 渦旋對稱化過程對颱風強度的影響

林李耀<sup>1</sup>、郭鴻基<sup>2</sup>

國家災害防救科技中心<sup>1</sup>

臺灣大學大氣科學系<sup>2</sup>

## 摘要

颱風渦旋在正壓的軸對稱動力過程中，可以帶動中心氣壓的下降 (Kossin and Schubert, 2001)，然而在不同渦旋初始結構下，其造成的壓力距平亦有所差異。本文利用觀測中常見的幾種渦旋結構 (環形渦旋、偏移眼形渦旋、不對稱單渦旋)，探討非絕熱效應無顯著改變下，渦旋結構差異所導致的氣壓下降情形。經由數值模擬分析中發現，在合理颱風風速 (60~80 m/s) 比較下，環形渦旋的氣壓下降最為顯著 (大於 30 hPa)，偏移眼形渦旋的氣壓有小幅下降 (大約 10 hPa)，無眼不對稱渦旋則僅有 1~2 hPa。

另外，我們也分析各類渦旋在對稱化過程中最大風速與所在半徑的變化情形。

關鍵詞：颱風、渦旋對稱化、渦旋結構。

## 一、前言

颱風中心附近觀測到生命期數個小時的中尺度渦旋已是公認的事實 (Black and Marks, 1991; Kossin and Schubert, 2001)。2001 年 9 月納莉颱風侵台期間，透過高解析衛星照片也清

楚的發現中心附近數個渦旋結構，這些中尺度渦旋以及多邊形颱風眼 (Lewis and Hawkins, 1982; Muramatsu, 1986; Kossin et al., 2002)，很可能是渦旋對稱化過程中伴隨出現的現象 (Schubert et al., 1999)。重要的是，渦旋的對稱化合併過程可以帶動渦旋中心氣壓的下降，如此一來，颱風也有增強可能 (Kossin and Schubert, 2001)。

經由觀測分析，隨著颱風形狀的差異，其基本的渦度空間分布也有所不同 (Kossin and Eastin, 2001)，因此我們利用幾種典型的颱風中心渦旋結構，其中包括環形渦旋 (annular ring)、偏移眼形渦旋 (offset eye)、無眼不對稱渦旋 (lopsided monopole) 三類渦旋，來探討對稱化過程中渦旋結構對颱風強度變化的影響程度。

## 二、數值模式

在研究颱風強度的變化時，邊界層與水氣無疑扮演重要角色，因此若要忠實的詮釋強度特徵，完整的非線性動力過程以及複雜的水氣非絕熱效應都應該考慮。只是本研究的重點在釐清渦旋對稱化過程將渦度重新分布後，是否明顯影響颱風強度，在此目的下，我們的實驗並不需考慮水氣，基本動力也以平流動力為基礎，因此使用無輻散正壓模式 (Nondivergent

barotropic model), 進行數值模擬, 基本方程如下:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(\psi, \zeta)}{\partial(x, y)} = \nu \nabla^2 \zeta \quad (1)$$

$$\nabla^2 \psi = \zeta \quad (2)$$

(1)式為渦度預報方程, 其中  $\nu = 6.5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , 代表很小的 viscosity 耗散項, (2)式為流函數與渦度場的關係, 至於壓力場則是利用梯度風非線性平衡方程診斷而來:

$$\frac{1}{\rho} \nabla^2 p = f \nabla^2 \psi + 2 \left[ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \quad (3)$$

其中  $\rho = 1.13 \text{ kgm}^{-3}$ ,  $f = 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

在實驗設計上, 模式水平區域範圍為  $200 \times 200 \text{ km}$ , 水平網格均為  $512 \times 512$  點, 積分時間步長為 6 秒, 其他各組實驗參數設計如表一所示, 其中  $\gamma$  為無因次的渦旋強度比, A 為環形渦旋眼牆內部面積比, D 為環形渦旋眼牆厚度比。

### 三、模擬結果與分析

圖一為環形渦旋不同渦旋強度比 ( $\gamma=1\sim 4$ ) 初始條件下, 積分 0, 6, 12, 24 小時後的空間渦度分布情形。由圖中得知在滿足正壓不穩定條件下, 環狀結構先破碎為 7 個小渦旋後 (圖中未示) 再逐漸合併, 在  $\gamma=1$  時 (渦旋最大風速為  $22 \text{ m/s}$ ), 積分 24 小時後為 4 個渦旋, 但隨著實驗的  $\gamma$  增大, 較大的水平風速伴隨較快的渦旋合併過程, 24 小時後  $\gamma=2\sim 4$  均已合併成為單一渦旋。

圖二為圖一實驗中, 渦旋壓力最大負距平中心隨時間變化情形, 除了  $\gamma=1$  壓力無明顯下降外,  $\gamma=2\sim 4$  均呈現階梯形的壓力下降特徵, 無論是剛開

始的渦旋破碎或是後來的渦旋合併, 這些較顯著的壓力下降都反應渦度在局部區域集中現象, 以  $\gamma=4$  實驗為例, 在積分第 12 小時左右的渦旋合併過程可以造成大約  $15 \text{ hPa}$  的壓力下降。

圖三與圖四分別為偏移眼形與無眼不對稱渦旋在  $\gamma=1\sim 4$  初始條件下, 積分 0, 6, 12, 24 小時後的空間渦度分布情形。圖中顯示這兩類渦旋在積分過程中並未破碎成數個小渦旋, 偏移眼形渦旋的眼形結構在對稱化過程中逐漸變形, 最後成為單一渦旋結構; 而無眼不對稱渦旋亦快速調整為軸對稱渦旋結構。

為了探討三種不同渦旋的氣壓下降趨勢, 我們選取合理颱風風速範圍 ( $60\sim 70 \text{ m/s}$ ) 下的實驗 (A3, O2, L2) 作為標準組進行分析, 圖五即為標準組實驗的中心氣壓隨時間變化情形, 圖中清楚發現, 環形渦旋在破碎合併過程中, 大量渦度在局部區域集中 (中尺度渦旋) 造成壓力下降。實驗 A3 歷經二次快速的破碎與合併階段, 渦旋中心壓力在 24hr 內下降了大約  $30 \text{ hPa}$ 。偏移眼渦旋雖然沒有發生環形渦旋的渦旋合併過程, 但對稱化過程中的渦度混合使中心氣壓下降大約  $10 \text{ hPa}$ , 至於無眼不對稱渦旋的對稱化過程中, 局部渦度沒有發生太大變化, 因此中心氣壓僅下降  $1\sim 2 \text{ hPa}$ 。因此環形渦旋在正壓對稱化過程中有較大的潛勢可以造成颱風的增強。

### 四、討論

Kossin and Eastin (2001) 根據觀測將不同渦旋軸對稱結構分類為 regime I 與 regime II 兩大類, regime I 渦旋特

徵為中心附近渦度甚小，主要渦度集中在渦旋外圍眼牆區域內，這類渦旋通常為颱風增強前的特徵；regime II 渦旋的特徵為環流中心已有相當的渦度存在，這類渦旋通常發生在颱風增強期之後。

圖六為標準組實驗切向風速（左欄）、氣壓差（中欄）、與渦度（右欄）的軸對稱結構分析，其中初始為虛線，24 小時為實線。由初始渦度結構中可以看出，環形渦旋為典型 regime I 渦旋，模擬 24 hr 結果壓力有明顯下降，此點與觀測 regime I 渦旋常發生在增強期前之特徵相吻合；至於觀測中 regime I 渦旋過渡到 regime II 的過程可小於 1 hr，這點也可由圖五 A3 實驗的渦旋合併過程得到說明。至於偏移眼與無眼不對稱渦旋都是典型 regime II 渦旋，模擬 24 hr 結果中心壓力下降相當有限，也與觀測 regime II 渦旋常發生在增強期之後的特徵相同。

除了渦度結構與氣壓變化特徵外，渦旋最大切向風速與風速所在半徑的變化（圖六左欄）也相當值得討論。過去我們常將颱風視為 Rankine-like vortex，因此在渦度沒有大變化下，渦旋半徑內縮時最大風速也同時增加，但由環形渦旋積分 24hr 的結果發現，其最大風速半徑由 17 km 內縮到 6.5 km，切向風速卻由 63 m/s 下降到 45 m/s。足見不同渦旋結構對颱風強度變化而言也有顯著差異。偏移眼渦旋 24 hr 最大風速半徑內縮 4.5 km，但風速增加 9 m/s，而無眼不對稱渦旋 24hr 結果最大風速半徑內縮 1 km，風速下降 1.6 m/s。

由以上的討論得知，環形渦旋有較大的潛勢造成颱風增強，因此，我們

改變環形渦旋結構內部面積與眼牆厚度來進行敏感度測試，其空間渦度分布結果分別如圖七與圖八所示，圖七說明當渦旋內部面積增加時，渦旋合併發生所需的時間較長，因此 A=2~4 實驗在 24 hr 內均無法合併為單一渦旋，壓力下降均不顯著（~10 hPa）。而當渦旋厚度增加時（圖八），其合併速度較快（因平流風速增加），同時氣壓也下降更顯著（因局部混合的渦度增加），A10 實驗（D=4）24 hr 壓力下降可達 47.5 hPa。

## 五、結論

我們將所有模擬結果歸納如下：圖九為三種典型渦旋結構 24hr 壓力下降分析，橫軸為渦旋最大風速，縱軸為氣壓差。在三種典型渦旋結構中以環形渦旋（regime I）的氣壓下降最為顯著，隨著渦旋風速的增加，其壓力下降也顯著增加，當風速在 85m/s 時壓力下降可達 60 hPa，各實驗壓力下降程度取決於有多少渦度可以在局部區域混合集中。偏移眼渦旋（regime II）的氣壓下降較不顯著，當風速在 77m/s 時壓力下降大約 12 hPa，而無眼不對稱渦旋下降僅 1~2 hPa。

圖十為三種典型渦旋結構 24hr 最大風速與所在半徑變化分析，橫軸為最大風速半徑距中心距離變化，縱軸為渦旋風速變化。由圖中可知，環形渦旋對稱化結果其渦旋最大切向風速半徑內縮，其風速也下降，各種不同敏感度實驗結果均呈現相同的特徵。偏移眼形渦旋對稱化結果與環形渦旋不同，其渦旋最大切向風速半徑內縮，但風速卻是上升，其特徵與 Rankine-like vortex 渦旋半徑內縮的情

形相似。而無眼不對稱渦旋的對稱化結果變化不大。

## 六、參考文獻

- Black, P. G., and F. D. Marks, 1991: The structure of an eyewall meso-vortex in Hurricane Hugo (1989). *Proc. 19<sup>th</sup> Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc., 579-582.
- Kossin, J., P., and M. D. Eastin, 2001: Two distinct regimes in the kinematic and thermodynamic structure of the hurricane eye and eyewall. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 1079-1090.
- Kossin, J., P., and W. H. Schubert, 2001: Mesovortices, polygonal flow patterns, and rapid pressure falls in hurricane-like vortices. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 2196-2209.
- Kossin, J., P., and B. D. McNoldy, W. H. Schubert, 2002: Vortical swirl in hurricane eye clouds. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 3144-3149.
- Lewis, B. M., and H. F. Hawkins, 1982: Polygonal eye walls and rainbands in hurricanes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **63**, 1294-1300.
- Muramatsu, T., 1986 : The structure of polygonal eye of a typhoon., *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 913-921.
- Schubert, W. H., M. T. Montgomery, R. K. Taft, T. A. Guinn, S. R. Fulton, J. P. Kossin, and J. P. Edwards, 1999: Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1197-1223.

Annual ring vortex experiments

|     | $C_{max}$<br>( $\times 10^3 s^{-1}$ ) | $V_{max}$<br>( $ms^{-1}$ ) | $\gamma$ | A | D | M/NM |
|-----|---------------------------------------|----------------------------|----------|---|---|------|
| A1  | 1.2                                   | 22.5                       | 1        | 1 | 1 | NM   |
| A2  | 2.4                                   | 43.3                       | 2        | 1 | 1 | M    |
| A3  | 3.6                                   | 64.1                       | 3        | 1 | 1 | M    |
| A4  | 4.8                                   | 84.9                       | 4        | 1 | 1 | M    |
| A5  | 2.4                                   | 44.3                       | 2        | 2 | 1 | NM   |
| A6  | 2.4                                   | 44.7                       | 2        | 3 | 1 | NM   |
| A7  | 2.4                                   | 44.7                       | 2        | 4 | 1 | NM   |
| A8  | 2.4                                   | 59.2                       | 2        | 1 | 2 | M    |
| A9  | 2.4                                   | 69.8                       | 2        | 1 | 3 | M    |
| A10 | 2.4                                   | 79.2                       | 2        | 1 | 4 | M    |

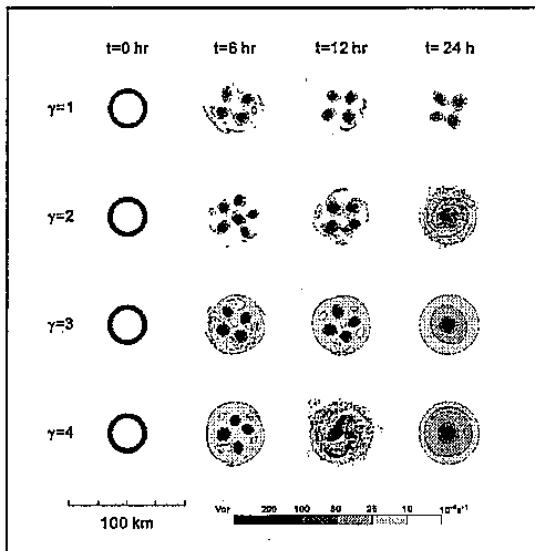
Offset eye vortex experiments

|    | $C_{max}$<br>( $\times 10^3 s^{-1}$ ) | $V_{max}$<br>( $ms^{-1}$ ) | $\gamma$ |
|----|---------------------------------------|----------------------------|----------|
| O1 | 3.0                                   | 39.7                       | 1        |
| O2 | 6.0                                   | 77.0                       | 2        |
| O3 | 9.0                                   | 114.3                      | 3        |
| O4 | 12.0                                  | 151.6                      | 4        |

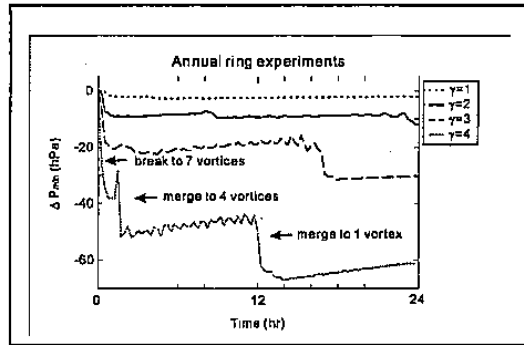
Lopsided vortex experiments

|    | $C_{max}$<br>( $\times 10^3 s^{-1}$ ) | $V_{max}$<br>( $ms^{-1}$ ) | $\gamma$ |
|----|---------------------------------------|----------------------------|----------|
| L1 | 3.0                                   | 30.9                       | 1        |
| L2 | 6.0                                   | 61.9                       | 2        |
| L3 | 9.0                                   | 92.8                       | 3        |
| L4 | 12.0                                  | 123.8                      | 4        |

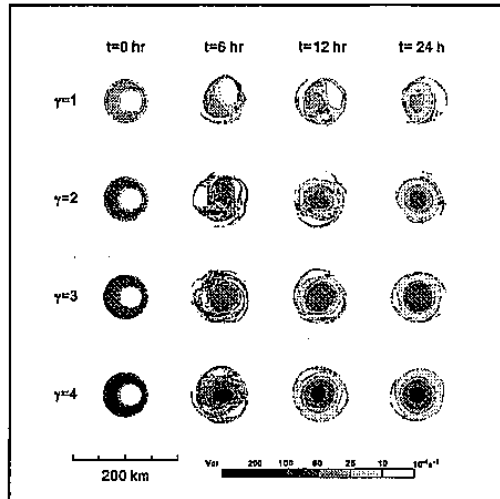
表一：不同初始渦旋型態的實驗設計列表。其中  $C_{max}$  為渦旋最大渦度， $V_{max}$  為渦旋最大風速， $\gamma$  為各組之渦度比參數 ( $C_{max}/C_{1max}$ )，A 為相對實驗 A2 的渦旋內部面積比，D 為相對實驗 A2 的眼牆厚度比。



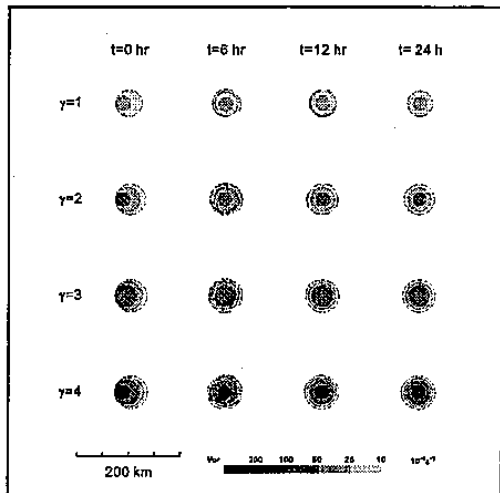
圖一：環形 (annual ring) 渦旋強度比 ( $\gamma$ ) 的敏感度測試 ( $\gamma=1-4$ )，其中  $A=1, D=1$ 。(實驗 A1~A4)



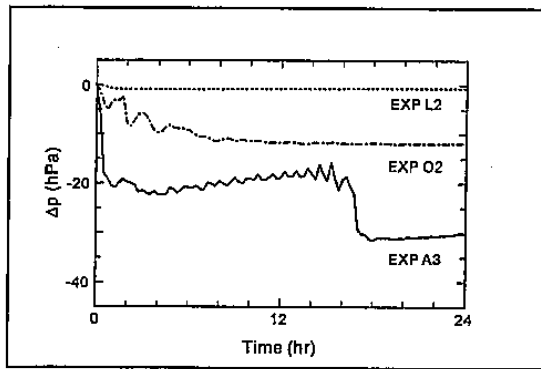
圖二：相對圖一的渦旋低壓中心壓力隨時間變化圖。



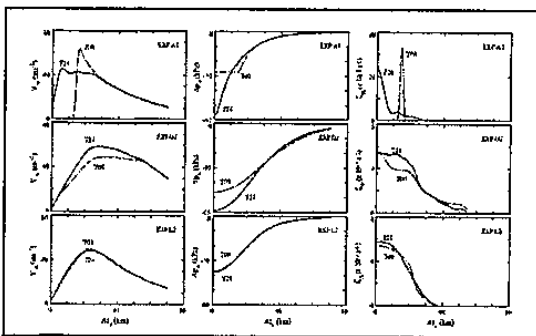
圖三：與圖一相同，但為偏移眼 (offset eye) 渦旋實驗組。(實驗 O1~O4)



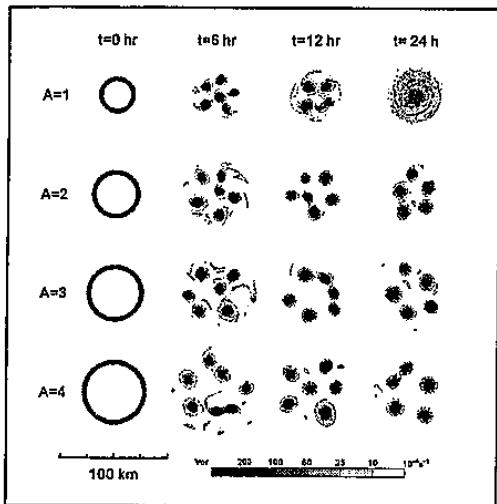
圖四：與圖一相同，但為無眼不對稱 (lopsided monopole) 渦旋實驗組。(實驗 L1~L4)



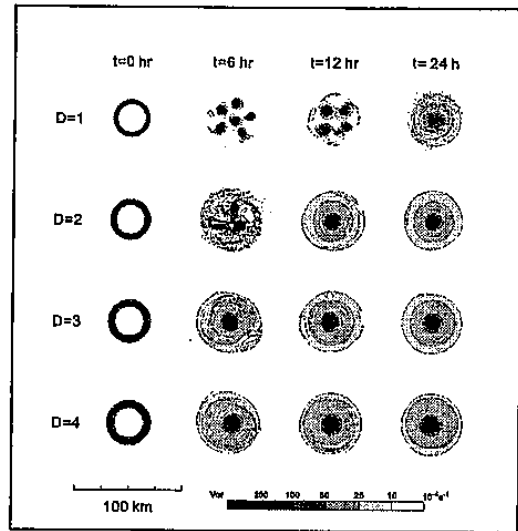
圖五：三種渦旋標準組實驗 (A3,O2,L2) 的氣壓下降隨時間變化圖。



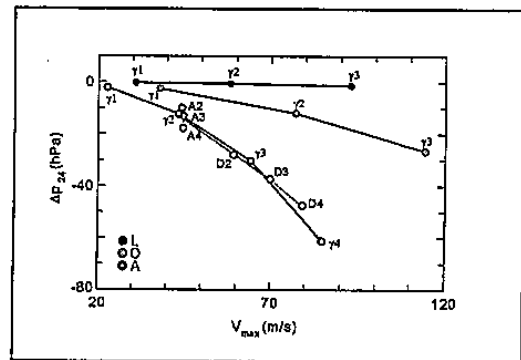
圖六：三種渦旋標準組實驗 (A3,O2,L2) 的軸對稱結構分析，左欄為切向風速，中欄為氣壓差，右欄為渦度，其中虛線表 T=0hr，實線為 T=24hr。



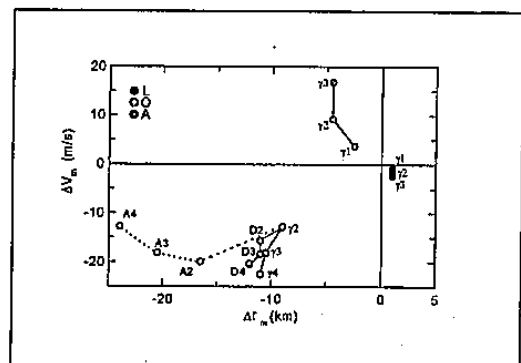
圖七：環型渦旋內部面積比 (A) 的敏感度測試 (A=1~4)，其中  $\gamma=2, D=1$ 。(實驗 A2, A5~A7)



圖八：環型渦旋眼牆厚度比 (D) 的敏感度測試 (D=1~4)，其中  $\gamma=2, A=1$ 。(實驗 A2, A8~A10)



圖九：三種渦旋 24hr 低壓中心壓力下降分析圖，橫軸為渦旋最大風速 ( $\text{ms}^{-1}$ )，縱軸為壓力變化值 (hPa)。



圖十：三種渦旋 24hr 最大風速與所在半徑變化分析圖，橫軸為最大風速半徑距中心距離變化 (km)，縱軸為渦旋最大風速變化 ( $\text{ms}^{-1}$ )。