

# 颱風雙眼牆形成機制探討

郭鴻基<sup>1</sup>、林李耀<sup>2</sup>

臺灣大學大氣科學系<sup>1</sup>

國家災害防救科技中心<sup>2</sup>

## 摘要

本文利用一非線性無輻散正壓模式來探討颱風雙眼牆形成的可能動力機制。我們認為雙眼牆颱風外眼牆的形成、內縮及對稱化過程中，中心渦旋扮演決定性角色，此動力過程可以理想化為一小而強的渦旋(代表颱風中心渦旋)與一大而弱的渦旋(代表眼四周所產生之不對稱渦度區)間的雙渦旋交互作用；小而強的渦旋可以自我維持，並將外側不對稱渦度拉伸、重新組織分配形成對稱而穩定的外眼牆，在此過程中亦將導致類似觀測中外眼牆內縮的情況。

根據數值模擬的結果，我們歸納出颱風雙眼牆形成的重要條件如下：(1) 強的中心渦旋(至少比外側對流區強度大上六倍)，(2) 比中心渦旋更大面積的不對稱對流區，(3) 雙渦旋距離需在中心渦旋半徑三倍之四倍的範圍內。

關鍵詞：颱風、雙眼牆、渦旋對稱化。

## 一、前言

從許多雷達回波觀測顯示，雙眼牆颱風特徵如下：(1) 位於內(主)眼牆及外(次)眼牆的強對流區，(2) 位於此二強對流區雷達回波空白區，通常稱為 moat；(3) 強對流區通常為切向風

速極值區，也就是伴隨著強渦度區。Black and Willoughby (1992) 在觀測 1988 年 Hurricane Gilbert 雙眼牆的形成過程中，發現在內眼牆強度維持不變之情況下，外側強對流區在 12 小時左右由軸不對稱變成軸對稱，並伴隨外眼牆從 100 公里內縮至 50 公里處。類似的情形在 2001 年利奇馬颱風雙眼牆形成過程中亦被觀測到，在 12 小時之內，颱風眼周圍大範圍、不對稱的對流區形成一對稱的外眼牆。

Shapiro and Willoughby (1982) 與 Schubert and Hack (1982) 曾利用軸對稱模式說明加熱與渦度交互作用可以造成環形對流的內縮，只是在軸對稱架構下是否能解釋由不對稱對流開始的颱風雙眼牆形成目前並不清楚，Montgomery and Kallenbach (1997) 提出雙眼牆結構可能是徑向移行線性羅士比波反應在某重要半徑上的結果。Kossin et al. (2000) 探討雙眼牆結構下中心渦旋的穩定作用，但對如何形成雙眼牆並未提出說明。Nong and Emanuel (2003) 在軸對稱架構下，認為經由外力強迫下所造成的 WISHE 不穩度可以形成颱風外眼牆，但是這個說法仍然無法呈現颱風非軸對稱動力本質。

我們利用雙渦旋交互作用的想法來詮釋不對稱對流如何組織成對稱的颱風雙眼牆結構，圖一為利奇馬颱風

(2001)雷達觀測圖，圖中發現中心強渦旋將圍繞外部大範圍的不對稱對流逐漸組織化，在 12 小時過程中逐漸形成雙眼牆，Hoose and Colon (1970)的雷達觀測也發現相類似情形。Dritschel and Waugh (1992)與 Dritschel (1995)曾經進行一系列雙渦旋數值實驗，討論不同距離、半徑下相同強度渦旋的交互作用，但有關不同強度渦旋交互作用與雙眼牆結構的相關在過去並未被討論過，以下我們將利用一非線性無輻散正壓模式延伸 Dritschel and Waugh 的實驗設計進行探討。

## 二、數值模式

本文所使用的非線性無輻散正壓模式(Nondivergent barotropic model)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。

在實驗設計上，雙渦旋實驗水平範圍為  $200 \times 200 \text{ km}$ ，利奇馬颱風實驗水平範圍為  $600 \times 600 \text{ km}$ ，網格為均為  $512 \times 512$  點，積分時間步長為 6 秒，初始渦旋結構如(3)式所示：

$$\zeta(x, y, 0) = \sum_{j=1}^J \zeta_j P(r_j) \quad (3)$$

其中  $\zeta_j$  為第  $j$  個渦旋最大渦度值，而  $r_j = [(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2]^{1/2} / R_j$  為無因次徑向距離， $x_j, y_j$  為渦旋中心座標， $R_j$  為第  $j$  個渦旋半徑大小。另外，

$$P(r_j) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\frac{30}{r_j} \exp\left(\frac{1}{r_j - 1}\right)\right] & \text{if } r_j < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

，在我們的雙渦旋實驗 ( $J=1,2$ ) 中，小而強的渦旋  $\zeta_1 = 1.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ， $R_1 = 10$  公里，本文討論之無因次參數定義如下：

一、雙渦旋無因次距離：

$$\frac{\Delta}{R_1} = \frac{x_1 - x_2 - (R_1 + R_2)}{R_1} \quad (4)$$

二、雙渦旋強度比：

$$\gamma = \frac{\zeta_1}{\zeta_2} \quad (5)$$

三、雙渦旋半徑比：

$$r = \frac{R_1}{R_2} \quad (6)$$

圖二為雙渦旋結構與相關參數示意圖，本文探討的無因次參數值範圍為  $0 \leq \Delta/R_1 \leq 4$ ， $1 \leq \gamma \leq 10$ ， $1/4 \leq r \leq 1$ 。

## 三、模擬結果與分析

圖三為雙渦旋不同強度比 ( $\gamma=1, 3, 5, 6$ ) 的實驗結果，其中  $\Delta/R_1=1$ ， $r=1/3$ 。由圖中可以發現當  $\gamma=1$  與  $\gamma=3$  的模擬結果最後形成單渦旋，而  $\gamma=5$  為三極渦旋，當  $\gamma=6$  時則為包含 moat 的雙眼牆結構。因此可知，中心強渦旋對雙眼結構的形成具有重要的影響，此點與 Kossin et al. (2000)所認為中心渦旋具有穩定外部渦度的說法相符合。另外，在雙眼牆形成過程中周圍渦度被風切拉伸 (straining out) 成的螺旋形渦度結構，也與許多颱風觀測相符。

圖四為雙渦旋不同無因次距離比 ( $\Delta/R_1=0, 1, 2, 3$ ) 的實驗結果，其中  $\gamma=5$ ， $r=1/3$ 。由圖中發現在適當的距離比下 (例如  $\Delta/R_1=2$ )，較易形成雙眼牆結構。距離太遠會形成雙渦旋互繞 ( $\Delta/R_1=3$ )，距離太近則容易合併 ( $\Delta/R_1=0$ ) 或形成三極渦旋 ( $\Delta/R_1=1$ )。因此渦旋間距離也是影響雙渦旋形成的重要參數。

圖五為雙渦旋不同半徑比 ( $r=1, 1/2, 1/3, 1/4$ ) 的模擬實驗結果，其中  $\gamma=5$ ， $\Delta/R_1=1$ 。當  $r=1$  時由於外部渦度範圍較小，在受強渦旋風切拉伸過程中因渦度帶太細而被 viscosity 項耗散，沒有雙眼牆結構形成，當  $r=1/2$  可形成雙眼牆，但  $r=1/3$  與  $1/4$  時形成三極渦旋，顯示渦旋半徑比也是影響因素之一。

圖六為雙渦旋  $\gamma=10$ ， $\Delta/R_1=0$  的模擬實驗結果，其中  $r$  分別為  $1, 1/2, 1/3, 1/4$ 。圖中發現除了  $r=1$  沒有出現雙眼牆結構外，其他實驗都出現雙眼牆結構，也就是說中心渦旋夠強時 (10 倍周圍渦度)，容易形成雙眼牆。

為了說明數值實驗過程中，外眼牆最大風速隨時間有明顯內縮情形，我們將兩個大而弱的渦旋放在小而強渦旋西、南象限進行數值模擬，圖七為模擬過程 0, 6, 12 小時，渦旋西 (左半部)、南 (右半部) 風速隨半徑變化圖，圖中可以清楚的看出外眼牆風速極值隨時間向渦旋中心內縮，在時間與空間尺度上也大致與 Black and Willoughby (1992) 的觀測結果相當，由此可知，在渦旋軸對稱化的非線性平流過程中，即使不考慮非絕熱加熱效果也會有風速內縮的現象。

#### 四、結論

根據前述的雙渦旋數值模擬結果，我們嘗試模擬利奇馬颱風雙眼牆結構的形成，圖八為利奇馬颱風雙眼牆形成數值模擬與敏感度測試實驗結果。控制實驗 ( $\gamma=7.5$ ， $\Delta/R_1=0.6$ ) 為參考雷達觀測之徑向風速與初始中心渦旋大小 ( $R_1=10$  公里) 所設計，控制實驗在 12 小時的模擬過程中的確可形成與觀測 (圖一) 相似的雙眼牆結

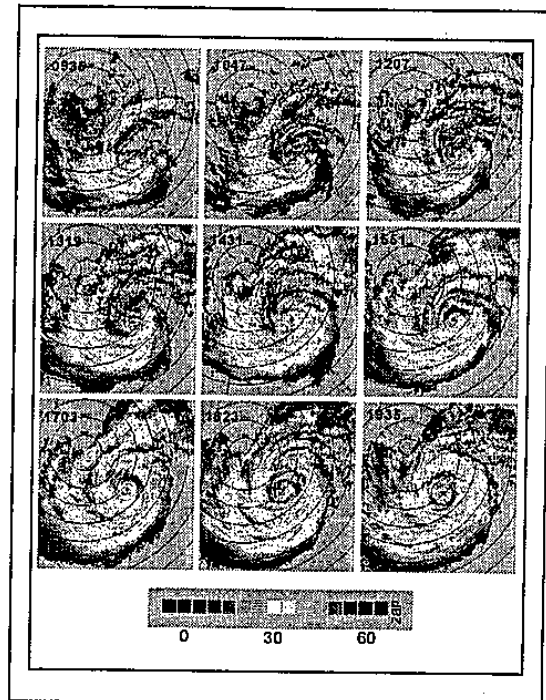
構。而當我們將渦旋距離調整到  $\Delta/R_1=0$  時，發現由於負渦度平流不足無法形成 moat，最後混合形成單一渦旋，這也說明前述推論雙渦旋距離是雙眼牆形成重要參數的合理性，當我們將渦旋強度比調降到  $\gamma=3$  時，雙渦旋混合形成單一渦旋，另外，在  $\gamma=3$  情形下，即使讓兩渦旋開始就是同心圓結構 ( $\Delta/R_1=2.8$ )，最後雙渦旋仍然混合形成單一渦旋，這也滿足前述強調渦旋強度的重要性。

最後，我們將所有雙渦旋實驗結果歸納為以下 4 類 regime，(1) C (雙眼牆)，(2) T (三極渦旋)，(3) M (單一渦旋)，(4) EI (渦旋互繞)，並根據渦旋強度比 ( $\gamma$ )、無因次距離 ( $\Delta/R_1$ )、渦旋半徑比 ( $r$ ) 畫成概念圖如圖九所示。圖中可以發現形成雙眼牆或單一渦旋的臨界點大約在  $\gamma=5$  左右，此時出現的渦旋特徵是三極渦旋，當  $\gamma$  大於 5 以後雙眼牆出現的機會就增加，在  $\gamma=6$  情形下，雙渦旋出現在  $\Delta/R_1=0.5 \sim 0.35$  左右，在  $\gamma$  大於 7 的情形下， $\Delta/R_1$  延展到  $0 \sim 0.35$ ，有趣的是當  $\gamma$  足夠大 ( $\gamma > 8$ ) 時，只要不要弱渦度離中心渦旋太遠 (大約 3~4 倍中心渦旋半徑)，都可以形成雙眼牆結構。

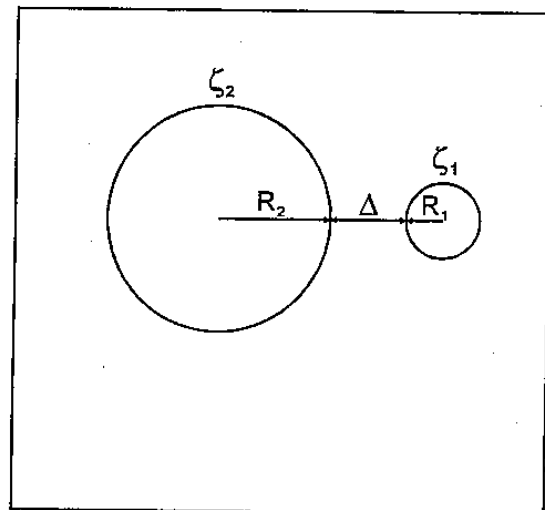
#### 五、參考文獻

- Black, M. L., and H. E. Willoughby, 1992: The concentric eyewall cycle of Hurricane Gilbert. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 947-957.
- Dritschel, D. G., and D. W. Waugh, 1992: Quantification of the inelastic interaction of unequal vortices in two-dimensional vortex dynamics. *Phys. Fluids*, A4, 1737-1744.
- Dritschel, D. G., 1995: A general theory for

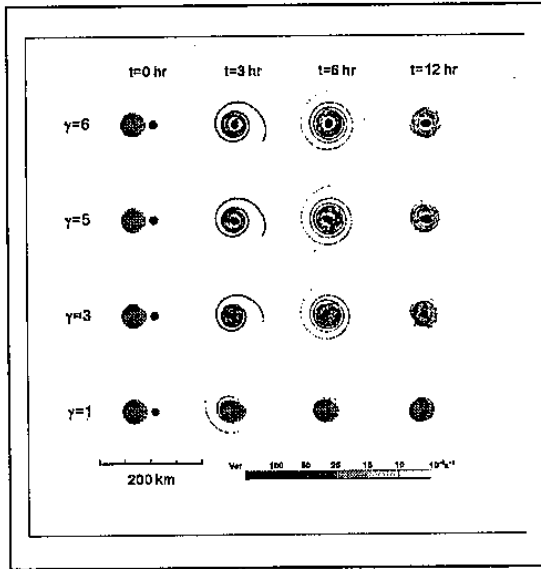
- two-dimensional vortex interactions. *J. Fluid Mech.*, **293**, 269-303.
- Hoose, H. M., and J. A. Colon, 1970: Some aspects of the radar structure of Hurricane Beulah on September 9, 1967. *Mon. Wea. Rev.*, **98**, 529-533.
- Kossin, J., P., W. H. Schubert, and M. T. Montgomery, 2000: Unstable interaction between a hurricane primary eyewall and a secondary ring of enhanced vorticity. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3893-3917.
- Montgomery, M. T., and R. J. Kallenbach, 1997: A theory for vortex Rossby-waves in its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 435-465.
- Nong, S., and K. A. Emanuel, 2003: A numerical study of the genesis of concentric eyewalls in hurricane. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, in press.
- Shapiro, L. J., and H. E. Willoughby, 1982: The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 378-394.
- Schubert, W. H., and J. J. Hack, 1982: Inertial stability and tropical cyclone development. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1687-1697.
- Schubert, W. H., and J. J. Hack, 1982: Inertial stability and tropical cyclone development. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1197-1223.



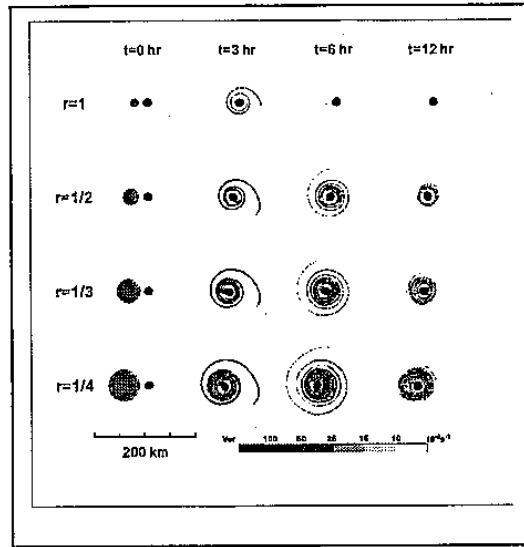
圖一：利奇馬颱風(2001)雙眼牆結構形成之雷達回波觀測圖(9月25日 0935 Z - 1935 Z)，每張圖時間間隔約 75 分鐘。



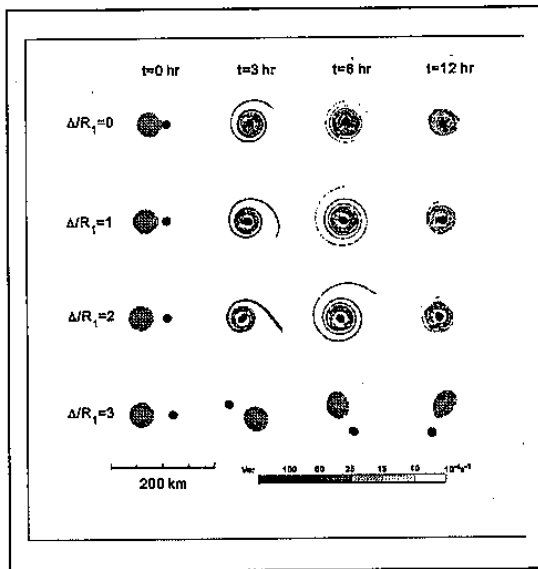
圖二：初始渦旋結構示意圖。其中大小渦旋的渦度分別為 $\zeta_2$ 與 $\zeta_1$ ，半徑分別為 $R_2$ 與 $R_1$ ，渦旋間距為 $\Delta$ 。



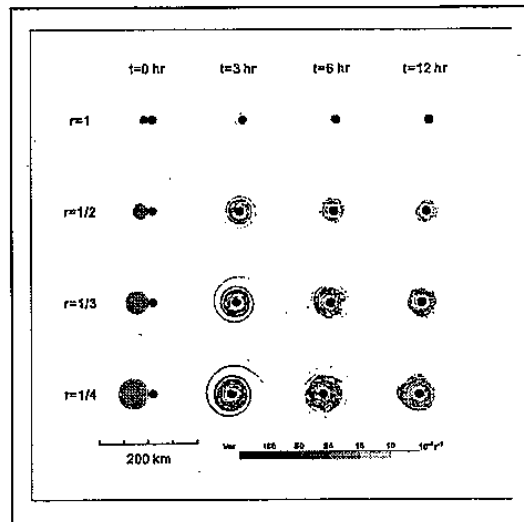
圖三：雙渦旋實驗針對渦旋強度比 ( $\gamma$ ) 的敏感度測試，其中渦旋無因次距離 ( $\Delta/R_1$ ) 為 1，半徑比 ( $r$ ) 為 1/3。



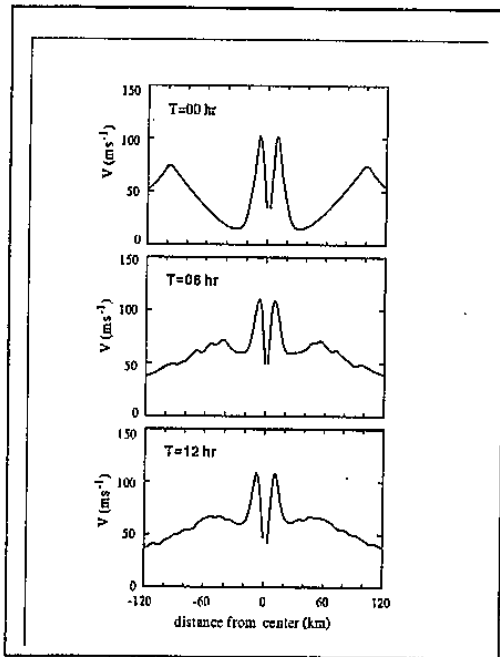
圖五：雙渦旋實驗針對半徑比 ( $r$ ) 的敏感度測試，其中渦旋強度比 ( $\gamma$ ) 為 5，渦旋無因次距離 ( $\Delta/R_1$ ) 為 1。



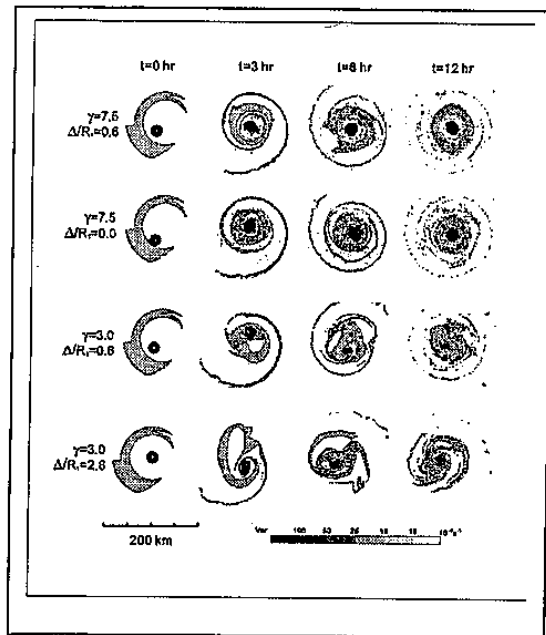
圖四：雙渦旋實驗針對無因次距離 ( $\Delta/R_1$ ) 的敏感度測試，其中渦旋強度比 ( $\gamma$ ) 為 5，半徑比 ( $r$ ) 為 1/3。



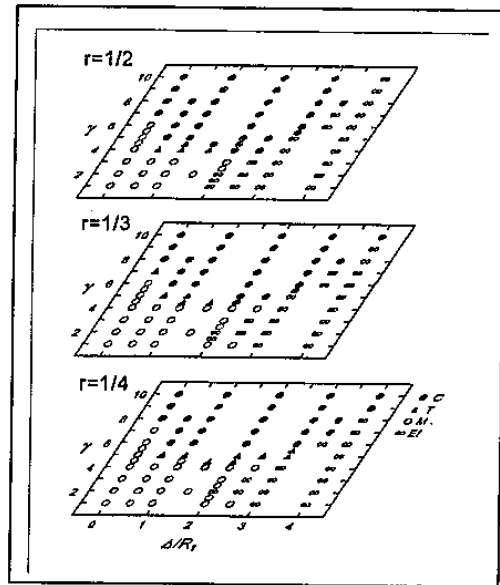
圖六：與圖五同，但其中渦旋強度比 ( $\gamma$ ) 為 10，渦旋無因次距離 ( $\Delta/R_1$ ) 為 0。



圖七：雙眼牆數值實驗中的外眼牆最大風速內縮圖。



圖八：利奇馬颱風雙眼牆形成之數值模擬 ( $\gamma=7.5$ ,  $\Delta/R_1=0.6$ ) 與敏感度測試，第一列為控制組實驗，第二列實驗與控制組同但  $\Delta/R_1=0$ ，第三列實驗與控制組同但  $\gamma=3$ ，第四組實驗之  $\Delta/R_1=2.8$  且  $\gamma=3$ 。



圖九：雙渦旋數值實驗結果根據渦旋強度比 ( $\gamma$ )、無因次距離 ( $\Delta/R_1$ )、與半徑比 ( $r$ ) 表示的概念示意圖。圖中 C 表形成雙眼牆，T 為三極渦旋，M 為單一渦旋，EI 為渦旋互繞不合併。