

雙眼牆形成動力之斜壓過程探討

陳珮雯 郭郁芬 郭鴻基

台灣大學大氣科學研究所

摘要

Kuo et al.(2004)提出：雙眼牆的形成動力可理想化為一小而強的渦旋(代表颱風中心渦旋)及一大而弱的渦旋(代表眼四周所產生之不對稱渦旋區)之雙渦旋交互作用的結果。本研究將此結果延伸至二維斜壓過程，利用一簡單兩層淺水非輻散模式，希望討論斜壓過程對於雙眼牆形成動力之影響。

本研究結果初步顯示，當斜壓性愈大時，意即渦旋之上下偶合度較差時，將會抑制雙眼牆的形成，而垂直上渦旋的互相抑制效果，似乎比厚度的影響更為顯著。垂直風切亦不利於雙眼牆的形成。

關鍵詞：雙眼牆形成、斜壓過程。

一、前言

從雷達回波觀測(e.g., Willoughby et al. 1982, Black and Willoughby 1992) 顯示，雙眼牆颱風特徵如下：(1) 強對流區：內(主)眼牆及外(次)眼牆，(2)雷達回波空白區，稱為 moat；強對流區通常為切向風速極值區。在雙眼牆形成過程中，通常可以觀測到在內眼牆強度維持不變之情況下，外側強對流區在 12 小時左右由不對稱變成對稱，並伴隨外眼牆內縮(e.g., Hurricane Gilbert by Black and Willoughby 1992)。在 2001 年利奇馬颱風亦觀測到在 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。Hoose and Colon(1970) 觀測雙眼牆颱風--Beulah(1967)亦得到類似之結論。Kuo et al.(2004)根據以上觀測結果，認為雙眼牆形成時外眼牆的內縮及對稱化過程中，中心渦旋扮演決定性的角色，可

將此動力過程理想化為一小而強的渦旋(代表颱風中心渦旋)及一大而弱的渦旋(代表眼四周所產生之不對稱渦旋區)之雙渦旋交互作用之結果，示意圖如圖 1，他們認為小而強的渦旋可以自我維持，並將外側不對稱的渦度拉伸、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。而這樣理想化之雙渦旋交互作用之模擬乃延伸自 Dristchel et al.(1992) 的雙渦旋交互作用實驗，他們使用兩個渦度相同的渦旋，改變其渦旋半徑比以及兩渦旋之距離，認為理想之雙渦旋交互作用結果，可分為三種 regime，而這三種 regime 亦在實際颱風觀測上得到印證：(1)Elastic interaction(EI)，藤原效應，即雙颱風作氣旋式的互繞運動。(2) Partial Merger(PE) or Complete merger(CE)，意指雙颱風合併之情況，如 1994 年之 Pat 和 Ruth 颱風便是颱風合併的一例。(3)Partial Straining-out(PSO) or Complete Straining-out(CSO)，即指其中一個颱風之對流區被另一個颱風拉扯成帶狀形式的情況，如 1998 年 Zeb 和 Alex 颱風便是一例，而這也是文獻上第一個記載的 straining-out 的例子(Kuo et al. 2000)。相較於 Dristchel 等人的實驗，Kuo 等人又加入了渦旋的強度比對於雙眼牆之形成做探討，他們的主要結論如下面三點：(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，他們並將此結論應用在 2001 年利奇馬

颱風做模擬，亦得到和觀測相似(外眼牆約在 12 小時形成、且外眼牆內縮)的結果(圖略)，因此相較於 Dristchel 等人的實驗，Kuo 等人認為雙渦旋之交互作用可重新定義為四種 regime：(1)雙眼牆(C)，(2)三極渦旋(T)，(3)完全或部份合併(M)，以及(4)elastic interation(EI)。

本研究延用 Kuo et al.(2004)之結論，並利用一簡單之兩層淺水模式進模擬，希望進一步探討斜壓過程中雙眼牆形成之動力。

二、研究方法：

2.1 模式簡介：

本模式為一簡單之兩層淺水模式。模式延用 Demaria(1996)之兩層淺水方程，並加上一位渦預報方程，因輻散項很小，故忽略之，其模式簡圖如圖 2，其中 1 為下層，2 為上層；下層密度為 ρ ，上層密度為 $\varepsilon\rho$ ； H_1 、 H_2 為下層及上層的平均厚度，但 $H_1+H_2=10\text{km}$ ； h_1 、 h_2 則為下層及下層之擾動厚度。其模式方程式如下：

$$\frac{dZ_j}{dt} = \frac{\partial Z_j}{\partial t} + u_j \frac{\partial Z_j}{\partial x} + v_j \frac{\partial Z_j}{\partial y} = -\nu \nabla^2 Z_j, \dots (0)$$

其中 $j=1,2$

$$\Rightarrow \frac{\partial Z_j}{\partial t} = -u_j \frac{\partial Z_j}{\partial x} - v_j \frac{\partial Z_j}{\partial y} - \nu \nabla^2 Z_j, \dots (1)$$

$$Z_j = H \frac{\zeta_j + f}{H + h_j}, \dots (2)$$

$$\nabla^2 \psi_j = \zeta_j, \dots (3)$$

$$u_j = -\frac{\partial \psi_j}{\partial y}; v_j = \frac{\partial \psi_j}{\partial x}, \dots (4)$$

$$\nabla^2 \phi_j = f \zeta_j + 2 \left(\frac{\partial u_j}{\partial x} \frac{\partial v_j}{\partial y} - \frac{\partial u_j}{\partial y} \frac{\partial v_j}{\partial x} \right), \dots (5)$$

$$\begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} = g \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix}, \dots (6)$$

其中下標 $j=1$ 代表下層， $j=2$ 代表上層。(1)

式為位渦守恆預報方程， Z 為位渦，(2)式-(6)式為診斷方程：(2)式中 ζ 為相對位渦， f 為柯氏參數，其中 f 為定值。(3)式為流函數 (stream function) 方程， ψ 為流函數。(5)式為非線性平衡方程(non-linear balanced equation)， ϕ 為重力位高度。

模式運算流程如下：首先給定初始位渦 (Z_j) 分佈，且先猜想 $h_j=0$ ，代入(2)式-(6)式診斷後得到新的 h_j ，再將新的 h_j 代入(2)-(6)式重新診斷，如此重複運算，直到新的 h_j 和之前的 h_j 差值小於 1m 時，求得平衡解，再利用(1)式積分得到下一時刻的位渦 (Z_j)。

2.2 模式設定：

本研究延續 Kuo et al.(2004)的工作，將雙眼牆形成過程理想化為一小而強的似阮肯渦旋(Rankine-like vortex)(代表颱風中心渦旋)及一大而弱的似阮肯渦旋(代表眼四周所產生之不對稱渦旋區)之雙渦旋交互作用，並在垂直上加入一自由度，希望探討斜壓過程對於雙眼牆形成過程扮演之角色，示意圖如圖 3。控制之參數設定方面，總共有 7 個控制參數，除 Kuo et al.(2004)提出之正壓過程中雙眼牆形成之三重要的決定因子：(1)渦旋半徑比： $r = R_1/R_2$ (R_1 為小渦旋之半徑， R_2 為大渦旋之半徑)，(2)渦旋之無因次距離(dimensionless gap)： Δ/R_1 ($\Delta = d - R_1 - R_2$ ，其中 d 為兩渦旋之質心距離)，(3)渦旋位渦強度比 $\gamma = \zeta_1/\zeta_2$ (ζ_1 為小渦旋之渦度， ζ_2 為大渦旋渦度)，另加入四個控制參數：(4)上下層平均水深 (H_2 、 H_1)，(5)上層流體密度 (ε)，(6)上下層渦度比 $\gamma_z = \zeta_1/\zeta_2$ (即上層渦度與下層渦度比)，以及(7)垂直風切，以期深入探討斜壓過程扮演之角色。

本模式考慮在一參考緯度為 20N 的 f 平面上，且不考慮摩擦及非絕熱過程，此乃延用 Demaria(1996)之設定。模式水平範圍

為 200 km*200 km，空間微分使用傅利葉波譜法(Fourier spectral method)，網格間距為 1km。時間積分使用跳蛙法(Leap-frog method)，為了計算的穩定性，選取較小的時距 3 秒。使用與颱風渦度較相近的似阮肯渦旋模擬颱風強對流區。在耗散項處理的部份，則延用 Kuo et al.(2004)的設定，使用較小的擴散係數($\nu=6.5 \text{ m}^2/\text{s}$)，這是因為較大的擴散係數將會導致較多的 Enstrophy cascade，以致渦旋容易合併，導致於在模擬中單一渦旋(即合併)及三極渦旋的個案容易發生(Kuo et al.2004)。

三、模擬結果：

本研究共模擬四組實驗，其實驗設定如表 1，分析結果如後述：

3.1 實驗一：

模擬一暖心結構之理想雙渦旋交互作用，得到當上層加入渦旋時，將會抑制雙眼牆的生成，但仍可看到中心強渦旋將外側不對稱對流區組織成較為對稱的對流區的情況(上下層皆如此)，見圖 4。

3.2 實驗二：

由實驗一得到初步推論：當上層加入渦旋時，將會抑制雙眼牆的形成，於是我們將上層渦旋強度再減弱，此時 $\gamma_z=1/3$ ，結果顯示下層約在 24 小時以後組織成雙眼牆形式，30 小時之後系統才逐漸達到穩定，見圖 5。這和 Kuo et al.(2004)認為雙眼牆形成約為 12 小時足足多了兩倍。由實驗一、二我們初步推論，斜壓過程使得渦旋上下層的耦合度變差，不利於雙眼牆的形成。

3.3 實驗三：

線性化的位渦方程如下：

$$\begin{cases} fZ_1' = L_1\phi_1 + \frac{\varepsilon}{\lambda_1^2}\phi_2 \dots (7) \\ fZ_2' = L_2\phi_2 + \frac{1}{\lambda_2^2}\phi_1 \dots (8) \end{cases}$$

其中 L_1 、 L_2 為 ∇^2 ， Z_1' 、 Z_2' 為位渦擾動， ϕ 為重力為高度， λ 為羅士培變形半徑(Rossby radius of deformation)。若我們分別對(7)、(8)做 ∇^2 ，則可以得到下式：

$$\begin{cases} \left(L_2 L_1 - \frac{\varepsilon}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \phi_1 = f \left(L_2 Z_1' - \frac{\varepsilon}{\lambda_1^2} Z_2' \right) \dots (9) \\ \left(L_1 L_2 - \frac{\varepsilon}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \phi_2 = f \left(L_1 Z_2' - \frac{1}{\lambda_2^2} Z_1' \right) \dots (10) \end{cases}$$

根據(9)、(10)我們可以稍微估計上(下)層位渦對下(上)層位渦的影響如下式：

$$\begin{aligned} R_{\text{上 vs. 下}} &= \frac{\left| \frac{\varepsilon}{\lambda_1^2} Z_2' \right|}{\left| L_2 Z_1' \right|} = \frac{\frac{\varepsilon}{\lambda_1^2} A_2}{k^2 + \frac{1}{\lambda_2^2} A_1} \\ &= \varepsilon \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{H_2}{H_1} \cdot \frac{1}{k^2 \lambda_2^2 + 1} \dots (11) \end{aligned}$$

及(12)式：

$$\begin{aligned} R_{\text{下 vs. 上}} &= \frac{\left| \frac{1}{\lambda_2^2} Z_1' \right|}{\left| L_1 Z_2' \right|} = \frac{\frac{1}{\lambda_2^2} A_1}{\left(k^2 + \frac{1}{\lambda_1^2} \right) A_2} \\ &= \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{H_1}{H_2} \cdot \frac{1}{k^2 \lambda_1^2 + 1} \dots (12) \end{aligned}$$

根據(11)式我們可以得到當上層若要對下層有較大的影響，則需要以下幾個條件：

- (1) 較大的 ε ，意即上下耦合度較好。
- (2) 較大的(上下層)強度比，意即當上層渦旋較強時，對於下層有較大的影響。
- (3) 較大的(上下層)厚度比，意即當上層厚度較厚時，上層較有能力去影響下層。
- (4) 較大的(第四項)，意即下層水平尺度大於上層厚度時(i.e.下層水平尺度要夠大)較易感受到上層的影響。

根據上述的線性估計結果，我們仿照實驗二(有雙眼牆形成)的設定，我們改變平均厚度比以及上下渦旋強度比，使得 $\gamma_z=2/3$ ， $H_2/H_1=1/2$ ，探討是否可得到實驗二之結

果，發現如此設定並無法得到雙眼牆形成之結果，並且結果與實驗一較為類似，如圖 6，意即在斜壓過程中，強度似乎對於抑制雙眼牆形成過程中，扮演較為重要的角色(i.e.強度和厚度並非呈線性的影響)。

3.4 實驗四：

實驗四探討垂直風切對於雙眼牆形成時所扮演之角色，相較於實驗三，在垂直上加入 $0.5s^{-1}$ 的風切，結果圖 7 所示，認為風切亦不利於雙眼牆之形成，系統將傾向 tripole 的形式。

四、結論：

本研究是延續 Kuo et al.(2004)的工作，利用一簡單的兩層淺水模式探討雙眼牆的形成機制，初步模擬結果顯示，斜壓過程較不利於雙眼牆的形成，意即垂直上的擾動將不利中心渦旋將外側渦旋組織成對稱形式，並且強度的影響較為重要。另外相較於正壓過程，在斜壓過程中雙眼牆形成的時間將受到延遲，大約需 30 小時才能形成較穩定的雙眼結構；對於垂直風切探討部分，初步認為風切亦不利於雙眼牆渦度的組織與形成。

未來將定量分析垂直擾動對於雙眼牆形成時的影響，並計算其中各能量間的轉換。

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., 1995: A general theory for two-dimensional vortex interactions. *J. Fluid Mech.*, **293**, 269-303.
Dritschel, D.G., and D. W. Waugh, 1992:

Quantification of the inelastic interaction of unequal vortices in two-dimensional vortex dynamics. *Phys. Fluids*, **A4**, 1797-1744.

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's primary eyesall and a secondary ring of enhanced vorticity. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3893-3917.

Kuo, H.-C., G. T.-J. Chen, and C.-H. Lin, 2000: Merger of tropical cyclones Zeb and Alex. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2967-2975.

Kuo, H.-C., L.-Y. Lin, C.-P. Chang, and R. T. Williams, 2004: The formation of concentric vorticity structures in typhoons. *J. Atmos. Sci.*, submitted.

Rozoff, M. C., W. H. Schubert, B. D. McNoldy, and J. P. Kossin, 2004: In intense tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, submitted.
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.

Willoughby, H. E., J. A. Clos, and M. Shoreibah, 1982: Concentric eye walls, secondary wind maxima, and the evolution of the hurricane vortex. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 395-411.

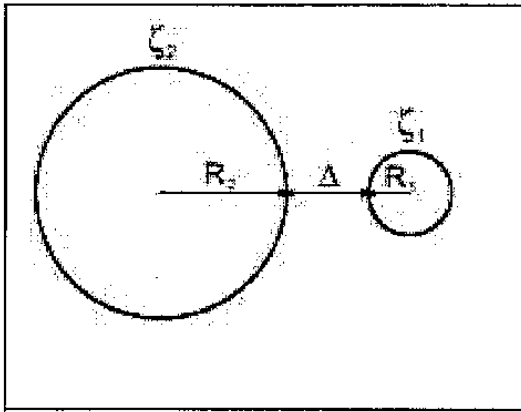


圖 1: Kuo et al(2004)認為雙眼牆形成之動力過程可理想化為一小而強的渦旋(即 ζ_1 , ζ 為渦度),及一大而弱的渦旋(即 ζ_2)之雙渦旋交互作用之結果。其中 Δ 為兩渦旋距離, R_1 、 R_2 為渦旋半徑。

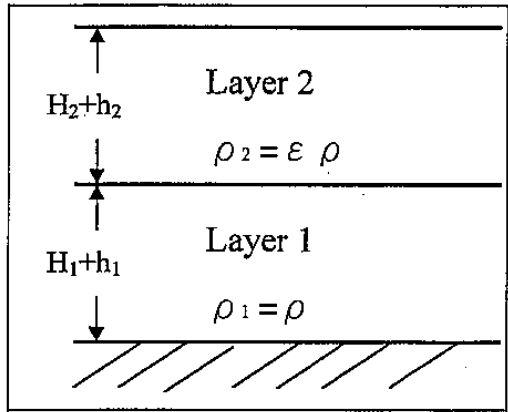


圖 2: 兩層淺水模示意圖。簡化大氣(對流層)為兩層密度不同的流體, 下層(layer 1)密度為 $\rho_1 = \rho$, 上層(layer 2)密度為 $\rho_2 = \epsilon \rho$; H_1 、 H_2 為下層及上層的平均厚度, 但 $H_1 + H_2 = 10\text{km}$; h_1 、 h_2 則為下層及上層之擾動厚度。

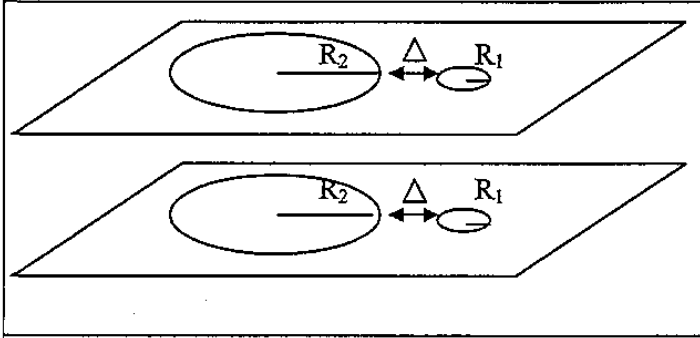


圖 3: 本研究模式設定簡圖。設定同圖 1, 只是在垂直上再加入一層。

	$\zeta_1(s^{-1})$ (下層)	$\zeta_2(s^{-1})$ (下層)	γ ($=\zeta_1/\zeta_2$)	$\zeta_1(s^{-1})$ (上層)	$\zeta_2(s^{-1})$ (上層)	γ_2 ($=\zeta_1/\zeta_2$)	Δ (km)	r ($=r_1/r_2$)	ρ ($m^2/2$)	H_2/H_1	$\frac{\partial u}{\partial z}$ (s^{-1})
實驗一	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	10	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	2/3	10	1/3	6.5	1	0
實驗二	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	10	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	1/3	10	1/3	6.5	1	0
實驗三	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	10	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	2/3	10	1/3	6.5	1/2	0
實驗四	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	10	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	1/3	10	1/3	6.5	1	0.5

表 1: 實驗設計。

