

第十九屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA19-300

作品名稱：以淺水模式探討雙眼牆結構渦漩

姓名：葉凱傑

關鍵字：雙眼牆颱風、淺水模式、三眼牆形成

摘要

本研究旨在探討雙眼牆結構渦旋與外界的互動模式以及其特性，我使用淺水模式的數值模擬進行理想實驗，根據不同的參數設定不同的初始場進行研究並歸納分析，分別探討：雙眼牆結構會與周圍弱渦度區如何作用，且在作用後會如何發展並改變型態；三眼牆結構可能的形成機制，以及各個參數對於三眼牆形成的影響；探討內核渦旋偏移對雙眼牆結構和三眼牆形成的影響。

研究中得知了雙眼牆結構與弱渦度區相對強度的變化會影響渦旋的最終型態，而兩結構間的距離為不敏感變因，且在特殊的條件下，可能會出現三眼牆的情況，在過去的觀測中也可見到雙眼牆將外圍雲區軸對稱化來形成三眼牆，為一可能的三眼牆形成機制，且形成的條件相當嚴格，內核渦度需非常強，而弱渦度區的大小與距離也需適當。在內核渦旋偏移的模擬中觀察到了類似於過去在杜鵑颱風所觀測到的運動模式：內核渦旋繞著外眼中心旋轉，且具有內外兩不同的軌跡。研究中了解了偏移量會對雙眼牆結構造成多大程度的影響，同時討論了穩定時長以及旋轉的週期，而在三眼牆的形成中，內核偏移不可過大，且向弱渦度區的方向偏移更難以形成三眼牆。

前言

雙眼牆結構，意即從颶風中心徑向外有兩個強對流區，兩強對流區中包含一弱對流區，稱為 moat，是對流被抑制區，且常伴隨著中尺度的下沉運動。近年來雷達或飛機所觀測到的資料顯示：隨著颱風強度越強，越容易形成雙眼牆結構。而 Hawkins et al. (2009)利用微波衛星雲圖進行統計，發現西北太平洋的強颱風，有 80%以上都具有雙眼牆颱風，因此對雙眼牆若有更深入的了解，對於西北太平洋颱風發展的預測上能有顯著的幫助。

1940 到 1950 年代間，隨著電腦以及數值模式的進步，逐漸可以利用模式來進行氣象的實驗，除了觀測的歸納與假說的提出，更可以利用電腦進行模擬並驗證，而在諸多科學家的努力下，建構出了天氣預報的模式，與我們的日常息息相關，由此可知數值模式對於大氣科學的重要性，而本研究就是要利用數值模式來對雙眼牆颱風進行探討。

壹、研究動機

在暑假時利奇馬與哈吉貝這兩個颱風造成了巨大的災害，它們所具有特別的雙眼牆結構吸引了我的注意，在盯著令人著迷的衛星雲圖時，我發現周圍的雲會受到颱風的影響而移動或改變形狀，但對於確切雲區的改變、雙眼牆結構的改變卻是一知半解，我就想到了利用數值模擬的方式，於是開始進行了這次研究。

貳、研究目的

- 一、探討不同型態的雙眼牆結構渦流與一弱渦度區會如何產生交互作用
- 二、探討三眼牆颱風的形成機制
- 三、探討內核渦流偏移對雙眼牆颱風以及三眼牆形成的影響

參、研究過程與方法

一、數值模式

(一)淺水模式

我使用的數值模式為淺水模式，「淺」字意指模式中水平尺度遠大於垂直尺度，因此我只需考慮平流，即使有劇烈的運動在垂直方向上也能視為靜力平衡，在實驗中使用單層的淺水模式代表自由大氣，而其實淺水模式就是著名方程式 Laplace's tidal equation 的區

域版，但淺水模式還具有非線性項，因此些微改變就會帶來巨大影響。

淺水模式的平均厚度為 1020 公尺，產生的重力波波速為 100 m s^{-1} 。在卡氏座標中展開可以得到：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) - fv = -g \frac{\partial h}{\partial x} + v \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + fu = -g \frac{\partial h}{\partial y} + v \nabla^2 v \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = v \nabla^2 h \quad (3)$$

下標 s 表示淺水模式的變數，其中 u 是 x 方向的風速， v 是 y 方向的風速， h 是高度場， v 為擴散係數， f 科氏參數 = $5.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。(1)(2)式描述了 x, y 方向上速度隨時間的變化，是由水柱高造成的壓力梯度力、速度場的平流、科氏力影響以及擴散項決定。(3)式則描述了水柱高隨時間的變化，由 x, y 方向上水的聚集以及擴散項決定。

根據上述式子也能改寫成渦度和散度場，如下：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial[(f + \zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(f + \zeta)v]}{\partial y} = v \nabla^2 \zeta \quad (4)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} - \frac{\partial[(f + \zeta)v]}{\partial x} + \frac{\partial[(f + \zeta)u]}{\partial y} + \nabla^2 \left[gh + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \right] = v \nabla^2 \delta \quad (5)$$

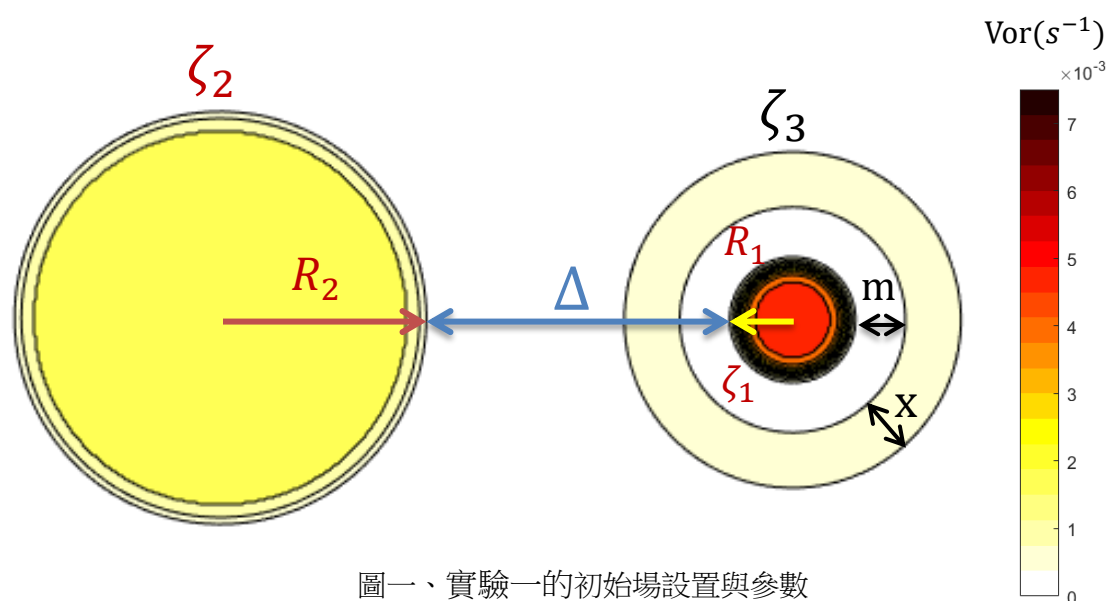
其中 $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ 是相對渦度，而 $\delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ 是散度。

(二)初始場設置

圖一是實驗一與的初始場設置以及對應的實驗參數，兩圓形區域為渦流，其中右側的渦流為較強而較小的渦流，左側的渦流則較弱且較大。我利用右側的結構來模擬雙眼牆，將結構中央的渦流做為內核渦流，外圍的渦度環為外眼牆，而由於雲區會釋放潛熱形成渦流的關係，可將左側的弱渦度區視為在雙眼牆結構周圍的雲區。內核渦流的半徑

為 R_1 ，渦度為 ζ_1 ；弱渦度區半徑為 R_2 ，渦度為 ζ_2 ；代表雙眼牆的渦度環渦度為 ζ_3 ，形狀由 m (moat 的寬度)、 x (渦度環之寬度) 兩參數決定，而 Δ 為兩渦流之間的距離。我將兩參數 $R_1 = 10km$ 、 $\zeta_2 = 1.5 \times 10^{-3}s^{-1}$ 設為定值。為了方便討論，我將一些參數用比值的方式表示，如下。

$$r = \frac{R_1}{R_2}, \quad \gamma = \frac{\zeta_1}{\zeta_2}, \quad d = \frac{\Delta}{R_1}, \quad a = \frac{m}{R_1}, \quad b = \frac{x}{R_1}, \quad c = \frac{\zeta_3}{\zeta_1}$$



我初始場設定的近中心風速大概落在 $30 \sim 80 \text{ m/s}$ ，依照中央氣象局颱風分級為中颱、強颱。

二、設計實驗

(一) 實驗一：

探討一個雙眼牆颱風與一個較弱的渦度區會如何產生交互作用，我先將雙眼牆颱風本身的結構(a 、 b 、 c)固定下來，且根據 James P. Kossin 等人於 2000 年發表的研究，較寬的外眼牆與較寬的 moat 更為穩定，因此將參數設為 $a = b = 1.5$ ，又外眼牆渦度太強會造成不穩定，因此將 c 設為 0.2 。本實驗主要探討三個參數 r 、 γ 、 d 的影響，分別固定其他兩參數做 7 個實驗，以研究個別參數對實驗結果連續分布的影響，並設定範圍 $r = 1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/4$ ， $\gamma = 3$ 、 5 、 7 ， $d = 3$ 、 4 、 5 ，做出三維的相位圖。

利用同樣的初始場，在某些情況下可以形成三眼牆型態的渦流，因此我從此條件下進行延伸，先固定一較小的雙眼牆形狀($R_1 = 5 \text{ km}, m = 15 \text{ km}, x = 12.5 \text{ km}$)、弱渦度區渦度($\zeta_2 = 0.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)、以及外環渦度($\zeta_3 = 0.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)，再針對 ζ_1 、 R_2 、 Δ 等參數進行一系列實驗，來探討三眼牆的形成機制，以及各個參數造成的影響。

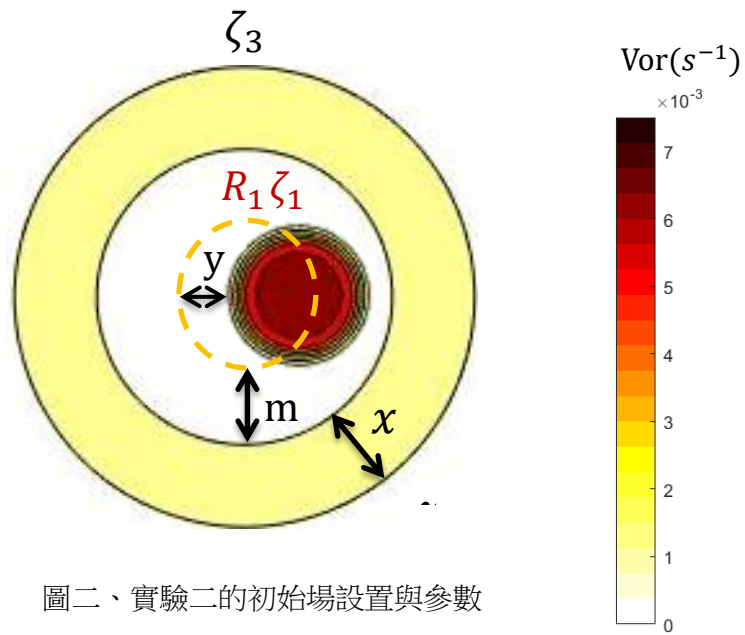
(二) 實驗二：

在這個實驗中要探討雙眼牆結構的內核偏移時，會如何恢復到原先的穩定態或是無法承受該程度的偏移，而給予內核渦流的偏移量為 $y(\text{km})$ ，使其偏離外眼牆圓心再觀察會如何恢復，圖二為實驗二的初始場設定。我希望能探討穩定性，因此需要一個較為穩定的結構才能觀察之間的差異。因此將渦度環的結構設定為 $a = b = 2$ 。實驗參數的部分著重於 y 、 ζ_1 、 ζ_3 以及整體結構強度的影響，因此分別改變這四個參數進行實驗。這個實驗有兩個研究重點，第一個重點為偏移影響比率 P ，根據 James P. Kossin 等人於 2000 年的研究^[1]，moat 的不穩定會使內核渦流呈橢圓形，並進而形成 tripole。而我將從一開始偏移中心的初始場，到因 moat 不穩定而使內核渦流呈橢圓時所經過的時長稱為 t' (相對於無偏移量的所需時長 t)，由此定義 P ：

$$P = \frac{t - t'}{t}$$

透過觀察 P 可以觀察偏移對此渦流穩定所需時長的影響，若 P 越大，則此渦流受偏移的影響較大， P 越小則反之(若 $t' > 45\text{hr}$ ，因時間尺度過大本研究不納入討論)。第二個重點為內核渦流旋轉的週期，因為週期越短代表此結構更能快速地回復到原來的狀態。

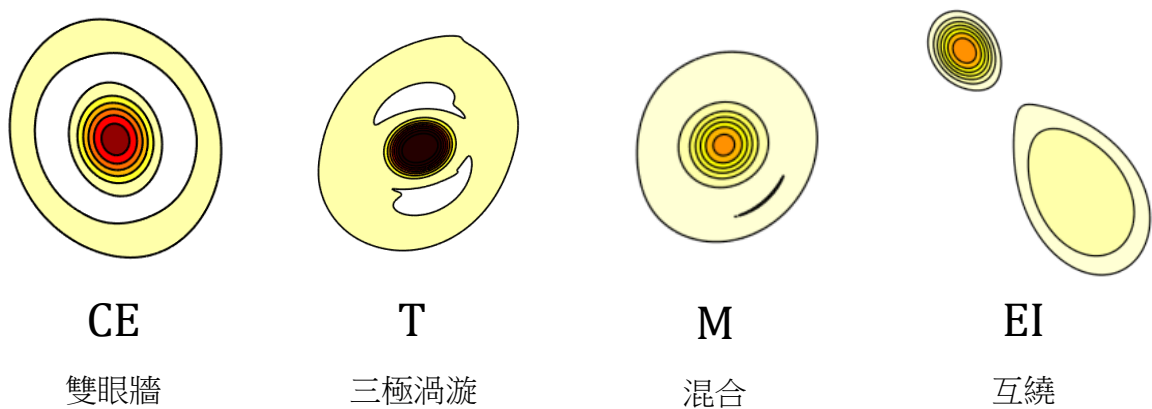
而延續了實驗一中對於三眼牆結構形成機制的探討，我融合兩實驗的設計與變因，來觀察在會形成三眼牆的初始場中，若加入了內核的偏移，會如何影響三眼牆的形成。



圖二、實驗二的初始場設置與參數

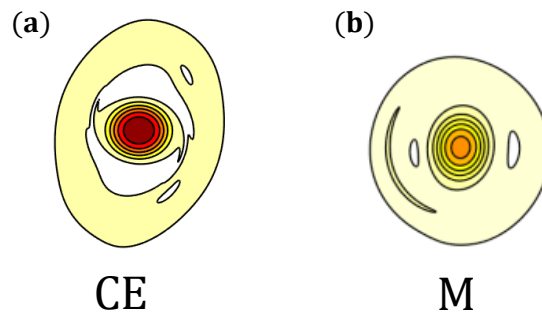
三、結果判讀

我參考了 H.-C. Kuo 於 2004 的研究將結果分為四類(圖三)：Concentric Eyewall(CE)、Triple(T)、Merge(M)、Elastic Interaction(EI)，四類各有其不同的特徵，CE 有很明顯的環狀 moat 區，內核渦流與外眼牆沒有接觸，可視為內核渦流在外環穩定在周圍，T 的型態內核呈橢圓形並與外環相接，moat 區為兩個較小的區塊。混合型即混合成一個渦流，為最穩定之形態。互繞則是在距離較遠時發生，兩渦流受到彼此渦度影響行圓周運動，但卻因距離過遠而沒辦法接觸混合，因此彼此呈現互繞。



圖三、實驗結果的判讀分類

而我在研究過程中發現到較難判讀的情形，根據性質我會將之歸於其中一類。如圖四(a)，此情形難以判讀為 T 或是 CE，內核渦旋會與外眼牆不斷接觸再分開，我觀察後發現 CE 的內核渦旋與外眼牆的旋轉並不同步(角速度不同)，而 T 則會同步，而這種過渡狀態的旋轉並不同步，因此將之歸類為 CE。而圖四(b)，此情形雖有如 T 型態的兩個渦度空洞，但軸對稱化並不完全，兩空洞非常小且存在時間不長，因此我將之歸為 M。



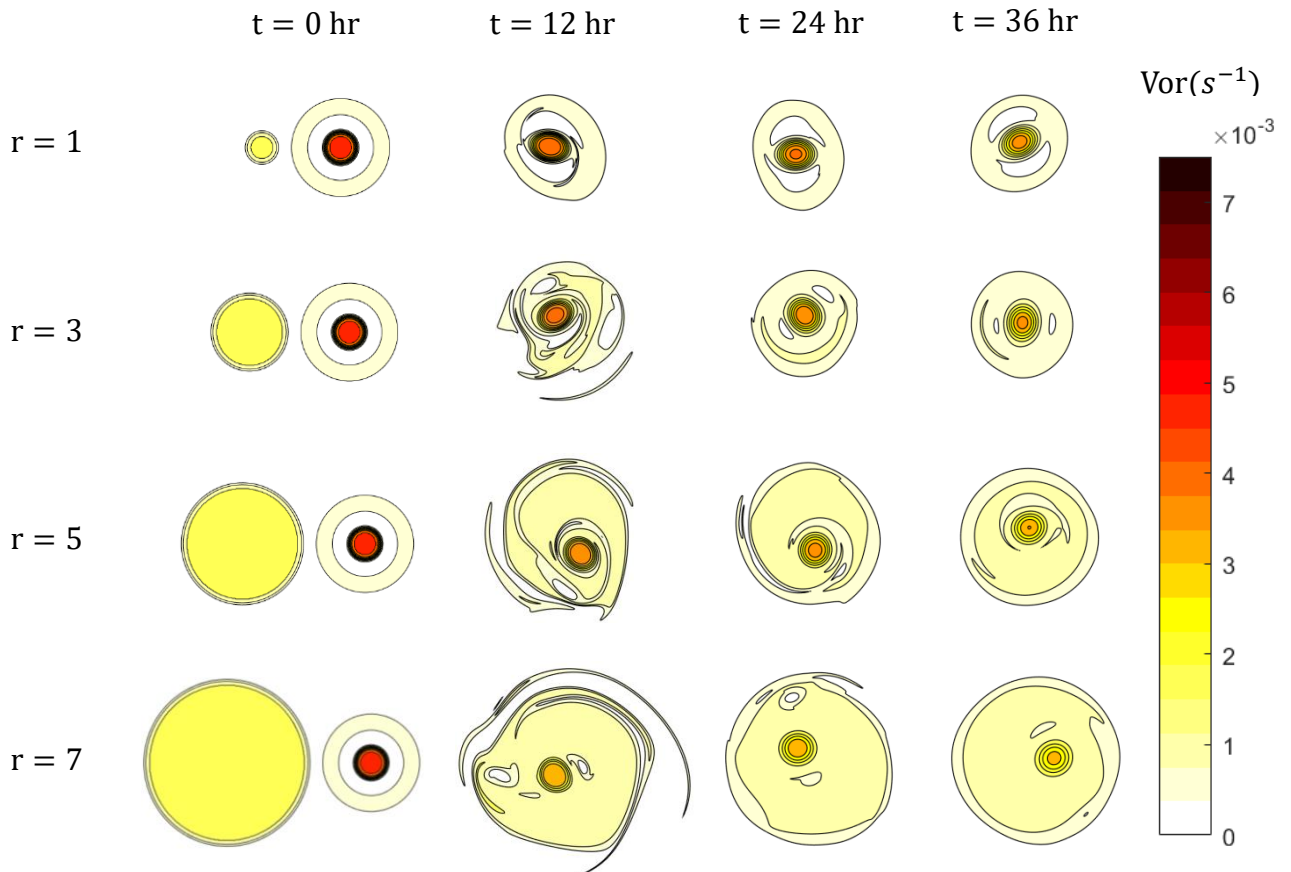
圖四、利用性質判讀實驗結果

肆、研究結果與討論

一、實驗一：

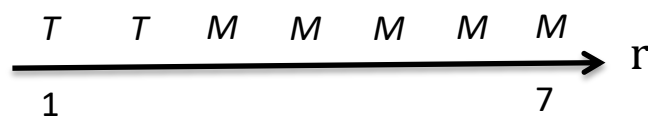
(一)雙眼牆結構與弱渦度區的交互作用：

我分別將三個參數(r 、 d 、 γ)的結果繪製成圖五、圖七、圖九，縱軸為參數的變化，橫軸為時間，由此圖可以觀察各個參數變化時，渦流如何隨時間的變化，並比較結果。

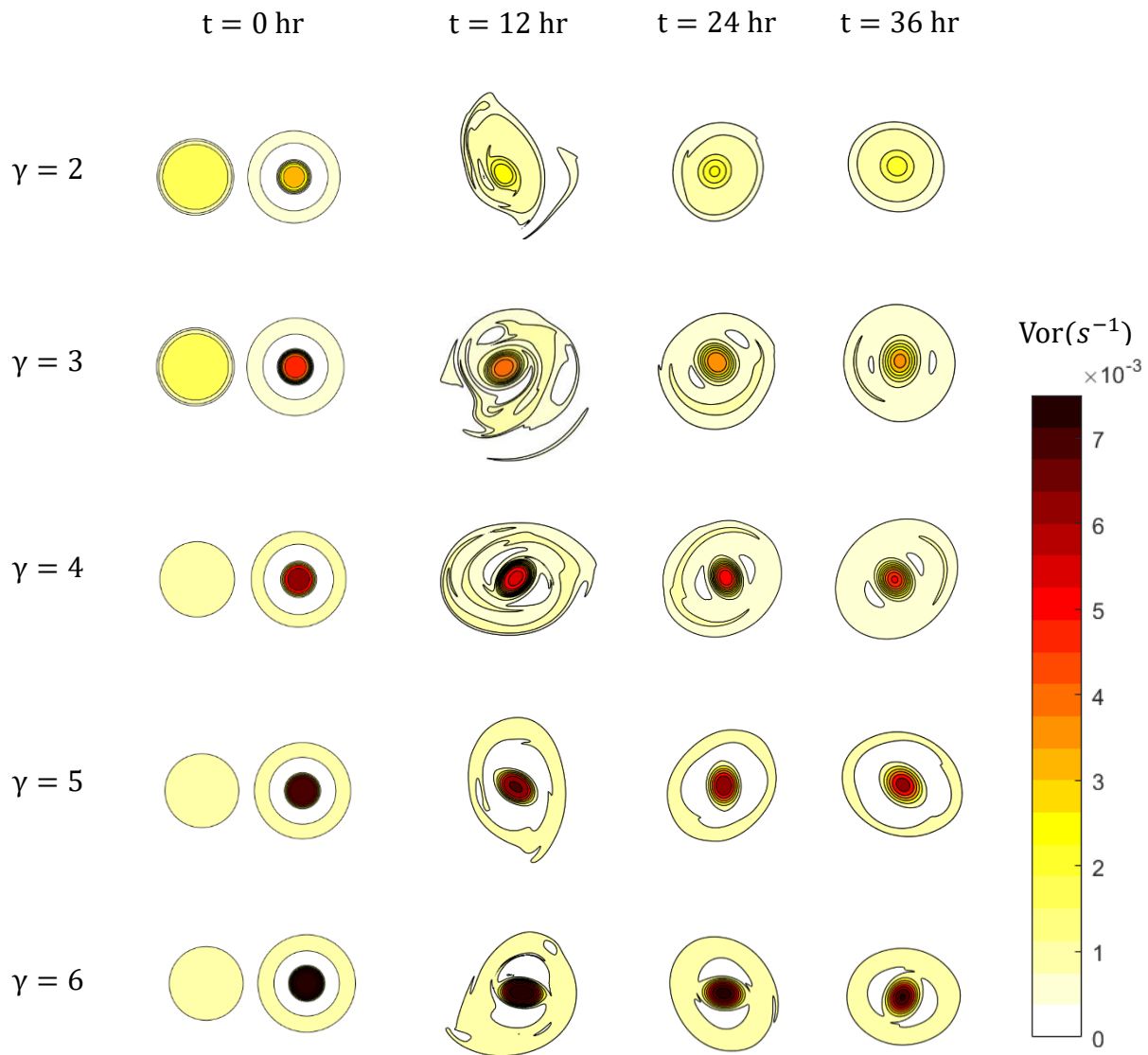


圖五、雙眼牆結構與弱渦度區在 $r = 1, 3, 5, 7$ ($d = 5$ 、 $\gamma = 3$) 時隨時間的變化

我觀察到當弱渦度區過大時，內核渦流沒辦法將弱渦度區拉伸在周圍，反而被其吞噬，經過軸對稱化混合稱一個新的渦流(圖五)。在 $d = 5$ 、 $\gamma = 3$ 的情況下， r 由 2 至 3 時從 T 轉為 M，且之後皆為混和型(圖六)。我也可以觀察到，混合後的渦流面積與 r 呈正相關，但混合後渦流的中心最大渦度卻與 r 無明顯相關。

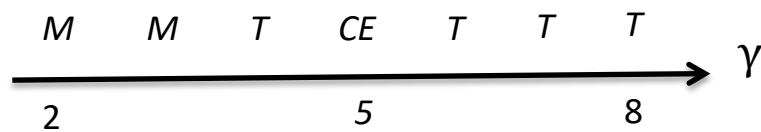


圖六、參數 r 的實驗結果

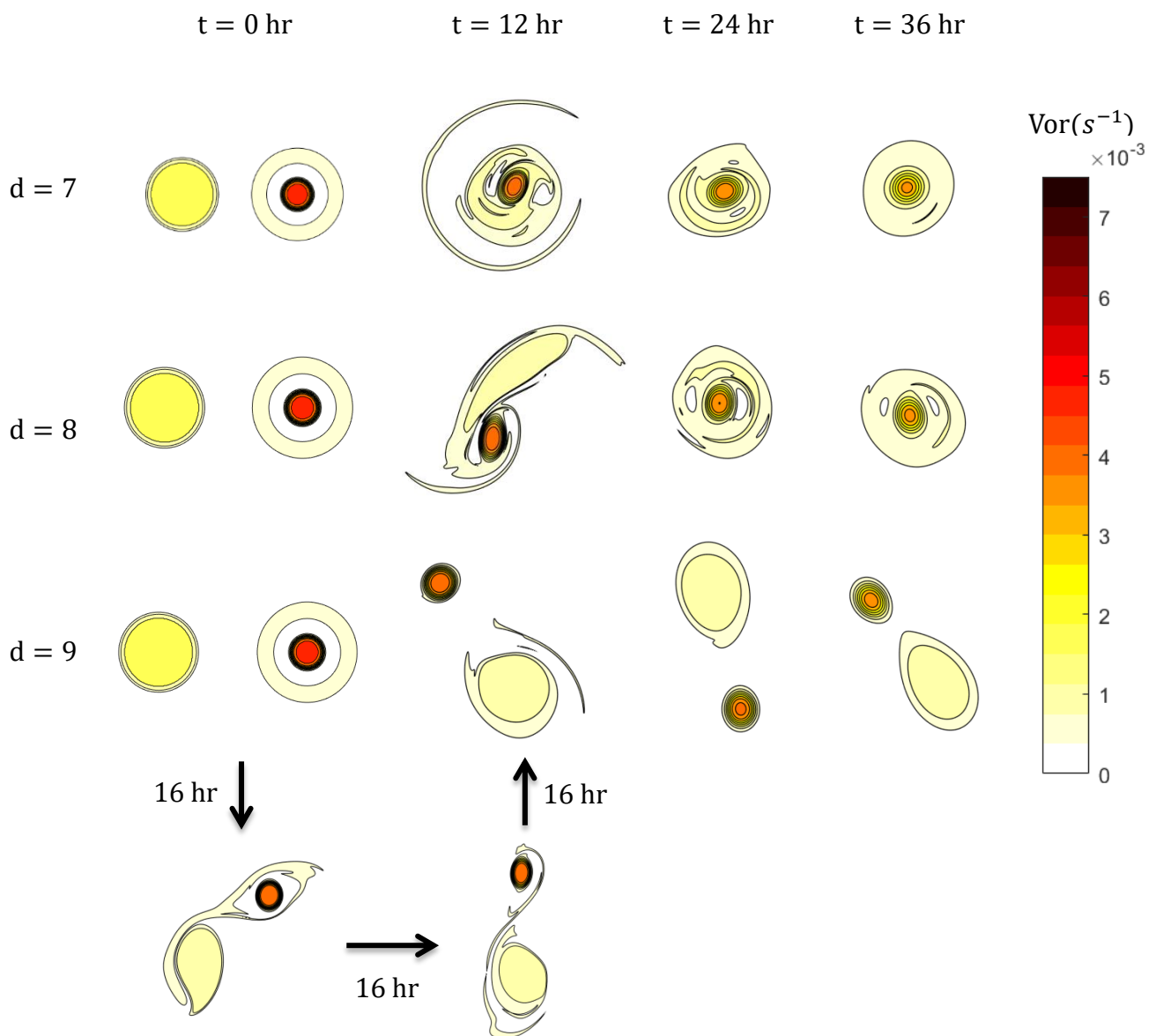


圖七、雙眼牆結構與弱渦度區在 $\gamma = 2, 3, 4, 5, 6$ ($d = 5$ 、 $r = 3$) 時隨時間的變化

當核心渦流不夠強時，無法有效地維持結構，導致整體結構崩潰，變為混和型，而核心渦流較強時，雖較能維持結構，但整體結構還是受到了一定的影響，結構產生變化後呈 tripole 的狀態維持(圖七)。在 $d = 5$ 、 $r = 3$ 的情況下， γ 由 3 至 4 時從 M 轉為 T，且之後除了 $\gamma = 5$ 時為 CE，其餘皆為 tripole(圖八)。

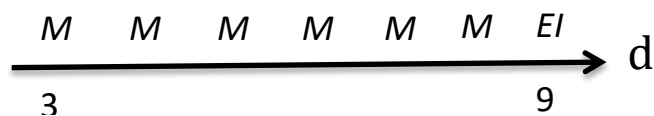


圖八、參數 γ 的實驗結果



圖九、雙眼牆結構與弱渦度區在 $d = 7, 8, 9$ ($r = 3, \gamma = 3$) 時隨時間的變化

$d = 8$ 時，一開始弱渦度區並沒有被核心拉伸，而是呈現互繞的狀態，再形成更大渦度區之後才被核心拉伸並結合， $d = 9$ 時我可以觀察到外眼牆被弱渦度區拉伸並與弱渦度區融合，形成更大的渦度區，再與核心互繞(圖九)。在 $r = 3, \gamma = 3$ 的情況下，在 $d < 9$ 時皆為混合， $d = 9$ 時變成互繞的情況(圖十)。根據以上結果，我認為其他情況在距離夠大時，所有情況都會變成互繞的情形，在距離很大時，兩者會被彼此渦度影響而旋轉，但又無法結合，因此呈現互繞的狀態。



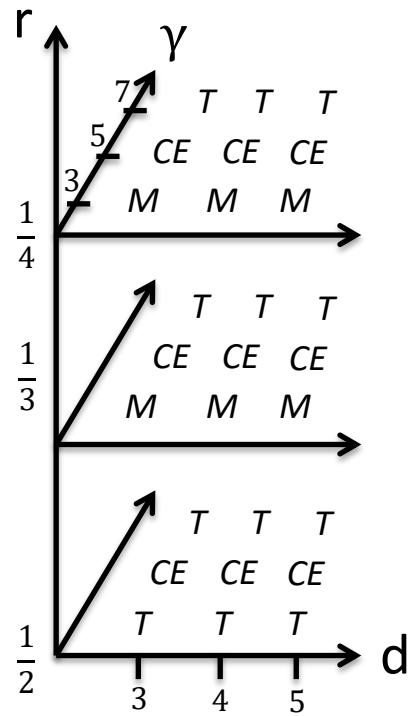
圖十、參數 d 的實驗結果

我將實驗一的結果以 r 、 γ 、 d 作為三軸畫成右邊的三維相位圖(圖十一)，觀察相位圖可以發現 d 軸並不影響實驗結果，結合以 d 軸做延伸的實驗，我推測弱渦度區與核心距離(雙眼結構距離)為不敏感變因。

根據 H.-C. Kuo 的研究^[2](2004)， T 為 M 與 CE 的過渡型態，但在我的相位圖中， CE 卻夾在 T 中間在研究之後，我認為可能原因為這裡的 CE 情形中， $\zeta_3 = \zeta_2 = 0.2 \zeta_1$ ，因此外眼牆在與弱渦度區交互作用的時候，混合得更加順利與快速，因此形狀較能維持對稱，形成雙眼牆結構。

綜合 γ, r 兩軸之延伸，我可以觀察到雙眼牆結構相對越強(雙眼牆結構渦度越大、弱渦度區半徑

越小) 結果越傾向 T ，反之則傾向為 M ，我推測當雙眼牆結構相對強時，較容易維持本身內外層的狀態，反之則容易被弱渦度區牽引導致結構破碎，最終合併成一個較大渦旋，而 CE 就是當中 $\zeta_3 = \zeta_2$ 時的特例。



圖十一、 r 、 γ 、 d 三軸所構成之三維相位圖

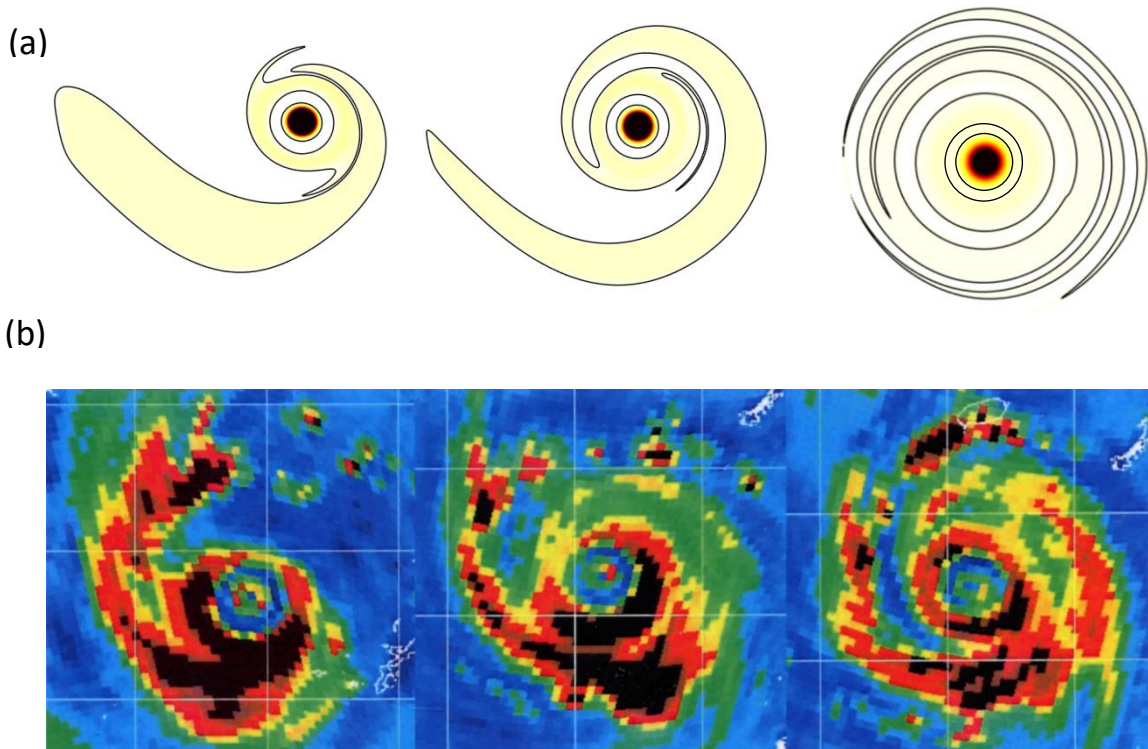
(二)三眼牆的形成機制：

在過往的觀測中，除了觀察到雙眼牆外，儘管非常稀少，但有時我們還是能觀察到三眼牆型態的颱風(圖十二右)，比起雙眼牆結構又多了一道眼牆，存活時間更短、更不穩定。



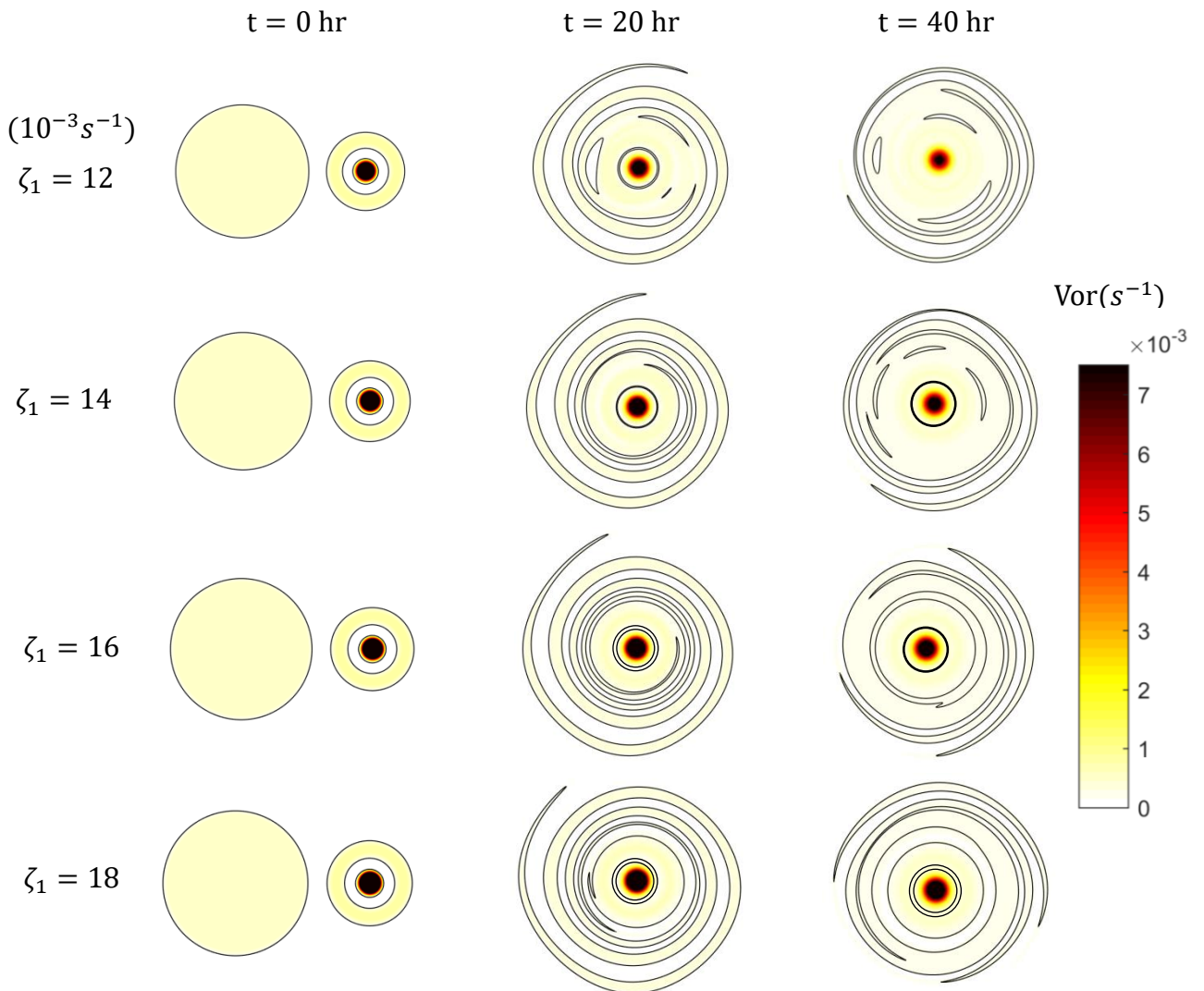
圖十二、颶風 FRANCES(2004)形成三眼牆的過程，
第三張圖中可見清晰的三眼牆結構

而在實驗一中，雙眼牆結構相對較小且強度較強時，可以觀察到整個雙眼牆結構渦流將弱渦度區拉伸在周圍，而在某些時候，更能維持兩個 moat 的穩定，將整個弱渦度區軸對稱化形成眼牆，轉變為一三眼牆的清況，如圖十三(a)。而在衛星的觀測資料也能觀察到類似於上述的過程，如圖十三(b)以及圖十二，因此雙眼牆的渦流動力可能為一種三眼牆結構的形成機制。



圖十三、(a)為利用實驗一初始場模擬出的三眼牆形成過程，
與(b)中 MAEMI(2003)透過軸對稱化形成三眼牆的過程相似

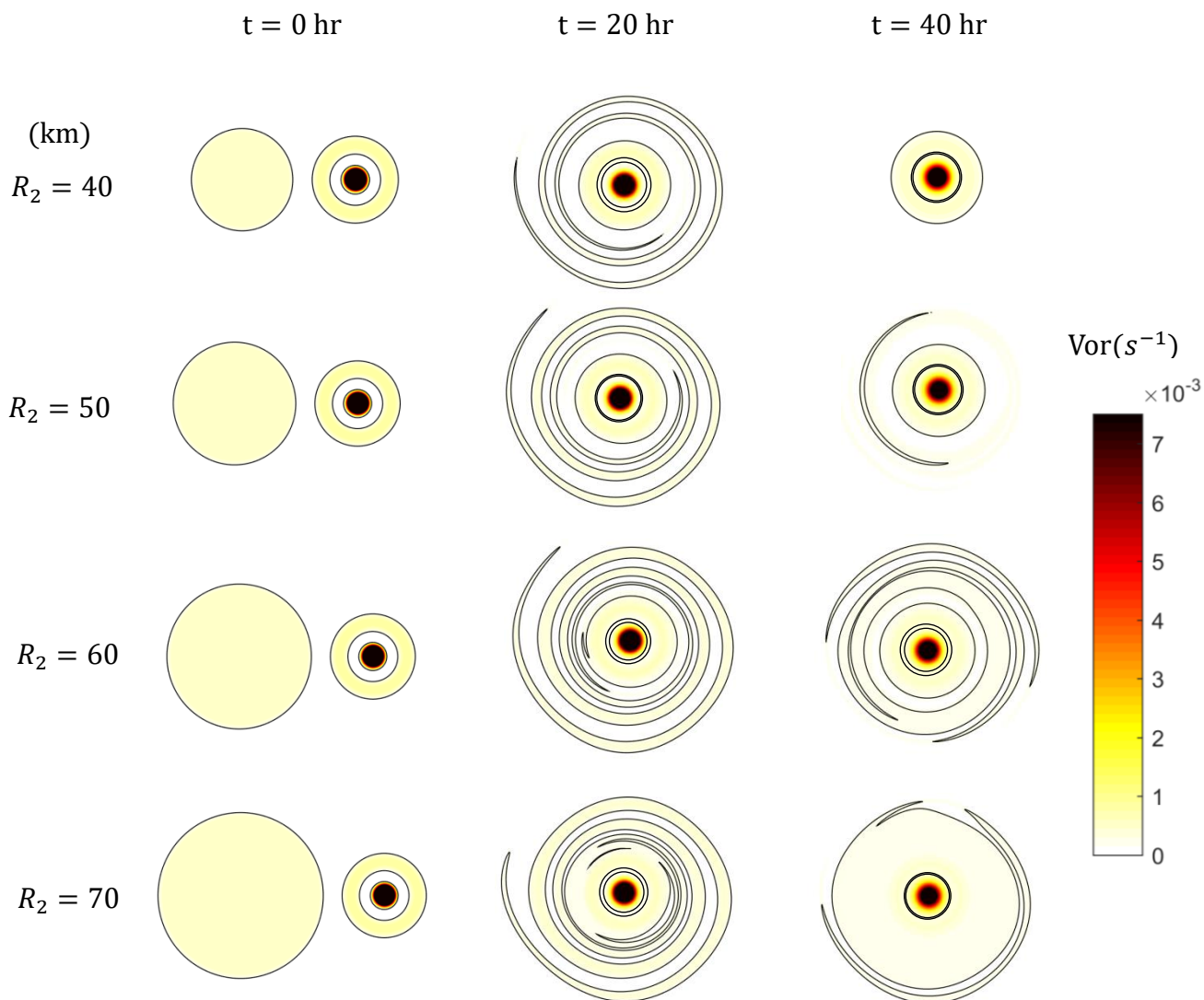
接下來分別將三個參數(ζ_1 、 R_2 、 Δ)的結果繪製成圖十四、圖十五、圖十六，縱軸為參數的變化，橫軸為時間，由此圖可以觀察各個參數變化時，渦流如何隨時間的變化，並比較結果。



圖十四、雙眼牆結構與弱渦度區在 $\zeta_1 = 12, 14, 16, 18$ ($10^{-3} s^{-1}$) 時隨時間的變化

圖十四中，在 $\zeta_1 = 12$ 時，最終形成了混合；在 $\zeta_1 = 14$ 時，最終留下了原來的 moat，形成了雙眼牆；在 $\zeta_1 = 16, 18$ 的情況中，除了原來的 moat，還可透過軸對稱化弱渦度區形成了另一道眼牆(三眼牆結構)。

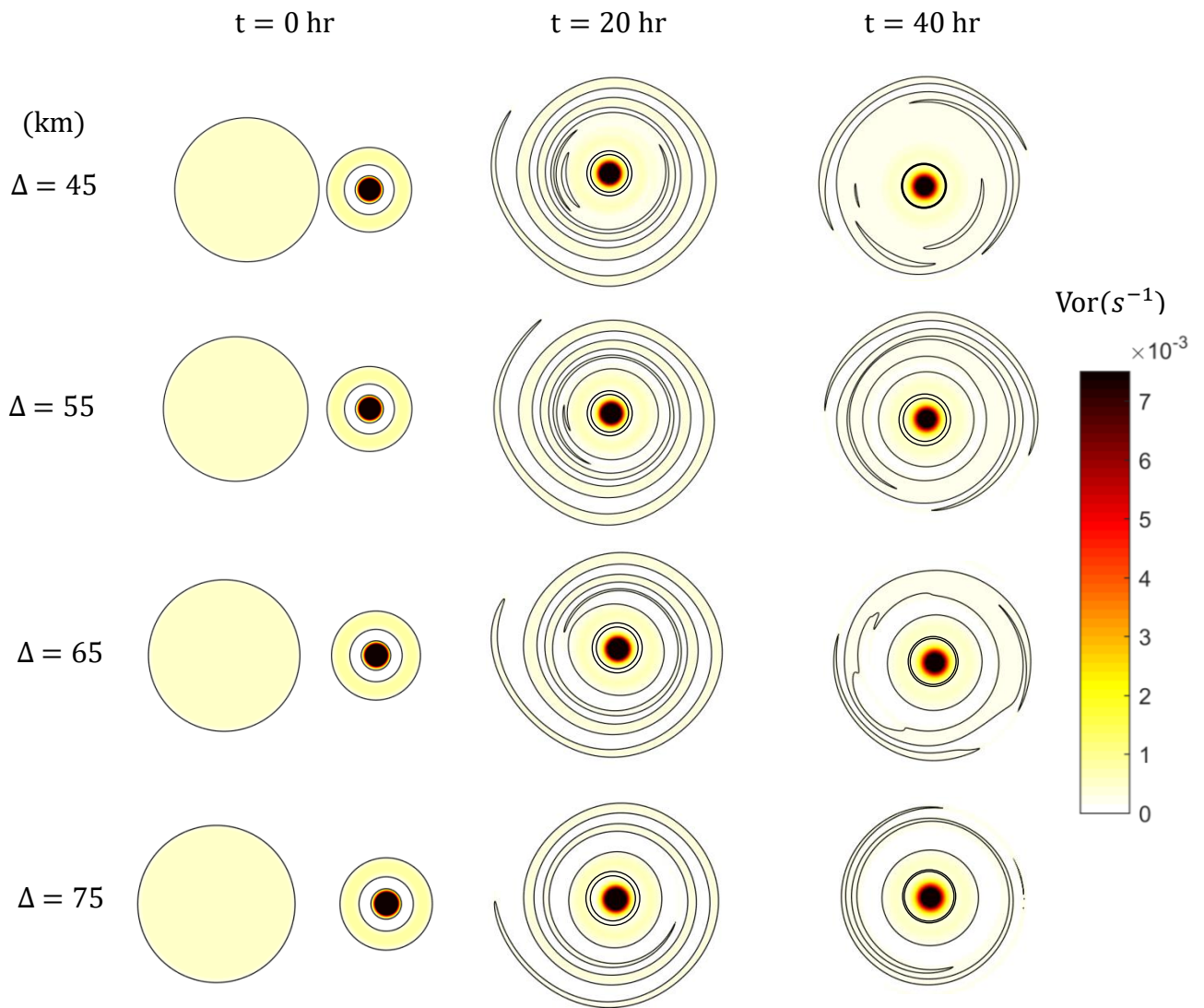
當內核渦度過弱時，難以將弱渦度區拉伸在離內核較遠的位置，而使之與外眼牆融合，並導致了外眼牆的不穩定，形成混合或是 moat 很小的雙眼牆，當內核渦度足夠大時，才能將弱渦度帶拉伸在較遠的位置，有適當的空間形成第二道 moat，並維持本來結構的穩定形成三眼牆。



圖十五、雙眼牆結構與弱渦度區在 $R_2 = 40, 50, 60, 70(\text{km})$ 時隨時間的變化

圖十五中，在 $R_2 = 40$ 時，最終形成了 moat 不明顯的雙眼牆；在 $R_2 = 50$ 時，最終形成了 moat 很小的雙眼牆，外圍還有一些弱且細的細絲帶，不形成一道眼牆；在 $R_2 = 60$ 時，最終形成了三眼牆的結構；在 $R_2 = 70$ 時，最終形成不明顯的雙眼牆，moat 幾乎消失。

在弱渦度區半徑很小時，由於面積太小的關係，在進行軸對稱化拉伸時無法在外圍形成一道足夠厚的眼牆，而轉為細絲帶消散掉；而在弱渦度區半徑很大時，內核無法有效地進行拉伸，使得弱渦度區與外眼牆結合，並影響到雙眼牆結構本身的穩定，導致雙眼牆結構幾乎被破壞。



圖十六、雙眼牆結構與弱渦度區在 $\Delta = 45, 55, 65, 75(\text{km})$ 時隨時間的變化

圖十六中，在 $\Delta = 45$ 時，最終形成了 moat 不明顯的雙眼牆；在 $\Delta = 55$ 時，最終形成了三眼牆的結構；在 $\Delta = 65$ 時，最終形成了三眼牆的結構，但最外圍的眼牆軸對稱有些不完全，但是一穩定的狀態；在 $\Delta = 75$ 時，最終形成不明顯的雙眼牆，外圍的細絲帶很快就消散掉了。

在距離很近時，弱渦度區會與外眼牆融合，並影響雙眼牆的穩定；距離很遠時，弱渦度區的一部份因距離太遠而無法被內核拉伸，使得拉伸到周圍形成的眼牆較薄，很快就消散掉了。

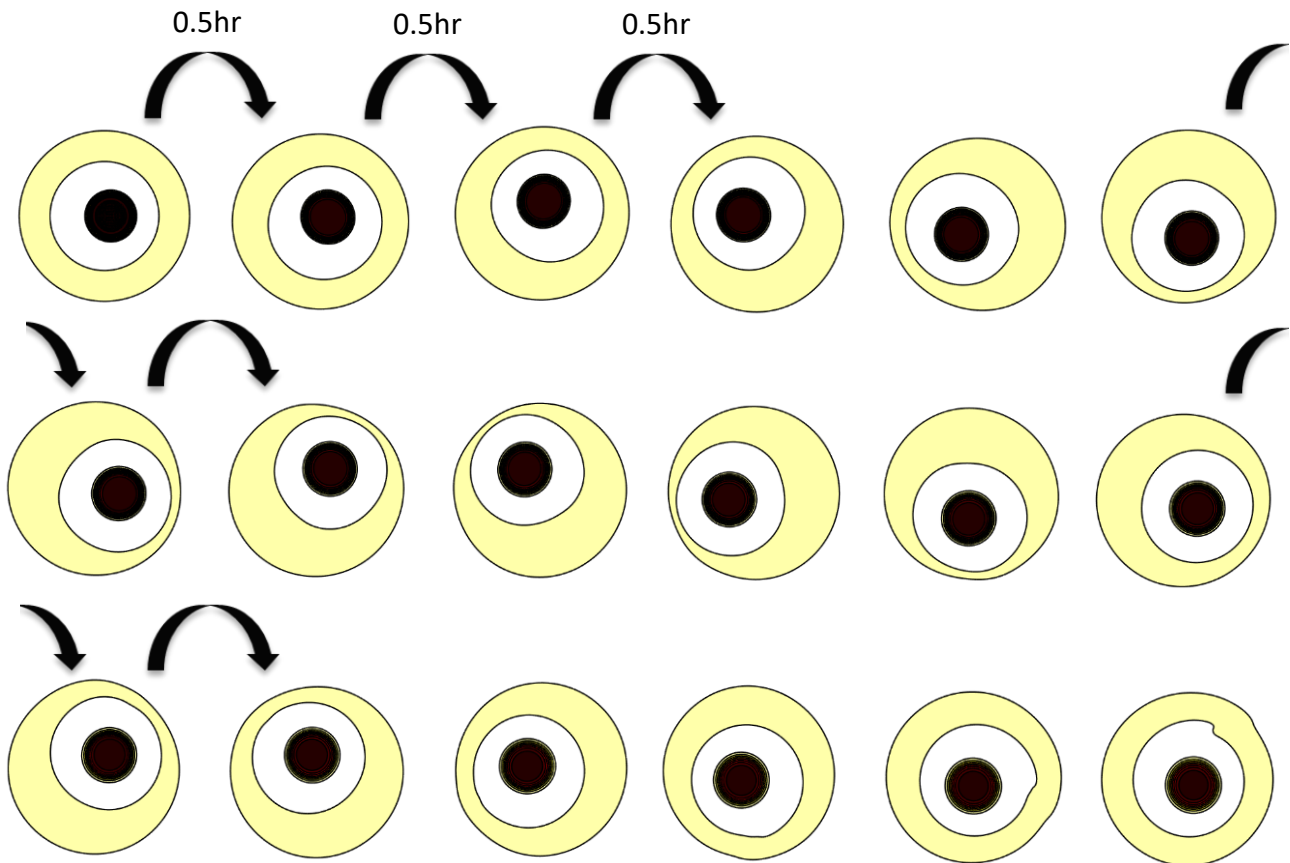
由以上實驗可以觀察到，三眼牆是可以由雙眼牆與一弱渦度區的交互作用形成但內核渦旋的渦度需非常強，才能維持雙眼牆本身 moat 的穩定，並有效的將弱渦度區拉身在周圍形成第三道眼牆；弱渦度區的大小也必須適當，太大會影響到雙眼牆本身，太小不足以形成眼牆而消散掉；兩者間的距離也需適當，太近會影響穩定，太遠無法有效地拉伸雲區。

上述條件相當嚴苛，形成三眼牆結構的實驗中，初始場的近中心最大風速在 60 m/s 以上，已達到了強烈颱風的等級，且在弱渦度區大小與距離都必須適當的情況下，三眼牆應為一相當稀有之現象，而實際觀測到的次數也是非常的少。

最近幾年來，出現了好幾個近中心最大風速超過 65 m/s 的颱風，因為威力實在太驚人，因此有人發明了一個新名字，將它們稱為「超級強烈颱風」，若在現今的極端氣候下，觀測到的超級強烈颱風越來越多，也許我們會觀測到更多的三眼牆颱風。

二、實驗二：

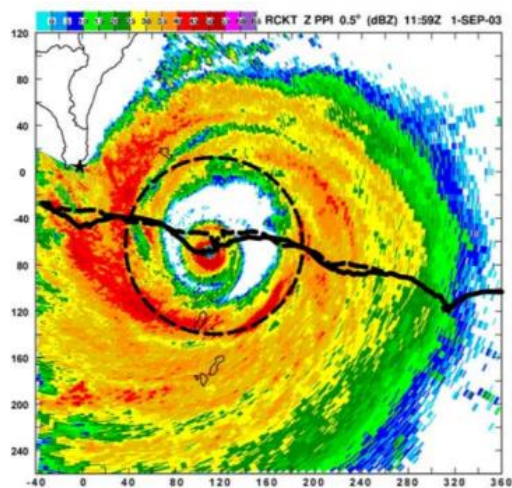
探討內核渦旋的偏移對雙眼牆結構的影響以及結構的承受度。我在實驗結果中發現，內核渦旋從內到外再從外到內作圓周運動，且過程中角速度會不斷的改變，而 moat 區也跟著內核渦旋移動。我稱從中心出發，到外圍，再回到中心的過程為一個週期(圖十七)。在經過幾個週期之後，內核渦旋不再繞著外眼牆中心旋轉，而轉換成 moat 區的不穩定，變為橢圓形內核，進而形成 T。



圖十七、內核渦旋偏移導致運動模式的連續圖片 ($\gamma=3$,每張間隔半小時)

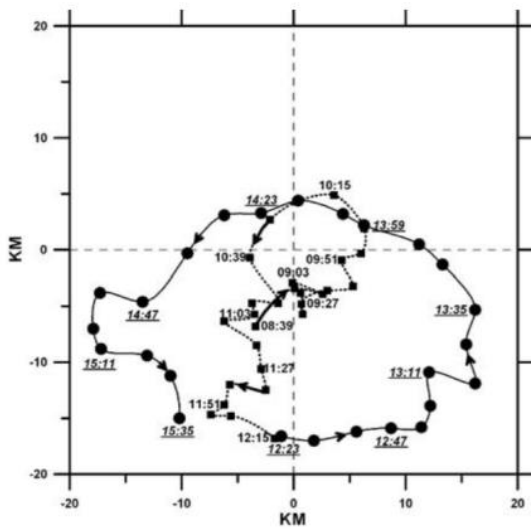
張寶亮博士與洪景山博士的研究^[4]利用都普勒雷達分析杜鵑颱風時，有發現到杜鵑颱風內眼牆中心偏離外眼中心(圖十八)，並環繞颱風中心旋轉的現象，與我以數值模式觀察到的實驗結果有些相似。

而張博士與洪博士在研究中有繪製一張特別的圖，他們將杜鵑颱風內眼中心相對於外眼中心的位置

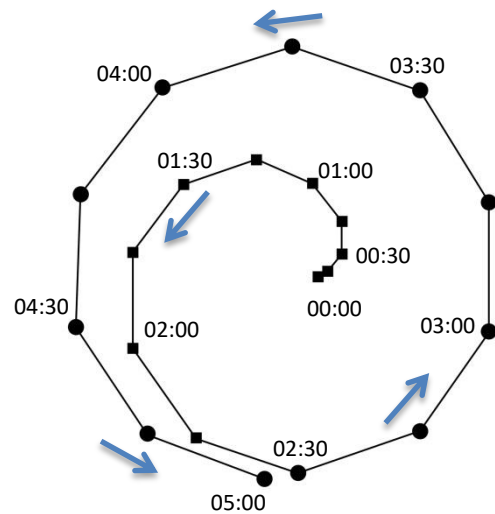


圖十八、杜鵑颱風內眼中心的偏離^[4]

隨時間描繪出來(圖十九)，由此得出內眼中心在外眼牆內部的運動路徑，而我利用 Adobe after effects，利用 track motion 鎖定整個渦漩，並追蹤內眼中心生成節點，最後得出內眼中心在外眼牆內部的運動路徑(圖二十)。接著我觀察兩圖，可以觀察到兩圖皆有內外兩圈不同的路徑，而實際觀測圖整體偏向南邊的原因在張博士的論文有提及，是因為杜鵑颱風當時受到顯著的南向風切，由此我們可將觀測所做出的圖與模式做出的圖互相比較，即可發現一些不尋常的地方加以研究。



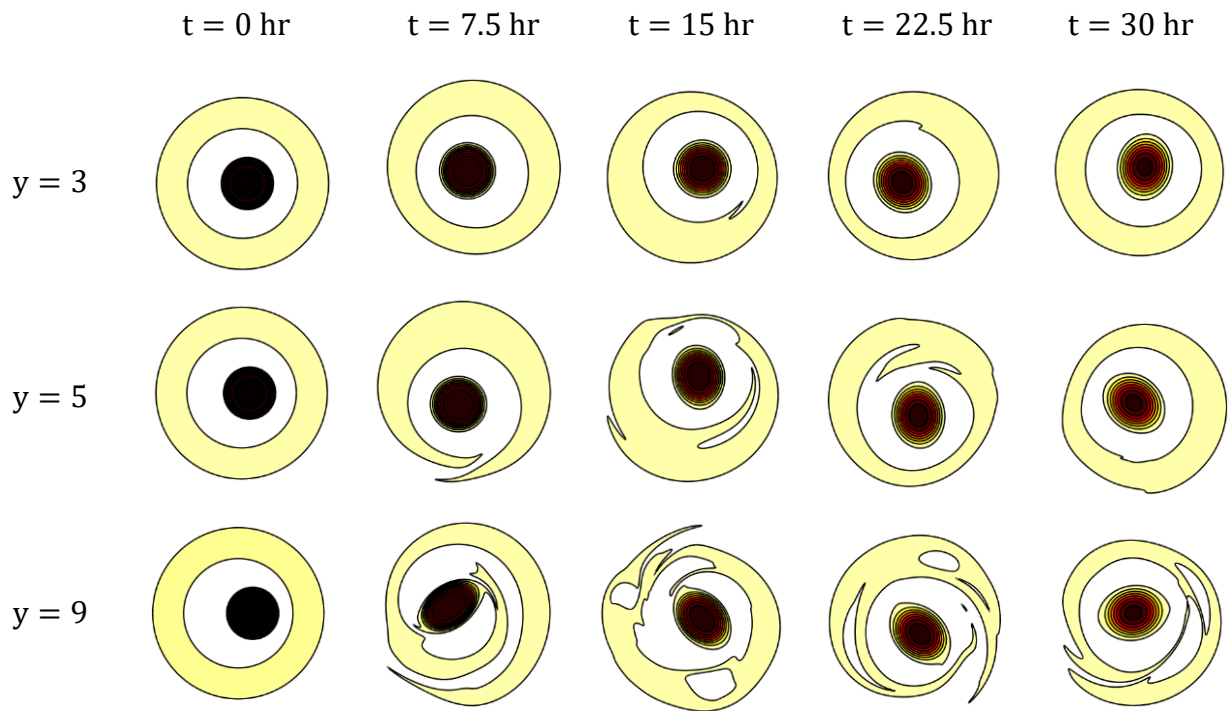
圖十九、杜鵑颱風內眼中心相對於外眼牆中心之位置，時間標示於位置下方^[4]



圖二十、 $y=3$ 時內眼中心相對於外眼牆中心之位置，時間標示於位置旁^[4]

(一)參數 y :

我在 $\zeta_1 = 9 \times 10^{-3} s^{-1}$, $\zeta_3 = 1.8 \times 10^{-3} s^{-1}$ 的情況下，對 y 從 1 至 15 做實驗，我發現當 $y < 5$ 時，渦度環可以承受核心渦流產生的偏移，讓核心渦流可以經歷數次週期。
 $5 \leq y \leq 7$ 時，外眼牆會因為 moat 區過大的移動而破裂，且破裂的兩端會產生錯位，異端被捲近核心渦流無法相接，形成不對稱的渦度環，但之後會利用軸對稱的方式修復，恢復成對稱的渦度環。而當 $y > 7$ 時，結構過於不穩定導致無法再形成對稱的渦度環，變為破碎的渦度帶環繞在核心渦流周圍。圖二十一為分屬三不同區間的情況。



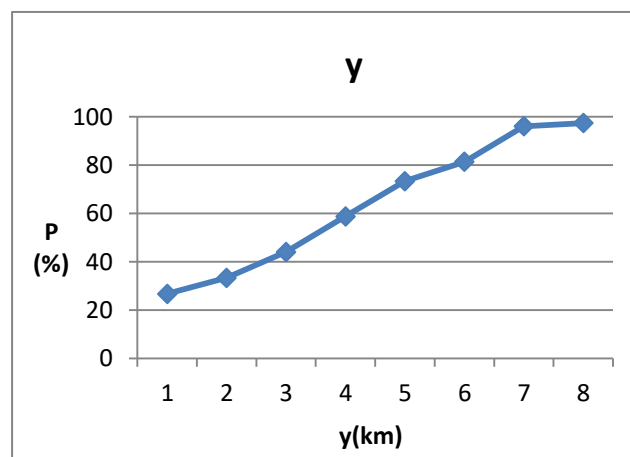
圖二十一、不同的內核渦流偏移量隨時間變化有不同表現

根據以上，為了實驗的嚴謹不能增加更多變數，以下實驗討論強度對 P 與週期的影響時，會將 y 定為 3，讓雙眼牆保持完整。

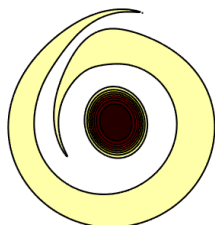
(二) 偏移影響比率 P ：

我想要探討不同雙眼牆結構強度對於內核心的偏移會有甚麼不同的表現，因此我分別針對四參數研究：內核偏移量 y 、整體強度 ($\zeta_3 = 0.2 \zeta_1$)、外眼牆渦度 ζ_3 、內核渦度 ζ_1 ，我首先要討論內核偏移量 y 與 P 的關係，以 y 為縱軸、 $P(\%)$ 為橫軸繪製成表一。

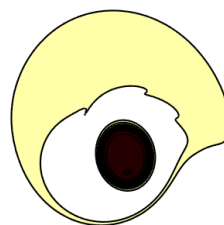
表一、參數 y 實驗中，縱軸 P 與橫軸 y 的關係



由表一我能得出 y 與 P 呈明顯正相關的結果，我認為正相關的原因為隨著 y 的上升，外眼牆無法承受內核渦旋及 moat 區巨大的偏移，導致環帶斷裂甚至完全扭曲，將外環捲至內核渦旋旁，導致 moat 區極不穩定，產生橢圓形內核渦旋(圖二十二)， $y \geq 7$ 時，內核渦旋皆在 2hr 內轉為橢圓形，已經趨近於完全無法穩定的結構(圖二十三)。



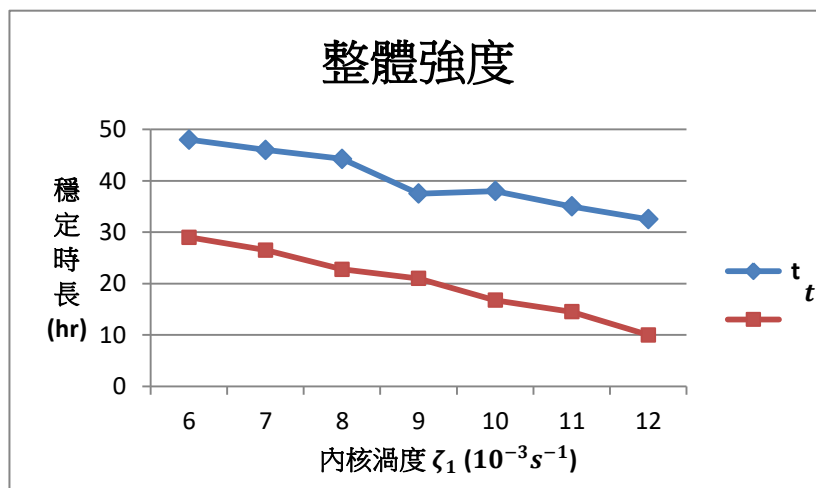
圖二十二、 $y=6$ 在 9hr 時因為過度環斷裂導致的 moat 不穩定



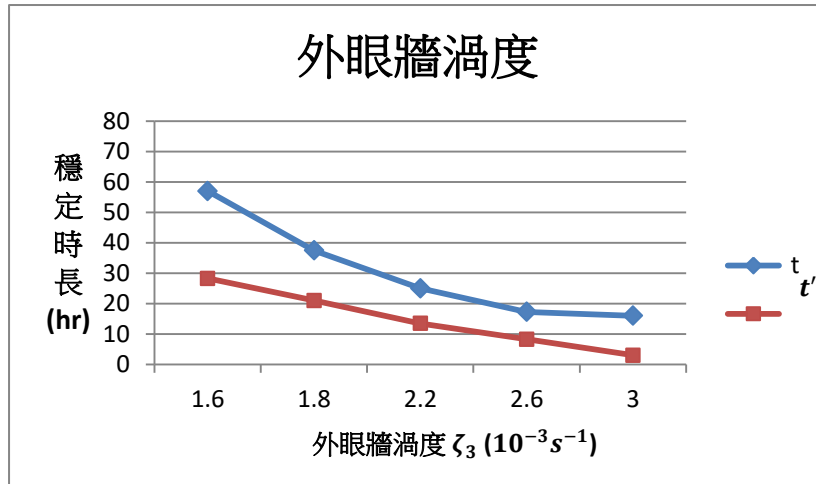
圖二十三、 $y=8$ 在 2.5hr 時因為過度扭曲的過度環導致的 moat 不穩定

接下來我要討論整體強度、外眼牆渦度、內核渦度與 P 之間的關係，這時我要先從無偏移時的穩定時長 t 以及 $y=3$ 時的穩定時長 t' 開始討論，我將研究結果繪製成以下圖表：

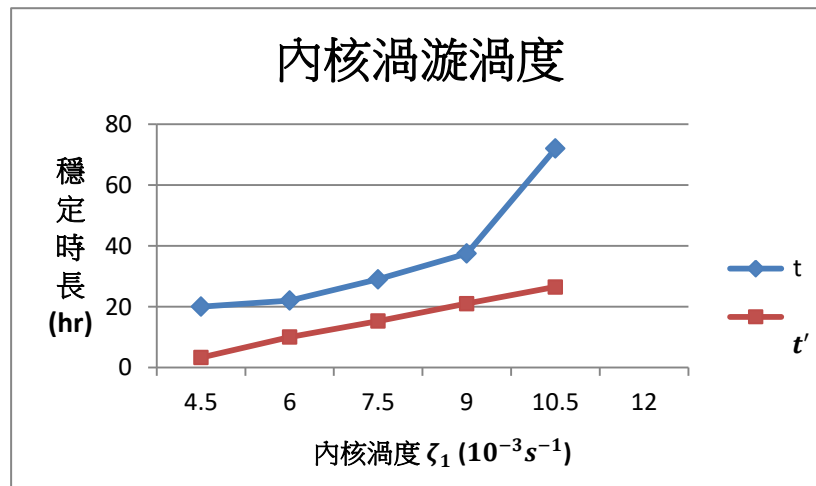
表二、改變整體強度時，縱軸 t 與 t' 與橫軸 ζ_1 的關係



表三、改變外眼牆渦度時，縱軸 t 與 t' 與橫軸 ζ_3 的關係



表四、改變內核渦流渦度時，縱軸 t 與 t' 與橫軸 ζ_1 的關係



我可以觀察到在固定 $a=b=2$ 的情況下，雙眼牆結構的穩定性有以下結果：

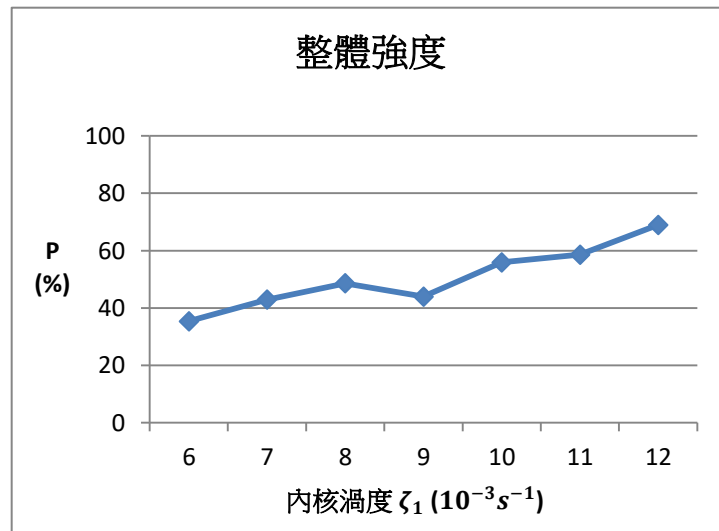
1. t 與 t' 與整體強度呈負相關
2. 外眼牆渦度與 t 及 t' 呈負相關，且在渦度較小時， t 的變化較大
3. 內核渦流渦度與 t 及 t' 呈正相關，且在渦度較大時， t 的變化較大
4. t' 的變化接近線性

根據前人的研究^[2]，雙眼牆結構穩定的機制為內核渦流將外眼牆穩定在周圍，因此內核太弱或外眼牆太強都會造成不穩定，與我對 t 的實驗結果相同。整體強度呈負相關的原因可能是在此實驗 $a=b=2$ 的情況下，兩種效應的加成導致。

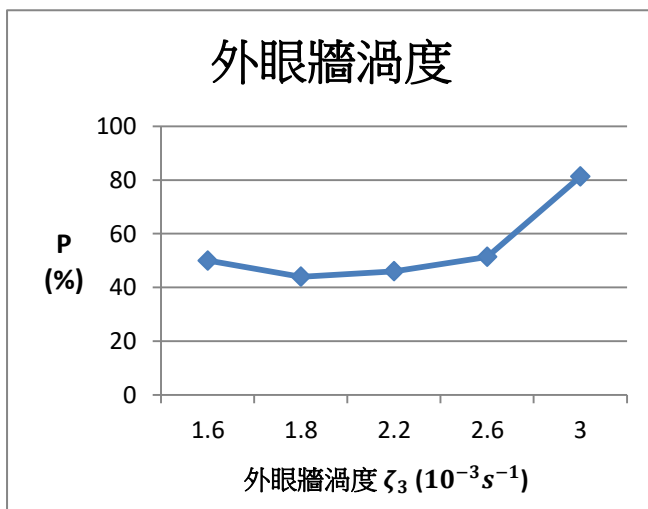
我發現 t 的變化成非線性，但 t' 的變化卻接近線性。以外眼牆渦度為例，我認為外眼牆渦度較大時，結構的穩定性較差，穩定時長的趨緩可能是在該結構下，moat 區能保持一定的穩定時長，而不會隨著強度不斷的上升導致穩定時長趨近於 0，在內核渦流較弱時亦是如此。但 t' 與強度呈線性關係，也就是說內核渦流的偏移使 moat 原本能保持的最低穩定時長消失了，比較兩者差異後，我認為此最低的穩定時長是來自 moat 區的寬度，越寬時就能保持更久的最低穩定時長，越窄則相反。但當內核渦流偏移時，就等於破壞了 moat 區的寬度，使得此穩定性質消失。

接下來我再從以下圖表來觀察整體強度、外眼牆渦度、內核渦度與 P 之間的關係：

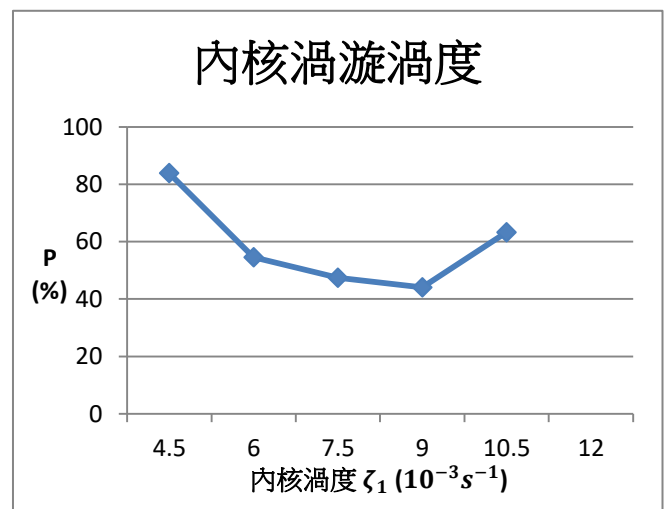
表五、改變整體強度時，縱軸 P 與橫軸 ζ_1 的關係



表六、改變 ζ_3 時，縱軸 P 與橫軸 ζ_3 的關係



表七、改變 ζ_1 時，縱軸 P 與橫軸 ζ_1 的關係



由上表我可以得出以下結果：

1. 在 $a=b=2$ 的情況下，整體強度與 P 為弱正相關
2. $\zeta_3 > 1.8$ 時外眼牆渦度與 P 呈正相關，且在渦度較大時， P 的變化較大，但當 $\zeta_3 < 1.8$ 時，渦度與 P 呈負相關
3. $\zeta_1 < 9$ 時，內核渦流渦度與 P 呈負相關，且在渦度較小時， P 的變化較大，但當 $\zeta_1 > 9$ 時，渦度與 P 呈正相關

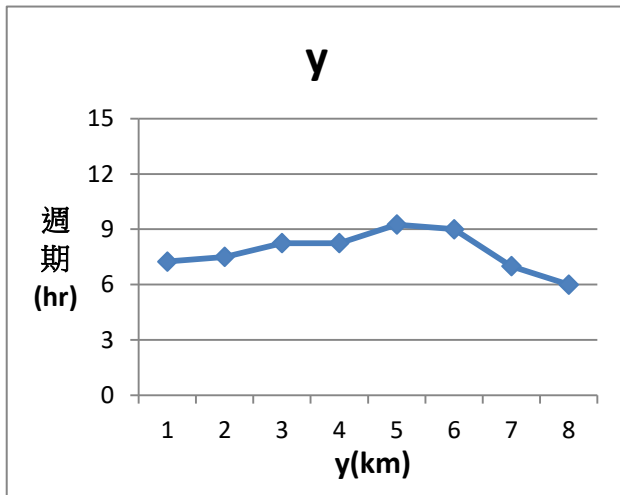
將 t 與 P 的結果比對可以發現，強度變化對於 P 與穩定性的效應大致上是相反的，也就是本身穩定性越佳的渦流，內核偏移造成的影響越小。而當 $\zeta_3 < 1.8$ 或 $\zeta_1 > 9$ 也就是較為穩定時 P 卻成相反走向，此現象的成因為 t 與 t' 的非線性與線性關係，使得 P 不會隨著穩定性增加而逐漸降低，反而會有上升的趨勢。

我也可以觀察到，在外眼牆渦度較大或內核渦流渦度較小時，也就是較不穩定時，強度變化對於 P 的影響較大，因此對於不穩定的結構來說，偏移的影響比率對於強度變化較為敏感。

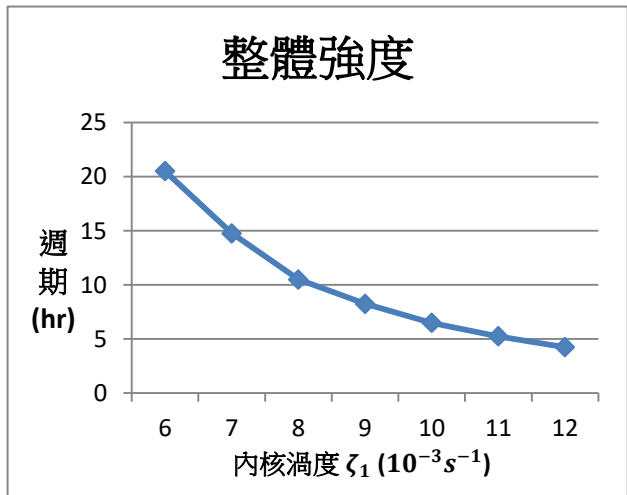
(三) 週期

我想要探討在內核偏移的情況下，週期在不同強度的雙眼牆結構下會如何變化，因此我將偏移量 y 、整體強度($\zeta_3 = 0.2 \zeta_1$)、外眼牆渦度 ζ_1 、內核渦度 ζ_3 等參數與週期的關係繪製成以下表格：

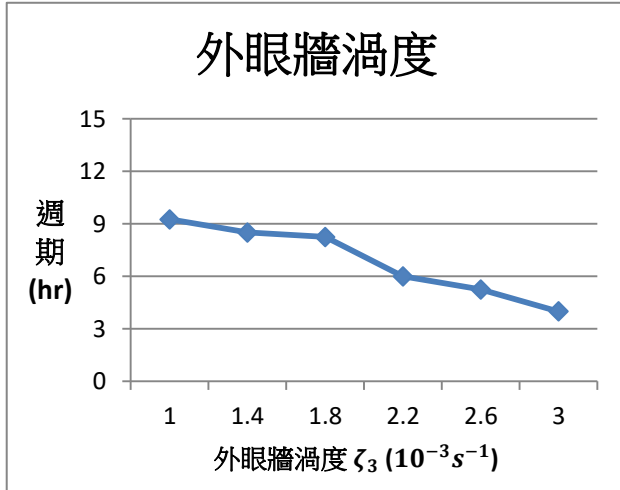
表八、改變 y 時，縱軸週期與橫軸 y 的關係



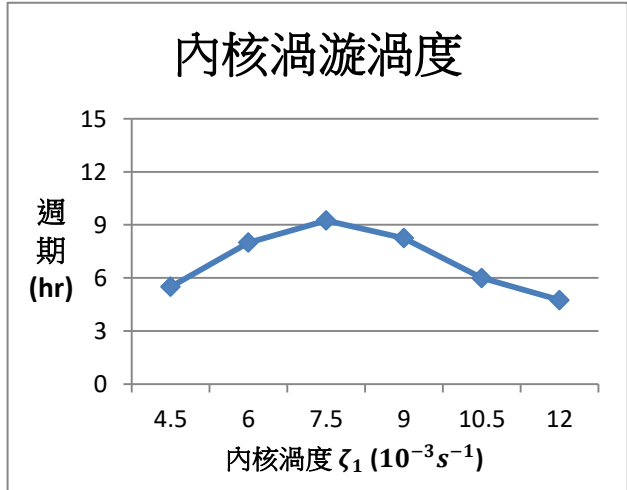
表九、改變整體強度時，縱軸週期與橫軸 ζ_1 的關係



表十、改變 ζ_3 時，縱軸週期與橫軸 ζ_3 的關係



表十一、改變 ζ_1 時，縱軸週期與橫軸 ζ_1 的關係



由上面四個圖表，我能發現以下結果

1. $y < 5$ 時， y 與週期呈正相關； $y > 5$ 時， y 與週期呈負相關
2. 除了內核渦度 $\zeta_1 < 7.5$ 的情況，其餘週期皆隨著渦度的增加而減少

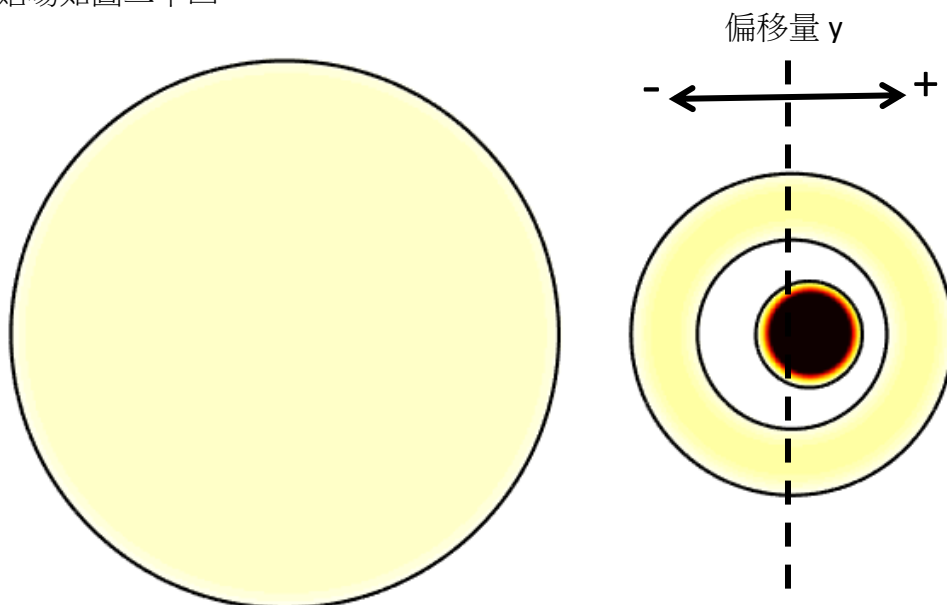
首先我探討 y 與週期的關係， $y < 5$ 時， y 與週期呈正相關的原因我推測為，當偏移越大時，內核渦流往外的距離也會更遠，因此行經的距離更長，且內核渦流越是往外，

在內核外側的眼牆就相對越薄，因此內核往往傾向於在外側繞圈，而不是回到中心，因此週期會隨之變長。而當 $y > 5$ 時，我發現在第一次週期中，內核渦旋即變為橢圓形 ($t' < \text{週期}$)，因此我推論週期變短的原因是因為偏移造成的影響已經被轉為 moat 的不穩定，而使內核渦旋更快歸於中心。

再來是渦度與週期之間的關係，我認為週期與渦度呈負相關的原因為，當渦度上升時，風速也隨之增加，因此內核渦旋可以更快的回到中心，而 $\zeta_1 < 7.5$ 的情況也可用 t' 的方式解釋， $\zeta_1 < 7.5$ 時 t' 與週期相當接近，因此我認為週期的減少是因為 moat 的不穩定分攤了內核偏移造成的影響。

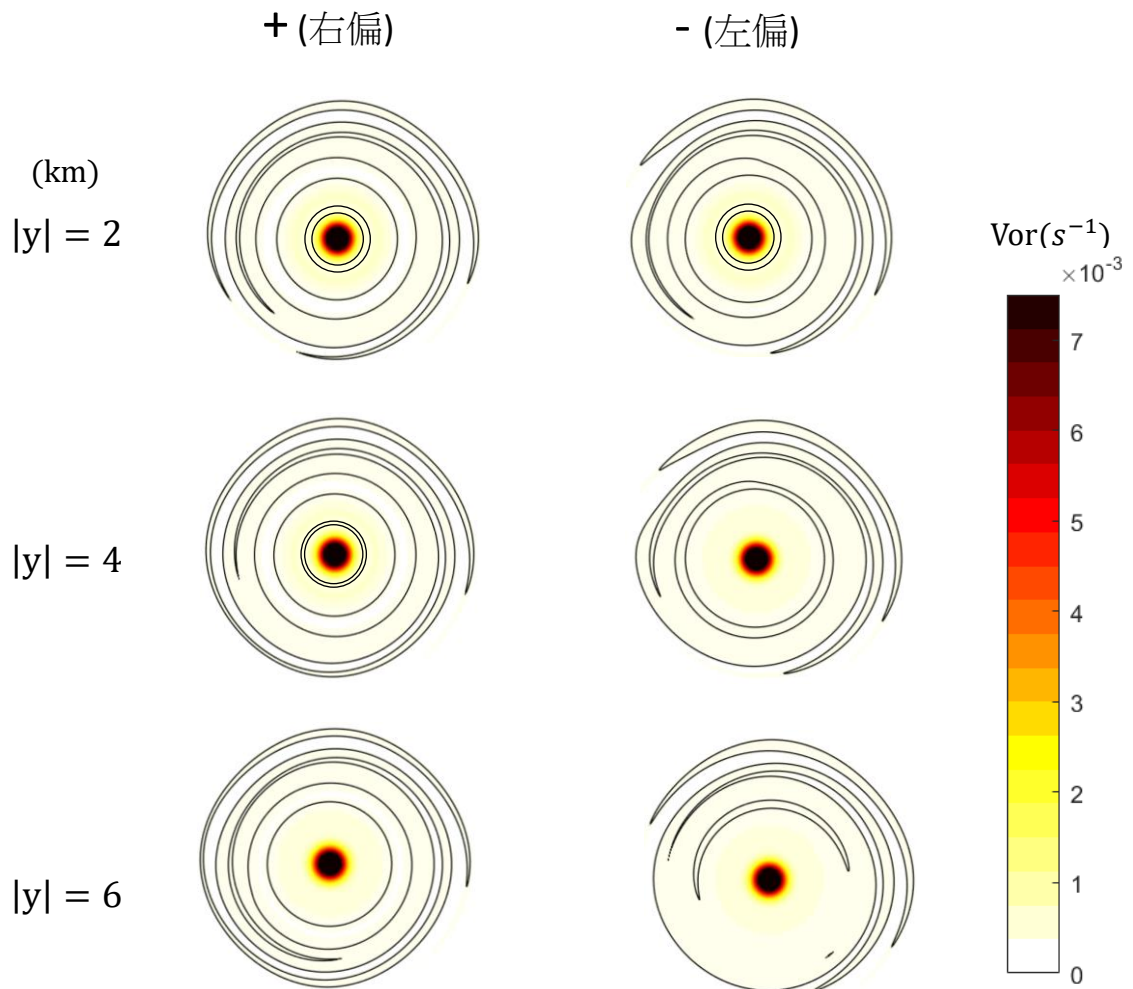
(四) 內核偏移對三眼牆形成的影響

實驗一的最後我探討了三眼牆颱風的形成，而在這裡我再添加了內核偏移量的參數 y ，取一會形成三眼牆的初始場，將內核渦旋偏移後進行實驗，來探討在形成過程中的影響。這裡的 y 具有方向性，因此我定義向右為正(遠離弱渦度區)、向左為負(接近弱渦度區)，初始場如圖二十四。



圖二十四、在雙眼牆與弱渦度區交互作用的初始場中加入內核偏移的參數

接下來我將實驗的最終結果(40 小時)以 y 的正負、偏移量的大小呈現出來，如圖二十五。



圖二十五、40 小時後的渦流型態

由圖二十五可見，在 $|y| = 2$ 時，無論往左或往右偏都還是能形成三眼牆；在 $|y| = 4$ 時，只有往右偏(遠離弱渦度區)時才能形成三眼牆，往左偏(接近弱渦度區)時則會形成雙眼牆；在 $|y| = 6$ 時，無論往左或往右偏都不能形成三眼牆。

以偏移量的大小來看，可以很明顯的發現，隨著偏移量變大，本身雙眼牆的結構被影響，導致內部更容易合併為單一眼牆渦流，三眼牆變得愈難形成。

至於偏移向左或是向右的影響，我發現到當內核往左偏時(接近弱渦度區)，被拉伸的弱渦度區會與外眼牆有更多接觸，使得第二道 moat 難以形成，由圖二十五中 $|y| = 4$ 時，第二道 moat 的寬度差可知，在 $|y| = 6$ 且左偏時，第二道 moat 甚至幾乎消失了。而弱渦度區與外眼牆的接觸多寡同樣也會影響到雙眼牆的穩定，因此在 $|y| = 4$ 時才會發生往左偏無法形成三眼牆的情況。

伍、結論

一、雙眼牆結構與弱渦度區互動

(一) 各參數對於交互作用的影響

1. 雙眼牆結構相對於弱渦度帶越強時，越傾向形成三極渦漩；越弱時則傾向混合
2. 外眼牆與弱渦度區強度相等時會快速混合並形成雙眼牆結構
3. 距離為不敏感變因

(二) 三眼牆結構的形成條件

1. 雙眼牆的渦流動力可能為一種三眼牆結構的形成機制
2. 內核渦漩的渦度需非常強，近中心風速超過了強烈颱風的等級
3. 弱渦度區的距離與大小都必須適當

二、內核渦漩偏移對雙眼牆結構的影響

(一) 現象觀察

1. 內核偏移會使內核渦漩繞著外眼中心旋轉，且具有內外兩不同的軌跡，與 Jing-Shan Hong and Pao-Liang Chang(2003)的研究中杜鵑颱風的觀測相似
2. 在內核偏移大於一定值時，渦度環會產生斷裂，但會恢復成對稱的渦度環；若偏移再大過另一定值，則會無法修復

(二) 內核渦漩偏移對雙眼牆結構 moat 區穩定之影響

1. 本身穩定性越佳的渦漩，內核偏移造成的影響越小
2. 由於 moat 區分布的變化，內核偏移的 moat 穩定時長 t' 隨渦漩強度改變呈線性變化，而無偏移時(t)呈非線性。此也造成內核偏移對非常穩定之結構的 moat 穩定造成相對較大的影響。

(三) 內核渦漩運動之週期

1. 偏移量在小於一定值時與週期長短呈正相關，若在第一次週期中內核即變為橢圓形，則會因 moat 的不穩定分攤內核偏移的影響，使週期長短與偏移量呈負相關
2. 渦度上升時，風速也隨之增加，週期因此變短
3. 內核渦漩過弱時，moat 的不穩定分攤內核偏移的影響，因此週期變短

(四) 內核偏移對三眼牆形成的影響

1. 偏移量越大，三眼牆結構越難形成
2. 內核偏向弱渦度區時，由於被拉伸的弱渦度區會與外眼牆有更多接觸，兩道 moat 都會受到影響更難形成與維持

陸、參考資料與其他

- [1] Kossin, J. P., W. H. Schubert, and M. T. Montgomery, “Unstable interaction between a hurricane’ s primary eyewall and a secondary ring of enhanced vorticity.” *J. Atmos. Sci.*,2000.
- [2] H.-C. Kuo, L.-Y. Lin, C.-P. Chang, *et al.*, “The Formation of Concentric Vorticity Structures in Typhoons.” *J. Atmos. Sci.*, 2004.
- [3] David G. Dritschel, ” On the stabilization of a two-dimensional vortex strip by adverse shear.” *Great Britain*,1989.
- [4] Jing-Shan Hong and Pao-Liang Chang, “Double EyewallandTrochoid-likeTrack of Typhoon Dujuan(2003):Doppler Radar Analysis.” *Atmospheric Sciences*,2005.
- [5]郭郁芬：雙眼牆形成之正壓動力探討。國立台灣大學大氣科學研究所碩士論文，2004。