

## 二、研究計畫內容：

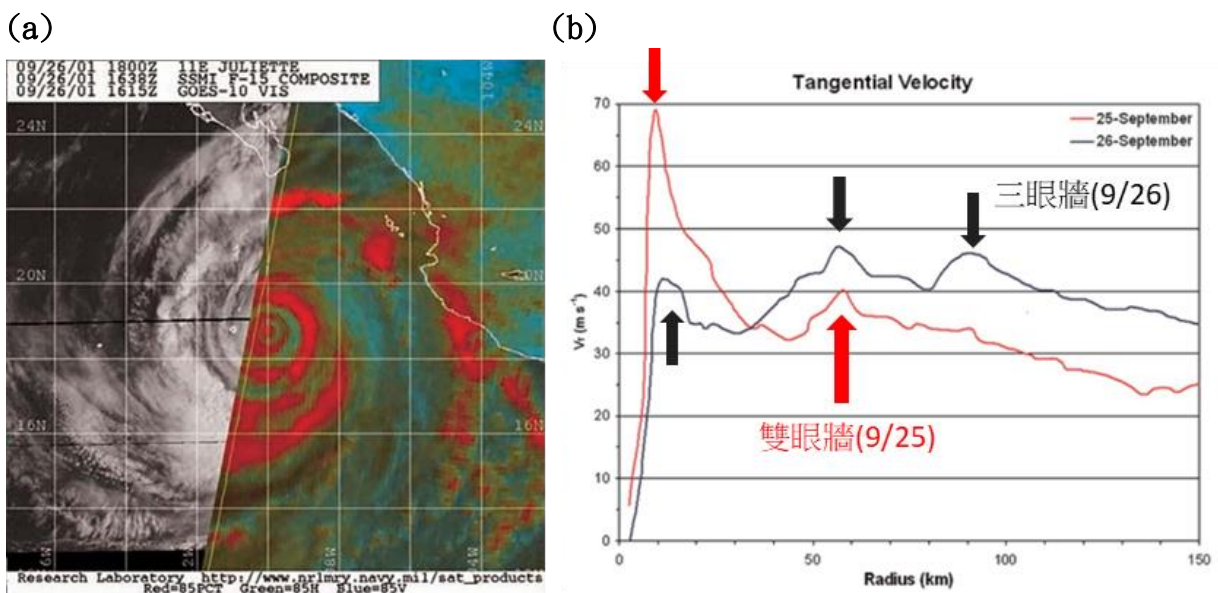
### (一) 摘要

本計畫使用淺水模式探討雙眼牆颱風演化成三眼牆颱風的條件。

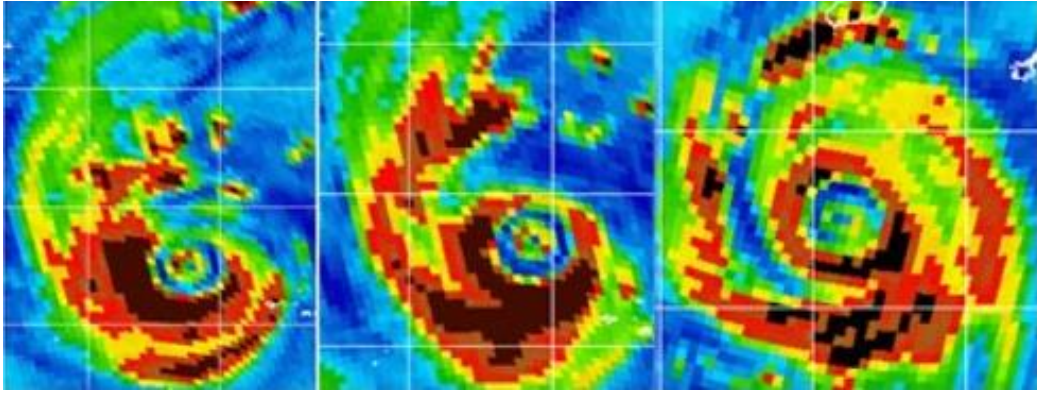
### (二) 研究動機與研究問題

對於颱風動力研究方向大致分為颱風路徑預報與颱風強度預報，而後者相對於前者的發展相對緩慢，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中，有 80%以上具有雙眼牆結構，因此對雙眼牆有更深入的探討，在西北太平洋颱風強度預報上能有顯著的幫助。

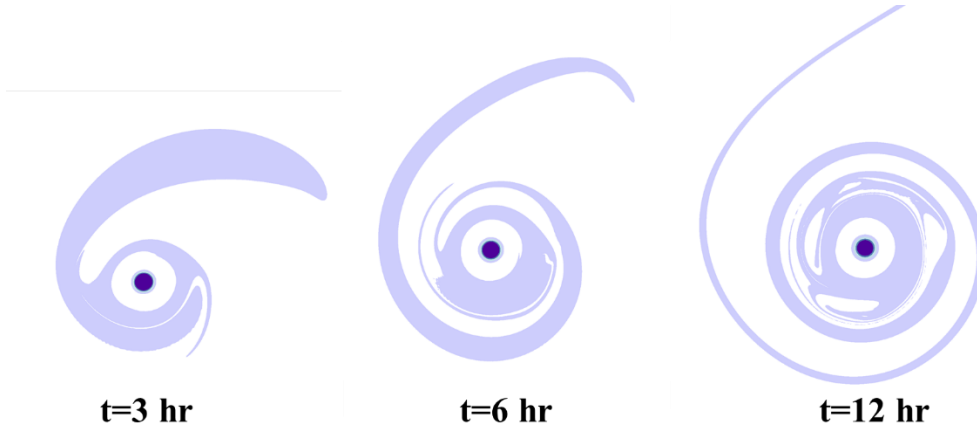
在過去的觀測資料中，可觀察到雙眼牆颱風將外圍雲帶軸對稱化後形成三眼牆颱風，如 Juliette (2001)颱風和 Mamei (2003)颱風(圖一和圖二)。比起雙眼牆結構，除了在衛星和雷達圖中可看出三道眼牆，亦可觀測到三個高風速區，足以見得雲帶和渦度帶之耦合。同時，此結構較雙眼牆颱風更不穩定且存活時間更短。本研究希望參考研究前人雙眼牆颱風研究之經驗，利用淺水模式探討外渦度帶之拉伸過程，以及雙眼牆颱風演化為三眼牆颱風之條件。



圖一、Juliette (2001)颱風之(a)SSM/I 85-GHz 微波衛星觀測圖和(b)切向風速圖紅線為 9 月 25 日、黑線為 9 月 26 日，顯示雙眼牆颱風演化成三眼牆颱風的過程。



圖二、Maemi (2003)颱風之雷達回波圖。由左至右為雙眼牆演化成三眼牆的過程。



圖三、使用淺水模式模擬 Maemi (2003)颱風由雙眼牆演化成三眼牆的過程(由左至右)。

### (三) 文獻回顧與探討

本研究主要參考 Kuo et al. (2008)的方法，進行實驗與模式設計。該論文主要利用渦度動力進行雙眼牆形成機制之模擬。由於渦度帶與雲帶會透過 Ekman pumping 機制控制雲帶，而雲帶會反饋給渦度帶，所以渦度帶與雲帶在觀測上近乎耦合(圖一)。因此這篇研究指出利用渦度動力能夠模擬出類似於雷達觀測上雙眼牆的形成，並以此模式歸納出形成雙眼牆的條件(圖二與圖三)。

該論文以淺水模式作為模擬工具，再分析其渦度動力。實際大氣近似於層化，故水平尺度遠大於垂直尺度，因此我只需要考慮水平平流，故使用淺水模式模擬；淺水模式的平均厚度為 1020 m，產生的重力波波速為 100 m/s，非線性的 Laplace's tidal equations 在卡式座標展開：

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

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

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

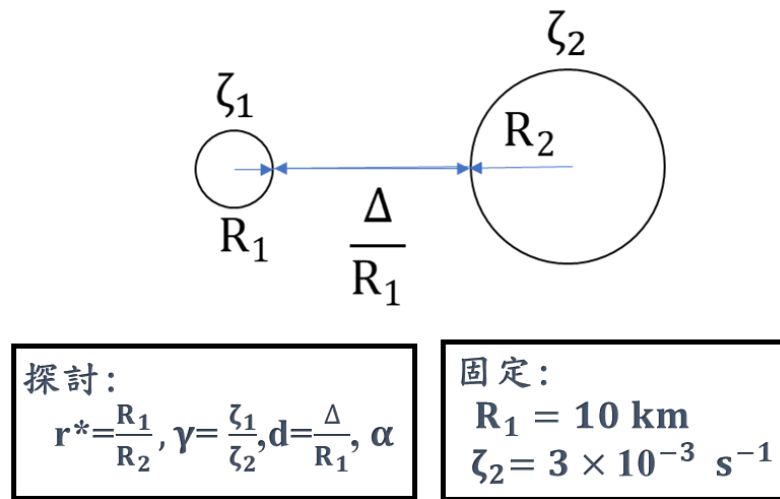
$u$  是  $x$  方向的風速， $v$  是  $y$  方向的風速， $h$  是高度場， $\nu$  是擴散係數， $f$  是科氏參數(模式中設定為  $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )。(1)、(2)式描述了  $x, y$  方向上的速度隨時間的變化；(3)式描述液面高度隨時間的變化，由  $x, y$  方向上水的輻合與輻散決定。

該論文之淺水模式設定如表一所示。

表一、淺水模式的設定

1.  $300 \times 300 \text{ km domain}$
2.  $512 \times 512 \text{ collocation points}$
3.  $170 \times 170 \text{ Fast Fourier Transform modes (FFT)}$
4. 4th order Runge-Kutta method with 3-s time step
5.  $e^{-1}$  time is 3.37 h for all modes having total wavenumber 170

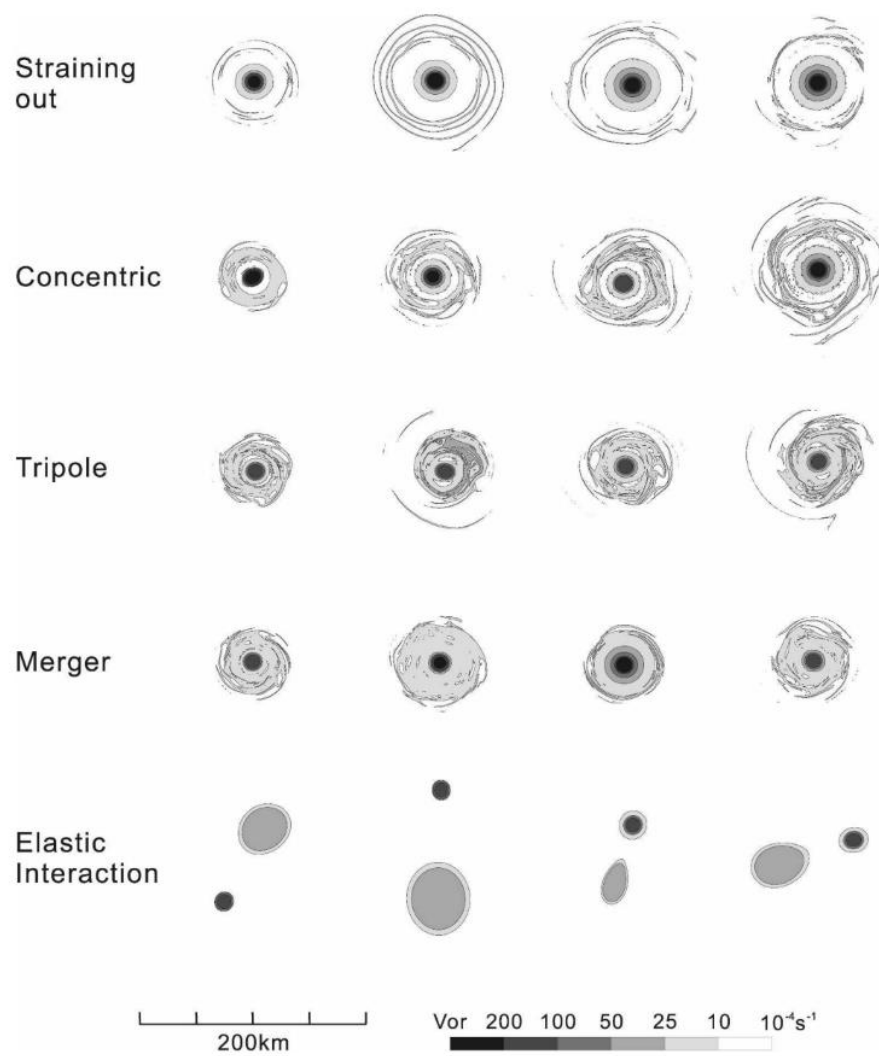
Kuo et al. (2008)的初始場兩個圓形區域代表渦度帶(圖四)，左邊代表強且小的渦旋，又因為雲帶會釋放潛熱成渦度帶的關係，所以右邊的弱渦度帶可以視為強渦旋的周圍雲帶；定義出 5 個物理變數：強渦度半徑  $r_1$ 、渦度值  $\zeta_1$ ；弱渦度半徑  $r_2$ 、渦度值  $\zeta_2$ ；強渦度帶與弱渦度帶的無因次距離  $\frac{\Delta}{R_1}$ ；固定弱渦度的渦度強度( $\zeta_2 = 3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )與強渦旋半徑( $r_1 = 10 \text{ km}$ )，為了方便討論前述 5 個物理變數，Kuo et al. (2008)定義出：弱渦度與強渦度的渦度值比  $\gamma = \frac{\zeta_1}{\zeta_2}$ 、弱渦度與強渦度的半徑比  $r^* = \frac{R_1}{R_2}$ 、弱渦度與強渦度的無因次距離  $\frac{\Delta}{R_1} = \frac{d-(r_1+r_2)}{r_1}$ ，另外還加入裙度(skirt parameter)  $\alpha$  共五個參數討論；其中，Kuo et al. (2008)引用 Shea and Gray et al. (1973)和 Mallen et al. (2005)提到裙度值在實際大氣介於 0.5 至 1，並使用  $\alpha = 0.5$  模擬窄體渦旋、 $\alpha = 0.7$  模擬寬體渦旋和  $\alpha = 1$  模擬剛體渦旋三個數值討論。



圖四、Kuo et al. (2008)雙渦旋之初始場設定。

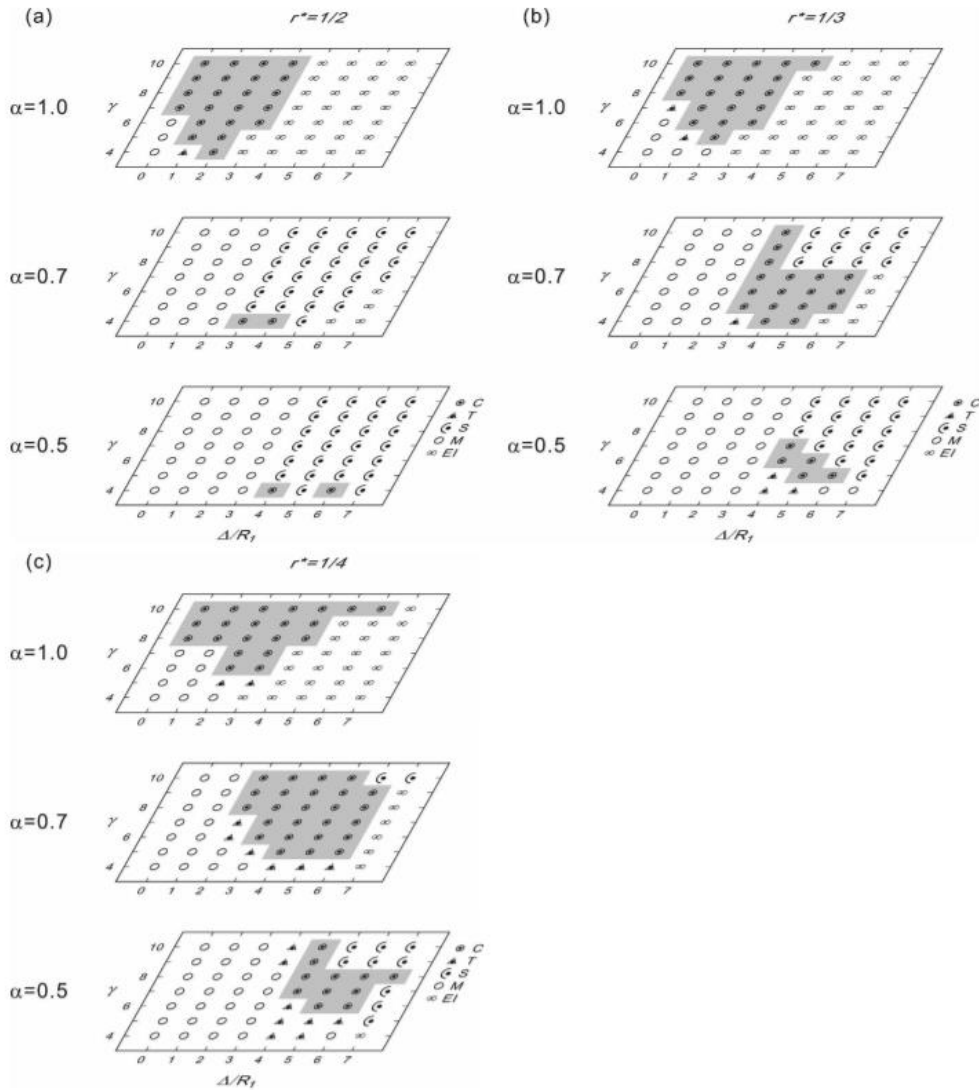
以上探討的四個變數取以下數值範圍： $r^* = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{4}$ ， $\gamma = 4 \sim 10$ ， $d = 0 \sim 7$ ， $\alpha = 0.5、0.7、1$ ；結果判讀與總結在每個數值實驗到 12 小時就會進行判讀，Kuo et al. (2008)發現所有實驗各有不同的特徵，最後判讀分成 5 種(圖五)：拉伸(Straining out)、雙眼牆(Concentric)、三極渦旋(Tripole)、混合(Merger)與互繞(Elastic interaction)：

1. 拉伸：中心渦旋的外圍渦度帶細絲帶化。
2. 雙眼牆：有明顯的環狀 moat 區，中心渦旋與外眼牆沒有接觸，可視為外環穩定在中心渦旋周圍。
3. 三極渦旋：中心渦旋呈橢圓形並與外環相接，moat 區為兩個較小的區塊，並且軸對稱化。
4. 混合：混合成一個渦旋，為最穩定之型態。
5. 互繞：兩渦旋在距離較遠時發生，因受到彼此渦度影響行圓周運動，但卻因為距離過遠而沒辦法接觸混合，因此彼此呈現互繞。



圖五、在 12 小時的渦度場範例，顯示有 5 種不同的數值渦度交互作用結果(摘自 Kuo et al. 2008)

最後把所有實驗做出三維相位圖做出總結：



圖六、兩渦旋交互作用的結果：EI 為互繞，M 為合併，S 為拉伸，T 為三極渦旋與 C 是雙眼牆(摘自 Kuo et al. 2008)。利用三維相位圖顯示雙眼牆颱風形成條件。

可以從圖六得出以下結論：

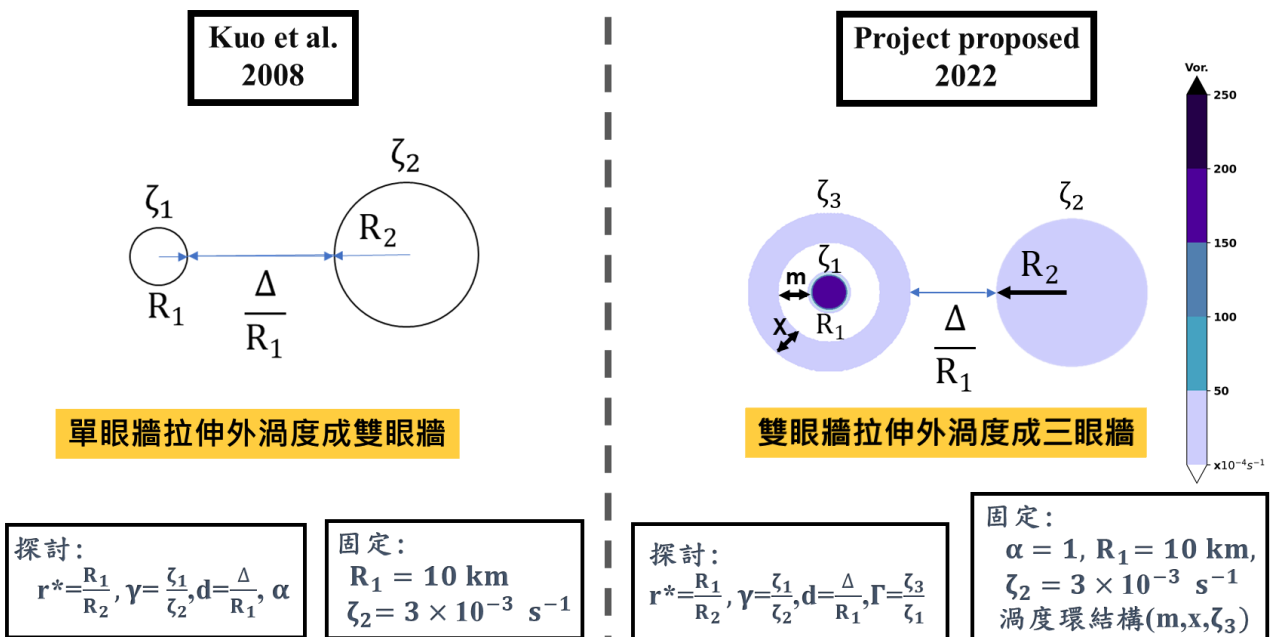
(1)當強渦旋的 $\alpha = 0.5$ 或 $0.7$ 時(即非 Rankine vortex)，弱渦度帶的半徑必須是強渦度帶半徑的 3 倍以上，這個結論可以理解成，弱渦度帶的半徑必須夠大才能在強渦度帶外圍繞成一圈形成雙眼牆。

(2)強渦度帶的渦度值必須是弱渦度帶渦度值的 4 到 6 倍以上才有機會形成雙眼牆，在一樣的距離與半徑比，強渦度帶的渦度值太弱會無法把弱渦度帶繞成第二眼牆，但如果強渦度值渦度值太強，會形成太寬 moat 區域、把弱渦度帶細絲帶化，如此就會變成拉伸形態(Straining out)。

(3)無因次距離如果太遠會容易形成互繞，或是無法在 12 hr 內把弱渦度帶繞得完全，無法形成第二道眼牆；但如果無因次距離太近，強渦度帶會無法把弱渦度帶有效拉伸，強渦度中心容易被過大的弱渦度帶吞噬，而形成混合(Merger)形態；所以強度比與半徑比必須搭配「適當」無因次距離才有機會形成雙眼牆。

(4)三極渦旋(Tripole)形態是混合形態與雙眼牆形態的過度形態，也就是說三極渦旋形態是種罕見的形態，必須弱渦度帶半徑、渦度強度比與距離都剛剛好才會出現三極渦旋，如果距離太近或渦度值強度比太小(即強渦度帶渦度值太弱)會形成混合形態；如果距離太遠或渦度值強度比太大(即強渦度帶渦度值強度太強)會形成拉伸形態或互繞形態。

Kuo et al. (2008)利用淺水模式實驗單眼牆強渦旋與弱渦度帶交互作用，總結出形成雙眼牆颱風的條件，在本計畫中，利用淺水模式實驗雙眼牆颱風與弱渦度帶交互作用，總結三眼牆颱風形成的條件。(圖七)



圖七、Kuo et al. (2008)與本計畫提案的比較；前者歸納出單眼牆拉伸外渦度成雙眼牆的條件，後者試圖歸納出雙眼牆拉伸外渦度成三眼牆的條件。

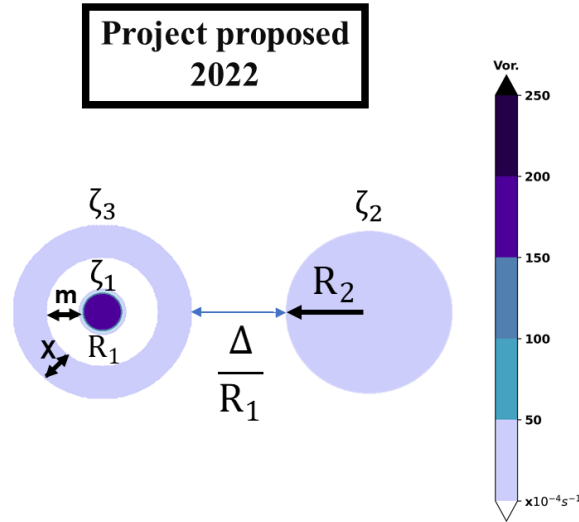
## (四) 研究方法及步驟

### 1. 初始場設定

圖八兩個圓形區域為渦度帶，右邊的渦旋弱且大，左邊的渦旋強且小；我把左邊



的渦度帶模擬成雙眼牆颱風，中心為雙眼牆颱風的內核渦旋，外圍的渦度環為第二眼牆；由於雲帶和渦度帶耦合，所以右邊弱且大的弱渦度帶可以理想化為雙眼牆颱風周圍的雲帶；內核渦旋半徑  $R_1$ 、渦度值  $\zeta_1$ ，弱渦度帶半徑  $R_2$ 、渦度值  $\zeta_2$ ；雙眼牆颱風的外眼牆渦度環的渦度值  $\zeta_3$ ，moat 的寬度  $m$ ，外眼牆的寬度  $x$ ，裙度 (skirt parameter)  $\alpha$ 。為了方便討論，我把以上變數用比值的方式表示，如下：



$$r^* = \frac{R_1}{R_2}, \gamma = \frac{\zeta_1}{\zeta_2}, d = \frac{\Delta}{R_1}, \Gamma = \frac{\zeta_3}{\zeta_1}, \alpha, a = \frac{m}{R_1}, b = \frac{x}{R_1}$$

圖八、本計畫提案的初始場與變數。

## 2. 設置實驗

先固定強渦旋半徑  $r_1$  為 10 km、 $\zeta_2 = 3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ；且我發現如果 moat 寬度太小雙眼牆渦度帶本身會無法維持雙眼牆形態，所以我參考了 Kossin et al. (2003) 以及 Juliette (2001) 颱風的結構(圖一、b)理想化  $a = b = 1.5$  來固定  $m$  和  $x$ ，使左邊的渦度帶能夠維持雙眼牆型態；本研究探討  $r^*$ 、 $\gamma$ 、 $d$ 、 $\Gamma$  和  $\alpha$  五個變數，固定  $\alpha = 1$ ，並訂  $\Gamma = \frac{1}{6}、\frac{1}{8}$ ；所以會有兩類情況：(1)  $\alpha = 1$  且  $\Gamma = \frac{1}{6}$  (2)  $\alpha = 1$  且  $\Gamma = \frac{1}{8}$ ；之後在這兩類中個別做  $r^* = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{7}$ 、 $\gamma = 3 \sim 10$  (此設定用意是使強渦旋中心的風速值達 30 m/s 以上，即中央氣象局定義強度達中颱以上等級)、 $d = 0 \sim 7$  的三維相位圖。

## 3. 結果分析

參考 Kuo et al. (2008) 在 12 hr 做最後 5 種型態的判讀，歸納出所有實驗渦度的最後型態，並探討出形成三眼牆颱風的條件。



## (五) 預期結果

利用三維圖呈現三眼牆颱風的形成條件，並且探討四個( $r^*$ 、 $\gamma$ 、 $d$ 、 $\Gamma$ )物理變數的意義，提供日後對於颱風強度預報進一步的研究資料。

## (六) 參考文獻

1. 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.*, 61, 2722-2734. SCI
2. Kuo, H.-C., W. H. Schubert, C.-L. Tsai, and Y.-F. Kuo, 2008: Vortex interactions and barotropic aspects of concentric eyewall formation. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 5183-5198. SCI
3. Kossin, J. P., and W. H. Schubert, 2003: Diffusion versus advective rearrangement of a circular vortex sheet. *J. Atmos. Sci.*, 60, 586–589
4. Mallen, K. J., M. T. Montgomery, and B. Wang, 2005: Reexamining the near-core radial structure of the tropical cyclone primary circulation: Implications for vortex resiliency. *J. Atmos. Sci.*, 62, 408-425
5. Shea, D. J., and W. M. Gray, 1973: The hurricane's inner core region. I. Symmetric and asymmetric structure. *J. Atmos. Sci.*, 30, 1544-1564
6. McNoldy, B. D. 2004: Triple eyewall in Hurricane Juliette. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 1663-1666.

## (七) 需要指導教授指導內容

1. 理論基礎：大氣動力學、颱風與渦旋動力、科學數學方法與數值方法
2. 淺水模式最後(12 hr)的結構診斷與分析(使用 Python 與 Fortran)
3. 成果報告撰寫(使用 Word 與 Latex)
4. 引導使用學校圖書館或網路上蒐集相關之文獻