

2019 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 180014

參展科別 地球與環境科學

作品名稱 「方」「圓」之內——多邊形颱風眼之探究

得獎獎項 大會獎：一等獎

出國正選代表

就讀學校 高雄市立高雄高級中學

指導教師 吳嘉鴻

作者姓名 馬法有、楊奇瑋

關鍵詞 颱風眼、正壓模式、渦度

作者簡介



我是馬法有，現在是高雄中學的高三生，儘管近來被考試壓得快要喘不過氣，但我對於地科的熱情依舊不減。我國中時有一位專門負責地科的老師，他有趣的解說與親身經驗的佐證深深吸引了我，便開始對這個領域起了興趣，而後不只參加了地科能力競賽，也著手做了大氣範疇的研究。未來希望能繼續投身地科領域，融興趣與專業於一身。

我是楊奇瑋，是個普通的高中生，喜歡向別人講述知識，會因此而多多閱讀。專業是地科，但對許多領域都有興趣。雖然總說想往地科方面發展，但神奇的是我甚至不清楚是怎麼開始喜歡上這門學問的，只知道我總能回答同學的疑問，和對它有莫名的熱情。目前正因考試與志願的部分感到煩惱，現在只希望能好好過完高中生活。

前言

在本研究中，我們在正壓模式裡植入渦旋，當作實驗中的颱風眼，以不同的渦旋結構類型、渦度環及渦度比值進行實驗並觀察其變化。實驗結果顯示當渦旋結構的徑向渦度梯度變率存在正負的變化時，有機會導致正壓不穩定的發生，促進擾動而使渦旋形成多邊形結構。當渦旋內部的渦度梯度越大，則多邊形的形成越快但邊數越少；若渦旋外圈的強渦度區越薄，多邊形的形成越快且邊數越多。多邊形渦旋結構的演化則有可能發生「邊數合併」或「混合內縮」的情形，最終達到穩定或均質化的狀態。2017 年泰利颱風行經台灣東北方海域時，我們從衛星雲圖中可觀察到颱風眼輪廓有多邊形變化，本文闡述此現象變化的歷程與可能的機制，進而希望在未來能利用此特點在颱風預報之領域中做出貢獻。

壹、研究動機

在一次地科老師促成的演講當中，主題談到了臺灣人再熟悉不過的颱風，講者郭教授舉了咖啡奶精的例子讓我們由淺入深了解颱風，而內容其中出現讓我們眼睛一亮的新知識——橢圓形的颱風眼。一開始還以為那只是如同觀察白雲之後，投射出動物或人影形狀般的心理作用，仔細一瞧才發現颱風眼竟然真的形成稍扁的橢圓，還會繞著中心旋轉，於是我們便好奇是否還能夠發現不同形狀的颱風眼，恰巧不久前的泰利颱風由於蘋果形的颱風眼登上了新聞版面，更加深了我們的好奇心，於是為了一探究竟，我們展開了一系列的研究。

貳、研究目的

- 一、探討渦旋結構對於渦旋形狀變化的影響
- 二、探討渦度環寬度對於渦旋形狀變化的影響
- 三、探討渦度強度差對於渦旋形狀變化的影響
- 四、探討多邊形渦旋形狀隨時間的演化情形
- 五、探討多邊形渦旋之風速分布特徵

參、研究原理與設備

一、颱風眼與渦度原理

(一)颱風眼

在衛星雲圖中，可以把颱風分成三個部分，分別是最外圈的螺旋雨帶，雨勢最強勁的眼牆，還有通常晴朗無雲的颱風眼。我們研究中的模擬渦旋即是採用颱風眼的尺度，演算渦旋內的渦度變化，進而影響邊界產生多邊形。

(二)渦度

就如同速度是一個描述物體運動的物理量，渦度則是一個描述流體旋轉的物理量，兩者皆為向量。而在氣象學應用之中，渦度是用來描述氣流相對於地面在水平方向上旋轉的物理量，其向量的方向可以用右手來判斷，若氣流以逆時針轉動則渦度指離地面以「正」表示，順時針轉則指向地面以「負」表示，因此在本研究中提到的颱風(北半球)就擁有正的渦度。渦度的數學表達式可以寫成

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{其中 } u \text{ 為經向 (x) 風速, } v \text{ 為緯向 (y) 風速。}$$

就舉倒奶精進咖啡當作例子(圖 3-1)，在表面旋轉產生拉花紋路其實就是一種渦度的展現。只要流體的兩端有著渦度差、渦度梯度，擾動的過程中就會產生位渦波並使渦度重新分布，若位渦波持續成長，該情況就叫做「正壓不穩定」。



圖 3-1

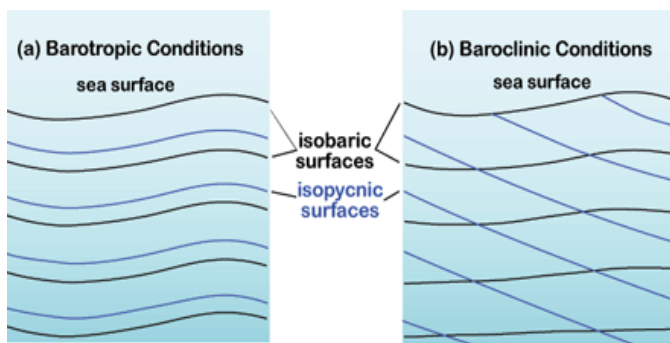


圖 3-2 (a)正壓條件

(b)斜壓條件

二、正壓模式介紹

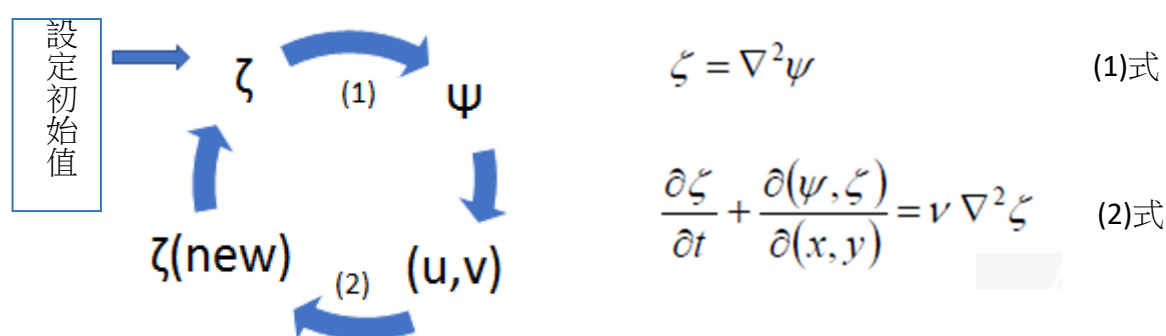
圖 3-2(a)正壓條件，是一種流體的狀況，其特色為等密線與等壓線平行，亦即流體中密度只與壓力有關，相較起來，圖 3-2(b)為斜壓條件，則是密度除了與壓力有關，同時還會被溫度變化所影響。我們的研究中使用的是二維非線性非輻散正壓的模式，

用本模式來模擬颱風的因素有二：首先，颱風位於的熱帶海面上水平差距造成的溫度梯度不大，使用正壓模式為合理的近似，經常被運用在颱風動力的探討。其次，颱風結構上非常扁平，以尺度分析觀點來看，颱風的水平尺度可達 1000km，可是垂直尺度約 10 km，所以在簡化的模擬中可視作一個二維的渦旋來看待。

本研究中所使用的正壓模式是由臺灣大學大氣科學系動力模擬研究室所發展，我們另依研究目的需求撰寫副程式並控制研究變因。本模式中風場以流函數 Ψ 表示，定義為

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad ; \quad v = \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

模式運作流程及控制方程式如下：



(1)式為渦度場與流函數的關係，(2)式為渦度預報方程式，使用這兩式即可透過流函數的運算得出下個時刻的渦度場，而渦度又與流函數有關，如此循環運算即可模擬出渦旋隨時間的變化。我們的模擬中設定的範圍為 200km×200km，網格為 768×768 點，積分時間步長為 3 秒。

三、多邊形渦旋的文獻探討

在 Rayleigh 所敘述的正壓不穩定情況中不穩定主要發生在中心渦度環之內側，導致渦度向內混合，可能形成三極渦旋。定義帶狀化時間(filamentation time)代表的是拉伸主宰區的渦度梯度成長率的指數遞減時間，文獻研究顯示帶狀化時間小於 30 分鐘意味著渦度會被拉伸成細絲帶。

Schubert(1999)曾使用非輻散正壓模式以渦度環來模擬颱風眼牆，其環的內側從中心向外渦度梯度為正，外側再向外則是渦度梯度為負，產生兩個相反方向渦旋羅士比波(vortex Rossby wave)，當內外波動相位鎖定时會讓彼此成長且產生正壓不穩定，渦度環將會混合使眼牆產生不對稱的收縮，最終形成單極渦旋，環上的渦度值降低，環

內外兩側的風速提高，中心的壓力急遽降低。

而 Kossin 和 Schubert(2004)又針對上述發生在眼牆的不對稱收縮提出論點，表示颱風眼可能出現三角形、四邊形甚至多邊形。其他的觀測資料在 hurricane Guillermo(1997) 和 hurricane Bret(1999)都發現了多邊形的颱風眼，而有些案例則是在颱風眼中出現了數個小渦旋，如圖 3-3 中的 hurricane Isabel(2003)，與模式中軸對稱化的過程中被扯碎的渦度環有關，上述之情形可以用渦度側向混合的理論來詮釋。

在郭(1998)的論文裡提到橢圓形的颱風眼，敘述橢圓形可以視作一個有兩個邊的多邊形，其邊數可視作波數(wave number)，及一個在渦旋邊界上的波動，有幾個完整的波就有幾個邊角，波峰為角而波谷為邊，於是乎能夠以波動的角度來觀察一個多邊形渦旋的自轉，而造成這個波的成因也決定了多邊形渦旋的樣子。

在郭(1998)等人的研究中，提到颱風眼中沒有激烈的積雲對流，反而有微弱的下沉氣流，造成其渦度被抑制，而眼牆的渦度值最大，至於組成外圍環流的層狀雲區域則有最小的渦度值。

在尋找颱風例子的過程中，我們發現的確有一部份的颱風皆出現了多邊形的颱風眼，例如圖 3-3 的 hurricane Isabel(2003)便被發現具有五邊形的颱風眼，而圖 3-4 的 hurricane Erin 則是有三角形的颱風眼。

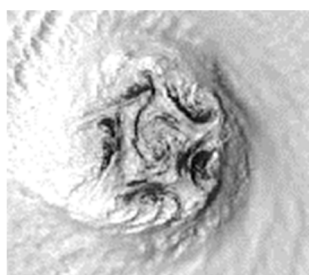


圖 3-3 由 DMSP 拍攝的
颶風 Isabel 五邊形颱風眼



圖 3-4 由 MODIS 拍攝的
颶風 Erin 三角形颱風眼

四、研究設備與軟體

硬體設備：電腦數臺 軟體設備：正壓模式程式碼、Virtual Box、Putty

肆、研究過程與方法

一、模擬渦旋的程式碼使用步驟

- (一)使用 Virtual Box 設定出一台 Linux 作業系統的 CentOS 虛擬機
- (二)將正壓模式的程式碼載入至虛擬機內
- (三)使用 Putty 連結起虛擬機與電腦主機
- (四)透過介面控制虛擬機，調整參數

```
y=j*dy;
r=radius(x,y);
if (r<=r_bound)
{
    if (r<= r_bound*0.8)
    {
        vort[IDX(i,j)]=(zeta0*0.4);
    }
    else
    {
        vort[IDX(i,j)]=zeta0;
    }
}
else
{
    vort[IDX(i,j)]=0;
}
```

半徑比
強度比

```
import numpy as np;

nx = 768
ny = 768

Lx = 200000.0
Ly = 200000.0

x_range = np.array([0.0, Lx])
y_range = np.array([0.0, Ly])

x_vec = np.linspace(0, Lx, nx)
y_vec = np.linspace(0, Ly, ny)

t_range = np.array([0, 12.0])

dt = 3.0
record_step = 600
total_steps = int(60 * 60 * 60 / dt)
avg_n = 30

# 'start'
draw_wind = 'barb'
barb_skip=15
```

時間與運算步數

- (五)執行程式演算
- (六)使用 FileZilla 將圖片與資料從虛擬機取到主機

二、繪製風速圖的步驟

- (一)在虛擬機中創立一個繪製風速圖用的資料夾
- (二)以 FileZilla 放入先前模式運算之 u 與 v 的 bin 檔
- (三)再放入我們設計之繪圖的程式碼

```
fpu=open("u_step_%d.bin"%(step),"rb")
u_data=np.fromfile(fpu,dtype='<f4',count=(768*768))
u2_data=u_data.reshape((768,768))
u3_data=u2_data.transpose()

u5_data=u2_data[0:768,384]
u6_data=u2_data[384,0:768]

fig=plt.figure()
ax=fig.add_subplot(1,1,1)
ax.plot(u6_data)
ax.set_xlim([0,768])
ax.set_ylim([-60,60])

fig.savefig("kiwi we u_step_%d.png"%(step),dpi=100,format='png')

step=step+600
```

- (四)執行繪圖並用 FileZilla 將產出的圖取出

三、泰利颱風風場資料來源

(一)開啟 <https://earth.nullschool.net>

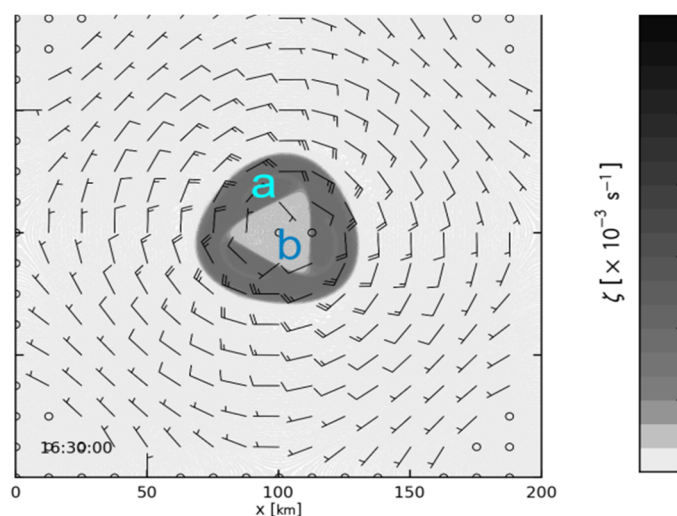
(二)將時間調整為泰利颱風接近臺灣之時間(2017 年 9 月 13-14 日)

(三)選取貫穿颱風眼的垂直與水平兩軸格點，記錄位置與風速大小、方向

(四)計算轉換成 u 與 v 方向風速，分別對垂直與水平軸做圖

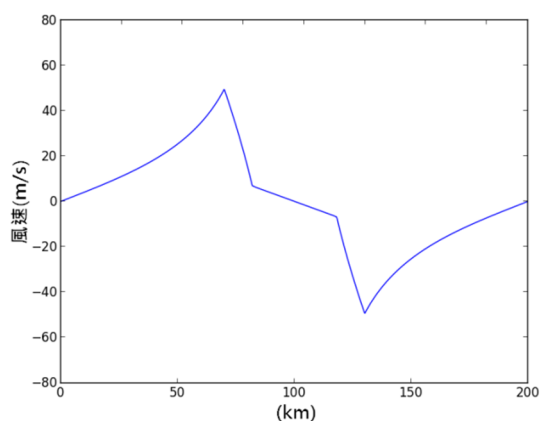
四、渦旋圖形與風速曲線之說明圖例

(一)kiwi 渦旋的標示舉例



說明：a 區為強渦度環，b 區為弱渦度的中心，風向與風速以風標符號顯示，渦度值以灰階色塊表示，後續研究結果僅以左側圖形部分呈現。

(二)風速曲線的標示舉例



說明：縱軸為風速度值，渦旋中心位置在 100 km。u 方向風場，西風為正、東風為負；v 方向風場，南風為正、北風為負，此圖的距離單位與尺度同於渦旋圖形

伍、研究結果

一、探討何種條件能夠形成多邊形渦旋

在我們一開始的程式中，有數種渦旋結構副程式，其中為單個且圓形的有兩種：Constant 渦旋與 Gaussian 渦旋。為了嘗試模擬颱風眼並且製造出多邊形，我們另外自己撰寫了一個渦旋構造的副程式，目的是創造出有環狀且外強內弱的渦旋，取名叫做 Kiwi(奇瑋)渦旋，其結構類似於 Schubert(1999)所研究的渦度環，但不同的是，我們參考郭(1998)對於颱風渦度的說明，加入內部弱渦度區的構造，以效仿颱風眼中因下沉氣流作用時，颱風眼內部渦度的改變。

在圖 5-1 中，顯現了三種渦旋結構在渦度值上徑向的分布差異：Constant 渦旋內部是均質的，渦度從中心到邊界完全沒有差別，而邊界非常明顯，只有外側存在一次的渦度梯度，以紅色線段表示；Gaussian 渦旋的邊界渦度值由內向外依高斯函數曲線平滑的遞減，渦度梯度的方向也僅單方向向外，以藍色線段表示；Kiwi 渦旋被設計成一個環狀，內部有弱渦度區，外部有強渦度環，所以在環的內外渦度梯度變率存在正負的變化而產生不同方向的影響，以綠色線段表示。

在圖 5-2 中，我們從實驗中發現 Constant 渦旋和 Gaussian 渦旋呈現穩定的形態，隨著時間積分的結果也維持著原先渦度的分布，並不會產生多邊形；相對的 Kiwi 渦旋卻出現了擾動與不穩定，並且產生了三角形結構，可以觀察到內部有渦度混合的現象。

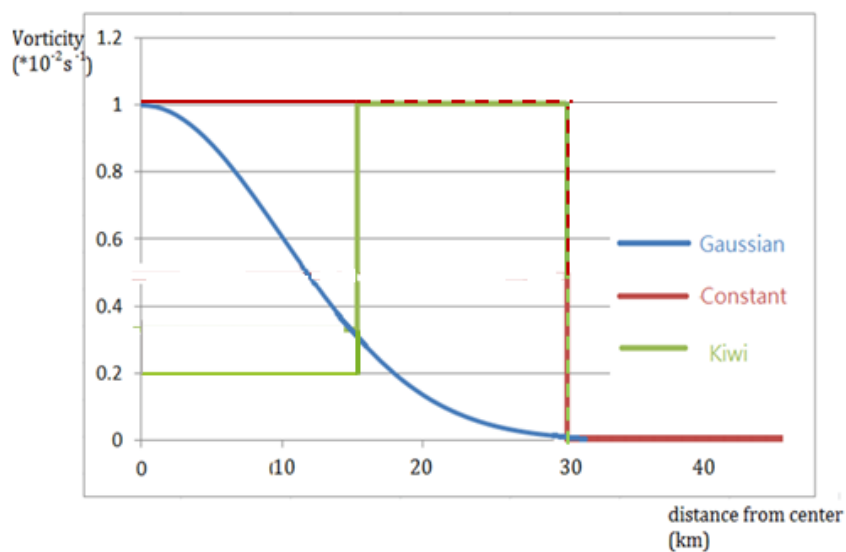


圖 5-1 Constant，Gaussian 和 Kiwi 渦旋結構的渦度分布圖

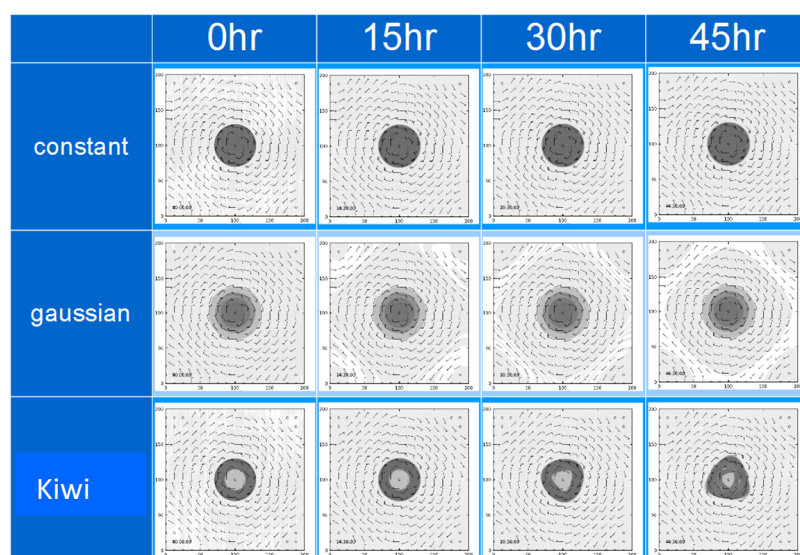


圖 5-2 Constant，Gaussian 和 Kiwi 渦旋的形狀比較圖

二、探討渦度環寬度對於渦旋形狀之影響

我們接著進行 kiwi 渦旋結構的兩項變因 —— 內部弱渦度區的半徑與強度的探討。我們在程式碼中設定 Kiwi 渦旋半徑為 30 km，訂定 r 代表內圈半徑與 Kiwi 渦旋半徑的比值，例如 $r = 0.9$ ，表示內部弱渦度區的半徑為 27 km，外圈渦度環寬度 3 km；至於 Kiwi 渦旋中的強渦度環的渦度則是固定在 $5 \times 10^{-3} (s^{-1})$ ，訂定 Z 代表內部弱渦度區的渦度與強渦度環的渦度之比值，例如 $Z = 0.9$ ，表示內部弱渦度區的渦度為 $4.5 \times 10^{-3} (s^{-1})$ 。在實驗中，我們將 r 值從 0.9 開始測試，每次降低 0.1，而 Z 值從 0.1 開始測試，每次提高 0.1，直到渦旋難以觀察出變化為止。

(一) $Z=0.1$ 組

在 $Z=0.1$ 組的結果中，發現 $r=0.4$ 的渦旋從頭到尾都沒有發生變形，渦旋結構維持穩定，更小的內半徑也沒有變形，於是從圖表中省略，至於 r 值在 0.5 以上者，均出現正壓不穩定的情況，初始渦旋結構因位渦波擾動成長而破壞，並且 r 值增加，波數也有增加的情況； $r=0.5$ 與 $r=0.6$ 的擾動發展形成三角形，最後混合回圓形； $r=0.7$ 與 $r=0.8$ 的渦度環在擾動成長過程中均碎裂成四個小渦旋，不同的是前者後來發生混合內縮情形，但後者維持小渦旋分裂並隨風場旋轉的狀態； $r=0.9$ 的渦度環在擾動成長過程中碎裂成八個小渦旋，小渦旋在旋轉擾動過程中產生交互作用，進而合併成四個。碎裂的案例中，外渦度環都

先出現了波數為其後續分裂小渦旋數量的位渦波，波動振幅隨時間成長，使局部渦度環被拉展變細而斷裂，形成小渦旋並隨風場逆時針旋轉，有的案例在後續擾動的交互作用之下出現小渦旋合併的現象。

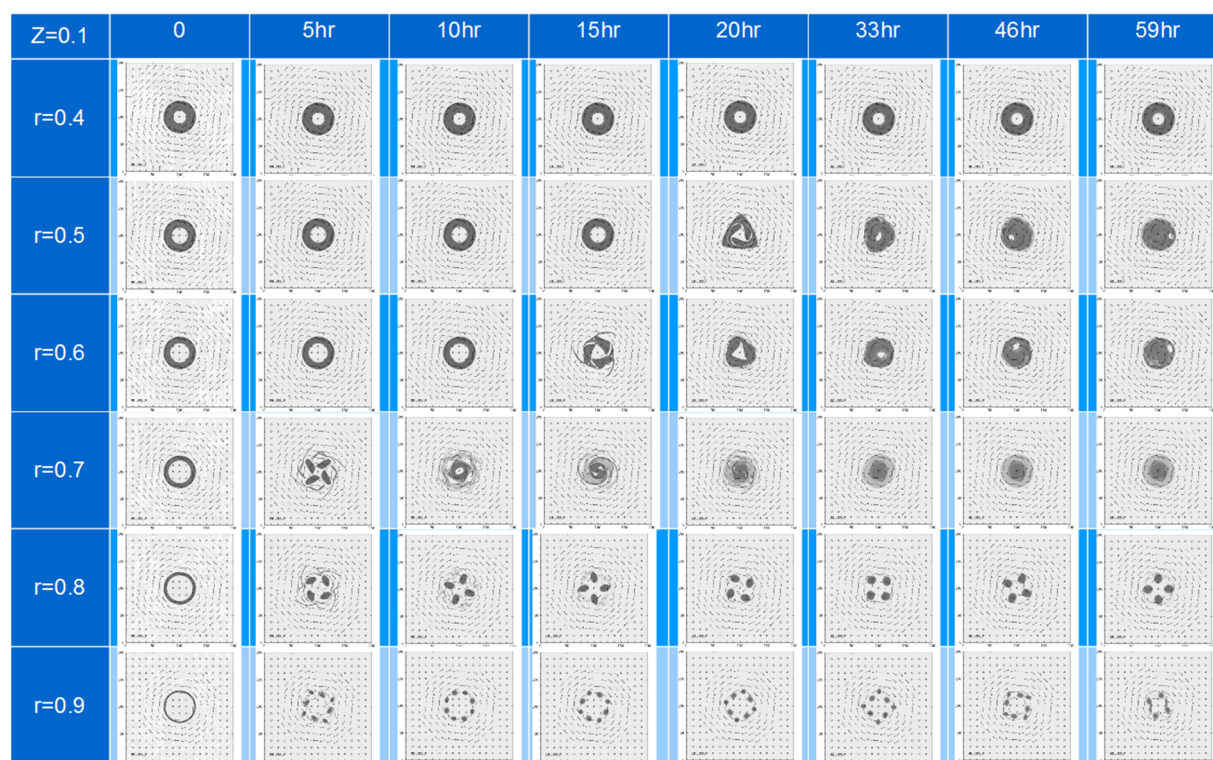


圖 5-3 Z=0.1，不同渦度半徑比例 r 的渦旋變化比較圖

(二)Z=0.2 組

在 $Z=0.2$ 組的結果中，如同 $Z=0.1$ 組，發生正壓不穩定與否的邊界仍出現在 $r=0.4$ ，並且 r 值增加，波數也增加； $r=0.5$ 形成三角形，最後混合回圓形； $r=0.6$ 形成四邊形，最後也混合回圓形； $r=0.7$ 與 $r=0.8$ 碎裂成四個小渦旋，前者後來混合，但後者維持小渦旋分裂的狀態； $r=0.9$ 碎裂成 12 個小渦旋，合併成八個後又再合併成四個；碎裂者的演化過程同 $Z=0.1$ 組中的敘述。

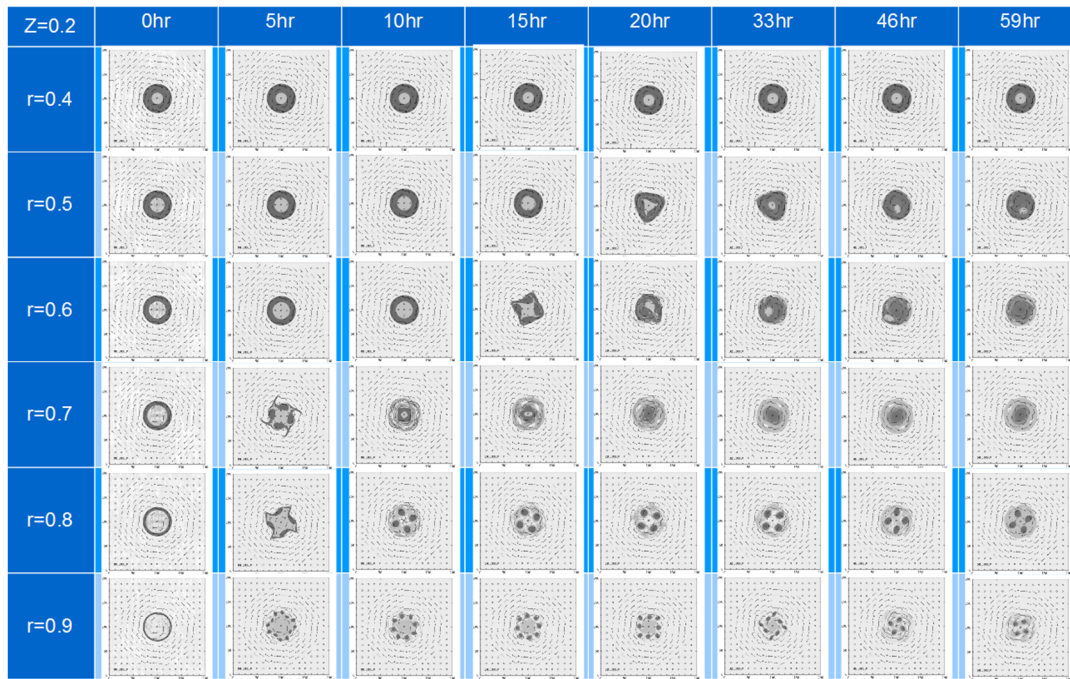


圖 5-4 $Z=0.2$ ，不同渦度半徑比例 r 的渦旋變化比較圖

(三) $Z=0.3$ 組

在 $Z=0.3$ 組的結果中，發生正壓不穩定與否的邊界仍出現在 $r=0.4$ ，故也將其從表中省略，後兩組圖表(圖 5-6、圖 5-7)也將其省略，而 r 值與波數的關係也與前幾組相同； $r=0.5$ 形成三角形，最後混合回圓形； $r=0.6$ 與 $r=0.7$ 形成四邊形，最後也混合； $r=0.8$ 形成六邊形，最後變成三極渦旋； $r=0.9$ 碎裂演化成 12 個小渦旋，後來合併成四個後又混合。不同的是，混合的個案多一個。

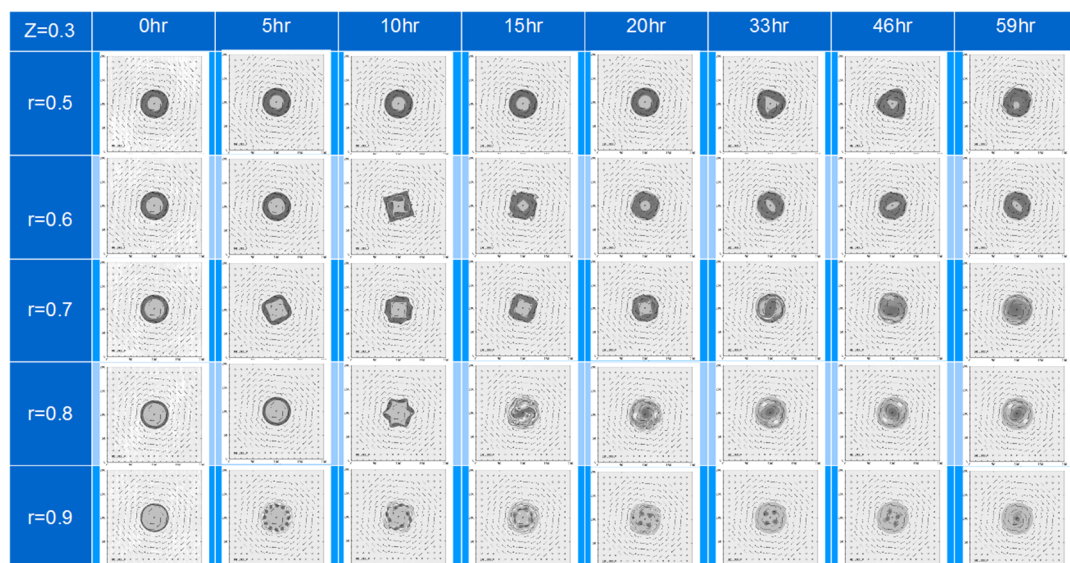


圖 5-5 $Z=0.3$ ，不同渦度半徑比例 r 的渦旋變化比較圖

(四) $Z=0.4$ 組

在 $Z=0.4$ 組的結果中， $r=0.4$ 以下為穩定， r 值與波數的關係為： $r=0.5$ 與 $r=0.6$ 形成四邊形，後者混合； $r=0.7$ 形成五邊形後混合； $r=0.8$ 形成八邊形，再合併成四邊形後混合； $r=0.9$ 碎裂演化成 12 個小渦旋，合併成八個後又再合併成四個，最後混合。本組實驗中沒有出現三角形的個案，且最後都混合回圓形。

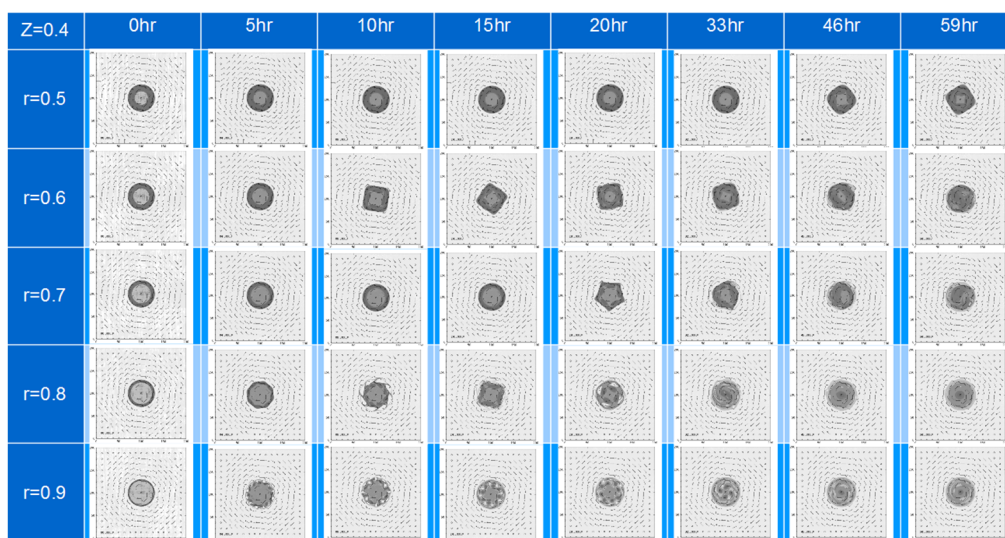


圖 5-6 $Z=0.4$ ，不同渦度半徑比例 r 的渦旋變化比較圖

(五) $Z=0.5$ 組

在 $Z=0.5$ 組的結果中， $r=0.4$ 以下為穩定， $r=0.5$ 形成四邊形； $r=0.6$ 形成五邊形； $r=0.7$ 形成六邊形後混合； $r=0.8$ 形成八邊形後也混合； $r=0.9$ 看得出邊界有發生波動，且邊數極多，但是起伏極小而快速的混合，不易觀察。

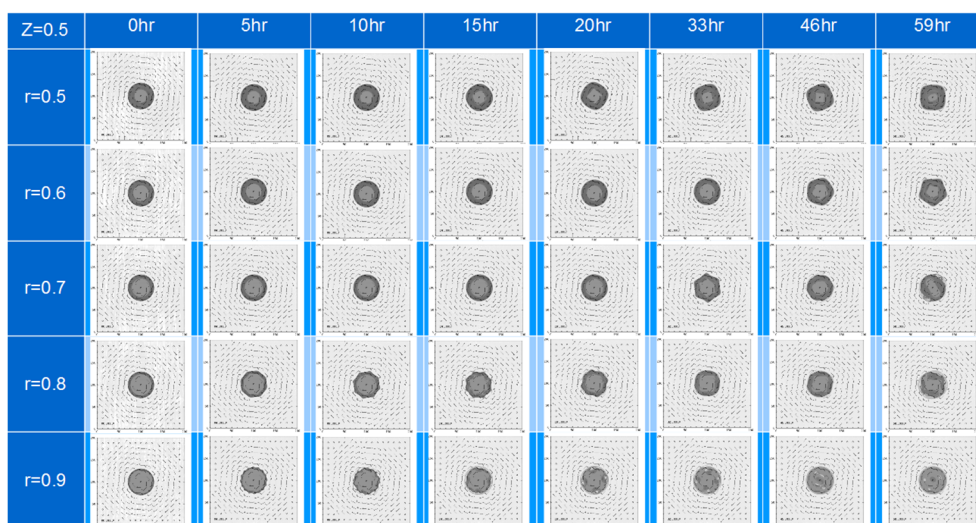


圖 5-7 $Z=0.5$ ，不同渦度半徑比例 r 的渦旋變化比較圖

三、探討渦度強度差對於渦旋形狀之影響

(一) $r=0.9$ 組

在 $r=0.9$ 組的結果中，各項實驗均出現正壓不穩定擾動成長的現象，位渦波的波數隨著內圈強度增加而增多； $Z=0.1$ 時，外圈渦度環出現波數八的位渦波，波動振幅隨時間成長，使局部渦度環貝拉伸而變細至斷裂，而形成八個小渦旋並隨風場逆時鐘旋轉，小渦旋在旋轉擾動過程中產生交互作用進而合併成四個； $Z=0.2$ 碎裂成 12 個小渦旋，合併成八個後又再合併成四個； $Z=0.3$ 碎裂成 12 個小渦旋，後來合併成四個； $Z=0.4$ 碎裂成 12 個小渦旋，合併成八個後又再合併成四個，最後混合； $Z=0.5$ 看得出邊界有發生波動，且邊數極多，但是起伏極小而快速的混合； $Z=0.6$ 的邊界上有極細微的波動，但是起伏極小且快速的混合，不易觀察。 $Z=0.7$ 以上渦度強度差異小，難以觀察。

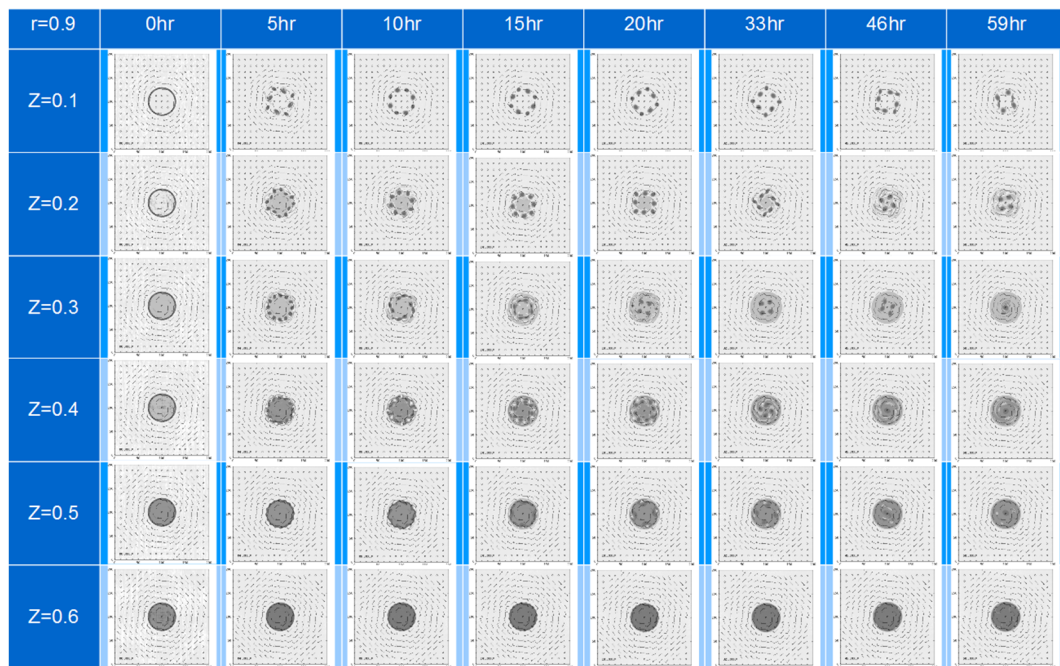


圖 5-8 $r=0.9$ ，不同渦度強度比例 Z 的渦旋變化比較圖

(二) $r=0.8$ 組

在 $r=0.8$ 組的結果中，波數與內圈強度的關係與 $r=0.9$ 組中的敘述相同； $Z=0.1$ 與 $Z=0.2$ 維持四個小渦旋； $Z=0.3$ 形成六邊形而 $Z=0.4$ 與 $Z=0.5$ 形成八邊形，三者後續皆混合； $Z=0.6$ 的邊界上持續拉出細微擾動，但不斷的混合；碎裂者的演化過程同 $Z=0.1$ 組中的敘述。

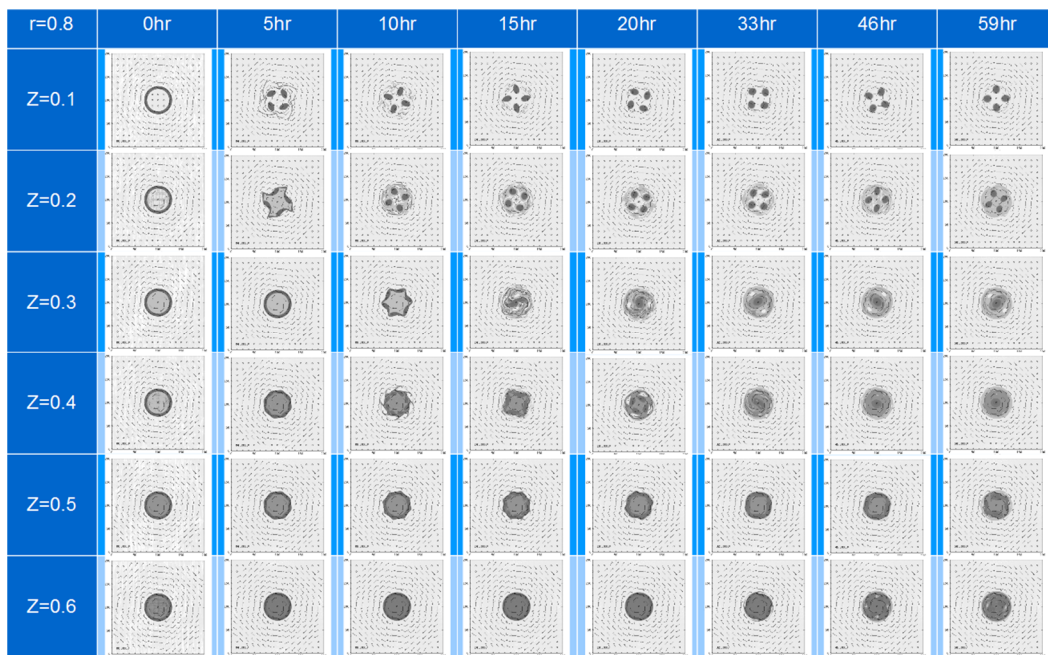


圖 5-9 $r=0.8$ ，不同渦度強度比例 Z 的渦旋變化比較圖

(三) $r=0.7$ 組

在 $r=0.7$ 組的結果中， $Z=0.1$ 與 $Z=0.2$ 產生四個小渦旋後混合； $Z=0.3$ 形成四邊形， $Z=0.4$ 形成五邊形， $Z=0.5$ 形成六邊形，三者後續皆混合； $Z=0.6$ 的邊界沒有變形，僅漸漸混合；碎裂者的演化過程同 $Z=0.1$ 組中的敘述。

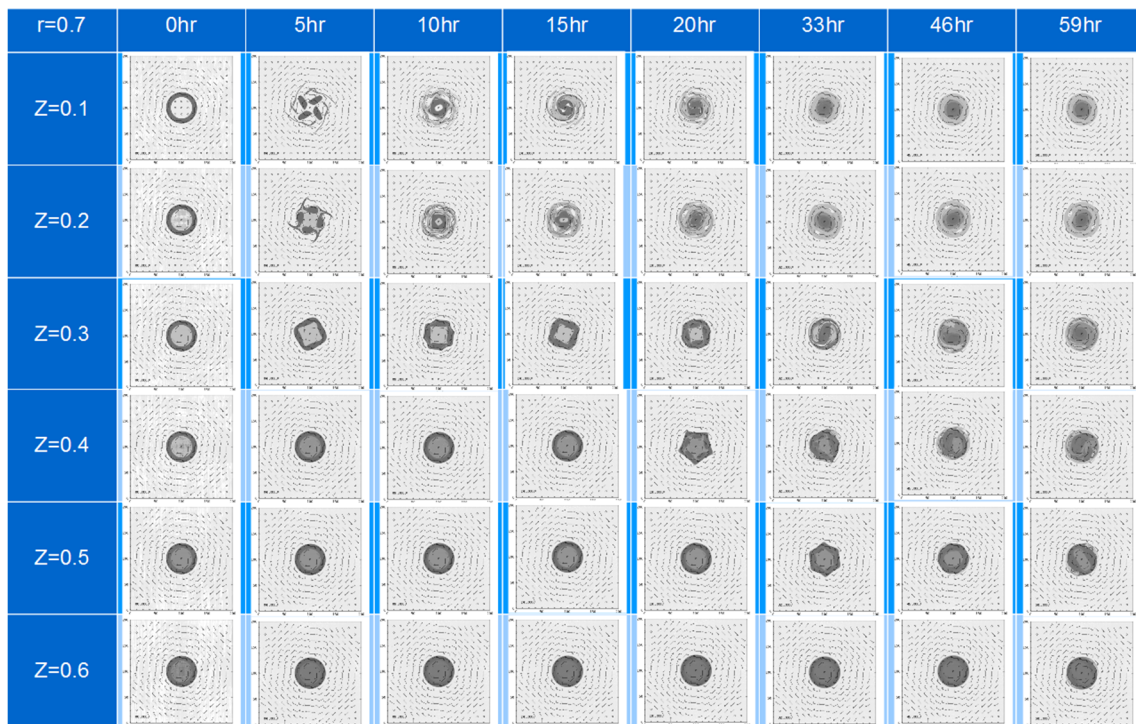


圖 5-10 $r=0.7$ ，不同渦度強度比例 Z 的渦旋變化比較圖

(四) $r=0.6$ 組

在 $r=0.6$ 的結果中， $Z=0.1$ 形成三角形， $Z=0.2$ 、 $Z=0.3$ 與 $Z=0.4$ 形成四邊形，後續全部都混合成圓形； $Z=0.5$ 形成五邊形； $Z=0.6$ 的變化已經看不出來了，於是在圖表中省略。與前幾組實驗結果相較，隨著渦度環的寬度增加，本組實驗中的任何個案均為出現渦度環斷裂的現象，且最大邊數有下降的情形。

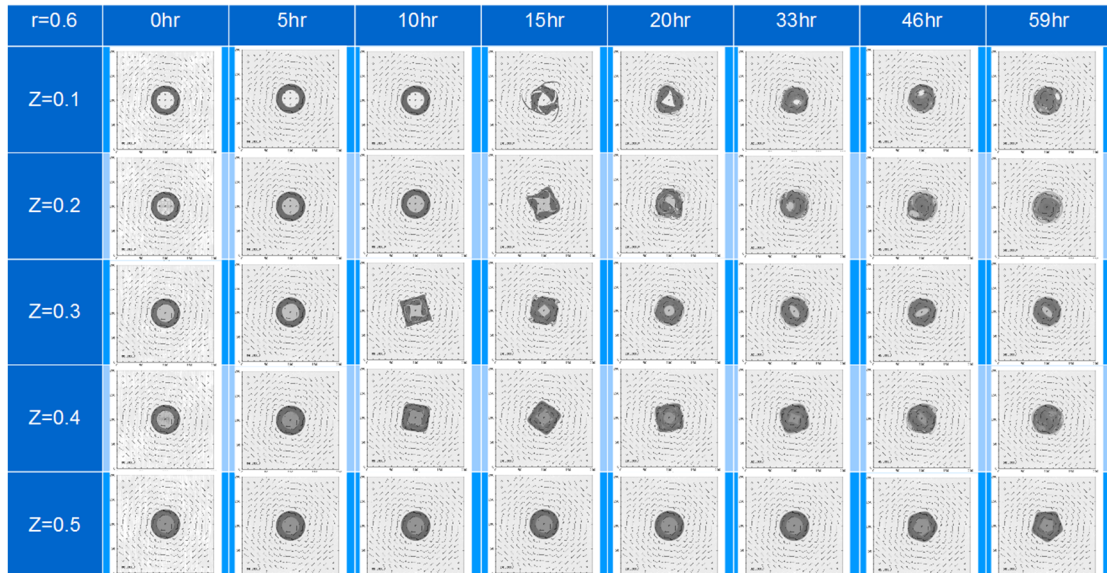


圖 5-11 $r=0.6$ ，不同渦度強度比例 Z 的渦旋變化比較圖

(五) $r=0.5$ 組

在 $r=0.5$ 的結果中， $Z=0.1$ 、 $Z=0.2$ 與 $Z=0.3$ 形成三角形，三者後來都混合了； $Z=0.4$ 與 $Z=0.5$ 形成四邊形； $Z=0.6$ 的變化不易觀察，於是也在圖表中省略。本組最大邊數為四。

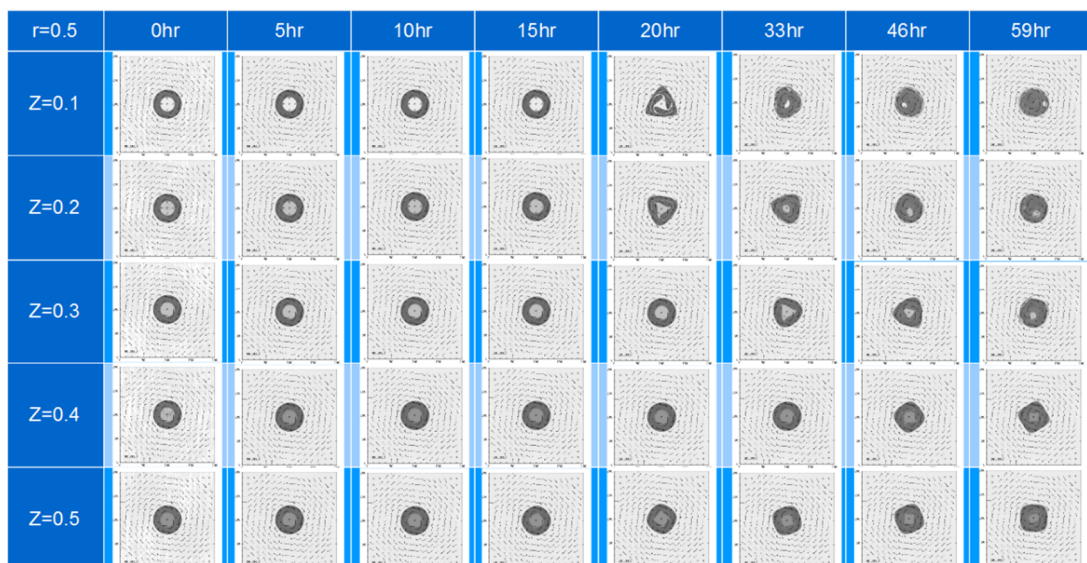


圖 5-12 $r=0.5$ ，不同渦度強度比例 Z 的渦旋變化比較圖

四、探討不同的渦旋條件與風速的關係

除了渦旋多邊形形狀變化特徵之外，我們想要進一步探討形狀變化與風速的關係，以期能與真實颱風做連結。於是我們讀取出程式運算其中的 u 與 v 風速檔，將渦旋垂直軸的東西向 u 風速與渦旋水平軸的南北向 v 風速繪製出來，由於模擬之渦旋上下左右對稱，於是只取其一方向來做比較即可。

從圖 5-13 中可以看出 Kiwi 渦旋的風速變化左右兩側顛倒，表示渦旋中心的兩側風向反向，且最高風速發生在強渦度環上，自渦度環向內則有一遞減的較低風速，下降幅度的轉折點恰好發生在渦度環內側的邊界上。於是可以看出隨著內圈半徑越大，轉折點也離中心越遠；而隨著內圈渦度越強，轉折點會從越大的風速開始改變遞減幅度。至於最高風速值，當內圈半徑越小，也就是強渦度環越寬，最高風速值越大；而內圈的渦度越大，最高風速值也越大。



圖 5-13 Kiwi 渦旋的初始 u 風速值與 r 、 Z 值關係比較圖

五、泰利颱風(2017)多邊形颱風眼探討

泰利颱風經過台灣附近的 2017 年 9 月 13、14 日兩天，明顯發生颱風眼多邊形變化，圖 5-14 為 NASA 的繞極軌道衛星 Terra 在 9 月 14 日 05：18 拍攝到泰利颱風五邊形颱風眼。我們利用中央氣象局的同步衛星雲圖資料，並且蒐集 earth.nullschool.net 網站上的風速資料一同比對。

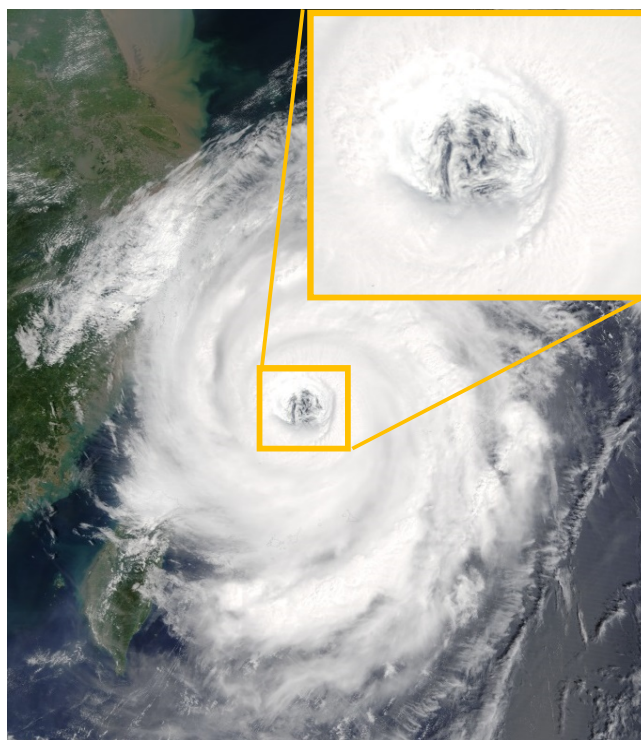


圖 5-14 由 NASA 的 Terra 衛星拍攝的泰利颱風五邊形颱風眼

從圖 5-15(a)與(b)中，我們可以看到泰利颱風的颱風眼有著一連串的變化，從 9 月 13 日的 01:00 時颱風眼結構還沒有非常明顯，03:50 出現了三角形的颱風眼，06:20 轉變成為了四邊形，但是到了 06:40 就漸漸混合，出現新聞中所謂的蘋果形颱風眼，07:20 結構開始破碎，08:10 雖然看得出有邊角的結構，但是仍處於破碎的狀態。9 月 13 日的 11:00 時，颱風眼消散而準備進入下一個變化期，13:10 產生了橢圓形的颱風眼，14:20 颱風眼再一次的出現了三角形，16:10 變成南北方向較長的矩形，擁有四個角，17:30 發現四邊形的其中一個角變得比較鈍，19:10 演變成了五邊形，但是南方的邊有雲的擾動(星號處)，19:40 我們認為它有形成類似六邊形的結構，但整體而言又漸漸開始混合，20:20 的時候邊角都變得更加模糊，颱風眼稍微的擴大。9 月 13 日的 21:10 時颱風眼又從邊數較少的三角形開始下一週期的演變，21:40 可以看到其實該三角形是有逆時針旋轉的，與先前的研究符合，22:20 颱風眼的形狀變得比較模糊不好辨認，但 9 月 14 日的 00:10 出現了六邊形，01:50 颱風眼變得比較圓滑，等到 04:00 又回復到六邊形。繼續往後看便會發現颱風眼的邊界開始不斷地擾動，從 05:00 到 14:10 的過程中邊角的結構漸漸回復到圓形，至於 15:20 以後的圓形颱風眼就沒有太大的變化了。

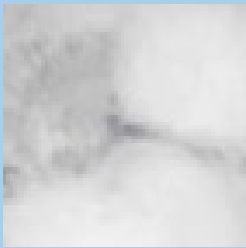
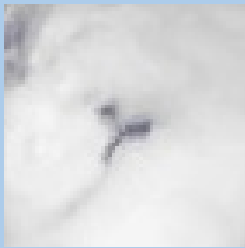
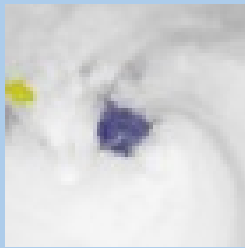
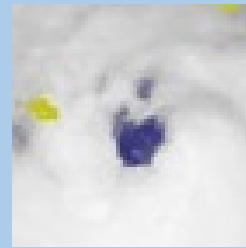
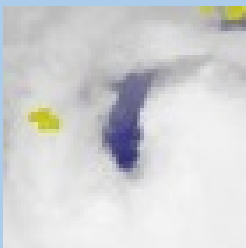
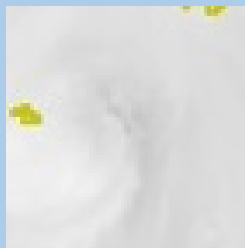
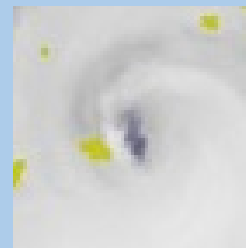
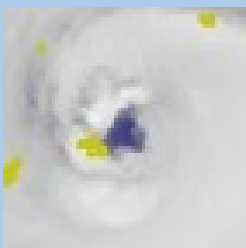
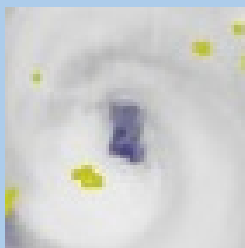
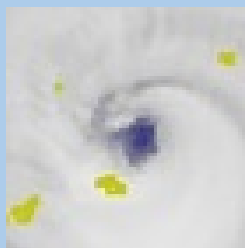
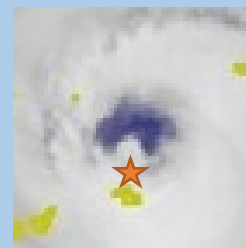
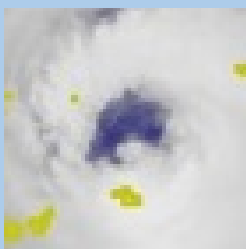
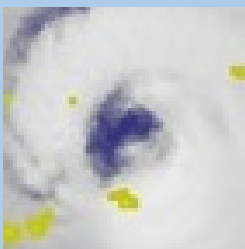
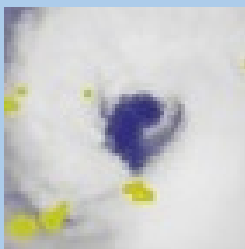
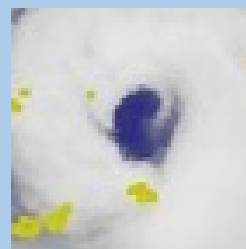
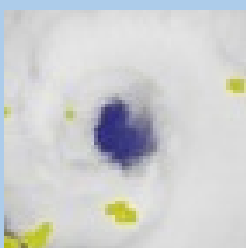
	9/13 01:00	9/13 03:50	9/13 06:20	9/13 06:40
紅外線雲圖				
	9/13 07:20	9/13 08:10	9/13 11:00	9/13 13:10
紅外線雲圖				
	9/13 14:20	9/13 16:10	9/13 17:30	9/13 19:10
紅外線雲圖				
	9/13 19:40	9/13 20:20	9/13 21:10	9/13 21:40
紅外線雲圖				
	9/13 22:20			
紅外線雲圖				

圖 5-15(a) 泰利颱風在 9 月 13 日颱風眼變化的階段圖

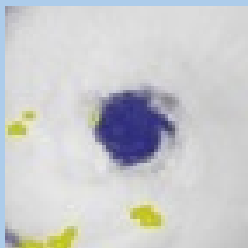
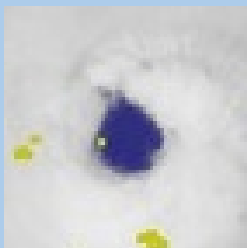
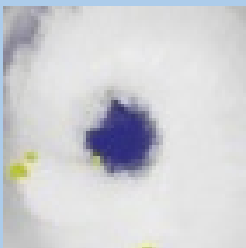
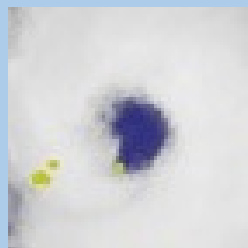
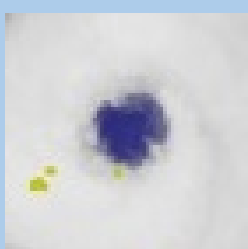
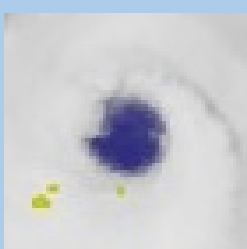
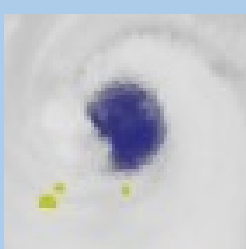
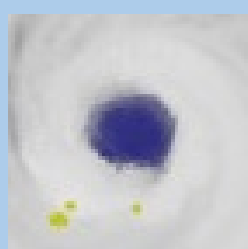
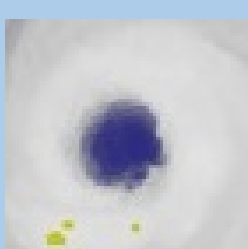
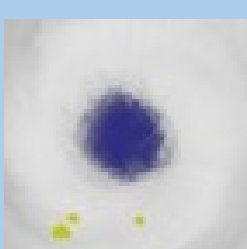
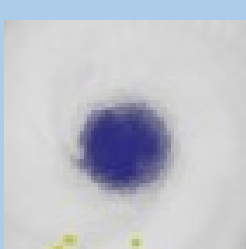
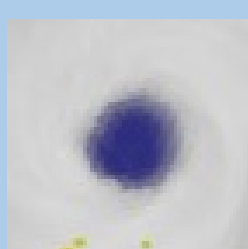
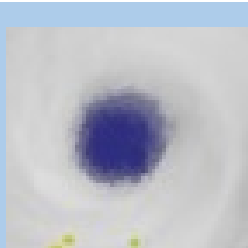
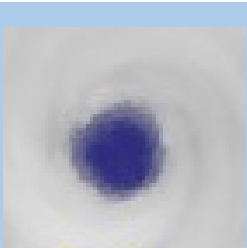
	9/14 00:10	9/14 01:50	9/14 04:00	9/14 05:00
紅外線雲圖				
	9/14 07:10	9/14 08:00	9/14 09:00	9/14 10:10
紅外線雲圖				
	9/14 11:00	9/14 12:00	9/14 14:10	9/14 15:20
紅外線雲圖				
	9/14 16:00	9/14 17:20		
紅外線雲圖				

圖 5-15(b) 泰利颱風在 9 月 14 日颱風眼變化的階段圖

我們想要由颱風的強度，即最高風速，討論多邊形颱風眼的變化。從美國國家海洋暨大氣總署的 Center for Satellite Application and Research 的網頁上我們找到 2017 年 9 月 13 日 13:15 GMT(台灣時間 21:15)衛星 ASCAT 取得的泰利颱風的風速資料可知最高風速達 60 knot，約為 31.2 m/s，另外 9 月 14 日 00:55 GMT(台灣時間 08:55)的最高風速為 65 knot，約為 33.8 m/s。但風速資料為繞極軌道衛星所觀測，一日僅兩筆資料，不夠討論上使用。我們再將衛星風速資料與 NASA 開發的 earth.nullschool.net 模式的風速資料對照，2017 年 9 月 13 日台灣時間 20:00 至 23:00 之間，模式中泰利颱風的最高風速在 28 ~ 34 m/s 之間，又 9 月 14 日台灣時間 08:00 的模式風速為 34 m/s，比較衛星與模式風速的資料大致相同，所以採用 earth.nullschool.net 模式每三小時一筆的風速資料做為颱風強度討論的依據。

圖 5-16 為 9 月 13 日 0 時到 12 時泰利颱風中心南北向的 u 風速分布。泰利颱風在 9 月 13 日凌晨的時候最高風速在 02:00 時只有 25 m/s，颱風眼尚不明顯，然後颱風便開始漸漸增強，最高風速逐漸增強且與颱風中心距離也增加，05:00 時最高風速 27 m/s，08:00 時最高風速 28 m/s，這段時間中颱風眼出現，並在形狀上發展出新聞上所說的蘋果形颱風眼，至 11:00 時的最高風速到達 32 m/s 且與中心距離約 82 km，而颱風眼則消失在衛星雲圖中。

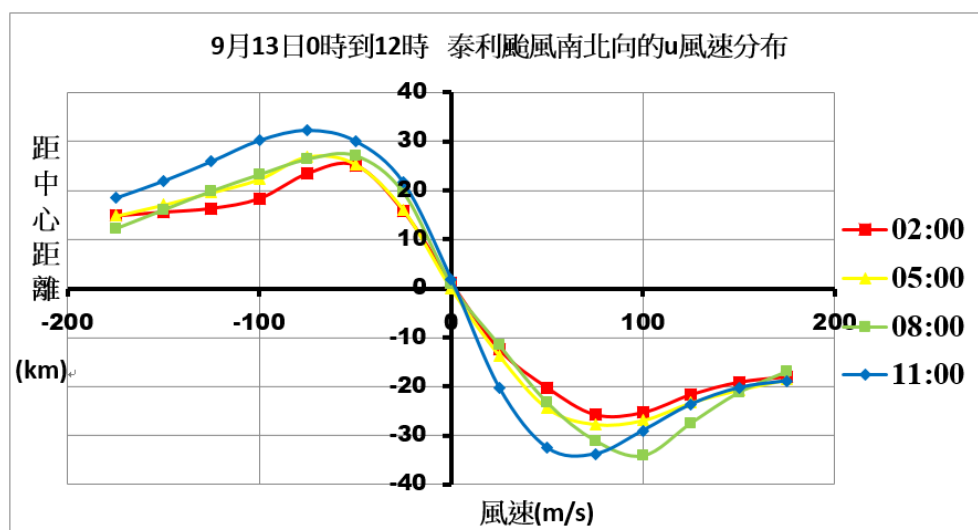


圖 5-16 為 9 月 13 日 0 時到 12 時泰利颱風中心南北向的 u 風速分布

從圖 5-17 為 9 月 13 日 12 時到 24 時泰利颱風中心南北向的 u 風速分布。從衛星雲圖觀察 11 時到 13 時，颱風眼不明顯，此段期間最高風速有降低的情況，14：00 時最高風速降為 28 m/s，但颱風又開始漸漸增強，最高風速位置外移的現象也又出現，17：00 時最高風速 31 m/s，在風速增強期間，颱風眼的形狀從三角形、四邊形演變至六邊形，20：00 時最高風速稍降到 28 m/s，颱風眼的輪廓顯得模糊且擴大，23：00 時的最高風速回升至 34 m/s。

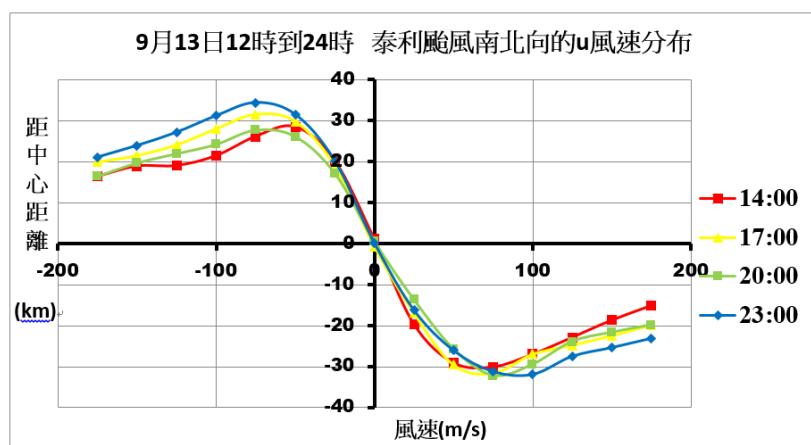


圖 5-17 9 月 13 日 12 時到 24 時泰利颱風中心南北向的 u 風速分布

從圖 5-18 中可以看出泰利颱風進入 9 月 14 日之後風速維持高峰，02：00 時最高風速 34 m/s，05：00 時最高風速 31 m/s，08：00 時最高風速 34 m/s，到 11：00 時的最高風速達到 36 m/s，為兩天內之最高的風速，並且其最高風速位置稍微向內移動。颱風眼在 0 時到 5 時之間，明顯呈現六邊形且颱風眼輪廓持續擾動，而 5 時之後擾動過程中邊角的結構漸漸回復到圓形。

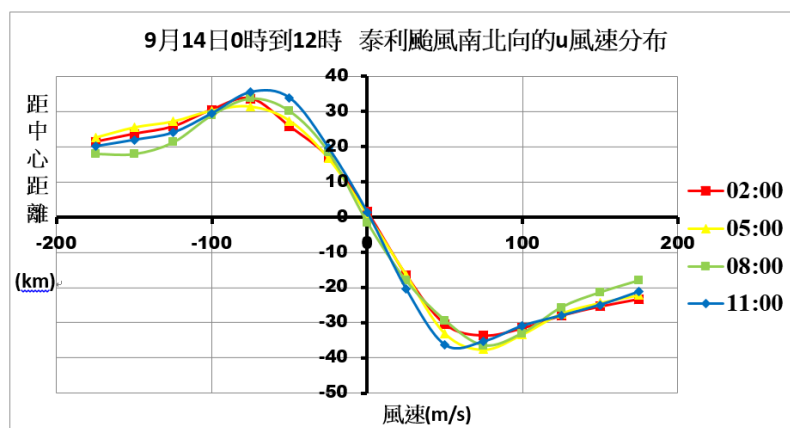


圖 5-18 9 月 14 日 0 時到 12 時泰利颱風中心南北向的 u 風速分布

從圖 5-19 中可以看出泰利颱風過了中午之後較上午風速稍降，儘管從 14:00 到 17:00 的這段期間，最高風速從 30 m/s 回升至 36 m/s，但是 20:00 時又降回到 33m/s，到了 23:00 又再下降到 31 m/s，颱風眼輪廓大致維持圓形，沒有太明顯變化。整體來說泰利颱風已經開始從風速最強的階段開始減弱，這也與其進入較高緯海面而漸漸消亡有關。

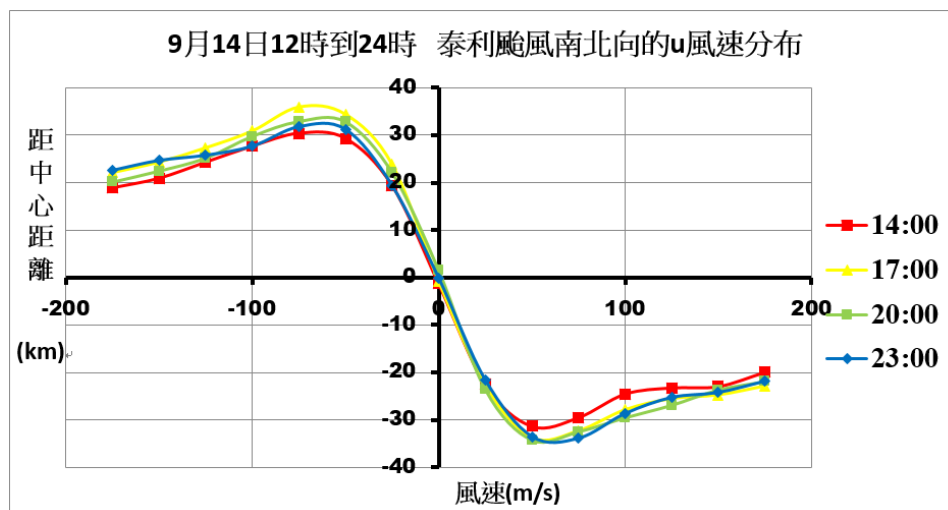


圖 5-19 9 月 14 日 12 時到 24 時泰利颱風中心南北向的 u 風速分布

陸、討論

一、形成多邊形渦旋的條件

從研究結果一可以看出：在渦旋之中，如果有強渦度帶形成一個在外側的環，環之兩側會有不同方向的渦度梯度，與內部較弱渦度區交互作用時會產生波動，而正壓不穩定會加強這個波。基於渦度梯度而產生的波動，其波會位於渦度落差的邊界上繞成一圈，而用波數的觀點來看，波峰就代表著多邊形的角，有幾個波峰就有幾個角。Constant 渦旋和 Gaussian 渦旋並沒有符合對於渦度梯度條件的要求，但 Kiwi 渦旋的情況卻能成功形成多邊形，於是我們推論強渦度的外圍包覆著弱渦度的核心，即為產生多邊形渦旋的條件。

二、渦度環寬度與多邊形渦旋

從研究結果二(圖 5-3~5-7)可看出在相同的渦旋大小之下，內圈半徑的比例越大，也就是外圈強渦度環越薄，越容易形成邊數越多的多邊形。我們推測是由於多邊形的形成有鑒於位於外圍的強渦度環產生波動，只要內外圈的渦度梯度提供足夠的動力，外圈的環即會開始扭曲，產生波動並在邊界上傳遞，當原本在內外圈邊界上的波峰波谷起伏牽

動整個外圍強渦度環，整個渦旋的形狀便會形成一個明顯的多邊形。越薄的外圈(意味著比例越大的內圈)，會越容易產成形變扭曲，產生更多波峰波谷，使得多邊形的邊數越多。

這一現象導致內圈半徑比例越小時，渦度梯度差會越難使渦旋形成多邊形，內圈半徑與最低所需強度差有一負相關趨勢，而當半徑比例變為 $r=0.4$ 時，最大的強度差也無法使其形成多邊形了。另外，在進行調整渦度環寬度的實驗時，我們意外發現部分外環薄且渦度梯度大的渦旋，外環有被扯碎的現象，在多邊形的邊上斷開，一個角形成一個小渦旋，但整體卻繼續維持著該多邊形的架構，此情形如同 Terra 衛星拍攝到有中小尺度渦旋發生在泰利颱風的颱風眼內的現象(圖 5-14)。

三、渦度強度差與多邊形渦旋

從研究結果三(圖 5-8~5-12)可看出在相同的渦旋大小之下，內圈強度比例越小，也就是渦度梯度差越大，越容易形成邊數少的多邊形。根據上述討論對於多邊形渦旋的形成原理，我們可以推測強度的比例相差越大，意味著提供扭曲之動力越大，在形成邊界上的波動時，波峰波谷的幅度越大，於是形成了邊數越少之多邊形，反映了其較小的內角所代表的轉折。

與討論二相對而言，越大的渦度梯度可以使越厚的外圈也扭曲成多邊形，反過來說，過小的渦度梯度，在實驗中只要內圈強度比例達到 $Z=0.6$ 以上，就算有扭曲也很難觀察到明顯現象，其混合的速度也很快，其強度差不大的渦旋邊界很容易混和，甚至整個渦旋均質化。所以綜合而言，同時討論渦旋強度差與渦度環寬度的影響結果如圖 6-1，兩者相輔相成地影響多邊形渦旋的形成。

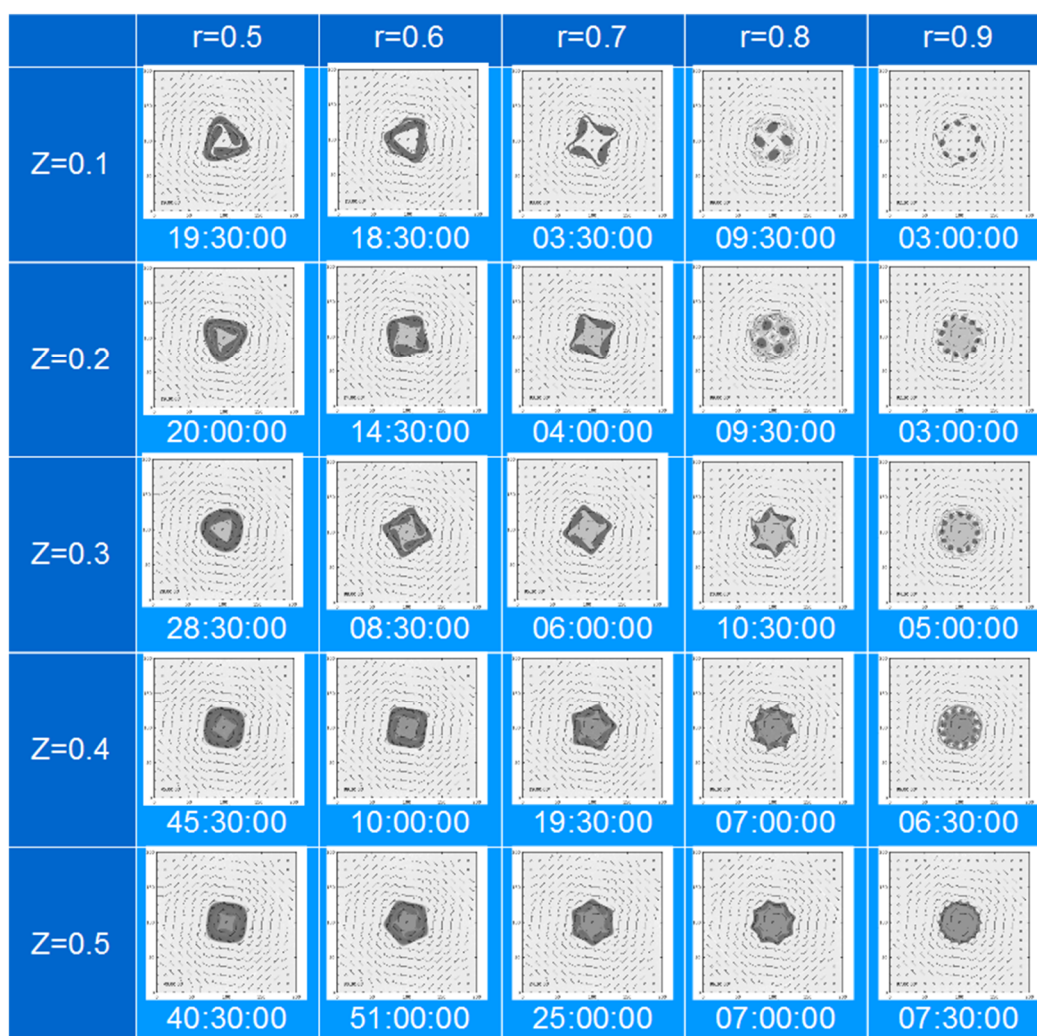


圖 6-1 不同渦度強度(Z)與渦度環(r)的多邊形渦旋關係

(時間 hr:min:sec 為該個案初始形成多邊形)

四、多邊形渦旋隨時間的形狀演化

在觀察分析各個不同條件所構成的渦旋之後，我們將研究中所模擬出的渦旋演化方式分為三類，以下逐個說明：

- (一)穩定不變型：發生於強渦度環過厚，內部弱渦度區半徑過小的情況，在實驗中顯示為 $[r \leq 0.4]$ 。此種演化過程非常單純，渦旋從一開始就無法產生足夠之擾動，無法使波動成長，所以強渦度的外環便不會被扭曲拉扯，整個渦旋維持初始的樣貌，我們推測其在邊界上仍然還是有渦度的擴散，會以極慢的速度漸漸均質化，但不會產生多邊形。
- (二)環狀成形型：發生於兩種情況，一為有適當厚度之外渦度環，二為擁有足夠但不過大以致扯碎外渦度環的渦度差，兩者會互相影響，在實驗中為 $[r=0.9, Z=0.6]$ 、 $[r=0.8, Z$

$\geq 0.5]$ 、 $[r=0.7, Z \geq 0.4]$ 、 $[r=0.6]$ 、 $[r=0.5]$ 的渦旋(圖 5-8~5-12)。此類渦旋能夠形成正壓不穩定現象，在邊界的波動驅使外環變形扭曲時，整個環變為多邊形，並以逆時針旋轉。而這些渦旋的演化終點都會邁向混合，只是差在時間的早晚，實驗中如 $[r=0.6, Z=0.5]$ (圖 5-11)等例子中，由於形成多邊形的過程非常慢，在整個模擬的盡頭仍來不及看到混合，但可以從漸漸模糊的邊界中推測其未來將混合。我們觀察到強渦度環在多邊形形成之後，原先內側與外側共同對齊的角會漸漸產生些微的錯開，邊界上的局部擾動會頓時加劇，造成渦度的混合，多邊形的角便會暈開變得不明顯，即便部分渦旋內側與外側又再重新對齊，終究又會再一次發生上述情形，漸漸邁向混合，形成接近均質化的單極渦旋。我們推測此運作機構與文獻中 Schubert 提到的渦度混合後會內縮的現象有關，一個由環形成的渦旋會經過多邊形這個演化的過渡期，在渦度漸漸混合之後，以一個較均質化的圓形被觀察到，其風速曲線的特徵也符合混合內縮的現象，以下舉 $[r=0.5, Z=0.2]$ 為典型(圖 6-2)。

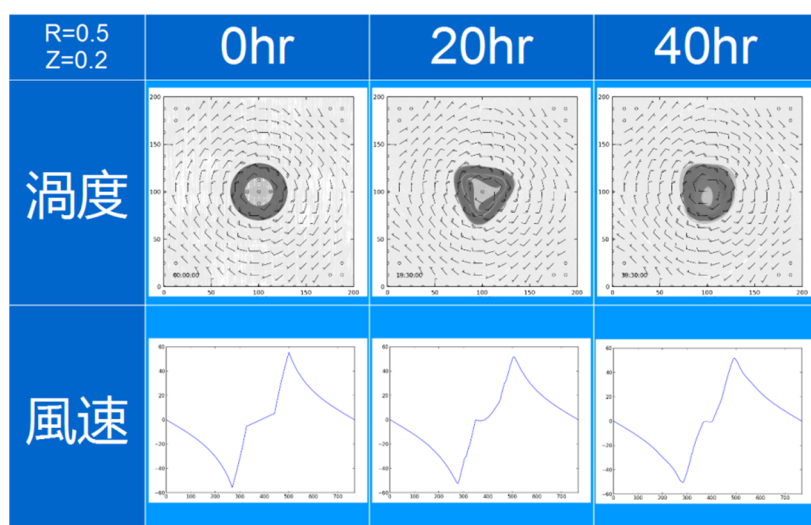


圖 6-2 $r=0.5$ $Z=0.2$ 渦旋的演化階段與 v 風速

(三)碎裂小渦旋型：發生在相反於第二類型的兩種情況，一為夠薄的外渦度環，二為擁有夠大足以扯碎外渦度環的渦度差，兩者會互相影響，在實驗中為 $[r=0.9, Z \leq 0.5]$ 、 $[r=0.8, Z \leq 0.4]$ 、 $[r=0.7, Z \leq 0.3]$ 的渦旋(圖 5-8~5-12)。此類渦旋也能夠形成正壓不穩定現象，但在上述的條件之下，渦度環會被振幅過大的波動拉開扯碎，經過一段細絲帶化的過程，形成數個比原本還小的渦旋，若渦度環越薄或渦度差越小，便會扯碎出越多小渦

旋。小渦旋形成之後，除了自身旋轉，也會繞著中心逆時針公轉。後續的發展將會有兩條方式，第一種是渦度環分裂之後，各個小渦旋各自形成平衡，就像同一軌道上的數個衛星，保持著相同的間距運行，實驗中皆為四個小渦旋的情況，以下舉 $[r=0.8, Z=0.2]$ 為典型(圖 6-3)；第二種是渦度環分裂出數量較多的小渦旋，各個渦旋由於靠得太近，當各自的旋轉受到彼此的干擾，容易拉成更長的橢圓形，甚至碰在一起，發成合併的現象，同時也出現細絲帶化的特徵，並且在數量降低回歸穩定之後進入更小的運行軌道，此現象應證了先前提到的渦度混合並內縮，以下舉 $[r=0.9, Z=0.2]$ 為典型(圖 6-4)，這兩個過程中的風速也都展現了混合內縮的特色。至於演化的終點，經過上述兩種發展其一之後，一部分的多邊形渦旋完全混合，強渦度區聚集到中心，外觀為圓形(圖 5-10)；另一部份的多邊形渦旋維持住平衡，以四個小渦旋的形式留存下來，我們推測小渦旋的離心率越小，運行軌道的半徑越大，越有可能留存下來。在此類渦旋中也發現了許多有趣的現象，例如在 $[r=0.7, Z=0.2]$ 、 $[r=0.8, Z=0.3]$ 兩組資料中(圖 5-4、5-5)，為何渦旋演化成穩定的三極渦旋，還有上述的小渦旋之間是否能套用藤原效應，都是未來待深入研究的課題。

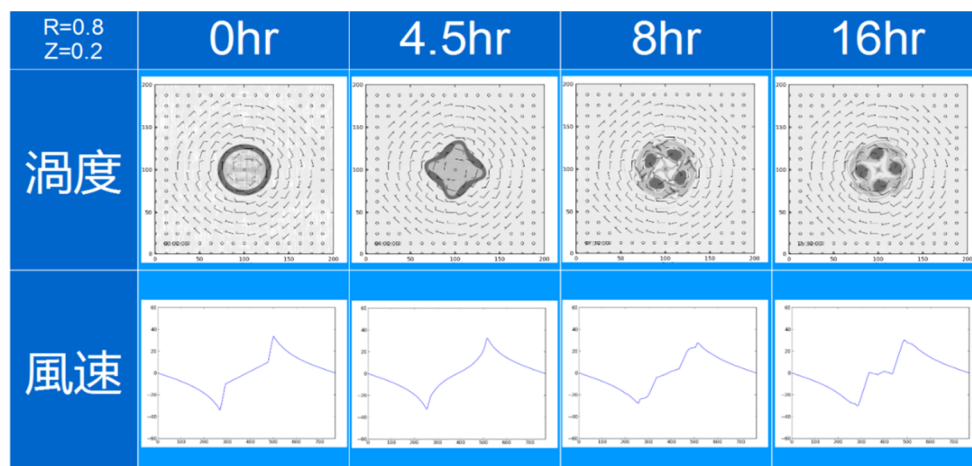


圖 6-3 $r=0.8$ $Z=0.2$ 渦旋的演化階段與 v 風速

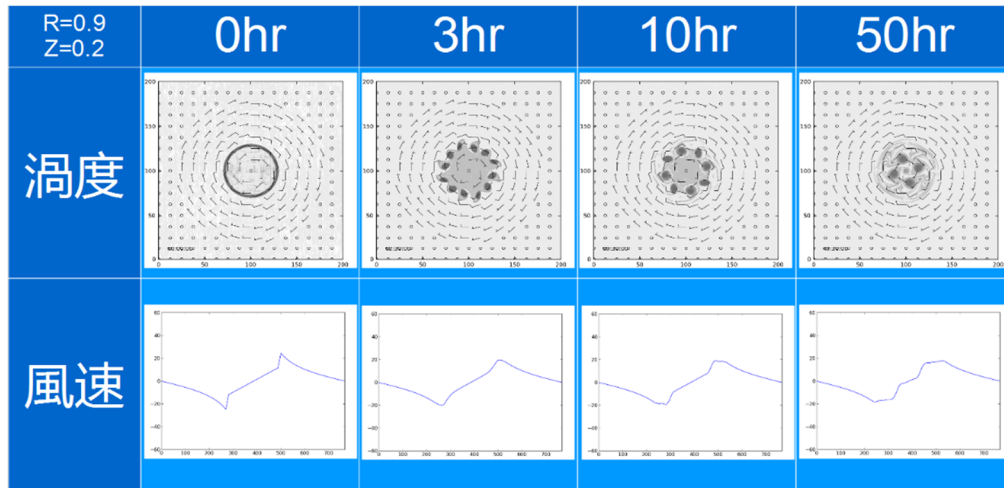


圖 6-4 $r=0.9$ $Z=0.2$ 渦旋的演化階段與 v 風速

五、不同的渦旋條件與風速

在圖 5-13 中，我們可知風速的狀況與渦旋結構被設定的半徑、渦度的比例有關，隨著內部弱渦度區半徑越大，由於內部弱渦度區的風速變率比強渦度環上來的平緩，所以已經越過位於強渦度環上最高峰值而開始下降的風速數值，就會越早遇到轉折點，換成以較緩的遞減速度降低，風速平緩下降的區域就會越大。從另一方面來看，強渦度環的面積相對減少，風速上升的幅度就會跟著變小，最高風速的值就跟著降低了。

至於渦度的比例對風速的影響，隨著內部弱渦度區的渦度比例上升，由於內部弱渦度區與外側強渦度環的差異變小，所以已經越過位於強渦度環上最高峰值而開始下降的風速數值，就會在較高的風速遇到轉折點，位於內部弱渦度區的遞減速度就會趨近在外側強渦度環越過峰值後的遞減速度，風速下降幅度趨緩的現象就會變的不明顯。從另一方面來看，整個渦旋的環流其實是變大的，導致最高風速的值會跟著提高。

再回顧圖 6-2、6-3 與 6-4，我們可以看到風速的演化，也能符合渦旋形狀演化上的特徵。細絲帶化的過程意味著渦度的混合，反映在風速上就顯示出轉折點變平滑的現象；而分裂出來的小渦旋運行半徑變短，代表渦度混合內縮，就如同讓內部弱渦度區的半徑變短，就會看到最高風速與轉折點的位置向內移動。

綜合討論三、四與上述說明的看法，可以知道半徑與渦度這兩個條件，會分別以不同的方式影響渦旋中多邊形的形狀與渦旋風速這兩個表徵，所以當看見渦旋出現了多邊

形，或者觀測得知渦旋的風速，我們就能反向推測出該渦旋可能具有的渦度分布情形，進而對該渦旋做出更多的分析。

六、探討泰利颱風的衛星雲圖與風速

在研究結果五的圖 5-15 中，我們可以看出泰利的颱風眼出現了數次的變化週期，從 9 月 13 日凌晨尚無明顯的颱風眼，演化出三角形、四邊形，到中午前就混合了，下午則再度形成三角形，並增加邊數至六邊形，期間颱風眼還有擴大的現象，晚上 20 時左右多邊形的特徵消失，21 時再度形成三角形，並且大小比先前的都大，接著再一次增加邊數至六邊形，進入 9 月 14 日之後位渦波振幅減小，最後恢復回較穩定的圓形。在兩天之內，泰利的颱風眼出現邊數增加的週期，依照先前模擬渦旋的結果來推理，邊數增加可能是由於強渦度環變薄，或者內部弱渦度區渦度增強。至於颱風眼擴大的現象，依照此多邊形渦旋的研究尚無法解釋，可能有其他颱風眼形態的演化機制，有待更多研究。

至於圖 5-16~19 中對於泰利颱風的風速，可以看出 9 月 13 日的上半天，泰利颱風的風速峰值上升，中午過後稍微降低，但下半年又出現風速峰值上升的現象，9 月 14 日上半天的風速峰值達到兩天中最高，雖然在個時間點的風速差異並不大，但是其位置有向內靠近的趨勢，與其邊界發生擾動，渦度混和向內縮的現象符合，下半年則是傍晚時雖然風速峰值稍高，但最後又下降回來。這兩天的風速變化，若以研究結果四的風速資料來推理，風速峰值上升可能是由於強渦度環變厚，或者內部弱渦度區渦度增強。

綜合整個研究結果五來看，可以發現最高風速值上升的趨勢竟然與颱風眼邊數增加的現象大致上吻合，但這並不代表兩者是因果關係，更恰當的說，這兩者都是由於渦度的分布而受影響的表徵，渦度才是牽動那些現象的因素。而比對造成最高風速值上升與邊數增加的可能條件，我們推論出泰利颱風的颱風眼中心之弱渦度區可能發生了渦度增加的現象，至於究竟是下沉氣流的減弱、潛熱釋放出的能量，還是其他的因素共同造成了渦度改變，就需要更多的研究來解開謎團了。

柒、結論與未來展望

- 一、形成一個多邊形渦旋的主因是來自外側強渦度環上渦度梯度變率的變化，導致了正壓不穩定，產生不同波數的位渦波，使外側強渦度環扭曲成多邊形。
- 二、固定強度時，隨著內圈比例變小，外環越來越厚時，多邊形渦旋的形成速度越慢而邊數越少，但外環過厚時便不易被扭曲，不會形成多邊形。
- 三、固定內外半徑時，隨著內圈弱渦度與外環強渦度差距越小，多邊形渦旋的形成速度越慢而邊數越多，但差距過小時便會直接混合，不會形成多邊形。
- 四、多邊形渦旋隨著時間演化，如果發生了環的內外側相位錯開，或是中小尺度渦旋互相干擾，就會發生渦度混合內縮的情形，最後導致渦旋混和成接近均勻的圓形。
- 五、當衛星觀測確認多邊形颱風眼存在時，表示颱風的渦度結構必定存在著一個內部弱渦度區。
- 六、在泰利颱風的演化過程中，颱風眼發生邊數變多，風速變快的情況，其主要原因應為內部弱渦度區的渦度增加，進而牽動該兩現象。

未來研究希望能把產生三極渦旋的機制繼續地探明，並且深入探討數個小尺度渦旋是否能套用藤原效應來解釋互繞與合併的現象。另外，我們得出泰利颱風的颱風眼中心之弱渦度區應該發生了渦度增加的現象，使得颱風眼輪廓發生多邊形的變化，至於究竟是下沉氣流的減弱、潛熱釋放出的能量，還是其他的因素共同造成了渦度改變，也是一個值得探究的問題。最後以致能夠利用颱風眼的型式來了解更多颱風的狀態，推展至氣流強度、降雨分布，甚至是颱風的移動路徑，均能提供防災應變之用途。

捌、參考資料與文獻

- Schubert, W. H., M. T. Montgomery, R. K. Taft, T. A. Guinn, S. R. Fulton, J. P. Kossin, J. P. Edwards, 1999: Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 56, 1197-1223.
- 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 Eastin, M.D., 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., B. D. McNoldy, and W. H. Schubert, 2002: Vortical swirls in hurricane eye clouds. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 3144-3149.
- Kossin, J. P., and W. H. Schubert, 2004: Mesovortices in Hurricane Isabel. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 85, 151-153.
- 郭鴻基、林宗賢、陳建河、吳佳純，1998：賀伯颱風眼轉動可能機制探討。大氣科學，26，249-264
- 徐理寰，郭鴻基，2006：軸對稱化與雙渦旋交互作用。台北，國立臺灣大學大氣科學研究所碩士論文
- NASA 全球數值模式 <https://earth.nullschool.net>
- 二維非線性非輻散正壓模式由臺灣大學大氣科學系動力與模擬研究室許天耀先生撰寫

【評語】 180014

颱風是太平洋周邊地區衝擊人類環境的自然災害，也是大氣與海洋互動的精彩表現，投入這個題材，既有學術性也有實用價值。該研究探討颱風眼外形變化的可能機制，利用正壓模式的渦旋變化，模擬在不同的參數(型態、渦旋環、渦旋度比值)條件下，所形成颱風眼的外形結構；最後以 2017 年泰利颱風作案例，實際驗證模式的結果。整個實驗的設計完備，結果良好，是十分良好的作品，未來繼續深入探討的潛力極佳。