

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 180004
參展科別 地球與環境科學
作品名稱 雙眼牆颱風的內眼滾動
得獎獎項 大會獎 一等獎
美國 ISEF 正選代表

就讀學校 國立臺灣師範大學附屬高級中學
指導教師 郭鴻基、王靖華
作者姓名 臧逸新

關鍵詞 颱風、雙眼牆、淺水模式

作者簡介



臧逸新，師大附中高三指考生，愛好大氣、天文，時而走訪山林，但多半時候不學無術、虛擲光陰、留戀野花、好行小慧，糊一糊不堪敗仗又無力返手的人生，如此而已。

摘要

本研究初步分析颱風雷達回波圖發現，利奇馬、蘇力、柯羅莎、杜鵑 4 個雙眼牆的颱風，內眼牆有沿著外眼牆內側旋轉的現象，時間尺度約為 3 至 14 小時。接著比較颱風個案，選定杜鵑颱風作為主要觀察研究對象，以探討影響雙眼牆颱風內眼牆滾動週期的因素為研究目標，並以數值模式簡化問題。我做出兩種猜測，認為此一現象的成因，有可能是眼區的繞轉，或是內眼牆被眼區內的正渦度帶動旋轉。我先後設計了單、雙眼牆旋轉實驗，發現影響此二系統旋轉週期的主因不盡相同。其中，從雙眼牆實驗的結果可以發現，影響內眼牆滾動週期的參數，主要是眼區半徑以及眼區渦度，呼應了內眼牆受眼區內渦度帶動旋轉的猜測。最後，我在模擬杜鵑颱風的實驗中，做出相似的旋轉週期，證明內眼牆滾動的機制，主要以水平動力為主，也證明先前實驗的參數，即是影響旋轉週期的要素。

Abstract

In this research, I discovered a phenomenon that the inner-eyewall of certain typhoons(DuJuan, Krosa, Soulik, Lekima) would rotate around in their outer-eyewalls, and that their periods are about 3-14 hours. After comparisons between those cases, we chose Typhoon DuJuan as our main research target, in order to find out the factors contributing to the period change. I developed two hypotheses to explain it. For one, it may result from the rotation of the eye; for another, it might result from the vorticity in the eye that forced the inner-eyewall to rotate. Then, I designed two experiments and conducted them in the shallow water model, respectively for single-eyewall and double-eyewall. From these experiments, I discovered that the main factors influencing their periods are the vorticity in the eye and the radius of the eye, which corresponds to the hypothesis. At last, the experiment simulating Typhoon DuJuan has successfully simulated its rotation period, from which I could infer that the factors contributing to the phenomenon have been considered in the shallow water model and conclude that the factors we found in previous experiments are those essential for the rotation of the inner-eyewall.

壹、研究動機

2019 年，利奇馬颱風侵襲台灣期間，其在台灣東北部海面，向西北西移動。雷達回波圖顯示，內眼牆中心有一段時間看似往南移動。然而，中央氣象局颱風警報中，並未寫道過去 1 小時內，颱風中心有向南移動的現象。當時，網路討論區的大氣系研究生，表示雙眼牆颱風的內眼牆，會自然在外眼牆內，進行逆時針方向的滾動。為此現象感到好奇之下，便著手開始搜尋颱風資料庫中的類似案例，進而發現不同的雙眼牆颱風，內眼滾動的週期也不一。本研究旨在探討影響雙眼牆颱風內眼滾動週期的因素。

貳、研究目的

- 一、從個案的觀察，找出個案的內眼牆滾動週期。
- 二、探討影響雙眼牆颱風內眼滾動週期的因素。
- 三、利用 matlab 程式模式造初始場，並模擬錯位旋轉系統隨時間的變化。
- 四、使用淺水模式模擬渦旋水平結構，改變給定的初始場，觀察其結果並分析影響旋轉週期的變因。

參、研究設備及器材

- 一、Measure 2.0.1
- 二、MATLAB R2016a
- 三、periodic shallow water model(pswm，週期性淺水模式)
- 四、MobaXterm
- 五、WinSCP
- 六、颱風資料庫雷達回波圖資料

肆、研究過程與結果

- 一、雙眼牆颱風內眼牆滾動之現象觀察
 - (一) 選定目標觀察颱風

我起先發現利奇馬颱風(Lekima，編號 201919)的內眼牆，有環繞外眼牆內側進行滾動的現象。於是我開始著手在 2001 年至 2019 年，有發警報颱風列表中，尋找是否有相似個案。符合以下條件的颱風，我即選定並做進一步之觀察：

1. 有發布海上颱風警報。
2. 雷達回波資料完備。
3. 內眼牆有在外眼牆內滾動之現象，且持續時間大於 120 分鐘。

最後符合上述條件的颱風，依時間先後排序如下：

1. 2003 杜鵑 (Dujuan，編號 200313)
2. 2007 柯羅莎 (Krosa，編號 200715)
3. 2013 蘇力 (Soulik，編號 201307)
4. 2019 利奇馬 (Lekima，編號 201919)

(二) 現象定性觀察結果

我從上述颱風的內外眼牆完整進到雷達範圍或是雙眼牆結構趨於穩定開始，觀察內眼牆在外眼牆內的動態變化。而我經 Measure 2.0 在螢幕上分別定位內外眼牆中心後，發現以上挑選 4 個颱風個案，雖皆有在雷達回波圖上被肉眼觀察到內眼滾動現象，仍可依內外眼牆中心錯置與否分為兩類。

第一類是內外眼牆呈現兩個大小錯位圓的形態，並且內眼牆中心隨著時間繞外眼牆中心運動。以杜鵑颱風 (Dujuan，編號 200313) 為例，可以觀察到內眼牆滾動現象，如下 (圖 1-1) 至 (圖 1-8) 所示，為台灣時間 2003 年 9 月 1 日 18 時 0 分起，至台灣時間 2003 年 9 月 1 日 21 時 30 分，每 30 分中擷取之雷達回波圖：

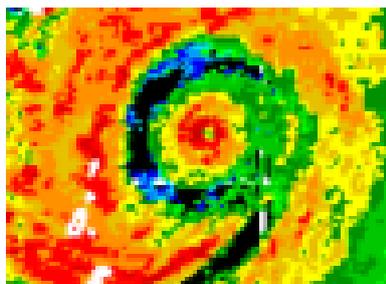


圖 1-1

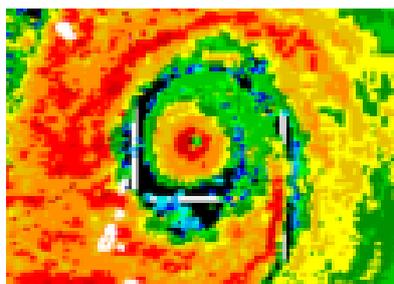


圖 1-2

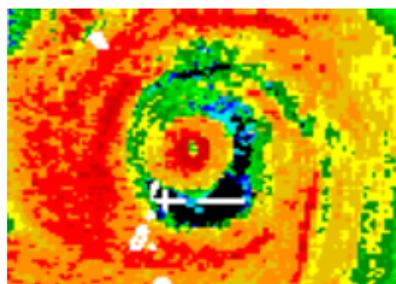


圖 1-3

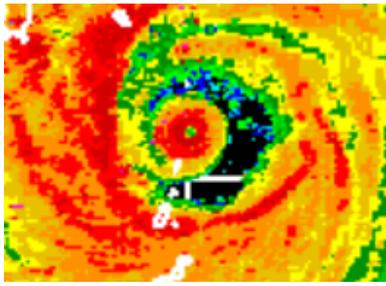


圖 1-4

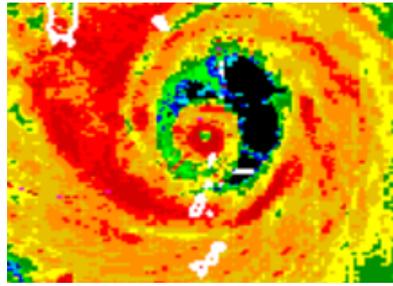


圖 1-5

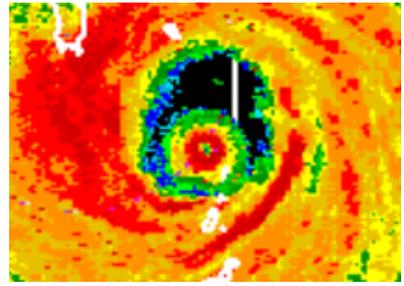


圖 1-6

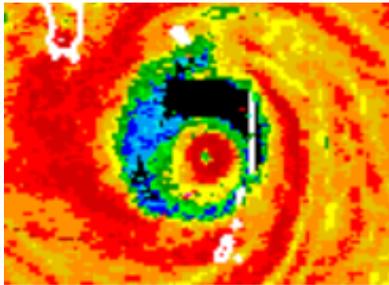


圖 1-7

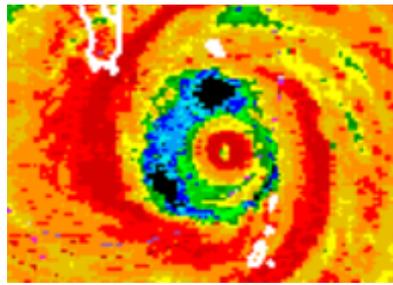


圖 1-8



色標 (單位：dBZ)

從 (圖 1-1) 至 (圖 1-8) 共 4 小時的連續變化，可以看到，內眼牆中心一開始在外眼牆偏東之內側，後以逆時針方向，在外眼牆內完成滾動繞行一周，於 3.5 小時後又回到外眼牆內之東側。換句話說，此颱風的內眼牆，具有以約 3.5 小時的週期在外眼牆內側滾動之現象。

第二類則是內外眼牆中心重疊，但內眼牆一側的乾空氣區 (Moat)，出現一些回波帶與外眼牆內側接觸。可以觀察到，隨著內眼的自轉，內外眼牆接觸帶的方位也會逆時針繞行。以利奇馬颱風 (Lekima，編號 201919) 為例，可以觀察到內眼牆滾動現象，如下 (圖 2-1) 至 (圖 2-8) 所示，為台灣時間 2019 年 8 月 9 日 6 時 0 分起，至台灣時間 2019 年 8 月 9 日 9 時 30 分，每 30 分中擷取之雷達回波圖：

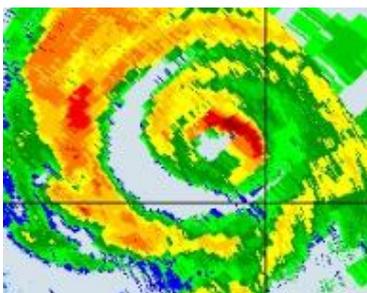


圖 2-1

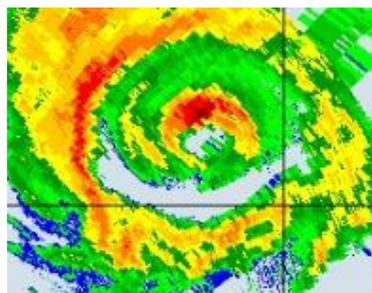


圖 2-2



圖 2-3

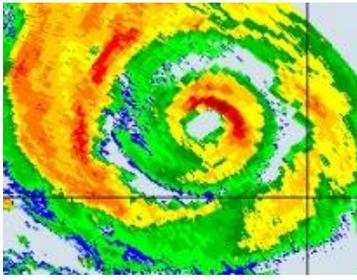


圖 2-4

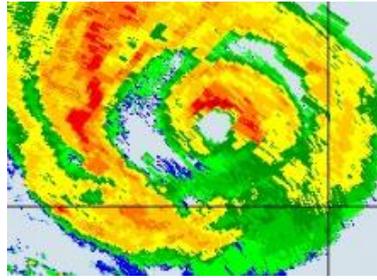


圖 2-5

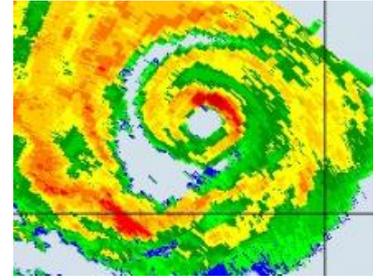


圖 2-6

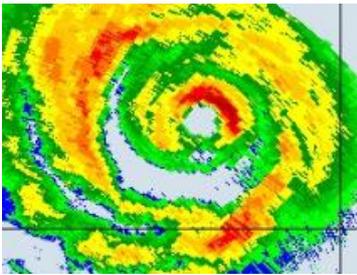


圖 2-7

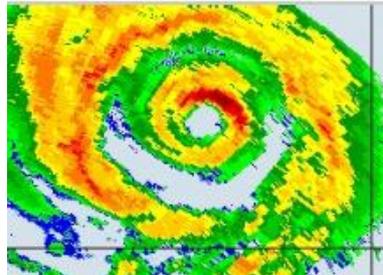


圖 2-8



色標 (單位：dBZ)

從 (圖 2-1) 至 (圖 2-8) 共 4 小時的連續變化，可以看到，內外眼牆接觸帶一開始在外眼牆東偏北之內側，後以逆時針方向，在外眼牆內完成滾動繞行一周，於約 2.5 至 3 小時後又回到外眼牆內之東偏北側。從圖上看來，此颱風的內眼牆，也如同第一類案例，具有以約 2.5 至 3 小時小時的週期在外眼牆內側滾動之現象。

而柯羅莎颱風 (Krosa，編號 200715) 和蘇力颱風 (Soulik，編號 201307) 雖然皆未在進入雷達觀測期間內完成滾動一圈，但也可藉由所觀測時間內滾動的角度估算週期。經由 Measure 粗略量出角度並估算後，得到柯羅莎颱風之內眼牆 210 分鐘內逆時針滾動 90 度，週期約為 14 小時；而蘇力颱風之內眼牆 300 分鐘內逆時針滾動 249 度，週期約為 7 小時。

經過與指導老師的討論，我們認為第一類滾動 (如杜鵑颱風) 的滾動現象較為單純，也是我最一開始想探討的類型；而第二類滾動中，內眼牆的動態較接近自轉，而在內外眼牆間乾空氣 (Moat) 區出現繞行內眼的回波，可能牽涉到颱風中心附近的垂直運動或是濕過程，故僅作現象觀察，不做進一步分析或是後續之數值模式模擬。

(三) 以杜鵑颱風為例，定義「內眼牆中心對外眼牆中心連線偏角」並分析作圖

為在後續之數值實驗中，精準量化任何旋轉系統的「週期 (period)」，我必須先量測旋轉角度，再用角度變化量除以時間變化量，得到旋轉週期。首先，需要定義角度資料的測量方法。以杜鵑颱風為例，可以循以下步驟，並參考 (圖 3) 之示意圖，量出其「內眼牆中心對

外眼牆中心連線偏角 (以下簡稱：內外眼牆連線偏角)」：

1. 先分別找出外眼牆、內眼牆中心 (圖 3 中之紫色、藍色圓點)。
2. 從外眼牆中心指向內眼牆中心做出具方向之射線 (圖 3 之藍色箭頭)。
3. 以逆時針為正向，射線與水平線 (圖 3 之紫色直線) 夾角即為所求。

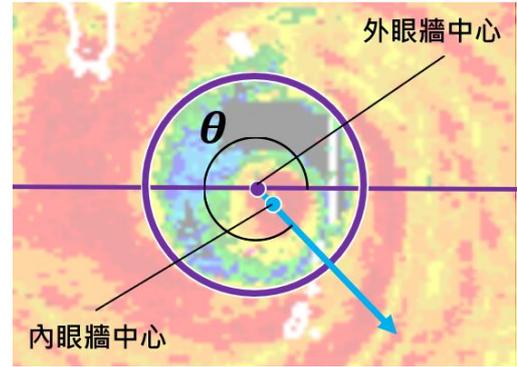


圖 3、內外眼牆連線偏角量測示意圖

定義「第一圈週期」 T_1 。設恰旋轉超過一圈的

時間為 T ， T 分鐘時，系統累計旋轉 θ° ，則：

$$T_1 = T \frac{360^\circ}{\theta^\circ}$$

同理，設恰旋轉超過 n 圈的時間為 T ， T 分鐘時，系統累計旋轉 θ° ，則「前 n 圈平均週

期」 $T_{n(avg)}$ 一樣可以表示為：

$$T_{n(avg)} = T \frac{360^\circ}{\theta^\circ}$$

以上量測及計算方法，適用本文所有項目 (如上例之外眼牆中心、內眼牆中心) 連線偏角之取得。

在定義量測方法後，我利用 Measure，以上述的方法，在螢幕上量出逐時偏角，如 (表 1)。(表 1)的時間，以台灣時間 2003 年 9 月 1 日 17 時 30 分作為時間原點，依每 30 分鐘的雷達回波資料，量出內外眼牆連線偏角，並依前 6 小時的數據，算出滾動一圈的週期為 203 分鐘。我們再依照表格，繪製角度對時間的關係圖，如(圖 4)。

Dujan 200313			
time (min)	angle (deg)	time (min)	angle (deg)
0	232	210	209
30	271	240	239
60	315	270	329
90	30	300	39
120	91	330	132
150	134	360	151
180	169	390	172

表 1、杜鵑颱風逐時內外眼牆連線偏角

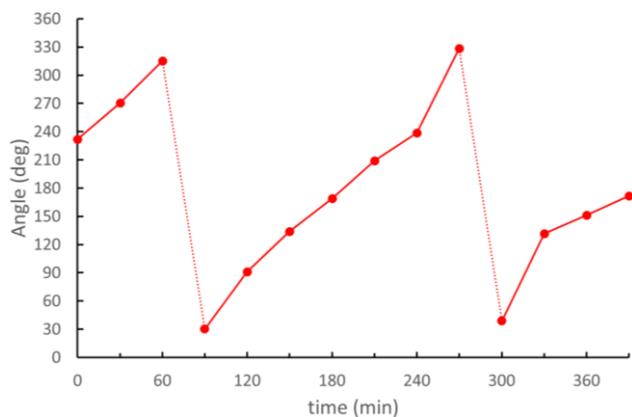


圖 4、內外眼牆連線偏角之角度-時間圖

製作角度-時間圖，除了幫助觀察單一個案的轉速變化，也方便比較不同個案之間的旋轉速度。如(圖 5)所示：

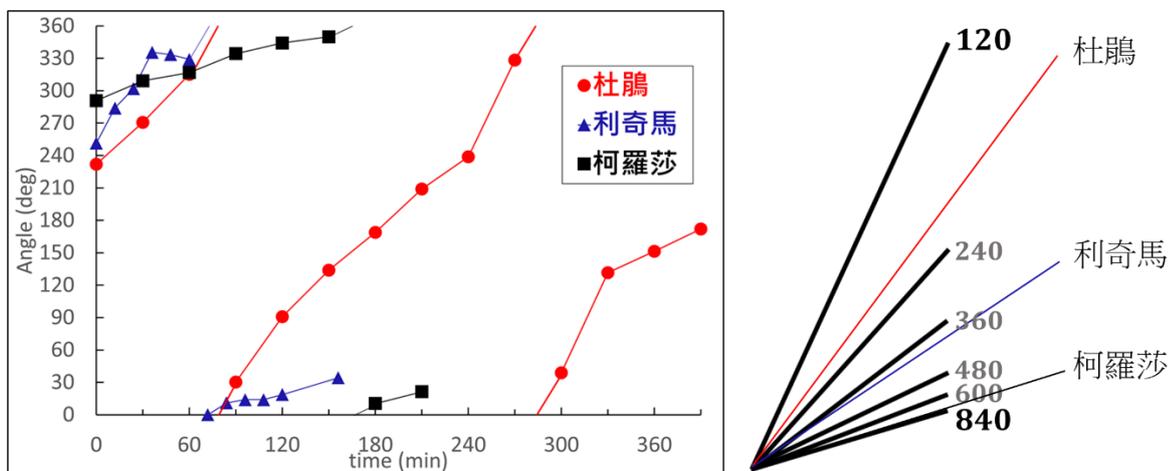


圖 5、杜鵑、利奇馬、科羅莎颱風 角度-時間圖 比較

從(圖 5)中，可以從分別的斜率，比較出平均旋轉週期。其中以杜鵑颱風 213 分鐘最快，利奇馬颱風 394 分鐘居次，以及柯羅莎颱風 836 分鐘耗時最長。其旋轉週期差異甚鉅，3 至 14 小時不等。(圖 5)也顯示，杜鵑颱風的生命期中，共完成兩次完整的旋轉，其餘二者皆不足一圈。綜合以上原因，我們選擇了旋轉周期最短、旋轉現象最明顯而完整的杜鵑颱風 (2003)，作為主要研究與模擬對象。

二、利用週期性淺水模式進行模擬實驗

淺水模式 (shallow water model) 適用於模擬不同渦度區的非線性交互作用。本研究推測，影響颱風內眼牆沿外眼牆旋轉的主要因素，和颱風渦旋結構有關。因此本研究選用淺水模式，探討水平動力上影響內眼牆旋轉週期的機制。

我先對第一類滾動現象的可能成因做出以下猜測：

1. 內眼牆在外牆內，受到外眼牆中的正渦度影響而滾動。
2. 外眼牆有不對稱的情況，於是外眼牆的自轉，造成內眼牆看起來在外眼牆內滾動，反而內眼中心近乎不轉動。

這兩種猜測，都是可以被週期性淺水模式模擬的。實際案例中，颱風的行進方向或變化

或是定位的不精確，會讓驗正第二種猜測顯得更困難。而數值實驗能撇開颱風行進的因素，更能驗正第二種猜想。

由於驗證第一種猜想所需要建立的初始場，較第二種猜想複雜，所以我決定先建立中空圓盤狀的初始場。一來模擬僅有不對稱外眼牆時，此系統的結構在哪些情況下能穩定存在；二來探討不對稱外眼牆的自轉速率受到哪些參數控制。

三、實驗一：中空圓盤狀初始渦度場

(一)實驗設計

我設計了中空圓盤狀的初始渦度場來模擬不對稱外眼牆的情形，並挑出幾項我認為可能影響轉動週期或結構穩定性的變因。初始場示意圖以及參數意義，可參考(圖 6)之註解：

1. 眼牆渦度 ζ_R 。
2. 眼區渦度 ζ_r 。
3. 眼牆半徑 R (不包含過渡帶)。
4. 眼區半徑 r (不包含過渡帶)。
5. 眼牆與眼區中心錯位距離 Δ 。

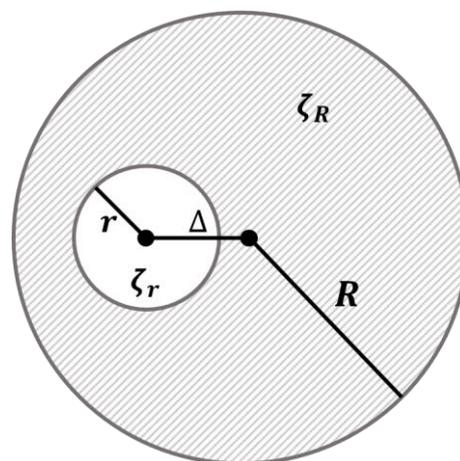


圖 6、中空圓盤狀初始場 參數示意圖

註 1：「中心」皆為幾何中心。

我所設計的四組子實驗，皆是在 R 固定的情況下，分別改變對照組的另外四個參數，以分析影響轉動周期的主要變因。

所有子實驗的變因如(表 2)所示；(表 3)所列，是本實驗中，淺水方程式進行運算的各項參數。

實驗參數	R (km)	Δ (km)	r (km)	ζ_r ($10^{-3}s^{-1}$)	ζ_R ($10^{-3}s^{-1}$)
對照組實驗	50	10	10	0.25	2.5
子實驗1	1-1	10			
	1-2	50	10	0.25	2.5
	1-3		30		
子實驗2	2-1		10		
	2-2	50	10	0.25	2.5
	2-3		30		
子實驗3	3-1			0.25	
	3-2	50	10	0.75	2.5
	3-3			1.25	
子實驗4	4-1				2.5
	4-2	50	10	0.25	2.0
	4-3				1.6

表 2、子實驗變因一覽

模式參數	數值
x, y 計算域	300 km
x, y 格點數	512
x, y 解析度	0.6 km
時步	3 sec
輸出時間間隔	30 min
水深	500 m
淺水波波速	70 ms^{-1}
科氏參數	$5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

表 3、淺水模式運算參數

(二)實驗結果

1. 改變錯位距離 Δ

取三組子實驗 12 小時內的實驗模擬結果，每 30 分鐘量測眼區中心對眼牆中心的偏角。三組不同 Δ 值的子實驗，結果及作圖如(圖 7)。

可以看到，不對稱中空圓盤狀系統的自轉週期，在前三圈內近乎完全不受 Δ 值影響，而在第三圈之後， Δ 值大的系統先開始變形。變形前後的差異，以子實驗 1-3 為例，請見(圖 8)、(圖 9)。另外，也可以從(圖 7)歸納出，變形愈多的系統，自轉速度會略為減慢。所以 Δ 值最大的子實驗 1-3，轉速最先開始微幅下降。但大致上看來，不同中空圓盤狀渦度場的 Δ 值，幾乎不造成轉速差異，且 Δ 值 30 在公里以內時，此一系統皆能在 12 小時內保持不破碎。

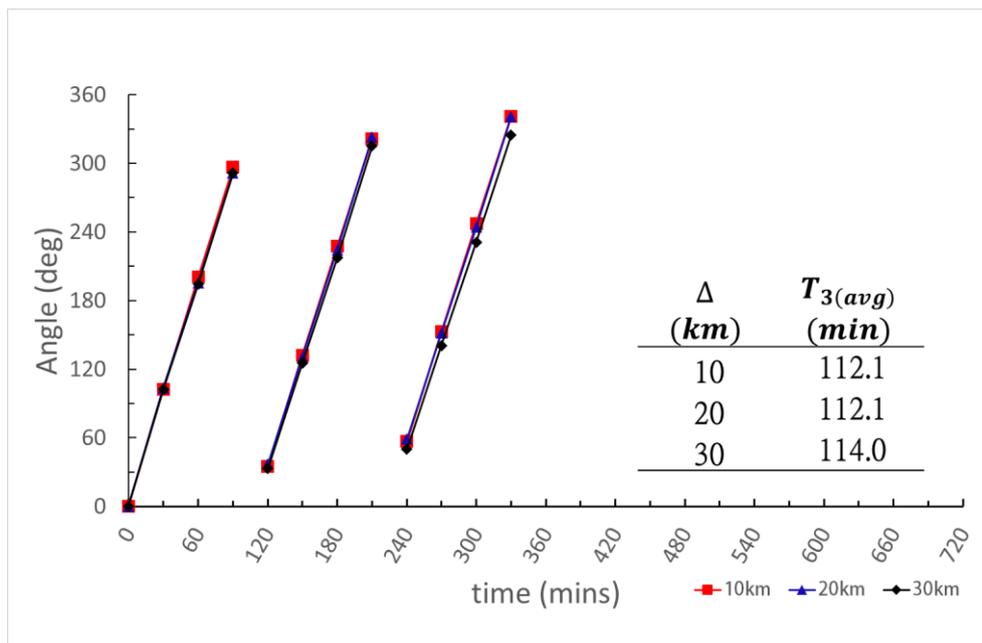


圖 7、不同 Δ 值 前三圈轉動之實驗結果

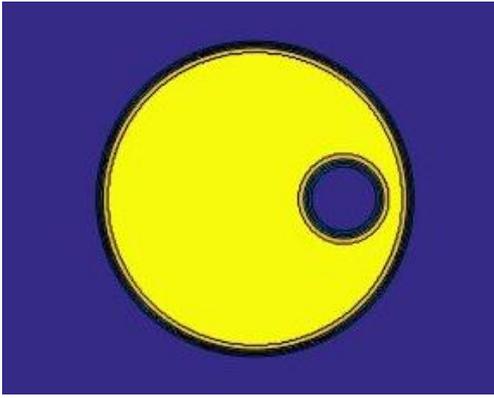


圖 8、子實驗 1-3 給定之初始場

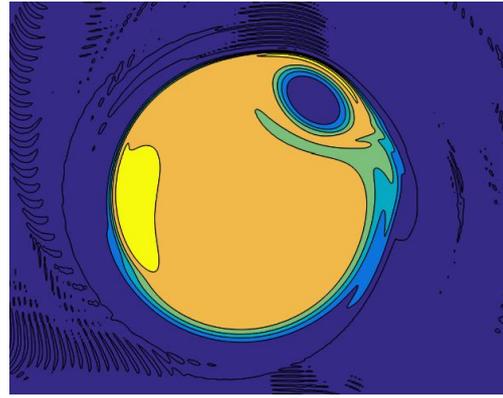


圖 9、子實驗 1-3 在 T=6hr 時 系統略為變形

2. 改變眼區半徑 r

取三組子實驗 12 小時內的實驗模擬結果，每 30 分鐘量測眼區中心對眼牆中心的偏角。三組不同 r 值的子實驗，結果及作圖如(圖 10)。

可以從實驗結果看到，在實驗的一開始，就可以看出三組子實驗的第一圈週期有明顯的分別。子實驗 2-1、子實驗 2-2、子實驗 2-3 的第一圈週期分別為 109、120、146 分鐘；相較而言，前三圈週期皆較第一圈週期略為下降，可能與結構的破碎有關。如(圖 11)、(圖 12)所示，360 分鐘時，眼區半徑 30 公里的子實驗 2-3，結構就出現破碎，以致無法找出眼區中心。此外，我們還發現子實驗 2-2 在實驗進行一段時間後，圓形的眼區，會漸漸轉為類似三角形的形狀，並且能穩定存在的時間也較子實驗 2-3 長，請見(圖 13)、(圖 14)。

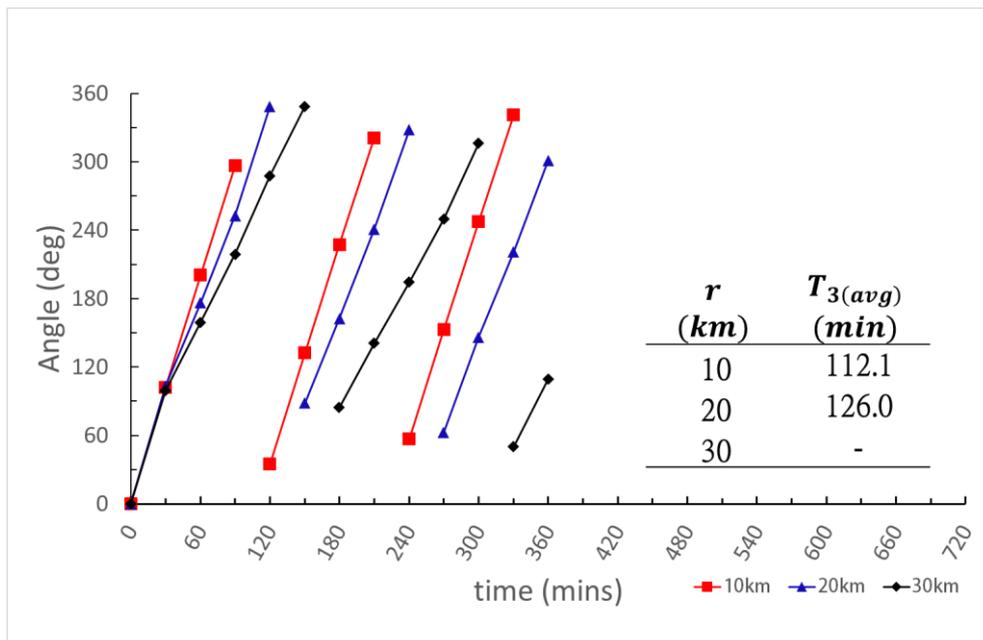


圖 10、不同 r 值 前三圈轉動之實驗結果

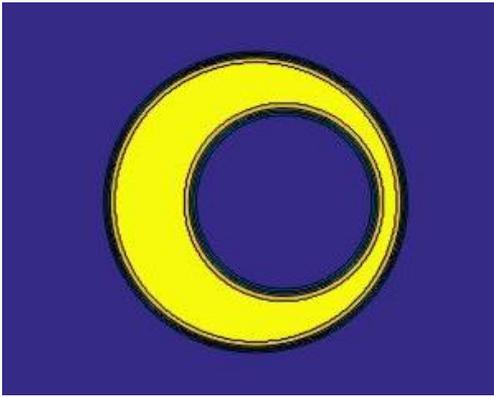


圖 11、子實驗 2-3 初始場

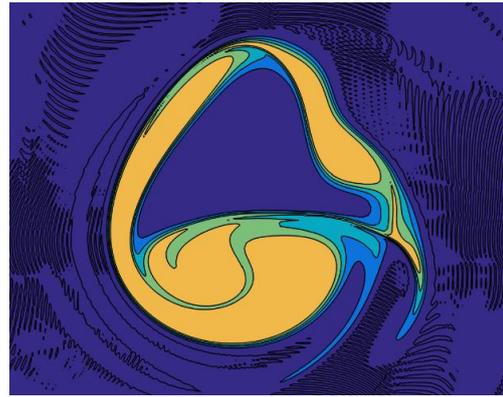


圖 12、子實驗 2-3 在 T=6hr 時系統破碎情形

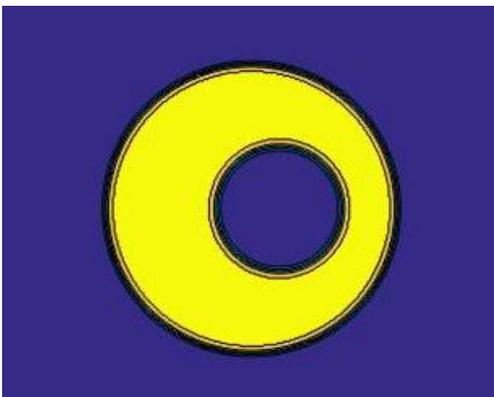


圖 13、子實驗 2-2 給定之初始場

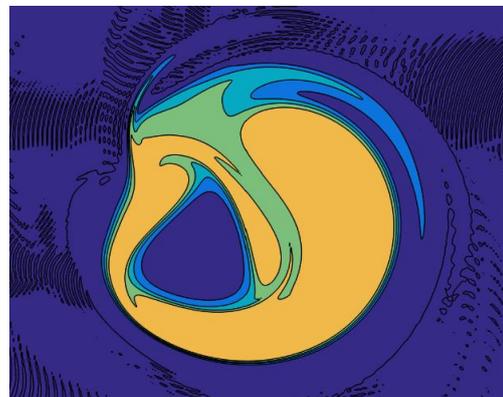


圖 14、子實驗 2-2 在 T=6hr 時的結果

3. 改變眼區渦度 ζ_r

取三組子實驗 12 小時內的實驗模擬結果，每 30 分鐘量測眼區中心對眼牆中心的偏角。三組不同 ζ_r 值的子實驗，結果及作圖如(圖 15)。

(圖 15)可以看出，三組不同 ζ_r 值的實驗，圖上的斜率都非常固定，表示旋轉週期都非常穩定。子實驗 3-1、子實驗 3-2、子實驗 3-3 的第一圈週期，分別是 109、108、106 分鐘。而前三圈平均週期則是 112、110、109 分鐘，週期皆隨時間略增。總體而言， ζ_r 值越大，轉速越慢。

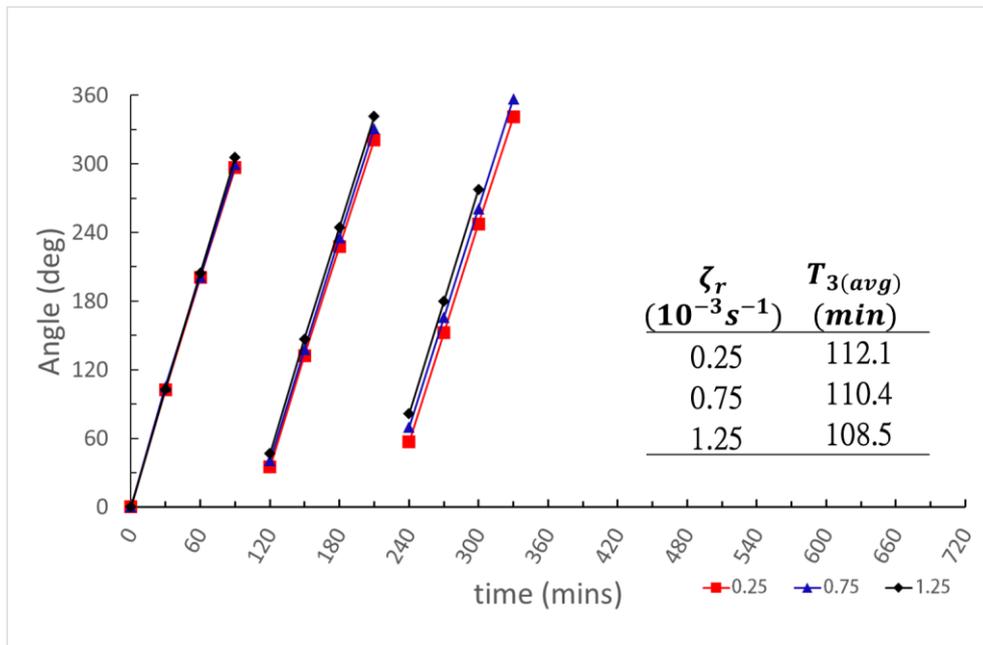


圖 15、不同 ζ_r 值 前三圈轉動之實驗結果

4. 改變眼牆渦度 ζ_R

實驗結果見(圖 16)，從斜率的差異就可看出， ζ_R 與旋轉週期有非常明顯的關係。三組子實驗的第一圈週期，分別是 160、131、109 分鐘；前三圈來看，轉速也隨著 ζ_R 的提高，有非常顯著的增加。可見直接影響動力的 ζ_R 是影響此系統轉速的主因之一。

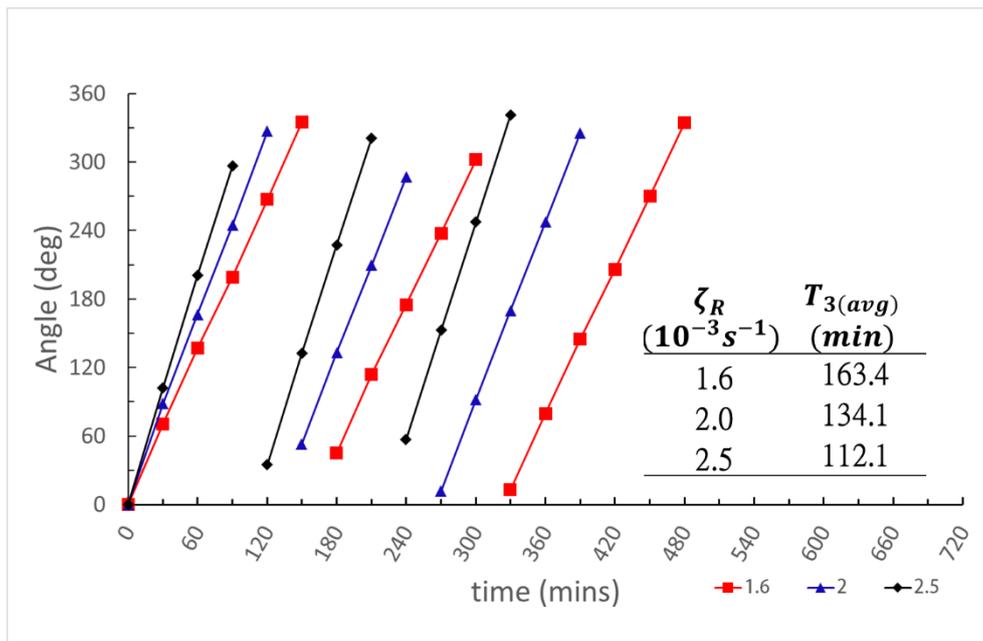


圖 16、不同 ζ_R 值 前三圈轉動實驗結果

四、實驗二：單、雙眼牆轉動情形比較

做完一系列中空圓盤狀初始場的實驗後，為了比較單雙眼牆轉動情形，以及驗證先前提到，「內眼牆在外牆內，受到外眼牆裡的正渦度帶動而滾動」的猜想，於是我們設計了此實驗。

初始場的型態，大致上是在中空圓盤中植入一小型圓形渦度場，目的有二：模擬雙眼牆颱風的內眼牆，以及和實驗一比較植入內眼牆前後的差異。

(一)實驗設計

欲比較單雙眼牆轉動情形，需要先選擇適合的初始場，來植入內眼牆。我整理了以下幾個適合進行此實驗的初始場條件：

1. 眼區半徑 r 足夠大，可以植入具有合理半徑的內眼。
2. 轉動行為穩定，結構未嚴重破碎或變形。
3. 風速分布合理，與現實情況沒有太極端的差距。

實驗一的子實驗 2-2， r 為 20 公里，足夠在其中加入半徑 10km 的內眼牆；而其結構雖不致破碎，但眼區有發生變形，如(圖 14)或(圖 17-2)。因此，我們選擇微調子實驗 2-2 的初始場，將其 ζ_r 微調至 $1.25 \times 10^{-3} s^{-1}$ ，使其結構更穩定，利於本實驗進行(圖 17-5)。

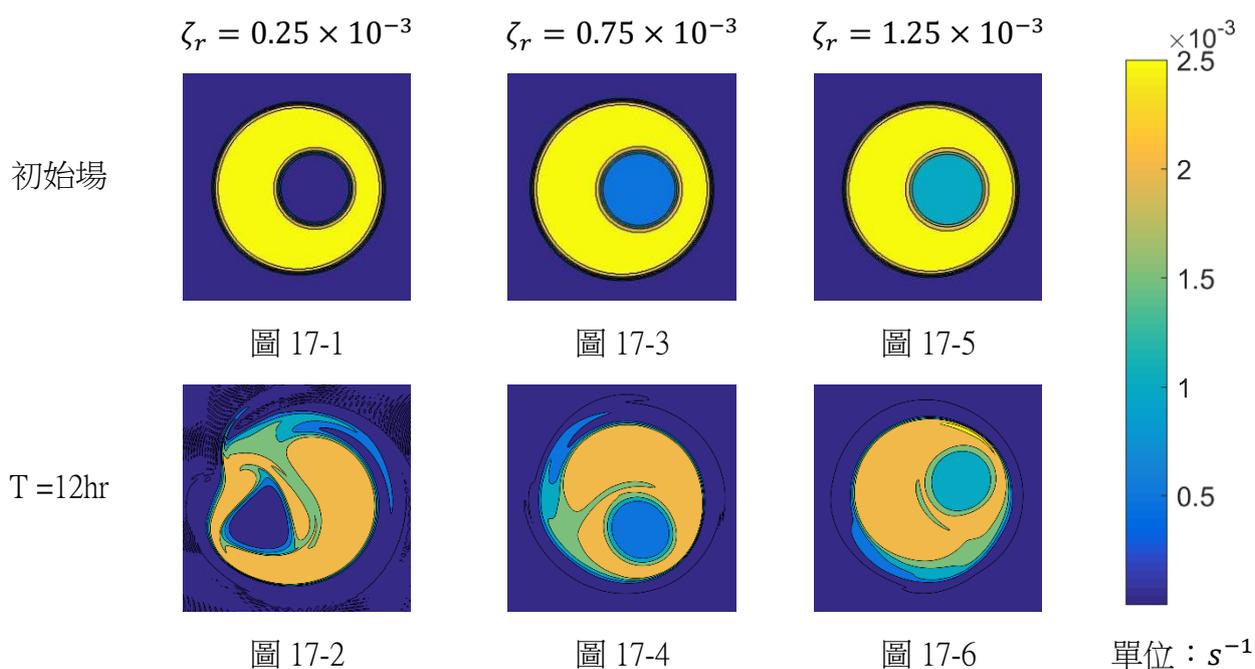


圖 17、改變 ζ_r 值的子實驗 2-2，初始場與 $T=12\text{hr}$ 時之比較

植入之半徑 10km 內眼牆，渦度值為 ζ_R 的 4.5 倍；內眼牆中心與眼區中心相同。其餘參數，除 ζ_r 修為 $1.25 \times 10^{-3} s^{-1}$ 外，皆與實驗一的子實驗 2-2 相同。初始場之風速剖面圖如(圖 18)所示，其近中心風速分布，落在現實情況的合理範圍內。

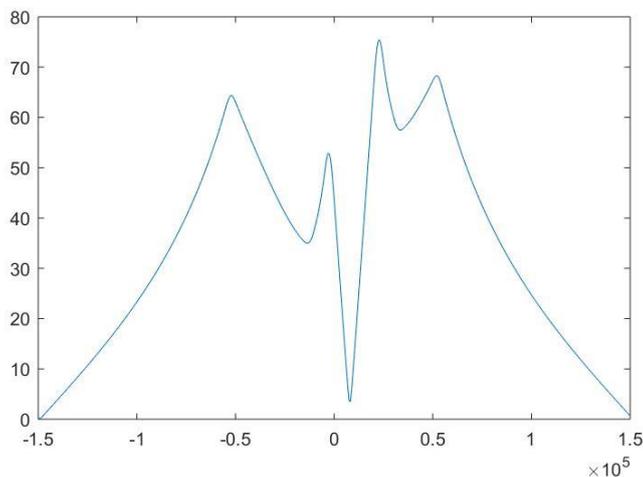
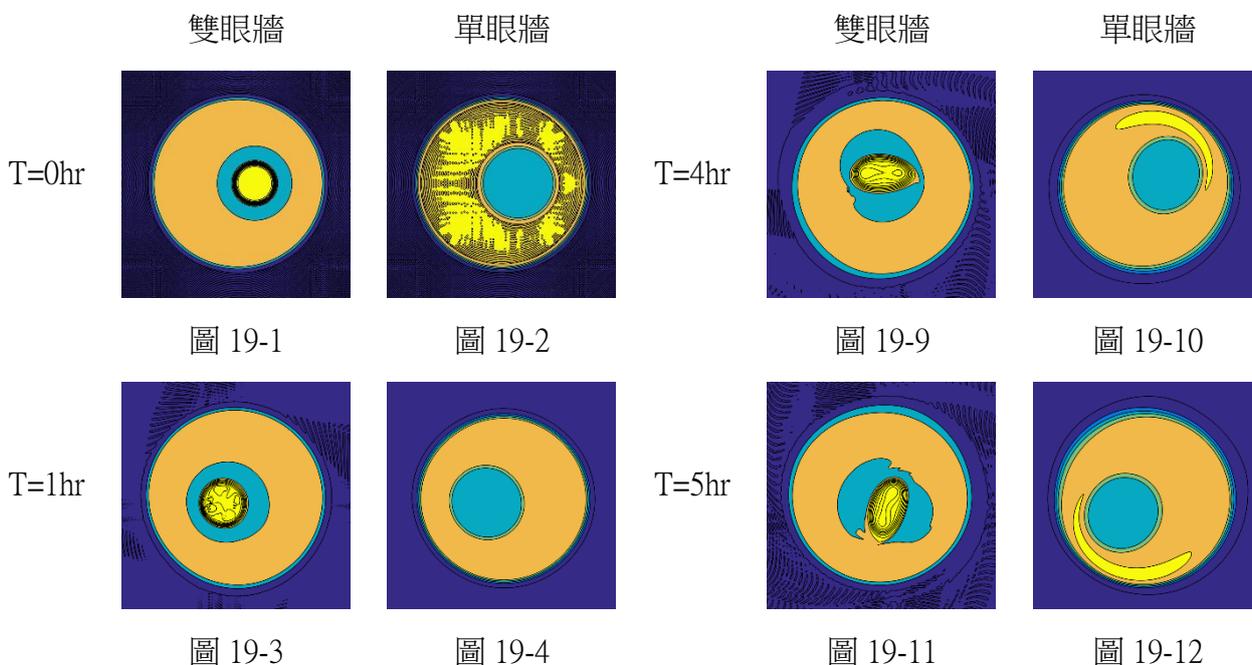


圖 18、實驗二 風速剖面圖 (橫軸單位：m，縱軸單位：m/s)

(二) 實驗結果

比較從 T=0hr 到 T=6hr 的每小時實驗結果(圖 19)以及 12 小時內旋轉週期差異(圖 20)：



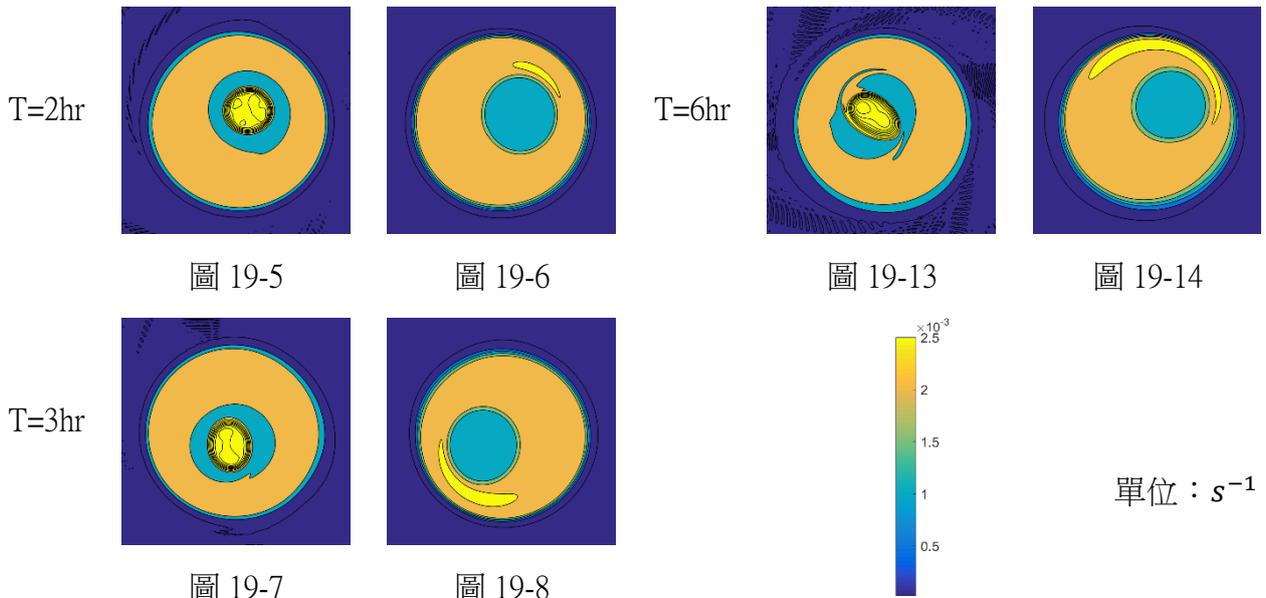


圖 19、T=0hr 至 T=6hr，單、雙眼牆轉動情形之比較

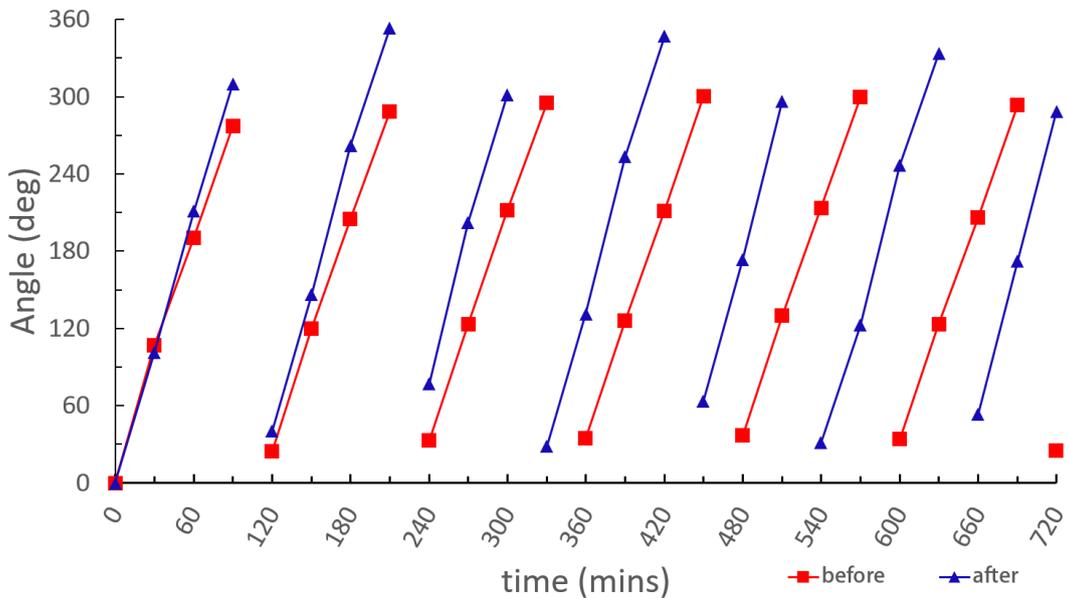


圖 20、植入內眼牆前後 12hr 內的旋轉情形

從(圖 19)的逐時比較可以看到，實驗二中，單、雙眼牆的結構皆屬穩定，變形不明顯。植入的內眼牆會隨著時間被拉伸成橢圓(T=3hr)、三極渦漩(T=4—6hr)。植入後的第一圈週期為 108 分鐘，快於植入前 112 的分鐘；前五圈周期則分別是 118、128 分鐘，皆有隨時間減緩的趨勢。另外，從(圖 20)的角度-時間關係，也可以發現，兩者除了斜率大小(角速率)差異以外，藍線(雙眼牆)的斜率較紅線(單眼牆)不固定，轉折較多，意味著其轉速整體而言大於單眼牆實驗，但也比較複雜不定。

五、 實驗三：雙眼牆初始場實驗

儘管上個實驗結果顯示，雙眼牆與單眼牆的系統，眼區中心相對外眼牆中心的旋轉速率，有明顯差異，我仍不認為這是影響其轉動週期的主要機制。回歸一開始的現象觀察，我們在雷達回波圖中看到的現象，並非如實驗二的系統一樣，眼區與內眼牆同心，而是有相對錯位。因此，在這個實驗中，我們想藉由設計一系列內眼牆中心與眼區中心有相對錯位的初始場，來探討主要影響週期的機制。

本實驗分成兩部分：子實驗 A - C 用來尋找結構穩定、易觀察的初始場，做為第二段模擬雙眼牆的轉動情形的參考。第二階段的子實驗則用來尋找，雙眼牆系統中影響轉動週期的因素。

本實驗的參數，也較實驗一新增了與內眼牆位置、渦度、大小有關的項目，如下所列，並參照(圖 21)：

1. 外眼牆渦度 ζ_R 。
2. 眼區渦度 ζ_r 。
3. 內眼牆渦度 $\zeta_{r'}$ 。
4. 眼牆半徑 R (不包含過渡帶)。
5. 眼區半徑 r (不包含過渡帶)。
6. 內眼牆半徑 r' (不包含過渡帶)。
7. 外眼牆中心與眼區中心錯位距離 Δ 。
8. 外眼牆中心與內眼牆中心錯位距離 Δ' 。

註 1：實驗實際情況中，為保持操縱變因單一，將固定 Δ 或 Δ' 其中一者為 0，故在此不設內眼牆與眼區錯距之參數(其中一者中心與外眼牆中心重疊)。

註 2：「中心」皆為幾何中心。

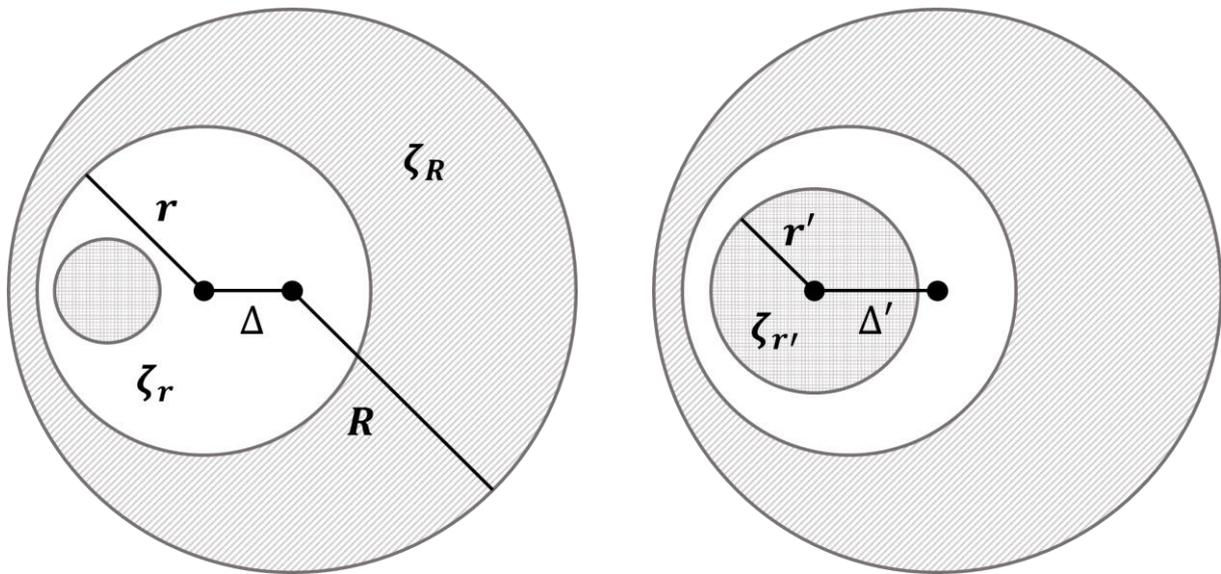


圖 21、實驗三 雙眼牆實驗初始場 參數示意圖

(一) 實驗設計(A - C)

根據實驗一的結果可以推斷，固定 R 的情形下，影響結構穩定性的參數，主要有 ζ_R 、 ζ_r 、 $\zeta_{r'}$ 、 r ，討論起來略微複雜。因此，為簡化問題，我依據實驗一的子實驗 3 結果認定，在 $\zeta_r = 0$ 的條件下能穩定存在的系統，在其它 $\zeta_r > 0$ 的條件下也能穩定存在，並固定 $\zeta_{r'}$ 。這樣一來，只剩下兩個操縱變因要討論，能有效找出適合後續實驗進行的初始場。下(表 4)是各項參數：

操縱變因		ζ_R ($10^{-3}s^{-1}$)	r (km)
子實驗A	A-1	1.5	30
	A-2		40
	A-3		50
	A-4		60
子實驗B	B-1	1.25	30
	B-2		40
	B-3		50
	B-4		60
子實驗C	C-1	1.0	30
	C-2		40
	C-3		50
	C-4		60

模式參數	數值
x, y 計算域	600 km
x, y 格點數	512
x, y 解析度	0.6 km
時步	3 sec
水深	500 m
淺水波波速	$70ms^{-1}$
科氏參數	$5 \times 10^{-5}s^{-1}$
控制變因	數值
R	100km
r'	20km
Δ	10km
Δ'	0km
ζ_r	$0 \times 10^{-3}s^{-1}$
$\zeta_{r'}$	$4.5 \times 10^{-3}s^{-1}$

表 4、子實驗 A - C 實驗變因與模式參數

(二) 實驗結果(A - C)

實驗結果如(圖 22)，可以看到， $T=6hr$ 時， $r = 50km$ 、 $r = 60km$ 的外眼牆已瀕臨破碎或嚴重扭曲，而 $r = 30km$ 的實驗，眼區多出現填塞，不利觀察。因此， $r = 40km$ 較適合後續實驗進行。其中又以 $\zeta_R = 1.0 \times 10^{-3}s^{-1}$ 的時候，內眼牆扭曲變形程度最低。最終，我們選擇 $r = 40km$ 、 $\zeta_R = 1.0 \times 10^{-3}s^{-1}$ 的子實驗 C-2，並考量角度量測方便性，微調 Δ 或 Δ' 至 $20km$ (其中一者為 0)，來做為後續子實驗之設計參考。

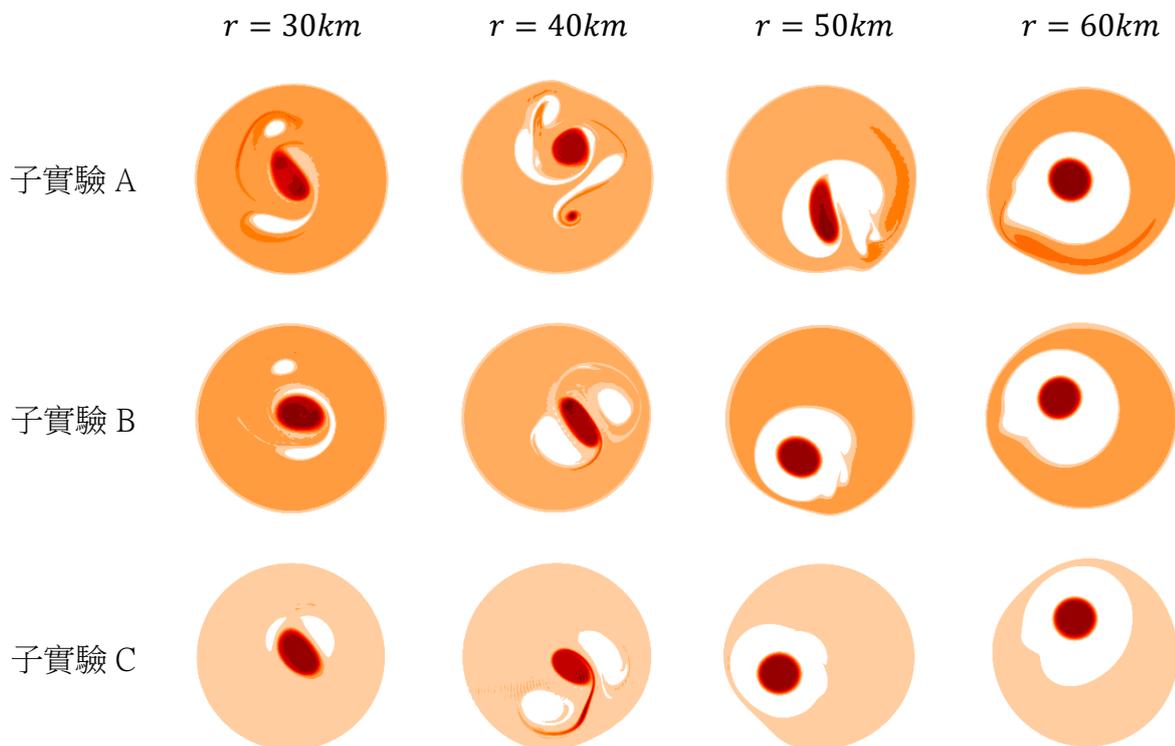


圖 22、 $T=6hr$ 時，所有子實驗的輸出結果

(三) 實驗設計 (1 - 3)

各組子實驗參數如(表 5)所列，模式參數則同上(表 4)。透過子實驗之間互相比較，以找出影響內眼牆滾動週期的因素。

實驗參數	操縱變因					控制變因				
	ζ_R ($10^{-3}s^{-1}$)	r (km)	Δ' (km)	Δ (km)	ζ_r ($10^{-3}s^{-1}$)	ζ_{rr} ($10^{-3}s^{-1}$)	R (km)	r' (km)		
子實驗 1	1-a-1	1.50	30	10	0	0	4.5	100	20	
	1-a-2		40							
	1-a-3		50							
	1-a-4		60							
	1-b-1	1.25	30							
	1-b-2		40							
	1-b-3		50							
	1-b-4		60							
	1-c-1	1.0	30							
	1-c-2		40							
	1-c-3		50							
	1-c-4		60							
子實驗 2	2-a-1	1.0	40	10	10	0	4.5	100	20	
	2-a-2			20						
	2-a-3			30						
	2-b-1			0						20
	2-b-2									30
	2-b-3									30
子實驗 3	3-1	1.0	40	0	20	0	4.5	100	20	
	3-2					0.3				
	3-3					0.5				
	3-4					0.7				

表 5、各組子實驗變因列表

(四) 實驗結果 (1-3)

1. 改變外眼牆渦度 ζ_R

比較 $r = 40km$ 時，不同 ζ_R 的內眼牆滾動週期，可以發現，雖然在實驗一中， ζ_R 是改變眼區轉動週期的最大因素之一，但此實驗的結果在(圖 23)中顯示，不同 ζ_R 的子實驗，斜率幾乎重合，無規則可循。故 ζ_R 在此實驗設定範圍(1.0 - 1.5)內，對於內眼牆中心相對於眼區中心的旋轉週期，影響並不顯著。

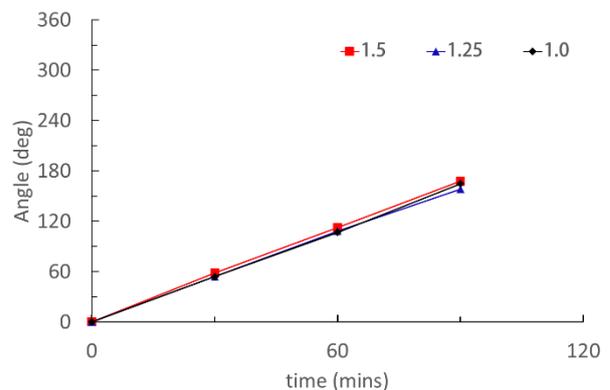


圖 23、 $r = 40km$ 時，改變 ζ_R 實驗結果

註 1：在 $T=90mins$ 以後，眼區受內眼牆拉扯發生變形，難以找出幾何中心，量測角度。

2. 改變眼區半徑 r

從右(圖 24)可以發現，眼區半徑 r 越大，內眼牆滾動週期明顯增大，且滾動週期與 r 在本實驗範圍裡，有接近線性的關係。

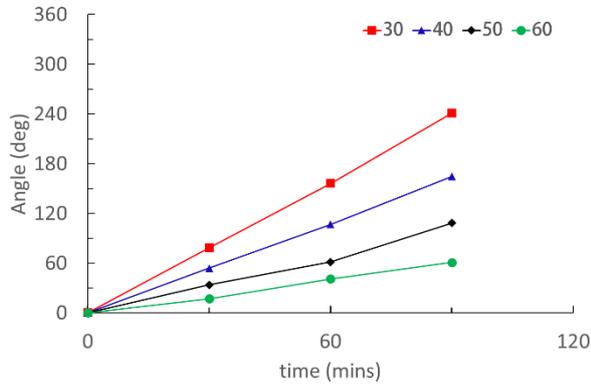


圖 24、 $\zeta_R = 10^{-3} s^{-1}$ 時，不同 r 實驗結果

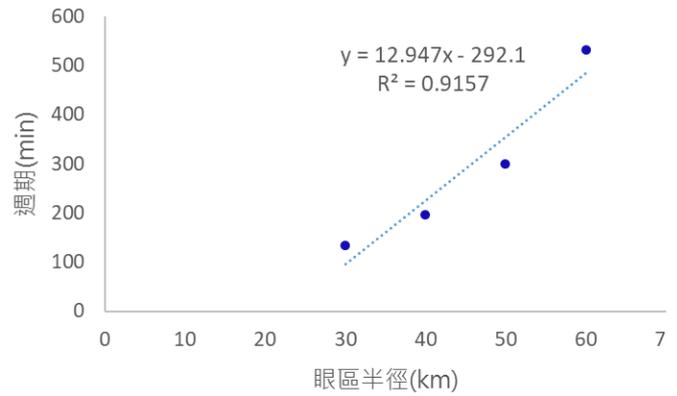


圖 25、週期對眼區半徑 r 回歸分析直線

3. 改變錯位距離 Δ 、 Δ'

(圖 26)、(圖 27)顯示，不同錯位距離 Δ 、 Δ' ，其旋轉週期雖然稍有分歧，但不明顯。其中 $\Delta = 30km$ 的系統的旋轉週期，相較其它子實驗，分歧程度又更高，推測可能是 $\Delta = 30km$ 初始場的內眼牆，和外眼牆渦度部分重合，因而有更複雜的交互作用發生。另外，實驗結果也顯示， Δ 、 Δ' 距離相同時，轉速也差異不大。

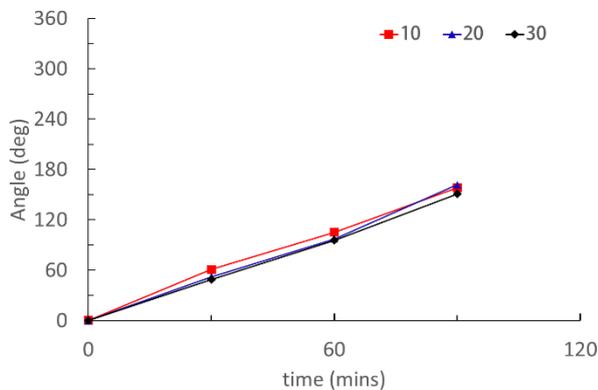


圖 26、改變 Δ' 實驗結果

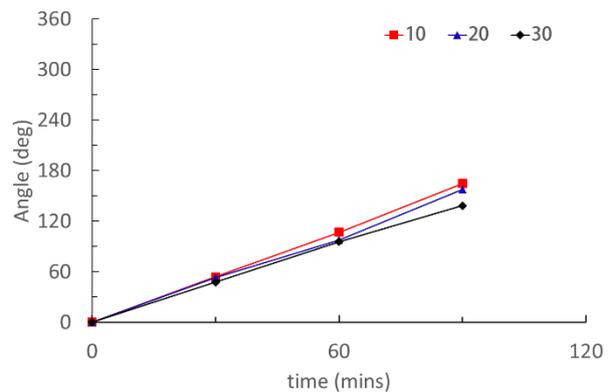


圖 27、改變 Δ 實驗結果

4. 改變眼區渦度 ζ_r

右圖(圖 28)顯示， ζ_r 越大，週期變快。 $\zeta_r = 0$ 、 $\zeta_r = 0.3$ 、 $\zeta_r = 0.5$ ，週期分別是 206、195、184 分鐘。此觀察結果與實驗一的單眼牆轉動實驗相符。

另外，三組子實驗的結構都相當穩定，而在 ζ_r 較高的子實驗中，眼牆與眼區的渦度，會漸漸趨向混合的最終穩定狀態(圖 29)。

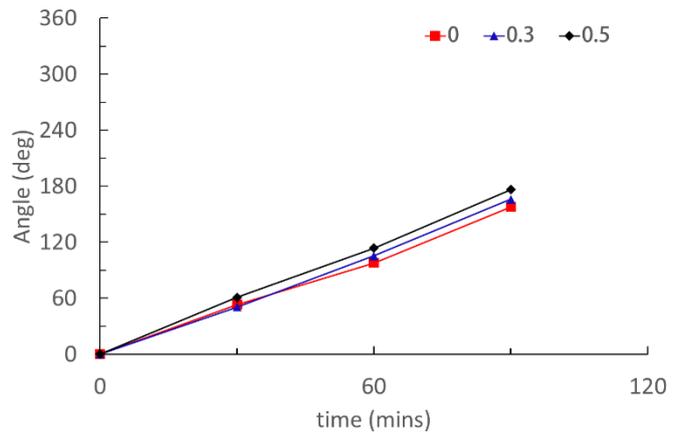


圖 28、改變 ζ_r 實驗結果

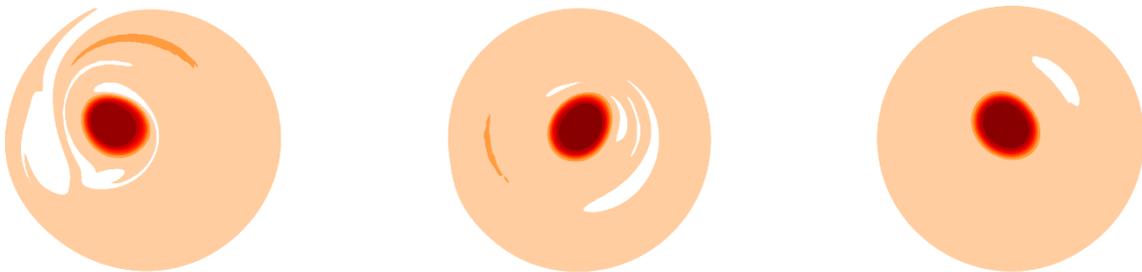


圖 29、由左至右， $T=12\text{hr}$ 時， $\zeta_r = 0$ 、 $\zeta_r = 0.3$ 、 $\zeta_r = 0.5$ 的子實驗結果

六、實驗四：模擬杜鵑颱風

(一) 實驗設計

先前觀察實際個案時，我選定了杜鵑颱風做為主要研究對象。在本實驗中，我將依照可得的雷達回波資料，造出類似於杜鵑颱風的初始場，觀察轉動週期是否與杜鵑颱風相似。我也保留了杜鵑颱風為第一類或第二類滾動的可能性，設計了兩組子實驗，分別把雷達回波觀測到的內眼牆錯距，指定為 Δ 、 Δ' 。以下(表 6)是本實驗參數：

實驗變因	Δ' (km)	Δ (km)	ζ_R ($10^{-3} s^{-1}$)	ζ_r ($10^{-3} s^{-1}$)	$\zeta_{r'}$ ($10^{-3} s^{-1}$)	R (km)	r (km)	r' (km)
子實驗1	15	0	0.8	0.4	4.5	120	50	20
子實驗2	0	15						

表 6、實驗四參數

其中，與距離有關的參數，是在雷達回波圖上量測；與渦度有關的參數，則是按照杜鵑颱風當時測得風速來估算。模式參數的部分，則與實驗三相同。

(二) 實驗結果

三者週期比較如(表 7)：

量測項目	杜鵑颱風	子實驗一	子實驗二
旋轉週期(min)	213	227	233

三者旋轉週期差距並不大，因此可以總結，與現實情況相符的雙眼牆颱風內眼滾動行為，可以在淺水模式中被模擬，並且影響

表 7、實際個案與數值實驗 旋轉週期比較

實際颱風個案旋轉週期的主要因素，已經幾乎可以由上述 8 個實驗參數所決定。

伍、討論

- 一、實驗的初始場直徑 100 至 200km，但雙眼牆颱風的眼區以外仍為暴風圈，渦度風速並非為零。單眼牆旋轉實驗模擬的是眼區內的旋轉情形，尚未完整模擬到整個颱風，僅模擬眼區附近以及部分暴風圈之現象。
- 二、造成雷達回波圖上看到的滾動現象的可能原因很多，我們看到的內外眼牆的相對運動，也有可能受到周圍風場或大氣狀態的影響。
- 三、有些參數，如 ζ_R 、 ζ_r ，在單眼牆轉動實驗裡，影響旋轉週期顯著，但在雙眼牆實驗中，則影響不明顯。可能與觀察總時距有關。觀察總時間不一，不同參數造成的影響程度也會有非線性的變化。

陸、結論

在對 4 個颱風個案的觀察中，我把我觀察到的滾動現象分成兩類。第一類是內外眼牆中心確實有錯位，並且有旋轉的情形。而第一類滾動也是我比較想進一步探討的。我也針對這一類滾動行為的機制，提出兩種猜測。一是眼區的繞轉，形成的內外眼牆相對運動；二是內眼牆在眼區內，受到其中正渦度的影響，而被帶動旋轉。而透過對第一類滾動個案——杜鵑颱風的觀察，我們確定了雙眼牆颱風之內眼牆在外眼牆內滾動的現象，以及我們的量測工具與分析方法。

為了撇除真實個案複雜的周圍影響因素，於是開始數值實驗，一方面解決個案過少的問題，一方面簡化系統，方便從我們列出的變因之中找到控制週期的因素。由於第一類滾動牽涉到的垂直運動與熱力因素不顯著，所以我選用週期性淺水模式(periodic shallow water model, pswm)進行數值實驗。

我先設計單眼牆旋轉實驗，以模擬單獨外眼牆的自轉情形，以及找到結構穩定的初始場，方便日後在其中植入內眼牆，模擬雙眼牆的情形。

在單眼牆系統的實驗一中，我們整理出以下結論：

- 一、錯位距離 Δ 與初期旋轉週期無關，可推測此一系統的轉動行為很接近剛體。
- 二、眼區半徑 r 越大，近中心渦度總和相對越小，週期越長，結構也越不穩定。
- 三、眼區半徑 r 大的實驗，眼區傾向形成三角形；反之傾向形成橢圓形。
- 四、 ζ_r 越大，旋轉週期略短，且結構也越穩定。
- 五、 ζ_R 是直接與動力有關的因素，影響週期最長。

因此，可以從實驗一歸納出， ζ_R 由於是直接與動力有關的因素，主要影響週期。 ζ_r 與 Δ 在此一旋轉行為近似剛體的系統中，對週期的影響不明顯，反而對結構影響非常大。而眼區半徑 r 同時影響週期與結構穩定性。

在得出以上結果後，我微調實驗一的子實驗 2-2 初始場，植入一渦度為 4.5 倍 ζ_R 的內眼牆，與植入前的結果做對照。植入後整體週期變快，有可能是因為新增的渦度帶給旋轉系統更多的動力以及更高的近中心風速。而時快時慢的旋轉週期，推測是被拉伸成橢圓形或三極渦漩的內眼牆，造成更不均勻的風力結構所致。

從模擬雙眼牆的實驗三，先是發現 $r = 40km$ ， $\zeta_R = 1.0 \times 10^{-3} s^{-1}$ 的初始場，外眼牆不容易破碎，眼區也不易填塞，適合作為後續子實驗的初始場設計參考。而在後續的子實驗中，得出以下結論：

- 一、 ζ_R 對雙眼牆系統旋轉週期的影響，遠不及其在單眼牆實驗中之顯著。 ζ_R 雖然影響眼區相對於外眼牆的轉速甚鉅，但不是影響內眼牆相對眼區旋轉的主要機制。
- 二、眼區半徑 r 越大，內眼牆滾動週期明顯增大，且具有接近線性的關係。推測與渦度總和改變有關。
- 三、 Δ 、 Δ' 造成的轉速差異小，並且 Δ 、 Δ' 對旋轉週期的影響程度相同，與實驗一的假說

相符，即此轉動行為在短時間內接近剛體轉動。

四、 ζ_r 增加，轉動週期越短，與實驗一結果相符，也代表眼區內的正渦度帶動，確實是內眼牆旋轉的主要機制之一。

最後，在模擬杜鵑颱風的實驗四中，我依照雷達回波圖即颱風資料庫的資料，一一利用量測或是估算，填入我先前定義的 8 個參數，進行模擬。實驗結果也顯示，模擬的雙眼牆系統，確實有與杜鵑颱風接近的轉動週期。因此，可以做出以下結論：

- 一、雙眼牆颱風的內眼滾動現象，確實可以在淺水模式中重現。也代表影響此現象的機制，很可能是水平動力造成。
- 二、無論錯位距離參數是設在 Δ 、 Δ' ，旋轉週期並無顯著影響。綜合實驗三改變 ζ_r 的實驗結果來看，眼區內的正渦度以及近中心渦度總和，可能才是影響轉動週期的主要因素，與分別的錯位距離關係不大。
- 三、在控制 8 個參數的情況下，即可重現相似的旋轉週期。因此，可以推斷，影響其旋轉都其的主要變因，包含在這些設定的參數中。顯而易見地，其中影響週期最顯著的 ζ_r 、 r ，便是影響雙眼牆颱風內眼滾動週期的主要因素。

柒、參考資料

張保亮、洪景山（2005）。似擺線路徑颱風之近中心風力分布特徵分析。

颱風資料庫，取自：<https://rdc28.cwb.gov.tw/>

【評語】 180004

本研究探討影響雙眼牆颱風內眼牆滾動週期的因素，從個案的觀察分析，找出個案的內眼牆滾動週期，並以淺水波模式進行實驗，實驗分析解果確實可以解釋部分雙眼牆颱風內眼牆滾動的機制。動機與研究方法都很合理，也有抓到問題的重點。若能在相關文獻之收集整理以及淺水波研究此問題的限制方面多一些探討，作品會更為出色。