

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科

第二名

051913

雙眼牆颱風的內眼滾動

學校名稱：國立臺灣師範大學附屬高級中學

作者： 高二 臧逸新	指導老師： 王靖華
---------------	--------------

關鍵詞：雙眼牆、數值模式

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，其內眼牆相對於外眼牆內側有滾動的現象，故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。先在中空甜甜圈狀的初始場模擬單一眼牆的旋轉行為，發現眼牆渦度值、眼區半徑為影響旋轉週期的主因。而眼區與眼牆渦度比、眼區半徑、眼區與眼牆錯距則影響轉速與結構上的穩定性。我們在轉速及結構穩定的中空圓盤狀初始場中植入小型圓形渦度高區，以模擬雙眼牆颱風眼區旋轉情形，發現植入前後旋轉週期與結構皆有差異，並以杜鵑颱風的風速與結構進行數值模擬。

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、改變給定的初始場，進行模擬實驗，觀察其結果並分析影響轉動週期的變因與週期之數學關係。

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

我們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。於是我們開始著手在 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，我們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

我們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。而我們經 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，我們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：

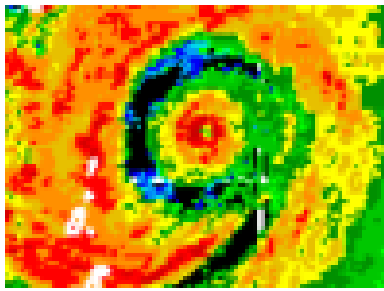


圖 1-1

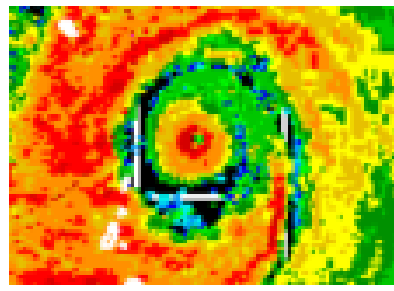


圖 1-2

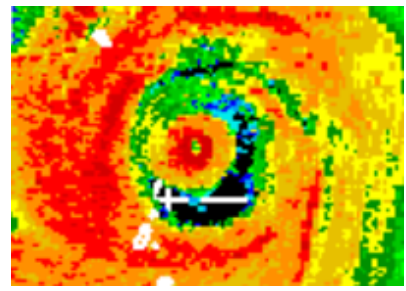


圖 1-3

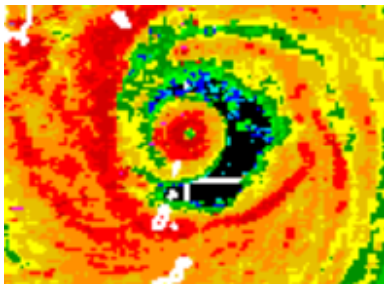


圖 1-4

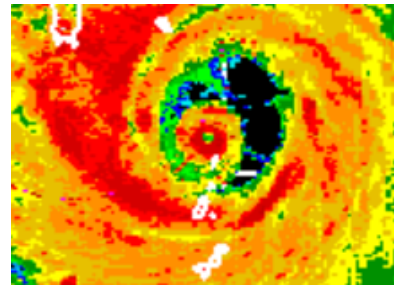


圖 1-5

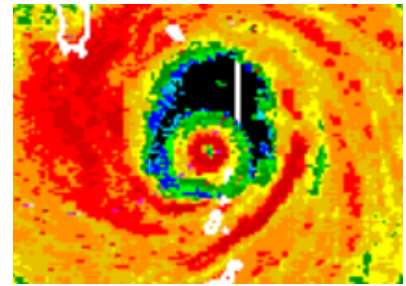


圖 1-6

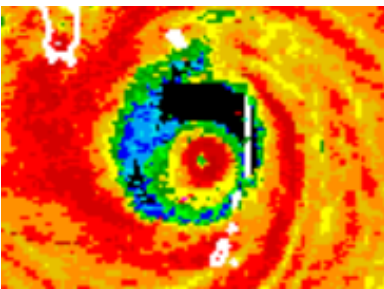


圖 1-7

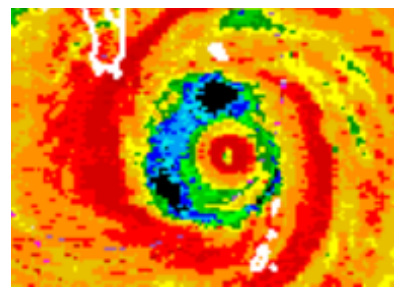


圖 1-8



色標 (單位：dBZ)

從 (圖 1-1) 至 (圖 1-8) 共 4 小時的連續變化，我們可以看到，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。我們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，我們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：

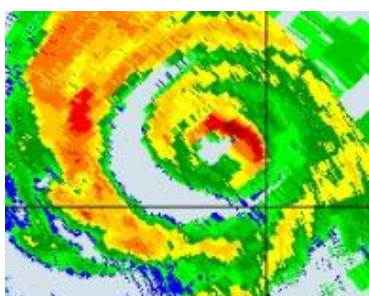


圖 2-1

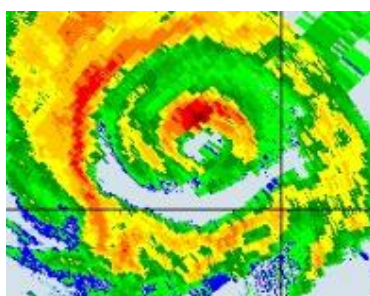


圖 2-2

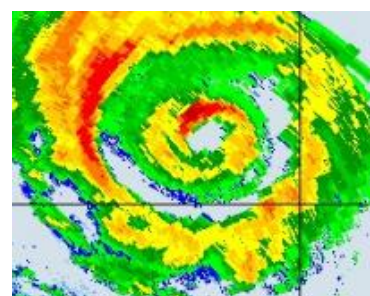


圖 2-3

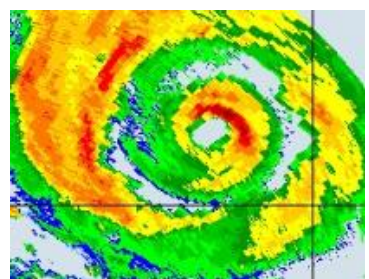


圖 2-4

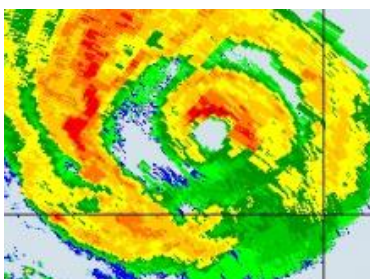


圖 2-5



圖 2-6



圖 2-7

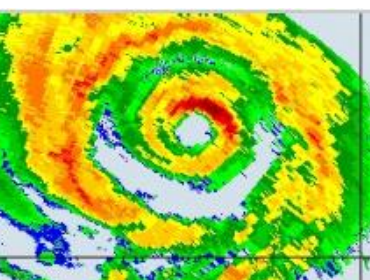
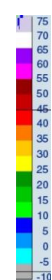


圖 2-8



色標 (單位：dBZ)

從 (圖 2-1) 至 (圖 2-8) 共 4 小時的連續變化，我們可以看到，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，也是我們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)」，我們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。我們首先要定義角度資料的測量方法，以杜鵑颱風為例，我們可以循以下步驟，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。

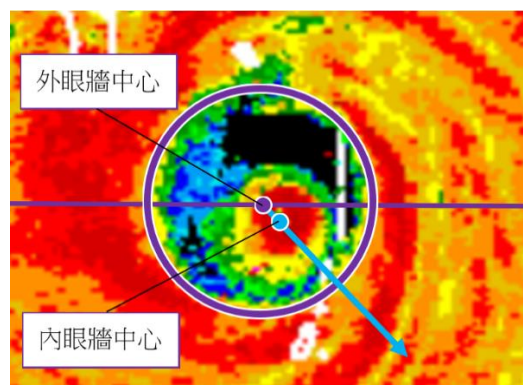


圖 3、內外眼牆連線偏角量測示意圖

以上作圖及量測方法，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，我們便可以利用 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

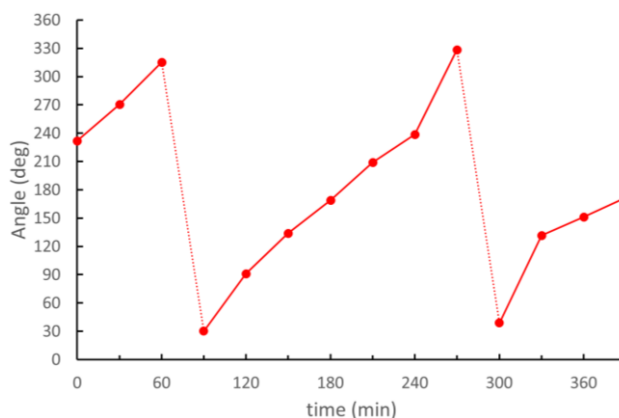


圖 4、內外眼牆連線偏角之角度-時間圖

製作角度-時間圖，可以方便比較個案之的旋轉速度，以及單一個案的轉速變化。雖然在此僅杜鵑颱風一個個案，無從比較，但此法仍會大量為後續之數值實驗結果分析所用。

二、利用週期性淺水模式進行數值實驗

週期性淺水模式 (periodic shallow water model)，是一種可用於流體水平運動遠大於垂直運動的系統的數值模式，在實驗中，使用單層的淺水模式代表自由大氣。我們在與指導老師討論過後，認為我們所要模擬的系統中，較不看重大氣垂直運動與其熱力過程，因此選用週期性淺水模式進行我們的數值實驗，即可幫助我們從動力上探討影響內眼牆滾動週期的因素。

(一)實驗發想

我們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，所以我們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。

(二)實驗變因-中空圓盤狀初始渦度場

我們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，如(圖 5)，並挑出幾項我們認為可能影響轉動週期或結構穩定性的變因，參考(圖 6)之註解所示，如下：

1. 眼牆渦度 $Zeta_0$ 的數值。
2. 眼區渦度 $Zeta_1$ 與眼牆部分渦度 $Zeta_0$ 之比值 $rZeta$ 。
3. 眼牆半徑 R_1 (不包含渦度過渡帶)。
4. 眼區半徑 R_2 (不包含渦度過渡帶)。
5. R_1 、 R_2 之比值 rR 。

6. 眼牆中心與眼區中心錯位距離 R_o 。

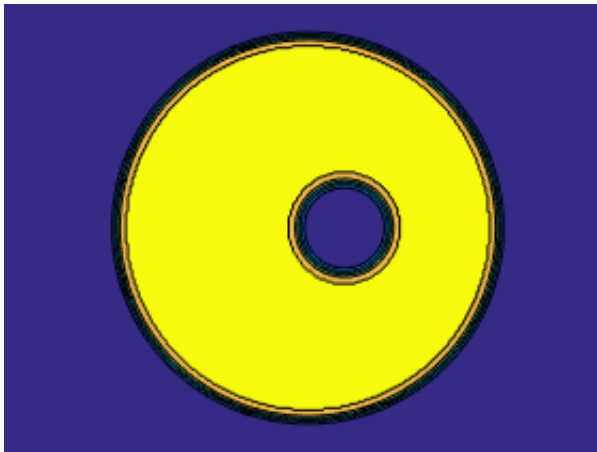


圖 5、中空圓盤狀初始渦度場示意圖

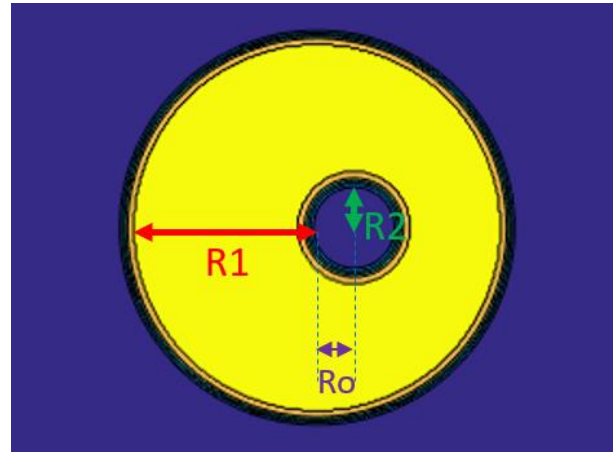


圖 6、中空圓盤狀初始渦度場實驗參數註解

(三)實驗設計與結果

1. 改變錯位距離 R_o

我們設計了三組實驗，控制變因如(表 2)所示，操縱變因如(表 3)所示：

控制變因	量值
R1	50km
R2	10km
rR	0.2
Zeta0	$2.5 \times 10^{-3} s^{-1}$
rZeta	0.1

表 2、實驗 1 控制變因

項目	操縱變因	量值
實驗 1-1		10km
實驗 1-2	R_o	20km
實驗 1-3		30km

表 3、實驗 1 操縱變因

我們取 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_o 之實驗之結果作圖如(圖 7)。

我們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 R_o 值影響，而在第三圈之後， R_o 值大的系統先開始變形，變形前後的差異，以實驗 1-3 為例，請見(圖 8)、(圖 9)。而我們也可以從(圖 7)歸納出，系統變形愈嚴重，自轉速度越慢。所以 R_o 值最大的實驗 1-3，轉速最先開始減慢，減慢幅度也最大。但大致上看來，不同中空圓盤狀渦度場的 R_o 值，不造成轉速差異，且 R_o 值 30 在公里以內時，此一系統皆能在 12 小時內保持不破碎。

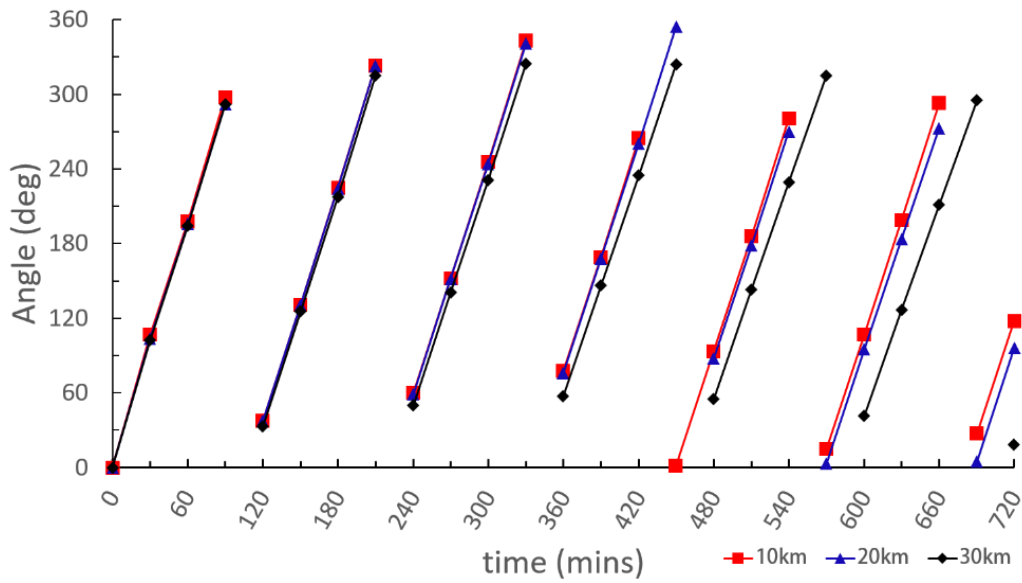


圖 7、不同錯位距離 Ro 值之 12 小時內實驗結果 角度-時間圖

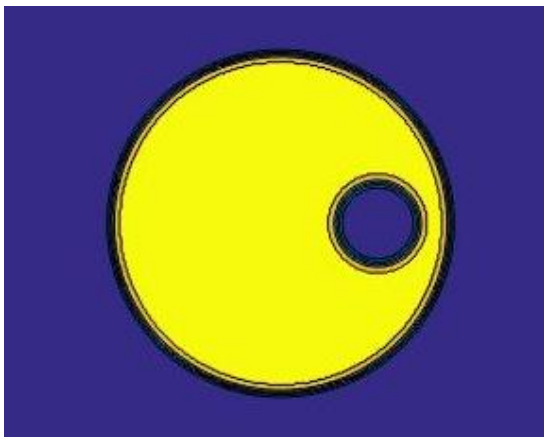


圖 8、實驗 1-3 給定之初始場

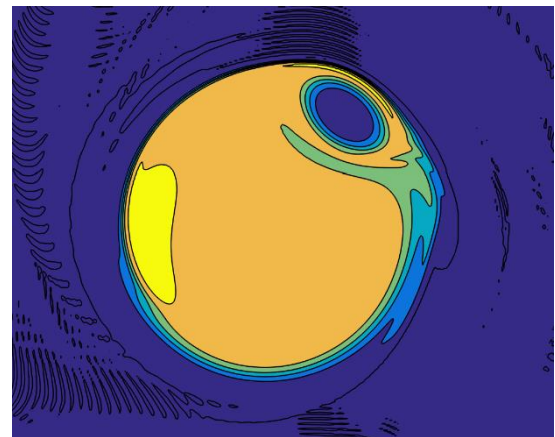


圖 9、實驗 1-3 在 360 分鐘後系統略為變形

2. 改變眼區半徑 R2

我們設計了三組實驗，控制變因如(表 4)所示，操縱變因如(表 5)所示：

控制變因	量值
R1	50km
Ro	10km
Zeta0	$2.5 \times 10^{-3} s^{-1}$
rZeta	0.1

表 4、實驗 2 控制變因

項目	操縱變因	量值
實驗 2-1		10km
實驗 2-2	R2	20km
實驗 2-3		30km

表 5、實驗 2 操縱變因

我們取 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 R2 之實驗之結果作圖如(圖 10)。

我們先定義「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：

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

我們可以從實驗結果看到，在實驗的一開始，就可以看出三組實驗的第一圈週期有明顯的分別。實驗 2-1、實驗 2-2、實驗 2-3 的第一圈週期分別為 109、120、146 分鐘。而在 360 分鐘時，眼區半徑 30 公里的實驗 2-3，結構就出現破碎，以致無法找出眼區中心。破碎情形如(圖 11)、(圖 12)所示。此外，我們還發現實驗 2-2 在實驗進行一段時間後，圓形的渦度眼區，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長，請見(圖 13)、(圖 14)。

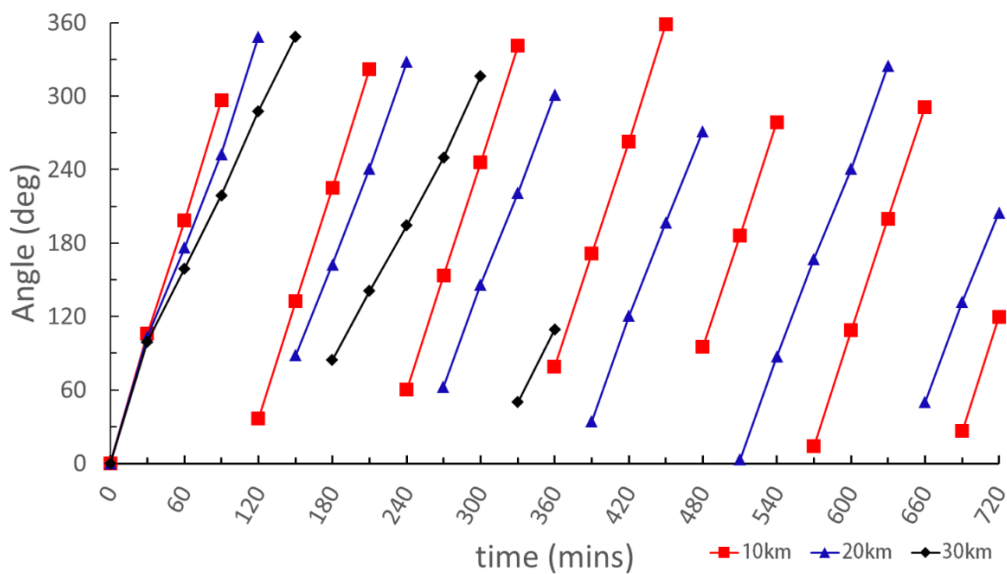


圖 10、不同中空半徑 R_2 值之 12 小時內實驗結果 角度-時間圖

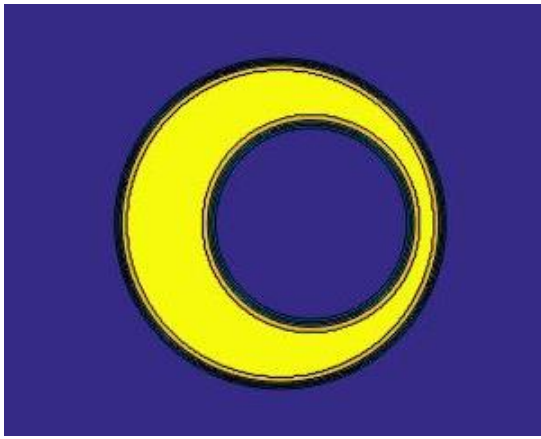


圖 11、實驗 2-3 給定之初始場

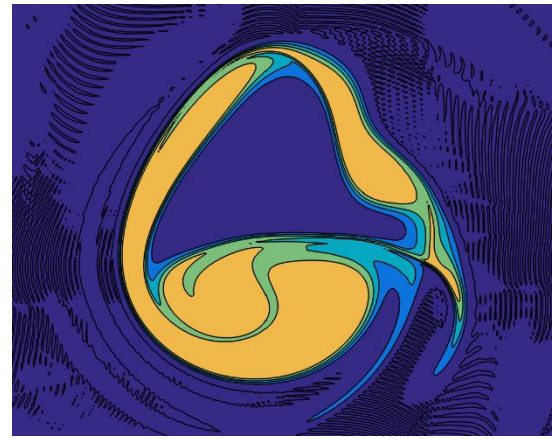


圖 12、實驗 2-3 在 360 分鐘後系統破碎情形

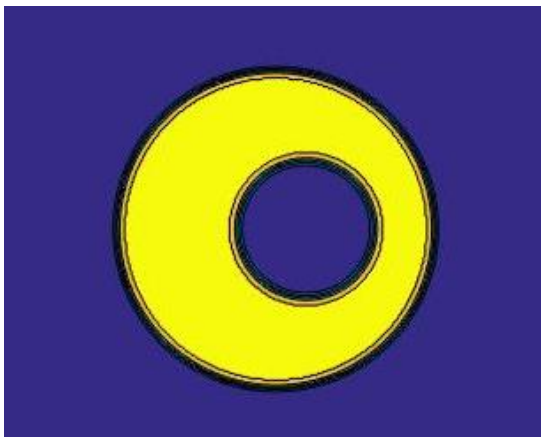


圖 13、實驗 2-2 給定之初始場

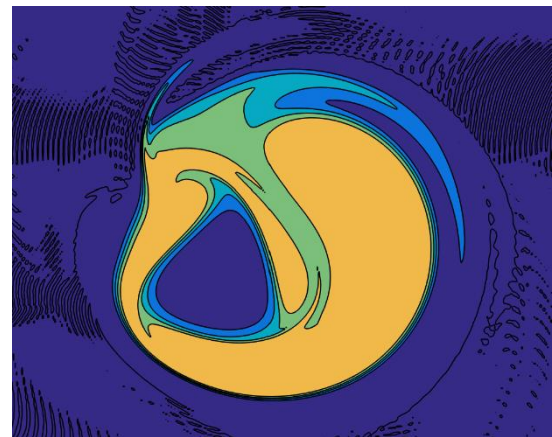


圖 14、實驗 2-2 在 12 小時後的結果

3. 改變眼區與眼牆部分渦度比值 rZeta

我們設計了三組不同 rZeta 值的實驗，控制變因如(表 6)所示，操縱變因如(表 7)所示：

控制變因	量值
R1	50km
R2	20km
rR	0.4
Zeta0	$2.5 \times 10^{-3} s^{-1}$
Ro	10km

表 6、實驗 3 控制變因

項目	操縱變因	量值
實驗 3-1	rZeta	0.1
實驗 3-2		0.3
實驗 3-3		0.5

表 7、實驗 3 操縱變因

實驗結果如(圖 15)所示，我們可以看到三組不同 rZeta 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。實驗 3-1、實驗 3-2、實驗 3-3 的第一圈週期，分別是 120、117、112 分鐘。而前五圈平均週期則是 128、123、118 分鐘，週期時間有略減慢。總體而

言， $rZeta$ 值越大，轉速越慢。

而結構上， $rZeta$ 較大的實驗，結構也較穩固，且 $rZeta=0.3$ 、 0.5 的實驗，也未如實驗 3-1 一樣，眼區部分形成三角形，反而是呈橢圓形。三組實驗之初始場與 12hr 的結果比較，請見(圖 16)。

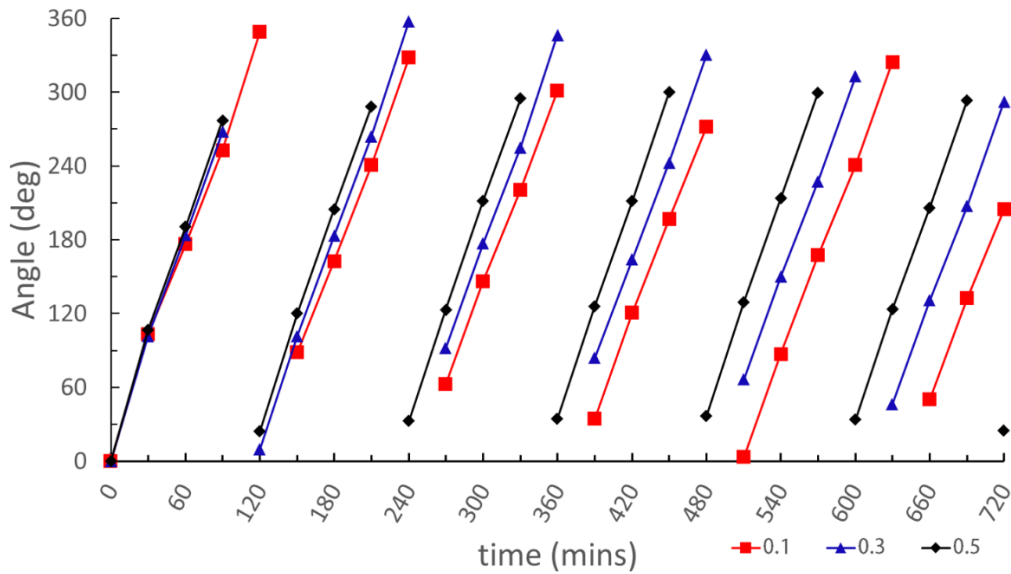


圖 15、不同內外渦度比值 $rZeta$ 之 12 小時內實驗結果 角度-時間圖

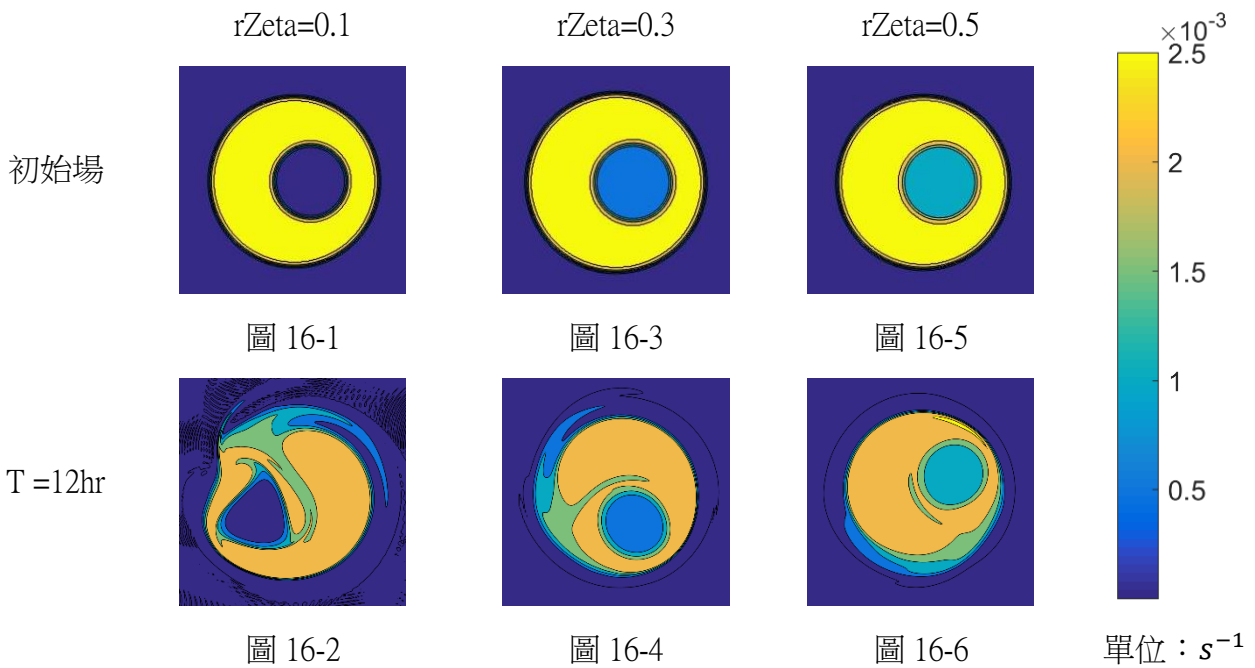


圖 16、不同 $rZeta$ 值的實驗，於實驗前與實驗第 12hr 之比較

4. 改變眼牆部份初始給定渦度 Zeta0

我們設計了三組不同 Zeta0 值的實驗，控制變因如(表 8)所示，操縱變因如(表 9)所示：

控制變因	量值
R1	50km
R2	10km
rR	0.2
R0	10km
rZeta	0.1

表 8、實驗 4 控制變因

項目	操縱變因	量值
實驗 4-1	Zeta0	$2.5 \times 10^{-3} s^{-1}$
實驗 4-2		$2.0 \times 10^{-3} s^{-1}$
實驗 4-3		$1.6 \times 10^{-3} s^{-1}$

表 9、實驗 4 操縱變因

實驗結果請見(圖 17)，我們可以發現 Zeta0 與旋轉週期有非常明顯的關係。三組實驗的第一圈週期，分別是 160、131、109 分鐘。可見直接影響動力的 Zeta0 是影響此系統轉速的主因之一。

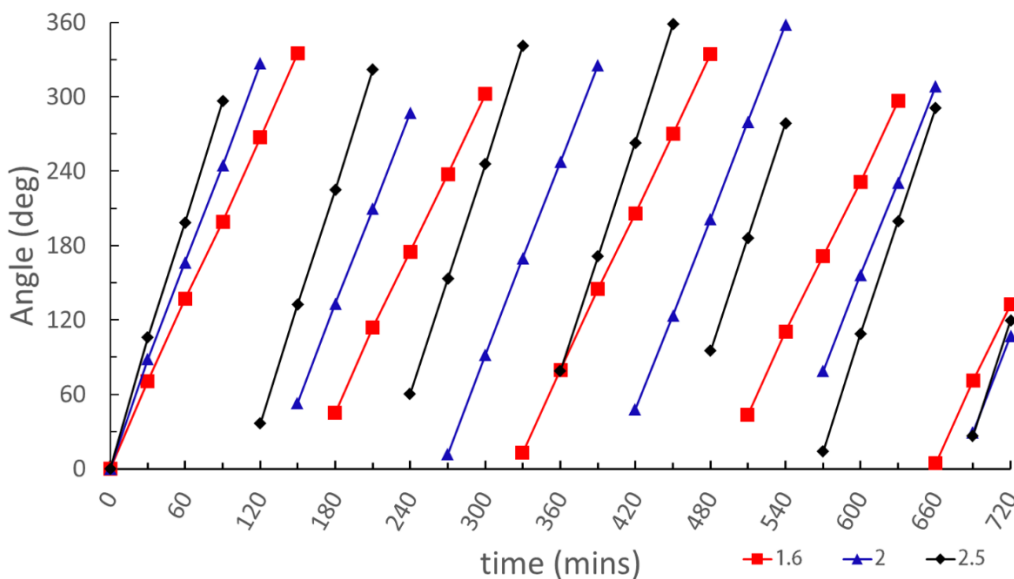


圖 17、不同給定之圓盤初始渦度 Zeta0 之 12 小時內實驗結果 角度-時間圖

做完一系列中空圓盤狀初始場實驗後，我們為了更接近雙眼牆颱風的真實情況，以及驗證第一個猜想，我們又設計了一系列實驗。初始場的型態，大致上是在中空圓盤中植入一小形圓形渦度場，目的有二：模擬內眼牆，以及比較植入小型圓形渦度場前後的差異。

(四)實驗變因-中空圓盤狀初始場中植入小型圓形初始渦度場

進行實驗之前，我們找出了幾個重要、可控制的實驗參數。中空圓盤植入小型圓形初始渦度場實驗示意圖與參數註解皆見(圖 18)，如下：

1. 圓盤部分渦度 $Zeta_0$ 的數值。
2. 眼區渦度 $Zeta_1$ 與外眼牆部分渦度 $Zeta_0$ 之比值 $rZeta$ 。
3. 植入之內眼牆渦度 $Zeta_2$ 的數值。
4. $Zeta_2$ 與 $Zeta_0$ 之比值 $rZeta'$ 。
5. 外眼牆半徑 R_1 (不包含渦度過渡帶)。
6. R_1 、眼區半徑 R_2 之比值 rR 。
7. R_2 、植入之內眼牆半徑 R_3 之比值 rR' 。
8. 外眼牆中心與中空半徑中心錯位距離 Ro 。
9. 內眼牆中心與中空半徑中心錯位距離 Ro' 。

註 1：(圖 18) Ro 恰等於 Ro' 。

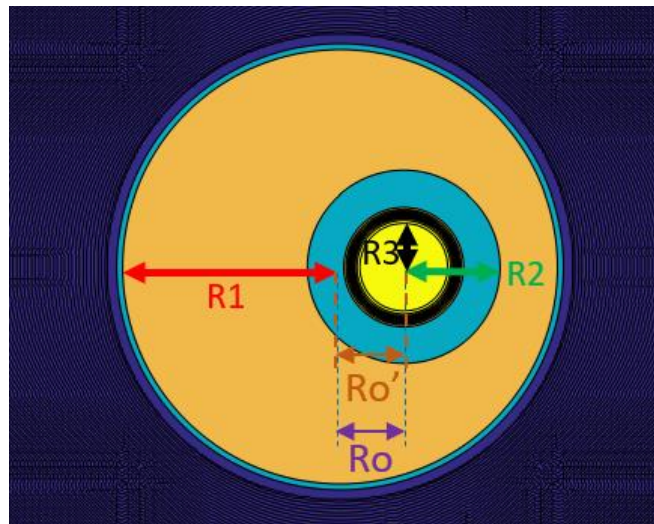


圖 18、中空圓盤狀初始場植入小型圓形初始渦度場-實驗參數註解

(五)實驗過程與結果

1. 比較實驗 3-3 植入小型圓形前後差異

實驗 3-3 的結果顯示， $rZeta=0.5$ 時，此旋轉系統結構在 12 小時內皆相當穩定，且 $R_2=20km$ 足夠讓我們植入小型圓形渦度高區，模擬雙眼牆情形，並比較有無植入的差異。為讓風速剖面圖(圖 19)盡可能貼近真實颱風，我們把實驗 5-1 的 $rZeta'$ 值設為 4。另外，我們讓內眼牆與眼區部分同心， $Ro=Ro'$ 。其餘參數皆與實驗 3-3 無異。

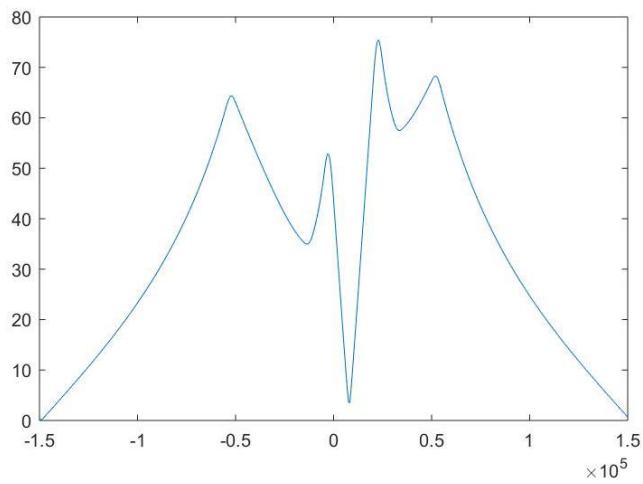
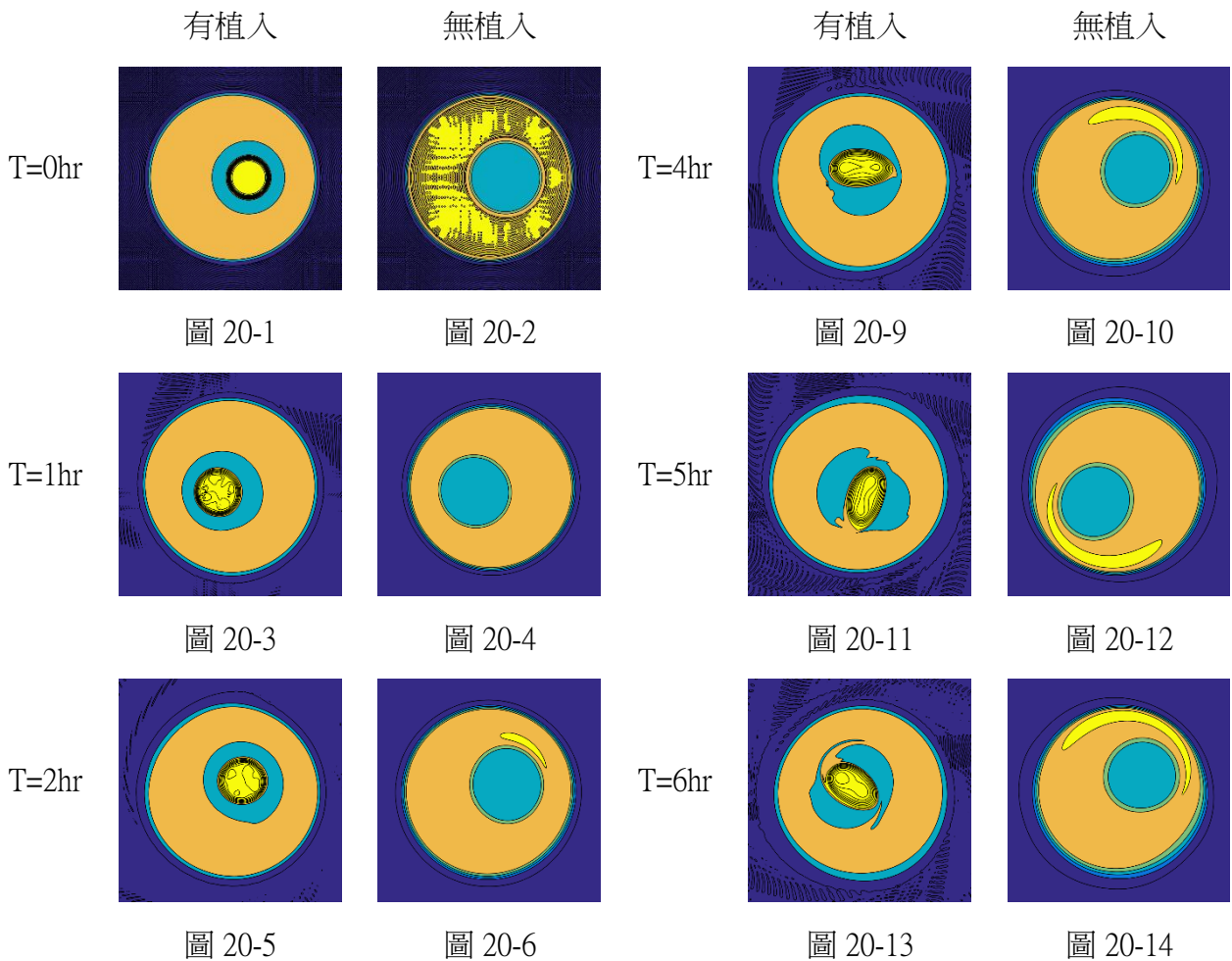


圖 19、實驗 5-1 風速剖面圖(縱軸單位：m/s)

我們比較從 0hr 到 6hr 的每小時實驗結果(圖 20)以及 12 小時內旋轉週期差異(圖 21)：



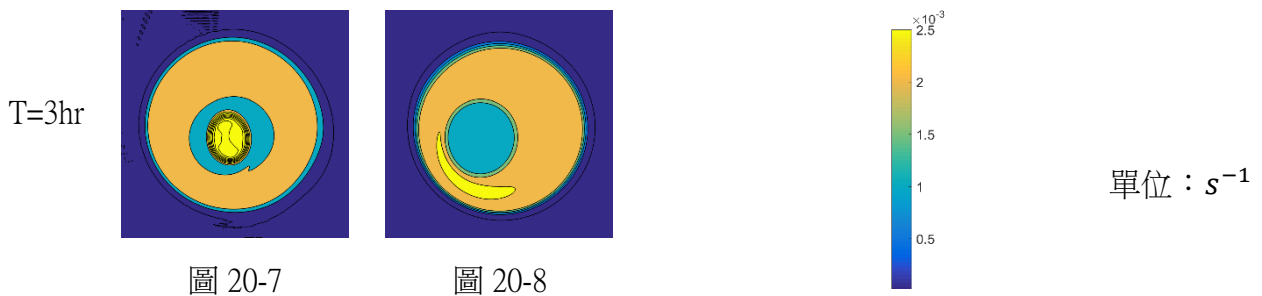


圖 20、T=0hr 至 T=6hr 有無植入小型圓形之比較

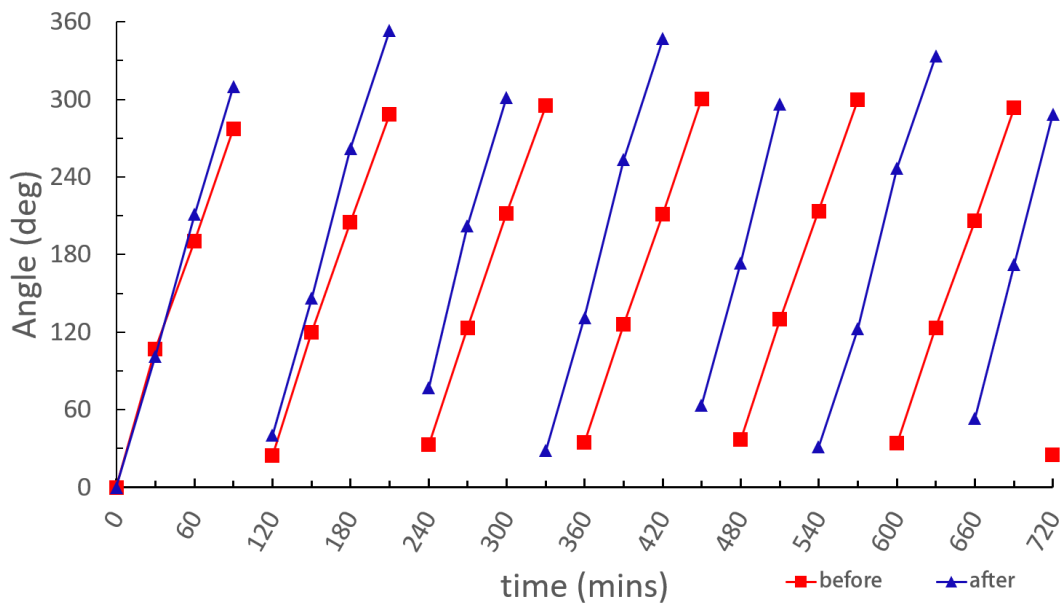


圖 21、有無植入內眼牆之 12hr 內旋轉情形

結構上看來，植入前後的結構皆屬穩定，植入後的內眼牆會隨著時間被拉伸成橢圓。植入前的第一圈週期為 112 分鐘，慢於植入後的 108 分鐘。而我們也觀察到植入前的轉速相較於植入後時快時慢的旋轉為穩定。

伍、討論

- 一、中空圓盤狀系統實驗的初始場直徑 100km，但雙眼牆颱風的眼區以外仍為暴風圈，渦度風速並非為零。中空圓盤實驗模擬的是眼區內的旋轉情形，尚未模擬到整個颱風。
- 二、造成我們在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、在進行完在中空圓盤狀系統內植入渦度高區的更多實驗後，我們傾向於建立一個條件與杜鵑颱風相近的初始場，並觀察是否得到相近的轉動週期。如果否，便探討其間差異。

陸、結論

在對 4 個颱風個案的觀察中，我們把我們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們比較想進一步探討的。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。

我們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奧的垂直運動與熱力因素不顯著，所以我們選用週期性淺水模式(periodic shallow water model, pswm)進行我們的數值實驗。

我們先設計中空圓盤狀渦度場，以模擬單獨不對稱外眼牆的自轉情形，以及找到結構穩定的中空圓盤，方便日後在其中植入小型圓形渦度高區，模擬雙眼牆的情形。

在中空圓盤狀系統的實驗中，我們整理出以下結論：

- 一、錯位距離 R_0 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_2 影響週期甚鉅。 R_2 越大，旋轉週期越長，結構也越不穩定。
- 三、眼區半徑 R_2 大的實驗，眼區傾向形成三角形；反之傾向形成橢圓形。
- 四、眼區與眼牆部分渦度比值 $rZeta$ 越大，旋轉週期略短，結構也越穩定。
- 五、與動力有關的眼牆渦度 $Zeta_0$ 大幅影響轉速，對結構穩定性影響甚小。

因此，我們歸納出， $Zeta_0$ 是直接與動力有關的因素，主要影響週期。 $rZeta$ 與 R_0 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_2 同時影響週期與結構穩定性。

在得出以上結果後，我們選用實驗 3-3，植入一渦度為四倍 $Zeta_0$ 的小型圓形渦度高區，

與實驗 3-3 做對照。我們發現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所致。而時快時慢的旋轉週期，推測是被拉伸成橢圓形的內眼牆，造成更不均勻的風力結構所致。

柒、參考資料

1. 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。
2. 颱風資料庫，取自：<https://rdc28.cwb.gov.tw/>

【評語】 051913

本研究先分析颱風雷達回波影像圖，清楚呈現雙眼牆颱風之內眼牆相對於外眼牆的滾動運行現象，進而以淺水數值模式模擬探討影響此滾動運行週期及影響此現象轉速與結構之穩定性之因素。作者研究雙眼颱風內外眼的相對運動，並探其原因。動機明確，對颱風雷達回波圖觀察細膩，將模擬結果作有系統之呈現。建議應加強相關研究文獻之收集與整理；強化實驗結果之討論，內容論述特別是討論與結論應做更有邏輯之呈現。建議對以下所列問題再多加說明，可以提升本研究報告之品質：

1. 雙眼牆颱風之生成機制、內部構造及內部氣流運行狀況。
2. 週期性淺水模式。
3. 模擬眼牆運動之控制變因之一，渦度場之定義及數值意義。

若能加深討論實驗結果，並強調本研究之可能實用性，則更能彰顯本研究之價值。

摘要

- 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。我們在本研究中分析其旋轉之週期，時間尺度約3至4小時。
- 進行淺水模式模擬旋轉現象，結果顯示：外眼牆渦度值、內眼牆半徑為影響旋轉週期的主因；內眼牆渦度、內眼牆與外眼牆的錯置距離，則影響不顯著。
- 植入小形渦度區於內眼牆，則渦旋旋轉週期與結構皆產生明顯差異。
- 數值模式模擬雙眼牆颱風內眼牆旋轉週期與觀測數值大致相符。

壹、前言

我們發現有些雙眼牆風的內眼牆，相對於外眼牆有旋轉的現象，且旋轉週期不一。張與洪(2006)對此一現象的解釋，認為是颱風中心的渦旋受垂直風切產生水平錯置，因而內眼牆沿外眼牆旋轉。本研究以非線性數值模擬量化探討此水平錯置所產生的旋轉現象。主要工作如下：

- 從個案的觀察，找出個案的內眼牆旋轉週期。
- 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。

貳、研究方法

颱風個案研究

以氣象局雷達圖
選定個案

未來目標：
模擬真實個案

數值模擬實驗

建立初始場

淺水模式
數值模擬實驗

結果分析

觀測與模擬圖比對

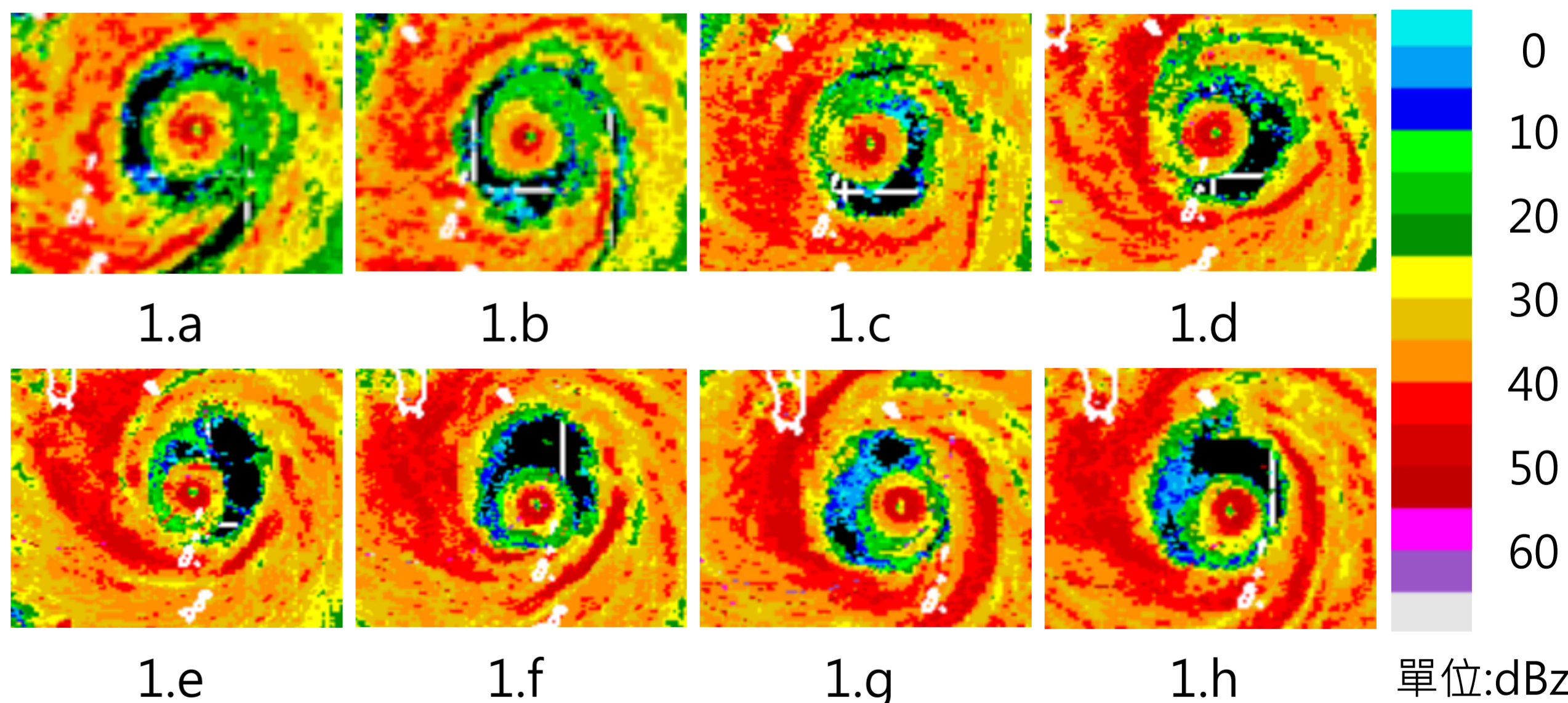
計算旋轉週期

參、研究結果

杜鵑(Dujuan,2003)颱風內眼牆旋轉之現象觀察

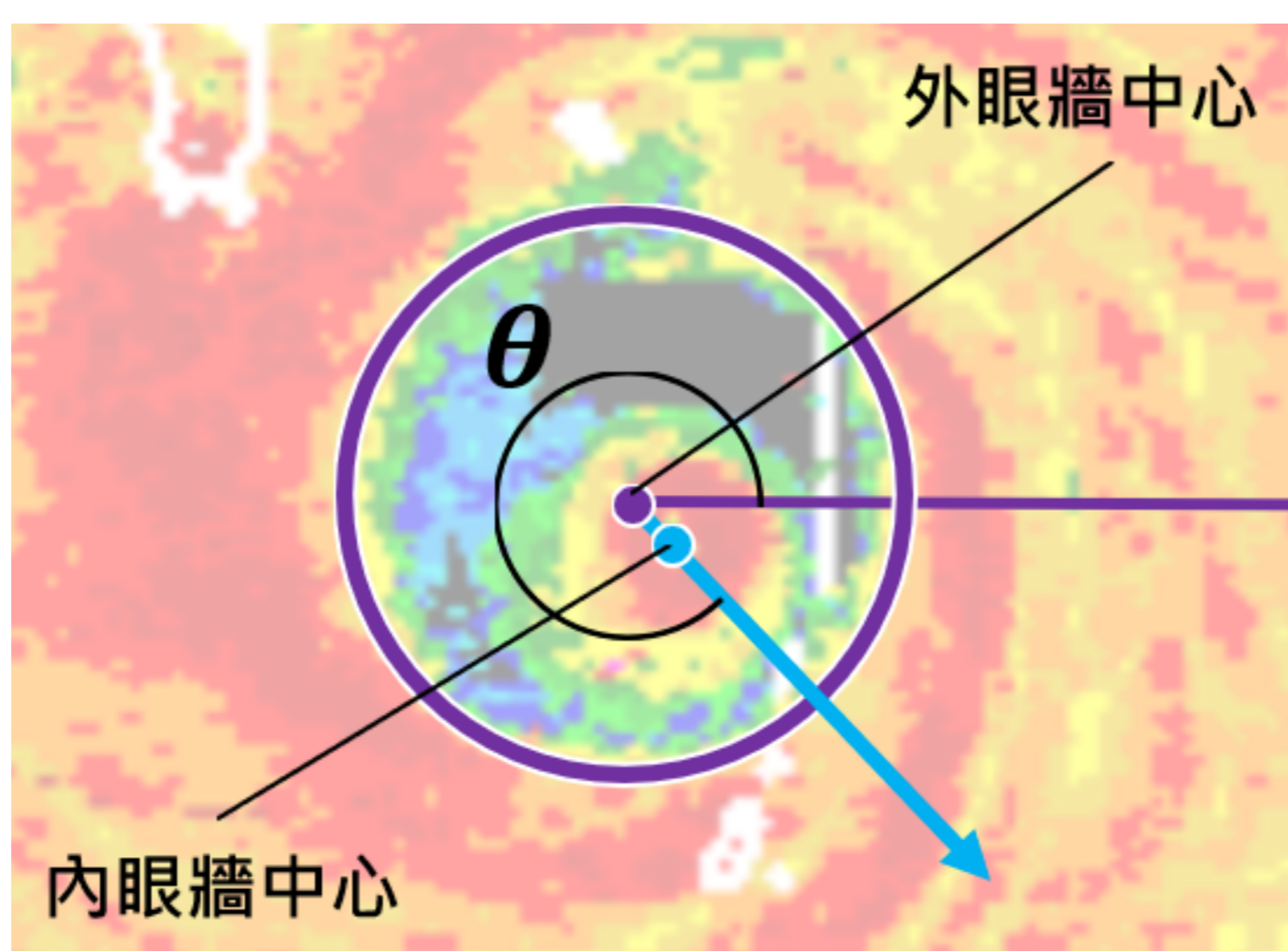
- 台灣時間2003年9月1日 18時0分起至 21時30分，每30分鐘擷取雷達回波圖。

內眼牆中心一開始在外眼牆偏東之內側，其後3.5小時內，以逆時針方向，在外眼牆內完成旋轉繞行一週。



實際個案的角度量測、旋轉週期計算

- 從外眼牆中心(左圖紫點)指向內眼牆中心(右圖藍點)做出連線。水平線、外內眼牆中心連線之逆時針方向夾角，即為所求 θ 。

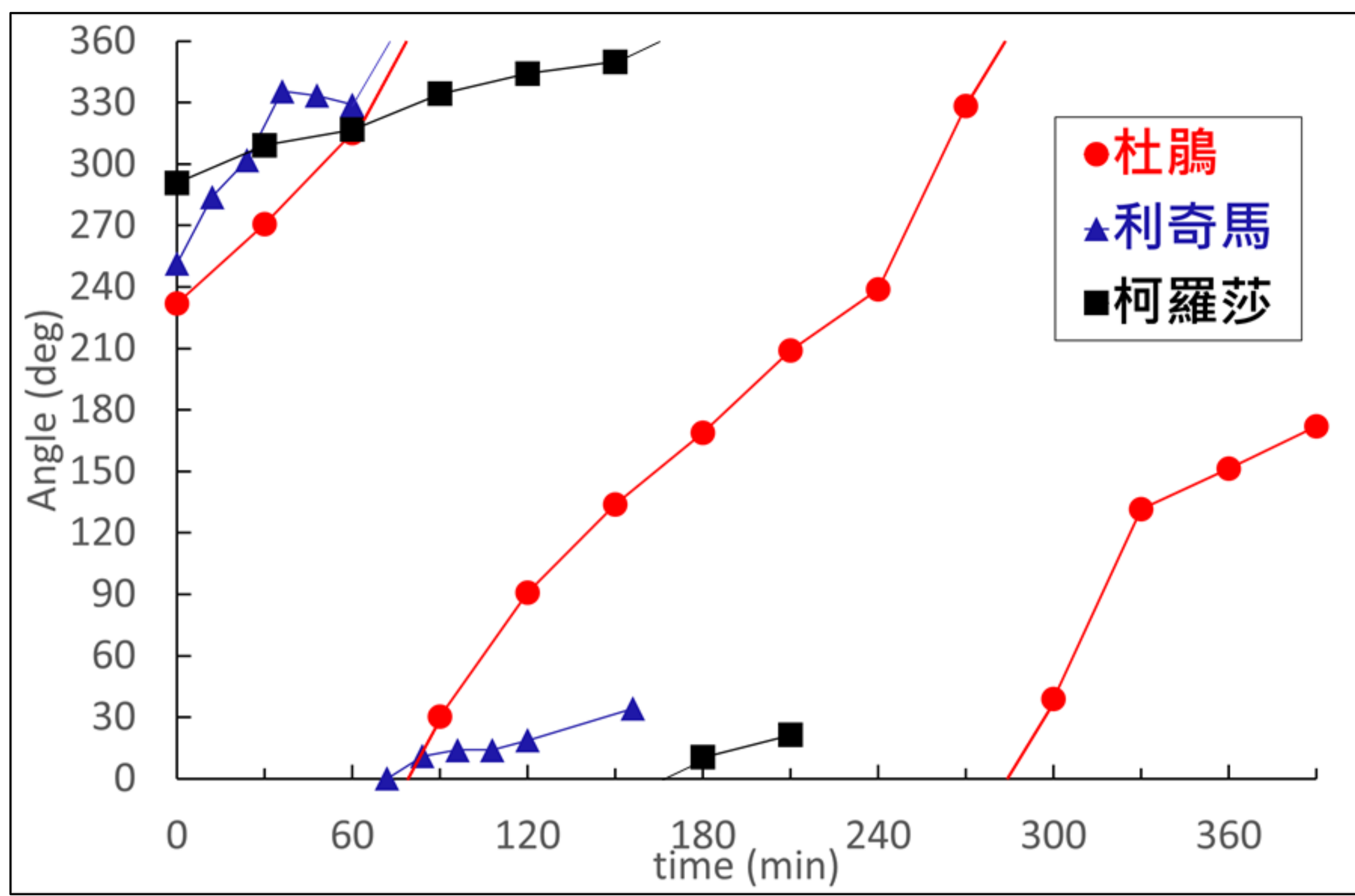


設旋轉一圈的時間為 T 分鐘，系統累計旋轉 θ° ，則第一圈週期 T_1 ：

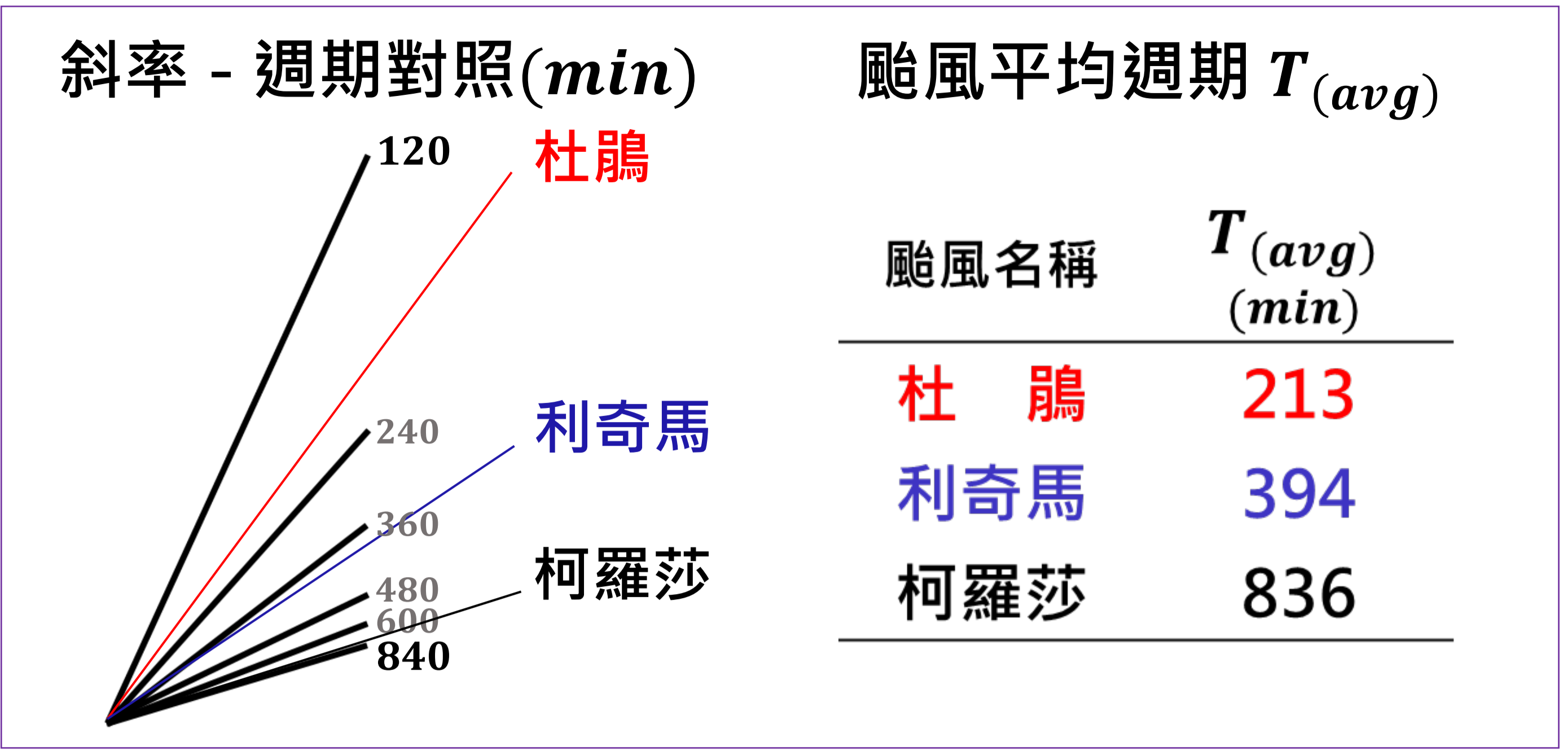
$$T_1 = T \frac{360^\circ}{\theta^\circ}$$

同理，「前 n 圈平均週期」 $T_{n(avg)}$ ：

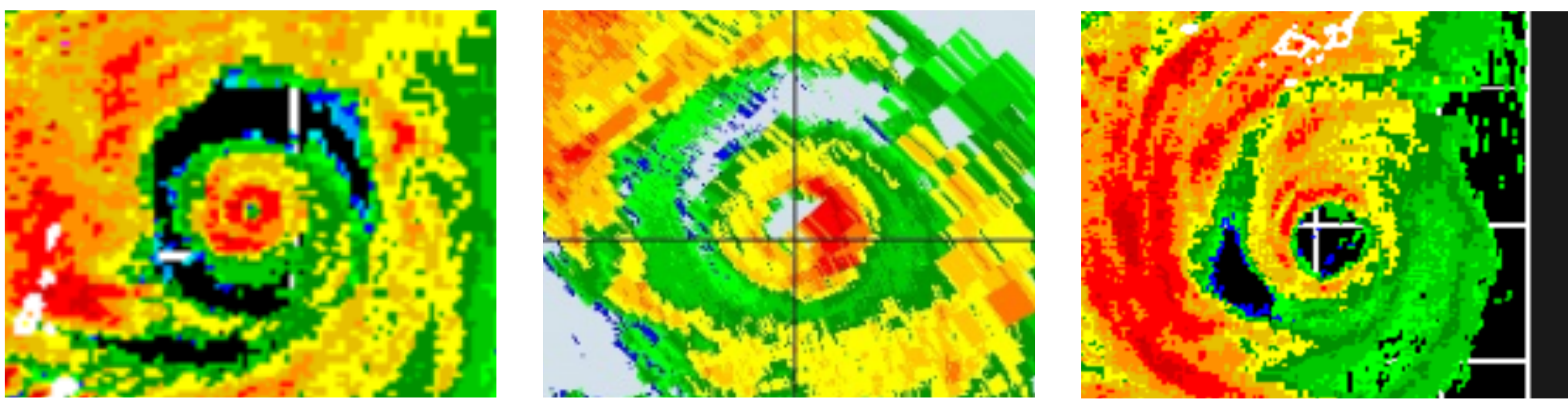
$$T_{n(avg)} = T' \frac{360^\circ}{\theta^\circ}$$



➤ 左圖橫軸為時間 (從轉動開始時起算)，縱軸為角度 θ ，斜率愈大表示旋轉週期越短。



上圖顯示，杜鵑颱風的內眼牆完成兩個周期的旋轉，且內外眼牆錯置距離大，旋轉現象明顯，易觀察其週期，因此選擇杜鵑颱風為主要研究對象。然而不同颱風週期差異甚鉅，內眼牆旋轉週期介於3—14小時。



➤ 由左至右：
杜鵑、利奇馬、柯羅莎
颱風眼區附近雷達圖，杜鵑
颱風結構最清晰可辨，且維
持時間最長。

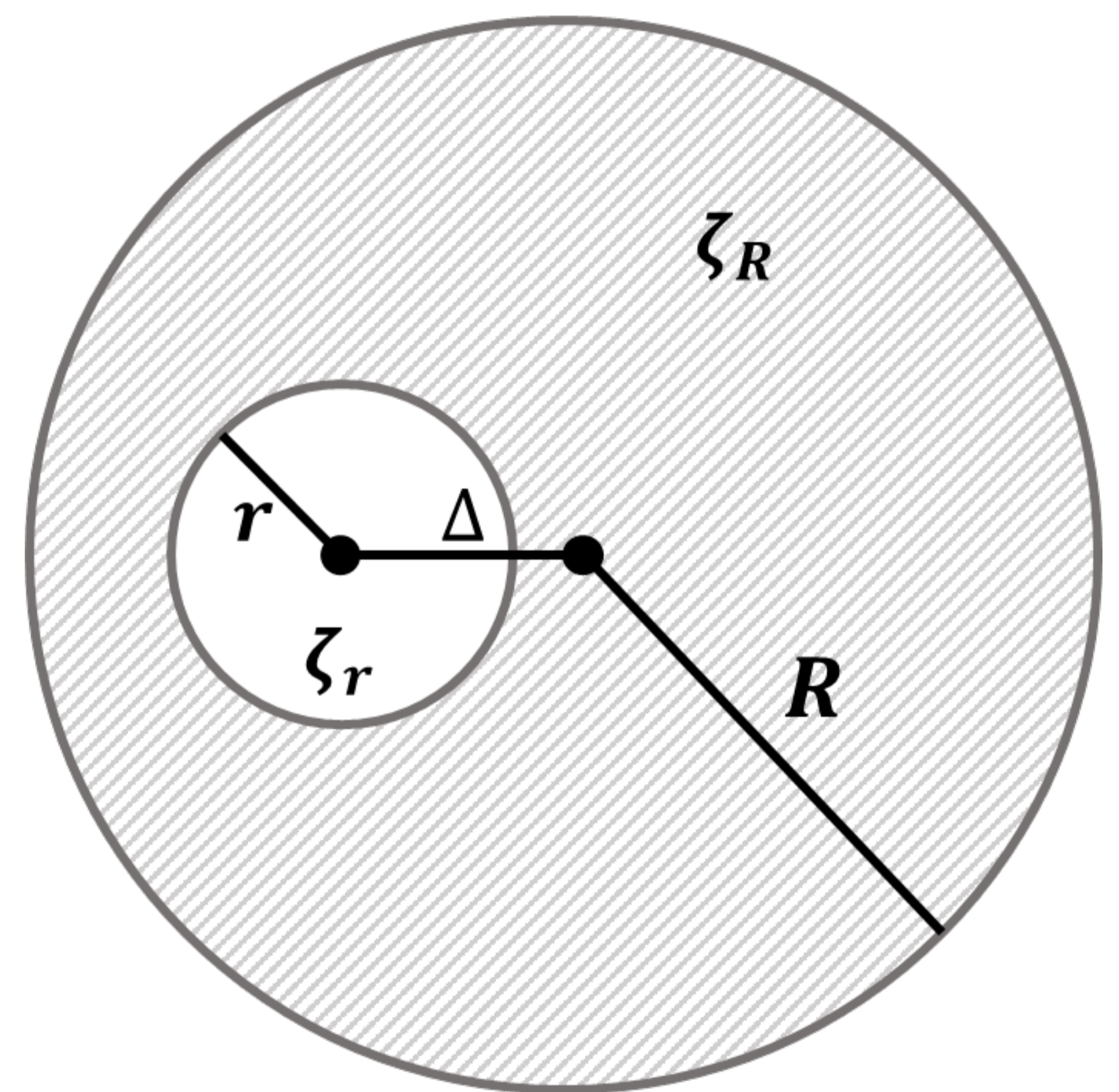
利用週期性淺水模式進行數值實驗

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。

實驗參數與示意圖

內眼牆旋轉現象可能受下列機制影響：內眼牆在外眼牆內，受到外眼牆中的正渦度與環流影響而旋轉。因此依據猜測設計以下模式實驗，包含五項重要實驗因子：

1. 外眼牆半徑 R (固定為50km)
2. 渦旋中心錯置距離 Δ
3. 內眼牆半徑 r
4. 內眼牆渦度 ζ_r
5. 外眼牆渦度 ζ_R



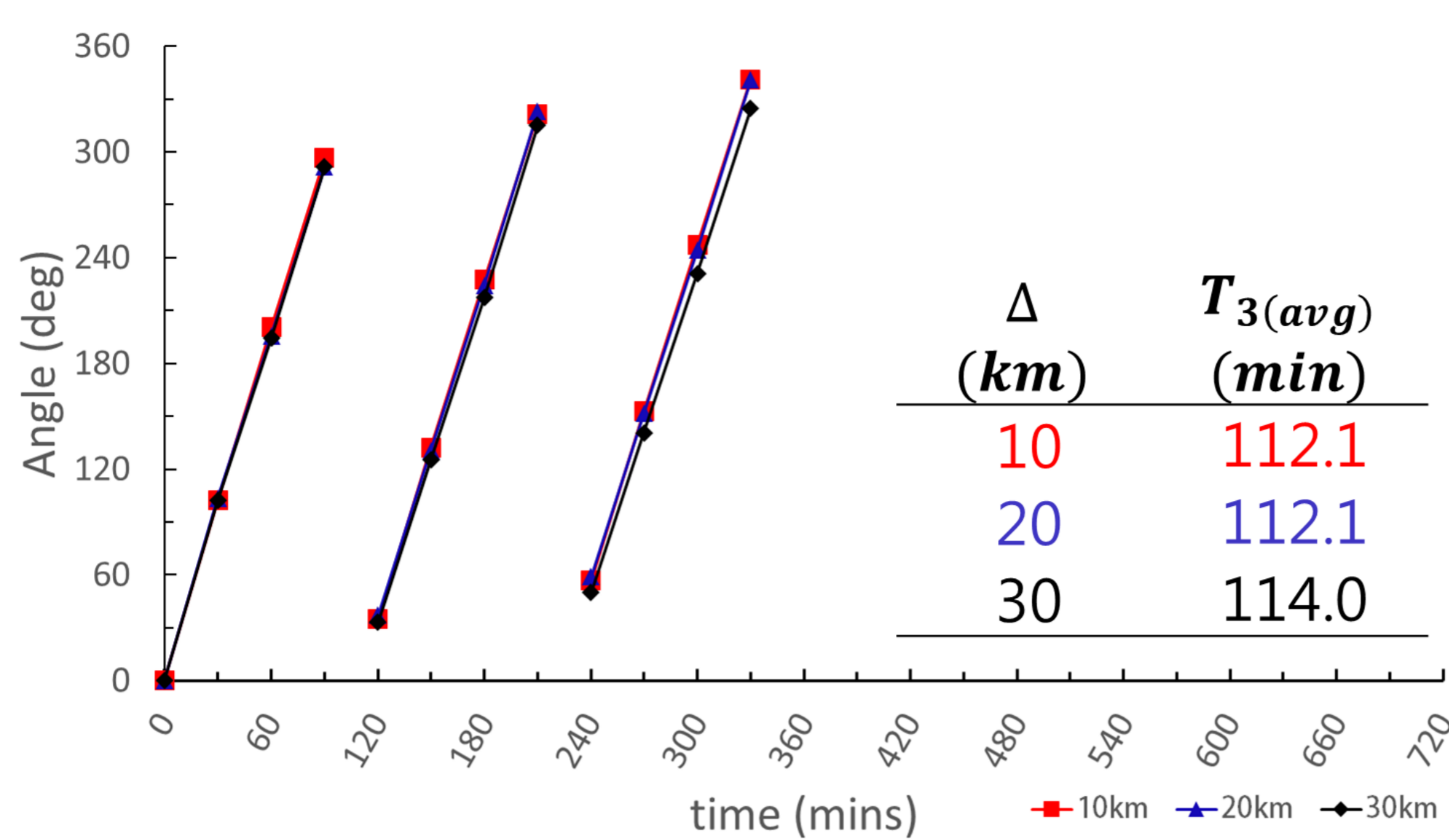
實驗參數與模式參數

實驗參數	R (km)	Δ (km)	r (km)	ζ_r ($10^{-3}s^{-1}$)	ζ_R ($10^{-3}s^{-1}$)	模式參數	數值
實驗1	1-1	10				x, y 計算域	300 km
	1-2	50	10	0.25	2.5	x, y 格點數	512
	1-3		30			x, y 解析度	0.6 km
實驗2	2-1		10			時步	3 sec
	2-2	50	10	0.25	2.5	輸出時間間隔	30 min
	2-3		30			水深	500 m
實驗3	3-1			0.25		淺水波波速	70 ms^{-1}
	3-2	50	10	0.75	2.5	科氏參數	$5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
	3-3			1.25			
實驗4	4-1				2.5		
	4-2	50	10	0.25	2.0		
	4-3				1.6		

實驗結果

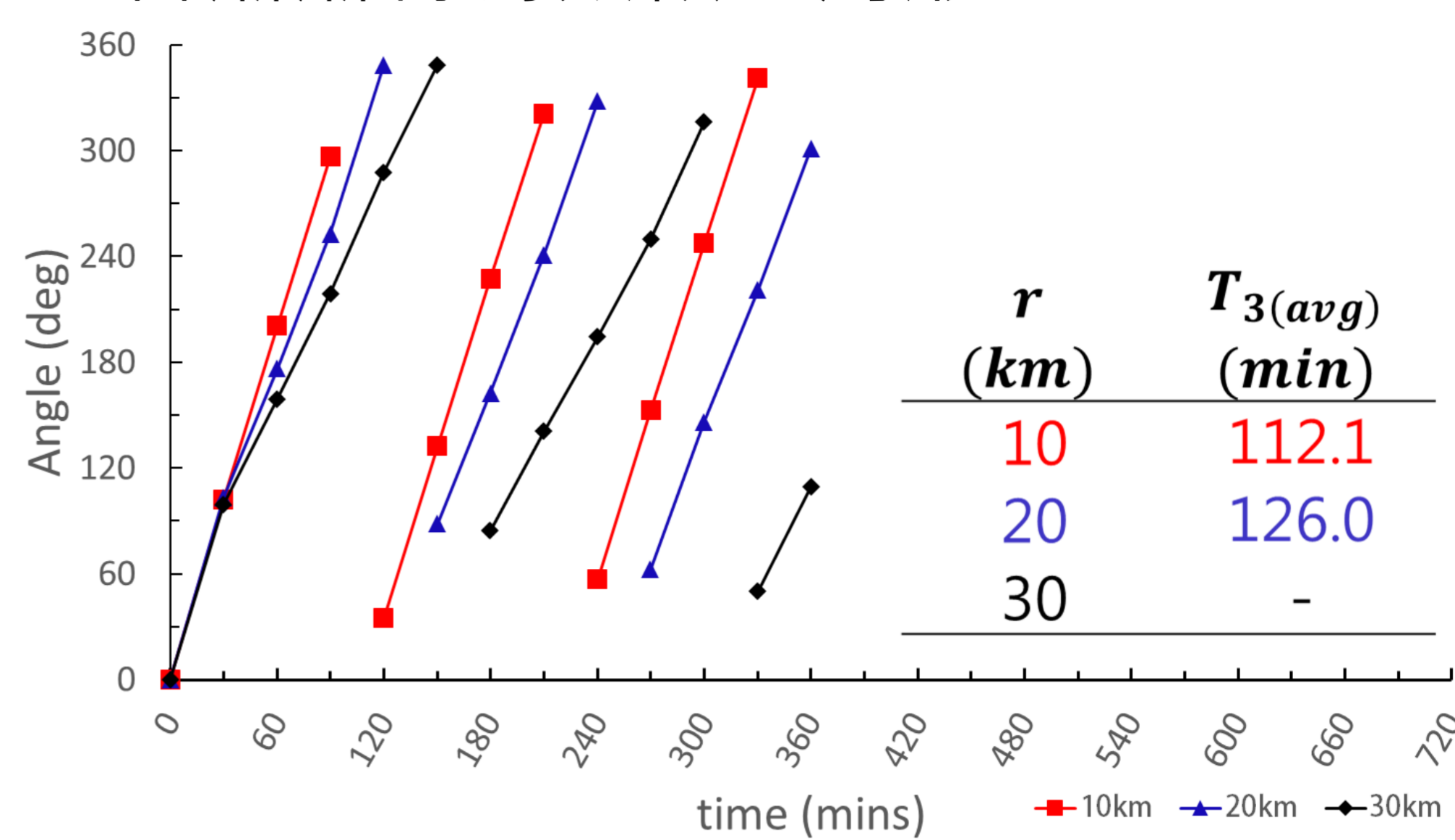
實驗1 - Δ 實驗 [Δ 影響週期不明顯]

- Δ 值越大，結構越早變形，轉速略降。



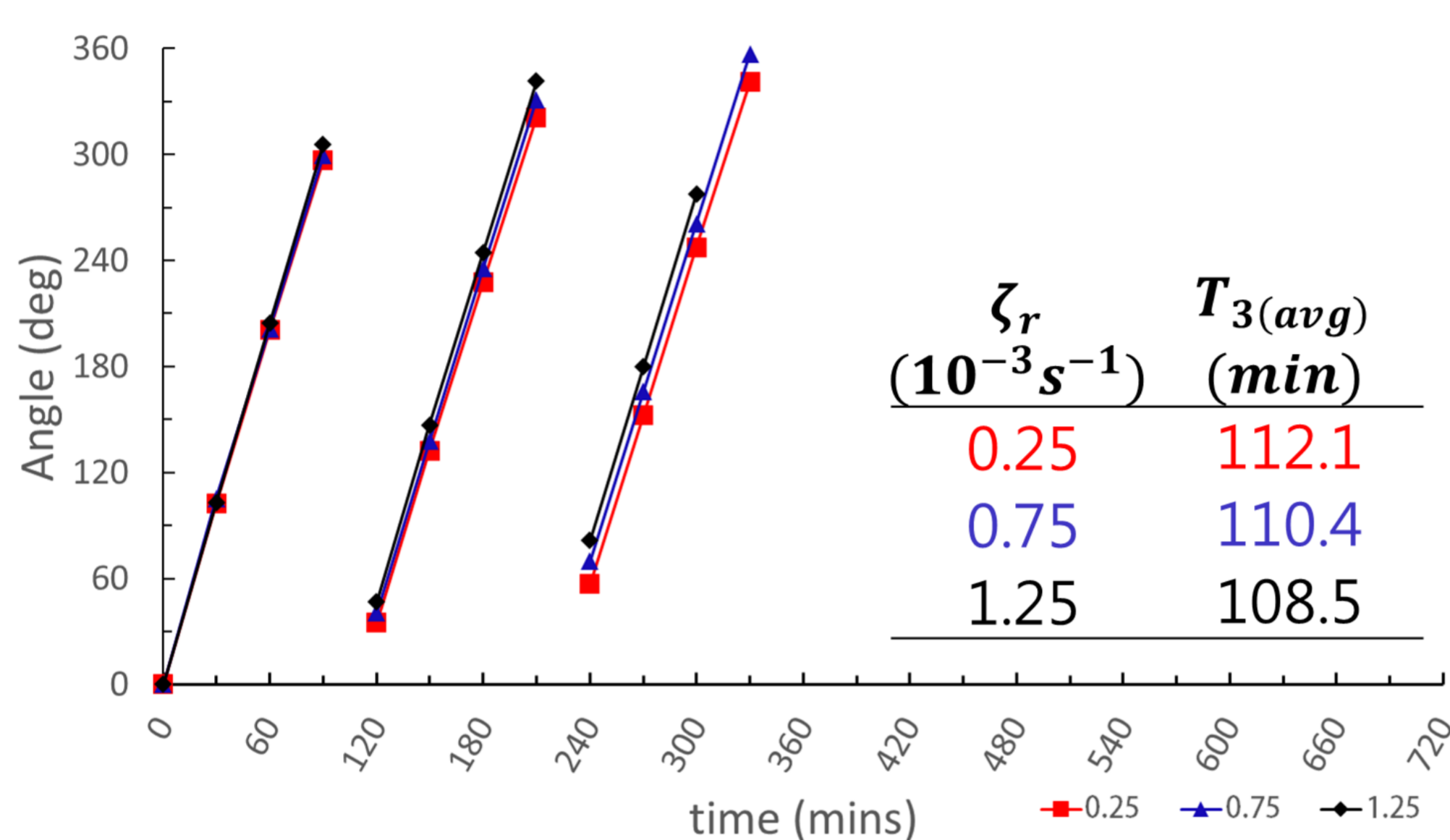
實驗2 - r 實驗 [r ↑, 週期↑顯著]

- r 越大，系統越早破碎； $r = 20$ 時，眼區會漸漸轉為類似三角形。



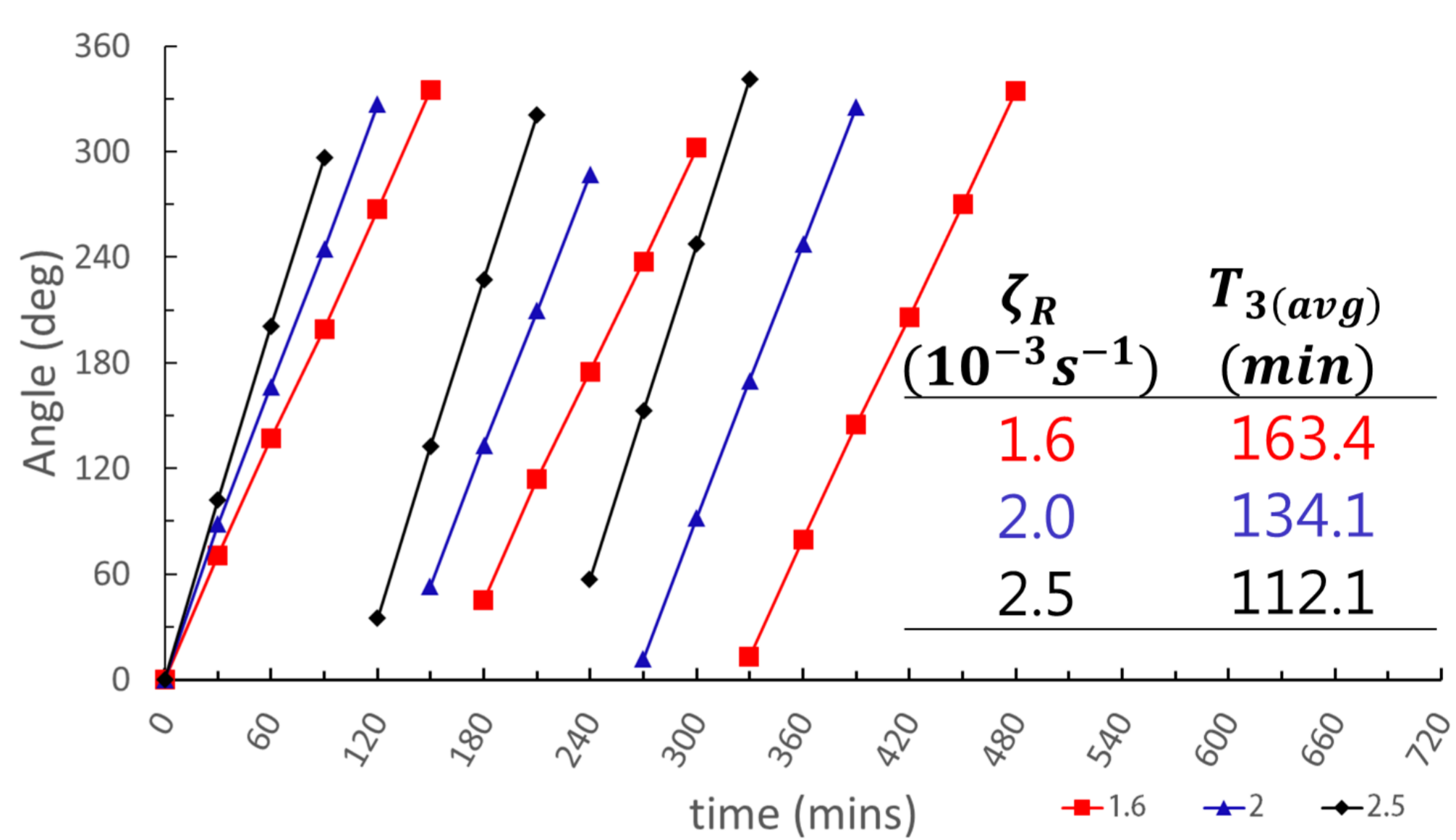
實驗3 - ζ_r 實驗 [ζ_r ↑, 週期↓]

- 不同 ζ_r 值，旋轉週期皆相當固定。
- ζ_r 值越大，結構越穩定。



實驗4 - ζ_R 實驗 [ζ_R ↑, 週期↓顯著]

- 不同 ζ_R 值，旋轉週期皆相當固定。
- ζ_R 在此數量級內，對結構無顯著影響。

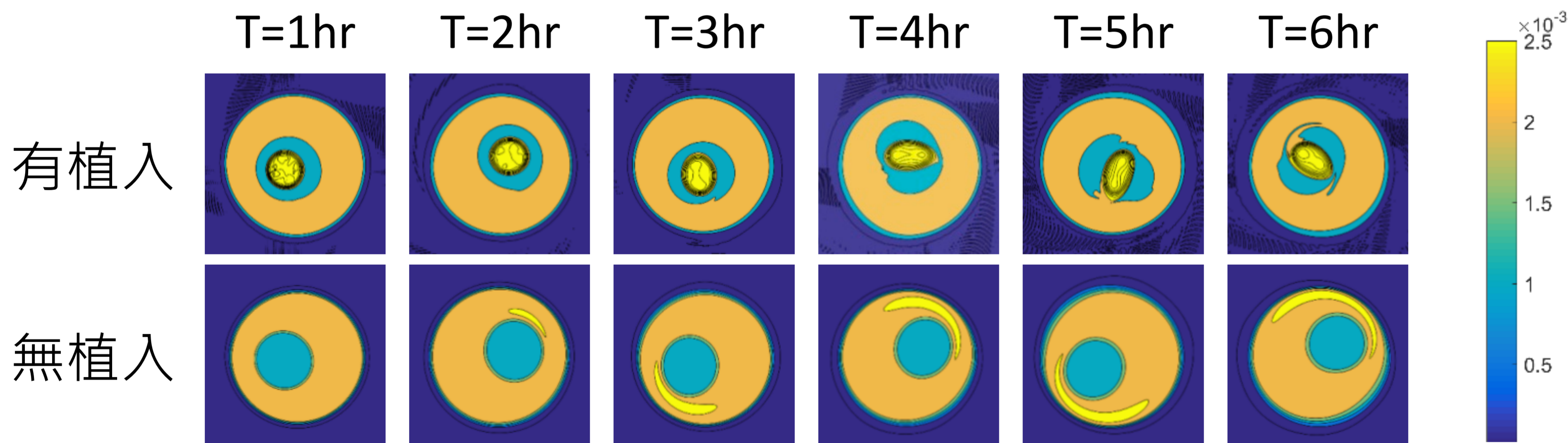


肆、討論

完成以上實驗之後，在旋轉系統中植入另一內眼牆，觀察並討論其旋轉行為之變化：

植入內眼牆對旋轉現象的影響

- 植入後的內眼牆，會隨著時間被拉伸成橢圓($T=3hr$)、三極渦旋($T=4-6hr$)。
- 整體而言，植入內眼牆後，旋轉週期減短。且轉速並非一致，時快時慢。



※ 註1：為使風速剖面貼近真實颱風情況貼近，植入之內眼牆渦度，為 ζ_R 之四倍。

※ 註2：植入之內眼牆與眼區同心，半徑10km。

伍、結論

在本研究中，我們量化並探討張與洪(2006)內眼牆偏移外眼牆中心產生旋轉的機制。在淺水模式中觀察到的內眼牆旋轉現象和觀測相符，並可能產生橢圓形眼牆、以及三極渦旋等複雜結構，進而影響內眼牆旋轉的週期。重要結論如下：

- 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。
- ζ_r 越大，旋轉週期略短，且結構也越穩定。
- ζ_R 是直接與動力有關的因素，影響週期最長。
- 植入內眼牆後，整體而言旋轉速度加快、週期變短。

陸、參考資料

- 張保亮, & 洪景山. (2006). 杜鵑 (2003) 颱風雙眼牆與似擺線路徑之都卜勒雷達分析. 大氣科學, 34(2), 143-156.
- 颱風資料庫。(<https://rdc28.cwb.gov.tw/>)