

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 物理與天文學科

051815

有限水量放流之漩渦成因探討及模型建立

學校名稱：國立鳳山高級中學

作者： 高二 李慧敏 高二 蔡志群 高二 謝碧軒	指導老師： 蔡易達
---	------------------

關鍵詞：漩渦、漩渦模型

摘要

前期研究中我們發現靜置後的水經底部放流不會形成漩渦，若要產生漩渦需有效地擾動水體。於是我們在靜止水體中控制攪拌動力，探討影響漩渦形成的因素。我們發現雖然影響漩渦形成有許多因素，但這些因素指向一個關鍵，就是如何有效帶動核心區的水體；同時若攪拌範圍涵蓋整個核心區，漩渦會自然且快速產生，再加大攪拌範圍也屬多餘。因此，為了探討如何有效產生漩渦，我們計算出核心區的體積、液面起始高度至放流孔距離及漩渦形成效率的關係。

最後，我們建立了漩渦形成模型。除得知漩渦現象是各位置相鄰水流彼此作用及流速調整才得以產生外，也由實驗推知外圍水流依白努力原理而向內壓迫內圈水流，使流速向內偏向，最終呈現螺線形流線。

壹、研究動機

搖動水壺觀察壺中的漩渦，是我們童年的共同經驗。但漩渦究竟是如何形成？

起初，我們以為漩渦是自桶底產生，因而將漏斗放在桶底放流孔處，企圖以漏斗表面的紋路引導漩渦的形成，卻發現與漩渦的形成無顯著關係，反而與水面微小的擾動有著密切相關，才發現到原來漩渦是自水面產生後向下延伸至放流孔。為了瞭解擾動現象與漩渦形成的關聯性，我們從擾動的方式對漩渦的形成進行初步研究，並進一步探討影響漩渦形成的成因、造成的趨勢與其中原理，希望能對漩渦有更深入的認識。

貳、研究目的

- 一、探討靜止水經桶底放流會不會形成漩渦。
- 二、探討影響漩渦形成的因素及趨勢。
- 三、建立漩渦形成模型。

參、名詞解釋

- 一、渦凹、渦管：漩渦的形成順序為自渦凹再至渦管。因此我們定義渦凹為漩渦產生之凹陷處（圖 3-1）；渦管為漩渦成熟所造成的中央空氣柱（圖 3-2）。
- 二、半徑方向：半徑方向為自漩渦中心指向液面上任一點的方向（圖 3-3）。

三、自由放流：水在自然情況下放流（圖 3-4）。

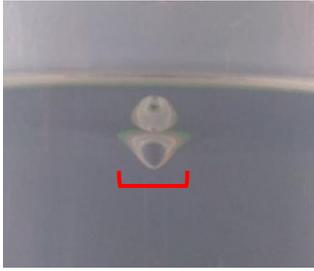


圖 3-1

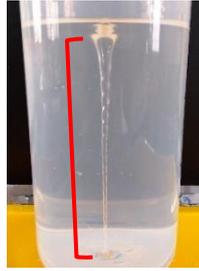


圖 3-2

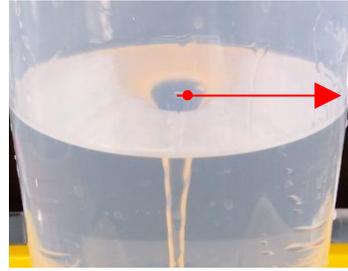


圖 3-3



圖 3-4

肆、研究設備及器材

一、實驗設備及用途

(一) 攪拌系統（圖 4-1）：

1. 馬達：帶動攪拌子。
2. 中央轉軸：連接攪拌子。

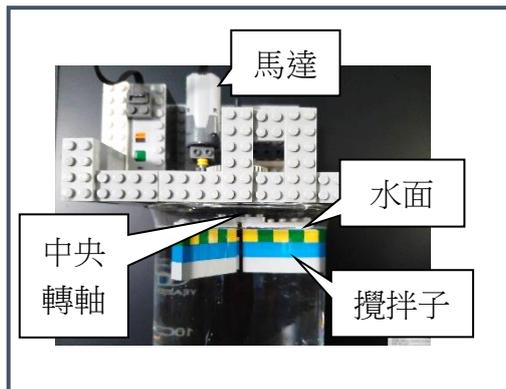


圖 4-1

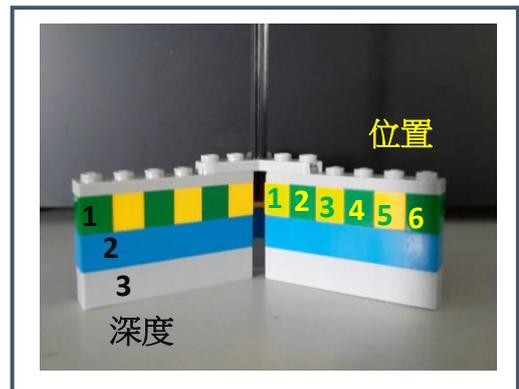


圖 4-2

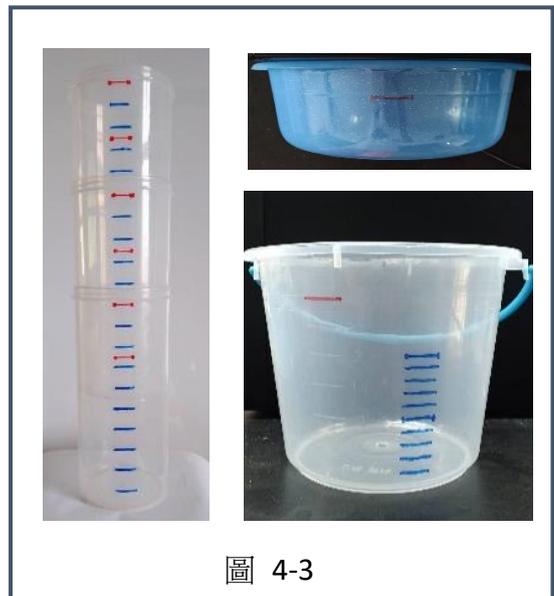
3. 攪拌子：置於中央轉軸，垂直深入水體並在液面下進行迴轉式攪拌。
 - (1) 轉速：每分鐘 80 轉。
 - (2) 組成：規格標準化長（0.8 公分）、寬（0.8 公分）、高（1.0 公分）的樂高。
 - (3) 位置及深度：實驗中我們改變攪拌子的半徑位置與液面下的深度，藉以控制攪拌範圍。表 4-1 為攪拌範圍示意圖，表中左側為靠近中央轉軸的內側、右側為靠近容器邊緣的外側。

例如當攪拌子設定在位置 6 深度 3 時，攪拌子應設定如圖 4-2。

表 4-1

		攪拌位置					
		位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6
攪拌深度	深度 1						
	深度 2						
	深度 3						

(二) 盛水容器：為減少水流衝擊容器造成能量損失干擾實驗數據，我們選擇平面對稱的圓形容器來進行實驗。容器有三種：直桶（口徑 11.0 公分／高 46.5 公分）、水桶（口徑 19.5 公分、底徑 15.5 公分／高 16.0 公分）、臉盆（口徑 29.0 公分、底徑 24.0 公分／高 9.0 公分），並在容器底部正中心挖放流孔（圖 4-3）。



二、實驗裝置及說明

(一) 觀察漩渦形成等現象的裝置（圖 4-4、圖 4-5、圖 4-6、圖 4-7）：

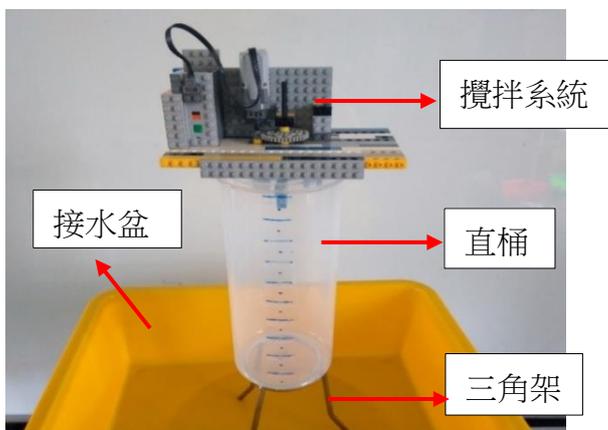


圖 4-4

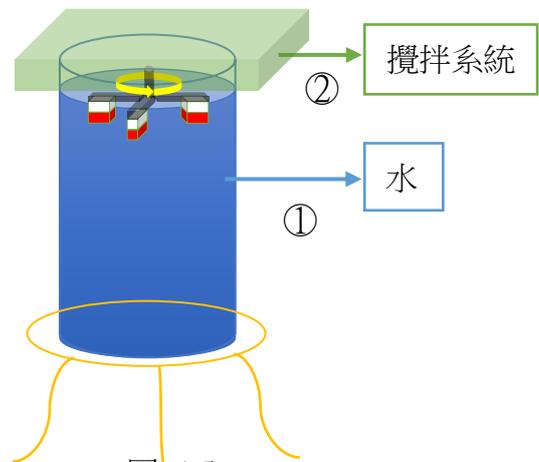


圖 4-5

此裝置操作說明：

- ①將容器盛妥實驗規劃之水量。
- ②於容器上方放置攪拌系統後與水一起靜置 60 秒，再攪拌 60 秒。

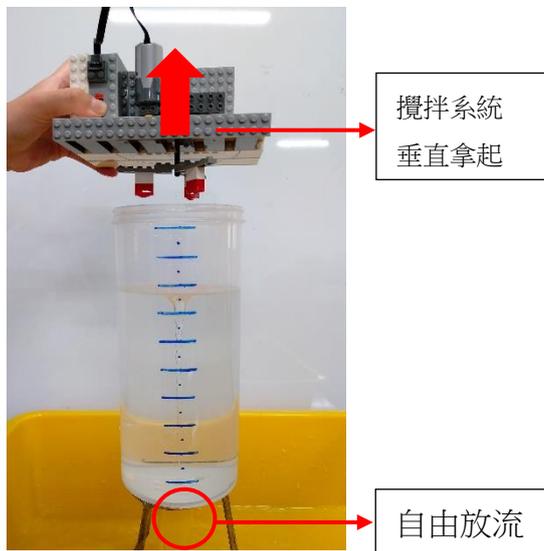


圖 4-6

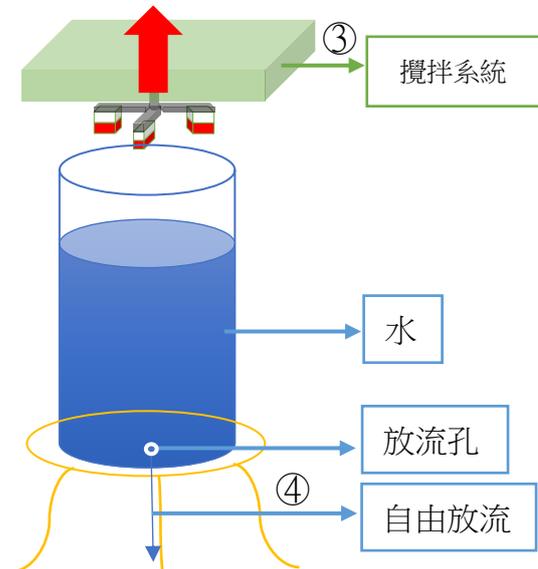


圖 4-7

此裝置操作說明：

- ③攪拌結束後將攪拌系統垂直拿起。
- ④再經 5 秒後自由放流，水從放流孔流出，並觀察漩渦等現象。

(二) 觀察白努力原理的裝置 (圖 4-8)：

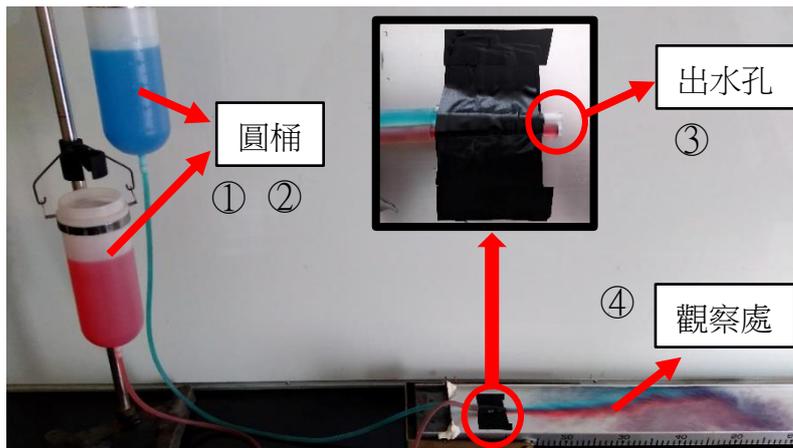


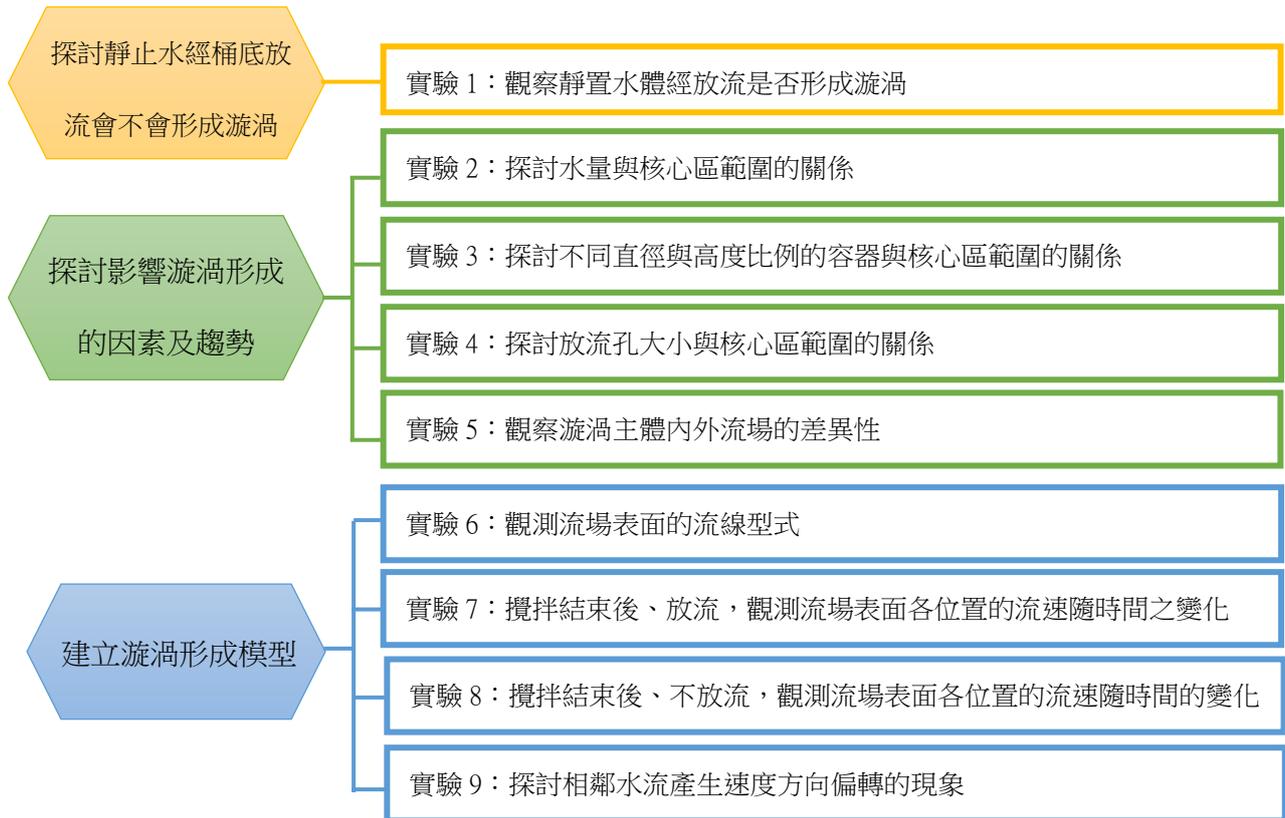
圖 4-8

此裝置操作說明：

- ①於兩圓桶分別滴入不同染劑。
- ②調整兩圓桶的相對高度。
- ③同時射出紅色與藍色染液。
- ④於觀察處觀察所造成的現象。

伍、研究過程或方法

仔細觀察漩渦水面我們可以發現兩現象：其一，水繞著渦凹旋轉的範圍不大，甚至與整個液面的面積相比，所佔的比例很小；其二，除了漩渦影響範圍內有明顯的流動外，漩渦影響範圍外的水體其流速明顯變小。種種的細節似乎讓同一桶水，在漩渦形成後卻分成運動性質截然不同的兩區域，我們以此想法規畫以下實驗：



一、探討靜止水經桶底放流是否形成漩渦

實驗 1：觀察靜置水體經放流會不會形成漩渦

(一) 實驗目的：研究不同起始水量，在不受擾動、自由放流時，確認是否有渦凹產生、渦管生成等顯著漩渦現象。

(二) 實驗步驟：

1. 以量筒分別量取 2000 毫升、1800 毫升、1400 毫升、1000 毫升的水於直桶靜置 3 分鐘後，自由放流。
2. 放流孔大小：直徑 1.0 公分。

3. 觀察是否有渦凹產生、渦管生成等顯著漩渦現象，並以染液觀察流場趨勢。

二、探討影響漩渦形成的因素及趨勢

實驗 2：探討水量與核心區範圍的關係

(一)實驗目的：在不同起始水量及攪拌時間的條件下，改變攪拌子攪拌範圍，比較渦管生成時刻，探討形成漩渦時攪拌子所需帶動的核心區範圍。核心區為能夠快速且有效形成漩渦之攪拌位置及深度的最小範圍，當加大其攪拌位置或深度時，渦管生成時刻不再有明顯改變。

(二)實驗步驟：

- 1.起始水量分成 1500 毫升、2000 毫升、2500 毫升、3000 毫升、3500 毫升、4000 毫升，盛水容器為直桶。
- 2.靜置 60 秒後攪拌，攪拌時間 60 秒。
- 3.放流孔大小：直徑 1.0 公分。
- 4.攪拌子：設定在不同位置與深度。
- 5.攪拌時間結束後將攪拌系統垂直拿起，經過 5 秒後自由放流。
- 6.測渦管生成時刻。

實驗 3：探討不同直徑與高度比例的容器與核心區範圍的關係

(一)實驗目的：探討不同直徑與高度比例的容器是否影響核心區的範圍。

(二)實驗步驟：

1. 起始水量 3000 毫升，盛水容器為直桶、水桶、臉盆。
2. 靜置 60 秒後攪拌，攪拌時間 60 秒。
3. 放流孔大小：直徑 1.0 公分。
4. 攪拌子：設定在不同位置與深度。
5. 攪拌時間結束後將攪拌系統垂直拿起，經過 5 秒後自由放流。
6. 測渦管生成時刻。

實驗 4：探討放流孔大小與核心區範圍的關係

(一)實驗目的：探討容器底部放流孔大小是否影響核心區的範圍。

(二)實驗步驟：

- 1.起始水量 2000 毫升，
盛水容器為直桶。
2. 靜置 60 秒後攪拌，攪
拌時間 60 秒。



3. 放流孔大小：直徑 1.0、1.5、2.0 公分（圖 5-1）。
- 4.攪拌子：設定在不同位置與深度。
- 5.攪拌時間結束後將攪拌系統垂直拿起，經過 5 秒後自由放流。
- 6.測渦管生成時刻。

實驗 5：觀察漩渦主體內外流場的差異性

(一)實驗目的：在漩渦初期與中期分別以染液輔助，觀察盛水桶內不同位置的流場趨勢，以比較漩渦主體內外流場的差異性。

(二)實驗步驟：

- 1.起始水量 2000 毫升，盛水容器為直桶。
- 2.靜置 60 秒後攪拌，攪拌時間 60 秒。
- 3.放流孔大小：直徑 1.0 公分。
- 4.攪拌子：設定在位置 4 深度 2。
- 5.攪拌時間結束後將攪拌系統垂直拿起，經過 5 秒後自由放流。
- 6.於放流開始後 1 秒（初期）及 15 秒（中期），分別在自圓心算起半徑分別為 2.5 公分、3.5 公分、4.5 公分處，並於液面滴下染液。
- 7.以攝影方式作全程觀察，最後以截圖作實驗觀察紀錄。

三、建立漩渦形成模型

實驗 6：觀測流場表面的流線型式

(一)實驗目的：在攪拌結束且開始自由放流後，於流場表面滴下染液，藉此觀察流場的流動趨勢，以決定後續實驗流速觀測方式。

(二)實驗步驟：

1. 起始水量分成 2000 毫升，盛水容器為直桶。
2. 靜置 60 秒後攪拌 60 秒。
3. 放流孔大小：直徑 1.0 公分。
4. 攪拌子：設定在位置 4 深度 2。
5. 攪拌時間結束後將攪拌系統垂直拿起，經過 5 秒後自由放流。
6. 分別於實驗進行 5 秒、15 秒時，自圓心算起半徑 4.5 公分處，儘量靠近液面滴下染液並拍照。

實驗 7：攪拌結束後、放流，觀測流場表面各位置的流速隨時間之變化

(一)實驗目的：攪拌結束後，探討流場表面於各位置的流速隨時間之變化，並從數據得到回歸方程。

(二)實驗步驟：

1. 起始水量為 2000 毫升，盛水容器為直桶。
2. 靜置 60 秒後攪拌 60 秒。
3. 放流孔大小：直徑 1.0 公分。
4. 攪拌子：設定在位置 4 深度 2。
5. 攪拌時間結束後將攪拌系統垂直拿起，經過 5 秒後自由放流。
6. 等待 5 秒時，於液面上均勻灑上亮粉以利流速測量（圖 5-2）。
7. 流速測量位置與時間：自圓心算起半徑分別為 2.5 公分、3.5 公分、4.5 公分處，於自由放流結束後 1 秒、3 秒、5 秒、10 秒、15 秒、25 秒觀測前述位置之流速。



圖 5-2

實驗 8：攪拌結束後、不放流，觀測流場表面各位置的流速隨時間的變化

(一) 實驗目的：在不放流的狀況下，攪拌結束後，探討流場內外各位置的表面流速隨時間的衰減、水內部能量耗損的現象。

(二) 實驗步驟：

1. 起始水量為 2000 毫升，盛水容器為直桶。
2. 靜置 60 秒後攪拌 60 秒。
3. 攪拌子：設定在位置 4 深度 2。
4. 攪拌時間結束後將攪拌系統垂直拿起並於液面上均勻灑上亮粉以利流速測量。
5. 流速測量位置與時間：自圓心算起半徑分別為 2.5 公分、3.5 公分、4.5 公分處，於攪拌結束後 1 秒、3 秒、5 秒、10 秒、15 秒、25 秒觀測前述位置之流速。

實驗 9：探討相鄰水流產生速度方向偏轉的現象

(一) 實驗目的：利用紅、藍染劑觀察相鄰水體產生速度方向偏轉的現象及驗證白努力原理。

(二) 實驗步驟：

1. 於兩圓桶分別滴入紅藍染劑，置於相同高度，同時射出染液。
2. 於兩圓桶分別滴入紅藍染劑，將紅色置於相對低處，藍色置於相對高處，同時射出染液。

陸、研究結果

一、探討靜止水經桶底放流會不會形成漩渦

實驗 1：觀察靜置水體經放流是否形成漩渦

(一) 實驗影像紀錄 (圖 6-1)：

1. 2000 毫升、1800 毫升、1400 毫升、1000 毫升四種起始水量，從放流開始

至結束，皆無渦凹產生與渦管生成，毫無漩渦的跡象。

2. 以藍色染液觀察流場流線。在四種起始水量中，染液皆呈現無旋轉且大致沿半徑方向流進放流孔。

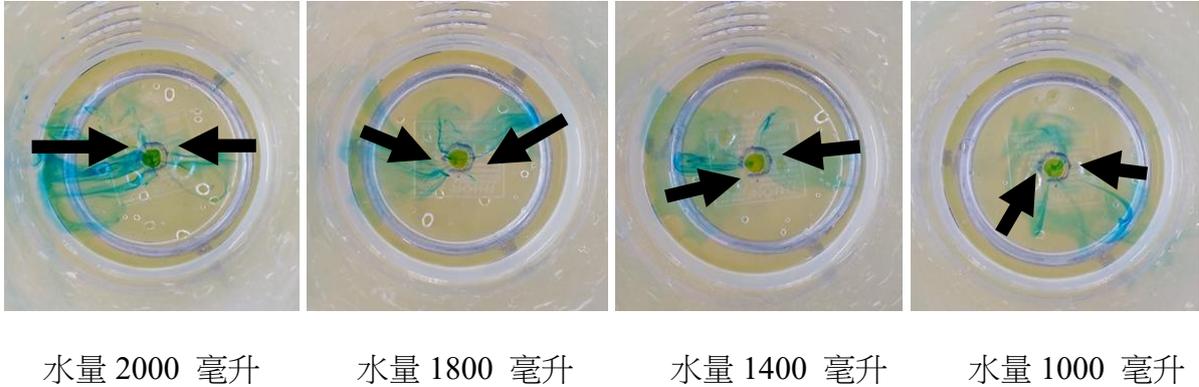
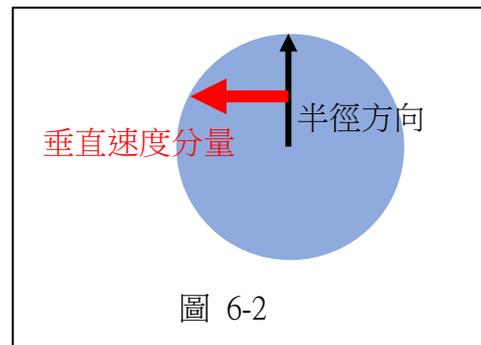


圖 6-1 各起始水量經放流所呈現之流線形狀

(二) 分析：

水在靜置且不受擾動的條件下，無法產生垂直半徑方向的速度分量，因而無法形成漩渦（圖 6-2）。



二、探討影響漩渦形成的因素及趨勢

實驗 2：探討水量與核心區範圍的關係

- (一) 實驗數據（單位：秒）：以下數據及圖表為各種水量中渦管生成時刻（表 6-1 至表 6-6、圖 6-3 至圖 6-8）。

表 6-1

1500 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	12.75	7.17	5.32	3.91	3.37
深度 2	X	9.38	4.81	3.63	3	3.06
深度 3	X	7.72	4.37	3.59	2.9	2.9

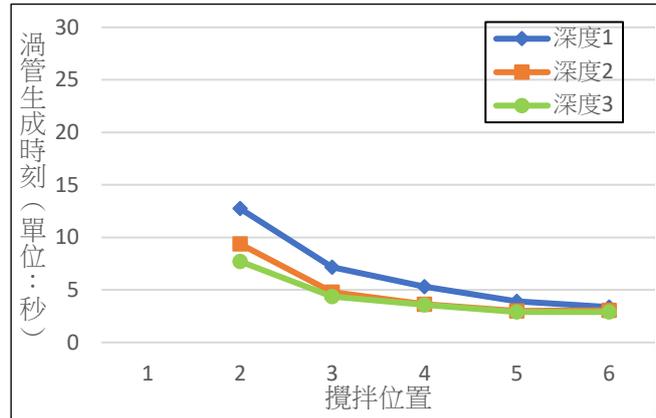


圖 6-3

表 6-2

2000 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	21.93	15.63	7.66	6.56	4.28
深度 2	X	19.19	6.65	5.24	4.24	4.37
深度 3	X	12.87	6.4	4.56	4.06	4.06

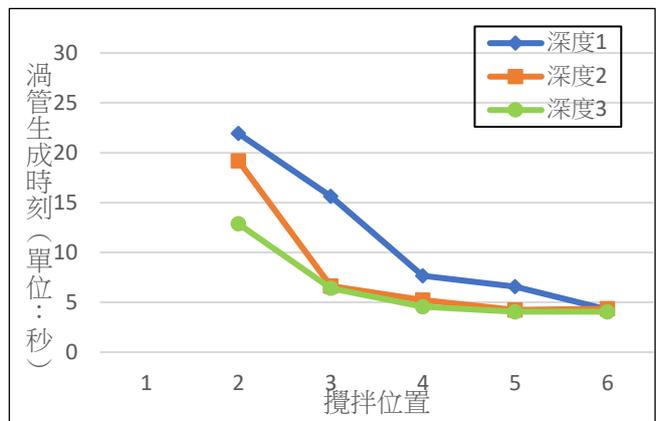


圖 6-4

表 6-3

2500 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	30.64	21.82	12.86	8.45	6.39
深度 2	X	24.33	9.01	5.77	5.52	4.66
深度 3	X	21.76	7.96	5.29	4.43	4.43

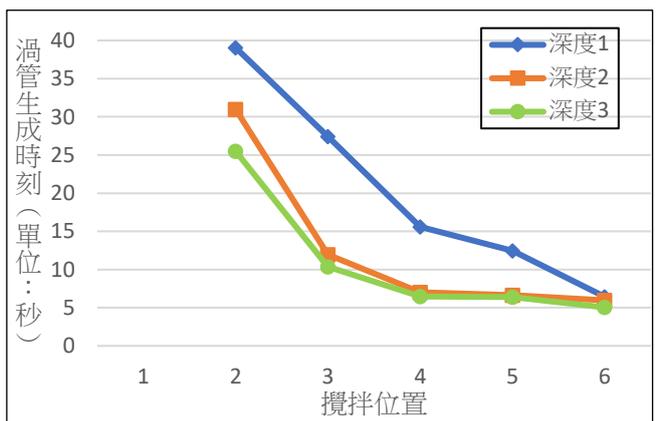


圖 6-5

表 6-4

3000 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	39.75	30.1	15.61	12.45	6.44
深度 2	X	30.98	11.97	7	6.65	5.97
深度 3	X	25.5	10.36	6.47	6.38	5.04

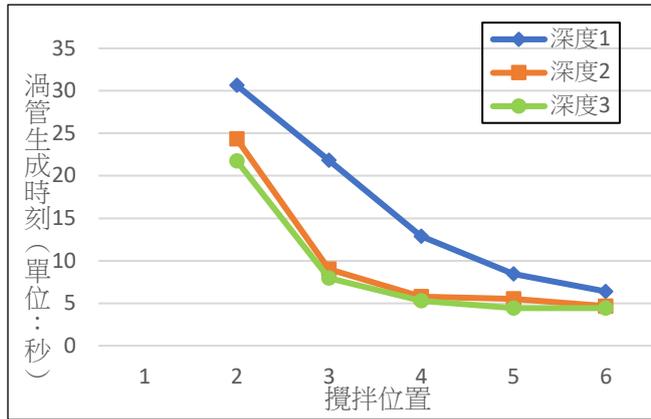


圖 6-6

表 6-5

3500 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	43.04	35.46	26.34	15.06	11.67
深度 2	X	39.35	23.31	10.68	8.57	7.35
深度 3	X	38.14	15.17	8.92	6.96	6.96

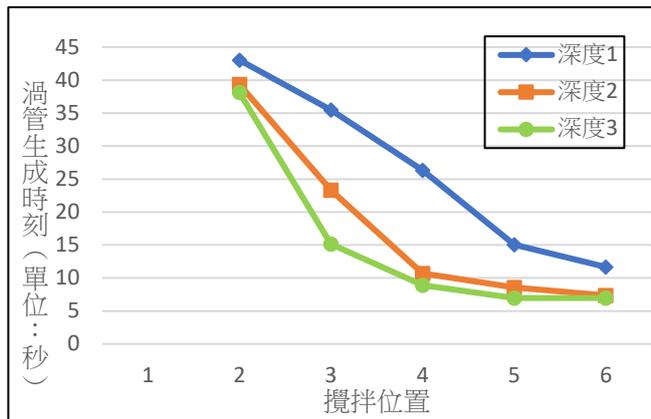


圖 6-7

表 6-6

4000 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	X	44.14	34.94	17.55	11.51
深度 2	X	48.27	29.05	13.01	11.13	9.58
深度 3	X	42.44	15.32	11.82	9.32	9.07

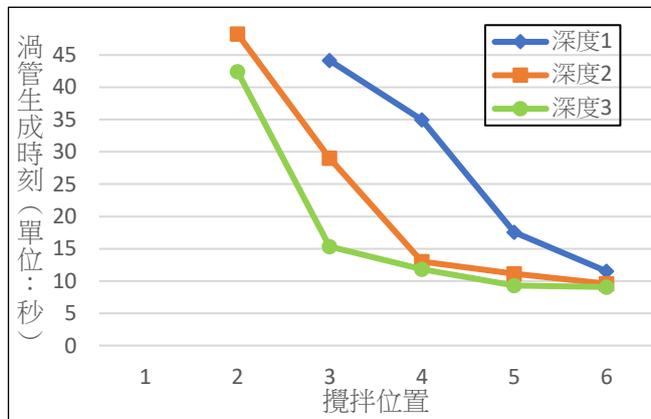


圖 6-8

(二) 分析：

- 我們將核心區定義為能夠快速且有效地產生渦管的最小範圍（表 6-1 至表 6-6 中的紅框），若攪拌子所擾動的範圍大於核心區時，渦管形成時間的差距值必須在水體放流完總時長的 $\pm 5\%$ 。表 6-7 詳列出不同攪拌位置與深度的條件之下攪拌子所擾動的水體體積，又因為每單位時間攪拌子對水做功 \propto 攪拌子所帶動的水體質量，因此分析攪拌子所帶動的水體體積對於漩渦形成趨勢可同於分析攪

拌系統所輸入水體的能量對於漩渦形成的影響。

表 6-7 (單位：立方公分)

體積	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6
深度 1	2.602	8.720	18.858	33.014	51.190	73.386
深度 2	5.203	17.440	37.715	66.029	102.381	146.771
深度 3	7.805	26.160	56.573	99.043	153.571	220.157

2. 在不同起始水量的情況下，當攪拌子設定於位置 1 時皆無渦管生成，僅有渦凹產生的漩渦初步現象。因此可推知當攪拌的半徑位置過小時，透過垂直半徑的速度分量所帶動的水體不足，無法形成成熟的漩渦現象。
3. 在不同起始水量的情況下，可發現當水量為 1500 毫升時核心區體積為 51.190 立方公分 (位置 5 深度 1)，當水量介在 2000 毫升至 3000 毫升時，核心區體積為 66.029 立方公分 (位置 4 深度 2)。若繼續增加起始水量至 3500ml 時，核心區體積為 99.043 立方公分 (位置 4 深度 3)，當起始水量到達 4000ml 時核心區體積為 102.381 立方公分 (半徑 5 深度 2)。故核心區會隨著水量而有所變化(圖 6-9)。

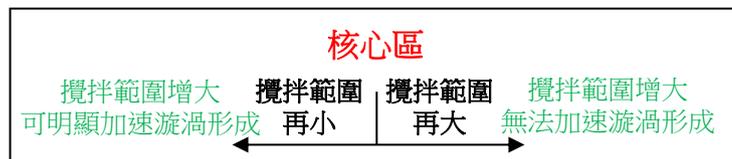


圖 6-9

4. 在相同水量且相同攪拌深度的情況下，當攪拌範圍小於核心區時加寬攪拌子的半徑位置，漩渦皆能提前產生，此為攪拌位置所造成的漩渦提前現象。
5. 在相同水量且相同攪拌位置的情況下，當攪拌範圍小於核心區時增加攪拌子液面下的深度，漩渦皆能提前產生，此為攪拌深度所造成的漩渦提前現象。
6. 當攪拌子所帶動的水體涵蓋核心區的範圍時，漩渦形成時間趨於一致;反之，當攪拌子所帶動的水體小於核心區時，需耗費較多的時間使得渦凹向下延伸形成渦管。
7. 礙於攪拌子組裝的限制，攪拌子所帶動的水體體積非等比的連續數列，造成當中有不同水量卻有共的核心區的結果。

8. 結合以上分析，當起始水量越大，核心區也隨之提升，意即若要使更多的水體形成漩渦現象，同時也需要更多的能量。

實驗 3：探討不同直徑與高度比例的容器與核心區範圍的關係

(一) 實驗數據（單位：秒）：以下數據及圖表為不同容器中渦管生成時刻（表 6-8 至表 6-10、圖 6-10 至圖 6-12）。

表 6-8

直桶 3000 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	39.75	30.1	15.61	12.45	6.44
深度 2	X	30.98	11.97	7	6.65	5.97
深度 3	X	25.5	10.36	6.47	6.38	5.04

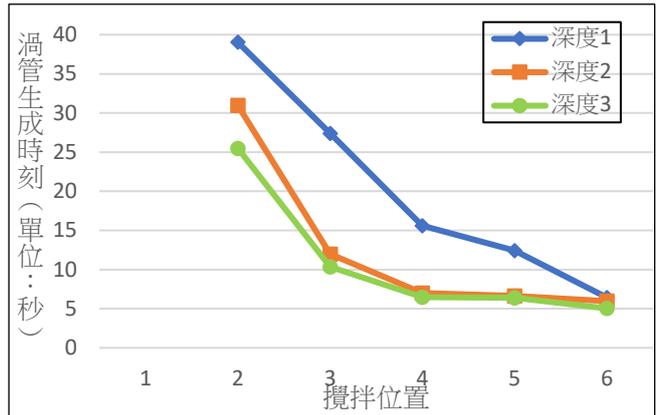


圖 6-10

表 6-9

水桶 3000 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	28.92	4.94	3.35	3.01	2.83
深度 2	X	9.56	3.43	2.55	2.22	1.96
深度 3	X	7.53	3.04	2.4	2.06	1.74

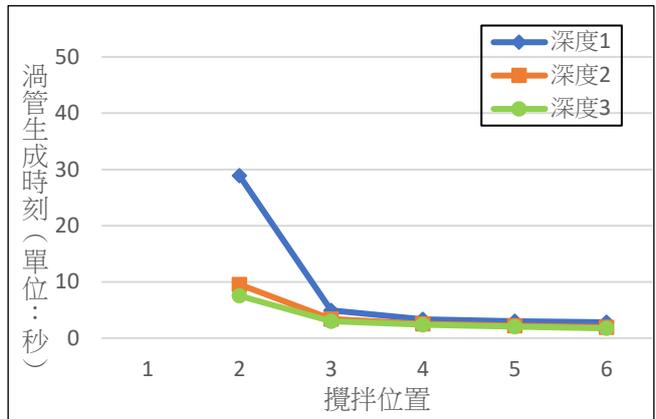


圖 6-11

表 6-10

臉盆 3000 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	4.49	2.54	1.45	1.51	1.12
深度 2	X	4.42	1.73	1.22	1.13	1.09
深度 3	37.56	3.76	1.44	1.2	1.11	1.06

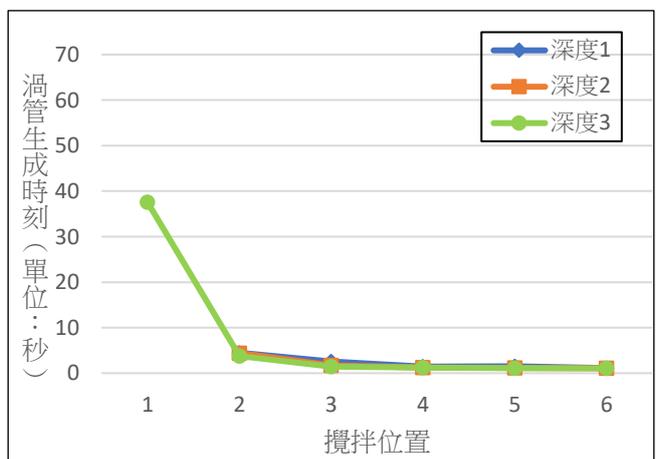


圖 6-12

(二)分析：

- 1.比對不同容器的相同攪拌深度與位置，可發現臉盆的渦管形成時間最快、水桶次之、直桶最慢，此為液面與放流孔距離不同的結果。在同為 3000 毫升的條件之下，容器較直長的直桶液面較高，故渦凹產生至渦管生成所需時間最久；反之，容器較寬扁的臉盆液面較低，渦凹與渦管現象幾乎在同時間發生，進而造成渦管在放流後馬上生成的結果（圖 6-13）。

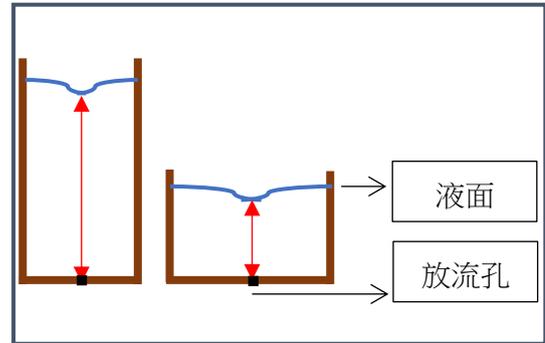


圖 6-13

- 2.比較三種容器的渦管生成時間，可發現當攪拌子設定於位置 1 深度 1 與位置 1 深度 2 時皆無渦管生成，僅有渦凹產生的漩渦初步現象。而當容器為臉盆時，位置 1 深度 3 卻能形成漩渦，此為因為在相同起始水量的條件之下，容器較寬扁的臉盆因液面與放流孔距離較小，因此易於直桶與水桶行成渦管。
- 3.表 6-8 至表 6-10 中的紅框表示核心區範圍。在起始水量為 3000 毫升的條件之下，直桶的核心區體積為 66.029 立方公分（位置 4 深度 2），水桶的核心區體積為 33.014 立方公分（位置 4 深度 1），臉盆的核心區體積為 8.720 立方公分（位置 2 深度 1）。故核心區會隨著容器比例而有所變化。
- 4.結合前項實驗，水量與容器（外在環境）的變化皆會影響核心區的範圍。

實驗 4：探討放流孔大小與核心區範圍的關係

- (一) 實驗數據（單位：秒）：以下數據及圖表為不同放流孔大小的渦管生成時刻（表 6-11 至表 6-13、圖 6-14 至圖 6-16）。

表 6-11

放流孔 1.0cm 2000 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	21.93	15.63	7.66	6.56	4.28
深度 2	X	19.19	6.65	5.24	4.24	4.37
深度 3	X	12.87	6.4	4.56	4.06	4.06

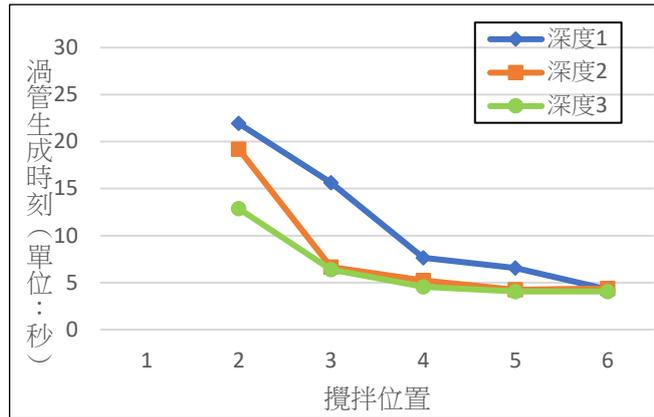


圖 6-14

表 6-12

放流孔 1.5cm 2000 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	12.75	9.81	7.23	5.71	4.07
深度 2	X	10.88	6.64	4.76	3.33	2.94
深度 3	X	9.53	5.34	3.58	3.2	2.83

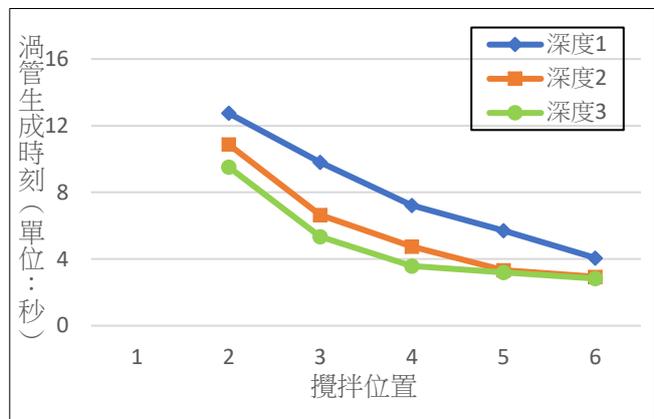


圖 6-15

表 6-13

放流孔 2.0 cm 2000 毫升	位置	位置	位置	位置	位置	位置
	1	2	3	4	5	6
深度 1	X	6.94	5.56	4.91	4.16	3.75
深度 2	X	6.03	4.94	3.86	3.15	2.68
深度 3	X	5.55	4.21	3.36	2.68	2.69

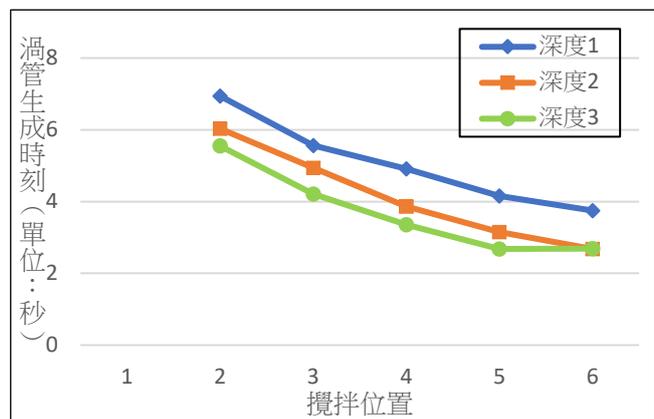


圖 6-16

(二) 分析：

1. 在水量 2000 毫升的條件之下，放流孔 1.0 公分、1.5 公分、2.0 公分放流所需的平均時間分別為 32.66 秒、18.06 秒、8.89 秒。由此可知，加大放流孔大小可有效地減少放流放流所需的時間。
2. 表 6-11 至表 6-13 中的紅框表示核心區範圍。在實驗容器為直桶且水量為 2000

毫升的條件之下，1.0 公分放流孔的核心區體積為 66.029 立方公分（位置 4 深度 2），1.5 公分放流孔的核心區體積為 99.043 立方公分（位置 4 深度 3），2.0 公分放流孔的核心區體積為 146.771 立方公分（位置 6 深度 2）。故核心區會隨著放流孔大小而有所變化。

3. 結合前項實驗，起始水量、容器比例（外在環境）與放流孔大小皆會影響核心區的體積。

實驗 5：觀察漩渦主體內外流場的差異性

(一) 實驗影像紀錄（圖 6-17、圖 6-18）：

1. 放流後 1 秒（初期）



圖 6-17

2. 放流後 15 秒（中期）

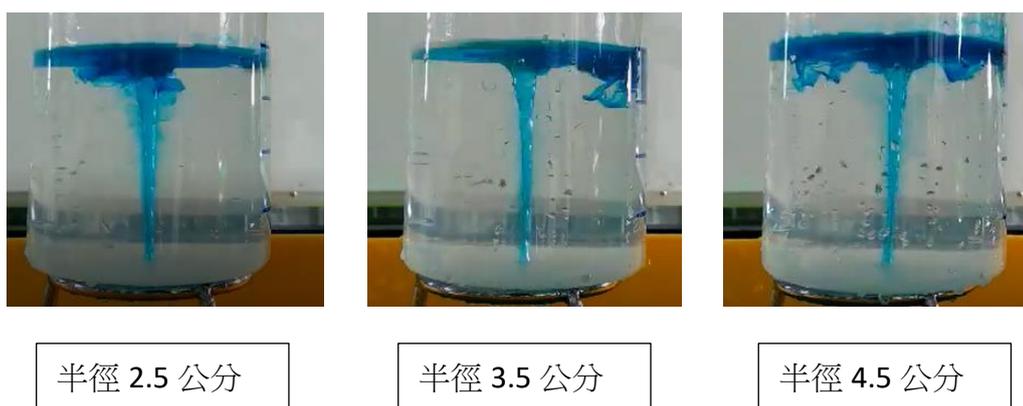


圖 6-18

(二) 分析：

1. 放流後 1 秒時漩渦尚未形成，染液大至於滴入水面的半徑處環繞圓心，與周遭水體無任何明顯的交互混和現象。
2. 放流後 15 秒時渦管已成熟，不論在液面何處滴入染液，水體內部的染液僅環繞

漩管周圍，也沒有與周遭水體產生任何明顯的交互混和現象。因此，可看出漩渦影響範圍僅限於圖 6-18 中藍色染液處的水體，其餘無染液的水體並未受到漩渦現象的影響，我們將其稱之為漩渦影響範圍外剛體（圖 6-19）。

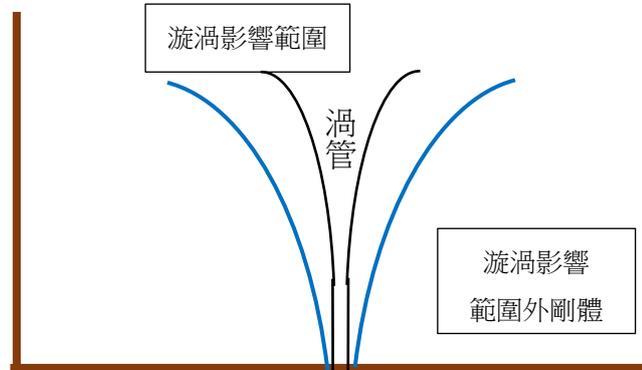


圖 6-19

三、建立漩渦形成模型

實驗 6：觀測流場表面的流線型式

(一)流場觀察結果（圖 6-20、圖 6-21）：



圖 6-20



圖 6-21

(二)分析：

1. 分別討論放流後 5 秒與放流後 10 秒時的流場狀態。
 - (1)放流後 5 秒：染液於水面形成封閉且環狀的圓，無任何染液進入圓內區域。
 - (2)放流後 15 秒：流場呈現向內的螺線形式，無明顯的封閉環狀流場。
2. 透過此次實驗結果，在後續實驗中為了減少流速測量上的誤差，我們以夾角 45 度的弧長除以所經過的時距所得的平均速率當作是該時刻時該半徑位置

水流所相對應的速率。此外因圓心周遭流速太大造成觀察不易，且誤差過大數值將無法採信，因此在後續的實驗中，我們定自圓心算起沿半徑方向 2.5 公分、3.5 公分、4.5 公分處為表面流場流速觀測位置，並以預先投入水中的細小亮片輔助流場觀察與流速測量。

實驗 7：攪拌結束後、放流，觀測流場表面各位置的流速隨時間之變化

(一) 實驗數據 (單位：公分/秒；表 6-14、圖 6-22)：

表 6-14

		自圓心算起之半徑觀測位置		
		2.5 公分	3.5 公分	4.5 公分
放流後經過時間	1 秒	12.08	11.86	9.39
	3 秒	13.31	7.71	5.59
	5 秒	12.92	10.49	7.32
	10 秒	14.41	10.52	7.66
	15 秒	10.98	8.06	5.92
	25 秒	11.15	6.19	5.82

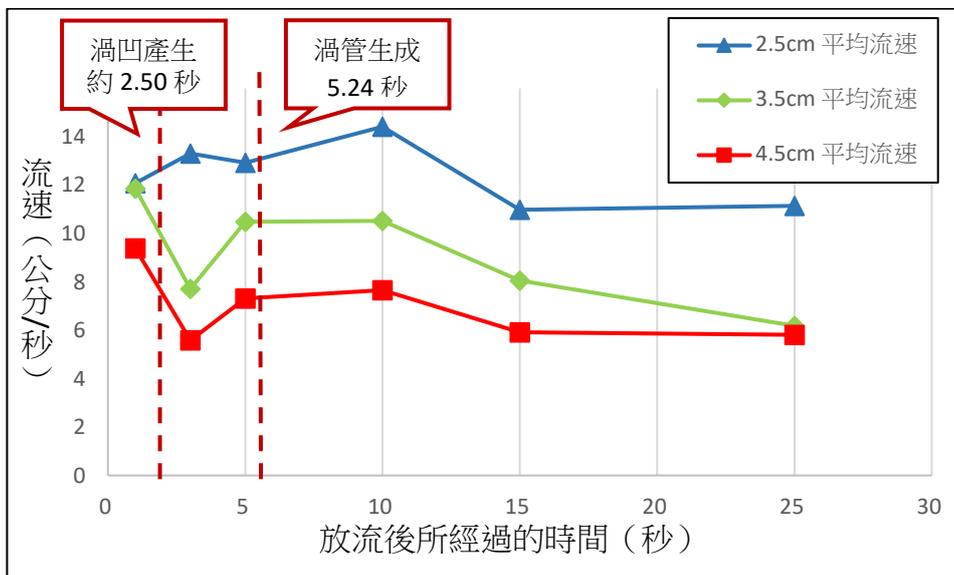


圖 6-22

(二)分析：

1. 以下我們分別對放流後 1 秒瞬間、1-3 秒、3-5 秒、5-10 秒、10-15 秒、15 秒後進行分析。

(1)放流後 1 秒瞬間：攪拌範圍內半徑 2.5 公分、攪拌範圍邊緣半徑 3.5 公分的流速幾乎相同，而攪拌範圍外半徑 4.5 公分的流速較低於前兩者，此數據反

應出了受攪拌的水流速較大。

- (2)放流後 1-3 秒期間：由實驗中可知，當攪拌子設定在位置 4 深度 2 時，渦凹在約 2.50 秒時產生，代表此時漩渦現象已初步形成。此期間較靠近漩渦中心的 2.5 公分位置流速持續提高，但外圍的 3.5 公分、4.5 公分位置流速明顯降低。此顯示圓心附近的水在漩渦形成過程中特有的流速加速現象，成因為重力位能轉換成動能的結果；漩渦外的水呈現流速趨緩，此為攪拌動力源移除後，必然的結果。
- (3)放流後 3-5 秒期間：渦管即將生成，漩渦現象已逐漸成熟。此期間較靠近漩渦中心的 2.5 公分位置流速無明顯變化，但外圍的 3.5 公分、4.5 公分位置流速明顯提升。此是漩渦形成階段加速重力位能轉換成動能的機制，擴大漩渦影響範圍。
- (4)放流後 5-10 秒期間：渦管於 5.94 秒生成，此時漩渦現象已成熟。與 3-5 秒期間的現象相反，靠近圓心的 2.5 公分位置流速再次提升，反而是外圍的 3.5 公分、4.5 公分位置流速無明顯變化，因為在渦管生成之後，最靠近漩渦中心的 2.5 公分位置水流增加了沿著漩渦曲面的速度分量，造成流速些微上升。
- (5)放流後 10-15 秒：渦管持續存在，但三個觀測位置的流速皆明顯下降，因為在有限水量放流的條件之下，液面高度會隨著時間下降，又液面下降速率公式 $H = H_0 - kt^2/2$ 可知， $\sqrt{H_0 - H}$ 與 t 成正比，因此液面高度變化量的上升速度會隨著時間而降低，造成重力位能轉換成動能效率也跟著下降，進而減少此時段各位置的流速。
- (6)放流 15 秒以後：此時段中 3.5 公分位置處流速下降，乃漩渦在結束前縮減影響範圍所造成的結果，3.5 公分位置除原位於漩渦主要影響範圍內，但在此階段時已成為漩渦主要影響範圍外的區域。至於為何 2.5 公分及 4.5 公分位置處的水流流速趨於平緩，則透過 $V_{液面下降速率}^2 = 2gH/[(R/r)^4 - 1]$ 可知， \sqrt{H} 與 V 成正比，因此在 H 極小的情況之之下， V 所造成的重力位能

轉換成動能的機制已小到可忽略。

2. 在自由渦流情況下 rV 切線方向流速 $=\Gamma/2\pi$ ， r 與 V 成反比關係。為了驗證我們流速測量方式的可信性，我們以半徑距離的倒數為橫軸作圖並得出回歸方程（表 6-15、圖 6-23）。

表 6-15

經過時間	回歸方程	R ²
1 秒	$y=13.53x+7.01$	0.67
3 秒	$y=44.10x-4.47$	0.99
5 秒	$y=30.28x+1.07$	0.94
10 秒	$y=37.53x-0.49$	0.99
15 秒	$y=28.15x-0.20$	0.99
25 秒	$y=31.59x-1.84$	0.91

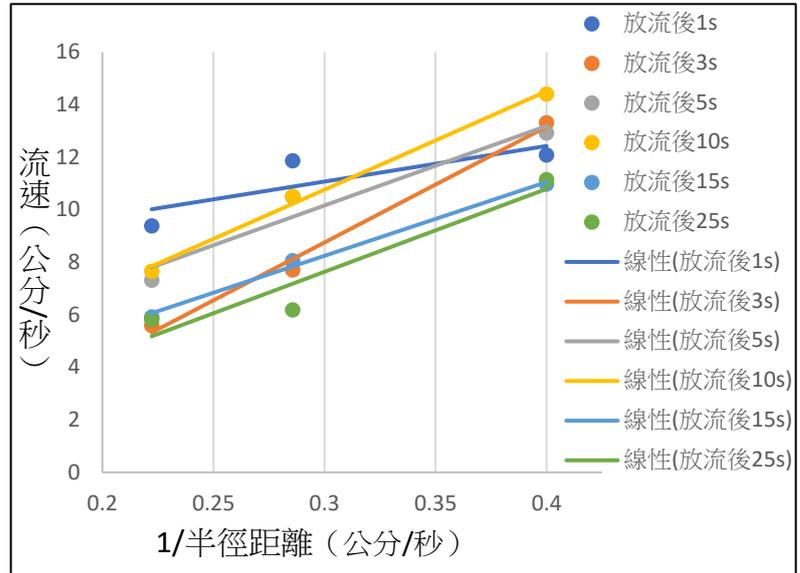


圖 6-23

- (1)放流後 1 秒：此刻 R^2 較小，是因為漩渦現象尚未形成，流場正處於形成自由渦流前的階段。
- (2)放流 3 秒以後：渦凹約 2.50 秒時形成，而 3 秒後的 R^2 皆大於 0.9，因此能推論出當渦凹產生後 r 與 V 即成反比關係，自由渦流現象則在渦凹產生後隨之形成，也進一步驗證了我們流速測量方式的可信性。

實驗 8：攪拌結束後、不放流，觀測流場表面各位置的流速隨時間的變化

- (一) 實驗數據（單位：公分/秒；表 6-16、圖 6-24）：

表 6-16

		自圓心算起之半徑觀測位置		
		2.5 公分	3.5 公分	4.5 公分
經過時間	1 秒	12.18	12.73	10.24
	3 秒	12.18	12.78	11.88
	5 秒	10.33	10.91	10.24
	10 秒	11.32	9.73	9.13
	15 秒	11.61	9.60	8.01
	25 秒	6.36	6.39	5.22

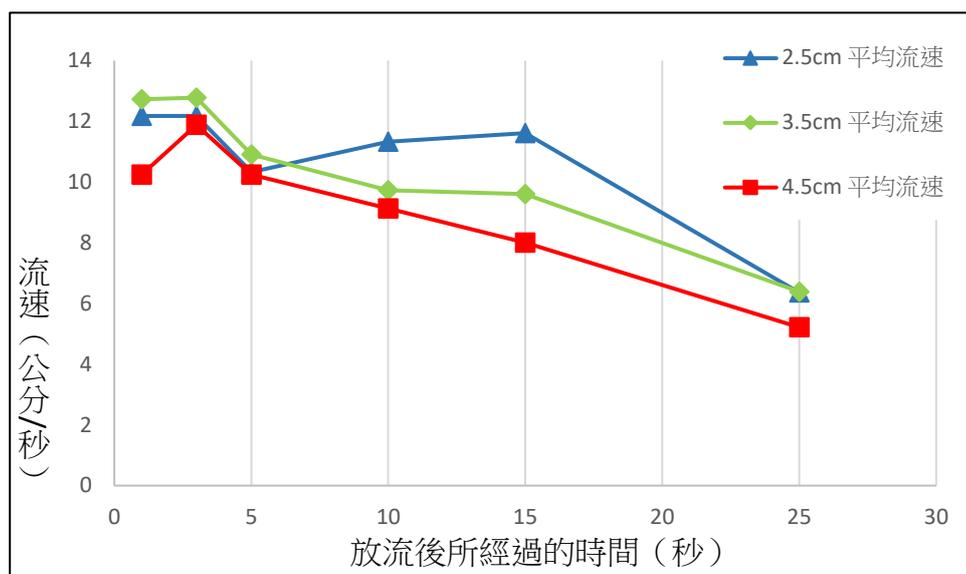


圖 6-24

(二)分析：

1. 以下我們對放流後 1 秒瞬間、1-3 秒、3 秒後進行分析。

(1)放流後 1 秒瞬間：此刻流速還受到攪拌系統所影響，沿半徑方向 2.5 公分與 3.5 公分皆位於原先攪拌範圍內屬強制渦流且攪拌系統所造成的角速度相同，透過圓周運動公式 $V=r\omega$ 可知 2.5 公分處流速小於 3.5 公分處流速。至於為何 4.5 公分處水流流速較低，乃因為此處不位於原先的攪拌範圍內。

(2)放流後 1-3 秒期間：原攪拌範圍內的流速保持不變，攪拌系統所造成的強制渦流依然存在，原攪拌系統外的 4.5 公分處與內圈高速水流作用，使得流速略為提升。

(3)放流 3 秒以後：移除外界輸入的能量後，水體中各半徑位置的動能趨於平衡且一致，又因為內圈水量較外圈少，因此在動能一致的情況下，內圈流速會較外圈快，造成 2.5 公分處流（藍）速略微提升。

2. 歸納以上分析結果，強制渦流在動力源移除後僅能維持 1-3 秒，而我們在其他實驗中攪拌完後等待 5 秒才自由放流，也是為了消除垂直拿起攪拌系統與強制渦流所造成的影響。

實驗 9：探討相鄰水流產生速度方向偏轉的現象

(一)白努力現象觀察結果（圖 6-25）：

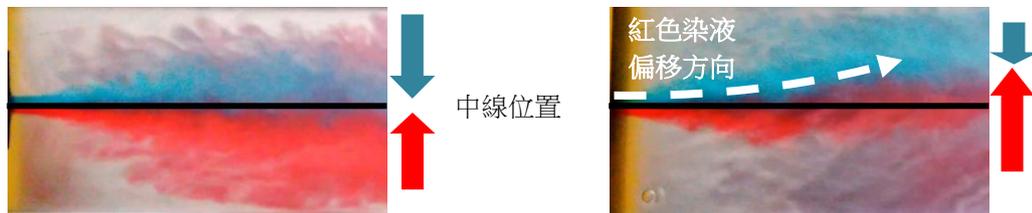


圖 6-25

(二)分析：

1. 分別討論兩張圖中流速所造成的現象。

(1) 圖 6-25 左側為兩水柱在流速相同的情況下彼此勢均力敵且互不超過中線位置。

(2) 圖 6-25 右側為藍色水柱速為高流速、紅色水柱速為低流速，紅色水柱跨越

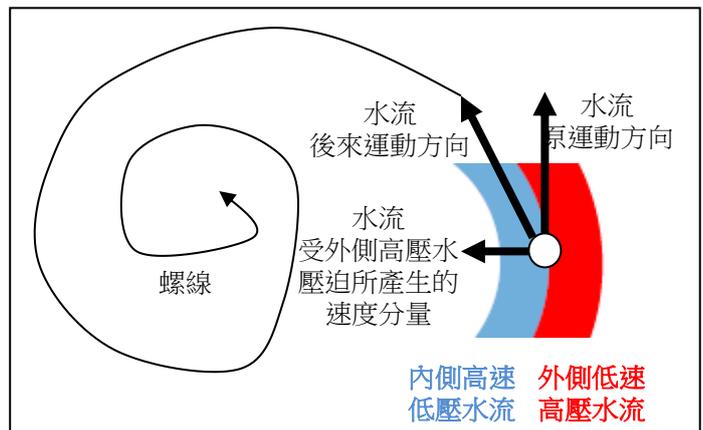


圖 6-26

中線位置並侵入原本屬藍色水柱區域。

2. 按白努力原理：低流速水流較高流速水流的壓力為大，因此低流速水將向高流速水流的區域偏轉。

3. 利用白努力原理再分析前述實驗 6 的漩渦流場，可將圖 6-26 視為漩渦中某段螺線弧長放大後的狀態。

柒、討論

一、漩渦形成效率

(一)為了探討漩渦在不同起始水量的情況之下漩渦的形成效率，我們分析渦管存在的總時長與水放流結束所需時間的關係，進一步了解不同條件之下漩渦形成的最大效率，

如下列公式：

$$\text{漩渦形成效率} = 1 - \left(\frac{\text{渦管生成時間}}{\text{水體放流完總時長 } T} \right) \times 100\%$$

因此，若漩渦形成效率接近 100%則表示渦管於放流後瞬間生成，而漩渦形成效率越趨於 0%則表示渦管於放流結束前一刻才生成。

(二)改變攪拌子所帶動的水體體積及起始水量（圖 7-1）：

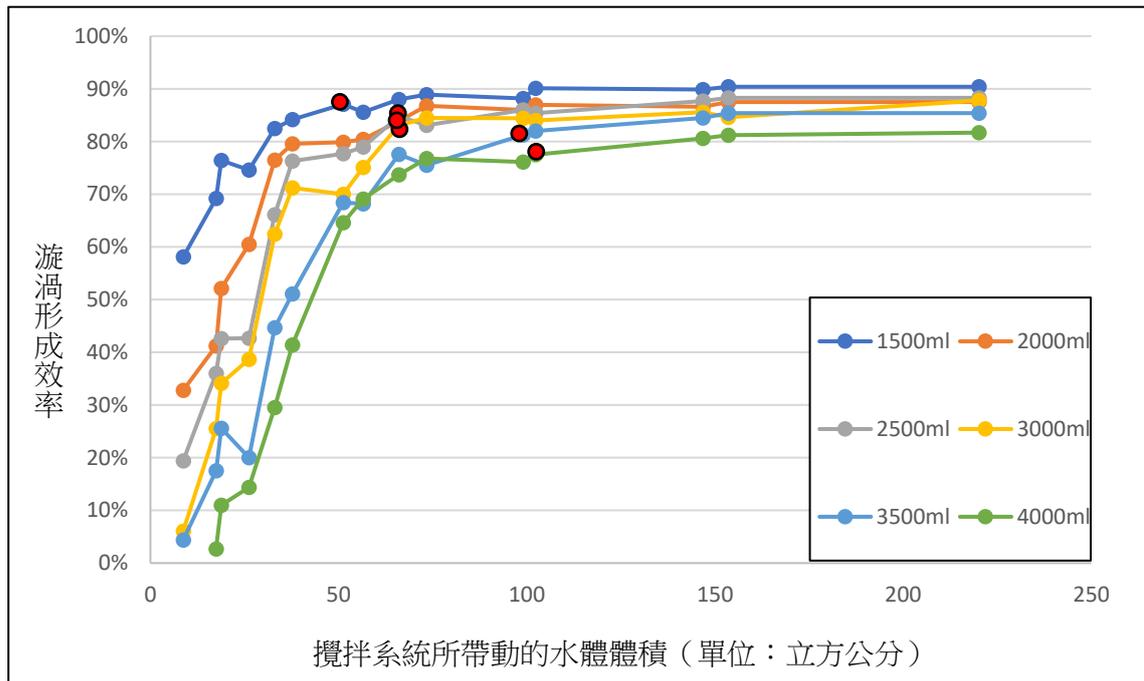


圖 7-1

1. 圖中各點表示在不同攪拌位置與深度時，攪拌系統所帶動的水體體積與漩渦形成效率的關係。
2. 在六種起始水量中，渦管生成時間的數據大致可分成圖中紅點以左與紅點以右兩個部分。紅點以左的實驗數據中，若增加攪拌子所帶動的水體體積，能有效地增加漩渦形成效率；然而，在紅點以右的實驗數據中，再增大攪拌子所帶動的水體體積則無法明顯地加速漩渦形成效率。
3. 紅點上各點表示不同水量下個別的核心區所帶動的水體體積，當攪拌子所帶動的水體體積大於核心區時，漩渦形成效率趨於水平且不再有明顯變化。

(三)改變攪拌子所帶動的水體體積及實驗容器（圖 7-2）：

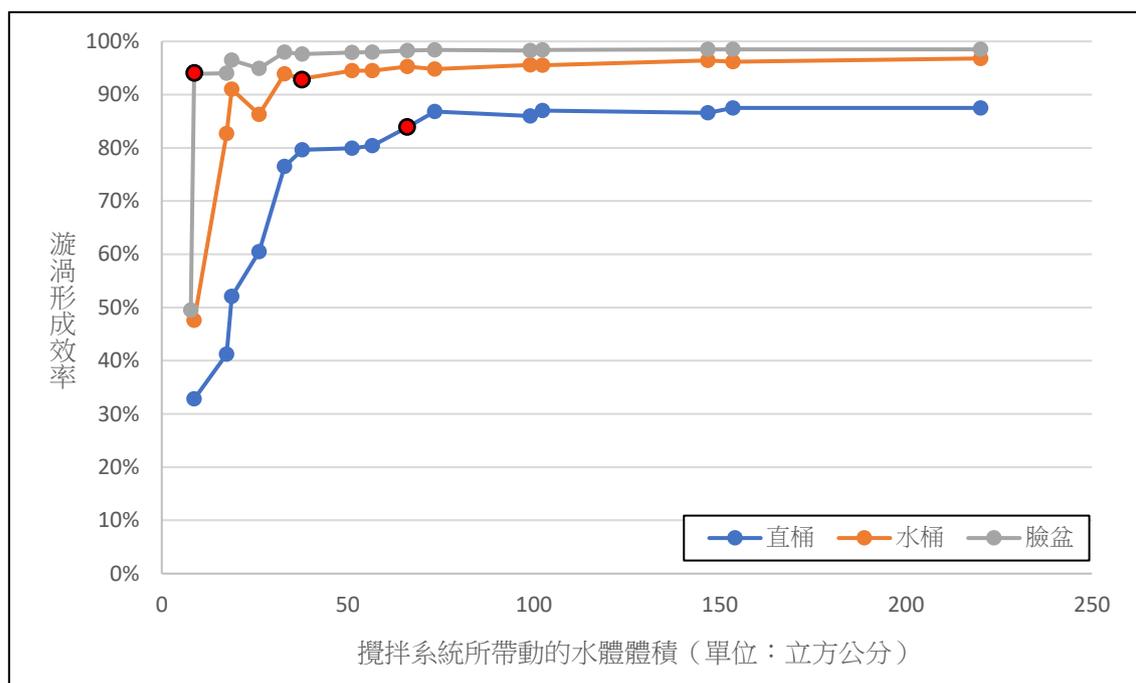


圖 7-2

1. 圖中各點表示在不同攪拌位置與深度時，攪拌系統所帶動的水體體積與漩渦形成效率的關係。
2. 紅點表是三種實驗容器各自的核心區，同於改變水量的效果，當攪拌子所帶動的水體體積大於核心區時，漩渦形成效率不再走明顯的改變。
3. 比對三種實驗容器紅線以右的實驗數據，可發現在攪拌系統所帶動的水體體積相同的情況之下，臉盆的漩渦形成效率最大、水桶次之、直桶最小，此為起始液面高度與放流孔的距離不同所造成的差異。

(四)漩渦形成效率極限：

1. 由上述可知，不論改變起始水量或實驗容器，若攪拌子所帶動的水體體積大於核心區時漩渦形成效率皆趨近於水平，我們將其定義為該條件下的漩渦形成效率極限，其意義為漩渦形成效率的最大值，再增大攪拌系統所帶動的水體體積也無法使漩渦形成效率進一步地提升。而在不同起始水量的條件下，起始液面高度與放流孔的距離也不同，表 7-1 為結合各種起始水量與實驗容器攪拌範圍大於核心區時的漩渦形成效率平均，得出起始液面高度與漩渦形成效率極限的線性關係（圖

7-3)。

表 7-1

	臉盆 3000 毫升	水桶 3000 毫升	直桶 1500 毫升	直桶 2000 毫升	直桶 2500 毫升	直桶 3000 毫升	直桶 3500 毫升	直桶 4000 毫升
液面至放流孔距離 H_0	6	12	16.5	22	27.5	33	38.5	44
漩渦形成效率極限	97.3%	95.1%	88.7%	86.5%	86.2%	84.9%	83.7%	80.3%

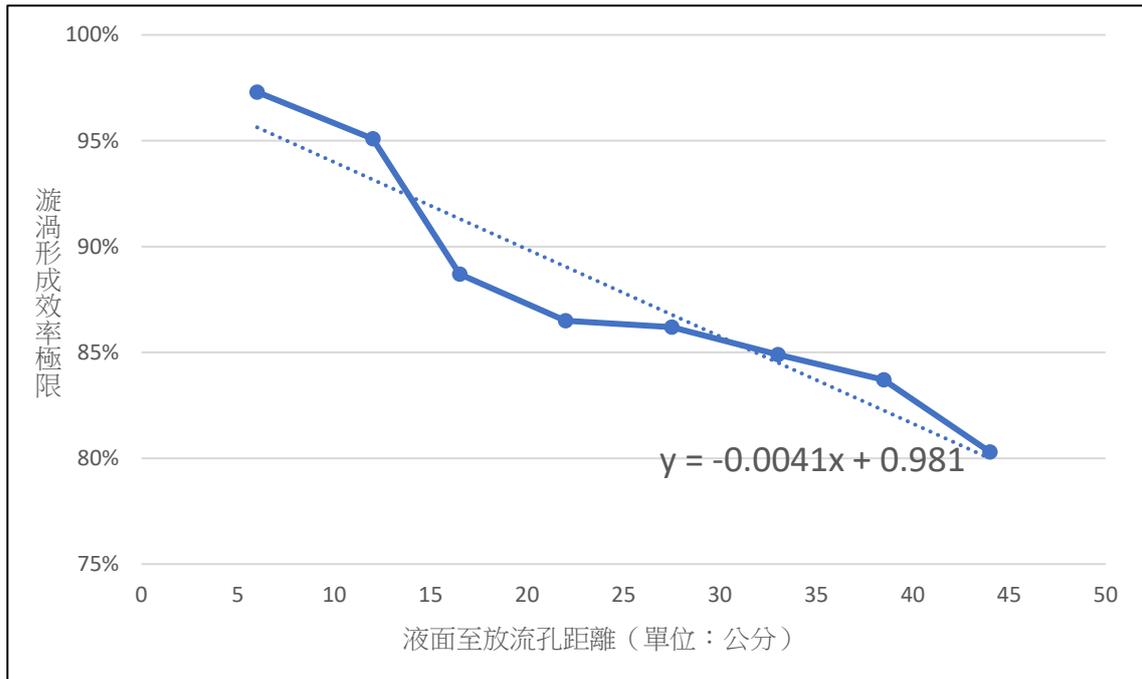


圖 7-3

2. 為此，只要擁有起始液面高度 H_0 的數據，便可求出該條件之下的漩渦形成效率極限，結合水體放流完總時長 T ，可得出渦管最快生成的時間。

二、建立漩渦形成模型

(一)根據實驗 7 的實驗數據，我們更進一步利用各半徑位置流速的變化差異將漩渦分成成長期、成熟期、衰退期。

1. 成長期：為渦凹產生至渦管生成的階段，而此階段的時間長短則受到攪拌效應的影響。由實驗 6 流線的形式得知，流場於此時由渦凹時期的平面環狀的封閉流線進一步透過白努力原理成為渦管時期的螺線。在迴轉式攪拌結束後，不在持續提供垂直半徑方向上的速度分量，而圓心周圍的水流透過液面下降的重力位能加速作用，使得流速明顯提升。成長期為流速調整的階段，水體將在此階段形成自由

渦流，最終呈現流速與半徑距離成反比關係。

- 2.成熟期：渦管於此階段形成，漩渦現象已成熟，各半徑位置的水流透過重力位能轉換成動能的機制而獲得提升，扣除原先攪拌系統所造成的垂直半徑的速度分量，各半徑流速於此階段達到最大。
- 3.衰退期：在有限水量放流的條件下，漩渦終究會結束並消失。此階段佔漩渦總期程最多的時間，而又因為液面下降速率降低，造成位量轉換效率下降，使得流速於此階段降低並趨於平緩。

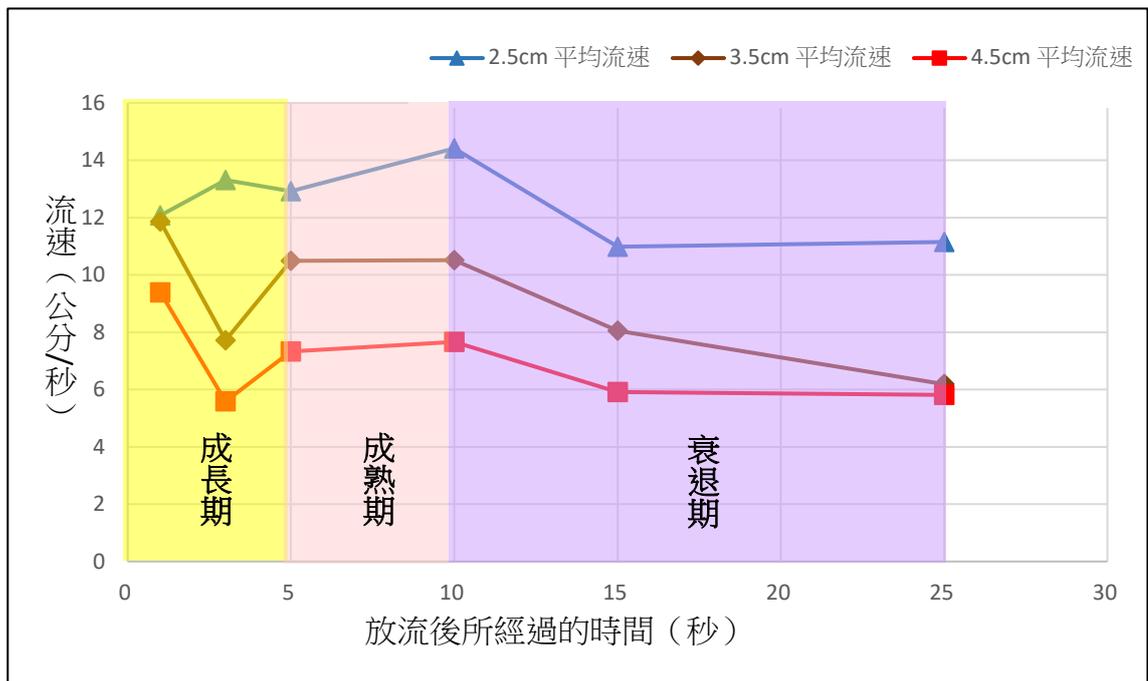


圖 7-4

捌、結論

透過上述實驗，我們分別推出以下結論：

- 一、由實驗 1 可得知：靜置且不受攪拌的水經底部放流時不會形成漩渦，水僅沿著半徑方向並順放流孔流出，水的流速不會產生垂直半徑方向上的速度分量，因此不會形成漩渦。自實驗 2 開始，我們以迴轉式攪拌子攪拌水體，透過人為產生垂直半徑方向上的速度分量使得漩渦自然形成，此為漩渦形成的關鍵。
- 二、由實驗 2 可得知：核心區範圍會受到水量多寡而有所影響，此為改變水量的時液面至放流孔的距離同時改變所造成的現象。

- 三、由實驗 3 可得知：核心區範圍會受到容器直徑與高度的比例與外在環境變化而有所影響，且寬扁容器較高瘦容器所需的渦管生成時間來得短，此為液面與放流孔距離所影響的結果。
- 四、由實驗 4 可得知：核心區範圍會受到放流孔大小而有所改變，且放流孔愈大時核心區範圍愈大。
- 五、由實驗 5 可得知：漩渦影響範圍僅限於渦管周圍的水體，其餘皆為不受漩渦現象影響的漩渦影響範圍外鋼體。
- 六、由實驗 6 可得知：漩渦形成前液面流場會呈現封閉且環狀的圓，漩渦形成之後則會產生向內的螺線。
- 七、由實驗 7 可得知：在自由放流之後初期仍結合強制渦流的效應，而渦凹產生後即形成自由渦流的現象，且流速與半徑距離成反比關係。
- 八、由實驗 8 可得知：在不放流的情況下，1 秒瞬間仍受到攪拌系統所造成的強制渦流影響，流速大致上會隨著時間而下降。
- 九、由實驗 9 可得知：漩渦形成後會呈現向內的螺線乃白努力原理所造成的結果。

玖、未來展望

透過本次研究，我們了解水體於靜置的情況下並不會形成漩渦，並透過改變攪拌條件來探討核心區體積的變化與起始液面至放流孔距離的關係，最後利用各位置的流速隨時間的變化將漩渦分成三個期程來建立漩渦形成模型。未來，仍可進一步探討下列研究方向：

- 一、核心區範圍與流體密度及黏度等之間的關係。
- 二、除本次觀測的水面各點的流速外，漩渦內各點的實際流速仍待更高速、更高解析度的攝影器材協助分析。
- 三、水流彼此間的作用力、壓力的量化。
- 四、漩渦整體動能、流體能量內耗與重力位能管換機制的量化關係。
- 五、計算外界輸入水體的能量與渦管生成時間的關係。

拾、參考資料

- 1.林可涵、廖子萱（2007）。「漩」機重重。中華民國第四十七屆中小學科學展覽會高中組物理科作品說明書。<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/47/senior/040101.pdf>
- 2.平震傑、左伊心（2008）。神祕的拉扯——漩渦與漩渦現象的探討。中華民國第四十八屆中小學科學展覽會國中組生物及地球科學科作品說明書。<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/48/high/031726.pdf>
- 3.林奕汝、賴玟羽、洪文心（2001）。“漩”機妙算。中華民國第 52 屆中小學科學展覽會高中組物理科作品說明書。<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/52/pdf/040101.pdf>
- 4.林峻瑋、蘇益加、張瑞文、黃福坤、賈至達（2001）。簡易而精確的伯努力定律實驗。科學教育月刊，295。[http://www.sec.ntnu.edu.tw/Monthly/95\(286-295\)/295-PDF/03.pdf](http://www.sec.ntnu.edu.tw/Monthly/95(286-295)/295-PDF/03.pdf)
- 5.陳奕中（2003）。漩渦之美。臺灣 2003 年國際科學展覽會。<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-2/International2003/pdf/020006.pdf>
- 6.黃靖純、吳佳倩、邱欣姿（2001）。渦流試驗。逢甲大學學生報告。[http://www.sec.ntnu.edu.tw/Monthly/95\(286-295\)/295-PDF/03.pdf](http://www.sec.ntnu.edu.tw/Monthly/95(286-295)/295-PDF/03.pdf)
- 7.Azarpira & Zarrati.（2019）. Water Science and Engineering. *Issue.*（12）3, 244-252.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237019300778>
- 8.Peter R.N. Childs.（2011）. *Rotating Flow*.<https://reurl.cc/arkGz>

【評語】 051815

本作品建立與探討水槽放水時漩渦形成之模型。特別是發現藉由攪拌帶動核心區的水體可使漩渦自然且快速產生。因此，為有效產生漩渦，作者計算出核心區的體積、液面起始高度至放流孔距離及漩渦形成效率之關係。

渦流產生的原因與起始角動量有關，除了與各位置相鄰水流彼此作用及流速調整產生外，也由實驗推知外圍水流依白努力原理而向內壓迫內圈水流，使流速向內偏向，最終呈現螺線形流線。

本作品在實驗設計、流程分析上，雖能顯現探討議題，但並未有創新的作法，特別是定量定出起始角動量之大小，另外在實驗方法上，也欠缺能定量定出產生渦流的量值的方法，為本作品可改善之處。在攪拌器的設計上，可更為精準與彈性，例如直接在出水口以小型之攪拌器攪拌。

研究動機

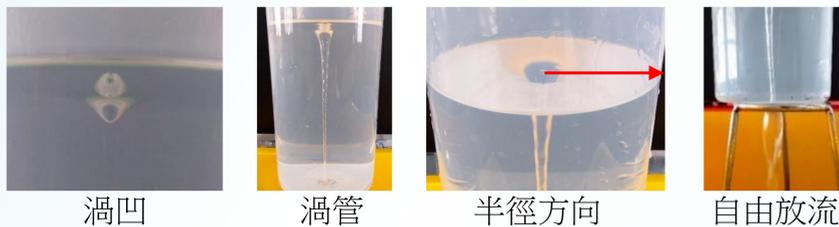
起初我們將漏斗放在桶底，並改變其表面紋路來引導漩渦的形成，卻發現此與漩渦形成無顯著關係。接著我們從擾動對漩渦形成進行初步研究，並進一步探討影響漩渦形成的成因、造成的趨勢與其中原理，希望能對漩渦有更深入的认识。

研究目的

- 探討靜止水經桶底放流會不會形成漩渦。
- 探討影響漩渦形成的因素及趨勢。
- 建立漩渦形成模型。

名詞解釋

- **渦凹、渦管**：渦凹為漩渦形成之凹陷處；渦管為漩渦成熟所造成的中央空氣柱。
- **半徑方向**：漩渦中心指向液面上任一點的方向。
- **自由放流**：水在自然情況下放流。



研究架構圖

探討靜止水經桶底放流會不會形成漩渦

實驗1：觀察靜置水體經放流是否形成漩渦

實驗2：探討水量與核心區範圍的關係

探討影響漩渦形成的因素及趨勢

實驗3：探討不同直徑與高度比例的容器與核心區範圍關係

實驗4：探討放流孔大小與核心區範圍的關係

實驗5：觀察漩渦主體內外流場的差異性

建立漩渦形成模型

實驗6：觀測流場表面的流線型式

實驗7：攪拌結束後、放流，觀測流場表面各位置的流速隨時間之變化

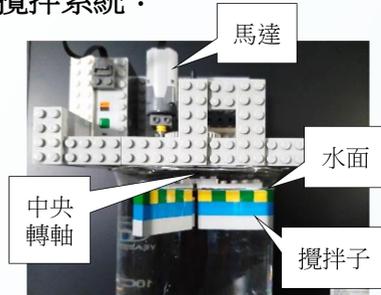
實驗8：攪拌結束後、不放流，觀測流場表面各位置的流速隨時間之變化

實驗9：探討相鄰水流產生速度方向偏轉的現象

研究設備及器材

實驗設備及用途

● 攪拌系統：



- **盛水容器**：為減少水流衝擊容器造成能量損失干擾實驗數據，我們選擇平面對稱的圓形容器來進行實驗。



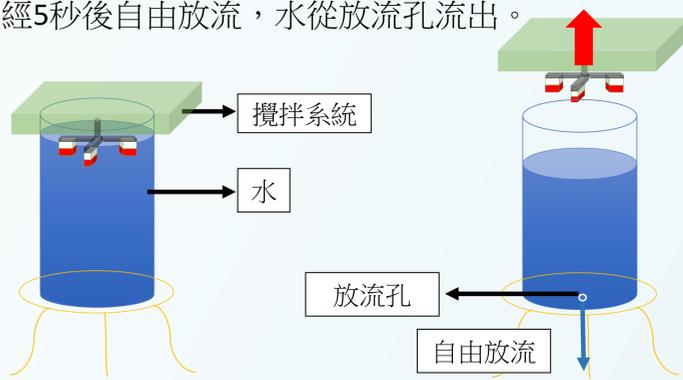
實驗裝置及說明

觀察漩渦形成等現象及白努力原理的裝置。



實驗操作

- 靜置60秒，攪拌60秒。
- 攪拌結束後將攪拌系統垂直拿起。
- 再經5秒後自由放流，水從放流孔流出。

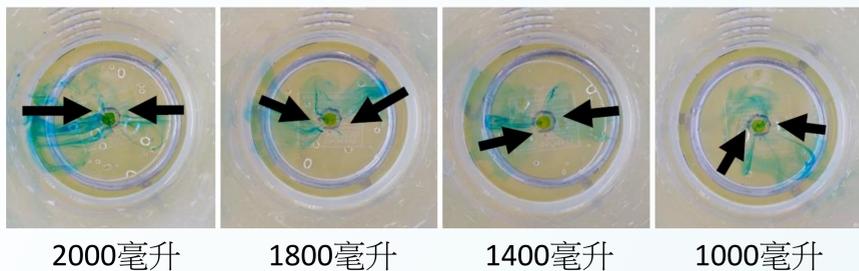


研究成果

探討靜止水經桶底放流會不會形成漩渦

實驗1：觀察靜置水體經放流是否形成漩渦

- **實驗影像紀錄**：以染液觀察流場，呈現無旋轉且沿半徑方向流進放流孔。
- **分析**：在四種起始水量中，水在靜置且不受擾動下，無法產生垂直半徑方向的速度分量，故無法形成漩渦。

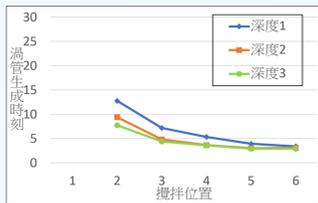


探討影響漩渦形成的因素及趨勢

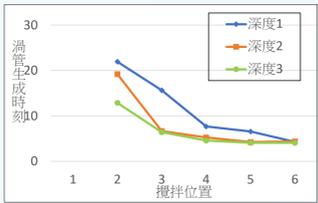
實驗2：探討水量與核心區範圍的關係

- **渦管生成時刻數據與圖形**：（單位：秒）

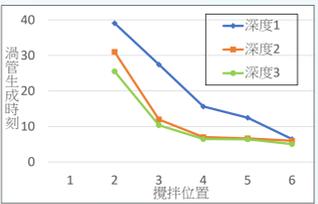
1500毫升	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	12.75	7.17	5.32	3.91	3.37
深度2	X	9.38	4.81	3.63	3	3.06
深度3	X	7.72	4.37	3.59	2.9	2.9



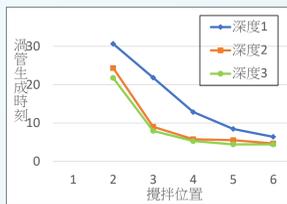
2000毫升	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	21.93	15.63	7.66	6.56	4.28
深度2	X	19.19	6.65	5.24	4.24	4.37
深度3	X	12.87	6.4	4.56	4.06	4.06



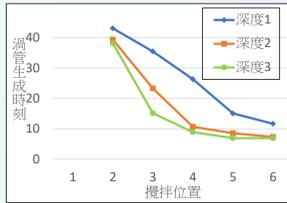
2500毫升	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	30.64	21.82	12.86	8.45	6.39
深度2	X	24.33	9.01	5.77	5.52	4.66
深度3	X	21.76	7.96	5.29	4.43	4.43



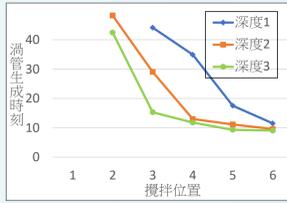
3000毫升	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	39.75	30.1	15.61	12.45	6.44
深度2	X	30.98	11.97	7	6.65	5.97
深度3	X	25.5	10.36	6.47	6.38	5.04



3500毫升	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	43.04	35.46	26.34	15.06	11.67
深度2	X	39.35	23.31	10.68	8.57	7.35
深度3	X	38.14	15.17	8.92	6.96	6.96



4000毫升	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	X	44.14	34.94	17.55	11.51
深度2	X	48.27	29.05	13.01	11.13	9.58
深度3	X	42.44	15.32	11.82	9.32	9.07



● 分析：

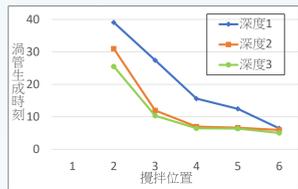
- 我們將核心區定義為能夠快速且有效地生成渦管的最小範圍，若攪拌子所擾動的範圍大於核心區，渦管生成時間的差距值必須在水體放流完總時長的±5%。當攪拌子所帶動的水體涵蓋核心區的範圍時，漩渦形成時間趨於一致。反之，當攪拌子所帶動的水體小於核心區時，需耗費較多時間使得渦凹向下延伸生成渦管。
- 礙於攪拌子組裝限制，其所帶動的水體體積非連續數列，造成不同水量卻有相同核心區的結果。
- 當起始水量越大，核心區也隨之提升，意即若要使更多的水體形成漩渦現象，同時也需要更多的能量。



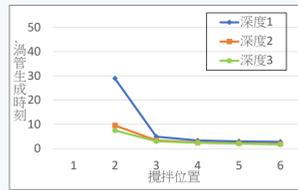
實驗3：探討不同直徑與高度比例的容器與核心區範圍的關係

● 渦管生成時刻數據與圖形：（單位：秒）

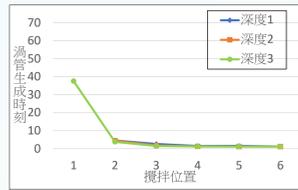
直桶	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	39.75	30.1	15.61	12.45	6.44
深度2	X	30.98	11.97	7	6.65	5.97
深度3	X	25.5	10.36	6.47	6.38	5.04



水桶	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	28.92	4.94	3.35	3.01	2.83
深度2	X	9.56	3.43	2.55	2.22	1.96
深度3	X	7.53	3.04	2.4	2.06	1.74

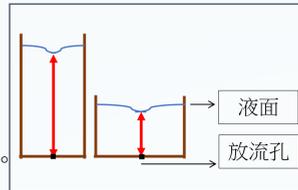


臉盆	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	4.49	2.54	1.45	1.51	1.12
深度2	X	4.42	1.73	1.22	1.13	1.09
深度3	37.56	3.76	1.44	1.2	1.11	1.06



● 分析：

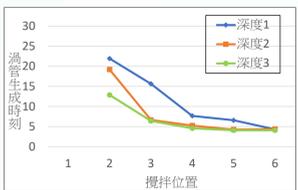
- 比對不同容器在相同攪拌條件下，臉盆的渦管生成時間最快、水桶次之、直桶最慢，此為液面與放流孔距離不同所致。



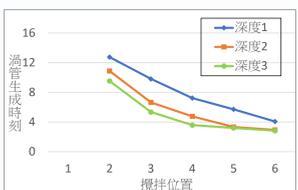
實驗4：探討放流孔大小與核心區範圍的關係

● 渦管生成時刻數據與圖形：（單位：秒）

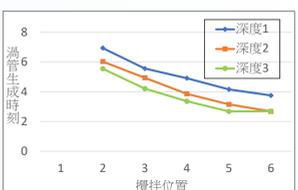
孔徑 1.0公分	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	21.93	15.63	7.66	6.56	4.28
深度2	X	19.19	6.65	5.24	4.24	4.37
深度3	X	12.87	6.4	4.56	4.06	4.06



孔徑 1.5公分	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	12.75	9.81	7.23	5.71	4.07
深度2	X	10.88	6.64	4.76	3.33	2.94
深度3	X	9.53	5.34	3.58	3.2	2.83



孔徑 2.0公分	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6
深度1	X	6.94	5.56	4.91	4.16	3.75
深度2	X	6.03	4.94	3.86	3.15	2.68
深度3	X	5.55	4.21	3.36	2.68	2.69



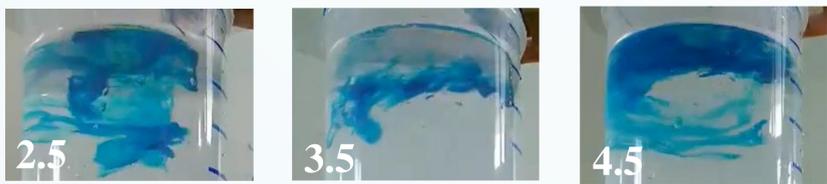
● 分析：

- 水量2000毫升的條件之下，加大放流孔大小可有效地減少放流所需時間。
- 結合前項實驗，起始水量、容器比例（外在環境）與放流孔大小皆會影響核心區的體積（表中紅框）。

實驗5：觀察漩渦主體內外流場的差異性

● 實驗影像紀錄：

攪拌完放流後1秒，染液滴在2.5、3.5、4.5公分位置



攪拌完放流後15秒，染液滴在2.5、3.5、4.5公分位置



● 分析：

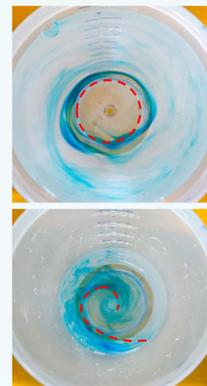
- 放流後1秒時漩渦尚未形成，染液環繞圓心。
- 放流後15秒時渦管已成熟，不論何處滴入染液，水體內部的染液僅環繞漩管周圍，無與周遭水體產生混和現象。
- 漩渦影響範圍僅限渦管周遭部分水體，其餘無染液的水體未受漩渦影響，我們將其稱為漩渦影響範圍外剛體。

► 建立漩渦成長模型

實驗6：觀測流場表面的流線型式

● 實驗影像紀錄與分析：

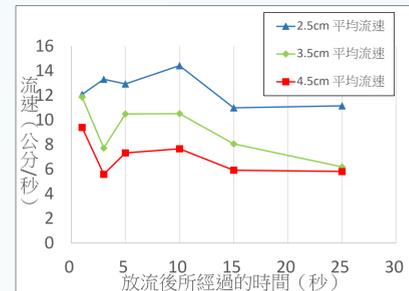
- 放流後5秒：染液於水面形成封閉且環狀的圓，無任何染液進入圓內區域。
- 放流後15秒：流場呈現向內的螺線形式，無明顯的封閉環狀流場。



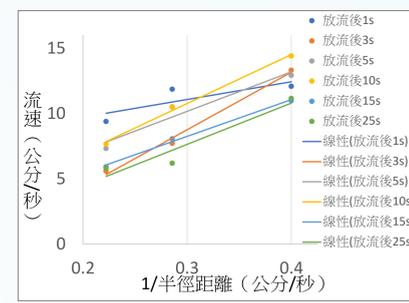
實驗7：攪拌結束後、放流，觀測流場表面各位置的流速隨時間之變化

● 液面流速數據與圖形：（單位：公分/秒）

放流經過時間	自圓心算起之半徑觀測位置		
	2.5公分	3.5公分	4.5公分
1秒	12.08	11.86	9.39
3秒	13.31	7.71	5.59
5秒	12.92	10.49	7.32
10秒	14.41	10.52	7.66
15秒	10.98	8.06	5.92
25秒	11.15	6.19	5.82



時間	回歸方程	R²
1秒	y=13.53x+7.01	0.67
3秒	y=44.10x-4.47	0.99
5秒	y=30.28x+1.07	0.94
10秒	y=37.53x-0.49	0.99
15秒	y=28.15x-0.20	0.99
25秒	y=31.59x-1.84	0.91



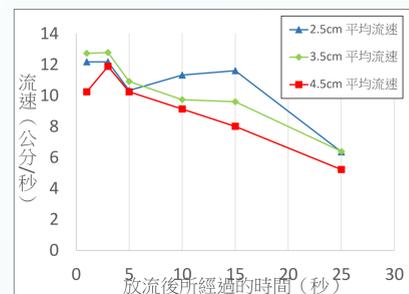
● 分析：

- 在自由渦流情況下 rV 切線方向流速 $=\Gamma/2\pi$ ， r 與 V 成反比關係。為了驗證我們流速測量方式的可信性，我們以半徑距離的倒數為橫軸作圖並得出回歸方程。
- 放流後1秒：此刻 R^2 較小，是因為漩渦現象尚未形成，流場正處於形成自由渦流前的階段。
- 放流3秒以後：推論出自由渦流現象在渦凹產生後隨之形成，也進一步驗證我們流速測量方式的可信性。

實驗8：攪拌結束後、不放流，觀測流場表面各位置的流速隨時間之變化

● 液面流速數據與圖形：（單位：公分/秒）

放流經過時間	自圓心算起之半徑觀測位置		
	2.5公分	3.5公分	4.5公分
1秒	12.18	12.73	10.24
3秒	12.18	12.78	11.88
5秒	10.33	10.91	10.24
10秒	11.32	9.73	9.13
15秒	11.61	9.60	8.01
25秒	6.36	6.39	5.22

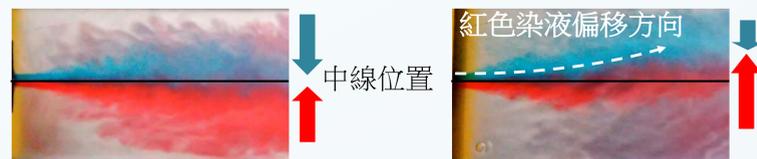


● 分析：

- 強制渦流在動力源移除後僅能維持1-3秒，而我們在其他實驗中攪拌完後等待5秒才自由放流，也是為了消除垂直拿起攪拌系統與強制渦流所造成的影響。

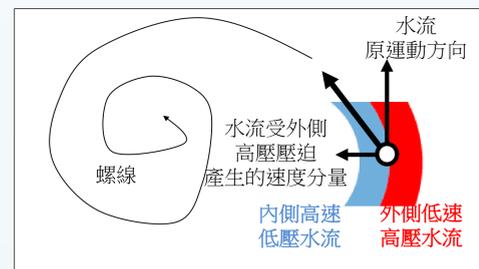
實驗9：探討相鄰水體因流速不同引起壓力差異，產生速度方向偏轉的現象

● 實驗影像紀錄：



● 分析：

- 白努力實驗可解釋漩渦流場成螺線的原因，漩渦內側高流速水流受外側低流速水流壓迫而偏轉形成向內的螺線。



討論

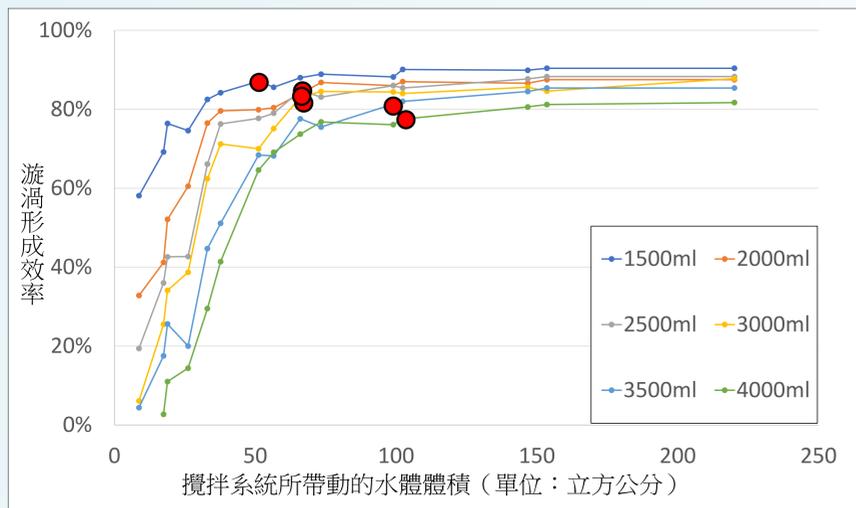
● 漩渦形成效率與極限

- 為了探討漩渦在不同起始水量的情況之下漩渦的形成效率，我們分析渦管存在的總時長與水放流結束所需時間的關係，進一步了解不同條件之下漩渦形成的最大效率，如下列公式：

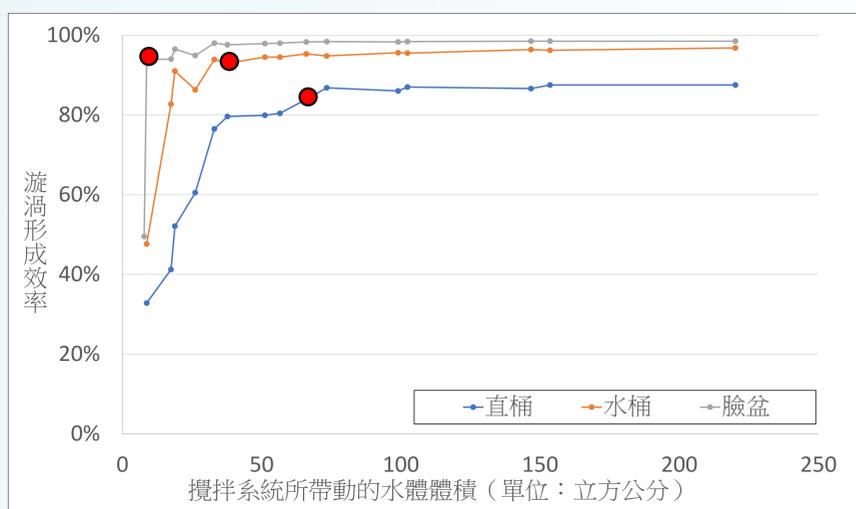
漩渦形成效率 =

$$1 - \left(\frac{\text{渦管生成時間}}{\text{水體放流完總時長 } \tau} \right) \times 100\%$$

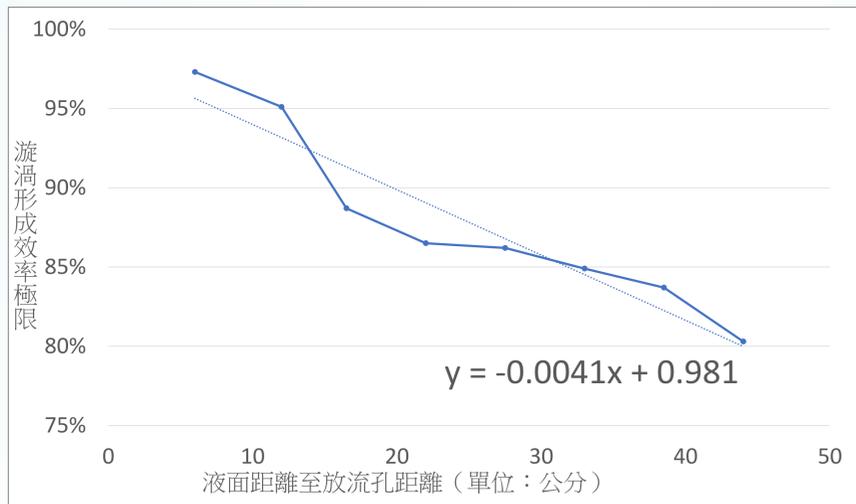
- 下圖分別為六種起始水量，紅點表示核心區所帶動的水體體積，當攪拌子所帶動的水體體積大於核心區時，漩渦形成效率趨於水平。



- 下圖三種實驗容器紅點以右的實驗數據，可發現臉盆的漩渦形成效率最大、水桶次之、直桶最小，此為起始液面高度與放流孔的距離不同所造成的差異。

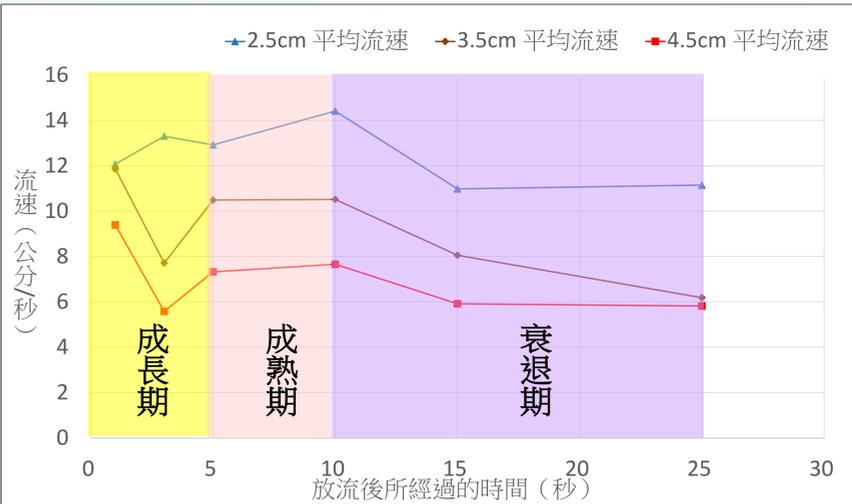


- 不論改變起始水量或實驗容器，若攪拌子所帶動的水體體積大於核心區時漩渦形成效率皆不再改變，我們將其定義為該條件下的漩渦形成效率極限，其意義為漩渦形成效率的最大值。下圖為結合各種起始水量與實驗容器攪拌範圍大於核心區時的漩渦形成效率平均，得出起始液面高度與漩渦形成效率極限的線性關係。



● 建立漩渦形成模型

- 成長期：**為渦凹產生至渦管生成的階段，在迴轉式攪拌結束後，圓心周圍的水流透過液面下降的重力位能加速作用，使得流速明顯提升。
- 成熟期：**渦管於此階段形成，漩渦現象已成熟，各半徑位置的水流透過重力位能轉換成動能的機制而獲得提升。
- 衰退期：**因液面下降速率降低，造成位能轉換效率下降，使此時流速降低並趨於平緩。



結論

- 形成漩渦必須使水流產生垂直半徑方向上的速度分量。
- 影響漩渦形成的因素及趨勢
- 起始水量：
當起始水量越大，核心區也隨之提升，意即若要使更多的水體形成漩渦現象，同時也需要更多的能量。
- 不同直徑與高度比例的容器：
寬扁容器較高瘦容器所需的渦管生成時間來得短，此為液面與放流孔距離所影響的結果。
- 放流孔大小：放流孔愈大時核心區範圍愈大。
- 建立漩渦形成模型
- 在自由放流之後初期仍結合強制渦流的效應，而渦凹產生後即形成自由渦流的現象，且流速與半徑距離成反比關係。
- 在不放流的情況下，1秒瞬間仍受到攪拌系統所造成的強制渦流影響，流速大致上會隨著時間而下降。
- 漩渦形成呈現向內的螺線為白努力原理造成的結果。

參考資料

- 林可涵、廖子萱(2007)。「漩」機重重。中華民國第四十七屆中小學科學展覽會高中組物理科作品說明書。
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/47/senior/040101.pdf>
- 平震傑、左伊心(2008)。神秘的拉扯—漩渦與漩渦現象的探討。中華民國第四十八屆中小學科學展覽會國中組生物及地球科學科作品說明書。
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/48/high/031726.pdf>
- 林奕汝、賴玟羽、洪文心(2001)。「漩」機妙算。中華民國第52屆中小學科學展覽會高中組物理科作品說明書。
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/52/pdf/040101.pdf>
- 林峻瑋、蘇益加、張瑞文、黃福坤、賈至達(2001)。簡易而精確的伯努力定律實驗。科學教育月刊，295。
[http://www.sec.ntnu.edu.tw/Monthly/95\(286-295\)/295-PDF/03.pdf](http://www.sec.ntnu.edu.tw/Monthly/95(286-295)/295-PDF/03.pdf)
- 陳奕中(2003)。漩渦之美。臺灣2003年國際科學展覽會。
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race2/International2003/pdf/020006.pdf>
- 黃靖純、吳佳倩、邱欣姿(2001)。渦流試驗。逢甲大學學生報告。
[http://www.sec.ntnu.edu.tw/Monthly/95\(286-295\)/295-PDF/03.pdf](http://www.sec.ntnu.edu.tw/Monthly/95(286-295)/295-PDF/03.pdf)

未來展望

- 核心區範圍與流體密度與黏度等之間的關係。
- 除本次觀測的水面各點的流速外，漩渦內各點的實際流速仍待更高速、更高解析度的攝影器材協助分析。
- 水流彼此間的作用力、壓力的量化。
- 漩渦整體動能、流體能量內耗與重力位能轉換機制的量化關係。
- 計算外界輸入水體的能量與渦管生成時間的關係。