

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 物理科

第二名

030111

水中的甜甜圈---渦環運動的觀察與研究

學校名稱：臺北市立石牌國民中學

作者：  國二 劉家伶  國二 呂語蘋	指導老師：  鄭鈺亮  黃泰日
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：渦環、伯努力定律、表面張力

# 摘要

渦環是生活中一種很有趣的小玩意兒，就和煙圈類似，有它形成的原理和條件。然而，要描述它的運動模式，或是探討不同因素對渦環造成的影響，似乎不甚容易！

所幸，現在物理的教學資源豐富，我們使用現代化記錄器材與免費物理運動分析軟體-Tracker，使得我們不需用昂貴的實驗器材，也可以針對渦環的運動作準確的研究。

我們想知道液滴從不同高度落入水中，對於渦環的最大深度、垂直下降速度與環部的直徑擴張有何關係？不同的水溫或在水中加入清潔劑，對渦環有什麼影響？液滴在任何高度滴落水中都會形成渦環嗎？液滴重量與最大高度有何關係？是否可以在其他方向注入液滴而形成渦環？經過一系列的探究活動之後，讓我們對於渦環的運動有了更深一層的體認。

## 壹、研究動機

接到一封朋友寄來的電子郵件，裡面附著一個網址，那是在 youtube 上面的影片，內容是一隻海豚愉快的與自己製造出來的「氣泡環」玩耍。因為被這影片深深吸引，於是針對這部影片的關鍵字「Vortex Ring」（渦環）搜索相關資料。

在 google 上找到不少自製渦環的方法，其中在「澳洲 ABC」電視台的科學節目「Surfing Scientist」中介紹的方式 (<http://www.abc.net.au/science/surfingscientist/toroidalvortex.htm>) 最為簡單，只要將食用色素溶液自水面上滴落，就會在水面下形成渦環。我們親自實作後，覺得非常奇妙！但究竟這渦環是怎麼形成的？到底有哪些因素會對渦環造成的影響？

為了進一步認識渦環的運動模式，我們閱讀了有關流體力學、液體壓力、阻力、摩擦力、熱對流等文章，並且學習了網路容易取得的工具與免費軟體，讓我們能更精準的分析渦環的運動，以揭開這其中的奧秘。

## 貳、研究目的

- 一、 探討不同高度的液滴對於渦環的影響
  1. 渦環最大深度探討
  2. 渦環垂直速度探討
  3. 渦環直徑變化探討
- 二、 探討液滴滴落不同溫度的水中對於渦環的影響
  1. 渦環最大深度探討
  2. 渦環垂直速度探討
  3. 渦環直徑變化探討
- 三、 探討水中加入清潔劑對於渦環的影響
  1. 渦環最大深度探討
  2. 渦環垂直速度探討
  3. 渦環直徑變化探討
- 四、 探討渦環形成的方向性（反向渦環的形成）
- 五、 探討渦環形成時液滴重量與最大高度的關係

## 參、研究設備及器材

### 一、 穩定液滴下落設備

1. 洗瓶（250 mL）
2. 點滴輸液套件（TERUMO®）
3. 微滴管頭（18、20、22、24 號）



圖 1 洗瓶與輸液套件

### 二、 主體部分

1. 透明塑膠方瓶（標記比例尺）
2. 相機腳架、雲台板
3. 木製平臺、洗瓶固定架、鐵夾

### 三、 記錄與分析設備

1. 攝影機、相機、腳架
2. 筆記型電腦
3. 軟體： Tracker、WinSnap（報告製作時擷取電腦畫面使用）、JAVA、Microsoft Word、Excel、KMPlayer、PowerDVD、PhotoImpact

### 四、 其餘部分

1. 食用色素紅色 40 號電子秤
2. 竹籤、保麗龍
3. 刮勺、滴管量筒、燒杯



圖 2 食用色素紅色 40 號與電子秤

## 肆、研究過程與方法

◎參考文獻與理論探討

### 一、伯努力定理

用於描述不具黏性、連續的流體的行為，主要討論其速度與壓力的關係。

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + p = \text{const.}$$

( $\rho$  為密度， $v$  為速度， $g$  為重力加速度， $p$  為壓力)

由公式我們可以看的出來，對於同一個水平面而言，流體速度越快，壓力就越小。

### 二、免費物理分析軟體-Tracker

美國 Cabrillo College 的 Doug Brown 教授所開發，可以一個畫格一個畫格分析影片的免費軟體。本實驗規劃初期本來打算將影片分為很多張圖片，在列印出來用尺筆分析，索性在師大物理討論區，看到黃福坤教授分享這樣的軟體，所以改採用這個便利的免費工具。

Tracker 使用前必須先安裝 JAVA 程式，並可以分析 MOV 影片或是 JPG 的圖片，若要分析 MOV 影片必須先安裝 QuickTime。因為我們在嘗試使用 MOV 影片時，常發生不知原因的錯誤而無法使用 Tracker 開啓影片檔案，所以本實驗中的分析都是另利用 KMPlayer 擷取影片轉為 JPG 檔，再放入 Tracker 分析。

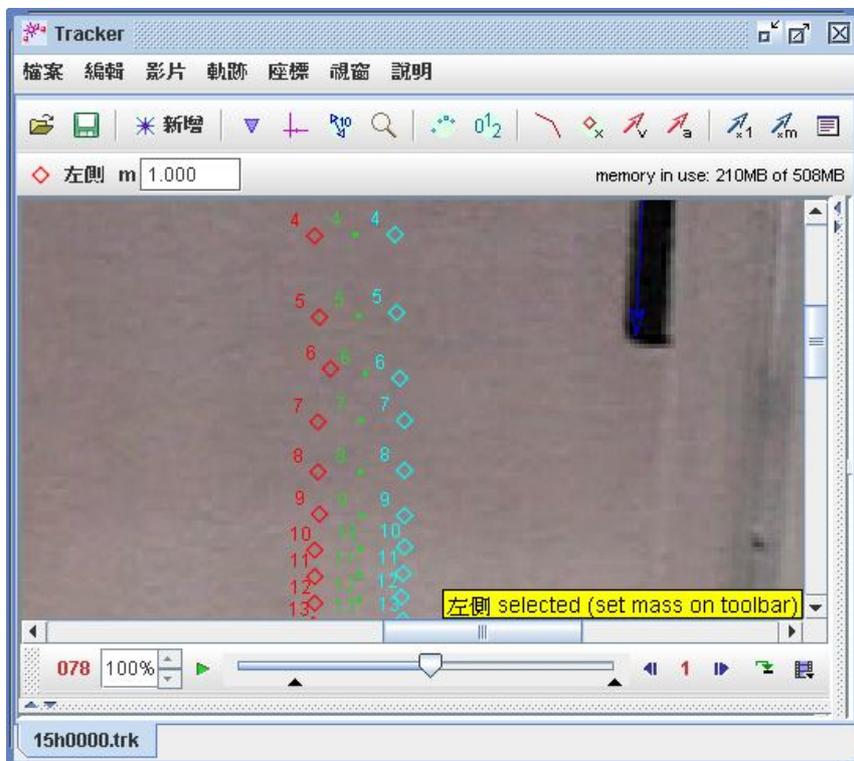


圖 3 免費物理分析軟體 -Tracker

### 三、關於渦環的形成

若我們將一固體自乙液體液面上自由釋放，當此固體在液面下下落的過程，我們可以假想為液體由下方往上沖向固體，如圖 4 所示。

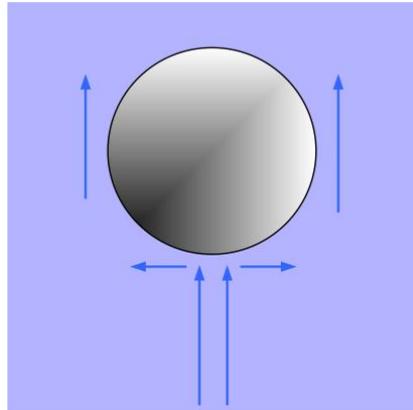


圖 4

乙液體會順著固體流動，但是由於下落的是固體，所以固體本身不會有形變。

但是當較快速甲液體滴入穩定的乙液體時（甲乙兩液體必須能互溶），在甲液體外層因為受乙液體向上的牽引力而流速減慢，但是甲液體中間的並不會受到影響而保持速度。若是我們將此觀念與固體下落的想像結合在一起的話，我們假想乙液體由下向上沖擊甲液體，甲液體的下緣因向外的乙液體的應力而沿展，並且邊緣兩側因著向上的應力，使得中央上緣較周圍來得低。如圖 5 所示。

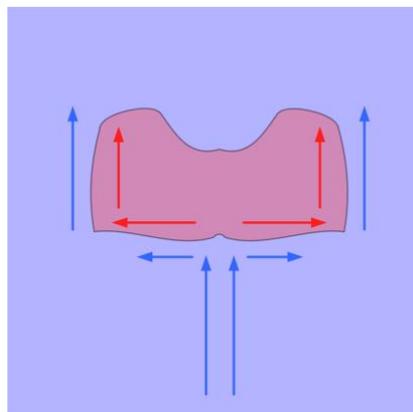


圖 5

由於甲液體的上緣下凹因此有著較小的壓力，使得周遭的乙液體向甲液滴中間被吸引（圖 6），而切割甲液滴整個扭曲形成渦環。

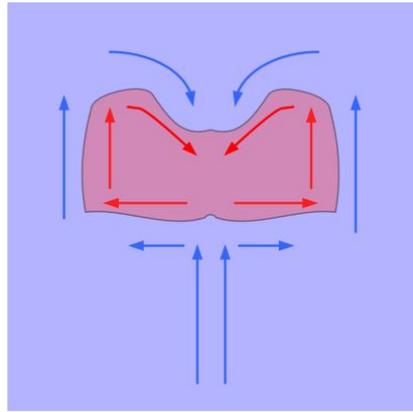


圖 6

並且由於下側水持續向上沖（圖 7 左），並且在甲液體周圍的乙液體會隨著甲液體流動-渦環內環的流動速度（圖 7 中），於是將兩種方向合併（圖 7 右），造成了渦環中央的流速會低於周著的流速，根據伯努力定律，使得渦環逐漸增加它的直徑。

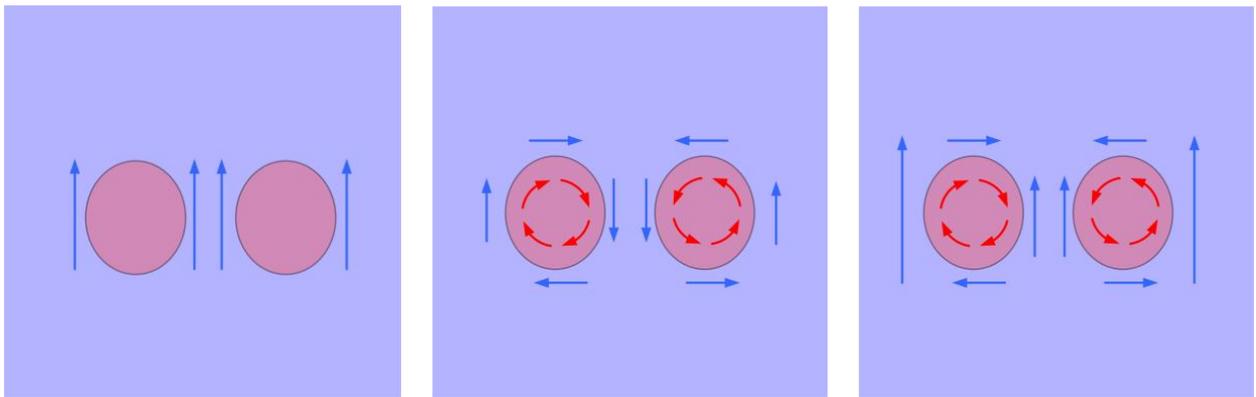


圖 7

## 一、 探討不同高度的液滴對於渦環的影響

### 甲、組裝穩定液滴裝置

1. 秤量 0.1 g 食用色素紅色 40 號與 500 mL 清水混合，並加入洗瓶中。
2. 將點滴輸液套件截短，並將前端軟針套上微滴管頭以確保安全。  
確定點滴套件為關閉止流狀態。
3. 將洗瓶與輸液套件結合，並固定於相機腳架上，如圖 8。

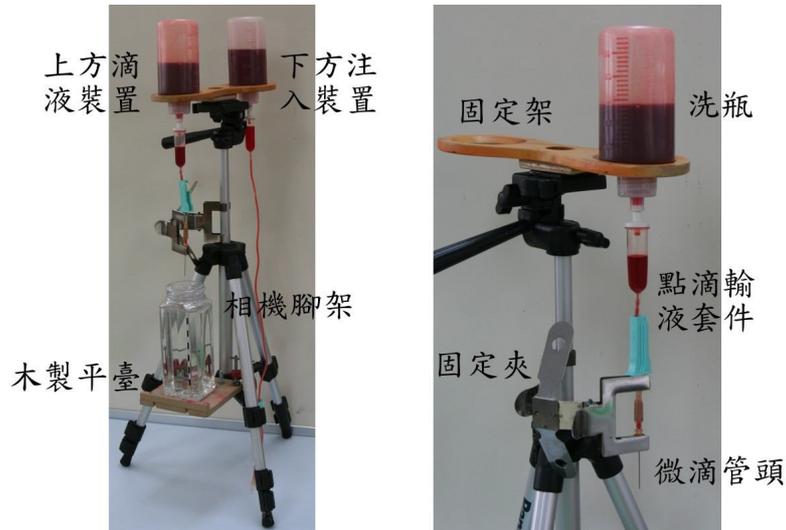


圖 8 穩定液滴裝置

### 乙、安置觀察方瓶

1. 將透明方瓶貼上比例尺（一格為 1 公分），如圖 9。
2. 將清水裝至比例尺最上端，並放到穩定液滴裝置的下方。
3. 製作一支浮標：將一竹籤立於保麗龍上，並標記刻度，可方便及準確測量微滴管頭與水面的距離。
4. 調整觀察水瓶與穩定液滴裝置間的距離，三項測定項目分別為微滴管頭距水面 0.5 公分、1.0 公分與 1.5 公分。



圖 9 觀察水瓶

自製寶麗龍浮標

### 丙、目視觀察

1. 將液滴滴落速率調整為每分鐘 1 滴。
2. 觀察液滴滴下造成渦環情形，並且同時調整鐵架水平或進行其餘改進動作，盡可能使每一個渦環都符合要求：
  - a. 落下水平位移不超過 2 公分
  - b. 渦環傾斜角度不超過 30 度。
3. 等形成渦環穩定符合要求後，即可進行錄影與分析。

### 丁、錄影與截圖

原本 Tracker 可以直接讀取 mov 檔，但是實際在使用時，發現幾乎無法開啓，在師大物理的網頁中，也發現有其他人有類似問題，所以決定改轉為截圖再載入分析。

1. 裝置腳架與相機，透過相機視窗確定可以錄到水瓶從水面至瓶底所有影像，並且調整腳架高低與角度，使相機攝影水平面與水瓶水面盡可能平行。
2. 將錄製好的影片檔案移至電腦，並使用免費軟體 KMPlayer 擷取圖片。每秒鐘 10 畫格，並且圖片檔案為 jpg 檔。如圖 10。

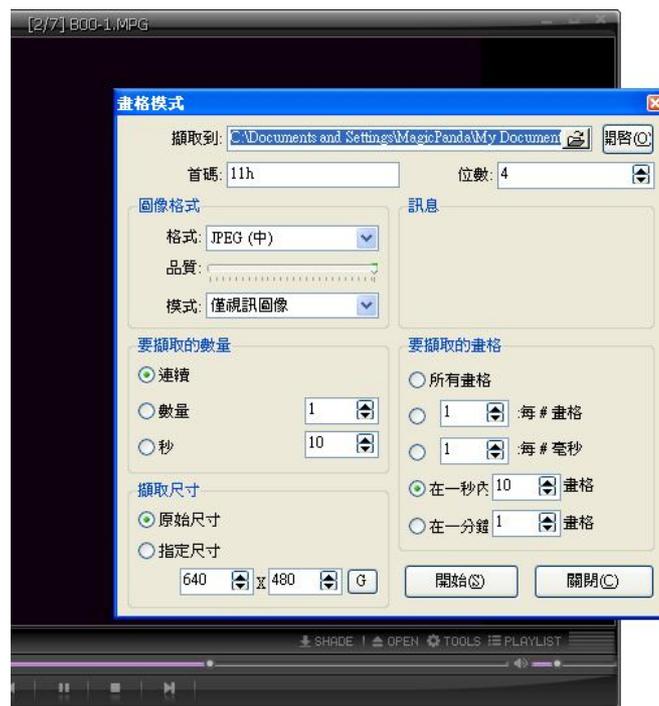


圖 10 擷取連續圖片

#### 戊、使用 Tracker 分析影片

1. 開啓 Tracker 3.00，並調整記憶體使用量為最大 1GB，如圖 11。

調整後即可開啓連續圖片。

（分析一組實驗圖片約需要 250 mb，所以開到 1GB 比較保險；但是在實驗後期 Tracker 更新至 3.10 版，即可以不必調整記憶體）

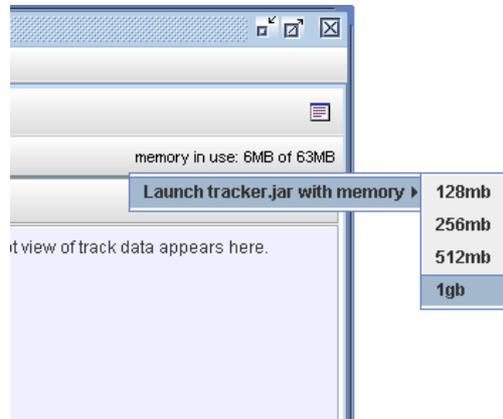


圖 11 調整記憶體

2. 設定比例尺、座標與時間間隔。
  - a. 比例尺與水瓶上的貼紙重合，並標示長度。  
如圖 12 右側藍色雙箭頭所示。
  - b. 座標中心為水面液滴落入處，並且以向左為正 X 方向、  
向下為正 Y 方向。如圖 12 上側桃色十字所示。

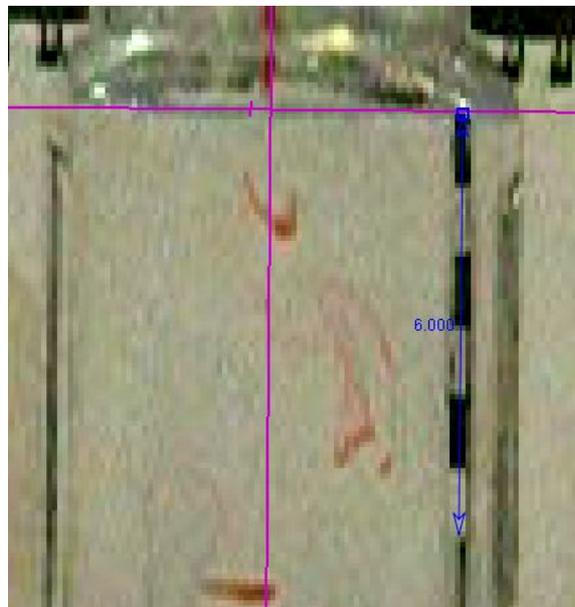


圖 12 設定比例尺與座標

- c. 調整時間間隔為 10 張/1 秒，與當初使用 KMPlayer 擷取圖片時間相同。並且從液滴落入水面開始採用，直到渦環不再垂直下落或擴張直徑停止。



### 3. 標示追蹤點

- a. 在第一張影格中，渦環的最左側標示追蹤點，並且換到下一影格重複標示，直到最後一張影格標示完畢。標示位置如圖 13 所示。

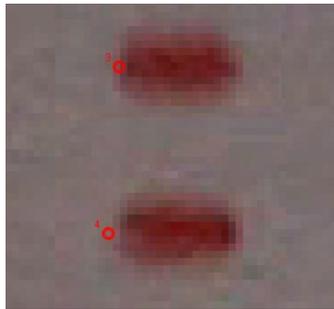


圖 13 第 3、4 影格的追蹤點標示

- b. 重複 a 的動作，但是此時將追蹤點標示在最右側。  
c. 使用軟體 Tracker，取左側與右側的中心位置。如圖 14 所示。

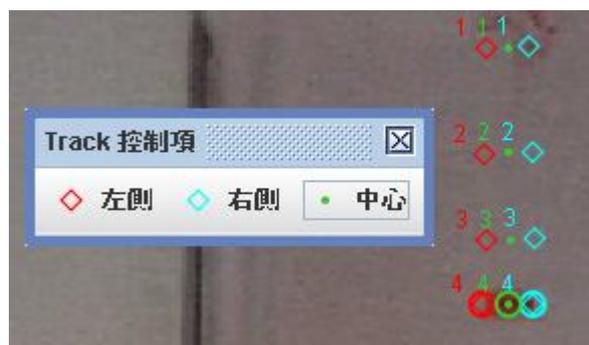
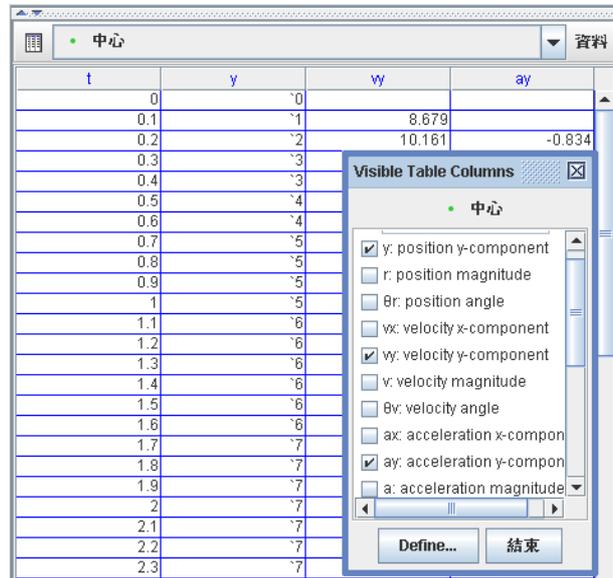


圖 14 完整追蹤點標示位置

#### 4. 數據取得與圖形展現

- a. Tracker 可以利用圖像的追蹤與分析量得位置與距離，並且搭配時間計算出速度與加速度，所以我們利用渦環中心的位置、速度與加速度代表渦環的運動。



t	y	vy	ay
0	10		
0.1	9.1	8.679	
0.2	8.2	10.161	-0.834
0.3	7.3		
0.4	6.4		
0.5	5.5		
0.6	4.6		
0.7	3.7		
0.8	2.8		
0.9	1.9		
1	1		
1.1	0.1		
1.2	0.1		
1.3	0.1		
1.4	0.1		
1.5	0.1		
1.6	0.1		
1.7	0.1		
1.8	0.1		
1.9	0.1		
2	0.1		
2.1	0.1		
2.2	0.1		
2.3	0.1		

圖 15 Tracker 可以自動計算運動的值

- b. Tracker 沒有特殊的工具可以紀錄渦環的直徑，所以我們另外計算，計算出左側與右側的水平距離來代表渦環的直徑。
- c. Tracker 可以直接將數據轉換成圖形，但是為便於分析，所以大部分的圖形仍使用 Microsoft Excel。

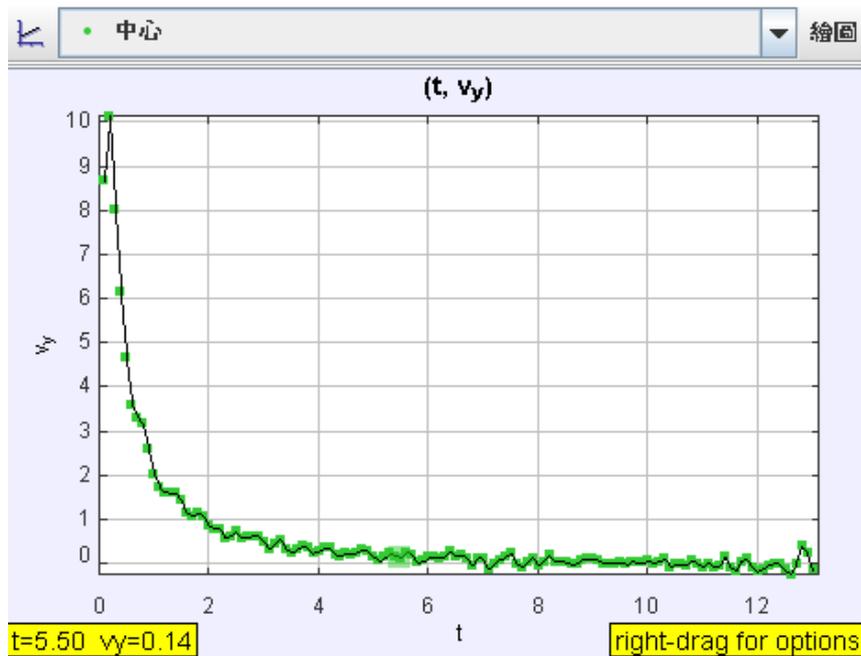


圖 16 使用 Tracker 繪製圖形

## 二、 探討液滴滴落不同溫度的水中對於渦環的影響

1. 調整觀察水瓶與穩定液滴裝置間的距離，並固定為水面上 1.0 cm。
2. 取常溫清水（25℃）、高溫清水（70℃）、低溫清水（0℃）倒入方瓶中，並插入溫度計。
3. 常溫清水等瓶內水穩定就可開始實驗，但高溫與低溫清水必須等到高溫清水降溫到 65℃；低溫清水升溫至到 5℃ 才可以開始滴入顏料。  
ps.因為方瓶的 PE 材質為熱塑性，所以要先將飲水機的熱水倒入燒杯中降至 70℃ 再倒入方瓶，以免方瓶變形。
4. 其他實驗步驟及分析方式與第一部分「探討不同高度的液滴對於渦環的影響」相同。

## 三、 探討水中加入清潔劑對於渦環的影響

1. 調整觀察水瓶與穩定液滴裝置間的距離，並固定為水面上 0.5 cm。
2. 取常溫清水並加入數滴清潔劑，等瓶內水穩定後開始滴入顏料。
3. 其他實驗步驟及分析方式與第一部分「探討不同高度的液滴對於渦環的影響」相同。
4. 將實驗結果與第一部分「探討不同高度的液滴對於渦環的影響」高度 0.5 cm 的實驗結果做比較。

## 四、 探討渦環形成的方向性（反向渦環的形成）

1. 將微滴管頭由塑膠方瓶的底部向上插入，已熱熔膠密封以防漏水，並將點滴輸液套件的軟針套上微滴管頭。
2. 迅速開關點滴輸液套件的調節輪，利用較大的壓力將液滴由瓶底注入，使其形成渦環。
3. 也可用注射針筒直接套上微滴管頭，以手按壓注射針筒將液滴由瓶底注入，使其形成渦環。
4. 其他實驗步驟及分析方式與第一部分「探討不同高度的液滴對於渦環的影響」相同。

## 五、 探討渦環形成時液滴重量與最大高度的關係

1. 更換粗細不同的微滴管頭（18、20、22、24 號），以改變液滴的大小與質量。（微滴管頭的號碼愈小，針頭愈粗。）
2. 以電子天平秤量各種微滴管頭滴出 100 滴的質量，並求出一滴的質量。
3. 利用腳架升降調整微滴管頭與水面的距離，並以自製保麗龍浮標精確測量，觀察與紀錄各種微滴管頭滴出的液滴能形成渦環的最大高度。
4. 比較各種液滴的重量與形成渦環的最大高度之間，是否有特定的關係？

## 伍、研究結果

### 一、探討不同高度的液滴對於渦環的影響

我們調整微滴管頭到液面的高度，分別為 0.5 cm、1.0 cm 及 1.5 cm，並且利用 Tracker 取得數據進行討論，其採用影格數如圖表 1。

高度 (cm)	0.5	1.0	1.5
採用影格數	54	99	132

圖表 1

我們等待渦環穩定形成後，錄製影片並且使用 Tracker 分析，所得的渦環軌跡如圖 17 所示。

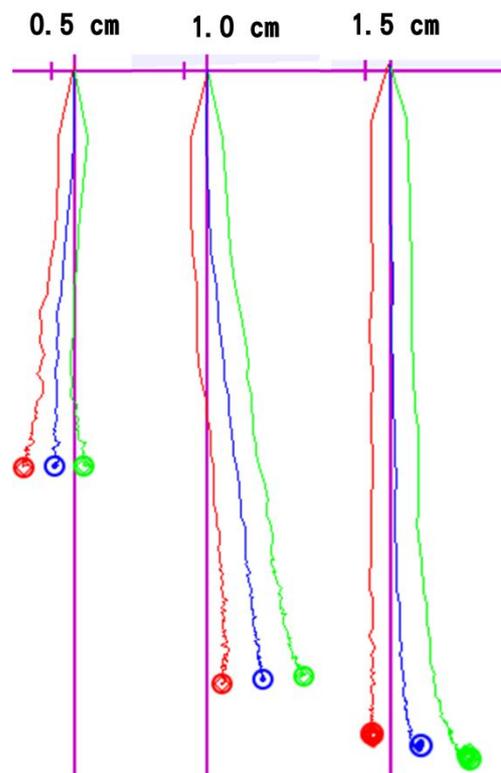
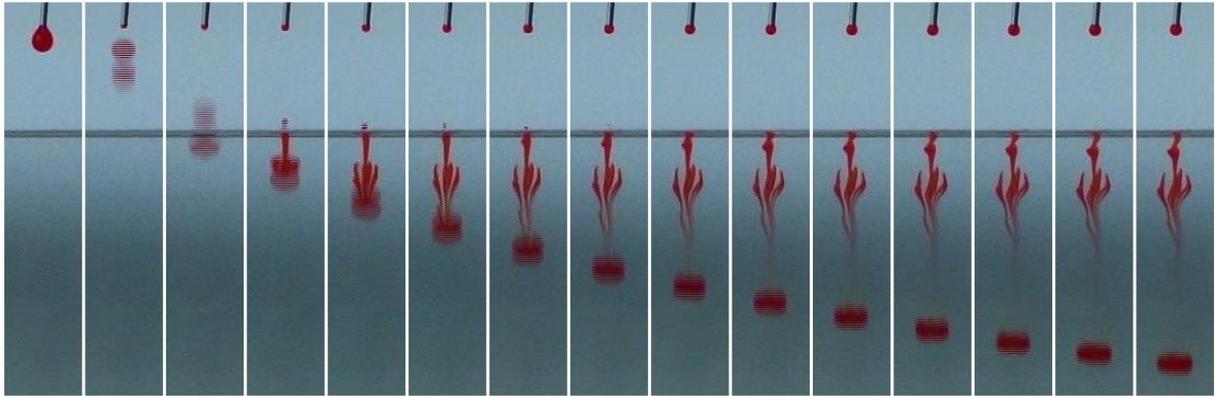


圖 17 不同高度滴下的液滴在水中運動軌跡

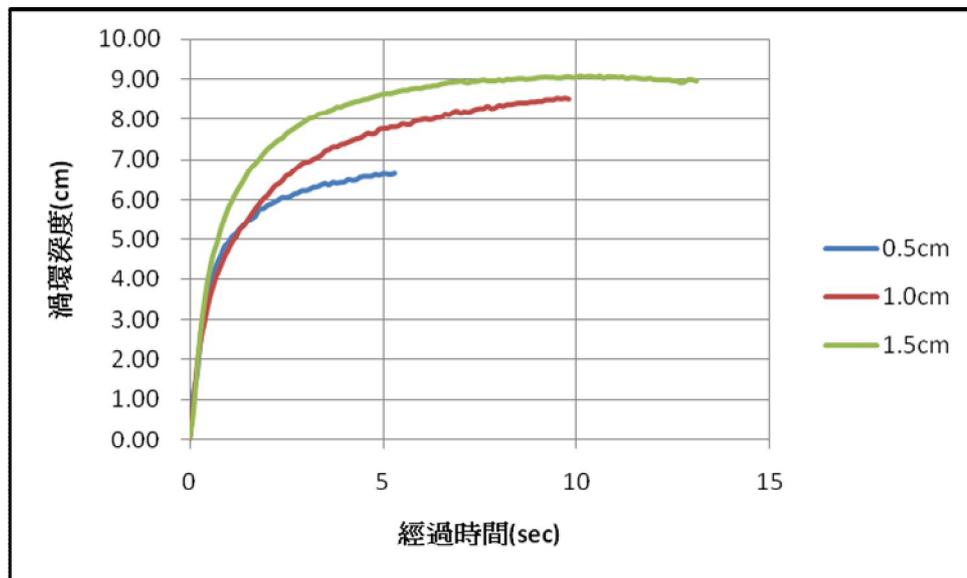
## 1. 不同高度的液滴對於渦環最大深度的探討

(1)將染色的純水滴落到清水中，所形成的渦環並不會一直運動到水瓶的底部，而是會逐漸減慢速度後停止在水下某處。



以上圖片是拍攝影片經由 PowerDVD 截圖後剪裁排列而成，每張畫格的間隔時間為 1/30 秒，微滴管頭與水面的距離為 1.0 cm。圖中渦環的連線越趨於水平，表示下降的速度越緩慢，最後停止在水下某處。

(2)比較三組實驗，其深度與時間的關係圖如圖表 2 所示。



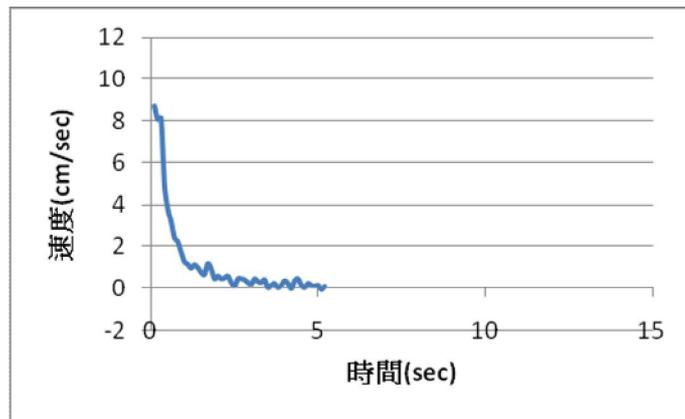
圖表 2 不同高度產生的渦環，其深度-時間關係圖

(3)由圖表可以清楚發現，越高處滴落所產生的渦環，所能到達水下的深度也就會越深。

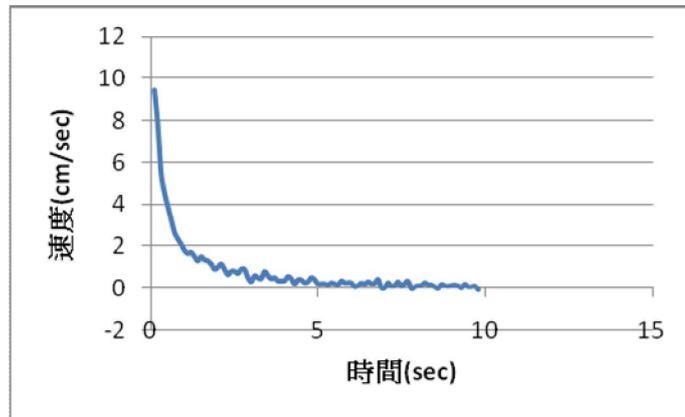
## 2. 不同高度的液滴對於渦環垂直速度的探討

(1)就常理來說，我們在越高的地方釋放液滴，它下落至液面的速度就會越快，雖然我們的實驗沒有記錄液滴在空氣速度，但是想當然爾，液滴落進液面後，也應該是位置越高的速度越快。

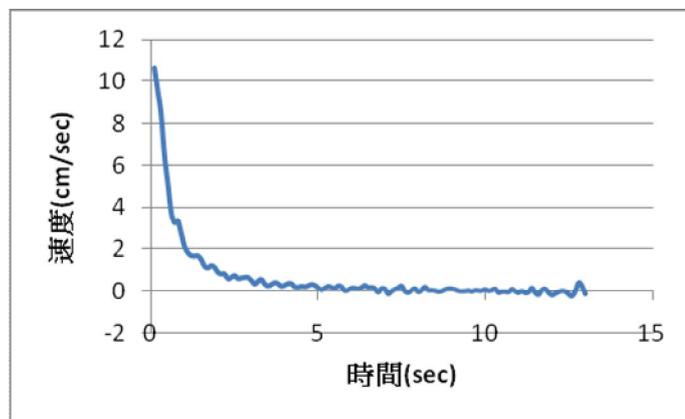
(2)爲了避免圖形彼此遮掩，我們先將三個不同高度的速度與時間關係圖分開表現。如圖表 3、圖表 4、圖表 5。



圖表 3 0.5 cm 滴落，速度-時間關係圖

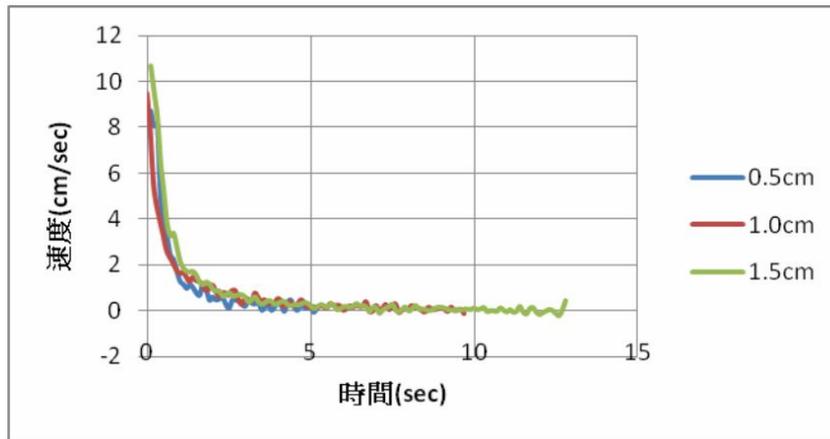


圖表 4 1.0 cm 滴落，速度-時間關係圖



圖表 5 1.5 cm 滴落，速度-時間關係圖

(3)就上面三個圖表來看，正如之前所預料，剛開始入水的速度，越高位置滴落會越快速，但是隨著時間增加，三者的速度會趨近一致，如圖表 6 所示。



圖表 6 三種落下高度其速度-時間關係圖

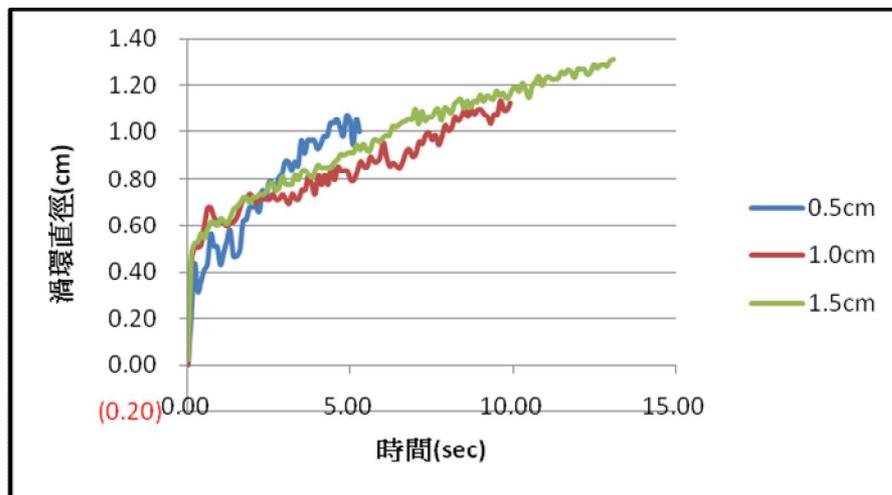
(4)其原因，可能是因為液滴遭遇清水的阻力，隨著速度越大而越大。

也就是說，雖然 1.5 cm 滴落的液滴，它的初始速度較大，但是它在液體中所受到的阻力也較大，因此它的速度很快就會變慢。

### 3. 不同高度的液滴對於渦環直徑變化的探討

(1)我們用兩種方式探討：一、渦環直徑與時間的關係。 二、渦環直徑與深度的關係。

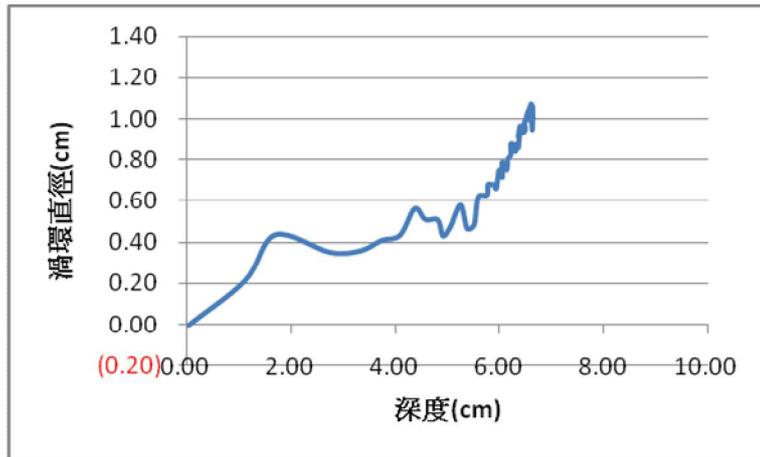
(2)繪出渦環直徑與時間的關係圖，如圖表 7。



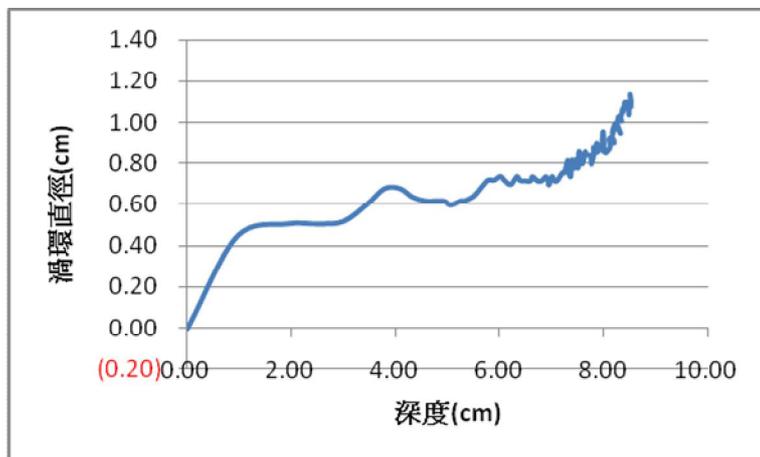
圖表 7 渦環直徑-時間關係圖

(3)圖表 7 為渦環直徑與時間的關係圖，我們可以清楚的發現，無論哪一種高度落下，渦環直徑增加會隨著時間持續增大，也就是說，無論當時渦環所處的深度，以及當時下落的速度為何，都不會影響渦環直徑增加的速率。

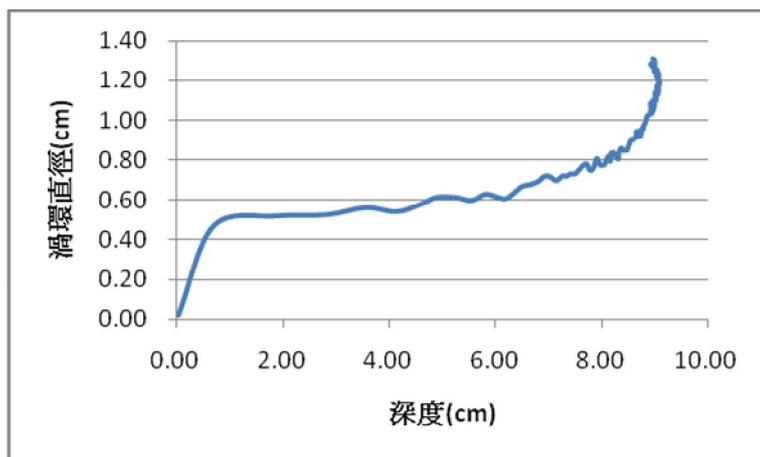
(4)繪出渦環直徑與深度的關係圖，如圖表 8、圖表 9、圖表 10。



圖表 8 高度 0.5 cm 渦環直徑-深度關係圖



圖表 9 高度 1.0 cm 渦環直徑-深度關係圖



圖表 10 高度 1.5 cm 渦環直徑-深度關係圖

(5)由以上三個圖表可以發現：

- ①剛開始的時候，渦環下降較快速，但渦環直徑增加速率保持一定。
- ②下降一段深度後，渦環直徑比較保持一定，以致於上面三個圖的中央都有一個緩和的平原地區。
- ③當深度幾乎不再增加時，渦環直徑卻持續增加，因此會在圖形的後端形成一個向上翹的趨勢。

#### 4. 綜合討論

(1)由上述三項探討，我們發現：

- ①滴落高度越高，渦環的初速越快；但是雖然初速很快，可是馬上速度就會降下來。
- ②從越高的高度滴落，渦環可以到達的深度也就越深，渦環直徑也就越大。
- ③渦環直徑擴張大小，與中心下落速度關係不大，與中心深度關係也不大。

(2)如果以能量的觀點來看，位置越高，應該儲備有越多的位能，這點可以由下落高度越高，渦環的中心初速越大得以印證。所以我們小組推斷，雖然中心速度因著水阻力而下降，但是並不是所有能量都轉化成摩擦熱消失，而有可能進入了渦環的內圈速度，因此造成了渦環直徑大小與滴下位置的相關。

## 二、探討液滴滴落不同溫度的水中對於渦環的影響

我們調整方瓶內水的溫度，分別為 5°C、25°C 及 65°C，並且利用 Tracker 取得數據進行討論。其採用影格數如圖表 11。

溫度 (°C)	5	25	65
採用影格數	72	99	82

圖表 11

我們等待渦環穩定形成後，錄製影片並且使用 Tracker 分析，所得的渦環軌跡如圖 18 所示。

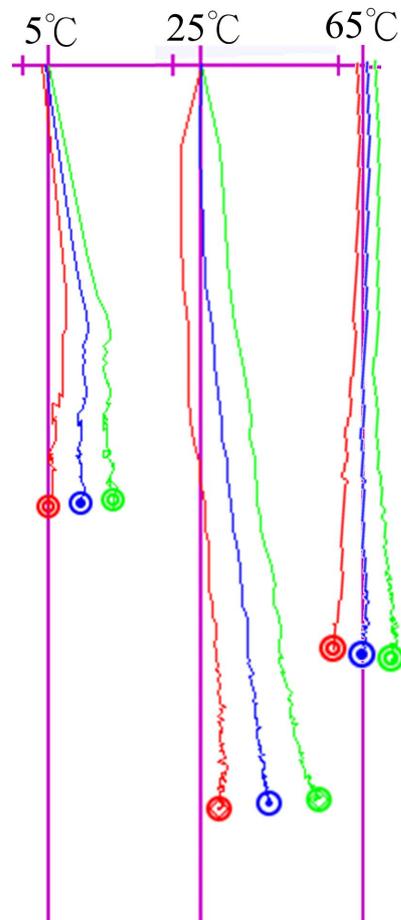


圖 18 滴下的液滴在不同溫度水中運動軌跡

在作不同溫度的渦環實驗時，會發現，如果方瓶內的水並非定溫，那麼在渦環停止的時候並不會靜止在水中。若在  $65^{\circ}\text{C}$  的水中，渦環會向上飄；而若在  $5^{\circ}\text{C}$  的水中，渦環會下流。其原因可能與不同溫度時，水的密度會不同有關。如圖 19 所示，在  $4^{\circ}\text{C}$  時體積最小，也意味著  $4^{\circ}\text{C}$  時密度最大。

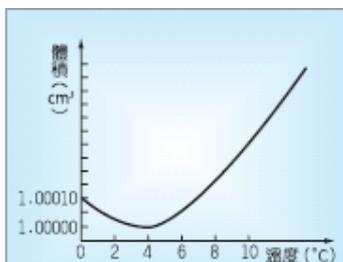


圖 19 翰林國中理化課本-水的體積與溫度關係圖

在  $65^{\circ}\text{C}$  時，由於器壁附近降溫較快，因此密度較大，外側較低溫水流向下，導致中央高溫水流向上，渦環便隨著水流上飄，如圖 20。

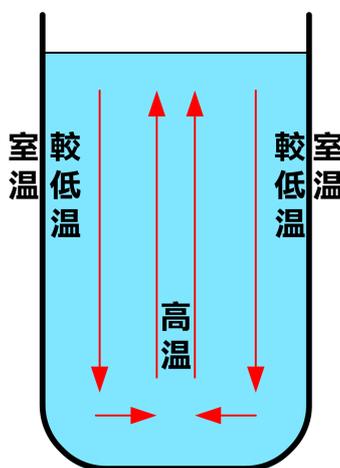


圖 20  $65^{\circ}\text{C}$  的方瓶於室溫的對流

而在  $5^{\circ}\text{C}$  時，由於器壁附近升溫較快，因此密度較小，外側較高溫水流向上，導致中央低溫水流向下，渦環便隨著水流下流，如圖 21。

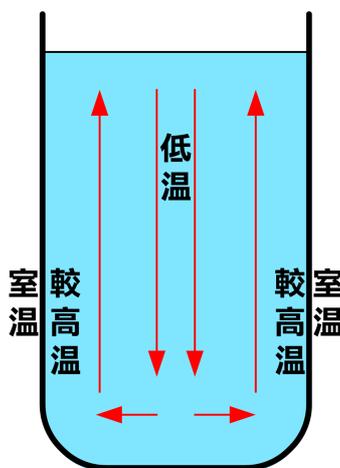


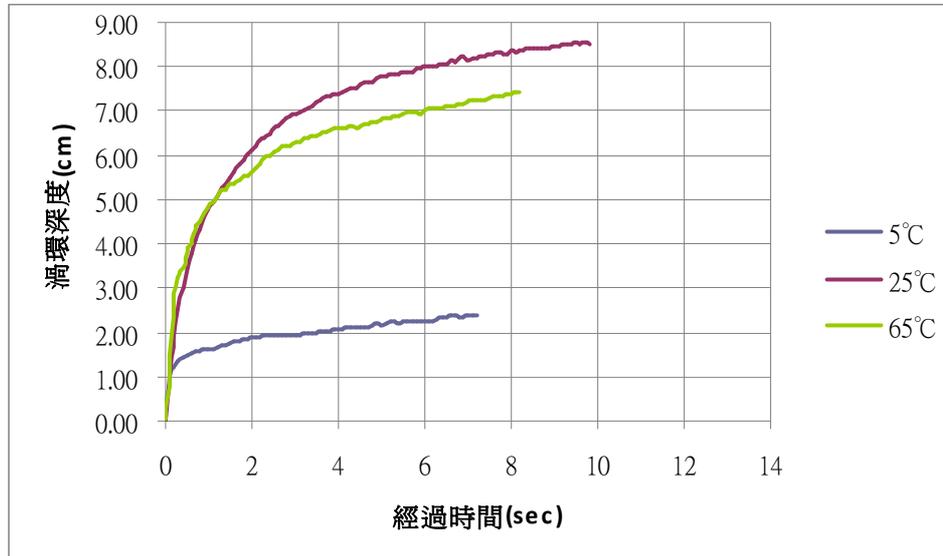
圖 21  $5^{\circ}\text{C}$  的方瓶於室溫的對流

由於對流因素，導致在討論不同水溫對渦環的影響變數變多，需要特別注意！

## 1. 不同溫度對於渦環最大深度的探討

(1)將染色的純水滴落到清水中，所形成的渦環並不會一直運動到水瓶的底部，而是會逐漸減慢速度後停止在水下某處，並且在高溫與低溫的方瓶中，渦環還會上飄或下流。

(2)比較三組實驗，其深度與時間的關係圖如圖表 12 所示。

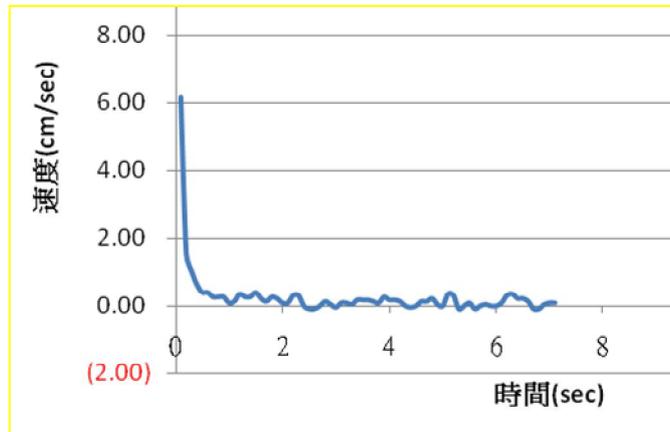


圖表 12 不同溫度時產生的渦環，其深度-時間關係圖

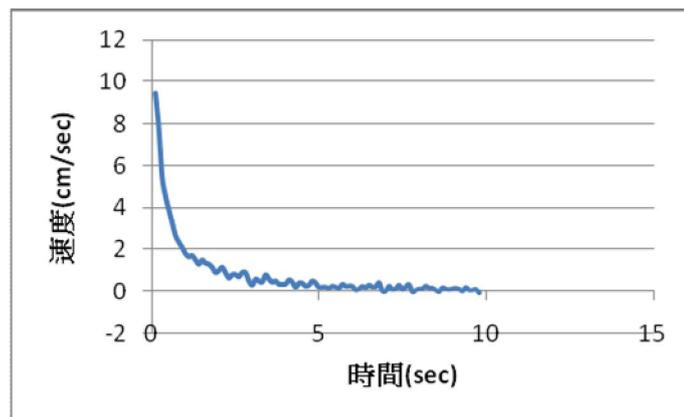
(3)由圖表可以清楚發現，常溫時渦環可以到達的深度為最深，高溫其次，最淺的則為低溫時的渦環。當然，因為低溫時的渦環在停止後，還會向下漂流，但是此時渦環已經潰散，所以不列入考慮。

## 2. 不同溫度對於渦環垂直速度的探討

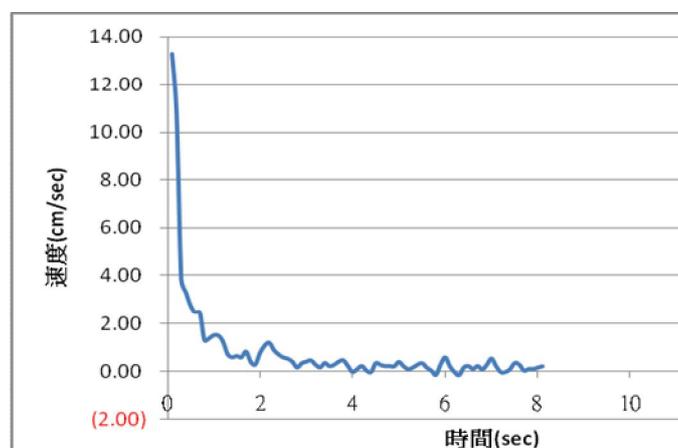
(1)就網路所查詢資料(維基百科),溫度越高,水的表面張力會越低,因此溫度越高的水,渦環在進水面時的降速會越少。這在圖形中也清楚的表現出來。爲了避免圖形彼此遮掩,我們先將三個不同高度的速度與時間關係圖分開表現。如圖表 13、圖表 14、圖表 15。



圖表 13 5°C時,速度-時間關係圖

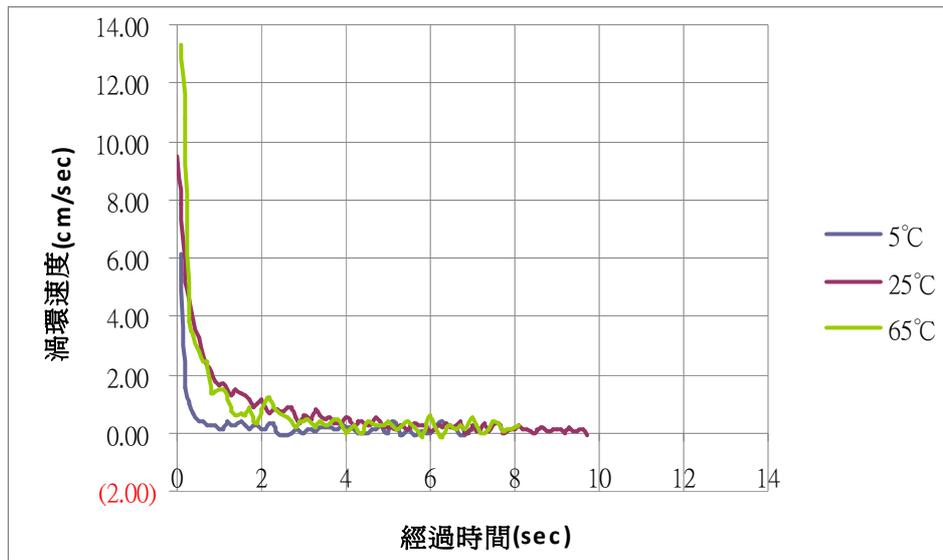


圖表 14 25°C時,速度-時間關係圖



圖表 15 65°C時,速度-時間關係圖

(2)就上面三個圖表來看，正如之前所預料，溫度越高，初速越快。但是在液滴進入水面後再過些時間，65°C卻降速的較25°C來的快，如圖表 16 所示。

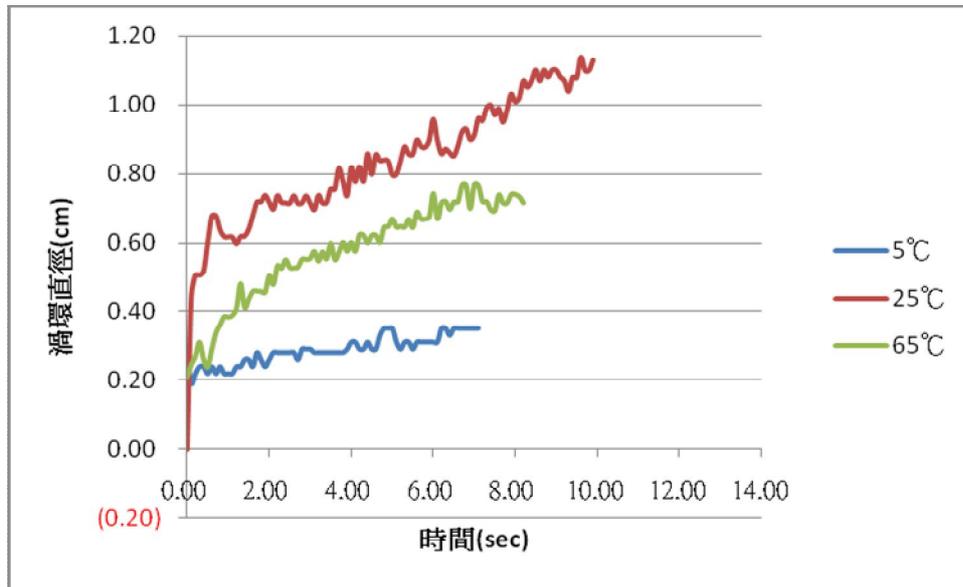


圖表 16 三種不同溫度其時間-速度關係圖

(3) 65°C降速的較25°C來的快的原因，可能是因為在高溫中，水中央有向上的水流，而使得使渦環降速。

### 3. 不同溫度對於渦環直徑變化的探討

(1)不同溫度對於渦環直徑的改變，其圖形如圖表 17 所示。



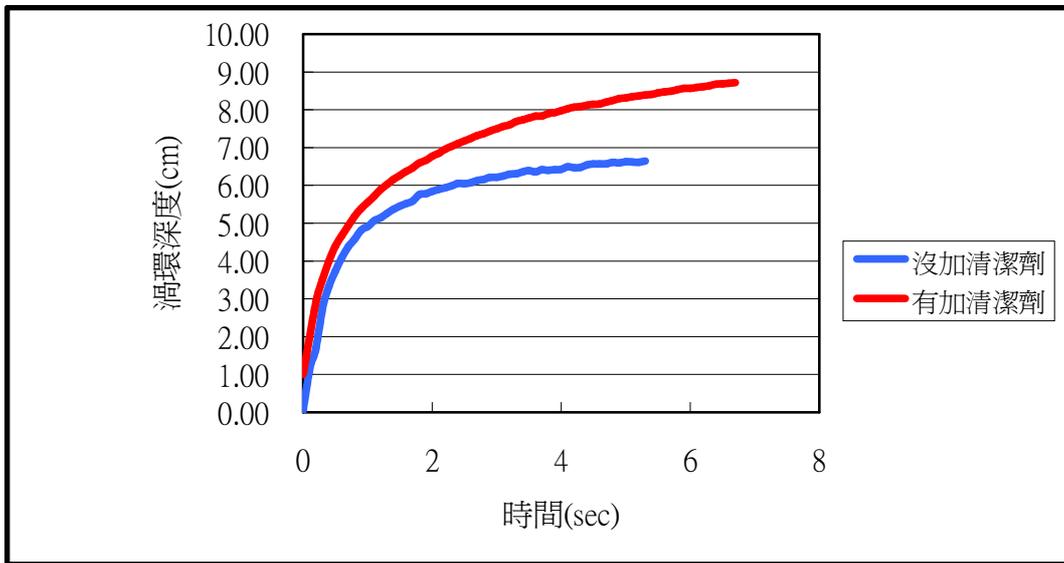
圖表 17 渦環直徑-時間關係圖

- (2)我們由實驗結果發現，25°C的渦環直徑擴張最快，其次是65°C，5°C的渦環則最慢。5°C的渦環下降速度較慢，渦環內外的流速差異較小，不利於渦環直徑的擴張。雖然25°C與65°C渦環直徑-時間關係圖的中後段的傾斜程度相近，但是一開始25°C卻有一個很快速的擴張，但是65°C卻沒有。這樣的擴張是因為液滴為要突破表面張力，液滴中央在初始即有凹陷，而使得液滴中央的向上水流可以快速通過而造成。而65°C時液滴承受的表面張力較小，因此缺乏這樣的急速擴張。
- (3)而到了後期，因為65°C有承受因為對流而造成的向上水流，使得內外流速差異不大，所以雖然擴張阻力應該較25°C來得少，但是整個擴張的能力卻相當接近。

### 三、探討水中加入清潔劑對於渦環的影響

#### 1. 加入清潔劑對於渦環最大深度的探討

(1)比較兩組實驗，其深度與時間的關係圖如圖表 12 所示。

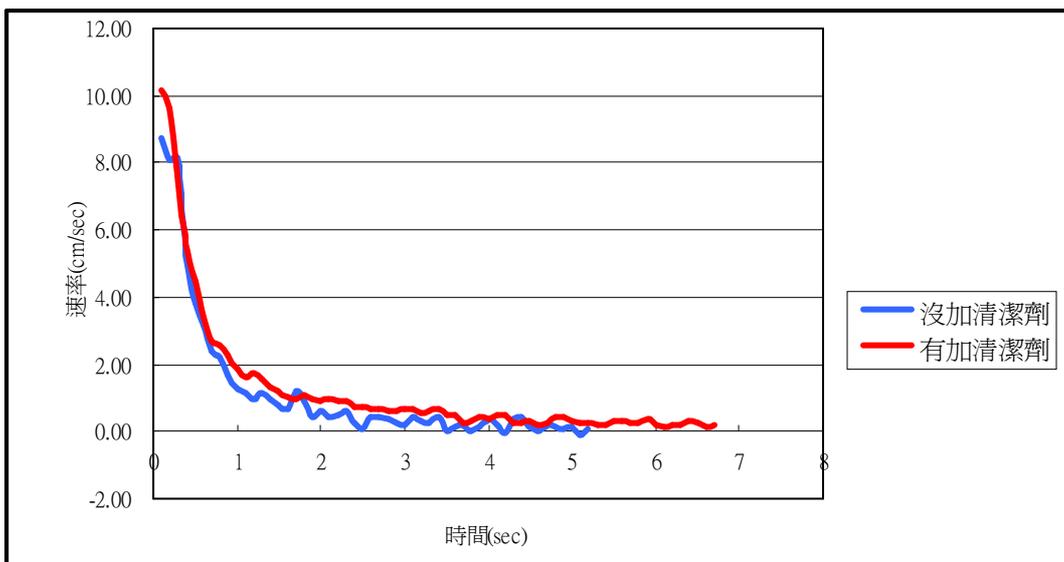


圖表 18 有否加清潔劑時，渦環深度-時間的關係圖

(2)由圖表可以清楚發現，水中加入清潔劑時，渦環可以到達的深度增加。

#### 2. 加入清潔劑對於渦環垂直速度的探討

(1)當水中加入清潔劑時，水的表面張力會降低，因此液滴在進入水面時的降速會越少。比較兩組實驗，其深度與時間的關係圖如圖表 12 所示。

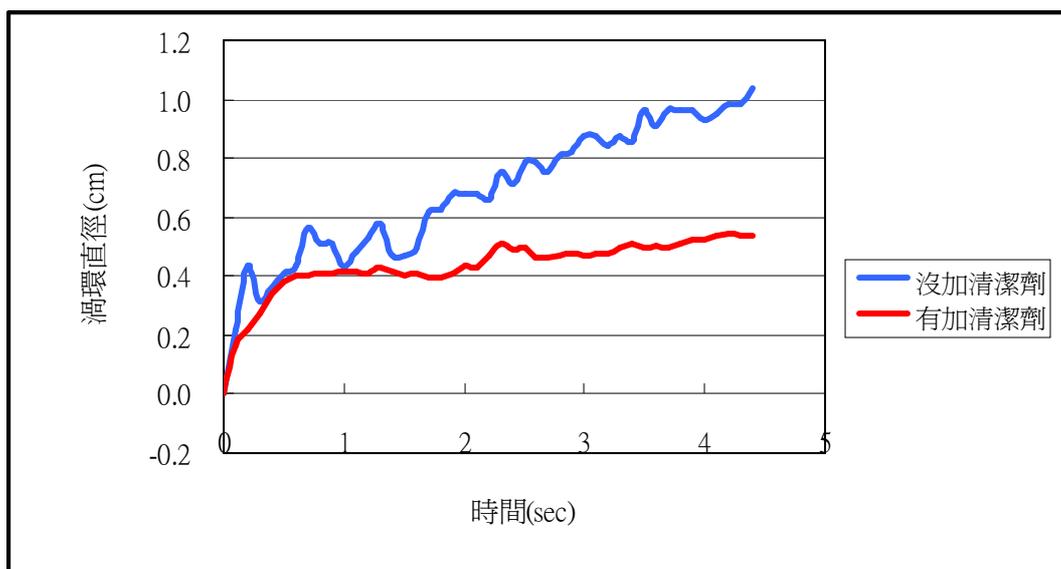


圖表 19 有否加清潔劑時，渦環速率-時間的關係圖

(2)由圖表顯示，水中加入清潔劑時，渦環在水中下降的速率較快。

### 3. 加入清潔劑對於渦環直徑變化的探討

(1)比較兩組實驗，渦環直徑-時間的關係圖如圖表 17 所示。

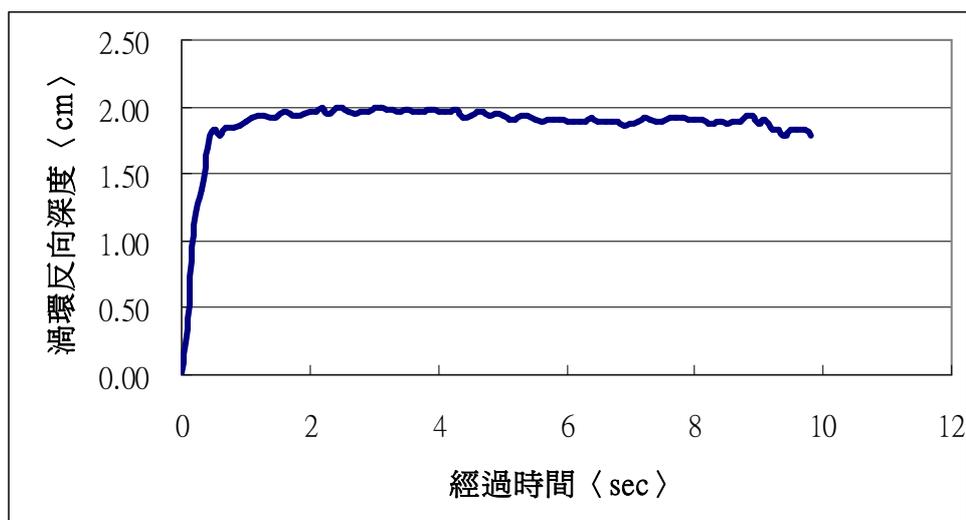


圖表 20 有否加清潔劑時，渦環直徑-時間的關係圖

(2)由圖表可以發現，水中加入清潔劑時，渦環的直徑反而增加較緩慢。一開始時，未加清潔劑的水中，液滴有一個很快速的擴張，但是加入清潔劑的水中卻沒有。這樣的擴張是因為液滴爲了要突破表面張力所造成。水中加入清潔劑時，表面張力被破壞，便不利於渦環直徑的擴張。

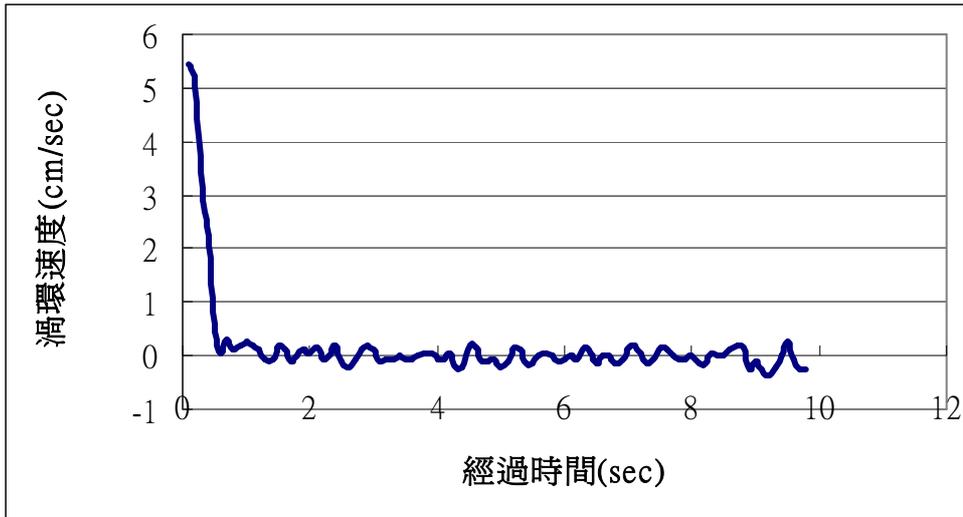
### 四、探討渦環形成的方向性（反向渦環的形成）

1. 將染色的液體由瓶底向上注入清水中，所形成的渦環並不會一直向上運動，而會逐漸減慢速度，最後停在水中的某處，渦環反向深度-時間的關係圖如圖表 12 所示。



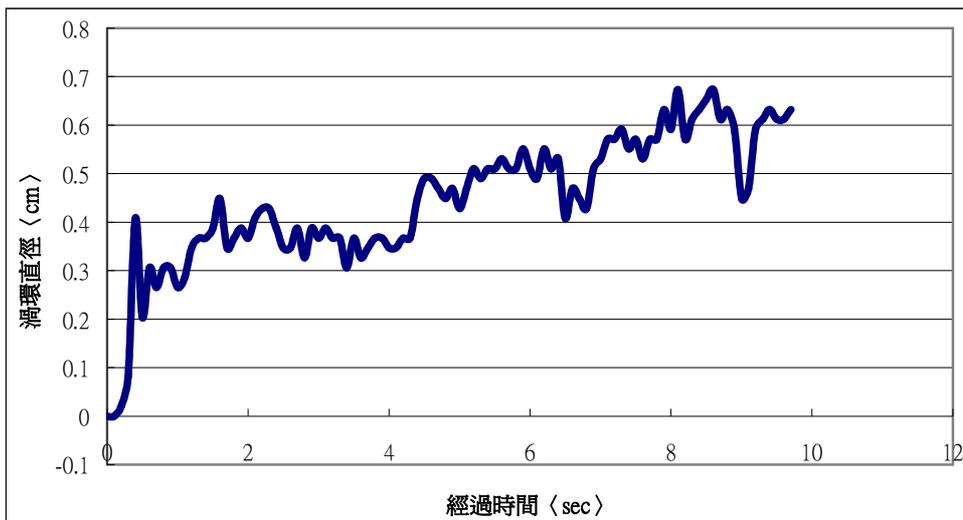
圖表 21 渦環反向深度-時間的關係圖

2. 反向渦環速度-時間的關係圖如圖表 12 所示。



圖表 22 反向渦環速度-時間的關係圖

3. 反向渦環直徑-時間的關係圖如圖表 12 所示。



圖表 23 反向渦環直徑-時間的關係圖

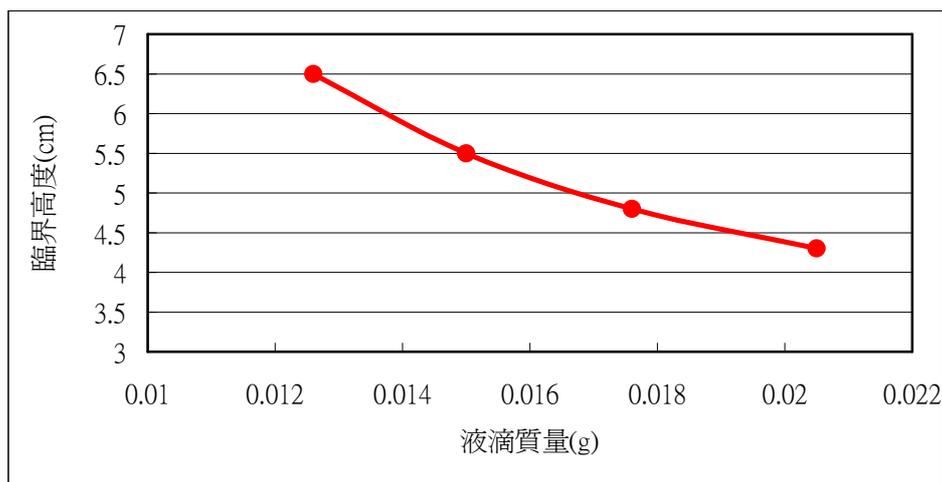
4. 由以上圖表所分析出渦環的反向深度、速度、直徑與時間的關係圖，和上方滴落的結果相近，可推知由各方向皆可產生渦環。

## 五、探討渦環形成時液滴重量與最大高度的關係

1. 由粗細不同的微滴管頭（18、20、22、24 號）滴出一滴的質量，與各液滴形成渦環的最大高度，如下表所示。

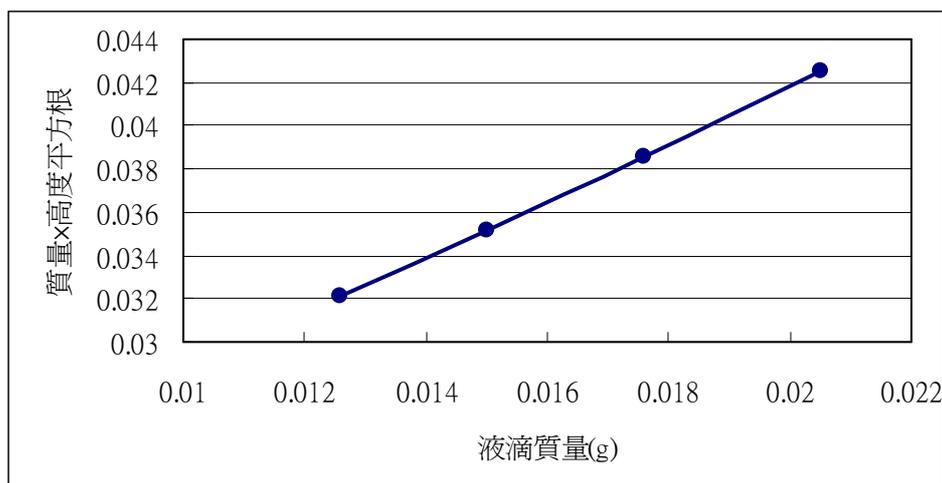
微滴管頭口徑	18 號	20 號	22 號	24 號
液滴的質量 (g)	0.0205	0.0176	0.0150	0.0126
形成渦環臨界高度 (cm)	6.5	5.5	4.8	4.3

2. 畫出液滴的質量與形成渦環臨界高度的關係圖。



由關係圖可知：液滴的質量愈大，形成渦環的臨界高度愈小，即愈不易形成渦環。

3. 液滴入水的速度與高度的平方根成正比，若將液滴質量  $\times$  臨界高度的平方根則與動量成正比，畫出液滴的質量與相關動量的關係圖。



由關係圖可知：液滴的質量與液滴入水的動量成一直線關係，表示欲形成渦環，液滴的質量與動量之間有一特定關係。

## 陸、討論

一、在滴落裝置方面，最初是採用 Y 型的滴落裝置（圖 23），大針筒作為壓力的緩衝，小針筒為手動主要操作處。然而這樣的裝置所造成最大的問題，就是會使得方瓶內的水在滴落時同時被搖晃，導致實驗結果產生失誤。

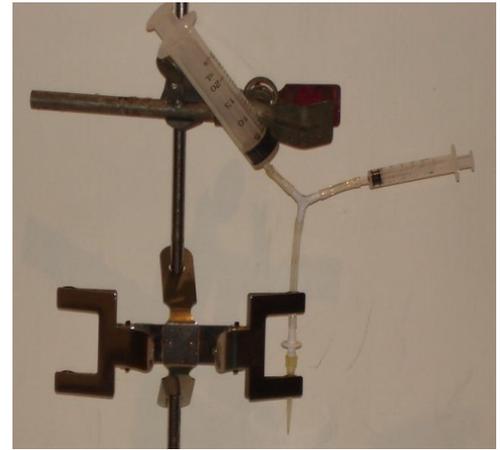


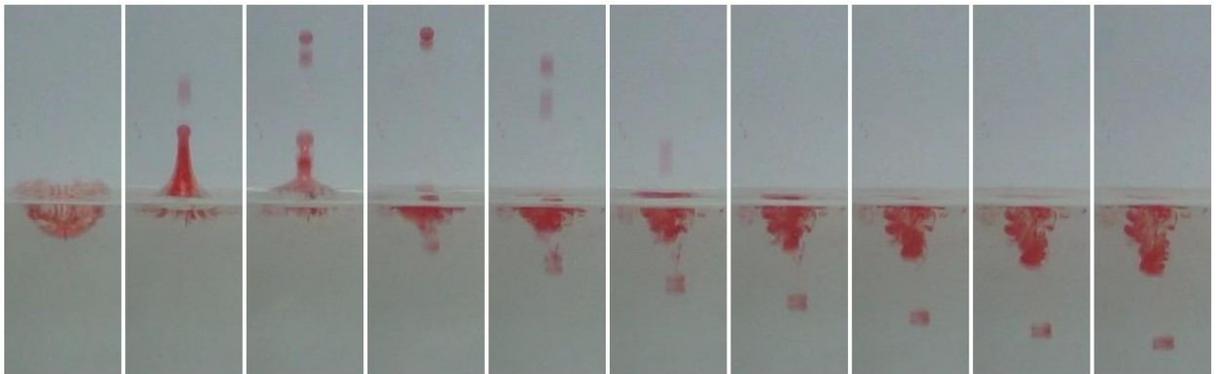
圖 23 Y 型滴落裝置

二、反向渦環也可以用手按壓注射針筒，將液滴由瓶底注入，使其形成渦環。但是力量的控制較不容易，太多或太少都會失敗，需多次練習方能熟練。這可能也與動量有關，超過臨界點便不能形成渦環。

三、於 5°C 的液滴實驗過程中，因瓶面不斷凝結霧氣而影響攝影的清晰度，後來將瓶面以肥皂水擦拭後便有所改善，但我們仍舊發現，在低溫中渦環表現不佳，大多呈杯狀而無法形成漂亮的環狀。渦環下降速度緩慢，導致中央與外部的流速差異不大，也就比較無法順利擴張。

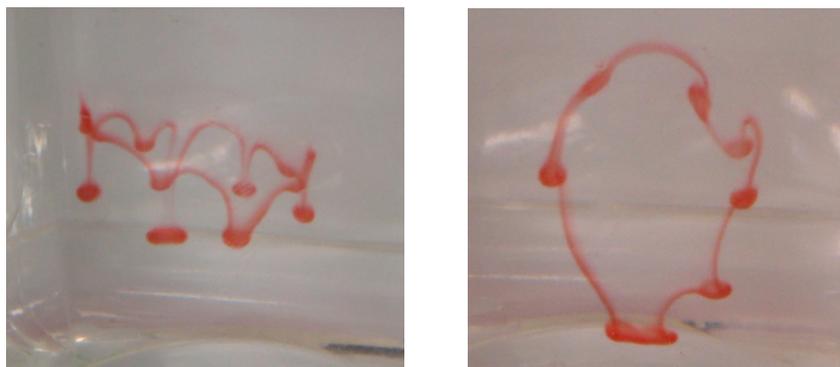
四、對於高溫渦環，其表現不如常溫的原因，主要是高溫時在方瓶中間有因為熱對流所造成的向上水流。並且因為高溫，液體間的摩擦力較低，也導致渦環內圈不容易增加速度，也會使得高溫的渦環表現不佳。

五、微滴管頭的高度大於形成渦環的臨界高度時，液滴落至水面會濺起水花，甚至在水面上形成皇冠型的美麗圖案，但無法在水中形成渦環。



六、當水下形成渦環時，水面附近會有殘存的有色液體，無法讓整個液滴完全形成渦環，而且發現高度愈高，殘存的量愈多，高度大於形成渦環的臨界高度時，便無法形成。但有時濺上來的水花，散成數滴，質量與高度都變小，而符合臨界的動量，會再度形成數個小渦環。

七、渦環在水中達到最大深度後，會停留一段時間，之後會潰散成較不規則的形狀，有時也會形成水中的美麗皇冠，皇冠的邊緣又再度形成小渦環。



八、我們發現連續滴下數滴液滴時，第一個液滴所形成的渦環速度較慢，但水面被擾動後，表面張力變小，後面的液滴所形成渦環的速度較快，因此會超越先前產生的渦環，而形成了奇特的「環中環」。



## 柒、結論

### 一、探討不同高度的液滴對於渦環的影響：

1. 將染色的純水滴落到清水中，所形成的渦環並不會一直運動到水瓶的底部，而是會逐漸減慢速度後停止在水下某處。
2. 越高處滴落所產生的渦環，所能到達水下的深度也就會越深。
3. 越高的位置滴落，入水的速度會越快速，但是隨著時間增加，最後的速度會趨近一致。
4. 剛入水時渦環下降較快速，但無論當時的下落速度以及所處的深度為何，都不會影響渦環直徑增加的速率。(直徑增加速率保持一定)
5. 渦環下降一段深度後，直徑會比較保持一定，但下沉到深度幾乎不再增加時，渦環直徑卻又再度增加。

## 二、探討液滴滴落在不同溫度的水中對渦環的影響：

1. 常溫（25°C）時渦環可到達的深度最深，高溫（65°C）其次，低溫（5°C）則最淺。
2. 液滴入水時，水溫越高，初速越快，因高溫的水表面張力較低。但是液滴進入水面後再過些時間，高溫（65°C）水中的渦圈下降速度卻較低溫（25°C）的快，是因高溫的水中央有向上的水流，而使得渦環減速。
3. 雖然 25°C 與 65°C 渦環直徑-時間關係圖的中後段傾斜程度相近，液滴入水後，在低溫（25°C）的水中快速擴張，渦環直徑較大，但是高溫（65°C）的卻沒有，是因液滴要突破表面張力，使得液滴中央的向上水流快速通過而造成。而 65°C 時液滴承受的表面張力較小，因此擴張較小。到了中後段，兩個擴張的能力卻相當接近。

## 三、探討水中加入清潔劑對於渦環的影響

1. 當水中加入清潔劑時，水的表面張力會降低，因此液滴在進入水面時的降速會越少。渦環可以到達的深度會增加，渦環在水中下降的速率也較快。
2. 水中加入清潔劑破壞了表面張力，液滴入水時缺乏快速的擴張，渦環的直徑反而增加較為緩慢。

## 四、探討渦環形成的方向性（反向渦環的形成）

1. 由瓶底注入所形成的渦環並不會一直向上運動，而會逐漸減慢速度，最後停在水中的某處。
2. 渦環的反向深度、速度、直徑與時間的關係圖，和上方滴落的結果相近，可推知由其他方向也可產生渦環。

## 五、探討渦環形成時液滴重量與最大高度的關係

1. 液滴的質量愈大，形成渦環的臨界高度愈小，即愈不易形成渦環。
2. 液滴的質量與液滴入水的動量成一直線關係，表示欲形成渦環，液滴的質量與動量之間有一特定關係。

## 捌、參考資料

1. 維基百科  
([http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex\\_ring](http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_ring))
2. Surfing Scientist  
(<http://www.abc.net.au/science/surfsingscientist/toroidalvortex.htm>)
3. TeachEngineering.org Activity - Floating and Falling Flows
4. Tracker 線上教學：  
(<http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/help/frameset.html>)
5. 國中理化第二、三冊（康軒出版、南一出版、翰林出版）
6. 高中物理第三、四冊（南一出版、翰林出版）

## **【評語】 030111**

- 1.研究液體滴入第二種液體時，液滴產生的擴散形狀及其隨時間的變化，題材具新穎性，為前人未曾探討，結果可對流體的研究者有助益。
- 2.研究內容可望應用到生物醫學或流體脈衝，具應用潛力。