

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）

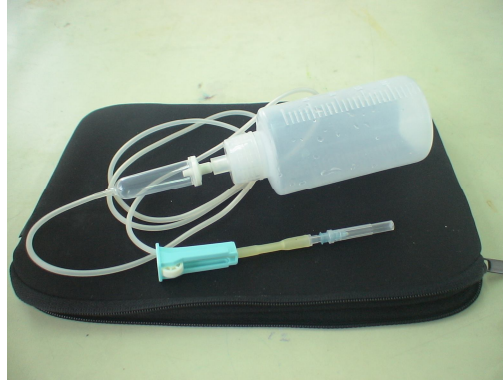


圖 1 洗瓶與輸液套件

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。

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

(ρ 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。

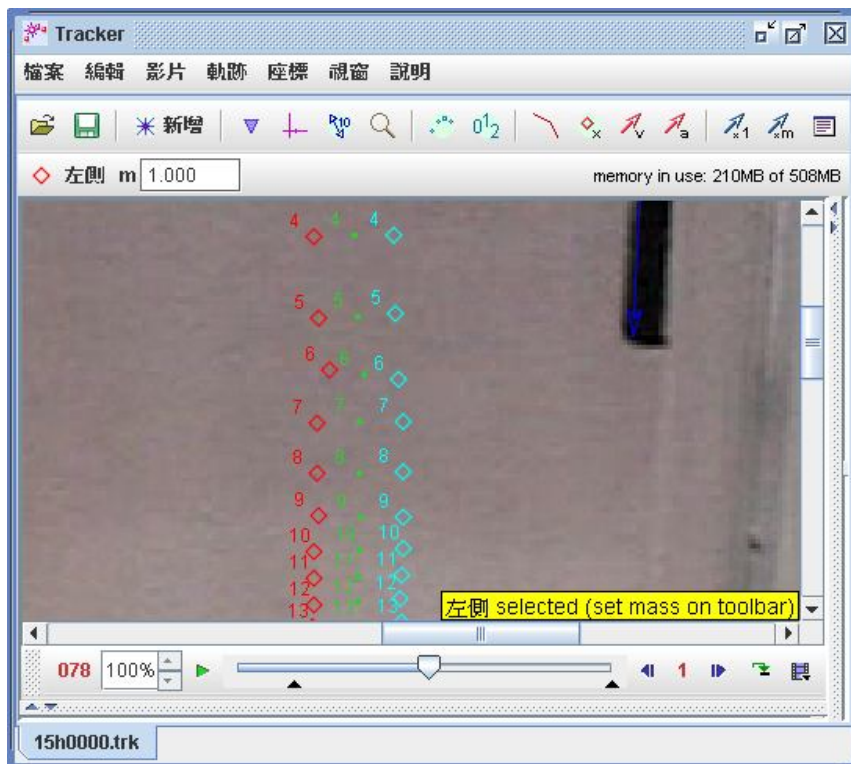


圖 3 免費物理分析軟體 -Tracker

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。

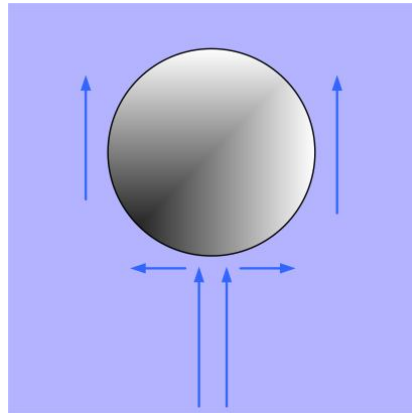


圖 4

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。

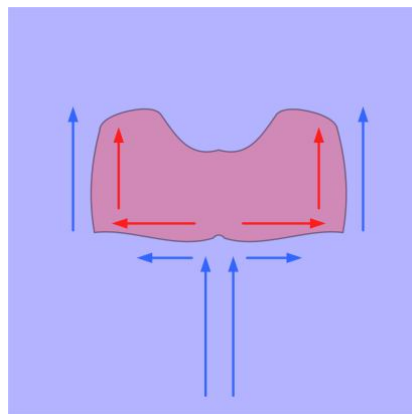


圖 5

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。

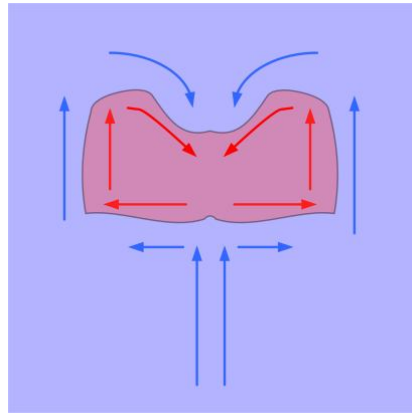


圖 6

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。

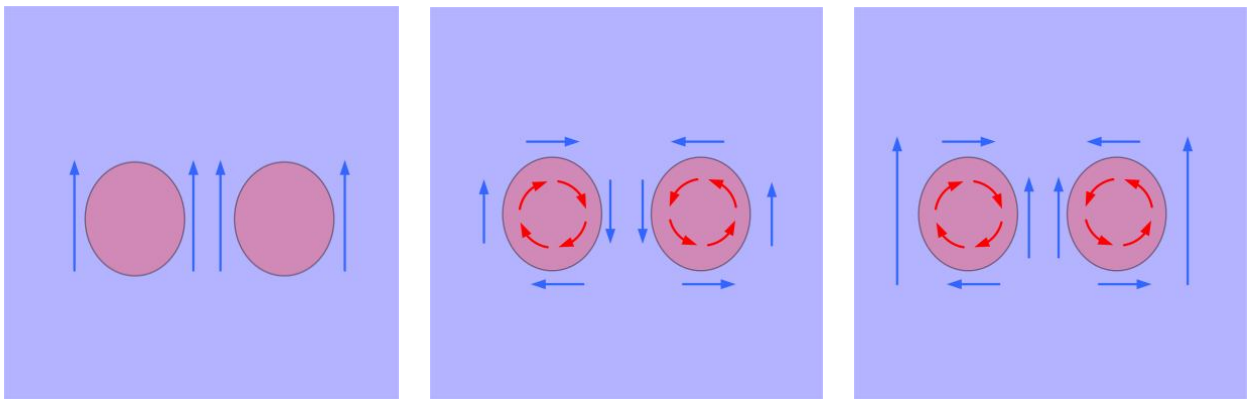


圖 7

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。

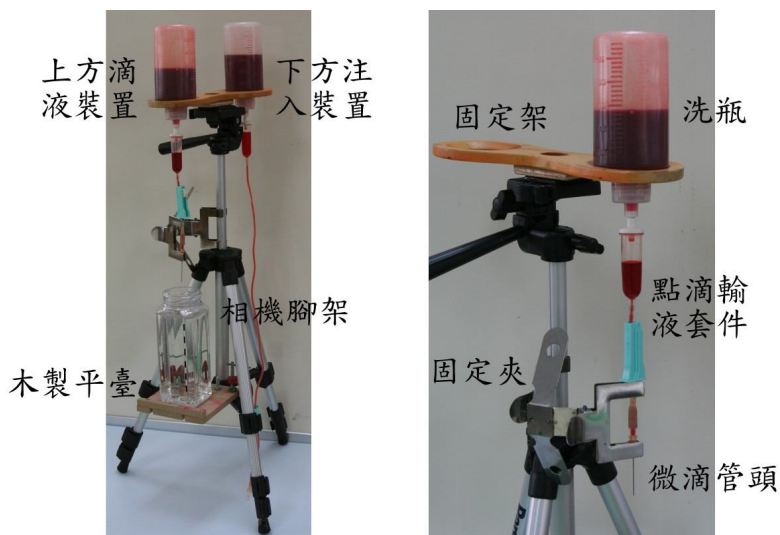


圖 8 穩定液滴裝置

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。

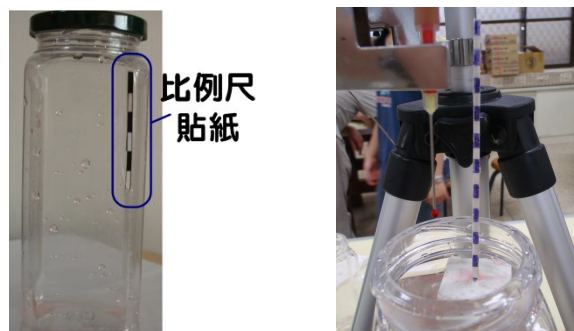


圖 9 觀察水瓶

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。

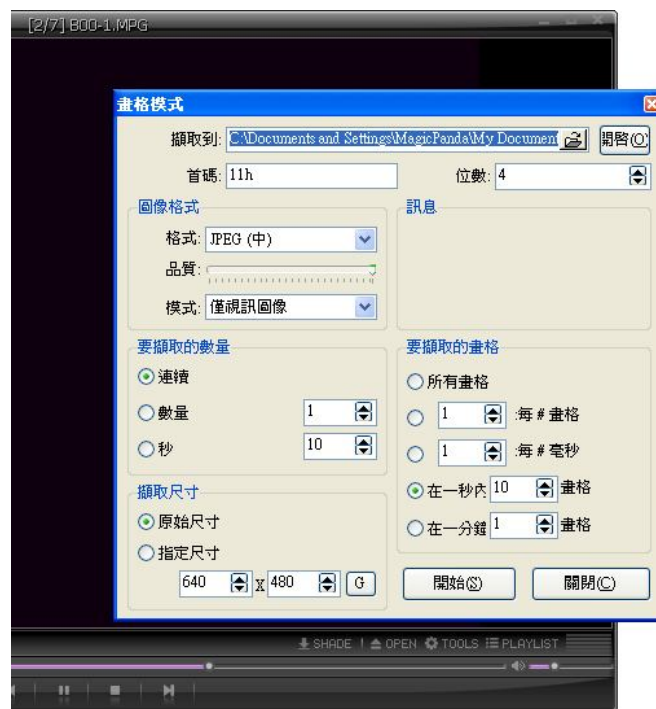


圖 10 擷取連續圖片

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）

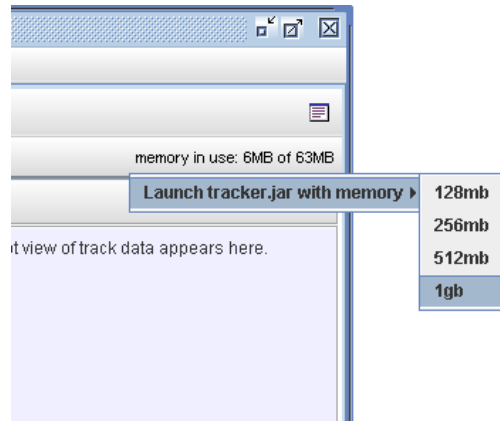


圖 11 調整記憶體

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。

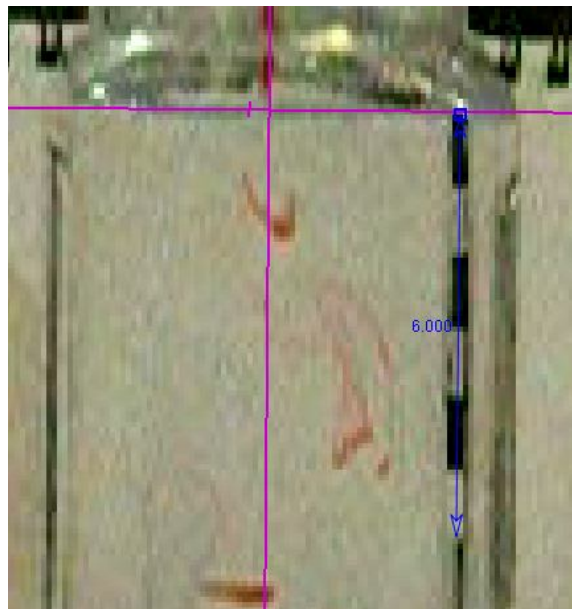


圖 12 設定比例尺與座標

- 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。

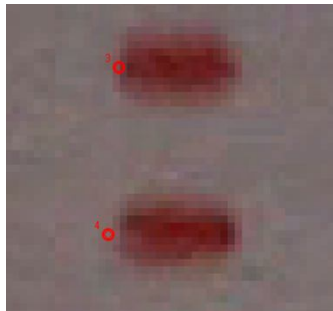


圖 13 第 3、4 影格的追蹤點標示

- 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。

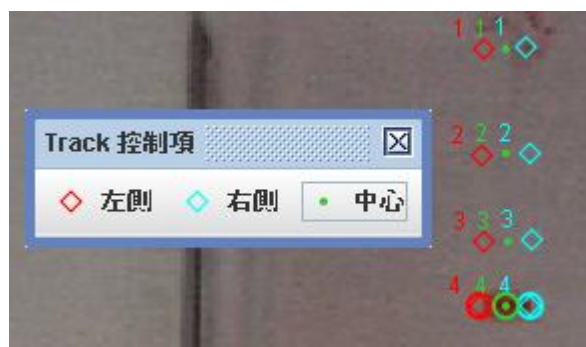
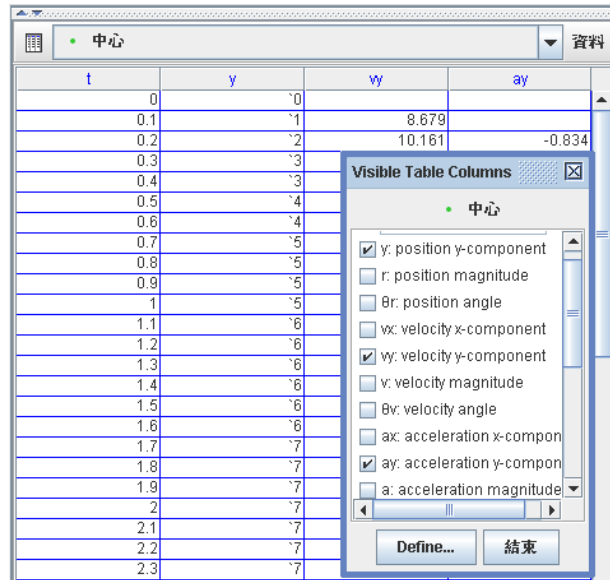


圖 14 完整追蹤點標示位置

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。

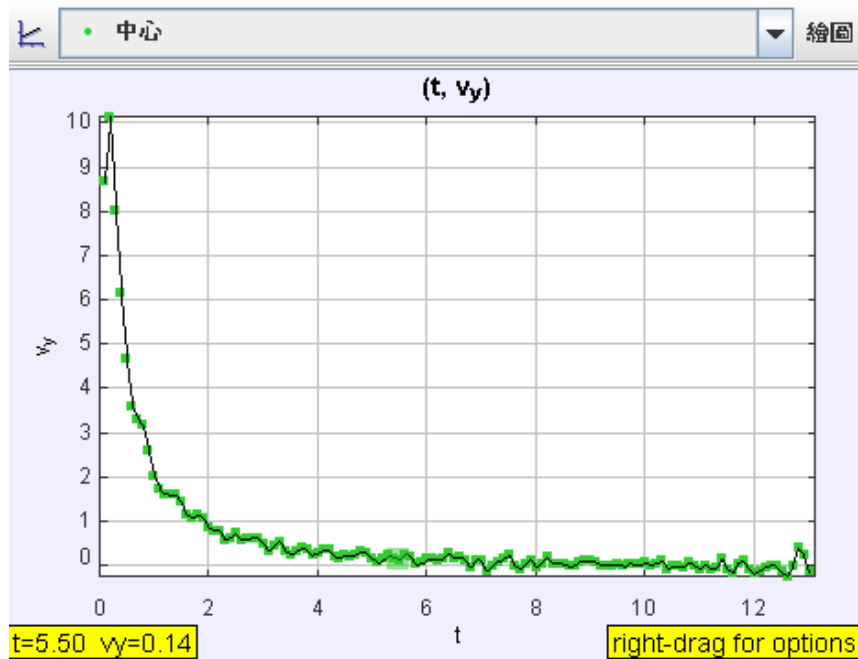


圖 16 使用 Tracker 繪製圖形

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。

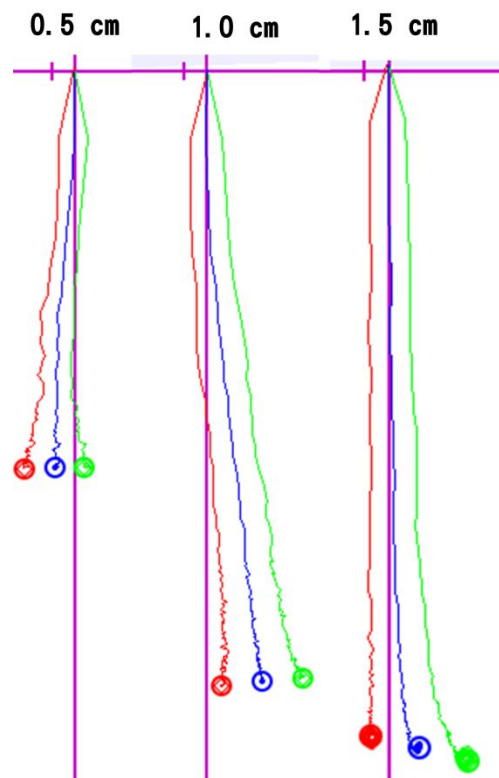
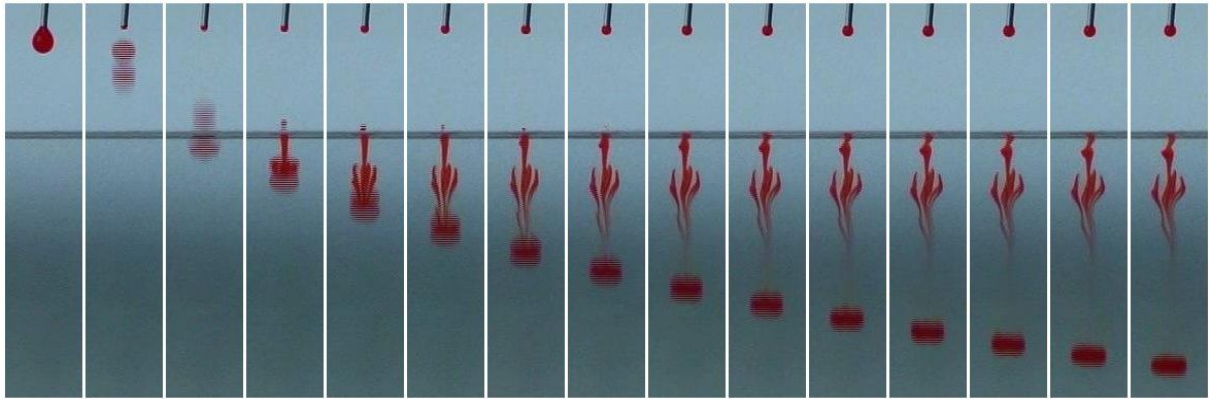


圖 17 不同高度滴下的液滴在水中運動軌跡

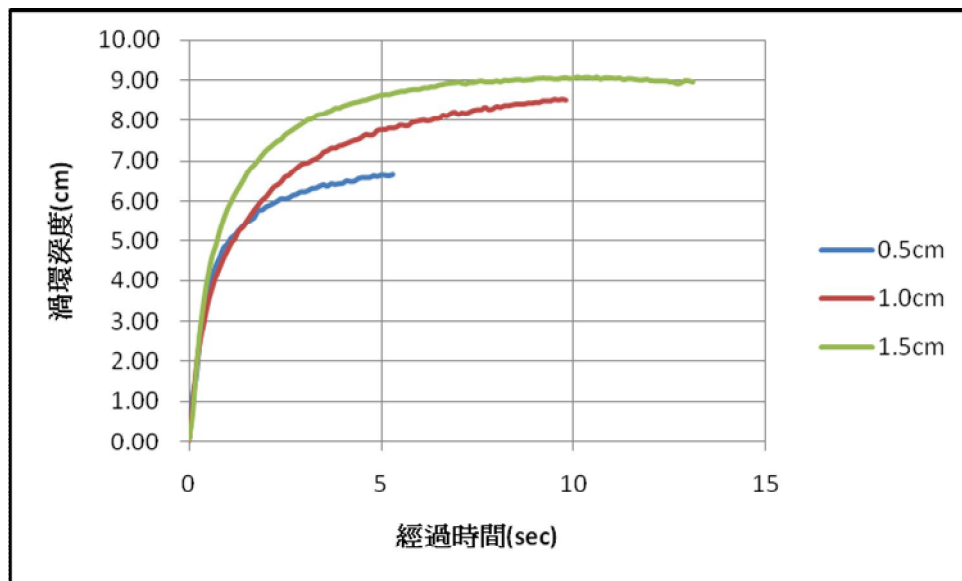
1. 不同高度的液滴對於渦環最大深度的探討

(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。



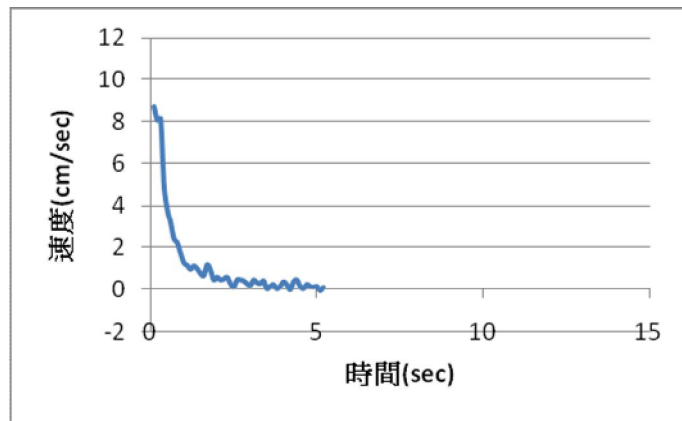
圖表 2 不同高度產生的渦環，其深度-時間關係圖

(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。

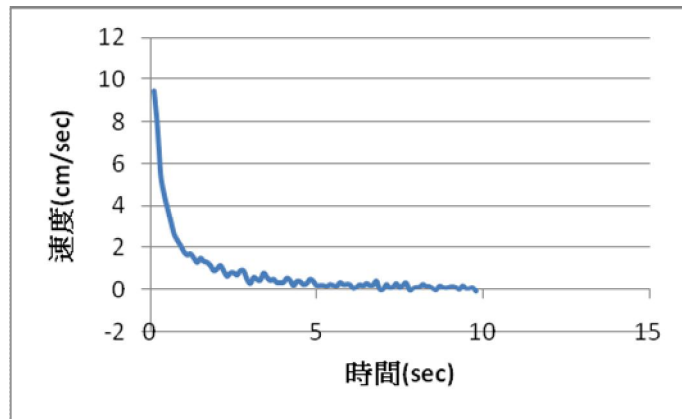
2. 不同高度的液滴對於渦環垂直速度的探討

(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。

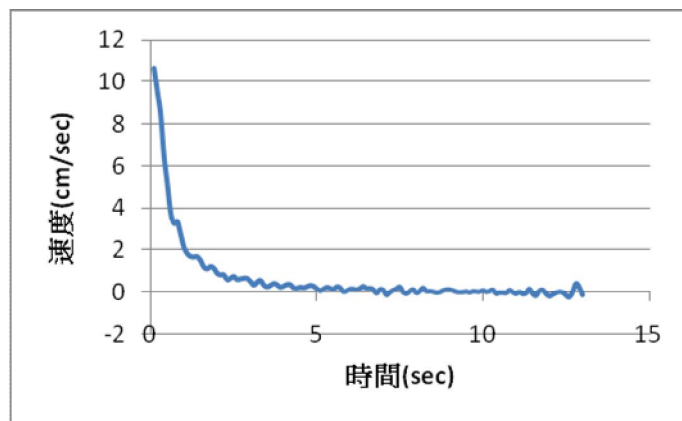
(2)爲了避免圖形彼此遮掩，我們先將三個不同高度的速度與時間關係圖分開表現。如圖表 3、圖表 4、圖表 5。



圖表 3 0.5 cm 滴落，速度-時間關係圖

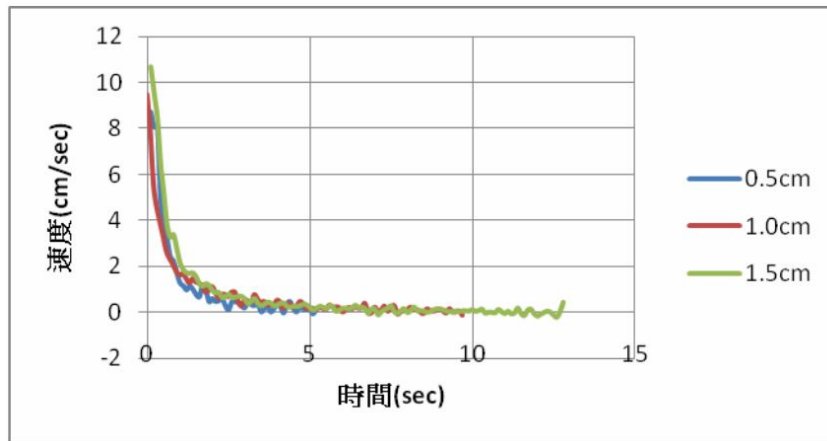


圖表 4 1.0 cm 滴落，速度-時間關係圖



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

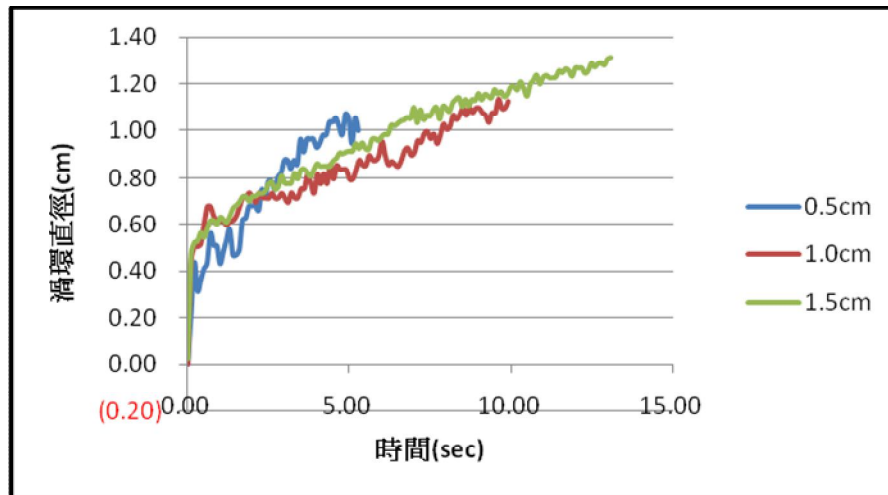
(4)其原因，可能是因為液滴遭遇清水的阻力，隨著速度越大而越大。

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。

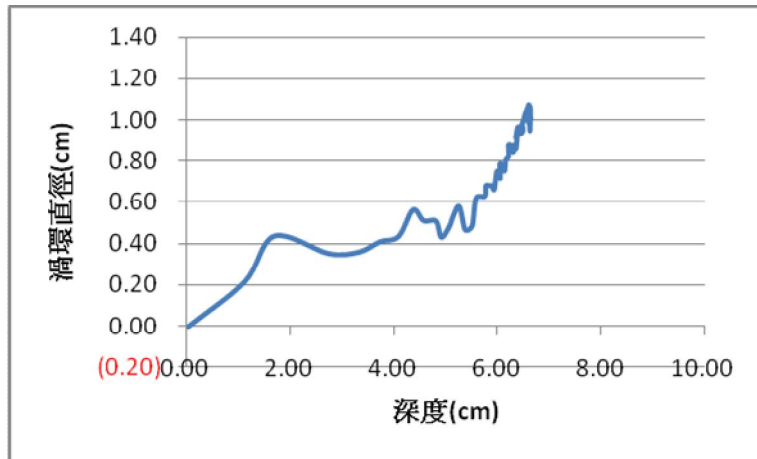
(2)繪出渦環直徑與時間的關係圖，如圖表 7。



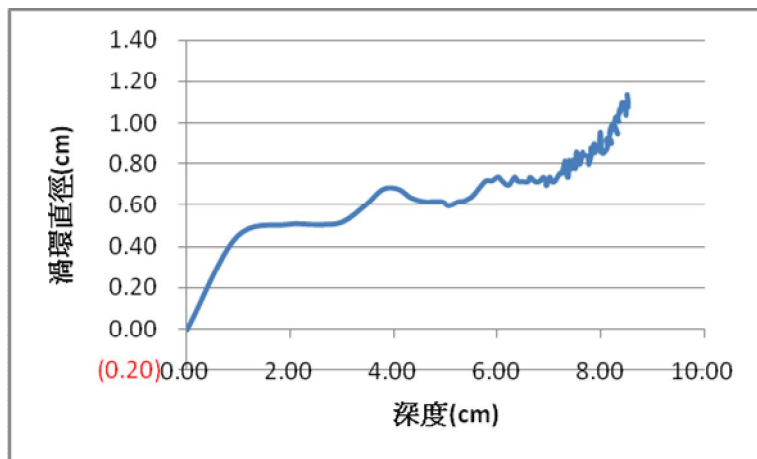
圖表 7 渦環直徑-時間關係圖

(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。

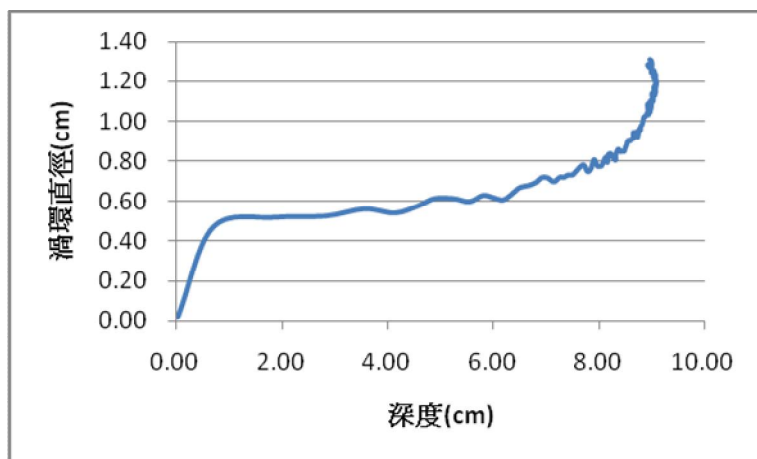
(4)繪出渦環直徑與深度的關係圖，如圖表 8、圖表 9、圖表 10。



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。

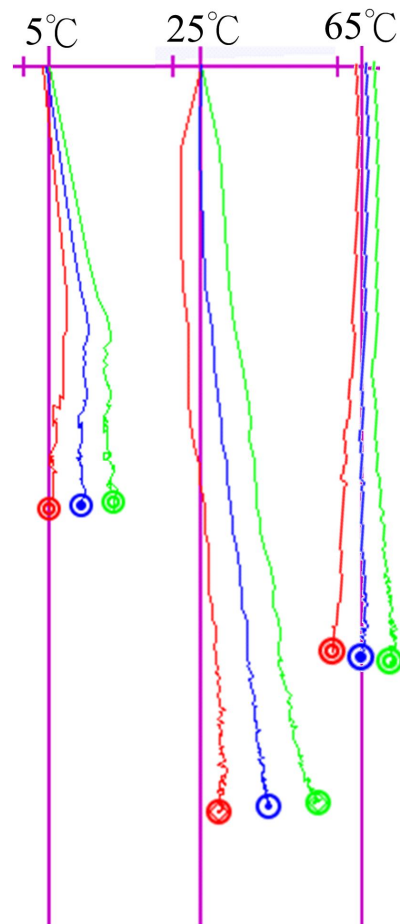


圖 18 滴下的液滴在不同溫度水中運動軌跡

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°C 的水中，渦環會向上飄；而若在 5°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°C 時體積最小，也意味著 4°C 時密度最大。

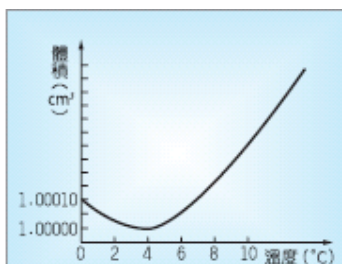


圖 19 翰林國中理化課本-水的體積與溫度關係圖

在 65°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。

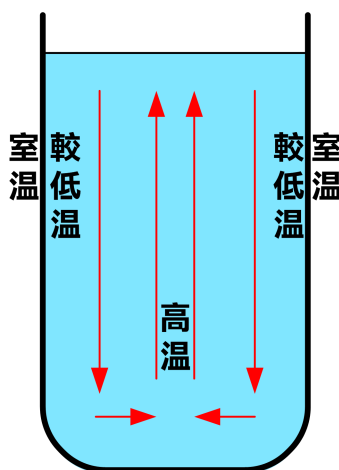


圖 20 65°C 的方瓶於室溫的對流

而在 5°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。

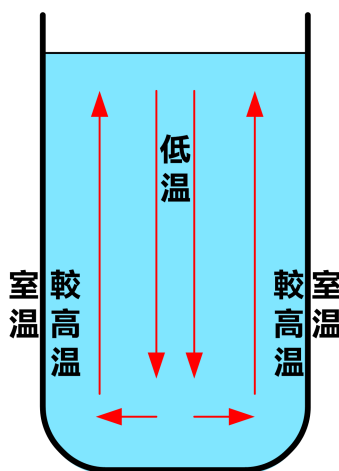


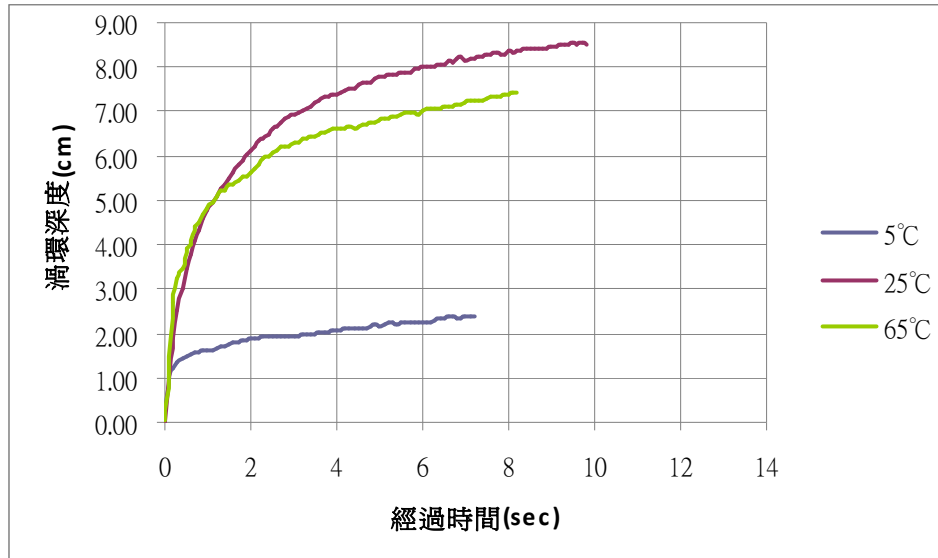
圖 21 5°C 的方瓶於室溫的對流

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。

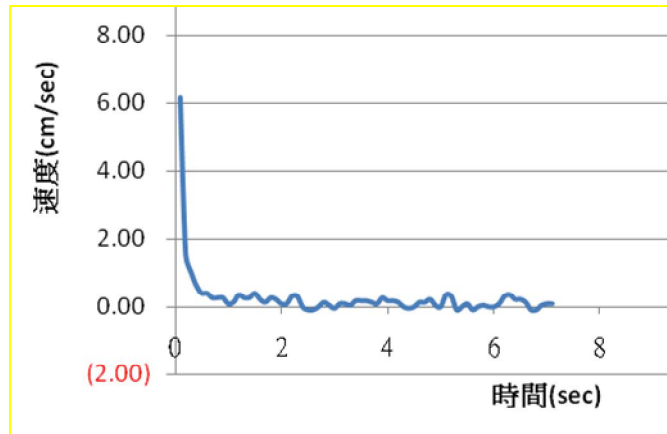


圖表 12 不同溫度時產生的渦環，其深度-時間關係圖

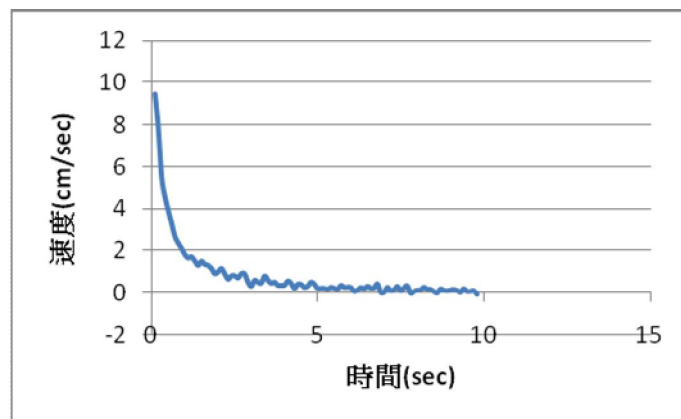
(3)由圖表可以清楚發現，常溫時渦環可以到達的深度為最深，高溫其次，最淺的則為低溫時的渦環。當然，因為低溫時的渦環在停止後，還會向下漂流，但是此時渦環已經潰散，所以不列入考慮。

2. 不同溫度對於渦環垂直速度的探討

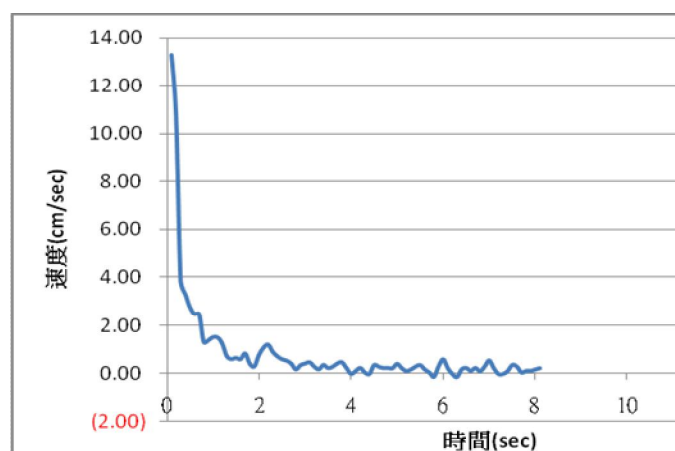
(1)就網路所查詢資料(維基百科),溫度越高,水的表面張力會越低,因此溫度越高的水,渦環在進水面時的降速會越少。這在圖形中也清楚的表現出來。爲了避免圖形彼此遮掩,我們先將三個不同高度的速度與時間關係圖分開表現。如圖表 13、圖表 14、圖表 15。



圖表 13 5°C時,速度-時間關係圖

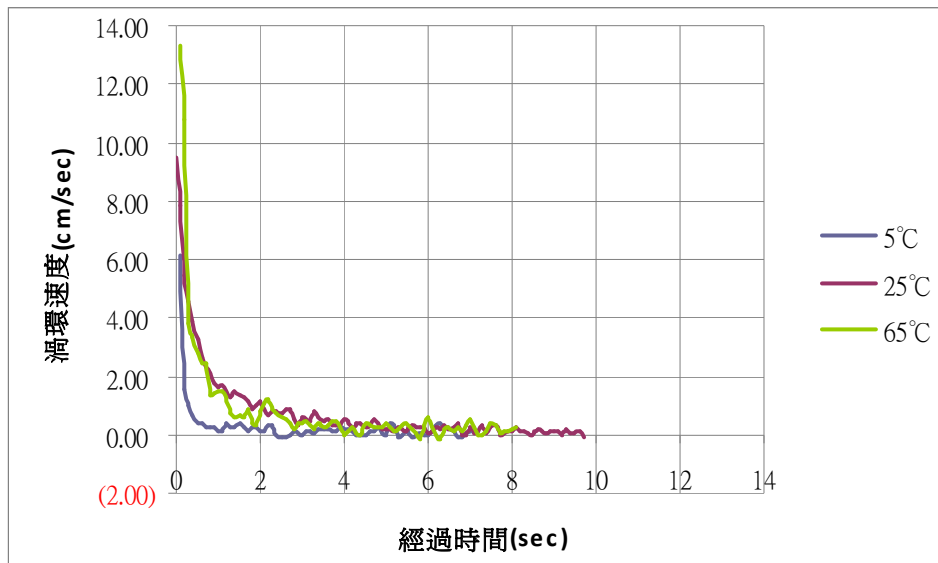


圖表 14 25°C時,速度-時間關係圖



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。

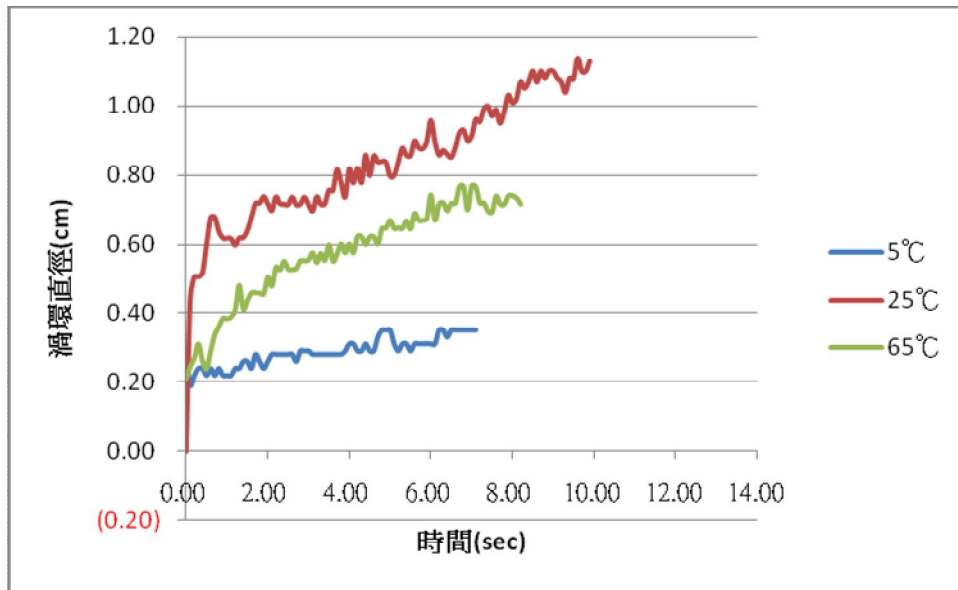


圖表 16 三種不同溫度其時間-速度關係圖

(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。



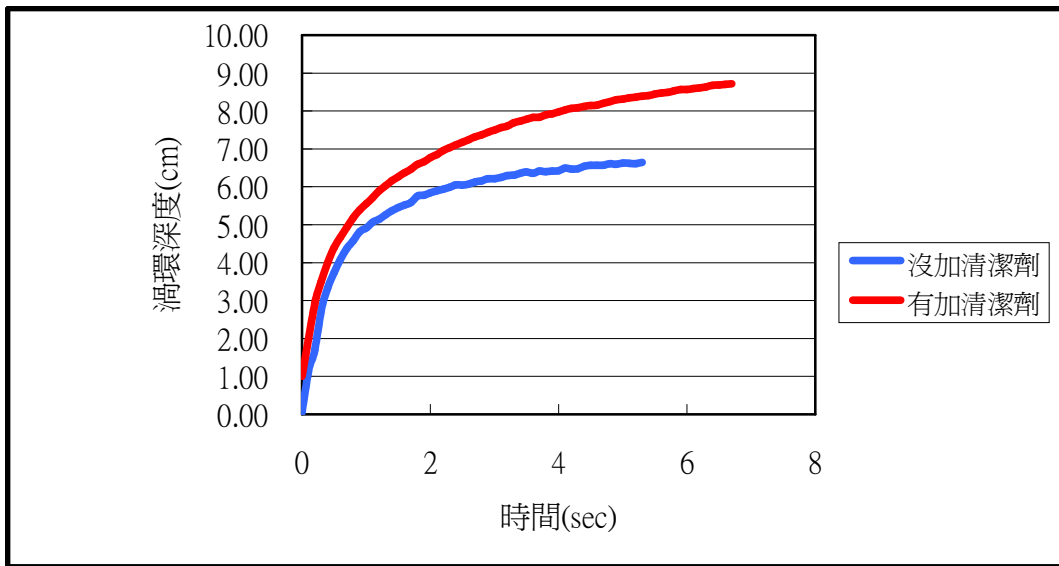
圖表 17 渦環直徑-時間關係圖

- (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。

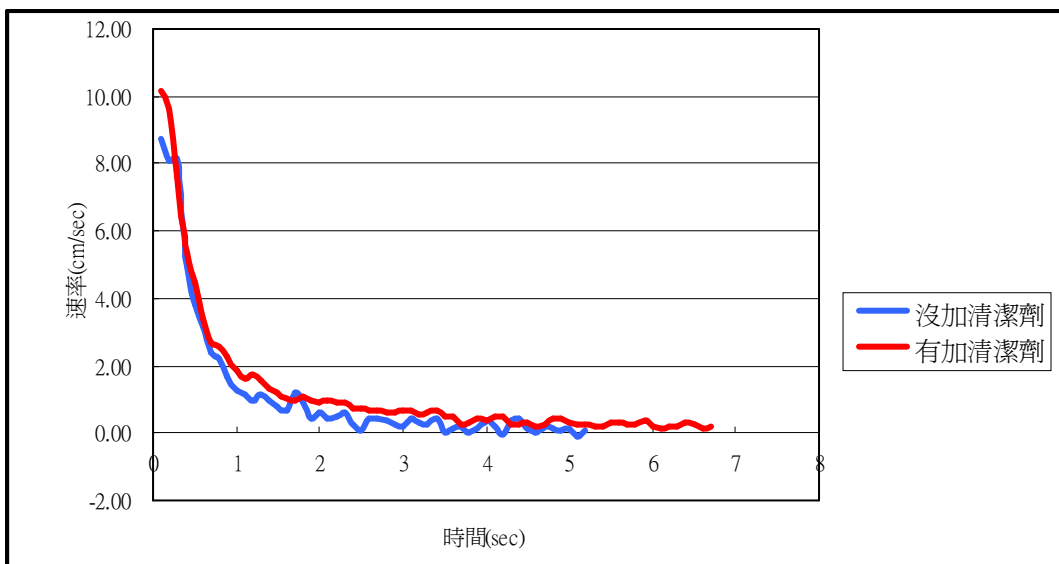


圖表 18 有否加清潔劑時，渦環深度-時間的關係圖

(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。

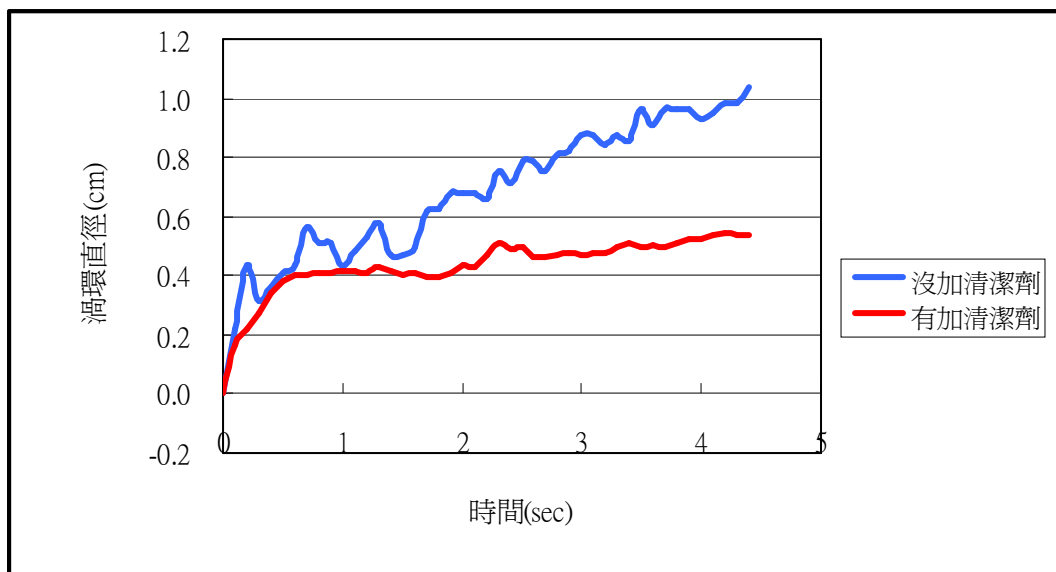


圖表 19 有否加清潔劑時，渦環速率-時間的關係圖

(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。

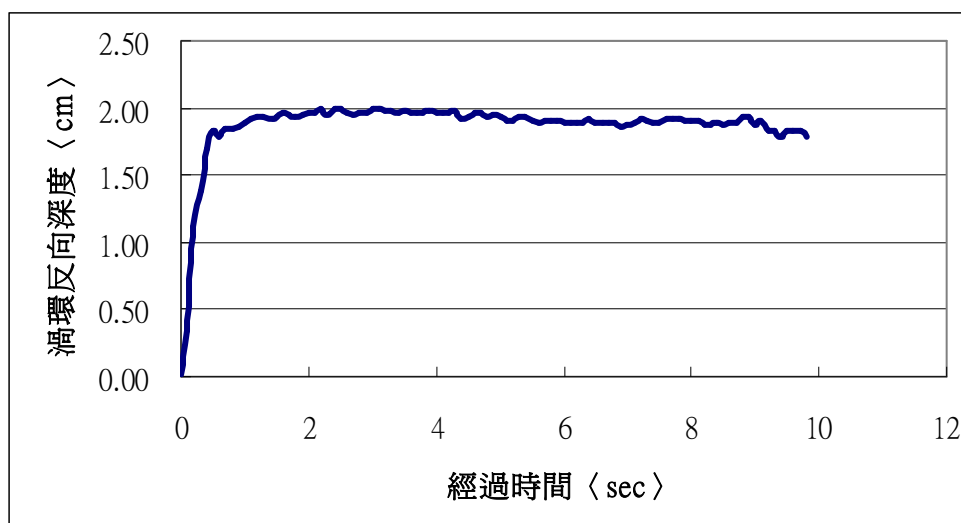


圖表 20 有否加清潔劑時，渦環直徑-時間的關係圖

(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。

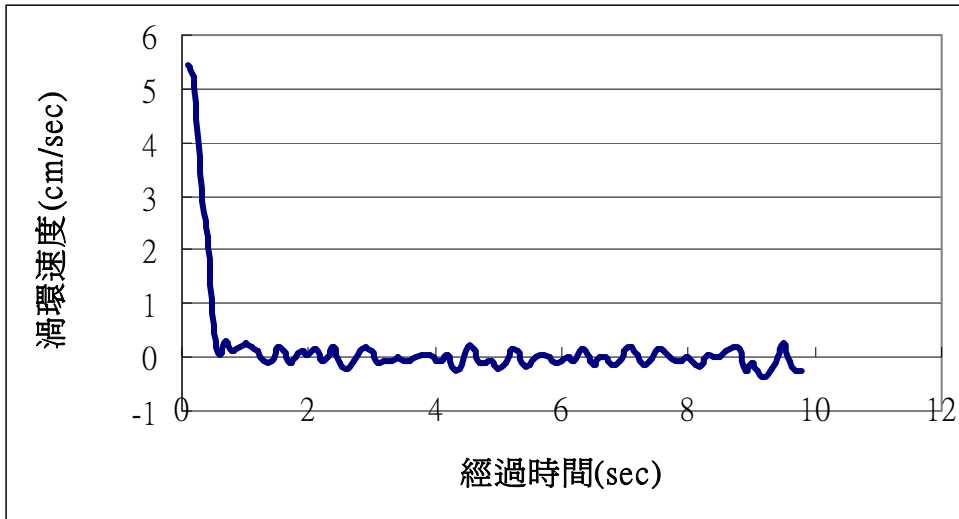
四、探討渦環形成的方向性（反向渦環的形成）

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。



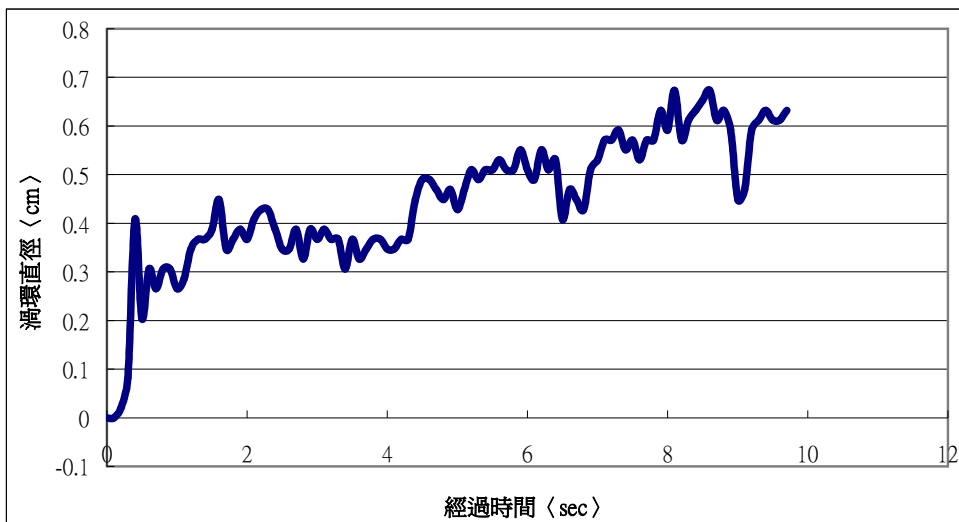
圖表 21 渦環反向深度-時間的關係圖

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

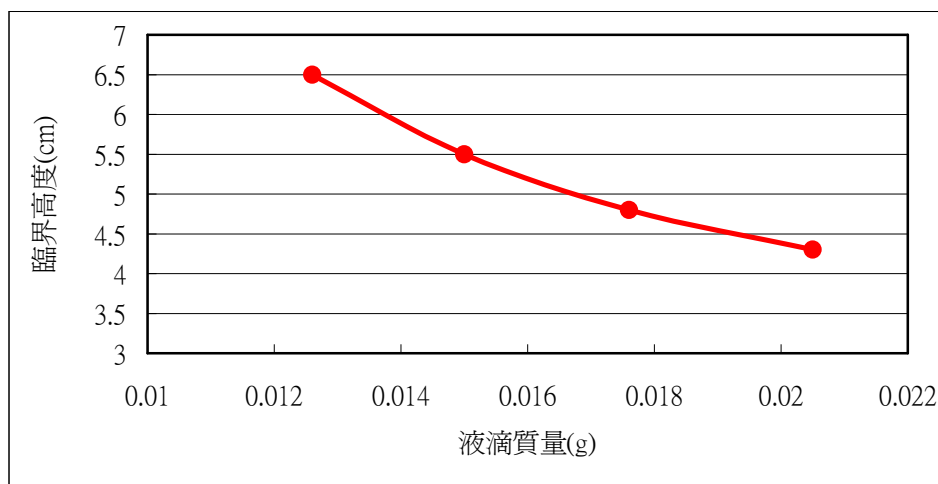
4. 由以上圖表所分析出渦環的反向深度、速度、直徑與時間的關係圖，和上方滴落的結果相近，可推知由各方向皆可產生渦環。

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。

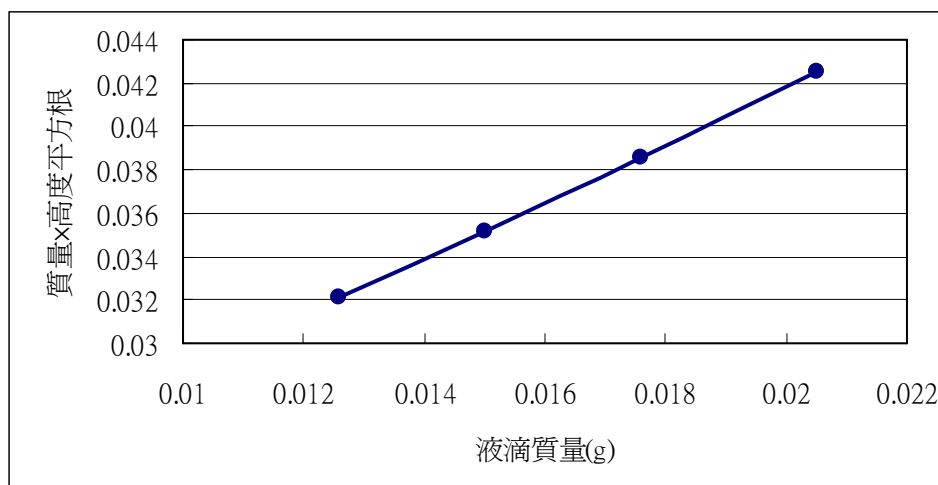
微滴管頭口徑	18 號	20 號	22 號	24 號
液滴的質量 (g)	0.0205	0.0176	0.0150	0.0126
形成渦環臨界高度 (cm)	6.5	5.5	4.8	4.3

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。

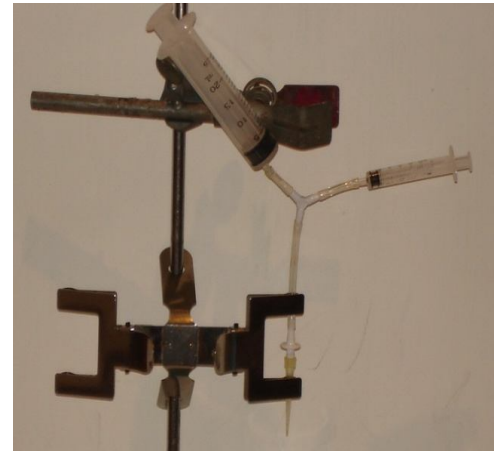


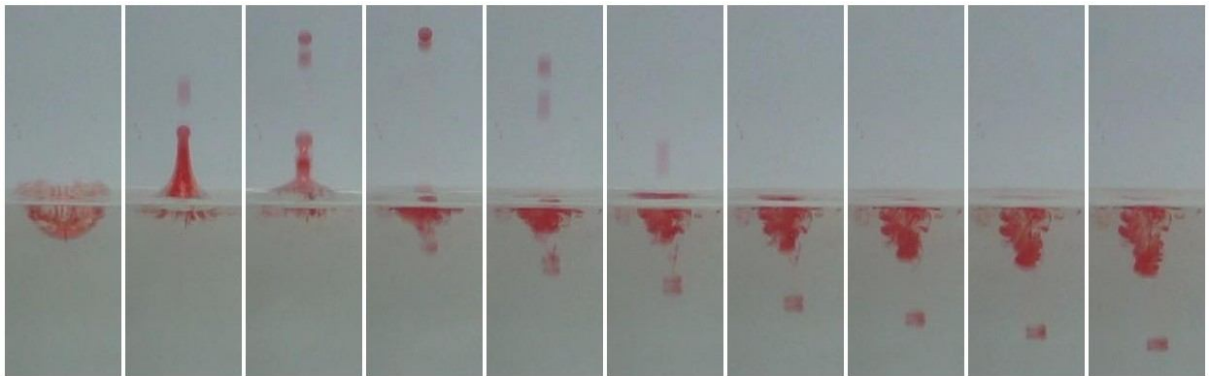
圖 23 Y 型滴落裝置

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。

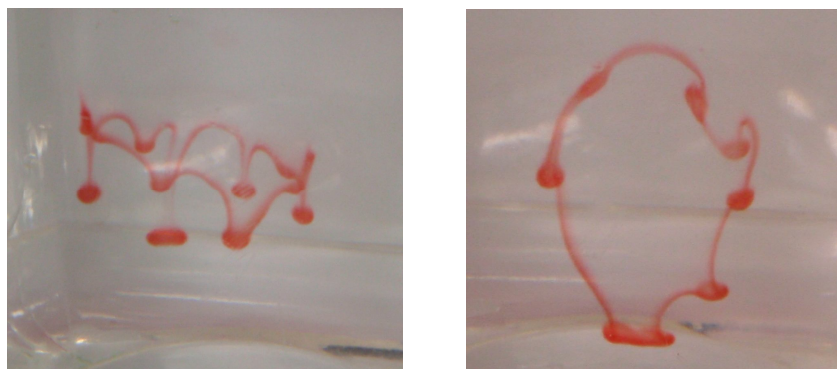
四、對於高溫渦環，其表現不如常溫的原因，主要是高溫時在方瓶中間有因為熱對流所造成的向上水流。並且因為高溫，液體間的摩擦力較低，也導致渦環內圈不容易增加速度，也會使得高溫的渦環表現不佳。

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)
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。