

# 環形渦流

## 高中組物理科第一名

高雄縣私立普門中學

作者：陳緯仁

指導教師：鍾志輝

### 一、研究動機

一個又一個的煙圈從老爸的口中神奇般的出現，上升一段距離後，漸漸消失。令我好不羨慕！

一個又一個的煙圈從老爸那破舊的機車排煙管中，冒出後消失。真讓人驚訝！

由於好奇心的驅使，終想一探究竟，先前在南區科展中，就以煙圈的題目榮獲佳作。在評審教授的建議及參考文獻下，於是決定將流場作改變，由原來氣體改為液體。並且將定性的描述改由定量的探討及控制各種控制變因。

### 二、研究目的

(一) 探討環形渦流在靜止流場中，各種可能影響其形成的作用力及環境因素。

(二) 觀察環形渦流在靜止流場中運動過程，其動態的變化情形，並且進一步分析其受力與流場的互動關係。

(三) 探討鹽水液滴在水面上 0mm 及 5mm 高度下滴落，形成環形渦流而平均外直徑—內直徑、壁高、壁厚、與鹽水密度的關係。

(四) 探討鹽水液滴在水面上 0 mm 高度下滴落，形成的環形渦流其平均下降速度、平均放大率、環流維持時間、散逸時間與鹽水密度的關係。

### 三、研究設備器材

(一) 調配不同鹽水密度的器材：

1. 電子天平(min 10mg)
2. 量筒數個(容量25ml)

3. FILTER PAPER(ADVANTEC)
  4. 高級精鹽一包
  5. 滴管數個
  6. 攪拌器、勺子各一支
- (二) 攝影器材：1. HT-8-架(SONY CCD-TR2000)
2. 電視機一台
  3. HALOGEN-STRAHLER(150W) 一盞
  4. AV端子
  5. FS照相機一架
  6. 放大鏡一面(直徑7.5cm + 焦距25cm)
  7. 平面鏡一面(長20cm + 寬7cm)
  8. 腳架
- (三) 自製針筒：1. 針筒一支(容量3.0ml)
2. 脫脂棉
- (四) 過濾RO水的器材：1. FILTER PAPER(ADVANTEC)
2. 分液漏斗、漏斗各一個
  3. 小水管(細長1m + 直徑1.5cm)
  4. 滴管、有孔軟木塞各一個
  5. 有蓋水桶2個(約15公升)
- (五) 其他器材：1. 電腦(分析數據和影像處理) 一台
2. 長20cm、寬15cm、高25cm的玻璃缸兩個
  3. 鐵尺一把(15cm)
  4. 食用色素紅色6號(易於觀察)
  5. 游標尺
  6. 應用軟體：Microsoft Excel、Tablecurve2d、Vlead Videostudio、Paint Shop ProS

#### 四、實驗過程

##### (一) 預備：

1. 調配不同鹽水密度：用高級精鹽與RO水調配出相對密度為1.01、1.03、1.05、1.07、1.09、1.11、1.13、1.15、1.17、1.19、1.21之鹽水密度，其調配方法如下：在兩個燒杯中分別預備純的RO水及飽和鹽水，將兩者依比例倒入已知

質量的精密量筒內，若倒入之鹽水體積有十ml，重量有12.1g，則該鹽水密度為1.21g/ml，如果密度不符所需，則可加水或飽和鹽水，調整鹽水密度。

2. 製作自製針筒：拿3ml的針筒（活塞拿掉）和少許棉花，先把調配好的鹽水加入約1.5ml，並塞入少許棉花至筒口後倒放（讓棉花吸入少許鹽水以把棉花變成新活塞）。這樣可以利用滲透壓力控制滴數和不受手壓活塞所產生的衝力影響，防止人為誤差。

3. 測量Ro.H<sub>2</sub>O與不同鹽水密度之表面張力，並繪折線圖。

4. 過濾RO水：利用虹吸管原理製作（節省人力）並在出口放置三層FILTER PAPER (ADVANTEC)，使得到更乾淨的RO水（防止水中雜質影響表面張力和擾亂環形渦流行進）。

5. 實驗架構：(1)實驗環境需在暗室中進行（防止其它光線使玻璃缸和放大鏡產生反光），並在玻璃缸上方25cm處放置一150W照明燈。

(2)把長20寬15高25(cm)的玻璃缸裝進濾過的RO水至20cm水高。

(3)放置一面放大鏡（直徑7.5cm，焦距25cm）於玻璃缸前8-10cm處（視情況而定）

(4)斜立一平面鏡（長20cm，寬7cm）於玻璃缸後，約65-75度，讓鏡子反射光線照在環狀密度流上以便Hi8攝影捕捉影像（傾斜角度視情況而定）

(5)在玻璃缸上方固定自製針筒，並且固定自製針筒，並且固定鐵尺於水中，防止產生人為誤差。

(6)在距玻璃缸前約45-60cm處放置Hi8攝影機，STANDBY。

#### (二) 實驗方法：

1. Hi8攝影機應調整至手動，以免影響測量時，攝影機自動焦所造成的比例誤差。

2. 將不同密度的鹽水溶液逐一作滴定，並且攝影以便觀察、測量。

3. 每滴完一滴須停1-2分鐘，待之前的環流變成紊流散逸後，再繼續滴定第二滴。

4. 每一種密度都作15次，但取最相近的數據5次作平均。

5. 每次做完一種密度應該換一次RO水，因為先前的RO水已被污染會影響數據。

6. 針筒每次做完一種密度後應該用濾過RO水清洗並換一次棉花。

#### (三) 影像處理與測量數據方式：

1. 利用Hi8攝影機的慢動作觀察環形渦流的運動狀態。

2. 將錄製的環形渦流運動狀態放進電腦作影像處理(Ulead Video Studio、

Paint Shop Pro5)印出每1/30秒鐘的狀態以便做觀察。

3.位置固定水面下25mm上下1mm處(因為環形渦流都在水面下25mm後散逸),利用H18攝影機慢動作先取好比例再用游標尺在電視上測量其外直徑、內直徑、壁高、壁厚、時間並求出速度、平均外直徑、平均內直徑、平均壁高、平均壁厚、平均速度和其平均誤差及環流大小變化量和滴狀→環狀、環狀→散逸的時間。

平均誤差：例如

|     | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 平均    |
|-----|------|------|------|------|------|-------|
| 外直徑 | 4.03 | 4.02 | 4.17 | 4.15 | 4.16 | 4.106 |

$$\frac{1}{5} \sqrt{(4.106-4.03)^2 + (4.106-4.02)^2 + (4.106-4.17)^2 + (4.106-4.15)^2 + (4.106-4.16)^2}$$

=外直徑平均誤差

速度：25mm/時間(s)

4.利用Microsoft Excel、TableCurve 2D繪出折線圖和簡單線性模擬程式，並探討環形渦流其平均外直徑、平均內直徑、平均壁高、平均壁厚、平均速度、維持環流時間、環流散逸時間、放大率之間的關係。

(四)注意事項：

1.流場的擾動是影響環流形成及數據的一項因素，所以作實驗前應讓長20寬15高25(cm)的玻璃缸裝水並靜止一段時間使流場穩定，且玻璃缸口要覆蓋住以免雜質掉入。

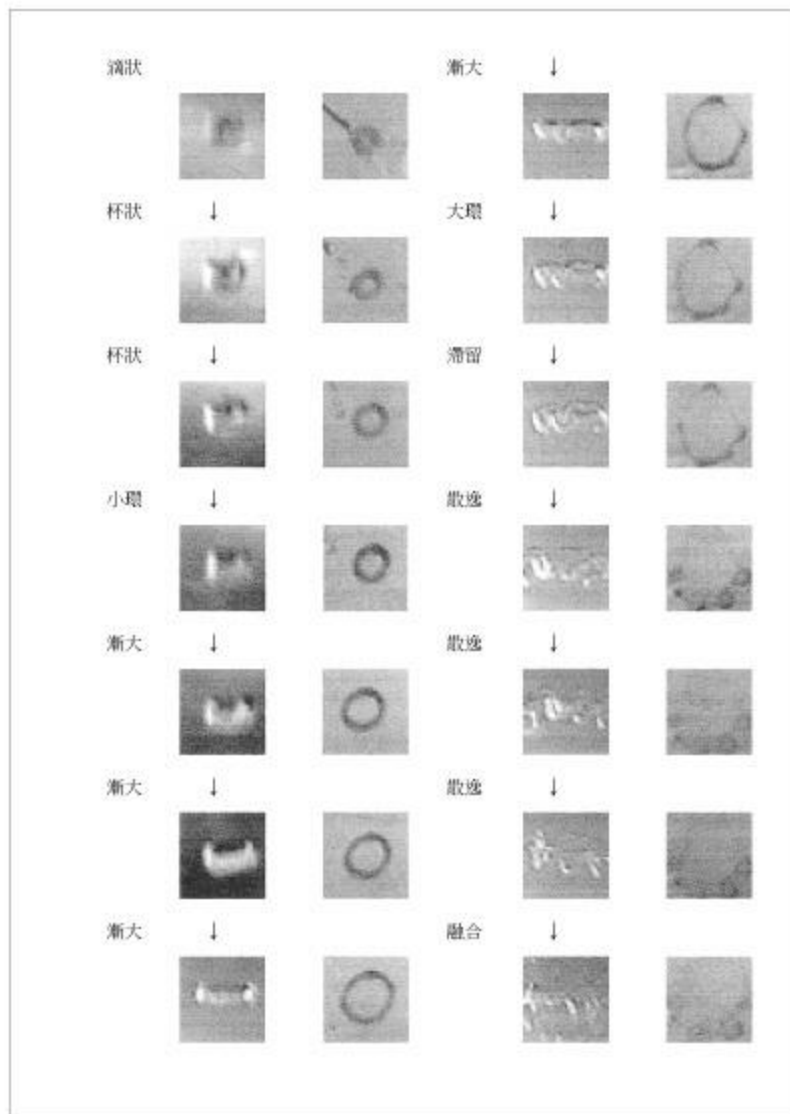
2.在實驗中，應避免觸碰桌子以免產生振動，否則會影響環流形成、數據，並使流場產生擾動。

3.測量時，為了避免個觀察的標準不同，所產生的人為誤差，應由特定的人作測量。

4.食用色素6號只能用在觀察方面，但不能用在測量方面，因為食用色素6號會影響環形渦流速度和變大率。

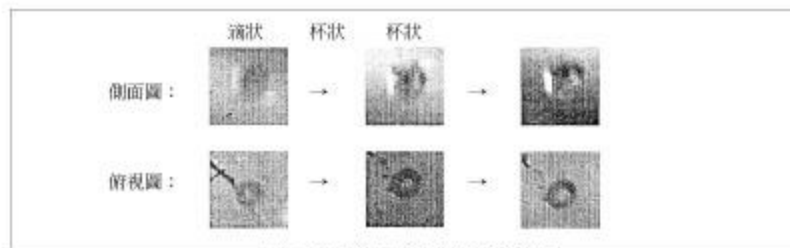
## 六、數據分析與討論

「相對的密度」比較下，較大的溶液滴入於密度較小的溶液中，會產生環狀的密度流現象(如下面灰階處理圖片)。此環狀密度流在液體中沿著重力方向越降越慢。在運動中，其初入水面時到完全散逸的形態依序是：



(一) 環形渦流由滴狀→杯狀→小環→大環→滯留→散逸的演化與分析

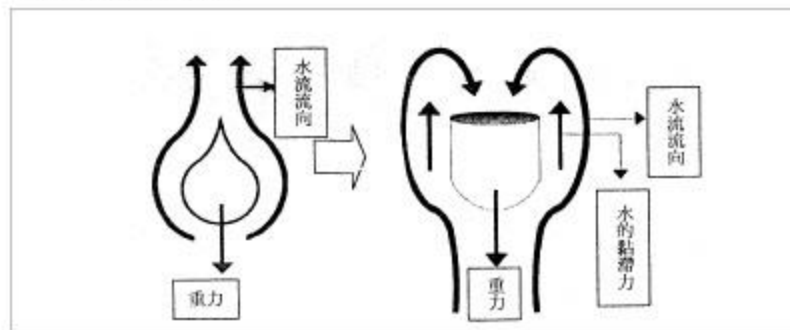
1. 滴狀→杯狀演化



圖(6.1.1)滴狀→杯狀演化過程分解圖

觀察情形：

液滴初入水時，保持水滴狀，其中心逐漸呈現凹狀，而底部呈現微凸的杯狀，其過程只有2/30秒。

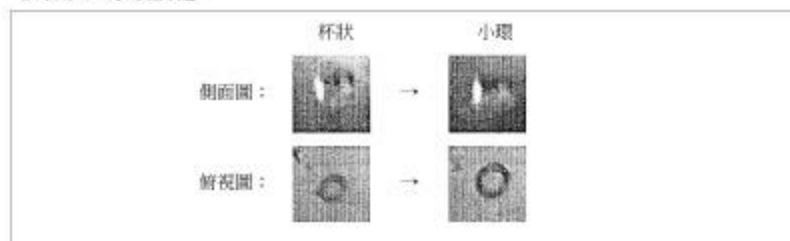


圖(6.1.2)滴狀→杯狀演化過程水流流向及受力情形

分析流場流向及受力情形：

環形渦流由滴狀→杯狀期間，液滴外圍受下方轉向水流的形狀阻力與黏滯力作用，而減速度運動，然中心部分（受重力往下拉作用）繼續維持原來的速度，於液滴外圍逐漸落後中心部分，形成一底部下凸、中心凹陷的杯狀外形。

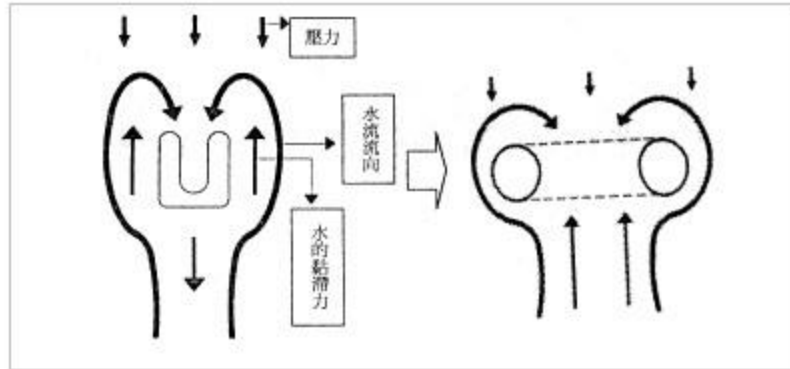
2. 杯狀→小環演化



圖(6.2.1)杯狀→小環演化過程分解圖

觀察情形：

形成一杯狀後，底部微凸部分被中間的水流推向兩旁，使其漸平、漸薄。最終底部被貫穿，形成環狀。

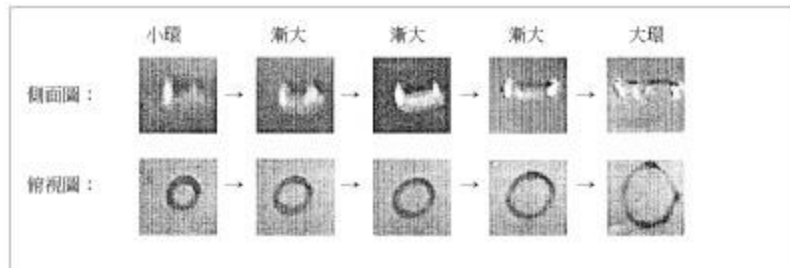


圖(6.2.2)杯狀→小環演化過程水流流向及受力情形

分析流場流向及受力情形：

環形渦流由杯狀→小環期間，杯狀中空部分被繞過外環的水流填補，進而貫穿，形成環流，並牽動附近水流流動（受形狀阻力與黏滯力作用）。

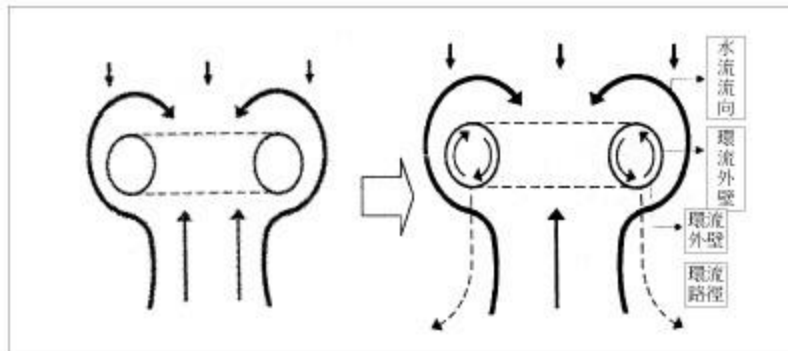
### 3. 小環→大環演化



圖(6.3.1)小環→大環演化過程分解圖

觀察情形：

從俯視圖可看，環流越往下越擴大，從側面圖可看出，環流兩旁壁高越往下降越小。若進一步分析動態變化可觀察到，環流外環是由外向內轉入的下降運動。而且下降速度是沿著重力方向漸慢。

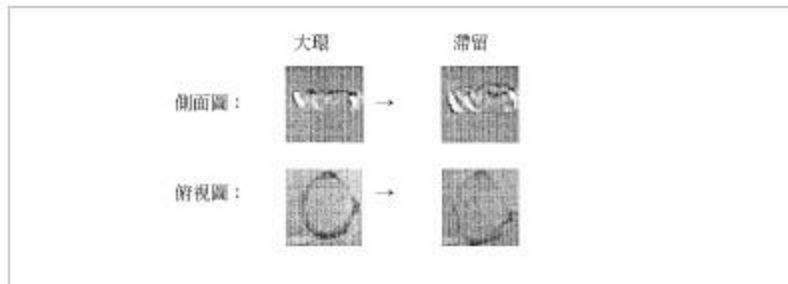


圖(6.3.2)小環→大環演化過程水流流向及受力情形

分析流場流向及受力情形：

環形渦流由小環→大環期間，上部附近的水流受到牽動並與來自下方轉向的水流一直往環流中心補進，造成環流外環向外向內轉入。理論上環流壁由水流所產生的黏滯力所影響，應逐漸拉長，但因環流本身自己表面張力影響，使得壁高不拉長反而收縮回來。環形渦流外環因壁高內外水流相對的運動（補進的水流與往上水流相抵，造成環形渦流速度內慢外快的現象），而產生升力（依據伯努利定律，速度差造成壓力差）向外擴張。

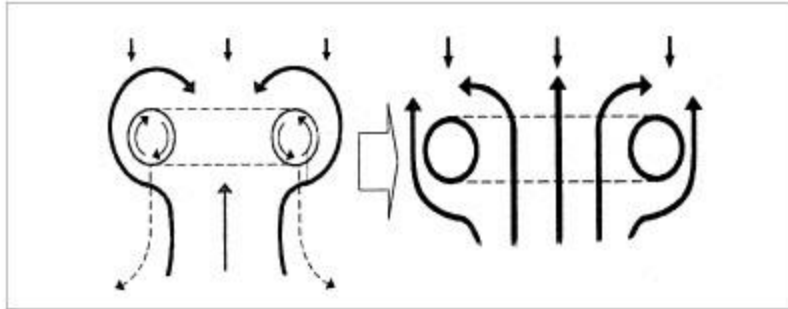
#### 4. 大環→滯留演化



圖(6.4.1)大環→滯留演化過程分解圖

觀察情形：

環形外環由外向內轉停，且在高度上亦呈滯留狀態，其滯留雖短暫，但明顯可見。

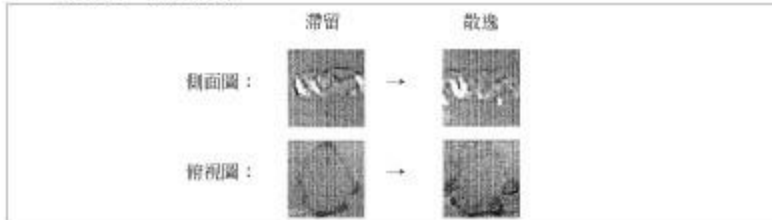


圖(6.4.2)大環→滯留演化過程水流流向及受力情形

分析流場流向及受力情形：

環形渦流由大環→滯留大環期間，由於外環擴張太大，使得中心下部大部份往上的水流不再繞過外環，改由中心穿過，並與補進水流相抵合力=0，產生滯留。

5. 滯留→散逸演化



圖(6.5.1)滯留→散逸演化過程分解圖

觀察情形：

從電視上可觀察出環形散逸時，其將由內向外分裂一段一段的，然後從俯視圖可看出，其又形成數個微小環流，維持1/30秒左右，終致散開呈無序的紊流而消失。



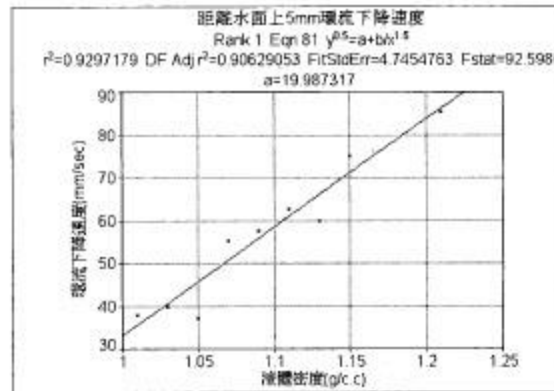
圖(6.5.2)演滯留→散逸化過程水流流向及受力情形

分析流場流向及受力情形：

環形渦流由滯留→散逸大環期間，在產生滯留後，由於中心部份上下水流相激，衝裂了環流。而每段裂的環流又因表面張力影響，又形成球狀下降，進而在次變成微小的環流。

(二) 分析距離水面5mm、0mm環流速度與討論

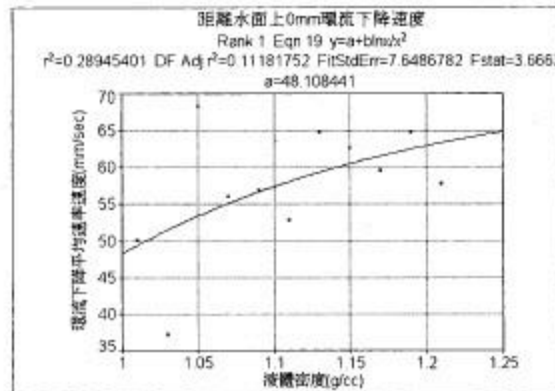
1. 模擬距離水面上5mm環流下降速度簡單線性程式圖(6.2.1)



分析距離水面上5mm環流下降速度：由TableCurve2D繪出簡單線性模擬程式中，看出環流下降速度與液體密度有明顯成正比的關係。

誤差值：相差甚小，可信度很高。

2. 模擬距離水面上0mm環流下降速度簡單線性程式圖(6.2.2)



分析距離水面上0mm環流下降速度：由TableCurve2D繪出簡單線性模擬程式中，由於1.03、1.05兩點起伏太大影響模擬程式，所以懷疑這兩點為誤差值。整體上環流下降速度與液體密度成正比的關係，曲線斜率比距離水面上5mm環流下降速度小。

誤差值：由於1.03、1.05兩點起伏太大影響，造成誤差值變大。

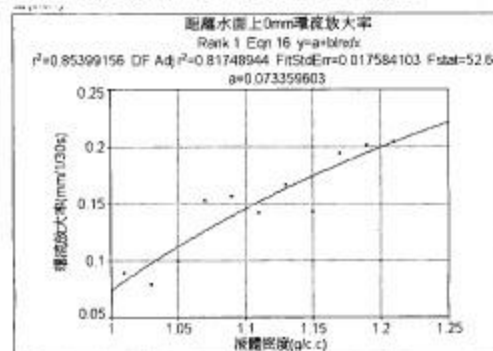
### 3. 討論：

液滴距離水面上高度5mm、0mm處滴落，對環流有相當明顯的差別。由圖比較得出，兩條曲線會有交點。而距離水面的高度5mm的曲線受到空氣阻力、表面張力及重力位能產生的動能的影響，推論在交點之前空氣阻力、表面張力（液滴與水接觸時，造成水與鹽水的表面張力會互相排斥產生阻力）的影響大於重力位能產生的動能，所以形成頻率及速度特別低，在交點之後重力位能產生的動能影響大於空氣阻力、表面張力，所以速度提高超過距離水面的高度0mm環流（沒有重力位能產生的動能），但是形成頻率還是比距離水面的高度0mm環流低太多（受表面張力影響）。

#### （三）分析距離水面上0mm環流速度、放大率、散逸時間、維持時間與討論

P.S：距離水面上5mm環流速度、放大率、散逸時間會有空氣阻力的問題，所以不做討論。

#### 1. 模擬距離水面上0mm環流放大率簡單線性程式圖(6.3.1)

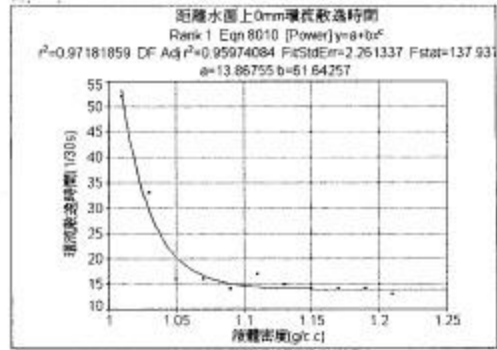


分析距離水面上0mm環流放大率：由TableCurve2D繪出簡單線性模擬程式中，1.07、1.15雖在誤差線之外，但影響不大。整體上環流放大率與液體密度成正比的關係。

誤差值：1.07、1.15雖在誤差線之外，但誤差值相差甚小，可信度很高。

附環流放大率折線圖與數據表

## 2. 模擬距離水面上0mm環流散逸時間簡單線性程式圖(6.3.2)

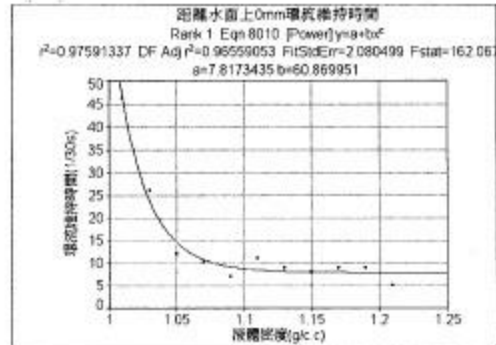


分析距離水面上0mm環流散逸時間：由TableCurve2D繪出簡單線性模擬程式中，環流散逸時間曲線趨近終端，所有點都在誤差曲線內。

誤差值：誤差值極小，可信度很高。

附環流散逸時間折線圖與數據表

## 3. 模擬距離水面上0mm環流維持時間簡單線性程式圖(6.3.3)



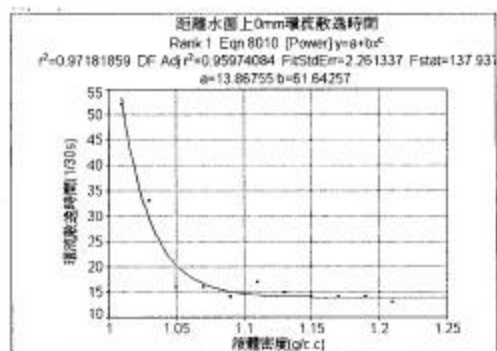
分析距離水面上0mm環流維持時間：由TableCurve2D繪出簡單線性模擬程式中，環流維持時間曲線趨近終端，與環流散逸時間曲線為同一條線性程式。

誤差值：誤差值極小，可信度很高。

附環流維持時間折線圖與數據表

附環流放大率折線圖與數據表

## 2. 模擬距離水面上0mm環流散逸時間簡單線性程式圖(6.3.2)

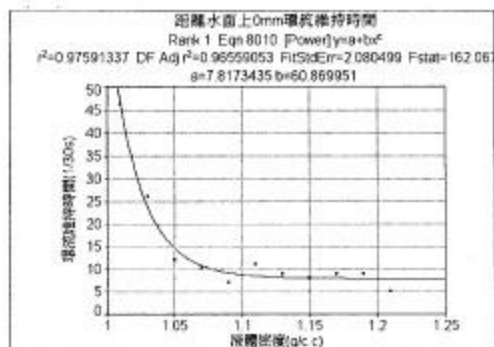


分析距離水面上0mm環流散逸時間：由TableCurve2D繪出簡單線性模擬程式中，環流散逸時間曲線趨近終端，所有點都在誤差曲線內。

誤差值：誤差值極小，可信度很高。

附環流散逸時間折線圖與數據表

## 3. 模擬距離水面上0mm環流維持時間簡單線性程式圖(6.3.3)



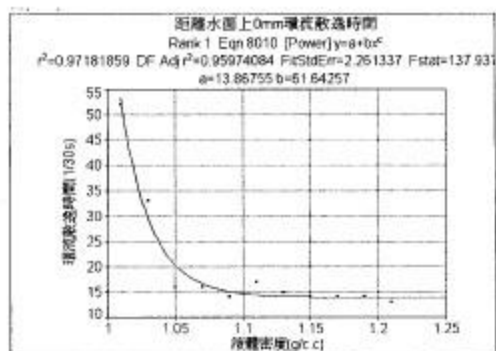
分析距離水面上0mm環流維持時間：由TableCurve2D繪出簡單線性模擬程式中，環流維持時間曲線趨近終端，與環流散逸時間曲線為同一條線性程式。

誤差值：誤差值極小，可信度很高。

附環流維持時間折線圖與數據表

附環流放大率折線圖與數據表

## 2. 模擬距離水面上0mm環流散逸時間簡單線性程式圖(6.3.2)

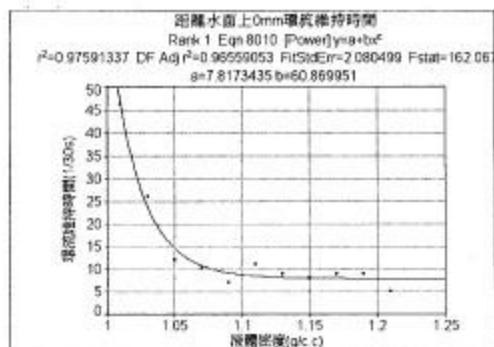


分析距離水面上0mm環流散逸時間：由TableCurve2D繪出簡單線性模擬程式中，環流散逸時間曲線趨近終端，所有點都在誤差曲線內。

誤差值：誤差值極小，可信度很高。

附環流散逸時間折線圖與數據表

## 3. 模擬距離水面上0mm環流維持時間簡單線性程式圖(6.3.3)



分析距離水面上0mm環流維持時間：由TableCurve2D繪出簡單線性模擬程式中，環流維持時間曲線趨近終端，與環流散逸時間曲線為同一條線性程式。

誤差值：誤差值極小，可信度很高。

附環流維持時間折線圖與數據表

## 六、結論

(一) 由預前實驗及實驗歸納而知：在液滴的體積固定下

1. 環流渦流最易在水面上0mm滴落處滴後形成，形成頻率為100%。

2. 環形渦流受重力、表面張力、黏滯力、升力、形狀阻力、浮力、壓力的影響。但由此公式可提出，達終端速度時

達終端速度時

$$mg=D$$

$$D=1/2C\rho Au^2$$

→

$$mg=1/2C\rho Au^2 \rightarrow u^2 = \frac{2mg}{C\rho A} \therefore u = \sqrt{\frac{2mg}{C\rho A}} \therefore u = \sqrt{\frac{2gV_{物} \cdot \rho_{物}}{C\rho A}}$$

$$\therefore u = \sqrt{\frac{2gV_{物} \cdot \rho_{物}}{C\rho A}}$$

$$\rightarrow u = \sqrt{\rho_{物} \cdot \beta}$$

$$\text{若 } V_{物}、\rho、C、A \text{ 都不變 } \beta = \frac{2gV_{物}}{C\rho A}$$

$$\rightarrow u \propto \sqrt{\rho_{物}} \rightarrow u = \#A \cdot (\#B \cdot \rho_{物}) + \#C$$

(#A、#B、#C是常數值，代表一切不可避免的存在變因)

C = drag 係數

$\rho$  = 流場密度 (例如水的密度)

A = 截面積      u = 速度

$\rho_{物}$  = 物體密度 (例如水液滴密度)

若一物體在流體中運動之阻尼、截面積及本身的體積不變時，其下降終端速度和物體的密度成正比 ( $u_{\infty} \propto \sqrt{\rho}$ )。對液滴而言，不論密度為何在入水的瞬間 (<6/30秒) 即已形成環狀，在液面下2.5公分處呈平穩下降，環形漸漸變大時，測其瞬時速度。若該速度和液滴的密度也有同樣的趨勢時，可以證明環形形變的主要因素都是源自於重力。如圖所示圓點是實驗數據，環形渦流的下降速度隨液體的密度的增大而增加；實線是理論模型

(運用TableCurve，模擬理論運動方程式)

$u = \#A \cdot (\rho \cdot \#B) + \#C$  繪出理論模型，#A、#B、#C是常數值，代表一切不可避免的存在變因)，兩者在實驗的範圍內相符合。因此在此階段中環形由小變大的因素，基本上都由重力而來。

(二) 在距離水面的高度5mm、0mm的環流外直徑、內直徑、壁高、壁厚的折線圖，可以看出環流外直徑、內直徑、壁高、壁厚是一起做變化的，而且趨勢相似。但在距離水面的高度5mm的環流比較不明顯有這樣的趨勢。距離水面的高度5mm、0mm的環流外直徑、內直徑、壁高、壁厚比較，距離水面的高度0mm的環流外直徑、內直徑、壁高、壁厚較整齊、規則。推得距離水面的高度5mm的環流受

到空氣阻力、表面張力所導致這樣結果。

(三) 由實驗推得不同的鹽水密度下，環形渦流的平均放大率、平均速度、環流散逸時間及環流維持時間這四者之間是：平均速度越快，平均放大率會越大，那環流維持環狀的時間也相對越短，而環流散逸時間與環流維持環狀的時間是一樣的。

## 七、參考資料

- (一) Fundamentals of Fluid Mechanics張國標、簡安男編著  
台灣復文興業股份有限公司
- (二) 形與流——帶阻力的流體力學Asher H. Shapiro著  
曹家政譯 臺灣中華書局印行
- (三) 大眾科學講座第十一輯——流體力學淺說(P. 164)  
尤芳志著 國立台灣科學教育館編印
- (四) 物理基礎觀念——第十章流動的流體 吳友仁著  
東江圖書公司印
- (五) 物理實驗陳龍英  
三民書局印行
- (六) 物理化學生物K.E. Van Holde著 潘裕敬譯  
台灣中華書局印行
- (七) 高中物理第二冊——第九章流體力學  
國立編譯館編著

## 評語

在有效控制液滴大小的情況下，能清晰取得下滴液滴在溶液中下降時，其形狀的變化及碎裂情形，就實驗技巧言有一定的難度。對數據亦有適當的量化描述，對液滴變化的解釋則尚稱合理。

