

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

030105

水中鑽戒- 探討不同條件下對水鐘形狀的影響

學校名稱：嘉義市立民生國民中學

作者： 國二 王妍禎 國一 李依璇 國一 黃羿瑄	指導老師： 陳正雍 吳銘訓
---	-----------------------------

關鍵詞：水鐘、表面張力、流速

摘要

清洗高腳杯時，發現水出現奇特形狀，決定研究水鐘。探討的變因包含擋水片的大小與形狀、水管粗細、出水量、出水口高度及不同表面張力的液體。發現流速不同時，固定溶液的水鐘長寬比變化不大，但不同溶液有不同的水鐘長寬比，表面張力愈大，水鐘愈矮胖。水鐘的寬長比與表面張力的關係圖為固定斜率的直線。也發現流速愈快，水鐘愈大。當擋水片為 3cm 及水管粗細為直徑 1.29 cm 時，都可以出現最大的水鐘。當出水量愈大，造成的水鐘愈大，形狀也愈矮胖；出水量太大，則出現水傘形狀。當出水口高度愈小，愈容易出現水鐘形狀，愈遠，則容易出現水傘形狀；而出水口高度愈大，則水鐘形狀愈矮胖也愈大。不同形狀的擋水片，則會在出水口高度較大時，出現水花瓣。

壹、研究動機

有一天，正在清洗晚上所使用過的餐具，正當清洗到高腳杯，發現當水柱落在高腳杯底部時，出現很奇特的形狀，這個現象讓我非常疑惑，於是決定翻書找尋相關資料，但並沒有得到滿意的答案。後來我在科學網站(NTCU)上看到水鐘與水幕的小實驗，這個實驗所產生的現象與我在清洗高腳杯時的現象很類似。科學網站上還分成封閉性水鐘和開發性水鐘，讓我感到非常驚豔。和兩位對此實驗也感興趣的同學及老師討論後，決定進行研究，我們探討水鐘與表面張力、流速、擋水片和水柱間的關聯性。設計好實驗後決定開始著手研究此主題。

貳、研究目的

- 一、探討水壓與流速的關係
- 二、探討流速與水鐘大小及形狀的關係
- 三、探討表面張力與水鐘大小及形狀的關係
- 四、探討水柱距離與水鐘大小及形狀的關聯性
- 五、探討水柱粗細與水鐘大小及形狀的關聯性
- 六、探討流量與水鐘大小及形狀的關聯性
- 七、探討圓形擋水片大小與水鐘大小及形狀的關係
- 八、探討不同形狀擋水片與水鐘大小及形狀的關聯性

參、研究設備及器材



壓克力板



金屬棒



木板



水平儀



游標尺



塑膠水管



金屬切割器



雷射切割機



酒精



熱熔膠槍



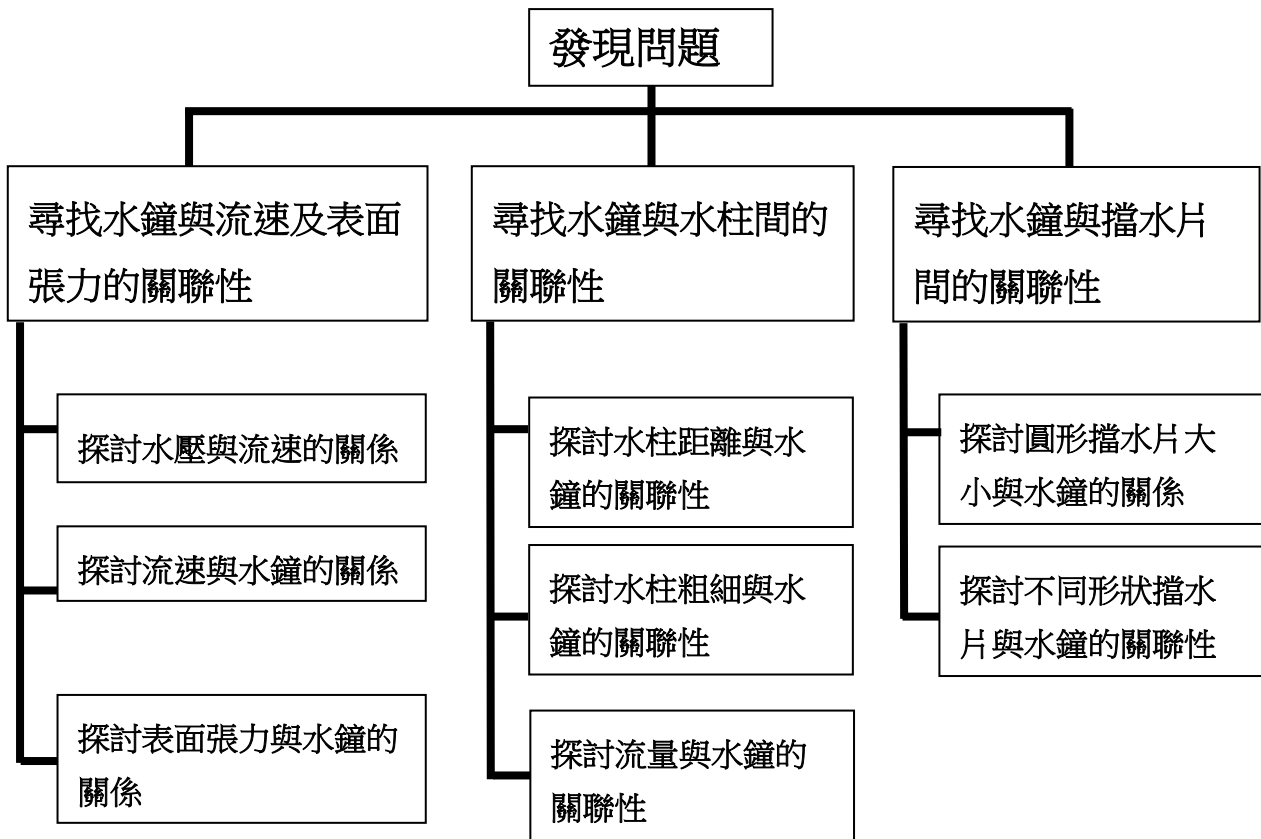
洗碗精



水盆

肆、研究過程或方法

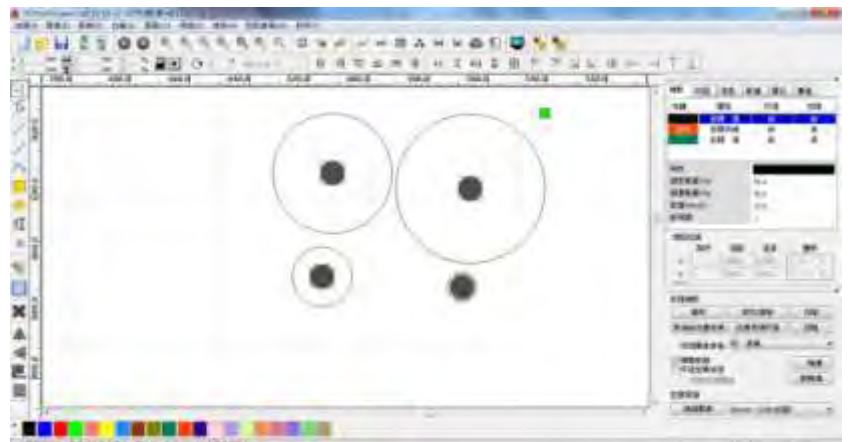
一、研究架構



二、準備實驗：組裝實驗器材

(一)組裝擋水片裝置

1. 利用雷射切割機，設計出實驗所需的擋水片，並擋水片的下方雕割出符合銅棒粗細的圓形凹槽(如圖一所示)。
2. 利用電鑽在木塊上挖洞，將金屬棒敲入木塊中。
3. 用熱溶膠黏少許在擋水片下方的圓形凹槽，並將金屬棒嵌入，即完成擋水片主體。



圖一 利用雷射程式設計擋水片



圖二 圓形擋水片



圖三 擋水片主體

(二)組裝出水端裝置

1. 將水管一端放在水盆內，一端連接 PVC 接頭，並塞入裝有金屬管的橡皮塞。
2. 實驗過程中，補充水盆內的水，使桌上的水盆維持水位一定。
3. 出水口端則固定在金屬橫桿上，以確認高度位置。

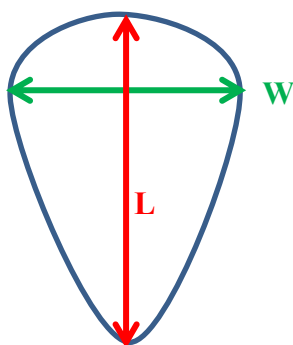


圖四 出水端實驗裝置擺放位置

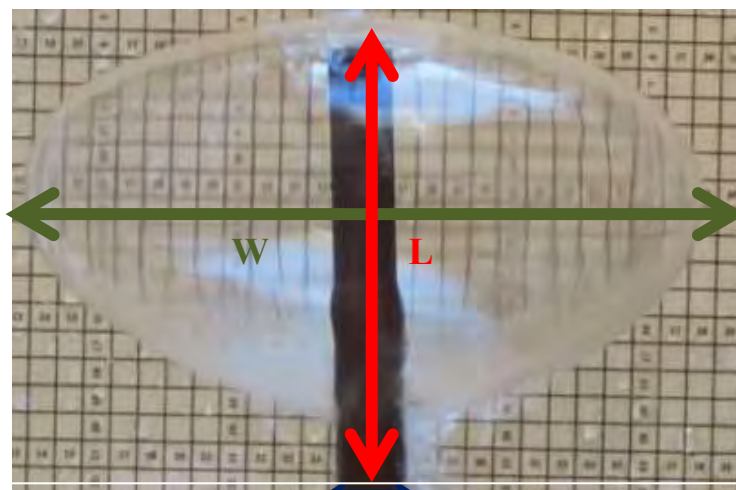
三、實驗分析方法

為了數據準確，我們將錄影下固定條件的水鐘，在不同時間點，共截圖 3 次，再利用 GeoGebra 量出長度，但是長度大小會隨電腦畫面放大縮小而改變，不過，實驗中金屬棒的直徑都固定的，因此最後我們再依比率算出所需長度的真正大小。

為了想知道水鐘形狀的變化，因此討論後決定量測水鐘寬度的距離 W' ，水鐘頂點到底部的長度 L' ，以及作為校正的金屬棒直徑 D' ，在不同時間點，總共測量 3 次，因為資料量龐大，因此將此數據紀錄於附件一。



圖五 水鐘各數值的示意圖



圖六 水鐘的長寬示意圖

(一)分析水鐘大小與長寬比

測量的數據 W' 、 L' 及 D' 並非真實長度(是攝影機拍出的大小)，因此利用金屬棒的真實長度進行校正，如圖所示。

$$\text{水鐘長度 } L = \frac{L'}{D'} * \text{金屬棒實際直徑}$$

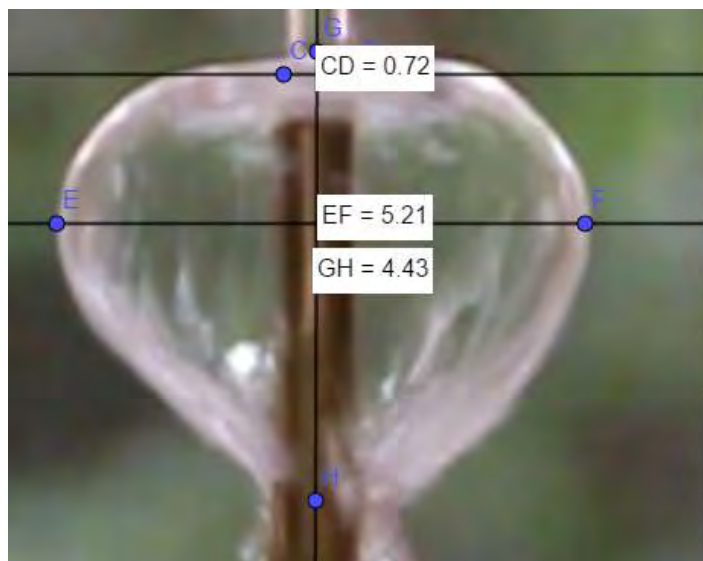
$$\text{水鐘寬度 } W = \frac{W'}{D'} * \text{金屬棒實際直徑}$$

$$\text{水鐘長寬比 } R = \frac{L}{W}$$

例：(以水位差 15.5 cm 的數值為例)(金屬棒直徑為 0.8 cm)

測量出的金屬棒直徑 D'(cm)	水鐘寬度 W'(cm)	水鐘長度 L'(cm)
0.72	5.21	4.43

水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L (cm)	水鐘長寬比
$W = \frac{5.21}{0.72} * 0.8 = 5.8$	$L = \frac{4.43}{0.72} * 0.8 = 4.9$	$R = \frac{4.9}{5.8} = 0.84$

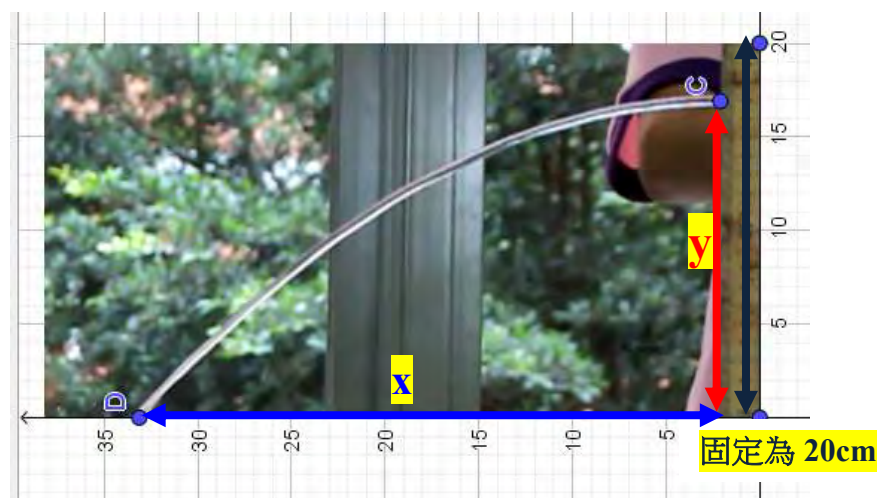


圖七 分析水鐘長寬

(二)分析流速

我們將固定水壓的出水口朝水平發射出去，根據平拋運動

水平方向 $x = vt$ 鉛直方向 $y = \frac{1}{2}gt^2$ 得 $v = x \sqrt{\frac{g}{2y}}$



圖八 分析流速大小

四、實驗一：探討不同水速對水鐘的關係

1. 將實驗裝置擺放好，擋水片選擇圓形造型，直徑為 3 公分，並利用水平儀確定擋水片為水平面。
2. 紀錄出水口高度與水面高度數值，紀錄為 h_1 。
3. 打開出水口將水流到擋水片中央處。
4. 用相機錄下實驗的水鐘形狀。
5. 將出水端朝水平射出水柱，並利用相機記錄水柱落下的高度及水平距離。
6. 重複步驟 1~5，改變出水口高度與水面高度，並記錄數值為 h_2 。
7. 重複步驟 6，分別改變出水口高度與水面高度為 h_3 、 h_4 、 h_5 。



圖九 水平射出水柱

五、實驗二：探討不同種類的溶液與水鐘的關係

1. 改變溶液為固定濃度的洗碗精水溶液。
2. 紀錄 5 次不同的出水口到水面高度的水鐘。
3. 並將出水端朝水平射出水鐘，並記錄水柱落下的高度及水平距離。
4. 配置酒精溶液為重量百分濃度 10%。
5. 紀錄 5 次不同的出水口到水面高度的水鐘。
6. 並將出水端朝水平射出水鐘，並記錄水柱落下的高度及水平距離。

六、實驗三：探討不同出水口高度對水鐘的影響

1. 將實驗裝置擺放好，擋水片選擇圓形造型，直徑為 3 公分，並利用水平儀確定擋水片為水平面。
2. 將水注入水盆中，並維持水位一定。
3. 等待出水口有穩定的水流流出後。(過程中維持水盆內的水位一定)
4. 調整實驗主體到出水口的高度，利用直尺量出距離，紀錄為 H_1 。
5. 用相機錄下實驗的水鐘形狀。
6. 重複步驟 1~6，改變出水口的高度到擋水片的距離，分別記錄為 H_2 ~ H_6 。

七、實驗四：探討不同水管粗細對水鐘的影響

1. 將實驗裝置擺放好，並維持水盆內水位一定，固定出水口高度 10cm。
2. 等待出水口有穩定的水流流出。
3. 用相機錄下實驗的水鐘形狀。
4. 重複步驟 1~4，改變出水口的水管直徑，測量水管內直徑。
5. 總共探討四種不同粗細的水管。

八、實驗五：探討不同出水量對水鐘的影響

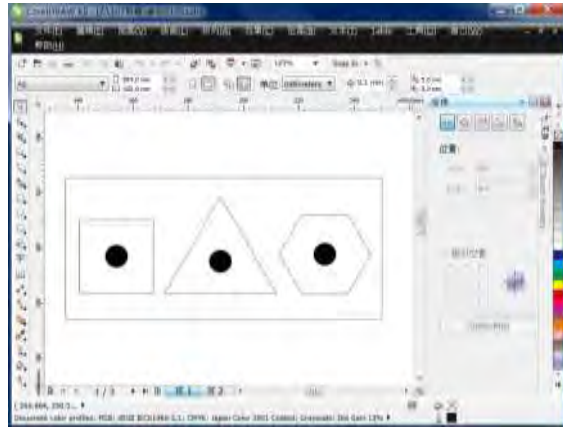
1. 將實驗裝置擺放好，擋水片選擇圓形造型，直徑為 3 公分，並利用水平儀確定擋水片為水平面。
2. 將水龍頭轉到角度 1。
3. 把出水口的水流到燒杯內，計時 3 秒，並利用量筒量測水量，紀錄於表。
4. 調整出水口的高度到擋水片的距離為 10 cm。
5. 用相機錄下實驗的水鐘形狀。
6. 重複步驟 1~5，但調整水龍頭到角度 2。
7. 重複步驟 6，但分別調整水龍頭到角度 3、角度 4 及角度 5。

九、實驗六：探討不同大小的擋水片對水鐘的影響

1. 將實驗裝置擺放好，擋水片選擇圓形造型，直徑為 1 公分，並利用水平儀確定擋水片為水平面。
2. 固定出水口的高度到擋水片的距離為 10 公分。
3. 用相機錄下實驗的水鐘形狀。
4. 重複步驟 1~5，改變擋水片的直徑為 2 公分、3 公分、4 公分、5 公分。

十、實驗七：探討不同形狀的擋水片對水鐘的影響

1. 計算出直徑 3cm 圓形擋水片的面積，分別計算出固定面積下的三角形、正方形及六邊形的邊長。
2. 利用 CorelDRAW 繪製圖案後，利用雷射切割機製作出如圖十一的不同形狀擋水片。
3. 將不同形狀的擋水片裝在銅棒上，並釘入木塊中。
4. 將三角形擋水片擺放好，並維持水盆內水位一定，固定出水口高度 10cm。
5. 用相機錄下實驗的水鐘形狀。
6. 重複步驟 4~6，分別改變擋水片為正方形及六邊形。



圖十

利用 CorelDRAW 設計不同形狀的擋水片



圖十一 不同形狀的擋水片及實驗裝置

十一、 實驗八：探討三角形擋水片在不同出水口高度對水鐘的影響

想探討在什麼情況下會出現水花形狀，因此我們決定利用三角形擋水片來進行實驗，調整不同出水口高度來進行分析

1. 將三角形擋水片擺放好，並維持水盆內水位一定
2. 測量出水口高度，紀錄為 H1。
3. 等待出水口有穩定的水流流出後。
4. 用相機錄下實驗的水鐘形狀。
5. 重複步驟 1~4，分別更改出水口高度，並紀錄為 H2~H3。

伍、結果與討論

一、實驗一：探討不同水速對水鐘的關係



圖十二 h1(15.5 公分)、h2(19 公分)的水鐘截圖



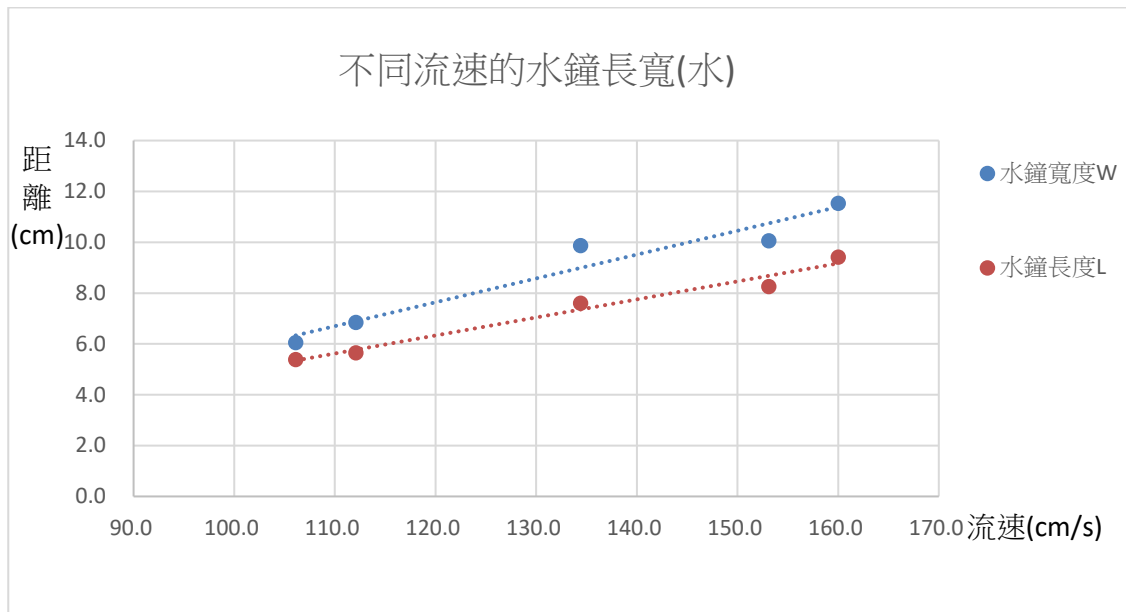
圖十三 h3(23 公分)、h4(25.5 公分)的水鐘截圖



圖十四 h5(28 公分)的水鐘截圖

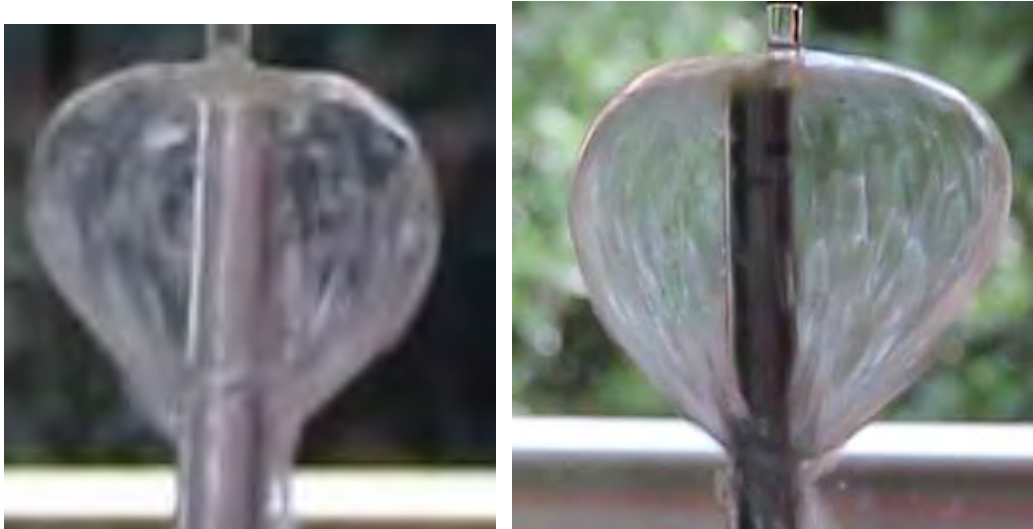
表一 不同水速的水鐘數值

出水口到擋水片距離 h(cm)	出水端的水速 v(cm/s)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L(cm)	水鐘長寬比 值 R
15.5	106.1	6.1	5.4	0.89
19.0	112.1	6.8	5.6	0.83
23.0	134.4	9.9	7.6	0.77
25.5	153.1	10.1	8.3	0.82
28.0	160.0	11.5	9.4	0.82



圖十五 不同流速的水鐘大小(水)

二、實驗二：探討不同種類的溶液與水鐘的關係



圖十六 h1(15公分)、h2(18公分)的水鐘(酒精溶液)截圖



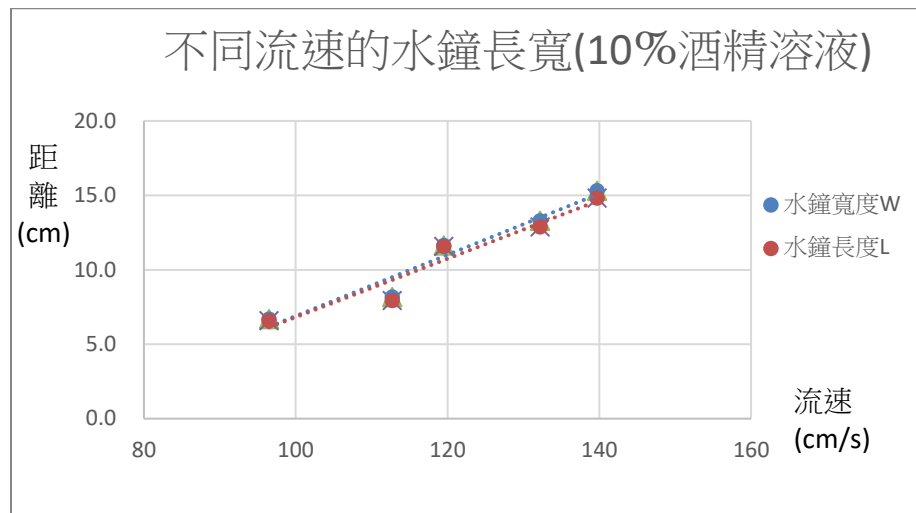
圖十七 h3(23公分)、h4(25公分)的水鐘(酒精溶液)截圖



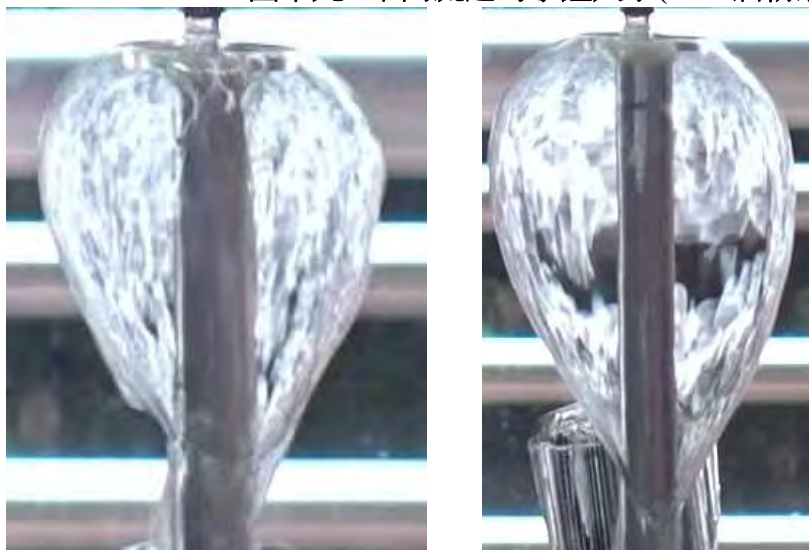
圖十八 h5(28公分)的水鐘(酒精溶液)截圖

表二 酒精溶液時，不同流速的水鐘數值

出水口到擋水片 距離 h(cm)	出水端的水 速 v(cm/s)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L(cm)	水鐘長寬比 值 R
15.0	96.5	6.7	6.6	0.98
18.0	112.7	8.2	7.9	0.97
23.0	119.5	11.6	11.6	0.99
25.0	132.2	13.3	12.9	0.97
28.0	139.7	15.3	14.8	0.97



圖十九 不同流速的水鐘大小(10%酒精溶液)



圖二十 h1(15公分)、h2(20公分)的水鐘(洗碗精溶液)截圖



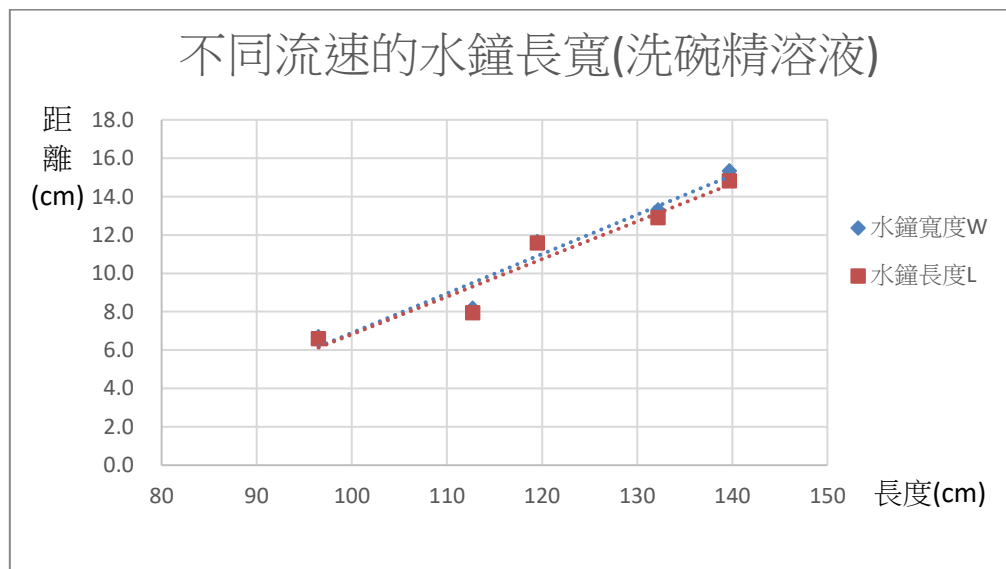
圖二十一 h3(23公分)、h4(26公分)的水鐘(洗碗精溶液)截圖



圖二十二 h5(31公分)的水鐘(洗碗精溶液)截圖

表三 洗碗精溶液時，不同流速的水鐘數值

出水口到擋水片距離 h(cm)	出水端的水速 v(cm/s)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L(cm)	水鐘長寬比值 R
15.0	116.5	5.9	7.4	1.26
20.0	120.2	6.4	10.0	1.57
23.0	130.3	8.9	13.8	1.56
26.0	130.0	9.3	12.7	1.36
31.0	148.4	11.5	15.7	1.36



圖二十三 不同流速的水鐘大小(洗碗精溶液)

老師與我們討論了形成水鐘的原因，有兩個可能，一為表面張力造成的現象，二是內外壓力差可能也會有影響，我們在進行實驗時，發現一開始形成的水鐘比較大，但隨著實驗繼續進行，水鐘會持續變小，我們懷疑是內外壓力差造成的，因此我們將金屬棒在水鐘內的部分挖一個洞，下方部分挖一個洞，使內外壓力相同，果然水鐘會變小的情況就消失了。



圖二十四 金屬棒挖洞(紅色圈圈為挖洞的部分)

當水由出水口落下後，到了擋水片上，因為此時水仍有流速，由擋水片開始向外流出，此時水有一個向外的速度(紅色箭頭所示)，但是此時，仍有力(藍色箭頭)作用在水分子上，包含重力、空氣阻力、浮力及內聚力等，若表面張力足夠強，內聚力也相對較大，就能將水分子拉在一起而閉合，形成水鐘。

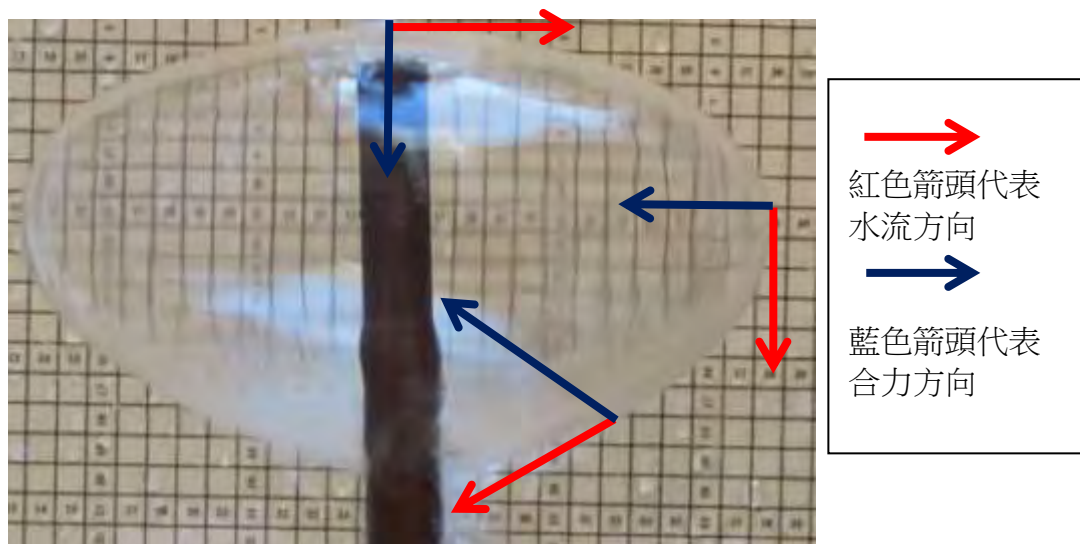
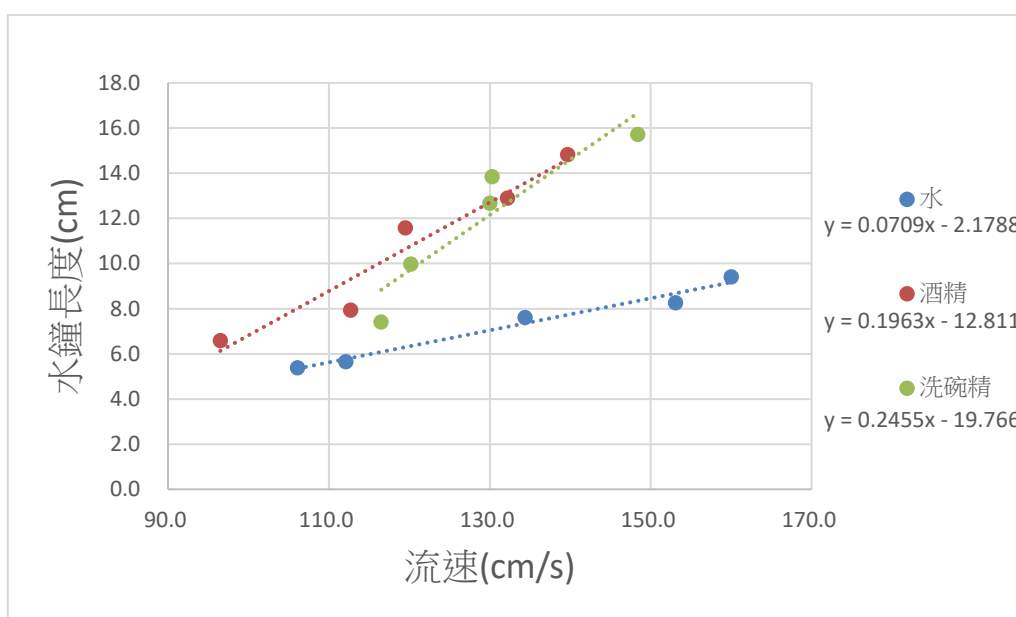


圖 二十五水分子的速度與合力的關係圖

由圖表可以發現，當水壓變大時，流速也增加，此時水鐘的寬度會變大，由線性可以發現成正相關，推測因為流速快，水平方向的初速度大，相同的表面張力下，提供的內聚力相同，所以需要較大的曲率半徑才能轉彎，因此水鐘的寬度也會較大。

因為水鐘寬度變大，所以表面張力要將水分子聚集回來形成水鐘就需要更多時間，因此水鐘下半部也較長，水鐘的長度也變大。又因為此時水分子受到重力的影響，所以造成水鐘上半部與下半部的形狀會不對稱(下半部會比上半部長)。



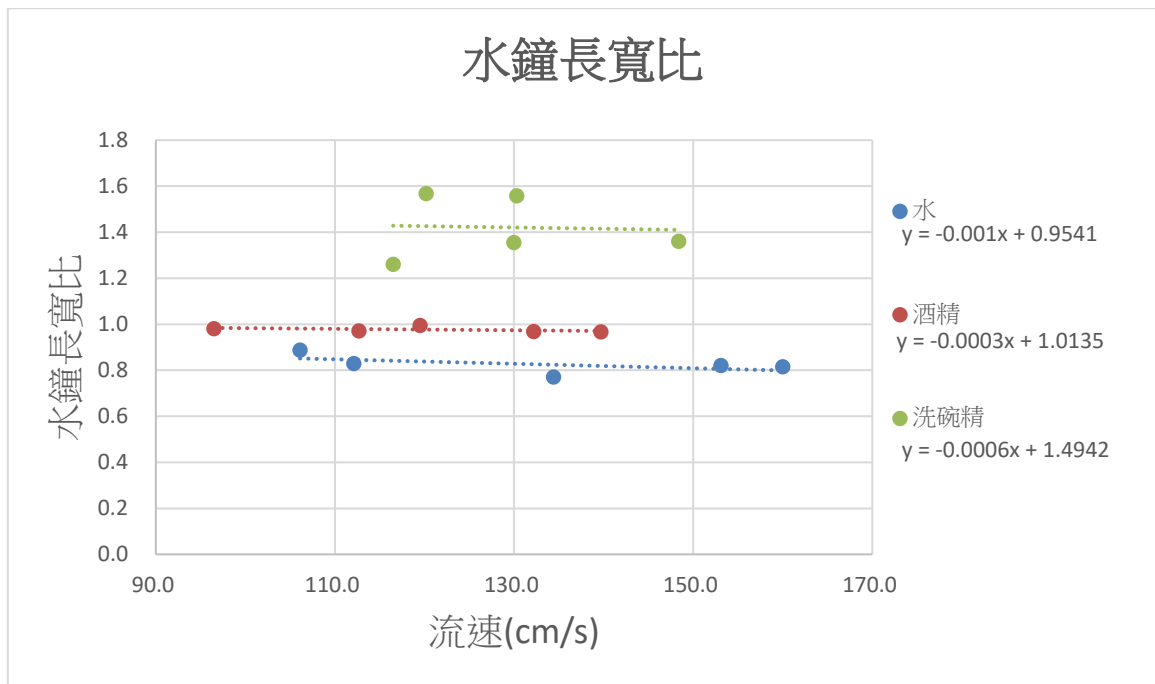
圖二十六 不同溶液時，水鐘的長度關係

由圖可以觀察到，水的水鐘長度較小，且斜率較小；而酒精與洗碗精溶液的水鐘長度較大，斜率則是洗碗精溶液比酒精溶液大。水鐘長度越長，表示表面張力較小，所以需要更多時間才能將水分子來回來，而形成水鐘。

表面張力的大小順序分別為：

水(0.073 N/m) > 10%酒精溶液(0.046 N/m) > 肥皂水溶液(0.025 N/m)

水鐘的長度大小依序則是：肥皂水溶液 > 10%酒精溶液 > 水



圖二十七 流速與水鐘形狀的關係圖

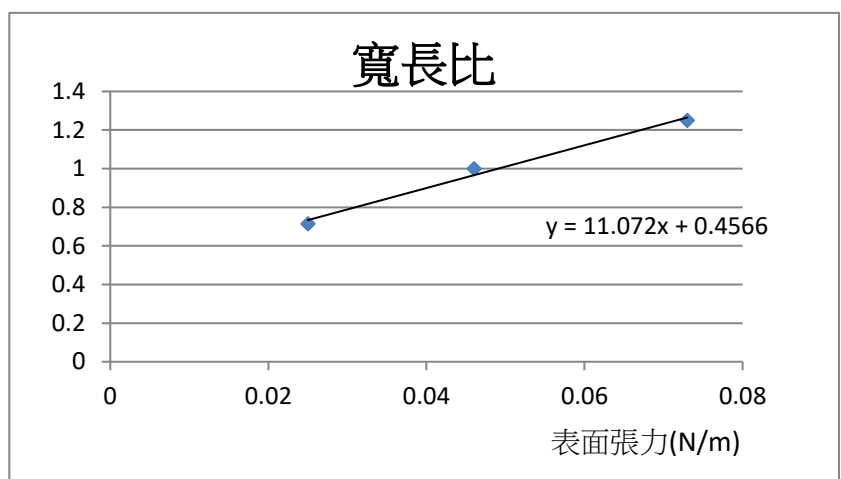
由圖可以觀察到，單一溶液時，流速改變，水鐘的長寬比變化不大。水的水鐘長寬比隨流速增加而微幅變小。酒精溶液的水鐘形狀在不同流速下變化不大。但是洗碗精溶液的形狀則變下較不規則，我們推測是否與實驗過程中，有產生泡沫有關，但基本上變化也不大。

但是不同溶液時，不同表面張力也不同，此時水鐘的長寬比差異頗大

表面張力的大小順序分別為：

水(0.073 N/m) > 10%酒精溶液(0.046 N/m) > 肥皂水溶液(0.025 N/m)

水鐘的長寬比依序則是：肥皂水溶液(1.42) > 10%酒精溶液(0.98) > 水(0.83)



圖二十八 表面張力與水鐘形狀的關係圖

將長寬比(L/W)轉為寬長比(W/L)時，發現寬長比與表面張力的變化量相同(斜率一致)，所以若分析出不同溶液的寬長比，或許可以推測出該溶液的表面張力大小。

三、實驗三：探討不同出水口高度對水鐘的影響

將同樣條件下，不同時間點的水鐘，共截圖 3 次，將 W 及 L 紀錄於附件。並算出 R。



圖二十九 出水口高度為 3.3 公分、10.0 公分的水鐘截圖



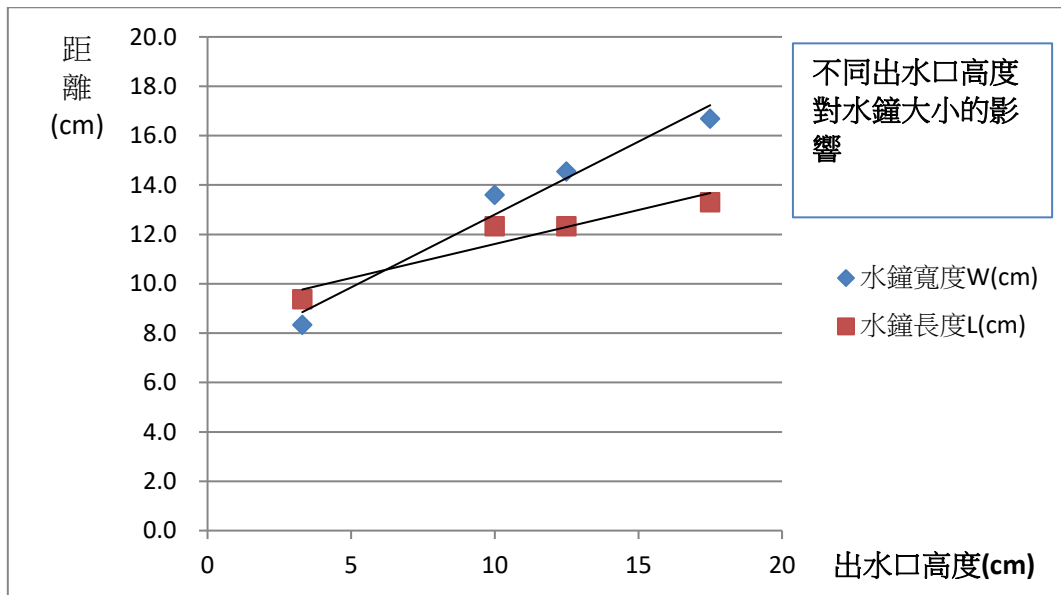
圖三十 出水口高度為 12.5 公分、17.5 公分的水鐘截圖



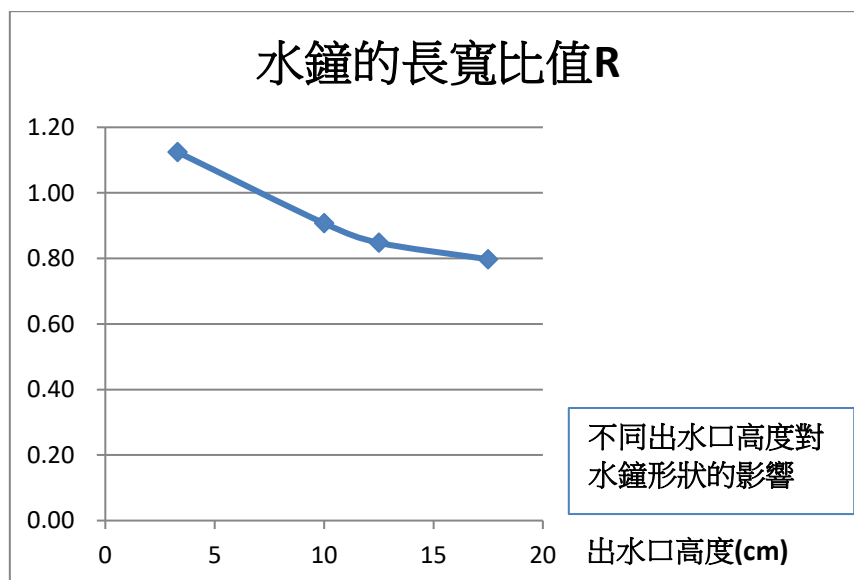
圖三十一 出水口高度為 22.5 公分、38.7 公分的水鐘截圖

表四 不同出水口高度下，所測量及分析的數據

出水口高度 H(cm)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L(cm)	水鐘的長寬比值 R
3.3	8.3	9.4	1.12
10.0	13.6	12.3	0.91
12.5	14.6	12.3	0.85
17.5	16.7	13.3	0.80



圖三十二 不同出水口高度對水鐘大小的影響



圖三十三 不同出水口高度對水鐘形狀的影響

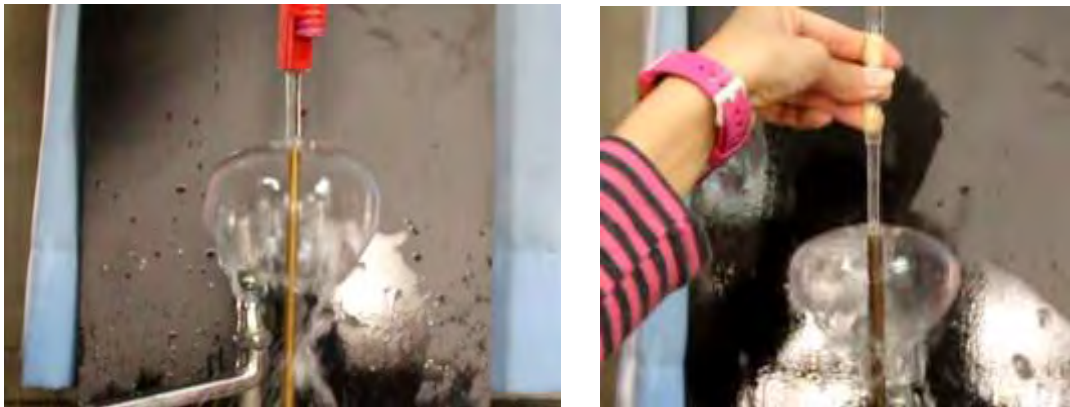
根據表格及圖所示，發現隨著出水口的高度愈高(3.3~17.5cm)，所形成的水鐘變的愈來愈矮胖(R 變小)，而水鐘的大小也會變大(W 及 L 變大)。

但是當出水口的高度愈高(超過 22.5 cm 後)，所形成的形狀為水傘狀，但水傘的寬度一樣會隨出水口的高度變高而變大，推測是由於高度愈高，水的流速愈快而導致。

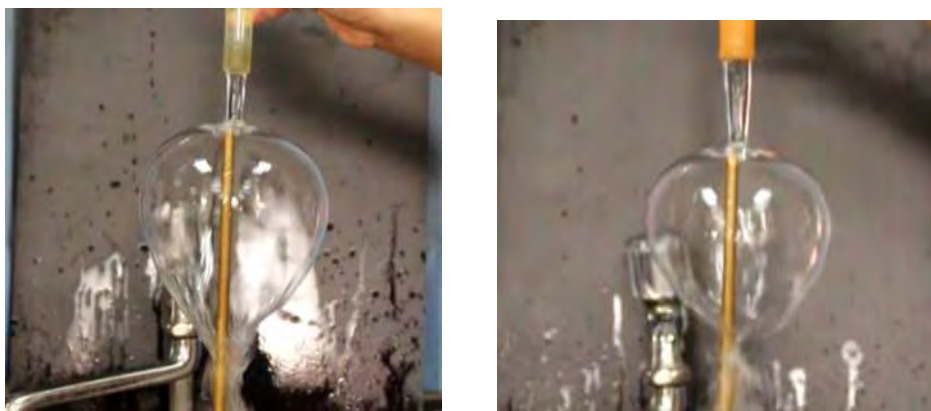
到底不同高度會造成什麼影響？我們觀察到接近出水口的水流與遠離出水口的水流看起來似乎不太相同，查了資料，發現上方水流是屬於層流，是因為流速慢，流體分層流動，互不混合；若高度差愈大，下方水流的流速增加到很大時，流線不再清楚可辨，稱為紊流。

當高度口高度愈小，水流流速慢，合力足夠將水閉合成水鐘的樣貌，但是一旦出現紊流，代表水流流速太快，此時，出現水傘的機率就變高了。

四、實驗四：探討不同水管粗細對水鐘的影響



圖三十四 不同水管粗細時的水鐘截圖(左圖水管內直徑 0.62 cm、右圖水管內直徑 1.01 cm)

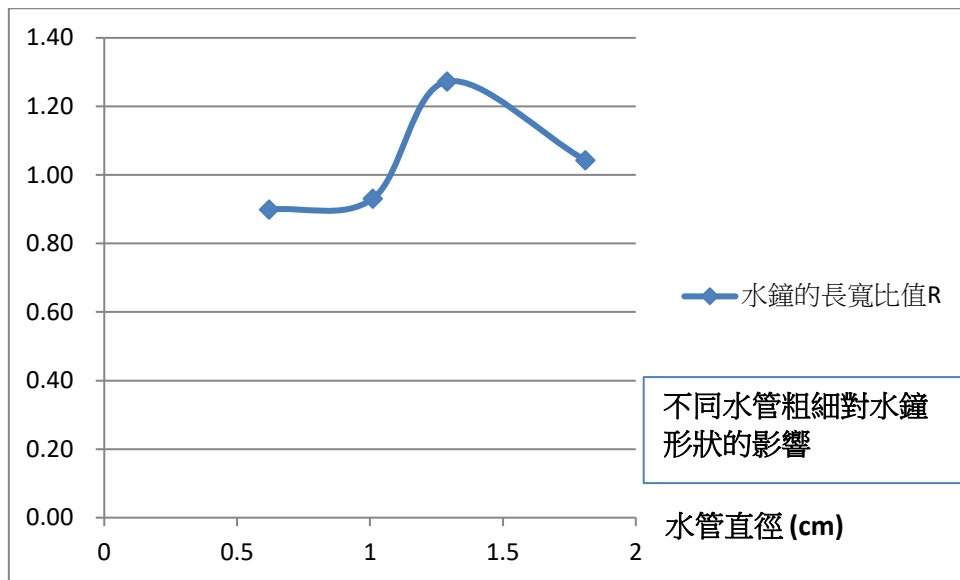


圖三十五 不同水管粗細時的水鐘截圖(左圖水管內直徑 1.29 cm、右圖水管內直徑 1.81 cm)

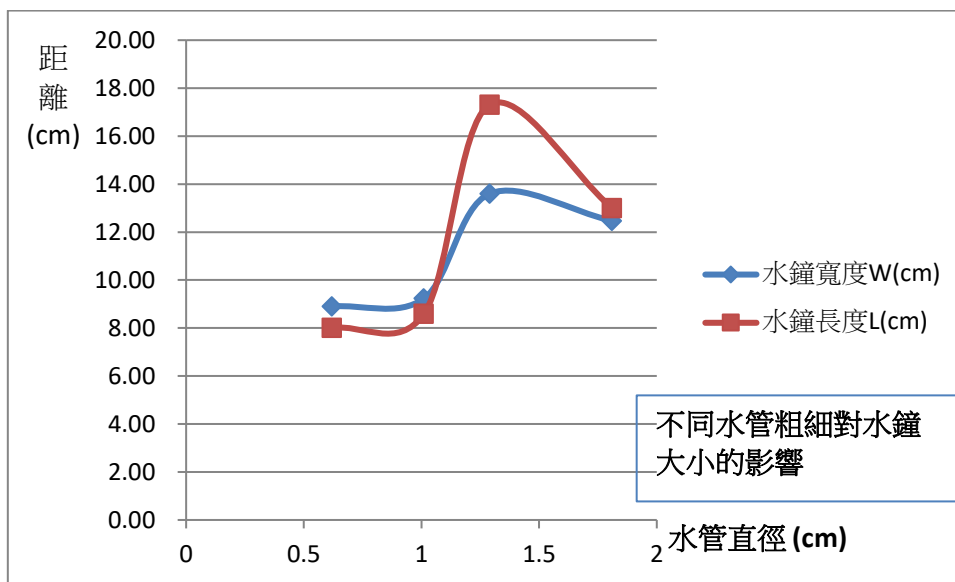
表五 不同水管粗細下，所測量及分析的數據

水管內直徑(cm)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L(cm)	水鐘的長寬比值 R
0.62	8.90	8.00	0.90
1.01	9.23	8.59	0.93
1.29	13.60	17.31	1.27
1.81	12.47	13.00	1.04

根據圖表所示，發現在是四種水管中，水管直徑為 1.29cm 時，出現的水鐘形狀最瘦長，而且，水鐘體積最大，並非愈大的水管就能出現愈大的水鐘。



圖三十六 不同水管粗細對水鐘形狀的影響



圖三十七 不同水管粗細對水鐘大小的影響

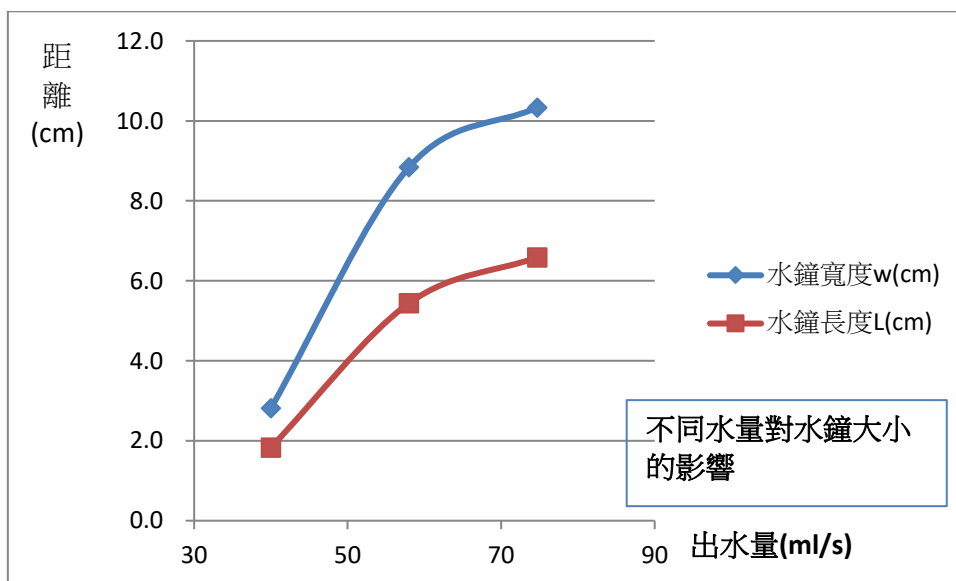
五、實驗五：探討不同出水量對水鐘的影響



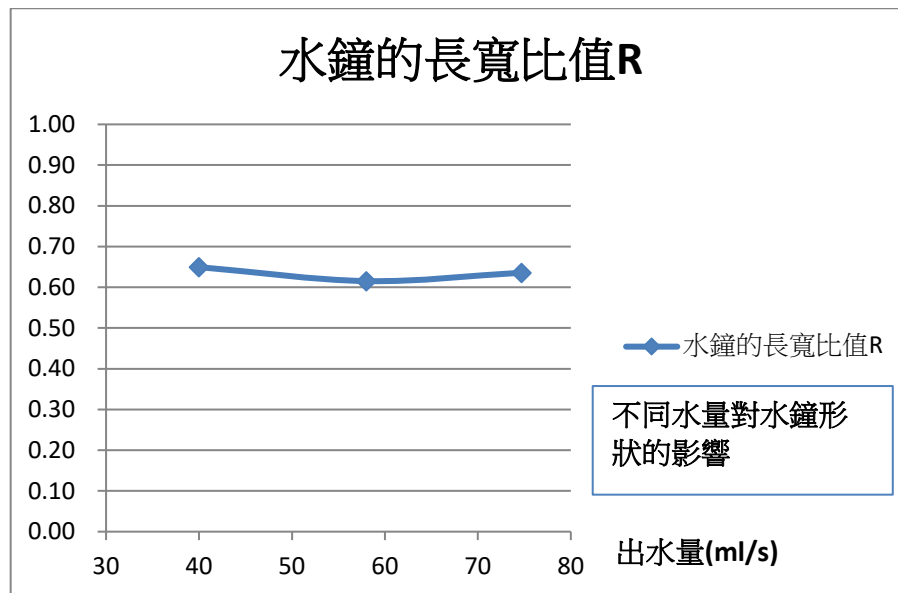
圖三十八 不同水龍頭角度時的水鐘截圖(左上到右下為角度 1~5)(紫色圈圈為出現小水滴處)
(出水量由左上到右下，分別為 40.0、58.0、74.7、93.9 及 111.3 ml/s)

表六 不同出水流量，所測量及分析的數據

出水流量 (ml/s)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L (cm)	水鐘的長寬 比值 R
40.0	2.8	1.8	0.65
58.0	8.8	5.4	0.62
74.7	10.3	6.6	0.64



圖三十九 不同出水量對水鐘大小的影響



圖四十 不同出水量對水鐘形狀的影響

根據表格及圖所示，發現水流量為 40.0 ml/s 到 74.7ml/s 時，都能成功形成水鐘，推測，此時的流速下，水的表面張力能有能力將水聚合成水鐘。但是當水流量到了 93.7ml/s 以上時，因為流速太快，無法閉合，而形成傘的形狀。

水流量為 40.0 ml/s 到 74.7ml/s 時，由圖可發現，所形成的水鐘明顯變大，但水鐘形狀變化不大。推測原因是流出擋水片時的水流快，但此時水的表面張力能足夠將其閉合；但水流量在 93.7ml/s 後，雖然形狀變得更寬，但下半部就無發閉合了。

觀察水的透光程度(可藉由觀察水鐘或水傘後方物體的扭曲程度判斷)，在水流量為 40.0 ml/s，可以發現似乎水中所含的水層較厚，隨著水流量增加，所形成的水鐘因為變更大，水層似乎也變薄了。觀察水流量 93.7ml/s 所形成的傘狀，發現傘的下半處，因為水量開始分配不足，導致出現小水滴的情況，因此推斷，就算表面張力足夠，是否也會因為水量不足，而無法出現閉合的情況呢？

六、實驗六：探討不同大小的擋水片對水鐘的影響



圖四十一 擋水片直徑 1 公分、2 公分及 3 公分的水鐘截圖



圖四十二 擋水片直徑 4 公分及 5 公分的水鐘截圖

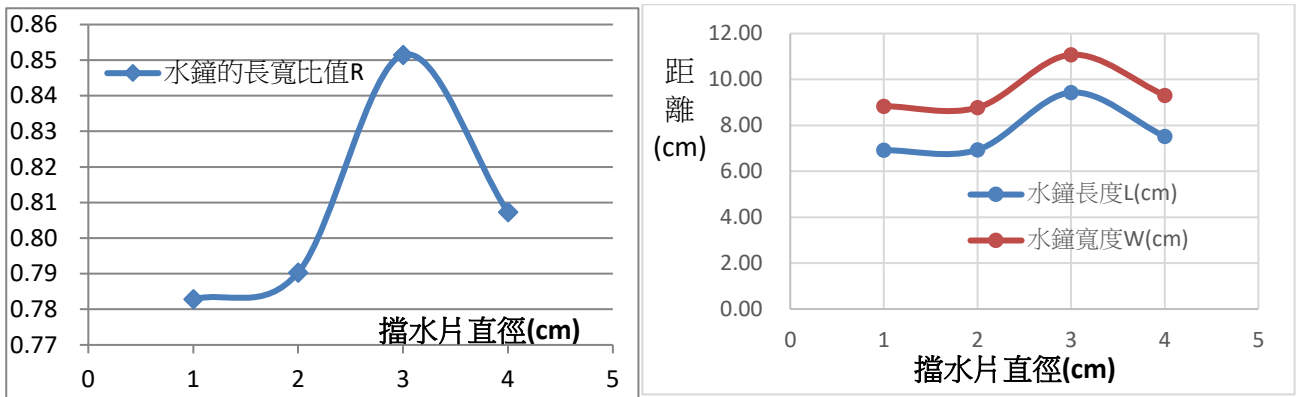
表七 不同大小的擋水片下，所測量及分析的數據

擋水片直徑 (cm)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L (cm)	水鐘的長寬比值 R
1.0	8.8	6.9	0.78
2.0	8.8	6.9	0.79
3.0	11.1	9.4	0.85
4.0	9.3	7.5	0.81
5.0	×	×	×

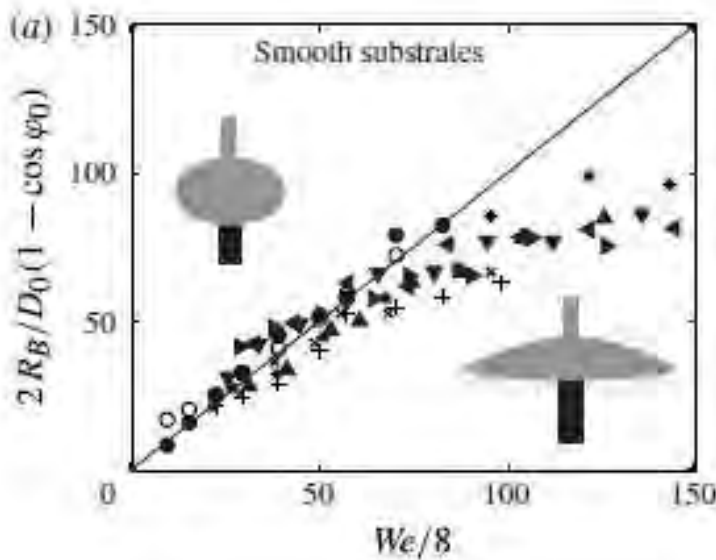
當擋水片直徑由 1cm 到 4cm 時，都能成功形成水鐘，但是擋水片的直徑為 5cm 時，只見到如傘的形狀，下半部無法成功閉合。

由表可發現，不管擋水片的大小如何變化，在是在擋水片的直徑為 3cm 時，水鐘最寬。發現擋水片必須在一定範圍的大小下，才容易形成水鐘，擋水片過大，無法形成水鐘。

這個現象和不同粗細的水管對水鐘的影響的結果蠻類似的，因此推測，想要形成愈大的水鐘，出水口水管口徑(即水流截面積)與擋水片要互相配合，並非愈大的水管或愈大的擋水片就能出現愈大的水鐘。



圖四十三 不同直徑擋水片對水鐘形狀的影響(左圖)及不同直徑擋水片對水鐘大小的影響(右圖)



圖四十四 文獻七的相關附圖

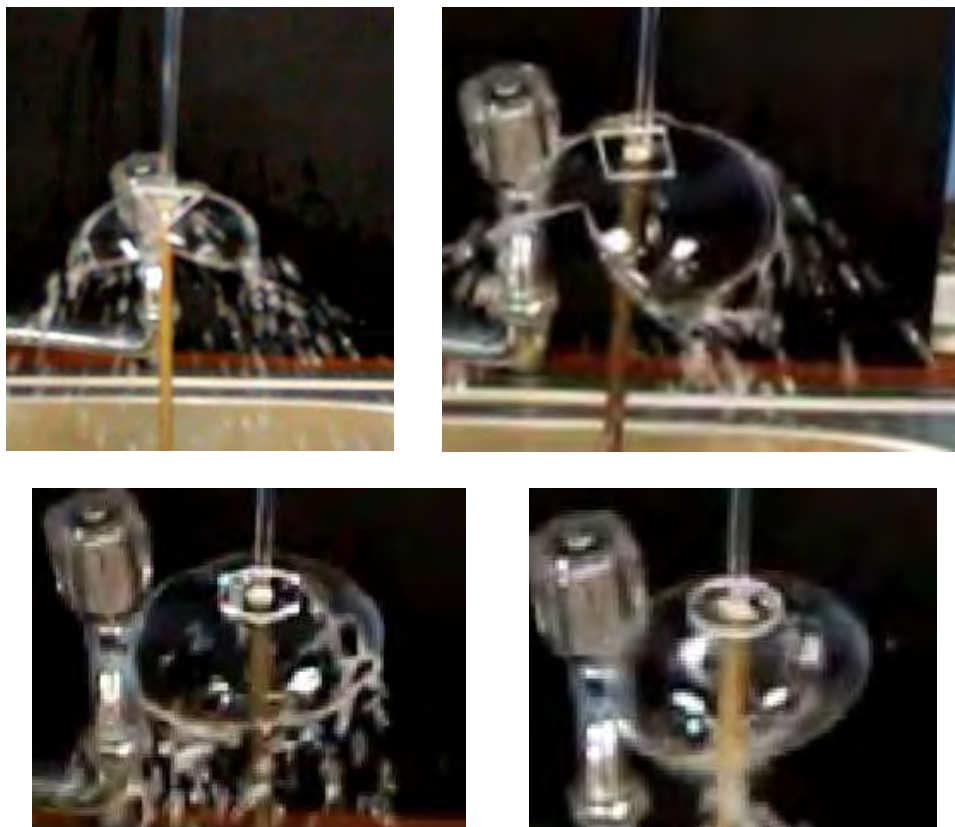
我們在網路上找到一份資料(參考文獻七)，內容對哪種條件下會產生水鐘及水傘也有相同類似的研究，與我們的實驗結果符合，其中 R_B 為水鐘寬度， D_0 為水柱直徑， φ_0 為沖擊角度， We 為韋伯數

韋伯數(Weber number)的計算公式為
$$We = \frac{\rho v^2 l}{\sigma}$$

(其中為 ρ 流體密度， v 為特徵流速， l 為特徵長度， σ 為流體的表面張力係數。)

由上圖我們可以發現韋伯數越大，越容易形成水傘，與我們所觀察到速度越大，以及表面張力越小越容易形成水傘的現象有一致性。

七、實驗七：探討不同形狀的擋水片對水鐘的影響



圖四十五 出水口高度 10cm 下，不同形狀擋水片所造成的水鐘形狀
(左上：三角形) (右上：正方形) (左下：六邊形) (右下：圓形)

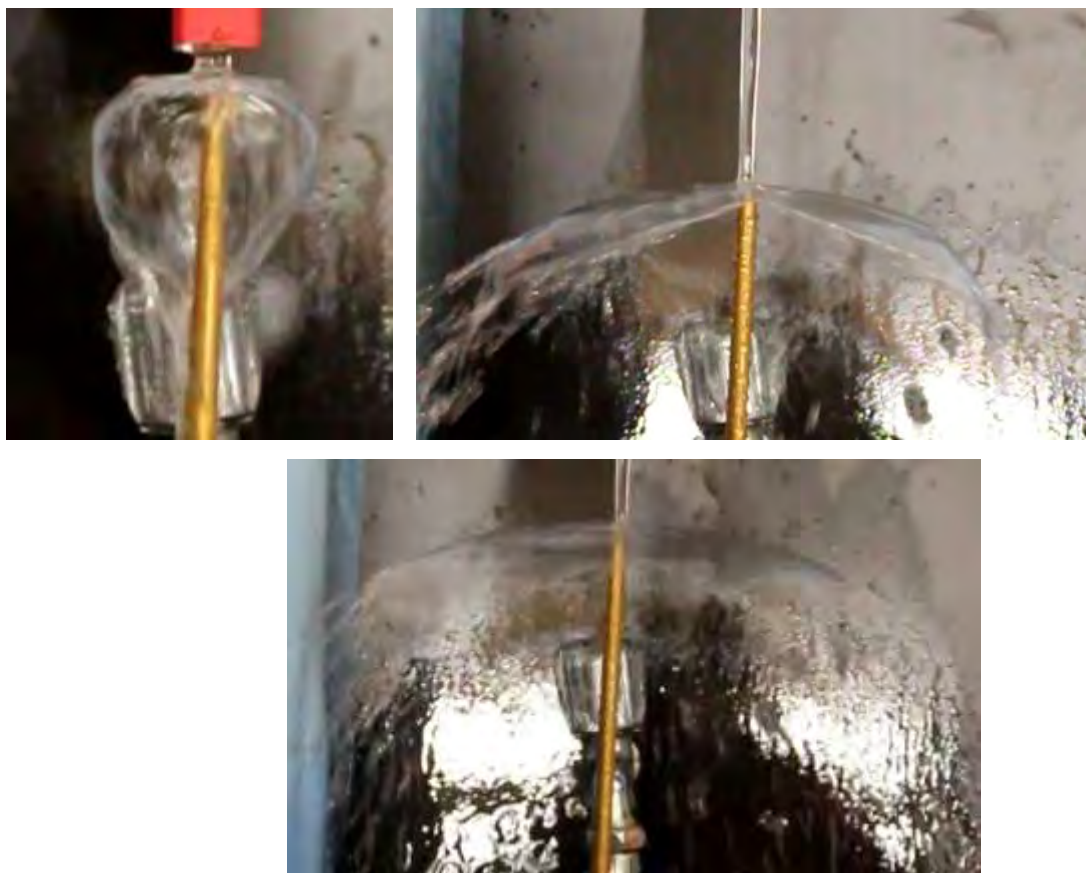
由圖可以發現，當出水口高度都固定為 10cm 時，三角形的擋水片會出現類似花瓣的圖形 (共三片)；而正方形有部分出現花瓣形狀，有部分卻仍是呈現水鐘閉合狀；六邊形的外型則像是水鐘狀，圓形擋水片仍然維持圓型。這個現象讓我們覺得很有趣，想知道正方形及六邊形有沒有機會出現花瓣狀，因此我們調整了不同出水口高度，結果都成功出現水花瓣圖案，如圖所示。



圖四十六 不同形狀擋水片在適當出水口高度下，都出現水花瓣形狀

八、實驗八：探討三角形擋水片在不同出水口高度對水鐘的影響

想探討在什麼情況下會出現水花形狀，因此我們決定利用三角形擋水片來進行實驗，調整不同出水口高度來進行分析



圖四十七 三角形擋水片在不同高度時的形狀變化
(左上圖 $H_1=1\text{cm}$)(右上圖 $H_2=20.5\text{cm}$)(下圖 $H_3=38.5\text{cm}$)

當出水口距離夠近(1cm)時，觀察到水鐘的水層較厚(代表水量足夠)，三角形擋水片也能出現水鐘形狀，此時表面張力仍足夠將水拉成水鐘狀。但是當出水口高度變高，水碰到擋水片時流速快，應該出現水傘形狀，但又因為擋水片形狀關係，導致三角形三個頂點的水量不足，所以最終出現水花瓣狀。

我們觀察出現水花瓣時，是由三角形尖角處裂開，猜測是因為水由檔板中心流到尖角處的距離較長，所以離開檔水片的水速較慢且因為流得比較遠，水膜厚度較薄，因此水膜由此處裂開產生水花瓣，當出水口距離夠近時，整體水的流速較慢，即使是三角形尖角處的水流也有足夠的水膜厚度，所以還能形成水鐘的形狀。

陸、結論

- 一、由實驗一可知，水壓愈大，則流速愈大。相同溶液時，流速愈大，水鐘長度、寬度愈大。
- 二、由實驗二可知，表面張力愈小的溶液，形成的水鐘長寬比愈大，水鐘的長度也愈大。
- 三、由實驗三可知，出水口高度愈高，造成流速愈快，水鐘形狀愈矮胖(長寬比值愈小)；出水口高度愈高，水鐘也愈大。
- 四、由實驗四可知，粗細不同的水管會出現形狀及大小不同的水鐘。
- 五、由實驗五可知，出水流量愈大，會造成水鐘形狀愈矮胖；當出水量過大，會造成水鐘無法閉合，形成水傘；出水量愈大，水鐘也愈大。
- 六、由實驗六可知，不同大小的圓形擋水片會出現大小不同的水鐘。
- 七、由實驗七可知，不同形狀的擋水片，都有機會造成水花瓣狀圖形。
- 八、由實驗八可知，三角形擋水片，在出水口距離近的情況，會形成水鐘；出水口距離遠，則形成水花瓣。

柒、參考文獻

- 一. 郭重吉等編著(民國 107 年)，自然與生活科技二上 2-2 水溶液，南一出版。
- 二. 郭重吉等編著(民國 107 年)，自然與生活科技二下第六章力與壓力，南一出版。
- 三. 水鐘與水幕, 國立台中教育大學 NTCU 科學教育與應用學系科學遊戲實驗室, 2018/10/26
取自 <http://scigame.ntcu.edu.tw/water/water-034.html>
- 四. 亂流, 維基百科, 2018/12/28 取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B9%8D%E6%B5%81>
- 五. 卓靜哲等(1996)，物理化學，第九章界面化學，三民出版社。
- 六. 江郁嫻等(民國 90 年)，水蔥花---散射水膜所激起的完整水苞,
<https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=&a=0&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=586&sid=365>
- 七. Emilie Dressaire, Laurent Courbin, Adrian Delancy, Marcus Roper and Howard A. Stone, (2013), Study of polygonal water bells. J.Fluid Mech.,vol.721,pp 46-57.

【評語】 030105

本作品探討不同條件下對水鐘形狀的影響，例如流速、表面張力、水柱距離與粗細、擋水片大小及形狀等。控制變因做得完整且具系統性，實驗設計清楚簡潔，現象觀察記錄的非常仔細，是一個生活科學研究的好範例。可惜的是作品多是現象觀察記錄的結果，對水鐘形成的原理模型建立不足，未能有定量的分析。未來若能在原理分析的部分加強，相信是很好的延伸工作，同學們的努力也很值得鼓勵。

摘要

清洗高腳杯時，發現水出現奇特形狀，決定研究水鐘。探討的變因包含擋水片的大小與形狀、水管粗細、出水量、出水口高度及不同表面張力的液體。發現流速不同時，固定溶液的水鐘長寬比變化不大，但不同溶液有不同的水鐘長寬比，表面張力愈大，水鐘愈矮胖。水鐘的寬長比與表面張力的關係圖為固定斜率的直線。也發現流速愈快，水鐘愈大。當擋水片為3cm及水管粗細為直徑1.29 cm時，都可以出現最大的水鐘。當出水量愈大，造成的水鐘愈大，形狀也愈矮胖；出水量太大，則出現水傘形狀。當出水口高度愈小，愈容易出現水鐘形狀，愈遠，則容易出現水傘形狀；而出水口高度愈大，則水鐘形狀愈矮胖也愈大。不同形狀的擋水片，則會在出水口高度較大時，出現水花瓣。

壹、研究動機

有一天，正在清洗晚上所使用過的餐具，正當清洗到高腳杯，發現當水柱落在高腳杯底部時，出現很奇特的形狀，這個現象讓我非常疑惑，於是決定翻書找尋相關資料，但並沒有得到滿意的答案。後來我在科學網站(NTCU)上看到水鐘與水幕的小實驗，這個實驗所產生的現象與我在清洗高腳杯時的現象很類似。科學網站上還分成封閉性水鐘和開發性水鐘，讓我感到非常驚豔。和兩位對此實驗也感興趣的同學及老師討論後，決定進行研究，我們探討水鐘與表面張力、流速、擋水片和水柱間的關聯性。設計好實驗後決定開始著手研究此主題。

貳、研究目的

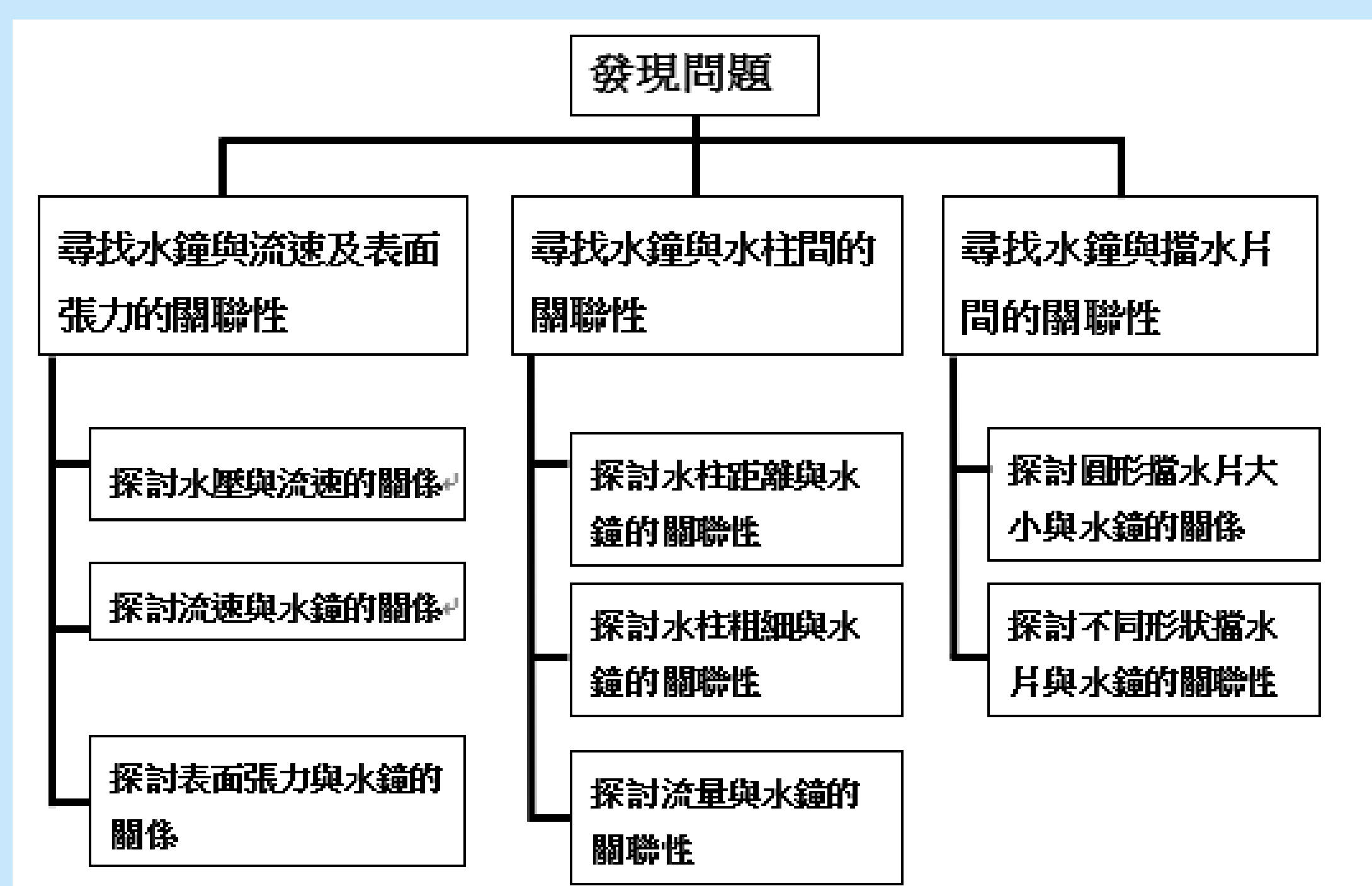
- 一. 探討水壓與流速的關係
- 二. 探討流速與水鐘大小及形狀的關係
- 三. 探討表面張力與水鐘大小及形狀的關係
- 四. 探討水柱距離與水鐘大小及形狀的關聯性
- 五. 探討水柱粗細與水鐘大小及形狀的關聯性
- 六. 探討流量與水鐘大小及形狀的關聯性
- 七. 探討圓形擋水片大小與水鐘大小及形狀的關係
- 八. 探討不同形狀擋水片與水鐘大小及形狀的關聯性

參、研究設備及器材

略(詳情請見作品說明書)

肆、研究過程、程結果與討論

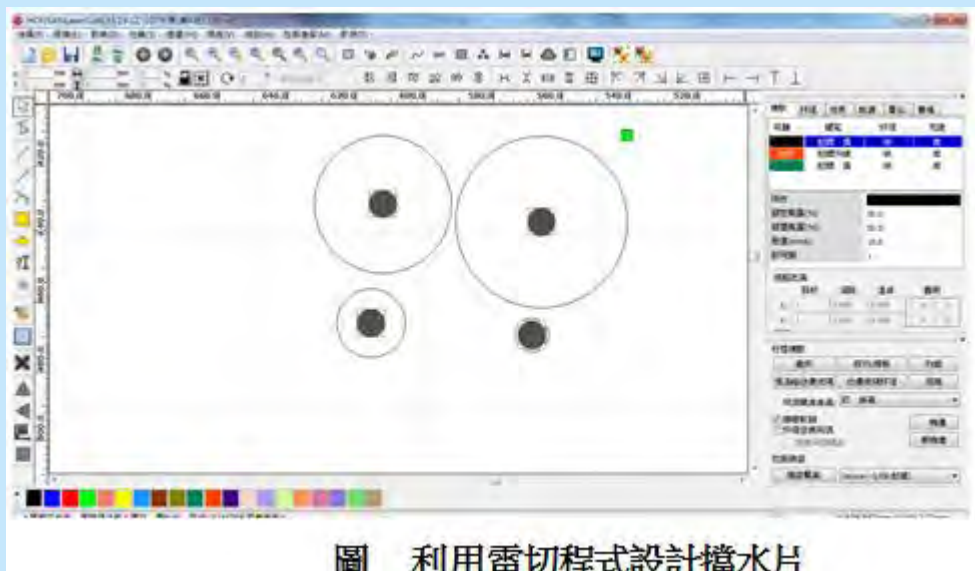
一、研究架構



二、準備實驗：組裝實驗器材

(一)組裝擋水片裝置

1. 利用雷射切割機，設計出實驗所需的擋水片，並擋水片的下方雕刻出符合銅棒粗細的圓形凹槽。
2. 利用電鑽在木塊上挖洞，將金屬棒敲入木塊中。
3. 用熱溶膠黏少許在擋水片下方的圓形凹槽，並將金屬棒嵌入，即完成擋水片主體。



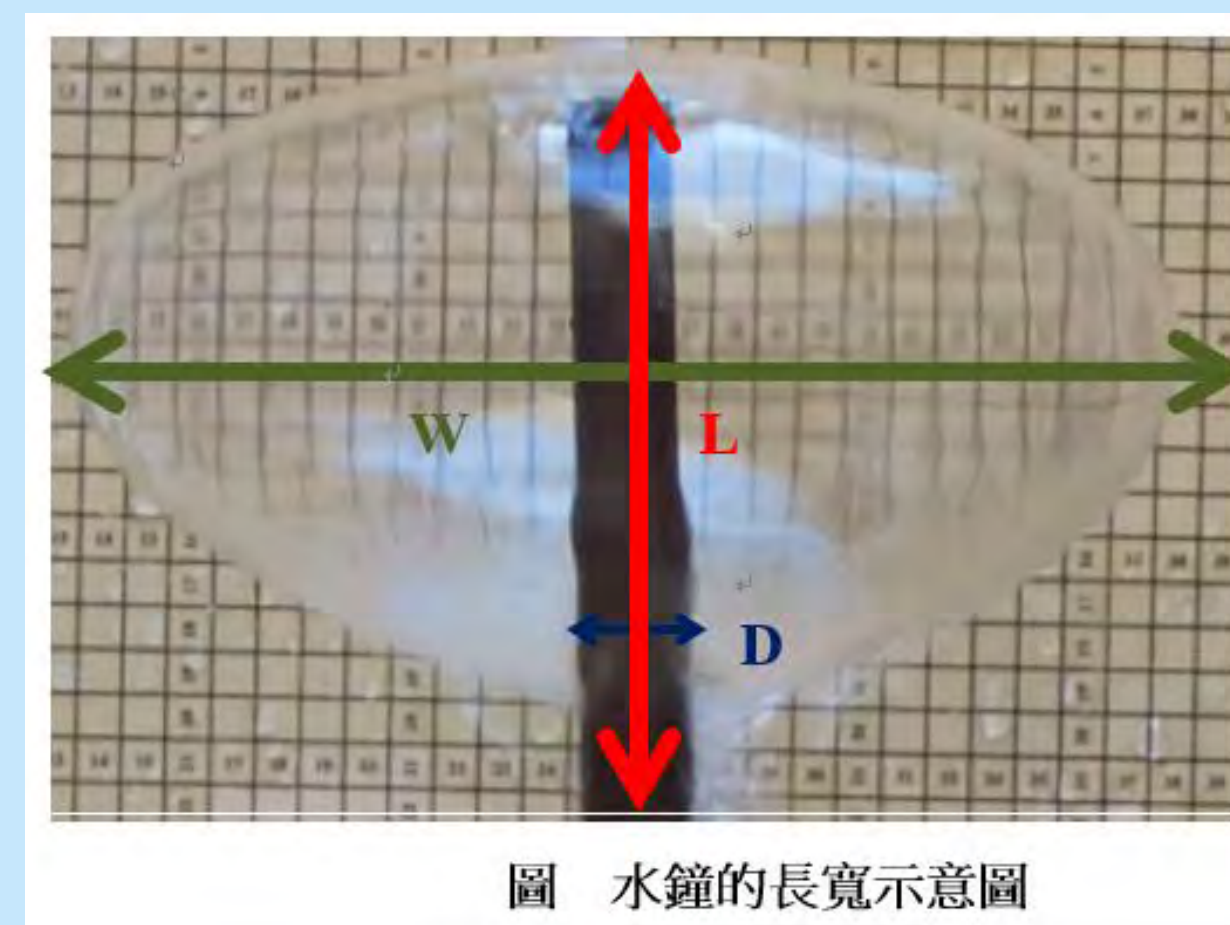
(二)組裝出水端裝置

1. 將水管一端放在水盆內，一端連接PVC接頭，並塞入裝有金屬管的橡皮塞。
2. 實驗過程中，補充水盆內的水，使桌上的水盆維持水位一定。
3. 出水口端則固定在金屬橫桿上，以確認高度位置。



三、實驗分析方法

為了數據準確，我們將錄影下固定條件的水鐘，在不同時間點，共截圖3次，再利用GeoGebra量出長度，但是長度大小會隨電腦畫面放大縮小而改變，不過，實驗中金屬棒的直徑都固定的，因此最後我們再依比率算出所需長度的真正大小。



為了想知道水鐘形狀的變化，因此討論後決定量測水鐘寬度的距離W'，水鐘頂點到底部的長度L'，以及作為校正的金屬棒直徑D'，在不同時間點，總共測量3次，因為資料量龐大，因此將此數據紀錄於附件。

(一)分析水鐘大小與長寬比

測量的數據W'、L'及D'並非真實長度(是攝影機拍出的大小)，因此利用金屬棒的真實直徑進行校正。

$$\text{水鐘長度 } L = \frac{L'}{D'} * \text{金屬棒實際直徑}$$

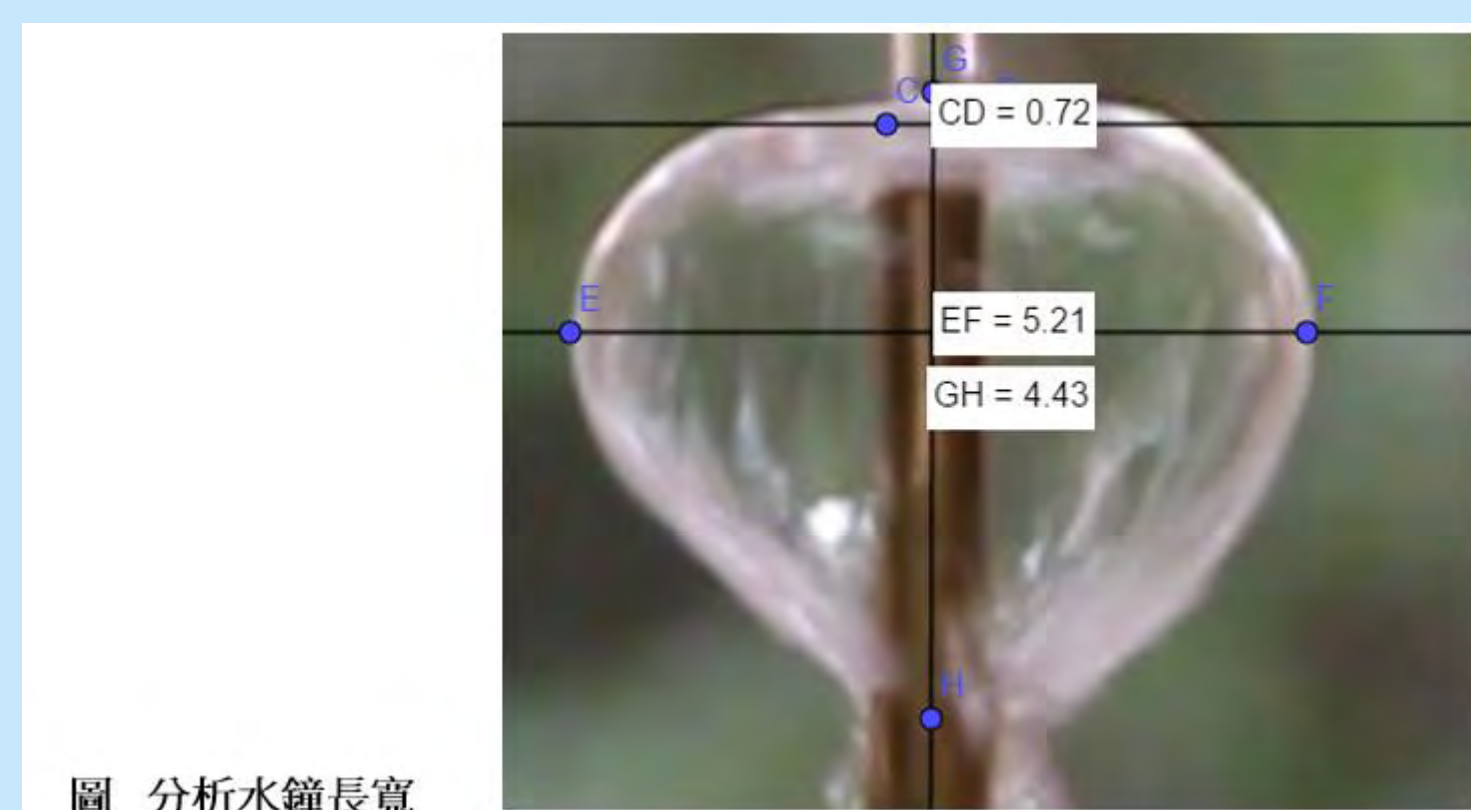
$$\text{水鐘寬度 } W = \frac{W'}{D'} * \text{金屬棒實際直徑}$$

$$\text{水鐘長寬比 } R = \frac{L}{W}$$

例：(以水位差 15.5 cm 的數值為例)(金屬棒直徑為 0.8 cm)

測量出的金屬棒直徑 D'(cm)	水鐘寬度 W'(cm)	水鐘長度 L'(cm)
0.72	5.21	4.43

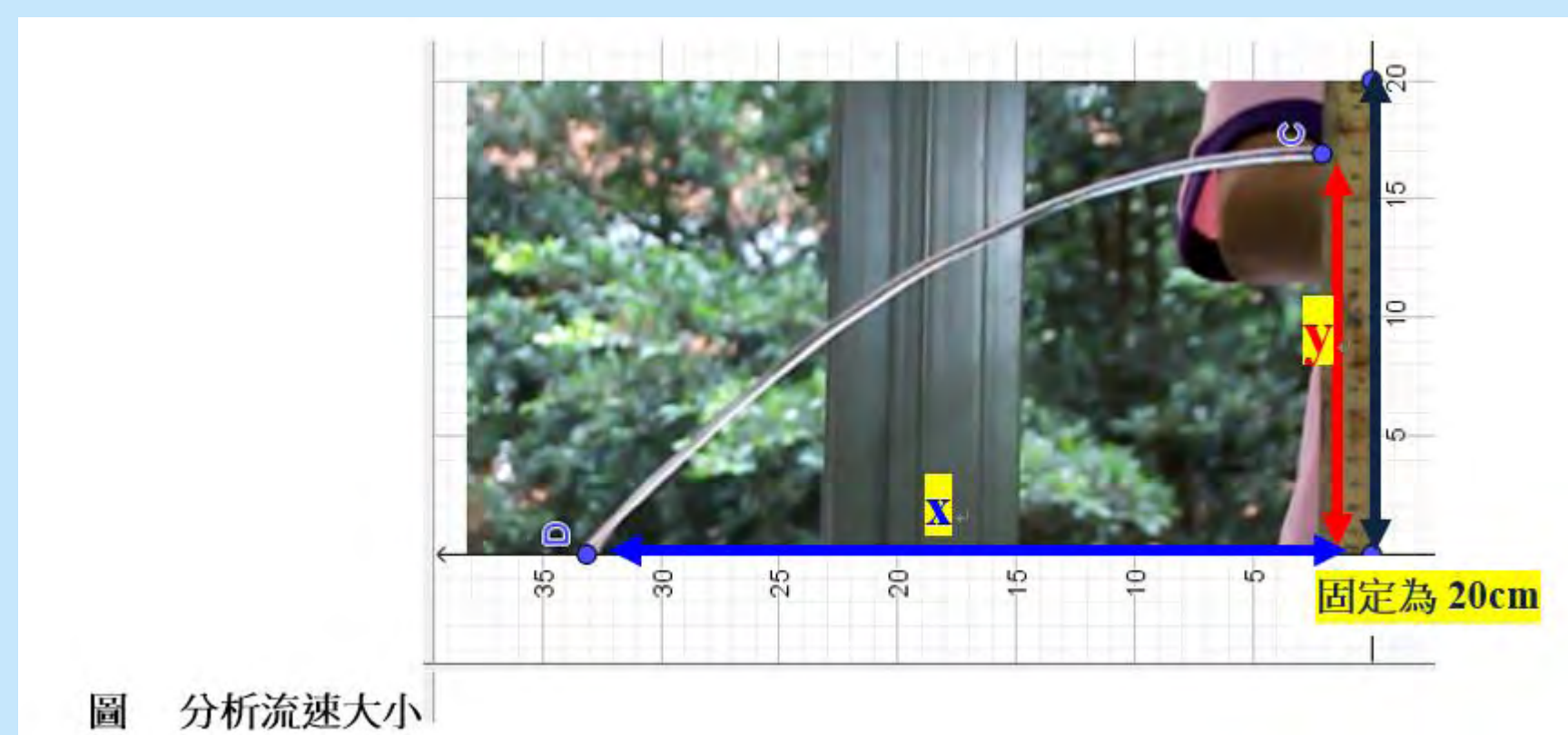
水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L (cm)	水鐘長寬比
$W = \frac{5.21}{0.72} * 0.8 = 5.8$	$L = \frac{4.43}{0.72} * 0.8 = 4.9$	$R = \frac{4.9}{5.8} = 0.84$



(二)分析流速

我們將固定水壓的出水口朝水平發射出去，根據平拋運動

$$\text{水平方向 } x = vt \quad \text{鉛直方向 } y = \frac{1}{2}gt^2 \quad \text{得 } v = x\sqrt{\frac{g}{2y}}$$



四、實驗一：探討不同水速對水鐘的關係

(一)實驗過程

1. 將實驗裝置擺放好，擋水片選擇圓形造型，直徑為3公分，並利用水平儀確定擋水片為水平。
2. 紀錄出水口高度與水面高度數值，紀錄為h1。打開出水口將水流到擋水片中央處。
3. 用相機錄下實驗的水鐘形狀。
4. 將出水端朝水平射出水柱，並利用相機記錄水柱落下的高度及水平距離。
5. 重複步驟1~5，改變出水口高度與水面高度，並記錄數值為h2、h3、h4、h5。



(二)實驗結果與討論

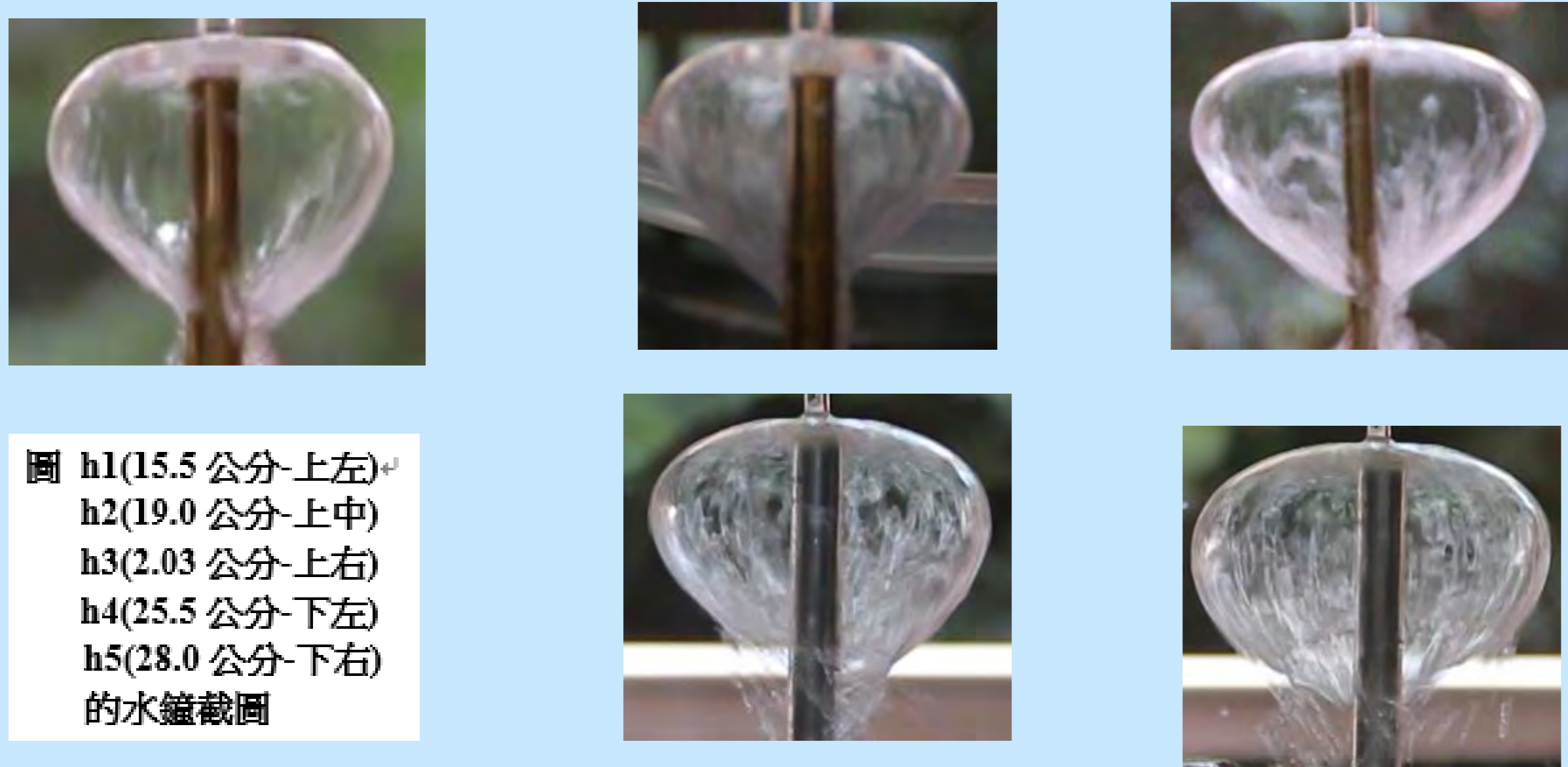


圖 h1(15.5公分-上左)
h2(19.0公分-上中)
h3(2.03公分-上右)
h4(25.5公分-下左)
h5(28.0公分-下右)
的水鐘截面

出水口到擋水片距離 h(cm)	出水端的水速 v(cm/s)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L(cm)	水鐘長寬比值 R
15.5	106.1	6.1	5.4	0.89
19.0	112.1	6.8	5.6	0.83
23.0	134.4	9.9	7.6	0.77
25.5	153.1	10.1	8.3	0.82
28.0	160.0	11.5	9.4	0.82

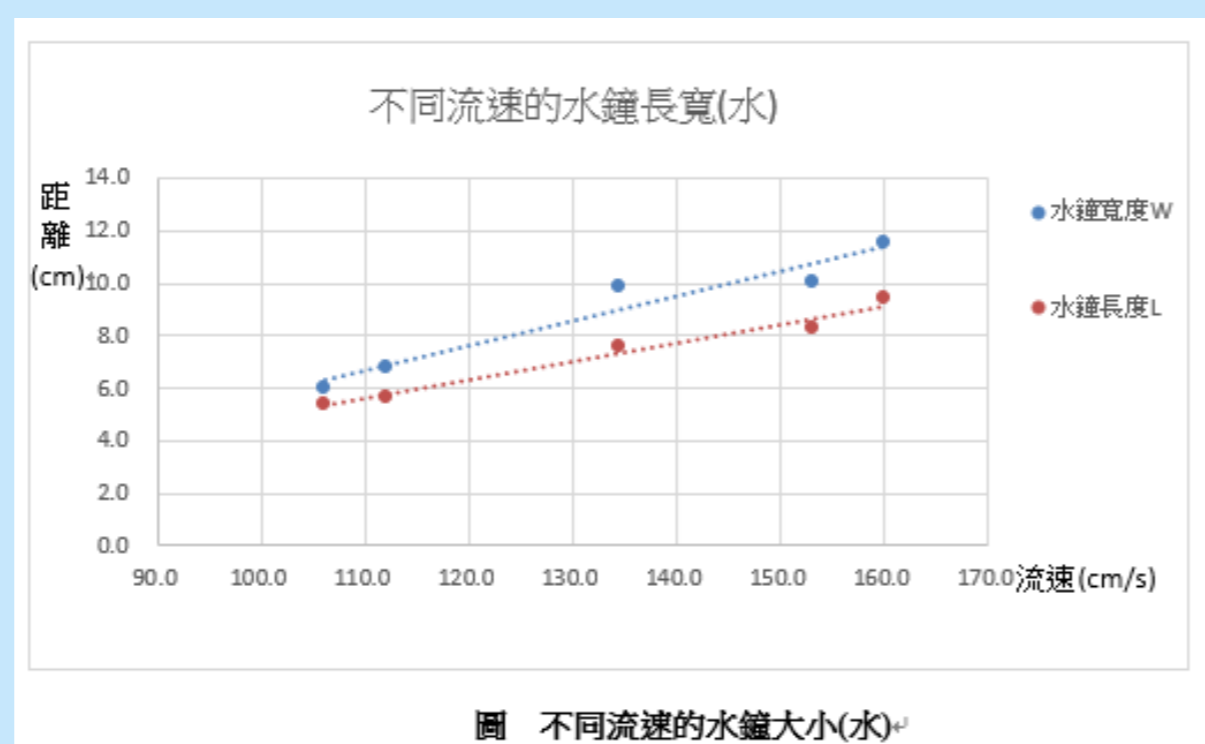


圖 不同流速的水鐘大小(水)

五、實驗二：探討不同種類的溶液與水鐘的關係

(一)實驗過程：詳見作品說明書

(二)實驗結果與討論

酒精



圖 h1(15.0公分-上左)
h2(18.0公分-上中)
h3(23.0公分-上右)
h4(25.0公分-下左)
h5(28.0公分-下右)
的水鐘截面

出水口到擋水片距離 h(cm)	出水端的水速 v(cm/s)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L(cm)	水鐘長寬比值 R
15.0	96.5	6.7	6.6	0.98
18.0	112.7	8.2	7.9	0.97
23.0	119.5	11.6	11.6	0.99
25.0	132.2	13.3	12.9	0.97
28.0	139.7	15.3	14.8	0.97

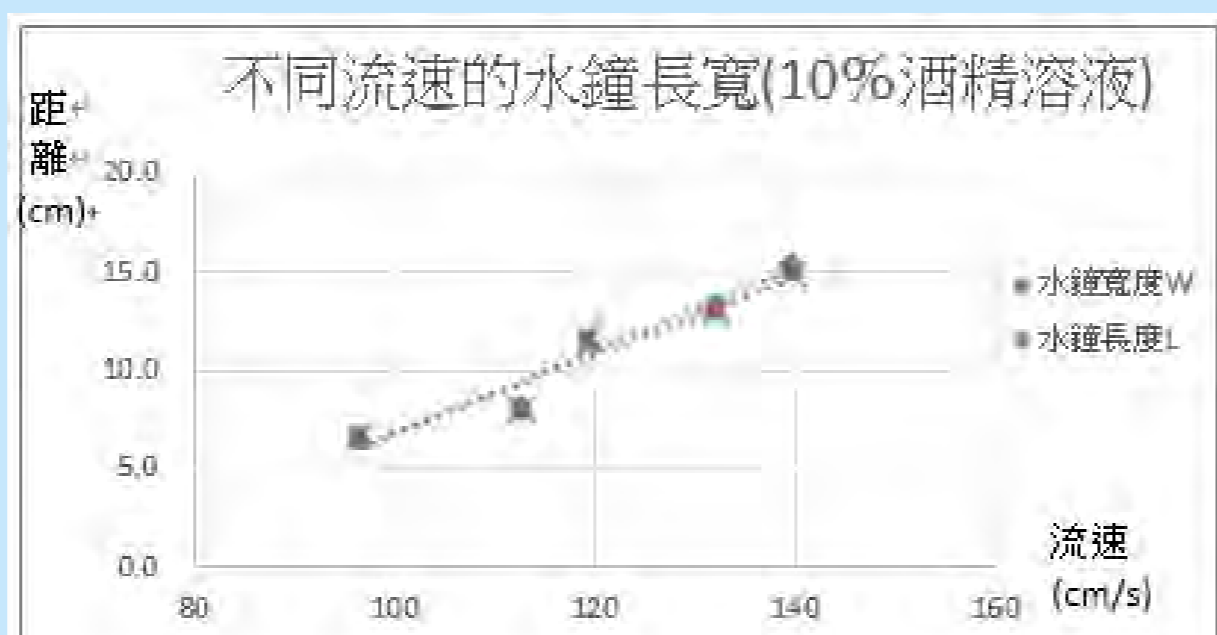


圖 不同流速的水鐘大小(10%酒精溶液)

洗碗精水溶液



圖 h1(15.0公分)、h2(20.0公分)、h3(23.0公分)、h4(26.0公分)、h5(31.0公分)的水鐘截面

出水口到擋水片距離 h(cm)	出水端的水速 v(cm/s)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L(cm)	水鐘長寬比值 R
15.0	116.5	5.9	7.4	1.26
20.0	120.2	6.4	10.0	1.57
23.0	130.3	8.9	13.8	1.56
26.0	130.0	9.3	12.7	1.36
31.0	148.4	11.5	15.7	1.36

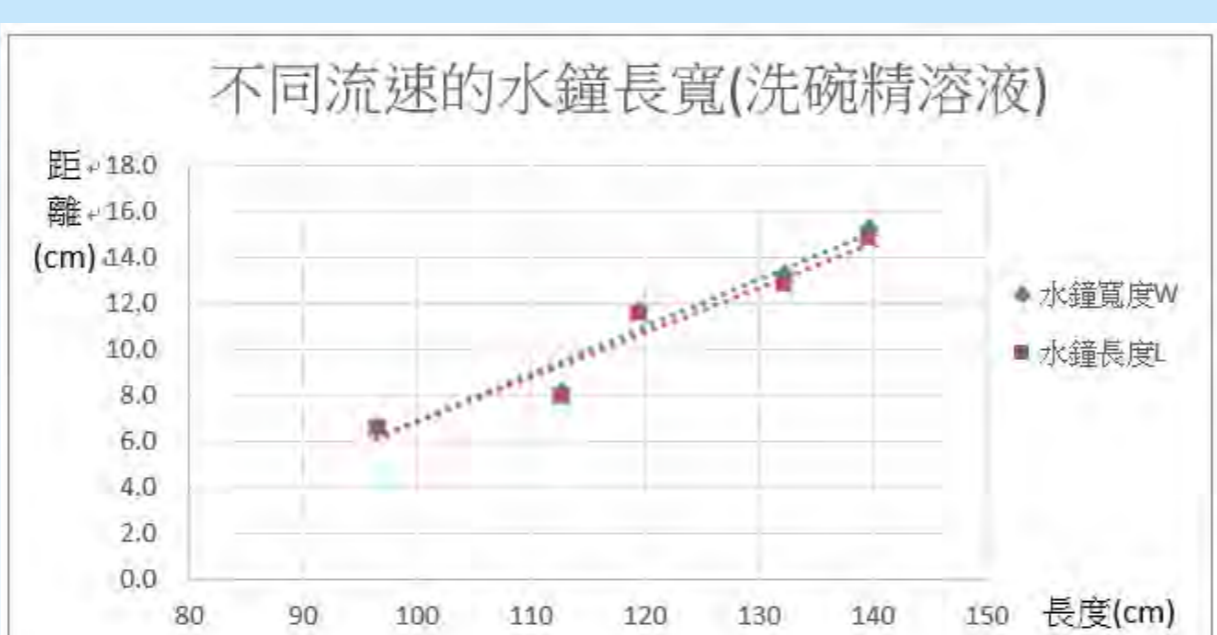


圖 不同流速的水鐘大小(洗碗精溶液)

老師與我們討論了形成水鐘的原因，有兩個可能，一為表面張力造成的現象，二是內外壓力差可能也會有影響，我們在進行實驗時，發現一開始形成的水鐘比較大，但隨著實驗繼續進行，水鐘會持續變小，我們懷疑是內外壓力差造成的，因此我們將金屬棒在水鐘內的部分挖一個洞，下方部分挖一個洞，使內外壓力相同，果然水鐘會變小的情況就消失了。



圖 金屬棒挖洞(紅色圈為挖洞的部分)

當水由出水口落下後，到了擋水片上，因為此時水仍有流速，由擋水片開始向外流出，此時水有一個向外的速度(紅色箭頭所示)，但是此時，仍有力(藍色箭頭)作用在水分子上，包含重力、空氣阻力、浮力及內聚力等，若表面張力足夠強，內聚力也相對較大，就能將水分子拉在一起而閉合，形成水鐘。

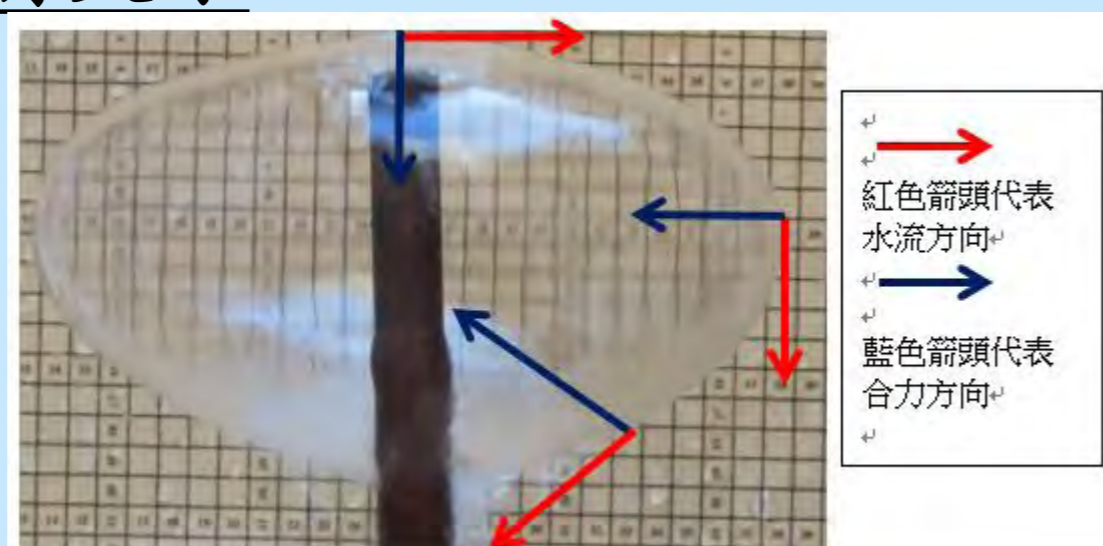


圖 水分子的速度與合力的關係圖

由圖表可以發現，當水壓變大時，水速也增加，此時水鐘的寬度會變大，由線性可以發現成正相關，推測因為水速快，水平方向的初速度大，相同的表面張力下，提供的內聚力相同，所以需要較大的曲率半徑才能轉彎，因此水鐘的寬度也會較大。

因為水鐘寬度變大，所以表面張力要將水分子聚集回來形成水鐘就需要更多時間，因此水鐘下半部也較長，水鐘的長度也變大。又因為此時水分子受到重力的影響，所以造成水鐘上半部與下半部的形狀會不對稱(下半部會比上半部長)。

由圖可以觀察到，水的水鐘長度較小，且斜率較小；而酒精與洗碗精溶液的水鐘長度較大，斜率則是洗碗精溶液比酒精溶液大。水鐘長度越長，表示表面張力較小，所以需要更多時間才能將水分子來回，而形成水鐘。

表面張力的大小順序分別為：

水(0.073 N/m) > 10%酒精溶液(0.046 N/m) > 洗碗精溶液(0.025 N/m)
水鐘的長度大小依序則是：洗碗精溶液 > 10%酒精溶液 > 水

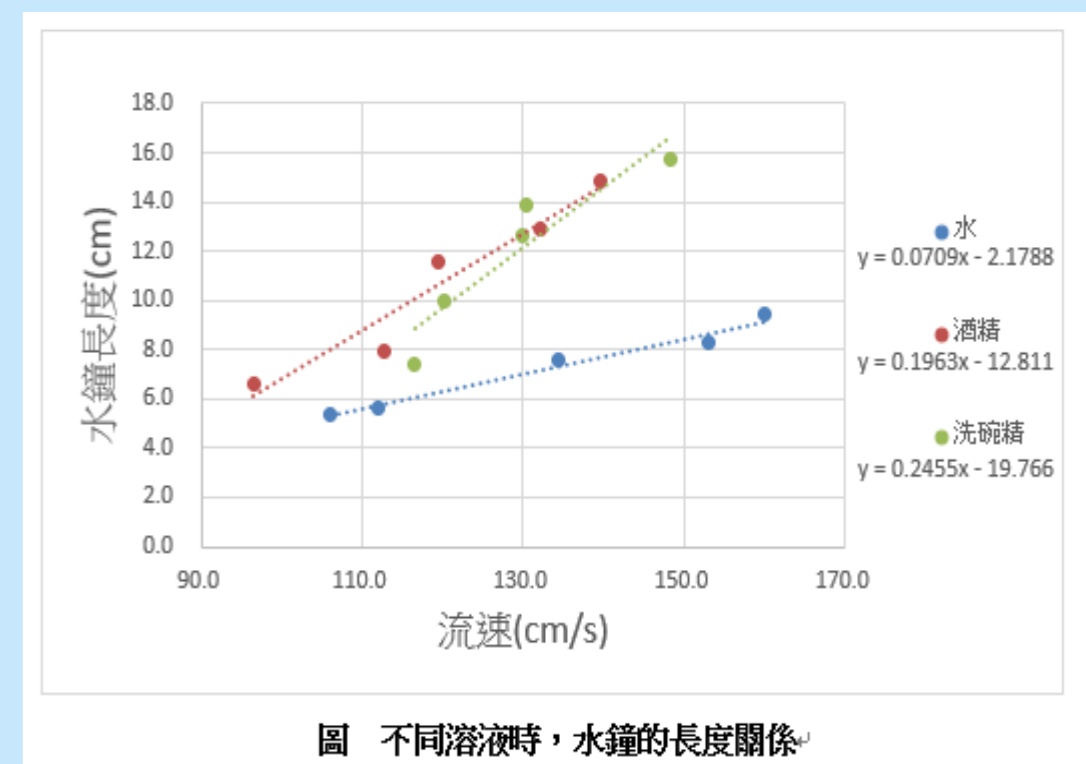


圖 不同溶液時，水鐘的長度關係

由圖可以觀察到，單一溶液時，流速改變，水鐘的長寬比變化不大。水的水鐘長寬比隨流速增加而微幅變小。酒精溶液的水鐘形狀在不同流速下變化不大。但是洗碗精溶液的形狀則變下較不規則，我們推測是否與實驗過程中，有產生泡沫有關，但基本上變化也不大。

不同溶液時，不同表面張力也不同，此時水鐘的長寬比差異頗大。表面張力的大小順序分別為：

水(0.073 N/m) > 10%酒精溶液(0.046 N/m) > 洗碗精溶液(0.025 N/m)
水鐘的長寬比依序則：

洗碗精溶液(1.42) > 10%酒精溶液(0.98) > 水(0.83)

將長寬比(L/W)轉為寬長比(W/L)時，發現寬長比與表面張力的變化量相同(斜率一致)，所以若分析出不同溶液的寬長比，或許可以推測出該溶液的表面張力大小。

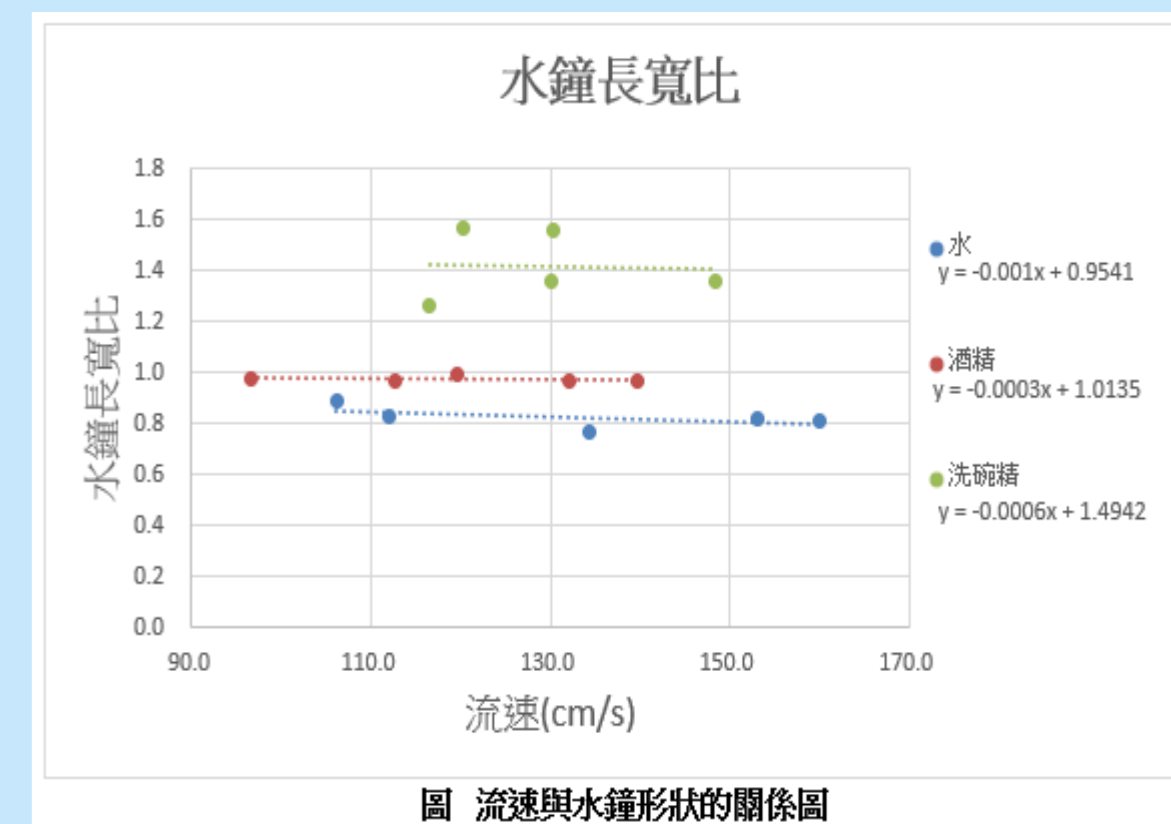


圖 流速與水鐘形狀的關係圖

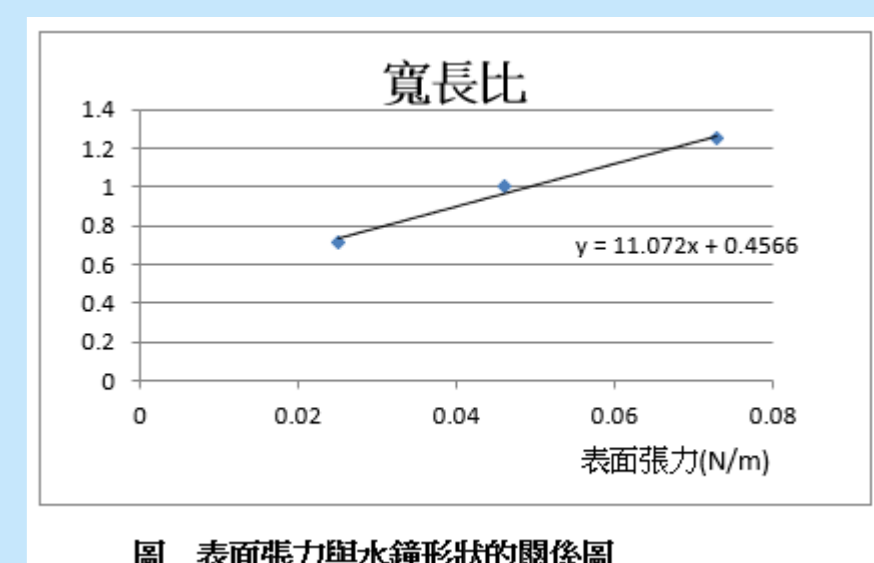


圖 表面張力與水鐘形狀的關係圖

六、實驗三：探討不同出水口高度對水鐘的影響

(一)實驗過程：詳見作品說明書

(二)實驗結果與討論

根據表格及圖所示，發現隨著出水口的高度愈高(3.3~17.5cm)，所形成的水鐘變的愈來愈矮胖(R變小)，而水鐘的大小也會變大(W及L變大)。

但是出水口的高度愈高(超過22.5 cm後)，形成的形狀為水傘狀，但水傘的寬度一樣會隨出水口的高度變高而變大，推測是由於高度愈高，水的流速愈快而導致。

到底不同高度會造成什麼影響？我們觀察到接近出水口的水流與遠離出水口的水流看起來似乎不太相同，查了資料，發現上方水流是屬於層流，是因為流速慢，流體分層流動，互不混合；若高度差愈大，下方水流的流速增加到很大時，流線不再清楚可辨，稱為紊流。

當出水口高度愈小，水流流速慢，合力足夠將水閉合成水鐘的樣貌，但是一旦出現紊流，代表水流流速太快，此時，出現水傘的機率就變高了。

出水口高度 H(cm)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L(cm)	水鐘的長寬比值 R
3.3	8.3	9.4	1.12
10.0	13.6	12.3	0.91
12.5	14.6	12.3	0.85
17.5	16.7	13.3	0.80

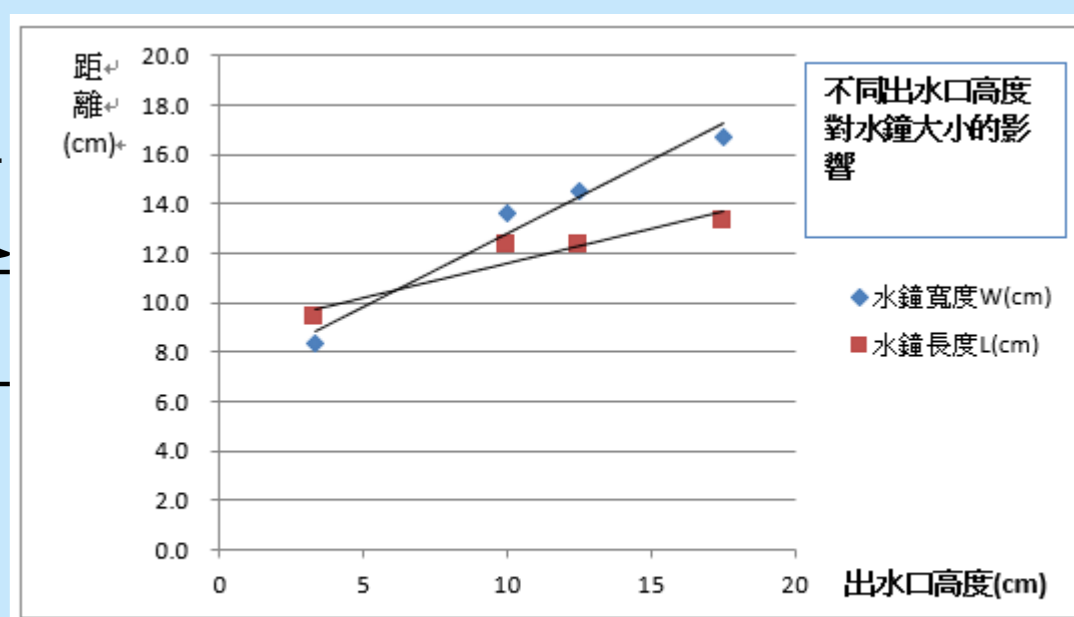


圖 不同出水口高度對水鐘大小的影響

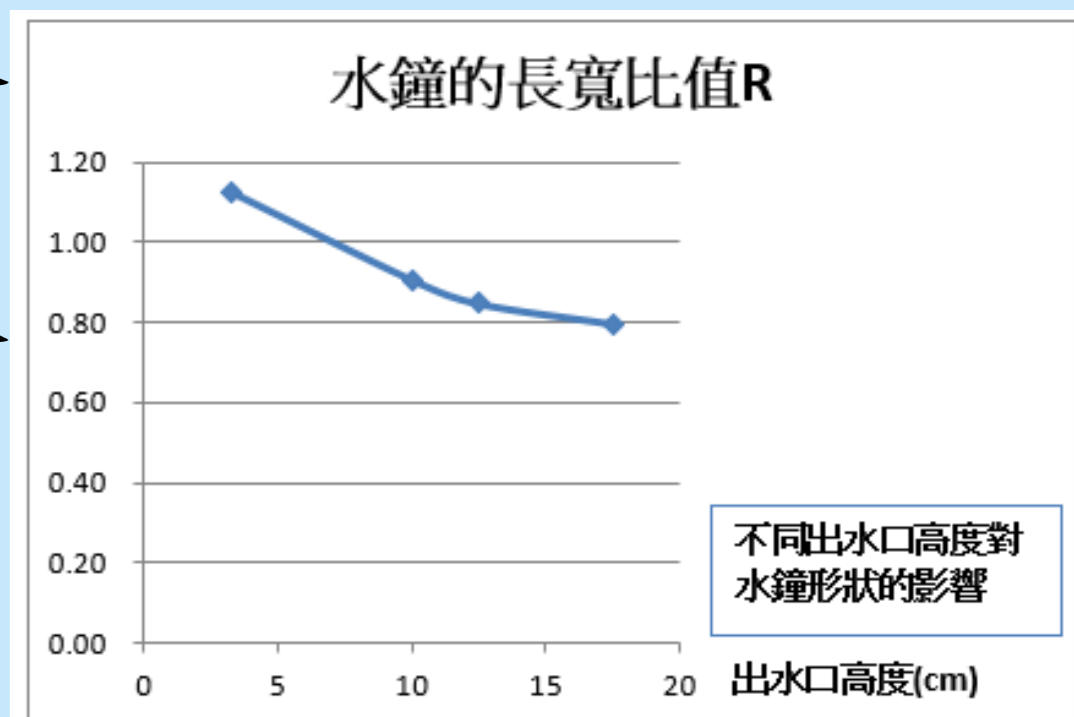


圖 不同出水口高度對水鐘形狀的影響

七、實驗四：探討不同水管粗細對水鐘的影響

(一)實驗過程：詳見作品說明書

(二)實驗結果與討論



圖 不同水管粗細時的水鐘截面(水管內直徑 0.62 cm、1.01 cm、1.29 cm、1.81 cm)

根據圖表所示，發現在是四種水管中，水管直徑為1.29cm時，出現的水鐘形狀最瘦長，而且，水鐘體積最大，並非愈大的水管就能出現愈大的水鐘。

水管內直徑(cm)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L(cm)	水鐘的長寬比值 R
0.62	8.90	8.00	0.90
1.01	9.23	8.59	0.93
1.29	13.60	17.31	1.27
1.81	12.47	13.00	1.04

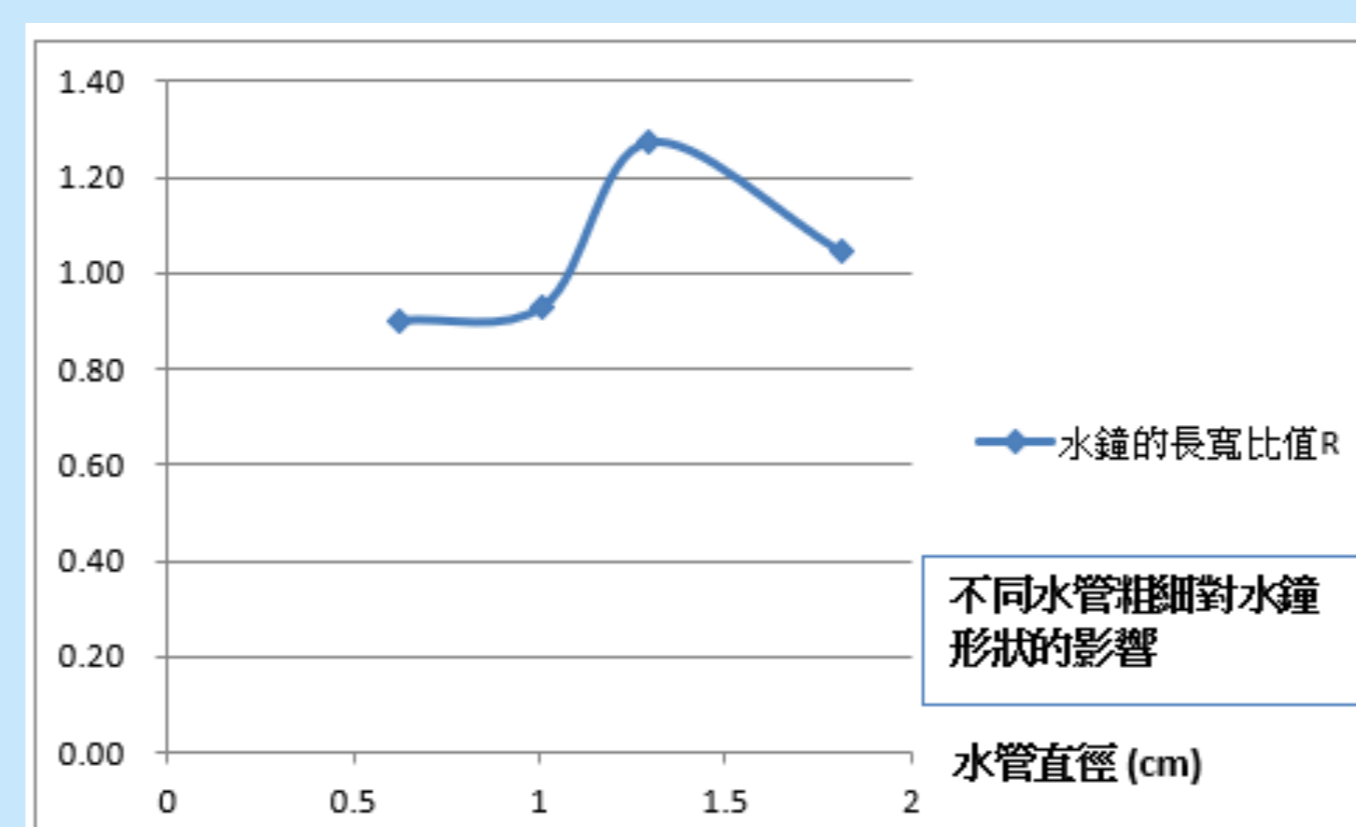


圖 不同水管粗細對水鐘形狀的影響

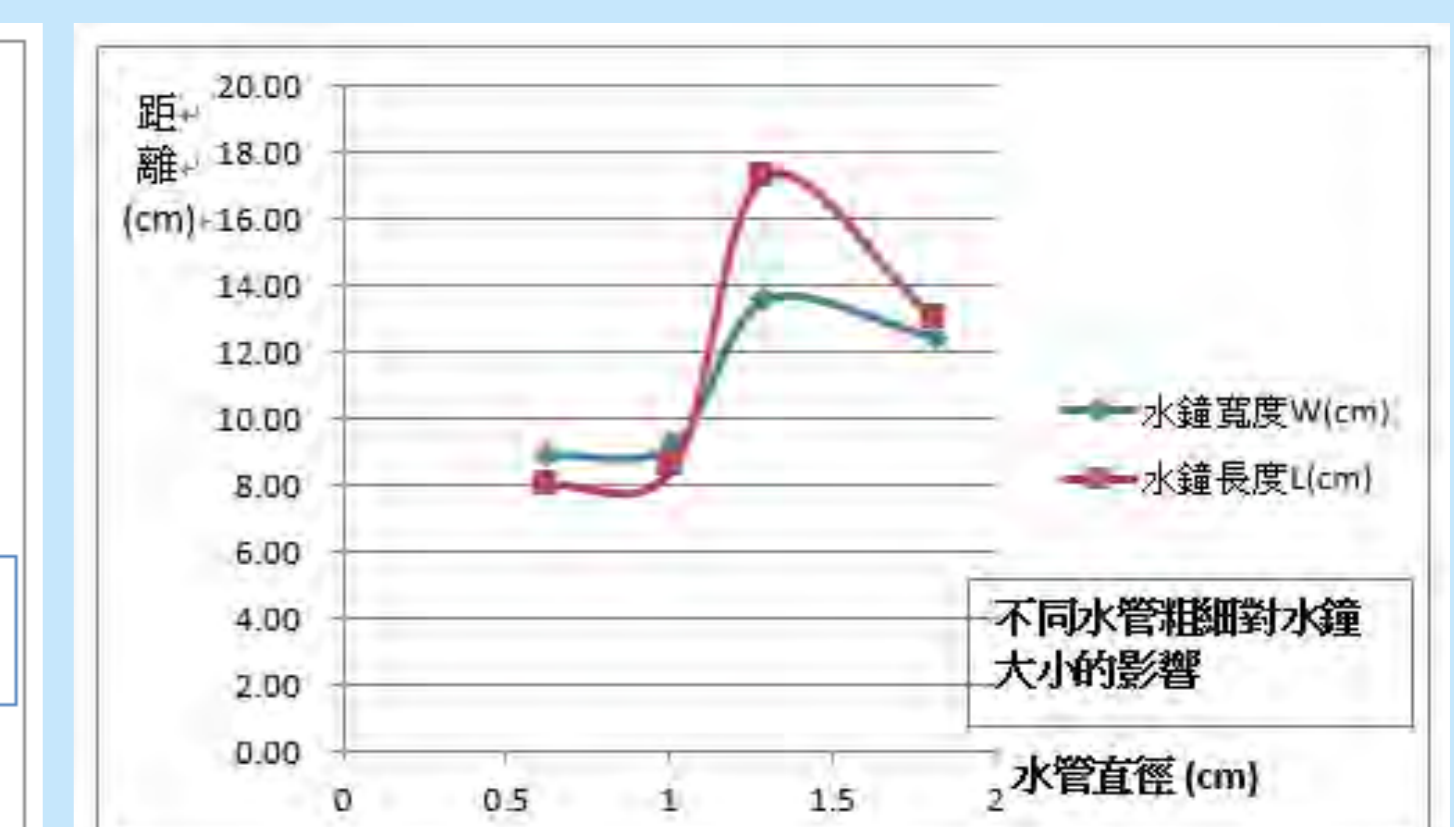


圖 不同水管粗細對水鐘大小的影響

八、實驗五：探討不同出水量對水鐘的影響

(一)實驗過程：詳見作品說明書

(二)實驗結果與討論

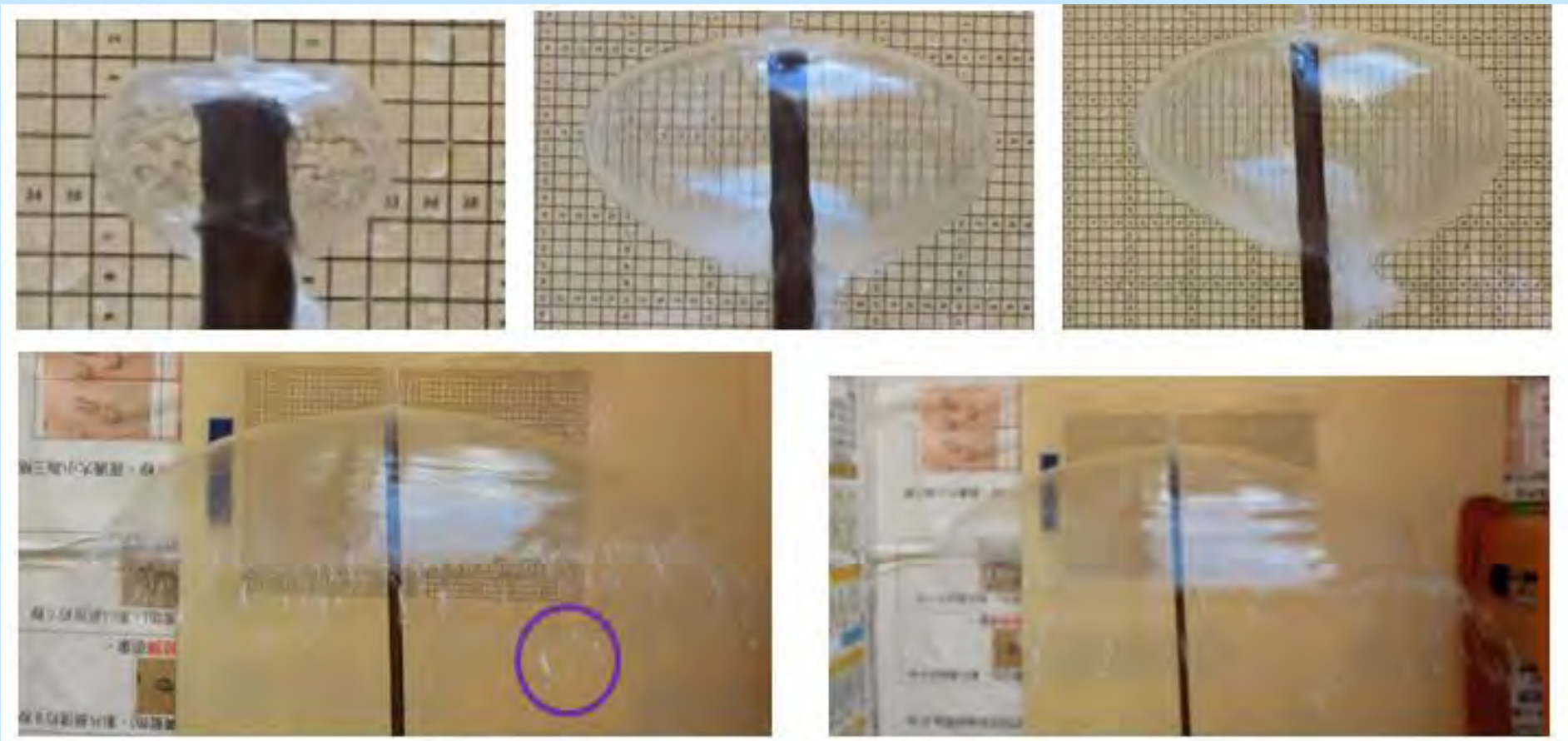


圖 不同水龍頭角度時的水鐘截圖(左上到右下為角度 1~5)(紫色圈圈為出現小水滴處)
(出水量由左上到右下,分別為 40.0、58.0、74.7、93.9 及 111.3 ml/s)

根據表格及圖所示,發現水流量為40.0 ml/s到74.7ml/s時,都能成功形成水鐘,推測,此時的流速下,水的表面張力能有能力將水聚合形成水鐘。但是當水流量到了93.7ml/s以上時,因為流速太快,無法閉合,而形成傘的形狀。

水流量為40.0 ml/s到74.7 ml/s時,由圖可發現,所形成的水鐘明顯變大,但水鐘形狀變化不大。推測原因是流出擋水片時的水流快,但此時水的表面張力能足夠將其閉合;但水流量在93.7ml/s後,雖然形狀變得更寬,但下半部就無發閉合了。

觀察水的透光程度(可藉由觀察水鐘或水傘後方物體的扭曲程度判斷),在水流量為40.0 ml/s,可以發現似乎水中所含的水層較厚,隨著水流量增加,所形成的水鐘因為變更大,水層似乎也變薄了。觀察水流量93.7ml/s所形成的傘狀,發現傘的下半處,因為水量開始分配不足,導致出現小水滴的情況,因此推斷,就算表面張力足夠,是否也會因為水量不足,而無法出現閉合的情況呢?

九、實驗六：探討不同大小的擋水片對水鐘的影響

(一)實驗過程：詳見作品說明書

(二)實驗結果與討論

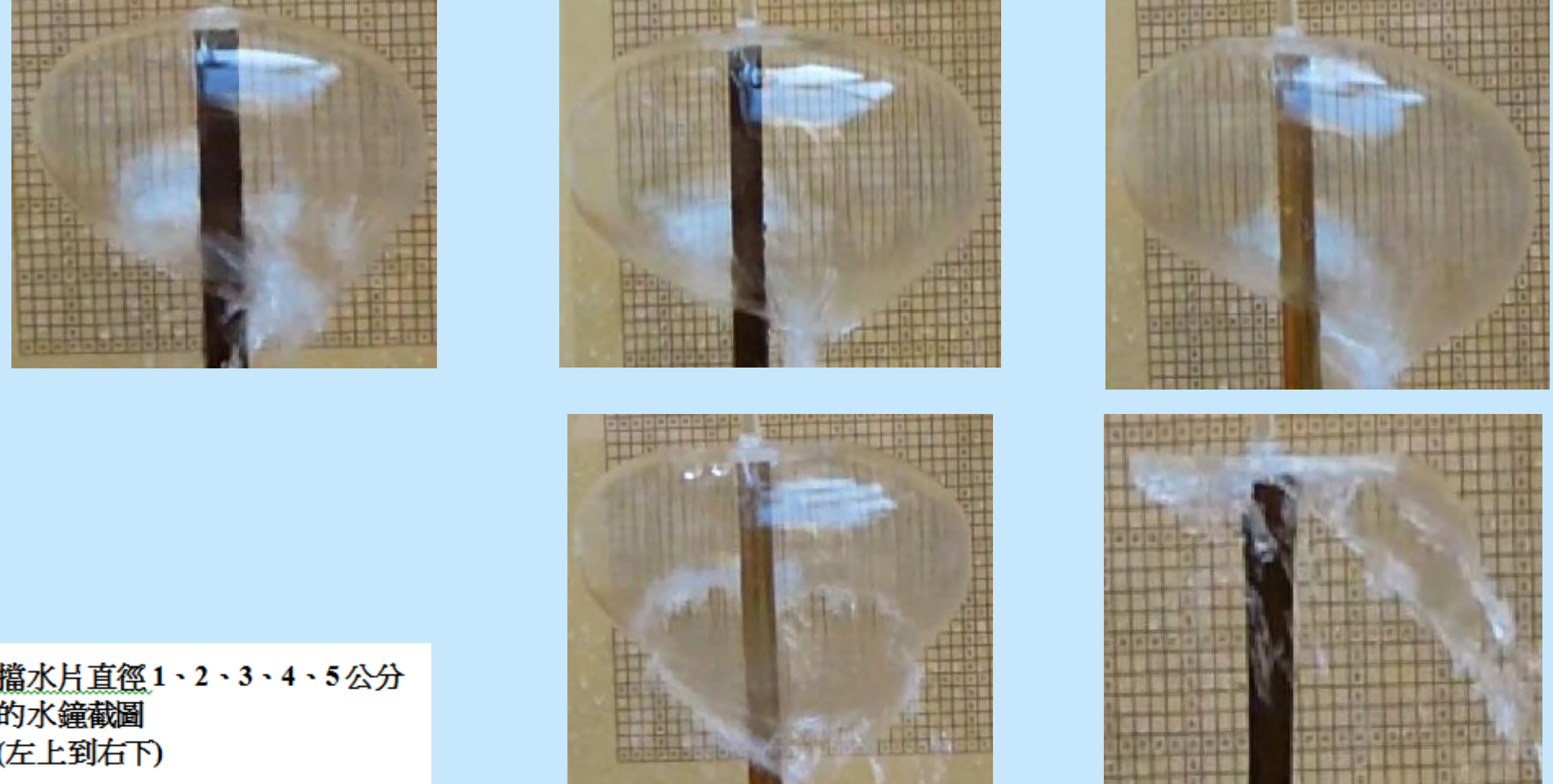


圖 擋水片直徑 1、2、3、4、5 公分的水鐘截圖(左上到右下)

當擋水片直徑由1cm到4cm時,都能成功形成水鐘,但是擋水片的直徑為5cm時,只見到如傘的形狀,下半部無法成功閉合。

由表可發現,在擋水片的直徑為3cm時,水鐘最寬。發現擋水片必須在一定範圍的大小下,才容易形成水鐘,擋水片過大,無法形成水鐘。

這個現象和不同粗細的水管對水鐘的影響的結果蠻類似的,因此推測,想要形成愈大的水鐘,出水口水管口徑(即水流截面積)與擋水片要互相配合,並非愈大的水管或愈大的擋水片就能出現愈大的水鐘。

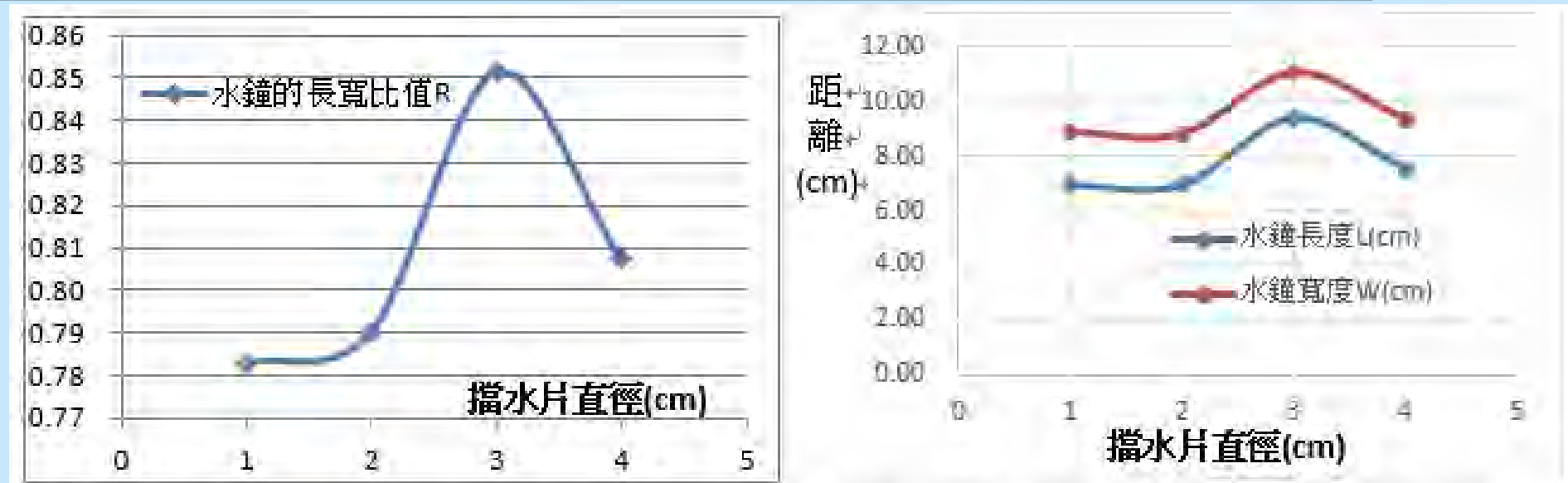


圖 不同直徑擋水片對水鐘形狀的影響(左圖)及不同直徑擋水片對水鐘大小的影響(右圖)

我們在網路上找到一份資料(參考文獻七),內容對哪種條件下會產生水鐘及水傘也有相同類似的,與我們的實驗結果符合,其中 R_B 為水鐘寬度, D_0 為水柱直徑, ϕ_0 為衝擊角度, We_e 為韋伯數

表六 不同出水量,所測量及分析的數據

出水量 (ml/s)	水鐘寬度 W(cm)	水鐘長度 L (cm)	水鐘的長寬比值 R
40.0	2.8	1.8	0.65
58.0	8.8	5.4	0.62
74.7	10.3	6.6	0.64

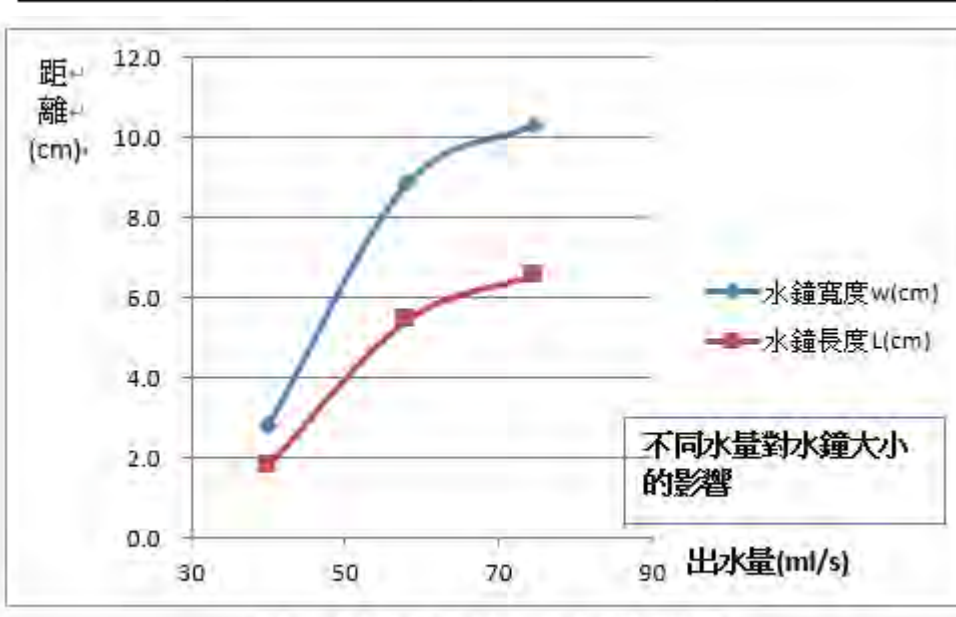


圖 不同出水量對水鐘大小的影響

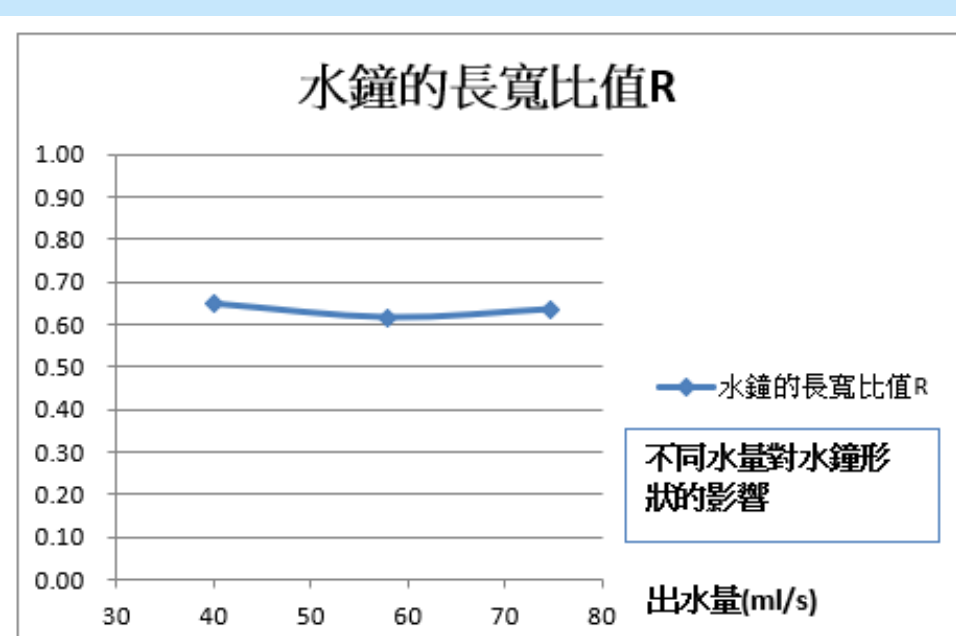


圖 不同出水量對水鐘形狀的影響

(其中 ρ 為流體密度, v 為特徵流速, l 為特徵長度, σ 為流體的表面張力係數。)

由上圖我們可以發現韋伯數越大,越容易形成水傘,與我們所觀察到速度越大,以及表面張力越小越容易形成水傘的現象有一致性。

十、實驗七：探討不同形狀的擋水片對水鐘的影響

(一)實驗過程：詳見作品說明書

(二)實驗結果與討論

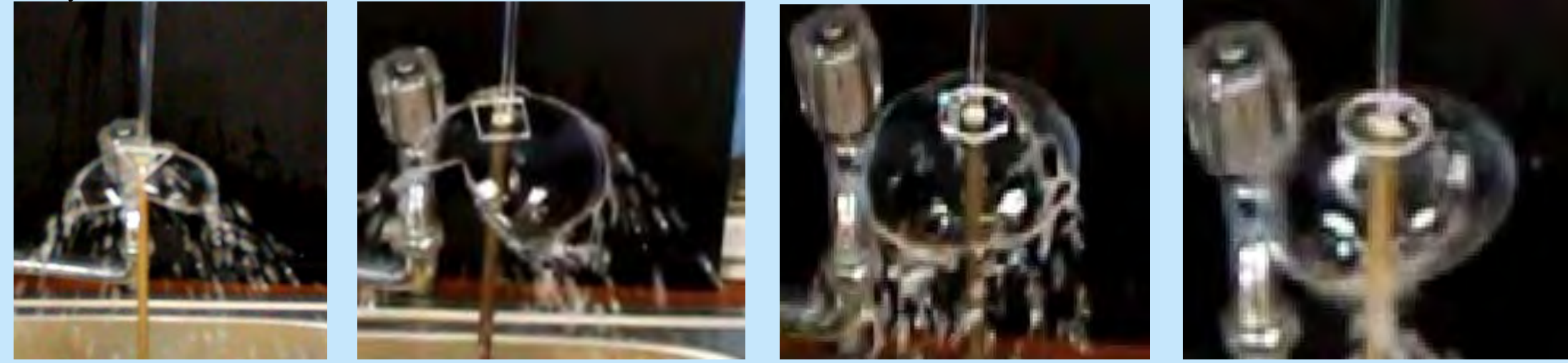


圖 出水口高度 10cm 下,不同形狀擋水片所造成的水鐘形狀(由左到右的擋水片形狀,分別為三角形、正方形、六邊形、圓形)

由圖可以發現,當出水口高度都固定為10cm時,三角形的擋水片會出現類似花瓣的圖形(共三片);而正方形有部分出現花瓣形狀,有部分卻仍是呈現水鐘閉合狀;六邊形的外型則像是水鐘狀,圓形擋水片仍然維持圓型。這個現象讓我們覺得很有趣,想知道正方形及六邊形有沒有機會出現花瓣狀,因此我們調整了不同出水口高度,結果都成功出現水花瓣圖案。

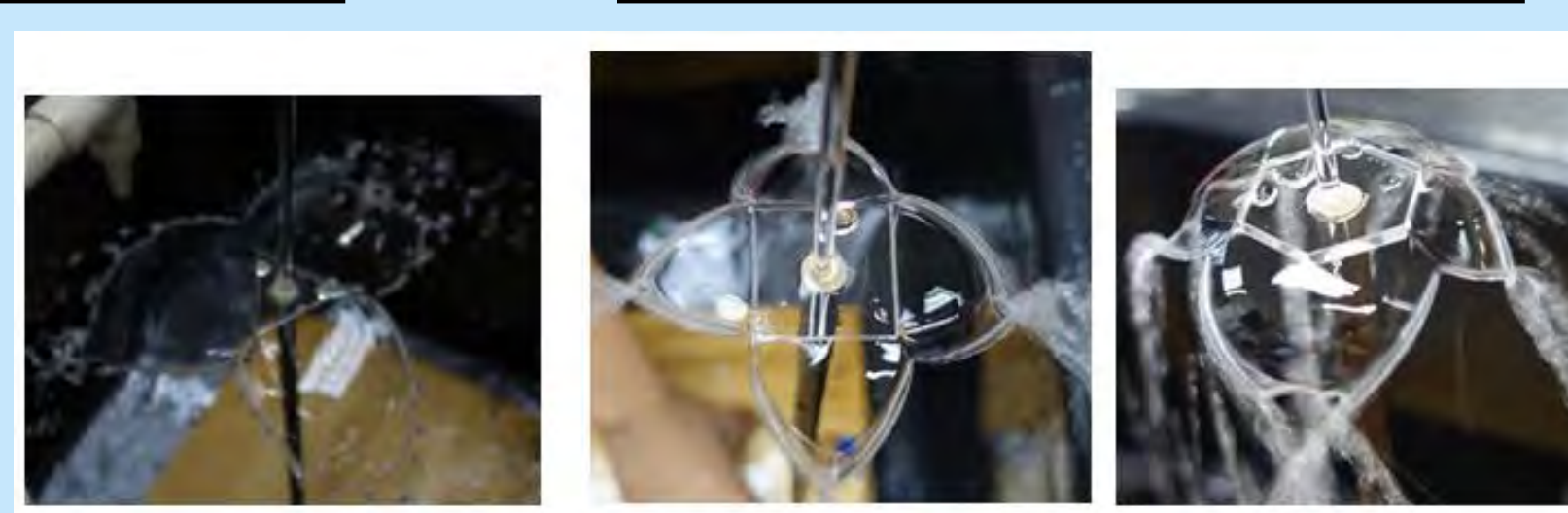


圖 不同形狀擋水片在適當出水口高度下,都出現水花瓣形狀

十一、實驗八：探討三角形擋水片在不同出水口高度對水鐘的影響

(一)實驗過程：詳見作品說明書

(二)實驗結果與討論

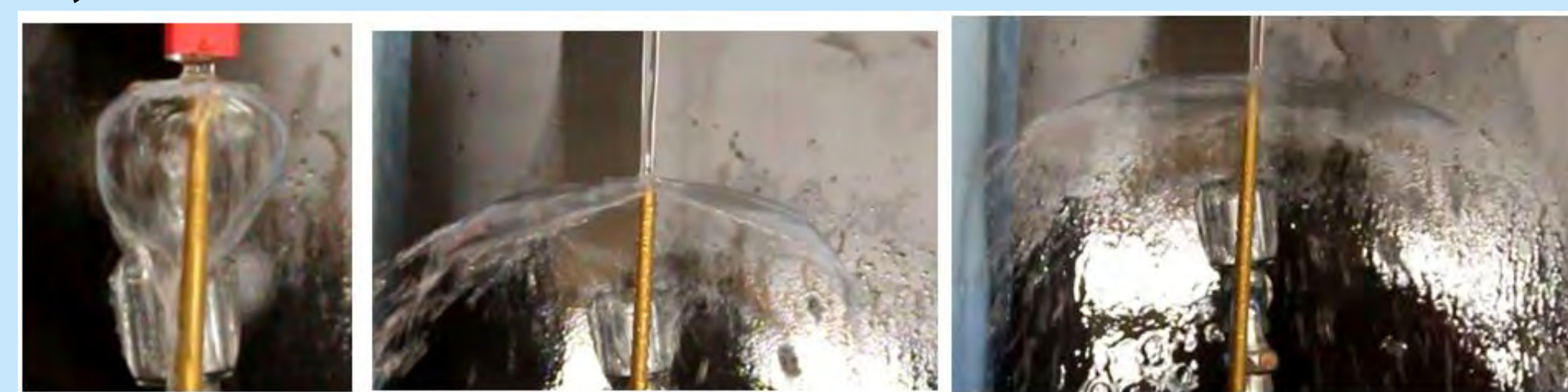


圖 三角形擋水片在不同高度時的形狀變化(由左至右圖高度分別為 1.0、20.5、38.5cm)

當出水口距離夠近(1cm)時,觀察到水鐘的水層較厚(代表水量足夠),三角形擋水片也能出現水鐘形狀,此時表面張力仍足夠將水拉成水鐘狀。但是當出水口高度變高,水碰到擋水片時流速快,應該出現水傘形狀,但又因為擋水片形狀關係,導致三角形三個頂點的水量不足,所以最終出現水花瓣狀。

我們觀察出現水花瓣時,是由三角形尖角處裂開,猜測是因為水由擋板中心流到尖角處的距離較長,所以離開擋水片的水速較慢且因為流得比較遠,水膜厚度較薄,因此水膜由此處裂開產生水花瓣,當出水口距離夠近時,整體水的流速較慢,即使是三角形尖角處的水流也有足夠的水膜厚度,所以還能形成水鐘的形狀。

伍、結論

- 由實驗一可知,水壓愈大,則流速愈大。相同溶液時,流速愈大,水鐘長度、寬度愈大。
- 由實驗二可知,表面張力愈小的溶液,形成的水鐘長寬比愈大,水鐘的長度也愈大。由實驗三可知,出水口高度愈高,造成流速愈快,水鐘形狀愈矮胖(長寬比值愈小);出水口高度愈高,水鐘也愈大。
- 由實驗四可知,粗細不同的水管會出現形狀及大小不同的水鐘。
- 由實驗五可知,出水流量愈大,會造成水鐘形狀愈矮胖;當出水量過大,會造成水鐘無法閉合,形成水傘;出水量愈大,水鐘也愈大。
- 由實驗六可知,不同大小的圓形擋水片會出現大小不同的水鐘。
- 由實驗七可知,不同形狀的擋水片,都有機會造成水花瓣狀圖形。
- 由實驗八可知,三角形擋水片,在出水口距離近的情況,會形成水鐘;出水口距離遠,則形成水花瓣。

陸、參考文獻

略(請見作品說明書)

韋伯數(Weber number)的計算公式為 $We = \frac{\rho v^2 l}{\sigma}$

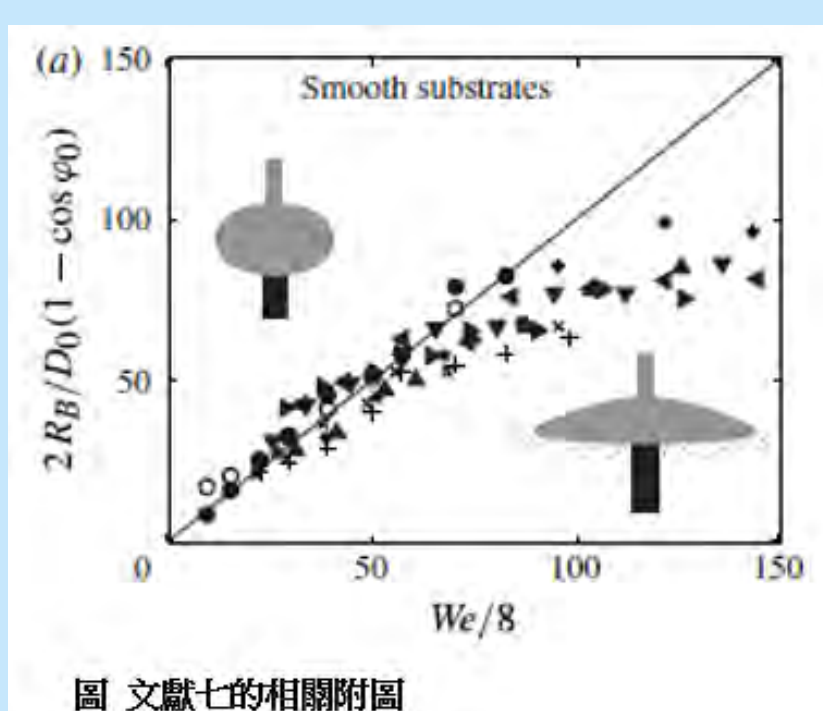


圖 文獻七的相關附圖