

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

第三名

040102

碰!水流不只是流動-水流噴射實驗

學校名稱：國立臺中第一高級中學

作者： 高二 陳昕陽 高二 林昂頡 高二 高永銘	指導老師： 吳錫玠
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：表面張力、自然振盪

摘要

倒水時，常可看到水不平穩的流出，並出現了類似旋轉的現象，同時有一些看似「聚縮」的點。我們想知道這種現象的成因。首先，我們驗證水是否在轉動，而發現旋轉現象並不存在。接著，我們發現聚縮點出現之鉛直高度在同截面下固定，故此現象很可能具週期性。我們拍攝下水珠的振盪而證實水具有因表面張力造成的自然振盪週期。我們接著研究影響振盪產生的因素：恢復力以及慣性。我們改變慣性來觀察在不同面質量下，振盪產生的時間和質量的關係，發現振盪產生的時間和開口面積的平方根成正比。為了驗證此現象和恢復力有關，我們使用 1:1 水和甘油混合液重覆前一個實驗，發現聚縮的時間有所改變。我們證實這個現象是一個由表面張力造成的收縮振盪。

壹、研究動機

當你每天、慣例地將水從水壺倒入杯子中時，你是否曾想過，水是以什麼形式流進去的？

每個人一生中都會倒上萬次的水，但很少人曾細細研究過倒出的水流。當問起：「水是怎麼流進去的？」一般人可能會說：「就從瓶子平平的流到杯子裡啊。」我們也不例外。直到有一次，我們突然發現，從牛奶瓶中倒出的牛奶流入杯中的過程，竟然還像麻花般歪歪扭扭的流進杯子裡！（如下圖）

於是，在驚奇之餘，我們也懷著強烈的好奇心及濃厚的求知慾，自己設計一套實驗器材，以模擬水從杯中流出的情形；並且以水代替牛奶，進行一系列的實驗，改變參數，試圖找出造成麻花狀牛奶流的原因。為了協助我們的研究，我們參照了高級中學物理課本第一冊之平面運動以及第二冊之流體力學之內容。



▲為水龍頭流出水的情形，沒有明顯形成麻花狀水流。



▲為牛奶從罐中流出情形，可以看出扭曲的牛奶流。

貳、研究目的

一、探討此現象的結構及成因。

這到底是什麼樣的運動？此現象的本質是什麼？是什麼造成此現象的產生？

二、研究有哪些可能的變因。

會影響現象產生的可能一和水的流速有關嗎？

三、推論變因和現象的關係

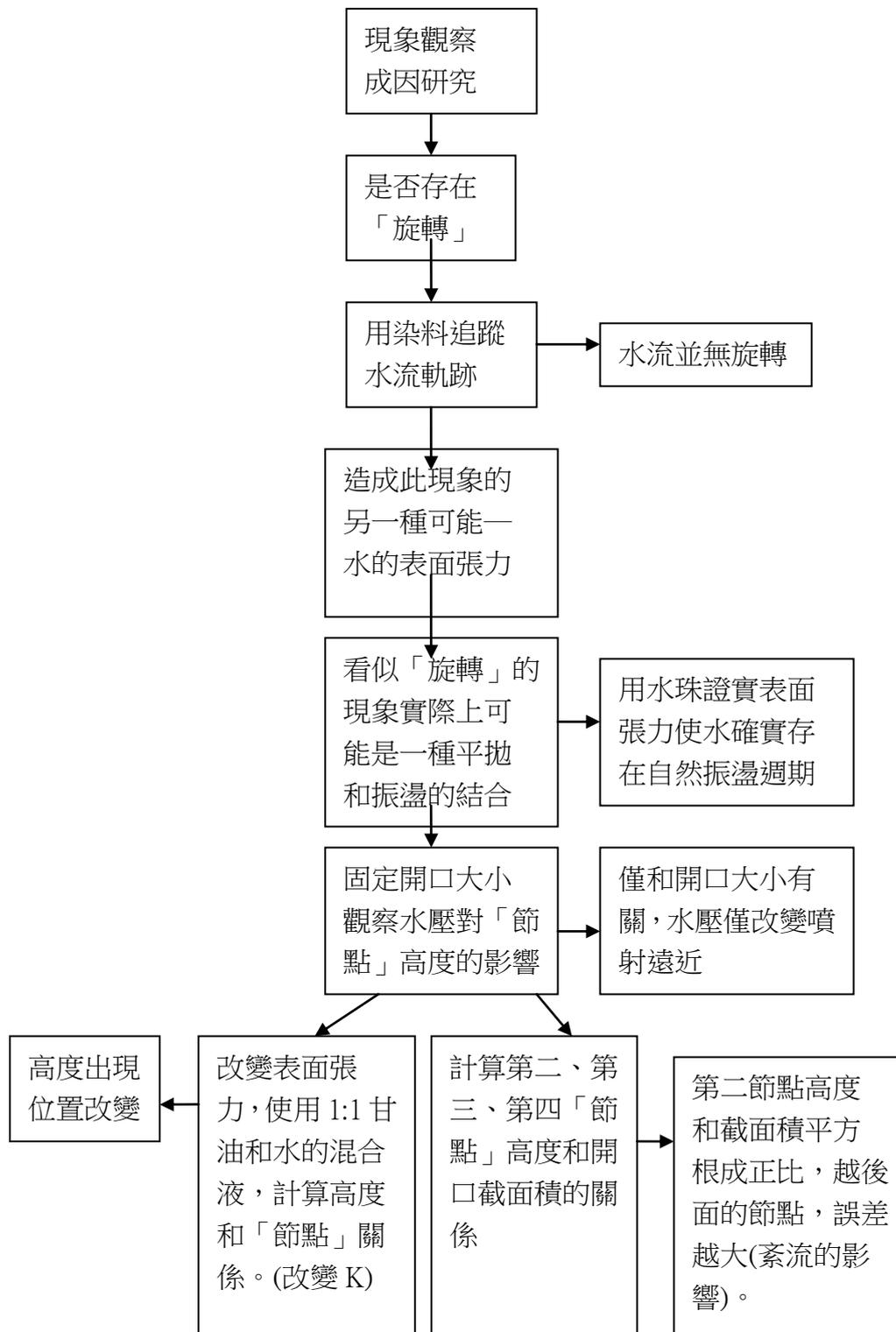
此現象在不同條件下，會有什麼改變呢？

參、研究設備及器材

- | | |
|--|------|
| 一.訂製的壓克力製的水缸(30 cm×30 cm×45 cm)，上有 5 cm×5 cm的開口----- | 1 個 |
| 二.自製的墊板，有不同大小的開口 ----- | 10 個 |
| 三.高速攝影機（1000 萬畫素以上）----- | 1 台 |
| 四.普通相機----- | 1 台 |
| 五.水缸----- | 1 個 |
| 六.壓克力顏料----- | 多種 |
| 七.針頭----- | 3 支 |
| 八.甘油----- | 一桶 |

肆、研究過程或方法

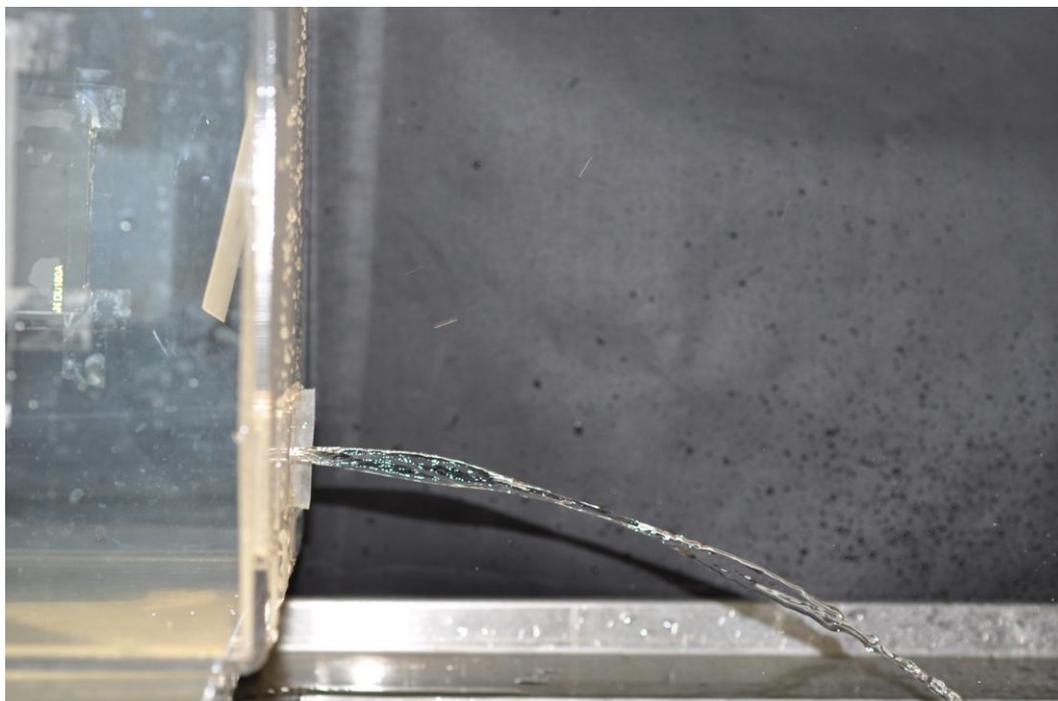
一、實驗流程



二、實驗

(一)實驗一、大略現象觀察

在水流噴出時出現類旋轉現象，在兩個水波之間，有一個交點，我們也發現，水波面彼此並不平行，一個水波面和下一個二個水波面垂直。



(二)實驗二、水噴出的軌跡研究—測定水流的流向

我們決定重新觀察此現象的發生及水流的組成，以深刻了解組成結構。

裝置：1.壓克力水箱

2.針頭（內有紅色顏料）

測定方式：(1)當水流波面為水平面時，我們分別在左、中、右，用針頭注入壓克力顏料，測定水流方向。

(2)當水流波面為垂直面時，我們分別在上、中、下，用針頭注入壓克力顏料，測定水流方向。

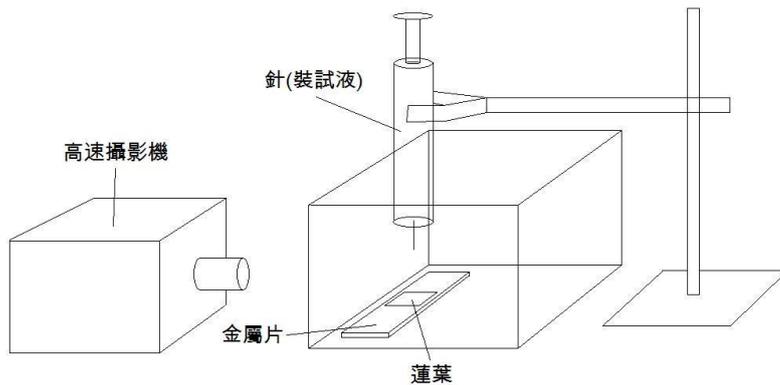
(三)實驗三、節點高度的觀察

裝置：1.壓克力水缸(30 cm×30 cm×45 cm) 2.相機 3.尺

用壓克力製的水缸，側邊打上開口，接著拍攝在不同水位高度(水壓)之下，噴出後出現的點(聚縮處)和開口的鉛直距離，在用自由落體公式，來回推此「點」出現的時間。

(四)實驗四、水的自然振盪週期

裝置：(見附圖)



測定方式：

用高速攝影機拍攝水珠落下時，其因為受到表面張力而產生的自然振盪情形。

(五)實驗五、水自長方形截面噴出時的振盪情形

實驗裝置：1.壓克力水缸

2.相機

3.墊板

實驗方法：在水缸中，距開口上端 22.5 cm 處畫一個刻度。此時，分別將 0.1 cm×1 cm、0.2 cm×1 cm、0.3 cm×1 cm、0.4 cm×1 cm、0.5 cm×1 cm 開口的墊板套在 5 cm×5 cm 大開口上，再讓水從滿水位開始下降。水位到達刻度時，瞬間拍下振盪情形，之後再分析噴出情況(包括變因間的探討)。

(六)實驗六、1：1 水和甘油溶液自長方形截面噴出時的振盪情形

實驗裝置：1.壓克力水缸

2.相機

3.墊板

實驗方法：在水缸中，距開口上端 22.5 cm 處畫一個刻度。此時，分別將 0.1 cm×1 cm、0.2 cm×1 cm、0.3 cm×1 cm、0.4 cm×1 cm、0.5 cm×1 cm 開口的墊板套在 5 cm×5 cm 大開口上，再讓混合液從滿水位開始下降。混合液到達刻度時，瞬間拍下振盪情形，之後再分析噴出情況(包括變因間的探討)。

伍、實驗結果

一、實驗一結果：

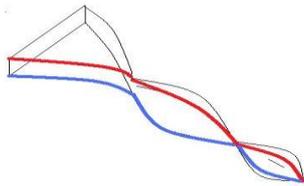
當我們觀察水自開口噴出時，我們可以觀察到有幾個類似「聚縮」的地方。在這個聚縮之處的前後，水「噴出的面」彼此垂直。在越後面出現之「聚縮的點」，越不容易觀察。(見下圖)我們要確認是否為轉動尚須作進一步實驗(實驗二)。



二、實驗二結果：

當我們一次把顏料打入水流的上、下層的時候，我們有了很意外的發現。

- (1) 水在從開口噴出之後，就朝著「聚縮點」處流去，而不是作一個類似水平拋射的運動。
- (2) 無論是在噴出口水流的上層還是下層注入顏料，只要是在左側注入的顏料，就一直在左側流動，右側亦是。也就是說，水並沒有「轉」到另一邊去。因此，我們發現，「轉動」並不存在此現象中。

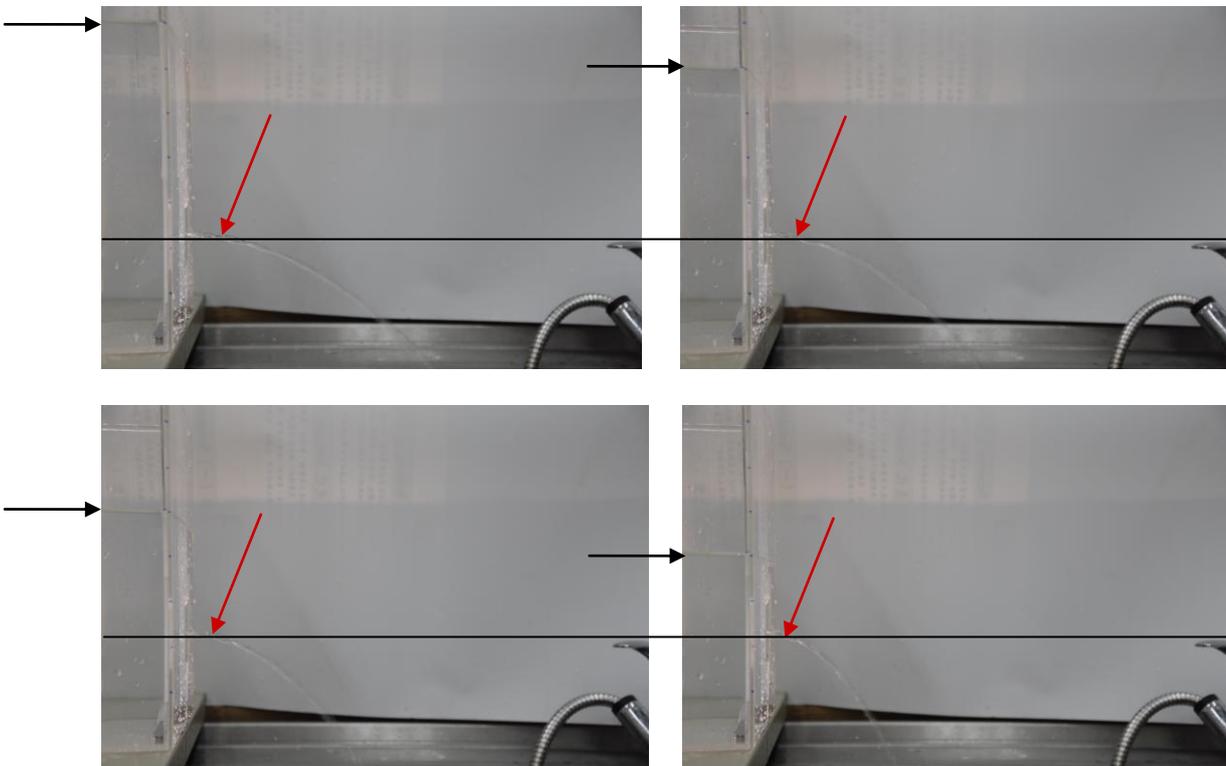


三、實驗三結果：

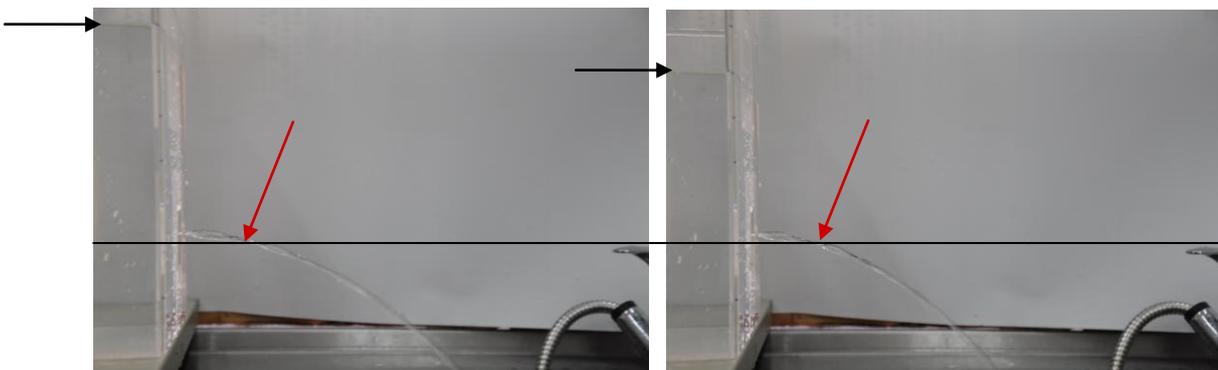
我們觀察了開口為 $0.1\text{cm}\times 1\text{cm}$ 、 $0.1\text{cm}\times 2\text{cm}$ 、 $0.1\text{cm}\times 3\text{cm}$ 、 $0.1\text{cm}\times 4\text{cm}$ 、 $0.1\text{cm}\times 5\text{cm}$ 等五種不同開口下，水流噴出的情形。我們觀察這些不同開口在水位高 4.5 cm 、 7.5 cm 、 10.5 cm 及 13.5 cm 情況下，「聚縮點」出現的高度

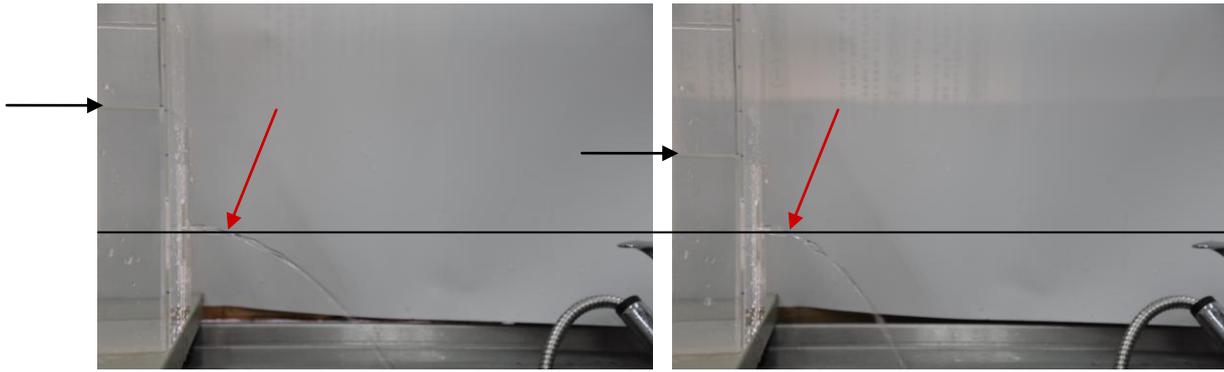
在分析了這些「聚縮點」出現的鉛直高度之後，我們又找到了驚人的結果—隨著水壓漸漸下降，水流噴出的射程也漸漸減少，但是，「聚縮點」的和噴出口之間的鉛直高度並未隨之下降，反而和一開始噴出的時候高度相當。換言之，「聚縮點」出現的時間並不會受到水壓的影響。

開口為 $0.1\text{cm}\times 1\text{cm}$ 時：（黑色箭頭代表水位高度；紅色箭頭代表聚縮點位置；黑線代表聚縮點高度）

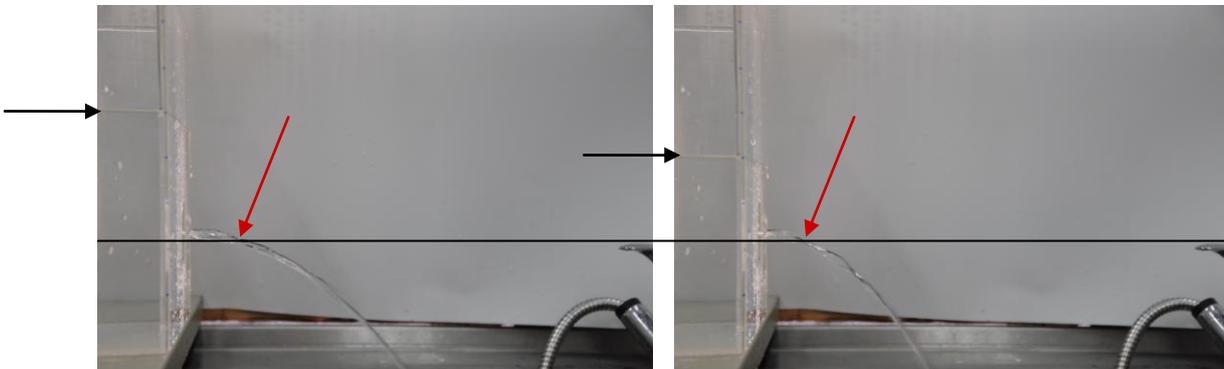
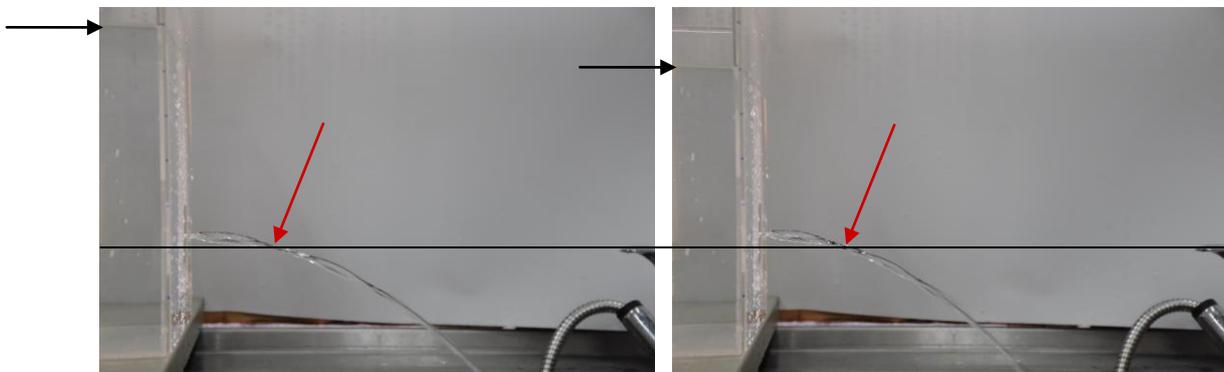


開口為 $0.1\text{cm}\times 2\text{cm}$ 時：（黑色箭頭代表水位高度；紅色箭頭代表聚縮點位置；黑線代表聚縮點高度）

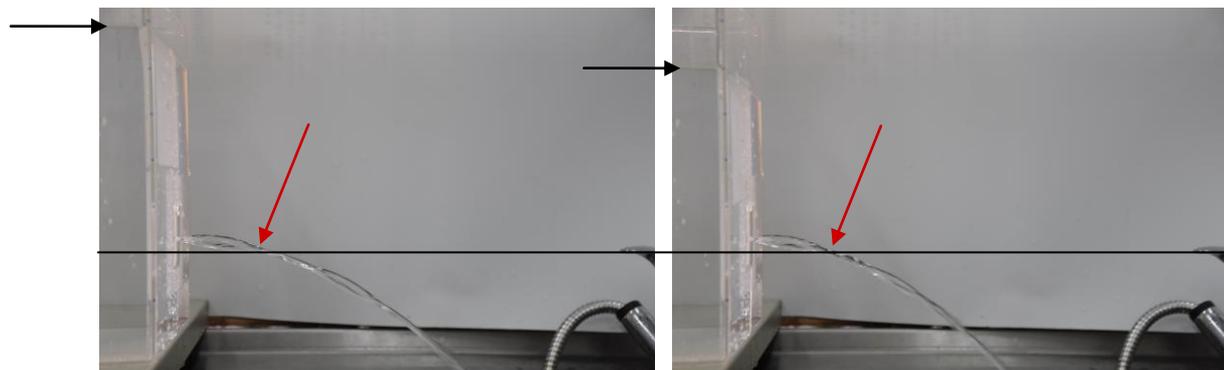


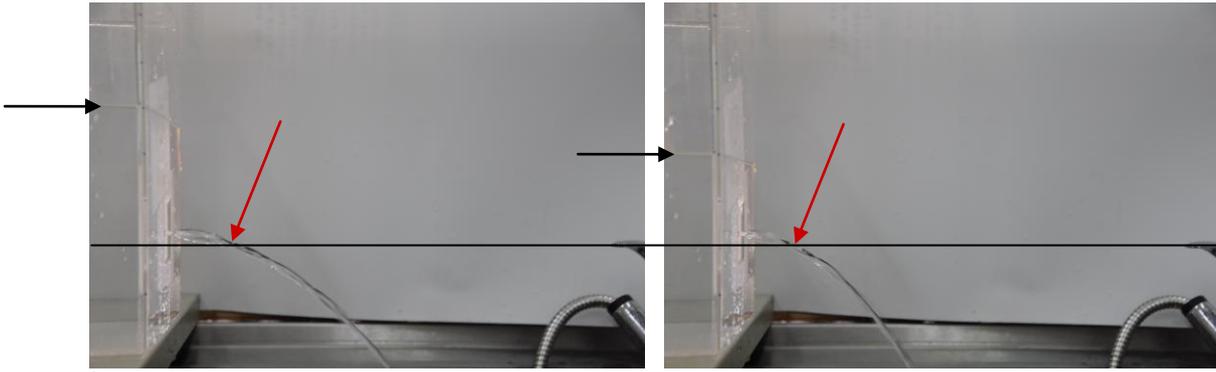


開口為 0.1cm×3cm 時：(黑色箭頭代表水位高度；紅色箭頭代表聚縮點位置；黑線代表聚縮點高度)

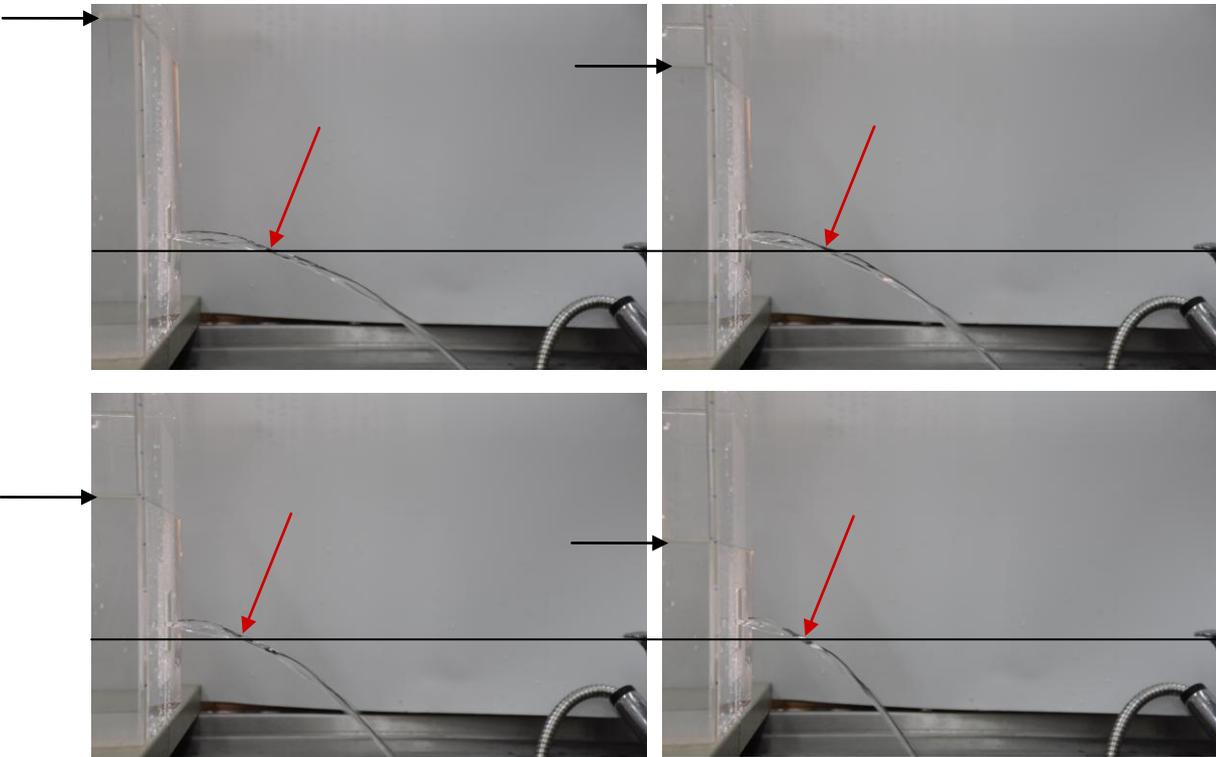


開口為 0.1cm×4cm 時：(黑色箭頭代表水位高度；紅色箭頭代表聚縮點位置；黑線代表聚縮點高度)





開口為 0.1cm×5cm 時：(黑色箭頭代表水位高度；紅色箭頭代表聚縮點位置；黑線代表聚縮點高度)



我們量測在不同開口、不同水位下，節點產生的高度：

水位高度 開口大小	距開口 4.5cm	距開口 7.5cm	距開口 10.5cm	距開口 13.5cm
0.1cm×1cm	0.28cm	0.29cm	0.29cm	0.28cm
0.1cm×2cm	0.43cm	0.44cm	0.43cm	0.47cm
0.1cm×3cm	0.65cm	0.68cm	0.65cm	0.68cm
0.1cm×4cm	0.90cm	0.91cm	0.92cm	0.91cm
0.1cm×5cm	1.10cm	1.14cm	1.05cm	1.03cm

由本實驗可知，我們量測到節點產生的時間和水壓無關。

四、實驗四結果：



這是我們用高速攝影機拍攝下來的水珠振盪情形。



最低點(橫線處)

最高點(比橫線處高)

回到最低點(橫線處)

我們以影格數量測水自然振盪一次所需時間，獲得以下結果（一個影格為 0.001 秒）：

次數	影格數	週期(秒)
第 1 次	18	0.018
第 2 次	18	0.018
第 3 次	18	0.018
第 4 次	18	0.018
第 5 次	17	0.017
第 6 次	19	0.019
第 7 次	18	0.018
第 8 次	18	0.018
第 9 次	19	0.019
第 10 次	18	0.018
第 11 次	18	0.018
第 12 次	17	0.017
第 13 次	17	0.017
第 14 次	18	0.018
第 15 次	18	0.018
第 16 次	18	0.018
第 17 次	19	0.019

第 18 次	18	0.018
第 18 次	18	0.018
第 20 次	18	0.018
平均		0.018

我們測得當水珠為 $5.65 \times 10^{-3} \text{cm}^3$ (5.65×10^{-3} 公克) 時，水珠的自然振盪週期為 0.018 秒。

從參考文獻上，我們得知，這個振盪週期和表面張力有以下的關係：

$$T = \left(\frac{\pi^2 \rho_w a_0^3}{2\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \sigma \text{ 表面張力 } \rho_w \text{ 水的密度 } a_0 \text{ 水珠半徑}$$

由這個實驗可知，水確實存在自然振盪週期，而造成此週期的恢復力只有水自身的表面張力。對照實驗三的結果，我們幾乎可以確定，這是一個由表面張力所造成、具有週期性的收縮振盪。當水自開口噴出的時候，它會因為自身的表面張力而設法降低表面積，於是，水就開始收縮。然而，水在噴出方向的水平動量無法被抵銷，於是在「聚縮點」處形成一個類似節(之後改稱為「節點」)的形狀。

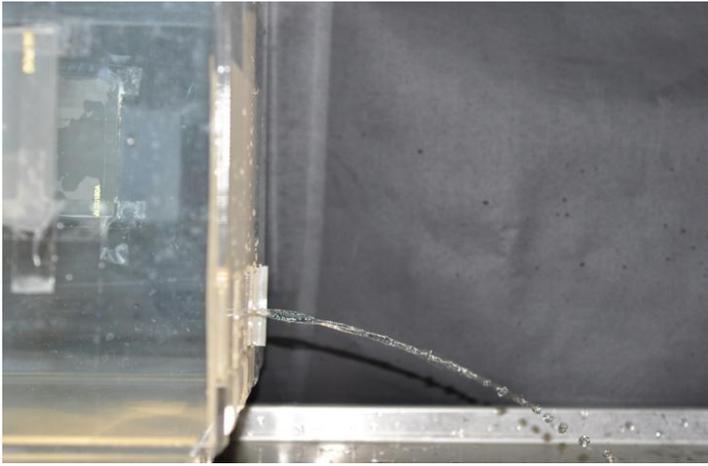
五、實驗五結果：

1. 由於我們得知整個現象成因是因為表面張力造成水流的收縮，因此我們進一步想要分析節點形成的時間受到哪些因素影響。由於振盪週期受到 M(質量)和 K(本性、溫度……)的影響，而由於我們在相同環境之下，都以水作為研究對象，因此，我們暫時不考慮改變 K。至於 M 的部分，我們也可藉由控制水噴出的開口面積，在固定水壓下，計算其「面質量」的比例以及其時間之間的關係。

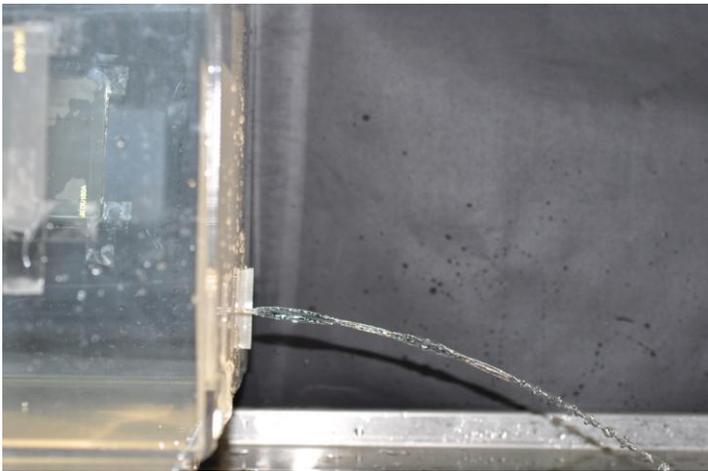
我們做了多次實驗，結果如下：

2. 水自截面開口噴出的情形：

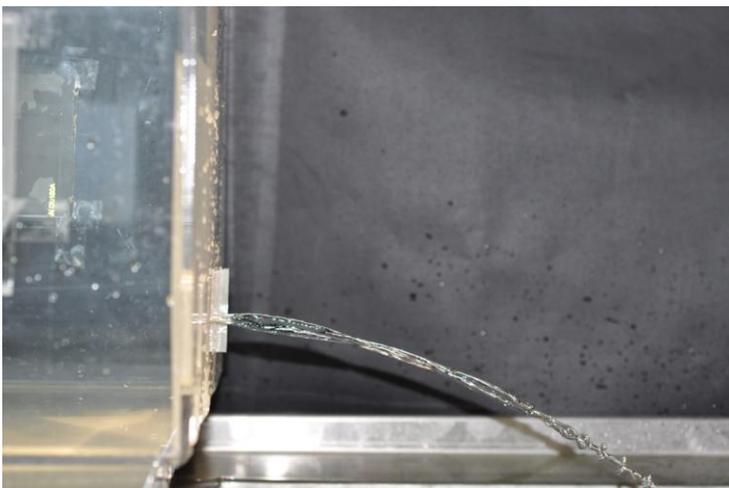
0.1 cm^2 的截面



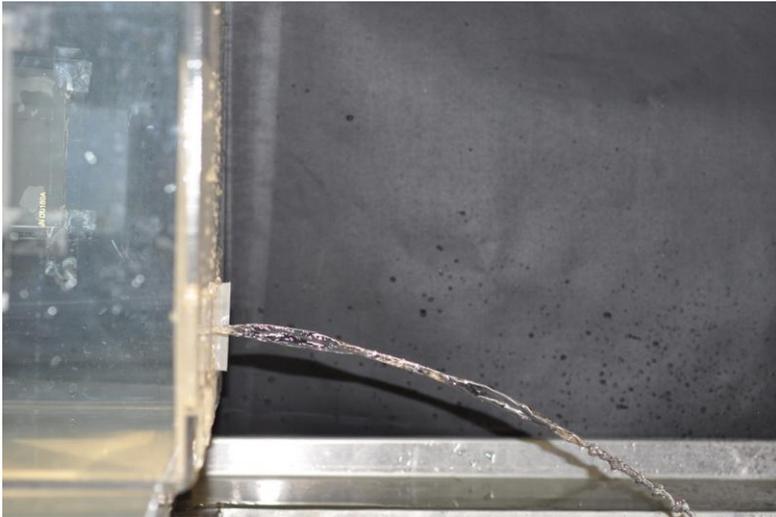
0.2 cm²的截面



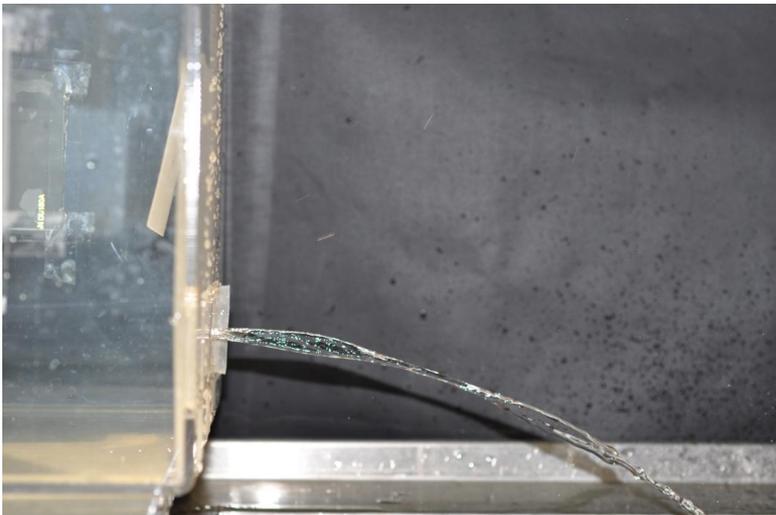
0.3 cm²的截面



0.4 cm²的截面



0.5 cm²的截面



3. 實驗數據

第一次實驗：

	0.10 cm× 1.00 cm	0.20 cm× 1.00 cm	0.30 cm× 1.00 cm	0.40 cm× 1.00 cm	0.50 cm× 1.00 cm
節點 1 高度	距噴水口太近，以致於無法測量				
節點 2 高度	0.32 cm	0.62 cm	0.97 cm	1.36 cm	1.70 cm
節點 3 高度	0.54 cm	1.47 cm	2.78 cm	3.13 cm	4.55 cm
節點 4 高度	0.99 cm	3.00 cm	5.66 cm	6.17 cm	8.91 cm

第二次實驗：

	0.10 cm× 1.00 cm	0.20 cm× 1.00 cm	0.30 cm× 1.00 cm	0.40 cm× 1.00 cm	0.50 cm× 1.00 cm
--	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------

節點 1 高度	距噴水口太近，以致於無法測量				
節點 2 高度	0.35 cm	0.63 cm	0.93 cm	1.30 cm	1.58 cm
節點 3 高度	0.54 cm	1.52 cm	2.83 cm	3.15 cm	4.52 cm
節點 4 高度	0.97 cm	2.93 cm	5.06 cm	5.97 cm	8.51 cm

第三次實驗：

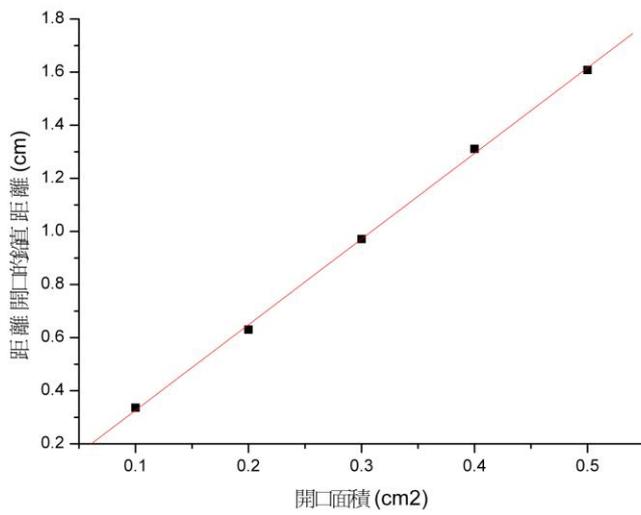
	0.10 cm× 1.00 cm	0.20 cm× 1.00 cm	0.30 cm× 1.00 cm	0.40 cm× 1.00 cm	0.50 cm× 1.00 cm
節點 1 高度	距噴水口太近，以致於無法測量				
節點 2 高度	0.34 cm	0.63 cm	1.01 cm	1.27 cm	1.54 cm
節點 3 高度	0.56 cm	1.41 cm	2.64 cm	3.19 cm	4.26 cm
節點 4 高度	0.99 cm	2.98 cm	5.19 cm	5.97 cm	8.49 cm

平均數據：

	0.10 cm× 1.00 cm	0.20 cm× 1.00 cm	0.30 cm× 1.00 cm	0.40 cm× 1.00 cm	0.50 cm× 1.00 cm
節點 1 高度	距噴水口太近，以致於無法測量				
節點 2 高度	0.34 cm	0.63 cm	0.97 cm	1.31 cm	1.61 cm
節點 3 高度	0.55 cm	1.47 cm	2.64 cm	3.19 cm	4.44 cm
節點 4 高度	0.98 cm	2.97 cm	5.06 cm	5.94 cm	8.64 cm

4.開口面積(面質量)對鉛直高度作圖(線性回歸)

(1)第二節點距離開口高度和開口大小的關係(作線性迴歸)

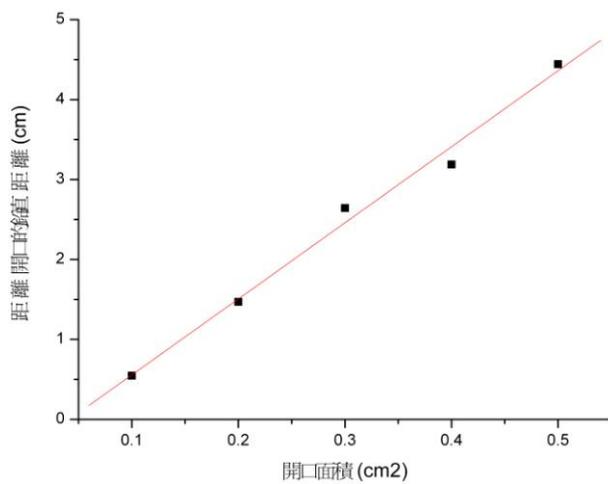


開口面積和鉛直高度關係式：

$$Y = -0.0045 + 3.266 X$$

誤差：截距：0.02198；X 係數：0.08026

(2)第三節點距開口高度和開口大小的關係

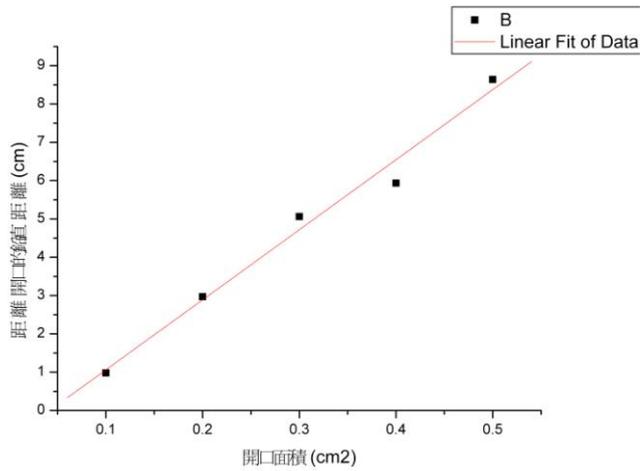


開口面積和鉛直高度關係式：

$$Y = -0.395 + 9.512 X$$

誤差：截距：0.18295； X 係數：0.5516

(3)第四節點距開口高度和開口大小的關係



開口面積和鉛直高度關係式：

$$Y = -0.7669 + 18.281X$$

誤差：截距：0.4587； X 係數：1.38304

5.換算成時間：用水平拋射公式近似：

$$\text{高度 (h)} = 1/2 \times \text{重力加速度 (g)} \times \text{時間 (t)}^2$$

$$\text{所以時間 (t)} = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

噴出速度 $v = \sqrt{2gh} = 210 \text{ cm/s}$ ($h = 22.5 \text{ cm}$) 為一定值。(Torricelli 定理)

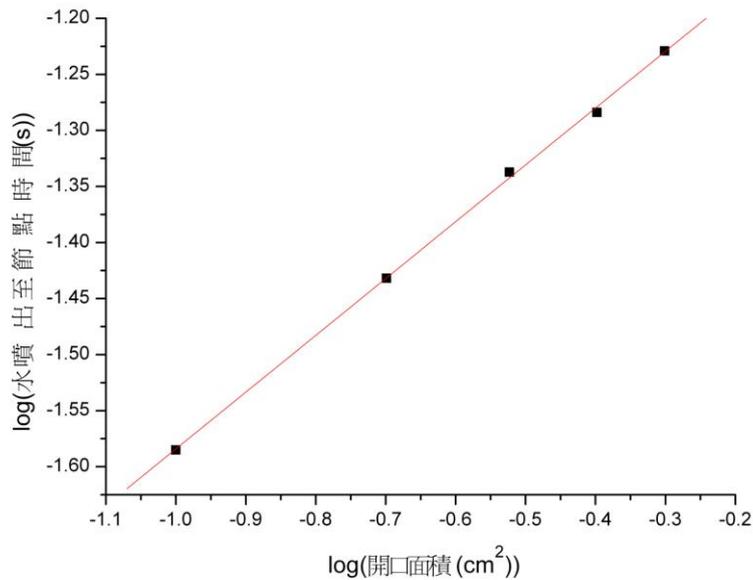
	0.10 cm× 1.00 cm	0.20 cm× 1.00 cm	0.30 cm× 1.00 cm	0.40 cm× 1.00 cm	0.50 cm× 1.00 cm
節點 1 時間	略	略	略	略	略
節點 2 時間	0.026s	0.037s	0.046s	0.052s	0.059s

節點 3 時間	0.033s	0.055s	0.073s	0.081s	0.095s
節點 4 時間	0.043s	0.080s	0.105s	0.124s	0.135s

開口面積(面質量)對時間做圖

作圖：令 $\text{Log}(\text{水噴出至截點時間})=Y$ ， $\text{Log}(\text{開口面積})=X$

(1)水流由噴出口至**第二節點**所經時間對開口面積作對數作圖(求和截面積的幾次方成正比)

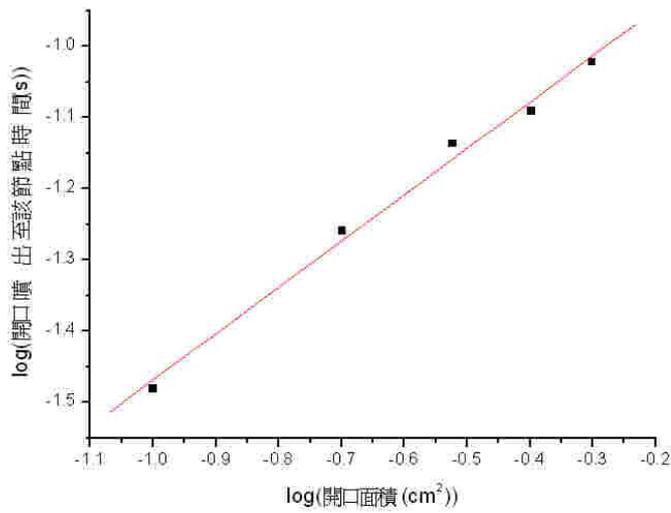


$$y = -1.0774 + 0.50677x,$$

誤差：截距=0.00479, X 係數=0.00755

→和開口面積的 0.5066(約 0.5 次方)成正比

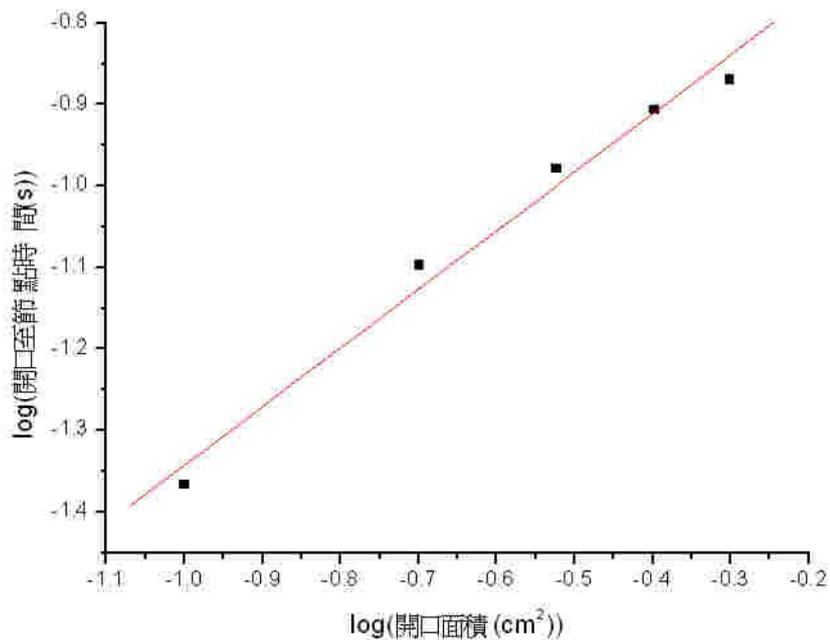
(2)水流由噴出口至**第三節點**所經時間對噴出時間(T)對數作圖(求和截面積的幾次方成正比)



$$Y = -0.81814 + 0.65081 X,$$

誤差：截距：0.02185，X 係數：0.03445

(3)水流由噴出口至第四節點所經時間對噴出時間(T)對數作圖(求和截面積的幾次方成正比)



$$Y = -0.62357 + 0.7192X,$$

誤差：截距：0.03476，X 係數：0.05481

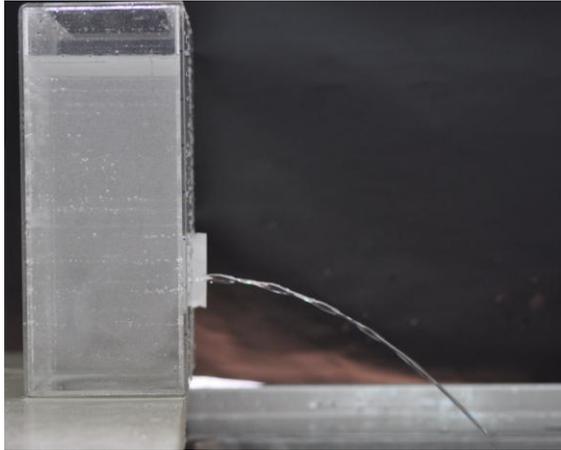
六、實驗六結果：

1.由於我們得知整個現象成因是因為表面張力造成水流的收縮，因此我們進一步

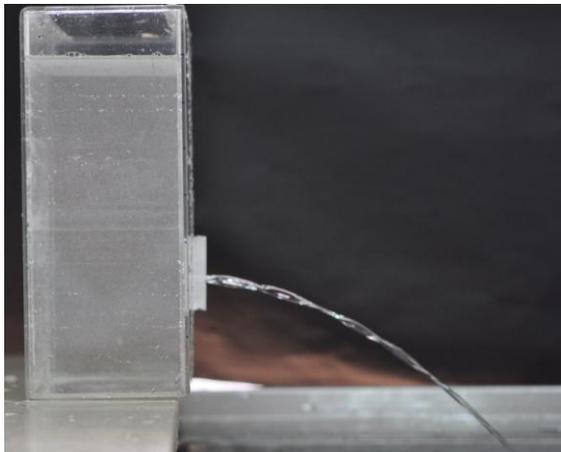
想要分析節點形成的時間受到哪些因素影響。由於振盪週期受到 M (質量)和 K (本性、溫度……)的影響，這一次我們改變 K 。我們用 50% 甘油和水之混合液，重複實驗五。只是，由於 $0.50\text{ cm}\times 1.00\text{ cm}$ 噴射軌跡過長，因此我們先就 $0.10\text{ cm}\times 1.00\text{ cm}$ 、 $0.20\text{ cm}\times 1.00\text{ cm}$ 、 $0.30\text{ cm}\times 1.00\text{ cm}$ 和 $0.40\text{ cm}\times 1.00\text{ cm}$ 之開口作討論。

2. 混合液自開口噴出情形：

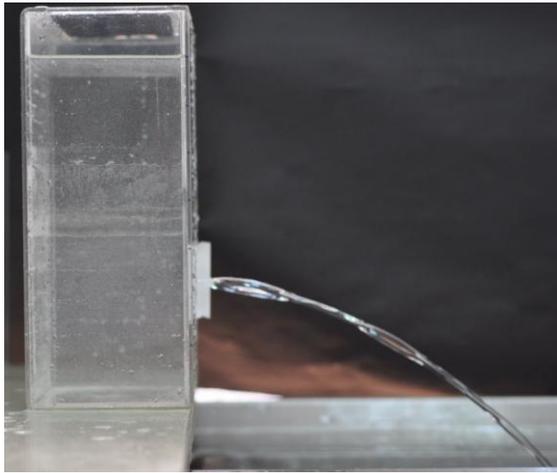
1. $0.10\text{ cm}\times 1.00\text{ cm}$



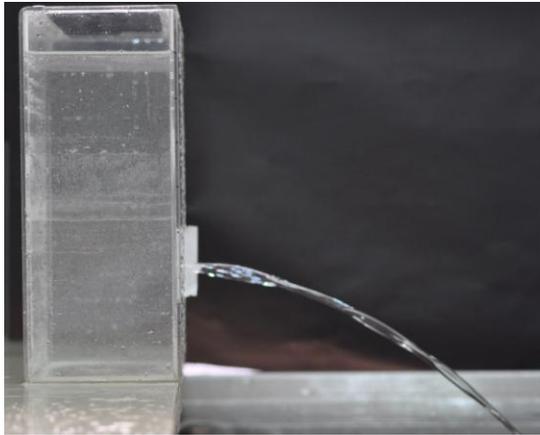
2. $0.20\text{ cm}\times 1.00\text{ cm}$



$0.30\text{ cm}\times 1.00\text{ cm}$



0.40 cm×1.00 cm

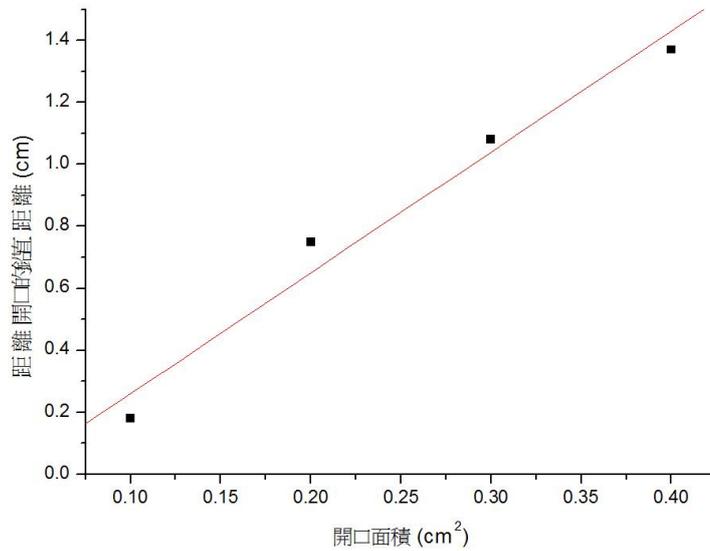


3. 實驗數據

開口面積	0.10 cm×1.00 cm	0.20 cm×1.00 cm	0.30 cm×1.00 cm	0.40 cm×1.00 cm
節點高度				
節點 1 高度	距噴口太近，以致於無法測量			
節點 2 高度	0.18 cm	0.75 cm	1.08 cm	1.37 cm
節點 3 高度	0.48 cm	1.39 cm	2.49 cm	3.16 cm
節點 4 高度	1.00 cm	2.59 cm	4.81 cm	5.80 cm

4. 開口面積(面質量)對鉛直高度作圖(線性回歸)

(1)第二節點距離開口高度和開口大小的關係(作線性迴歸)

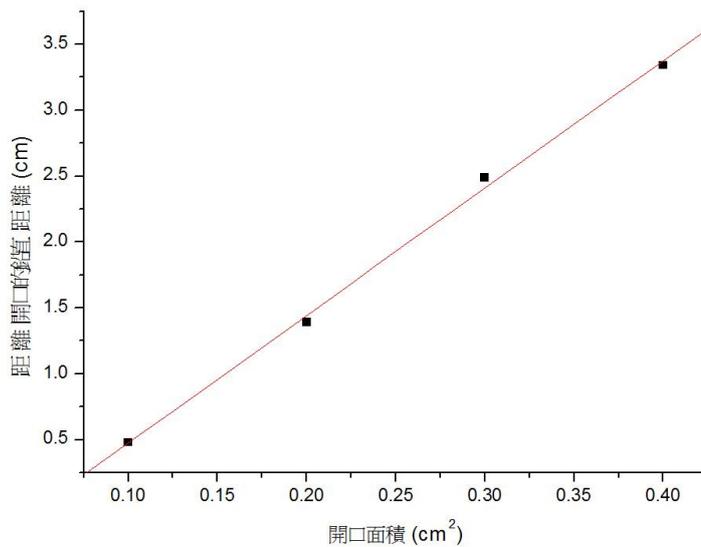


開口面積和鉛直高度關係式：(Y：距離開口的鉛直距離；X：開口面積)

$$Y = -0.405 + 9.14X$$

誤差：截距：0.159；X 係數：0.580

(2)第三節點距離開口高度和開口大小的關係(作線性迴歸)

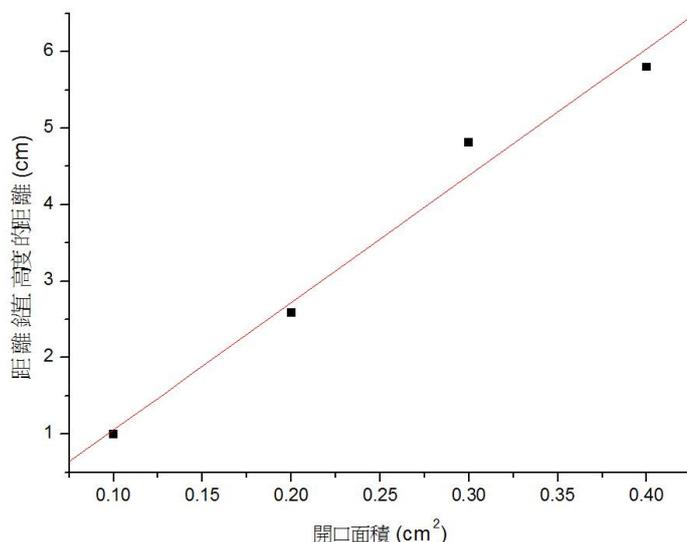


開口面積和鉛直高度關係式：(Y：距離開口的鉛直距離；X：開口面積)

$$Y = -0.495 + 9.68X$$

誤差：截距：0.089；X 係數：0.325

(3)第四節點距離開口高度和開口大小的關係(作線性迴歸)



開口面積和鉛直高度關係式：(Y：距離開口的鉛直距離；X：開口面積)

$$Y = -0.605 + 16.62X$$

誤差：截距：0.44；X 係數：1.62

陸、結論

一、我們所觀察到的「節點現象」，實際上是因為水本身的表面張力收縮所造成的。表面張力促使水流由不規則截面聚縮成圓形（最小表面積），而表面張力水流造成的衝量又再度促使水流截面從圓形回到不規則形，形成了週期運動。

二、由於節點現象是由表面張力造成的，所以水位高度、開口面積等和此現象的形成無關，卻會間接影響節點形成距離及時間。

三、 $T(\text{振盪週期}) \propto \sqrt{\frac{A}{S}}$ (A：開口面積；S：表面張力)。

由實驗五，我可以推出一個公式： $T(\text{振盪週期}) = k\sqrt{\frac{A}{S}}$ (K：校正常數，S：

表面張力，A：開口面積)。倘若我們用表面張力對週期的公式($T \propto \sqrt{\frac{M}{S}}$ 對照，開口面積相當於控制面質量，則相當符合。因此，我們可以認定這是一個由表面張力造成的週期性振盪。

至第二節點前，振盪週期和截面的面積的 0.5 次方成正比，相當吻合。但到第三節點、第四節點時，因受紊流干擾，造成水流不穩定，而有誤差，振盪週期分別和截面面積的 0.6 次方、0.7 次方成正比。

四、表面張力會影響振盪產生的週期。在實驗六當中，我們發現「節點」出現的高度確實會有變化，也就是說此振盪產生的週期會隨著恢復力(表面張力)改變而改變。

柒、討論

一、流體的性質

除了水之外，其他的流體也可以找到類似的現象。在我們的實驗六中，造成會產生節點的原因主要是因為表面張力。當我們改變流體的同時，我們必須考慮到流體的黏滯性。實驗六只單單就 50% 甘油作探討，而我們也希望可透過改變不同的濃度或使用其他種類的流體，找到一個可以將表面張力、開口面積(面質量)以及振盪週期一起結合公式。

二、截面

實驗中，我們只設計水平長方形的開口，我們推估，若使用其他開口，如直立長方形、三角形、梯形等，均會造成類似現象，在後續的實驗中，我們希望能深入的探討這些問題。

三、水位高度

水位高度影響水流速度及系統的穩定性，高度愈高，水面的擾動對水流的影響愈小，相對的，高度愈低，影響愈小。但水流速度卻會因壓力差而有所影響，高度高，壓力大，水流速度快，導致節點的位置模糊不清，而高度低時則相反。所以找出節點清楚、系統穩定的高度，也是我們未來的發展方向。

捌、參考資料及其他

- 一、Halliday, David 編 李佳榮譯(民 96) 物理第七版(上)。台北縣：全華圖書股份有限公司出版
- 二、White 著 范德仙編譯(民 95)大專用書流體力學。台北縣：全華科技圖書股份有限公司

- 三、 Fox/McDonald 著 鄭智中編譯(民 92) 大專用書流體力學導論。台北縣：
全華科技圖書股份有限公司
- 四、台師大物理系物理教學示範實驗教室網站—討論區「奇怪的奶」取自
<http://forum.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=18895>
- 五、余威寬、吳文智(民 91)。第五期《中二中學報》 〈水為什麼不再流〉
- 六、Pruppacher, H. R., and Pitter, R. L.,1971: J. Atmos. Sci., 28, 86

【評語】 040102

本作品主要探討日常生活中在倒水時，可觀察到水不平穩的流出，並出現了旋轉的現象，探討主題有趣，並嘗試了解與理論推導結果的異合之處，本作品應屬佳作。