

中華民國第 57 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 物理科

第三名

030101

石落水出-落體入水空腔激柱現象探討

學校名稱：宜蘭縣立國華國民中學

作者： 國三 邱 萱 國二 黃杏瑜 國二 邱梓敬	指導老師： 邱旻昇 張俊傑
---	-----------------------------

關鍵詞：空腔、水柱、節

摘要

物體落入水中時，中央處會激發水柱，這和水面下形成的空腔密切相關。空腔體積變化愈快，水柱激發速度愈大，高度愈高。由於一般落體入水的狀態難以控制，無法定向鉛直落下，導致觀察結果有限。本研究的裝置透過 3D 列印及滾珠軸承組的設計改善了這個問題，藉由高速攝影並結合自行發展的分析方法，可獲得上、下腔的體積、氣流流出的速度…等重要資訊，擴大觀察的可能，對空腔形成過程的物理機制有更深入的了解。研究發現：落體入水的速度、截面積的大小、外觀的形態、溶液的種類以及周圍的氣壓高低都會使落體入水後空腔的形成有所差異，進而影響氣流流出的速度及激發的水柱高度。此外也發現下腔周圍在腔頸接合前後，會有波動產生明顯的 S 節及 L 節。

壹、研究動機

去年夏天和弟弟在湖岸邊玩投石遊戲，不經意發現，當石頭投入水中時，周圍先激起一圈水花，隨後在水面中央上方隆起了高高的水柱！這個現象不禁讓我們產生好奇心，和老師以及同學分享並查閱了許多報告後，發現到幾乎都是針對水滴落入水面這類的研究，談到的內容也大多集中在周圍水花的噴濺形式。但是，以固體落入水中，並把焦點放在隆起的水柱及其形成機制的探討卻少之又少。於是，我們設計了一連串的實驗，期望能有更進一步的了解。

貳、研究目的

一、觀察落體入水空腔激柱現象的過程並發展相關分析方法

(一)實驗 1：觀察分析落體入水空腔激柱現象的過程並發相關分析方法

二、改變「落體狀態」對空腔激柱現象的影響

(一)實驗 2：改變「落體速度」對空腔激柱現象的影響

(二)實驗 3：改變「落體截面」對空腔激柱現象的影響

(三)實驗 4：改變「落體形體」對空腔激柱現象的影響

(四)實驗 5：改變「落體表面狀態」對空腔激柱現象的影響

三、改變「液體狀態」對空腔激柱現象的影響

(一)實驗 6：改變「液體種類」對空腔激柱現象的影響

(二)實驗 7：改變「油-水分層厚度」對空腔激柱現象的影響

四、改變「環境氣壓」對空腔激柱現象的影響

(一)實驗 8：改變「環境氣壓」對空腔激柱現象的影響

參、研究設備及器材

一、設備、器材

		
高速攝影機 × 2	滾珠軸承組合落體套頭	3D 印表機
		
各式落體(材質為 PLA)	真空抽氣組	LED 補光燈 (含架)
		
水缸	高速鑽孔機	熱熔膠槍
		
游標尺	電磁鐵及電源供應器	氣壓計
		
黑色油畫顏料、快乾、嬰兒油、沙拉油、疏水型撥水劑、乙醇、甘油、洗碗精		

圖 3-1

二、分析軟體

Tracker、Inkscape、Sketchup、123D Design、Cura、Ulead GIF Animator、Excel、Picpick

三、實驗裝置製作流程

起初我們是以自由落體的方式進行衝擊水面實驗，但隨即發現這樣會使落體入水後軌跡不定進而影響水面下的空腔形成及水面上的水柱生成(僅球體除外，但觀察效果仍然不佳)，造成實驗數據無法蒐集，如下圖 3-2。

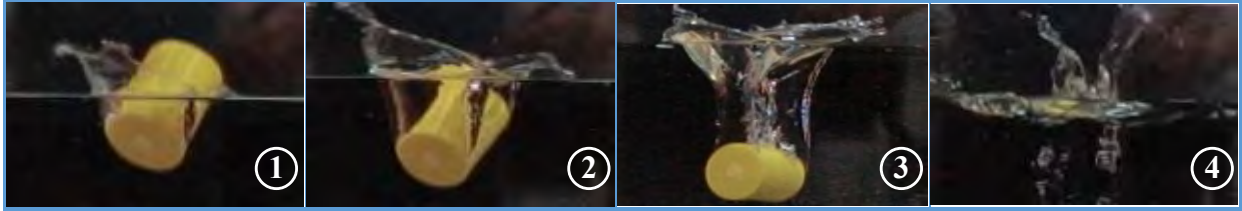


圖 3-2

因此我們花了很長的時間一次又一次的討論、設計、測試、改善、再測試，最後製作出一個能固定落體下降、生成又細又長水柱，可作清晰觀察的實驗裝置 I、II，製作的步驟如下圖 3-3。

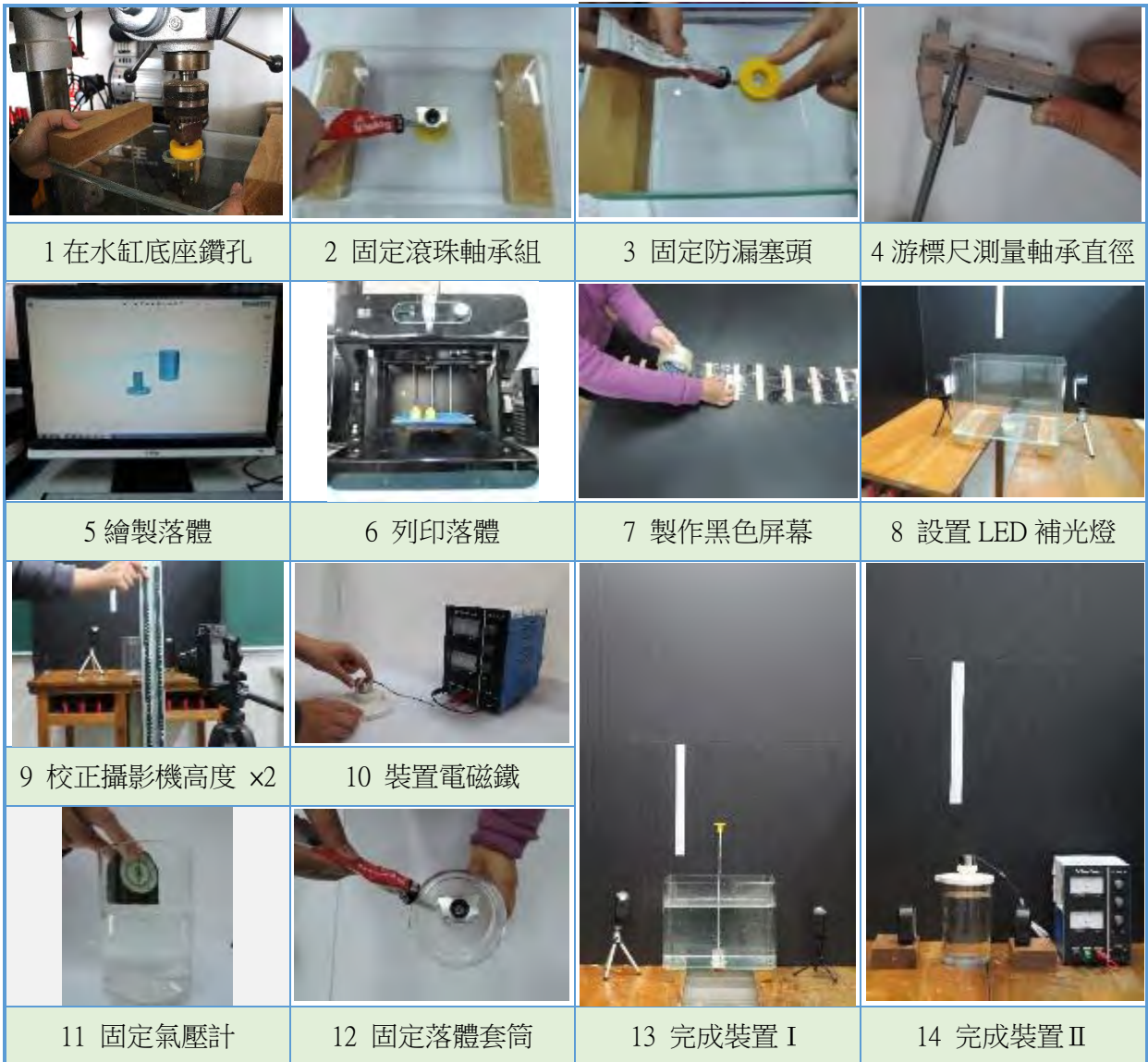


圖 3-3

實驗裝置 I 說明如下圖 3-4，供實驗 1-5 使用，實驗 6-8 因所需液體較為昂貴，以體積較小的塑膠筒代替水缸進行實驗。落體套頭可隨軸承連桿往下降落，衝擊水面以便進行觀察。

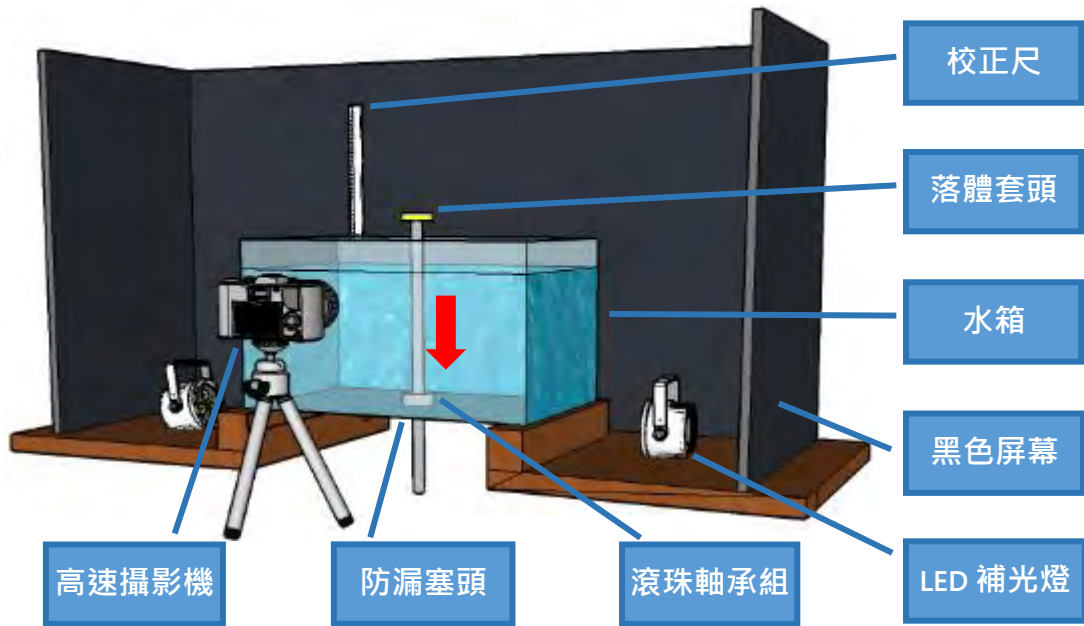


圖 3-4 裝置 I 示意圖

因為在本篇報告第四部份實驗 9 中，會以改變「氣壓」狀態觀察空腔激柱現象，因為需要創造低壓環境，故以抽氣真空罐取代水箱、強力電磁鐵、金屬球落體取代滾珠軸承組的裝置 II 如下圖 3-5 供實驗 9 蒐集數據觀察研究用。

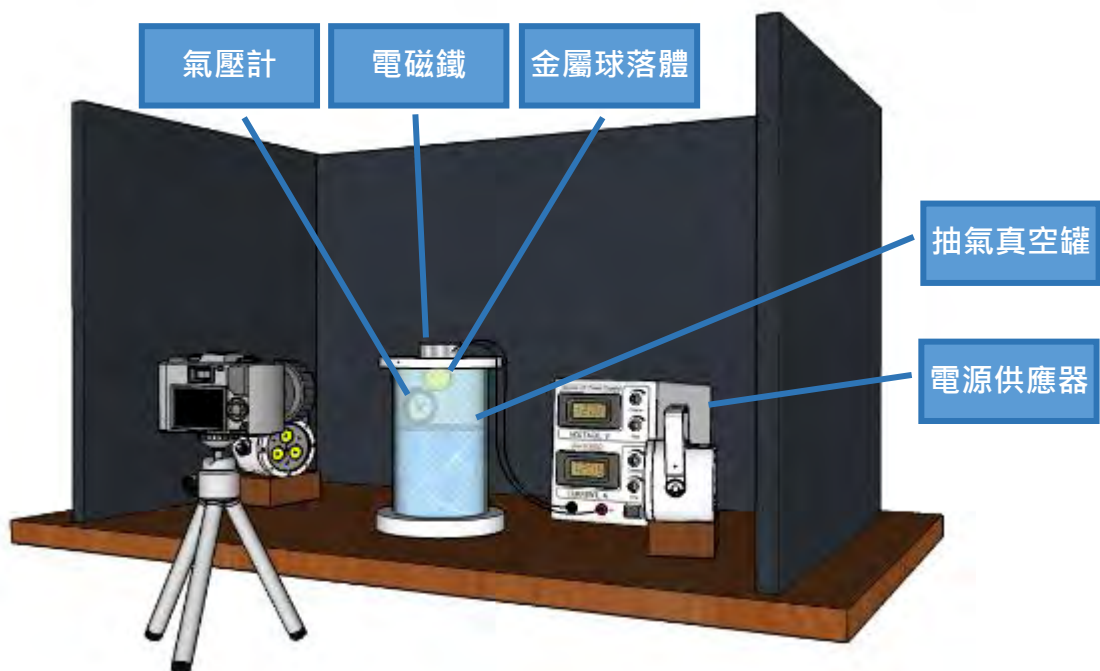


圖 3-5 裝置 II 示意圖

肆、研究過程與方法

一、研究流程與架構

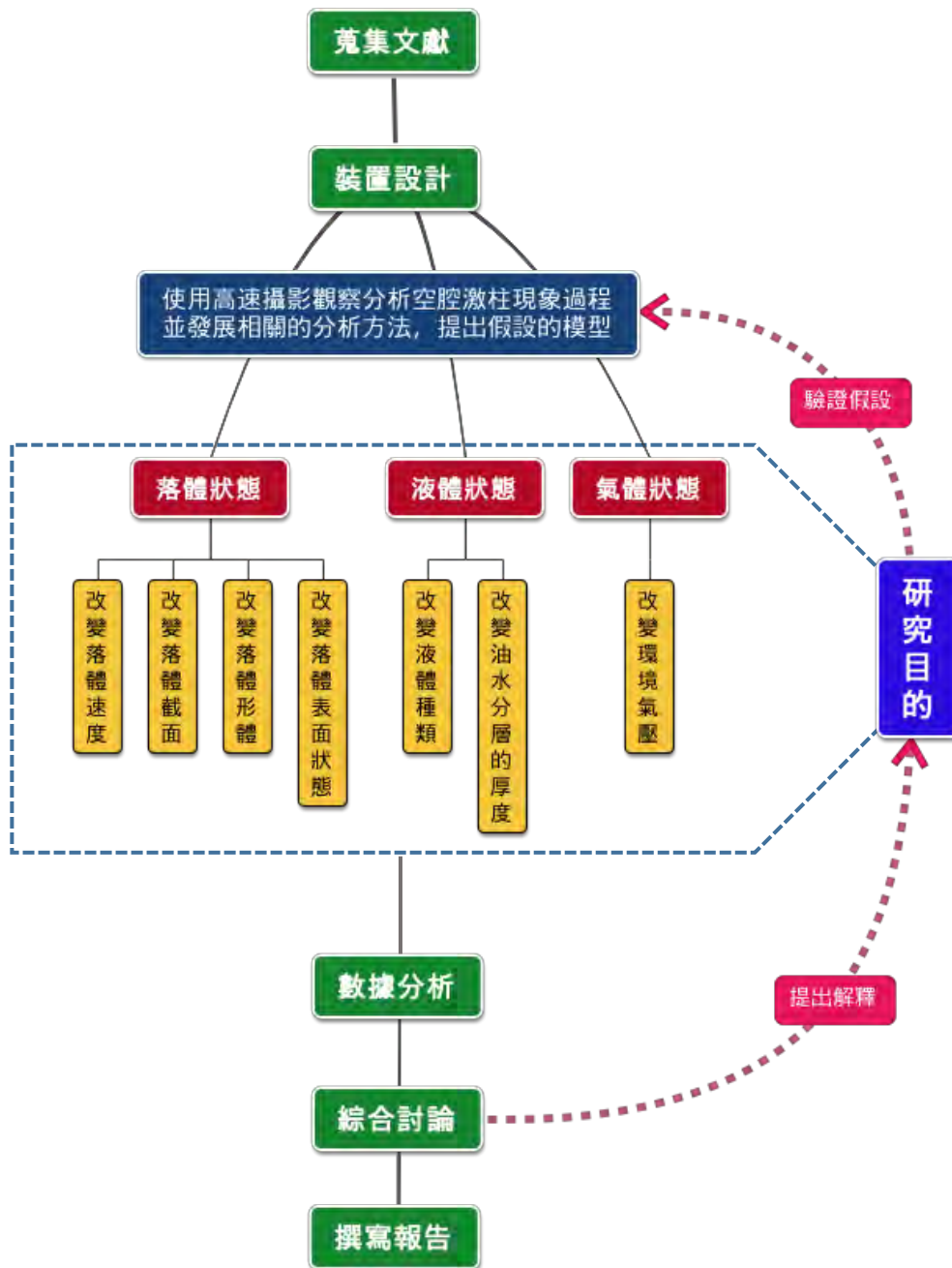


圖 4-1

二、實驗過程

(一)第一部份：觀察分析落體入水空腔激柱現象的過程並發展相關分析方法

- 1.使用 3D 繪圖軟體 123D Design、Cura，設計並列印所需落體(材質為 PLA)如圖 4-2。
- 2.設置好實驗裝置 I 及高速攝影機(共兩臺，一臺對焦於水面下的空腔、一臺對焦於水面上的水柱)。
- 3.將落體 A 套至滾珠軸承上，調整至距水面 3cm 高。
- 4.拍攝落體入水空腔激柱過程，並分析影片。

(二)第二部份：改變「落體狀態」對空腔激柱現象的影響

- 1.使用 3D 繪圖軟體 123D Design、Cura，設計並列印出各式落體如下圖 4-2。
- 2.依照「改變速度」、「改變截面積」、「改變形體」、「改變表面狀態」四部分，將不同的落體套至滾珠軸承上，調整至指定高度，重覆第一部份實驗過程。

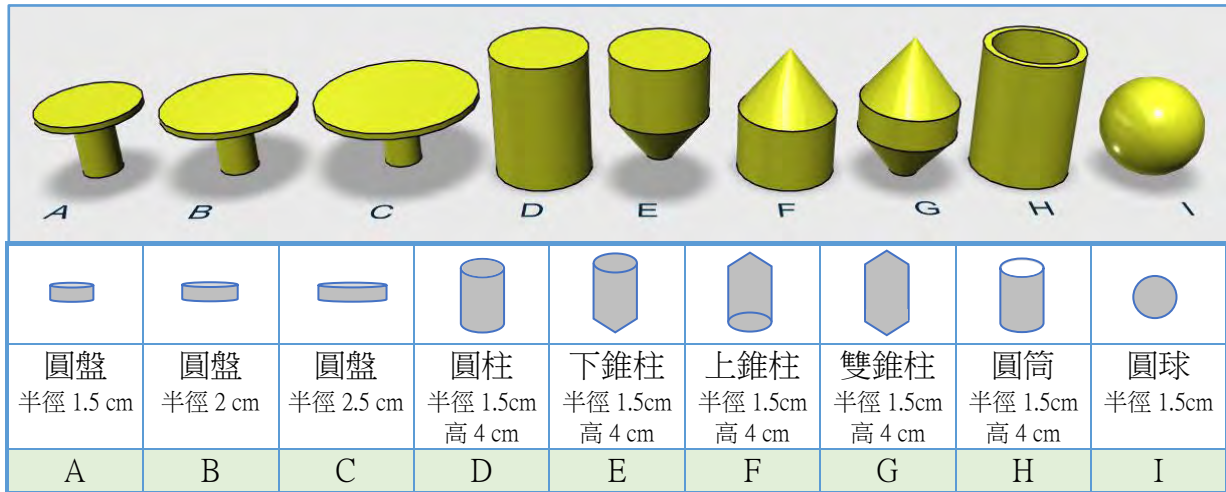


圖 4-2

(三)第三部份：改變「液體狀態」對空腔激柱現象的影響

- 1.依照改變「液體種類」及「油-水分層厚度」重覆第一部份實驗過程。

(四)第四部份：改變「氣壓狀態」對空腔激柱現象的影響

- 1.設置好實驗裝置 II 與高速攝影機。
- 2.將液體及落體裝到實驗裝置內，並使用電磁鐵將金屬球體落體吸至裝置頂部，使用真空抽氣組改變實驗裝置 II 內的氣壓大小(常壓與低壓)。
- 3.拍攝落體入水空腔激柱過程，並分析影片。

三、數據蒐集名詞定義

本研究需要測量的數值類別較多，分別說明如下圖 4-3，以供討論分析使用：

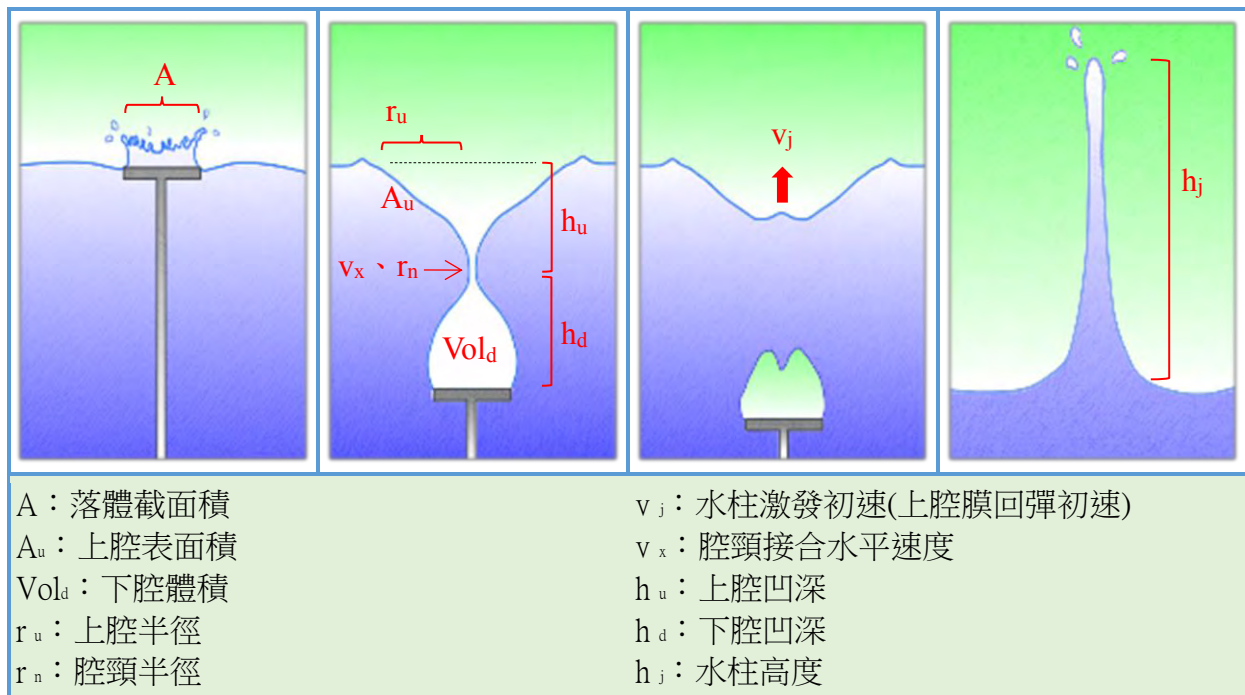


圖 4-3

四、數據蒐集及處理分析的方法(電腦軟體使用介紹)

(一)取得高速影像，並以物理實驗影像分析軟體 Tracker 測量 r_u 、 r_n 、 h_u 、 h_d 、 h_j 、 v_j 、 v_x

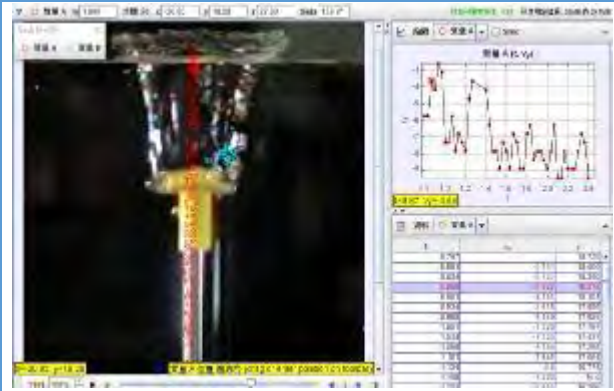
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 為了使拍攝影像更清楚，使用黑幕背景，並利用 LED 補光燈讓影像更清楚。 2. 載入影片並設定正確幀數(480fps)。 3. 點選座標軸，標示直角座標原點。 4. 使用校正桿功能校正畫面長度，再使用測量工具中的量尺即可測量長度。 5. 點選新增質點，按住 Shift 鍵與滑鼠左鍵，手動追蹤標的至追蹤結束。 6. 螢幕右方選取所需物理量，進行分析。
使用軟體 Tracker	說明

圖 4-4

(二)測量液面下空腔體積及表面積

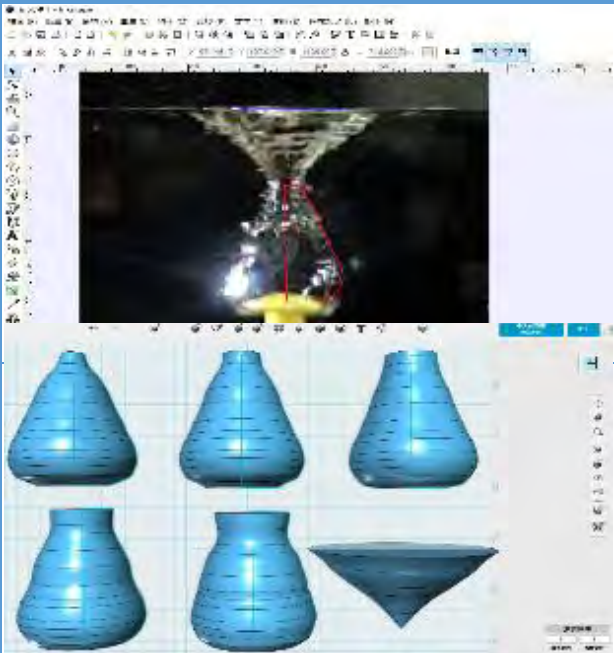
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 將影片中選取好的空腔畫格，以 Picpick 截圖。 2. 使用向量繪圖軟體 Inkscape 貝茲曲線功能描繪截圖中的空腔形狀(如左圖紅線)並將曲線以 svg 形式存檔。 3. 將此 svg 檔匯入至 3D 繪圖軟體 123D Design，將圖檔調整至正確比例尺。 4. 以 revolve(圍繞)功能將曲線同軸圍繞成立體狀，點選 measure(測量)功能即可計算上下腔體的體積及表面積。
使用軟體 Inkscape、123D Design、Picpick	說明

圖 4-5

(三)製作擬真(去背)動畫

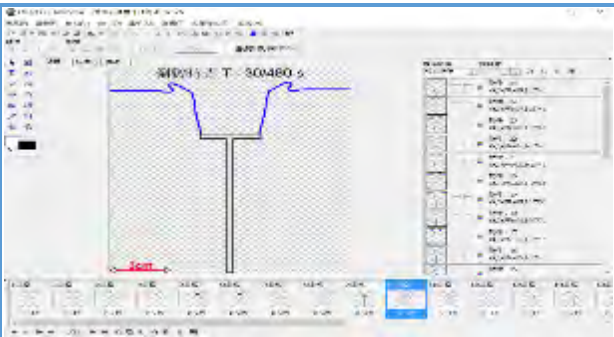
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 將影片中選取好的空腔畫格，以 Picpick 每 2/480 秒截一張圖。 2. 使用 Inkscape 貝茲曲線功能描繪截圖中的空腔形狀並將曲線以 png 形式按倒數時間順序編碼存檔。 3. 將所得圖檔匯入 Ulead GIF Animator，使用動畫精靈，設定寬高及畫格速率，即可完成動畫。
使用軟體 Ulead GIF Animator、Inkscape、Picpick	說明

圖 4-6

伍、研究結果與討論

【第一部份：觀察落體入水空腔激柱現象的過程並發展相關分析方法】

實驗 1：觀察落體入水空腔激柱現象的過程並發展相關分析方法

一、操作步驟

(一)套好 A 落體(圓盤、半徑 1.5cm)，移至距離水面 3cm 高。

(二)拍攝落體入水空腔激柱過程，並分析影片。

二、實驗結果

依時間序擷取重要階段畫面如下圖 5-1-1，完整過程請見

影片 1 <https://goo.gl/bDC6Mu>、影片 2 <https://goo.gl/ogZh8g> 及

影片 3 <https://goo.gl/DhcNeM> 或掃描 QR-Code 觀看。



影片 1

影片 2

影片 3

註：報告中的影片經歷時間皆很短暫，建議手控格放(錄製格式為 480fps)，可作更精確觀察。



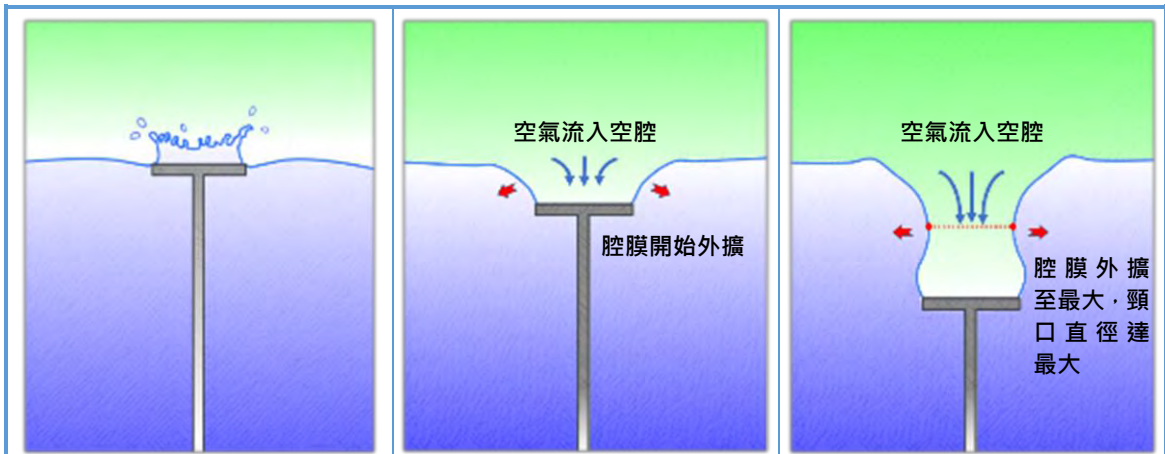
圖 5-1-1

三、分析討論

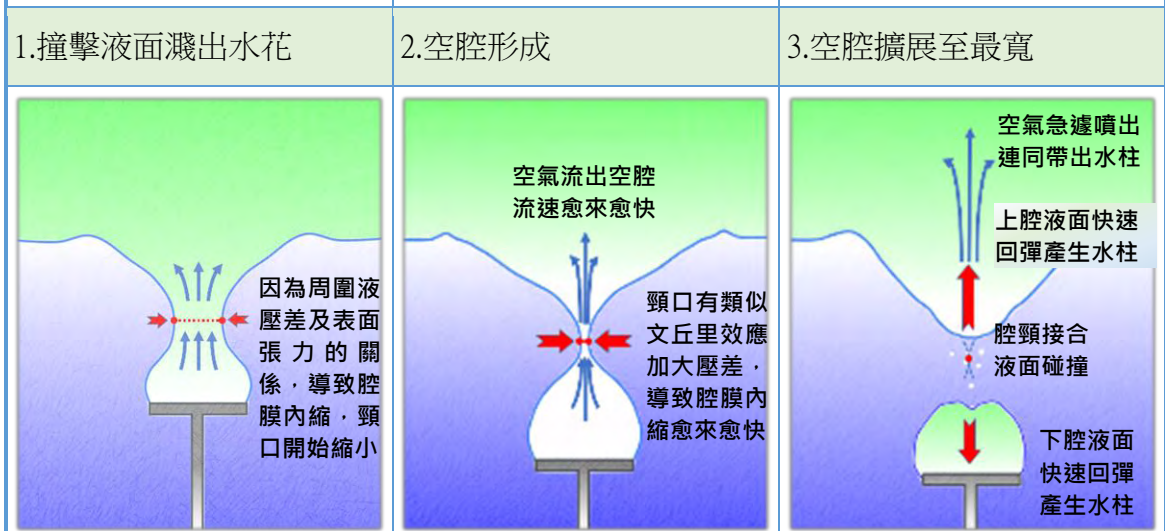
(一)落體入水空腔激柱現象的步驟說明：

根據所拍攝到的大量影片，我們不斷地觀看、討論、分析，最後有了共識，認為落體入水空腔激柱形成過程，可分為「空腔擴展」、「空腔收縮」、「凹面回彈」三大階段，共 9 個步驟，如下頁圖 5-1-2。推估上腔的表面積變化以及下腔氣體的快速流出可能為影響水柱生成的重要因素。而這是否又和落體的形狀、液體種類、空腔內的氣體…有關？這些假設，都將在報告中的後續實驗中討論。尤其是在步驟 5 值得注意的是，氣體在沙漏狀的下腔中流出，很類似應用到伯努力原理的文氏管(文丘里管效應)，差別在於下腔是個持續縮小的文氏管，腔頸也持續的在縮小，而壓力的來源並非固定在一側，而是周圍液壓差及表面張力所造成。於是，我們認為，下腔內的氣體會愈來愈快的流出而使得水柱上升得更直更高。

空腔擴展



空腔收縮



凹面回彈

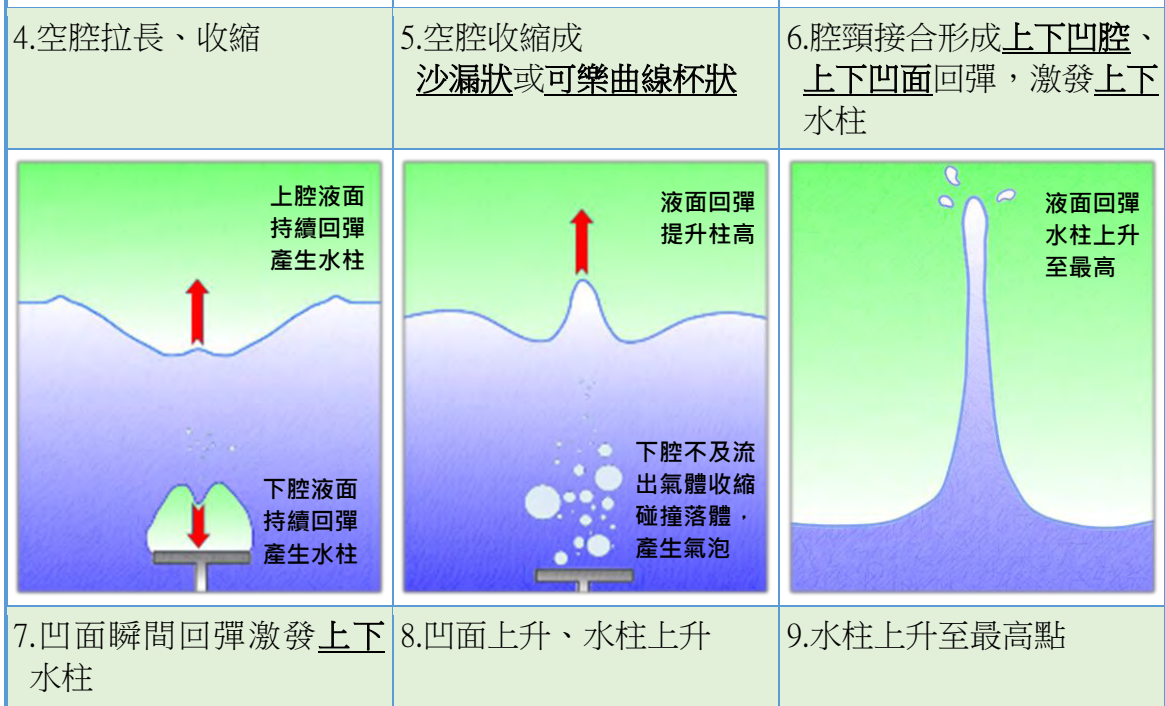


圖 5-1-2

(二)液面空腔的去背步驟及動畫模擬：

使用影片撥放軟體格放 p.8 的影片 1 並且截圖(每張間格 1/240 秒)，接著使用 Inkscape 描繪空腔外圍後再去背，部份去背圖示如下圖 5-1-3：

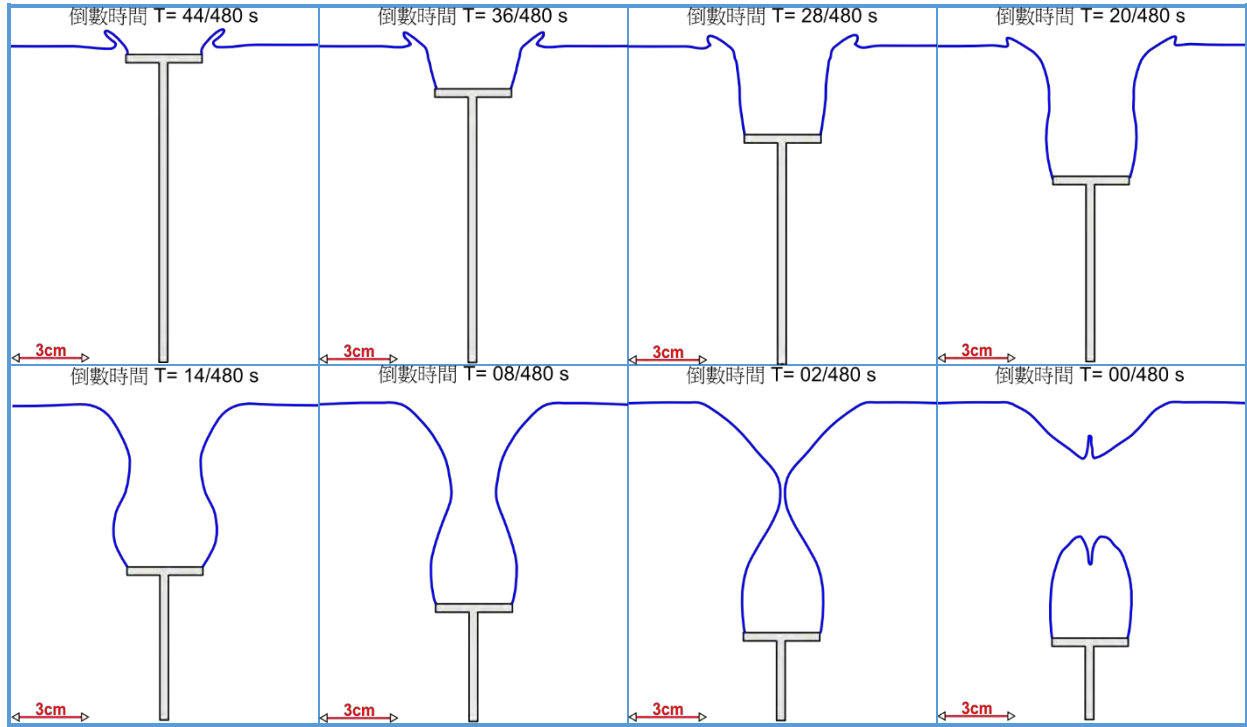


圖 5-1-3

最後，再利用動畫製作軟體 Ulead GIF Animator 製成動畫 GIF 檔如影片 4 <https://goo.gl/xa7wC2> 或掃描 QR-Code 觀看。從動畫圖中可知道從落體撞擊水面起至激起水柱，所需時間也才不過約 1/10 秒、而自腔頸內縮至激起水柱的時間更只是約 1/40 秒。



影片 4

(三)腔頸的運動狀態分析：

由上項動畫可觀察出空腔在開始收縮時，腔頸接合的速度似乎有愈來愈快的趨勢，相互靠近的運動路徑也有變化，使用了 Tracker 分析如下圖 5-1-4~5-1-8：

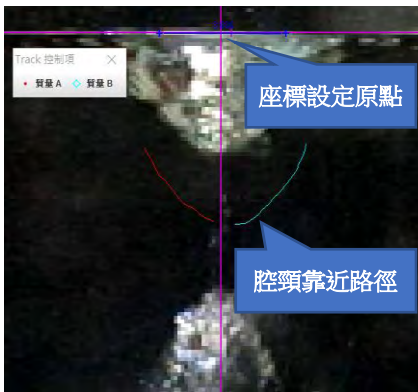


圖 5-1-4

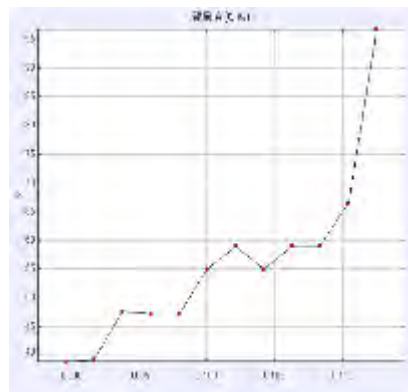


圖 5-1-5

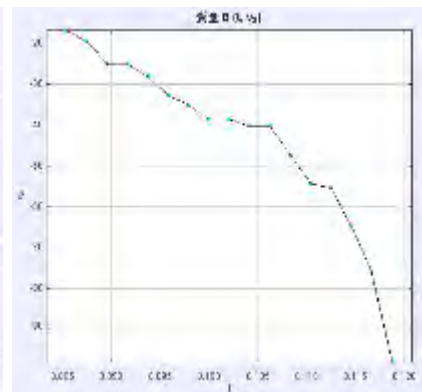
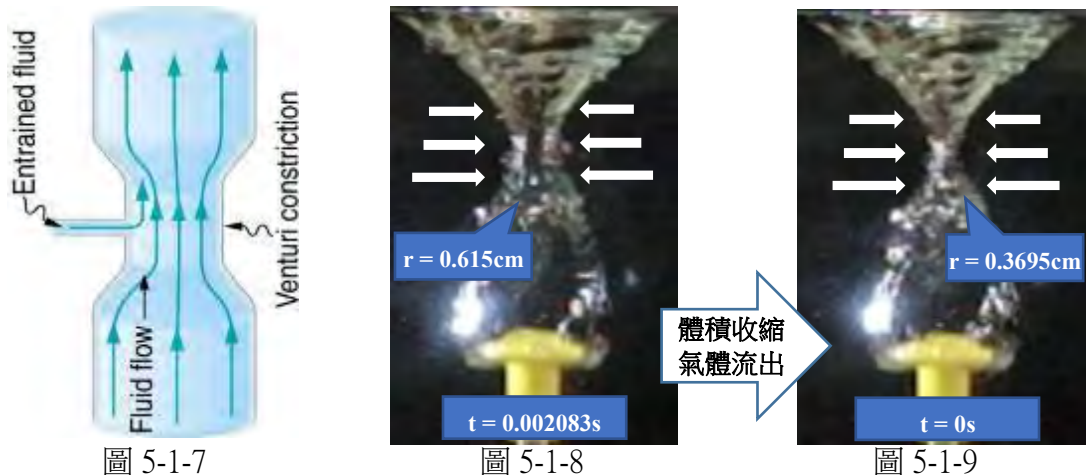


圖 5-1-6

圖 5-1-4 的紅線和綠線可看出腔頸的移動路徑是愈來愈往下，最後相互靠近直至接合。圖 5-1-5 和圖 5-1-6 則可看出，腔頸在水平方向上的靠近速度(v_x)會愈來愈快，快至接合時，在水平方向上的速度 v_x 可高達 90 cm/s 以上。而不同的液體接合速度會有不同的差異，可續參見實驗 6。

(四)下腔空氣流出速度估算

在 p.9 圖 5-1-2 的空腔收縮階段，我們認為是由於周圍液壓差及表面張力關係導致空腔內縮，因此下腔中的空氣會流出空腔。再根據伯努力原理，推測頸口處會有類似文丘里管效應加大壓差，導致腔頸內縮的速度以及下腔內氣體流出的速度愈來愈快，對照圖如下：



以 p.8 的影片 1 為例，使用撥放軟體格放腔頸接合前的最後兩張圖片，接著用 Inkscape 描繪空腔去背後，匯入 123D 同軸包圍出空腔形狀計算出下腔體積(詳見 p.7)，即可估算出在此時段氣體的平均流出速度，相關測量結果如表 5-1-1：

	倒數第二張		最後一張
倒數時間 t(s)	0.002083s	0.001042s	0s
腔頸半徑 r_n (cm)	0.615		0.3695
腔頸平均截面積 A_n (cm^2)平均		0.7612	
下腔體積 Vol_d (cm^3)	73.195664		69.403705
下腔體積變化率 $\Delta Vol_d / \Delta t$ (cm^3/s)		1820.1403	
下腔氣體平均流速 v_{air} (cm/s)		2391.0218	
圖例		體積收縮 氣體流出	

表 5-1-1

從表 5-1-1 中，可看出下腔氣體在最後的 1/480s 間流出腔頸時的平均流速竟然可達 2391cm/s，若非受限於攝影機每秒張數，氣流的流出估算速度應該更大，也因為下腔高速氣體的流出，帶動周圍的水，會使得激發出的水柱形態變得更細更直，高度也變得更大。右方的影片 5：<https://goo.gl/f3U5ZW> 則是一個沒有下腔的水柱生成過程，可與影片 1、影片 2 作一比較，差異非常明顯。



影片 5

依照上表 5-1-1 的方法，截取腔頸接合前最後 5 張圖片並計算後，可得表 5-1-2 及下頁圖 5-1-10，驗證下腔內氣體流出的速度會愈來愈快。若採用圖 5-1-10 趨勢線的方程式，腔頸接合前，下腔氣體的流出速率估計可達 3129 cm/s，甚至更高。

倒數時間 t(s)	0.0083333 (4/480)	0.00625 (3/480)	0.0041667 (2/480)	0.0020833 (1/480)	0
腔頸半徑 r_n (cm)	1.212	0.9065	0.7725	0.615	0.3695
下腔體積 Vol_d (cm^3)	84.14285	80.18752	76.96658	73.195664	69.403705
下腔氣體平均流速 v_{air} (cm/s)		538.6141	698.2848	1197.1036	2391.0218

表 5-1-2

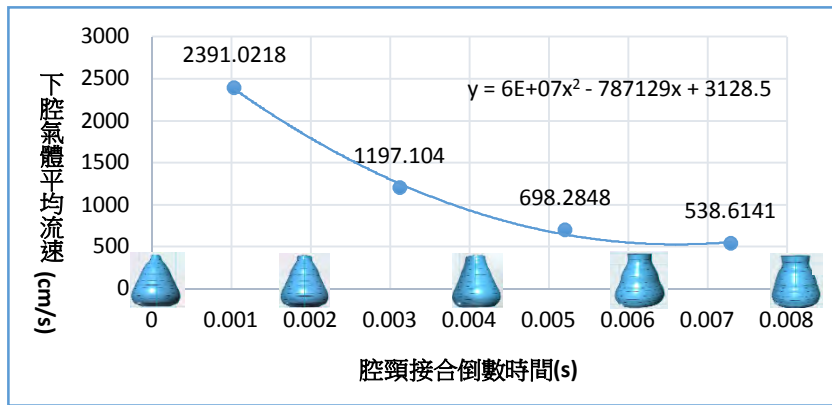


圖 5-1-10

(五) 驗證氣流的存在

為了驗證下腔收縮時會有氣流流出，懸掛一衛生紙片在落體正上方，截取水柱噴出水面前 3 張照片如下圖，明顯發現衛生紙片在水柱尚未到達前，即被噴出的氣流影響而運動抬升，請見影片 6：<https://goo.gl/xtZJ4v> 或掃描 QR-Code 觀看。



影片 6

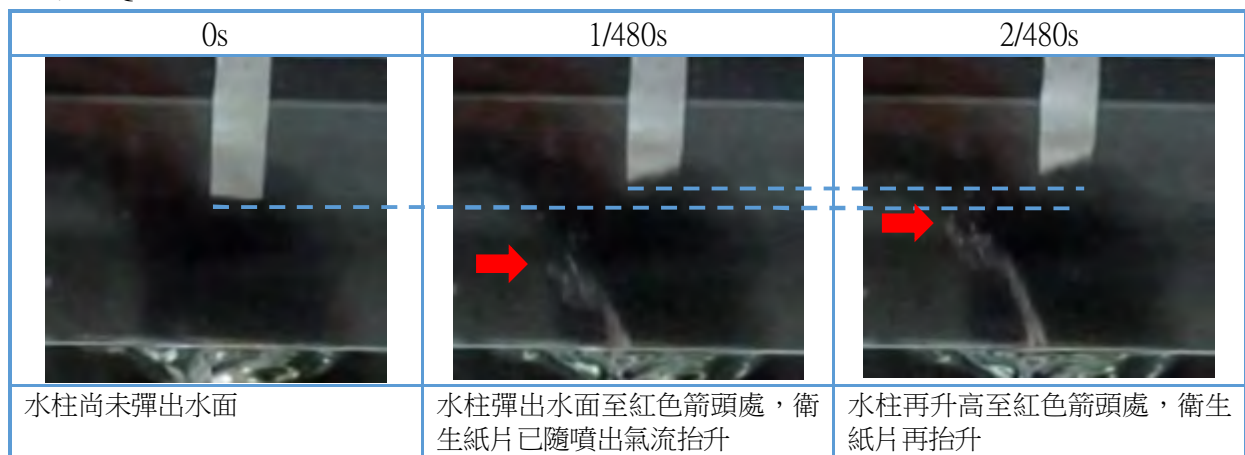


圖 5-1-11

(六) 上腔表面積變化估算

如下圖 5-1-12 所示，以 p.8 的影片 1 截取腔頸接合時上腔圖片，利用 Tracker 測量錐體底部半徑，將圖片匯入 Inkscape 描繪形狀再匯入 123D 包圍旋轉後，即可計算出原本平靜的水面變成上腔的面積變化量 $\Delta A_u = 20.44 \text{ cm}^2$ 。



圖 5-1-12

落體掉落時，因力學能守恆，重力位能轉為動能；衝擊過程中，因功與動能定理，部份動能的變化量造成冠狀水花濺出並對液面持續作功使得液面的表面積的增加。表面積增加的愈大，表面能愈大，即代表恢復力會愈大(上空腔的浮力、液壓差、表面張力…的總合)，激起的水柱也應愈高。

(七)上、下腔皆有激發水柱現象

在影片分析中，有個令人非常驚喜的發現，腔頸接合時，不只上腔可以激發出水柱，連下腔也會有明顯水柱出現(請見影片 1 連結)。我們認為只要腔頸在接合時，兩側若是明顯且完整的拋物曲線(黃色曲線，即腔體是明顯的沙漏外觀)，接合瞬間會因為表面張力的關係，在接合點上各自快速收縮，因此激發出上、下水柱。以腔頸接合為計時起點，格放影片並截取前三張圖片如下圖：



圖 5-1-13

由圖中可看到，白點為上腔及下腔回彈激發水柱的起點，經過 2/480 秒後，各自激發的水柱已至白色及紅色箭頭指示位置，明顯可看出上腔激發水柱所經距離大於下方。以 123D 及 Tracker 分析可得下表 5-1-3：

	表面積(cm ²)	水柱激發初速(cm/s)
上腔	107.86	1280.35
下腔	89.69	848.58

表 5-1-3

由測量結果可知：因為上腔的表面積較大，而且會有氣流往上流出加強效應，所以上腔激發出的水柱初速明顯大於下腔。

第一部份實驗中，各項討論之推論及所發展出的相關分析方法，為後續各項實驗的重要基礎，並做為操縱其餘變因時是否影響結果的重要判斷依據。

【第二部份：改變落體狀態對空腔激柱現象的影響】

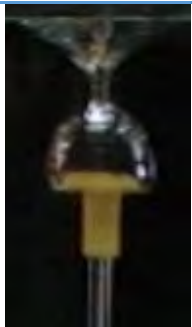


實驗 2：改變落體速度對空腔激柱現象的影響

一、操作步驟

- (一)套好 A 落體(圓盤、半徑 1.5cm)，分別移至距離水面 1cm、3cm、5cm 高。
- (二)拍攝落體入水空腔激柱過程各 5 次，並分析影片記錄各項數據。

二、實驗結果

(一)空腔的形態比較 (完整過程影片請參考附錄連結)

落體類別	A(1cm)	A(3cm)	A(5cm)
空腔形態			
觀察結果	腔體為三者中最小，且下腔圓弧的形狀最明顯	下腔明顯較 A(1cm)的下腔大，形狀也較細長	腔體為三者中最大，且下腔形狀最細長

註：本報告中的後續截圖比較皆為相同比例呈現

圖 5-2-1

(二)各項測量結果

測量類別		落體類別		
		A(1cm)	A(3cm)	A(5cm)
v_i (cm/s)	撞擊水面時的速度	42.19	73.92	93.67
r_u (cm)	上腔半徑	2.19	2.67	2.80
h_u (cm)	上腔凹深(腔頸深度)	2.16	3.20	3.57
h_d (cm)	下腔凹深	2.65	4.91	5.99
$\Delta Vol_a / \Delta t$ (cm ³ /s)	下腔體積變化率	869.76	1301.57	3710.98
ΔA_u (cm ²)	上腔表面積變化量	14.52	46.16	59.95
v_{air} (cm/s)	下腔空氣最後流出速度	960.70	2014.14	4018.55
v_j (cm/s)	水柱激發初速(上腔膜回彈初速)	616.52	698.54	749.20
h_j (cm)	水柱高度	34.27	74.46	82.51

表 5-2-1

三、分析討論

- (一)以理論值而言($v = \sqrt{2gh}$)，落體落水速度略小於自由落體，但差異不大。當速度愈大，上下腔體積愈大，形狀也愈細長，尤其以下腔最為明顯。
- (二)因為力學能守恆的緣故，當落體位置愈高，衝擊水面的動能就愈大。落體落水的高低變化與上腔半徑、上腔表面積變化量、上腔凹深、下腔凹深等數值變化都有完全的關聯性。

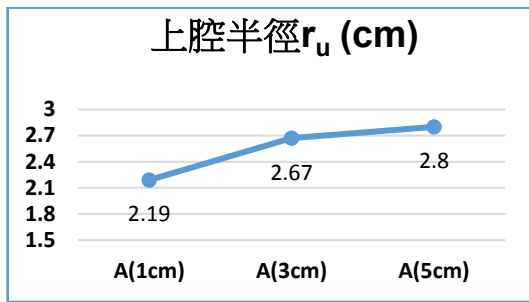


圖 5-2-2

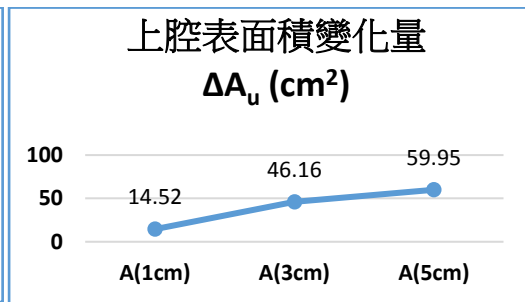


圖 5-2-3

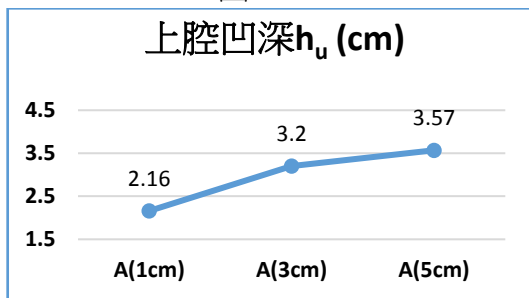


圖 5-2-4

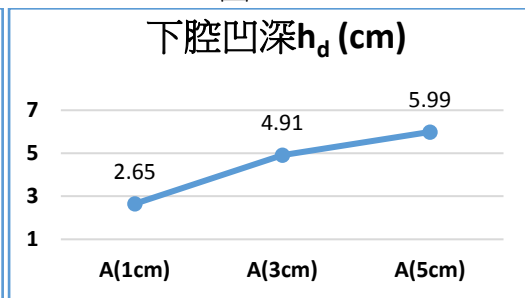


圖 5-2-5

(三)空腔愈深(h_u+h_d)，體積變化率就愈大。我們推測應該是液壓較大的關係，也因此造成下腔空氣最後流出速度較大。

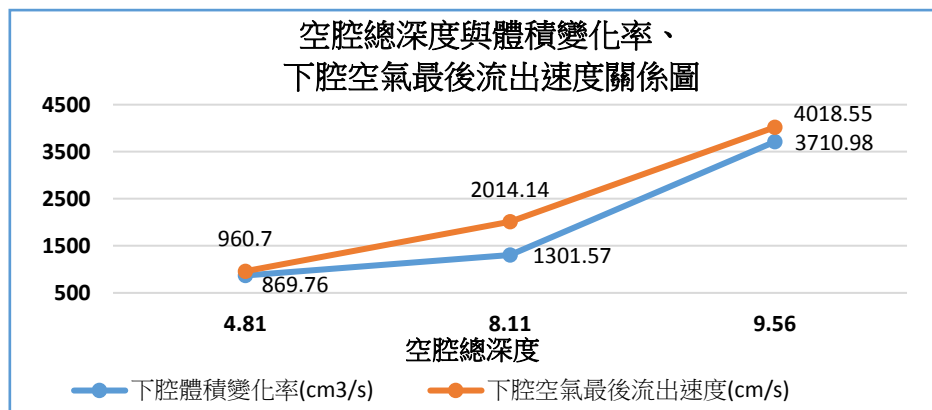


圖 5-2-6

(四)經過分析發現，上腔表面積變化量(ΔA_u)與下腔空氣最後流出速度(v_{air})皆會影響水柱激發初速(上腔膜回彈初速)(v_j)；而當 v_j 愈大，則水柱高度(h_i)愈大。

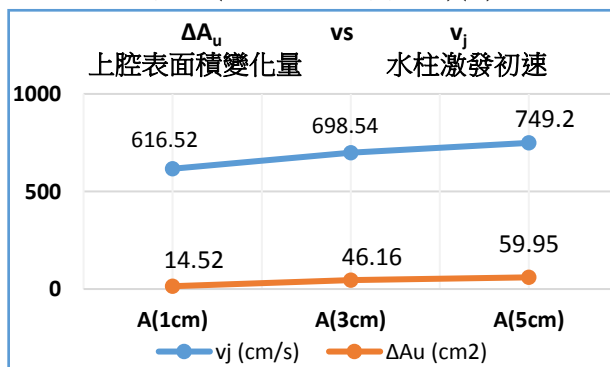


圖 5-2-7

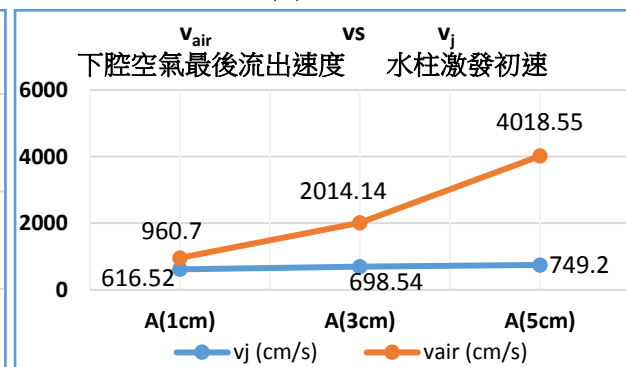


圖 5-2-8

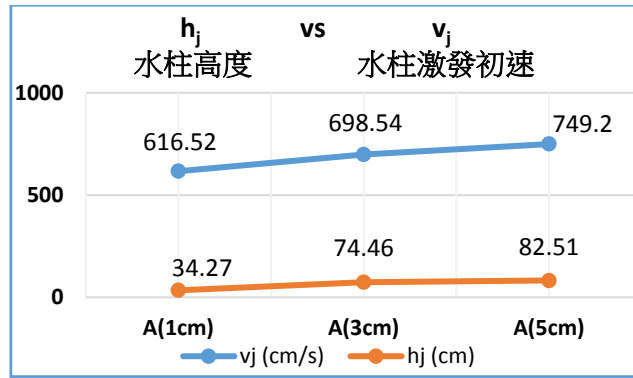


圖 5-2-9

實驗 3：改變落體截面對空腔激柱現象的影響

一、操作步驟

- (一)分次套好 A、B、C 落體(圓盤，半徑 1.5cm、2cm、2.5cm)，移至距離水面 3cm 高。
- (二)拍攝落體入水空腔激柱過程各 5 次，並分析影片記錄各項數據。

二、實驗結果

(一)空腔的形態比較 (完整過程影片請參考附錄連結)




落體類別	A	B	C
空腔形態			
觀察結果	腔體最小、下腔最細長	腔體較 A 大、下腔圓弧的形狀略為明顯	腔體為三者中最大、下腔圓弧的形狀最明顯

圖 5-3-1

(二)各項測量結果

		落體類別		
測量類別		A	B	C
ΔA_u (cm ²)	上腔表面積變化量	46.16	80.99	95.75
v_{air} (cm/s)	下腔空氣最後流出速度	2014.14	3695.12	3790.01
v_j (cm/s)	水柱激發初速(上腔膜回彈初速)	698.54	846.58	893.73
h_j (cm)	水柱高度	74.46	89.44	102.84

表 5-3-1

三、分析討論

- (一)當落體截面愈大，衝撞出的腔體體積愈大，上腔收縮角度愈平緩，且下腔圓弧的形狀也愈明顯。
- (二)截面積愈大，上腔表面積變化量(ΔA_u)與下腔空氣最後流出速度(v_{air})皆愈大，水柱激發初速自然愈大(上腔膜回彈初速)(v_j)。而當 v_j 愈大，則水柱高度(h_j)愈大。

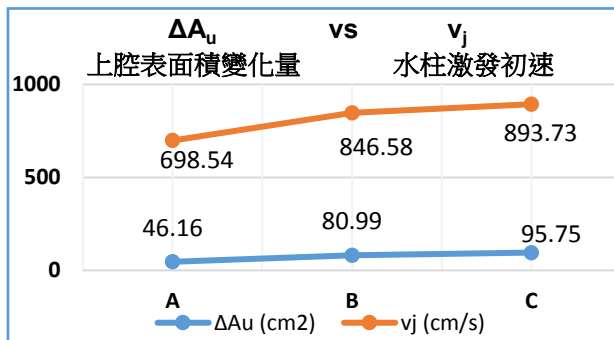


圖 5-3-2

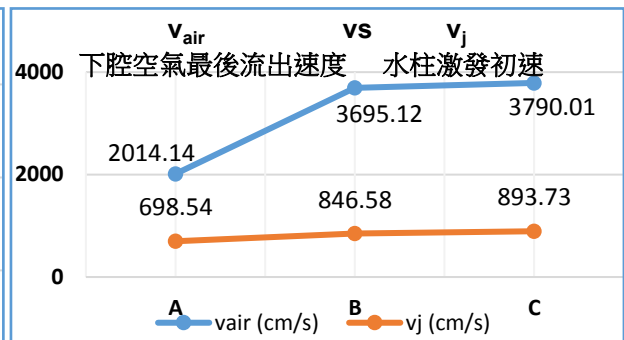


圖 5-3-3

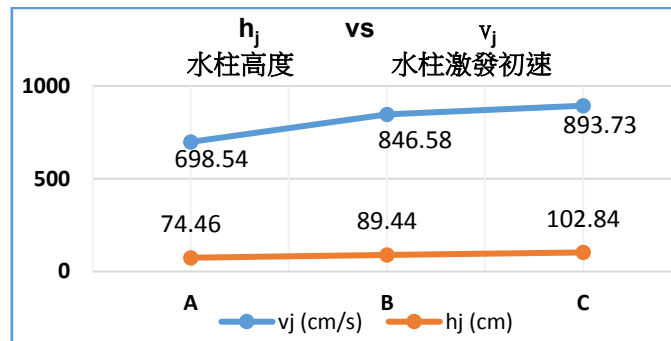


圖 5-3-4

實驗 4：改變落體形體對空腔激柱現象的影響

一、操作步驟

(一)分次套好 A、D、E、F、G、H、I 落體如下圖 5-4-1，移至距離水面 3cm 高。

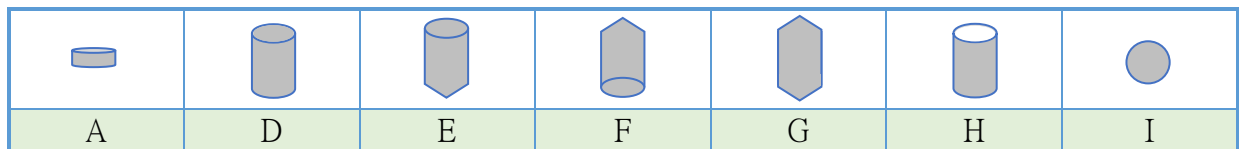


圖 5-4-1

(二)拍攝落體入水空腔激柱過程各 3 次，並分析影片記錄各項數據。

二、實驗結果

(一)空腔的形態比較 (完整過程影片請參考附錄連結)

落體類別	A	D	E	F
空腔形態				
觀察結果	上下腔平滑完整。	下腔壁會被落體上緣(藍點)截斷被分割出較小的下腔。原有下腔空間被落體占據。	錐狀端衝擊水面，因擾動較小，所以上腔較小。下腔仍有截斷分割出較小下腔現象。	下腔無截斷分割現象。
落體類別	G	H	I	

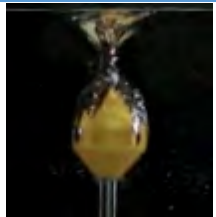
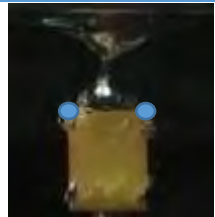
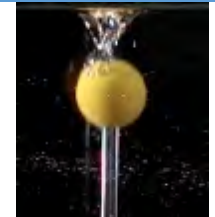
空腔形態				
觀察結果	上下腔小，空腔收縮速度快，過程紊亂，曲面很不平整。	下腔有截斷分割現象，過程紊亂，曲面很不平整，下腔小。	幾乎無下腔，空腔收縮速度最快。	

圖 5-4-2

(二)各項測量結果

測量類別		落體類別						
		A	D	E	F	G	H	I
ΔA_u (cm ²)	上腔表面積變化量	46.16	40.67	38.47	42.87	11.25	27.20	3.18
v_{air} (cm/s)	下腔空氣最後流出速度	2014.14	1395.57	1031.83	1143.67	272.73	1203.67	186.30
v_j (cm/s)	水柱激發初速(上腔膜回彈初速)	698.54	686.82	577.23	646.28	359.84	291.75	277.01
h_i (cm)	水柱高度	74.46	64.93	56.51	61.22	45.16	32.99	30.25

表 5-4-1

三、分析討論

(一)落體長度的影響(A 和 D 的比較)：

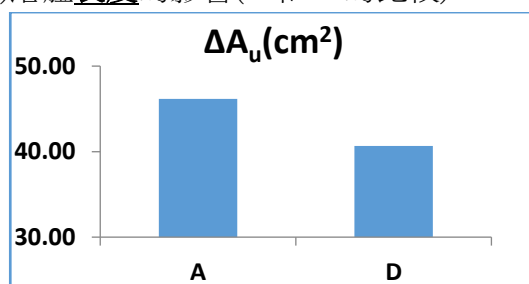


圖 5-4-3

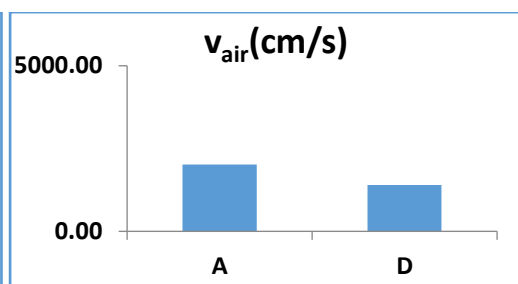


圖 5-4-4

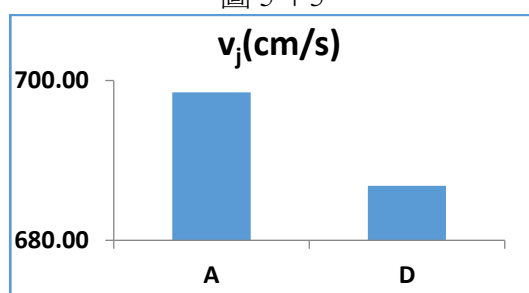


圖 5-4-5

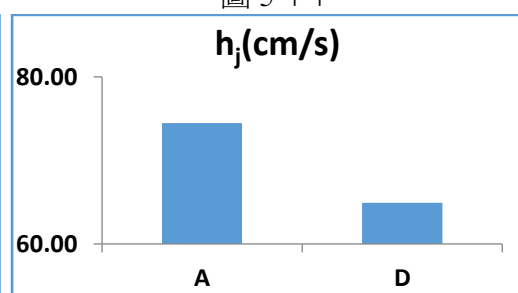


圖 5-4-6

1.比較落體不同長度(落體 A、D)的實驗數值，發現長度較短的落體(圓盤)，其上腔表面積變化量(ΔA_u)與下腔空氣最後流出速度(v_{air})較大，水柱激發初速(v_j)與水柱高度(h)較大。

2.下腔的截斷效應：落體 D、E、H 的下腔有被截斷分割出較小的下腔的現象。以圖 5-4-7 為例，藍點的位置決定了下腔是否被截斷，臨界高度約為 2cm。落體長度只要不大於約 2cm，就不會被截斷。若被截斷，會分割出較小下腔，導致下腔收縮及氣體流出效果較差，激柱效果自然較差，而且因為界面張力的關係，下腔較為扁平。



圖 5-4-7

(二)落體前、後端形態的影響(D、E、F、G、I)：

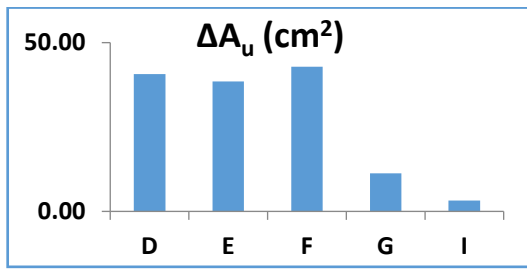


圖 5-4-8

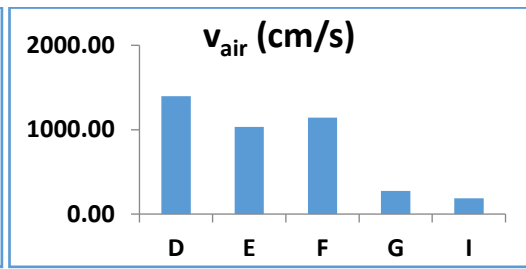


圖 5-4-9

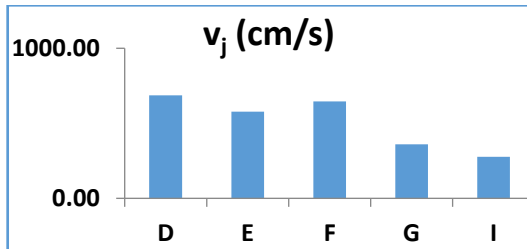


圖 5-4-10

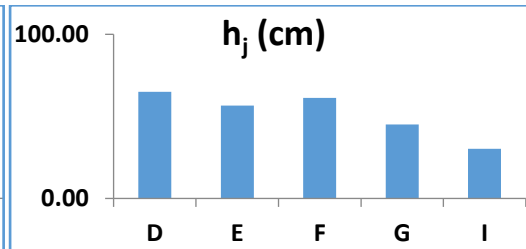


圖 5-4-11

上列結果顯示出落體的前、後端形態明顯的影響實驗結果。空腔激柱效果如下：

D(前平後平) > F(前平後尖) > E(前尖後平) > G(前尖後尖) > I(球體)

前三者的差異不大，但 G(前尖後尖)及 I(球體)的空腔激柱效果明顯差了許多。

(三)圓柱狀和空筒狀落體的差異(D、H)：

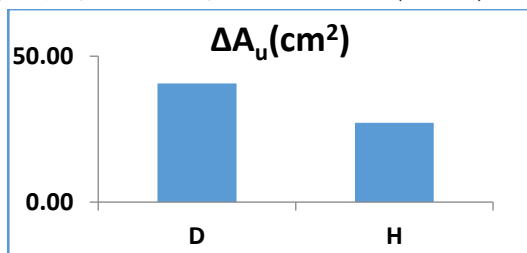


圖 5-4-12

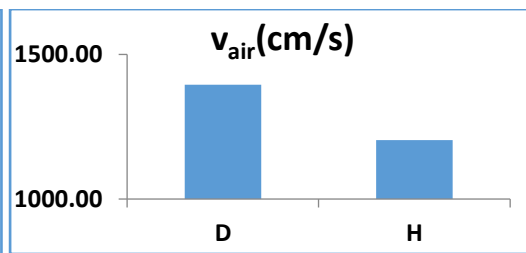


圖 5-4-13

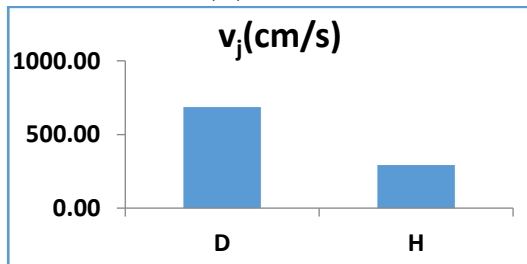


圖 5-4-14

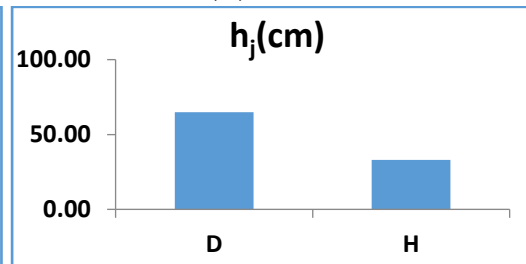


圖 5-4-15

空筒狀落體的效果明顯比圓柱差了許多，從影片的觀察推測因為空腔收縮時，空筒內尚能容納氣體，導致氣流紊亂，上下腔曲面不平整，使得激柱效果下降。

由上討論可知落體形體的差異導致激柱效果：圓盤 > 圓柱 > 圓球，如下圖所示：

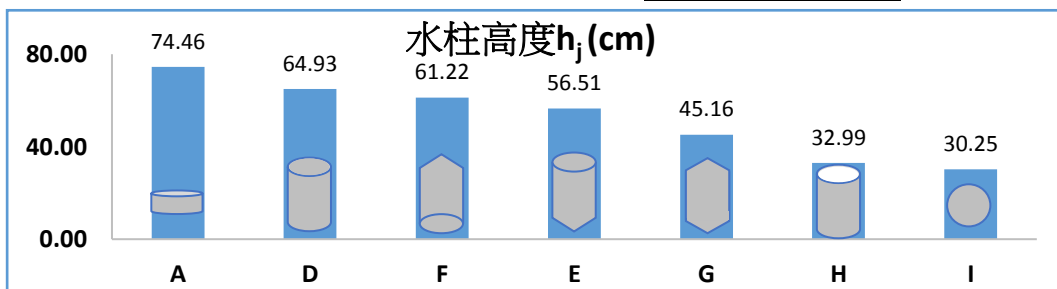


圖 5-4-16

實驗 5：改變落體表面狀態對空腔激柱現象的影響

一、操作步驟

- (一)套好 D、I 落體並均勻塗抹撥水劑，移至距離水面 3cm 高。
- (二)拍攝落體入水空腔激柱過程各 3 次，並分析影片記錄各項數據。

二、實驗結果

(一)空腔的形態比較 (完整過程影片請參考附錄連結)




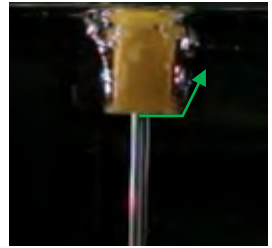


階段	落體入水	腔壁與落體頂端接合	腔頸接合前
空腔形態 (有撥水劑)			
觀察結果	撞擊後劃出的空腔角度較大且平滑完整，體積擴展較大。	下腔壁會與落體上緣接合(藍點)重新分割出較小的下腔。上腔體積較大，下腔被接點分割後，重新形成。	上腔體積較大、深度較大。
空腔形態 (沒撥水劑)			
觀察結果	撞擊後劃出的空腔角度較小較紊亂，體積擴展較小。	上腔體積較小，下腔被接合點分割後，重新形成。	上腔體積較小、深度較小。

圖 5-5-1

(二)各項測量結果

測量類別	落體類別	D	D 疏水
		ΔA_0 (cm ²)	上腔表面積變化量
v_{air} (cm/s)	下腔空氣最後流出速度	1395.57	1971.30
v_j (cm/s)	水柱激發初速(上腔膜回彈初速)	686.82	687.42
h_j (cm)	水柱高度	64.93	71.08

表 5-5-1

三、分析討論

- (一)比較兩種落體的實驗數值，發現有塗抹撥水劑的落體，其上腔表面積變化量(ΔA_0)與下腔空氣最後流出速度(v_{air})較大，因此水柱激發初速(v_j)與水柱高度(h_j)也較大。

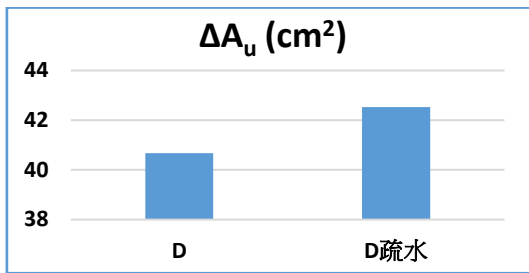


圖 5-5-2

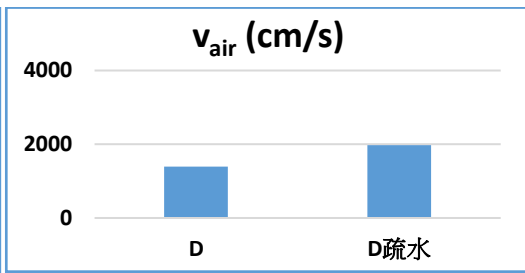


圖 5-5-3

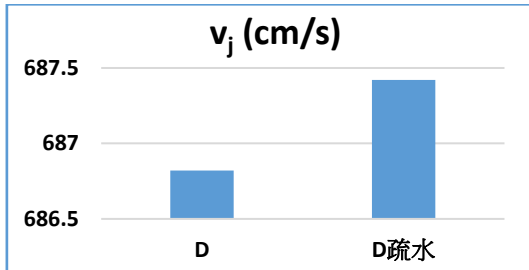


圖 5-5-4

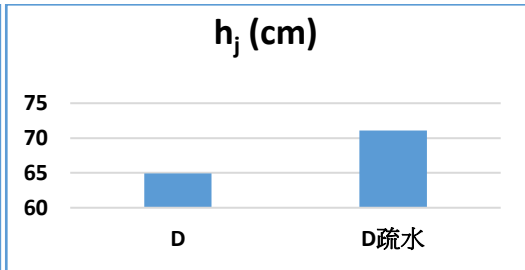


圖 5-5-5

(二)藉由塗抹撥水劑可以改變「水-空氣-落體」三者之間的表面張力(如右圖 5-5-6)，達到水和落體之間附着力改變的目的，看出空腔擴展及收縮時的差異：

1. **擴展時**，沒有塗抹疏水劑的落體和水的附着力較大，空腔擴展效果較小，衝擊出的空腔較為紊亂。而塗抹撥水劑的落體所衝擊出的空腔較為平滑、體積擴展較大。

2. **收縮時**，柱體截圖顯示出的接觸角(θ)及下腔的外觀差異沒有非常顯著，可能是因為表面不連續圓滑加上收縮的時間過短不易觀察。因此，我們續做了球體的實驗，截取水瞬間圖片，如下圖 5-5-7，：

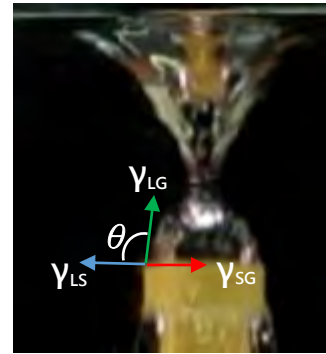


圖 5-5-6

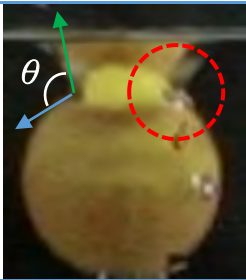

落體類別	I	I 塗抹撥水劑
空腔形態		
觀察結果	無下腔，深度較小	會形成上下腔，深度較大

圖 5-5-7

由於球體表面比柱體更連續圓滑，可看出較明顯的表面張力效應。從圖中球體的兩側可看出入水後的接觸角有明顯的差異，造成空腔形態有極大的不同，進而影響了激柱的結果，驗證了一開始的假設。

【第三部份：改變液體狀態對空腔激柱現象的影響】

實驗 6：改變液體種類對空腔激柱現象的影響

一、操作步驟

(一)套好 A 落體，移至距離水面 3cm 高。

(二)容器中的液體以水、乙醇、洗碗精水溶液、甘油分次替換。

(三)拍攝落體入水空腔激柱過程各 3 次，並分析影片記錄各項數據。

二、實驗結果

(一)空腔的形態比較 (完整過程影片請參考附錄連結)



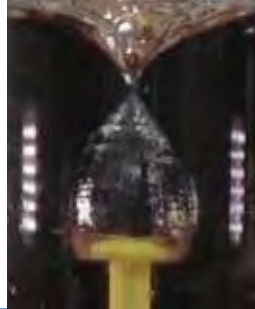
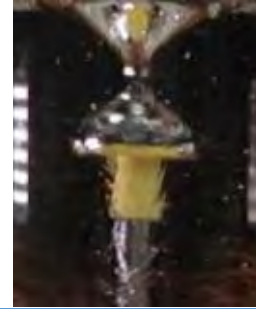
落體類別	水	乙醇	洗碗精水溶液	甘油
空腔形態				
觀察結果	上下腔只比甘油大	上下腔最大。	上下腔只比乙醇小。	上下腔明顯最小，下腔扁平。

圖 5-6-1

(二)各項測量結果

倒數時間 t(s)		0.0083333 (4/480)	0.00625 (3/480)	0.0041667 (2/480)	0.0020833 (1/480)	0
腔頸接合 水平速度 v_x (cm/s)						
水		35.22	58.70	62.61	70.44	86.09
乙醇		71.66	77.63	83.60	107.49	119.43
洗碗精水溶液		71.67	84.71	94.48	114.03	123.80
甘油		47.97	51.66	59.04	66.42	73.80

表 5-6-1

落體類別		水	乙醇	洗碗精水 溶液	甘油
測量類別					
ΔA_0 (cm ²)	上腔表面積變化量	19.53	22.06	23.23	18.37
v_{air} (cm/s)	下腔空氣最後流出速度	2335.7	3117.3	3415.40	600.01
v_1 (cm/s)	水柱激發初速(上腔膜回彈初速)	439.73	440.86	403.49	285.60
h_1 (cm)	水柱高度	58.01	54.46	52.20	29.81

表 5-6-2

三、分析討論

(一)腔頸接合之前：

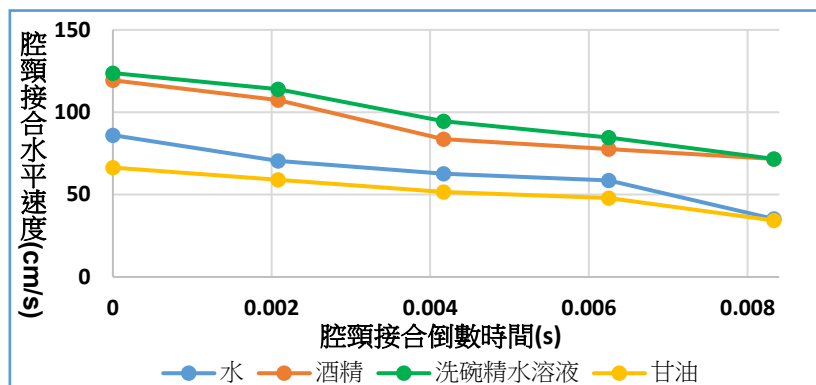


圖 5-6-2

1.如圖 6-2 所示，當腔頸越靠近接合時間，其接合的水平速度都會越大，因為頸口處有類似文丘里管效應，導致腔頸內縮的速度越來越快。(詳細說明 p.11)

2.洗碗精水溶液與乙醇的黏度和水相近，但表面張力小很多，經查表整理如右表。我們推測，洗碗精水溶液與乙醇的接合速度之所以比水還大，是表面張力的差異所致。**表面張力越小，腔頸接合的速度也越快。**

液體種類 25°C	水	乙醇	甘油
表面張力 (dyne/cm)	71.98	22	62.5
黏度 (mPa · s)	0.89	1.078	945

表 5-6-3

3.甘油和水的表面張力接近，但黏度卻大很多。推測甘油的腔頸接合速度之所以比水小，是黏度差異所致。**黏滯力越大，液體越不容易流動，腔頸的接合速度也越慢。**

(二)腔頸接合之後：

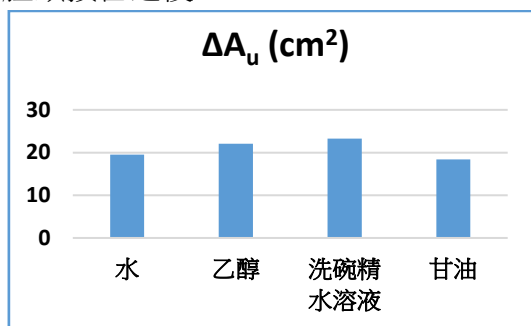


圖 5-6-3

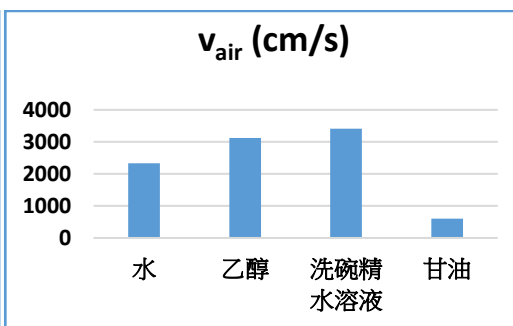


圖 5-6-4

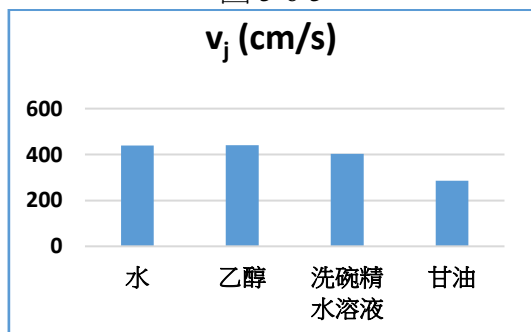


圖 5-6-5

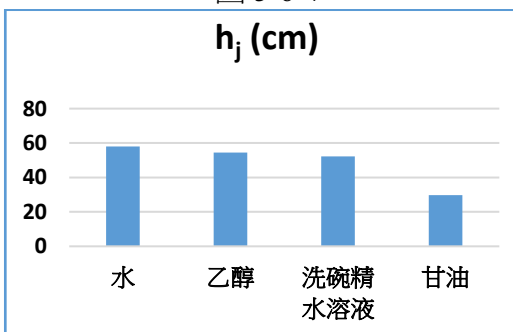


圖 5-6-6

經過分析發現，液體表面張力的差異對於水柱激發速度影響不顯著。推測**造成水柱激發初速差異的主因是黏度**。甘油的黏度較其他三種液體還要大很多，液體最不容易流動，因此其水柱激發初速比其他三者小很多，水柱高度自然最小。

實驗 7：改變油-水分層厚度對空腔激柱現象的影響

一、操作步驟

(一)套好 A 落體，移至距離液面 5cm 高。

(二)以沙拉油層 0.5cm(薄)、1.5cm(中)、3.0cm(厚)分別加在水面上分次替換。

(三)拍攝落體入水空腔激柱過程，並分析影片記錄各項數據。

二、實驗結果

(一)空腔的形態比較 (完整過程影片請參考附錄連結)







落體類別	沙拉油層 0.5cm	沙拉油層 1.5cm	沙拉油層 3.0cm
空腔形態			
			
觀察結果	腔頸接合前， <u>少許</u> 的沙拉油被曳引至下腔的上半部(上圖白色箭頭標示處)；腔頸接合後，下圖白色箭頭處有腔壁殘存形成的 油柱 。下腔上半部的沙拉油收縮回彈，下腔水柱尖端有 <u>少許</u> 沙拉油。	腔頸接合前， <u>較多</u> 的沙拉油被曳引至下腔的上半部(上圖白色箭頭標示處)；腔頸接合後，下圖白色箭頭處有腔壁殘存形成的 油柱 。下腔上半部的沙拉油收縮回彈，下腔水柱尖端有 <u>較多</u> 沙拉油。	腔頸接合前， <u>很多</u> 的沙拉油被曳引至下腔的上半部(上圖白色箭頭標示處)，下腔下方有產生 節 的現象；腔頸接合後，下圖白色箭頭處有腔壁殘存形成的 油柱 。下腔上半部的沙拉油收縮回彈，下腔水柱前段 皆為 沙拉油。

圖 5-7-1

(二)各項測量結果

測量類別		落體類別	沙拉油層 0.5cm	沙拉油層 1.5cm	沙拉油層 3.0cm
v_1 (cm/s)	水柱激發初速(上腔膜回彈初速)		867.02	613.37	450.87
h_1 (cm)	水柱高度		56.13	48.18	35.18

表 5-7-1

腔頸接合 水平速度 v_x (cm/s)	倒數時間 t(s)	0.0083333 (4/480)	0.00625 (3/480)	0.0041667 (2/480)	0.0020833 (1/480)	0
沙拉油層 0.5cm(薄)		51.32	55.34	62.72	95.93	131.35
沙拉油層 1.5cm(中)		42.11	46.32	54.74	75.79	113.68
沙拉油層 3.0cm(厚)		42.03	45.85	53.49	64.96	68.78

表 5-7-2

三、分析討論

(一)與前列實驗結果一致，腔頸接合水平速度越快，水柱激發速度及水柱高度也會越大。

(二)沙拉油層愈厚，在上下腔中的油-水比例就愈高，會影響液體的黏度。因此我們推測，

沙拉油層越厚，黏滯力越大，液體越不容易流動，腔頸的接合速度也越慢。

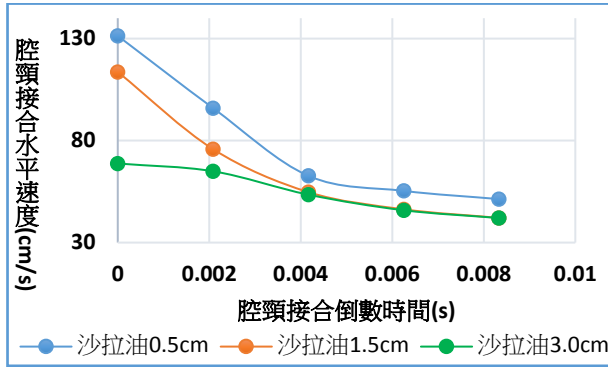


圖 5-7-2

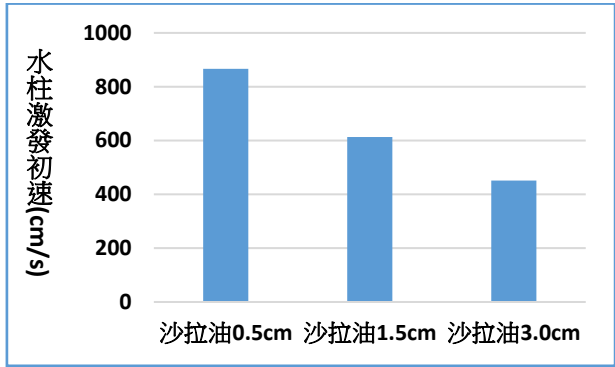


圖 5-7-3

(三)意外的發現～「節」的現象討論：

從上頁圖 5-7-1 可見，下腔為「油水」共存的完整空腔，腔上有一層薄薄的油膜。過程中，發現下腔會出現一層一層的「節」，截取部份過程如下圖 5-7-4，完整過程可參考影片 7：<https://goo.gl/bHfQ4w> 或掃描 QR-Code 觀看。一開始節和節的間距較大(約 0.35cm)，隨著空腔收縮速度加快，節距愈來愈小且紊亂，直到下腔油柱逐漸噴出後，節逐漸消失。我們將過程製成動畫解說 GIF 檔如影片 8：<https://goo.gl/oeAcPF> 或掃描 QR-Code 觀看。



影片 7



影片 8

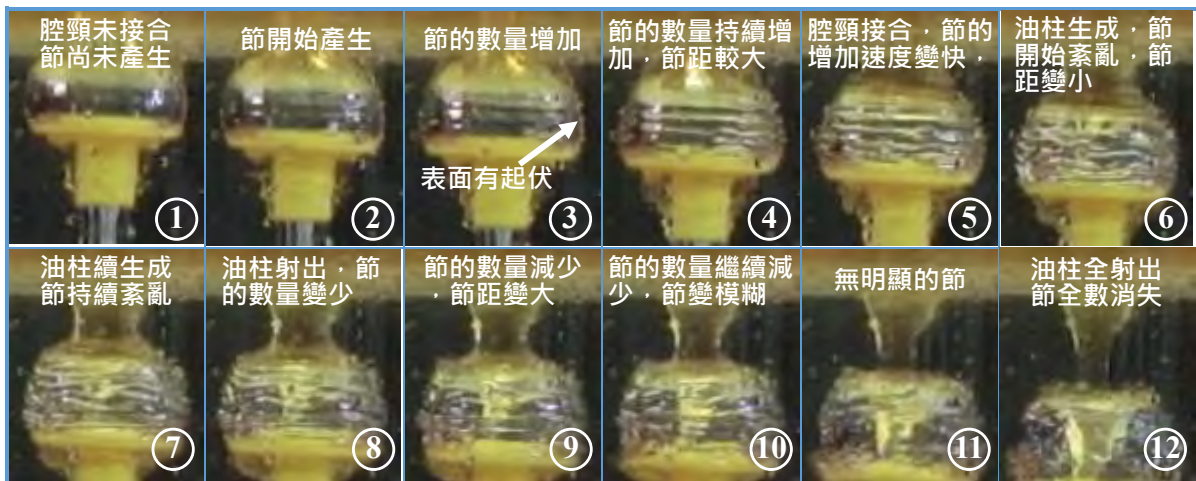


圖 5-7-4

為何會有「節」，我們的推論如下：落體下落時，油和水沿著落體腔體邊緣往上流動，油在內、水在外。因為油以直角改變流動方向(類似 T 型流道分液機制)，流速變大時，油水之間的交互作用產生了波浪狀擺動，頻率及振幅隨之增大，就如同介於「層流」和「紊流」之間的「過渡流」，進而產生了「節」。

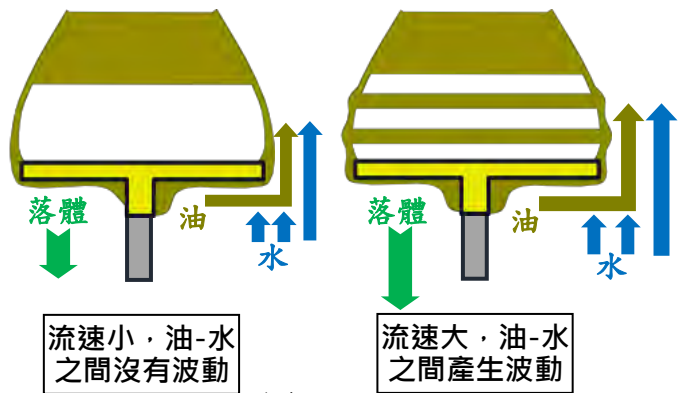


圖 5-7-5

為了確認上述推論，我們將油染黑再進行觀察，所得結果如右圖，腔上有明顯黑色節線，下腔周圍有二層波動，外側(紅線)有一層水和油之間的波動，油的起伏就是節線，成份為沙拉油；至於內側(藍線)也有一層油和氣之間的波動(即腔膜，下部份會進一步討論)，可參考影片 9：<https://goo.gl/m634Uk> 或掃描 QR-Code 觀看。



影片 9

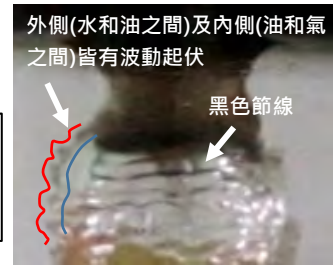


圖 5-7-6

(四)只有「水」會不會有「節」？

起初我們推測若將水腔外側的水流分成兩部份來看(如右圖 5-7-7)是否也會有節？回頭遍尋各類影片，竟發現 A、B、C 落體的下腔也有明顯的節線，這是研究初期始料未及的！

截取部份過程如下圖 5-7-8，完整過程請參考影片 10：

<https://goo.gl/LKCT7S>、影片 11：
<https://goo.gl/hW8DXP>、動畫 GIF 檔
請參考影片 12：<https://goo.gl/iBEwCe>
或掃描 QR-Code 觀看。



影片 10



影片 11



影片 12

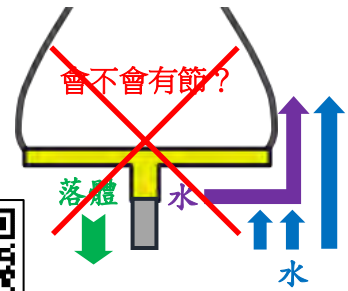


圖 5-7-7

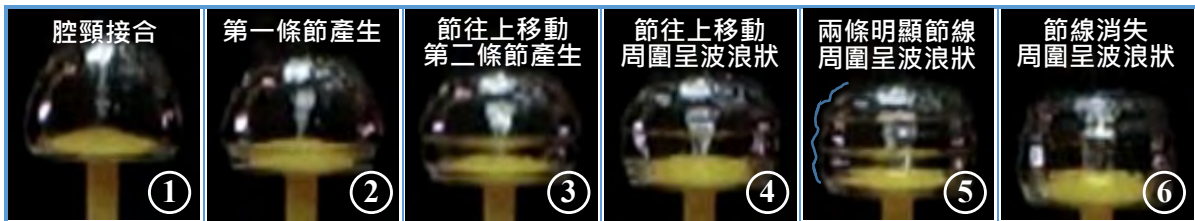


圖 5-7-8

因為水的節線只發生在腔頸接合後，而油的節線卻在腔頸接合前即產生，這個差異引發我們的好奇？在反覆觀察多支影片後，我們發現水生成「節」與油生成「節」的成因「不同」，原因應為：腔頸接合瞬間，急遽的恢復力使腔膜產生壓縮振盪，在與落體接觸的圓周上產生了波動，生成了節，如圖 5-7-9 所示。這個現象，就如同水波槽實驗可觀察到節線一樣。而圖 5-7-10 為水腔的 3D 模擬示意圖。

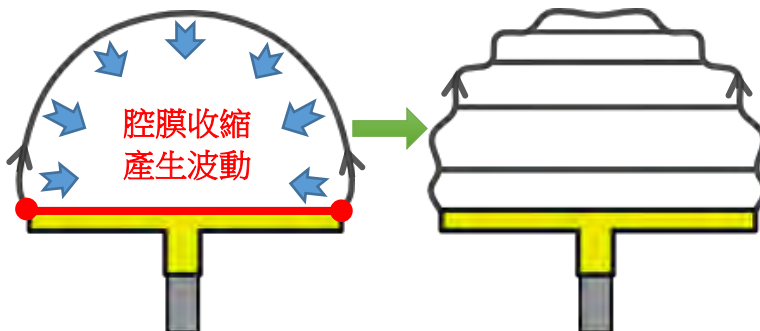


圖 5-7-9

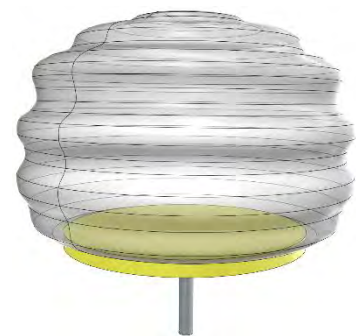


圖 5-7-10

於此，可以確認「節」是一種波動現象，成因有二。分層液體(油和水)在腔頸接合前即會產生節距較小的節，本研究以「S 節」稱之、單一液體在腔頸接合後會產生節距較大的節，本研究以「L」節稱之。

(五)分層液體在腔頸接合後，會不會也有節距大的「L節」產生？

如前頁圖 5-7-6 所示，腔頸接合後會有兩層波動，分層液體理應也有 L 節。觀察發現，在薄油層的影片中，除 S 節外，確實也可觀察到 L 節，但油層愈厚愈不利觀察，截取部份過程如下圖 5-7-11，完整過程請參考影片 13：<https://goo.gl/kZry9B>、動畫 GIF 檔請參考影片 14：<https://goo.gl/zbJiPB> 或掃描 QR-Code 觀看。

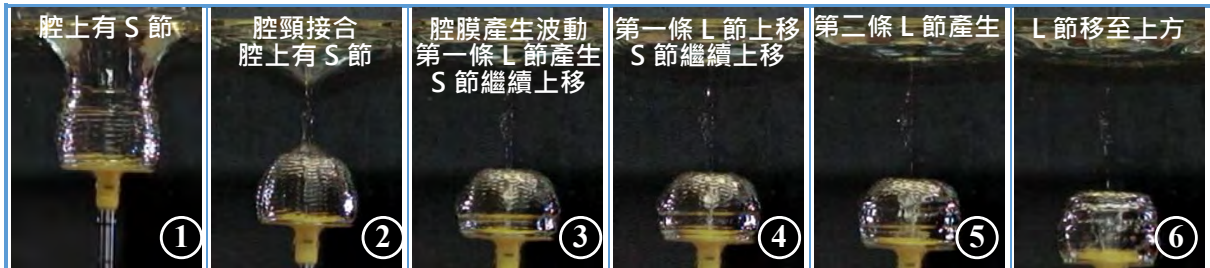


圖 5-7-11

由上列(三)、(四)、(五)的討論，將節的觀察結果整理如下表：

類別	油水分層(多液)：產生 S 節、L 節	水(單液)：產生 L 節
節的成因特性	1. 腔頸接合前 ：油水之間的交互作用產生 S 節 ，發生位置在油和水之間，節距小，節線為沙拉油 2. 腔頸接合後 ：除 S 節外，急遽的恢復力使腔膜產生壓縮振盪，在的與落體接觸圓周上產生了波動，生成了 L 節 ，發生位置在腔膜上，節距大	腔頸接合後 ，急遽的恢復力使腔膜產生壓縮振盪，在與落體接觸圓周上產生了波動，生成了 L 節 ，發生位置在腔膜上(水和空氣之間)，節紋細、節距大

表 5-7-3

(六)「節」的傳播速度之測量與計算

以影片 7 為例，下腔產生第 1 條 S 節時開始截圖(時間標示為 0s)，圖示說明如下：

0s	2/480s	4/480s
1. 下腔周圍的水和油往上收縮，產生第 1 條節線 2. 落體往下移動，平均速度約為 -91.94 cm/s	1. 產生 2 條節線(頻率約為 240hz)，節距約為 0.35cm 2. ①號節線 往上收縮移動 ，但因腔體持續往下運動且大於往上收縮速度，故系統外觀觀察到的位移仍然往下，故速度方向向下(紅色箭頭)	1. 產生 3 條節線(頻率約為 240hz) 2. ①、②號節線 往上收縮移動 ，但因腔體持續往下運動且大於往上收縮速度，故系統外觀觀察到的位移往下，故速度方向向下(紅色箭頭)

圖 5-7-12

方法 1：由 Tracker 直接測量(需注意參考座標的不同)

以 Tracker 分析可得節線和落體的平均速度： $v_{節原} = -6.09 \text{ cm/s} \downarrow$ 及 $v_{腔原} = -91.94 \text{ cm/s} \downarrow$ (以落體入水瞬間的中心點為參考原點)。由於下腔持續向下，因為參考座標系的不同，所以要將相對速度考量在內，故節線在腔上的行進速度如下：

$$v_{節腔} = v_{節原} - v_{腔原} = -6.09 - (-91.94) = 85.85 \text{ cm/s} \uparrow \text{ (方向為向上)}$$

方法 2：由 $v = \lambda \times f$ 計算

①號和②號節線之間的距離，經 Tracker 測量約為 0.35cm，產生的時間間隔為 1/240 秒，所以頻率為 240 hz。由國二所學的公式可得波速約：

$$v = \lambda \times f = 84 \text{ cm/s} \uparrow$$

從上列兩種推導方法所得到「節」的速度幾乎相等，更加確認了推導的合理性。若再以上列兩種方法分析影片 10「水」腔上的 L 節速度可得：

方法 1： $v_{節腔} = v_{節原} - v_{腔原} = 87.31 - (-80.19) = 167.5 \text{ cm/s} \uparrow$

方法 2： $v = 0.7 \times 240 = 168 \text{ cm/s} \uparrow$ (節距約 0.7cm，約 2 個影格一條節線，故頻率約 240 hz)

(七)落體類別與落高對節距、節速的影響 (以薄油層為例)

以上列對節的討論為基礎，我們加做了 B、C 落體在薄油層的實驗，整理如下：

落高	A		B		C	
	S 節節距	L 節節距	S 節節距	L 節節距	S 節節距	L 節節距
3cm	0.423	0.511	0.429	0.569	0.448	0.794
5cm	0.389	0.582	0.406	0.711	0.392	0.904
7cm	0.295	0.675	0.303	0.998	0.312	1.128
	S 節節速	L 節節速	S 節節速	L 節節速	S 節節速	L 節節速
3cm	117.30	129.96	112.84	131.80	96.39	137.85
5cm	131.50	136.79	130.08	143.87	99.24	152.84
7cm	145.78	148.50	141.59	159.69	115.53	173.46

表 5-7-4

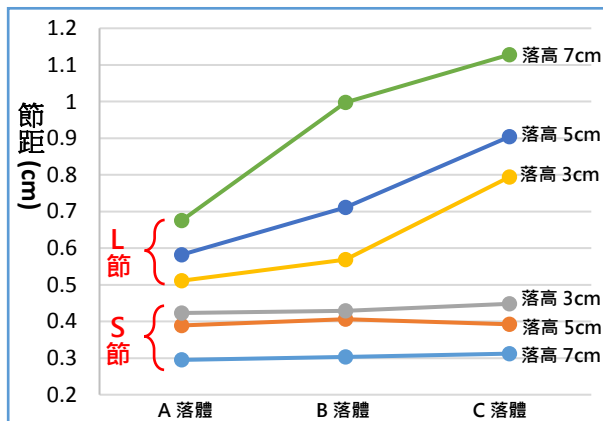


圖 5-7-13

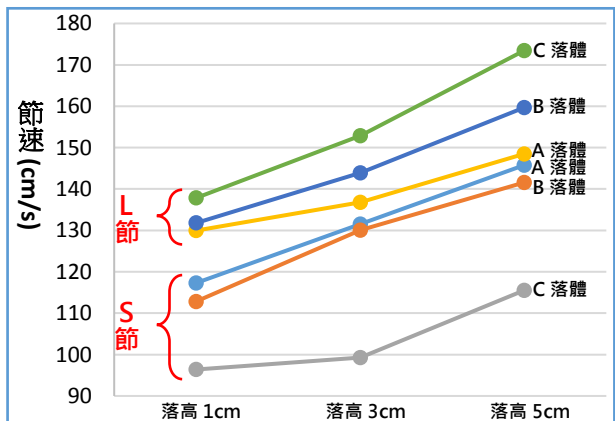


圖 5-7-14

由上表 5-7-4、圖 5-7-13 及 5-7-14 可得下列結果：

有關節距	有關節速
相同落體：落高愈大，S 節愈小，L 節愈大。	相同落體：落高愈大，S 節及 L 節皆愈大。
相同落高：截面愈大，S 節差異不大；L 節愈大。	相同落高：截面愈大，S 節愈小，L 節愈大。
相同落體落高：L 節皆大於 S 節。	相同落體落高：L 節皆大於 S 節。

表 5-7-5

【第四部份：改變環境氣壓對空腔激柱現象的影響】

實驗 8：改變環境氣壓對空腔激柱現象的影響

一、操作步驟

- (一)將金屬落體塗上黃色壓克力顏料便於觀察、塗上撥水劑增強空腔產生之效應。
- (二)使用真空抽氣組改變裝置內的氣壓大小(常壓與低壓約 1/5 大氣壓)。
- (三)使用電磁鐵將金屬球體吸至裝置 II 頂部，拍攝落體入水空腔激柱過程並分析影片。

二、實驗結果

(一)空腔的形態比較 (完整過程影片請參考附錄連結)


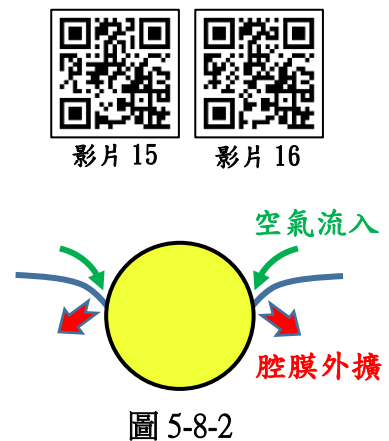
落體類別	常壓	低壓
空腔形態		
觀察結果	有明顯空腔，且有激柱現象產生	整個下落過程完全沒有空腔及激柱現象。因氣壓降低，導致罐內壁有很多小氣泡。

圖 5-8-1

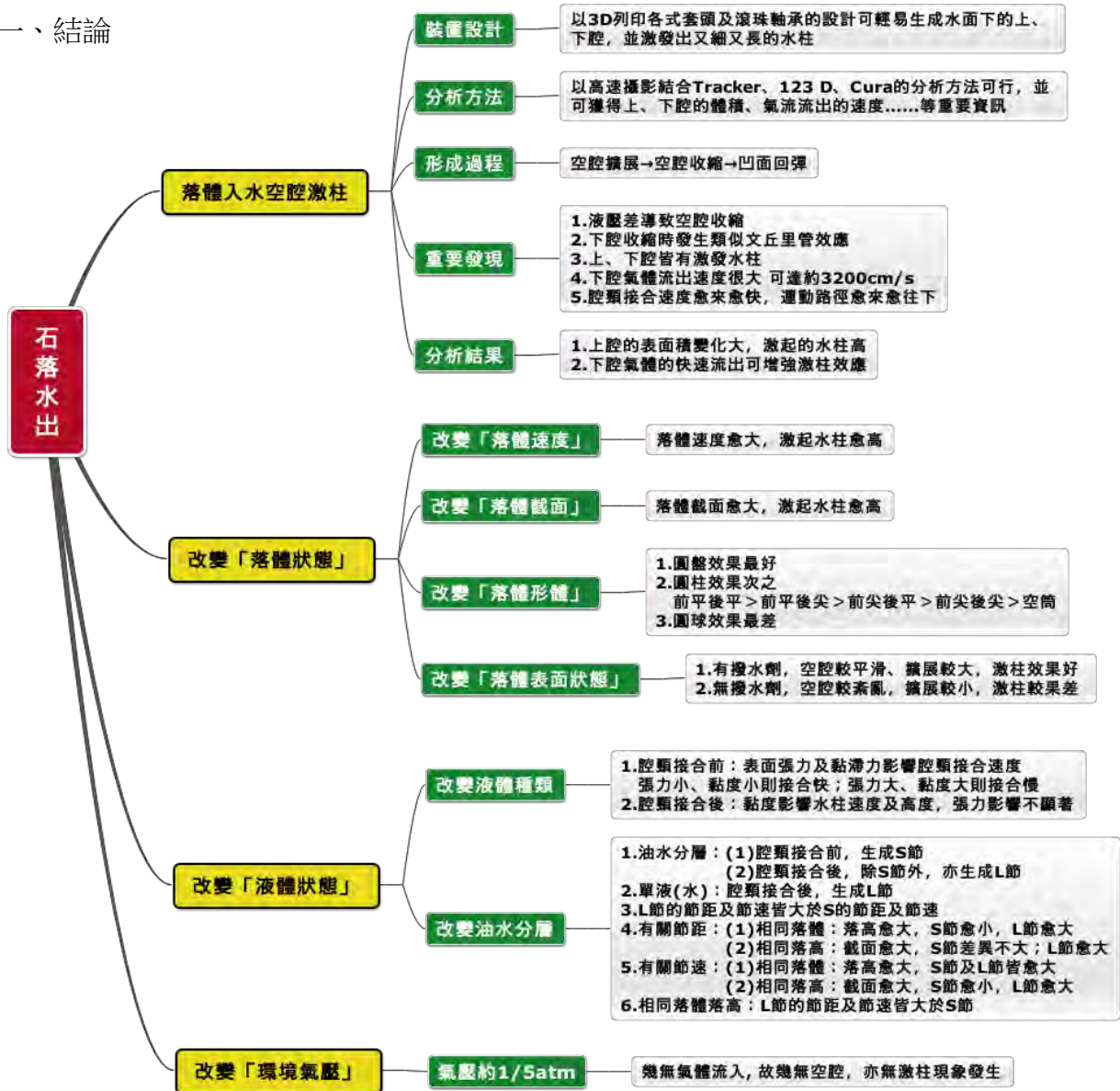
三、分析討論

因為要控制落體入水方向穩定，本部份的實驗僅能以球體進行實驗。發現在常壓下，有明顯的空腔與激柱；反觀低壓狀態下的落體，幾乎沒有產生空腔與激柱現象，過程可參考影片 15：<https://goo.gl/8KFt2s>、影片 16：<https://goo.gl/3zvcVK> 或掃描 QR-Code 觀看。如右圖 5-8-2 所示，空氣的流入與否，是形成空腔的重要關鍵，空氣流入可擴大空腔，之後，在空腔收縮階段，便可因為氣流的快速流出加強激柱現象。若無空氣流入，水和落體之間貼合的速度非常快，僅見球體快速隱沒於水中及水面的上下起伏連漪而已。這部份的結果也驗證了實驗一空腔激柱步驟有關空腔擴展的推論。



陸、研究結論與建議

一、結論



二、實驗改進建議與未來研究方向

- (一)若能加快落體速度，使下腔更加細長更易於觀察，下腔產生的水柱便可深入分析。
- (二)若攝影設備能夠精進，對於「節」的現象，可有更深入的了解。
- (三)落體的形態及落下的方式還可以很多元，假如能夠再進行更多形狀、材質甚至是不對稱落體的實驗，再以不同的角度入水...，必能發現更多的現象。
- (四)若能真正測量下腔氣體的流出速度，則可與本研究自行發展的推導方法作一驗證。
- (五)承上，若能知道下腔周圍所受的壓力大小，便可使用垂直文氏管的理論式推導出下腔氣流流出的理論速度，即可驗證把下腔當作垂直文氏管的想法是否可行。

柒、參考資料

- 一、參考文獻：<https://goo.gl/zqYqyb>
- 二、各項實驗影片參考：<https://goo.gl/mjqx5G>
- 三、原始數據平均總表：<https://goo.gl/tdgopv>

【評語】 030101

觀察仔細，實驗裝置或許在製作上應該可以簡化一些。對於現象的解釋，量化的分析比較不足。然而，流體力學本身就是個相當複雜的非線性現象。另一方面，研究團隊具有將複雜現象系統化描述的能力，令人驚艷。若未來考慮繼續發展該主題，應該可以比較專注於節點的形成與動態行為，再思考其中蘊含的理論原理。

作品海報

摘要

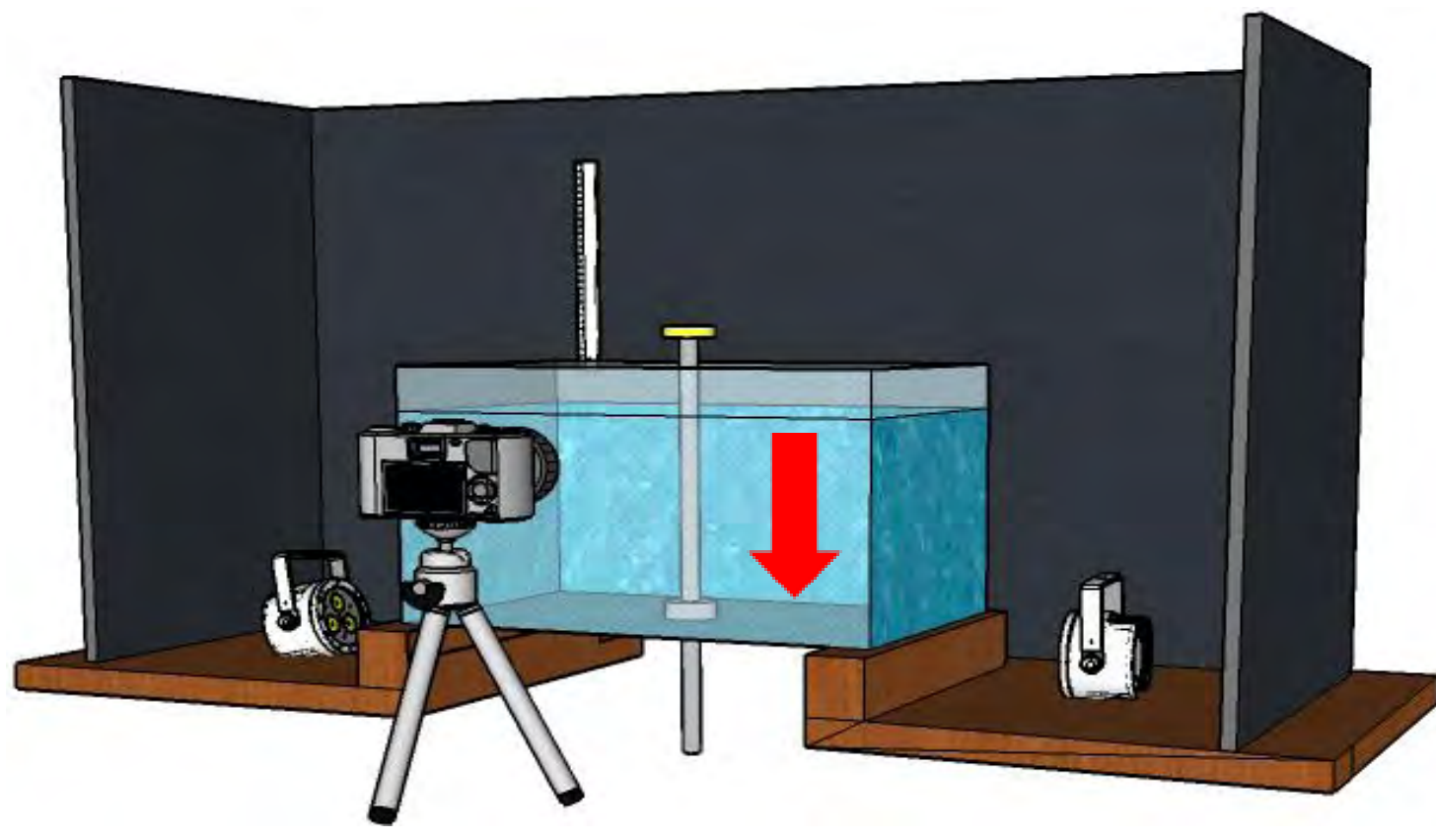
物體落入水中時，會產生空腔激柱。我們研發出的實驗裝置，能夠控制落體的入水狀態，進而使觀察結果更為多元、明顯。透過本研究，驗證落體入水的速度、截面積的大小、外觀的形態、溶液的種類以及周圍的氣壓高低都會使落體入水後空腔的形成有所差異，進而影響氣流流出的速度及激發的水柱高度。此外，更發現在空腔形成過程中，會產生明顯的節線。

研究目的

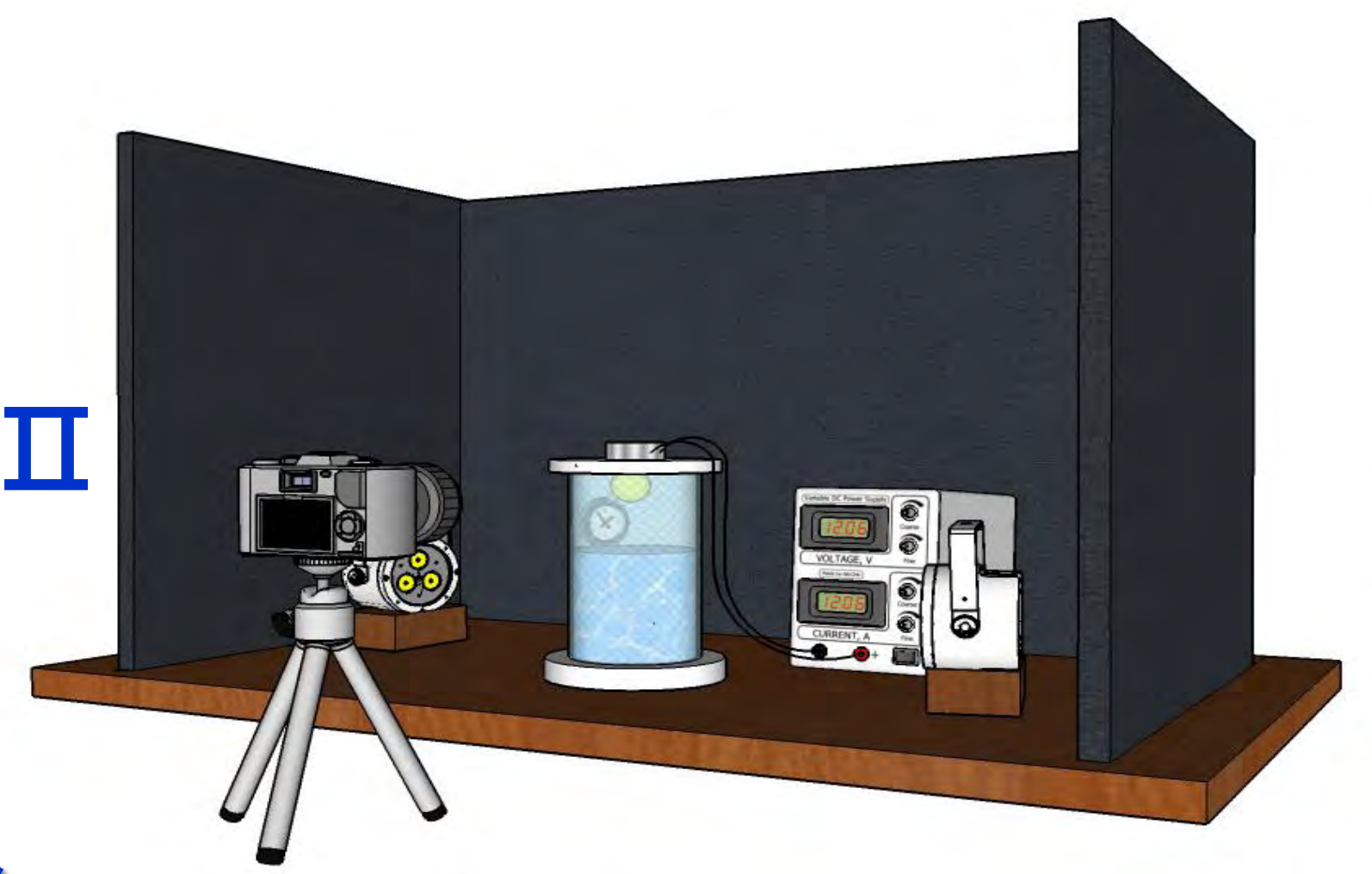
- 一、觀察分析落體入水空腔激柱現象並發展分析方法
- 二、改變「落體狀態」對空腔激柱現象的影響
- 三、改變「液體狀態」對空腔激柱現象的影響
- 四、改變「環境氣壓」對空腔激柱現象的影響

研究裝置

裝置 I



裝置 II



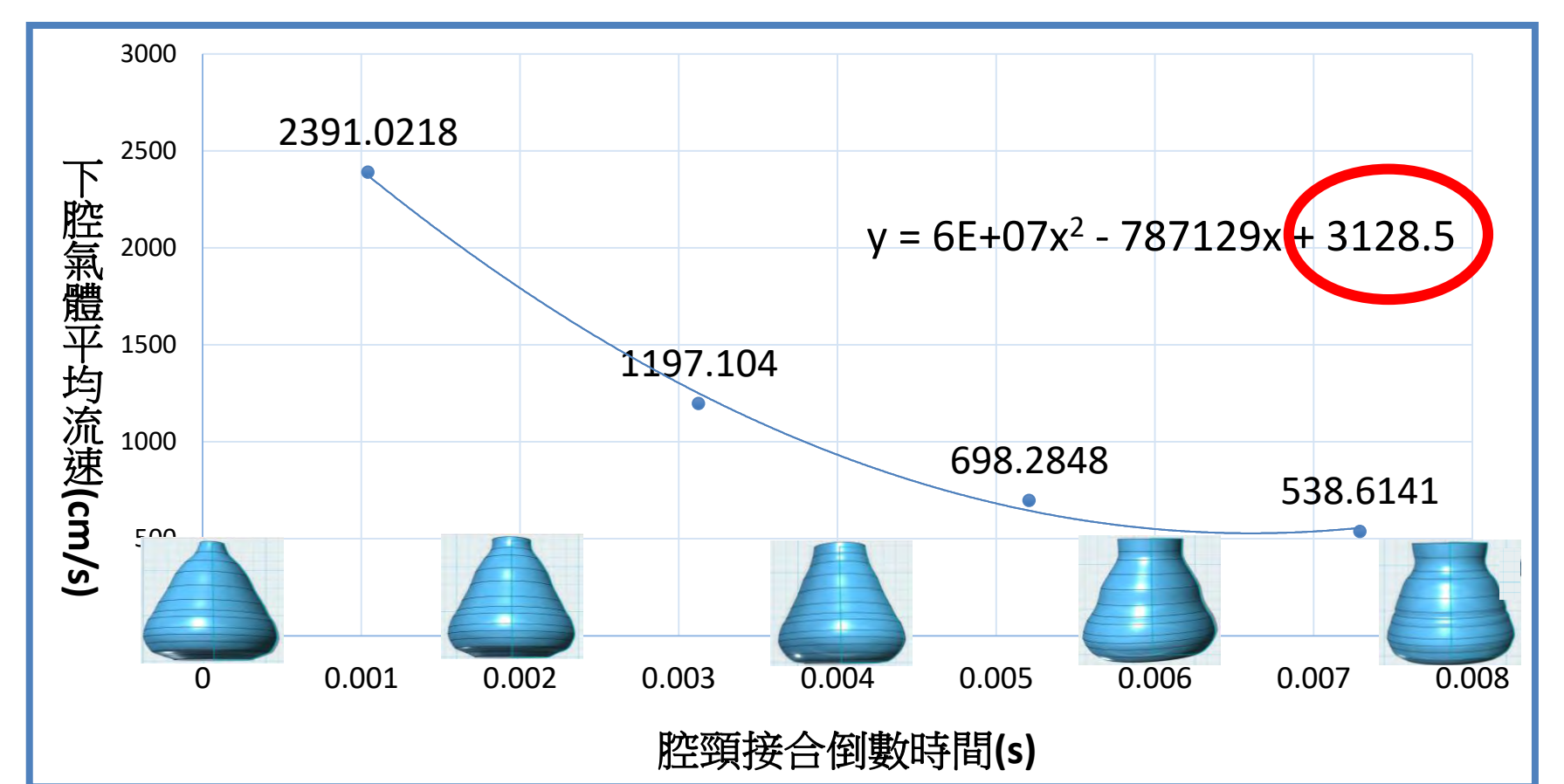
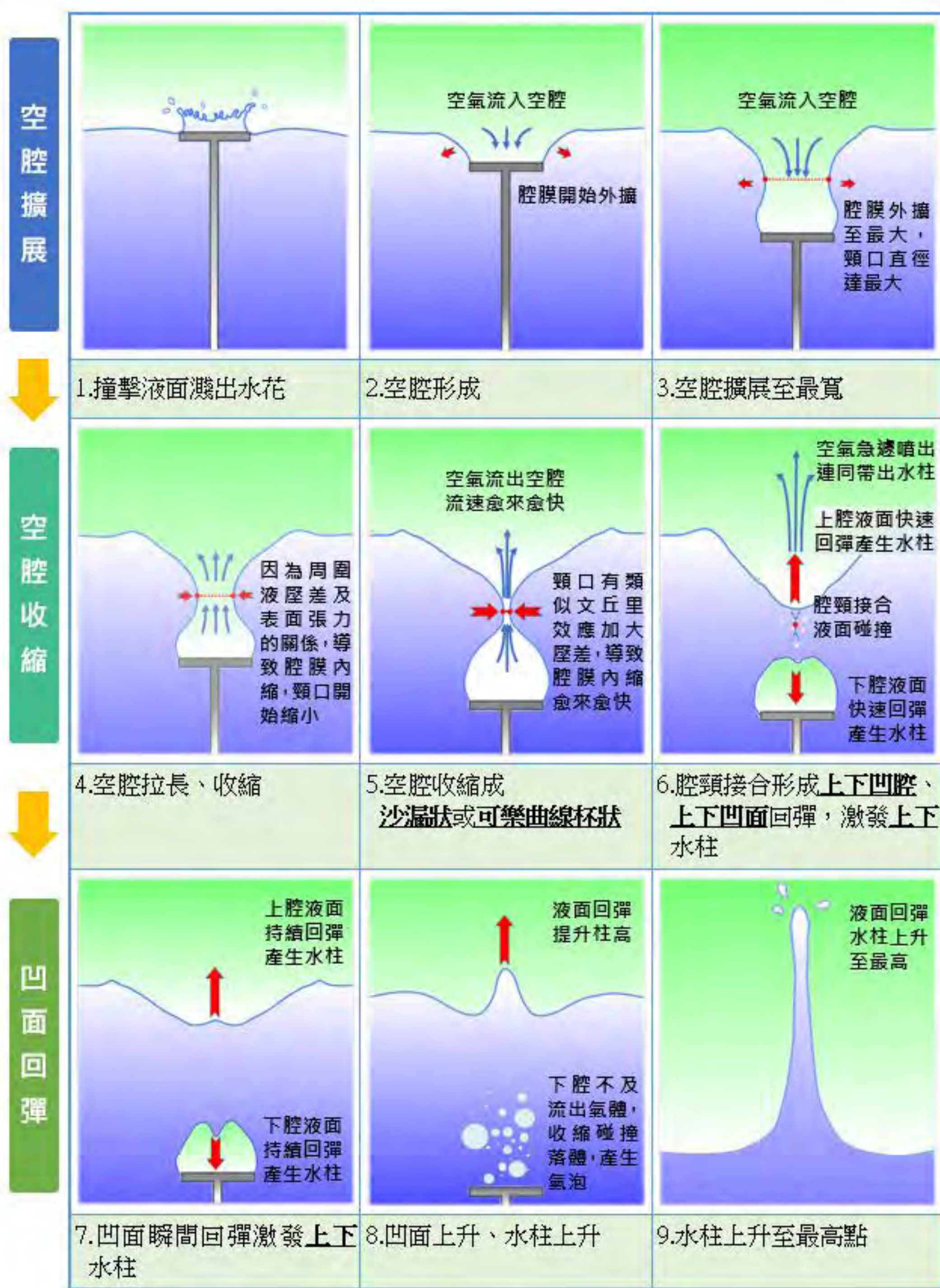
研究結果與討論

分析空腔激柱現象



空腔激柱1 空腔激柱2 空腔激柱3

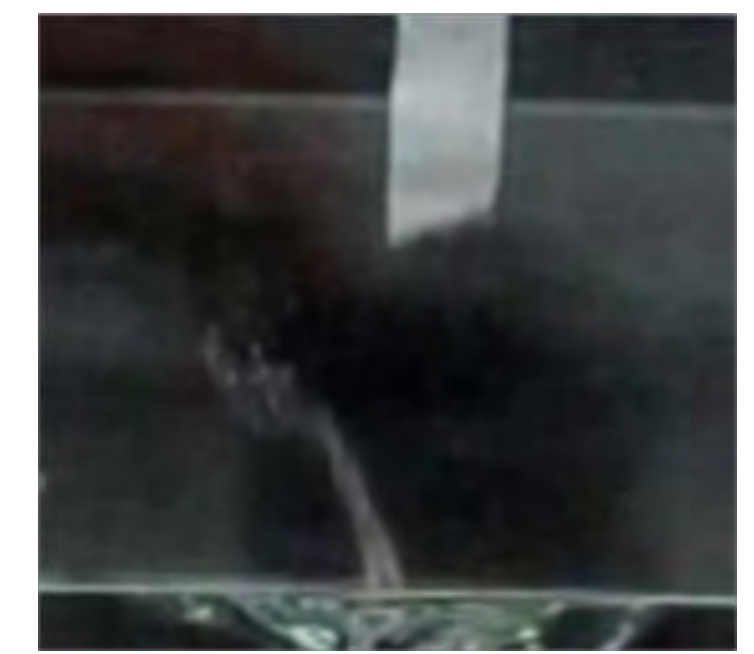
空腔擴展、空腔收縮、凹面回彈三階段



自行發展分析方法，計算出下腔有高速氣體流出，帶動周圍的水，使激發出的水柱更細、更直、更高。

下腔氣流流出的驗證

衛生紙片在水柱尚未到達前，即被噴出的氣流影響而抬升，驗證下腔收縮時會有氣流流出。



氣流流出

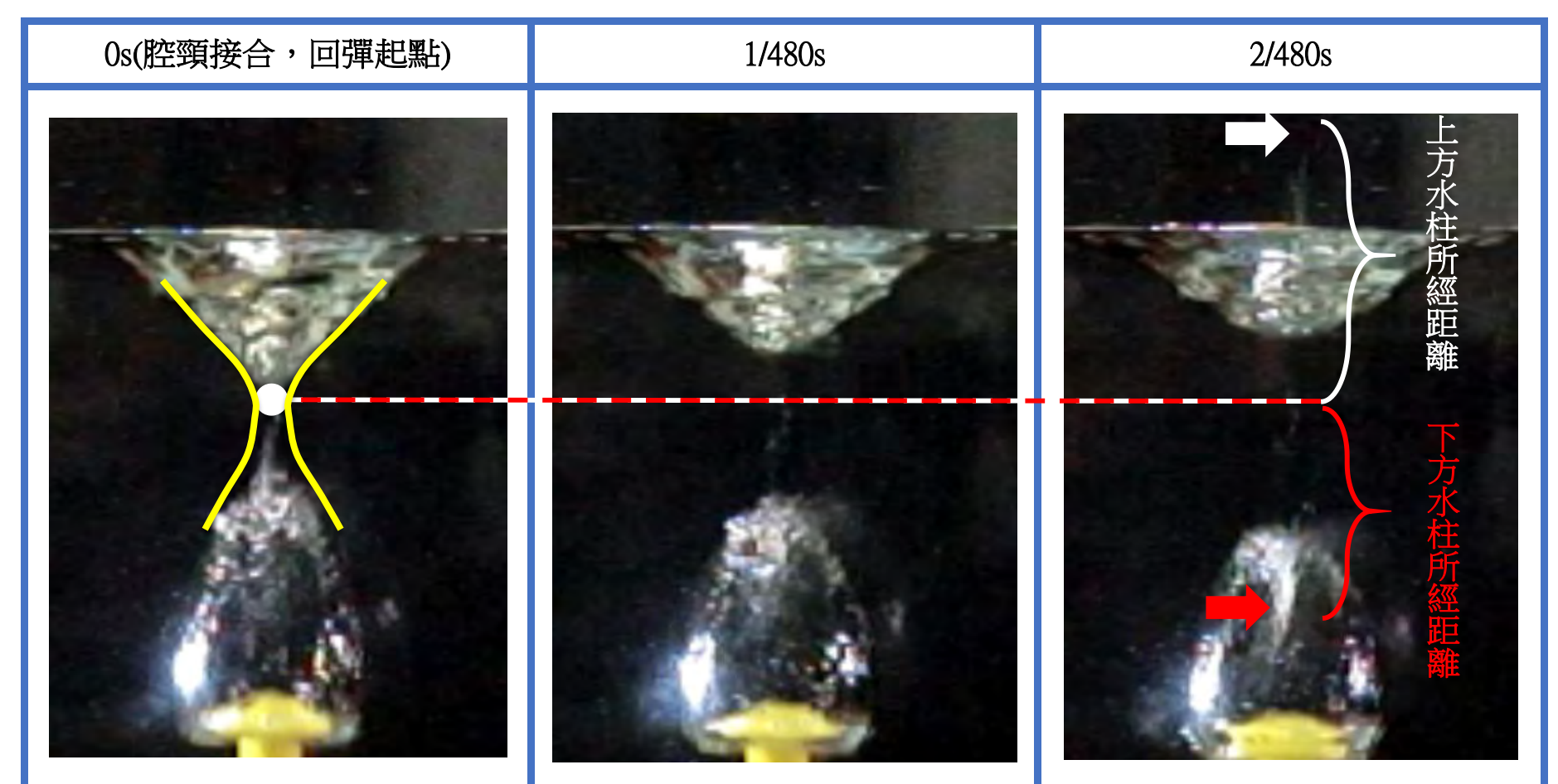
表面積變化的估算

表面積增加愈大，表面能愈大，代表恢復力會愈大，激起的水柱也應愈高。



上、下腔激發水柱

只要兩側是明顯且完整的拋物曲線，接合瞬間會因表面張力，在接合點上各自快速收縮，激發出上、下水柱。

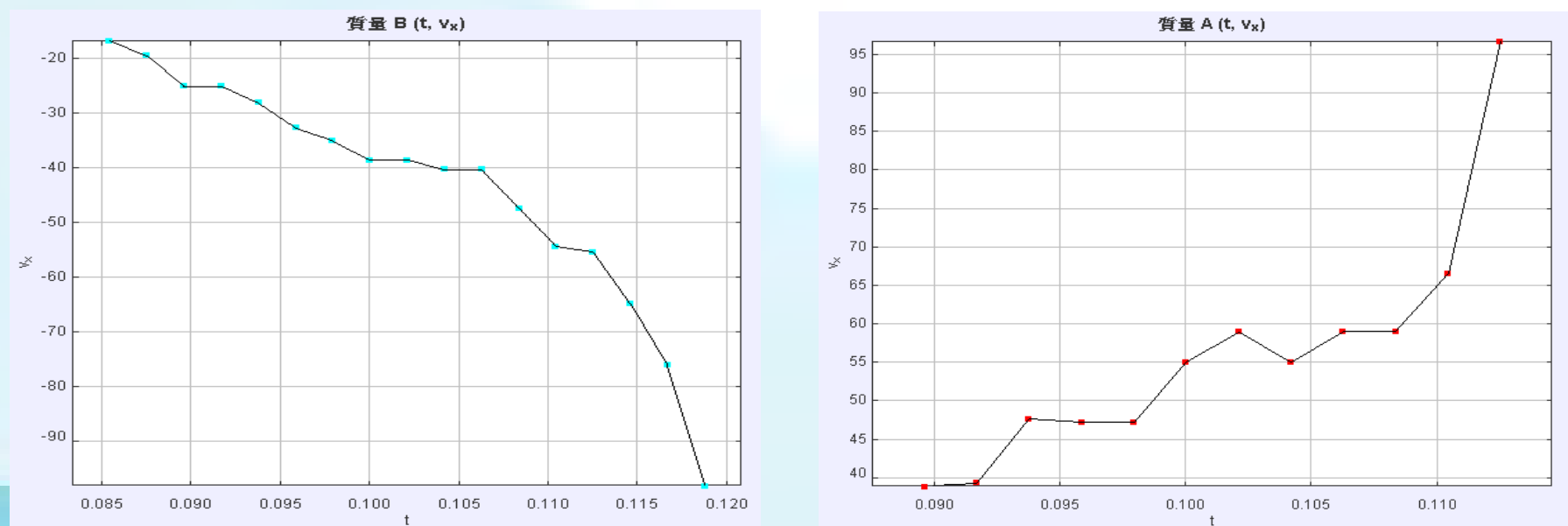


腔頸的運動狀態

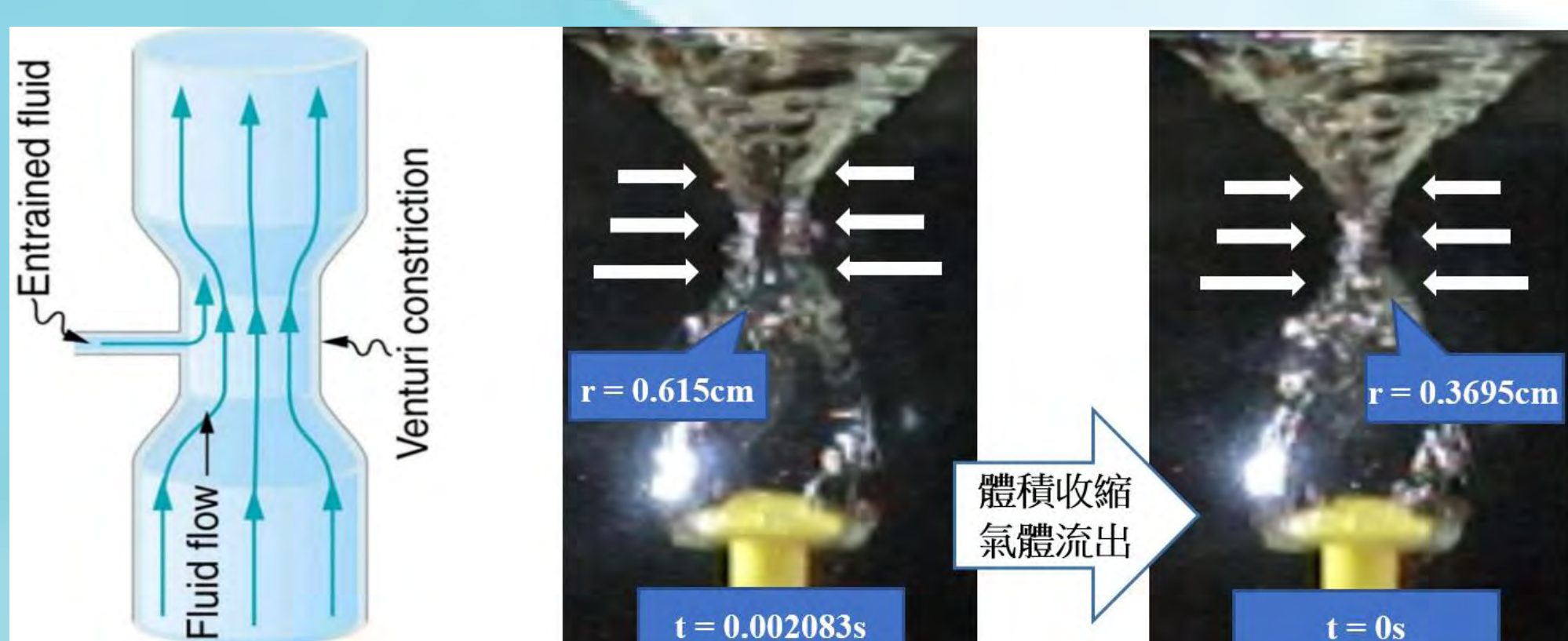
用Tracker分析腔頸接合速度。發現腔頸在水平方向上的靠近速度(V_x)愈來愈快。



去背動畫



下腔氣流流速的估算與形成機制



由於液壓差及表面張力，導致空腔內縮，下腔空氣流出。根據伯努力原理，頸口處有類似文丘里管效應加大壓差，導致腔頸內縮的速度以及下腔內氣體流出的速度愈來愈快。

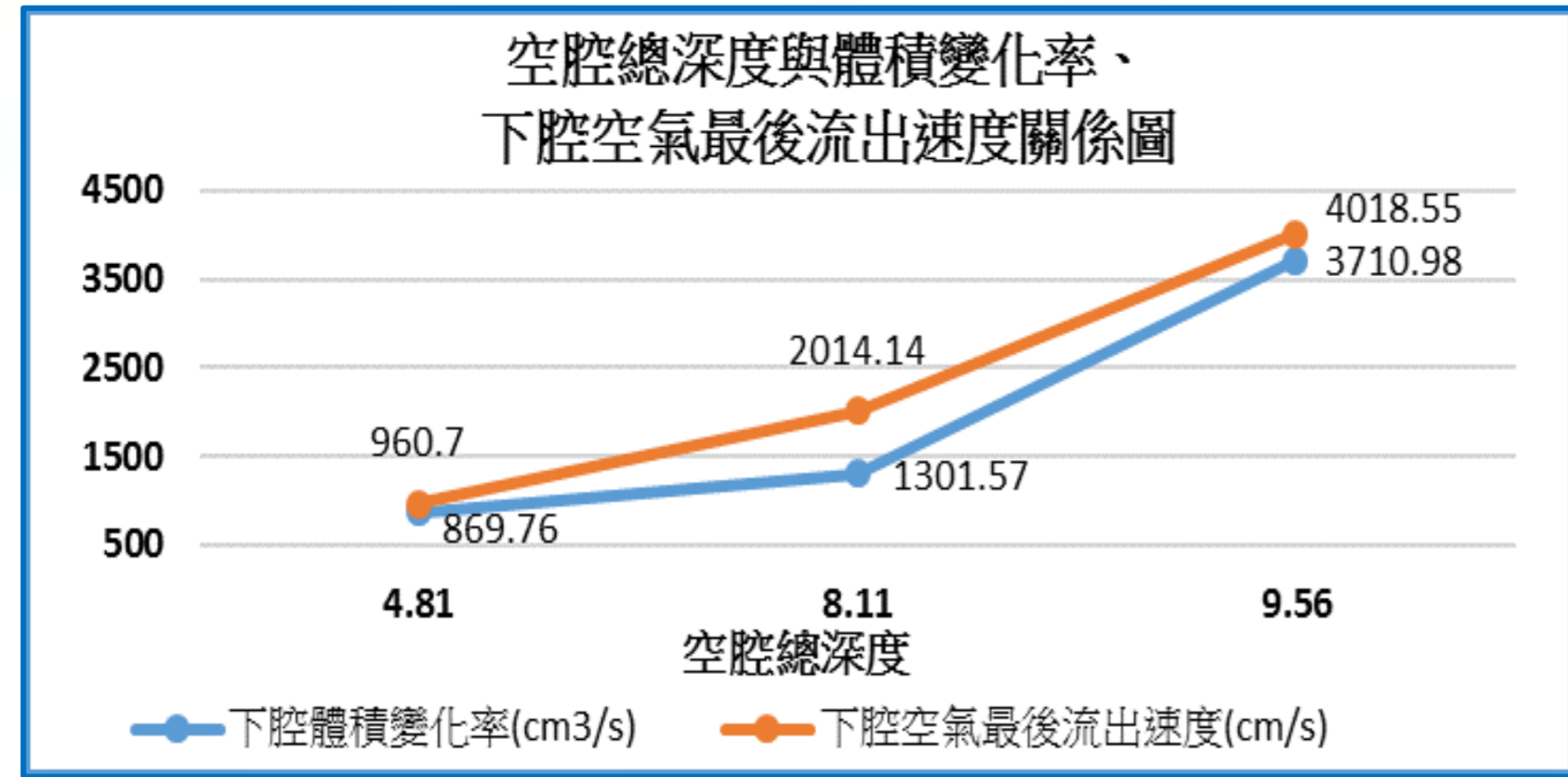
改變落體狀態對空腔激柱現象的影響

改變落體速度

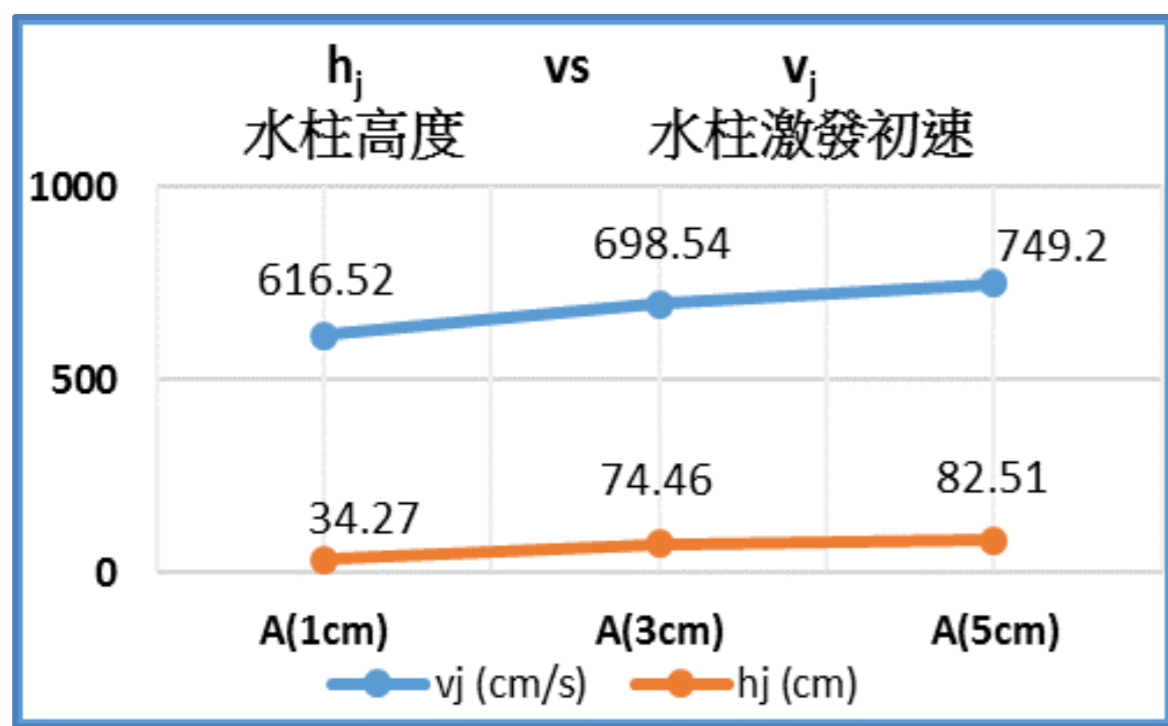
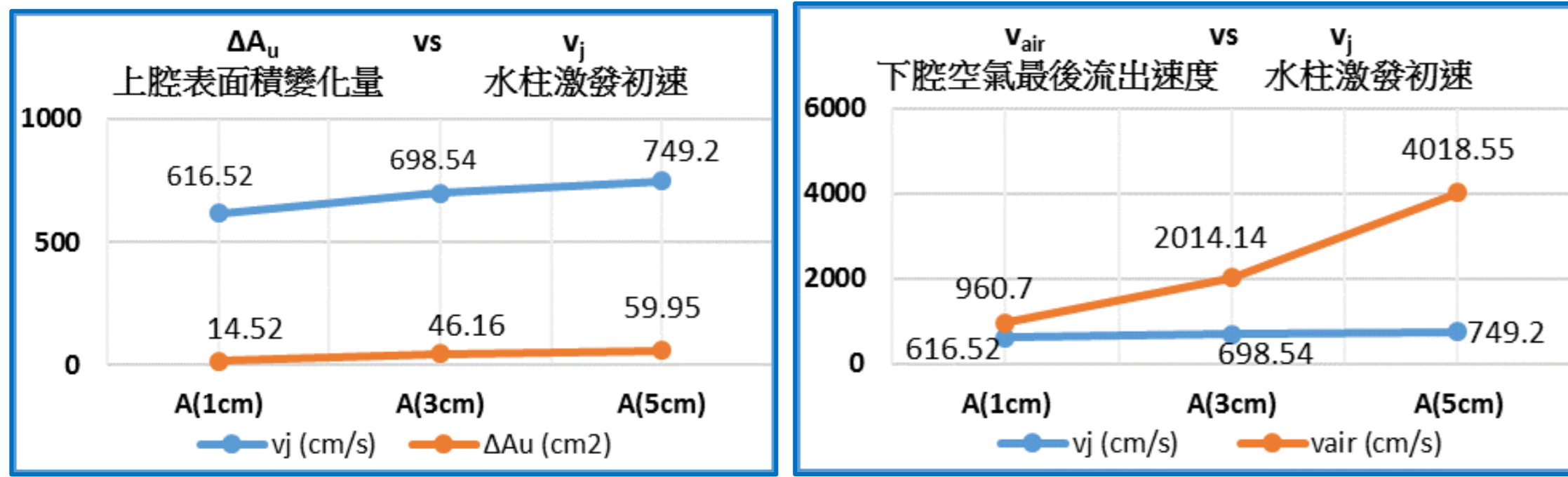
將落體移至距水面1、3、5cm高，進行實驗。

落體類別	A(1cm)	A(3cm)	A(5cm)
空腔形態			
觀察結果	腔體為三者中最小，且下腔圓弧的形狀最明顯	下腔明顯較A(1cm)的下腔大，形狀也較細長	腔體為三者中最大，且下腔形狀最細長

當空腔愈深(h_u+h_d)，液壓越大，所以造成體積變化率與下腔空氣最後流出速度較大。

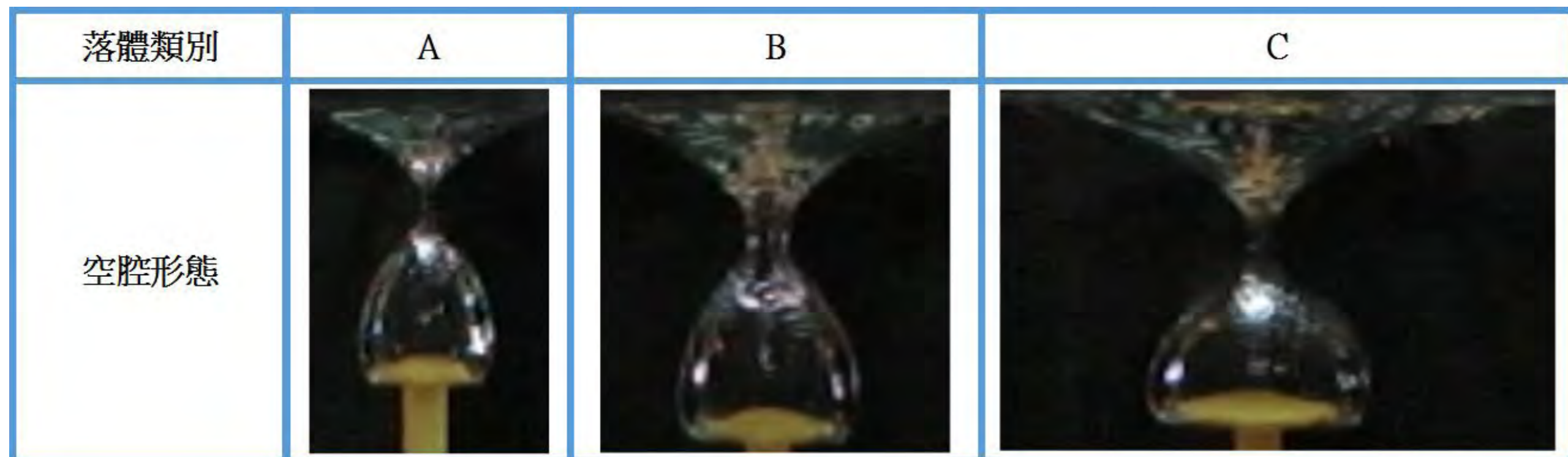


上腔表面積變化量與下腔空氣最後流出速度皆會影響水柱激發初速；進而影響水柱高度。

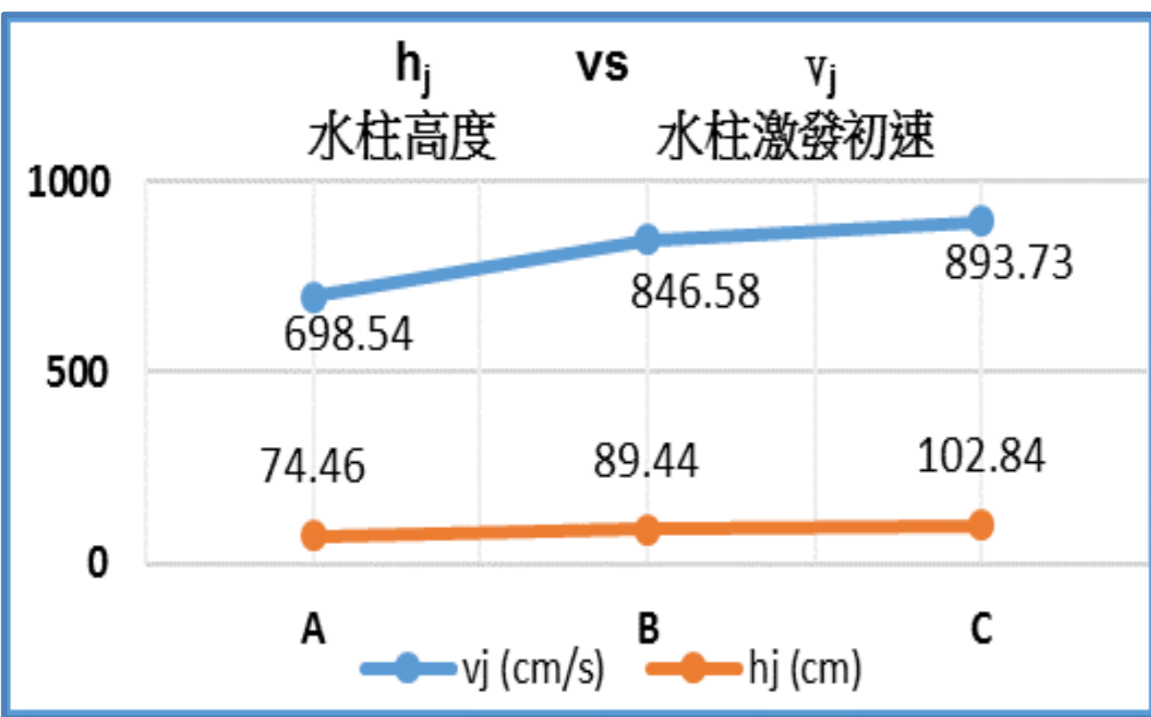
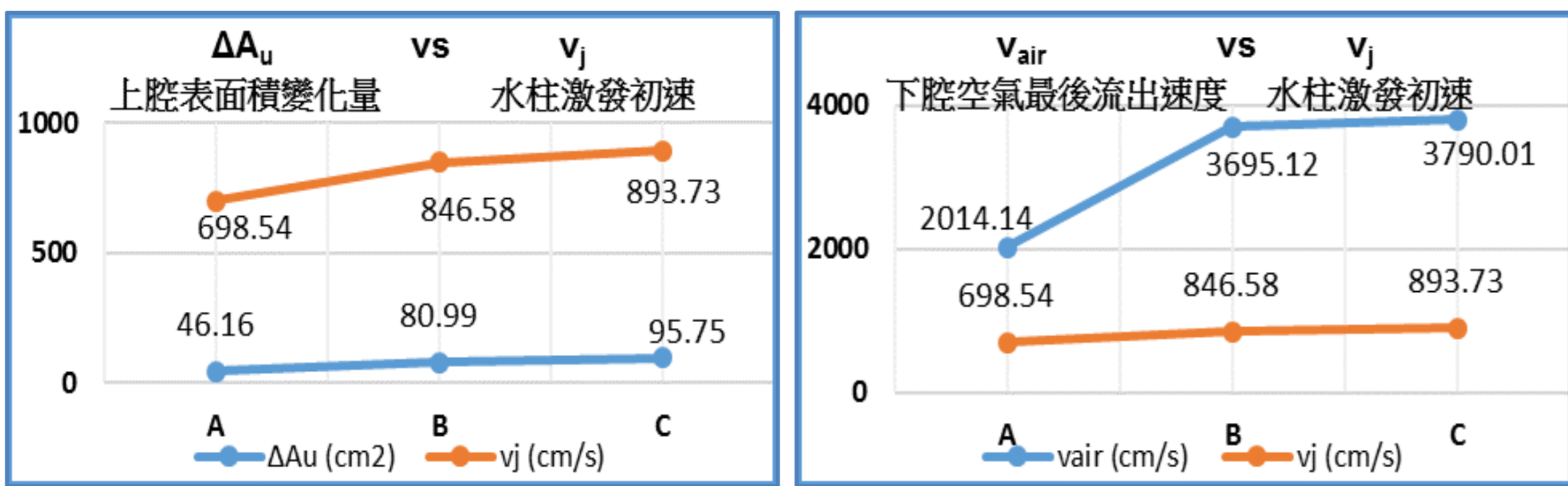


改變落體截面

套好落體(圓盤，半徑1.5cm、2cm、2.5cm)，移至距離水面3cm高，進行實驗。

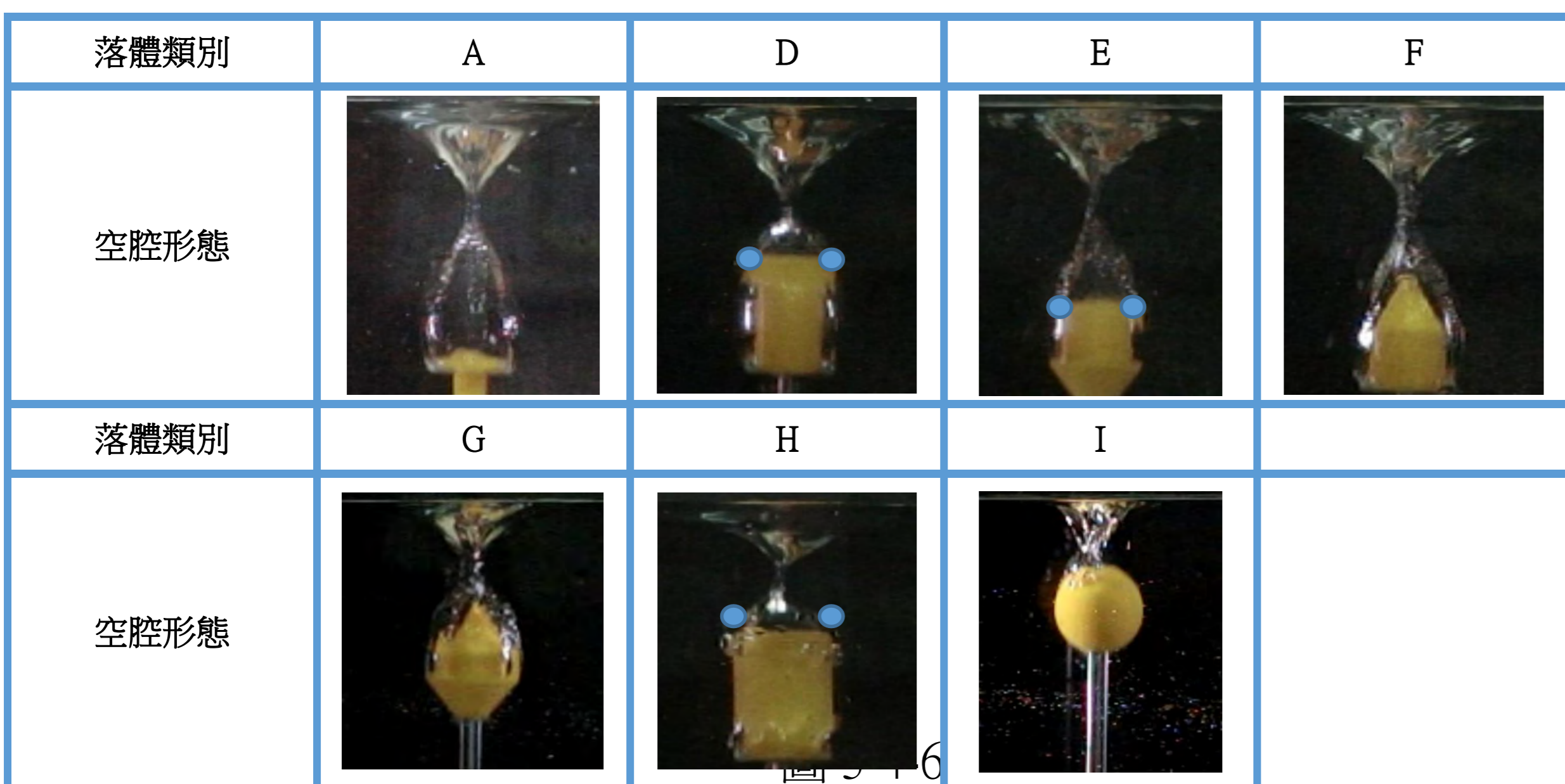


截面積愈大，上腔表面積變化量與下腔空氣最後流出速度較大，因此水柱激發初速與水柱高度較大。



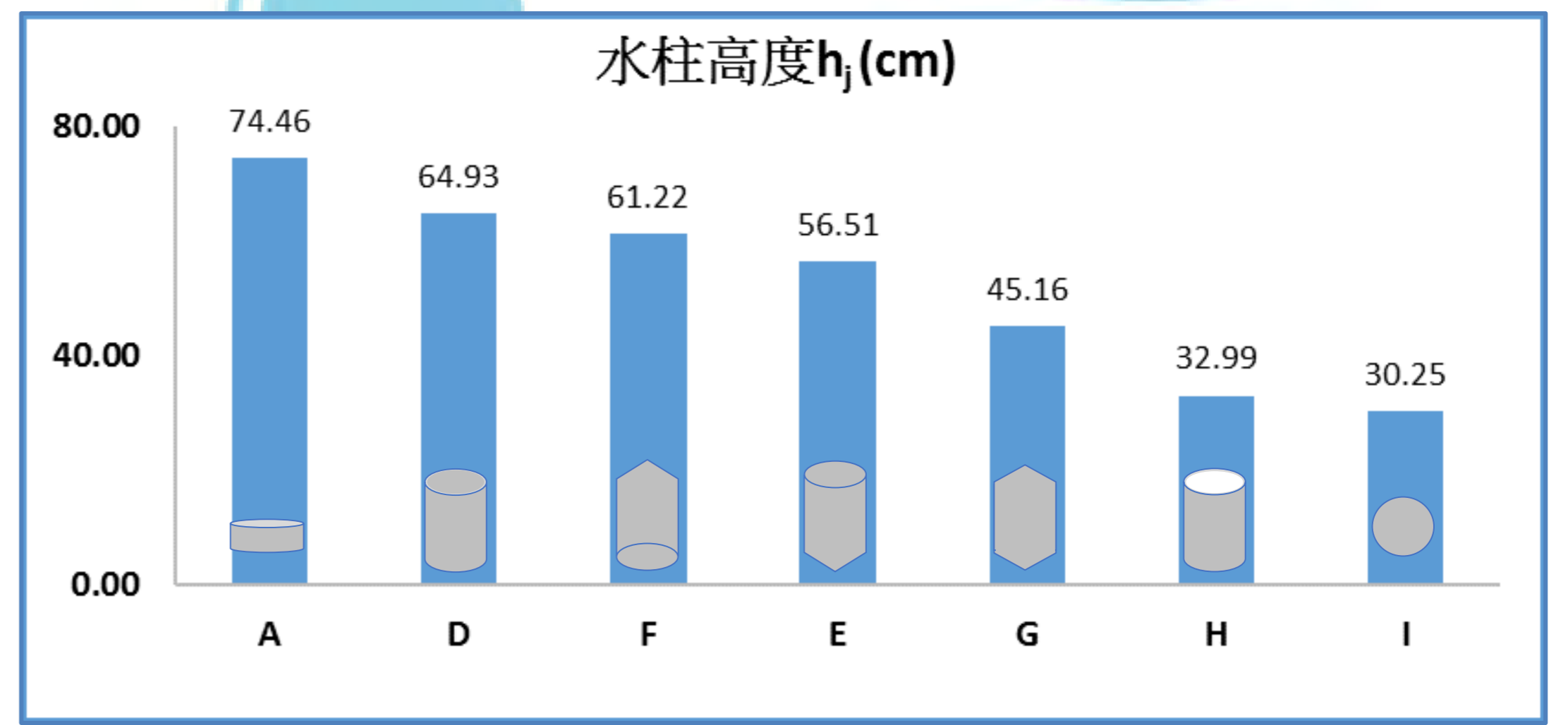
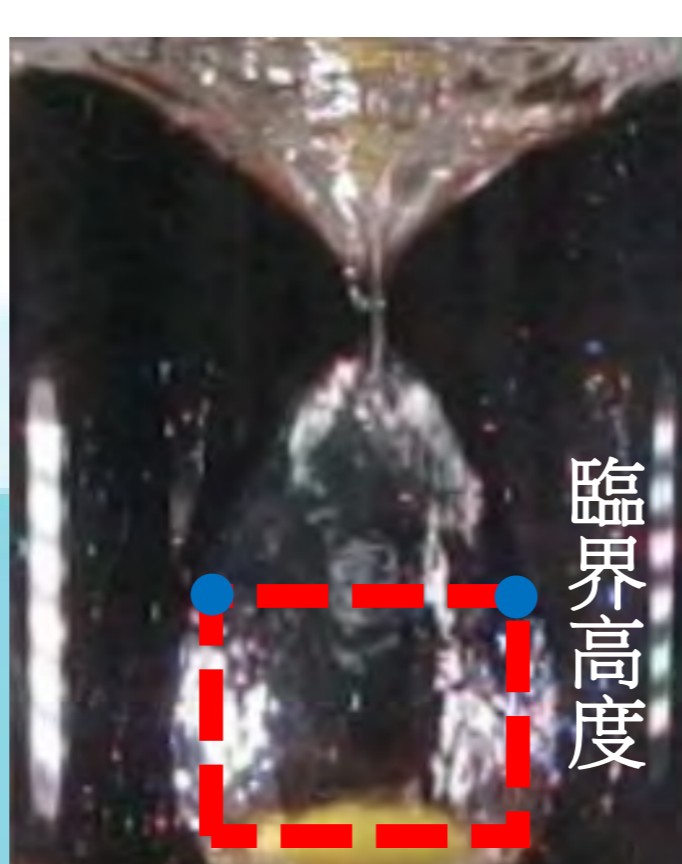
改變落體形體

分別以不同落體，移至距離水面3cm高，進行實驗。



4-5

邊A、D)的實驗數值，發現長度較短的落體(圓盤)的下腔的截斷效應；落體下腔截斷分割出較小下腔的現象。落體長度大於臨界高度，就會被截斷，分割出較小、較扁的下腔，激柱效果也會較差。



綜合比較：圓盤 > 圓柱 > 圓球

改變落體表面狀態

套好圓柱、球狀落體並均勻塗抹撥水劑，移至距離水面3cm高，進行實驗。塗抹撥水劑的落體，上腔表面積變化量與下腔空氣最後流出速度較大，水柱激發初速與水柱高度也較大。

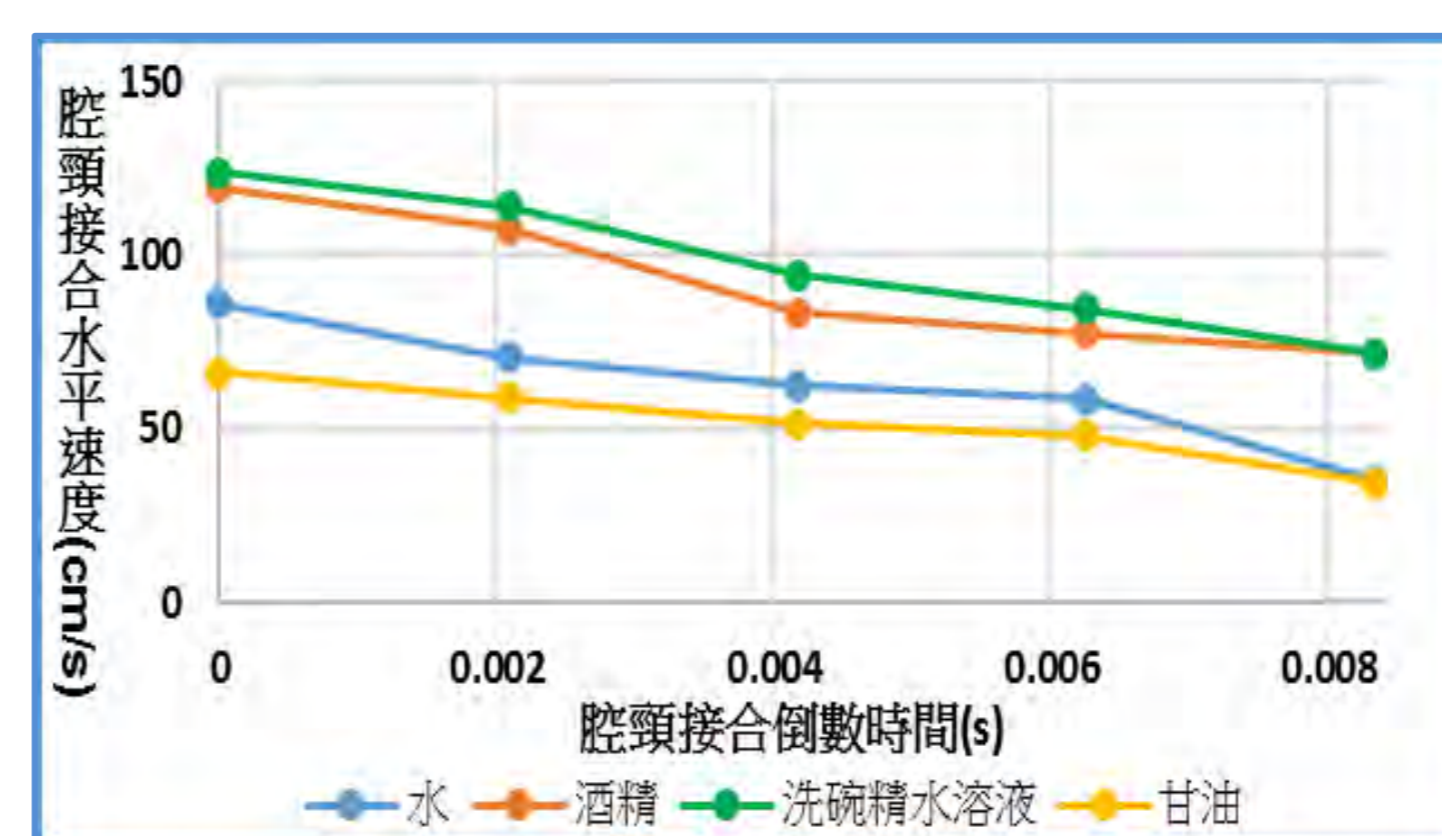
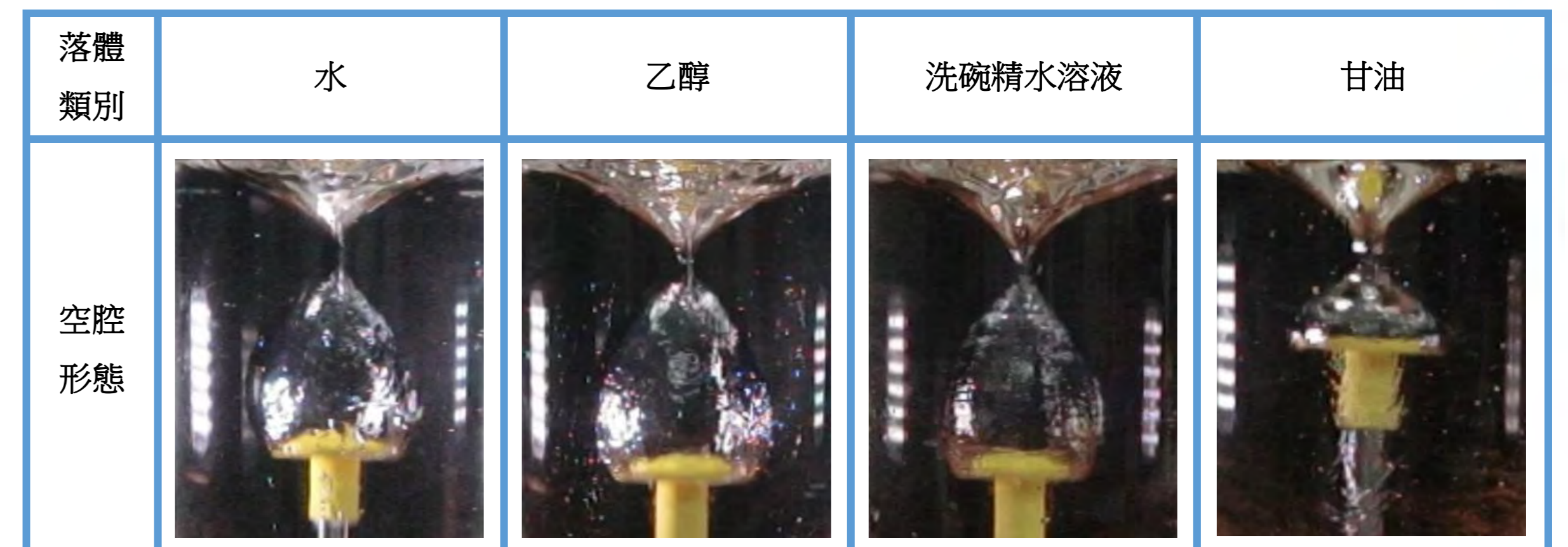
落體類別	I	I 塗抹撥水劑
空腔形態		
觀察結果	無下腔，深度較小	會形成上下腔，深度較大

從球體可看出較明顯的表面張力效應，其兩側可看出入水後的接觸角有明顯差異，造成空腔形態極不同，進而影響了激柱的結果。

改變液體狀態對空腔激柱現象的影響

改變液體種類

以同一落體分別置於不同液體(水、乙醇、洗碗精水溶液、甘油)內，進行實驗。



液體種類 25°C	水	乙醇	甘油
表面張力 (dyne/cm)	71.98	22	62.5
黏度 (mPa · s)	0.89	1.078	945

腔頸接合前：

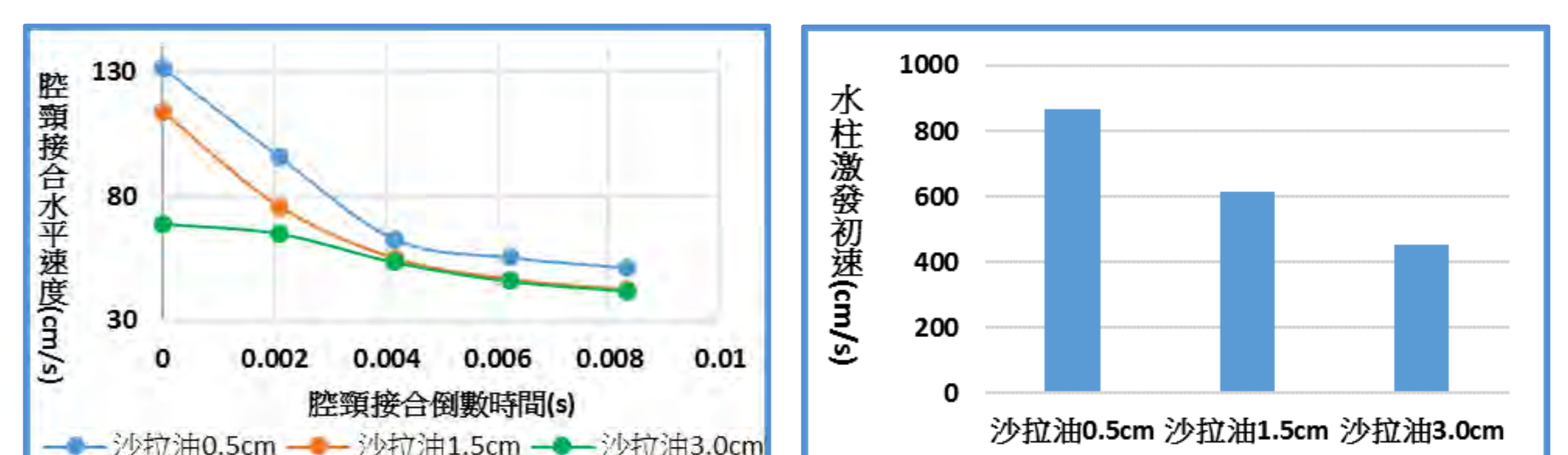
- 1.張力小，接合快；張力大，接合慢。
- 2.黏度小，接合快；黏度大，接合慢。

腔頸接合後：

造成水柱激發初速差異的主因是黏度。

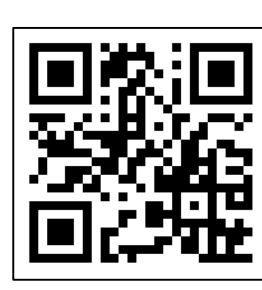
改變油-水分層厚度

將落體置於不同厚度沙拉油層中，進行實驗。

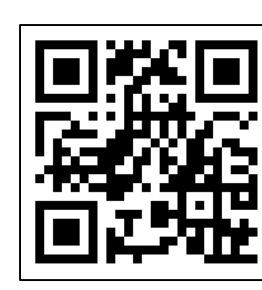


沙拉油層越厚，黏滯力越大，液體越不容易流動，腔頸的接合速度也越慢。

「節」的現象討論：



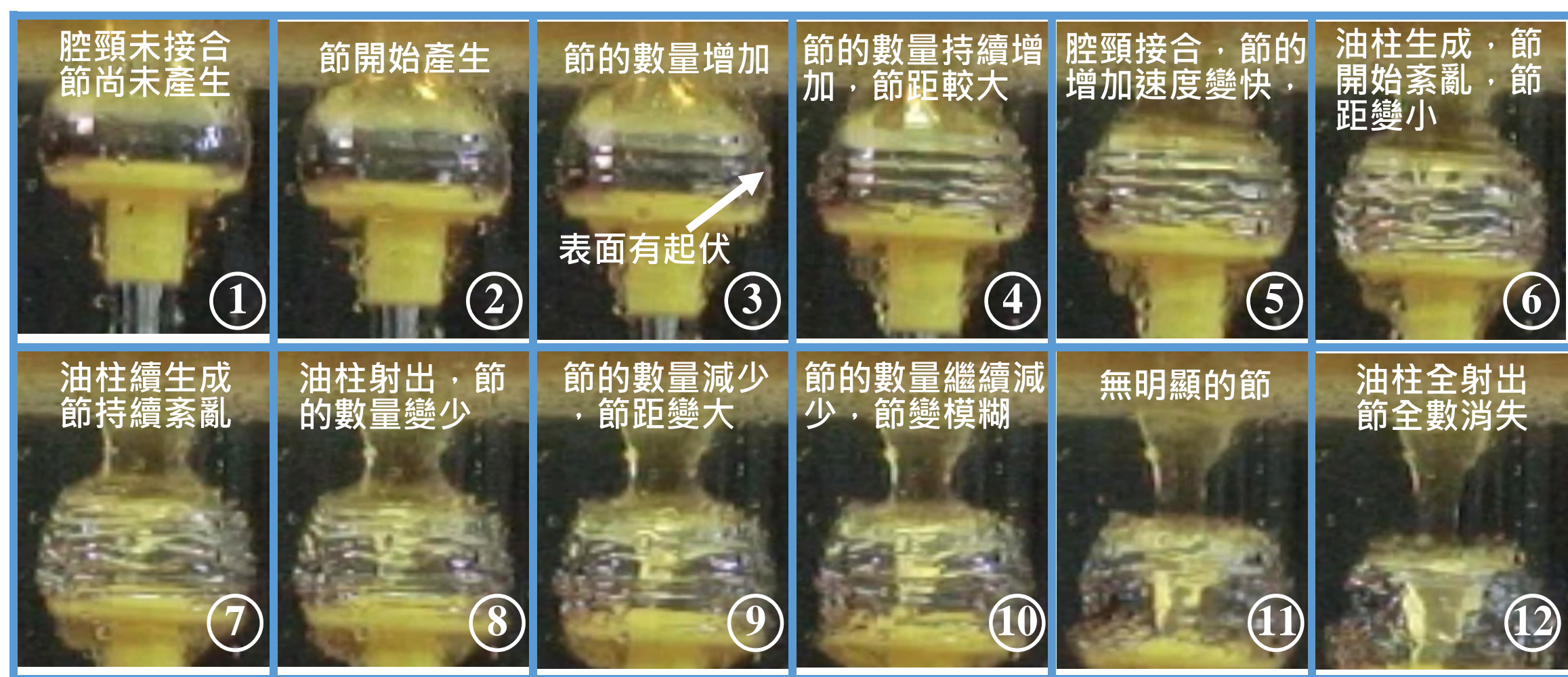
油節



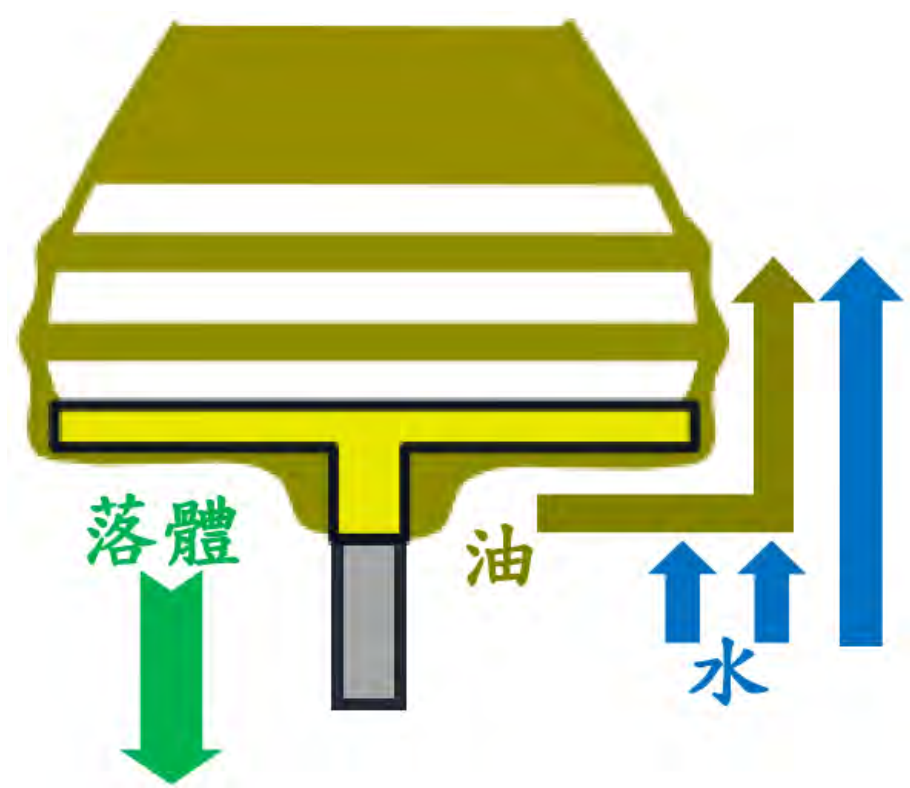
油節動畫

使用油水分層實驗，發現腔體

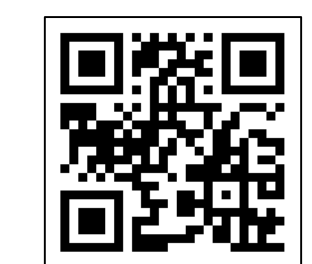
收縮時，下半部會出現油-水間隔的「節」。



油和水會沿著邊緣往上流動，油在內、水在外。液體以T型流道而上，經由摩擦，油-水之間出現波浪狀的擺動。



為了確認上述推論，分別將水、油染色，確認此處節線為油。



紅水油腔



黑油油腔

類別	將水染成紅色	將油染成黑色
空腔形態		

「水」也會產生「節」，腔體邊緣可見明顯波動。



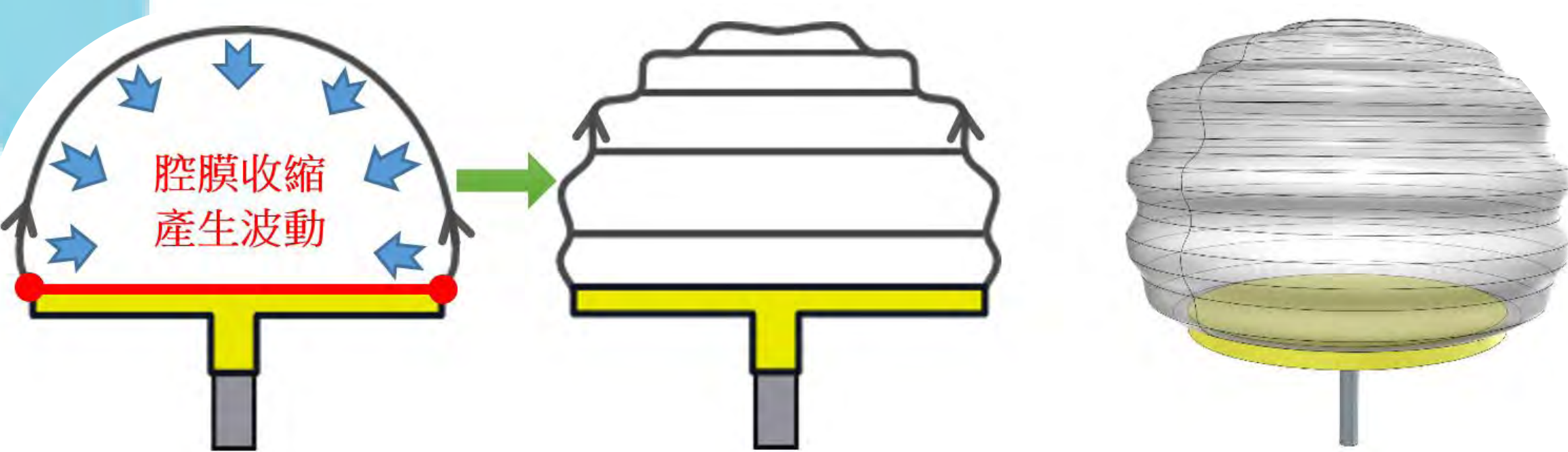
水節



水節動畫

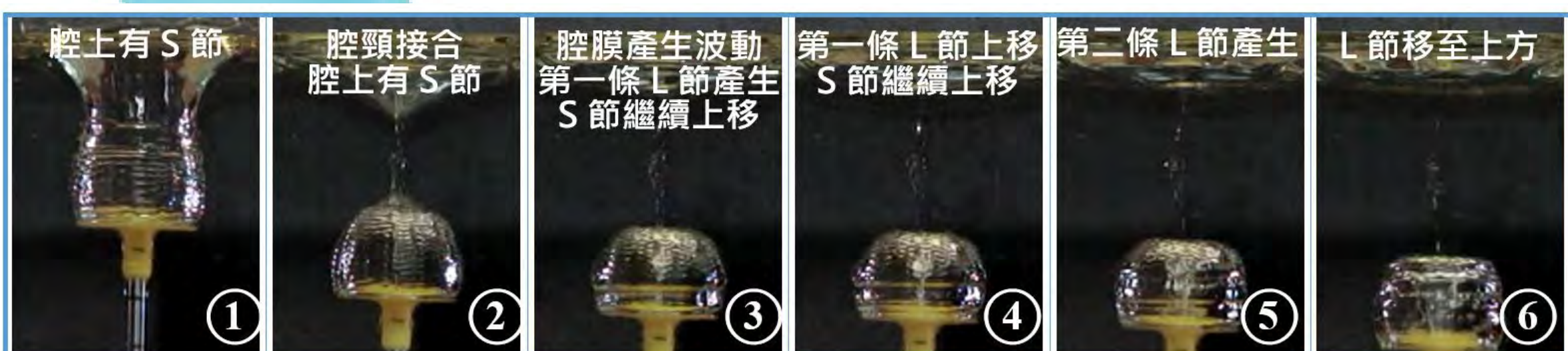


腔頸接合瞬間，急遽的恢復力使腔膜壓縮振盪，在與落體接觸的圓周上產生波動，生成了節



分層液體(油和水)在腔頸接合前即會產生節距較小的節，以「S節」稱之、單一液體在腔頸接合後會產生節距較大的節，以「L節」稱之。

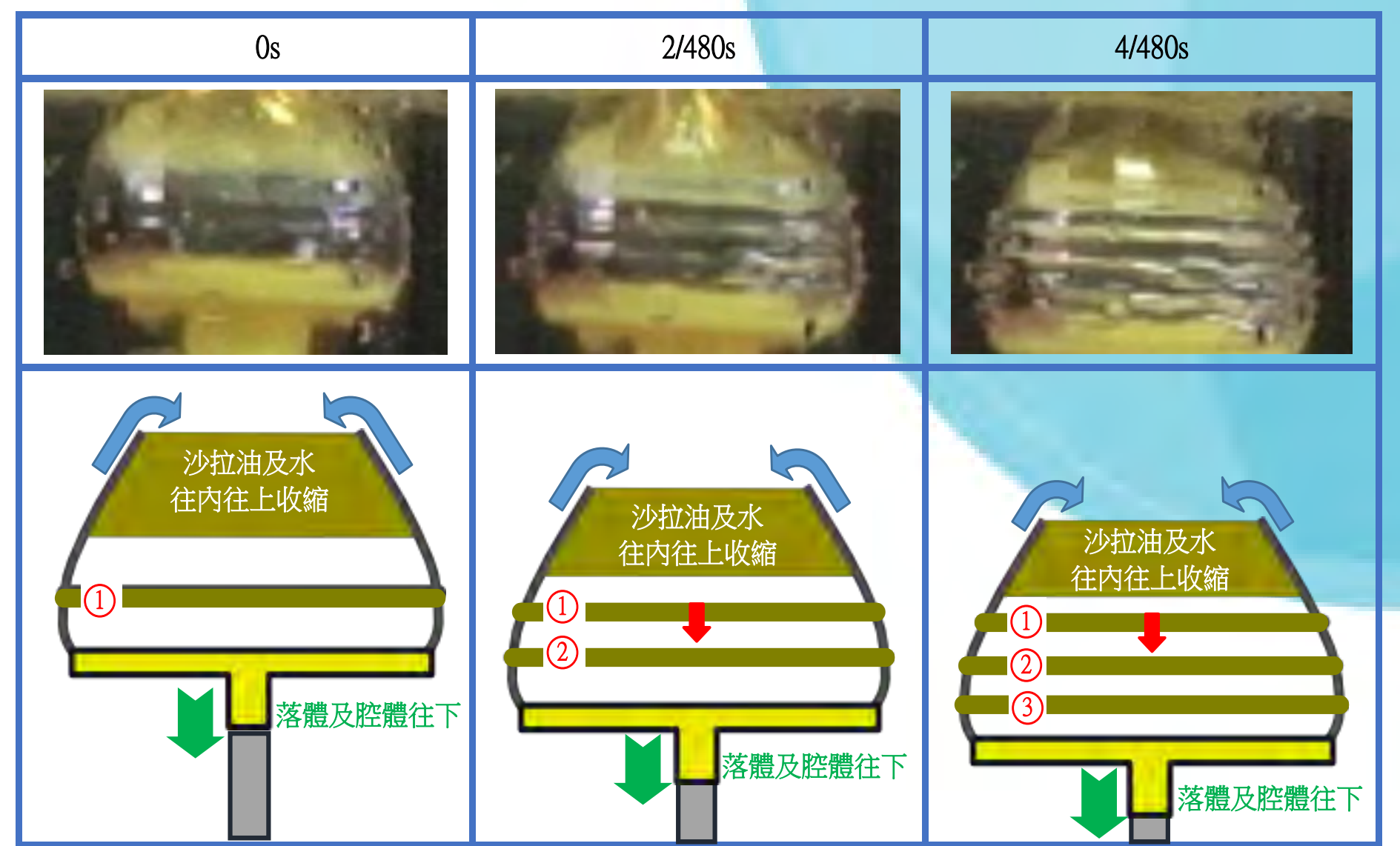
在薄油層的實驗中發現:分層液體在腔頸接合後，除S節外，確實也可觀察到L節。



節的觀察結果整理如下表:

類別	油水分層(多液)：產生S節、L節	水(單液)：產生L節
節的成因特性	<p>腔頸接合前：油水之間的交互作用產生S節，發生位置在油和水之間，節距小，節線為沙拉油</p> <p>腔頸接合後：除S節外，急遽的恢復力使腔膜產生壓縮振盪，在與落體接觸圓周上產生了波動，生成L節，發生位置在腔膜上，節距大</p>	<p>腔頸接合後，急遽的恢復力使腔膜產生壓縮振盪，在與落體接觸圓周上產生波動，生成L節，發生位置在腔膜上(水和空氣之間)，節紋細、節距大</p>

「節」在腔上的速度：



方法1： $V_{節腔} = V_{節原} - V_{腔原}$

方法2： $v = \lambda \times f$

以油-水腔為例

$$V_{節腔} = -6.09 - (-91.94) = 85.85 \text{ cm/s} \uparrow$$

$$v = \lambda \times f = 0.35 \times 240 = 84 \text{ cm/s} \uparrow$$

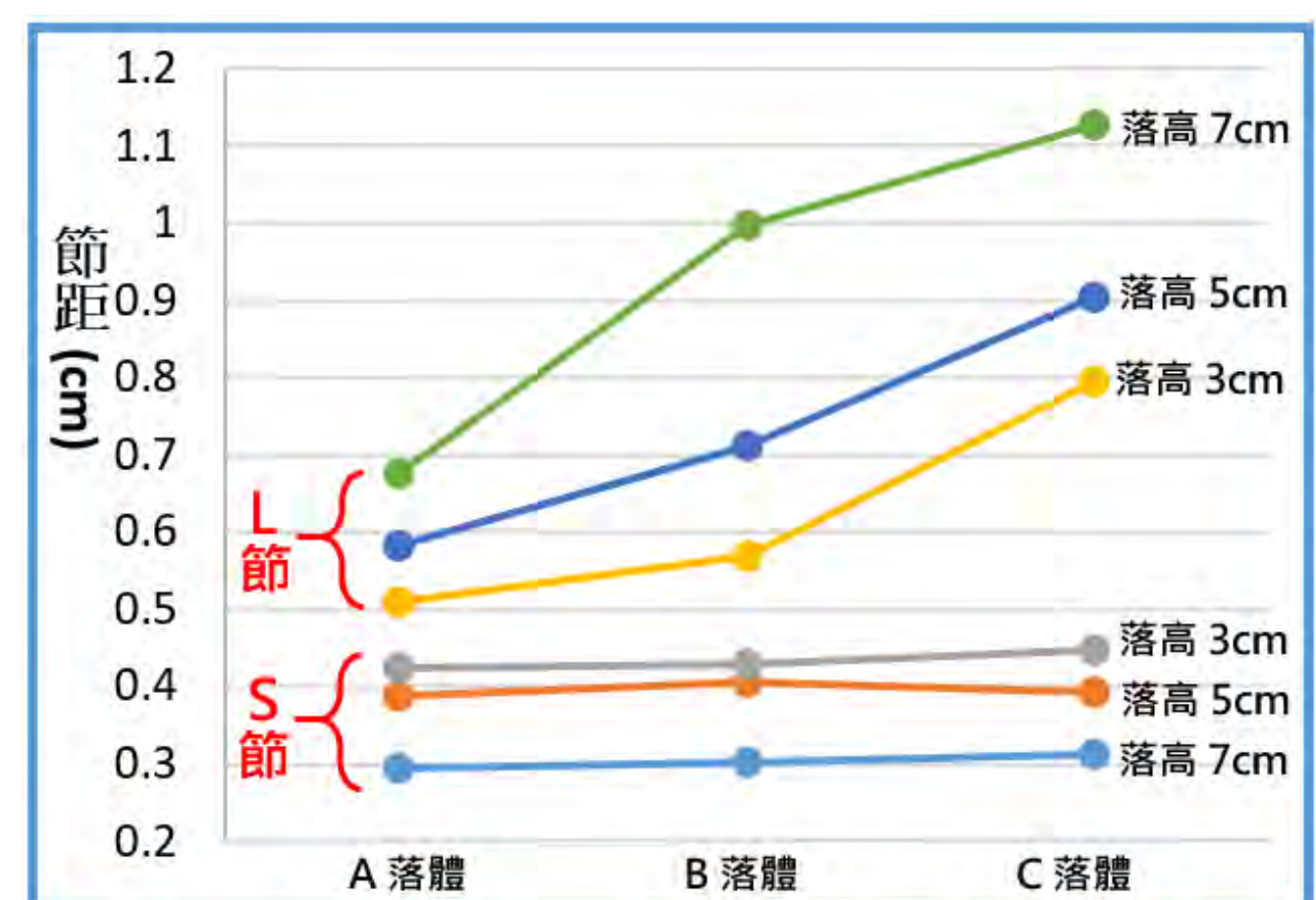
以水腔為例

$$V_{節腔} = 87.31 - (-80.19) = 167.5 \text{ cm/s} \uparrow$$

$$v = \lambda \times f = 0.70 \times 240 = 168 \text{ cm/s} \uparrow$$

水腔上的「節」速比油水腔上的「節」速大

「節距」分析：L節皆大於S節



相同落體：

相同落高：

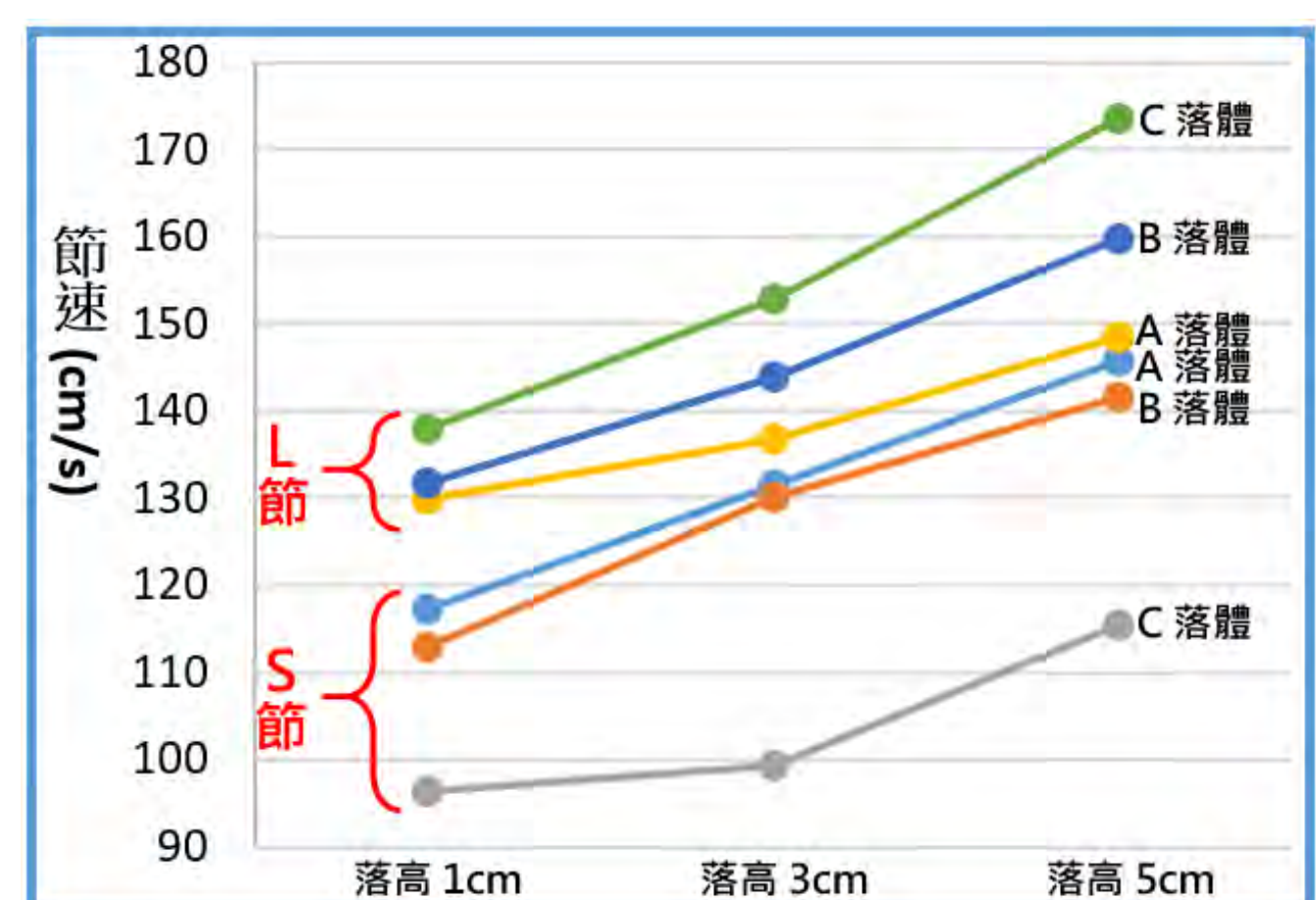
落高愈大，S節愈小

截面愈大，S節差異不大

落高愈大，L節愈大

截面愈大，L節愈大

「節速」分析：L節皆大於S節



相同落體：

相同落高：

落高愈大，S節愈大

截面愈大，S節愈小

落高愈大，L節愈大

截面愈大，L節愈大

改變環境氣壓對空腔激柱現象的影響

將金屬落體塗上黃色壓克力顏料塗上撥水劑，並置於不同氣壓狀態下進行實驗。



常壓入水



低壓入水

