

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

最佳團隊合作獎

030117

掀開『奧托馬蒂克·賽芬裘』的神秘面紗

—虹吸球排水因素之研究

學校名稱：臺中市立大甲國民中學

作者：	指導老師：
國二 莊曜亘	楊鍾鳴
國二 杜祐陞	楊麗親
國二 李睿哲	

關鍵詞：虹吸現象、液壓、大氣壓力

摘 要

以往魚缸換水都是將長長的水管裝滿水後，再將雙邊管口塞住後，一端放入抽水魚缸，另一端放入空的盛水槽中。通常這樣子要拿著長且重的管子換水，同時要將水管先完全裝滿水很不方便。本研究依據俄國物理學家 Platonov 所發明的『自動虹吸球 Automatic Siphon Ball』，進行變因的探討研究，製作出一個簡單且排水高度、排水效果較佳的自動虹吸球。研究發現：管長越長、管口徑越小、球直徑越大、管內小孔位置越高、小孔越小、球下孔越小、水溫越高、球體深入越深的水面下，會有很好的汲水效果。如此只要將虹吸球綁上重物丟入水中，自動下沉後便會進行虹吸現象，將魚缸水抽完，十分方便。

壹、研究動機

以前小學時老師曾教過簡單的虹吸現象。但在操作此實驗時，要先讓導管充滿水或吸出空氣。後來研究者發現俄國的物理學家 Platonov 製作的虹吸裝置，僅僅簡單利用一個圓球、一條導管，便讓水導引流出。因為俄國物理學家並未仔細說明裝置的作用原理，所以引起研究者的好奇，想窺探圓球內部發生了什麼樣的改變，了解為什麼可以將容器的水汲出？如果能夠提升汲水的高度便能夠提高汲水的成功率，這樣以後換水時手就可以不用碰到髒的魚缸水，而自動換水了。

貳、研究目的與問題

本研究的目的是在於設計自動虹吸球（Automatic Siphon Ball）裝置，探討裝置產生的虹吸現象的機制，並探討球體、導管、溶液等相關因素對虹吸現象的影響，期待能製作出設計優良的自動虹吸球。因此本研究的目的有：

- 一、 探討虹吸球體內的『運作機制』。
- 二、 探討虹吸球的『導管因素』部分對排液高度之表現影響。
- 三、 探討虹吸球的『球體因素』部分對排液高度之表現影響。
- 四、 探討置入『溶液因素』部分對排液高度之表現影響。

依據研究目的，本研究要探討的問題如下：

1. 推論虹吸球裝置中的運作機制為何？
2. 虹吸球導管的粗細對排液高度的關係為何？
3. 虹吸球導管內孔洞開孔位置對排液高度的關係為何？
4. 虹吸球導管內孔洞大小對排液高度的關係為何？
5. 虹吸球的球體內容容量大小對排液高度的關係為何？
6. 虹吸球的球底部入水孔大小對排液高度的關係為何？
7. 溶液溫度對排液高度的關係為何？
8. 虹吸球裝置置入溶液深度對排液高度的關係為何？

參、研究器材

- 1.不同直徑壓克力透明球 5 顆(直徑各為 3、4、6、8、10 cm)，如圖 1
- 2.不同口徑(3、4、6、8、10mm)軟管 數目(依據實驗需求數量)，如圖 2
- 3.溫度計 1 個
- 4.砝碼 5 個
- 5.鉛棒 2 個
- 6.老虎鉗 2 個
- 7.榔頭 1 個
- 8.鐵釘 2 包
- 9.木棒 2 根
- 10.大桶子、大量筒、大燒杯各 1 個
- 11.乒乓球 數顆
- 12.黏土 2 包
- 13.膠帶 2 捲 (3~13 工具如圖 3)
- 14.簡易裝置如示例圖 4



圖 1：不同直徑透明球



圖 2：不同口徑軟管



圖 3：實驗使用其他工具



圖 4：完成之虹吸球裝置圖

肆、研究假設

右圖 5 為實驗裝置圖，當水由入水孔進入球內時，會擠壓內部的空氣，使得球內部的氣壓變大。當『球內部氣壓』大於外部『大氣壓力』時，便會從管內小孔排出內部空氣。當球內氣體被排除時，會引導管小孔下方氣體排除，此時導管『小孔下方內部氣壓』小於球內部氣壓，依據白努力定律，因而將球內部的水壓出。接著球內氣體又被從小孔擠出，反覆引導排出水，因而出現一段一段的水柱。當壓出的水高度超過彎管最高點變開始進行虹吸原理而排水。

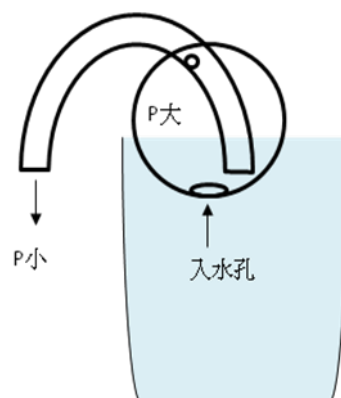


圖 5：實驗裝置示意圖

為了量測方便，我們將導管拉直，測量受壓水向上的最大高度，當受壓水向上高度越大，越容易進行虹吸現象而排水，如圖 6。而『排液高度』定義為一開始盛水容器水面至管內液面之最大高度。

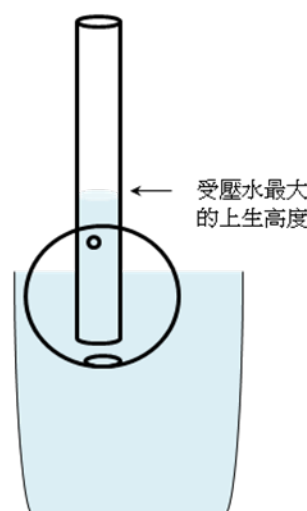


圖 6：實驗量測示意圖

假設：當球內部氣壓變化較大時，此時球體內的氣壓瞬間會比導管小孔下方的氣壓大，從球內經由小孔排入管中的氣流會引導管內下方的水。因此如何『使球內部氣壓變化』、『使導管內排出氣流流速增加』、『使導管小孔下方氣壓變小』便會是這個自動虹吸管成功排水的重要關鍵。在實驗未進行之前，我們推測下列方法可以達到此目的：

1. 球體下壓進入水中的速率與深度越大越好
2. 適當大小的導管小孔、球下方的入水孔越大越好，且導管小孔不得大於入水孔大小。
3. 導管口徑適當大小的情況下效果較好。
4. 先封住出水口，再將球體放入水中後打開出水口使得管內氣壓明顯變化的效果較好。
5. 因為氣體有一定的壓縮率，球體有一適當大小的情況下效果較好。
6. 溫度較高時有利於球內部氣體排除，因此較高水溫效果較好。
7. 依據液壓公式 $P=hd$ ，在相同液壓時使用密度較小的液體成功率較高。

伍、實驗的流程與步驟

實驗一：探究虹吸球導管的內徑粗細對排水高度有何影響？

實驗步驟：(相關圖示如圖 7)

1. 拿相同直徑 40mm 的乒乓球五顆。
2. 拿不同內徑(3mm、4mm、6mm、8mm、10mm)、長度 500mm 導管各一，將球上方開與導管口徑相同的孔洞，孔洞下方偏側約 5mm 處開直徑 10mm 的另一孔洞，放入導管深入下方孔洞(管底不與球內面接觸)。
3. 與球上方孔洞接觸的管壁用油性筆做記號後抽出導管，然後在距記號下方 10mm 處的導管壁開固定大小之小孔(五條導管皆相同，約 1mm)，再將導管插回接近球體底部，完成自動虹吸球裝置。
4. 在球體上方導管旁固定 100g 砝碼，準備 1000ml 大量筒，加水至滿水位，並量測其水溫與當時氣溫。
5. 封住導管與空氣接觸之口徑後，將整個裝置自量筒水面上方自由落下，然後將管子懸掛於自製的高度測量器，觀察完成虹吸現象時管子的彎曲置放高度。
6. 改變管子的彎曲懸掛高度反覆進行實驗，直到找出最大的排水高度值。

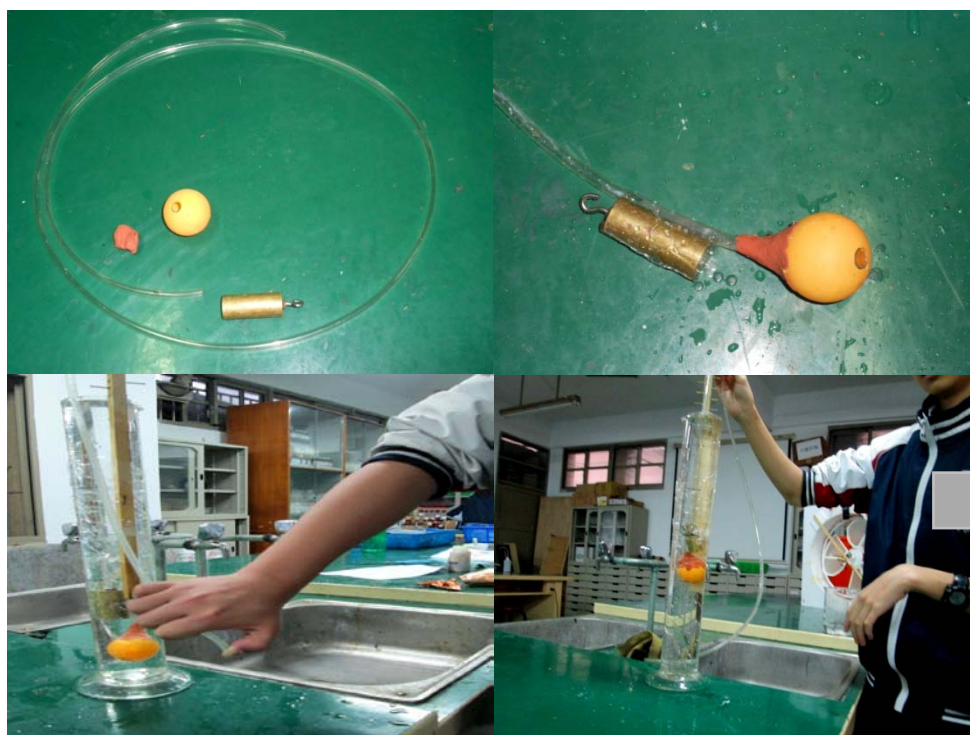


圖 7：實驗一相關圖示

實驗二：虹吸球裝置置入溶液深度對排液高度的關係為何？

實驗步驟：(相關圖示如圖 8)

1. 拿一個管長 1500mm、直徑 4mm 的自動虹吸管裝置，和一個 430mm 的大量筒。
2. 將裝水的大量筒用尺把水的高度的區分成 5 等分，分別是水面下 55、130、205、280、355mm，每等分間隔 75mm。
3. 將自動虹吸球的球體外之管壁黏上 100g 的砝碼，將大量筒加至滿水位，並量測其水溫與當時氣溫
4. 封住管子與空氣接觸之口徑後，將整個裝置自量筒水面上方自由落下，然後將導管懸掛於自製的高度測量器，觀察完成虹吸現象時管子的彎曲置放高度。
5. 改變管子的彎曲懸掛高度反覆進行實驗，測量並找出每個區分刻度能排出水的最大高度。



圖 8：實驗二相關圖示

實驗三、虹吸球裝置導管的長度對排水高度有何影響

實驗步驟：

1. 拿 5 顆相同的乒乓球。
2. 拿不同管長(100、125、150、175、200cm)的導管，將球上方開與管子口徑相同的孔洞，孔洞下方偏側約 5mm 處開直徑 10mm 的另一孔洞，放入管子深入下方孔洞(管底不與球內面接觸)。
3. 與球上方孔洞接觸的管壁用油性筆做記號後抽出管子，然後在距記號下方 10mm 處的導管壁開固定大小之小孔(五條管子皆相同，約 1mm)，再將導管插回接近球體底部，完成自動虹吸球裝置。
4. 將自動虹吸球的導管上用膠帶黏上 100g 的砝碼，將大量筒加至滿水位，並量測其水溫與當時氣溫。
5. 改變懸掛高度並量出每種長度可排水的最高高度。



圖 9：實驗三相關圖示

實驗四、虹吸球管內小孔的位置對排水高度有何影響

實驗步驟：

1. 拿 5 顆相同大小的乒乓球。
2. 以相同管長 2000mm 的塑膠水管，將球上方開與管子口徑相同的孔洞，孔洞下方偏側約 5mm 處開直徑 10mm 的另一孔洞，放入管子深入下方孔洞(管底不與球內面接觸)。
3. 依次在球孔洞上方將管子做記號，然後抽出水管在距離下孔洞上方 15、20、25、30、35、40 mm 處，開直徑 1mm 孔洞，再將水管插回，深入底部。
4. 將自動虹吸球的水管上用膠帶黏上 100g 的砝碼，將大量筒加至滿水位，並量測其水溫與當時氣溫，改變懸掛高度並量出每種長度可出水的最高高度。



圖 10：實驗四相關圖示

實驗五、虹吸球管內小孔的大小對排水高度的影響

實驗步驟：

1. 拿 5 顆相同的乒乓球。
2. 以同管長 2000mm 的導管，將球上方開與管子口徑相同的孔洞，孔洞下方偏側約 5mm 處開直徑 10mm 的另一孔洞，放入管子深入下方孔洞(管底不與球內面接觸)。
3. 依次在球孔洞上方以油性筆將管壁做記號，然後抽出水管在距離下孔洞上方 40mm 處開一個直徑 1mm 小孔。
4. 將自動虹吸球的水管用膠帶黏上 100g 的砝碼，將大量筒加至滿水位並量測其水溫與當時氣溫
5. 改變懸掛高度後測量每個等分能排出水的最大高度。
6. 依次在小孔同樣高度位置上開不同數目的孔洞，再持續進行實驗。

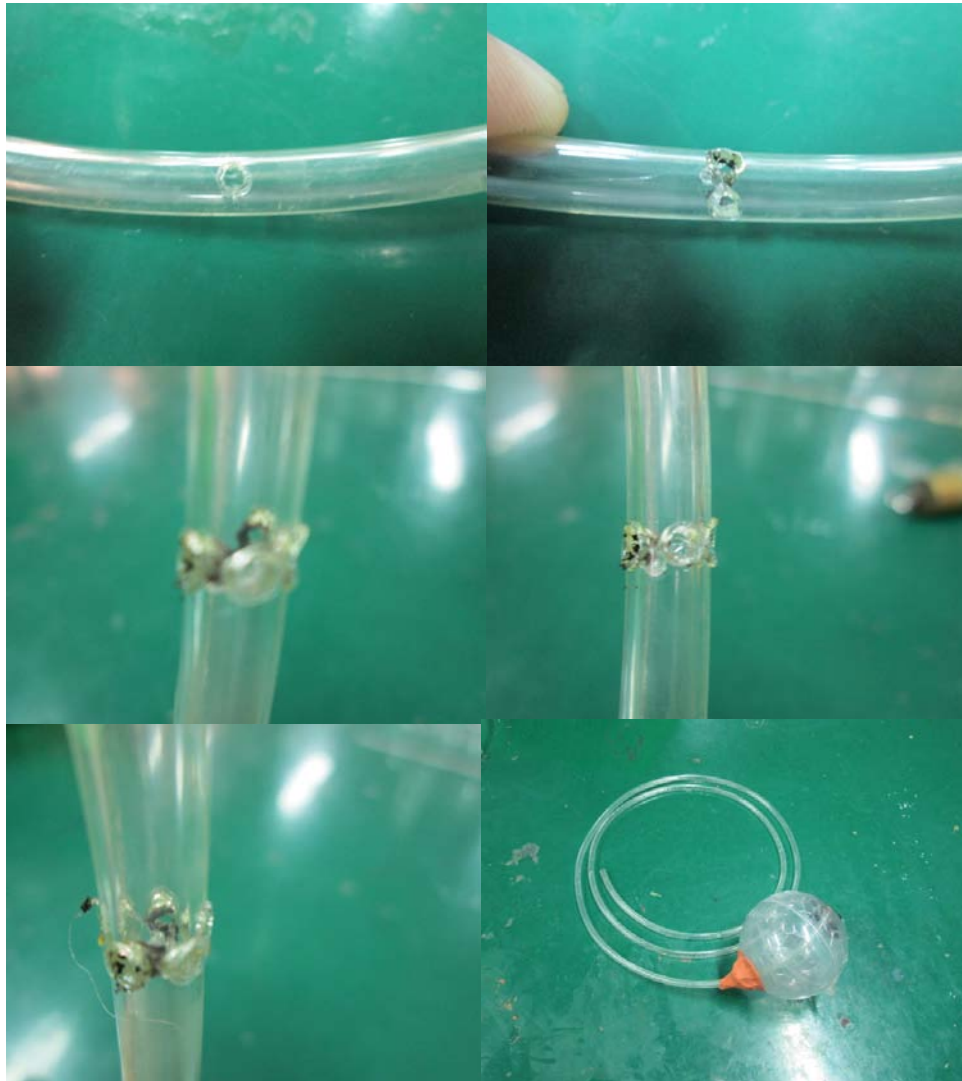


圖 11：實驗五相關圖示

實驗六、水溫對虹吸球的排水高度有何影響？

實驗步驟：

1. 準備適當的虹吸球裝置(管長 200cm)
2. 5 個大燒杯，分別配裝不同溫度(8、16、24、32、40℃)的水。
3. 分別將量筒的水倒入大量筒中。
4. 將自動虹吸球的水管上用膠帶黏上 100g 的砝碼。
5. 將大燒杯的水依序倒入大量筒中。
6. 測量不同溫度的水在自動虹吸球裝置中所汲出水的最高高度。



圖 12：實驗六相關圖示

實驗七、虹吸球之球體體積對排水高度有何影響

實驗步驟：

1. 取直徑不同大小之球體製作的自動虹吸球。
2. 在球體上方塑膠管固定 100g 砝碼，準備大量筒加水至滿水位，固定水溫與量測並固定氣溫。
3. 封住管口後，將整個虹吸球裝置自齊水面高度自由落下，將上方的塑膠管懸掛於自製的高度測量器，觀察是否可以完成虹吸現象，並改變懸掛高度反覆實驗，找出裝置最大的排水高度。
4. 換取不同直徑球體之虹吸球裝置，持續第三步驟，找出不同直徑虹吸球裝置的最大排水高度。



圖 13：實驗七相關圖示

實驗八、虹吸球底部入水孔大小對排液高度的關係為何？

實驗步驟：

1. 拿出直徑 10cm 的壓克力球體製作的虹吸球裝置。
2. 在球下方開啟不同數目的等大小的孔。
3. 在球上方塑膠管固定 100g 砝碼，準備大量筒加水至滿水位，並量測其水溫與當時氣溫。
4. 封住管口後，將整個球形裝置自齊水面高度自由落下，將上方的塑膠管懸掛於自製的高度測量器，觀察是否可以完成虹吸現象。
5. 改變懸掛高度再進行實驗一次，找出最大的排水高度。
6. 開放不同數目的下方孔洞，重複實驗。

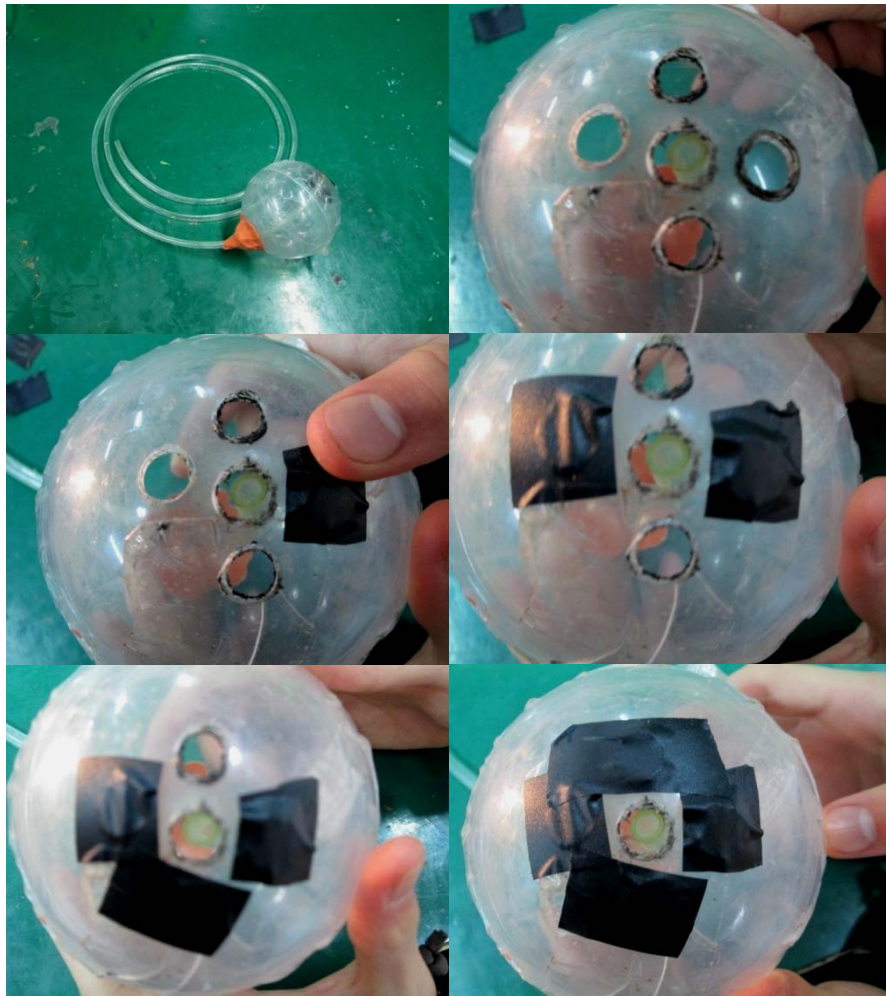


圖 14：實驗八相關圖示

陸、實驗結果

實驗一：探究虹吸球導管的內徑粗細對排水高度的影響

(氣溫 22°C，水溫 18°C、水深 350mm)

選取直徑為 40mm 的球體，插入相同長度、不同口徑的導管，加重物後於水面自由垂下，虹吸球裝置發生汲水現象，探究導管口徑大小與排水高度的影響。

表 1：不同粗細導管的排水高度

導管內直徑 (mm)	3	4	6	8	10
排水高度 (mm)	15	35	25	25	5

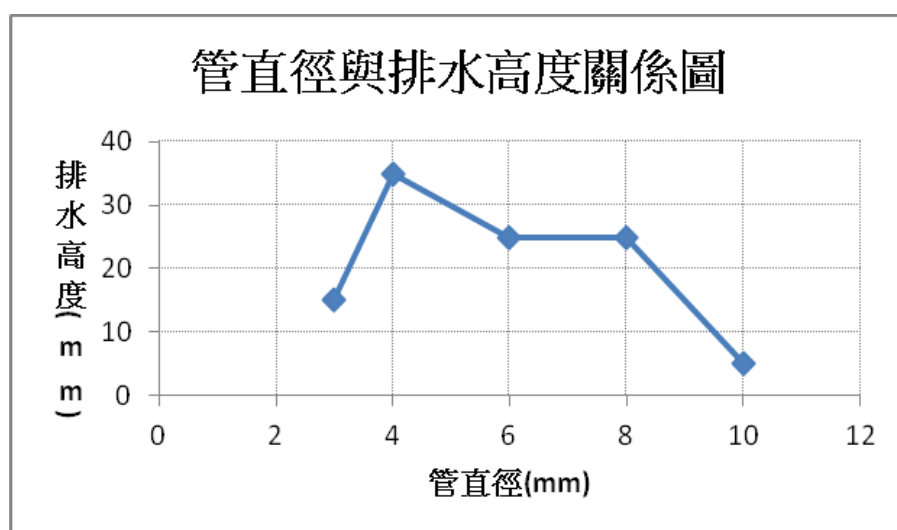


圖 15：不同粗細導管對排水高度的關係圖

小結：

1. 導管口徑 4mm，有最好的排水高度約 35mm。
2. 導管直徑太小(3mm)，推測可能是因為水流進細管中摩擦力形成阻力的關係，造成排水高度不足。
3. 在 4mm 之後，隨著導管直徑愈寬，排水高度漸次降低。推測 10mm 之導管管內氣壓較大的關係，影響排水高度。
4. 口徑大於 8mm 之後，排水高度有逐漸降低趨勢。

實驗二：虹吸球裝置置入溶液深度對排液高度的影響

(氣溫 22℃，水溫 18℃、管長 1000mm)

將裝水的大量筒用尺把水的高度的區分成 5 等分，然後將虹吸球裝置加上 100g 的砝碼，使其以自由落下方式垂降至實驗高度。探討虹吸球裝置深入液體不同深度，對排液高度的影響。

表 2：虹吸球置入溶液深度的排水高度

水面下深度 (mm)	55	130	205	280	355
排水高度 (mm)	5	75	75	85	95

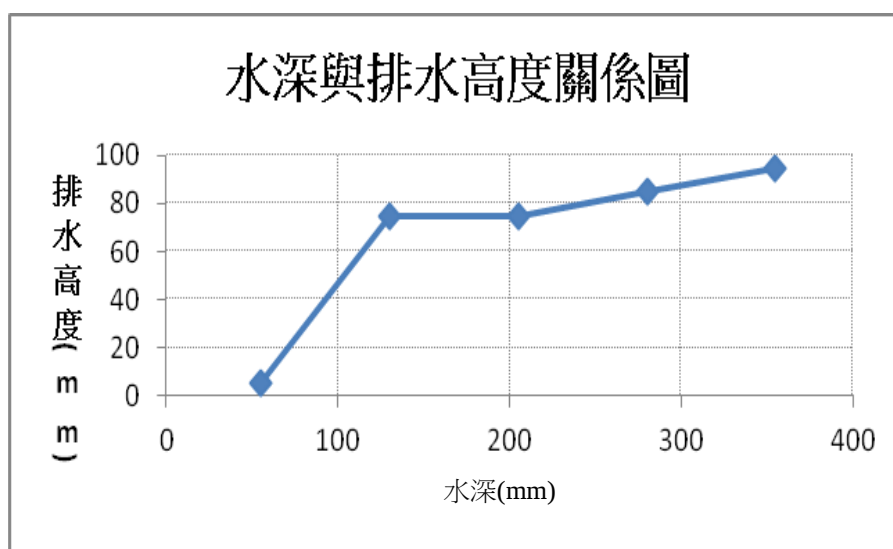


圖 16：深入不同液面高度的排水高度的關係

小結：

1. 當虹吸球裝置深入水面下 55mm 處時，其導管排水高度約 5mm；而當虹吸球深入水面下 355mm 處時，導管內排水高度約 95mm。推測深入水面下 100mm 以下深度對虹吸球球體內部的壓力運作之推升效果較佳。
2. 球體在液面下越深，其排水高度愈大。
3. 從圖 16 可以發現，當球體在液面下越深處，其排水高度愈大，但有漸趨平緩的趨勢。

實驗三：虹吸球裝置導管的長度對排水高度的影響

拿不同管長(100、125、150、175、200、1000cm)的導管的虹吸球裝置，然後將虹吸球裝置加上 100g 的砝碼，使其以自由落方式垂降至實驗高度。探討不同導管長度對排液高度的影響。

表 3：不同長度導管的排水高度

管長(cm)	100	125	150	175	200	1000
排水高度(cm)	9.5	20.5	22.5	23.5	26.5	34.0

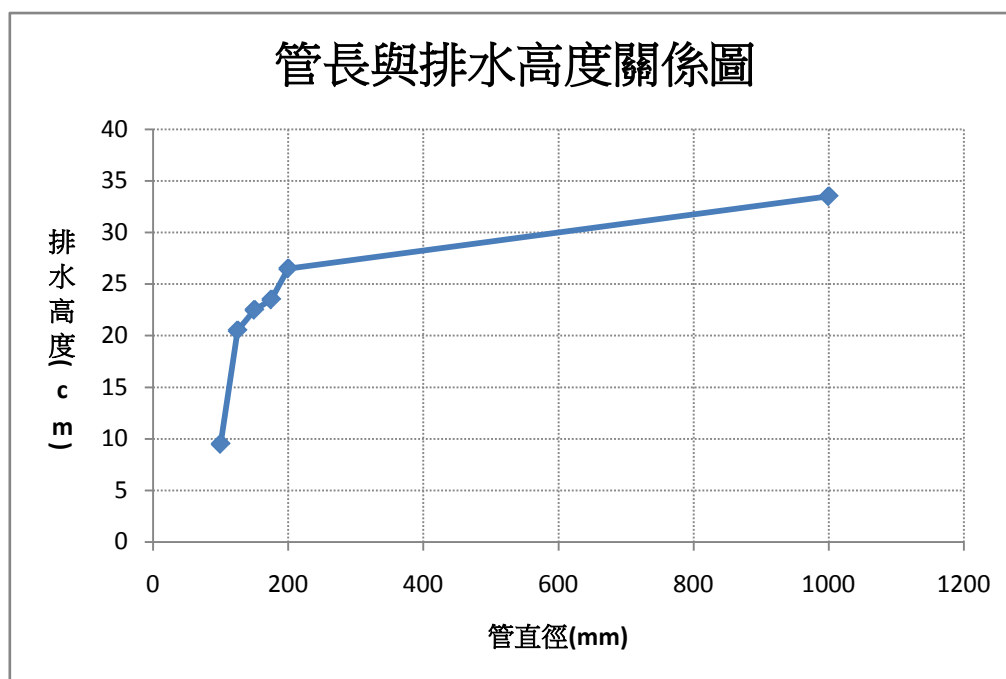


圖 17：不同導管長度與排水高度關係圖

小結

1. 從表 3 中發現，當導管長度為 100cm 長時，其排水高度約為 9.5cm，而導管長度為 125cm 以上時，排水高度上升幅度較大，隨著管長愈長，排水高度愈高。
2. 從圖 17 發現，排水高度隨管長增加其排水高度漸趨平緩，推測管長造成排水高度有一極限值，此狀況下的極限值約為 35cm。

實驗四：虹吸球內部導管小孔的位置對排水高度的影響

將導管在距離虹吸球球體下方孔洞約 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 cm 處開 1mm 小孔，將虹吸球裝置加上 100g 的砝碼，探討虹吸球球體內部導管小孔位置對排水高度的影響。

表 4：球體內部導管小孔不同位置的排水高度

小孔高度(cm)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
排水高度(cm)	8.5	14.5	18.5	25.5	38.5	43.5

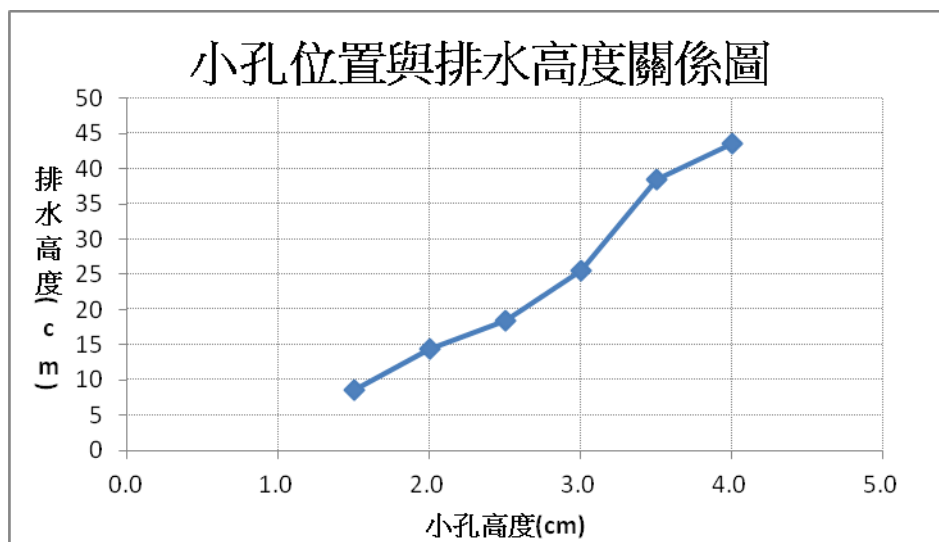


圖 18：導管小孔位置與排水高度關係圖

小結：

1. 從表 4 中發現，小孔位置 1.5cm，其排水高度僅約 8.5cm，小孔高度接近 4cm 時，其排水高度最高，約 43.5cm。(因為此實驗使用之球體直徑約 4cm，所以導管小孔無法開在大於 4cm 處。)推測小孔位置愈接近球體直徑高度時，球體壓力運作機制最佳，會有最佳排水高度。
2. 從圖 18 發現，小孔位置高度在 3~4cm 時，排水高度差距較大。隨著導管的小孔高度愈高，排水之高度愈高。

實驗五：虹吸球裝置球體內部導管小孔的大小對排水高度的影響

將虹吸球裝置球體內部導管頂端相同位置開 1mm 小孔，每條導管之小孔數不同(依次為 1、2、3、4、5 個小孔)，再將虹吸球裝置加上 100g 的砝碼，使其自由落下至容器底部，探討虹吸球球體內部導管小孔數對排水高度的影響。

表 5：球體內部導管不同小孔數的排水高度

小孔數(個)	1	2	3	4	5
排水高度(cm)	43.5	39.5	29.5	26.5	22.5

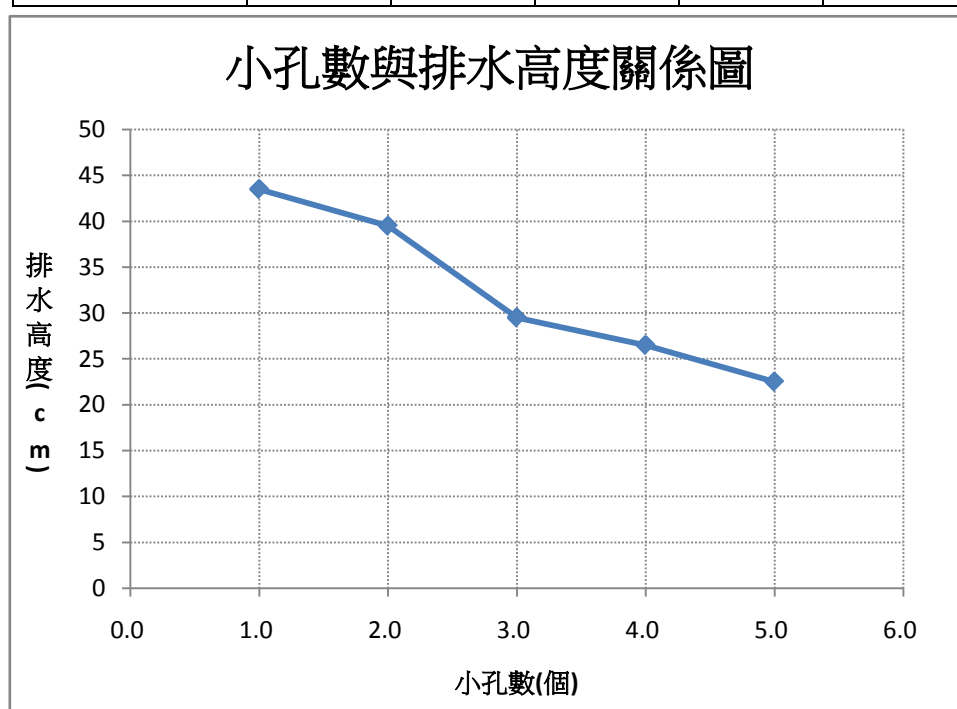


圖 19：導管小孔數與排水高度關係圖

小結:

1. 從表 5 中發現，開 1 個小孔之排水高度約 43.5cm，開 2 個小孔孔數排水高度約 39.5cm，開 3 個小孔之排水高度為約 29.5cm，開 4 個小孔之排水高度約為 26.5cm，5 個小孔數之排水高度約 22.5cm。
2. 導管開小孔數愈多，虹吸球裝置之排水高度越低。
3. 推測小孔數愈多，球體內部導管瞬間之進水量增加，導致壓力推升效果不佳。

實驗六：水溫對虹吸球的排水高度的影響

使用管長為 200cm 虹吸球裝置，分別置於不同水溫的量筒中，觀察不同水溫對虹吸裝置排水高度的影響。

表 6：虹吸球裝置在不同水溫的排水高度

水溫(°C)	8.0	16.0	24.0	32.0	40.0
排水高度(cm)	27.5	34.5	37.5	46.5	52.5

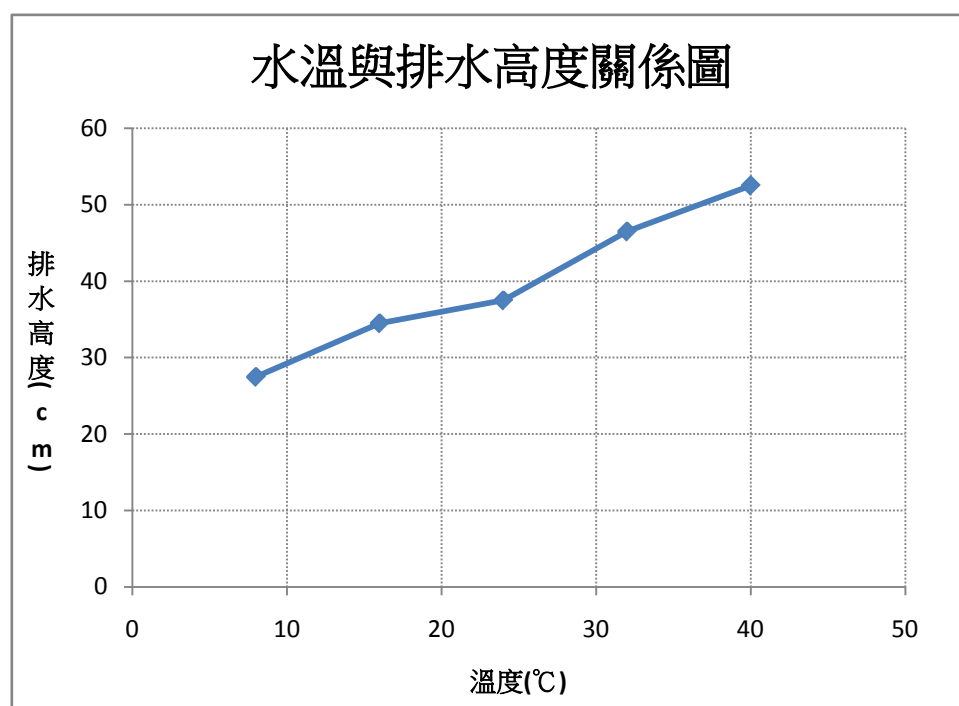


圖 20：不同水溫與排水高度關係圖

小結：

1. 從表 6 中可以看出，水溫為 8°C 時，排水高度約 27.5cm；水溫 16°C 時，排水高度約 34.5cm；水溫為 24°C 時，排水高度約為 37.5cm；水溫 32°C 時，排水高度約 46.5cm；水溫為 40°C 時，排水高度約為 52.5cm。
2. 從圖 20 關係圖中發現，當量筒中的水溫越高，虹吸球裝置的排水高度越高。
3. 推測高水溫會導致球內有較大的氣壓，因而增加排水高度。

實驗七：虹吸球之球體體積(直徑不同)對排水高度的影響

以口徑為 4mm、長度 200cm 之導管配裝球體直徑分別為 3cm、4cm、6cm、8cm、10cm 製作自動虹吸球裝置，探討不同體積之球體對排水高度的影響。

表 7：不同球體體積虹吸球裝置的排水高度

球直徑 (cm)	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0
排水高度 (cm)	29.5	35.5	47.5	51.5	61.5

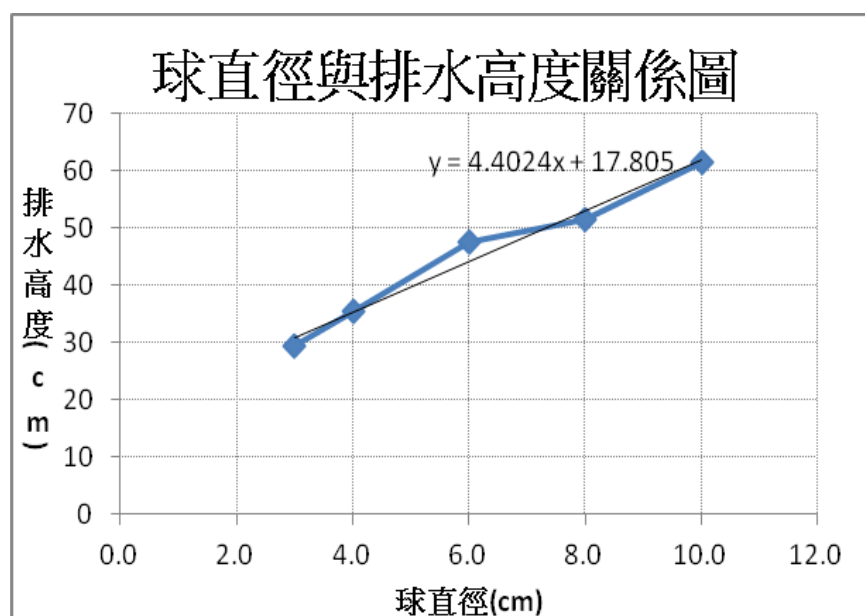


圖 21：不同球體體積與排水高度關係圖

小結：

1. 當控制其他變因，改變自動虹吸球裝置的球體大小，其排水高度如表 7 所示，球體直徑越大則球體體積越大，裝置的排水高度越高，有成斜直線關係。
2. 排水高度有一個截距約為 18cm。

實驗八：虹吸球體底部入水孔大小對排液高度的影響

使用先前實驗較佳排水的自動虹吸球裝置(導管口徑為 4mm、長度約 200cm)，探討球體下方入水孔面積對排水高度的影響。

表 8：不同虹吸球體底部入水孔面積的排水高度

下孔開啟數目 (個)	1	2	3	4	5
排水高度 (cm)	63.5	31.5	17.5	9.5	7.5

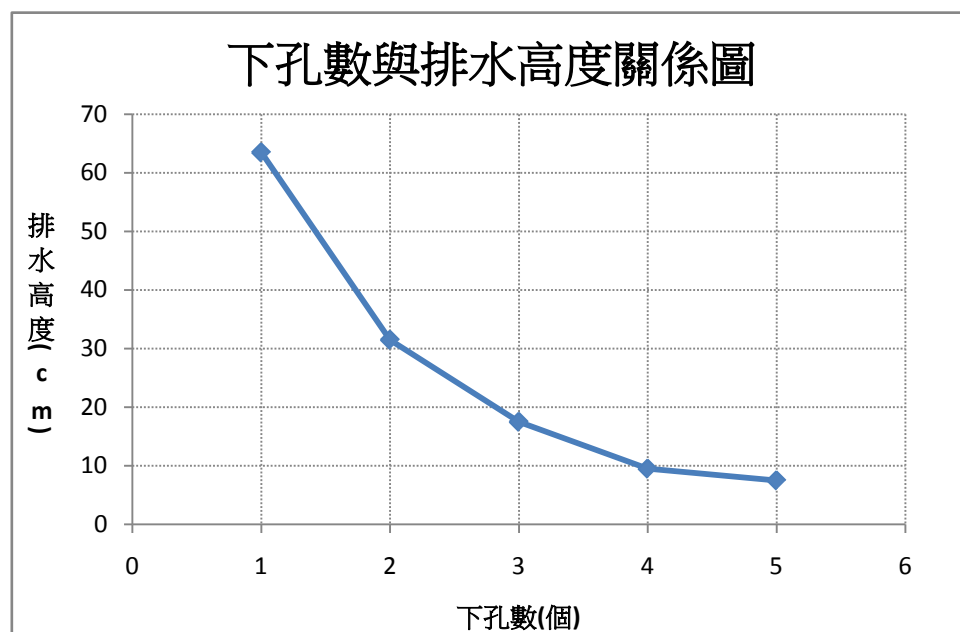


圖 22：不同入水孔面積與排水高度關係圖

小結：

1. 從表 8 中發現，當球體下方孔數 1 個時(即入水孔面積較小)，有最佳之排水高度約為 63.5cm。當入水孔洞數越多(入水孔面積越大)時，排水的高度越低。
2. 從圖 22 關係圖中發現，球體下方水孔數(入水孔面積)與高度形成一個類似反比的曲線。推測入水孔面積與排水高度成負相關關係。

柒、討論

一、為何塑膠導管口徑越小排水高度越高？

我們先將球體以漏斗型來模擬說明，如右圖 23 模擬圖(甲)，當我們用手指塞住管口時管內會有氣壓 $P_{\text{管}}$ 、浸入液體內會受到液壓 $P_{\text{液}}$ 、推擠向上的液柱壓力為 $P_{\text{柱}}$ 、大氣壓力為 $P_{\text{氣}}$ 。大氣壓力 $P_{\text{氣}}$ 與液體的壓力 $P_{\text{液}}$ 會擠壓造成管內氣壓 $P_{\text{管}}$ 的改變。

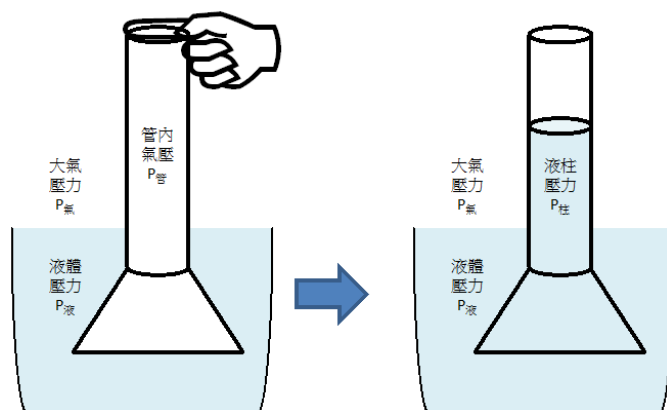


圖 23：模擬圖(甲)

在實驗一，我們把球體放在相同深度的水面下，故大氣壓力、液體壓力與球內氣壓是固定不變的，所以可視作『有同樣的起始壓力： $P_{\text{氣}} + P_{\text{液}} - P_{\text{管}}$ 』將水上推，因而『排水量是相同』的。當我們使用手指封住管口時，因水面上升而使管內的氣壓 $P_{\text{管}}$ 增加。當我們將手指放開時水面會因為壓力差而被推擠向上，而造成支撐的液柱壓力。當我們類比成水管出水時，將水龍頭全開時會有同樣的起始壓力，所以排水量是相同的。但我們緊縮水管口時，出水口的流速會較快而使得水排得較高（也就是面積越小排水高度越高）。所以我們管口徑越小其排水高度越高。

我們可以發現，液體的壓力較大時應該會有較大的起始壓力而產生較多的排水量與排水高度，所以接下來（實驗二）進行液面下深度對排水高度的影響進行探討。

二、為何口徑 3mm 的排水高度較 4mm 的排水高度低？

如右圖 24 模擬圖（乙），當我們以手指壓住管口時，以波以耳定律（ $PV=\text{定值}$ ）來討論『起始壓力』：我們使用長度相同但口徑不同的試管倒置放入水中，不使管內氣體逸出，則大氣壓力加上水壓會等於管內氣體壓力，即 $P_{\text{氣}} + P_{\text{液}} = P_{\text{管}}$ 。若液體密度為

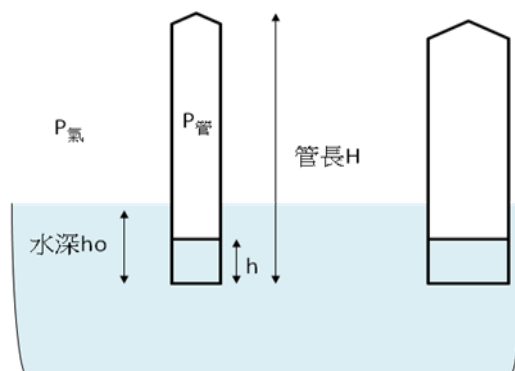


圖 24：模擬圖(乙)

d、水深 h_0 、管內水面上升 h 、管長 H 、管截面積 A ，則 $P_{\text{氣}} + (h_0 - h)d = P_{\text{管}}$ 。管內原本氣壓為大氣壓力，又因為波以耳定律可知： $P_{\text{氣}} + HA = P_{\text{管}}(H - h)A$ ，代入前一式，則 $P_{\text{氣}} + (h_0 - h)d = P_{\text{氣}} \times H / (H - h)$ 。由此公式可知， $P_{\text{氣}}$ 、 h_0 、 d 為定值，所以 h 為定值與管截面積 A 無關。

由波以耳定律可知管內氣壓 $P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{定值 } K$ ，若 $V_1 > V_2$ 則管內氣壓增加為 $\Delta P = P_2 - P_1 = \left(\frac{K}{V_2}\right) - \left(\frac{K}{V_1}\right) = \left(\frac{K}{(H-h)A}\right) - \left(\frac{K}{HA}\right) = \frac{K}{A} \times \left(\frac{h}{(H-h)H}\right)$ 。

因此增加的壓力與管截面積有關，且截面積越小增加的壓力越大。而討論一的起始壓力為 $P_{\text{氣}} + P_{\text{液}} - P_{\text{管}}$ ，而管口徑越小 $P_{\text{管}}$ 越大，越不利於排水，所以管口徑小時排水高度反而降低。管口徑大於 4mm 時其管內氣壓 $P_{\text{管}}$ 的影響不大，管口徑較小時便會出現影響。若實驗一管截面積為 1 cm^2 、50cm 管長沉入 35cm 水中，尚有 15cm 管長在液體外，當球體沉入水中壓縮管內空氣而上升的高度約不到 0.5cm，所造成管內氣壓增

壓的壓力約為 $\Delta P = \frac{K}{A} \times \left(\frac{h}{(H-h)H}\right) = 1033.6 \times \left(\frac{0.5}{(15-0.5)15}\right) = 2.38(\text{cm-H}_2\text{O})$ ，

而原本管內氣壓 = 大氣壓力約為 1033.6 cm-H₂O 相差甚大，所以影響甚小，而最大管徑與最小管徑截面積相差 9 倍之多，這就是為什麼管口徑 3mm 排水高度低於 4mm 管口徑排水高度的原因。

在此我們可以注意到管長 H 越長會造成較少的管柱內的氣壓增加，而可能增加排水高度，因此之後我們有必要對管長進行研究，以證實我們的理論。（請見實驗三）

三、球內管中的小孔作用為何？

如右圖 25，當將手離開管口啟動時，管內的氣壓便會恢復到大氣壓力的值，因而不利於排水。若無小孔，從壓力的角度來看： $P_{\text{氣}} + P_{\text{液}} - P_{\text{球}} = P_{\text{柱}} + P_{\text{管}}$ ，此時球內氣壓成為阻力。當有小孔時，球內氣體從小孔流出會減少管內壓力，同時有助於壓縮水面迫使水從細管內排出。當液體通過小孔時會在下方進入氣體形成一小段空氣柱。當液體繼續上升時會因為空氣柱的壓力小於球內壓

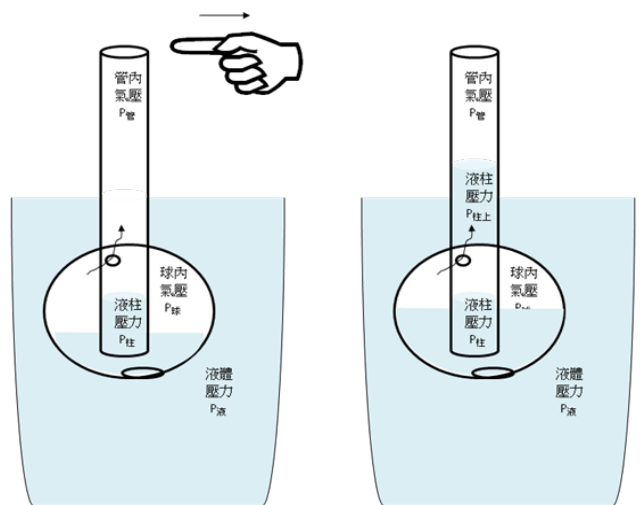


圖 25：模擬圖(丙)

力，而將下方的水繼續壓入管中形成下方液柱。如此循環，便會產生許多的空氣柱。當液面上升超過小孔位置時便不會再產生空氣柱。而一段一段的水柱便會被推至較沒有小孔時來得高的位置，因而有助於排水。

在此我們可以發現，球的容積會影響球內氣壓與小孔位置可能造成不同的排水高度，成為我們之後的實驗探討因素。（請見實驗四、實驗五）

四、為何隨著球體在水深越深處其排水高度未成正比？

從起始壓力為 $P_{\text{氣}} + P_{\text{液}} - P_{\text{管}}$ 可知，當水深越深時 $P_{\text{液}}$ 越大所以排液高會越大。我們使用固定的管長 H 、水面上升高度 h 、液面下水深 h_0 則前式變為 $P_{\text{氣}} + (h_0 - h)d = P_{\text{氣}} H / (H - h)$ 。若以縱軸為水面上升高度 h 、橫軸為液面下水深 h_0 ，可以求得曲線如下圖 26。則當球體深入越深時，管內水面上升 h 越多，但因為管內增加氣壓而管內水面上升的趨勢減緩，所以排水高度增加的趨勢變少，故未成正比。

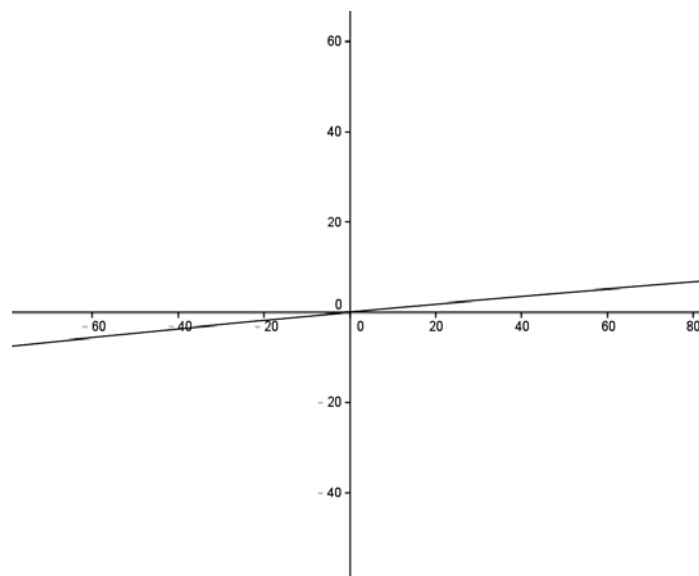


圖 26：曲線圖

五、為何同樣 4mm 口徑水深 350mm 時，實驗一與二的排水高度不同？

實驗一的管長約 500mm，而實驗二我們將管長變為 1000mm，因此管內氣壓增加變化較小，也就是就深度的情況下管子較長時其起始壓力較大，所以排水高度較高。

為了進一步確認管長會影響排水高度，因此在實驗三我們針對管長進行操縱變因的研究，來確認我們的推論是否正確。

六、 為何導管長則排水高度越高？

先不考慮小孔造成的氣壓減少問題，從壓力的角度來看： $P_{\text{氣}} + P_{\text{液}} - P_{\text{球}} = P_{\text{柱}} + P_{\text{管}}$ 。實驗步驟在將球體放入水中前先用手指封住管口，因此當管長越長其管內氣壓 $P_{\text{管}}$ 因管內氣體壓縮而變化較小，亦即管內氣壓增加不大，因此會有較高的排水高度。本實驗數據中管長 1000cm 為手指先不封住管口，迅速將球體浸入水中所得到的排水高度。亦即當管長無限長時，其管內的氣壓即為大氣壓力。

在本實驗中我們可以發現，若不封住管口時會有較高的排水高度。雖然如此，但封住管口啟動虹吸現象，有時可以帶來許多方便，例如魚缸換水時，以封住管口的方式將排水口放在另一個水槽中，便能從容不迫的將魚缸中的水利用虹吸球達到換水的目的。

七、 為何小孔位置越高其排水高度越高？

將球體放入水中後其水面逐漸上升，因此小孔位置越低水面越快上升到小孔位置，導致無法將球內氣體體積排出因此而不利於排水。所以小孔位置越高，可以增長球內氣體排水的作用時間，而將水柱送到較高的高點也是需要時間的，因此有利於將水柱送到較高處。為了有較高的排水高度，管內小孔應該越高越好。

而小孔的大小會影響到排氣的氣壓，因此接下來我們利用孔數的增加來進行孔大小對排水高度的影響探討。

八、 為什麼小孔增加時排水高度低

當孔數越多時，通過小孔的氣壓越小，因此不利於減少管內氣壓，因此孔數越多排水高度越不高。當孔數多到一定的數量時就形同沒有孔洞，所以無法減少管內氣壓所以排水高度將會最低。

由於孔洞內氣體的流動氣壓的大小會影響排水高度，因此接下來我們改變水溫，使球內氣體因溫度而有不同的氣壓改變，因對排水高度有所影響。（請見實驗六）

九、 為何水溫越高，水的排水高度越高？

當水溫越高時，球體中氣體因受熱膨脹而氣壓變大。球內氣體壓力越大透過小孔就可以輕鬆地將水推出去。

十、 為何球直徑越大其排水高度越大？

在水深度相同的情況下，所受的水壓是相同的，因為 $F=PA$ 的關係，當球直徑越大在水中的截面積越大，所以球內的水面受到的總力 F 就越大，則水面所受到推力的動能會轉換成水柱的重力位能。故截面積越大，排水高度越高。

此外，因為球體的直徑越大，水進入球體的時間越長，球體內部的空氣有更多的時間可以將球體內部的水利用氣壓將水排入管內，所以排水的高度也會相對地提高。

十一、 球半徑與排水高度有何關係？

設球半徑為 r ，則其最大的截面積為 πr^2 。若水深為 H ，則水壓為 $Hd_{\text{水}}$ ，水面受力 $F=Hd_{\text{水}}\pi r^2$ 。若細管面積為 a ，最大的排水高度為 h ，重力加速度為 g ，則細管內水的重力位能為 $d_{\text{水}}aghh$ 。假設水從球內的進水量每單位時間是相同的，其上升高度為 S 。則對水所作的功 = 水的重力位能。因此有下列關係：

$$Hd_{\text{水}}\pi r^2 S = d_{\text{水}}aghh, \text{ 則 } h^2 = \frac{H\pi S}{ag} r^2$$

如下圖 27，當我們單純使用水管封口時，放開封口後，水面會上升至某一個高度，在加上球內管上小孔的作用，會使得這個高度更高，因此會有一個起始高度 h_0 ，也就是為什麼會有一個截距的關係。所以上式可以修正為：

$$h = \sqrt{\frac{H\pi S}{ag}} \times r + h_0$$

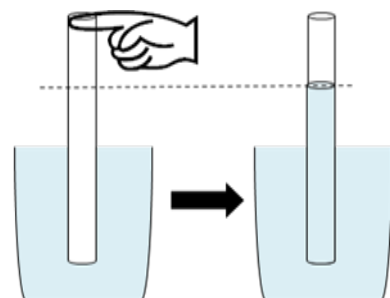


圖 27：模擬圖(丁)

在這個實驗中我們也可以意識到，水進入球下方小孔的水量或速度有可能影響到起始高度 h_0 的大小，因此接下來我們將球下小孔數目增加，用來探討小孔面積與排水高度的影響關係。

十二、 為何孔洞數越多，排水高度越低?

因為孔洞數量越多，水進入球內的速率增加，此時水會直接壓縮球內氣體從球內小孔迅速排出，雖然小孔從小孔排出的空氣量變大或速率變大，可以使得管內下方的水被牽引向上，但緊接著從小孔排出的氣體會產生較大的液柱間的空隙，使得牽引水的力量變小許多，同時縮短將水排出的時間，所以球體將水排出的高度也相對的降低。這樣的現象有點像是圖 28 的作用：把一個重鐵塊鉛直垂掛，一磁鐵繫上細繩從旁拉動重鐵塊，若拉動磁鐵的速度過快，則無法繼續牽引重鐵塊而擺動幅度變小。需要緩慢拉動磁鐵才可能造成較大的擺動幅度。所以下方孔洞的數目過大、過多時，導致小孔排氣速度過快，牽引管內水至較上方的高度反而較低。因而下方孔洞的數目不應該太大。

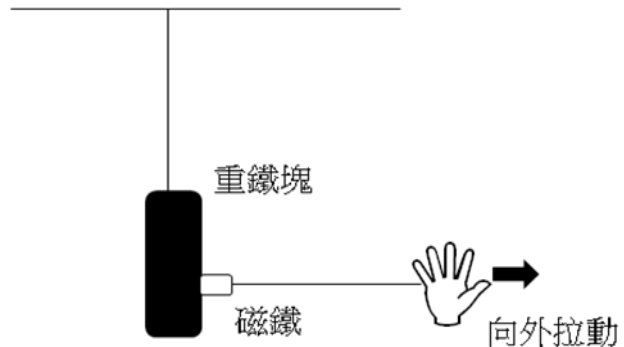


圖 28：模擬圖(戊)

十三、 孔洞數和排水高度有何關係?

根據實驗所測量出的實驗數據，以折線圖的方式呈現，可發現此圖中的線條大致為一條負相關的曲線，所以孔洞的數量可能與排水高度成負相關。而水進入球內的速率與孔洞數成正比，因此可以推斷進水速率與排水高度有負相關的關係。

捌、結論

- 一、管內口徑稍小排水高度較高，但排水高度太小則容易形成阻力，以管內口徑 4mm 之塑膠導管有最好的排水高度約 35mm。
- 二、球體在液面下越深，其排水高度越大，但排水高度隨深度有漸趨平緩的趨勢。
- 三、管長越長，管內氣壓較小使得排水高度越高。若以不封閉管口方式會有較高的排水高度，而排水高度隨管長增加但有一極限值約為 35cm。
- 四、球內小孔的位置越高會有較長的排水時間，其排水高度較高。
- 五、球內小孔孔數越多，使得排氣速率過快反而降低排水高度。
- 六、高水溫可以產生較大的球內氣壓可以使排水高度較高。
- 七、球直徑越大排水高度越高，有較多的時間引導水向上，故排水高度較高。球直徑與增加排水高度有正比關係，排水高度有一個截距約為 18cm。
- 八、球下孔的大小越大，排水的高度越低，有負相關。推論進水速率與排水高度有負相關，因此球下孔的孔洞越小越好。

玖、建議

一、一節一節空氣柱與水柱的研究與探討

在實驗室的過程中，當我們實驗的時候，在長管中會產生一節一節的空氣柱與水柱。因為本研究的目的在於找出自動虹吸球最大的排水高度，因此並未深入探討這樣的現象。我們發現隨著變因的改變，每一節的空氣柱長度、每一節水柱的厚度也不同，因此關於這兩個現象是很值得日後去研究、構思與探討的。我們初步認為：空氣柱的長度、進水速率和球內氣體壓縮程度有關，而水柱的厚度則與壓力差異有關。

二、自動虹吸球的應用

自動虹吸球應用在換魚缸水時不用觸碰到魚缸水，同樣的也可以用在汙水處理。此外，泡咖啡時所利用的虹吸式咖啡機，是利用酒精加熱後造成的壓力差來推動水柱，進而產生虹吸現象。因此製造出玻璃製的自動虹吸球，只要放入適當水溫的熱水中，因溫度更加容易產生排水效果，同時彎管的設計恰好可以用來隨心所意的沖泡咖啡粉，在日常生活中應用十分方便。另外可以利用多個虹吸球連接於一個長管，如此一來便可大幅增加排水高度。不過排水高度越高的虹吸球通常它的流量較少，因此改善流量為一個非常重要的研究課題，我們也在努力當中。如果流量問題可以控制，這樣可以應用在滴定管上、地下室積水時的抽水與排水問題的解決。

參考資料

01. 李冠旻 劉俊豪等人(2002)。利用水柱測量大氣壓力的另一種方法。第四十二屆中小學科學展覽說明書。
02. 林敬翰、陳建州、陳浩瑋 (2002)。再忙！也要和你喝杯咖啡——利用自製實驗裝置探討虹吸式咖啡壺原理與應用之研究。中華民國第四十二屆中小學科學展覽說明書。
03. 嚴志瑜等(2012)。蓄壓空氣型虹吸抽水器。中華民國第五十二屆中小學科學展覽說明書。
04. 梁敬杰，虹吸現象。<http://blog.dgps.kh.edu.tw/blog/gallery/82/%E8%99%B9%E5%90%B8%E7%8F%BE%E8%B1%A1.ppt>
05. 楊秉鈞，大氣壓力與密閉容器的氣壓。<http://w1.chjhs.tyc.edu.tw/jim5631/slides/stdatm/stdatm.ppt>
06. A.Zilberman (1980). Physics in your kitchen lab. Edited by Academician I. K. Kikoin. 新竹市：國興出版社。

【評語】 030117

1. 這是經典科學實驗的具體展示，可以利用攝影機說明其原理，
讓這個展示更加生動。
2. 進行各種變因的量測，可以再系統化設計會較佳。
3. 有創意。解說也很清楚。