

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

佳作

080123

水花消失術

學校名稱：靜心學校財團法人臺北市私立靜心高級中
等學校

| | |
|--------|-------|
| 作者： | 指導老師： |
| 小六 侯宥岑 | 蔡垂其 |
| 小六 劉郁澄 | 王晶瑩 |
| 小六 王辰希 | |
| 小六 許廷睿 | |

關鍵詞： 跳水、水花、氣泡

摘 要

本研究探討跳水過程中不同因素對氣泡與水花產生的影響，並分析如何透過改變跳水姿勢來減少水花量。結果顯示，**球體直徑與撞擊速度**增加皆會顯著提升水花高度與氣泡空腔大小。**水平速度**會改變水花傾斜角度並減少高度，使氣泡空腔偏移。**柱體形狀與錐度比**對水花影響顯著，圓柱體產生穩定現象，尖頂柱體則集中撞擊能量，產生更高更細的水花。**手部姿勢與面積大小**顯示手掌外翻放平與小面積能有效減少水花與氣泡空腔，達到最小水花效果。最後，**水花消失術**是跳水前擦乾身體，入水前身體筆直頭向下、雙手向水面伸直，手掌外翻抓手放平，入水後，將空氣帶入水底，減少氣泡空腔造成的沃辛頓射流現象，以水底產生氣泡浮出水面取代水花，進一步降低水花產生。

壹、前言

※研究動機：

2024 年巴黎舉辦奧運，我們四個人都熱衷關注各項比賽，並特別被「跳水」這項競賽所吸引。在賽場上，我們注意到中國選手全紅嬋以她精湛的技術和幾乎無水花的跳水表現脫穎而出，這引發了我們一個疑問：為什麼全紅嬋能跳出所謂的「水花消失術」？這樣的問題讓我們開始思考，水花到底是如何形成的？在進一步搜尋資料時，我們發現有些地方的跳水比賽，並非比誰跳出的水花小，而是比誰跳出的水花大。這一發現讓我們對水花的相關議題更加好奇，並促使我們決定將「水花消失術」作為研究主題，探究影響水花大小與消失的各種因素，希望能從中找到影響跳水表現的關鍵。

※研究目的：

- 一、不同**大小**的圓球對水花的影響
- 二、不同**落下高度**對水花的影響
- 三、不同的**入水速度**對水花的影響
 - (一)不同**垂直落下**的速度
 - (二)不同**水平拋射**的速度
- 四、不同**入水形狀**對水花的影響
 - (一)相同入水截面積，不同**形狀**
 - (二)相同入水截面積，不同**錐度**
- 五、模型不同**入水姿勢**對水花的影響
 - (一)**雙手**不同的入水姿勢
 - (二)**手掌**不同的入水面積

※文獻回顧：

水花是因為**運動**中的物體撞擊水面後所形成，**動能**則是物體因為運動而擁有的能量，而運動中的物體在落下時具備動能，這個能量在物體落下並撞擊水面時，會部分轉化為水的運動能量，並造成**沃辛頓射流**，形成水花。

一、運動：

運動：物體的位置隨時間改變，稱為運動。若運動方向與速度大小不變，則為**等速運動**，若速度隨時間改變，則為**加速度運動**。

(一)自由落體運動：指物體只受重力影響而下落的運動，若不考慮受到空氣阻力影響，物體的速度如下。

$$v = gt \quad (g \text{ 是重力加速度, } t \text{ 是時間})$$

(二)水平拋射運動：指物體以初速度沿水平方向拋出後，在重力作用下運動，軌跡呈拋物線。若不考慮受到空氣阻力影響，物體的速度如下。

$$\text{水平方向速度(等速運動): } v_x = v_0 \quad (v_0 \text{ 是初速度})$$

$$\text{垂直方向速度(自由落體運動): } v_y = gt \quad (g \text{ 是重力加速度, } t \text{ 是時間})$$

二、動能：

「動能」時，指的是一個物體因為其運動而擁有的能量。動能的大小由物體的質量和速度決定，具體公式為：

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (E_k \text{ 是動能、} m \text{ 是物體的質量、} v \text{ 是物體的速度})$$

物體的質量越大，或者物體的速度越大，它的動能就越大。例如，如果你將兩個物體從同樣的高度掉落，一個是重的，一個是輕的，那麼重的物體會擁有更大的動能，因為它的質量較大。

速度方面，動能和速度的關係是二次方的，這意味著即使速度稍微增加，動能會顯著增加。這也就是為什麼快速運動的物體，例如飛行的子彈，會具有很大的破壞力。

另外若是物體以自由落體的方式落下，則物體會以位能轉換為動能的方式，高度愈高、位能愈大、轉換成動能也就愈大。

$$\text{自由落體的動能 } E = mgh \quad (m \text{ 是物體的質量、} g \text{ 重力加速度、} h \text{ 是物體的高度})$$

三、沃辛頓射流 (Worthington Jet)

當落體掉落而撞擊下方液體表面時，它會產生漂浮、反彈、聚合、飛濺等現象。在飛濺狀態下，落體會先在流體表面產生一個隕石坑，然後在隕石坑周圍形成一個皇冠。隨後，坍塌液滴的動能會導致液體向上擠壓形成垂直液柱。這種從落體落在流體表面形成的隕石坑中心突出的中央射流，稱為沃辛頓射流 (Worthington Jet) (鄭永銘。2023)

四、歷屆中小學科展有關水花的研究：

表 1-1 歷屆中小學科展有關水花的研究與評語

| 作品名稱(屆次) | 摘要(節錄) | 評審評語(節錄) |
|----------------------------|--|---|
| 止一剎的花火-泡沫對水花濺起高度之影響 (57 屆) | 這份研究在探討球在不同的泡沫厚度、泡沫濃度、水深、水面面積、距水高度、水面有無衛生紙的條件，對水花濺起高度的影響。歸納得知，水花濺起高度與空氣柱的長度有關，空氣柱越長，濺起的水花越高。 | 研究主題明確，具潛在實用價值，有關應用在馬桶，器材與設計過於理想化，但實驗結果適用於一般濺水情形，數據收集確實，觀察入微，但照片呈現宜加強。分析包括誤差與顯著性估計，推論亦屬合理。 |
| 水花的減緩者 (63 屆) | 發現水花高度和擬便距離水面的高度成高度線性關係，空腔深度和擬便距離水面的高度也成高度線性關係。 其次，擬便的密度、先接觸水面端的面積、形狀、突起排列對水花高度的影響並無明確的規律性。 | 本作品研究生活中常見的落體進入液體所致的噴濺行為。過程紀錄與討論相當詳實，且為一個相當實用的研究。不過相近的報導與研究較多，或許可以嘗試不同的研究切入點。 |
| 水中的奇妙力量探秘—沃辛頓射流 (64 屆) | 以實驗室容易取得的重物與乒乓球模擬網路上跳水彈射手中球體的沃辛頓射流實驗。結果發現圓形的類天然海棉因為具有吸水迅速、可以平穩入水的優點，因此選擇以此為托球的載體進行實驗。 | 本作品作者設法在實驗室中，重現在影片中看到的物理現象。嘗試不同載體、水深、落下高度，找到容易產生沃辛頓射流的組合，並拍攝影片，利用一張一張的影像，觀察整個現象的發生過程。此外，乒乓球的質量測量，反彈的高度測量，都可以再更精確。 |

貳、研究設備及器材

一、研究器材：

表 2-1 研究器材

| | | | |
|----------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 1. 3D 列印機 × 1 臺 | 2. 定速馬達 × 1 臺 | 3. 數位相機 × 1 臺 | 4. 水族箱 × 1 個 |
| 5. 圓球夾放器 × 1 臺 | 6. PLA 線材 × 3 捲 | 7. 相機腳架 × 1 支 | 8. 珍珠板 × 4 片 |
| 9. 筆記型電腦 × 1 臺 | 10. 圓盤 × 1 個 | 11. 監看螢幕 × 1 臺 | 12. 電子秤 × 1 臺 |
| 13. 黑色背景布 × 1 條 | 14. 細鐵棒 × 1 根 | 15. 固定夾 × 2 個 | 16. 腳架 × 4 支 |
| 17. 方形塑膠細管 × 3 根 | 18. 海棉 × 2 塊 | 19. H 型鋁條 × 1 條 | 20. 線軸 × 1 個 |
| 21. Tracker 軟體 × 1 套 | 22. 棉線 × 1 捲 | 23. 積木 × 1 批 | 24. 細鐵棒 × 1 根 |
| 25. ImageJ 軟體 × 1 套 | 26. 黏土 × 1 批 | 27. 油土 × 1 批 | 28. 木板 × 3 片 |

二、研究設備：

(一)水花實驗錄影裝置：

首先為了減少人為操作產生的誤差，不以人的手進行持球與放球的動作，是以設計製作的圓球夾放器來進行球體的持球與放球。為了控制圓球夾放器開爪放開的速度相同，我們以定速馬達、線軸等設計一個定速捲線器，以相同的速度打開圓球夾放器的爪子。如下圖所示。

水是透明且出現的水花是快速的、是短暫的，因此需要透過慢動作錄影，再經由影片的影格截取水花的影像，才能進行水花的分析，我們選用可慢動作錄影的數位相機，進行 8 倍速的慢動作錄影，同時以黑色的背景布，增加水花的可見度。

影像以 ImageJ 進行水花的寬度與高度分析時，需要有一個基準的參考長度，因此設計製作長度對比分析板放置於水族箱旁，與水花的中心點在同一平面，避免拍攝時產生的誤差。

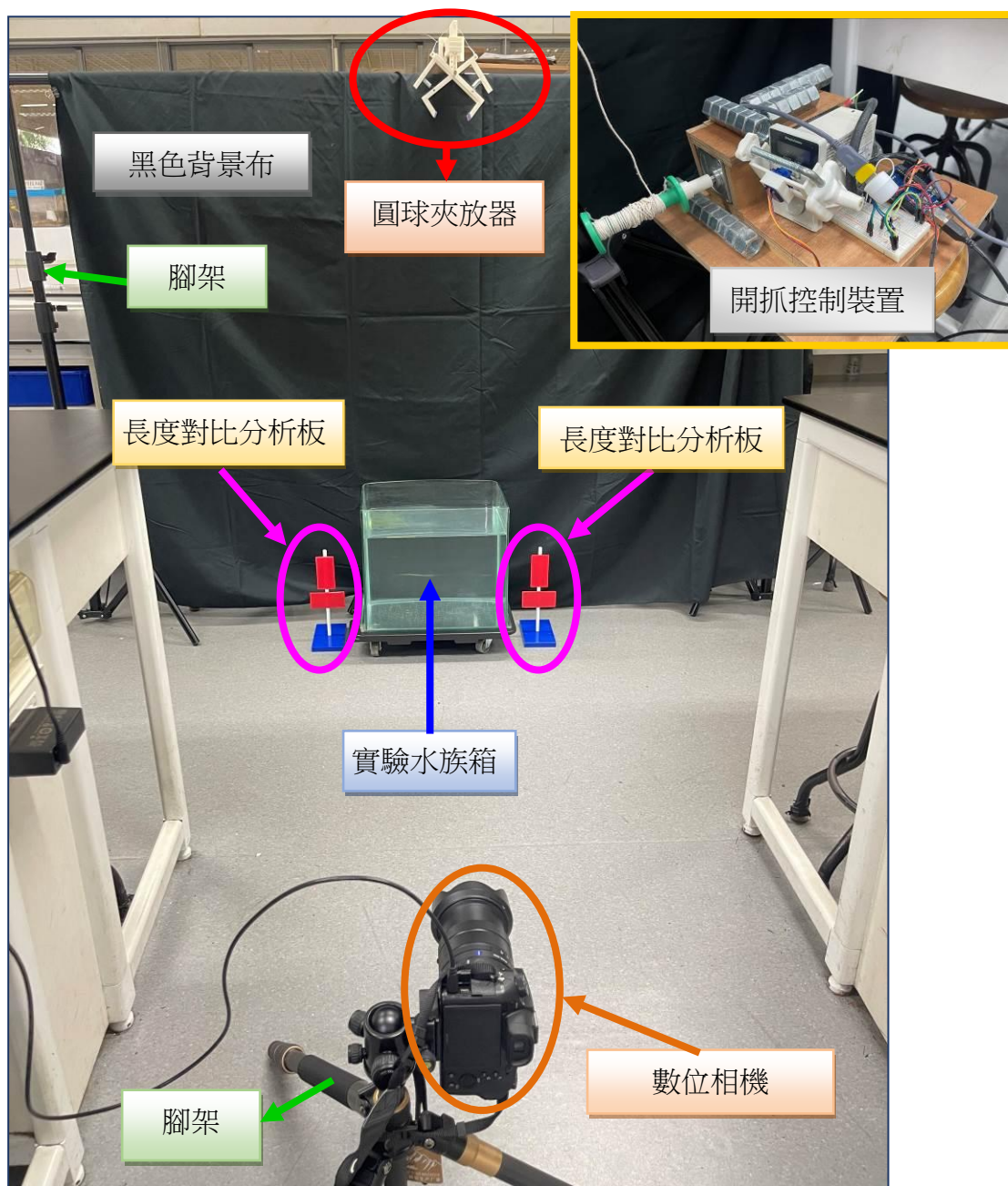
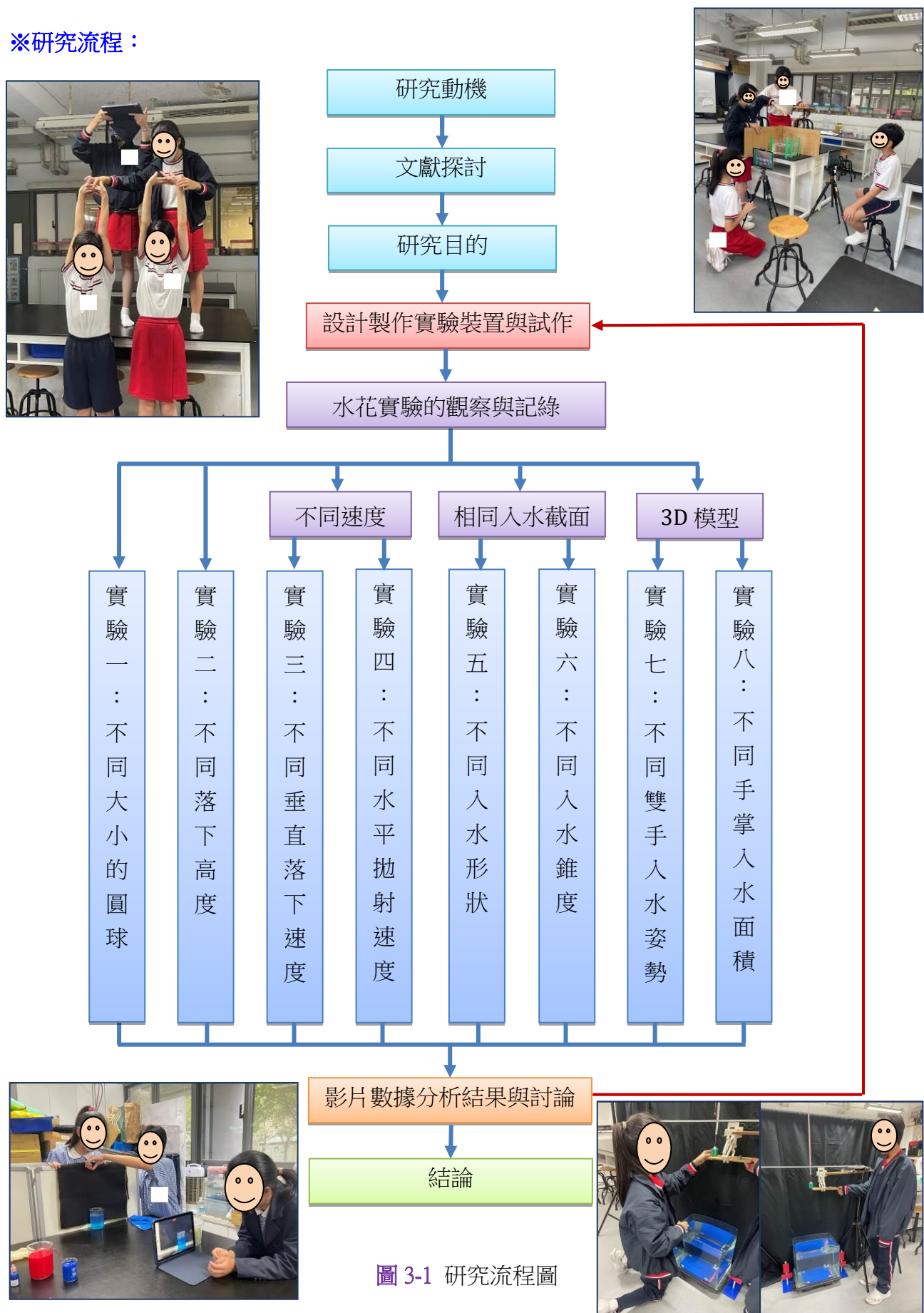


圖 2-1 水花實驗錄影裝置

參、研究過程或方法

※研究流程：



※水花實驗錄影裝置操作步驟：

- 1.調整圓球夾放器的高度，使夾取圓球時，圓球底部距離水面為 100 公分。
- 2.利用鉛錘綁線由圓球夾放器的中心位置延伸至水中，得知圓球的落點。
- 3.調整水族箱的位置，使圓球的落點位於水族箱的中央。
- 4.由圓球的落點位置向水族箱兩側的同平面放置長度對比分析板。
- 5.調整數位相機的高度，使相機鏡頭中心與水面高度同高。
- 6.調整數位相機拍攝的畫面範圍，並調整為 8 倍慢動作影片拍攝。
- 7.將待測圓球，夾取在圓球夾放器。
- 8.切換數位相機為慢動作錄影，開始錄影。
- 9.按下圓球夾放器的開關，使圓球夾放器打開，讓圓球落下。
- 10.錄完圓球落到水族箱產生的水花後，即停止數位相機的慢動作錄影。
- 11.重覆步驟 7 至步驟 10，相同實驗進行 5 次。
- 12.將數位相機拍攝的影片載入個人電腦中，進行水花的截圖與 ImageJ 的寬度與高度分析。

※水花產生的過程階段

氣泡的寬度和深度與水花的寬度和高度分別如圖 3-2 所示。

階段一：圓球撞擊水面後進入水中

階段二：形成最大氣泡空腔(有一部分空氣會隨著圓球潛入水中後，再慢慢浮出水面)

階段三：最大水花形成(本研究以最大水花寬度時，對應的水花高度)

階段四：水花散落消失

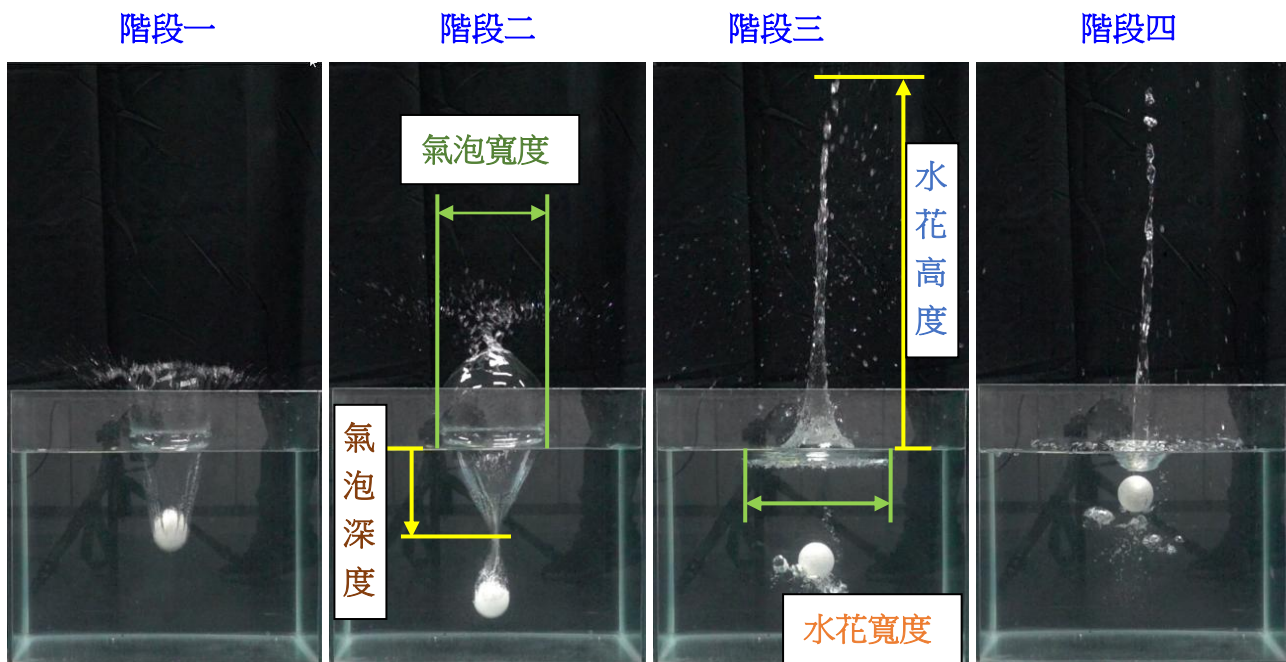


圖 3-2 水花產生的過程的四階段

※撞擊水面時的速度

自由落體的動能是由物體的質量與速度所決定，我們可以透過電子秤得到物體的重量，再利用影像分析軟體 Tracker，分析物體掉落的過程，可以得到物體掉落過程中接觸水面時的速度。如圖 3-3 所示。

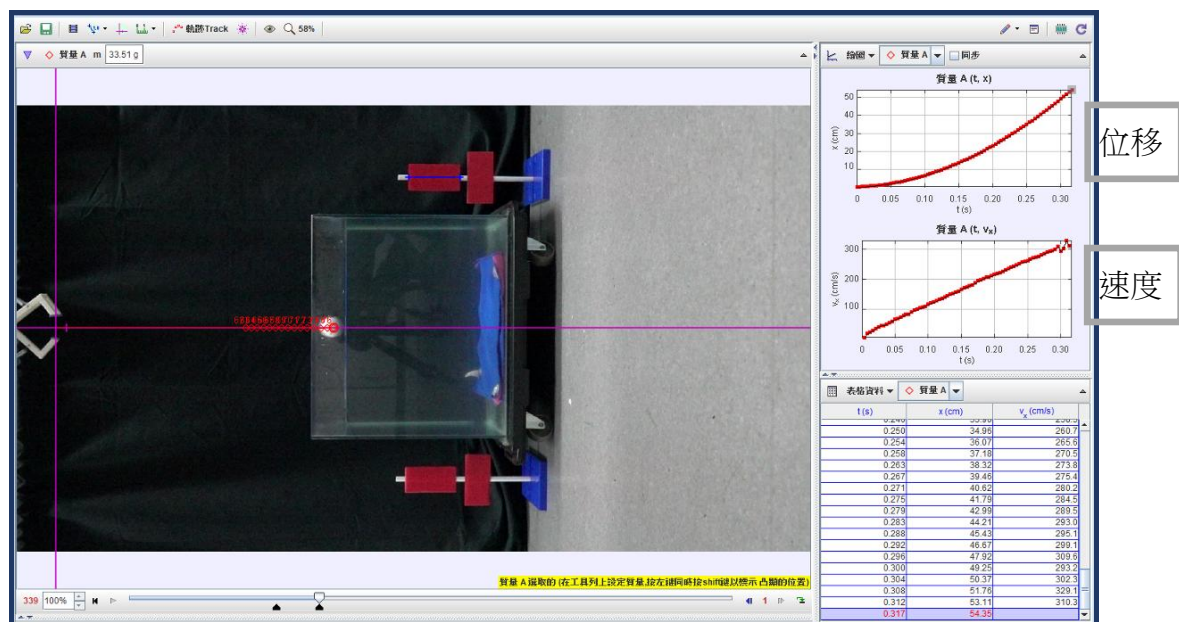


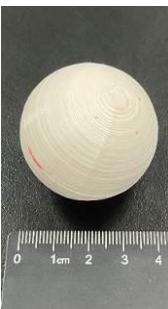




圖 3-3 Tracker 影片分析物體撞擊水面時速度

一、不同大小的圓球對水花的影響

首先我們想知道不同體積大小與不同重量對水花的影響，我們以 3D 列印機列印不同直徑大小的圓球，但因列印的材料是 PLA 線材，且圓球內部會以蜂巢的中空方式列印，圓球重量相對輕，且不容易控制圓球的重量，因此改成列印兩個空心半圓球組合成圓球，再以填充內部的方式控制圓球重量。配合人體的比重約為 1，先求出圓球的體積，再以鉛塊、油土與海綿填充圓球內部，使圓球的比重為 1。

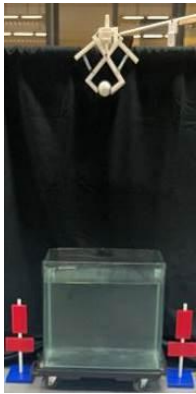



表 3-1 比重為 1 不同大小圓球

| 直徑(mm) | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
|--------|---|---|---|--|---|
| 圖片 |  |  |  |  |  |
| 重量(gw) | 4.19 | 14.14 | 33.51 | 65.45 | 113.1 |

二、不同落下高度對水花的影響

奧運跳臺跳水是從 10 公尺的高度跳下，而一般賽事還有 5 公尺和 7.5 公尺的跳臺跳水，不同高度的跳臺跳水有什麼差異呢？我們也想了解物體從不同的高度落下入水時，對水花有何影響？我們以直徑 4 公分的圓球，分別從 55cm、100cm、150cm 和 200cm 的高度進行實驗。

表 3-2 不同的落下高度

| 高度(cm) | 55 | 100 | 150 | 200 |
|--------|--|--|---|--|
| 圖片 |  |  |  |  |

三、不同入水速度對水花的影響。

在圓球的速度方面，我們以垂直速度與水平速度進行考量，一是圓球垂直落下時，所產生的入水速度，二是圓球一開始從平台水平拋射出去，產生水平速度呈現拋物線路徑，然後掉落入水，這兩種情形對水花各有何影響呢？

(一) 不同垂直落下的速度

跳水是人體以自由落體的方式向下移動，撞擊水面產生水花，然後進入水中，我們想了解若不是以自由落體所產生的速度入水，而是以較慢的速度入水，對水花的形成又有何影響。我們用可控制轉速的馬達與轉盤，轉盤的半徑為 10 公分，設計製作一個可以控制圓球下降速度的裝置，如圖 3-4 所示。分為以不同的轉速，如表 3-3 所示的轉速，控制圓球垂直落下撞擊水面的速度，圓球撞擊水面後產生水花的實驗，圓球直徑為 4 公分，比重為 1，圓球底部距離水面的高度為 100 公分。

表 3-3 不同的垂直落下速度(轉速：RPM，落下速度 cm/s)

| 轉速 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 | 2200 | 2400 | 2600 |
|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 落下速度 | 62.83 | 83.78 | 104.72 | 125.66 | 146.61 | 167.55 | 188.50 | 209.44 | 230.38 | 251.33 | 272.27 |

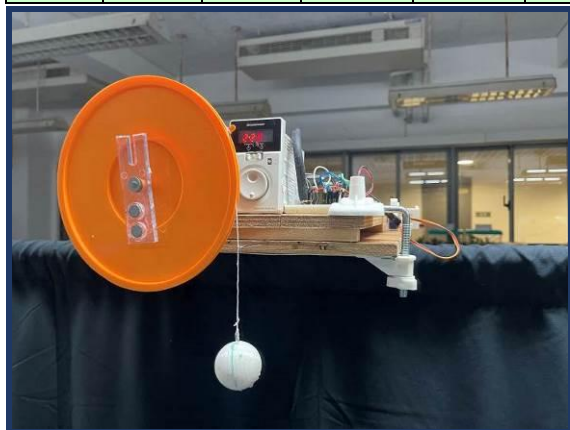


圖 3-4 落下速度控制裝置

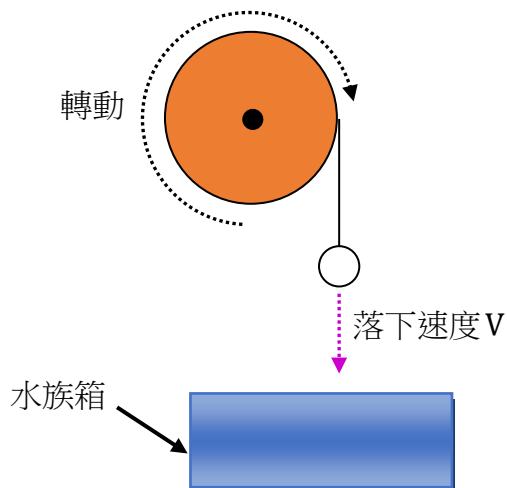


圖 3-5 落下速度控制裝置示意圖

(二) 不同水平拋射的速度

跳水者並不是以直上直下的方式進行跳水，而是必須向前跳離跳臺，因此也會有一個向前的水平速度，我們也想了解此水平速度的大小對水花有何影響，我們以可控制轉速的馬達、撥棒、積木組合的軌道等，設備製作一個水平發射裝置，如下圖所示。分為以不同的轉速，如下表的轉速，進行圓球水平射出後入水產生水花的實驗。圓球底面距離水面高度為 80 公分。

表 3-3 不同的水平拋射速度

| 轉速(RPM) | 50 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 水平速度(cm/s) | 3.67 | 43.98 | 58.64 | 73.30 | 87.96 | 102.63 | 117.29 |

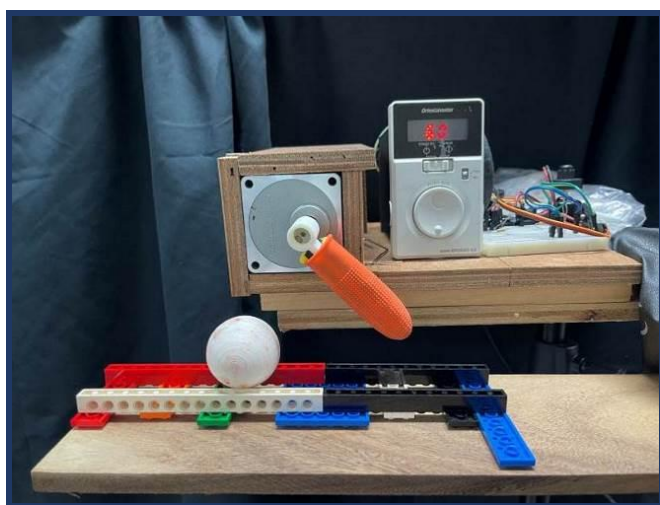


圖 3-6 水平速度控制裝置

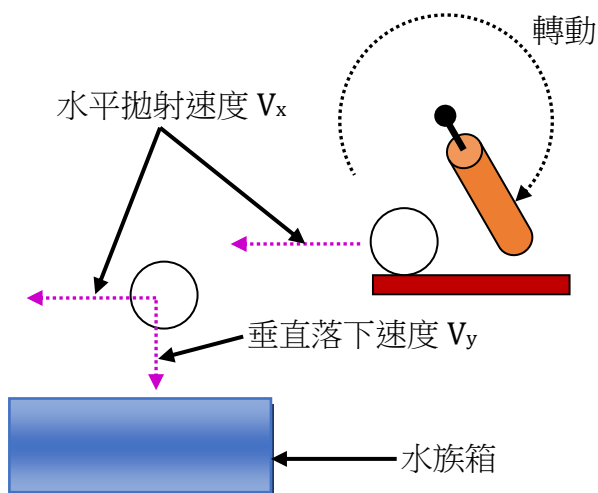


圖 3-7 水平速度控制裝置示意圖

四、不同入水形狀對水花的影響。



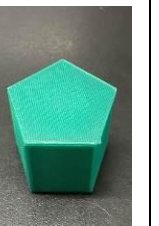



完成圓球的相關研究後，接著以較接近人體形狀的柱體為研究形狀，我們先以圓柱體進行研究，再以柱體前端有不同的錐度為研究，最後再研究不同形狀的柱體。

而在試作實驗時，發現圓柱體從上方向下掉落時，不容易維持垂直的狀態入水，因而造成水花的變化相當大，因此於柱體上方的中心加上一根細鐵棒，並將細鐵棒穿在一細長管內，以控制細鐵棒與下方的圓柱可以垂直向下掉落入水。如圖 3-9 所示。

(一) 相同入水截面積，不同形狀

以圓柱底部的截面積大小為基準，分別計算並以 3D 列印機列印相同截面積大小、相同高度、相同重量，不同形狀的柱體，如表 3-4 所示。

表 3-4 相同入水截面積，不同形狀

| 形狀 | 圓柱 | 正六角柱 | 正五角柱 | 正四角柱 | 正三角柱 | 長方柱 |
|----|--|--|--|---|--|--|
| 圖片 |  |  |  |  |  |  |

圓柱內部填充鉛塊、海綿，加上細鐵棒，還有連結固定細鐵棒(重量為 22.4 克重)與圓柱小底座(重量為 1.3 克重)。柱體底面距離水面高度為 58 公分。

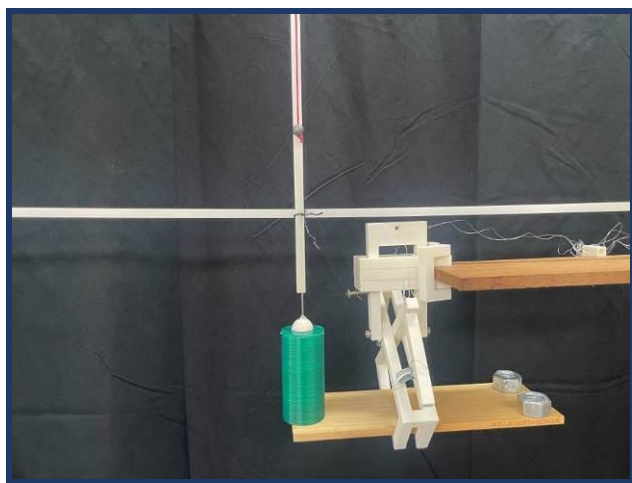


圖 3-8 垂直入水裝置

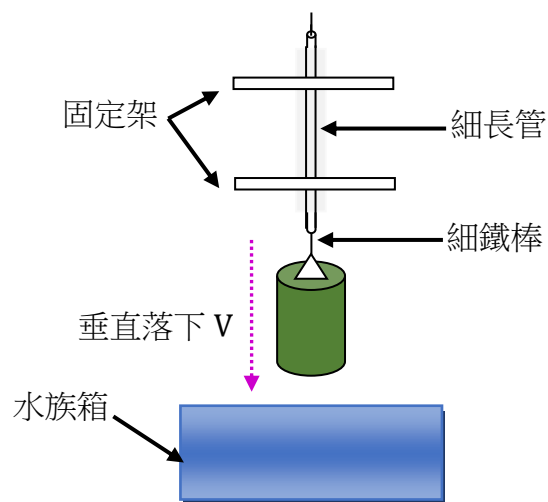


圖 3-9 垂直入水裝置示意圖








(二) 相同入水截面積，不同錐度

我們也想知道入水時錐度是否愈尖，入水時的阻力就會較小，形成的水花也會較小，以直徑為 3cm，高為 7cm，重量皆為 49.5 克重，前端不同錐度的圓柱，如下表所示，進行柱體的水花實驗。柱體底面距離水面高度為 63 公分。

錐度比：錐度可以用底部直徑與高度之間的比例來表示。這個比例常被稱為錐度比（taper ratio）。一般公式為： $\text{錐度比} = \text{底部直徑} / \text{高度}$

其中底部直徑為 3 公分，高為 7 公分的圓柱體，還有圓頂柱體高度分為 1、2、3、4、5 公分，另外還有一個高度 4 公分尖的尖頂柱體，經計算得到的錐度比如下。

表 3-5 相同入水截面積，不同錐度比

| 柱體 | 圓柱體 | 圓頂柱體 | | | | | 尖頂柱體 |
|-----|---|---|---|---|--|---|---|
| 錐度比 | 平面 | 3 | 1.5 | 1 | 0.75 | 0.6 | 0.75 尖 |
| 圖片 |  |  |  |  |  |  |  |








五、模型不同入水姿勢對水花的影響

以 3D 繪圖軟體，依人體外觀形狀繪製手部不同擺放方式的入水姿勢，再以 3D 列印機進行 3D 實體的列印，而為了使比重接近人體的 1，因此同樣以中空的方式進行模型的 3D 列印，因為是不規則的體積，所以我們使用排水法來求得體積的大小，再配合體積將內部中空的部分填充適當重量的鉛塊與海綿，使 3D 人體模型的比重為 1。

(一)雙手不同的入水姿勢

考量跳水時，手可以也可能擺放的方式對水花有何影響，我們主要以四種手的姿勢作為實驗，分別為雙手併軀幹、雙手舉直、手掌合併成尖、手掌合併平放。其中手掌合併成尖又分成不同四種，分別為大面積尖、中面積尖、小面積尖、很尖。頭頂距離水面的高度為 50 公分。

表 3-6 雙手不同的入水姿勢

| 手勢 | 雙手併軀幹 | 雙手舉直 | 大面積尖 2x1.5cm 錐度比 1.7 | 中面積尖 1.5x0.8cm 錐度比 2.2 | 小面積尖 1x0.8cm 錐度比 2.7 | 很尖 1.8x0.8cm 錐度比 1 | 手掌平放 1.6x0.8cm |
|----|---|---|---|---|--|---|---|
| 圖片 |  |  |  |  |  |  |  |

(二)手掌不同的人水面積

跳水時，最先接觸水面的部位是手，因此手的擺放姿勢也會影響水花的形成的大小，曾經出現過的手勢如圖 3-10 所示：



圖 3-10 跳水四種不同手勢(來源：杜輝英,四種壓水花技術比較。參考文獻 6)

一般跳水入水之前，跳水者會將手掌向下外翻且抓手放平，我們也想了解手掌外翻放平的方式，對水花有何影響，而若手掌向下外翻所呈現的入水面積不同，對水花又有什麼影響呢？我們除了手掌正常比例的手掌面積，也嘗試不同大小的手面積，以了解不同入水面積，對水花有何影響。頭頂距離水面的高度為 50 公分。

表 3-7 手掌不同的人水面積

| 手掌面積 | 大圓 | 大方 | 中方 | 小方 | 小小方 |
|------|---------|------------|--------------|--------------|--------------|
| 尺寸 | 直徑 4 公分 | 4 x 3.2 公分 | 3.2 x 2.4 公分 | 2.4 x 1.5 公分 | 1.6 x 0.8 公分 |
| 圖片 | | | | | |
| 人形圖片 | | | | | |

肆、研究結果

將實驗錄下的慢動作影片，先以影片分析軟體 Tracker，找出物體撞擊水面時的速度，再將影片以逐格播放檢視，找出氣泡與水花最大狀態，然後進行截圖，透過影像分析軟體 ImageJ，分別量測出氣泡寬度、氣泡深度、水花寬度和水花高度，進行後續的分析。

一、不同大小的圓球對水花的影響

表 4-1 比重為 1 不同大小圓球的氣泡空腔與水花截圖圖片


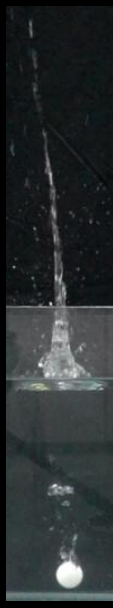
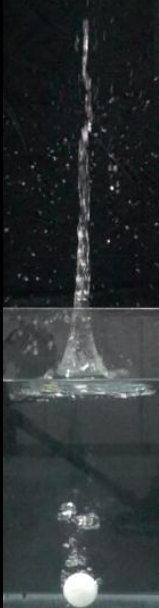







| 圓球直徑(mm) | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
|----------|---|---|---|--|---|
| 重量(gw) | 4.19 | 14.14 | 33.51 | 65.45 | 113.1 |
| 水花 |  |  |  |  |  |
| 氣泡空腔 |  |  |  |  |  |

表 4-2 比重為 1 不同大小圓球的氣泡與水花量測數據

| 圓球直徑 (mm) | 撞擊水面速度 (cm/ s) | | 氣泡寬度 (mm) | | 氣泡深度 (mm) | | 水花寬度 (mm) | | 水花高度 (mm) | |
|--------------|-------------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|-------|
| | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD |
| 20 | 433.4 | 0.65 | 65.78 | 0.61 | 71.47 | 2.55 | 76.84 | 0.95 | 142.16 | 14.70 |
| 30 | 434.9 | 0.65 | 93.30 | 0.81 | 96.16 | 0.25 | 108.56 | 1.19 | 285.24 | 10.32 |
| 40 | 436.4 | 0.66 | 122.97 | 2.00 | 116.96 | 1.95 | 172.37 | 1.37 | 439.11 | 8.46 |
| 50 | 437.9 | 0.66 | 161.12 | 4.62 | 134.62 | 2.59 | 192.15 | 4.00 | 529.76 | 11.96 |
| 60 | 438.5 | 0.66 | 186.82 | 2.88 | 158.19 | 4.18 | 248.07 | 5.52 | 589.90 | 16.63 |

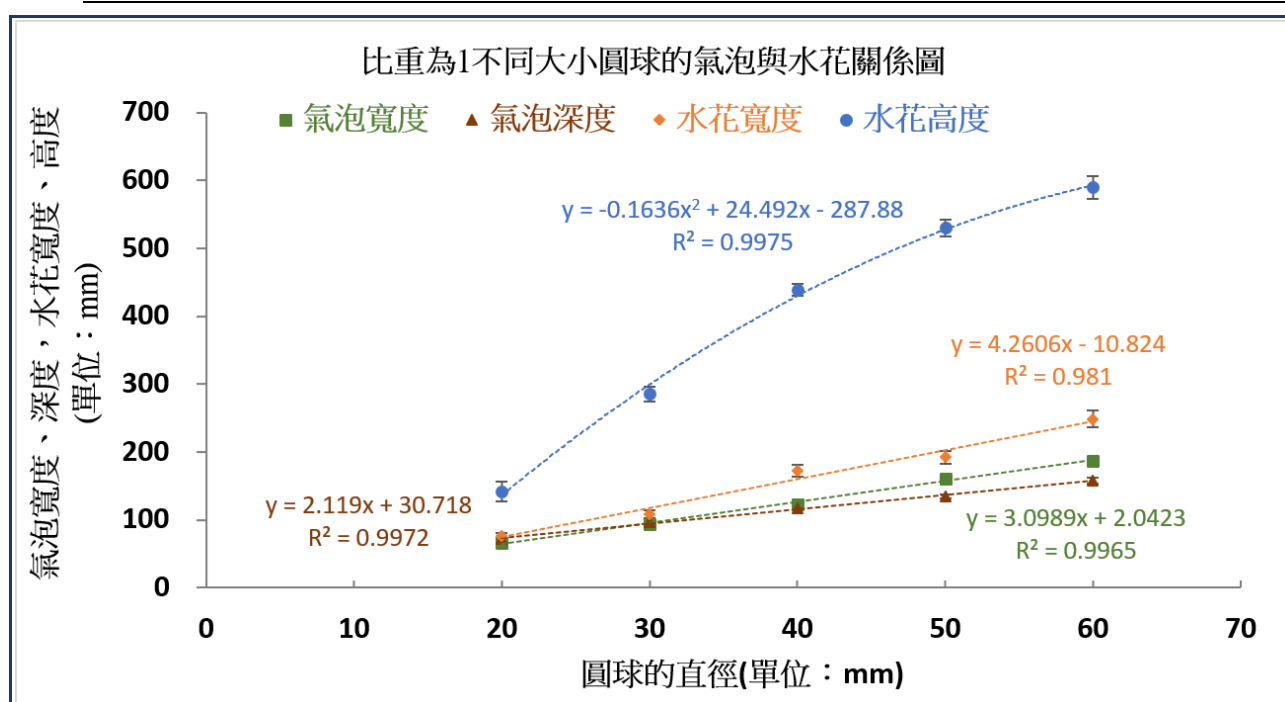


圖 4-1 比重為 1 不同大小圓球的氣泡與水花關係圖

實驗影片結果分析：

1. 隨著圓球直徑增加，水花的高度明顯增加。這是因為較大球體的動能較高，使水面受到更強的衝擊，導致水花噴濺更劇烈。
2. 當球體進入水中時，會形成氣泡空腔，並逐漸閉合，小直徑球的空腔較小，大直徑球的空腔較大，形狀更明顯。

實驗數據結果分析：

1. 隨著圓球直徑增加，水花高度、水花寬度與氣泡尺寸都明顯增加，特別是水花高度的變化最顯著。
2. 氣泡寬度與深度變化相對平緩，但仍隨球體直徑增大而增加。
3. 撞擊速度雖有增加，但變化幅度較小，約在 432~439 cm/s 之間。

實驗結果：

1. 比重為 1 時，圓球越大，重量愈重，動能也愈大，水花越高，氣泡空腔越大。
2. 比重為 1 時，球體直徑越大，產生的水花與氣泡規模越大，且撞擊速度亦隨之增加，顯示球體大小對撞擊結果的影響非常顯著。

二、不同落下高度對水花的影響(因篇幅有限，省略影片截圖的呈現，但仍有相關分析)

表 4-3 相同圓球不同掉落高度的氣泡和水花量測數據

| 掉落高度 (cm) | 撞擊水面速度 (cm/ s) | | 氣泡寬度 (mm) | | 氣泡深度 (mm) | | 水花寬度 (mm) | | 水花高度 (mm) | |
|--------------|-------------------|-------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|-------|
| | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD |
| 55 | 324.00 | 9.72 | 114.44 | 3.12 | 92.81 | 1.93 | 135.64 | 1.91 | 388.08 | 7.23 |
| 100 | 439.10 | 13.17 | 121.38 | 3.60 | 118.36 | 4.75 | 153.13 | 1.54 | 424.28 | 10.04 |
| 150 | 538.50 | 16.16 | 137.50 | 4.09 | 138.14 | 3.47 | 168.88 | 1.26 | 488.45 | 12.08 |
| 200 | 622.30 | 18.67 | 144.91 | 7.51 | 155.73 | 3.50 | 181.48 | 5.11 | 602.79 | 26.80 |

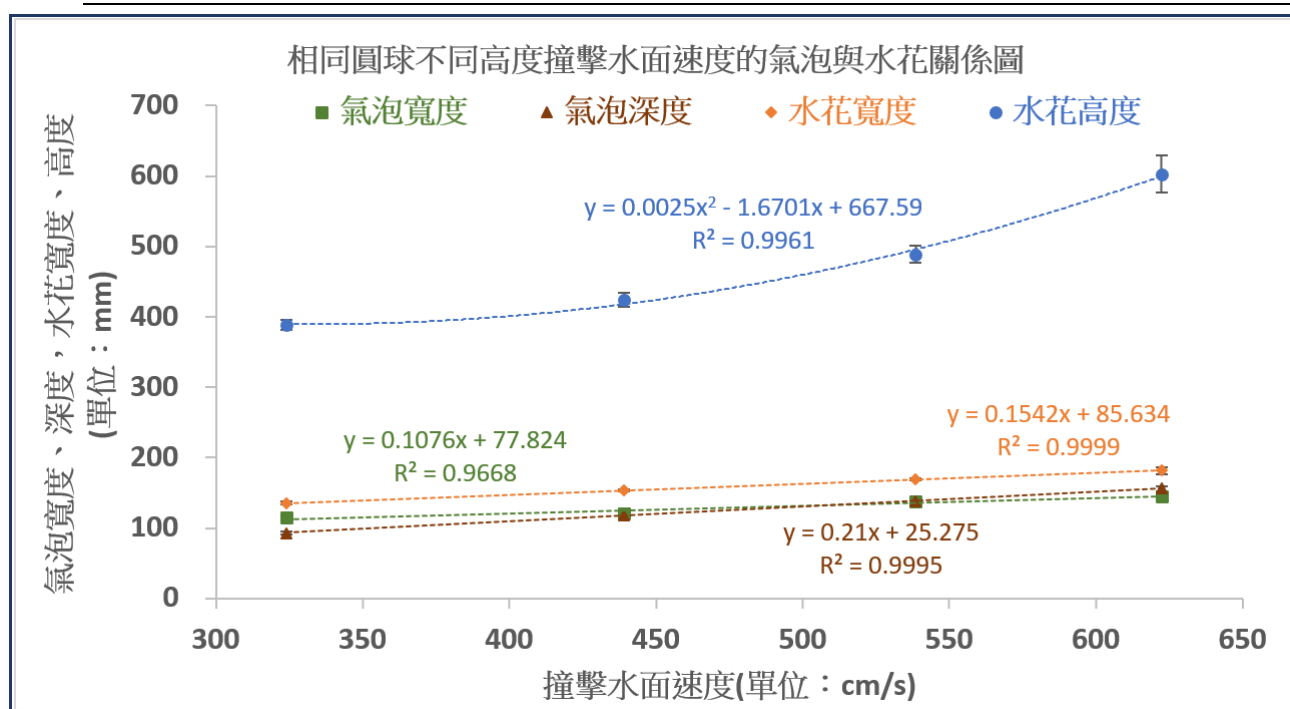


圖 4-2 相同圓球不同落下高度的氣泡與水花關係圖

實驗影片結果分析：

1. 落下高度較低(55cm)，撞擊水面速度較小，水花較小，水面僅有些微擾動。
2. 落下高度較高(200cm)，撞擊水面速度較大，水花顯著增高，水面擾動較大。
3. 落下高度低(55cm)，氣泡空腔較小，落下高度高(200cm)，氣泡空腔較大。

實驗數據結果分析：

1. 撞擊速度隨落下高度增加而增加，符合自由落體運動的物理特性。
2. 水花高度隨著落下高度增加明顯上升，顯示較高撞擊能量會產生更高的水花。
3. 水花寬度和氣泡寬度皆隨落下高度增加略有上升，但幅度較水花高度小。








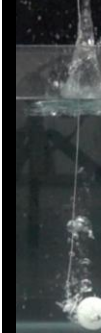





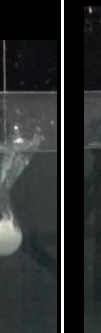


實驗結果：

1. 落下高度越高，撞擊水面速度越大，水花越高，氣泡空腔越大。
2. 氣泡寬度、氣泡深度與水花寬度亦會隨著落下高度增加，但變化相對較小。

三、不同入水速度對水花的影響

(一) 不同垂直落下的速度

表 4-4 不同垂直落下速度的氣泡與水花截圖圖片(轉速：RPM，落下速度 cm/s)

| 轉速 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1800 | 2200 | 2400 | 2600 |
|------|---|---|---|---|---|---|--|---|
| 落下速度 | 62.83 | 83.78 | 104.72 | 125.66 | 167.55 | 209.44 | 230.38 | 251.33 |
| 水花 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 氣泡空腔 |  |  |  |  |  |  |  |  |

備註：因篇幅關係，將轉速 1600 和 2000 省略，但從數據與統計圖可得知變化仍是規律。

表 4-5 不同垂直落下速度的氣泡與水花量測數據

| 轉速 (RPM) | 落下速度 (cm/ s) | | 氣泡寬度 (mm) | | 氣泡深度 (mm) | | 水花寬度 (mm) | | 水花高度 (mm) | |
|-------------|-----------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
| | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD |
| 600 | 62.83 | 3.14 | 27.15 | 0.44 | 11.51 | 0.39 | 9.94 | 0.24 | 7.95 | 0.11 |
| 800 | 83.78 | 4.19 | 29.94 | 0.20 | 13.58 | 0.39 | 12.15 | 0.30 | 10.51 | 0.16 |
| 1000 | 104.72 | 5.24 | 32.73 | 1.01 | 16.77 | 0.31 | 16.86 | 0.40 | 22.67 | 0.49 |
| 1200 | 125.66 | 6.28 | 38.29 | 0.72 | 28.08 | 0.90 | 50.29 | 0.75 | 37.54 | 0.97 |

接續上表

| 轉速 (RPM) | 落下速度 (cm/ s) | | 氣泡寬度 (mm) | | 氣泡深度 (mm) | | 水花寬度 (mm) | | 水花高度 (mm) | |
|-------------|-----------------|-------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|-------|
| | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD |
| 1400 | 146.61 | 7.33 | 48.32 | 0.33 | 44.13 | 1.48 | 62.22 | 1.83 | 40.82 | 1.07 |
| 1600 | 167.55 | 8.38 | 70.19 | 2.41 | 57.86 | 0.77 | 97.96 | 1.18 | 60.99 | 1.35 |
| 1800 | 188.50 | 9.42 | 89.89 | 2.44 | 60.72 | 0.90 | 111.46 | 2.80 | 121.67 | 3.63 |
| 2000 | 209.44 | 10.47 | 112.53 | 4.83 | 78.80 | 5.60 | 143.78 | 5.60 | 158.36 | 3.63 |
| 2200 | 230.38 | 11.52 | 120.23 | 4.55 | 114.76 | 1.64 | 147.16 | 2.03 | 321.32 | 14.98 |
| 2400 | 251.33 | 12.57 | 120.91 | 2.48 | 114.45 | 5.15 | 147.69 | 5.18 | 366.52 | 17.20 |
| 2600 | 272.27 | 13.61 | 120.30 | 3.24 | 118.65 | 1.32 | 152.80 | 3.20 | 372.75 | 6.11 |

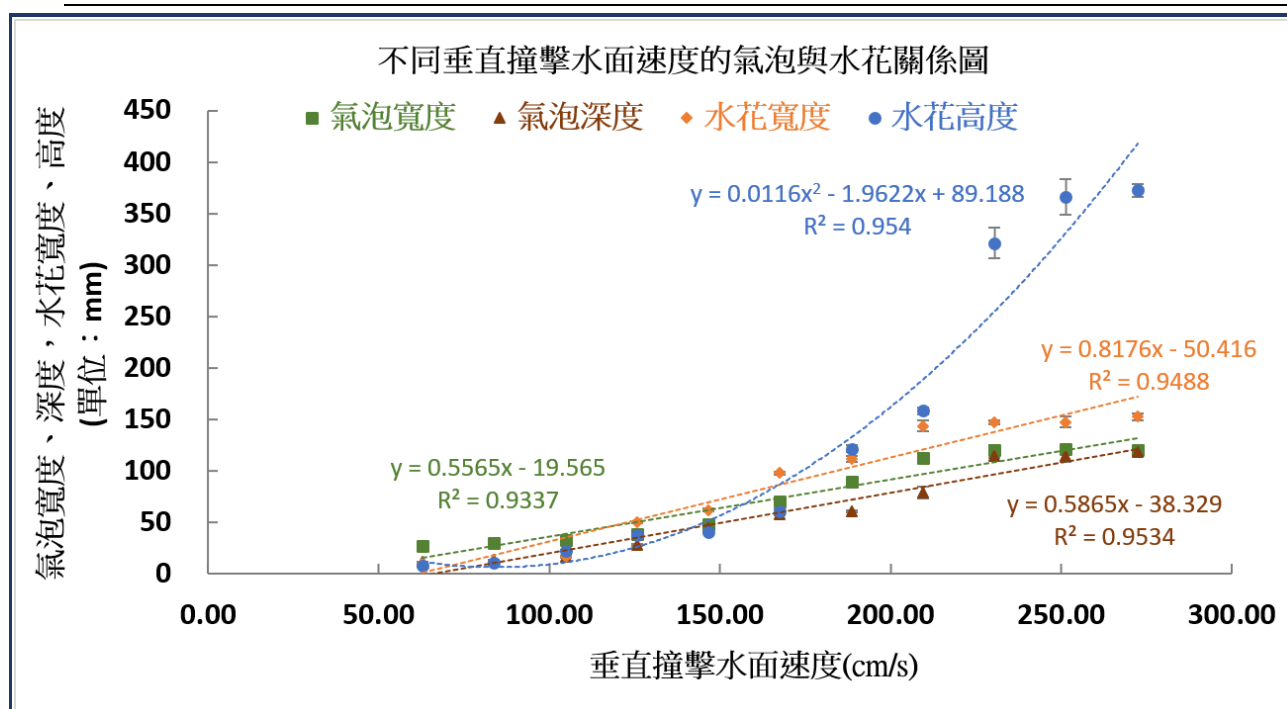


圖 4-3 不同垂直落下速度的氣泡與水花關係圖

實驗影片結果分析：

- 1.垂直落下速度慢(62.83 cm/s)，水花較小，僅有少量水濺起，垂直落下速度快(251.33 cm/s)，水花明顯增高，水柱細長。
- 2.垂直落下速度慢(62.83 cm/s)，氣泡空腔較小，垂直落下速度快(251.33 cm/s)，氣泡空腔更大，形狀明顯。

實驗數據結果分析：

- 1.垂直落下速度增加時，水花高度有最明顯的上升趨勢。
- 2.垂直落下速度超過 209.44cm/s 後，水花高度迅速增加，並達到約 372.75mm。
- 3.氣泡寬度與氣泡深度也隨著垂直落下速度增加而緩慢上升，但變化量較小。

實驗結果：

- 1.垂直落下速度增加，表示球體撞擊水面時的動能增加，造成更強的水面擾動，因此垂直落下速度越快，水花越高，氣泡空腔越大。
- 2.垂直落下速度越快，水花高度的影響最顯著，說明高速撞擊時會產生更劇烈的水面擾動。

(二)不同水平拋射的速度

表 4-6 不同水平拋射速度的氣泡與水花截圖圖片(轉速：RPM，水平速度 cm/s)

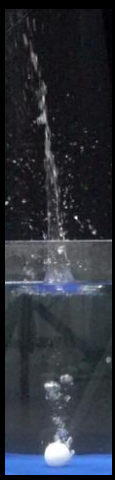

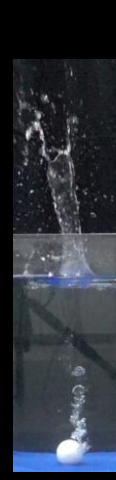



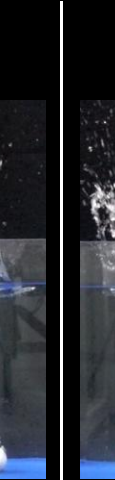







| 轉速 | 50 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
|------|--|--|--|--|---|--|--|
| 水平速度 | 3.67 | 43.98 | 58.64 | 73.30 | 87.96 | 102.63 | 117.29 |
| 水花 |  |  |  |  |  |  |  |
| 氣泡空腔 |  |  |  |  |  |  |  |

表 4-7 不同水平拋射速度的氣泡與水花量測數據

| 轉速 (RPM) | 水平拋射速度 (cm/ s) | | 氣泡寬度 (mm) | | 氣泡深度 (mm) | | 水花寬度 (mm) | | 水花高度 (mm) | |
|-------------|-------------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|-------|
| | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD |
| 50 | 3.67 | 0.18 | 105.96 | 2.64 | 100.76 | 3.61 | 145.36 | 2.99 | 320.04 | 9.73 |
| 600 | 43.98 | 2.20 | 120.17 | 2.59 | 96.06 | 2.51 | 161.91 | 5.57 | 305.40 | 6.27 |
| 800 | 58.64 | 2.93 | 110.38 | 1.46 | 98.41 | 2.25 | 133.90 | 5.06 | 247.10 | 5.66 |
| 1000 | 73.30 | 3.67 | 118.90 | 3.56 | 106.66 | 1.94 | 147.09 | 2.65 | 247.24 | 4.78 |
| 1200 | 87.96 | 4.40 | 116.50 | 3.20 | 111.96 | 1.98 | 143.66 | 2.26 | 258.12 | 11.49 |
| 1400 | 102.63 | 5.13 | 109.45 | 4.21 | 107.91 | 4.67 | 144.78 | 2.25 | 220.73 | 3.42 |
| 1600 | 117.29 | 5.86 | 116.20 | 2.55 | 107.96 | 2.52 | 150.70 | 4.47 | 161.37 | 5.83 |

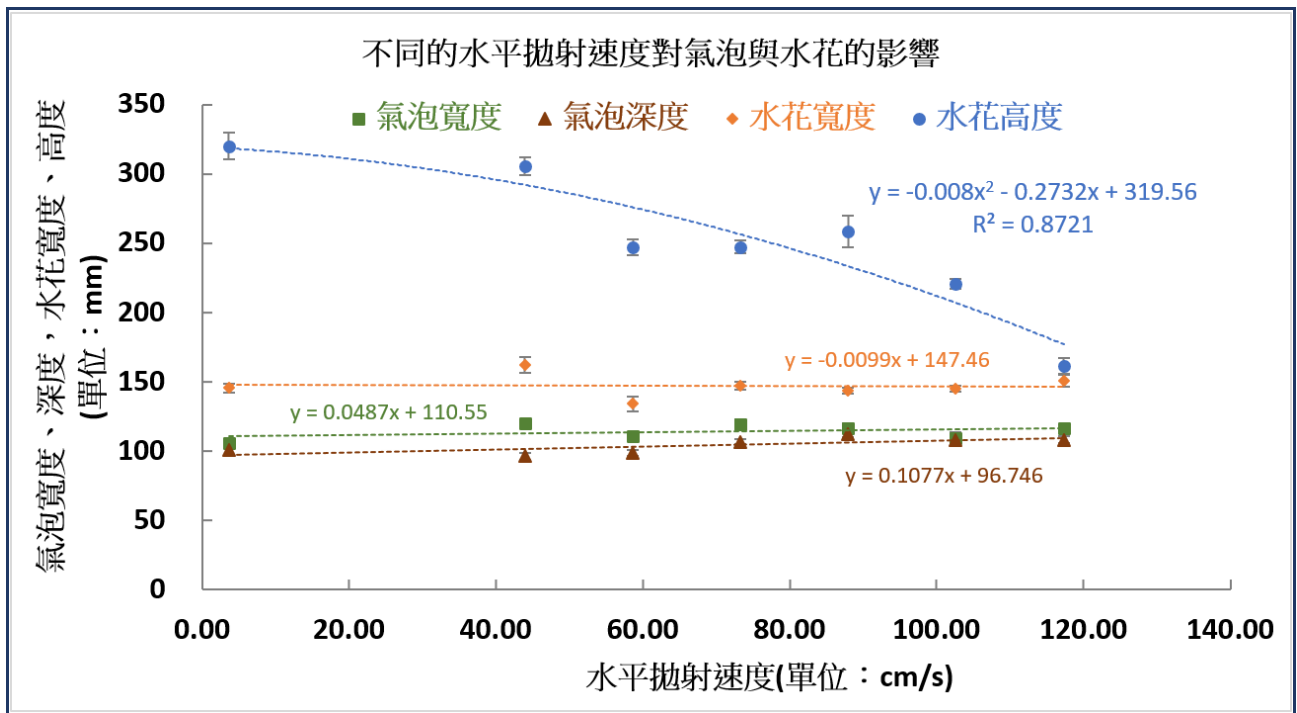


圖 4-4 不同水平拋射速度的氣泡與水花關係圖

實驗影片結果分析：

- 1.水平拋射速度慢(3.67 cm/s)：水花較小，幾乎是直線向上噴濺，水平速度快(117.29 cm/s)，水花明顯偏向一側，並且濺射範圍更大。
- 2.水平拋射速度慢，氣泡空腔幾乎為對稱圓柱狀，表示球體幾乎是垂直下沉。水平拋射速度快，氣泡空腔呈現明顯的傾斜，顯示球體受到水平動能的影響，造成水中運動路徑偏移。

實驗數據結果分析：

- 1.水花高度顯示明顯下降趨勢，隨著水平拋射速度增加，水花高度逐漸減少。
- 2.水花寬度呈現相對穩定趨勢，變化幅度較小，代表水平拋射速度對水花寬度的影響不顯著。
- 3.氣泡寬度與氣泡深度變化趨於平穩，數值介於 95mm ~ 125 mm 之間，顯示水平拋射速度對氣泡大小影響較小。

實驗結果：

- 1.水平拋射速度越快，水花越傾斜、擴散範圍越大。
- 2.氣泡空腔形狀會隨著水平拋射速度增加而產生偏移或扭曲。
- 3.水平拋射速度增加會降低水花高度，但不顯著影響水花寬度。表示水平拋射速度的影響主要集中在水花的形狀。
- 4.隨著水平拋射速度增加，水花的垂直高度顯著減少，可能因為撞擊能量被分散到水平方向，減少了向上的擾動。

四、不同入水形狀對水花的影響

(一)相同入水截面積，不同形狀

表 4-8 不同入水形狀的氣泡與水花截圖圖片

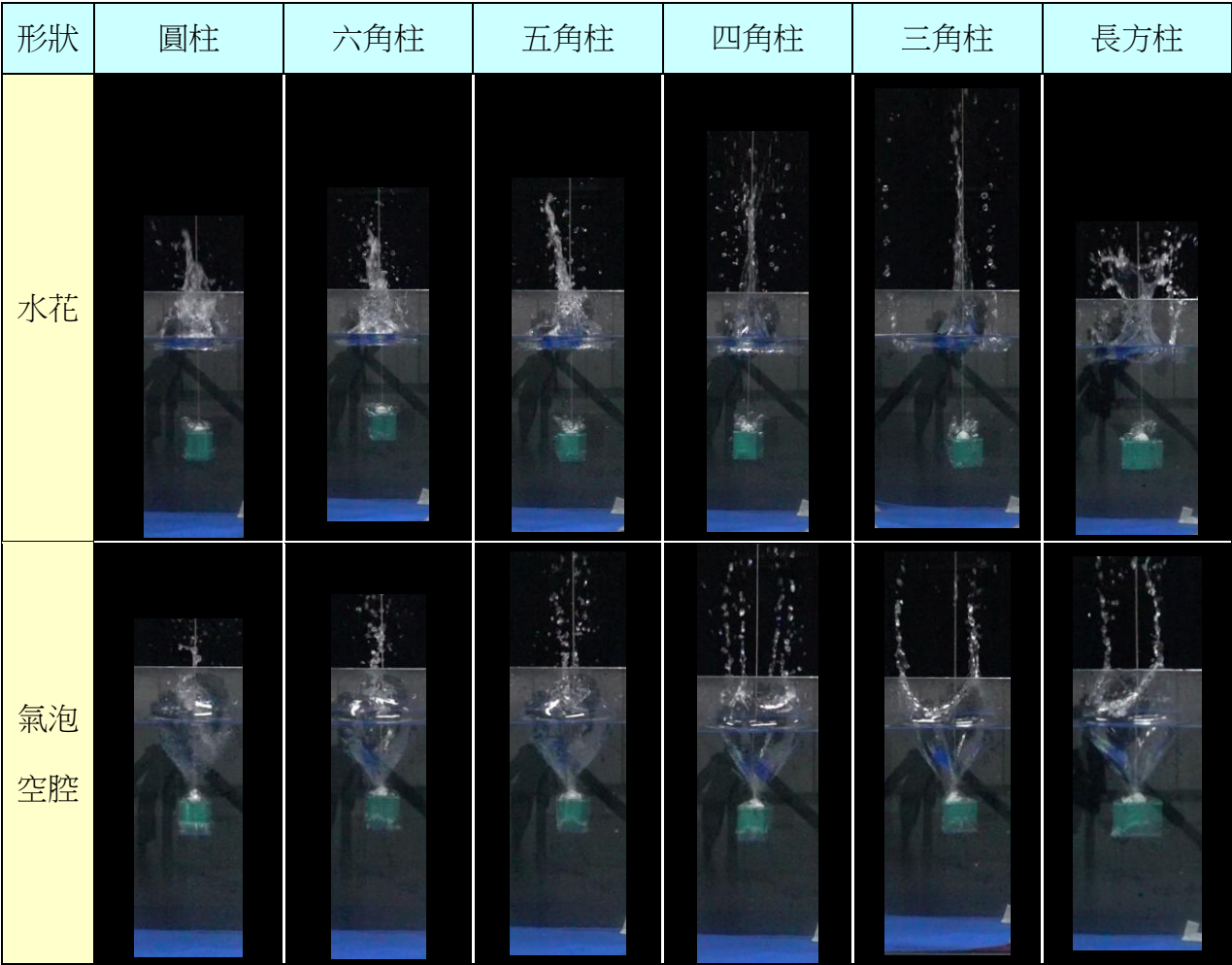


表 4-9 不同入水形狀的氣泡與水花量測數據

| 入水 形狀 | 氣泡寬度 (mm) | | 氣泡深度 (mm) | | 水花寬度 (mm) | | 水花高度 (mm) | |
|----------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
| | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD |
| 圓形 | 88.48 | 1.21 | 77.93 | 2.02 | 132.94 | 4.40 | 169.50 | 0.65 |
| 六邊形 | 105.21 | 1.79 | 82.59 | 1.84 | 125.08 | 3.51 | 225.81 | 4.12 |
| 五邊形 | 114.83 | 3.54 | 78.29 | 2.06 | 143.21 | 3.67 | 242.79 | 4.56 |
| 正方形 | 120.46 | 1.29 | 84.70 | 2.85 | 135.62 | 2.21 | 264.20 | 8.26 |
| 三角形 | 123.78 | 3.53 | 81.96 | 2.68 | 171.67 | 5.15 | 271.93 | 9.44 |
| 長方形 | 139.12 | 1.66 | 79.33 | 2.43 | 135.68 | 5.07 | 170.95 | 3.06 |

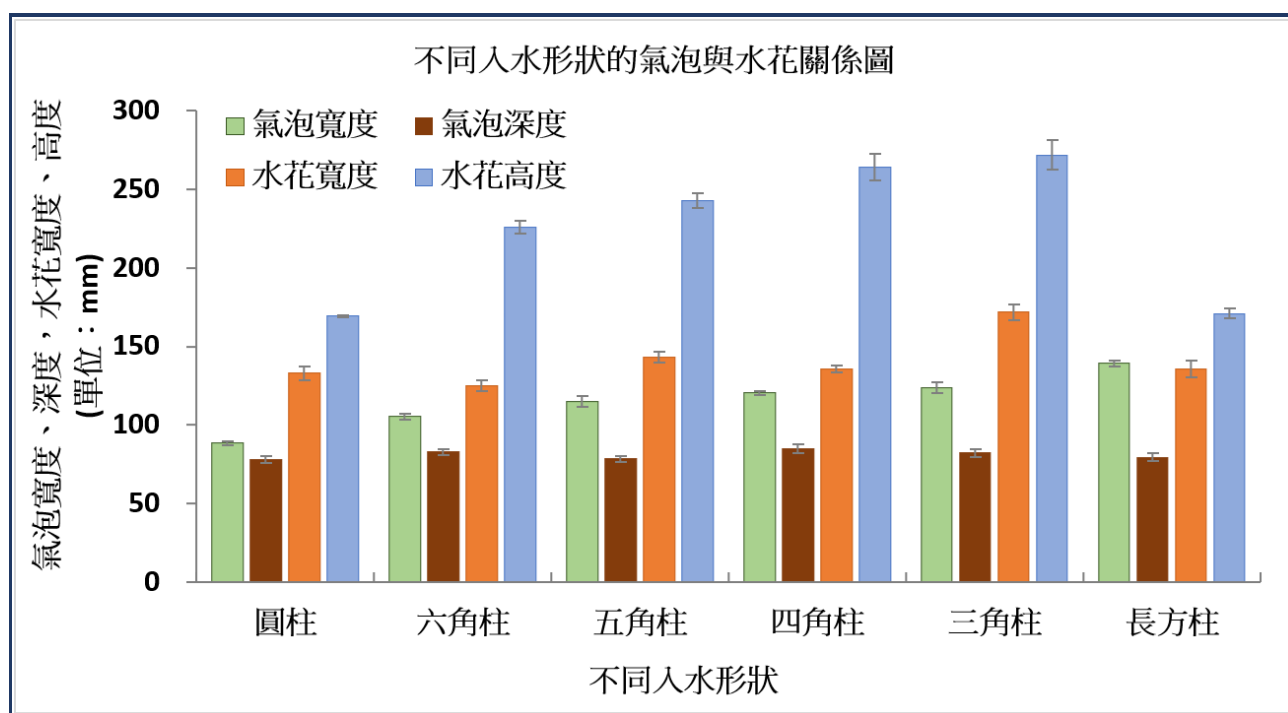


圖 4-5 不同入水形狀的氣泡與水花關係圖

實驗影片結果分析：

- 1.圓形柱體的水花較小且對稱，水面波動較溫和，顯示流體阻力最小，三角形柱體的水花最劇烈，波動範圍較大，可能因為撞擊時的受力不均勻，使水流向不同方向分散，長方形柱體：水花範圍較廣，顯示其撞擊水面時，受力較為不均，產生較大擾動。
- 2.圓形柱體：氣泡空腔最對稱，呈現圓柱狀，顯示下落時水流較均勻。多邊形柱體（六邊形、五邊形、四邊形）：氣泡空腔形狀開始變得不對稱，顯示水流受到影響。
- 3.長方形柱體的氣泡空腔呈現扭曲狀態，顯示形狀影響流體的方向性，使得水流不穩定。

實驗數據結果分析：

- 1.水花高度在各項數據中變化最明顯，以三角柱的為最高，圓柱和長方體最低。另外發現相同面積，隨著正多邊形的邊數減少，水花高度有增加的趨勢。
- 2.相同面積的正多邊形，隨著邊數的減少，氣泡寬度也有增加的趨勢。
- 3.相同的撞擊面積，不同的撞擊形狀，氣泡深度沒有明顯的變化。

實驗結果：

- 1.圓形柱體對水面的影響最小，多邊形與三角形柱體會產生較大的水花與不規則的氣泡空腔，顯示形狀不對稱時，水流受到更強烈的影響，長方形柱體則顯示水花與氣泡空腔最不穩定。
- 2.圓柱造成最小的氣泡與水花，撞擊平穩且擾動最小，正方形與三角形會產生較高且寬的水花，代表撞擊時的動能釋放最劇烈。

(二) 相同入水截面積，不同錐度

表 4-10 不同入水錐度的氣泡與水花截圖圖片

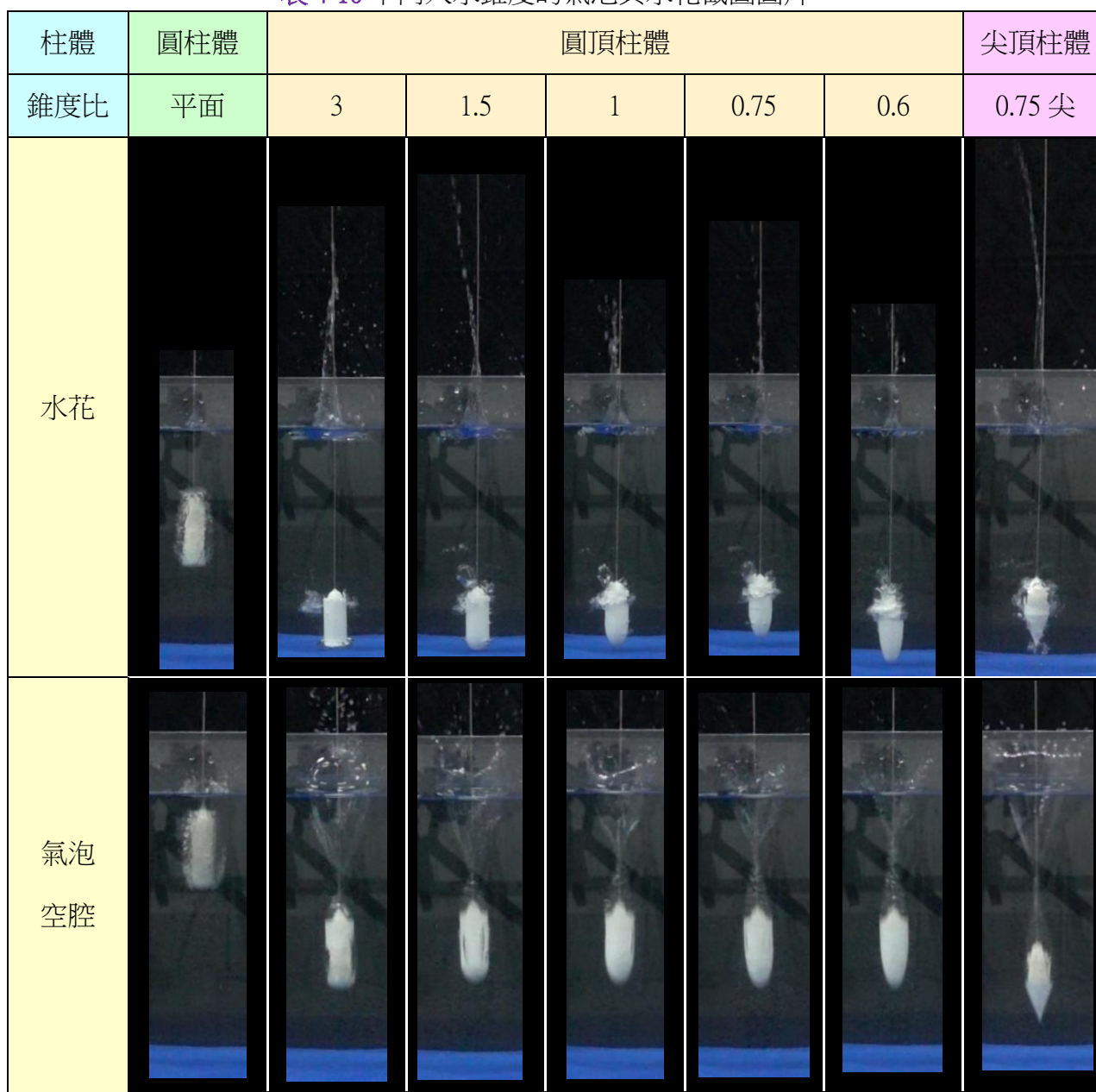


表 4-11 不同入水錐度的氣泡與水花量測數據

| 錐度比 | 氣泡寬度 (mm) | | 氣泡深度 (mm) | | 水花寬度 (mm) | | 水花高度 (mm) | |
|---------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
| | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD |
| 平面 | 37.68 | 1.12 | 15.96 | 0.28 | 35.55 | 1.04 | 53.18 | 1.13 |
| 圓頂 3 | 70.60 | 1.97 | 96.93 | 2.29 | 104.75 | 3.31 | 199.52 | 6.95 |
| 圓頂 1.5 | 62.93 | 1.73 | 85.31 | 2.36 | 84.47 | 1.85 | 139.55 | 5.61 |
| 圓頂 1 | 73.98 | 1.78 | 72.56 | 2.46 | 86.46 | 2.36 | 139.25 | 2.36 |
| 圓頂 0.75 | 72.16 | 0.98 | 53.19 | 1.10 | 81.94 | 1.86 | 119.65 | 4.23 |
| 圓頂 0.6 | 58.95 | 2.60 | 49.77 | 1.58 | 68.50 | 1.83 | 75.87 | 1.21 |
| 尖頂 0.75 | 94.78 | 2.05 | 79.03 | 1.49 | 88.40 | 2.39 | 309.89 | 4.68 |

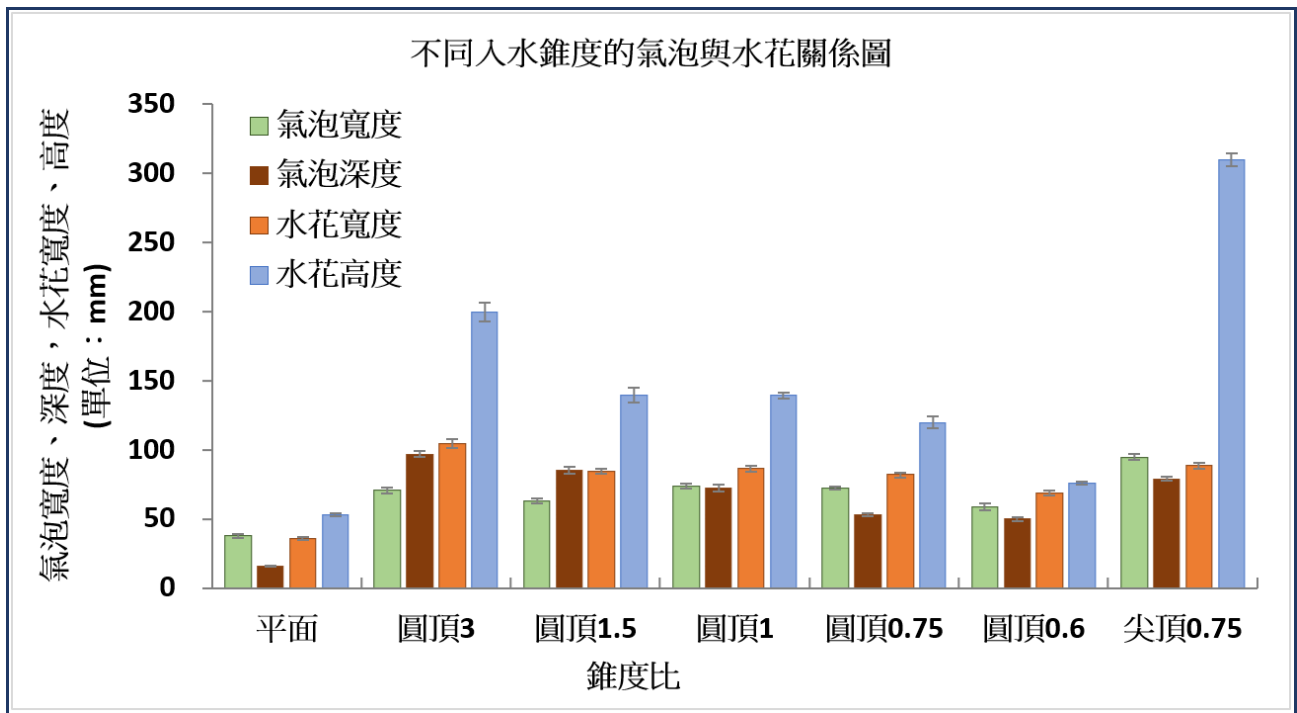


圖 4-6 不同入水錐度的氣泡與水花關係圖

實驗影片結果分析：

- 1.平面撞擊水面後，產生少許水花，空氣隨著圓柱進入水中，只有少許的空氣會形成氣泡空腔，因此造成的氣泡空腔很小，水花也相對較低且狹窄。
- 2.圓頂柱體隨著錐度比從 3 減小至 0.6，撞擊前端愈來愈尖銳，氣泡的深度會有變小的趨勢，且氣泡愈來愈不完整，而水花高度變低，水花底部也從寬厚變細窄。

實驗數據結果分析：

- 1.錐度比 0.75 的尖頂圓柱，產生最高的水花，約 309.89 mm，表示越尖銳的物體會讓水花向上噴濺得更高。
- 2.圓頂柱體錐度比從 3 至 0.6 減小的過程，水花的高度也有變低的趨勢。

實驗結果：

- 1.撞擊水面前端的形狀為平面，若能將空氣帶入水中，則氣泡空腔最小，水花也最小。
- 2.圓頂柱體較鈍面物體會讓撞擊範圍擴大，使水花向外擴散且氣泡較深。
- 3.尖頂柱體的錐度比越小(越尖銳)，水花越細，噴濺時會越集中且高度更高。

五、模型不同入水姿勢對水花的影響(因篇幅有限，省略影片截圖的呈現，但仍有相關分析)

(一) 雙手不同的入水姿勢

表 4-12 雙手不同的入水姿勢的氣泡與水花量測數據

| 手的姿勢 | 氣泡寬度 (mm) | | 氣泡深度 (mm) | | 水花寬度 (mm) | | 水花高度 (mm) | |
|-------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
| | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD |
| 雙手併軀幹 | 93.98 | 3.17 | 63.99 | 1.34 | 107.12 | 3.29 | 169.19 | 5.70 |
| 雙手舉直 | 65.75 | 1.82 | 52.31 | 1.30 | 69.82 | 0.70 | 129.84 | 3.73 |
| 大面積尖 | 81.02 | 1.36 | 49.79 | 1.41 | 107.63 | 0.87 | 120.23 | 3.70 |
| 中面積尖 | 66.32 | 2.02 | 44.04 | 1.02 | 68.48 | 0.53 | 80.29 | 1.95 |
| 小面積尖 | 62.32 | 0.84 | 34.54 | 0.92 | 66.04 | 2.22 | 78.85 | 0.92 |
| 很尖 | 69.85 | 1.12 | 33.85 | 1.11 | 49.05 | 1.23 | 35.79 | 0.85 |
| 手掌平放 | 35.08 | 1.13 | 31.77 | 0.91 | 43.45 | 0.74 | 33.75 | 0.46 |

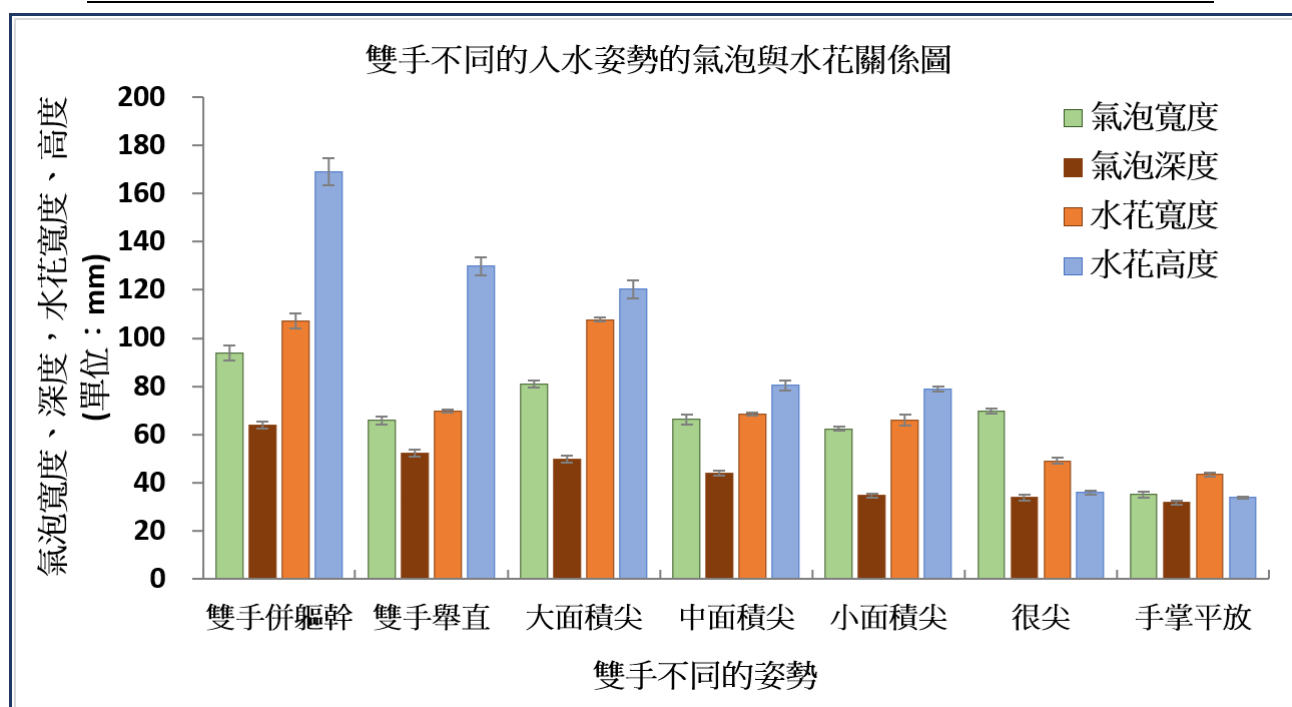


圖 4-7 雙手不同的入水姿勢的氣泡與水花關係圖

實驗影片結果分析：

1. 雙手併攏軀幹，撞擊水面的面積較大，氣泡空腔和水花會最大，呈現四散噴濺。
2. 大面積尖，氣泡呈現外擴狀態，水花較大，範圍較寬，隨著面積變小，水花有變小的趨勢。
3. 手勢很尖的情況下，氣泡寬度會變大，但氣泡深度變小，使水花不至於變太大。
4. 手掌平放時的氣泡空腔最小，產生的水花也最小。

實驗數據結果分析：

1. 手掌平放的姿勢數據最低，因為入水面積較大，阻力分散，水花與氣泡的產生都最小。
2. 雙手併攏軀幹水花最高，表示入水時阻力最大，產生最明顯的水花，隨著手勢變尖，水花高度與寬度逐漸下降，代表阻力減小，入水更加流線型。

實驗結果：

- 1.不同手部姿勢的撞擊會影響水花與氣泡的形成。手掌尖銳姿勢可以有效降低水花寬。
 - 2.手掌平放能產生最小的水花與氣泡空腔，最接近專業跳水運動員入水時的理想效果。
- (二)手掌不同的入水面積

表 4-13 手掌不同的入水面積的氣泡與水花截圖圖片

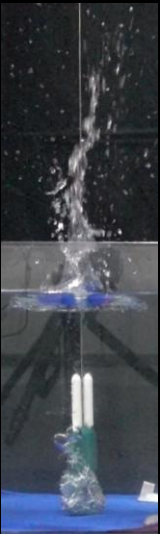

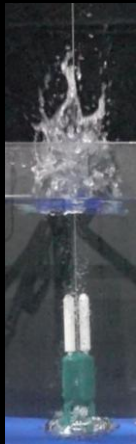







| 手掌面積 | 大圓 | 大方 | 中方 | 小方 | 小小方 |
|----------|---|---|---|---|---|
| 尺寸 | 直徑 4 公分 | 4 x 3.2 公分 | 3.2 x 2.4 公分 | 2.4 x 1.5 公分 | 1.6 x 0.8 公分 |
| 水花 |  |  |  |  |  |
| 氣泡 空腔 |  |  |  |  |  |

表 4-14 手掌不同的入水面積的氣泡與水花量測數據

| 手掌面積 | 氣泡寬度 (mm) | | 氣泡深度 (mm) | | 水花寬度 (mm) | | 水花高度 (mm) | |
|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
| | M | SD | M | SD | M | SD | M | SD |
| 大圓 | 102.91 | 3.37 | 101.42 | 2.61 | 132.71 | 5.89 | 132.41 | 2.85 |
| 大方 | 115.91 | 4.83 | 101.81 | 0.99 | 143.07 | 3.62 | 235.42 | 6.15 |
| 中方 | 95.28 | 1.94 | 80.45 | 1.97 | 118.16 | 2.60 | 163.49 | 1.55 |
| 小方 | 61.11 | 1.66 | 57.81 | 1.63 | 77.86 | 1.86 | 83.32 | 2.19 |
| 小小方 | 34.57 | 0.55 | 31.91 | 0.79 | 43.69 | 1.07 | 35.54 | 0.70 |

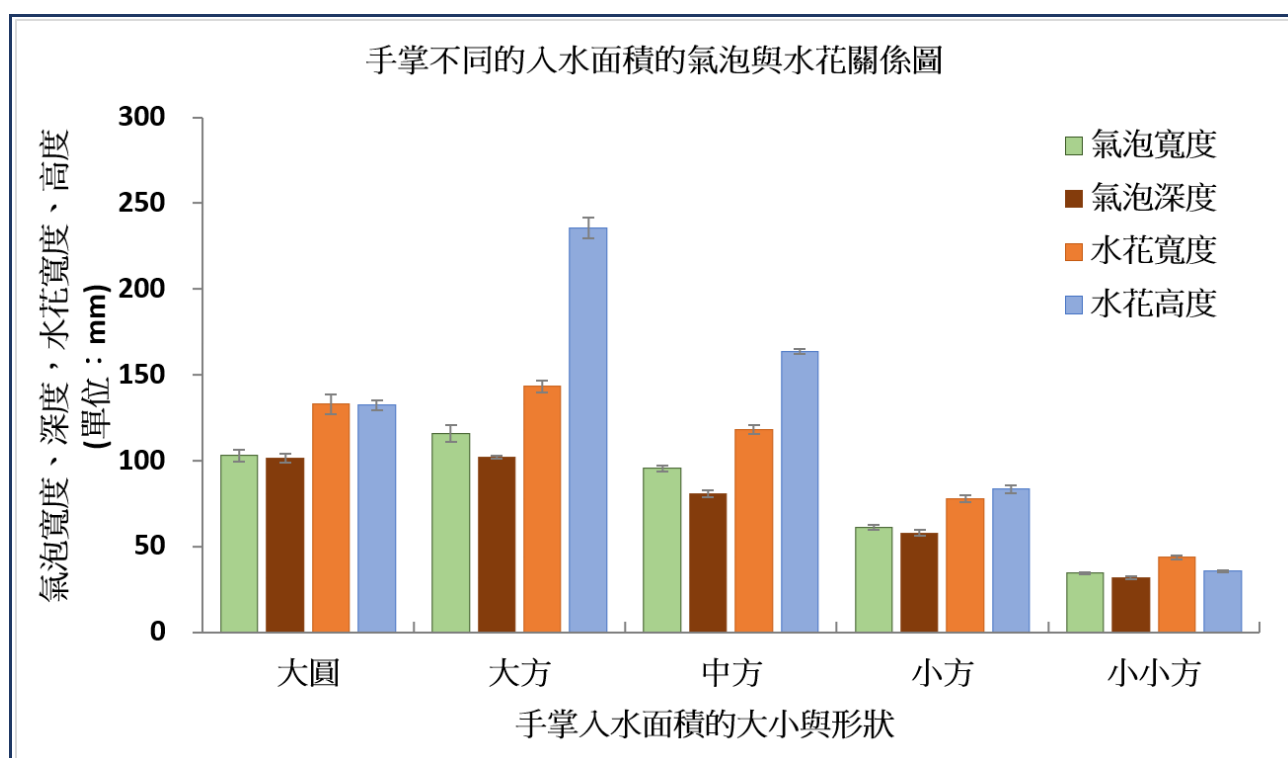


圖 4-8 手掌不同的入水面積的氣泡與水花關係圖

實驗影片結果分析：

- 1.手掌的入水面積是「大方」時，因撞擊面積大，氣泡空腔較大，範圍擴散且不穩定，水花較高，噴濺高度最高且範圍最廣。
- 2.手掌的入水面積是「小小方」時，的氣泡空腔最小，水花最小，噴濺範圍極窄。

實驗數據結果分析：

- 1.手掌的入水面積是「大方」 會產生較大的氣泡範圍與較高的水花高度。
- 2.手掌的入水面積是「小小方、小方」 會產生較小的氣泡範圍與較低的水花高度。
- 3.手掌的入水面積越大，氣泡與水花的影響範圍越廣。







實驗結果：

- 1.手掌的入水面積越大，水花越大，氣泡空腔越擴散，手部面積越小，水花越小，氣泡空腔越窄且穩定，阻力減小。
- 2.手掌的入水面積較大時，會產生更大的水花與氣泡範圍，面積較小時，則能有效降低水花與氣泡影響。

伍、討論

一、人體的比重接近於 1，研究中探討的物體比重也是以 1 作為基準，而我們也想知道若比重較大或較小時，對於氣泡和水花會有什麼差異，我們以相同直徑 4 公分的圓球，調整不同重量，形成不同比重進行實驗。



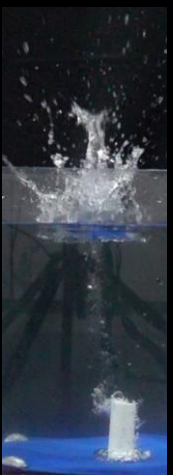
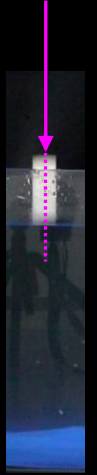
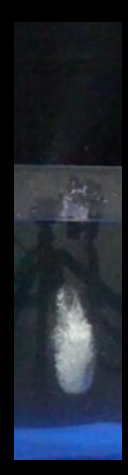

表 5-1 相同大小不同比重的圓球形成的氣泡空腔

| 重量(gw) | 14 | 25.5 | 35.5 | 56.6 | 77.9 | 100.5 |
|--------|---|---|---|--|---|---|
| 比重 | 0.42 | 0.76 | 1.06 | 1.69 | 2.32 | 3.00 |
| 氣泡空腔 |  |  |  |  |  |  |

結果發現比重大小與水花高度沒有明顯的相關性，但從氣泡中發現比重較重，因為速度較快，動能較大，撞擊水面後，產生的氣泡深度較深，但因速度快，所以也會將部份空氣帶入水中，使氣泡空腔的空氣減少，雖然氣泡空腔空氣減少，但氣泡深度增加，彈射的效果也大，水花的大小與氣泡深度、氣泡空腔的空氣量相關，若能將氣泡空腔的空氣減少，就可以減少沃辛頓射流的效果，另外比重小於 1 時，氣泡上方會不完整，形成皇冠的形狀。

二、研究中除了考量水平速度的實驗，其他皆以垂直入水的方式進行實驗，不同的文獻都提到身體要筆直入水，當物體以垂直的方式掉落，且物體本身沒有筆直入水，而是以傾斜的方式入水，水花會產生多大的差異呢？

表 5-2 圓柱傾斜入水與筆直入水的氣泡與水花

| 入水角度 | 傾斜 1 | 傾斜 2 | 傾斜 3 | 筆直 1 | 筆直 2 | 筆直 3 |
|-------|---|---|---|--|---|---|
| 空氣與氣泡 |  |  |  |  |  |  |

結果發現圓柱傾斜入水時，產生明顯的氣泡空腔，造成水花的噴濺；而當圓柱筆直入水時，除了一開始產生的小水花，其餘的空氣附著在圓柱被帶入水中，沒有形成氣泡空腔，也就沒有形成更大的水花。

三、研究中我們發現不同撞擊形狀的圓柱，會產生較少的水花，除了符合文獻提到楔形剛體的尖角越尖銳，激起的水花越高，方形剛體則激起的水花較低，但方形剛體接觸面積過大，也會激起較大的水花。

(圖 5-1、圖 5-2。來源：金錢競光,張松寧,金海泉.跳水「壓水花」技術運動生物力學研究。參考文獻 7)

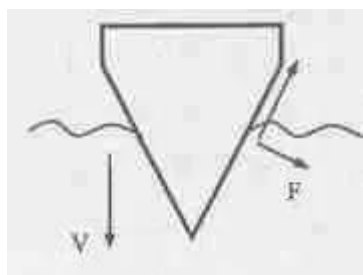


圖 5-1 楔形剛體

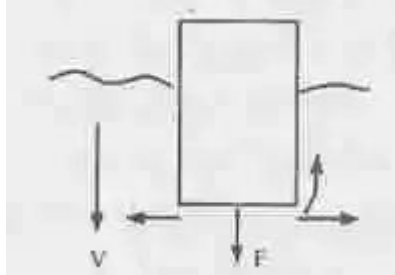


圖 5-2 方形剛體



圖 5-3 不同圓柱

另外我們也發現物體愈大，撞擊水面一開始所形成的水花也會較大，產生的空氣也較多，若空氣能被物體帶入水中，也就能減少氣泡空腔所產生的沃辛頓射流，使水花較小。還有圓柱撞擊時的撞擊面積與圓柱高度也有相關性，若高度太短，較無法攜帶空氣進入水底，就容易形成氣泡空腔，就會造成水花變大。

四、我們也觀察到跳水選手，在跳水前會把身體擦乾，這對跳水的水花會有影響嗎？我們可以以得到較少水花的圓柱體進行實驗，結果發現在圓柱體入水後，擦乾的圓柱體，明顯的可以把空氣帶入水中，而溼的圓柱體，不容易把空氣帶入水中，而直接形成氣泡空腔彈射出水面造成明顯的水花，如表 5-3 所示。


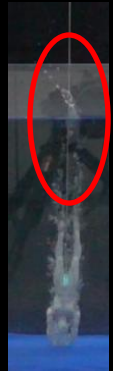




表 5-3 圓柱表面潮溼與乾燥入水的氣泡與水花

| 表面 | 潮溼 1 | 潮溼 2 | 潮溼 3 | 乾燥 1 | 乾燥 2 | 乾燥 3 |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| 空氣與氣泡 | | | | | | |

溼的圓柱體，表面有一層水膜，物體撞擊後產生的空氣不易附著在圓柱體上，而直接向上移動形成氣泡空腔，造成較明顯的水花，當圓柱表面是乾的，空氣附較容易附著在圓柱體上，因此空氣較能隨著圓柱被帶入水中，變成氣泡後再浮出水面，減少水花的形成。

五、以人體模型進行入水後的水花分析，以標準姿勢可以得到較低的水花，手掌以合掌尖銳的方式入水，水花的確較細較高，而從手平舉腳打開的方式入水，手臂受水的作用力變斜下，且手腳上方有明顯的空氣附著，水花則呈現兩處較高。當手平舉腳打開以平躺的方式入水，因為撞擊水面的面積最大，水花也最大最高。

表 5-4 人體模型不同姿勢入水的水花

| 姿勢 | 標準 | 手尖 | 雙手直上 | 立正 | 手平腳開 | 手平腳開(平躺) |
|----|---|---|---|---|--|---|
| 水花 |  |  |  |  |  |  |

陸、結論

- 一、球體直徑為影響水花與氣泡空腔的關鍵因素。圓球直徑越大，水花高度的變化也最為顯著，水花寬度與氣泡空腔寬度、氣泡空腔深度皆顯著增加，並伴隨撞擊速度的微幅上升。
- 二、圓球撞擊水面受到落下高度的顯著影響。落下高度越高，撞擊速度隨之增加，導致水花高度與氣泡空腔大小明顯增加。水花寬度、氣泡寬度與氣泡深度亦隨高度增加而略微上升，但變化幅度較小。
- 三、垂直撞擊速度是影響水花與氣泡空腔的重要因素。隨著垂直撞擊速度增加，水花高度明顯上升，並在高速撞擊時呈現更劇烈的水面擾動。氣泡空腔的寬度與深度會隨著垂直撞擊速度增加而略微增大，但變化幅度較小。
- 四、水平速度對圓球撞擊水面後的水花與氣泡空腔具有顯著影響。隨著水平速度增加，水花高度減少且傾斜，濺射範圍擴大，顯示水平動能會分散撞擊能量，改變水花形狀。氣泡空腔的大小變化幅度較小，但其形狀會因水平速度而產生明顯偏移。
- 五、柱體撞擊水面的形狀是影響水花與氣泡空腔規模的重要因素。圓形柱體對水面擾動最小，並產生較小的氣泡空腔和較小的水花。多邊形與三角形柱體因其不對稱性，會產生較大的水花與不穩定的氣泡空腔，顯示形狀越尖銳或邊數越少，水花受到的影響越大。
- 六、柱體前端錐度比在撞擊水面時中扮演重要角色。尖頂圓柱較尖銳的尖頂會集中撞擊能量，產生更高、較細的水花。圓頂柱體較鈍面的則會增加撞擊範圍，產生較廣且較深的氣泡空腔，使水花底部較寬較明顯。

七、手部擺放姿勢對水花與氣泡空腔的大小及形狀有顯著影響。手掌平放的姿勢最能減少水花與氣泡空腔，達到最小擾動效果，尖銳手勢可進一步減少水花寬度，顯示流線型姿勢對降低水面擾動的優勢。

八、手部面積大小對於水花與氣泡空腔的形成具有重要影響。較大面積的手部姿勢會增加水面擾動，導致較高的水花與較大的氣泡範圍。而較小面積的手部姿勢則能有效減少水花噴濺，並產生較小且穩定的氣泡空腔。

九、水花消失術是跳水前擦乾身體，入水前身體筆直頭向下、雙手向水面伸直，手掌外翻抓手放平，入水後，將空氣帶入水底，減少氣泡空腔造成的沃辛頓射流現象，以水底產生氣泡浮出水面取代水花，進一步降低水花產生，因此當跳水產生的水花很少時，就會看到選手入水後，水中有氣泡陸續冒出水面。



圖 6-1 水中氣泡

柒、參考文獻資料

1. Smith, J. (2020). "Hydrodynamics in Diving." *Journal of Sports Science*, 38(4), 345-356.
2. Lee, K. & Wang, H. (2019). "Effect of Entry Angle on Splash Size in Diving Competitions." *Physics of Fluids*, 31(2), 023101.
3. Brown, P. (2021). "Biomechanical Analysis of Diving Techniques." *International Journal of Sports Physics*, 45(3), 287-299.
4. 李明哲 (2023). 《跳水物理學》，台北：科學出版社。
5. 張瑞祥, 陳少華 (2020). 《跳水運動員入水姿勢對水花大小的影響》. 北京體育大學學報, 43(5), 112-118.
6. 杜輝英.四種壓水花技術比較[J].成都體育學院學報,1991(2):56-59+74.
7. 金錢競光,張松寧,金海泉.跳水「壓水花」技術運動生物力學研究[J].體育科學,2004(12):49-53.
8. 鄭永銘 (2023) 沃辛頓射流。跟著鄭大師玩科學 <https://www.masters.tw/319614/worthington-jet>
9. 全國中小學科學展覽會(57 屆)。止一剎的花火-泡沫對水花濺起高度之影響。
10. 全國中小學科學展覽會(63 屆)。水花的減緩者。
11. 全國中小學科學展覽會(64 屆)。水中的奇妙力量探秘—沃辛頓射流。

本作品說明書內所含圖片、照片，除了圖 3-10、圖 5-1、圖 5-2 外，其餘皆由作者拍攝與繪製。

【評語】 080123

本作品以奧運跳水為靈感，對「水花消失術」進行了深入且系統性的物理探討。作者運用 3D 列印製作實驗模型，來確保形狀、比重等變因控制，對實驗的精確度及多樣性有極大的幫助。過程中測試了多個關鍵變因，例如：球體直徑、落下高度、入水速度、物體形狀、手部姿勢和面積，實驗設計嚴謹，並採用高速攝影及影像分析軟體進行量化測量，最後還找到如何減少水花的技巧。特別強調「帶入空氣會減少氣泡空腔造成的沃辛頓射流現象」的創新視角，使整個作品更具深度和完整，成為將生活現象轉化為科學探究的優秀範例。

作品海報

水花消失術

摘要

本研究探討跳水過程中不同因素對氣泡與水花產生的影響，並分析如何透過改變跳水姿勢來減少水花量。結果顯示，球體直徑與撞擊速度增加皆會顯著提升水花高度與氣泡空腔大小。水平速度會改變水花傾斜角度並減少高度，使氣泡空腔偏移。柱體形狀與錐度比對水花影響顯著，圓柱體產生穩定現象，尖頂柱體則集中撞擊能量，產生更高更細的水花。手部姿勢與面積大小顯示手掌外翻放平與小面積能有效減少水花與氣泡空腔，達到最小水花效果。最後，水花消失術是跳水前擦乾身體，入水前身體筆直頭向下、雙手向水面伸直，手掌外翻抓手放平，入水後，將空氣帶入水底，減少氣泡空腔造成的沃辛頓射流現象，以水底產生氣泡浮出水面取代水花，進一步降低水花產生。

壹、研究動機與文獻探討

研究動機

2024 年巴黎舉辦奧運，我們四個人人都熱衷關注各項比賽，並特別被「跳水」這項競賽所吸引。在賽場上，我們注意到中國選手全紅嬋以她精湛的技術和幾乎無水花的跳水表現脫穎而出，這引發了我們一個疑問：為什麼全紅嬋能跳出所謂的「水花消失術」？促使我們探究影響水花大小與消失的各種因素，希望能從中找到影響跳水表現的關鍵。

文獻探討

- 一、運動：
 - (一)自由落體運動： $v = gt$
 - (二)水平拋射運動： $v_x = v_0 \quad v_y = gt$
- 二、動能： $E_k = \frac{1}{2}mv^2$
- 三、沃辛頓射流（Worthington Jet）



貳、研究目的

- 一、不同大小的圓球對水花的影響
- 二、不同落下高度對水花的影響
- 三、不同的入水速度對水花的影響
 - (一)不同垂直落下的速度
 - (二)不同水平拋射的速度
- 四、不同入水形狀對水花的影響
 - (一)相同入水截面積，不同形狀
 - (二)相同入水截面積，不同錐度
- 五、模型不同入水姿勢對水花的影響
 - (一)雙手不同的入水姿勢
 - (二)手掌不同的入水面積

參、研究流程與設備及器材

研究動機
文獻探討
研究目的
設計製作實驗裝置與試作
水花實驗的觀察與記錄
不同速度
相同入水截面積
3D 模型
實驗一：不同大小的圓球
實驗二：不同落下高度
實驗三：不同垂直落下速度
實驗四：不同水平拋射速度
實驗五：不同入水形狀
實驗六：不同入水錐度
實驗七：不同雙手入水姿勢
實驗八：不同手掌入水面積
影片數據分析結果與討論
結論

黑色背景布
腳架
圓球夾放器
開抓控制裝置
長度對比分析板
實驗水族箱
數位相機

階段一
階段二
階段三
階段四
速度
位移
Tracker
影像軟體

肆、研究過程及方法

一、不同大小的圓球對水花的影響

| 直徑 (mm) | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
|---------|------|-------|-------|-------|-------|
| 圖片 | | | | | |
| 重量 (gw) | 4.19 | 14.14 | 33.51 | 65.45 | 113.1 |

二、不同落下高度對水花的影響

| 高度 (cm) | 55 | 100 | 150 | 200 |
|---------|----|-----|-----|-----|
| 圖片 | | | | |

三、不同的入水速度對水花的影響 (此處轉速為設定顯示值，實際轉速需除以 10)

(一) 不同垂直落下的速度 (轉速:顯示 RPM，落下速度:cm/s)

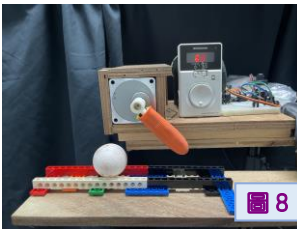
| 轉速 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 | 2200 | 2400 | 2600 |
|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 落下速度 | 62.83 | 83.78 | 104.72 | 125.66 | 146.61 | 167.55 | 188.50 | 209.44 | 230.38 | 251.33 | 272.27 |

(二) 不同水平拋射的速度

| 轉速 (RPM) | 50 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 水平速度 (cm/s) | 3.67 | 43.98 | 58.64 | 73.30 | 87.96 | 102.63 | 117.29 |



轉動
落下速度
水族箱
換算：
 $r = 10 \text{ cm}$
實際轉速 RPS
 $RPS = RPM/60 = f$
 $v_t = 2\pi r f$



轉動
水平拋射速度 V_x
垂直落下速度 V_y
水族箱
換算：
 $r = 7 \text{ cm}$
 $v_t = 2\pi r f$

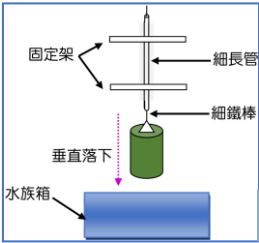
四、不同入水形狀對水花的影響

(一) 相同入水截面積，不同形狀

| 形狀 | 圓柱 | 正六角柱 | 正五角柱 | 正四角柱 | 正三角柱 | 長方柱 |
|----|----|------|------|------|------|-----|
| 圖片 | | | | | | |

(二) 相同入水截面積，不同錐度 錐度比=直徑變化/高度

| 柱體 | 圓柱體 | 圓頂柱體 | | | | | 尖頂柱體 |
|-----|-----|------|-----|---|------|-----|--------|
| 錐度比 | 平面 | 3 | 1.5 | 1 | 0.75 | 0.6 | 0.75 尖 |
| 圖片 | | | | | | | |



五、模型不同入水姿勢對水花的影響

- (一) 雙手不同的入水姿勢
- (二) 手掌不同的入水面積

圖 10 垂直落下裝置

| 手勢 | | 雙手併攏 | 雙手平直 | 大面積尖 2x1.5cm 斜度比 1.7 | 中面積尖 1.5x0.8cm 斜度比 2.2 | 小面積尖 1x0.8cm 斜度比 2.7 | 很尖 1.8x0.8cm 斜度比 1 | 手掌平放 1.6x0.8cm |
|----|--|------|------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------|
| 圖片 | | | | | | | | |

表 7

| 尺寸 | 大圓 直徑 4 公分 | 大方 4 x 3.2 公分 | 中方 3.2 x 2.4 公分 | 小方 2.4 x 1.5 公分 | 小小方 1.6 x 0.8 公分 |
|----------|---------------|------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 圖片 | | | | | |
| 人形 圖片 | | | | | |

表 8

伍、研究結果

一、不同大小的圓球對水花的影響

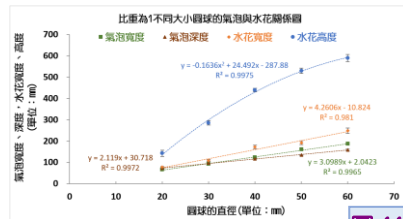


圖 11

二、不同落下高度對水花的影響

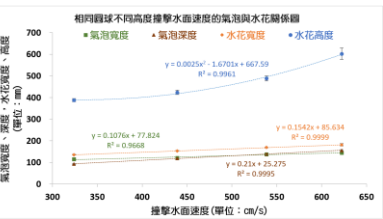


圖 12

四、不同入水形狀對水花的影響

(一) 相同入水截面積，不同形狀

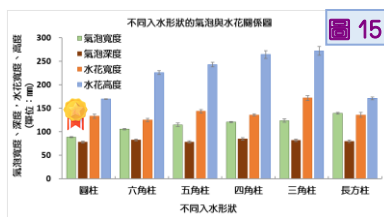


圖 15

(二) 相同入水截面積，不同錐度

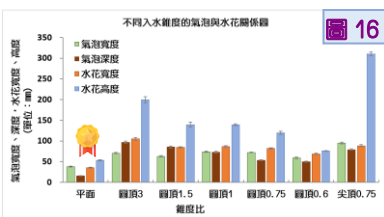


圖 16

| 圓球直徑 (mm) | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|
| 重量 (gw) | 4.19 | 14.14 | 33.51 | 65.45 | 113.1 |

表 9



結果分析：

- 圓球直徑增加，氣泡空腔變大，水花高度變高。
- 落下高度增加，氣泡空腔變大，水花高度變高。
- 不同大小的圓球撞擊速度雖有增加，但變化幅度較小，約在 432 至 439 cm/s 之間。
- 不同落下高度撞擊水面的速度，隨落下的高度增加而增加，約在 324 至 623 cm/s 之間。

三、不同的入水速度對水花的影響

(一) 不同垂直落下的速度

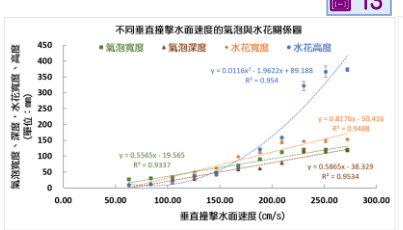


圖 13

(二) 不同水平拋射的速度

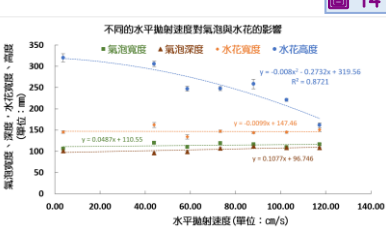
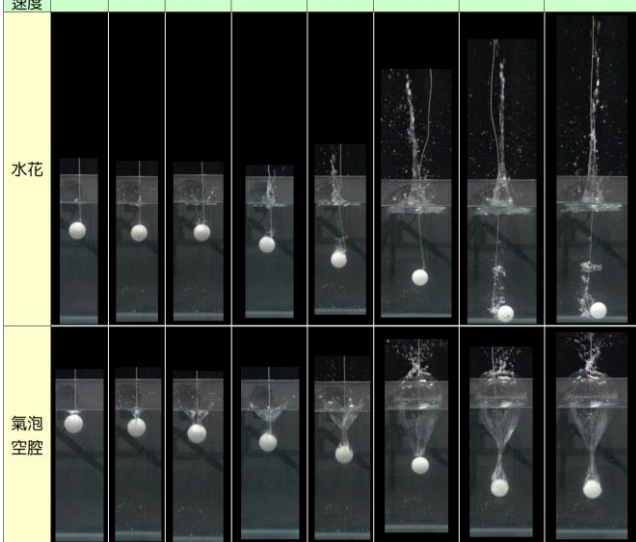


圖 14

| 轉速 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1800 | 2200 | 2400 | 2600 |
|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 落下速度 | 62.83 | 83.78 | 104.72 | 125.66 | 167.55 | 209.44 | 230.38 | 251.33 |

表 10

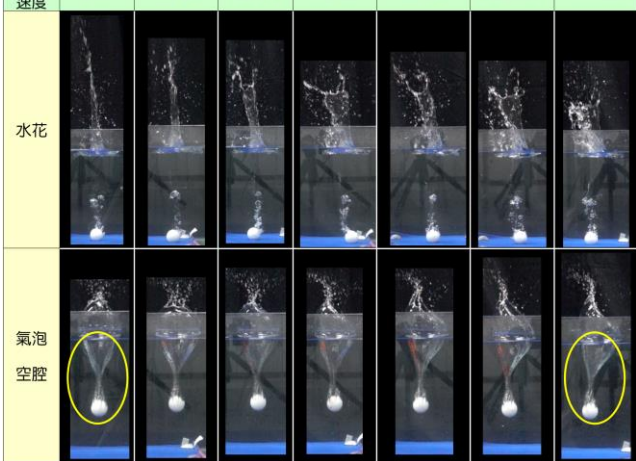


結果分析：

- 垂直落下速度增加，表示球體撞擊水面時的動能增加，因此垂直落下速度越快，水花越高。
- 垂直落下速度越快，水花高度的影響最顯著，說明高速撞擊時會產生更劇烈的水面擾動。

| 轉速 | 50 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 水平速度 | 3.67 | 43.98 | 58.64 | 73.30 | 87.96 | 102.63 | 117.29 |

表 11



結果分析：

- 隨著水平拋射速度增加，水花的垂直高度顯著減少。
- 水平拋射速度越快，水花越傾斜、擴散範圍越大。
- 氣泡空腔形狀隨著水平拋射速度增加而產生偏移或扭曲。

五、模型不同入水姿勢對水花的影響

(一) 雙手不同的入水姿勢

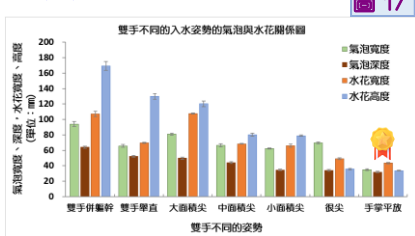


圖 17

(二) 手掌不同的入水面積

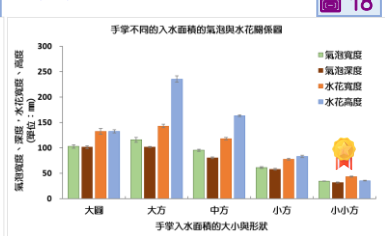


圖 18

| 手掌面積 | 大圓 | 大方 | 中方 | 小方 | 小小方 |
|------|---------|------------|--------------|--------------|--------------|
| 尺寸 | 直徑 4 公分 | 4 x 3.2 公分 | 3.2 x 2.4 公分 | 2.4 x 1.5 公分 | 1.6 x 0.8 公分 |







表 14



結果分析：



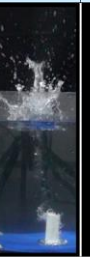

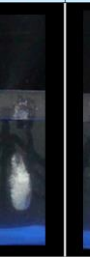

- 手掌平放能產生最小的水花與氣泡空腔。
- 手掌尖銳的姿勢可以有效降低水花寬度。
- 手掌的入水面積愈大，水花愈大，手部面積愈小，水花愈小，氣泡空腔愈窄且穩定。

一、若**比重**較大或較小時，對於氣泡和水花會有什麼差異，以相同直徑 4 公分的圓球，調整不同重量，形成不同比重進行實驗。

| 重量 (gw) | 14 | 25.5 | 35.5 | 56.6 | 77.9 | 100.5 |
|---------|---|---|---|---|---|---|
| 比重 | 0.42 | 0.76 | 1.06 | 1.69 | 2.32 | 3.00 |
| 氣泡空腔 |  |  |  |  |  |  |

結果發現**比重大小與水花高度沒有明顯的相關性**，但從氣泡發現**比重較重**，因為**速度較快**，**動能較大**，撞擊水面後，產生的**氣泡深度較深**，但因速度快，所以也會將部份空氣帶入水中，使氣泡空腔的空氣減少，雖然氣泡空腔空氣減少，但氣泡深度增加，彈射的效果也大，水花的大小與氣泡深度、氣泡空腔的空氣量相關，若能將氣泡空腔的空氣減少，就可以減少沃辛頓射流的效果，另外**比重小於 1 時**，**氣泡上方會不完整，形成皇冠的形狀**。

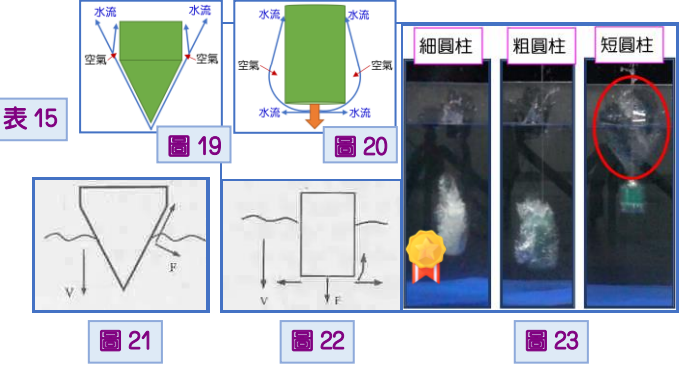
二、研究中除了考量水平速度的實驗，其他皆以垂直入水的方式進行實驗，不同的文獻都提到身體要**筆直入水**，當物體以垂直的方式掉落，且物體本身沒有筆直入水，而是以**傾斜**的方式入水，水花會產生多大的差異呢？

| 入水角度 | 傾斜 1 | 傾斜 2 | 傾斜 3 | 筆直 1 | 筆直 2 | 筆直 3 |
|-------|--|--|--|--|--|--|
| 空氣與氣泡 |  |  |  |  |  |  |

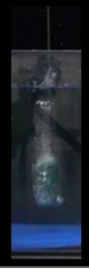





結果發現圓柱**傾斜入水時**，產生**明顯的氣泡空腔**，**造成水花的噴濺**；而當圓柱筆直入水時，除了一開始產生的小水花，其餘的空氣附著在圓柱被帶入水中，沒有形成氣泡空腔，也就沒有形成更大的水花。

三、研究中我們發現不同撞擊形狀的圓柱，會產生較少的水花，除了符合文獻提到楔形剛體的**尖角越尖銳**，激起的水花**越高**，**方形剛體則激起的水花較低**，但方形剛體接觸面積過大，也會激起較大的水花。

另外我們也發現**物體愈大**，撞擊水面一開始所形成的**水花也會較大**，產生的空氣也較多，若空氣能被物體帶入水中，也就能減少氣泡空腔所產生的沃辛頓射流，使水花較小。還有**圓柱撞擊時的撞擊面積與圓柱高度也有相關性**，若**高度太短**，較無法攜帶空氣進入水底，就容易形成氣泡空腔，就會**造成水花變大**。









四、我們也觀察到跳水選手，在跳水前會把**身體擦乾**，這對跳水的水花會有影響嗎？我們以可以得到較少水花的圓柱體進行實驗，結果發現在圓柱體入水後，**擦乾的圓柱體，明顯的可以把空氣帶入水中**，而溼的圓柱體，不容易把空氣帶入水中，而直接形成氣泡空腔彈射出水面造成明顯的水花，如表 17 所示。

| 表面 | 潮溼 1 | 潮溼 2 | 潮溼 3 | 乾燥 1 | 乾燥 2 | 乾燥 3 |
|-------|--|---|--|--|--|--|
| 空氣與氣泡 |  |  |  |  |  |  |

溼的圓柱體，表面有一層**水膜**，物體撞擊後產生的**空氣不易附著**在圓柱體上，而直接向上移動形成氣泡空腔，造成較明顯的水花，當圓柱表面是**乾的**，**空氣附較容易附著**在圓柱體上，因此空氣較能隨著圓柱被帶入水中，變成氣泡後再浮出水面，減少水花的形成。

五、以人體模型進行入水後的水花分析，以標準姿勢可以得到較低的水花，手掌以**合掌尖銳的方式入水**，**水花的確較細較高**，而從手平舉腳打開的方式入水，手臂受水的作用力變斜下，且手腳上方有明顯的空氣附著，水花則呈現兩處較高。當手平舉腳打開以**平躺的方式入水**，因為**撞擊水面的面積最大**，**水花也最大最高**。

| 姿勢 | 標準 | 手尖 | 雙手直上 | 立正 | 手平腳開 | 手平腳開(平躺) |
|----|---|--|---|---|---|---|
| 水花 |  |  |  |  |  |  |

- 一、球體直徑為影響水花與氣泡空腔的關鍵因素。**圓球直徑越大**，**水花高度的變化也最為顯著**，水花寬度與氣泡空腔寬度、氣泡空腔深度皆顯著增加，並伴隨撞擊速度的微幅上升。
- 二、圓球撞擊水面受到落下高度的顯著影響。**落下高度越高**，**撞擊速度隨之增加**，導致**水花高度與氣泡空腔大小明顯增加**。水花寬度、氣泡寬度與氣泡深度亦隨高度增加而略微上升，但變化幅度較小。
- 三、垂直撞擊速度是影響水花與氣泡空腔的重要因素。隨著**垂直撞擊速度增加**，**水花高度明顯上升**，並在高速撞擊時呈現更劇烈的水面擾動。氣泡空腔的寬度與深度會隨著垂直撞擊速度增加而略微增大，但變化幅度較小。
- 四、水平速度對圓球撞擊水面後的水花與氣泡空腔具有顯著影響。隨著**水平速度增加**，**水花高度減少且傾斜**，**濺射範圍擴大**，顯示水平動能會分散撞擊能量，改變水花形狀。**氣泡空腔**的大小變化幅度較小，但其形狀會因水平速度而產生**明顯偏移**。
- 五、柱體撞擊水面的形狀是影響水花與氣泡空腔規模的重要因素。**圓形柱體**對水面擾動最小，並**產生較小的氣泡空腔和較小的水花**。多邊形與三角形柱體因其不對稱性，會產生較大的水花與不穩定的氣泡空腔，顯示形狀越尖銳或邊數越少，水花受到的影響越大。

- 六、柱體前端錐度比在撞擊水面時中扮演重要角色。尖頂圓柱**較尖銳的尖頂**會集中撞擊能量，**產生更高、較細的水花**。圓頂柱體較鈍面的則會增加撞擊範圍，產生較廣且較深的氣泡空腔，使水花底部較寬較明顯。
- 七、手部擺放姿勢對水花與氣泡空腔的大小及形狀有顯著影響。**手掌平放**的姿勢最能**減少水花與氣泡空腔**，達到最小擾動效果，尖銳手勢可進一步減少水花寬度，顯示流線型姿勢對降低水面擾動的優勢。
- 八、手部面積大小對於水花與氣泡空腔的形成具有重要影響。**較大面積的手部姿勢**會增加水面擾動，導致**較高的水花與較大的氣泡範圍**。而**較小面積的手部姿勢**則能有效**減少水花噴濺**，並產生較小且穩定的氣泡空腔。
- 九、水花消失術是跳水前**擦乾身體**，入水前**身體筆直頭向下**、**雙手向水面伸直**，**手掌外翻抓手放平**，入水後，**將空氣帶入水底**，**減少氣泡空腔造成的沃辛頓射流現象**，以水底產生氣泡浮出水面取代水花，進一步降低水花產生，因此當跳水產生的水花很少時，就會看到選手入水後，水中有氣泡陸續冒出水面。

圖 24



李明哲 (2023). 《跳水物理學》，台北：科學出版社。
鄭永銘 (2023) 沃辛頓射流。跟著鄭大師玩科學 <https://www.masters.tw/319614/worthington-jet>
全國中小學科學展覽會 (64 屆)。水中的奇妙力量探秘—沃辛頓射流
本海報內所含圖片、照片，除了圖 1(ChatGPT 生成)、圖 21 與圖 22(參考文獻 7) 之外，其餘皆由作者拍攝與繪製。