中華民國第52屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組　物理科

040108

解開 BB 彈上浮之謎

學校名稱：臺中市立東山高級中學

作者：	指導老師：
高二 方昱凱 高二 魏瑋辰	陳俊清

關鍵詞：斷裂氣泡、殘留氣泡、寬高比

摘　　要

本實驗探討密度大於 1 g/cm^3 的 BB 彈於水中上浮之運動情形。本研究利用高速攝影機拍攝，觀察 BB 彈自由落下進入水面、下沉、停止、轉而上浮過程的變化，改變離水面的下落高度、玻璃水箱的水深等因素，討論不同條件對 BB 彈上浮的影響，經過實驗討論後，本研究得出 BB 彈上浮過程會經過三個階段：1. 形成完整氣泡(空氣柱)、2. 形成斷裂氣泡 3. 形成殘留氣泡，而且殘留氣泡的半徑要在一定範圍內(介於 1.13mm~3.96mm)才會上浮，並發現在距水面高 160cm 時，BB 彈上浮的機率最高。

壹、研究動機

正常情況下，BB 彈放置水中會呈現下沉現象，一次意外的嬉鬧，同學把 BB 彈丟入水中，感到驚訝的是，密度大於水的 BB 彈，原本應該下沉卻意外上浮。與老師討論後，這使我們感到好奇：在什麼情況下 BB 彈會上浮，又有甚麼條件會改變 BB 彈上浮的機率呢?為此設計了一組實驗，藉由實驗結果，歸納、討論，並試以高中課程理論解釋之。

貳、研究目的

一、測量 BB 彈、水的密度

二、探討入水高度(速度)對 BB 彈上浮之影響

三、探討水深對 BB 彈上浮之影響

參、研究設備及器材

一、硬體設備

(一) 高速攝影機(Casio Ex-2R100)

(二) 攝影機腳架

(三) 強化玻璃水箱(35cm×29cm×29.5cm)

(四) 金屬支架(L 型角鋼)

(五) BB 彈

(六) 自製發射器

(七) 黑色擋板

(八) 台燈

(九) 尺(準確度至 1mm)

(十) 電子秤(準確度至 0.01g)

(十一) 游標尺(準確度至 0.05mm)

(十二) 自來水

圖 1、高速攝影機

二、電腦軟體

(一) Microsoft Excel 2007

(二) Extra Movie To Gif

(三) Meazure

(四) Free Video Dub

(五) Tracker

(六) GIF Animator 5

肆、實驗過程

一、要使 BB 彈上浮的條件，形成的條件

系統浮力>系統重力(系統為 BB 彈、氣泡)

BB 彈所受浮力+氣泡所受浮力> BB 彈重量+氣泡重量(單位：使用 C.G.S 制)

$$D_{水} \times \frac{4}{3}\pi \times r^3_{BB\,彈} g + D_{大氣} \times \frac{4}{3}\pi \times r^3_{氣泡} g > M_{BB\,彈} g + M_{氣泡} g (M_{氣泡}太小忽略)$$

$$1 \times \frac{4}{3}\pi \times 0.2975^3 g + \frac{1.294}{1000} \times \frac{4}{3}\pi \times r^3_{氣泡} g > 0.112g公克$$

$$r_{氣泡} > 0.113cm$$

($D_{水}$：水的密度、$r_{BB\,彈}$：BB 彈半徑、$r_{氣泡}$：氣泡半徑、$M_{BB\,彈}$：BB 彈質量、

$M_{氣泡}$：氣泡質量)

氣泡半徑>1.13mm，才有基本條件，使 BB 彈上浮。

二、波以耳定律：

壓力×體積＝莫耳數×理想氣體常數×溫度(絕對溫度)，莫耳數、溫度相同情況下，得知體積、壓力成反比。

三、Plateau-Raleigh Instability

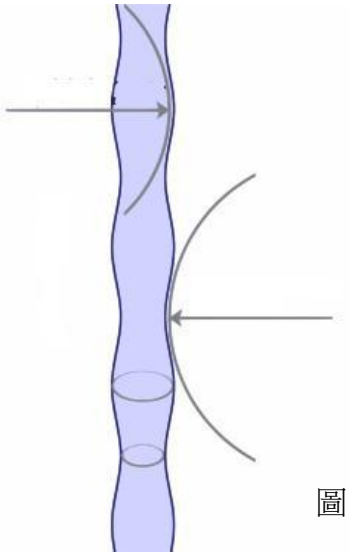


圖 2 、Plateau-Raleigh Instability

水柱在撞擊衝擊板前，因空氣的擾動與作用在水柱上壓力的不平均，水柱並不是完美的圓柱形，會產生粗細的差異，尤其在從高處落下時，此現象會更明顯(稱為 Plateau-Raleigh Instability)。

四、研究流程

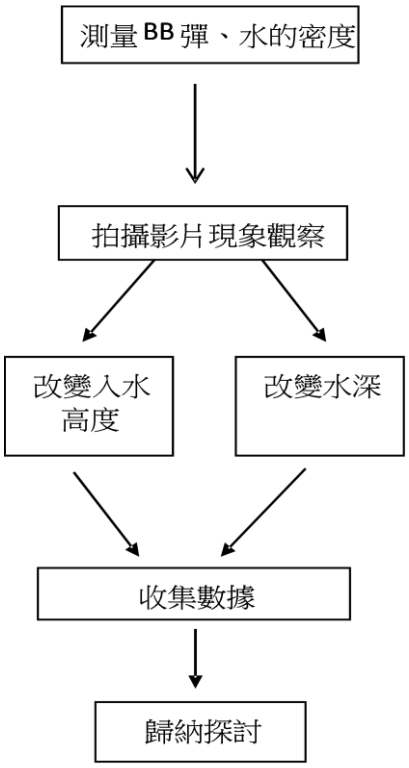


圖 3、實驗流程圖

五、實驗方式

(一) 影片拍攝：

以自製發射器使ＢＢ彈自由落下，在水族箱前方架設一把尺，作為比例轉換。由水族箱上方照光，以高速攝影機每秒 240 影格（240fps）拍攝 BB 彈進入水中之過程。

(二) 數據處理：

1. 剪輯影片：

以應用程式 Extra Movie To Gif 剪輯拍攝影片，並將影片分析後，以 MOV 檔轉換成 JPG 檔，切成每秒 30 張的圖片檔。

2. 實驗值測量：

(1) y-t、v-t 資料取得：

應用程式 Tracker 可於影片畫面上定座標、定時、設定校正桿，追蹤物體的運動情形，測得物體的位移、速率等數值，並由畫面中之比例尺求得實際數值。

(2) 形成氣泡體積的測量：

利用應用程式 Tracker 的量尺測量功能，可量畫面上任兩點的距離。我們以 Tracker 測量影片上附著於ＢＢ彈上的氣泡直徑，經由比例尺求得

實際長度，並假設氣泡為正球體，以球體體積公式推導出氣泡體積。

3. 整理資料：以 Microsoft Excel 2007 繪製圖表。

六、實驗方法

(一)、名詞定義：

1. 完整氣泡：又稱空氣柱、氣柱。BB 彈進入水面所拖曳出的空氣柱。
2. 斷裂氣泡：完整氣泡破碎後，繼續附著於 BB 彈的氣泡。
3. 殘留氣泡：斷裂氣泡破碎後，最後附著於 BB 彈的氣泡。
4. 寬高比(如圖 5)：氣柱高度/氣柱寬度，寬高比取於斷裂氣泡擠壓破碎前的有效圖片。

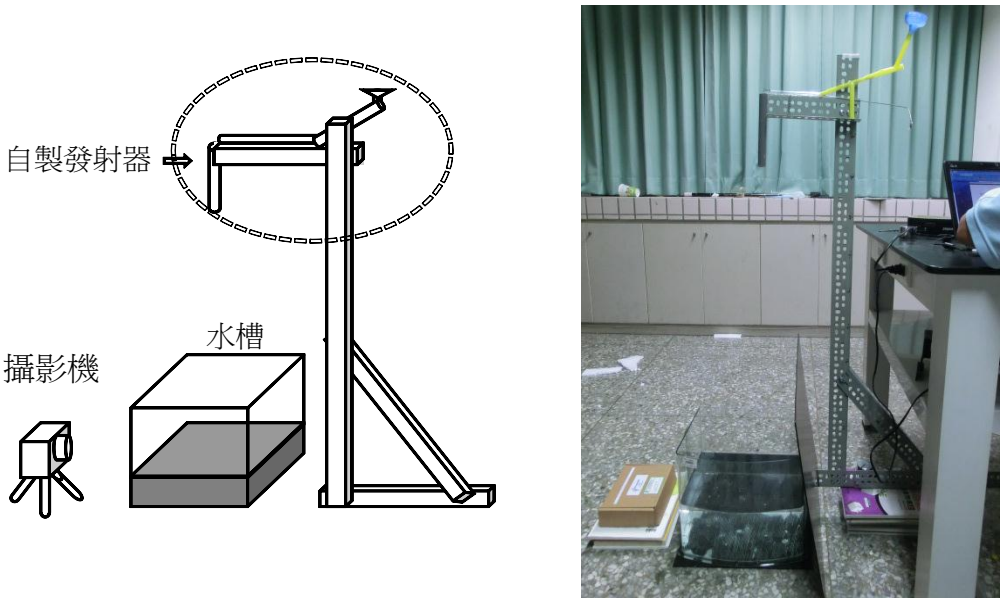


圖 4、器材示意圖及實際圖

(二)、實驗一：測量 BB 彈平均密度及水的密度

1. BB 彈密度測量:

以電子秤和量筒分別測出 BB 彈的質量和體積，以 100 顆為單位，測量 5 次後計算出平均單顆 BB 彈的質量，在以 100 顆為單位丟入水中，並藉由水的高度差計算 100 顆 BB 彈的體積，連續測量 5 次後計算出平均單顆 BB 彈的體積，帶入高中所學的密度公式 D=M/V(密度=質量/體積)，求得 BB 彈的密度。

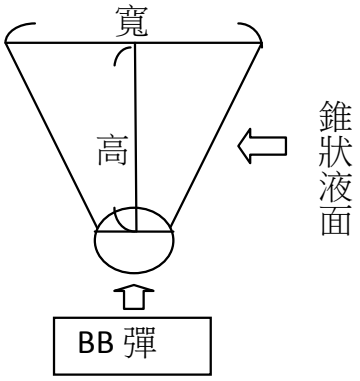


圖 5、寬高比示意圖

2. 水的密度測量:

以量筒量出固定 10 毫升的水後，將水放置電子秤上量出水的質量，帶入高中所學的密度公式 D=M/V(密度=質量/體積)，求得水的密度。

(三)、實驗二：水深對 BB 彈上浮的影響

1. 改變 BB 彈落下高度：

將 BB 彈自由落下於容器中心(35cm×29cm)，玻璃容器內水深為 10cm。固定離水面 140cm，使 BB 彈自由落下 50 顆，並分析記錄上浮顆數。

2. 重複步驟 1 五次。
3. 改變水深 12.5cm、15cm、17.5cm、20cm，重複步驟 1、 2。
4. 比較不同水深，BB 彈上浮顆數。

(四)、實驗三：入水高度對 BB 彈上浮的影響

1. 改變 BB 彈落下高度：

將 BB 彈自由落下於容器中心(35cm×29cm)，固定玻璃容器內水深為 15cm。離水面 140cm，使 BB 彈自由落下 50 顆，並分析記錄上浮顆數。

2. 重複步驟 1 五次。
3. 改變離水面的距離 150cm、160cm、170cm、180cm 重複步驟 1、2。
4. 比較不同入水高度，BB 彈上浮顆數。

伍、研究結果

一、實驗一：測量 BB 彈平均密度及水的密度

表 1、BB 彈質量與體積平均、水質量平均

100 顆 BB 彈	一	二	三	四	五	平均
質量(g)	10	11	12	12	11	11.2
體積(cm^3)	11	10	12	9	11	10.6

100ml 的水	一	二	三	四	五	平均
質量(g)	97.7	98.3	99.4	99.5	98.9	98.8

1. BB 彈密度測量結果

經由實驗測得平均單顆 BB 彈的質量為 0.112 公克，測得平均單顆 BB 彈的體積為 0.106 立方公分，帶入高中所學的密度公式 D=M/V 而得知，BB 彈

的密度為 1.057 公克/立方公分。

2. 水密度測量結果

經由實驗固定水的體積為 100 立方公分，並測得平均質量為 98.8 公克，高中物理密度公式 D(密度)=M(質量)/V(體積)得知，水的密度為 0.988 公克/立方公分。

二、實驗二：水深對 BB 彈上浮的影響

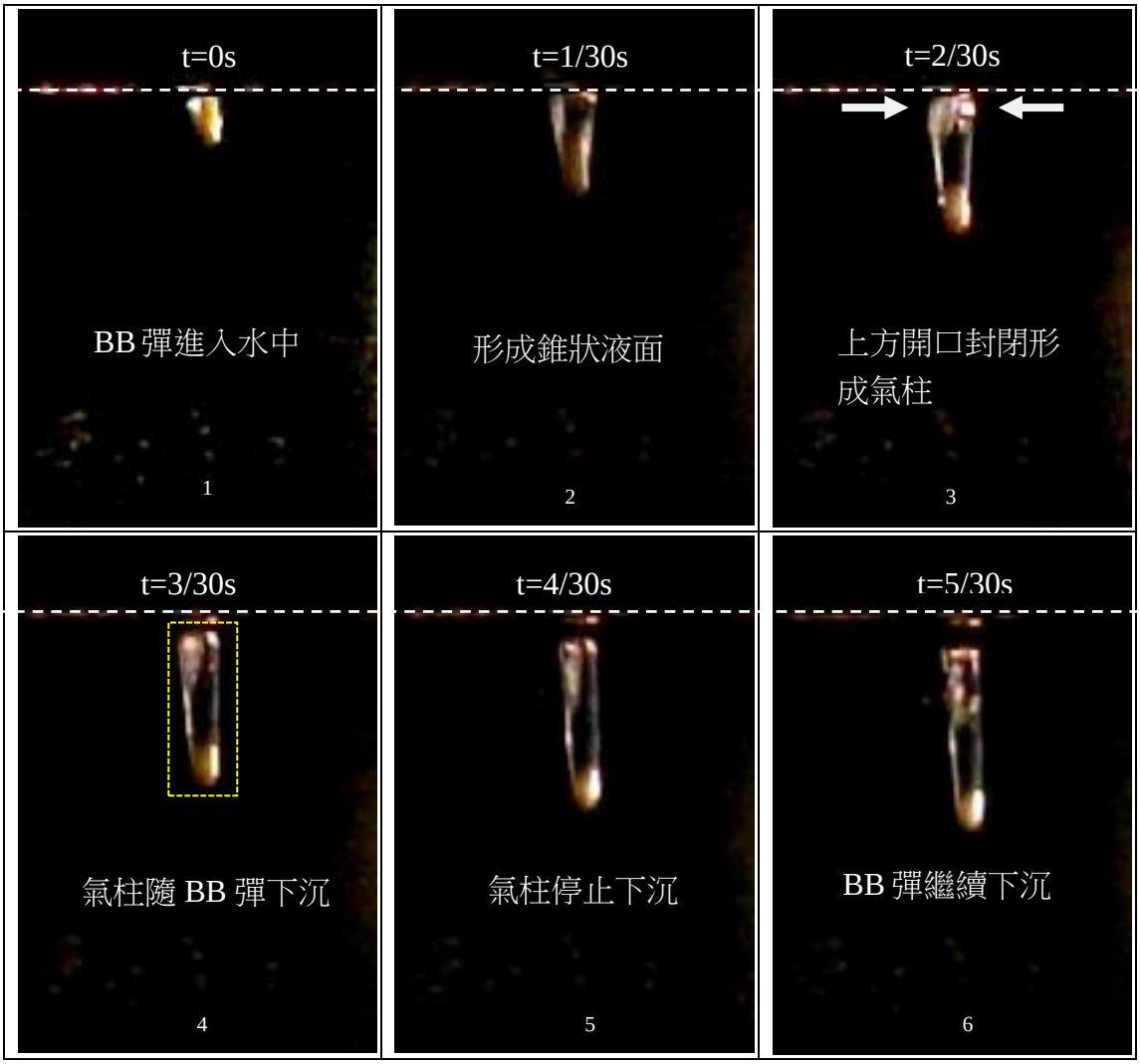


圖 6、BB 彈上浮情形

BB 彈從高處落下，會將原有的位能轉成動能，進入水中後，形成錐狀液面後，上方水受擠壓後回流，錐狀液面形成密閉空氣柱(完整氣泡)，氣柱因隨 BB 彈下降，氣泡停止下沉，讓空氣柱伸長至一定的體積，依據波以耳定律，壓力×體積＝定值，體積與壓力成反比，在體積變大至一定值，氣泡壓力小於

水壓，而使空氣柱被水壓截成斷裂氣泡，此時，氣泡體積依舊偏大，持續分裂到氣泡壓力等於水壓，形成殘留氣泡，殘留氣泡附著於 BB 彈上，帶著 BB 彈往上浮。

圖 6-1～圖 6-3 為 BB 彈進入水中時產生之錐狀液面或空氣柱
圖 6-4～圖 6-7 空氣密閉形成細長的氣泡，空氣氣泡被 BB 彈拉長
圖 6-8～圖 6-11 完整氣泡從中斷裂成數段
圖 6-12～圖 6-14 此時氣泡斷裂破碎再度被 BB 彈拉長，使氣泡再次斷裂
圖 6-15 殘留氣泡附著於 BB 彈上，並隨之上浮

表 2、距水面高 140cm 各水深 BB 彈上浮顆數

水高 140cm	**10cm**	**12.5cm**	**15cm**	**17.5cm**	**20cm**
一	9	15	10	13	16
二	8	14	11	15	10
三	12	15	13	14	14
四	8	13	15	12	9
五	10	15	13	12	13
平均	9.4	14.4	12.4	13.2	12.4

表 2 說明
1. 在 12.5cm 時，上浮平均次數最多。
2. 在 10cm 時，上浮平均次數最少。
3. 在 15cm、17.5cm、20cm 的上浮次數介於 12.5cm 跟 10cm 之間，三者的上浮平均次數幾乎相同。

表 3、距水面高 150cm 各水深 BB 彈上浮顆數

水高 150cm	10cm	12.5cm	15cm	17.5cm	20cm
一	18	17	25	19	19
二	14	16	25	20	26
三	16	20	20	19	19
四	22	16	20	20	17
五	18	20	23	24	16
平均	17.6	17.8	22.6	20.4	19.4

表 3 說明

1. 在 15cm 時，上浮平均次數最多。
2. 在 10cm 時，上浮平均次數最少。
3. 上浮平均次數從水深 10cm 開始往上增加至 15cm 為最多，而後下降。

表 4、距水面高 160cm 各水深 BB 彈上浮顆數

水高 160cm	10cm	12.5cm	15cm	17.5cm	20cm
一	16	17	26	22	23
二	20	18	22	23	23
三	17	19	23	20	22
四	20	21	24	18	22
五	18	18	23	19	21
平均	18.2	18.6	23.6	20.4	22.3

表 4 說明

1. 在 15cm 時，上浮平均次數最多。
2. 在 20cm 時，上浮平均次數最少。
3. 上浮平均次數從水深 10cm 開始往上增加至 15cm 為最多，而後下降。

表 5、距水面高 170cm 各水深 BB 彈上浮顆數

水高 170cm	10cm	12.5cm	15cm	17.5cm	20cm
一	16	18	23	19	19
二	18	18	24	17	15
三	15	19	22	18	20
四	16	17	21	17	16
五	19	15	21	17	18
平均	16.8	17.4	22.2	17.6	16.6

表 5 說明

1.在 15cm 時，上浮平均次數最多。

2.在 20cm 時上浮平均次數最少。

3.上浮平均次數從水深 10cm 開始往上增加至 15cm 為最多，而後下降。

表 6、距水面高 180cm 各水深 BB 彈上浮顆數

水高 180cm	10cm	12.5cm	15cm	17.5cm	20cm
一	8	10	15	14	12
二	15	13	14	15	14
三	14	14	14	14	13
四	11	12	18	12	13
五	9	10	17	12	12
平均	11.4	11.8	15.6	13.4	12.8

表 6 說明

1.在水深 15cm、水深 17.5cm、水深 20cm 時上浮平均次數最多。

2.在水深 10cm 時上浮平均次數最少。

3.水深 10cm、12cm 上浮平均次數大約相同，而水深 15cm 上浮平均次數最多。

三、實驗三：入水高度對 BB 彈上浮的影響

表 7、水深 10cm 各距水面高度 BB 彈上浮顆數

水深 10cm	140cm	150cm	160cm	170cm	180cm
一	9	18	16	16	8
二	8	14	20	18	15
三	12	16	17	15	14
四	8	22	20	16	11
五	10	18	18	19	9
平均	9.4	17.6	18.2	16.8	11.4

表 7 說明

1.在落水高度 160cm 時，上浮平均次數最多。

2.在落水高度 140cm 時，上浮平均次數最少。

3.上浮平均次數從入水高度 140cm 開始往上增加至 160cm 為最多，而後下降。

表 8、水深 12.5cm 各距水面高度 BB 彈上浮顆數

水深 12.5cm	140cm	150cm	160cm	170cm	180cm
一	15	17	17	18	10
二	14	16	18	18	13
三	15	20	19	19	14
四	13	16	21	17	12
五	15	20	18	15	10
平均	14.4	17.8	18.6	17.4	11.8

表 8 說明

1.在落水高度 160cm 時，上浮平均次數最多。

2.在落水高度 140cm 時，上浮平均次數最少。

3.上浮平均次數從入水高度 140cm 開始往上增加至 160cm 為最多，而後下降。

表 9、水深 15cm 各距水面高度 BB 彈上浮顆數

水深 15cm	140cm	150cm	160cm	170cm	180cm
一	10	25	26	23	15
二	11	25	22	24	14
三	13	20	23	22	14
四	15	20	24	21	18
五	13	23	23	21	17
平均	12.4	22.6	23.6	22.2	15.6

表 9 說明

1.在落水高度 160cm 時，上浮平均次數最多。

2.在落水高度 140cm 時，上浮平均次數最少。

3. 上浮平均次數從入水高度 140cm 開始往上增加至 150cm、160cm、170cm 為最多，而後下降。

表 10、水深 17.5cm 各距水面高度 BB 彈上浮顆數

水深 17.5cm	140cm	150cm	160cm	170cm	180cm
一	13	19	22	19	14
二	15	20	23	17	15
三	14	19	20	18	14
四	12	20	18	17	12
五	12	24	19	17	12
平均	13.2	20.4	20.4	17.6	13.4

表 10 說明

1.在落水高度 150cm 時，上浮平均次數最多。

2.在落水高度 140cm 時，上浮平均次數最少。

3. 上浮平均次數從入水高度 140cm 開始往上增加至 150cm、160cm 為最多，而後下降。

表 11、水深 20cm 各距水面高度 BB 彈上浮顆數

水深 20cm	140cm	150cm	160cm	170cm	180cm
一	16	19	23	19	12
二	10	26	23	16	14
三	14	19	22	20	13
四	9	17	22	16	13
五	13	16	21	18	12
平均	12.4	19.4	22.2	16.6	12.8

表 11 說明

1.在落水高度 160cm 時上浮機率最高。

2.在落水高度 140cm、180cm 時上浮機率最低。

3. 上浮平均次數從入水高度 140cm 開始往上增加至 160cm 為最多，而後下降。

陸、討論

一、BB 彈密度大小

BB 彈密度為 1.057 公克/立方公分，水的密度為 0.988 公克/立方公分，故 BB 彈密度略大於水的密度，理應下沉；本研究發現在特定條件下，卻可發生上浮之現象。

二、BB 彈上浮過程

經過實驗觀察，得知 BB 彈會上浮是因為有氣泡形成且附著於上方，使 BB 彈隨氣泡上浮。而氣泡的大小程度也影響了 BB 彈是否會上浮及快慢， BB 彈上浮過程分析如下：

1. BB 彈進入水面後，因水的衝擊波及液體壓力，會先拖曳出一條圓錐狀的液面，隨著時間，液面的開口端會因為水受擠壓回流而封閉起來，形成一

氣柱稱完整氣泡(如圖 7)。

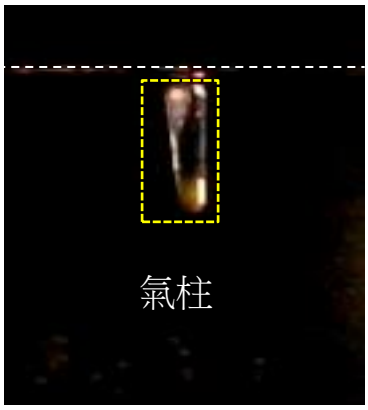


圖 7、完整氣泡(氣柱)

2. 因為完整氣泡和 BB 彈之間有一層水膜，而且水膜與 BB 彈間會有附著力，完整氣泡因 Plateau-Raleigh Instability 而擠壓變形，針對斷裂點分成上下兩部分來討論。上段因為斷裂處完整氣泡表面的分子間作用力等於浮力，上段會停止不動，但會隨著完整氣泡體積變大，浮力及斷裂處完整氣泡表面的分子間作用力同步變大；下段則是完整氣泡與 BB 彈的附著力大於浮力及斷裂處完整氣泡表面的分子間作用力，完整氣柱因為此現象而逐漸變得細長，又因為擾動、水壓形成擠壓出現了斷裂點，下段形成斷裂氣泡。

3. 斷裂氣泡大小斷裂成小顆原因，因為氣泡表面能仍太大，以至於再度被拉長(原理同上 2)，出現斷裂點，形成殘留氣泡。

4. 視殘留氣泡的大小，將導致氣泡與 BB 彈(視為同一系統)上浮與否。
   (1)、殘留氣泡太小，系統重力大於浮力，系統會下沉
   (2)、殘留氣泡適中，浮力略大於系統重力(但 BB 彈與殘留氣泡間之附著力，不能超過其最大承受值)，系統會上浮。
   (3)、斷裂氣泡小到無法形成殘留氣泡，BB 彈的加速度不等於斷裂氣泡的加速度(附著力已達最大承受值)，斷裂氣泡將會脫離 BB 彈自行上浮，BB 彈將會沉於水底。

三、氣泡形成

1. 氣泡液滴或氣泡會不會破裂，直接看的是表面張力與慣性力的比值(Weber number)，當韋伯數(Weber number)夠大時，液滴與外面間的慣性力大於表面張力，液滴就會破裂。

2. 氣泡直徑越大時表面張力相對較小，因此慣性力易大於表面張力，當氣泡

表面出現不穩定時，浮力與表面張力結合便會出現 Plateau-Rayleigh instability(如圖 2)，使大氣泡破裂成許多小氣泡，不過一個大氣泡的表面能比那些破裂的小氣泡低，所以如果沒有浮力在的話，氣泡會傾向結合而非破裂，又因為氣泡上浮有終端速度，所以會有個臨界直徑，小於臨界直徑的氣泡較不會破裂。

3. 氣柱之所以會破裂，參考相關文獻[5]得知在水膜上會產生一波動，而此波動產生之原因與 Plateau Raleigh Instability 相似，且此波動的形狀如上圖，因水壓及擾動關係，而使水膜的左表面與右表面交會，造成水膜破裂。又因離水面愈深、水壓愈大，氣泡斷裂容易發生在氣泡下端(如圖 9)。

4. 寬高比值越大，其產生碎裂的氣泡較多；寬高比值越小，產生碎裂的氣泡較少，原因是因為寬高比大的氣柱較細長，因為擾動及水壓的緣故，氣柱各處高度位置的左右表面相較寬高比小的氣柱接近，容易凹陷、接觸導致產生多個氣泡(如圖 8)。

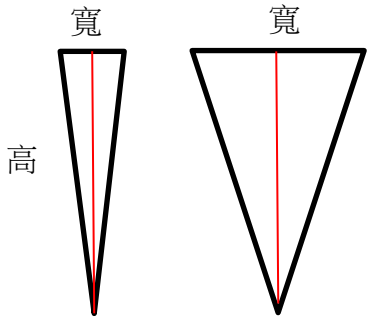


圖 8、寬高比值大小示意圖較短

圖 9、氣泡斷裂示意圖

四、相同水深、不同高度的平均上浮顆數

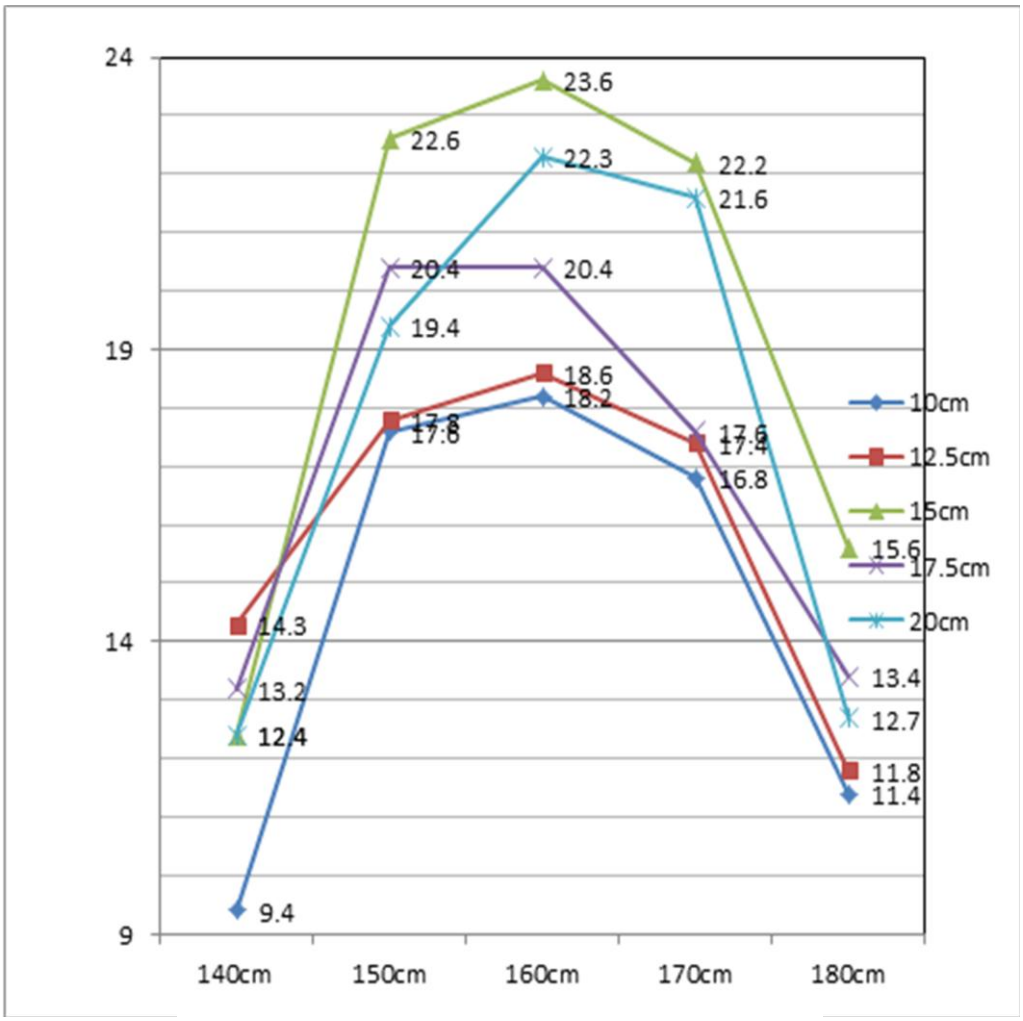


圖 10、相同水深，不同距水面高上浮顆數折線圖

(一)、理論

本研究認為水為彈性體在水平方向的運動暫且視為有阻尼簡諧運動(SHM)，水流回復的簡諧運動將會決定空氣柱的寬高比。

(二)、實驗數據統整後(如圖 10)，得出以下結論

1. 當距水面高為 140cm 時，上浮機率小於 28.6%。

推論原因是因為 140cm 時速度小，水平方向的水分子封住錐狀液面的時間相同，在水中平均位移較短(如圖 11)，所以，形成的完整氣泡小到無法形成斷裂氣泡(如圖 12)。

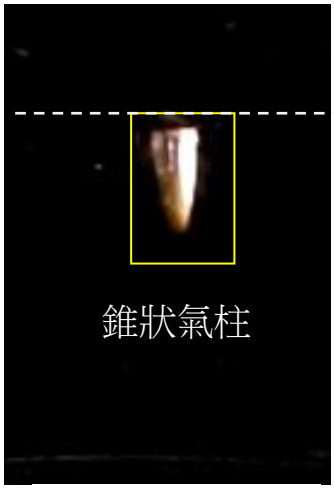


圖 11、距水面高 140cm 的錐狀氣柱

2. 當距水面高介於 150cm~170cm 時，上浮機率趨於常態分布

推論當距水面於 150cm 時，已可以形成空氣柱，空氣柱開始產生條件符合的斷裂氣泡與殘留氣泡，使其上浮機率明顯增加。

呈現常態分布的原因，則因為距水面 150cm 產生的空氣柱是呈現類似橢圓狀氣泡，所以當產生斷裂點時，斷裂點容易出現在氣泡中央偏下的位置，推因水愈深、液壓愈大及氣膜固定附著於 BB 彈表面之緣故，

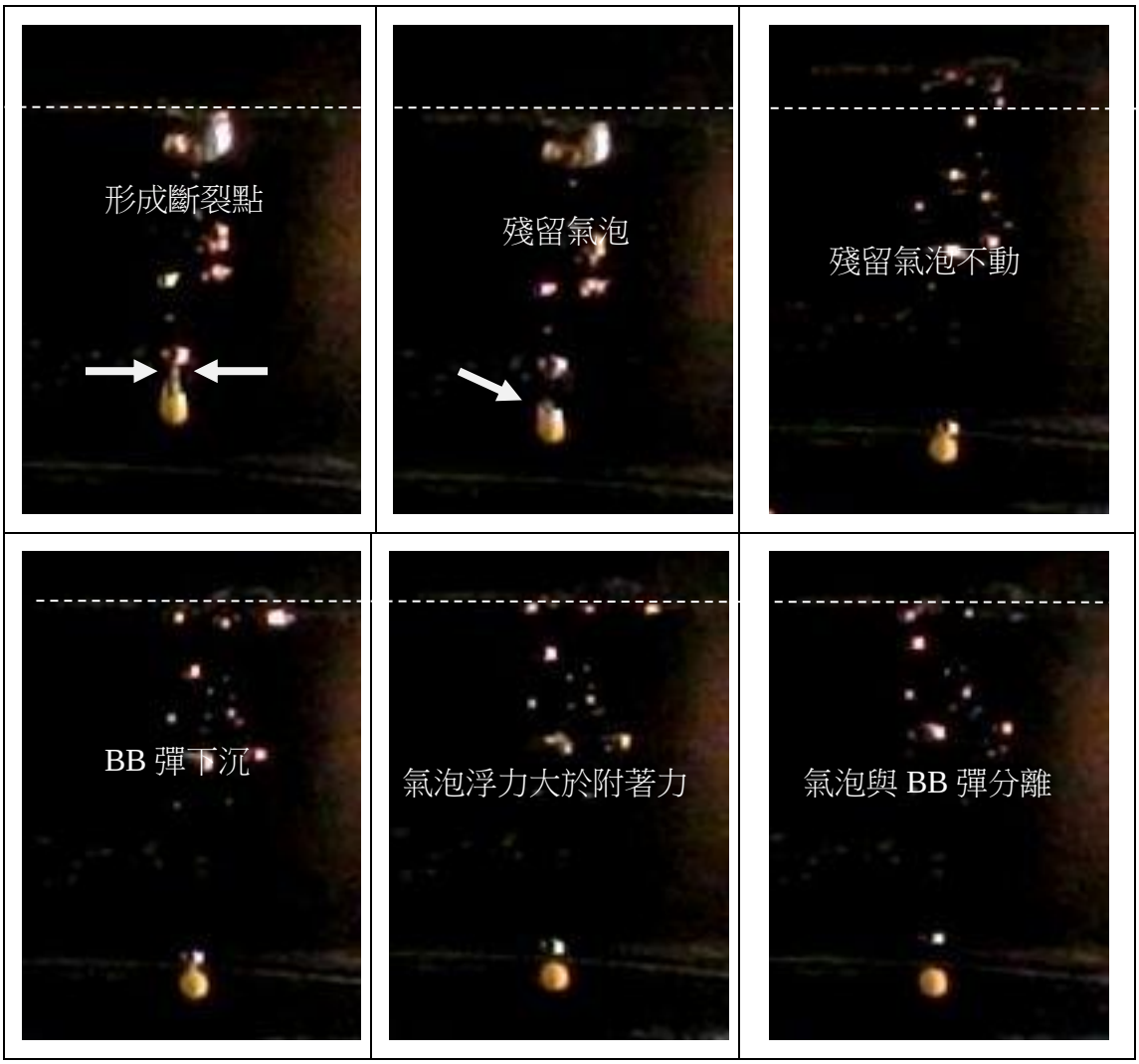


圖 12、BB 彈上浮失敗示意圖(距水面高 140 cm 水深 15cm)

斷裂氣泡偏大(相較距水面 160cm、170cm 條件的情況)，所以還是會出現斷裂氣泡大到無法形成殘留氣泡的情況，故上浮機率小於距水面 160cm 的條件。

距水面 160cm 則是一個寬高比適當的空氣柱，其斷裂氣泡大多可再形成殘留氣泡，附著於 BB 彈上，使之上浮。

距水面 170cm 而形成空氣柱的寬高比介於距水面 160cm、180cm 之間，有時會產生較細的空氣柱，導致量大且細碎的氣泡產生，使 BB 彈無法上浮。

3. 當距水面高大於 180cm 時，上浮機率小於 31.2%

因為距水面高 180cm 的 BB 彈的速度較快，其產生完整氣泡，在出現斷裂點前 1/30s，會呈現細長狀，空氣柱上的寬都大致相同，所以斷裂點出現的位置不一或出現多個斷裂點，導致完整氣泡斷裂後的斷裂氣泡多為細小的氣泡，無法再形成殘留氣泡，所以 BB 彈要上浮的機率只有 31.2%。

五、相同高度、不同水深的平均上浮顆數

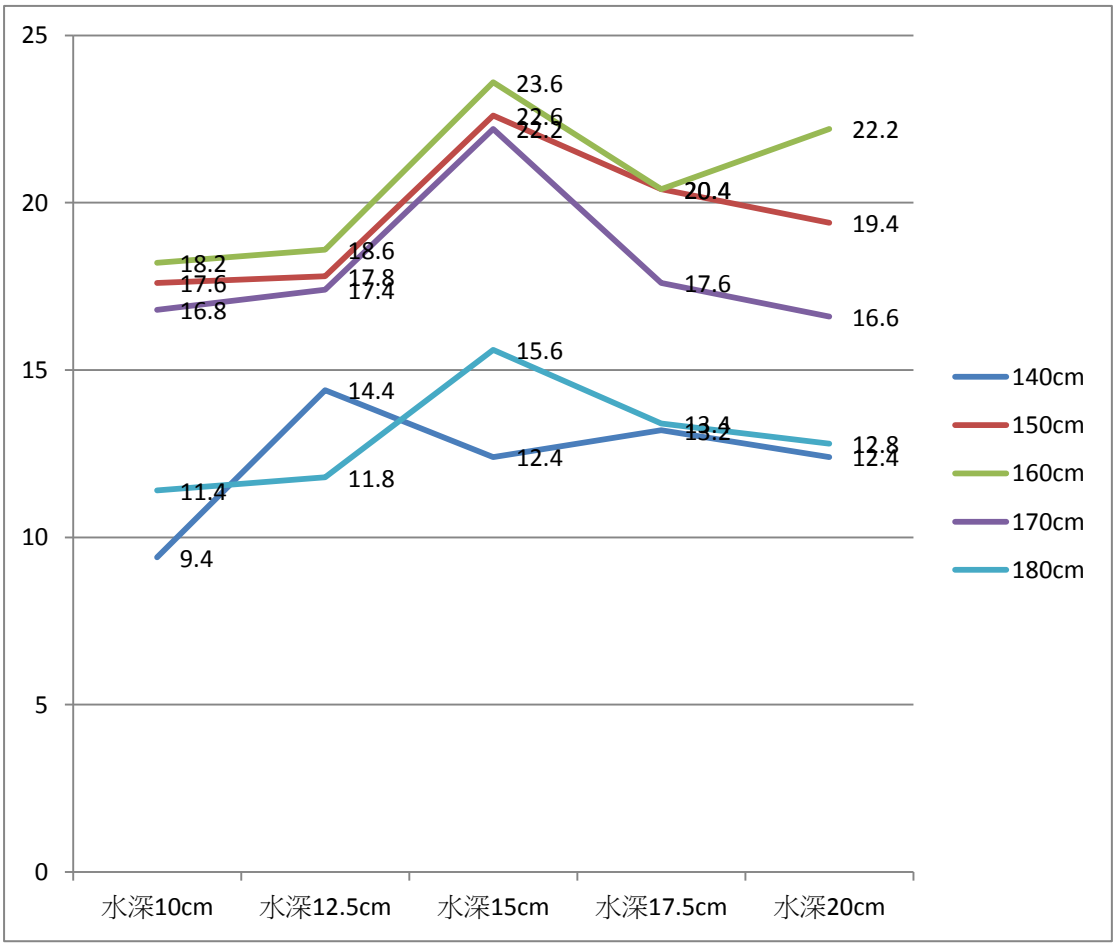


圖 13、相同距水面高不同水深上浮顆數

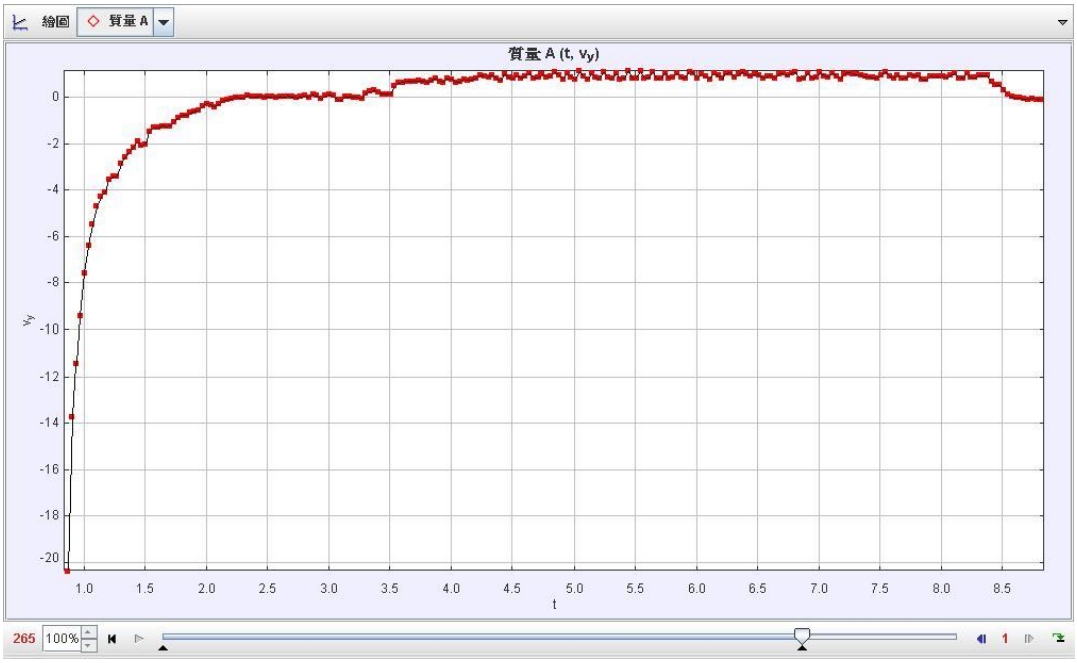


圖 14、Vy-t 圖(距水面高 180cm 水深 12.5cm)

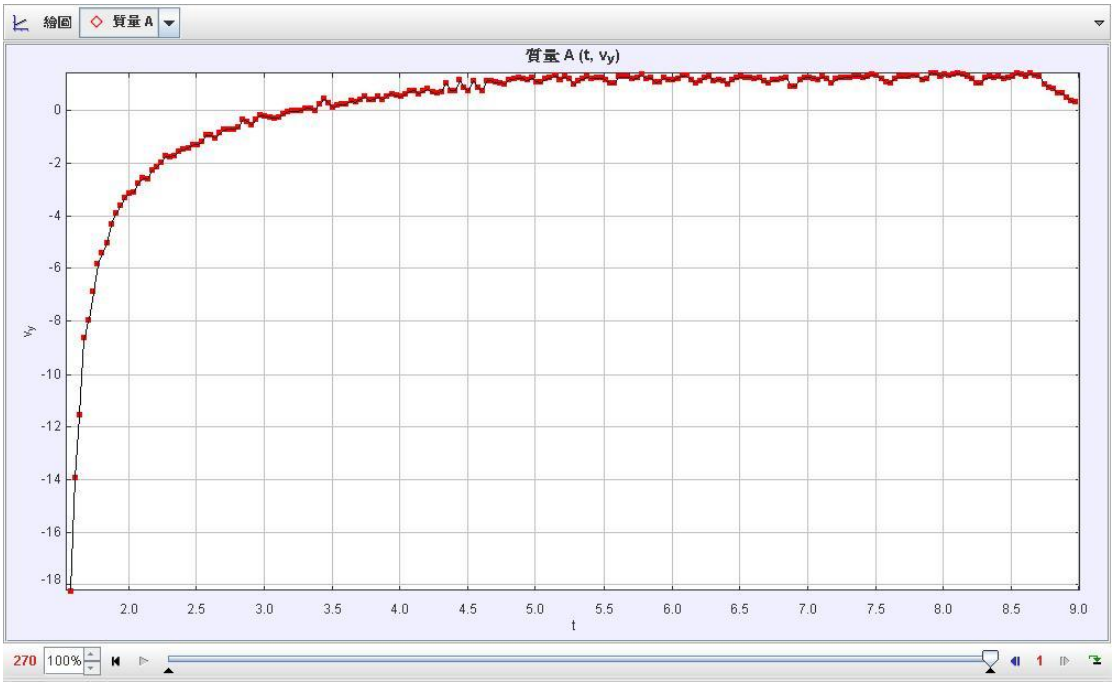


圖 15、Vy-t 圖(距水面高 180cm 水深 17.5cm)

本研究發現水深隨著深度越深，大致而言 BB 彈上浮顆數也隨之成高斯分布圖形(如圖 13)，推論出：當 BB 彈進入不同水深的時候，BB 彈的入水高度相同時，速度也會相同(P、Q 兩處速度相同)(如圖 16) 。但是當進入至距水底相同距離時，BB 彈速度快(水淺情況)，水底容器壁給於阻力(壓力阻力、黏滯阻力)、壓應力較大，故加速度大 (如圖 14)；而 BB 彈進入水深的情況下，進入至距水底相同距離時，BB 彈速度慢，水底容器壁給於阻力(壓力阻力、黏滯阻力)、壓應力較小，故加速度小 (如圖 15)。BB 彈速度慢，

水分子容易被排開，速度快水分子不容易被排開，產生壓應力較大，本研究認為 BB 彈在淺水的加速度大、深水的加速度小。

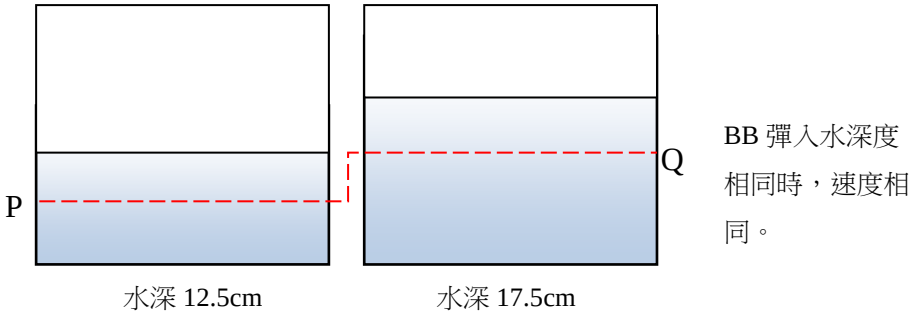


圖 16、BB 彈入水深度相同時，速度相同示意圖

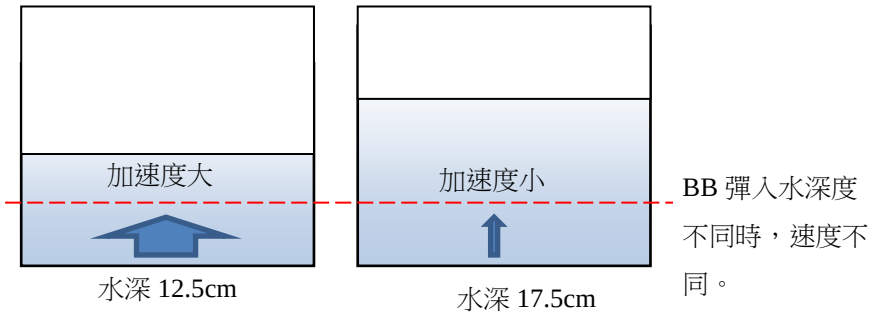


圖 17、BB 彈入水深度不同時，速度不同

由上述理論來解釋 BB 彈上浮顆數：

1. 因為水由淺至深，加速度由大至小，形成氣泡柱的形狀就會從橢圓轉為細長狀。
2. BB 彈進入水中時，初速均相同，又 BB 彈在水深較淺時的平均加速度較大(如圖 14-15，$9.18m/s^2>5.65m/s^2$)；因此 BB 彈在較深比起在較淺的水中，需要更長的時間讓速度達到 0，又位移與時間成正比，根據等加速度公式：位移=(末速+初速)/2*時間，因此 BB 彈進入淺水中的氣泡較在深水中短，因此經過實驗得到的數據，推論出：氣柱高與水深呈正相關(如圖 19)。

當 BB 彈穿越水時，水不論是被排開或擾動，都是阻力的來源。隨著 BB 彈速度的不同，造成水被排開，擾動的方式不同，也形成不同水的阻力。

當 BB 彈通過空氣時，BB 彈下端直接受到水分子的撞擊產生水壓，撞擊 BB 彈下端的水單元，必須繞過 BB 彈，繼續流動。當水繞過 BB 彈後，由於慣性作用，水分子將繼續往後流動，而無法垂直轉彎，流向 BB 彈背後，而造成 BB 彈上端產生真空，形成壓力阻力；BB 彈與水的摩擦，形成黏滯阻力。

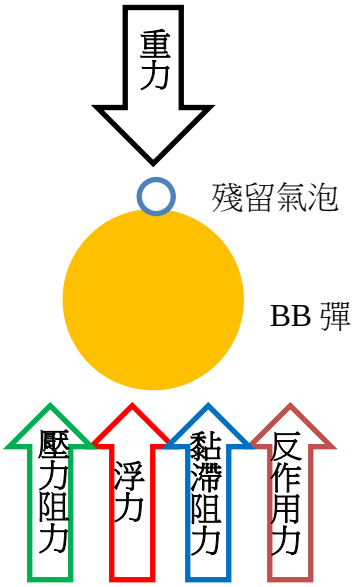


圖 18、BB 彈受力示意圖

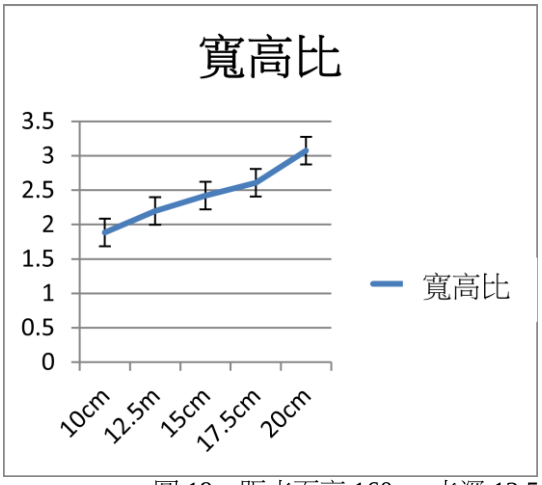
反作用力:底部容器給予之反作用力

六、完整氣泡的寬與高分析：

實驗數據統整後(如圖 19、表 12)，得出幾個現象：

表 12、距水面高 160cm 水深 12.5cm 斷裂氣泡高、寬及寬高比

高	1.875	2.095	2.1451	2.2556	2.5949
寬	0.9952	0.9534	0.8856	0.8646	0.8435
寬高比	1.884043	2.197399	2.42209	2.608893	3.076203



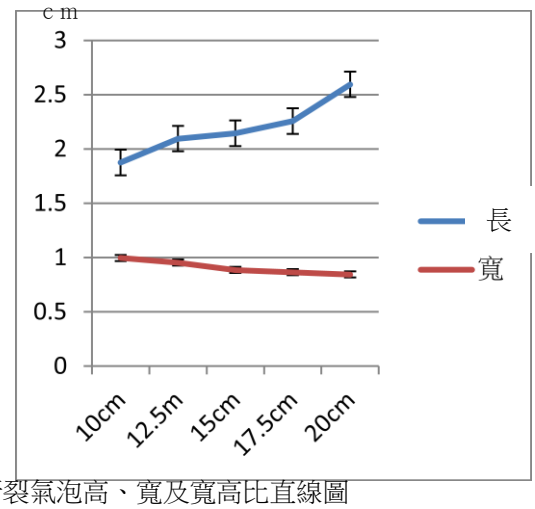


圖 19、距水面高 160cm 水深 12.5cm 斷裂氣泡高、寬及寬高比直線圖

(一)、相同入水高度、不同水深條件下，BB 彈射入水深 10cm～20cm 中時，入水初速均相同，又 BB 彈在水淺時的加速度較大；BB 彈射入水中時產生了相同橫向的擠壓，產生的擠壓到達 SHM 的端點折返，復合封閉形成氣柱，水愈深氣柱高愈長。

(二)、實際上，所形成不同高度的完整氣泡，因完整氣泡受液壓影響，故水深愈深、完整氣泡就愈窄，完整氣泡寬度與水深呈負相關(如圖 19)，但遠較完整氣泡高度與水深的關聯性低。

(三)、因完整氣泡寬度與水深的關聯性，遠較完整氣泡高度與水深的關聯性低，故相同入水高度愈深寬高比愈大。

七、誤差來源

(一)、上浮現象實與 BB 彈進入水面時的動能相關，但未考慮落下時所受的阻力，造成誤差。

(二)、影片解析度的限制，使畫面上的水珠邊界不夠明確，測量氣泡長寬時便會產生一定程度的誤差。而當水珠體積越小時，相對誤差的影響會更明顯。

柒、結論

根據實驗及討論 BB 彈平均密度，本研究得出一些 BB 彈上浮的條件：

1. BB 彈要形成上浮，必須經過三個階段。
   (1)、形成完整氣泡(空氣柱)。
   (2)、形成斷裂氣泡。
   (3)、形成殘留氣泡。
2. 殘留氣泡半徑要大於 1.13mm，但不可大於 3.96mm。
3. 完整氣泡(斷裂氣泡)大小適中，否則無法形成斷裂氣泡(殘留氣泡)。
4. 距水面高 150cm~170cm，上浮機率大於 40%，且成常態分布。
5. 入水速度太慢，BB 彈不易上浮(距水面高≦140cm)；入水速度太快，亦不易上浮(距水面高≧180cm)。
6. 水深越深，空氣柱越長，完整氣泡長度與水深成正相關。
7. 水深越深，空氣柱越窄，空氣柱寬度與水深成負相關，但較完整氣泡長度與水深的關聯性低。

捌、參考資料

一、實驗火箭原理設計與製作，景鴻鑫、何崇德、彭上吉 著，民國 100 年，台北市，科學月刊雜誌社

二、物理(上)，David Halliday、Robert Resnick、Jearl Walker 原著，田麗文、王行達、莫定山 編譯，2006 年，台北市，全華科技股份有限公司

三、物理馬戲團 1 Q&A - 讓你藝高人膽大的力學題庫，Jearl Walker 原著，葉偉文 編譯，2009 年，台北市，天下遠見出版股份有限公司

四、中華民國第五十一屆中小學科學展覽會佳作作品—【彈】何容易—水珠的反彈

五、第十屆旺宏科學獎金牌獎作品—現形吧！水母—放射狀水膜之性質探討

【評語】040108

1. 本作品嘗試探討密度大於水之 BB 彈何以能在入水後上浮，實驗之設計執行頗堪嘉許。

2. 本作品應考慮進一步控制變因，以釐清其相互間的關係，進一步了解所觀察到的現象，例如造成上浮之最佳墜落高度。

3. 現象之解釋應更進一步量化。