

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

佳作

040114

在水中上升之氣泡其長軸長度對其運動情形的影響

學校名稱：臺北市立建國高級中學

作者： 高二 林紘生 高二 楊棋宇	指導老師： 黃普信
---------------------------------	------------------

關鍵詞： 氣泡、速度、運動路徑

作品名稱

在水中上升之氣泡其長軸長度對其運動情形的影響。

壹、摘要

氣泡在水中運動時其形狀會近似於一橢圓體，我們利用攝影機分別垂直於兩垂直平面做拍攝記錄，並藉由影像軟體進行分析，定出其位置，發現它上升的路徑有時會在一平面上做來回運動，而來回運動的偏移幅度與氣泡本身的大小有密切關係，因此我們試著歸納出氣泡大小對其運動路徑的影響。我們討論的氣泡大小為長軸長度介於 0.42 mm 與 4.36 mm 之間，其中氣泡長軸在 2.25 mm 以上時會有明顯的來回運動，在長軸為 2.96 mm 時第一週期振幅即到達最大值，並隨著長軸長度的增減而減少，我們也發現垂直速度的第一個高點，會隨著氣泡長軸的增加使發生時刻延後。此外，我們設計了實驗，證明氣泡在水中會沿一平面做水平來回運動，是由於氣泡形變所造成的。

貳、研究動機

有一次在我發呆看著水族箱時，發現箱中打氣機所打出的氣泡串會連接成一優美的曲線，因此我就對這樣的運動情形產生了興趣，而想要去了解到底有哪些因素影響了它的運動情形，此外在看到二下流體這一章時，在課本白努力原理的應用這節裡，有講到變化球的形成原因，這讓我想到了它與氣泡在水中的運動是否有關聯，因此我們設計了實驗，試著以科學的方式製造並控制更優美的氣泡路徑線條。

參、研究目的

以自製實驗器材模擬氣泡由水底自然上升，以達成下列目的：

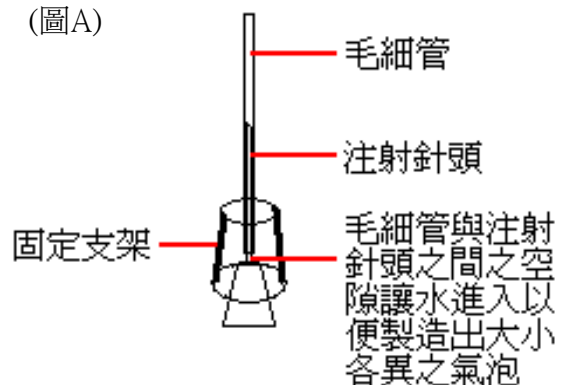
- (一) 相同液溫下，不同氣泡長軸長度與路徑的比較。
- (二) 探討氣泡長軸長度與垂直速度的關係。
- (三) 探討氣泡長軸長度與第一週期振幅的關係。
- (四) 利用動力相似的原理試證明氣泡在水中之二維來回振盪為氣泡形變所致。
- (五) 觀察水中上升之氣泡是否會達到穩定的運動狀態，如果是，其穩定運動狀態有何特徵？

肆、研究設備及器材

一、主要實驗器材

水箱(25*25*29.5 cm)、注射針頭、毛細管(內徑
1.1-1.2 mm、管壁厚 0.2 ± 0.02 mm、長度 75 mm)
(毛細管頂距水箱底部為 12.5cm)、針筒(3 c.c.)
可由單一口徑打出不同氣泡大小之裝置(圖 A)

(圖A)



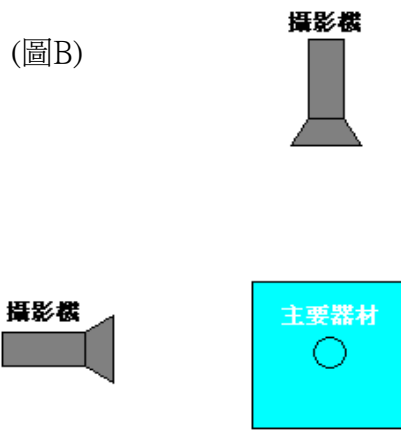
二、驗證實驗器材

鋼珠(直徑 0.140 cm)、水箱(25*25*29.5 cm)、吸附裝置(吸塵器)、分析軟體：Tracker 1.30

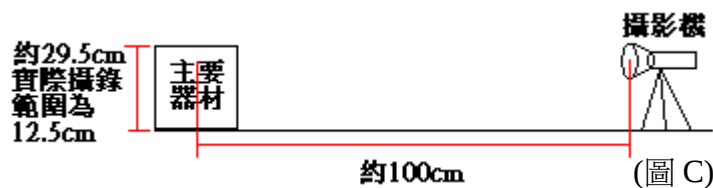
三、攝影器材(圖 B)

攝影機 1: SONY DCR-DVD755 動態 69 萬像素 CCD 107 萬像素

攝影機 2: SONY DCR-SR100 動態 205 萬像素 CCD 330 萬像素



四、器材架設方式(圖 C)

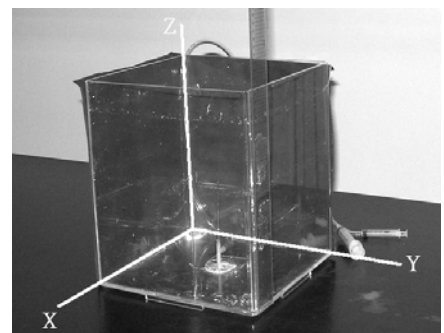


攝影器材架設時為避免 DV 攝錄時所造成的誤差，特別加大「主要器材與攝影機的距離」與「實際攝錄範圍」之比值(其張角約為 16.78°)

伍、研究過程或方法

一、研究過程

- (一) 裝水水高為離底 25 cm，此時氣泡上升最大高度為 12.5 cm
- (二) 慢慢打氣使氣泡幾乎為自然上升
- (三) 使用兩架攝影機(1/30 秒/格) 分別垂直 XZ 平面與 YZ 平面拍攝記錄
- (四) 利用軟體點出每單位時間氣泡於 XZ 與 YZ 平面上的位置，並以像素為單位將氣泡紀錄影片數值化
- (五) 使用 XZ 與 YZ 平面的紀錄定出其實際位置
- (六) 將像素轉為實際長度
- (七) 利用 origin 數據分析軟體將數據繪成圖表，以利分析



二、資料處理方式

- (一) 將影片用 VirtualDub-MPEG2 轉成影格的形式
- (二) 將氣泡上升過程中的每一格影格轉成圖片
- (三) 用影像軟體將每張圖片中氣泡的位置定位，以毛細管口為原點，製作出座標數據。

(四) 將數據依軌跡、第一週期振幅與垂直速度作分析

1. 軌跡

(1) 以 Origin 7.5 將座標數據畫成 3D 軌跡圖以利分析

2. 第一週期振幅

(1) 將軌跡圖之氣泡軌跡投影至 XY 平面

(2) 於 XY 平面的投影中，找出氣泡第一週期振幅之量值

(3) 依氣泡長軸大小歸類、分析

3. 垂直速度

(1) 用 Excel 以座標數據算出氣泡兩時間點間(相距 1/30 秒)的平均垂直速度，視為兩數據點之時間中點的瞬時速度(由於兩數據點相距時間差非常短，且距離非常接近，所以兩數據點之時間中點的瞬時速度與兩時間點之平均速度相近)

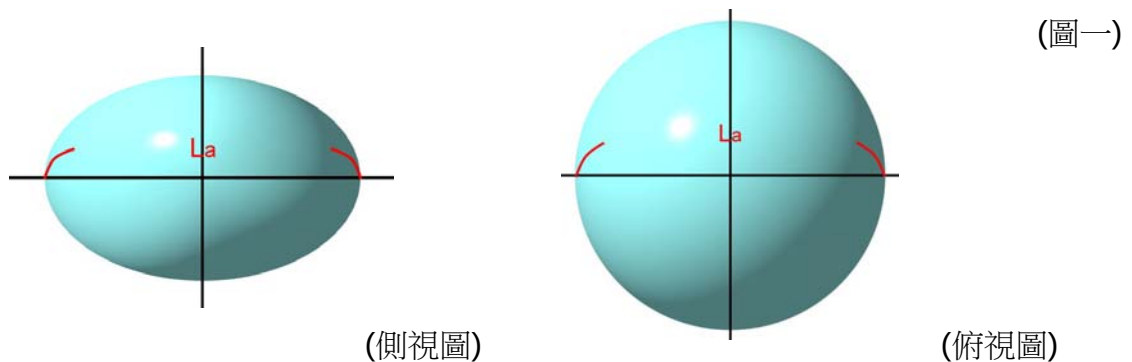
(2) 以 Origin 7.5 將平均垂直速度數據畫成垂直速度圖

(3) 依氣泡長軸大小歸類、分析

三、名詞定義

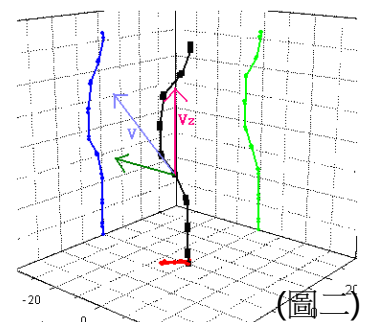
(一) 氣泡長軸長度 L_a :

在「參考資料 2」中，有明顯照出氣泡在水中的形狀，且在其 Introduction 中有提到，在先前的實驗中較大的氣泡被假設為橢圓體，雖然根據其實驗可明顯的看出氣泡在水中的運動並不是完美的橢圓體，但在這裡基於實驗方便與器材的限制下，我們還是以橢圓體定義 L_a ，因氣泡之形狀是一沿中心垂直軸對稱的橢圓體，所以我們定義 L_a 為氣泡表面距離中心垂直軸之最大距離的兩倍。(圖一)



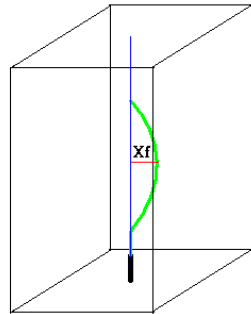
(二) 垂直速度 V_z :

V_z 為氣泡在水中運動時，任意時間任意時刻在垂直方向的速度分量。(圖二)



(三) 第一週期振幅 X_f :

在「參考資料 1」中得知氣泡在水中的運動為一來回運動，而我們決定研究第一次來回運動之運動情形，因此我們定義 X_f 為第一次來回運動中，氣泡第一週期軌跡距離氣體出口向上延伸之垂直軸的最大距離。(圖三)



(圖三)

圖註:

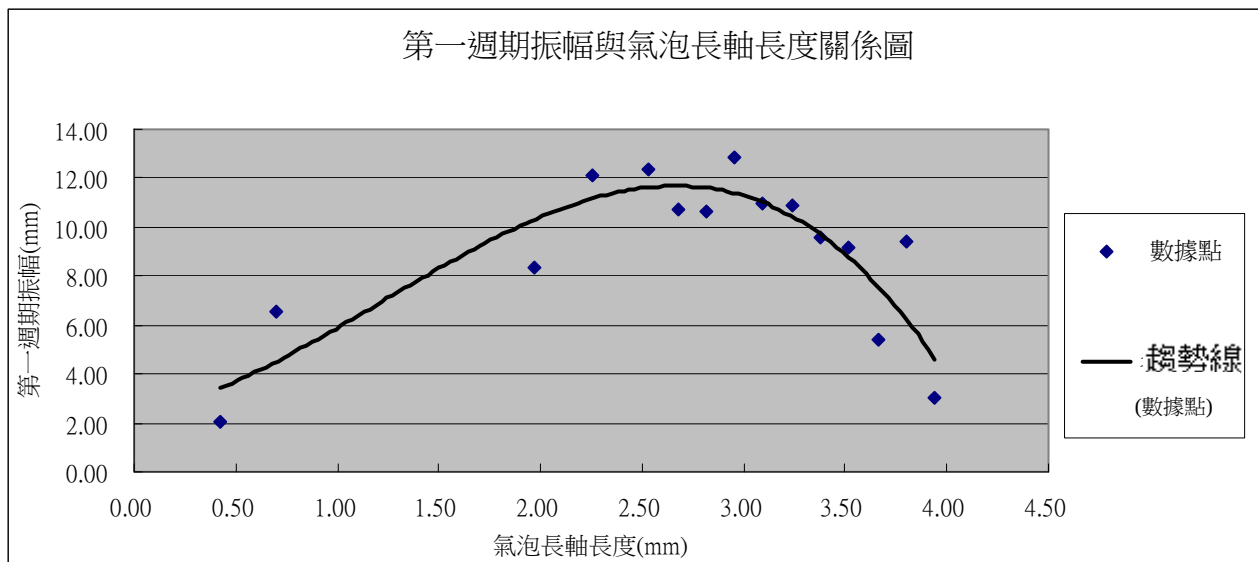
藍色為氣體出口向上延伸之垂直軸

綠色為運動軌跡

紅色部分則為 X_f

陸、研究結果

一、第一週期振幅(X_f)與氣泡長軸長度(L_a)的關係

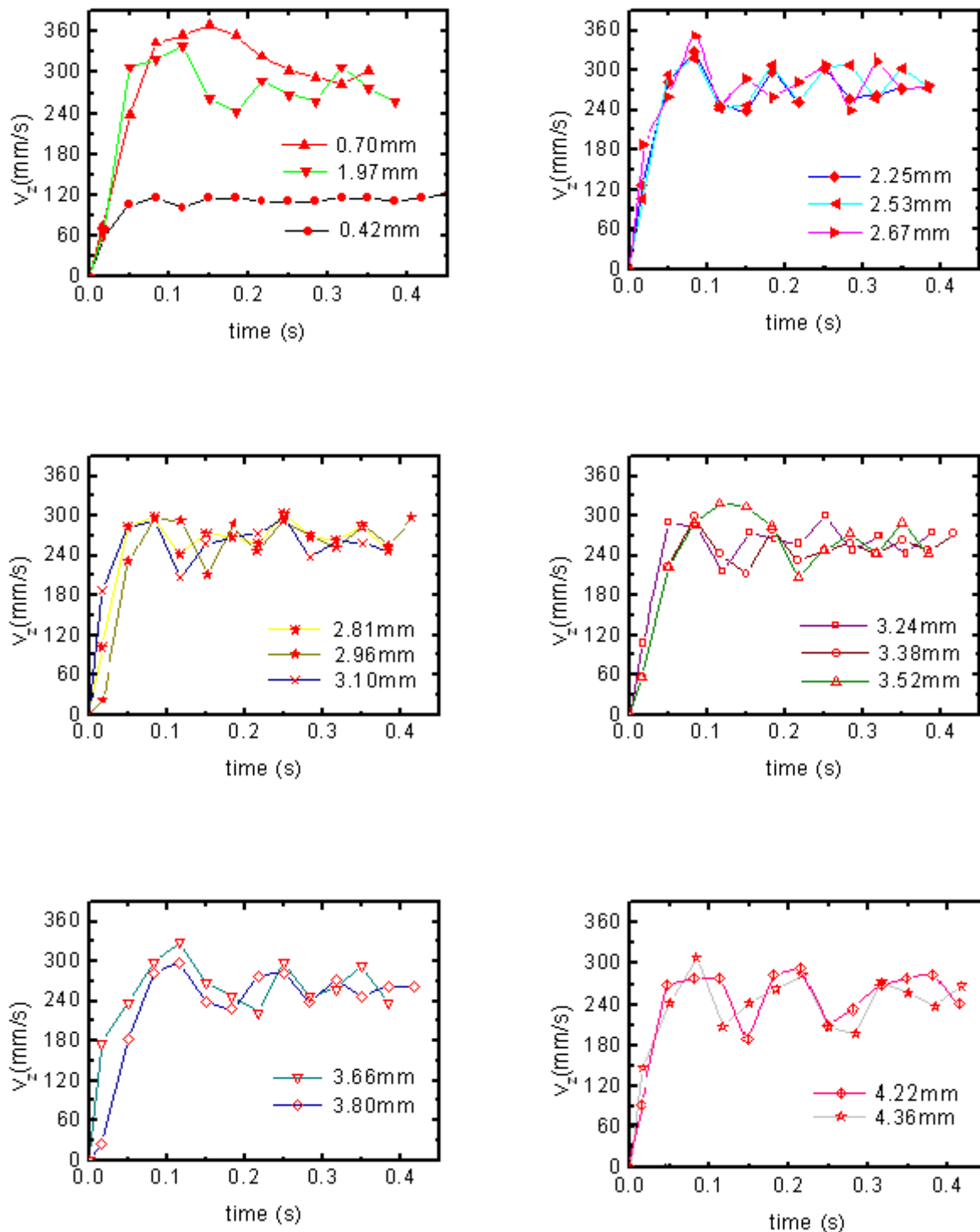


實驗中測量到最小的氣泡為 $L_a=0.42$ mm，其 $X_f=2.06$ mm，當 $L_a \leq 2.94$ mm時，隨著 L_a 的增加 X_f 也會增加，並在 $L_a=2.94$ mm時到達最大值($X_f=12.89$ mm)，當 $L_a > 2.94$ mm時，隨著 L_a 的增加 X_f 反而會減少。

二、氣泡長軸長度(L_a)與垂直方向速度(V_z)的關係

氣泡長軸長度(L_a)與垂直方向速度(V_z)關係圖(依氣泡長軸長度(L_a)排列)(如下圖)

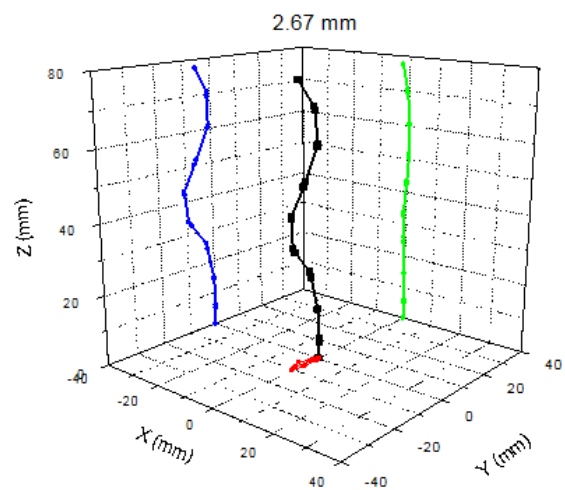
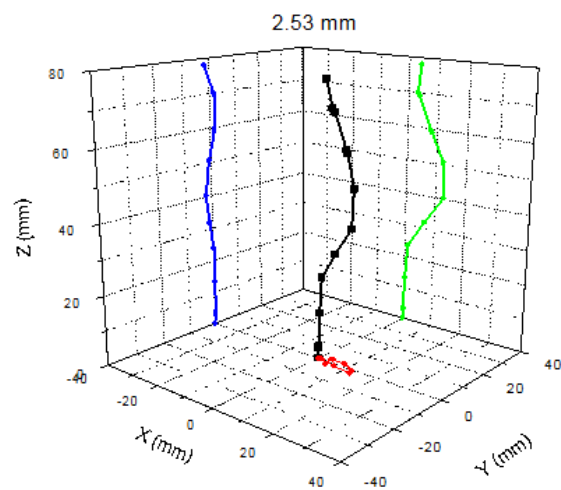
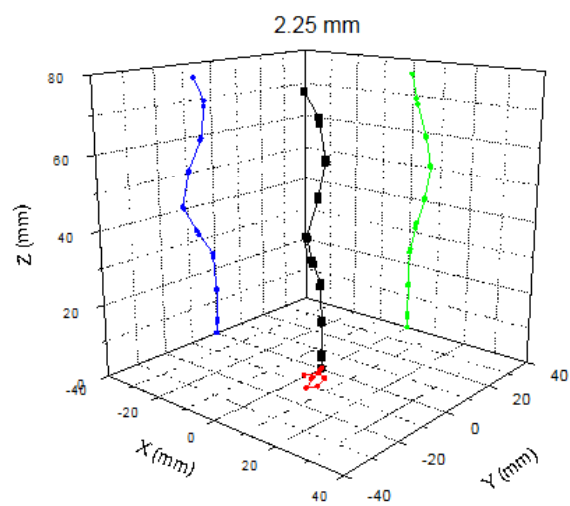
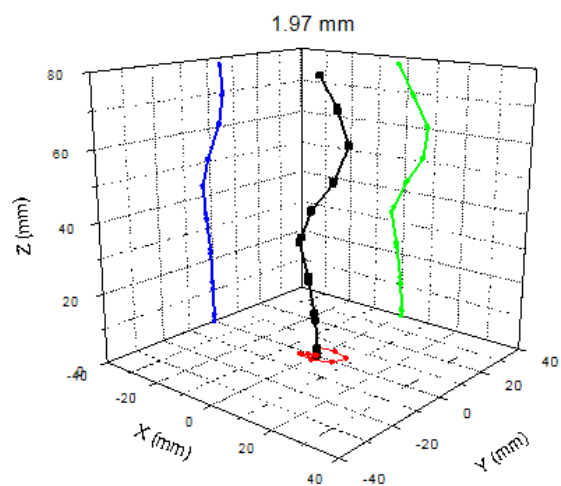
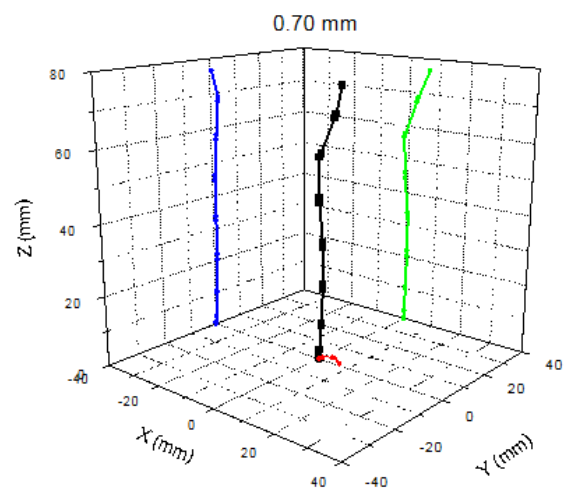
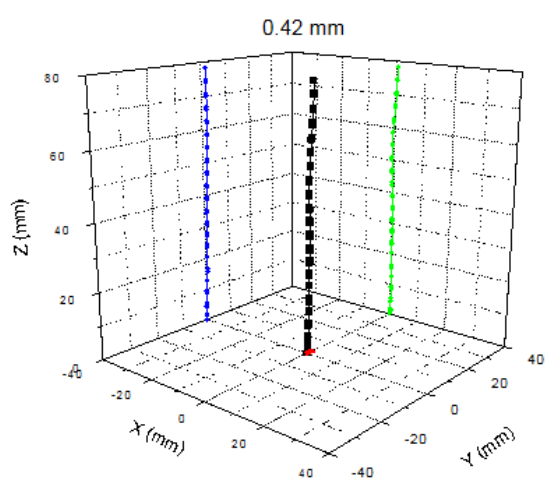
(每一條折線皆為一顆氣泡於一次運動中之實驗紀錄)

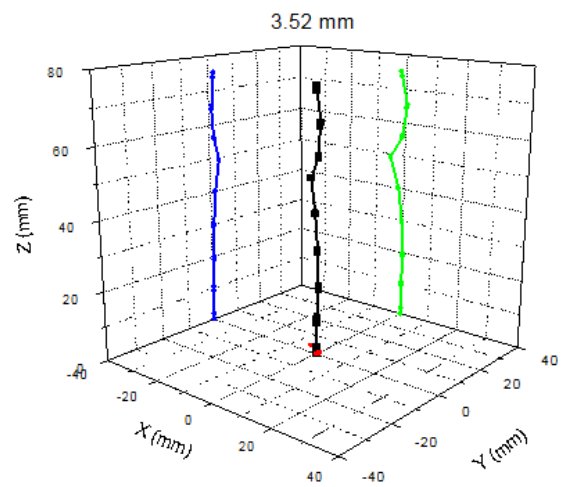
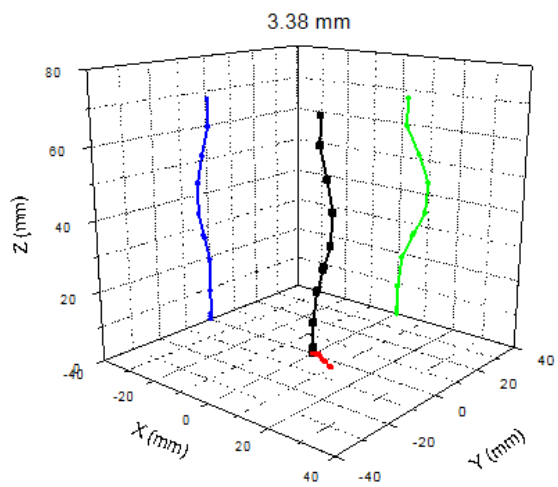
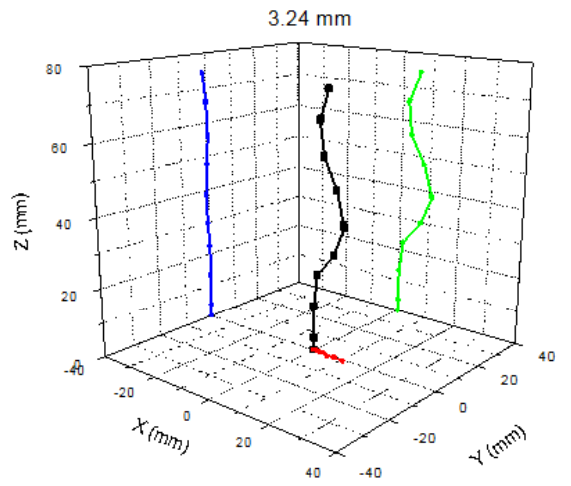
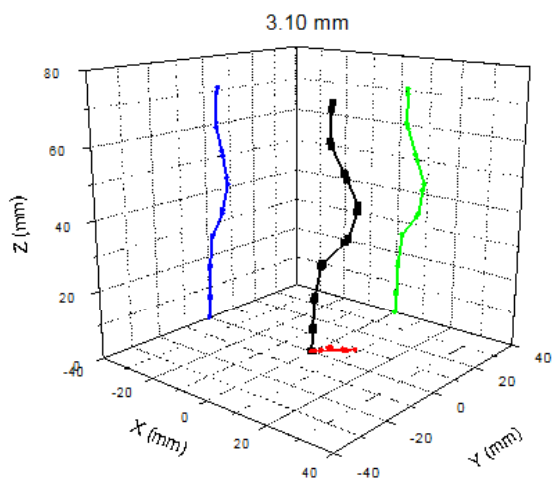
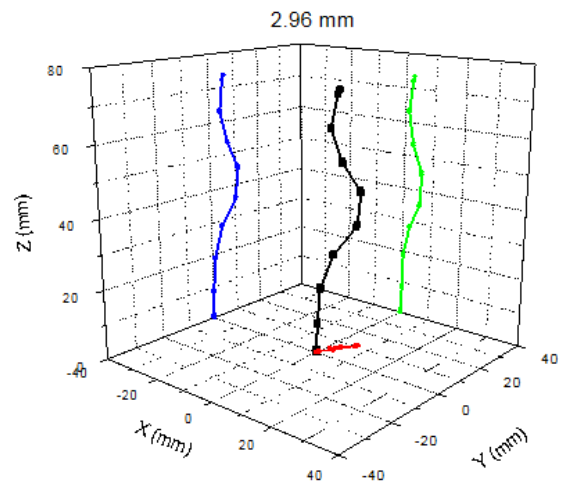
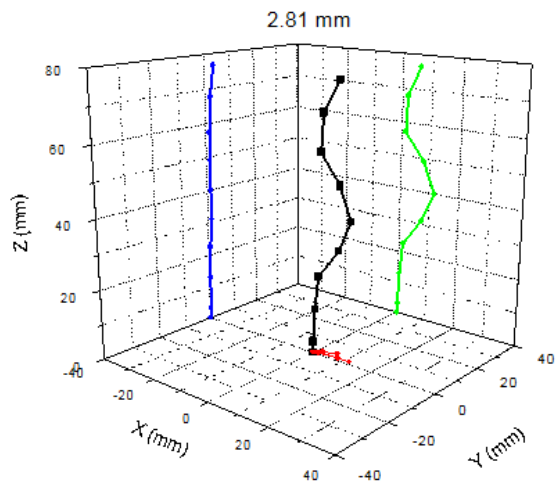


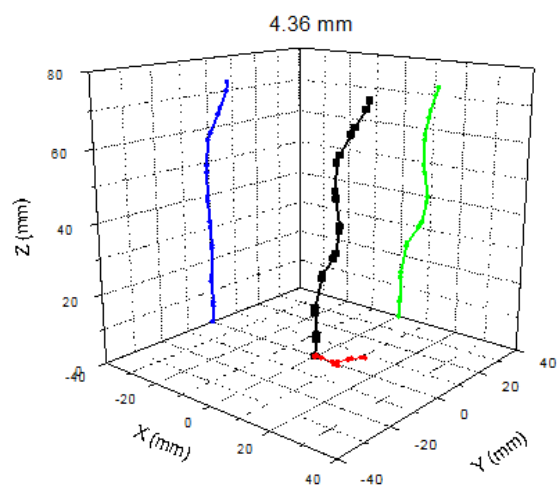
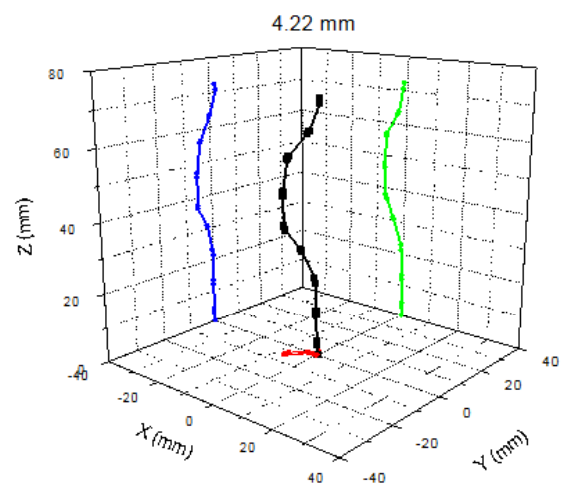
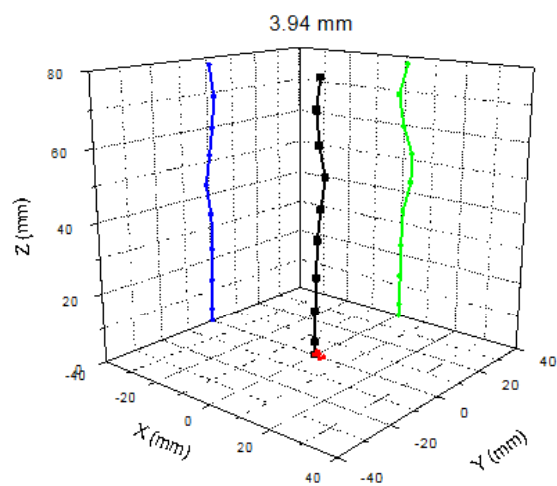
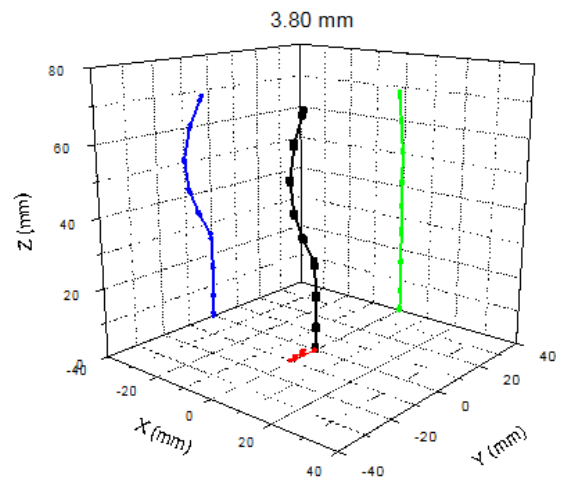
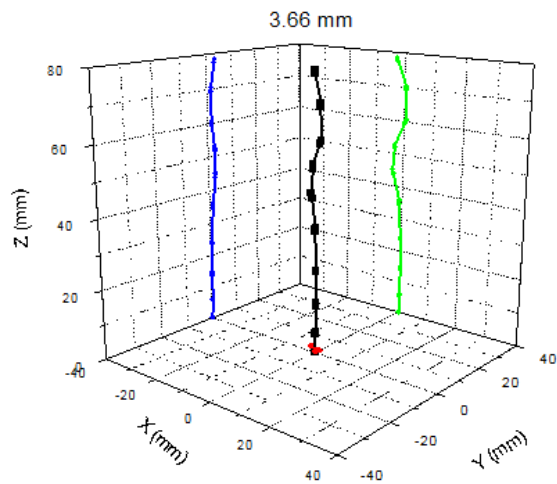
根據氣泡長軸長度(L_a)與垂直方向速度(V_z)關係圖，當 $L_a \geq 2.25$ mm 或 ≤ 3.80 mm 時，其垂直方向速度的第一個高點會出現在 0.10 秒(含)與 0.13 秒(含)之間，且其出現時刻會隨著 L_a 的增加而有延後的趨勢，但當 $L_a > 3.80$ mm 或 < 2.25 mm 時便無明顯規律；此外 $L_a = 0.42$ mm 時，垂直速度會有特殊情形，其非常快速到達穩定狀態，且終端速度較其它氣泡來得小。

三、氣泡長軸長度 (L_a) 與其路徑的關係

氣泡路徑圖（依氣泡長軸長度 (L_a) 排列）(如下圖)







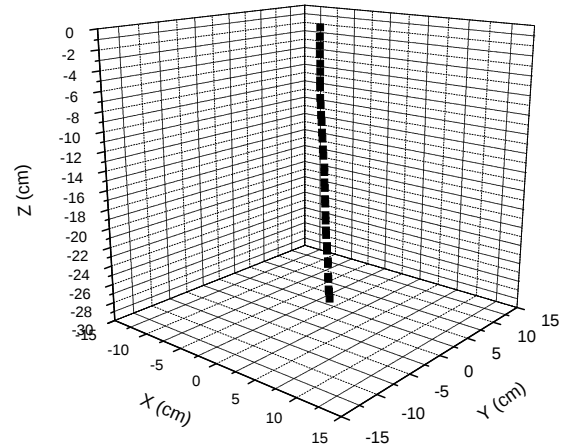
根據氣泡路徑圖，當 $L_a = 0.42$ mm時其偏移量非常小，使得運動路徑幾乎為一鉛直直線；當 $L_a > 0.42$ mm且 < 2.25 mm時，其運動路徑較無明顯規律；當 $L_a \geq 2.25$ mm且 < 4.36 mm時，其運動方式幾乎皆為沿一平面之來回運動。

注：黑色折線為運動軌跡

紅色、綠色、藍色折線分別為運動軌跡對 XY、XZ、YZ 平面之投影

四、鋼珠驗證實驗結果

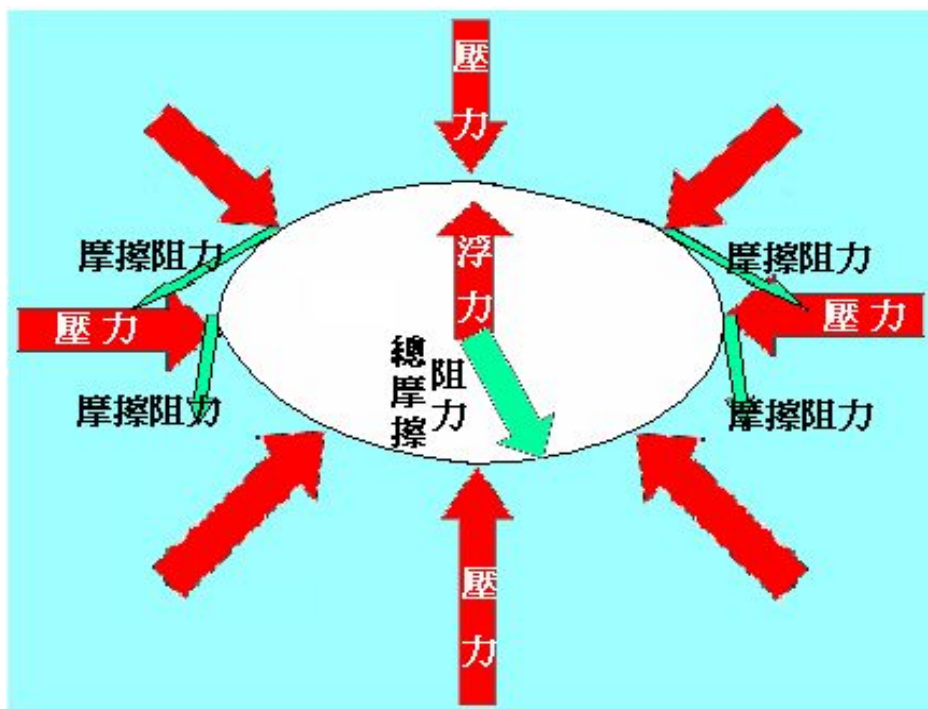
在鋼珠驗證實驗中，我們發現鋼珠在水中之運動，其運動路徑幾乎為一直線，也沒有週期性的運動現象（如右圖所示）。我們去計算鋼珠在運動時的雷諾數大約為 6 左右，與氣泡運動時之雷諾數相近，在雷諾數相近的前提下，物體的運動情形應該也要相似，但鋼珠和氣泡卻沒有相似的運動情形，因此我們可以推斷，在雷諾數計算中沒有考慮到的變因，同時也是氣泡與鋼珠之間的唯一相異之處：形變，在氣泡的水平振盪運動中扮演了很重要的角色。



圖註：圖中之零位面即為水面

柒、討論

一、針對氣泡形變造成來回振盪運動的推論



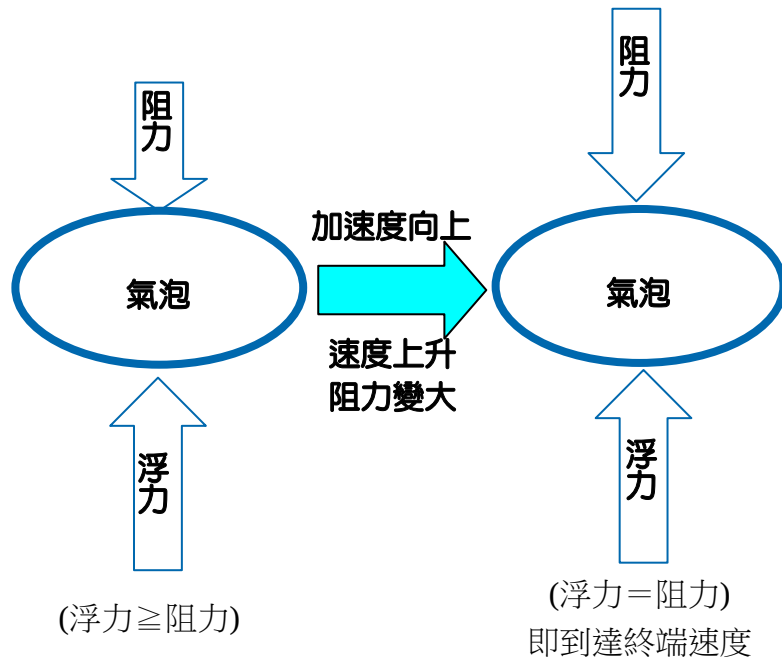
氣泡會沿一平面來回振盪是由於水平力的作用，在水中運動的氣泡會受到許多力的作用，而水平力的唯一來源，只有水對氣泡的摩擦阻力之水平分量，因此我們推測路徑的左右偏移，是由於氣泡形變造成摩擦阻力方向改變，使左右水平分力大小不一所造成。（如上圖）

在我們的驗證實驗中，鋼珠在水中的運動情形，並不如同氣泡在水中會沿一平面來回振盪，在雷諾數相似情況下，鋼珠與水中氣泡唯一的差別，在於鋼珠不會形變而氣泡會形變，故此實驗驗證了氣泡會沿一平面來回振盪的主因，是由於氣泡形變造成摩擦阻力水平分量改變所致。

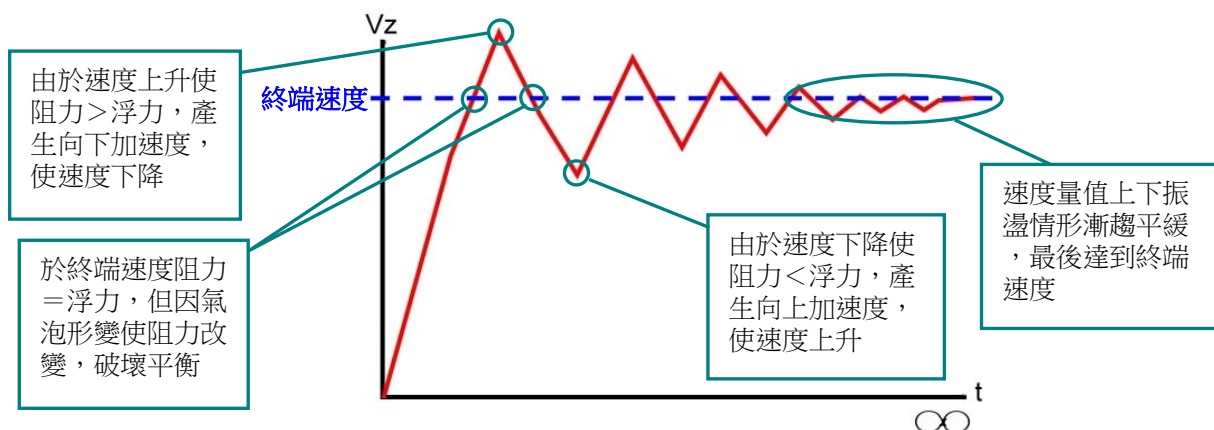
然而當 $L_a \geq 4.36 \text{ mm}$ 或 $< 2.25 \text{ mm}$ 時並無明顯的沿一平面來回振盪，我們做了以下猜測：

- (一) 當 $L_a \geq 4.36 \text{ mm}$ 時，我們猜測是由於氣泡過大，使得其形狀不規則變形，並非為橢圓體，所以並無明顯規律。文獻中討論的氣泡大小為 3.4 mm ，其所觀測到的氣泡形狀為橢圓體，因此當半徑差距過大時就會有不規則形變的可能。
- (二) 當 $L_a < 2.25 \text{ mm}$ 時，我們猜測是由於氣泡過小，使得氣泡上下之壓力差不足以使氣泡變為橢圓體，所以並不符合 $L_a \geq 2.25 \text{ mm}$ 且 $< 4.36 \text{ mm}$ 時在運動路徑上的規律。

二、針對氣泡長軸長度對垂直速度影響的推論



速度圖最後速度上下振盪的情形，可以視為趨向終端速度的起始，在雷諾數低的情形下，根據史多克阻力定律($\text{阻力} \propto \text{流體流速} \times \text{液體黏滯度} \times \text{物體長度}$)，會產生上圖的情形，達到終端速度，然而我們卻發現實際上垂直速度量值會有上下振盪的情形，對此我們做了以下推斷：在浮力與阻力達成平衡時，物體長度(在此即為氣泡短軸)仍持續在變化，也就是氣泡依然有形變產生，使得阻力改變，破壞了浮力與阻力之間的平衡，而阻力與氣泡之速度變化便產生了如下圖的關連性。此外，我們發現氣泡趨向終端速度的起始時刻，會隨著氣泡長軸的增加而延後，我們推想因為氣泡長軸較大時體積較大，其上升的浮力也較大，造成氣泡向上加速，而產生向下的阻力與摩擦力，由於氣泡浮力較大，故能產生大小能與之抗衡的阻力與摩擦力以達到力平衡的時間也較長。



三、針對氣泡來回振盪運動之平面的討論

在實驗紀錄中我們發現，雖然我們沒有刻意去改變氣泡運動的初始狀態，但每一次氣泡運動之平面皆不同，應與其初始條件的微小變化有關，我們猜測這可能與氣泡內部的氣體流動或出氣孔的微小偏角有關，未來我們想設計實驗，對這部分做更深入的探討，並找出何種因素決定其運動平面。

四、針對氣泡穩定運動狀態的討論

由實驗紀錄我們可以看出氣泡之運動在我們的實驗中尚未到達穩定之運動狀態，因此我們想做一進階實驗以探討氣泡之穩定運動情形。我們將以較高的水箱(約 150 cm)來進行氣泡運動路徑的實驗，並增加攝影機的數目，以求記錄完整的運動路徑。對於進階實驗我們有一些預期結果：氣泡在水中為一沿中心垂直軸對稱之橢圓體，無左右之方向性，因此在穩定運動時應會呈現對稱的運動路徑。

捌、結論

一、氣泡長軸長度對運動路徑的影響

- (一) 氣泡長軸長度大於等於 2.25 mm 且小於 4.36 mm 之氣泡會於水中沿一平面做水平來回運動。
- (二) 氣泡長軸大於 0.42 mm 且小於 2.25 mm 之氣泡，其路徑並無明顯規律，且重複性低。
- (三) 氣泡長軸為 2.94 mm 時第一週期振幅將達到最大值(12.89 mm)。

二、氣泡形變對運動路徑的影響

在水中運動的氣泡非常容易因外力影響產生形變，而此形變即造成氣泡在水中沿一平面做水平來回運動的主要原因。

三、氣泡長軸長度對垂直速度的影響

氣泡長軸長度大於等於 2.25 mm 小於等於 3.80 mm 之氣泡，其趨向終端速度的起始時刻，會在 0.10 秒(含)與 0.13 秒(含)之間，且其起始時刻會隨著氣泡長軸長度的增加而有延後的趨勢。

玖、參考資料及其他

- 一、Woodrow L. Shew and Jean-Francois Pinton 6 OCTOBER 2006 **Dynamical Model of Bubble Path Instability** PHYSICAL REVIEW LETTERS PRL 97, 144508 (2006) week ending
- 二、G. Brenna*, V. Kolobarica, F. Durstb 2006 **Shape oscillations and path transition of bubbles rising in a model bubble column** Chemical Engineering Science 61 (2006) 3795 – 3805
- 三、夏皮諾(Shapiro Ascher H.)，形與流-帶阻力的流體力學，四版，台灣中華書局，P.44-P.69，民 72

【評語】 040114

本作品以磨擦阻力、浮力、重力等因素探討水泡上浮之運動路徑，能以實影定出路徑之偏移情況，值得推薦。作品可再提供速度隨時間會震盪的實驗數據，再進一步對此現象深究。