

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

佳作

040105

好聽的鐵板燒

—低溫液體撞擊高溫金屬板之聲音研究探討

學校名稱：國立新竹高級中學

作者： 高二 李威果 高二 胡耀傑 高二 彭胤傑	指導老師： 吳思鋒 詹育嘉
---	-----------------------------

關鍵詞：氣爆、絕熱膨脹、Leidenfrost Effect

摘要

我們將水滴滴向高溫金屬鋁板發現其有高頻的聲音產生。推測聲音產生的機制應由底部水分子在短暫時間內迅速沸騰氣爆所致；同時也發現其聲音波形應是由多個接觸點產生的聲音疊合而成。透過實驗結果可知：滴落高度差、水滴與鋁板溫度差、酒精重量百分濃度皆與聲音頻率呈現正向關係，而液滴質量與聲音頻率呈現負向關係，此外鋁板大小及厚度不影響聲音頻率。

壹、研究動機

有一次與同學相約去吃鐵板燒，我們發現當廚師將蔬菜放置鐵板上開始烹煮時，蔬菜上的水珠灑落到高熱的鐵板面，同時發出高頻刺耳的聲音，我們發現這和一般家裡廚房炒菜時，水滴滴落鍋子所發出的滋滋聲相異，因此我們推測，聲音的不同是否跟鐵板溫度有關係。經過廣泛的資料涉略後，我們得知當金屬板達到某一特定高溫時，水珠會在接觸金屬板瞬間產生一空氣薄膜，反而不會迅速沸騰而消失。我們開始產生疑惑，這個時候水珠仍會發出聲音嗎？如果會，那此時的聲音是否仍是滋滋聲，抑或是它將產生不一樣的聲音？回到了實驗室，我們開始設計這套實驗，並期望能夠對這種發聲現象做更進一步的探討。

貳、研究目的

- 一、研究水滴發出聲音之機制
- 二、研究水滴聲音波形
- 三、研究液滴質量、鋁板大小及厚度、水滴與鋁板溫度差、滴落高度差與聲音頻率之間的關係
- 四、研究水滴與鋁板溫度差和波包數之間的關係
- 五、研究其在於酒精濃度測量上的應用

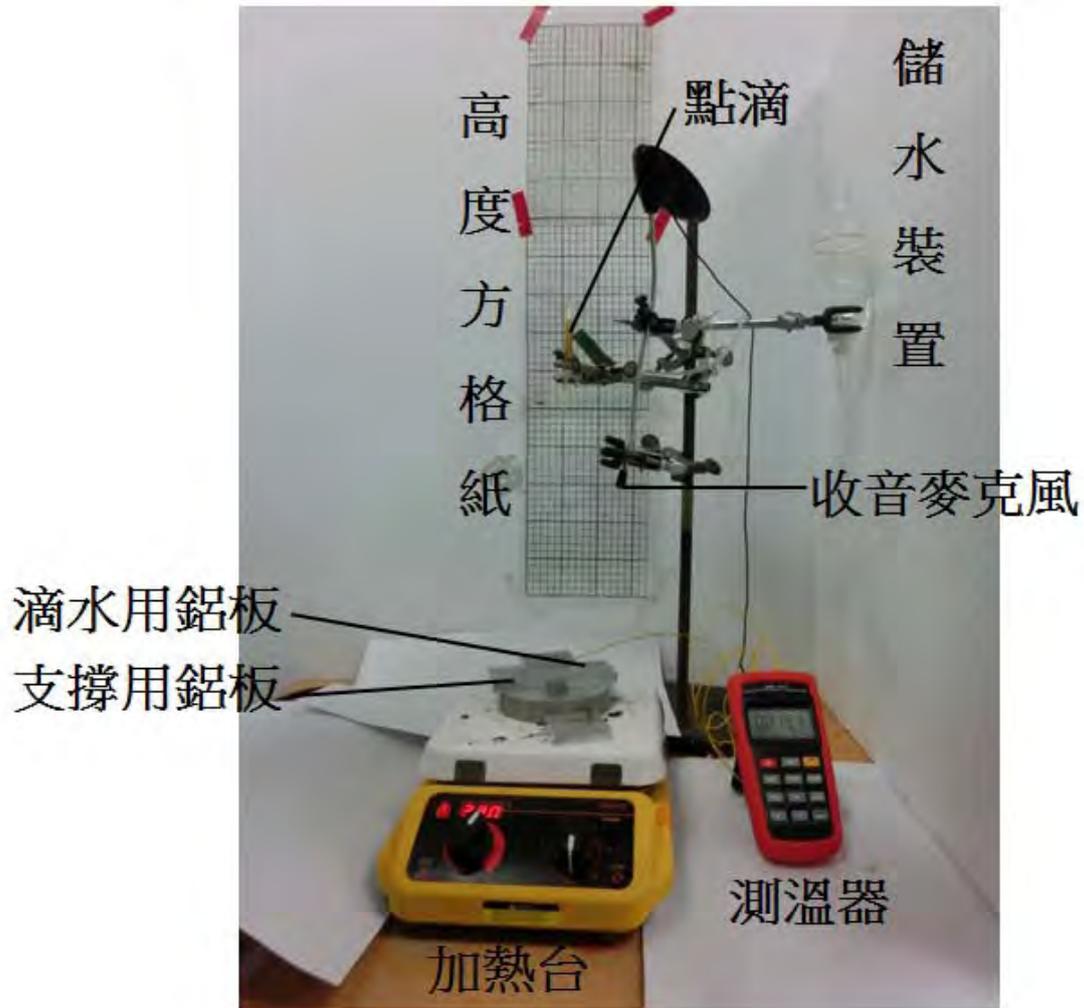
參、研究設備及器材

- 一、硬體設備
 - (一) 醫療調控點滴(滴水裝置)及兩種不同尺寸的點滴針頭 (0.017 g/滴、0.06 g/滴)
 - (二) Thermo Cimerac 可控溫加溫台(加熱裝置)
 - (三) MC08 Multi 單指向麥克風(收音裝置)
 - (四) CHY801B-K type 單點式量溫器(測溫裝置)
 - (五) UWE NJW-300 電子秤
 - (六) 金屬鋁板(長*寬*厚,單位:mm):A板(50*50*10)、B板(75*75*10)、C板(25*25*10)、D板(50*50*15)、E板(50*50*5)
 - (七) LAE MATE⁺ 微量滴管

二、分析軟體

- (一) Free Audio Editor(錄音程式)
- (二) Audacity1.03(分析程式)
- (三) Microsoft Visual Basic 6.0

三、設備裝置圖(圖一)



(圖一)

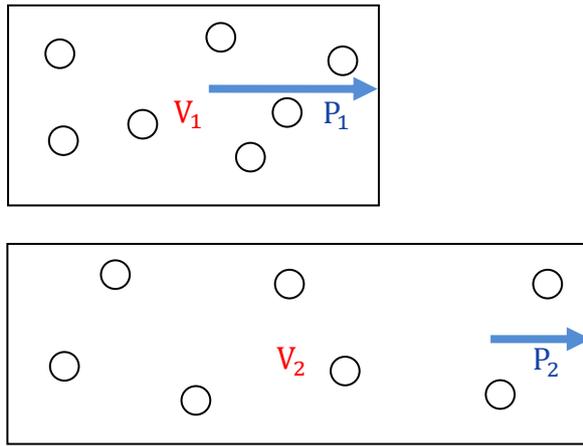
肆、研究過程或方法

一、實驗原理

(一) 絕熱膨脹：

假定一個由氣體組成的封閉系統，且此系統不和外界有熱交換，則當此系統做膨脹(或收縮)時，稱為絕熱膨脹。過程中任意時刻皆會滿足以下關係：

$$PV_1^\gamma = PV_2^\gamma = \text{常數} \quad (\text{如下頁圖二})$$

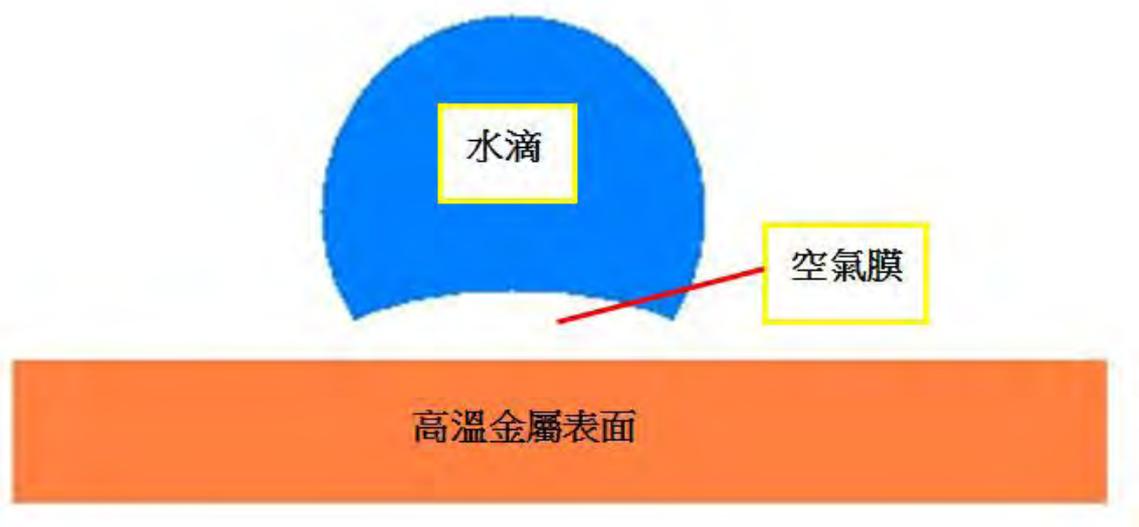


(圖二) 絕熱膨脹示意圖

式中的 γ 為一常數，當系統中的氣體為單原子分子時， $\gamma = 5/3$ ；當系統中的氣體為雙原子分子時， $\gamma = 7/5$ 。

(二) 萊頓弗羅斯特現象(Leidenfrost Effect)：

我們如果將水珠放置於一高溫金屬板(其溫度遠大於水的沸點)，則此液滴所蒸發的水蒸氣會在液滴底部形成一層非常薄的空氣膜(蒸氣層)並阻止液滴直接接觸高溫金屬板(如下圖三)，也由於水蒸氣的熱傳導率大約只有水的 1/10，因此液滴沸騰的速度大大減慢，使液滴反而能存留的更久，此現象稱為萊頓弗羅斯特現象。

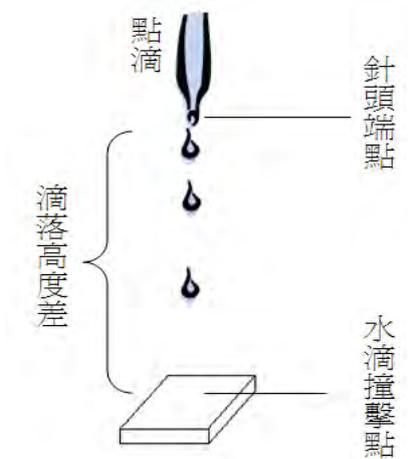


(圖三) 萊頓弗羅斯特現象示意圖

二、名詞定義

(一) 滴落高度差：

從滴落水滴的點滴針頭到水滴撞擊鉛板的撞擊點，兩者之間的垂直距離。
(如下圖四)。



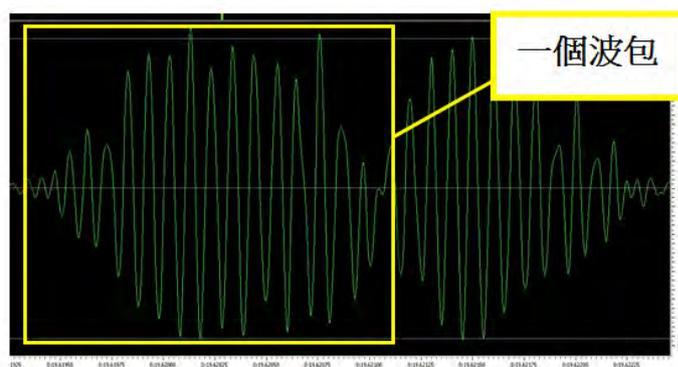
(圖四) 滴落高度差示意圖

(二) 水滴與鉛板溫度差：

鉛板溫度減去水滴溫度之值。

(三) 波包：

一個聲音強度先變大再變小之波群集合(如下圖五)。



(圖五) 波包圖形

(四) 波包數：

每一滴水滴撞擊鉛板即會產生一個聲波，而此聲波在分析軟體(Free Audio Editor 或 Audacity)中會以一個或數個波包的形式呈現，波包數為一個聲波所含的波包總數。

三、實驗步驟

(一) 前置實驗一：測定液滴質量

1. 步驟：

- (1) 啟動電子秤並置上一空的量筒。
- (2) 將電子秤歸零並開啟滴水裝置。
- (3) 將滴水裝置之旋鈕調整至適當位置以獲得一穩定的滴水速率。
- (4) 測量固定數量之水滴質量。
- (5) 重複步驟(1)~(4)，計算平均質量。

(二) 前置實驗二：製作不同口徑之微量滴管管套

1. 步驟：

- (1) 加工微量滴管管套。
- (2) 將管套裝在微量滴管上並滴出固定數量之水滴，並測量總質量。
- (3) 得知此管套滴出之水滴平均質量。
- (4) 重複步驟(1)~(3)，製作多種口徑之微量滴管管套。

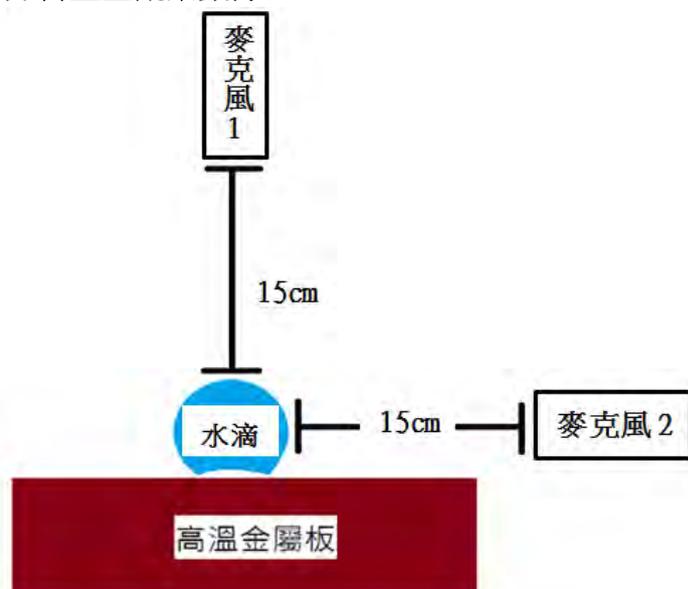
(三) 現象觀察實驗：由不同錄音位置觀察產生聲音之波形

1. 變因：

- (1) 操縱變因：麥克風錄音位置。
- (2) 應變變因：聲音波形。
- (3) 控制變因：滴落高度差 25 cm、水滴質量 0.017 g、鋁板溫度 215.0 ± 1.0 °C。

2. 步驟：

- (1) 分別將上方與側邊之麥克風定位(均與水滴撞擊處的直線距離為 15 cm)。(如下圖六)。利用錄音程式以調整兩麥克風至錄音振幅相同(利用點聲源正弦波進行校正)，以確定兩麥克風的起始條件皆相同。
- (2) 開啟滴水裝置，同時啟動錄音。
- (3) 滴落 20 滴水滴後，立刻停止滴水及錄音。
- (4) 分析並且觀察數據。



(圖六) 聲音訊號的波源數測定之實驗裝置側視圖

(四) 實驗一：探討水滴與鋁板溫度差對產生聲音頻率及波包數的影響

1. 變因：

- (1) 操縱變因：水滴與鋁板溫度差。
- (2) 應變變因：聲音頻率、波包數。
- (3) 控制變因：滴落高度差(實驗設定：5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、30 cm 共六種)、水滴質量 0.017 g。

2. 步驟：

- (1) 架設實驗裝置，麥克風定位(與水滴撞擊處鉛直距離相距 15cm 並固定)。
- (2) 進行前置實驗一設定水滴質量為 0.017 g，並用容器暫時阻止水滴滴落。
- (3) 微調加熱台旋鈕並確認此時鋁板的溫度已達穩定狀態。
- (4) 移除容器使水滴得以滴落至鋁板上，同時開始錄音。
- (5) 滴落 8 滴水滴後即結束錄音，並將儲水裝置加水至原先水位，改變溫度後重複步驟(3)~(5)。
- (6) 改變實驗設定的滴落高度差(5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、30 cm 共六種)，重複步驟(2)~(5)。分析(計算平均頻率及波包數)並觀察數據。

(五) 實驗二：探討滴落高度差對產生聲音頻率的影響

1. 變因：

- (1) 操縱變因：滴落高度差(實驗設定：2 cm、6 cm、10 cm、14 cm、18 cm、22 cm、26 cm、30 cm 共八種)。
- (2) 應變變因：產生聲音頻率。
- (3) 控制變因：水滴質量 0.017 g、鋁板溫度 250.0 ± 1.0 °C。

2. 步驟：

- (1) 架設實驗裝置，麥克風定位(與水滴撞擊處鉛直距離相距 15 cm 並固定)，設定滴落高度差為 2 cm。
- (2) 進行前置實驗一設定水滴質量為 0.017 g，並用容器暫時阻止水滴滴落至鋁板。
- (3) 微調加熱台旋鈕並確認此時鋁板的溫度已達到 250.0 ± 1.0 °C。
- (4) 移除容器使水滴得以滴落至鋁板上，並同時啟動錄音。
- (5) 滴落 8 滴水滴後即結束錄音，並將儲水裝置加水至原先固定之水位。
- (6) 改變實驗設定的滴落高度差，重複步驟(1)~(5)。分析(計算平均頻率)並觀察數據。

(六) 實驗三：探討鋁板大小對產生聲音頻率的影響

1. 變因：

- (1) 操縱變因：使用五種不同尺寸的鋁板。
- (2) 應變變因：聲音頻率。
- (3) 控制變因：水滴質量 0.017 g、鋁板溫度 250.0 ± 1.0 °C、滴落高度差 25 cm。

2. 步驟：

- (1) 架設實驗裝置，麥克風定位(與水滴撞擊處鉛直距離相距 15cm 並固定)。
- (2) 進行前置實驗一設定水滴質量為 0.017 g，並用容器暫時阻止水滴滴落至鋁板。
- (3) 微調加熱台旋鈕並確認此時鋁板的溫度已達 250.0 ± 1.0 °C。
- (4) 移除容器使水滴滴落至 A 鋁板上，同時啟動錄音。
- (5) 滴落 8 滴水滴後即結束錄音，並將儲水裝置加水至原先水位。
- (6) 將鋁板分別改為 B 板、C 板、D 板、E 板，重複步驟(2)~(5)。分析(計算平均頻率)並且觀察數據。

(七) 實驗四：探討不同液滴質量對產生聲音頻率的影響

1. 變因：

- (1) 操縱變因：水滴與鋁板溫度差。
- (2) 應變變因：聲音頻率。
- (3) 控制變因：滴落高度差 25 cm、水滴質量 0.060 g。

2. 步驟：

- (1) 架設所有實驗裝置：麥克風定位(與水滴撞擊處鉛直距離相距 15 cm 並固定)。
- (2) 進行前置實驗一設定水滴質量為 0.060 g，並用容器暫時阻止水滴滴落至鋁板。
- (3) 微調加熱台旋鈕並確認此時鋁板的溫度已達到穩定狀態。
- (4) 移除容器使水滴得以滴落至鋁板上，並同時啟動錄音。
- (5) 滴落 8 滴水滴後即結束錄音，並將儲水裝置加水至原先水位。
- (6) 改變溫度後重複實驗步驟(3)~(5)，並分析(計算平均頻率)且觀察數據。

(八) 實驗四之後置實驗(用於理論驗證)

1. 變因：

- (1) 操縱變因：水滴質量(實驗設定：0.024g、0.265g、0.29g、0.32g、0.36g、0.38g、0.41g 共七種)。
- (2) 應變變因：聲音頻率。
- (3) 控制變因：滴落高度差 25 cm、鋁板溫度 250.0 ± 1.0 °C。

2. 步驟：

- (1) 架設實驗裝置，麥克風定位(與水滴撞擊處鉛直距離相距 15 cm 並固定)，設定滴落高度差為 25cm。
- (2) 進行前置實驗二。
- (3) 將管套安裝上微量滴管。
- (4) 微調加熱台旋鈕並確認此時鋁板的溫度已達到 250.0 ± 1.0 °C。
- (5) 滴落 8 滴水滴後即結束錄音。
- (6) 更換微量滴管管套，重複步驟(3)~(5)。分析(計算平均頻率)並且觀察數據。

(九) 實驗六：探討其在於酒精濃度測量上的應用

1. 變因：

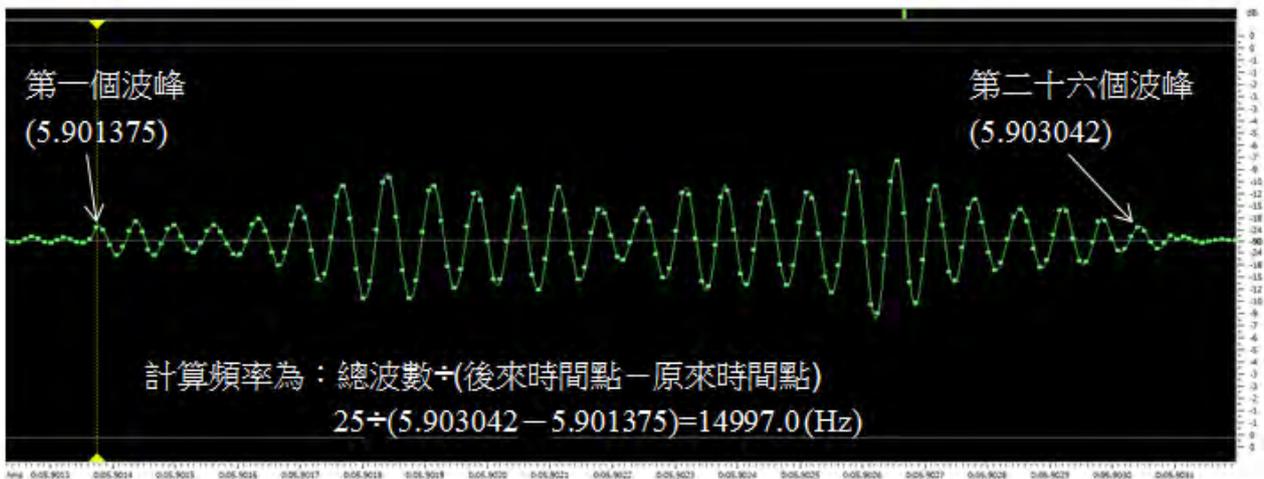
- (1) 操縱變因：酒精濃度(實驗設定：9.5%~95%，每增 10%一組，共十組)。
- (2) 應變變因：聲音頻率。
- (3) 控制變因：滴落高度差 25 cm、鋁板溫度 200.0 ± 1.0 °C、微量滴管管套口 (0.024g)。

2. 步驟：

- (1) 架設實驗裝置，麥克風定位(與水滴撞擊處鉛直距離相距 15 cm 並固定)，設定滴落高度差為 25cm。
- (2) 將未加工(0.024g)之管套套上微量滴管。
- (3) 配置固定濃度之酒精溶液。
- (4) 微調加熱台旋鈕並確認此時鋁板的溫度已達到 200.0 ± 1.0 °C。
- (5) 滴落 8 滴液滴後即結束錄音。
- (6) 重新調配不同濃度之酒精溶液，重複步驟(3)~(5)。分析(計算平均頻率)並且觀察數據。

(十) 平均頻率計算方法：

1. 以(圖七)中第一個波峰為首，至最後一個波峰為止，記錄其總波數，並計算其所經歷的時間差(最後一個波峰的時間點減去第一個波峰的時間點)，將總波數除以時間差可得出聲音頻率。
2. 將每組不同溫度差之實驗數據各取出八個聲波檔，並去除兩極端值留下六個聲波檔，求其平均值即為此相對溫度差所產生之聲音頻率。



(圖七) 平均頻率的計算方式

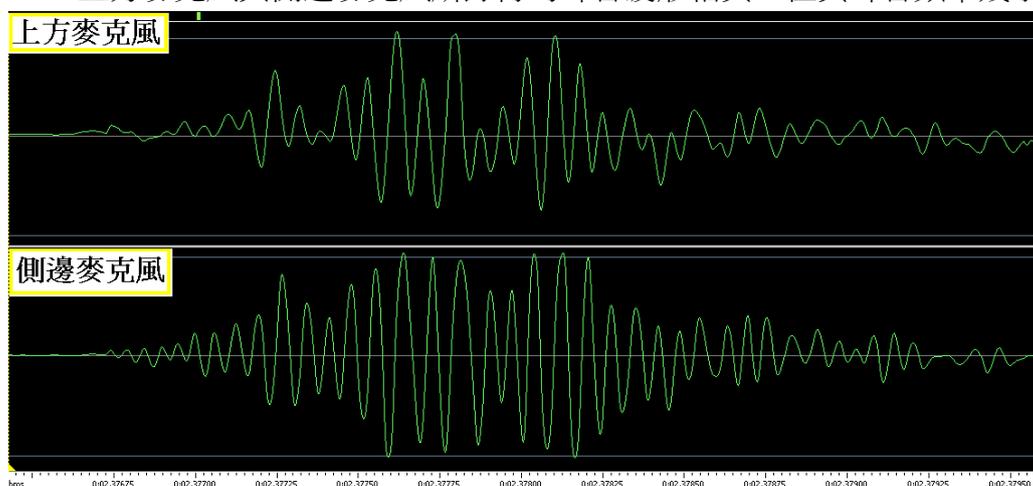
(十一) 平均波包數計算方法：

1. 實驗中的聲波，波包數大約一至十個，將波包數進行加總後並平均，取得此次實驗的平均波包數。

伍、研究結果

一、現象觀察實驗：由不同錄音位置觀察產生聲音之波形

上方麥克風與側邊麥克風所錄得的聲音波形相異。但其聲音頻率幾乎相同。



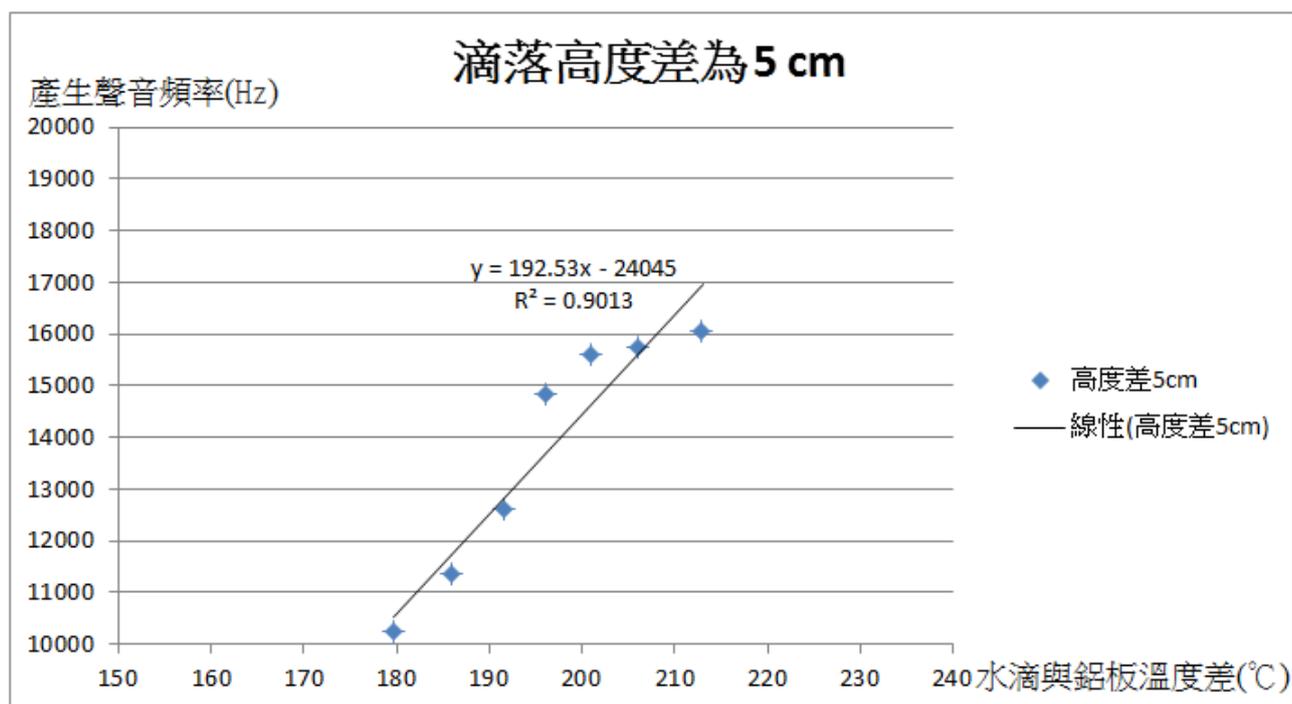
(圖八) 液滴滴落處的正上方和水平面處所偵測到的聲波波形

二、實驗一：探討水滴與鋁板溫度差對產生聲音頻率及波包數的影響

(一) 實驗溫度與產生聲音頻率的關係圖：

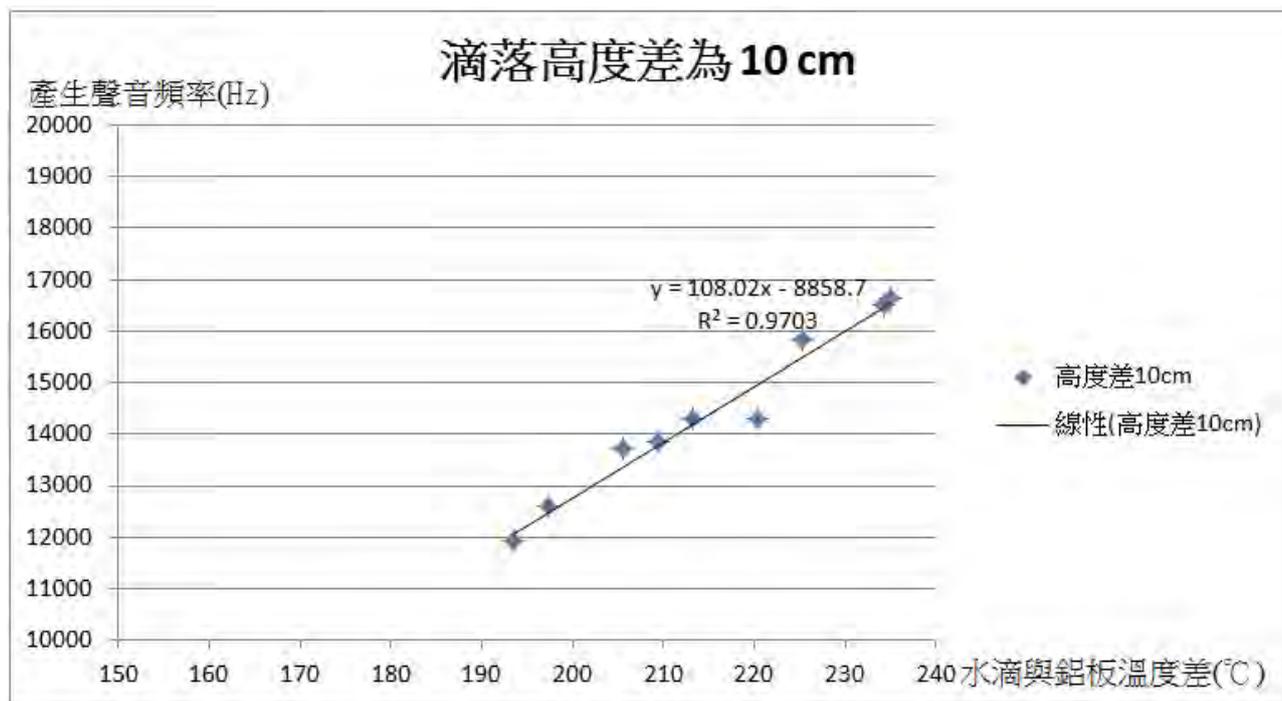
不論滴落高度差為多少，隨著水滴與鋁板溫度差的增加，聲音頻率與其具有正相關性並且會以線性的方式逐漸增加。其實驗結果如圖九至十四所示。

1. 滴落高度差：5 cm



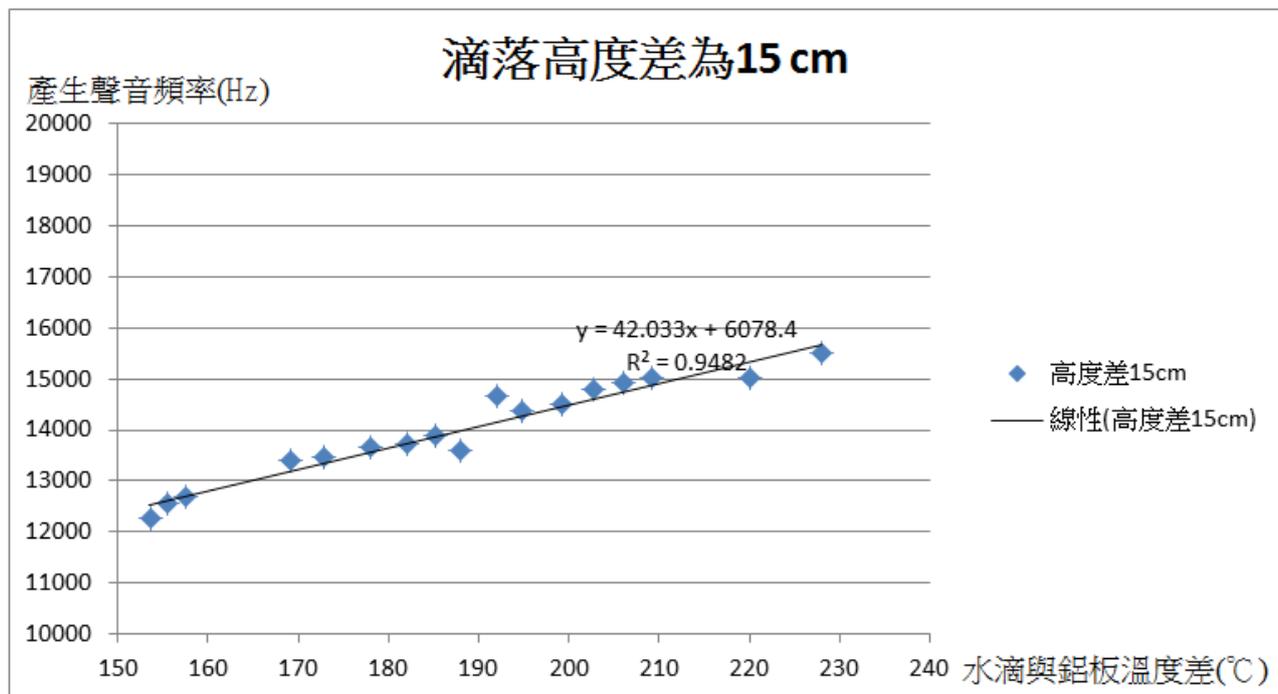
(圖九)

2. 滴落高度差：10 cm



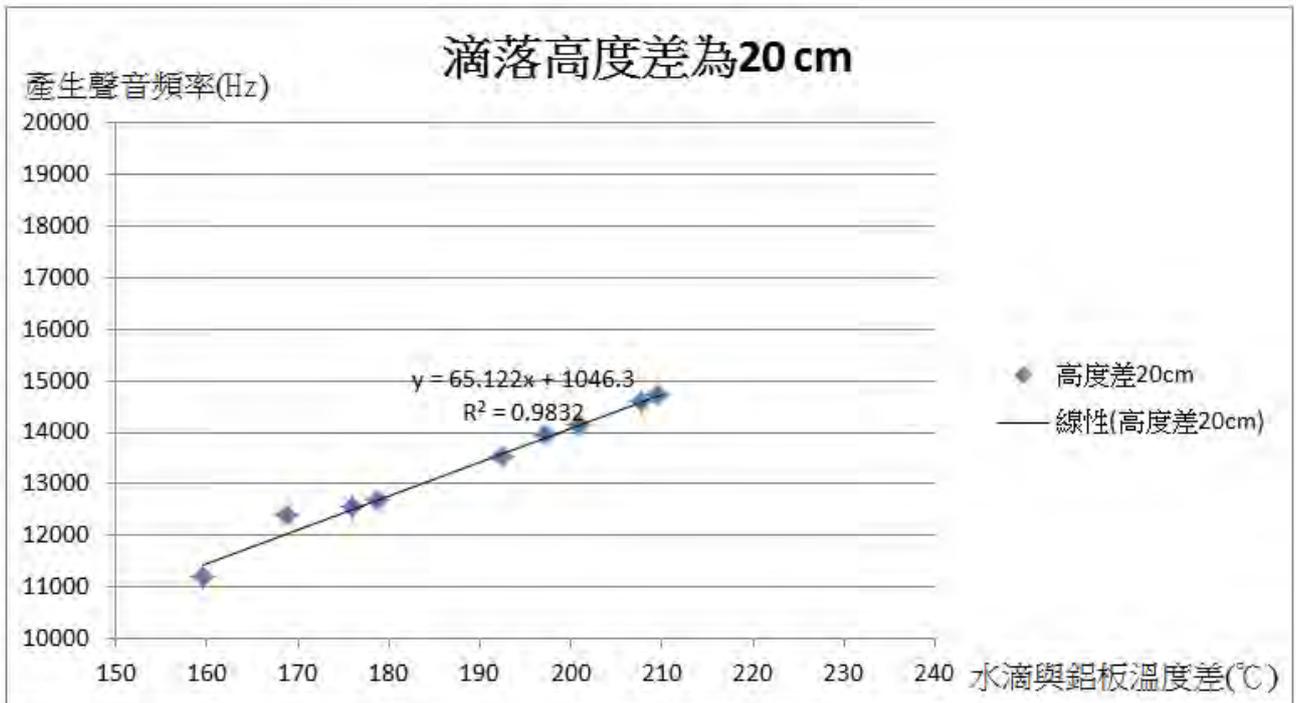
(圖十)

3. 滴落高度差：15 cm



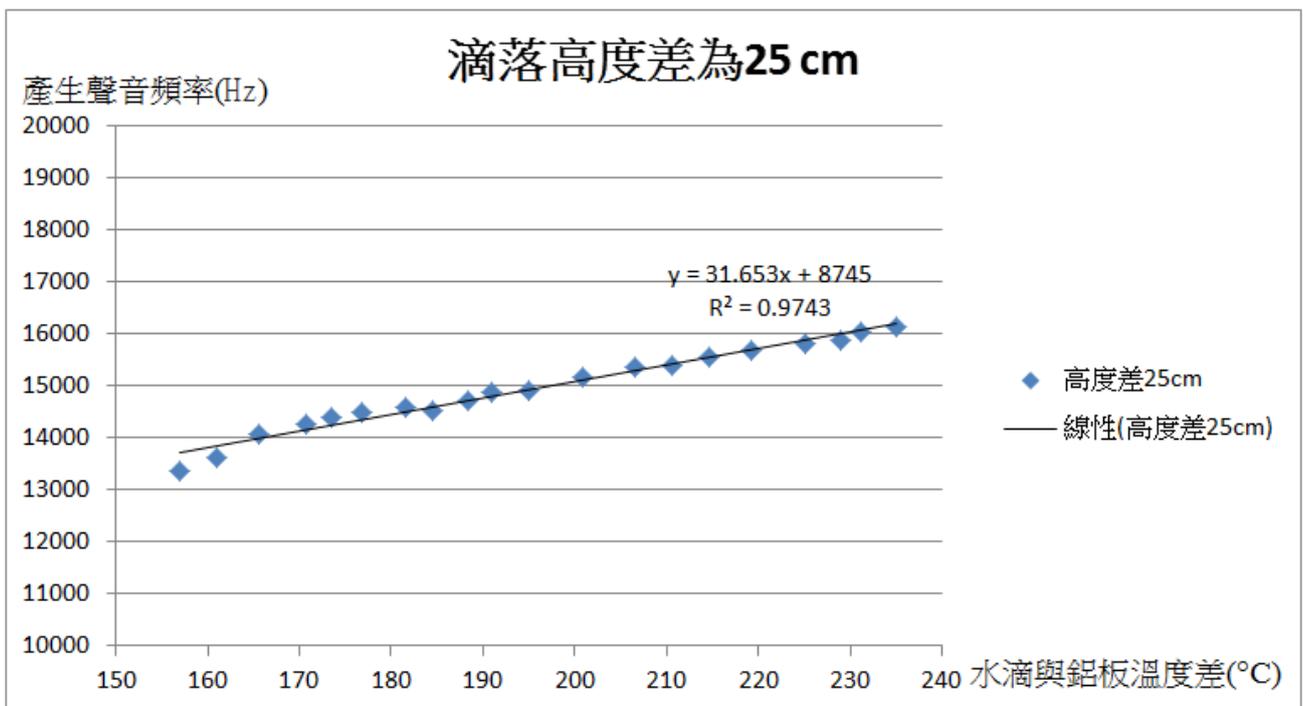
(圖十一)

4. 滴落高度差：20 cm



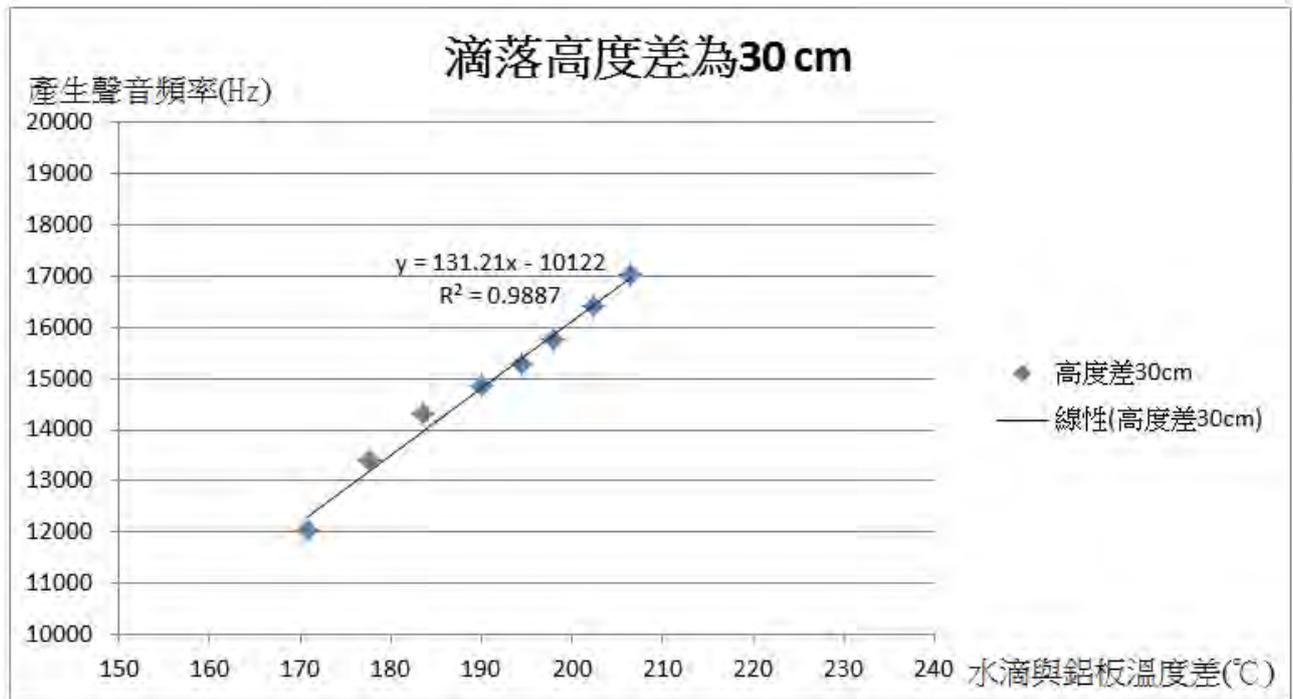
(圖十二)

5. 滴落高度差：25 cm



(圖十三)

6. 滴落高度差：30 cm

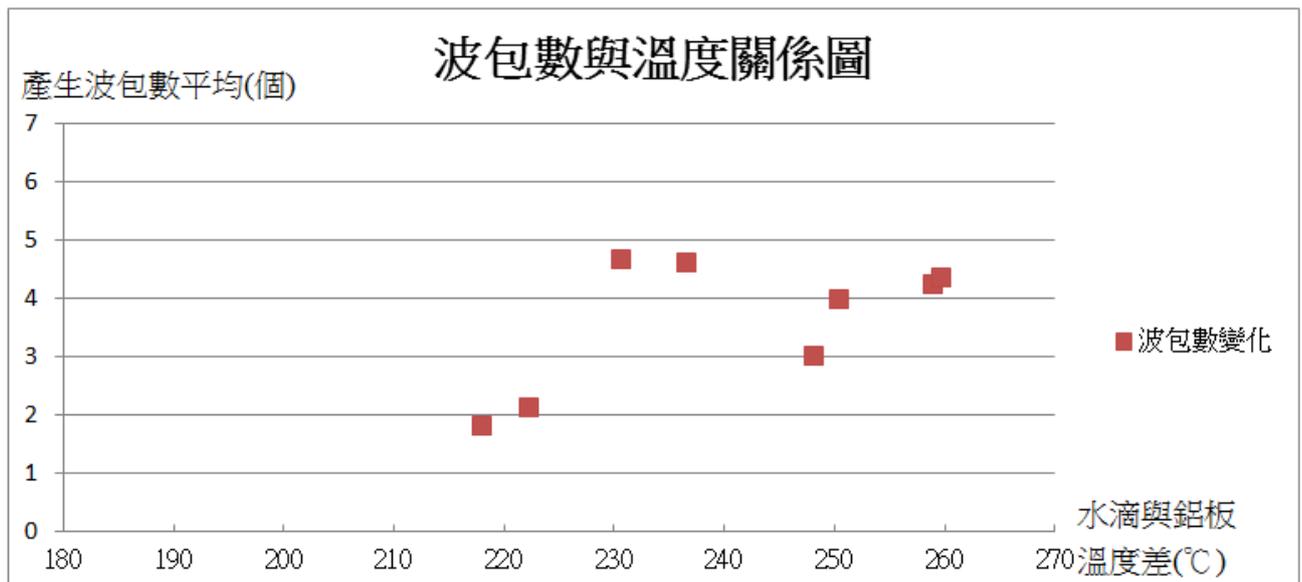


(圖十四)

(二) 水滴與鋁板溫度差與波包數關係圖

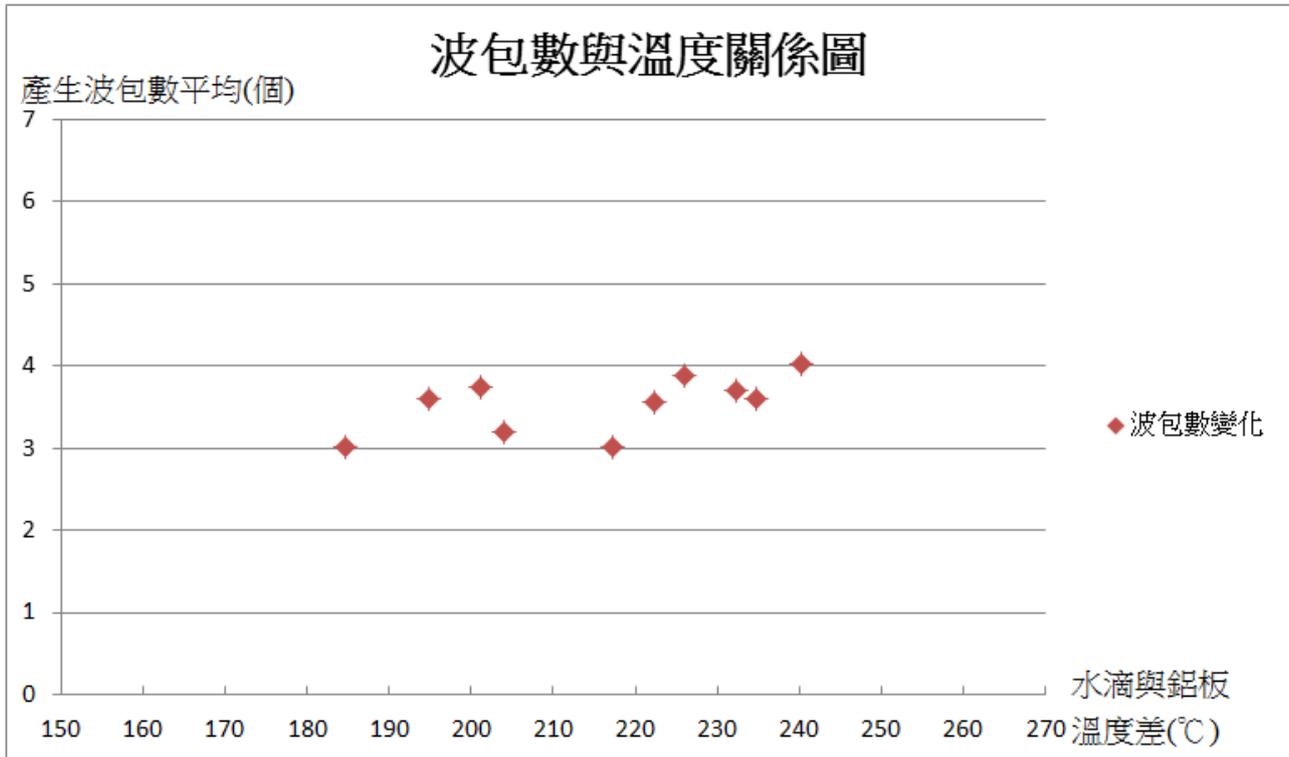
在實驗數據中會觀察到許多不同波包數的聲音波形，發現波包數隨著水滴與鋁板溫度差的變化而呈現隨機分佈的狀況，並無規律可言，且以產生 1~4 個波包數為主，實驗結果如圖十五至十七所示。

1. 滴落高度差：10 cm



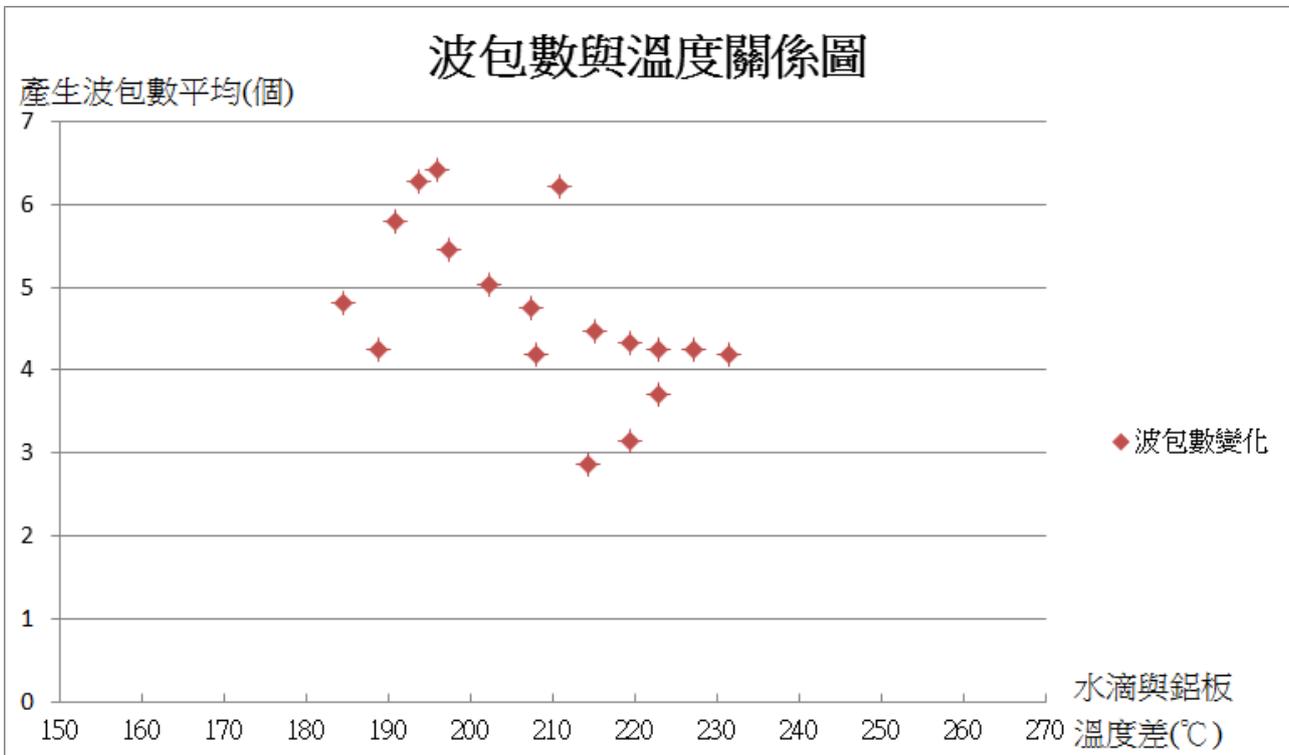
(圖十五)

2. 滴落高度差：20 cm



(圖十六)

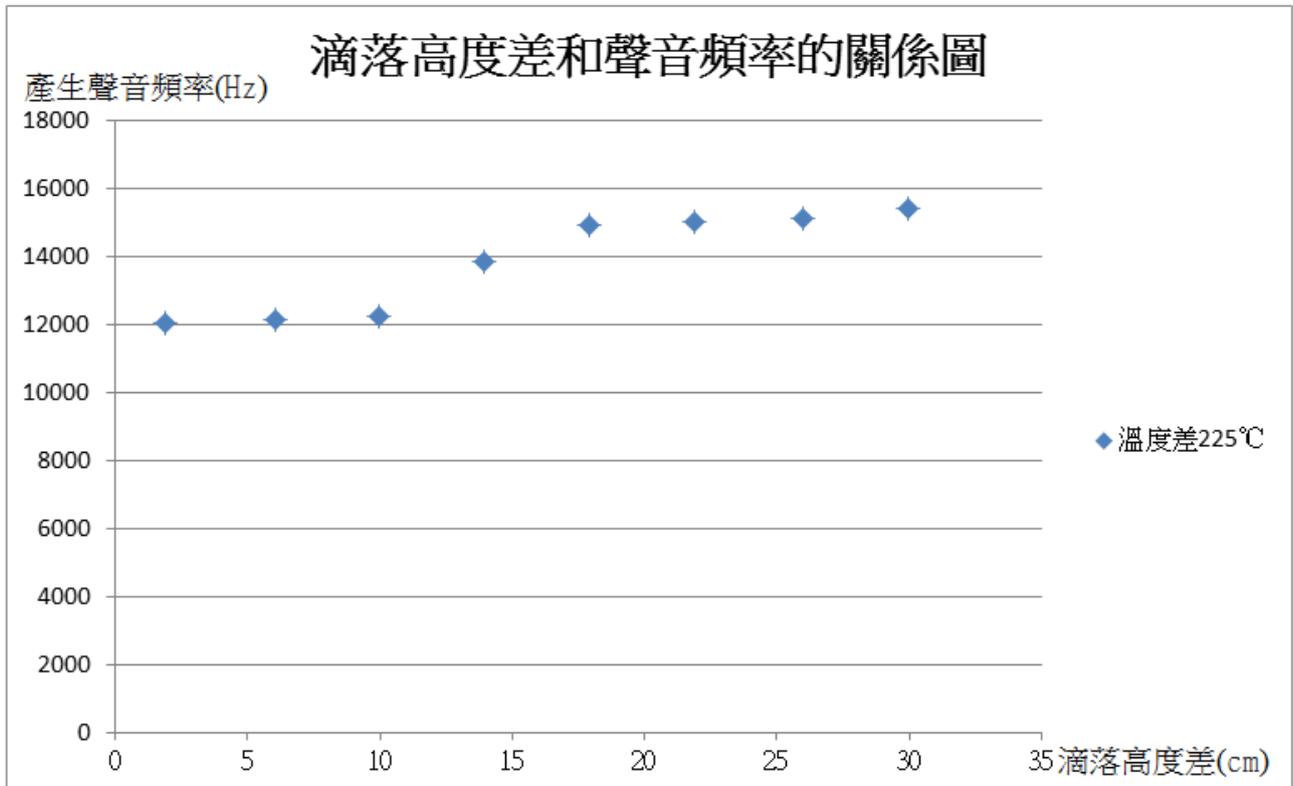
3. 滴落高度差：30 cm



(圖十七)

三、實驗二：探討滴落高度差對產生聲音頻率的影響

在水滴與鋁板溫度差為 250 °C，液滴質量為 0.017 g 時，發現當滴落高度差越高時，所產生的聲音頻率會有逐漸增加的趨勢，實驗結果如下圖十八所示。



(圖十八)

四、實驗三：探討鋁板大小對產生聲音頻率的影響

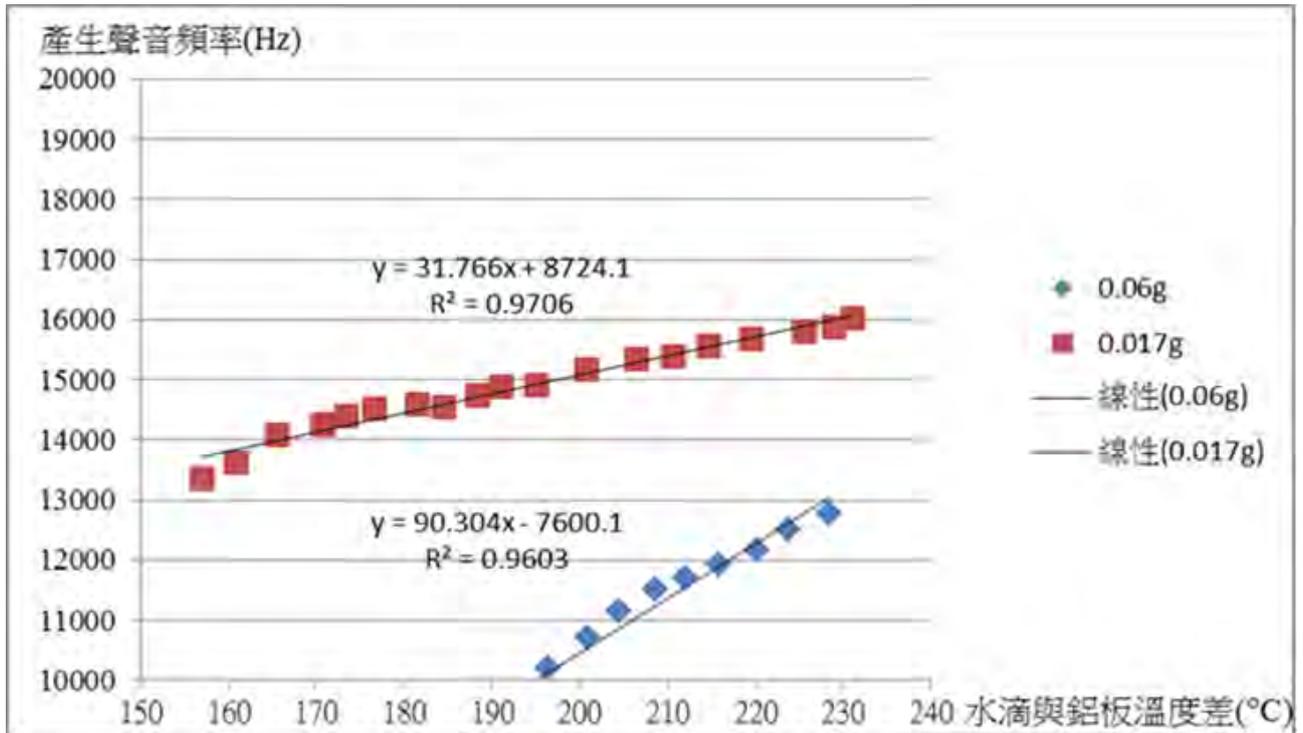
根據各種尺寸的鋁板得出的聲音頻率數據，其各自所測得的聲音頻率之差異最多僅差 1.3 %，並由實驗結果可知鋁板的大小及厚度對產生聲音頻率的平均值無任何影響(如下表一)。

鋁板編號	A	B	C	D	E
尺寸大小： 長*寬*厚(mm)	50*50*10	75*75*10	25*25*10	50*50*15	50*50*5
平均聲音頻率(Hz)	15914.4	15973.37	15765.46	15818.02	15899.16
標準差(Hz)	286.1825	376.5252	142.5156	480.0981	402.1302

(表一) 金屬鋁板尺寸與產生聲音頻率之表格

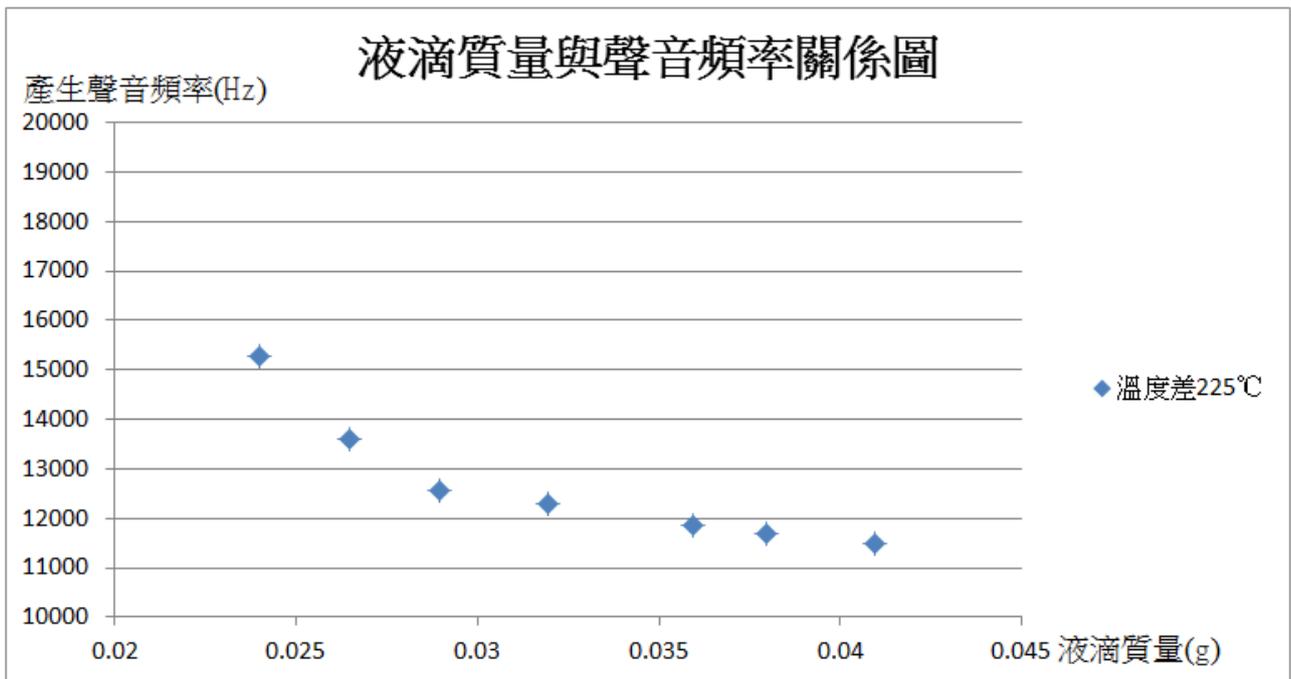
五、實驗四：探討不同液滴質量對產生聲音頻率的影響

由實驗結果可發現，即使液滴的質量有所不同，液滴撞擊鋁板所產生的聲音頻率亦會隨著水滴與鋁板溫度差增加而升高。



(圖十九) 在不同液滴質量的條件下，水滴與鋁板溫度差和產生聲音頻率的相依圖

六、實驗四之後置實驗(理論驗證)：

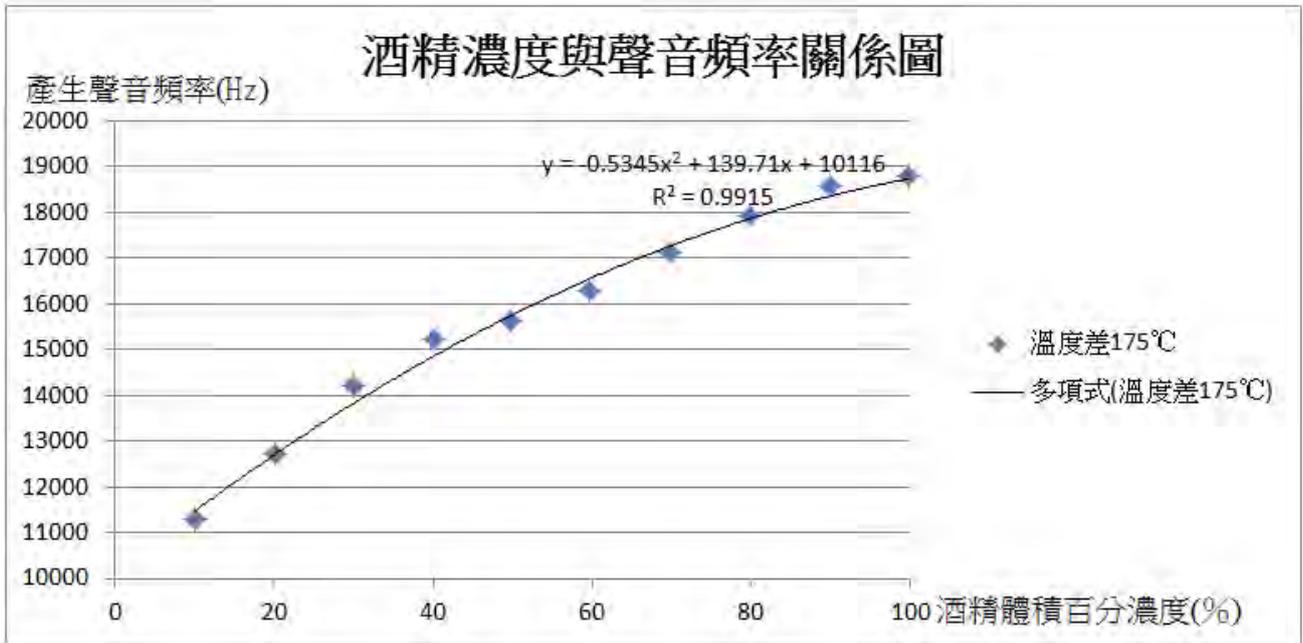


(圖二十)

在水滴與鋁板溫度差為 225°C 時，隨著液滴質量的增加，產生聲音頻率也隨著下降，但其並非線性關係。

七、實驗五：探討其在於酒精濃度測量上的應用

在水滴與鉛板溫度差為 175°C 時，隨著酒精體積百分濃度的上升，產生聲音頻率也逐漸上升，但兩者的確切關係尚待釐清。

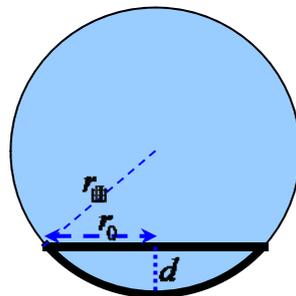


(圖二十一)

陸、討論

一、理論模型：

當一滴水滴撞擊高溫金屬板時，其底部將會因瞬間沸騰而被削去一部分水體。假設水滴為球形，被削去之水體厚度為 d ，被削去之水體截面半徑為 r_0 ，而削去的水體之下表面的曲率半徑為 $r_{\text{凹}}$ (如圖二十二所示)。

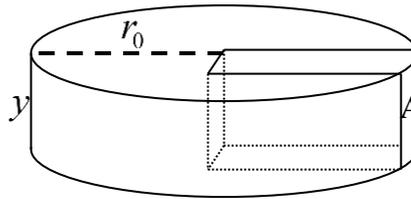


(圖二十二)

由圖一可推得上述三個長度間的關係為

$$r_0 = \sqrt{2r_{\text{凹}}d - d^2} \quad \text{--- ①}$$

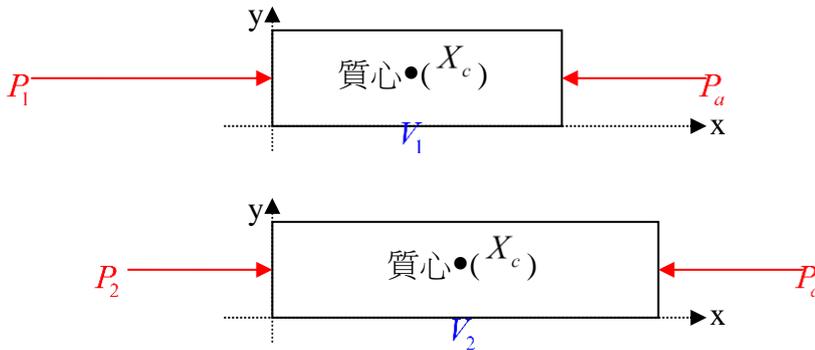
蒸發生成的水蒸氣會變成一氣層，假設氣層形狀是半徑 r_0 ，厚度 y 的圓柱形(如圖二十三)。



(圖二十三)

我們從氣層中獨立分析其中一塊長方體的部分(如圖二十三中虛線部分所示)，且令長方體的側面面積大小為 A 。若令整個氣層的蒸氣壓力為 P ，而外面大氣壓力為 P_a ，則 P 和 P_a 間的氣壓差會使長方體產生振動，因此長方體就成了發聲聲源，且其振動頻率即為產生的聲音頻率。

若我們令長方體左端點為座標原點，長方體質心水平座標為 X_c (如圖二十四)



(圖二十四)

長方體質心所受外力來源有二：一是外界大氣壓力形成的作用力，其方向向左，二是圓柱形氣層除長方體外其他部分施予長方體的作用力，其方向向右。令氣層形成的瞬間，其蒸氣壓力大小 $P = P_1$ ，且 $P_1 > P_a$ ，則長方體會開始向右膨脹，質心也開始向右位移。若經過一段時間 Δt 之後，蒸氣壓力大小減少至 P_2 且 $P_2 = P_a$ 時，代表質心所受外力合力為零，則此時質心位置應為振動過程的平衡點，而 Δt 即為振動週期的四分之一。

假設起初長方體體積為 V_1 ，質心位於平衡位置時長方體體積為 V_2 ，因振動時間極短，所以氣體的膨脹應為絕熱膨脹，所以上述壓力和體積會滿足下列關係：

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma = \text{常數} k - \textcircled{2}$$

接下來我們試著表示出質心振動平衡點的座標。假設質心在振動平衡點時的座標為 $X_{\text{平}}$ ，則長方體的體積為 $2X_{\text{平}}A$ ，將此結果帶入②式，則

$$P_2(2X_{\text{平}}A)^\gamma = k, \text{ 則 } X_{\text{平}} = \frac{1}{2A} \cdot \left(\frac{k}{P_2}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{1}{2A} \cdot \left(\frac{k}{P_a}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad \text{--- ③}$$

若振動過程的任一瞬間，長方體質心位置為 $X_{\text{平}} + \Delta X$ ，則此瞬間長方體體積為 $2A(X_{\text{平}} + \Delta X)$ ，而此時氣層壓力為 P ，則兩者間亦滿足絕熱膨脹方程式，即

$$P[2A(X_{\text{平}} + \Delta X)]^\gamma = k \quad \text{--- ④}$$

將③式代入④式後加以整理，可得任一瞬間氣層壓力值為

$$P = \frac{k}{\left\{2A \left[\frac{1}{2A} \cdot \left(\frac{k}{P_a}\right)^{\frac{1}{\gamma}} + \Delta X \right] \right\}^\gamma}$$

再將上式重新整理可得

$$P = P_a \left[1 + \left(\frac{k}{P_a}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot 2A\Delta X \right]^{-\gamma} \quad \text{--- ⑤}$$

假設 ΔX 極小，則可引用 $(1+a)^n \approx 1+na$ 的近似將⑤式調整為

$$P \approx P_a \left[1 - \gamma \left(\frac{k}{P_a}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot 2A\Delta X \right] \quad \text{--- ⑥}$$

接下來我們將氣層壓力與大氣壓力同時考慮後寫出長方體質心受力情形如下：

$$F = (P - P_a)A$$

我們將上式之氣層壓力 P 以⑥式帶入：

$$F = -P_a \left[\gamma \left(\frac{k}{P_a}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot 2A^2\Delta X \right] \quad \text{--- ⑦}$$

⑦式代表長方體質心所做的運動為簡諧運動，且受力和位移間的比例常數為

$$P_a \left[\gamma \left(\frac{k}{P_a} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot 2A^2 \right]$$

由簡諧運動頻率公式可得長方體的振動頻率為

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_a \left[\gamma \left(\frac{k}{P_a} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot 2A^2 \right]}{m}} \quad \text{--- ⑧}$$

我們將長方體質量 m 以 $A r_0 \rho_0$ 表示，其中 r_0 為長方體最初的長度， ρ_0 為最初長方體內氣體的密度。

另外，依據絕熱膨脹方程式，長方體最初體積與壓力會滿足下列關係：

$$P_1 V_1^\gamma = k, \text{ 則 } P_1 (r_0 A)^\gamma = k$$

將上述 k 與 m 的替換結果代入⑧式可得振動頻率為

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_a \left[\gamma \left(\frac{P_1 (r_0 A)^\gamma}{P_a} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot 2A^2 \right]}{r_0 A \rho_0}} = \frac{1}{2\pi r_0} \sqrt{\frac{2P_a \left[\gamma \left(\frac{P_1}{P_a} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right]}{\rho_0}}$$

由於 $P_1 M = \rho_0 R T$ (M 為氣體的分子量)，將 P_1 以 $\frac{\rho_0 R T}{M}$ 代入之

$$f = \frac{1}{2\pi r_0} \sqrt{\frac{2\gamma P_a^{1+\frac{1}{\gamma}}}{\rho_0 P_1^{\frac{1}{\gamma}}}} = \frac{1}{2\pi r_0} \sqrt{2\gamma \left(\frac{P_a}{\rho_0} \right)^{1+\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{M}{RT} \right)^{\frac{1}{\gamma}}} \quad \text{--- ⑨}$$

在水滴與金屬板溫度差相同時，上式的 T 會相同，且我們猜測 ρ_0 在該溫度下為定值，因此：

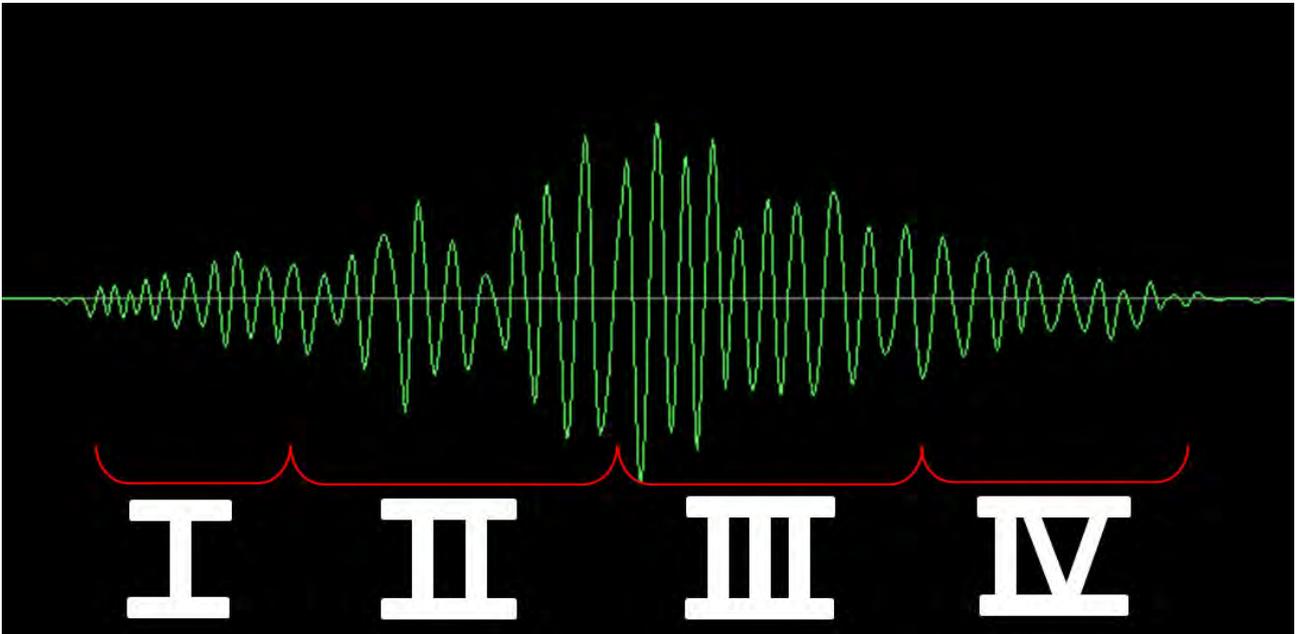
$f \propto \frac{1}{r_0}$ 我們將 r_0 以①式代入得：

$$f \propto \frac{1}{\sqrt{r_{\#} d - d^2}}, \text{ 且溫度不變時： } f^{-2} \propto r_{\#} d - d^2 \quad \text{--- ⑩}$$

二、聲音波形之分段分析

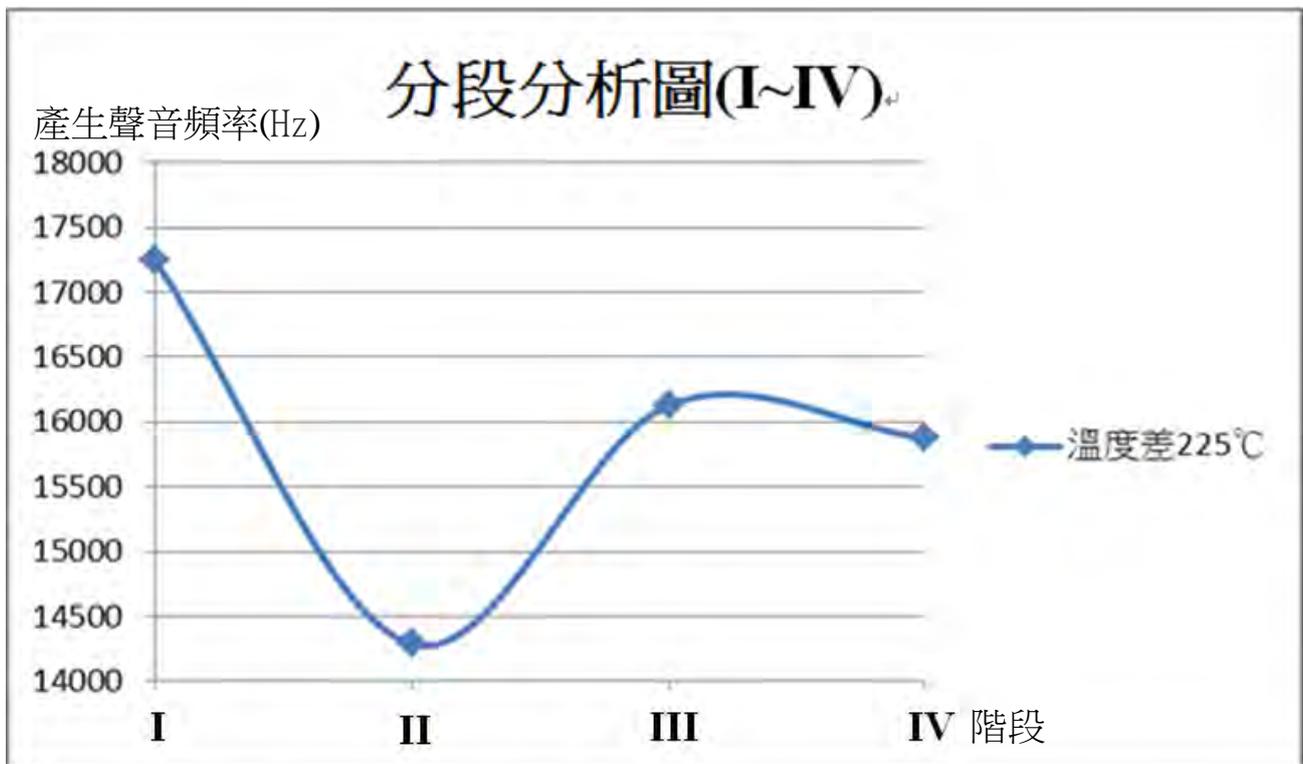
(一) 聲音波形(共四階段 I~IV)

下圖二十五為溫度差 225°C，滴落高度差 25cm 時的聲音波形。對於波形的觀察，我們發現波峰之間的疏密程度在同一個聲音中竟會有些微的變化，因此我們將一個聲波切成四階段(I~IV)，每階段為十個週期長度，各自進行平均頻率計算，發現其中發生很大的變化，遠遠超過我們數據的標準差。



(圖二十五)

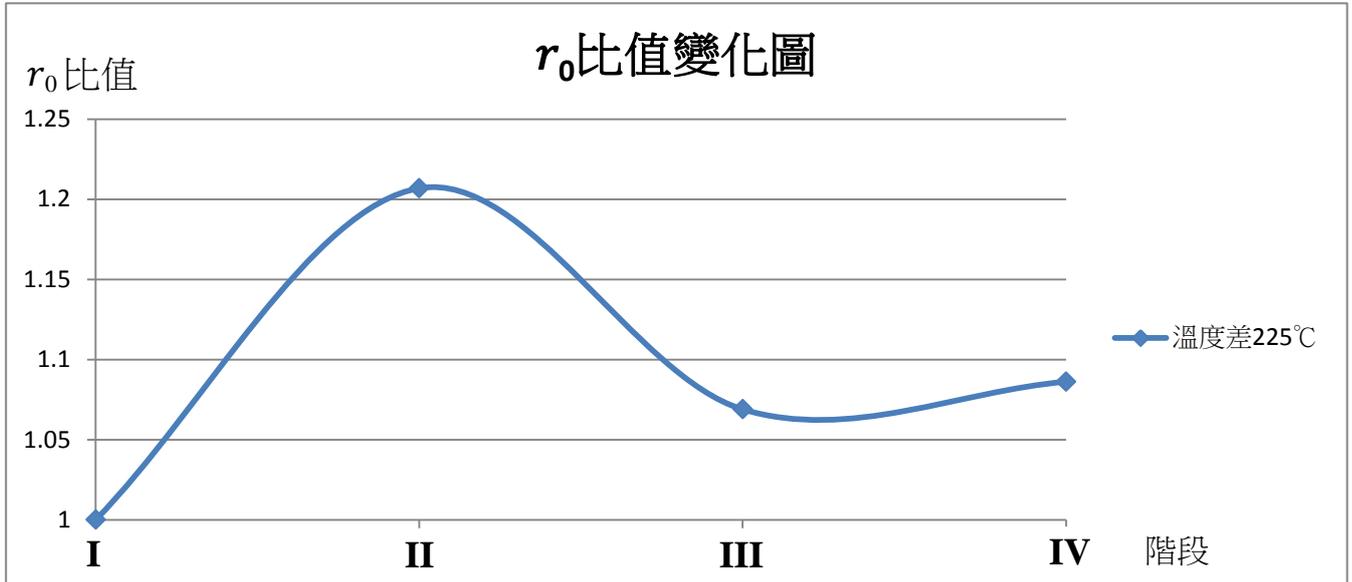
(二) 頻率變化趨勢



(圖二十六)

(三) r_0 變化趨勢

由先前理論推導過程，我們得知 $f \propto \frac{1}{r_0}$ ，所以我們將圖二十六中的頻率取導倒數，作為各階段 r_0 的大小，並以第一階段的 r_0 為基準，將各階段的 r_0 值與之相除求比值，可得圖二十七。



(圖二十七)

(四) 理論說明

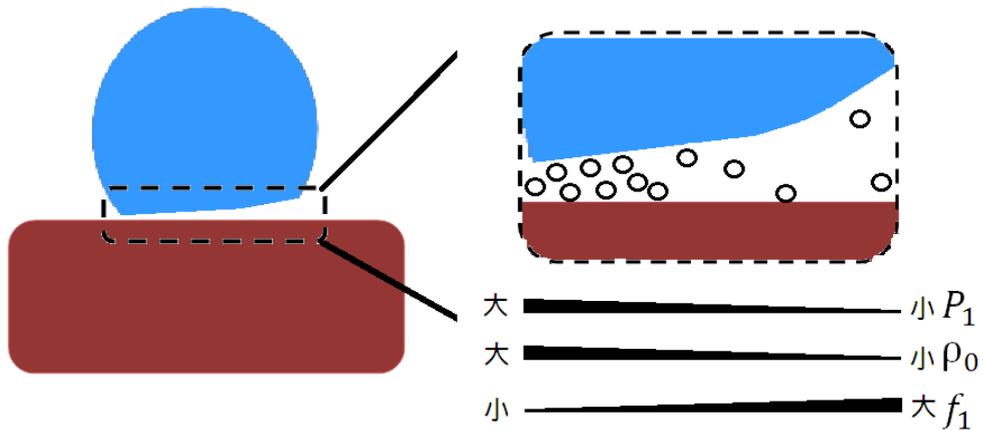
	I	II	III	IV
水滴形狀				
狀況說明	當液滴滴落撞擊鋁板瞬間，空氣層方才形成， r_0 為最小值，故聲音頻率最高。	當撞擊後，液滴形狀最扁，也就延展面積最大時， r_0 為最大值，故聲音頻率最低。	液滴形狀從最扁慢慢回復，由於本身彈性使得其形狀將超越球形而成為垂直卵形， r_0 漸小，故聲音頻率漸漸回升。	最後液滴形狀回復球形， r_0 漸大並趨近一定值，使得聲音頻率降低。

(表二)

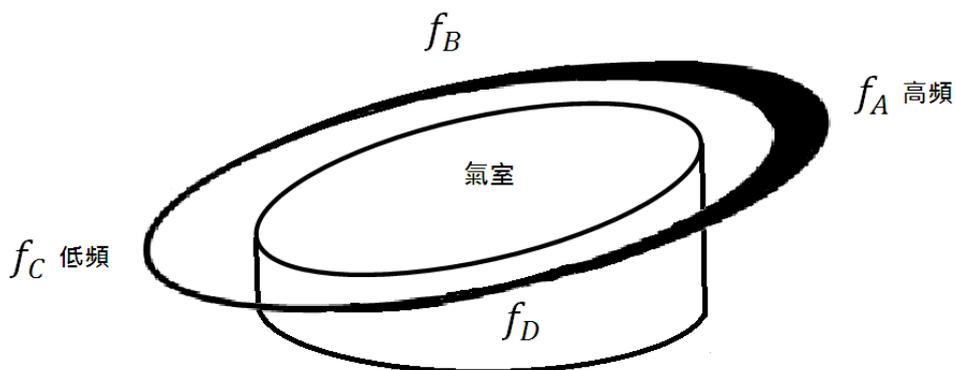
三、現象觀察實驗：由不同錄音位置觀察產生聲音之波形

(一) 原因解釋：

我們認為當液滴滴落至高溫鉛板上時，底部空氣層壓力有些微差異，造成產生聲音頻率亦稍微不同。此外，不同點至錄音位置的距離會有波程差，使得路得的聲音波形有所差異。

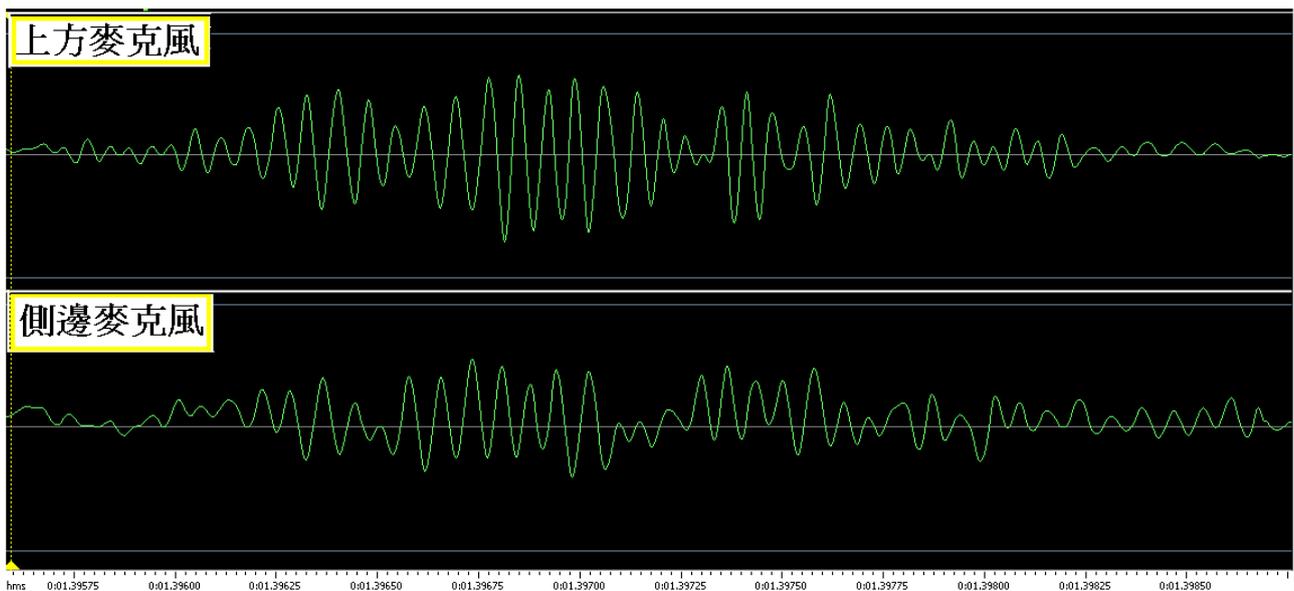


(圖二十八) 空氣層中不同位置壓力相異之微觀示意圖



(圖二十九) 氣室位置與聲音頻率高低之立體示意圖

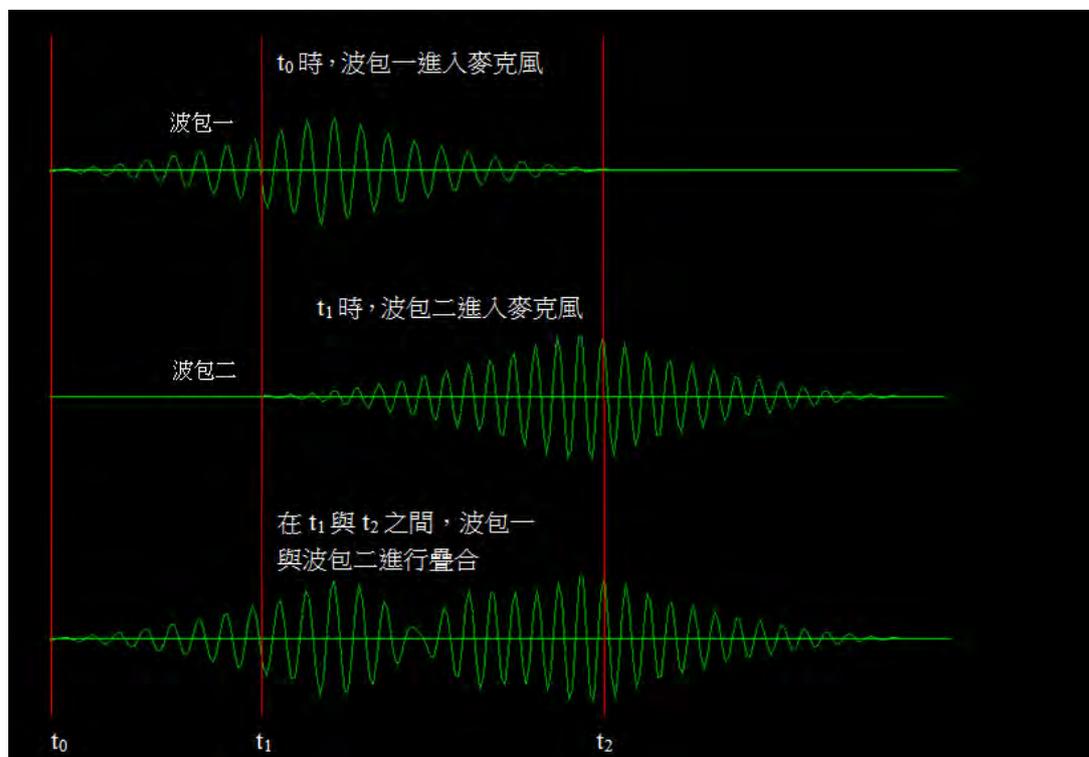
因為接觸點產生的聲音到達兩麥克風的時間相異，故干涉後的波形亦會有所差異，而這也是造成波包數隨機變化的主要原因，但是此兩聲音的頻率卻是幾乎相同的。由此可知，於水滴撞擊點的任一方位角處所量測的聲音頻率對於實驗結果並不會造成影響。而實驗時所得到的聲音波形如下頁圖三十。



(圖三十) 分別由上方麥克風和側邊麥克風所得到之聲音波形

(二) 由模擬程式 visual basic 6.0 討論聲波的波形

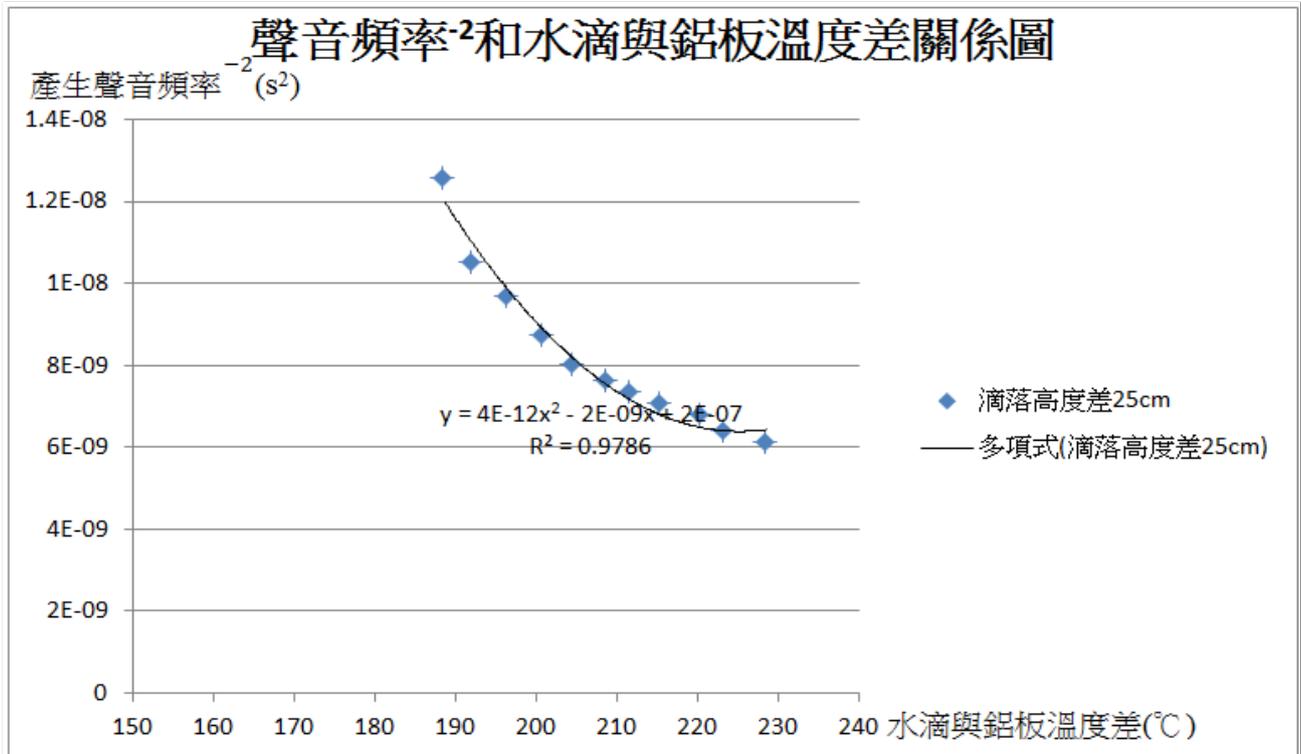
為了證實理論是正確的，我們利用 visual basic 6.0 撰寫一個程式，用以模擬兩個波包的干涉情形，利用程式進行兩個分別獨立的聲波在空間中的疊合。假設聲波一在 t_0 進入麥克風中，而聲波二在 t_1 進入麥克風中，這時將此兩個獨立的聲波在空間中疊合，於 t_1 至 t_2 期間，聲波一和聲波二會進行疊合，並產生部分地干涉而造成波形的改變，如下圖三十一。



(圖三十一) 利用 visual basic 6.0 模擬兩聲波在不同時間點進入相同麥克風時的疊合結果

四、實驗一：探討水滴與鋁板溫度差對產生聲音頻率及波包數的影響

當溫度愈高，空氣膜會愈快形成，而第⑨式中的 d 會愈小，頻率因此而上升。如果我們假設 T 及 ρ_0 不隨水滴與鋁板溫度差改變(不會有太大的變化量)，則根據第⑩式， f^{-2} 與 d 呈二次曲線變化關係。



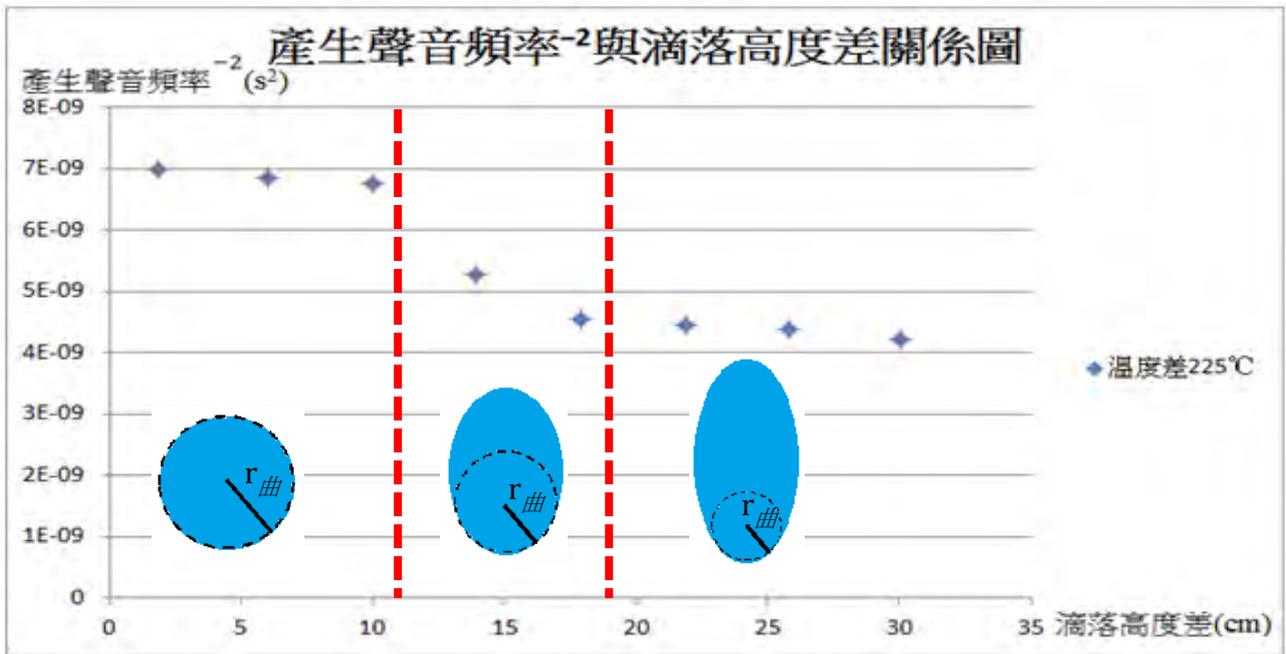
(圖三十二)

我們可以發現 f^{-2} 和水滴與鋁板溫度差呈二次曲線變化關係，因此我們猜測 d 和水滴與鋁板溫度差呈負向且變化關係。

五、實驗二：探討滴落高度差對產生聲音頻率的影響

滴落高度越高，水珠會因為受空氣阻力的影響而趨向流線形， $r_{\#}$ 會逐漸降低而趨向一定值，又根據第⑩式， f^{-2} 與 $r_{\#}$ 會有正向線性關係(假設溫度一樣時， d 一樣)。

(如下頁圖三十三)



(圖三十三)

可以看出 f^{-2} 會趨向一定值，表示 $r_{\#}$ 會逐漸趨向一定值。

六、實驗三：探討鋁板大小對產生聲音頻率的影響

觀察實驗結果，我們可以發現，就算鋁板的大小及厚度有所不同，產生聲音頻率仍是維持一定值。因為我們推測水滴的發音機制是由底部瞬間沸騰所致，所以鋁板尺寸的不同將不會影響產生聲音頻率。

七、實驗四：探討不同液滴質量對產生聲音頻率的影響

第⑩式 d 不隨液滴質量改變 (我們假設溫度一樣時， d 一樣)，若上式 d 極小，則

$f^{-2} \propto r_{\#}$ 又因：

$$m_{\text{水滴}} = \left(\frac{4}{3}\pi r_{\#}^3\right) \rho_{\text{水}}$$

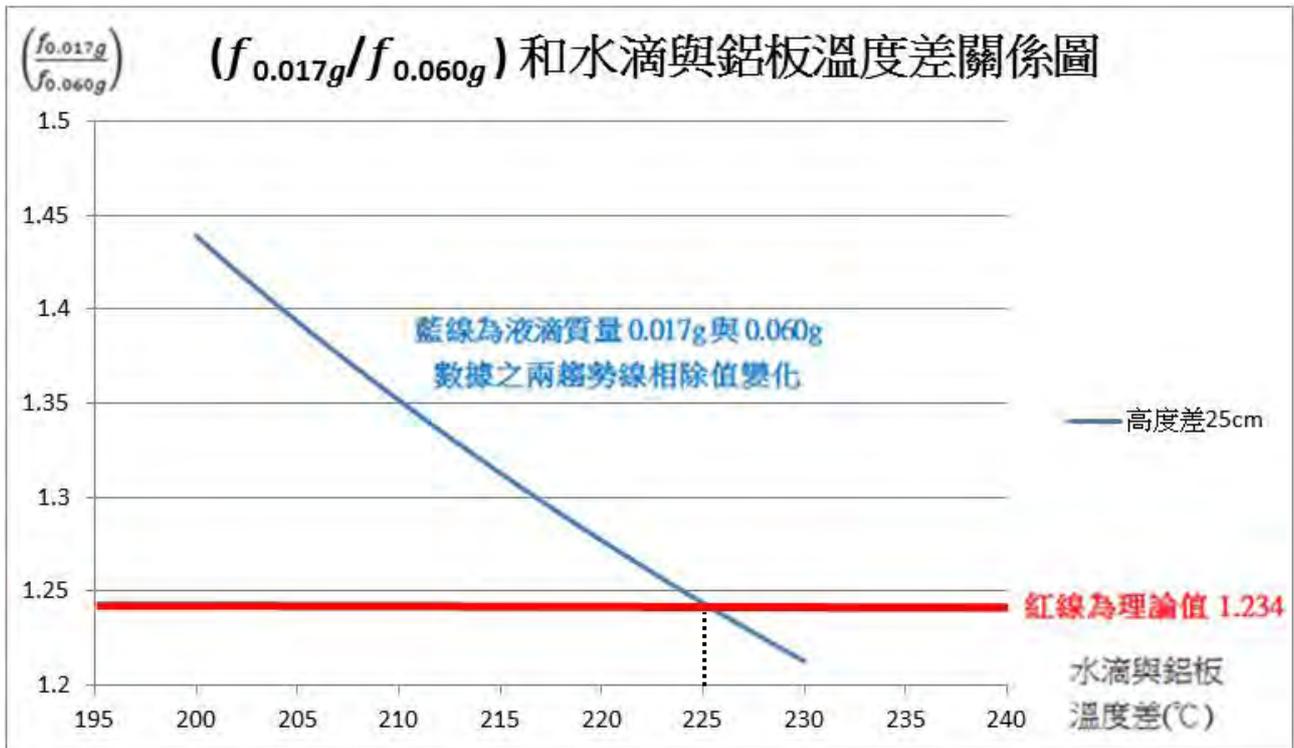
因此

$$f^{-2} \propto m_{\text{水滴}}^{\frac{1}{3}}, \text{ 且 } f \propto m_{\text{水滴}}^{\frac{1}{6}}$$

當水珠質量為 m 時，我們令其發音頻率為 f_m ，則

$$\frac{f_{0.017g}}{f_{0.060g}} = \sqrt[6]{\frac{0.060}{0.017}} = 1.234$$

我們觀察 $\left(\frac{f_{0.017g}}{f_{0.060g}}\right)$ 和水滴與鋁板溫度差之關係圖(如下頁圖三十四)：



(圖三十四)

我們可以看出當水滴與鋁板溫度差愈高時，頻率之比值會愈接近理論值。我們對此現象之解釋為：當水滴與鋁板溫度差愈低時，第⑩式之 d 會愈大(愈慢形成穩定空氣膜)，因此實驗值會略大於理論值。

為了驗證我們的理論，我們才會進行所謂的實驗四之後置實驗。在實驗過程中，我們使用最接近理論值的水滴與鋁板溫度差(225°C)，也就是上圖紅線與藍線的交點。

八、實驗四之後置實驗(理論驗證)：

根據第⑩式， f^{-2} 與 $r_{\text{曲}}$ 呈線性正向關係，又因：

$$m_{\text{水滴}} = \left(\frac{4}{3}\pi r_{\text{曲}}^3\right) \rho_{\text{水}}$$

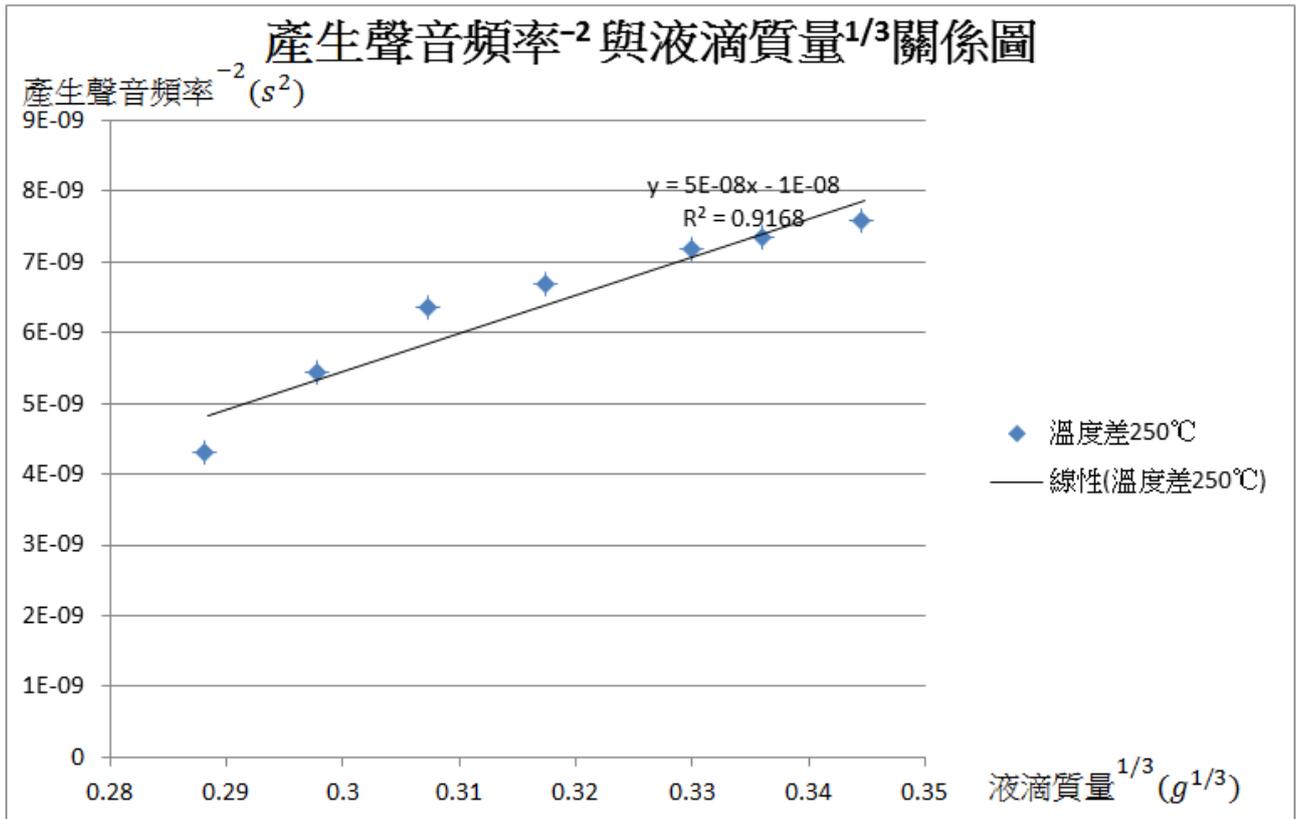
因此

$$r_{\text{曲}} = m_{\text{水滴}}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{4}{3}\pi \rho_{\text{水}}\right)^{-\frac{1}{3}}$$

將上式代入第⑩式，得：

$$f^{-2} \propto \left[d \left(\frac{4}{3}\pi \rho_{\text{水}}\right)^{-\frac{1}{3}} \right] \cdot m_{\text{水滴}}^{\frac{1}{3}} - d^2$$

從上式可以看出： f^{-2} 與 $m_{\text{水滴}}^{\frac{1}{3}}$ 呈線性正向關係(假設溫度相同時， d 也相同)。



(圖三十五)

可以看出其為一線性正向的關係。另外，由於

$$f^{-2} \propto \left[d \left(\frac{4}{3} \pi \rho_{\text{水}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \cdot m_{\text{水滴}}^{\frac{1}{3}} \cdot d^2,$$

我們得知 $\frac{1.000 \cdot 10^{-8}}{5.000 \cdot 10^{-8}} = \frac{d^2}{\left[d \left(\frac{4}{3} \pi \rho_{\text{水}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]} = \frac{d}{\left(\frac{4}{3} \pi \rho_{\text{水}} \right)^{\frac{1}{3}}}$ ，將 $\rho_{\text{水}}$ 以 1.0 g/cm^3 代入之，得：

$$d = 0.124 \text{ cm}$$

九、實驗五：探討其在於酒精濃度測量上的應用

由於得知酒精濃度與產生聲音頻率之關係，我們可以將此關係應用在酒精濃度的測量。只要提高滴水設備的穩定度，我們就可以減少聲音測量上的誤差，進而提高酒精濃度測量的精準度。

柒、結論

- 一、水滴發聲機制為其接觸鋁板瞬間底部沸騰氣爆所致。
- 二、聲音波形由於氣層密度不均造成多個相異聲源，而相異聲源產生之聲波在空間中疊合，所以收音位置影響聲音波形，但不影響聲音頻率。
- 三、各操縱變因與聲音頻率之關係
 - (一)液滴質量¹與聲音頻率⁻²成正向線性關係。
 - (二)鋁板大小及厚度不影響聲音頻率
 - (三)水滴與鋁板溫度差和聲音頻率⁻²成二次變化關係。
 - (四)隨著滴落高度差的增加，聲音頻率⁻²逐漸降低並趨向一定值。
- 四、水滴與鋁板溫度差不影響波包數。
- 五、酒精體積百分濃度與聲音頻率成正向關係。此現象可以利用於酒精濃度的測量。

捌、參考資料及其他

一、實驗檢討及未來展望

- (一) 我們希望能利用理論模型，在水滴與鋁板溫度差與聲音頻率之關係的方面，與實驗結果進行更進一步的結合或是佐證。
- (二) 我們希望藉由更高速的攝影機，能將水滴撞擊發聲的完整過程，連續的記錄下來，除了更方便了解其經過，更可以用來確認發聲機制。
- (三) 我們希望酒精濃度的測量能更精準並且能有實際的運用性。
- (四) 我們希望能夠利用化學反應，準確的測量水滴撞擊鋁板瞬間的接觸面積。

二、參考資料

(一) 中文部分：

1. 馬大猷、楊訓仁(1996)。**聲學漫談 RANDOM TALK ON ACOUSTICS**。臺北市：牛頓。
2. 陳光彥、陳藹然(2009)。**蒸發 (Vaporization) 與沸騰 (Boiling)**。2013年2月24日，取自：<http://case.ntu.edu.tw/hs/wordpress/?p=3363>

(二) 英文部分：

1. Lewis, C. E. (1983). *Thinking Physics is Gedanken Physics*. San Francisco, MA: Insight Press.
2. David, H. & Robert, R. (1962). *Physics part I. Physics part I: Waves in Elastic Media, Sound waves* (pp. 463-508). New York: John Wiley & Sons.

【評語】 040105

自設實驗探索水滴落於高溫鐵板瞬間所發出的聲音頻率及相關物性，實驗數據完整，並有簡單的理論討所及比對，作品完整。
若對物理機制能再深入探討，將會更好。