

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 化學科

第三名

030214

泡泡之聲-利用氣泡頻率測量雙氧水分解的反應
級數

學校名稱： 新北市立福和國民中學

作者：	指導老師：
國二 彭穎芊	丁亦男
國二 江昀蓁	李進興

關鍵詞： 反應級數、頻率、雙氧水

摘要

在傳統的反應速率實驗中，反應速率常以質量減少、體積變化或顏色變化等物理量作為指標。然而這些方法通常需仰賴精密儀器或誤差較大，又或者耗時較長。本研究嘗試以氣體生成反應中產生的氣泡聲頻率作為分析依據，結合聲音分析軟體 AUDACITY，從氣泡震盪頻率觀察反應速率及計算推導反應級數大小。此方法不僅器材簡便，也具備低成本，能提供一個簡單快速測量反應級數的方法。

壹、 研究動機

上課時，我們做了個用二氧化錳催化雙氧水的實驗。實驗後，我們開始想平常我們學到化學反應速率時，總是要量測氣體的體積、質量、濃度…，不過似乎都不是很容易且八年級的課程中我們甚至只用眼睛判斷顏色、亮度變化來測量反應速率，這也造成很大誤差，所以我們就想：如果反應產生的氣泡會發出「啵啵啵」的美妙聲音，那這些聲音是不是也藏著反應快慢的線索呢？剛好現在有一個叫做 AUDACITY 的免費錄音軟體，可以把聲音變成圖表，幫助我們看到氣泡出現的頻率。於是我們跑去跟老師討論，能不能把「電腦」作為「耳朵」，藉由現代科技作為準確、簡便測量反應速率的工具！

貳、 研究目的

本研究目的是想利用氧氣氣泡聲的頻率變化來探討該反應的反應級數與反應速率之關聯

- 1 是否可以利用 AUDACITY 測量雙氧水分解產生氧氣氣泡聲頻率，及氧氣氣泡聲頻率的大小。
- 2 何種反應條件測量雙氧水分解反應才能夠產生穩定且有效代表氣泡的頻率。
- 3 如何利用雙氧水分解產生氣泡的頻率變化來測量其反應級數。
- 4 利用產生氣泡的頻率變化來測量其他反應的反應級數

參、 研究設備及器材

一、藥品

雙氧水(35%)、二氧化錳(MnO_2)、鹽酸、氫氧化鈉、大理石、鎂帶、酚酞

二、器材

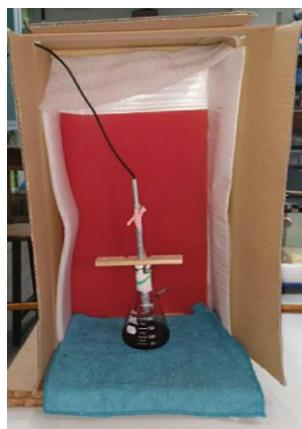
100mL 小錐形瓶、量筒、滴管、滴定管、溫度計、燒杯、麥克風、吸濾瓶、高腳杯、小鋼杯、pH 計

肆、 研究過程及方法

研究一：確認氧氣泡泡聲的頻率大小

研究步驟：

(一)將 45 毫升的水倒入吸濾瓶，然後將吸濾瓶置放於三面貼上海綿的紙箱中，並將簡易桌上型麥克風連接到電腦上，調整麥克風位置使其位於吸濾瓶口上方，並調整麥克風至適當高度。如下圖(一)。



圖(一) 實驗儀器及設備圖(此照片為作者自己拍攝)

- (二)打開 AUDACITY(免費音樂剪輯軟體)錄下聲音，再以 AUDACITY 內建頻率分析的功能測量出頻率。
- (三)取 40 毫升水，5 毫升雙氧水，1 克二氧化錳，倒入吸濾瓶，重複步驟(一)及(二)。
- (四)比較步驟(一)、(三)之結果，分析從 AUDACITY 測出的頻譜圖，從中找出最適合的代表產生氣泡聲音的頻率。

研究二：使用不同的杯子觀察聲音頻率的變化

研究步驟：

- (一)取 40 毫升水，5 毫升雙氧水，1 克二氧化錳，倒入 100 毫升燒杯，然後將吸濾瓶置放於三面貼上海綿的紙箱中，並將麥克風調整至燒杯口上方適當高度。
- (二)打開 AUDACITY 錄下聲音，再以 AUDACITY 內建頻率分析功能測量出頻率。
- (三)將 100 毫升的燒杯改換成小鋼杯、高腳酒杯，並重複步驟(一)及(二)。

研究三：改變雙氧水濃度觀察聲音頻率的變化

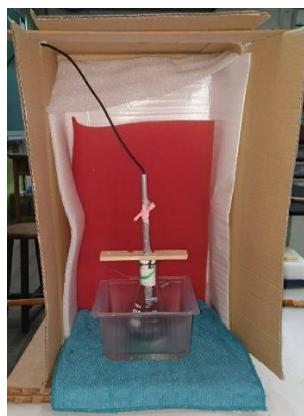
研究步驟：

- (一)取 40 毫升水，5 毫升雙氧水，1 克二氧化錳，倒入吸濾瓶，然後將吸濾瓶置放於三面貼上海綿的紙箱中，並將麥克風調整至燒杯口上方適當高度。
- (二)打開 AUDACITY 錄下聲音，再以 AUDACITY 內建頻率分析功能測量出頻率。
- (三)改取 35 毫升水，10 毫升雙氧水，1 克二氧化錳，重複步驟(一)及(二)。
- (四)改取 43 毫升水，2 毫升雙氧水，1 克二氧化錳，重複步驟(一)及(二)。

研究四：改變溫度觀察聲音頻率的變化

研究步驟：

- (一)取一塑膠盒內裝 320 克室溫水。
- (二)取 40 毫升室溫水，5 毫升雙氧水，1 克二氧化錳，倒入吸濾瓶，然後將吸濾瓶置放於三面貼上海綿的紙箱中，並將吸濾瓶放入步驟(一)塑膠盒內，調整麥克風至燒杯口上方適當高度。如下圖(二)。



圖(二) 實驗儀器及設備圖(此照片為作者自己拍攝)

- (三)打開 AUDACITY 錄下聲音，再以 AUDACITY 內建頻率分析功能測量出頻率。
- (四)改取 320 克 0°C 水放入塑膠盒內。
- (五)取 40 毫升 0°C 水，5 毫升雙氧水，1 克二氧化錳，倒入吸濾瓶，並將吸濾瓶放入步驟(四)塑膠盒內，調整麥克風至燒杯口上方適當高度。
- (六)打開 AUDACITY 錄下聲音，再以 AUDACITY 內建頻率分析功能測量出頻率。
- (七)改取 320 克 40°C 水放入塑膠盒內。
- (八)取 40 毫升 40°C 水，5 毫升雙氧水，1 克二氧化錳，倒入吸濾瓶，並將吸濾瓶放入步驟(四)塑膠盒內，調整麥克風至燒杯口上方適當高度。
- (九)打開 AUDACITY 錄下聲音，再以 AUDACITY 內建頻率分析功能測量出頻率。

研究五：以酒精度計測量雙氧水分解過程濃度變化

研究步驟：

(一)以酒精度計（刻度式）來測量的雙氧水濃度

- 1 配置重量百分濃度 35%、18.5%、12.6%、9.5%、7.7、6.4%、5.5%、4.8%、4.3%、3.9%的雙氧水。
- 2 用小滴管吸取少量 35%雙氧水溶液滴於酒精度計（刻度式）的稜鏡上並蓋上透明蓋板，然後以手機拍照，再從照片判讀出雙氧水濃度。
- 3 改取 18.5%、12.6%、9.5%、7.7、6.4%、5.5%、4.8%、4.3%、3.9%的雙氧水，重複步驟 2 實驗。

(二)以酒精度計測量雙氧水分解過程濃度變化

- 1 將 40 毫升室溫水及 5 毫升 35%雙氧水倒入 100mL 燒杯中混合均勻。
- 2 用小滴管吸取少量溶液滴於酒精度計（刻度式）的稜鏡上並蓋上透明蓋板，然後以手機拍照，再從照片判讀出雙氧水濃度。
- 3 以電子天平量取 1 克的二氧化錳倒入上述步驟 1 的燒杯中。
- 4 每隔 1 分鐘用小滴管吸取少量溶液滴於廚房紙巾上過濾掉二氧化錳後，再將過濾後的溶液以步驟 2 的方法測量雙氧水濃度。
- 5 重複步驟 4 的方法測量第 1~12 分鐘時雙氧水濃度。

研究六：鎂與鹽酸反應的反應級數

研究步驟：

(一)改變鹽酸濃度觀察氫氣泡泡聲頻率的變化

- 1 將 20 毫升 1.5M 的鹽酸倒入 100 毫升小錐形瓶中，然後將小錐形瓶放入裝有約 320 公克室溫水的塑膠盒內，再置放於三面貼上海綿的紙箱中。
- 2 將 10cm 鎂帶(約 0.125g)放入小錐形瓶後，然後將連接到電腦上的簡易桌上型麥克風置於小錐形瓶口上方適當高度處，如前圖(二)。接著打開 AUDACITY 錄下聲音，再以 AUDACITY 內建頻率分析功能測量出頻率。
- 3 改取 20 毫升 1M、0.75M、0.6M、0.3M 的鹽酸重複步驟(一)及(二)的實驗。

(二)測量鎂與鹽酸反應過程中剩餘鹽酸的濃度

- 1 在編號 1~5 號的 5 個 100 毫升小錐形瓶中，分別倒入 20 毫升 0.6M 的鹽酸。
- 2 量取 14cm 鎂帶(約 0.175g)共 5 段，並分別同時放入這 5 個 100 毫升小錐形瓶中，同時按下碼錶開始計時。
- 3 在反應開始後第 3 分鐘時，將編號 1 號小錐形瓶中剩餘鎂帶取出，接著將剩餘鹽酸取出 10 毫升，加入 3 滴酚酞後，再以 1M 的氫氧化鈉溶液滴定，並記錄滴定結果。
- 4 在反應開始後第 6、9、12、15 分鐘時，分別將編號 2~5 號的 4 個小錐形瓶重複步驟 3 的實驗。

(三)0.6M 鹽酸與鎂反應產生氫氣泡聲的頻率

- 1 將 20 毫升 0.6M 的鹽酸倒入 100 毫升小錐形瓶中，然後將小錐形瓶放入裝有約 320 公克室溫水的塑膠盒內，再置放於三面貼上海綿的紙箱中。

2 將 14cm 錄帶(約 0.175g)放入小錐形瓶後，然後將連接到電腦上的簡易桌上型麥克風置於小錐形瓶口上方適當高度處，如前圖(二)。接著打開 AUDACITY 錄下聲音，再以 AUDACITY 內建頻率分析功能測量出頻率。

研究七：大理石與鹽酸反應的反應級數

研究步驟：

(一)測量大理石與鹽酸反應產生二氧化碳氣泡聲的頻率

1 將 20 毫升 1M 的鹽酸倒入 100 毫升小錐形瓶中，然後將小錐形瓶放入裝有約 320 公克室溫水的塑膠盒內，再置放於三面貼上海綿的紙箱中。

2 取一塊大理石以電子天平秤量質量後，將此大理石放入小錐形瓶後，然後將連接到電腦上的簡易桌上型麥克風置於小錐形瓶口上方適當高度處，如前圖(二)。接著打開 AUDACITY 錄下聲音，再以 AUDACITY 內建頻率分析功能測量出頻率。

(二)測量大理石與鹽酸反應過程中剩餘鹽酸的濃度

1 在編號 1~4 號的 4 個 100 毫升小錐形瓶中，分別倒入 20 毫升 1M 的鹽酸。

2 取五塊大理石以電子天平秤量質量後，將這五塊大理石分別同時放入這 4 個小錐形瓶後，按下碼表開始計時。

3 在反應開始後第 2 分鐘時，將編號 1 號小錐形瓶中的剩餘大理石取出，接著將剩餘鹽酸取出 10 毫升，加入 3 滴酚酞後，再以 1M 的氫氧化鈉溶液滴定，並記錄滴定結果。

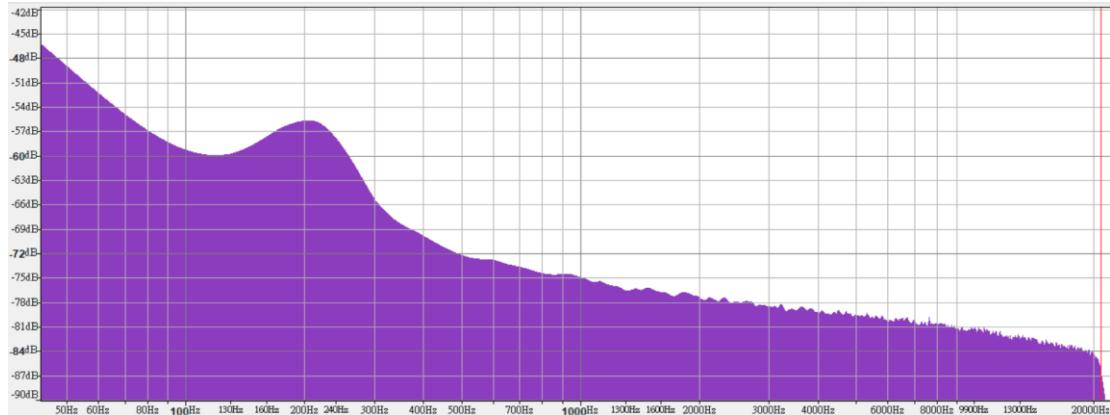
4 在反應開始後第 4、6、9 分鐘時，分別將編號 2~5 號的 3 個小錐形瓶重複步驟 3 的實驗。

研究結果與討論

研究一：確認氧氣泡泡聲的頻率大小

結 果：

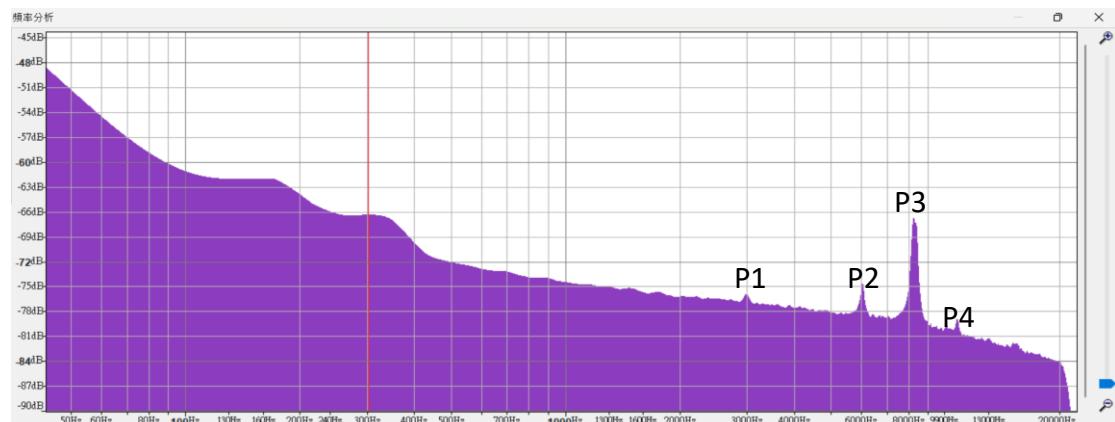
(一)用 AUDACITY 軟體測出步驟(一)中背景噪音的頻譜圖如下圖(三)。



圖(三) 背景噪音頻譜圖

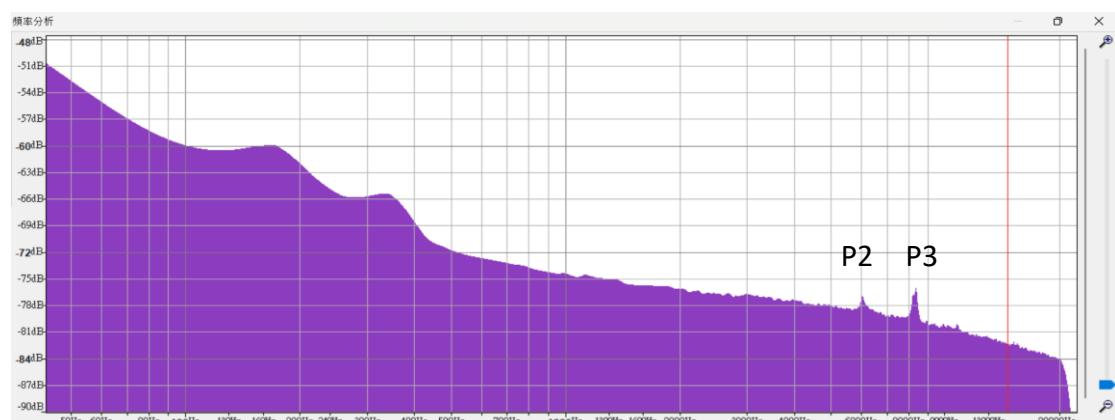
(二)用 AUDACITY 軟體測出步驟(三)中雙氧水分解產生氧氣泡泡聲的頻譜圖。

1 雙氧水剛開始分解產生氧氣泡泡聲的頻譜圖如下圖(四)。



圖(四) 雙氧水剛開始分解產生氧氣泡泡聲的頻譜圖

2 雙氧水分解一段時間後產生泡泡聲的頻譜圖如下圖(五)。



圖(五) 雙氧水分解一段時間後產生氧氣泡泡聲的頻譜圖

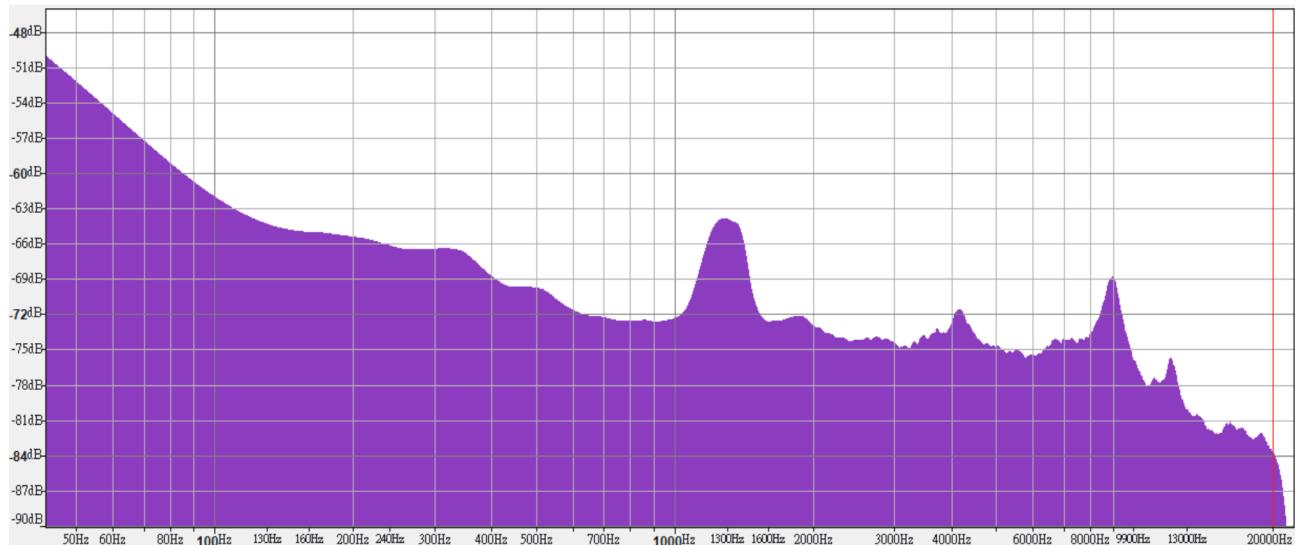
(三)比較圖(三)、(四)發現當雙氧水分解產生氣泡時，會產生四個比較明顯的頻率(P1~P4)，而這四個頻率的大小大約為 3000Hz(P1)、6000Hz(P2)、8000Hz(P3)及 10000Hz(P4)，而且。其中以 P3(約 8000Hz)的峰線能量最強、響度最大。

(四)比較圖(四)及(五)可以發現隨著雙氧水分解、濃度逐漸下降，其產生氣泡聲的響度也會逐漸變小，尤其到反應末段 P1、P4 的能量很快衰減到在頻譜圖上看不到峰線，但 P2、P3 仍然有夠強的響度可以判別出聲音的頻率，所以接下的實驗，我們主要以偵測、分析 P3 或 P2 這兩個「指標頻率」為主。

研究二：使用不同的杯子觀察聲音頻率的變化

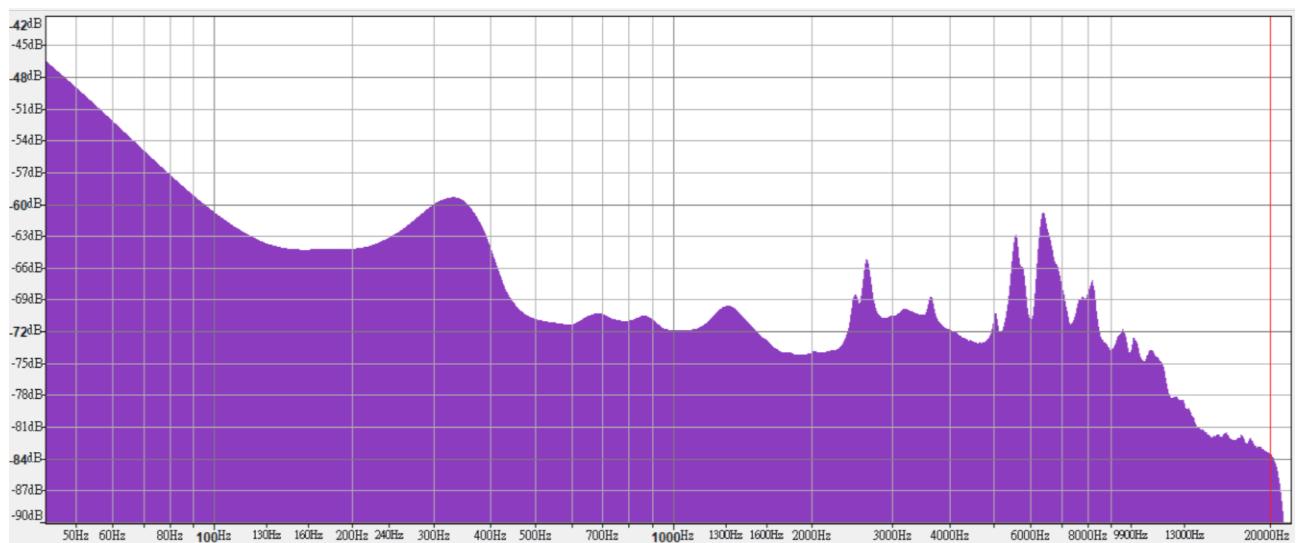
結果：

(一)雙氧水在 100 毫升燒杯中分解產生氣泡聲的頻譜圖下圖(六)。



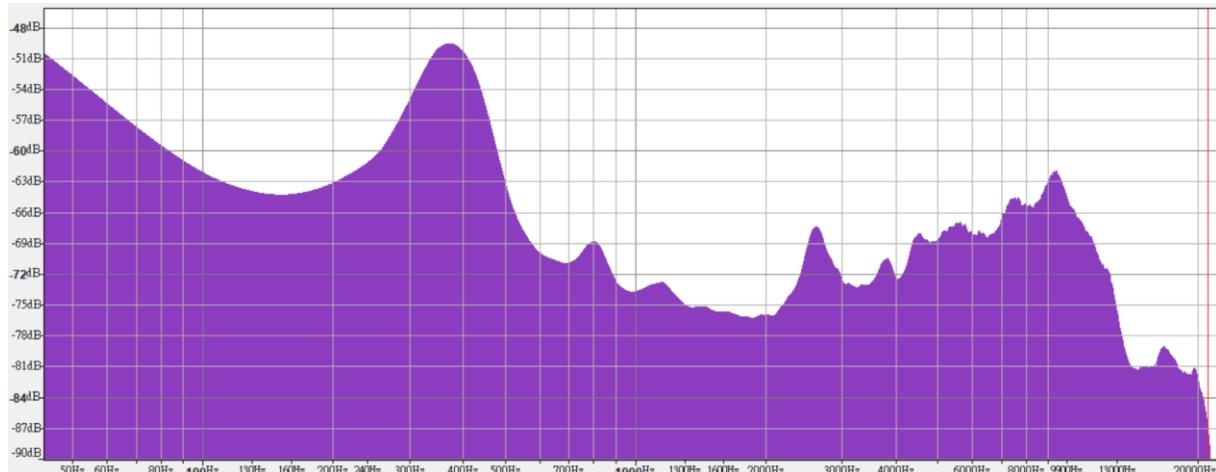
圖(六) 雙氧水在 100 毫升燒杯中分解產生氣泡聲的頻譜圖

(二)雙氧水在小鋼杯中分解產生氣泡聲的頻譜圖如下圖(七)。



圖(七) 雙氧水在小鋼杯中分解產生氣泡聲的頻譜圖

(三)雙氧水在高腳酒杯中分解產生氧氣泡泡聲的頻譜圖如下圖(八)。



圖(八) 雙氧水在高腳酒杯中分解產生泡泡聲的頻譜圖

(四)比較圖(四)、(六)、(七)及(八)可以發現雙氧水在 100 毫升燒杯、小鋼杯、高腳酒杯中分解產生泡泡聲的頻率鋒線彼此重疊且雜亂不利判讀，故後續實驗我們主要以吸瀘瓶或形狀相似的錐形瓶作為反應進行的容器。

研究三：不同濃度雙氧水分解產生泡泡聲音頻率的變化

結 果：

(一)不同濃度雙氧水分解產生泡泡聲頻率與時間數據及關係圖

1 雙氧水(40 毫升水+5 毫升雙氧水+1 克二氧化錳)分解過程測得泡泡聲頻率與時間數據如下表(一)、關係圖如下圖(九)。

表(一) 雙氧水分解產生泡泡聲頻率與時間數據

時間(分)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
頻率(Hz)	5988	5964	5956	5944	5931	5927	5916	5911	5910	5903	5897
時間(分)	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11
頻率(Hz)	5894	5891	5889	5886	5886	5885	5880	5878	5879	5880	5880

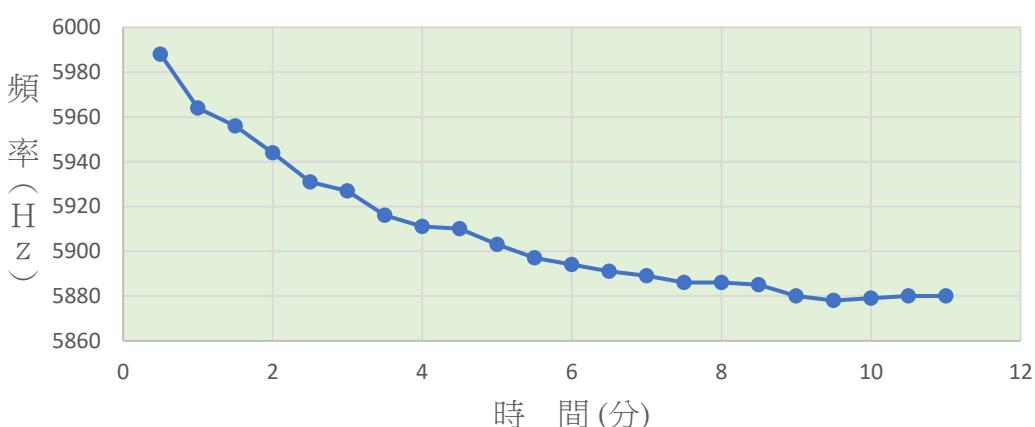


圖 (九) 雙氧水分解產生泡泡聲頻率與時間關係圖
(40mL水+5mL雙氧水+1g二氧化錳)

2 雙氧水(35mL 水+10mL 雙氧水+1g 二氧化錳)分解過程測得泡泡聲頻率與時間
數據如下表(二)、關係圖如下圖(十)。

表(二) 雙氧水分解產生泡泡聲頻率與時間數據

時間(分)	1	2	3	4	5	6	7	8
頻率(Hz)	5941	5946	5968	6027	6058	6071	6085	6083
時間(分)	9	10	11	12	13	14	15	16
頻率(Hz)	6082	6077	6078	6069	6063	6064	6064	6044



圖 (十) 雙氧水分解產生泡泡聲頻率與時間關係圖
(35mL水+10mL雙氧水+1g二氧化錳)

3 雙氧水(43mL 水+2mL 雙氧水+1g 二氧化錳)分解過程測得泡泡聲頻率與時間
數據如下表(三)。

表(三) 雙氧水分解產生泡泡聲頻率與時間數據

時間(分)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	
頻率(Hz)	6095	6077	6065	6068	6066	6063	響度太小無法判讀頻率

(二)圖(九)及圖(十)的比較

1 由圖(九)可以看到雙氧水分解產生泡泡的頻率會隨著時間逐漸變小，最後趨於定值。

(1) 2006 年國際科展物理科「都是氣泡惹的禍」這篇說明書中有三點結論：

a 液體內部存在有氣泡時會使杯子的發聲頻率變高。

b 液體表面之擾動會使杯子的發聲頻率變低。

c 液面上存有泡沫時會使杯子的發聲頻率變低。

(2) 當雙氧水剛開始分解時，因為雙氧水濃度較大，產生泡泡較快、較多，所以測到的頻率較高，隨著反應時間越久，雙氧水濃度變小，產生泡泡變慢、變少，所以測到的頻率就會隨著時間逐漸變小。

(3) 雙氧水分解產生泡泡的頻率最後趨於定值，我們認為雙氧水分解到後段時，因為反應速率變得很慢，所以雙氧水濃度變化不大，因此產生泡泡的速率及數量變化趨於定值，使得最後的頻率也趨於定值。

2 圖(十)中氧氣泡泡聲頻率反而隨時間呈現變大的趨勢，跟圖(九)的圖形完全相反，我們認為可能是因為雙氧水的濃度較大，而雙氧水分解是放熱反應，所以放出的熱量較多，溶液溫度變化太大，導致結果出現較大的誤差。所以為避免雙氧水分解時溫度過高造成干擾，因此接下來的實驗主要控制在以低濃度及低溫度下反應，並將全程以水浴法將吸濾瓶浸泡於室溫水中。

3 濃度較低的雙氧水雖然也能測到頻率，但是因為雙氧水的濃度小，聲音能量很快的下降，所以能測得有效頻率的時間太短，如表(三)。故後續的實驗，我們主要以 40mL 水+5mL 雙氧水+1g 二氧化錳這樣的濃度為主。

研究四：在不同的溫度下觀察雙氧水分解產生泡泡聲的頻率變化

結 果：

(一) 0°C 時，雙氧水分解產生泡泡頻率與時間關係數據如下表(四)，關係圖如下圖(十一)。

表(四) 雙氧水於 0°C 分解產生泡泡聲頻率與時間數據

時間(分)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
頻率(Hz)	5891	5895	5851	5845	5816	5808	5805	5799	5792	5785	5777	5770	5768
時間(分)	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
頻率(Hz)	5763	5759	5754	5749	5748	5748	5747	5745	5741	5738	5736	5736	5737
時間(分)	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5
頻率(Hz)	5735	5734	5731	5733	5732	5731	5733	5734	5730	5728	5730	5729	5730

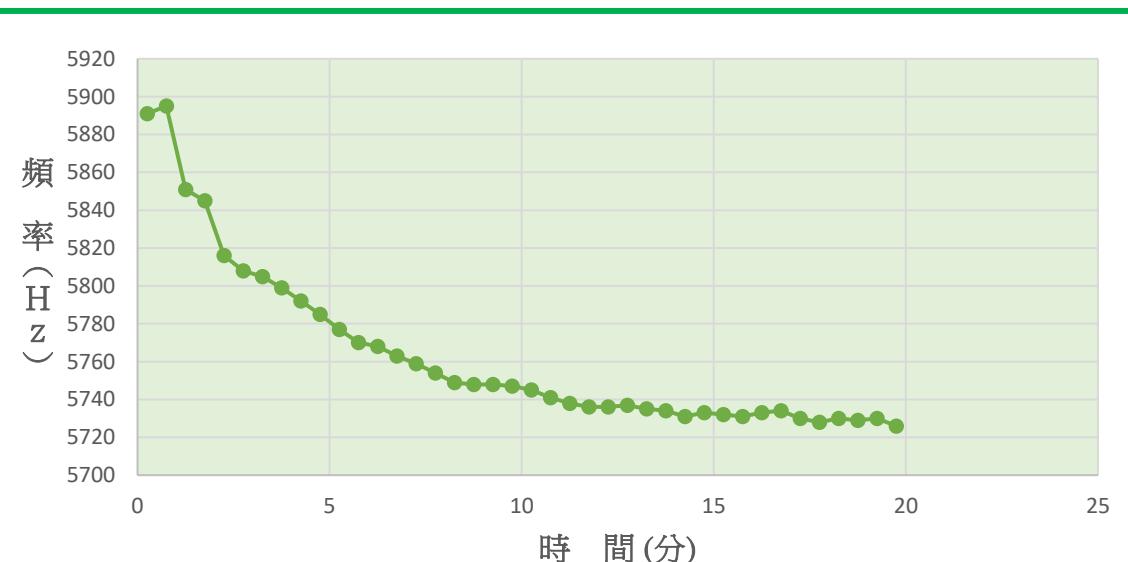


圖 (十一) 雙氧水於 0°C 時分解產生泡泡聲頻率與時間關係圖

(二) 21°C 時，雙氧水分解產生泡泡頻率與時間關係數據如下表(五)，關係圖如下圖(十二)。

表(五) 雙氧水於 21°C 分解產生泡泡聲頻率與時間數據

時間(分)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
頻率(Hz)	5988	5964	5956	5944	5931	5927	5916	5911	5910	5903
時間(分)	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
頻率(Hz)	5897	5894	5891	5889	5886	5886	5885	5880	5878	5879
時間(分)	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14	14.5	15
頻率(Hz)	5880	5880	5885	5883	5885	5884	5884	5885	5885	5885

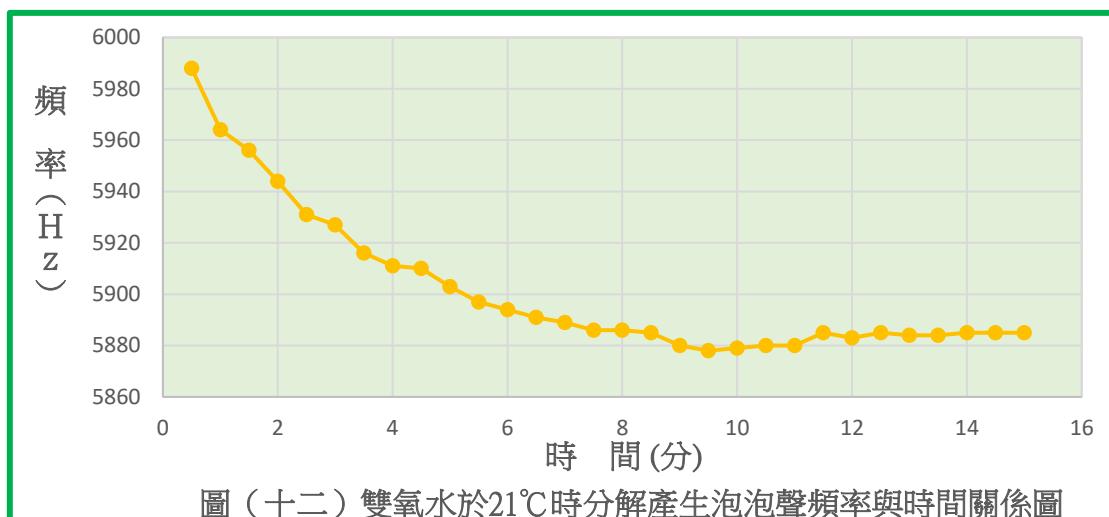


圖 (十二) 雙氧水於 21°C 時分解產生泡泡聲頻率與時間關係圖

(三) 38°C 時，雙氧水分解產生泡泡頻率與時間關係數據如下表(六)，關係圖如下圖(十三)。

表(六) 雙氧水於 38°C 分解產生泡泡聲頻率與時間數據

時間(分)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
頻率(Hz)	8218	8145	8118	8087	8084	8083	8085	8083	8082	8084	8081	8077	8087	8097



圖 (十三) 雙氧水於 38°C 時分解產生泡泡聲頻率與時間關係圖

(四)比較圖(十一)、(十二)、(十三)可以看到雙氧水分解產生泡泡的頻率變化(下降)程度隨著溫度上升會逐漸變快，也就是說當溫度愈高時，雙氧水分解產生泡泡聲頻率的下降趨勢會越來越快，這是因為溫度愈高時雙氧水分解速率愈快，雙氧水濃度減少的速率也變快，所以每單位時間內減少的泡泡數目也就越明顯，故產生泡泡聲頻率的下降趨勢也就越快。

研究五：以酒精度計測量雙氧水分解過程濃度變化

結 果：

(一)以酒精度計測量配製的雙氧水濃度，再以手機拍攝下刻度，所得到的刻度照片如下圖(十四)，然後將照片以 word 中「美術效果」功能處理成下圖(十五)，以方便判讀數據。

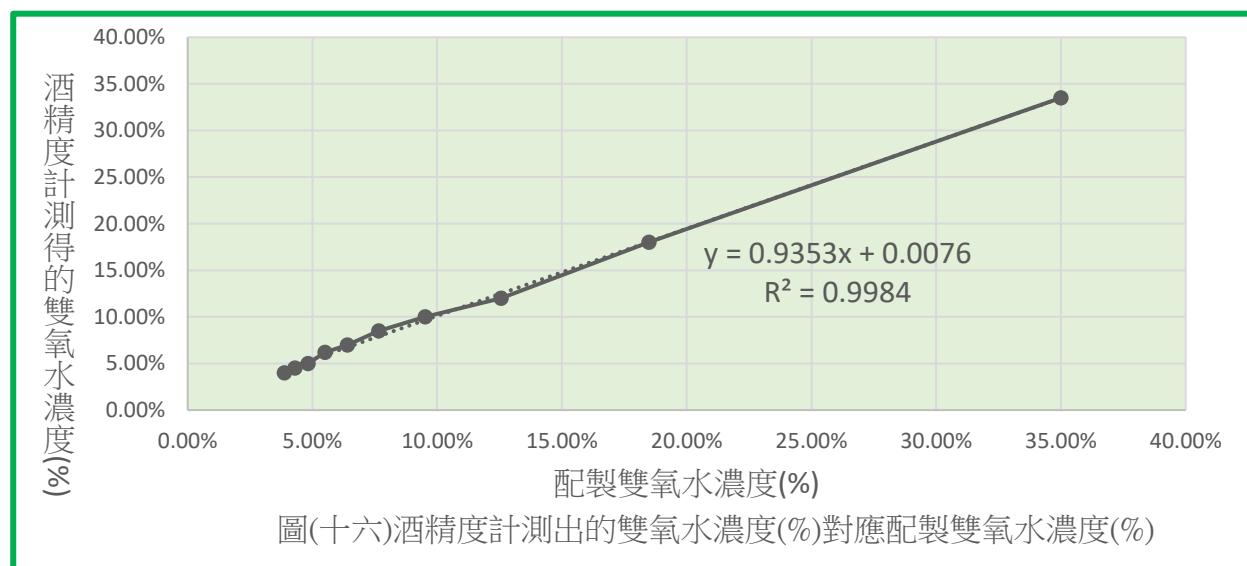


圖(十四) (照片皆為作者自己拍攝) 圖(十五) (照片皆為作者自己拍攝)

(二)配製的雙氧水濃度及酒精度計測得的雙氧水濃度(%)兩者對應數據如下表(七)，關係圖如下圖(十六)。

表(七) 雙氧水於 0°C 分解產生泡泡聲頻率與時間數據

雙氧水重量百分濃度%	35.0%	18.5%	12.6%	9.5%	7.7%	6.4%	5.5%	4.8%	4.3%	3.9%
以酒精度計測得的雙氧水濃度(%)	33.5%	18.0%	12.0%	10.0%	8.5%	7.0%	6.2%	5.0%	4.5%	4.0%



1 上圖中的圖形幾乎是一條通過原點的斜直線，表示「配製雙氧水濃度」和「酒精度計測得的雙氧水濃度」兩者之間呈現正比的關係，這也表示此斜直線可做為檢量線來推算雙氧水的真正濃度。

2 另外這也表示我們可以使用酒精度計來代替其他複雜的化學方法或儀器做為測量雙氧水濃度的儀器。

(二)以酒精度計測量雙氧水分解過程濃度與時間關係如下表(八)。

表(八) 雙氧水分解過程濃度與時間關係(18°C)

時間(分)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
濃度(%)	5	4.2	3.6	3.1	2.9	2.6	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3	1

研究六：鎂與鹽酸反應的反應級數

結 果：

(一)改變鹽酸濃度觀察氫氣泡泡聲頻率的變化

1 濃度為 1.5M 、 1.0M 、 0.75M 、 0.3M 鹽酸與鎂反應測得氫氣泡泡聲頻率與時間數據如下表(九)。

表(九) 1.5M 、 1.0M 、 0.75M 、 0.3M 鹽酸與鎂反應測得氫氣泡泡聲頻率與時間數據

時間(秒)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390
頻率(Hz) (1.5M)	10272	9503	8950	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
頻率(Hz) (1.0M)	9985	9776	9436	9195	9024	8834	8766	8632	—	—	—	—	—
頻率(Hz) (0.75M)	9419	9745	9542	9322	9169	8983	8864	8768	8697	8629	8591	—	—
頻率(Hz) (0.3M)	8226	8455	8579	8611	8619	8616	8604	8602	8587	8568	8560	8555	8552

(「—」表示無法測得頻率數據)

2 濃度 0.6M 鹽酸與鎂反應測得氫氣泡泡聲頻率與時間數據如下表(十)。

表(十) 0.6M 鹽酸與鎂反應測得氫氣泡泡聲頻率與時間數據

時間(秒)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420
頻率(Hz)	8720	9319	9262	9169	9070	8998	8948	8898	8854	8793	8765	8736	8709	8683
時間(秒)	450	480	510	540	570	600	630	660	690	720	750	780	810	840
頻率(Hz)	8664	8637	8600	8561	8545	8510	8494	8472	8460	8438	8383	8441	8425	8366

3 比較表(九)、(十)，當鹽酸濃度較大時，反應速率較快，反應時間較短，能測得的數據也就較少；當鹽酸濃度較小時，反應速率較慢，產生氫氣泡泡聲響度較小，能測得的數據也一樣偏少，故探討鹽酸與鎂的反應級數時，鹽酸的濃度以 0.6M 為主。

(二)測量鎂與鹽酸反應過程中剩餘鹽酸的濃度，測得數據如下表(十一)。

表(十一)反應達設定時間時剩餘鹽酸濃度

	第1杯	第2杯	第3杯	第4杯	第5杯
反應時間 (分)	3	6	9	12	15
消耗 1M 氢氧化鈉體積(mL)	2.1	1	0.55	0.35	0.2
剩餘鹽酸濃度(M)	0.21	0.1	0.055	0.035	0.02

(三)0.6M 鹽酸與鎂反應產生氫氣泡聲的頻率

表(十二) 0.6M 鹽酸與鎂反應產生泡泡聲頻率與時間第 1 次測量數據

第 一 次	時間(秒)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
	頻率(Hz)	—	9721	9723	9511	9321	9192	9042	8916	8855	8813	8787	8755
	時間(秒)	390	420	450	480	510	540	570	600	630	660	690	720
	頻率(Hz)	8720	8705	8661	8611	8596	8569	8550	8531	8519	8498	8476	8420
	時間(秒)	750	780	810	840	870	900	930	960	990	1020	1050	1080
	頻率(Hz)	8448	8430	8403	8394	8385	8369	8335	8342	8338	8320	8341	8289

表(十三) 0.6M 鹽酸與鎂反應產生泡泡聲頻率與時間第 2 次測量數據

第 二 次	時間(秒)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
	頻率(Hz)	—	9748	9625	9488	9350	9235	9141	9061	8988	8936	8889	8857
	時間(秒)	390	420	450	480	510	540	570	600	630	660	690	720
	頻率(Hz)	8829	8806	8773	8761	8737	8706	8683	8645	8629	8606	8567	8544
	時間(秒)	750	780	810	840	870	900	930	960	990	1020	1050	1080
	頻率(Hz)	8527	8518	8500	8469	8449	8436	8423	8380	8381	8375	—	—

研究七：大理石與鹽酸反應的反應級數

結 果：

(一) 1M 鹽酸與大理石反應產生二氧化碳氣泡聲的頻率

表(十四) 1M 鹽酸與大理石反應產生泡泡聲頻率與時間數據

第 1 次	時間(秒)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
	頻率(Hz)	7889	7582	7357	7177	7043	6946	6872	6822	6784	6753	6728	6713
	時間(秒)	390	420	450	480	510	540	570	600	630	660	690	720
	頻率(Hz)	6697	6683	6675	6672	6667	6674	6669	6681	6694	6697	6713	6731
第 2 次	時間(秒)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
	頻率(Hz)	7821	7615	7419	7281	7177	7076	6991	6930	6879	6847	6812	6781
	時間(秒)	390	420	450	480	510	540	570	600	630	660	690	720
	頻率(Hz)	6760	6746	6739	6728	6720	6726	6718	6719	6726	6731	6741	6746

(二)測量大理石與鹽酸反應過程中剩餘鹽酸的濃度，測得數據如下表(十五)。

表(十五)反應達設定時間時剩餘鹽酸濃度

	第 1 杯	第 2 杯	第 3 杯	第 4 杯
反應時間 (分)	2	4	6	9
消耗 1M 氢氧化鈉體積(mL)	7.6	6.2	5.5	4.5
剩餘鹽酸濃度(M)	0.76	0.62	0.55	0.45

陸、討 論

一、由研究一、二、三的實驗結果，我們認為當雙氧水分解產生氧氣泡泡時會產生大約 3000Hz、6000Hz、8000Hz 及 10000Hz 特殊頻率的聲音，其中以 8000Hz 附近的聲音能量最強、響度最大，而 6000Hz 附近的頻率能量及響度則次之，可作為測量或判斷雙氧水分解速率快慢的「指標頻率」。而且當雙氧水分解速率變慢時，因為產生氧氣泡泡的速度也變慢，所以產生氧氣泡泡聲的頻率會有逐漸下降的情形發生。

1 另外從研究六及七，也就是鹽酸+鎂帶和鹽酸+大理石的反應也可以得的類似的結果，也就是這兩個反應所產生泡泡聲在頻率 8000Hz 附近的聲音能量最強、響度最大，而 6000Hz 附近的頻率能量及響度則次之。

2 以上三個反應都會產生相近頻率的泡泡聲，這些泡泡聲是因為氣泡的生成與膨脹造成液體震動所產生的，其產生的機制如下(Leighton, 1994; Minnaert, 1933)：

(1)氣泡生成與膨脹造成液體震動

- A 氣泡從零體積突然生成 → 快速擴張
- B 液體為了「讓位」給氣泡 → 發生壓縮與回彈
- C 液體壓力的變化會產生壓力波 → 聲音傳出

(2)氣泡在水中震盪 (共振)

- A 氣泡在生成後不會馬上穩定，而是會膨脹與收縮
- B 這種震盪會以特定頻率進行，此頻率可用 Minnaert 頻率公式預測。
- C 每次氣泡震盪都會讓周圍液體發出聲波

(3)通常產生的氣泡越小其頻率就會越高；氣泡越大其頻率就會越低。

3 所以我們用 AUDACITY 軟體所測得的氣泡聲頻率是氣泡震盪與液體振動產生的，而非氣泡「爆破」產生的。

4 當反應產生氣泡速率越快時，液體中產生氣泡的體積就會越小，所以產生泡泡聲的頻率就越高；相反的當反應產生氣泡速率越慢時，液體中產生氣泡的體積就會較大，所以產生泡泡聲的頻率就會越低。

5 當反應溫度越高時氣泡的膨脹與收縮就會越快、越明顯，所以反應所測得結果就越雜亂無章，因此實驗時應盡量在較低的溫度、較小濃度及水浴法下進行。

二、反應級數

(一)以 0°C 時，雙氧水分解產生泡泡頻率與時間關係圖為例。

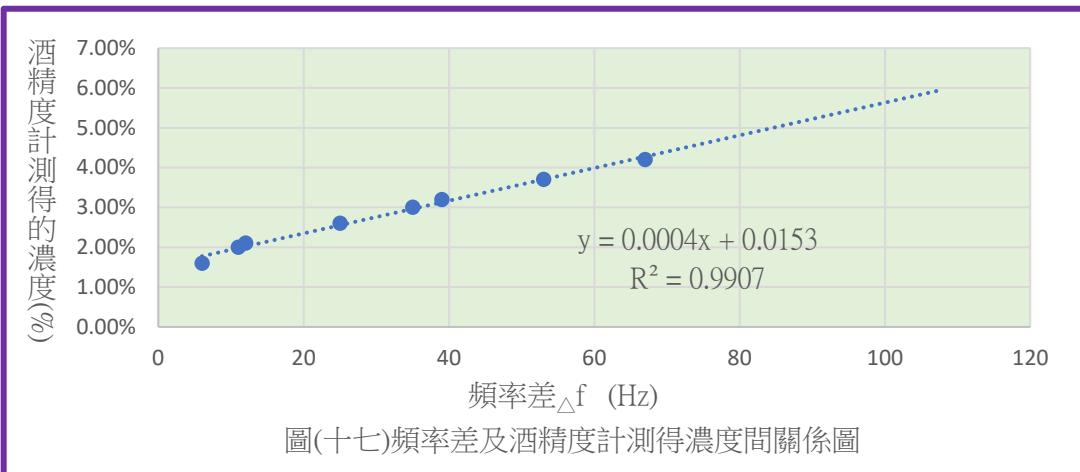
1 因為雙氧水的濃度愈大，分解速率就愈快，產生泡泡速率也就越快，因此測到的頻率就變高；相反的雙氧水的濃度愈小，分解速率就愈慢，產生泡泡就愈慢，因此測到的頻率就變低，所以我們認為頻率和雙氧水濃度間彼此有關連性。而且由圖(十一)的頻率下降曲線可以發現，當反應時間到達 15 分鐘時頻率趨於穩定，代表此時的雙氧水濃度已經很小趨近於定值，所以頻率變化不大呈現一個穩定值，尤其是實驗時我們使用低濃度的反應物，因此達穩定值時反應物的濃度已經很低。所以我們認為可以將第 15 分鐘後的穩定頻率取平均值 f_e ，而 15 分鐘前各個時間點的頻率和平均頻率 f_a 間的頻率差(Δf)和雙氧水濃度($[H_2O_2]$)間有正比的關係，所以此時就可以將頻率差(Δf)視為各個時間點的雙氧水濃度。

2 為了探討頻率差(Δf)和雙氧水濃度($[H_2O_2]$)之間的關係，我們設計了「研究五」的實驗，以酒精度計作為測量儀器來驗證頻率差(Δf)和雙氧水濃度($[H_2O_2]$)之間的關係。

(1) 將「研究三」表(一)的「頻率差(Δf)」數據和「研究五」表(八)「酒精度計測得的濃度」兩者的數據合併成表(十六)，並作圖如下圖(十七)

表(十六) 頻率差及酒精度計測得濃度數據

時間 (分)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
頻率差 Δf (Hz)	108	67	55	53	45	39	37	35	31	25	24	108
酒精度計測得的濃度(%)	—	4.2	—	3.6	—	3.1	—	2.9	—	2.6	—	2.1



(2)由上圖可以發現頻率差(Δf)和雙氧水濃度之間幾乎呈現正比關係。

3 判斷反應級數

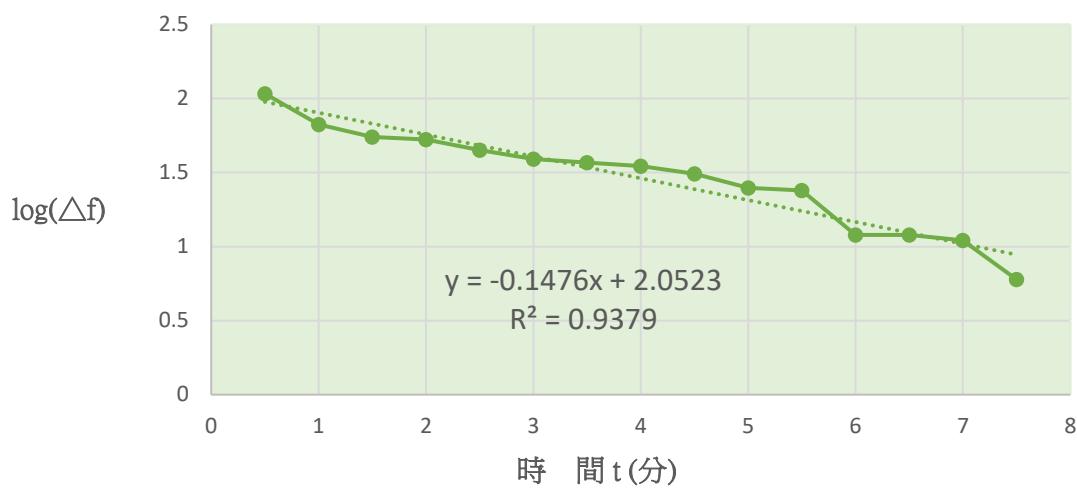
- (1)以表(三)中雙氧水(40mL 水+5mL 35%雙氧水+1 克二氧化錳)分解產生泡泡頻率數據為例。
- (2)各時間點泡泡生頻率和平均頻率 f_e (第 9~11.5 分鐘內的平均頻率 $f_e=5813\text{Hz}$)之間的頻率差及其他相關數據如下表(十七)

表(十七) 各時間點頻率差及其他相關數據

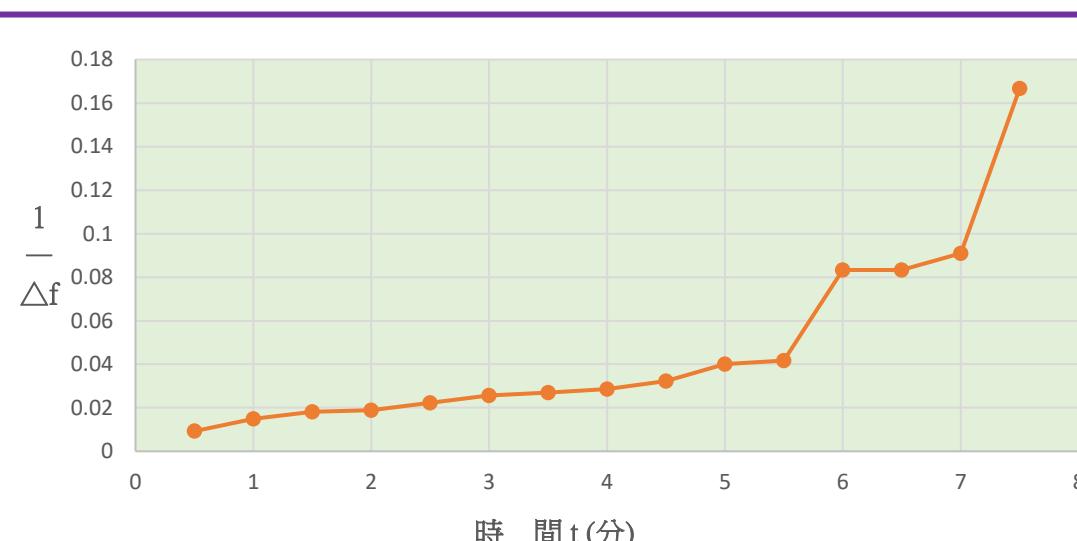
時間 t(分)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5
頻率差 Δf (Hz)	108	67	55	53	45	39	37	35	31	25	24	12	12	11	6	6	2
$\log \Delta f$	2.033	1.826	1.740	1.724	1.653	1.591	1.568	1.544	1.491	1.398	1.380	1.079	1.079	1.041	0.778	0.778	0.301
$1/\Delta f$	0.0093	0.0149	0.0182	0.0189	0.0222	0.0256	0.0270	0.0286	0.0323	0.0400	0.0417	0.0833	0.0833	0.0909	0.1667	0.1667	0.0093

(3)為確認反應級數，所以將表(十七)中頻率差 Δf 數據轉換成 $\log(\Delta f)$ 及 $\frac{1}{\Delta f}$ ，並繪製

$\log(\Delta f)$ 與時間 t 關係圖(如下圖(十八)) 及 $\frac{1}{\Delta f}$ 與時間 t 關係圖(如下圖(十九))。



圖（十八） $\log(\Delta f)$ 與時間 t 關係圖



圖（十九） $1/\Delta f$ 與時間 t 關係圖

(4)綜合圖(十八)~(十九)，二氧化錳催化雙氧水的反應屬於「一級反應」(因為 $\log(\Delta f)$ 與時間 t 關係圖成一斜直線)，此結果和我們所查到的資料相符合。

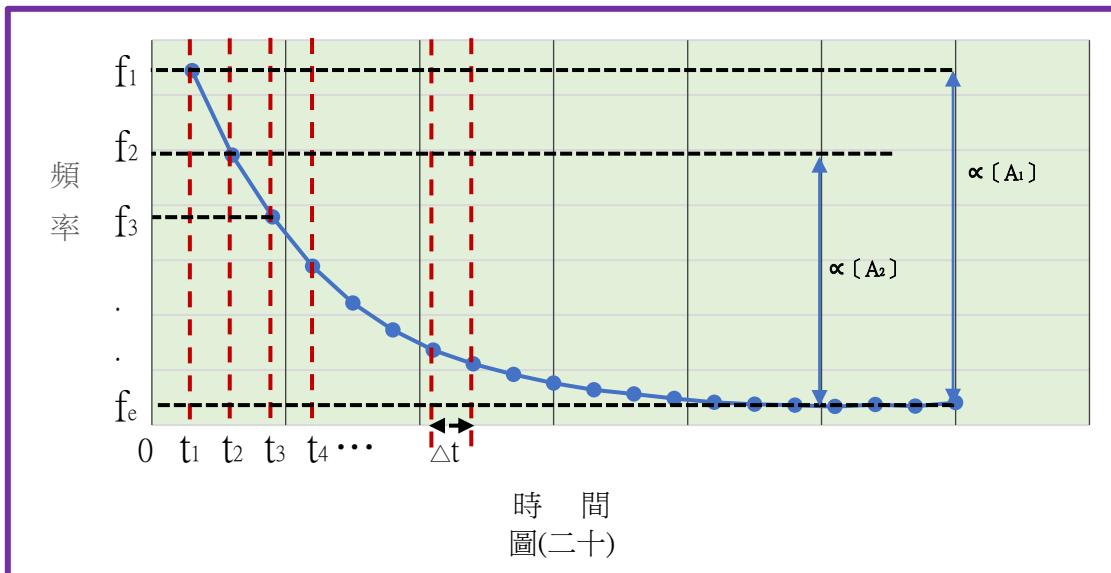
三、其他反應的級數

(一)我們之前以驗證法證明了雙氧水分解是一級反應，但是其他非一級的反應該如何以測頻率變化的方法來測量其反應級數？

1 若有一產生氣體的反應： $A_{(aq)} + B_{(s)} \rightarrow C_{(g)}$ ，我們以測量頻率方式測得其頻率隨時間關係圖如下圖(二十)。

假設將反應在前一段固定時間內(例如 $0 \sim t_1$)測到的頻率 f_1 定義為 t_1 時刻的頻率

將反應在下一段固定時間內(例如 $t_1 \sim t_2$)測到的頻率 f_2 定義為 t_2 時刻的頻率
而整個反應在達到平衡或結束反應時的頻率為 f_e



2 因為反應物的濃度和頻率差成正比 $\rightarrow [A_1] = a \times (f_1 - f_e) \quad [A_2] = a \times (f_2 - f_e)$

速率反應式為 $R = k [A]^n$ 可以改寫為

$$\begin{aligned}
 \frac{[A_1] - [A_2]}{\Delta t} &= k \left[\frac{[A_1] + [A_2]}{2} \right]^n \\
 \Rightarrow \frac{(a \times (f_1 - f_e)) - a \times (f_2 - f_e)}{\Delta t} &= k \left[\frac{(a \times (f_1 - f_e)) + a \times (f_2 - f_e)}{2} \right]^n \\
 \Rightarrow \frac{a \times (f_1 - f_2)}{\Delta t} &= k \left[\frac{a \times ((f_1 + f_2) - 2f_e)}{2} \right]^n \\
 \Rightarrow \log \left(\frac{a \times (f_1 - f_2)}{\Delta t} \right) &= \log \left(k \left[\frac{a \times ((f_1 + f_2) - 2f_e)}{2} \right]^n \right) \\
 \Rightarrow \log a + \log (f_1 - f_2) - \log (\Delta t) &= \log k + n \times \log a + n \times \log \left[\frac{((f_1 + f_2) - 2f_e)}{2} \right] \\
 \Rightarrow \log (f_1 - f_2) &= n \log \left[\frac{((f_1 + f_2) - 2f_e)}{2} \right] + (\log k + n \times \log a + \log (\Delta t) - \log a)
 \end{aligned}$$

(設 $(f_1 - f_2)$ 稱為分段頻率差、 $\left[\frac{((f_1 + f_2) - 2f_e)}{2} \right]$ 稱為分段平均頻率)

因為每次實驗時，我們都是以固定間隔時間來測量讀取頻率，則 Δt 是一個固定值，另外 k 、 a 及 n 也都是固定值，所以上述的方程式就是一條直線方程式，也就是當我們以 $\log(\text{分段頻率差})$ 對 $\log(\text{分段頻率差})$ 作圖時，直線斜率即為反應級數 n 。

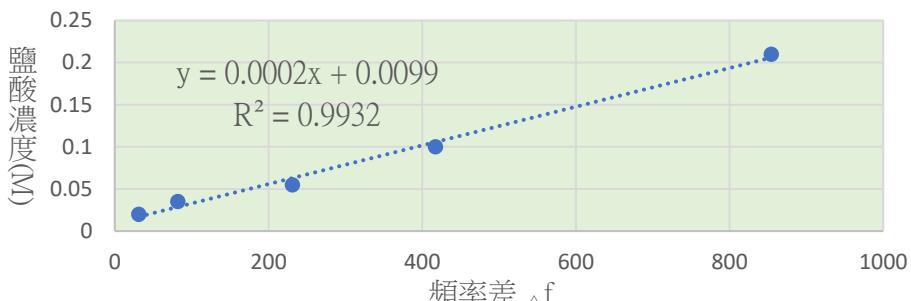
(二)鹽酸和鎂帶的反應級數

1 為了證明頻率差(Δf)和鹽酸濃度($[HCl]$)成正比的關係，我們設計了「研究六」的實驗，以酸鹼滴定法測量鹽酸濃度並驗證頻率差(Δf)和鹽酸濃度($[HCl]$)之間的關係如下。

(1)將「研究六」表(十一)第1次測量數據的「頻率差(Δf)」數據和「研究六」表(十二)「設定時間時剩餘鹽酸濃度」兩者的數據合併成表(十八)，並作圖如下圖(二十一)。

表(十八)「頻率差(Δf)」數據和「設定時間時剩餘鹽酸濃度」相關數據

時間(分)	3	6	9	12	15
頻率差 Δf (Hz)	854	417	231	82	31
鹽酸濃度 (M)	0.21	0.1	0.055	0.035	0.02



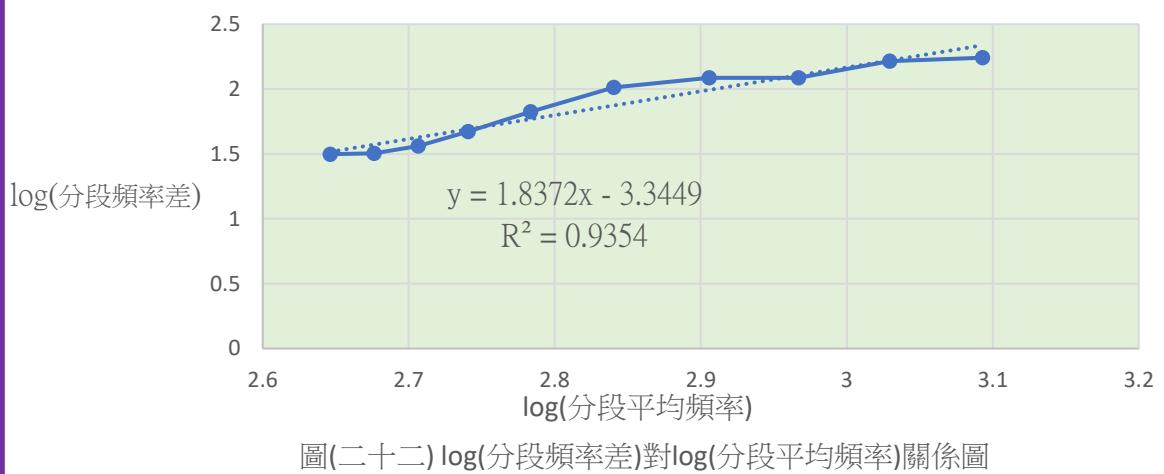
圖(二十一)頻率差(Δf)與設定時間時剩餘鹽酸濃度關係圖

(2)由圖(二十一)可以看到頻率差(Δf)和鹽酸濃度之間幾乎呈現正比關係。

(3)我們將「研究六」表(十一)第1次、第2次測量數據求平均值，並計算出所需相關數據，如下表(十九)，並將 $\log(\text{分段頻率差})$ 對 $\log(\text{分段頻率差})$ 作圖(二十二)。

表(十九) 鹽酸和鎂帶反應第1、2次測量數據平均值及相關數據(f_c =第1020秒數值=8347.5Hz)

時間(秒)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
平均頻率(Hz)	—	9734.5	9674	9499.5	9335.5	9213.5	9091.5	8988.5	8921.5	8874.5	8838	8806
分段頻率差 (Hz)	—	60.5	174.5	164	122	122	103	67	47	36.5	32	—
log(分段頻率差)	—	1.782	2.242	2.215	2.086	2.086	2.013	1.826	1.672	1.562	1.505	—
分段平均頻率(Hz)	—	3.1325	3.0932	3.0294	2.9671	2.9058	2.8404	2.7835	2.7408	2.7065	2.6762	—
log(分段平均頻率)	—	3.1325	3.0932	3.0294	2.9671	2.9058	2.8404	2.7835	2.7408	2.7065	2.6762	—
時間(秒)	390	420	450	480	510	540	570	600	630	660	690	720
平均頻率(Hz)	8774.5	8755.5	8717	8686	8666.5	8637.5	8616.5	8588	8574	8552	8521.5	8482
分段頻率差 (Hz)	31.5	19	38.5	31	19.5	29	21	28.5	14	22	30.5	—
log(分段頻率差)	1.498	1.279	1.585	1.491	1.290	1.462	1.322	1.455	1.146	1.342	1.484	—
分段平均頻率(Hz)	474.5	442.75	417.5	388.75	354	328.75	304.5	279.5	254.75	233.5	215.5	—
log(分段平均頻率)	2.6762	2.6462	2.6207	2.5897	2.5490	2.5169	2.4836	2.4464	2.4061	2.3683	2.3334	—
時間(秒)	750	780	810	840	870	900	930	960	990	1020	—	—
平均頻率(Hz)	8487.5	8474	8451.5	8431.5	8417	8402.5	8379	8361	8359.5	8347.5	—	—
分段頻率差 (Hz)	39.5	-5.5	13.5	22.5	20	14.5	14.5	23.5	18	—	—	—
log(分段頻率差)	1.597	—	1.130	1.352	1.301	1.161	1.161	1.371	1.255	—	—	—
分段平均頻率(Hz)	154.25	137.25	133.25	115.25	94	76.75	62.25	43.25	22.5	—	—	—
log(分段平均頻率)	2.1882	2.1375	2.1247	2.0616	1.9731	1.8851	1.7941	1.6360	1.3522	—	—	—



(4)因為反應剛開始時及反應末期，所測得的數據相對較不穩定，所以我們都是以反應中段較為穩定時的數據來作圖，如圖(二十二)。此圖中的直線方程式：
 $y = 1.8372x - 3.3449$ ，其斜率為 1.8372，也就表示鹽酸和鎂的反應級數約為 1.8 級，而此反應就我們查到的資料為 2 級反應(Birk and Walters, 1993)兩者頗為接近。

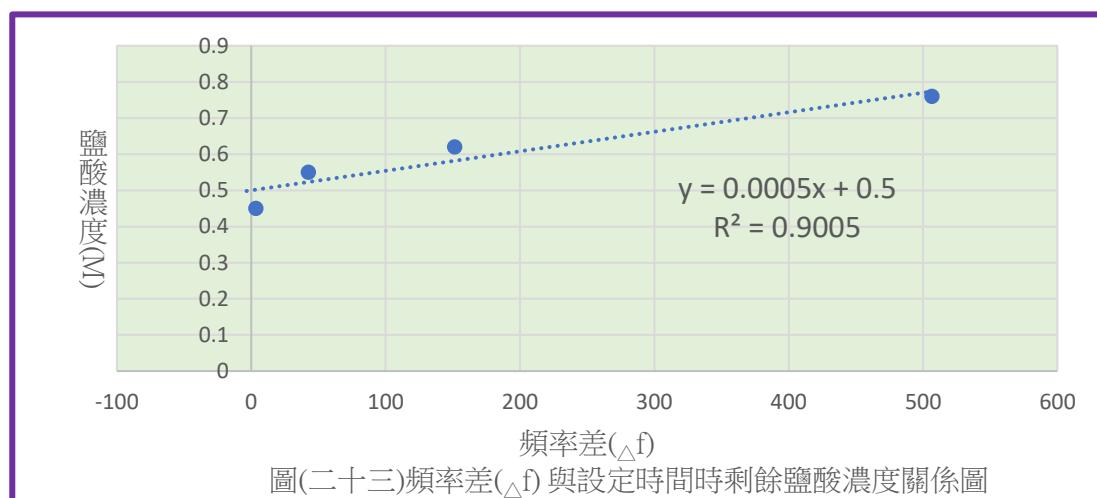
(三) 大理石與鹽酸反應的反應級數

1 為了探討頻率差(Δf)和鹽酸濃度($[HCl]$)之間的關係，我們設計了「研究七」的實驗，以酸鹼滴定法測量鹽酸濃度並驗證頻率差(Δf)和鹽酸濃度($[HCl]$)之間的關係。

(1)將「研究七」表(十四)第 1 次測量數據的「頻率差(Δf)」數據和「研究七」表(十五)「設定時間時剩餘鹽酸濃度」兩者的數據合併成表(二十)，並作圖如下圖(二十三)。

表(二十)「頻率差(Δf)」數據和「設定時間時剩餘鹽酸濃度」相關數據

時間 (分)	2	4	6	9
頻率差 Δf (Hz)	506.5	151.5	42.5	3.5
鹽酸濃度 (M)	0.76	0.62	0.55	0.45

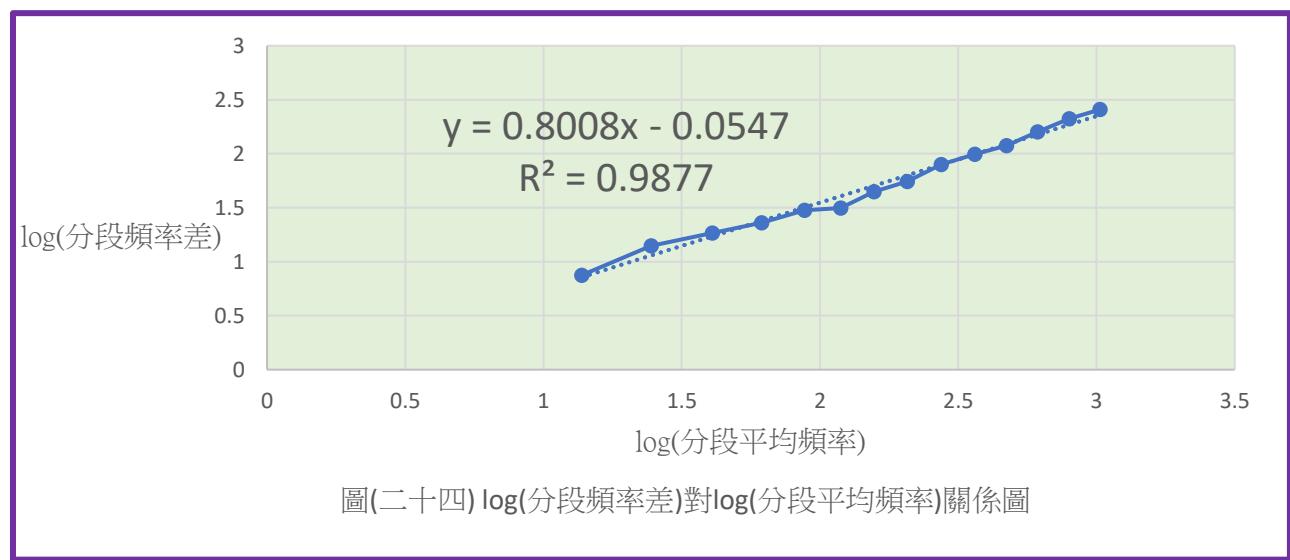


(2)由圖(二十三)可以看到頻率差(Δf)和鹽酸濃度之間幾乎呈現正比關係。

(3)我們將「研究七」表(十四)第1次測量及第2次測量數據求平均值，並計算出所需相關數據，如下表(二十一)，並將 $\log(f_n - f_{n+1})$ 與 $\log\frac{(f_n + f_{n+1}) - 2f_0}{2}$ 作圖(二十四)。

表(二十一) 鹽酸和大理石反應第1、2次測量數據平均值及相關數據(f₀取450~570秒間平均值=6679Hz)

時間(秒)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
平均頻率(Hz)	7855	7598.5	7388	7229	7110	7011	6931.5	6876	6831.5	6800	6770	6747
分段頻率差 (Hz)	256.500 2.409 1029.750 3.013	210.500	159.000	119.000	99.000	79.500	55.500	44.500	31.500	30.000	23.000	
log(分段頻率差)		2.323	2.201	2.076	1.996	1.900	1.744	1.648	1.498	1.477	1.362	
分段平均頻率(Hz)		796.250	611.500	472.500	363.500	274.250	206.750	156.750	118.750	88.000	61.500	
log(分段平均頻率)		2.901	2.786	2.674	2.561	2.438	2.315	2.195	2.075	1.944	1.789	
時間(秒)	390	420	450	480	510	540	570	600	630	660	690	720
平均頻率(Hz)	6728.5	6714.5	6707	6700	6693.5	6700	6693.5	6700	6710	6714	6727	6738.5
分段頻率差 (Hz)	18.500 1.267 40.750 1.610	14.000	7.500	7.000	6.500	-6.500	6.500	-6.500	-10.000	-4.000	-13.00	
log(分段頻率差)		0.875	0.845	0.813	—	0.813	—	—	—	—	—	
分段平均頻率(Hz)		24.500	13.750	6.500	-0.250	-0.250	-0.250	-0.250	8.000	15.000	23.500	
log(分段平均頻率)		1.389	1.138	0.813	—	—	—	—	0.903	1.176	1.371	



(4)圖(二十四)中的直線方程式 $y = 0.8008x - 0.0547$ ，其斜率為 0.8008，也就表示鹽酸和大理石的反應級數約為 0.8 級，而我們從網路查到鹽酸和大理石的反應應該是一級反應，兩者間有少許差距。

(以上所有數據圖片皆為作者自己繪製、照片皆為作者自己拍攝)

柒、結論

- 一、本實驗是以測量反應過程產生泡泡聲的頻率作為測量反應級數的依據，因此本實驗不需要複雜的裝置及儀器，只需要簡易的麥克風、電腦及免費軟體 AUDACITY 即可作為觀測反應速率快慢及測量反應級數實驗，因此適合做為簡易觀察或學習之用。但因為聲音比較容易被外在環境噪音影響，所以實驗時應盡量選擇安靜的場所。另外反應條件盡量以低溫、低濃度、水中雜質少的條件來進行以避免干擾及誤差。
- 二、本反應可作為「反應速率與反應級數」單元的延伸實驗，用以引導學生從聲音現象理解化學反應過程。
- 三、當溶液中反應物反應產生氣泡時，此時我們耳朵聽到的聲音，並非氣泡「爆炸」產生的，而是氣泡在液體中形成與崩解時引發的震盪現象，而是氣泡震盪與液體振動產生的聲波。
- 四、當反應產生氣泡速率越快時，液體中產生氣泡的體積就會越小，所以產生泡泡聲的頻率就越高；相反的當反應速率越慢時，液體中產生氣泡的體積就會較大，所以產生泡泡聲的頻率就會越低，因此我們可以利用反應過程中泡泡聲音的頻率變化量來做為測量反應速率及級數的依據。
- 五、因為本實驗盡量在低濃度的條件反應，所以當反應物快用完或反應達平衡時，反應物的濃度都較低，所以「某時刻測得的頻率」和「反應物快用完或反應達平衡測得的頻率」兩者之間的「頻率差」會和「某時刻反應物的濃度」成正比，所以可以作為「某時刻反應物的濃度」的替代數據。
- 六、我們可以使用酒精度計來代替其他複雜的化學方法或儀器做為測量雙氧水濃度的有效儀器。
- 七、在某些產生氣體的反應中，可用測量泡泡聲音頻率變化的方法來檢測反應速率是否異常，作為一種早期預警監控方式。

捌、參考資料

- 1 中華民國第 44 屆中小學科學展覽會高中組化學科. (2004). 不鳴則矣，一觸驚人—設計實用的反應裝置有效探討白金催化雙氧水分解反應之化學動力學. 台灣科學教育館網站.
- 2 中華民國第 59 屆中小學科學展覽會國中組物理科. (2019). 聽酒杯在唱歌—濃度與聲音頻率關係之探討. 台灣科學教育館網站.
- 3 臺灣 2006 年國際科學展覽會物理科. (2006). 都是氣泡惹的禍. 台灣科學教育館網站.
- 4 新竹市第 39 屆中小學科學展覽會國中甲組化學科. (2016). 化學的聲音：氣泡對聲音頻率變化之研究.
- 5 中華民國第 54 屆中小學科學展覽會國中組化學科. (2014). 快氣 8 加鞭—催生一對氣！台灣科學教育館網站.
- 6 Zenit, R., & Rodríguez-Rodríguez, J. (原著), 林祉均 (譯) . (2019). 啤酒中的物理—氣泡飲料與流體力學. 物理雙月刊. <https://pb.ps-taiwan.org/modules/news/article.php?storyid=94>
- 7 維基百科. (n.d.). 一級反應. <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E4%B8%80%E7%B4%9A%E5%8F%8D%E6%87%89>
- 8 陽明交通大學. (n.d.). 催化反應動力學 - H_2O_2 分解反應. <https://ir.lib.nycu.edu.tw/bitstream/11536/50924/7/852207.pdf>
- 9 WineNow. (2022). 香檳趣聞—聽，香檳杯裡的氣泡在呼喚你. <https://winenow.com.hk/2022/03/champagne-bubble>
- 10 物理雙月刊. (n.d.). 憶人的滴水聲. <https://pb.ps-taiwan.org/modules/news/article.php?storyid=444>
- 11 PanSci 泛科學. (n.d.). 油炸的聲音學：水滴在油鍋中的三種爆炸方式. <https://pansci.asia/archives/360273>
- 12 Minnaert, M. (1933). On musical air-bubbles and the sounds of running water. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 16(104), 235 – 248. <https://doi.org/10.1080/14786443309462277>
- 13 Leighton, T. G. (1994). The Acoustic Bubble. Academic Press.
- 14 Birk, J. P., & Walters, D. L. (1993). Pressure measurements to determine the rate law of the magnesium-hydrochloric acid reaction. Arizona State University, Tempe, AZ 85286-1604

【評語】030214

本研究提出利用氣體生成反應中氣泡聲頻率，結合聲音分析軟體 AUDACITY，作為反應速率與反應級數的分析方法。此技術器材簡便、成本低廉，克服傳統質量、體積或顏色變化測量的耗時與誤差問題，提供快速且有效的反應動力學測定新途徑。本作品實驗裝置非常簡單，用麥克風、電腦及軟體來測量氣體生成的量，轉換成化學反應的速率的相關數據。實驗用雙氧水分解、鹽酸和鎂帶的反應、及大理石與鹽酸的反應來展示成果。審查委員了解用氣泡聲頻率作為氣體生成的速度有非常多的限制，能應用的化學反應及場域很小且沒有與現行所用方法比較，但立意不錯，審查委員給予肯定。本項研究在討論方面其實可以有更多的發揮，例如從原理中就可以解釋出為何氧氣的產生與氫氣的產生頻率明顯不同，報告中有利用實驗結果試圖推斷反應速率的關係，得到初步的成功，同學可以思考是否有多種不同的實驗裝置，可以使得本篇作品與利用氣泡與頻率關係的科展以及其他利用化學反應產生氣泡的科展做出更大的區隔，整體而言是一個有意思的作品。

作品海報

泡 泡 之 聲 一

和 例 氣 泡 頻 率 測 量 雙 氣 水 分 解 的 反 應 現 象



摘要

本研究嘗試以反應中生成的氣泡聲頻率作為分析依據，結合聲音分析軟體AUDACITY，從氣泡震盪頻率觀察反應速率及推導反應級數大小。

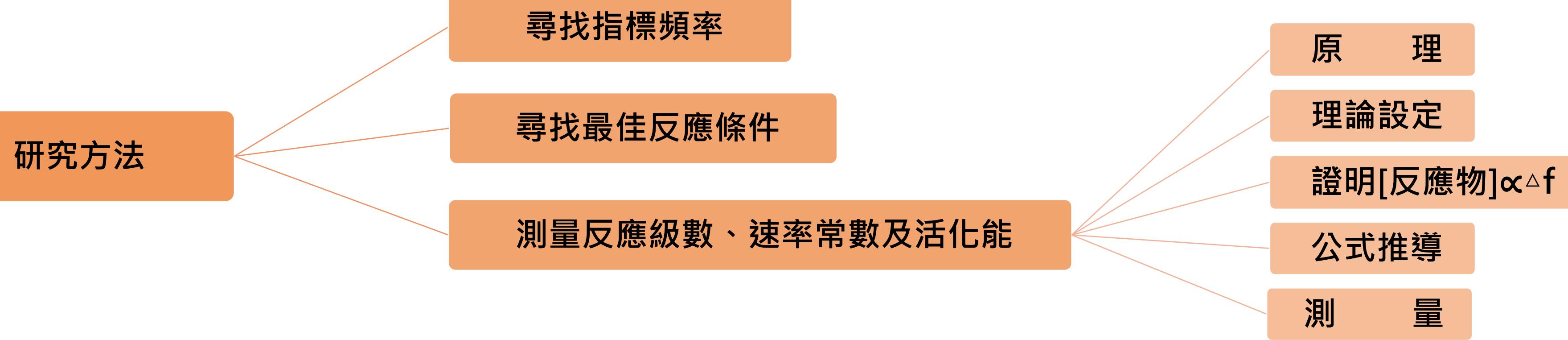
研究目的

1可否利用AUDACITY測得氣泡聲頻率並作為「指標頻率」之用
2何種反應條件才能測得穩定且能有效的「指標頻率」
3如何利用雙氧水分解產生氣泡的頻率變化來測量反應級數
4利用產生氣泡的頻率變化來測量其他反應的反應級數及相關數據

研究設備、藥品及器材

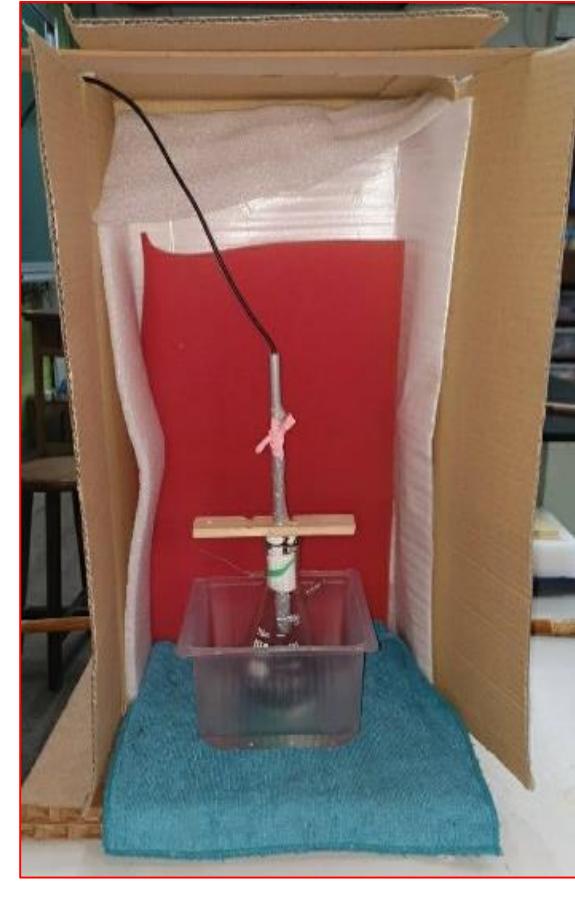
雙氧水、二氧化錳、麥克風、鹽酸氫氧化鈉、大理石、鎂帶、酚酞、錐形瓶、量筒、溫度計、小鋼杯、滴定管、燒杯、吸濾瓶、高腳杯

研究過程或方法

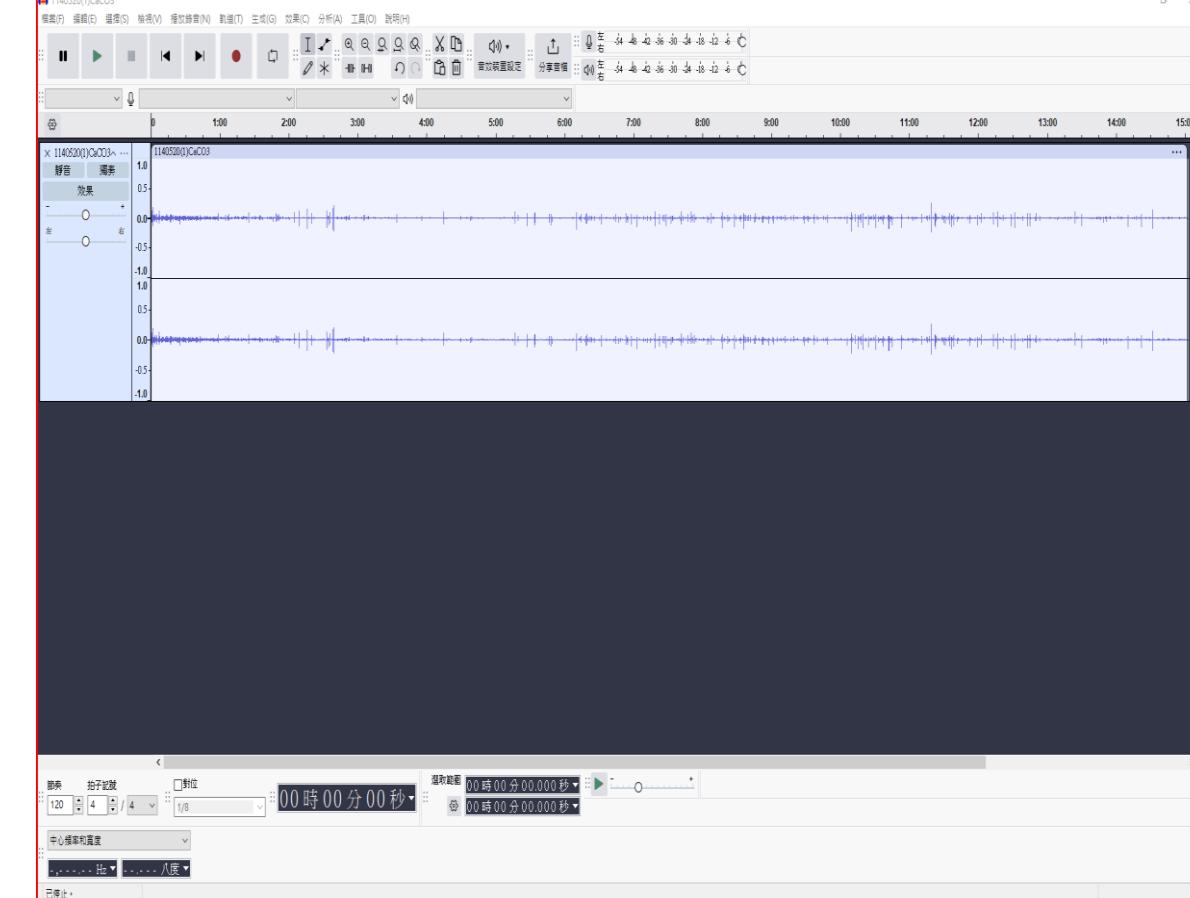


研究結果與討論

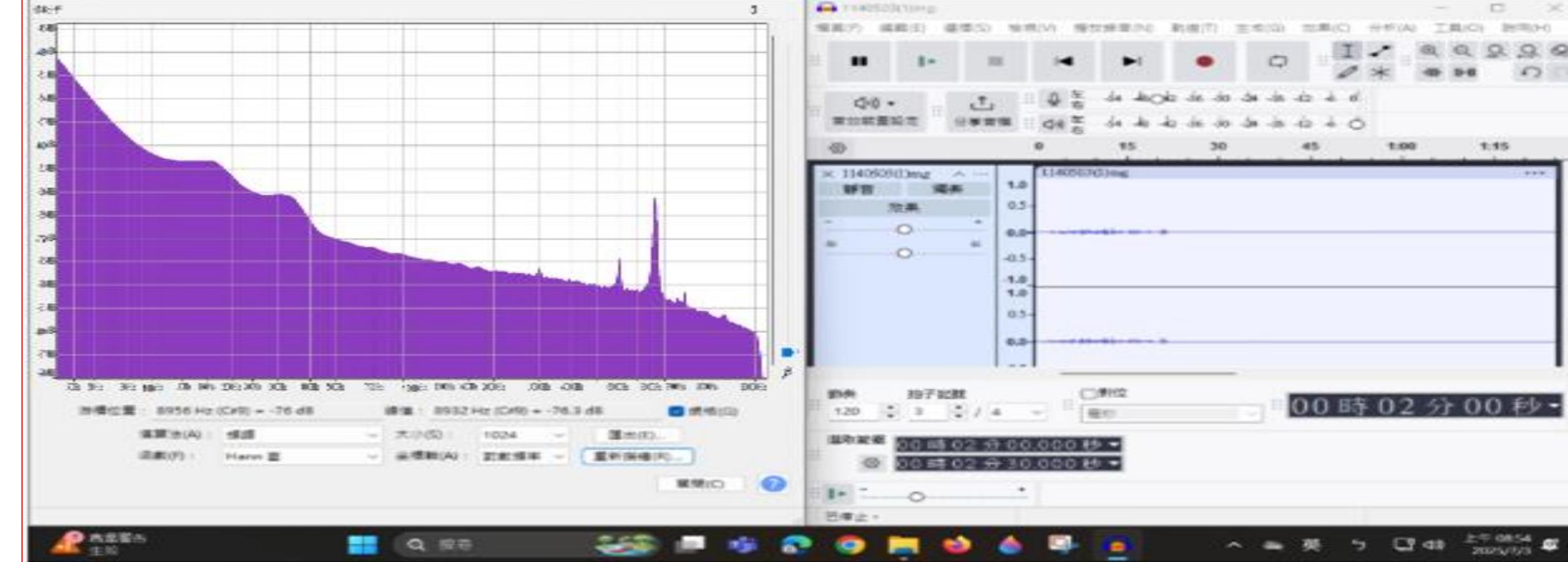
實驗流程



架設設備、儀器

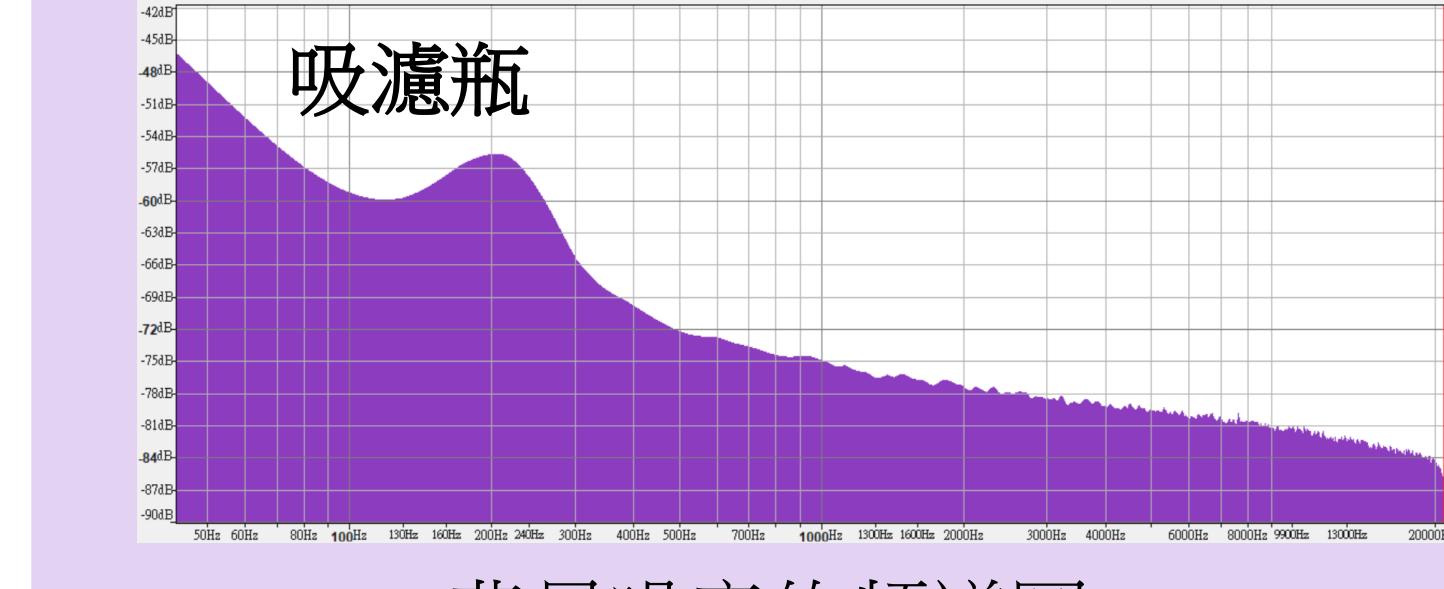


以AUDACITY錄下氣泡聲音檔

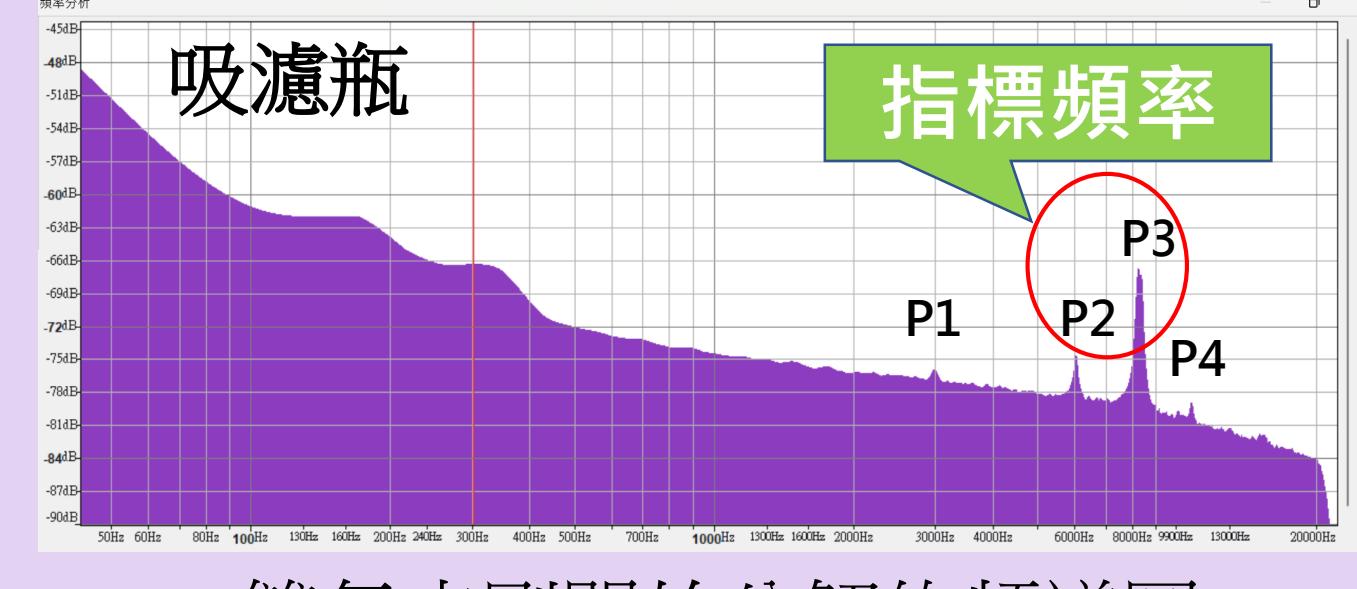


逐步分析讀取設定時間間隔內氣泡聲頻率

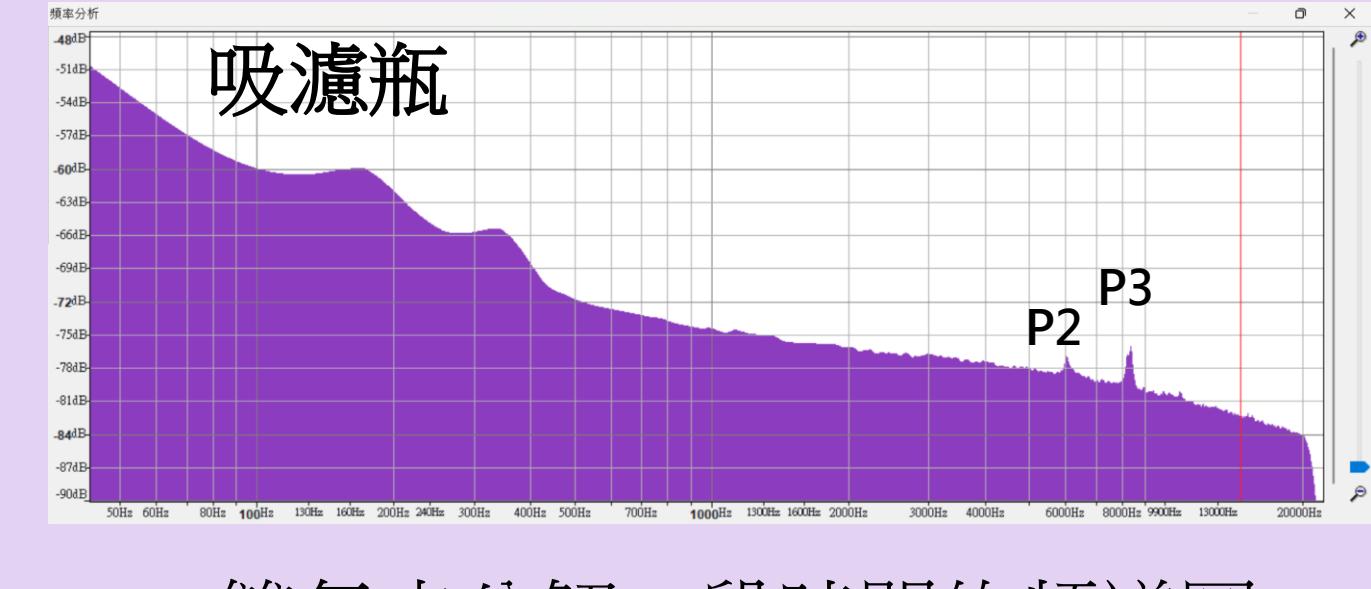
一、尋找指標頻率



背景噪音的頻譜圖

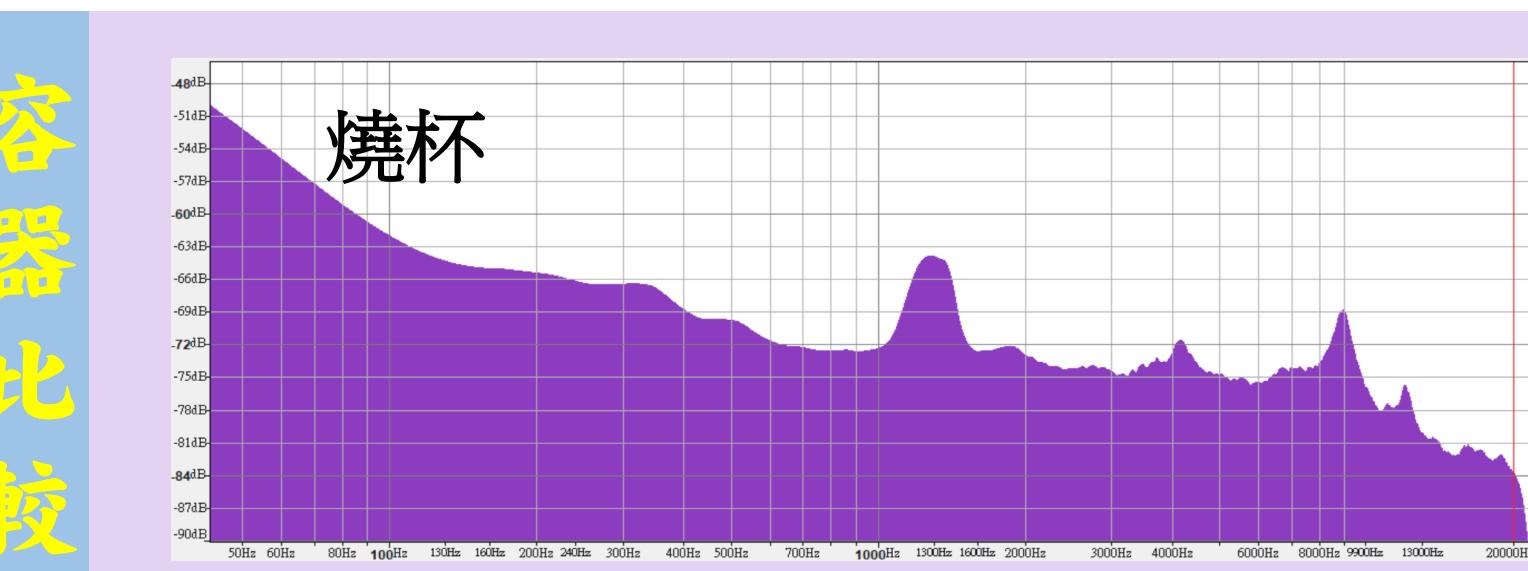


雙氧水剛開始分解的頻譜圖

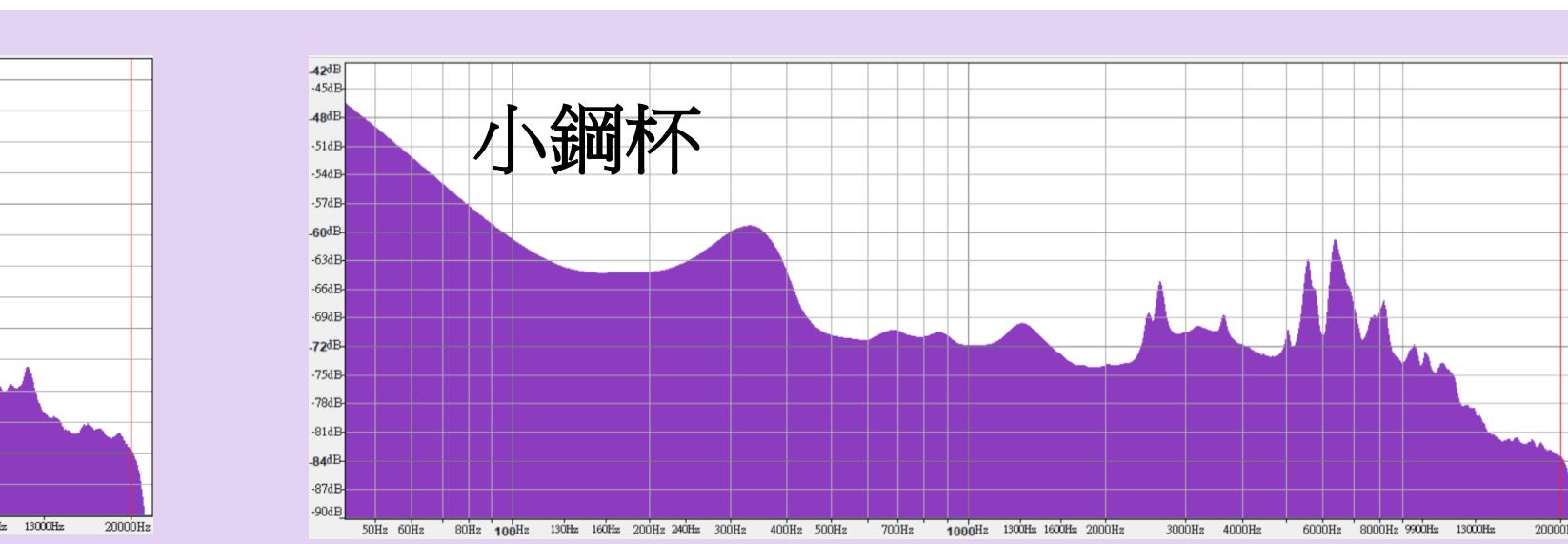


雙氧水分解一段時間的頻譜圖

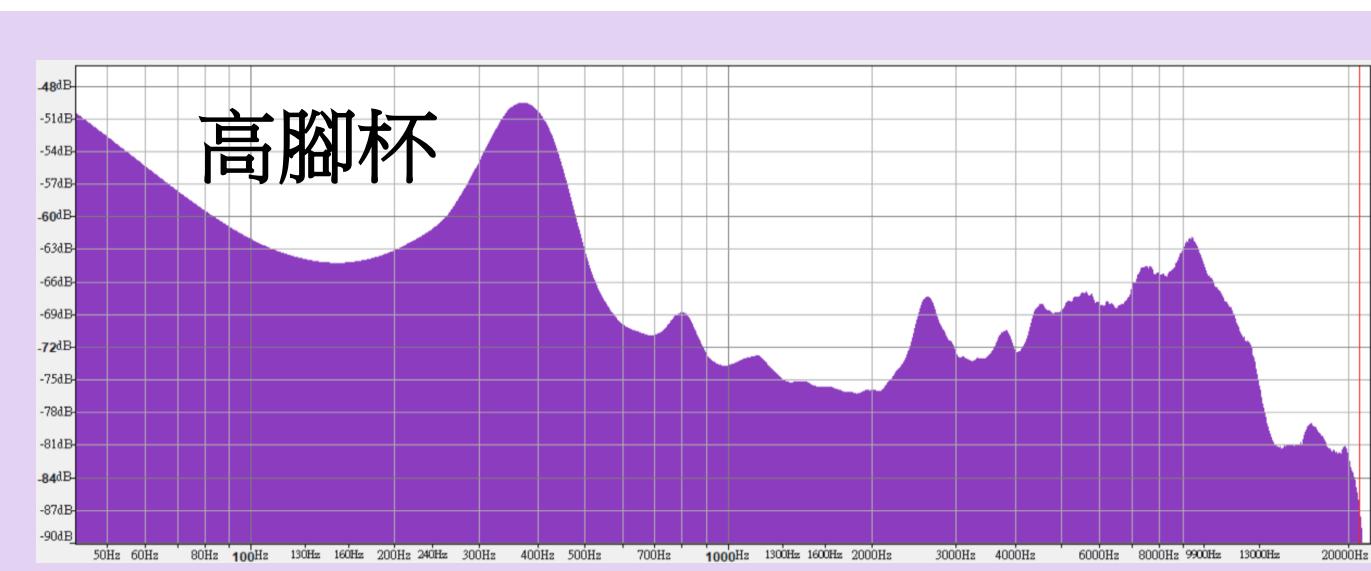
二、尋找最佳反應條件



燒杯



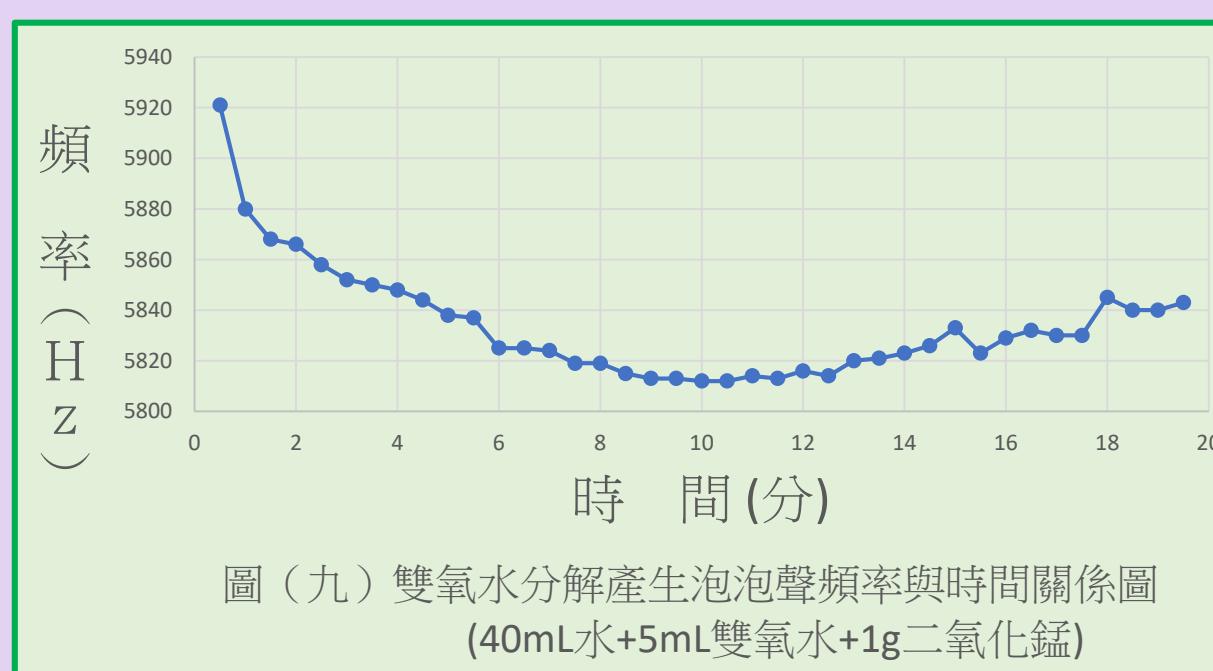
小鋼杯



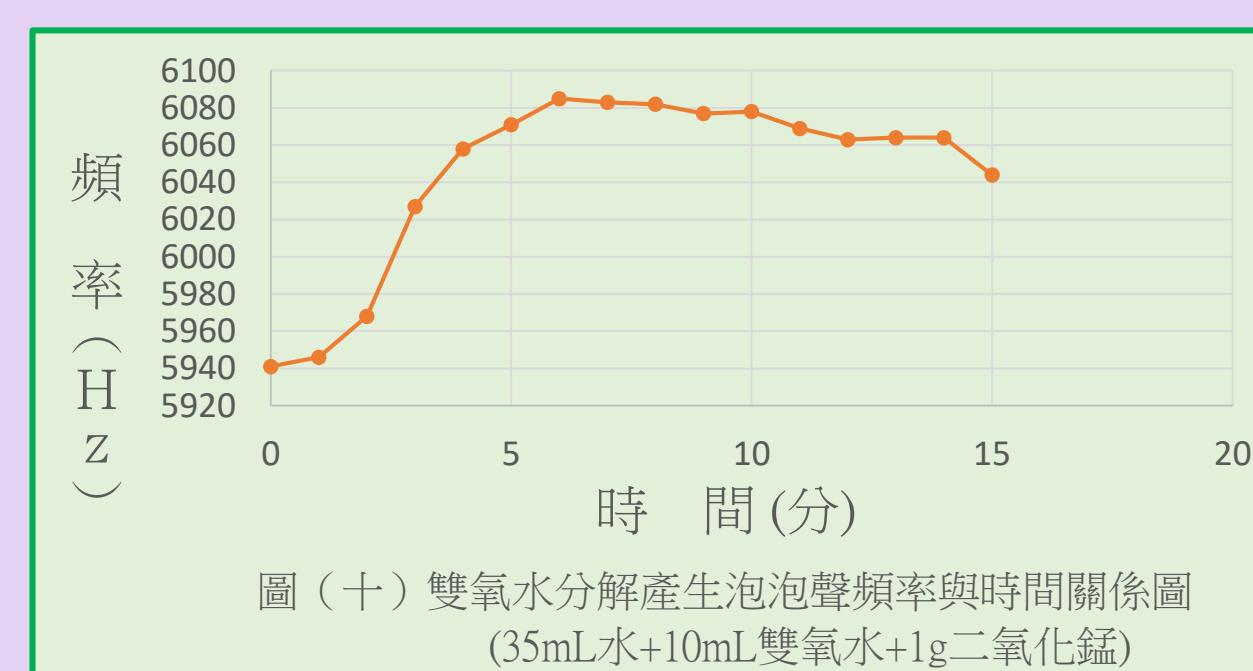
高腳杯

雙氧水在不同容器中分解產生泡泡頻率與時間的頻譜圖

容器比較



圖(九)雙氧水分解產生泡泡聲頻率與時間關係圖
(40mL水+5mL雙氧水+1g二氧化錳)

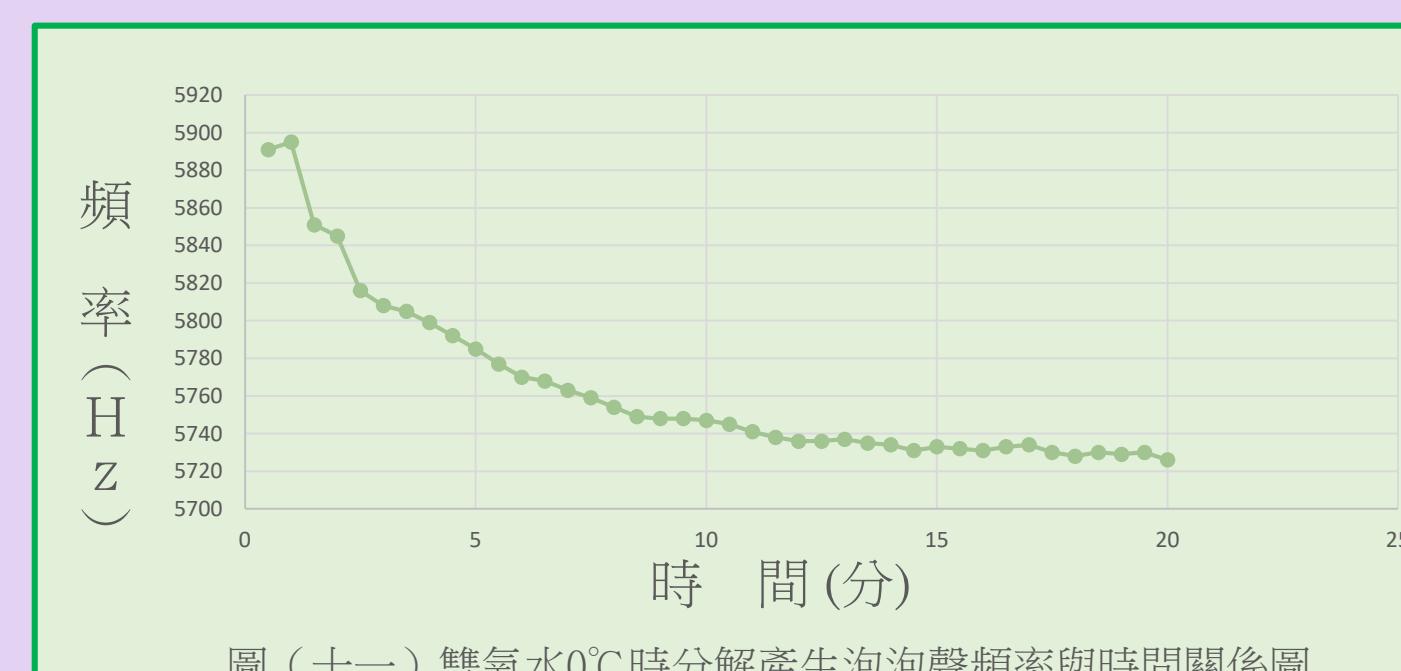


圖(十)雙氧水分解產生泡泡聲頻率與時間關係圖
(35mL水+10mL雙氧水+1g二氧化錳)

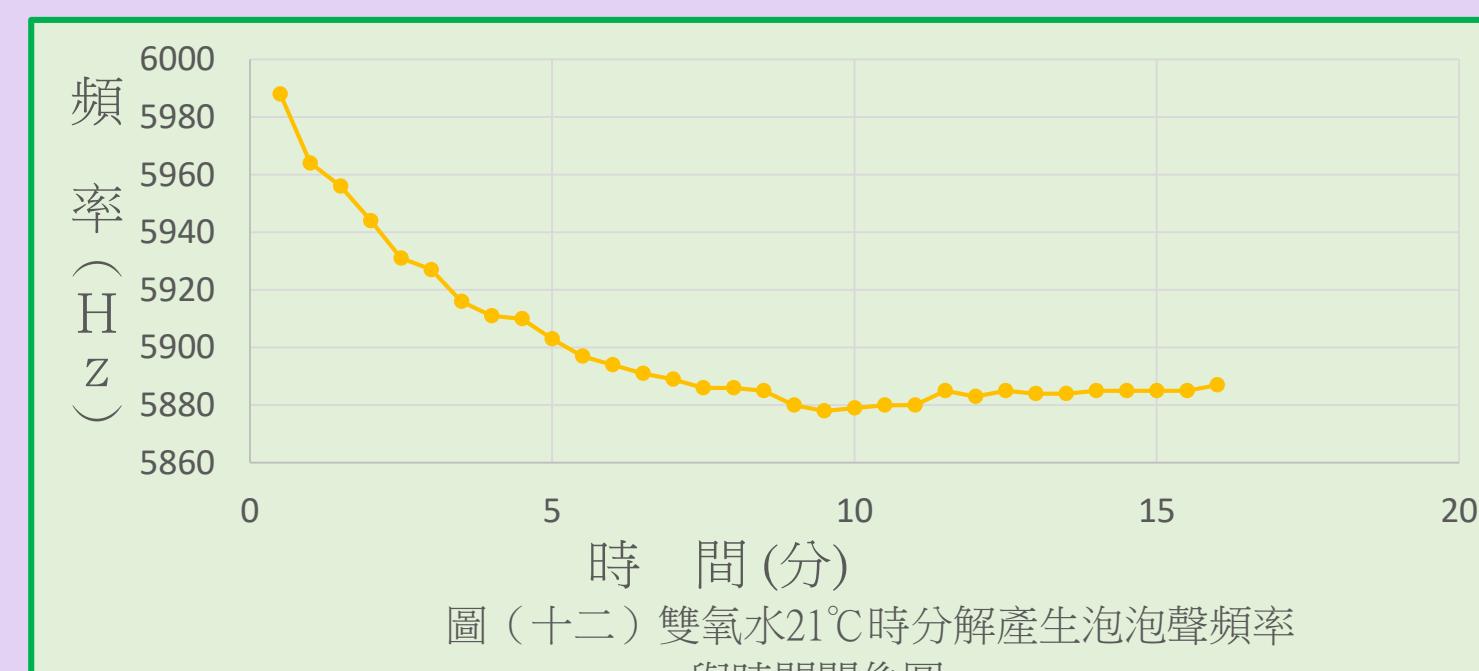
表(一)雙氧水分解產生泡泡聲頻率與時間數據

時間(分)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
頻率(Hz)	5921	5880	5868	5858	5852	5850	5848	5844	5838	5837	5825	5825	
時間(分)	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
頻率(Hz)	5824	5819	5819	5815	5813	5813	5812	5812	5814	5813	5816	5814	5820
時間(分)	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5
頻率(Hz)	5821	5823	5826	5833	5823	5829	5832	5830	5830	5845	5840	5840	5843

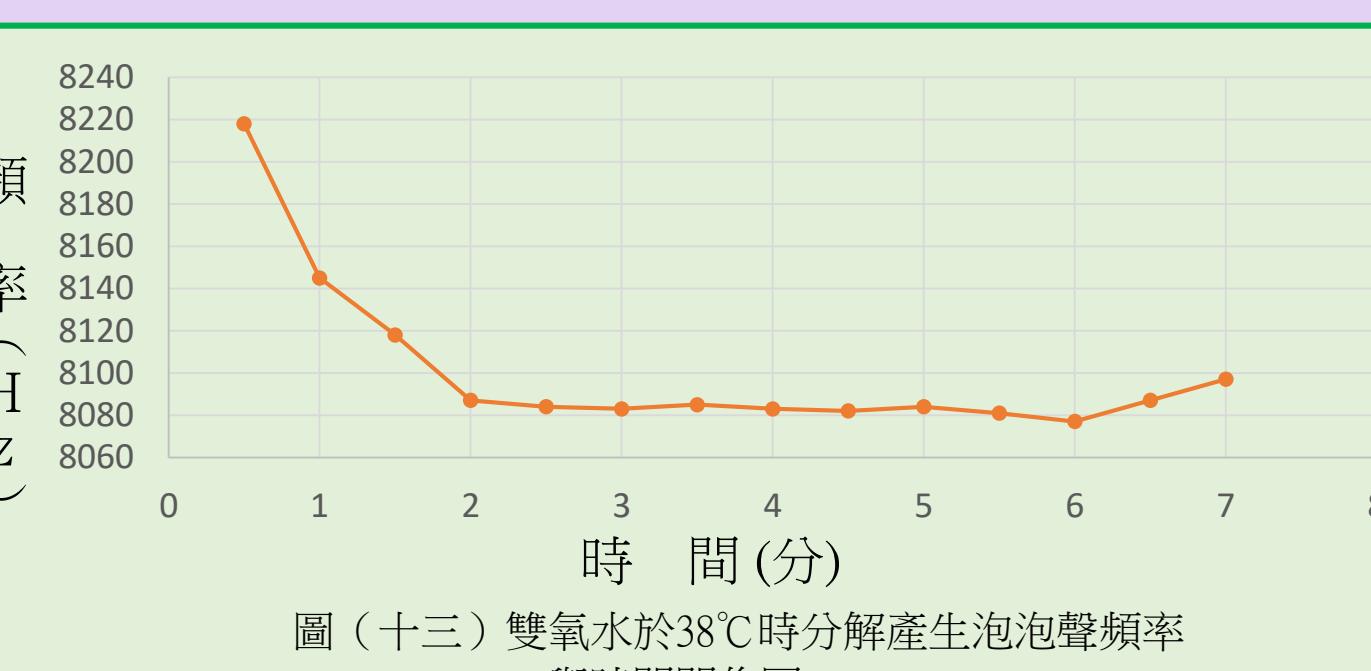
濃度比較



圖(十一)雙氧水0°C時分解產生泡泡聲頻率與時間關係圖



圖(十二)雙氧水21°C時分解產生泡泡聲頻率與時間關係圖



圖(十三)雙氧水於38°C時分解產生泡泡聲頻率與時間關係圖

三、測量反應級數、速率常數及活化能

(一)原理

以上三個反應都會產生相近頻率的泡泡聲，這些泡泡聲是因為氣泡的生成與膨脹造成液體震動所產生的，其產生的機制如下(Leighton, 1994; Minnaert, 1933)：

1氣泡生成與膨脹造成液體震動

A氣泡從零體積突然生成 \rightarrow 快速擴張

B液體為了「讓位」給氣泡 \rightarrow 發生壓縮與回彈

C液體壓力的變化會產生壓力波 \rightarrow 聲音傳出

2氣泡在水中震盪(共振)

A氣泡在生成後不會馬上穩定，而是會膨脹與收縮

B這種震盪會以特定頻率進行，此頻率可用Minnaert頻率公式預測。

C每次氣泡震盪都會讓周圍液體發出聲波

3通常產生的氣泡速率越快，體積就越小其頻率會越高；

氣泡體積越大其頻率就會越低。

	反應速率快	反應速率慢
氣泡體積	較小	較大
氣泡聲頻率	較高	較低

註：Minnaert 頻率公式

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{3\gamma P_0 + \frac{4\sigma}{R}}{\rho}}$$

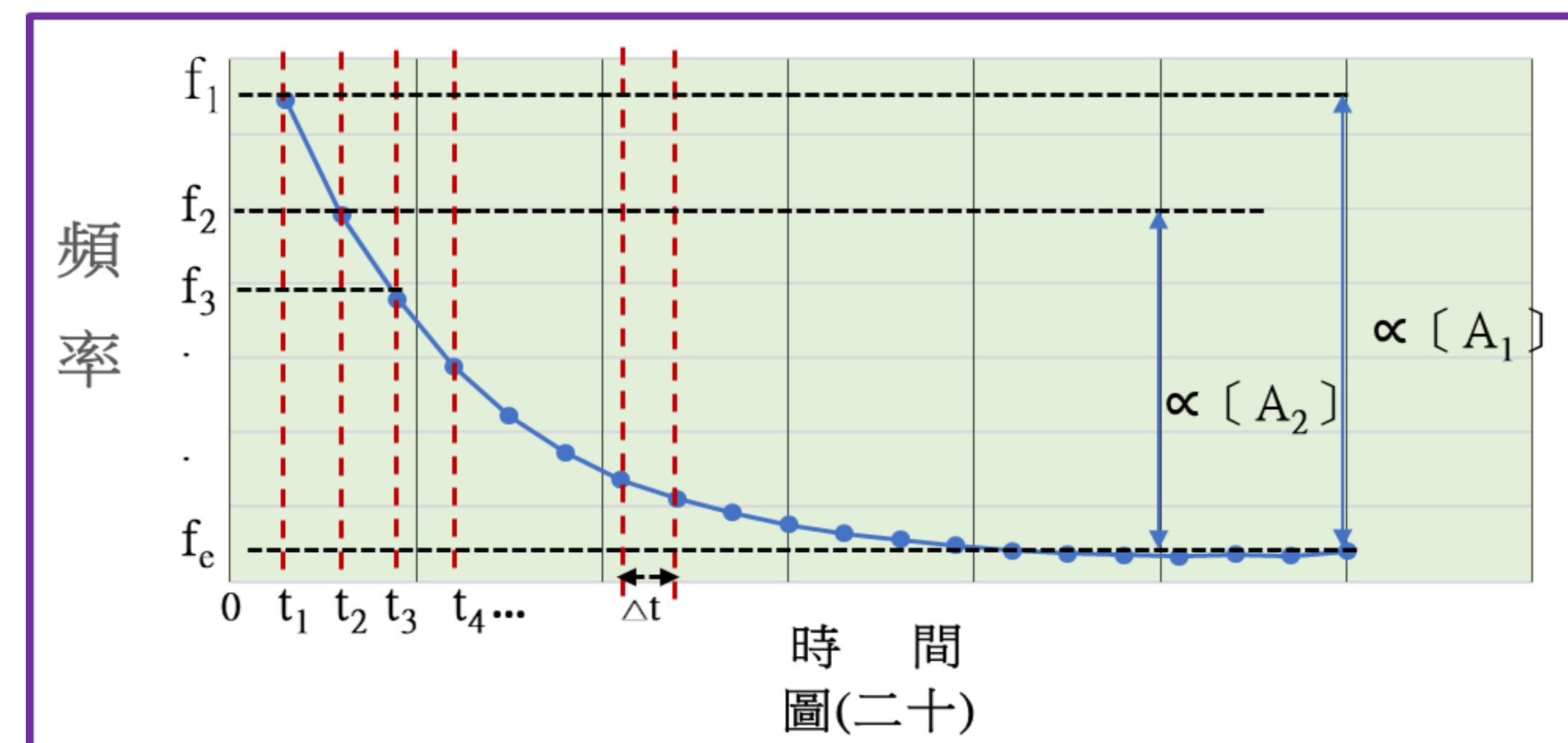
(二)理論設定

若有一反應： $A_{(aq)} + B_{(s)} \rightarrow C_{(g)}$ ，我們以測量頻率方式測得其頻率隨時間關係圖如右圖。

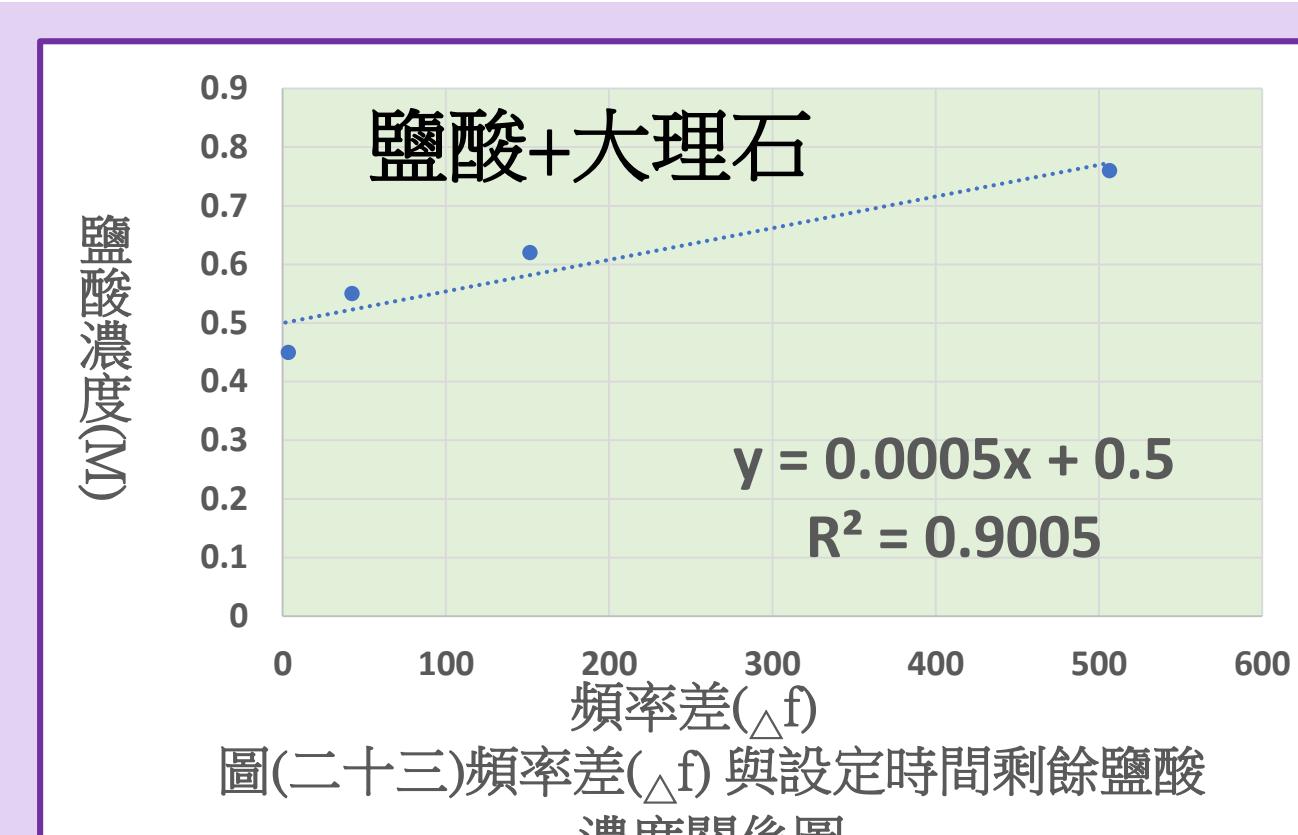
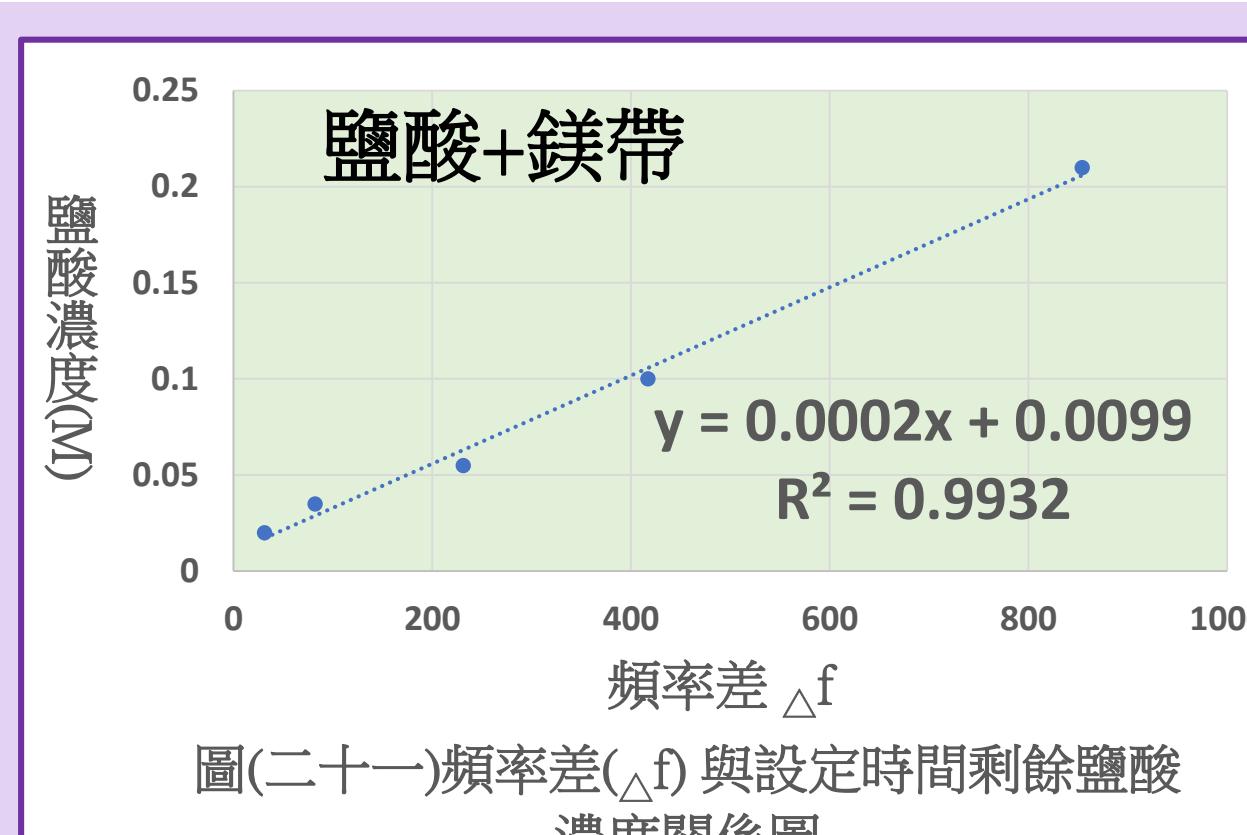
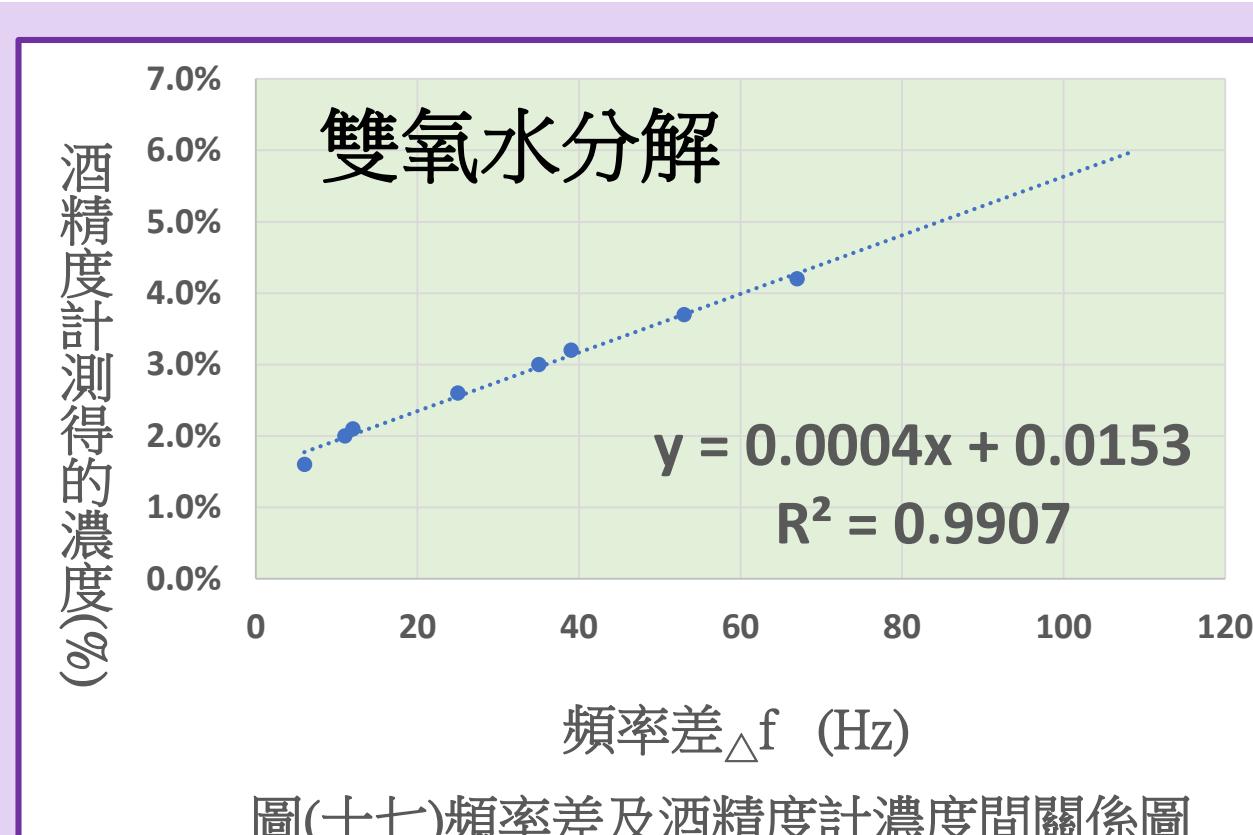
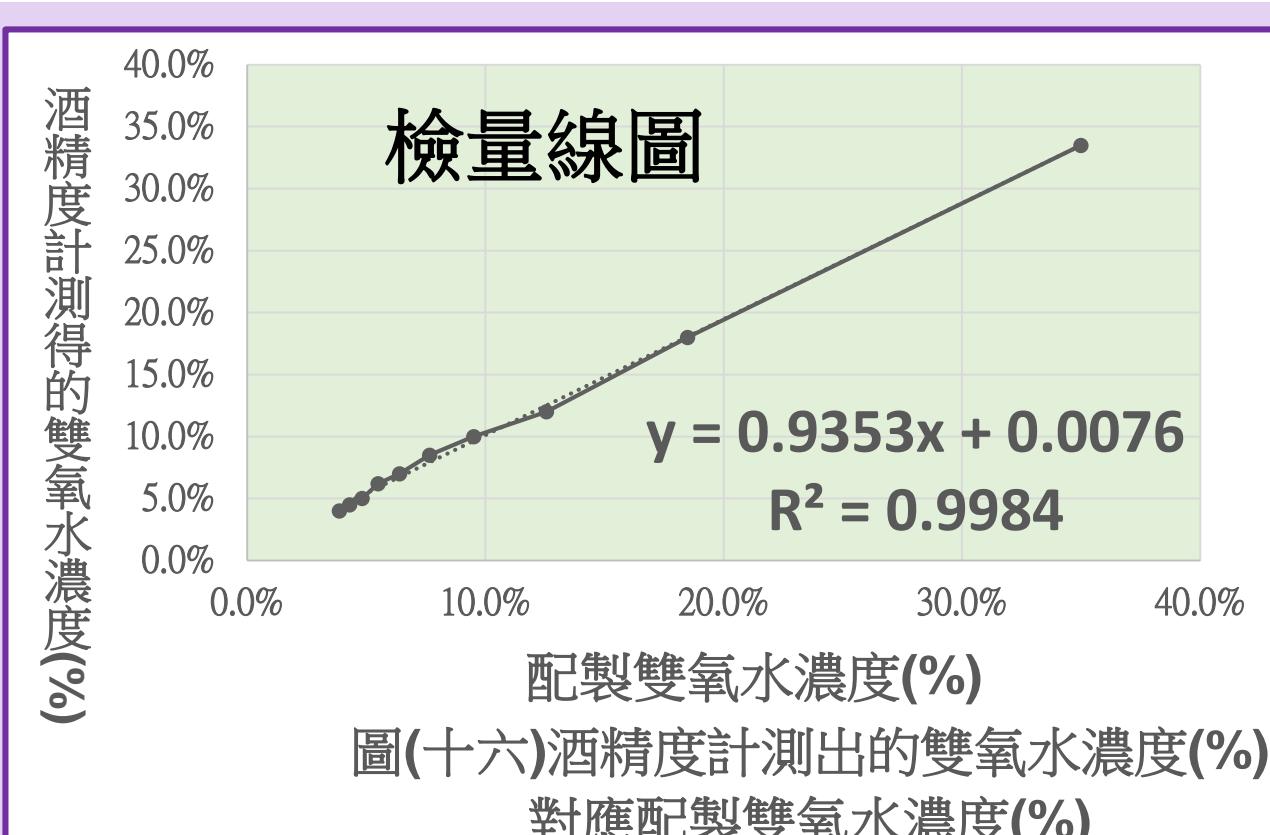
假設將 $0 \sim t_1$ 秒內測到的頻率 f_1 定義為 t_1 時刻的頻率；

將反應 $t_1 \sim t_2$ 秒內測到的頻率 f_2 定義為 t_2 時刻的頻率…，

而整個反應在頻率趨於穩定達到平衡或結束反應時的頻率為 f_e ，尤其是實驗時我們盡量使用低濃度的反應物，因此頻率達穩定值 f_e 時反應物的濃度已經很低，所以我們認為此時頻率達平衡前各時間點的頻率和平衡頻率 f_e 間的頻率差(Δf)和反應物濃度有正比的關係，也就是可以將頻率差(Δf)視為各個時間點的反應物濃度。



(三)證明 $[反應物] \propto \Delta f$



酒精度計可作為測量雙氧水濃度的儀器

頻率差(Δf) \propto 反應物濃度

(四)公式推導

1 以驗證法驗證雙氧水分解是一級反應

若雙氧水分解是一級反應，則其

$\log \Delta f$ 與時間 t 關係圖會是一條斜率為負的直線。

因為 H_2O_2 濃度及時間 t 的關係可用下列方程式表示：

$$\log[H_2O_2] = \frac{-k}{2.303}t + \log[H_2O_2]_0$$

因為 $[H_2O_2] \propto \Delta f \Rightarrow [H_2O_2] = a \times \Delta f$ (a為倍數)

$$\Rightarrow \log(a \times \Delta f) = \frac{-k}{2.303}t + \log(a \times \Delta f_0)$$

$$\Rightarrow \log a + \log \Delta f = \frac{-k}{2.303}t + \log a + \log \Delta f_0$$

$$\Rightarrow \log \Delta f = \frac{-k}{2.303}t + \log \Delta f_0$$

且此時 $\log \Delta f$ 與時間關係圖中圖形的斜率 = $\frac{-k}{2.303}$

\Rightarrow 速率常數 $k = -2.303 \times$ 斜率

2 非一級反應級法求法

因為反應物的濃度和頻率差成正比

$$\Rightarrow [A_1] = a \times (f_1 - f_e) \quad [A_2] = a \times (f_2 - f_e)$$

速率反應式為 $R = k [A]^n$ 可以改寫為

$$\Rightarrow \frac{[A_2] - [A_1]}{\Delta t} = k \left[\frac{[A_1] + [A_2]}{2} \right]^n$$

$$\Rightarrow \frac{[A_1] - [A_2]}{\Delta t} = k \left[\frac{[A_1] + [A_2]}{2} \right]^n$$

$$\Rightarrow \frac{(a \times (f_1 - f_e) - a \times (f_2 - f_e))}{\Delta t} = k \left[\frac{(a \times (f_1 - f_e) + a \times (f_2 - f_e))}{2} \right]^n$$

$$\Rightarrow \frac{a \times (f_1 - f_2)}{\Delta t} = k \left[\frac{a \times ((f_1 + f_2) - 2f_e)}{2} \right]^n$$

$$\Rightarrow \log \left(\frac{a \times (f_1 - f_2)}{\Delta t} \right) = \log \left(k \left[\frac{a \times ((f_1 + f_2) - 2f_e)}{2} \right]^n \right)$$

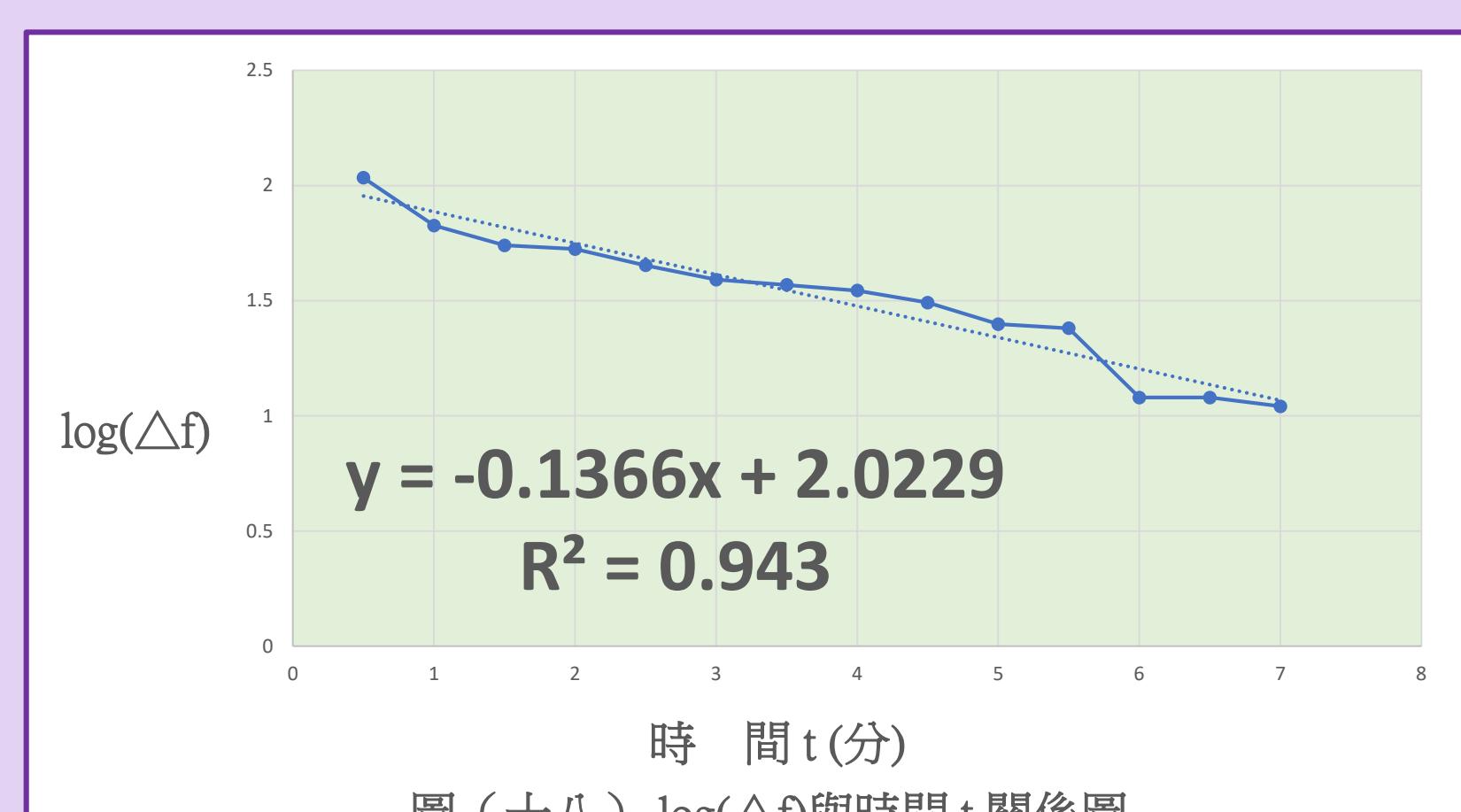
$$\Rightarrow \log(f_1 - f_2) = n \log \left[\frac{f_1 + f_2 - 2f_e}{2} \right] + (\log k + (n - 1) \times \log a + \log(\Delta t))$$

以 $\log(\text{分段頻率差})$ 對 $\log(\text{分段平均頻率})$ 作圖，圖形斜率即為反應級數 n

(設 $(f_1 - f_2)$ 為分段頻率差、 $\frac{(f_1 + f_2) - 2f_e}{2}$ 為分段平均頻率)

(五)測量

1 驗證雙氧水的反應級數



$\log \Delta f$ 與時間 t 關係圖

呈一斜直線

雙氧水分解是一級反應

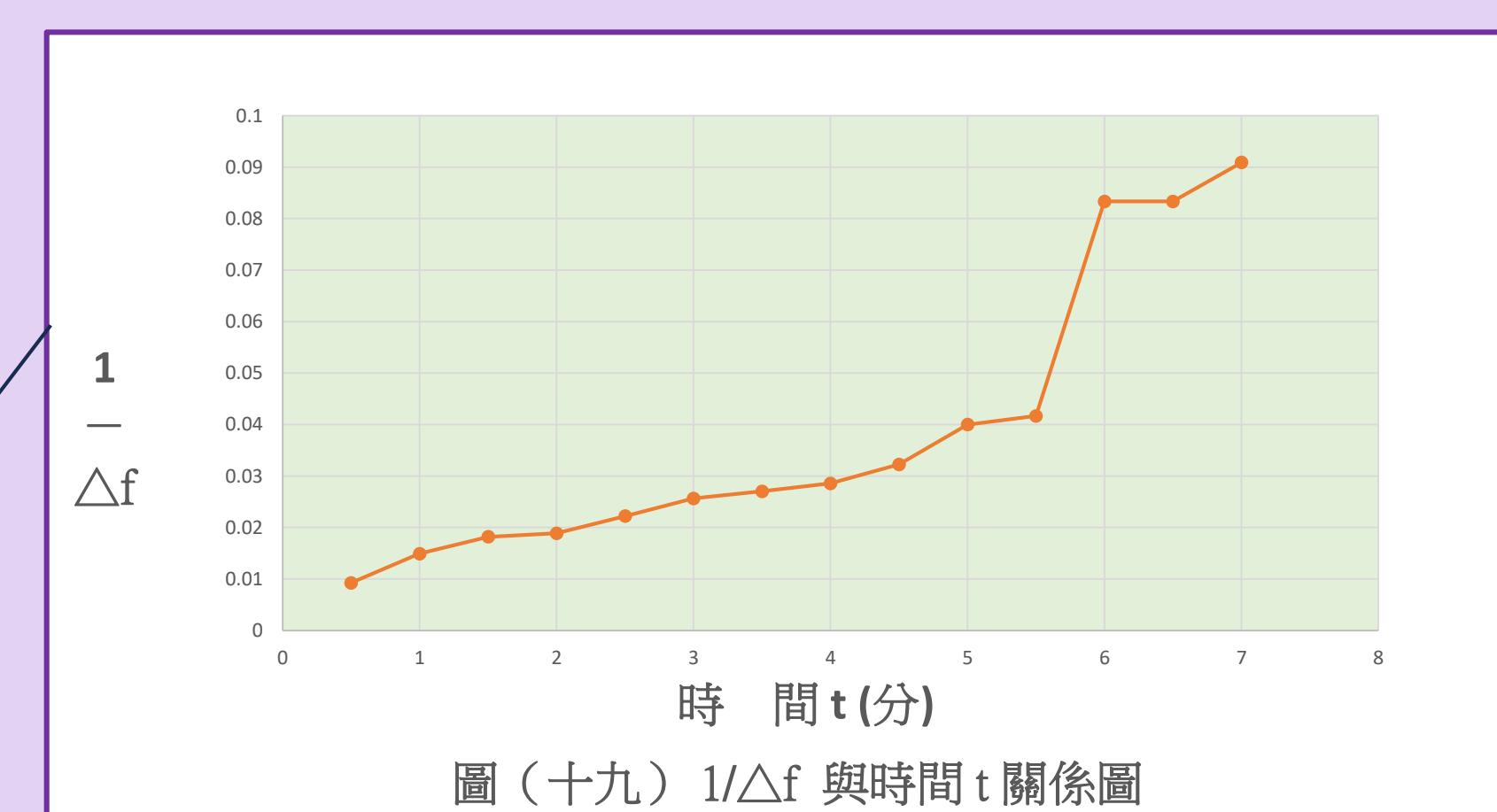
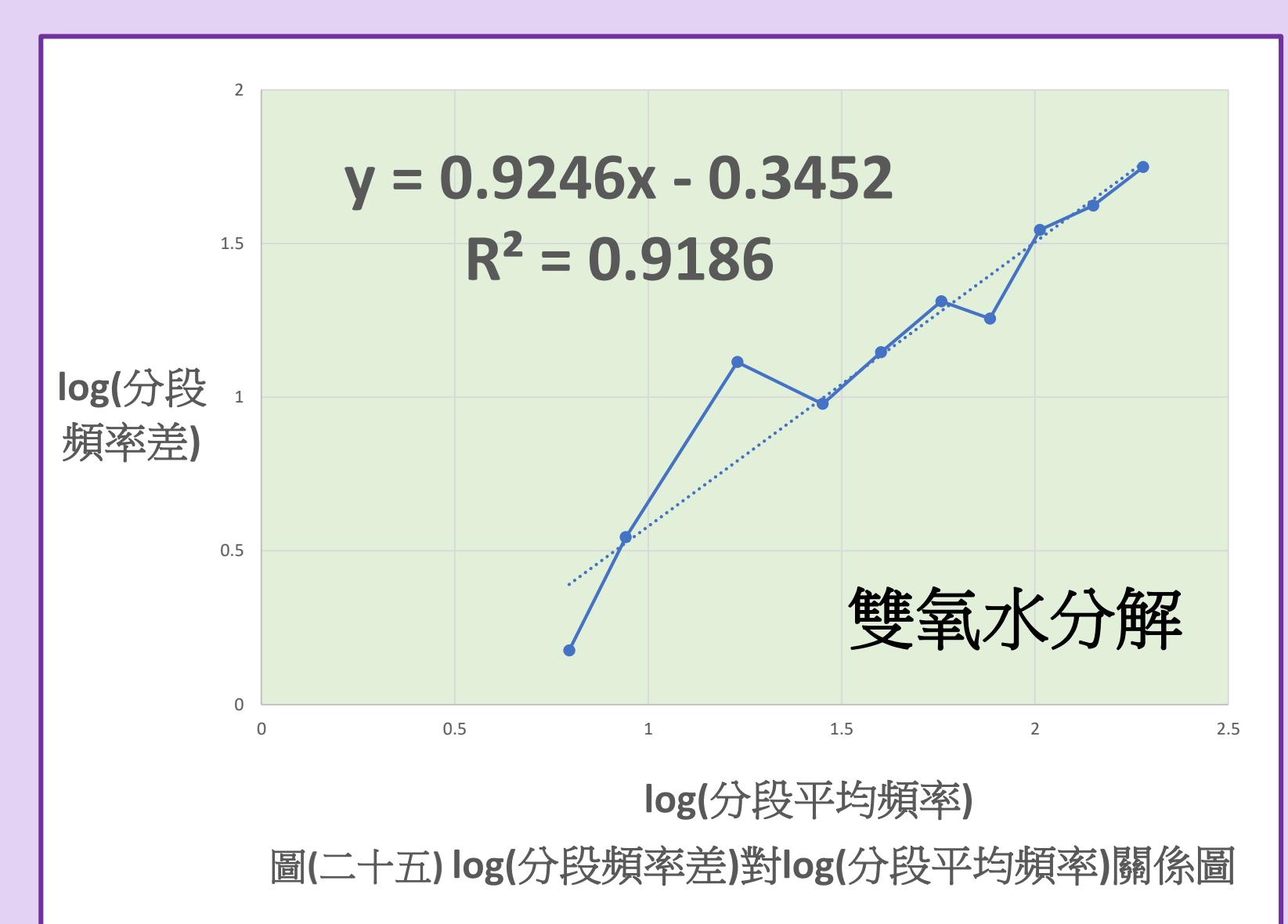
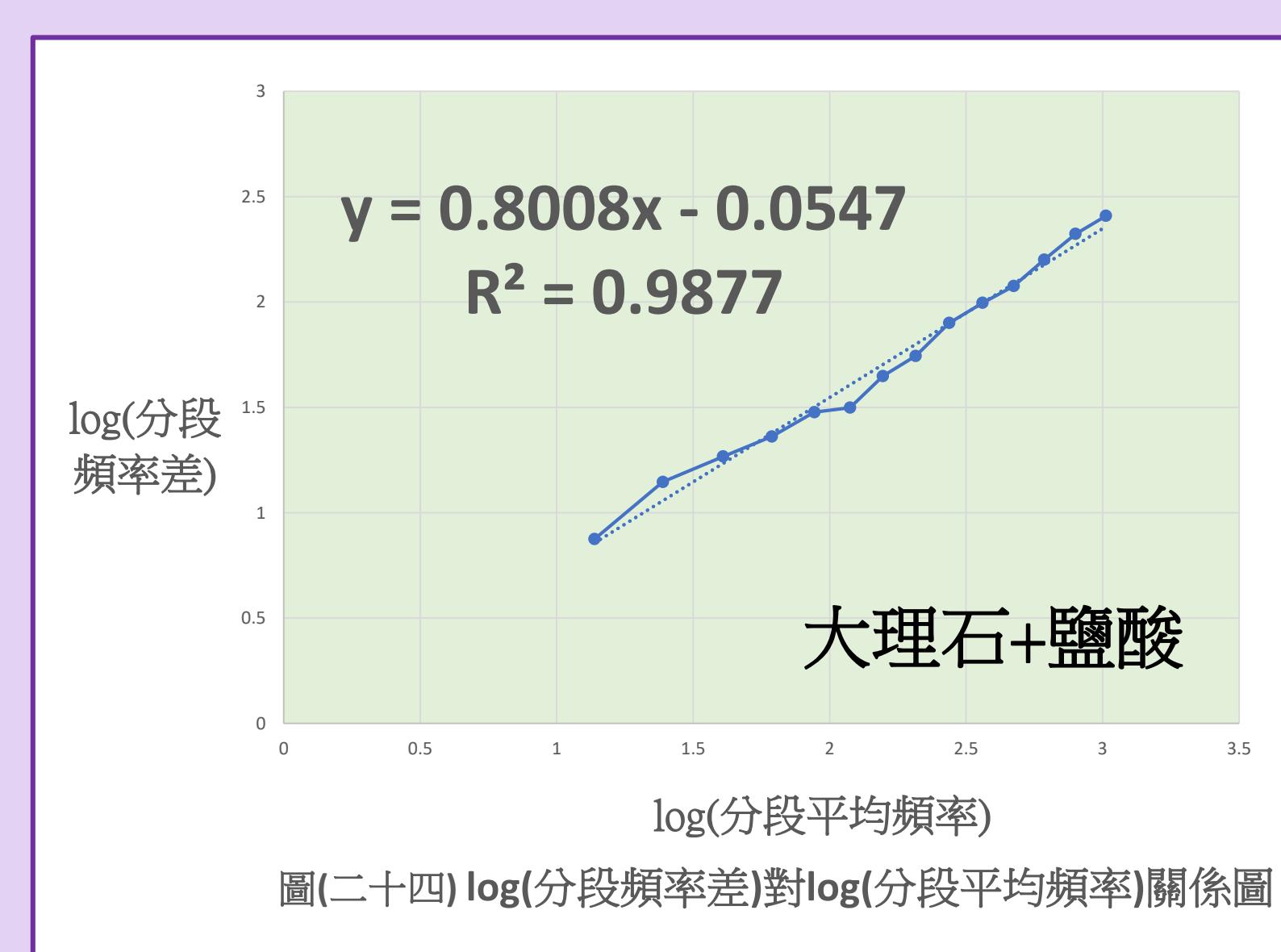
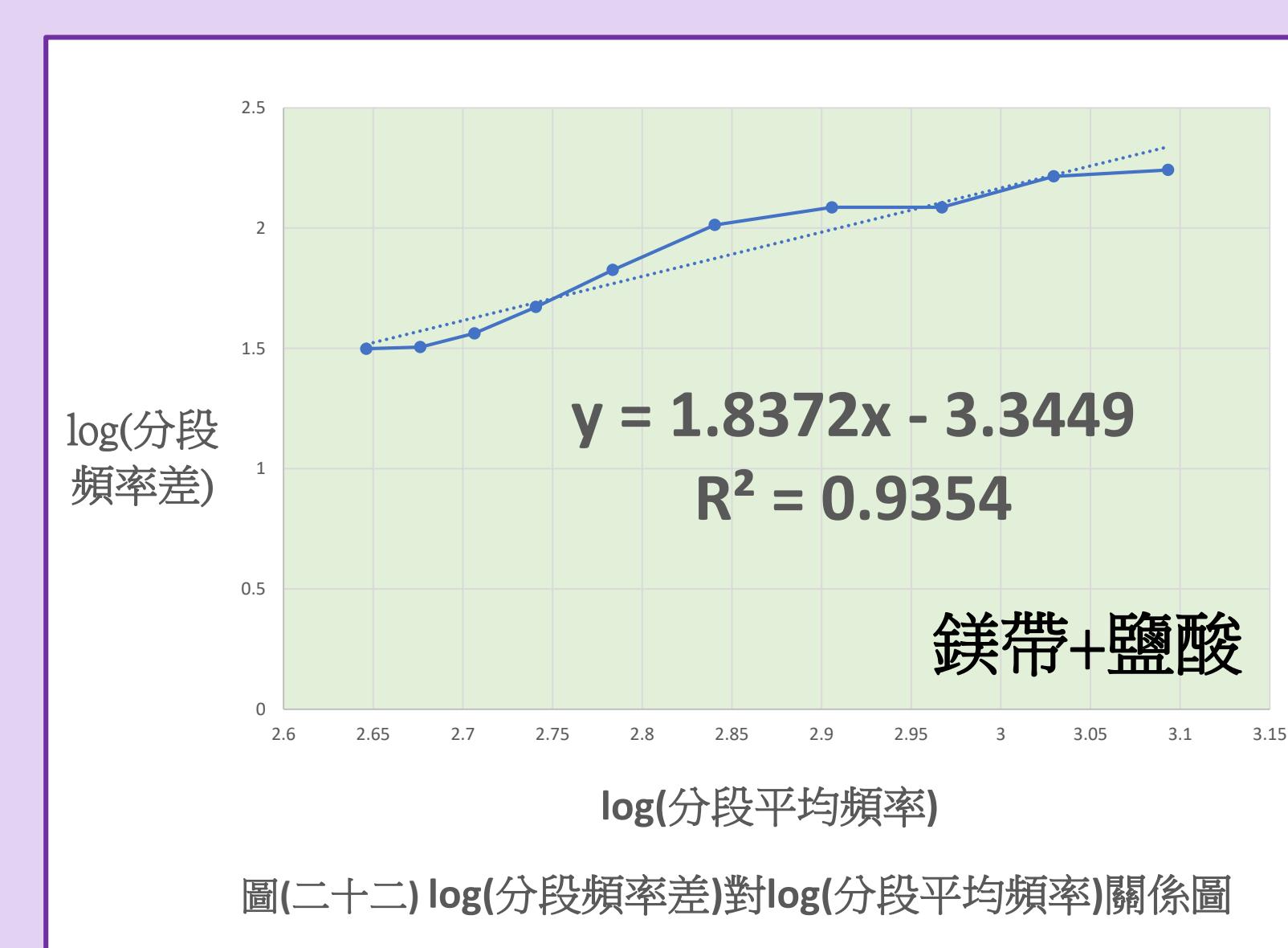


圖 (十九) $1/\Delta f$ 與時間 t 關係圖

2 推導其他反應級數



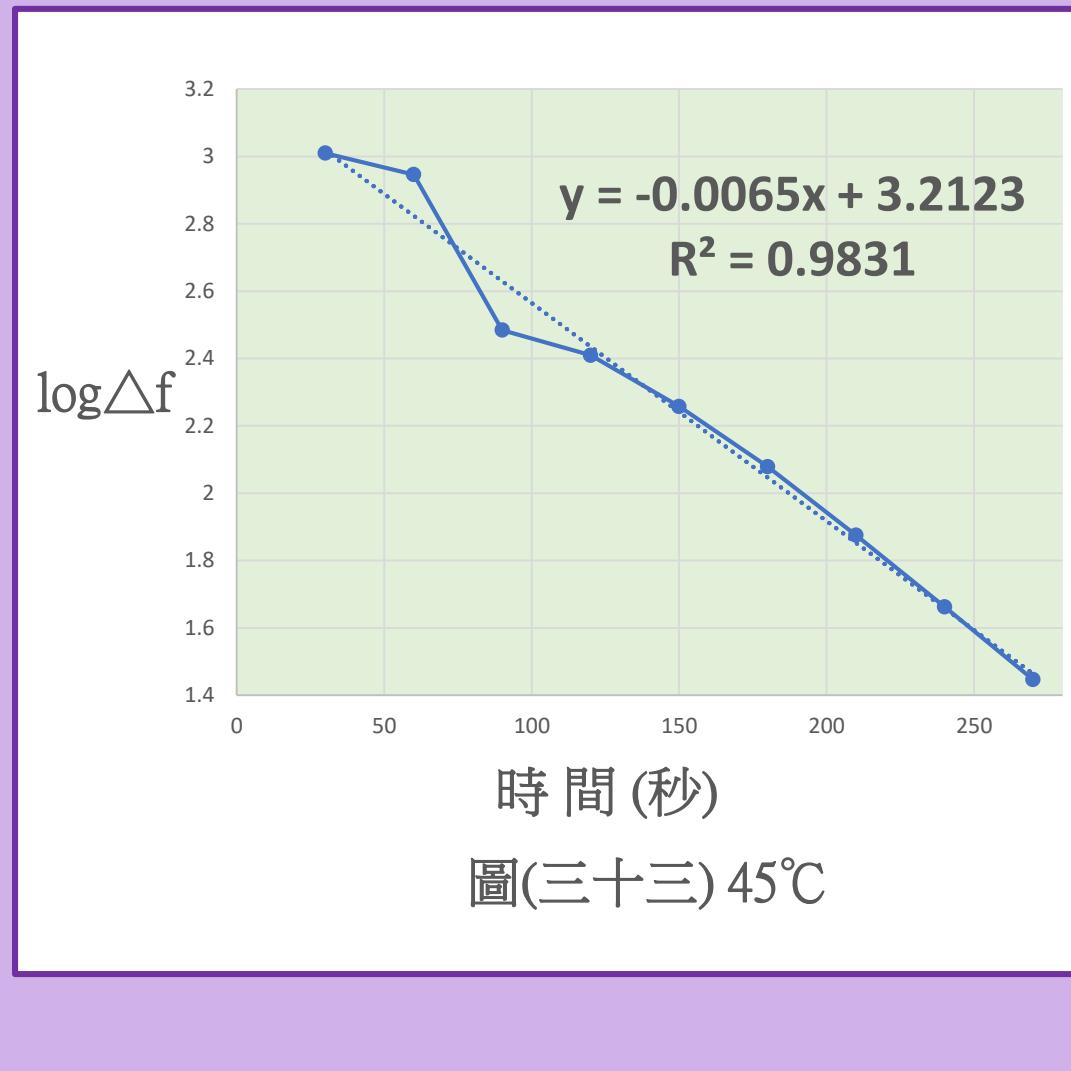
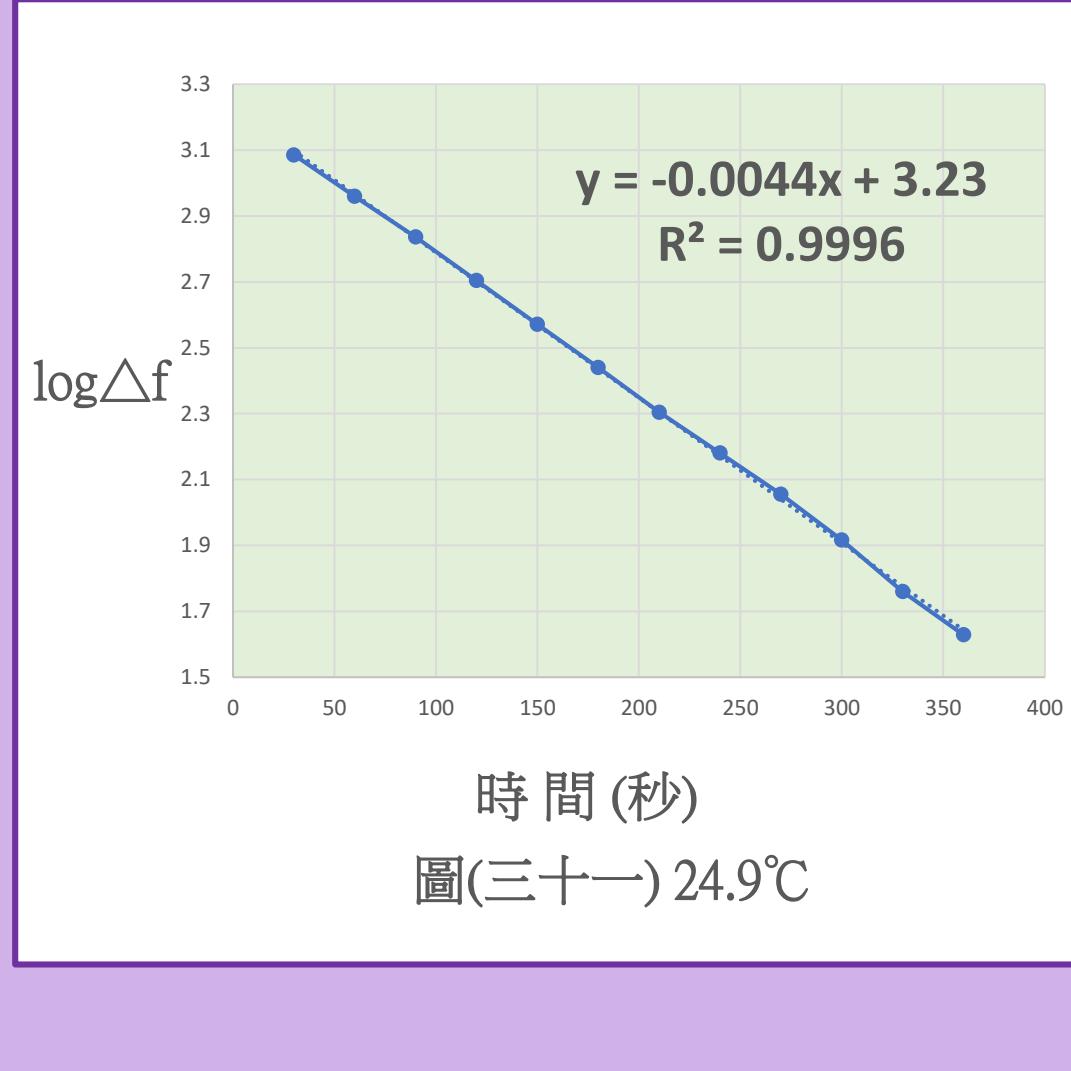
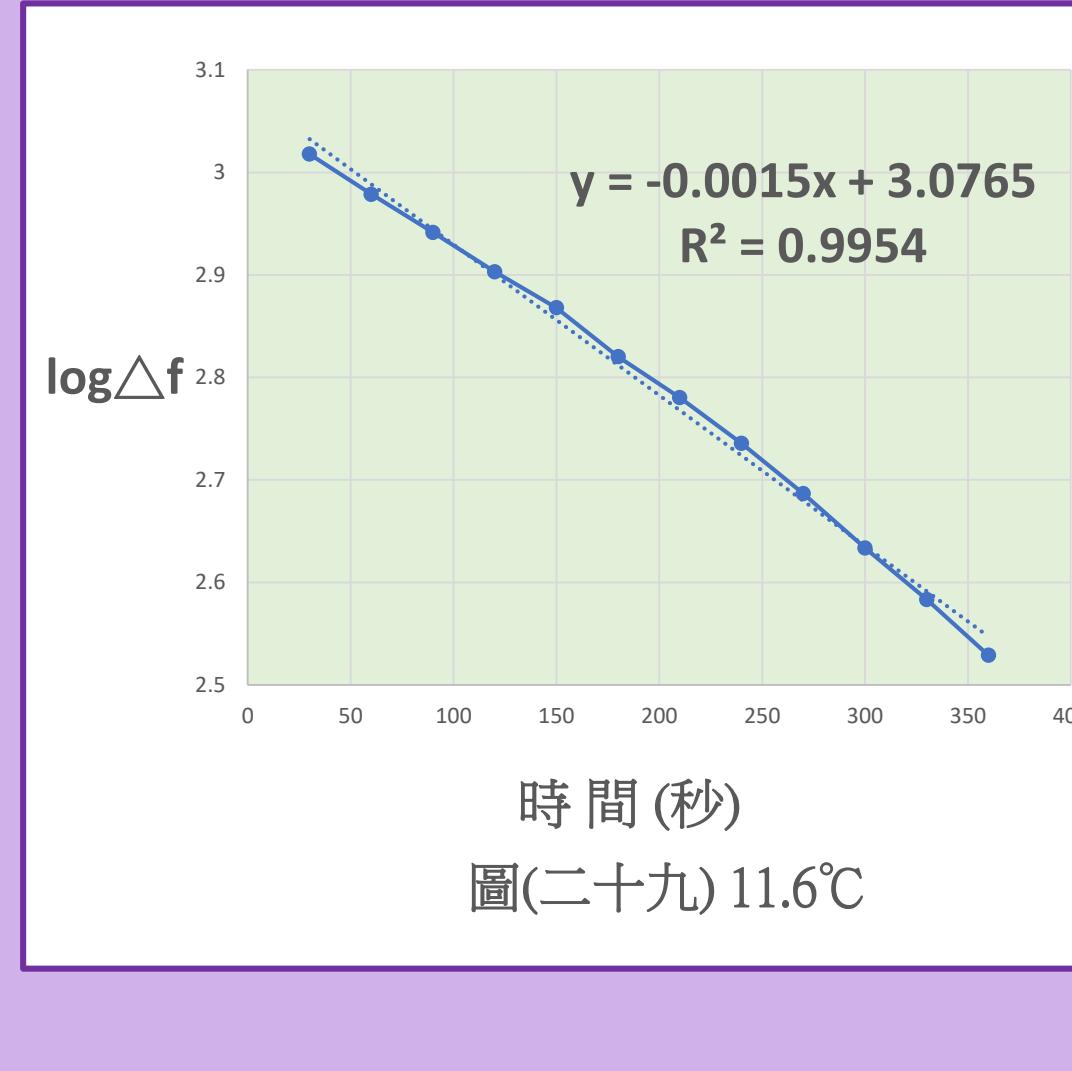
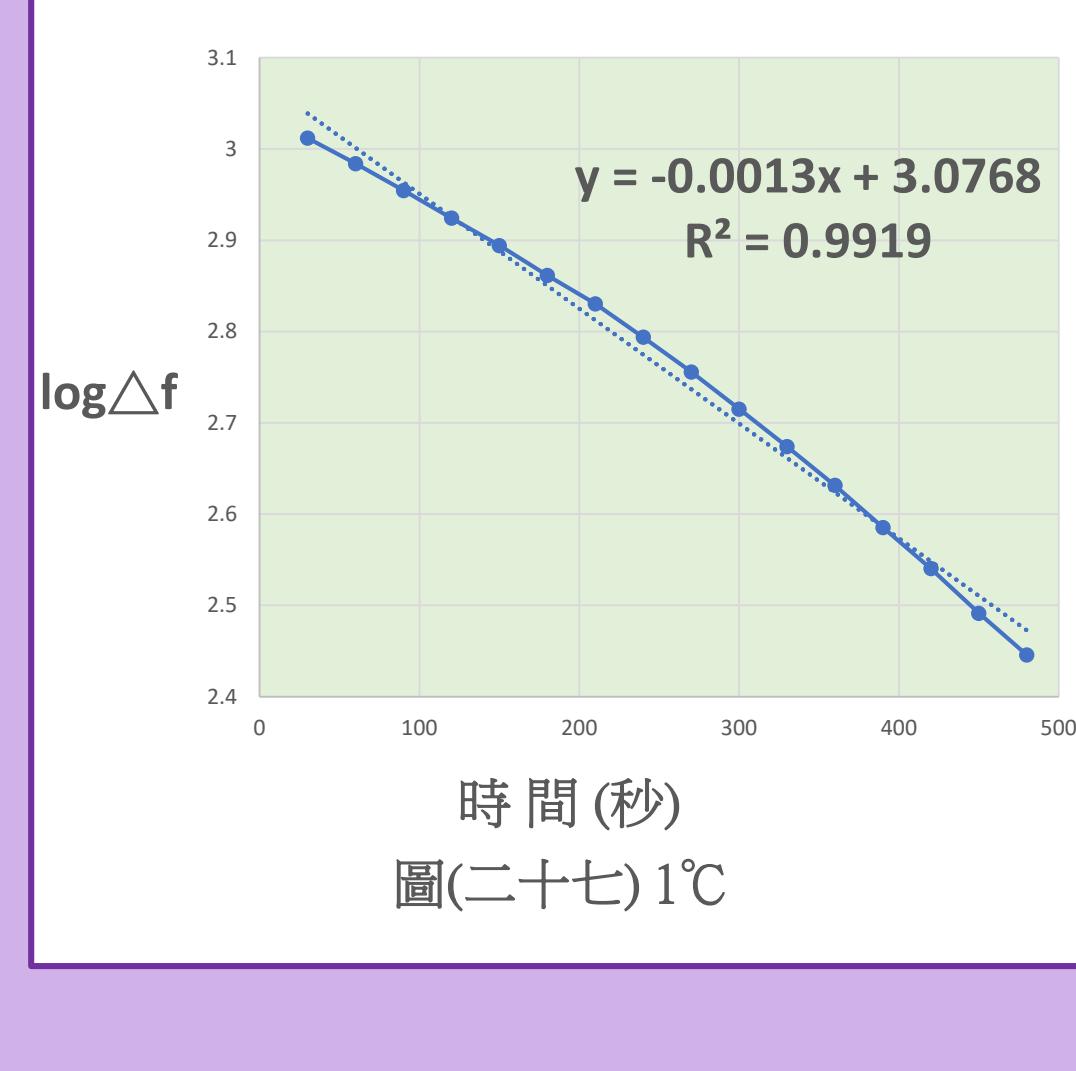
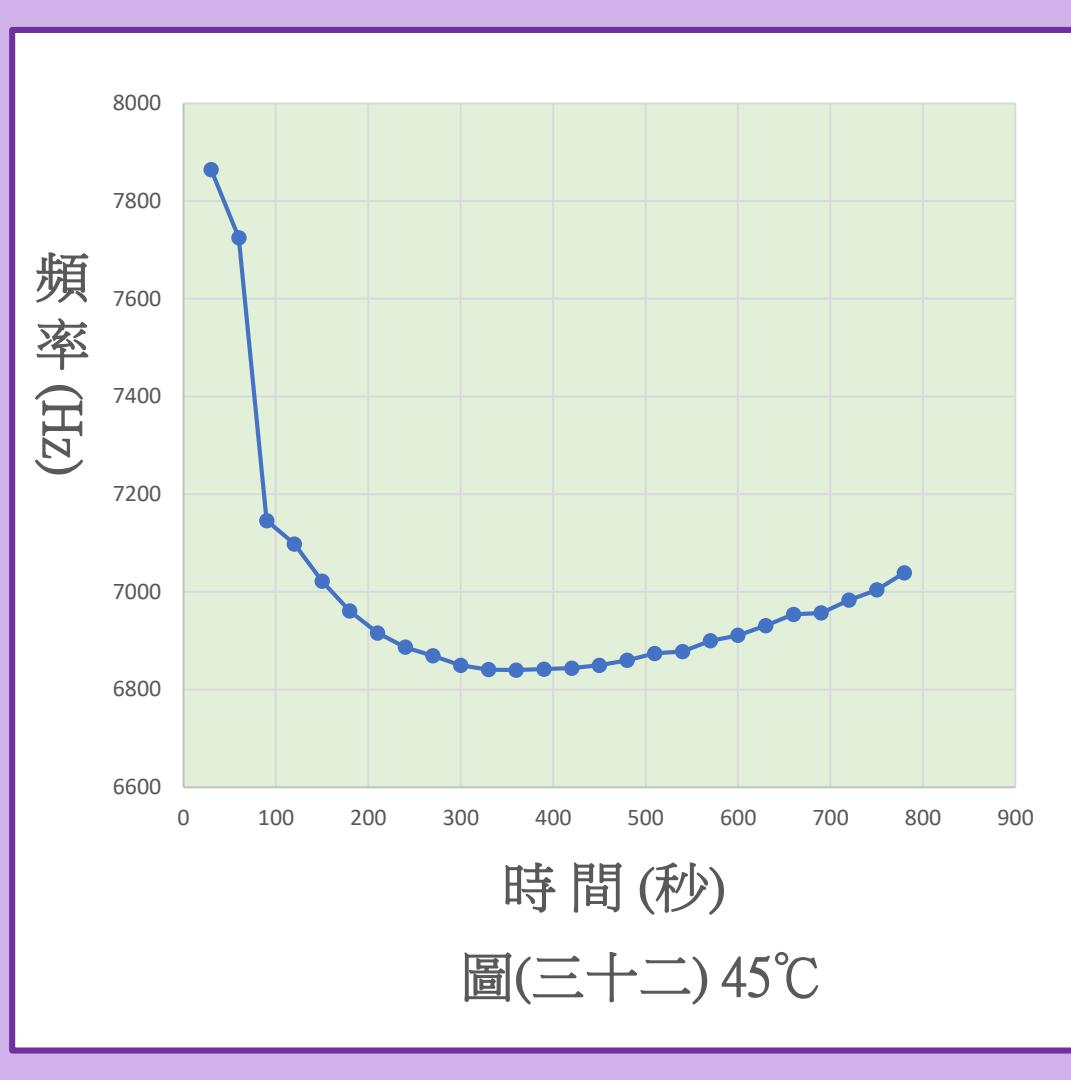
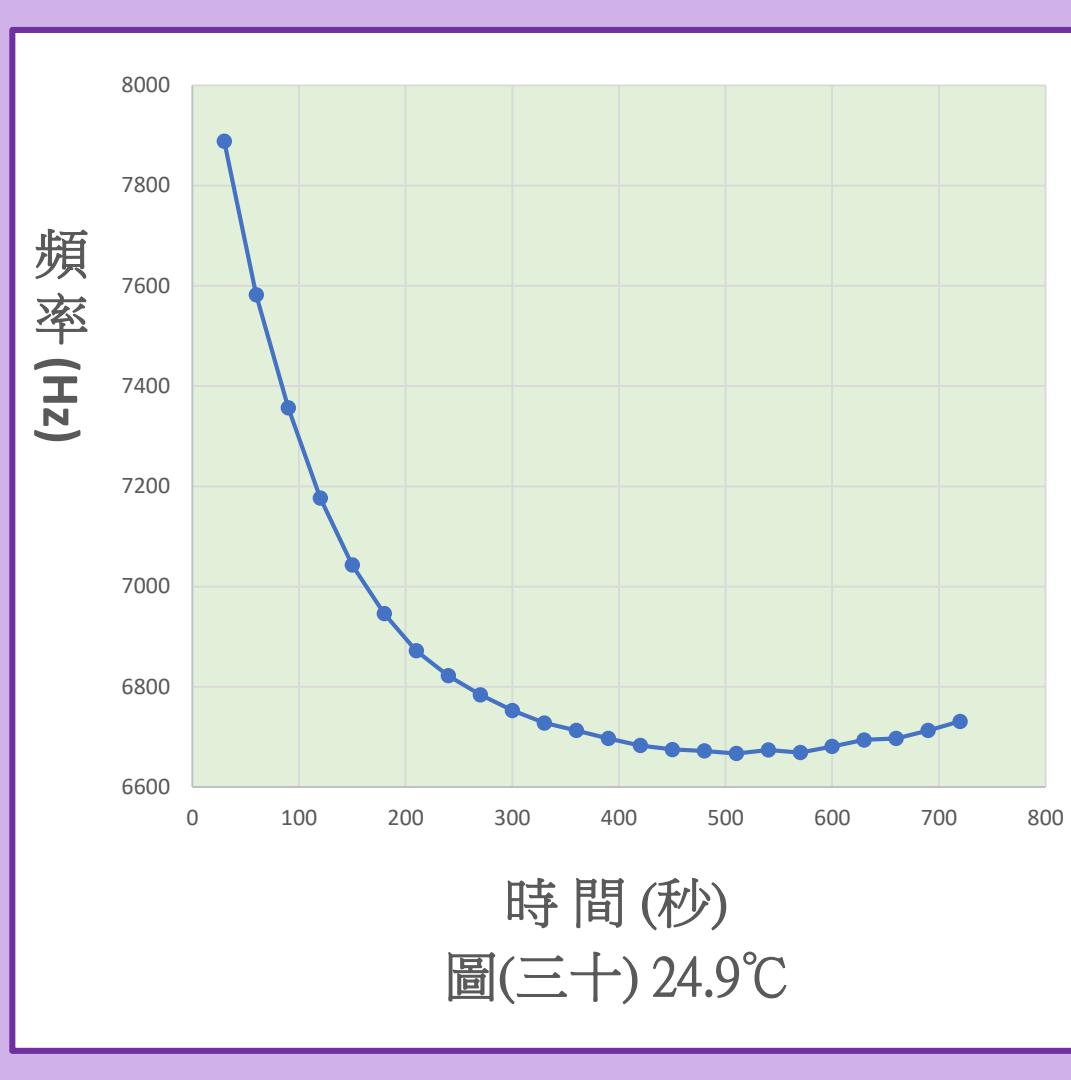
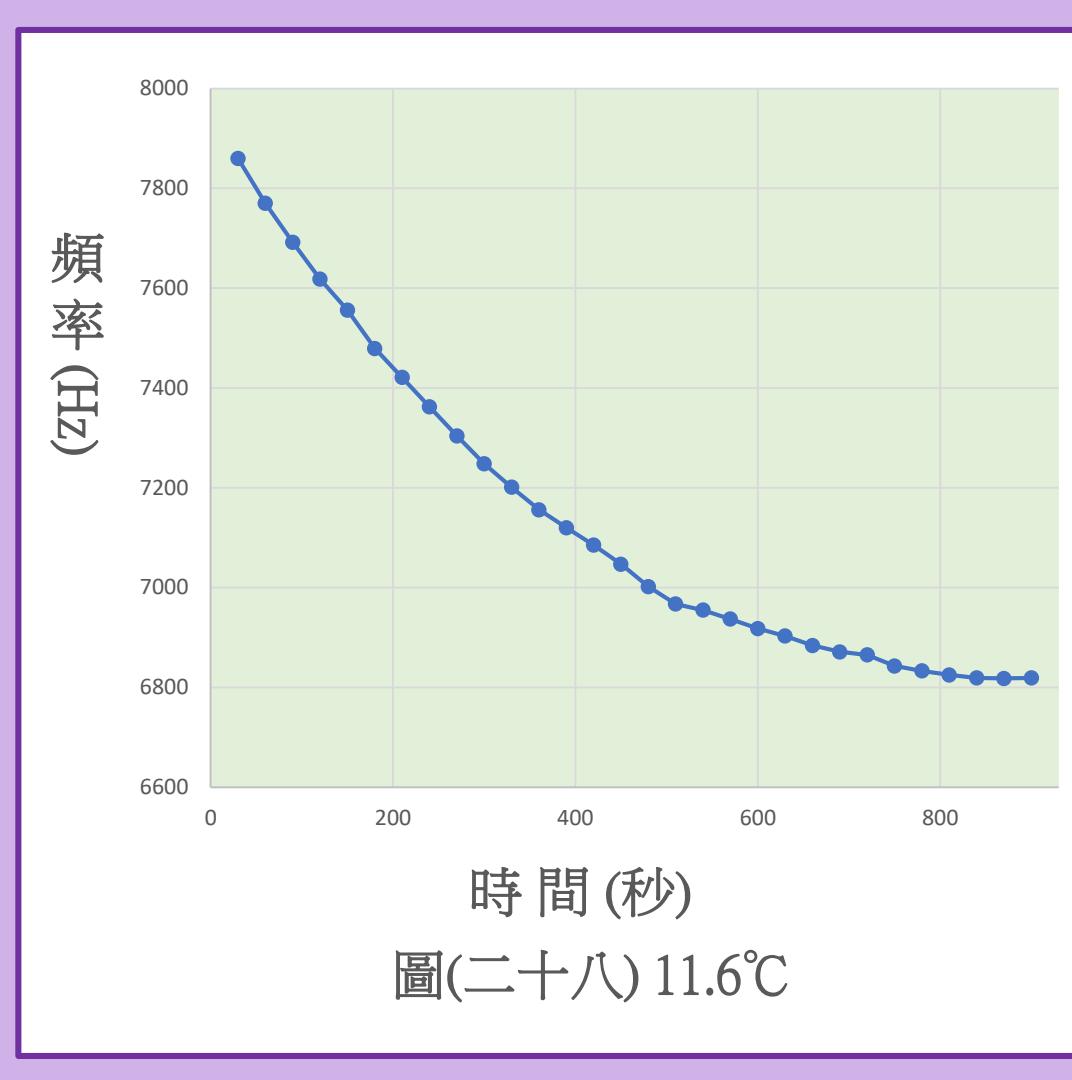
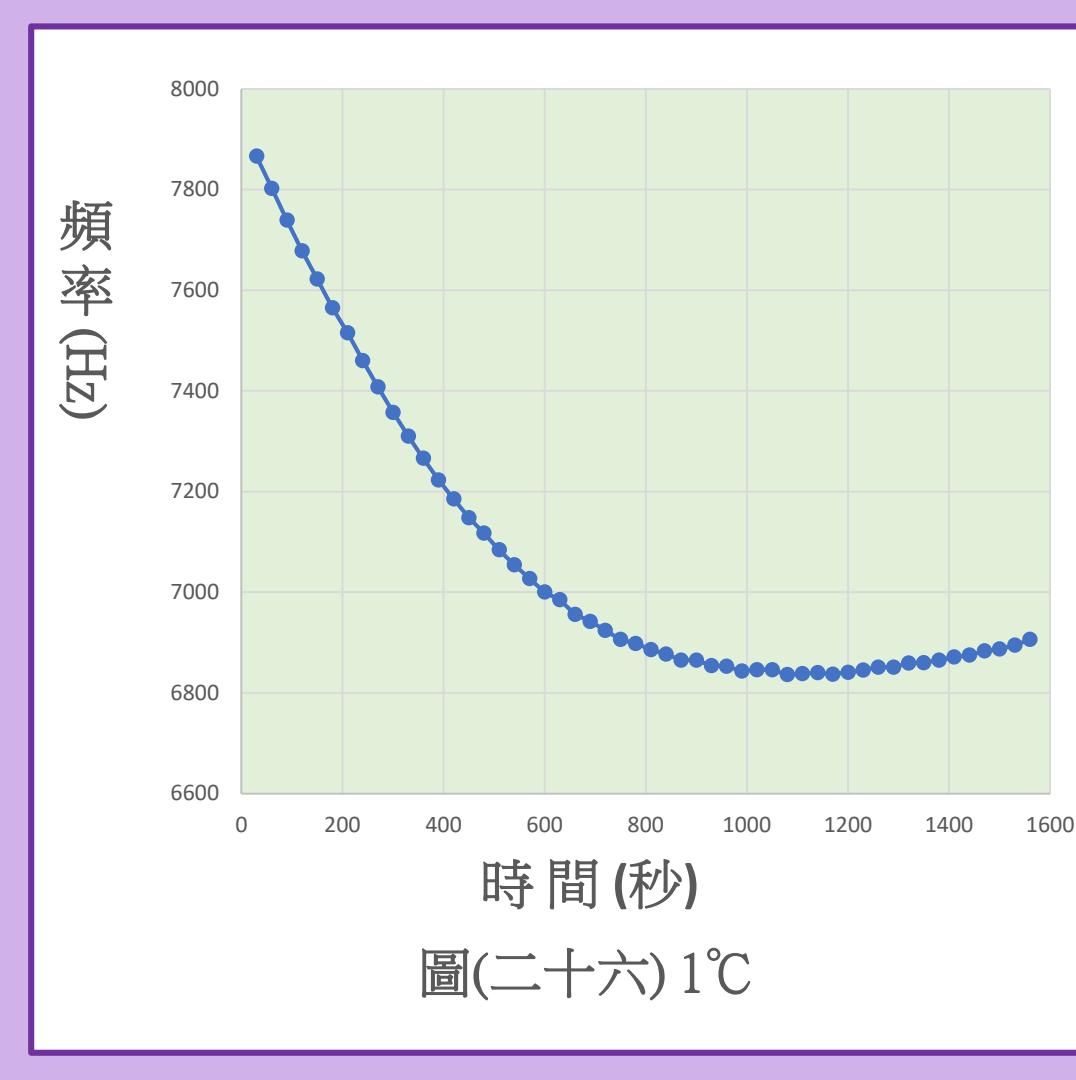
因為反應初期及反應末期，所測得的數據相對較不穩定，所以我們都是以反應中段較為穩定時的數據來作圖，如圖(二十二)、(二十四)。圖中的直線方程式： $y = 1.8372x - 3.3449$ ，其斜率為1.8372，也就表示鹽酸和鎂的反應級數約為1.8級，而此反應就我們查到的資料為2級反應(Birk and Walters, 1993)；而圖(二十四)及圖(二十五)中的直線方程式： $y = 0.8008x - 0.0547$ 及 $y = 0.9246x - 0.3452$ ，其斜率分別為0.8008、0.9246，也就表示鹽酸和大理石及雙氧水以二氧化錳催化分解的反應級數約為0.8級及0.9級，而我們查到的資料兩者皆為一級反應。

3 活化能

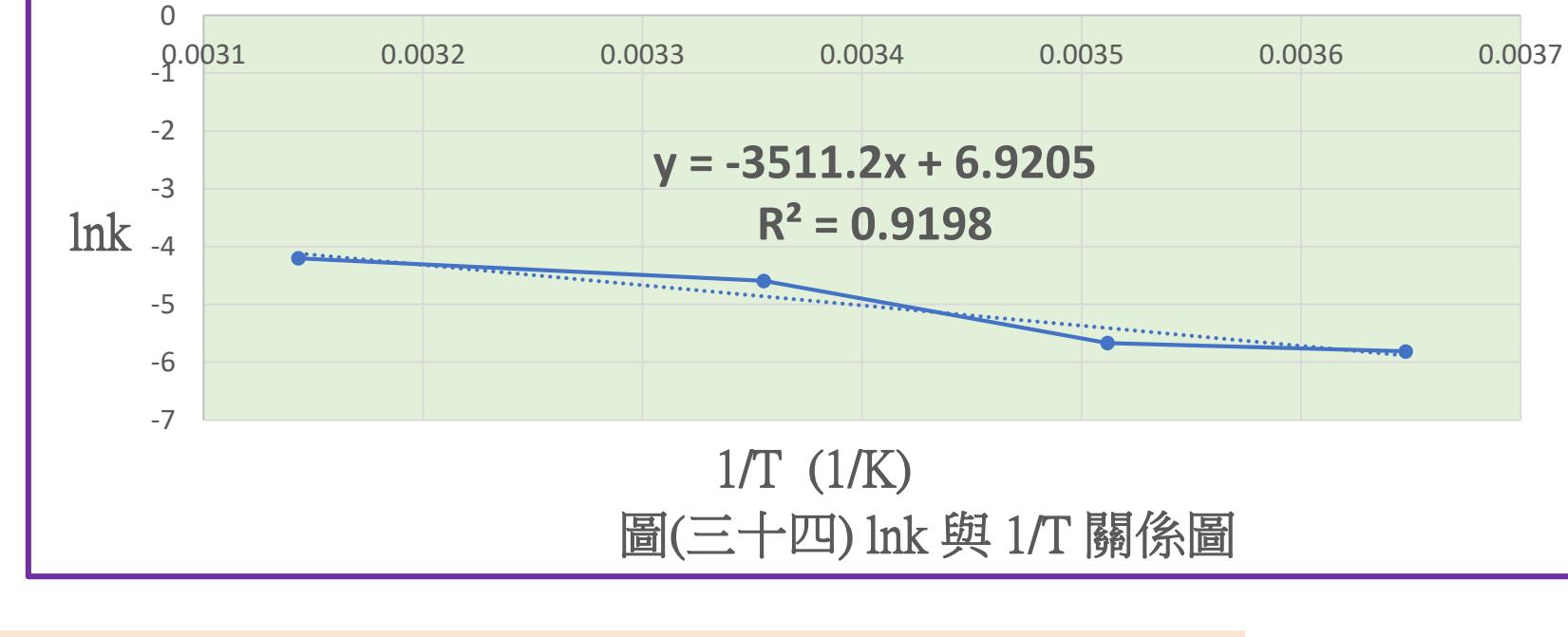
(1) 依Arrhenius equation $k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$ $\Rightarrow \ln k = \ln A + \left(\frac{-E_a}{R}\right) \times \frac{1}{T}$ ($\ln k$ 與 $\frac{1}{T}$ 關係圖中圖形的斜率 $= \frac{-E_a}{R}$)

$$\rightarrow E_a = -R \times \text{斜率}$$

(2) 鹽酸與大理石反應活化能大小的推導，如下圖(二十六)～圖(三十四)。



溫度(°C)	溫度 T (K)	速率常數(k)值	1/T (1/K)	lnk
1.0	294.15	0.0013×2.303=0.00299	0.003648	-5.81118
11.6	284.75	0.0015×2.303=0.00345	0.003512	-5.66808
24.9	298.05	0.0044×2.303=0.01013	0.003355	-4.59194
45.0	318.15	0.0065×2.303=0.01497	0.003143	-4.20174



3 因為 $E_a = -R \times \text{斜率}$

$$\rightarrow \text{鹽酸與大理石反應活化能 } E_a = -8.314 \times (-3511.2) = 29192 \text{ J/mol} = 29.192 \text{ kJ/mol}$$

結論

- 一、本實驗是以測量反應過程產生泡泡聲的頻率作為測量反應級數的依據，因此本實驗不需要複雜的裝置及儀器，只需要簡易的麥克風、電腦及免費軟體AUDACITY即可作為觀測反應速率快慢及測量反應級數實驗，因此適合做為簡易觀察或學習之用。但因為聲音比較容易被外在環境噪音影響，所以實驗時應盡量選擇安靜的場所。另外反應條件盡量以低溫、低濃度、水中雜質少的條件來進行以避免干擾及誤差。
- 二、本反應可作為「反應速率與反應級數」單元的延伸實驗，用以引導學生從聲音現象理解化學反應速率的快慢。
- 三、當溶液中反應物反應產生氣泡時，此時我們耳朵聽到的聲音，並非氣泡「爆炸」產生的，而是氣泡在液體中形成與崩解時引發的震盪現象，而是氣泡震盪與液體振動產生的聲波。
- 四、當反應產生氣泡速率越快時，液體中產生氣泡的體積就會越小，所以產生泡泡聲的頻率就越高；相反的當反應速率越慢時，液體中產生氣泡的體積就會較大，所以產生泡泡聲的頻率就會越低，因此我們可以利用反應過程中泡泡聲音的頻率變化量來做為測量反應速率及級數的依據。
- 五、因為本實驗盡量在低濃度的條件反應，所以當反應物快用完或反應達平衡時，反應物的濃度都較低，所以「某時刻測得的頻率」和「反應物快用完或反應達平衡測得的頻率」兩者之間的「頻率差」會和「某時刻反應物的濃度」成正比，所以可以作為「某時刻反應物的濃度」的替代數據。
- 六、我們可以使用酒精度計來代替其他複雜的化學方法或儀器做為測量雙氧水濃度的有效儀器。
- 七、在某些產生氣體的反應中，可用測量泡泡聲音頻率變化的方法來檢測反應速率是否異常，作為一種早期預警監控方式。
- 八、我們也可以利用此方法來測量速率常數，並配合測量不同溫度的速率常數，還可以推算出活化能的大小。

參考資料

- 1 中華民國第44屆中小學科學展覽會高中組化學科. (2004). 不鳴則矣，一觸驚人—設計實用的反應裝置有效探討白金催化雙氧水分解反應之化學動力學. 台灣科學教育館網站.
- 2 中華民國第59屆中小學科學展覽會國中組物理科. (2019). 聽酒杯在唱歌—濃度與聲音頻率關係之探討. 台灣科學教育館網站.
- 3 臺灣2006年國際科學展覽會物理科. (2006). 都是氣泡惹的禍. 台灣科學教育館網站.
- 4 新竹市第39屆中小學科學展覽會國中甲組化學科. (2016). 化學的聲音：氣泡對聲音頻率變化之研究.
- 5 中華民國第54屆中小學科學展覽會國中組化學科. (2014). 快氣加鞭—催生一對氣！台灣科學教育館網站.
- 6 Zenit, R., & Rodríguez-Rodríguez, J. (原著), 林祉均 (譯). (2019). 啤酒中的物理—氣泡飲料與流體力學. 物理雙月刊. <https://pb.ps-taiwan.org/modules/news/article.php?storyid=94>
- 7 維基百科. (n.d.). 一級反應. <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E4%B8%80%E7%B4%9A%E5%8F%8D%E6%87%89>
- 8 陽明交通大學. (n.d.). 催化反應動力學 - H_2O_2 分解反應. <https://ir.lib.nycu.edu.tw/bitstream/11536/50924/7/852207.pdf>
- 9 WineNow. (2022). 香檳趣聞一聽，香檳杯裡的氣泡在呼喚你. <https://winenow.com.hk/2022/03/champagne-bubble>
- 10 物理雙月刊. (2019). 懶人的滴水聲. <https://pb.ps-taiwan.org/modules/news/article.php?storyid=444>
- 11 PanSci 泛科學. (2022). 油炸的聲音學：水滴在油鍋中的三種爆炸方式. <https://pansci.asia/archives/360273>
- 12 Minnaert, M. (1933). On musical air-bubbles and the sounds of running water. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 16(104), 235 – 248. <https://doi.org/10.1080/14786443309462277>
- 13 Leighton, T. G. (1994). The Acoustic Bubble. Academic Press.
- 14 Birk, J. P., & Walters, D. L. (1993). Pressure measurements to determine the rate law of the magnesium-hydrochloric acid reaction. Arizona State University, Tempe, AZ 85286-1604