

第 20 屆 旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA20-164

作品名稱：當化學反應遇上物理駐波

姓名：林威廷

關鍵字：藍瓶效應、酸鹼值、駐波

摘要

水溶液的化學反應通常具有許多型態，如氧化還原、酸鹼中和等。利用搖晃產生的化學反應，如藍瓶反應，雖可利用搖晃，使空氣中氧氣溶解產生氧化還原反應，但無法控制搖晃的頻率。本實驗裝置可用振動強化水中的化學反應，讓溶液內同時存在不同顏色的氧化還原態、酸鹼值的非平衡狀態並具可再現性。

驅動液體振盪可控制氣體(如 O_2 和 CO_2)在水中的溶解，在溶液中產生不同的化學模式(如氧化還原態或酸鹼值之差異)，藉由向氣液界面持續供應能量來控制溶液中的化學反應，讓溶液的表面呈現特定的圖案，將溶液狀態分離成具特定圖案的反應模態。實驗中同時嘗試以加熱後的本氏液產生駐波後，將葡萄糖溶液滴入，觀察駐波振動對銅離子還原反應造成的影響；並將本氏液與葡萄糖溶液共同加熱產生之橙色懸浮液加以駐波共振，觀察懸浮液之變化。


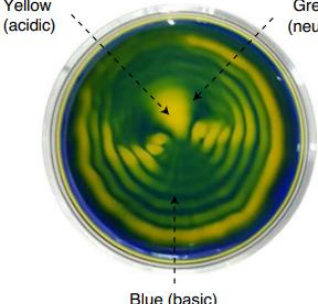


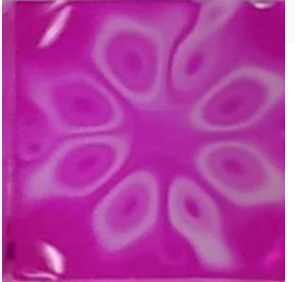
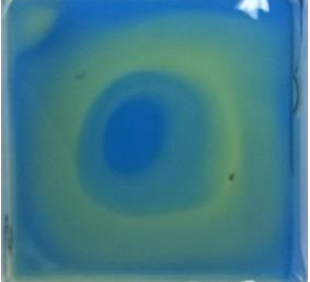
實驗中觀測不同共振模態時，所對應的特定頻率與駐波圖案，找出使溶液達成共振的決定因素和條件，進一步探討其應用。

當化學反應遇上物理駐波

一、 研究動機

老師在課堂中示範藍瓶反應，利用溶液搖晃可將液體在無色藍色來回變色，這個神奇的反應引發我們的興趣。想要了解物理的振動對化學反應的影響。資料搜尋發現有【Ilha Hwang et al.2020】將連二亞硫酸鈉溶液(SDT, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)加入甲基紫精(methyl viologen)置於培養皿中[1]，利用振動的方式將 O_2 通入溶液中進行反應，如圖 1-1a 所示；利用相同的方式也可將含有溴瑞香草酚藍(BTB)的鹼性溶液通入 CO_2 加以振動後會呈現不同酸鹼值的分布，如圖 1-1b 所示，圖中黃色為酸性，中性為綠色，藍色為鹼性。

但圖 1-1a 及圖 1-1b 中有 2 個非常明顯的渦流，這在液體中是種擾動，不能在溶液中有效分隔不同的狀態(如還原態及氧化態)。我們開始思考那是否可找到比較適當的方法有效區隔溶液中不同的狀態物質(如還原態及氧化態)呢？於是我們以藍瓶效應[2]、酸鹼變化的溶液及葡萄糖之本氏液檢測反應設計相關實驗來做進一步的探討(圖 1-2a、b、c 及 d)。

| | | | |
|--|---|--|---|
|  |  | | |
| <p>圖 1-1a 文獻中利用聲波振動將二亞硫酸鈉加甲基紫精之溶液分隔出無色的氧化態與藍色的還原態情形[1]</p> | <p>b. 文獻中利用聲波振動將通有 CO_2 之溴百里酚藍鹼性溶液呈現出黃 (酸性)、綠 (中性)及藍(鹼性)之情形。[1]</p> | | |
|  |  |  |  |
| <p>圖 1-2a 本實驗利用駐波振動將藍瓶效應之溶液清楚區分出藍色氧化態與無色還原態之同心圓分布情形。</p> | <p>b.本實驗將加熱後之葡萄糖-本氏液反應後之橘色懸浮液，利用駐波振動形成同心圓沉澱之分布情形。</p> | <p>c.本實驗將通有 CO_2 之鹼性溶液含酚酞利用駐波振動後，呈現出：桃紅(鹼性)、無色(酸性)</p> | <p>d.本實驗將通有 CO_2 之鹼性溶液含廣用指示劑利用駐波振動後，呈現出黃(酸性)、綠(中性)及藍(鹼性)之情形</p> |

二、 研究目的

- (一)、以駐波振動控制氣液間之化學反應(藍瓶反應、酸鹼反應)，觀察分析其在共振下的顏色分布。
- (二)、以駐波振動控制 2 種溶液間的化學反應(葡萄糖之本氏液檢測反應)，觀察分析其在共振下的顏色分布。
- (三)、找出共振狀態下溶液特定顏色分布之形成機制。

三、 研究設備與器材



圖 3-1 實驗使用藥品
(氫氧化鈉、葡萄糖、亞甲藍液、
廣用指示劑、酚酞、市售本氏液)



圖 3-2 測量振動加速
度之手機 app



圖 3-3 二氧化碳鋼瓶



圖 3-4 抽氣幫浦及玻璃罩等抽
氣設備

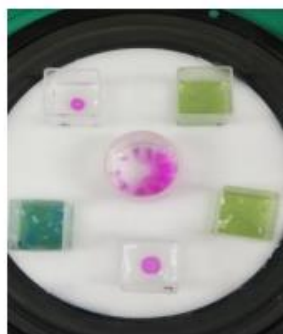


圖 3-5 揚聲器振動平
台及上方之容器



圖 3-6 函數產生器及
紅外線溫度計

四、 研究過程或方法

(一) 原理探討 [3-5]

1. 反應原理

(1)、藍瓶反應振動後之顏色變化原理

將亞甲藍加入氫氧化鈉和葡萄糖的混合溶液中搖晃數次，溶液會因為空氣中的 O₂ 氧化亞甲藍呈現藍色的氧化態，靜置後，溶液中葡萄糖會還原亞甲藍使顏色會逐漸變回無色的還原態結構。由亞甲藍結構式可以看出其在氧化態時有較多的共軛雙鍵，因此吸收光往長波長移動，導致呈現藍色。反應式如下所示：

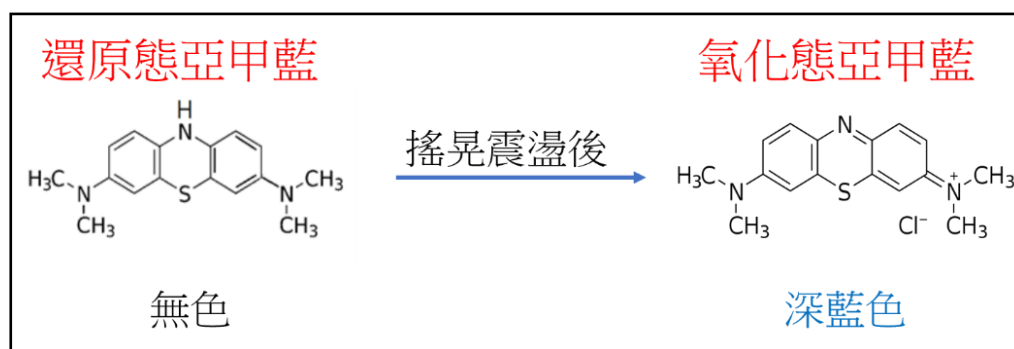
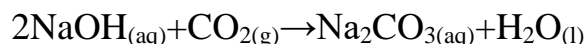


圖 4-1 亞甲藍於氧化態與還原態之結構式分布

(2)、因振動造成酸鹼值改變之顏色分布

當通入 CO₂ 溶解於 NaOH 溶液會產生下列反應：



含有酸鹼指示劑的 NaOH 溶液會因局部區域溶入 CO₂ 的多寡而改變其酸鹼值，實驗中使用廣用指示劑、酚酞指示劑來加以討論。

(1) 酚酞指示劑

酚酞是一種有機弱酸，分子式為 C₂₀H₁₄O₄，是一種常用的酸鹼指示劑，在 pH < 8.2 的水溶液裡為無色，當 pH > 8.2 時為粉紅色。實驗中在溶液局部位置因二氧化碳的溶入多寡，導致原來鹼性的溶液變為中性甚至酸性，所以會在溶液形成粉紅色、無色。

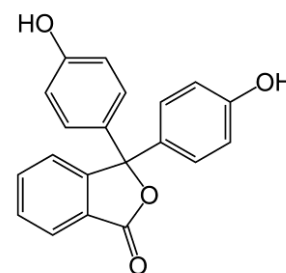


圖 4-2 酚酞結構圖

(2) 廣用指示劑

廣用試劑是 pH 指示劑的一種，其適用範圍為 pH 3~12，可以用以顯示不同溶液之酸鹼度，廣用試劑在鹼性下為藍色，而在在中性條件 (pH = 7) 下是綠色，酸性 (pH < 6.0) 條件下呈黃色。實驗中在溶液局部位置因二氧化碳的溶入多寡，導致原來鹼性的溶液變為中性甚至酸性，所以會在溶液形成藍、綠及黃色。

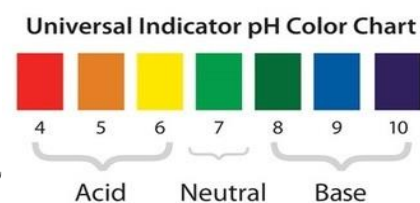


圖 4-3 廣用試劑變色範圍

(3)、以本氏液檢測葡萄糖反應之顏色變化

本氏液的配製是由碳酸鈉、檸檬酸鈉和硫酸銅混合而成。溶液呈藍色的原因是含有銅離子(Cu^{2+})，當銅離子與葡萄糖反應時，藍色銅離子(Cu^{2+})會被還原成亞銅離子(Cu^+)，並產生紅色的氧化亞銅(Cu_2O)沉澱。當不同產量的氧化亞銅與本氏液混合，會呈現綠、黃、橙等顏色(如圖 4-4 所示)。

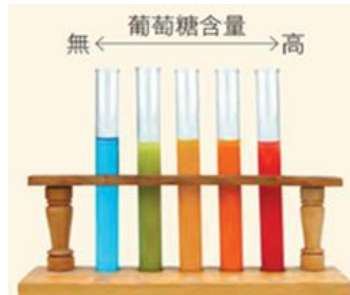


圖 4-4 本氏液與不同含量葡萄糖之反應結果

2. 波動原理

(1)、表面波及駐波[3]

靜止的液體表面呈水平，在極輕微的局部擾動下會出現上下起伏之波動。液體一旦離開平衡狀態，液體的重力和表面張力等就會發揮回復力的作用，促其返回平衡位置，從而形成液體質點的振動和波的傳播。若忽略重力的影響，只考慮表面張力的作用，這種液體之自由表面波稱為表面張力波(capillary wave)。對水面來說，當波長 $< 1.73\text{cm}$ 時，表面張力效應較為重要，此種表面張力波可呈現同心圓波形。

一般的水波其角頻率 $\omega(\omega=2\pi f)$ 與波長 λ 的散布關係式(dispersion relation)為

$$\omega^2 = \left(gk + \frac{\sigma}{\rho} k^3 \right) \tanh(kh) \quad (4-1)$$

$$\text{水波波速為 } v = \left[\left(\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda} + \frac{\lambda g}{2\pi} \right) \tanh(kh) \right]^{1/2} \quad (4-2)$$

其中 g 為重力加速度， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ， σ 為表面張力， ρ 為液體密度， h 為水深。

本實驗中的波長因為數個 mm，主要便是由表面張力所形成的短波長，所以(4-2)式主要考慮第 2 項。

以液體在一維方向為例，在液體振動形成駐波時，會在容器邊界上形成自由端，且在容器兩側會分別形成振動一上一下最大位移之腹點處(如圖 4-5[5]所示)。

而圓形或方形容器內的液體振動，為滿足流體振動之駐波

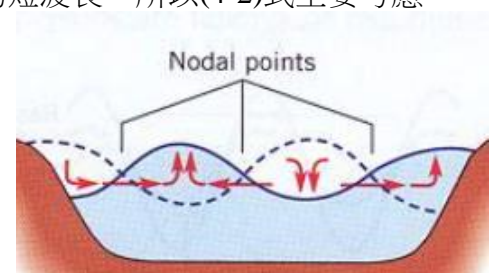


圖 4-5 液體之一維駐波示意圖[4]

在容器邊界上為自由端，會呈現類似克拉德尼圖形的模態分布[5]，如圖 4-6a、圖 4-6b 所示。

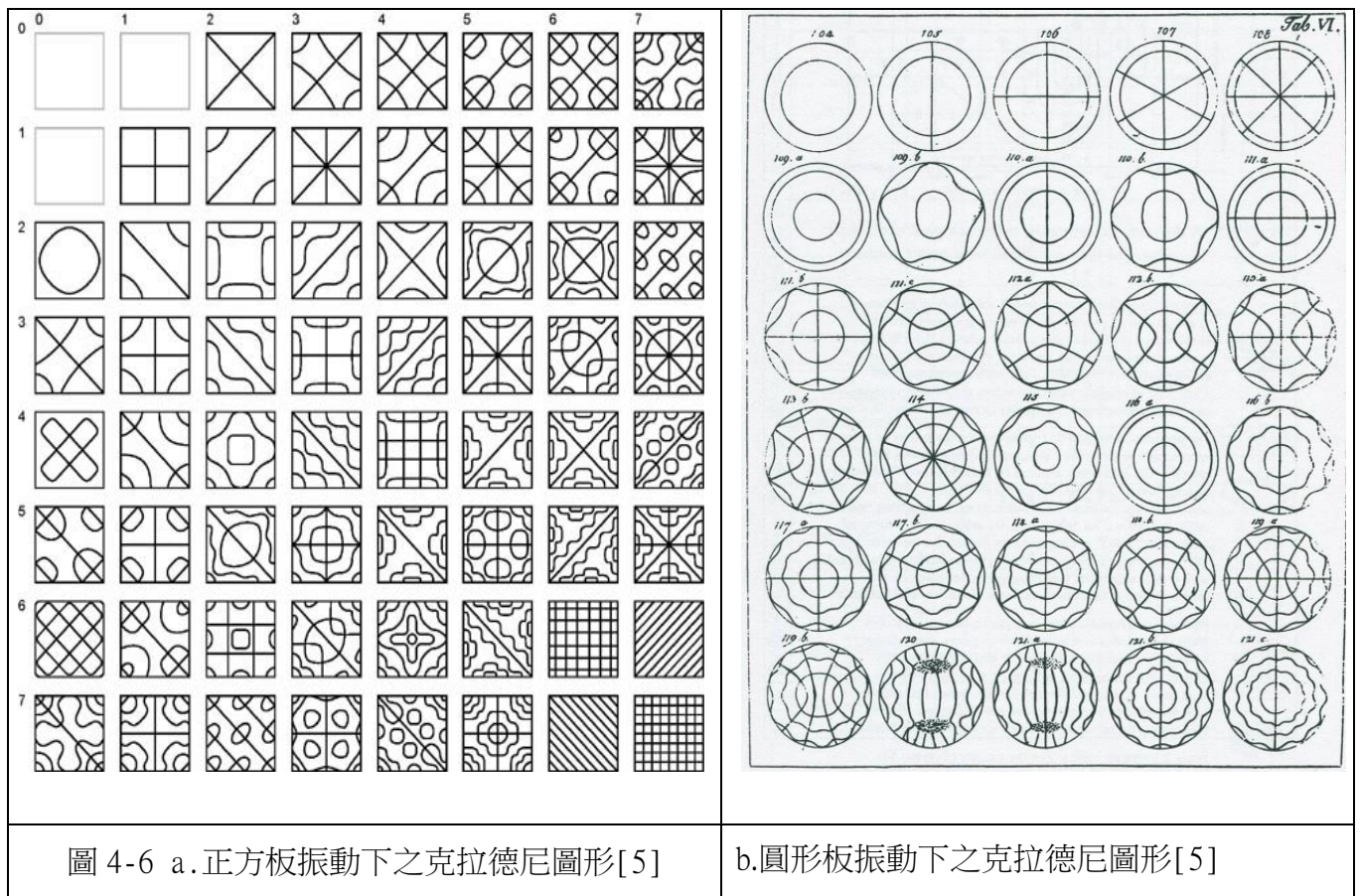


圖 4-6 a. 正方板振動下之克拉德尼圖形[5]

b. 圓形板振動下之克拉德尼圖形[5]

(2). 法拉第波[2]

法拉第波是由參數化的作用力引起。在重力加速度 g 的環境下，若有一種黏滯性的液體，密度為 ρ ，表面張力為 σ ，液體深度 h ，當液面以一個垂直方向的加速度 $a = a_{\max} \cos 2\pi f t = \Gamma g \cos 2\pi f t$ 加以上下振動，此處 Γ 為減縮加速度，當 Γ 超出一個門檻值時，便會形成頻率為 $f/2$ 的表面駐波，稱為法拉第駐波(如圖 4-7)，又稱為法拉第不穩定性 (instability)。法拉第駐波的圖案會因容器的幾何形狀、液體深度、振動頻率產生各式的變化。

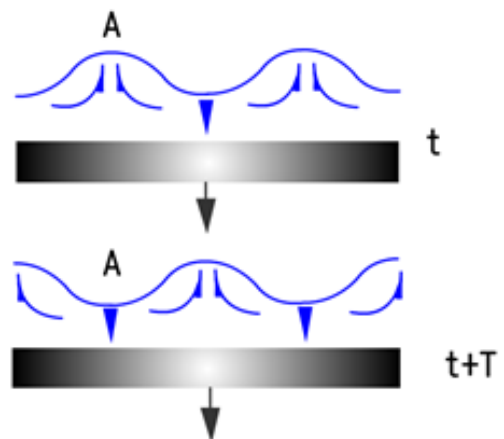


圖 4-7 法拉第駐波示意圖[2]

(二) 實驗方法

1、藍瓶反應振動後之顏色分布

(1)、實驗一：找出最佳之溶液配方

因初步測試發現藍瓶反應中葡萄糖溶液的濃度對藍瓶反應顏色改變所需時間有較明顯的影響，所以取氫氧化鈉(1.0M, 2.0 mL)、亞甲藍(3滴, 每滴約 10 μ L)與不同體積之葡萄糖溶液(1.0M, 4mL、6 mL、8 mL、10mL)均勻混合後形成藍色溶液，將 4 種藍色溶液倒入方盒(邊長 2.50cm)，固定深度為 3mm，加蓋置於平台上靜置一段時間，讓葡萄糖將亞甲藍由藍色的氧化態逐漸還原成無色的還原態後，再將函數產生器以頻率 35Hz 及小振幅驅動平台，觀察記錄 4 種不同比例溶液之顏色分布情形，找出最佳之溶液配方。

(2)、實驗二：找出最佳之振動加速度(振幅)

參考文獻資料[1]使用相同之圓形培養皿(內徑 56.0 mm)，依照實驗一之較佳溶液配方，固定振動頻率 38Hz，固定深度 5mm。使用四種不同之振動加速度(振幅)：0.2g-0.4g(小振幅)、0.6g-0.8g(中振幅)、1.0g-0.8g(稍大振幅)、1.4g-2.0g(大振幅)，觀察記錄 4 種不同振幅下溶液顏色之分布情形，找出最佳之振幅條件。。

(3)、實驗三：找出最佳尺寸之圓形容器

依實驗一之較佳溶液配方，實驗二之較佳振幅，固定溶液深度 5mm，使用內徑 25.0mm、30.0mm、35.0mm、40.0mm 四種不同尺寸之圓形容器，觀察記錄 4 種圓形容器溶液之顏色分布情形，找出最佳之圓形容器。。

(4)、實驗四：找出最佳之溶液深度

依實驗一之最佳溶液配方，實驗二之最佳振幅，實驗三之最佳尺寸圓形容器，改變溶液深度依序為 8.0mm、5.0mm、4.0mm、3.0mm，觀察記錄 4 種溶液深度之顏色分布情形，找出最佳之溶液深度。

(5)、實驗五：依實驗一至實驗四之最佳條件，改變振動頻率，觀察圓形容器中藍瓶反應振動後之顏色分布

依實驗一之最佳溶液配方、實驗二之最佳振幅、實驗三之最佳尺寸圓形容器及實驗四之最佳溶液深度，使用五種振動頻率 8Hz、18 Hz、28 Hz、38 Hz、48 Hz，觀察記錄個別之顏色分布，並分析其對應之振動模態及光譜吸收情形。

(6)、實驗六：依實驗一、實驗二之最佳條件，改變振動頻率，觀察邊長 25.0mm 方形容器中藍瓶反應振動後之顏色分布

使用實驗一之最佳溶液配方、實驗二之最佳振幅，固定溶液深度 3mm，觀察 31Hz、35Hz、38 Hz、41 Hz 四種振動頻率之顏色分布，並分析其個別對應之振動模態。

(7)、實驗七：依實驗一、實驗二之最佳條件，固定振動頻率，觀察記錄邊長 25.0mm 之方盒內藍瓶效應溶液之穩定態持續時間

使用實驗一之最佳溶液配方、實驗二之最佳振幅，固定溶液深度 3mm，觀察 24.4 Hz 振動頻率之圖案分布與隨時變化情形，記錄其穩定態持續時間。

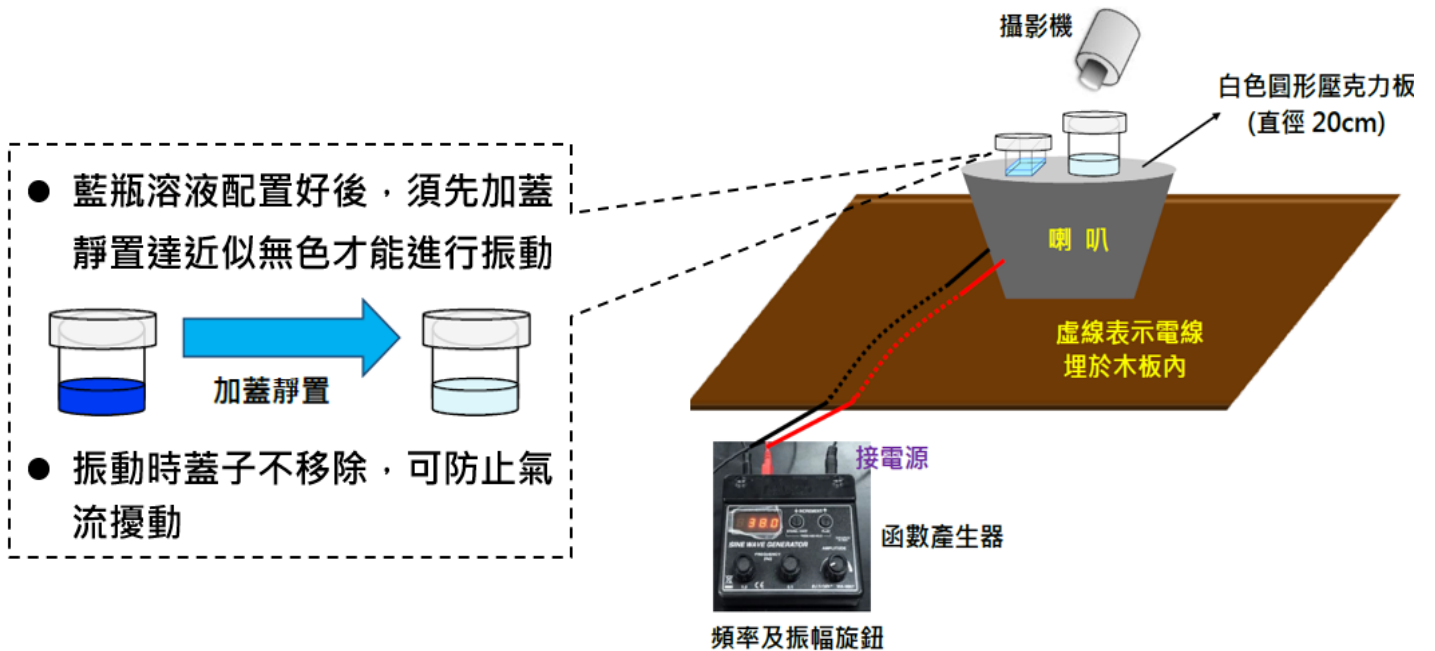


圖 4-8 藍瓶反應溶液振動裝置示意圖

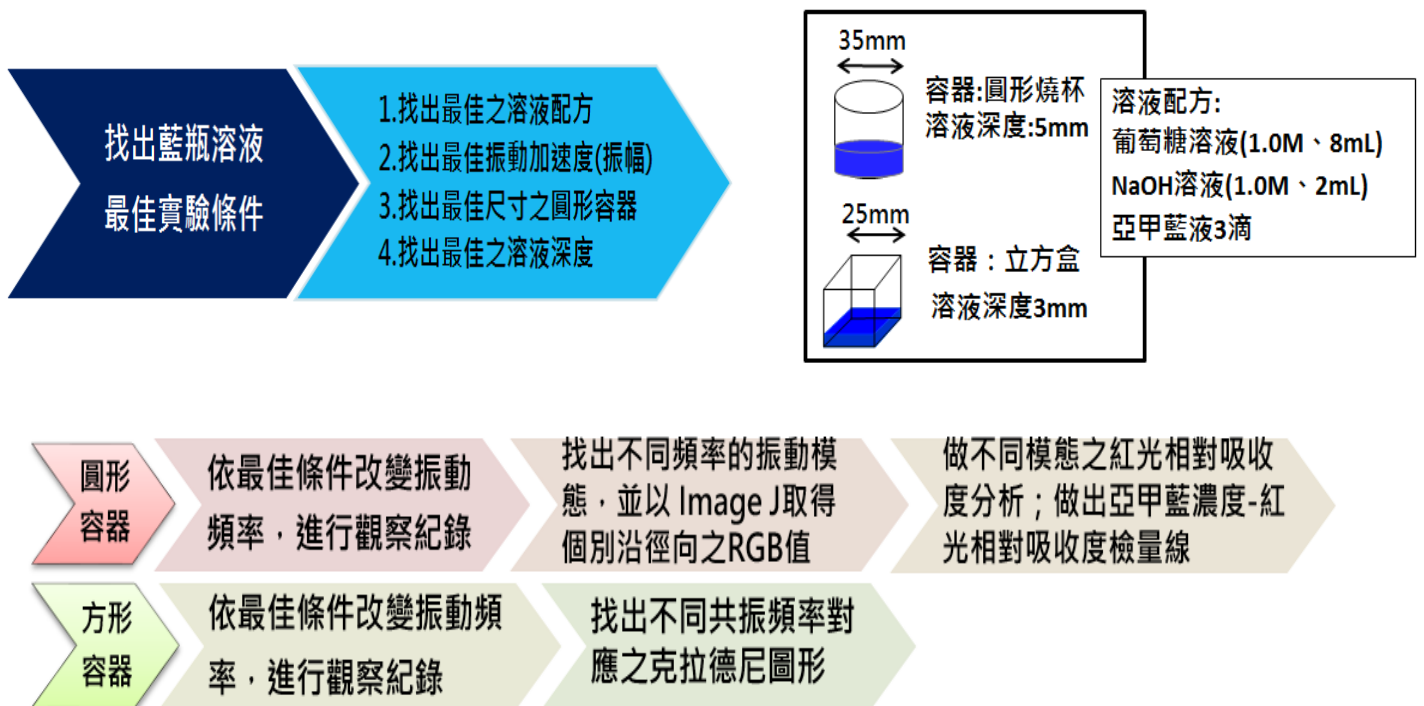


圖 4-9 藍瓶反應溶液振動實驗流程圖

2、因振動造成酸鹼值改變之顏色分布

配置氫氧化鈉($5 \times 10^{-3} \text{M}$, 100mL)與 5 滴酸鹼指示劑(廣用指示劑或酚酞)均勻混合後形成之鹼性溶液(廣用指示劑：藍色、酚酞：桃紅色)，將容器封於 15.0L 的圓柱型玻璃罩中，將玻璃罩內抽真空至(200 mbar)後，通入二氧化碳(200 mbar)，並將函數產生器設定以 15-50Hz 間的數種頻率驅動平台，觀察容器內的溶液顏色變化情形。

(1)、實驗八：依實驗二之最佳條件及實驗六之容器及深度條件，改變振動頻率，觀察方形容器中含酸鹼指示劑之鹼性溶液，在通 CO_2 經振動後之顏色分布

使用實驗二之最佳振幅、邊長 25.0mm 方形容器、固定溶液深度 4.0mm，以 31Hz-41Hz 之頻率範圍振動，找出可形成特定圖案之共振頻率，觀察記錄共振動頻率下之圖案，並分析其個別對應之振動模態。

(2)、實驗九：依實驗二、實驗三及實驗四之最佳條件，改變振動頻率，觀察圓形容器中含指示劑之鹼性溶液，在通 CO_2 經振動後之顏色分布

使用實驗二之最佳振幅、實驗三之最佳圓形容器、實驗四之最佳容易深度觀察 18.0 Hz、28.0 Hz、38.0 Hz、48.0 Hz 振動頻率之顏色分布，並分析其個別對應之振動模態。以下是我們進行實驗的裝置示意圖及實驗流程。

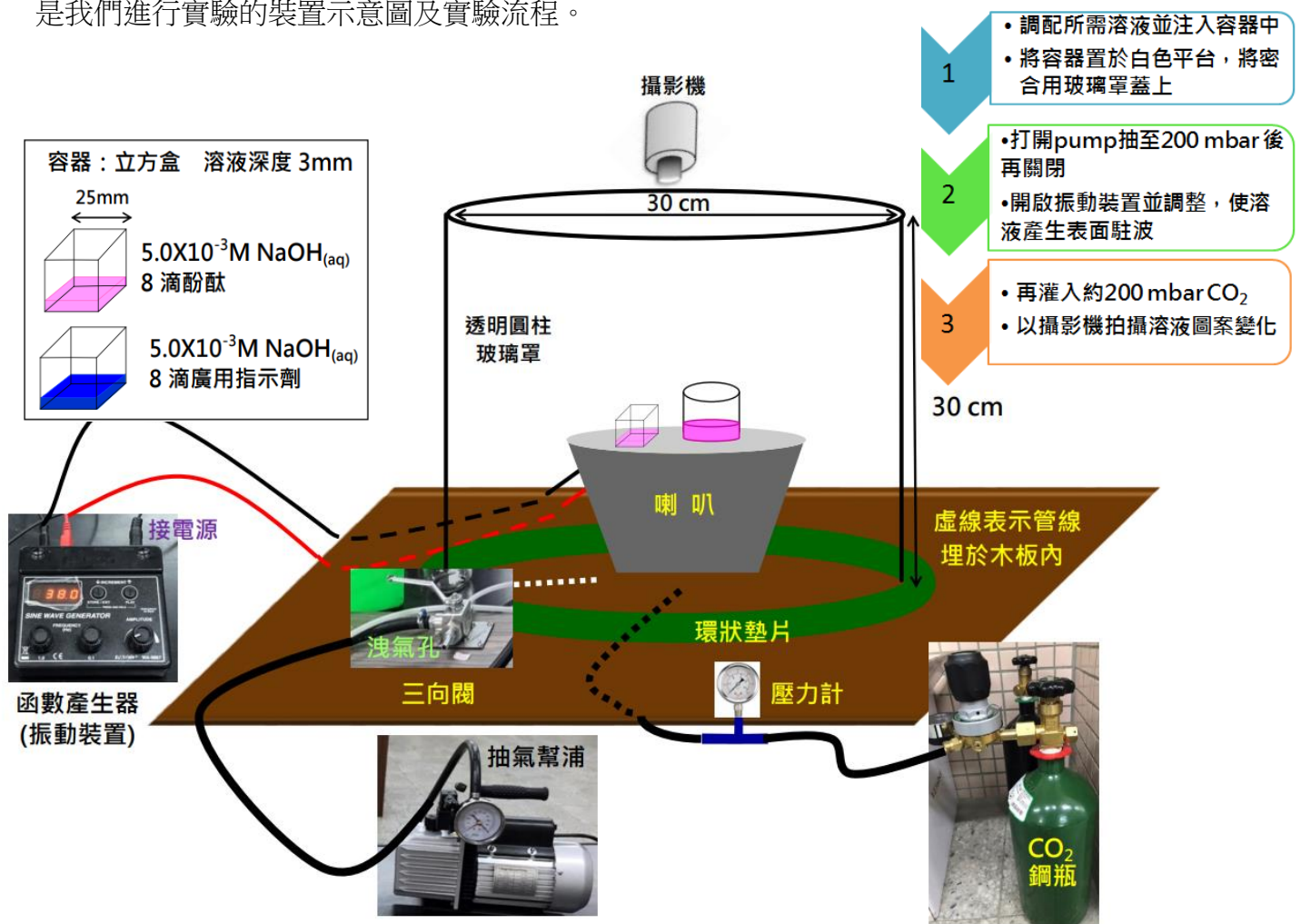


圖 4-10 酸鹼反應振動實驗裝置示意圖及流程圖

3、因振動造成本氏液+葡萄糖

液加熱後之溶液顏色分布

使用前述實驗之最佳振幅、最佳圓形燒杯，將本氏液與葡萄糖液以圖 4-11 所示之 2 種流程分別進行實驗。實驗中使用 4 種同心圓駐波頻率 18 Hz、28 Hz、38 Hz、48 Hz，觀察記錄個別之顏色分布，並分析其對應之振動模態及顏色分布。

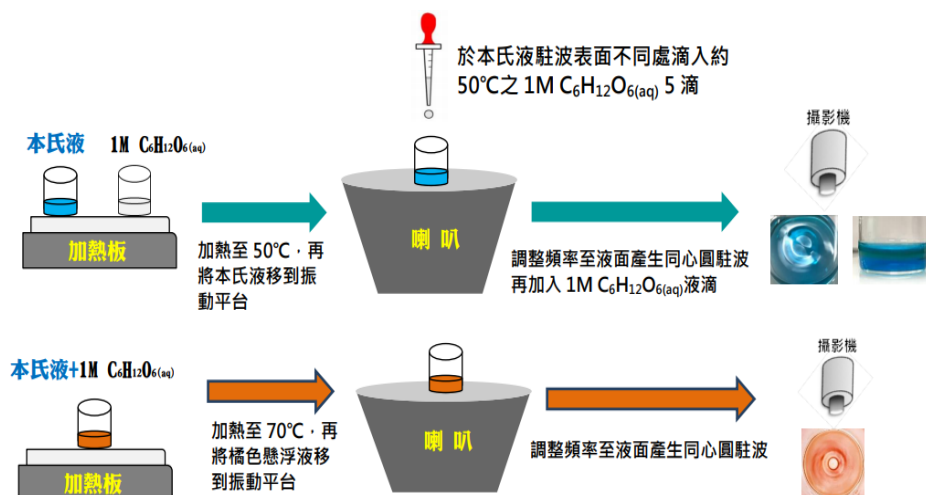


圖 4-11 本氏液加葡萄糖於加熱後之振動實驗流程圖

五、實驗結果

(一) 藍瓶反應振動後之實驗結果

1、找出藍瓶反應振動後之溶液的最佳條件

(1)、其他條件固定下，不同溶液配方之藍瓶效應振動後之顏色分布

邊長 2.50cm 立方盒，固定液體深度 4mm，小振幅(0.2g-0.4g)，振動頻率 35Hz。

| 溶液配方 | | | 實驗照片 | | |
|-------------------------|--------------------------|-----------|------|-------|-------|
| 葡萄糖 1M 體積 (mL) | NaOH 1M 體積 (mL) | 亞甲藍 滴數 | t=0 | t=1 分 | t=2 分 |
| 10 | 2 | 3 | | | |
| 8 | 2 | 3 | | | |
| 6 | 2 | 3 | | | |
| 4 | 2 | 3 | | | |

實驗發現當溶液靜置時，葡萄糖將亞甲藍由藍色的氧化態慢慢還原成無色的還原態。當溶液振動形成駐波時，腹點位置的氧氣溶於溶液中，又將亞甲藍由無色的還原態氧化成藍色的氧化態(如圖 5-1)。

實驗結果發現溶液配方為葡萄糖溶液(1.0M、8 毫升)，NaOH 溶液(1.0M、2 毫升)，亞甲基藍液(3 滴)配置之溶液，經振動後呈現之圖案分布最清晰，且振動出

圖 5-1 其他條件固定，不同比例之藍瓶反應溶液經振動後於不同時刻之顏色分布情形

穩定圖案後可持續至少 10 分鐘，故後續藍瓶效應振動實驗均採用此種比例之溶液配方。

實驗一小結論：最佳溶液配方為葡萄糖溶液(1.0M、8 毫升)，NaOH 溶液(1.0M、2 毫升)，亞甲基藍液 3 滴。

(2)、其他條件固定下，不同振動加速度之藍瓶效應振動後之顏色分布

固定條件：參考文獻資料[1]使用相同之圓形培養皿(內徑 56.0 mm)，實驗一小結論之溶液配方，振動頻率 38Hz，深度 5mm；改變不同振動加速度(振幅)。





| 照片 | 波動種類 | 最大振動加速度 (振幅) |
|---|-------------------|---------------------|
|  | 表面張力波 | 0.2g-0.4g (小振幅) |
|  | 表面張力波 產生雙渦流之情形 | 0.6g~0.8g (中振幅) |
|  | 法拉第波穩定態 | 1.0g~1.2g (稍大振幅) |
|  | 法拉第波之不穩定態或混亂態 | 1.4g~2.0g (大振幅) |

圖 5-2 其他條件固定，不同振幅下於圓形容器之藍瓶反應顏色分布情形

由圖 5-2 可看出在小振幅振動的狀況下，溶液產生表面張力波，會產生類似克拉德尼的振動圖案。中振幅振動時，雖然也會出現克拉德尼的振動圖案，但同時也伴隨著渦流產生，不利實驗觀測。稍大振幅振動時會形成較複雜的法拉第波之穩定態圖案，大振幅振動則是出現不穩定的混亂圖案。

實驗二小結論：最佳振動加速度為小振幅振動，可產生持續且穩定清楚之振動圖案。

(3)、其他條件固定下，不同尺寸圓形容器藍瓶效應氧化還原態之顏色分布
 固定條件：最佳溶液配方，小振幅，振動頻率 28.0Hz，深度 5.0mm













| 容器內徑(mm) | 實驗照片 | | |
|----------|---|--|---|
| | t=0(未振動) | t=2 分 | t=5 分 |
| 25.0 |  |  |  |
| 30.0 |  |  |  |
| 35.0 |  |  |  |
| 40.0 |  |  |  |

圖 5-3 其他條件固定，不同尺寸圓形容器之藍瓶反應顏色分布情形

由圖 5-3 可看出其他條件固定下，內徑 3.50cm 的圓形燒杯可呈現完整清楚的同心圓振動圖案。容器太大(40.0mm)，振動圖案越複雜且越易產生雙渦流。內徑較小(30.0mm、25.0mm)時，較無法在容器內形成完整清楚的振動圖案。實驗發現容器過大，振動溶液易形成渦流，且在容器邊緣的駐波振幅衰減過多，不利振動圖案之觀察。參考文獻[1]中使用 56.0mm 之培養皿來做振動圖案觀察均有渦流生成，而本實驗中使用 56.0mm 之培養皿得到複雜之振動圖案，不易分析，故應將容器尺寸降低為宜。但容器也不宜過小，因為過小的底面積能夠觀察到的腹線有限，對應的駐波圖案也有限。

實驗三小結論:最佳尺寸之圓形容器為內徑 3.50cm 的圓形燒杯。

(4)、其他條件固定下，不同溶液深度之藍瓶效應溶液之顏色分布

固定條件：最佳溶液配方，小振幅，振動頻率 28 Hz，容器內徑 3.50cm




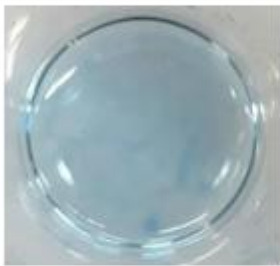


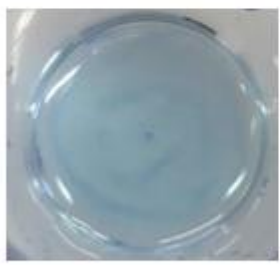

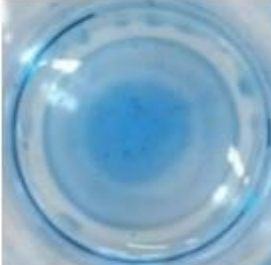



| 深度(mm) | 實驗照片 | | |
|--------|---|--|---|
| | t=0(未振動) | t=2 分 | t=5 分 |
| 8.0 |  |  |  |
| 5.0 |  |  |  |
| 4.0 |  |  |  |
| 3.0 |  |  |  |

圖 5-4 其他條件固定，不同溶液深度之藍瓶反應顏色分布情形

由圖 5-4 可看出，其他條件固定下，深度 5.0mm 的同心圓振動圖案最清楚。深度 8.0mm 振動圖案產生雙渦流；深度 4.0mm 於 2 分鐘產生清楚的振動圖案，但 5 分鐘時就變模糊，持續時間過短；深度 3.0mm 無法產生清楚的振動圖案。溶液深度不宜太深，會不易振動或產生渦流；也不能太淺，會造成藍色氧化態不易流動至腹點位置堆積，使得振動圖案較模糊。

實驗四小結論：最佳溶液深度為 5.0mm，可產生持續且完整之振動圖案。

(5)、圓形容器中藍瓶溶液共振後之顏色分布

依照前述最佳實驗條件，以 8Hz-50Hz 之頻率範圍振動，觀察到 8.0Hz、18.0Hz、28.0Hz、38.0Hz 及 48.0Hz 出現同心圓圖案，且頻率越高同心圓圈數越多。在此將藍瓶效應溶液於不同頻率下的圓形振動圖形與對應之克拉德尼振動圖案做成圖 5-5。










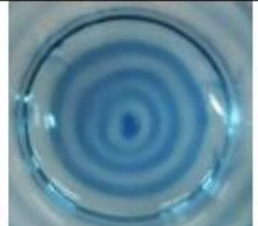





| 振動頻率 (Hz) | 實驗照片 藍圈為圓形腹線 | 克拉德尼振動圖案 白圈為圓形節線[2] | 同心圓圈數 n | 未振動照片 |
|-----------|---|---|---------|---|
| 8.0 |  |  | 1 |  |
| 18.0 |  |  | 2 |  |
| 28.0 |  |  | 3 |  |
| 38.0 |  |  | 4 |  |
| 48.0 |  |  | 5 |  |

圖 5-5 不同振動頻率下圓形容器之藍瓶反應實驗照片與對應之克拉德尼圖案

由圖 5-5 可看出圓形容器在特定頻率振動下，氧化態亞甲藍、還原態亞甲藍以藍色和無色在同心圓中交錯出現，共振駐波穩定圖案出現後可維持 10 分鐘以上的時間。在相同條件下重複實驗，都可以得到相同的振動圖案。實驗顯示通過對溶液施加振動，可以控制相同溶液不同局部區域之氧氣溶解度。在同心圓駐波的波腹位置會形成藍色，是因

此處的溶液激烈振動，造成溶氧量高，氧化態亞甲藍含量多，故形成明顯的藍色。

實驗五小結論：在前述實驗 1~4 之最佳條件下，8.0Hz、18.0Hz、28.0Hz、38.0Hz 及 48.0Hz 頻振動下出現藍色同心圓圖案，且頻率越高同心圓圈數越多。

(6)、方形容器中藍瓶溶液共振後之顏色分布

依照實驗一、二之小結論使用配方溶液為葡萄糖溶液(1.0M、8 毫升)，NaOH 溶液 (1.0M、2 毫升)，亞甲基藍液滴數均固定 3 滴)，注入邊長 25.0mm 之小方盒，固定深度 3.0mm。以 31Hz-41Hz 之頻率範圍振動，觀察到 31.0Hz、35.0Hz、38.0Hz 及 41.0Hz 出現共振之特定圖案。方盒內藍瓶反應溶液共振形成之圖案，呈現不同型態的克拉德尼圖形，同樣也是波腹呈現藍色之氧化態分布，共振圖案也可維持 10 分鐘以上。在此將不同共振頻率下的實驗照片與對應之克拉德尼振動圖案羅列於圖 5-6 中。






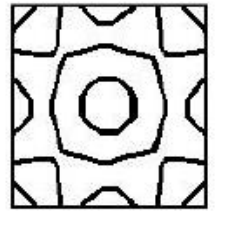


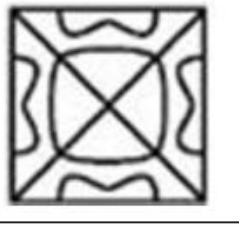


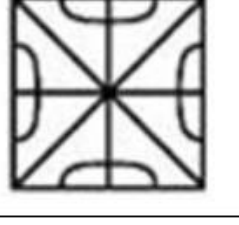
| 頻率(hz) | 未振動照片 | 振動穩定後之照片 | 克拉德尼振動圖形 |
|--------|---|--|---|
| 31.0 |  |  |  |
| 35.0 |  |  |  |
| 38.0 |  |  |  |
| 41.0 |  |  |  |

圖 5-6 不同振動頻率下方形容器之藍瓶反應實驗照片與對應之克拉德尼圖案

實驗六小結論：邊長 25.0mm 之方盒，注入深度 4mm 之藍瓶反應溶液(1M、8mL 之 $C_6H_{12}O_{6(aq)}$)、1M、2mL $NaOH_{(aq)}$ 及 3 滴亞甲藍)，以 31Hz-41Hz 之頻率範圍振動，在 31.0Hz、35.0Hz、38.0Hz 及 41.0Hz 出現共振，可出現持續 10 分鐘以上的藍色克拉德尼圖案。

(7)、觀察方形容器藍瓶效應溶液之穩定態持續時間

依照實驗六之小結論使用配方溶液為葡萄糖溶液(1.0M、8 毫升)，NaOH 溶液(1.0M、2 毫升)，亞甲基藍液滴數均固定 3 滴)，注入邊長 25.0mm 之小方盒，固定深度 3.0mm，以 24.4Hz 之頻率振動，觀察藍瓶反應暴露常溫常壓下隨時間演變的照片，對應於圖 5-7 中。

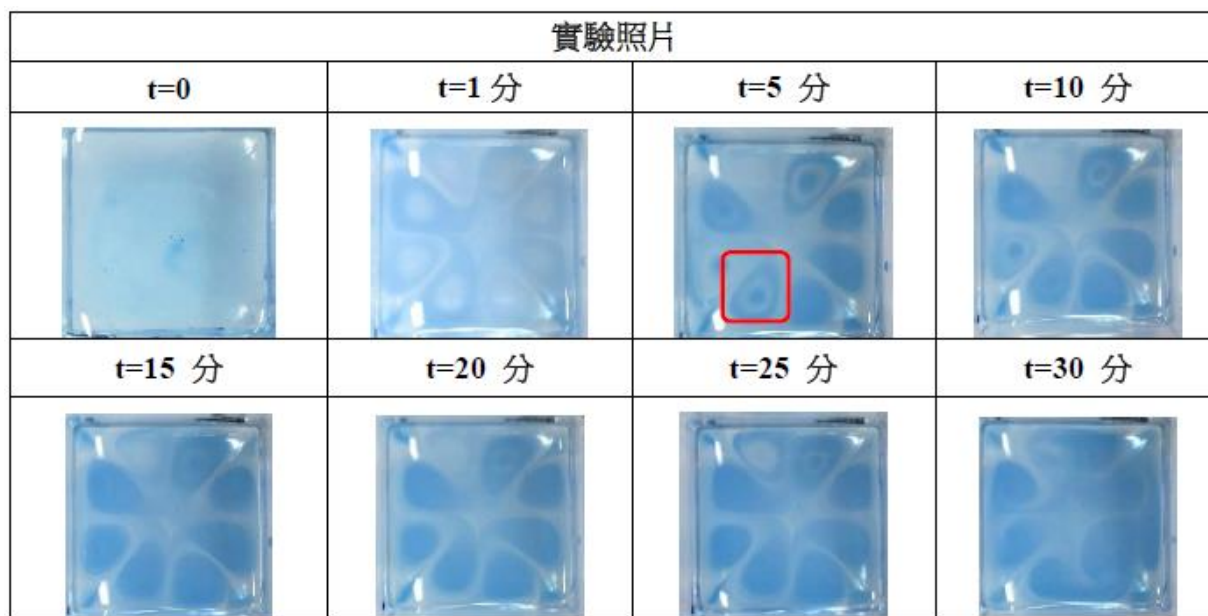


圖 5-7 方形容器注入配置之藍瓶溶液，經 24.4 Hz 振動下不同時刻之照片

圖 5-7 為將藍瓶溶液配置於方形容器，並暴露在常溫常壓的環境下，24.4 Hz 穩定態的振動圖形可以維持持續 30 分鐘。從圖 5-7 可看出，1 分鐘出現外緣為藍色(腹線)、內部為無色的 8 片花瓣形狀；5 分鐘時部分花瓣核心部分(如紅框處)由原有的無色變成藍色，代表此處也是腹點分布區域，只是振幅較花瓣外緣處小，導致溶氧量較少，故較花瓣外緣處晚些出現藍色分布；而紅框中花瓣內的無色部分應是節線區域，此處因沒有振動增加溶氧量，故仍維持無色。隨著時間演進，氧化反應持續進行，溶液中藍色亞甲藍越來越多，逐漸流動至花瓣內的無色區域，使花瓣幾乎全部轉為藍色。由藍瓶溶液共振過程可看出氧氣會先從特定區域開始反應，反應較多處呈現藍色，較少處則呈現無色，此項可以應用於在相同容器中針對特定之區域產生指定的化學反應。

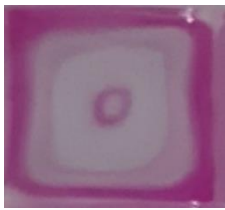
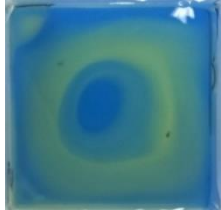
實驗七小結論：藍瓶反應溶液(1M、8mL 之 $C_6H_{12}O_6(aq)$ 、1M、2mL $NaOH(aq)$ 及 3 滴亞甲藍)，以 24.4Hz 之頻率振動，可出現持續 30 分鐘穩定的花瓣圖案，而反應會沿著花瓣外緣向內，花瓣核心向外逐漸進行。

(二) 通有二氧化碳含酸鹼指示劑之鹼性溶液經振動後之顏色分布

1、含酚酞指示劑與廣用指示劑之鹼性溶液相同頻率之共振圖案比較

因使用圓形容器做酸鹼反應共振，均產生渦流，後方僅針對方形容器中酸鹼溶液出現清楚

共振圖案之情形做討論。加入酚酞指示劑與廣用指示劑的酸鹼反應，雖為不同的指示劑，但在 26.3Hz 振動下實驗的結果大致相同(如圖 5-8 所示)，NaOH+酚酞指示劑溶液通入 CO₂，由外而內顏色分佈依序為：桃紅色(pH 最高)→粉紅色(pH 次高) → 無色(pH 最低) →粉紅色(pH 次高) → 無色(pH 最低)； NaOH+廣用指示劑溶液通入 CO₂，由外而內顏色分佈依序為：藍色(pH 最高)→綠色(pH 次高) → 黃色(pH 最低) →綠色(pH 次高) → 藍色(pH 最高)。

| | | |
|---|---|---|
| 共振頻率 | 26.3Hz | |
| 對應圖案 |  |  |
| 對應溶液 | NaOH _(aq) +酚酞指示劑 通入 CO _{2(g)} | NaOH _(aq) +廣用指示劑 通入 CO _{2(g)} |
| 圖 5-8 加入不同指示劑的酸鹼溶液對應相同共振頻率，60 秒時之顏色分布情形 | | |

另在 41 Hz 振動下 2 者隨時變化的實驗結果也是大致相同(如圖 5-9 所示)，都出現了 8 瓣花朵的特定圖形，只是含酚酞指示劑之酸鹼反應產生的圖案較清楚。因酸鹼反應是溶液通入 CO₂ 反應後中各處氫離子之濃度變化，易受溶液的流動、氣體壓力改變、擾動等因素影響，為一非平衡化學系統，特定的共振圖案出現時間短暫(約數十秒)；且隨著 CO₂ 逐漸溶入液體，整杯溶液最後全部變成酸性，所以利用駐波振動控制二氧化碳通入之鹼性溶液來區隔出特定酸鹼區域，其應用價值有限。








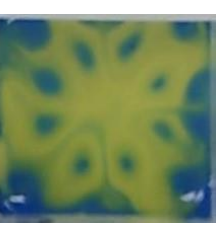
| 振動頻率(Hz) | 實驗照片 | | | |
|----------|---|---|--|---|
| | t=0(未振動) | t=30 秒 | t=60 秒 | t=90 秒 |
| 41.0 |  |  |  |  |
| |  |  |  |  |

圖 5-9 實驗中使用不同指示劑之酸鹼溶液在方形容器共振下不同時刻之顏色分布情形

2、含酚酞指示劑之鹼性溶液 2 種共振頻率之圖案比較

邊長 25.0mm 之方盒，注入深度 3mm 之鹼性溶液($5.0 \times 10^{-3} \text{M NaOH}_{(aq)}$)及 5 滴的酚酞)，通入二氧化碳，以 2 種共振頻率(24.4Hz、41Hz)振動 60 秒後，雖然均呈現 8 片花瓣的相似圖案，但其實 2 者的特定圖案並不相同，在此將 2 者圖案的差異比較羅列於表 5-1。

表 5-1 方形容器內含酚酞之 $\text{NaOH}_{(aq)}$ 通入 CO_2 後，二種共振頻率之圖案對照比較表

| 共振頻率/拍攝時刻 | 24.4 Hz / 60 秒 | 41 Hz / 60 秒 |
|-----------|---|---|
| 共振時之特定圖案 |  |  |
| 花瓣外緣之幾何形狀 | 近似三角形 | 近似鸞形 |
| 花瓣內部 | 只有核心區域呈桃紅色，其餘多為無色 | 由外而內依序為無色、桃紅色、粉紅色、桃紅色 |

由表 5-1 的比較可看出共振頻率 41Hz 的特定圖案要較 24.4Hz 複雜得多，代表溶液形成駐波時因每處的振幅大小不一，使得 CO_2 的溶解量也各不相同，造成溶液形成桃紅色(鹼性)、粉紅色(弱鹼性)及無色(酸性)，因而產生特定的圖案分布。

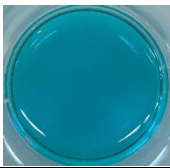


方盒內含酸鹼溶液(指示劑為酚酞或廣用指示劑)及藍瓶溶液共振下之小結論：

- (1) 相同條件的酸鹼溶液在不同頻率的駐波共振下，出現的圖案即使外型相似也還是代表不同的圖案。相似圖形，共振頻率越高，對應的特定圖案越複雜。
 - (2) 兩種指示劑之酸鹼溶液以相同駐波頻率振動，會出現相同之圖案，其中以含酚酞指示劑之酸鹼反應產生的圖案較清楚，但維持時間均短暫(約數十秒)。
- (三) 本氏液加熱後因駐波振動與葡萄糖反應後之溶液顏色分布

因前面藍瓶反應、酸鹼反應都是用駐波振動控制氣體與液體的化學反應，故後來嘗試以駐波振動控制具顏色變化的液體-液體化學反應。此處選擇加熱後的本氏液振動產生駐波，再將 1M 葡萄糖溶液滴入，觀察駐波振動對銅離子還原反應造成的影響。因為本氏液檢測還原糖反應，均為持續加熱到某一高溫(如 70°C)，加熱應當是增加液體分子間有效碰撞頻率便於產生反應。故實驗設計本氏液加熱至 50°C 加以振動產生同心圓駐波後，再將 1M 葡萄糖溶液滴入，藉由駐波中的液面振動，觀察溶液在腹線、節線位置的液體分子是否會因共振使得腹線、節線位置之有效碰撞頻率不同而讓化學反應所有區別。實驗發現在 4 種同心圓共振頻率 18 Hz、28 Hz、38 Hz、48 Hz 之結果均非常類似，在此僅以 28 Hz 的情形做成圖 5-10 加以分析說明。

比較圖 5-10 之 a、b 可看出，28 Hz 振動下，燒杯內 50°C 的本氏液(深度 5mm)與 1M 葡萄糖溶液 5 滴混合產生反應，形成 Cu_2O 的顆粒懸浮在溶液中，使得 b 中的溶液

看起來較 a 混濁；但駐波振動並未讓溶液出現特定的圖案顏色分布，代表此實驗不適合利用在本氏液與還原糖的反應作空間分布區隔，詳細原因會在後面討論加以詳細分析。

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| 圖 5-10 a.加熱至 50°C 的本氏液之俯視圖 | b.將 a.的本氏液共振後再滴入 1M 葡萄糖溶液之俯視圖 | c. 以斜上方拍攝 b.的溶液證明其產生同心圓駐波 |

因觀察到反應後的溶液中有懸浮顆粒，想到駐波振動是否會對懸浮液造成影響呢？故接著將本氏液與 1M 葡萄糖溶液混合加熱至 70°C 形成橙色的懸浮液置於內徑 35.0 mm 之燒杯(懸浮液深度 5mm)，再將其置於平台分別以 4 種同心圓共振頻率 18 Hz、28 Hz、38 Hz、48 Hz 加以振動 3-5 分鐘後觀察，結果發現駐波振動會讓原來懸浮於溶液中的 Cu_2O 奈米顆粒，團聚後沉積於節線位置，如圖 5-11 所示。由圖 5-11 可看出 38 Hz、48 Hz 共振下之分布與對應之克拉德尼圖案幾乎一致；但在 18 Hz、28 Hz 共振下的圓形節線半徑均小於克拉德尼圖案對應之情形，推測是因為駐波振動加強原先懸浮之奈米顆粒聚合，使其在約一半振幅之位置處即因顆粒較重而沉積於下方底部位置。

| 振動頻率 (Hz) | 實驗照片 紅棕圈為圓形節線 | 同心圓克拉德尼圖案 (白色為節線) | 未振動之 溶液照片 |
|-----------|---|---|---|
| 18.0 |  |  |  |
| 28.0 |  |  | |
| 38.0 |  |  | |
| 48.0 |  |  | |

圖 5-11 本氏液與 1M 葡萄糖溶液混合加熱至 70°C 形成橙色的懸浮液在 4 種共振頻率下的特定圖案

查詢參考文獻[6]中有提到學者們利用培養液培養菌落，再以法拉第駐波共振約 24 小時後，讓菌落沉積在底座上做成生物晶片，如圖 5-12 所示，代表駐波振動可利用來幫助懸浮液中一些較大的奈米顆粒或懸浮物沉積在節線位置來加以應用，或是用來分離和過濾異質溶液中的污染物質。

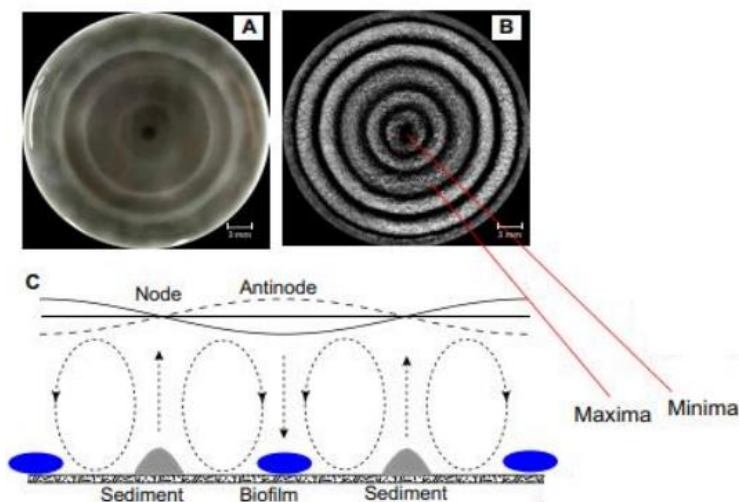


圖 5-12 學者利用駐波振動做出同心圓沉澱分布的生物晶片說明圖 [6]

小結論：本氏液 (50°C) 駐波振動後，加入葡萄糖溶液數滴反應後無法形成特定圖案；
本氏液檢測葡萄糖溶液(70°C)形成的橘色懸浮液以 18 Hz、28 Hz、38 Hz、
48 Hz 駐波振動後可形成同心圓圖案。

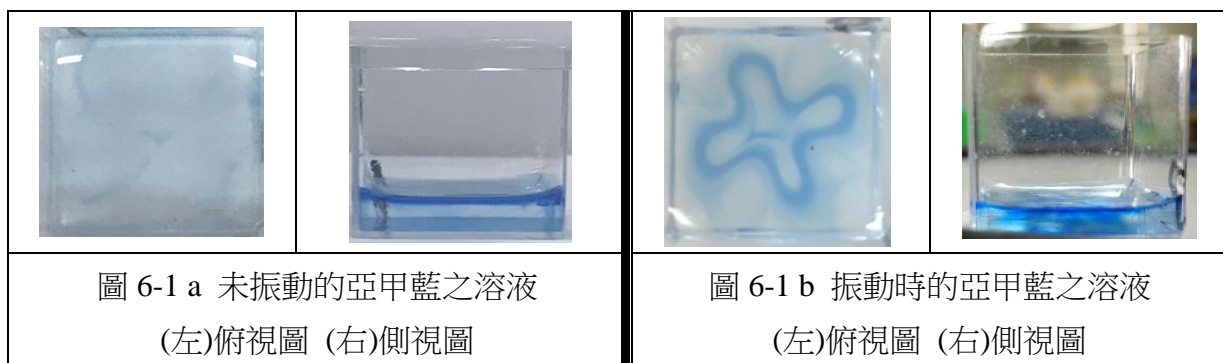
六、討論與應用

(一) 藍瓶溶液共振前後比較：

未振動時的亞甲藍液，如圖 6-1a 所示，由對應的側視圖可看出此時方形容器加蓋時，其中的溶液只有上面薄層為藍色氧化態，而下方為近似無色的還原態。在沒有振動的情況下，氧氣在溶液中的溶解會因自然對流導致隨機模式，而溶液上方薄層尚有接觸氧氣的部份，便會保留藍色。

共振時的亞甲藍溶液，如圖 6-1b 所示，可觀察到在波腹位置呈現藍色，對應到側視圖的液面下方局部深度內也呈現藍色，說明振動所形成的反應不是只有液體表面的分子產生化學反應，連垂直於液面下方之分子也產生反應。

由此可以分析出圖 5-4 中，當藍瓶溶液深度過淺時，在液面腹線下方的藍色氧化態亞甲藍無法往下延伸，很容易就擴散到鄰近的其它範圍，使得共振圖案無法生成。當溶液深度稍淺時，腹線下方聚積之一些氧化態亞甲藍，接觸到容器底部時，也會有往兩邊

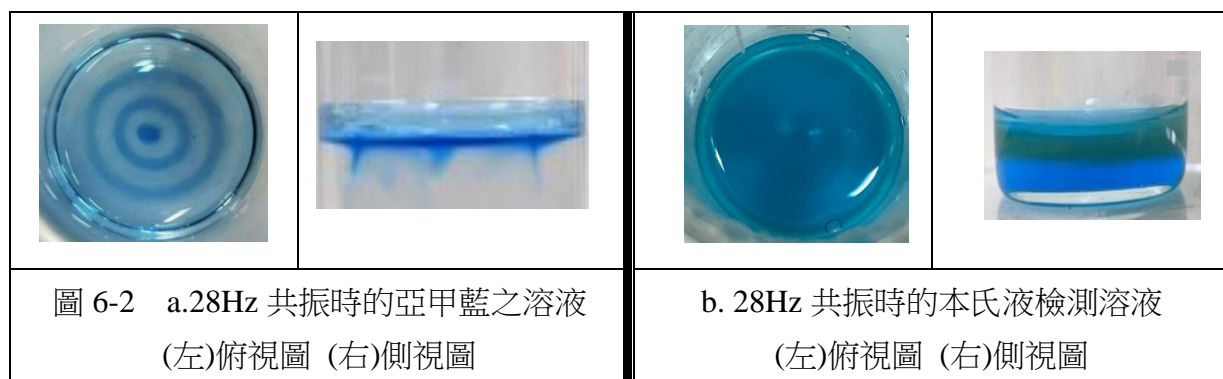


擴散的現象。所以造成雖有圖案形成，但不清楚。溶液太深的時候，因溶液振幅調控較困難，稍有不慎就會形成混亂狀態，亦不利形成清楚的圖案分布。

(二) 加熱本氏液與滴入之葡萄糖溶液反應於共振時之討論

50°C 的本氏液產生駐波振動後與滴入的 1M 葡萄糖溶液混合產生反應(以下簡稱為本氏液檢測糖反應)，並未出現特定圖案分布，這是為何呢？由下面同樣以 28Hz 駐波振動的藍瓶溶液與本氏液檢測糖反應溶液之側視圖(如圖 6-2)便可以了解。

由圖 6-2a 可看出當 28Hz 共振下，藍色亞甲藍會在腹線位置往液面下方延伸。由容器底部向上出發的紅光在腹線或節線位置會被不同厚度的氧化態亞甲藍吸收，因此可在藍瓶溶液中形成藍色同心圓分布。但共振下的本氏液檢測糖溶液由圖 6-2b 可看出由下而上依序為：未反應的本氏液(藍層，銅離子多)、紅色 Cu_2O 顆粒懸浮於藍色本氏液(淺綠層)及被葡萄糖還原過的本氏液(淺藍層，銅離子較少)。該淺綠層厚度分布均勻，無法像藍瓶溶液的氧化態亞甲藍可藉由振動造成不同的深淺分布，所以無法呈現同心圓共振圖案。



雖然本氏液檢測糖溶液目前尚無法用駐波振動去區分出特定狀態分布，但它提供我們一個重要觀點釐清何種狀況下的化學反應才能用駐波振動去區分出溶液中特定的狀態分布。基本上化學溶液反應的產物若含有懸浮顆粒者，應當可應用駐波振動幫助懸浮物聚積在節線加以分離。

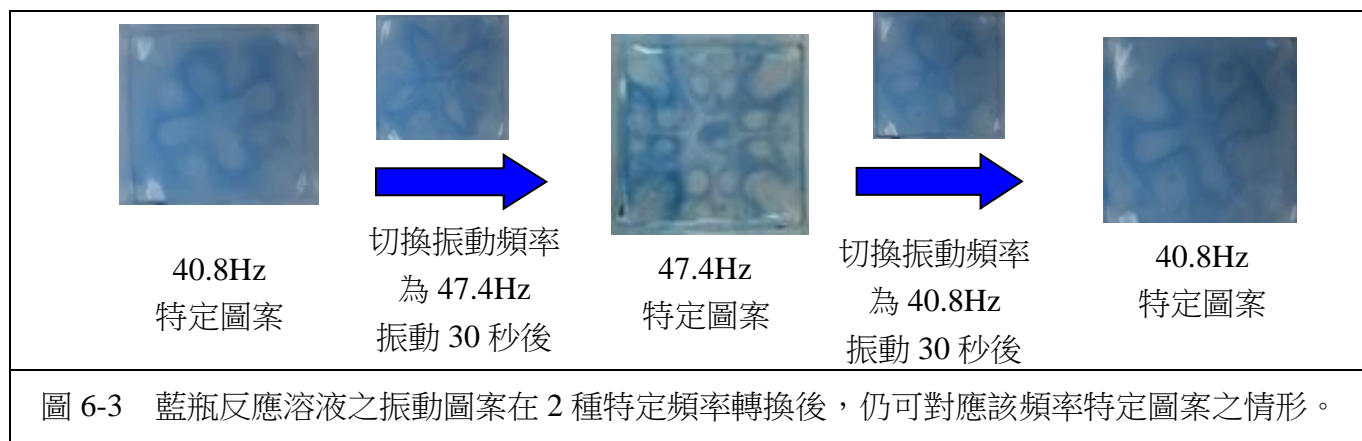
(三) 藍瓶溶液之駐波振動探討：

1、特定圖案之修復與轉換

藍瓶反應溶液之振動圖案會隨驅動的頻率、振幅、容器形狀、溶液深度而產生各種變化。另外振動出之特定圖案還表現出「自我修復」行為，即它們在被外界擾動(如細針擾動)後會再恢復到該頻率下對應之圖案。也可以在原本模態中藉由頻率改變，轉換到另種特定圖案，如圖 6-3 所示。

此種特定圖案的修復與轉換應當是其中亞甲藍的氧化態與還原態在切換過程中因溶氧量改變，逐漸調整其在空間中的分布位置所致。例如圖 6-3 初始為 40.8Hz 的振動圖案，當頻率切換至 47.4Hz 時，經 30 秒振動後就變成 47.4Hz 對應的特定圖案；再切換至 40.8Hz 經 30 秒振動後就又回到 40.8Hz 的振動圖案。代表只要實驗條件固定，轉換

至不同共振頻率就可以對應此頻率下的特定圖案，因此可藉由改變振動頻率來控制溶液中藍色氧化態分子的分布區域。



2、駐波頻率與波速之探討

當燒杯內藍瓶反應溶液形成同心圓駐波時，相鄰兩藍色圓形腹線的間距即為對應駐波的半波長。測量照片中相鄰兩腹線間的間距去推得波長並加以平均，可得到實驗中駐波的波長 λ 。由前述(4-2)關係式，可得出共振時溶液之波速理論值 $V_{理}$ 。

$$\text{波速理論值 } V_{理} = \left[\left(\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda} + \frac{\lambda g}{2\pi} \right) \tanh(kh) \right]^{1/2} \quad \text{-----(6-1)}$$

其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ，代表波數； $g=9.8\text{m/s}^2$ ； σ 為溶液表面張力，以 70 mN/m 加以計算； ρ 為藍瓶溶液密度，經測量約為 1.09 g/cm^3 ；溶液深度 $h=5\text{mm}$ 。



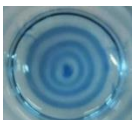

計算時發現因實驗中的駐波波長均為數個 mm ，與溶液深度的數量級一致，使得(6-1)式中的 $\tanh(kh) \sim 1$ ，代表溶液深度在 10mm 以內其實對波速幾乎沒有影響，適當的溶液深度只是要使溶液產生清楚的共振圖案。在此將實驗中測出的駐波波長 λ 代入(6-1)式，求得藍瓶反應中 4 種同心圓駐波的波速理論值 $v_{理}$ ，並利用 $v_{實} = \lambda f_{實}$ 做出表 6-1 的比較表。由表 6-1 中可看出下列 2 點：

- (1) 4 種同心圓駐波(18Hz、28Hz、38Hz、48Hz)，其所對應的波速理論值($V_{理}$)均小於實驗值($V_{實}$)。
- (2) 4 種同心圓駐波(18Hz、28Hz、38Hz、48Hz)分別對應的波速理論值($V_{理}$)與共振頻率呈正相關變化；但波速實驗值($V_{實}$)除了在 18Hz 略小外，其餘在 28Hz、38Hz、48Hz，大約為一定值($\sim 33.6\text{cm/s}$)，並未隨頻率上升而增加。

推測上述波速理論值與實驗值的差異應是當溶液在駐波振動下，腹線主要為藍色氧化態分布，節線主要為無色還原態分布。此時燒杯內的波動傳遞相當於在 2 種交錯分布的介質中進行，並非理論推導的單一介質(例如水)，因而造成駐波波速的實驗值與理論的對照分析出現差異。但溶液中 2 種週期性排列的介質分布會如何影響表面波的傳遞速率，需要更深入的

數學分析探討，實非目前程度所能及。

表 6-1 藍瓶反應 4 種同心圓駐波的共振頻率、波速之實驗值與理論值之一覽表

| 同心圓駐波照片 | 共振頻率(Hz) | V _實 (cm/s) | V _理 (cm/s) |
|---|----------|-----------------------|-----------------------|
|  | 18.0 | 31.5 | 22.4 |
|  | 28.0 | 34.3 | 22.8 |
|  | 38.0 | 33.3 | 24.4 |
|  | 48.0 | 33.6 | 26.2 |

3、紅綠藍三色光之相對吸收度之探討：

在此我們利用 Image J 測出未振動時沿徑向不同位置之 RGB 數值為吸收前之光強度，測出振動後沿徑向不同位置之 R' G' B' 數值為吸收後之光強度，並定義：

$$\text{紅光相對吸收度}=(R-R')/R\text{-----}(6-2)$$

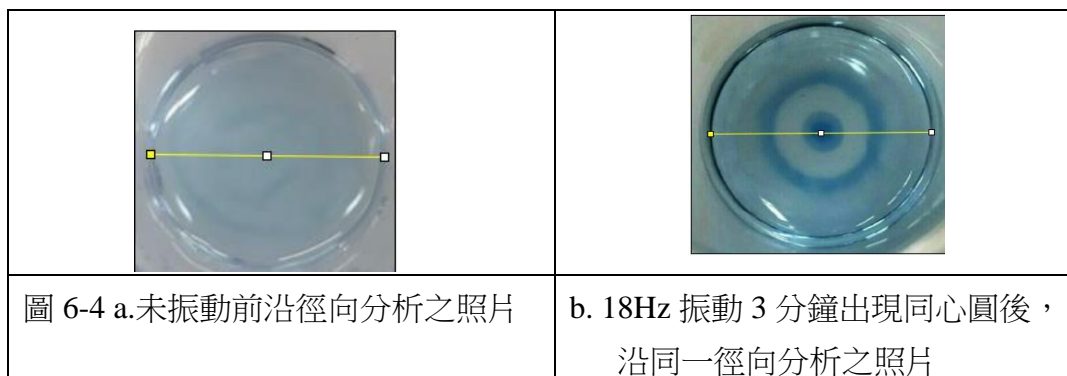
$$\text{綠光相對吸收度}=(G-G')/G\text{-----}(6-3)$$

$$\text{藍光相對吸收度}=(B-B')/B\text{-----}(6-4)$$

以上述定義計算出三種色光之相對吸收度沿徑向上的變化情形。

現將實驗五中以 18Hz 振動藍瓶反應溶液為例加以說明：

將 18Hz 振動前後之照片(如圖 6-4 a 及 b 所示)，18Hz 振動 3 分鐘後沿同一徑向用 Image J 測出未振動時沿同一徑向不同位置之 RGB 數值，此處均定圓形容器中心位置為 r=0，最左側位置為 r = -1.75cm，最右側位置為 r = +1.75cm。



將未振動下的照片做出光強度-徑向位置之分布圖如圖 6-5 所示；18Hz 振動 3 分鐘後沿

同一徑向不同位置之 RGB 數值，做出光強度-徑向位置之分布圖如圖 6-6 所示。利用(6-2)到(6-4)式之定義，將三種色光之相對吸收度沿徑向之變化關係做成圖 6-7。由圖 6-5 可看出當未振動時溶液中大多數為還原態之亞甲藍，所以綠藍二種色光強度大小接近，紅光光強度略低，故還原態亞甲藍溶液呈透明的淡藍色。由圖 6-6 可看出 18Hz 振動 3 分鐘後，藍光之光強度些微降低，綠光、紅光之光強度明顯下降，尤以紅光下降最明顯，代表溶液中還原態亞甲藍吸收氧氣變為氧化態，而氧化態甲基藍會吸收長波長的紅光，造成紅光之強度明顯降低。

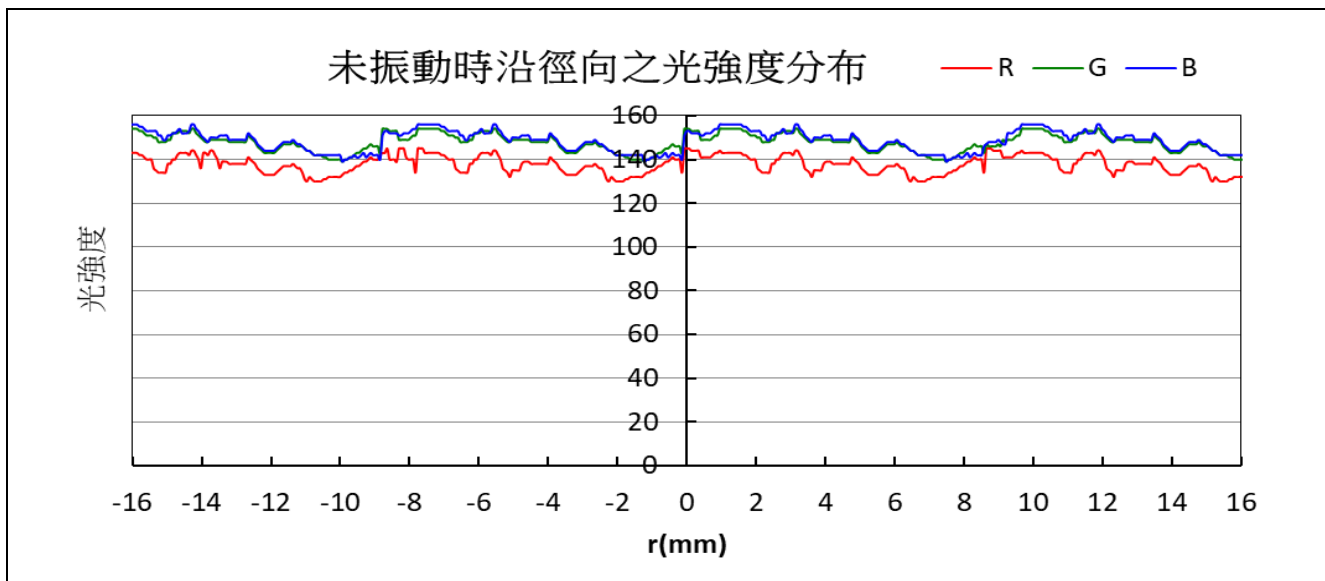


圖 6-5 實驗五之藍瓶反應溶液未振動時沿徑向之 RGB 數值分布圖

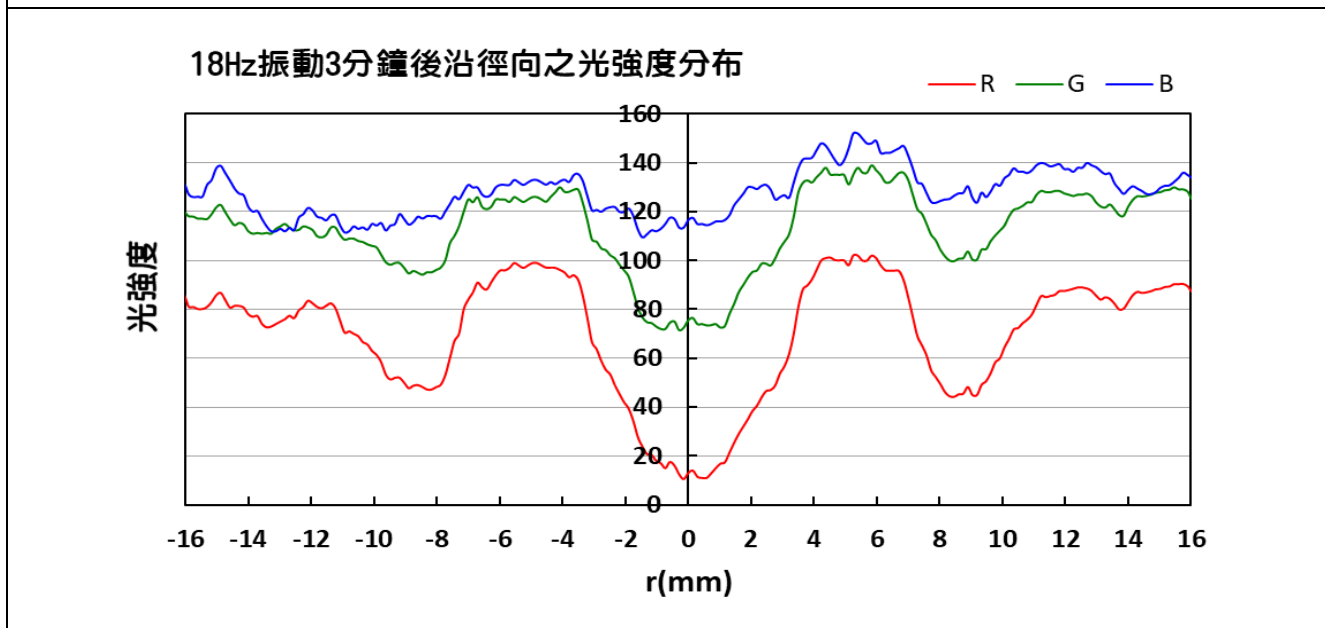


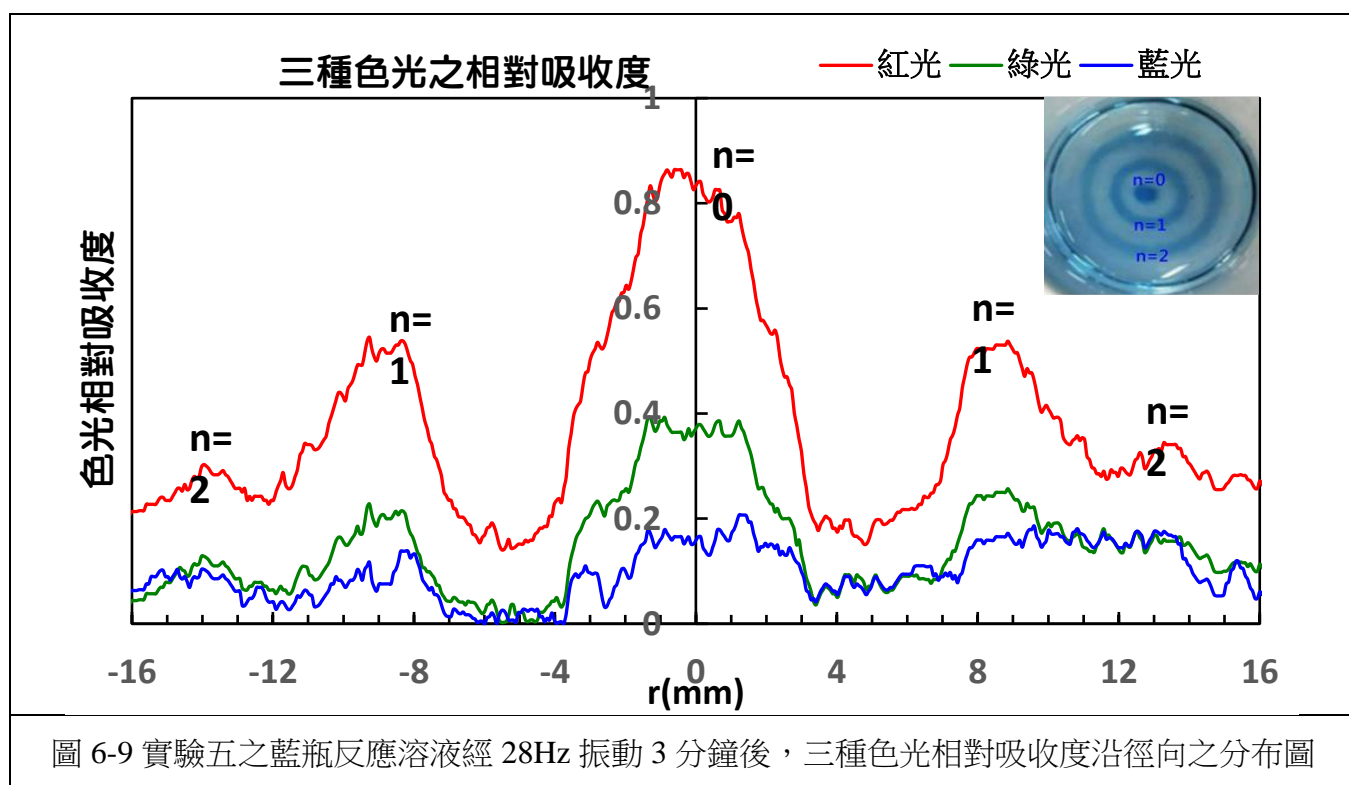
圖 6-6 實驗五之藍瓶反應溶液以 18Hz 振動 3 分鐘後沿徑向之 RGB 數值分布圖

振幅最大 $n=0$ 之腹點位置，造成此處溶氧量最強，氧化態含量最多，使得紅光、綠光的相對吸收度均呈現峰值，且紅光吸收程度較綠光明顯，故在圓心處呈現一個藍色實心圓。另因紅光吸收較為顯著，以下僅針對紅光吸收度做討論。在 $n=1$ 之腹點位置，此處紅光的相對吸收度亦呈現峰值，只是此處峰值約為圓心處的 72%，這是因為 $n=1$ 之腹點振幅較圓心處($n=0$) 來得小，所以溶氧量較少，紅光吸收度變小。

另外比照 18Hz 之分析方式，將 28Hz 與 38Hz 振動 3 分鐘後，三種色光之相對吸收度沿徑向之變化關係做成圖 6-9 與 6-10。由圖 6-9 可看出 28 Hz 之共振圖案出現 $n=0$ 、 $n=1$ 及 $n=2$ 之腹線(點)，在腹點位置之紅光相對吸收度亦呈現峰值，且此些峰值隨 n 值增加而減少。 $n=1$ 位置之紅光相對吸收度約為圓心處($n=0$)的 69%， $n=2$ 位置之紅光相對吸收度約為圓心處($n=0$)的 34%。

由圖 6-10 可看出 38 Hz 共振圖案出現 $n=0$ 、 $n=1$ 、 $n=2$ 及 $n=3$ 之腹線(點)，在腹點位置之紅光相對吸收度亦呈現峰值，但這些對應之峰值卻未隨 n 值增加而減少。圖 6-10 中 $n=1$ 、 $n=2$ 及 $n=3$ 三處腹點位置之紅光相對吸收度大致相同，約為圓心處($n=0$)的 70%，這是較為奇怪之處。因 n 值越大的腹點其振幅越小，應當溶氧量會越少，紅光吸收度會越小。此一奇特之處推測可能是溶液中同心圓腹線分布太過密集時，易使溶液因劇烈的濃度梯度形成流動，讓溶液中氧化態亞甲藍的分布不全然是由溶液表面的振幅大小所決定。而密集的同心圓分布所導致的劇烈濃度梯度，就是學者們[2]中使用培養皿作多種化學實驗均出現渦流的因素，故需降低容器尺寸才能得到穩定清楚的共振圖案。

而 8Hz 振動只有出現圓心處 $n=0$ 之藍色實心圓，與前述討論類似；另 48 Hz 振動後沿徑向之紅光相對吸收度分布較為凌亂，在此未作分析討論。



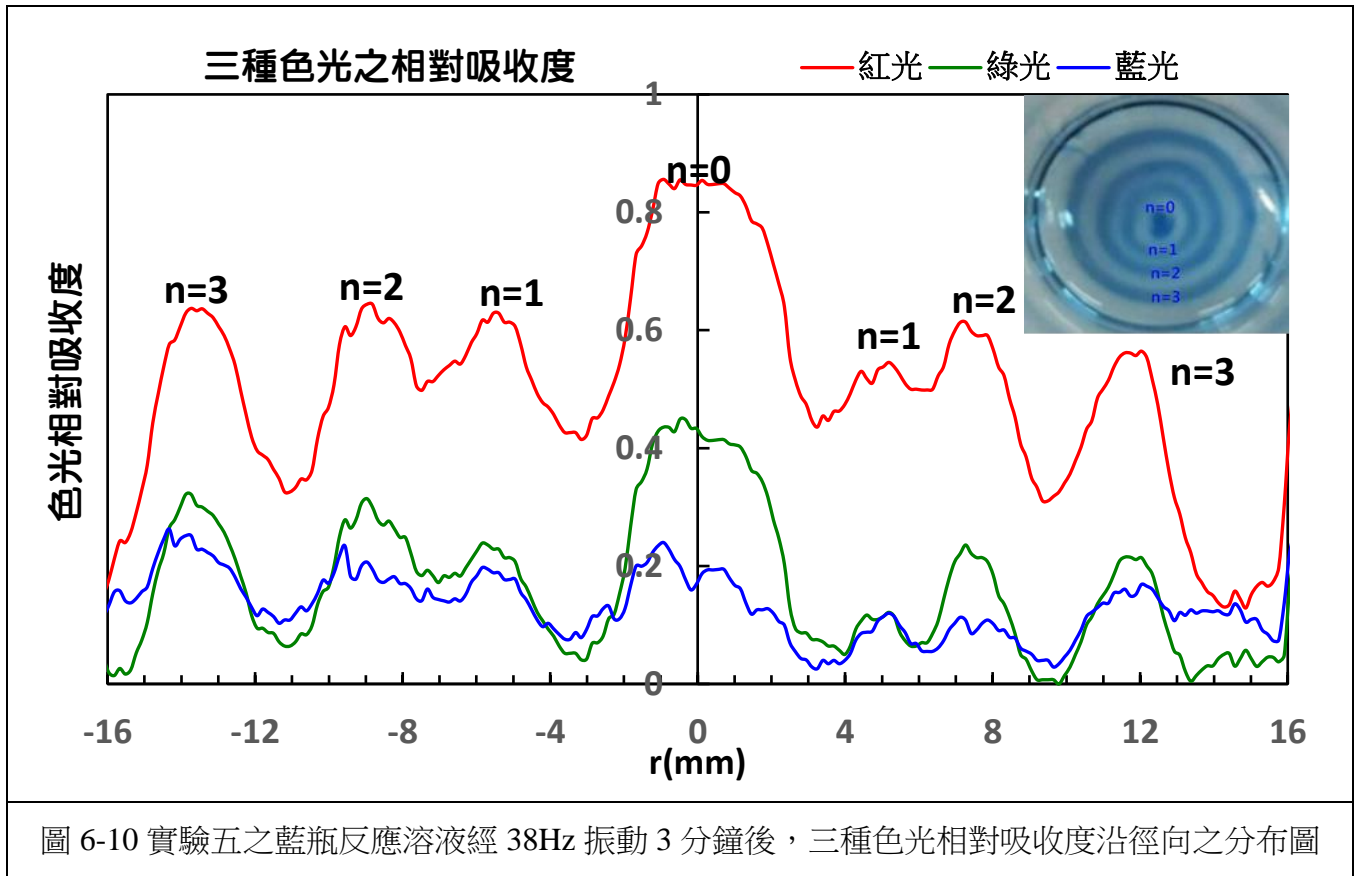


圖 6-10 實驗五之藍瓶反應溶液經 38Hz 振動 3 分鐘後，三種色光相對吸收度沿徑向之分布圖

(四) 亞甲藍濃度-紅光相對吸收度之檢量線分析

為了找到振動圖形和亞甲藍濃度對應關係，我們使用相同 3.5cm 圓形燒杯，配置相同 1M 葡萄糖和 1M 的氫氧化鈉之溶液，並調整不同濃度的亞甲藍，並用 Image J 測出照片找尋觀察濃度區間的平均紅光強度做不同濃度的亞甲藍之對應之紅光強度一覽表(如表 6-2)。在此以

亞甲藍濃度為 0 時的紅光強度定為 I_0 ，不同濃度下的氧化態亞甲藍之紅光強度定為 I ，

並定義

$$\text{紅光相對吸收度} = (I_0 - I) / I_0 \text{-----(6-4)}$$

藉此找出不同濃度氧化態亞甲藍的紅光相對吸收度，製作濃度-紅光相對吸收度檢量線(如圖 6-11)。

表 6-2 不同濃度的氧化態亞甲藍對應照片與對應之紅光強度一覽表

| 氧化態亞甲藍濃度 ($\times 10^{-5} M$) | 0 | 3.125 | 6.250 | 9.375 | 12.500 | 15.625 | 18.750 |
|---------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 實驗照片 | | | | | | | |
| 紅光強度 | 141.14 | 112.40 | 61.22 | 59.27 | 23.54 | 6.23 | 1.12 |

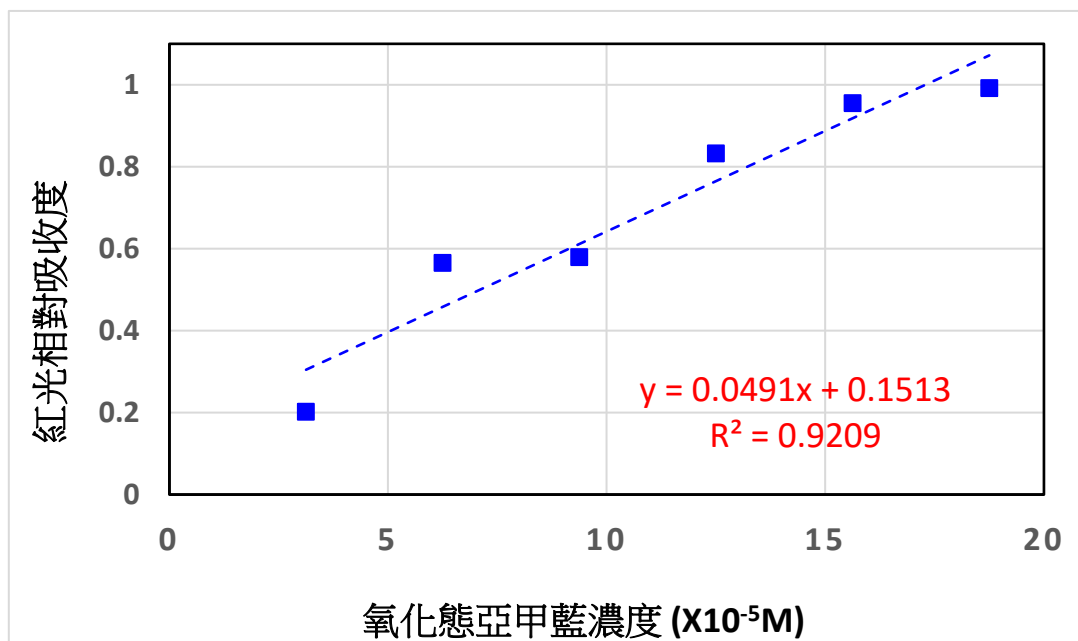


圖 6-11 氧化態亞甲藍濃度-紅光相對吸收度之檢量線

使用圖 6-11 的檢量線可以用來分析氧化態亞甲藍濃度，氧化態亞甲藍溶液濃度越高，對應到吸收的紅光越多，藍色越深，由圖 6-11 可看出氧化態亞甲藍濃度和紅光相對吸收度呈現正相關的線性關係。若能以相同之均勻光源下固定拍攝位置，做出規準化的氧化態亞甲藍濃度-紅光相對吸收度之檢量線來進行比對，便可準確分析出亞甲藍在振盪時，不同位置的氧化態亞甲藍濃度之變化情形。

以實驗結果舉例說明，圖 6-7 中實驗五之藍瓶反應溶液經 18Hz 振動 3 分後在圓心處的紅光相對吸收度約為 90%，對照圖 6-11 的檢量線可找出圓心位置的氧化態亞甲藍濃度約為 $1.52 \times 10^{-4} \text{M}$ ；而 $n=1$ 腹點處的紅光相對吸收度約為 63%，對照檢量線可找出該位置的氧化態亞甲藍濃度約為 $9.75 \times 10^{-5} \text{M}$ ，其他情形依此類推，均可藉由不同位置的紅光相對吸收度找出該位置對應的氧化態亞甲藍濃度。

(五) 共振模態之應用探討

實驗中以特定頻率振動藍瓶溶液，會在駐波之波腹位置出現特定圖案且維持 10 分鐘以上。共振頻率下溶液的氧化態分布，代表可以用來應用成一個新的化學環境，該化學環境可被劃分為不同的分子環境，類似於細胞的微環境，可以用在生化研究上。而含有懸浮顆粒或物質溶液，可用駐波振動讓懸浮物聚積在節線上加以應用，例如應用聲波振動方式[6]控制細菌堆積做成生物薄膜(如圖 6-12a)，或是細胞堆積做出生物晶片[7](如圖 6-12b)。

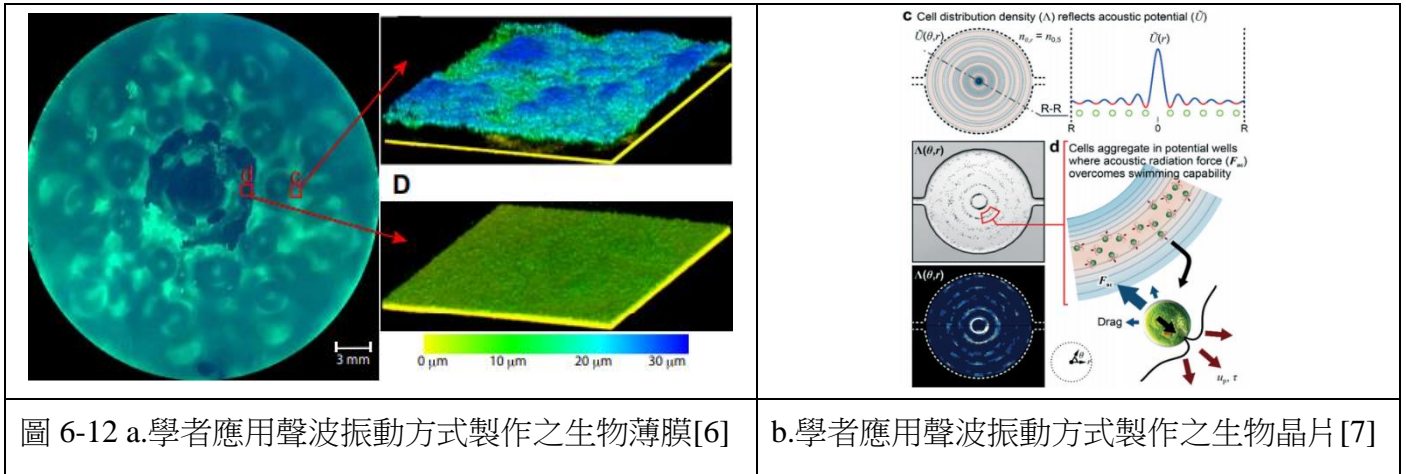


圖 6-12 a.學者應用聲波振動方式製作之生物薄膜[6]

b.學者應用聲波振動方式製作之生物晶片[7]

七、結論

(一)、實驗中溶液共振時會形成特定類似克拉德尼的圖案，此圖案取決於聲源振動的頻率、振幅、溶液深度以及容器的幾何形狀。

實驗中找到藍瓶反應能產生穩定振動圖案之最佳實驗條件如下：

溶液配方：葡萄糖溶液(1M、8 毫升)、NaOH 溶液(1M、2 毫升)、亞甲基藍液 3 滴；
小振幅振動(0.2~0.4g)；圓形容器之尺寸：內徑 3.50cm 的圓形燒杯；溶液深度：5mm。
希望未來能夠找到更多適當條件，探討振動下液體特定圖形分佈之化學系統，並找出對應的規律。

(二)、藍瓶反應溶液和通有二氧化碳含廣用指示劑或酚酞的氫氧化鈉溶液，當以共振頻率振動時，會產生特定的表面駐波，使局部區域氧氣或二氧化碳等氣體在溶液中的化學反應程度有所差異，可在同杯溶液中的不同區域分隔出不同的狀態（如高低濃度、氧化態還原態、酸性鹼性），表示物理振動影響反應或排列，在不同化學反應下也能加以應用。

(三)、藍瓶反應溶液之共振圖案

1、圓形容器：以最佳實驗條件，在特定頻率(8.0Hz、18.0Hz、28.0Hz、38.0Hz 及 48.0Hz)振動下產生藍色同心圓圖案，共振頻率越高，同心圓數目越多。藍色分布在駐波波腹位置，且此處之紅光相對吸收度為峰值，其中 18.0Hz、28.0Hz 振動下不同腹點之紅光相對吸收度峰值沿徑向遞減。所對應之駐波波速理論值均較實驗值來得小；波速理論值會隨頻率增加而變大，但波速實驗值在 28.0Hz 以上趨向一定值。

2、方形容器：特定頻率(31.0Hz、35.0Hz、38.0Hz 及 41.0Hz)振動產生不同之克拉德尼圖案。藍色分布在駐波波腹位置，此處氧化態濃度較大。

(四)、本氏液檢測葡萄糖反應因產物為懸浮的 Cu_2O 顆粒，共振時無法在溶液中形成深淺不一之分布，故無法得到特定圖案。加熱反應後之橙色懸浮液可藉由駐波振動形成同心圓沉積分布。

- (五)、我們將物理駐波的概念應用在化學反應上，藉此達到溶液濃度的特定分布。實驗中發現圓形容器所區分之共振圖案較為簡單且清晰，同心圓的狀態也較穩定，希望未來能進行更精確的量化，方便進一步觀察與探討。
- (六)、本作品實驗結果，相較 Ilha Hwang[2]等人的實驗文獻，文獻中的振動圖案產生渦流，較無法清楚呈現特定區域的圖形分布，圖形通常 5 分鐘內就會消失不見。然而本實驗中的藍瓶反應呈現出較穩定的化學平衡系統，可以維持在特定濃度分布持續至少 10 分鐘以上。同時藉由振動調整頻率，可控制圖形的空間分布位向；此外系統受到干擾時，也會自我修復圖形，形成分子穩定的空間排列。

未來希望能找到更多化學反應，藉由振動實驗得到穩定圖形，應用局部區域的化學反應，來固定分子之分布或直接提取出單一區域物質，可使反應合成上幫助分離反應物和生成物的成分；醫學上可以控制藥物分布或細胞方式達到局部性殺死腫瘤細胞等應用。

目前我們正對各種聲波振動的物理原理、化學動力學特性、流體力學做更多資料搜尋和探討，希望能更了解這種獨特的化學反應系統，能衍伸找到更多相關的化學反應應用在生物科技、化學工程、化學合成、分析化學、醫藥等領域。

八、參考資料

1. 藍瓶實驗；吳鑫俞、蕭次融，科學研習月刊 45-7。 2021.1.5 取自 <https://www.ntsec.edu.tw/LiveSupply-Content.aspx?cat=6838&a=6829&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&lsid=82332>.
2. Ilha Hwang , Rahul Dev Mukhopadhyay , Prabhu Dhasaiyan , Seoyeon Choi, Soo-Young Kim , Young Ho Ko , Kangkyun Baek and Kimoon Kim (2020) , Audible sound-controlled spatiotemporal patterns in out-of-equilibrium systems, *Nature Chemistry* **12**, 808
3. 蔣儀宣、朱鳳華、徐悅聲。2012。與波共舞的飄浮水滴。2012 年臺灣國際科學展覽會優勝作品專輯。
4. Stowe, K. (1995) "Exploring Ocean Science", 2th ed. 2021.1.5 取自 <http://w3.oc.ntu.edu.tw/chap7/chap7s1.htm>
5. Steven Lehar(2003), Directional harmonic theory: A computational Gestalt model to account for illusory contour and vertex formation, *Perception*, **32**, 423 – 448
6. Sung-Ha Hong, Jean-Baptiste Gorce, Horst Punzmann, Nicolas Francois, Michael Shats, Hua Xia, Surface waves control bacterial attachment and formation of biofilms in thin layers, *Sci. Adv.* 2020; 6 : eaaz9386. 2021.2.17 取自 <https://advances.sciencemag.org/content/6/22/eaaz9386>
7. Minji Kim, Philip V. Bayly and J. Mark Meacham (2021), Motile cells as probes for characterizing acoustofluidic devices, *Lab Chip*, **21**, 521–533