

# 中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國小組 物理科

佳作

080110

「形」「音」不離對稱剪紙

學校名稱：臺南市善化區大成國民小學

作者：  小六 曾楹芝 小六 蘇榆芹	指導老師：  黃雅君
-----------------------------	------------------

關鍵詞： 頻率、共振、對稱剪紙

## 摘要

生活中的聲音隨處可「聽」，聲音來自於振動，因此我們拆解音響喇叭設計實驗，首先自製不同喇叭震源設備之圖形模擬器，再搭配不同材質、厚度和複合材質的板子與不同頻率的輸入，觀察其圖形變化。

實驗發現：

- 一、以共振喇叭設備在固定時所形成的節線較為完整且清晰，產生圖形的頻率範圍較廣。
- 二、不同材質的板子密度（重量）不同，導致在高頻時，出現相似圖形的頻率差異較大。
- 三、單一紅銅板或複合材質的板子密度（重量）相近，出現相似圖形的頻率無明顯差異。
- 四、特定頻率下的幾何圖形，當頻率越高，出現的圖形越複雜，皆有對稱性，讓我們聯想到『中國的剪紙藝術』，我們試著把「看見」的聲音形狀用色紙剪出其對稱圖形。

## 壹、研究動機

生活中的聲音隨處可「聽」，像是我們聽的音樂、工地很吵雜的噪音、說話聲、晚上睡覺擾人的蚊子聲……，在五年級中學到聲音來自於振動，老師利用肯特管讓我們看到排列整齊的波浪形狀，在網路上搜尋了有關克拉尼圖形的影片，我們好奇「每一種聲音都可以振動出不一樣的形狀嗎？」

因此我們先拆解出兩個音響單體及購買一組共振喇叭，自製不同喇叭震源設備之圖形模擬器，再使用平板連接，利用「phyphox App」的聲調產生器，製造不同頻率搭配不同材質的板子以觀察砂子圖形變化，是否能振出更多神奇又好玩的圖案，讓我們真的能「看見」聲音。

## 貳、研究目的

一、自製不同喇叭震源設備之圖形模擬器。

- （一）音響喇叭 KINYO - 4”重低音單體（ $8\Omega$ ，20W，35~200Hz）
- （二）音響喇叭 KINYO - 3”全音域單體（ $8\Omega$ ，20W，200~18kHz）
- （三）共振喇叭（ $4\Omega$ ，25W）

二、探討不同喇叭震源設備不固定與固定的圖形變化。

- （一）設備不固定
- （二）設備固定

三、探討不同材質的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化。

(一) 壓克力板 (尺寸：15×15×0.15cm，重量：50g)

(二) 紅銅板 (尺寸：15×15×0.15cm，重量：300g)

四、探討不同厚度的壓克力板和紅銅板在共振喇叭設備固定的圖形變化。

(一) 壓克力板：厚度 0.15cm / 厚度 0.3cm

(二) 紅銅板：厚度 0.15cm / 厚度 0.3cm

五、探討複合材質的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化。

(一) 壓克力板 (上) / 紅銅板 (下) (尺寸：15×15×0.3cm，重量：350g)

(二) 紅銅板 (上) / 壓克力板 (下) (尺寸：15×15×0.3cm，重量：350g)

六、探討不同頻率的圖形變化規律性及其對稱關係。

## 參、文獻探討

### 一、克拉尼圖形

恩斯特·克拉尼 (Ernst Chladni, 1756 – 1827) 是十九世紀的德國物理學家及音樂家，他對聲音所進行的開創性實驗讓人們尊稱他為「聲學之父」。克拉尼對振動和波動的研究促使了他對克拉尼圖形的發現。克拉尼圖形是一種以波紋、振動或頻率為基礎的幾何圖案，這些圖案通常出現在振動表面上，在自然界和科學實驗中都有廣泛的應用。

研究聲音如何影響物質的學問，稱為顯波學 (Cymatics)，它是由瑞士醫生暨科學家漢斯·詹尼 (Hans Jenny, 1904 – 1972) 博士所發現並命名的。科學家們依據克拉尼開創性的著作，持續檢視振動聲調對不同物質的影響。振動可以劇烈且立即地改變物質的結構。現代的克拉尼板會連接在一個稱為振動產生器的科學儀器上，調整頻率讓金屬板以不同的頻率振動。如果把白砂等對比色的東西灑在金屬板上，圖案就清楚可見。一旦特定頻率通過分子，這些頻率就會製造特定的圖形。一般來說，頻率越高，所製造出來的圖案就越複雜。[1]

### 二、駐波

駐波為兩個振幅、波長、週期皆相同的波雙向行進干涉而成的合成波。在波節處，由於兩列波引起的兩振動恰好反相，相互抵消，故波節處靜止不動，稱為節點 (Node)；在波腹處，由兩列波引起的兩振動恰好同相，相互加強，故波腹處振幅最大，稱為波腹 (Antinode)。

[2]

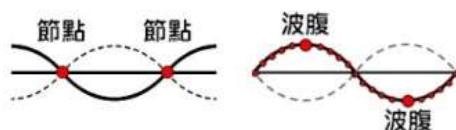


圖 3 - 1 節點與波腹示意圖（通訊博物館[2]）

### 三、文獻回顧分析

表 3 - 1 文獻分析

屆別	題目	組別／科別	研究重點
40 屆	神奇的波動[3]	國中組 物理科	1.頻率愈高，圖形的節線數量愈多 2.節線數與金屬板密度（質量）呈正相關 3.振幅只會影響圖形的清晰度及成圖時間
48 屆	粗沙跳動 VS 細沙跳動[4]	高中組 物理科	1.使用振動產生器、PASCO 介面及聲音感測器 2.觀察細砂飛舞模態及平板上方的波形振幅變化分析，討論「反節點」形成原因
63 屆	「情」時多語「偶振語」- 克拉尼圖探討 [5]	國小組 物理科	1.以共振喇叭為震源設備，利用功率放大板提高振幅 2.使用不同厚度的正方形鋁板 3.鋁片的厚度與頻率成正比 4.振動顆粒的尺寸、形狀、不同密度皆不影響產生圖形之頻率

綜合歷屆科展報告中，我們與其不同之處在於：

- （一）自製喇叭震源設備，除了共振喇叭外，再加上一般音響單體喇叭，包含重低音單體及全音域單體。
- （二）大部分震源設備多為固定，此次實驗加入探討設備不固定對圖形的變化影響。
- （三）實驗使用壓克力板外，再與紅銅板疊加形成複合材質，探討其圖形的變化。

## 肆、研究設備及器材

### 一、設備

表 4-1 研究設備及材料說明（圖為本團隊拍攝）

研究設備及材料	說明
 <p>實物投影機、筆記型電腦、藍芽板、平板、計時器、喇叭震源設備固定</p>	筆記型電腦、平板、實物投影機、藍芽板、12V 電源供應器、計時器
 <p>墊片、共振喇叭、固定白鐵片、JST2.5mm - 2P 母-連接線、全音域單體、束線帶、三角板扣、重低音單體、木板、震源設備固定</p>	KINYO - 4"重低音單體、KINYO - 3"全音域單體、共振喇叭、墊片、固定白鐵片、三角板扣、螺絲、束線帶、木板 (50×20×1.5cm)、JST2.5mm - 2P - 母 - 連接線、圓鋸機、電鑽、熱熔膠槍
 <p>游標尺、水平儀、銅柱、電子秤、篩網、直尺、紙杯、壓克力板(15×15×0.15cm)、紅銅板(15×15×0.15cm)、石英砂 (~0.5mm)</p>	游標尺、水平儀、銅柱、電子秤、篩網、直尺、紙杯、壓克力板(15×15×0.15cm)、紅銅板(15×15×0.15cm)、石英砂 (~0.5mm)

### 二、軟體

物理工具 phyphox (physical phone experiments) 是由德國亞琛工業大學第二物理學院 Sebastian Staacks 博士所開發，利用其中「聲學」項目的「聲調產生器」，採用「簡易模式」製造不同頻率的聲波進行實驗與測試。

表 4-2 實驗用軟體介紹 (Sebastian Staacks 博士[6])

圖片			
說明	phyphox App	聲學 - 聲調產生器	簡易模式

## 伍、研究過程及方法

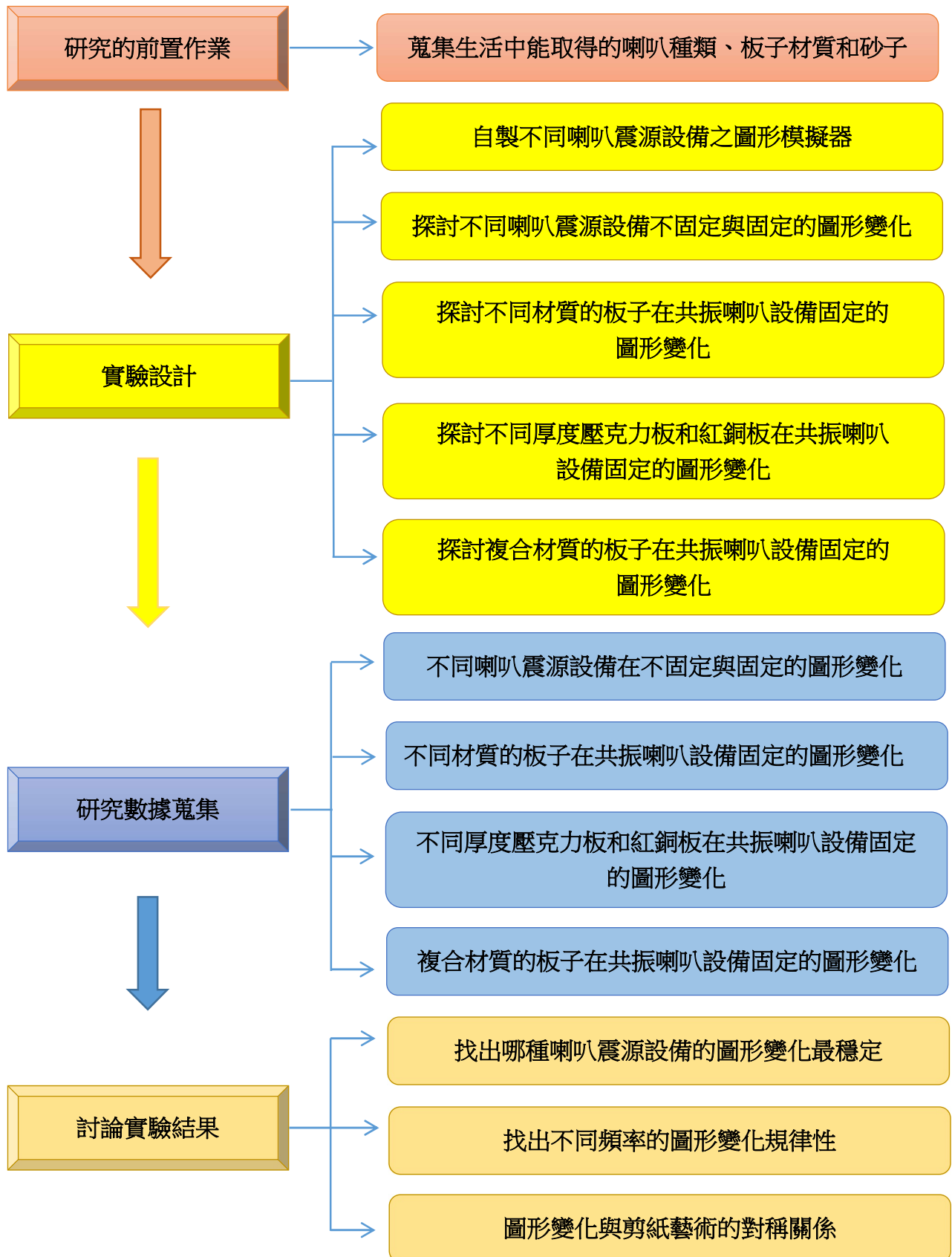


圖 5 - 1 研究架構圖

## 一、自製不同喇叭震源設備之圖形模擬器

首先先蒐集生活中常見的喇叭，跟資訊組長取得汰換下來，但功能仍正常的『KINYO KY-970 雙重低音喇叭』，拆解出 4 組單體，分別為 2 個 4”重低音單體和 2 個 3”全音域單體(如圖 5-2)，另外參考網路影片取得共振喇叭，來比較不同的震源設備(如表 5-1)。

音源輸入裝置使用 JST2.5mm - 2P - 母 - 連接線，搭配藍芽功率放大板(如圖 5-3)及 12V 電源供應器，利用平板安裝 phyphox App - 聲學 - 聲調產生器 - 簡易模式下，輸入頻率 20~3000Hz 進行實驗，其中某些頻率的振動效果不明顯或太顯著，因此會使用平板音量控制其振幅，以達到最佳效果。

	
<p>圖 5-2 KINYO KY-970 雙重低音喇叭 (圖為本團隊拍攝)</p>	<p>圖 5-3 藍芽功率放大板 (圖為本團隊拍攝)</p>

表 5-2 震源設備比較表(左欄位圖為本團隊拍攝)

震源設備		原理	構造/結構
	重低音單體	<p>由磁鐵、線圈、振膜(錐盆)所組成，當電流(從放大器出來的音頻訊號)通過線圈產生電磁場，線圈即隨著電流的頻率振動，而和線圈相連的振膜當然也跟著振動，推動周圍的空氣振動，由此產生聲音。[7]</p>	 <p>(莫里國際[7])</p>
	全音域單體		
	共振喇叭	<p>沒有喇叭盆體及音箱構造，當音頻經過轉換後以機械振動介質面(如木質桌面等)，使介質整個物體產生共振，從而使物體播放出悠揚的樂曲。[8]</p>	 <p>(天極網[8])</p>

綜合上述，我們仍決定選用三種喇叭做為震源設備，因為各有優缺點，傳統單體是藉由空氣傳遞聲音至振膜的方式，容易受聲波振幅的影響且振動幅度大較不穩定；共振喇叭是由機芯（固體）傳遞聲音至共振接觸鋁合金圓盤，但會受共振的介質面影響，發出的頻率較不刺耳；因此在自製不同喇叭震源設備時，我們針對「水平」問題進行改良設計。

#### （一）音響喇叭 KINYO - 4"重低音單體

由於「重低音單體」的振膜（錐盆）上沒有防塵蓋，所以我們必須先將銅柱用熱熔膠黏在振膜的正中心，但發現鎖上的板子與懸邊有空隙，水平不穩定（第一代）；改造裁剪適當高度的紙杯支撐板子與振膜間的空隙，但實際灑砂後，發現會因為砂子不夠均勻而水平不穩定（第二代）；接下來改良使用較短的銅柱，讓板子直接與懸邊接觸，實際用水平儀量測，水平顯著改善（第三代），自製流程圖如圖 5 - 4。



圖 5 - 4 重低音單體自製震源設備改良流程圖（圖為本團隊拍攝）

#### （二）音響喇叭 KINYO - 3"全音域單體

由於「全音域單體」的振膜（錐盆）上有防塵蓋，所以我們先將防塵蓋切下，再將銅柱鎖在防塵蓋的正中心，之後用熱熔膠黏回振膜上，但發現鎖上的板子與懸邊有空隙，水平不穩定（第一代）；改造裁剪適當高度的紙杯支撐板子與振膜間的空隙，但實際灑砂後，發現會因為砂子不夠均勻而水平不穩定（第二代）；接下來改良使用較短的銅柱，讓板子直接與懸邊接觸，實際用水平儀量測，水平顯著改善（第三代），自製流程圖如圖 5 - 5。



圖 5 - 5 全音域單體自製震源設備改良流程圖（圖為本團隊拍攝）



### (三) 共振喇叭

共振喇叭可直接將板子用銅柱鎖在共振接觸鋁合金圓盤上，但另一端有接線會導致水平不穩定，因此在底部放置厚度為 0.18cm 的墊片黏貼至木板上，實際用水平儀量測，水平顯著改善，如圖 5 - 6。

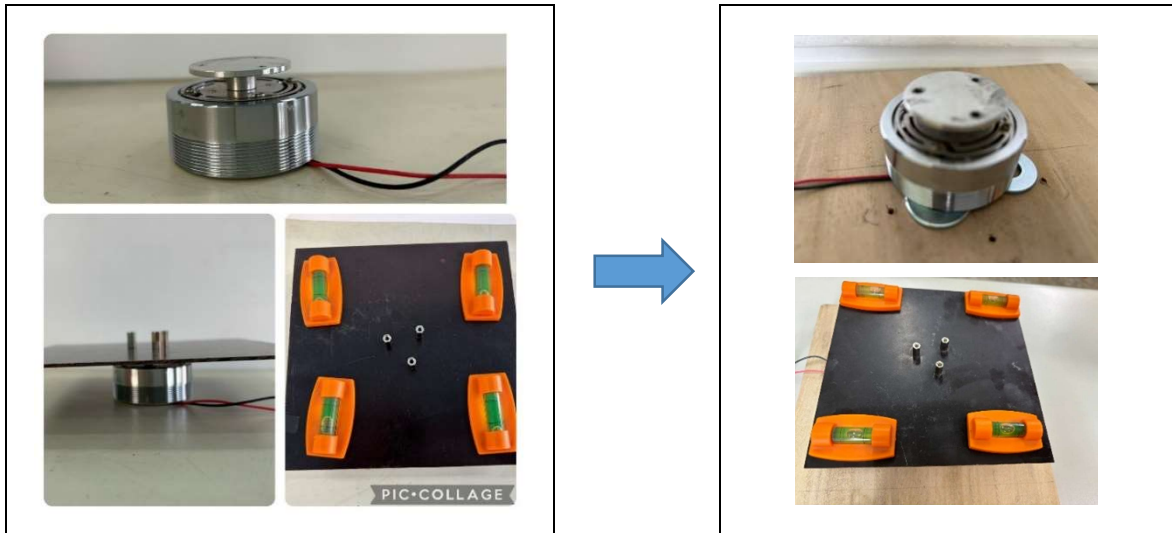


圖 5 - 6 共振喇叭自製震源設備改良流程圖（圖為本團隊拍攝）

### (四) 不同喇叭震源設備的固定

先將三角板扣鎖附在木板（50×20×1.5cm）上，再透過束線帶將第三代「重低音單體」與「全音域單體」固定；由於共振喇叭無法透過束線帶固定，因此改用固定白鐵片三邊夾住共振喇叭，一樣鎖附在木板上，如圖 5 - 7。

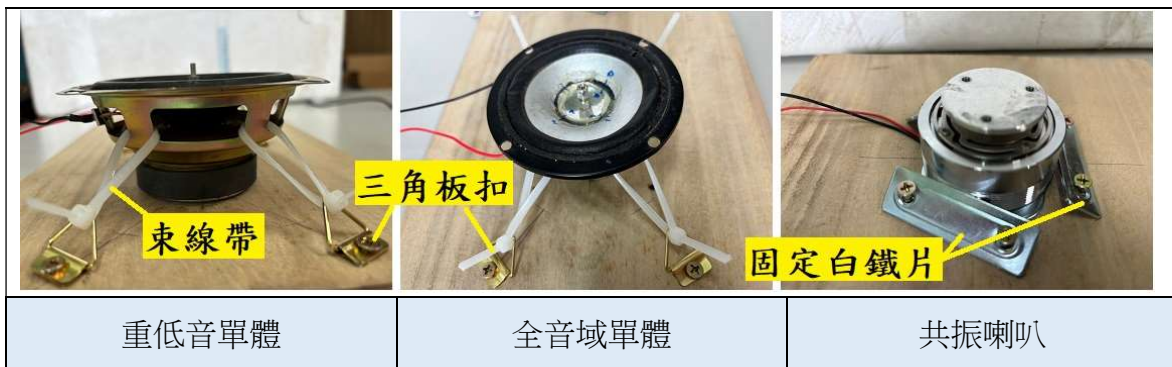


圖 5 - 7 不同喇叭震源設備的固定圖（圖為本團隊拍攝）

## 二、探討不同喇叭震源設備不固定與固定的圖形變化

(一) 操縱變因：喇叭震源設備不固定（重低音單體、全音域單體、共振喇叭共三種）與固定（重低音單體、全音域單體、共振喇叭共三種）。

(二) 控制變因：壓克力板水平、壓克力板面積、壓克力板厚度、定量石英砂、振動時間。

(三) 實驗步驟：

- 1、將一片厚度 0.15cm 壓克力板與不同喇叭震源設備用銅柱鎖緊，利用水平儀量測壓克力板的水平。
- 2、將喇叭震源設備連接藍芽板，插上電源供應器。
- 3、稱取石英砂重量約 35 克，利用篩網均勻撒在壓克力板上，再用直尺刮平。
- 4、將平板與藍芽板連線，開啟 phyphox App – 聲學 – 聲調產生器，輸入頻率，調整平板音量（最大聲為 16 格），使石英砂開始明顯振動。
- 5、計時 1 分鐘，觀察其圖形的變化，利用實物投影機在其正上方進行拍攝。
- 6、依序更換三種設備不固定及三種設備固定，重複以上步驟。

表 5-3 實驗步驟簡表（圖為本團隊拍攝）

			
步驟 1：鎖緊→測水平	步驟 2：開啟藍芽板	步驟 3 - 1：將定量石英砂倒入篩網中	步驟 3 - 2：均勻撒在板上
			
步驟 3 - 3：用直尺刮平	步驟 4：開啟 App，設定參數	步驟 5：拍攝記錄	步驟 6：清理石英砂

### 三、探討不同材質的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化

(一) 操縱變因：板子材質（壓克力板、紅銅板共二種）。

(二) 控制變因：板子水平、板子面積、板子厚度、喇叭震源設備、定量石英砂、振動時間。

(三) 實驗步驟：

- 1、將一片厚度 0.15cm 紅銅板與與共振喇叭設備固定用銅柱鎖緊，利用水平儀量測紅銅板的水平。
- 2、將共振喇叭設備連接藍芽板，插上電源供應器。
- 3、稱取石英砂重量約 35 克，利用篩網均勻撒在壓克力板上，再用直尺刮平。
- 4、將平板與藍芽板連線，開啟 phyphox Ap - 聲學 - 聲調產生器，輸入頻率，調整平板音量（最大聲為 16 格），使石英砂開始明顯振動。
- 5、計時 1 分鐘，觀察其圖形的變化，利用實物投影機在其正上方進行拍攝。

### 四、探討不同厚度壓克力板和紅銅板在共振喇叭設備固定的圖形變化

(一) 操縱變因：壓克力板厚度（0.15cm、0.3cm 共二種）與紅銅板厚度（0.15cm、0.3cm 共二種）。

(二) 控制變因：板子水平、板子面積、喇叭震源設備、定量石英砂、振動時間。

(三) 實驗步驟：

- 1、將二片重疊厚度共 0.3cm 壓克力板與共振喇叭設備固定用銅柱鎖緊，利用水平儀量測壓克力板的水平。
- 2、將共振喇叭設備連接藍芽板，插上電源供應器。
- 3、稱取石英砂重量約 35 克，利用篩網均勻撒在壓克力板上，再用直尺刮平。
- 4、將平板與藍芽板連線，開啟 phyphox Ap - 聲學 - 聲調產生器，輸入頻率，調整平板音量（最大聲為 16 格），使石英砂開始明顯振動。
- 5、計時 1 分鐘，觀察其圖形的變化，利用實物投影機在其正上方進行拍攝。
- 6、利用二片重疊厚度共 0.3cm 紅銅板，重複以上步驟。

## 五、探討複合材質的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化

(一) 操縱變因：板子材質(壓克力板(上)／紅銅板(下)、紅銅板(上)／壓克力板(下)共二種)。

(二) 控制變因：板子水平、板子面積、板子厚度、喇叭震源設備、定量石英砂、振動時間。

(三) 實驗步驟：

- 1、將壓克力板(上)／紅銅板(下)二片重疊厚度共 0.3cm 與共振喇叭設備固定用銅柱鎖緊，利用水平儀量測複合板子的水平。
- 2、將共振喇叭設備連接藍芽板，插上電源供應器。
- 3、稱取石英砂重量約 35 克，利用篩網均勻撒在壓克力板上，再用直尺刮平。
- 4、將平板與藍芽板連線，開啟 phyphox Ap - 聲學 - 聲調產生器，輸入頻率，調整平板音量(最大聲為 16 格)，使石英砂開始明顯振動。
- 5、計時 1 分鐘，觀察其圖形的變化，利用實物投影機在其正上方進行拍攝。
- 6、利用紅銅板(上)／壓克力板(下)二片重疊厚度共 0.3cm，重複以上步驟。

## 陸、研究結果

### 【實驗一】不同喇叭震源設備在不固定與固定的圖形變化

(一) 實驗結果 - 1：觀察三種喇叭震源設備在不固定與固定時相同頻率下的圖形變化，以頻率 100Hz 為間距，如下表 6-1~6-3。

表 6-1 重低音單體在不固定與固定的圖形變化表 (圖為本團隊拍攝)

























































震源設備		頻率(Hz)	300Hz	400Hz	500Hz	600Hz	700Hz	800Hz	900Hz
重低音 單體	不固定								
	固定								
震源設備		頻率(Hz)	1000Hz	1100Hz	1200Hz	1300Hz	1400Hz	1500Hz	1600Hz
重低音 單體	不固定								
	固定								

表 6-2 全音域單體在不固定與固定的圖形變化表 (圖為本團隊拍攝)

震源設備		頻率(Hz)	200Hz	300Hz	400Hz	500Hz	600Hz	700Hz	800Hz
全音域 單體	不固定								
	固定								
震源設備		頻率(Hz)	900Hz	1000Hz	1100Hz	1200Hz	1300Hz	1400Hz	1500Hz
全音域 單體	不固定								
	固定								

(續次頁)

震源設備		頻率(Hz)	1600Hz	1700Hz	1800Hz	1900Hz	2000Hz	2100Hz	2200Hz
全音域 單體	不固定								
	固定								
震源設備		頻率(Hz)	2300Hz	2400Hz	2500Hz	2600Hz	2700Hz	2800Hz	2900Hz
全音域 單體	不固定								
	固定								

表 6 - 3 共振喇叭在不固定與固定的圖形變化表（圖為本團隊拍攝）

震源設備		頻率(Hz)	200Hz	300Hz	400Hz	500Hz	600Hz	700Hz	800Hz
共振 喇叭	不固定								
	固定								
震源設備		頻率(Hz)	900Hz	1000Hz	1100Hz	1200Hz	1300Hz	1400Hz	1500Hz
共振 喇叭	不固定								
	固定								
震源設備		頻率(Hz)	1600Hz	1700Hz	1800Hz	1900Hz	2000Hz	2100Hz	2200Hz
共振 喇叭	不固定								
	固定								
震源設備		頻率(Hz)	2300Hz	2400Hz	2500Hz	2600Hz	2700Hz	2800Hz	2900Hz
共振 喇叭	不固定								
	固定								

























(二) 實驗發現 - 1：三種喇叭震源設備在不固定與固定的比較，

(1)經由實驗發現，設備在不固定與固定下的圖形輪廓類似，但以固定時在大多頻率區段下的節線較為完整且清晰。

(2)設備不固定時，在某些頻率容易出現圖形歪斜狀況，如表 6 - 1 之重低音單體 800Hz 與 1500Hz 的圖形變化。






















(3)設備不固定時，20~300Hz 明顯有受振動影響，而產生喇叭震源設備旋轉的狀況，如表 6 - 4。

表 6 - 4 三種喇叭震源設備在不固定時，20~300Hz 的振動情形（圖為本團隊拍攝）

震源設備	20Hz	60Hz	100Hz	140Hz	180Hz	220Hz	260Hz	300Hz
重低音								
旋轉情形	輕微	明顯	輕微	無	無	無	無	無
全音域								
旋轉情形	輕微	輕微	無	無	無	無	無	無
共振喇叭								
旋轉情形	無	明顯	明顯	無	輕微	無	明顯	無

(三) 實驗結果 - 2：觀察三種喇叭震源設備在固定時相同頻率下的圖形變化，以頻率 100Hz 為間距，如下表 6 - 5。

表 6 - 5 三種喇叭震源設備在固定的圖形變化表（圖為本團隊拍攝）

震源設備		頻率(Hz)						
		200Hz	300Hz	400Hz	500Hz	600Hz	700Hz	800Hz
固 定	重低音單體							
	全音域單體							
	共振喇叭							

(續次頁)

震源設備 \ 頻率(Hz)		900Hz	1000Hz	1100Hz	1200Hz	1300Hz	1400Hz	1500Hz
固定	重低音單體							
	全音域單體							
	共振喇叭							

震源設備 \ 頻率(Hz)		1600Hz	1700Hz	1800Hz	1900Hz	2000Hz	2100Hz	2200Hz
固定	重低音單體							
	全音域單體							
	共振喇叭							

震源設備 \ 頻率(Hz)		2300Hz	2400Hz	2500Hz	2600Hz	2700Hz	2800Hz	2900Hz
固定	重低音單體							
	全音域單體							
	共振喇叭							

(四) 實驗發現 - 2：三種喇叭震源設備在固定時的比較，

(1)截止頻率(無明顯圖形變化)先後依序為重低音單體(1400Hz)、全音域單體(2500Hz)、共振喇叭(3000Hz以上)。

(2)經由實驗發現，三種喇叭震源設備在截止頻率前圖形無明顯差異，但以共振喇叭所形成的節線較為清晰，且產生圖形的頻率範圍較廣，因此接續實驗皆以共振喇叭在固定下進行探討。



## 【實驗二】不同材質的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化

(一) 實驗結果：觀察壓克力板和紅銅板在共振喇叭設備固定時相同頻率下的圖形變化，以頻率 100Hz 為間距，如下表 6-6。

表 6-6 壓克力板和紅銅板在共振喇叭設備固定的圖形變化表 (圖為本團隊拍攝)

板子材質		頻率(Hz)	200Hz	300Hz	400Hz	500Hz	600Hz	700Hz	800Hz
厚度	壓克力板								
	紅銅板								
板子材質		頻率(Hz)	900Hz	1000Hz	1100Hz	1200Hz	1300Hz	1400Hz	1500Hz
厚度	壓克力板								
	紅銅板								
板子材質		頻率(Hz)	1600Hz	1700Hz	1800Hz	1900Hz	2000Hz	2100Hz	2200Hz
厚度	壓克力板								
	紅銅板								
板子材質		頻率(Hz)	2300Hz	2400Hz	2500Hz	2600Hz	2700Hz	2800Hz	2900Hz
厚度	壓克力板								
	紅銅板								

(二) 實驗發現：壓克力板和紅銅板在共振喇叭設備固定時的比較，由圖 6-2 觀察發現，

- 1、壓克力板和紅銅板在相似圖形下 (圖形編號 1~4、9、11)，壓克力板相較於紅銅板出現的頻率較低。
- 2、在 1000Hz 內，壓克力板和紅銅板出現相似圖形的頻率差異較小，約在 100Hz；在 1500Hz 以上，出現相似圖形的頻率差異則較大，約在 400~600Hz。
- 3、壓克力板和紅銅板各有獨特的圖形出現，因此後續實驗仍以這兩種材質進行探討。

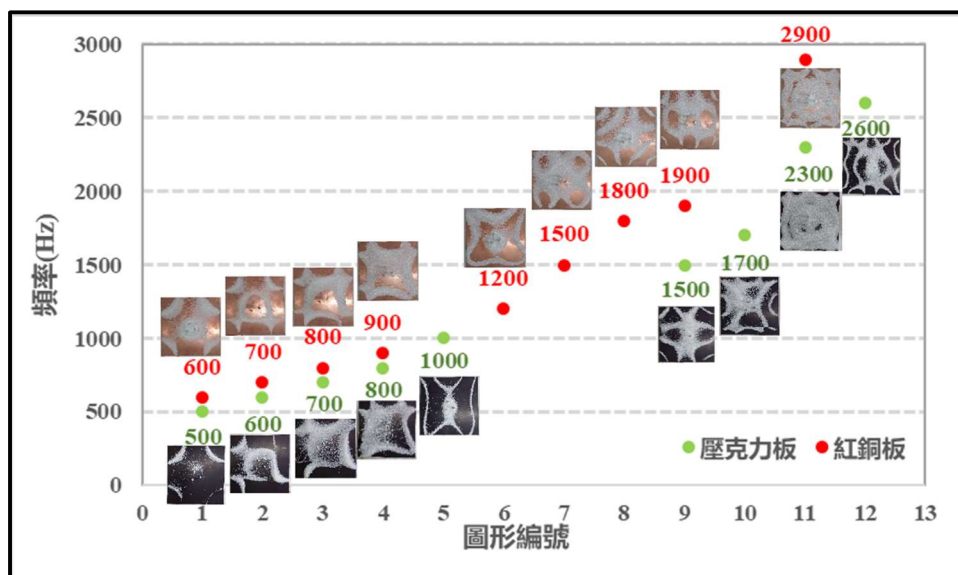


圖 6-2 壓克力板和紅銅板的圖形與頻率比較圖（圖為本團隊拍攝）

**【實驗三】不同厚度的壓克力板和紅銅板在共振喇叭設備固定的圖形變化**

（一）實驗結果 - 1：觀察不同厚度壓克力板在共振喇叭設備固定時，取三組具有明顯節線圖形的頻率區段，分別為 480~600Hz、980~1100Hz、1480~1600Hz 進行比較，如下表 6-7。

表 6-7 不同厚度壓克力板在共振喇叭設備固定的圖形變化表（圖為本團隊拍攝）

頻率(Hz)		480Hz	500Hz	520Hz	540Hz	560Hz	580Hz	600Hz
板子材質/厚度	壓克力板							
	0.3cm							
頻率(Hz)		980Hz	1000Hz	1020Hz	1040Hz	1060Hz	1080Hz	1100Hz
板子材質/厚度	壓克力板							
	0.3cm							
頻率(Hz)		1480Hz	1500Hz	1520Hz	1540Hz	1560Hz	1580Hz	1600Hz
板子材質/厚度	壓克力板							
	0.3cm							

(二) 實驗發現 - 1：不同厚度壓克力板在共振喇叭設備固定時的比較，

1、由圖 6 - 3 觀察發現，不同厚度出現相似圖形，壓克力板厚度 0.15cm 相較於厚度 0.3cm 出現的頻率較低。

2、由表 6 - 7 紅框處發現，壓克力板厚度 0.15cm 相較於厚度 0.3cm，可維持相似圖形的頻率區段較長。

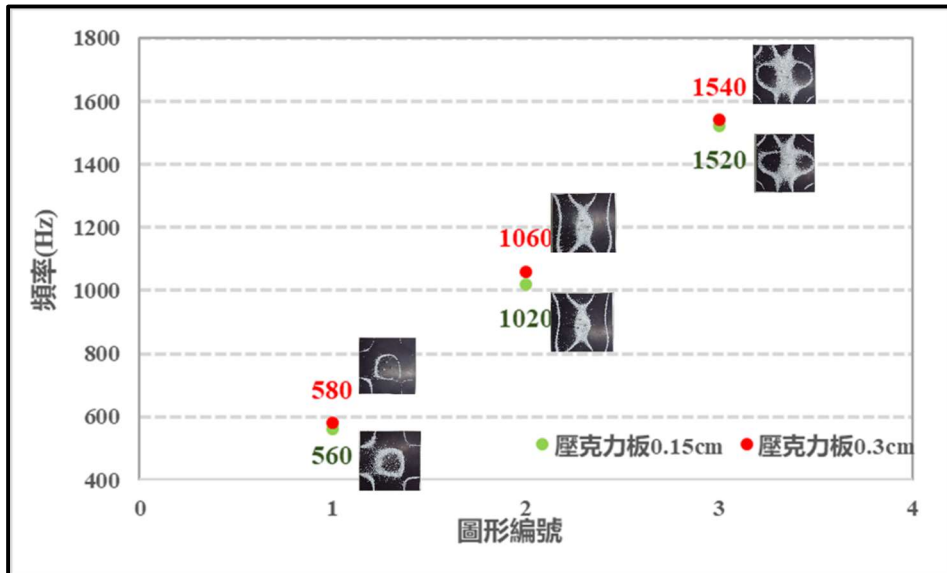












































圖 6 - 3 不同厚度的壓克力板之圖形與頻率比較圖（圖為本團隊拍攝）

(三) 實驗結果 - 2：觀察不同厚度紅銅板在共振喇叭設備固定時，取三組具有明顯節線圖形的頻率區段，分別為 620~740Hz、1320~1580Hz、1680~1940Hz 進行比較，如下表 6 - 8。

表 6 - 8 不同厚度紅銅板在共振喇叭設備固定的圖形變化表（圖為本團隊拍攝）

板子材質 / 厚度		頻率(Hz)						
		620Hz	640Hz	660Hz	680Hz	700Hz	720Hz	740Hz
紅銅板	0.15cm							
	0.3cm							
板子材質 / 厚度		頻率(Hz)						
		1320Hz	1340Hz	1360Hz	1380Hz	1400Hz	1420Hz	1440Hz
紅銅板	0.15cm							
	0.3cm							

板子材質／厚度		頻率(Hz)						
		1460Hz	1480Hz	1500Hz	1520Hz	1540Hz	1560Hz	1580Hz
紅銅板	0.15cm							
	0.3cm							
板子材質／厚度		頻率(Hz)						
		1680Hz	1700Hz	1720Hz	1740Hz	1760Hz	1780Hz	1800Hz
紅銅板	0.15cm							
	0.3cm							
板子材質／厚度		頻率(Hz)						
		1820Hz	1840Hz	1860Hz	1880Hz	1900Hz	1920Hz	1940Hz
紅銅板	0.15cm							
	0.3cm							

- (四) 實驗發現 - 2：不同厚度紅銅板在共振喇叭設備固定時的比較，由表 6 - 8 觀察發現，
- 1、在 620~740Hz 間，不同厚度出現相似圖形，紅銅板厚度 0.15cm 相較於厚度 0.3cm 出現的頻率較低，可維持相似圖形的頻率區段較長。
  - 2、在 1320~1580Hz 間，相似圖形出現的頻率無明顯差異，且可維持相似圖形的頻率區段亦無明顯差異。
  - 3、在 1680~1940Hz 間，紅銅板厚度 0.3cm 相較於厚度 0.15cm 出現相似圖形的頻率幾乎一致，但節線較不明顯。
  - 4、我們發現不同厚度的壓克力板和紅銅板在相似圖形出現的頻率與可維持的頻率區段不盡相同，因此後續以壓克力板和紅銅板複合材質的組合進行探討。

**【實驗四】複合材質的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化**

(一) 實驗結果：觀察壓克力板厚度 0.15cm 和紅銅板厚度 0.15cm 組合的複合材質板子在共振喇叭設備固定時，與單一材質 0.15cm 板子在相同頻率下的圖形變化比較，以頻率 100Hz 為間距，如下表 6-9。

表 6-9 複合材質與單一材質的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化表（圖為本團隊拍攝）

頻率(Hz) 板子材質	200Hz	300Hz	400Hz	500Hz	600Hz	700Hz	800Hz
壓克力板厚度 0.15cm							
紅銅板厚度 0.15cm							
壓克力板（上）/ 紅銅板（下）							
紅銅板（上）/ 壓克力板（下）							
頻率(Hz) 板子材質	900Hz	1000Hz	1100Hz	1200Hz	1300Hz	1400Hz	1500Hz
壓克力板厚度 0.15cm							
紅銅板厚度 0.15cm							
壓克力板（上）/ 紅銅板（下）							
紅銅板（上）/ 壓克力板（下）							
頻率(Hz) 震源設備/厚度	1600Hz	1700Hz	1800Hz	1900Hz	2000Hz	2100Hz	2200Hz
壓克力板厚度 0.15cm							
紅銅板厚度 0.15cm							
壓克力板（上）/ 紅銅板（下）							
紅銅板（上）/ 壓克力板（下）							

震源設備 \ 頻率(Hz)	2300Hz	2400Hz	2500Hz	2600Hz	2700Hz	2800Hz	2900Hz
壓克力板厚度 0.15cm							
紅銅板厚度 0.15cm							
壓克力板(上) / 紅銅板(下)							
紅銅板(上) / 壓克力板(下)							

(二) 實驗發現：複合材質的板子在共振喇叭設備固定時的比較，由表 6 - 9 觀察發現，

- 1、二種複合材質的板子【壓克力板(上) / 紅銅板(下); 紅銅板(上) / 壓克力板(下)】，相似圖形出現的頻率且可維持相似圖形的頻率區段皆無明顯差異，除了壓克力板(上) / 紅銅板(下) 在頻率 2880~3000Hz 再次出現獨特圖形。
- 2、複合材質不論如何組合【壓克力板(上) / 紅銅板(下); 紅銅板(上) / 壓克力板(下)】，相似圖形出現的頻率且可維持相似圖形的頻率區段，都與單一材質的紅銅板類似。

#### 【實驗五】不同頻率的圖形變化規律性及其對稱關係

綜合【實驗一】~【實驗四】可整理歸納出以下幾點：

(一) 不同板子材質在不同頻率下的幾何圖形變化，如表 6 - 10 觀察發現，

- 1、頻率越高，出現的圖形越複雜，以下獨特圖形皆有對稱性，如：線對稱或點對稱。
- 2、參照圖 6 - 2 壓克力板和紅銅板的圖形與頻率比較圖中，
  - (1) 壓克力板在頻率 1020Hz (圖形編號 5) 與 2600Hz (圖形編號 12) 及紅銅板在頻率 1340Hz (圖形編號 6) 與 1820Hz (圖形編號 8) 皆屬於該材質的特有圖形。
  - (2) 壓克力板在頻率 560Hz (圖形編號 1)、紅銅板在頻率 720Hz (圖形編號 2) 與壓克力板在頻率 1540Hz 及紅銅板在頻率 1900Hz (圖形編號 9) 皆為二種材質的共同相似圖形。

表 6 - 10 不同板子材質在不同頻率下的幾何圖形變化（圖為本團隊拍攝）

頻率(Hz)	560Hz	1020Hz	1540Hz	2600Hz
板子材質				
壓克力板厚度 0.15cm				
對稱方式	線對稱	線對稱	線對稱	線對稱
頻率(Hz)	720Hz	1340Hz	1820Hz	1900Hz
板子材質				
紅銅板厚度 0.15cm				
對稱方式	線對稱	線對稱	點對稱	線對稱

（二）我們將常見的音階輸入，利用厚度 0.15cm 的壓克力板和紅銅板在共振喇叭設備固定下振出不同的圖形變化，如表 6 - 11 觀察發現，

- 1、在音階（c1：中央 Do~Si）下，壓克力板和紅銅板出現相似圖形，皆為簡單線條。
- 2、在音階（c2：高音 Do~Si）下，壓克力板和紅銅板開始出現圖形的差異，但皆有明顯節點出現。

表 6 - 11 音階輸入於厚度 0.15cm 的壓克力板和紅銅板在共振喇叭設備固定時的圖形變化(圖為本團隊拍攝)

音階 (c1)	中央 Do	Re	Mi	Fa	So	La	Si
頻率	261.6Hz	293.7Hz	329.6Hz	349.2Hz	392.0Hz	440Hz	493.9Hz
壓克力板							
紅銅板							
音階 (c2)	高音 Do	高音 Re	高音 Mi	高音 Fa	高音 So	高音 La	高音 Si
頻率	523.3Hz	587.4Hz	659.2Hz	698.4Hz	784Hz	880Hz	987.8Hz
壓克力板							
紅銅板							

## 柒、討論

一、從【實驗一】發現在 1000、1100、1300Hz 屬於水平與垂直的線條容易觀察到圖形有旋轉 90°的差異，推測與板子的方向有關，因此設計實驗探討板子的不同方向在重低音單體固定時是否對圖形造成影響，如表 7-1，觀察壓克力板與紅銅板皆有此現象，且板子正反面亦會造成此影響，推測可能是板子密度不均勻或尺寸所導致，建議實驗時需定義板子方向及正反面。

表 7-1 板子的不同方向在重低音單體固定時的圖形變化（圖為本團隊拍攝）

板子材質	左上 (0°)	左下 (90°)	右下 (180°)	右上 (270°)
壓克力板 (在 1020Hz)				
紅銅板 (在 1420Hz)				

二、從【實驗三】發現在高頻率區段 (>2000Hz) 容易出現圖形輪廓模糊且節線較不明顯，推測與石英砂覆蓋量及振動時間有關，因此針對壓克力板厚度 0.15cm 在共振喇叭設備固定時以頻率 2900Hz 進行石英砂覆蓋量與振動時間對圖形的影響，如表 7-2，觀察砂量多時，需延長振動時間且無明顯圖形變化；在砂量中及少時，發現振動時間越長，圖形輪廓越清晰，說明石英砂覆蓋量及振動時間兩者有關聯，需再更嚴謹的實驗設計。

表 7-2 石英砂覆蓋量與振動時間在壓克力板厚度 0.15cm 使用頻率 2900Hz 於共振喇叭設備固定時的圖形變化（圖為本團隊拍攝）

石英砂覆蓋量	振動前	1 分鐘	2 分鐘	3 分鐘	4 分鐘	5 分鐘	6 分鐘	7 分鐘
少(約 12±3 克)								
中(約 18±3 克)								
多(約 30±3 克)								



- 三、從【實驗二~四】發現壓克力板和紅銅板在低頻（ $<1000\text{Hz}$ ）時出現相似圖形的頻率差異較小，但在高頻（ $>1500\text{Hz}$ ）時出現相似圖形的頻率差異則較大，推測在低頻時，不同密度（重量）板材的振幅差距較小，因為低頻波的傳播損耗小，不同密度（重量）板材的振幅衰減較慢，因此產生相似圖形的頻率較接近；在高頻時，不同密度（重量）板材的振幅差距較大，因為高頻波的傳播損耗大，不同密度（重量）板材的振幅衰減較快，因此產生相似圖形的頻率差別較大；而單一紅銅板或複合材質板子，由於密度（重量）相近，所以在高頻時，出現相似圖形的頻率無明顯差異。
- 四、從【實驗五】發現在實驗過程中，壓克力板和紅銅板在多數頻率下的石英砂跳動幅度小；但在特定頻率下的石英砂會劇烈跳動，而產生節線較細且清晰的圖形，如表 6 - 10，推測這些特定頻率可能符合壓克力板或紅銅板的共振頻率。
- 五、喇叭單體頻率超過  $3000\text{Hz}$ ，振幅調到最大時，對人耳是刺激的，我們嘗試帶耳塞或使用保麗龍箱，試圖隔絕高頻率聲波，但效果都不彰，建議設計實驗時，應該也將隔音系統考量進去，提高頻率測試範圍。

## 捌、結論

### 一、不同喇叭震源設備在不固定與固定的圖形變化

- (一) 設備在不固定與固定下的圖形輪廓類似，但在設備不固定時，某些頻率容易出現圖形歪斜狀況。
- (二) 設備不固定時，20~300Hz 明顯有受振動影響，而產生喇叭震源設備旋轉的狀況，尤其以共振喇叭為最嚴重，因為喇叭接線位於下方，需用墊片墊高，避免水平不佳及接線斷裂，故其接觸面積較小。
- (三) 三種喇叭震源設備的截止頻率（無明顯圖形變化）先後依序為重低音單體（1400Hz）、全音域單體（2500Hz）、共振喇叭（3000Hz 以上），在截止頻率前圖形無明顯差異，但以共振喇叭設備在固定時所形成的節線較為完整且清晰，產生圖形的頻率範圍較廣。

### 二、不同材質的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化

- (一) 壓克力板和紅銅板在相似圖形下，壓克力板相較於紅銅板出現的頻率較低，可能與紅銅板密度（重量）相關。
- (二) 在 1000Hz 內，壓克力板和紅銅板出現相似圖形的頻率差異較小，約在 100Hz；1500Hz 以上，出現相似圖形的頻率差異則較大，約在 400~600Hz。

### 三、不同厚度的壓克力板和紅銅板在共振喇叭設備固定的圖形變化

- (一) 壓克力板在不同厚度出現相似圖形，厚度 0.15cm 相較於厚度 0.3cm 出現的頻率較低。
- (二) 紅銅板在 620~740Hz 間，不同厚度出現相似圖形，厚度 0.15cm 相較於厚度 0.3cm 出現的頻率較低，可維持相似圖形的頻率區段較長；其次在 1320~1580Hz 間，相似圖形出現的頻率且可維持相似圖形的頻率區段無明顯差異；最後在 1680~1940Hz 間，厚度 0.3cm 相較於厚度 0.15cm 出現相似圖形的頻率相似，但節線較不明顯。

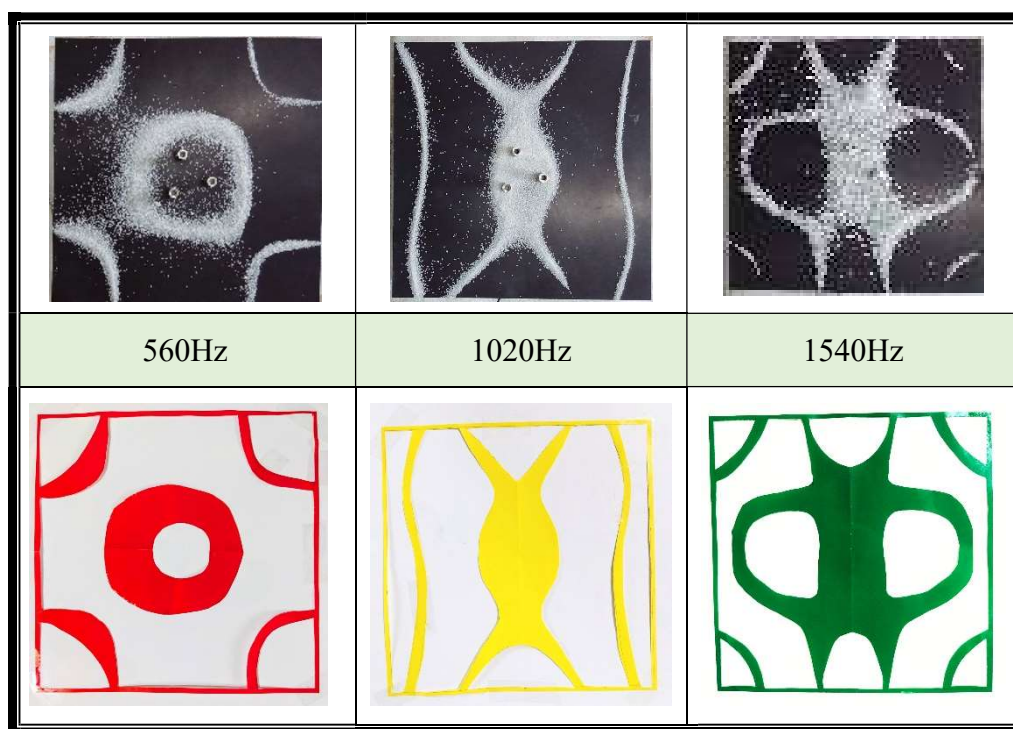
### 四、複合材質的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化

- (一) 二種複合材質的板子【壓克力板（上）／紅銅板（下）；紅銅板（上）／壓克力板（下）】，相似圖形出現的頻率且可維持相似圖形的頻率區段皆無明顯差異，除了壓克力板（上）／紅銅板（下）在頻率 2880~3000Hz 再次出現獨特圖形。
- (二) 複合材質不論如何組合【壓克力板（上）／紅銅板（下）；紅銅板（上）／壓克力板

（下）】，相似圖形出現的頻率且可維持相似圖形的頻率區段，都與單一材質的紅銅板類似。

### 五、不同頻率的圖形變化規律性及其對稱關係

- （一）不同板子材質在不同頻率下的幾何圖形變化，頻率越高，出現的圖形越複雜，且獨特圖形皆有對稱性，如：線對稱或點對稱。
- （二）壓克力板和紅銅板除了有各自材質的特有圖形，也有二種材質共同相似的圖形。
- （三）透過音階輸入，在音階 c1 範圍，皆為簡單線條；在音階 c2 範圍，開始出現圖形的差異且有明顯節點出現，發現每個音階都有其獨特圖形，讓我們可以「看見」聲音。
- （四）看著一盤散砂能在特定頻率下出現各種神奇又好玩的圖案，讓我們聯想到『中國的剪紙藝術』，我們試著把「看見」的聲音形狀用色紙剪出其對稱圖形，如下圖 8-1。



## 玖、參考資料及其他

- [1] Circle & Light (2020 年 8 月 17 日)· 顯波學 (Cymatics) : 頻率如何改變物質 · 取自  
<https://circleandlightblog.wordpress.com/2020/08/17/cymatics/>
- [2] 通訊博物館 · 聲音與振動 : 駐波 · 取自  
[https://www.cmm.gov.mo/chi/exhibition/secondfloor/moreinfo/2\\_11\\_0\\_StandingWave.html](https://www.cmm.gov.mo/chi/exhibition/secondfloor/moreinfo/2_11_0_StandingWave.html)
- [3] 新竹市第 40 屆中小學科學展覽會 · 神奇的波動 · 國中組物理科。
- [4] 中華民國第 48 屆中小學科學展覽會 · 粗沙跳動 VS 細沙跳動 · 高中組物理科。
- [5] 金門地區第 63 屆中小學科學展覽會 · 「情」時多雲「偶振語」· 國小組物理科。
- [6] 德國亞琛工業大學第二物理學院 Sebastian Staacks 博士 · phyphox APP 官方網頁 · 取自  
<https://phyphox.org/>
- [7] 莫里國際 (2020 年 4 月 8 日) · 音響世界入門第一課 : 弄清楚揚聲器、喇叭與單體 · 取自  
<https://www.moryaudio.com.tw/>
- [8] 天極網 (2010 年 4 月 10 日) · 沒喇叭也發聲 - 共振音箱與普通箱拆解對比 · 取自  
<https://speaker.yesky.com/117/11208617all.shtml#p11208617>

## 【評語】 080110

本作品探討平板在音源激發下產生的克拉尼共振圖案，嘗試以不同聲源裝置及搭配不同平板，分析在各種頻率下產生的圖形關係。此實驗裝置設計改良用心，有系統的收集並分析圖形差異性，成果完整。歷年相關研究已累積較多，建議研究可以進一步考慮邊界效應，此會造成圖形如何的變化差異，或從簡單系統逐步找出激發頻率產生共振圖案的細微不同，會是不錯的研究方向。

## 作品簡報



「形」「音」宋離對稱剪紙


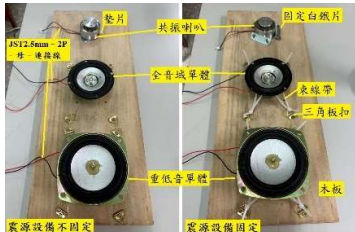



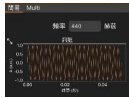
# 研究動機

生活中的聲音隨處可「聽」，像是我們聽的音樂、工地很吵雜的噪音、說話聲、晚上睡覺擾人的蚊子聲……，在五年級中學到聲音來自於振動，老師利用肯特管讓我們看到排列整齊的波浪形狀，在網路上搜尋了有關克拉尼圖形的影片，我們好奇「每一種聲音都可以振動出不一樣的形狀嗎？」

因此我們先拆解出兩個音響單體及購買一組共振喇叭，自製不同喇叭震源設備之圖形模擬器，再使用平板連接，利用「phyphox App」的聲調產生器，製造不同頻率搭配不同材質的板子以觀察砂子圖形變化，是否能振出更多神奇又好玩的圖案，讓我們真的能「看見」聲音。

## 研究設備及器材

表1 研究設備、材料說明（圖為本團隊拍攝）及實驗用軟體介紹（Sebastian Staacks博士[6]）

圖片			
說明	研究設備裝置圖	喇叭震源設備不固定與固定	研究材料
圖片			
說明	phyphox App	聲學-聲調產生器	簡易模式

## 研究過程

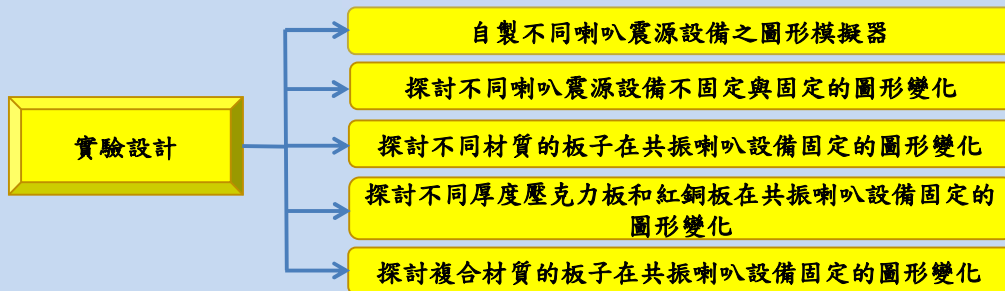
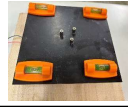
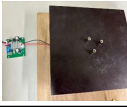


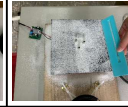

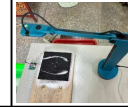



表2 實驗步驟簡表（圖為本團隊拍攝）

步驟1	步驟2	步驟3-1	步驟3-2	步驟3-3	步驟4	步驟5	步驟6
							
用銅柱鎖緊→ 測水平	開啟藍芽板	將定量石英砂 倒入篩網中	均勻撒在板子 上	用直尺刮平	開啟App，設 定頻率參數	開啟實物投影 機拍攝記錄	清理石英砂

## 研究結果

【實驗一】探討不同喇叭震源設備不固定與固定的圖形變化

☞實驗發現-1：三種喇叭震源設備在不固定與固定的比較，

1、喇叭震源設備在不固定與固定下的圖形輪廓類似，但以**固定時**在大多頻率區段下的**節線較為完整且清晰**，如表3。

2、設備**不固定時**，**20~300Hz**明顯有受**振動**影響，產生喇叭震源設備**旋轉**的狀況，而在**某些頻率容易出現圖形歪斜狀況**，如表4。

表3 共振喇叭在不固定與固定的圖形變化表，原始資料詳見實驗日誌（圖為本團隊拍攝）

震源設備	頻率(Hz)	900Hz	1000Hz	1100Hz	1200Hz	1300Hz	1400Hz	1500Hz
		共振						
喇叭	固定							

表4 三種喇叭震源設備在不固定時，20~300Hz的振動情形（圖為本團隊拍攝）

震源設備	20Hz	60Hz	100Hz	140Hz	180Hz	220Hz	260Hz	300Hz
重疊音								
旋轉情形	輕微	明顯	輕微	無	無	無	無	無
全音域								
旋轉情形	輕微	輕微	無	無	無	無	無	無
共振喇叭								
旋轉情形	無	明顯	明顯	無	輕微	無	明顯	無



☞實驗發現-2：三種喇叭震源設備在**固定**時的比較，

- 1、截止頻率先後依序為：重低音單體（1400Hz）、全音域單體（2500Hz）、共振喇叭（3000Hz以上）。
- 2、三種喇叭震源設備在截止頻率前圖形**無明顯差異**，但以**共振喇叭**所形成的**節線較為清晰**，且產生圖形的**頻率範圍較廣**，如表5，因此接續實驗皆以**共振喇叭在固定下**進行探討。

表5 三種喇叭震源設備在固定時的圖形變化表（圖為本團隊拍攝）

震源設備		頻率(Hz)						
		200Hz	300Hz	400Hz	500Hz	600Hz	700Hz	800Hz
固定	重低音單體							
	全音域單體							
	共振喇叭							

震源設備		頻率(Hz)						
		900Hz	1000Hz	1100Hz	1200Hz	1300Hz	1400Hz	1500Hz
固定	重低音單體							
	全音域單體							
	共振喇叭							

【實驗二】探討**不同材質**的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化

☞實驗發現：**壓克力板和紅銅板**在共振喇叭設備固定時的比較，

- 1、在**1000Hz**內，壓克力板和紅銅板出現**相似圖形的頻率差異較小**，約在**100Hz**，如圖1之圖形編號1~4；在**1500Hz**以上，出現**相似圖形的頻率差異則較大**，約在**400Hz**，如圖1之圖形編號9。
- 2、壓克力板（圖形編號5、10、11）和紅銅板（圖形編號6~8）各有獨特的圖形出現，因此後續實驗仍以這兩種材質進行探討。

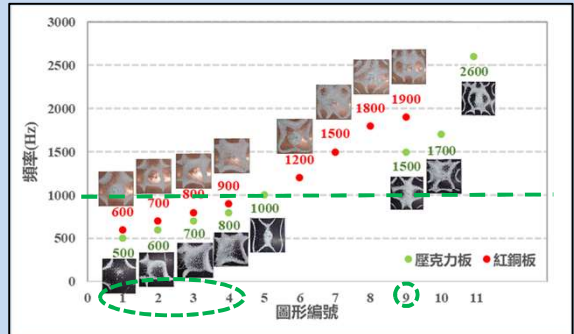


圖1 壓克力板和紅銅板的圖形與頻率比較圖（圖為本團隊拍攝）

【實驗三】探討**不同厚度**壓克力板和紅銅板在共振喇叭設備固定的圖形變化

☞實驗發現-1：**不同厚度壓克力板**在共振喇叭設備固定時的比較，

- 1、不同厚度出現相似圖形，**壓克力板厚度0.15cm**相較於厚度0.3cm**出現的頻率較低**，可維持的**頻率區段較長**，如圖3。

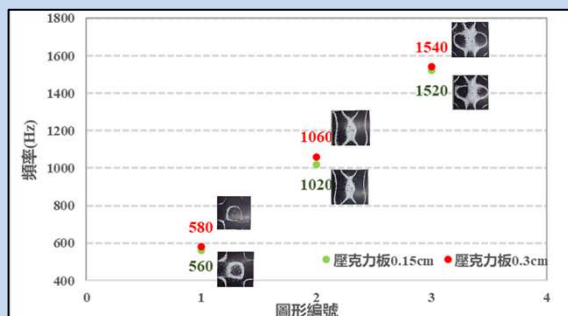


圖2 不同厚度壓克力板的圖形與頻率比較圖（圖為本團隊拍攝）

☞實驗發現-2：**不同厚度紅銅板**在共振喇叭設備固定時的比較，

- 1、在**620~740Hz**間，不同厚度出現相似圖形，**紅銅板厚度0.15cm**相較於厚度0.3cm**出現的頻率較低**，可維持的**頻率區段較長**，如表6。

- 2、在**1340~1460Hz**間，相似圖形出現的頻率無明顯差異，如表6。
- 3、在**1780~1940Hz**間，**紅銅板厚度0.3cm**相較於厚度0.15cm出現相似圖形的**頻率幾乎一致**，但**節線較不明顯**，如表6，除了頻率在1880、1900Hz例外。

表6 不同厚度紅銅板的圖形變化表（圖為本團隊拍攝）

板子材質/厚度		頻率(Hz)						
紅銅板	0.15cm							
	0.3cm							
紅銅板	0.15cm							
	0.3cm							
紅銅板	0.15cm							
	0.3cm							
紅銅板	0.15cm							
	0.3cm							

【實驗四】探討**複合材質**的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化

☞實驗發現：**複合材質的板子**在共振喇叭設備固定時的比較，二種複合材質的板子相似圖形出現的頻率，與可維持相似圖形的頻率區段皆**無明顯差異**，且相似圖形出現的頻率，都與**單一材質的紅銅板類似**，如表7。

表7 複合材質與單一材質的板子的圖形變化表（圖為本團隊拍攝）

震源設備/厚度		頻率(Hz)						
壓克力板厚度 0.3cm	0.3cm							
	0.3cm							
壓克力板(上)/紅銅板(下)	0.3cm							
	0.3cm							

【實驗五】**不同頻率**的圖形變化**規律性**及其**對稱關係**

☞實驗發現：**頻率越高**，出現的圖形越**複雜**，如表8的獨特圖形皆有**對稱性**，如：線對稱或點對稱。

表8 不同板子材質在不同頻率下的幾何圖形變化（圖為本團隊拍攝）

板子材質		頻率(Hz)			
壓克力板厚度 0.15cm	0.15cm				
	對稱方式	線對稱	線對稱	線對稱	線對稱
紅銅板厚度 0.15cm	0.15cm				
	對稱方式	線對稱	線對稱	點對稱	線對稱

# 討論、心得與展望

一、從【實驗一】發現在1000、1100、1300Hz屬於水平與垂直的線條容易觀察到圖形有**旋轉90°**的差異，推測與**板子的方向**有關，因此設計實驗探討板子的不同方向在重低音單體固定時是否對圖形造成影響，如表9，觀察壓克力板與紅銅板皆有此現象，且板子正反面亦會造成此影響，推測可能是**板子密度不均勻或尺寸**所導致，建議實驗時需**定義板子方向及正反面**。

二、從【實驗三】發現在**高頻率區段(>2000Hz)**容易出現圖形輪廓模糊且節線較不明顯，推測與**石英砂覆蓋量及振動時間**有關，因此針對壓克力板厚度0.15cm在共振喇叭設備固定時以頻率2900Hz進行石英砂覆蓋量與振動時間對圖形的影響，如表10，觀察砂量多時，需延長振動時間且無明顯圖形變化；在砂量中及少時，發現振動時間越長，圖形輪廓越清晰，說明石英砂覆蓋量及振動時間兩者有關聯，需再更嚴謹的實驗設計。

表9 板子的不同方向在重低音單體固定時的圖形變化

(圖為本團隊拍攝)

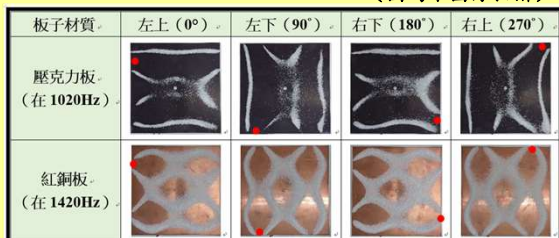
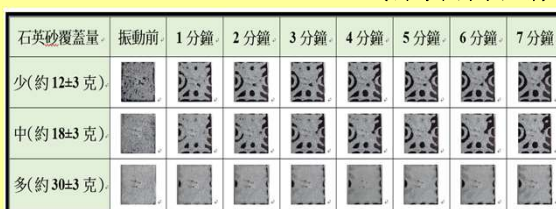


表10 石英砂覆蓋量與振動時間在壓克力板厚度0.15cm使用頻率2900Hz於共振喇叭設備固定時的圖形變化

(圖為本團隊拍攝)



三、從【實驗二~四】發現壓克力板和紅銅板在**低頻(<1000Hz)**時出現相似圖形的**頻率差異較小**，但在**高頻(>1500Hz)**時出現相似圖形的**頻率差異則較大**，推測在低頻時，不同密度(重量)板材的振幅差距較小，因為**低頻波的傳播損耗小**，不同密度(重量)板材的**振幅衰減較慢**，因此產生相似圖形的**頻率較接近**，如圖1；反之亦然。而單一紅銅板或複合材質板子，由於密度(重量)相近，所以在高頻時，出現相似圖形的頻率無明顯差異，如表6。

四、從【實驗五】發現在實驗過程中，壓克力板和紅銅板在多數頻率下的石英砂跳動幅度小；但在**特定頻率下**的石英砂會劇烈跳動，而產生節線較細且清晰的圖形，如表8，推測這些特定頻率可能符合壓克力板或紅銅板的**共振頻率**。

## 結論

### 一、不同喇叭震源設備在不固定與固定的圖形變化

- (一) **設備不固定時**，20~300Hz明顯有受振動影響，而產生喇叭震源設備**旋轉**的狀況，尤其以**共振喇叭為最嚴重**，因為喇叭接線位於下方，需用墊片墊高，避免水平不佳及接線斷裂，故其接觸面積較小。
- (二) 三種喇叭震源設備的截止頻率(無明顯圖形變化)先後依序為重低音單體(1400Hz)、全音域單體(2500Hz)、共振喇叭(3000Hz以上)，在截止頻率前圖形無明顯差異，但以**共振喇叭設備在固定時所形成的節線較為完整且清晰**，產生圖形的頻率範圍較廣。

### 二、不同材質的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化

- (一) 壓克力板和紅銅板在相似圖形下，**壓克力板**相較於紅銅板**出現的頻率較低**，可能與**紅銅板密度(重量)**相關。
- (二) 在**1000Hz內**，壓克力板和紅銅板出現相似圖形的**頻率差異較小**，約在**100Hz**；**1500Hz以上**，出現相似圖形的頻率**差異則較大**，約在**400Hz**。

### 三、不同厚度的壓克力板和紅銅板在共振喇叭設備固定的圖形變化

- (一) **壓克力板**在不同厚度出現相似圖形，**厚度0.15cm**相較於厚度0.3cm**出現的頻率較低**。
- (二) **紅銅板**在不同厚度出現相似圖形，
  - (1) 在**620~740Hz**間，**厚度0.15cm**相較於厚度0.3cm**出現的頻率較低**，可維持相似圖形的**頻率區段較長**；
  - (2) 在**1340~1460Hz**間，相似圖形出現的頻率無明顯差異；
  - (3) 在**1780~1920Hz**間，**厚度0.3cm**相較於厚度0.15cm出現相似圖形的**頻率幾乎一致**，但**節線較不明顯**。

### 四、複合材質的板子在共振喇叭設備固定的圖形變化

二種複合材質的板子相似圖形出現的頻率，與可維持相似圖形的頻率區段**皆無明顯差異**，且相似圖形出現的頻率，都與**單一材質的紅銅板類似**。

### 五、不同頻率的圖形變化規律性及其對稱關係

- (一) 不同板子材質在不同頻率下的幾何圖形變化，**頻率越高**，**出現的圖形越複雜**，且獨特圖形皆有**對稱性**，如：線對稱或點對稱。
- (二) 看著一盤散砂能在特定頻率下出現各種神奇又好玩的圖案，讓我們聯想到『**中國的剪紙藝術**』，我們試著把「看見」的聲音形狀用色紙剪出其對稱圖形。