

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

佳作

080119

響由形生~喇叭狀共振腔對聲音表現的影響

學校名稱： 彰化縣溪州鄉水尾國民小學

作者：	指導老師：
小六 鐘婉軒	吳建儒
小六 鐘婉玲	林碧珊

關鍵詞： 共振腔形狀、響度、音色

摘要

本研究探討喇叭共振腔的波導形狀，對聲音傳播距離、響度和音色造成影響，我們依斜率變化自製窄頸、橢圓、三角喇叭共振腔進行探究，成功發現形狀影響聲音表現背後的物理關聯。研究結果如下：

- 1.喇叭狀設計會引導聲波能量更順暢往出口集中傳播，也會改變諧波數量造成音色變化。
- 2.窄頸喇叭響度增強效果最好，聲音傳最遠。
- 3.三角喇叭在中低音諧波太多，易產生雜音。
- 4.喇叭邊界的形狀會決定空氣對流速度，窄頸喇叭空氣流動最慢反而響度最高。
- 5.聲波遇到喇叭邊界後，產生的干涉會影響傳播距離與範圍：窄頸喇叭能量集中於中央軸線，傳播遠，具指向性；三角喇叭兼顧傳播範圍和強度；橢圓喇叭能量均勻散佈腔體，傳播範圍最廣但強度不足。

壹、前言

一、研究動機

在上音樂課時，老師播放許多管樂器的吹奏影片，我們發現有些樂器末端會加上喇叭狀的開口構造(圖 1-1)，仔細一看，這些構造的形狀其實都不一樣，這令我們感到好奇，為什麼要設計這種一端小一端大的開口來引導聲音呢？於是進一步思考：聲波在喇叭開口裡面發生了什麼事？這樣子的共振腔構造是單純放大音量，還是也會改變音頻和音色呢？我們決定進行一連串的研究，解開心中的疑惑。



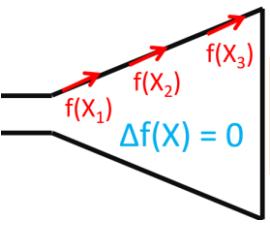
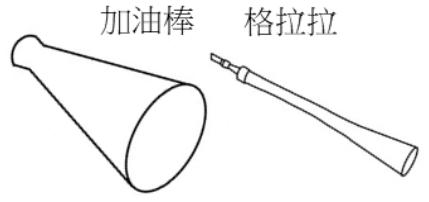
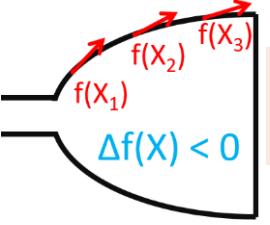
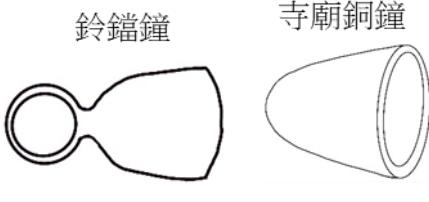
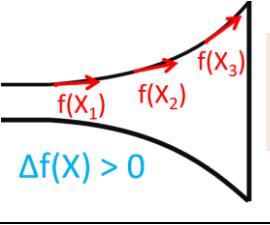
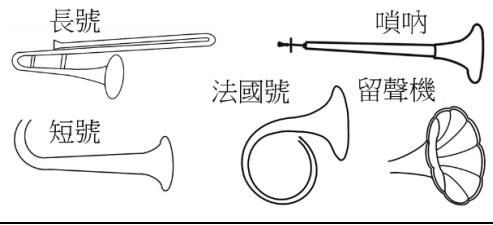
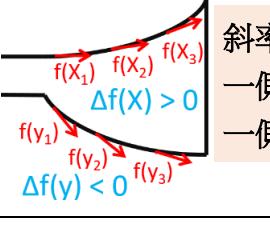
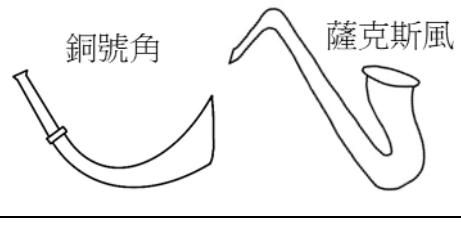
圖 1-1 法國號、活塞式薩克斯風

二、文獻探討

(一)發聲體開口的形狀

我們蒐集在校園或生活中常見的樂器或發聲體，將其開口處的截面描繪出來後做分析。發現依形狀可分為對稱及不對稱兩種。其中**對稱形狀**中，可**依截面兩側線條的斜率(遞增、遞減及不變)**，歸納出三種形狀：**三角形**、**橢圓形**和**窄頸形**。

表 1-1 發聲體開口形狀分析表

形狀 名稱	截面形狀	斜率變化	樂器
對稱截面	三角形	 斜率 不變 $\Delta f(X) = 0$	
	橢圓形	 斜率 遞減 $\Delta f(X) < 0$	
	窄頸形	 斜率 遞增 $\Delta f(X) > 0$	
不對稱截面	號角形	 斜率 一側遞增 一側遞減 $\Delta f(X) > 0$ $\Delta f(y) < 0$	

從表 1-1 可知樂器末端的開口是錐形管狀，以一端小、一端大的的方式呈現。因為要做出尺寸精準的立體管狀開口，對現階段的我們是有難度的，因此我們**將立體形狀簡化為二維形狀，從錐狀變成盒狀**的共振腔，以對稱截面的兩側線條(三角、橢圓、窄頸)做為不同形狀的喇叭共振腔，並以**音叉**音箱的**方形**形狀作為**對照組**，來進行本次的研究。

(二)聲音為何會被增加或減弱？

1.共振效應：當聲音在傳播過程中遇到與其頻率相同或接近的物體時，入射波與反射波的波峰與波谷分別重疊就會產生更大的合成波，合成波形呈駐波後，產生共振，使聲音的振幅加大，進而增強音量(圖 1-2)。

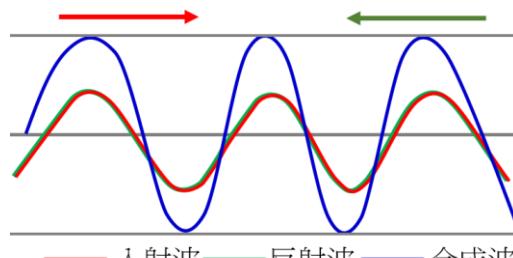


圖 1-2 共振原理示意圖

2.波的建設性干涉：當多個聲波相位一致時(波峰與波峰重疊)，使聲波疊加，聲音會增強(圖 1-3)。

3.波的破壞性干涉：多個聲波相位相反(即波峰與波谷重疊)時，使聲波相消，聲音會減弱(圖 1-4)。

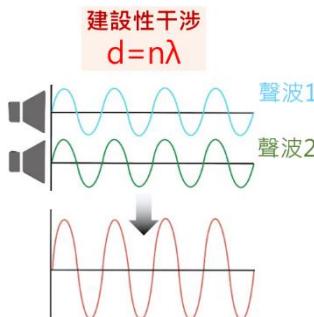


圖 1-3 建設性干涉示意圖

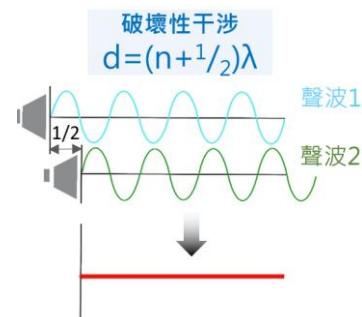


圖 1-4 破壞性干涉示意圖

4.反平方定律：聲音在空氣中傳播時，能量會隨距離增加而擴散，導致聲音變弱。音壓會隨著距離增加 1 倍而衰減 6dB，也就是聲壓與距離的平方呈反比(圖 1-5)。

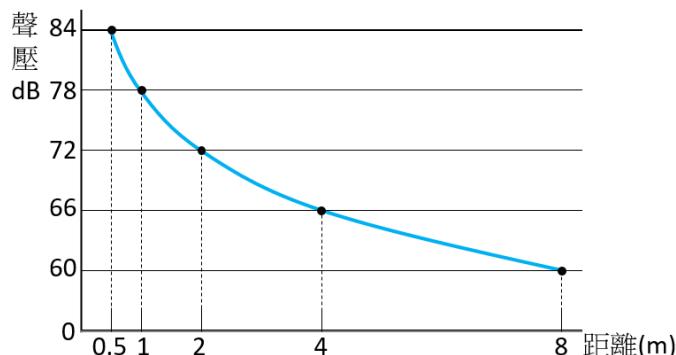


圖 1-5 反平方定律示意圖

(三)共振腔頻率

1.閉口管的發聲原理及駐波振動模式

管樂器有「開口管」和「閉口管」的分別，在**本實驗的共振腔屬於一端封閉、一端開放的「閉口管」**。當駐波通過閉口管時，封閉端的空氣不會振動，震幅為零，稱為節點，開口端是振幅最大的區域，位在兩節點之間，稱為腹點，而閉口管的**基頻波長為管長的四倍**(圖 1-6)。

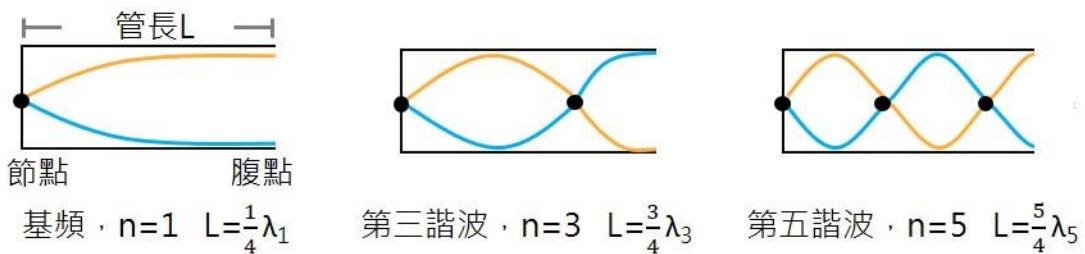


圖 1-6 閉口管內空氣柱振動時的三種駐波位移模式及對應的聲音名稱

2.計算不同溫度時的共振頻率

共振頻率來自於駐波的形成
$$f_n = \frac{n \cdot v}{4L}$$
 (n為奇數，1,3,5...)

空氣中的聲速會隨溫度而改變，可用公式來求聲速 $v=331+0.6T$
 v：聲速(m/s)
 T：攝氏溫度

將聲速公式帶入共振頻率公式中 $\rightarrow f_n = \frac{n(331+0.6T)}{4L}$

(四)聲音表現的定義

1.與響度有關的聲音表現

聲音的大小稱為響度，聲波的振幅愈大，響度愈大；每個人對聲音的感覺不同，為求精準客觀，因此制定出分貝(dB)，作為響度的單位。研究中我們想要知道，**距離變長時，誰比較大聲？**以及**不同的音從哪一個共振腔發出來比較大聲？**所以決定用**聲音的傳播距離**和**聲音響度的增強程度**來做聲音表現的指標。

2.與音色有關的聲音表現

音色是指不同的發聲體具獨特的發聲特性，主要是受到基頻和諧波的影響。**基頻**是聲音的最低頻率，而**諧波**是基頻的整數倍頻率，它們的**相對強度**和**比例**決定了**音色**。由文獻可知**諧波數量**是決定音色表現的指標，我們用 phyphox® App 聲譜功能，從時頻譜中找出單音的基頻和諧波數量(圖 1-7)，判斷形狀對音色造成的影響。

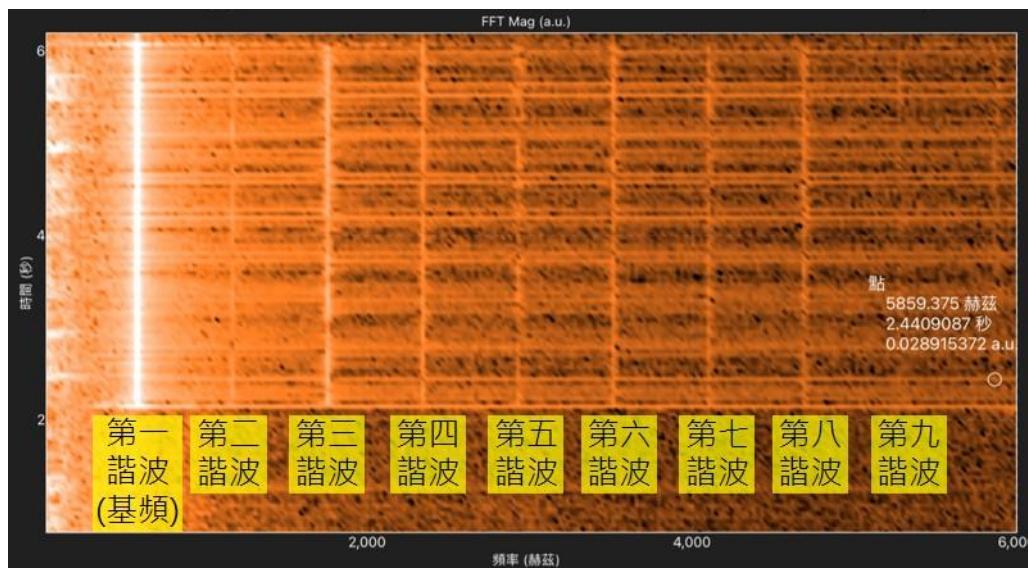


圖 1-7 播放單音時頻譜顯示的基頻和諧波

另外在音調方面，本研究是以藍芽喇叭播放聲音，而藍牙喇叭的音調是根據數位音訊信號產生的，除非改變音訊內容，否則它的**頻率不會因為外部箱體而改變**，因此我們沒有用音調變化來當聲音表現的研究指標。

三、研究目的

- (一)探討不同形狀喇叭共振腔的**聲音傳播距離**
- (二)比較不同形狀喇叭共振腔聲音**響度的增強程度**
- (三)分析不同形狀喇叭共振腔造成的**諧波數量**差異
- (四)聲壓通過不同喇叭共振腔的可視化探討
 - 1.喇叭共振腔內的**聲音壓力可視化**
 - 2.喇叭共振腔內的**空氣流動可視化**
 - 3.喇叭共振腔造成的**聲波干涉情形可視化**

貳、研究設備及器材

一、材料：

壓克力板(30*30cm，厚 3mm)、壓克力箱(60*30*40cm)、壓克力箱(60*40*6cm)、捲尺、HIPS 板、燈、micro bit 開發板、伺服馬達、矽膠耳朵模型、波浪形吸音棉、智高積木、塑膠黏著劑

二、器材：

分貝計、收音麥克風、平板、手機、藍芽音箱、雷射切割機、刻磨機、煙霧機、腳架、雷射筆、溫度計

三、軟體：

(一)平板：phyphox[®] App

(二)電腦：RD WorksV8[®](圖 2-1)、

Microsoft[®] Office Excel[®]

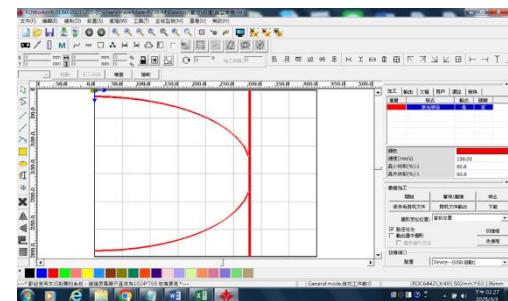
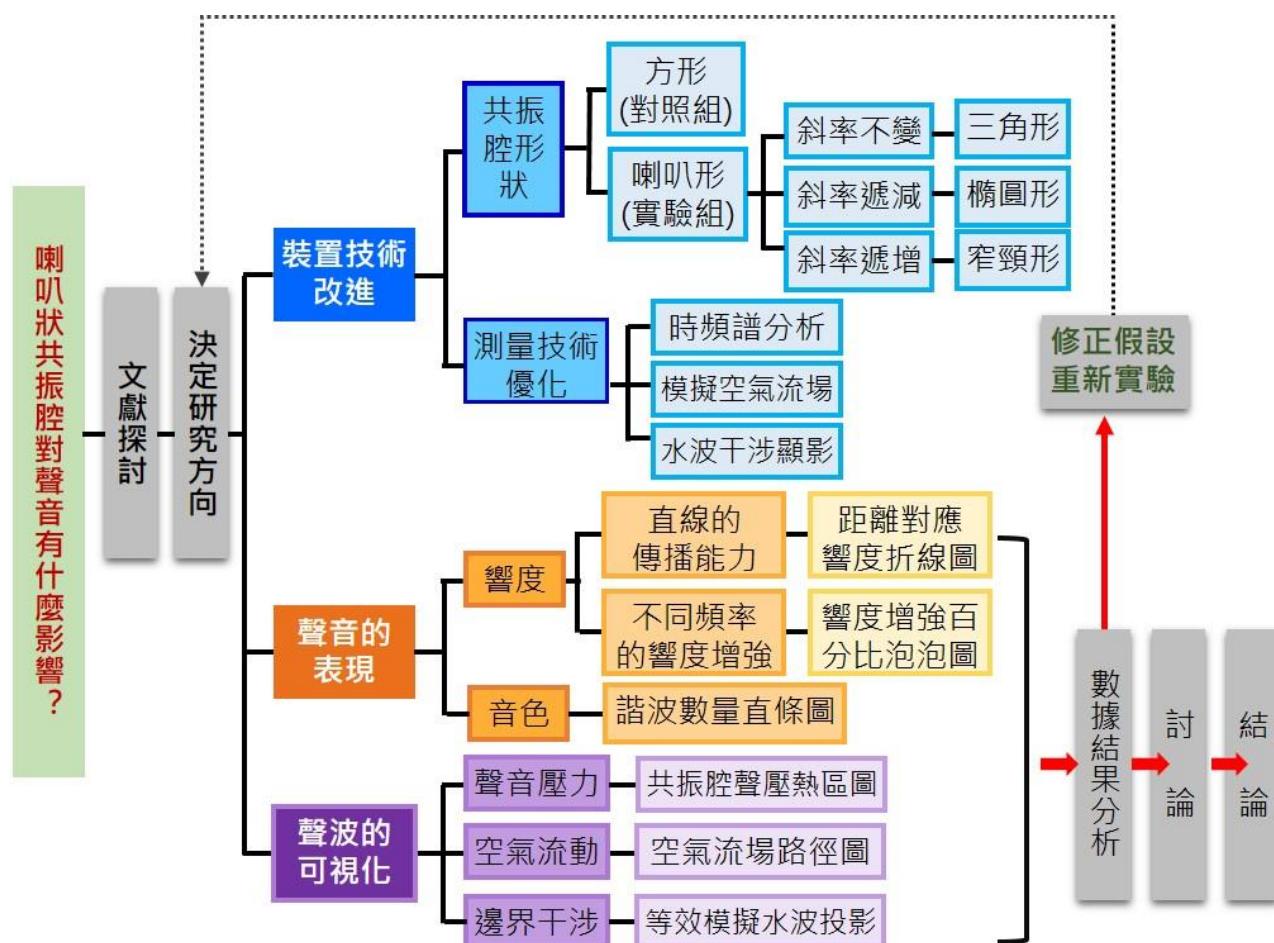


圖 2-1 RDWorks V8 雷射切割路徑圖
RDWorks V8 用於設計、設定雷射切割與雕刻的參數，然後將指令發送給雷射切割機。

叁、研究過程或方法

一、架構圖



二、自製裝置介紹

(一)自製喇叭狀共振腔

我們想要模擬樂器末端開口的形狀自製喇叭狀共振腔(28*28*5.5cm)，因無法做出曲線形狀的錐形開口管。所以，用兩面透明壓克力板互相平行做為腔壁，在壓克力板上切出喇叭形狀的線條，最後用兩片可彎曲的PVC板固定，做出聲音傳播的邊界，腔體的開口大小一致(28*5.5cm) (圖 3-1)。

另外，依據文獻的歸納，我們選擇用**橢圓曲線**(圖 3-2)當模板，以此設計斜率遞增、斜率不變、斜率遞減的三種喇叭狀邊界，對照組則是方形邊界(圖 3-3)。

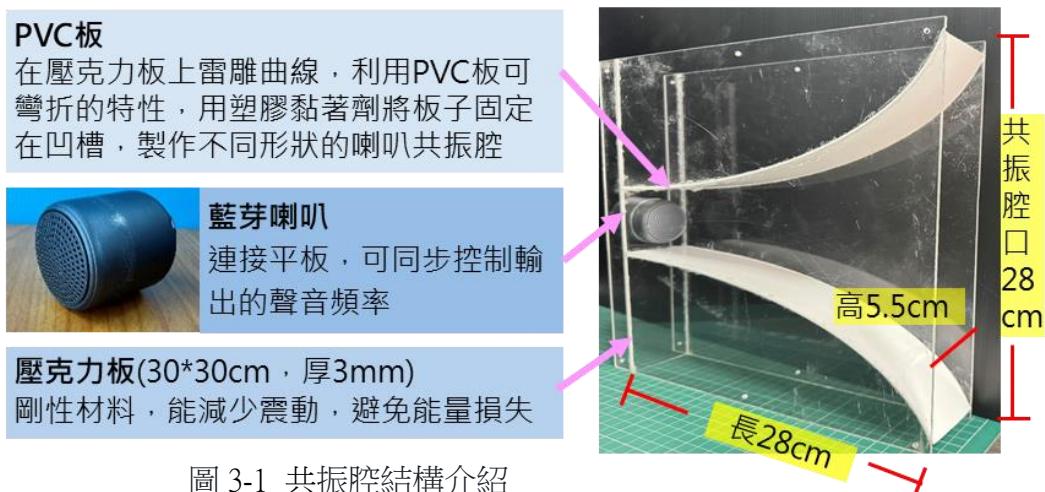


圖 3-1 共振腔結構介紹

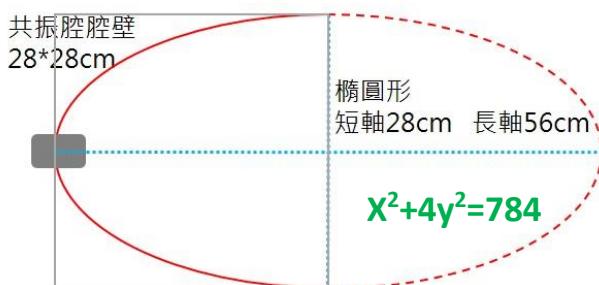


圖 3-2 橢圓形曲線的規格

共振腔側面為 28*28cm 正方形。
以 28cm 為橢圓形短軸，56cm 為長軸，
畫出橢圓形，取 1/4 橢圓曲線來塑造喇叭
形狀。

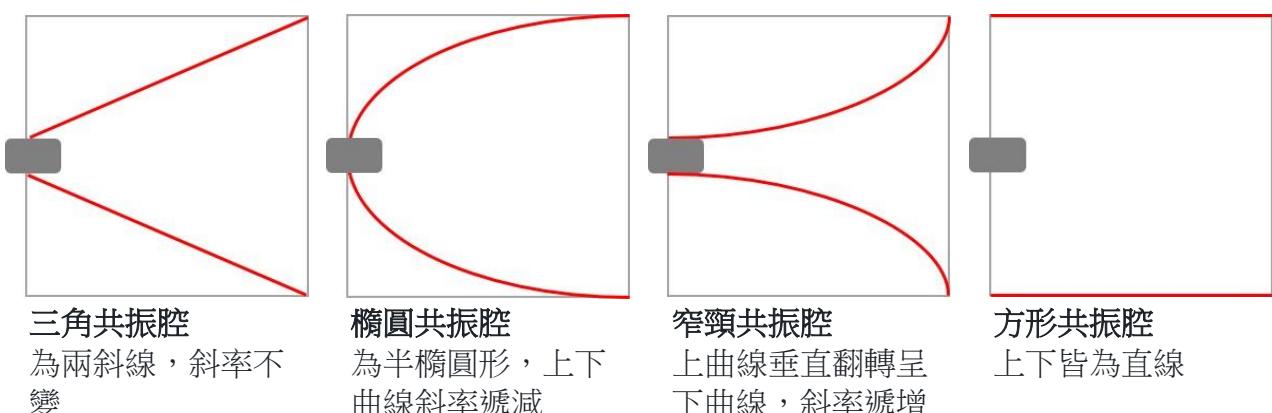


圖 3-3 共振腔的曲線斜率變化

(二)自製無響室

室內做聲音的實驗，容易因牆壁、天花板或地板的反射而產生誤差，因此我們利用波浪形吸音棉自製無響室(圖 3-4)，吸收聲波，讓聲音不會反射回來。

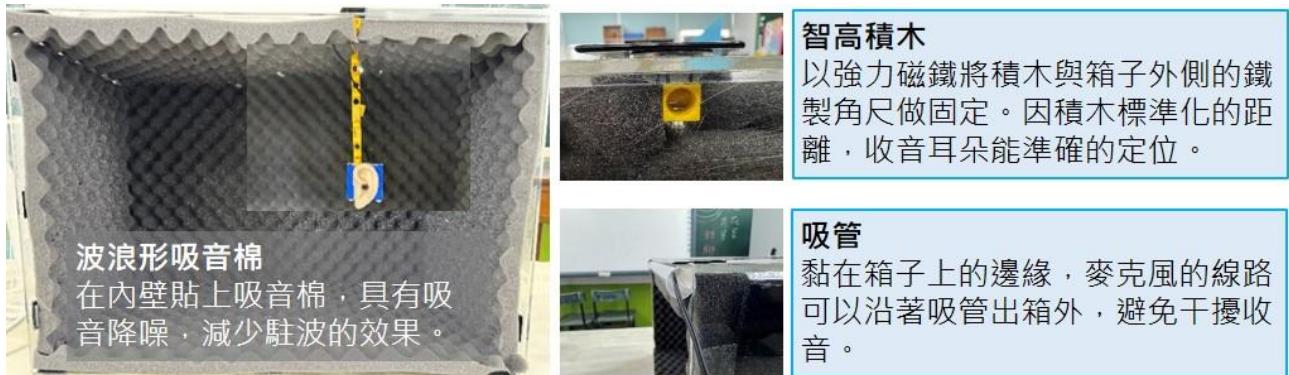


圖 3-4 無響室介紹

(三)人工收音耳

測量響度時，我們會使用分貝計。在無響室測量頻率和音色時，為模擬耳朵實際接收聲音的狀況，將全指向式麥克風置入矽膠耳朵模型中接收聲音(圖 3-5)。

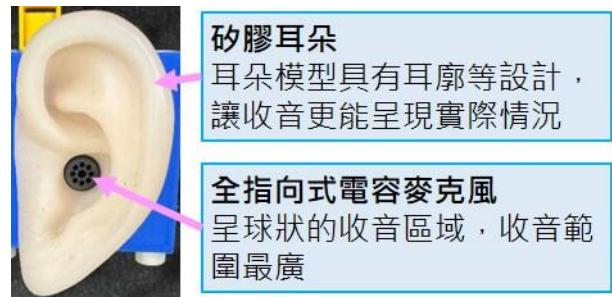


圖 3-5 人工收音耳介紹

(四)自製水波槽

以透明壓克力水槽(60*40*6cm)當作水波槽，內裝 3cm 高的水。將共振腔放入水槽，上方覆蓋白色 HIPS 板(50*60cm，厚 1mm)；以 Micro bit 編寫程式控制伺服馬達，在波源處產生固定頻率的點波源，為避免水波碰到槽壁後反射，在槽壁上加上吸音棉，用來吸收水波。槽下放置光源，將圓形波遇到邊界產生的干涉現象投影到 HIPS 板，產生清晰的波形亮暗波紋(圖 3-6)。

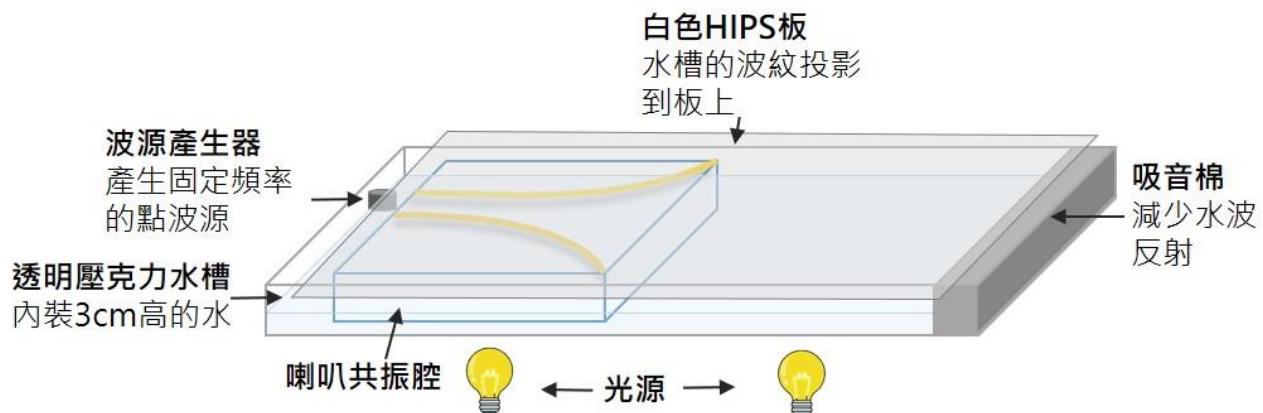


圖 3-6 自製水波槽介紹

三、研究過程

研究一 不同喇叭共振腔的聲音傳播距離

- 1.在直線跑道每隔 5 公尺設置一測量點(含起點 0 公尺處)，共 11 個，全長 50 公尺。
- 2.相同條件下，播放共振頻率(基頻)、第三、五諧波。(共振頻率依當時溫度做調整)
- 3.將分貝計固定在腳架上，測量響度，並在腳架上裝雷射筆定位在各測量點的位置。
- 4.將在 11 個測量點測得的數據算出平均值及標準差，繪製成距離對應響度折線圖。



圖 3-7 phyphox® App 依序播放基頻、第三、五諧波



圖 3-8 將分貝計定位在測量點測量響度

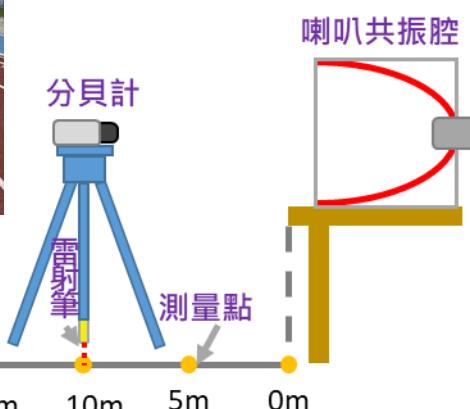


圖 3-9 裝置定位示意圖

研究二 不同喇叭共振腔內聲音頻率對應響度的變化

- 1.操場跑道上，在距離共振腔開口 1 公尺的位置架設測量點。
- 2.播放 C 大調音階，從低音 DO 到高音 Si 三個八度音，共 21 個單音頻率。
- 3.由分貝計測得四個不同形狀共振腔的響度，另外也測量相同條件無共振腔的數據。
- 4.計算出響度增強的百分比，再繪製成響度增強泡泡圖。

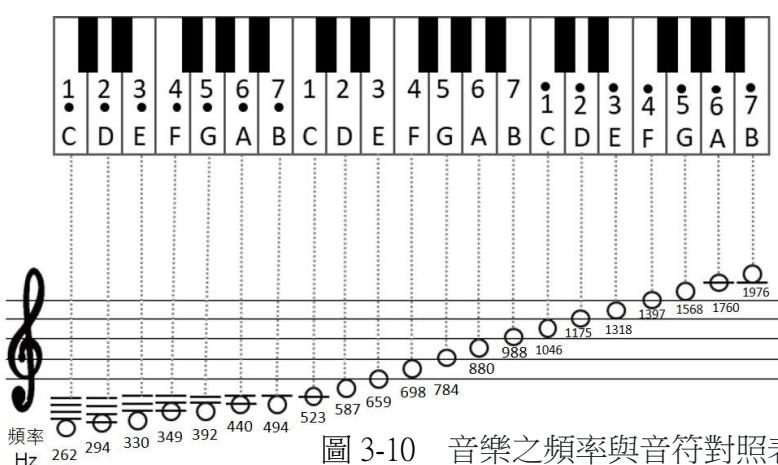


圖 3-10 音樂之頻率與音符對照表



圖 3-11 測量不同頻率的響度

研究三 不同形狀喇叭共振腔造成的諧波數量差異

1. 將矽膠耳朵和全指向收音麥克風模擬人耳收音，放進自製無響室的最佳聆聽點。
2. 播放 C 大調音階，低音 DO 到高音 Si 的三個八度音，共 21 個單音頻率，再使用軟體 phyphox® 的聲譜功能，計算各單音頻的諧波數量。
3. 依數據繪製奇、偶次諧波數量直條圖。

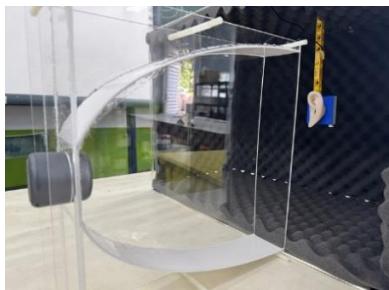


圖 3-12 收音耳放進自製無響室的最佳聆聽點

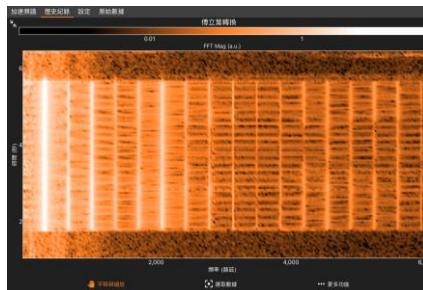


圖 3-13 三角共振腔播放 349Hz 的時頻譜

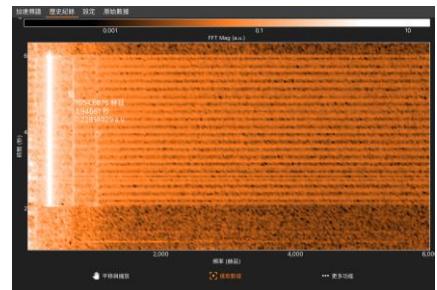


圖 3-14 窄頸共振腔播放 349Hz 的時頻譜

研究四 聲壓通過不同喇叭共振腔的可視化探討

子研究一 喇叭共振腔內的聲音壓力可視化

1. 將室溫維持在 25°C，藍芽喇叭音量固定，播放共振頻率 309Hz。
2. 繪製方格貼在共振腔壁(圖 3-15)，標示座標作為測量定位(圖 3-16)。
3. 分貝計固定在塑膠棍上，3D 列印銜接環，連接塑膠棍及雲台，以調整測量的位置。
4. 在每個區域中央測量 5 次響度(圖 3-16)，計算均值後，製作聲壓熱區圖。

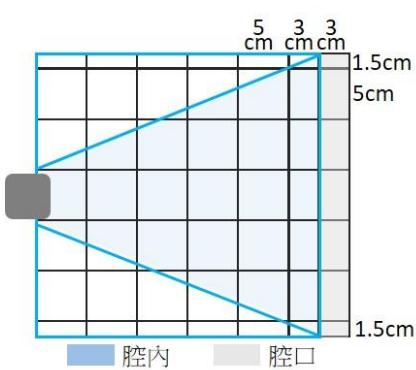


圖 3-15 定位用方格尺寸

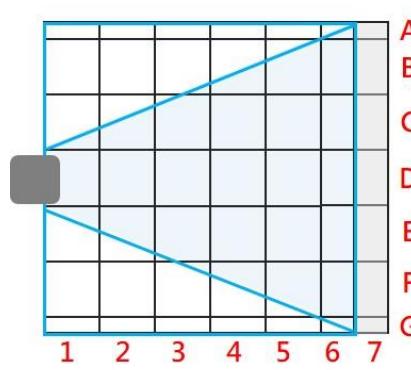


圖 3-16 方格座標



圖 3-17 以分貝計測量不同座標的響度

子研究二 喇叭共振腔內的空氣流動可視化

1. 做環境控制，減少光源及反光，室溫維持在 25°C，共振頻率為 309Hz。
2. 共振腔固定於桌子邊緣，使用煙霧機製造定量煙霧，再用擋板使煙霧保留在音箱裡。
3. 播放聲音後抽掉擋板，用慢速攝影紀錄過程，再拍攝無聲音時煙霧情形做為對照。
4. 將動態紀錄用文字描述，並繪製共振腔的聲音傳播路徑圖。



圖 3-18 煙霧產生器放出定量的煙霧，用壓克力板使煙霧保留在音箱裡



圖 3-19 播放出共振頻率後，壓克力板拿掉，使煙釋放出來

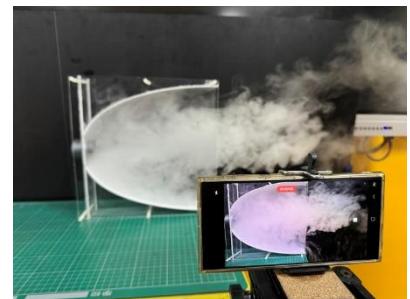


圖 3-20 手機的慢速攝影記錄煙霧消散的情形

子研究三 喇叭共振腔造成的聲波干涉情形可視化

1. 做環境控制，減少光源及反光，搭建成水波顯影裝置。
2. 將共振腔置入水槽內，用波源產生器固定頻率製造圓形波。
3. 在白色 HIPS 板上方，以手機慢速攝影記錄，再將結果用文字描述。



圖 3-21 操作水波顯影裝置



圖 3-22 自製波源產聲器



圖 3-23 調整光源，控制水波顯影

肆、研究結果

一、探討不同形狀喇叭共振腔的聲音傳播距離

(一)由圖 4-1~4-3 可知，實驗結果符合反平方定律，三種喇叭狀共振腔聲音傳播距離皆優於對照組方形共振腔。

(二)由圖 4-1 中可知，當共振頻率為基頻時，窄頸喇叭共振腔傳播效果最佳。

(三)由圖 4-2、4-3 可知，隨著頻率增加，三種喇叭狀共振腔的傳播效果差距逐漸變小。

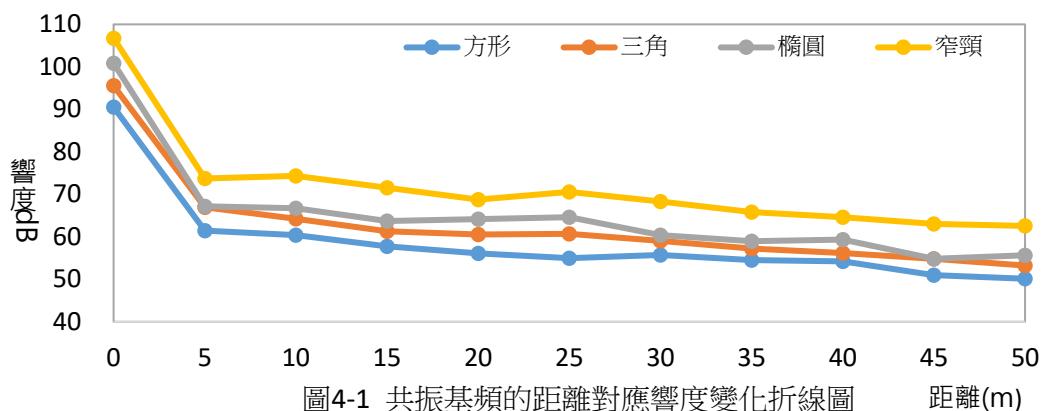


圖4-1 共振基頻的距離對應響度變化折線圖

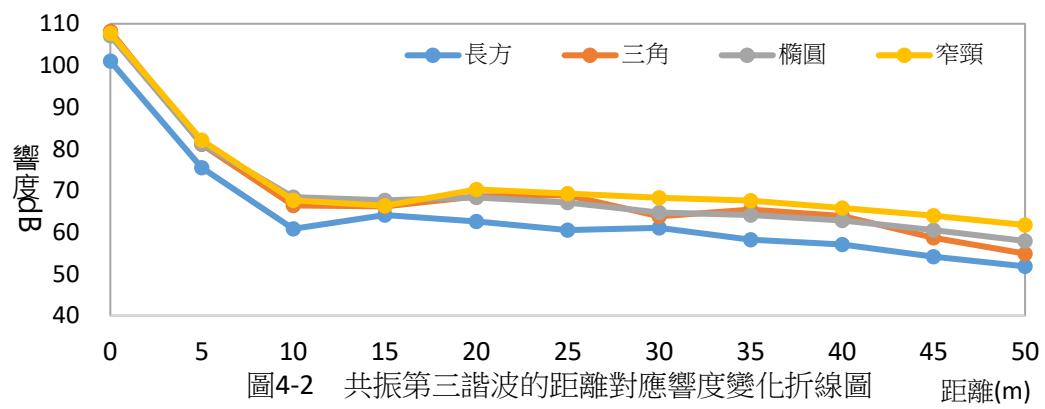


圖4-2 共振第三諧波的距離對應響度變化折線圖

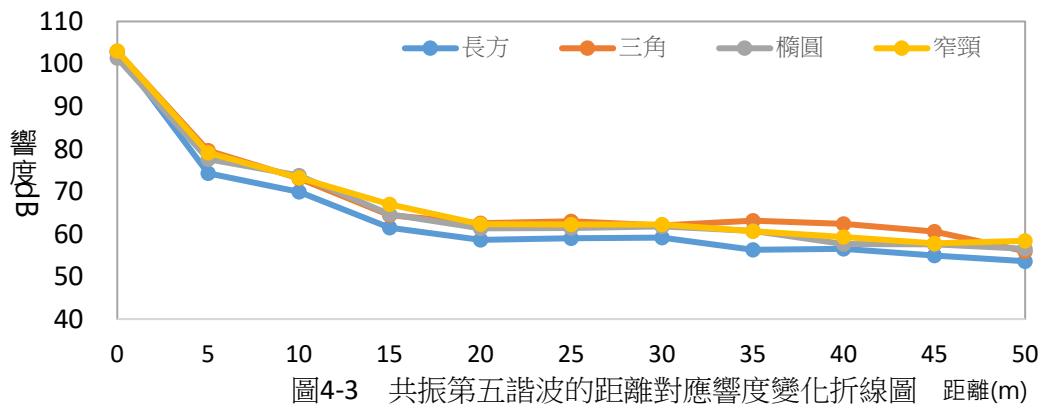


圖4-3 共振第五諧波的距離對應響度變化折線圖

二、比較不同形狀喇叭共振腔聲音響度的增強程度

(一) 實驗組和對照組的共振腔，在抽樣的七個**低音**皆全數呈現**正增強**，平均增強幅度**窄頸**

(13.0%)和**三角**(12.9%)相近，**略大於橢圓**(11.4%)，而對照組方形也有9.1%的平均增幅。

(二) 在抽樣的七個**中音**內，**窄頸**和**橢圓**全數呈現**正增強**，平均增強幅度**窄頸(9.5%)>三角**

(7.7%)>橢圓(6.0%)>對照組方形(2.2%)。

(三) 在抽樣的七個**高音**內，只有**窄頸**全數呈現**正增強**，平均增強幅度**窄頸(7.5%)>三角**

(6.7%)>橢圓(4.8%)>對照組方形(-0.3%)。

(四) 綜合以上結果，可得知**喇叭狀共振腔**在**中音**和**高音**的**增強效果**明顯**優於**對照組。其中

窄頸喇叭共振腔的響度增強最多，**三角喇叭**略低於窄頸，但是相對**起伏較大**。

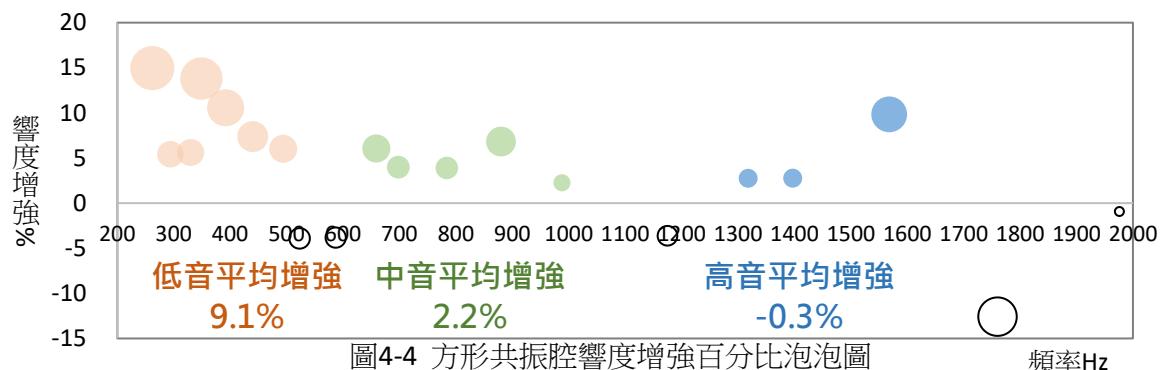


圖4-4 方形共振腔響度增強百分比泡泡圖

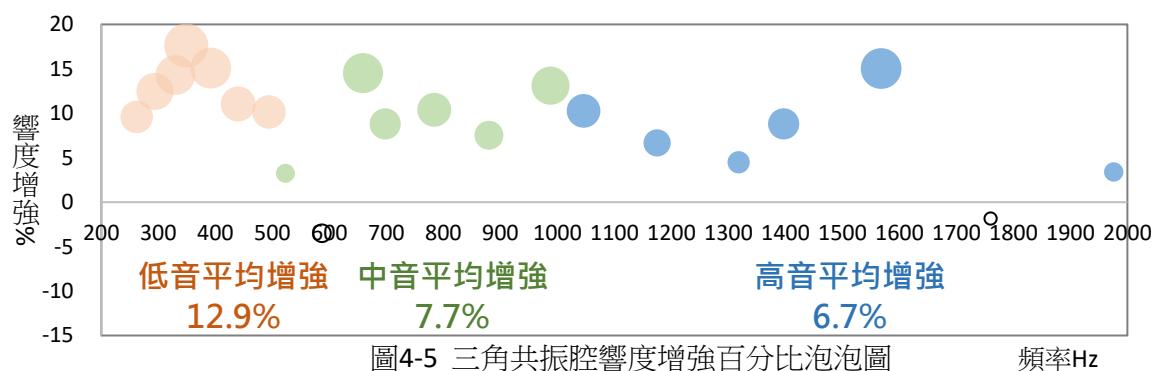


圖4-5 三角共振腔響度增強百分比泡泡圖

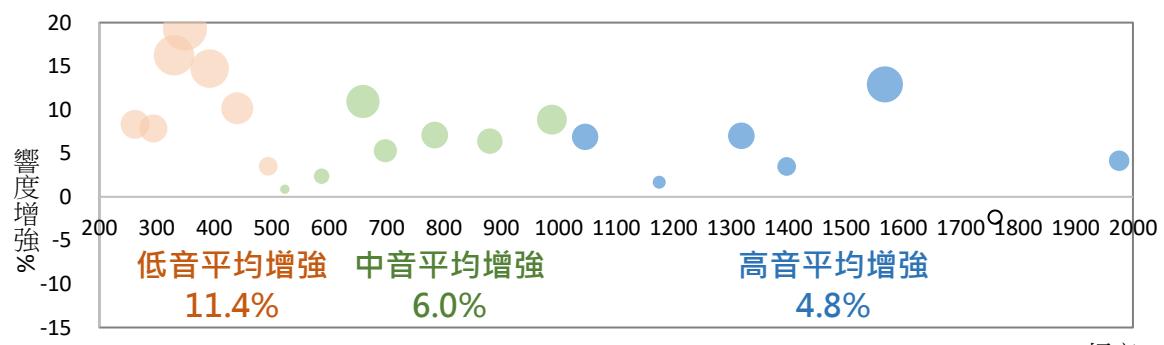


圖4-6 橢圓共振腔響度增強百分比泡泡圖

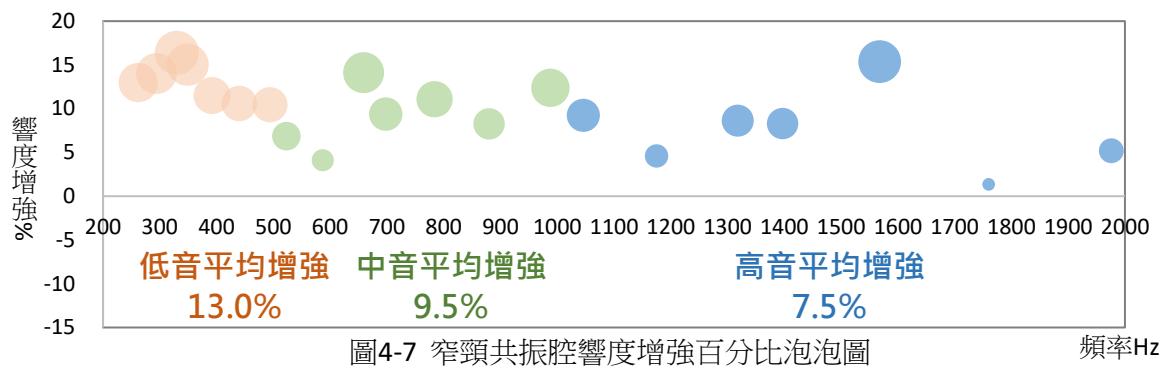


圖4-7 窄頸共振腔響度增強百分比泡泡圖

頻率Hz

三、分析不同形狀喇叭共振腔造成的諧波數量差異

- (一)由圖 4-9、4-10、4-11 中可知，三種喇叭共振腔中，**三角的諧波數**在 330~659Hz(中低音頻)明顯**多於其他兩形狀**，尤其在 349Hz 更多達 17 個諧波數。
- (二)由圖 4-9 及圖 4-11 可知**三角**喇叭共振腔在 988~1568Hz(高音頻)，**窄頸**在 523~988Hz(中音頻)，**只有基頻，沒有諧波**。
- (三)由圖 4-10 可知**橢圓**喇叭共振腔諧波數量在低、中、高音頻都很接近，沒有明顯變多或變少。
- (四)由圖 4-8 對照組**方形共振腔**的**諧波數量**在某些頻率會增加，某些頻率會減少，**無規律變化**。

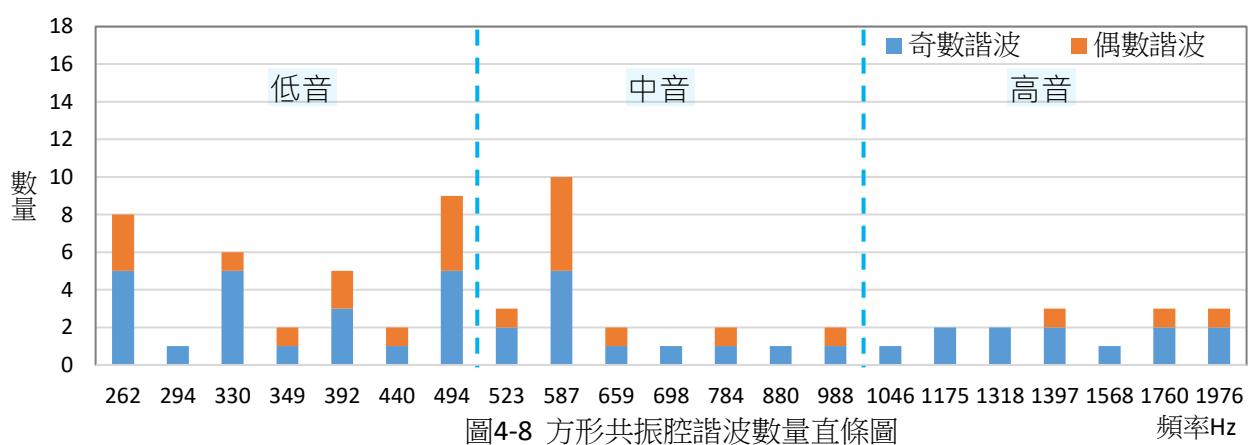


圖4-8 方形共振腔諧波數量直條圖

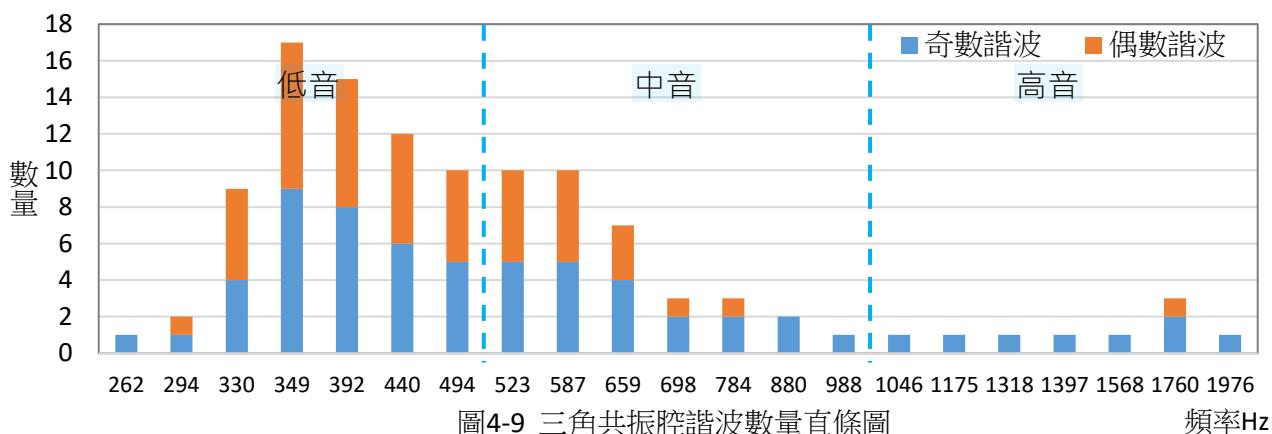


圖4-9 三角共振腔諧波數量直條圖

頻率Hz

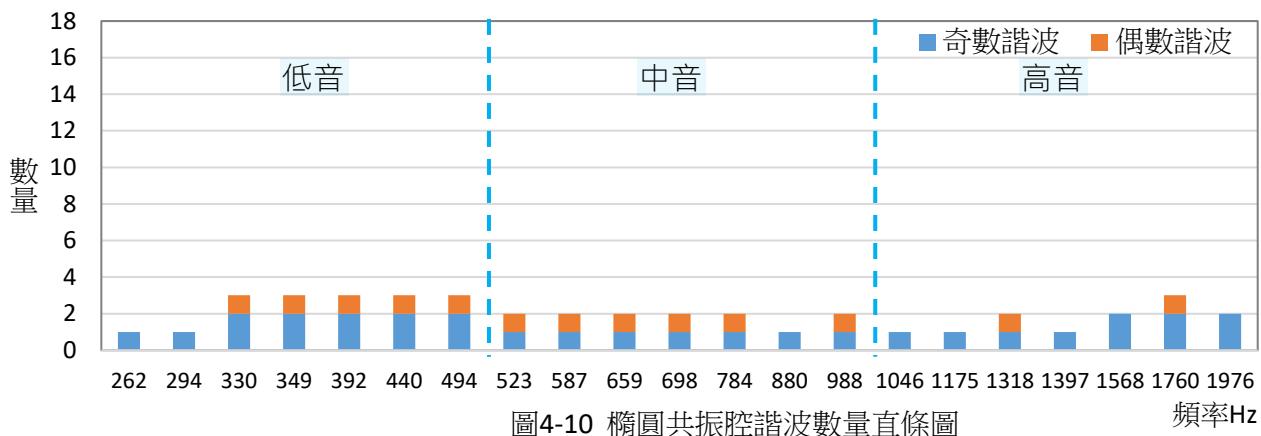


圖4-10 橢圓共振腔諧波數量直條圖

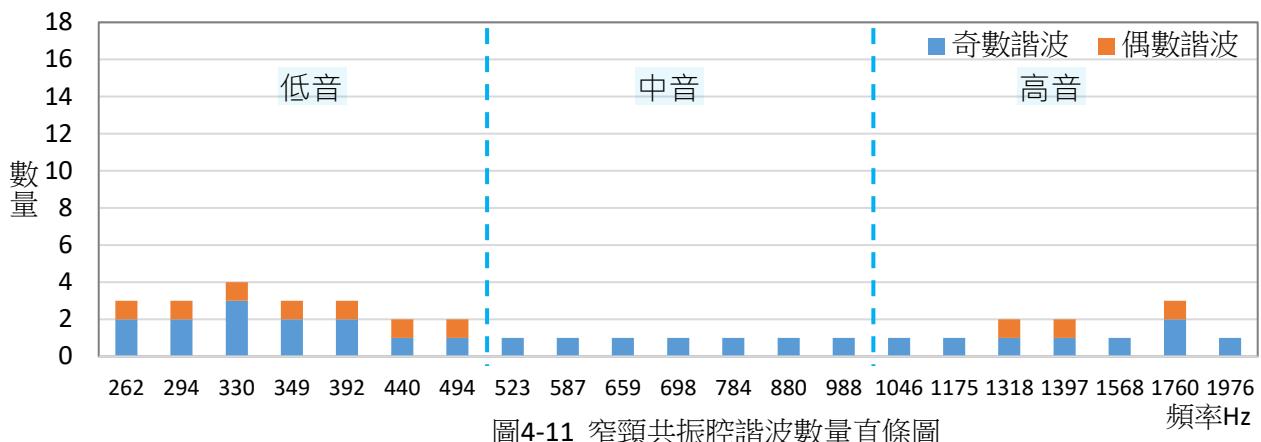


圖4-11 窄頸共振腔諧波數量直條圖

四、聲壓通過不同喇叭共振腔的可視化探討

(一)喇叭共振腔內的聲音壓力可視化(圖 4-12、圖 4-13)

- 1.窄頸喇叭共振腔：初始**聲壓最強(124.3db)**，音源至出口處衰退 23.3db，**開口**會出現中央強兩邊弱的**聲壓集中**現象。
- 2.橢圓喇叭共振腔：初始**聲壓次之(113.4db)**，音源至出口處**衰退最少(19.3db)**，**開口聲壓分布均勻**。
- 3.三角喇叭共振腔：初始**聲壓最小(110.0db)**，音源至出口處衰退 20.9db，**開口聲壓略往中央集中**。
- 4.對照組方形共振腔：腔體內**聲壓強度由兩側往外衰退**，**開口聲壓分布均勻**。

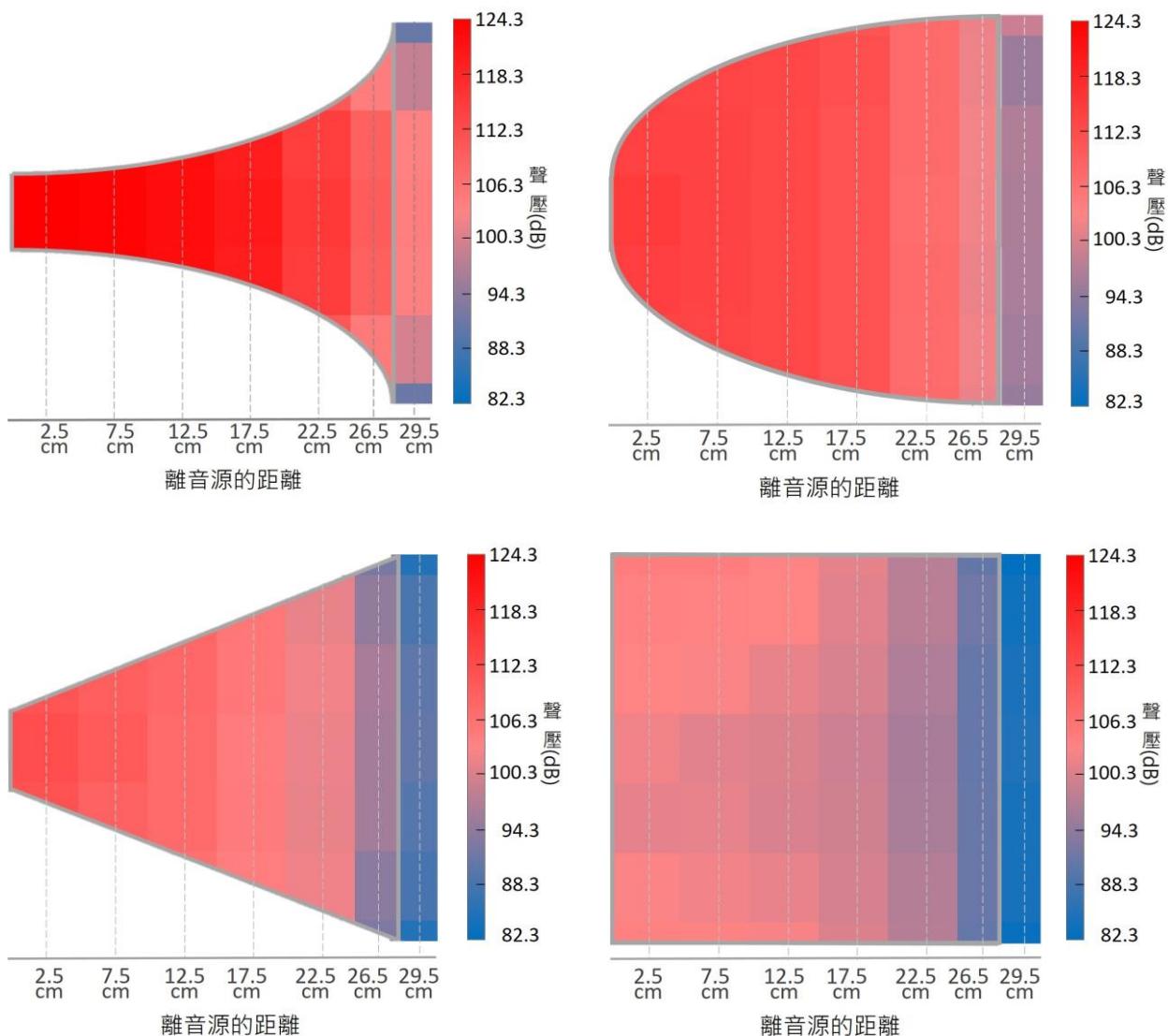


圖 4-12 共振腔聲壓熱區圖

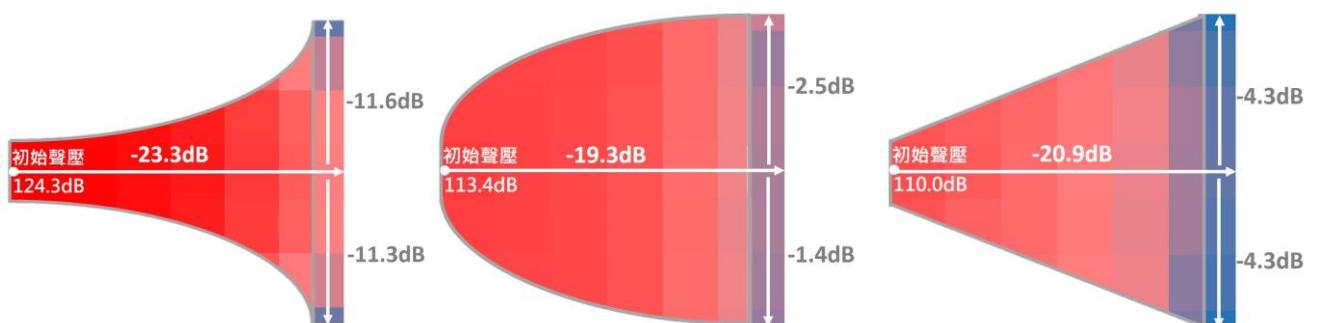
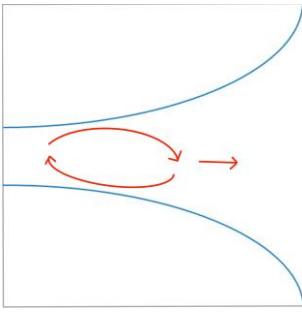
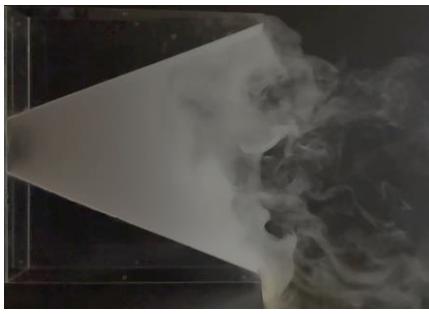
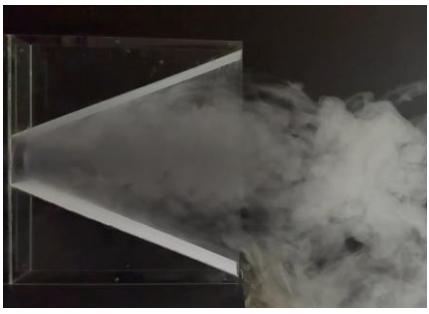
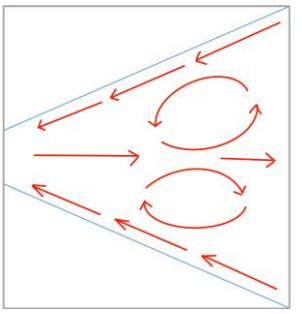
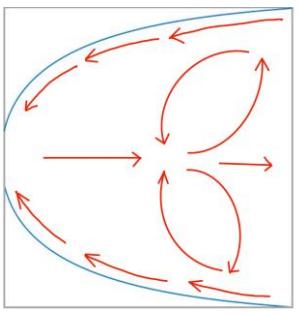
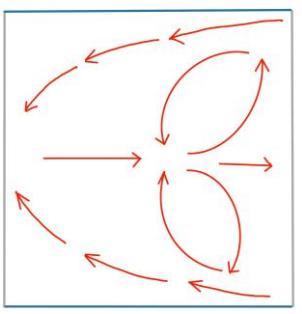


圖 4-13 喇叭共振腔聲壓衰退變化圖

(二)喇叭共振腔內的空氣流動可視化

由煙霧實驗結果可知(表 4-1)，聲音播放後，腔內的空氣會因為聲壓而產生更規律的流動現象，**三角**、**橢圓**和**方形**共振腔**會出現湍流**，讓煙霧的**消散速度**增快，而**窄頸共振腔**煙霧流動**沒有明顯變化**。

表 4-1 四種共振腔的空氣流動狀況整理

形狀	沒播放聲音的空氣流動	播放共振頻率的空氣流動	空氣流動路徑圖
窄 頸 共 振 腔			
	空氣沒有沿上下管壁進入腔體的現象，煙霧聚集在腔內窄頸處， 無渦流產生 ， 煙霧離開腔口後集中在中央 ，煙霧 消散最慢(45秒) 。		
三 角 共 振 腔			
	空氣沿上下管壁 快速 的進入腔內。箱內產生 兩個 不同方向 湍流 ， 煙霧離開腔口後均勻擴散 ，煙霧 消散最快(20秒)		
橢 圓 共 振 腔			
	空氣沿上下管壁進入腔體， 速度先快後慢 。箱內產生 兩個 不同方向 湍流 ， 煙霧離開箱口後均勻擴散 ，煙霧 消散快(24秒) 。		
方 形 共 振 腔			
	空氣沿上下管壁 快速 的進入腔內。箱內產生 兩個 不同方向 湍流 ， 煙霧離開腔口後均勻擴散 ，煙霧 消散快(26秒)		

(三)喇叭共振腔造成的聲波干涉情形可視化(圖 4-14)

- 1.窄頸喇叭共振腔：初始波為圓形波，向外遇到曲線邊界後會有反射波向內，在中央會有明顯的駐波，**波前會重整趨近直線**，看起來像是平行的直線波，離開腔體後，**波紋明顯集中在中央軸線**。
- 2.三角喇叭共振腔：初始波為圓形波，向外遇到直線傾斜邊界，在**兩側會有比較明顯干涉條紋**，中央較少，離開腔體後，在**邊界延伸的範圍都可看到明顯的波紋**。
- 3.橢圓喇叭共振腔：初始波為圓形波，向外遇到圓弧邊界後，產生多方向的反射，**干涉條紋加強的比較平均**，離開腔體後，圓形波前略為變形，**波紋較不明顯**。
- 4.對照組方形共振腔：初始波為圓形波，通過上下端的直角邊界，**形成兩個朝對角線前進的圓形波前**，靠近波源時，中間的干涉條紋較明顯，距離增加後波紋變淡，離開腔體後，水面出現不明顯的格狀波紋。

窄
頸
共
振
腔



三
角
共
振
腔



橢
圓
共
振
腔



方
形
共
振
腔



圖 4-14 水波等效模擬聲波干涉圖

伍、討論

一、喇叭開口對聲波傳導的影響

從研究結果可知，**喇叭狀的波導**設計，**聲量和傳播距離明顯高於**相同條件的**對照組**方形共振腔，這是因為(圖 5-1)喇叭狀波導藉由**漸擴的邊界設計**，能**引導聲波能量往出口方向集中傳播，減少反射與損耗**，使聲音的輸出效率與方向性顯著提升；而在**方形共振腔**中，聲波**因平行邊界的反射**讓聲波**產生二個次波源**，能量不集中也耗損較多，傳出效率較低。

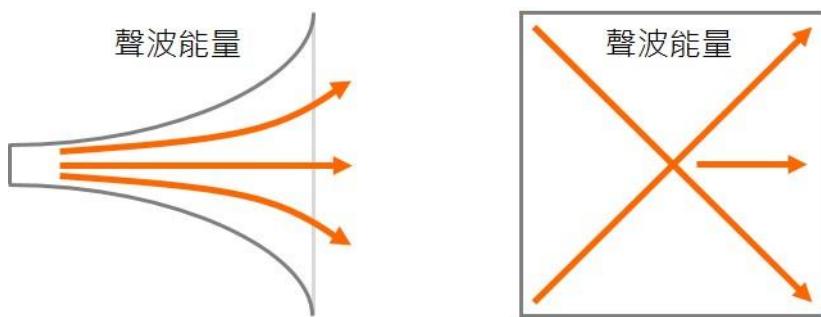


圖 5-1 喇叭狀和方形波導能量引導狀況整理圖

二、不同喇叭形狀波導產生的響度差異

(一)形狀造成的空氣流動影響聲量大小

共振腔形狀主要影響了腔體內部空間，而聲波是以空氣為介質傳遞能量，由實驗結果可知，**三角、橢圓、方形**共振腔的聲音播放後，腔體內外**壓力差會讓空氣對流**，讓**部分聲波能量**不再以壓縮／膨脹方式傳播，而是**轉換成空氣的質量流動**(圖 5-2)，最後導致測得的**聲壓變小**，而**窄頸**共振腔因為形狀緣故，空氣不易產生對流，沒有形成往外噴發的流場，**聲能耗損轉成空氣動能的現象不明顯**，所以在開口處測得的音量較高。

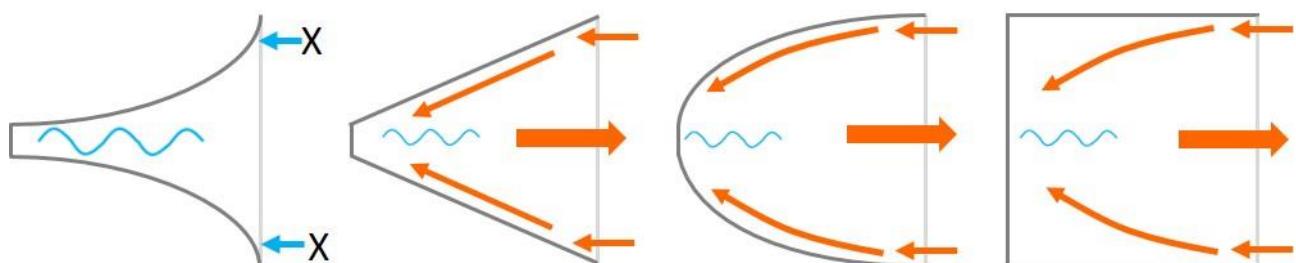


圖 5-2 聲能耗損轉為空氣動能示意圖

(二)形狀造成的聲波干涉會影響傳播距離與範圍

由研究一和研究四的結果可知，共振腔**幾何形狀邊界**造成的**干涉**，是**決定傳播能力**和**範圍的主要因素**，以下針對三個形狀分別討論(圖 5-3)：

1.斜率遞增的窄頸喇叭

窄頸喇叭的指數型漸增邊界，可以**重整圓形波前**，讓波在通道內形成類似直線波的平行波前，**能量明顯集中在中央軸線**方向，波幅穩定**傳播較遠**，是**指向性最高**的波導設計。

2.斜率不變的三角喇叭

三角喇叭的直線斜邊擴張邊界，讓圓形波前可以順利的由窄處向外發散，**能量集中但兩側略大於中央軸線**，是可以**兼顧傳播範圍和強度**的波導設計。

3.斜率遞減的橢圓喇叭

橢圓喇叭的類圓形曲面邊界，讓圓形波前得以迅速向外擴展，**能量可以均勻散佈在整個腔體**，**擴散角度大**，是**傳播範圍最廣**，但**傳播強度較不足**的波導設計。

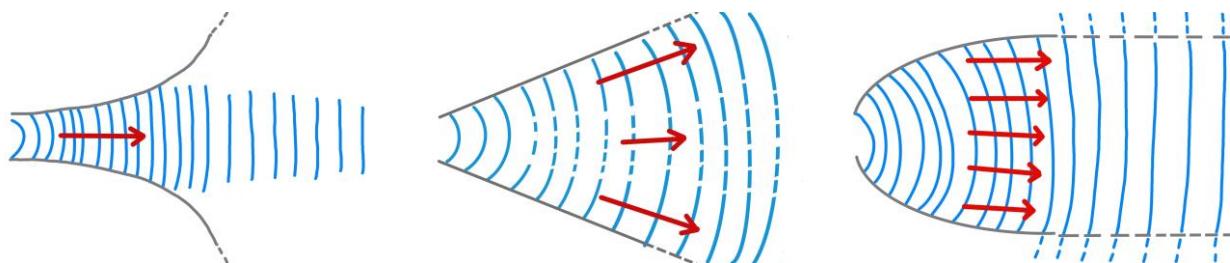


圖 5-3 喇叭共振腔的聲波干涉情形整理圖

三、不同喇叭形狀波導產生的音色差異

(一)三角喇叭為何容易產生比較多諧波

由研究三結果可知，三角喇叭在中低音的諧波數遠多於窄頸和橢圓喇叭，這在播放單音時可以明顯分辨差異，在**播放樂曲**時，如果有合弦或合奏，也可以**明顯聽到三角喇叭出現的雜音**。我們進一步將三角和窄頸喇叭的腔壁灑上色沙，分析兩者在播放 349Hz 單音時產生的二維波形，由圖 5-4 可知，**三角**喇叭的**駐波節點密度高於窄頸**喇叭，**可以看到頻率更高更豐富的克拉尼圖形**，顯示**三角**喇叭的**形狀容易激發更多諧波產生**，我們推測這是因為三角喇叭的直線漸擴邊界容易產生反射，聲波在兩邊界間反射後干涉，在多處形成節點與腹點導致。

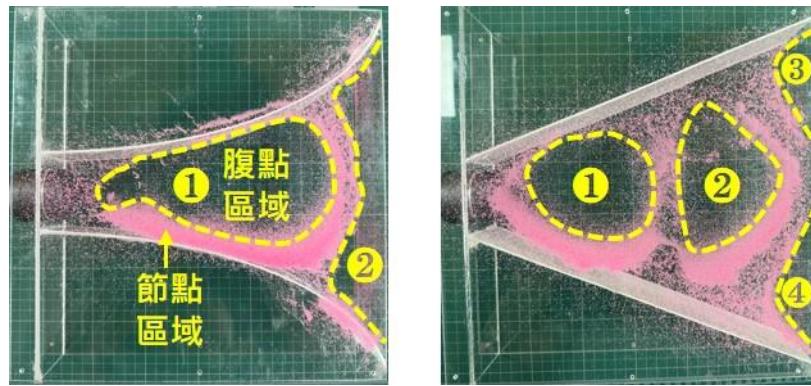


圖 5-4 窄頸和三角喇叭共振腔的克拉尼圖形比較

(二) 發現共振腔延時現象

我們在研究三分析諧波時發現，當單音在設定播放的四秒**時間結束後**，在**時頻譜**上似乎**會有延長的軌跡**(圖 5-5)，接著我們比對四種共振腔的 21 個音，總共 84 筆的時間資料後得知，不同共振腔延長時間並不相同。進一步測試在**樂曲裡播放**的狀況，我們播放給愛麗絲(Für Elise)音樂前四小節，包含高音、中音和低音三種頻段，結果顯示**也有聲音延時的現象**發生(圖 5-6)。排除反射波造成收音的可能性後，我們猜測是共振腔內空間造成類似回聲的現象。這是一個有趣的發現，之後可以進一步探討共振腔延時造成的音色差異，這可以解釋為何有的共振腔聲音聽起來會有立體感，有的聽起來只是單純的大聲而已。

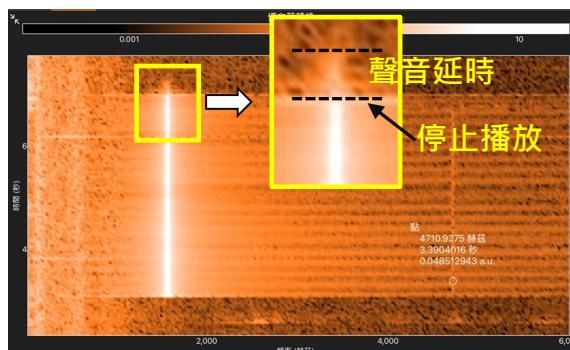


圖 5-5 單音頻的聲音延時現象

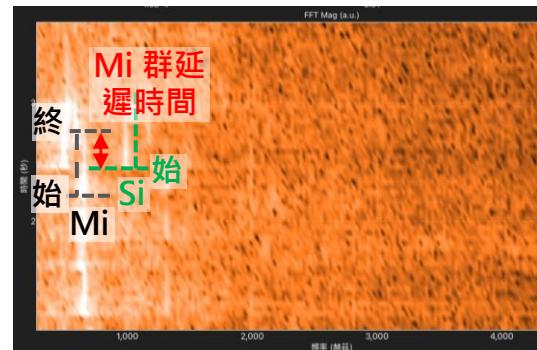


圖 5-6 播放樂曲時的聲音延時現象

四、研究的誤差控制

(一)溫度對波速造成的影響

本研究的響度實驗選擇在室外進行量測，無法像在室內使用空調控制溫度，所以我們把溫度變化造成的聲速差異納入考量，將當天測得的溫度，透過波速公式轉換成適合共振腔長度的共振頻率(表 5-1)，用微調後的頻率進行響度量測，數據的值都在平均數正負三個標準差範圍內。

表 5-1 不同溫度下的共振頻率轉換表

溫度	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
共振頻率	309	309	310	311	311	312	312	313	313	314	314	315	315

(二)控制聲波在室內反射造成的誤差

研究三的音色實驗是用麥克風錄製共振腔發出的聲音，再用軟體分析諧波數量，經測試後發現，在室內量測容易受到牆壁反射波影響諧波數據，本組決定採用短距離量測並自製無響室和收音耳，成功過濾反射波造成的諧波干擾。



圖 5-7 窄頸共振腔的 349Hz 時頻譜(沒有無響室)

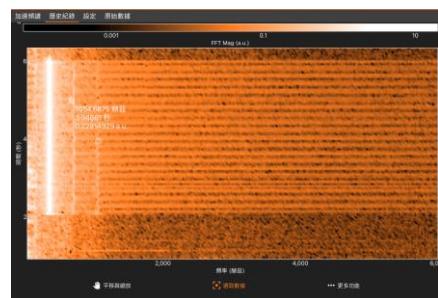


圖 5-8 窄頸共振腔的 349Hz 時頻譜(有無響室)

(三)共振腔窄邊的駐波是否會影響實驗結果

本次研究使用的自製共振腔為箱體結構，主要空間由長邊形狀決定，但窄邊是否會產生駐波干擾實驗結果呢，我們以窄邊內長 5.5cm 推算，在室內溫度 30°C 時，波速為 349m/s，假設兩端板子為節點，產生的基本駐波為 1/2 波長，換算後的共振頻率為 3173Hz(圖 5-9)，遠高於本研究頻率使用的範圍(262Hz~1976Hz)，故忽略窄邊壓克力板產生駐波的影響。

$$\text{聲速 } v = 331 + 0.6 \times 30 = 349 \text{ m/s}$$

$$\text{管長 } L = 5.5 \text{ cm} = 0.055 \text{ m}$$

$$\text{波長 } \lambda = 2L = 2 \times 0.055 = 0.11 \text{ m}$$

$$\text{共振頻率 } f = v / \lambda = 349 / 0.11 \approx 3173 \text{ Hz}$$

圖 5-9 室溫 30°，窄邊發生共振的頻率推算

五、未來展望與應用

(一)探討幾何形狀優化聲波聚焦效果

由研究結果顯示，窄頸共振腔的波導設計，可以讓聲波有效集中，後續可以針對曲線的曲度變化(圖 5-10)以及不同曲線如**拋物線**(圖 5-11)、**雙曲線圖**(5-12)的窄頸喇叭，尋找**讓能量有效疊加的最佳波導設計**，應用在**超音波聚焦探頭**的設計與改良。

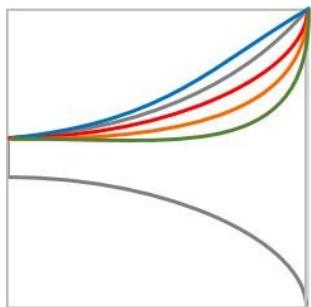


圖 5-10 不同曲度窄頸喇叭共振腔

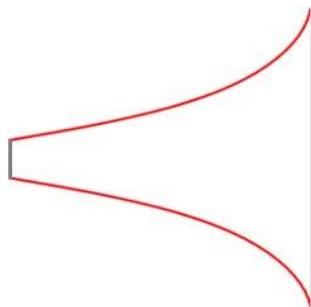


圖 5-11 拋物線的窄頸喇叭示意圖

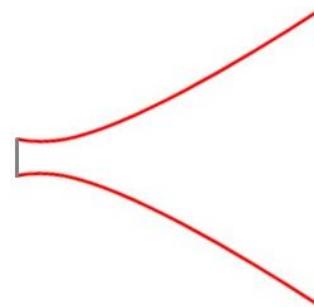


圖 5-12 雙曲線窄頸喇叭示意圖

(二)探討左右非對稱形狀的通道讓聲音集中轉向

本次研究主要探討對稱形狀的喇叭共振腔，我們另外製作了斜率一邊遞增一邊遞減的非對稱喇叭共振腔(表 1-1)，將它放入自製水波槽做干涉投影，發現離開腔體後的波紋雖然沒有很明顯，但是**聲波的傳遞方向會有角度的偏折發生**(圖 5-13)，後續可以探討如何透過非對稱波導，實現讓**聲波波束轉向**的可能。

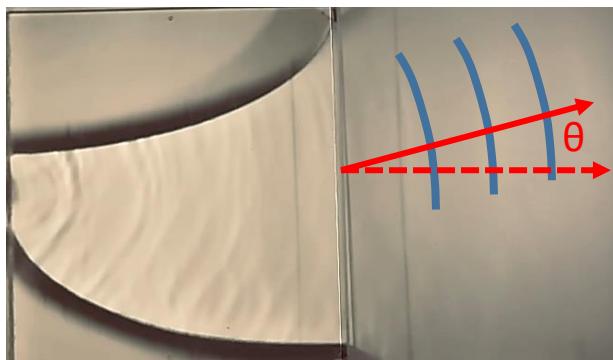


圖 5-13 非對稱共振腔干涉後角度偏折

陸、結論

- 一、共振腔形狀會影響聲音傳播距離，喇叭狀共振腔效果優於對照組方形共振腔，其中以斜率遞增的窄頸喇叭共振腔傳播能力最強。
- 二、共振腔形狀會影響聲音響度的增強程度，喇叭狀共振腔在中音和高音的增強效果優於對照組。其中窄頸喇叭共振腔的響度增強最多。
- 三、共振腔形狀會影響諧波數量，進而造成音色差異，三角喇叭共振腔的諧波數在中低音大幅增加，容易產生雜音。
- 四、喇叭共振腔的形狀會影響腔內空氣流動和聲波干涉情形，進而造成腔內聲壓分布差異。
 - (一)窄頸喇叭共振腔初始聲壓最強，在開口處會有中央強、兩邊弱的聲壓集中現象；橢圓喇叭共振腔音源至出口處衰退最少，開口聲壓分布均勻；三角喇叭共振腔初始聲壓最小，開口聲壓略往中央集中。
 - (二)聲音播放後，喇叭共振腔內的空氣會因為聲壓而產生規律的流動現象，邊界的形狀會決定空氣對流速度，窄頸流速最慢，橢圓次之，三角最快，空氣流動越慢反而響度越高，空氣流動越快響度越低。
 - (三)聲波遇到喇叭共振腔邊界後，產生的干涉會影響傳播距離與範圍，窄頸的邊界可以讓能量集中在中央軸線方向，傳播較遠，具有指向性；三角的邊界，讓聲波可以順利向外發散，兼顧傳播範圍和強度；橢圓的邊界，讓能量均勻散佈在整個腔體，傳播範圍最廣，但傳播強度較不足。

柒、參考資料及其他

- 一、陳榮貴（2019）。專業音響實務秘笈。台北市：麥書國際文化事業有限公司。
- 二、南一出版社編輯部（2024）。《國中自然二上：第三單元 波動與聲音的世界》（第 87 – 92 頁）。南一出版社。
- 三、吳明德（2010）。物理，搞什麼飛機。泰宇出版。
- 四、蔡坤憲（2017 年 8 月 5 日）。你知道亞得里亞海岸旁的「海風琴」嗎？《物理雙月刊》。
取自 <https://bimonthly.ps-taiwan.org/articles/67bc355d1efd7411b20cd67d>
- 五、林桂如（2022）。為何喊破喉嚨對方還是聽不到？——淺談聲波的「平方反比定律」與日常聆聽。《泛科學》。取自 <https://pansci.asia/archives/334279>
- 六、聲波干涉。<https://www.ntsec.edu.tw/liveSupply/detail.aspx?a=6829&cat=6843&lid=16819&print=1>
- 七、為什麼會產生共振？<http://www.toachina.com.cn/otokukan/otomame/1-6.htm>
- 八、吳炯毅（2024）。腔體共振與開孔流速的探討。國立彰化高級中學。

照片、圖片出處索引：

一、指導教師拍攝或製作：

圖 1-1、圖 3-6、圖 3-7、圖 3-8、圖 3-9、圖 3-11、圖 3-18、圖 3-19、圖 3-20、圖 3-21、圖 3-22、圖 3-23、圖 4-14、圖 5-4、圖 5-13、

二、作者拍攝或製作

表 1-1、表 4-1、表 5-1、表 8-1~8-12、圖 1-7、圖 2-1、圖 3-1、圖 3-2、圖 3-3、圖 3-4、圖 3-5、圖 3-10、圖 3-12、圖 3-13、圖 3-14、圖 3-15、圖 3-16、圖 3-17、圖 4-1、圖 4-2、圖 4-3、圖 4-4、圖 4-5、圖 4-6、圖 4-7、圖 4-8、圖 4-9、圖 4-10、圖 4-11、圖 4-12、圖 4-13、圖 5-1、圖 5-2、圖 5-3、圖 5-5、圖 5-6、圖 5-7、圖 5-8、圖 5-10、圖 5-11、圖 5-12、圖 8-1、圖 8-2、圖 8-3、圖 8-4

三、其他出處

圖 1-2 引自 <http://www.toachina.com.cn/otokukan/otomame/1-6.htm>

圖 1-3 圖 1-4 引自吳明德（2010）。物理，搞什麼飛機。泰宇出版。

圖 1-5 引自陳榮貴（2019）。專業音響實務秘笈。台北市：麥書國際文化事業有限公司。

圖 1-6 引自 <https://bimonthly.ps-taiwan.org/articles/67bc355d1efd7411b20cd67d>

捌、附錄

研究一 探討不同形狀喇叭共振腔的聲音傳播距離

表 8-1 方形喇叭共振腔的基頻和諧波在不同距離的響度紀錄表

		距離 (m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
基頻	響度 (dB)	90.5	61.1	60.4	57.9	56.1	55.0	55.7	54.5	54.3	51.0	50.1	
	標準差 (dB)	1.5	1.2	1.5	0.9	1.3	0.6	1.9	0.5	1.1	0.7	0.6	
第三 諧波	響度 (dB)	101.0	75.5	60.8	64.1	62.6	60.5	61.1	58.2	57.1	54.1	51.8	
	標準差 (dB)	0.4	1.9	2.0	1.6	0.6	0.5	1.1	1.5	0.6	2.0	1.6	
第五 諧波	響度 (dB)	102.8	74.3	69.9	61.5	58.6	59.0	59.1	56.3	56.5	55.0	53.6	
	標準差 (dB)	0.8	1.3	0.8	2.0	1.4	0.5	0.9	1.7	0.4	1.8	1.5	

表 8-2 三角喇叭共振腔的基頻和諧波在不同距離的響度紀錄表

		距離 (m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
基頻	響度 (dB)	95.6	67.0	64.2	61.3	60.5	60.7	59.1	57.2	56.2	54.8	53.2	
	標準差 (dB)	1.1	0.8	0.9	1.3	1.0	1.7	1.1	1.0	1.1	1.6	1.4	
第三 諧波	響度 (dB)	108.2	81.1	66.5	66.2	68.7	68.7	63.8	65.4	63.9	58.6	54.9	
	標準差 (dB)	0.4	1.6	1.8	1.6	1.6	0.7	1.5	2.5	0.3	0.5	1.1	
第五 諧波	響度 (dB)	103.0	79.7	73.1	64.4	62.6	63.6	62.0	63.2	62.4	60.6	57.9	
	標準差 (dB)	0.2	0.7	0.1	1.2	1.5	1.4	1.2	1.1	1.3	0.9	1.3	

表 8-3 橢圓喇叭共振腔的基頻和諧波在不同距離的響度紀錄表

		距離 (m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
基頻	響度 (dB)	100.8	68.6	66.7	63.7	64.2	64.6	60.4	59.6	59.4	54.8	55.6	
	標準差 (dB)	0.5	1.1	2.3	1.7	0.7	0.6	1.3	1.4	1.3	0.6	1.3	
第三 諧波	響度 (dB)	107.1	81.2	68.8	67.6	68.4	67.1	64.7	64.1	62.8	60.5	57.9	
	標準差 (dB)	0.6	0.9	1.1	1.4	2.2	1.6	1.4	1.8	1.2	0.8	2.1	
第五 諧波	響度 (dB)	101.4	77.6	73.8	64.4	61.3	61.4	61.8	60.7	57.6	57.6	56.5	
	標準差 (dB)	0.7	2.3	1.8	1.6	0.7	1.2	0.9	2.0	0.8	1.5	1.0	

表 8-4 窄頸喇叭共振腔的基頻和諧波在不同距離的響度紀錄表

	距離 (m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
基頻	響度 (dB)	106.8	73.7	74.4	71.6	68.8	70.5	68.3	65.8	64.6	63.0	62.6
	標準差 (dB)	0.3	0.8	0.8	1.1	1.9	0.5	0.5	1.2	1.2	1.5	1.7
第三 諧波	響度 (dB)	107.7	82.2	69.5	66.1	69.9	69.3	68.2	67.6	65.8	63.9	61.7
	標準差 (dB)	0.9	0.8	0.9	2.6	1.7	0.5	0.6	0.5	1.5	2.0	2.0
第五 諧波	響度 (dB)	103.0	79.1	73.2	67.0	62.3	62.3	62.3	62.2	60.7	59.3	58.4
	標準差 (dB)	0.8	0.6	1.7	2.1	1.7	2.2	1.6	1.5	2.6	2.5	1.8

研究二 比較不同形狀喇叭共振腔聲音響度的增強程度

表 8-5 方形喇叭共振腔 21 個單音頻率的響度紀錄表(固定距離：1m)

頻率 (Hz)	262	294	330	349	392	440	494	523	587	659	698	784	880	988	1046	1175	1318	1397	1568	1760	1976
響度 (dB)	76.4	72.0	74.3	82.8	88.3	87.8	86.9	80.2	74.2	77.1	79.5	80.4	86.9	82.8	78.9	77.4	82.4	84.4	86.1	75.5	82.5
標準差 (dB)	0.4	0.3	0.9	0.4	1.1	0.1	1.5	0.5	1.0	0.3	0.2	0.7	0.7	0.7	0.4	1.1	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6

表 8-6 三角喇叭共振腔 21 個單音頻率的響度紀錄表(固定距離：1m)

頻率 (Hz)	262	294	330	349	392	440	494	523	587	659	698	784	880	988	1046	1175	1318	1397	1568	1760	1976
響度 (dB)	71.9	77.8	81.8	86.7	93.0	91.4	90.9	86.1	74.4	84.7	83.7	86.3	87.6	93.1	87.9	85.9	83.9	90.0	91.3	83.5	86.2
標準差 (dB)	0.6	1.0	1.5	1.0	0.3	0.4	1.1	1.0	0.5	0.8	0.3	0.5	0.4	0.4	0.6	0.1	0.1	0.1	1.0	1.1	1.8

表 8-7 橢圓喇叭共振腔 21 個單音頻率的響度紀錄表(固定距離：1m)

頻率 (Hz)	262	294	330	349	392	440	494	523	587	659	698	784	880	988	1046	1175	1318	1397	1568	1760	1976
響度 (dB)	70.9	73.9	83.7	88.5	92.6	90.5	84.7	84.0	78.9	81.3	80.6	83.2	86.5	88.8	84.7	81.6	86.1	85.1	89.1	83.1	86.9
標準差 (dB)	0.7	0.9	0.9	0.4	0.8	0.3	0.5	0.7	1.5	0.4	0.2	0.5	0.6	1.0	0.9	0.6	0.2	0.6	1.2	0.2	0.1

表 8-8 窄頸喇叭共振腔 21 個單音頻率的響度紀錄表(固定距離：1m)

頻率 (Hz)	262	294	330	349	392	440	494	523	587	659	698	784	880	988	1046	1175	1318	1397	1568	1760	1976
響度 (dB)	74.7	79.2	83.8	84.0	89.3	90.9	91.2	89.4	80.3	84.3	84.2	86.9	88.3	92.3	86.9	84.1	87.7	89.5	91.7	86.2	87.9
標準差 (dB)	0.4	0.4	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.3	0.4	0.5	1.0	0.8	0.2	0.1	0.2	0.5	0.9	0.6	0.6	0.2	0.3

研究三 分析不同形狀喇叭共振腔造成的諧波數量差異

表 8-9 方形喇叭共振腔諧波數量統計表

頻率 數量	262	294	330	349	392	440	494	523	587	659	698	784	880	988	1046	1175	1318	1397	1568	1760	1976
奇次 諧波	5	1	5	1	3	1	5	2	5	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2
偶次 諧波	3	0	1	1	2	1	4	1	5	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1
合計	8	1	6	2	5	2	9	3	10	2	1	2	1	2	1	2	2	3	1	3	3

表 8-10 三角喇叭共振腔諧波數量統計表

頻率 數量	262	294	330	349	392	440	494	523	587	659	698	784	880	988	1046	1175	1318	1397	1568	1760	1976
奇次 諧波	1	1	4	9	8	6	5	5	5	4	2	2	2	1	1	1	1	1	2	1	
偶次 諧波	0	1	5	8	7	6	5	5	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
合計	1	2	9	17	15	12	10	10	7	3	3	2	1	1	1	1	1	1	3	1	

表 8-11 橢圓喇叭共振腔諧波數量統計表

頻率 數量	262	294	330	349	392	440	494	523	587	659	698	784	880	988	1046	1175	1318	1397	1568	1760	1976
奇次 諧波	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	
偶次 諧波	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	
合計	1	1	3	3	3	3	2	2	2	2	1	2	1	1	1	2	1	2	3	2	

表 8-12 窄頸喇叭共振腔諧波數量統計表

頻率 數量	262	294	330	349	392	440	494	523	587	659	698	784	880	988	1046	1175	1318	1397	1568	1760	1976
奇次 諧波	2	2	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
偶次 諧波	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	
合計	3	3	4	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	3	1	

研究四之一 喇叭共振腔內的聲音壓力可視化

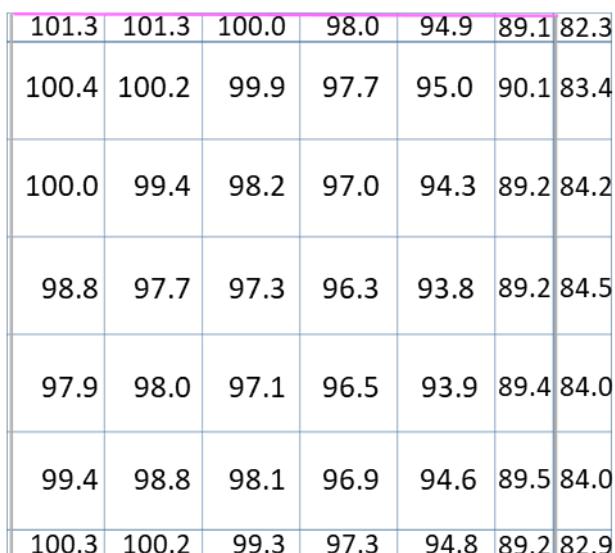


圖 8-1 方形喇叭共振腔聲壓分布圖

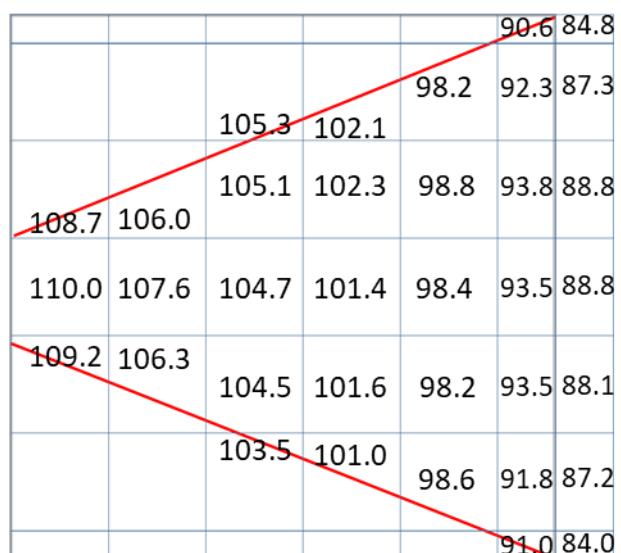


圖 8-2 三角喇叭共振腔聲壓分布圖

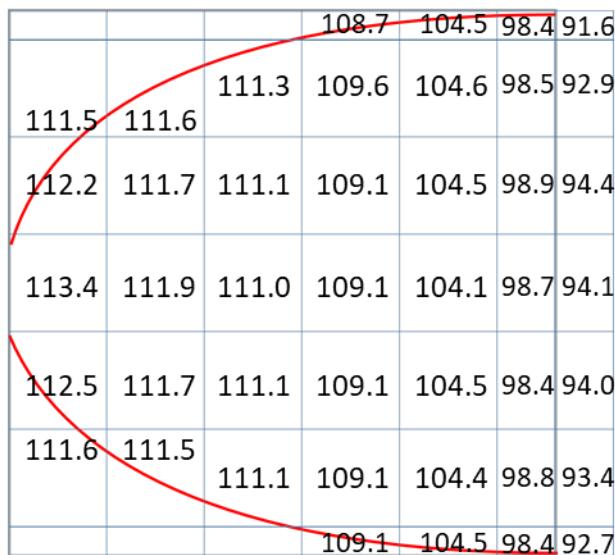


圖 8-3 橢圓喇叭共振腔聲壓分布圖

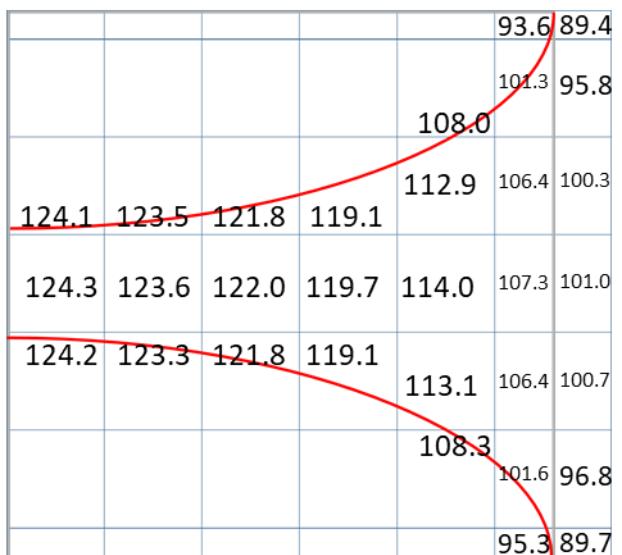


圖 8-4 窄頸喇叭共振腔聲壓分布圖

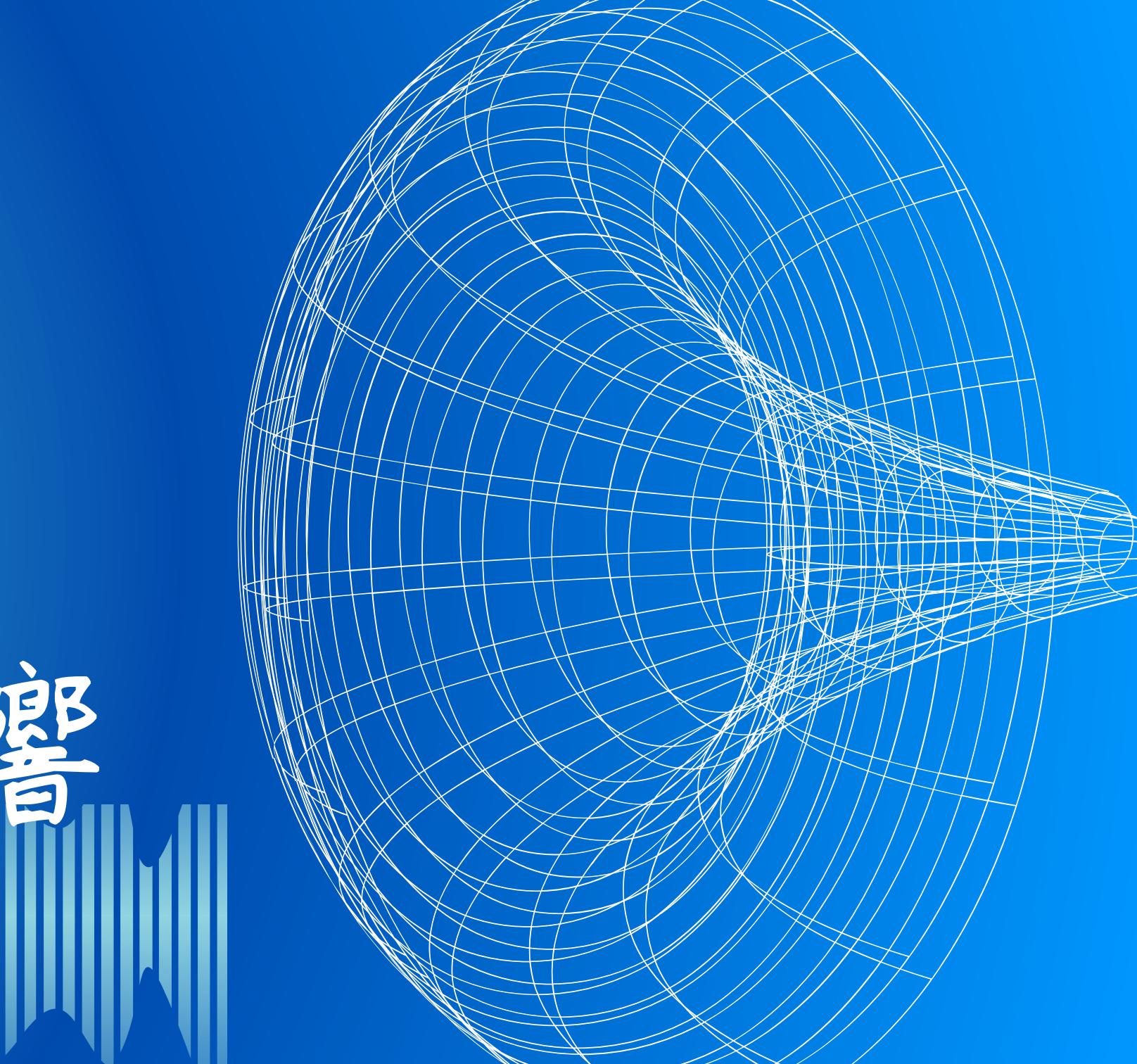
【評語】080119

該作品是探討號角喇叭對於聲音傳遞的影響。作者比較了幾種不同幾何形狀的號角曲線對聲音能量傳遞的強度分布以及距離。同時為了解釋該結果，他們也運用了各種不同的技巧來觀察號角在氣流與音波傳遞上所扮演的角色。例如以煙霧來觀察號角傳遞出的氣流變化，以及以水波代替音波觀察對波傳遞的干涉繞射現象。他們不只著重於應用層面的功效探討，也深入探討背後的物理機制。這樣的多角度切入使得該作品的成果非常的突出。是一個非常精彩的科展作品。

作品海報

響由形生

~喇叭狀共振腔對聲音表現的影響



摘要

本研究探討喇叭共振腔的波導形狀，對聲音傳播距離、響度和音色造成影響，我們依斜率變化自製窄頸、橢圓、三角喇叭共振腔進行探究，成功發現形狀影響聲音表現背後的物理關聯。研究結果如下：

- 1.喇叭狀設計會引導聲波能量更順暢往出口集中傳播，也會改變諧波數量造成音色變化。
- 2.窄頸喇叭響度增強效果最好，聲音傳最遠。
- 3.三角喇叭在中低音諧波太多，易產生雜音。
- 4.喇叭邊界的形狀會決定空氣對流速度，窄頸喇叭空氣流動最慢反而響度最高。
- 5.聲波遇到喇叭邊界後，產生的干涉會影響傳播距離與範圍：窄頸喇叭能量集中於中央軸線，傳播遠，具指向性；三角喇叭兼顧傳播範圍和強度；橢圓喇叭能量均勻散佈腔體，傳播範圍最廣但強度不足。

壹、研究動機

在上音樂課時，老師播放許多管樂器的吹奏影片，我們發現有些樂器末端會加上喇叭狀的開口構造，仔細一看，這些構造的形狀其實都不一樣，這令我們感到好奇，為什麼要設計這種一端小一端大的開口來引導聲音呢？於是進一步思考：聲波在喇叭開口裡面發生了什麼事？這樣子的共振腔構造是單純放大音量，還是也會改變音頻和音色呢？我們決定進行一連串的研究，解開心中的疑惑。

貳、文獻探討

一、發聲體開口形狀的歸納及分類

表2-1 發聲體開口形狀歸納表

形狀	實驗組(喇叭狀共振腔)			對照組
	三角形	橢圓形	窄頸形	方形
斜率	斜率不變 斜率 $\neq 0$	斜率遞減	斜率遞增	斜率 = 0
截面形狀				
發聲體圖示	加油棒	銅鐘	長號	音叉 音箱

二、聲音為何會被增加或減弱？

(一)共振效應

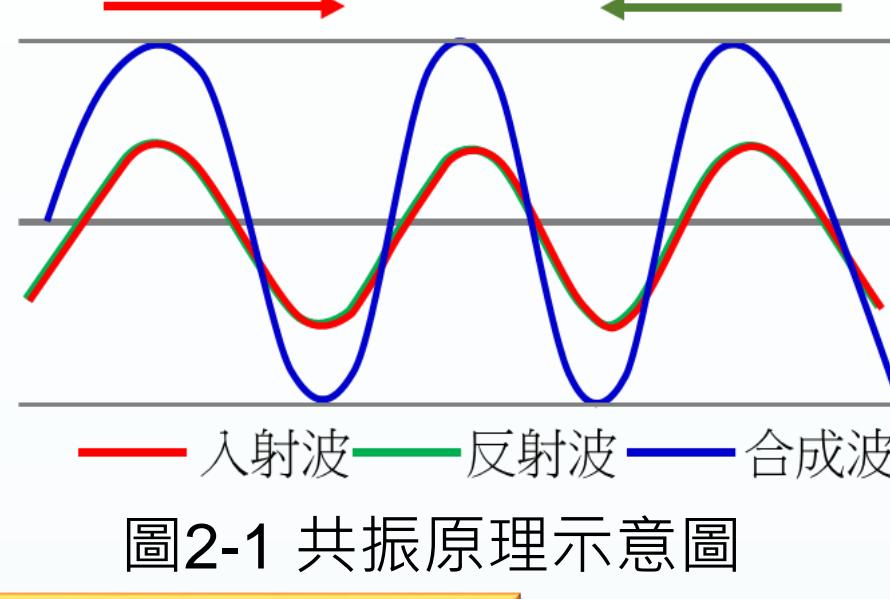


圖2-1 共振原理示意圖

(二)反平方定律

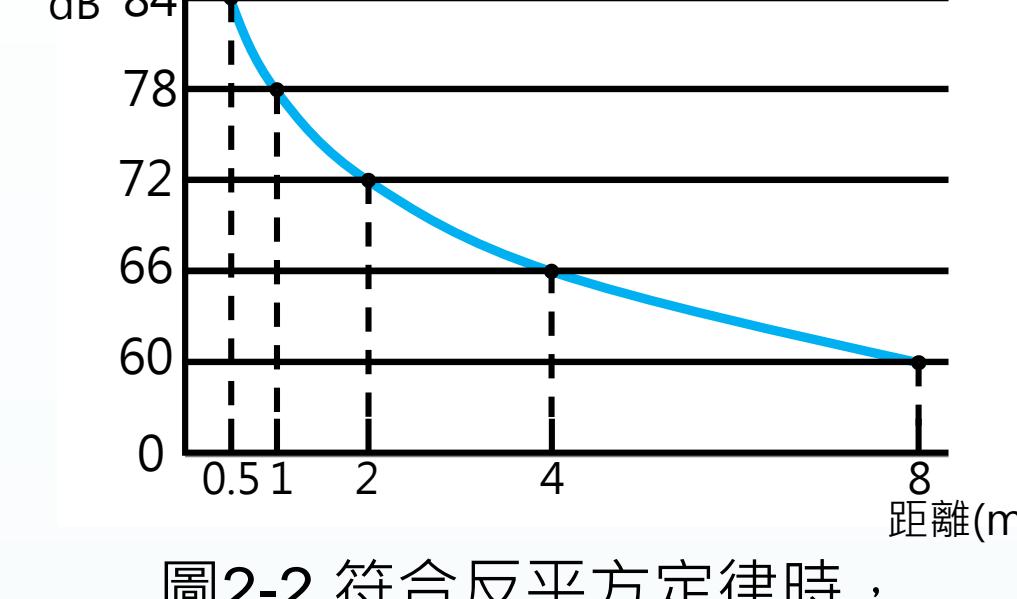


圖2-2 符合反平方定律時，距離和聲壓的關係

三、共振腔頻率

(一)閉口管的發聲原理及駐波振動模式

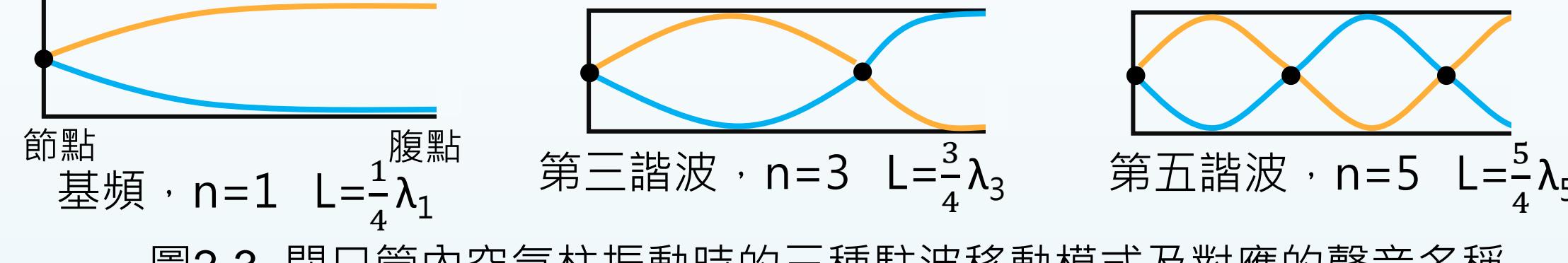


圖2-3 閉口管內空氣柱振動時的三種駐波移動模式及對應的聲音名稱

(二)計算不同溫度時的共振頻率

$$\text{共振頻率公式} : f_n = \frac{n \cdot v}{4L} = \frac{n(331 + 0.6T)}{4L}$$

n 為奇數，1,3,5...
 v ：聲速(m/s)
 L ：管長(m)
 T ：攝氏溫度($^{\circ}\text{C}$)

四、從聲音三要素定義聲音表現

(一)響度：聲音的大小，響度的單位為分貝(dB)。本研究除了測量不同頻率的響度，也在不同距離測量直線的傳播響度。

(二)音色：聲音的特色，基頻是聲音的最低頻率，諧波的組合決定音色。本研究找出單音頻的基頻和諧波數量，來分析音色差異。

(三)音調：聲音的振動頻率，單位為赫茲(Hz)。本研究使用藍芽喇叭的音調是依數位音訊信號產生，不受外部箱體影響，因此沒有當作聲音表現的指標。

參、研究目的

- (一)探討不同形狀喇叭共振腔的聲音傳播距離
- (二)比較不同形狀喇叭共振腔聲音響度的增強程度
- (三)分析不同形狀喇叭共振腔造成的諧波數量差異
- (四)聲壓通過不同喇叭共振腔的可視化探討

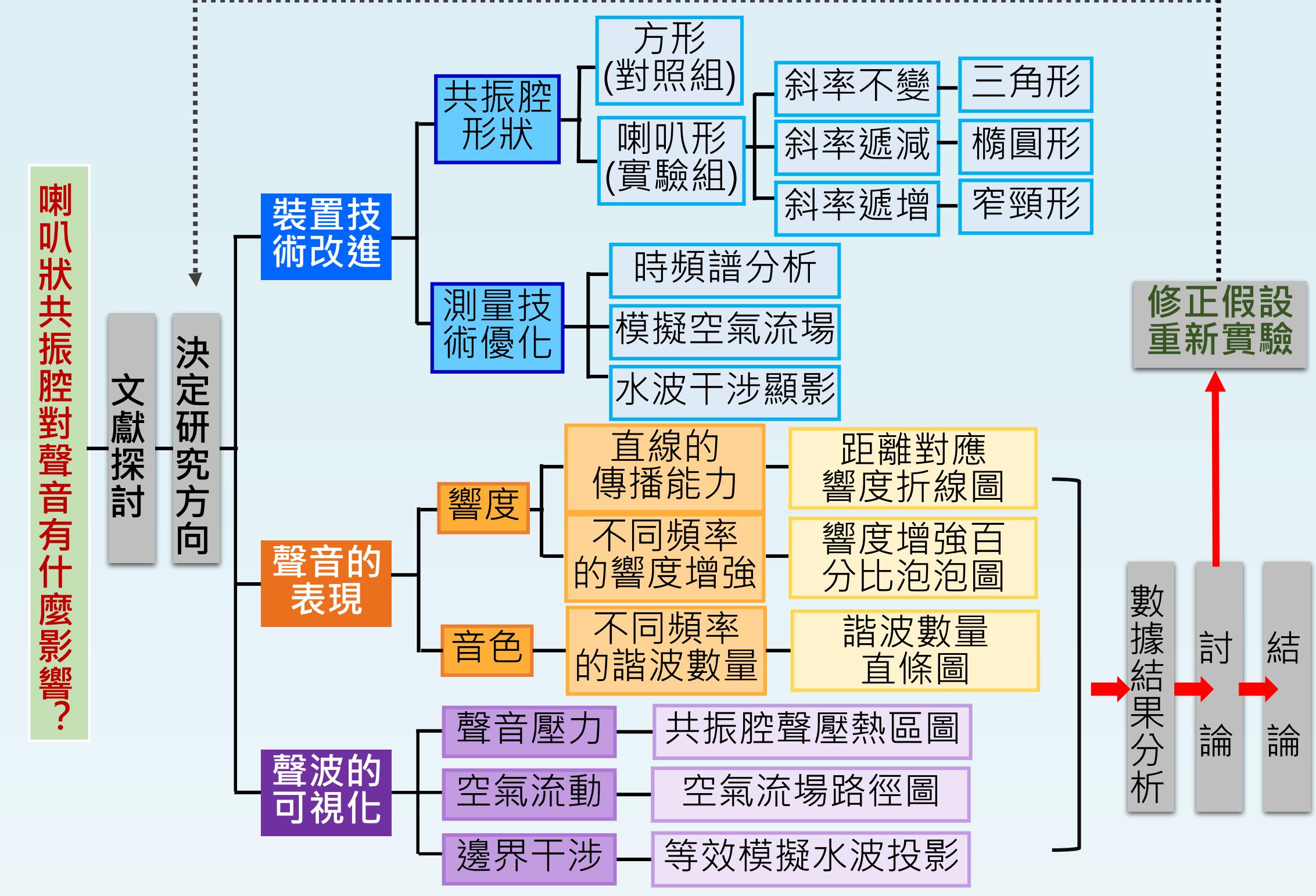
1.喇叭共振腔內的聲音壓力可視化

2.喇叭共振腔內的空氣流動可視化

3.喇叭共振腔造成的聲波干涉情形可視化

肆、研究過程與方法

一、研究架構圖



二、自製裝置介紹

(一)自製喇叭狀共振腔

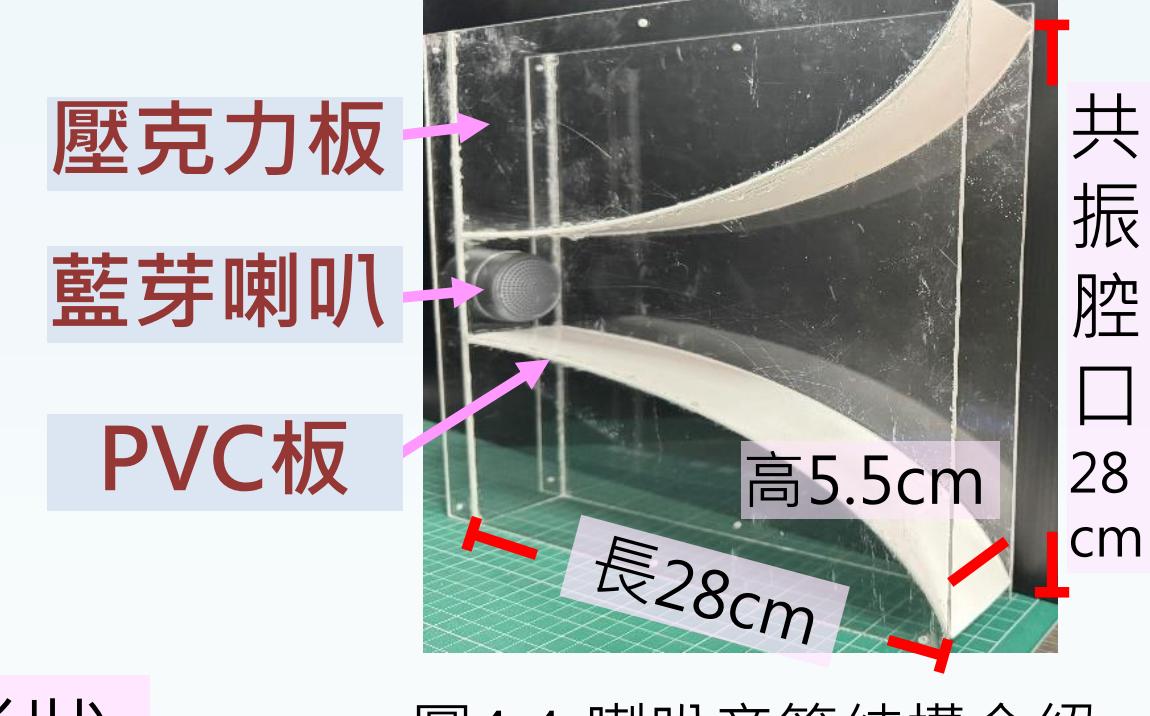


圖4-1 喇叭音箱結構介紹

(二)自製無響室

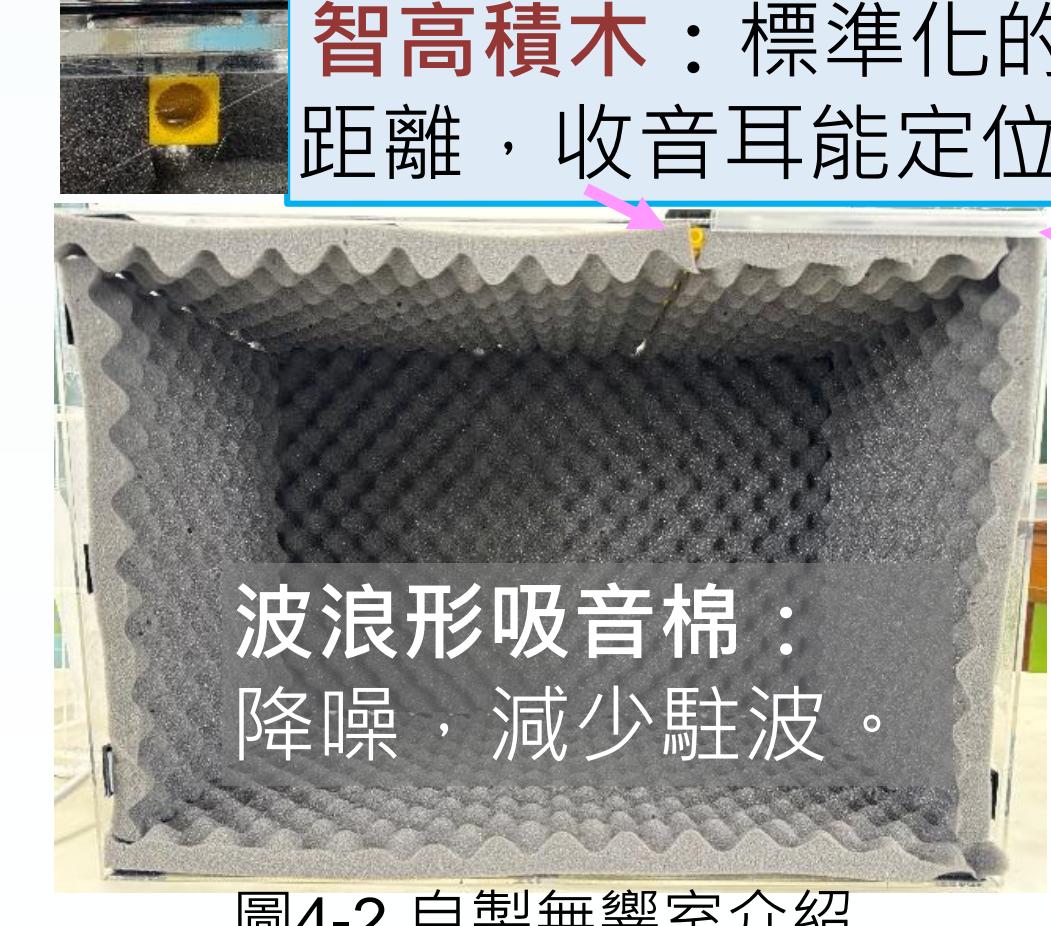


圖4-2 自製無響室介紹

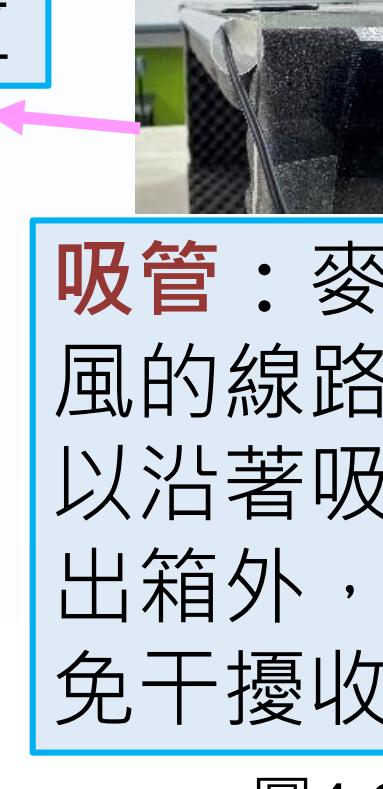


圖4-3 人工收音耳介紹

(四)自製水波投影槽

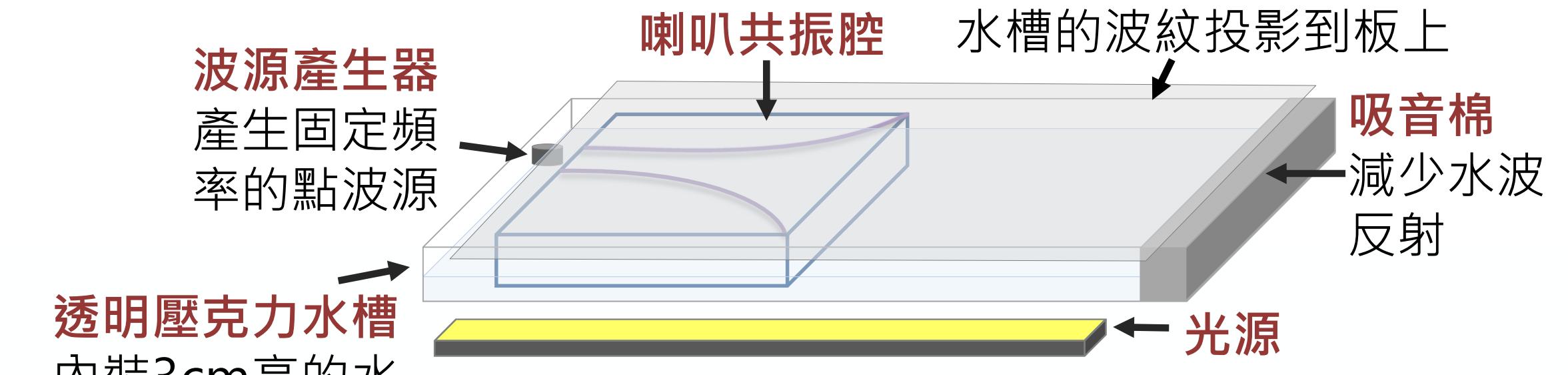


圖4-4 自製水波投影槽介紹

三、研究方法

(一)探討不同共振腔的聲音直線傳播距離

在室外，每隔5m設置一測量點，共11個。腳架裝雷射筆定位。平板連結藍芽喇叭，播放共振頻率，用分貝計測得響度。



圖4-5 室外實驗

圖4-6 裝置位置示意圖

(二)不同共振腔內聲音頻率對應響度的變化

在距離開口1公尺的位置，播C大調從低音DO到高音Si三個八度音，共21個單音頻，測量有共振腔及無共振腔的響度。

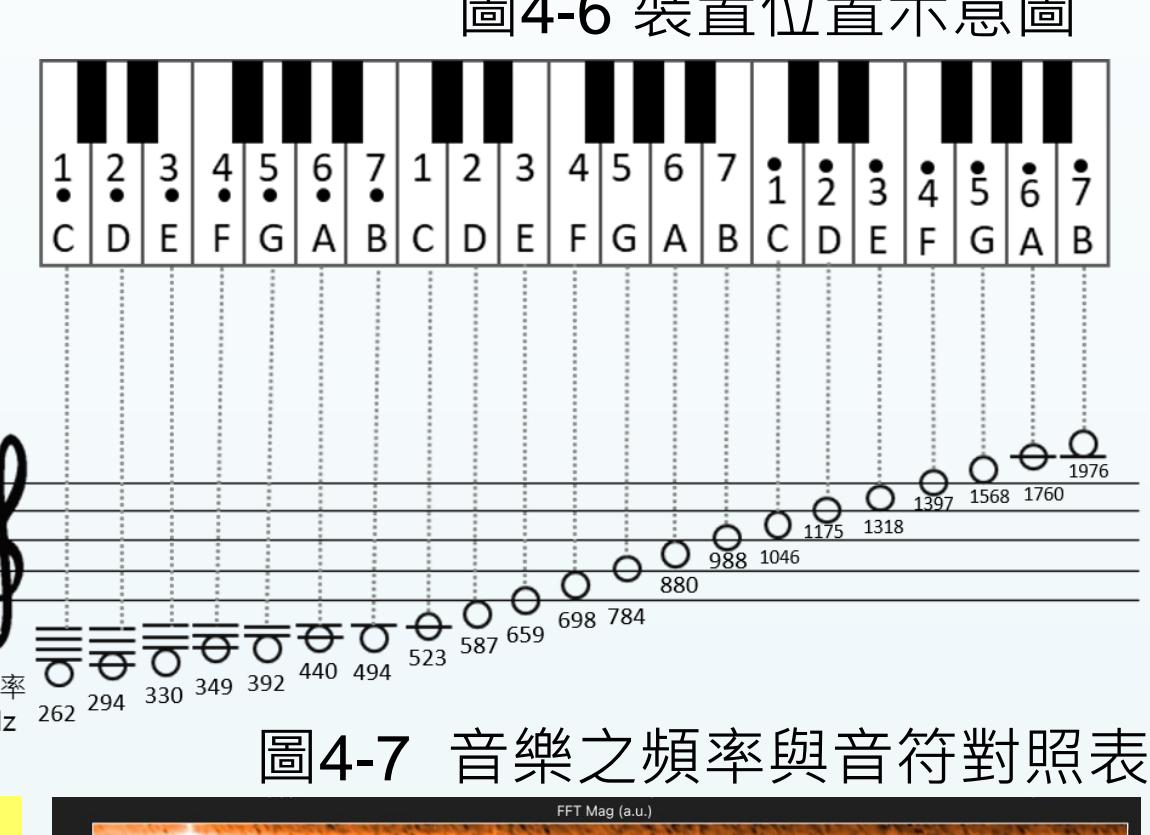


圖4-7 音樂之頻率與音符對照表

(三)測量不同共振腔的諧波數量

人工收音耳放進自製無響室收音，固定量測位置，播21個單音頻，使用phyphox APP的聲譜功能，分析時頻譜，並計算諧波數量。



圖4-8 喇叭共振腔的基頻和諧波

(四)聲壓通過不同共振腔的可視化探討

1.喇叭共振腔內的聲音壓力可視化

固定室溫，播放共振頻率。共振腔標示座標做為測量定位，每個區域中央測量5次響度。



圖4-9 共振腔座標

2.喇叭共振腔內的空氣流動可視化

以煙霧機放出定量的煙霧保留在共振腔裡。固定室溫，播放共振頻率，再釋放出煙。接著用手機的慢速攝影記錄煙霧消散的過程。

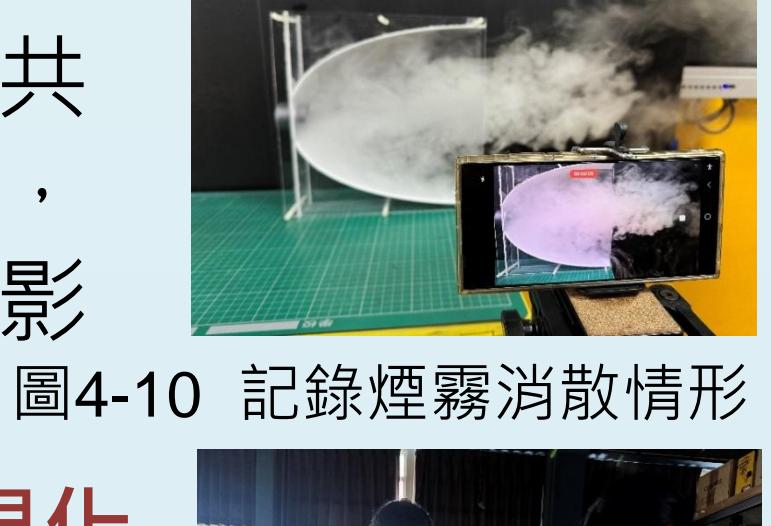


圖4-10 記錄煙霧消散情形

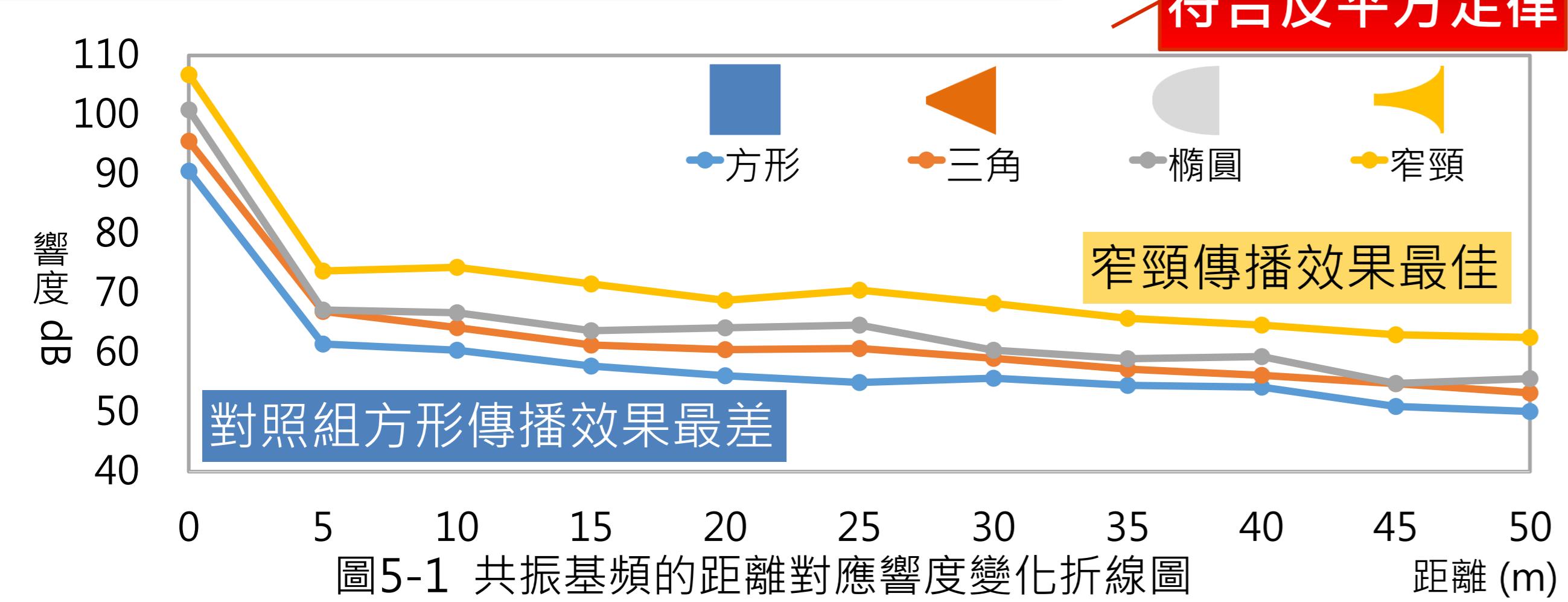
3.喇叭共振腔造成的聲波干涉情形可視化

將共振腔置入自製水波槽內，用波源產生器固定頻率製造圓形波，投影在白色HIPS板，再以手機攝影。

圖4-11 操作水波投影裝置

伍、研究結果

一、不同形狀喇叭共振腔的聲音傳播距離



二、不同形狀喇叭共振腔聲音響度的增強程度

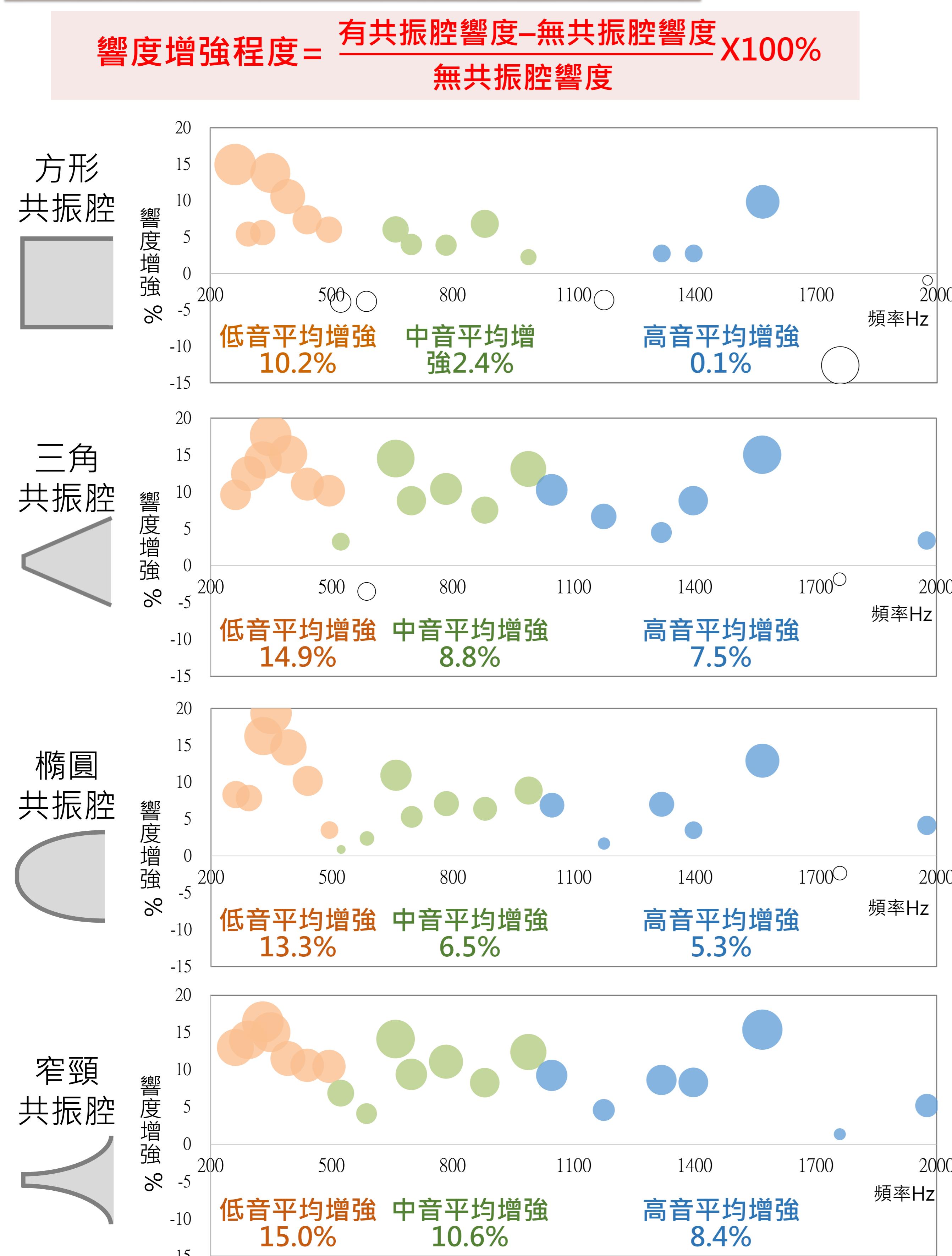


圖5-2 不同形狀共振腔響度增強百分比泡泡圖

三、不同形狀喇叭共振腔造成的諧波數量差異

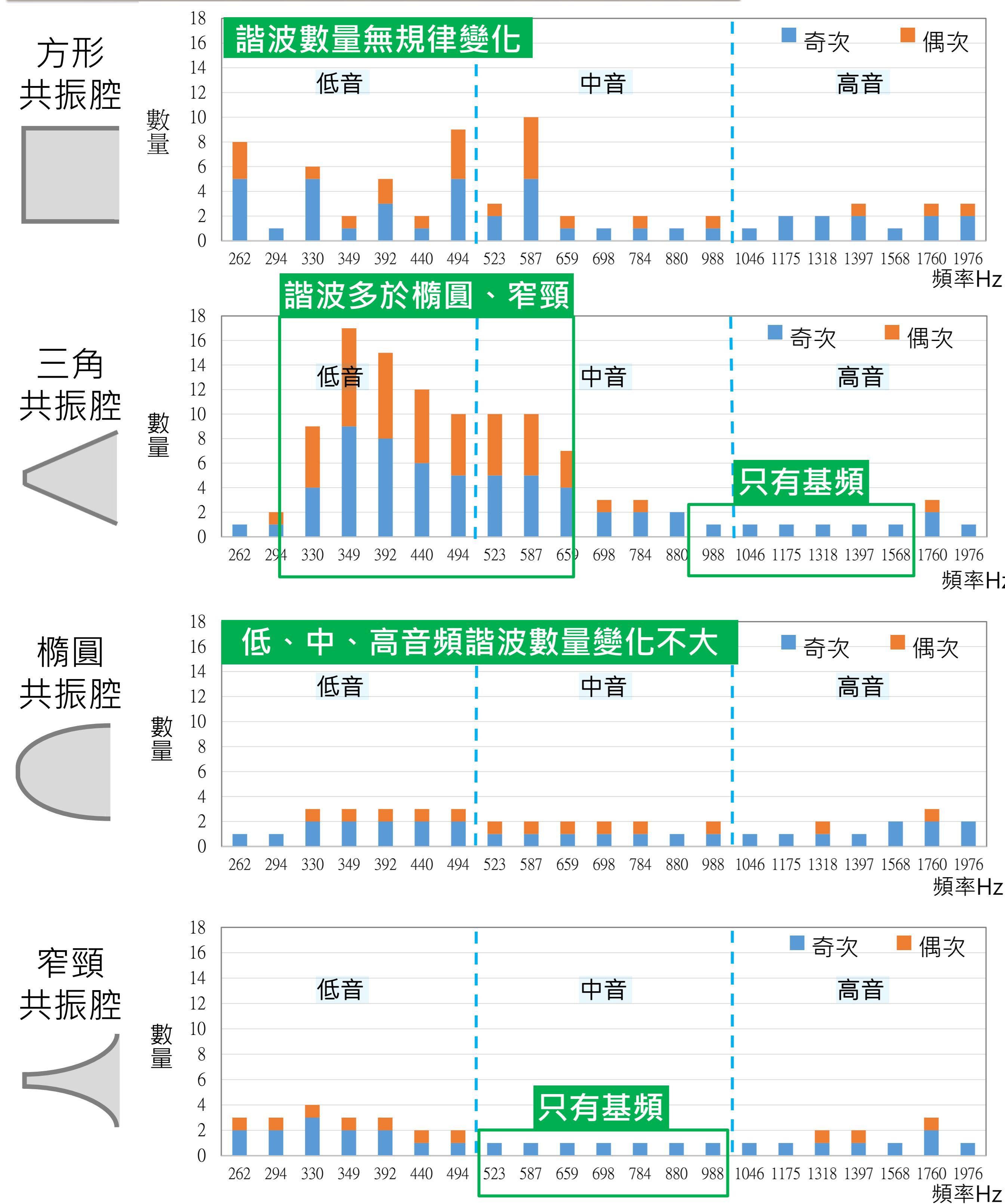


圖5-3 不同形狀共振腔諧波數量直條圖

四、聲壓通過不同喇叭共振腔的可視化探討

(一)喇叭共振腔內的聲音壓力可視化

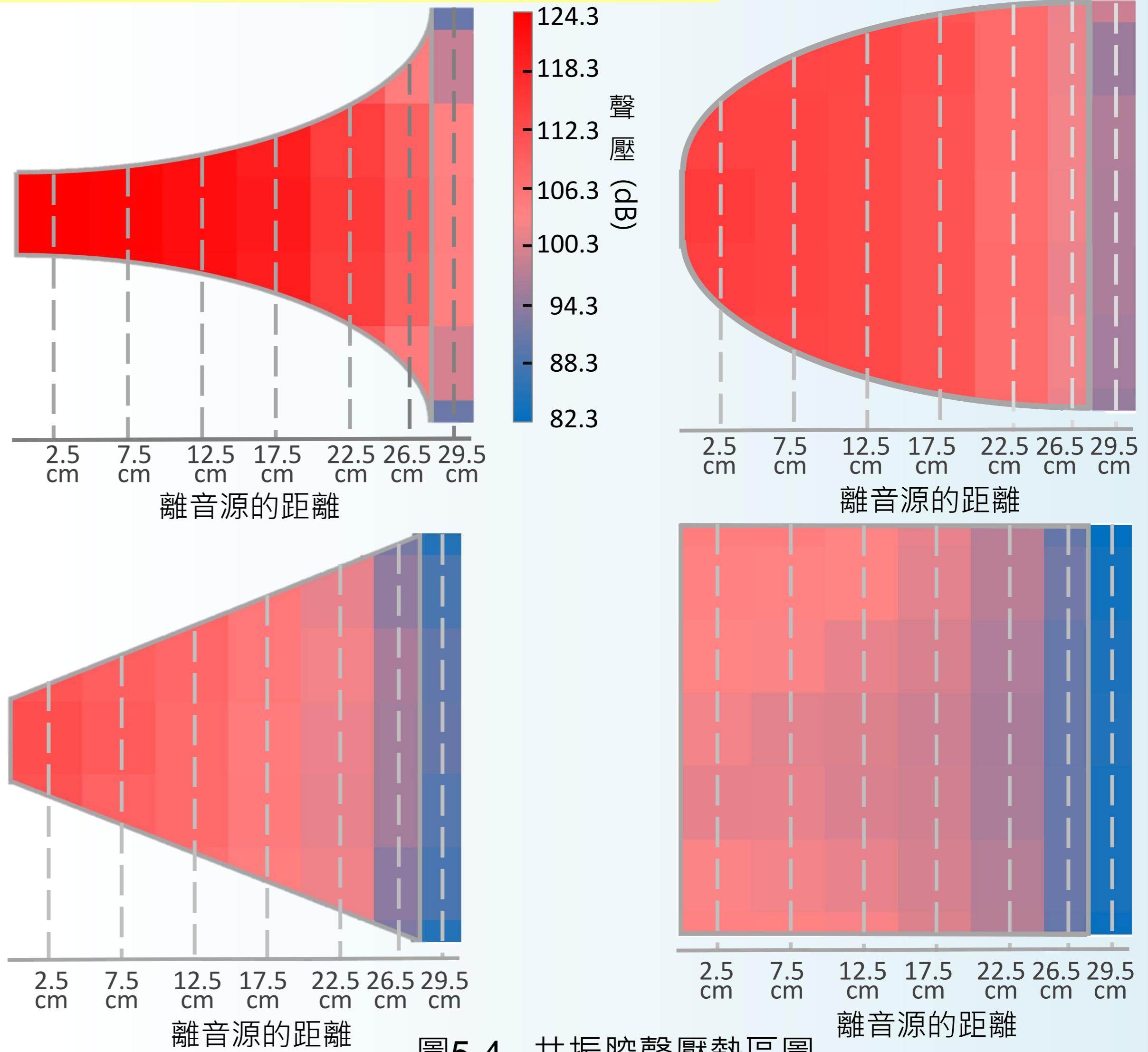
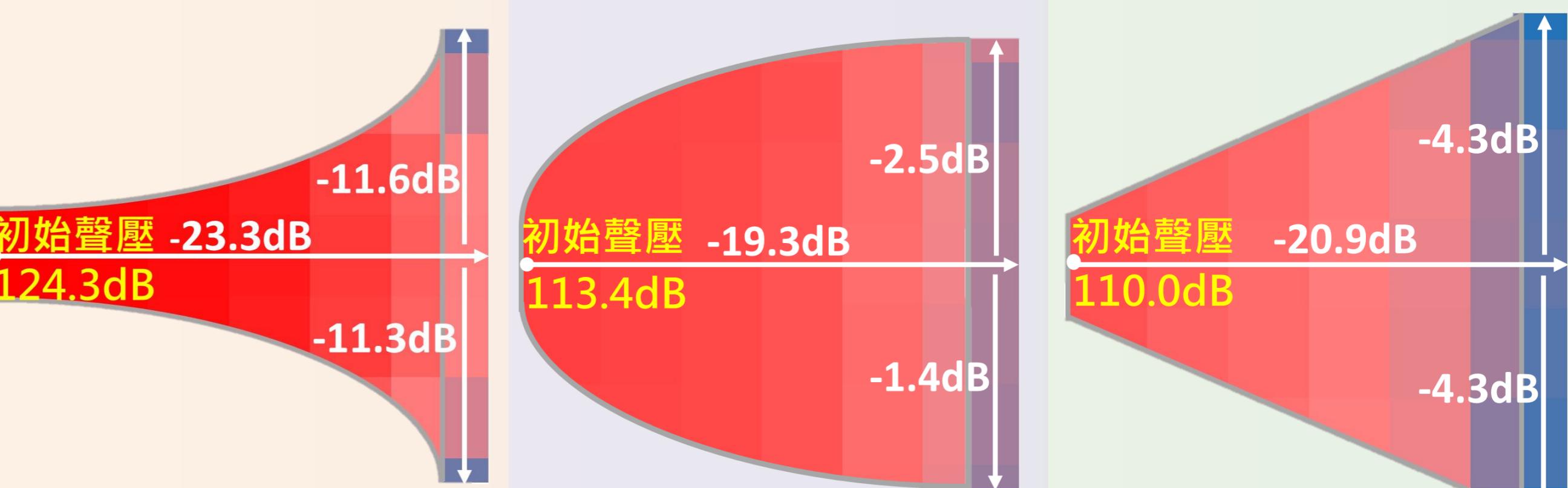


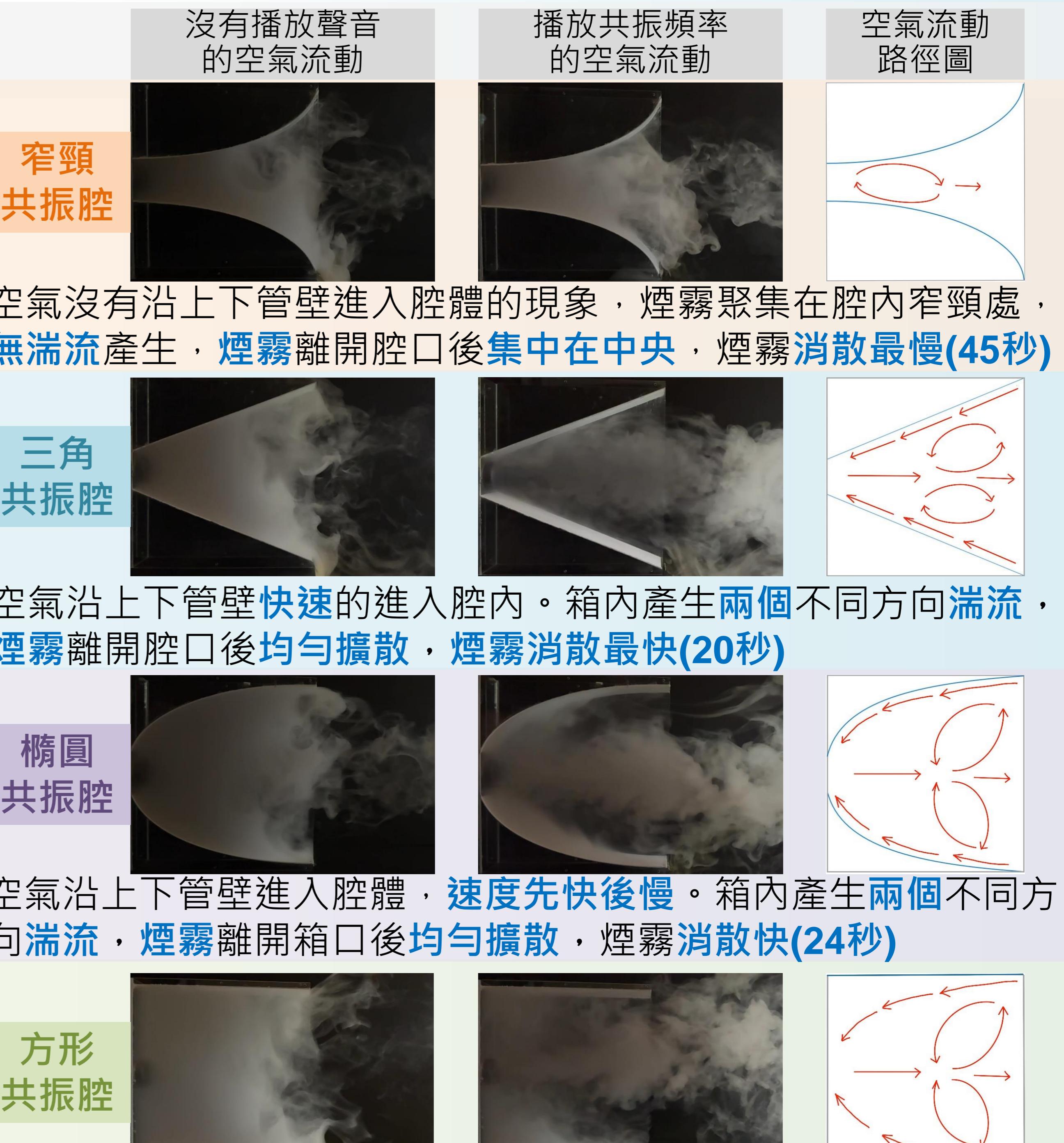
圖5-4 共振腔聲壓熱區圖



初始聲壓最強，開口會出現中央強兩邊弱的聲壓集中。
初始聲壓次之，開口聲壓分布均勻。
初始聲壓最小，開口聲壓略往中央集中。

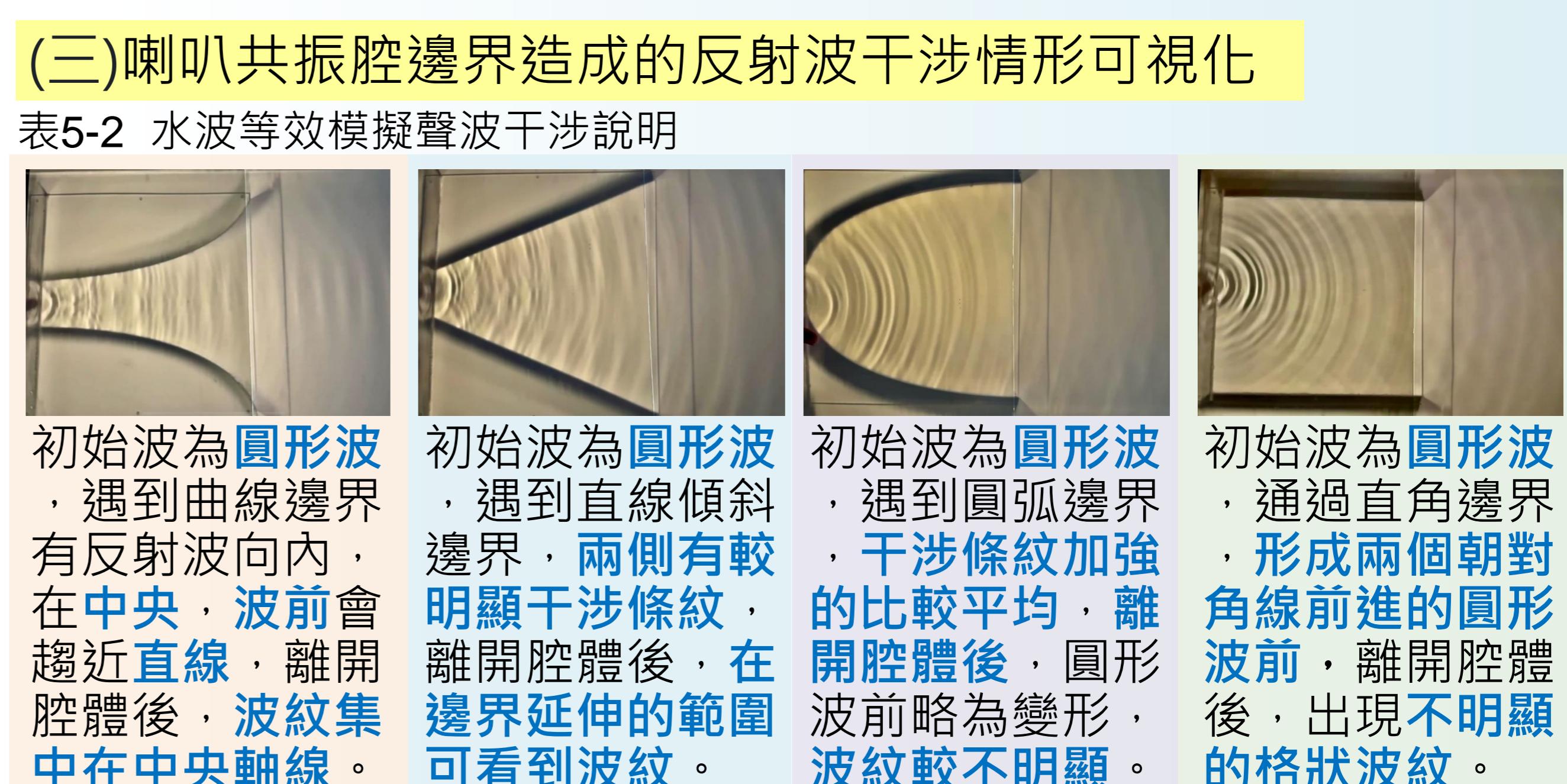
(二)喇叭共振腔內的空氣流動可視化

表5-1 四種共振腔的空氣流動狀況整理



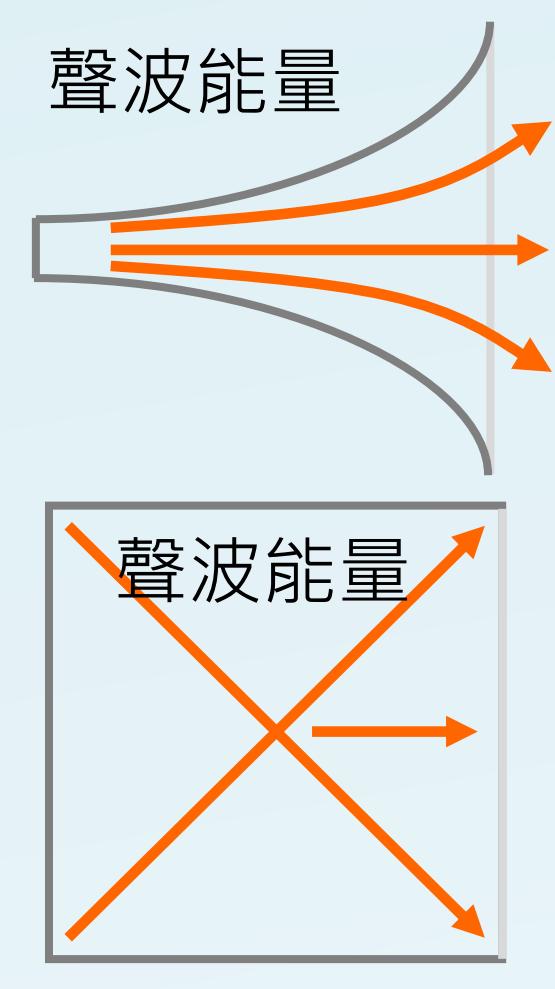
(三)喇叭共振腔邊界造成的反射波干涉情形可視化

表5-2 水波等效模擬聲波干涉說明



六、討論

一、喇叭開口對聲波傳導的影響



喇叭狀的波導設計，聲量和傳播距離明顯高於相同條件的對照組方形共振腔。喇叭狀波導藉由漸擴的邊界設計，能引導聲波能量往出口方向集中傳播，減少反射與損耗。方形共振腔中，聲波因平行邊界的反射讓聲波產生二個次波源，能量不集中也耗損較多。

圖6-1 喇叭狀和方形波導能量引導狀況整理圖

二、不同喇叭形狀波導產生的響度差異

(一)形狀造成的空氣流動影響聲量大小

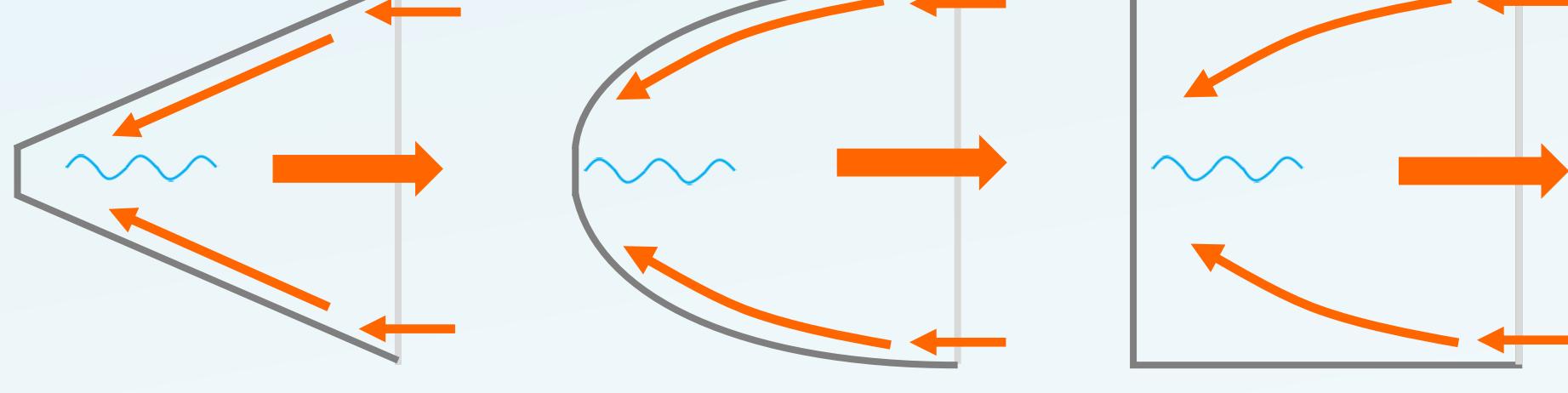
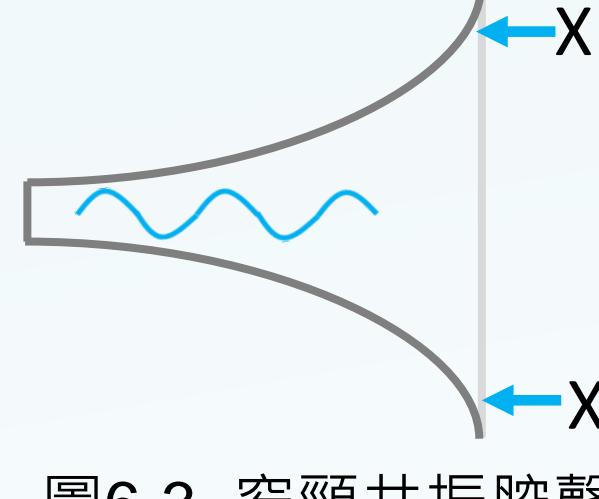


圖6-2 三角、橢圓、方形共振腔聲能耗損轉為空氣動能示意圖

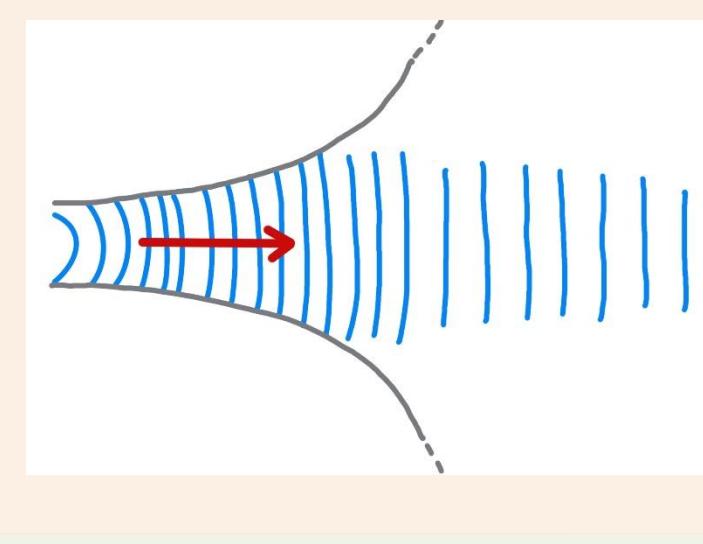
三個共振腔的聲音播放後，腔體內外壓力差會讓空氣對流，讓部分聲波能量不再以壓縮/膨脹方式傳播，而是轉換成空氣的質量流動，最後導致測得的聲壓變小。(圖6-2)



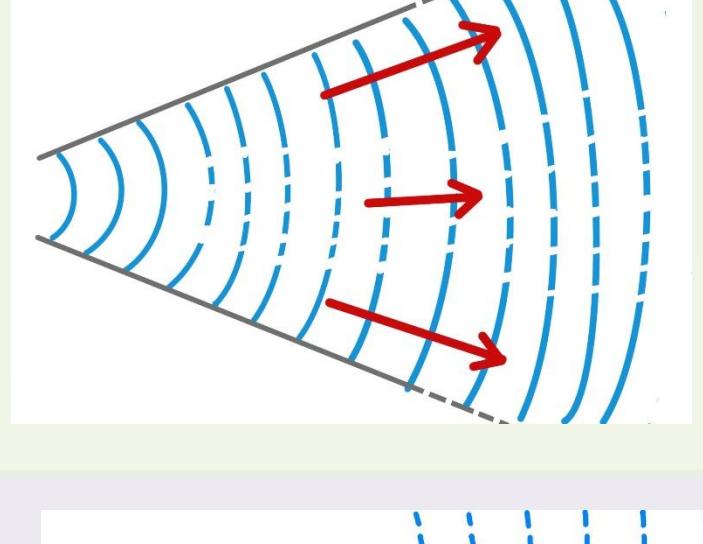
窄頸共振腔因形狀，空氣不易產生對流，沒有形成往外噴發的流場，聲能耗損轉成空氣動能的現象不明顯，所以在開口處測得的音量較高。(圖6-3)

圖6-3 窄頸共振腔聲能耗損轉為空氣動能示意圖

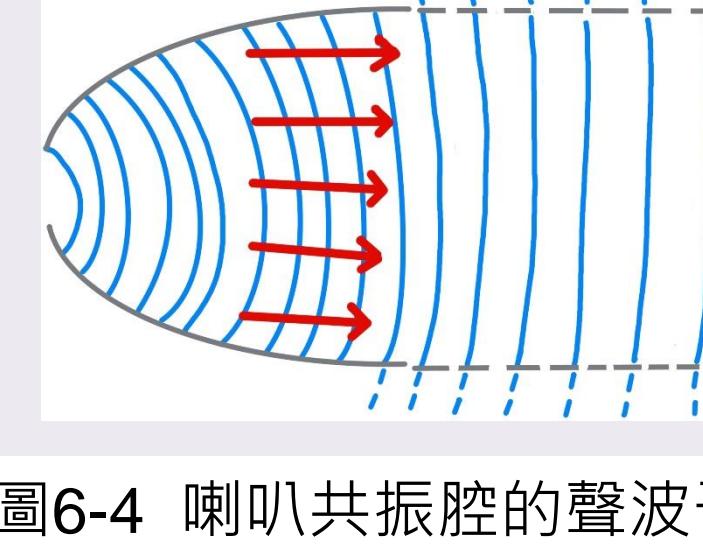
(二)形狀造成的聲波干涉會影響傳播距離與範圍



窄頸喇叭的指數型漸增邊界，讓波在通道內形成類似直線波的平行波前，能量明顯集中在中央軸線方向，波幅穩定傳播較遠，是指向性最高的波導設計。



三角喇叭的直線斜邊擴張邊界，讓圓形波前可以順利的由窄處向外發散，能量集中但兩側略大於中央軸線，可以兼顧傳播範圍和強度的波導設計。

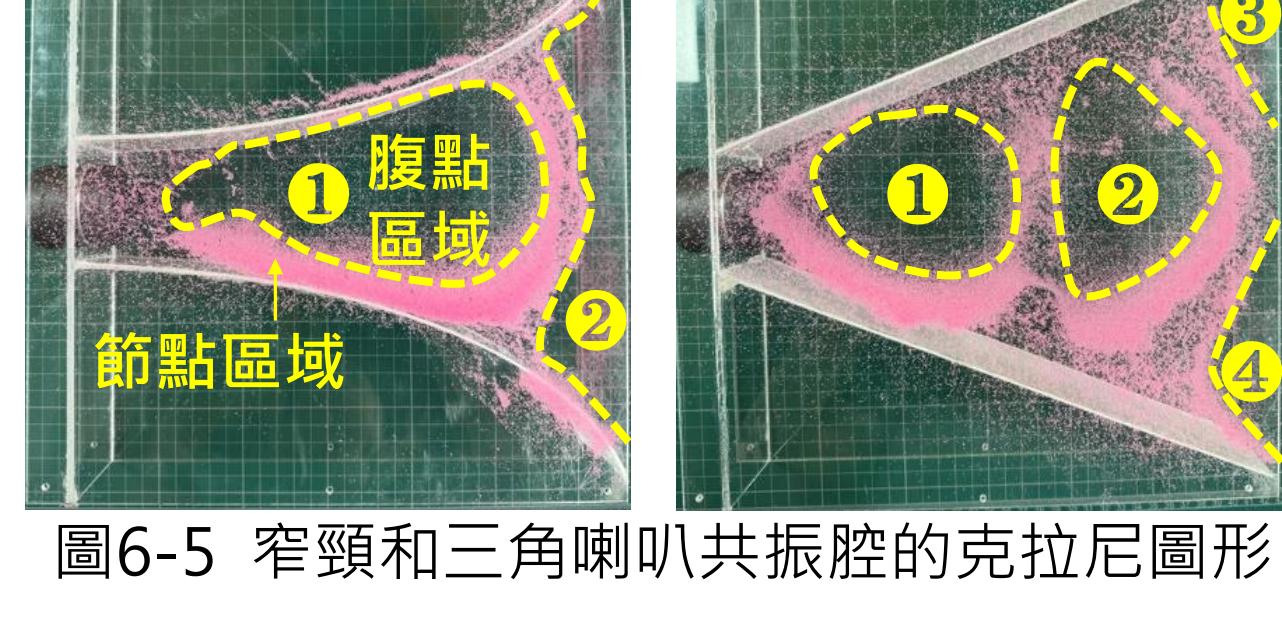


橢圓喇叭的類圓形曲面邊界，讓圓形波前迅速向外擴展，能量均勻散佈整個腔體，擴散角度大，是傳播範圍最廣，但傳播強度較不足的波導設計。

圖6-4 喇叭共振腔的聲波干涉情形整理圖

三、不同喇叭形狀波導產生的音色差異

(一)三角喇叭為何容易產生比較多諧波



三角喇叭的駐波節點密度高於窄頸喇叭，出現頻率更高更豐富的克拉尼圖形。顯示三角喇叭的形狀容易激發更多諧波產生。

推測是因為三角喇叭的直線漸擴邊界易產生反射，聲波在兩邊界間反射後干涉，在多處形成節點與腹點導致。

- 一、共振腔形狀會影響聲音傳播距離，喇叭狀共振腔效果優於對照組方形共振腔，其中以斜率遞增的窄頸喇叭共振腔傳播能力最強。
- 二、共振腔形狀會影響聲音響度的增強程度，喇叭狀共振腔在中音和高音的增強效果優於對照組。其中窄頸喇叭共振腔的響度增強最多。
- 三、共振腔形狀會影響諧波數量，進而造成音色差異，三角喇叭共振腔的諧波數在中低音大幅增加，易產生雜音。
- 四、喇叭共振腔的形狀會影響腔內空氣流動和聲波干涉情形，進而造成腔內聲壓分布差異。

- (一)窄頸喇叭共振腔初始聲壓最強，在開口處會有中央強、兩邊弱的聲壓集中現象；橢圓喇叭共振腔音源至出口處衰退最少，開口聲壓分布均勻；三角喇叭共振腔初始聲壓最小，開口聲壓略往中央集中。
- (二)聲音播放後，喇叭共振腔內的空氣會因為聲壓而產生規律的流動現象，邊界的形狀會決定空氣對流速度，窄頸流速最慢，橢圓次之，三角最快，空氣流動越慢反而響度越高，空氣流動越快響度越低。
- (三)聲波遇到喇叭共振腔邊界後，產生的干涉會影響傳播方向，傳播較遠，具有指向性；三角的邊界，讓聲波可以順利向外發散，兼顧傳播範圍和強度；橢圓的邊界，讓能量均勻散佈在整個腔體，傳播範圍最廣，但傳播強度較不足。

捌、附錄

圖表出處索引

指導教師：圖4-4、圖4-5、圖4-6、圖4-10、圖4-11、表5-2、圖6-5、圖6-13
作 者：表2-1、圖4-1、圖4-2、圖4-3、圖4-7、圖4-8、圖4-9、圖5-1
圖5-2、圖5-3、圖5-4、圖5-5、表5-1、圖6-1、圖6-2、圖6-3
圖6-4、圖6-6、圖6-7、圖6-8、圖6-9、圖6-10、圖6-11、圖6-12

(二)發現共振腔延時現象

分析諧波時發現，當單音在設定播放的四秒時間結束後，在時頻譜上似乎會有延長的軌跡。比對四種共振腔的21個音，不同共振腔延長時間並不相同。(圖6-6)

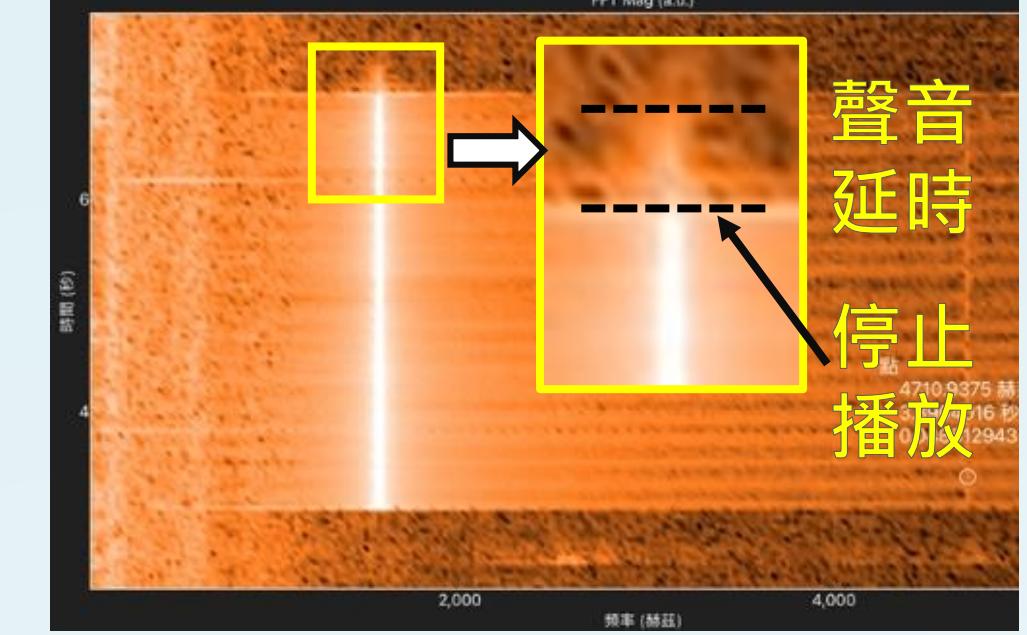


圖6-6 單音頻的聲音延時現象

播放給愛麗絲(Für Elise)前四小節，包含高音、中音和低音三種頻段，結果顯示也有聲音延時的現象發生。(圖6-7)

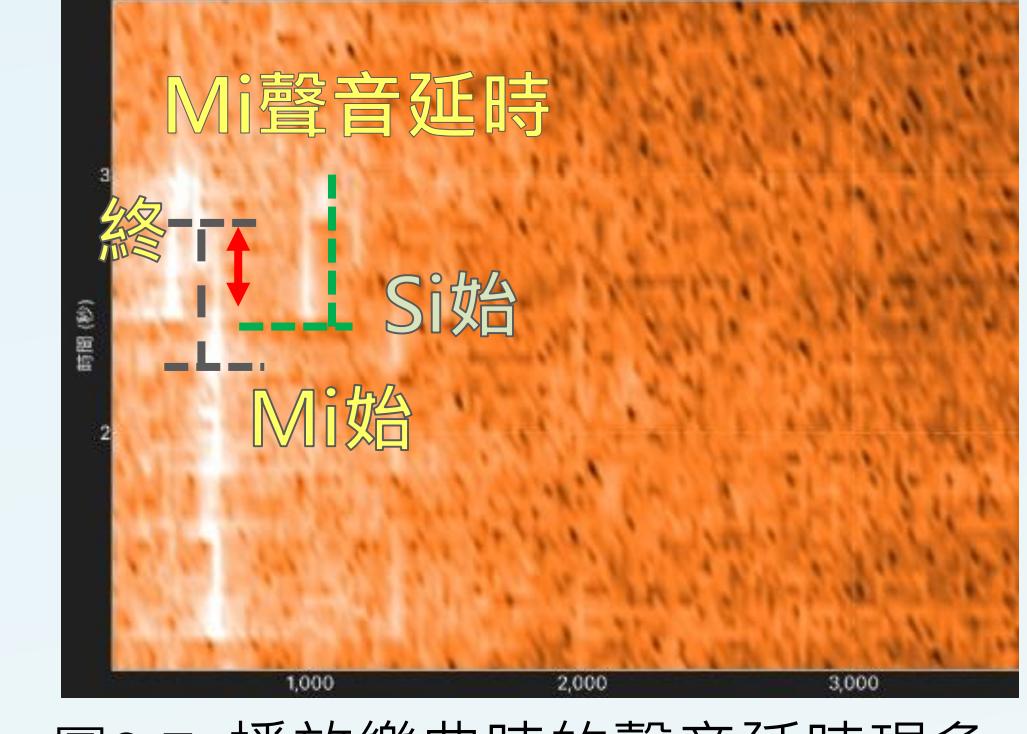


圖6-7 播放樂曲時的聲音延時現象

四、研究的誤差控制

(一)溫度對波速造成的影響

溫度變化造成的聲速差異納入研究考量，依據當時的溫度，透過波速公式轉換成適合共振腔長度的共振頻率，測得的響度數值都在平均數正負三個標準差範圍內。

(二)控制聲波在室內反射造成的誤差

室內易受到牆壁反射波影響諧波數據，本研究採用短距離量測並自製無響室和收音耳，成功過濾反射波造成的諧波干擾。

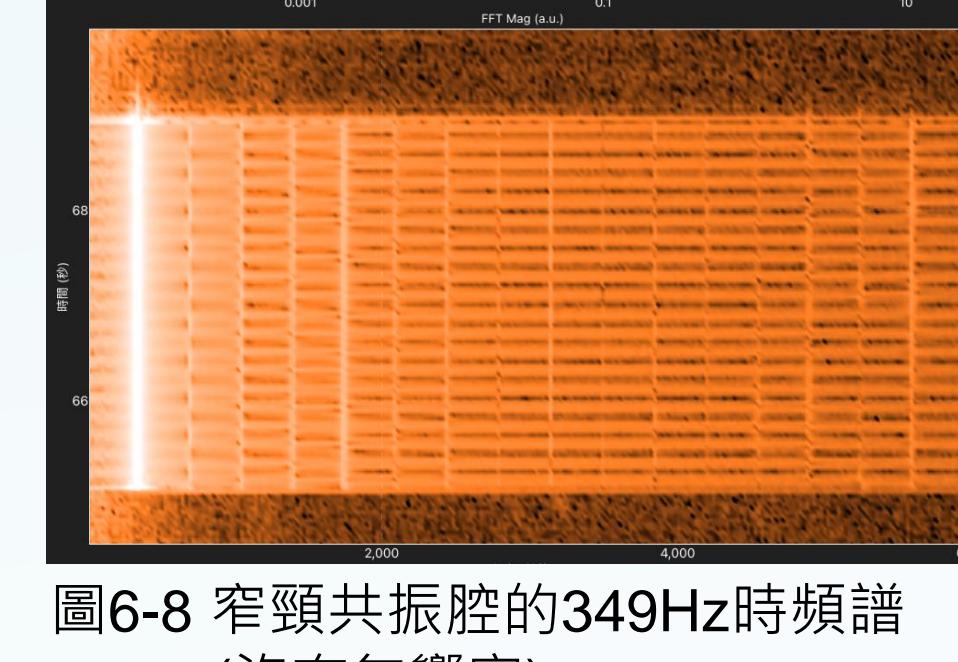


圖6-8 窄頸共振腔的349Hz時頻譜
(沒有無響室)

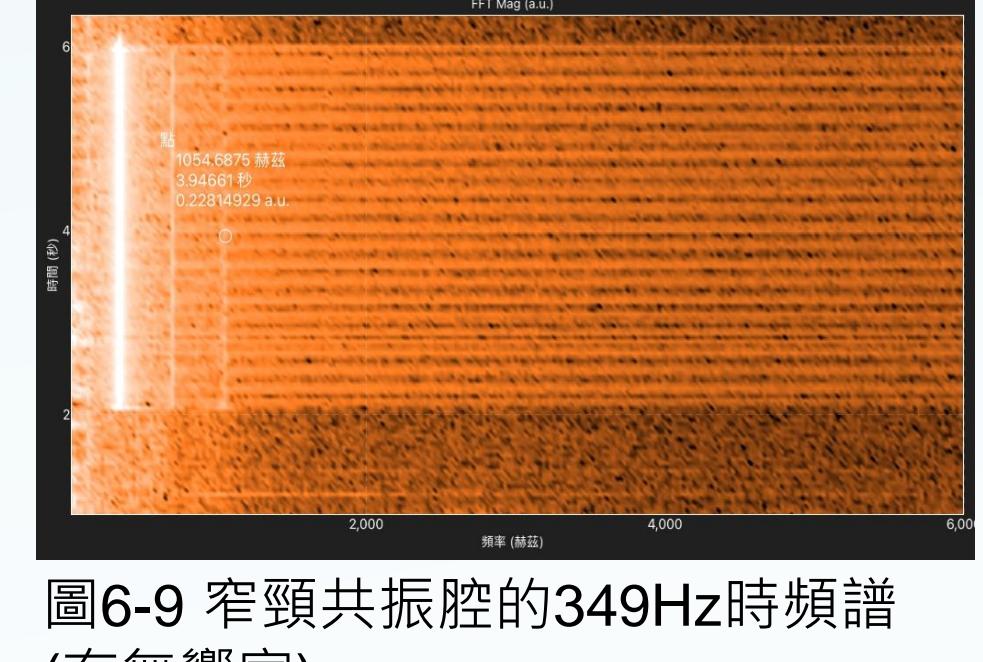


圖6-9 窄頸共振腔的349Hz時頻譜
(有無響室)

(三)共振腔窄邊的駐波是否會影響實驗結果

室內溫度30°C，腔體窄邊內長5.5cm，假設兩端板子為節點，產生的基頻駐波為1/2波長，換算後的共振頻率為3173Hz，遠高於本研究頻率使用的範圍(262Hz~1976Hz)，故忽略窄邊壓克力板產生駐波的影響。

聲速 $v=331+0.6\times30=349$ m/s 管長 $L=5.5$ cm = 0.055 m

波長 $\lambda=2L=2\times0.055=0.11$ m 共振頻率 $f=v/\lambda=349/0.11 \approx 3173$ Hz

五、未來展望與應用

(一)探討幾何形狀優化聲波聚焦效果

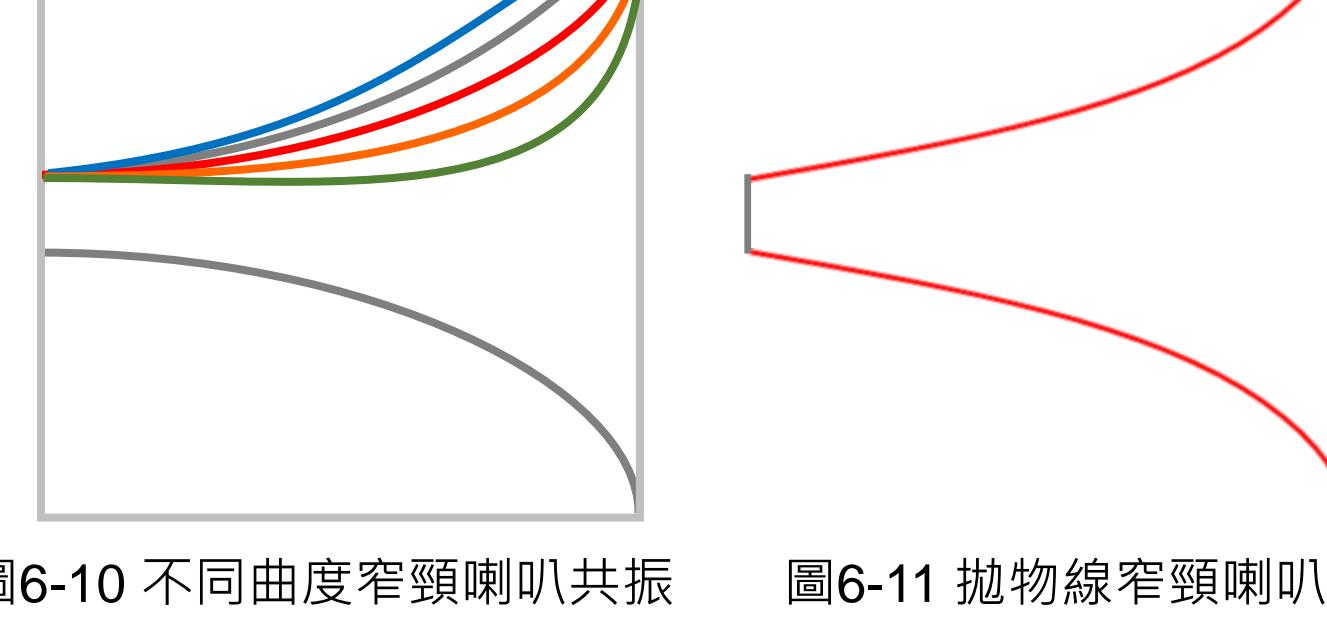


圖6-10 不同曲度窄頸喇叭共振

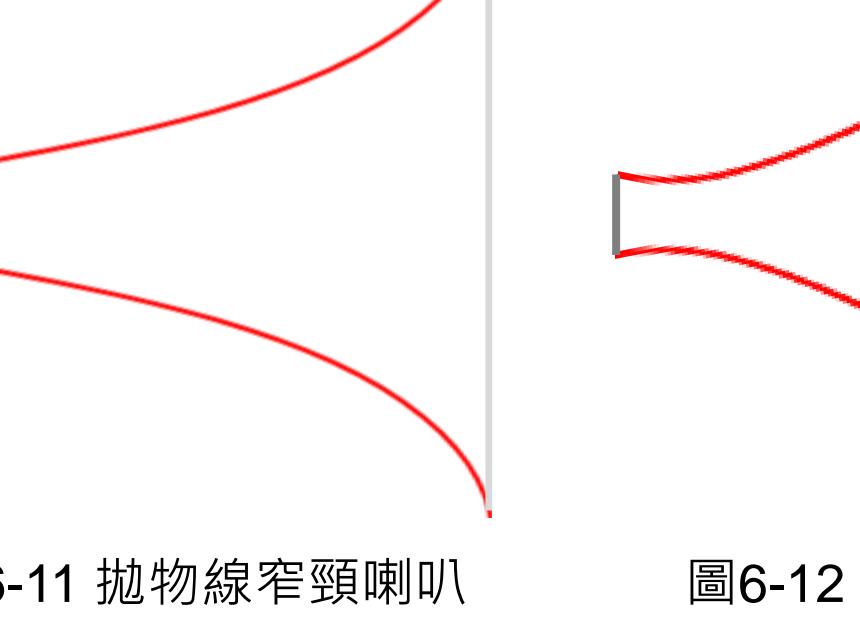


圖6-11 抛物線窄頸喇叭

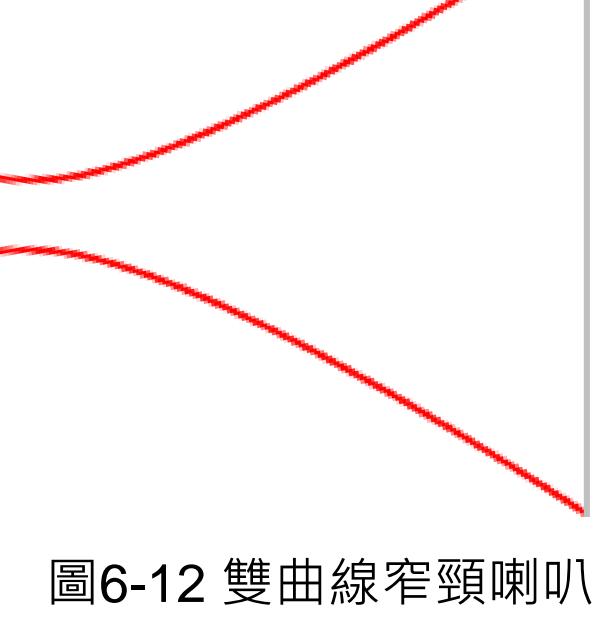


圖6-12 雙曲線窄頸喇叭

窄頸共振腔的波導設計，可以讓聲波有效集中，後續可以針對曲線的曲度變化(圖6-10)以及不同曲線如拋物線(圖6-11)、雙曲線圖(6-12)的窄頸喇叭，尋找讓能量有效疊加的最佳波導設計，應用在超音波聚焦探頭的設計與改良。

(二)探討左右非對稱形狀的通道讓聲音集中轉向



圖6-13 非對稱共振腔干涉後角度偏折

斜率一邊遞增一邊遞減的非對稱喇叭共振腔，放入水波槽做干涉投影，發現聲波的傳遞方向會有角度的偏折發生，後續可探討如何透過非對稱波導，實現讓聲波波束轉向的可能。

柒、結論

一、共振腔形狀會影響聲音傳播距離，喇叭狀共振腔效果優於對照組方形共振腔，其中以斜率遞增的窄頸喇叭共振腔傳播能力最強。

二、共振腔形狀會影響聲音響度的增強程度，喇叭狀共振腔在中音和高音的增強效果優於對照組。其中窄頸喇叭共振腔的響度增強最多。

三、共振腔形狀會影響諧波數量，進而造成音色差異，三角喇叭共振腔的諧波數在中低音大幅增加，易產生雜音。

四、喇叭共振腔的形狀會影響腔內空氣流動和聲波干涉情形，進而造成腔內聲壓分布差異。

(一)窄頸喇叭共振腔初始聲壓最強，在開口處會有中央強、兩邊弱的聲壓集中現象；橢圓喇叭共振腔音源至出口處衰退最少，開口聲壓分布均勻；三角喇叭共振腔初始聲壓最小，開口聲壓略往中央集中。

(二)聲音播放後，喇叭共振腔內的空氣會因為聲壓而產生規律的流動現象，邊界的形狀會決定空氣對流速度，窄頸流速最慢，橢圓次之，三角最快，空氣流動越慢反而響度越高，空氣流動越快響度越低。

(三)聲波遇到喇叭共振腔邊界後，產生的干涉會影響傳播方向，傳播較遠，具有指向性；三角的邊界，讓聲波可以順利向外發散，兼顧傳播範圍和強度；橢圓的邊界，讓能量均勻散佈在整個腔體，傳播範圍最廣，但傳播強度較不足。

其他出處：

圖2-1 引自<http://www.toachina.com.cn/otokukan/otomame/1-6.htm>

圖2-2 引自陳榮貴(2019)。專業音響實務秘笈。台北市：麥書國際文化事業有限公司

圖2-3 引自<https://bimonthly.ps-taiwan.org/articles/67bc355d1efd7411b20cd67d>