

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

第三名

051810

材料的 $1/1&1/3$ OCT 迴響時間測量與吸音研究

學校名稱：高雄市立高雄女子高級中學

作者： 高二 吳映璿 高二 萬文甯	指導老師： 林孝正 連瑜君
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：迴響時間、OCT、吸音

摘要

本實驗利用自製的實驗裝置及自行推導的公式，推算出材料的吸音率。

材料的吸音率，一般是送至專業的迴響實驗室測量（如：成大迴響實驗室），且單一樣品測試費用昂貴（每件樣品 4~6 萬元）。

我們設計的實驗將迴響空間縮小，會遭遇到直傳音場影響大過反射音場的問題，因此利用合成音場公式將兩者分離，再利用均能音量及方向因子 Q，以及吸音率、室型常數 R 之間的關係，建立迴響時間的函數。

複合材料運用範圍廣，但若要得知吸音率，又需花費一筆可觀費用。本實驗模組能快速、方便、經濟地得到各樣品（包含複合材料）的吸音率。同時由音頻分析可得知噪音的頻段，即可選擇最適合的材料進行裝修，達到最佳的吸音效果和最高的經濟效益。

壹、 研究動機

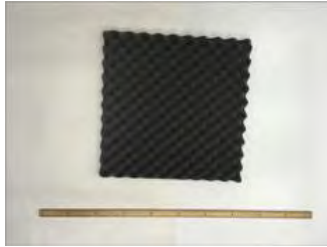
學校的活動中心常會有回音過大，影響演奏者和聽眾的聽覺品質的問題，一般利用加裝吸音材料來改善。在蒐集資料的過程中發現多種吸音材質，且材料的吸音率可由量化回音大小的迴響時間推算得知。但吸音率必須送由專業的迴響實驗室測定，既耗資又缺乏便利性。因此，本研究希望透過實驗測量及公式推算，建立實驗模組將迴響時間與吸音率做轉換。

貳、 研究目的

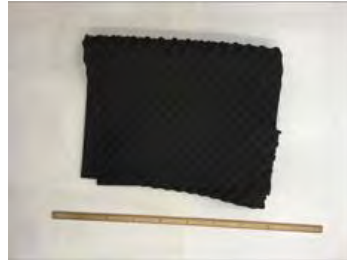
- 一、由**實驗一、二、三**，測量各吸音材料對八音度頻率迴響時間及均能音量 L_{eq} ，並分析各吸音材料的吸音情形。
- 二、由**實驗四與推導**，及**實驗一、二、三的數據**，找得自製迴響箱內合成、直傳及反射音壓位準、方向因子Q、室型常數R、吸音率 $\bar{\alpha}$ 、迴響時間的關聯。
- 三、由**實驗五**，找出各頻率的Q值，分離合成音場中的直傳音與迴響音。

參、 研究設備及器材

一、吸音材料



蛋形波浪棉



波浪泡棉



吸音毯



岩棉



礦纖板



羊毛毯

二、器材

1/1&1/3 OCT 頻譜分析儀 (TES 1358C)、個人電腦、麥克風、音響、壓克力箱 (長 49cm 寬 60cm 高 40cm)。

三、軟體

聲頻分析軟體 Audacity、Microsoft Excel

肆、 研究過程與方法

一、實驗前置準備

1. 自製迴響箱：訂做適當大小的壓克力箱，作為小型迴響室使用（以下稱壓克力迴響箱），裁切吸音材料並黏貼於箱內。壓克力箱不能使聲波產生駐波，故長、寬、高要避開測試頻段的波長。

在實驗桌上標記位置，以確保每次實驗的位置與環境都相同。

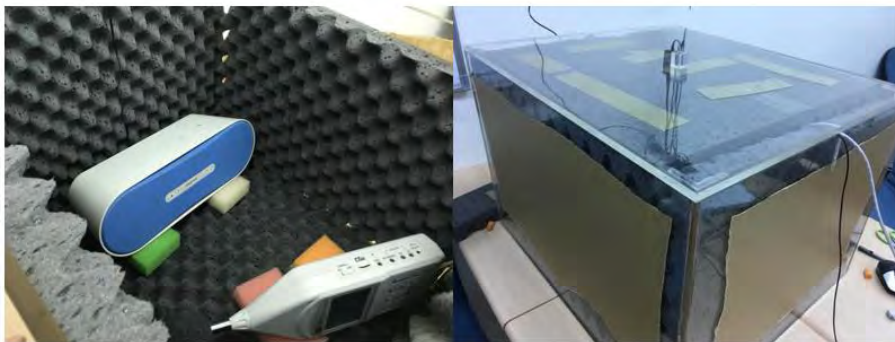


黏貼材料前



黏貼材料(波浪泡棉)後

2. 音源：製作 1/1OCT（八音度頻率）的中央頻段（125Hz、250Hz、500Hz、1000Hz、2000Hz、4000Hz）的單頻音檔並加大音量超過 90dB，降低環境噪音所造成的影響，亦可使波形的 T60 更完整。用喇叭(Creative mf8090)放送。
3. 吸音材料：裁切前述吸音材料成適當大小，使其恰能貼附於六個壁面，且轉折處不得有空隙。
4. 接收設備與分析軟體：
 - I. 使用頻譜分析儀測量均能音量（Leq），連接電腦記錄
 - II. 使用錄音及分析軟體（Audacity），連接麥克風

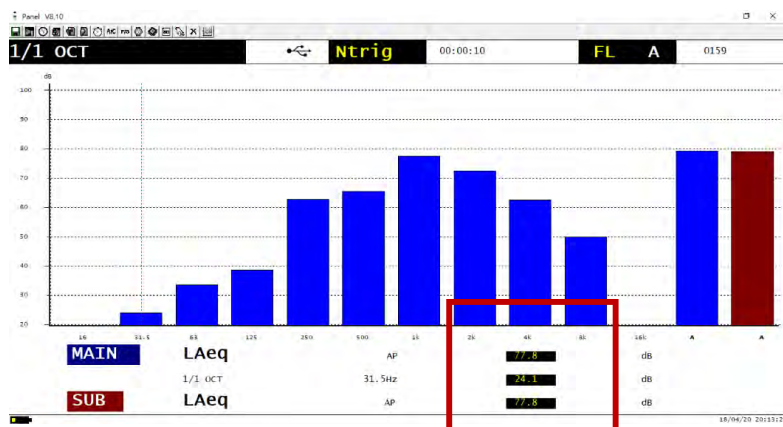


二、實驗操作流程

1. 測量均能音量（Leq）：

均能音量：指特定時段內所測得音量之能量平均值。

將音源、接收器放入裝置內，播放聲源 10 秒，待聲能已達到均勻穩定的狀態，以 OCT 頻譜分析儀接收。讀取頻譜分析儀測量後電腦顯示的 Leq 值記錄之。（單位：dB）



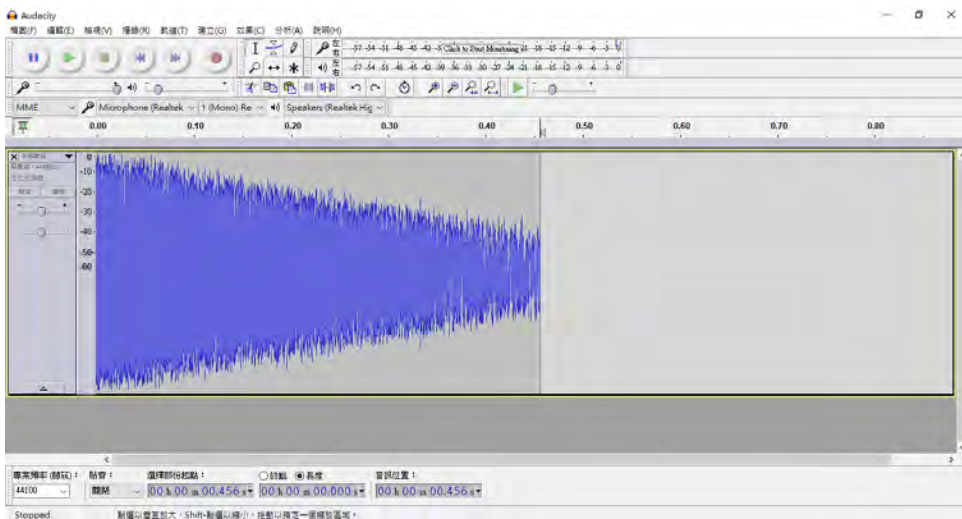
使用頻譜分析儀中測量均能音量(L_{eq} ，或稱 L_{Aeq})的功能，測量 L_{eq} 值。

上圖為連接電腦後顯示的介面，讀取右下方紅框中數據。

2. 測量迴響時間 (T_{60}):

迴響時間：聲音減弱 60 分貝所需要的時間。

將音源、麥克風放入箱內，待音場穩定後暫停聲音，並使用軟體 Audacity，測量音量衰減的趨勢，分析波形，由此找出迴響時間。(單位：sec)



3. 合成音壓位準 (L_{pT}):

音壓位準(sound level pressure)：該聲音的聲音壓力均方根值的平方與依某參考聲音壓力的比值，取以 10 為底的對數，再乘 10 的結果。

$$10^{\frac{L_{pT}}{10}} = 10^{\frac{L_p(\text{直})}{10}} + 10^{\frac{L_p(\text{反})}{10}}$$

$$L_p(\text{直}) = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right)$$

$$L_p(\text{反}) = L_w + 10 \log \left(\frac{4}{R} \right)$$

直傳音壓位準 $L_p(\text{直})$ ：聲音直接傳到受音點的音壓位準。

反射音壓位準 $L_p(\text{反})$ ：聲音在空間中經無數次反射後，傳到受音點的音壓位準。(單位：(dB)，以 L_{eq} 表示之。)

伍、 研究結果與討論

一、**實驗一**：測量單一材料的音壓位準 Leq 值——藉由測量箱內的 Leq ，得知材料於各頻段的吸音效果。

說明：如何知道吸音材料的效能？查閱資料後，得知相關業者會將吸音材料送至迴響室（或稱音響實驗室），測量該材料的吸音率。吸音率是一個國際通用的指標（國內及歐盟體系皆使用 ISO 認證規章），但每一次送件測量需花費五至六萬元的金額，並非在一般民眾可負擔的範圍內。因此，我們以尋求一個簡便、經濟的方式得知材料的吸音效果為目標。

操作：利用 OCT 頻譜分析儀中等效連續聲級（ Leq ）的功能，與空白實驗比較，得知材料吸音的情形。將材料貼於自製迴響箱內側，音源和 OCT 頻譜分析儀以固定間隔距離放置於箱內，由喇叭放音，頻譜分析儀連接電腦進行數據收集。

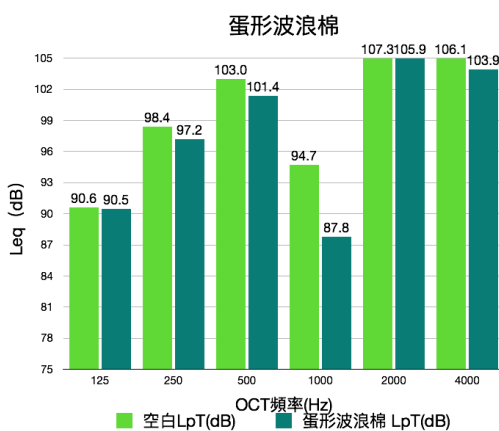
實驗結果：

1. 材料於 OCT 頻率的吸音情形

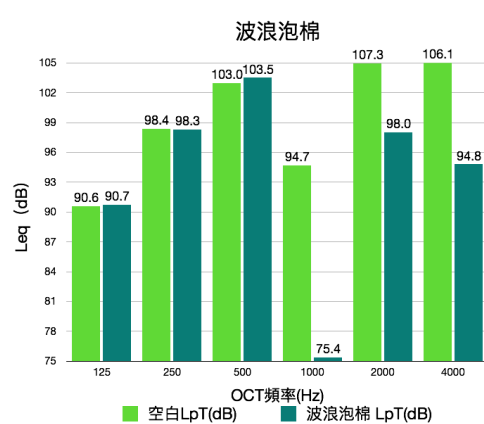
與空白實驗相比，分貝值降低越多的頻段為此材料吸音效果越佳之處。

我們將 OCT 頻率中 125Hz、250Hz 定為低頻音，500Hz、1000Hz 為中頻音，2000Hz、4000Hz 為高頻音做討論。

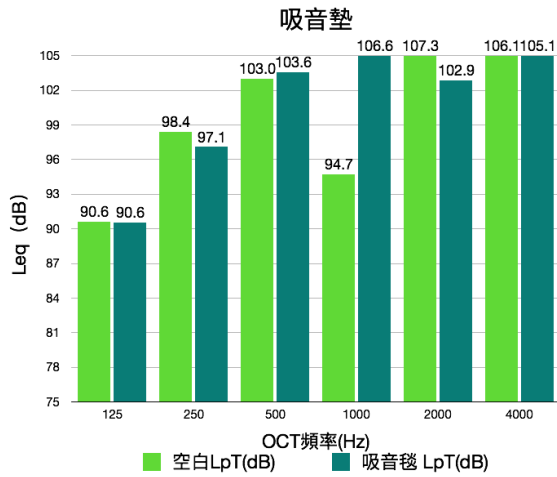
測量材料於各頻率之 Leq ，與空白實驗比較。



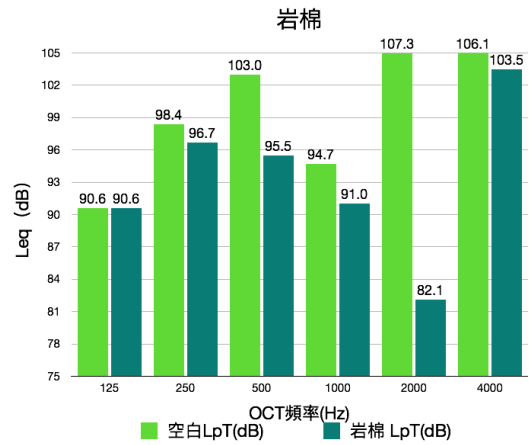
蛋形波浪棉於中低頻吸音率較佳



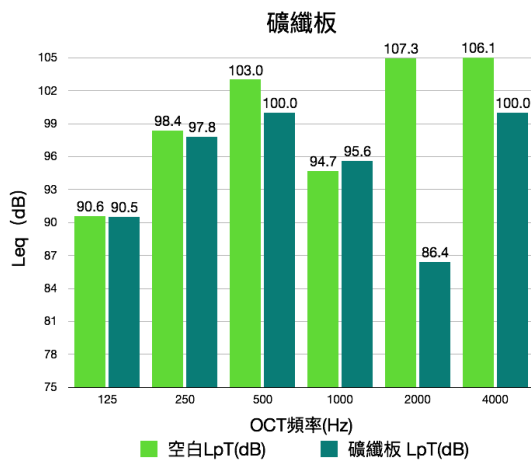
波浪泡棉於 1000Hz 吸音效果佳



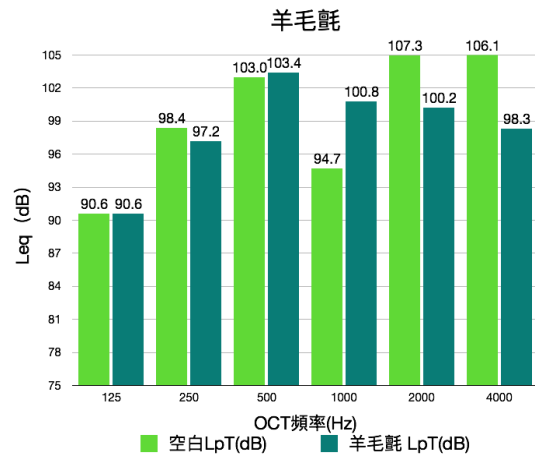
吸音墊出現測得的 Leq 值大於空白實驗的狀況，我們推測其為迴響音場導致分貝值加大。



岩棉的吸音效果在中高頻特佳，亦為所有材料中平均吸音效果最佳之材料。



礦纖板在中、高頻段的吸音效果佳，其中又以高頻中 2000Hz 最佳。

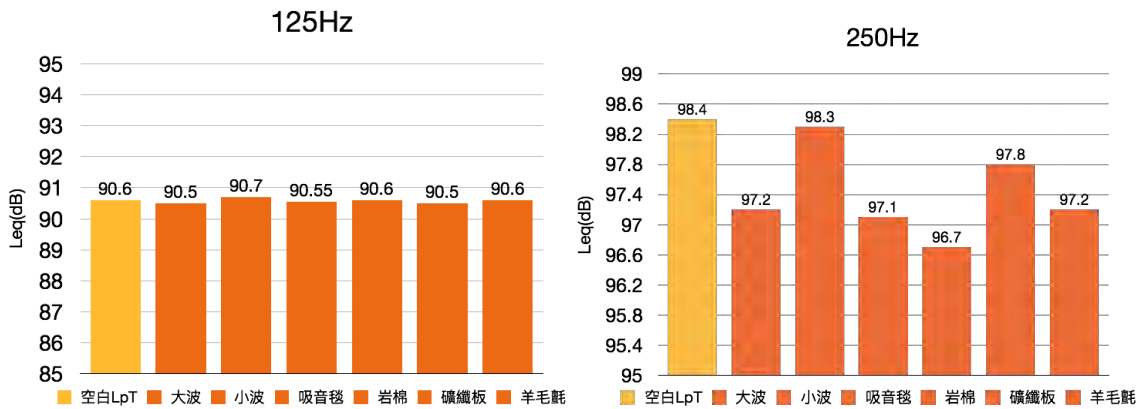


羊毛氈在高頻部分吸音效果較佳，於中低頻則較無效果。

2. OCT 頻率中各材料的吸音情形

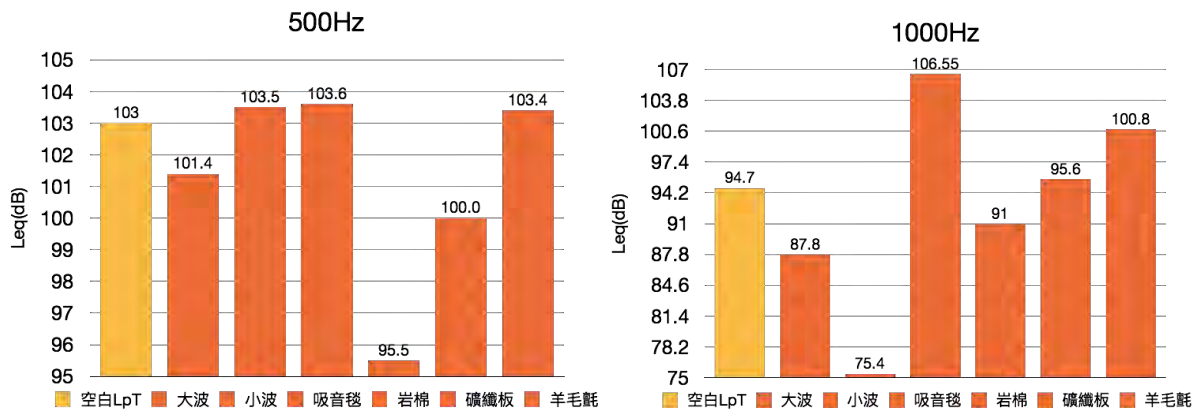
淺色長條為空白實驗之 Leq 值，深色長條所代表各材料 Leq ，由左而右依序為：蛋形波浪棉、波浪泡棉、吸音毯、岩棉、礦纖板、羊毛氈。

I. 低頻（125Hz、250Hz）



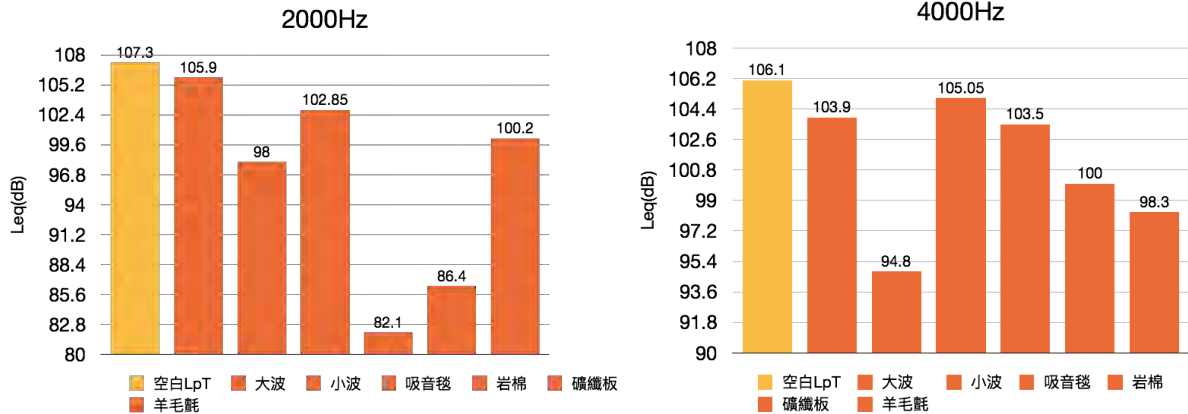
所有材料對於 125Hz 之吸音能力皆微弱；蛋形波浪棉、吸音毯和岩棉於 250Hz 之吸音率則相對較佳。

II. 中頻（500Hz、1000Hz）

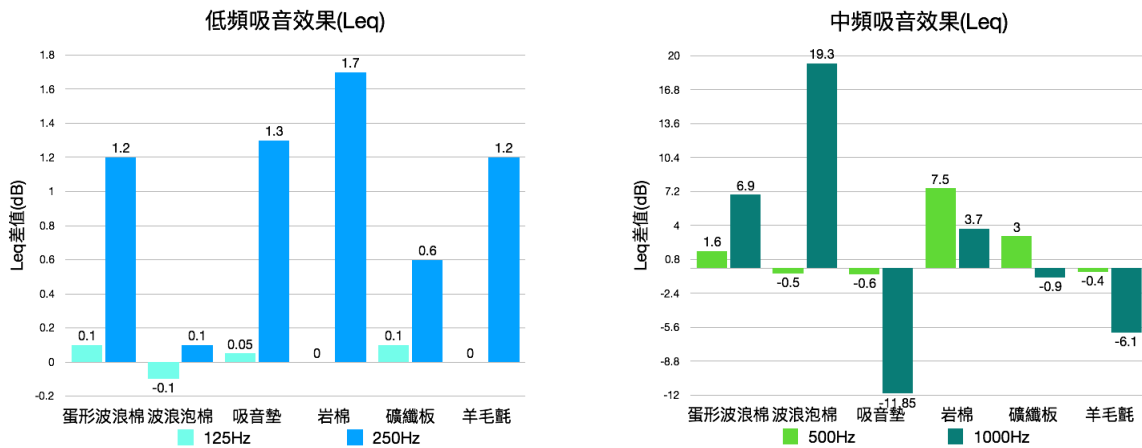


岩棉於 500Hz 吸音效果能由圖表中明顯看出；波浪泡棉於 1000Hz 表現特好。

III. 高頻 (2000Hz、4000Hz)

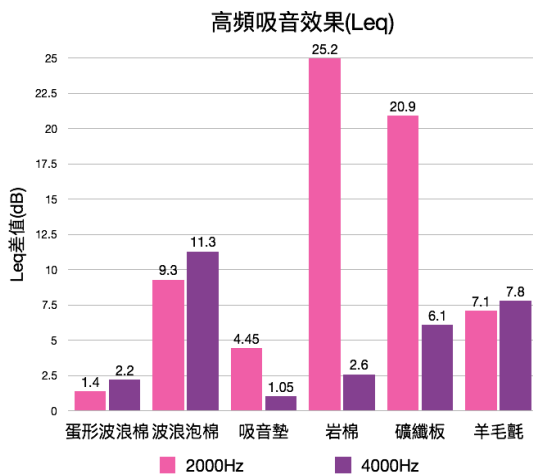


各材料於高頻率的吸音能力皆較佳，其中又以波浪泡棉、岩棉與羊毛氈特佳。



各材料於低頻音的吸音效果皆不佳；其中由岩棉為最佳，波浪棉最差。

由圖表可以看出在低頻音表現最差的波浪棉，於中頻段 1000Hz 的部分表現特佳。



各材料於高頻皆有吸音的效果，其中以波浪泡棉、岩棉及礦纖板的效果最顯著。負值部分為測得的 Leq 值大於空白實驗，表示材料的反射效果大於吸收。

OCT 頻譜分析儀做八音度分析材料在不同頻率的吸收狀況。我們能由以上實驗看出材料對各頻段的音源具選擇性，並了解各頻段的吸音效果並無明顯的直接相關性。

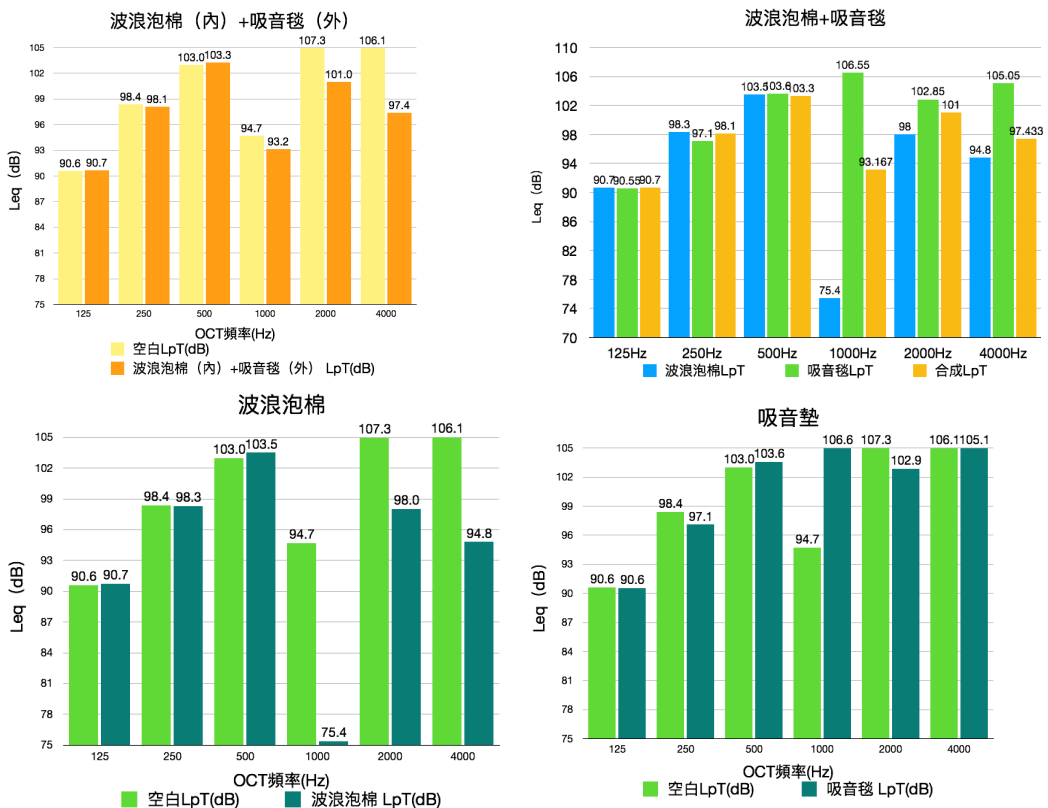
二、實驗二：測量複合材料的音能位準 Leq 加成作用

說明：許多吸音板、吸音牆面，都是兩種或以上的材料疊合，以達到雙重的效果。若將兩種材料合併為複合材料，其吸音率並無法由組成中各材料的吸音率直接運算得知。欲得知其吸音率，又得花費大筆金額至迴響室測量。而我們藉由測量複合材料置於箱內時的 Leq 值，即可看出複合材料在 OCT 個頻段的表現，如此可省下一筆可觀的費用。

操作：選用兩種吸音材料，利用 OCT 頻譜分析儀中等效連續聲級 (Leq) 的功能，與空白實驗比較得知材料吸音的情形。將材料貼於自製迴響箱內側，音源 (喇叭) 和 OCT 頻譜分析儀以固定間隔距離放置於箱內，由喇叭放音，頻譜分析儀連接電腦進行數據收集。

1. 複合材料的吸音情形：以波浪泡棉和吸音毯為例

下圖為複合吸音材料的 Leq 與單一材料 Leq 的對照。



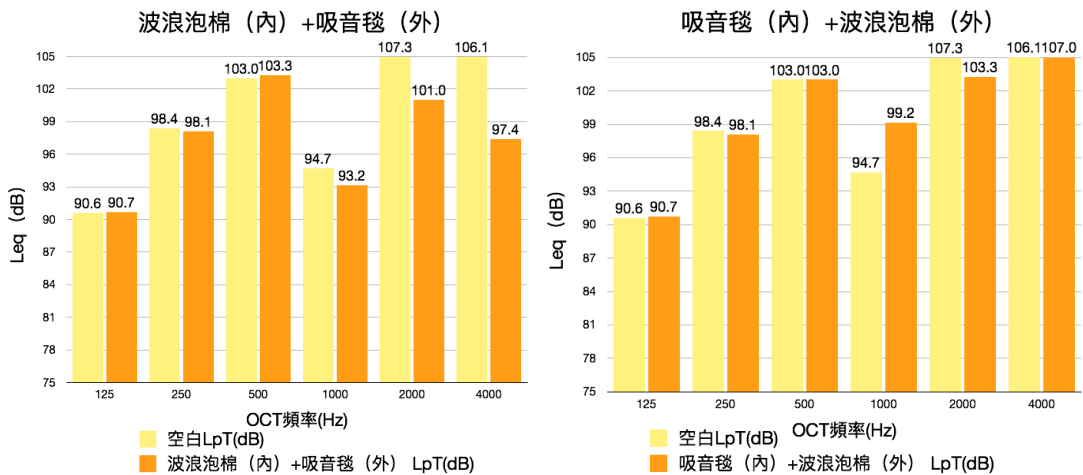
三、**實驗三**：目的性的複合材料——以兩種材料疊合測試其等效連續聲級（Leq）值，並內外交替測量之，分析其吸音情形。

說明：數種材料疊加時，有一者比較靠近聲源的順序問題。我們好奇，兩種吸收不同頻段的材料疊合起來，效果是否會共顯？兩種吸收同頻段的材料疊合起來，是否有加成的效果？

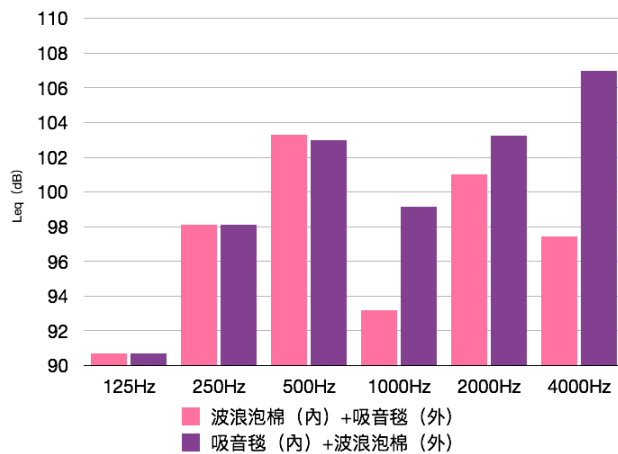
操作：選用兩種吸音材料，利用 OCT 頻譜分析儀中等效連續聲級（Leq）的功能，與空白實驗比較得知材料吸音的情形，並將內外曾置換測量。將材料貼於自製迴響箱內側，音源（喇叭）和 OCT 頻譜分析儀以固定間隔距離放置於箱內，由喇叭放音，頻譜分析儀連接電腦進行數據收集。

實驗結果：

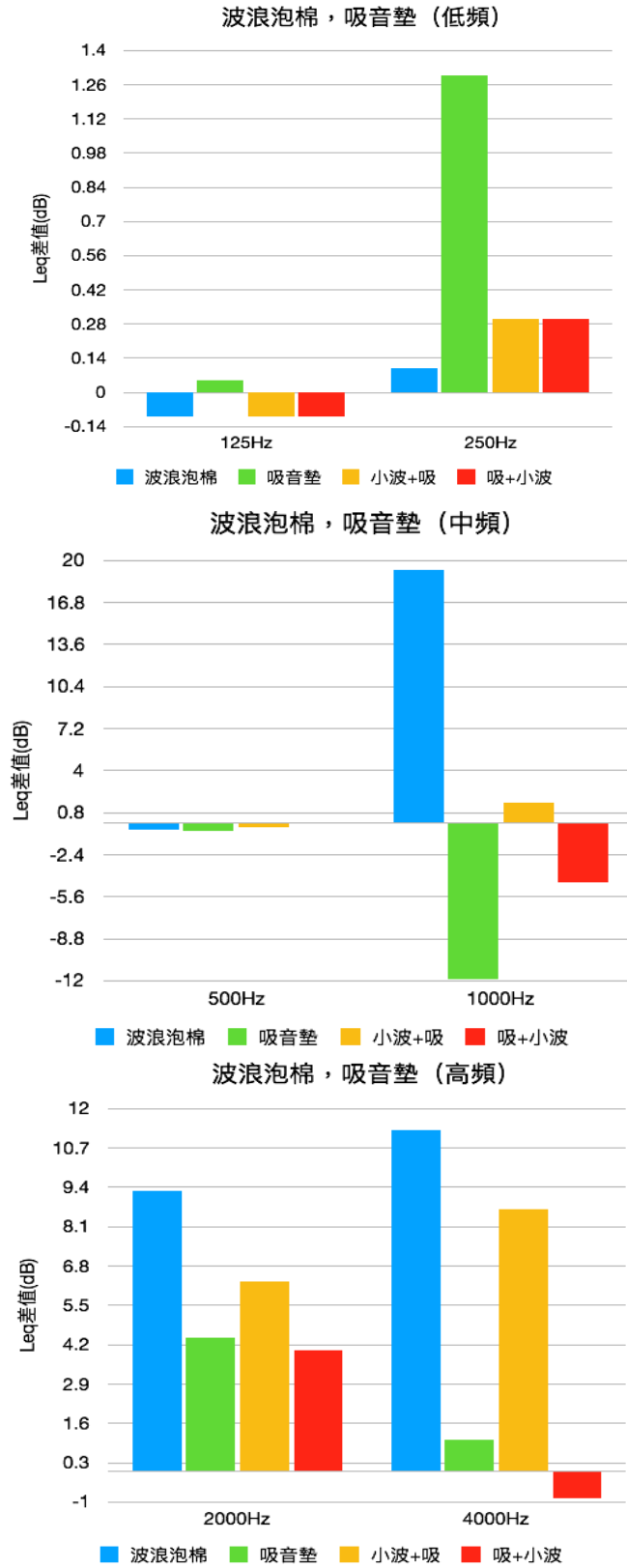
1. 波浪泡棉與吸音墊的 Leq 比較



波浪泡棉，吸音墊

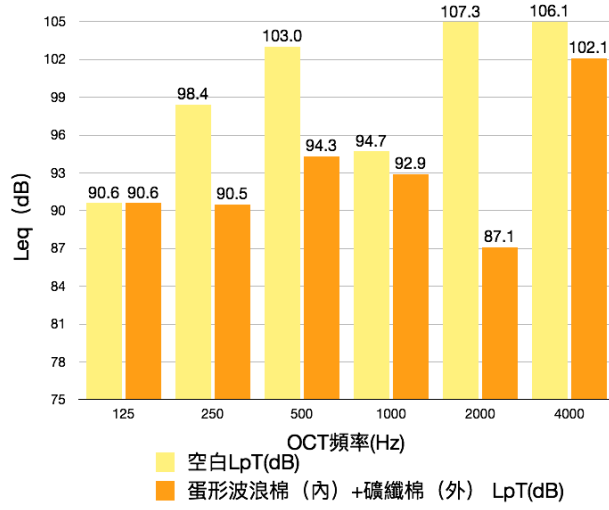


圖為複合材料於低、中、高頻的 Leq 與空白實驗的差值。

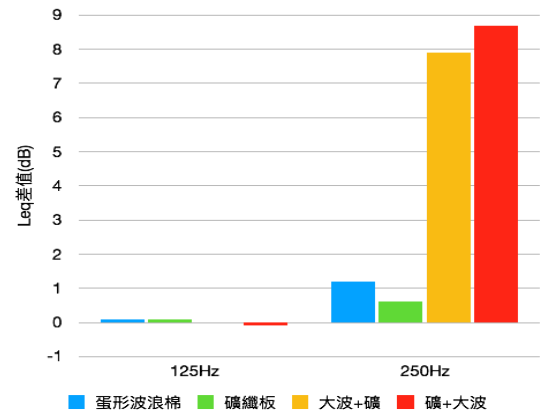


2. 蛋形波浪棉與礦纖板

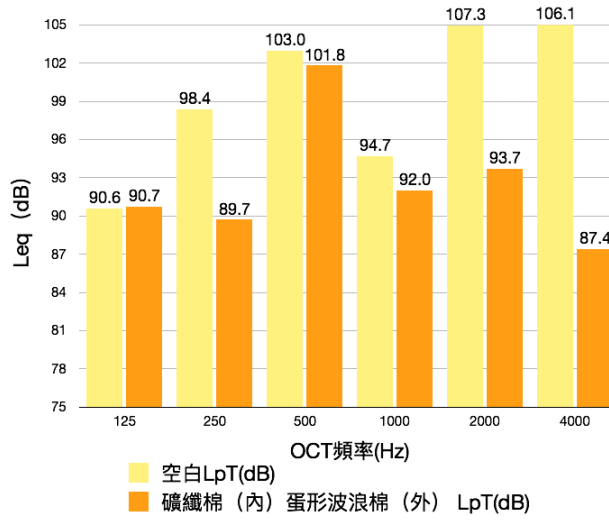
蛋形波浪棉 (內) + 礦纖棉 (外)



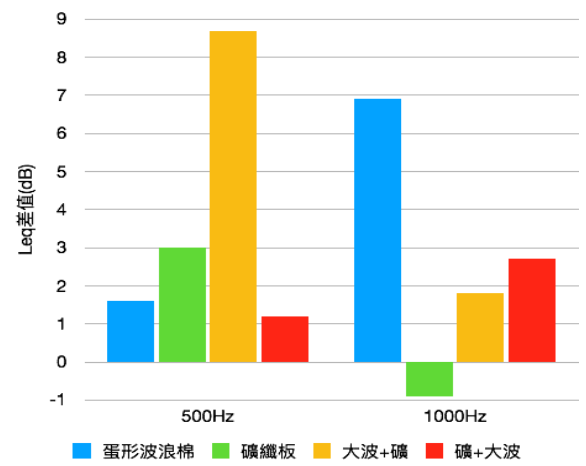
蛋形波浪棉，礦纖板 (低頻)



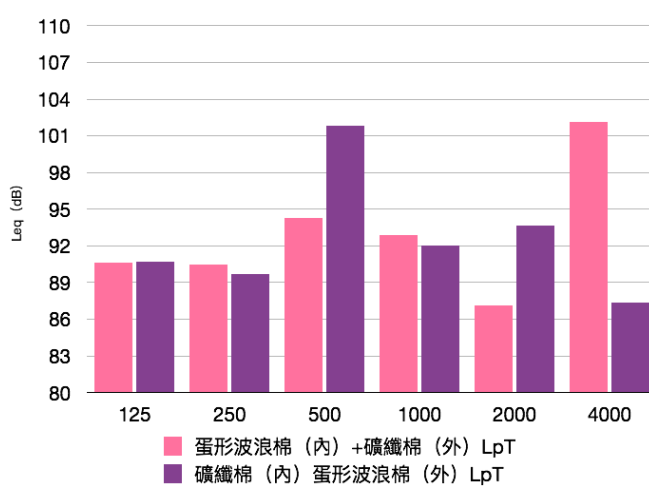
礦纖棉 (內) 蛋形波浪棉 (外)



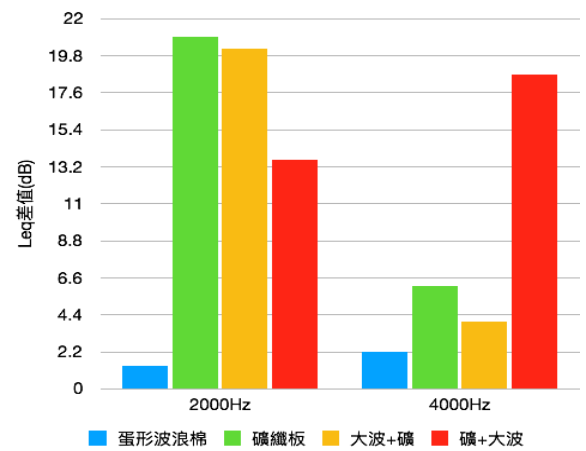
蛋形波浪棉，礦纖板 (中頻)



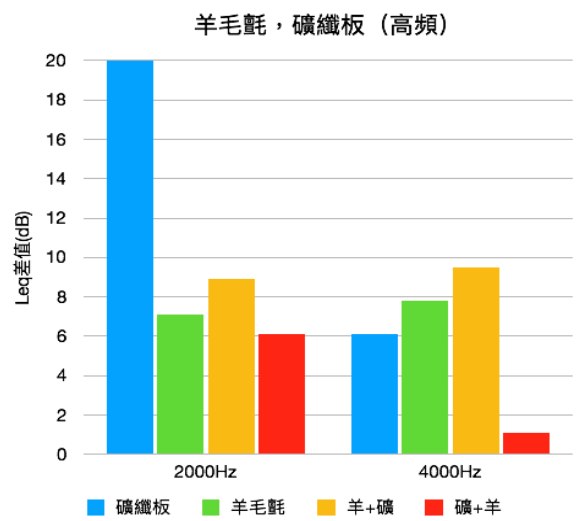
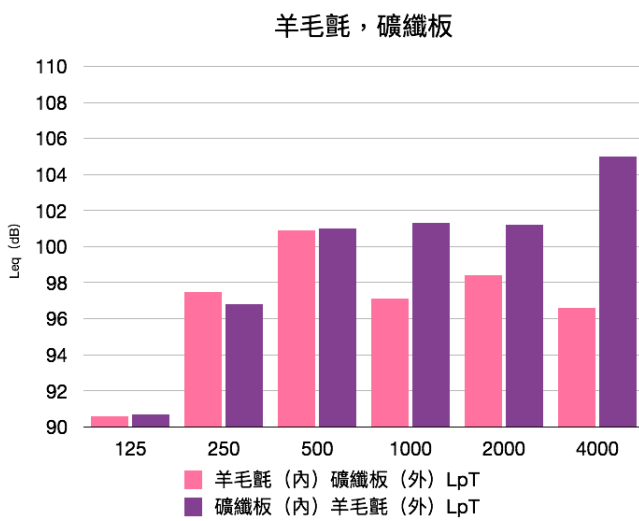
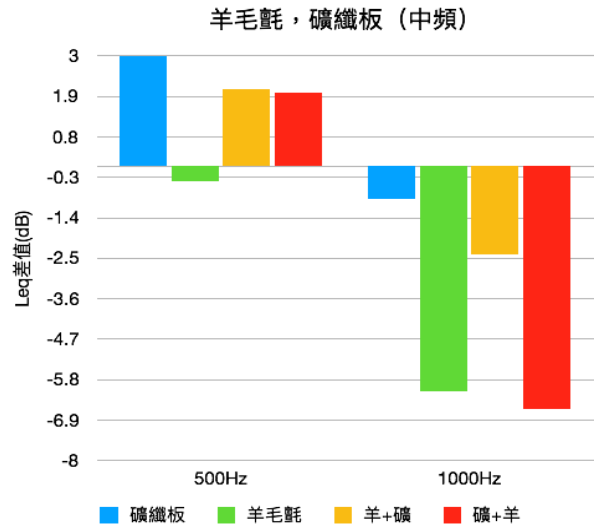
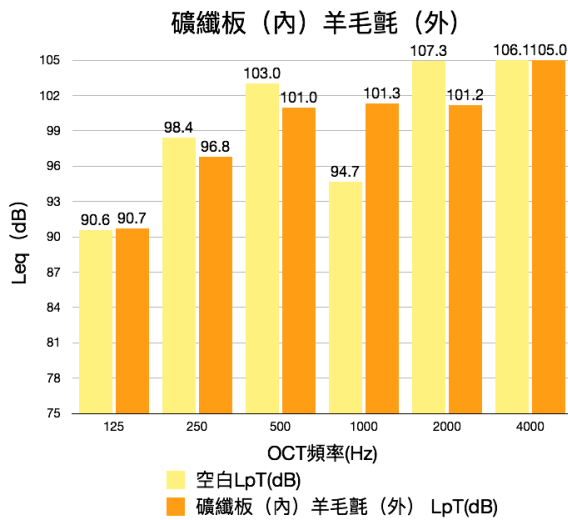
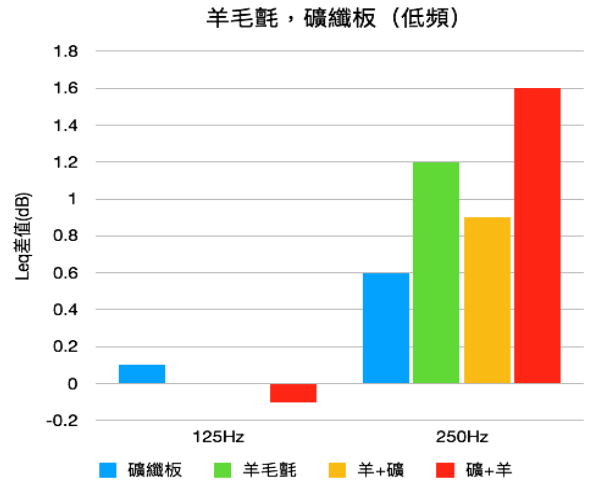
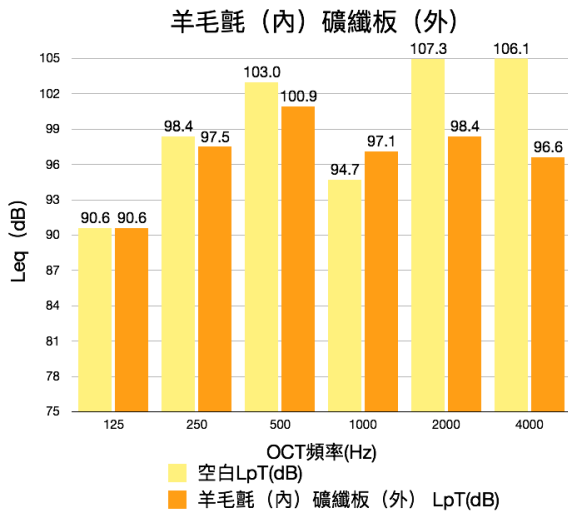
蛋形波浪棉，礦纖板



蛋形波浪棉，礦纖板 (高頻)



3. 羊毛氈與礦纖板



討論：知道疊合材料能使吸音效果加強後，期望搭配出針對不同環境需求的材料組合。環境中，會有幾個頻段的噪音分貝值特別高，例如：壓縮機旁、卡拉OK 間附近的環境容易遭受低頻段的聲音的干擾，工地旁則會有高頻噪音的影響。差值出現負值之狀況代表材料於此頻段反射效果較吸音效果更顯著，故要避免於對應頻段使用。

針對不同環境，我們建議可選擇以下不同材料的組合：

I. 中、高頻噪音（如：馬路、工地旁）：

礦纖棉（內）蛋形波浪棉（外）

波浪泡棉（內）吸音毯（外）

羊毛氈（內）礦纖板（外）

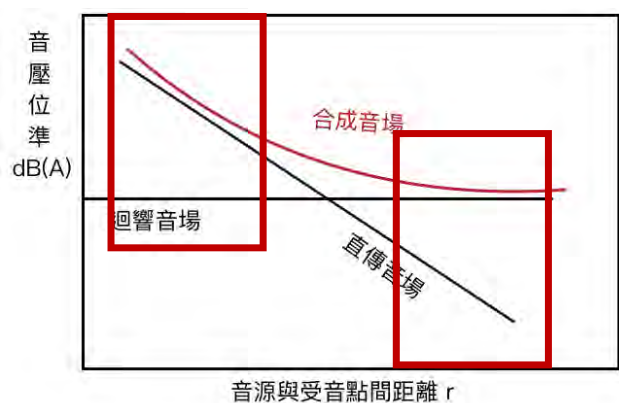
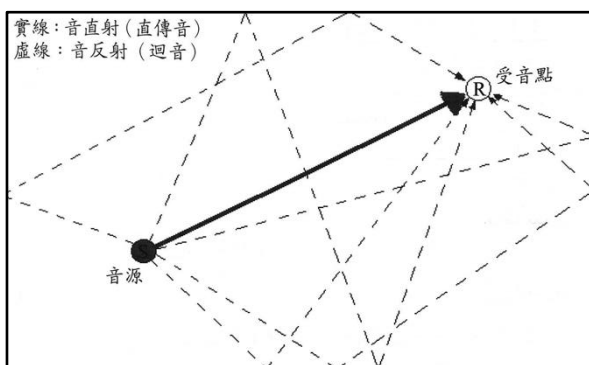
II. 中、低頻噪音（如：壓縮機旁、卡拉OK 室鄰近區域）

蛋形波浪棉（內）礦纖棉（外）

礦纖板（內）羊毛氈（外）

四、推導及實驗四

迴響實驗室中由於空間夠大（大於 200 m³），音源與受音點距離夠遠，聲音四處擴散產生反射音場後才傳至受音點（如左圖虛線部分），導致空間中的音場由迴響音主導（可對應至右下圖左側），並可忽略直傳音場的影響。



實驗結果可對應至右上圖偏左的位置：箱內合成音場由直傳音場主導，且受迴響音場影響。因此，以本實驗裝置模擬迴響室時，必須將直傳音場的影響納入考量。

以下以能量觀點推導出室內音場、迴響音場、直傳音場、合成音場、方向因子及迴響時間的函數。

1. 室內音場

$$\frac{d\delta'}{dt} + \frac{cs\delta'\bar{\alpha}}{4V} = \frac{W}{V}$$

δ' ：瞬間平均能量密度， W ：音源功率， V ：室內體積

解一階常微分方程

$$\Rightarrow \delta' = \frac{4W}{sc\bar{\alpha}} \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{sc\bar{\alpha}}{4V}\right]t} \right\}$$

當時間夠長，音場經過充分反射平衡後，穩態音場 δ' 為

$$\delta' = \frac{4W}{sc\bar{\alpha}}$$

上述穩態音場任點的 δ' 包括直傳部的音能密度 δ'_d 及反射部的音能密度 δ'_r ，即

$$\delta' = \delta'_d + \delta'_r$$

針對一等向性音源而言，其直傳部的音能密度 δ'_d 為

$$\delta'_d = \frac{I}{c} = \frac{W}{4\pi r^2 c}$$

其反射部的音能密度

$$\delta'_r = \frac{\delta' \cdot V - \int_V \delta'_d dV}{V} = \frac{4W}{cR}$$

瞬間平均能量密度 δ' 亦可表示為

$$\delta' = \frac{p^2}{\rho_0 c^2}$$

對具有方向性的音源而言，直傳部的音能密度 δ'_d 可寫為

$$\delta'_d = Q \frac{W}{4\pi r^2 c}$$

Q 為方向性因子，由上式推得 $p^2 = W\rho_0 c \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right]$

2. 迴響音場

音源傳至牆面做無數的音反射，最後達到一個均勻的音場，稱之為迴響音場，由於反射音的強弱取決於牆面的吸音能力，故牆面的吸音性亦為迴響音的控制參數之一。

$$p_r^2 = \frac{4W\rho_0c}{R}$$

$$Lp(\text{反射音}) = 10\log\left[\frac{p_d^2}{p_{re}^2}\right] = \boxed{Lw + 10\log(4/R)},$$

$$R(\text{室型常數}) = \frac{S_T\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} ; S_T(\text{室內總面積}) = \sum_{i=1}^n S_i ; \bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i\alpha_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

3. 直傳音場

直傳音場 $Lp_{\text{直}}$ 指由音源直接傳播至受音點處的音量所形成的音場。由前述知直

傳部的均方音壓 p_d' 為 $p_d' = \frac{WQ\rho_0c}{4\pi r^2}$

$$Lp_{\text{直}} = 10\log\left(\frac{p_d'^2}{p_{re}^2}\right) = \boxed{Lw + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right)},$$

其中的方向因子 Q 為分離直傳、合成音場的重要因素。

4. 合成音場

同時考慮直傳音與反射音的效應，室內任一點的合成音壓位準為

$$Lp_T = 10\log\left(10^{\frac{Lp(\text{直})}{10}} + 10^{\frac{Lp(\text{反})}{10}}\right)$$

其中， $Lp(\text{直}) = Lw + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right)$

$$Lp(\text{反}) = Lw + 10 \log\left(\frac{4}{R}\right)$$

$$\text{得 } Lp_T = Lw + 10 \log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right)$$

式中，室形常數 R 代表該室內音場在八音頻吸音能力與特性，主要影響參數為壁面材質的吸音率 α 與表面積 S_T 。

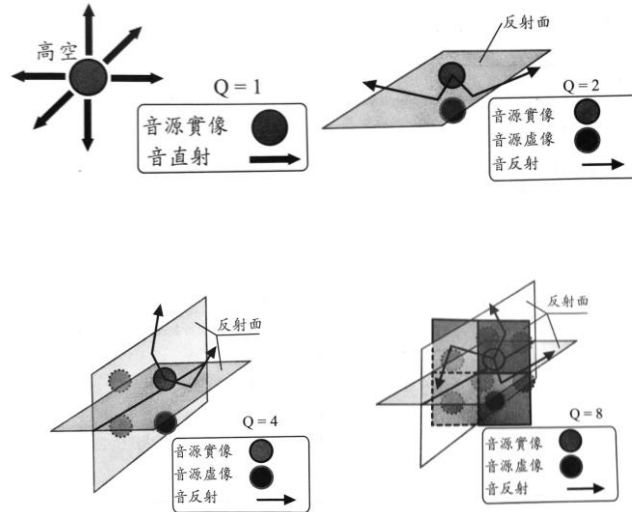
對於低吸音能力的室內音場而言， R 值近於 0，即由迴響音場所主宰。

當室內牆面具有高吸音能力時， R 值趨近於無限大，即由直傳音場所主宰。

5. 方向因子 Q

$$\text{由前述知直傳部音場為 } Lp_{\text{直}} = 10 \log\left(\frac{pd^2}{p_{re}^2}\right) = Lw + 10 \log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right)$$

方向性因子 Q 一音源與牆面的相對位置而定，其關係如圖



上圖的狀況皆視反射音為鏡像音源，但現實生活中的鏡像音源不可能完全反射，意即 Q 值並不可能為整數。而 Q 值為影響吸音率和迴響時間的重要因子，因此將所有 Q 視為 1 的沙賓公式僅適用於大型空間（視為無鏡像音源），無法適用於所有狀況。而找出各空間的方向因子即為我們的目標。

6. 迴響時間的函數

使用頻譜分析儀測量 L_{eq} ，測得開放空間中的直傳音壓位準 $L_p(\text{直})$

由公式 $L_p(\text{直傳音}) = L_w + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right)$ ，此時因無反射面，故 Q 值可代 1，

得 $L_w = L_p(\text{直傳音}) - 10\log\left(\frac{1}{4\pi r^2}\right)$ ，可算得 L_w

將音源、接收器放入貼有吸音材料的箱內，播放聲源 10 秒，以頻譜分析儀接收，並讀取頻譜分析儀上顯示的 L_{eq} ，測得 L_{pT} （合成音壓位準）。

同時考慮直傳與反射音的效應，室內任點的合成音壓位準 L_{pT} 為

$$L_{pT} = 10\log\left(10^{L_p(\text{直傳音})/10} + 10^{L_p(\text{反射音})/10}\right)$$

$$\text{其中，} L_p(\text{直傳音}) = L_w + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right)$$

$$L_p(\text{反射音}) = L_w + 10\log\left(\frac{4}{R}\right)$$

$$\text{合成音壓位準 } L_{pT} = L_w + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right)$$

$$\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \text{ 中，令 } \frac{1}{R} = \frac{1}{S_T}(\frac{1}{\bar{\alpha}} - 1)$$

$$Q = 1 + q(1 - \bar{\alpha})$$

$$\bar{\alpha} = \frac{mV}{TS_T}$$

(q 、 m 為常數) 整理得

$$10^{\frac{L_{pT}-L_w}{10}} = \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}$$

$$= \left(\frac{4}{Vm}\right)\Gamma + \left(\frac{-mqV}{4\pi r^2 S_T}\right)\frac{1}{T} + \left(\frac{1+q}{4\pi r^2} - \frac{4}{S_T}\right)$$

即推得一迴響時間對合成音壓位準的函數。

7. **實驗四：沙賓公式與迴響時間——由實驗得 m**

說明：吸音率為吸音效果量化的精確指標。由已知吸音率的材料，已知岩棉的吸音率，推得迴響時間的理論值，再與實驗值相對照。接著從迴響時間和吸音率推算前述假設之 m 值。

操作：材料貼於箱內六面，把音響和麥克風放置箱內適當間隔距離。喇叭放送聲音，待至聲音已達均勻的穩定音場時，關閉聲音，由麥克風連接電腦測量迴響時間。以測得的迴響時間與理論的迴響時間對照，確認我們的做法是否可行。

下表為理論值與實際值之比較：

Hz	已知吸音率	理論迴響時間	實驗迴響時間	m
125	0.18	0.0725	0.0709	0.157
250	0.44	0.0296	0.1349	0.732
500	0.75	0.0174	0.0208	0.192
1000	0.81	0.0161	0.0138	0.138
2000	0.87	0.0150	0.0140	0.151
4000	-	-	0.0058	-

討論：得常數 $m=0.159$ ，與沙賓公式中常數 0.161 大致符合。利用此常數，即可推算個材料之 q 值。

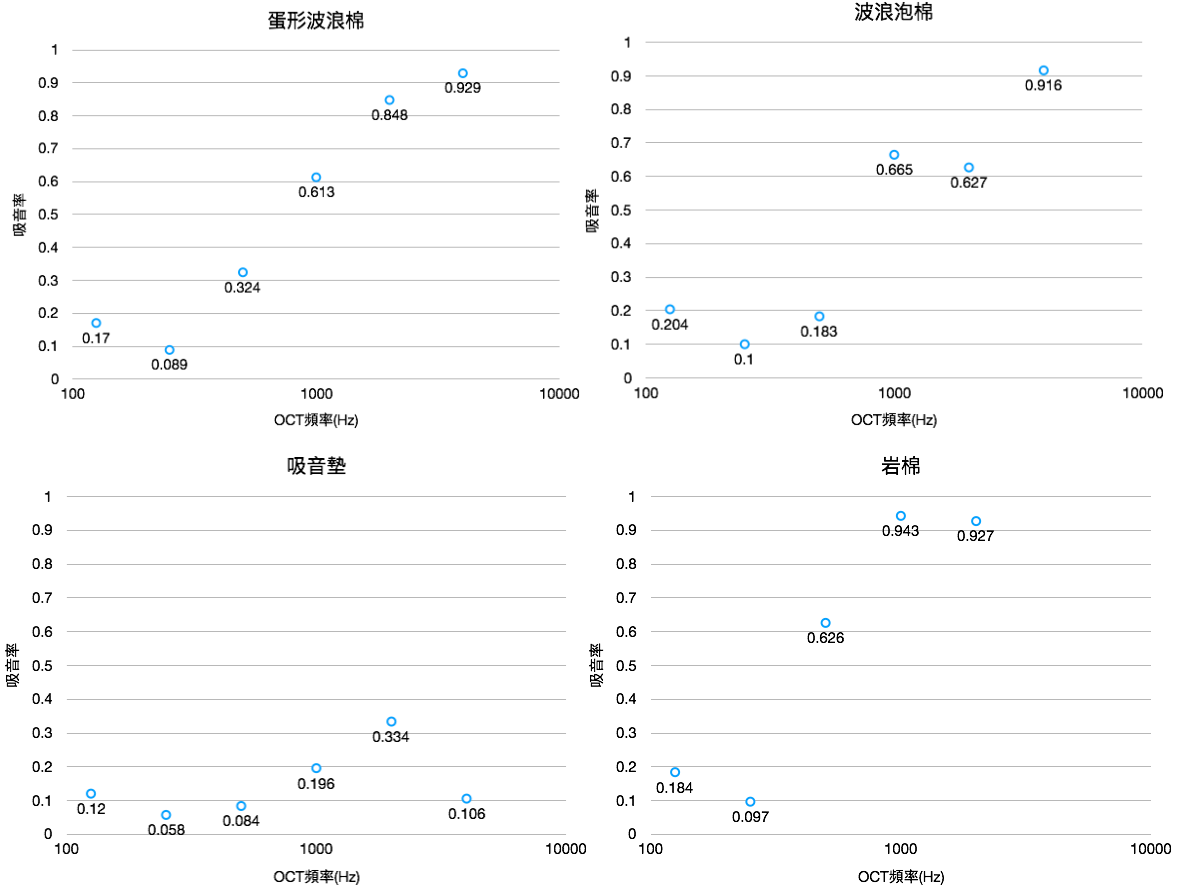
五、實驗五：各材料的吸音率

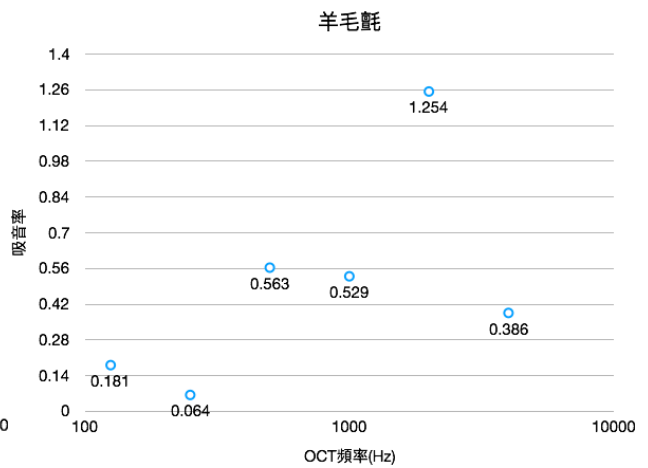
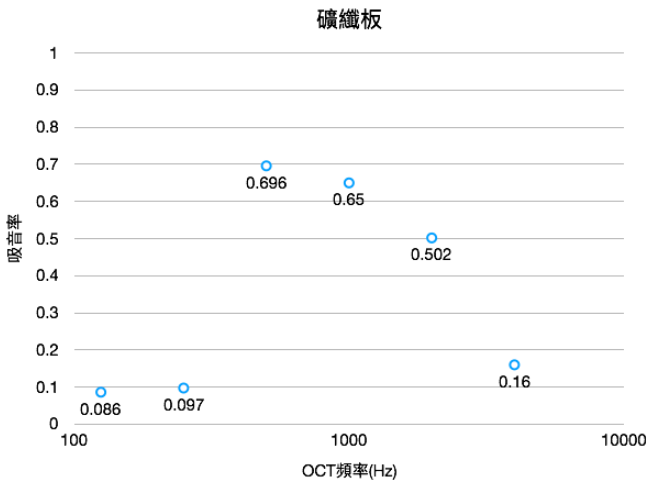
由前述 $\bar{\alpha} = \frac{mV}{TS_T}$ ， $m=0.159$ ，可由實驗測得的迴響時間求得各頻率吸音率

各材料迴響時間如下表：

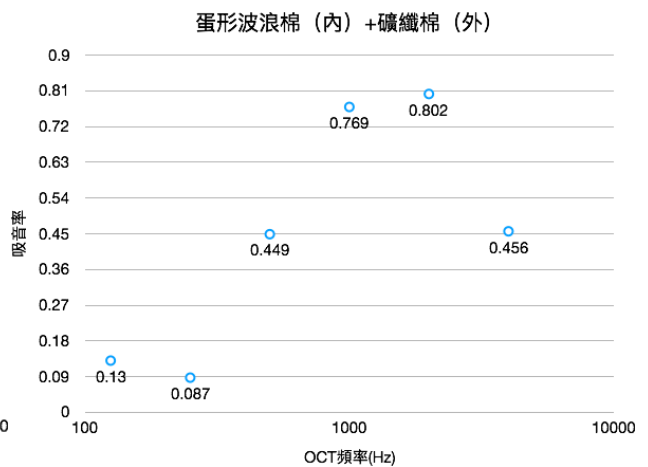
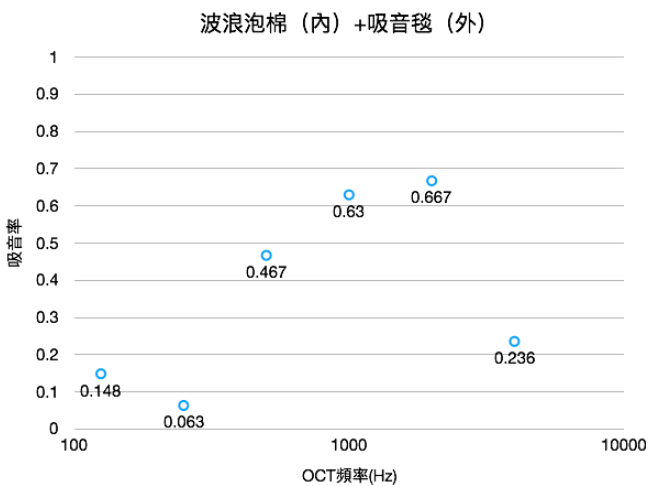
迴響時間(ms)						
Hz	蛋形波浪棉	波浪泡棉	吸音墊	岩棉	礦纖板	羊毛氈
125	0.076	0.063	0.108	0.070	0.151	0.072
250	0.147	0.130	0.226	0.134	0.134	0.230
500	0.040	0.071	0.155	0.020	0.018	0.023
1000	0.021	0.019	0.066	0.013	0.020	0.024
2000	0.015	0.020	0.039	0.014	0.026	0.010
4000	0.014	0.014	0.123	0.005	0.081	0.033

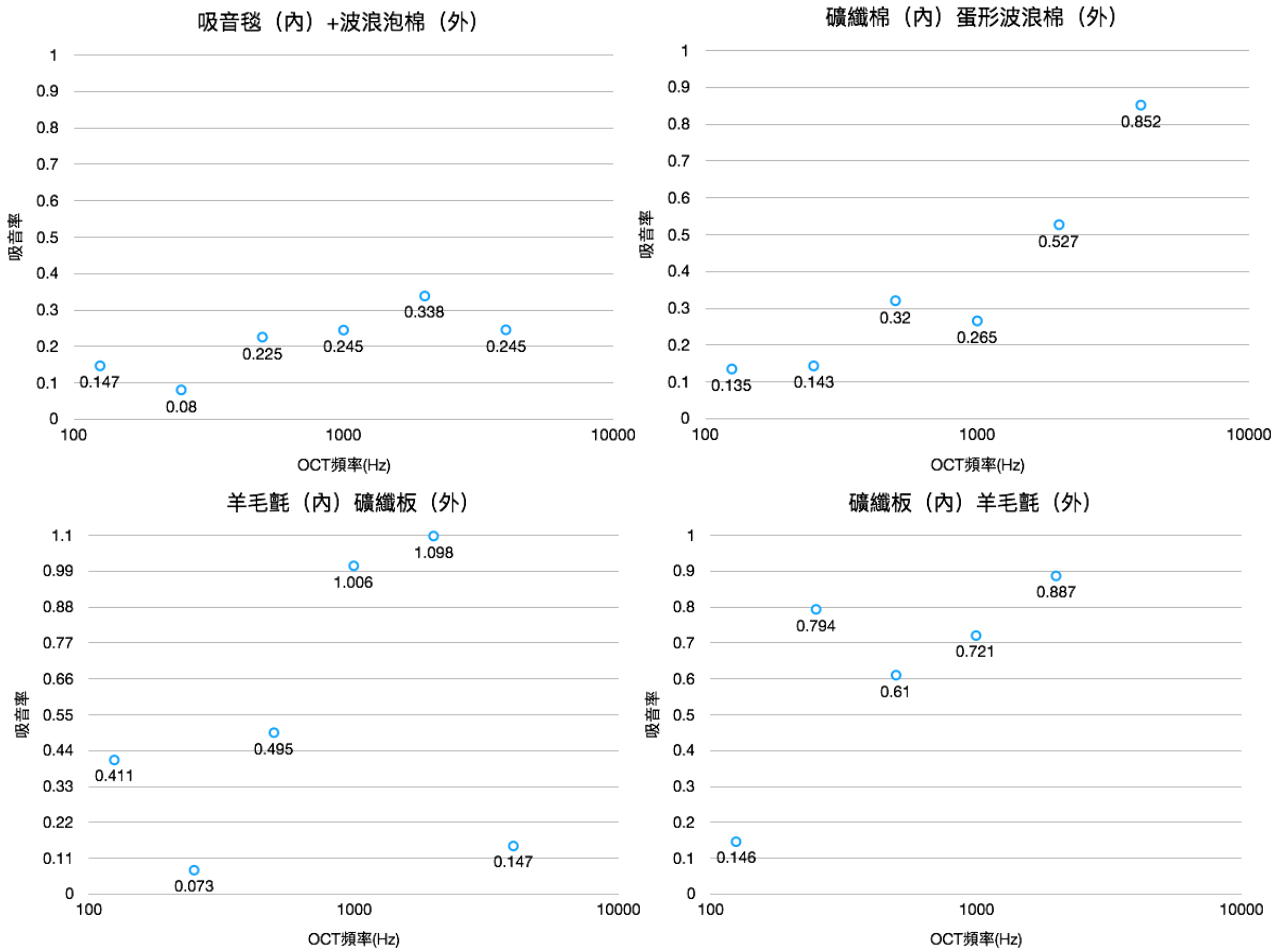
利用上表實驗迴響時間推算得到的吸音率如下：





迴響時間(ms)						
Hz	波浪泡棉 吸音墊	吸音墊 波浪泡棉	蛋形波浪棉 礦纖板	礦纖板 蛋形波浪棉	礦纖板 羊毛氈	礦纖板 羊毛氈
125	0.087	0.089	0.100	0.096	0.031	0.089
250	0.206	0.162	0.149	0.091	0.178	0.016
500	0.027	0.057	0.029	0.040	0.026	0.021
1000	0.020	0.053	0.016	0.049	0.012	0.018
2000	0.019	0.038	0.016	0.024	0.011	0.014
4000	0.055	0.053	0.028	0.015	0.088	0.010





六、 Lp_T 、 Lp 直、 Lp 反比較及 Q 值

將合成音場 (Lp_T) 中直傳音場 (Lp 直) 與反射音場 (Lp 反) 分離。

以岩棉 500Hz 為例：

開放空間中無反射音場，因此測得之 Leq 值即為直傳音，且方向因子 $Q=1$ 。

由 $Lp(\text{直}) = Lw + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right)$ ，帶入實驗值 $Lp(\text{直}) = 97.3$ ，得

$$Lw = 97.3 - 10\log(1/4 \pi * 0.3 * 0.3) = 87.9$$

測得箱內之合成音壓位準 $Lp_T = 95.0$

由 $Lp_T = Lw + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right)$ ，得 $\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} = 0.57$

已知 $m=0.159$

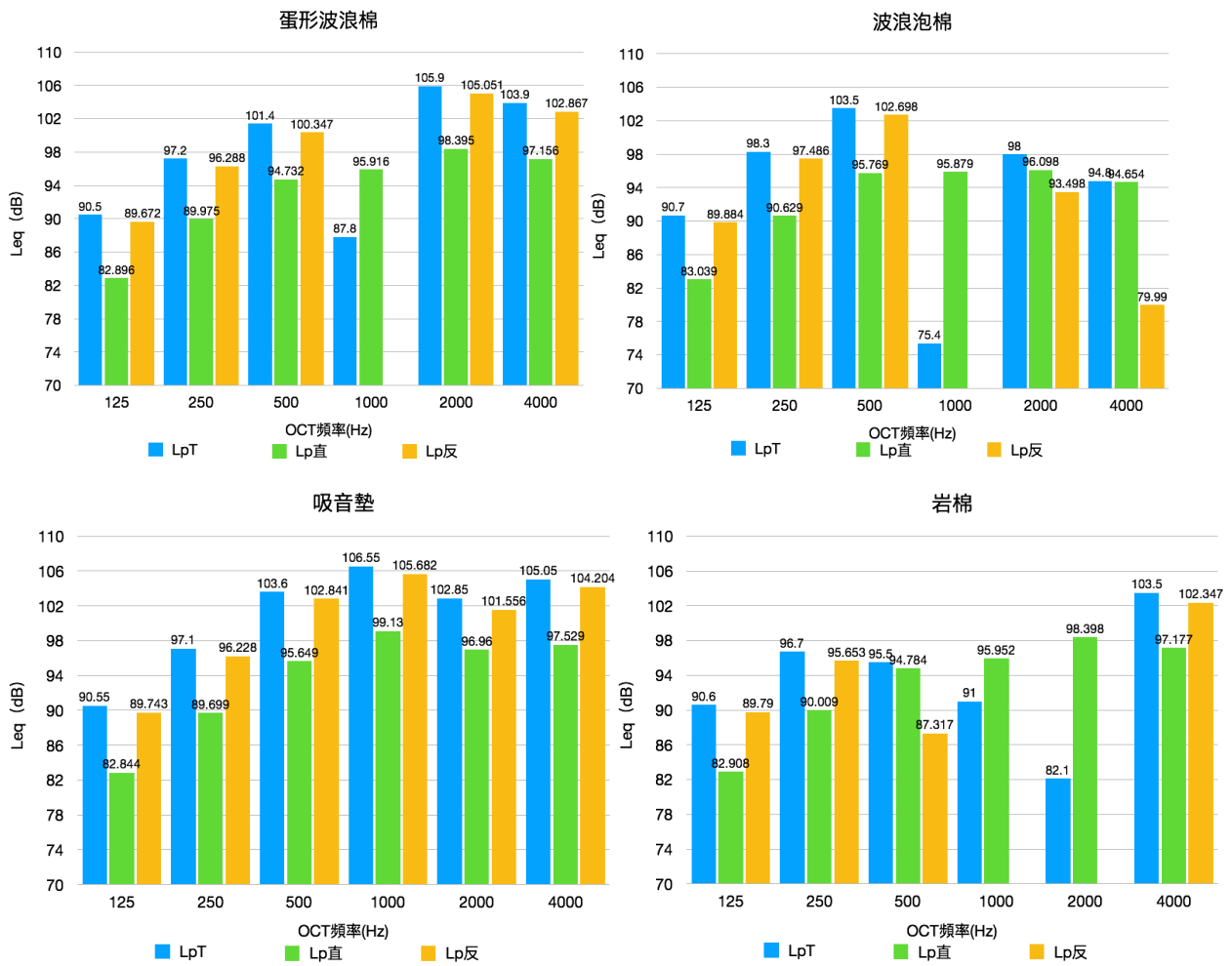
由 $10^{\frac{Lp_T - Lw}{10}} = \left(\frac{4}{Vm}\right)T + \left(\frac{-mqV}{4\pi r^2 S_T}\right)\frac{1}{T} + \left(\frac{1+q}{4\pi r^2} - \frac{4}{S_T}\right)$ ，得 $q = 12.08$

$\bar{\alpha} = 0.62$ ，帶回 $Q = 1 + q(1 - \bar{\alpha})$ ，得 $Q = 5.51$

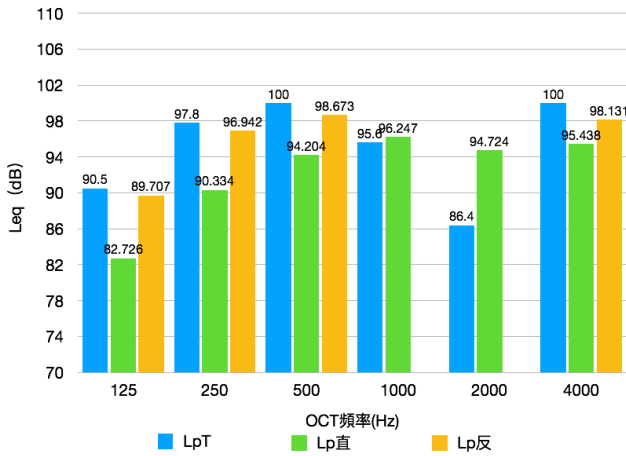
帶入 $Lp(\text{直傳音}) = Lw + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right)$ ，得 $Lp(\text{直傳音}) = 94.78$

由 $Lp(\text{反射音}) = Lw + 10\log\left(\frac{4}{R}\right)$ ，得 $Lp(\text{反射音}) = 87.31$

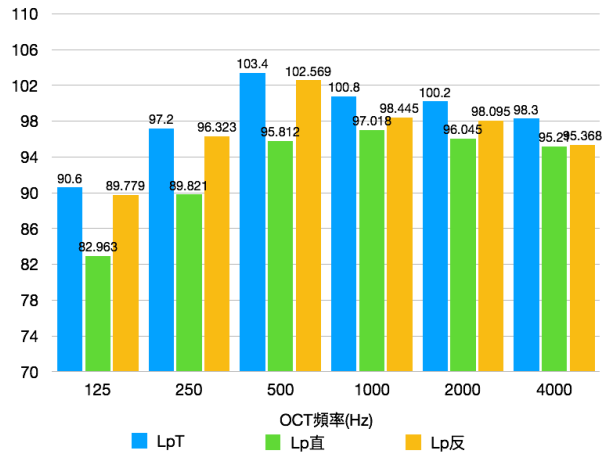
完成自合成音場 (Lp_T) 分離直傳音場 (Lp 直) 與反射音場 (Lp 反)。



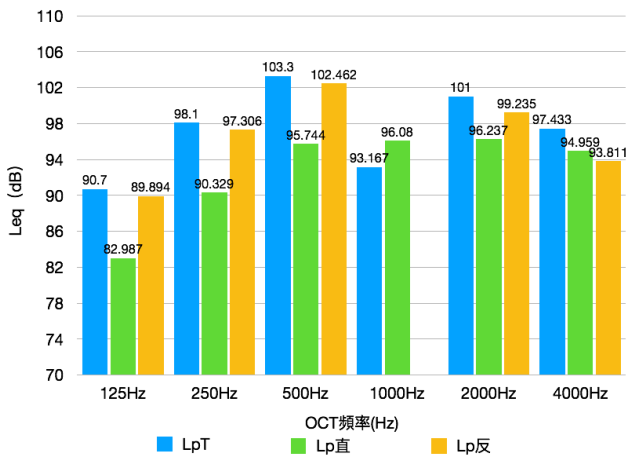
礦纖板



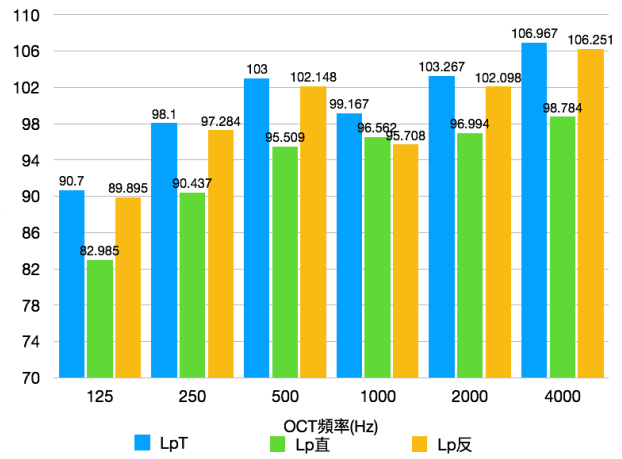
羊毛氈



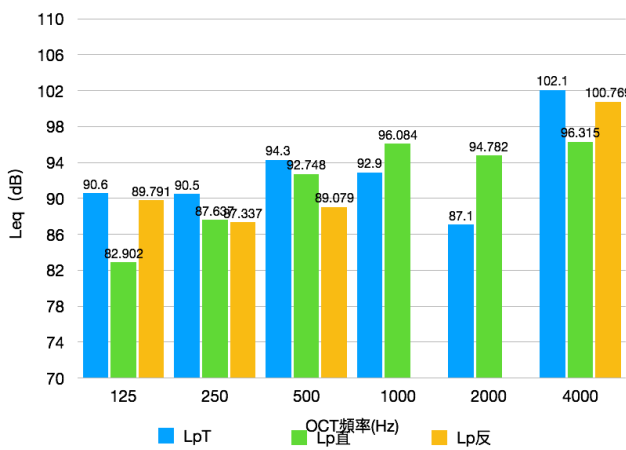
波浪泡棉 (內) + 吸音毯 (外)



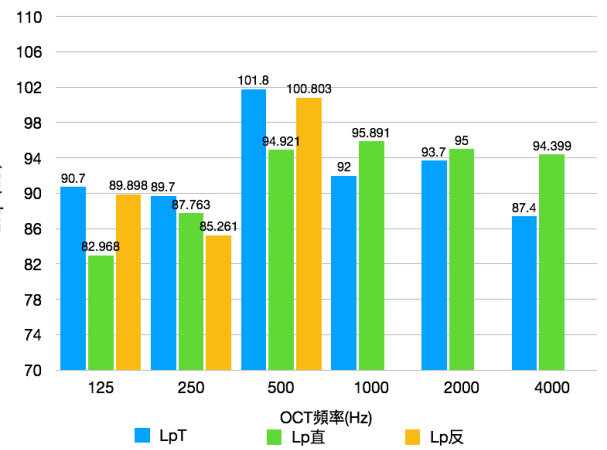
吸音毯 (內) + 波浪泡棉 (外)



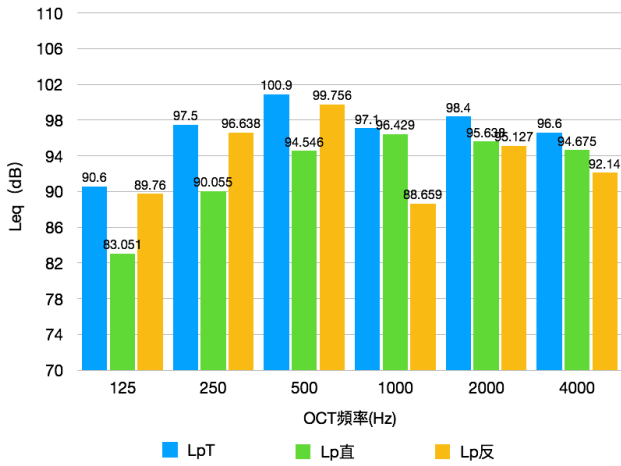
蛋形波浪棉 (內) + 礦纖棉 (外)



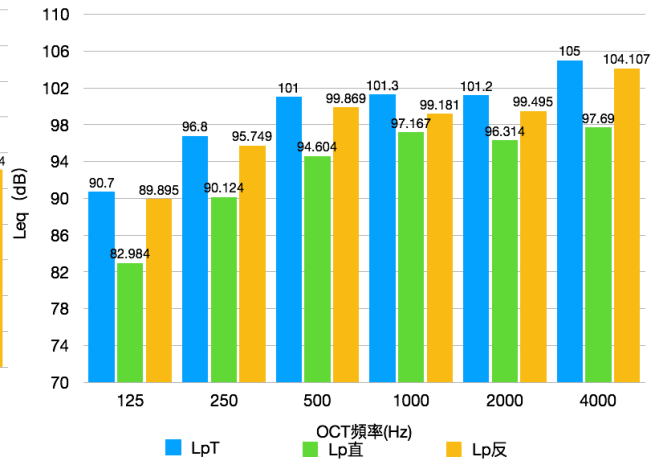
礦纖棉 (內) 蛋形波浪棉 (外)



羊毛氈 (內) 礦纖板 (外)



礦纖板 (內) 羊毛氈 (外)



各材料方向因子 Q 值

Hz	蛋形波浪棉	波浪泡棉	吸音墊	岩棉	礦纖板	羊毛氈
125	6.60	6.82	6.52	6.61	6.34	6.70
250	5.42	6.30	5.08	5.46	5.89	5.23
500	5.45	6.92	6.73	5.51	4.82	6.99
1000	3.03	3.00	6.35	3.05	3.27	3.90
2000	7.01	4.13	5.04	7.02	3.01	4.08
4000	5.78	3.25	6.30	5.81	3.89	3.69

陸、 結論

- 一、材料對各頻段的音源具有相當明顯的選擇性
- 二、各頻段的吸音效果並無明顯的直接相關性
- 三、中、高頻噪音適用材料：礦纖棉（內）蛋形波浪棉（外）、波浪泡棉（內）吸音毯（外）、羊毛氈（內）礦纖板（外）；中、低頻噪音適用材料：蛋形波浪棉（內）礦纖棉（外）、礦纖板（內）羊毛氈（外）

四、根據實驗結果，驗證各因子的相關性

1. 開放空間 $L_p(\text{直}) = L_w - 0.55$

2.
$$10^{\frac{L_p T - L_w}{10}} = \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} = \left(\frac{4}{S_T m}\right)T + \left(\frac{-mq}{4\pi r^2}\right)\frac{1}{T} + \left(\frac{1+q}{4\pi r^2} - \frac{4}{S_T}\right)$$

3. 方向因子 Q 與吸音率 $\bar{\alpha}$ 、室型常數 R 的關係為

$$Q = 1 + q(1 - \bar{\alpha}) = 1 + \frac{qS_T}{S_T + R}$$

4. 吸音率 $\bar{\alpha}$ 和室型常數 R 關係
$$\bar{\alpha} = \frac{mV}{TS_T} = \frac{R}{R + S_T}$$

5. 將自製小型迴響箱實驗測得的迴響時間 T、直傳音壓位準 $L_p(\text{直})$ 、音能位準 L_w 、方向因子 Q、室型常數 R 代入我們所導出的函數中，即可推得空間中之直傳音場（ L_p 直）與反射音場（ L_p 反）。

6. 與大型迴響實驗室比較，本實驗能以更經濟方便的方式得知各吸音材料的吸音率。

7. 由於吸音率無法直接相加減，欲得知複合材料吸音率時，理論公式便無法運用；大型迴響實驗所得單一材料結果亦無法套用。使用本實驗模組，則可方便快速的得知單一和複合材料的吸音率。

柒、 參考資料及其他

- 一、邱銘杰 藍天雄 (2014)【噪音控制原理與工程設計】 五南出版初版一刷
- 二、邱銘杰 張英俊 藍天雄 (2008)【噪音振動之原理與應用】 東華書局出版初版
- 三、蔡國隆 王光賢 涂聰賢(2016)【聲學原理與噪音量測控制】 全華出版第四版
- 四、鄭長聚 洪宗輝 王諶賢 章力(1995)【環境噪音控制工程】 科技圖書發行初版
- 五、W.B Joyce (1975) 【Sabine’ s reverberant time and ergodic auditoriums.】
- 六、L.Nijs & A.Schuur 【Expressing legal demands in acoustical quantities; is the reverberation time a good predictor for the speech intelligibility in a sports hall?】

【評語】 051810

用一個簡易的方法來測吸音率是還不錯的想法，也有能力提出一個分析方法，大致得到合理的數據，值得鼓勵。如果能對各種材料本身的參數與吸音率找到有些定量的關係，問更深入的問題會對分析的方法更有說服力。

摘要

材料的吸音率，一般送至專業迴響實驗室測量，但測試費用昂貴(每樣品 4~6 萬)。將迴響空間縮小，造成直傳音場影響大過反射音場。利用合成音場公式將兩者分離，再用均能音量及方向因子Q，以及吸音率 α 、室型常數R之間的關係建立函數。業界(如：成大音響實驗室)及文獻資料中皆使用沙賓公式將迴響時間轉換為吸音率。本實驗模組僅需藉由測量迴響箱內Leq (分貝值)，不需經過測量迴響時間，即能快速、經濟地得到樣品(含複合材料)的吸音率。

壹、研究動機

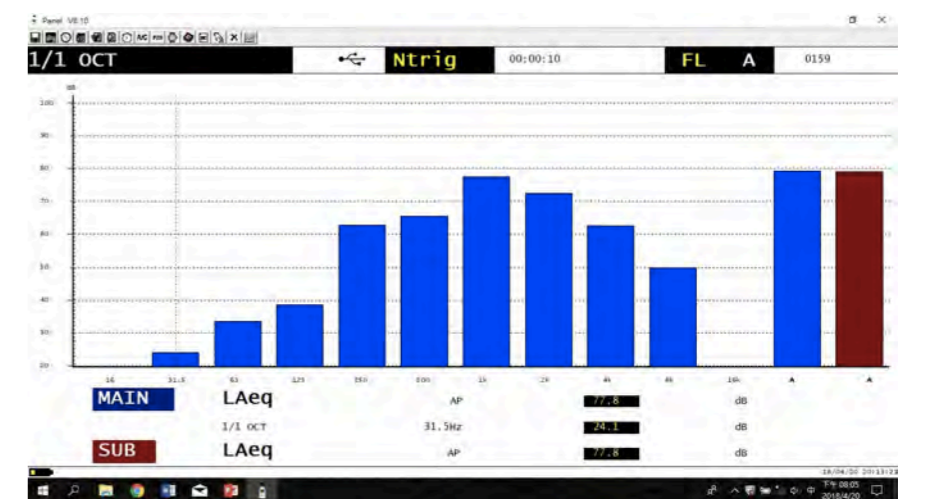
學校的活動中心常會有回音過大影響聽覺品質的問題，一般利用加裝吸音材料來改善。材料的吸音率可由量化回音大小的迴響時間推算得知，但吸音率必須送由專業的迴響實驗室測定。因此，本研究希望透過實驗測量及公式推算吸音率。

貳、研究目的

- 一、測量吸音材料OCT的迴響時間T及均能音量Leq，並分析各其吸音情形。
- 二、由推導及實驗數據，找得迴響箱內合成、直傳、反射音壓位準、方向因子Q、室型常數R、吸音率 α 、迴響時間T的關聯。
- 三、找出各頻率的Q值，分離合成音場中的直傳音與迴響音，並求得材料之吸音率。

參、研究設備及器材

- 一、設備：OCT頻譜分析儀、電腦、麥克風、音響、壓克力箱(長49cm寬60cm高40cm)
- 二、吸音材料(下圖)：蛋形波浪棉、波浪泡棉、吸音墊、岩棉、礦纖板、羊毛氈。



肆、研究過程與方法

前置

- 單頻音源
- 設備軟體

實驗

- Leq、T
- 單、複材

理論

- 能量關係
- 合成音場

程式

- 假設變數
- 最小平方法
- 窮舉法

建立模組

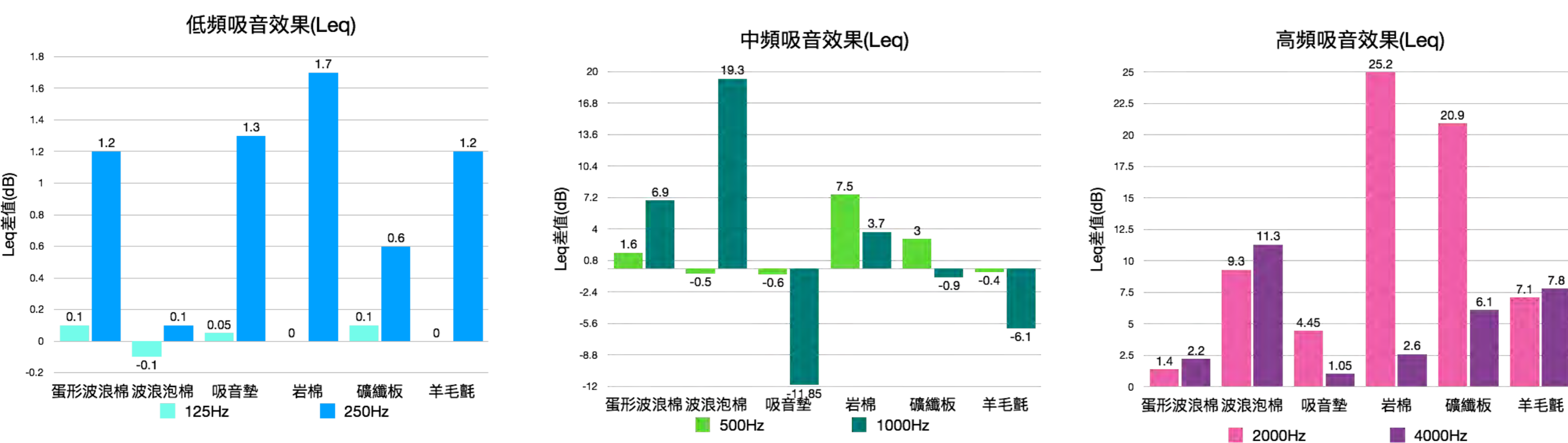
- 代回常數
- 建立函數

檢驗

- 已知吸音率

伍、研究結果

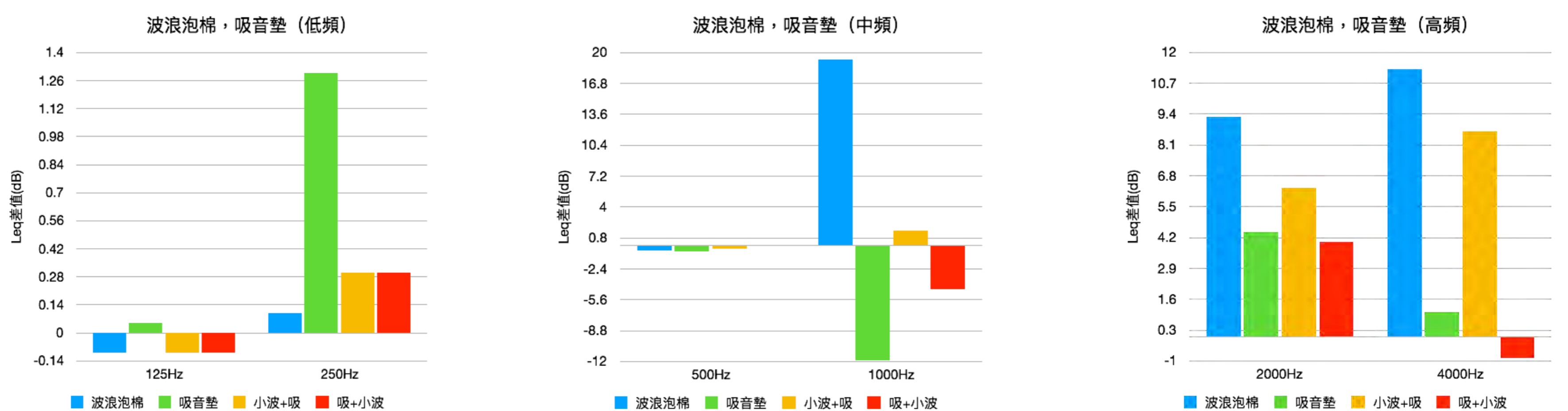
實驗一：測量箱內的Leq，得知材料於OCT頻段的吸音效果。(下圖以Leq差值呈現)



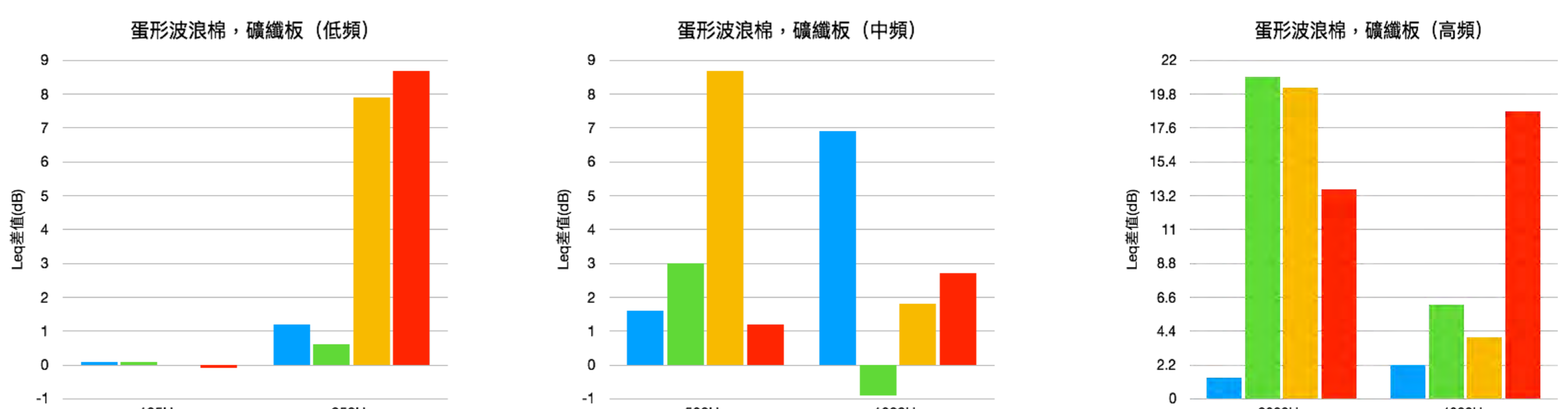
Leq：音能位準(dB)
T：迴響時間(s)
 α ：吸音率(s/m)
R：室型常數(m²)

實驗二、三：測量複合材料的音能位準Leq (下圖以Leq差值表示)

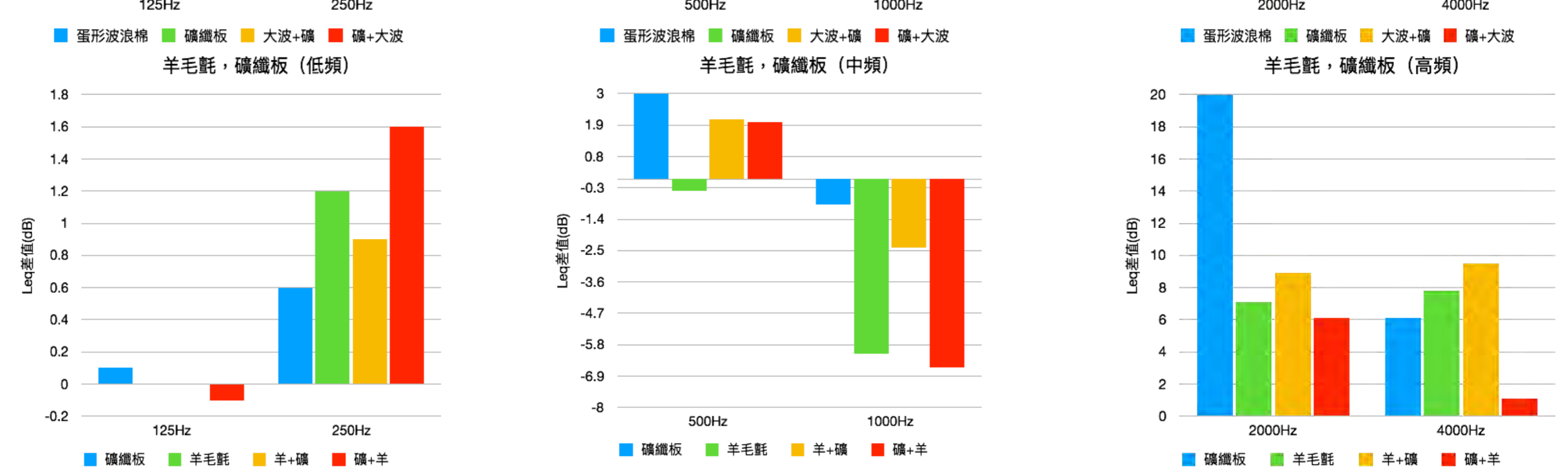
一、波浪泡棉 + 吸音墊



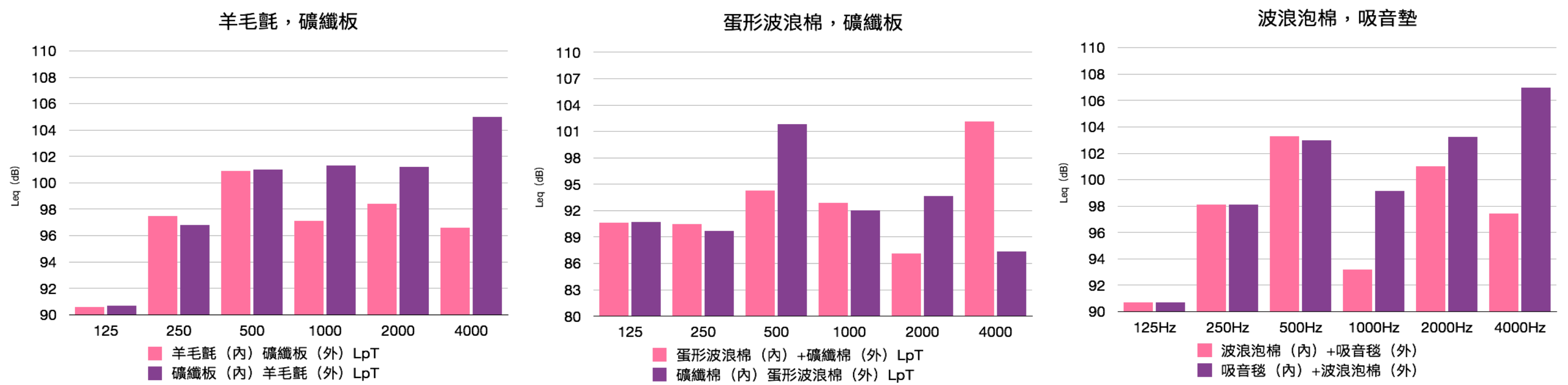
二、蛋形波浪棉 + 礦纖板



三、羊毛氈 + 礦纖板



複合材料吸音效果



- 中、高頻噪音 (如：馬路、工地旁)
 - 礦纖棉 (內) 蛋形波浪棉 (外)
 - 波浪泡棉 (內) 吸音毯 (外)
 - 羊毛氈 (內) 礦纖板 (外)
- 中、低頻噪音 (如：壓縮機旁、卡拉OK鄰近處)
 - 蛋形波浪棉 (內) 礦纖棉 (外)
 - 礦纖板 (內) 羊毛氈 (外)

陸、討論

一、由能量觀點推導音場公式

1. 直傳音場：由音源直接傳至受音點的音量所形成的音場，稱為直傳音場，公式 $p^2 = W\rho_0c \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right]$ 得，

$$Lp(\text{直傳音}) = 10 \log \left(\frac{p_d^2}{p_{re}^2} \right) = Lw + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right)$$

2. 迴響音場：音源傳至牆面做無數的音反射達到均勻的音場，稱為迴響音場。得反射部的均方音壓 $p_r^2 = \frac{4W\rho_0c}{R}$

$$Lp(\text{反射音}) = 10 \log \left[\frac{p_d^2}{p_{re}^2} \right] = Lw + 10 \log \left(\frac{4}{R} \right)$$

3. 合成音場：考慮直傳與反射音， $Lp_T = 10 \log \left(10^{\frac{Lp(\text{直})}{10}} + 10^{\frac{Lp(\text{反})}{10}} \right)$ 由上式，

$$Lp_T = Lw + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

二、假設及推演

$$Lp(\text{直}) = Lw + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right), Lp(\text{反}) = Lw + 10 \log \left(\frac{4}{R} \right), Lp_T = Lw + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

若低吸音力室內音場R值近於0，由迴響音場主宰。若高吸音能力牆面R值趨近無限大，由直傳音場主宰。

開放空間中Q可視為1，音源、收音點距離0.3m，代入 $Lp(\text{直}) = Lw + 0.534$ ，得Lw。

$$Lp_T = 10 \log \left(10^{\frac{Lp(\text{直})}{10}} + 10^{\frac{Lp(\text{反})}{10}} \right), \text{由上式} = Lw + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \text{得} 10^{\frac{Lp_T - Lw}{10}} = \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}$$

$$\text{知} \frac{1}{R} = \frac{1}{S_T} \left(\frac{1}{\bar{\alpha}} - 1 \right), \text{令} Q = 1 + q(1 - \bar{\alpha}), \bar{\alpha} = m \frac{1}{T}, \text{得} 10^{\frac{Lp_T - Lw}{10}} = \frac{4T}{Vm} + \left(\frac{-mqV}{4\pi r^2 S_T} \right) \frac{1}{T} + \left(\frac{1+q}{4\pi r^2} - \frac{4}{S_T} \right)$$

由實驗四知 $m = 0.159$ ，代入測量迴響時間T，體積 $V = 0.12(m^3)$ 及表面積 $S_T = 1.48(m^2)$ ，得到OCT頻率的q值。

並將q及吸音率 α 代入得Q值。再由 $10^{\frac{Lp_T - Lw}{10}} = \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}$ 代入 Lp_T 測量結果及該頻率對應之方向因子Q，即可分離直傳音和迴響音，算出吸音率 α 。

實驗四：沙賓公式與迴響時間——由實驗得m (sec/m)

單一材料OCT迴響時間(s)

複合材料OCT迴響時間(s)

Hz	蛋形波浪棉	波浪泡棉	吸音墊	岩棉	礦纖板	羊毛氈	波浪泡棉吸音墊	吸音墊波浪泡棉	蛋形波浪棉礦纖板	礦纖板蛋形波浪棉	礦纖板羊毛氈	礦纖板羊毛氈
125	0.076	0.063	0.108	0.070	0.151	0.072	0.087	0.089	0.100	0.096	0.031	0.089
250	0.147	0.130	0.226	0.134	0.134	0.230	0.206	0.162	0.149	0.091	0.178	0.016
500	0.040	0.071	0.155	0.020	0.018	0.023	0.027	0.057	0.029	0.040	0.026	0.021
1000	0.021	0.019	0.066	0.013	0.020	0.024	0.020	0.053	0.016	0.049	0.012	0.018
2000	0.015	0.020	0.039	0.014	0.026	0.010	0.019	0.038	0.016	0.024	0.011	0.014
4000	0.014	0.014	0.123	0.005	0.081	0.033	0.055	0.053	0.028	0.015	0.088	0.010

Hz	已知吸音率 α	理論迴響時間	實驗迴響時間T	m
125	0.18	0.0725	0.0709	0.157
250	0.44	0.0296	0.1349	0.732
500	0.75	0.0174	0.0208	0.192
1000	0.81	0.0161	0.0138	0.138
2000	0.87	0.0150	0.0140	0.151
4000	—	—	0.0058	—

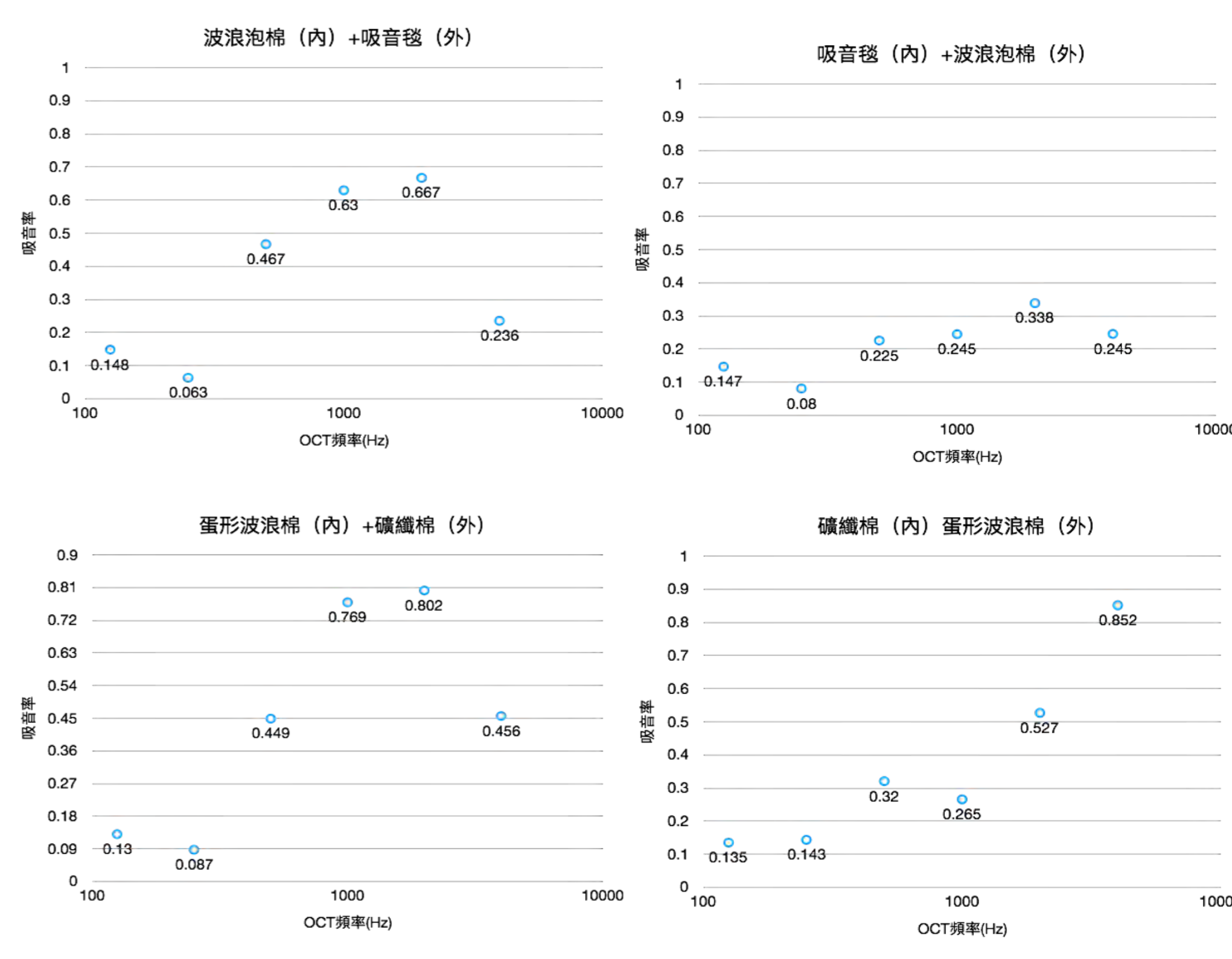
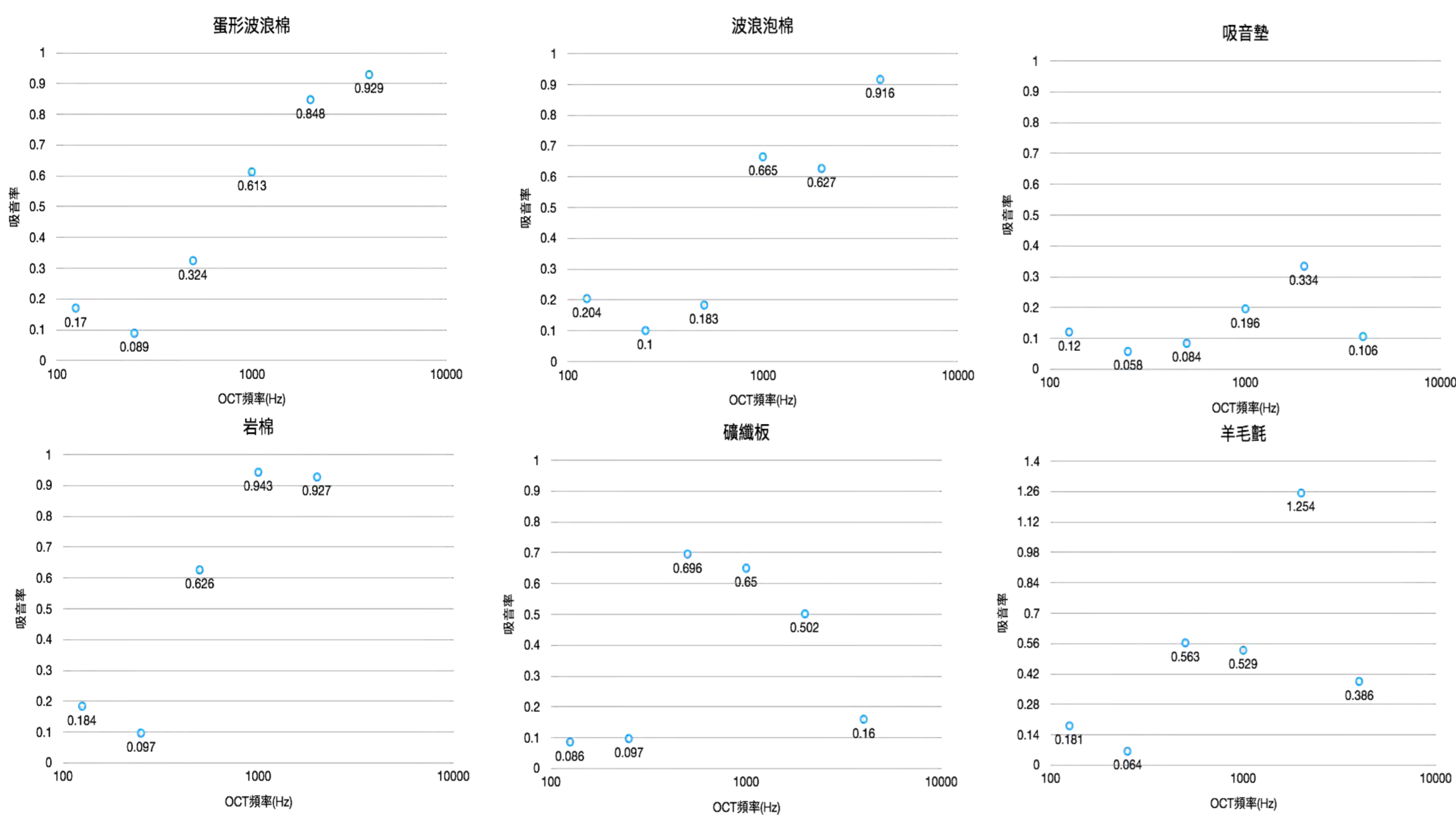
得常數 $m = 0.159$ ，與沙賓公式中常數0.161大致符合。

$$\text{由} \bar{\alpha} = \frac{mV}{TS_T}, m = 0.159,$$

可由實驗測得的迴響時間求得各頻率吸音率。

單一材料OCT吸音率 α

複合材料OCT吸音率 α



單一材料空間方向因子Q

Hz	蛋形波浪棉	波浪泡棉	吸音墊	岩棉	礦纖板	羊毛氈
125	1.240	1.166	1.432	1.208	1.679	1.213
250	1.675	1.556	2.154	1.602	1.588	2.010
500	1.069	1.204	1.692	0.994	0.997	0.983
1000	1.020	1.014	1.190	1.000	1.013	1.023
2000	0.986	1.007	1.070	0.992	1.040	1.009
4000	0.995	1.000	1.515	1.125	1.326	1.067

複合材料空間方向因子Q

Hz	波浪泡棉 吸音墊	吸音墊 波浪泡棉	蛋形波浪棉 礦纖板	礦纖板 蛋形波浪棉	礦纖板 羊毛氈	礦纖板 羊毛氈
125	1.301	1.307	1.374	1.352	1.309	1.009
250	2.011	1.749	1.740	1.395	0.990	1.854
500	0.996	1.139	1.048	1.067	0.997	1.013
1000	1.016	1.173	1.005	1.160	1.001	0.999
2000	1.003	1.067	1.004	1.032	0.997	1.001
4000	1.185	1.078	1.027	1.002	1.017	1.380

得到方向因子Q，即可分離直傳音 $L_p(\text{直})$ 及迴響音 $L_p(\text{反})$ ，再由迴響音 $L_p(\text{反})$ 中的室型常數R得到吸音率。

也就是說，透過測量材料直傳、合成音的音能位準 Leq ，即可推算材料的吸音率。

本迴響箱內OCT頻率對應Q值

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Q	1.298	1.573	1.100	1.051	1.017	1.143

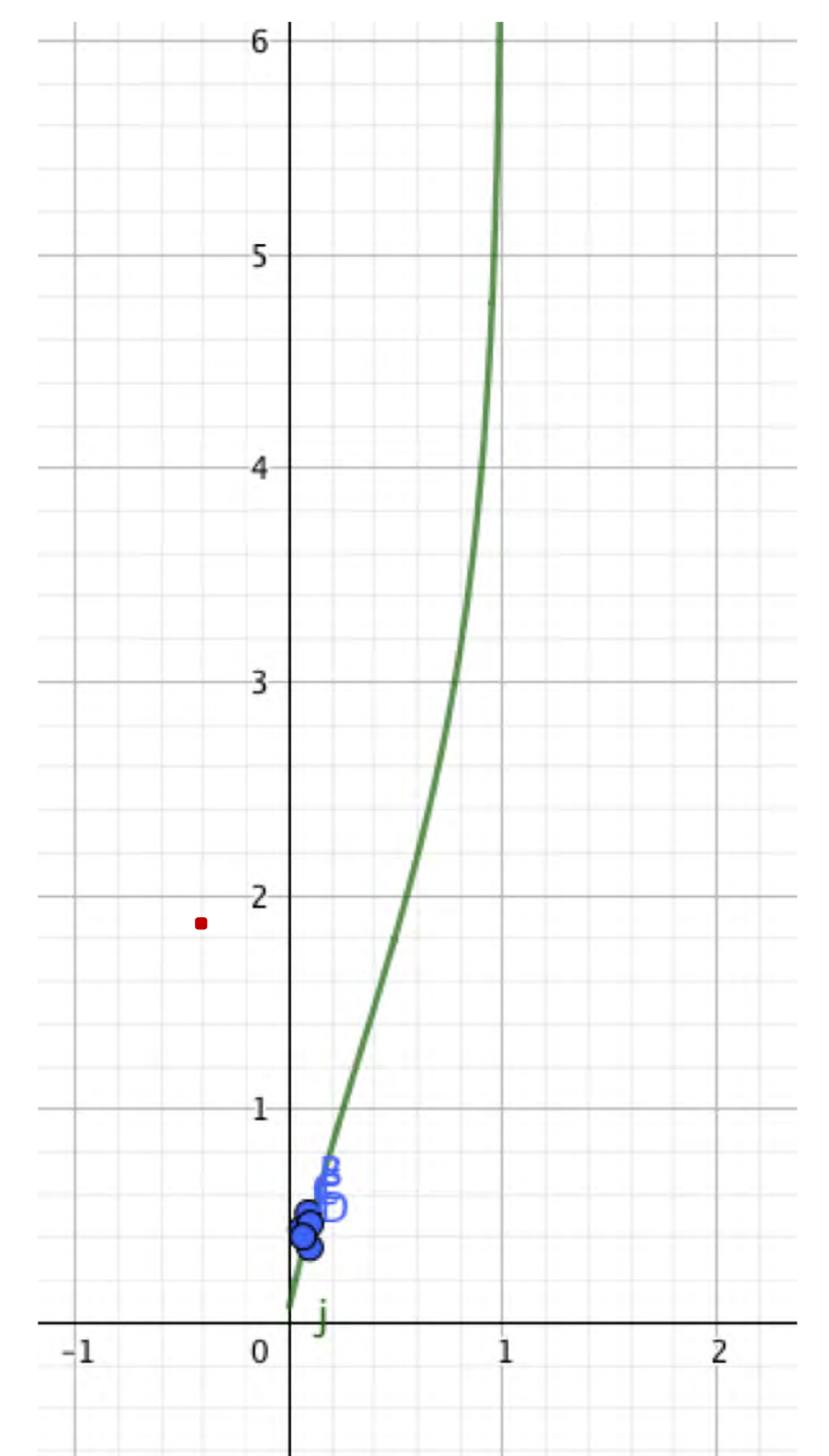
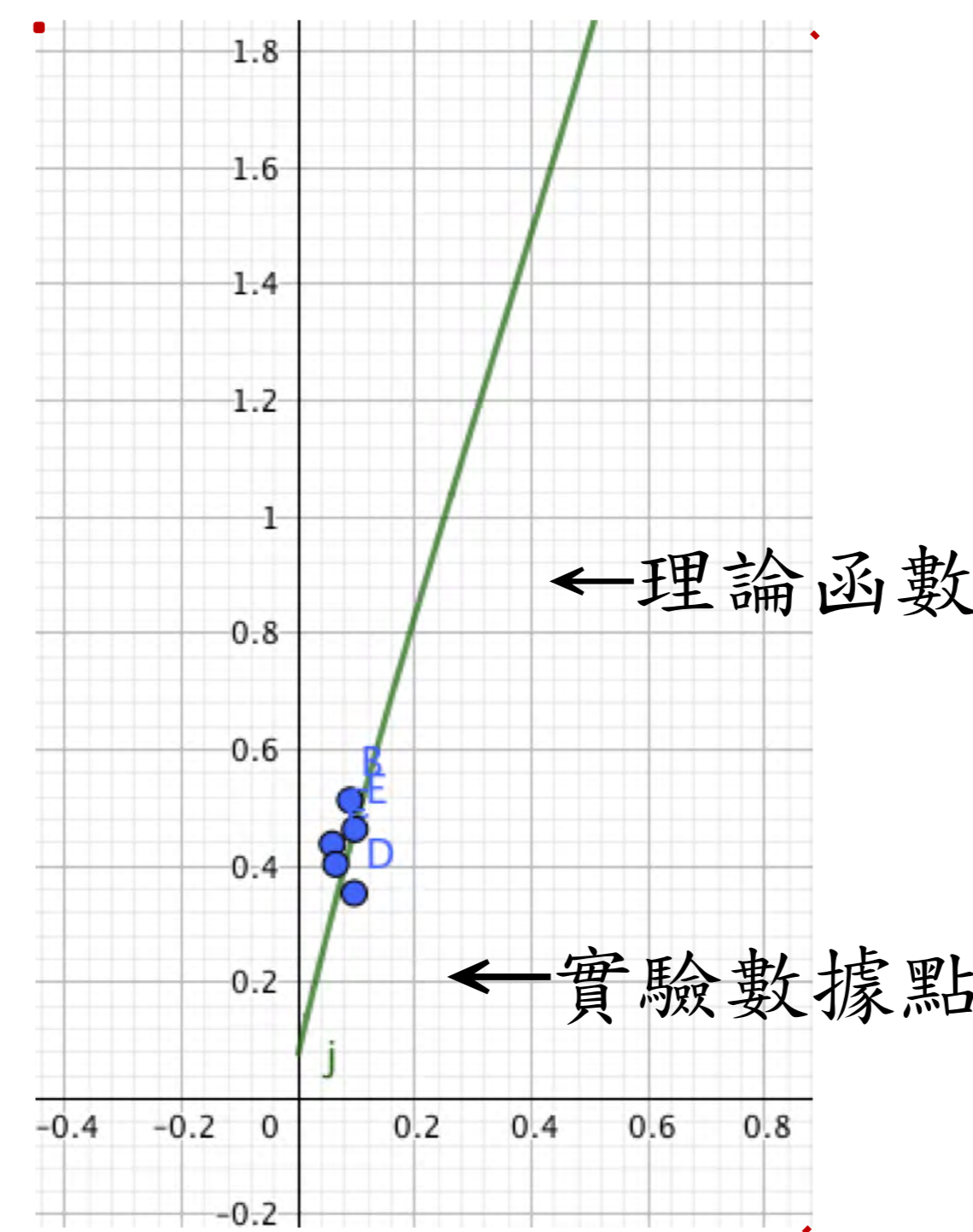
以程式GeoGebra繪出的函數圖：以250Hz為例：

$$y = \frac{Lp_T - Lw}{10} = \log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4S_T\alpha}{1-\alpha}\right)$$

圖形中橫坐標為吸音率 α ，縱座標為 $\frac{Lp_T - Lw}{10}$ 。

可以從圖上看出吸音率和 $\frac{Lp_T - Lw}{10}$ 的關係，進而代出Q值，以及吸音率不大於1（漸近線為x=1）的現象。

右圖為吸音率 α 及 $\frac{Lp_T - Lw}{10}$ 的函數圖形，圖中點為實驗數據點。



柒、結論

- 一、同一吸音材料在1/10OCT頻率有不同吸音率 α 。
- 二、複合材料疊置的順序對吸音效果有顯著影響。除OCT頻譜分析外，本裝置更能增加材料使用效率。
- 三、經實驗得低、中頻及中、高頻噪音適用材料：
 - 低中頻：礦纖棉（內）蛋形波浪棉（外）、波浪泡棉（內）吸音毯（外）、羊毛氈（內）礦纖板（外）
 - 中高頻：蛋形波浪棉（內）礦纖棉（外）、礦纖板（內）羊毛氈（外）
- 四、利用已知吸音材料吸音率（岩棉），推算箱體m值（本箱m=0.159，與沙賓公式相符）
- 五、由函數 $\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} = \left(\frac{4}{S_T m}\right) T + \left(\frac{-mq}{4\pi r^2}\right) \frac{1}{T} + \left(\frac{1+q}{4\pi r^2} - \frac{4}{S_T}\right)$ ，前述實驗知m=0.159，代入迴響時間T測量結果，得q值，並推算方向因子Q。
- 六、欲求材料吸音率，利用方向因子Q，能夠由 $L_p(\text{直傳音}) = Lw + 10 \log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right)$ ，得音能位準Lw，再將測量之 Lp_T 代入 $10 \frac{Lp_T - Lw}{10} = \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}$ ，以室型常數R，再推吸音率 α 。
意即，本模組透過測量空間中的音能位準 Leq ，而不需測量迴響時間，即可推算吸音率 α 。

捌、參考資料

1. 邱銘杰 藍天雄 (2014)【噪音控制原理與工程設計】五南出版初版一刷
2. 邱銘杰 張英俊 藍天雄 (2008)【噪音振動之原理與應用】東華書局出版初版
3. 蔡國隆 王光賢 涂聰賢(2016)【聲學原理與噪音量測控制】全華出版第四版
4. 鄭長聚 洪宗輝 王諤賢 章力(1995)【環境噪音控制工程】科技圖書發行初版
5. W.B Joyce (1975)【Sabine's reverberant time and ergodic auditoriums.】
6. L.Nijs & A.Schuur【Expressing legal demands in acoustical quantities; is the reverberation time a good predictor for the speech intelligibility in a sports hall?】