

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生活與應用科學科(三)

第三名

033009

綠色協奏曲～咖啡渣與吸音棉共築板擦機的「無聲潔靜」

學校名稱：彰化縣立陽明國民中學

作者： 國一 李沐謙 國一 張祐嘉 國一 黃曉群	指導老師： 蔡名峯 陳炳彰
---	-----------------------------

關鍵詞：板擦機降噪、填充材、隔音罩

摘要

本組自製壓克力立體箱，由聲音頻譜分析儀得板擦機頻率 580、1160、4060Hz 特定聲波，以藍芽喇叭控制上述三種頻率，測試多種吸音材料，研發創新**吸音棉+咖啡渣+吸音棉**三明治**複合材料**，展現卓越降噪效果。增加咖啡渣厚度有效減弱聲音，厚度達 3.12 公分以上，隔音效果不明顯；在 3.57 公分下，重壓提高**孔隙密度**，進而從 68 分貝降至 55 分貝達 **13 分貝(19%)**。

由以上研究結果，設計板擦機**外部隔音罩**，內部黏貼此**複合材料**，兼具**隔音與防灰逸散**功能，從 110 分貝降至 65 分貝減 **45 分貝(40%)**，降噪效果顯著，並申請專利中。研究成果應用在**家電馬達**，延伸**隔音牆**建築上。實踐**變廢為寶**永續精神，展現低成本創新環保降噪解方。

壹、前言

一、研究動機

每次專心坐在教室內聆聽課程時，卻被左鄰右舍突如其來、震耳欲聾的**板擦機聲響**打斷！「吸的雖是粉筆灰，卻也吸走我們的靈魂」；簡直像在嘈雜市集裡，心情也跟著亂成一團。雖然把教室門關上，卻仍然無法阻擋那些聲音**像洪水猛獸般襲來**，彷彿有無數隻「**噪音怪獸**」在門外奔跑。我們不敢大聲要求隔壁班的同學關門，此困擾讓人無可奈何。於是本組決定對教室的板擦機處理噪音的問題。

本組結合理化課程(**二上-波動與聲音, 二上 3-5 多變的聲音**) 介質對響度變化的影響，針對不同的吸音材質，在**板擦機不同頻率**條件下-搭建出**有效的複合式吸音材料**，如同為板擦機穿上『**隔音外套**』，對照於傳統室內裝潢吸音複雜的聲學設計，本組提出有效小成本、小規模的經濟方式-穿上『**隔音外套**』，達到非常好的**降噪效果**；板擦機穿上本組自製的**隔音外套**，當啟動時，**稱職扮演吸粉筆灰外**，也不會吵到別人，教師與學生皆能安靜授課與聽講。

二、研究目的

欲利用發音源穿透過不同材質孔板，以及在此兩板材間形成的腔體中，添加不同填充材料，去探討吸音效果，而最終以市售吸音材料降噪表現為標竿，而自製優異創新**複合吸音材料**，達到“**變廢為寶**”的最終目的。以下是本組將進行的各個實驗：

- (一)、先利用聲音頻譜儀測量板擦機所發噪音的各種頻率。
- (二)、求得無吸音材質下的空腔體(**鐵板、鋁板、木板、壓克力板**)板擦機的各種噪音強度。
- (三)、探討腔體內不同填充材料對板擦機所發出的各種頻率的隔音效果。
 1. 測試腔體厚度 50mm +**稻稈**對板擦機噪音的隔音效果。
 2. 測試腔體厚度 50mm +**粗糠**對板擦機噪音的隔音效果。

3. 測試腔體厚度 50mm + **羊毛絨**對板擦機噪音的隔音效果。
4. 測試腔體厚度 50mm + **廚餘粉**對板擦機噪音的隔音效果。
5. 測試腔體厚度 50mm + **咖啡渣**對板擦機噪音的隔音效果。
6. 測試腔體厚度 50mm + **聚酯纖維板**對板擦機噪音的隔音效果。
7. 測試腔體厚度 50mm + **吸音棉**對板擦機噪音的隔音效果。

(四)、根據以上實驗設計有效創新複合材料各種組合的隔音效果。

(五)、以**藍芽喇叭模擬板擦機**的噪音頻率，測量**吸音棉+咖啡渣+吸音棉**的隔音效果。

(六)、針對板擦機實際穿上本組自製的『**隔音外套**』，並測量其對噪音的隔音效果。

三、文獻回顧

1. 而本組在實驗前，必須以學理為基礎，進而在老師的指導下，前後找了幾篇相關文章研讀，其中包含了：

(一)、究竟聲音遇到障礙物的傳播行為是如何呢?本組從”內政部建築研究所自行研究報告”中得知，入射音波 I=反射音波 R+**被吸收音波 A**+穿透音波 T (I=R+A+T)，而材料中的吸音能力是用吸音係數來評估，吸

音係數 $\alpha = \frac{I-R}{I} = \frac{A+T}{I}$ (圖 1-1)。

1. **林雨莊**，**環境類**第 8 章中，8.2.2 **多孔材料吸音原理**，得知**(1)多孔吸音材料的吸音性能**，主要受材料的**流阻、孔隙率、結構因數、材料厚度、堆積密度**、材料背後的空氣層、材料表面的裝飾處理以及使用的外部條件等影響，本組利用上述來設計【**實驗七**】【**實驗八**】。

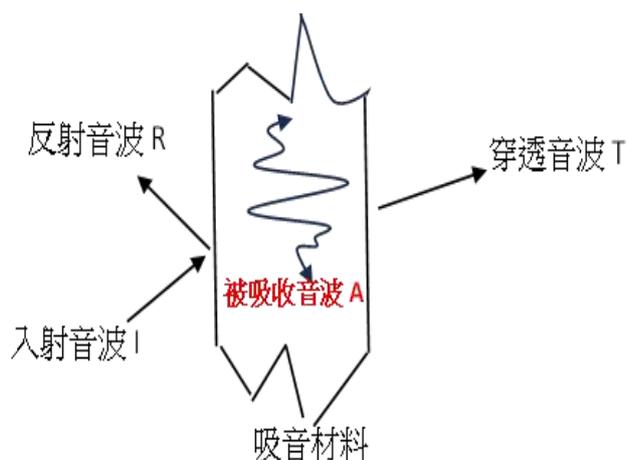


圖 1-1 聲音遇到障礙物的傳播路徑

本圖為研究者自行製作

2. **Kang 等人**，2023，在 *Bio Resources* 期刊上的 ” Investigation of the sound-absorbing performances of pure coffee grounds” 研究指出，測量了純咖啡渣的吸音係數，發現其吸音性能可與其他天然吸音材料媲美。研究結果顯示，當**咖啡渣的厚度和密度增加時**，**低頻的吸音係數會提高**，而**高頻的吸音係數則會降低**。在密度為 0.3g/cm³ 和厚度為 50mm 時，**咖啡渣的最佳降噪係數 (NRC) 達到 0.61**。這表明**咖啡渣作為一種環保吸音材料具有很高的應用價值**，而設計出【**實驗七**】【**實驗八**】。
3. **金一凡等**，2004，” 輕質量高聲阻材料之探討” 中，本組發現複材面板與蜂巢芯組成

之複材蜂巢芯三明治結構穿透損失值之測試結果，有三個蠻重要的結論，其(1)利用蜂巢結構改善材料的聲阻特性，除了輕量化外，穿透損失值也會隨著頻率的增加而增加，本組參考其結論，而設計出【實驗二】【實驗六】。

4. 廖彩君等，2010，” 點食成金--粗糠與常見材料的保溫、隔音及緩衝效能之研究” 中，對相同材料而言，隔音效果分層放置 > 均勻混合 > 單一材料，混合材料的隔音效果優於單一材料，是因為混合後顆粒間空隙被填滿，使密度上升，增加聲音反射。而混合後空隙大小改變，能有效過濾的聲音頻率也隨之改變，隔音材料分層放置，增加界面數可提升反射量。而每種材料空隙尺寸不同，最佳過濾頻率也所不同，能一次過濾兩種頻率組合而提升隔音效果，將材料壓縮也可提升隔音效果，上述結論與本組設計的【實驗三】【實驗四】相符合。
5. 黃柏勛等，2018，” 小簾立大功【窗簾的吸音與隔音效果之研究】” 的這篇研究中，使得本組可以知道幾個重要結論，其(1)材料厚度與吸音效果呈正相關性，與隔音效果呈負相關性，窗簾材料厚度增加，對吸音效果有利，但對隔音效果不利，其(2)材料孔隙面積與吸音、隔音效果都呈負相關性，這與本組【實驗七】相符合。
6. Mugahed Amran 等，2021，” Sound-Absorbing Acoustic Concretes: A Review” ，本組了解吸音產品、降低聲波聲功率的新型建築材料的重要性。每種建築材料都有不同的NRC(噪音降低係數：Noise reduction coefficient)，主要是取決於其密度。先前的研究人員很少考慮聲音傳播的基本原理、傳播的保存、吸聲特性及其參數。世界各地的建築業主要開始使用吸音混凝土來降低開放和封閉空間中的聲音頻率並提高隔音效果。更輕的混凝土，如加氣混凝土，會比高密度混凝土吸收更多的聲音，本文對吸音混凝土進行了概述，本組利用本篇文章的點子，未來可自創的複合材料吸音板，咖啡渣與混凝土結合後，成為吸音板，並實驗看其效果。
7. 一般學習良好的學習環境其背景音量需在 55~65 分貝，本組的研究必須經找到一種材料，將板擦機的發出音量降到 65 分貝左右，這才能算是有效吸音。

貳、研究設備及材料

一、材料及設備(硬體) 圖 2-1 至圖 2-26 研究者自行製作

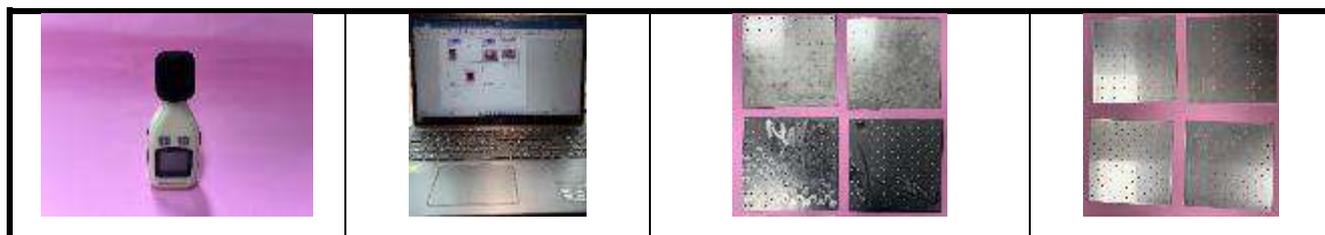


圖 2-1 積分式檢測計	圖 2-2 筆電	圖 2-3 鐵板	圖 2-4 鋁板
			
圖 2-5 木板	圖 2-6 壓克力板	圖 2-7 藍芽喇叭	圖 2-8 粗糠
			
圖 2-9 廚餘粉	圖 2-10 咖啡渣	圖 2-11 稻稈	圖 2-12 隔音檢測箱
			
圖 2-13 穿孔機	圖 2-14 板擦機	圖 2-15 瞬間黏著劑+矽利康槍+熱熔槍	圖 2-16 吸音棉
			
圖 2-17 聚酯纖維板	圖 2-18 手機	圖 2-19 軟木墊	圖 2-20 瑜珈墊
			
圖 2-21 氣泡布	圖 2-22 燒杯	圖 2-23 電子磅秤	圖 2-24 羊毛絨
			
圖 2-25 量筒	圖 2-26 棉袋		
			

二、應用軟體

GNU Octave 自由免費軟體



本圖擷取自 GUN Octave 網站

Audio Spectrum Analyzer 自由免費 APP 軟體



本圖擷取自 Analyer 網站

三、穿孔板製作

本組為了模擬聲音在不同材質之門板，及在尺寸相同之孔洞，但不同鑽孔率下的穿孔板，對聲音的穿透率是否有差異，因此，自製了四種以木板、鐵板、鋁板及壓克力板為材料的穿孔板，而為了讓其孔率呈現出兩種的差異，因此，以 5mm 直徑大小的孔洞，在穿孔率 1.4% 和 2.8% 來呈現設計的差異性，穿孔率 1.4% (圖 2-27) 是以板材表面積 (30cm*30cm) 的 1.4% 下去計算 5mm 直徑孔洞的面積的孔數(56)，並平均分布到板材上，而穿孔率 2.8% 的孔數(圖 2-28) 是 1.4% 的兩倍(112)，也就是說，穿孔率就是指鑽孔鑽出來的餘料量，穿孔面積總和與板材總面積的比值，例如：穿孔面積為 a ，板材面積為 A ，則穿孔率等於 a/A ，計算好孔數後，先以電腦繪畫在紙張上，然後，黏貼在板材上定位，再以穿孔機進行孔位鑽孔(圖 2-29&2-30)。



圖 2-27 穿孔率 1.4% 左右兩圖研究者自行製作



圖 2-28 穿孔率 2.8%



圖 2-29 鑽孔機 左右兩圖研究者自行製作



圖 2-30 鑽孔機鑽孔

四、隔音檢測箱製作

本組藉由不同板材、不同填充材下以及不同孔率下，來模擬聲音對其穿透率的差異性，因此，需製作模擬無響室的檢測箱，因此在材料選擇上，選擇質量輕，方便操作，且能將隔音效果顯現出來，利用壓克力板密閉效果較紙箱或塑膠瓦楞板佳的特性，避免實驗過程中，有背景或環境干擾因素產生，利用 3mm 厚的 6 塊壓克板，尺寸分別是 2 塊 30cm*30cm，以及 4 塊 30cm*90cm，自行黏合出 30cm*30cm*90cm 的壓克力立體箱(圖 2-31)，並在分貝計的檢測端，鑽出 1.5cm 的孔洞，以利分貝計的檢測頭可穿入，而數值的讀取可在箱體外方便目視得出(圖 2-32)。

	
<p>本圖為研究者自行製作 壓克力箱體 圖 2-31</p>	<p>本圖為研究者自行製作 壓克力箱體 圖 2-32</p>

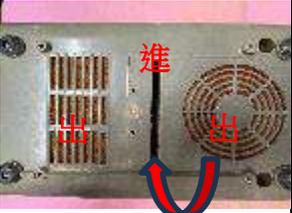
(一)、填充材製備

本組設計一些可吸音的填充材來實驗，其中取自農夫收割後的稻稈，農會碾米廠的粗糠，廚餘乾噪機的廚餘粉，爸爸泡咖啡後咖啡渣，市售聚酯纖維隔音板，市售隔音棉毯，市售羊毛絨等，自製複合材料等(如圖 2-33~2-40)，比較其對聲音的吸音阻隔效果。

		
<p>圖 2-33 粗糠+鋁板</p>	<p>圖 2-34 廚餘粉+鋁板</p>	<p>圖 2-35 咖啡渣+鋁板</p>
		
<p>圖 2-36 聚酯纖維板+瑜伽墊</p>	<p>圖 2-37 軟木墊+鋁板</p>	<p>圖 2-38 羊毛絨+鋁板</p>
		<p>圖 2-33 至圖 2-40 研究者自行製作</p>
<p>圖 2-39 羊毛絨+鋁板</p>	<p>圖 2-40 稻稈+鋁板</p>	

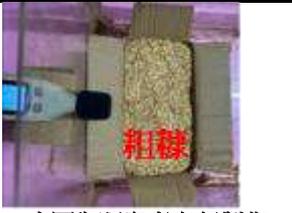
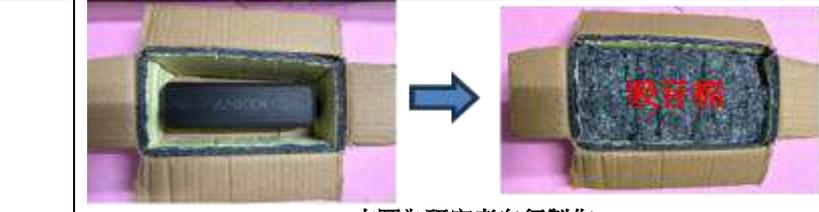
(二)、透過板擦機構造研究(圖 2-41~2-48)，打造最強隔音罩，替板擦機穿『隔音外套』。

			
<p>本圖為研究者自行製作 圖 2-41 板擦機音量</p>	<p>本圖為研究者自行製作 圖 2-42 壓克力外殼</p>	<p>本圖為研究者自行製作 圖 2-43 粉筆灰集塵</p>	<p>本圖為研究者自行製作 圖 2-44 馬達及集塵</p>

		袋(含濾棉)	袋位置(紅框處)
			
本圖為研究者自行製作	本圖為研究者自行製作	本圖為研究者自行製作	本圖為研究者自行製作
圖 2-45 板擦機底下秘密白色蓋子	圖 2-46 負壓進出氣口	圖 2-47 抽氣馬達側面	圖 2-48 抽氣馬達葉輪

(三)、隔音罩的製作

利用紙箱模擬隔音罩，而藍芽喇叭模擬板擦機，將粗糠、稻稈、廚餘粉、咖啡渣、保龍板、羊毛絨、軟木墊、吸音棉及聚酯纖維板等填充材來製作隔音罩填充材，藉此模擬填充在板擦機的外殼壓克力板與抽氣馬達間，裝上此隔音罩的降噪效果，如(圖 2-49~2-53)。

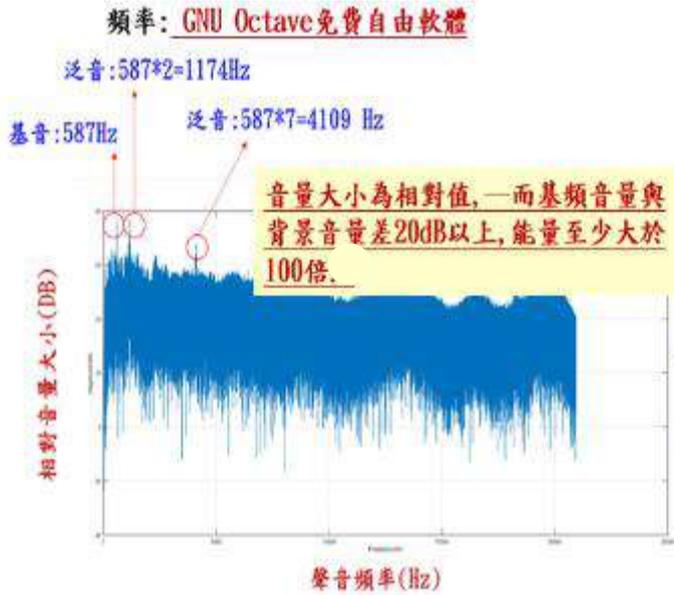
		
本圖為研究者自行製作	本圖為研究者自行製作	本圖為研究者自行製作
圖 2-49 粗糠隔音罩	圖 2-50 稻稈隔音罩	圖 2-51 廚餘粉隔音罩
		
本圖為研究者自行製作	本圖為研究者自行製作	
圖 2-52 咖啡渣隔音罩	圖 2-53 吸音棉隔音罩	

參、研究過程及方法

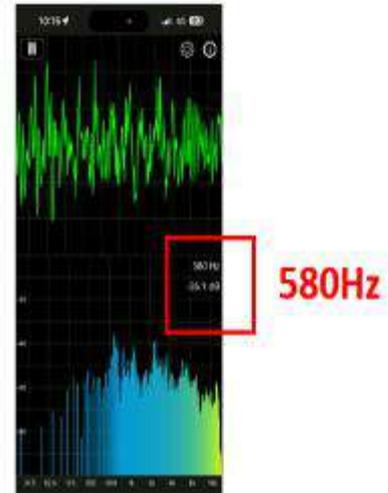
一、根據研究目的，本組的研究方法與步驟如下：

(一)、在板擦機的頻率與響度方面，其研究方法與步驟如下：

如下(圖 3-1)及(圖 3-2)，本組先利用手機在安靜的環境下錄製板擦機噪音源，透過 GNU Octave 自由免費軟體，將其錄製的 wave 聲音檔做頻譜分析，得知基音頻率(Fundamental Frequency)約為 587Hz，並有 2 倍和 7 倍的泛音。除此之外，亦透過手機免費 Audio Spectrum Analyzer APP 做相互驗證：它使用 FFT(傅立葉轉換)時檢測(real-time analysis)聲頻譜的原理。得知噪音源的頻率後，在筆電安裝 Octave 免費自由軟體，操縱變因為音量跟頻率大小，進行本實驗對於各種經濟環保吸音材質的研究。



頻率: Audio Spectrum Analyzer手機免費APP軟體



成功相互驗證

圖 3-1 利用 GNU Octave 和 Audio Spectrum Analyzer 相互驗證成功說明圖

本圖為研究者自行製作

(步驟1)

用分貝計測得
板擦機聲音大小
(85dBA → 訂出實驗音量大小)



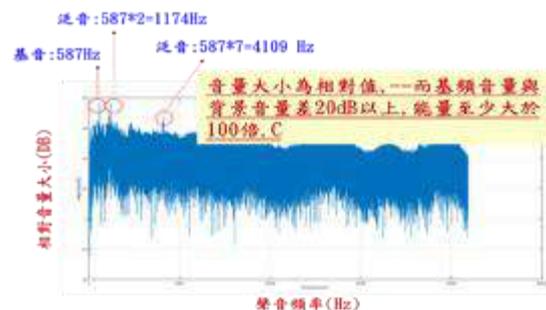
(步驟2)

用手機錄製板擦機聲音
(1min wave音檔)



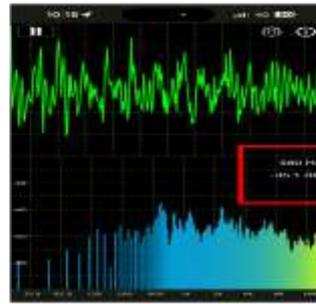
(步驟3)

GNU Octave軟體
對聲音檔做頻譜分析



(步驟4)

手機App
Audio Spectrum Analyzer
最大音量的基頻得出頻率



580Hz

(步驟5)

GNU Octave軟體
利用程式發出聲音
(可調整響度與頻率)



(步驟6)

利用分貝計測得音量大小
(進行吸音材質的研究)

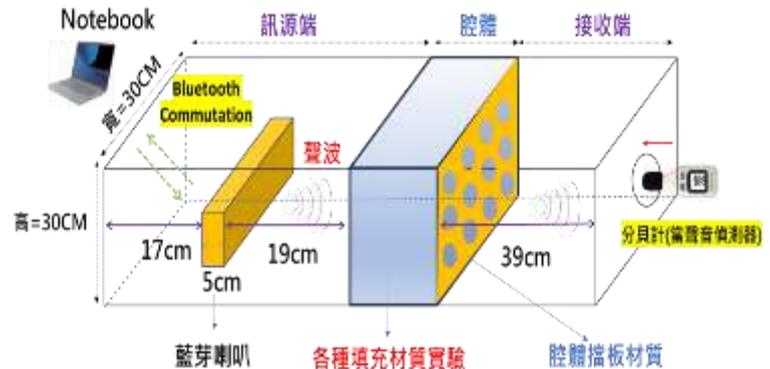


圖 3-2 利用分貝計、手機、筆電、軟體進行吸音材料的研究流程說明

本圖為研究者自行製作

二、探討腔體內填充不同吸音材料對板擦機所發出的各種頻率的隔音效果方面，其研究過程與方法如下：

(一)、吸音材質研究的壓克力立體箱內設備位置說明

利用GNU Octave免費自由軟體，
程式產生純音聲波，可以調整
音量與頻率。

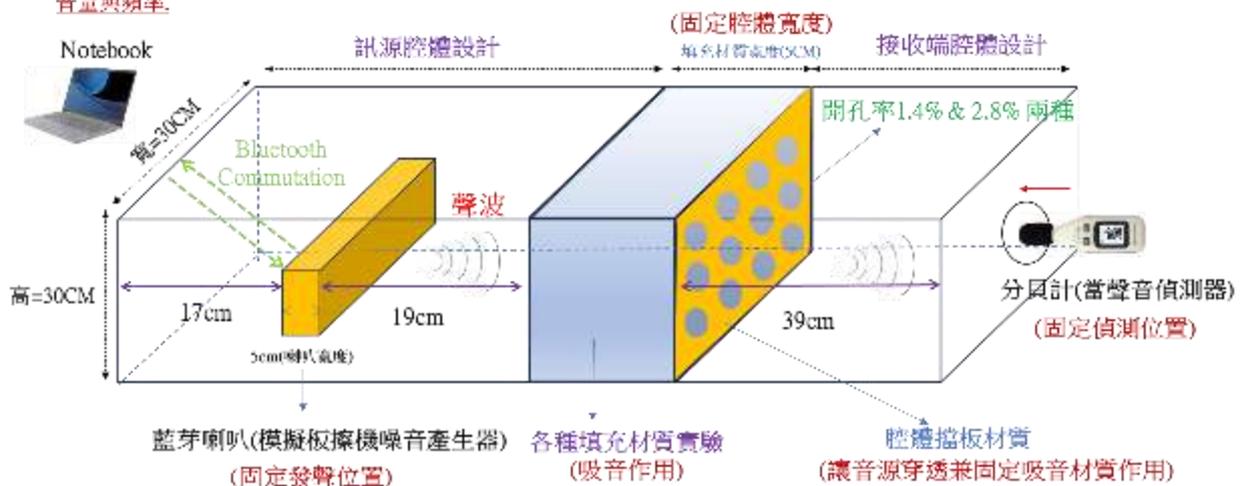


圖 3-3 壓克力立體箱內對吸音材質研究的設備位置說明

本圖為研究者自行製作

(二)、自製壓克力測試箱

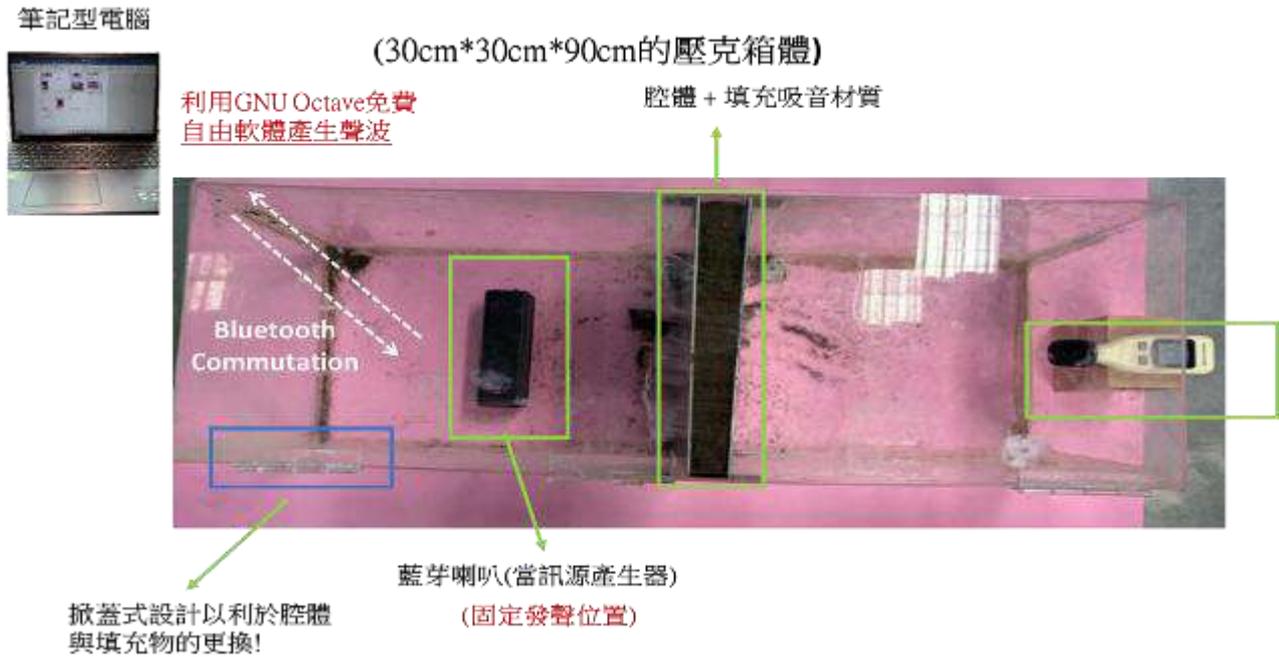


圖 3-4 自製壓克力立體測試箱及相關設備位置說明

(三)、聲音實驗-對照組示意圖

本圖為研究者自行製作

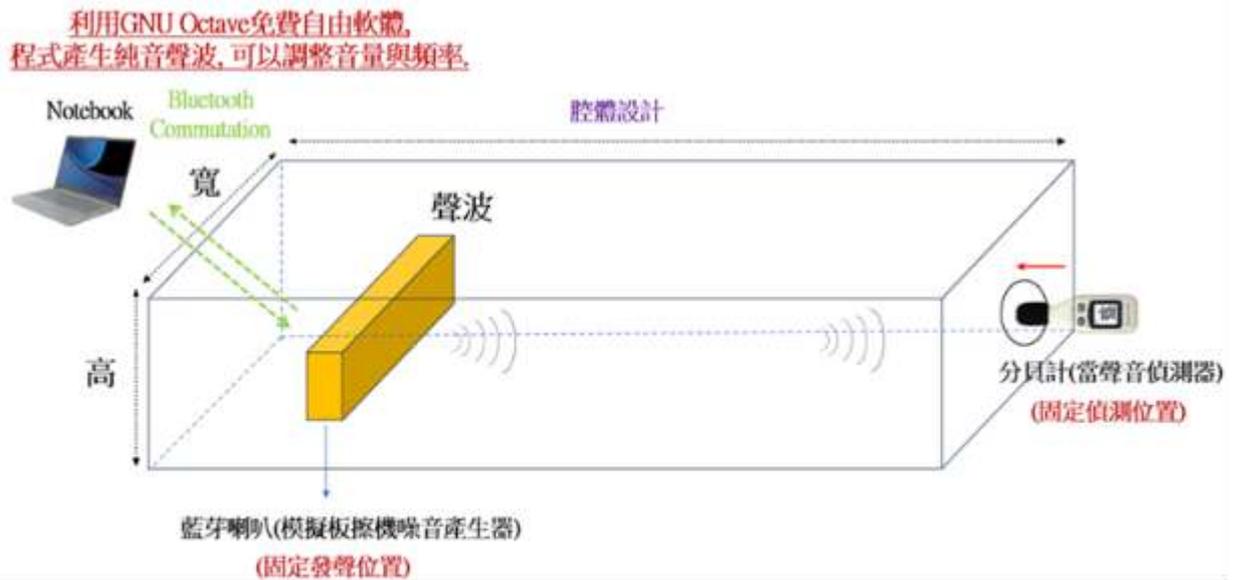
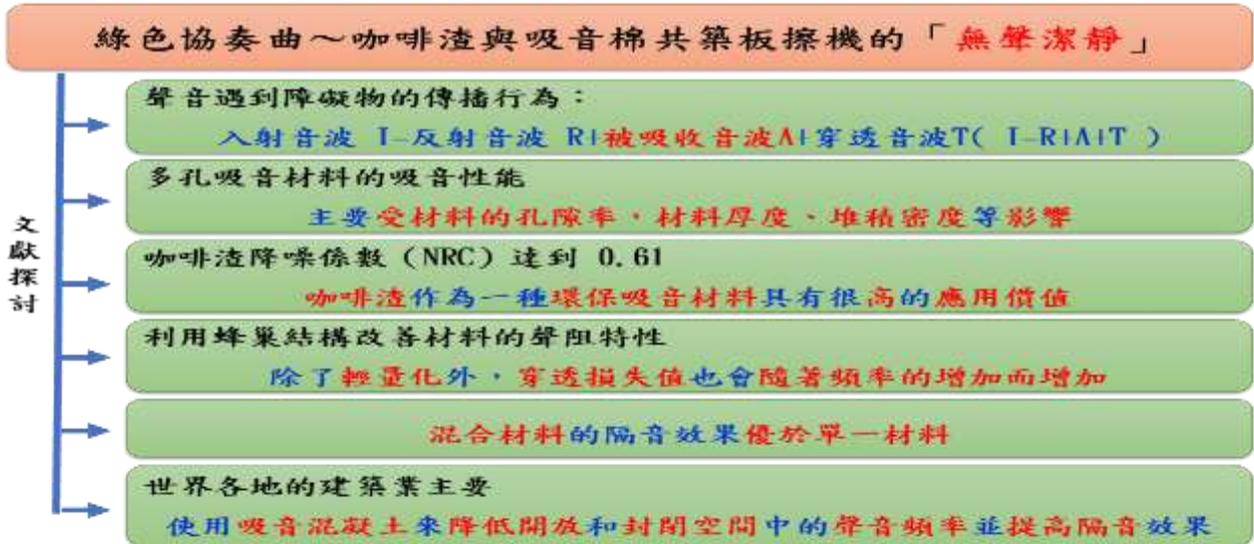


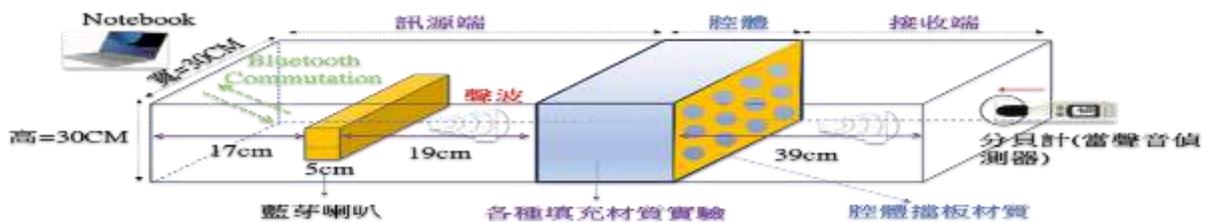
圖 3-5 實驗對照組說明

本圖為研究者自行製作

二、實驗研究流程圖 本圖為研究者自行製作



聲音實驗-吸音材質的研究



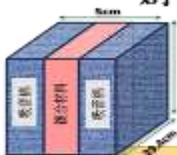
第一階段：吸音單一材料的研究，找出最佳吸音材料候選人

稻稈 粗糠 羊毛絨 廚餘粉 咖啡渣 聚醃纖維板 吸音棉

修正改良

第二階段：吸音複合材料的研

創新的複合材料吸音棉+咖啡渣+吸音棉得到最顯著降噪效果。



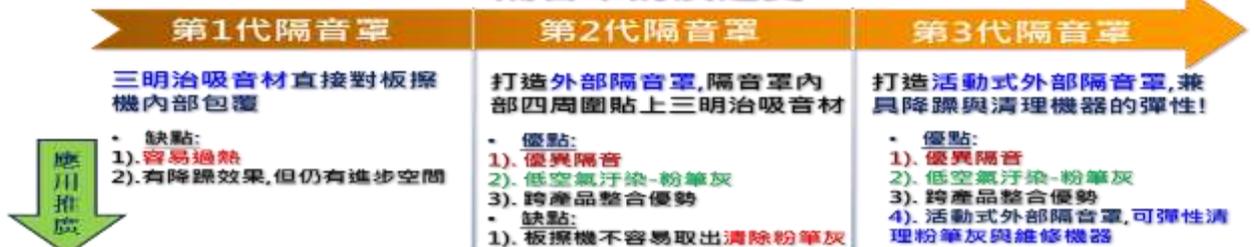
吸音棉	保麗龍	吸音棉	吸音棉	瑜珈墊	吸音棉
吸音棉	氣泡袋	吸音棉	吸音棉	軟木塞	吸音棉
吸音棉	咖啡渣	吸音棉	吸音棉	吸音棉	吸音棉

第三階段：模擬「隔音外套」的研究

對照於傳統室內裝潢吸音複雜的聲學設計，本組提出有效小成本、小規模的經濟方式-穿上「隔音外套」，達到非常好的降噪效果！

第四階段：動手打造「實體隔音罩」

隔音罩的演進史



此核心概念可應用於許多馬達家電；例如抽水馬達，甚至延伸至隔音牆夾層材料建築上。實踐「變廢為寶」永續精神，展現小成本、大創意的環保降噪解方。

三、正式試驗：

【實驗一】在無腔體與無填充材質下，對於不同頻率下之純音，控制同樣響度，同樣聲音傳播距離，以分貝計測得的響度為**實驗對照組**，用以**呼應研究目的一**。

操作變因：聲音頻率 580Hz、1160Hz 和 4060Hz。

控制變因：聲音響度 85 分貝、無腔體、無填充材質、壓克力立體箱、喇叭位置、分貝計位置。

利用自製壓克力檢測箱來測量無腔體、無填充材下純音的對照組(圖 3-6)，並紀錄之。

利用GNU Octave免費自由軟體, 程式產生純音聲波, 可以調整音量與頻率.



圖 3-6 聲音實驗-對照組說明

本圖為研究者自行製作

【實驗二】第一階段外箱板材選定作業，聲音穿過不同腔體材質音量衰減表現，**呼應研究目的二**(圖 3-7)。

操作變因：不同腔體材質(四種板材，並對每種材質分為穿孔率 1.4%跟 2.8%)。

控制變因：聲音響度 85 分貝、聲音頻率 580Hz、1160Hz 和 4060Hz、壓克力立體箱、喇叭位置、分貝計位置。

- (1)利用自製壓克力立體箱來測量無填充物之下，不同材質下單獨降噪的效果。
- (2)空腔體不同材質單獨測試：在輸入音源腔體中心處固定位置，放置藍芽喇叭，並蓋好頂蓋，而在收音源腔體放置分貝計整備接收音波。
- (3)利用電腦 GNU Octave 軟體控制程式，在頻率 580Hz、1160Hz 和 4060Hz 下，產生響度 85 分貝，來**模擬『板擦機』**的聲音
- (4)測試不同腔體材質與穿孔率下，以分貝計量測音量，每項**取五次並記錄求其平均值**。
- (5)比較不同腔體材質與穿孔率下的響度關係。

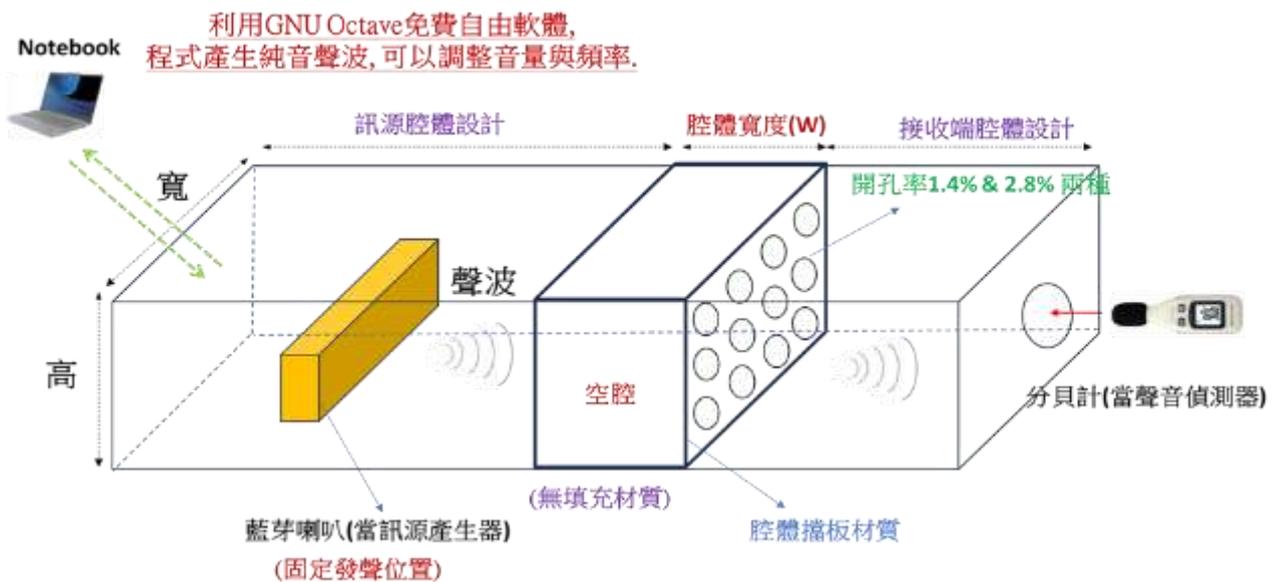


圖 3-7 聲音穿過不同空腔(板)材質的音量衰減表

本圖為研究者自行製作

【實驗三】第一階段研究填充稻稈、粗糠、羊毛絨、廚餘粉、咖啡渣、聚酯纖維板及吸音棉的吸音表現，呼應研究目的三。

操作變因：三種頻率，分別是 580Hz、1160Hz 和 4060Hz，以及鋁板開孔率 1.4%及 2.8%。

控制變因：聲音響度 85 分貝、壓克力立體箱、喇叭位置、分貝計位置。

以粗糠、廚餘粉、咖啡渣、聚酯纖維板、稻稈、羊毛絨及吸音棉作為”隔音罩材質”在鋁板開孔率 1.4%及 2.8%的吸音表現，如下(圖 3-8 ~ 圖 3-14)。

		
圖 3-8 粗糠+鋁板	圖 3-9 廚餘粉+鋁板	圖 3-10 咖啡渣+鋁板
		
圖 3-11 聚酯纖維板+鋁板	圖 3-12 稻稈+鋁板	圖 3-13 羊毛絨+鋁板
	圖 3-8 至圖 3-14 研究者自行製作	
圖 3-14 羊毛絨+鋁板		

【實驗四】第二階段研究兩側分別以吸音棉夾住中間的**創意材料(保麗龍、瑜珈墊、氣泡紙、軟木塞及咖啡渣)**形成**創新複合材料**的吸音表現，呼應**研究目的四**。

操作變因：三種頻率，分別是 580Hz、1160Hz 和 4060Hz。

控制變因：聲音響度 85 分貝、壓克力立體箱、喇叭位置、分貝計位置。

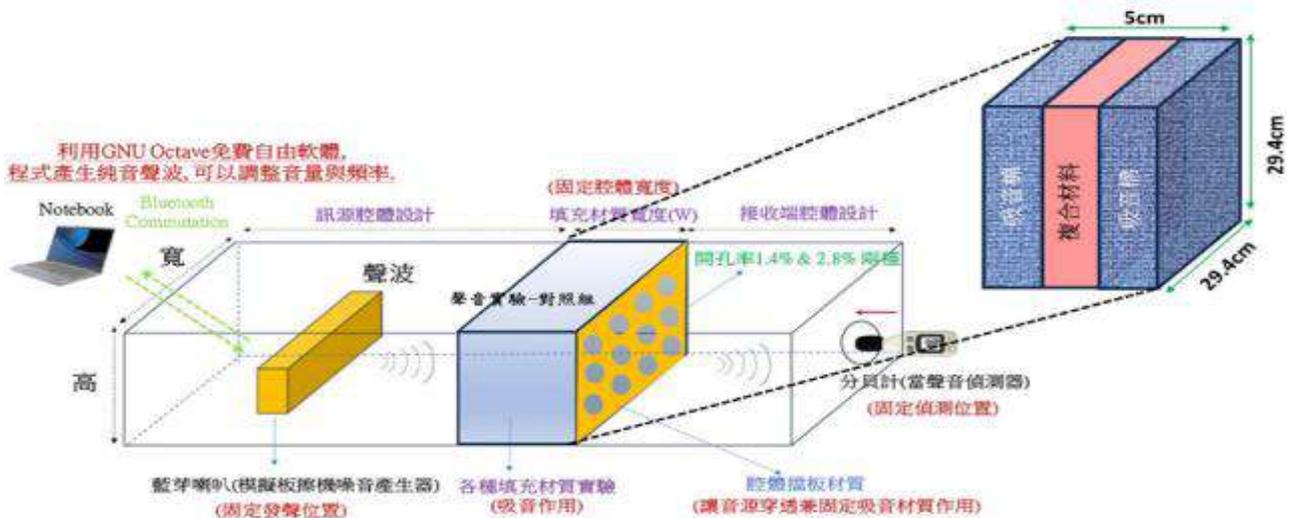


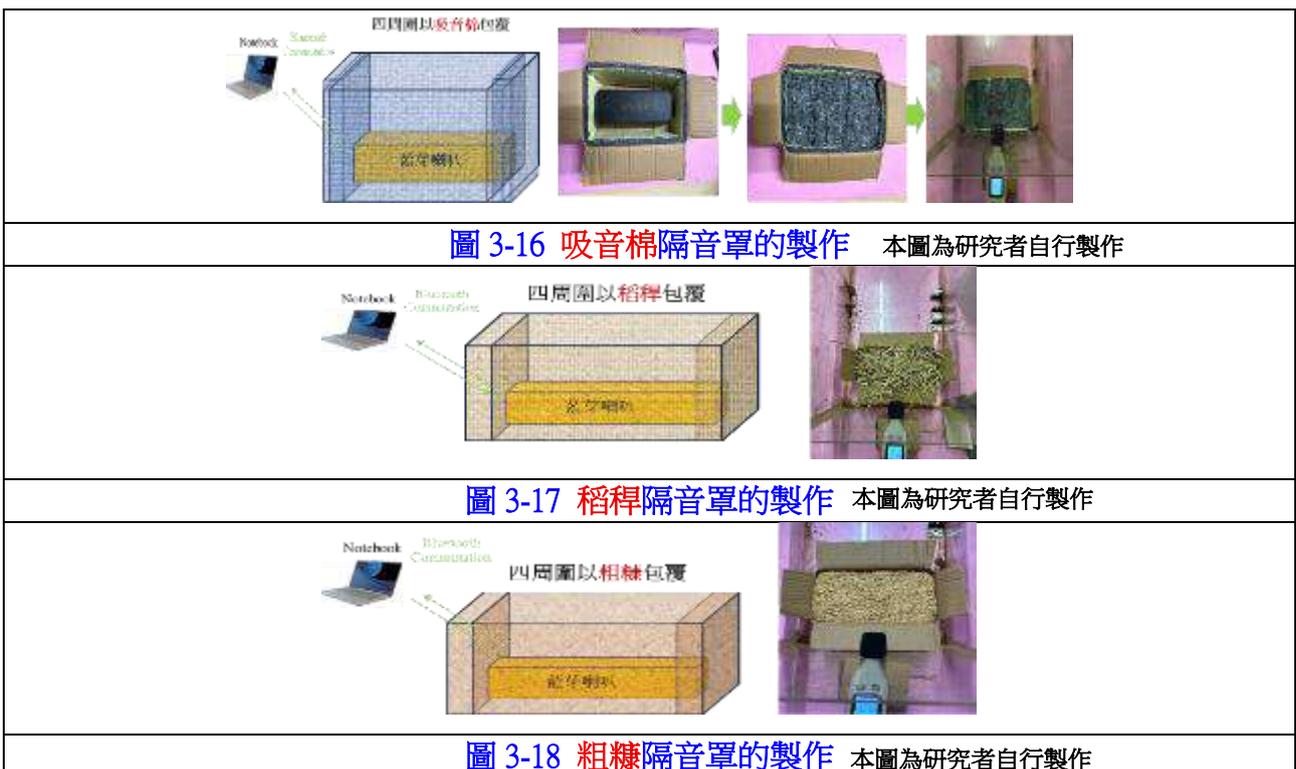
圖 3-15 創意複合材料降噪檢測說明

本圖為研究者自行製作

【實驗五】第三階段研究以吸音棉(圖 3-16)、稻稈(圖 3-17)、粗糠(圖 3-18)、廚餘粉(圖 3-19)、咖啡渣(圖 3-20)及創新複合材料**吸音棉+咖啡渣+吸音棉**(圖 3-21)作為**自製隔音罩材質**的吸音表現，呼應研究目的五。

操作變因：三種頻率，分別是 580Hz、1160Hz 和 4060Hz。

控制變因：聲音響度 85 分貝、模擬隔音罩的外箱、喇叭位置、分貝計位置。



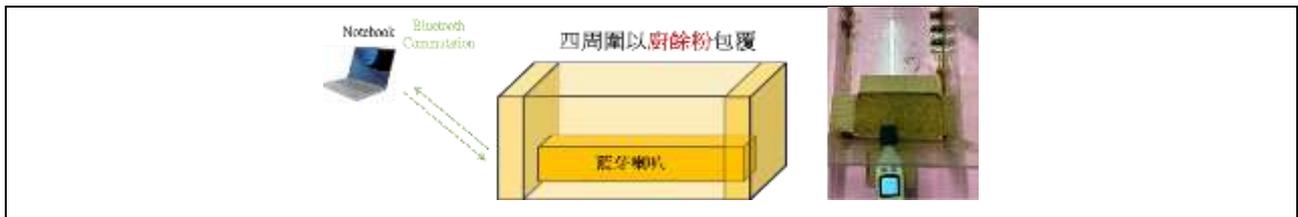


圖 3-19 廚餘粉隔音罩的製作 本圖為研究者自行製作

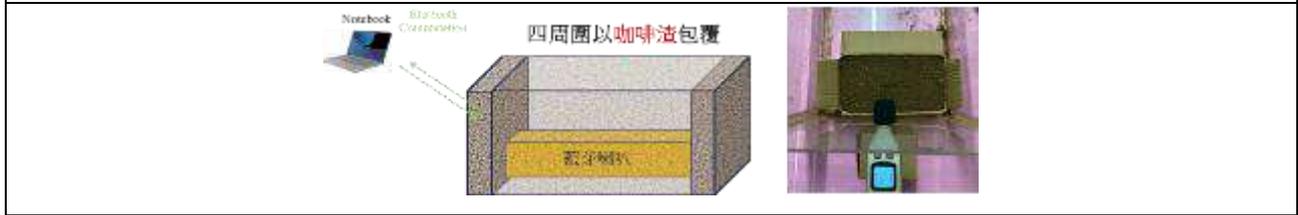


圖 3-20 咖啡渣隔音罩的製作 本圖為研究者自行製作

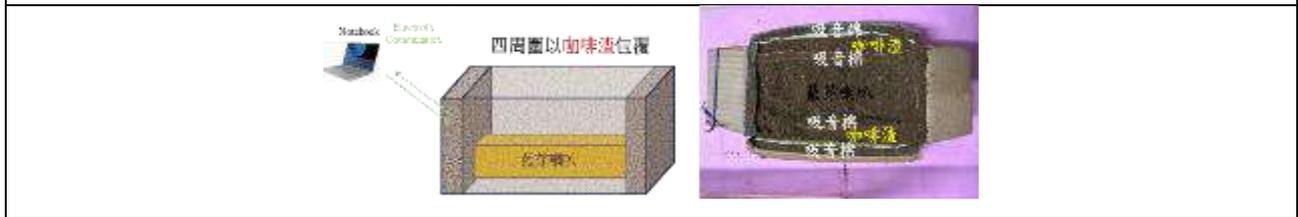


圖 3-21 創新複合材料隔音罩的製作 本圖為研究者自行製作

【實驗六】研究吸音棉、稻稈、粗糠、廚餘粉、咖啡渣 5 種填充材的密度與空隙率。

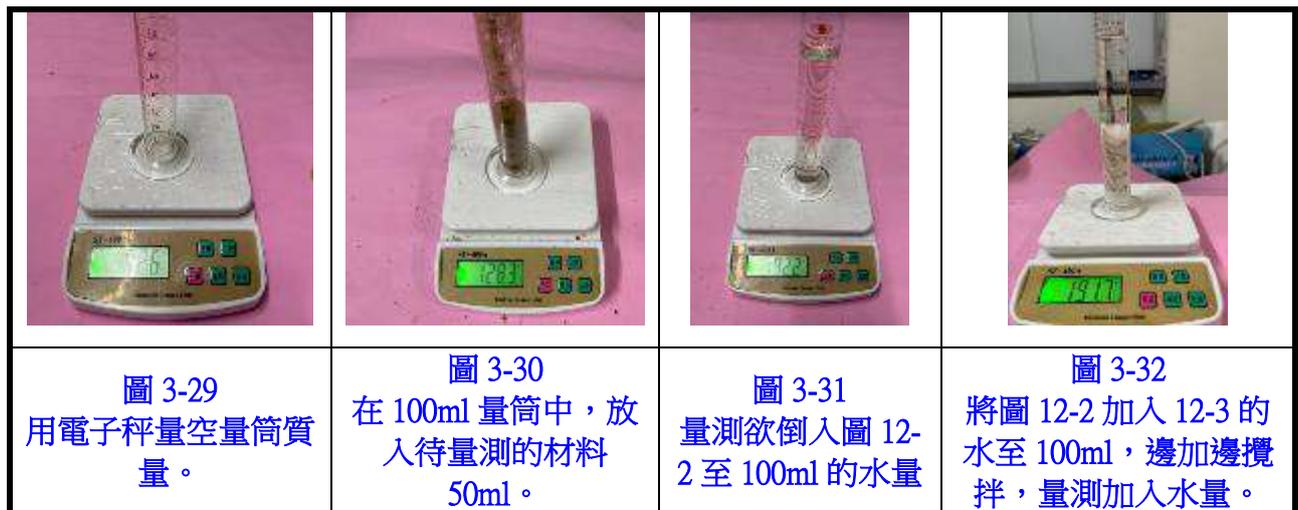
密度是指一物質單位體積下的質量：

$$\text{密度 } \rho = \frac{\text{質量 } m}{\text{密實體積 } V} = \frac{\text{質量(g)}}{100(\text{cm}^3) - \text{加入水量} \times (\text{cm}^3)}, \text{ 單位 } \text{g/cm}^3$$

空隙率是指顆粒或粉狀材料的堆積體積中，顆粒間空隙所佔百分比。

$$\text{空隙率 } P' = \frac{\text{堆積體積 } V_o' - \text{密實體積 } V}{\text{堆積體積 } V_o'} \times 100\% = \frac{50\text{cm}^3 - (100\text{cm}^3 - \text{加入水量} \times (\text{cm}^3))}{50\text{cm}^3} \times 100\%$$

依實際測良知結果，算出密度及空隙率(圖 3-29~圖 3-32)。圖 3-29 至圖 3-32 研究者自行製作

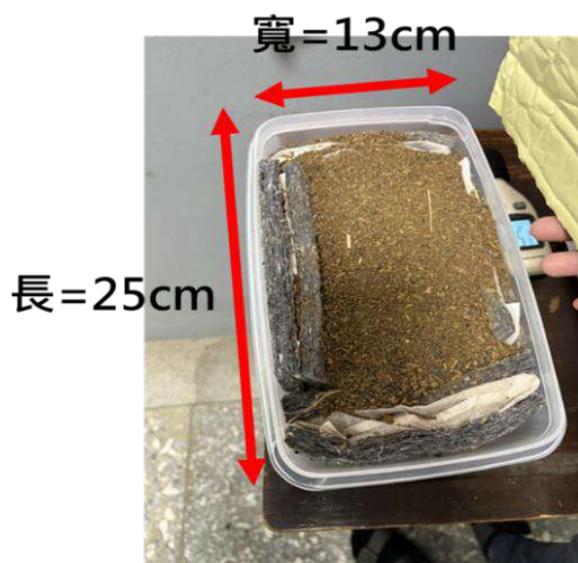


【實驗七】研究創新複合材料”吸音棉+咖啡渣+吸音棉”中的咖啡渣厚度(披覆量)吸音表現(圖 3-33)，呼應研究目的四。

操作變因：三種頻率 580Hz、1160Hz 和 4060Hz 及咖啡渣厚度(披覆量)。

控制變因：音聲音響度 85 分貝、壓克力立體箱、喇叭位置、分貝計位置。

一開始先將藍芽喇叭置入長寬分別為 25 公分乘以 13 公分盒子內，其外添加咖啡渣與周圍吸音棉齊平後，每增加 100 公克咖啡渣單位量後，並做抹平表面的動作，再分別發出三種頻率之固定響度聲音，並以分貝計測得衰減後的響度，將它完整紀錄。



(本圖片由作者親自拍攝)

■ 公式:
長(25cm)*寬(13cm)*每增加
d(厚度cm)*0.69g/cm³(密度/排
水法測得)=質量(公克)
→d(厚度)=質量/(長*寬*密度)

圖 3-33 咖啡渣厚度(披覆量)實驗說明 本圖為研究者自行製作

【實驗八】第四階段動手打造隔音罩，研究拆解“板擦機”為其穿隔離罩後的吸音表現，並研究如何減少教室內粉塵-粉筆灰，呼應研究目的六。

板擦機的工作原理(圖 3-22)：充滿粉筆灰的板擦→放置板擦機上方，按啟動鍵→藉由前後移動抖落粉筆灰→粉筆灰被吸入集塵袋內→集塵袋內部氣體過濾後被抽氣馬達抽入，經過抽氣馬達葉輪後，過濾後排出。

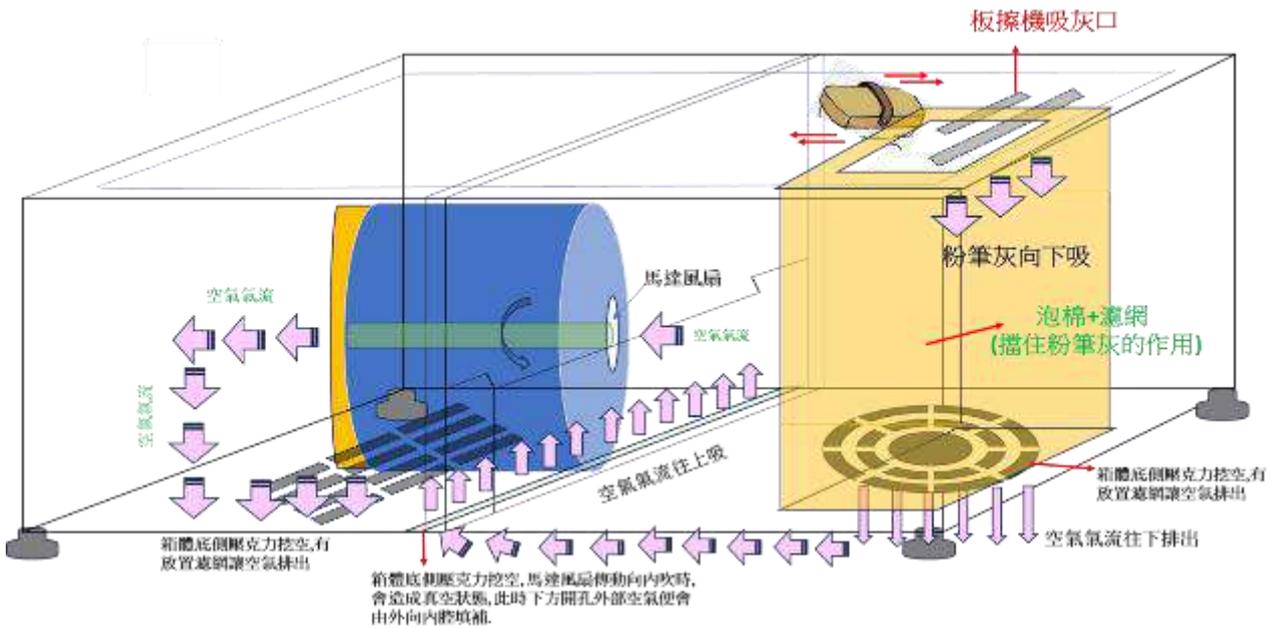


圖 3-22 板擦機內部構造及工作原理圖說

本圖為研究者自行製作

本組找出產生的聲音源頭---抽氣馬達，針對板擦機內部及抽氣馬達周圍直接進行包覆，測得顯著降噪近 10%(圖 3-23，圖 3-24，圖 3-25)，此為第一代板擦機隔音罩。



另外，維持板擦機的吸力功能，有幾點是很重要的事：務必定期清潔泡棉跟濾網，因為粉筆灰堆積太多會直接影響板擦機的吸力表現，日積月累完全阻塞後就喪失了吸粉筆灰的能力，而使得粉筆灰未能有效吸入到泡棉空腔內，反而逸散到大氣之中，影響空氣汙染與師生健康。

我們提出『水族羊毛絨』(圖 3-26)填充內層來增加泡棉吸附性，因為它是高密度纖維結構，應用在水族魚缸中能有效阻隔固態雜質的同時，仍能維持良好的水流通性，使其成為水族過濾系統中理想的濾材選擇。此外高密度聚酯纖維材質耐用，可重複清洗使用，節省耗材成本，清洗後仍可保持良好的過濾效果，不影響其功效。因此加入此材料，可以不影響吸力情況(利用高過濾效果)，吸附能力又強，又能可重複清洗，實是避免粉筆灰造成空氣汙染的好幫手。

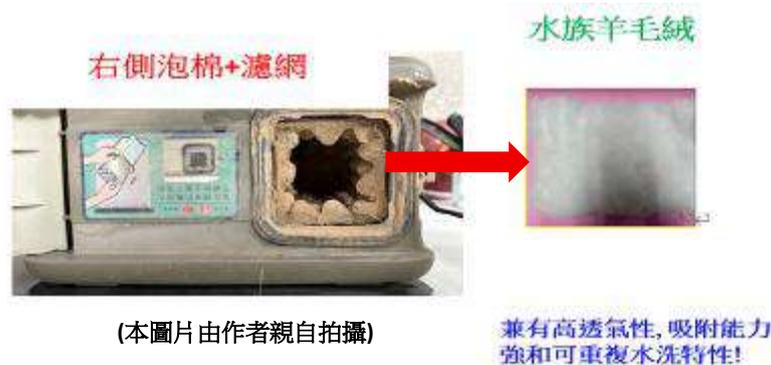


圖 3-26 板擦機內部吸附粉筆灰原理及替代泡棉的羊毛絨說明圖

在教室實際運轉數日後，發現第一代隔音罩仍有不少缺點，包含導熱不良、電線短路及降噪有限，因此本組立刻著手改造，此時第二代板擦機隔音罩(長 37 公分*寬 25 公分*高 41 公分)出現(圖 3-27)了，本組從內部包覆改成外部包覆，隔音罩內部四周圍貼上創新的三明治結構吸音材，其優點 1).優異隔音，2).低空氣汙染-粉筆灰，3).跨產品整合優勢，而在教室試用數週後，發現其缺點是：同學在清理粉筆灰時，不易將板擦機取出，因此，本組持續改良產生第三代板擦機隔音罩(圖 3-28)，打造更經濟的尺寸(長 37 公分*寬 25 公分*高 33 公分)及可掀蓋活動式外部隔音罩，兼具降噪與易清理、易維修機器的彈性。

外部隔音罩的創意概念來自~

新冠疫情的檢測箱的概念聯想！



(本圖片引自聯合新聞網)
(<https://udn.com/news/>)

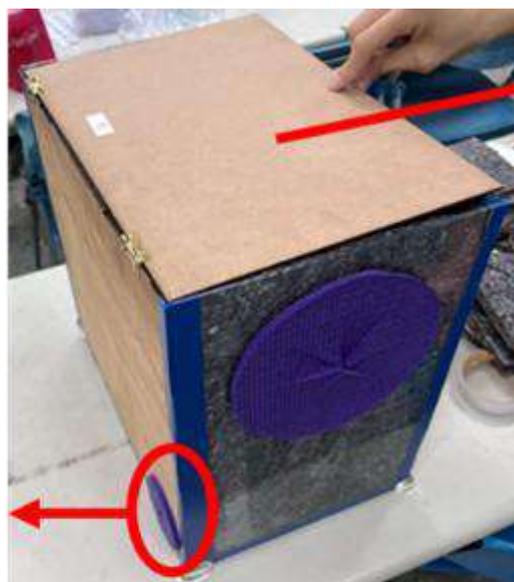


(本圖片由作者親自拍攝)



圖 3-27 第二代隔音罩內外部說明

板擦機
電線出口



(本圖片由作者親自拍攝)

圖 3-28 第三代隔音罩活動式外部說明

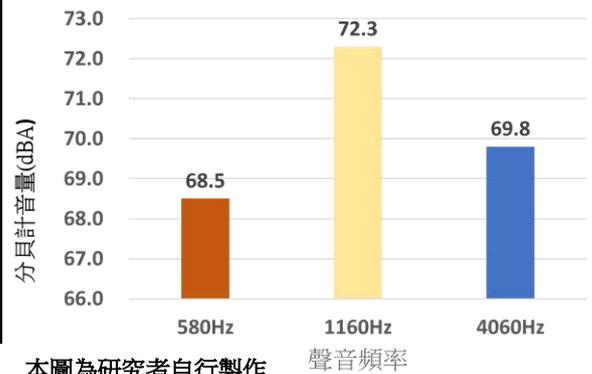
可掀蓋

肆、研究結果與討論

一、在無腔體與無填充材質下，對於不同頻率下之純音，控制同樣響度，同樣聲音傳播距離，以分貝計測得的響度(表 4-1)(圖 4-1)。

表 4-1 不同頻率下，測得 5 次數數據的對照組 本表為研究者自行製作

實驗次數	腔體與吸音材料	580Hz	1160Hz	4060Hz
1	無	68.3	72.2	67.5
2	無	68.2	72.3	70.4
3	無	68.4	72.4	70.3
4	無	68.4	72.3	70.4
5	無	69	72.2	70.5
平均值(分貝)		68.5	72.3	69.8



本圖為研究者自行製作

圖 4-1 將對照組數據表 4-1 以柱狀圖表示

由(表 4-1)及(圖 4-1)推測：

在無腔體與無填充材質下，對於不同頻率下之純音，控制同樣響度，同樣聲音傳播距離，以分貝計測得的響度並沒有顯著的不同，它做為我們實驗的對照組數據。

二、在第一階段外箱板材選定作業，聲音穿過不同腔體材質音量衰減表現(表 4-2)(圖 4-2)。

表 4-2 聲音穿過不同腔體材質音量衰減表現，測得 5 次數數據的結果。

實驗次數	腔體板材填充材	壓克力板(1.4%)	壓克力板(2.8%)	木板(1.4%)	木板(2.8%)	鐵板(1.4%)	鐵板(2.8%)	鋁板(1.4%)	鋁板(2.8%)
		1	70.4	77	67.5	73.8	73.8	81	66.9
2	無	69.3	76.9	70.4	76.4	75.2	83.5	67.1	76.6
3	無	68.8	77.3	70.3	76.4	75.0	83.0	67.9	76.7
4	無	68.4	77.8	70.4	75.4	75.6	83.3	67.2	77.7
5	無	69.0	76.7	70.5	75.6	76.1	83.6	66.7	76.6
平均值(分貝)		69.1	77.1	69.8	75.5	75.1	82.8	67.1	76.8

本表為研究者自行製作

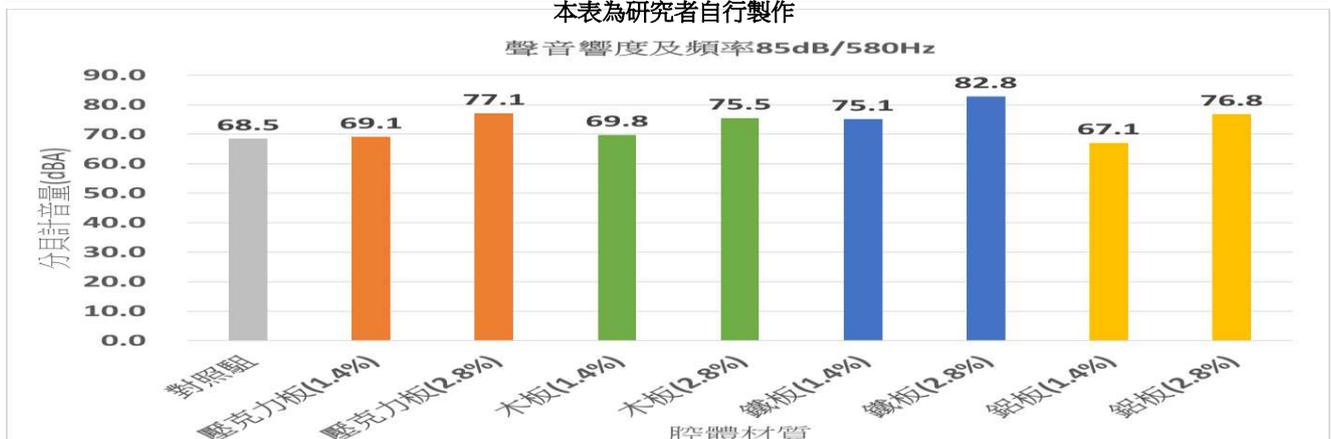


圖 4-2 將聲音穿過不同腔體材質音量衰減數據表 4-2 以柱狀圖表示

本圖為研究者自行製作

由(表 4-2)及(圖 4-2)推測：

聲音穿過不同空腔材質的音量衰減表現，(1)穿孔率越大，均測得較大的聲音響度。(2)無填充材質下，聲音響度沒有呈現衰減的現象(3)選定平均表現較佳的鋁板，作為接下來實驗的主角。本組得知腔體板材中以鋁板隔音表現較佳，其板材的表現**鋁板>木板>壓克力板>鐵板**，但就成本計算而言，隔音罩外箱材料以**木板的價格較便宜**。

三、在第一階段鋁板 1.4%孔率下，分別研究填充材質稻稈、粗糠、羊毛絨、廚餘粉、咖啡渣、聚酯纖維板及吸音棉的吸音表現，得到(圖 4-3)及(圖 4-4)。在第一階段鋁板 1.4%孔率下，

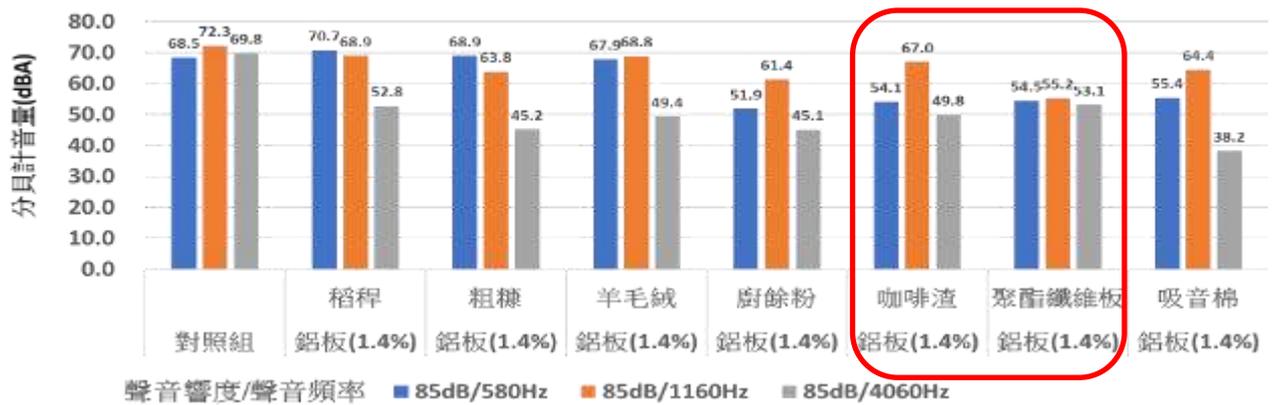


圖 4-3 研究鋁板孔率 1.4% 下，選定的 7 種填充材質吸音表現

本圖為研究者自行製作

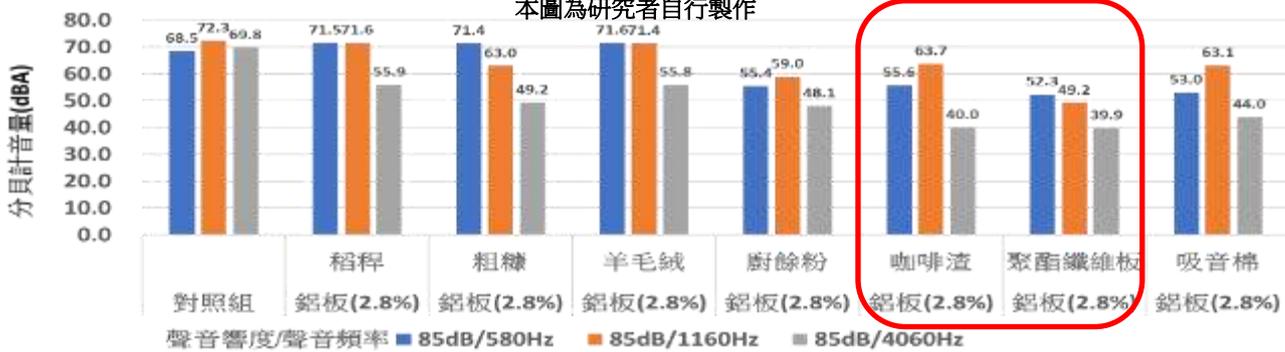


圖 4-4 研究鋁板孔率 2.8% 下，選定的 7 種填充材質吸音表現

下表為研究者自行製作

上圖為研究者自行製作

表 4-3 聲音分別穿過鋁板 1.4% 及 2.8% 孔率下，不同填充材質音量衰減表現。

控制變因		響度 85 分貝 / 頻率 580Hz		響度 85 分貝 / 頻率 1160Hz		響度 85 分貝 / 頻率 4060Hz	
對照組		68.5		72.3		69.8	
吸音材質	腔體板材	鋁板 (1.4%)	鋁板 (2.8%)	鋁板 (1.4%)	鋁板 (2.8%)	鋁板 (1.4%)	鋁板 (2.8%)
	填充物						
選手 1	稻稈	70.7	71.5	68.9	71.6	52.8	55.9
選手 2	粗糠	68.9	71.4	63.8	63.0	45.2	49.2
選手 3	羊毛絨	67.9	71.6	68.8	71.4	49.4	55.8
選手 4	廚餘粉	51.9	55.4	61.4	59.0	45.1	48.1
選手 5	咖啡渣	54.1	55.6	67.0	63.7	49.8	40.0
選手 6	聚酯纖維板 (商用材料)	54.5	52.3	55.2	49.2	53.1	39.9
選手 7	吸音棉 (商用材料)	55.4	53.0	64.4	63.1	38.2	44.0

分別研究填充材質稻稈、粗糠、羊毛絨、廚餘粉、咖啡渣、聚酯纖維板及吸音棉的吸音表現，得到(圖 4-3)及(圖 4-4)。

由(圖 4-3)、(圖 4-4) 及(表 4-3)推測：

(1)腔體填充材表現上，則是以**廚餘粉>咖啡渣>聚酯纖維板>吸音棉>羊毛絨>粗糠>稻稈**，推論可能跟**密集度(密度與空隙率)**有關，**廚餘粉與咖啡渣較為細小且密集**，因此，其**吸音效果最佳**，這引發本組想像空間了，天馬行空的發想著”如何設計一個複合材料組合?”，看看**能否超越商用材料的表現**，考慮取得的難易度和數量，本組選擇**咖啡渣作為填充材**。

(2)填充材的吸音研究以粗糠、稻稈、羊毛絨、廚餘粉、咖啡渣、聚酯纖維板及吸音棉**作為”隔音單材質”**，在**鋁板開孔率 1.4%及 2.8%**的吸音表現，其中以**聚酯纖維板及吸音棉表現最佳**，考慮隔音罩外型需可撓性的彈性操作，本組選擇**吸音棉作為外單材質**。

四、第二階段研究 5 種-兩側分別以吸音棉夾住中間的**創意材料(保麗龍、瑜珈墊、氣泡紙、軟木塞及咖啡渣)**形成**創新複合材料**的吸音表現，在聲音響度 85 分貝，及聲音頻率 580Hz 下，其吸音的表現，得到(表 4-4)。

表 4-4 研究以吸音棉夾住 5 種中間創意材料的吸音表現

本表為研究者自行製作

聲音響度85 dBA/ 聲音頻率 580Hz	創意複合材料			分貝計測得音量 (dBA)
編號	左邊材質	中間夾層	右邊材質	鋁板 (1.4%)
1	吸音棉	保麗龍	吸音棉	63.4
2	吸音棉	瑜珈墊	吸音棉	59.1
3	吸音棉	氣泡紙	吸音棉	58.8
4	吸音棉	軟木塞	吸音棉	58.1
勝 5	吸音棉	咖啡渣	吸音棉	46.2
對照組	吸音棉	吸音棉	吸音棉	55.4

由(表 4-4)得知：

本組搭建的**一系列中間夾層(三明治結構)**，搭配兩側優異的吸音材料-吸音棉，組合成**創意複合材料**，**最後**以複合材料**咖啡渣**搭配兩側吸音棉組合**(降 46%至 46.2dBA)**，竟然**超越純吸音棉**的吸音表現**(降 36%至 55.4dBA)**，這意味著本組找到**最佳的隔音罩內部吸音材料**。

五、第三階段研究將**創意複合材料**中**兩側材質**以吸音棉、稻稈、粗糠、廚餘粉、咖啡渣及吸音棉+咖啡渣+吸音棉 6 種材料，作為隔音罩材質，模擬在音響度 85 分貝，及聲音頻率

580Hz 下，其吸音的表現，得到(圖 4-5)。

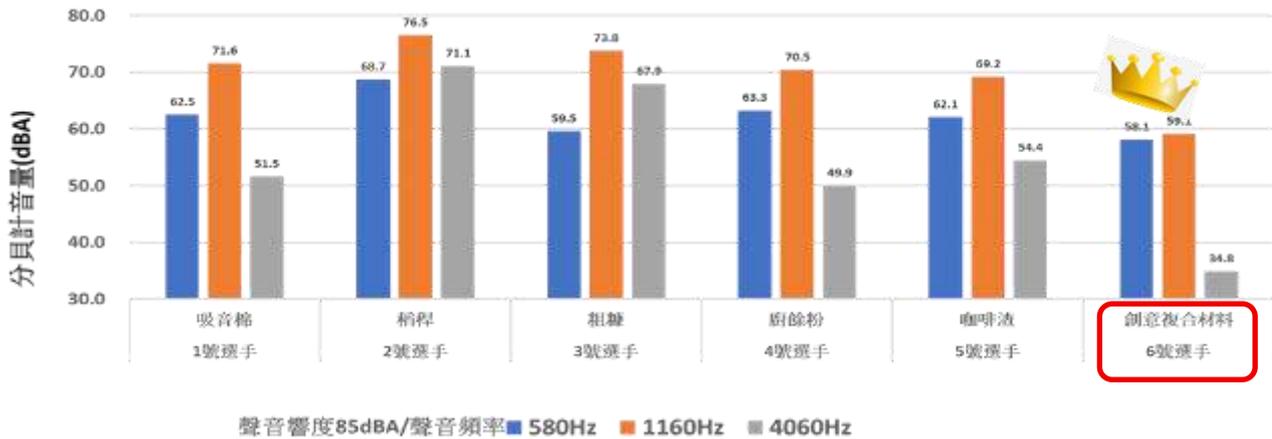


圖 4-5 研究隔音罩的創意複合材料吸音表現

本圖為研究者自行製作

由(圖 4-5)得知：

本組欲搭建一系列中間夾層(三明治結構)，搭配兩側優異的吸音棉吸音材料，組合成創意複合材料，最後複合材料咖啡渣搭配兩側吸音棉組合(降 46%至 46.2dB)，竟然超越純吸音棉的吸音表現(降 36%至 55.4dB)。

六、從研究吸音棉、稻稈、粗糠、廚餘粉、咖啡渣 5 種填充材的密度與空隙率得到(表 4-5)。

表 4-5 研究 5 種填充材料的密度與空隙率

本表為研究者自行製作

填充材質	稻稈	粗糠	羊毛絨	廚餘粉	咖啡渣
質量m(g)	5	5.7	4	34.7	25.5
密實體積V(ml)	15	8	7	45	37
加水量(mL)	85	92	93	55	63
密度($\rho = g/cm^3$)	0.33	0.71	0.57	0.77	0.69
空隙率(%)	70	84	86	10	26

由(表 4-5)各種填充材的密度及空隙率研究本組發現廚餘粉與咖啡渣的密度較高，且這兩種的填充材的空隙率也較低，其隔音效果在實驗 3 中也證實比較佳，因此，推測隔音的效果與密度及孔隙率也有關。

七、既然，密度和空隙率與隔音效果有關，那就須研究咖啡渣披覆量與降噪效果間的關係，本組設計了咖啡渣披覆量與隔音厚度間換算，得到(表 4-6)，再從咖啡渣披覆量延伸出與

隔音間的關係圖，得到(圖 4-6)。

表 4-6 咖啡渣批量與隔音厚度間計算

本表為研究者自行製作

咖啡渣 逐步增加重量(公克)	咖啡渣增加厚度 (公分)
100	0.45
200	0.89
300	1.34
400	1.78
500	2.23
600	2.68
700	3.12
800	3.57

■ 公式:
 $\text{長}(25\text{cm}) \times \text{寬}(13\text{cm}) \times \text{每增加 } d(\text{厚度cm}) \times 0.69\text{g/cm}^3(\text{密度/排水法測得}) = \text{質量(公克)}$
 $\rightarrow d(\text{厚度}) = \text{質量} / (\text{長} \times \text{寬} \times \text{密度})$

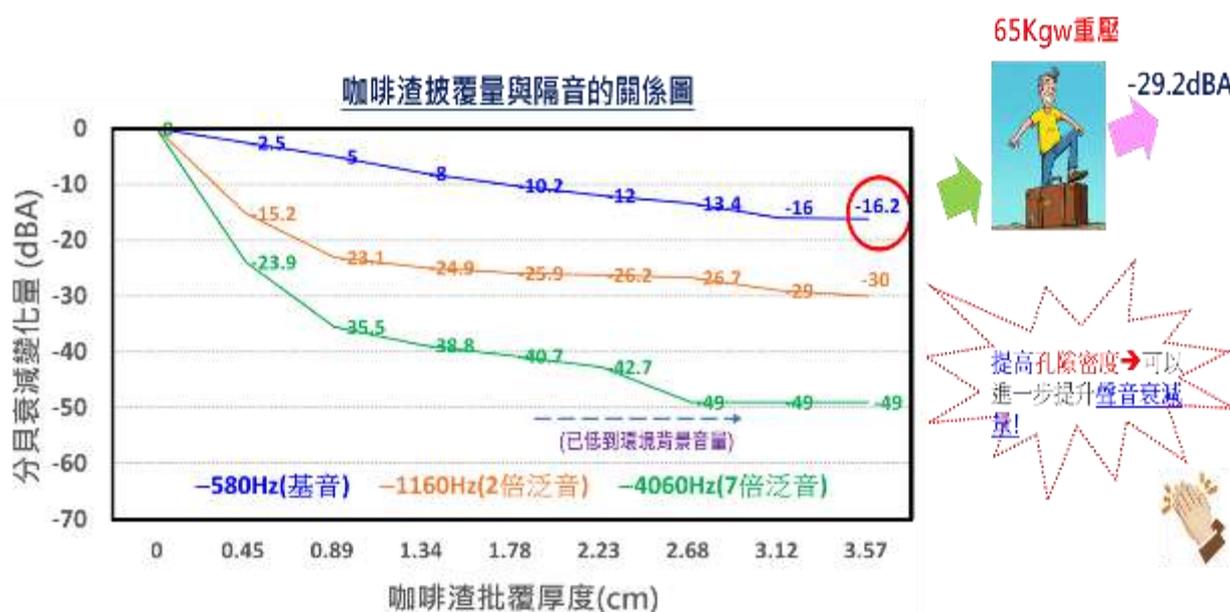


圖 4-6 研究咖啡渣披覆量與隔音的關係圖

本圖為研究者自行製作

由(表 4-6) 咖啡渣每增加 100 公克，在長 25 公分寬 13 公分的盒子裡，其厚度約增加 0.45 公分，重量與厚度成正比；而從(圖 4-6)得知披覆重量越大，測得音量越來越小，其咖啡渣厚度 $\geq 3.12\text{cm}$ ，趨近於背景音量，尤其以高頻率最為明顯，最終在 800 公克重量下，本組為了提高其密度，請班上 65 公斤的同學協助重壓，在 3.57 公分下，提高孔隙密度，可以進一步提升聲音衰減變化量從 -16.2 分貝增加到 -29.2 分貝 (減少 13 分貝，減少達 80%)，其隔音成效斐然，本組將藉此開始動手打造板擦機隔音罩。

八、本組綜合上述研究結果與討論後，開始動手打造板擦機隔音罩(圖 4-7)，第一代是針對板擦機內部進行包覆，利用吸音棉與放入料理袋的咖啡渣，將板擦機內部的抽氣馬達進行全面性包覆，而第二代則是改造成板擦機放入特製的壓克力與木板拼製的箱子裡，箱子內部以複合創新材料咖啡渣+吸音棉的三明治材料做整個包覆，第三代則是延續第二代做

外部尺寸縮小改良，以符合小成本、大創新的降噪解方。



圖 4-7 隔音罩演進史

本圖為研究者自行製作



圖 4-8 隔音罩迭代優化的演進史

本圖為研究者自行製作

由(圖 4-6)及(圖 4-7)：

本組設計板擦機外部隔音罩，內部黏貼創意複合材料，開口以瑜珈墊密封，靈感來自醫療檢測箱，兼具隔音與粉塵逸散功能，最終從 110 分貝降到 65 分貝達 45 分貝(40%)，在聲學上，其強度減少 3 萬倍，降噪效果顯著，並申請專利中。

九、綜合上述討論，本組得知以下幾個重點，固定音量的高頻噪音與低頻噪音在經過吸音材質時，衰減程度有顯著差異。本組將詳細解釋其原因和原理：

1.衰減程度差異：

(1)高頻噪音：高頻噪音的波長較短，容易被吸音材質的纖維或孔洞阻擋和吸收。因此，高頻噪音在經過吸音材質時，能量衰減較快，效果較為顯著。

(2)低頻噪音：低頻噪音的波長較長，穿透力較強，不容易被吸音材質吸收。需要較厚、較密實的吸音材質，才能有效降低低頻噪音。低頻噪音容易繞過較小的障礙物，所以一般吸音材質對低頻效果較差。

2.原理解釋：

(1)波長與吸收：聲音的波長與頻率成反比，頻率越高，波長越短。

(2)吸音材質吸收原理是將聲能轉換為熱能，這需要聲波與材質的纖維或孔洞產生摩擦。

(3)高頻噪音的短波長更容易與材質的纖維或孔洞產生摩擦，因此吸收效果較好。

(4)低頻噪音波長長，容易穿透吸音材質，或是震動吸音材質，而造成吸音效果降低。

3.咖啡渣的多孔性原理應用：

聲音在緊實的咖啡渣裡會迅速減弱，主要是因為咖啡渣，特別是緊實填裝後，形成了一種多孔性吸音材料 (Porous Acoustic Absorber)。當聲音傳播到這種材料中時，聲能會通過以下幾種主要的機制被吸收和散射，導致迅速衰減：

(1)黏滯性損失：

聲音是一種機械波，它通過介質的振動來傳播。當聲波進入咖啡渣中的微小孔隙時，會引起孔隙中空氣的振動。由於孔隙非常狹窄且咖啡渣顆粒表面粗糙，空氣分子在振動時會與咖啡渣顆粒的內壁產生摩擦。這種摩擦（即空氣的黏滯性阻力）會將聲波的動能轉換成熱能耗散掉。緊實的咖啡渣意味著孔隙更小、更彎曲、互連性更複雜，這大大增加了空氣與固體表面的摩擦，使得黏滯性損失更為顯著，吸音效果更好。

(2)熱力損失：

聲波在孔隙中傳播時，會引起空氣的快速壓縮和膨脹。在壓縮時，空氣溫度升高；在膨脹時，空氣溫度降低。由於孔隙很小，這些溫度變化與周圍咖啡渣顆粒之間的熱交換非常迅速。熱量會從較熱的空氣傳遞到較冷的固體框架，反之亦然。這種熱量的交

換是一個不可逆的過程，會導致部分聲能轉換成熱能而損失掉。**緊實的咖啡渣同樣因為孔隙小，增加了空氣與固體之間的熱傳導效率，增強了熱力損失。**

(3) 散射和反射：

咖啡渣是由許多不規則形狀的顆粒堆疊而成，其內部結構是不均勻的。當**聲波遇到這些顆粒、孔隙邊界或結構變化時，會發生散射和多重反射**。這些散射和反射會使聲波的能量向各個方向分散，而不是沿著原來的方向直線傳播，這使得**聲音在傳播距離上迅速減弱其在特定方向的強度**。

(4) 結構振動 (較次要)：

總之，緊實的咖啡渣創造了一個充滿微小、複雜孔隙的結構。聲音進入這些孔隙後，其能量主要通過空氣與固體之間的摩擦（黏滯性損失）和快速熱交換（熱力損失）被吸收，同時不規則的結構也會導致聲波的散射，這些因素共同作用，使得聲音在其中迅速衰減。

伍、結論

- 一、由實驗一，聲音**在特定頻率下，會發生共振，響度增大，聲音頻率增高，衰減響度量更大**。
- 二、由實驗二，穿孔板的材質表現上，**依序是鋁板 >木板 >壓克力板 >鐵板**。
- 三、由實驗三，填充材稻稈、粗糠、羊毛絨對於中低頻聲音無吸音效果，但**廚餘粉及咖啡渣能發揮顯著降噪作用**，兩者表現差異不大，此兩種吸音效果與商用材料媲美。
- 四、由實驗四，**本組最終以吸音棉+咖啡渣+吸音棉打造出完美組合**，其表現在檢測時，**幾乎聽不到以藍芽喇叭發出 85 分貝的聲響，一度還以為藍芽喇叭沒電或壞掉了，”傑克，這真是太神奇了”**，使得本組替板擦機穿外套的目地達成，也符合初衷”**變廢為寶**”的**雙重目的**了。
- 五、由實驗五，把壓克力箱填充材的研究成果，**導入小成本(市售板擦機 1700 元，吸音棉 200 元+木板箱 100 元+裝咖啡渣料理袋 1 元/袋*10 袋，合計 310 元)**，**小規模經濟方式**，模擬對板擦機打造一個隔音罩，吸音表現幾乎複製初始壓克力箱研究成果。
- 六、實驗六，成功以『**隔音棉和咖啡渣夾層**』**創新複合材料套用在板擦機內部**，得到**聲量降低約 10 分貝，強度約 10%**的最佳降噪效果，證明本組壓克力箱設計正確，並將吸附粉筆灰的海綿以**羊毛絨取代**，得到**更好的吸附成效**，**減少板擦機啟動時揚塵**。
- 七、**未來應用**：讓學校花費最少成本，符合其經濟效益，將此隔音罩應用在降低板擦機啟動

時的音量上，創造教室內最佳讀書環境；另外，現代建築材料上，建築結構的聲學性能和隔音性能越來越重要。世界各地的建築業開始使用吸音混凝土來降低開放和封閉空間中的聲音頻率並提高隔音效果，因此，吸音混凝土的開發，也許咖啡渣和廚餘粉可以提供實驗的可能性，畢竟，”變廢為寶”符合環保議題，並在 ESG 的議題貢獻一份心力，小至板擦機外套，大到建築材料，開發出未來的無限可能。

八、**延伸研究**：本組為更進一步精進研究，朝著咖啡渣的**批覆量與隔音間關係**，製作重要發現的**關係(圖 4-6)**，此簡單的**重壓實驗**，可**增加孔隙密度**，可以進一步**提升聲音率減量**，若能以**熱壓成型的方式**，其減噪效果應該更佳，構想研發從一代隔音罩逐步改良到二代，最終完美呈現第三代隔音罩，其**演進史如(圖 4-7)**，讓聲音響度由 **110 分貝大大降至 65 分貝**，整整減少了 **45 分貝**，**降噪 41%**，本組持續改善隔音罩的缺點，開發出**活動式外部**隔音罩，**兼顧降噪與清理的彈性**，將其**降噪效果極佳化**，**隔音罩進化史如(圖 4-8)**。

九、**未來展望**---寧靜的**產品延伸應用**：本研究的成果不僅解決了教室**板擦機**的**噪音與粉塵問題**，其**核心技術與「變廢為寶」**的理念更具備廣闊的應用前景，**有望為更多領域帶來寧靜與永續的解決方案**。研究的核心在於利用『**三明治咖啡渣**』複合材料技術可延伸應用於抽水馬達、洗衣機等家用電器或小型辦公/工業機械的噪音控制，提升生活與工作品質。隔音罩產品應用(一)如**(圖 5-1)**進而延伸應用於建築隔音材料上，隔音罩產品應用(二)如**(圖 5-2)**，**革新建築聲學材料**將**咖啡渣**、廚餘粉等廢棄物融入新型建築材料（如吸音混凝土）的開發，為現代建築提供更優異、更環保的隔音方案，推動建築產業的**永續發展 ESG**，如**(圖 5-3)**。



圖 5-1 隔音罩產品應用(一)

打造KTV輕質牆體



(本圖片引自好樂迪KTV)
<https://www.holiday.com.tw/>

獨立隔音房



(本圖片引自樂天購物網站)
<https://www.rakuten.com.tw/>

高速公路吸音牆



(本圖片由作者親自拍攝)

圖 5-2 隔音罩產品應用(二)

咖啡渣混凝土



(本圖片引自奇摩新聞)
<https://hk.news.yahoo.com/>

咖啡渣可使混凝土更堅固,缺氧條件下烘烤咖啡渣,得到了一種叫做生物炭的物質把它添加到混凝土中代替沙子時,材料的強度提高了30%。

參考文獻: “Recycling of spent coffee grounds in construction materials”

咖啡渣磚塊

(具有良好的隔熱和吸音性能)



(本圖片引自參考文獻)

咖啡渣/馬鈴薯澱粉生物基材料-作為建築材料非承重結構木結構房屋中的填充磚。

參考文獻: “Spent Coffee Grounds as Building Material for Non-Load-Bearing Structures”

圖 5-3 咖啡渣未來潛能應用

陸、參考文獻

- 一、內政部建築研究所自行研究報告。
- 二、林雨莊，<http://www.epa.url.tw/>永續社環境類第 8 章吸音原理及其應用。
- 三、Kang 等人，2023，在 Bio Resources 期刊上的 ” Investigation of the sound-absorbing performances of pure coffee grounds” 。
- 四、金一凡等，2004，” 輕質量高聲阻材料之探討” ，中華民國音響學會第十七屆學術研討會論文集。
- 五、黃柏勛等，2018，” 小簾立大功【窗簾的吸音與隔音效果之研究】” ，中華民國第 58 屆中小學科學展國小組物理科，台北。
- 六、廖彩君等，2010，” 點食成金--粗糠與常見材料的保溫、隔音及緩衝效能之研究” 。
- 七、Mugahed Amran 等，2021，” Sound-Absorbing Acoustic Concretes: A Review” 。

【評語】 033009

1. 研究主題具創新性及環保永續性，實驗運用科學方法探討吸音棉與咖啡渣複合材料的吸音效果，並進一步應用於板擦機的外部隔音罩設計，同時達到隔音與防止粉塵逸散的功能。
2. 報告中對文獻資料的說明詳細，系統性地收集與分析數據，且運用藍芽喇叭發音實驗方法具體可行。這項研究成果具備實際應用潛力，未來有望應用於家電馬達或建築等領域的隔音裝置。
3. 實驗結果說明表達能力佳，回答問題邏輯清晰，資料記錄詳實。
4. 建議報告的材料與方法部分可具體量化說明不同隔音罩材質的規格、使用目的與用意，以提高比較結果的一致性與準確性。

作品海報



綠色協奏曲



~咖啡渣與吸音棉共築板擦機的

「無聲潔靜」

壹、前言

一、研究動機

每次坐在教室內專心聽課時，卻常被左鄰右舍震耳欲聾的**板擦機**聲響打斷！本組因此針對不同的**吸音材質**，對於板擦機不同**主要頻率**條件下，搭建出有效的**複合式吸音材料**；對照於傳統室內裝潢吸音複雜的聲學設計，本組希望能提出有效**小成本**、**小規模**的經濟方式來達到很好的**降噪**效果。板擦機穿上本組自製的『**隔音外套**』，兼具**隔音**與**防止粉筆灰逸散**功效。

二、研究目的

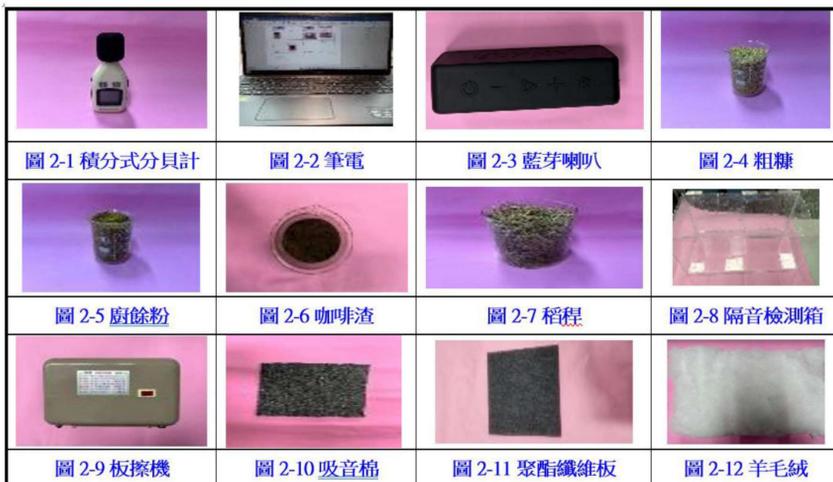
- (一) 先利用**聲音頻譜儀**來分析板擦機噪音的**主要頻率**。
- (二) 求得板擦機在無吸音材質下的空腔體(**鐵板**、**鋁板**、**木板**、**壓克力板**)中的各種噪音強度。
- (三) 探討**不同填充材料**對板擦機各種頻率的隔音效果。
- (四) 根據以上實驗設計出創新**複合材料**各種組合的隔音效果。
- (五) 藍芽喇叭模擬板擦機的噪音頻率，測量**吸音棉+咖啡渣+吸音棉**的隔音效果。
- (六) 探討**咖啡渣的厚度**與對於不同頻率間的隔音效果。
- (七) 探討**咖啡渣的孔隙密度**與對於不同頻率間的隔音效果。
- (八) 板擦機穿上『**隔音外套**』，並測量其對噪音的隔音效果。

三、文獻回顧

- (一) 聲音遇到障礙物的傳播行為：
 $入射音波 I = 反射音波 R + 被吸收音波 A + 穿透音波 T (I = R + A + T)$
- (二) 多孔吸音材料的吸音性能
主要受材料的**孔隙率**，**材料厚度**、**堆積密度**等影響
- (三) 咖啡渣降噪係數 (NRC) 達到 0.61
咖啡渣作為一種環保吸音材料具有很高的應用價值
- (四) 利用蜂巢結構改善材料的聲阻特性
除了輕量化外，**穿透損失值**也會隨著頻率的增加而增加
- (五) **混合材料的隔音效果優於單一材料**
- (六) 世界各地的建築業主要
使用**吸音混凝土**來降低開放和封閉空間中的聲音頻率並提高隔音效果

貳、研究設備與器材

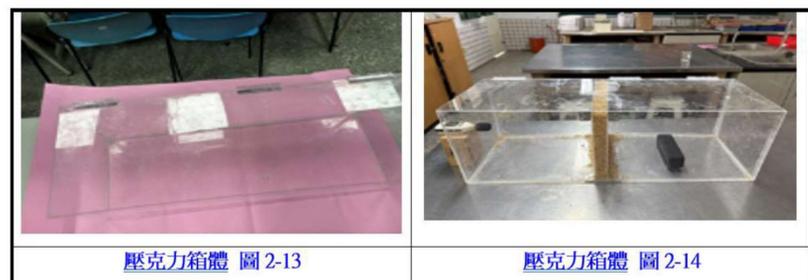
一、材料及設備(硬體)



以上圖形由研究者自行製作

二、隔音檢測箱製作

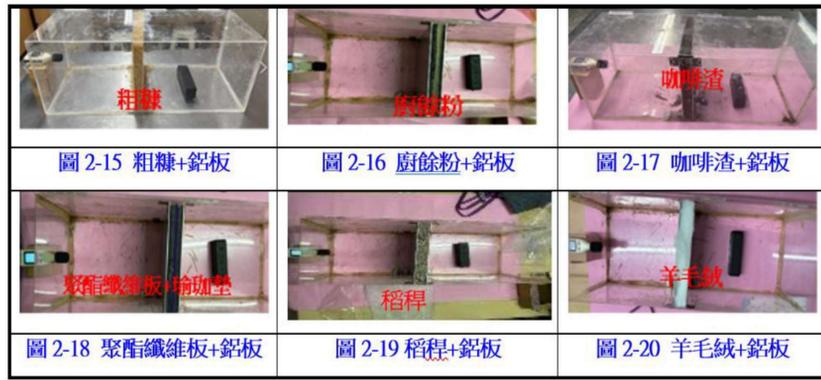
本組利用**壓克力板**密閉效果較佳的特性，避免背景或環境的干擾，黏合**30cm*30cm*90cm**壓克力立體箱，並在分貝計的檢測端，鑽出直徑**1.5cm**的圓形孔洞，以利分貝計的檢測頭可穿入，而數值的讀取可在箱體外方便目視得出。



以上圖形由研究者自行製作

三、填充材製備

本組設計一些可吸音的填充材來實驗，其中取自農夫收割後的**稻稈**，**農會碾米廠的粗糠**，**廚餘乾噪機的廚餘粉**，**爸爸泡咖啡後咖啡渣**，**市售聚酯纖維隔音板**，**市售隔音棉**，**市售羊毛絨**等，自製複合材料等(如圖2-15~2-20)，比較其對聲音的吸音阻隔效果。



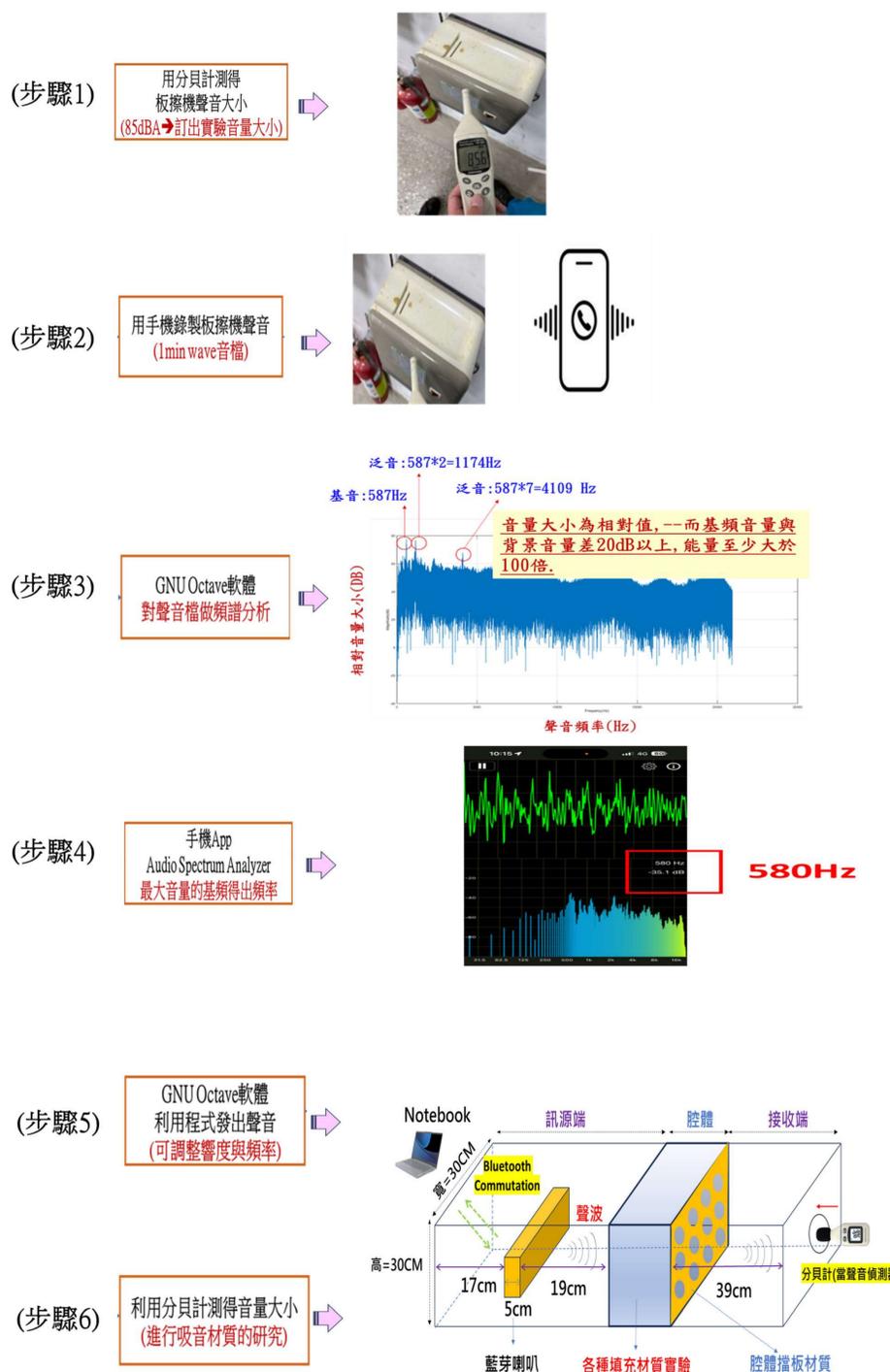
以上圖形由研究者自行製作

參、研究過程與方法

一、研究方法與步驟

首先量測板擦機的頻率與響度，如下圖(3-1)及圖(3-2)，本組先利用**手機**在安靜的環境下錄製**板擦機噪音源**，透過**GNU Octave**軟體，將其錄製的wave聲音檔做**頻譜分析**，得知**基音頻率(Fundamental Frequency)**約為**587Hz**，並有**2倍**和**7倍的泛音**。除此之外，亦透過手機**Audio Spectrum Analyzer APP**做相互驗證：它使用**FFT(傅立葉轉換)**時檢測(real-time analysis)聲頻譜的原理。得知噪音源的頻率後，在筆記型電腦安裝**GNU Octave**軟體，進行各種經濟環保**吸音材質**的研究。

自製壓克箱體對各種吸音材質的實驗研究流程

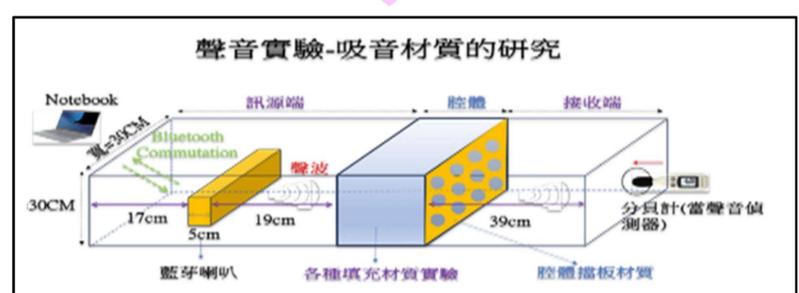


以上圖形由研究者自行製作

二、實驗研究流程圖

綠色協奏曲~咖啡渣與吸音棉共築板擦機的「無聲潔靜」

文獻探討





對於傳統室內裝潢吸音複雜的聲學設計，本組提出有效**小成本、小規模**的經濟方式-穿上「**隔音外套**」，達到非常好的降噪效果！

第四階段：動手打造「實體隔音罩」



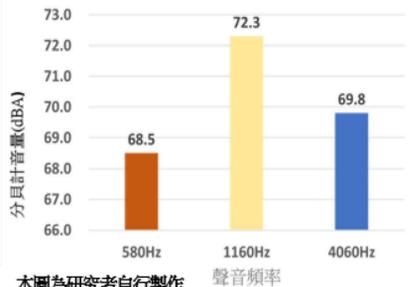
以上圖形由研究者自行製作

肆、研究結果與討論

【實驗一】在**無空腔與無填充材質**下，對於不同聲音純音頻率下，控制同樣響度，同樣聲音傳播距離，分貝計測得的響度為實驗對照組。

表4-1 不同頻率下，測得5次數據的對照組 本表為研究者自行製作

實驗次數	腔體與吸音材料	580Hz	1160Hz	4060Hz
1	無	68.3	72.2	67.5
2	無	68.2	72.3	70.4
3	無	68.4	72.4	70.3
4	無	68.4	72.3	70.4
5	無	69	72.2	70.5
平均值(分貝)		68.5	72.3	69.8

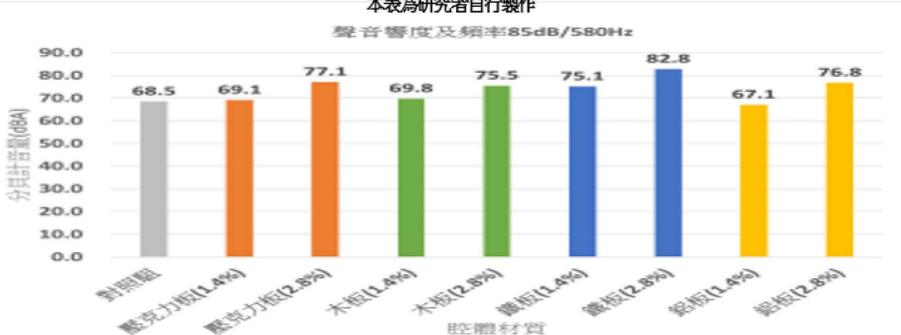


由(表4-1)及(圖4-1)推測：
在**無腔體與無填充材質**下，對於不同頻率下之純音，控制同樣響度，同樣聲音傳播距離，以分貝計測得的響度並沒有顯著的**不同**，它做為我們實驗的對照組數據。

【實驗二】外箱板材選定作業，**聲音穿過不同腔體材質音量的衰減**表現。

表4-2 聲音穿過不同腔體材質音量衰減表現，測得5次數據的結果。

實驗次數	腔體板材填充材	壓克力板(1.4%)	壓克力板(2.8%)	木板(1.4%)	木板(2.8%)	鐵板(1.4%)	鐵板(2.8%)	鋁板(1.4%)	鋁板(2.8%)
1	無	70.4	77	67.5	73.8	73.8	81	66.9	76.7
2	無	69.3	76.9	70.4	76.4	75.2	83.5	67.1	76.6
3	無	68.8	77.3	70.3	76.4	75.0	83.0	67.9	76.7
4	無	68.4	77.8	70.4	75.4	75.6	83.3	67.2	77.7
5	無	69.0	76.7	70.5	75.6	76.1	83.6	66.7	76.6
平均值(分貝)		69.1	77.1	69.8	75.5	75.1	82.8	67.1	76.8



以上圖表由研究者自行製作

由(表4-2)及(圖4-2)推測：聲音穿過不同空腔材質的音量衰減表現，(1)穿孔率越大，均測得較大的聲音響度。(2)無填充材質下，聲音響度沒有呈現衰減的現象(3)選定平均表現較佳的**鋁板**，作為**接下來實驗的主角**。本組得知腔體板材中以**鋁板隔音表現較佳**，其板材的表現**鋁板>木板>壓克力板>鐵板**，但就成本計算而言，**隔音罩外箱材料**以木板的價格較便宜。

【實驗三】研究**填充稻稈、粗糠、羊毛絨、廚餘粉、咖啡渣、聚酯纖維板及吸音棉**的吸音表現。

各種填充材質的吸音比較

輸入音源: 85dB/580Hz和85dB/4060Hz (模擬-板擦機基頻與7倍泛音音源)

控制變因	85dB / 580Hz	85dB / 1160Hz	85dB / 4060Hz				
對照組	68.5	72.3	69.8				
吸音材質	腔體板材填充物	鋁板(1.4%)	鋁板(2.8%)	鋁板(1.4%)	鋁板(2.8%)	鋁板(1.4%)	鋁板(2.8%)
選手1	稻稈	70.7	71.5	68.9	71.6	52.8	55.9
選手2	粗糠	68.9	71.4	63.8	63.0	45.2	49.2
選手3	羊毛絨	67.9	71.6	68.8	71.4	49.4	55.8
選手4	廚餘粉	51.9	55.4	61.4	59.0	45.1	48.1
選手5	咖啡渣	54.1	55.6	67.0	63.7	49.8	40.0
選手6	聚酯纖維板(商用材料)	54.5	52.3	55.2	49.2	53.1	39.9
選手7	吸音棉(商用材料)	55.4	53.0	64.4	63.1	38.2	44.0

以上圖表由研究者自行製作

腔體填充材表現上，以**廚餘粉>咖啡渣>聚酯纖維板>吸音棉>羊毛絨>粗糠>稻稈**，推論可能跟**密集度(密度與空隙率)**有關，**廚餘粉與咖啡渣**較為細小且密集，因此其吸音效果最佳。本組想搭建一個**複合材料組合**，看看能否超越商用材料的表現。

【實驗四】研究五種“**創意複合材料**”的吸音表現。

表4-4 研究以吸音棉夾住5種中間創意材料的吸音表現
本表為研究者自行製作

聲音響度85 dBA/聲音頻率580Hz	創意複合材料			分貝計測得音量(dBA)
編號	左邊材質	中間夾層	右邊材質	鋁板(1.4%)
1	吸音棉	保麗龍	吸音棉	63.4
2	吸音棉	瑜珈墊	吸音棉	59.1
3	吸音棉	氣泡紙	吸音棉	58.8
4	吸音棉	軟木塞	吸音棉	58.1
5	吸音棉	咖啡渣	吸音棉	46.2
對照組	吸音棉	吸音棉	吸音棉	55.4

以上圖表由研究者自行製作

由(表4-4)得知：本組搭建的一系列中間夾層(三明治結構)，**搭配兩側優異的吸音材料-吸音棉**，組成**創意複合材料**，最後以複合材料**咖啡渣**搭配兩側吸音棉組合(降46%至46.2dBA)，竟然超越純吸音棉的吸音表現(降36%至55.4dBA)，這意味著本組找到最佳的**隔音罩內部吸音材料**。

【實驗五】將創意複合材料中兩側材質以**吸音棉、稻稈、粗糠、廚餘粉、咖啡渣及吸音棉+咖啡渣+吸音棉6種材料**，研究最佳的**隔音罩材質**，模擬在聲音響度85分貝，及聲音頻率580Hz下，發掘出最佳**隔音罩吸音材料組合**，得到(圖4-5)。



以上圖表由研究者自行製作

由(圖4-5)得知，創意複合材料所組成的**隔音罩**，由**咖啡渣**搭配兩側吸音棉組合(降46%至46.2dBA)，竟然超越純吸音棉的吸音表現(降36%至55.4dBA)。

【實驗六】研究吸音棉、稻稈、粗糠、廚餘粉、咖啡渣5種填充材的密度與空隙率得到(表4-5)

表 4-5 研究 5 種填充材料的密度與空隙率
本表為研究者自行製作

填充材質	稻稈	粗糠	羊毛絨	廚餘粉	咖啡渣
質量m(g)	5	5.7	4	34.7	25.5
密實體積V(ml)	15	8	7	45	37
加水量(mL)	85	92	93	55	63
密度($\rho = g/cm^3$)	0.33	0.71	0.57	0.77	0.69
空隙率(%)	70	84	86	10	26

以上圖表由研究者自行製作

由(表4-5)各種填充材的密度及空隙率研究本組發現廚餘粉與咖啡渣的密度較高，且這兩種的填充材的空隙率也較低，其隔音效果在實驗3中也證實比較佳，因此，推測隔音的效果與密度及孔隙率有關。

【實驗七】既然密度和空隙率與隔音效果有關，那就須研究咖啡渣披覆量與降噪效果間的關係，本組設計了咖啡渣披覆量與隔音厚度間換算，得到下圖4-6的結果。

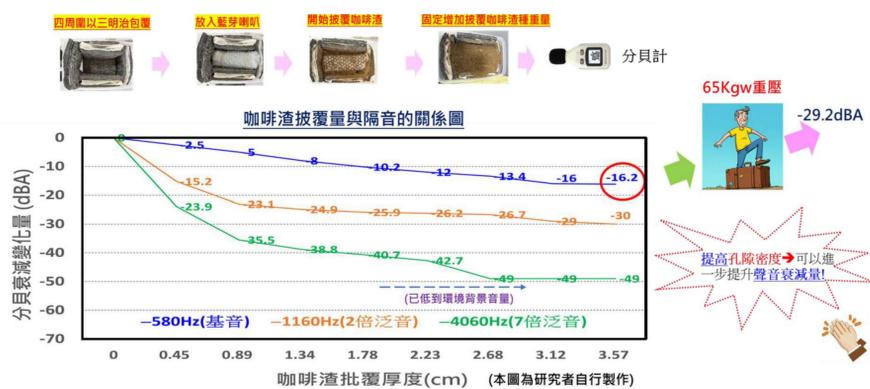


圖4-6 研究咖啡渣披覆量與隔音的關係圖

以上圖表由研究者自行製作

從(圖4-6)得知咖啡渣披覆厚度增加，測得音量越來越小，本組為了提高其密度，請班上65公斤的同學協助重壓重踩，在3.57公分下，提高孔隙密度，可以進一步提升聲音衰減變化量從-16.2分貝增加到-29.2分貝(減少13分貝，減少達80%)，隔音成效斐然。

【實驗八】為了更客觀來量化咖啡渣孔隙密度與對於不同頻率間的隔音效果，得到下圖4-7的結果。

咖啡渣孔隙密度對音量衰減的影響

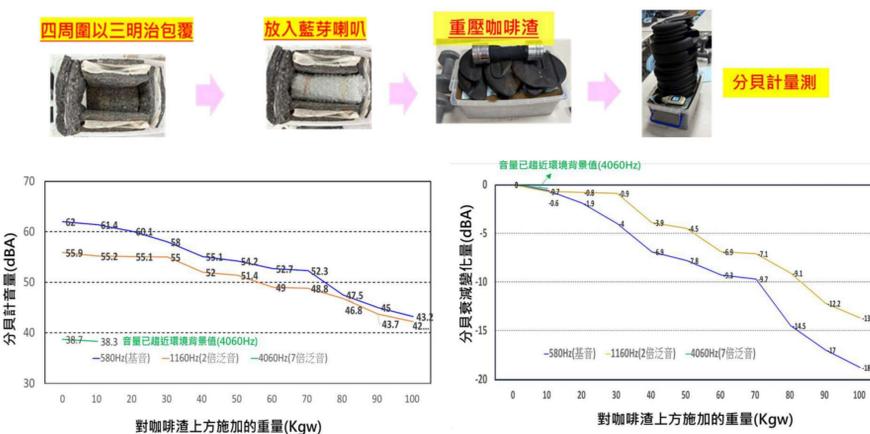


圖 4-7 孔隙密度對音量衰減的影響 以上圖表由研究者自行製作 隨著壓力加大-提高咖啡渣孔隙密度，對於不同頻率下均達到音量逐漸減弱的效果!

【實驗九】綜合上述研究結果與討論後，開始動手打造板擦機隔音罩(圖4-8)

第1代隔音罩	第2代隔音罩	第3代隔音罩
<p>三明治吸音材直接對板擦機內部包覆</p> <ul style="list-style-type: none"> 缺點: 1) 容易過熱 2) 有降噪效果,但仍有進步空間 	<p>打造外部隔音罩,隔音罩內部四周圍貼上三明治吸音材</p> <p>外部隔音罩的創意概念來自~</p> <ul style="list-style-type: none"> 優點: 1) 優異隔音 2) 低空氣汙染-粉筆灰 3) 跨產品整合優勢 缺點: 1) 板擦機不容易取出清除粉筆灰 	<p>打造活動式外部隔音罩,兼具降躁與清理機器的彈性!</p> <ul style="list-style-type: none"> 優點: 1) 優異隔音 2) 低空氣汙染-粉筆灰 3) 跨產品整合優勢 4) 活動式外部隔音罩,可彈性清理粉筆灰與維修機器

圖 4-8 隔音罩迭代優化的演進史 以上圖表由研究者自行製作

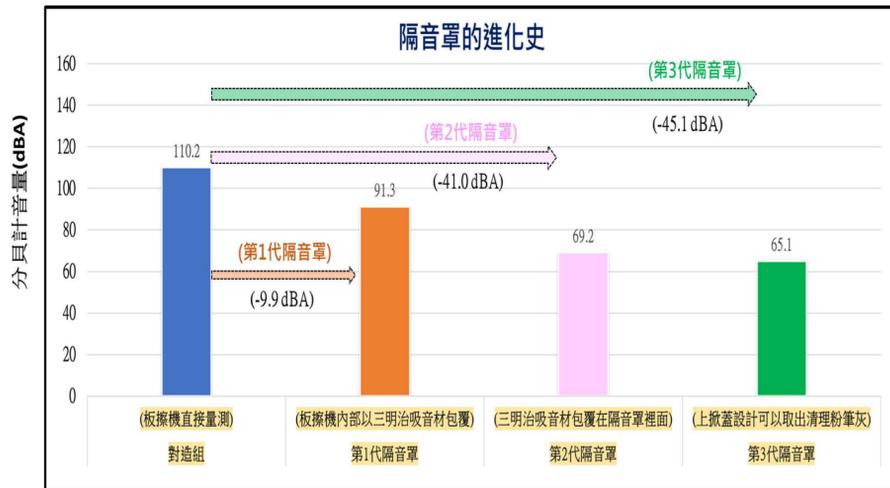


圖 4-9 隔音罩迭代優化的演進史 以上圖表由研究者自行製作

由(圖4-8)及(圖4-9)得知，本組設計板擦機外部隔音罩，內部黏貼創意複合材料，開口以瑜珈墊密封，靈感來自醫療檢測箱，兼具隔音與粉塵逸散功能，最終從110分貝降到65分貝達45分貝(40%)，在聲學上，其強度減少3萬多倍，降噪效果顯著。

伍、結論

- 一、聲音在特定頻率下，會發生共振，響度增大，聲音頻率增高，衰減響度量更大。
- 二、穿孔板的材質表現依序是鋁板 > 木板 > 壓克力板 > 鐵板。
- 三、填充材稻稈、粗糠對於中低頻聲音無吸音效果，但廚餘粉及咖啡渣能發揮顯著降噪作用，兩者表現差異不大，此兩種吸音效果與商用材料媲美。
- 四、本組最終以吸音棉+咖啡渣+吸音棉 打造出完美組合，其表現在檢測時，幾乎聽不到以藍芽喇叭發出85dB的聲響，一度還以為藍芽喇叭沒電或壞掉了，使得本組替板擦機穿外套的目地達成，也符合初衷“變廢為寶”的目的。
- 五、把壓克力箱填充材的研究成果，導入小成本、小規模經濟方式(吸音棉200元+木板箱100元+裝咖啡渣料理袋1元/袋*10袋，合計310元)，模擬對板擦機打造一個隔音罩，隔音表現驗證了前面壓克力箱吸音材料的研究成果。
- 六、利用排水法推論出咖啡渣的隔音的效果可能跟高密度及低空隙率有關。
- 七、研究咖啡渣的厚度與隔音的關係，增加咖啡渣厚度可有效減弱聲音，但當其厚度達3.12公分以上，隔音效果漸漸不特別明顯；而在3.57公分厚度，重壓以提高孔隙密度，可進一步從68分貝降至55分貝達13分貝(19%)。
- 八、利用重壓-提高咖啡渣孔隙密度，對於不同頻率下均達到音量逐漸減弱的效果!
- 九、打造板擦機隔音罩，迭代優化，開發出『活動式外部隔音罩』-讓聲音響度由110分貝大大降至65分貝，整整減少了45分貝，降噪40%，並兼顧降噪與清理的彈性優點，降噪效果極佳化。

陸、未來展望

本組研究核心利用『三明治咖啡渣』複合材料-替板擦機打造優異的隔音罩，概念更可延伸應用於抽水馬達、洗衣機等家用電器或小型辦公/工業機械馬達的噪音控制，此外還可延伸應用於建築隔音板材料上。期待未來可將咖啡渣融入新型建築材料(如吸音混凝土)的開發，為現代建築提供更優異、更環保的隔音方案，推動建築產業的永續發展ESG。

柒、參考資料

- 一、林雨莊，<http://www.epa.url.tw/>永續社環境類第8章吸音原理及其應用。
- 二、Kang等人，2023，在 Bio Resources 期刊上的 "Investigation of the sound-absorbing performances of pure coffee grounds"、
- 三、廖彩君等人，2010，"點食成金--粗糠與常見材料的保溫、隔音及緩衝效能之研究"。