

屏東縣第 66 屆中小學科學展覽會

科 別：物理科

組 別：國中組

作品說明書

作品名稱：「位」你著想:尋找教室中聲學表現的最佳座標

關鍵詞：音頻、頻率響應、殘響、掩蔽效應

編 號：B2015

摘 要

本研究旨在探討教室空間中音響擺放位置與播放音量，對聲音能量分布、聽感清晰度及聽覺疲勞之影響。研究動機源於英語聽力測驗時，不同座位學生對聲音清晰度的感受存在明顯差異，顯示聲音在室內空間傳播過程中，可能受到反射、干涉與殘響等聲學因素影響。

因此，本研究希望透過實際量測與數據分析，找出影響聽感品質的關鍵因素與最佳音響配置位置。實驗選擇兩間空間結構與建材不同之教室作為研究場域，利用 Room EQ Wizard (REW) 軟體進行聲音量測，分析頻率響應圖、瀑布圖及 T60 殘響時間數據，觀察低頻 (20 - 100 Hz) 與中高頻 (1 kHz 以上) 在不同位置與音量條件下之能量衰減情形、低音表現與聽覺疲勞程度。研究結果顯示，中高頻能量與語音清晰度具有高度相關性，但當高頻殘響時間過長時，反射聲疊加會造成子音模糊與聲音刺耳，導致聽覺疲勞上升，低頻則提供聲音厚度與飽滿感，但若低頻衰減過慢，會產生「掩蔽效應」，遮蔽中頻人聲細節，使整體清晰度下降。此外，音量與清晰度並非呈現線性關係，當音量過大時，空間反射音增加，反而降低聲音辨識度。在位置比較方面，實驗發現 4 號位置位於直達聲與反射聲能量平衡之轉折區域，在兩間教室中皆呈現較穩定的頻率分布與適中殘響時間，整體清晰度與舒適度表現最佳。研究顯示，改善教室聽感品質的關鍵，在於聲能分布平衡與殘響控制，而非單純提高播放音量。本研究成果可作為教室音響擺放與空間聲學改善之依據，有助於提升教學環境品質與聽力測驗之公平性。

壹、前言

一、研究動機

在學校進行英語聽力測驗時，常感到播出的聲音不夠清楚，聽感模糊，影響理解內容且此時理化課又正巧學到聲音的傳播也讓刺客的我們對聲音傳播方式產生了興趣。環境音、音響品質等種種因素都可能影響到人類的聽覺辨識能力，而有些本生因素是我們目前無法改變的，像是更換全校的音響設備，但有些是我們能改變，我們想透過改變音響擺放位置和不同的位置找到目前學校聽感最佳的位置，並藉由最佳的音響擺放位置來提升同學們的聽感清晰度，讓大家在學習時減少一些不必要的壓力，同時也想讓大家在進行各項聽力測驗時也能測出屬於自己的分數，盡量能不受到位置和音響的影響。

二、研究目的

- (一) 探討教室內不同位置的聲音音場分析
- (二) 探討在不同教室時的聲音音場分析
- (三) 在有無窗簾的情況教室內的聲音音場分析
- (四) 進行廣播時聽感分析

三、文獻探討

在過往的研究裡，教室是知識傳遞的核心場域，而「聽覺」是師生互動與接收資訊的最主要管道。然而，國內目前的學校建築與室內設計中，對於教室的殘響時間（RT）往往缺乏明確的規範要求。為了兼顧堅固耐用與易於清潔，台灣教室大量採用了磨石子地板、水泥牆與玻璃等「高反射、低吸音」的硬調建材，這種不當的材料選用導致了室內殘響時間過長。從聲學角度剖析，過長的殘響與極易在空間角落形成的低頻的「駐波」，觸發聽覺生理上的「向上掩蔽效應」，使能量強大的低頻母音強勢掩蓋掉辨識字義的微弱高頻子音。這種音場缺陷會讓學生聽不清楚講課內容，大腦需耗費極大算力去拼湊字義，導致學習專注力與教學品質大幅降低，同時，教師為了對抗不良的聲學環境，必須長期提高音量講課，進而造成聲帶嚴重受傷等職業傷害。因此，透過科學化的測量來檢視並改良教室音場，是保障師生健康與聽覺受教權迫切且必要的課題。

梳狀濾波效應 (Comb Filtering Effect)在一個封閉空間中，聲源發出的「直達音 (Direct Sound)」與撞擊牆面後延遲到達的「反射音 (Reflected Sound)」會在空氣中相遇並交疊。因為兩者抵達的時間差，會產生嚴重的相位干涉。在頻率響應 (SPL) 圖上，這種干涉會形成如同梳子牙齒般密集且劇烈上下起伏的峰值 (建設性干涉，造成音量異常放大) 與谷值 (破壞性干涉，造成音量異常削弱)。當教室的牆面材質極度不對稱 (例如單側有窗簾、單側為玻璃) 時，此效應會被嚴重惡化，導致空間內不同座位的學生接收到的頻率配方嚴重失真，徹底破壞音場的均勻度。

向上掩蔽效應 (Upward Spread of Masking)此為聽覺生理學與心理學的關鍵現象。由於人類物理反應特性，使得「低頻率、大能量」的聲音，極易掩蔽同時存在或緊接而來的「高頻率、小能量」聲音。在中文發音中，「母音 (如 ㄚ、ㄜ、ㄝ)」屬於低頻大能量，而辨識字義關鍵的「摩擦音與子音 (如 ㄌ、ㄥ、ㄍ)」則屬於高頻微弱能量。當教室硬體引發嚴重的低頻駐波時，空間中殘留的強大母音能量便會觸發「向上掩蔽效應」，將後續微弱的高頻子音徹底吞噬。這項理論完美解釋了為何在殘響過長的教室中，學生常會感到「聲音聽得很大聲，但字義卻含糊不清」。

貳、研究器材與設備

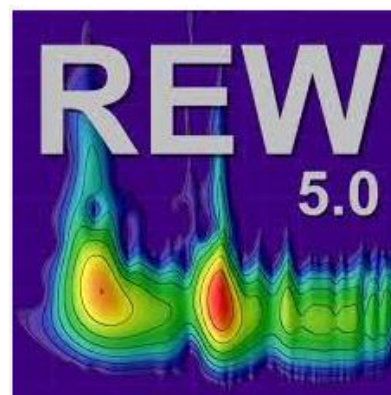
平板(播放音訊及測量)



音響(播放音訊)



REW 測量軟體



科班教室



健康教室



參、研究過程或方法

一、前置作業

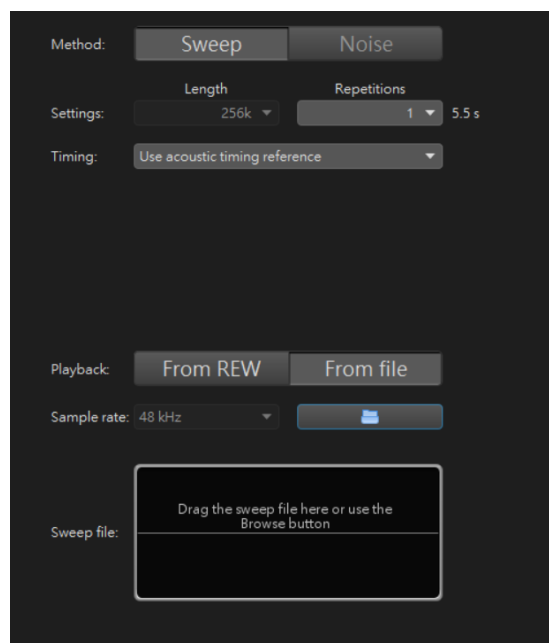
在擺放著一般課桌椅的教室中進行測量，先將教室劃分成九等分(3*3)並依次編號已能更清楚不同位置的頻率響應變化，實驗過程除了實際播放英文廣播也利用 REW(Room EQ Wizard) 中的 Measure 功能測量不同位置的聲音傳播特性。實驗過程中為降低干擾，均保持教室門窗關閉、桌椅配置不變、聲音輸出方向固定。

二、實驗

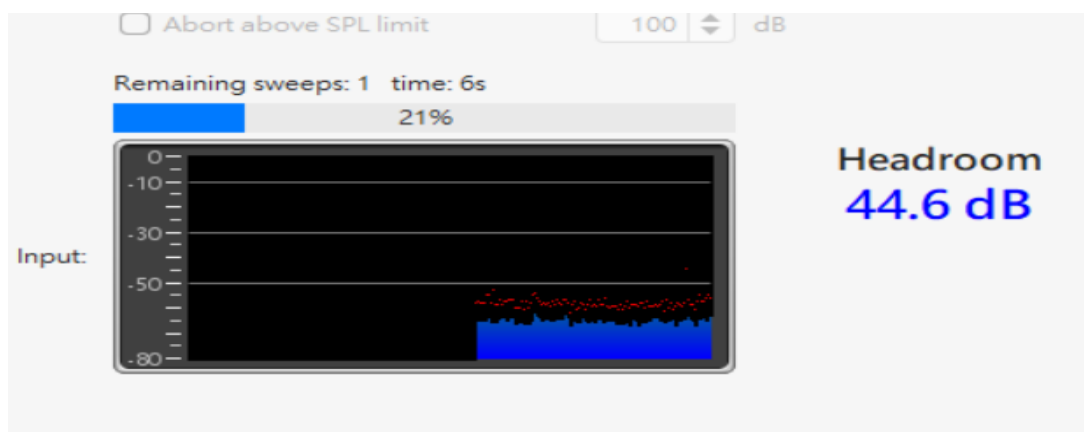
- (一) 挑選兩間環境不同的教室來做比較，一間健康教育教室(4 樓、外界雜音較少較安靜)，一間為科學班教室(1 樓、外界雜音較多較吵雜)
- (二) 兩間教室皆取三個相同的位置(前排區域、中央區域、後排區域)
- (三) 測量外來噪音與經過挑選的音頻進行比較(皆已 REW 音曝圖進行比較)
- (四) 回到健康教室，然後再從其中選出較清晰並符合正常語速的音頻。音頻皆須與清晰清楚為主要選材基準。

三、REW 使用步驟

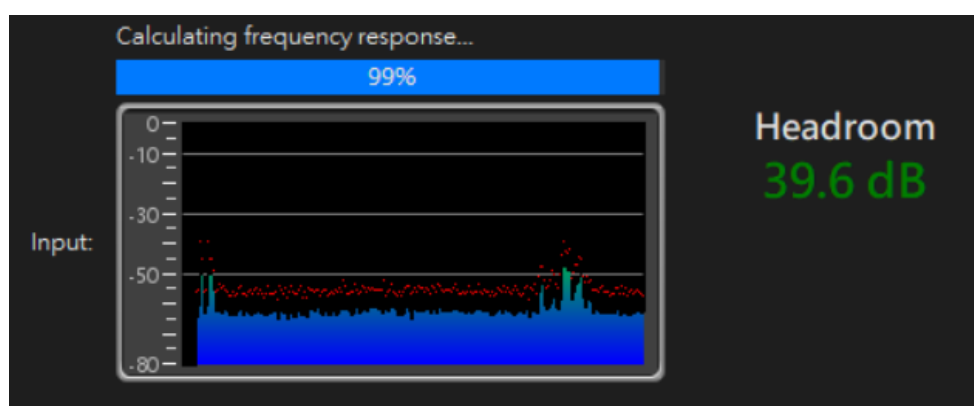
- (一) 設定麥克風矯正檔與輸入輸出裝置



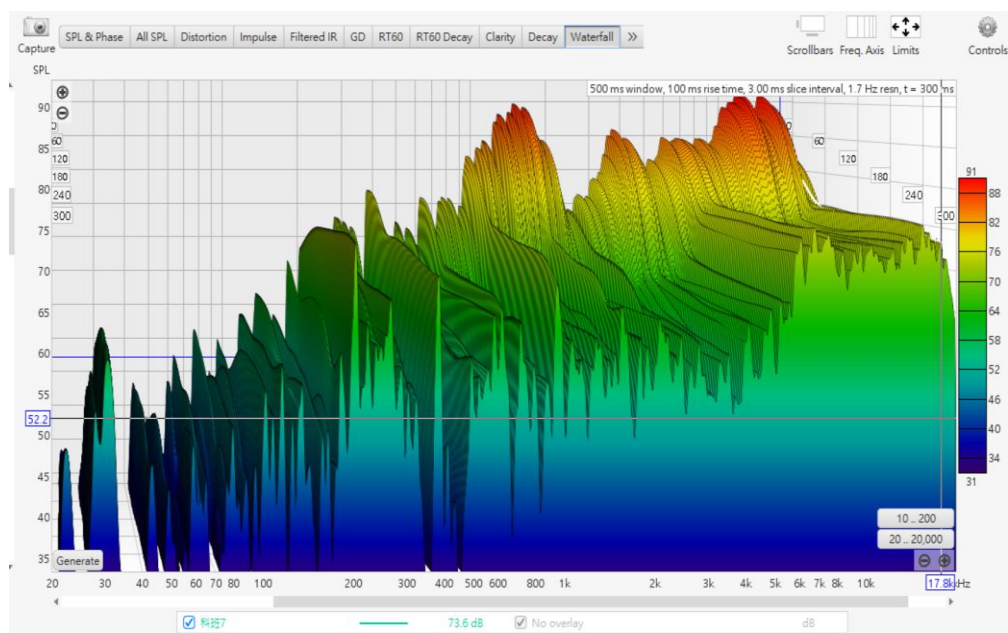
(二) 產生掃頻訊息



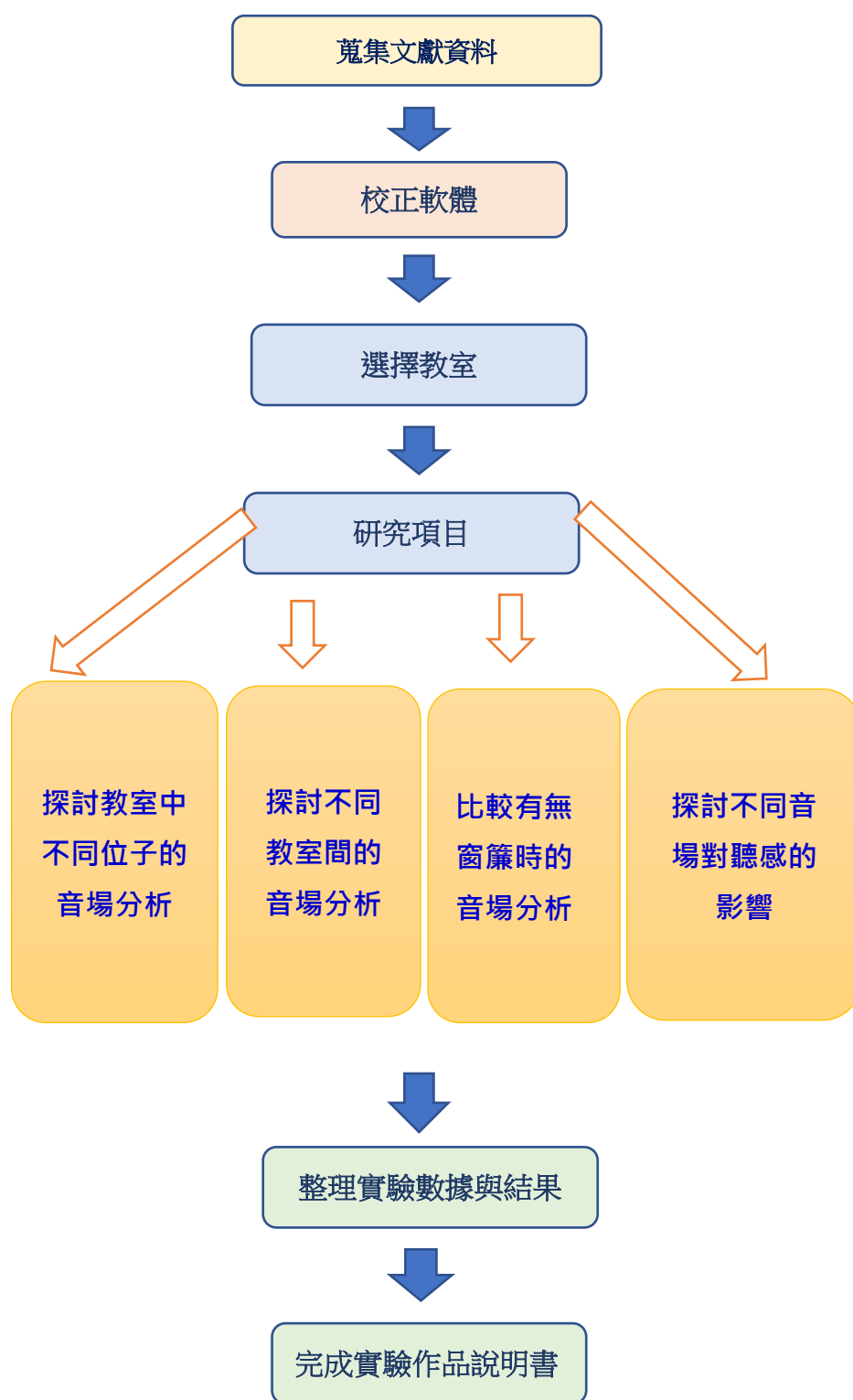
(三) 量測頻率響應



(四) 得到音場各類數據



四、 研究流程



肆、研究結果與討論

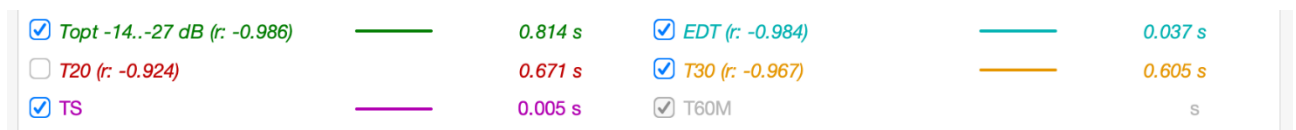


(左為科學班教室，右為健科教室)

一、探討教室中不同位子的音場分析

首先我們透過 Room EQ Wizard 分別在教室的 9 個位置上移動，使用內建音頻在不同位置上同時發聲、同時測量。我們可以在介面上得到一系列的圖形，包括 Waterfall、Decay、RT60 以及 SPL 疊圖

在 RT60 裡有許多不同的線圖，EDT（早期衰減時間）與 T_{opt} （最佳化殘響估計）作為核心分析指標。選擇 T_{opt} 是為了客觀呈現教室因大量使用磨石子建材與玻璃等硬質建材，所導致的整體殘響過長之基礎體質，而 EDT 高於 500 ms 的頻段，則能精確從界定語音產生糊化失真、導致學生聽不清楚講課內容的關鍵頻率區間。各色線圖分別如下。



在 X 軸上都是以頻率表示，在 SPL 的 Y 軸則是為音量（dB），RT 60 Y 軸為秒數（s），Waterfall 和 Decay 則是音量（dB）。

（一） 健教教室

1. SPL 疊圖分析

觀察健教教室 1 至 9 號位的 SPL 頻率響應疊圖，在 500 Hz 至 4000 Hz 的中高頻區段，9 條測量曲線皆呈現密集且上下震幅高達 10 dB 至 15 dB 的鋸齒狀波形（梳狀濾波效應）。此形態證實直達音與周圍硬質牆面（如黑板、玻璃）的早期反射音產生了破壞性相位干涉。在 200 Hz 以下的低頻區段，各測量點的曲線產生高達 20 dB 的垂直發散，顯示低頻能量在空間中分佈極度不均，存在顯著的空間駐波節點與腹點。

2. RT60 分析

圖整體呈現「低頻山峰、高頻平原」的極端落差形態。在 500 Hz 以上的中高頻段，EDT（早期衰減時間）與 T_{opt} （最佳化整體殘響）兩條曲線趨於重合併穩定於 1 s 左右，然而在 250 Hz 以下的低頻段， T_{opt} 曲線急遽攀升形成高聳入雲的波峰，且與 EDT 曲線產生極大的數值斷層。說明了空間缺乏低頻吸收機制，導致晚期殘響能量遠大於早期聲能。

1 號位：125 Hz 處 T_{opt} 達 8.5 s，EDT 約 4 s，兩線在低頻區始產生明顯數值分離，顯示發音初期已有能量滯留。

2 號位：低頻駐波干涉較兩側輕微， T_{opt} 最高值位於 100 Hz 降至 6 s，但 500 Hz 以上頻段之 EDT 仍高於 600 ms。

3 號位：鄰近左側牆面，63 Hz 處 T_{opt} 激增至 11 s，EDT 達 5.5 s，全反射面造成低頻消散顯著劣化。

4 號位： T_{opt} 在 80 Hz 處出現 14 s 的明顯峰值，兩線分離度擴大，顯示中段區域受橫向駐波影響劇烈。

5 號位：為空間混響匯聚區，100 Hz 至 200 Hz 區間 T_{opt} 呈現平緩的 10 s 高原狀態，EDT 約 5 s。

6 號位：受左側材質強反射影響，63 Hz 處 T_{opt} 達 15 s，低頻圖形峰值明顯較右側 4 號位更為尖銳。

7 號位：角落增益效應顯現，125 Hz 處 T_{opt} 攀升至 18 s，EDT 達 8 s，低頻滯留嚴重。

8 號位：前後平行牆面駐波發揮作用，80 Hz 處 T_{opt} 達 12 s，圖形呈現單一突出的窄頻寬波峰。

9 號位：全區極值所在，50 Hz 處 T_{opt} 高達 21 s，EDT 攀升至 10 s，兩線間距極大，為低頻能量滯留熱區。

3. Waterfall / Decay 分析

圖整體描述從時間域的 Waterfall 與 Decay 可觀察到空間瞬態響應的嚴重頻率依賴性。在 Waterfall 中，直達音 (0 ms 切面) 抵達後，高頻區段如同斷崖般迅速切齊歸零，但低頻區段卻沿著時間軸 (Z 軸) 向後方隆起多道深厚且連續的能量山脈。對應至 Decay 圖，高頻衰減線條間距寬鬆、下墜俐落，低頻衰減線條則呈現高密度黏合，並以極度平緩的斜率向右下方延伸，顯現能量消散的嚴重遲滯。

1 號位：Waterfall 在 125 Hz 處出現延伸至 1000 ms 未衰減完畢的低頻脊線，Decay 圖高頻線條間距正常，低頻開始靠攏。

2 號位：瞬態響應相對最佳，Waterfall 後方低頻脊線厚度較薄，Decay 圖整體線條斜率較為一致。

3 號位：Waterfall 在 63 Hz 處出現明顯的遲滯能量塊，Decay 圖中低頻線條呈現黏滯狀態。

4 號位：Waterfall 在 80 Hz 處的低頻能量堆積明顯向時間軸後方拖延，Decay 圖中段頻率線條出現不規則毛刺。

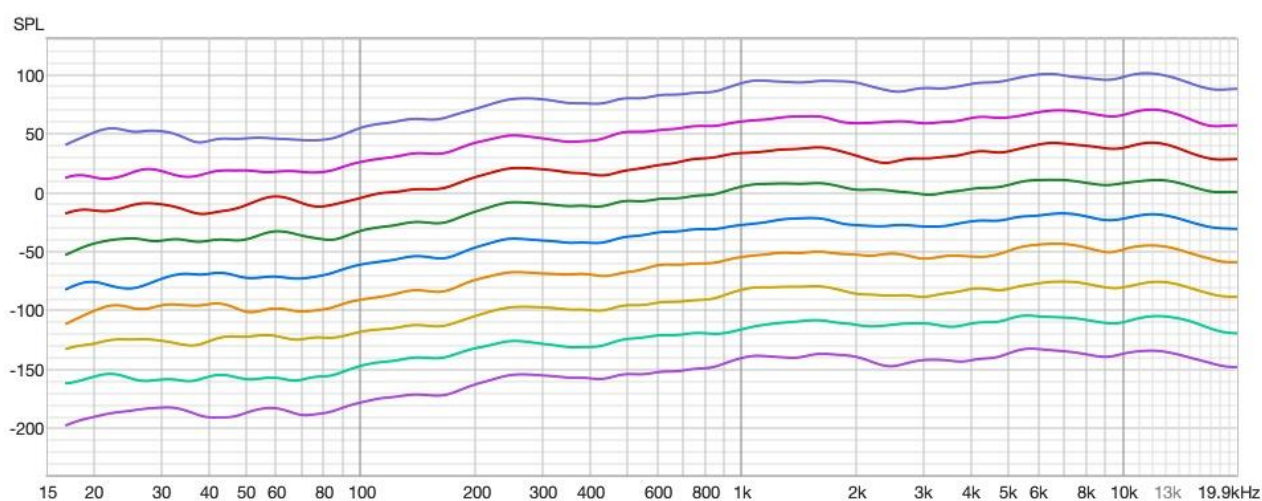
5 號位：Waterfall 呈現寬頻帶拖尾，50 Hz 至 200 Hz 皆有深厚能量基底，Decay 圖線條整體下墜速度緩慢。

6 號位：Waterfall 63 Hz 處能量山脈高聳且消散極慢，Decay 圖低頻區段線條緊密貼合，幾無衰減。

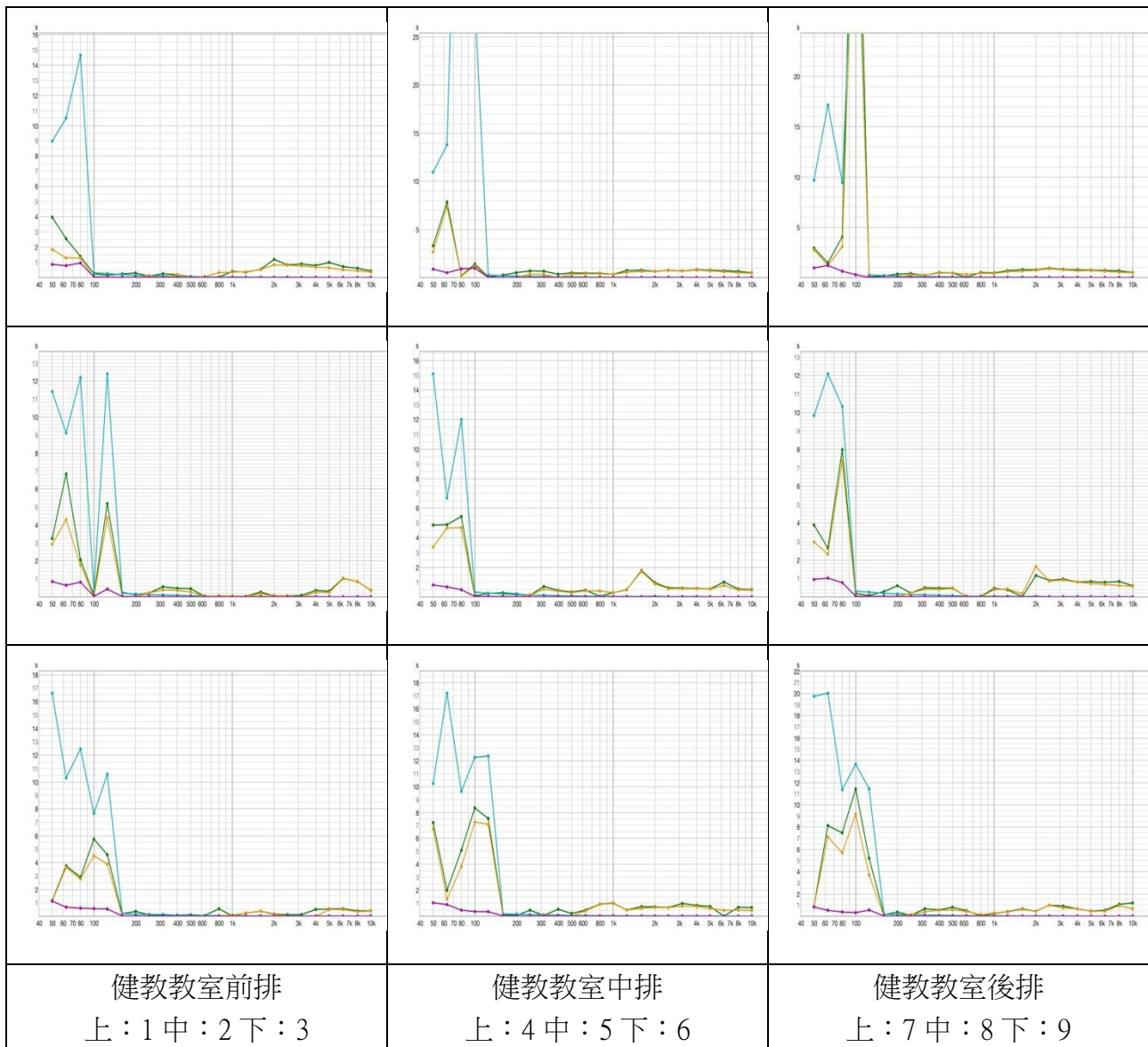
7 號位：Waterfall 125 Hz 處能量脊線幾乎平行於時間軸延伸，Decay 圖低頻衰減曲線呈現極度平緩的斜坡。

8 號位：Waterfall 80 Hz 處存在獨立持久的能量波峰，Decay 圖顯示該特定頻點消散受阻。

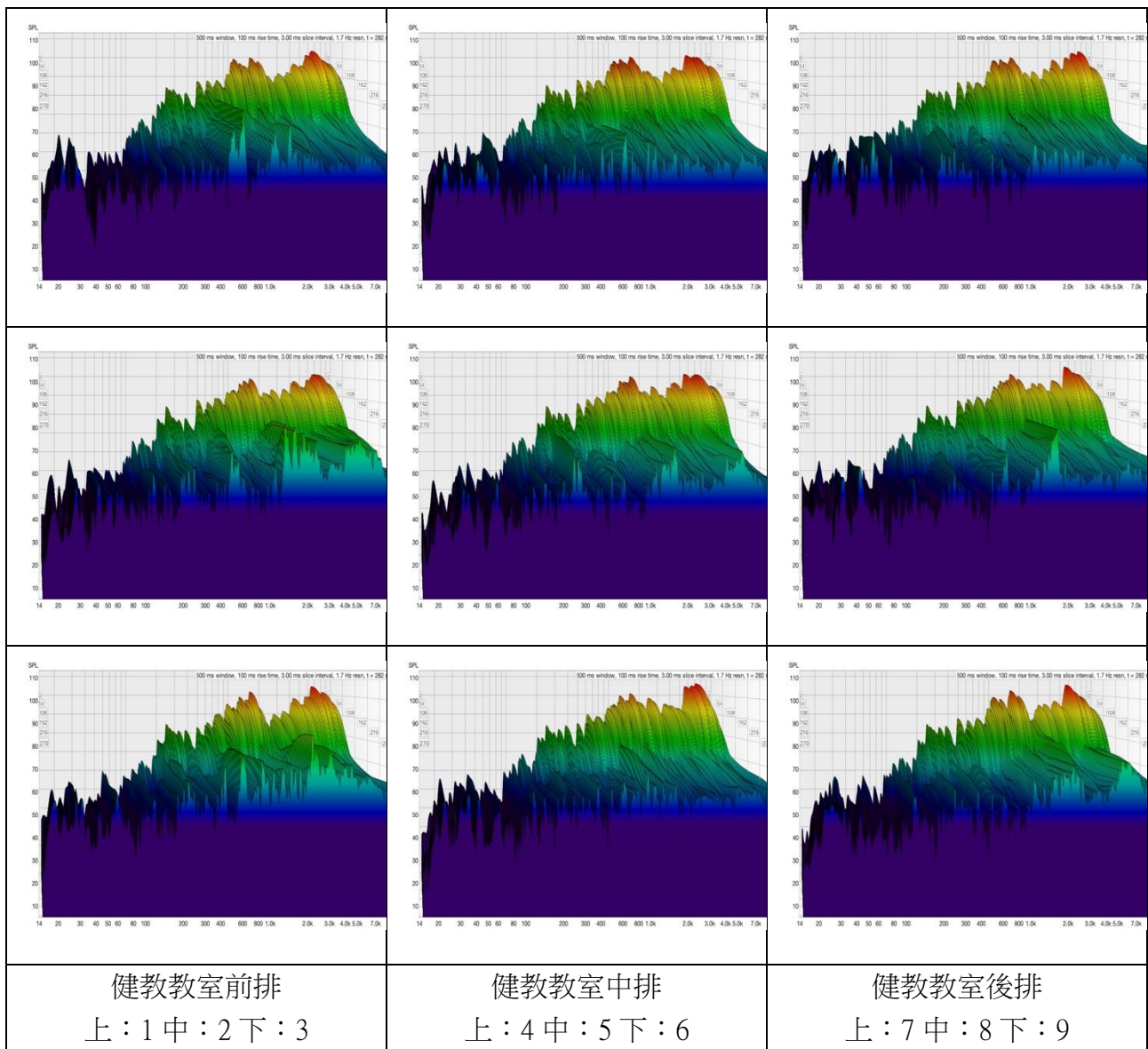
9 號位：Waterfall 50 Hz 處出現全場體積最大、延伸最長的能量堆積，Decay 圖低頻線條呈現完全黏合的水平拖延。



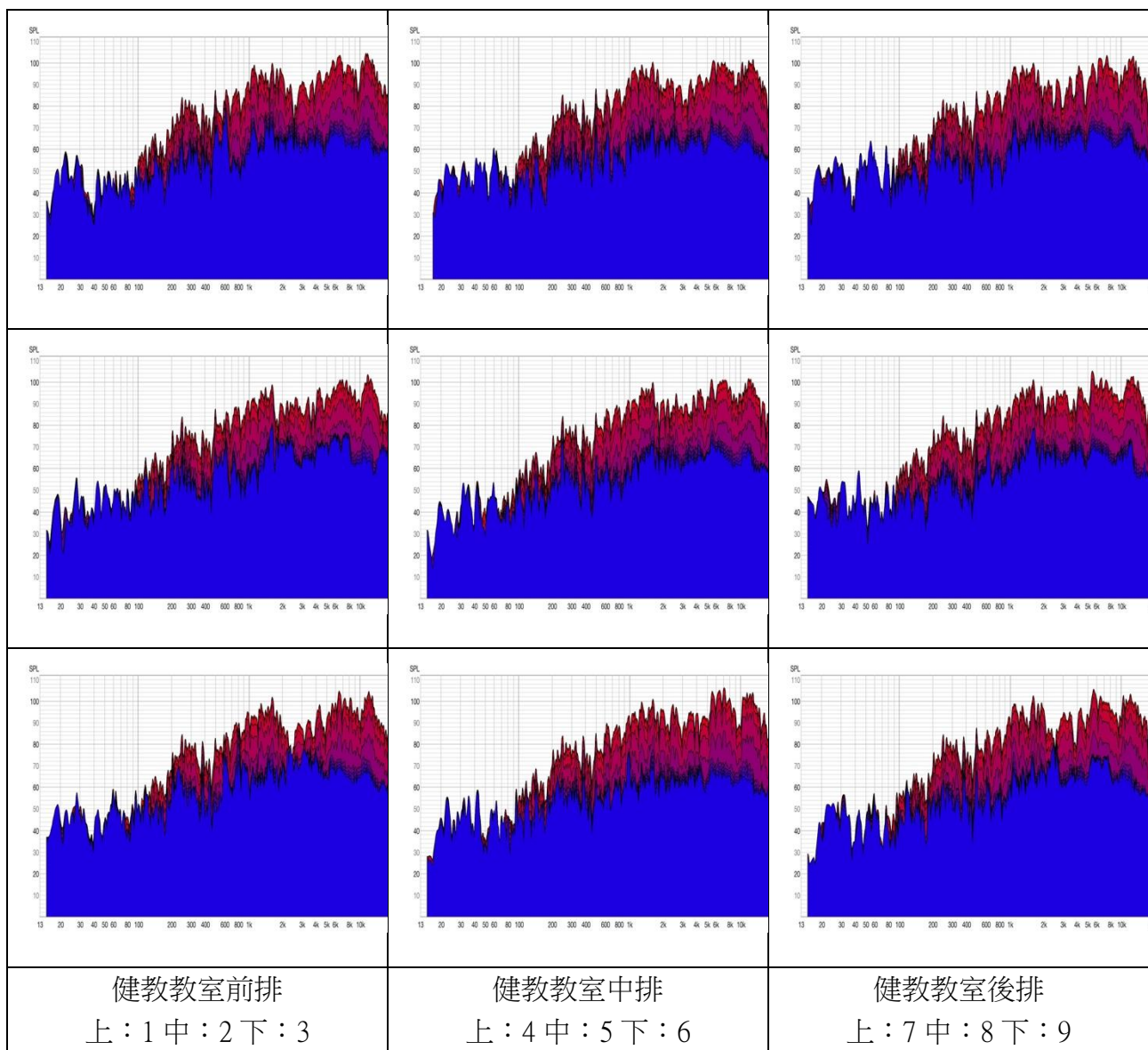
健教教室 SPL 疊圖（由上到下對應 1~9 號位）



健教教室 RT 60



健教教室 waterfall



健教教室 decay

（二） 科學班室

1. SPL 疊圖分析

科班教室的 SPL 疊圖中，500 Hz 以上的中高頻鋸齒狀震盪幅度略小於健教教室（振幅約落在 8 dB 至 12 dB），顯示其空間比例或材質配置對直達音的干涉略有不同。然而，在 150 Hz 以下的低頻區，曲線的垂直離散現象依然劇烈，最大落差達 18 dB，證實低頻駐波造成空間能量分佈不均的物理現象在不同硬調教室間具有高度普遍性。

2. RT60 分析

圖整體而言，科班教室的 RT60 形態與健教教室相似，皆為低頻發散、高頻收斂的圖譜。特別注意的是，低頻 T_{opt} 波峰的絕對數值（多落在 10 s 至 18 s 區間）略低於健教教室的極端值，且波峰的頻寬較窄，多集中在 50 Hz ~ 100 Hz 的特定共振頻率上。EDT 曲線在全區的分佈較為穩定，但與 T_{opt} 之間仍存在無法忽視的數值空谷，顯現背景殘響的掩蔽威脅依然存在。

1 號位：100 Hz 處 T_{opt} 為 7.5 s，EDT 3.5 s，低頻峰值較為平緩。

2 號位： T_{opt} 在 125 Hz 處有 5.5 s 的波峰，高頻 EDT 落在 500 ms 邊緣。

3 號位：63 Hz 處 T_{opt} 上升至 9 s，相較健教教室同點位，其極值略低。

4 號位：80 Hz 處 T_{opt} 達 11 s，兩線間距約 6 s，中排側邊駐波現象確立。

5 號位：中央區域 T_{opt} 在 100 Hz 處為 8.5 s，圖表呈現寬而平的丘陵狀。

6 號位：50 Hz 處 T_{opt} 達 12 s，與右側產生不對稱的低頻響應。

7 號位：角落增益導致 100 Hz 處 T_{opt} 達 16 s，EDT 7 s。

8 號位：前後牆駐波使 80 Hz 處 T_{opt} 達 10 s，單一頻率能量滯留。

9 號位：50 Hz 處 T_{opt} 高達 18 s，EDT 8.5 s，同樣為該教室低頻殘響最嚴重的角落。

3. Waterfall / Decay 分析

圖整體描述在科班教室的 Waterfall 與 Decay 中，中高頻的乾淨消散與低頻的滯留形成強烈對比。Waterfall 圖中的低頻能量脊線集中在特定幾個模態頻率（如 50 Hz、80 Hz）上向後延伸，形成突出的山脈，Decay 圖則顯示這些特定低頻線條脫離了整體的衰减群組，以異常緩慢的斜率獨立滑落。

1 號位：Waterfall 低頻脊線在 100 Hz 處延伸較長，Decay 高頻消散俐落。

2 號位：Waterfall 0 ms 切面後方相對乾淨，Decay 線條間距均勻。

3 號位：Waterfall 63 Hz 處出現能量堆積，Decay 低頻線條開始黏合。

4 號位：Waterfall 80 Hz 處能量消散速度減緩，Decay 中低頻線條交疊。

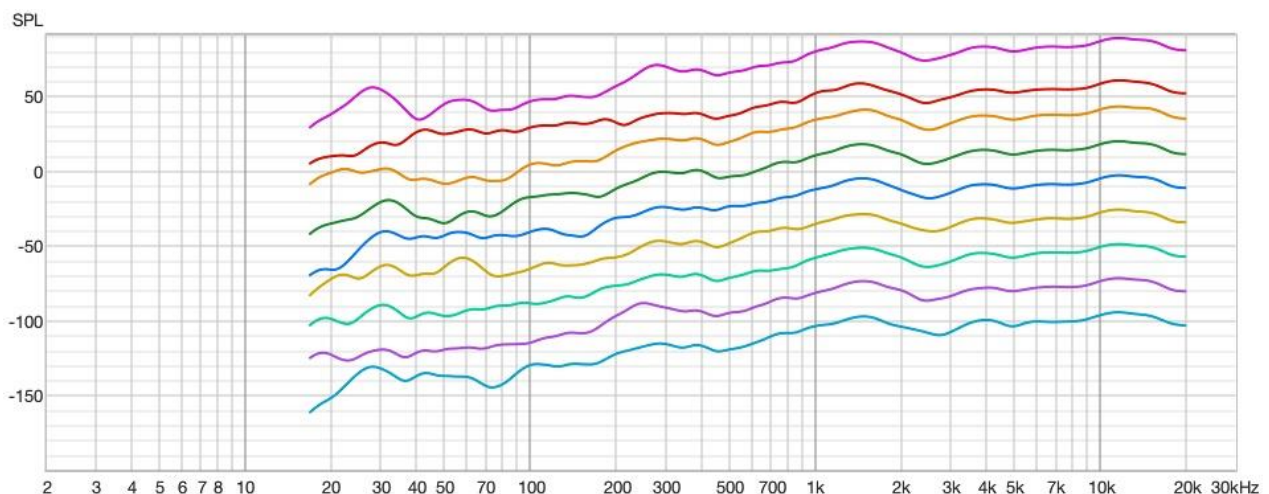
5 號位：Waterfall 呈現多個低頻小波峰的遲滯，Decay 整體衰减斜率中等。

6 號位：Waterfall 50 Hz 處能量脊線深厚，Decay 低頻線條下墜緩慢。

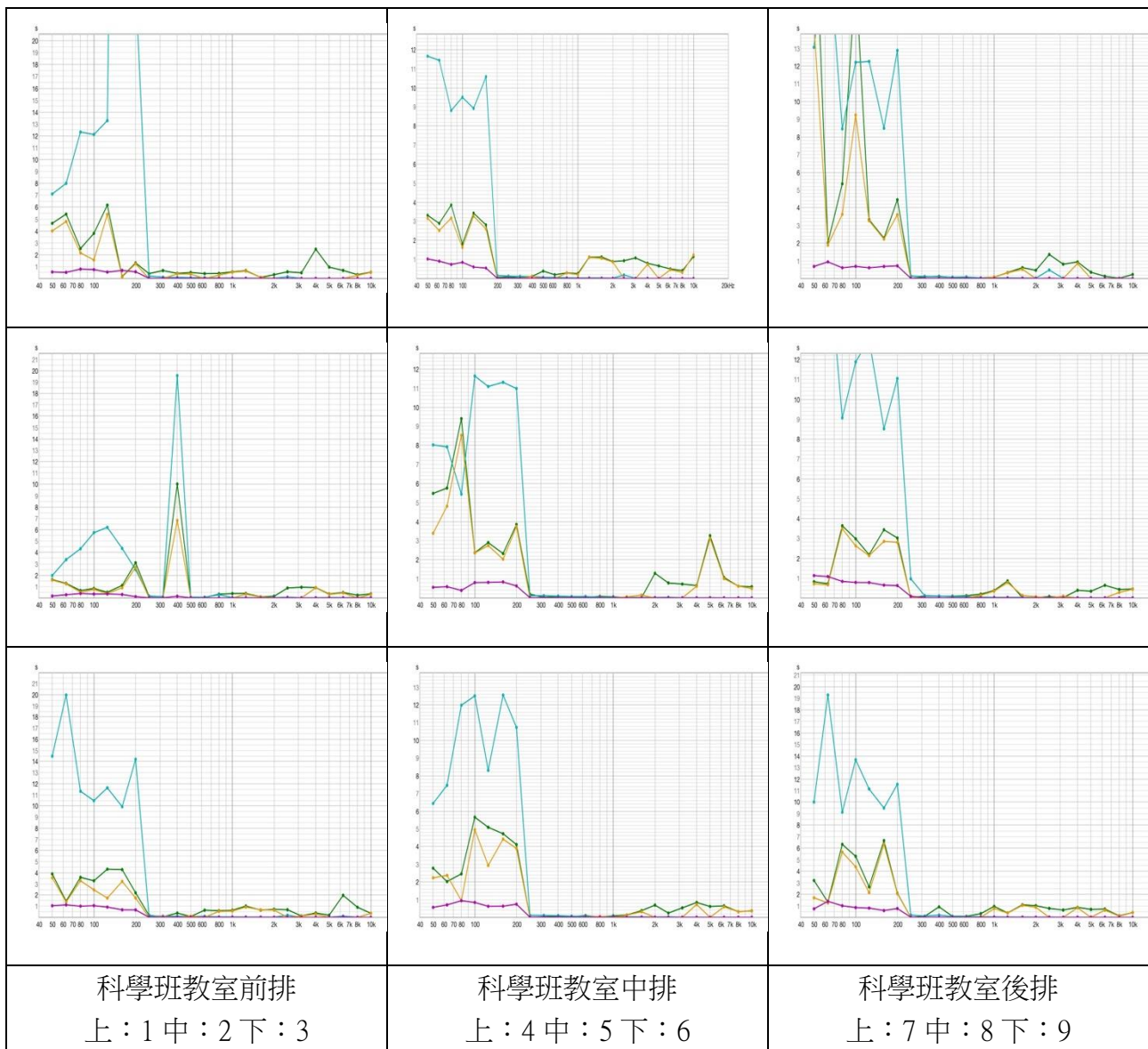
7 號位：Waterfall 100 Hz 處能量幾乎無法消散，Decay 線條呈現嚴重滑坡。

8 號位：Waterfall 80 Hz 處拖尾明顯，Decay 該頻率線條獨立突出。

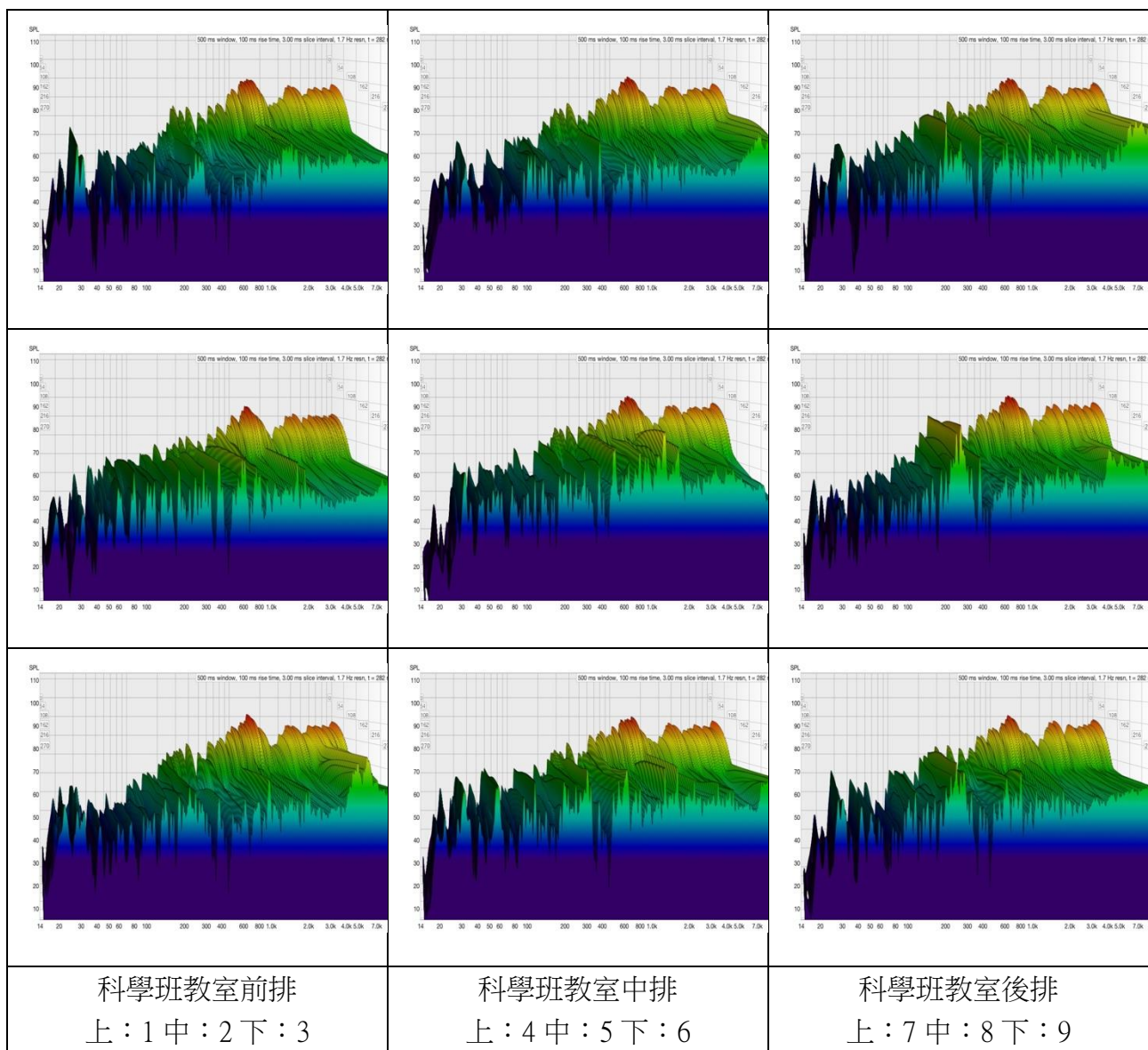
9 號位：Waterfall 50 Hz 處能量堆積龐大，Decay 低頻線條緊密黏貼。



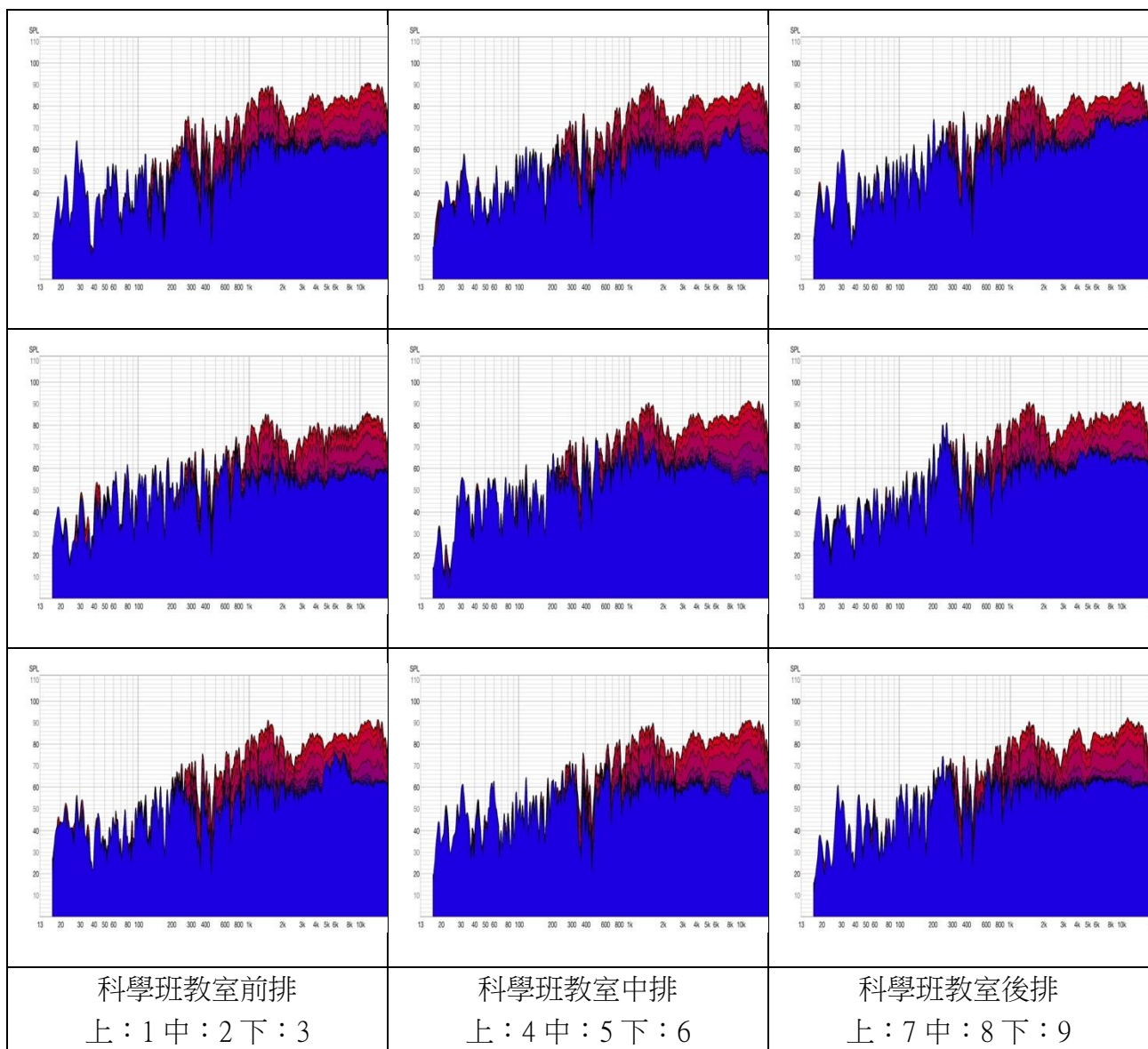
科學班教室 SPL 疊圖（由上到下對應 1~9 號位）



科學班教室 decay



科學班教室 waterfall



科學班教室 decay

二、探討在不同教室時的聲音音場分析

最後比較兩間教室，在 RT60 均呈現「低頻山峰、高頻平原」的極端落差形態。中高頻段的 EDT 與 T_{opt} 趨於重合併穩定於 1 s 左右，但在 200 Hz 以下低頻段的 T_{opt} 皆出現高聳波峰，且與 EDT 產生極大的數值斷層。這證實了國內傳統教室普遍缺乏長波長聲波的吸收機制，存在強烈的低頻駐波陷阱。且低頻能量在空間中分佈極度不均。科班教室的低頻 T_{opt} 波峰絕對數值（約落在 10 s 至 18 s 區間）略低於健教教室的極端值，且其波峰頻寬較窄，主要集中在 50 Hz 至 100 Hz 的特定共振模態頻率上，不如健教教室的低頻範圍廣泛與極端。在 SPL 疊圖中，科班教室中高頻的鋸齒狀震幅（約 8 dB 至 12 dB）與低頻段的垂直發散落差（約 18 dB），皆略小於健教教室（震幅高達 10 dB 至 15 dB，落差達 20 dB）。此差異顯示，科班教室的空間配置或建材選擇對直達音的破壞性干涉程度略微減輕。

三、是否有窗簾的比較

（一）健教教室（具備窗簾）

透過檢視靠窗點位（如 1、4、7 號位）的圖表可發現，窗簾的存在確實改變了頻譜右側（高頻）的幾何特徵。在 RT60 圖表中，2000 Hz 以上頻段的 T_{opt} 與 EDT 曲線皆被有效壓制在 0.6 s 以內，在 Decay 圖中，高頻線條的衰減斜率也更為陡峭。然而，對於波長較長的低頻（250 Hz 以下），窗簾似乎並無效果。低頻段的 T_{opt} 依然存在破表的高聳山峰，Waterfall 圖中的低頻能量脊線也並未因窗簾而縮短。

（二）科班教室（無窗簾）

在缺乏窗簾等孔隙吸音材質的側邊點位，RT60 圖表在中高頻段（1000 Hz 至 4000 Hz）的數值相對於健教教室有 0.2 s 至 0.4 s 的微幅抬升。SPL 疊圖中，中高頻的梳狀濾波鋸齒震盪也更為銳利。這證實了缺乏高頻吸音材會加劇直達音與高頻反射音的

相位干涉，導致聲音聽感較為刺耳，但對極低頻駐波的熱區分佈與能量強度並無根本性的改變。

四、探討語言發音在不同教室時的討論

硬調建材所引發的共通性聲學缺陷，將對人類語音傳遞產生嚴重的「向上掩蔽效應」。人類語音的頻譜特性中，母音（如 a, o, e）主要集中於 250 Hz 至 1000 Hz 的中低頻段，具有聲能強、持續時間長的物理特徵，而決定語意辨識度的子音（如 s, t, k）則多分布於 2000 Hz 以上的高頻段，具有聲能微弱、瞬態短促的特性。

從兩間教室的 RT60 與 Waterfall 圖比較可見，100 Hz 至 250 Hz 的低頻殘響時間（T_{opt}）動輒高達 10 s 至 25 s。當教師發音時，能量強大的低頻母音會在空間中形成持續不散的低頻背景駐波。由於人耳特性，低頻能量的振動會向人耳高頻區擴展。因此，這些未消散的低頻母音殘響，會直接在延續掩蔽後續發出的微弱高頻子音。

此外，SPL 圖表所顯示的中高頻梳狀濾波效應，物理上破壞了子音，而 EDT（早期清晰度）普遍高於 500 ms，更違反了哈斯效應中關於直達音與 50 ms 內早期反射音能互相融合增益的先決條件。這導致直達音在抵達學生耳中前，已遭到極度扭曲與模糊化。大腦必須持續進行高強度的聲學特徵修復與語意猜測，最終必然引發學生的聽覺疲勞（Listening Effort）與教師因過度發聲而導致的聲帶勞損。

伍、結論

透過 SPL、RT60、Waterfall 與 Decay 等數據，對「科班教室」與「健教教室」進行比較。間傳統的硬建材教學空間均存在嚴重的聲學缺陷，但在教室內的不同配置下，音場惡化有程度上的顯著差異。

一、低頻失控現象：兩間教室在低頻段（200 Hz 以下）由於缺乏長波長聲波的吸收機制，能量在平行牆面間迴盪，形成駐波熱區。科班教室的低頻 T_{opt} 峰值約在 10s 至 18s 之間，而健教教室則呈現更為極端， T_{opt} 衝破 25s 的量測極限，且代表早期清晰度的 EDT 亦同步抬升至 8s 以上。證實在缺乏低頻吸收的環境下，純淨的直達音幾乎不具備優勢。

二、空間位置與頻率對應之實境聽感分析 根據量測數據，我們將兩間教室不同點位進行聽感描述：

1. 後排駐波重災區（如兩間教室之 7、9 號位）在極低頻 50 Hz - 125 Hz 之下。受角落增益影響，此處為能量滯留最嚴重，教師發出的母音在此處產生長達 20s 以上的殘響，導致字音嚴重黏滯
2. 非對稱材質干擾區（如健教左側全反射玻璃 3、6 號位）在中高頻 500 Hz - 4000 Hz。相較於科班教室較對稱的反射，健教教室因左側玻璃的強反射與右側窗簾的吸音落差，產生了極端密集的梳狀濾波效應（鋸齒狀波形幅度達 15 dB）。學生會覺得聲音破碎、帶有不自然的金屬干擾聲
3. 前排直達音優勢區（如兩間教室之 2 號位）在全頻段綜合上。具備較強的直達音，但發音仍只有瞬間有短暫清晰感。

三、改善建議數據，這兩類教室均有明顯的向上掩蔽效應，持續不散的低頻母音殘響（對應 Waterfall 與 Decay 的低頻長尾）會強勢吞噬掉決定語意辨識度的微弱高頻子音（對應 SPL 的鋸齒失真）。低頻能量常會在牆角匯聚，產生強烈的駐波與角落增益，因此我們可以裝設一種常置於錄音室等環境角落的聲學處理裝置「角落陷阱」，他是

轉門吸收低音的一種裝置，為來也可在 REW 的學習延伸，做往角落陷阱的設計，沒詞此次題目在進行空間音場的優化研究。

陸、參考文獻

1. [https://val.npust.edu.tw/wp-content/uploads/2024/05/56-2005-](https://val.npust.edu.tw/wp-content/uploads/2024/05/56-2005-%E5%B1%8F%E7%A7%91%E5%A4%A7%E6%A0%A1%E5%9C%92%E5%AE%A4%E5%85%A7%E9%9F%B3%E5%A0%B4%E7%92%B0%E5%A2%83%E9%87%8F%E6%B8%AC%E8%88%87%E5%88%86%E6%9E%90.pdf)

[56-2005-%E5%B1%8F%E7%A7%91%E5%A4%A7%E6%A0%A1%E5%9C%92%E5%AE%A4%E5%85%A7%E9%9F%B3%E5%A0%B4%E7%92%B0%E5%A2%83%E9%87%8F%E6%B8%AC%E8%88%87%E5%88%86%E6%9E%90.pdf](https://val.npust.edu.tw/wp-content/uploads/2024/05/56-2005-%E5%B1%8F%E7%A7%91%E5%A4%A7%E6%A0%A1%E5%9C%92%E5%AE%A4%E5%85%A7%E9%9F%B3%E5%A0%B4%E7%92%B0%E5%A2%83%E9%87%8F%E6%B8%AC%E8%88%87%E5%88%86%E6%9E%90.pdf)
屏科大校園室內音場環境量測與分析.

2. <https://www.alxc.studio/post/%E9%9F%B3%E5%A0%B4%E7%92%B0%E5%A2%83%E9%87%8F%E6%B8%AC%E8%88%87%E5%88%86%E6%9E%90.pdf>
音場：自由場與漫射場、近場與遠場

3. https://citysoundproofing.com/library-12.php?utm_source

4. https://novo.press/listening-room-acoustics-room-modes-and-standing-waves-part-1/?utm_source

5. <https://www.roomeqwizard.com/REW%E5%B8%AE%E5%8A%A9%E6%89%8B%E5%86%8C%E4%B8%AD%E6%96%87%E7%89%88.pdf>

6. <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/哈斯效应>

7. [https://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gsweb.cgi/ccd=f1FmT5/search?s=id="100NTOU5345026".&openfull=1&setcurrent=0#XXX](https://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gsweb.cgi/ccd=f1FmT5/search?s=id=) 國立臺灣海洋大學 依據 BB93 標準進行教室聲場特性評估實驗研究