

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 物理科

(鄉土)教材獎

080106

坑腔有利-翟山坑道音場探討

學校名稱：金門縣烈嶼鄉卓環國民小學

作者： 小六 洪少揚 小六 方柏瑞	指導老師： 陳秋蟬 吳 真
-------------------------	---------------------

關鍵詞：音場、殘響

摘要

本研究主要探討翟山坑道本身音場狀態，希望透過殘響分析找出翟山坑道作為音樂演奏會表演場地的條件優勢。透過比較坑道內不同位置、響度、頻率所測得的殘響數值後發現，不同樂器在不同坑道位置，會有不同的殘響表現。並且坑道內部結構為不規則形，不同位置具有不同的音場條件，越靠近內部位置，殘響數值越長。不同響度，在不同的位置殘響數值也不同。就頻率而言，外部位置，低頻的殘響數值較長；內部位置，則是高頻的殘響數值較長。整體而言，翟山坑道的音場效果，並不如預期中好，但就其天然條件(空間大、水道)而言，確實比一般坑道具有更佳的音場效果，再加上所擁有的戰地歷史脈絡，更增加其作為地區音樂表演場所的價值。

壹、研究動機

自 2009 年「翟山坑道」舉行首創的「古寧頭和平祈福音樂會」，引起各界廣大迴響，「金門坑道音樂節」便年年舉辦，結合了戰地文化與中西方音樂的交流，於 2018，迎來了舉辦以來的第十周年，「金門坑道音樂節」已成為金門的一大亮點。

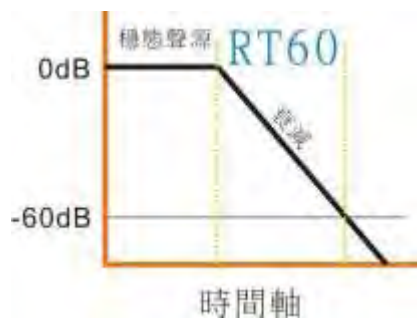
翟山坑道能夠從戰地遺跡轉型成為演奏廳，其實是因為國際知名的大提琴家—張正傑老師因緣際會進入翟山坑道參觀，本著音樂家的敏銳耳朵，發現翟山坑道擁有非常好的音場。於是，因戰爭而建的翟山坑道，就化身為沁人心脾的音樂殿堂。但我們也忍不住好奇，什麼叫做好的音場？音場的好壞有什麼測量標準嗎？「翟山坑道」在做為音樂演奏場所有到底有何優勢？

貳、文獻探討

經過資料的蒐集，我們發現音樂廳的聆聽品質好壞可以從三項指標觀察：

- 一、音樂廳的每個座位是否都得到相同的音響水準。
- 二、每個座位聽到的殘響時間，都能控制得令人滿意，如果殘響時間太長，會出現迴音，觀眾就會察覺。
- 三、觀眾多與觀眾少的時候，音響效果是否仍一致。

一個音場的好壞，「殘響時間」占了決定性的因素，而殘響是指聲音發出後殘留在空間中的響應，當聲源停止後，音量衰減到 60 分貝所需的時間，就是殘響時間。



對音樂廳來說，理想的殘響時間通常 1.8 至 2.0 秒。哈佛大學聲學教授沙賓的研究認為，理想的殘響表現，可決定音樂表現的成敗。著名的維也納金黃色大廳，殘響值為 2.05 秒，柏林愛樂的音樂廳為 1.95 秒，台北的國家音樂廳有 2.5 秒；理論上殘響過長，聲音易混濁；殘響過短，聲音乾枯。

因此，我們決定以「殘響」為探討的主要目標，借此研究翟山坑道的音場好壞與樂器演奏位置的關係。

另外，雖然在文獻中並沒有提到響度(分貝)和頻率(音高)是影響殘響的因素，但我們直覺上認為其兩者應該也會對殘響有所影響，因此也把響度(分貝)和頻率(音高)作為我們探討的變因之一。

參、研究目的

一、第一階段研究

- (一) 比較翟山坑道內不同位置，測得的殘響數值有何差異。
- (二) 比較翟山坑道內不同樂器(音色)，測得的殘響數值有何差異。

二、第二階段研究

- (一) 在不同的位置下，不同響度(分貝)與不同樂器所產生的殘響效果有何差異。
- (二) 在不同的位置下，不同頻率(音高)與不同樂器所產生的殘響效果有何差異。
- (三) 根據上述分析結果，探討在翟山坑道內不同位置所適合的演奏形式。

肆、研究過程與方法

一、第一階段研究

(一) 設備及器材

1. 錄製好的音檔
 - (1) 單音 LA
 - (2) 音源持續 3 秒
 - (3) 固定分貝(90)
2. 揚聲器
3. 撥放器
4. 錄音筆
5. 一公尺長之木棍

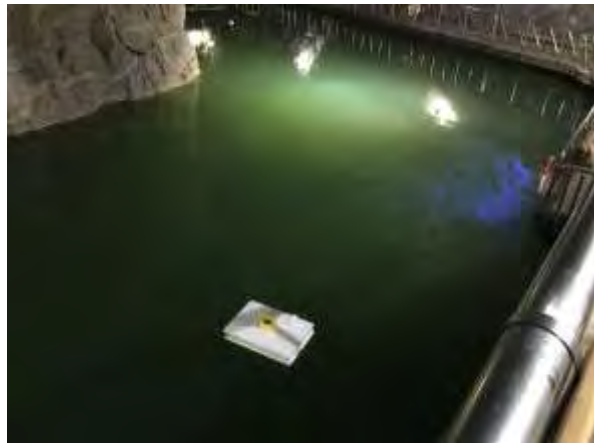
(二) 研究步驟

1. 利用揚聲器在指定地點放出音源。
2. 在距離音源大約 0.7 公尺處，使用錄音筆收音。
3. 將收音結果利用 gold wave 音效處理器，進行分析判讀。
4. 找出音源衰減 60 分貝所經時間。

二、第二階段研究

(一) 設備及器材

1. 錄製好的音檔
 - (1) Do 至高音 Do 八個音。
 - (2) 音源持續 3 秒。
 - (3) 分別錄製 90 及 120 分貝。
2. 揚聲器
3. RODE 專業指向性麥克風
4. Sony 錄音筆
5. 自製簡易竹筏



伍、研究結果討論

一、第一階段研究

(一) 資料蒐集步驟

1. 坑道位置標示

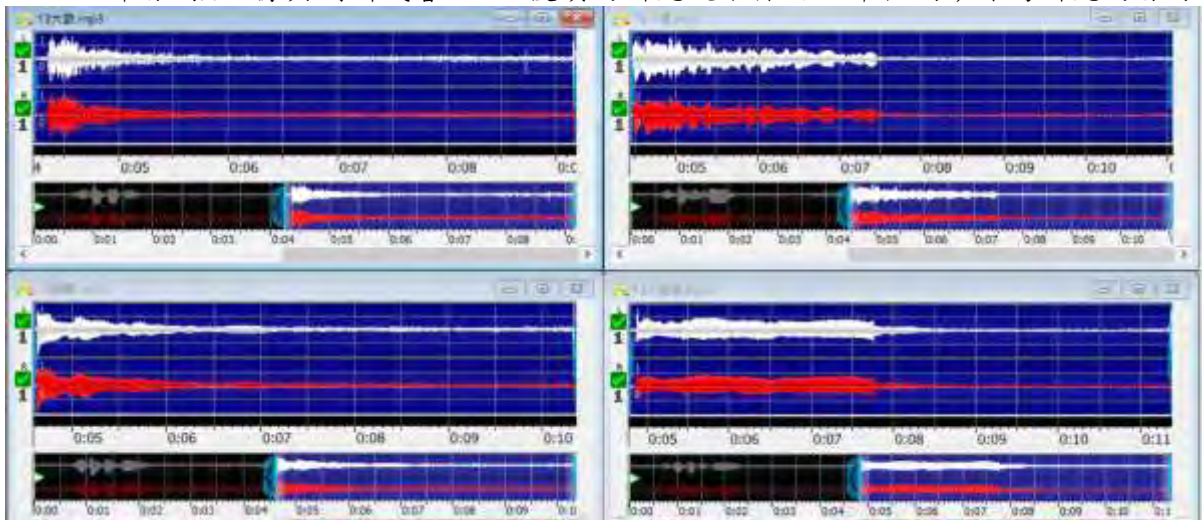


2. 在指定位置(13、15、中央、23、27、29、31)放出音源並收音
3. 音檔判讀
4. 資料分析

位置/樂器	長笛		人聲		鼓聲		鋼琴		小提琴	
13 號	8.22	2.43	7.45	0.98	—	—	—	—	7.75	1.35
	10.65		8.43		—		9.1			
15 號	7.14	1.88	7.87	1.03	—	—	—	—	—	—
	9.02		8.9		—		—			
23 號	7.74	1.76	8	0.9	—	—	—	—	7.71	1.79
	9.5		8.9		—		9.5			
27 號	9.56	1.09	9.21	1.39	—	—	—	—	7.87	2.18
	10.65		10.6		—		10.05			
29 號	9.46	1.74	10.13	0.81	—	—	—	—	7.19	2.14
	11.2		10.94		—		9.33			
31 號	8.03	1.52	9.48	1.52	—	—	—	—	7.83	1.72
	9.55		11.0		—		9.55			
中央	8.13	1.98	7.7	1.55	—	—	—	—	—	—
	10.11		9.25		—		—			

(二) 發現與討論

1. 大鼓、鋼琴聲波形狀相似，因其皆為打擊樂器，無法塑造持續音源，所以所收的聲音，無法據其判斷殘響，因此後續的研究便不採用鼓聲和鋼琴作為研究的音源。



2. 坑道內不同的位置及不同的樂器會有不同的殘響表現。詳細如下：

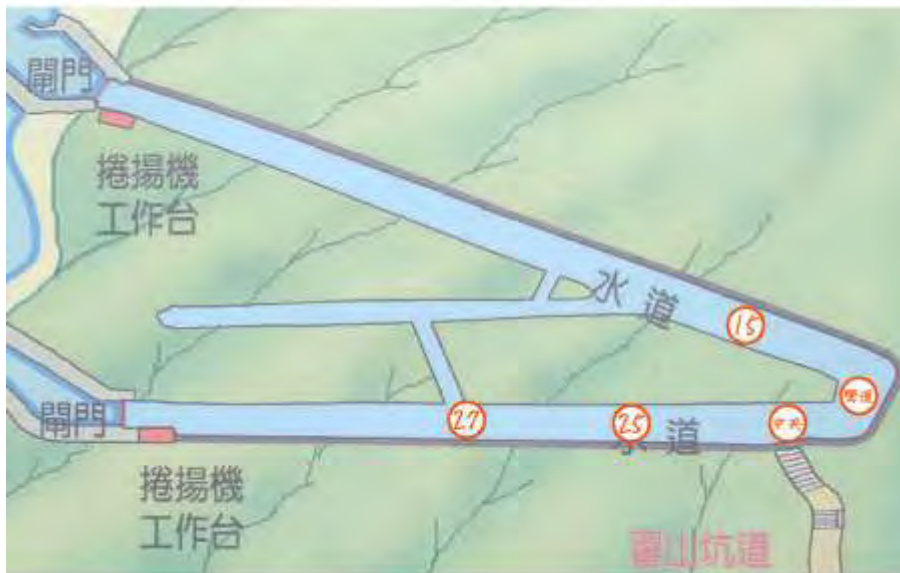
- (1) 根據所測得的數值，小提琴的殘響表現最好，除了在 13 號位置干擾過大，數值出現差異外，其餘大約介於 1.7s~2.2s 之間，尤其在 27 及 29 號位置表現最好，其殘響時間與理想的數值最接近。

- (2) 人聲與長笛的表現，在 31 號及中央位置相似，殘響表現最佳，介於 1.5s~2.0s 之間。
- (3) 人聲與長笛在 15、23、27、29 號位置的表現較不穩定，但整體而言，長笛的表現較人聲的表現佳。
3. 在第一階段的研究中發現，若在正常開放時間所收到的聲音，有太多的干擾，因此若要使聲音更具可靠性，必須盡量降低坑道內其他聲音的干擾。
4. 因翟山坑道內部結構特殊，不同位置具有不同的音場條件，且實驗結果發現不同的演奏位置確有其不同的音場表現，因此需要各自視為獨立音場進行研究。

二、第二階段研究

(一) 方法改進

1. 音源的選擇：採用小提琴、人聲、長笛；排除鼓聲和鋼琴。
2. 改善收音設備，希望能收到較準確的聲音。
3. 排除位置相似度高且干擾過大者，重新選擇 15、彎道、中央、25、27 進行收音。



4. 模擬現場演奏時，聲音的播放位置。

(二) 資料分析

1. 在第二階段的實驗依據第一階段實驗的結果進行方法改進，因收音設備較好，較容易收到細微的聲音，因此用原方法(聽力搭配波型)分析殘響時，高估了殘響值，而且透過聽力判斷，也容易產生主觀認定上的誤差，也就是殘響會受腦中餘音影響而拉長，因此為了避免此問題，除了直接判定 T60，也能利用 T20 乘以 3 對 T60 進行估算，因此，我們以 T20 x 3 的方法再次進行資料分析：
透過電腦軟體去除雜訊後，以其標示的相對強度 20 分貝找出 T20，再乘以 3 算成 T60，以減少人為及設備因素所造成的誤差。
2. 分析完畢後，考慮收音的環境干擾，依據以下條件，排除不合理的數值
 - (1) T20 x 3 計算的秒數大於 5 且高於 T60 超過 1 秒者。
 - (2) T20 x 3 計算的秒數低於 1 秒，且與 T60 差距大於 4 秒者。

(三) 發現與討論

1. 在不同的位置下，不同響度(分貝)與不同樂器所產生的殘響表現。

(1) 27 號位置

	小提琴	人聲	長笛	Total
90	2.789	2.214	2.377	2.477
105	2.424	2.800	2.750	2.662

由此表可知，除了小提琴在低分貝時的殘響數值大於高分貝，其餘整體而言，高分貝的殘響數值大於低分貝。

(2) 25 號位置

	小提琴	人聲	長笛	Total
90	3.140	2.735	2.465	2.773
105	2.929	2.974	3.747	3.229

整體之殘響數值為高分貝大於低分貝，除了小提琴相反之外，人聲、長笛的分貝及殘響數值皆呈現正相關，尤其是長笛最明顯。

(3) 中央位置

	小提琴	人聲	長笛	Total
90	3.025	4.034	4.035	3.698
105	3.861	4.009	3.400	3.752

此處的殘響數值差異細微，無法看出不同的分貝大小對殘響數值的影響差異，反而是小提琴在中央位置，分貝及殘響數值呈現正相關，但長笛之分貝及殘響數值卻是呈現負相關。

但整體而言，平均的殘響數值皆高於 27 號、25 號位置。

(4) 彎道位置

	小提琴	人聲	長笛	Total
90	3.842	3.123	3.453	3.457
105	3.348	3.487	3.007	3.293

90 分貝的殘響數值可能比 105 分貝的殘響數值長，但小提琴和長笛在 105 分貝時殘響數值反而較 90 分貝時的殘響數值低。

彎道的殘響數值低於中央的殘響數值，高於 27 號及 25 號的殘響數值。

(5) 15 號位置

	小提琴	人聲	長笛	Total
90	2.100	3.098	3.851	3.021
105	3.364	3.355	4.438	3.702

15 號位置的小提琴、人聲、長笛及平均殘響數值之分貝及殘響數值呈現正相關。除小提琴之外，整體數值和 25 號位置的表現相近。

(6) 綜合分析



演奏位置越靠近內部，平均殘響數值相對較高、殘響越大，但愈靠近內部的的位置，分貝大小對殘響的影響愈不明確，不同響度的殘響數值不僅較看不出差異，有時更出現相反的情形。

2. 在不同的位置下，不同頻率(音高)與不同樂器所產生的殘響表現。

(1) 27 號位置

	小提琴	人聲	長笛	Total	
Do	2.004	2.607	2.328	2.387	低頻
Re	3.175	1.896	3.129	2.950	
Mi	2.828	1.884	2.601	2.535	/
Fa	3.203	1.764	3.117	2.881	
Sol	2.466	2.690	2.766	2.675	
La	2.466	3.284	2.360	2.703	
Si	2.058	2.667	2.547	2.424	
高 Do	1.011	2.423	1.745	2.108	高頻
				2.266	

在 27 號位置不同音高的殘響表現介於 2.11~2.49(秒)之間，其中以 Re、Fa 的殘響值最高。整體而言，低頻的殘響高於高頻。

(2) 25 號位置

	小提琴	人聲	長笛	Total	
Do	2.049	3.023	3.453	2.887	低頻
Re	3.840	2.705	2.349	2.789	
Mi	4.115	3.006	3.225	3.615	/
Fa	2.922	2.577		2.750	
Sol	3.096	3.078	3.692	3.327	
La	2.687	2.852	2.985	2.841	
Si	3.789	2.958	3.423	3.390	
高 Do	1.557	2.457	3.492	2.502	高頻
				2.946	

不同音高的殘響表現差異較大，介於 2.5~4.16(秒)之間，其中 Mi、Si、Sol 皆大於 3 秒，但低頻與高頻的殘響表現看不出差異。

(3) 中央位置

	小提琴	人聲	長笛	Total		
Do	3.116	4.145	3.563	3.608	低頻	3.385
Re	3.294	2.612	3.687	3.051		
Mi	3.179	4.245	3.137	3.520		
Fa	3.336	4.616	3.395	3.782		
Sol	3.120	4.191	2.523	3.278		
La	4.341	3.941	4.302	4.195		
Si	4.290	4.691	4.989	4.730		
高 Do	2.847	3.612	3.536	3.275	高頻	4.003

不同音高的殘響表現皆大於 3 秒，介於 3.01~4.73 之間，其中以 La、Si 的殘響最長，分別是 4.19 秒和 4.73 秒，而且在中央位置，高頻的殘響值大於低頻的殘響值。

(4) 彎道位置

	小提琴	人聲	長笛	Total		
Do	3.929	2.219	1.757	2.635	低頻	3.021
Re	2.396	3.341	4.487	3.408		
Mi	3.329	2.201	1.704	2.552		
Fa	4.479	3.429	2.414	3.441		
Sol	4.194	2.586	2.757	3.263		
La	1.911	4.770	4.311	3.535		
Si	4.469	3.056	3.909	3.811		
高 Do	4.266	4.839	3.932	4.361	高頻	4.061

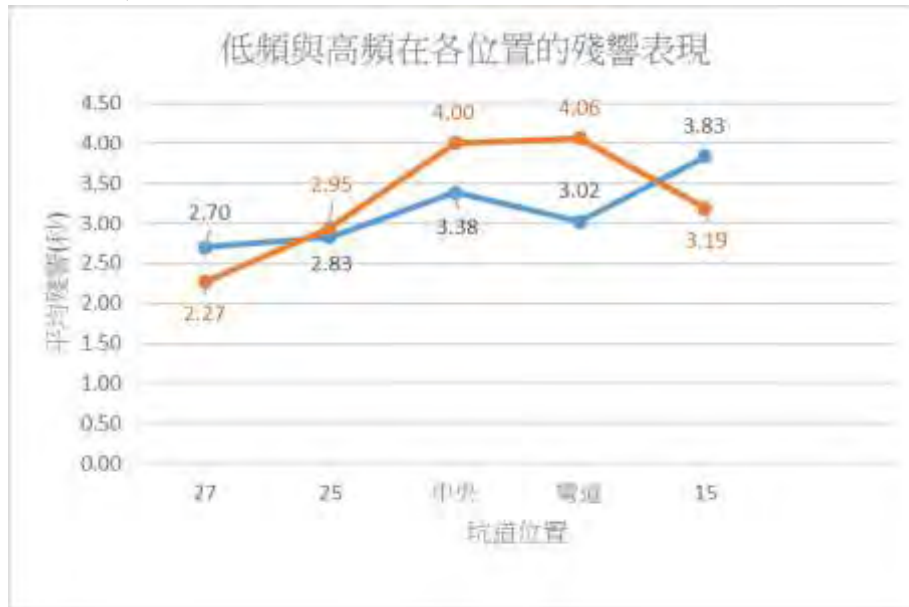
不同音高的殘響表現，介於 2.55~4.36(秒)之間，其中以 Do、Mi 的殘響數值最短，分別為 2.63 秒和 2.55 秒，而 Si、高音 Do 的殘響數值最大，分別為 3.81 秒和 4.36 秒。高頻的殘響數值大於低頻。

(5) 15 號位置

	小提琴	人聲	長笛	Total		
Do	4.548	3.662	4.107	3.995	低頻	3.834
Re	4.845	3.531	3.312	3.706		
Mi	3.120	1.306	3.708	2.711		
Fa	1.400	2.523		1.961		
Sol	3.816	3.074	5.259	4.050		
La	2.810	4.037	5.190	4.012		
Si	1.440	5.076	3.990	3.624		
高 Do	1.512	3.594	3.573	2.893	高頻	3.185

不同音高的殘響表現不同，介於 2.71~4.05(秒)之間，其中以 Sol、La 的殘響數值最長，皆大於 4 秒，但整體而言，低頻的殘響數值大於高頻。

(6) 綜合分析



靠近內部位置，愈高頻，殘響數值愈大；外部位置則是低頻的殘響數值大於高頻。

陸、研究結論

我們發現不同的樂器及不同位置，會有殘響表現。從研究中我們得到以下幾個結論：

- 一、翟山坑道的內部結構屬不規則形，不同的位置有其不同的音場條件，根據所測得的數值結果也發現，不同的位置有不同的殘響表現，因此各個位置可視為不同的音場。
- 二、整體而言，靠近內部(中央、彎道)的殘響數值偏長，比較理想的演奏位置，是靠近出海口的27號位置。
- 三、就不同的響度而言，接近出口的位置(27號、25號、15號)分貝愈大，殘響數值愈長，接近內部位置(中央)愈看不出差異，直至彎道位置時，分貝愈大，殘響數值愈短，因此，我們無法據其說明響度與殘響數值的關係。
- 四、就不同頻率而言，愈靠近出口位置(27、15)，殘響數值呈現低頻大於高頻；愈靠近內部位置(中央、彎道)，則相反，呈現高頻的殘響數值大於低頻，因此在不考慮響度的狀況下，內部殘響數值偏大的位置，也許較適合低音樂器進行演奏，外部位置則較適合高音樂器進行演奏。
- 五、整體而言，翟山坑道的音場效果並不如預期中理想，就音樂廳的標準，不一定是個品質優良的演奏空間，只能說就其天然條件，比一般坑道更具優勢，因內部空間夠大，且除了岩壁，還有不同的吸音材質(水)，造就了其比一般坑道更好的音響效果，加上其獨特的歷史文化脈絡，更增加了其作為金門地區音樂表演場所的價值。

柒、未來研究建議

- 一、以高階收音設備收音時，比起較低階的儀器，會收到更多雜音，且也放大了所有聲響以至於超越人耳聽覺的靈敏度，因而在聲音上及數字判讀皆會影響研究，因此到底高階收音設備是否真的為較適合進行研究的設備，值得後續探討。

捌、參考資料

- 一、自然與生活科技(民 107)。五下聲音與樂器。康軒出版社。
- 二、2018 坑道音樂節。引自：<https://hiking.biji.co/index.php?q=event&act=detail&id=7173>。
- 三、測量殘響時間。引自：
<https://www.taiwanaccess.com.tw/blog/posts/%E6%B8%AC%E9%87%8F%E6%AE%98%E9%9F%BF%E6%99%82%E9%96%93-rt60>。台灣高空。
- 四、音樂廳的建築音響學。引自：
<http://blog.ilc.edu.tw/blog/index.php?op=printView&articleId=52711&blogId=4048>。聯合報。
- 五、音樂廳音場設計。引自：<http://www.musicq.org/lofiversion/index.php?t1864.html>。

【評語】 080106

本研究利用區域文化之利，探討翟山坑道本身音場狀態，透過殘響分析找出翟山坑道作為音樂演奏會表演場地的條件優勢。研究結果發現不同的樂器及不同位置，會有殘響表現。整體而言，翟山坑道的音場效果，並不如預期中好，但就其天然條件（空間大、水道）而言，確實比金門地區一般坑道具有更佳的音場效果，再加上所擁有的戰地歷史脈絡，更增加其作為地區音樂表演場所的價值。整體而言，本研究作品具有鄉土性。建議未來可針對不同音樂演奏特性探討最適合規劃舞台與聽眾坐位的地點進行探究，未更具應用的價值。

研究動機

自2009年「翟山坑道」舉行首創的「古寧頭和平祈福音樂會」，引起各界廣大迴響，「金門坑道音樂節」便年年舉辦，已成為金門的一大亮點。

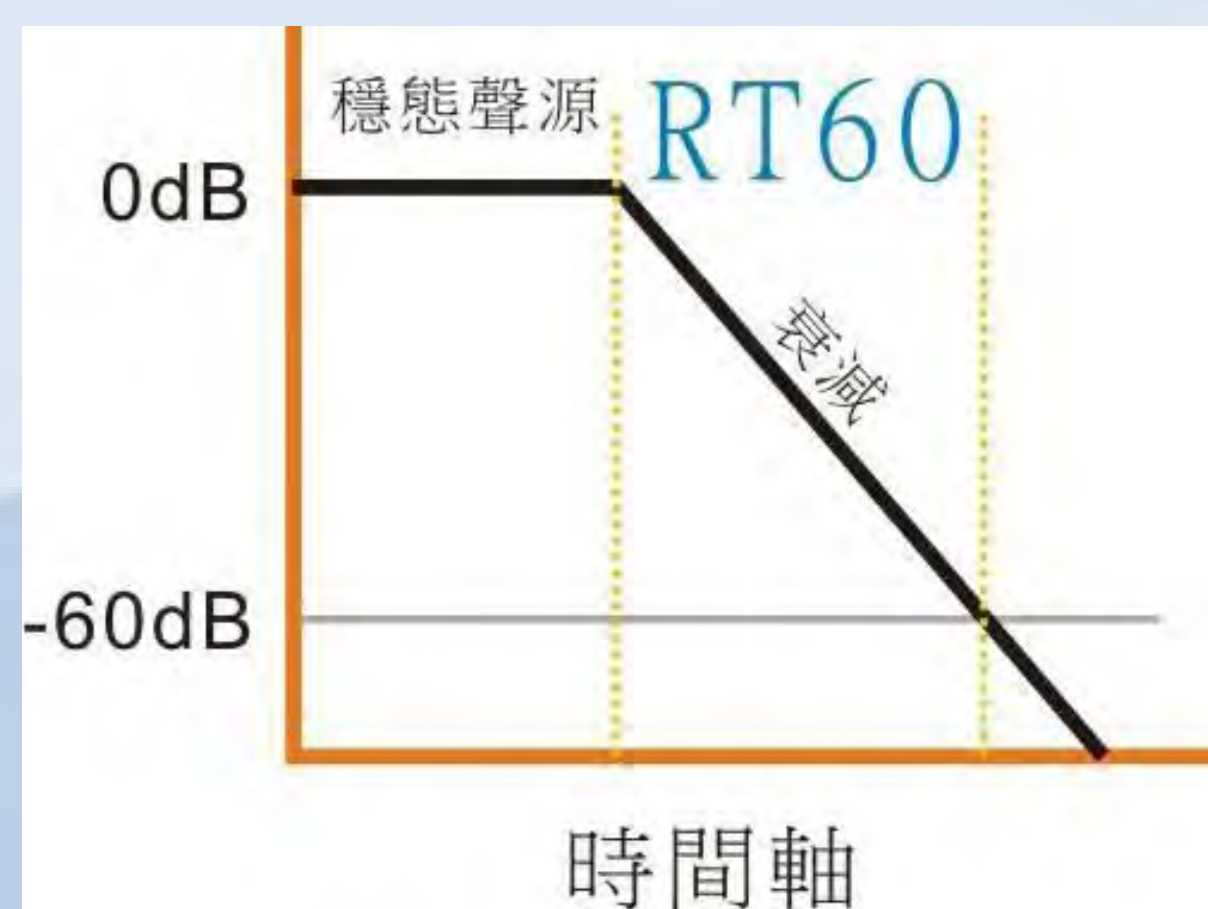
翟山坑道能夠從戰地遺跡轉型成為演奏廳，其實是因為大提琴家—張正傑老師因緣際會進入翟山坑道參觀，本著音樂家的敏銳耳朵，發現翟山坑道擁有非常好的音場。於是，因戰爭而建的翟山坑道，就化身為沁人心脾的音樂殿堂。但我們也忍不住好奇，什麼叫做好的音場？音場的好壞有什麼測量標準嗎？「翟山坑道」在做為音樂演奏場所有到底有何優勢？

文獻探討

經過資料的蒐集，我們發現音樂廳的聆聽品質好壞可以從三項指標觀察：

- 一、音樂廳的每個座位是否都得到相同的音響水準。
- 二、每個座位聽到的殘響時間，都能控制得令人滿意，如果殘響時間太長，會出現迴音，觀眾就會察覺。
- 三、觀眾多與觀眾少的時候，音響效果是否仍一致。

一個音場的好壞，「殘響時間」占了決定性的因素，而殘響是指聲音發出後殘留在空間中的響應，當聲源停止後，音量衰減到60分貝所需的時間，就是殘響時間。



對音樂廳來說，理想的殘響時間通常1.8至2.0秒。而理想的殘響表現，可決定音樂表現的成敗。

因此，我們決定以「殘響」為探討的主要目標，借此研究翟山坑道的音場好壞與樂器演奏位置的關係。

另外，雖然在文獻中並沒有提到響度(分貝)和頻率(音高)是影響殘響的因素，但我們直覺上認為其兩者應該也會對殘響有所影響，因此也把響度(分貝)和頻率(音高)作為我們探討的變因之一。

研究目的

第一階段研究

- 一、比較翟山坑道內不同位置，測得的殘響數值有何差異。
- 二、比較翟山坑道內不同樂器(音色)，測得的殘響數值有何差異。

第二階段研究

- 一、在不同的位置下，不同響度(分貝)與不同樂器所產生的殘響效果有何差異。
- 二、在不同的位置下，不同頻率(音高)與不同樂器所產生的殘響效果有何差異。
- 三、根據上述分析結果，探討在翟山坑道內不同位置所適合的演奏形式。

研究過程與方法

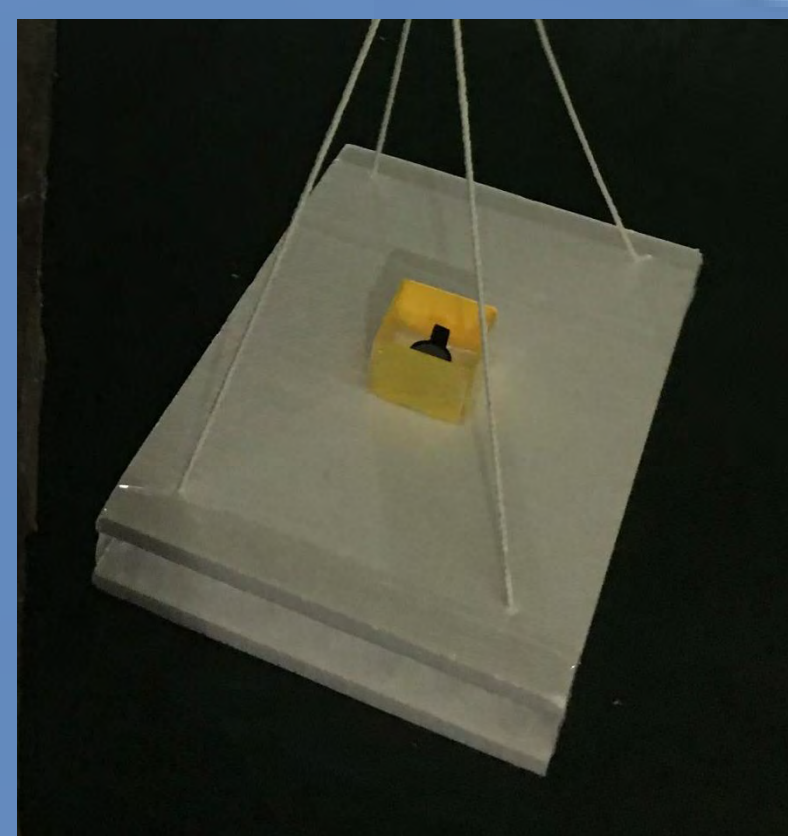
第一階段研究

- 一、設備及器材：
錄製好的音檔(單音LA、音源持續3秒、固定90分貝)
揚聲器、撥放器、錄音筆、一公尺長之木棍

- 二、研究步驟：
 - 1.利用揚聲器在指定地點放出音源。
 - 2.在距離音源大約0.7公尺處，使用錄音筆收音。
 - 3.將收音結果利用gold wave音效處理器，進行分析判讀。
 - 4.找出音源衰減60分貝所經時間。

第二階段研究

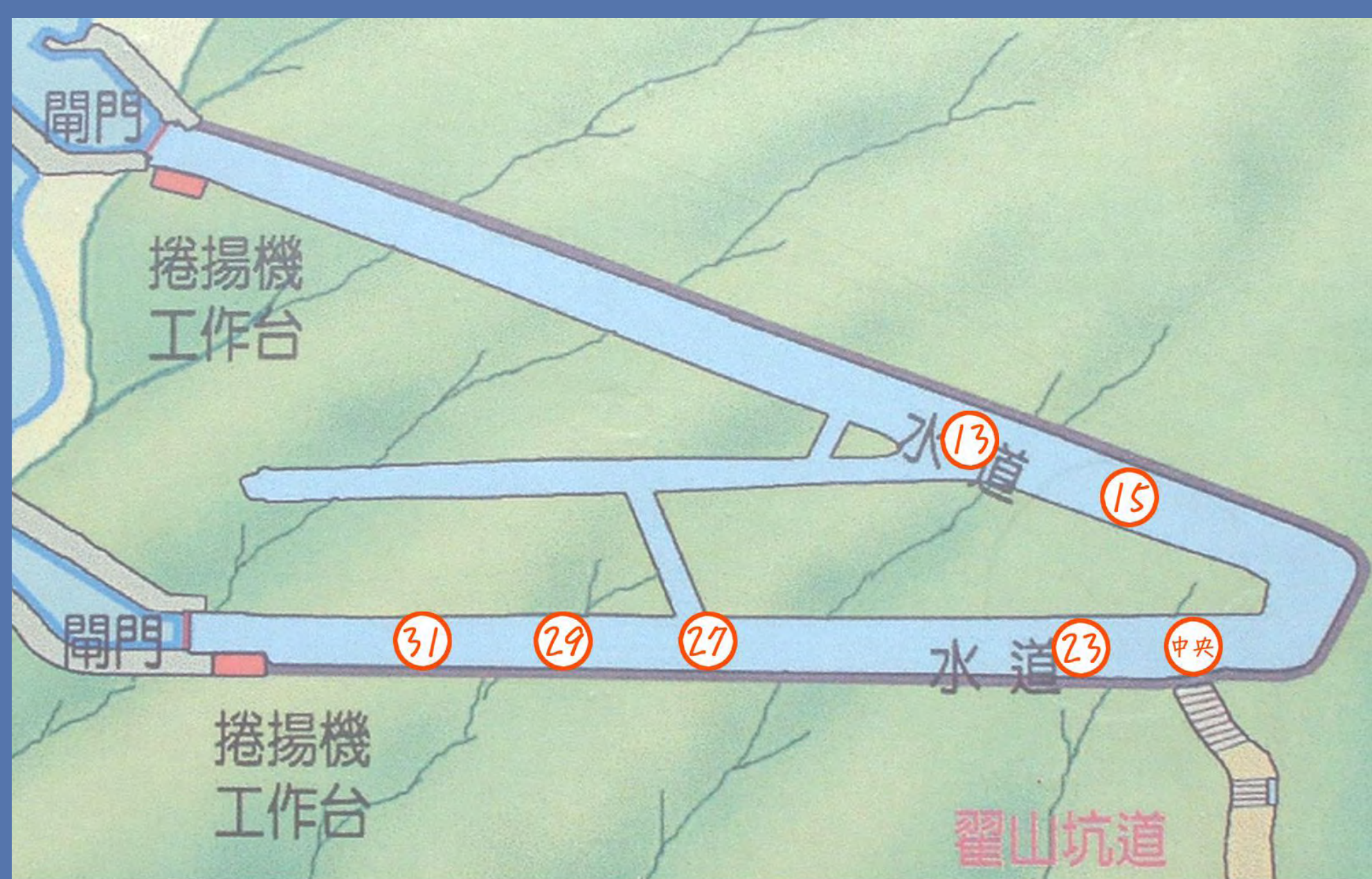
- 一、設備及器材：
錄製好的音檔(Do至高音Do八個音、音源持續3秒、分別錄製90及120分貝)
揚聲器、RODE專業指向性麥克風、Sony錄音筆、自製簡易竹筏



研究結果討論

第一階段研究

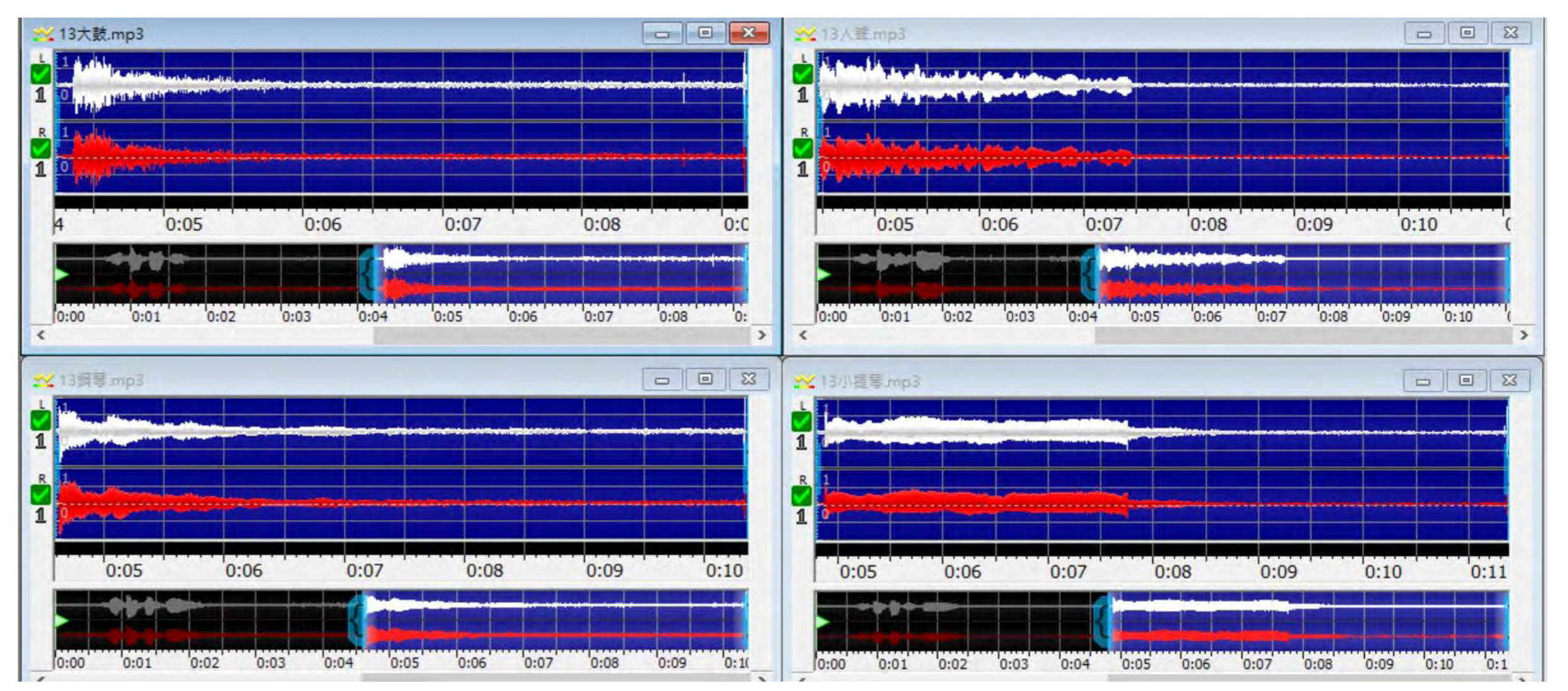
- 一、資料蒐集步驟
 - 1.在指定位置放出音源並收音
 - 2.音檔判讀
 - 3.資料分析(如右表)



位置/樂器	長笛		人聲		鼓聲		鋼琴		小提琴	
13號	8.22	2.43	7.45	0.98	—	—	—	—	7.75	1.35
	10.65		8.43		—		9.1			
15號	7.14	1.88	7.87	1.03	—	—	—	—	—	—
	9.02		8.9		—		—			
23號	7.74	1.76	8	0.9	—	—	—	—	7.71	1.79
	9.5		8.9		—		9.5			
27號	9.56	1.09	9.21	1.39	—	—	—	—	7.87	2.18
	10.65		10.6		—		10.05			
29號	9.46	1.74	10.13	0.81	—	—	—	—	7.19	2.14
	11.2		10.94		—		9.33			
31號	8.03	1.52	9.48	1.52	—	—	—	—	7.83	1.72
	9.55		11.0		—		9.55			
中央	8.13	1.98	7.7	1.55	—	—	—	—	—	—
	10.11		9.25		—		—			

二、發現與討論

- 1.大鼓、鋼琴聲波形狀相似，因其皆為打擊樂器，無法塑造持續音源，所以所收的聲音，無法據其判斷殘響，因此後續的研究便不採用鼓聲和鋼琴作為研究的音源。
- 2.坑道內不同的位置及不同的樂器會有不同的殘響表現。
- 3.在第一階段的研究中發現，若在正常開放時間所收到的聲音，有太多的干擾，因此若要使聲音更具可靠性，必須盡量降低坑道內其他聲音的干擾。
- 4.因翟山坑道內部結構特殊，不同位置具有不同的音場條件，且實驗結果發現不同的演奏位置確有其不同的音場表現，因此需要各自視為獨立音場進行研究。



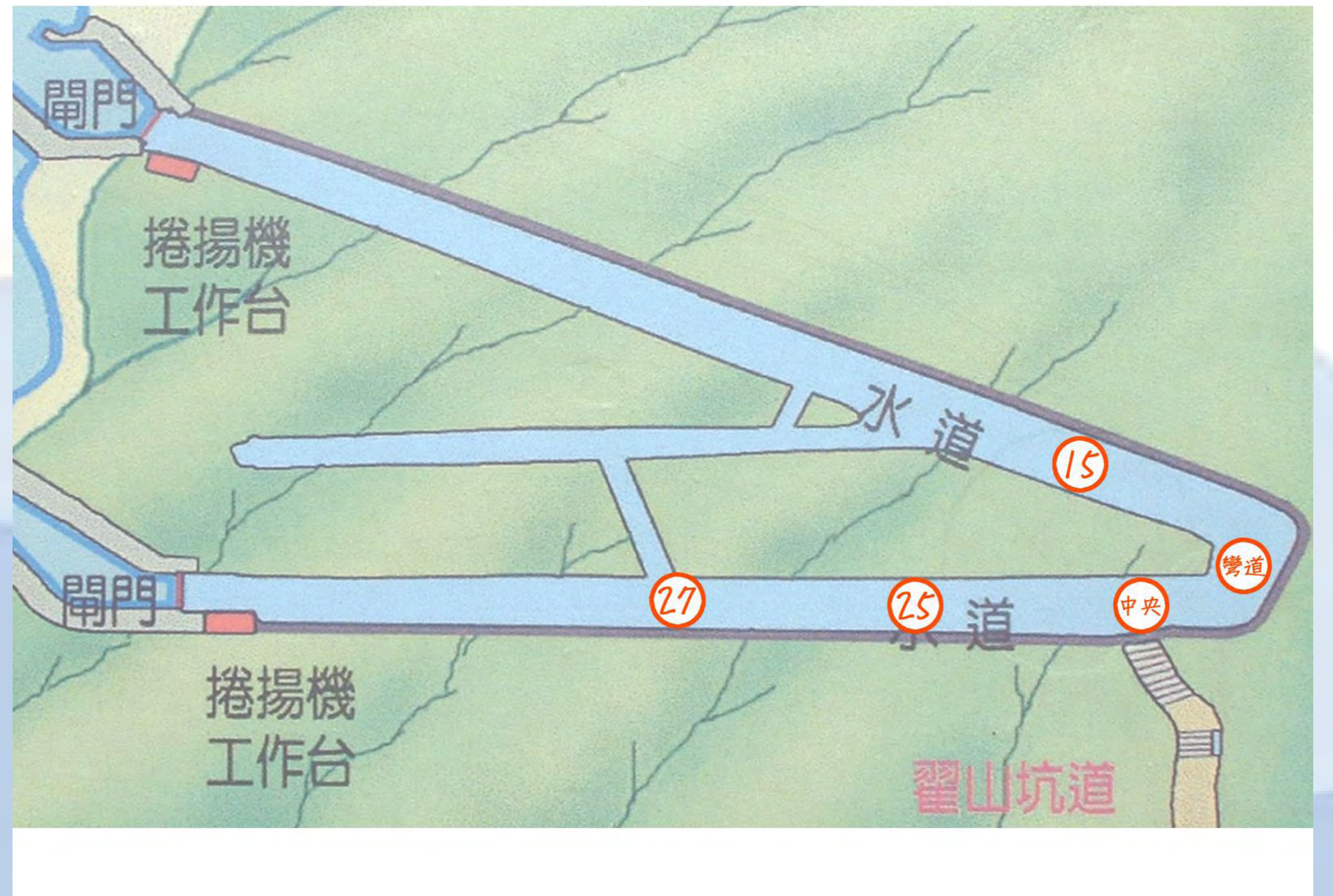
第二階段研究

一、方法改進

- 1.音源的選擇：採用小提琴、人聲、長笛；排除鼓聲和鋼琴。
- 2.改善收音設備，希望能收到較準確的聲音。
- 3.排除位置相似度高且干擾過大者，重新進行收音。

二、資料分析

- 1.在第二階段的實驗依據第一階段實驗的結果進行方法改進，因收音設備較好，較容易收到細微的聲音，因此用原方法(聽力搭配波型)分析殘響時，高估了殘響值，而且透過聽力判斷，也容易產生主觀認定上的誤差，也就是殘響會受腦中餘音影響而拉長，因此為了避免此問題，我們利用T20乘以3對T60進行估算，並以此方法再次進行資料分析。
- 2.分析完畢後，考慮收音的環境干擾，依據以下條件，排除不合理的數值。



三、發現與討論

- 1.在不同的位置下，不同響度(分貝)與不同樂器所產生的殘響表現。

27號位置

	小提琴	人聲	長笛	Total
90	2.789	2.214	2.377	2.477
105	2.424	2.800	2.750	2.662

25號位置

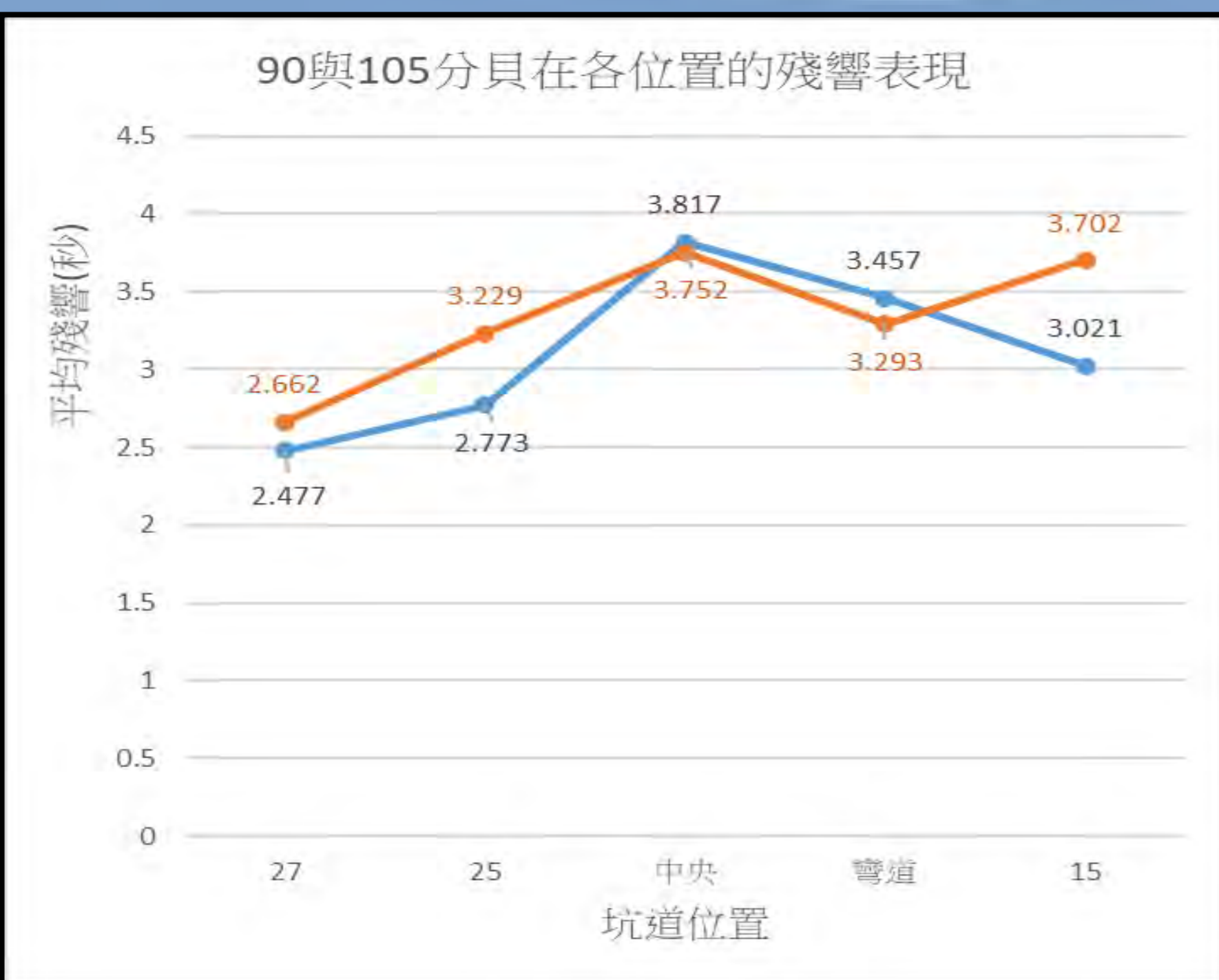
	小提琴	人聲	長笛	Total
90	3.140	2.735	2.465	2.773
105	2.929	2.974	3.747	3.229

中央位置

	小提琴	人聲	長笛	Total
90	3.025	4.034	4.035	3.698
105	3.861	4.009	3.400	3.752

由此表可知，除了小提琴在低分貝時的殘響數值大於高分貝，其餘整體而言，高分貝的殘響數值大於低分貝。

綜合分析



整體之殘響數值為高分貝大於低分貝，除了小提琴相反之外，人聲、長笛的分貝及殘響數值皆呈現正相關，尤其是長笛最明顯。

此處的殘響數值差異細微，無法看出不同的分貝大小對殘響數值的影響差異，反而是小提琴在中央位置，分貝及殘響數值呈現正相關，但長笛之分貝及殘響數值卻是呈現負相關。但整體而言，平均的殘響數值皆高於27號、25號位置。

15號位置

	小提琴	人聲	長笛	Total
90	2.100	3.098	3.851	3.021
105	3.364	3.355	4.438	3.702

15號位置的小提琴、人聲、長笛及平均殘響數值之分貝及殘響數值呈現正相關。除小提琴之外，整體數值和25號位置的表現相近。

彎道位置

	小提琴	人聲	長笛	Total
90	3.842	3.123	3.453	3.457
105	3.348	3.487	3.007	3.293

90分貝的殘響數值可能比105分貝的殘響數值長，但小提琴和長笛在105分貝時殘響數值反而較90分貝時的殘響數值低。彎道的殘響數值低於中央的殘響數值，高於27號及25號的殘響數值。

演奏位置越靠近內部，平均殘響數值相對較高、殘響越大，但愈靠近內部的位置，分貝大小對殘響的影響愈不明確，不同響度的殘響數值不僅較看不出差異，有時更出現相反的情形。

- 2.在不同的位置下，不同頻率(音高)與不同樂器所產生的殘響表現。

27號位置

	小提琴	人聲	長笛	Total	
Do	2.004	2.607	2.328	2.387	低頻 2.699
Re	3.175	1.896	3.129	2.950	
Mi	2.828	1.884	2.601	2.535	
Fa	3.203	1.764	3.117	2.881	
Sol	2.466	2.690	2.766	2.675	
La	2.466	3.284	2.360	2.703	
Si	2.058	2.667	2.547	2.424	高頻 2.266
高Do	1.011	2.423	1.745	2.108	

在27號位置不同音高的殘響表現介於2.11~2.49(秒)之間，其中以Re、Fa的殘響值最高。整體而言，低頻的殘響高於高頻。

25號位置

	小提琴	人聲	長笛	Total	
Do	2.049	3.023	3.453	2.887	低頻 2.833
Re	3.840	2.705	2.349	2.789	
Mi	4.115	3.006	3.225	3.615	
Fa	2.922	2.577		2.750	
Sol	3.096	3.078	3.692	3.327	
La	2.687	2.852	2.985	2.841	
Si	3.789	2.958	3.423	3.390	高頻 2.946
高Do	1.557	2.457	3.492	2.502	

不同音高的殘響表現差異較大，介於2.5~4.16(秒)之間，其中Mi、Si、Sol皆大於3秒，但低頻與高頻的殘響表現看不出差異。

中央位置

	小提琴	人聲	長笛	Total	
Do	3.116	4.145	3.563	3.608	低頻 3.385
Re	3.294	2.612	3.687	3.051	
Mi	3.179	4.245	3.137	3.520	
Fa	3.336	4.616	3.395	3.782	
Sol	3.120	4.191	2.523	3.278	
La	4.341	3.941	4.302	4.195	
Si	4.290	4.691	4.989	4.730	
高Do	2.847	3.612	3.536	3.275	高頻 4.003

不同音高的殘響表現皆大於3秒，介於3.01~4.73之間，其中以La、Si的殘響最長，分別是4.19秒和4.73秒，而且在中央位置，高頻的殘響值大於低頻的殘響值。

彎道位置

	小提琴	人聲	長笛	Total	
Do	3.929	2.219	1.757	2.635	低頻 3.021
Re	2.396	3.341	4.487	3.408	
Mi	3.329	2.201	1.704	2.552	
Fa	4.479	3.429	2.414	3.441	
Sol	4.194	2.586	2.757	3.263	
La	1.911	4.770	4.311	3.535	
Si	4.469	3.056	3.909	3.811	
高Do	4.266	4.839	3.932	4.361	高頻 4.061

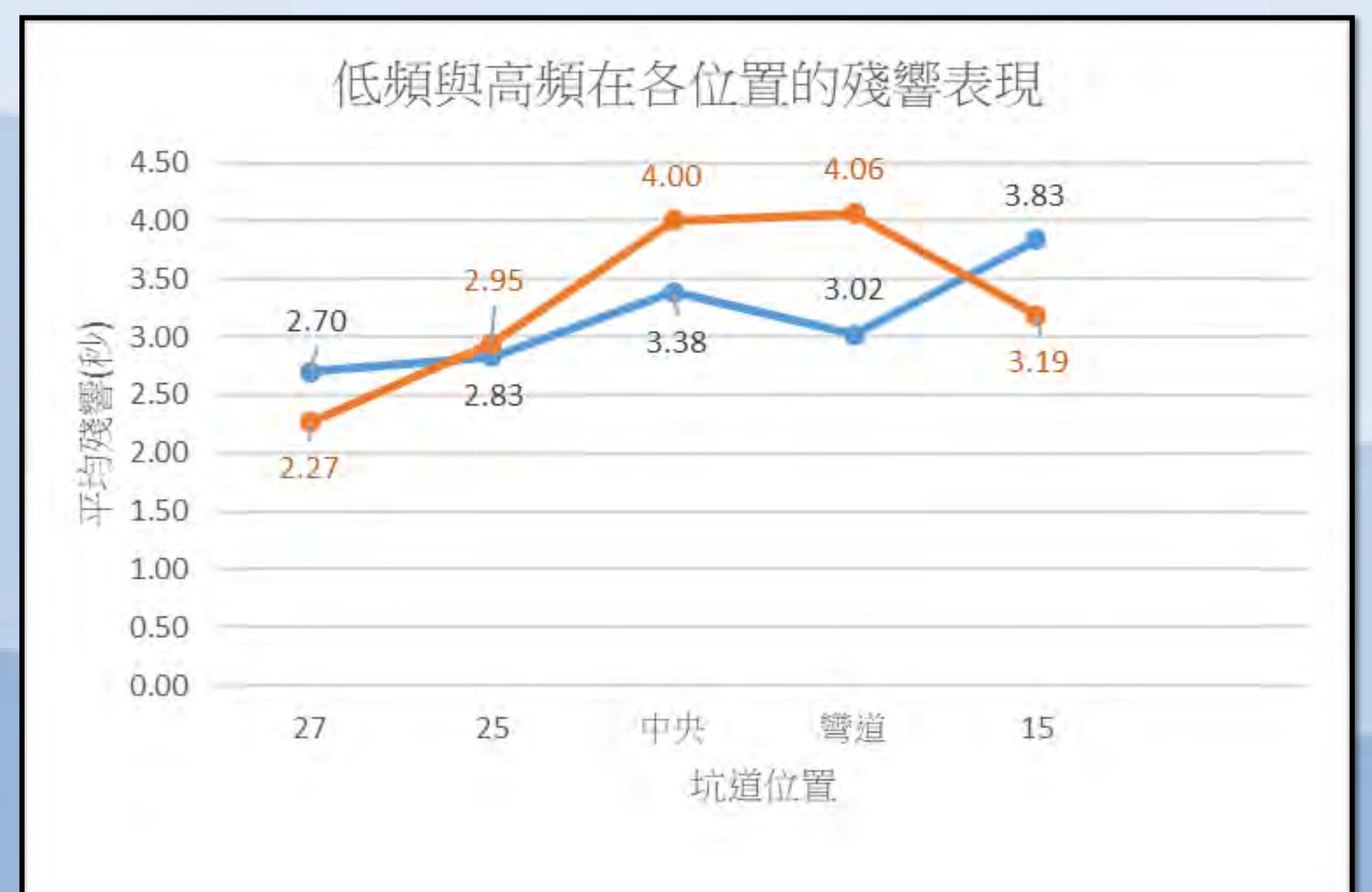
不同音高的殘響表現，介於2.55~4.36(秒)之間，其中以Do、Mi的殘響數值最短，分別為2.63秒和2.55秒，而Si、高音Do的殘響數值最大，分別為3.81秒和4.36秒。高頻的殘響數值大於低頻。

15號位置

	小提琴	人聲	長笛	Total	
Do	4.548	3.662	4.107	3.995	低頻 3.834
Re	4.845	3.531	3.312	3.706	
Mi	3.120	1.306	3.708	2.711	
Fa	1.400	2.523		1.961	
Sol	3.816	3.074	5.259	4.050	
La	2.810	4.037	5.190	4.012	
Si	1.440	5.076	3.990	3.624	
高Do	1.512	3.594	3.573	2.893	高頻 3.185

不同音高的殘響表現不同，介於2.71~4.05(秒)之間，其中以Sol、La的殘響數值最長，皆大於4秒，但整體而言，低頻的殘響數值大於高頻。

綜合分析



靠近內部位置，愈高頻，殘響數值愈大；外部位置則是低頻的殘響數值大於高頻。

研究結論

我們發現不同的樂器及不同位置，會有殘響表現。從研究中我們得到以下幾個結論：

- 一、翟山坑道的內部結構屬不規則形，不同的位置有其不同的音場條件，根據所測得的數值結果也發現，不同的位置有不同的殘響表現，因此各個位置可視為不同的音場。
- 二、整體而言，靠近內部(中央、彎道)的殘響數值偏長，比較理想的演奏位置，是靠近出海口的27號位置。
- 三、就不同的響度而言，接近出口的位置(27號、25號、15號)分貝愈大，殘響數值愈長，接近內部位置(中央)愈看不出差異，直至彎道位置時，分貝愈大，殘響數值愈短，因此，我們無法據其說明響度與殘響數值的關係。
- 四、就不同頻率而言，愈靠近出口位置(27、15)，殘響數值呈現低頻大於高頻；愈靠近內部位置(中央、彎道)，則相反，呈現高頻的殘響數值大於低頻，因此在不考慮響度的狀況下，內部殘響數值偏大的位置，也許較適合低音樂器進行演奏，外部位置則較適合高音樂器進行演奏。
- 五、整體而言，翟山坑道的音場效果並不如預期中理想，就音樂廳的標準，不一定是個品質優良的演奏空間，只能說就其天然條件，比一般坑道更具優勢，因內部空間夠大，且除了岩壁，還有不同的吸音材質(水)，造就了其比一般坑道更好的音響效果，加上其獨特的歷史文化脈絡，更增加了其作為金門地區音樂表演場所的價值。

未來研究建議

以高階收音設備收音時，比起較低階的儀器，會收到更多雜音，且也放大了所有聲響以至於超越人耳聽覺的靈敏度，因而在聲音上及數字判讀皆會影響研究，因此到底高階收音設備是否真的為較適合進行研究的設備，值得後續探討。

參考資料

- 自然與生活科技(民107)。五下聲音與樂器。康軒出版社。
- 2018坑道音樂節。引自：<https://hiking.biji.co/index.php?q=event&act=detail&id=7173>。
- 測量殘響時間。引自：<https://www.taiwanaccess.com.tw/blog/posts/%E6%B8%AC%E9%87%8F%E6%AE%98%E9%9F%BF%E6%99%82%E9%96%93-rt60>。台灣高空。
- 音樂廳的建築音響學。引自：<http://blog.ilc.edu.tw/blog/index.php?op=printView&articleId=52711&blogId=4048>。聯合報。
- 音樂廳音場設計。引自：<http://www.musicq.org/lofiversion/index.php?t1864.html>。