

鐵琴片振動特性與聲音關聯性之探討

Vibration and sound correlation study for a metal bar of metalophone

王栢村¹ 林怡馨²

摘要

本文主要是對鐵琴片之振動與聲音做一系列的探討。首先，架構鐵琴片之有限元素模型，進行理論模態分析，以求得鐵琴片之自然頻率及其對應之模態振型；然後再對鐵琴片進行實驗模態分析，求得實體之模態參數，包括自然頻率、模態振型及阻尼比，以實驗求得之模態參數為基準作為有限元素模型修正之依據，由結果顯示，理論有限元素分析與實驗模態分析所求得之模態參數均相當吻合，故成功地完成模型之驗證。本文亦量測鐵琴片經敲擊後的聲音頻譜響應，以了解鐵琴之基本頻率，並與振動特性做比較，得知聲音基本頻率與鐵琴片之振動模態對應之關係，第一個振動模態為鐵琴片之主頻率；也使用不同材質之敲擊錘對鐵琴片進行敲擊，由結果顯示，使用硬度高的敲擊錘進行敲擊時，高頻率模態易被激發，而一般鐵琴棒硬度較軟，適於激發第一個振動模態對應之鐵琴片聲音之頻率。本文也探討不同敲擊位置對鐵琴片聲音的影響，愈靠近鐵琴片的中心位置，可更明確激發第一個振動模態之聲音頻率。本文結合了振動理論與實驗分析於鐵琴片聲音特性之探討，將有助於往後對樂器進行振動與聲學特性的研究。

關鍵字：鐵琴、有限元素分析、實驗模態分析、模型驗證、聲音頻譜。

Abstract

This work presents both analytical and experimental analysis on the vibration characteristics of a metal bar of metalophone as well as sound spectrum measurement. First, the finite element model for the metal bar is constructed to perform modal analysis so as to obtain natural frequencies and mode shapes. Next, the metal bar is also carried out the experimental modal testing to experimentally determine its modal parameters. Base on the experimental modal data, the finite element model can be validated and useful for the prediction of vibration modes. This work also measures the sound spectra of the metal bar after struck to find its fundamental frequency of sound and compare to its vibration modes. The sound of metal bar can be correlated to the vibration modes and strongly dominated by the first mode of vibration. The effect of different materials of sticks hitting on the metal bar is investigated. Results show harder tips induce higher frequency modes strongly. The common used stick is softer so that the first mode of vibration can be properly excited to produce the fundamental frequency of sound. The effect of different hitting locations is also presented. The closer to the center of metal bar can more dominantly excite the first vibration mode and produce the desired sound frequency. This paper combines the theoretical and experimental vibration analysis to quantify the sound characteristics of the metal bar of metalophone and will be beneficial to percussion instrument study.

Keywords : metalophone, finite element analysis, experimental modal analysis, model verification, sound spectrum.

¹屏東科技大學機械工程系教授

²屏東科技大學機械工程系研究生

一、前言：

中國樂器有著音色優美柔和、聲音清脆圓潤、音韻特殊、演練較易、價格低廉攜帶便利等優點，但相對的中國樂器也是有缺點的如音域較小、音階短缺且欠準確、音量不足難適應大軍樂、規格與演奏方式未統一、仍停留在手工製造階段等缺點需要改進。

在演奏時，每個樂器結構振動的方式不相同，所以在音色、音質、音韻上就有很大的差異。過去對於聲音的分析，僅以耳聽的方式來判定音階的高低，現今科技發達，在聲音的量測上可透過儀器來取代人耳。

Bretos et al. [1]以有限元素分析木琴之木條的振動自然模態，探討木條均勻或凹刻截面對其自然頻率及模態振型之影響，得知木條之非均勻材料特性，其楊氏係數對側向振動模態影響最鉅。Doutaut et al. [2]以自由樑理論分析木琴受敲擊的時間域及頻率響應預測，其理論分析結果與實驗量測結果有良好的吻合性。王等人[4]藉由有限元素分析軟體與實驗模態分析來探討銅鑼之振動與聲音特性，實驗量測結果與理論預測結果有良好的吻合性，因此藉由有限元素分析軟體進行分析的方法是可行的；在聲音方面，使用質地軟地衝擊錘進行敲擊，其波型振幅低，雜訊影響大，因此，銅鑼適合用木頭進行敲擊。[5-6]藉由吉他弦聲音頻譜特性，與吉他弦的振動特性做比較，討論振動與聲音間的關連性。

本文採有限元素分析及實驗模態分析對一鐵琴片進行分析，主要分析目標如下：

1. 鐵琴片之模型驗證：以有限元素分析架構有限元素模型，得到理論之模態參數及頻率響應函數。再針對鐵琴片做實驗模態分析求得實驗之模態參數及頻率響應函數。以實驗模態分析為基準，對有限元素分析進行比對驗證，包括自然頻率、振型、頻率響應函數，進而確認模型的正確性，未來可做為其他鐵琴片之頻率預測分析。
2. 敲擊鐵琴片之聲音頻譜分析：藉由衝擊錘的敲擊，佐以麥克風當感測器，將所量得的訊號輸入頻譜分析儀做分析，將振動分析所得之模態參數與聲音量測得之聲音特性進行比對，找出鐵琴片振動與聲音間的關連性。並藉由不同材質之衝擊錘敲擊鐵琴片，進而探討衝擊錘的材質對敲擊鐵琴片後產生聲音的影響。

二、有限元素分析(FEA)

圖 1 為常見的鐵琴，本文擬分析鐵琴上的 C 音階鐵琴片，鐵琴片長、寬、厚分別為 122mm、30mm、3mm，表 1 為鐵琴片材料性質。

表 1、材料性質對照表

楊氏係數(N/m ²)	密度(kg/m ³)	浦松比	彈簧常數(N/m)
0.1847×10^{12}	7468	0.27	5125



圖 1、鐵琴實體圖

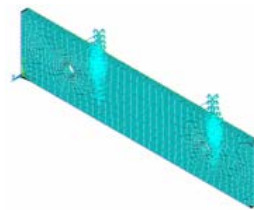


圖 2、鐵琴片有限元素模型示意圖

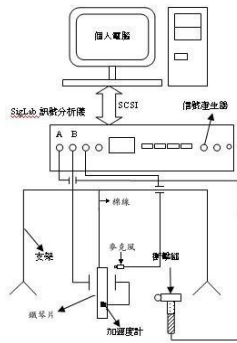


圖 3、實驗模態分析設備架設圖

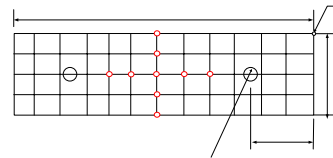


圖 4、鐵琴片分割圖

本文採用 ANSYS 分析軟體進行有限元素分析，圖 2 為鐵琴片之有限元素模型示意圖，假設鐵琴片材料為等向性且為均質性，並符合虎克定律之假設，所以，採用線性立體元素(solid45)來架構鐵琴片。元素分割方面，長度方向分割 36 等分，寬度方向分 15 等分，厚度方向分 1 層。由於實際上，鐵琴片是放在基座上，並非鎖固於基座，因此在鐵琴片實際邊界有限元素模型中，鐵琴片與基座的接觸則採用三維彈簧阻尼元素(COMBIN14)來架構，求得其係數彈簧常數。設定位移限制負荷條件方面，模態分析中不用設定負荷，簡諧分析中，為配合實驗之敲擊點，在不同衝擊鏈敲擊位置給予一單位外力。

首先進行模態分析(Modal Analysis)求出模態參數及振型。楊氏係數 E 、及浦松比 ν 已由自由邊界模型驗證求得[4]，令彈簧常數 k 為設計變數，利用最佳化的程式使理論分析和實驗分析得到的自然頻率誤差最小，最佳化之彈簧常數為 5125 (N/m) 。而後，再進行簡諧分析(Harmonic Analysis)，以求出頻率響應函數。

三、實驗模態分析方法與步驟

為對鐵琴片進行實驗模態分析，實驗架構圖如圖 3 所示，首先，將鐵琴片畫分為 65 個敲擊點，加速度計固定在第 65 個點上，如圖 4 所示，再以衝擊鏈敲擊鐵琴片上每一個測試點，由加速度計感測器量取鐵琴片之響應訊號。經過放大器將訊號傳入頻譜分析儀，頻寬為 $0\sim 10000\text{Hz}$ ，解析度 8192 條，頻譜分析儀對輸入模組之訊號作快速傅立葉轉換，求得鐵琴片之頻率響應函數和關聯性函數，之後再將傳入電腦中之頻率響應函數以 ME'scope VES 軟體作曲線嵌合(Curve Fitting)，以獲得鐵琴片模態參數，包括自然頻率、阻尼比和模態振型。

為對鐵琴片進行聲音量測分析，因此在儀器架構上，增添了麥克風當感測器。頻譜分析儀的設定與實驗模態分析一樣，在量測之前，首先必須先量測背景噪音的大小，若鐵琴量測到的聲音頻譜峰值大於背景噪音 10dB 以上，就表示所量得的聲音值是有效的，可以進一步作聲音頻譜的分析，本實驗以距離鐵琴 5cm 作基準進行量測，將分為三大方向來探討：

- (1) 加速度計質量效應對聲音的影響：由於要取得鐵琴片聲音與振動的關連性，因而在鐵琴片上黏加速度計，雖然加速度計小且輕巧，但難免會影響鐵琴所發出的聲音；本實驗採用鋼鏈當衝擊頭，針對鐵琴片中間點進行敲擊，分別以有加速度計與無加速度計進行實驗，藉以探討加速度計質量效應對聲音所造成的影響。
- (2) 不同材質的衝擊鏈敲擊：圖 5(a)~(c)為 3 種不同材質的衝擊鏈進行敲擊，分別為鋼鏈、塑膠鏈與鐵琴棒(橡膠頭)進行實驗。
- (3) 不同敲擊點對聲音的影響：在鐵琴片中央向外規劃了 9 個敲擊點進行敲擊，圖 4 為預定敲擊的規劃點圖，藉以探討敲擊位置對聲音的影響。



圖 5、不同材質的衝擊錘

四、結果與討論

首先進行模型驗證，圖 6 為驗證流程圖，模型驗證的主要在確認有限元素模型是否能代表實際模型，若比對的結果不佳，則需對有限元素模型進行修改，直到有限元素模型可以代表實際模型為止。接著進行聲音量測，由聲音頻譜特性，與鐵琴片的振動特性做比較，討論振動與聲音間的關連性。

4-1. 鐵琴片之模型驗證

將實驗所得的結果與有限元素分析之結果進行比對，其中包括頻率響應函數、自然頻率及模態振型，藉由模型驗證進而確定有限元素模型之正確性。

(1) 頻率響應函數

圖 7(a) 為不同點($H_{65,1}$)之頻率響應函數，圖 7(b) 為同點($H_{65,65}$)之頻率響應函數，在頻率響應函數圖中，分別有理論分析(FEA)之頻率響應函數曲線、實驗 (experimental) 模態分析之頻率響應函數曲線及曲線嵌合(synthesized)而成的頻率響應函數曲線。在不同點與同點頻率響應函數圖中，實驗與理論分析結果的共振尖峰值在頻寬 4000Hz 前有相當的吻合性；不同點頻率響應函數圖中，由於衝擊錘敲擊位置與感測器量測位置不同點，所以反共振點並不明確；同點頻率響應函數圖中，因為敲擊位置與感測器量測位置同點，故可在兩個共振尖峰點間出現明確的反共振點。

由圖 7 中可發現在頻率 4000Hz 後之共振尖峰有所誤差，其原因可能有三，一是有限元素模型中鐵琴片與基座間的接觸點是採一直線的点，而實際上鐵琴片與基座接觸的点並非如此，因而產生誤差；第二個原因可能是有限元素模型沒有把加速度計的質量效應列入考慮，因而產生誤差，第三個產生誤差的原因可能是加速度計感測器與鐵琴片的接觸面積橫跨 2 個量測點，所以在同點頻率響應函數圖中，實驗與理論分析曲線才會有些許落差。因此，若將以上產生誤差的因素都克服的話，高頻的共振尖峰應可完全吻合。

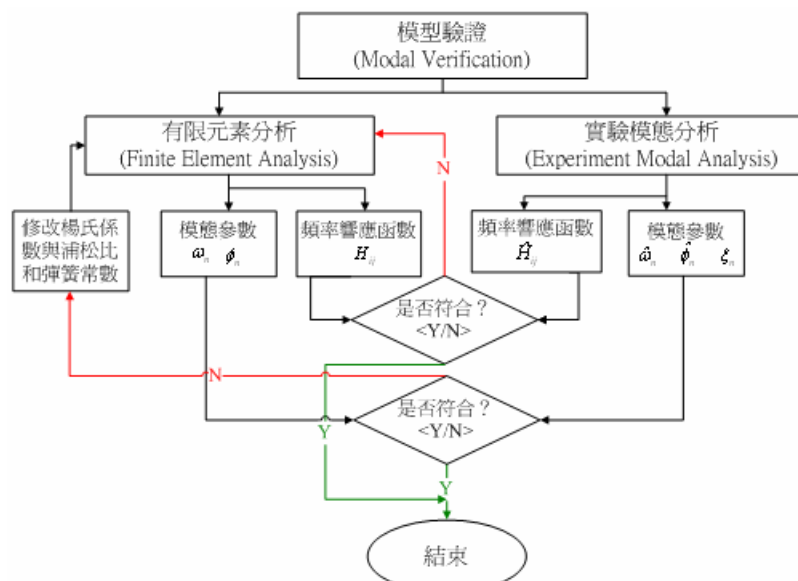
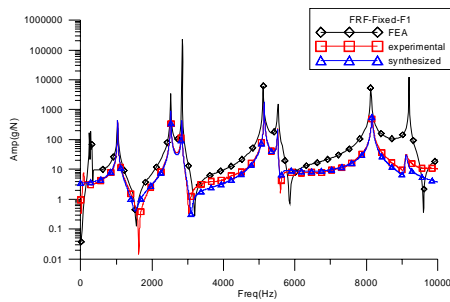
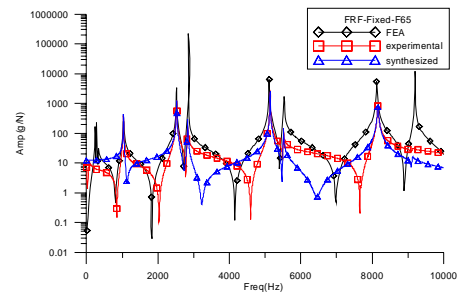


圖 6、模型驗證流程圖



(a) $H_{65,1}$ 頻率響應函數圖



(b) $H_{65,65}$ 頻率響應函數圖

圖 7、敲擊不同點與同點頻率響應函數圖

(2) 模態參數

表 2 為經由最佳化過程的理論分析與實驗模態分析所得之自然頻率比對表，表 3 為理論分析與實驗模態分析所得之模態振型對照表，綜合討論如下：

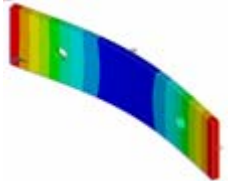
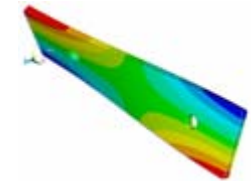
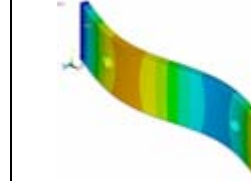
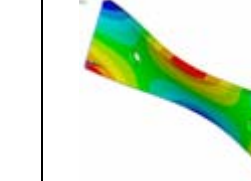
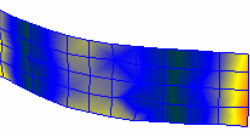
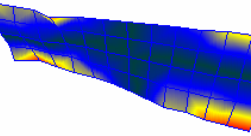
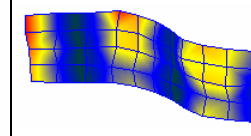
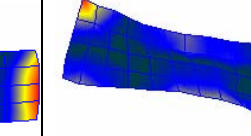
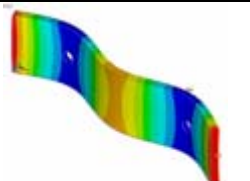
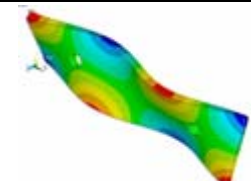
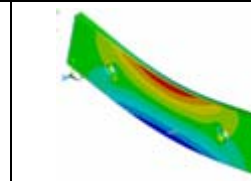
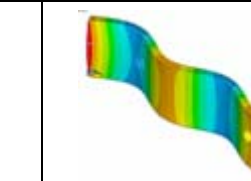
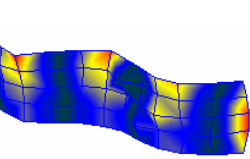
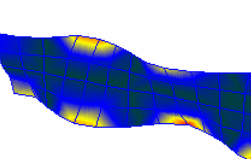
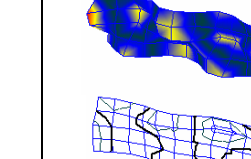
- 由表 2 自然頻率比對，所有自然頻率誤差百分比皆在 $\pm 1\%$ 以下，自然頻率比對成功。而理論有限元素分析 (FEA) 的第 7 個自然頻率並無對應到任何實驗模態分析 (EMA) 頻率值，乃因該模態為 y 方向彎曲模態，不論是振動或聲音，在 z 方向敲擊，均無法激發該模態，故無法量測得到。
- 一般而言，若實驗與理論的模態振型有良好的關連性，則 MAC(模態參數品質保證指標)數值會大於 0.9 以上，若 MAC 數值低於 0.05，則代表實驗與理論間之振型呈正交性。由表 2 中 MAC 比對結果顯示，以加速度計為感測器之 MAC 值明顯高於麥克風，因為加速度計感測器之振動訊號較明顯，而聲音較易受環境音場效應之影響，由表 3 振型圖仍可確認模態振型對應之正確性。表 3 中，第 8 個模態之理論模態振型是屬於 (6,1) 模態，而實驗模態振型等高線圖是屬於 (6,1) 模態，但是從力變化圖中它卻是 (6,2) 模態，理論與實驗模態振型有些微的出入，也造成了表 2 中第 8 個模態之 MAC 數值為 0.14 的原因；在表 2 中，除了第 7 與第 8 模態外，前 6 個模態的 MAC 數值都在 0.71 以上，表示前 6 個模態振型有良好的對應性。由表 3 中可明顯看出實驗之模態振型和理論之模態振型是相當吻合的。
- 以加速度計或麥克風為感測器實驗求得之阻尼比都在 0.1~0.3% 左右，相當一致，在分析時，阻尼比並無法獲得，在簡諧分析係以實驗求得之平均阻尼比代入，求得如圖 7 中之頻率響應函數。

在鐵琴片的頻率響應函數圖中，頻寬 4000Hz 前有相當的吻合性，在鐵琴片的模態參數中，自然頻率誤差百分比皆在 1% 以下，前 6 個模態的 MAC 數值都在 0.71 以上，表示前 6 個模態振型是相當吻合的，因此可推論模型驗證是成功的。因此，未來可依相同方法建構不同尺寸之鐵琴片，以預測其振動自然頻率以及鐵琴片之設計。

表 2、自然頻率對照表

Mode	模態振型	FEA (Hz)	加速度計 EMA (Hz)	Err (%)	MAC 值	修正阻 尼比(%)	麥克風 EMA (Hz)	Err (%)	MAC 值	修正阻 尼比(%)
1	(3,1)	1029.7	1034.3	-0.453	0.9596	0.2645	1034.3	-0.030	0.7358	0.2725
2	(2,2)	2517.3	2525.0	-0.305	0.8759	0.1298	2525	-0.502	0.4731	0.1288
3	(4,1)	2840.0	2834.3	0.199	0.9047	0.1348	2834	0.0007	0.7276	0.1388
4	(3,2)	5123.4	5143.7	-0.395	0.7147	0.0629	5143	-0.516	0.2292	0.0624
5	(5,1)	5533.0	5518.7	0.257	0.8569	0.0979	5518	-0.234	0.082	0.0886
6	(4,2)	8127.0	8165.6	-0.473	0.8266	0.1559	8165.6	-0.647	0.1431	0.1539
7	(1,2)	8642.0	X	X	X	X	X	X	X	X
8	(6,1)	9201.3	9118.2	0.905	0.1459	0.2359	9109.3	1.11	0.118	0.1929

表 3、鐵琴片模態振型對照表 (使用加速度計當感測器)

Mode	1	2	3	4
FEA 振型				
EMA 振型				
Mode	5	6	7	8
FEA 振型				
EMA 振型			X	

4-2 鐵琴片之振動與聲音關聯探討

在鐵琴之聲音的分析方面，將分為三大方向來探討。其一為加速度計質量效應對聲音的影響，二為不同材質的衝擊錘敲擊聲音比較，三為不同敲擊點對聲音的影響。

(1) 有無加速度計之聲音比較

本實驗採用鋼錘當衝擊頭，針對鐵琴片中間點進行敲擊，分別以有加速度計與無加速度計進行實驗，藉以探討加速度計質量效應對聲音所造成的影響。結果如圖 8 為有無加速度計的聲音頻譜圖，而表 4 為有無加速度計之自然頻率比較表，其綜合討論如下：

- 由圖 8 中可明確看出兩條曲線皆只有 4 個共振峰值，這是因為敲擊點為鐵琴片的中間點，所以不會激出偶數模態（第 2、第 4 和第 6 模態）；由於鋼錘是屬於硬材質的材料，鋼頭接觸鐵琴片的時間短，因此容易激出高頻的峰值，所以兩條曲線高頻的共振峰值都相當高。
- 從表 4 可發現 5562Hz 的聲音分貝數值是所有聲音分貝值中最大的，因此，當鋼錘敲擊鐵琴片時，人耳所聽到的聲音主頻率為 5562Hz 的聲音。
- 就兩條曲線的共振頻率而言，有加速度計的聲音頻率略低於無加速度計的聲音頻率，這是因為鐵琴片黏了加速度計感測器，其鐵琴片的質量增加，自然頻率因此而變小；由圖 8 中可看出黏著加速度計於鐵琴片對鐵琴所發出的聲音有些微影響，但不至於影響整體頻率曲線。

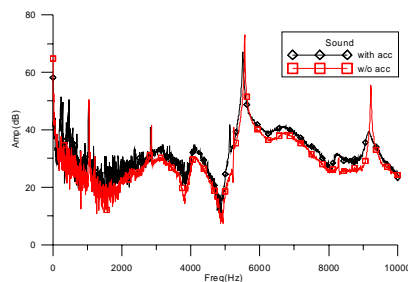


圖 8、有無加速度計的聲音頻譜圖

表 4、有無加速度計之頻率比較表

mode	有加速度計		無加速度計
	加速度計(Hz)	麥克風(Hz)	麥克風(Hz)
1(3,1)	1034.3	1034	1050
3(4,1)	2834.3	2834	2856
5(5,1)	5518.7	5518	5562
8(6,1)	9118.2	9109.3	9225

(2) 不同敲擊鎚之敲擊聲音比較

為了進一步了解衝擊鎚材質與鐵琴聲音之間的關聯性，便以不同的材質的衝擊鎚進行敲擊，分別為鋼鎚、塑膠鎚與鐵琴棒進行實驗。結果如圖 9 為不同衝擊鎚之聲音頻譜圖，表 5 為不同衝擊鎚之頻率比較表，表 6 為鋼琴鍵盤對應頻率表，其綜合討論如下：

- 由圖 9 中可看出鋼鎚的共振峰值中最高的點，所對應的頻率值為 5562Hz，與表 5 中鋼鎚聲音最高分貝值(73.2dB)所對應的頻率值是一樣的，因此，當鋼鎚敲擊鐵琴時，人耳所聽見的聲音為 5562Hz 所發出的聲音。
- 圖 9 中，塑膠鎚共振的峰值中最高的點有兩點，其所對應之頻率分別為 1050Hz 與 5559Hz，對照表 5 中的塑膠鎚之聲音分貝值，可發現 1050Hz 與 5559Hz 所對應的分貝值分別為 68.2dB 及 67.2dB，都相當高，因此當塑膠鎚敲擊鐵琴時，人耳所聽見的聲音是這兩個頻率的聲音。
- 圖 9 中，鐵琴橡膠棒共振的峰值中最高的點，其所對應之頻率為 1050Hz，與表 5 中的敲擊棒分貝值(68.2dB)相對照，可發現 1050Hz 所對應之聲音分貝值是所有敲擊棒之聲音分貝值中最高的，因此，當敲擊棒敲擊鐵琴時，人耳所聽見的聲音為 1050Hz 所發出的主頻率。
- 由於鐵琴片本身是設計發出 C 音階的音調，因此材質越硬的衝擊鎚(如鋼鎚)比較容易激出高頻的峰值，且其雜訊影響也大，不適合拿來進行敲擊；而塑膠頭之頻率峰值中最高的點有兩點，所以也不適合拿來進行敲擊；鐵琴棒質地較軟，適於激發第一個振動模態對應之鐵琴片聲音頻率。
- 對照鐵琴棒敲擊鐵琴之聲音頻譜與表 6 鋼琴鍵盤對應頻率表，可明確得知鐵琴棒敲擊鐵琴時發出的聲音頻率與鋼琴鍵盤上 C6 的聲音頻率是一樣的，因此可推論鐵琴片的第一振動模態為鐵琴片之聲音主頻率。

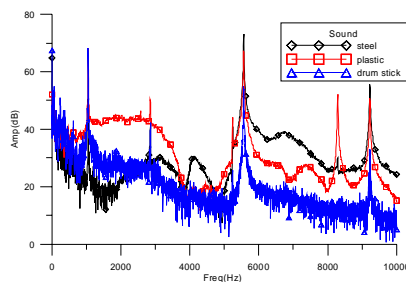


圖 9、不同衝擊鎚之聲音頻譜圖

表 5、不同衝擊鎚之頻率比較表

mode	鋼鎚 (Steel)		塑膠鎚 (Plastic)		敲擊棒 (Drum stick)	
	頻率(Hz)	dB	頻率(Hz)	dB	頻率(Hz)	dB
1(3,1)	1050	50.67	1050	68.24	1050	68.24
3(4,1)	2856	41.63	2856	49.39	2859	42.4
5(5,1)	5562	73.2	5559	67.24	5559	55.05
8(6,1)	9225	55.58	9225	50.76	9237	26.14

表 6、鋼琴鍵盤對應頻率表(Hz)

鍵盤	C6	D6	E6	F6	G6	A6	B6
頻率	1046	1174	1318	1396	1567	1760	1975

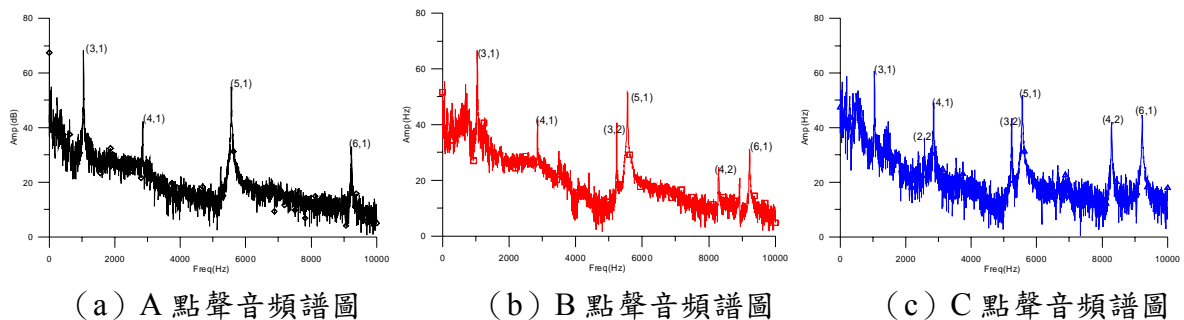


圖 10、不同位置之聲音頻譜圖

(3) 不同敲擊位置之聲音比較

當敲擊鐵琴片時，重複敲到同一位置的可能性不高，因此在鐵琴片中央規劃了 9 個敲擊點進行敲擊，如圖 4 所示，藉以探討不同敲擊位置對聲音的影響。圖 10 為 A、B、C 三點之實驗結果，由圖 10(a) 中可明確看出中心點的聲音頻譜圖中只有 4 個共振峰值，這是因為敲擊點為鐵琴片的中間點，所以偶數模態（第 2、第 4 和第 6 模態）並沒有被激出來；而圖 10(b) 與圖 10(c) 中，由於敲擊點是中心點偏下一些之敲擊，因此有激振出較多的模態。因此，敲擊鐵琴片的中間點，可明確激出第一個振動模態之聲音頻率。

五、結論

本文首先建立一個鐵琴片的有限元素模型，並藉由實驗模態分析比對驗證，再佐以聲音的量測，進而了解聲音與振動間的關連性以及敲擊材質與敲擊點與聲音間的關聯性。由以上分析可得到以下結論：

1. 模型驗證：理論分析與實驗所得的模態參數有相當程度的吻合性，且由 MAC 比對結果中，實驗得知的模態振型與有限元素分析得到的模態振型吻合程度相當高，因此在振動分析方面，模型驗證是成功的。由於模型驗證成功，故可藉由有限元素模型對其它不同音階的鐵琴片做振動分析與鐵琴片基礎頻率之預測。
2. 有無加速度計之聲音比較：由實驗所得到的聲音頻譜圖中可看出有加速度計的聲音頻率略低於無加速度計的聲音頻率，因此，可推論加速度計對鐵琴的聲音是有細微影響的。
3. 不同敲擊鉗之聲音比較：由於鋼鉗會激出高頻的峰值，因此峰值最高的地方都在高頻處，而鐵琴棒之敲擊頭是類似於橡膠的材質，因此，適於激發第一個振動模態對應之鐵琴片聲音頻率。
4. 不同敲擊位置之聲音比較：敲擊鐵琴片的中間點，可明確激出第一個振動模態之聲音頻率。

本文對於鐵琴振動與聲音的研究經驗，可推廣至其他不同種類的樂器，建立對應之有限元素分析模型，將有助於樂器之振動與聲音之理論分析預測。

六、參考文獻

1. Bretos J., Santamaria C., and Moral, J. A., 1999, "Finite Element Analysis and Experimental Measurement of Natural Eigenmodes and Random Responses of Wooden Bars Used in Musical Instruments," *Applied Acoustics*, Vol. 56 pp. 141-156.
2. Doutaut V., Matignon, D., and Chaigne, A., 1998, "Numerical Simulations of Xylophones. II. Time-Domain Modeling of the Resonator and of the Radiated Sound Pressure," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 104, No.3, pp. 1633-1647.
3. Bretos, J., Santamaria, C., and Moral, J. A., 1999, "Finite Element Analysis and Experimental Measurements of Natural Eigenmodes and Random Responses of Wooden Bars Used in Musical Instruments," *Applied acoustics*, Vol. 56, pp. 141-156.
4. 王栢村, 李雨軒, 張志偉, 2002, 「銅鑼振動與聲音特性之探討」, 中華民國振動與噪音工程學會第十屆學術研討會論文集, 第 245-252 頁。
5. 王栢村, 蘇集銘, 2006, 「吉他弦之振動與聲音特性探討」, 中華民國音響學會第十九屆學術研討會論文集, 台南, 論文編號: A7。
6. 王栢村, 胡惠文, 蘇敬翔, 2003, 「吉他共鳴箱之振動特性分析」, ANSYS 2003 台灣區用戶大會暨論文發表會, 雲林, 第 71-84 頁。