
聲音具體化的教學活動

李義評^{1*} 紀慶隆² 吳英正³

¹國立雲林科技大學 產業精密機械研究所

²臺中縣龍海國民小學

³國立雲林科技大學 機械工程系

壹、研究動機

聲音教學是國小高年級自然與生活科技領域的重要單元，其主要內容有聲音的產生、傳播、音量、音高、音色、噪音與樂音及共鳴。在生活方面，聲音是日常生活中最常接觸的信息來源之一，它是人與人溝通和自我表達自我呈現的重要信息載體；噪音會干擾我們的生活品質，而音樂欣賞又是人類重要的休閒活動。在學習方面，聲音單元更是國高中波動物理學的重要基礎。但因為聲音看不到又摸不著，一直是個很難懂且抽象的東西。本研究希望把聲音的抽象概念具體化。

在一份問卷自然科學適切性問卷調查結果中顯示，「多數教師認為課程內容應以能配合兒童身心發展並解決日常生活問題為優先」，以認知心理學做基礎發展課程（引自台灣省國民學校教師研習會，1998）。根據皮亞傑觀點，國小學生的認知發展階段，不易理解抽象概念，認知發展為具體概念。目前聲音教學的最大困境為聲音看不見，雖然透過聽覺，學生能夠區分聲音特色，但充滿好奇心的學生總會提出一堆相關的問題，讓老師不知如何回

答，或是回答過於抽象而無法理解。本研究希望把抽象概念具體化，這樣可以幫助學生學習，提高教師的教學成效。

貳、資訊面向

一、資料查詢

- (一) 首先在雅虎網站上建立「龍海自然家族」 http://tw.club.yahoo.com/clubs/Nature_of_Long-Hai/，然後每人在網路上蒐尋資料，貼在網路上，彼此分享。
- (二) 蘇文義老師在「利用媒體教學該怎麼教—談聲音的教學」一文中，提到如何使用免費軟體 Audacity 來教音高與音色。
- (三) 張仁昌老師在「聲波的波形與頻率的關係」中，提到影響聲音波形的因素很多，不同樂器、樂器在同一次振動中不同時刻取樣、同一樂器在發出基音不同的聲音時，因此要審慎使用聲音波形來解讀音色。

二、研究方法

(一) 樂器錄音

使用一般電腦用的麥克風，和 Window XP 內建軟體「錄音機」，錄製各種樂器的聲音，並做成 wav 檔，掛在網路

* 為本文通訊作者

上 <http://mail.lhes.tcc.edu.tw/~jih/sound/>，供往後分析用。

使用的樂器有鋼琴、大提琴、小提琴、鐵琴、木琴、大鼓、小鼓、口風琴、直笛、長笛和塑膠陶笛，共 11 種校園常見樂器。

(二) 頻率的計算

1. 請至 <http://audacity.sourceforge.net/> 下載 Audacity 安裝。
2. 啓動 Audacity 並開啓聲音檔。
3. 將游標移至某個音後，將長度設為 0.1 秒
4. 用放大鏡將波形放大，以便於計算波數，即可換算成頻率。

(三) 各種樂器的整體音形特性

將各種樂器的整體音形圖，複製到 Photoimpact 中，合併在一起，以供比對分析用。

(四) 不同樂器對波形的影響

針對 11 種樂器，每種樂器錄製若干音高的聲音，比較分析。

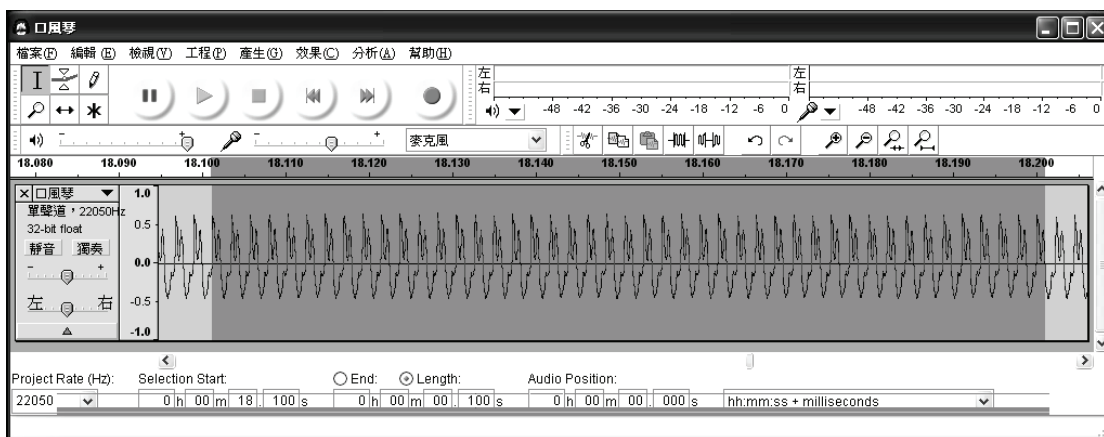
(五) 聲音判讀－波形的 FFT (快速傅立葉轉換) 分析：將聲音波形隨時間變化的關係以傅立葉函數轉為橫軸是頻率 縱軸是對應強度的頻譜來分析聲音的特性。

1. 針對 11 種樂器，每種樂器錄製若干音高的聲音。
2. 將波形運用 Audacity 做 FFT 轉換。
3. 將 FFT 資料存成文字檔，再開 Excel 載入文字檔，將每一種樂器的波形合併在一起，以供比對分析用。

三、研究成果

(一) 頻率的計算

以口風琴 A4 為例，取樣 0.1 秒的影像如下（如圖一所示），從影像中可以算出 45 個週期波，可算出頻率為 $45 \times 10 = 450\text{Hz}$ 。



圖一：口風琴 A4 的頻率計算

(二) 各種樂器的整體音形特性

各種樂器的整體音形如下圖（圖二、表一所示）。各種樂器每一個音各奏三次。圖表的左側說明如下：

- (1) 樂器名稱：大鼓、小鼓、鐵琴…等。
- (2) 聲道：單聲道、立體聲。
- (3) 取樣頻率：22050 Hz 或 44100Hz
- (4) 轉換位元：32bit，類比轉數位 (ADC)。
- (5) 靜音表無聲狀態，獨奏：表獨立控制音。
- (6) 左、右：表左右音量分佈。

從全音形特徵可將 11 種樂器大致分成三類：

第一類 音量明顯衰減。

以打擊樂器及擊絃樂器。其中鐵琴尾音快速截止，大小鼓有雜訊毛邊，可容易辨別出來，此類樂器敲擊後，音量隨時間自然衰減。

第二類 音量不穩定，開始音量漸大與結尾音量漸小。

以擦弦樂器的提琴類為代表，音量不穩可能是拉弦技巧不佳（演奏者皆為生手）所致。開始運弓時，力量由小而大，速度則由慢而快，而造成開始音量漸大的現象。運弓結束時，力量由大而小，速度則由快而慢，而造成結尾音量漸

小的現象。

第三類 音量穩定，開始音量快速上升與結尾音量快速下降。

以管樂器為代表，吹奏管樂器時，可能由於管樂器聲音共振特性，造成音量穩定及開始音量快速上升與結尾音量快速下降。

比較結果如表一所示。

(三) 聲音取樣位置對波形的影響

所有圖形都掛在 <http://mail.lhes.tcc.edu.tw/~jih/sound/>。分析如表二所示。

因音高不同，所以振動源（弦）物理基本特質會不同，造成波形的不同。

(四) 聲音判讀－波形的 FFT 分析

由於大小鼓波形雜亂無章、無穩定的週期波，所以只用九種樂器波形比較，如表三所示。

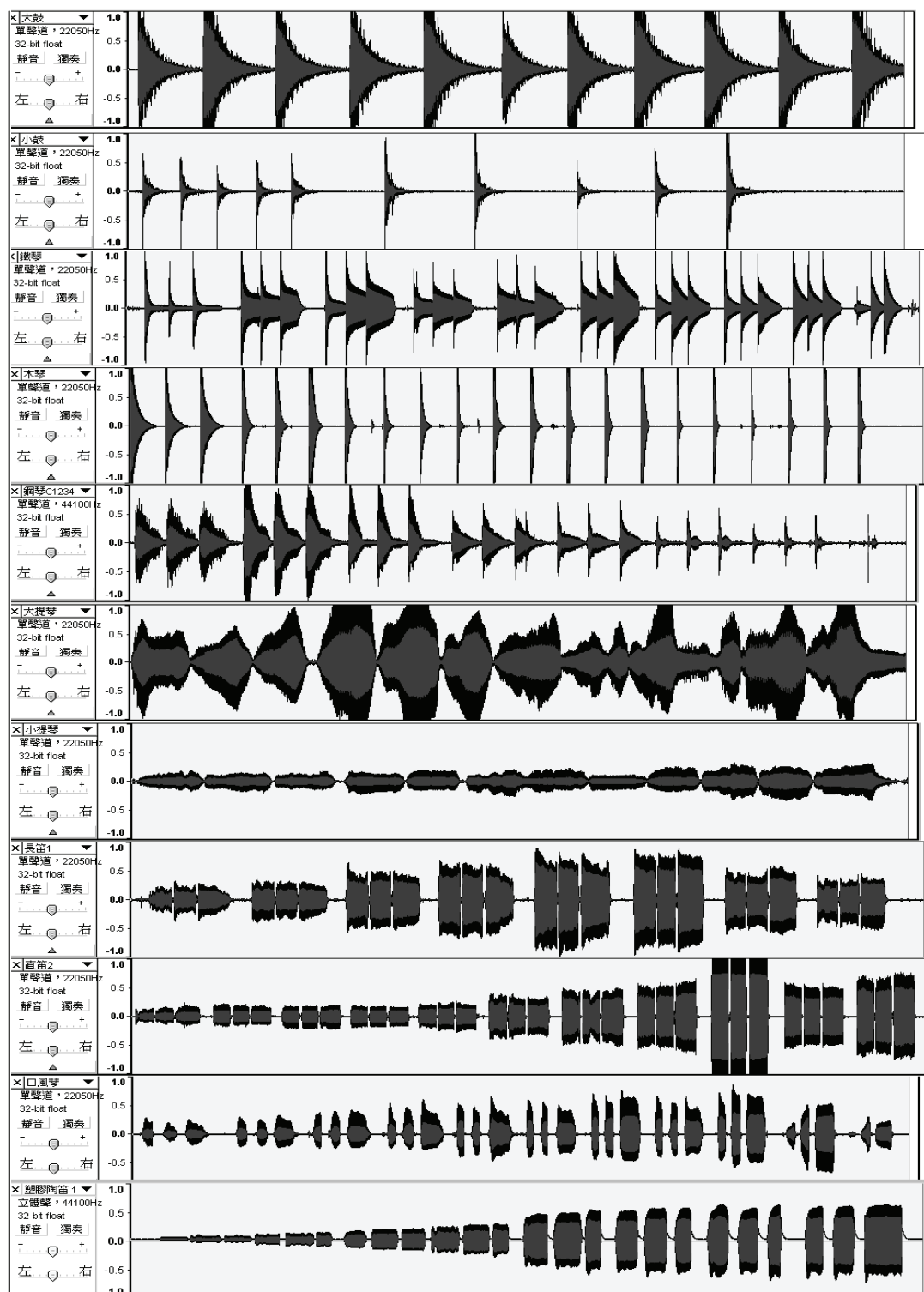
四、討論

(一) 頻率

Audacity 計算頻率非常方便，只需要幾個簡單功能便能使用。將頻率概念的視覺化，能協助學生將抽象概念具體化，清楚掌控聲音高低的意義。

(二) 響度

Audacity 很容易讓學生看到「看到」聲音的大小，如圖二所示，在圖中垂直方向的距離表示響度，以陶笛為例，陶笛的響度由左到右逐漸增加，。

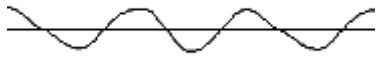
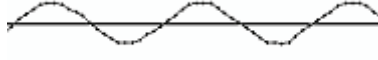
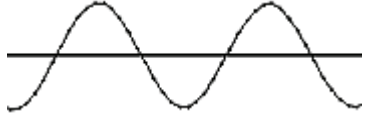

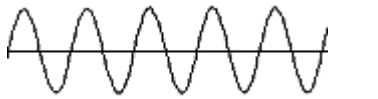


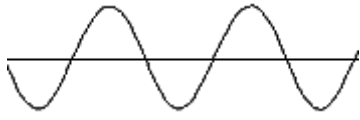
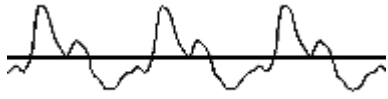
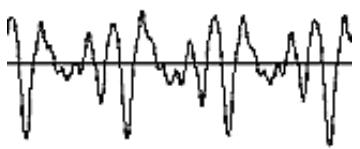
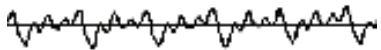
圖二：各種樂器的整體音形特性

表一：各種樂器的整體音形特性分析

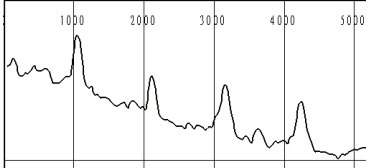
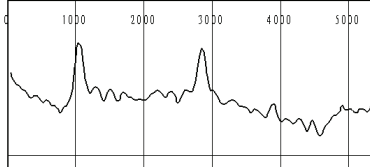
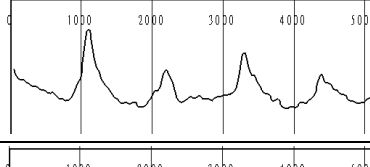
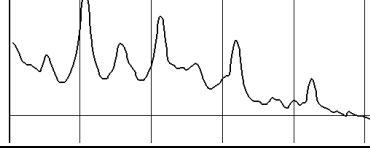
樂器類別	樂器名稱	全音形特徵	其他
打擊樂器	大鼓	音量明顯衰減	有雜訊毛邊
打擊樂器	小鼓	音量明顯衰減	有雜訊毛邊
打擊樂器	鐵琴	音量明顯衰減	尾音快速截止
打擊樂器	木琴	音量明顯衰減	衰減最快
擊絃樂器	鋼琴	音量明顯衰減	-----
擦絃樂器	大提琴	音量不穩定	開始音量漸大與結尾音量漸小
擦絃樂器	小提琴	音量不穩定	開始音量漸大與結尾音量漸小
管樂器	長笛	音量穩定	開始音量快速上升與結尾音量快速下降
管樂器	直笛	音量穩定	開始音量快速上升與結尾音量快速下降
管樂器	口風琴	音量穩定	開始音量快速上升與結尾音量快速下降
管樂器	陶笛	音量穩定	開始音量快速上升與結尾音量快速下降

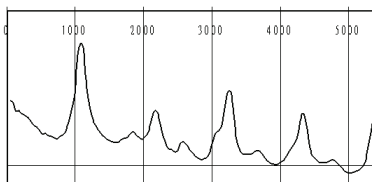
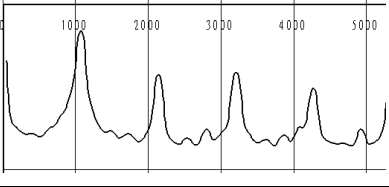
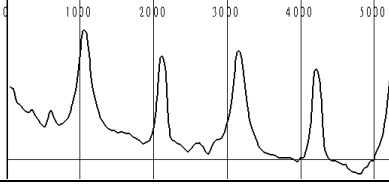
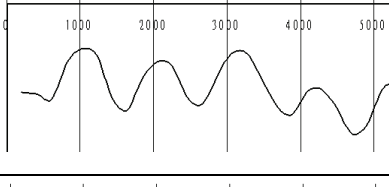
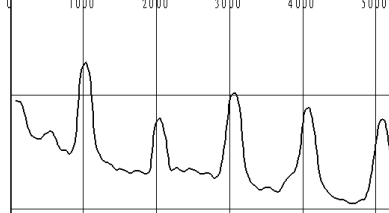
表二：不同樂器對波形的影響分析

樂器	音階	說明	波形
鋼琴	C4	週期波且兩波峰間有 1 個波。	
鐵琴	C6	波形為弦波。	
木琴	C#6	波形為弦波。	
長笛	C6	波形為弦波。	
直笛	C6	波形為弦波。	

陶琴	C6	波形為弦波。	
口風琴	C5	週期波且兩波峰間有 2 個小波。	
大提琴	C3	前、中、後段音皆是週期波，兩波峰之間有 2 個波	
小提琴	A4	週期波，兩波峰之間有 1-3 個波。	

表三：九種樂器波形的 FFT 說明

樂器	音階	說明	波形
鋼琴	C6	倍率穩定，波峰明顯。	
鐵琴	C6	奇數波明顯。	
木琴	C6	倍率穩定，音波明顯。	
長笛	C6	波峰明顯， f (基頻), $1.5f, 2f, 2.5f...$ 都有波峰出現，但整數倍 $f, 2f, 3f$ 波峰較大。	

直笛	C6	倍率穩定，波峰明顯。	
陶琴	C6	倍率穩定，波峰明顯。	
口風琴	C6	倍率很穩定，波很穩定也很相似。	
大提琴	A3	倍率很穩定，波非常穩定，波也很相似而且很清楚。	
小提琴	E5	倍率穩定，波峰明顯。	

分析校園常見的 11 種樂器的整體音形，將 11 種樂器大致分成三類：

第一類 音量明顯衰減。

以打擊樂器(鐵琴、木琴、大鼓、小鼓)及敲絃樂器(鋼琴)為代表。其中鐵琴尾音快速截止；大小鼓有雜訊毛邊，可容易辨別出來。此類樂器敲擊後，音量隨時間自然衰減。

第二類 音量不穩定，開始音量漸大

與結尾音量漸小。

以擦弦樂器(大提琴、小提琴)為代表。音量不穩可能是運弓技巧不佳(演奏者皆為生手)所致。開始運弓時，力量由小而大，速度則由慢而快，而造成開始音量漸大的現象。運弓結束時，力量由大而小，速度則由快而慢，而造成結尾音量漸小的現象。

第三類 音量穩定，開始音量快速上升與結尾音量快速下降。

以管樂器(口風琴、長笛、直笛、塑膠陶笛)為代表。其開始與結束的截止特徵可能由於管樂器聲音的共振特性所致。

長笛、直笛、塑膠陶笛。

第二類 各音階的波形主要為類似的週期波，有大提琴、口風琴。

第三類 各音階的波形差異較大，有小提琴、鋼琴。

(三) 音色

1. 只要使用「放大」功能，Audacity 很容易讓學生看到「看到」音色。將九種樂器的音色特性列表如表四。

(1) 取樣位置對波形的影響

管樂器的波形與取樣位置無關外，其他樂器聲音的取樣位置會影響波形的。

(2) 不同音階波形的影響

若以各種樂器中間位置的波形分析發現，主要可分成三類：

第一類 各音階的波形主要為弦波，有鐵琴、木琴、

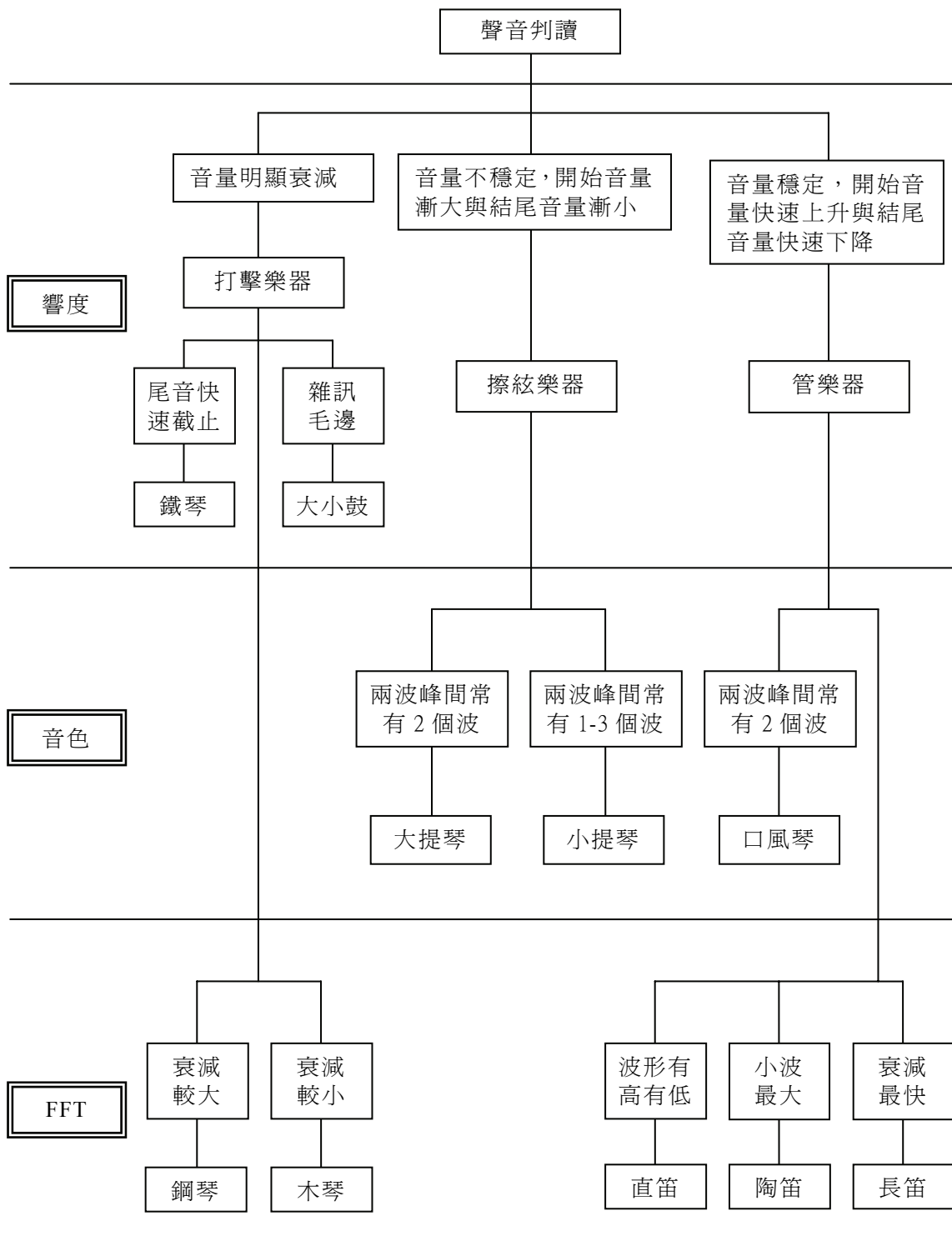
2. 原本希望透過波形的觀察分析，可以讓學生「看到」音色，沒想到聲音的波形變化這麼複雜，不同樂器種類、不同音階、不同取樣位置都有重大的影響；本試驗未對多支同一種樂器(例如：比較 5 把大提琴)進行研究。若要以波形表示音色時，應該註為音階。

例如同樣是弦波的聲音，耳朵依然能輕易辨別出鐵琴和長笛，可見「音色」可用波形來代表。

(四) 用響度加音色加 FFT 做聲音判讀： (如圖三所示)

表四：九種樂器的音色特性

樂器類別	樂器名稱	前中後段音	不同音階	其他
敲絃樂器	鋼琴	常常不同	常常不同	
擦絃樂器	大提琴	類似	類似	兩波峰間常有 2 個波
擦絃樂器	小提琴	類似	類似	兩波峰間常有 1-3 個波
打擊樂器	鐵琴	類似	主要為弦波	-----
打擊樂器	木琴	類似	主要為弦波	-----
打擊樂器	大鼓	---	---	-----
打擊樂器	小鼓	---	---	-----
管樂器	口風琴	類似	類似	兩波峰間常有 2 個波
管樂器	長笛	類似	主要為弦波	-----
管樂器	直笛	類似	主要為弦波	-----
管樂器	陶笛	類似	主要為弦波	-----



圖三：試驗樂器音色檢索表

參、聲音視覺化面向

一、資料查詢

科博館所展示的「滾筒示波器」，目前世界有十八個科教機構展示。相關的文章顯示可以目視弦的振動，並且有類似電氣式「示波器」的功能。當弦變緊時，你所聽到的音調越高，也會看到吉他弦所產生的小波動影像數目增加。

二、研究方法

(一) 不同轉速的影響

滾筒的轉速分別為每分鐘 104 轉、152 轉、180 轉。用攝影機記錄後做分析。將顯示出的波逐點繪出，看到的影像如圖四。分析不同滾筒速度的平均波數，彙整如表五所示。

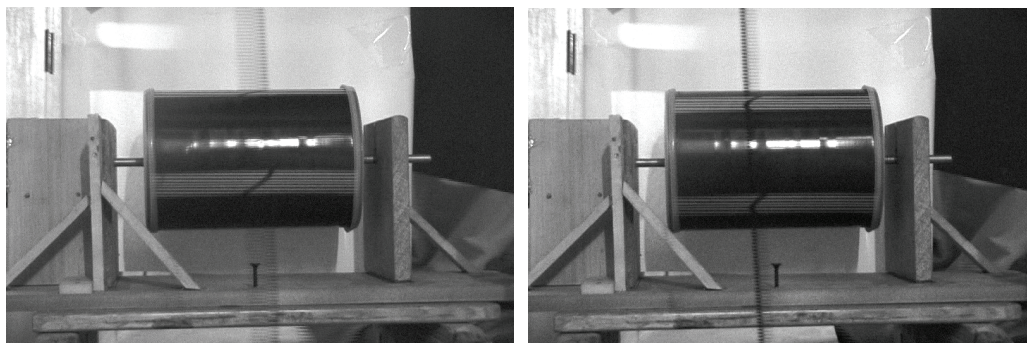
轉速越快，波數變少，因為弦會加速

通過至另一個位置。轉速慢，波數變多，因為弦會在一個白線上慢慢的移動。轉速和波數有關，兩者成轉速越大，波數越少的關係。

(二) 不同弦張力的影響

使用不同膠帶，組成成重量為 75 公克、150 公克及 300 公克，逐次將膠帶吊在弦上，並記錄長度後，綁在釘子上，做為弦的張力，如表六。

弦變鬆、波形變大。因為弦鬆時，弦振動頻率變少。來回次數變少，弦與白線的接觸點也會變少。弦變緊，波形變小。因弦變緊，所以在彈的期間弦的速度快，波雖然多、又密集，但消失的速度也快。張力增加，弦速越快，波數增加。張力和波數有關，兩者成張力越大，波數越多的關係。



圖四：不同轉速的影響

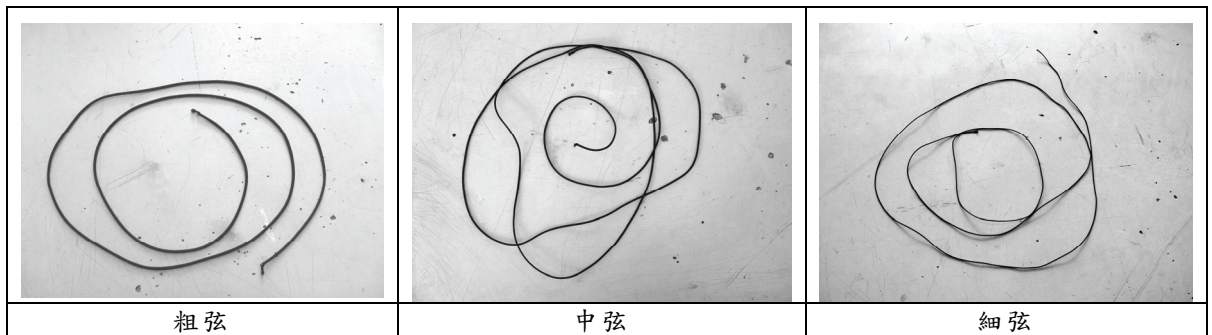
表五：不同轉速的影響分析

滾筒速度 (rpm)	張力 (公克)	線數目 (條)	弦粗細	線顏色	線粗細 (公分)	滾筒直徑 (公分)	平均波數
104	75	4	粗	白	0.5	13	1.8
152	75	4	粗	白	0.5	13	1.0
180	75	4	粗	白	0.5	13	0.9

表六：不同弦張力的影響分析

滾筒速度 (rpm)	張力 (公克)	線數目 (條)	弦粗細	線顏色	線粗細 (公分)	滾筒直徑 (公分)	平均 波數
152	75	4	粗	白	0.5	13	1.0
152	150	4	粗	白	0.5	13	1.4
152	300	4	粗	白	0.5	13	1.9

(三) 弦粗細變化的影響 (如圖五)。



圖五：弦粗細變化的影響

表七：弦粗細變化的影響：將相同材質的弦直徑大小做變化，有粗、中、細三種尺寸。

滾筒速度 (rpm)	張力 (公克)	線數目 (條)	弦粗細	線顏色	線粗細 (公分)	滾筒直徑 (公分)	平均 波數
152	75	4	粗	白	0.5	13	1.5
152	75	4	中	白	0.5	13	1.7
152	75	4	細	白	0.5	13	2.5

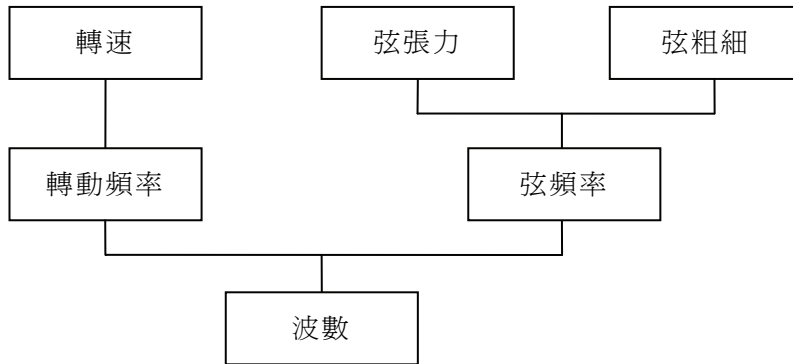
弦的直徑較粗，波數會變少。因為承受的重量（張力）都一樣，但弦較粗時，承受的平均重量會減輕，導致弦變鬆，振動頻率變少，弦和白線的接觸點變少，所以會使波數變少。在相同張力下，弦的直徑越細，振動速度較快，形成的波數越多。弦直徑和波數有關，兩者成弦直徑越粗，波數越少的關係。

三、波數規則歸納

整理研究結果，有影響波數的因素有三個，即轉速、弦張力、弦粗細，如圖六。

波數與轉動頻率及振動頻率有關，待實驗找出三者關係，如表八。

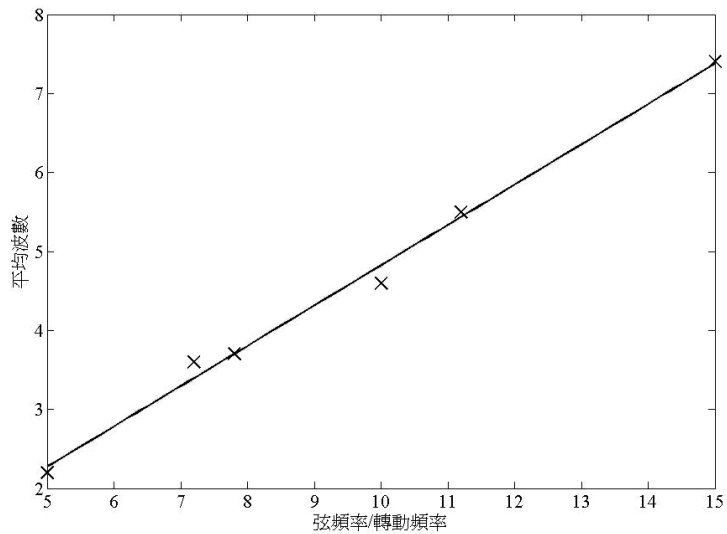
將弦頻率/轉動頻率及波數畫成圖，如圖七。



圖六：波數規則歸納

表八：波數規則歸納分析

張力	轉速	轉動頻率	弦頻率	弦頻率/轉動頻率	1	2	3	4	5	平均波數
75	82	1.4	7.0	5.0	2.0	2.3	2.1	2.4	2.4	2.24
150	82	1.4	11.2	7.8	3.5	3.8	3.8	3.6	3.7	3.68
300	82	1.4	15.0	11.2	5.3	5.6	5.5	5.4	5.5	5.46
400	82	1.4	21.0	15.0	7.0	7.2	7.6	7.6	7.4	7.36
400	128	2.1	21.0	10.0	4.2	4.5	4.7	4.9	4.7	4.60
400	172	2.9	21.0	7.2	3.5	3.6	3.4	3.7	3.7	3.58



圖七：弦頻率/轉動頻率及波數曲線擬合

(一) 直線部份為實驗數據經由曲線擬合 (curve fitting) 所繪出, 所得方程式為 $Y = 0.50 \times X - 0.28$, 由方程式可知, 弦頻率/轉動頻率、波數兩者的關係近似為直線。且斜率為 2:1 的直線, 所以弦頻率/轉動頻率、波數的關係大約是 2:1。

(二) 可推得弦頻率/轉動頻率和波數的關係為:

$$\text{波數} = \text{弦頻率} / \text{轉動頻率} \times 1/2$$

波數規則:

$$\text{弦頻率} = \text{轉動頻率} \times \text{波數} \times 2$$

若轉速已知, 波數可以從實驗時目視算出, 此時弦振動頻率就可以推得。若滾筒轉速 = 3000rpm = 50rps, 表示 1/50 秒轉 1 圈或 1/100 秒轉半圈, 若此時看到 1 個波, 則頻率 = 波數/時間 = $1 / (1/100) = 100\text{Hz} = \text{弦頻率}$ 。由於 $A_2 = 110\text{Hz}$, 因此看到吉他弦振動是有可能的。

四、聲音視覺化實驗

要達成聲音視覺化, 滾筒的轉速必須要增加, 生活中常見高轉速的電氣是電風扇, 所以需另外設計第二代的滾筒示波器, 來完成『聲音視覺化』。

實驗數據:

電風扇轉速: 經由十次實驗, 所得平均轉速為 3640(rpm)。

波數:

顯示出波形如下圖所示:(如圖八)

由照片中可知波數大約為一個波。



圖八: 聲音波形圖

由實驗三所得波數規則可計算出弦頻率:

$$\begin{aligned} \text{弦頻率} &= \text{轉動頻率} \times \text{波數} \times 2 \\ &= 3640 \times 1 \times 2 = 7280(\text{rpm}) = 121(\text{Hz}) \end{aligned}$$

經由聲音軟體量測十次平均, 弦振動頻率為 113Hz, 大約為 A_2 的頻率。

用波數規則計算出的偏差量大約為:

$$\text{偏差量} = (121 - 113) / 113 = 0.07$$

五、討論與結論

(一) 影響波數的因素

轉速: 實驗二發現, 轉速快, 波數少。滾筒轉速越快, 弦振動頻率不變, 弦和滾筒白線交點會加速通過到另一個位置, 波數變少。滾筒轉速慢, 弦振動頻率不變, 弦和滾筒白線交點會慢慢的移動, 波數增加。轉速和波數有關, 轉速變快、波數變少。

弦張力: 實驗二發現, 張力大, 波數多。張力小, 波數少。因為張力大, 弦越緊, 所以在彈的期間, 弦的振動速度快, 波雖然多、又密集, 但消失的速度也快。張力變大和波數變多有關。

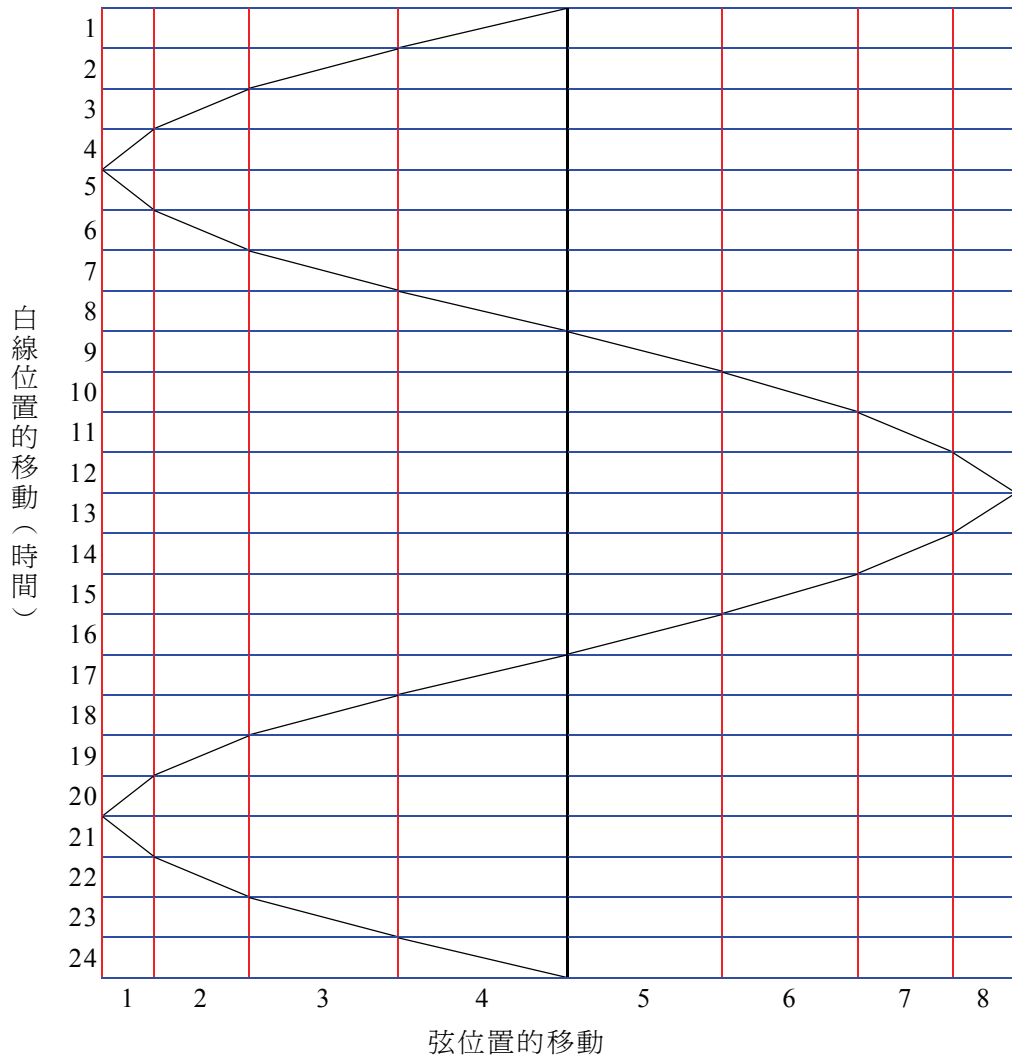
弦粗細：實驗二發現，弦直徑粗，波數少。

弦直徑細，波數多。因為承受的重量（75 公克）都一樣，但弦較細的話，會導致弦變得更緊，振動速度越快，波數變少。弦直徑變粗和波數變少有關。

(二) 成像模型：(圖九)

下圖為成像模型，藍線為滾筒白線的位置，左側數字表示白線位置的移

動，由於滾筒轉速大約為等速，所以間隔的距離是相等的。紅線表示弦的位置，下方數字表示弦的位置的移動，由於弦的速度會變化，在兩端的速度較慢、中間的速度較快，所以中間間隔距離較。藍線和紅線的交叉點為波的成像，將交叉點連線後的圖形，也就是我們眼睛所看到的波。



圖九：成像模型

(三) 波數規則歸納

經由三十次實驗，得出弦頻率、轉動頻率、波數三者的關係為：

$$\text{弦頻率} = \text{轉動頻率} \times \text{波數} \times 2$$

轉動頻率可從測量得知，波數可由眼睛或攝影機輔助視覺得到，將轉動頻率及波數帶入，即可推算出弦的振動頻率。

(四) 聲音視覺化實驗

大約以 $A_2=110\text{Hz}$ 做實驗，可以看見聲音的波動，令人振奮。並且運用實驗三所得的波數規則，計算出弦頻率，兩相對照，準確率為九成三，我真的「看見聲音」。

參考文獻

聲波的波形與頻率的關係 張仁昌 <http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/teacher/sound/index.html>

利用媒體教學該怎麼教—談聲音的教學
蘇文義 [http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=5044&forum=40&1.Note names, MIDI numbers and frequencies](http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=5044&forum=40&1.Note%20names,%20MIDI%20numbers%20and%20frequencies)
<http://www.phys.unsw.edu.au/jw/notes.html>

漫談聲音 <http://www.bud.org.tw/Ma/Ma23.htm>

U.S.A 舊金山 <http://www.exploratorium.edu/cmp/projects/ligo.html>

U.S.A----OSCYLINDERSCOPE:
<http://www.normantuck.com/catalogPages/oscylinderScope.html>

japan-Oscylinderscop:
<http://www.hirax.net/dekirukana4/ocilodisplay/index.html>

國立自然科學博物館：

<http://www.nmns.edu.tw/>

李義評、紀慶隆、林伯勳 (2008)。圓筒示波器之研究。2008 物理教育及示範研討會，14。

Sejun, Goh; Byungmu, Chang; Ilyong, Jeong; Kwon, Hyook-Tae; Il, Moon(1998). Safety Improvement by a Multimedia Operator Education System, Computers and Chemical Engineering Volume: 22, Supplement 1;, May 24 - 27 1998, pp. S531-S536