

中華民國第四十三屆中小學科學展覽會參展作品專輯

高中組

生活與應用科學科

科別：生活及應用科學

組別：高中組

作品名稱：琴聲叮叮咚

關鍵詞：振動頻率、響度

編號：040801

學校名稱：

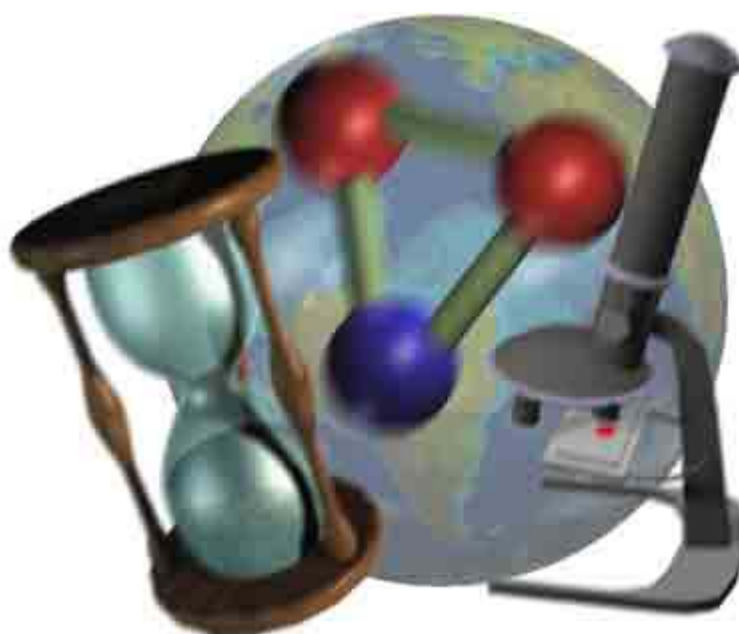
國立蘭陽女子高級中學

作者姓名：

吳敬萱、楊植纓、黃佩琦、蕭雅云

指導老師：

林冠宏、許義淵



摘要

我們以聲頻分析儀測量對木材的振動頻率，首先探討木材置放於不同溫度時的頻率變化，找出使木材振動頻率達穩定的最佳條件，並探究其原因。其次，藉由測量不同長、寬、厚度木材的振動頻率，歸納出木材振動頻率與其長、寬、厚度的關係方程式，由此關係方程式，發展出製造標準音高木條的流程。接著，我們以分貝儀測量木材的振動響度，探討木條在不同支撐位置的響度變化，找出有最大響度的支撐位置。另外，我們以氣柱共鳴法，探討不同振動頻率木條的共鳴管長度，並找出影響共鳴管長度的因素。最後，綜合我們的研究成果，完成一具高準確、響度足夠的木製打擊樂器。

壹、研究動機

高一基礎物理「聲音」、高中物理「波動」、「聲波」、「共鳴空氣柱實驗」，對樂器原理、聲波特性及駐波現象有所介紹，我們希望藉由這些知識及方法，對木材的振動進行研究，探討影響其振動頻率及響度的變因，藉由研究結果發展出一套製造木製打擊樂器的完整流程。

貳、研究目的

- 一、 探討木材振動頻率的穩定性。
- 二、 探討木材振動頻率與長寬厚度的關係。
- 三、 探討產生標準音頻木條的製作流程。
- 四、 探討支撐位置對木材振動響度的影響。
- 五、 探討提升木材振動響度的共鳴管長度。

參、研究器材與設備

- 一、直尺、游標尺、電子秤、橡皮棒、花梨木、白木、木架、氣柱共鳴管、
分貝儀、麥克風、個人電腦。
- 二、軟體：聲頻分析儀（Cool Edit）、Microsoft Excel。

肆、研究過程與方法

一、木材振動頻率穩定性的探討：

木材的材質及幾何形狀者都可能影響其振動頻率(參考資料一~五)，若欲探討木材的振動頻率與其長寬厚度的關係，需先有穩定的木材材質作為控制變因。因此，找出使木材材質穩定的條件是我們首要的研究目標。其實驗操作流程如下：

1. 取花梨木及白木原材裁切成長寬厚皆相同的長方形木條，將之置放於室溫的環境中(溫度 21~29℃;濕度 69~93%)，每間隔數小時，測量及記錄其質量、長寬厚度、振動頻率的變化。

其中木條振動頻率的測量方法如下：以擊槌敲擊木條，將其振動音頻以麥克風接收，連結至 PC，以音頻分析軟體“Cool Edit”測出振動頻率，如右圖示。軟體“Cool Edit”可由下列網址免費下載：<http://www.syntrillium.com/download/>。

2. 取相同規格花梨木及白木兩組，分別置入 50℃ 及 90℃ 的烘箱中，每間隔數小時，測量其質量 m 、長寬厚度及振動頻率 f ，記錄其變化情形。歷經數天後，將木條由烘箱中取出，置放室溫環境，繼續記錄各物理量的變化。
3. 比較不同溫度置放下，木條振動頻率的變化情形，找出振動頻率穩定的最佳條件。

二、木材振動頻率與長寬厚度關係的探討

實驗操作流程如下：

1. 取一花梨木原材，裁切成寬厚度相同，長度 L 不一的長方形木條樣本數塊。
2. 將樣本置放於室溫的實驗室內約一星期後，以擊槌敲擊木條，用聲頻分析測其頻率 f ，以“Microsoft Excel”分析頻率 f 與木條長度 L 的關係。
3. 取一花梨木材，裁切成長度、寬度相同，厚度 H 不一的長方形木條數塊，重複步驟 2，分析 f - H 的關係。
4. 取一花梨木材，裁切成長度、厚度相同，寬度 W



不同的長方形木條數塊，重複步驟 2，分析 f-W 的關係。

5. 改取白木原材，重複步驟 1~4。
6. 綜合 f-L、f-H、f-W 的關係，歸納出 f 與 L、H、W 可能的關係式。



三、產生標準音頻木條的製作流程

我們所研究出產生標準音頻木條的製作流程如下：

(一) 決定標準音頻 f_s

我們希望製作的木琴有八個鍵，其唱名及標準頻率如下表：(參考資料一)

木條 編號	音階 音名	音階 唱名	標準頻率 f_s (Hz)
1	c^2	Do	523.25
2	d^2	Re	587.33
3	e^2	Mi	659.26
4	f^2	Fa	698.46
5	g^2	Sol	783.99
6	a^2	La	880.00
7	b^2	Si	987.77
8	c^3	Do	1046.5

(二) 木條長度 L 與振動頻率 f 的關係

以木條製造成的打擊樂器(木琴)的琴鍵是由寬厚一致，但長度不同的長方形木條所組成。所以，欲裁切出產生標準頻率 f_s 的琴鍵，需先知道木條長度與頻率的關係。經由〈研究過程二〉中所歸納出振動頻率 f 與木條長度 L 的關係為：

$$f = K \frac{H}{L^2} \text{ ----- } \langle \text{公式一} \rangle$$

其中 K 值我們稱之為材質係數，可將木材材質對頻率的影響以 K 值量化之。不同木材，其材質係數 K 會有差異，即使同一木條，其木材結構、密度、含水量也不一定均勻，以致各部分的 K 值也可能略有不同。

(三) 初估琴鍵的長度 L_s

實驗操作流程如下：

1. 取一花梨木條，測其寬度 W_0 ，厚度 H_0 ，長度 L_0 ，以聲頻分析儀測其振動頻率 f_0 。假設此木條的材質係數為 K_0 ，依式〈一〉，其關係式應為：

$$f_0 = K_0 \frac{H_0}{L_0^2} \text{ ----- (1)}$$

2. 假設可以產生標準頻率 f_s 的琴鍵長度為 L_s ，裁切後琴鍵的材質係數為 K_s ，依式〈一〉，三者的關係應為：

$$f_s = K_s \frac{H_0}{L_s^2} \text{ ----- (2)}$$

3. 若原本木條長度 L_0 與標準長度 L_s 相近，木材材質的變異性便不致太大，則 $K_0 \doteq K_s$ 。將式(1)、(2)相除：

$$\begin{aligned} \frac{(1)}{(2)} &\Rightarrow \frac{f_0}{f_s} = \frac{L_s^2}{L_0^2} \\ \Rightarrow L_s &= \sqrt{\frac{f_0}{f_s}} L_0 \text{ ----- (3)} \end{aligned}$$

(四) 修正琴鍵長度 L_s'

式(3)的結果必須在原木長度 L_0 ，與標準長度 L_s 相近時才成立，否則當 L_0 被截短成 L_s 時，因木材材質並非理想均勻值，可能造成截短後琴鍵的材質係數 $K_s \neq$ 原木的材質係數 K_0 。因此若能將原木的長度 L_0 裁切至與琴鍵長度 L_s 相近，重新以式(3)估算一次，便可以得到更精確的琴鍵長度 L_s' 。其步驟如下：

1. 將原木的長度由 L_0 截短成 L_0' 。其中 $L_0' \equiv$ 初估長度 L_s + 預留裁切長度 ΔL 。考慮所使用裁切機的精細度及安全性，我們將 ΔL 定為 1 公分。
2. 以聲頻分析儀測量截短後的原木頻率 f_0' 。
3. 以式(3)重新估算標準頻率的琴鍵長度 L_s' ：

$$L_s' = \sqrt{\frac{f_0'}{f_s}} L_0'$$

4. 依照長度 L_s' 完成琴鍵的裁切。



(五) 檢測完工後琴鍵的振動頻率 (f_s' 、 f_s^*)

分別以聲頻分析儀及高中實驗中的氣柱共鳴管，檢測完工後琴鍵的頻率 (f_s' 、 f_s^*)。其中氣柱共鳴管的原理(參考資料六)如下：



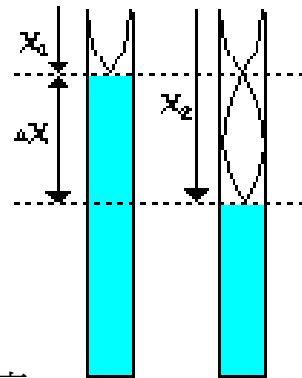
X_1 及 X_2 分別代表第一次及第二次產生共鳴的水位，則 Δ

$$X = X_2 - X_1 = \frac{1}{2} (\text{聲波波長 } \lambda) \rightarrow \lambda = 2 \Delta X$$

又 聲波波速 $V = 331 + 0.6 \times \text{溫度 } t$

而 頻率 $f = \text{波速 } V / \text{波長 } \lambda$

$$\therefore f = (331 + 0.6t) / 2 \Delta X$$



四、木材支撐位置對振動響度的影響

一架好的木琴，除了琴鍵的振動能夠發出標準音頻以外，其振動的響度也要足夠，因此，我們希望能夠探討木條在琴架上不同支撐位置的響度變化，以期找出有最大響度振動的支撐位置。其實驗操作流程如下：

1. 將木條置於木琴的支架上，木條下方置以測量聲音響度的分貝儀。
2. 將擊槌由相同高度處擊下，以固定每次的敲擊力道。敲擊後由分貝儀測量聲音的響度。
3. 改變支撐點的位置，重複步驟 1~2。
4. 由響度與支撐位置的關係圖找出最大響度的支撐點。

五、共鳴管長度的探討

(一) 共鳴管長度與振動頻率的關係

一般樂器為了增加其振動的響度，皆有共鳴管或共鳴箱的設計。對木琴而言，其共鳴管設置於琴鍵的下方，而共鳴管長度必須與琴鍵振動頻率配合，才能產生較佳共鳴效果。我們欲以一端開放、另一端封閉的玻璃圓管為木琴的共鳴管，可藉由「共鳴空氣柱法」檢測琴鍵頻率的過程，取其 X_1 的長度為共鳴管長度。由高中物理「駐波」的概念(參考資料八)， X_1 與聲音頻率 f 的關係式應為：

$$X_1 = \frac{1}{4} \lambda = \frac{1}{4} \frac{v}{f} \text{-----} \langle \text{公式二} \rangle$$

(二) 共鳴管管口處駐波波腹位置的探討

我們研究結果發現：木琴共鳴管長度 X_1 在與波長 λ 的關係並不如〈公式二〉中所示，應修正為：

$$X_1 = \frac{1}{4} \lambda - \Delta h = \frac{1}{4} \frac{V}{f} - \Delta h \text{-----} \langle \text{公式三} \rangle$$

Δh 為 $\lambda/4$ 與 X_1 間的差，我們稱之為修正長度，為了解影響 Δh

的因素，我們設計下列流程來探討：

1.推測可能影響修正長度 Δh 的變因

我們推測可能影響 Δh 的變因有三：

- (1) 木條的振動頻率 f
- (2) 木條距管口的垂直距離 S
- (3) 共鳴管的內直徑 D

2.探討 Δh 與 f 、 S 、 D 關係的實驗操作流程

- (1) 將木條置於最大響度的支撐位置上，以以小槌連續敲擊琴鍵，同時由管口向下調降共鳴管中的水位，找到第一個及第二個共鳴效果最佳的位置 X_1 、 X_2 。

- (2) 計算修正長度 Δh ：

$$\Delta h = \frac{1}{4}\lambda - X_1 = \frac{1}{4}\lambda - 2\Delta X = \frac{1}{2}(X_2 - X_1) - X_1$$

- (3) 以不同頻率 f 的木條，重複(1)、(2)，分析 Δh 與 f 的關係。

- (4) 固定木條的頻率，改變其在共鳴管上方的位置 S ，重複(1)、(2)，分析 Δh 與 S 的關係。

- (5) 固定木條的頻率及擺放位置，改變共鳴管的口徑 D ，重複(1)、(2)，分析 Δh 與 S 的關係。

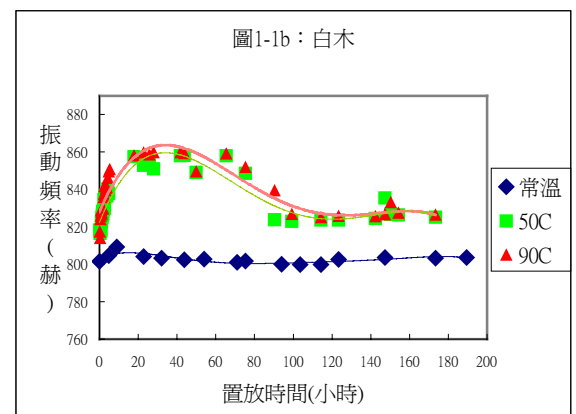
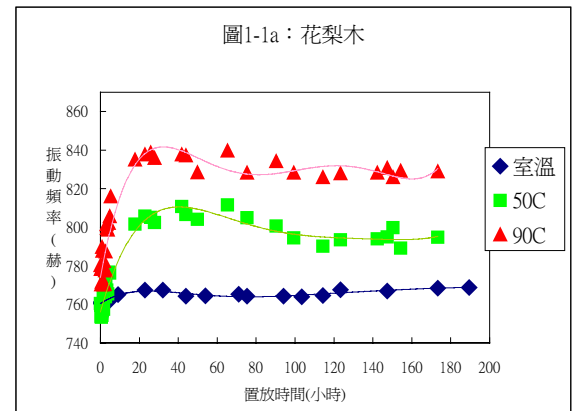


伍、研究結果

一、木材振動頻率穩定性的探討

花梨木及白木置放不同溫度環境中，所測的振動頻率如附錄〈表 1-1~1-3〉所示，將振動頻率隨置放時間的變化作成圖 1-1a 及 1-1b，由圖中可以看出：

1. 不管花梨木或白木，置放於室溫環境下，其振動頻率隨時間的起伏甚小。而且，隨著置放時間的加長，其振頻率有逐漸穩定的趨勢。
2. 不管花梨木或白木，當置放於高溫環境後，其振動頻率急速升高，而且隨時間的變化相當劇烈。由烘箱取出後(圖中置放時間>76 小時)，其振動頻率逐漸回降，隨置放時間的加長，其頻率也有漸趨穩定的趨勢，但仍有不規則的起伏。



3. 比較高溫及室溫的置放結果：若要木材的振動頻率穩定，在室溫下置放一段時間是比較好的選擇。

二、木材振動頻率與長寬厚度的關係

(一) 木材振動頻率 f 與長度 L 的關係

1. 不同長度木材的振動頻率測量結果如附錄〈表 2-1〉所示。將木材振動頻率 f 與木材長度 L 作成 f - L 的關係圖，如〈圖 2-1a〉所示，可以看出：不管是花梨木或白木，木材的長度愈長，其振動頻率愈低。

2. 若將振動頻率 f 與木材長度 L 改畫成 f - $1/L^2$ 的關係圖，如〈圖 1-1b〉所示，可以明顯地看出： f 與 $1/L^2$ 的關係為一條過原點的直線，即 振動頻率與長度的平方成反比：

$$f \propto 1/L^2$$

(二) 木材振動頻率 f 與厚度 H 的關係

不同厚度木材的振動頻率測量結果如附錄〈表 2-2〉所示。將振動頻率 f 與木材厚度 H 作成 f - H 的關係圖，如〈圖 2-2〉所示，可以看出：不管是花梨木或白木，木材的厚度愈厚，其振動頻率愈高。而且 f - H 的函數關係為一條通過原點的直線，即 振動頻率與厚度成正比：

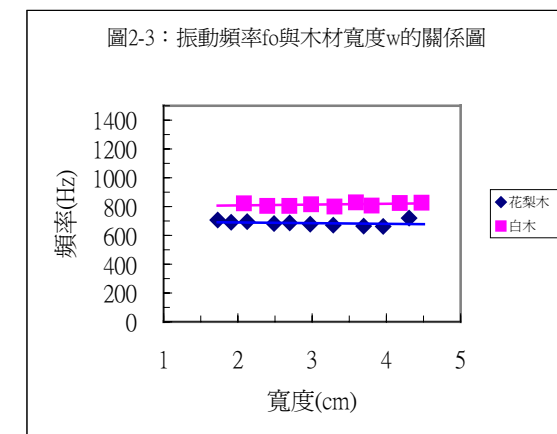
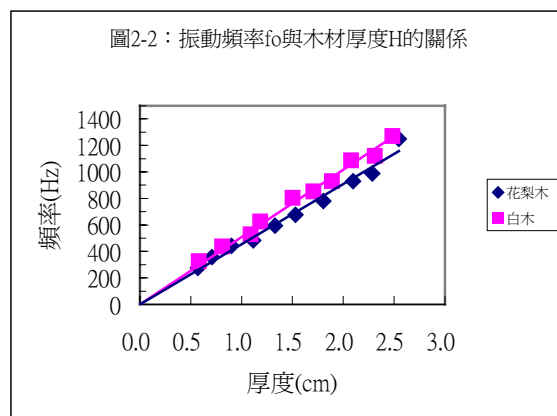
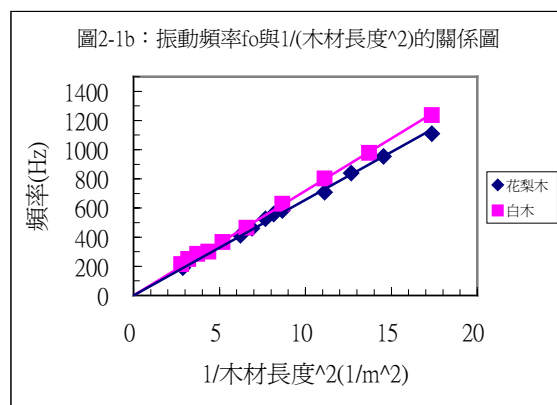
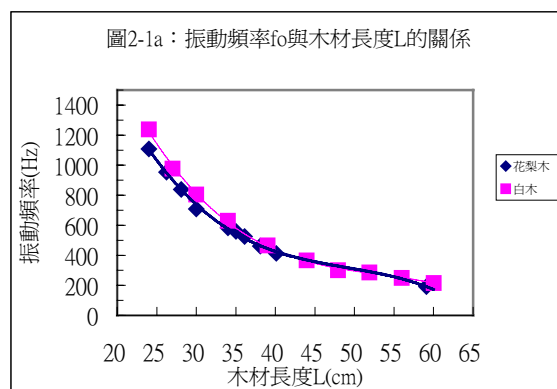
$$f \propto H$$

(三) 木材振動頻率 f 與寬度 W 的關係

不同寬度木材振動頻率的測量結果如附錄〈表 2-3〉所示。將振動頻率 f 與木材寬度 W 作成 f - W 的關係圖，如〈圖 2-3〉所示，可以看出：不管是花梨木或白木，木材的寬度對振動頻率的影響並不明顯，換言之：振動頻率幾乎與木材的寬度無關。

(四) 木材振動頻率與長寬厚度的關係

綜合（一）～（三）的結果，可以歸納出：木材的振動頻率與其厚度成



正比、與其長度的平方成反比，與其寬度無關。即

$$f \propto \frac{H}{L^2}。$$

可以關係式表示為：

$$f = K \frac{H}{L^2} \text{ ----- } \langle \text{公式一} \rangle$$

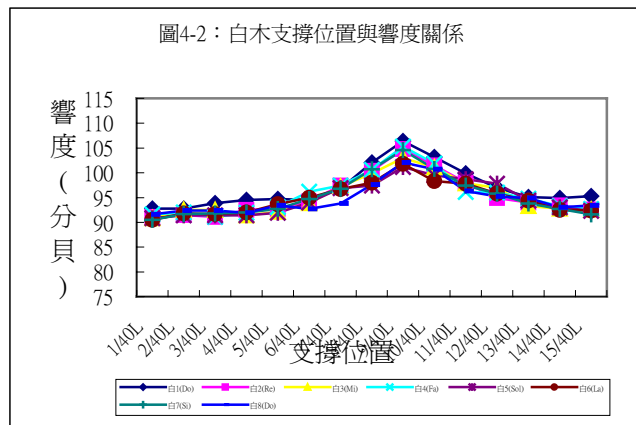
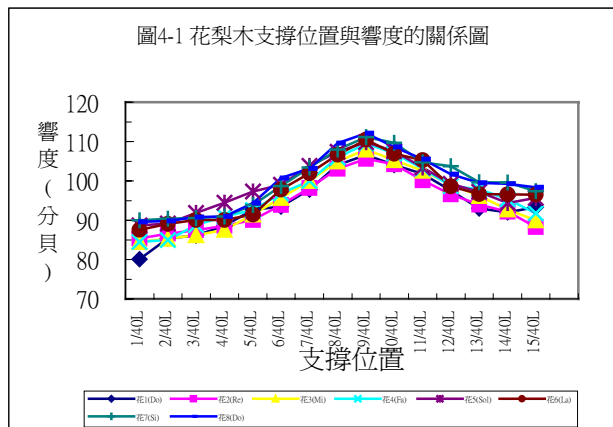
其中 K 為一比例常數。不同材質木材的 K 值不同，就〈表 1-1〉所示：花梨木與白木的 K 值分別約為 4.6×10^5 及 4.8×10^5 (Hz-cm)。

三、產生標準音頻木條的製作流程

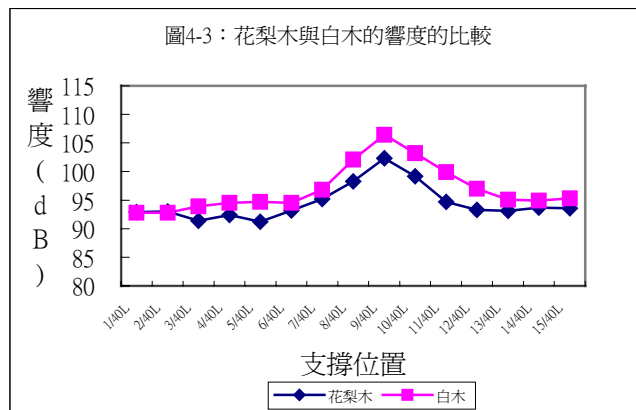
從測量原材的振動頻率 f_0 開始，藉由〈公式一〉的輔助，經初估長度與再推估長度的步驟，我們得以裁切出產生標準振動頻率的木條，其結果如附錄〈表 3-1〉所示。由表可以看出：不管是以聲頻分析法〈表 3-1〉或氣柱共鳴法〈表 3-2〉去評測完工後木條的振動頻率(f_s' 、 f_s^*)，其與標準頻率 f_s 間的偏差百分比皆在 1% 以下，顯示以我們的這種流程設計，可以製造出音高相當準確的木條來作為木琴琴鍵。

四、木材支撐位置對響度的影響

- (一) 在相同力道的敲擊下，置放於不同支撐位置的木材，其振動響度的測量結果如附錄〈表 4〉所示。〈圖 4-1〉〈圖 4-2〉分別是花梨木與白木的振動響度與支撐位置的關係圖，由圖可以明顯看出：不管是花梨木或白木，不管何種長度的木條，可以產生最大振動響度的支撐點皆位於距離端點 $9/40L$ 處 (L 為木條全長)。



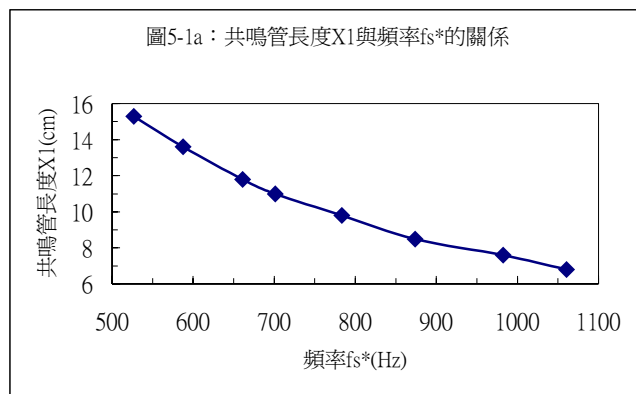
- (二) 以相同的力道的擊鍵，敲擊相同頻率的花梨木與白木作，其振動響度與支撐位置的關係圖如〈圖 4-3〉所示。兩者在 $9/40L$ 處皆有最大響度，而白木在各支撐點的響度皆較花梨木大。若單以響度的大小來



看，白木似乎較花梨木來得恰當。

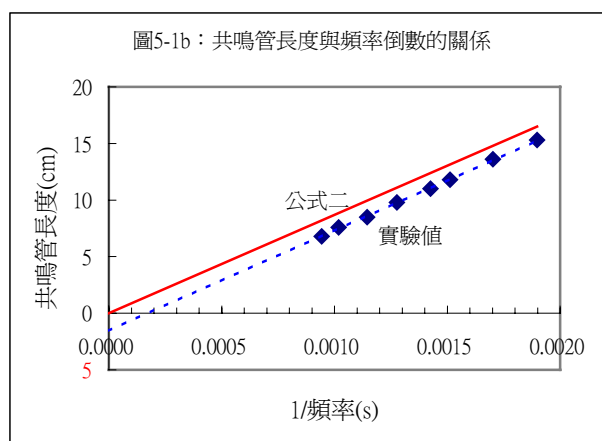
五、共鳴管長度的探討

- (一) 不同振動頻率 f 所對應的共鳴空氣柱長度 X_1 如附錄〈表 5-1〉所示。將 X_1 與 f 間的關係以〈圖 5-1a〉表示，可以發現：



振動頻率愈高的木條，所對應的共鳴空氣柱愈短。

- (二) 依實驗數據以及〈公式二〉理論數值作成的 X_1 與 $1/f$ 函數關係如〈圖 5-1b〉所示。由圖可以看出：理論組為通過原點的斜直線，而實驗組的斜率幾乎與之相同，將理論組的函數圖形在縱軸方向往下平移一段截距 Δh ，幾乎就是實驗組的圖形。換言之，實際共鳴管長度 X_1 與頻率 f 函數關係應修正為：



$$X_1 = \frac{V}{4} \cdot \frac{1}{f} - \Delta h = \frac{1}{4} \lambda - \Delta h \text{-----} \langle \text{公式三} \rangle$$

- (三) 我們探討了影響修正長度 Δh 的三個可能因素：波源的振動頻率 f 、波源距共鳴管口的距離 s 、共鳴管的直徑 D 。其結果如下：

1. 各種不同振動頻率 f 所測得的修正長度 Δh 如附錄〈表 5-1、2〉所示。 Δh 與 f 的函數關係如〈圖 5-2〉所示，由圖可以發現：振動頻率 f 對修正長度 Δh 的影響並不明顯。
2. 將振動木條與共鳴管間的距離 S 作改變後，所測得的 Δh 如附錄〈表 5-3〉所示。 Δh 與 S 的函數關係如〈圖 5-3〉所示，由圖可以發現：距離 S 對修正長度 Δh 的影響也不明顯。
3. 固定木條的振動頻率及擺放位置，不同內直徑 D 的共鳴管所測得 Δh 如〈表 5-4〉所示。 Δh 與 D 的函數關係如〈圖 5-4〉所示，由圖可以看出： D 愈大， Δh 隨之增加，而且兩

圖5-2:修正長度與頻率關係圖

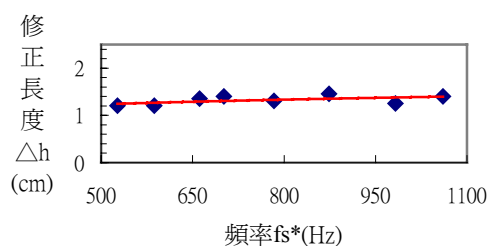
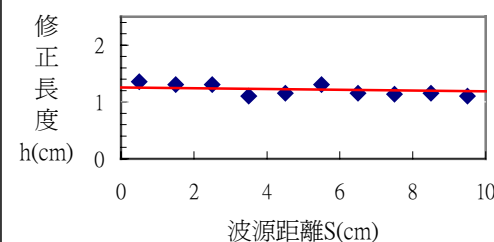


圖5-3:修正長度與波源距離關係圖

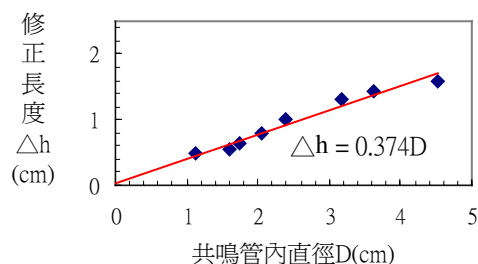


者間的函數關係近似一條通過原點的直線，即 Δh 與 D 成正比。其關係式為： $\Delta h = 0.37D$ 。

因此〈公式三〉可進一步表示為：

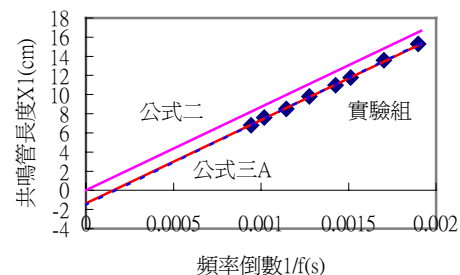
$$X_1 = \frac{1}{4}\lambda - 0.374D = \frac{1}{4}\frac{V}{f} - 0.374D \quad \text{--- 〈公式三 A〉}$$

圖5-4:修正長度與共鳴管口徑關係圖



4. 以〈公式三 A〉將 X_1 與 $1/f$ 的理論函數關係，與實驗組及〈公式二〉理論組值作比較，如〈圖 5-1c〉所示，可以看出：實驗組的函數關係幾與〈公式三 A〉的理論關係式預測吻合。

圖5-1c：共鳴管長度與頻率倒數的關係



六、木琴的組裝

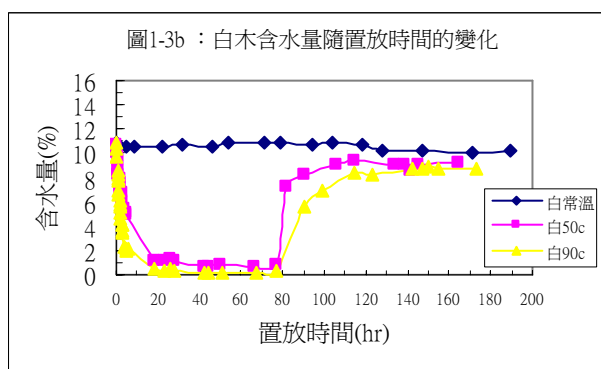
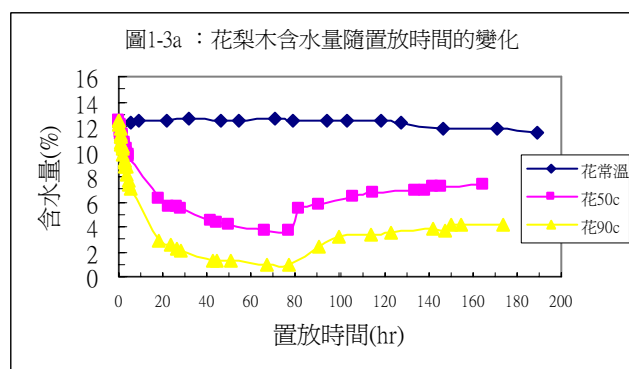
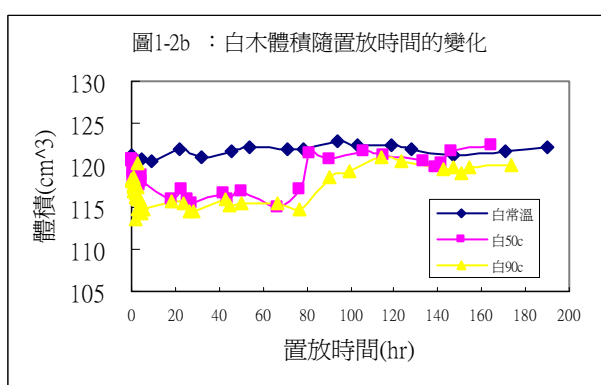
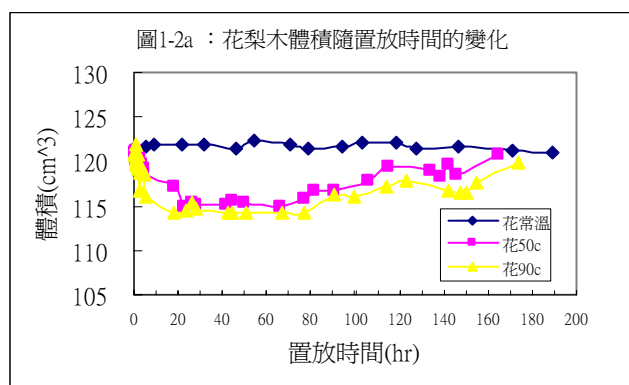
綜合以上的研究結果，調整兩支撐桿間距，將裁切好的木條置於響度最大的支撐點上。以裝水的玻璃杯作為共鳴管，調整水位高低，找出各木條對應的共鳴水位，將各對應共鳴水杯置於各木條下方，完成木琴的組合。



陸、討論

一、在高溫環境中的木材除了振動頻率產變化以外，是否還有其它物理量產生改變?這些物理量中，何者是造成振動頻率變化的主要原因?

1. 〈圖 1-2〉及〈圖 1-3〉分別是木材在置放過程中，其體積與含水量隨時間的變化情形。不論是花梨木或白木，置入高溫的環境時，其體積及含水量皆急劇減少，置回常溫環境中後(圖中時間>76 小時)，體積及含水量皆有逐漸回升的現象，其中體積大致可以回復至原狀，但含水量會比置放前來的減少。其中體積的變化，會影響〈公式一： $f=K \cdot H/L^2$ 〉中的 H/L^2 值，而木材含水量的變化，則可能造成木材內部材質的改變，而改變了〈公式一〉中的 K 值。因此置放過程中木材體積或含水量的改變，都有可能是頻率 f 變化的原因。



2. 〈圖 1-4〉是木材 K 值與含水量的函數關係圖，由圖可以發現：

木材的含水量 M 確實會對材料係數 K 產生影響， K 值隨含水量的增加而減少。對同一種木材而言，即使在不同溫度的環境下置放，其 K 值與 M 間的關係近似一次線性函數：

$$K = aM + b$$

其中 a 為關係圖的斜率，其值 <0 ; b 為關係圖縱軸的截距，代表木材絕乾時的材料係數值。

圖形中花梨木與白木的 a 值不同但 b 值很相近，依此推論：

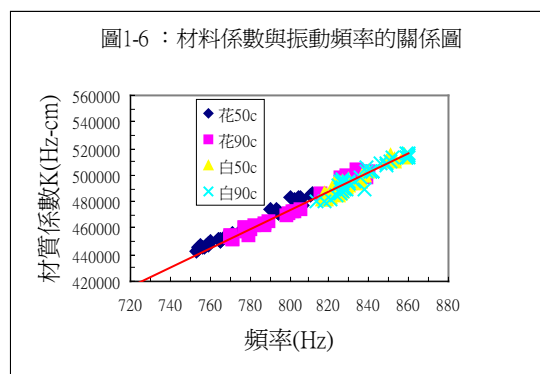
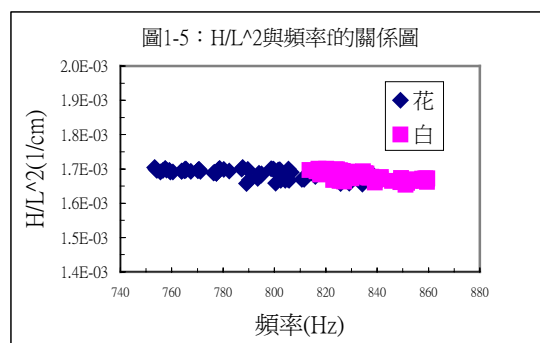
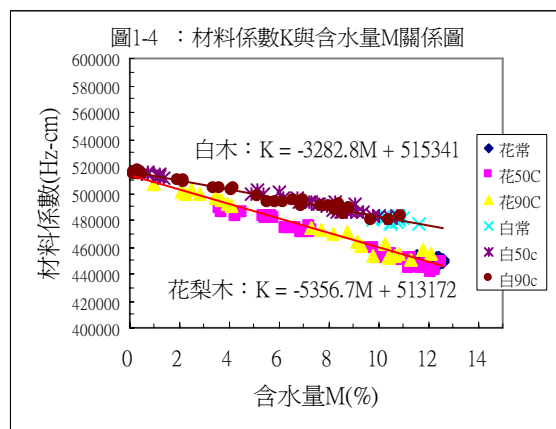
- (1) a 值可能與木材的種類有關，不同種類的木料， a 值不同。

(2) 花梨與白木的 b 值相近，表示兩者絕乾時有幾乎相同的材料係數。換言之，絕乾的花梨木與白木，其振動頻率只受形狀因素的影響，與其材質無關。

3. 爲了確認木材置放過程中造成振動頻率變化的主要原因，到底是形狀

變因、材質變因或是兩者兼具，依公式一： $f=K(H/L^2)$ ，我們將置放過程中的 H/L^2 值(形狀變因)及 K 值(材質變因)與振動頻率 f 的關係，分別作成如〈圖 1-5〉及〈圖 1-6〉所示。〈圖 1-5〉顯示：不管花梨木或白木，置放過程中不同頻率 f 所對應的 H/L^2 值幾爲定值；〈圖 1-6〉則顯示：置放過程中頻率 f 與 K 值間爲正比的線性關係。

綜合 1~3：置放於高溫環境下的木材，其振動頻率受形狀變異的影響很小，含水量改變導致內部材質變化才是頻率變化的主要原因。



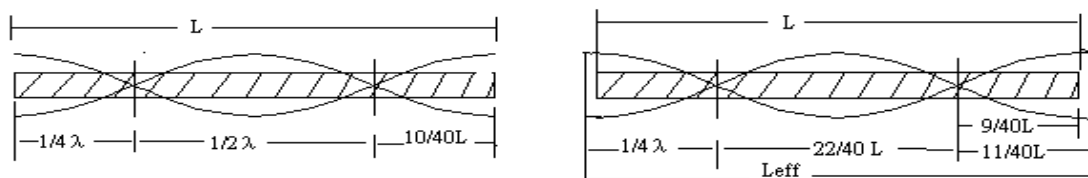
二、在製造標準音頻木條的過程中，是否一定要經歷兩次估算長度、裁切鍵長的步驟？

因爲當初考慮木材材質的均勻度不一定很理想，因此在估算木條長度的步驟中，經歷兩次估算、兩次裁切的步驟。其實若木材的質地夠均勻，原材長度與完工後長度間的差距也不太大，以估算長度一次、裁切一次的步驟，所製造出木條的振動頻率就已經很接近理想音頻了。以花梨木及白木爲例，前者的質地很均勻，因此以一次估算、一次裁切的步驟就可以，但後者的質地差異比較大，以兩次估算、兩次裁切的步驟，才能製造出理想音頻的木條。

三、木條最大響度的支撐位置在 $\frac{9}{40}L$ 處的意義何在？

依高中物理中「駐波」的概念(參考資料七、八)，木條振動時的駐波型態應該如下圖左所示：最大響度的支撐位置應出現在琴鍵振動時的節

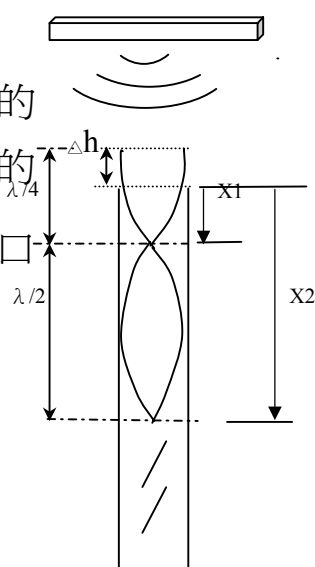
點處，其距離端點的長度應為 $\frac{1}{4}L$ ($\frac{10}{40}L$)。但實驗的結果顯示木條最大響度的支撐位置出現在距端點約 $\frac{9}{40}L$ 處，表示木條振動的駐波模式中，兩側的波腹位置並不是位於木條端點上，而是出現在端點外約 $\frac{2}{40}L$ 處(如下圖右)。因此木條振動時的駐波波長 Λ 與木條長度 L 間的關係式，應由 $[\Lambda=L]$ 修正為 $[\Lambda=L_{\text{eff}}]$ ，其中 $L_{\text{eff}} = \frac{44}{40}L = \frac{11}{10}L$ 。



四、實際共鳴管長度 $X_1 = \frac{1}{4}\lambda - \Delta h$ 的意義何在？

實驗發現共鳴空氣柱的長度 X_1 與聲波波長 λ 的關係為： $[X_1 = \frac{1}{4}\lambda - \Delta h]$ ，而非高中物理所描述的

$[X_1 = \frac{1}{4}\lambda]$ ，表示共鳴空氣柱駐波的波腹不在管口處，而是在距管口外 Δh 處，如右圖所示。



柒、結論

藉由木琴各部構造的研究，我們成功地發展出一套製造木琴的流程，從整個研製木琴的過程中，我們得到以下幾點結論：

一、 高溫環境下置放的木材，會因為含水量急劇減少，導致振動頻率升高與不穩定。若要木條有更穩定的振動頻率，將在室溫環境下置放一段時日，是比較好的選擇。

二、 木材的發音頻率與其長度、厚度有關，與琴鍵寬度無關。長度 L 愈短，厚度 H 愈厚，琴鍵的發音頻率 f 愈大。由實驗歸納出的關係式為：

$$f = K \times H / L^2$$

三、 木材的材質係數與木材的種類及含水量有關。同一種木材，含水量 M 愈高，材質係數 K 愈小，其函數關係近似於： $K=aM+b$ 。 $a<0$ ，其值由木材的種類決定；花梨木與白木的 b 值接近。

四、 藉由實驗歸納出木條振動頻率與其長度的關係式，可以準確推估標準頻率木條的長度，進而發展出製造正確音高的木琴琴鍵的裁切流程。

五、 木條的振動響度會隨支撐位置不同而改變，最大響度的支撐位置距離木條端點約為全長的 $9/40$ 。

六、 木琴的共鳴管長度 X_1 與木條的振動頻率 f 、共鳴管口徑 D 有關，與木條擺放距離無關。振動頻率愈高所對應的管長愈短，其函數關係為：

$$X_1 = \frac{v}{4f} - 0.374D$$

捌、參考資料

- 一、 陳文典.高中基礎物理.康熙出版社.
- 二、 陳文典.高中基礎物理教師手冊.康熙出版社.
- 三、 褚德三.高中基礎物理.龍騰文化事業公司.
- 四、 管傑雄等.高中基礎物理.三民書局.
- 五、 林明瑞.高中基礎物理.南一書局.
- 六、 林明瑞.高中物理實驗上冊,p1.南一書局.
- 七、 林明瑞.高中物質科學物理篇下冊.南一書局.
- 八、 林明瑞.高中物理上冊.南一書局.
- 九、 Bucur V. Acoustic of Wood. CRC press. Inc. p.52. 1995.
- 十、 <http://carini.physics.indiana.edu/P105S98/Standing-waves-in-pipes.html>

評語

實驗構思有創意，且能結合遊戲增加實驗過程的趣味性，若能增加樣本數，則實驗結果更具可信度。