

中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 物理科

佳作

最佳(鄉土)教材獎

030108

搗杵之音

學校名稱：南投縣立宏仁國民中學

作者：	指導老師：
國二 張叡珊	李學昌
國二 尤寶淑	李季篤
國二 張庭鳳	
國二 游子慧	

關鍵詞：杵音、響度分析、頻率分析

摘要

本研究分析布農族與邵族的杵音，發現杵音可分成四~六個音群(Do、Re、Mi、Sol、La、Si)，我們也探討了不同的變因(木頭種類、粗細、長短及溼度)，對於杵音響度及頻率的影響，並且利用科學化分析，成功地自製縮小版杵音及麻竹版杵音，可以改善原本只憑原住民耆老經驗製造杵音的誤差，並利用”木頭音響學”中 Young 的公式『 $E = [4\pi^2 L^4 \rho (fn)^2 A] / K_i^4$ 』，來計算杵音頻率的理論值，結果我們發現杵音頻率的實驗值與理論值，有正相關；同時以竹籤與乒乓球及彩蛋創造出迷你版的可調頻式杵音，來增加原住民音樂的多元性，達到推廣原住民文化的目標。

壹、研究動機

傳說邵族勇士在外打獵，直到要過年時，族裡的人使用杵敲打聲音，提醒勇士要過年了。布農族杵音是慶豐收時，用杵來搗米用的，所以我們決定探討杵音的奧秘，但是原住民杵音的木頭都非常巨大，所以我們決定要製作小型的杵音。然後我們詢問耆老及原住民音樂舞蹈家（阿克）得到邵族是使用七根杵，布農族是使用四根杵的答案，而這其中的音調與音色竟是憑著耆老的感覺來選擇木頭及製作杵音，於是引發我們決定探討有關杵音的奧秘。



貳、研究目的

1. 探討適合杵音的木頭。
2. 探討不同長度、直徑、形狀及溼度對杵音的影響。
3. 以理論探討握住杵不同位置(節點)敲擊對頻率的影響。
4. 以微觀角度探討木頭的振動頻率與彈性係數及密度關係。
5. 研究邵族、布農族杵音並且自製杵音，並且與理論值比較。
6. 研究以麻竹當材質自製竹子版杵音。
7. 自製作迷你版可調頻杵音。
8. 以自製杵音合奏出美妙的杵音。

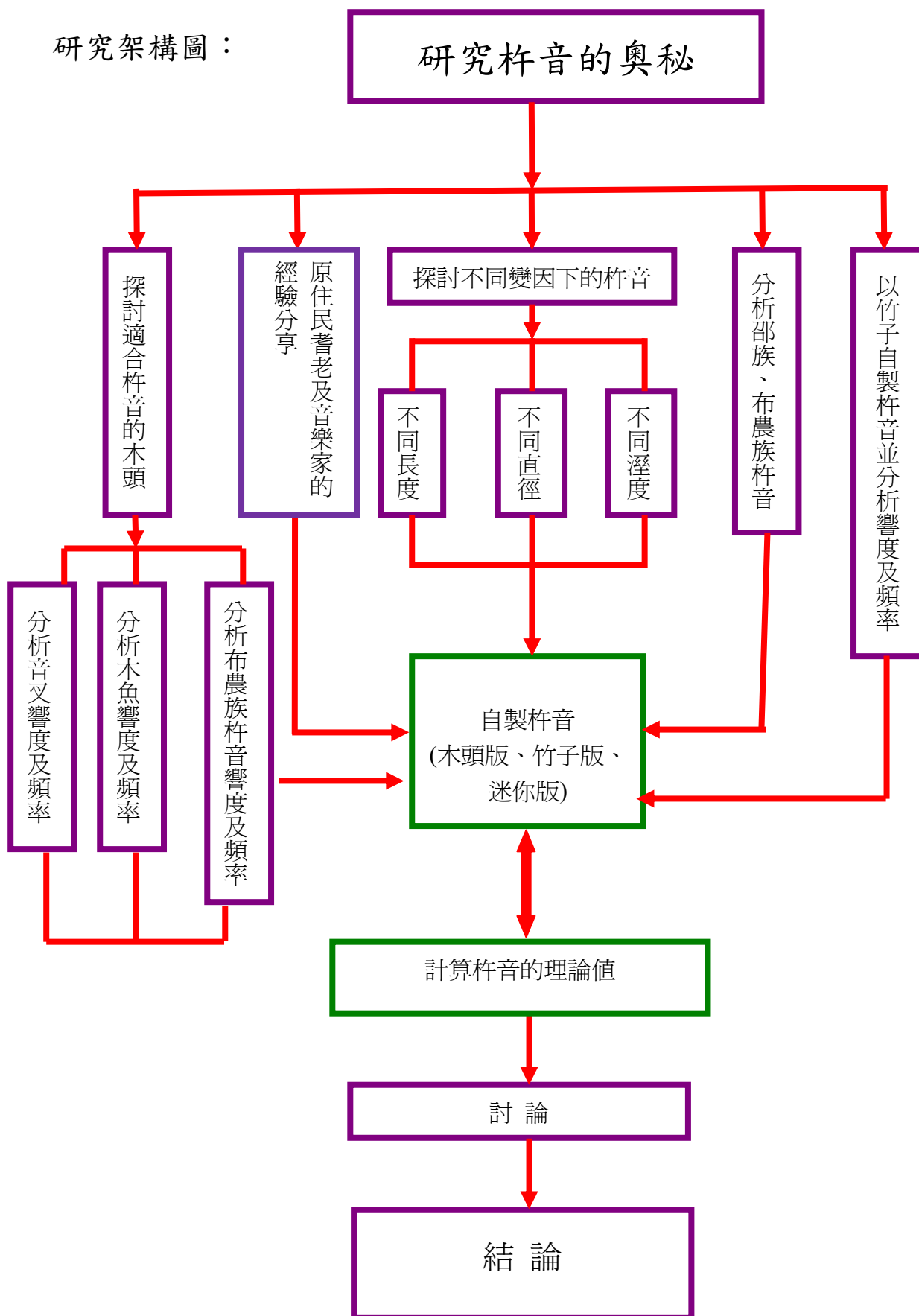
參、研究設備與器材

表 1：研究設備及器材

木頭材質	鋸木頭器材	分析杵音的工具	觀察細胞壁的器具
李木	鋸台	分貝機	顯微鏡
杉木	皮尺	電腦	載波片
松木	手工木工車床	攝影機	蓋波片
樟木	平面砂布輪	錄音筆	亞甲藍液
櫟木	測量力道的工具	隨身碟	美工刀
橡木	磅秤	Cool Edit 2000〈頻率分析軟體〉	
橡膠木	毛巾	相機	
麻竹		磅秤	

肆、研究過程與方法

研究架構圖：



前言：

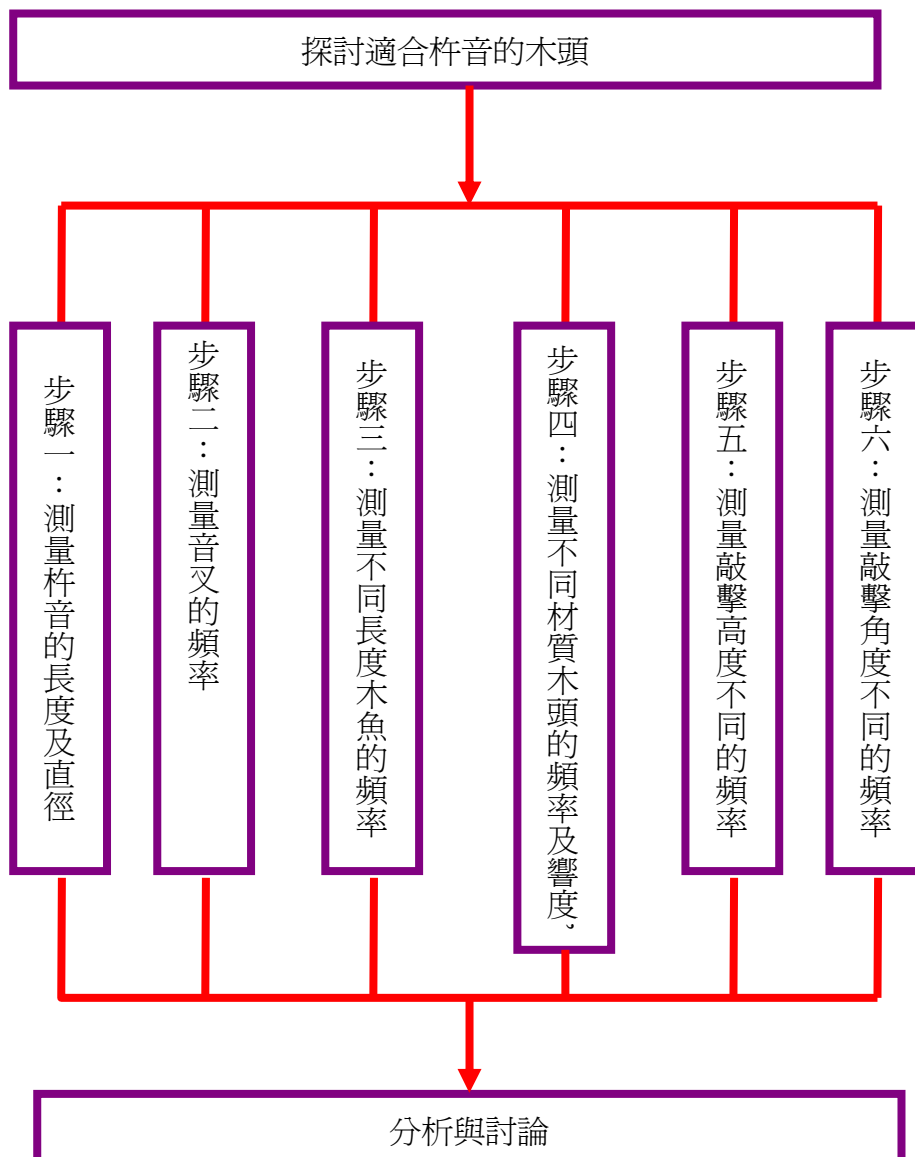
木杵是布農族與日月潭邵族特有的樂器，通常由六至七根長短不同的木杵，交替在石板上敲擊，藉著不同音階演奏出優美的旋律。木杵因為本身的大小不同，故敲打時會產生各種不同的聲響。

過去曾經用於實用上，也就是把粟米置於石板上，藉著木杵的敲擊使之脫殼，如今已完全當純粹的樂器演奏。布農族木杵的演奏，通常在六到十枝木杵的合奏。木杵演奏時，一定圍成圓圈，男女不拘，演奏者左手在上，握住木杵中間部份上端，右手則執下端。開始時一定先由一位演奏者（過去一定是祭司 lisigulusan）敲擊石板四次之後，大家再依一定的模式此起彼落的在時間差之內演奏，因此而產生複音及複節奏的現象。

木杵在傳統的布農族社會中，每當部落中即將舉行重大的祭儀活動前，族人會聚集在一起搗米以準備製作小米酒。因為以杵擊臼的緣故，發現木杵有一定的規律與節奏，因而將其做為一種合奏的樂器。每當族人聽到木杵擊打的聲音傳出來的時候，就說明最近聚落中即將舉辦慶典，杵音也因而具有傳遞訊息的功能。

研究一：探討適合杵音的木頭

流程圖：



步驟一：測量杵音的長度及直徑

(一)方法：測量布農族族杵的長度及直徑。

(二)結果：

表 2：布農族的四根杵				
編號	長度 (cm)	粗細 (直徑)	頻率 (HZ)	響度 (dB)
一	225 (最長)	12	498.0~533.0	91.2
二	186.5 (第二長)	7.5	549.0~589.0	94.5
三	169 (第三長)	11	620.0~667.0	92.6
四	167 (最短)	10	700.0~792.0	92.8

(三)討論：

1.我們得到木頭的長度與直徑比大約為 10~20。

2.由表中發現木頭的粗細、長短都會影響頻率的高低，但響度並不會差很多。

步驟二：測量音叉的頻率



說明：三根音叉



說明：敲擊有共鳴箱的銀色音叉



說明：敲擊有共鳴箱的黑色音叉



說明：敲擊無共鳴箱的音叉

(一)方法：取兩種不同頻率的音叉，以 Cool Edit 分析其頻率及響度。

(二)結果：

表 3：測量音叉的頻率					
項目	頻率 (HZ)	第一次響度 (dB)	第一次響度 (dB)	第三次響度 (dB)	平均響度 (dB)
有共鳴箱銀色的音叉	361.5~361.7	107.4	102.8	101.2	103.8
有共鳴箱黑色的音叉	371.1~371.7	104.2	102.8	104.1	103.7
無共鳴箱的音叉	326.9~326.9	74.8	70.1	72.6	72.5

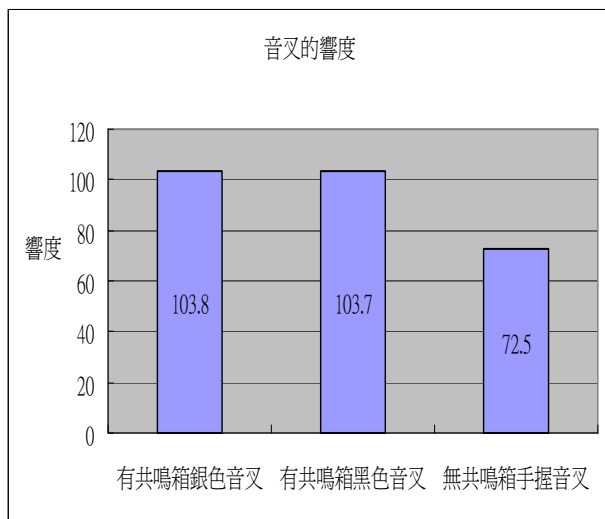


圖 1 說明：音叉的響度

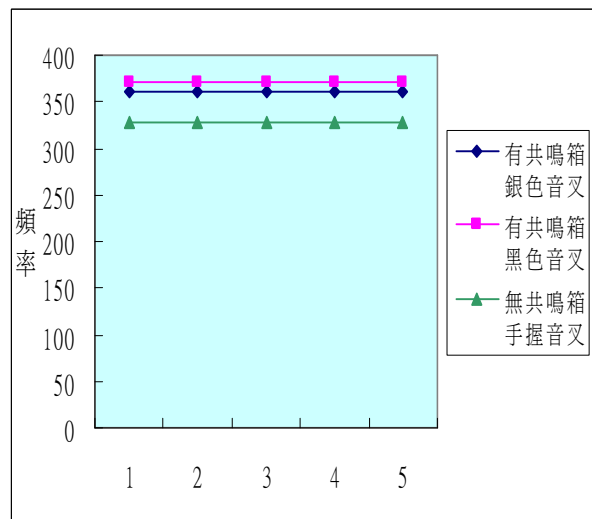


圖 2 說明：音叉的頻率關係圖

(三)討論：

- 1.音叉有共鳴箱和無共鳴箱的頻率沒有太大的差別。
- 2.不同音叉的頻率不同，但單一音叉的頻率變化不大，約 326~371Hz。
- 3.有共鳴箱的響度比無共鳴箱的響度大 30dB，能量大約大三倍。

步驟三：測量不同長度木魚的頻率



說明：敲擊在較長的木魚上



說明：敲擊在較短的木魚上

(一)方法：將木魚敲擊完的聲音錄下來，再分析其頻率及響度

(二)結果：

表 4：測量不同長度木魚的頻率及響度					
項目	頻率 (HZ)	第一次響度 (dB)	第二次響度 (dB)	第三次響度 (dB)	平均響度 (dB)
較長的木魚	1215.8~1300.8	65.8	61.9	63.1	63.6
較短的木魚	1431.0~1491.9	62.8	65.7	67.5	65.3

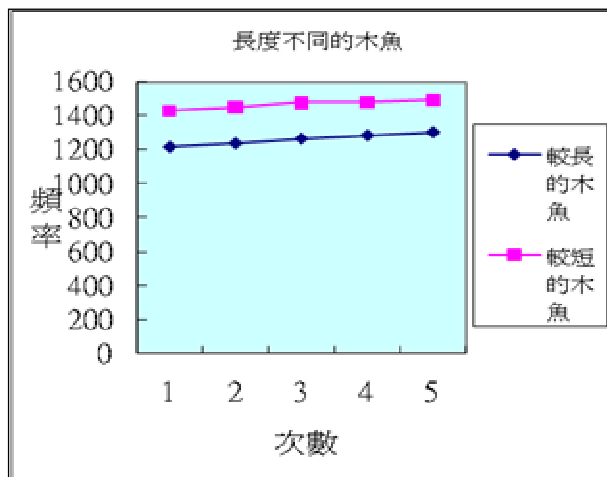
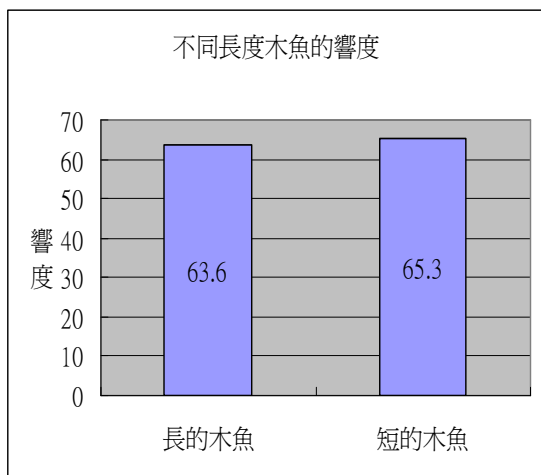


圖 3 說明：不同長度木魚的響度關係

圖 4 說明：不同長度木魚的響度關係

- 1.結果發現木魚長度愈短頻率愈高，木魚長度愈長頻率愈低。
- 2.木魚的長度對響度影響不大，而是敲擊力道才會影響響度。

步驟四：測量不同材質木頭的頻率及響度



說明：挑選七種木頭



說明：每次敲擊力道為 5kgw

(一)方法：

- 1.先找出七種不同材質的木頭。
- 2.測量出相同的長度及直徑。
- 3.分析在大理石地板上以相同的力度敲出的頻率及響度。
- 4.以磅秤測量敲擊力道，每次敲擊力量維持在 5 kgw。

(二)結果

(1)波形圖：如附錄（五）

表 5：七根不同材質的乾木頭頻率及響度					
編號	材質	長度 (cm)	粗細 (直徑)	敲擊三次頻率的平均範圍 (HZ)	敲擊三次的平均響度 (dB)
A	李木	60	6	808.5~1101.4	67.1
B	杉木	60	6	741.8~1062.2	71.0
C	松木	60	6	802.8~806.0	66.1
D	樟木	60	6	1112.4~1132.8	73.8
E	櫟木	60	6	609.9~699.4	63.3
F	橡木	60	6	1504.2~1567.7	65.5
G	橡膠木	60	6	1606.0~1662.8	65.9

(三)討論：

1.經由分析的結果：

(1)最高頻率值：橡膠木>橡木>樟木>李木>松木>杉木>櫟木

(2)最低頻率值：橡膠木>橡木>樟木>李木>松木>杉木>櫟木

2.本實驗將木頭從一般杵音 180~220 公分，縮短成 60 公分，因此分析頻率時，都較為偏高。請原住民音樂工作室的老師—阿克老師聽過後，他給我們的建議是：

(1)松木的音色可當第一根，但是音要低兩個全音。

(2)櫟木的音色可當第二根，但是音要低一個全音。

(3)樟木及橡木的音色可當第三根，但是音要低三個全音。

(4)橡膠木的音色可當第四根，但是音要低三個全音。

3.我們選擇櫟木、橡木、橡膠木及松木的原因是：

因為這四根木頭的密度比較集中、頻率比較穩定，而李木、杉木頻率分布較廣，較不適合當杵音，另外樟木較不易取得，因此我們以松木、櫟木、橡木、橡膠木四種木頭來進行後續的研究。

4.本研究木頭杵音的頻率分析以基音為主，因為杵音演出時是 4~8 人，同時合奏時，基音會加強，泛音影響較小。

步驟五：測量敲擊高度不同的頻率



說明：敲擊高度為 10 公分



說明：敲擊高度為 20 公分



說明：敲擊高度為 30 公分



說明：敲擊高度為 40 公分

(一)方法：

- 1.先用尺測量我們想要的高度。
- 2.再將我們需要的高度做記號。
- 3.進行敲擊工作、錄音及記錄響度。
- 4.將錄到的音進行分析後，得下表。

(二)結果：

1.響度分析

表 6：不同敲擊高度的響度比較				
木頭種類	檫木	松木	橡木	橡膠木
敲擊高度 〈cm〉	敲擊三次的 平均響度	敲擊三次的 平均響度	敲擊三次的 平均響度	敲擊三次的 平均響度
10 公分	66.6	67.3	66.1	65.9
20 公分	67.6	71.2	67.6	70.6
30 公分	69.8	72.8	68.3	71.3
40 公分	74.0	73.4	70.8	72.2

2.頻率分析

表 7：不同敲擊高度的頻率比較				
木頭種類	松木	檫木	橡木	橡膠木
敲擊高度 〈cm〉	敲擊三次頻率的 平均範圍	敲擊三次頻率的 平均範圍	敲擊三次頻率的 平均範圍	敲擊三次頻率的 平均範圍
10 公分	802.8~806.1	609.9~699.4	1504.2~1567.7	1606.0~1662.8
20 公分	836.7~878.1	698.8~718.1	1545.8~1599.3	1608.0~1684.8
30 公分	854.9~895.9	641.2~687.4	1524.7~1556.5	1611.1~1685.8
40 公分	817.7~886.2	715.6~748.1	1585.1~1599.3	1630.0~1696.5

(1)響度圖、頻率圖：如附錄（八）

(三)討論：

1.由頻率分析發現敲擊的高度對頻率的影響不大。

2.由響度分析發現敲擊高度愈高，響度就會愈大聲；敲擊高度愈低，響度就會愈小聲。

步驟六：測量敲擊角度不同的頻率



說明：敲擊角度為 90 度



說明：敲擊角度為 60 度



說明：敲擊角度為 45 度



說明：敲擊高度為 30 度

(一)方法：

- 1.維持敲擊高度為 10 公分
- 2.再用量角器測量我們要的的角度。
- 3.依照量角器進行敲擊工作、錄音及記錄響度。

(二)結果：

1.響度分析

表 8：敲擊角度不同地響度分析				
木頭材質	松木	櫟木	橡木	橡膠木
敲擊角度	敲擊三次的 平均響度	敲擊三次的 平均響度	敲擊三次的 平均響度	敲擊三次的 平均響度
30 度	66.7	68.2	65.8	64.5
45 度	66.8	70.6	68.5	65.4
60 度	69.0	71.0	73.0	66.2
90 度	70.6	73.0	74.0	73.0

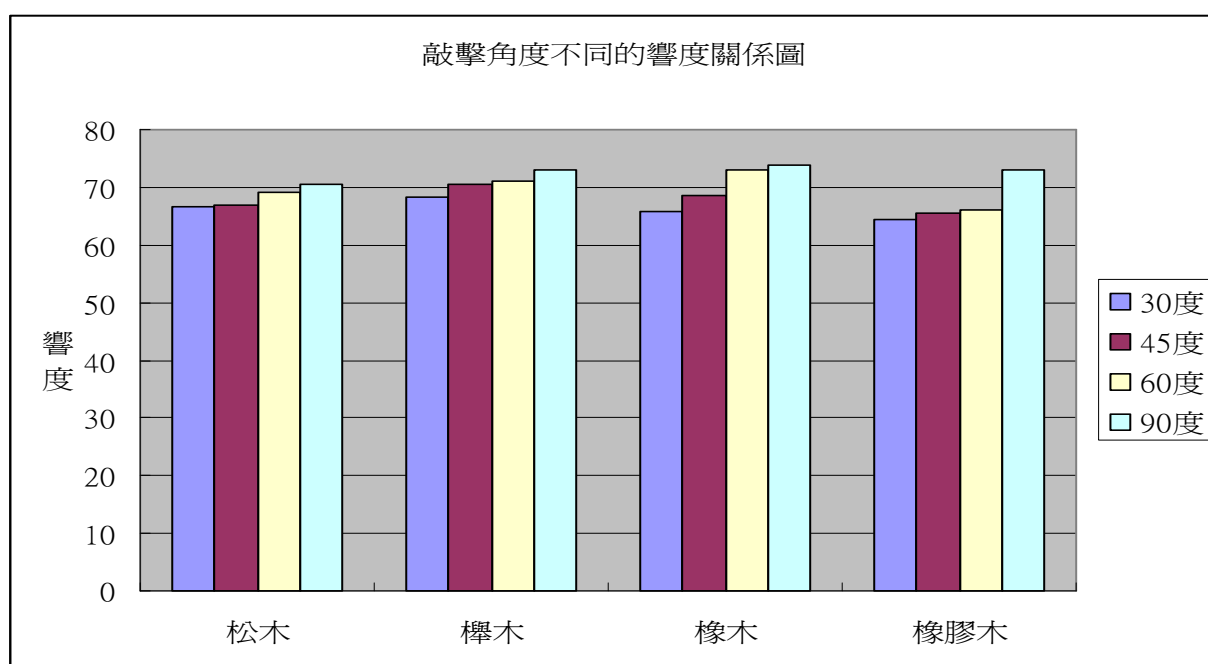


圖 5 說明：敲擊角度不同的響度關係圖

2.頻率分析

表 9：敲擊角度不同的頻率分析

材質 角度	松木	櫟木	橡木	橡膠木
	敲擊三次 頻率的平均範圍	敲擊三次 頻率的平均範圍	敲擊三次 頻率的平均範圍	敲擊三次 頻率的平均範圍
30 度	707.3~744.1	569.2~715.8	1699.6~1745.7	1690.8~1753.2
45 度	718.1~765.1	607.8~620.2	1569.6~1622.7	1526.2~1642.5
60 度	700.8~749.3	573.6~589.8	1517.7~1598.8	1515.7~1631.1
90 度	701.7~759.8	550.0~613.2	1504.2~1567.7	1561.9~1600.3

(1)頻率圖：如附錄（十二）

(三)討論：

- 1.不同木頭敲擊角度愈大，響度愈大，但是頻率差異不大。

研究二：探討不同地板對杵音的影響

步驟一：探討不同地板的頻率與響度



說明：木頭敲擊在大理石地板上



說明：木頭敲擊在泥巴地上



說明：木頭敲擊在地磚上



說明：木頭敲擊在柏油路上

(一)方法：

- 1.使用研究一鋸完的木頭，到校園中尋找不同的地板，進行敲擊工作。
- 2.再將錄到的聲音，進行分析工作。
- 3.最後就將所分析出的頻率，製作成如下的表。

(二)結果：

1.響度分析

表 10：比較不同敲擊地板的響度				
材質	大理石	泥巴地	地磚	柏油路
敲擊三次平均響度(dB)				
李木	97.0	74.0	85.7	78.2
杉木	81.8	61.4	78.9	70.2
松木	67.8	60.6	65.5	64.3
樟木	84.4	65.4	80.5	69.6
櫟木	70.4	61.7	67.2	65.1
橡木	70.6	65.7	70.1	68.2
橡膠木	69.4	66.4	69.2	65.9

2.頻率分析

表 11：比較不同敲擊地板的頻率				
敲擊三次頻率範圍(Hz)				
材質	大理石	泥巴地	地磚	柏油路
李木	808.5~1101.4	546.0~593.6	999.7~1043.8	715.1~834.2
杉木	741.8~1062.2	664.5~762.2	1522.1~1643.3	908.0~1009.7
松木	802.8~806.0	700.0~741.5	827.4~844.0	742.1~748.2
樟木	1112.4~1132.8	834.5~846.1	1089.6~1108.3	1066.0~1084.7
櫟木	609.9~699.4	484.2~576.0	691.9~716.0	574.2~609.5
橡木	1504.2~1567.7	1176.5~1357.5	1657.4~1668.7	1415.0~1429.3
橡膠木	1606.0~1662.8	1387.1~1406.5	1622.2~1696.6	1495.3~1502.3

(1)響度圖、頻率圖：如附錄（九）

(三)討論：

- 1.由響度分析發現，當木頭敲擊在泥巴地上的響度平均為 65(dB)，大約小於其他木頭 10(dB)；而大理石的響度是最大聲的、接著是地磚、柏油路，最後才是泥巴地。
- 2.由頻率分析發現，當木頭敲在地磚的頻率為最高，接著是大理石，再來是柏油路，但差異不大，但敲在泥巴地上頻率低 100~200(Hz)。

步驟二：探討不同濕地板的頻率與響度



說明：木頭敲擊在濕的大理石上



說明：木頭敲擊在濕的泥巴地上



說明：木頭敲擊在濕的地磚上



說明：木頭敲擊在濕的柏油路上

(一)方法：

- 1.遇到下雨天，把木頭帶到戶外進行錄製工作。
- 2.或者將水灑到地板上，進行敲擊工作。

(二)結果：響度圖、頻率圖：如附錄（十）

1.響度分析

表 12：比較不同敲擊濕地板的響度				
材質	濕的大理石	濕的泥巴地	濕的地磚	濕的柏油路
敲擊三次平均響度〈dB〉				
李木	85.1	66.6	80.3	69.4
杉木	87.2	64.5	85.8	67.4
松木	81.3	67.3	81.1	72.0
樟木	84.0	62.3	83.3	65.5
櫟木	83.6	69.8	78.8	71.4
橡木	79.4	63.6	76.8	71.7
橡膠木	78.4	63.8	77.7	71.5

2.頻率分析

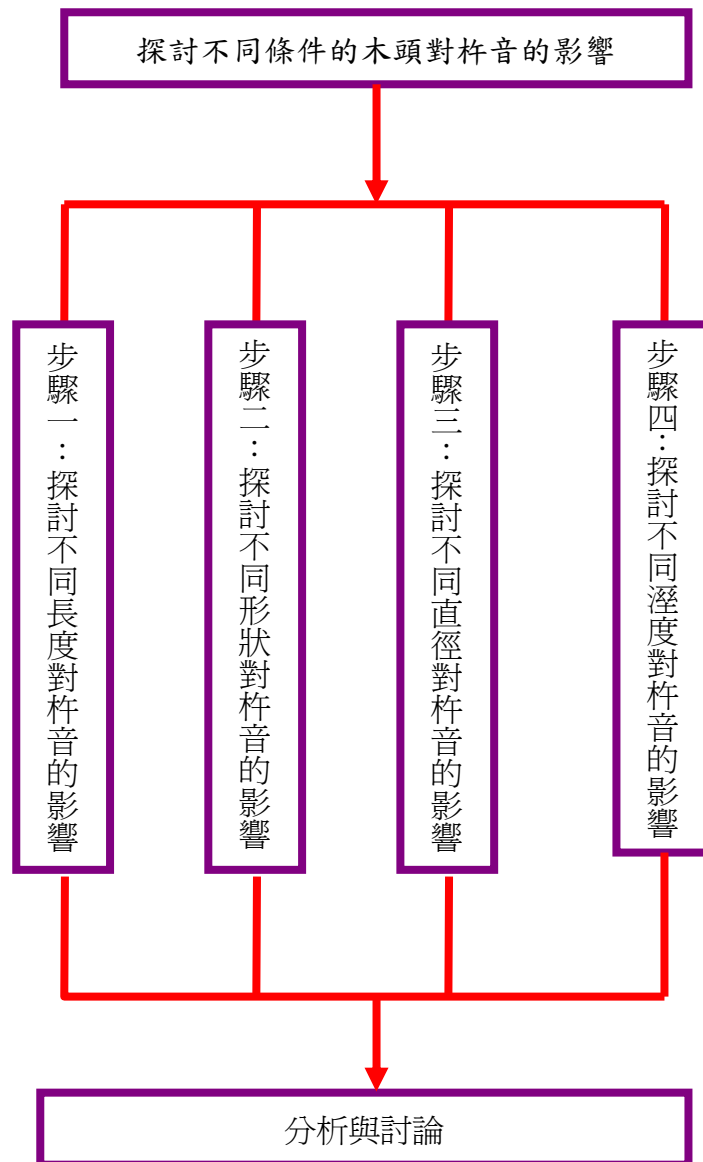
表 13：比較不同敲擊濕地板的頻率				
敲擊三次頻率範圍〈Hz〉				
材質	濕的大理石	濕的泥巴地	濕的地磚	濕的柏油路
李木	597.3~805.6	140.5~396.5	670.1~833.5	674.8~746.3
杉木	935.3~1319.5	327.5~553.6	1474.1~1481.9	762.2~773.9
松木	702.7~762.7	423.8~492.2	741.9~785.9	625.1~704.6
樟木	987.1~1058.2	578.0~592.1	812.2~853.8	934.5~936.3
櫟木	319.3~328.5	101.1~165.6	585.7~636.4	346.4~376.0
橡木	1280.6~1430.6	924.8~1025.2	1342.2~1388.0	1248.0~1274.0
橡膠木	1564.8~1686.5	919.1~1213.8	1385.3~1559.2	1294.0~1322.0

(三)討論：

- 1.由頻率分析發現，木頭敲擊在濕的地方，頻率比敲擊在乾的地方還要低 200~300(Hz)。
- 2.由響度分析發現，木頭敲擊在溼的地方，響度比敲擊在乾的地方還要小 5~10(dB)。

研究三：探討不同條件的木頭對杵音的影響

流程圖：



步驟一：探討不同長度對杵音的影響



說明：一組長短不同的木頭



說明：60 公分的木頭



說明：三十公分的木頭



說明：六公分的木頭

(一)方法：

- 1.利用研究一分析後的結果決定使用櫟木、松木、橡木及橡膠木，再下去做其他變因。
- 2.測量出不同的長度，粗細維持與研究一相同，並測量三次其頻率及響度。

(二)結果：響度圖、頻率圖：如附錄（十三）

表 14：櫟木不同長度的頻率及響度

編號	長度 (cm)	材質	粗細 (直徑)	敲擊三次頻率 的平均範圍 (HZ)	敲擊三次的 平均響度 (dB)
1	60	櫟木	6	609.9~699.4	66.8
2	30	櫟木	6	640.1~720.1	69.4
3	6	櫟木	6	655.1~795.2	72.8

表 15：松木不同長度的頻率及響度

編號	長度 (cm)	材質	粗細 (直徑)	敲擊三次頻率 的平均範圍 (HZ)	敲擊三次的 平均響度 (dB)
1	60	松木	6	701.5~742.8	66.1
2	30	松木	6	831.9~993.1	67.8
3	6	松木	6	882.2~1059.1	74.4

表 16：橡木不同長度的頻率及響度

編號	長度 (cm)	材質	粗細 (直徑)	敲擊三次頻率 的平均範圍 (HZ)	敲擊三次的 平均響度 (dB)
1	60	橡木	6	1504.1~1567.1	65.5
2	30	橡木	6	1678.3~1684.5	67.4
3	6	橡木	6	1746.4~1785.1	68.7

表 17：橡膠木不同長度的頻率及響度

編號	長度 (cm)	材質	粗細 (直徑)	敲擊三次頻率的平均範圍 (HZ)	敲擊三次的平均響度 (dB)
1	60	橡膠木	6	1606.1~1662.5	65.9
2	30	橡膠木	6	1684.2~1692.3	66.7
3	6	橡膠木	6	1785.4~1794.5	68.5

(三)討論：

- 1.由頻率發現櫟木、松木、橡木、橡膠木的長度愈短，頻率愈高；反之，頻率則愈低。
- 2.由響度分析四種木頭長度愈長，響度愈大；反之，響度則愈小。

步驟二：探討形狀對杵音的影響

(一)方法：

- 1.利用杵狀及圓筒狀木頭在大理石地板上進行敲擊工作。
- 2.記錄響度，分析頻率，得下表。

(二)結果：

表 18：杵狀與圓筒狀對杵的影響

材質	形狀	長度 (cm)	直徑 (cm)	敲擊三次頻率範圍 (Hz)	敲擊三次平均響度 (dB)
櫟木	杵狀	60	6	745.5~974.5	73.2
松木	杵狀	60	6	616.3~849.8	77.1
橡木	杵狀	60	6	1503.8~1567.7	76.2
橡膠木	杵狀	60	6	1549.9~1607.0	75.4
櫟木	圓筒狀	60	6	609.9~699.4	63.3
松木	圓筒狀	60	6	802.8~806.0	66.1
橡木	圓筒狀	60	6	1504.2~1567.7	65.5
橡膠木	圓筒狀	60	6	1606.0~1662.8	65.9

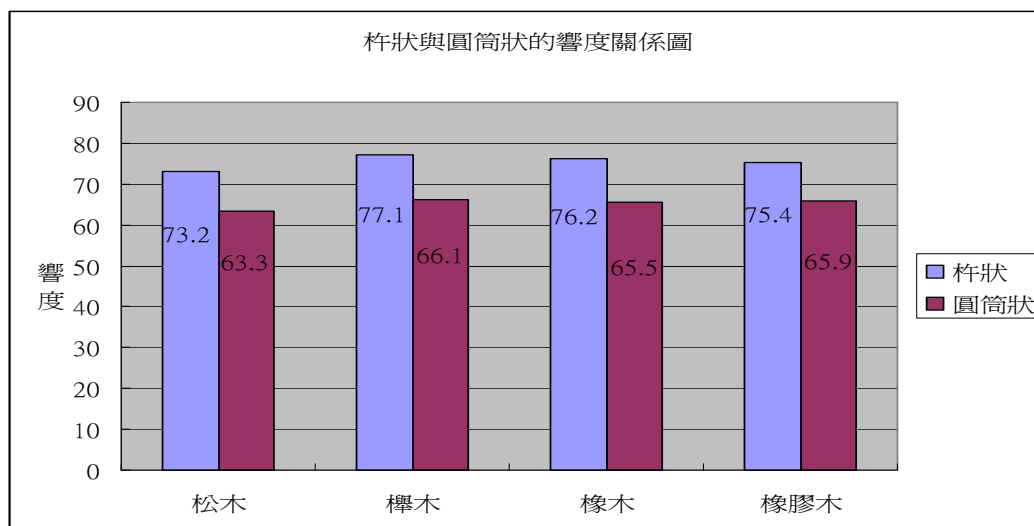


圖 6 說明：杵狀與圓筒狀的響度關係

(三)討論：

- 1.由響度分析，杵狀的響度比圓筒狀大約大 10(dB)。
- 2.由頻率分析，杵狀與圓筒狀差異不大。

步驟三：不同直徑的木頭對杵音的影響

(一)方法：

- 1.利用研究一選出的四種木頭，將長度增加為 100 公分。
- 2.再分別做出三種粗細不同的木頭。
- 3.將這些木頭進行頻率分析及分貝測量，得到下表

(二)結果：響度圖、頻率圖：如附錄（十三）、（十四）

表 19：不同直徑的頻率及響度								
木頭材質 不同粗細	櫟木		松木		橡木		橡膠木	
	三次 平均響度	三次 頻率範圍	三次 平均響度	三次 頻率範圍	三次 平均響度	三次 頻率範圍	三次 平均響度	三次 頻率範圍
9 公分	73.6	648.6~ 823.1	85.8	893.9~ 915.4	73.3	714.2~ 851.7	66.7	714.2~ 891.7
7 公分	67.4	852.3~ 933.2	86.3	994.6~ 1026.4	68.2	851.7~ 916.1	67.6	853.5~ 898.9
3.5 公分	84.4	1199.4~ 1219.4	82.8	998.5~ 1558.6	66.4	1134.4~ 1235.0	65.7	1301.9~ 1327.0

(三)討論：

- 1.由頻率分析發現，相同材質，木頭直徑愈小，頻率愈高。
- 2.由響度分析發現，不同材質敲擊的響度以松木較大聲，橡膠木較小聲，但同材質不同直徑間敲擊響度差異不大。

步驟四：探討濕木頭的頻率及響度

(一)方法：

- 1.將不同的木頭浸入水中 20 分鐘後取出，進行敲擊工作，並測量其頻率及響度。

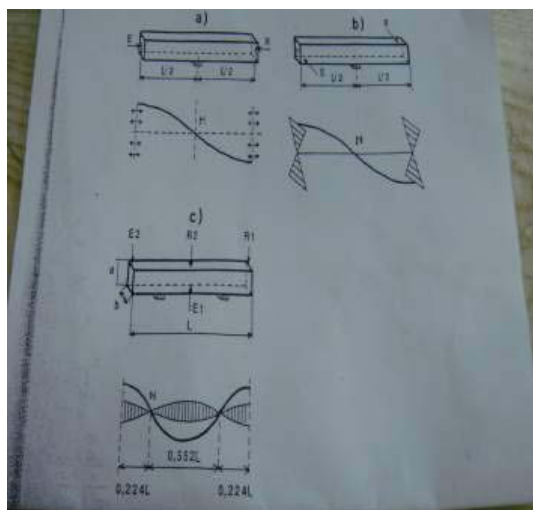
(二)結果：響度圖、頻率圖：如附錄（十五）

表 20：七根不同材質的溼木頭頻率及響度					
編號	材質	長度 (cm)	粗細 (直徑)	敲擊三次的頻率範圍 (HZ)	敲擊三次平均響度 (dB)
A	李木	60	6	325.6~647.0	74.7
B	杉木	60	6	382.0~506.1	66.4
C	松木	60	6	654.3~676.6	63.8
D	樟木	60	6	389.3~510.2	75.1
E	櫟木	60	6	523.5~587.2	62.9
F	橡木	60	6	551.3~569.5	64.7
G	橡膠木	60	6	594.2~614.8	65.0

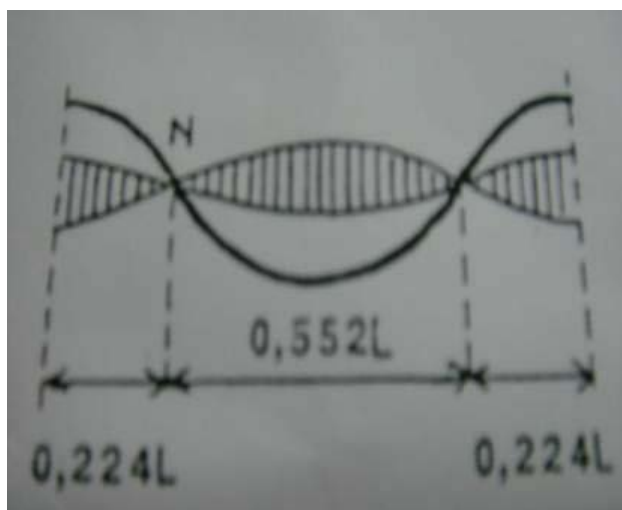
(三)討論：

- 1.由頻率分析發現，潮溼的木頭敲擊大理石地板上，因木頭吸水後的細胞壁會含水，使得振動頻率比乾燥的木頭還要低 200~800(Hz)。
- 2.由響度分析發現，潮溼的木頭敲擊大理石地板上，響度乾燥的木頭還要小 5~10(dB)。

研究四：探討握住杵不同位置敲擊對頻率的影響



說明：不同的振動模式



說明：振動產生的節點

(一)理論分析：

在木頭的音響學中，(參六)如圖，在棒狀物體自由振動時，在距離兩端 0.224 棒長處，會產生不動的節點，因此我們在敲擊杵音時，可選擇自由彈起或者握住 0.224 棒長的位置來敲擊，如此較不容易干擾木杵的振動，影響其振動的頻率。

(二)實驗方法：

- 1.我們以橡木及櫟木長度 100 cm，分別以自由彈起、握住不同位置做敲擊實驗，測量其振動頻率，結果如下表。

表 21：握住不同位置敲擊對頻率的影響

木頭 種類	自由彈起 敲擊三次的 頻率範圍 (HZ)	握住 77.6cm 處敲擊三次的 頻率範圍 (HZ)	握住 90cm 處敲擊三次的 頻率範圍 (HZ)	握住 70cm 處敲擊三次的 頻率範圍 (HZ)	握住 50cm 處敲擊三次的 頻率範圍 (HZ)	握住 30cm 處敲擊三次的 頻率範圍 (HZ)
櫟木	1027.9~1071.4	1019.1~1083.2	958.6~960.8	1006.8~1362.4	1544.7~1638.6	1550.8~1758.3
橡木	845.4~968.6	856.3~979.1	504.4~525.1	835.7~995.2	1000.2~1122.3	1126.6~1438.7

(三)討論：

- 1.由上述結果可知，自由彈起及握住 0.224 棒長節點位置處，所敲擊產生的頻率範圍相近，握住其他位置敲擊所產生的頻率差異較大，因此敲擊杵音時，建議自由彈起或者握住 0.224 棒長的位置來敲擊，產生誤差較小。

研究五：以公式來探討杵音的理論值

(一)理論探討：

在木頭的音響學中，提到可以利用 Young 的公式，來推測不同木頭振動的頻率(參六)，公式

$$\text{如右：} \quad E = [4 \pi^2 L^4 \rho (f_n)^2 A] / I k_i^4 \quad \text{-----}(1)$$

其中 E 是彈性係數；L 是長度； ρ 是密度； f_n 振動頻率；A 是截面積 πr^2 ；I 是 $\pi r^4/4$ ；

$n=1 \rightarrow k_i=4.73$ ； $n=2 \rightarrow k_i=7.853$ ； $n=3 \rightarrow k_i=10.996$

由(1)可推得 $(f_n)^2 = E I k_i^4 / 4 \pi^2 L^4 \rho A$

即 $f_n = \sqrt{E I k_i^4 / 4 \pi^2 L^4 \rho A}$ ----- (2) 可用來計算杵音的標準值

(二)計算

以櫟木為例：櫟木的 $E=144.2 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ ； $R=4.5\text{cm}$ ； $L=100\text{cm}$ ； $\rho=0.77 \text{ g/cm}^3$ ； $1\text{kgw}=9.8 \times 10^5 \text{ dyne}$

代入公式(2)可計算得「基音 $f_n=345.6(\text{Hz})$ 」、「第一泛音 $f_2=952.7(\text{Hz})$ 」

其他的杵音標準值計算如附件（一）、（二）。

(三)討論：

- 1.不同木頭的振動頻率與其彈性係數、密度、長度、直徑有關，其中彈性係數及密度可查表得知，故不同木頭杵音的振動頻率可由公式(2)計算得其理論值。
- 2.但不同木頭的生長條件不同，因此不同木頭的杵音，理論值與實驗值會略有差異。

研究六：以微觀角度探討不同木頭的彈性係數



說明：使用顯微鏡觀察



說明：連接筆電拍攝影像

(一)方法：

- 1.用美工刀刮下一塊可透光的木屑。
- 2.將木屑放置於載玻片上，再滴上亞甲藍液，最後蓋上蓋玻片。
- 3.將載玻片及木屑放置於顯微鏡載物台上，使用標本夾固定。
- 4.將顯微鏡拍攝連接到筆記型電腦上拍照（裝置如圖）。

(二)結果：
七種木頭的細胞壁



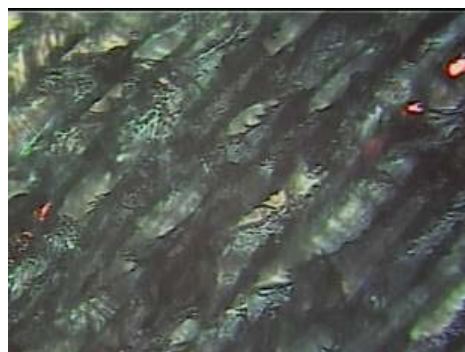
說明：李木春材



說明：李木秋材



說明：杉木春材



說明：杉木秋材



說明：松木春材



說明：松木秋材



說明：樟木春材



說明：樟木秋材



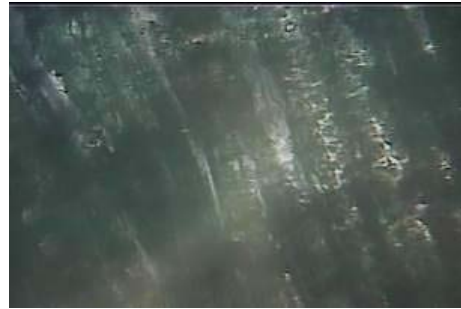
說明：欖木夏春材



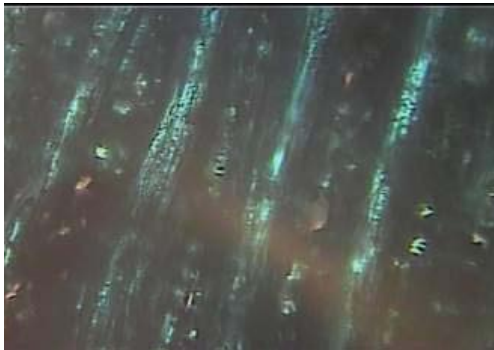
說明：欖木秋材



說明：橡木春材



說明：橡木秋材



說明：橡膠木春材



說明：橡膠木秋材

(三)討論：

1. 木材為**多孔性構造體**，包含**細胞壁**(纖維素、木質部)，及**無數小孔隙**(空氣液體、沉積物)，細胞壁內含孔洞，因春~夏季時溫度高雨量較多，所以吸收水分較多，故生長在春~夏季的木頭生長速度較快，所以**春材細胞壁內的孔洞及液體較多，年輪顏色較淺**。
2. 秋~冬季時溫度低雨量較少，故生長在秋~冬季的木頭生長速度較慢，吸收水分較少，所以，**秋材細胞壁內孔洞較少，年輪顏色較深**。
3. **不同木頭的彈性係數不同**，觀察其細胞壁也可**發現橡木、橡膠木、樟木、櫟木、松木的細胞壁較緊密故彈性係數較大，振動的頻率較高；杉木、李木的細胞壁較寬鬆，振動的頻率較低**。

研究七：研究邵族、布農族杵音並自製杵音且與理論值比較



說明：將木頭綁上石頭



說明：再扣掉石頭體積

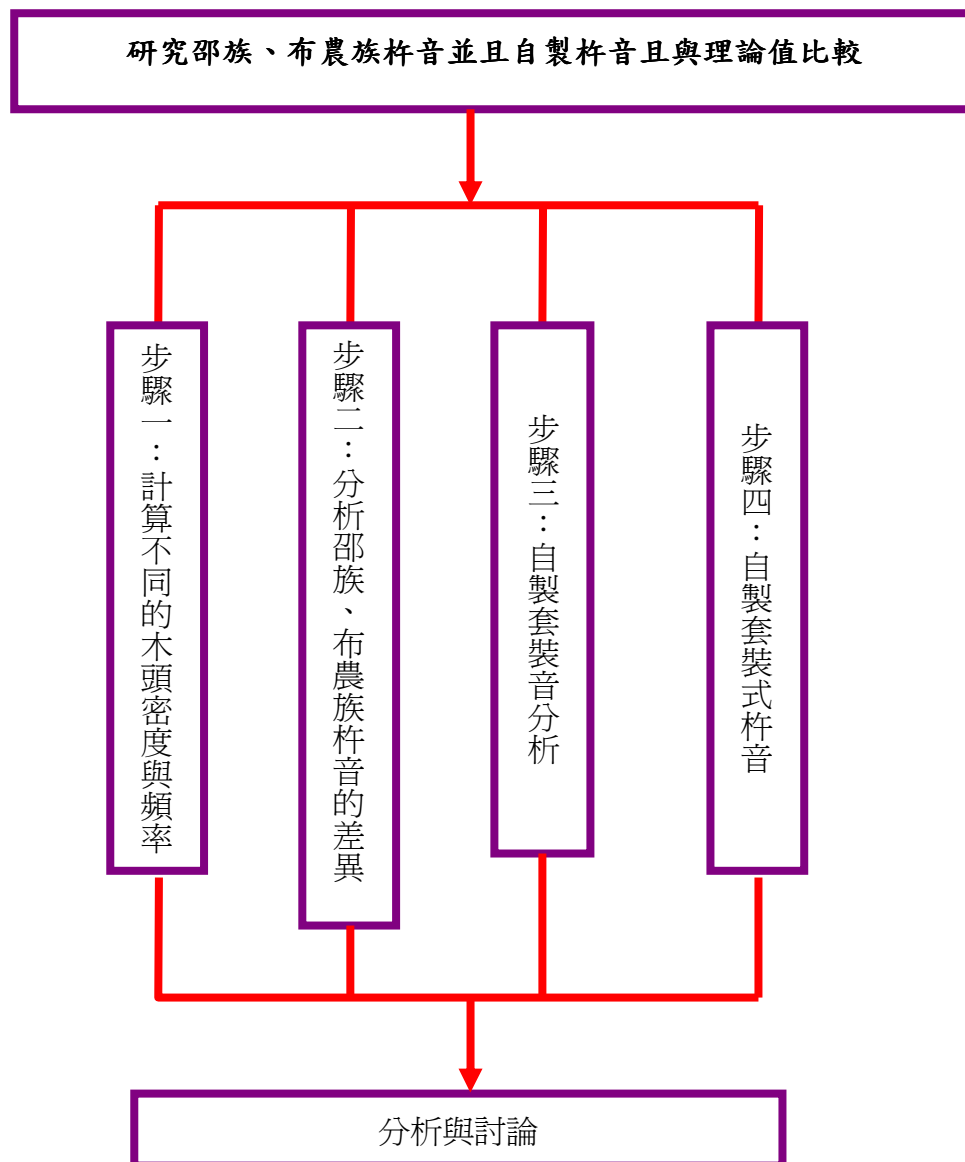


說明：測量木頭的質量



說明：測量水的體積

流程圖：



步驟一：計算不同的木頭密度與頻率

(一)方法：

- 1.將不同木頭以磅秤秤重。
- 2.把木頭綁上石頭，投入水中，測量水上升體積；減掉石頭的體積，即是木頭體積。
- 3.將質量除上體積，即為不同含水木頭的密度。
- 4.利用體積以底面積×長度來計算乾燥木頭的密度。

(二)結果：

表 22：木頭的密度對頻率的影響							
材質	李木	杉木	松木	樟木	櫟木	橡木	橡膠木
項目							
含水密度 (g/cm ³)	0.65	0.57	0.68	0.55	0.87	0.91	0.92
乾燥密度	0.48	0.43	0.54	0.42	0.76	0.73	0.74
查表密度直	無	0.36	0.54	0.42	0.77	無	0.64

(三)討論：

- 1.橡木、橡膠木及櫟木密度較大，樟木、李木、杉木、松木密度較小，橡木、橡膠木、李木易吸水，所以它的含水密度比乾燥的密度差異較大，木頭的含水量會影響敲擊產生的頻率。
- 2.測量的木頭的密度與查表的密度略有差異，所以以下的振動頻率理論值，由本實驗所測的密度代入頻率的公式(2)中計算。

步驟二：分析邵族、布農族杵音的差異

(一)方法：

- 1.到日月潭將邵族表演錄下後，進行分析後，得下表。
- 2.到九族文化村將布農族表演錄下後，進行分析工作，得下表。
- 3.杵音標準值計算如附件（三）。

(二)結果：

表 23：邵族標準音階與杵音頻率比較				
標準音階	Re	Mi	La	Si
標準音名	D7	E7	A7	B7
標準頻率	587	659	880	987
木頭材質	櫟木	櫟木	樟木	樟木
木頭長度	248 cm	225 cm	188 cm	176 cm
木頭直徑	11 cm	13 cm	8.5cm	8 cm
木頭頻率(Hz)	531.0~596.0	674.0~675.0	837.0~892.0	926.0~992.0
基音頻率理論值(Hz)	544.1	708.8	658.2	661.8
第一泛音理論值(Hz)	1499.9	1953.8	1814.5	1824.2

表 24：布農族標準音階與杵音頻率比較				
標準音階	Do	Re	Mi	Sol
標準音名	C7	D7	E7	G7
標準頻率	523	587	659	783
木頭材質	松木	松木	松木	杉木
木頭長度	225cm	186.5cm	169cm	167cm
木頭直徑	12cm	7.5cm	11cm	10cm
木頭頻率	498.0~533.0	549.0~589.0	620.0~667.0	700.0~792.0
基音理論值(Hz)	778.9	587.3	950.5	846.3
第一泛音理論值(Hz)	2147.0	1618.9	2620.2	2333.0

(三)討論：

- 1.由**邵族**杵音頻率分析中，得知其頻率分成**四個音群**，**Re、Mi、La、Si**，此與基本的敲擊節奏樂相符合，他們有時也用七根杵來敲擊，但是基本音變化不大。
- 2.由**布農族**杵音頻率分析中，得知其頻率分成**四個音群**，**Do、Re、Mi、Sol**，一般布農族用四根杵來敲擊杵音，但其實**只要有兩根杵即可敲擊出基本音**，**其他杵為伴奏**。
- 3.邵族與布農族的杵音的振動頻率與理論計算值比較，誤差約 5%~25%之間，推測原因可能為木頭的密度與及彈性係數與查表的理論密度有差異，因此和計算所得的頻率理論值產生誤差。

步驟三：自製套裝式杵音



說明：有裝杵音螺帽



說明：沒裝杵音螺帽

(一)方法：

- 1.將橡膠木兩端裁成較細直徑為 3 公分，長度 10 公分；另外挖一個直徑直徑 6 公分，中間孔洞為 3 公分，長度為 10 公分的杵音的螺帽，裝置如圖。
- 2.分別測量有裝杵音螺帽及沒裝杵音螺帽的頻率及響度

(二)結果：

表 25：自製套裝式杵音

敲擊的頻率與響度	敲擊三次的頻率範圍 (HZ)	敲擊三次平均響度 (dB)
套裝杵音		
有裝杵音螺帽	142.8~225.2	65.2
沒裝杵音螺帽	528.5~895.9	66.5

(三)討論：

- 1.**沒裝杵音螺帽敲擊產生的頻率較高**，可當高音合奏，**有裝杵音螺帽敲擊產生的頻率較低**，可當低音合奏。

步驟四：自製杵音分析

(一)方法：

- 1.由前面研究中挑出頻率在 Re、Mi、Sol、La、Si 的木頭。
- 2.將挑出的木頭一起敲擊出杵音並分析其頻率及響度。
- 3.杵音標準值計算如附件（一）、（二）。

(二)結果：

表 26：自製木頭標準音階與杵音頻率比較					
標準音階	Re	Mi	Sol	La	Si
標準頻率	588	660	784	440	980
木頭材質	櫟木	櫟木	松木	橡膠木	松木
木頭長度	60	100	60	60	100
木頭直徑	6	9	6	6	9
木頭敲擊三次 平均頻率(Hz)	609.9~ 699.4	648.6~ 823.1	802.8~ 806.0	853.5~ 898.9	893.9~ 915.4
基音頻率理論值(Hz)	640.1	345.6	761.9	523.7	411.4
第一泛音頻率理論值 (Hz)	1764.3	952.7	2100.3	1443.6	1134.2

(三)討論：

- 1.本研究成功地自製出不同音頻的杵，可以將邵族及布農族的杵音標準化，不用每次做杵都須靠耆老們的經驗才能製造。
- 2.本研究也發現杵音和地板材質有很大的關係，因此標準的杵音以打在大理石地板為佳，若木頭含水會影響其頻率及響度。
- 3.本實驗自製的杵音的振動頻率與理論計算值比較，誤差約 10%~30%之間，推測原因可能為木頭的密度及彈性係數與理論值有差異，因此所產生的頻率誤差。

研究八：研究以麻竹當材質自製竹子版杵音及製作合奏杵音



說明：砍竹子



說明：竹子版杵音

步驟一：以麻竹當材質自製竹子版杵音

(一)方法：

- 1.將麻竹鋸成大、中、小粗細不同而長度相同的大小，錄完音後，再進行分析。
- 2.將麻竹鋸成長度不同，而粗細固定的大小，錄完音後，再進行分析。

(二)結果：波形圖如附錄（六）

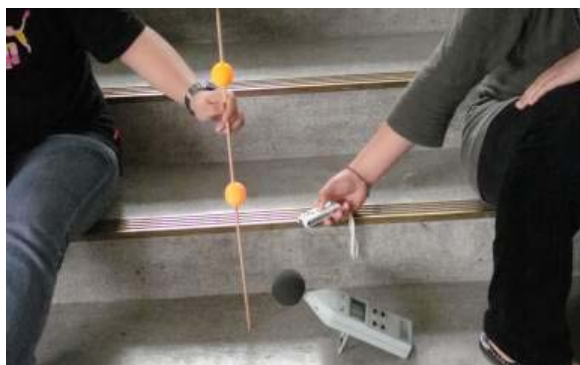
表 27：麻竹的響度及頻率分析						
不同長度 不同直徑	70 公分	55 公分	45 公分	70 公分	55 公分	45 公分
	敲擊三次 頻率範圍	敲擊三次 頻率範圍	敲擊三次 頻率範圍	敲擊三次 平均響度	敲擊三次 平均響度	敲擊三次 平均響度
10 公分	238.4~ 333.6	262.2~ 359.6	228.3~ 321.5	75.5	78.5	76.5
9.5 公分	319.1~ 396.2	315.9~ 429.0	279.6~ 367.1	66.4	68.3	73.1
6.5 公分	384.6~ 441.2	325.9~ 495.0	374.6~ 504.3	64.5	64.6	74.7

(三)討論：

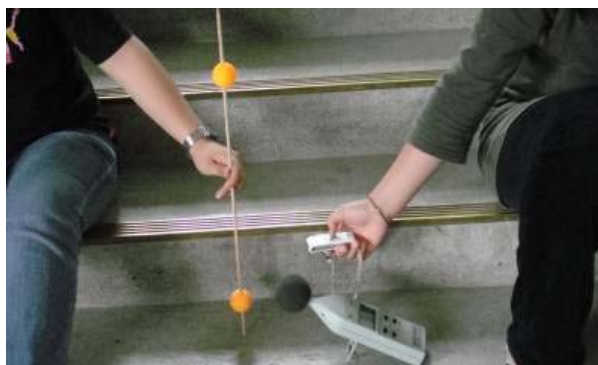
- 1.由響度分析發現，**直徑愈大竹子，響度愈大**，我們發現這個跟有共鳴箱的音叉，有相同的原理；**共鳴箱愈大則響度就愈大**。
- 2.由頻率分析發現，**竹子直徑愈細頻率愈高**；**竹子長度愈短，頻率愈高**，因為敲擊竹子產生聲音是由竹子與竹管中的空氣共同振動所產生，所以頻率差異不大，**範圍大約是 200~500 〈Hz〉**。

研究九：自製作迷你版可調頻式杵音

步驟一：迷你版杵音(乒乓球)



說明：乒乓球板迷你杵音



說明：乒乓球板迷你杵音

(一)方法：

- 1.準備乒乓球、櫟木竹籤。
- 2.將乒乓球穿洞後。
- 3.將乒乓球插入櫟木竹籤的兩側。
- 4.敲擊在地板上後，進行分析工作。
- 5.移動乒乓球，改變不同的距離。

(二)結果：波形圖如附錄（七）

1.響度分析

表 28：迷你版杵音(乒乓球版)						
長度	5 公分	10 公分	15 公分	20 公分	25 公分	30 公分
敲擊三次 平均響度	64.0	65.7	65.7	66.5	65.8	65.6

2.頻率分析

表 29：迷你版杵音(乒乓球版)						
長度	5 公分	10 公分	15 公分	20 公分	25 公分	30 公分
敲擊三次 頻率範圍	112.9~209.3	118.5~184.9	118.8~164.4	119.7~222.4	119.0~224.2	113.5~224.4

(三)討論：

- 1.由響度分析發現，乒乓球長度不同，**敲擊響度影響不大(64~66dB)**。
- 2.由頻率分析發現，乒乓球長度不同，因為敲擊聲音是由竹籤與乒乓球內空氣振動所產生，頻率差異不大(112~224Hz)。

步驟二：迷你版杵音(彩蛋)



說明：彩蛋版迷你杵音



說明：彩蛋版迷你杵音

(一)方法：

- 1.準備軟的彩蛋、櫟木竹籤。
- 2.將彩蛋穿洞後。
- 3.將彩蛋插入櫟木竹籤的兩側。
- 4.移動軟的彩蛋，改變不同距離，敲擊在地板上後，進行分析工作。

(二)結果：

1.響度分析

表 30：迷你版杵音(彩蛋版)						
長度	5 公分	10 公分	15 公分	20 公分	25 公分	30 公分
敲擊三次 平均響度	62.4	63.4	62.6	62.8	63.1	65.0

2.頻率分析

表 31：迷你版杵音(彩蛋版)						
長度	5 公分	10 公分	15 公分	20 公分	25 公分	30 公分
敲擊三次 頻率範圍	957.7~963.2	846.1~997.2	759.3~963.3	573.5~632.1	226.4~340.0	225.5~229.5
標準音	中音 # La	中音 La	中音 Sol	中音 # Re	低音 # Do	低音 Do

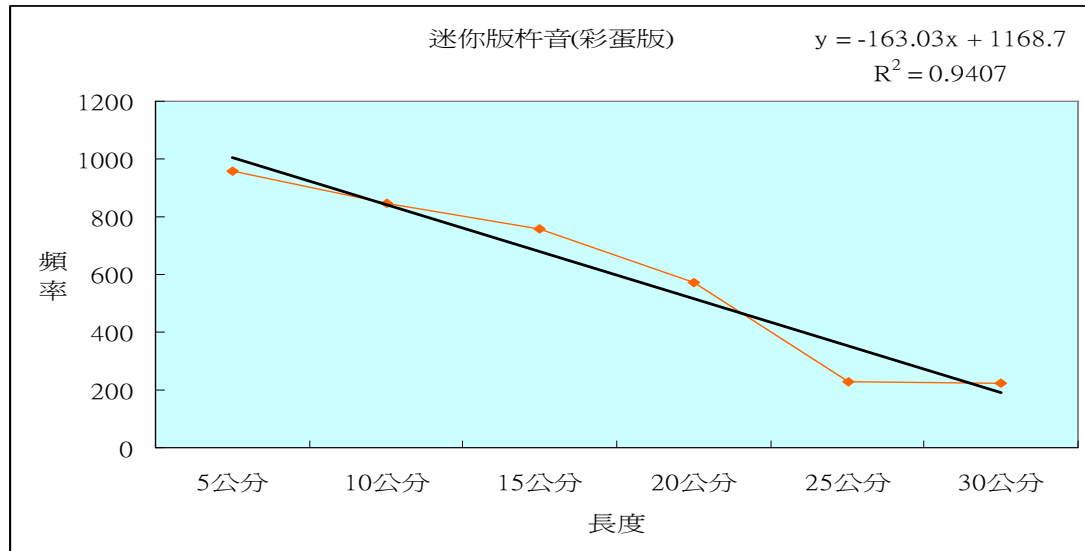


圖 7 說明：迷你版杵音(彩蛋版)長度與頻率的關係圖

(三)討論：

- 1.由響度分析發現，軟彩蛋長度不同，敲擊響度影響不大(62~65dB)。
- 2.由頻率分析發現，軟彩蛋會吸收敲擊地面所產生的聲音，因此聲音是由敲擊彩蛋兩端的竹籤所產生，故長度愈短，振動產生的頻率愈高(225~997Hz)。

伍、結論

- 1.杵音是布農族與邵族特有的樂器，由 6~10 根長短、粗細不同的木杵交替在石板上敲擊，會發出 4~6 個音群的杵音(Do、Re、Mi、Sol、La、Si)，用來表示舉辦慶典及傳遞訊息的功能。
- 2.本研究分析邵族的杵音，發現其杵音頻率範圍(531~992Hz)，由四根杵敲主音，另外三根杵敲伴奏，合奏出杵音。
- 3.本研究分析布農族的杵音，發現其杵音頻率範圍(498~792Hz)，由四根杵敲擊發出杵音，單獨敲擊杵音會發出基本音及泛音。因此，本研究以分析基本音為主，其餘泛音(如：附件)，因為杵音演奏時是 4~8 人，同時有節奏並圍成圓圈對稱狀的敲擊，會使每根杵的基本音產生基音疊加作用而加強，使得泛音影響較小(甚至，我們分析不到)，觀眾聽到的是 4~6 個音群合奏的聲音。

- 4.從音叉及木魚的頻率和響度分析中發現，音叉幾乎是單一頻率，沒有泛音，有共鳴箱會增加響度，而木魚長度愈短，頻率愈高，因為呈圓柱對稱狀，會使基音產生疊加作用，故分析不到泛音。
5. 本研究發現選擇杵的木頭要密實，彈性係數要大，敲出的聲音頻率範圍不要太大，以櫟木、松木、橡木、橡膠木為佳。不同木頭的敲擊頻率範圍以橡膠木>橡木>松木>櫟木，敲擊高度愈高，響度愈大，頻率變化不大；敲擊角度愈大，響度愈大，頻率愈低。
- 6.不同的地板敲擊響度：大理石>地磚>柏油>泥巴地；頻率：地磚和大理石及柏油比泥巴地大，但差異不大。
- 7.本研究發現，濕的地板敲擊響度比乾燥時小，頻率比乾燥時略低；若木頭潮溼（含水）敲擊時，會比乾燥時頻率低 200~800（Hz），響度也比乾燥時小 5~10（dB）；另外，天氣因素、溫度及溼度都會影響杵音頻率，但需做更進一步的探討。
- 8.本研究成功自製縮小版杵音：
 - (1) 本實驗基本杵音以櫟木，（長 60 公分，直徑 6 公分，頻率約：Re），
櫟木，（長 100 公分，直徑 9 公分，頻率約：Mi）；
松木，（長 60 公分，直徑 6 公分，頻率約：Sol）；
橡膠木，（長 60 公分，直徑 6 公分，頻率約：La）；
松木，（長 100 公分，直徑 9 公分，頻率約：Si）
 - (2)若要高音合奏，可以再用：
橡木，（長 30 公分，直徑 6 公分），頻率約(高音 Sol)。
橡膠木，（長 30 公分，直徑 6 公分）；頻率約(高音 La)。
 - (3)本研究嘗試用麻竹來自製改良版杵音，可以當作低音合奏杵音：
麻竹（長 70 公分，直徑 10 公分，頻率約：低音 Mi），
麻竹（長 55 公分，直徑 10 公分，頻率約：低音 Fa）；
麻竹（長 45 公分，直徑 10 公分，頻率約：低音 Sol）。
- 9.本研究也創新了以竹籤和乒乓球及軟彩蛋製造迷你版可調頻式杵音，迷你版杵音(乒乓球)頻率 112~224（Hz）；迷你版杵音(彩蛋)頻率 225~997（Hz），如此，便可以隨時攜帶做杵音表演。
- 10.本研究嘗試以 Young 的公式 $f_n = \sqrt{\frac{EIK_i^4}{4\pi^2 L^4 \rho A}}$ ，來推測杵音的理論值，發現實驗值與理論值有正相關，木頭的彈性係數、長度、直徑及密度，均會影響杵音的振動頻率，其中長度及彈性係數影響杵音較大，因此要選擇木頭做杵音時，可以先用理論值計算後，在挑選適合的木頭，如此可減少選錯木頭所造成的損失。

陸、未來展望

- 1.特別感謝很多教授及老師們，提供我們選擇木頭、杵音的分析意見及協助。
- 2.因為木頭的選擇儘量以木頭工廠已有的木頭為主，因此杵音的頻率無法精確估算，若未來要大量生產，需要做更多的資料分析，才可以更準確。
- 3.可以針對套裝杵音，改變套裝杵的大小、種類來製造不同頻率的杵音，做更深入的研究。

柒、參考資料

- 一、郭重吉（民 96），國中自然與生活科技第三冊第 34~53 頁。台南，南一書局。
- 二、廖彥婷、葉孟鑫、林啓維、方柏仁。**鄒之風聲---風笛**。
第四十六屆全國國中組科學展覽會作品說明書。
- 三、許世杭、羅婉綺、林佳嫻、何承翰（民 95）。**勇士之音—鄒之鼻笛**。
第四十六屆全國國中組科學展覽會作品說明書。
- 四、王裕中、洪崑涵、黃俊諺、黃俊穎。**西瓜之音-- ? Hz**。
第四十六屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 五、廖彥婷。**--鄒之風聲---風笛**。台灣二 00 七年國際科學展覽會作品說明書。
- 六、Voichita Bucur(1995)，Acoustics of wood p 52~53，CRC press。
- 七、農委會-嘉義大學(民 87)，台灣商用木材圖鑑第 151~152 頁。
- 八、蔡如藩（民 74），木材力學性質，第 49~70 頁，徐氏基金會。

【評語】 030108

1. 主題及材料是具鄉土性之優良作品。
2. 研究過程能由文獻分析出發符合科學精神。
3. 建議觀測分析過程變因的控制要更精準。