

慶典之聲(杵音)－布農族與邵族的杵音研究

類別：自然與科技

模組單元名稱：慶典之聲(杵音)－布農族與邵族的杵音研究

模組設計人：李學昌

研習編號：WOLF11001

模組教學年段：國中二年級

模組教學時間：8 小時

教學前準備

- 1.將學生分組
- 2.獎勵學生發言、準備獎勵卡

教學用具

- 1.準備不同種類的木頭
- 2.播放原住民杵音的影片
- 3.筆電、投影機



圖 1：科展“搗杵之音”研究相片

一、傳承傳統世界觀（30 分鐘）

（一）主要學習概念、學習活動目標、教材細目與分段能力指標

1. 主要學習概念

- (a)學習布農族杵音的族語
- (b)學習布農族與邵族杵音的文化意涵
- (c)學習布農族與邵族杵音的傳統故事

2.教材細目：自 216-4a

3. 學習活動目標

- (a)請耆老用族語說出布農族與邵族杵音的名稱（Tultul 巒群、Duldul 郡群 Pestle-Pounding music of Thao 邵族）。
- (b)請耆老能解說布農族與邵族杵音的文化意涵
- (c)同學們能與他人分享有關杵音的故事

4.能力指標：自 2-4-5-6

（二）學習活動

- (a)請同學們學耆老用族語說出布農族杵音的名稱三次(Tultul 巒群、Duldul 郡群)
- (b) 學習布農族與邵族杵音的文化意涵

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，通常在六到八枝木杵的合奏。

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。

(c)學習布農族與邵族杵音的傳統故事

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，大家一起分組探討杵音的奧秘。

(d)播放邵族「逐鹿市集」演奏杵音的影片，教師提醒學生找找看影響杵音高低音的因素有哪些？並且讓學生分組回家討論。

二、表達自我世界觀（60分鐘）

(一) 主要學習概念、學習活動目標、教材細目與分段能力指標

1.主要學習概念

- (a)知道布農族與邵族杵音的形狀及材質
- (b)表達對布農族與邵族杵音的看法
- (c)分析布農族與邵族杵音的故事

2.教材細目：自 216-4a、社 6-4-4-1 7-4-0-1

3.學習活動目標

在課堂上學生分組討論，並分享彼此對杵音的看法，及探討其影響的因素。

4.能力指標：自 2-4-5-6、5-4-1-2



圖 2：科展”搗杵之音”研究相片

(二) 學習活動

(a)分享對布農族與邵族杵音的形狀及材質的比較看法

放假時與家人到日月潭『逐鹿市集』看到邵族的杵音表演，於是引發我們探討杵音的興趣。但是原住民杵音的木頭都非常巨大(180-240 cm)，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）得到邵族是使用八根杵，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，我們決定分組探討有關杵音的奧秘。

(b)共同討論對布農族與邵族杵音的影響聲音高低的因素有哪些？

(三) 學習評量

- (a)請同學思考適合做杵音的木頭？
- (b)探討不同長度、直徑及形狀對杵音的影響？
- (c)將布農族與邵族杵音耆老的杵音分析？
- (d)以顯微鏡微觀角度探討木頭的密度與聲音的頻率有何關係？
- (e)分析布農族與邵族杵音的頻率？

三、探索世界觀（120分鐘）

（一）主要學習概念、學習活動目標、教材細目與分段能力指標

1. 主要學習概念

- (a)學習聲音的響度及頻率的概念
- (b)準備不同材質的木頭製作布農族與邵族杵
- (c)學習製做杵的方法及步驟
- (d)分析自製杵音的響度及頻率

2. 教材細目：自 216-4a、6-4-5-2

3. 學習活動目標

能利用聲音分析軟體 Cool Edit，分析自製杵音的響度及頻率

4. 能力指標

自 2-4-5-6、6-4-5-1



圖 3：科展搗杵之音相片

（二）學習活動

- (a)老師講解聲音的三要素
- (b)請達人耆老協助製作不同材質的木頭製作的杵
- (c)自己動手敲音叉以錄音筆錄音後，分析比較其響度及頻率
- (d)分析布農族與邵族杵音及自製杵音的響度及頻率
- (e)老師將學生三人一組，分別進行下列實驗，並且完成學習單及結果討論。

（三）學習評量

1.能說出聲音包含：響度（振幅）、音調（頻率）、音色（波形）三要素。

實驗一：測量音叉的頻率



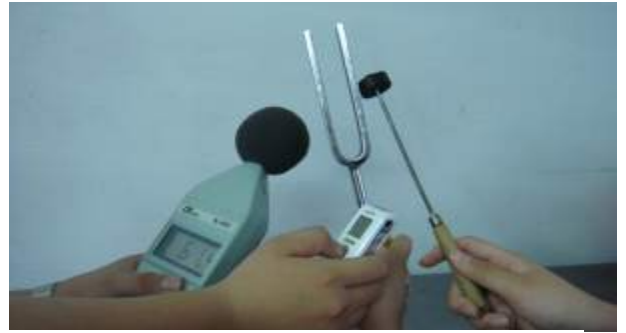
說明：三根音叉(李學昌攝)



說明：敲擊有共鳴箱的銀色音叉(李學昌攝)



說明：敲擊有共鳴箱的黑色音叉(李學昌攝)



說明：敲擊無共鳴箱的音叉(李學昌攝)

1.取兩種不同頻率的音叉，以錄音筆及 Cool Edit 分析其頻率及分貝計測量響度。

2.結果：

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)
361.5~361.7	107.4	102.8	101.2	103.8
371.1~371.7	104.2	102.8	104.1	103.7
326.9~326.9	74.8	70.1	72.6	72.5

3.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。

實驗二：測量不同材質木頭的頻率及響度

- 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.結果：以 Cool Edit 2000 頻率分析軟體分析聲音的波形圖：如附錄

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

5.討論：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

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。

四、形成新世界觀（90分鐘）

（一）主要學習概念、學習活動目標、教材細目與分段能力指標

1. 主要學習概念

(a)探討適合杵音的木頭。

(b)探討不同長度、直徑、形狀及溼度對杵音的影響。

(c)以理論探討握住杵不同位置(節點)敲擊對頻率的影響。

2.教材細目

自 216-4a

3. 學習活動目標

(a)找到適合杵音的木頭。

(b)了解不同長度、直徑、形狀及溼度對杵音的影響。

(c)可以用理論探討握住杵不同位置(節點)敲擊對頻率的影響。

4.能力指標：自 2-4-5-6 、6-4-5-2

（二）學習活動

(a)研究邵族、布農族杵音並且自製杵音，並且與理論值比較

(b) 老師將學生三人一組，分別進行下列實驗，並且完成學習單及結果討論。

（三）學習評量

實驗三：測量杵音的長度及直徑

1.測量布農族族杵的長度及直徑。

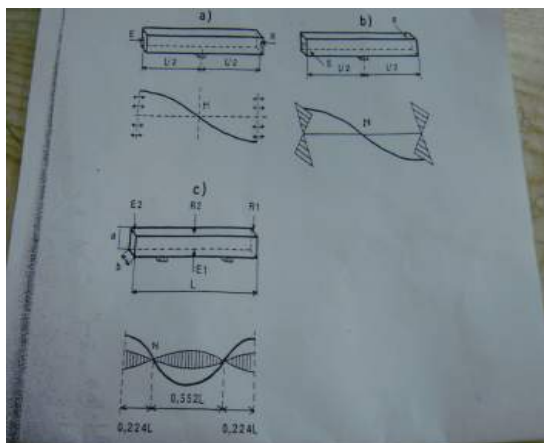
2.結果：

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

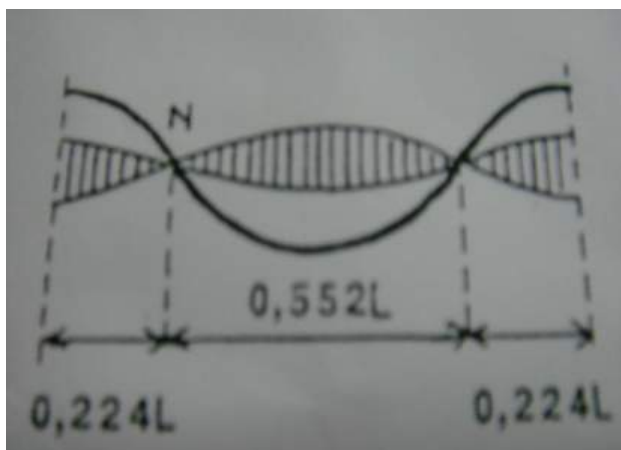
3.討論：

- 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。

*補充-實驗四：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(李學昌攝)



說明：振動產生的節點(李學昌攝)

(一)理論分析：

在木頭的音響學中，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 4：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	1027~1071	1019~1083	958~960	1006~1362	1544~1638	1550~1758
橡木	845~968	856~979	504~525	835~995	1000~1122	1126~1438

(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。

五、連結原住民族世界觀與學科世界觀（180 分鐘）

(一) 主要學習概念、學習活動目標、教材細目與分段能力指標

1. 主要學習概念

- (a)以微觀角度探討木頭的振動頻率與彈性係數及密度關係。
- (b)將邵族、布農族杵音並且自製杵音，並且與理論值比較。
- (c)自製作迷你版可調頻杵音。
- (d)以自製杵音合奏出美妙的杵音。

2. 教材細目

自 216-4a

3. 學習活動目標

- (a)能以微觀角度探討木頭的振動頻率與彈性係數及密度關係。
- (b)共同研究邵族、布農族杵音並且自製杵音，並且與理論值比較。
- (c)能自製作迷你版可調頻杵音玩具。
- (d)能以自製杵音合奏出美妙的杵音。

4. 能力指標

自 2-4-5-6 、7-4-0-1

(二) 學習活動

- (a) 老師將學生三人一組，分別進行下列實驗，並且完成學習單及結果討論。
- (b)研究邵族、布農族杵音，並且自製杵音，及調整其頻率。

(三) 學習評量

實驗五：探討不同木頭長度對杵音的影響



說明：一組長短不同的木頭(李學昌攝)



說明：60 公分的木頭(李學昌攝)



說明：三十公分的木頭(李學昌攝)

(一)方法：



說明：六公分的木頭(李學昌攝)

- 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

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

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

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

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。

實驗六：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：

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

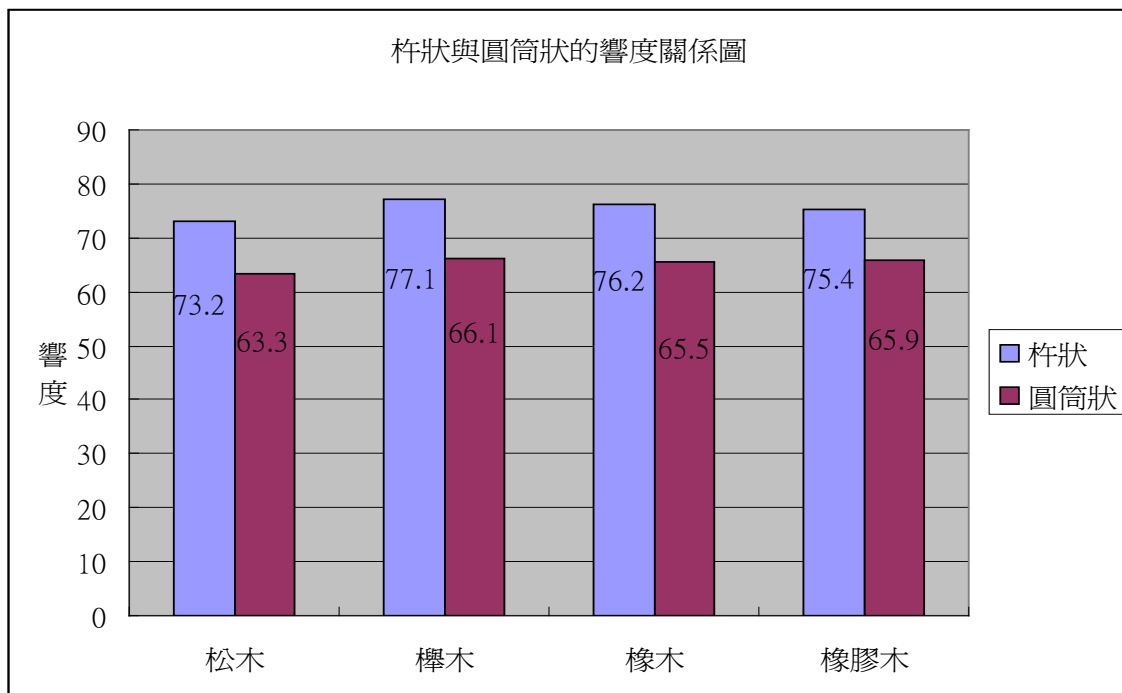


圖 4：科展” 搗杵之音” 研究相片：

(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。

實驗七：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：

木頭材質	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。

實驗八：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(李學昌攝)



說明：連接筆電拍攝影(李學昌攝)

(一)方法：

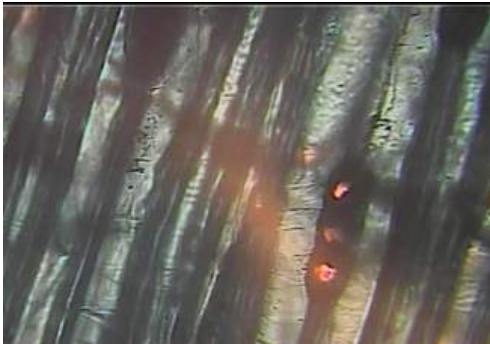
- 1.用美工刀刮下一塊可透光的木屑。
- 2.將木屑放置於載玻片上，再滴上亞甲藍液，最後蓋上蓋玻片。

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。

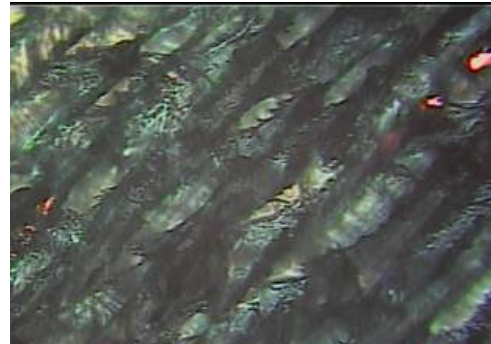
4.將顯微鏡拍攝連接到筆記型電腦上拍照（裝置如圖）。

(二)結果：

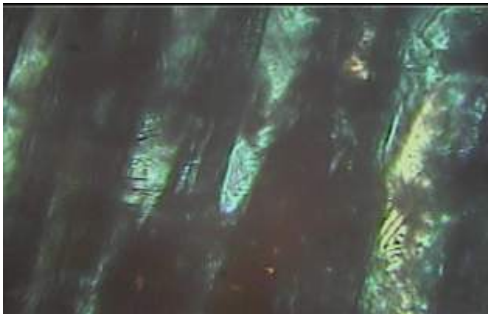
不同木頭的細胞壁



說明：杉木春材



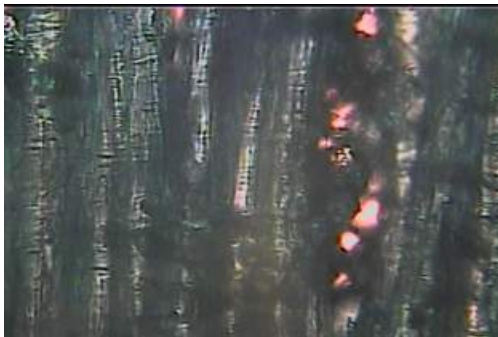
說明：杉木秋材



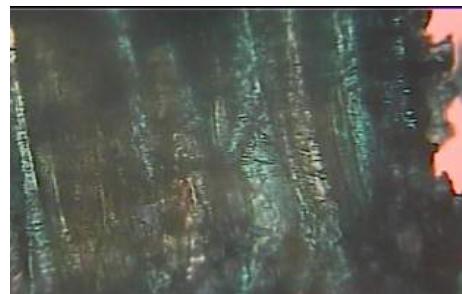
說明：松木春材



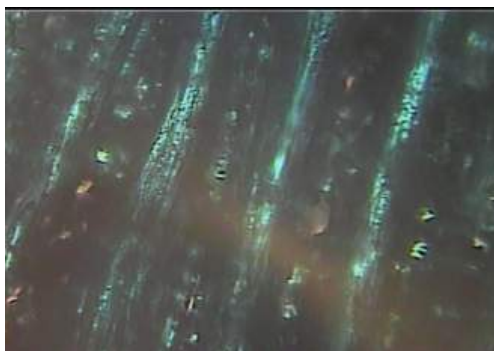
說明：松木秋材



說明：樟木春材



說明：樟木秋材



說明：橡膠木春材

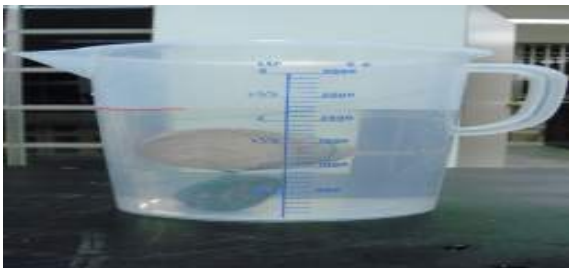


說明：橡膠木秋材

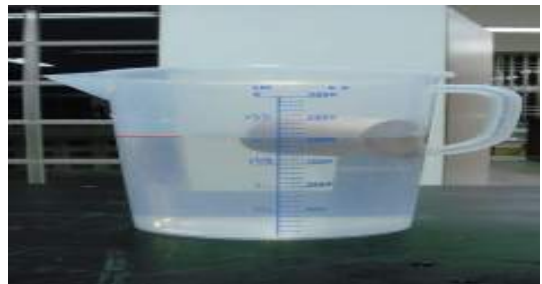
(三)討論：

- 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。

實驗九：計算不同的木頭密度與頻率



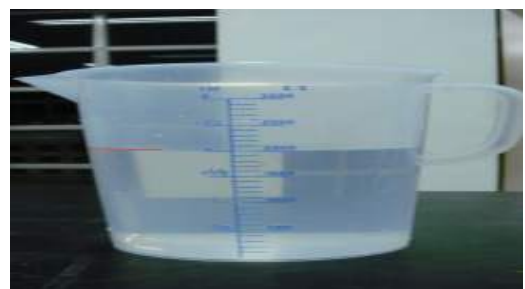
說明：將木頭綁上石頭(李學昌攝)



說明：再扣掉石頭體積(李學昌攝)



說明：測量木頭質量(李學昌攝)



說明：測量水的體積(李學昌攝)

(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x長度來計算乾燥木頭的密度。

表 11：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
-------	---	------	------	------	------	---	------

(二)結果：

(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中計算。

實驗十：研究邵族、布農族杵音並自製杵音且與理論值比較

(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。

(二)結果：

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

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。

實驗十一：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：

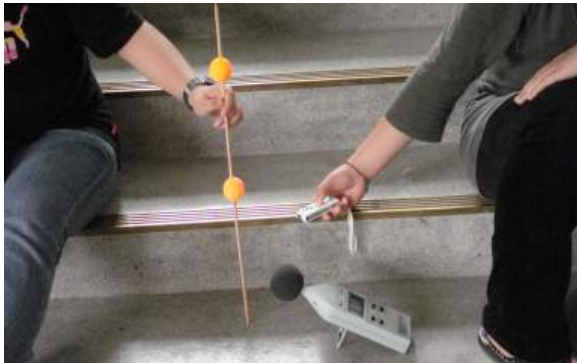
標準音階	Re	Mi	Sol	La	Si
標準頻率	588	660	784	440	980
木頭材質	櫟木	櫟木	松木	橡膠木	松木
木頭長度	60	100	60	60	100
木頭直徑	6	9	6	6	9
木頭敲擊三次 平均頻率(Hz)	609.9~ 699.4	648.6~ 823.1	802.8~ 806.0	853.5~ 898.9	893.9~ 915.4
基音頻率理論值(Hz)	640.1	345.6	761.9	523.7	411.4
第一泛音頻率理論值 (Hz)	1764.3	952.7	2100.3	1443.6	1134.2

(三)討論：

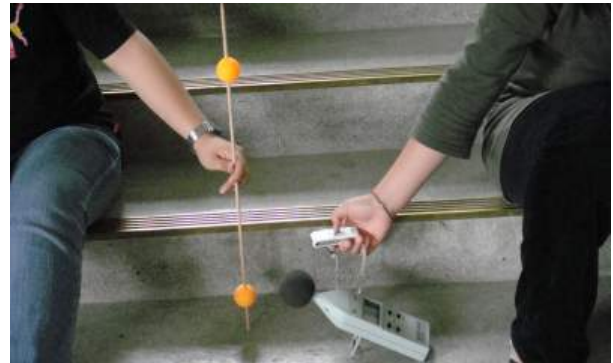
- 1.本研究成功地自製出不同音頻的杵，可以將邵族及布農族的杵音標準化，不用每次做杵都須靠著老們的經驗才能製造。
- 2.本研究也發現杵音和地板材質有很大的關係，因此標準的杵音以打在大理石地板為佳，若木頭含水會影響其頻率及響度。
- 3.本實驗自製的杵音的振動頻率與理論計算值比較，誤差約 10%~30%之間，推測原因可能為木頭的密度及彈性係數與理論值有差異，因此所產生的頻率誤差。

實驗十二：自製作迷你版可調頻式杵音玩具

步驟一：迷你版杵音玩具(乒乓球)



說明：乒乓球板迷你杵音(李學昌攝)



說明：乒乓球板迷你杵音(李學昌攝)

(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

1.響度分析

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

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	112~209	118~184	118~164	119~222	119~224	113~224

(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：迷你版杵音玩具(彩蛋)



說明：彩蛋版迷你杵音(李學昌攝)



說明：彩蛋版迷你杵音(李學昌攝)

(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 17：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 18：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	957.7~96 3.2	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

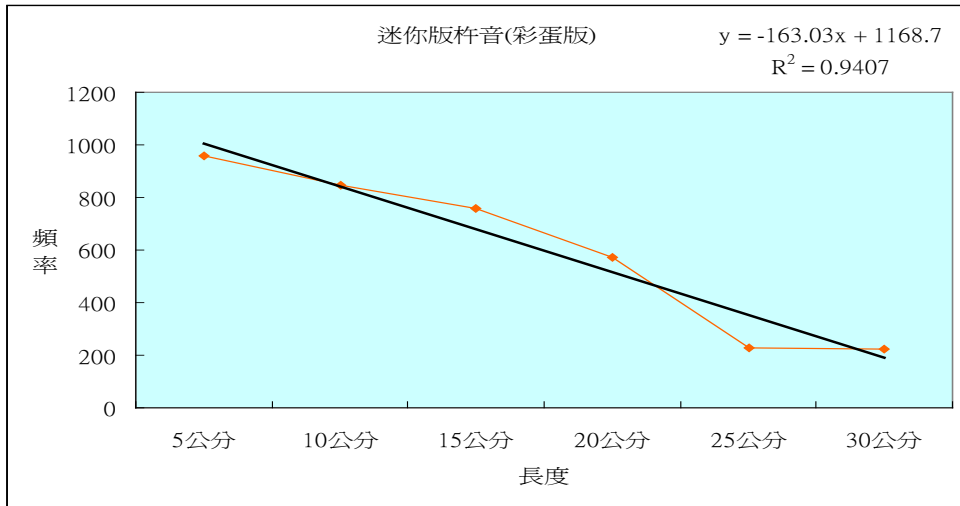


圖 5：科展” 搗杵之音” 研究相片：迷你版杵音(彩蛋版)長度

(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)。

老師總結—各組杵音實驗結果：

各組同學做完實驗，並且完成各組實驗學習單後，各組需做 5 分鐘的簡報，分享實驗結果及心得。

- 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，以檫木、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 > 檫木，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）。

8.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。

9.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。

未來展望

做完實驗科學分析後，驗證布農族與邵族祖先的智慧，並且和耆老們學習自製杵音及傳承經驗，我們也改良自製杵音玩具，希望可以將實驗結果，與其他部落的同學分享及推廣。

1.特別感謝阿克老師，協助我們選擇木頭及杵音的分析。

2.特別感謝劉淑惠老師及謝迺岳老師提供聲音分析意見及協助。

3.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。

附錄一學習單：

1. 杵音的族語念法：_____（布農族）、_____（邵族）

2. 布農族與邵族杵音的差別？

_____（布農族）、_____（邵族）

3. 不同的木頭質地不同？哪些木頭適合做杵？

4. 耆老說的故事中，你覺得哪些是最有價值的呢？

5. 聽完老師的說明後，你覺得引響聲音的要素有哪些？

6. 相片中的杵音應該有幾個音階呢？



附錄二實驗學習單：

實驗一：測量音叉的頻率

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)

實驗二：測量不同材質木頭的頻率及響度

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		
B	杉木	60	6		
C	松木	60	6		
D	樟木	60	6		
E	櫟木	60	6		
F	橡木	60	6		
G	橡膠木	60	6		

實驗三：測量杵音的長度及直徑

編號	長度 (cm)	粗細 (直徑)	頻率 (HZ)	響度 (dB)
一	225 (最長)	12		
二	186.5 (第二長)	7.5		
三	169 (第三長)	11		
四	167 (最短)	10		

實驗四：探討握住杵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)
檫木						
橡木						

實驗五：探討不同木頭長度對杵音的影響

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	檫木	6		
2	30	檫木	6		
3	6	檫木	6		

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		
2	30	松木	6		

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		
2	30	橡木	6		

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		

2	30	橡膠木	6		
---	----	-----	---	--	--

實驗六：探討形狀對杵音的影響

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)
檫木	杵狀	60	6		
松木	杵狀	60	6		
橡木	杵狀	60	6		
橡膠木	杵狀	60	6		
檫木	圓筒狀	60	6		
松木	圓筒狀	60	6		
橡木	圓筒狀	60	6		
橡膠木	圓筒狀	60	6		

實驗七：不同直徑的木頭對杵音的影響

木頭材質 不同粗細	檫木		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								
7 公分								
3.5 公分								

實驗八：以微觀角度探討不同木頭的彈性係數

請同學以顯微鏡拍下不同木材的微觀相片，並且比較春材及秋材的差別。

實驗九：計算不同的木頭密度與頻率

材質	李木	杉木	松木	樟木	檫木	橡木	橡膠木
項目							
含水密度 (g/cm ³)							
乾燥密度							

查表密度	無	0.36	0.54	0.42	0.77	無	0.64
------	---	------	------	------	------	---	------

實驗十：研究邵族、布農族杵音並自製杵音且與理論值比較

表 12：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 13：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

實驗十一：自製杵音分析

表 14：自製木頭標準音階與杵音頻率比較

標準音階	Re	Mi	Sol	La
標準頻率	588	660	784	440
木頭材質	櫟木	櫟木	松木	橡膠木
木頭長度	60	100	60	60
木頭直徑	6	9	6	6
木頭敲擊三次				

平均頻率(Hz)				
基音頻率理論值(Hz)				
第一泛音頻率理論值(Hz)				
標準音階				

實驗十二：自製作迷你版可調頻式杵音玩具

步驟一：迷你版杵音玩具(乒乓球)

同學分組完成下列實驗結果

1.響度分析

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						

2.頻率分析

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						

步驟二：迷你版杵音玩具(彩蛋)

同學分組完成下列實驗結果

1.響度分析

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						

2.頻率分析

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						
標準音						

*補充：以理論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

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

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

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

由(1)可推得 $(fn)^2 = EIKi^4/4 \pi^2 L^4 \rho A$

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

(二)計算

以檫木爲例：檫木的 $E=144.2 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$; $R=4.5\text{cm}$; $L=100\text{cm}$; $\rho=0.77 \text{ g/cm}^3$; $1\text{kgw}=9.8 \times 10^5 \text{ dyne}$

代入公式(2)可計算得「基音 $fn=345.6(\text{Hz})$ 」、「第一泛音 $f2=952.7(\text{Hz})$ 」

其他的杵音標準值計算如附件。

(三)討論：

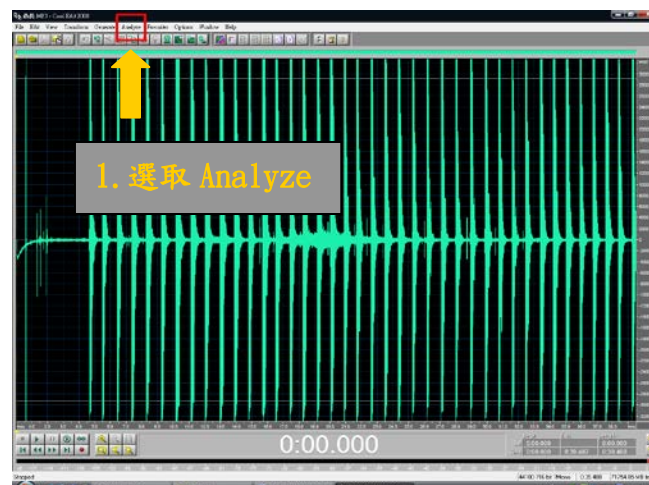
- 1.不同木頭的振動頻率與其彈性係數、密度、長度、直徑有關，其中彈性係數及密度可查表得知，故不同木頭杵音的振動頻率可由公式(2)計算得其理論值。
- 2.但不同木頭的生長條件不同，因此不同木頭的杵音，理論值與實驗值會略有差異。

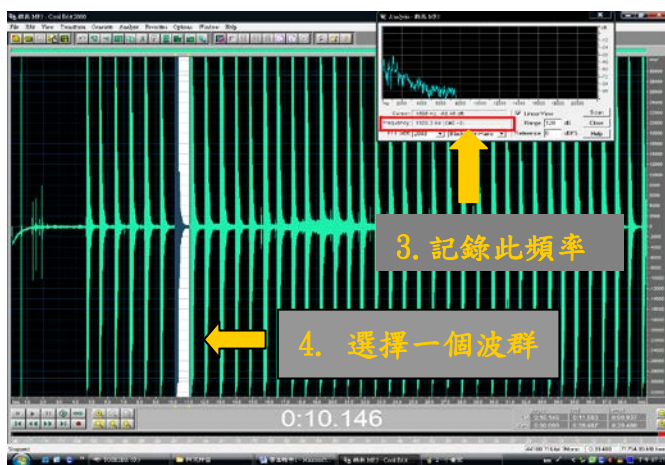
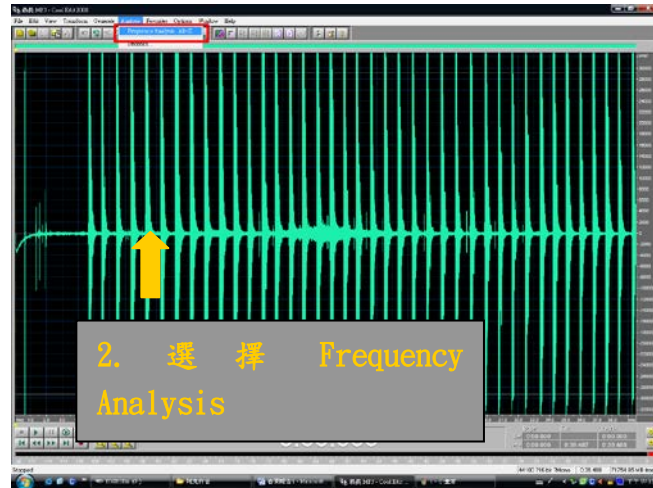
參考資料

- 一、第四十九屆全國國中組科學展覽會得獎作品「搗杵之音」。
- 二、原住民電視台：科學小原子--杵音單元。
- 三、飛鼠部落 <http://www.yabit.org.tw/index.php>。

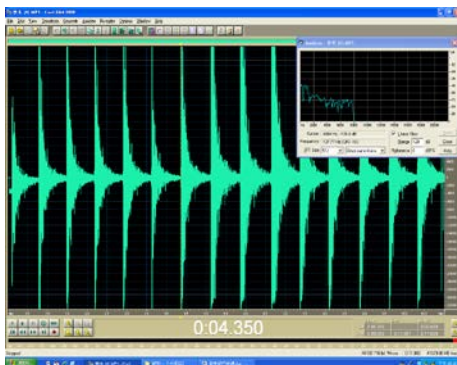
附錄三：杵音頻率的分析方法

- 1.利用 Cool Edit 軟體”中的「Analyze」
- 2.選擇 Frequency Analysis
- 3.選擇一個波群
- 4.紀錄頻率值
- 5.換下個波群，重複相同的方法。

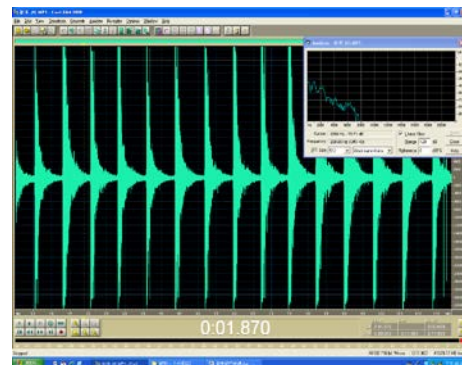




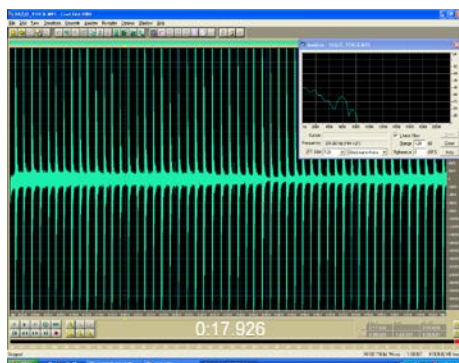
附錄四：波形圖



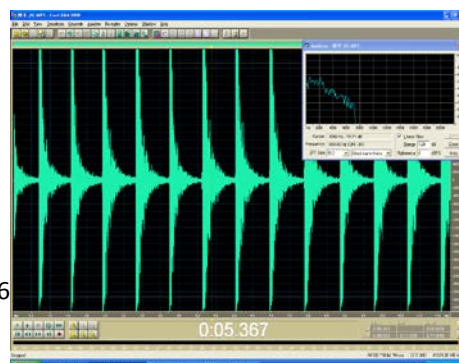
說明：李木



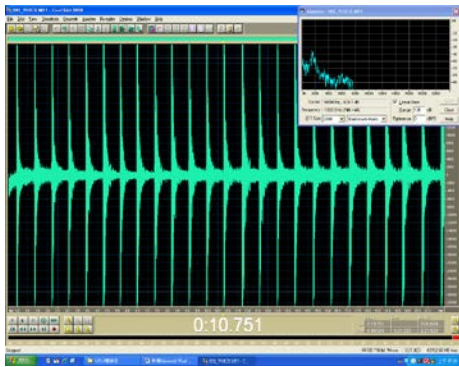
說明：杉木



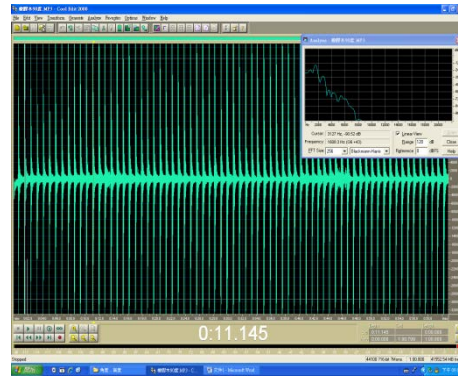
說明：松木



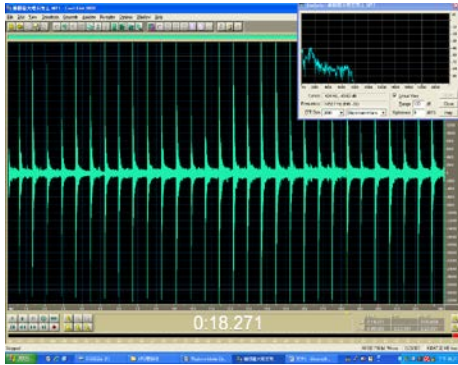
說明：樟木



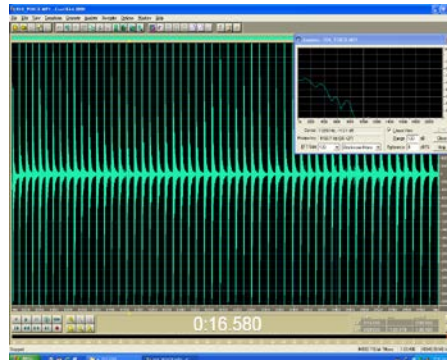
說明：櫟木



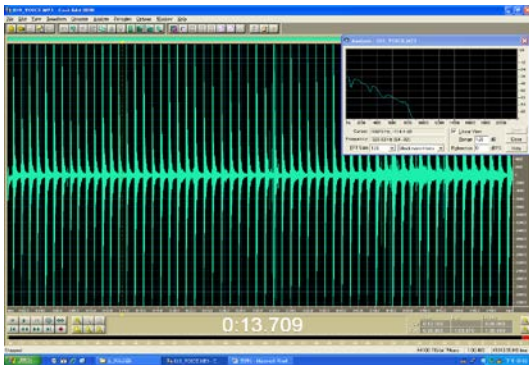
說明：橡木



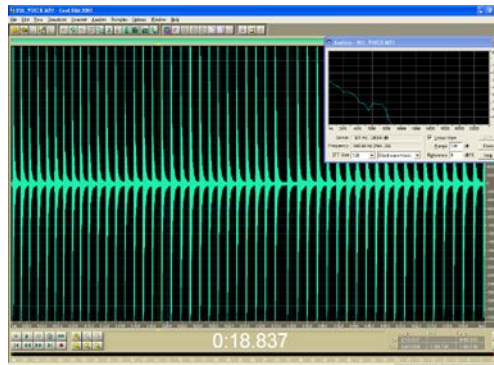
說明：橡膠木



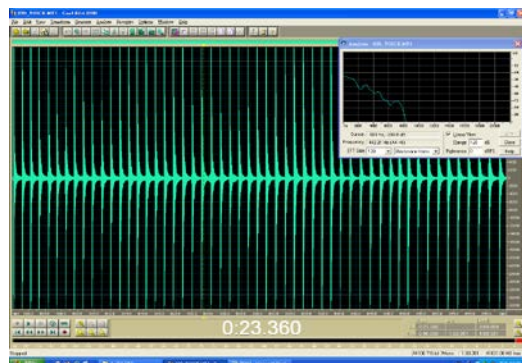
說明：粗 10 公分，長 70 公分的竹



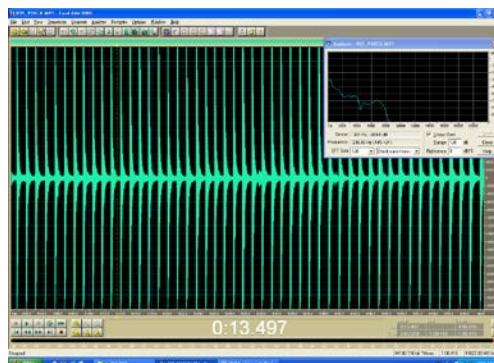
說明：直徑 10 公分，長 55 公分的竹子



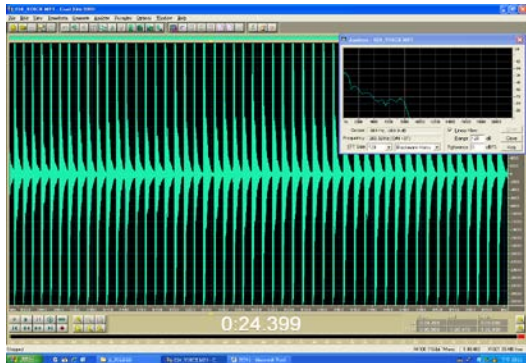
說明：直徑 10 公分，長 45 公分的竹子



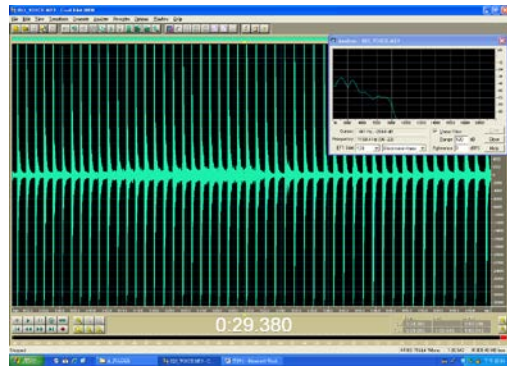
說明：直徑 6.5 公分，長 70 公分的竹子



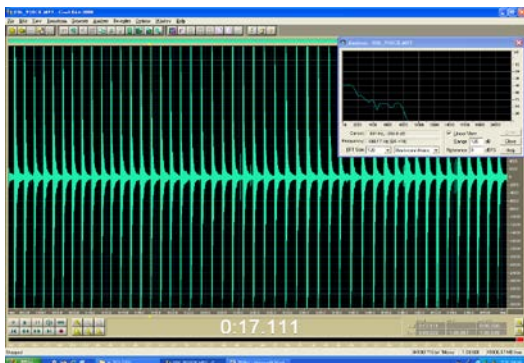
說明：直徑 6.5 公分，長 55 公分的竹子



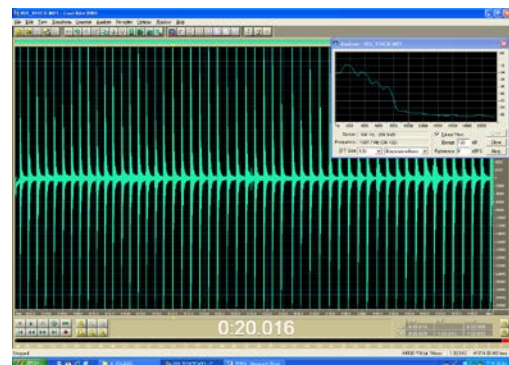
說明：直徑 6.5 公分，長 45 公分的竹子



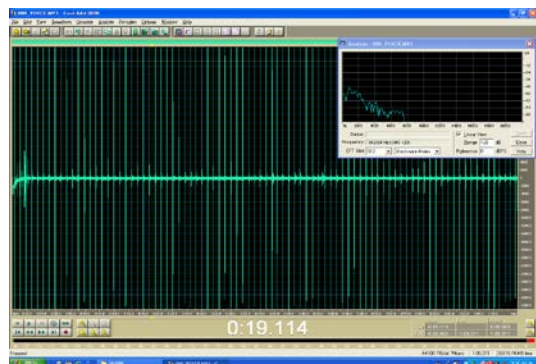
說明：直徑 9.5 公分，長 70 公分的竹子



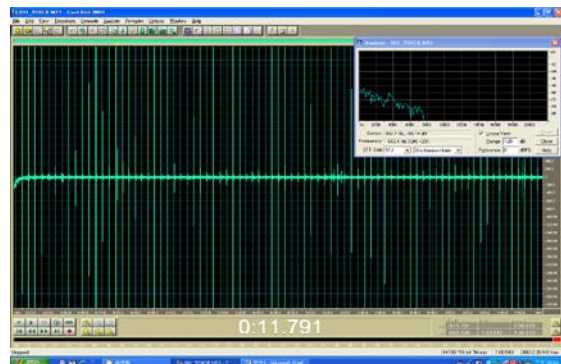
說明：直徑 9.5 公分，長 55 公分的竹子



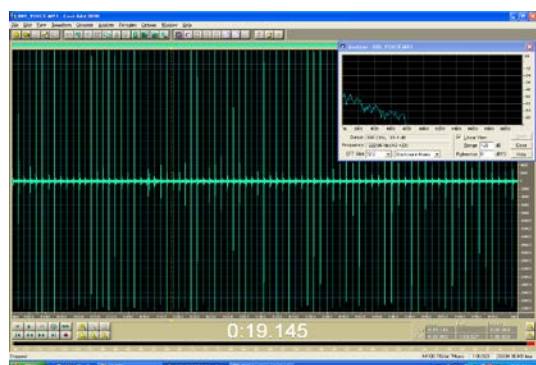
說明：直徑 9.5 公分，長 45 公分的竹子



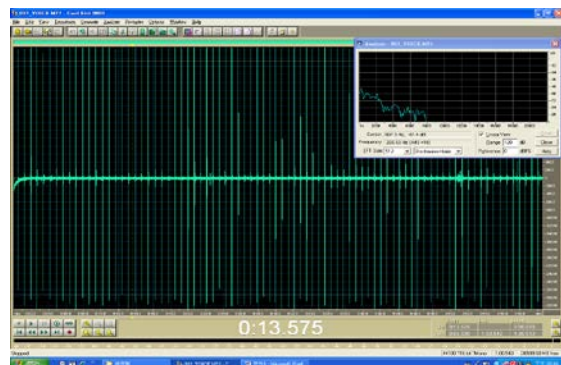
說明：彩蛋的竹籤高度為 3 公分



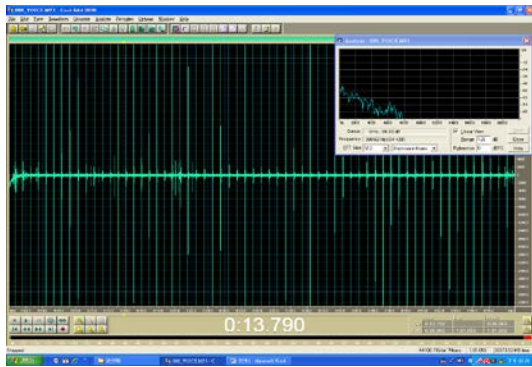
說明：彩蛋的竹籤高度為 6 公分



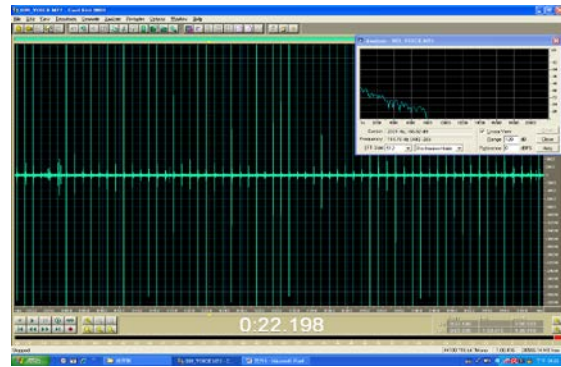
說明：彩蛋的竹籤高度為 9 公分



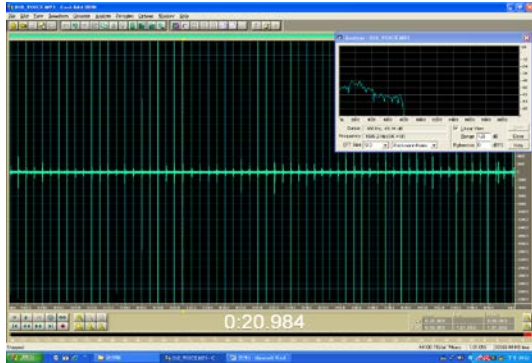
說明：彩蛋的竹籤高度為 12 公分



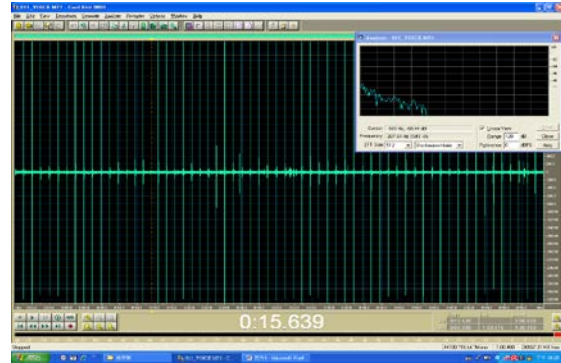
說明：乒乓球的竹籤高度為 3 公分



說明：乒乓球的竹籤高度為 6 公分



說明：乒乓球的竹籤高度為 9 公分



說明：乒乓球的竹籤高度為 12 公分

附錄五：音階頻率對照表

音階頻率對照表					
低音	頻率	中音	頻率	高音	頻率
Do	262	Do	524	Do	1048
Do#	277	Do#	554	Do#	1108
Re	294	Re	588	Re	1176
Re#	311	Re#	622	Re#	1174
Mi	330	Mi	660	Mi	1320
Fa	349	Fa	698	Fa	1396
Fa#	370	Fa#	740	Fa#	1480
So	392	So	784	So	1568
So#	415	So#	830	So#	1660
La	440	La	880	La	1760
La#	464	La#	928	La#	1856
Si	494	Si	988	Si	1976