

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 生活與應用科學科

第一名

030804

天籟美聲樂"陶陶"

學校名稱： 臺北市立民生國民中學

|        |       |
|--------|-------|
| 作者：    | 指導老師： |
| 國二 林昱甫 | 蘇恭彥   |
| 國二 林彥成 | 江幸真   |
| 國二 沈一心 |       |
| 國二 趙祐德 |       |

關 鍵 詞：頻率、自製陶板(陶筒)、自製陶板琴(陶筒琴)

## 壹、摘要

本研究以生活科技課程中製陶的方法，經軟體 Cool Edit Pro 2.1 來討論有關陶板（筒）的聲音頻率。

在研究一中，分析陶板厚度與發聲頻率成 1 次線性關係、長度與頻率成 2 次反比關係(與弦樂器不同)而寬度對頻率影響不大。

接著在研究二中發現，頻率與陶筒厚度成 1 次線性關係、筒高約成 1.5 次方反比並與孔徑大小約成 1.7 次方反比。

在研究三中發現，陶板兩邊的支撐位置在全長的  $\frac{9}{40}$  處，敲擊後的響度最大。

在研究四中，利用砂輪機及磨刀石微調陶板長度後，發現頻率與陶板長度的微小變化量成 1 次線性關係。(此結果與研究一中，陶板總長度與頻率成 2 次反比近似)。

最後結合研究一、二所得的數學關係，順利自製 12 平均律的陶板琴及一組 8 度音階的陶筒琴。

## 貳、研究動機

去年十月時參加鶯歌當地舉辦的「向世界發聲陶大哥大」活動。在此活動當中，有大小不同的陶製編鐘和長短不同的中空管，當我們以敲擊棒打擊時，能發出清脆樂耳的聲音，故引起我們的興趣，剛好生活科技製造科技課程接觸到製陶的方法、在理化課本第三冊第二章在教聲波，所以決定製作陶板、陶筒為出發點，研究不同大小、不同厚度的陶板及陶筒的聲音變化，進一步能發展製作一套陶製樂器。



圖 1-1：陶博館的樂器



圖 1-2：編鐘



圖 1-3：迷你窯



圖 1-4：練土機



圖 1-5：陶筒修坯



圖 1-6：鑽孔

## 參、研究目的

- 一、在研究一中探討陶板的長度、寬度、厚度與頻率的關係。
- 二、在研究二中探討陶筒的孔徑大小、長短、厚度與頻率的關係。
- 三、在研究三中探討陶板平放兩側支撐位置與響度的關係。
- 四、在研究四中製作標準音階的陶板琴與陶筒琴。

## 肆、研究設備及器材

- 一、自製陶板(陶土擰塑、燒製)、自製陶筒(陶土擰塑、燒製)。
- 二、修坯工具、尺、游標卡尺、鑽頭、磨刀石、手提式砂輪機。
- 三、陶板平放架設器(空針、軟管、三叉接頭、木板、止滑墊)。
- 四、自製敲擊儀器(軸承、木板、銅條、三叉管、指針、量角器、塑膠敲擊棒)。
- 五、自製陶板琴(木板、止滑墊)、自製陶筒琴(銅線、木板)。
- 六、Cool Edit Pro 2.1(聲音處理軟體)。
- 七、筆記型電腦、麥克風、分貝計。



圖 2-1：分貝計



圖 2-2：修坯工具



圖 2-3：調音器



圖 2-4：手提砂輪機

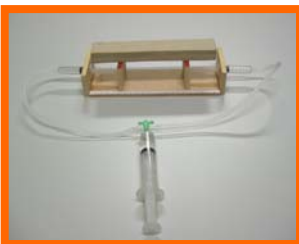


圖 3-1：陶板架設器

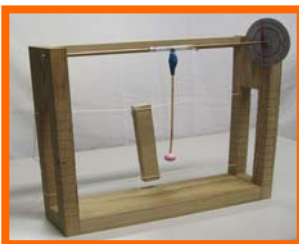


圖 3-2：陶板敲擊器



圖 3-3：磨刀石細磨



圖 3-4：砂輪機粗磨



圖 4-1：自製陶筒



圖 4-2：自製陶筒琴



圖 4-3：自製陶板



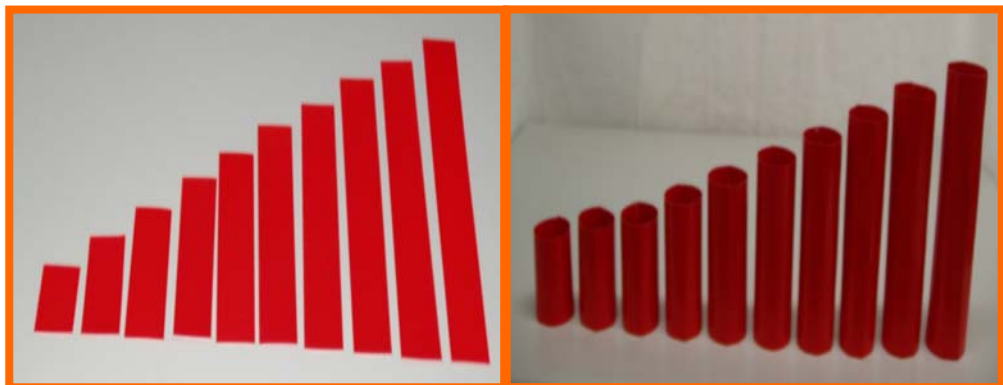
圖 4-4：自製陶板琴

## 伍、研究過程

### 一、自製實驗材料的製作過程

#### (一)、製作紙板模擬陶板陶筒的數量尺寸

1. 首先我們推測可能影響發聲頻率的變因有燒窯溫度、陶土成份、厚度、長度、寬度、有無鑽孔，因開窯成本高亦為求實驗精準，經由討論決定本研究的陶板及陶筒製作數量，以同一批陶土來製作，及一次燒窯完成。
2. 在相同燒窯溫度、相同窯土材料的情況下，探討厚度、長度、寬度、有無孔對頻率的影響。首先擬製作陶板（筒）長寬高尺寸一覽表，因慮及直接製作陶板陶筒尺寸組數多容易混淆，故先以不同顏色的書面做模型(圖 5)來模擬陶板陶筒的完成結果。



不同長度的紙板，同尺寸紙板捲起來變為內徑相同，長度不同的紙筒



不同寬度的紙板，同尺寸紙板捲起來變為同長度、不同內徑的紙筒

圖 5：紙模型

#### (二)、陶器製作流程

1. 第一批燒製的陶板、陶筒以實驗性質為主：了解長度、厚度、寬度變化與陶板(筒)敲擊頻率關係。
2. 第二批燒製的陶板、陶筒以製作出陶板琴、陶筒琴為目標：依據第一批燒製成果經由敲擊實驗與電腦分析，推測出製作陶板琴與陶筒琴的尺寸規格，來進行第二批的陶板(筒)的製作。





圖 6：選土  
(苗栗陶土與瓷土的混合(約 4:1)  
※同一批採購的土



圖 7：練土機 (機器練土)  
先用練土機練製二次完成，然後放置在  
塑膠袋內，重覆以上步驟，將預估使用的  
土量一次練製完成。



圖 8：壓製 (手工練土)  
以心肺復甦術的姿勢(雙手重疊，兩  
臂伸直)輪流且平均壓正、反面，若  
兩側有突出，可輕輕的壓(避免乾  
裂)，壓到約兩公分厚。



圖 9：陶板機 (陶板機製作陶片)  
將旋桿(壓製厚度控制器)每次順時  
針半圈→壓擰→然後將陶板翻面，反  
覆以上步驟 3 次，把陶片頭尾輕慢的  
拉起，移放在已鋪布的木板上



圖 10：陶板裁切  
把陶片四邊過薄的陶土切掉



圖 11：切割完成  
用尺及刀片量取適當的尺寸進行裁切



圖 12：  
完成陶板

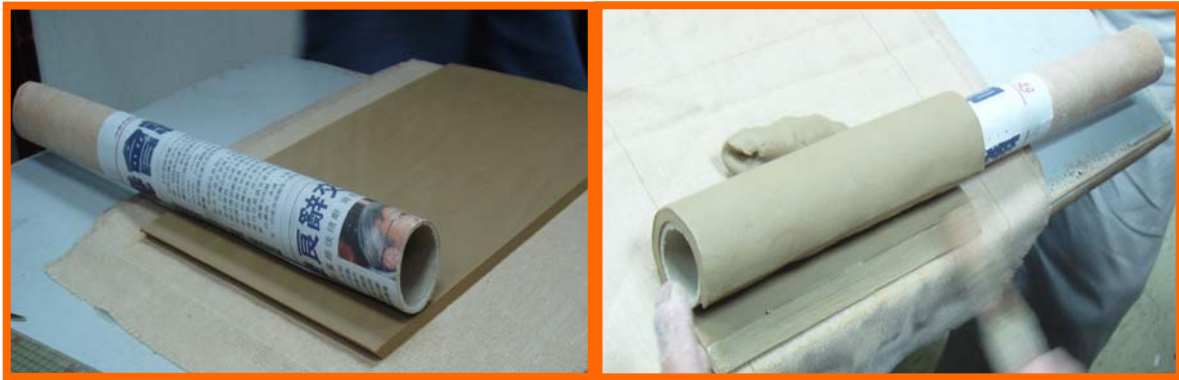


圖 13：捲陶筒

用直尺和木板把陶土片切割出陶筒的高，使陶片成長方形，並在要在要捲起的一邊斜切(黏合用)，選擇適合尺寸的紙筒（已包上報紙）捲陶筒(捲製)連墊布(因陶片不易捲起)、陶片、紙筒一起捲起，在另一處斜切面處做記號，斜切後將兩個斜切面塗上泥漿，接合完成



圖 14：乾燥

自製完成的陶板、陶筒自然晾乾，在乾燥的過程中，要每隔一段時間，持續不斷地翻面（陶板）或翻轉（陶筒），顏色由深轉變至淺，直到完全乾燥。



圖 15：電窯燒製

利用電窯，燒結溫度：  
：1230℃~1235℃

(三)、敲擊器製作流程：第一代敲擊器(如圖 16 所示)，第二代敲擊器(如圖 17 所示)

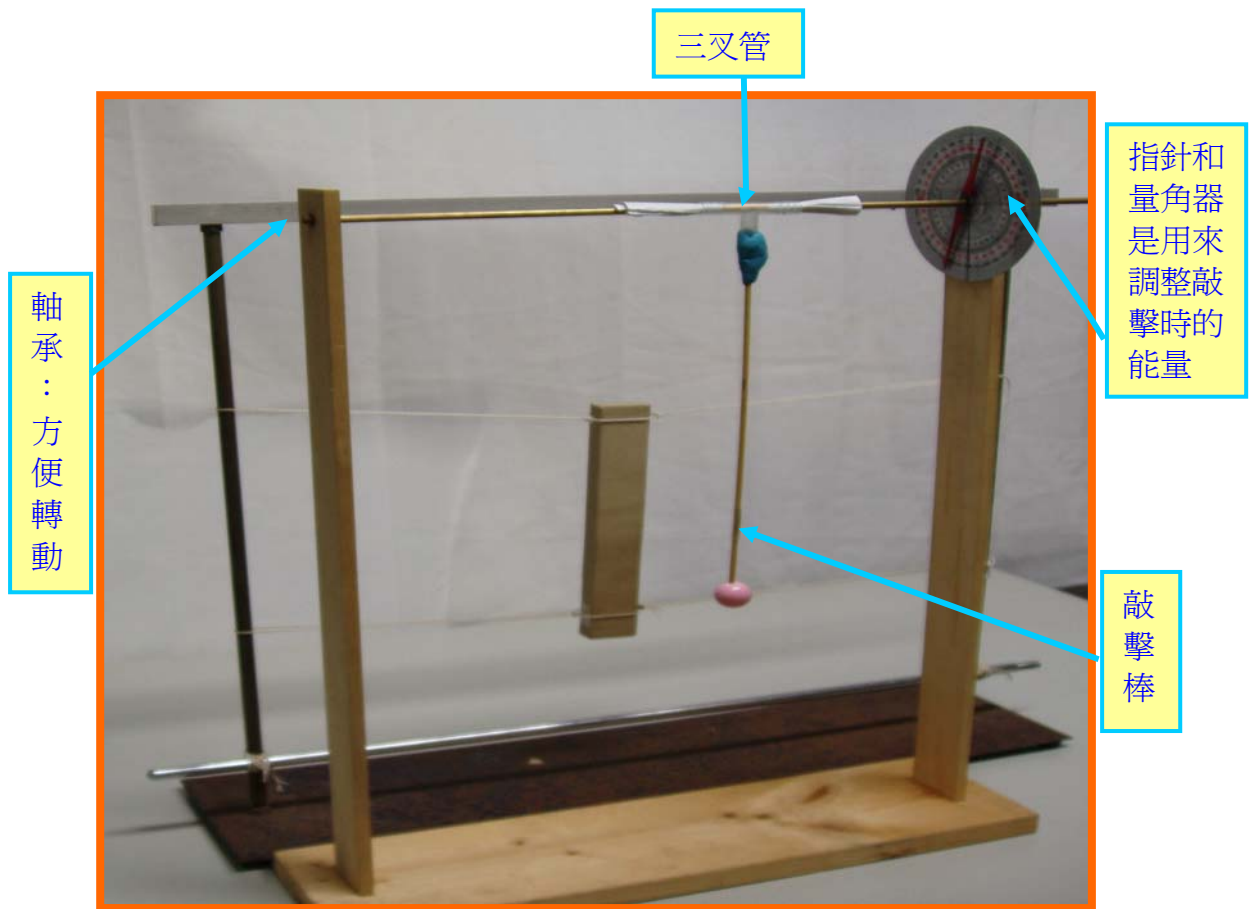


圖 16：第一代敲擊器及架設器，敲擊高度不易控制且較佔空間

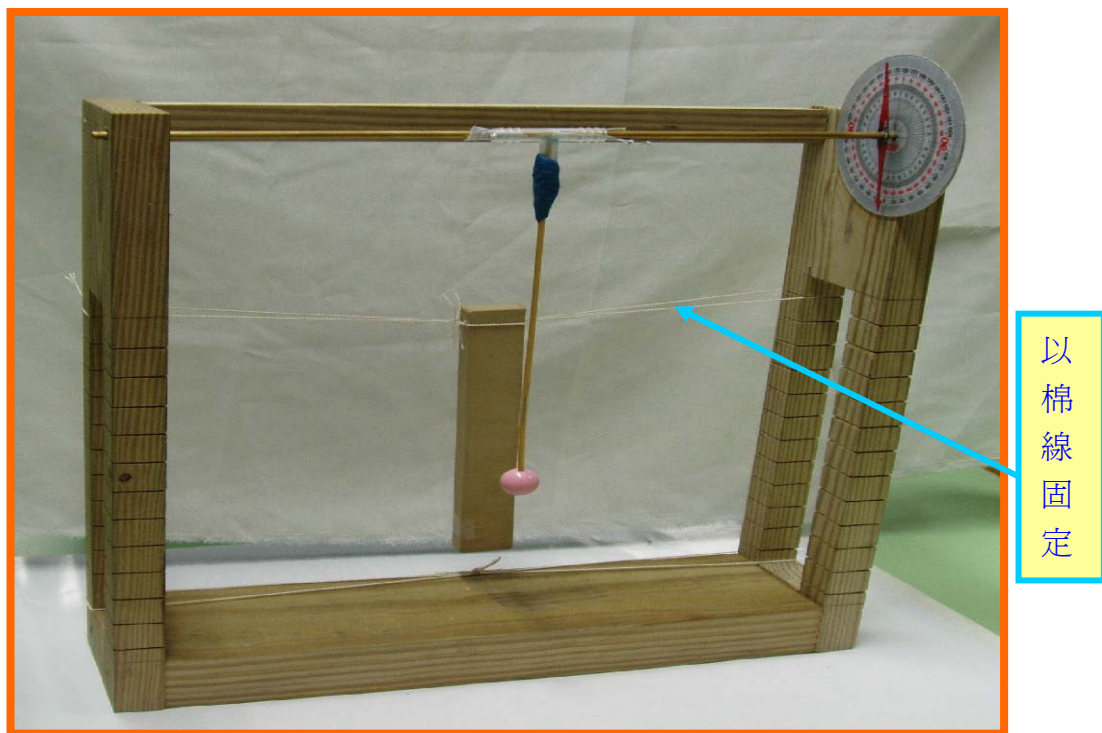


圖 17：第二代敲擊器，可直立也可平放敲擊，敲擊與架設合為一體。



#### (四)、測量陶器頻率及聲音響度：

1. 陶器架和敲擊器位置固定，放置實驗陶板（陶筒），麥克風和電腦就位。
2. 調好敲擊器指針的角度使能量一致，並在軟體開始紀錄時放開指針。
3. 以“Cool edit 2.1” 軟體(如圖 18 所示)紀錄五次數據，並存在電腦中，以波形振幅最大值為基音頻率。
4. 以分貝計（可精確至 0.1 分貝）測量響度，並以“SE322” 軟體(如圖 19 所示)分析。

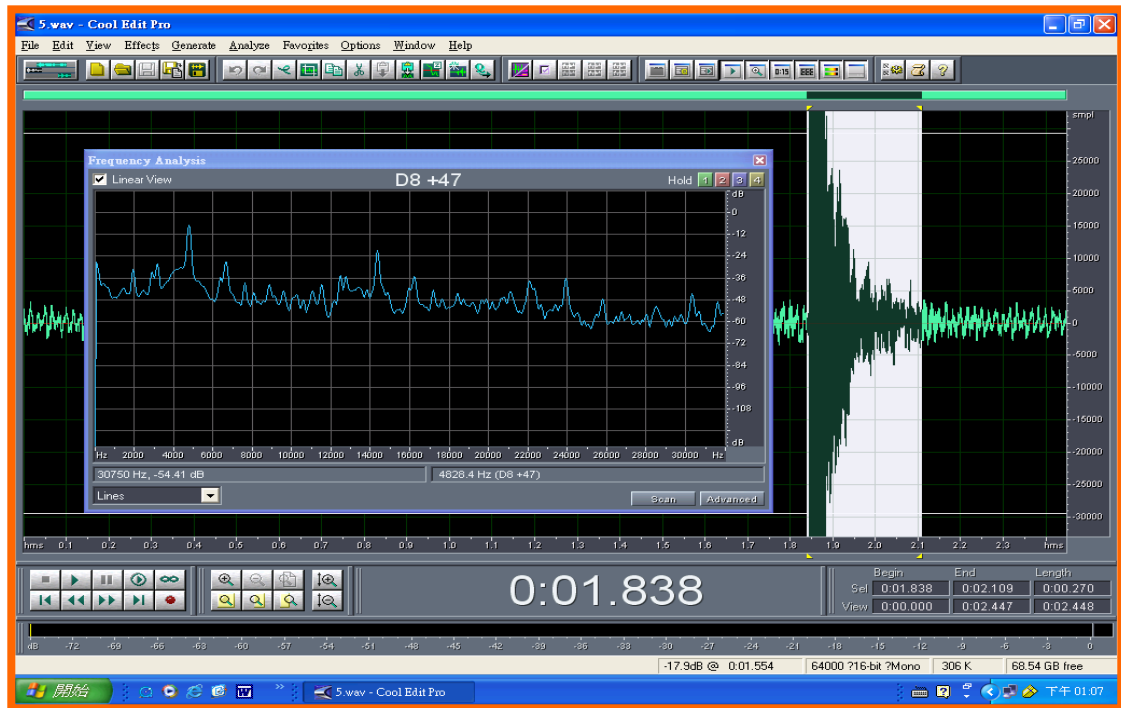


圖 18：Cool edit 2.1 分析頻率



圖 19：SE322 分析分貝



(五)、選擇敲擊響度最大的塑膠球作為敲擊棒

準備塑膠球、木球、瓷球、毛線球四種不同材質敲擊棒(如圖 20 所示)來敲擊陶板,以電腦連接麥克風,啟動分貝計軟體,錄音及分析分貝值,利用 EXCEL 分析分貝值與不同材質敲擊棒的關係,發現塑膠球敲擊響度最大,也考慮塑膠球的敲擊較不會損壞陶器,故所有的實驗都使用塑膠球。



圖 20：不同材質敲擊棒

(六)、選擇陶器架設的最佳方法

1.陶板的架設方式有三種：

- (1) 水平平放方式(如圖 21 所示)
- (2) 一端固定的直立方式(如圖 22 所示)
- (3) 兩端固定的直立方式(如圖 23 所示),

以電腦連接麥克風,啟動分貝計軟體,錄音及分析分貝值,利用 EXCEL 分析分貝值與不同架設的關係,發現水平平放方式響度最大,故所有陶板的敲擊實驗皆以最佳的水平平放方式來架設。



圖 21：水平平放方式

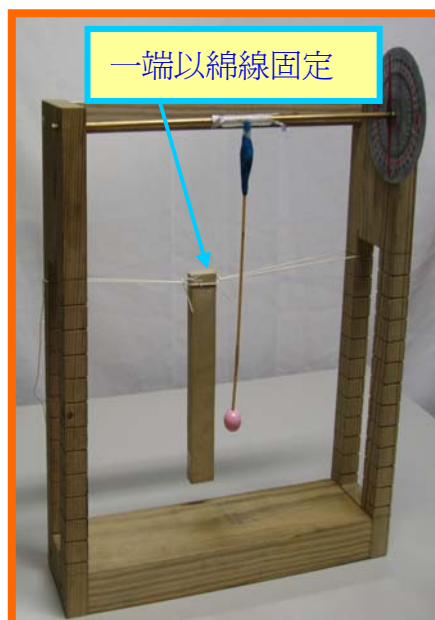


圖 22：直立方式(一端固定)

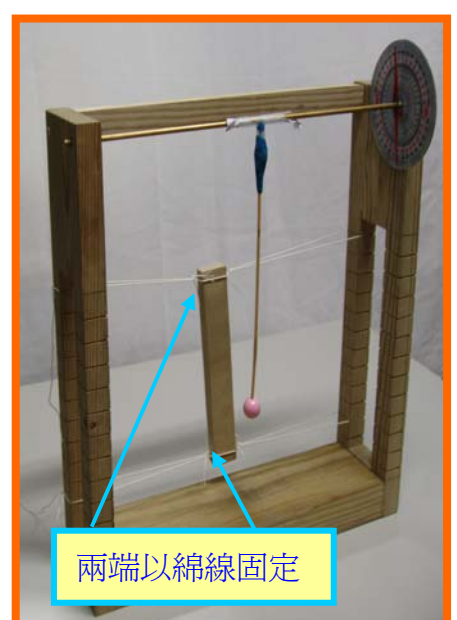


圖 23：直立方式(兩端固定)

## 2. 陶筒懸掛方式

(1). 第一批燒製的陶筒(如圖 24 所示)是以實驗性質為主，利用架設器使用綿繩將陶筒兩端雙綁、單側綁兩種架設方式，以相同於陶板測試響度的實驗方法，發現單側懸掛綁法的陶筒敲擊時的響度最大，故此批陶筒的敲擊實驗皆以最佳的單綁懸掛來架設。



圖 24：第一批陶筒單綁懸掛



圖 25：第二批陶筒以銅線懸掛

(2). 第二批燒製的陶筒(如圖 25 所示)是以製作陶筒琴為目標，為考慮美觀及實用性，故將燒製完成的每一支陶筒在距離端點 2 公分處鑽孔(如圖 26 所示)，使用銅線懸掛方式來敲擊。



圖 26：陶筒距端點 2 公分處鑽孔

## (七)、陶板琴、陶筒琴的製作

### 1、陶板琴的製作：

(1). 第一代陶板琴(如圖 27 所示)是以實驗性質的現有陶板找出長短、厚度不一的陶板，而且在校準音階頻率非常不易。

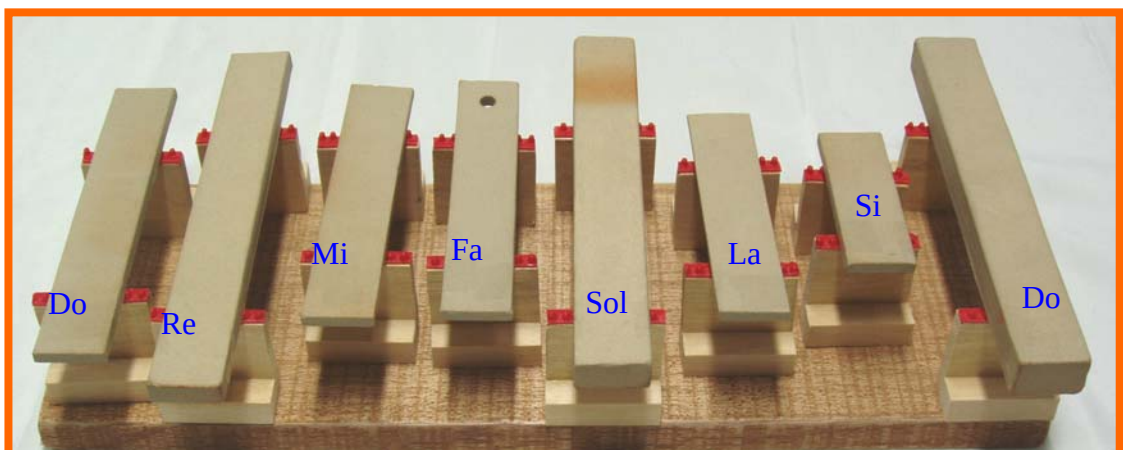


圖 27：第一代陶板琴

(2). 第二批陶板是依據第一批陶器實驗結果，所歸納出的數學關係式推測標準音調頻率的陶板規格來燒製，經由反覆的砂輪機粗磨(如圖 28、29 所示)、手工的細磨及測量頻率，調音器、調音軟體校準音調的程序，製作出一組標準音階(現代樂器的十二平均律)，而且長度呈規律變化的陶板琴，也依支撐點最佳位置設計製作出成梯形樣式的陶板琴架(如圖 30 所示)。



圖 28：不同粗細砂輪盤



圖 29：砂輪機砂磨陶板



圖 30：梯形陶板琴架

## 2、陶筒琴的製作：

第一批陶筒測量頻率都較高，故第二批陶筒利用數學關係式推測出其標準音調頻率的陶筒規格來燒製，經由反覆的手提砂輪機粗磨(如圖 31 所示)、手工使用砂紙的細磨陶筒(如圖 32 所示)的長度或厚度，及測量敲擊頻率校準音調的程序，製作出接近標準音調而且長度呈現規律變化的一組八度音階陶筒琴，並以銅線懸掛方式敲擊。



圖 31：陶筒以砂輪機磨長度



圖 32：陶筒以砂紙磨厚度



## 陸、研究結果

一、研究一：探討陶板厚度、寬度、長度與頻率的關係。

(一) 研究一之一：探討陶板厚度與頻率的關係。

1. 自製不同厚度的陶板五片(如圖 33 所示)。
2. 利用游標卡尺測量陶板厚度。
3. 電腦準備好，啟動頻率分析軟體 Cool Edit 2.1，錄音及分析頻率。
4. 測量及紀錄五次，並求平均值。
5. 利用 EXCEL 分析頻率與陶板厚度的關係。

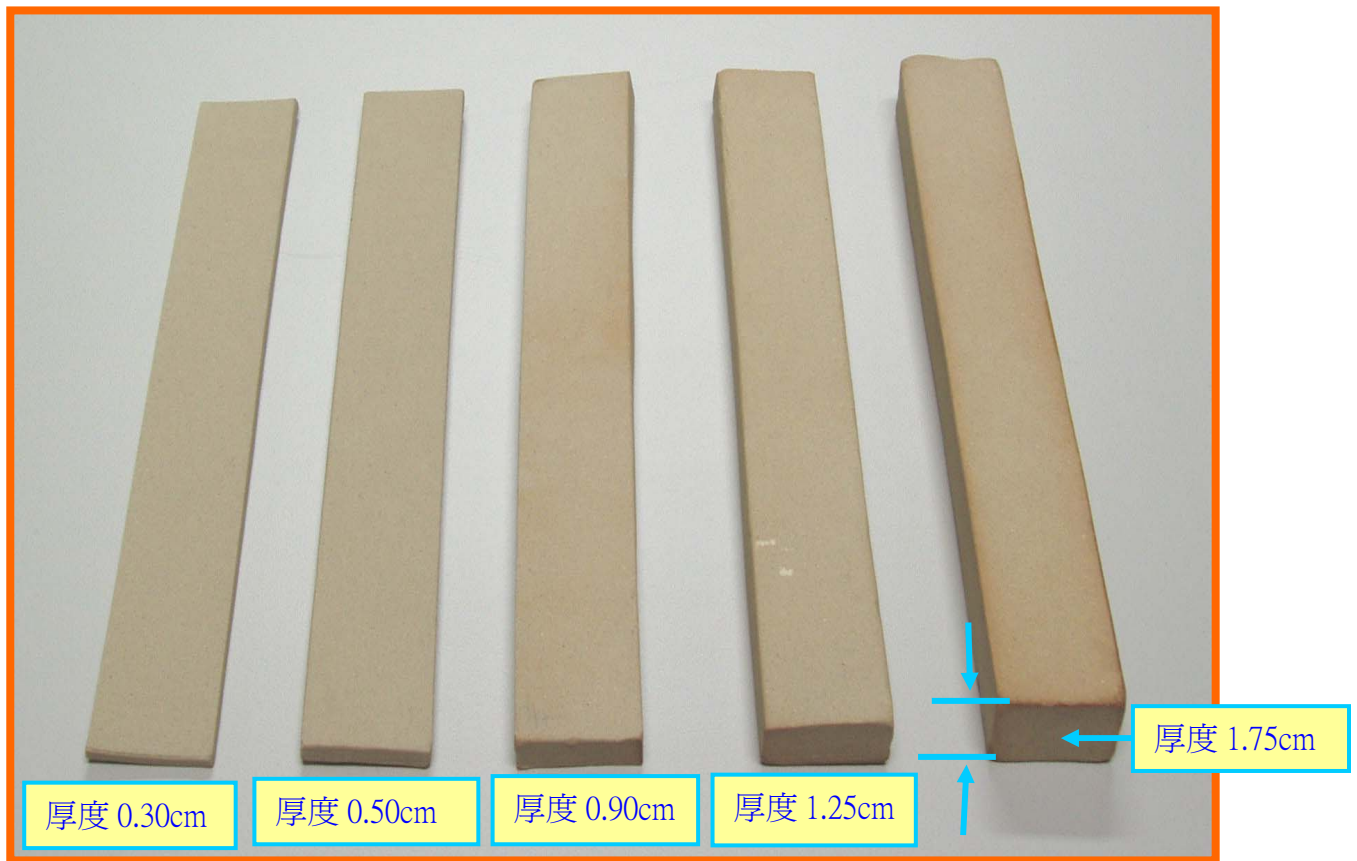
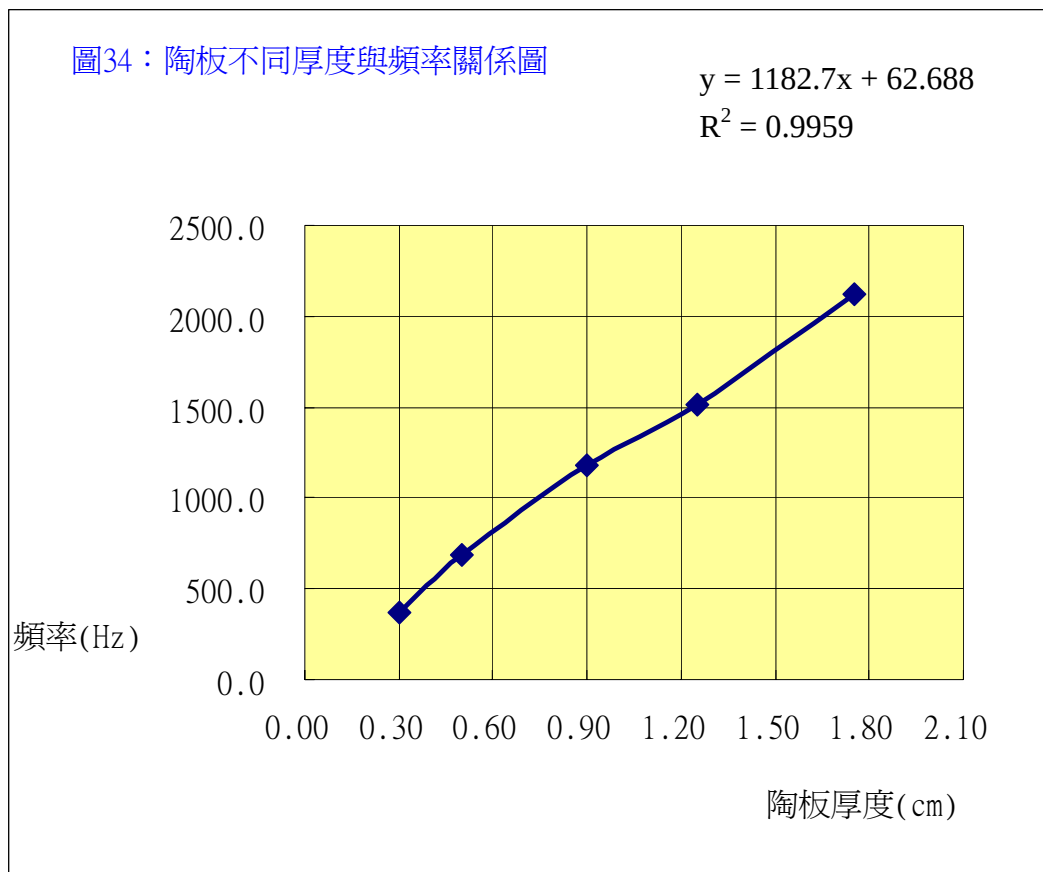


圖 33：厚度不同的五個陶板



表一：陶板不同厚度與頻率比較

| 陶板編號 | 厚度<br>cm | 寬度<br>cm | 長度<br>cm | 頻率測量 1 <sup>st</sup> (Hz) | 頻率測量 2 <sup>nd</sup> (Hz) | 頻率測量 3 <sup>rd</sup> (Hz) | 頻率測量 4 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量 5 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量平均值(Hz) |
|------|----------|----------|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| 1    | 0.30     | 3.00     | 20.20    | 366.7                     | 365.3                     | 364.0                     | 366.0                     | 366.7                     | 365.74      |
| 2    | 0.50     | 3.00     | 20.20    | 688.3                     | 683.0                     | 688.3                     | 688.3                     | 688.3                     | 687.24      |
| 3    | 0.90     | 3.00     | 20.20    | 1183.0                    | 1183.0                    | 1183.0                    | 1183.0                    | 1183.0                    | 1183.0      |
| 4    | 1.25     | 3.00     | 20.20    | 1513.0                    | 1513.0                    | 1513.0                    | 1513.0                    | 1513.0                    | 1513.0      |
| 5    | 1.75     | 3.00     | 20.20    | 2123.0                    | 2123.0                    | 2123.0                    | 2123.0                    | 2123.0                    | 2123.0      |



- 說明：1.研究發現，**陶板越厚時，頻率越高**。（此與課本弦樂器中，愈粗的弦線頻率愈低，**結果相反**）
- 2.經由 EXCEL 分析陶板厚度與頻度其相關係數 R 大於 0.75，達高度相關，趨勢線方程式  $y = 1182.7x + 62.688$ 。
- 3.故：**陶板厚度與頻率成線性關係**。

(二) 研究一之二：探討陶板長度與頻率的關係。

1. 自製不同長度的陶板八片(如圖 35 所示)。
2. 利用長尺測量陶板長度。
3. 電腦準備好，啟動頻率分析軟體 Cool Edit 2.1，錄音及分析頻率。
4. 測量及紀錄五次，並求平均值。
5. 利用 EXCEL 分析頻率與陶板長度的關係。

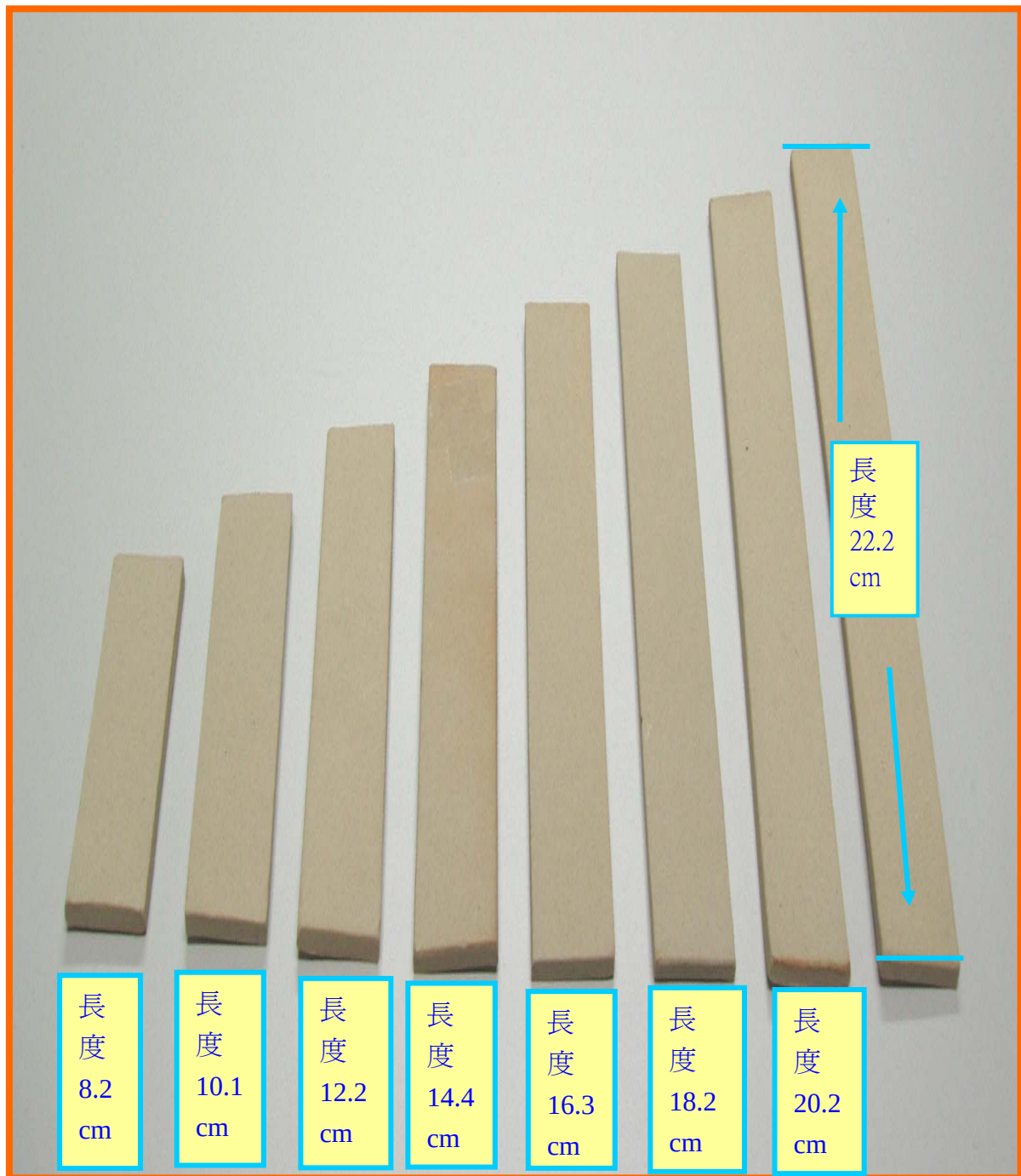
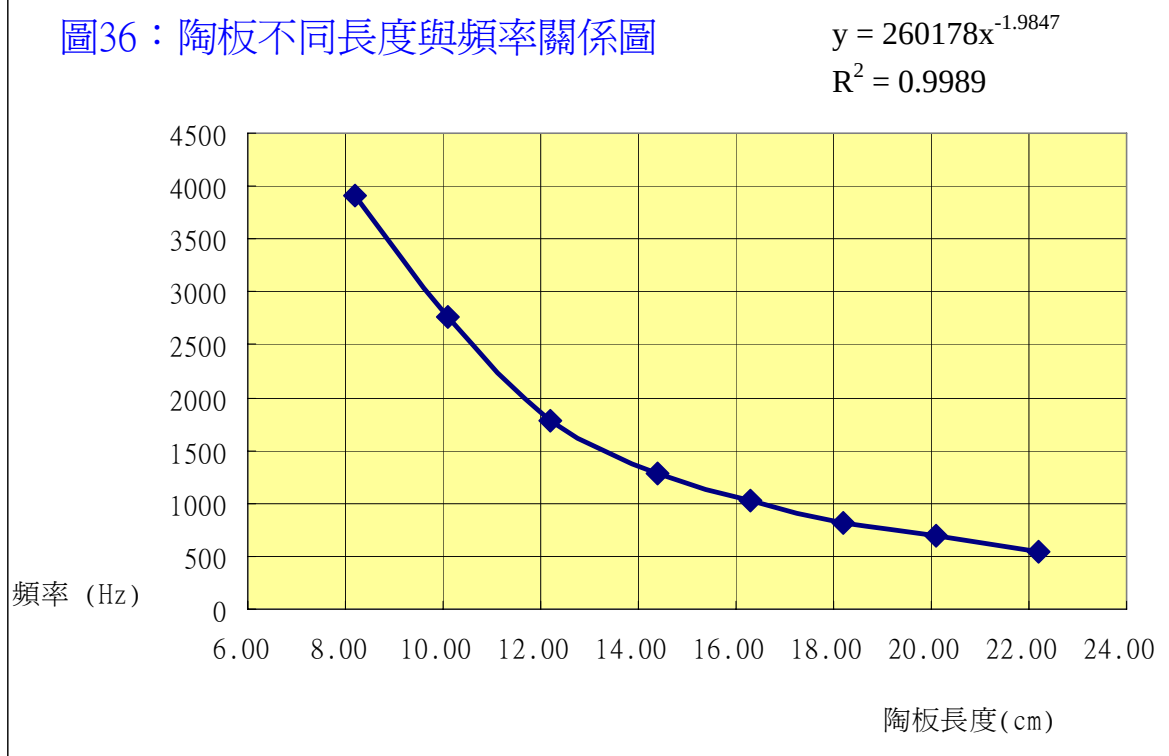


圖 35：長度不同的八個陶板

表二：陶板不同長度與頻率比較

| 陶板編號 | 厚度<br>cm | 長度<br>cm | 寬度<br>cm | 頻率測量<br>1 <sup>st</sup> (Hz) | 頻率測量<br>2 <sup>nd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>3 <sup>rd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>4 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>5 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>平均值<br>(Hz) |
|------|----------|----------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| 1    | 0.50     | 8.20     | 3.10     | 3906.0                       | 3906.0                       | 3905.0                       | 3906.0                       | 3905.0                       | 3905.6              |
| 2    | 0.50     | 10.10    | 3.10     | 2761.0                       | 2761.0                       | 2762.0                       | 2762.0                       | 2762.0                       | 2761.6              |
| 3    | 0.50     | 12.20    | 3.10     | 1789.0                       | 1789.0                       | 1789.0                       | 1789.0                       | 1789.0                       | 1789.0              |
| 4    | 0.50     | 14.40    | 3.10     | 1288.0                       | 1288.0                       | 1289.0                       | 1289.0                       | 1289.0                       | 1288.6              |
| 5    | 0.50     | 16.30    | 3.10     | 1032.0                       | 1033.0                       | 1034.0                       | 1032.0                       | 1032.0                       | 1032.6              |
| 6    | 0.50     | 18.20    | 3.10     | 812.8                        | 813.5                        | 813.5                        | 813.5                        | 813.5                        | 813.36              |
| 7    | 0.50     | 20.10    | 3.10     | 688.3                        | 688.0                        | 688.0                        | 688.0                        | 688.3                        | 688.12              |
| 8    | 0.50     | 22.20    | 3.10     | 546.4                        | 547.0                        | 547.0                        | 545.0                        | 547.0                        | 546.48              |

圖36：陶板不同長度與頻率關係圖



說明：1.研究發現，陶板越長時，頻率越低。

2.經由 EXCEL 分析，可得方程式  $y = 260178x^{-1.9847}$ ，約為  $y = 260178x^{-2}$

相關係數  $R(R^2 = 0.9989)$  的絕對值大於 0.75，故可知陶板長度與頻率為高度相關。

3.故：頻率(f)與陶板長度(L)的平方成反比。



(三)研究一之三：探討陶板寬度與頻率的關係。

- 1.自製不同寬度的陶板 10 片(如圖 37 所示)。
- 2.利用長尺測量陶板寬度。
- 3.電腦準備好，啟動頻率分析軟體 Cool Edit 2.1，錄音及分析頻率。
- 4.測量及紀錄五次，並求平均值。
- 5.利用 EXCEL 分析頻率與陶板寬度的關係。

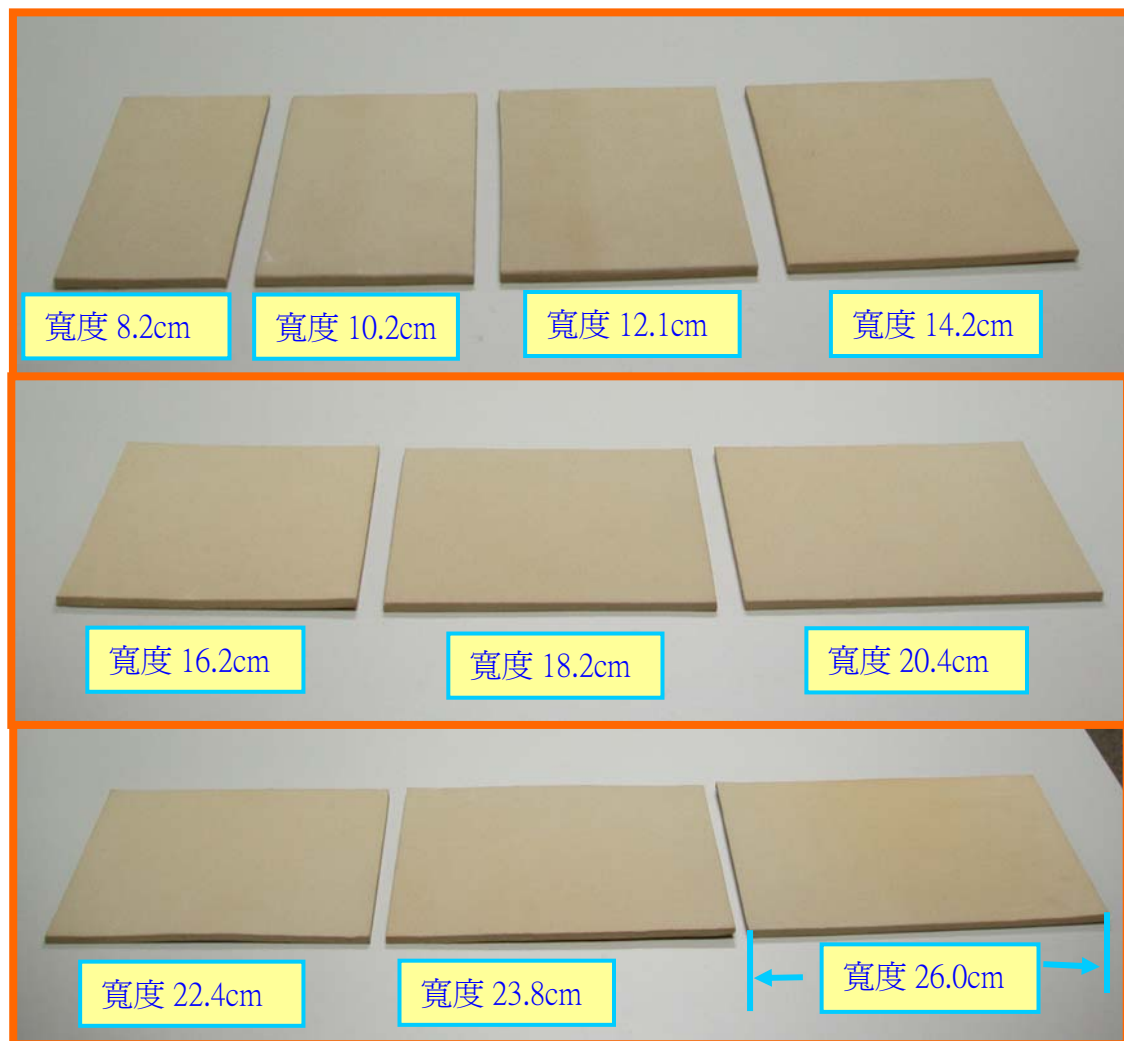
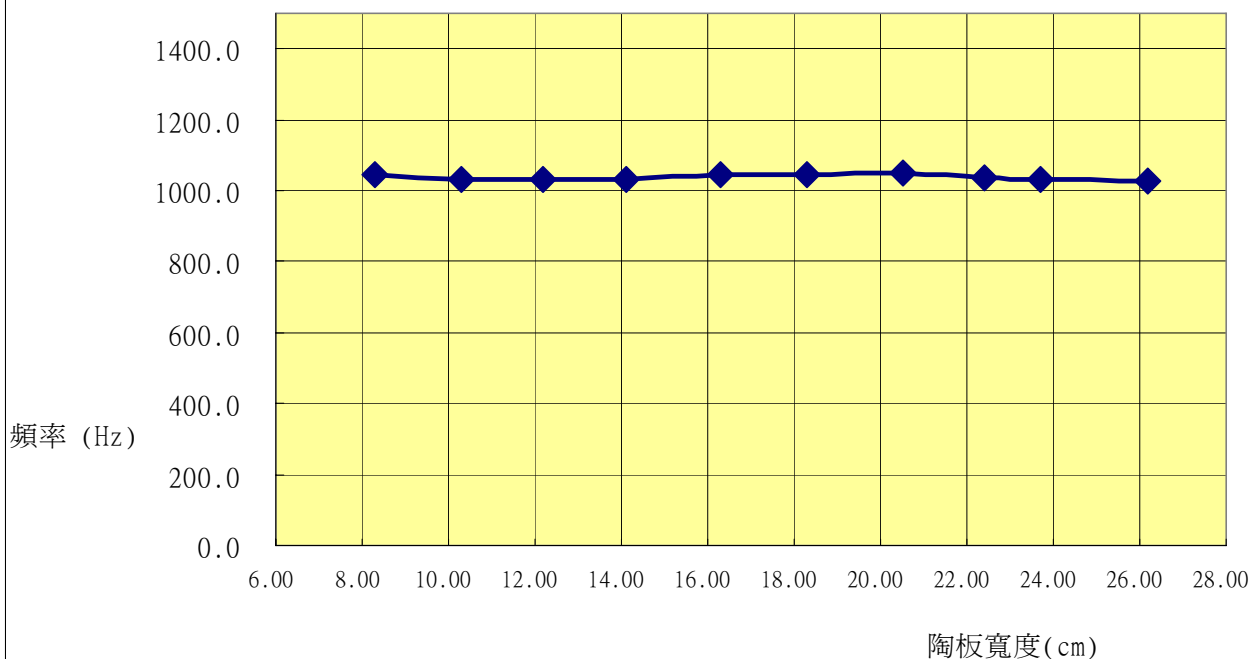


圖 37：寬度不同的十個陶板

表三：陶板不同寬度與頻率比較

| 陶板編號 | 厚度<br>cm | 長度<br>cm | 寬度<br>cm | 頻率測量<br>1 <sup>st</sup> (Hz) | 頻率測量<br>2 <sup>nd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>3 <sup>rd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>4 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>5 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>平均值(Hz) |
|------|----------|----------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|
| 1    | 0.50     | 16.20    | 8.30     | 1043.0                       | 1043.0                       | 1043.0                       | 1043.0                       | 1043.0                       | 1043.0          |
| 2    | 0.50     | 16.20    | 10.30    | 1032.0                       | 1033.0                       | 1032.0                       | 1032.0                       | 1032.0                       | 1032.2          |
| 3    | 0.50     | 16.30    | 12.20    | 1033.0                       | 1033.0                       | 1033.0                       | 1033.0                       | 1032.0                       | 1032.8          |
| 4    | 0.50     | 16.20    | 14.10    | 1032.0                       | 1032.0                       | 1032.0                       | 1033.0                       | 1033.0                       | 1032.4          |
| 5    | 0.50     | 16.30    | 16.30    | 1047.0                       | 1047.0                       | 1047.0                       | 1047.0                       | 1047.0                       | 1047.0          |
| 6    | 0.50     | 16.10    | 18.30    | 1043.0                       | 1043.0                       | 1043.0                       | 1043.0                       | 1043.0                       | 1043.0          |
| 7    | 0.50     | 16.00    | 20.50    | 1049.0                       | 1049.0                       | 1049.0                       | 1049.0                       | 1049.0                       | 1049.0          |
| 8    | 0.50     | 16.10    | 22.40    | 1038.0                       | 1038.0                       | 1038.0                       | 1038.0                       | 1038.0                       | 1038.0          |
| 9    | 0.50     | 16.30    | 23.70    | 1030.0                       | 1030.0                       | 1032.0                       | 1030.0                       | 1030.0                       | 1030.4          |
| 10   | 0.50     | 16.30    | 26.20    | 1027.0                       | 1027.0                       | 1027.0                       | 1030.0                       | 1027.0                       | 1027.6          |

圖38：陶板不同寬度與頻率關係圖



說明：1.研究發現所測量的頻率平均值為 1037.5 Hz。

2.發現陶板寬度對頻率影響不大。

## 二、探討陶筒的孔徑大小、長短、厚度與頻率的關係

### (一)研究二之一：探討陶筒厚度與頻率的關係。

- 1.自製不同厚度的陶筒 5 個(如圖 39 所示)。
- 2.利用游標卡尺測量陶筒厚度。
- 3.電腦準備好，啟動頻率分析軟體 Cool Edit 2.1，錄音及分析頻率。
- 4.測量及紀錄五次，並求平均值。
- 5.利用 EXCEL 分析頻率與陶筒厚度的關係。

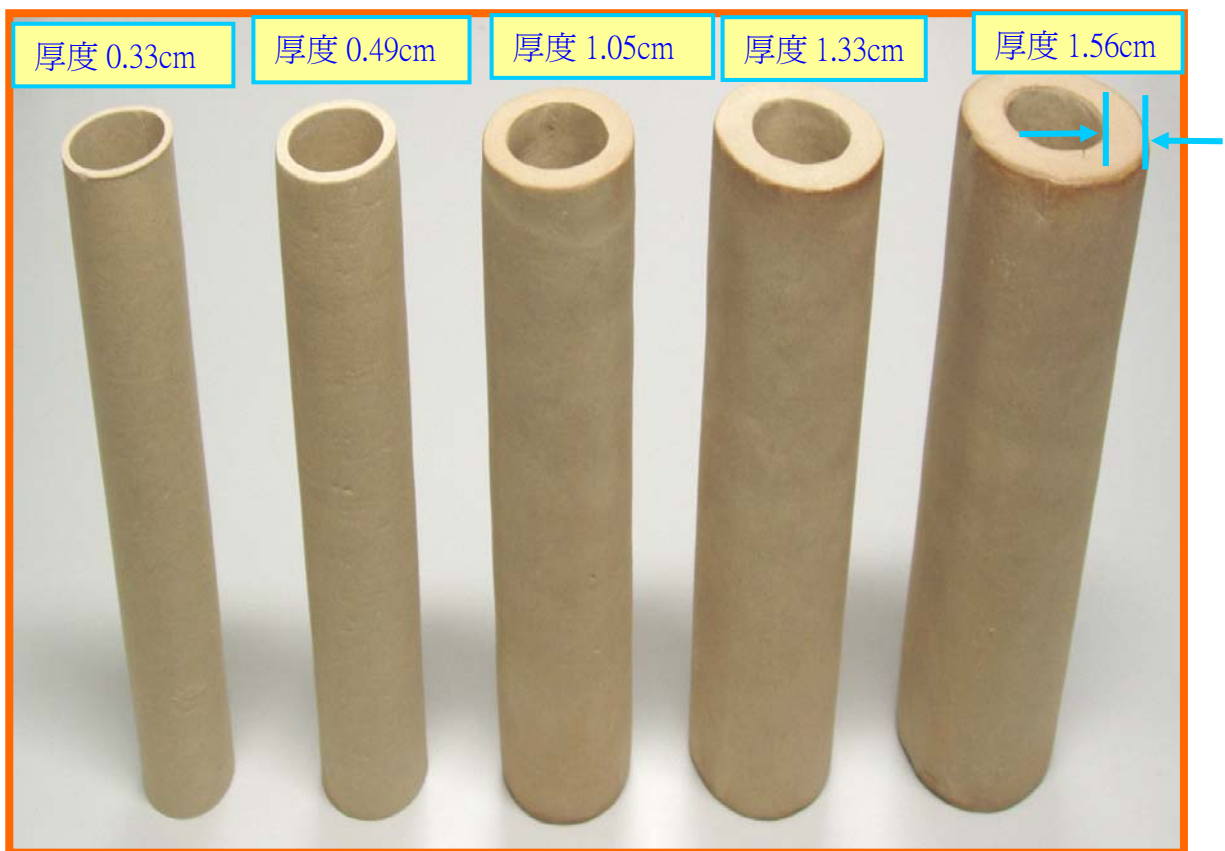
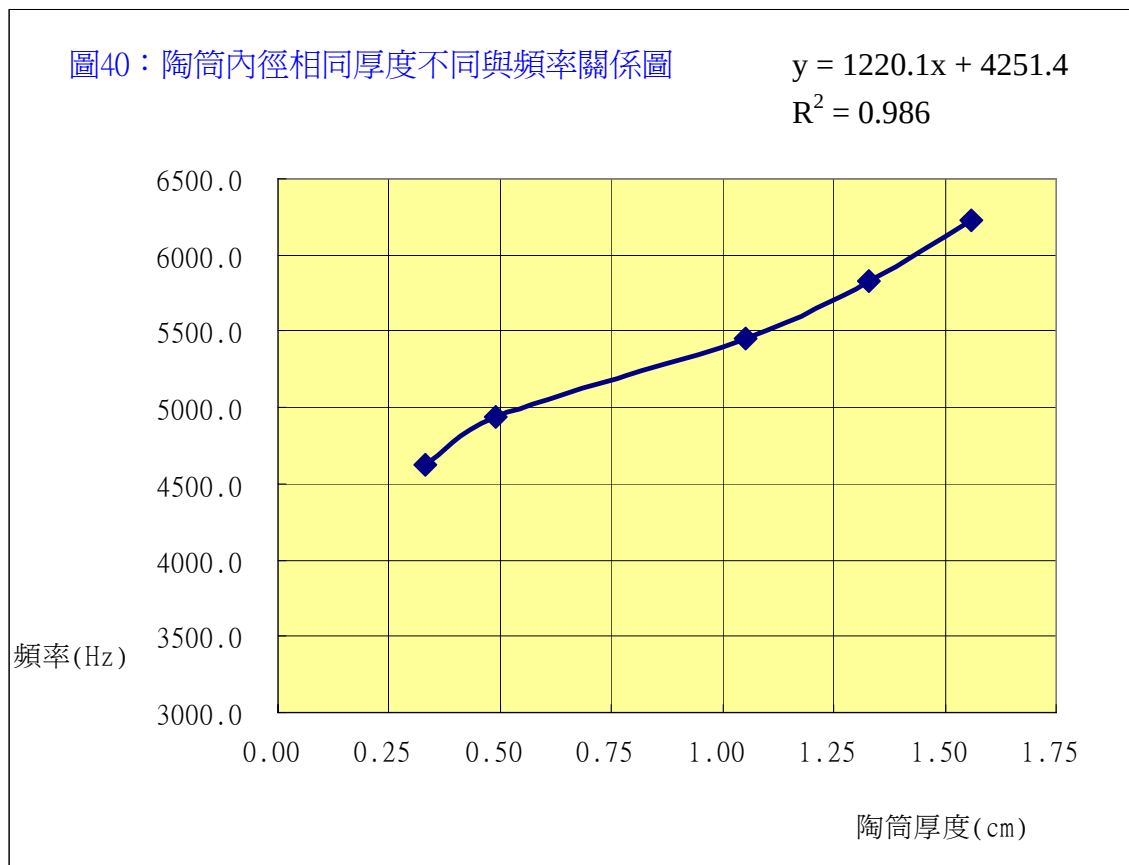


圖 39：內徑相同而厚度不同的五個自製陶筒

表四：陶筒內徑相同，厚度不同與頻率比較

| 陶筒編號 | 厚度<br>cm | 內直徑<br>cm | 長度<br>cm | 頻率測量<br>1 <sup>st</sup> (Hz) | 頻率測量<br>2 <sup>nd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>3 <sup>rd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>4 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>5 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>平均值<br>(Hz) |
|------|----------|-----------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| 1    | 0.33     | 3.50      | 20.40    | 4624.0                       | 4623.0                       | 4624.0                       | 4606.0                       | 4624.0                       | 4620.2              |
| 2    | 0.49     | 3.50      | 20.40    | 4918.0                       | 4968.0                       | 4968.0                       | 4918.0                       | 4918.0                       | 4938.0              |
| 3    | 1.05     | 3.50      | 20.40    | 5448.0                       | 5448.0                       | 5448.0                       | 5448.0                       | 5448.0                       | 5448.0              |
| 4    | 1.33     | 3.50      | 20.40    | 5830.0                       | 5830.0                       | 5828.0                       | 5828.0                       | 5829.0                       | 5829.0              |
| 5    | 1.56     | 3.50      | 20.40    | 6228.0                       | 6229.0                       | 6230.0                       | 6229.0                       | 6230.0                       | 6229.2              |



說明：1.研究發現，**陶筒越厚時，頻率越高**。

2.經由 EXCEL 分析，可得方程式  $y = 1220.1x + 4251.4$ ，相關係數為高度相關。

3.故：陶筒厚度與頻率成一次線性關係（與 P.11 研究一之一的結果相同）。



(二)研究二之二：探討陶筒高度與頻率的關係。

- 1.自製不同高度的陶筒 7 個(如圖 41 所示)。
- 2.利用游標卡尺測量陶筒高度。
- 3.電腦準備好，啟動頻率分析軟體 Cool Edit 2.1，錄音及分析頻率。
- 4.測量及紀錄五次，並求平均值。
- 5.利用 EXCEL 分析頻率與陶筒高度的關係。

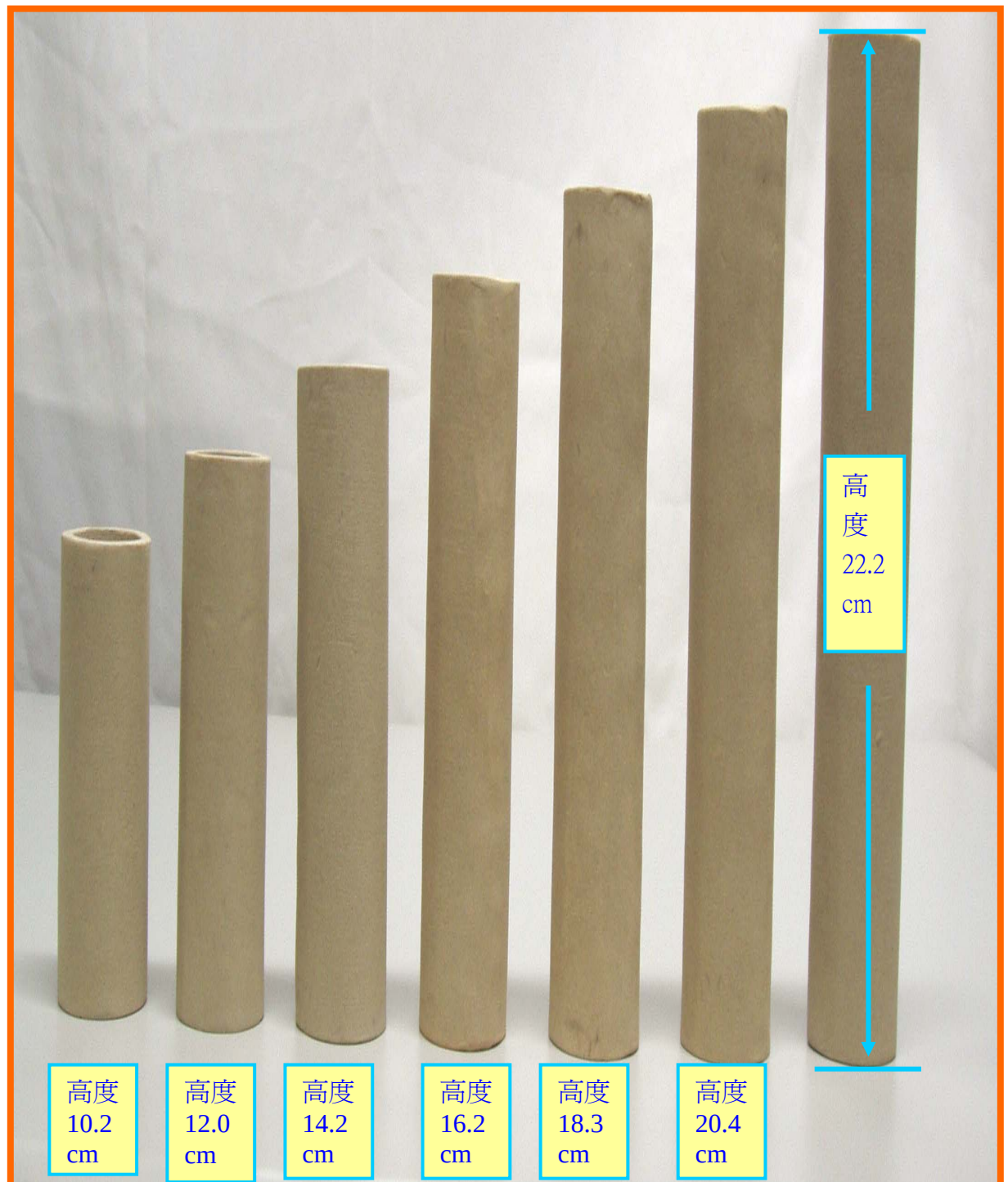
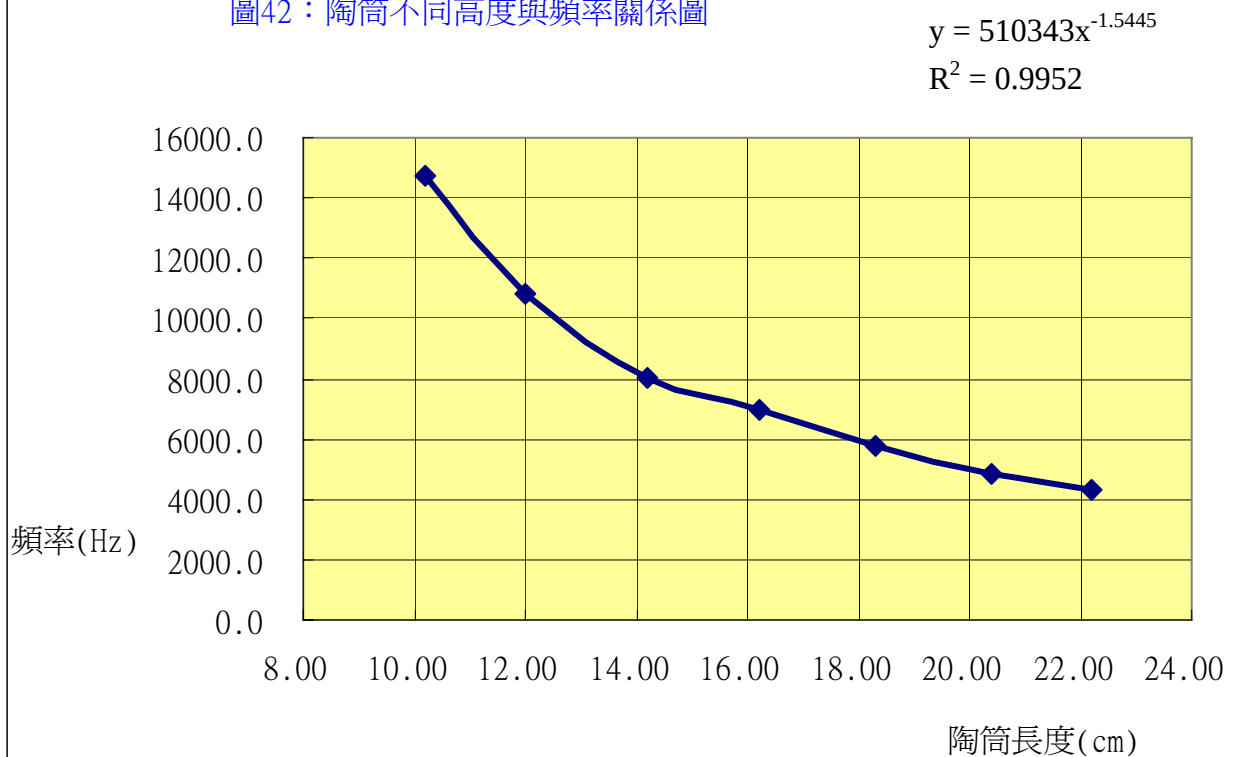


圖 41：自製不同高度的七個陶筒

表五：陶筒不同高度與頻率比較

| 陶筒編號 | 厚度<br>cm | 內直徑<br>cm | 長度<br>cm | 頻率測量<br>1 <sup>st</sup> (Hz) | 頻率測量<br>2 <sup>nd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>3 <sup>rd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>4 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>5 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>平均值<br>(Hz) |
|------|----------|-----------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| 1    | 0.55     | 3.40      | 10.20    | 14710.0                      | 14710.0                      | 14710.0                      | 14710.0                      | 14710.0                      | 14710.0             |
| 2    | 0.55     | 3.40      | 12.00    | 10810.0                      | 10810.0                      | 10810.0                      | 10810.0                      | 10810.0                      | 10810.0             |
| 3    | 0.55     | 3.40      | 14.20    | 8020.0                       | 8020.0                       | 8020.0                       | 8020.0                       | 8020.0                       | 8020.0              |
| 4    | 0.55     | 3.40      | 16.20    | 6972.0                       | 6972.0                       | 6972.0                       | 6972.0                       | 6972.0                       | 6972.0              |
| 5    | 0.55     | 3.40      | 18.30    | 5761.0                       | 5761.0                       | 5757.0                       | 5760.0                       | 5761.0                       | 5760.0              |
| 6    | 0.55     | 3.40      | 20.40    | 4822.0                       | 4822.0                       | 4822.0                       | 4822.0                       | 4822.0                       | 4822.0              |
| 7    | 0.55     | 3.40      | 22.20    | 4344.0                       | 4341.0                       | 4341.0                       | 4344.0                       | 4341.0                       | 4342.2              |

圖42：陶筒不同高度與頻率關係圖



說明：1.研究發現，**陶筒越長頻率越低**。

2.經由 EXCEL 分析，可得方程式  $y = 510343x^{-1.5445}$ ，相關係數為高度相關。

3.故：**頻率約與陶筒長度(L)1.5 次方成反比，(與 P.13 陶板研究一之二，結果相同)。**

(二)研究二之三：探討陶筒孔徑與頻率的關係。

- 1.自製不同孔徑的陶筒 8 個(如圖 43 所示)。
- 2.利用游標卡尺測量陶筒孔徑。
- 3.電腦準備好，啟動頻率分析軟體 Cool Edit 2.1，錄音及分析頻率。
- 4.測量及紀錄五次，並求平均值。
- 5.利用 EXCEL 分析頻率與陶筒孔徑的關係。

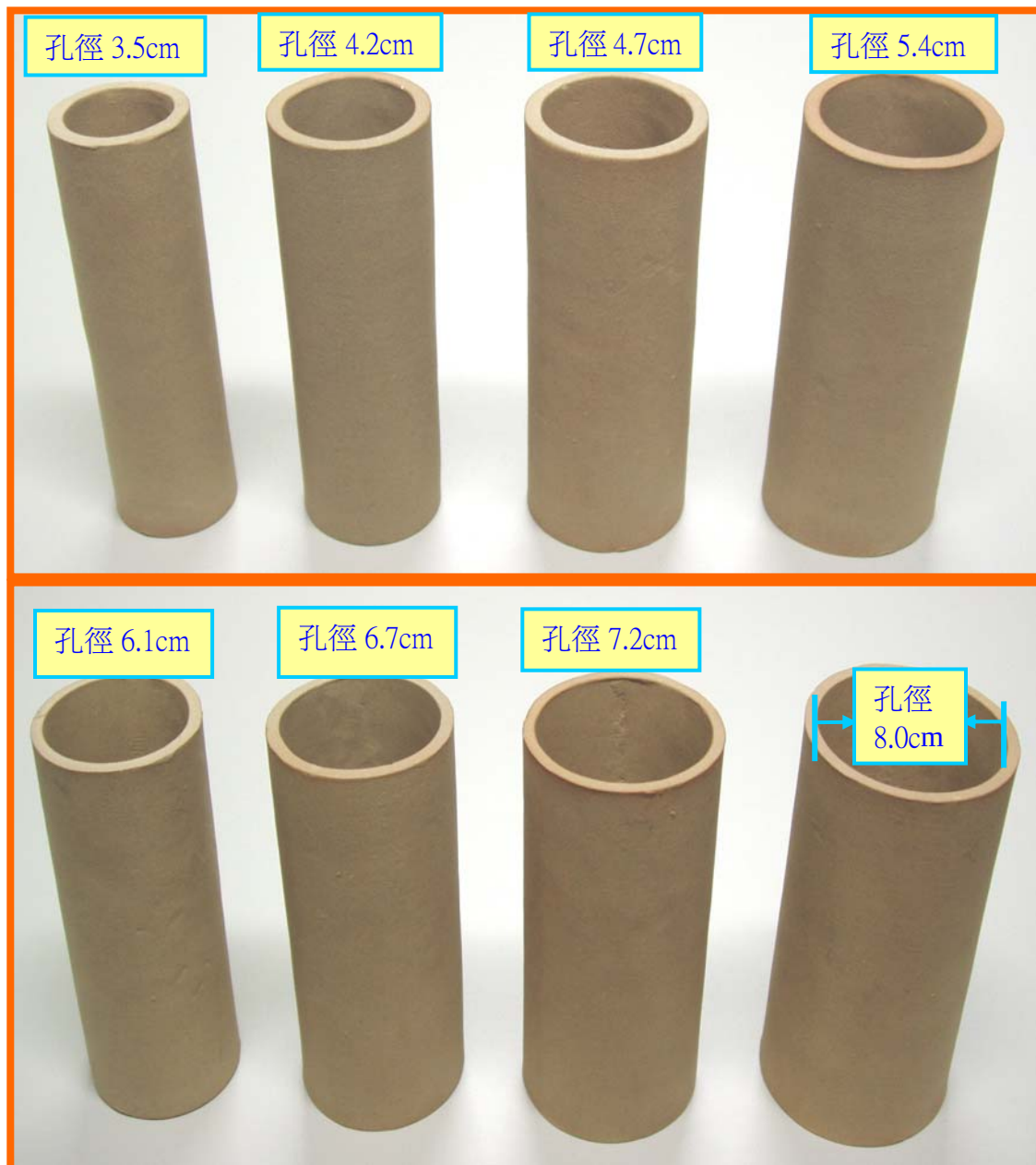
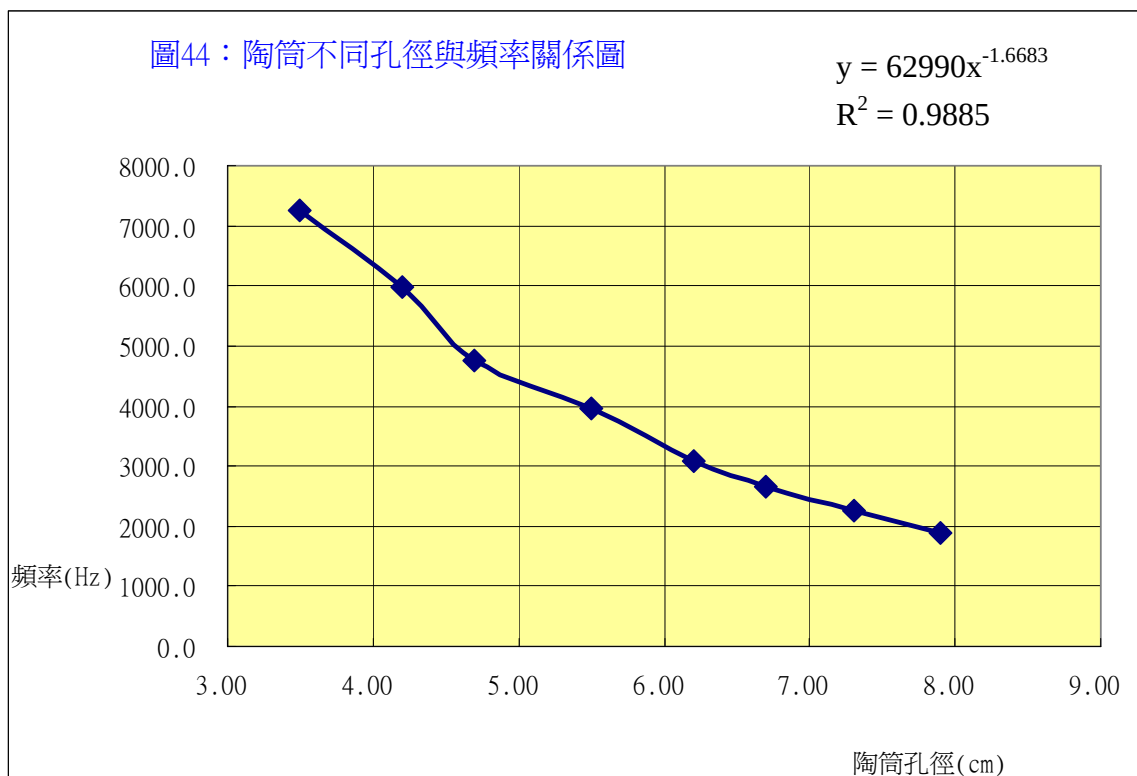


圖 43：自製不同孔徑的八個陶筒

表六：陶筒不同孔徑與頻率比較

| 陶筒編號 | 厚度<br>cm | 長度<br>cm | 內直徑<br>cm | 頻率測量<br>1 <sup>st</sup> (Hz) | 頻率測量<br>2 <sup>nd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>3 <sup>rd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>4 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>5 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>平均值<br>(Hz) |
|------|----------|----------|-----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| 1    | 0.50     | 16.40    | 3.50      | 7246.0                       | 7246.0                       | 7246.0                       | 7246.0                       | 7246.0                       | 7246.0              |
| 2    | 0.50     | 16.40    | 4.20      | 5991.0                       | 5911.0                       | 5994.0                       | 5991.0                       | 5993.0                       | 5976.0              |
| 3    | 0.50     | 16.30    | 4.70      | 4753.0                       | 4753.0                       | 4753.0                       | 4753.0                       | 4753.0                       | 4753.0              |
| 4    | 0.50     | 16.40    | 5.50      | 3982.0                       | 3955.0                       | 3959.0                       | 3981.0                       | 3981.0                       | 3971.6              |
| 5    | 0.50     | 16.30    | 6.20      | 3092.0                       | 3092.0                       | 3104.0                       | 3092.0                       | 3092.0                       | 3094.4              |
| 6    | 0.50     | 16.40    | 6.70      | 2649.0                       | 2649.0                       | 2651.0                       | 2652.0                       | 2649.0                       | 2650.0              |
| 7    | 0.50     | 16.30    | 7.30      | 2247.0                       | 2247.0                       | 2247.0                       | 2247.0                       | 2247.0                       | 2247.0              |
| 8    | 0.50     | 16.40    | 7.90      | 1882.0                       | 1882.0                       | 1889.0                       | 1881.0                       | 1881.0                       | 1883.0              |



說明：1.研究發現，陶筒孔徑越小時，頻率越高。

2.經由 EXCEL 分析，可得方程式  $y = 62990x^{-1.6683}$ ，相關係數為高度相關。

3.故：頻率約與陶筒孔徑的 1.7 次方成反比。



三、研究三：探討陶板平放兩側支撐位置與響度的關係。

- (一) 將長 20.2cm、寬 3.00cm 及厚 1.75cm 的陶板放置在可調式架設器上(經兩代改良如圖 45、46 所示)，測量陶板全長(L)及端點距支撐點距離( $\lambda$ )。
- (二) 依據參考資料有關木琴支撐架製作，逐次以 1/40 總長度調整可調式架設器，以改變陶板兩端支撐的位置
- (三) 電腦準備好，啟動分貝計軟體，錄音及分析分貝值。
- (四) 測量及紀錄五次，並求平均值。
- (五) 利用 EXCEL 分析分貝值與平放位置不同的關係。

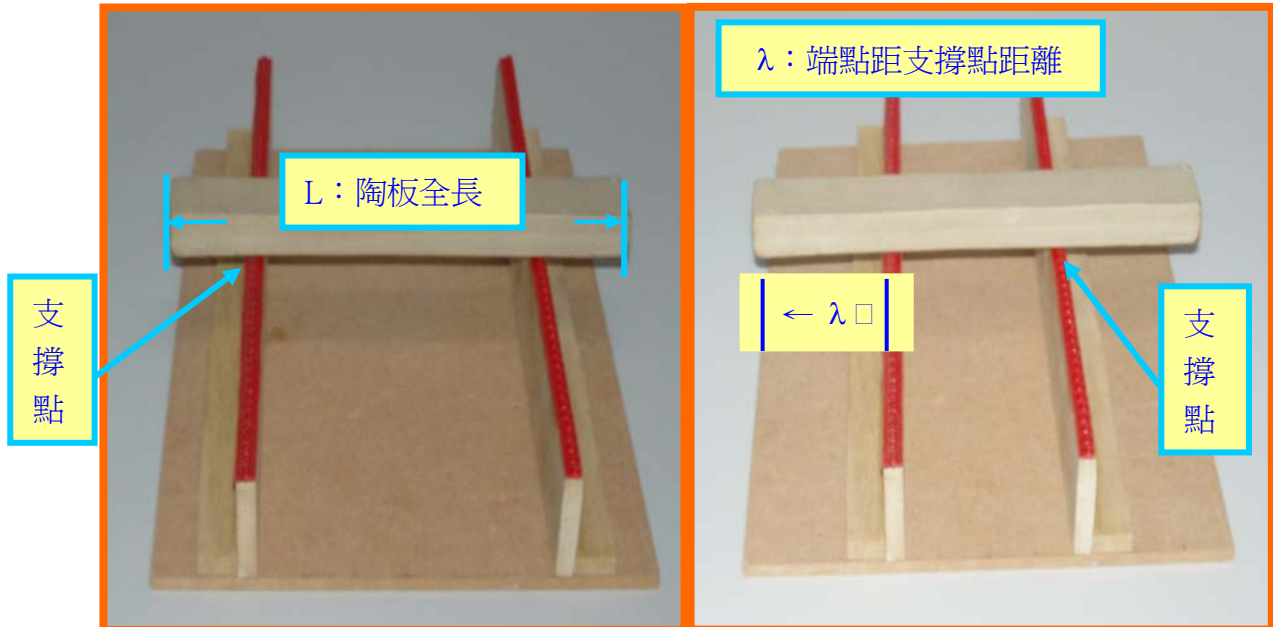


圖 45：第一代可調式支架（距離需隨時人工測量）

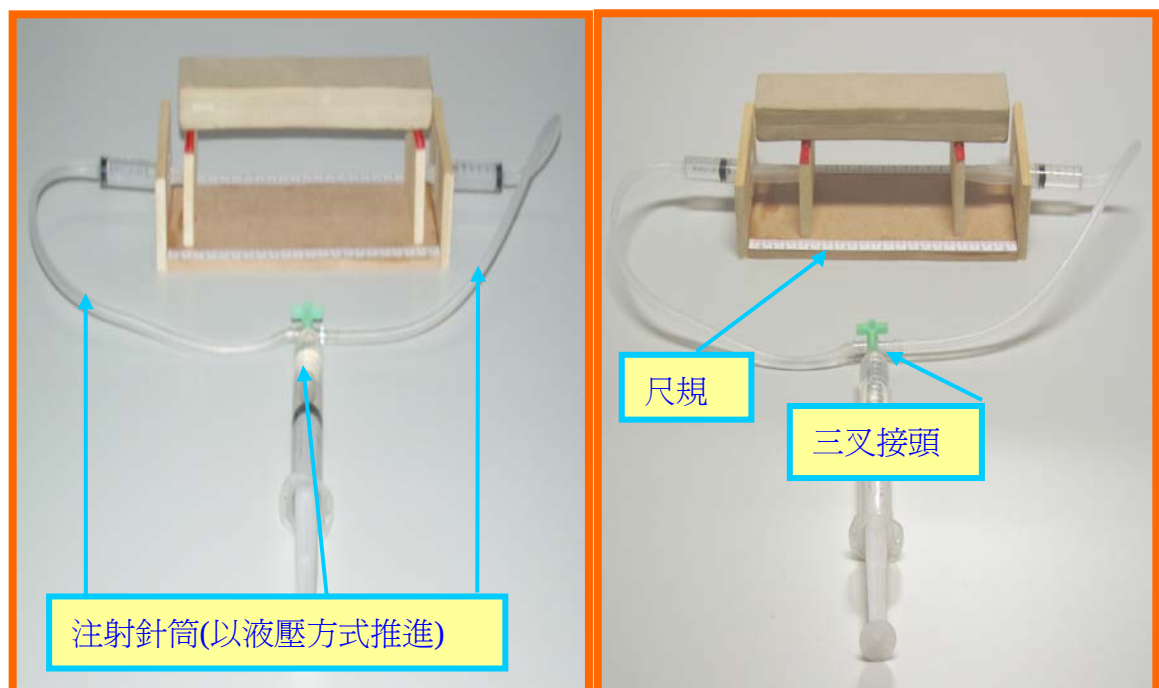
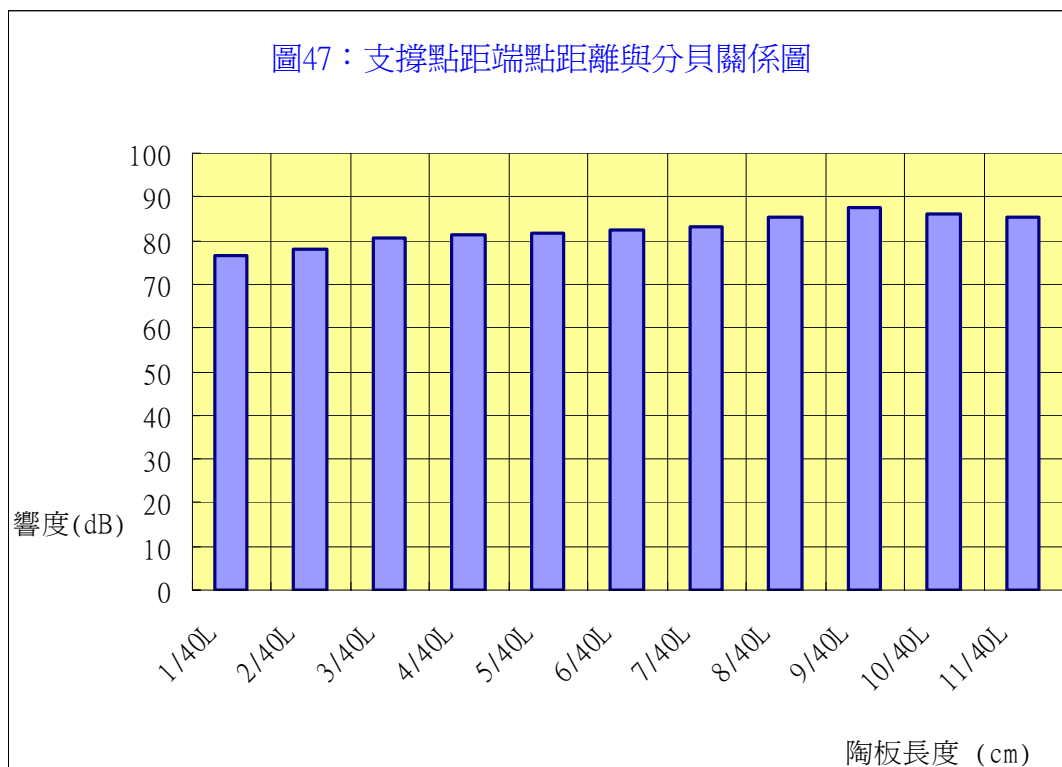


圖 46：第二代可調式支架（利用液壓方式可同時改變兩邊距離）

表七：陶板支撐點距端點距離與響度比較

| 陶板端點距<br>支撐點距離<br>為 $\lambda$ (cm) | 陶板長度<br>L：陶板<br>全長 | 分貝測量<br>1 <sup>st</sup> (dB) | 分貝測量<br>2 <sup>nd</sup> (dB) | 分貝測量<br>3 <sup>rd</sup> (dB) | 分貝測量<br>4 <sup>th</sup> (dB) | 分貝測量<br>5 <sup>th</sup> (dB) | 分貝測量<br>平均值(dB) |
|------------------------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|
| 0.50                               | 1/40L              | 76.4                         | 76.7                         | 76.5                         | 76.6                         | 76.4                         | 76.52           |
| 1.00                               | 2/40L              | 77.8                         | 77.5                         | 77.2                         | 78.4                         | 78.6                         | 77.9            |
| 1.50                               | 3/40L              | 80.3                         | 80.7                         | 80.9                         | 80.8                         | 80.7                         | 80.68           |
| 2.00                               | 4/40L              | 81.2                         | 81.3                         | 81.4                         | 81.2                         | 81.4                         | 81.3            |
| 2.50                               | 5/40L              | 81.7                         | 81.8                         | 81.6                         | 81.7                         | 81.7                         | 81.7            |
| 3.00                               | 6/40L              | 82.2                         | 82.2                         | 82.3                         | 82.2                         | 82.4                         | 82.26           |
| 3.50                               | 7/40L              | 83.2                         | 82.8                         | 83.4                         | 83.6                         | 83.4                         | 83.28           |
| 4.00                               | 8/40L              | 84.8                         | 85.2                         | 85.0                         | 85.0                         | 86.4                         | 85.28           |
| 4.50                               | 9/40L              | 87.8                         | 87.6                         | 87.6                         | 87.9                         | 87.5                         | 87.68           |
| 5.00                               | 10/40L             | 86.4                         | 87.5                         | 85.0                         | 85.0                         | 86.4                         | 86.06           |
| 5.50                               | 11/40L             | 84.8                         | 85.2                         | 85.5                         | 85.2                         | 85.8                         | 85.3            |



說明：架設器支撐放置在距離兩端 9/40 總長，也就是 20.2cm×9/40 大約是 4.54cm 處，其敲擊的響度最大。

#### 四、研究四：現有音調陶板製作簡單樂器的流程。

##### (一) 研究四之一：逐次砂磨陶板長度，探討長度變化與頻率的關係

1. 利用砂輪機及磨刀石(如圖 48-1 至 48-4 所示)，將長 14.40cm、寬 3.10cm、厚 0.50cm 的陶板逐次砂磨 2mm。
2. 電腦準備好，啟動頻率分析軟體 Cool Edit 2.1，錄音及分析頻率。
3. 測量及紀錄五次，並求平均值。
4. 利用 EXCEL 分析長度變化與頻率的關係。
5. 使用調音器及調音校準軟體(Tuner)，找出其音調（音名）



圖 48-1：不同粗細砂輪盤



圖 48-2：利用砂輪機粗調陶板長度



圖 48-3：利用磨刀石微調陶板長度

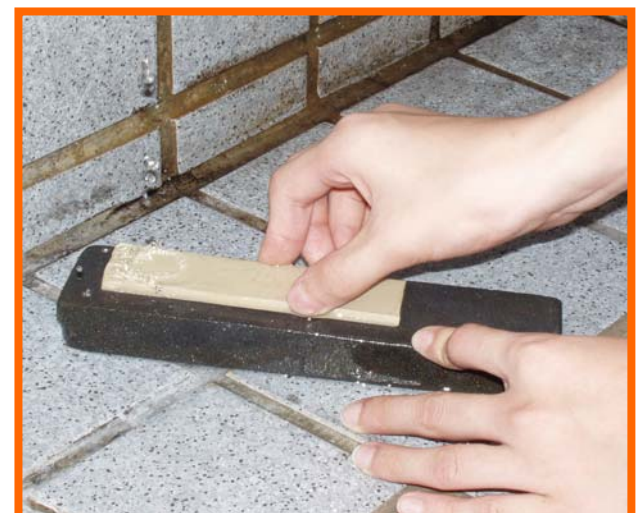
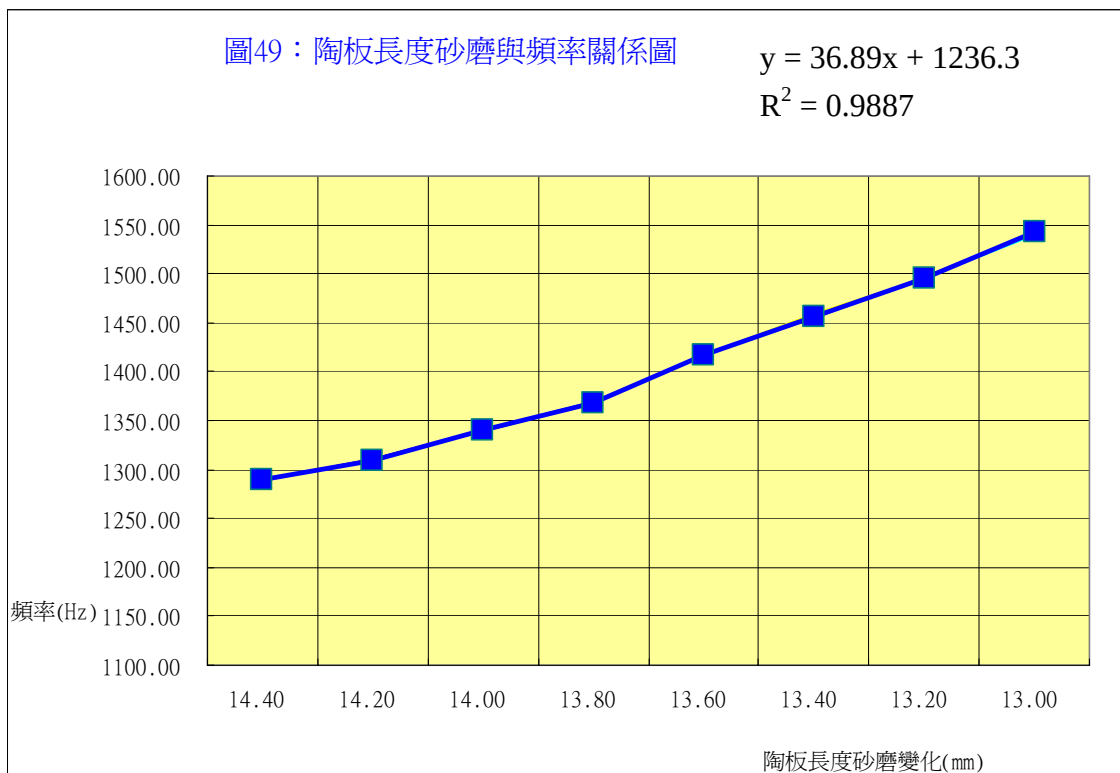


圖 48-4：利用磨刀石微調陶板厚度

表八：陶板長度砂磨與頻率比較

| 陶板長度<br>砂磨變化<br>$\Delta L$ (mm) | 頻率測量<br>1 <sup>st</sup> (Hz) | 頻率測量<br>2 <sup>nd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>3 <sup>rd</sup> (Hz) | 頻率測量<br>4 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>5 <sup>th</sup> (Hz) | 頻率測量<br>平均值<br>(Hz) | 音名              |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------|
| 14.40                           | 1288.0                       | 1289.0                       | 1289.0                       | 1289.0                       | 1289.0                       | 1288.80             | Mi              |
| 14.20                           | 1310.0                       | 1310.0                       | 1309.5                       | 1310.0                       | 1310.0                       | 1309.90             |                 |
| 14.00                           | 1341.0                       | 1341.0                       | 1339.5                       | 1339.2                       | 1341.0                       | 1340.34             |                 |
| 13.80                           | 1369.0                       | 1369.0                       | 1369.0                       | 1368.0                       | 1368.0                       | 1368.60             | Fa              |
| 13.60                           | 1417.0                       | 1416.5                       | 1417.0                       | 1417.0                       | 1417.0                       | 1416.90             | Fa <sup>#</sup> |
| 13.40                           | 1456.0                       | 1460.0                       | 1455.5                       | 1456.0                       | 1454.0                       | 1456.30             |                 |
| 13.20                           | 1495.0                       | 1496.0                       | 1496.0                       | 1495.0                       | 1497.0                       | 1495.80             |                 |
| 13.00                           | 1543.0                       | 1543.0                       | 1539.0                       | 1543.5                       | 1542.0                       | 1542.10             | Sol             |



說明：1.研究發現：頻率與陶板長度的變化量（ $\Delta L$ ）成一次線性關係。

2.使用調音器校準，逐次找到接近的標準音調，也發現每磨削約 2mm~3mm 的長度，逐次增高 1 個半音。

## (二)、研究四之二：製作標準音階的陶板琴

1. 依據研究四之一的結果，推論可以一個陶板作為基準，然後經由長度的砂磨、校準音名，應該可以做出接近現代樂器的十二平均律的音調，但第一批的陶器因先前規劃製作陶板尺寸時，考慮到製作陶板技術的限制，且著重實驗的性質，故僅能在現有的陶板上找出一組接近一個音域的 8 度音階陶板琴，屬第一代陶板琴。
2. 第二代陶板琴是將第二批燒製的陶板，經由反覆的砂磨機粗磨、手工的細磨、測量敲擊頻率校準音調、音樂老師敏銳音感的調整等程序，製作一組十二個標準音調(現代樂器的十二平均律)而且長度呈規律變化的陶板琴(如圖 50 所示)，也依研究三支撐點最佳位置實驗結果設計製作出成梯形樣式的陶板琴架。
3. 十二平均律的一組 12 個音階，就是相當於鋼琴鍵上一個音域內白鍵與黑鍵，為了避免混淆，故將升降音調（黑鍵）的陶板架設高度製作時高於一般八度（白鍵）的陶板。

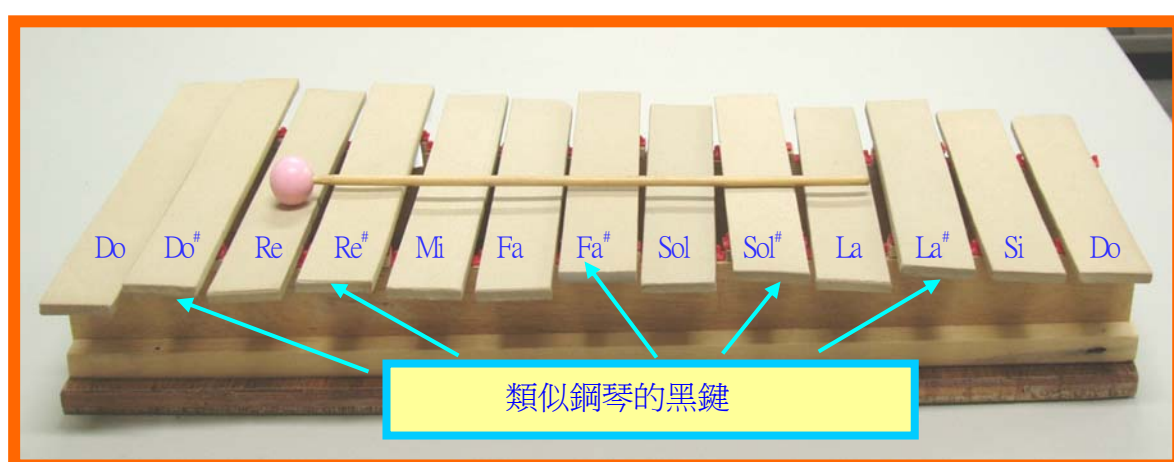


圖 50：第二代自製陶板琴

表九：標準音階頻率與陶板頻率比較

| 音階   | Do    | Do <sup>#</sup> | Re    | Re <sup>#</sup> | Mi    | Fa    | Fa <sup>#</sup> | Sol   | Sol <sup>#</sup> | La    | La <sup>#</sup> | Si    | Do     |
|------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-------|-----------------|-------|------------------|-------|-----------------|-------|--------|
| 音名   | C5    | C5              | D5    | D5              | E5    | F5    | F5              | G5    | G5               | A5    | A5              | B5    | C6     |
| 頻率   | 523.3 | 554.4           | 587.3 | 622.3           | 659.3 | 698.5 | 740.0           | 784.0 | 830.6            | 880.0 | 932.3           | 987.8 | 1046.5 |
| 陶板長度 | 22.15 | 20.90           | 20.00 | 19.80           | 19.00 | 18.20 | 17.90           | 17.40 | 17.30            | 16.90 | 16.35           | 16.00 | 15.40  |
| 陶板寬度 | 3.10  | 3.10            | 3.10  | 3.10            | 3.10  | 3.10  | 3.10            | 3.10  | 3.10             | 3.10  | 3.10            | 3.10  | 3.10   |
| 陶板厚度 | 0.50  | 0.50            | 0.50  | 0.50            | 0.50  | 0.50  | 0.50            | 0.50  | 0.50             | 0.50  | 0.50            | 0.50  | 0.50   |
| 陶板頻率 | 524.0 | 554.0           | 587.0 | 623.0           | 658.0 | 698.0 | 739.8           | 783.3 | 831.4            | 879.0 | 933.0           | 988.0 | 1046.0 |

說明：本陶板琴為 C5(比中央 Do:C4 高 1 個八度)的一組十二個音名的完整音階，每一塊陶板的敲擊頻率與標準頻率已達誤差值在正負 0.1%以內，而且經由電腦及音樂老師以敏銳的絕對音感來校準，其所敲擊出的音律是非常和諧的



### (三)、研究四之三：製作標準音階的陶筒琴

1. 依據第一批陶筒實驗結果，經由電腦分析所得數學關係式，計算欲得到標準頻率的陶筒規格，製作出第二批陶筒，爲了美觀及實用性，故將燒製完成的每一支陶筒在距離端點兩公分處鑽孔，使用銅線懸掛方式來敲擊(如圖 51 所示)。爲了調整陶筒至標準頻率，對陶筒長度或厚度（頻率太低削磨長度、頻率太高削磨厚度）反覆的砂磨機粗磨、手工的細磨、測量敲擊頻率校準音調、音樂老師敏銳音感的調整等程序，製作一組比中央 Do 高三個 8 度也就是 C7~C8 的 8 個標準音階。



圖 51：第二代自製陶筒琴

表十：標準音階頻率與陶筒頻率比較

| 音階    | Do     | Re     | Mi     | Fa     | Sol    | La     | Si     | Do     |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 音名    | C7     | D7     | E7     | F7     | G7     | A7     | B7     | C8     |
| 頻率    | 2093.0 | 2349.3 | 2637.0 | 2793.0 | 3136.0 | 3520.0 | 3951.1 | 4186.0 |
| 陶筒長度  | 35.00  | 32.40  | 30.40  | 29.10  | 27.00  | 26.30  | 24.50  | 23.70  |
| 陶筒內直徑 | 3.95   | 3.95   | 3.95   | 3.95   | 3.95   | 3.95   | 3.95   | 3.95   |
| 陶筒厚度  | 0.52   | 0.52   | 0.52   | 0.52   | 0.52   | 0.52   | 0.52   | 0.52   |
| 陶筒頻率  | 2083   | 2355   | 2630   | 2790   | 3133   | 3518   | 3948   | 4183   |

說明：本陶筒琴爲 C7(比中央 Do:C4 高 3 個八度)的一組 8 個音名的完整音階，每一個陶筒的敲擊頻率與標準頻率誤差值在正負 0.4%以內，而且經由電腦及音樂老師以敏銳的絕對音感來校準，其所敲擊出的音律尙稱和諧。

## 柒、研究討論

### 一、燒製陶器我們遇到以下幾個問題：

- (一)成品燒後會收縮：燒製陶器後原尺寸會收縮，搜集資料並分析後，製作尺寸是以理想尺寸 1.14 比例放大。
- (二)陶片會彎曲不平：剛開始燒出來的陶片，發現會有一些作品向上翹的現象非常嚴重，經分析後原來是在乾燥過程中，**上下水分散失不同造成作品收縮差異性**。所以在第二次製作時，將擱製後的作品約每隔一段時間將作品小心的翻面，直到**顏色由深至淺完全乾燥**。
- (三)成品脆、不宜敲擊：剛開始製作陶板時，以一般**素燒**的溫度 800℃ 燒製，結果成品非常脆弱、不適合敲擊。後來以較高溫（1230~1235℃）**一次燒結的方式**來燒製。

### 二、使用 cool edit 2.1 軟體測量陶板及陶筒的發聲頻率，找出**最高分貝的頻率**，也是主要頻率（基因），亦同時紀錄次高分貝及第三高分貝的頻率，發現他們之間有倍數關係，此結果也是影響音色的重要因素。

### 三、在陶板製作前，考慮陶板鑽孔與無鑽孔對頻率的影響，故也製作了一組有鑽孔的陶板(寬度皆為 3.10cm，厚度皆為 0.5cm，長度分別為 4.10cm、6.20cm、8.20cm、10.10cm、12.20cm、14.4cm，鑽孔中心位置皆在距離上方 1.5cm 處，鑽孔孔徑為 8.00mm)，發現**無孔的敲擊頻率比有孔的敲擊頻率稍低**。

### 四、第一代陶板琴(如圖 27 所示)，在找有音階的陶板時，經過測量與校準發現長 14.40cm、寬 3.10cm、厚 0.5cm **有鑽孔比無鑽孔的陶板音調更接近標準音階的頻率(Fa)**，故採用有鑽孔的陶板。

### 五、研究中探討敲擊陶板最大響度的支撐點的位置，實驗結果**以陶板總長的 9/40 為支撐點響度最大**，從所蒐集的參考資料九中找到木琴振動所產生的駐波節點出現在距端點總長度的 0.2242 及 0.7758，文獻中並未說明其推導過程，但與我們實驗的結果( $9/40=0.225$ )非常接近。

### 六、依據第一批實驗所得的經驗，製作成標準音調的樂器，其陶板、陶筒的長度變化不可太大，第一批陶板陶筒長度的改變是每隔 2 公分，其陶板(筒)的頻率變化相差 3 到 4 個以上的全音（3 到 4 個以上的鋼琴白鍵距離）約 200~1000Hz 以上，故要找出一個音域的標準音階是非常困難的。但**依據實驗結果得知若頻率太高時削磨厚度，頻率太低時削磨長度，所以要製作出標準音調的陶板與陶筒是可以預期的**。

### 七、第二批陶器依第六項討論的結果，並依數學關係式計算標準音調的規格，製作出長度變化間隔為 2mm 的多塊陶板、長度變化間隔為 1cm 的多個陶筒。經由砂輪機的削磨及手工磨刀石的細磨，及標準音調的校準，製作出陶板琴與陶筒琴。

## 捌、研究結論

一、在研究一中我們發現：

- (一)陶板厚度越厚，敲擊的發聲頻率越高（成 1 次線性關係）。
- (二)陶板長度越長，敲擊的發聲頻率越低（成 2 次反比關係，與弦樂器不同）。
- (三)陶板寬度的變化對發聲頻率影響不大。

二、研究二中我們發現：

- (一)陶筒厚度越厚，敲擊的發聲頻率越高（成 1 次線性關係）。
- (二)陶筒高度越高，敲擊的發聲頻率越低（成 1.5 次方反比關係，與弦樂器不同）。
- (三)陶筒孔徑越大，敲擊的發聲頻率越低（成 1.7 次方反比關係）。

三、在研究三發現陶板的兩端的支撐位置在總長度的 9/40 處，敲擊的響度最大。

四、在研究四中我們發現：

- (一)經砂輪機及磨刀石微調陶板長度後，頻率與陶板長度的變化量（ $\Delta L$ ）成一次線性關係。（此結果與研究一中，陶板總長度與頻率成 2 次反比相同）
- (二)結合研究一所得的數學關係，頻率太高削磨厚度、頻率太低砂磨長度，逐次精密削磨陶板尺寸，我們順利做出 12 平均律的自製陶板琴。
- (三)結合研究二所得的數學關係，逐次精密削磨陶筒的長度與厚度，製作出一組 8 度音階的自製陶筒琴。

## 玖、參考資料

- 一、劉良佑（民 81）。陶藝學。臺北市：幼獅出版社。
- 二、陶藝製作（民 89）。臺北市：武陵出版社。
- 三、呂嘉靖（民 92）。生活陶入門。臺北市：積木文化出版社。
- 四、陳烏土、鍾明正（民 72）。CNS 機械製圖理論與實際（2）。（310~315 頁）。臺北市：全華出版社。
- 五、郭重吉主編。國中自然與生活科技（民 94）。第三冊。臺北市：南一出版社。
- 六、林明瑞主編。高級中學一年級（民 88）基礎物理（112-129 頁）。臺北市：南一書局。
- 七、林明瑞主編。高級中學三上（民 90）。物理（2-13 頁）。臺北市：南一書局。
- 八、林明瑞主編。高級中學二下（民 90）。物質科學 物理篇（230-250 頁）。臺北市：南一書局。
- 九、鄭德淵（民 92）。音樂的科學。臺北市：大陸書店。
- 十、戴代祖（民 83）。中國古代物理學（47-66 頁）。臺北市：臺灣商務。

|   |   |
|---|---|
| 評 | 語 |
|---|---|

030804 天籟美聲樂“陶陶”

本作品先研究陶片的燒結方式，再研究陶板及陶管的發音物理，包括頻率與厚度，管徑及長度的關係，並據之製出陶板琴及陶筒琴。本作品具創意，研究方法適切，表達生動。是一優良作品。