

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

第三名

080101

神奇的陶罐

學校名稱： 高雄市鳳山區忠孝國民小學

作者：	指導老師：
小四 陳鈺允	蕭雅琳
小四 尹鈺凱	陳崇盛
小四 韋昕妘	
小四 許齊軒	
小四 黃允貞	
小四 陳昱辰	

關鍵詞： 口哨陶罐、鳥笛、雙耳節拍

神 奇 的 陶 罐

摘要

本研究將南美口哨陶罐、鳥笛與陶笛(泥哇鳴)的構造與製作原理相互結合，創造出一種新的樂器——神奇的陶罐。它可以演奏歌曲，甚至當我們在其中放入一些液體時，配合手勢的開合，可以重現鳥類的鳴叫與潺潺的流水聲等，非常有趣。然而，在嘗試吹奏及創作的過程中，我們發現，將兩個頻率相近的陶罐同時吹奏或單獨吹奏單腔體雙哨陶罐樂器，它們所發出的樂音頻率與頻率發聲器所產生的雙耳節拍頻率，透過音樂編輯軟體進行比對，是完全相符的，所以，我們所製作的陶罐除了能陶冶性情外，更具有影響腦電波的神奇效果呢！

關鍵字：口哨陶罐、鳥笛、雙耳節拍

壹、研究動機

有一次在老師分享的影片中，介紹了南美口哨陶罐，當時，我們看見一個人將野狼造型的水壺左右搖晃，陶罐居然可以發出狼嚎聲，拿了鳥造型的水壺搖晃，居然也可以發出鳥叫聲，聲音維妙維肖，令人忍不住想要進一步了解它的發聲原理與構造。

南美口哨陶罐與我們常見的鳥笛，都是在腔室內注入水後藉由搖晃或吹奏引發腔體內氣流變化進而發出聲音的樂器，它們外型構造也與陶笛十分相似，這三者是否能夠互相融合，又或者融合後會產生甚麼樣的變化，引發了我們強烈的想像力與好奇心。

貳、研究目的

希望透過文獻探討與研究分析，了解口哨陶罐、水鳥笛與陶笛的發聲原理，並期待能將這樣的原理應用在我們的生活中，創造出一種新的神奇樂器——「神奇的陶罐樂器」。

本實驗預計達到下列目的：

1. 探討水鳥笛、口哨陶罐空吹時的音頻變化
2. 分析水鳥笛與口哨陶罐結合後的音頻關係
3. 了解陶笛罐、單腔室單哨與雙哨陶罐與雙耳節拍的關係

參、研究設備及器材

一. 設備：電腦、手機、電窯（圖 1）、壓板機（圖 2）。



圖 1 電窯（作者自攝）



圖 2 壓板機（作者自攝）

二. 軟體：音樂編輯軟體 Cool Edit Pro 2.0（圖 3）、校音軟體 Syaku8（圖 4）、校音軟體 Spectroid（圖 5）、頻率發生器（圖 6）。



圖 3 Cool Edit Pro 2.0(作者自攝)

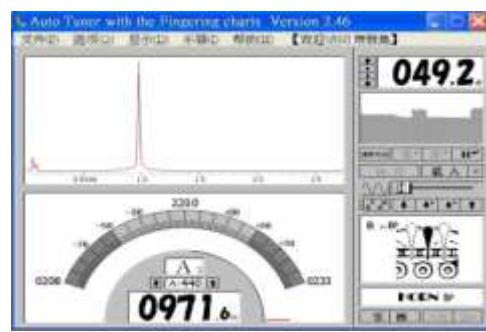


圖 4 校音軟體 Syaku 8(作者自攝)

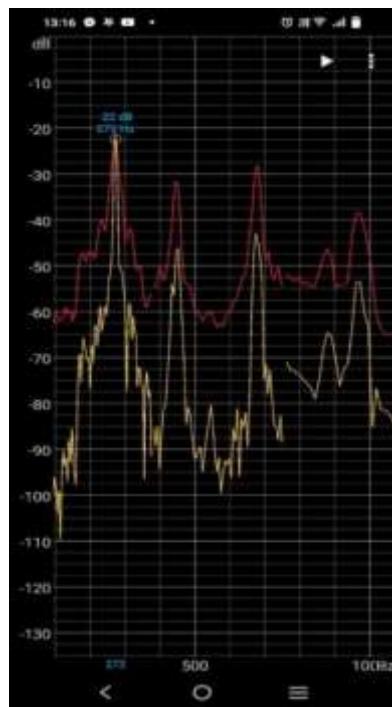


圖 5 校音軟體--Spectroid(作者自攝)



圖 6 頻率發生器(作者自攝)

三. 器材與工具：陶土、製陶工具組。

肆、研究過程或方法

一、相關資料蒐集與探討

(一) 南美的「口哨陶罐」

南美的口哨陶罐 (whistling jar)，特別是來自秘魯和奇穆文化的這些陶器，它們具有聲音及文化意義方面的獨特性。在陶罐內部，空氣或液體能夠經由連通管在腔體間的流動，通過共鳴腔體的氣窗來發出聲音。這些陶罐的聲音，可能對人體產生生理影響，如心率和血壓的改變，這表明它們可能用於儀式或治療目的(可夫，2022)。

在 1970 年代，研究人員發現，這些陶罐的聲音能引起明顯的生理反應，與其他文化的聽覺誘發狀態相似，支持了這些陶罐在儀式使用中的重要性。此外，這些陶罐常常裝飾有動物或人類的形象，暗示其可能擁有所象徵或精神意義，並與聲音和形狀的關聯（可夫，2022）。

當這些容器首次被發現時，人類學家最初認為它們只不過是華麗的液體容器。數百年來，它們在許多博物館和私人收藏中展示。這些器皿大多是在墓地或聖地發現的，可能是作為對過者或那些文化所崇拜的許多神的祭品，在這些地方發現它們證實了對這些物品的神聖崇敬。這些器皿並非特定於一種文化，而是與一些不同的文化有關，例如印加和莫切。

這些陶罐的設計巧妙，利用空氣和水流動的原理發出口哨聲。典型的口哨陶罐的腔體由兩個腔體所組成：

- (1) 主腔體：這部分通常存放液體。
- (2) 次腔體(共鳴腔體)：這部分通常有一個或多個小孔作為氣孔，且與主腔體通過小管相連。次腔體通常是產生口哨聲的部位。

口哨陶罐有兩種主要類型，第一種通常只有一個腔體(圖 7)，必須用口吹才能產生聲音。口哨的吹孔通常是附在陶罐上，以一種不起眼的方式隱藏起來。第二種類型通常有兩個腔體(圖 8)，通過向噴口吹氣或將液體從一個腔體倒入另一個腔體，迫使腔體中的空氣穿過一個或多個發聲邊緣(出音孔)，陶罐就會發出動物叫聲。



圖 7 單腔體口哨陶罐

(圖片取自 Whistling Jar(n.d.) The Met Fifth Avenue.)



圖 8 雙腔體口哨陶罐

(圖片取自 Whistling Jar(n.d.)The Met Fifth Avenue.)

共鳴腔體是產生口哨聲的部位，最常見的口哨型態如圖 9 所示。氣流從哨口進入後，因在不同大小的共鳴腔體產生摩擦，故而可以發出高低不同的音調。



圖 9 常見的口哨型態

(圖片取自 One Death Whistle(n.d.) Keller's Blog Site.)

南美的口哨陶罐，其發出的音頻主要決定於腔體內的共鳴腔體大小，但還能透過不同的傾倒搖晃或吹奏方式，在同一個陶罐內可發出不同的聲音，這是它非常獨特迷人的地方。這些鳥獸叫聲非常悅耳，讓人如置身於野外，使人心曠神怡。外國論壇的網友也都認為這種「樂器」巧奪天工，令人為之驚訝！

(二)鳥笛的探討

鳥笛的聲音傳達了製作它的人的品味，也表達了他們對鳥聲的感受。世界各地都有模仿鳥叫聲的木製和陶製鳥哨，而其發音主要方式如下：

1. 只用一個音符共鳴的笛子
2. 打開和關閉單一指孔的布谷鳥笛（雙音笛）
3. 演奏簡單旋律的陶笛
4. 通過將水倒入腔體內來振動的水鳥笛

水鳥笛是用一個容器及一根吹管做成的哨笛。經由吹管對容器吹氣，鳥笛便會發出悅耳的聲音。在容器中加水，鳥笛產生的聲音頻率會變低（開管變閉管樂器），但隨著容器中水越多，鳥笛聲音頻率越高，因為空氣柱變短。

鳥笛的發音方式是利用氣流直接通過笛的出音孔，空氣在笛唇處摩擦振動而產生聲音。吹奏時管內的空氣柱會改變，因此會產生不同的音頻，甚至藉由調整吹氣的氣壓，使得鳥笛的共振由基頻移至某個諧音，因此可以產生類似鳥鳴的聲音。

(三)陶笛的探討

陶笛（拉丁語：Ocarina），是一種具有悠久歷史的吹管樂器。現代陶笛的雛型曾在不同文化中出現。在中國有一種近似陶笛的古老樂器：埙。至於中國的「埙」跟陶笛有沒有共同源頭，已無從稽考，但是，在中國除了「埙」之外，還有很多陶土樂器，例如 1200 年歷史，源於寧夏回族自治區的「泥哇嗚」、源於湖北春秋戰國時期的「嗚嘟」卻與現代陶笛的基本特徵完全一致，不但在外形上區別不大，而且都具備陶笛哨口，甚至連孔數都完全一致；另外的共通點則是都是主要以陶泥燒製的閉管式樂器。而在南美的瑪雅人和阿茲特克人亦於六世紀出現一種用於裝飾和祭祀的仿鳥鳴的彩繪樂器，也被認為可能是現代陶笛的雛型(Allen, 2012)。

(四) 聲音的探討

從聲學的角度來看，樂音有三個主要特徵，即響度、音調、音色，稱為樂音三要素。聲音的強弱程度稱為響度，響度和聲波的振幅大小有關，聲波的振幅愈大，所聽到的聲音也就愈大。而聲音的高低稱為音調，聲音的頻率愈大，則聽到的聲音也就愈高昂；相反地，頻率愈小，聽到的聲音也就愈低沉。發聲體的發音特性稱為音色，其決定因素為發聲體所發出聲波的波形，若波形不同，則音色也不一樣。對於不同的樂器所發出的聲音，即使頻率都調成一樣，但其音色各不相同。

音叉振動時，只發單一頻率聲音，波形單純穩定；而大部分的樂器所發出的聲波都不是單一頻率波，乃是由基音和多組不同頻率的泛音複合而成的複合波（圖 10），其中泛音的頻率必為基音頻率的整數倍。

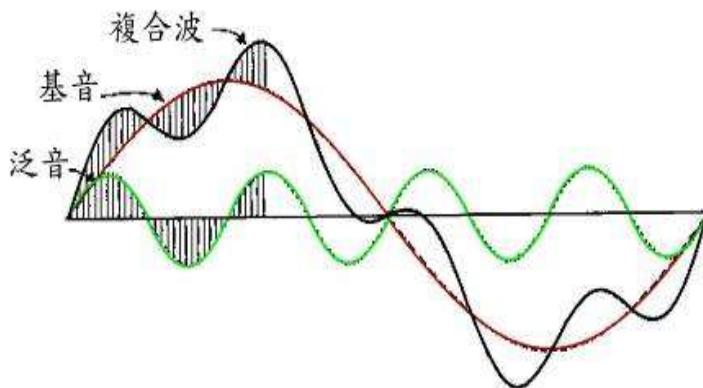


圖 10 基音與泛音所組成的複合波形(作者自行利用軟體繪製)

近年更開始流行聽『雙耳節拍』音樂，也就是兩隻耳朵聽不同頻率的音調，被認為能影響腦波，除了提高創造力外，還有放鬆助眠之效。『雙耳節拍』音樂是指耳朵在聽兩種不同頻率的音調後，在大腦內部所產生的聽覺錯覺。

1839 年，海因里希·威廉·多夫（Heinrich Wilhelm Dove）發現，如果分別在左右耳朵中聆聽到兩種不同的頻率（頻率都低於 1500 Hz，它們之間的差異小於 30 Hz），大腦會產生一種新的頻率，其大小為兩耳聽到的音頻的差值。（Lane, et al., 1998）。比方說左耳聽 400Hz 的音調，另一耳則聽 411Hz 的聲音，左右耳接收到的頻率會於大腦會逐漸調和，人聽到的不是兩種截然不同的音調，而是在大腦內會將兩種聲音得到整合，且取兩

者之差，產生了被稱之為”第三音”的腦電波。雙耳節拍是一種聽覺錯覺，科學家們透過這樣的技術改變腦波狀態，並利用來刺激大腦，產生生物效應，改善情緒、狀態或提升潛能(William R., 2018)

如上所述，我們可以聆聽雙耳節拍以鼓勵大腦產生特定類型（狀態）的腦電波。腦電波狀態主要有 5 種，如下所示：

德爾塔(delta δ)：1-3 Hz

西塔(Theta θ)：4-8 赫茲

阿爾法(Alpha α)：8-14 赫茲

貝塔(Beta β)：14-30 赫茲

伽瑪(Gamma γ)：30-100 赫茲

聆聽雙耳節拍對大腦的影響取決於音軌的頻率和它刺激產生的腦電波。文獻研究已經發現，不同的頻率會影響我們意識的不同面向，並且可以根據使用的頻率改變我們的心理狀態。這些頻率在當代冥想音樂中被用來達到一定的效果(Onno, 2020)。

二、「神奇的陶罐」設計

為了得到不同的聲音效果與組合，甚至能產生雙耳節拍的共鳴現象，我們結合了陶笛、水鳥笛與口哨陶罐的原理來設計「神奇的陶罐」。

(一) 水鳥笛與口哨陶罐的組合設計

水鳥笛與口哨陶罐的組合樂器製作程序如圖 11 所示：

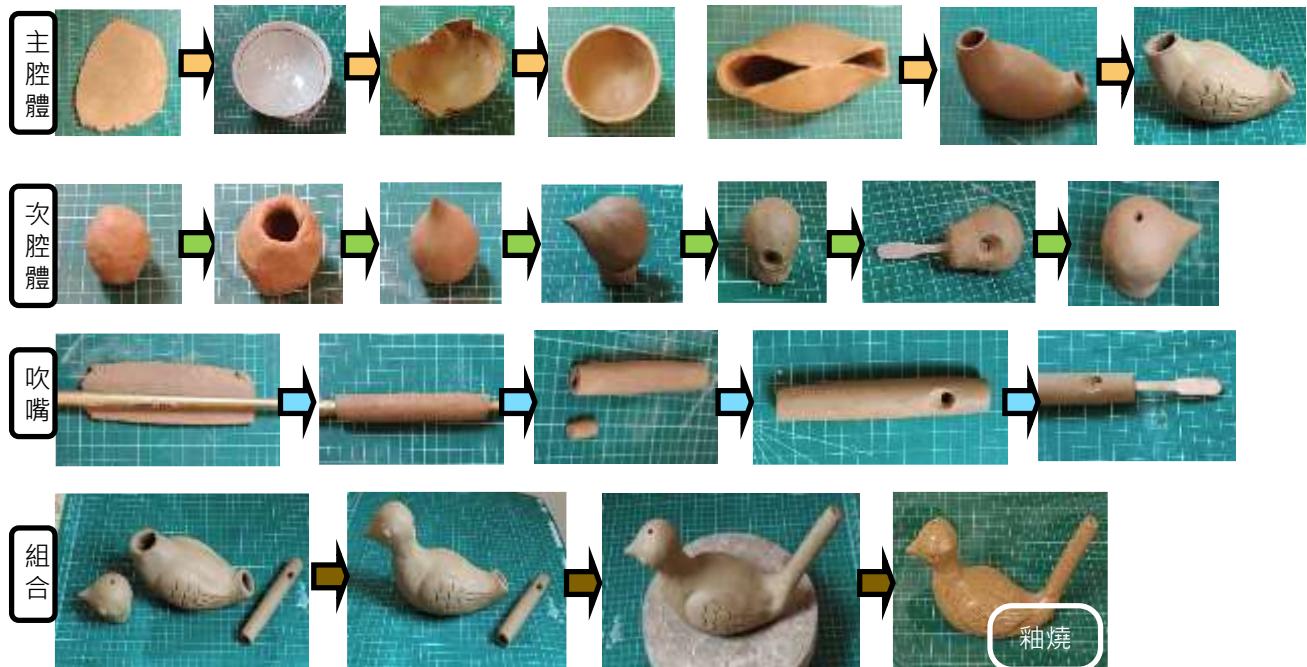


圖 11 水鳥笛與口哨陶罐的組合樂器的製作程序

水鳥笛與口哨陶罐的組合樂器製作說明如下：

【主腔體】

先以壓板機或壓條將陶土擀壓成 0.5cm 厚的陶板，選擇適當大小的碗當模具，包覆保鮮膜以利脫模。接著，將陶板放入碗內壓實並去除多餘的土片，並將陶碗上方捏扁接合，接合後拍打整形成鳥身，最後進行外部的裝飾就完成了。

【次腔體】

次腔體為陶罐的共鳴腔體，是影響音高的主要部分。先搓一糲小泥球，將小泥球捏成空心後將空心小泥球縮口包覆成中空球體。接著，在脖子位置上黏貼一小土片。製作出音孔與笛唇，並以竹片製作氣道並在頭頂挖一個調音孔，最後進行頭部外觀裝飾即可。依據郭芸吟(2018)實驗研究結果顯示，共鳴腔體的氣窗及笛唇設計，以笛唇角度 30 度，氣窗大小以 $4\text{mm} \times 10\text{mm}$ 進行標準化設

計，可以達成最佳吹奏效果。但，本實驗作品為陶土器皿，為求美觀，將氣窗大小 $4\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的面積轉換成直徑約為 7.12mm 的圓形，總面積大小不變。故本實驗之所有共鳴腔體的圓形氣窗及笛唇角度皆採此標準進行製作。

【鳥笛吹嘴】

此部分亦為共鳴腔體，參照鳥笛的設計，先擀壓一小土片，再以圓形木條當模具，把小土片包覆其上，搓成一中空圓管，接著搓約 2cm 長的泥條壓入管內，在距離管緣約 2cm 的位置，製作出音孔與笛唇泥條壓入管內，最後以竹片製作氣道，即可完成。其中，氣窗大小與笛唇角度設計與次腔體一致。

將製作完成的主腔體、次腔體及鳥笛吹嘴進行黏合，黏合前須試吹次腔體及水鳥笛確認發音狀態，黏合後亦須試吹，確認各部分氣體是否可以順暢流動，接著將鳥笛吹嘴(鳥尾)與主腔體(鳥身)粘合。完成的陶體於陰涼處放置陰乾。將陰乾後的陶體放入電窯內進行 800°C 素燒，素燒後的半成品陶體以噴腔上釉，再次放入電窯內進行 1230°C 軟燒。

(二) 陶笛罐、單腔室單哨與雙哨陶罐的組合設計

為了讓各個腔體大小能固定，我們以石膏模具來製作主腔體(貓咪身體)與共鳴腔體(貓咪頭部)，另以開挖音孔的方式來改變各腔體的音頻高低。

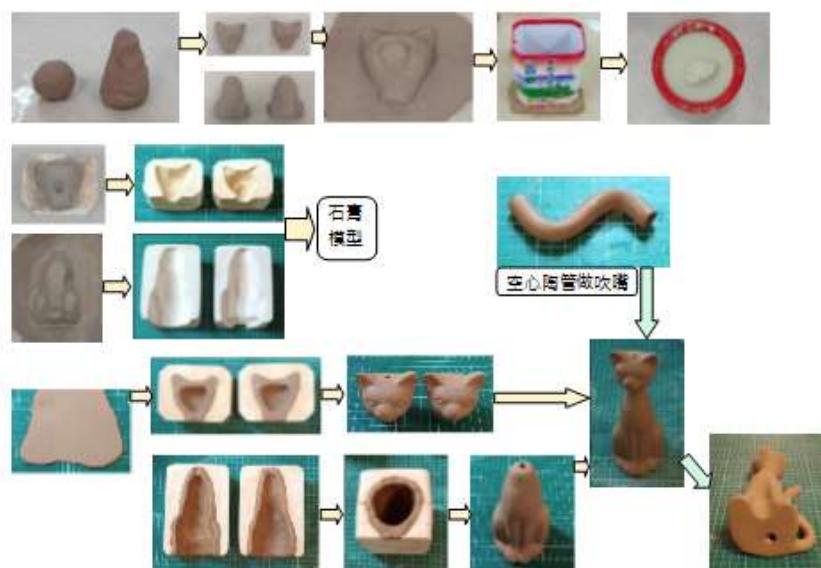


圖 12 石膏模型製作陶罐的程序

為方便以石膏模型進行製作，我們將主腔體拆解為貓咪身體，次腔體拆解為貓咪頭部，吹嘴為空心陶管的貓咪尾部，分別將主腔體(貓身)、次腔體(貓頭)與吹嘴(貓尾)進行粘合組裝，其製作陶罐的程序如圖 12 所示，其整體構造的製作方法與水鳥笛口哨陶罐相似。但貓咪造型的口哨陶罐，又可以依據音孔及氣窗位置不同分別創作成陶笛罐、單腔室單哨與雙哨陶罐，如圖 13 所示：



圖 13 各種貓咪造型的陶罐

① 貓咪造型陶笛罐

依陶笛配孔方式在貓咪腔體上開挖音孔，以陶笛罐所發出的筒音當 Do，每升高半音頻率，增加開挖音孔的面積大小 1.0595 倍(鄭慧慈，2008)，可使用電腦協助調音。完成的陶體於陰涼處放置 1 週後，放入電窯內進行 800°C 素燒。素燒後的半成品陶體以噴腔上釉，再次放入電窯內進行 1230°C 軟燒，即可得到「貓咪造型陶笛」成品。

② 貓咪造型單腔室單哨陶罐

利用貓咪造型石膏模製作貓咪造型口哨陶罐，其步驟與貓咪造型陶笛的製作程序雷同，主要的差異在於貓頭部分要變成共鳴腔體，而貓身腔體不開挖出音孔與音孔。

③ 貓咪造型單腔室雙哨陶罐

利用貓咪造型石膏模製作貓咪造型雙哨陶罐，其步驟與貓咪造型口哨陶罐的製作程序雷同，主要的差異在於貓身的主腔體上再增設一個共鳴腔體。

三、實驗計畫

我們所研發的「神奇的陶罐」，它的設計構想結合了陶笛、水鳥笛與口哨陶罐的原理，為了瞭解主腔體內水對各個共鳴腔體的音頻影響，盼能得到不同的聲音效果與組合，以及能否產生雙耳節拍的共鳴現象？這些都是我們所要探討的主要課題。依據實驗目的，我們分成三個主題來進行實驗，其實驗設計如下：

【主題一】探討水鳥笛、口哨陶罐空吹時的音頻變化

鳥型口哨陶罐(圖 14)，其尾巴的設計為一支開管笛哨，未加水時是為雙音笛，如將出音孔按住，氣流經由氣道、笛管、主腔室到達共鳴腔室而發出不同的聲音，可藉由鳥頭上的音孔開閉，來產生不同的音頻。



圖 14 水鳥笛與口哨陶罐組合設計
的鳥型口哨陶罐

1. 要改變的項目：a. 吹奏力道
b. 水鳥笛的出音孔開閉
c. 共鳴腔體(鳥頭)的音孔開閉。
2. 要觀察的項目：音高
3. 保持不變的項目：吹奏者、測音距離、錄音場所。

【主題二】分析水鳥笛與口哨陶罐結合後的音頻關係

鳥型口哨陶罐(圖 14)，在主腔室內注入水後，鳥尾巴是為一隻水鳥笛，將水鳥笛的出音孔按住，氣流則直接由氣道、笛管、到達主腔室，在主腔室會因水的阻力使氣流產生震動，而吹出顫動的聲音，也可控制鳥頭上的音孔開閉，發出不同的聲音頻率。

1. 要改變的項目：鳥笛吹管內的水量
(傾斜主腔體改變水的分佈位置)。
2. 要觀察的項目：音高
3. 保持不變的項目：吹奏者、測音距離、錄音場所。

【主題三】了解陶笛罐、單腔室單哨與雙哨陶罐能否產生雙耳節拍

由文獻得知，已發現的許多口哨陶罐會產生獨特的音符，當一起演奏時可以產生雙耳節拍。利用貓咪造型石膏模可製成陶笛(圖 15)、口哨陶罐和雙音口哨陶罐(圖 16~17)，使用石膏模主要在控制各個腔體的大小，我們以模具來製作主腔體(貓咪身體)與共鳴腔體(貓咪頭部)，另以開挖音孔的方式來改變各腔體的音頻高低。我們所製作的貓咪雙音口哨陶罐，能同時發出兩個音頻，將這二個音頻控制在 1500Hz 以下和音頻差在 40Hz 以內，即可得到雙耳節拍。而貓咪陶笛和貓咪口哨陶罐要有雙耳節拍的效果，則要用到二支類似的樂器來演奏，或者以開閉調音孔的方式分別錄製左右聲道亦可。

1. 要改變的項目：調音孔的開閉。
2. 要觀察的項目：音高。
3. 保持不變的項目：吹奏者、測音距離、錄音場所。



圖 15 貓咪造型陶笛



圖 16 貓咪造型口哨陶罐



圖 17 貓咪造型單主腔體雙音口哨陶罐

伍、研究結果分析與討論

【主題一】探討水鳥笛、口哨陶罐空吹時的音頻變化

為了解水鳥笛(開管、閉管)及口哨陶罐(閉管)腔體大小與音頻之間的變化關係，我們先以13mm的膠管笛(圖18)進行實驗，連接不同管長(腔體大小)的條件下，測量共鳴腔體大小與音頻之間的關係。



圖 18 膠管笛不同管長(腔體大小)實驗

膠管笛分別以膠帶串接成不同長度，量測2~10cm管長的頻率，得到結果如表1，其統計圖分析則如圖19所示：

表 1 口哨陶罐次腔體與水鳥笛吹管腔體體積的頻率測量記錄

管長	共鳴腔體頻率 (Hz)		口哨陶罐 (閉管笛)	水鳥笛 (開管笛)
	體積			
2 cm	2.6 ml		2367	4078
3 cm	3.9 ml		1750	3141
4 cm	5.2 ml		1430	2578
5 cm	6.5 ml		1195	2227
6 cm	7.8 ml		1102	1969
7 cm	9.1 ml		961	1758
8 cm	10.4 ml		891	1594
9 cm	11.7 ml		785	1465
10 cm	13.0 ml		732	1336

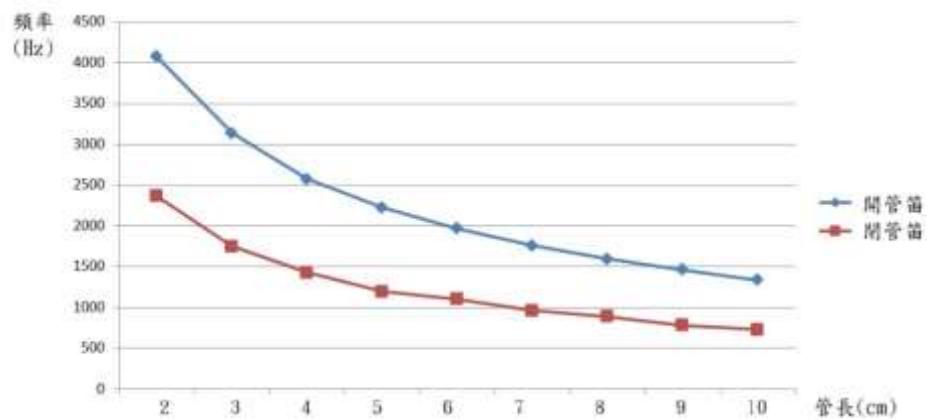


圖 19 口哨陶罐次腔體與水鳥笛吹管長短的頻率統計分析

根據聲學原理，閉管共鳴頻率公式（基本音）： $f = \frac{v}{4L}$ ；開管共鳴頻率公式（基本音）： $f = \frac{v}{2L}$ ，其中 f 是頻率， v 是聲速（約為 343 m/s）， L 是共鳴腔體的有效長度。

由圖 19 可以看出，開管笛的頻率約為閉管笛的 2 倍，隨著管長（腔體）的增加，頻率會愈來愈低，腔體大小與頻率均呈反比，腔體體積越小頻率越高，也就是口哨陶罐次腔體與水鳥笛吹管長短的頻率成反比，腔體越大則頻率越低。由於實驗中是用管長來改變體積，且管徑不變，我們可以將管體積視為與長度成正比，即： $V = A \cdot L \Rightarrow L = V/A$

以表 1 數據進行線性回歸擬合，我們推估水鳥笛（開管笛）腔體體積大小與頻率之間的關係為 $f \approx 9300 \times V^{-0.55}$ ，口哨陶罐頭哨（閉管笛）腔體體積大小與頻率之間的關係為 $f \approx 5300 \times V^{-0.51}$ ，以口哨陶罐頭哨腔體體積約 12ml 進行音頻測試，測試出來之頻率約為 762Hz，與公式推估數據差異不大。但水鳥笛部分，以實際水鳥笛（開管笛）腔體體積 11ml 進行音頻測試測試出來之頻率約為 1380Hz，接上主腔體後，略降為 1200Hz 左右，應是銜接部分的有效長度增加了的緣故。

本實驗所次腔體製作的鳥頭哨和貓頭哨比較偏向圓形或蛋形，將所測得的腔體大小與頻率資料，和市售的蛋形陶笛資料一起做統計分析，得到結果如圖 53 所示，其腔體大小與頻率之間具有高度相關，可依此統計圖來推估製作口哨陶罐的次腔體體積與頻率的關係。

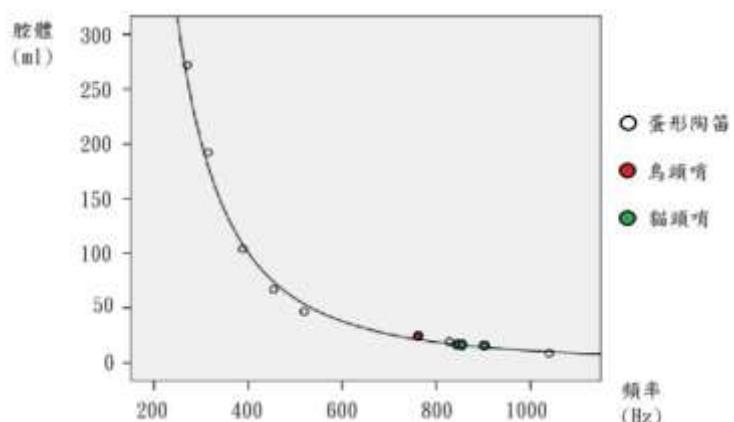


圖 20 蛋形腔體大小與頻率的統計分析

接著以校音軟體 Spectroid 來測量結合水鳥笛後的口哨陶罐音頻的音頻，其優點為可記錄一段時間內音頻的最大變化值(紅色線)。

在無注入水的情況下，水鳥笛輕吹的基音頻率為 1195 Hz (圖 21)，且伴隨著第 1 泛音與第 2 泛音的出現；而在重吹狀態下第 1 泛音 2531 Hz 會大於基音變成主音(圖 22)，與開管樂器的理論相符。

而口哨陶罐的鳥頭(共鳴腔體)則為閉管樂器，其頭頂有音孔可供改變音頻。在無注入水的情況下，口哨陶罐鳥頭在閉孔時發出的基音頻率為 762 Hz (圖 23)，也伴隨著第 1 泛音的出現；口哨陶罐鳥頭在開孔時所發出的基音頻率為 879 Hz (圖 24)，也伴隨著第 1 泛音的出現。

由圖 21~24 可以得知，水鳥笛、口哨陶罐的組合樂器，在空吹時可以吹出 762、879、1195 和 2531 Hz 4 種不同的聲音變化。

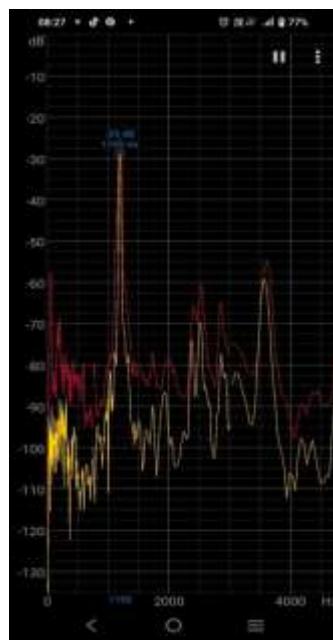


圖 21 鳥笛輕吹(無水)

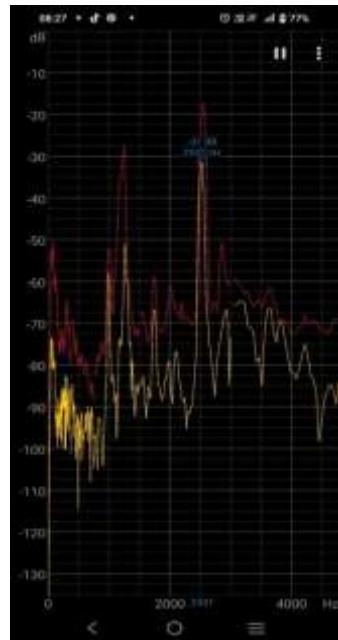


圖 22 鳥笛重吹(無水)

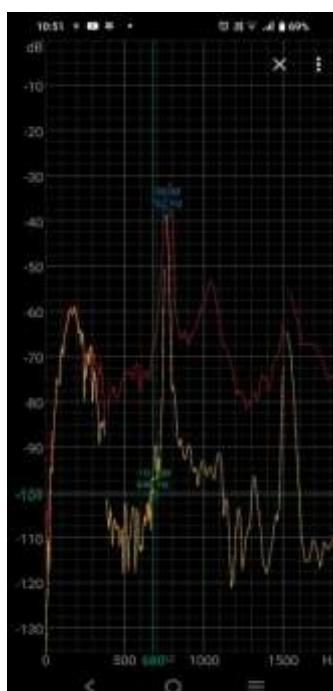


圖 23 鳥頭口哨閉孔(無水)

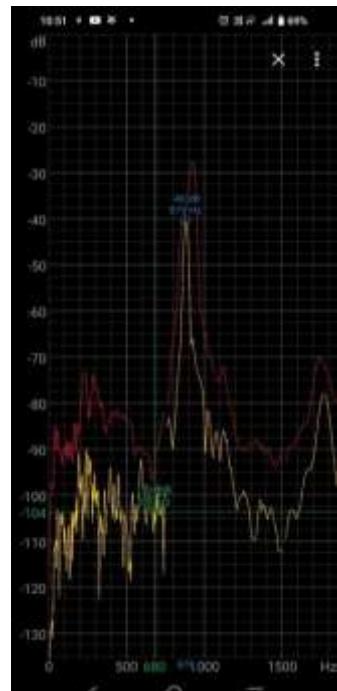


圖 24 鳥頭口哨開孔(無水)

【主題二】分析水鳥笛與口哨陶罐注入水後的音頻關係

水鳥笛與口哨陶罐所結合的樂器，在注入水後所發出的頻率則更為多變，水鳥笛在管內低水位時(剛好沒過水鳥笛與主腔體銜接處)，因空氣柱較長與吹氣壓力所造成的管長變動，會產生由高到低的音頻變化，類似鳥的鳴叫聲，其頻率約在 762~1500Hz 之間(圖 25)。

在管內處於高水位時(約為水鳥笛管長的一半)，因空氣柱較短與吹氣壓力所造成的管長變化，也會產生由高到低的音頻變化，其頻率約在 1113~1898Hz 之間(圖 26)。

圖 25 與圖 26 是在閉管的情形下所測得的音頻變化，當氣流衝出笛管，造成閉管與開管間不斷的變動時，其頻率的變動會變高如圖 27 與圖 28 所示。圖 27 是輕吹鳥笛所產生的鳥鳴振動頻率，約在 2227~2836 Hz 之間；而圖 28 是重吹鳥笛所產生的鳥鳴振動頻率，變高落於 2836~3750Hz 之間。由圖 25~28 得知，注入水後的鳥笛其聲音變化更多，更像各種鳥類的鳴叫

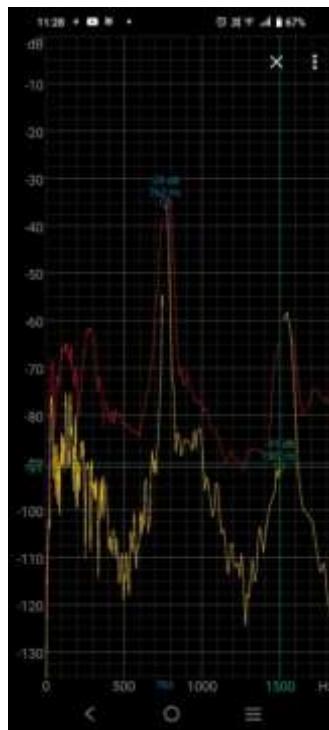


圖 25 鳥笛 (低水位)



圖 26 鳥笛(高水位)



圖 27 鳥笛輕吹(振動)

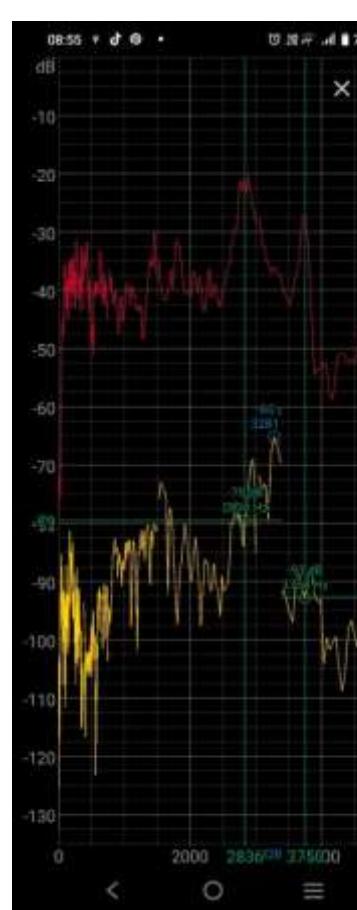


圖 28 鳥笛重吹(振動)

聲。

為了解鳥笛聲音的多變性，另以校音軟體 Syaku 8 來測量音頻，其特點在分析瞬間產生的音頻變化。由圖 29 不同時間所測的鳥笛頻率分析與圖 25~28 之紅色頻譜雷同，驗證了水鳥笛可發出多種的鳥鳴聲。

當按住鳥笛的出音孔，此時氣流會直達鳥頭共鳴槍體的出音孔，由圖 30 鳥頭口哨的閉孔頻譜分析，得知發出的基音頻率為 809 Hz，也出現第 1 泛音的諧音；由圖 31 鳥頭口哨的開孔頻譜分析，得知發出的基音頻率為 949 Hz，也有出現第 1 泛音的諧音，兩者的頻率也都高於無加水所發出的頻率(762 和 879 Hz)，因為加水後要吹響必須用比較大的力氣所導致的結果。

在按住鳥笛的出音孔情形下，搖晃主腔體(鳥身)，讓主腔體時而有水與時而無水堵住鳥笛的吹管，也可使口哨陶罐發出 762、879、809 和 949 Hz 4 種不同的聲音變化。

綜合上述，我們所製作的水鳥笛與口哨陶罐結合體，能讓此樂器所發出的音頻變化無窮。

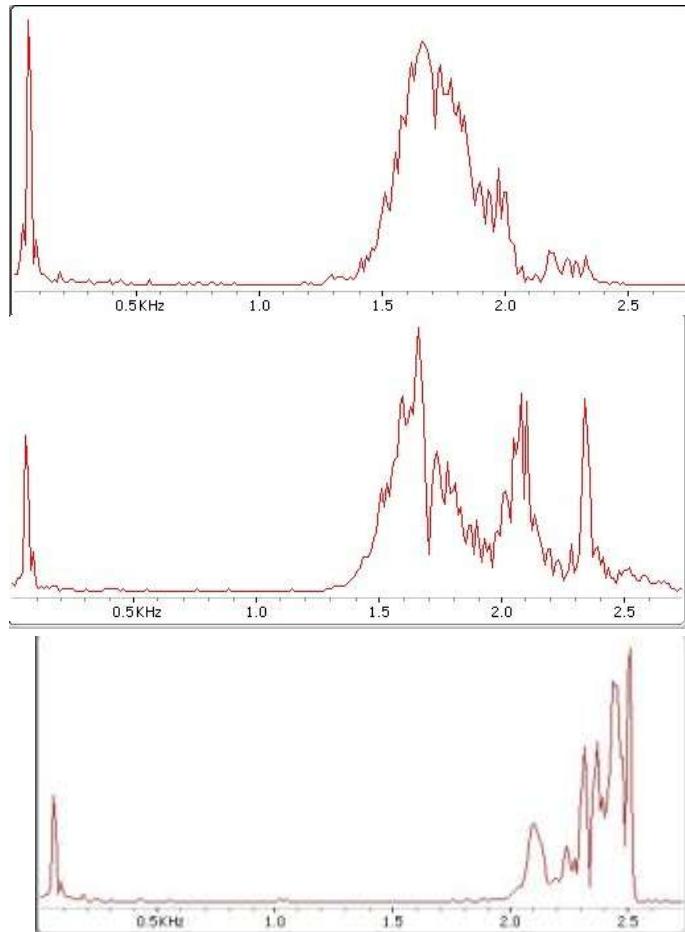


圖 29 不同時間所測的鳥笛頻率

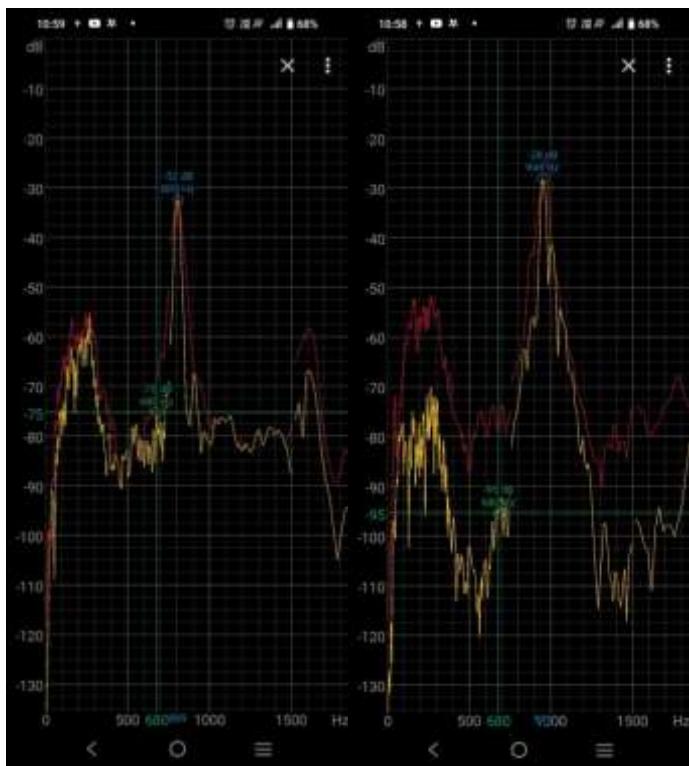


圖 30 鳥頭口哨閉孔(振動) 圖 31 鳥頭口哨開孔(振動)

【主題三】了解陶笛罐、單腔室單哨與雙哨陶罐能否產生雙耳節拍

我們利用貓咪造型石膏模，分別製成陶笛、口哨陶罐和雙音口哨陶罐，來進行能否產生雙耳節拍的實驗。

一、貓咪造型陶笛能否產生雙耳節拍的研究

使用石膏模主要在控制腔體的大小，我們以石膏模具來製作共鳴腔體（貓咪身體與頭部），在底部製作出音孔與笛唇，採用中空的尾巴當吹嘴，開挖陶笛共鳴腔體上的各個音孔。貓咪造型陶笛（參閱圖 15）吹奏時，以開放音孔的方式來改變音頻的高低。以校音軟體 Spectroid 來測量音頻，其記錄如表 2 所示。

表 2 貓咪造型陶笛的音階頻率紀錄

音階 笛別	1	2	3	4	5	6	7	i	2	3
A 笛	410	457	510	551	609	674	738	785	879	973
B 笛	398	451	498	539	592	656	721	773	867	961
音頻差	12	6	12	12	17	18	17	12	12	12

單位：Hz

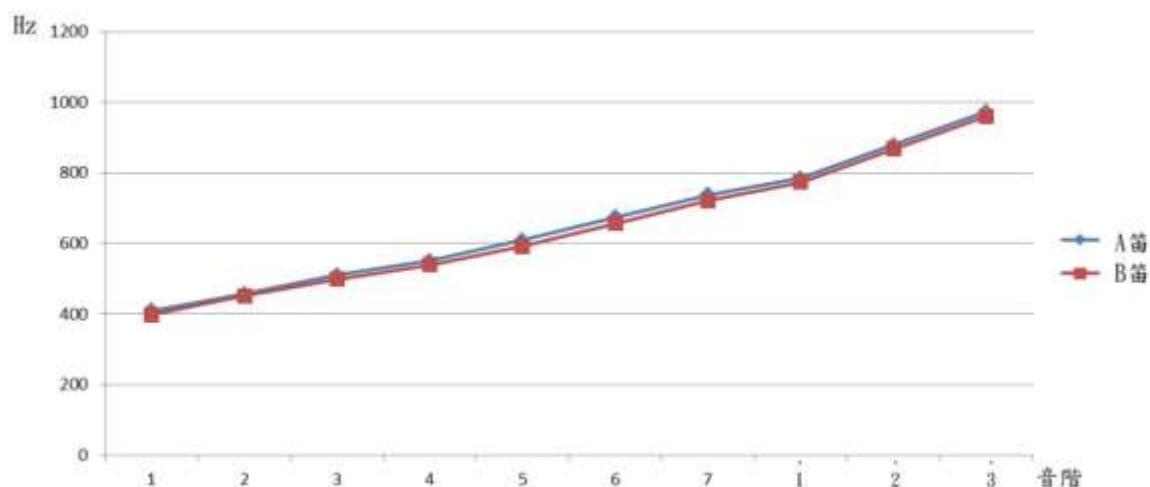


圖 32 完成後的貓咪造型陶笛音頻分析

由圖 32 的貓咪造型陶笛音頻分析得知，各笛的音階頻率平順和諧，各笛都能吹出優美的旋律。

由圖 33 各音階的音頻差分析得知，不同陶笛之間的音頻差也都維持在 30Hz 以下，因此符合了產生雙耳節拍的條件，依據理論推測 A 與 B 陶笛在合奏時，能發出對人體有益的 θ 、 α 和 β 等腦電波。

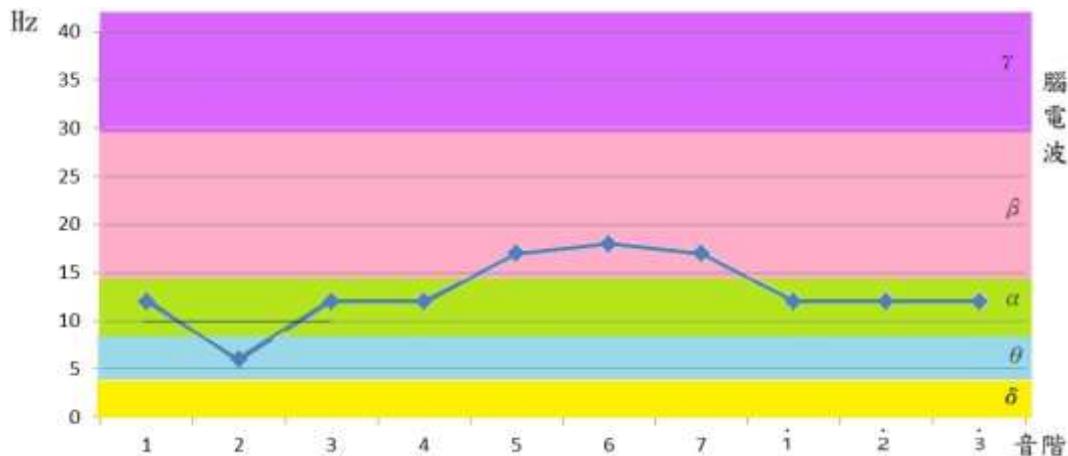


圖 33 各音階的音頻差產生的腦電波分析圖

分別演奏二隻貓咪造型陶笛進行錄音，所測得的頻譜分析如圖 34 所示，將圖 35 其頻譜分析結果局部放大，便可看到圖 34 的正弦波分析圖，而圖 36 則是二個不圖頻率所產生的雙耳節拍頻譜。

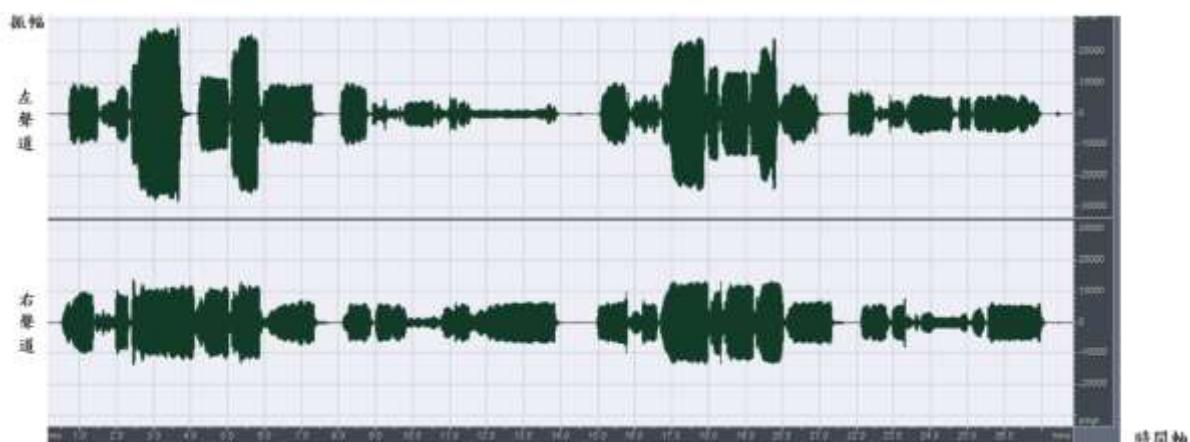


圖 34 演奏二隻貓咪造型陶笛所產生的雙耳節拍頻譜分析

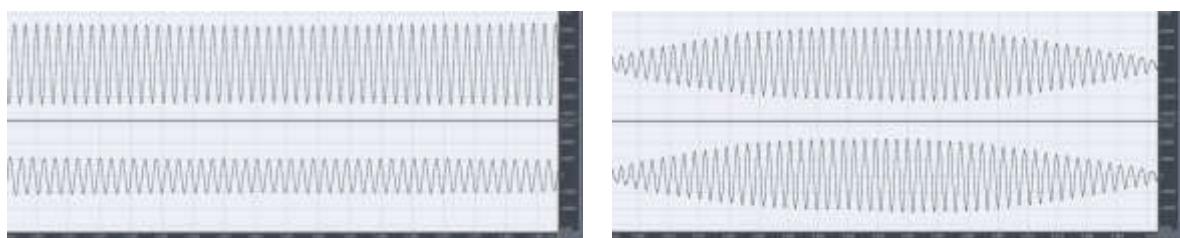


圖 35 不同聲道的雙耳節拍頻譜分析

圖 36 不同頻率合成的雙耳節拍頻譜分析

由圖 35 可以看出，不同聲道所產生的單一頻率聲音，其波形各自單純穩定，但兩相近頻率所合成的頻譜(圖 36)，其波形亦呈現單純的正弦波，但會有忽大忽小的顫動循環變化，此是否與雙耳節拍有關？特進行以下的雙耳節拍頻率差的研究：

依據 Heinrich Wilhelm Dove (1839)提出的理論，左右耳聽到的聲音，會透過聽神經傳達到中腦進行整合，而左右耳聽進的頻率進行調和時，會產生兩頻之差的脈動情形，此震動的頻率即為雙耳節拍(William Rodriguez, 2018)。

【實驗假設】：雙耳節拍的頻率差會產生忽大忽小的顫動循環變化

【驗證假設】：

使用頻率發生器(圖 6)來產生左右聲道的不同頻率，並用音樂編輯軟體 Cool Edit Pro 2.0 (圖 3) 進行頻譜分析。左聲道固定發出 400Hz，而右聲道分別發出 403Hz、405Hz、410Hz、420Hz、430Hz 與 440Hz，所測得的頻譜分析結果如圖 37~42 所示：



圖 37 雙耳頻率差 3Hz 的頻譜分析

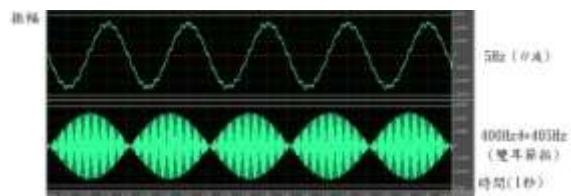


圖 38 雙耳頻率差 5Hz 的頻譜分析



圖 39 雙耳頻率差 10Hz 的頻譜分析



圖 40 雙耳頻率差 20Hz 的頻譜分析



圖 41 雙耳頻率差 30Hz 的頻譜分析



圖 42 雙耳頻率差 40Hz 的頻譜分析

由圖 37~42 的雙耳頻率差頻譜分析結果可以看出，雙耳節拍的頻率差所產生忽大忽小的顫動循環變化規律，剛好與兩耳間的頻率差異值相吻合，而其所產生對人體有益的腦電波，是人耳所無法察覺的聲波，但可藉由產生忽大忽小的顫動變化，刺激改變我們的心理狀態，此應是雙耳節拍所具有的特色。

二、貓咪造型口哨陶罐能否產生雙耳節拍的研究

利用貓咪造型石膏模，製成二個口哨陶罐（參閱圖 16）來進行能否產生雙耳節拍的實驗。

表 3 貓咪造型口哨陶罐的頻率紀錄

吹奏 口哨陶罐	無水吹奏		有水震動吹奏	
	音孔開放 (開口)	音孔閉合 (閉口)	音孔開放 (開口)	音孔閉合 (閉口)
A	1020	844	1043	867
B	1137	855	1177	879
頻率差值	117	11	134	12

由表 3 可以得知，A、B 口哨陶罐在音孔閉合時合奏，無論是有水或無水的狀態下，其二個頻率的差值都小於 30Hz，符合能產生良好雙耳節拍的條件，而加入水後的吹奏，在水的共振作用下，會加大雙音的頻率差異。利用音樂編輯軟體 Cool Edit Pro 來進行頻譜分析，擷取 1 分鐘得到結果如圖 43 與圖 44 所示，其波形亦呈現單純的正弦波，但也有忽大忽小的循環變化，與假設的驗證吻合，推定有雙耳節拍的效果。

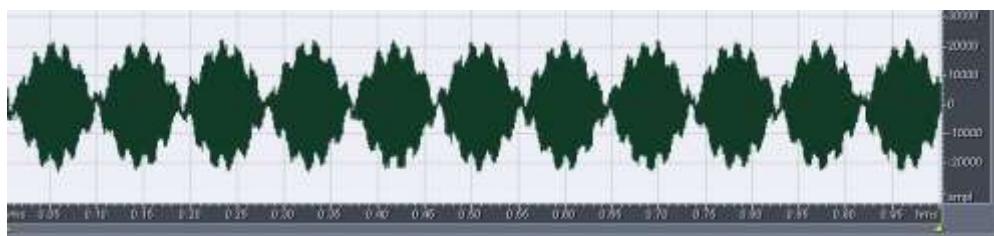


圖 43 A、B 口哨陶罐在音孔閉合時的頻譜分析圖(無水)



圖 44 A、B 口哨陶罐在音孔閉合時的頻譜分析圖(有水)

三、貓咪造型單腔室雙哨陶罐能否產生雙耳節拍的研究

利用貓咪造型石膏模，製作一個單腔室雙哨陶罐（參閱圖 18），來進行能否產生雙耳節拍的實驗。

表 4 貓咪造型單腔室雙哨陶罐的單音頻率紀錄

吹奏 口哨陶罐	無水吹奏		有水震動吹奏	
	音孔開放	音孔閉合	音孔開放	音孔閉合
頭哨	1020(Hz)	902(Hz)	1031(Hz)	913(Hz)
身哨	1008(Hz)	855(Hz)	1030(Hz)	873(Hz)

由表 4 可以得知，單腔室雙哨陶罐在頭哨與身哨同時開放或閉合時合奏，無論是有水或無水的狀態下，其二個頻率的差值都小於 30Hz，符合能產生雙耳節拍的條件。

在有水的實際演奏中，所測得的四種和聲頻率如表 5 所示：

表 5 貓咪造型單腔室雙哨陶罐的雙聲合音後頻率紀錄

雙聲合音頻率(Hz)	頭哨(音孔開放)	頭哨(音孔閉合)
身哨(音孔開放)	1000 (1031&1030)	926 (913&1030)
身哨(音孔閉合)	867 (1031&873)	844 (913&873)

利用音樂編輯軟體 Cool Edit Pro 來進行頻譜分析，得到結果如圖 45~48 所示，其波形亦呈現單純的正弦波，也有忽大忽小的穩定循環變化，但頻率差距以雙哨陶罐同時開放或同時閉合時，頻率差距最小，最符合良好雙耳節拍的產生條件，與雙耳節拍產生器進行頻率比較，波形亦完全符合。證明我們的貓咪造型單腔室雙哨陶罐，在同時開放或閉合雙哨的情形下，能產生對人體有益的雙耳節拍。

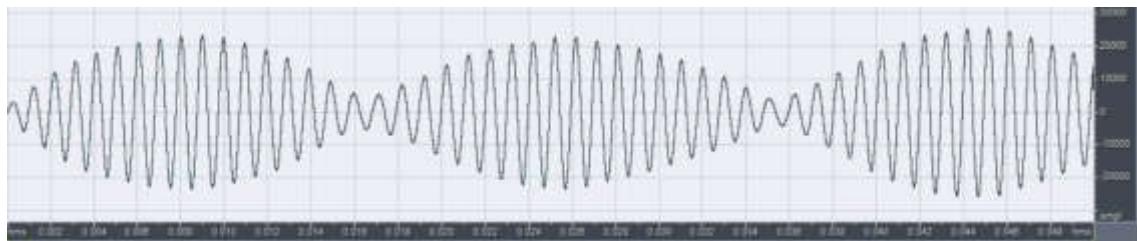


圖 45 頭哨音孔開放與身哨音孔開放的頻譜分析(差值=1)

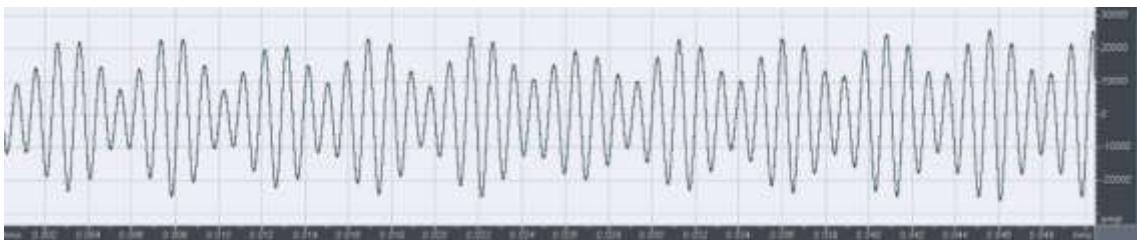


圖 46 頭哨音孔閉合與身哨音孔開放的頻譜分析(差值=118)

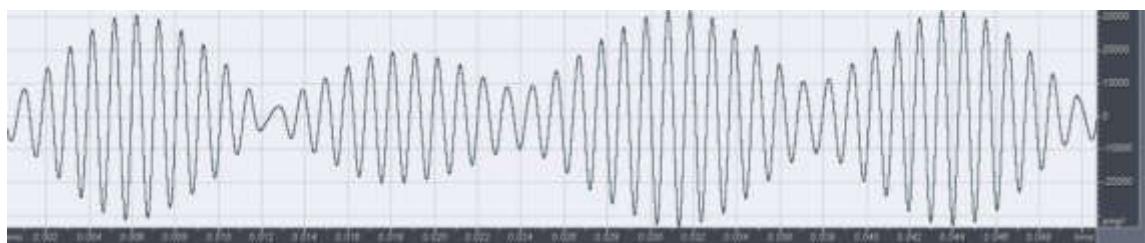


圖 47 頭哨音孔開放與身哨音孔閉合的頻譜分析(差值=158)

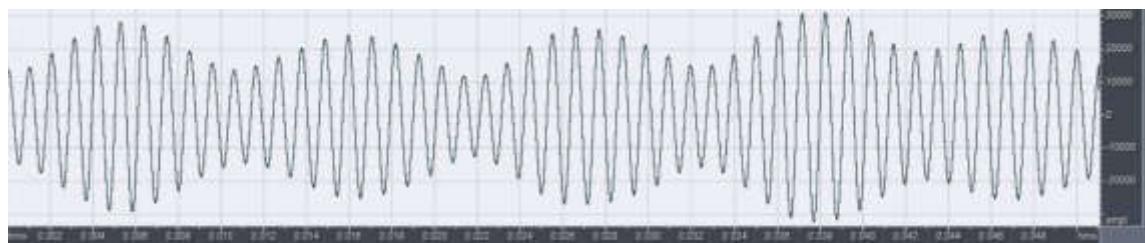


圖 48 頭哨音孔閉合與身哨音孔閉合的頻譜分析(差異 40)

陸、結論與建議

一、結論

依實驗計畫進行各項實驗，綜合研究結果分析與討論，我們得到了下列結果：

1. 水鳥笛與口哨陶罐的組合樂器，其內部容積大小與頻率呈反比，且開口笛的變化比閉口笛的變化大。口哨陶罐(閉管樂器)在無水狀態下可以吹出 762、879 Hz 的聲音，而水鳥笛(開管樂器)則會吹出基音 1195 Hz 和 2531 Hz 的倍頻泛音，共可發出 4 種不同的聲音變化組合。
2. 注入水後，在主腔體的水恰好能堵住鳥笛吹管與主腔體銜接處的前提下，吹奏時，在銜接處時而有水與時而無水的狀態下，口哨陶罐可發出 762、879、809 和 949 Hz 4 種不同的聲音變化。而水鳥笛在輕吹時，因吹氣壓力所造成的管長變動，會產生由高到低的音頻變化，類似鳥的鳴叫聲，其頻率約在 762~1898Hz 之間。當重吹使水產生振動，會讓頻率變高落於 2227~3750 Hz 之間。注入水後的水鳥笛與口哨陶罐的組合樂器，在笛哨與頭哨的合鳴下，其聲音變化更多，更像鳥群的鳴叫聲。
3. 同時演奏兩隻貓咪造型陶笛與同時吹奏兩隻貓咪造型口哨陶罐，所產生的雙音，都能產生雙耳節拍。而單獨吹奏單腔室雙哨陶罐，雖然它是單一樂器，但由於其具有 2 個共鳴腔體，能發出頻率差在 30Hz 以內的雙音，在同時開管或閉管吹奏的狀態下，亦能產生有益人體的雙耳節拍，此為本研究最大的發現。

二、建議

1. 由於我們可以透過控制共鳴腔體大小來掌握陶罐所能發出的頻率，雖然目前我們的單腔雙哨陶罐每哨僅能發出單一頻率，也許未來在樂器的設計上可以尋求其他可能性。
2. 貓咪造型單腔室雙哨陶罐，其雙哨共鳴腔體的形狀不一，除腔體大小不易控

制外，其背部共鳴腔接合處亦容易產生裂縫，要將兩共鳴腔發出的頻率控制在 30Hz 以下的確有些難度。因此，我們將二隻水鳥口哨陶罐結合成一體，其共鳴腔體都在鳥頭，如此要控制雙哨的共鳴腔體大小比較容易些。完成後的雙腔雙哨水鳥口哨陶罐如圖 49 所示：



圖 49 雙哨水鳥口哨陶罐

其在各條件下所測得的頻譜分析波形，如圖 50~53 所示，也都呈現單純的正弦波，而且也都具備了忽大忽小的循環變化。



圖 50 左音孔開放與右音孔開放的頻譜分析



圖 51 左音孔閉合與右音孔開放的頻譜分析

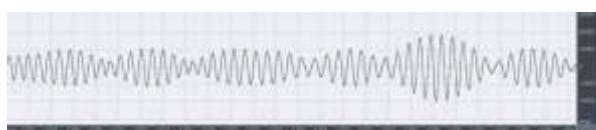


圖 52 左音孔開放與右音孔閉合的頻譜分析



圖 53 左音孔閉合與右音孔閉合的頻譜分析

柒、參考資料

Allen (2012, Dec. 09) *Ocarina History*. Ocarina forest.com.

<http://ocarinaforest.com/info/ocarina-history/>

Lane, James D; Kasian, Stefan J; Owens, Justine E; Marsh, Gail R. (1998, Jan) Binaural Auditory Beats Affect Vigilance Performance and Mood. *Physiology & Behavior*. 1998-01, 63 (2): 249 – 252.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0031938497004368?via%3Dihub>

Onno van der Groen (2020, Feb, 25) Sounds like hype: there's scant evidence the 'binaural beats' illusion relaxes your brain. *The conversation*. Academic rigour, journalistic flair <https://theconversation.com/sounds-like-hype-theres-scant-evidence-the-binaural-beats-illusion-relaxes-your-brain-132197>

William Rodriguez (2018, Feb., 6) *The Unique Instruments We Call Whistling Vessels*. Arvhaic Roots. Indigenous Instrument Education

https://archaicroots.com/2018/02/06/unique-instruments-call-whistling-vessels-huaco-silbador/?_gl=1%2A1wuxtfw%2A_ga%2AMTU50DE10DI1LjE3MzU2MTA4MTk.%2A_ga_YBN4JHBY8Q%2AMTczNjU4MDYxMj4zLjEuMTczNjU4MTQ4NS42MC4wLjA.

William Rodriguez(2018, May, 18) *What are Binaural Beats (Binaural Frequencies)?*

Arvhaic Roots. Indigenous Instrument Education

<https://archaicroots.com/2018/05/18/what-are-binaural-beats-binaural-frequencies/>

可夫 (2022 年 1 月 25 日) 南美傳統陶罐「倒」出動物聲音 烏鳴狼嚎唯妙唯肖。人與物 / 香港 01。

https://www.hk01.com/article/728537?utm_source=01articlecopy&utm_medium=referral

郭芸吟(2018)。「**曩**」本多「琴」。高雄市第 58 屆中小學科學展覽作品，未出版，高雄市

郭清進 (2009)。陶笛製作與音頻分析之研究。國立高雄師範大學工業科技教育學系教學碩士論文，未出版，高雄市。

鄭慧慈 (2008)。聲音的探討—以電腦測音分析陶磬與陶鐘為例。國立高雄師範大學工業科技教育學系教學碩士論文，未出版，高雄市。

引用圖片來源：

圖 7— Whistling Jar(n. d.) The Met Fifth Avenue. <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/502278>)

圖 8— Whistling Jar(n. d.)The Met Fifth Avenue.
<https://www.metmuseum.org/art/collection/search/501305>)

圖 9— One Death Whistle(n. d.) Keller's Blog Site.

<https://blogs.vsb.bc.ca/dkeller/dounut-media/axtec-death-whistle/>

【評語】080101

本作品能結合南美口哨陶罐、鳥笛與陶笛之構造與發聲原理，設計出具有雙音孔的陶罐樂器。自製陶罐的過程詳盡，將兩個頻率相近的陶罐同時吹奏或單獨吹奏單腔體雙哨陶罐樂器，它們所發出的樂音頻率與頻率發聲器所產生的雙耳節拍頻率，透過音樂編輯軟體進行比對，是相符的，作者自己設計且燒結陶器是獨特之處，並且利用音頻軟體進行頻率分析，對聲音高低和腔體體積關係也能提出合理推論，探究能力佳。利用二種不同聲音效果的組合，可產生所謂「雙耳節拍」共鳴現象。作品很有巧思，有系統的分析產生聲音的頻率。

作品海報



摘要

本研究將南美口哨陶罐、鳥笛與陶笛(泥哇嗚)的構造與製作原理相互結合，創造出一種新的樂器——神奇的陶罐。它可以演奏歌曲，甚至當我們在其中放入一些液體時，配合手勢的開合，可以重現鳥類的鳴叫與潺潺的流水聲等，非常有趣。然而，在嘗試吹奏及創作的過程中，我們發現，將兩個頻率相近的陶罐同時吹奏或單獨吹奏單腔體雙哨陶罐樂器，它們所發出的樂音頻率與頻率發聲器所產生的雙耳節拍頻率，透過音樂編輯軟體進行比對，是完全相符的，所以，我們所製作的陶罐除了能陶冶性情外，更具有影響腦電波的神奇效果呢！

關鍵字：口哨陶罐、鳥笛、雙耳節拍



壹、研究動機

有一次在老師分享的影片中，介紹了南美口哨陶罐，當時，我們看見一個人將野狼造型的水壺左右搖晃，陶罐居然可以發出狼嚎聲，拿了鳥造型的水壺搖晃，居然也可以發出鳥叫聲，聲音維妙維肖，令人忍不住想要進一步了解它的發聲原理與構造。

南美口哨陶罐與我們常見的鳥笛，都是在腔室內注入水後藉由搖晃或吹奏引發腔體內氣流變化進而發出聲音的樂器，它們外型構造也與陶笛十分相似，這三者是否能夠互相融合，又或者融合後會產生甚麼樣的變化，引發了我們強烈的想像力與好奇心。



貳、研究目的

希望透過文獻探討與研究分析，了解口哨陶罐、水鳥笛與陶笛的發聲原理，並期待能將這樣的原理應用在我們的生活中，創造出一種新的神奇樂器—「神奇的陶罐樂器」。

本實驗預計達到下列目的：

- 一. 探討水鳥笛、口哨陶罐空吹時的音頻變化
- 二. 分析水鳥笛與口哨陶罐結合後的音頻關係
- 三. 了解陶笛罐、單腔室單哨與雙哨陶罐與雙耳節拍的關係



文獻探討

(一) 南美的「口哨陶罐」

南美的口哨陶罐 (whistling jar)，特別是來自秘魯和奇穆文化的這些陶器。在陶罐內部，空氣或液體能夠經由連通管在腔體間的流動，通過共鳴腔體的氣窗來發出聲音。(可夫，2022)。

在 1970 年代，研究人員發現，這些陶罐的聲音能引起明顯的生理反應，與其他文化的聽覺誘發狀態相似，支持了這些陶罐在儀式使用中的重要性。此外，這些陶罐常常裝飾有動物或人類的形象，暗示其可能擁有象徵或精神意義，並與聲音和形狀的關聯(可夫，2022)。

這些陶罐利用空氣和水流動的原理發出口哨聲。典型的口哨陶罐的腔體由兩個腔體所組成：

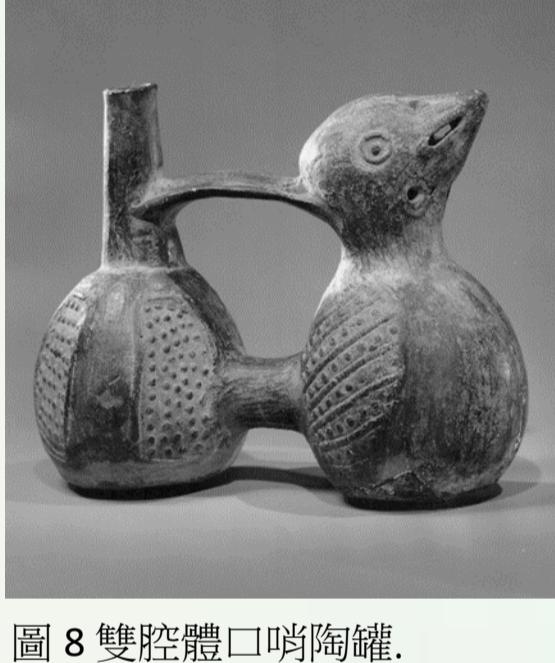
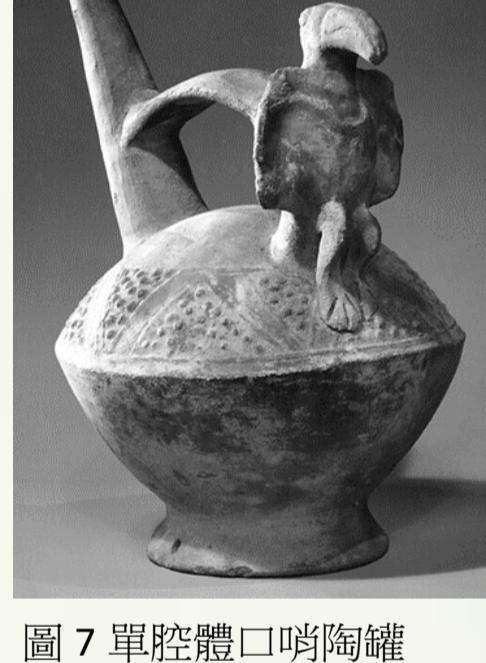


圖 7 單腔體口哨陶罐

圖 8 雙腔體口哨陶罐。

(皆取自 Whistling Jar(n.d.) The Met Fifth Avenue.)

1. **主腔體**：這部分通常存放液體。

2. **次腔體**(共鳴腔體)：這部分通常有一個或多個小孔作為氣孔，且與主腔體通過小管相連。

口哨陶罐有兩種主要類型，第一種通常只有一個腔體(圖 7)，必須用口吹才能產生聲音。口哨的吹孔通常是附在陶罐上，以一種不起眼的方式隱藏起來。第二種類型通常有兩個腔體(圖 8)，通過向噴口吹氣或將液體從一個腔體倒入另一個腔體，迫使腔體中的空氣穿過一個或多個發聲邊緣(出音孔)，陶罐就會發出聲音。

共鳴腔體是產生口哨聲的部位，最常見的口哨型態如圖 9 所示。



圖 9 常見的口哨型態

(取自 One Death Whistle(n.d.))

氣流從哨口進入後，因在不同大小的共鳴腔體產生摩擦，故而可以發出高低不同的音調。

南美的口哨陶罐，其發出的音頻主要由共鳴腔體大小與形狀決定，但還能透過不同的傾倒搖晃或吹奏方式，在同一個陶罐內可發出不同的聲音，這是它獨特迷人的地方。這些鳥獸叫聲非常悅耳，讓人如置身於野外，使人心曠神怡。

參、研究設備與器材

一. 設備：電腦、手機、電窯(圖 1)、壓板機(圖 2)。



圖 1:電窯



圖 2 壓板機

二. 軟體：音樂編輯軟體 Cool Edit Pro 2.0 (圖 3)、校音軟體 Syaku8 (圖 4)、校音軟體 Spectroid (圖 5)、頻率發生器 (圖 6)



圖 3 Cool Edit Pro 2.0



圖 4 校音軟體 Syaku 8

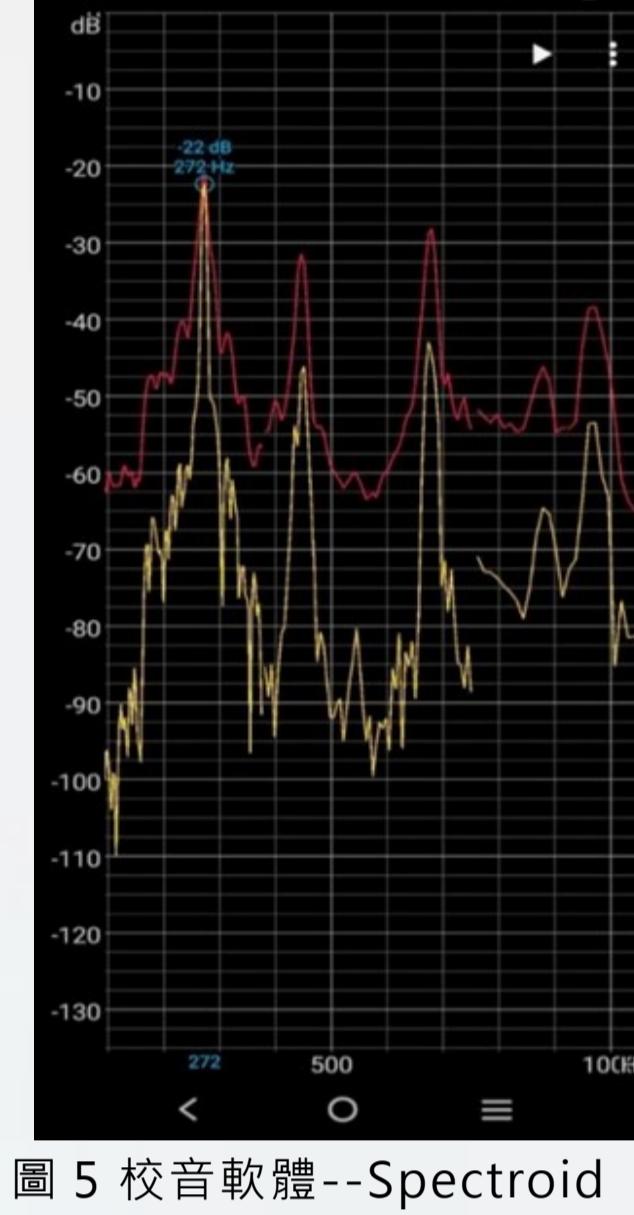


圖 5 校音軟體--Spectroid



圖 6 頻率發生器

三、器材與工具：陶土、製陶工具組。

(圖 1~6 皆為教師指導作者自攝)

(二) 鳥笛的探討

鳥笛的聲音傳達了製作它的人的品味，也表達了他們對鳥聲的感受。世界各地都有模仿鳥叫聲的木製和陶製鳥哨，而其發音主要方式如下：

1. 只用一個音符共鳴的笛子
2. 打開和關閉單一指孔的布谷鳥笛 (雙音笛)
3. 演奏簡單旋律的陶笛

4. 通過將水倒入腔體內來振動的水鳥笛

水鳥笛是用一個容器及一根吹管做成的哨笛。經由吹管對容器吹氣，鳥笛便會發出悅耳的聲音。在容器中加水，鳥笛產生的聲音頻率會變低(開管變閉管樂器)，但隨著容器中水越多，因為空氣柱變短，鳥笛聲音頻率會變高。

鳥笛的發音方式是利用氣流直接通過笛的出音孔，空氣在笛唇處摩擦振動而產生聲音。吹奏時管內的空氣柱會改變，因此會產生不同的音頻，甚至藉由調整吹氣的氣壓，使得鳥笛的共振由基頻移至某個諧音，因此可以產生類似鳥鳴的聲音。

(三) 陶笛的探討

陶笛 (Ocarina)，是一種具有悠久歷史的吹管樂器。現代陶笛的雛型曾在不同文化中出現。在中國有一種近似陶笛的古老樂器：埙。至於中國的「埙」跟陶笛有沒有共同源頭，已無從稽考，但是，在中國除了「埙」之外，還有很多陶土樂器，例如 1200 年歷史，源於寧夏回族自治區的「泥哇嗚」、源於湖北春秋戰國時期的「嗚嘟」卻與現代陶笛的基本特徵完全一致，不但在外形上區別不大，而且都具備陶笛哨口，甚至連孔數都完全一致；另外的共通點則是都是主要以陶泥燒製的閉管式樂器。而在南美的瑪雅人和阿茲特克人亦於六世紀出現一種用於裝飾和祭祀的仿鳥鳴的彩繪樂器，也被認為可能是現代陶笛的雛型(Allen, 2012)。

(四) 聲音的探討

從聲學的角度來看，樂音有三個主要特徵，即響度、音調、音色，稱為樂音三要素。聲音的強弱程度稱為響度，響度和聲波的振幅大小有關，聲波的振幅愈大，所聽到的聲音也就愈大。而聲音的高低稱為音調，聲音的頻率愈大，則聽到的聲音也就愈高昂；相反地，頻率愈小，聽到的聲音也就愈低沉。發聲體的發音特性稱為音色，其決定因素為發聲體所發出聲波的波形，若波形不同，則音色也不一樣。對於不同的樂器所發出的聲音，即使頻率都調成一樣，但其音色各不相同。

音叉振動時，只發單一頻率聲音，波形單純穩定；而大部分的樂器所發出的聲波都不是單一頻率波，乃是由基音和多組不同頻率的泛音複合而成的複合波，其中泛音的頻率必為基音頻率的整數倍。

近年更開始流行聽『雙耳節拍』音樂，也就是兩隻耳朵同時聽不同頻率的音調，被認為能影響腦波。除了提高創造力外，還有放鬆助眠之效。

『雙耳節拍』音樂是指耳朵在聽兩種不同頻率的音調後，在大腦內部所產生的聽覺錯覺。

1839 年，海因里希·威廉·多夫 (Heinrich Wilhelm Dove) 發現，如果分別在左右耳朵中聆聽到兩種不同的頻率 (頻率都低於 1500 Hz)，它們之間的差異小於 30 Hz)，大腦會產生一種新的頻率，其大小為兩耳聽到的音頻的差值。(Lane, et al., 1998)。比方說左耳聽 400Hz 的音調，另一耳如上所述，我們可以聆聽雙耳節拍以鼓勵大腦產生特定類型 (狀態) 的腦電波。腦電波狀態主要有 5 種，如下所示：

1. 德爾塔(delta δ)：1-3 Hz
2. 西塔(Theta θ)：4-8 赫茲
3. 阿爾法(Alpha α)：8-14 赫茲
4. 貝塔(Beta β)：14-30 赫茲
5. 伽瑪(Gamma γ)：30-100 赫茲

聆聽雙耳節拍對大腦的影響取決於音軌的頻率和它刺激產生的腦電波。文獻研究已經發現，不同的頻率會影響我們意識的不同面向，並且可以根據使用的頻率改變我們的心理狀態。這些頻率在當代冥想音樂中被用來達到一定的效果(Onno, 2020)。

『神奇的陶罐』設計

(一) 水鳥笛與口哨陶罐的組合設計

為了得到不同的聲音效果與組合，我們結合了陶笛、水鳥笛與口哨陶罐的原理來設計「神奇的陶罐」。水鳥笛與口哨陶罐的組合設計水鳥笛與口哨陶罐的組合樂器製作程序如圖 11 所示：

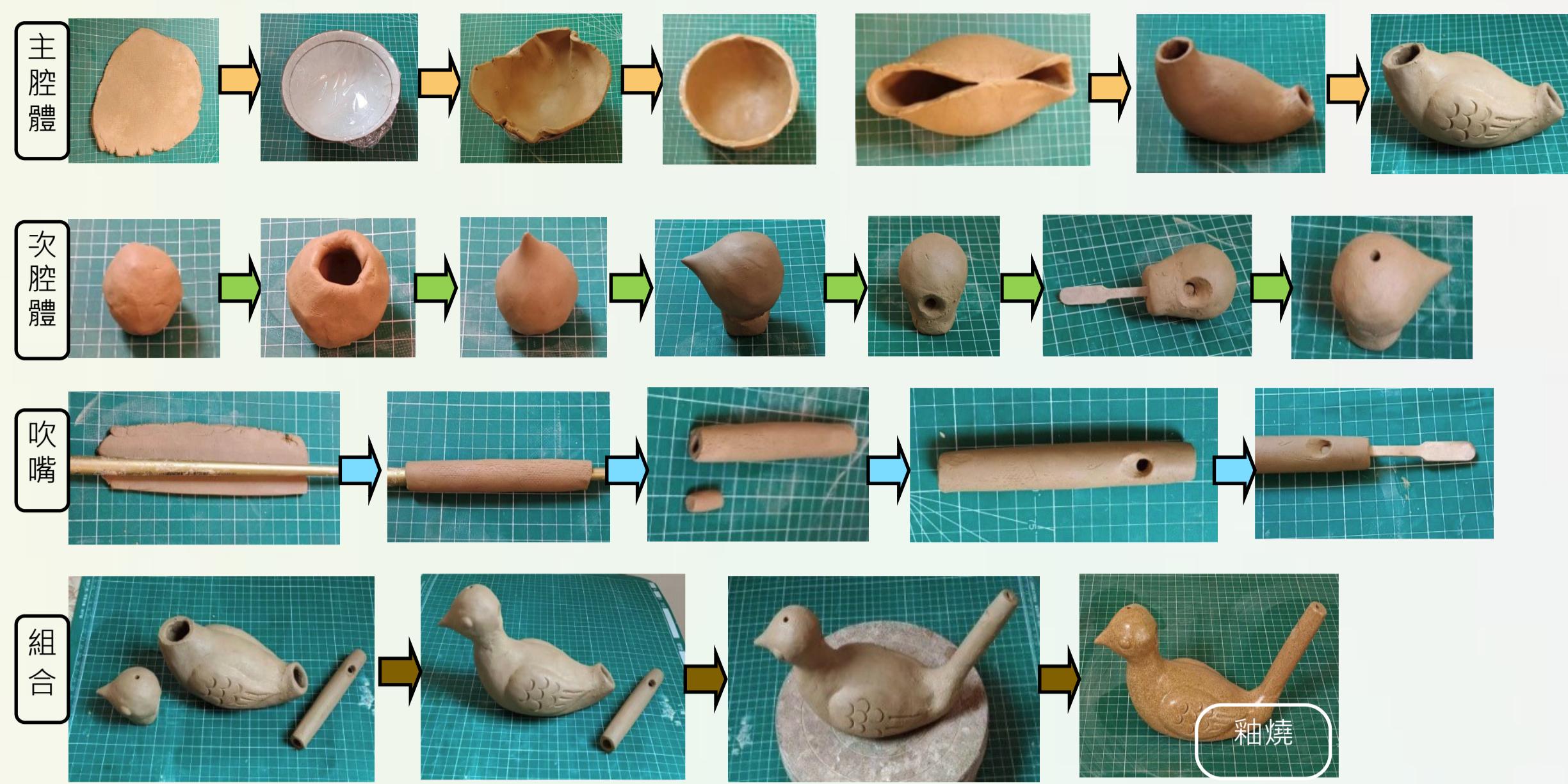


圖 11 水鳥笛與口哨陶罐的組合樂器的製作程序

其中次腔體為陶罐的共鳴腔體，為影響音高的主要部分。郭芸吟(2018)實驗研究結果顯示，共鳴腔體的氣窗及笛唇設計，以笛唇角度 30 度，氣窗大小以 $4\text{mm} \times 10\text{mm}$ 進行標準化設計，可以達成最佳吹奏效果。但本實驗作品為陶土器皿，為求美觀，將氣窗大小 $4\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的面積轉換成直徑約為 7.12mm 的圓形，總面積大小不變。故本實驗之所有共鳴腔體的圓形氣窗及笛唇角度皆採此標準進行製作。

(二) 陶笛罐、單腔室單哨與雙哨陶罐的組合設計

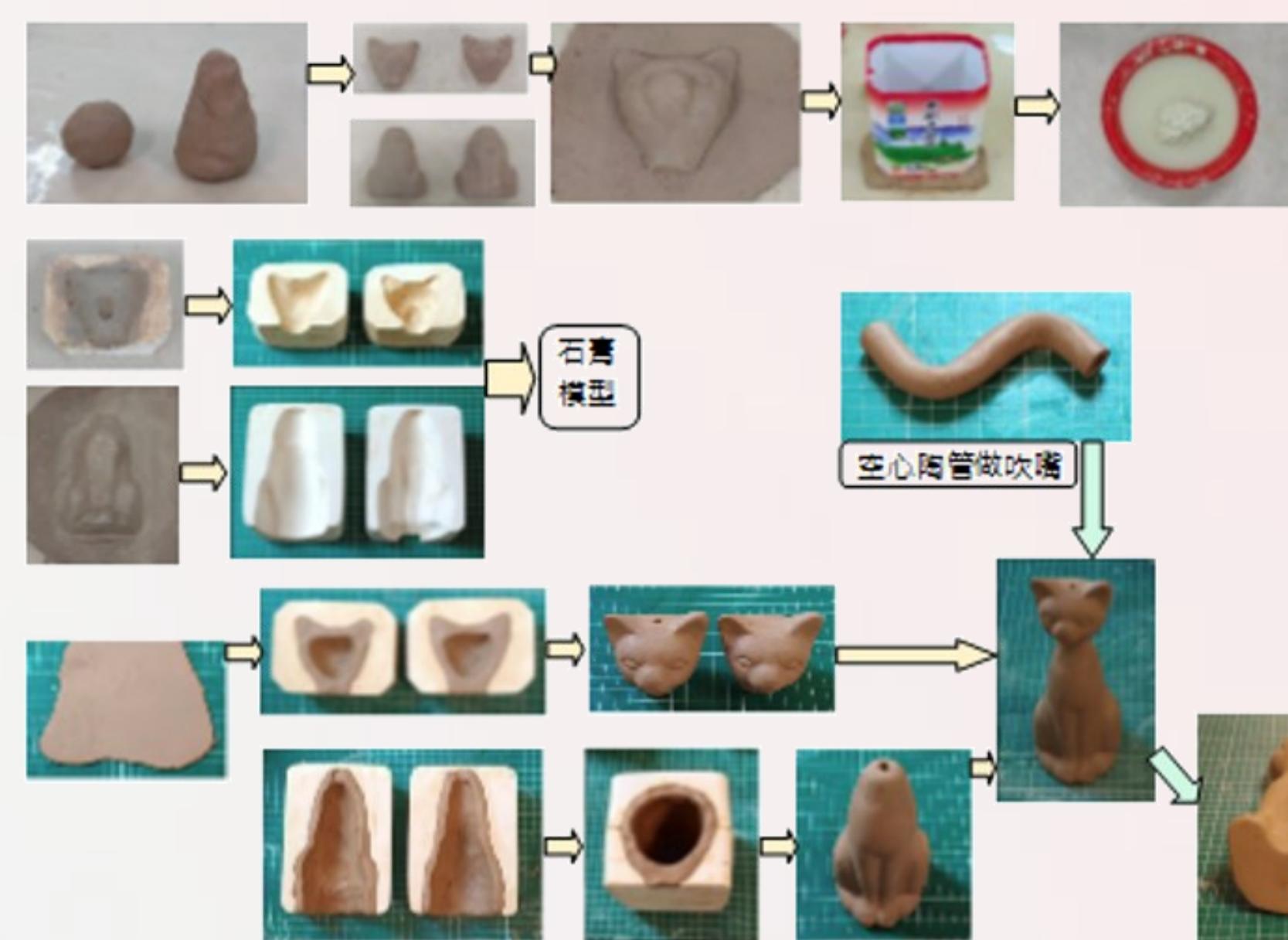


圖 12 石膏模型製作陶罐的程序

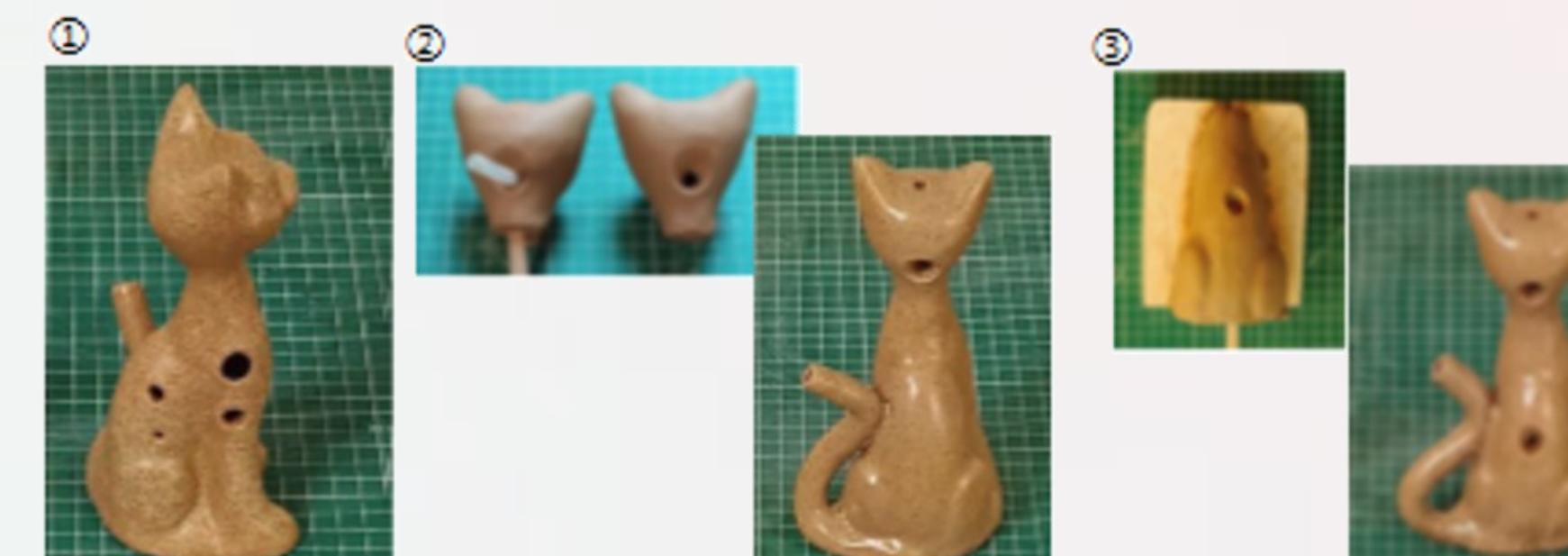


圖 13 各種貓咪造型的陶罐

為了讓各個腔體大小能固定，我們以石膏模具來製作主腔體(貓咪身體)與共鳴腔體(貓咪頭部)，另以開挖音孔的方式來改變各腔體的音頻高低。為方便以石膏模型進行製作，我們將主腔體拆解為貓咪身體，次腔體拆解為貓咪頭部，吹嘴為空心陶管的貓咪尾部，分別將主腔體(貓身)、次腔體(貓頭)與吹嘴(貓尾)進行粘合組裝，其製作陶罐的程序如圖 12 所示，其整體構造的製作方法與水鳥笛口哨陶罐相似。但貓咪造型的口哨陶罐，又可以依據音孔及氣窗位置不同分別創作成陶笛罐①、單腔室單哨②與雙哨陶罐③。

五、研究結果分析與討論

【主題一】探討水鳥笛、口哨陶罐空吹時的音頻變化

為了解水鳥笛(開管、閉管)及口哨陶罐(閉管)腔體大小與音頻之間的變化關係，我們先以 13mm 的膠管笛(圖 18)進行實驗，連接不同管長(腔體大小)的條件下，測量共鳴腔體大小與音頻之間的關係。

膠管笛分別以膠帶串接成不同長度，量測 2~10cm 管長的頻率，得到結果如表 1，其統計圖分析則如圖 19 所示：根據聲學原理，閉管共鳴頻率公式(基本音 $f = v/4L$)；開管共鳴頻率公式(基本音 $f = v/2L$)，其中 f 是頻率， v 是聲速(約為 343 m/s)， L 是共鳴腔體的有效長度。

由圖 19 可以看出，開管笛的頻率約為閉管笛的 2 倍，隨著管長(腔體)的增加，頻率會愈來愈低，腔體大小與頻率均呈反比，腔體體積越小頻率越高，也就是口哨陶罐次腔體與水鳥笛吹管長短的頻率成反比，腔體越大則頻率越低。由於實驗中是用管長來改變體積，且管徑不變，我們可以將管體積視為與長度成正比，即： $V = A \cdot L \Rightarrow L = V/A$ 以表 1 數據進行線性回歸擬合，我們推估水鳥笛(開管笛)腔體體積大小與頻率之間的關係為

管長	共鳴腔體頻率(Hz)		水鳥笛 (開管笛)
	體積	口哨陶罐 (閉管笛)	
2 cm	2.6 ml	2367	4078
3 cm	3.9 ml	1750	3141
4 cm	5.2 ml	1430	2578
5 cm	6.5 ml	1195	2227
6 cm	7.8 ml	1102	1969
7 cm	9.1 ml	961	1758
8 cm	10.4 ml	891	1594
9 cm	11.7 ml	785	1465
10 cm	13.0 ml	732	1336

圖 18 膠管笛不同管長(腔體大小)實驗

圖 19 口哨陶罐次腔體與水鳥笛吹管腔體體積的頻率測量記錄

【主題二】分析水鳥笛與口哨陶罐注入水後的音頻關係

水鳥笛與口哨陶罐所結合的樂器，在注入水後所發出的頻率則更為多變，水鳥笛在管內低水位時(剛好沒過水鳥笛與主腔體銜接處)，因空氣柱較長與吹氣壓力所造成的管長變動，會產生由高到低的音頻變化，類似鳥的鳴叫聲，其頻率約在 $762\text{~}1500\text{Hz}$ 之間(圖 25)。

在管內處於高水位時(約為水鳥笛管長的一半)，因空氣柱較短與吹氣壓力所造成的管長變動，也會產生由高到低的音頻變化，其頻率約在

$1113\text{~}1898\text{Hz}$ 之間(圖 26)。

圖 25 與圖 26 是在閉管的情形下所測得的音頻變化，當氣流衝出笛管，造成閉管與開管間不斷的變動時，其頻率的變動會變高如圖 27 與圖 28 所示。圖 27 是輕吹鳥笛所產生的鳥鳴振動頻率，約在 $2227\text{~}2836\text{Hz}$ 之間；而圖 28 是重吹鳥笛所產生的鳥鳴振動頻率，變高落於 $2836\text{~}3750\text{Hz}$ 之間。由圖 25~28 得知，注入水後的鳥笛其聲音變化更多，更像各種鳥類的鳴叫聲。



圖 25 鳥笛(低水位) 圖 26 鳥笛(高水位)

圖 27 鳥笛輕吹(振動) 圖 28 鳥笛重吹(振動)

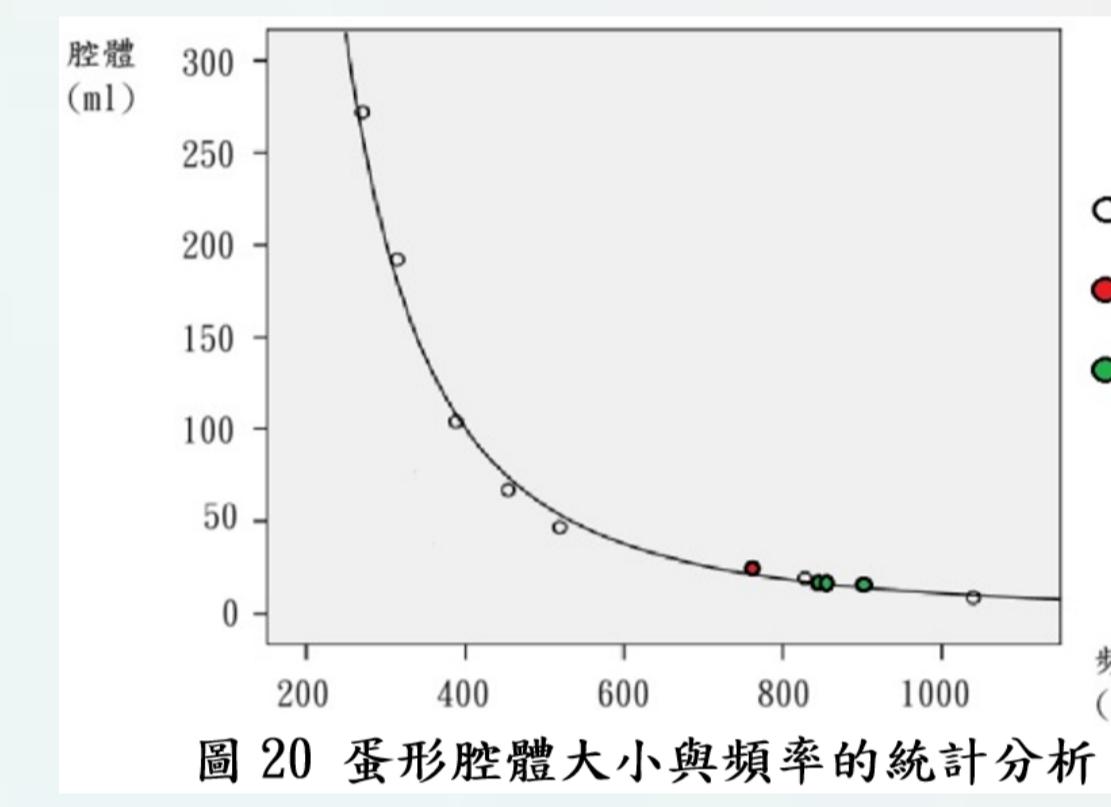


圖 20 蛋形腔體大小與頻率的統計分析

接著以校音軟體 Spectroid 來測量結合水鳥笛後的口哨陶罐音頻的音頻，其優點為可記錄一段時間內音頻的最大變化值(紅色線)。

在無注入水的情況下，水鳥笛輕吹的基音頻率為 1195 Hz (圖 21)，且伴隨著第 1 泛音與第 2 泛音的出現；而在重吹狀態下第 1 泛音 2531 Hz 會大於基音變成主音(圖 22)，與開管樂器的理論相符。

而口哨陶罐的鳥頭(共鳴腔體)則為閉管樂器，其頭頂有音孔可供改變音頻。在無注入水的情況下，口哨陶罐鳥頭在閉孔時發出的基音頻率為 762 Hz (圖 23)，也伴隨著第 1 泛音的出現；口哨陶罐鳥頭在開孔時所發出的基音頻率為 879 Hz (圖 24)，也伴隨著第 1 泛音的出現。

由圖 21~24 可以得知，水鳥笛、口哨陶罐的組合樂器，在空吹時可以吹出 762 、 879 、 1195 和 2531 Hz 4 種不同的聲音變化。

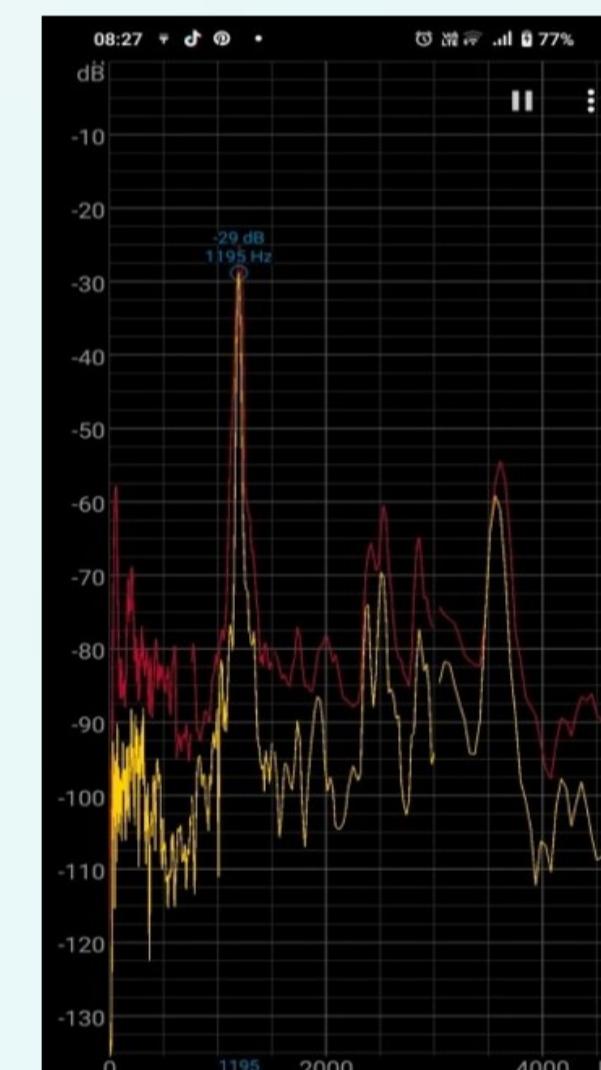


圖 21 鳥笛輕吹(無水)

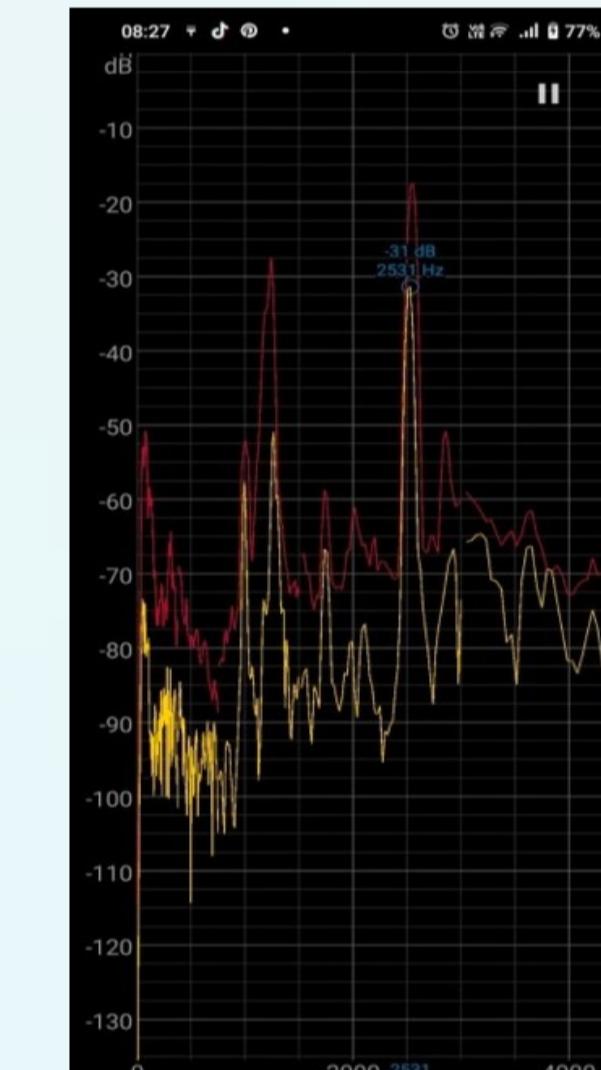


圖 22 鳥笛重吹(無水)

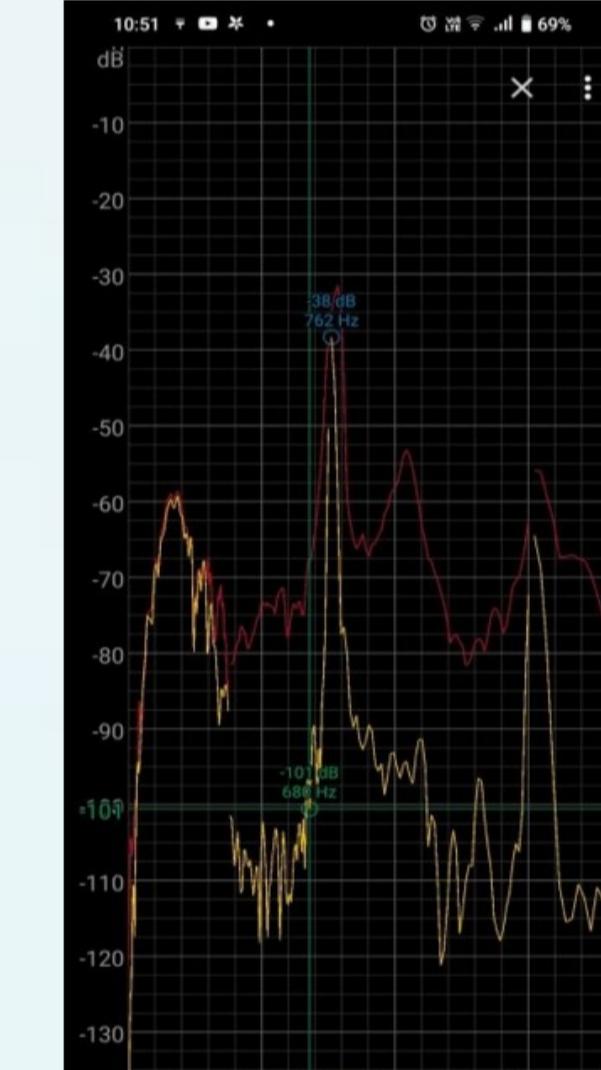


圖 23 鳥頭口哨閉孔(無水)

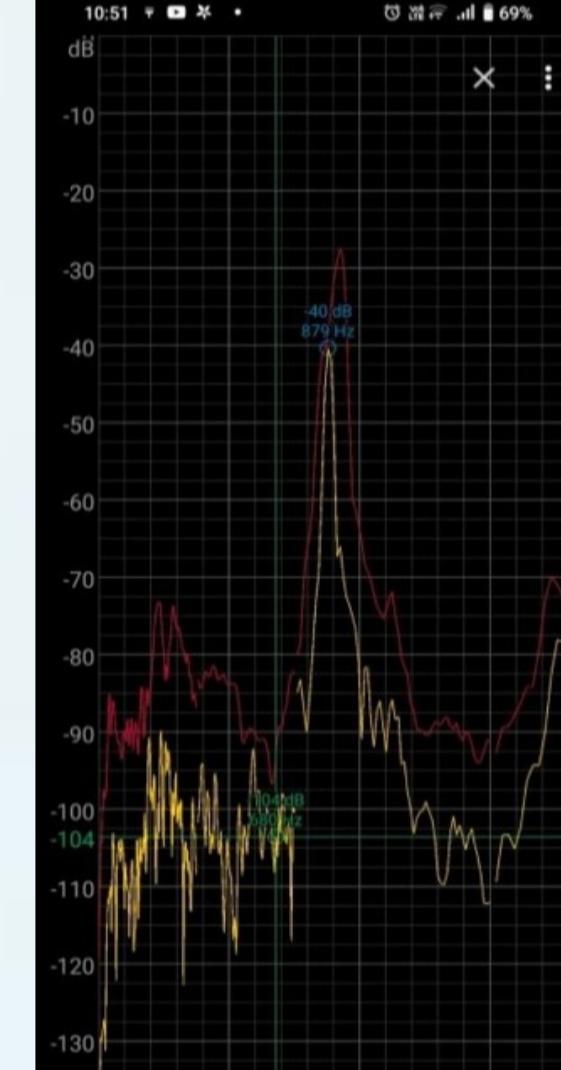


圖 24 鳥頭口哨開孔(無水)

為了解鳥笛聲音的多變性，另以校音軟體 Syaku 8 來測量音頻，其特點在分析瞬間產生的音頻變化。由圖 29 不同時間所測的鳥笛頻率分析與圖 25~28 之紅色頻譜雷同，驗證了水鳥笛可發出多種的鳥鳴聲。

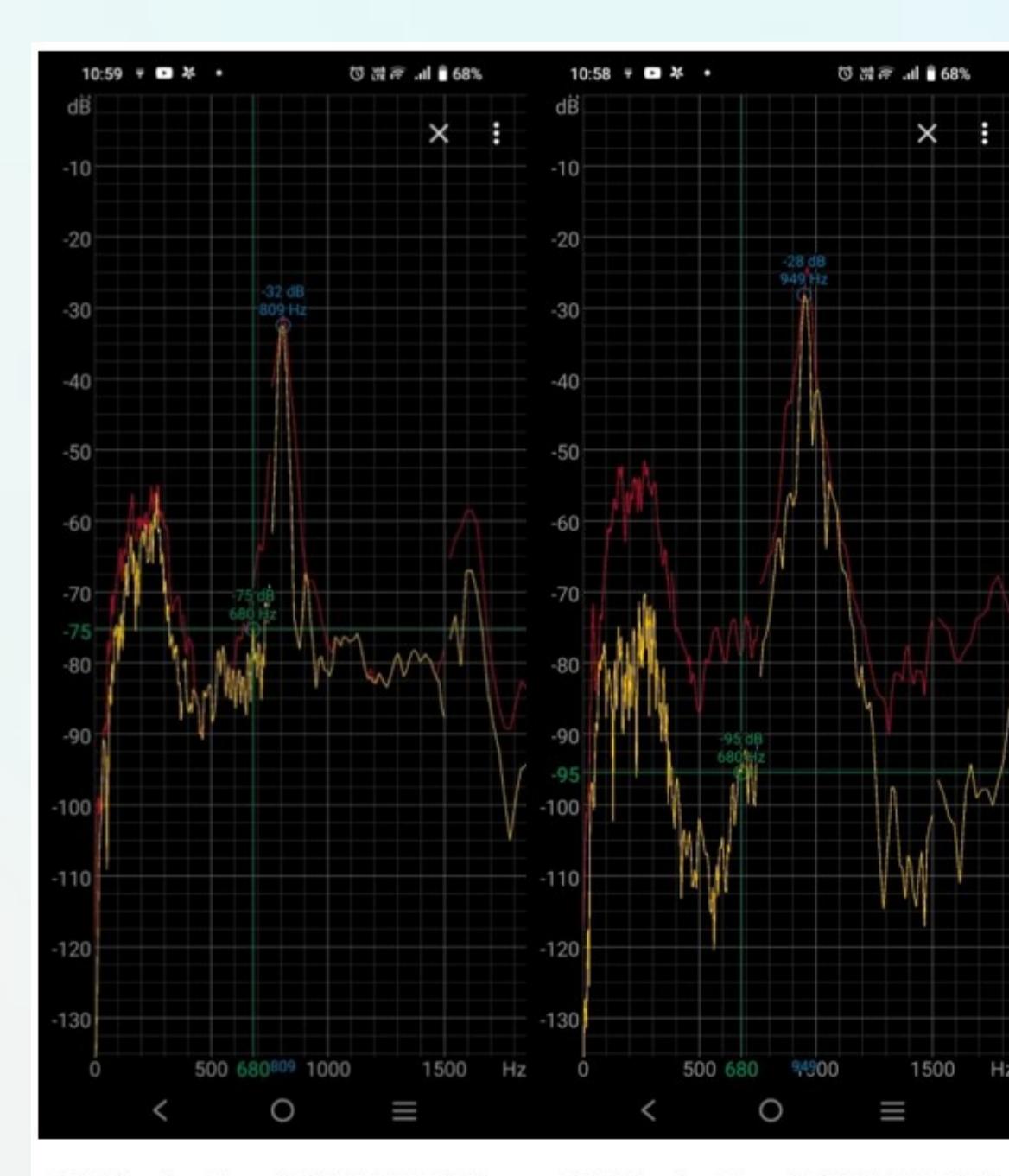


圖 29 不同時間所測的鳥笛頻率

當按住鳥笛的出音孔，此時氣流會直達鳥頭共鳴槍體的出音孔，由圖 30 鳥頭口哨的閉孔頻譜分析，得知發出的基音頻率為 809 Hz ，也出現第 1 泛音的諧音；由圖 31 鳥頭口哨的開孔頻譜分析，得知發出的基音頻率為 949 Hz ，也有出現第 1 泛音的諧音，兩者的頻率也都高於無加水所發出的頻率(762 和 879 Hz)，因為加水後要吹響必須用比較大的力氣所導致的結果。在按住鳥笛的出音孔情形下，搖晃主腔體(鳥身)，讓主腔體時而有水與時而無水堵住鳥笛的吹管，也可使口哨陶罐發出 762 、 879 、 809 和 949 Hz 4 種不同的聲音變化。

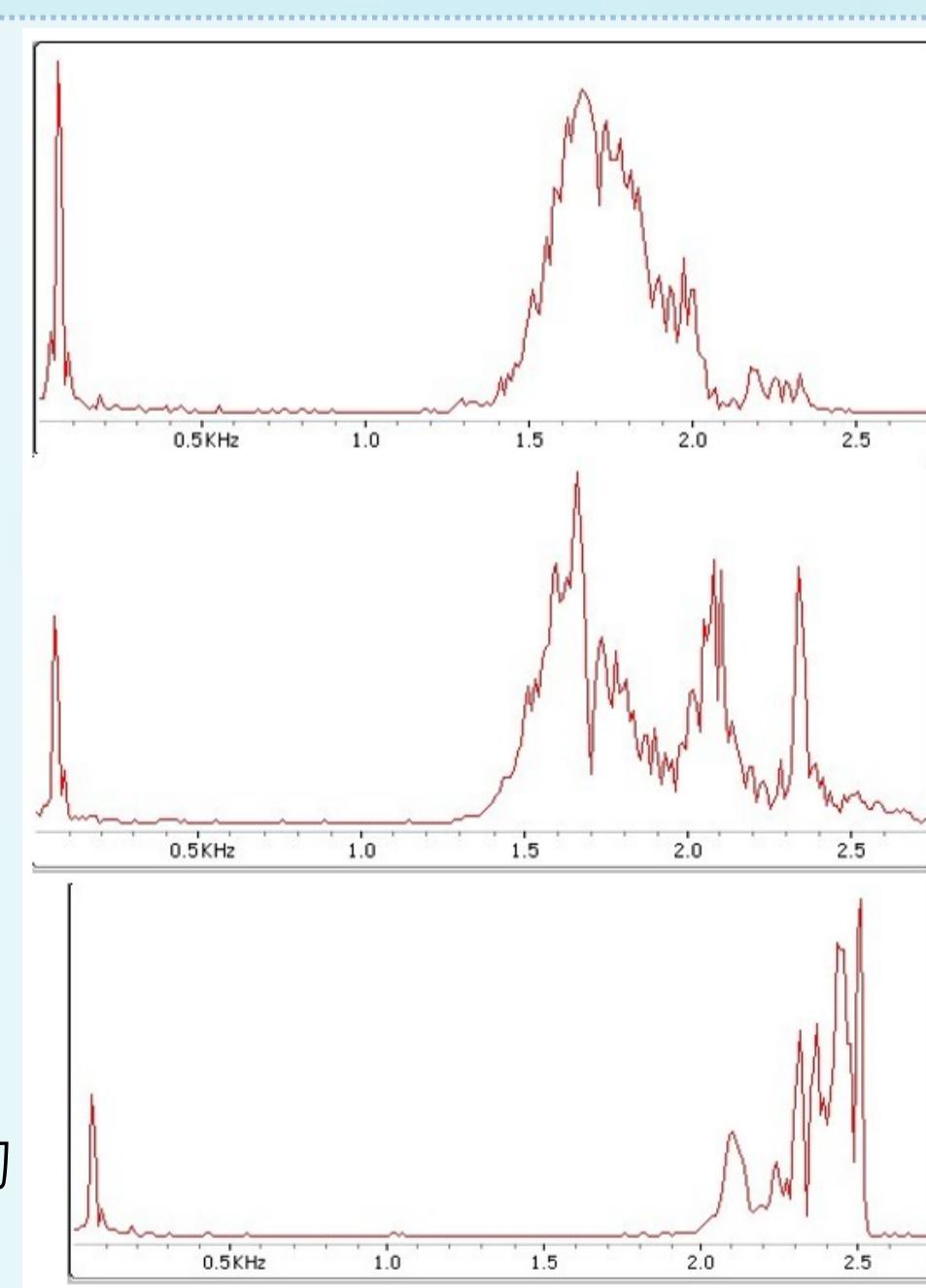


圖 30 鳥頭口哨閉孔(振動)

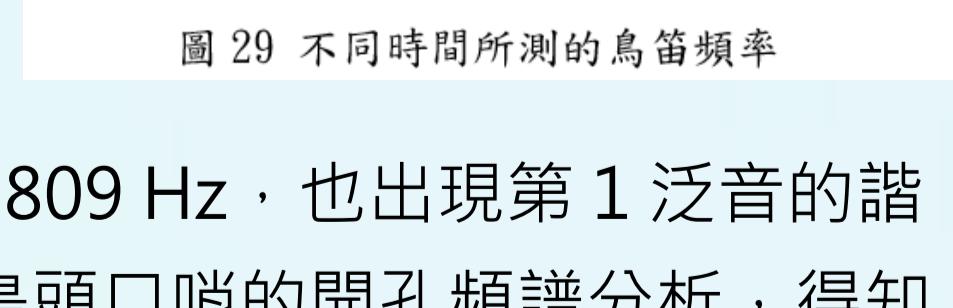


圖 31 鳥頭口哨開孔(振動)

【主題三】了解陶笛罐、單腔室單哨與雙哨陶罐能否產生雙耳節拍
我們利用貓咪造型石膏模，分別製成陶笛、口哨陶罐和雙音口哨陶罐，來進行能否產生雙耳節拍的實驗。

一、貓咪造型陶笛能否產生雙耳節拍的研究

表 2 貓咪造型陶笛的音階頻率紀錄

音階	1	2	3	4	5	6	7	i	2	3
A 箫	410	457	510	551	609	674	738	785	879	973
B 箫	398	451	498	539	592	656	721	773	867	961
音頻差	12	6	12	12	17	18	17	12	12	12

單位 : Hz

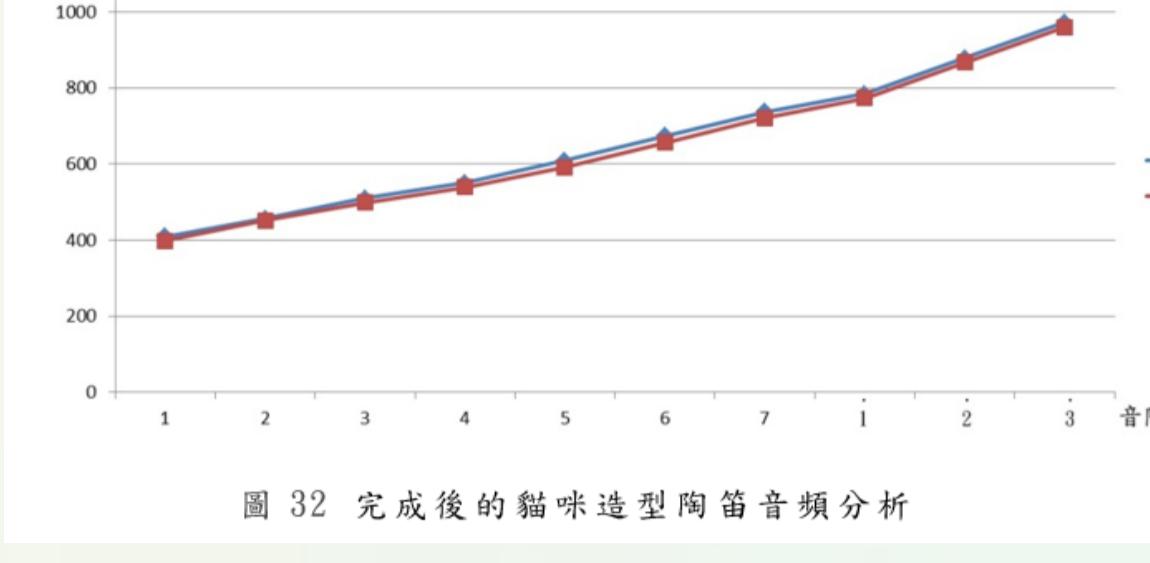
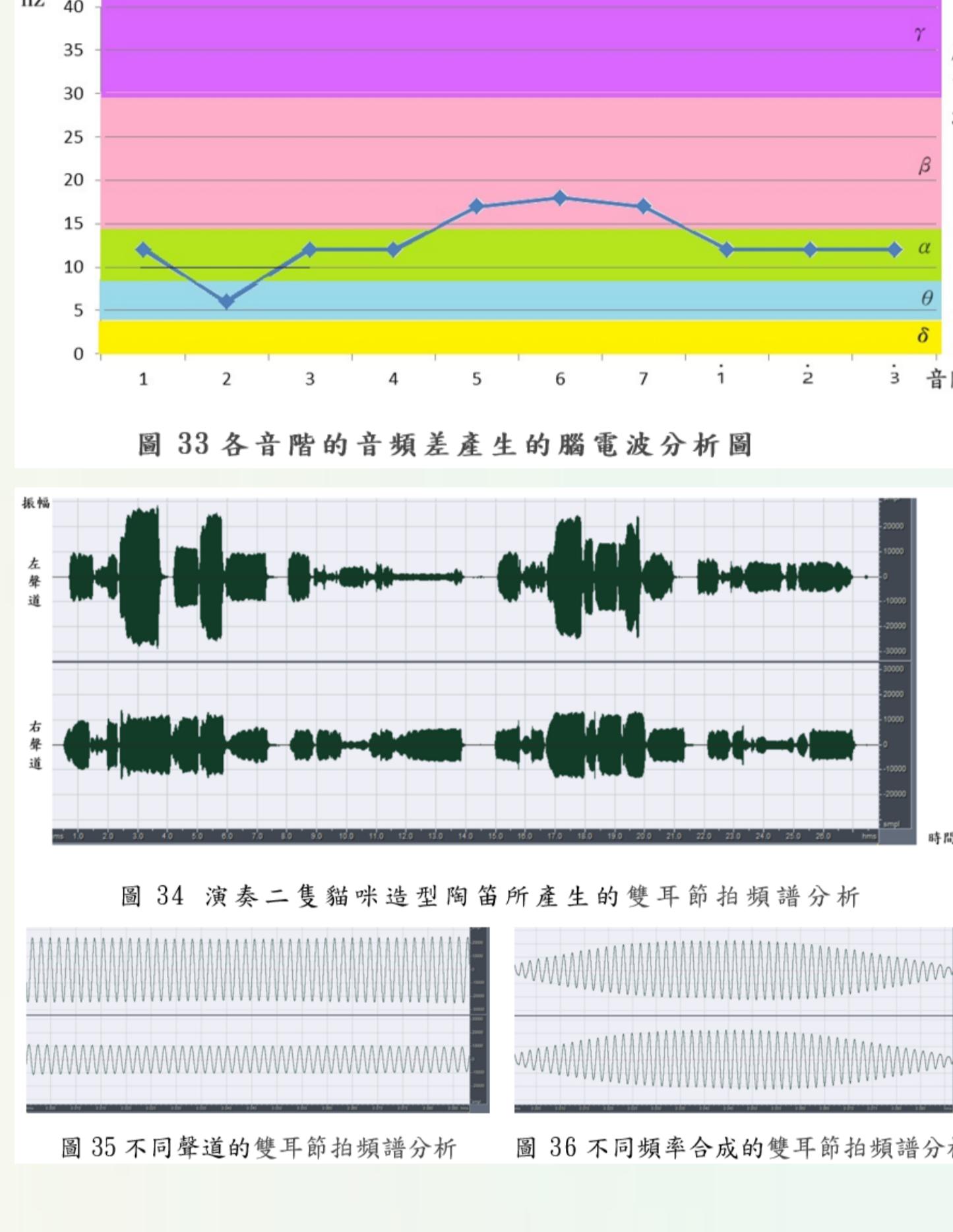


圖 32 完成後的貓咪造型陶笛音頻分析

以石膏模具來製作共鳴腔體(貓咪身體與頭部)，在底部製作出音孔與笛唇，採用中空的尾巴當吹嘴，開挖陶笛共鳴腔體上的各個音孔。貓咪造型陶笛吹奏時，以開放音孔的方式來改變音頻的高低。以校音軟體 Spectroid 來測量音頻，其記錄如表 2 所示。由圖 32 的貓咪造型陶笛音頻分析得知，各笛的音階頻率平順和諧，各笛都能吹出優美的旋律。

由圖 33 各音階的音頻差分析得知，不同陶笛之間的音頻差也都維持在 30Hz 以下，因此符合了產生雙耳節拍的條件，依據理論推測 A 與 B 陶笛在合奏時，能發出對人體有益的 θ 、 α 和 β 等腦電波。分別將二隻貓咪造型陶笛進行錄音，所測得的頻譜分析如圖 34 所示。將圖 35 其頻譜分析結果局部放大，便可看到圖 34 的正弦波分析圖，而圖 36 則是二個不同頻率所產生的雙耳節拍頻譜。

由圖 35 可以看出，不同聲道所產生的單一頻率聲音，其波形各自單純穩定，但兩相近頻率所合成的頻譜(圖 36)，其波形亦呈現單純的正弦波，但會有忽大忽小的顫動循環變化，此是否與雙耳節拍有關？特進行以下的雙耳節拍頻率差的研究：



定，但兩相近頻率所合成的頻譜(圖 36)，其波形亦呈現單純的正弦波，但會有忽大忽小的顫動循環變化，此是否與雙耳節拍有關？特進行以下的雙耳節拍頻率差的研究：

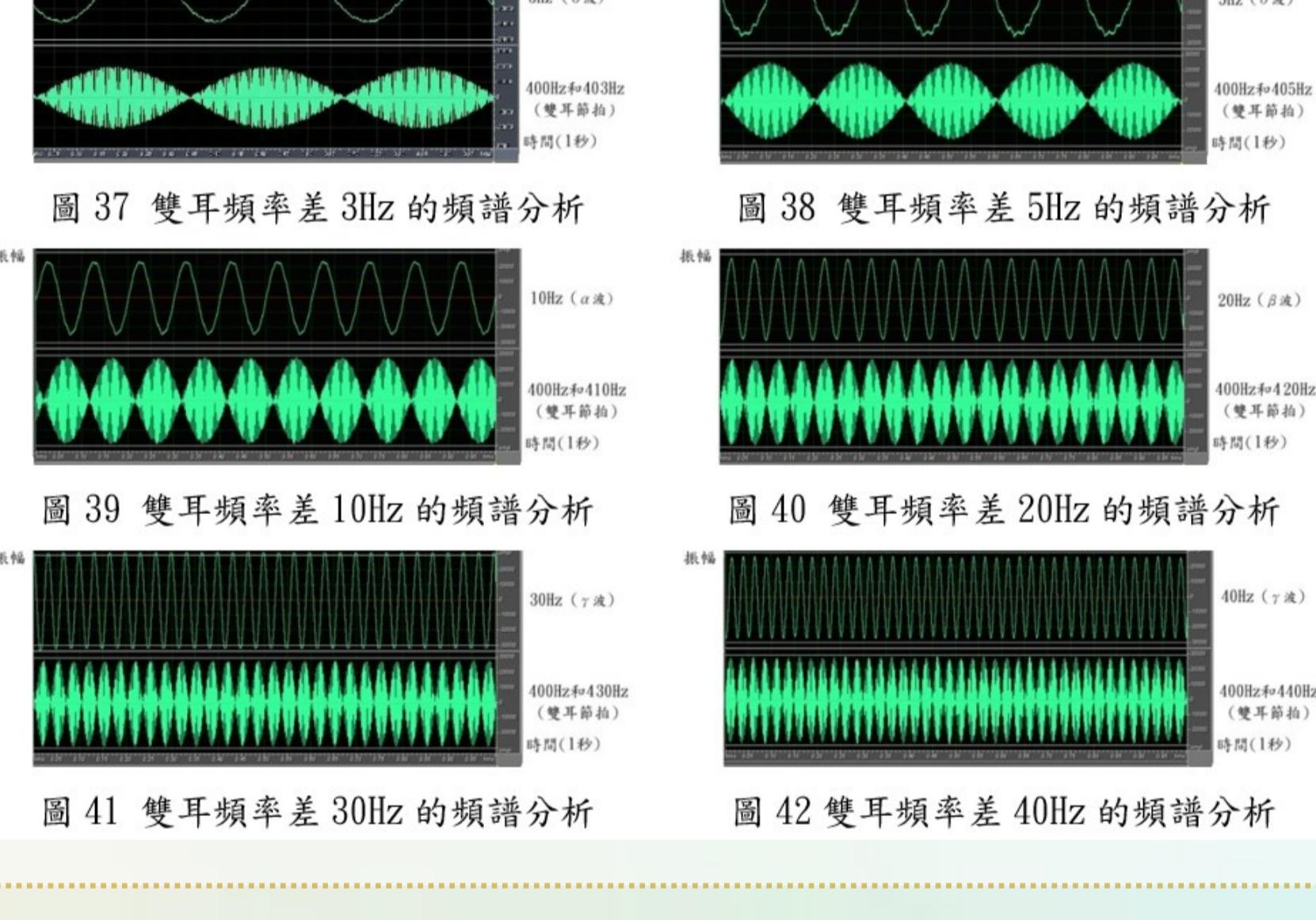


圖 37 雙耳頻率差 3Hz 的頻譜分析

圖 38 雙耳頻率差 5Hz 的頻譜分析

圖 39 雙耳頻率差 10Hz 的頻譜分析

圖 40 雙耳頻率差 20Hz 的頻譜分析

圖 41 雙耳頻率差 30Hz 的頻譜分析

圖 42 雙耳頻率差 40Hz 的頻譜分析

【實驗假設】：雙耳節拍的頻率差會產生忽大忽小的顫動循環變化

【驗證假設】：使用頻率發生器來產生左右聲道的不同頻率，並用音樂編輯軟體 Cool Edit Pro 2.0 進行頻譜分析。左聲道固定發出 400Hz，而右聲道分別發出 403Hz、405Hz、410Hz、420Hz、430Hz 與 440Hz。所測得的頻譜分析結果如圖 37~42 所示。

由圖 37~42 的雙耳頻率差頻譜分析結果可以看出，雙耳節拍的頻率差所產生忽大忽小的顫動循環變化規律，剛好與兩耳間的頻率差異值相吻合，而其所產生對人體有益的腦電波，是人耳所不易察覺的聲波，但可藉由產生忽大忽小的顫動變化，刺激改變我們的心理狀態，此應是雙耳節拍所具有的特色。

二、貓咪造型口哨陶罐能否產生雙耳節拍的研究

利用貓咪造型石膏模，製成二個口哨陶罐來進行能否產生雙耳節拍的實驗。

表 3 貓咪造型口哨陶罐的頻率紀錄

吹奏 口哨陶罐	無水吹奏		有水震動吹奏	
	音孔開放 (開口)	音孔閉合 (閉口)	音孔開放 (開口)	音孔閉合 (閉口)
A	1020	844	1043	867
B	1137	855	1177	879
頻率差值	117	11	134	12



圖 43 A、B 口哨陶罐在音孔閉合時的頻譜分析圖(無水)

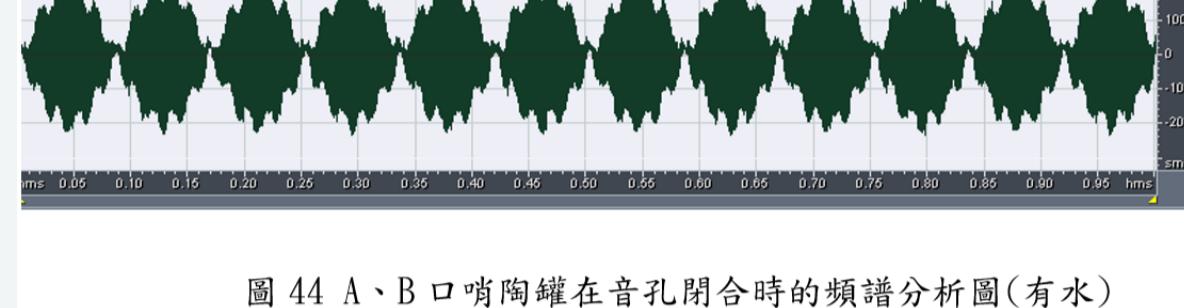


圖 44 A、B 口哨陶罐在音孔閉合時的頻譜分析圖(有水)

由表 3 可以得知，A、B 口哨陶罐在音孔閉合時合奏，無論是有水或無水的狀態下，其二個頻率的差值都小於 30Hz，符合能產生良好雙耳節拍的條件。

三、貓咪造型單腔室雙哨陶罐能否產生雙耳節拍的研究

利用貓咪造型石膏模，製作一個單腔室雙哨陶罐，來進行能否產生雙耳節拍的實驗。

表 4 貓咪造型單腔室雙哨陶罐的單音頻率紀錄

吹奏 口哨陶罐	無水吹奏		有水震動吹奏	
	音孔開放 (開口)	音孔閉合 (閉口)	音孔開放 (開口)	音孔閉合 (閉口)
頭哨	1020(Hz)	902(Hz)	1031(Hz)	913(Hz)
身哨	1008(Hz)	855(Hz)	1030(Hz)	873(Hz)

無論是有水或無水的狀態下，其二個頻率的差值都小於 30Hz，符合能產生雙耳節拍的條件。

在有水的實際演奏中，所測得的四種和聲頻率如表 5 所示：

表 5 貓咪造型單腔室雙哨陶罐的雙聲合音後頻率紀錄

雙聲合音頻率(Hz)	頭哨(音孔開放)	頭哨(音孔閉合)
身哨(音孔開放)	1000 (1031&1030)	926 (913&1030)
身哨(音孔閉合)	867 (1031&873)	844 (913&873)

利用音樂編輯軟體 Cool Edit Pro 來進行頻譜分析，得到結果如圖 45~48 所示，其波形亦

呈現單純的正弦波，也有忽大忽小的穩定循環變化，但頻率差距以雙哨陶罐同時開放或同時閉合時，頻率差距最小，最符合良好雙耳節拍的產生條件，與雙耳節拍產生器進行頻率比較，波形亦完全符合。證明我們的貓咪造型單腔室雙哨陶罐，在同時開放或閉合雙哨的情形下，能產生對人體有益的雙耳節拍。

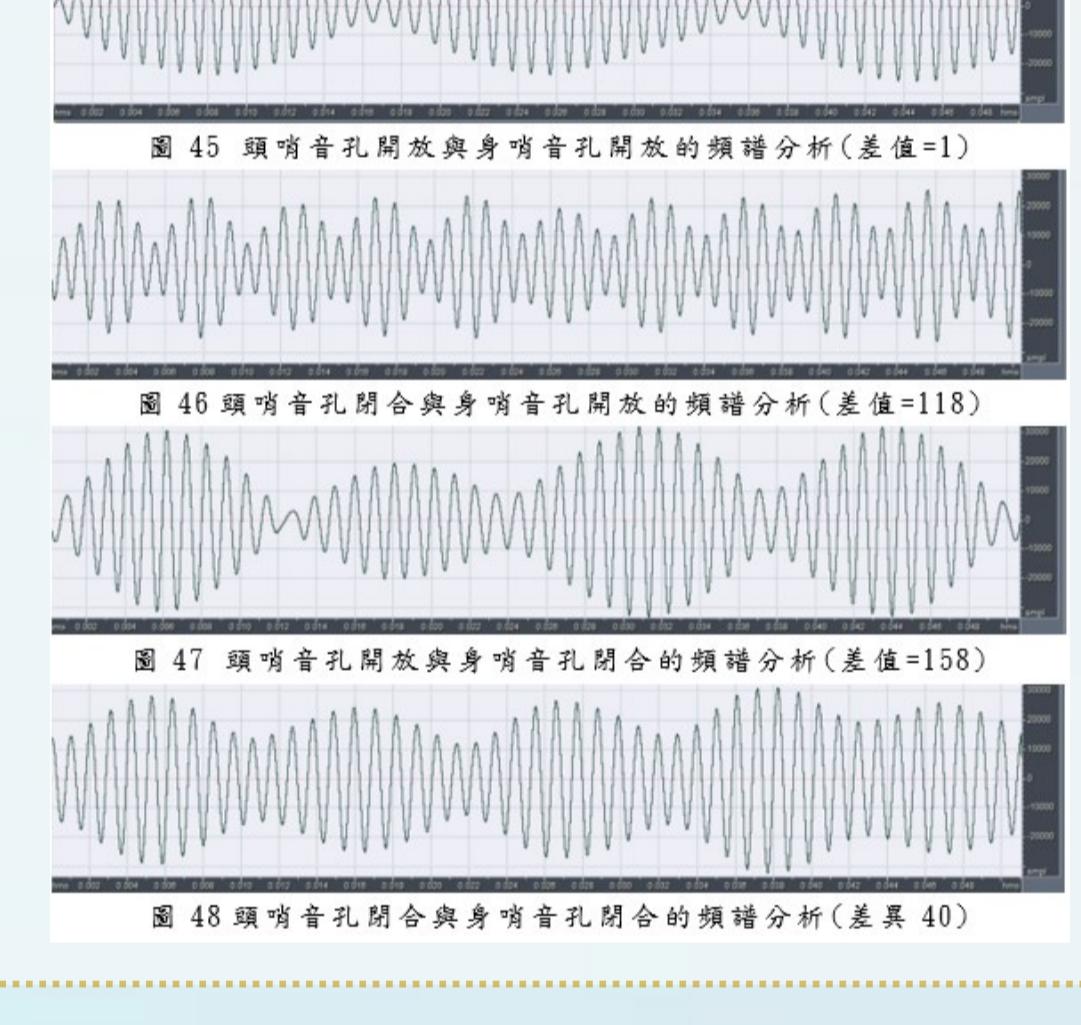


圖 45 頭哨音孔開放與身哨音孔開放的頻譜分析(差值=1)

圖 46 頭哨音孔閉合與身哨音孔開放的頻譜分析(差值=118)

圖 47 頭哨音孔開放與身哨音孔閉合的頻譜分析(差值=158)

圖 48 頭哨音孔閉合與身哨音孔閉合的頻譜分析(差值=40)

陸、結論與建議

一、結論

依實驗計畫進行各項實驗，我們得到了下列結論：

(一)水鳥笛與口哨陶罐的組合樂器，其內部容積大小與頻率呈反比，且開口笛的變化比閉口笛的變化大。口哨陶罐(閉管樂器)在無水狀態下可以吹出 762、879 Hz 的聲音，而水鳥笛(開管樂器)則會吹出基音 1195 Hz 和 2531 Hz 的倍頻泛音，共可發出 4 種不同的聲音變化組合。

(二)注入水後，在主腔體的水恰好能堵住鳥笛吹管與主腔體銜接處的前提下，吹奏時，在銜接處時而有水與時而無水的狀態下，口哨陶罐可發出 762、879、809 和 949 Hz 4 種不同的聲音變化。而水鳥笛在輕吹時，因吹氣壓力所造成的管長變動，會產生由高到低的音頻變化，類似鳥的鳴叫聲，其頻率約在 762 ~ 1898 Hz 之間。當重吹使水產生振動，會讓頻率變高落於 2227 ~ 3750 Hz 之間。注入水後的水鳥笛與口哨陶罐的組合樂器，在笛哨與頭哨的合鳴下，其聲音變化更多，更像鳥群的鳴叫聲。

(三)同時演奏兩隻貓咪造型陶笛與同時吹奏兩隻貓咪造型口哨陶罐，所產生的雙音，都能產生雙耳節拍。而單獨吹奏單腔室雙哨陶罐，雖然它是單一樂器，但由於其具有 2 個共鳴腔體，能發出頻率差在 30Hz 以內的雙音，在同時開管或閉管吹奏的狀態下，亦能產生有益人體的雙耳節拍，此為本研究最大的發現。

二、建議

1. 由於我們可以透過控制共鳴腔體大小來掌握陶罐所能發出的頻率，雖然目前我們的單腔室雙哨陶罐每哨僅能發出單一頻率，也許未來在樂器的設計上可以尋求其他可能性。

2. 貓咪造型單腔室雙哨陶罐，其雙哨共鳴腔體的形狀不一，除腔體大小不易控制外，其背部共鳴腔接合處亦容易產生裂縫，要將兩共鳴腔發出的頻率控制在 30Hz 以下的確有些難度。因此，我們將二隻水鳥口哨陶罐結合成一體，其共鳴腔體都在鳥頭，如此要控制雙哨的共鳴腔體大小比較容易些。完成後的雙腔雙哨水鳥口哨陶罐如圖 49 所示：



圖 49 雙哨水鳥口哨陶罐

其在各條件下所測得的頻譜分析波形，如圖 50 ~ 53 所示，也都呈現單純的正弦波，而且也都具備了忽大忽小的循環變化。

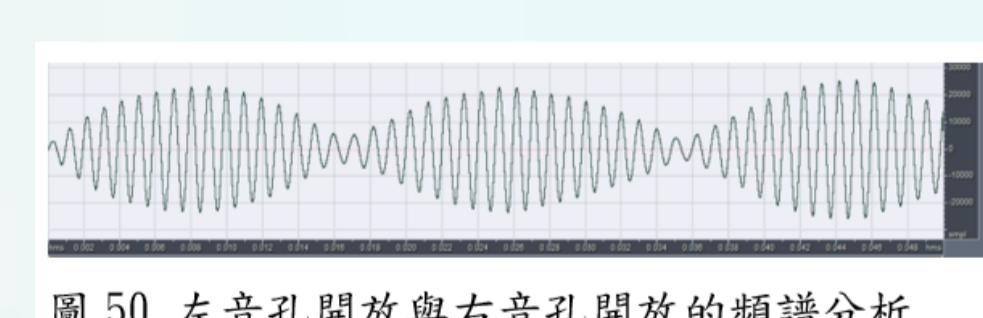


圖 50 左音孔開放與右音孔開放的頻譜分析

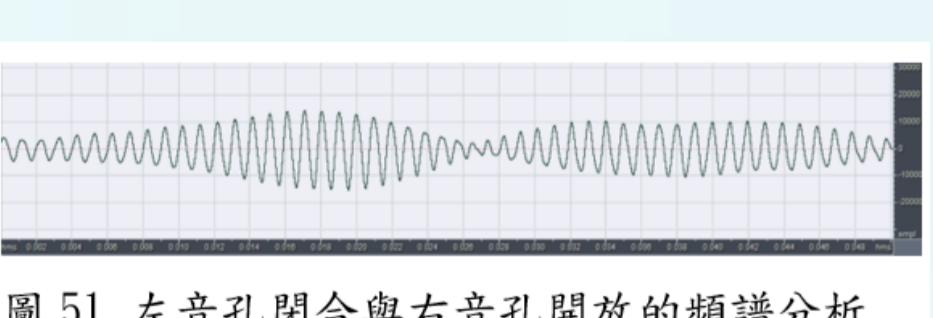


圖 51 左音孔閉合與右音孔開放的頻譜分析

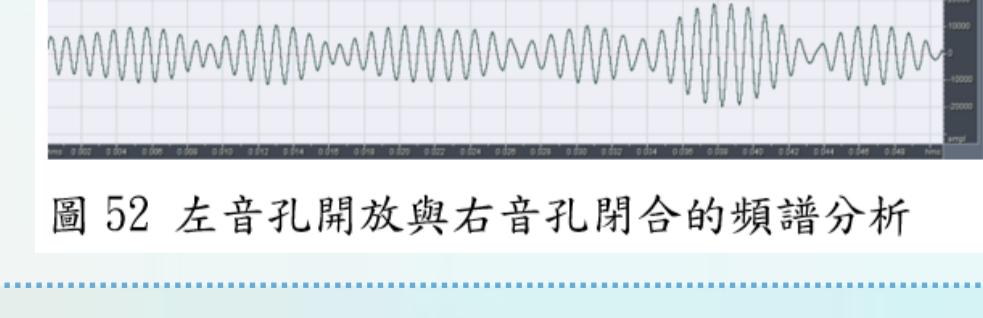


圖 52 左音孔開放與右音孔閉合的頻譜分析

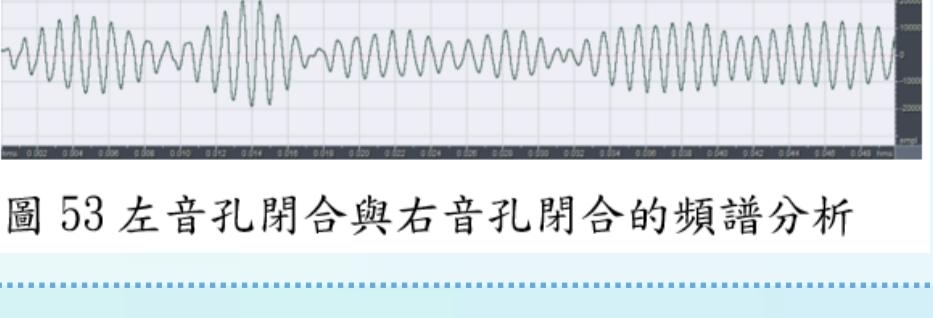


圖 53 左音孔閉合與右音孔閉合的頻譜分析

柒、參考資料

- Allen (2012, Dec. 09) Ocarina History.Ocarina forest.com, <http://ocarinaforest.com/info/ocarina-history/>
- Lane, James D; Kasian, Stefan J; Owens, Justine E; Marsh, Gail R.(1998, Jan) Binaural Auditory Beats Affect Vigilance Performance and Mood. Physiology & Behavior. 1998-01, 63 (2): 249 – 252. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031938497004368?via%3Dihub>
- Onno van der Groen (2020, Feb, 25) Sounds like hype: there's scant evidence the 'binaural beats' illusion relaxes your brain. The conversation. Academic rigour, journalistic flair <https://theconversation.com/sounds-like-hype-there-s-cant-evidence-the-binaural-beats-illusion-relaxes-your-brain-132197>
- William Rodriguez (2018, Feb, 6) The Unique Instruments We Call Whistling Vessels.Arvaic Roots. Indigenous Instrument Education <a href="https://archaicroots.com/2018/02/06/unique-instruments-call-whistling-vessels-huaco-silbador