

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

最佳(鄉土)教材獎

080111

打出不同聲音—竹鐘 Kakeng 的秘密

學校名稱：臺東縣長濱鄉長濱國民小學

作者： 小四 嚴詠慈 小四 陳晏渝 小四 高正益	指導老師： 廖斌吟
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：聲音、樂器、頻率

打出不同聲音-竹鐘Kakeng的秘密

摘要

從三年級開始就加入了阿美族「杳互」樂隊，表演用的樂器主要有三種：排笛、竹鼓和竹鐘。我們一直對這些阿美族傳統樂器的發聲原理很好奇，特別是外觀看起來大小、高度一樣竹鐘(Kakeng)，為什麼可以打出不同的聲音（音調）呢？在進行科學實驗之前，我們先訪談杳互指導老師，了解竹鐘的由來和演變歷史，再從訪談裡，還有練習竹鐘的經驗中想出要研究的問題。因此，我們決定探討竹鐘本身的特性（如高度、管口大小、深度）、演奏方式的差別（拍打力量大小、正拍或旁敲）是否會影響它打出的音調，以及探討竹鐘的聲音能傳播的距離有多遠。結果發現竹鐘的音調與竹管內部深度最有關係，拍打力量大小應該不會影響音調，側拍的方式無法拍出穩定且不同的音調。最後，我們還使用玻璃製品組成一組竹鐘。

壹、研究動機

從三年級開始就加入了學校的阿美族杳互樂隊，樂隊演奏使用了三種竹製的傳統樂器：排笛、竹鼓和竹鐘，如照片1。當時年級比較小，所以是負責演奏排笛，現在升到四年級才開始練習打擊竹鐘(Kakeng)。我們一直很好奇為什麼外觀看起來大小、高度一致的竹鐘可以打出不同的音調？原來這個疑問不只有我們有而已，連到校來訪的來賓看過我們的演出之後，也很想知道這個祕密。於是，我們在老師的指導之下，先學會「聲音與樂器」的知識，然後透過訪談了解阿美族傳統樂器竹鐘(Kakeng)歷史由來，討論出要研究的問題後，實際測量竹鐘的各方面數據，並進行不同實驗。最後還以玻璃杯進行實驗，希望能做出一組玻璃竹鐘。



照片1：杳互樂隊表演（左：竹鐘 中一：排笛 中二：竹鼓 右：竹鐘）

貳、研究目的

- 一、觀察竹鐘(Kakeng)的型態特徵。
- 二、探究竹鐘的各種型態特徵，如外觀高度、竹管直徑大小、竹管管壁厚度、竹管內部深度，與音調高低之間的關係。

- 三、探究不同拍打力量大小，對竹鐘發出的音調和音量的影響。
- 四、探究不同遠近距離，與所聽到的竹鐘音量的關係。
- 五、仿製出一組玻璃竹鐘。

參、研究設備及器材

一、樂器：

阿美族傳統樂器竹鐘(Kakeng)共四組、高密度泡棉拍一對。

二、測量音調和音量的設備：

筆記型電腦、麥克風、Syaku8頻率分析軟體。

三、仿製的樂器材料：

200c.c玻璃量筒。

四、其他：

捲尺、止滑墊、熱溶膠槍、塑膠砧板。



照片2：竹鐘(Kakeng)側面照



照片3：竹鐘俯視照



照片4：高密度泡棉拍



照片5：用 Syaku8 軟體測量敲打樂器的頻率和音量

肆、研究過程或方法

一、觀察竹鐘的型態特徵

沓互樂隊使用的竹鐘樂器是七根竹管為一組，而學校共有四組，因此我們拿捲尺一一去測量並紀錄每一根竹管的外部高度、竹管直徑大小和內部深度等數據，以了解竹鐘的基本型態特徵。

【實驗 1-1】測量竹鐘的型態特徵

【作法】

1. 使用捲尺測量每一根竹管的外部高度，並紀錄下來。
2. 從竹管最外面量它的直徑，將捲尺通過圓心橫向量一次，直向再測量一次，最後求平均作為竹管外部直徑。
3. 從竹管裡面量它的直徑，將捲尺通過圓心橫向量一次，直向再測量一次，最後求平均作為竹管內部直徑。
4. 至於竹管管壁厚度，是根據竹管外部直徑和內部直徑資料來推算的，方法是外部直徑減去內部直徑並除以二。
5. 從竹管裡面量它的深度，將捲尺往竹管中央伸進去量一次並紀錄，再將捲尺靠著竹管管壁再測量一次深度，最後求平均作為竹管內部深度。
6. 各項紀錄最後都打進 Excel 裡面。

二、探究竹鐘的各種型態特徵與音調高低之間的關係

【實驗 2-1】測量竹鐘的音調

【作法】

1. 架設好測量音調的設備，也就是將電腦開機，接好收音的麥克風，並開啟 Syaku8 軟體，以 C 大調作為測量基準。
2. 將麥克風置於被測量的竹管旁邊，使用高密度泡綿拍往竹管管口輕輕拍打，共拍擊 5 次。
3. 由於 Syaku8 軟體可以暫存一段時間內樂器發出的聲音資料，因此最後選擇音量最大的 3 次資料，將其頻率、唱名、分貝記錄下來。
4. 將四組竹鐘共 28 根竹管一一拍擊過，並紀錄數據。
5. 各項紀錄最後都打進 Excel 裡面。

【實驗 2-2】探究竹鐘的各種型態特徵與音調高低之間的關係

【作法】

1. 根據實驗 1-1 和實驗 2-2 的數據資料，畫出竹鐘竹管外部高度和音調的關係圖。
2. 根據實驗 1-1 和實驗 2-2 的數據資料，畫出竹鐘竹管內部直徑大小（管口大小）和音調的關係圖。
3. 根據實驗 1-1 和實驗 2-2 的數據資料，畫出竹鐘竹管管壁厚度和音調的關係圖。
4. 根據實驗 1-1 和實驗 2-2 的數據資料，畫出竹鐘竹管內部深度和音調的關係圖。

三、探究不同拍打力量大小，對竹鐘發出的音調和音量的影響。

【實驗 3-1】測量不同拍打力量時，竹鐘的音調和音量

【作法】

1. 架設好測量音調、音量的設備，也就是將電腦開機，接好收音的麥克風，並開啟 Syaku8 軟體，以 C 大調作為測量基準。

2. 將麥克風置於被測量的竹管旁邊，使用高密度泡綿拍往竹管管口拍打，分別以小力、中力、大力拍擊 5 次。

3. 由於 Syaku8 軟體可以暫存一段時間內樂器發出的聲音資料，因此最後選擇音量最大的 3 次資料，將其頻率、唱名、分貝記錄下來。

4. 將四組竹鐘共 28 根竹管一一拍擊過，並紀錄數據。

5. 用 Excel 畫出拍打力量大小與音調的關係圖和拍打力量大小與音量的關係圖。

四、探究不同遠近距離，與所聽到的竹鐘音量的關係。

【實驗 4-1】測量在不同距離下，都以大力拍打竹鐘時，竹鐘發出的音量

【作法】

1. 架設好測量音調、音量的設備，也就是將電腦開機，接好收音的麥克風，並開啟 Syaku8 軟體，以 C 大調作為測量基準。

2. 這次只使用第一組竹鐘來實驗。

3. 用高密度泡綿拍大力往竹管管口拍打 5 次，並分別測量將麥克風置於竹管旁邊(0 公尺)、距離 1 公尺、5 公尺、10 公尺以及 15 公尺時的聲音資料。

4. 由於 Syaku8 軟體可以暫存一段時間內樂器發出的聲音資料，因此最後選擇音量最大的 3 次資料，將其頻率、唱名、分貝記錄下來。

5. 將第一組竹鐘共 7 根竹管一一拍擊過，並紀錄數據。

6. 用 Excel 畫出不同遠近距離與音量的關係圖。

五、仿製一組玻璃竹鐘

根據實驗 1-1 和 2-1、2-2 的結果，我們知道最有可能決定竹鐘發出不同聲音的因素是竹子內部的深度，我們想要使用別的材料仿製出一組竹鐘，再次驗證這個原則是否確實。另外，我們還想知道如果拍子不往管口拍擊，而是由側邊往管口拍擊的話，是否也能製造出不同音調的聲音效果。

【實驗 5-1】用玻璃量筒作為材料，仿製一組玻璃竹鐘

【作法】

1. 架設好測量音調、音量的設備，也就是將電腦開機，接好收音的麥克風，並開啟 Syaku8 軟體，以 C 大調作為測量基準。

2. 這次使用 200c.c 的玻璃量筒來實驗，量筒內的深淺則用加水的方式來改變。

3. 第一次實驗時，量筒不裝水，深度相當於 28.8 公分，並將麥克風置於被測量的量筒旁邊，使用高密度泡綿拍往管口拍打，分別以小力、中力、大力拍擊 5 次，分別紀錄下 3 次的資料。

4. 量筒裝入 10c.c，相當於深度 27.5 公分，並按照上述步驟測量紀錄之。

5. 後來以 6c.c 為單位來加水，測量並紀錄聲音資料。最後一項紀錄則為加水至 200c.c。

【實驗 5-2】探究拍子以側邊敲打管口，對玻璃量筒的音調和音量的影響

【作法】

1. 架設好測量音調、音量的設備，也就是將電腦開機，接好收音的麥克風，並開啟 Syaku8 軟體，以 C 大調作為測量基準。
2. 玻璃量筒分別加入 0c.c、28c.c、56c.c、88c.c、106c.c、132c.c 的水來進行實驗。
3. 將麥克風置於被測量的量筒旁邊，使用高密度泡綿拍以大力往管口的側邊拍打 5 次，分別紀錄下 3 次的聲音資料。

伍、研究結果

一、竹鐘的各項型態特徵的測量數據

由於我們學校的竹鐘共有四組，因此以下分別呈現四組竹鐘在外部高度、深度、外內直徑、和厚度的數據資料，我們是用捲尺量的。以綁的繩結為定位，不同竹管的編號如下圖所示。



圖5：竹管編號示意圖

1. 第一組竹鐘的各項數據

表1：第一組竹鐘在高度、深度和外內直徑的資料(單位：公分)

	外觀高度 (H)	平均深度 (D)	平均外量 直徑(R1)	平均內量 直徑(R2)	管壁厚度 (R1-R2/2)
A	89.0	77.0	9.5	8.8	0.4
B	89.3	35.9	8.5	7.5	0.5
C	88.0	50.7	8.3	7.4	0.5
D	88.8	62.9	9.4	8.5	0.5
E	89.3	31.8	8.1	6.9	0.6
F	89.2	56.4	9.4	8.5	0.4
G	89.1	61.2	10.1	9.0	0.6

2. 第二組竹鐘的各項數據

表2：第二組竹鐘在高度、深度和外內直徑的資料(單位：公分)

	外觀高度 (H)	平均深度 (D)	平均外量 直徑(R1)	平均內量 直徑(R2)	管壁厚度 (R1-R2/2)
A	90.0	76.5	10.5	9.5	0.5

B	90.0	37.9	8.9	8.2	0.4
C	89.5	50.3	10.0	8.4	0.8
D	90.0	65.7	10.4	8.9	0.8
E	91.0	32.0	8.1	6.7	0.7
F	91.0	56.5	10.0	8.2	0.9
G	90.5	42.7	9.3	7.4	1.0

3. 第三組竹鐘的各項數據

表3：第一組竹鐘在高度、深度和外內直徑的資料(單位：公分)

	外觀高度 (H)	平均深度 (D)	平均外量 直徑(R1)	平均內量 直徑(R2)	管壁厚度 (R1-R2/2)
A	91.5	77.0	9.6	7.9	0.9
B	90.0	37.4	8.5	6.9	0.8
C	90.3	51.8	10.0	8.2	0.9
D	91.1	64.8	9.0	7.1	1.0
E	90.6	31.0	8.5	6.9	0.8
F	90.5	55.8	9.8	8.2	0.8
G	91.0	42.0	9.5	8.5	0.5

4. 第四組竹鐘的各項數據

表4：第四組竹鐘在高度、深度和外內直徑的資料(單位：公分)

	外觀高度 (H)	平均深度 (D)	平均外量 直徑(R1)	平均內量 直徑(R2)	管壁厚度 (R1-R2/2)
A	88.6	78.5	9.4	7.7	0.9
B	88.5	37.5	8.6	7.8	0.4
C	87.0	77.7	9.1	8.2	0.5
D	88.0	64.3	9.8	8.2	0.8
E	90.0	31.4	9.3	7.4	1.0
F	89.5	57.3	9.5	8.1	0.7
G	89.0	41.7	9.3	7.6	0.9

二、竹鐘的各項型態特徵與音調的關係

在還沒有使用Syaku8頻率分析軟體之前，我們早就知道每組竹鐘的竹管發出的聲音是哪些音調，因為沓互樂隊指導老師一開始教導我們演奏竹鐘這樂器的時候，就已經說明過了，例如A竹管是低音的la，而B竹管打出來的聲音是高音的la，至於C、D、E、F、G管，分別是

mi、低音do、高音do、re和sol。只是樂隊指導老師沒有說明的是，為什麼竹管會有高低音的差別，這也就是我們這次研究想要探討的問題。

經過實際測量後，我們知道了竹鐘的七根竹管的高度、深度、竹子管口大小(內量直徑)、竹子管壁的厚度，以及各個竹管的頻率值，如表5所示，因此接下來我們可以畫出兩個測量項目的關係圖，以看出最有可能影響竹管音調高低的因素是哪一個。

另外，平常在練習演奏時，就知道第四組竹鐘有兩個竹管壞掉了，它的音已經不是原來的音了，所以在探討這些項目與音調的關係時，不納入四D和四E的數據來討論。

表5：四組竹鐘在高度、深度、管口大小、管壁厚度和頻率的資料

編號	高度 (cm)	平均深 度(cm)	管口大 小(cm)	管壁厚 度(cm)	平均頻 率(Hz)	唱名
一 A	89.0	77.0	8.8	0.4	106.7	la2
一 B	89.3	35.9	7.5	0.5	217.7	la3
一 C	88.0	50.7	7.4	0.5	161.7	mi3
一 D	88.8	62.9	8.5	0.5	130.1	do3
一 E	89.3	31.8	6.9	0.6	256.4	do4
一 F	89.2	56.4	8.5	0.4	145.1	re3
一 G	89.1	61.2	9.0	0.6	193.4	sol3
二 A	90.0	76.5	9.5	0.5	109.8	la2
二 B	90.0	37.9	8.2	0.4	217.4	la3
二 C	89.5	50.3	8.4	0.8	165.4	mi4
二 D	90.0	65.7	8.9	0.8	130.3	do3
二 E	91.0	32.0	6.7	0.7	260.2	do4
二 F	91.0	56.5	8.2	0.9	147.7	re3
二 G	90.5	42.7	7.4	1.0	195.5	sol3
三 A	91.5	77.0	7.9	0.9	110.2	la2
三 B	90.0	37.4	6.9	0.8	218.3	la3
三 C	90.3	51.8	8.2	0.9	161.6	mi3
三 D	91.1	64.8	7.1	1.0	129.3	do3
三 E	90.6	31.0	6.9	0.8	217.6	do3/do4
三 F	90.5	55.8	8.2	0.8	147.0	re3
三 G	91.0	42.0	8.5	0.5	194.5	sol3
四 A	88.6	78.5	7.7	0.9	109.0	la2
四 B	88.5	37.5	7.8	0.4	218.3	la3
四 C	87.0	77.7	8.2	0.5	163.8	mi3
四 D	88.0	64.3	8.2	0.8	111.1	si ^b 2/la2
四 E	90.0	31.4	7.4	1.0	162.4	la ^b 3/re3/do3
四 F	89.5	57.3	8.1	0.7	146.3	re3
四 G	89.0	41.7	7.6	0.9	183.6	sol3

1. 竹鐘竹管高度與頻率的關係

(1)小結：如圖1的資料，四組竹管高度相仿，高度差約為1~2公分，平均來說為89.7公分高。而幾乎相同高度的竹管卻可以打出不同的高低音，我們可以推論竹管外觀高度不是決定竹鐘高低音差別的因素。

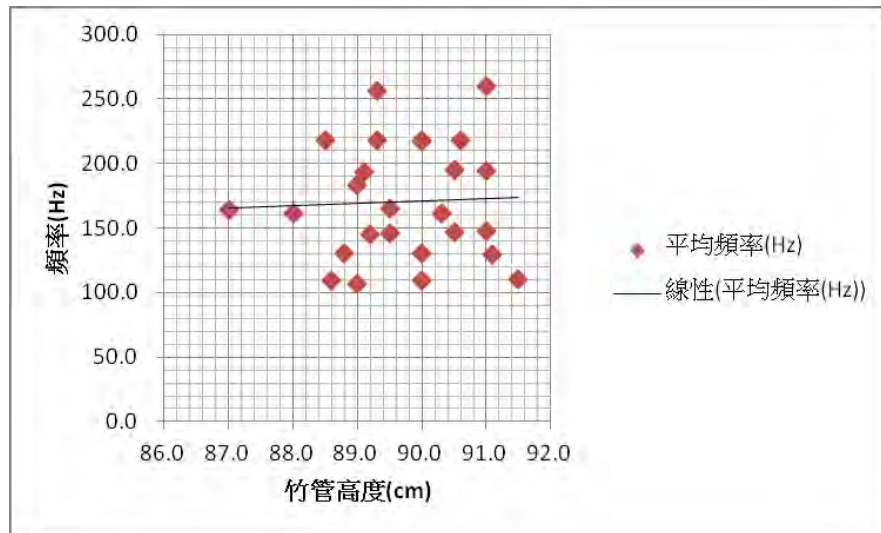


圖1：竹鐘竹管高度與頻率關係

2. 竹鐘竹管深度與頻率的關係

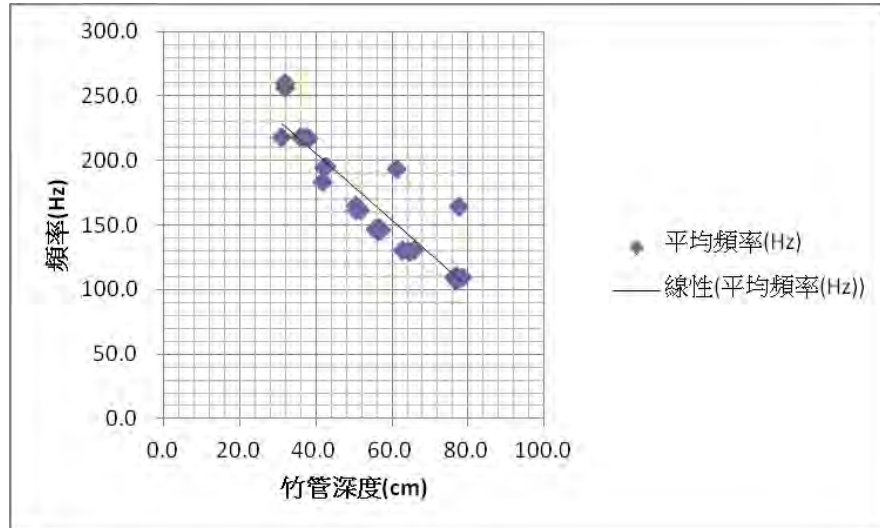


圖2：竹鐘竹管深度與頻率關係

(1)小結：從圖2的資料，可以看得出來竹管深度越深頻率越低的趨勢，而頻率越低則代表音調也越低，反之，竹管深度越淺頻率越高，頻率越高音調也越高。因此，竹管深度最有可能是影響竹鐘音調高低的因素。

3. 竹鐘竹管管口大小（內量直徑）與頻率的關係

(1)小結：從表5的資料可知，竹管管口大小直徑最大的為9.5公分，直徑最小的為6.7公分，平均值為7.9公分，而竹鐘的管口大小與頻率關係似乎呈現

管口越大頻率越低的趨勢（圖10），但是又大概有10個數據沒有遵從這個原則。總結來說，我們無法肯定管口大小這個因素是否會影響音調高低，需要更進一步做其他的實驗來確認。

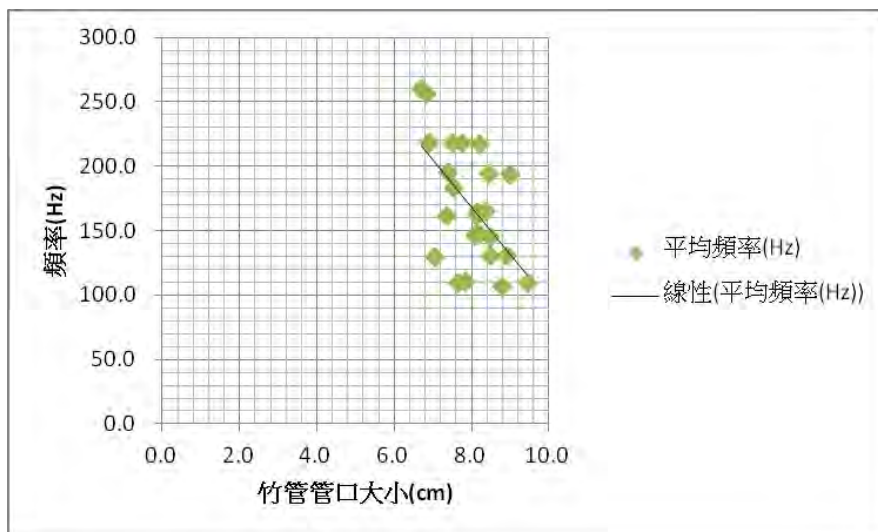


圖3：竹鐘竹管管口大小與頻率關係

4. 竹鐘竹管管壁厚度與頻率的關係

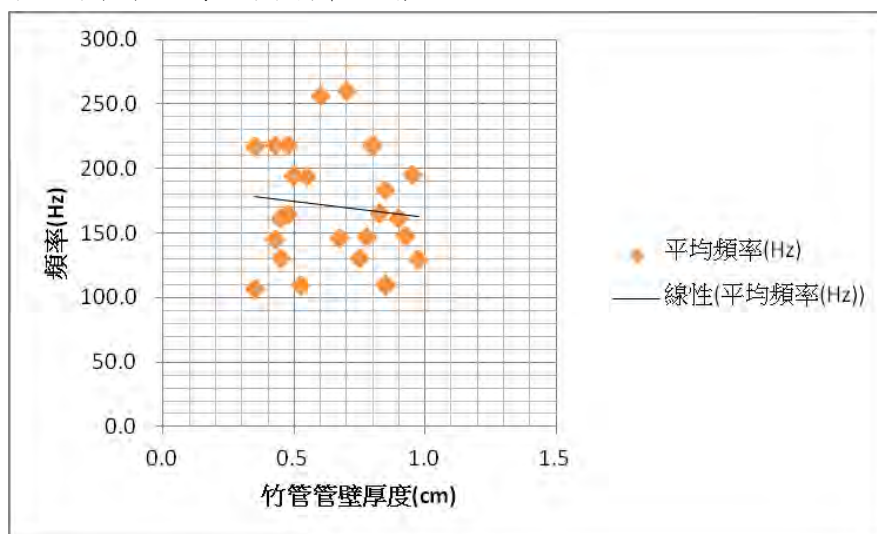


圖4：竹鐘竹管管壁厚度與頻率關係

(1)小結：從圖4的資料，24個竹管的管壁厚度介於1公分到0.5公分之間，差異不大，而幾乎相同厚度的竹管可以打出相差了100多Hz的頻率，我們可以推論竹管管壁厚度應該不是決定竹鐘高低音差別的因素。

三、不同拍打力量大小，對竹鐘發出的音調和音量的影響

沓互樂隊指導老師教導我們演奏竹鐘這樂器的時候，提醒我們拿著拍子的手腕要放鬆，靠手腕上下的力量去拍擊竹管管口，如果我們拍得很小力或很大力，會影響到竹鐘發出的音調或音量嗎？所以我們進行這個實驗。實驗數據如表6所示。

表6：四組竹鐘以大、中、小力拍擊時的音量和頻率資料

編號	力量	平均分貝(dB)	平均頻率(Hz)	唱名	編號	力量	平均分貝(dB)	平均頻率(Hz)	唱名
一 A	小	40.0	106.7	la2	三 A	小	58.2	110.2	la2
	中	47.9	107.4	la2		中	51.6	110.4	la2
	大	53.3	107.3	la2		大	55.0	110.5	la2
一 B	小	58.8	217.7	la3	三 B	小	54.7	218.3	la3
	中	52.1	218.5	la3		中	54.2	217.7	la3
	大	58.6	219.6	la3		大	48.7	216.1	la3
一 C	小	49.7	161.7	mi3	三 C	小	55.8	161.6	mi3
	中	52.1	161.8	mi3		中	50.8	164.1	mi3
	大	58.1	162.1	mi3		大	51.3	160.7	mi3
一 D	小	55.2	130.1	do3	三 D	小	53.5	129.3	do3
	中	56.3	128.8	do3		中	48.4	129.5	do3
	大	56.9	128.7	do3		大	52.0	129.5	do3
一 E	小	56.0	256.4	do4	三 E	小	40.7	217.6	do3/do4
	中	56.0	256.7	do4		中	35.3	171.6	do3
	大	54.0	257.0	do4		大	39.1	171.0	do3/do4
一 F	小	58.2	145.1	re3	三 F	小	37.4	147.0	re3
	中	60.2	145.4	re3		中	45.1	146.4	re3
	大	54.1	145.2	re3		大	48.3	144.6	re3
一 G	小	58.5	193.4	sol3	三 G	小	41.2	194.5	sol3
	中	62.9	192.9	sol3		中	43.7	192.9	sol3
	大	61.1	193.5	sol3		大	42.2	193.8	sol3
二 A	小	62.2	109.8	la2	四 A	小	31.8	109.0	la2
	中	62.6	110.4	la2		中	41.1	182.7	mi4/la2
	大	58.9	110.6	la2		大	35.6	109.8	la2
二 B	小	64.2	217.4	la3	四 B	小	31.5	218.3	la3
	中	45.4	215.3	la3		中	35.5	189.3	la3/do3
	大	40.5	187.0	la3/do3		大	33.1	218.7	la3
二 C	小	48.8	165.4	mi4	四 C	小	42.1	163.8	mi3
	中	48.5	166.1	mi4		中	39.5	164.0	mi3
	大	51.1	165.6	mi4		大	37.5	164.3	mi3
二 D	小	42.3	130.3	do3	四 D	小	41.7	111.1	si ^b 2/la2
	中	43.8	130.4	do3		中	38.7	120.5	la ^b 2/la2/re3
	大	53.3	130.2	do3		大	53.1	172.9	la ^b 2/la2/sol3
二 E	小	48.1	260.2	do4	四 E	小	29.4	162.4	la ^b 3/re3/do3
	中	40.9	248.6	do4/do3		中	39.7	141.4	reb3/re3
	大	32.8	171.9	do3/do4		大	29.2	144.1	re3

二 F	小	41.2	147.7	re3	四 F	小	35.2	146.3	re3
	中	50.4	181.5	re3		中	37.2	144.9	re3
	大	44.1	141.0	do3/re3		大	50.8	145.3	re3
二 G	小	49.0	195.5	sol3	四 G	小	42.1	183.6	sol3
	中	41.2	185.4	sol3		中	46.8	196.1	sol3
	大	40.6	184.5	sol3		大	42.8	167.8	sol3/si ^b 2

1. 不同拍擊力量與音量的關係

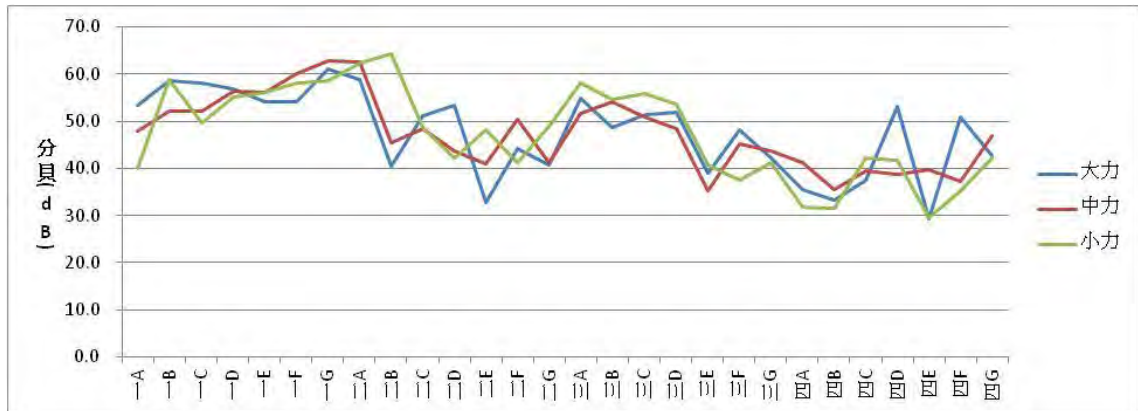


圖5：不同拍擊力量與音量的關係

(1)小結：以不同拍擊力量來拍打28個竹管，從圖5的資料可以發現，似乎不是越大力，竹管發出的音量越大，也不是越小力，音量越大的樣子。

2. 不同拍擊力量與音調的關係

(1)小結：以不同拍擊力量來拍打28個竹管，從圖6~8的資料可以發現，第一組的竹鐘數據最穩定，七根竹管並不會因為拍擊力量不同而有不同的頻率產生。而第二組有三根竹管B、E、F會因為力量不同而有不同的音調，第三組只有E竹管的音調會因為力量不同而在do3、do4之間轉換，第四組的A、B、D、E、G五根竹管都會因為力量不同而改變音調，甚至有的竹管如四D、四E，在相同拍擊力量下的三次音調都不同。雖然小力、中力、大力的拍擊都有可能使竹管改變音調，可是總的來說，如果力量用的越大，使竹管發出的音調改變的可能性越高。

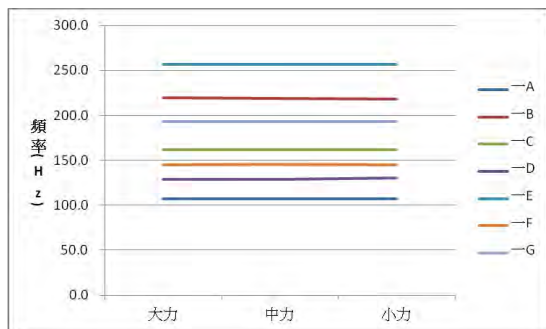


圖6：〈第一組〉不同拍擊力量與音調的關係

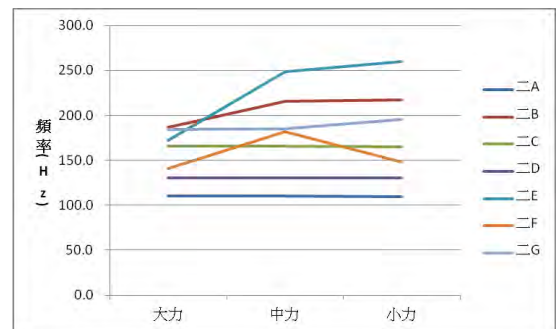


圖7：〈第二組〉不同拍擊力量與音調的關係

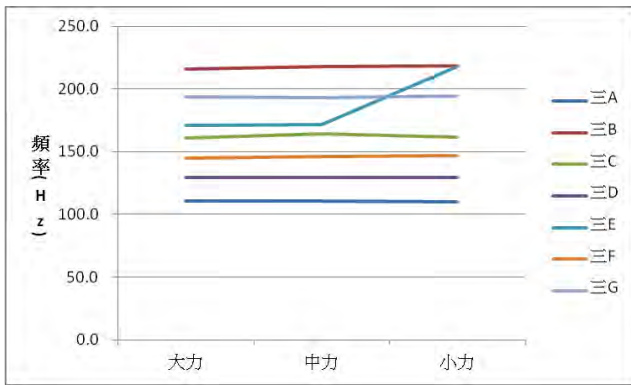


圖8：〈第三組〉不同拍擊力量與音調的關係

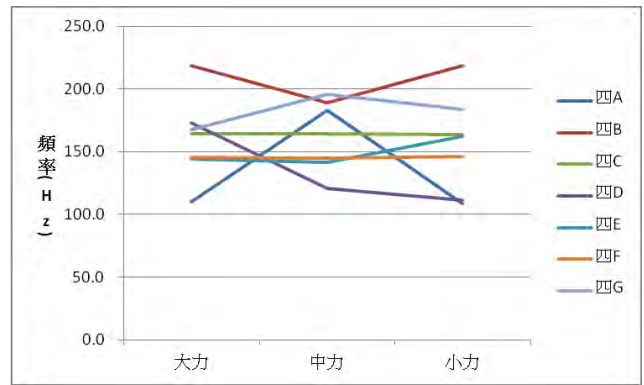


圖9：〈第四組〉不同拍擊力量與音調的關係

四、不同遠近距離，與所聽到的竹鐘音量的關係

先前訪談沓互老師關於竹鐘的歷史由來，我們得知最早竹鐘是用來報喜、傳訊，所以想知道竹鐘所傳播聲音可以有多遠，表7是以大力來拍打第一組竹鐘的條件下，在不同遠近距離時音量的數據資料。

表7：第一組竹鐘分別在不同距離下所測量到的音量大小(單位：平均分貝dB)

	1 公尺	5 公尺	10 公尺	15 公尺
一 A	52.6	34.0	42.9	37.4
一 B	47.7	43.9	37.9	31.5
一 C	38.6	39.2	34.9	34.5
一 D	43.3	30.7	29.0	37.8
一 E	33.8	35.0	35.8	37.2
一 F	24.9	46.4	40.4	40.9
一 G	36.2	47.0	42.0	35.4
平均	39.6	39.5	37.6	36.4

將表7數據畫成統計圖，如圖10所示，可以發現雖然都以大力拍打每根竹管，同一個距離下，七根竹管的音量也不太一樣，但平均來說，音量似乎會隨距離加長而變小，但就1公尺或15公尺而言，所測量到的音量大小相差不多，總的來說在15公尺的範圍內都還有接近40分貝的音量。

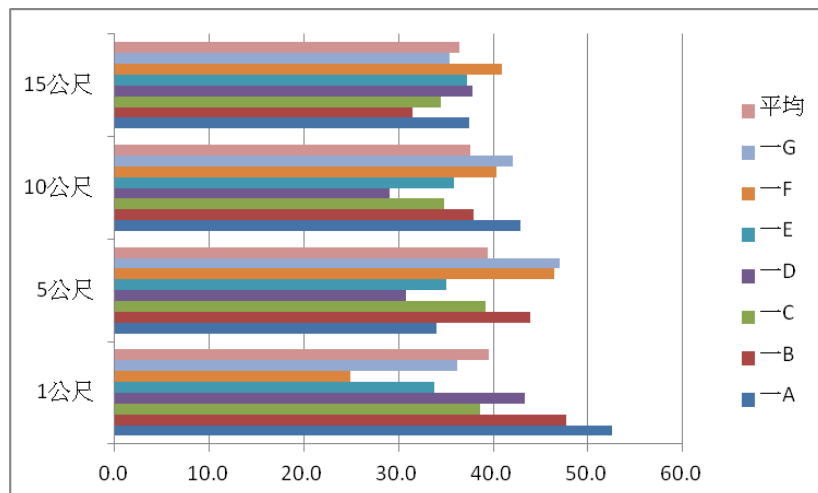


圖9：〈第一組〉不同距離與音量大小的關係

五、試驗仿製一組玻璃竹鐘

1.仿製一組玻璃竹鐘

我們運用測量竹鐘聲音頻率的方法，以C大調為測量基準，來蒐集200c.c玻璃量筒的聲音資料。另外，為了改善玻璃太輕，打了之後會一直晃動，產生額外的雜音問題，我們將止滑墊放在玻璃量筒底下再進行實驗。

表8：200c.c玻璃量筒的各項型態特徵

總容量(c.c)	高度(cm)	平均深度 (cm)	平均外量直 徑(cm)	平均內量直 徑(cm)	管壁厚度 (cm)
240	30.5	28.9	4.0	3.4	0.3

由於全部聲音資料有388筆資料，太多了，所以表8則摘錄我們成功仿製出的六個音階的數據。

表9：用玻璃量筒成功仿製出的六個音階

力量	加水刻度 (c.c)	深度 (cm)	平均頻率 (Hz)	平均分貝 (dB)	唱名	相當於D大調 的音	相當於竹 管編號
中	0	28.8	296.8	32.2	re4	do	D
中	28	25.1	322.8	32.5	mi4	re	F
中	56	22.8	377.1	41.9	sol ^b 4	mi	C
中	88	18.7	447.6	33.2	la4	sol	G
中	106	19.9	488.0	36.6	si4	la	B
中	132	13.9	600.8	21.1	re5	do	E

由表8和圖10可知，加水越多，也就是量筒深度越淺，其頻率也會越高，音調越高。至於音量大小，平均為32.9分貝，比竹製的竹鐘的40分貝還要小聲。而且紀錄下的三次數據也非常穩定，都呈現相同的音調。

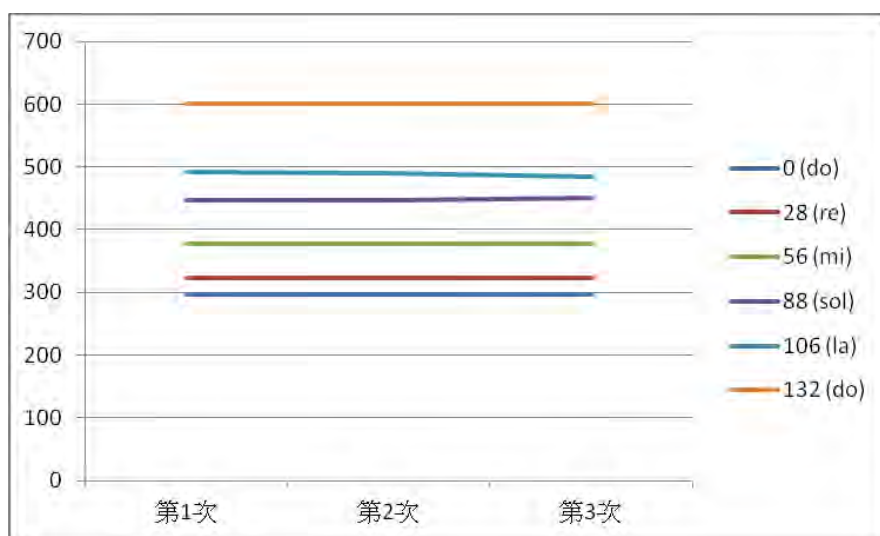


圖10：用玻璃量筒仿製的六個音調非常穩定

2.探究拍子以側邊敲打管口，對玻璃量筒的音調和音量的影響

因為竹製竹鐘早已用繩子綁好了，繩結還是作為演奏時的記號，為了避免發生我們在實驗過程拆開學校樂隊的樂器又無法復原的情況，因此探究大力的用拍子來敲打管口側邊的實驗，就改以六管玻璃竹鐘來進行。

表9：拍子以側邊敲打管口時的聲音頻率和音量資料

加水刻度(c.c)	次數	頻率(Hz)	分貝(dB)	唱名	加水刻度(c.c)	次數	頻率(Hz)	分貝(dB)	唱名
0	1	61.7	63.8	si ^b 2	88	1	102	60.9	lab2
	2	86.6	62.7	fa2		2	72.6	60.9	re2
	3	84	62.5	fa2		3	93.8	61.3	si ^b 2
28	1	107.3	62.3	la2	106	1	199.6	23.7	sol3
	2	108.7	62.4	la2		2	115.2	59	si ^b 2
	3	109.4	51.4	la2		3	104.3	26.4	la ^b 2
56	1	101.4	61.3	la ^b 2	132	1	115.1	61.4	si ^b 2
	2	99.8	54.1	sol2		2	94.8	60.7	si ^b 2
	3	126.7	62.9	si2		3	78	45.3	mi ^b 2

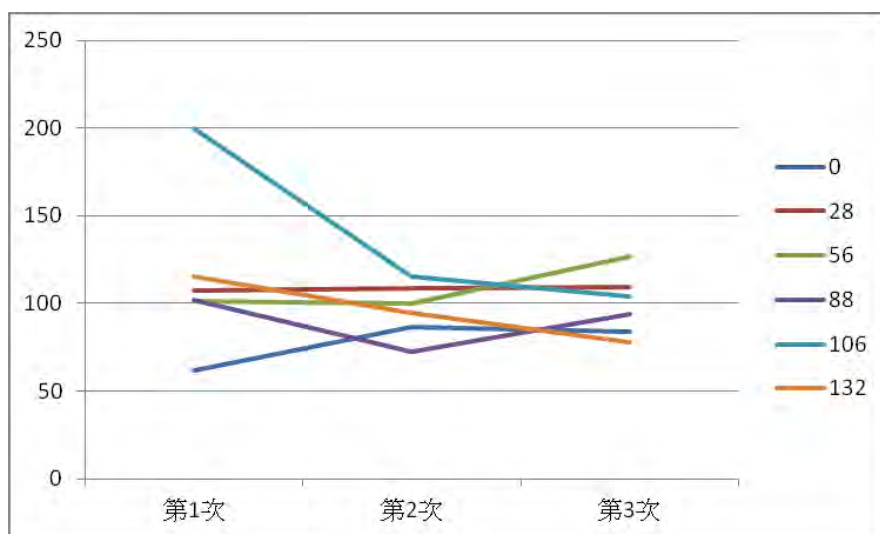


圖11：以側邊拍擊的方式所得的六個音調非常不穩定

由表9的資料發現大力的向管口側邊拍擊時，音量還蠻大的，平均為56.2分貝，可是聲音縱然大聲，音調卻非常不同，與實驗5-1的資料結果(表8)相差很多。同一個深度(或加水後的刻度)下的量筒拍擊後，所發出的音調甚至三次都不一樣，如圖11所示，而且頻率最高為199Hz，音調也不若實驗5-1拍子往管口拍擊方式所得的音調來的穩定。

陸、討論

一、影響竹鐘發聲因素的探討

1.音調

聲音的要素有三個，一個是樂器能發出不同的高低音(音調)，除了用耳朵聽能分辨得出

來之外，在科學上，音調用「頻率」表示，第二個則是樂器的聲音大小(響度)，響度用分貝來表示，最後一個聲音要素則是樂器聲音的特色(音色)，要研究它的話，則要分析聲音的波形。我們的實驗首要要研究哪些因素會影響音調，而這些因素可以分為兩大類，一類是竹鐘本身的型態特徵，如高度、管口大小和深度等，另一類是演奏方式是否會影響音調，如正拍管口，還是側邊拍擊管口。我們所進行的實驗的結果統整如下表10所示。

表10：影響竹鐘音調的因素探討

類型	因素	實驗探討	資料結果
型態特徵	高度	高度不會影響音調	圖1
	深度	深度會影響音調，深度越深的音調越低	圖2、表9
	管口大小	管口大小似乎會影響音調，管口越大的音調越低，還需進一步做其他實驗來確認	圖3
	管壁厚度	厚度不會影響音調	圖4
演奏方式	拍擊力量大小	由第一組竹鐘的實驗數據發現力量不會影響音調，但其餘竹鐘的數據顯示出好像力量越大的話，音調改變的可能性越高	圖6~圖9
	從管口正上方往下拍（正拍）或從管口旁邊拍（側拍）	從竹製竹鐘和玻璃竹鐘的實驗數據都可以發現，正拍方式所得的音調很穩定；用側拍的方式對玻璃量筒進行實驗，結果發現所得的音調非常不穩定，拍三次三次音調都不同，而且其頻率並不會依照深度的特性來改變	圖6~圖11

由表10我們會發現竹鐘本身的型態特徵和演奏的方式都有可能影響音調高低，在型態特徵方面，高度、厚度與音調比較沒有什麼關聯，深度是造成音調改變的主因，不管用竹製竹鐘，還是進一步用玻璃量筒所作的實驗，都能確認深度變化是音調高低的影響因素這個原則。至於管口大小，由竹製竹鐘的數據可以發現這也可能是造成音調變化的原因，最好進一步地再以相同材質、深度的條件，使用管口大小不同的材料來進行實驗，才能獲得肯定的結論。

由於我們取得竹子的原料有困難，所以再次以玻璃杯進行初步的實驗，初步結果發現再大賣場買的兩款管口不同的玻璃杯在深度相同的條件下，能打出不同音高的聲音，大約相差了半音，延伸的實驗紀錄如下：

表11：玻璃杯的各項數據資料(單位：公分)

	外觀高度 (cm)	內部深度 (cm)	外量直 徑(cm)	內量直 徑(cm)	管壁厚 度(cm)	平均 頻率	唱名
甲	17	15	7	6.5	0.25	523.0	do5
	17	14	7	6.5	0.25	551.5	re ^b 5
乙	15	14	6.5	6	0.25	596.1	re5

綜合深度和管口大小這兩個因素，這似乎就是指樂器的容量大小，也就是說容量越大的竹管或玻璃量筒，拍打出來的音調應該會越低，容量越小的竹管或玻璃量筒音調會越高。如果要再驗證這一個想法的話，可以再用其他種規格的玻璃量筒來進行實驗，加了不同c.c數的水之後，就能改變玻璃量筒內部的容量大小。甚至還可以拿不同形狀不同容量的容器來做實驗，看看是容量大小是主因，還是製作竹鐘時仍要考慮形狀（圓柱狀）。

至於演奏方式方面，從實驗得知，原來拍子由上面往管口中央拍擊是有道理的，這樣子的拍法，才能顯現出不同竹管或玻璃管的音調高低。不然即便改變了深度或管口大小，從旁邊拍管口，也製造不了不同又穩定的音調。看來，以前發明竹鐘的阿美族人也是有實驗過的，一方了解怎麼樣製造出不同深度的竹管，一方面又熟知怎麼樣演奏的效果最好，這樣傳承下來給我們的，真的是寶貴的智慧 and 知識。

2. 音量

關於音量這個部份，我們改變了不同拍打的力量，以及測量不同遠近距離下所能接收到的音量大小。實驗結果統整如表12。

表12：影響竹鐘音量的因素探討

因素	水準	實驗探討	資料結果
拍打力量	大力、中力、小力	結果發現似乎不是越大力，竹管發出的音量越大，也不是越小力，音量越大的樣子，並沒有一致的趨勢	圖5
遠近距離	1公尺、5公尺、10公尺、15公尺	平均來說，音量似乎會隨距離加長而變小，但就1公尺或15公尺而言，所測量到的音量大小相差不多(3.2分貝)，總的來說在15公尺的範圍內都還有接近40分貝的音量	表7、圖9

我們在進行不同力量拍擊的實驗的時候，就發現一個困難的地方，就是很難真正控制每一次的力道大小，如果要改善這個問題，可能要改用機器來拍擊才能獲得比較準確的數據。另外還有一個發現就是，如果我們拍子拍擊的位置正對管口中央的話，這樣聽起來的聲音不管在音調方面會很穩定之外，聲音聽起來也比較清脆，感覺不會濁濁的。這可能也可以作為將來繼續探討的議題，也就是拍子對準管口中央拍擊，或對著旁邊拍擊時，所得到的音調和音色（可能要用其他軟體來分析聲音波形）是否一致。

在遠近距離方面，最遠的15公尺處聽到的音量還有40分貝左右，就我們一般演奏的經驗，竹製竹鐘的聲音傳播距離還蠻遠的，有時候學姐在視聽教室練習時，遠在20公尺外，中間又隔了好幾教室，在二樓的我們都還能聽到竹鐘的聲音。因此我們相信沓互樂隊指導老師告訴我們的話：竹鐘原本是阿美族人以前用來報喜、傳訊的工具。

二、仿製的玻璃竹鐘

運用上述探討出來的發聲原理，我們算是成功地做出一組玻璃竹鐘，只差了一個音。會使用玻璃來做新的一組竹鐘的原因，一方面是我們不容易取得竹子原料，而且聽沓互樂隊指導老師說，將竹子砍下來之後還要先曬過，從新鮮的竹子曬到乾了，才會再進行下個製作步驟，這樣子要做出新的竹鐘要花好久時間喔。另一方面，我們考量到新材料要耐得住敲打，也要方便我們改變深度，用玻璃杯的話只要加水就可以改變深淺了。再來，我們想，研究出竹製的竹鐘的發聲科學原則，它應該也能應用在不同材質的竹鐘上面吧，不僅讓我們體會科學原則的共通性，也再次利用其他材料進行發聲原理的驗證。

使用200c.c玻璃量筒來找音調，我們發現玻璃量筒一開始是re4，一路加水改變量筒深度，找到了mi4、fa4、sol4、la4、si4、do5、re5、mi5、fa5、sol5，至於深度越淺小於6.7公分(相當於加水刻度196c.c以上)時，音開始不準，都變成la2。由於竹製竹鐘是C大調，以do當主音，而玻璃量筒的起始音是re，所以我們改用D大調，以re當主音，來找出一組竹鐘裡該有的音調。最後我們成功找到六個音，分別是re4[do]、mi4[re]、sol^b4[mi]、la4[sol]、si4[la]、re5[do]。如果玻璃量筒管口再大一點，起始音應該會低一點，就有希望找到si3[la]，就能組成一組七管的玻璃竹鐘了。

三、沓互樂隊裡其他樂器的比較

沓互樂隊的表演樂器有三項，我們這一次只針對竹鐘的發聲原理來研究，如果再繼續研究的話，可以研究竹鼓的發聲原理，這一個樂器也很特別，它是用巨竹做的，竹節間隔非常長，側邊有開一個長條形的洞口，橫擺在架子上面，演奏時用手拍擊，手拍擊的位置不同時，聽起來的聲音也會有所不同。這也令我們感到很好奇！

柒、結論

一、透過訪談得知，過去的阿美族人使用竹鐘(Kakeng)、竹鼓和排笛來報喜、傳訊。而現在由於樂團演奏的需要，改良了竹鐘，從過去單管改良成七管（七音）一組的組合。

二、國小演奏用的竹鐘是以C大調來調音，這七個竹管七個音分別是la₂、la₃、mi₃、do₃、do₄、re₃和sol₃，簡譜記作6̣、6、3、1、 $\dot{1}$ 、2、5。

三、竹鐘的外觀高度不影響竹鐘音調高低。

四、竹鐘竹管的內部深度與竹鐘音調高低最有關係，竹管越深的頻率越低，頻率越低的音調也越低，反之亦然。

五、竹鐘管壁厚度不影響竹鐘音調高低。

六、拍擊力量應該不會影響音調，不過少數數據顯示出力量越大的話，音調改變的可能性越高。

七、拍子從上往管口中央正拍方式所得的音調很穩定；用側拍的方式所得的音調非常不穩定，而且其頻率並不會依照深度的特性來改變。

八、不同拍打力量所得的音量大小似乎沒有關聯，需要改善拍打力量和拍在管口的位置的精準度。

九、竹鐘音量似乎會隨距離加長而變小，但就1公尺或15公尺而言，所測量到的音量大小相差不多(3.2分貝)，總的來說在15公尺的範圍內都還有接近40分貝的音量。

十、用高密度泡綿拍敲打玻璃量筒（杯）時，玻璃杯如同竹管一般，也會發出聲音。

十一、運用實驗結果，成功調製出一組（六管）以D大調為基準的玻璃竹鐘，其音分別為re⁴[do]、mi⁴[re]、sol^{b4}[mi]、la⁴[sol]、si⁴[la]、re⁵[do]，簡譜可記作1、2、3、5、6、 $\dot{1}$ 。

捌、參考資料及其他

王美芬等(2013)。國小自然與生活科技（5下）。臺北市：康軒文教。

陳玉珊、陳柔萍、林苡辰、陳俊佑、林峻揚、何緯綸(2006)。自製排笛的研究。中華民國第46屆中小學科學展覽會作品說明書。

蔡凱伊、魏玉珊(2009)。化腐朽為神奇的多多笛。中華民國第49屆中小學科學展覽會作品說明書。

附錄一、關於竹鐘歷史的訪談摘要紀錄

竹鐘的阿美族名字叫做Kakeng，在以前是作為報喜、報訊的用途，因為以前的族人都需要上山打獵，遠在深山裡面傳遞訊號不容易，所以想出用敲打天然的素材—竹子的方式來通訊。像竹鐘它所使用的竹子是刺竹，而竹鼓、排笛分別是用巨竹、蘆竹作成的，早期竹鐘是單管而已，後來成立樂團才改良它變成多管，至於排笛當初是三根為一組，方便外出的族人帶著，一樣可以傳訊和回應對方的訊號。

它們製作的過程都是先把竹子砍下來，然後曬到乾，需要的時間長短不一定，因為要看竹子大小和天氣狀況。曬乾好的竹子要用砂紙磨過，也因為現在的竹鐘是作為演奏用，所以還會上亮光漆。至於竹鐘七個竹管的聲音高低就用調音器來找，通常有製作出一組成功的竹鐘後，第二、三組的竹鐘就比較容易做了，因為可以仿造第一組的高度、深度來做，當然音階準確度還是都要經過調音器校正。讓小朋友演奏的竹鐘通常都是以C大調去調出來的，而成人演奏的竹鐘是用G大調。給國小小朋友演奏的竹鐘高度大概是以小朋友的身高為主，不能太高也不能太低，竹鐘高度大約在他們胸前，大概就是現在看到的高度90公分。而我們樂團所使用的竹鐘就比較高一點，配合成人的身高，這樣打起來，手臂的高度和手腕用力的方式會比較舒服一點。

談到演奏方面的注意事項的話，七根竹管調音之後用花繩把它們綁起來，如果是右撇子，主要手是右手的演奏者，繩子打結的那面就要朝著自己，右手可以打的音就是低音la、低音do、mi和re，左手可以打的音是高音la、高音do和sol(如照片6)。如果是左撇子，那麼繩結那面就要朝外，主要手左手打的音就是低音la、低音do、mi和re，右手打高音la、高音do和sol。



照片6：竹鐘不同音階示意圖

不管右撇子、左撇子，主要手通常力氣比較大，手也比較穩，所以負責打低音la、低音do、mi和re這些主要的音。在演奏的時候，不只打單音，我們也有和音的打法，如果低音do和mi一起打，我們就當作是mi的和音。

【評語】 080111

阿美族的竹鐘以各種竹管組合而成，發出美妙樂音。

本作品觀察，並模擬竹鐘的構造、形狀等特徵變因對於音量與音調的影響，並且進行初步的定量分析對於傳統樂器的科學內涵有初步的貢獻，定量的分析可更加明確嚴謹。