

中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

佳作

080103

「笛」確如此~笛子的製作與笛音的特性研究

學校名稱：桃園縣桃園市中山國民小學

| | |
|--------|-------|
| 作者： | 指導老師： |
| 小六 王建凱 | 張秀鳳 |
| 小六 陳映良 | 林文鄉 |
| 小六 江彥辰 | |
| 小六 薛郁臻 | |
| 小五 詹禮嘉 | |

關鍵詞：笛子、邊稜音、笛膜

壹、摘要

以吸管、胡蘿蔔做笛子，研究笛音的響度、音高、音色。發現笛音的響度與吹孔的大小、角度有關；音高與笛子的長度、管徑大小、窗口位置有關；並分析笛子的音色，比較有無笛膜的音色差別，發現笛膜可以豐富笛子的音色。最後依據所做的實驗數據來自製笛子。

貳、研究動機

自然課有聲音的單元，其中討論不同樂器的發聲原理，並且要自製樂器。敲擊樂器及絃樂器較易發出聲音，但製作管樂器時，卻不容易使管子發出諧音。老師教我們將吸管口剪兩個截角，再含住吸管口吹，但要很有技巧才能吹出聲音；或要我們直接吹吸管邊緣，但往往要在某個角度且很用力下，才能使發出響聲，因此，我們希望能做出容易吹的笛子。透過資料收集、閱讀相關文件及參觀樂器工廠，對於管樂器的發聲原理逐漸有更深入的了解，最後試驗出容易切削及控制變因的**吸管**及**胡蘿蔔**是製作笛子的好材料。

參、研究目的

- 一、製作出容易吹出諧音的笛子
- 二、影響笛子響度的因素研究
- 三、影響笛子音高的因素研究
- 四、笛子的音色特性分析

肆、研究設備及器材

吸管、胡蘿蔔、珍珠板、巴沙木、笛膜、分貝計、調音計、溫度計、風速計、數位相機、烙鐵、雕刻刀具、小型電鑽、空壓機、噴槍、筆記型電腦、cool edit pro2.1 軟體、Microsoft excel 軟體。

伍、研究過程或方法

一、理論依據：

(一) 邊稜音：

直笛、長笛、中國的橫笛能發出聲音，是因為空氣被笛子缺口邊緣稜邊，強制地切成兩路，一路流入內部，另一路流出外部。空氣被切成兩路所產生的摩擦音就是發音的來源，稱**邊稜音**。

(二) 共鳴：

聲源與管中駐波頻率相同時，管子才能產生**共鳴**，管子可形成共鳴的最低頻率稱為**基音**，以上則稱為**泛音**。

(三) 笛子的泛音吹奏法：

一般笛子只有六個按孔，但笛子有**平吹**、**急吹**和**超吹**三種力度。平吹音，就是笛子的基音，急吹音是第一泛音，超吹音是第二泛音。笛子因能吹奏泛音而使得音域更寬廣。

二、笛子的結構定義：



圖1：笛子結構圖



圖2：吸管笛製作

三、吸管笛製作：

- (一) 用一般的小吸管來做笛子，音量較小，因此大多以喝珍珠奶茶的吸管來做笛子。
- (二) 用美工刀或烙鐵在吸管上挖出一適當大小的**窗口**。
- (三) **笛塞**的製作開始是用珍珠板，後來用圓柱**巴沙木**。將巴沙木切下一段，約1~2公分，磨出適當的斜角，再將笛塞裝入吸管口構成吹孔。笛塞的用處，一是將口中吹出的氣流加速；二是使氣流能以適當的角度摩擦窗口邊緣產生邊稜音。

四、胡蘿蔔笛製作：

- (一) 根莖類蔬菜切削容易，適合做樂器。曾用胡蘿蔔、白蘿蔔、山藥、大黃瓜、菜心製作；生白蘿蔔有辣味，山藥有黏性，大黃瓜質地較軟，最後發現以**胡蘿蔔**較合適。
- (二) 胡蘿蔔切去頭尾部分，再用小型電鑽在胡蘿蔔上鑽出圓柱形管。
- (三) 在管子上部刻出**窗口**及**笛唇**斜坡。
- (四) 用巴沙木製作笛塞，並在笛塞上刻出吹孔，吹孔位置要使吹出的氣流能剛好碰到笛唇斜坡，而被分成上下兩股氣流，使管子能產生**邊稜效應**而共鳴。



圖3：根莖類蔬菜



圖4：山藥鑽孔



圖5：白蘿蔔笛



圖6：菜心笛



圖7：鑽孔工具



圖8：胡蘿蔔鑽孔



圖9：不同管徑

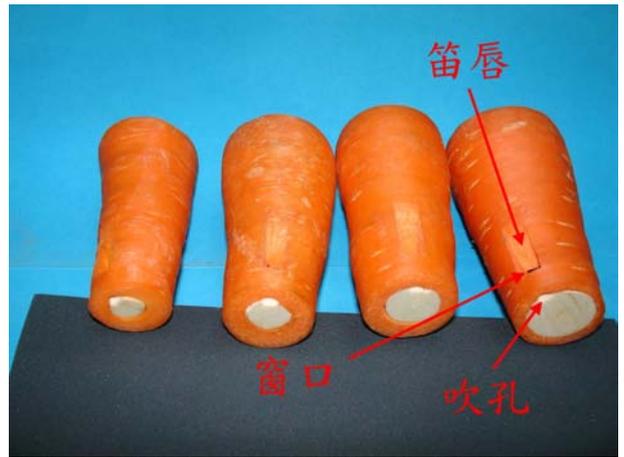


圖10：定義

五、音高、響度、音色的測量：

(一) **氣流的產生**：除用口吹之外，也利用學校製陶噴釉的空壓機，以噴槍噴出氣流，並用小型風速計測量風速。



圖11：空壓機



圖12：小型風速計

(二) **音高的測量**：本來用調音器測量音高頻率，但所能測量的音域較窄，所以後來用筆記型電腦（內建麥克風），以cool edit軟體分析頻率，並用鐵琴測試，證明誤差極小。



圖13：筆記型電腦及 cool edit 軟體

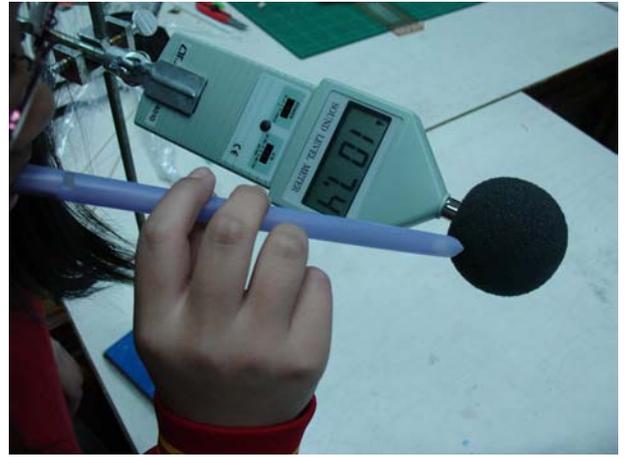


圖14：分貝計測響度

- (三) **響度的測量**：測量聲音大小使用分貝計，讓樂器靠近分貝計，記錄所能吹出的最大響度。
- (四) **音色分析**：以cool edit 軟體所顯示的波形來分析音色。

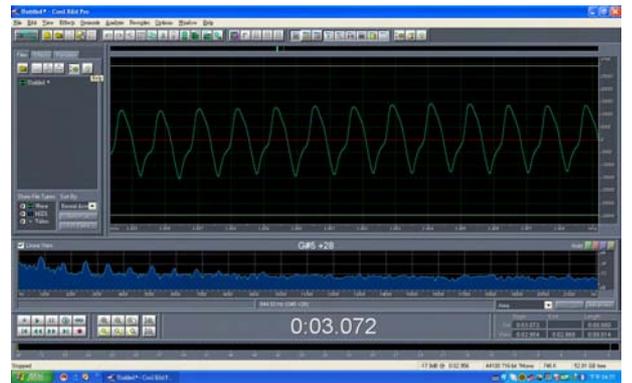


圖15：cool edit 軟體

六、研究架構：

設計實驗分析笛子的響度、音高、音色。

表1：實驗項目

| 聲音的三要素 | 研究內容 |
|--------|--|
| 響度 | <p>實驗2：吸管笛笛塞的角度影響研究</p> <p>實驗3：吸管笛吹孔的大小影響研究</p> |
| 音高 | <p>實驗1：影響管子共鳴的因素研究</p> <p>實驗4：吸管笛窗口形狀影響研究</p> <p>實驗5：胡蘿蔔笛笛唇角度影響研究</p> <p>實驗6：笛子長度的影響研究</p> <p>實驗7：窗口位置的影響研究</p> <p>實驗8：笛子管徑的影響研究</p> <p>實驗9：笛子管壁厚度的影響研究</p> <p>實驗10：開管與閉管的比較研究</p> <p>實驗11：笛子按孔大小、位置的影響研究</p> <p>實驗14：吸管笛的製作</p> <p>實驗15：不同管徑笛子按孔位置分析</p> <p>實驗16：自製直笛按孔位置研究</p> |
| 音色 | <p>實驗12：笛子的音色研究</p> <p>實驗13：笛膜的影響研究</p> |

陸、研究結果

一、實驗 1：影響管子共鳴的因素研究

- (一) 試管（長：15cm、管徑：16mm）用夾子夾緊，固定在鐵架上（圖 16）。
- (二) 用噴槍吹出氣流，氣流與試管平面夾角 45 度，分別以不同風速吹試管口邊緣，記錄試管發生共鳴時的風速。
- (三) 分別讓氣流與試管平面夾角 35 度、30 度、20 度、10 度、0 度，重複步驟（二）。



圖 16：試管



圖 17：試管吹氣

結果：

表 2：長 15cm、管徑 16mm 的試管共鳴實驗

| 夾角（度） | 讓試管共鳴的最小風速（公尺/秒） |
|-------|------------------|
| 45 | 沒有共鳴 |
| 35 | 9.0 |
| 30 | 8.0 |
| 20 | 5.5 |
| 10 | 4.0 |
| 0 | 沒有共鳴 |

基音頻率（音名（Hz））：D5-47（571.38）~D5-41（573.51）

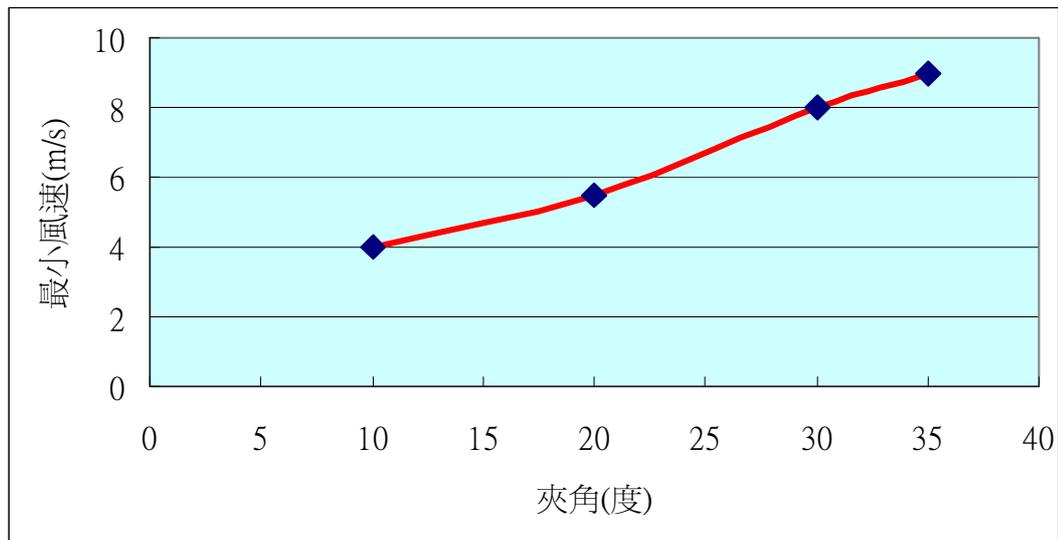


圖 18：讓試管共鳴的最小風速

發現：

1. 試管是否達到共鳴，與氣流的速度及氣流與管口的夾角有關。
2. 夾角越小，也就是氣流方向與管壁越接近垂直，越能以較小風速達到共鳴頻率。
3. 夾角為0，也就是氣流與管壁垂直時，不能共鳴，因氣流沒有進入管內產生邊稜效應。

二、實驗 2：吸管笛笛塞的角度影響研究

- (一) 圓柱形巴沙木切三段，先用砂紙磨平上部少許，再磨出不同斜角（圖 19）。
- (二) 分別將三種不同笛塞置入同一吸管笛中吹，用分貝計測量所能吹出的最大響度。

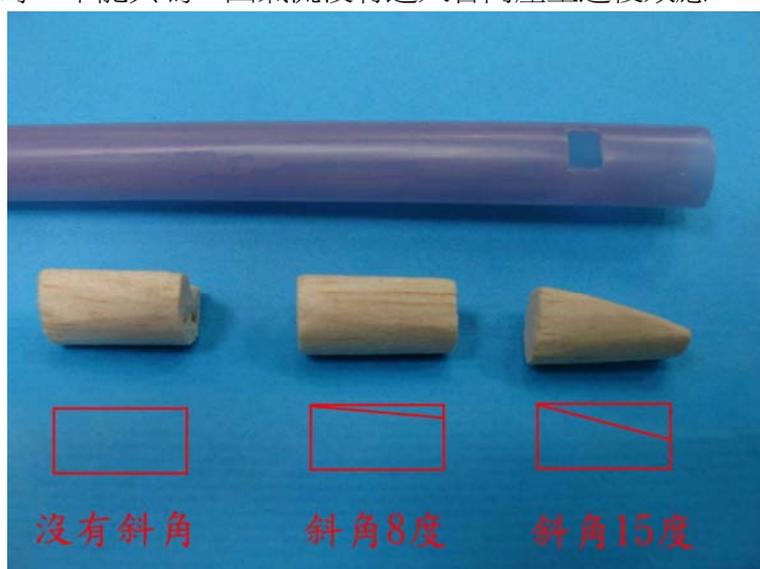


圖 19：不同斜角笛塞

結果：

表 3：不同笛塞的響度

| 不同笛塞 | 第一次吹最大響度 (分貝) | 第二次吹最大響度 (分貝) | 第三次吹最大響度 (分貝) | 第四次吹最大響度 (分貝) | 第五次吹最大響度 (分貝) | 平均最大響度 (分貝) |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| 沒有斜角 | 沒有共鳴 | 沒有共鳴 | 沒有共鳴 | 沒有共鳴 | 沒有共鳴 | non |
| 斜角 8 度 | 104.6 | 104.9 | 103.7 | 101.9 | 103.5 | 103.72 |
| 斜角 15 度 | 113.1 | 115.0 | 111.4 | 114.0 | 112.8 | 113.26 |

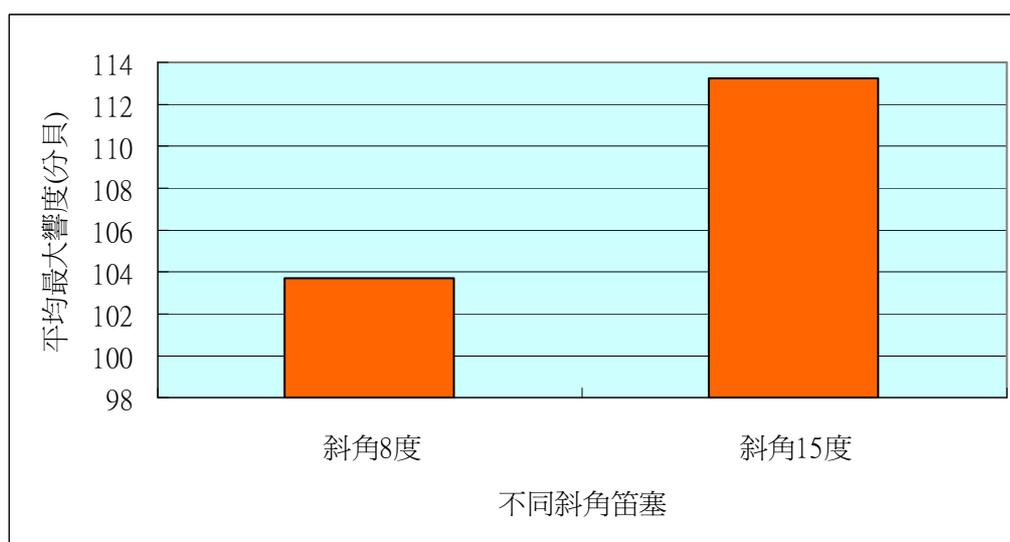


圖 20：不同笛塞響度

發現：

1. 沒有斜角的笛塞，無法使氣流衝擊吸管笛窗口邊緣，因此沒有共鳴。
2. 斜角不同，使氣流角度、風速、進氣量不同，吸管笛的響度也就不同。

三、實驗 3：吸管笛吹孔的大小影響研究

- (一) 分別將 7mm、9mm、12mm 不同管徑吸管，皆切成 14cm 長。
- (二) 在吸管刻出窗口。
- (三) 用巴沙木做笛塞，調整笛塞的角度，使吸管笛能吹出最大的響度。
- (四) 測吸管笛每次所能吹出的最大響度 5 次。



圖 21：不同管徑的吸管笛

結果：

表 4：不同管徑吸管的響度

| 不同管徑 吸管(mm) | 第一次吹 最大響度 (分貝) | 第二次吹 最大響度 (分貝) | 第三次吹 最大響度 (分貝) | 第四次吹 最大響度 (分貝) | 第五次吹 最大響度 (分貝) | 平均最大 響度 (分貝) |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| 小吸管 (7) | 103.7 | 100.8 | 102.5 | 101.3 | 100.6 | 101.78 |
| 中吸管 (9) | 106.4 | 109.5 | 109.3 | 105.0 | 107.6 | 107.56 |
| 大吸管 (12) | 115.7 | 117.1 | 118.2 | 117.6 | 116.6 | 117.04 |

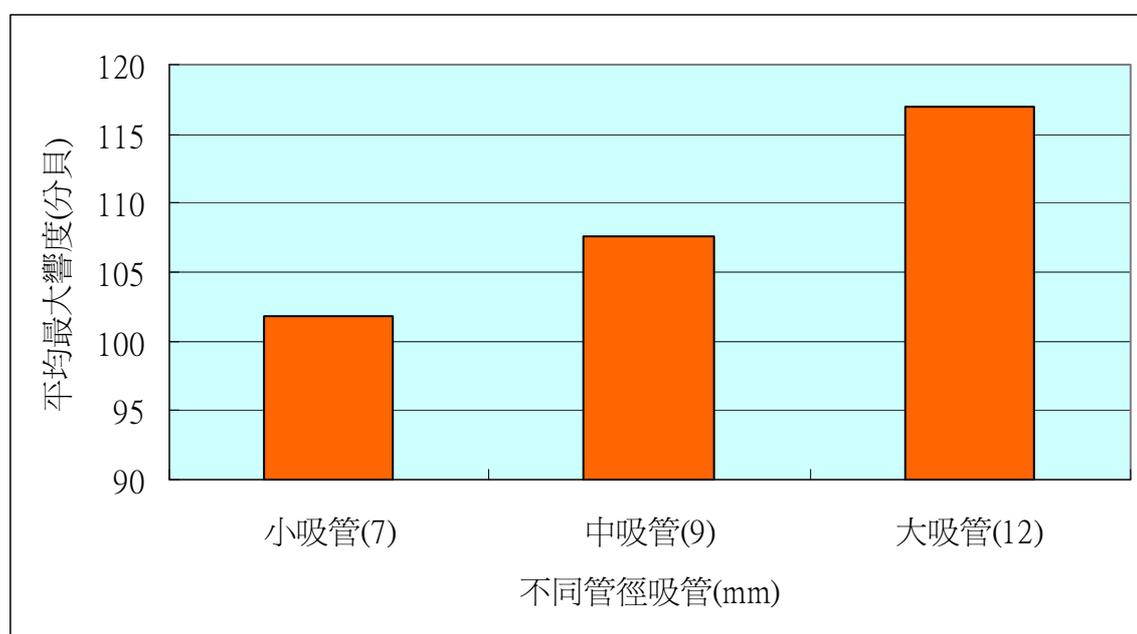


圖 22：不同管徑吸管的響度

發現：

1. 管徑越大，可吹出的響度越大。
2. 管徑越大的笛子，進入笛子中的氣流量越大，響度也越大。

四、實驗 4：吸管笛窗口形狀影響研究

- (一) 同長度 (19cm)、管徑 (12mm) 吸管做吸管笛，用汽水鋁罐剪成同面積 (0.4x0.6 平方公分) 不同形狀小鋁片 (圖 23)，再將小鋁片貼在吸管壁上，用烙鐵加熱，烙出不同形狀的窗口 (圓形由烙鐵直接烙洞)。
- (二) 製作笛塞，使吸管笛能吹出泛音。
- (三) 以吸管笛可吹出幾個泛音，判斷窗口的優劣。
- (四) 再製作另外一組同面積 (0.3x0.8 平方公分) 不同長寬比小鋁片，重複步驟 (一)、(二)、(三)。



圖 23：不同形狀鋁片

結果：

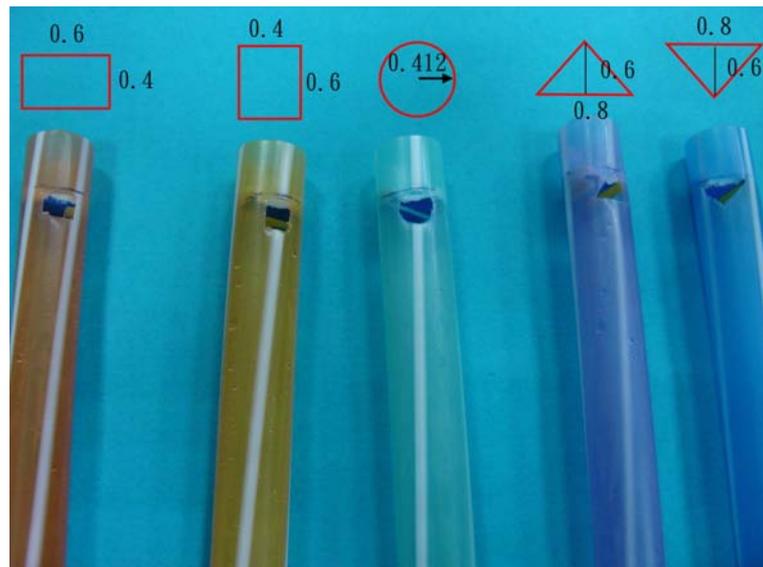


圖 24：不同形狀窗口

表 5：不同形狀窗口的影響

| 窗口形狀 | 可吹出幾個泛音 | 備註 |
|--------------------------------|---------|------------|
| 長方形一 (0.6x0.4cm ²) | 3 | |
| 長方形二 (0.4x0.6cm ²) | 2 | |
| 圓形 | 2 | |
| 三角形 | 2 | 基音吹不出，響度小。 |
| 倒三角形 | 0 | 沒有共鳴 |

發現：

1. 窗口製作的優劣，可由吹出幾個泛音來判斷，最好的窗口形狀是像長方形一。
2. 窗口邊緣以平直的效果最好。
3. 窗口製作的好，吸管笛可吹出 3 個泛音。

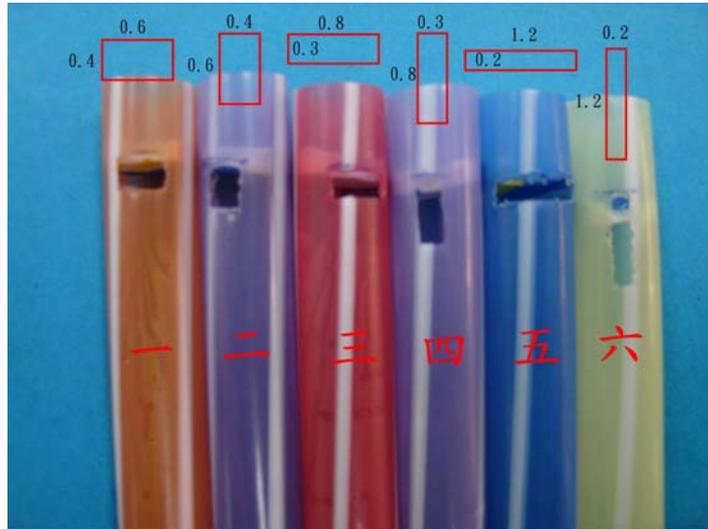


圖 25：不同形狀長方形窗口

表 6：不同長方形窗口的影響

| 窗口形狀 | 可吹出幾個泛音 | 備註 |
|--------------------------------|---------|------|
| 長方形一 (0.6x0.4cm ²) | 3 | |
| 長方形二 (0.4x0.6cm ²) | 2 | |
| 長方形三 (0.8x0.3cm ²) | 3 | |
| 長方形四 (0.3x0.8cm ²) | 2 | |
| 長方形五 (1.2x0.2cm ²) | 0 | 沒有共鳴 |
| 長方形六 (0.2x1.2cm ²) | 0 | 沒有共鳴 |

發現：

1. 長方形一、長方形三的效果較好；但太扁的長方形，例如長方形五，沒有共鳴，因太多氣流由窗口流出，導致無法共鳴。
2. 太狹長的窗口不利氣流摩擦邊緣，例如長方形六。

五、實驗 5：胡蘿蔔笛笛唇角度影響研究

- (一) 將胡蘿蔔笛的笛唇角度控制在 60 度，用噴槍噴出氣流，測量達到共鳴的最低風速。
- (二) 同一胡蘿蔔笛，笛唇角度削到 45 度，噴氣流並測量達到共鳴的最低風速。
- (三) 同一胡蘿蔔笛，笛唇角度削到 20 度，噴氣流並測量達到共鳴的最低風速。



圖 26：笛唇



圖 27：笛唇角度



圖 28：胡蘿蔔吹氣



圖 29：測風速

結果：

表 7：不同笛唇角度的影響

| 笛唇角度 | 基音頻率範圍 | 基音頻率平均值 | 達到基音頻率的最小風速 (公尺/秒) |
|------|------------------------------------|-----------|--------------------|
| 60 度 | A#5-9(927.41Hz)~A#5+2(933.53 Hz) | 930.47 Hz | 3.0 |
| 45 度 | A#5+9(937.26Hz)~B#5-49(960.1 Hz) | 948.68 Hz | 3.6 |
| 20 度 | A#5+15(940.74Hz)~B#5-38(965.88 Hz) | 953.31 Hz | 4.7 |

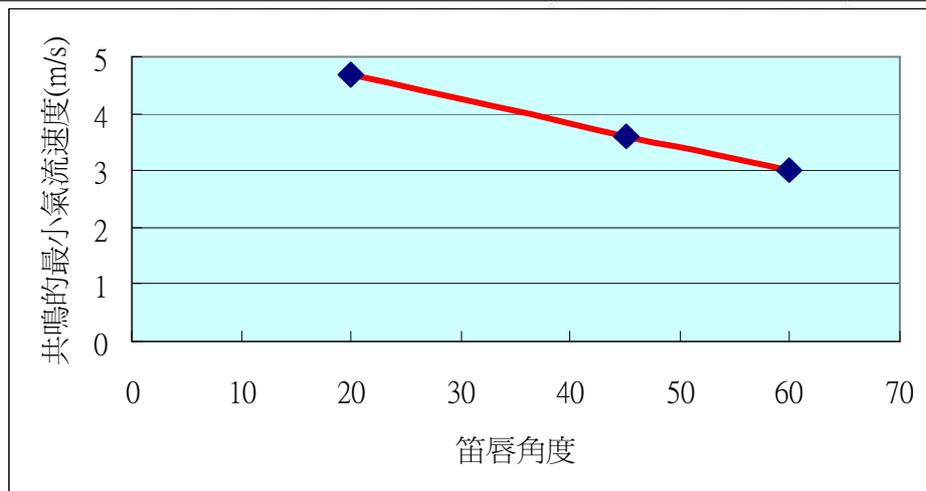


圖 30：不同笛唇角度的影響

發現：

1. 笛唇角度減少對基音頻率的改變很小。基音頻率不是固定值，而是有一範圍。
2. 笛唇角度越大，越能以較小的風速達到基音頻率。
3. 胡蘿蔔笛皆無法吹出泛音。

六、實驗 6：笛子長度的影響研究

- (一) 吸管笛長 20cm、管徑 12mm，以 cool edit 軟體測試所能吹出的基音、泛音頻率。
- (二) 同一吸管笛每次測試皆剪短 1cm，重複步驟 (一) 至吸管笛長度 10cm。

結果：

表 8：笛子長度對音高頻率的影響實驗值（溫度 19°C）

| 笛子全長 (cm) | 基音頻率 | | 第一泛音頻率 (Hz) | | 第二泛音頻率 (Hz) | | 第三泛音頻(Hz) | | 比例 f1 : f2 : f3 : f4 |
|-----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|-------------|----------|-------------------------|
| | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | |
| 20 | G#5+16-G#5+33 | 842.68 | G#6+32-G#6+47 | 1699.80 | D#7+23-E#7-29 | 2558.15 | A7-46-A7-41 | 3432.25 | 1:2.02:3.04:4.07 |
| 19 | A5-21-A5 | 874.71 | A6-44-A6-10 | 1732.55 | E7-24-E7+32 | 2643.65 | A7+19-A7+21 | 3562.30 | 1:1.98:3.04:4.07 |
| 18 | A#5-34-A#5-24 | 916.52 | A#6-44-A#6-4 | 1838.55 | F7-37-F7-19 | 2748.65 | 吹不出 | non | 1:2.01:3.00 |
| 17 | B5-48-B5-32 | 964.93 | B6-49-B6-25 | 1933.20 | F#7-49-F#7-14 | 2905.70 | 吹不出 | non | 1:2.00:3.01 |
| 16 | B5+39-B5+49 | 1013.50 | B6+28-C7-27 | 2034.10 | F#7+48-G7-48 | 3046.60 | 吹不出 | non | 1:2.01:3.01 |
| 15 | C#6-35-C#6-2 | 1096.80 | C#7-45-C#7+24 | 2204.95 | G#7-10-G#7+3 | 3315.70 | 吹不出 | non | 1:2.01:3.02 |
| 14 | D6-41-D6+10 | 1164.50 | D7-39-D7+4 | 2325.40 | A7-14-A7+1 | 3507.05 | 吹不出 | non | 1:2.00:3.01 |
| 13 | D#6-21-D#6+30 | 1248.05 | D#7-6-D#7=29 | 2530.10 | 吹不出 | non | 吹不出 | non | 1:2.03 |
| 12 | E6+7-F6-11 | 1356.05 | E7+33-F7-29 | 2717.25 | 吹不出 | non | 吹不出 | non | 1:2.00 |
| 11 | F6-F6+45 | 1415.25 | F#7-25-F#7-12 | 2927.45 | 吹不出 | non | 吹不出 | non | 1:2.07 |
| 10 | G6-3-G6+38 | 1583.95 | G7-10-G7+33 | 3156.90 | 吹不出 | non | 吹不出 | non | 1:1.99 |

表9：以公式 $f_n = \frac{nV}{2L}$ ， $n=1、2、3、\dots$ ， V 為聲速； L 為管長， $V=331+0.6T$ ， T 是溫度 (°C) 計算的理論值（溫度 19°C）

| 笛子長度 (cm) | 基音頻率 (Hz) | 第一泛音頻 (Hz) | 第二泛音頻 (Hz) | 第三泛音頻 (Hz) |
|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| 20 | 856.00 | 1712.00 | 2568.00 | 3424.00 |
| 19 | 901.05 | 1802.11 | 2703.16 | 3604.21 |
| 18 | 951.11 | 1902.22 | 2853.33 | 3804.44 |
| 17 | 1007.06 | 2014.12 | 3021.18 | 4028.24 |
| 16 | 1070.00 | 2140.00 | 3210.00 | 4280.00 |
| 15 | 1141.33 | 2282.67 | 3424.00 | 4565.33 |
| 14 | 1222.86 | 2445.71 | 3668.57 | 4891.43 |
| 13 | 1316.92 | 2633.85 | 3950.77 | 5267.69 |
| 12 | 1426.67 | 2853.33 | 4280.00 | 5706.67 |
| 11 | 1556.36 | 3112.73 | 4669.09 | 6225.45 |
| 10 | 1712.00 | 3424.00 | 5136.00 | 6848.00 |

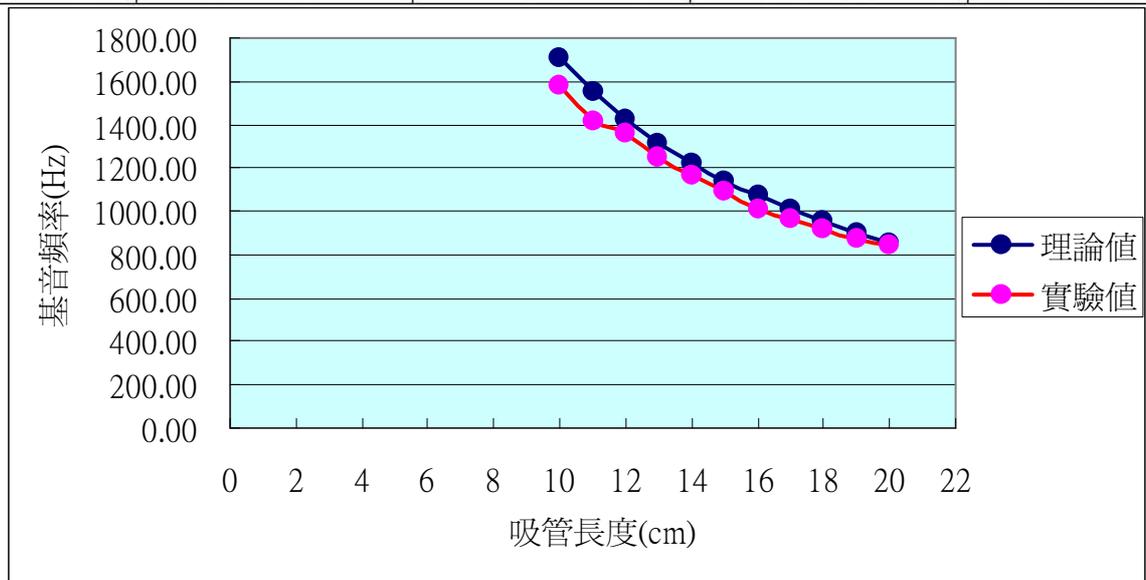


圖 31：隨長度變化的基音頻率

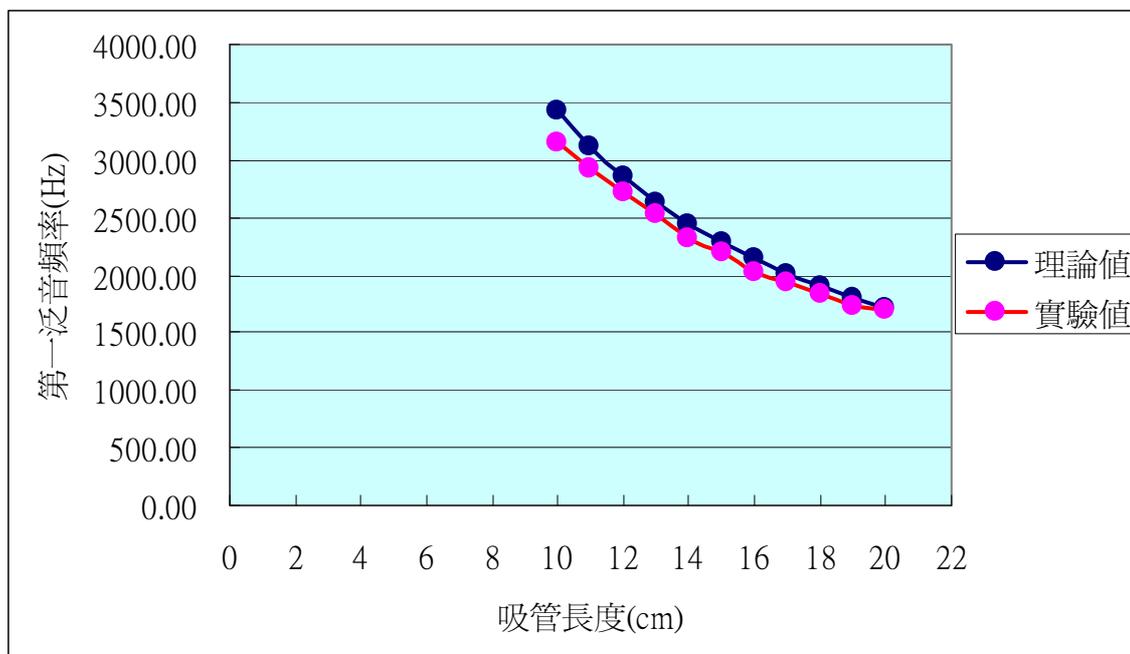


圖 32：隨長度變化的第一泛音頻率

發現：

1. 吸管笛的平均音高頻率與理論值接近，只略小一點。長度越接近 20cm 時越接近理論值，長度越短越偏離理論值。
2. 隨著吹的力道增加，產生泛音，其頻率呈倍數成長，比例接近 1 : 2 : 3 : 4。
3. 音高隨著長度增加而降低，成**反比**。

七、實驗 7：窗口位置的影響研究

- (一) 5 支吸管笛全長 19cm，全長不變，改變窗口位置 (圖 33)，測試吹出的基音、泛音頻率。
- (二) 再用另一吸管笛 (圖 34)，窗口下緣距吹孔 1.5cm，全長 18.5cm (窗口邊緣至底孔長度 17cm，與步驟(一)的第 1 支吸管相同)，測試吹出的基音、泛音頻率，然後每次剪 1cm，分 4 次調整吸管長度，全長雖與步驟(一)的吸管不同，但每次窗口邊緣至底孔長度分別與步驟(一)的另外 4 支吸管相同。每剪一次測試吹出的基音、泛音頻率。
- (三) 比較(一)、(二)的音高。



圖 33：改變窗口位置

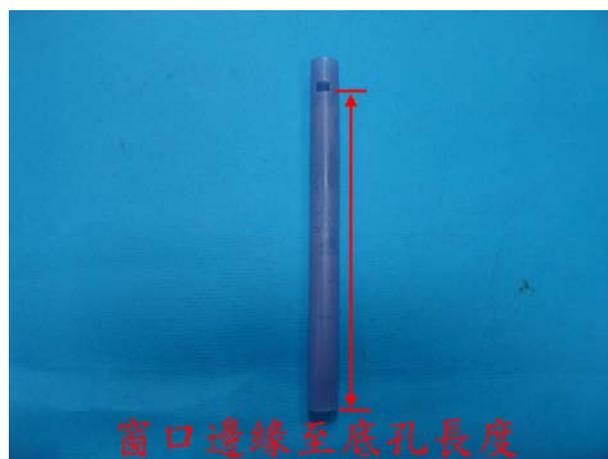


圖 34：窗口邊緣至底孔長度定義

結果：

表 10：全長相同、窗口位置不同的笛子基音、泛音頻率

| 窗口位置 (cm) | 基音頻率 | | 第一泛音頻率 (Hz) | | 第二泛音頻率 (Hz) | | 比例 1:2:3 |
|-----------|---------------|----------|---------------|----------|--------------|----------|-------------|
| | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | |
| 2 | A5-22~A5+22 | 880.10 | A6-19~A6+49 | 1775.65 | E7+23~E7+32 | 2661.40 | 1:2.02:3.02 |
| 3 | A#5-19~A#5+46 | 939.83 | A#6-2~A#6+20 | 1874.40 | F7+21~F7+46 | 2849.25 | 1:1.99:3.03 |
| 4 | B5-29~B5+25 | 986.89 | B6-49~B6-10 | 1941.85 | F#7-32~F#7+1 | 2933.55 | 1:1.97:2.97 |
| 5 | C6+8~C6+38 | 1060.95 | C7-9~C7+26 | 2102.95 | G7+41~G#7-21 | 3246.70 | 1:1.98:3.06 |
| 6 | C#6-14~C#6+32 | 1114.45 | C#7+34~C#7+43 | 2267.60 | G#7+35~A7-42 | 3413.10 | 1:2.03:3.06 |

表 11：單一吸管笛，每次修剪 1cm 的基音、泛音頻率

| 窗口邊緣至底孔長度 (cm) | 基音頻率 | | 第一泛音頻率 (Hz) | | 第二泛音頻率 (Hz) | | 比例 1:2:3 |
|----------------|---------------|----------|---------------|----------|--------------|----------|-------------|
| | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | |
| 17 | A5-4~A5+12 | 882.08 | A6-15~A6+21 | 1762.95 | E7+8~E7+26 | 2663.65 | 1:2.0:3.02 |
| 16 | A#5-17~A#5+4 | 929.00 | A#6-35~A#6-25 | 1832.50 | F7-17~F7+9 | 2788.00 | 1:1.97:3.0 |
| 15 | B5-30~B5+22 | 985.55 | B6-47~B6-17 | 1938.95 | F#7-26~F#7+1 | 2938.50 | 1:1.97:2.98 |
| 14 | C6-48~C6+23 | 1040.65 | C7-36~C7+30 | 2089.60 | G7+8~G7+34 | 3174.75 | 1:2.0:3.05 |
| 13 | C#6-13~C#6+40 | 1117.45 | C#7~C#7+25 | 2233.85 | G#7+29~A7-32 | 3417.20 | 1:2.0:3.06 |

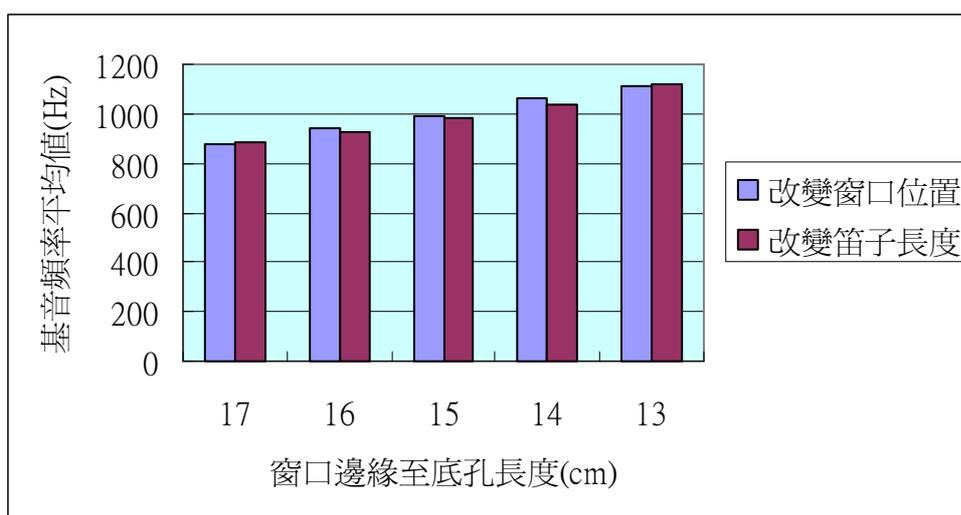


圖 35：全長不同，窗口邊緣至底孔長度相同的笛子，基音頻率比較

發現：

1. 笛子全長相同，**窗口位置**改變，音高隨著改變。
2. 笛子的長度不同，但窗口邊緣至底孔長度一樣，所吹出的基音、泛音頻率相同。
3. 真正影響笛子音高的是**窗口邊緣至底孔長度**，而不是笛子全長。

八、實驗 8：笛子管徑的影響研究

- (一) 4 支胡蘿蔔笛保持長度 (10.8cm)、笛唇角度 (30 度) 相同，而管徑不同，分別為 D1=14mm、D2=18mm、D3=22mm、D4=28mm。
- (二) 用 cool edit 測量吹出的基音頻率。

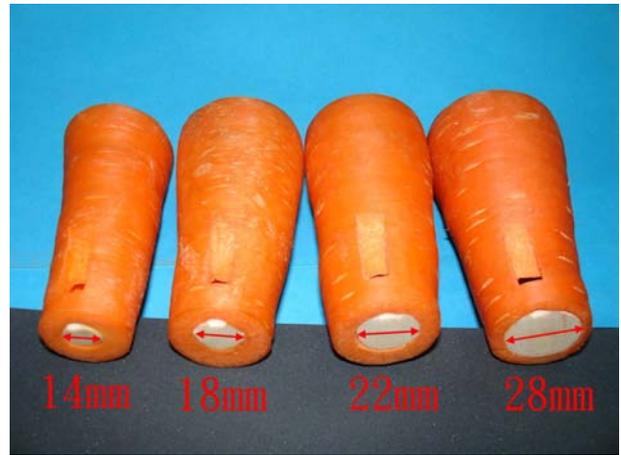


圖 36：不同管徑

結果：

表 12：不同管徑胡蘿蔔笛的基音頻率

| 管徑 (mm) | 基音頻率範圍 (Hz) | 基音頻率平均值 (Hz) |
|---------|-----------------------------------|--------------|
| 14 | F6-45 (1360.7) ~ F6-35 (1368.9) | 1364.80 |
| 18 | D6+15(1185.4)~D6+33(1197.8) | 1191.60 |
| 22 | C#6-36 (1085.3) ~ C#6-22 (1094.6) | 1089.95 |
| 28 | B5-13 (979.87) ~ B5+18 (998.52) | 989.195 |

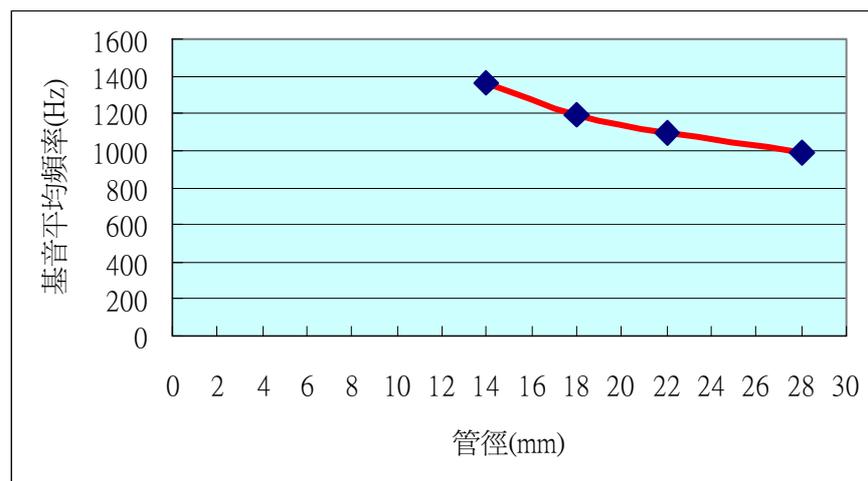


圖 37：不同管徑胡蘿蔔笛的基音頻率

發現：

音高隨著管徑增加而降低，成**反比**。

九、實驗 9：笛子管壁厚度的影響研究

- (一) 胡蘿蔔笛長 10.9cm、管徑 28mm、笛唇角度 45 度，皆保持固定，改變管壁厚度。
- (二) 用 cool edit 測量所能吹出的基音頻率。



圖 38：管壁厚度

表 13：不同管壁厚度的胡蘿蔔笛的基音頻率

| 管壁厚度 (mm) | 基音頻率範圍 (Hz) | 基音頻率平均值 (Hz) |
|-----------|--------------------------------|--------------|
| 18 | B5-29 (971.06) ~B5-9 (982.34) | 976.70 |
| 13 | B5-14(979.31)~B5+30(1005.2) | 992.26 |
| 10 | B5-8 (983.15) ~B5+26 (1003.1) | 993.13 |
| 5 | B5-7 (983.51) ~B5+32 (1006.5) | 995.00 |
| 4 | B5+27 (1003.8) ~B5+40 (1011.4) | 1007.60 |
| 3 | B5+19 (998.83) ~B5+41 (1011.8) | 1005.32 |

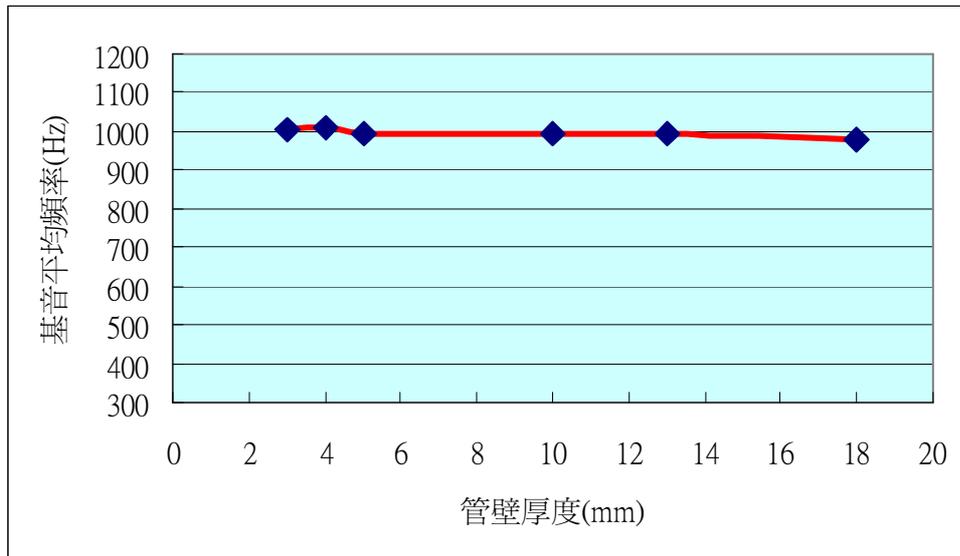


圖 39：不同管壁厚度的胡蘿蔔笛的基音頻率

發現：

管壁厚度對音高的影響極小。

十、實驗 10：開管與閉管的比較研究

- (一) 長 19cm、管徑 12mm 的吸管笛，以手掌塞住底孔吹出不同的泛音。
- (二) 用 cool edit 軟體測量吹出的音高頻率。

結果：

表 14：吸管笛的閉管音高頻率

| 基音頻率 | | 第一泛音頻率 | | 第二泛音頻率 | | 第三泛音頻率 | | 比例 f2 : f3 : f4 |
|------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------|
| 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | |
| 吹不出 | non | F6+41~ F#6-36 | 1440.15 | D7+27~ D#7-41 | 2408.35 | G#7+25~ G#7+41 | 3390.40 | 3:5:7:06 |

發現：

- 1. 基音吹不出，推測是吸管笛無法發出這麼低的頻率（約 460 Hz）。
- 2. 泛音頻率比例接近 3 : 5 : 7。

十一、實驗 11：笛子按孔大小、相對位置的影響研究

- (一) 吸管笛長度 19cm，在距離吹口 10cm 處烙一 2mm 直徑的孔。
- (二) 用 cool edit 軟體測量有烙孔的吸管笛所能吹出的音高頻率。
- (三) 再將孔擴大為 4mm、6mm，重複步驟(二)。
- (四) 繼續在吸管笛的 12cm 處烙第二個 6mm 直徑的孔，重複步驟(二)。
- (五) 繼續在吸管笛的 14cm 處烙第三個 6mm 直徑的孔，重複步驟(二)。



圖 40：按孔

結果：

表 15：烙孔後的吸管笛音高頻率

| 按孔直徑 (mm) | 基音頻率 | | 第一泛音頻率 | | 第二泛音頻率 | | 比例 f1 : f2 : f3 | 備註 |
|-----------|-------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|--------------------|--------------|
| | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | 範圍 (音名) | 平均值 (Hz) | | |
| 2 | 吹不出 | non | A#6-37~A#6-5 | 1841.85 | F7+13~F7+41 | 2838.65 | 2 : 3.08 | 基音吹不出 (只有一孔) |
| 4 | E6-16~E6+3 | 1313.30 | A#6-30~A#6+14 | 1856.45 | F#7-26~F#7+11 | 2946.85 | 1 : 1.41 : 2.24 | 基音不好吹 (只有一孔) |
| 6 | F6-6~F6+9 | 1398.20 | A#6-33~A#6+18 | 1856.90 | F#7+19~F#4+48 | 3018.65 | 1 : 1.33 : 2.16 | 基音不好吹 (只有一孔) |
| 6 | G6-2~G6+42 | 1586.30 | G7-5~G7+22 | 3151.45 | 吹不出 | non | 1 : 1.99 | 有兩孔 |
| 6 | G6+12~G#6-2 | 1618.90 | G7-38~G7-9 | 3092.75 | 吹不出 | non | 1:1.91 | 有三孔 |

發現：

1. 按孔太小基音吹不出，如 2mm 的情形，按孔越大音高有增加的趨勢，推測是管長也縮短了。
2. 單一按孔較不好吹，烙出第二、三孔後較好吹，音高頻率也與吸管笛長度 10cm 時的頻率(表 8 資料：基音 1583.95Hz；第一泛音：3156.90Hz) 接近。

十二、實驗 12：笛子的音色研究

- (一) 利用 cool edit 軟體分析胡蘿蔔笛、吸管笛、高音直笛的聲音波形。
- (二) 鐵管(長 19.8cm、管徑 1.75cm)用噴槍噴出氣流，讓鐵管產生共鳴，並利用 cool edit 軟體分析聲音波形。



圖 41：鐵管吹氣

結果：

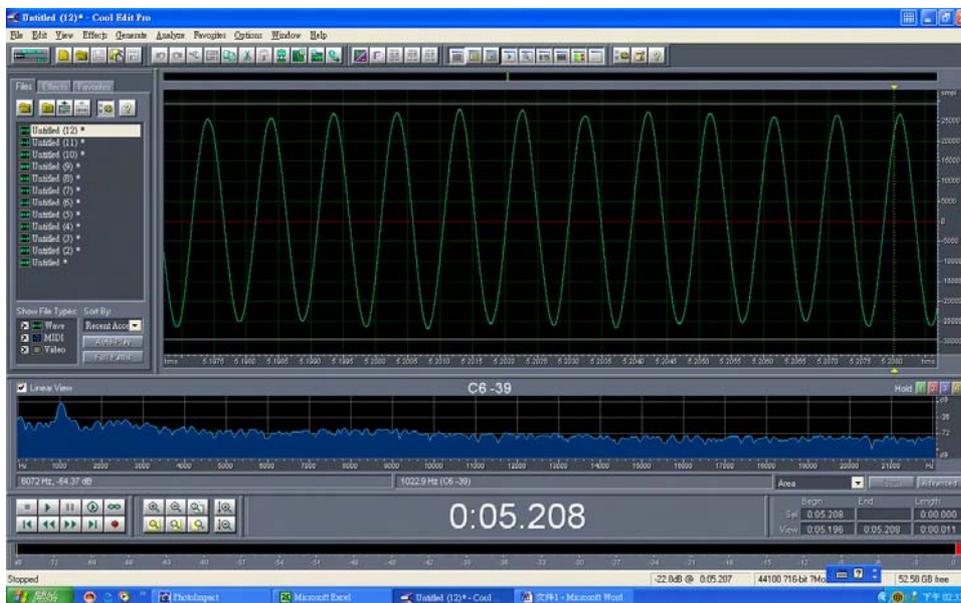


圖 42：胡蘿蔔笛聲音波形

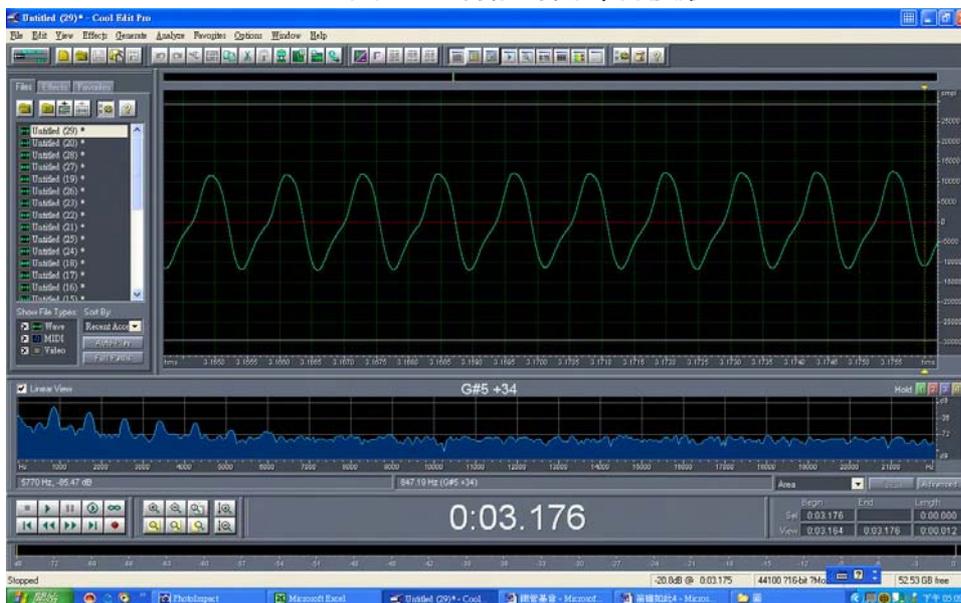


圖 43：吸管笛聲音波形

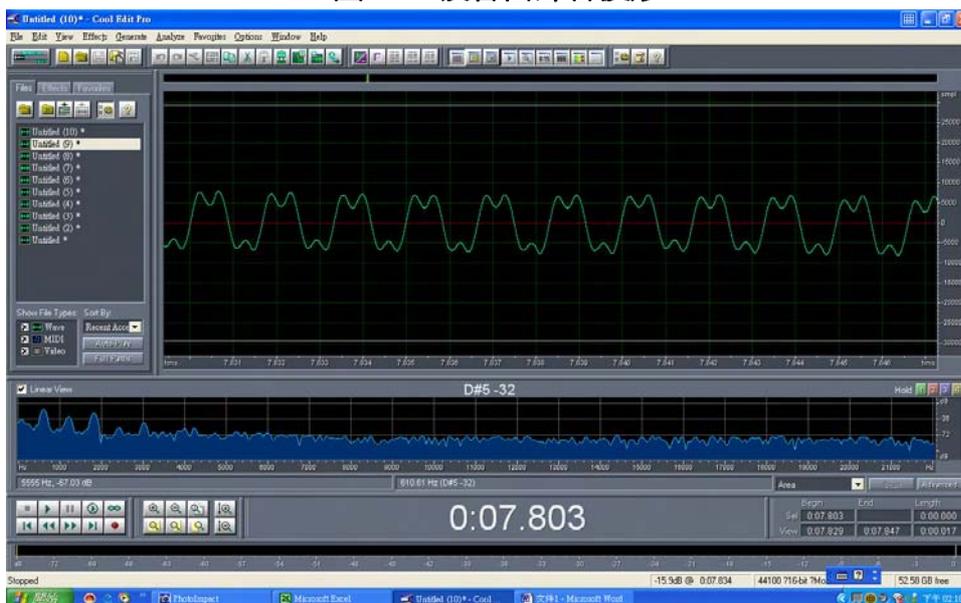


圖 44：高音直笛低音域

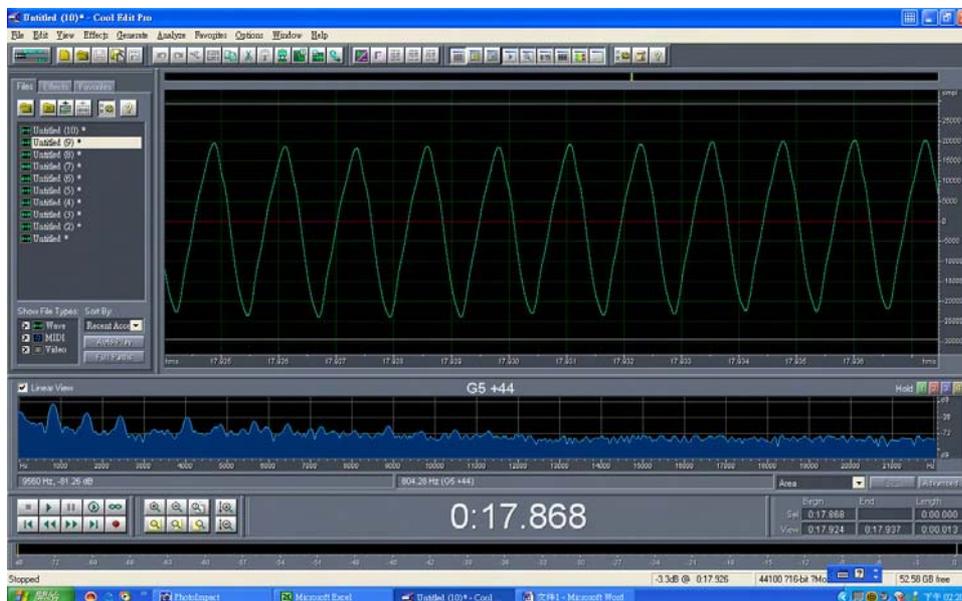


圖 45：高音直笛中音域

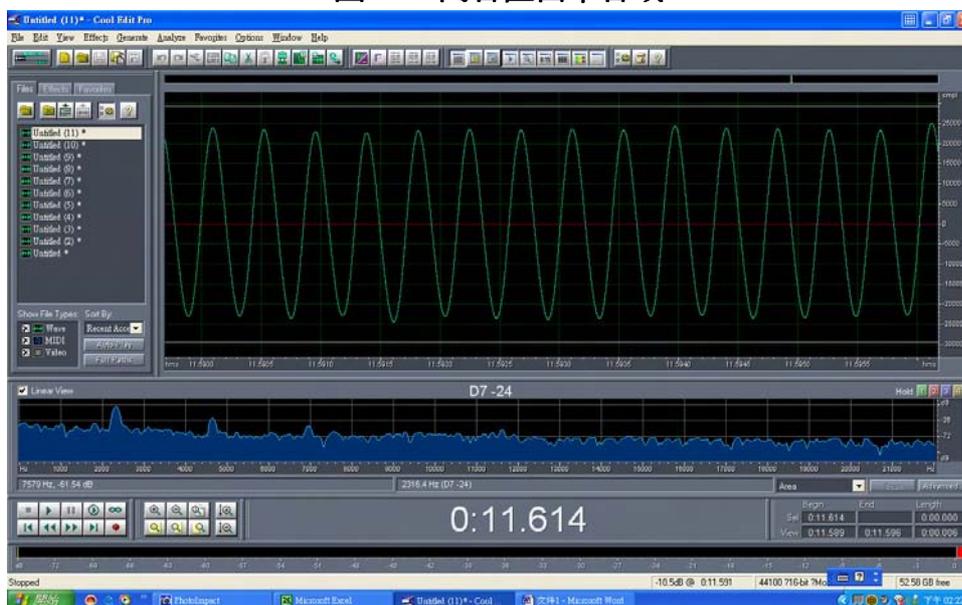


圖 46：高音直笛高音域

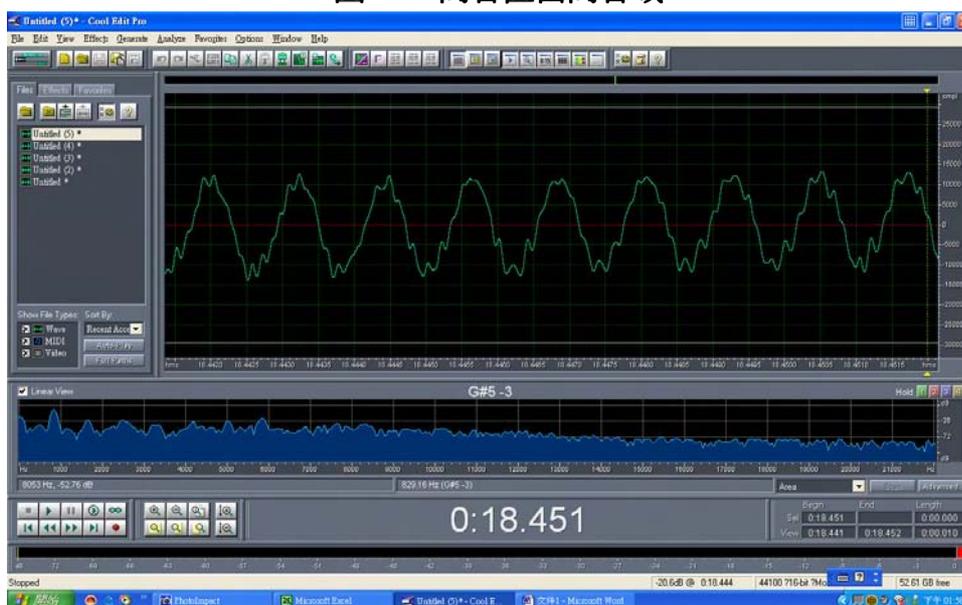


圖 47：鐵管基音共鳴波形

發現：

1. 胡蘿蔔笛、吸管笛的波形都較圓滑少變化，推測胡蘿蔔笛、吸管笛的聲音只有空氣柱的振動，而無管壁的振動；高音直笛在低音域會產生管壁的共振，中音域和高音域無。
2. 鐵管的波形出現鐵管壁的共振，聲音除了有空氣柱共鳴外，還加上鐵管壁的共鳴，增加了音色的豐富性。

十三、實驗 13：笛膜的影響研究

- (一) 橫笛的膜孔用白茅或阿膠沾水貼上笛膜來吹，用 cool edit 軟體分析聲音波形。
- (二) 將橫笛的膜孔用拇指按住來吹，分析其聲音波形。
- (三) 吸管笛挖出一膜孔，貼上笛膜（圖 50），分析其聲音波形。
- (四) 吸管笛膜孔貼膠帶（圖 51），分析其聲音波形。
- (五) 比較膜孔位置不同（圖 52）的差別。
- (六) 比較膜孔大小不同（圖 53）的差別。

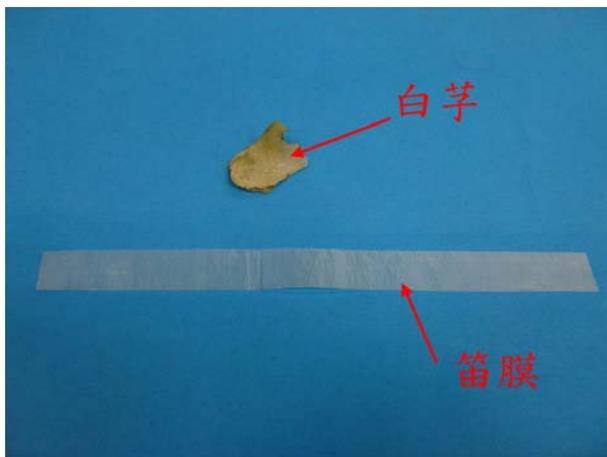


圖 48：笛膜



圖 49：橫笛



圖 50：吸管笛加笛膜



圖 51：吸管笛膜孔貼膠帶



圖 52：膜孔位於笛子前端與中間的比較
(膜孔大小 4x7mm)



圖 53：膜孔大小不同的比較
(膜孔大小，大：5x10mm、小：4x7mm)

結果：

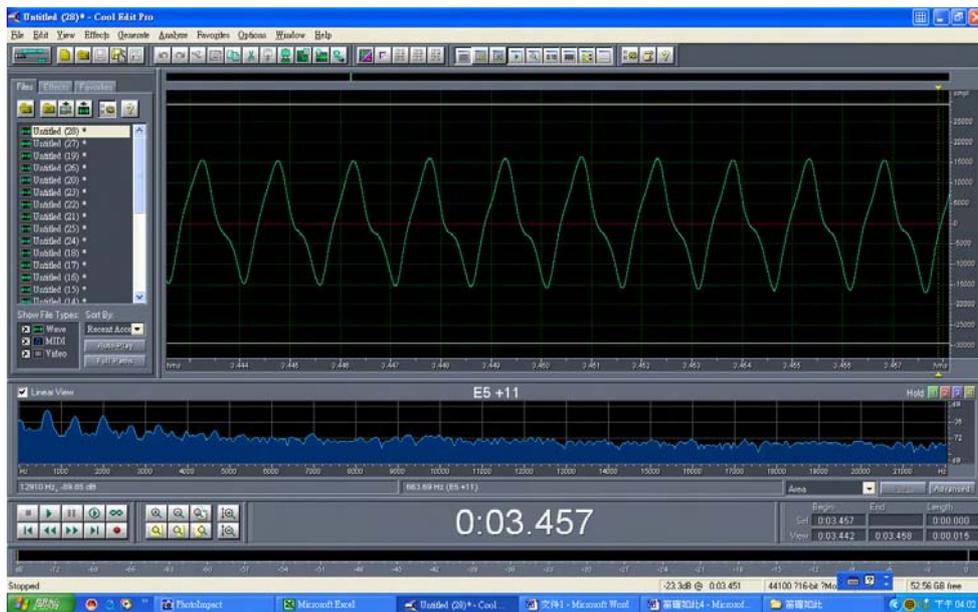


圖 54：橫笛（按 4 孔）膜孔用拇指按住時的波形（E5）

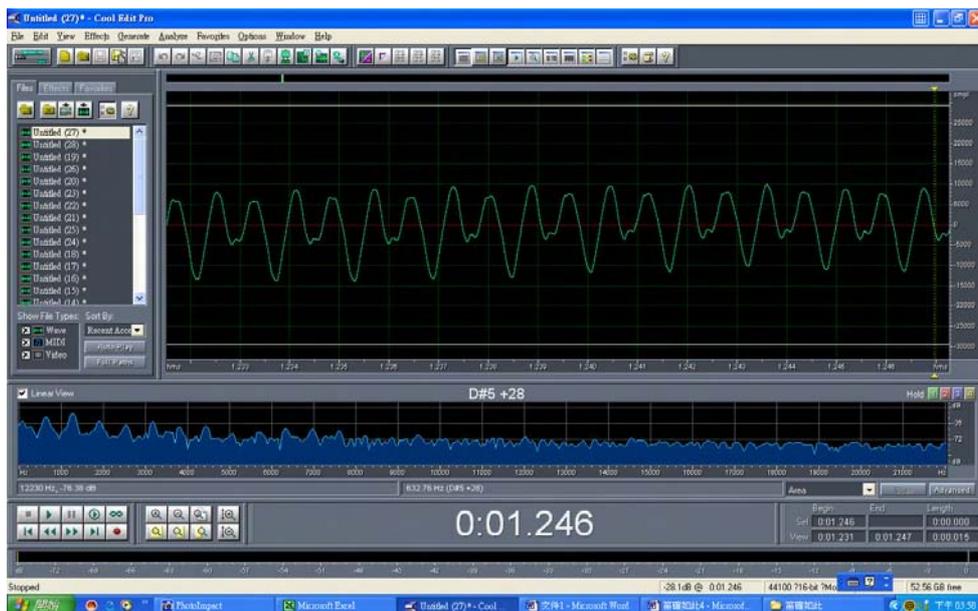


圖 55：橫笛（按 4 孔）有加笛膜時的波形（D#5）

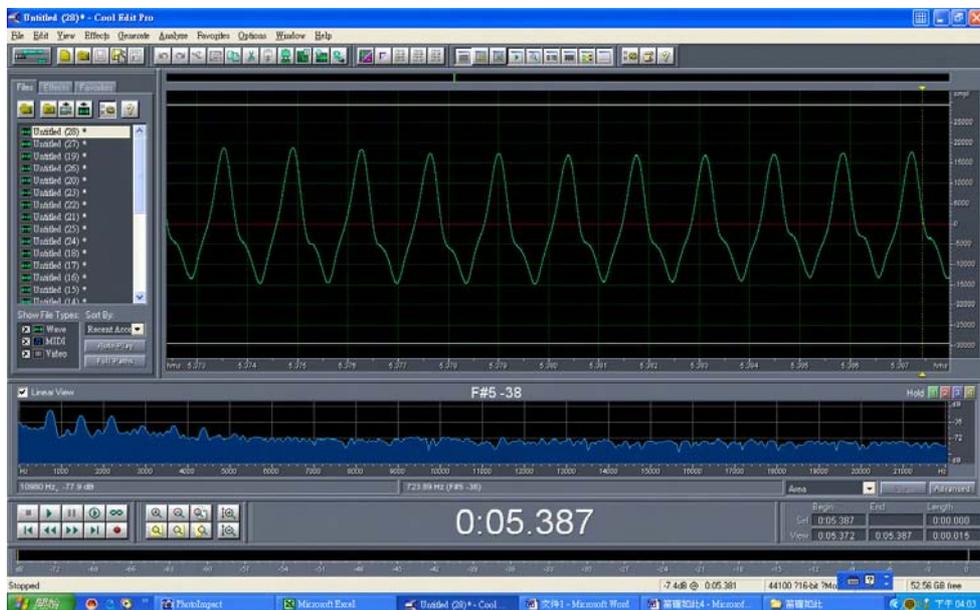


圖 56：橫笛（按 5 孔）膜孔用拇指按住時的波形（F#5）

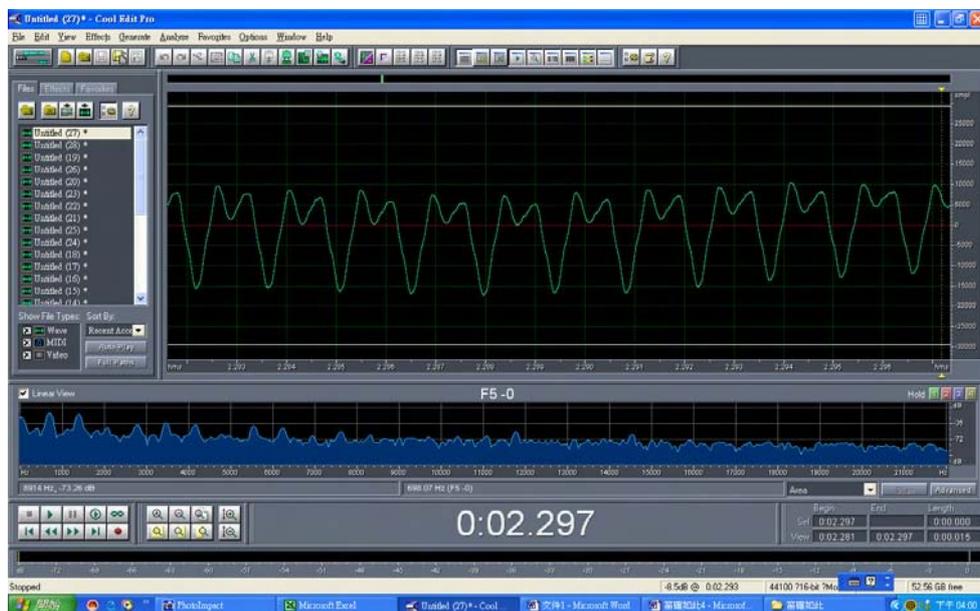


圖 57：橫笛（按 5 孔）有加笛膜時的波形（F5）

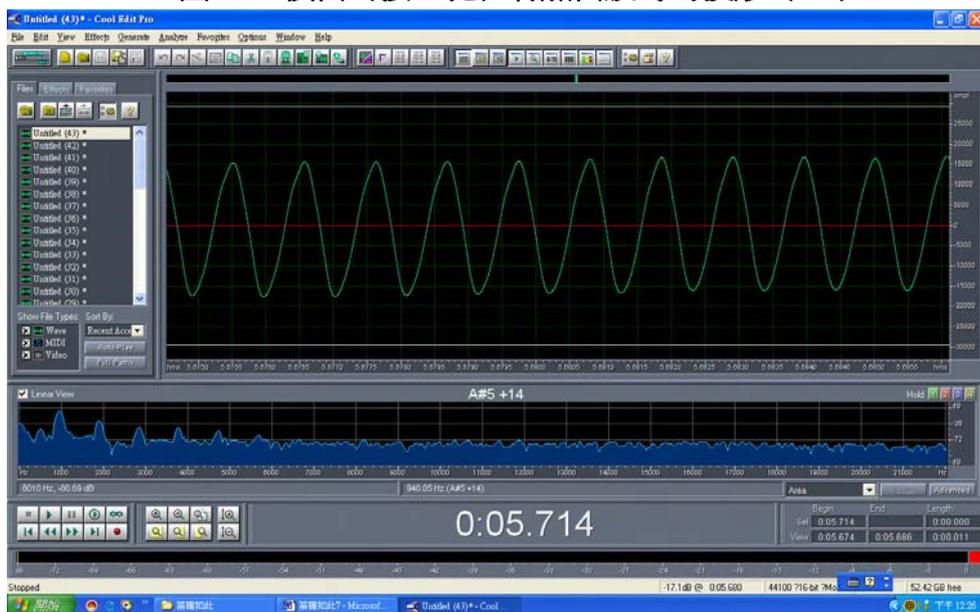


圖 58：吸管笛膜孔用膠帶貼住時的波形

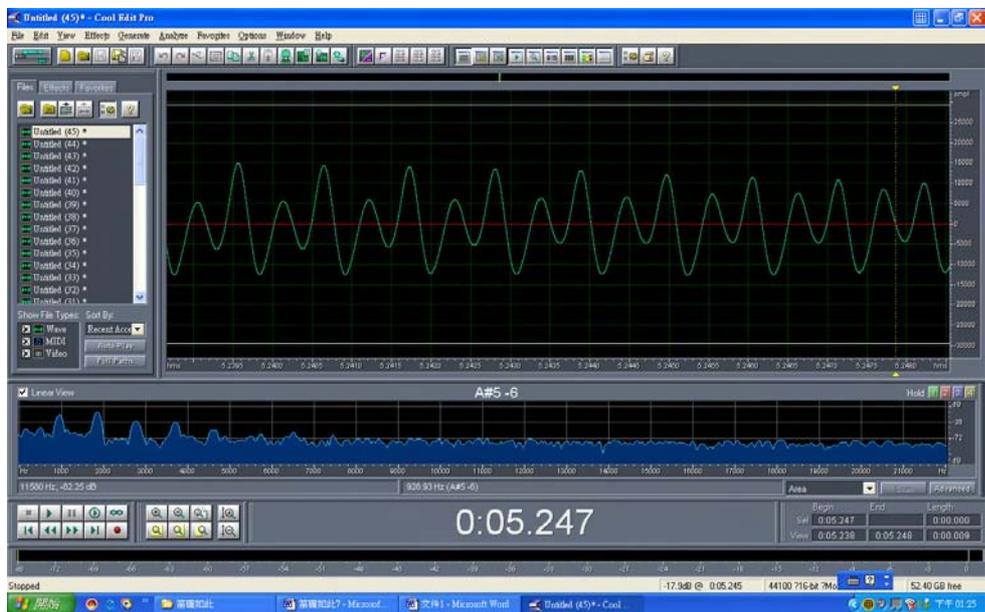


圖 59：吸管笛加笛膜時的波形

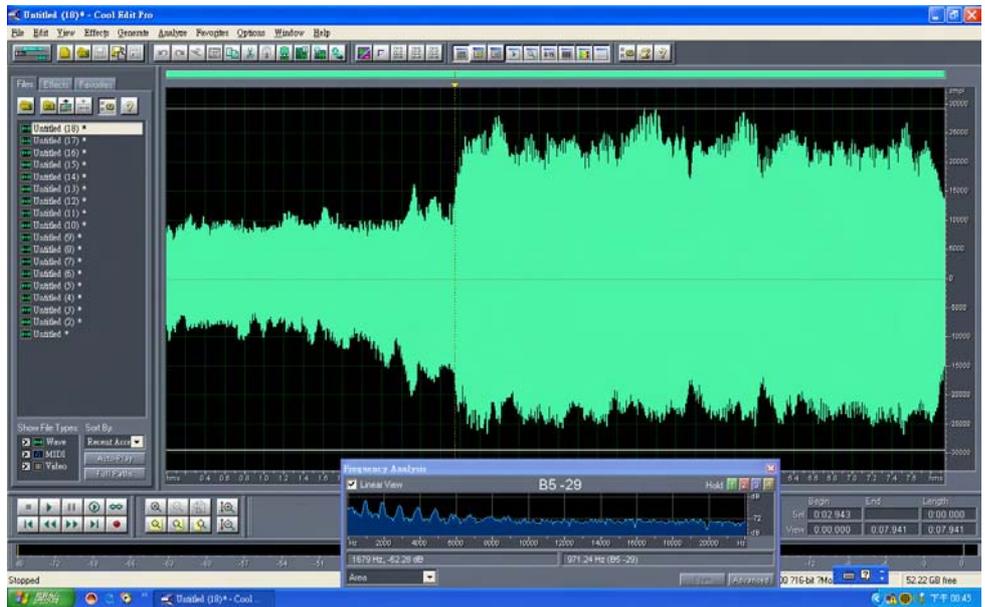


圖 60：吸管笛加笛膜時波形，黃色虛線左邊響度較小，笛膜無振動；右邊響度較大，笛膜有振動

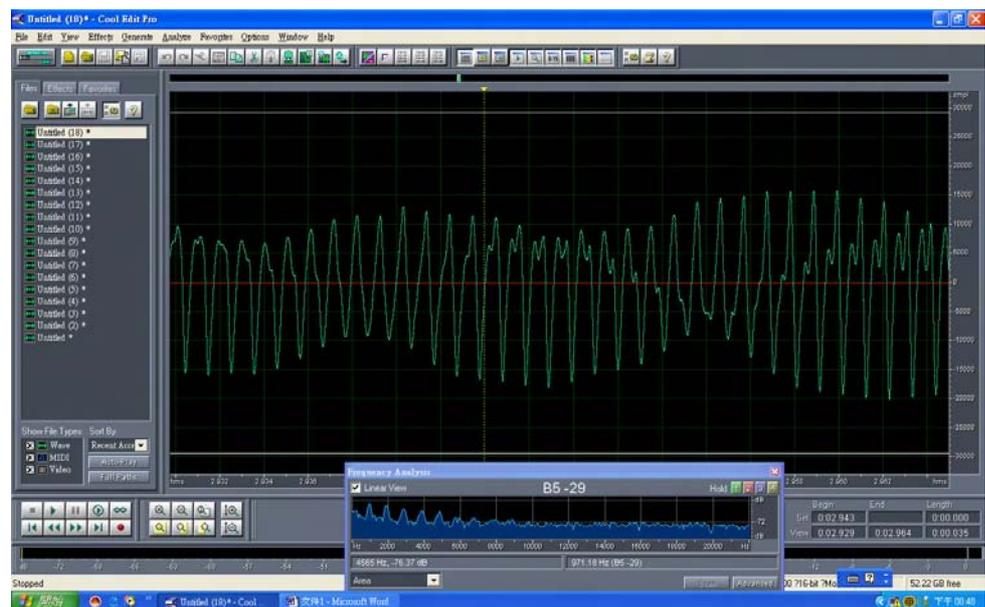


圖 61：圖 60 的放大，顯示黃色虛線左右兩邊有無笛膜振動的差別

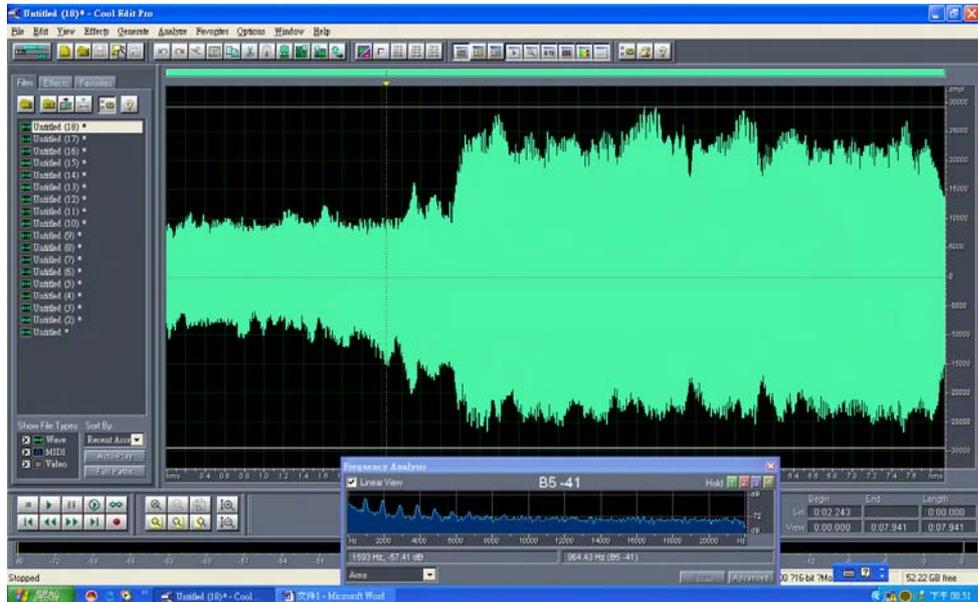


圖 62：同圖 60，黃色虛線處（響度較小）音高為 B5



圖 63：同圖 60，黃色虛線處（響度較大）音高為 A#5，顯示響度較大處音高反而較低

發現：

1. 加笛膜的笛子，其聲波中多了笛膜的振動，聲音聽起來較清脆嘹亮。
2. 加笛膜的笛子其音高有略降的趨勢，例如：橫笛 E5（圖 54：無膜）→D#5（圖 55：有膜）；F#5（圖 56：無膜）→F5（圖 57：有膜）。吸管笛 A#5+14（圖 58：貼膠帶）→A#5-6（圖 59：貼笛膜）。
3. 圖 60~63 顯示笛膜的振動出現在響度較大處，這裡原本應該是音高較高的地方，但因受笛膜振動的影響，音高反而降低。所謂聲音聽起來較清脆嘹亮，清脆是因笛膜的振動，嘹亮是因笛膜的振動在響度較大，原本音高較高的地方較為顯著。
4. 膜孔位在笛子中間會比位於前端的效果好。
5. 越大的膜孔，笛膜振動越明顯，太大的膜孔，笛膜振動的聲音掩蓋了笛音，效果反而不好。

十四、實驗 14：吸管笛的實作

- (一) 利用喝珍珠奶茶用的吸管（管徑 12mm），來實際製作排笛、伸縮笛。
- (二) 依據表 8 的基音數據，但笛子長度修正為窗口邊緣至底孔長度，利用 excel 軟體分析出趨勢線公式。
- (三) 用趨勢線公式算出不同音 B6、A6、G6、F6、E6、D6、C6、E5、D5、C5、B4 所需長度。

結果：

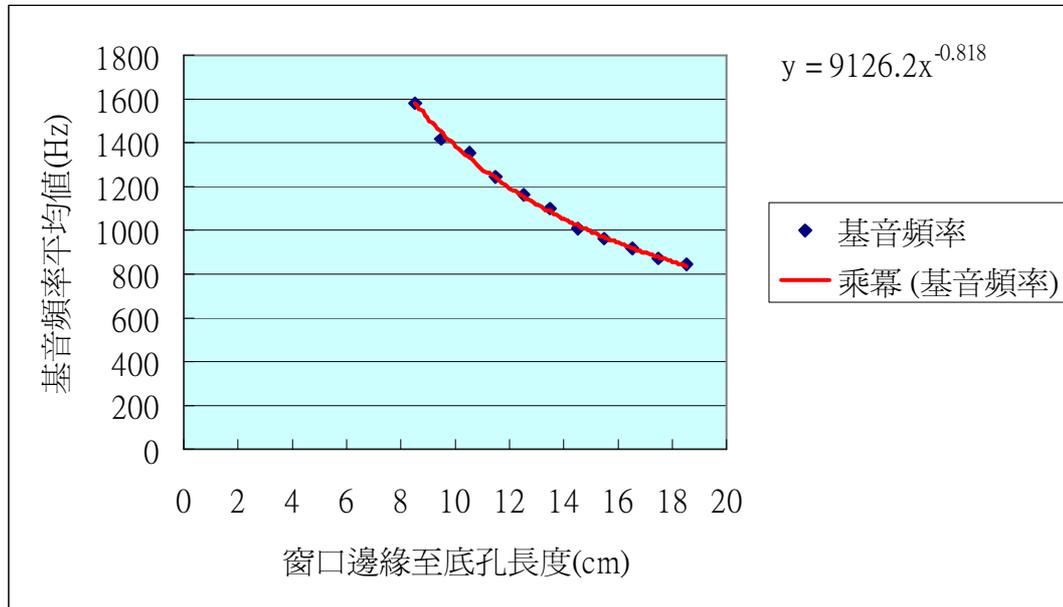


圖 64：用 excel 軟體分析吸管笛(12mm)隨長度變化的基音頻率趨勢線公式

表 16：用趨勢線公式算出笛子所需長度

| 音名 | B6 | A6 | G6 | F6 | E6 | D6 | C6 | E5 | D5 | C5 | B4 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 標準頻率(Hz) | 1975. | 1760. | 1567. | 1396. | 1318. | 1174. | 1046. | 659.2 | 587.3 | 523.2 | 493.8 |
| | 53 | 00 | 98 | 91 | 51 | 66 | 5 | 55 | 3 | 51 | 83 |
| 趨勢線公式所算出長度(cm) | 6.49 | 7.48 | 8.61 | 9.92 | 10.65 | 12.26 | 14.12 | 24.84 | 28.61 | 32.95 | 35.36 |



圖 65：排笛

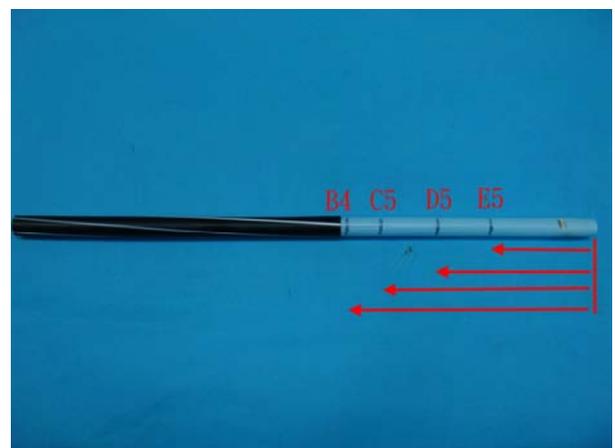


圖 66：伸縮笛

十五、實驗 15：不同管徑笛子按孔位置分析

- (一) 把管徑 10mm、12mm、15mm，窗口邊緣至底孔長 18.5cm 的吸管笛，每次剪掉 1cm，測其基音頻率。
- (二) 用 excel 軟體分析基音頻率隨長度而變的趨勢線公式。
- (三) 用趨勢線公式算出不同音的所需長度。
- (四) 用步驟 (三) 所計算出的數據，分析不同按孔位置所佔全長的比率。

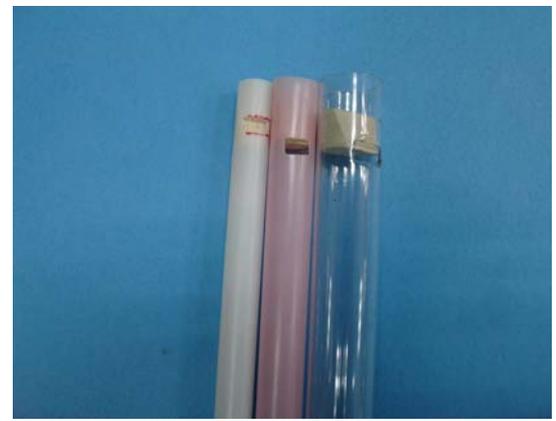


圖 67：不同管徑吸管笛

結果：

表 17：不同管徑吸管笛隨長度變化的基音頻率實驗值

| 窗口邊緣至底孔距離 (cm) | 管徑 10mm 的基音頻率 (Hz) | 管徑 12mm 的基音頻率 (Hz) | 管徑 15mm 的基音頻率 (Hz) |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 18.5 | 847.78 | 842.68 | 799.91 |
| 17.5 | 886.12 | 874.71 | 837.74 |
| 16.5 | 946.82 | 916.52 | 889.08 |
| 15.5 | 1004.30 | 964.93 | 935.12 |
| 14.5 | 1050.70 | 1013.50 | 1003.14 |
| 13.5 | 1111.55 | 1096.80 | 1054.10 |
| 12.5 | 1220.65 | 1164.50 | 1091.30 |
| 11.5 | 1265.90 | 1248.05 | 1190.45 |
| 10.5 | 1375.60 | 1356.05 | 1270.25 |
| 9.5 | 1489.05 | 1415.25 | 1374.80 |
| 8.5 | 1635.05 | 1583.95 | 1499.75 |

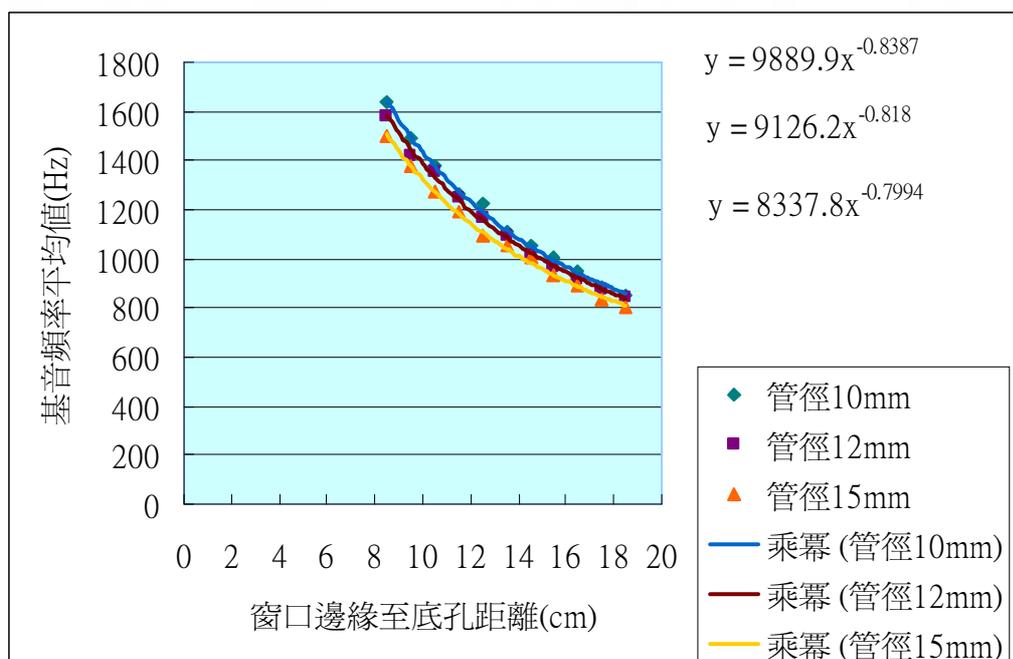


圖 68：用 excel 軟體分析不同管徑吸管笛隨長度變化的基音頻率趨勢線公式

表 18：用趨勢線公式算出不同管徑吸管笛所需的管長

| 音名 | 標準頻率(Hz) | 管徑 10mm 趨勢線公式所得長度(cm) | 管徑 12mm 趨勢線公式所得長度(cm) | 管徑 15mm 趨勢線公式所得長度(cm) |
|----|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| B6 | 1975.53 | 6.82 | 6.49 | 6.06 |
| A6 | 1760 | 7.83 | 7.48 | 7.00 |
| G6 | 1567.98 | 8.99 | 8.61 | 8.09 |
| F6 | 1396.91 | 10.32 | 9.92 | 9.35 |
| E6 | 1318.51 | 11.05 | 10.65 | 10.05 |
| D6 | 1174.66 | 12.68 | 12.26 | 11.61 |
| C6 | 1046.5 | 14.56 | 14.12 | 13.41 |
| B5 | 987.767 | 15.59 | 15.15 | 14.42 |
| A5 | 880 | 17.90 | 17.45 | 16.66 |
| G5 | 783.991 | 20.54 | 20.10 | 19.25 |
| F5 | 698.456 | 23.57 | 23.15 | 22.24 |
| E5 | 659.255 | 25.25 | 24.84 | 23.91 |
| D5 | 587.33 | 28.98 | 28.61 | 27.62 |
| C5 | 523.251 | 33.26 | 32.95 | 31.92 |
| B4 | 493.883 | 35.64 | 35.36 | 34.31 |

表 19：以 C6 音的管長為全長，其它音的管長除以全長所得的比率

| 音名 | 管徑 10mm | | 管徑 12mm | | 管徑 15mm | |
|----|---------|------|---------|------|---------|------|
| | 管長(cm) | 管長比率 | 管長(cm) | 管長比率 | 管長(cm) | 管長比率 |
| B6 | 6.82 | 47% | 6.49 | 46% | 6.06 | 45% |
| A6 | 7.83 | 54% | 7.48 | 53% | 7.00 | 52% |
| G6 | 8.99 | 62% | 8.61 | 61% | 8.09 | 60% |
| F6 | 10.32 | 71% | 9.92 | 70% | 9.35 | 70% |
| E6 | 11.05 | 76% | 10.65 | 75% | 10.05 | 75% |
| D6 | 12.68 | 87% | 12.26 | 87% | 11.61 | 87% |
| C6 | 14.56 | 100% | 14.12 | 100% | 13.41 | 100% |

表 20：以 F5 音的管長為全長，其它音的管長除以全長所得的比率

| 音名 | 管徑 10mm | | 管徑 12mm | | 管徑 15mm | |
|----|---------|------|---------|------|---------|------|
| | 管長(cm) | 管長比率 | 管長(cm) | 管長比率 | 管長(cm) | 管長比率 |
| E6 | 11.05 | 47% | 10.65 | 46% | 10.05 | 45% |
| D6 | 12.68 | 54% | 12.26 | 53% | 11.61 | 52% |
| C6 | 14.56 | 62% | 14.12 | 61% | 13.41 | 60% |
| B5 | 15.59 | 66% | 15.15 | 65% | 14.42 | 65% |
| A5 | 17.9 | 76% | 17.45 | 75% | 16.66 | 75% |
| G5 | 20.54 | 87% | 20.10 | 87% | 19.25 | 87% |
| F5 | 23.57 | 100% | 23.15 | 100% | 22.24 | 100% |

表 21：以 B4 音的管長為全長，其它音的管長除以全長所得的比率

| 音名 | 管徑 10mm | | 管徑 12mm | | 管徑 15mm | |
|----|---------|------|---------|------|---------|------|
| | 管長(cm) | 管長比率 | 管長(cm) | 管長比率 | 管長(cm) | 管長比率 |
| A5 | 17.90 | 50% | 17.45 | 49% | 16.66 | 49% |
| G5 | 20.54 | 58% | 20.10 | 57% | 19.25 | 56% |
| F5 | 23.57 | 66% | 23.15 | 65% | 22.24 | 65% |
| E5 | 25.25 | 71% | 24.84 | 70% | 23.91 | 70% |
| D5 | 28.98 | 81% | 28.61 | 81% | 27.62 | 81% |
| C5 | 33.26 | 93% | 32.95 | 93% | 31.92 | 93% |
| B4 | 35.64 | 100% | 35.36 | 100% | 34.31 | 100% |

發現：不同管徑的吸管笛，相同音的全長與管長比率幾乎相同。

十六、實驗 16：自製直笛按孔位置研究

- (一) 以 C6 音所需管長為全長，用表 19 的比率在吸管笛上烙出 6 個按孔，第 1 孔 D6、第 2 孔 E6、第 3 孔 F6、第 4 孔 G6、第 5 孔 A6、第 6 孔 B6。
- (二) 測試音高。



圖 69：自製直笛（管徑 12mm）

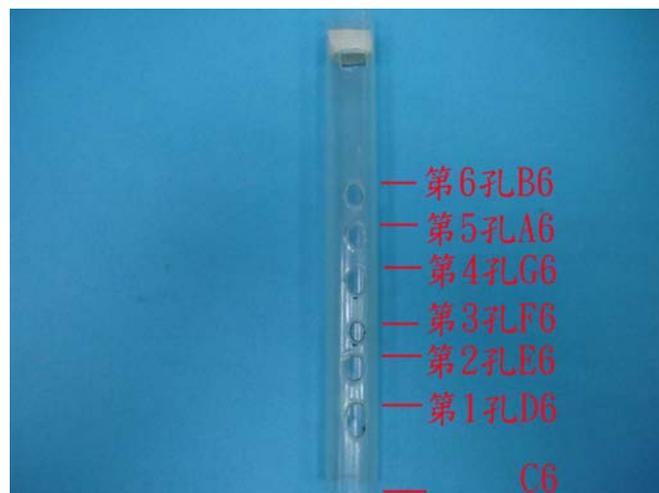


圖 70：自製直笛（管徑 15mm）

結果：

表 22：管長除以全長所得的比率修正

| 按孔位置（音名） | 管徑 12mm | | 管徑 15mm | |
|-----------|---------|------|---------|------|
| | 理論比率 | 實際比率 | 理論比率 | 實際比率 |
| 第 6 孔（B6） | 46% | 39% | 45% | 28% |
| 第 5 孔（A6） | 53% | 48% | 52% | 38% |
| 第 4 孔（G6） | 61% | 54% | 60% | 47% |
| 第 3 孔（F6） | 70% | 66% | 70% | 61% |
| 第 2 孔（E6） | 75% | 72% | 75% | 69% |
| 第 1 孔（D6） | 87% | 83% | 87% | 80% |
| 全長（C6） | 100% | 100% | 100% | 100% |

發現：

1. 以表 19 的比率烙孔，所得的音都比預期的低，推測是因孔下面還連有管壁，而表 17 的數據是剪成一段一段來測試的。
2. 管徑越大，比率修正更多，如管徑 15mm 的情形。

柒、討論

一、管樂裡雙簧管、薩克斯風是錐形管，樂器工廠的師父告訴我們，錐形管可用較短的管長而得到較低的音。我們嘗試用賽璐珞片捲成錐形管（圖 71），以製造吸管笛的方法來製作樂器，卻發現很不好吹，大家討論的結果，推論是利用邊稜效應的樂器必須分成兩股氣流，一股向內產生共鳴，一股向外，所以在管內氣流減少的情形下，還要去推動錐形管底孔附近較多的空氣，是比較困難的，而在吹伸縮笛時的經驗也發現，越長的笛子越難吹出聲音，我們也發現直笛的底孔都比前端的孔徑小，這樣的設計可能是要讓直笛能更好吹。因為邊稜音樂器要將氣流漏掉些，所以一般的錐形管樂器都是簧片樂器，這樣才能確保氣流量較充足，樂器能更容易吹。



圖 71：錐形管

二、中國笛的特色是貼笛膜，小小一片笛膜卻使笛子的物理特性產生變化，也豐富了笛子的音色。中國笛的材質是竹子，有人說中國笛脆亮的音色是因為竹子的關係，但竹子是不易產生管壁振動的材質，所以中國笛的特殊音色完全是笛膜造成的。有關笛膜的科學性研究還很少，未來將針對膜孔的大小、位置，笛膜材質、貼法、黏的鬆緊程度、皺紋的有無，做更詳細的研究。

捌、結論

一、笛子響度：

- （一）笛塞：笛塞的形狀好壞影響氣流的角度、速度、進氣量，因此會影響笛子的響度。
- （二）吹孔：吹孔越大進氣量越大，響度也越大。

二、笛子音高：

- (一) 氣流速度：氣流速度越快，邊稜音的頻率越高。
- (二) 氣流角度：氣流角度越與邊稜垂直，所產生的邊稜音頻率越高。
- (三) 窗口：窗口形狀以長方形最好，其寬度應不要超過笛塞的寬度。好的窗口可提高邊稜音的頻率，使笛子可吹出更多的泛音。吸管笛的窗口邊緣比一般胡蘿蔔笛堅硬、銳利，因此能製造更高的頻率，使吸管笛能吹出較多的泛音。
- (四) 笛唇：笛唇角度越大，越能以較小的速度使笛子共鳴。
- (五) 長度：笛子越長，共鳴頻率越低，成反比。影響笛子音高的有效長度是窗口邊緣至底孔的長度。
- (六) 管徑：管徑越大，共鳴頻率越低，成反比。
- (七) 管壁厚度：管壁厚度不影響笛子的共鳴頻率。
- (八) 閉管樂器：閉管使笛子的基音頻率降低，基、泛音比例變為 1 : 3 : 5；閉管樂器可強迫氣流由窗口流出，因此較易使管子產生共鳴，但音量會變小。
- (九) 按孔：按孔大小會稍微影響共鳴頻率。
- (十) 自製直笛：不同管徑笛子其相同音的按孔位置與全長的比率不同，管徑越大比率越小。

三、笛子音色：

- (一) 胡蘿蔔笛：以空氣柱的振動為主，管壁不容易共振，音色單調。
- (二) 吸管笛：以空氣柱的振動為主，管壁不容易共振，音色單調。
- (三) 高音直笛：在低音域部份會引起管壁的共振。
- (四) 笛膜：笛膜使笛子的音色產生變化，也會讓共鳴頻率稍微降低。笛膜的振動在響度較大，原本音高較高的地方較為顯著。膜孔位在笛子中間部分會比位於前端的效果好。太大的膜孔，效果不好。

玖、參考資料

- 一、許世杭等(民95)。勇士之音--鄒之鼻笛。中華民國第四十六屆中小學科展國中組生活與應用科學科。
- 二、張毓屏等(民96)。吸管笛的諧音之研究與發展。臺灣二〇〇七年國際科學展覽會物理科。
- 三、休伊特(民97)。觀念物理學IV聲學 光學。天下文化出版社。
- 四、沃克(民89)。物理馬戲團II。天下文化出版社。

【評語】 080103

同學很辛苦製造各種尺寸、結構的笛子，也開發以胡蘿蔔製成的笛子。表達能力亦佳，這個題目需要有更深入或創意的發揮，成果會較佳。