

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

佳作

030106

深入「笛」境

～自製塑膠管樂器之開發與原理之探討

學校名稱：高雄市立陽明國民中學

作者： 國二 張庭蓁 國二 劉芝瑜 國二 賴亭妤	指導老師： 柯瑞龍 柯翠菱
---	-----------------------------

關鍵詞：塑膠笛、基音、泛音

摘要

本次研究利用打氣機及簡易的變壓器製作可調整流速的裝置，透過自製的排水集氣及水位平衡裝置，成功測量出流速大小。利用示波器截取聲波的資訊，再用 Excel 進行傅立葉分析，可以找出複合音的頻率。我們自製塑膠管發現，頻率的大小與氣流流速、氣流到尖劈的距離、空腔體積、指孔大小皆有關聯，於是我們製作不同的塑膠管，找出它們之間交互作用的關係，最後推出頻率之通式，再用此方程式找出音階，設計了伸縮笛、合音笛伸縮版及指孔版等三種樂器。最後利用透明塑膠管和乾冰，觀察空腔共鳴時，內部氣流的流動情形，找出塑膠管頻率振動的原理，和實驗結果互相呼應。

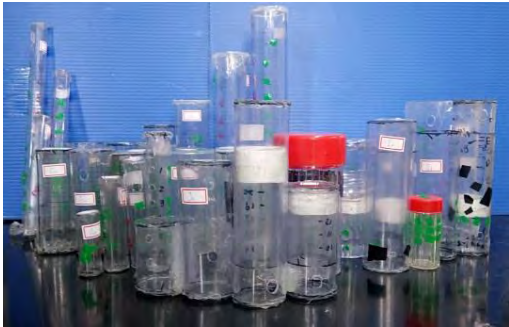

壹、動機










在一次偶然的機緣之下，我們欣賞到了高雄市交響樂團的演出，便對管樂器產生了很大的興趣，於是我們就想：這些管樂器究竟是靠什麼原理，發出美妙的聲音呢？而我們是否也能自己設計出屬於自己的管樂器呢？為了瞭解這些事物，並設計出自己專屬的樂器，我們開始了以下的研究。

貳、目的

- 一、如何測試聲音。
- 二、市售陶笛的性質。
- 三、如何自製塑膠管陶笛。
- 四、氣孔對自製塑膠管笛頻率之影響。
- 五、氣流對自製塑膠管笛頻率之影響。
- 六、指孔對自製塑膠管笛頻率之影響。
- 七、空腔大小對自製塑膠管笛頻率之影響。
- 八、自製樂器之研發。
- 九、自製塑膠管空腔內氣流流動之情形。

參、器材

自製塑膠管笛	排水集氣裝置
	

游標尺	熱熔槍	電鑽	風速計	線鋸機
				
碼表	打氣機	麥克風	示波器	陶笛
				

肆、原理及相關名詞

一、聲波(Sound Wave)：

(一) 聲波為縱波，發聲體振動使介質產生縱向（與波行進方向平行的方向）來回的運動。

以喇叭為例，當喇叭的薄膜往前推時，壓縮空氣（壓力增大）；往後推時，擴張空氣（壓力減少）。聲波也可說是壓力的簡諧運動（S.H.M.）。此外，繩波為橫波，他是一種介質在橫向（與波行進方向垂直的方向）來回的運動。

(二) 波的運動皆符合波速

$$V(\text{波速})=f(\text{波長})\times \lambda (\text{頻率})$$

的關係。聲波的波速約為

$$V=331.5+0.607T$$

(其中 T 為氣溫以°C 為單位，V 以 m/sec 為單位。)

二、邊稜音：

由窄縫出來的氣流噴到固體時所產生的聲音稱為邊稜音。固體一般是正對著窄縫的尖劈，正對小孔的圓稜，但這並不是必要的。必要的是正對流體，使流體分開，從而產生振動。

流體自窄縫噴出後，速度較大，和周圍靜止流體互相摩擦，產生兩串渦旋，渦旋在窄縫的兩邊輪流發出，旋轉方向相反。穩定條件是兩串間的距離和每串中前後渦旋距離之比， $h/l=0.28$ 。這和風吹聲中圓柱後面的兩串渦旋情況相似。這些渦旋產生寬帶噪聲，即噴氣噪聲。

如在噴口前距離 a 處有一尖劈，a 大於縫寬幾倍，就產生強烈的邊稜音，他的頻率滿足下式：

$$jV=2.12af \quad j \text{ 為一整數}$$

邊稜音的強度還沒有公認的公式，這可能是由於強度因噴口情況不同而異：噴口光滑時，強度較大，反之噴口較粗時，則強度即大為減少。

三、管中駐波：

在同一介質中，如果有兩個相同的波長，相向而行，其相位差為 $1/2$ 時，即可干涉形成駐波。當在共鳴管中形成駐波的頻率與管口外的音叉頻率相同時，則會產生共鳴的現象。當共鳴管中形成駐波時，在開口端處為波腹，在閉口端處則形成節點。

閉管的駐波	管長/波長	駐波頻率	名稱	名稱	節點	腹點
	$n=1$ $L = \frac{1}{4}\lambda$	$f_1 = \frac{v}{4L}$	第一諧音	基音	1	1
	$n=3$ $L = \frac{3}{4}\lambda$	$f_1 = \frac{3v}{4L}$	第三諧音	第一泛音	2	2
	$n=5$ $L = \frac{5}{4}\lambda$	$f_1 = \frac{5v}{4L}$	第五諧音	第二泛音	3	3

四、閉管的管口修正量：

管內空氣駐形成駐波時，管口並非為一波的波腹，如右圖，波腹通常在管口外，與管口有一段距離 c ，稱為管口修正量。當空氣以基頻振動時，

$$\lambda = 4 (l + c)$$

五、管樂器的泛音吹奏法：

排笛有很多根管來發出聲音，但是梆笛卻只有一根管和六個音孔，怎麼能獲得那麼多的音呢？基本上，如果笛子的管徑確定後，若不改變吹奏力度，音高就同管長成反向關係：音孔位置越上，音越高。但是笛子一般只有六個音孔，連同底孔也只能奏七個音，顯然不能滿足演奏的需要。因此，笛子有平吹、急吹和超吹三種力度，所發之音也就有平吹音、急吹音和超吹音三種。

六、亥姆霍茲共振(Helmholtz resonance)：

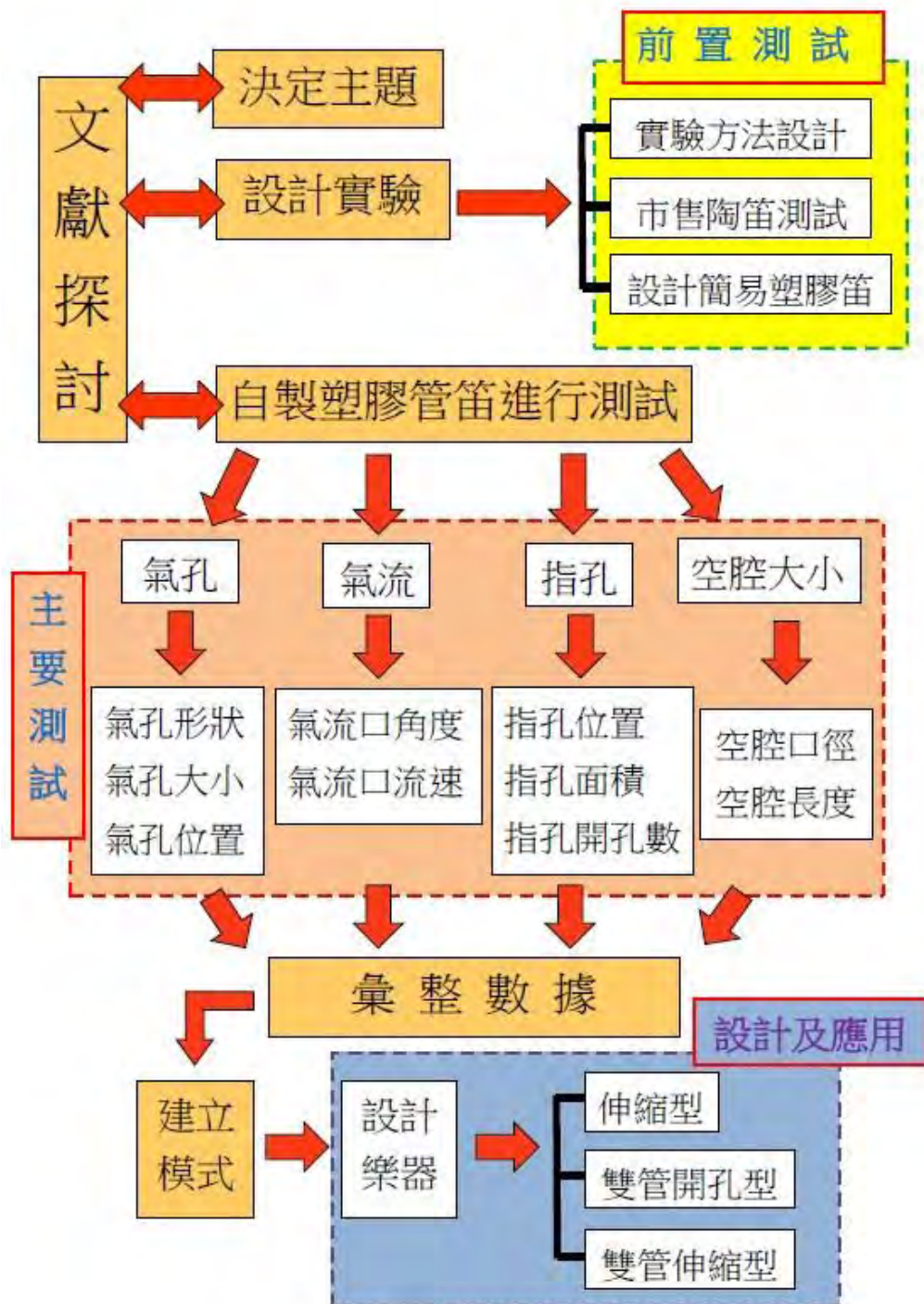
Helmholtz共振腔式一個內部充滿氣體(通常是空氣)並有著開孔的中空腔體聲學裝置，腔體與開孔會因為內部空氣振動跟著產生振動，可以類比為一個質塊-彈簧系統(如圖)。其原因就是因為頸部的渦流溢放產生共振。其自然共振頻率為：

$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V_0 L_{eq}}}$$

(A ：開口的截面積； v ：聲速； V_0 ：共振腔容積； L_{eq} ：瓶口的等效長度)

伍、研究過程、結果及討論

流程圖



研究一、如何測試聲音

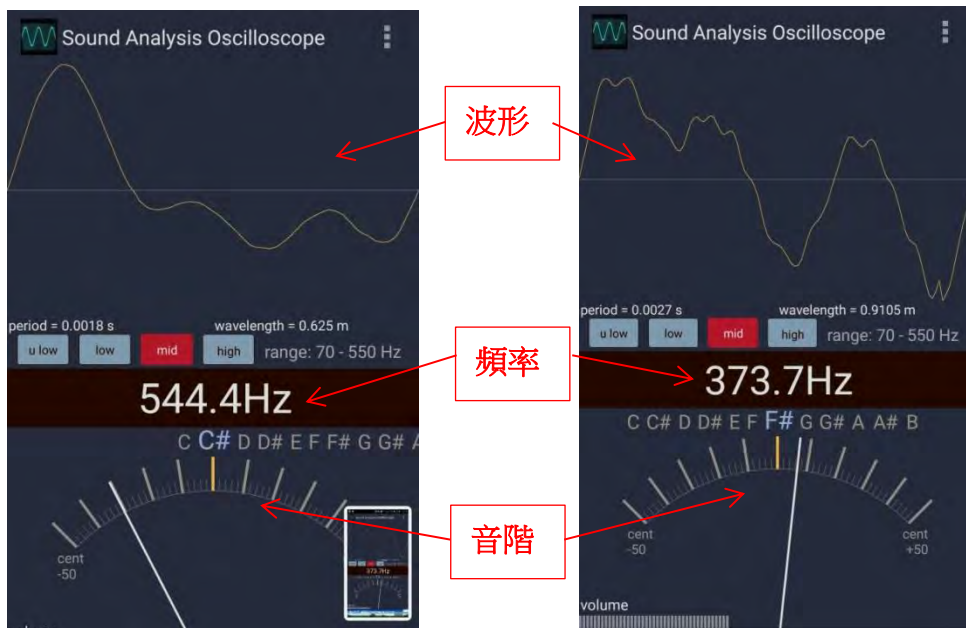
探討 1、如何使用 APP 測試聲音

(一)目的：使用手機 APP 測試聲音的性質

(二)步驟：1. 用手機下載 Sound Analisics Oscilloscope 軟體。

2. 打開手機 APP，測試聲音之特性

(三)結果：測試結果如下圖。



(四)討論：




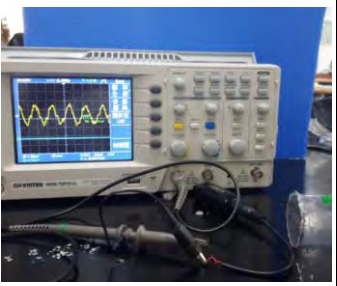
1. 透過手機 APP 可以輕易取得聲音的相關資訊，缺點是資料不易擷取，
2. 對於單音的頻率可以準確判斷，但是對於復合的音調只能判斷其範圍，無法分析個別音的音調，因此必須要另外找其他方法。

探討 2、如何使用示波器測試聲音

(一)目的： 利用示波器測試聲音的性質

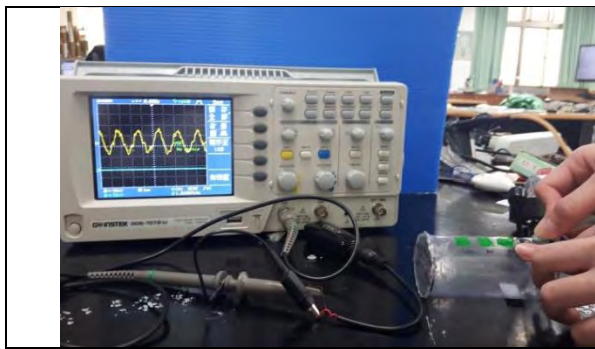
(二)步驟：

1. 流程圖如下

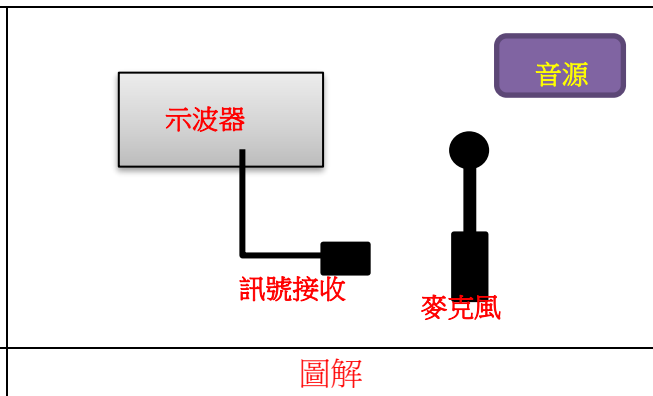
			
將無線麥克風接收器和音源線組合起來。	將音源線和示波器的訊號接收器連接。	利用麥克風收取聲音訊息。	將波形固定，並將數據輸出至隨身碟。

2. 將收到的數據利用 Excel 的功能將波形畫出來，並將原始數據進行傅立葉分析。

(三)結果：1. 裝置圖如下

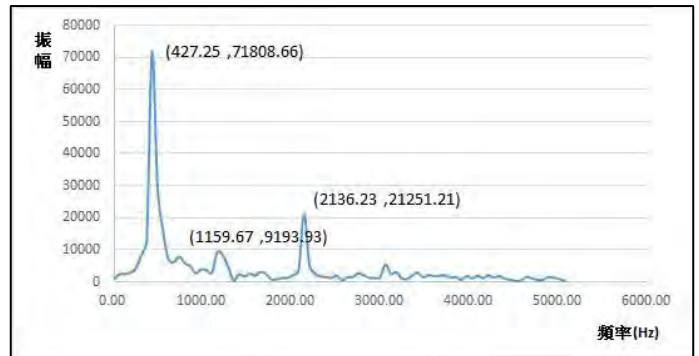
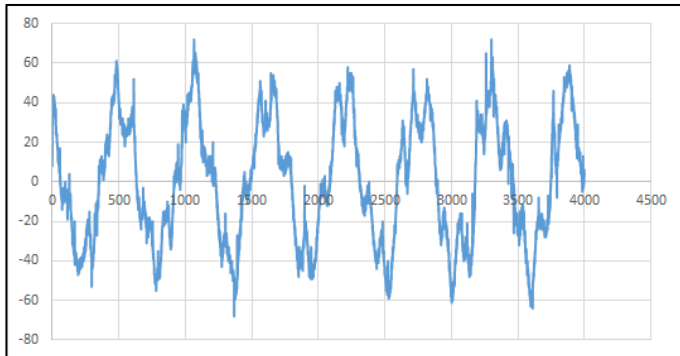


實際圖形



圖解

2. 原始波形及傅立葉分析



(四)討論：

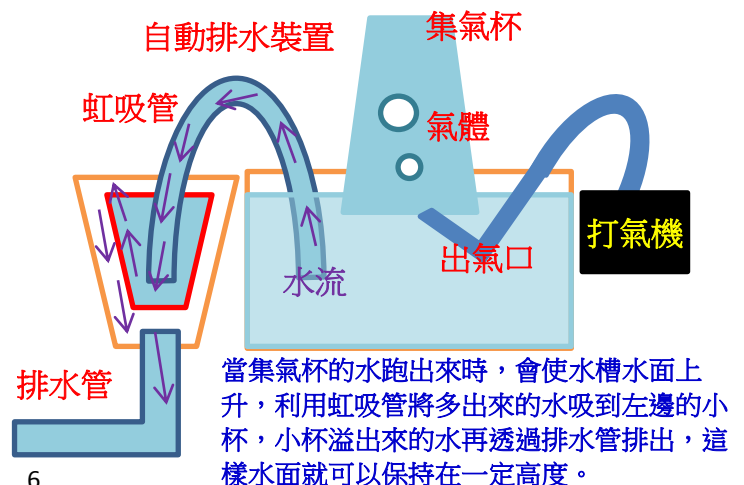
1. 透過 Excel 內的傅立葉分析功能，可以輕易地將複雜的波形進行頻率的分析，即使是複雜的波，也可以分離出來。

探討 3、氣流大小與電壓的關係

(一)目的：測試氣流流速與電壓大小之關係

(二)步驟：

1. 將打氣機和變壓器連接起來，並調整電壓為 4.0 伏特。
2. 將出氣口放置在接近水面位置後將打氣機打開，使氣體用排水集氣法及自動排水裝置收集起來，用碼表測量其收集至 2000ml 之時間，並計算流速(裝置如下)。

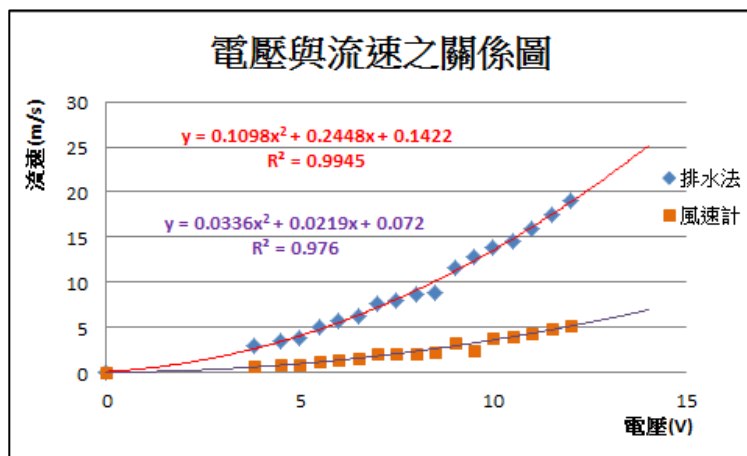


3. 改變電壓為 4.0、4.5、5.0、…、11.0、11.5、12.0 並重複步驟 2。

(三)結果：1. 數據

電壓(V)	0.00	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50
流速(m/s)	0.00	2.92	3.49	3.91	5.12	5.73	6.32	7.74	7.95
電壓(V)	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
流速(m/s)	8.69	8.94	11.66	12.77	13.90	14.54	15.98	17.57	19.05

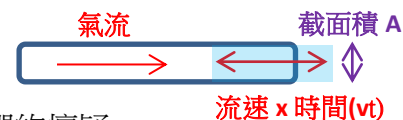
2.關係圖



(四)討論：

1. 原先我們是使用風速計來測試出氣口流速，但實測後發現流速即使開到最大也不過才 5.2m/s，明顯和現實流速有落差，探討原因可能是噴氣口的口徑小，吹出來的氣流只能對著風速計的某一邊扇葉吹，所以力道可能只有原本的 30%左右。為了改善此缺點，我們使用了國中二年級理化課學到的排水集氣法來收集氣體並計算流速。

2. 使用排水集氣法時我們發現，水排出後水槽的水面會上升，造成水面的深度增加，這樣會使出氣口的水壓增大，氣體無法順暢排出，這樣會影響實驗結果。為了改善此問題，我們設計了自動排水裝置，從集氣杯排出水的同時，會有等量的水經由管子流到一旁的小杯子中並排水至桶子，透過虹吸式水面調整裝置，可以讓水面維持在一定高度，並且排氣時盡量讓出氣口靠近水面，就可以減少誤差。



3. 實驗後發現，透過風速計測量的流速真的小很多，也驗證了我們的懷疑。

4. 出氣口的流速可以利用流速計算公式： $V = v \times A \times t$ (V ：氣體體積、 v ：流速、 A ：出氣口截面積、 t ：時間)將收集到的氣體體積代入 V ，出氣口截面積與時間也分別代入 A 和 t ，就可以將流速計算出來。最後將數據輸入電腦計算得到電壓與流速的換算方程式

$y = 0.1098x^2 + 0.2448x + 0.1422$ (y：流速、x：電壓)，透過此方程式，只要調整變壓器上的電壓，依照此方程式，就可以輕易地求得其流速關係。

研究二、市售陶笛的性質

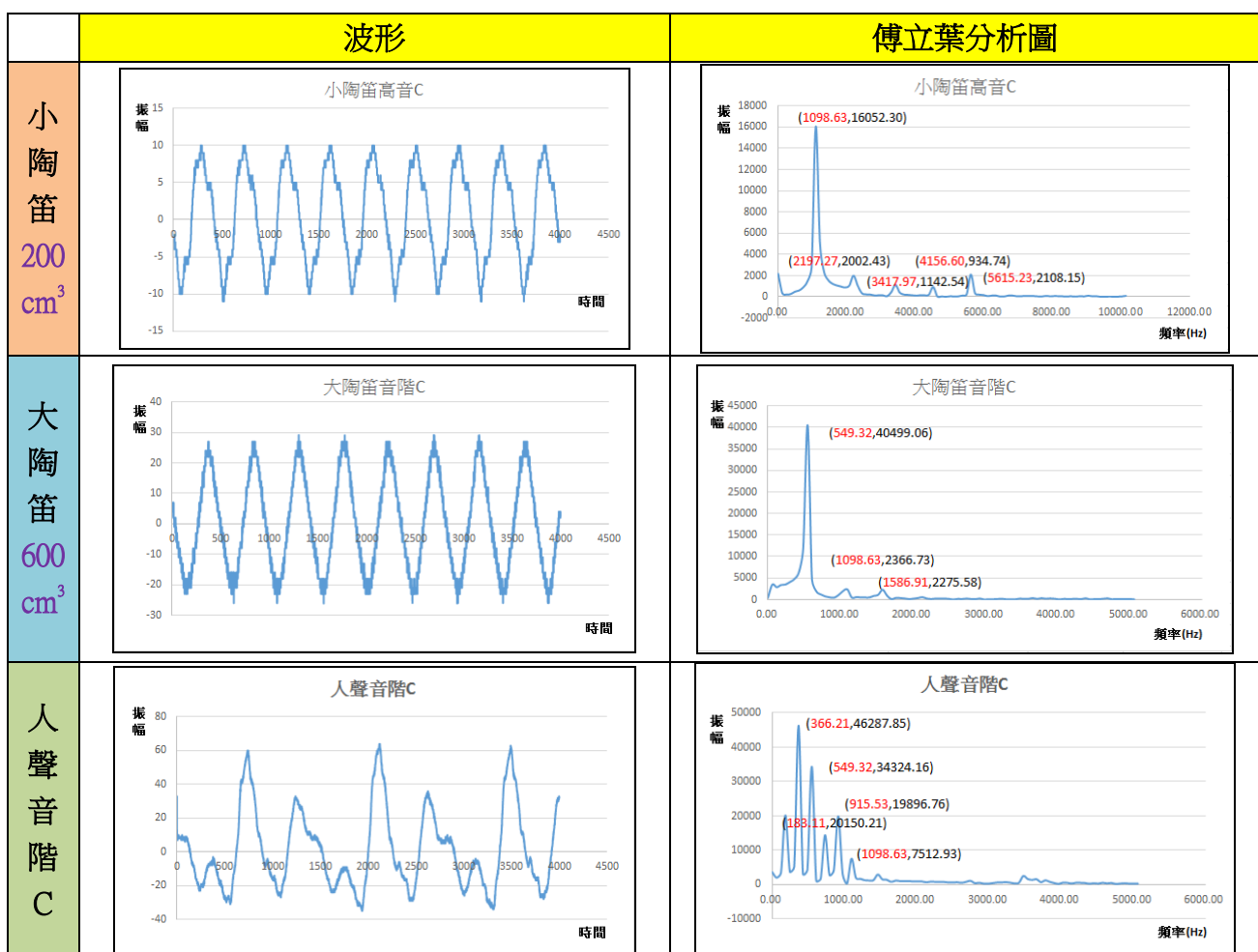
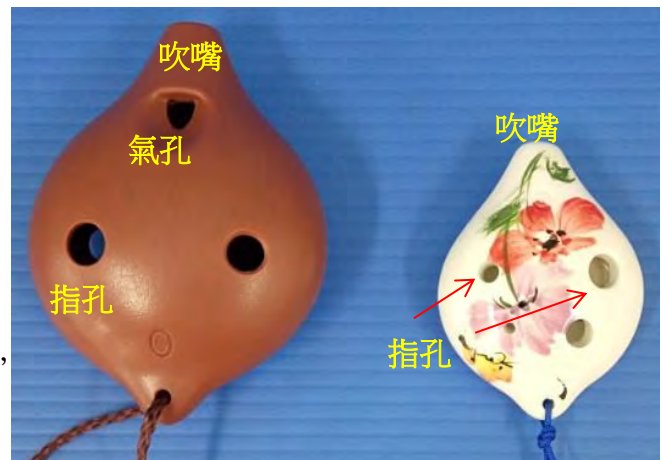
探討 1、空腔大小對陶笛音調的影響

(一)目的：測試市售陶笛的音調關係

(二)步驟：

1. 將市售的小陶笛和打氣機的出氣口連接，將氣流調到合適的大小，直到吹出音階 C。
2. 將數據收集，並進行傅立葉分析。
3. 利用步驟 1、2 之方式，測試大陶笛和人聲。

(三)結果：波形與傅立葉分析



(四)討論：

1. 過去的文獻中提到，陶笛發出的聲音和音叉一樣為單純的正弦波，但我們實際測試後發現，陶笛的波形有些微的鋸齒狀，透過傅立葉分析後得知，除了主要的音階之外，還存在著二倍音、三倍音甚至是五倍音在裡面，只是振幅很小，人耳並不容易分辨，所以若未仔細量測，很容易就會誤判為單一正弦波，這裡和過去的科展作品測試有明顯不同，也顯示本測試方式可以將所有的頻率都分析出來，準確度比以前大幅提高。
2. 人聲所發出的聲音為多種頻率合成的複合音，且各種頻率的振幅都有一定的大小。
3. 由上列波形中可發現，同樣是音階 C，但是小陶笛的 C 調大約為大陶笛的兩倍，在音階上相差了八度，而兩者空腔的體積約為三倍的關係，那是否每增加三倍體積，音階就會差八度？為了解開這個謎題，需要再做更深入的研究。

探討 2、開孔面積對陶笛音調的影響

(一)目的：測試市售陶笛開孔面積與音調關係

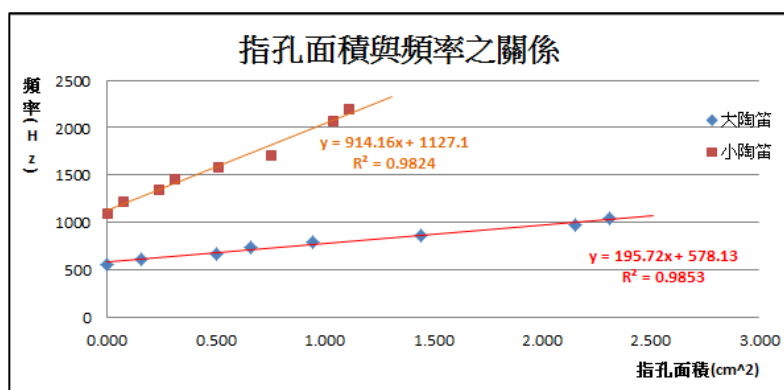
(二)步驟：

1. 將市售的小陶笛和打氣機的出氣口連接，將氣流調到合適的大小，直到吹出音階 C。
2. 將數據收集，並進行傅立葉分析。
3. 放開不同的指孔以改變指孔總面積，重複步驟 1、2。
4. 利用步驟 1~3 測試大陶笛的指孔面積與音調之關係。

(三)結果：1. 數據

小陶笛	音階(高音)	C	D	E	F	G	A	B	C
	頻率(Hz)	1046	1175	1318	1397	1568	1760	1926	2089
	指孔面積(cm ²)	0.00	0.07	0.24	0.31	0.51	0.75	1.04	1.11
	實測頻率(Hz)	1098.63	1220.70	1342.77	1464.84	1586.91	1708.98	2075.20	2197.27
大陶笛	音階(中音)	C	D	E	F	G	A	B	C
	頻率(Hz)	523	587	659	698	784	880	988	1046
	指孔面積(cm ²)	0.00	0.16	0.50	0.66	0.94	1.45	2.15	2.31
	實測頻率(Hz)	549.32	610.35	671.39	732.42	793.46	854.49	976.56	1037.60

2. 圖形



(四)討論：

1. 隨著音階的升高，指孔需打開更多，因此也需要較大的流速，所以我們配合音階，將流速做適當的調整，使其恰可吹出聲音。
2. 從指孔面積和頻率關係圖中可發現，陶笛頻率與指孔面積呈現一個線性的關係，且大陶笛與小陶笛大約低了八度的音程。
3. 由實測中發現，市售的陶笛音調與標準音階相比並未完全相同，有些音都比標準音階高了半音，有些音則較低，有些則差不多，這讓我們百思不得其解。而我們懷疑，是否是受到氣流大小的影響，為了證明此想法，我們進行以下的實驗。

探討 3、氣流大小對陶笛音調的影響

(一)目的：測試市售陶笛氣流大小與音調之關係

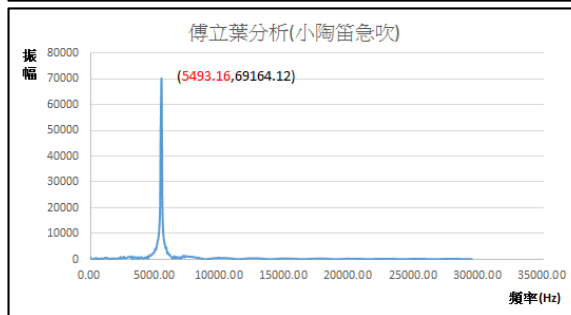
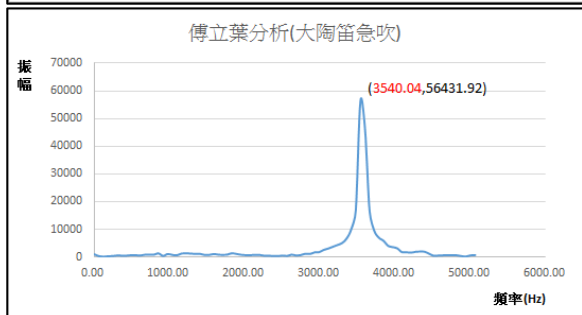
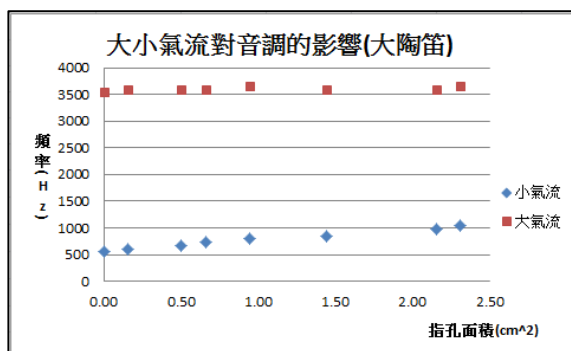
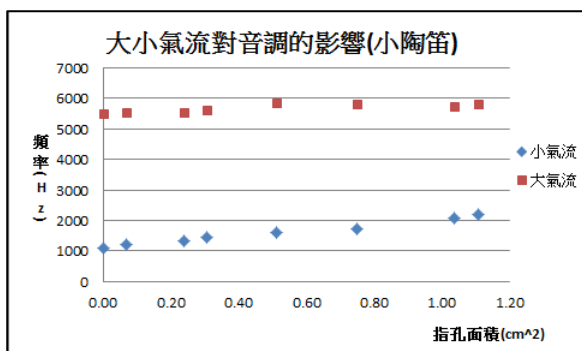
(二)步驟：

1. 將市售的大小陶笛和打氣機的出氣口連接，將氣流調到合適該陶笛可吹出音的大小。
2. 打開不同的指孔，再進行測試，並進行傅立葉分析。
3. 將出氣口氣流調到最大，再利用步驟 1~3 之方式，測試頻率。

(三)結果：1. 數據(流速：25m/s)

小陶笛	指孔面積(cm ²)	0.00	0.07	0.24	0.31	0.51	0.75	1.04	1.11
	大氣流頻率(Hz)	5493.16	5554.20	5524.20	5615.23	5859.38	5798.34	5737.30	5798.34
	小氣流頻率(Hz)	1098.63	1220.70	1342.77	1464.84	1586.91	1708.98	2075.20	2197.27
大陶笛	指孔面積(cm ²)	0.00	0.16	0.50	0.66	0.94	1.45	2.15	2.31
	大氣流頻率(Hz)	3540.04	3601.07	3601.07	3601.07	3662.11	3601.07	3601.07	3662.11
	小氣流頻率(Hz)	549.32	610.35	671.39	732.42	793.46	854.49	976.56	1037.60

2. 圖形



(四)討論：

1. 由實驗結果我們發現，當開到最大時，原本的基音會忽然消失，轉而取代的是原本存在但是聲音不大的數倍音。此結果顯示出氣流的大小也是影響頻率的一個因素。
2. 市售的陶笛雖然容易吹出聲音，但受限於規格，可測試的變因並不多，這樣無法讓我們深入了解其發聲原理，為了要更方便測試，我們決定使用塑膠管自製類陶笛的樂器。

研究三、如何自製塑膠管笛

探討 1、塑膠管笛的製作方式

(一)原由:因陶笛的製作時間過長，且使用市售陶笛能改變的變因又不大，我們決定以陶笛的發聲原理為基準，自製塑膠笛來進行更多樣化的測試。

(二)目的：製作塑膠管笛

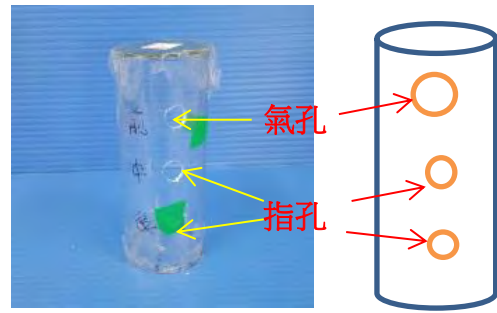
(三)步驟：製作流程如下



(三)結果：製作出的管子如右圖。

(四)討論：

1. 用此方式製作出的塑膠笛，可以依照我們的需求任意改變長度以及指孔和氣孔的大小，以便進行更深入的研究。
2. 由國二理化的波與聲音中提到，要發出聲音必須要有物體急速的振動，而此笛子則是利用氣孔附近的氣體的急速振動來發出聲音，再利用內部空腔產生共鳴而發聲。



研究四、氣孔對自製塑膠笛頻率之影響

探討 1、氣孔形狀對笛音音調的影響

(一)目的：測試氣孔形狀對塑膠笛音調的影響。

(二)步驟：

1. 將自製塑膠笛和打氣機的出氣口連接，將氣流調到 5m/s，記錄其音調關係。
2. 固定氣孔面積大小而改變氣孔形狀為 1~6 號(如下表)，再重複步驟 1。
3. 將數據收集，並進行傅立葉分析。

(氣流方向： ↓)

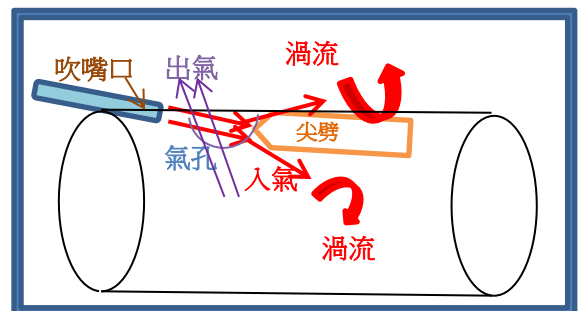
氣孔編號	1	2	3	4	5	6
氣孔形狀	○	□	△	▽	◻	▭

(三)結果：

氣孔編號	1	2	3	4	5	6
測試情形	容易發聲	容易發聲	不易發聲	吹不出聲	不易發聲	不易發聲
頻率(Hz)	610.35	610.35	610.35	X	610.35	610.35
響度(dB)	77.5	76.8	58.9	X	61.3	65.2

(四)討論：

1. 由實驗中發現，氣孔的形狀對於共鳴的產生有很重要的影響，其中以圓形和正方形最容易發出聲音，而且響度也最大，而倒三角形則無法吹出共鳴。



2. 由塑膠笛發聲的原理推論，當吹嘴口的氣流衝出時遇到一尖劈將氣流分成兩邊，兩邊

的氣流交替形成渦流而產生共鳴，若尖劈附近的空間不足，入氣不夠，則分離的氣流太少或無法有效分離，共鳴的效果就會大大地降低。另外出氣的空間不足，入氣和出氣兩者互相擠壓，也會降低共鳴效果。

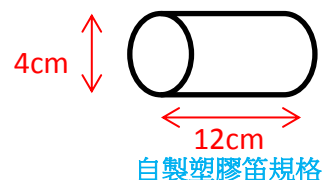
3. 根據上述想法，我們推測 3 號氣孔的出氣面過小；4 號氣孔的入氣過小；5 號氣孔的入氣面及尖劈皆過小；6 號氣孔的出氣及入氣之間的距離不足，因此這些形狀的氣孔皆不容易產生共鳴。
4. 圓形孔和方形孔的共鳴效果差不多，但圓形孔的製作較方便，故採用圓形孔測試。

探討 2、氣孔大小對笛音音調的影響

(一)目的：測試氣孔大小對塑膠笛音調的影響

(二)步驟：

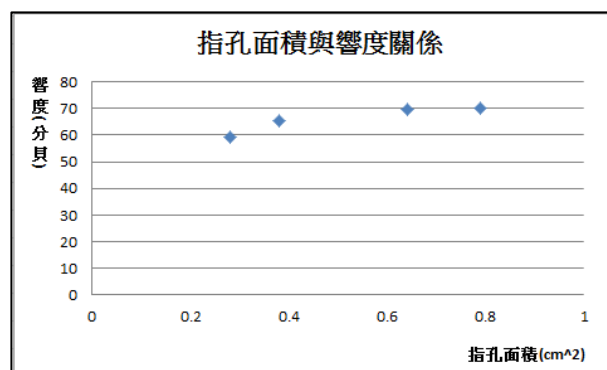
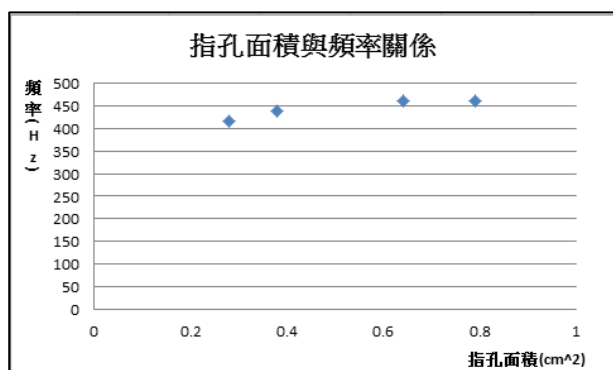
1. 將自製塑膠笛 B12 和打氣機的出氣口連接，將氣流調到 5m/s，記錄其音調關係。
2. 改變氣孔面積大小(如下表)，重複步驟 1。
3. 將數據收集，並進行傅立葉分析。



(三)結果：1. 數據 (●：無共鳴 ●：產生共鳴)

氣孔面積(cm ²)	0.07	0.13	0.20	0.28	0.38	0.64	0.79
測試情形	●	●	●	●	●	●	●
頻率(Hz)	X	X	X	416.12	438.11	460.24	460.24
響度(dB)	X	X	X	59.2	65.2	69.8	70.2

2. 圖形



(四)討論：

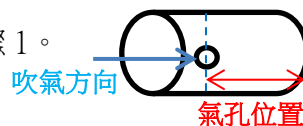
1. 從數據中發現，當氣孔面積需大於 0.28cm²時才產生共鳴，且氣孔越大，音調與響度也會慢慢變大，大約到了 0.64cm²以上時會達到穩定。

探討 3、氣孔位置對塑膠笛音調的影響

(一)目的：測試氣孔位置對音調的影響。

(二)步驟：

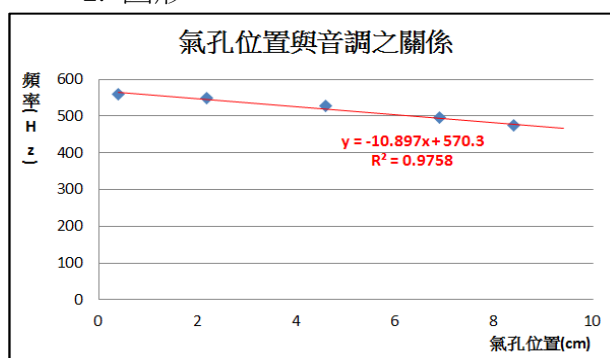
1. 將自製塑膠笛 B10 和打氣機的出氣口連接，將氣流調到 5m/s，記錄其音調關係。
2. 改變氣孔位置(如下表，表示與底部的距離。)，重複步驟 1。
3. 將數據收集，並進行傅立葉分析。



(三)結果：1. 數據(氣流固定向右吹)

氣孔位置(cm)	頻率(Hz)
8.40	474.01
6.90	495.12
4.60	528.03
2.20	549.12
0.40	560.05

2. 圖形



(四)討論：

1. 由數據中的趨勢我們發現，當氣孔位置距離底部越近時，其音調就越高，我們推測其原因可能是氣流進入空腔後，碰撞壁面的距離縮小，造成內部共鳴的駐波波長被壓縮的，根據課本中學到 $v = f \times \lambda$ 公式，在波速不變的形況下，波長變小時，音調就變高了。
2. 為了更加深入了解氣流和頻率之間的關係，我們進行了以下的研究。

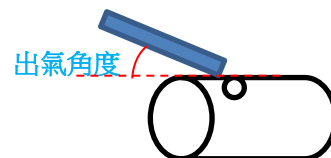
研究五、氣流對自製塑膠管笛頻率之影響

探討 1、氣流口形狀及角度對塑膠笛共鳴的影響

(一)目的：測試氣流口角度對塑膠笛共鳴的影響

(二)步驟：

1. 將自製塑膠笛 B10 和打氣機的出氣口連接，固定出氣角度為 0 度，將氣流調到 5m/s，記錄其音調關係。
2. 改變出氣角度為 20、30、...、80、90 度，重複步驟 1。



(三)結果： (●：無共鳴 ●：產生共鳴)

角度(度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
是否共鳴	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
頻率(H z)	X	473.02	471.12	471.12	468.08	473.02	X	X	X	X

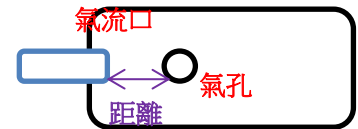
(四)討論：

1. 當角度太小或是太大時皆無法產生共鳴，大約在 20~40 度間都可以有很好的共鳴效果，其他角度即使發生共鳴，響度也不大。

探討 2、氣流口位置對塑膠笛頻率的影響

(一)目的：測試氣流口位置對塑膠笛頻率的影響

(二)步驟：

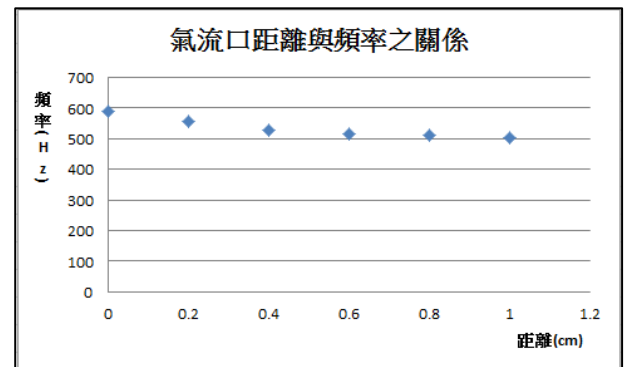


1. 將自製塑膠笛 B12 和打氣機的出氣口連接，固定出氣角度為 30 度，將氣流調到 5m/s，距離為 0 cm 記錄其音調關係。
2. 改變距離為 0.2 cm、0.4 cm、0.6 cm、0.8 cm 及 1.0 cm，重複步驟 1，並進行傅立葉分析。

(三)結果：1. 數據

距離(cm)	頻率(Hz)
0.00	588.28
0.20	558.28
0.40	527.25
0.60	515.04
0.80	510.04
1.00	502.11

2. 圖形



(四)討論：

1. 由上面的結果中可發現，頻率的大小會隨著氣流口氣孔的距離增加而變小，顯示距離亦是影響頻率大小的一個因素，原因可能是氣流口的距離改變，而氣流到達尖劈時的渦流效果或流速也發生了變化，因而影響了頻率。
2. 以上的因素可以用 Helmholtz 和 Rayleigh 曾經發展出的管口修正量來說明，因為和氣孔的距離改變，使其管口修正量增加，造成波長變大，因此頻率就變小了。

探討 3、氣流口流速對塑膠笛頻率的影響

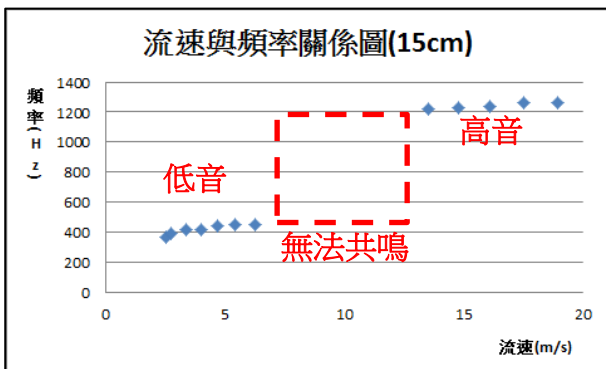
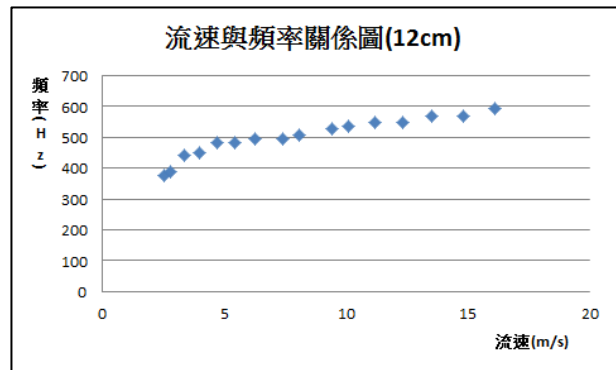
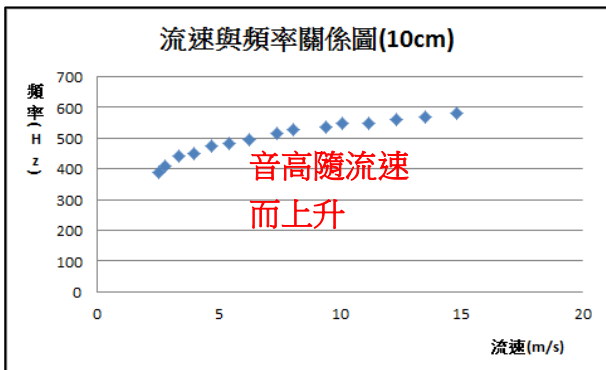
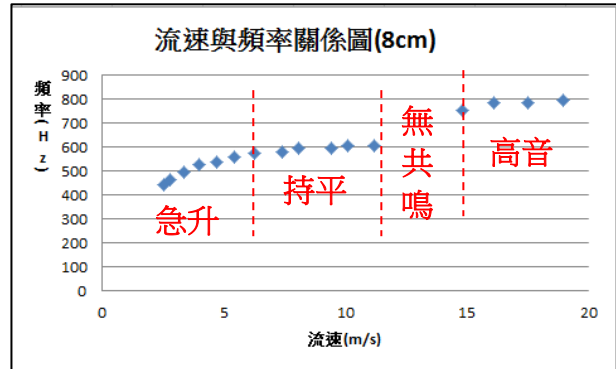
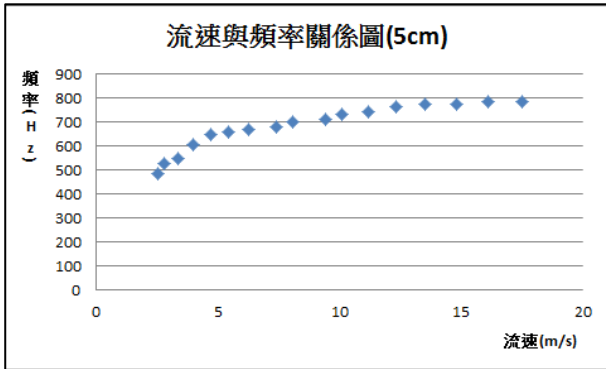
(一)目的：測試氣流口流速對塑膠笛頻率的影響

(二)步驟：

1. 將自製塑膠笛 B5(長度 5cm)和打氣機的出氣口連接，固定電壓為 4.0V，出氣角度為 30 度，距離為 0 cm 記錄其音調關係。
2. 逐漸調大電壓，並將笛音波形記錄下來，進行傅立葉分析。

3. 更改管子為 B8、B10、B12 及 B15，重複步驟 1、2。

(三)結果：各管子流速與頻率之關係圖如下



(四)討論：

1. 由實驗結果中發現，頻率的大小並不是固定不變的，例如關係圖(8cm)，頻率會隨著氣流流速的增加而增加，而到了某些流速時共鳴會忽然消失，加大到某一個流速時，共鳴又出現，但出現的是頻率高好幾倍的泛音。這樣的結果與一般人認知氣流的大小只是影響響度的大小，並不會影響音調的高低有明顯的不同。
2. 由以上的發現也可以解釋，為什麼我們之前測試市售陶笛，音高會高半音或低半音，主要是受到氣流流速的影響，若高半音表示氣流流速過快，所以要降低流速，若低半音表示流速過慢，要加大流速，故這類的樂器，都需透過事前的練習及校正，才可以真的吹出準確的音高。

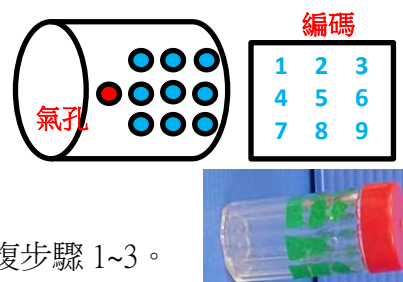
研究六、指孔對自製塑膠管笛頻率之影響

探討 1、指孔位置對塑膠管音調的影響

(一)目的：測試不同指孔位置對塑膠管音調的影響

(二)步驟：

1. 將自製塑膠管 B10 和打氣機的出氣口連接，將氣流調到 5m/s，記錄其音調關係。
2. 打開欲測量之指孔位置，其餘八個用膠布封住(如圖)，
重複步驟 1。
3. 將數據收集，並進行傅立葉分析。
4. 改變塑膠管為 B8(長 8cm)、B12(長 12cm)、C10(長 10cm)，重複步驟 1~3。



(三)結果：數據

(B：口徑 4cm C：7.2cm)

開放指孔	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
頻 率 (Hz)	B8	732.42	732.42	732.42	732.42	732.42	732.42	732.42	732.42	732.42
	B10	610.35	610.35	610.35	610.35	610.35	610.35	610.35	610.35	610.35
	B12	549.32	549.32	549.32	549.32	549.32	549.32	549.32	549.32	549.32
	C10	366.21	366.21	366.21	366.21	366.21	366.21	366.21	366.21	366.21

(四)討論：

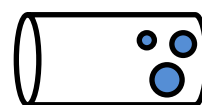
1. 由上面的數據中發現，同一種管子，指孔的位置不同時，頻率都相同，顯示指孔的位置並不會影響頻率的大小。
2. 另外從 B8、B10、B12 中可以發現，不同長度的管子，吹出來的頻率也不同，且同樣條件下，管子越長頻率越小。而由 C10(口徑 7.2cm、長度 10cm)的數據也發現，當管子越粗時，頻率也會越小。

探討 2、指孔面積對塑膠管音調的影響

(一)目的：測試單一指孔面積對塑膠管音調的影響。

(二)步驟：

1. 將自製塑膠管 Ic 和打氣機的出氣口連接，將氣流調到 5m/s，記錄其音調關係。
2. 打開欲測量之面積的指孔，其餘五個用膠布封住。
3. 將數據收集，並進行傅立葉分析。

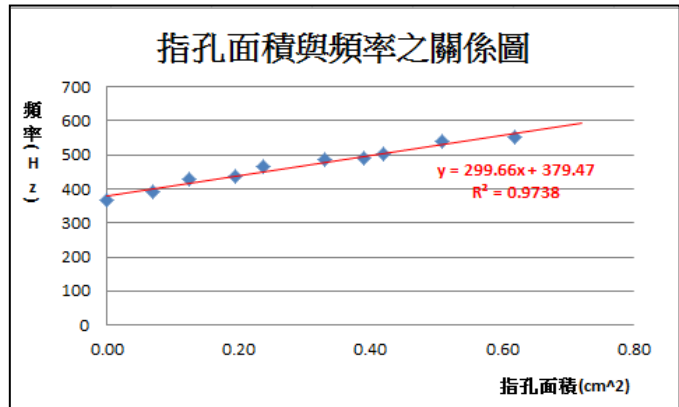


一次打開一個指孔，但面積越來越大。

(三)結果：1. 數據

指孔面積(cm ²)	頻率(Hz)
0.00	366.21
0.07	393.25
0.13	427.25
0.20	438.26
0.24	465.22
0.33	488.28
0.39	492.11
0.42	501.23
0.51	539.12
0.62	553.22

2. 圖形



(四)討論：

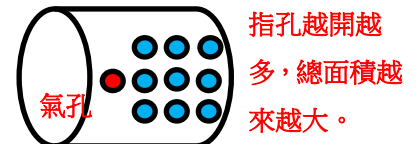
1. 由結果中可發現，當指孔的面積越大時，音調也會越高。
2. 如果將大面積的指孔改成小面積的指孔，又會產生甚麼效果呢？為了瞭解這個差別，我們設計了以下的實驗。

探討 3、指孔開孔數對笛音音調的影響

(一)目的：測試指孔總開孔面積對塑膠笛音調的影響。

(二)步驟：

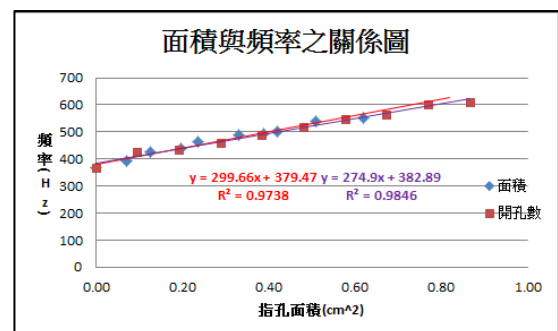
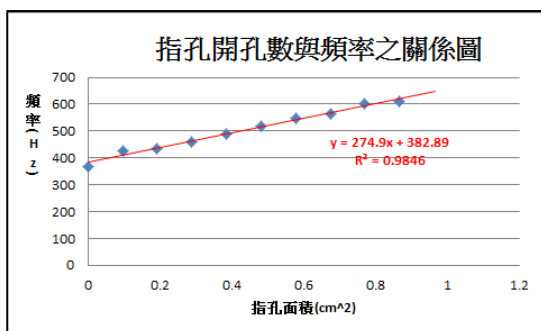
1. 將自製塑膠笛 Ic 和打氣機的出氣口連接，將氣流調到 5m/s，記錄其音調關係。
2. 將指孔開孔數逐漸增加，重複步驟 1，並進行傅立葉分析。



(三)結果：1. 數據

總面積(cm ²)	0.00	0.10	0.19	0.29	0.38	0.48	0.58	0.67	0.77	0.87
頻率(Hz)	366.21	427.25	435.25	458.22	488.28	519.11	549.32	562.12	602.39	610.35

2. 圖形



(四)討論：

1. 由實驗結果我們發現，開孔數越多、總開孔面積越大時，頻率也跟著越大。

2. 將兩種趨勢線放在一起相比，沒想到兩條線竟然幾乎重疊在一起，顯示音調的高低只和開孔的總面積有關，和開孔的位置及方式並沒有關係。

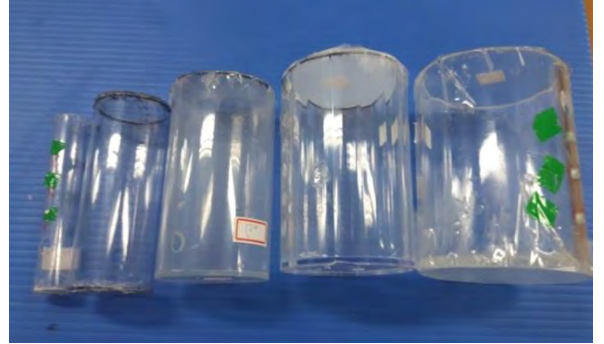
研究七、空腔大小對自製塑膠管笛頻率之影響

探討 1、空腔口徑大小對塑膠管音調的影響

(一)目的：測試空腔口徑大小對塑膠管音調的影響

(二)步驟：

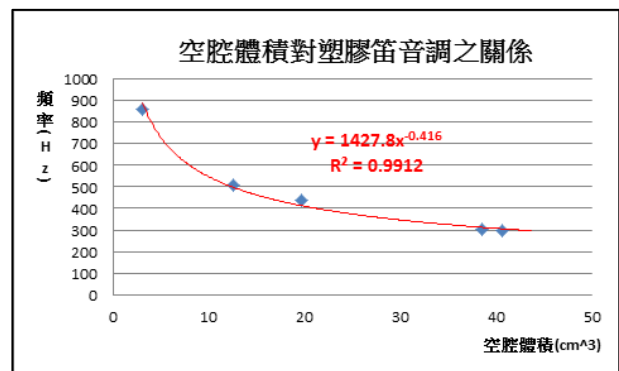
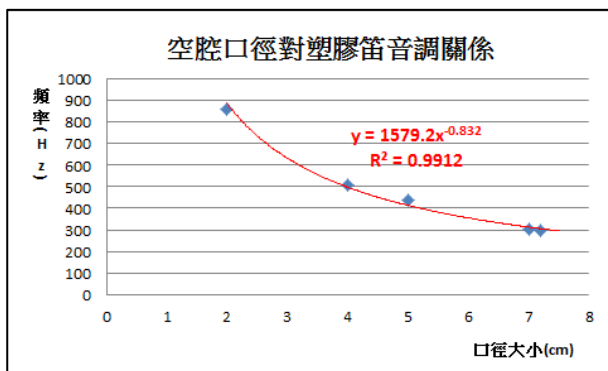
1. 將自製塑膠管 A10(口徑 2cm)和打氣機的出氣口連接，將氣流調到 5m/s，記錄其音調關係。
2. 使用長度固定口徑不同的塑膠管 B10、C10、G10、H10，重複步驟 1 並進行傅立葉分析。



(三)結果：1. 數據

口徑(cm)	2.00	4.00	5.00	7.00	7.20
體積(cm ³)	3.14	12.56	19.63	38.47	40.69
頻率(Hz)	862.32	510.35	439.45	305.18	295.28

2. 圖形



(四)討論：

1. 由實驗結果中發現，塑膠管的音調會隨著空腔的體積增加而變小，其關係式為：

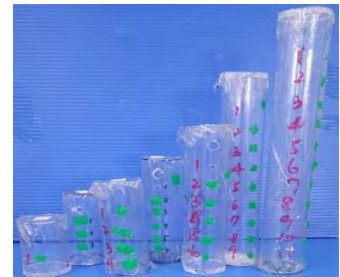
$$y = 1427.8x^{-0.416} \quad (y : \text{頻率} ; x : \text{體積})。$$

探討 2、空腔長度對塑膠管音調的影響

(一)目的：測試空腔長度對塑膠管音調的影響

(二)步驟：

1. 將自製塑膠管 B5(口徑 4cm)和打氣機的連接，將氣流調到 5m/s，記錄其音調關係。
2. 分別使用不同口徑的塑膠管(如下表)，重複步驟 1，並進行傅立葉分析。

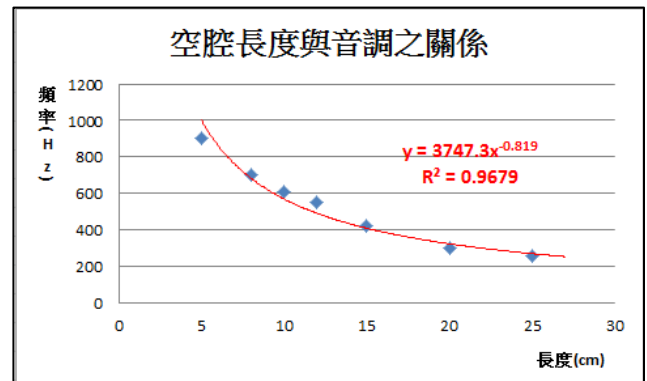


編號	B5	B8	B10	B12	B15	B20	B25
口徑(cm)	4	4	4	4	4	4	4
長度(cm)	5	8	10	12	15	20	25

(三)結果：1. 數據

編號	頻率(Hz)
B5	899.49
B8	702.42
B10	610.35
B12	549.32
B15	420.02
B20	298.32
B25	255.23

2. 圖形



(四)討論：

1. 本次研究的塑膠笛主要是圓柱狀，故空腔長度的關係就等於體積的關係。
2. 由實驗結果可知，當空腔體積越大時，得到的音調越低。關係式為： $y = 3747.3x^{-0.819}$

研究八、自製樂器之研發

探討 1、伸縮塑膠笛的製作

(一)目的：製作可以伸縮的塑膠笛。

(二)步驟：

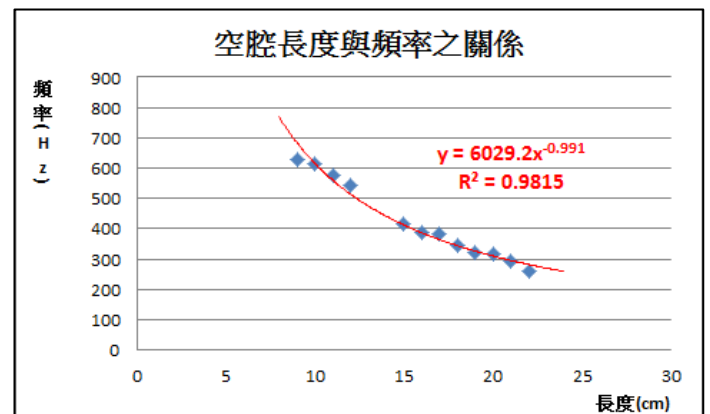
1. 將兩個口徑差不多的塑膠管切成適當的長度，其中一個纏上止瀉帶以防漏氣。
2. 將其中一管鑽出氣孔後，再將兩者組合即完成(如上圖)。
3. 測試不同長度的塑膠笛音調的情形，並進行傅立葉分析。



(三)結果：1. 數據

規格	伸縮長度(cm)	頻率
短伸縮	9	630.11
	10	615.80
	11	576.65
	12	543.04
長伸縮	15	416.22
	16	389.11
	17	382.21
	18	346.21
	19	322.12
	20	315.32
	21	293.11
	22	262.13

2. 圖形



(四)討論：

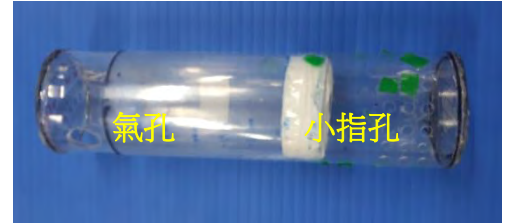
1. 透過伸縮的方式，可以改變管子的長度而達到改變音階的效果，而且還可以吹出半音的音程差，又可吹出陶笛吹不出的滑溜音。
2. 本實驗共使用了長短兩種不同的伸縮笛，將兩者數據合起來做出趨勢線後發現，頻率大約和長度呈現倒數的關係，其關係式為： $f = 6029.2 \times l^{-0.991}$ (f ：頻率； l ：長度)。

探討 2、伸縮塑膠笛的製作(改良)

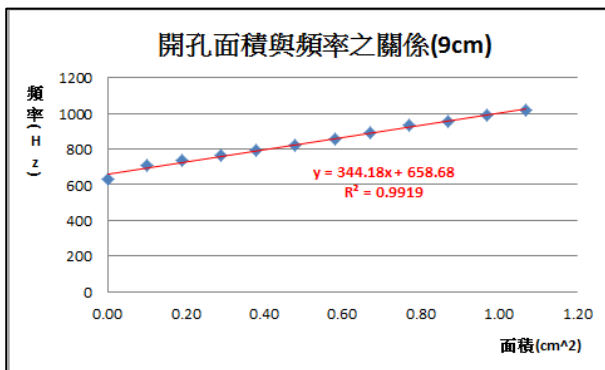
(一)目的：製作可以吹出更廣音域的伸縮塑膠笛。

(二)步驟：

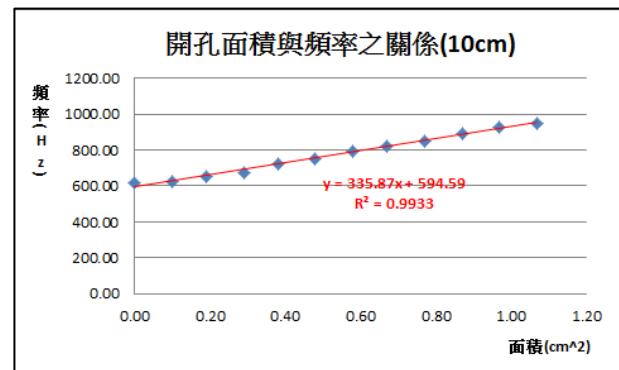
1. 將兩個口徑差不多的塑膠管切成適當的長度，其中一個纏上止瀉帶以防漏氣。
2. 在其中一個塑膠管鑽上許多小指孔，再將兩者組合即完成(如右上圖)。
3. 測試不同長度及開孔面積塑膠笛音調的情形，並進行傅立葉分析。



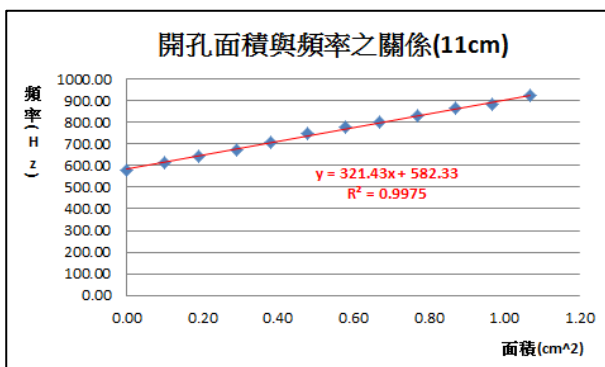
(三)結果：關係圖與方程式如下



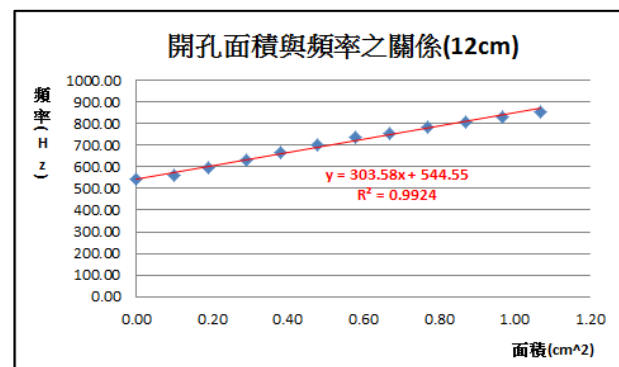
$$y = 344.18x + 658.68$$



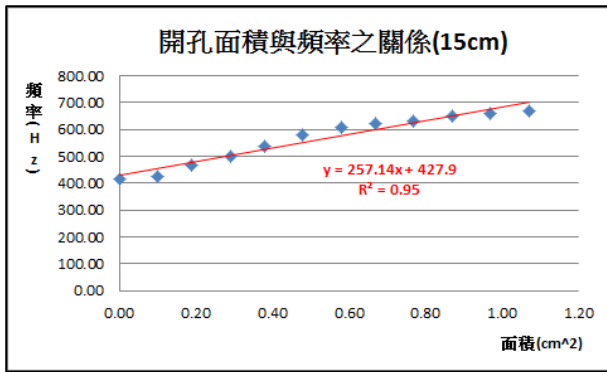
$$y = 335.87x + 594.59$$



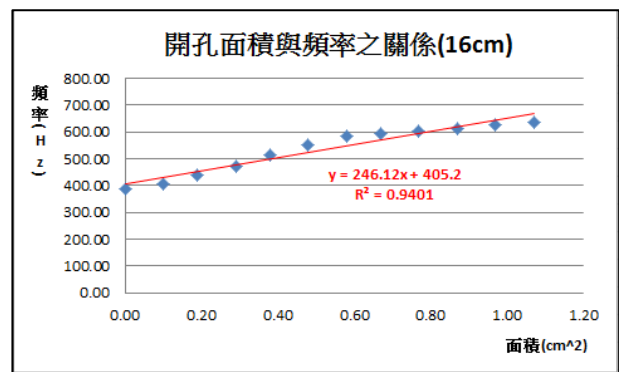
$$y = 321.43x + 582.33$$



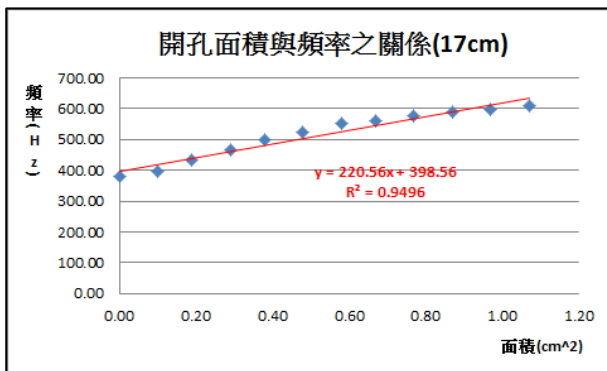
$$y = 303.58x + 544.55$$



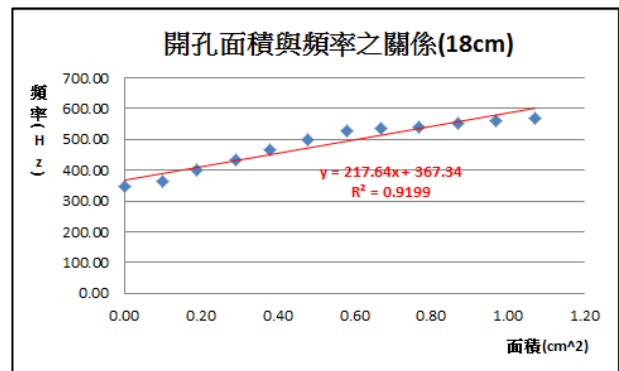
$$y = 257.14x + 427.9$$



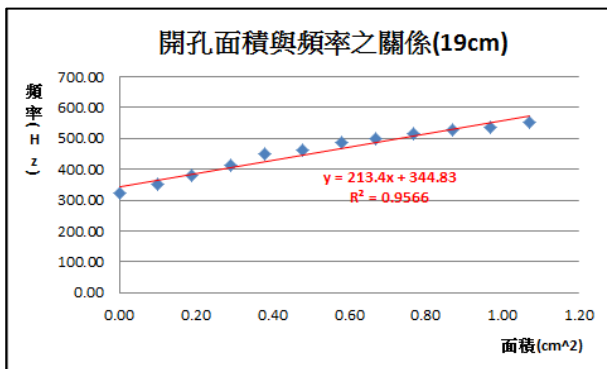
$$y = 246.12x + 405.2$$



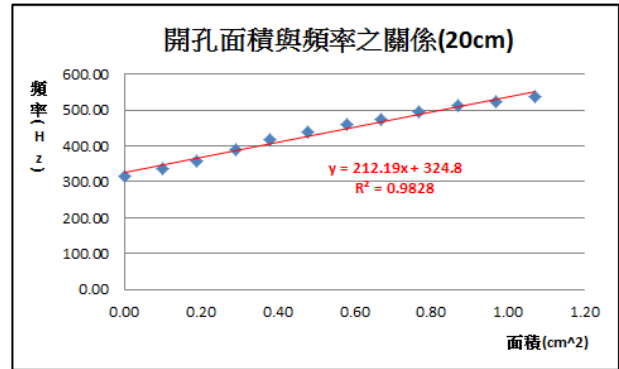
$$y = 220.56x + 398.56$$



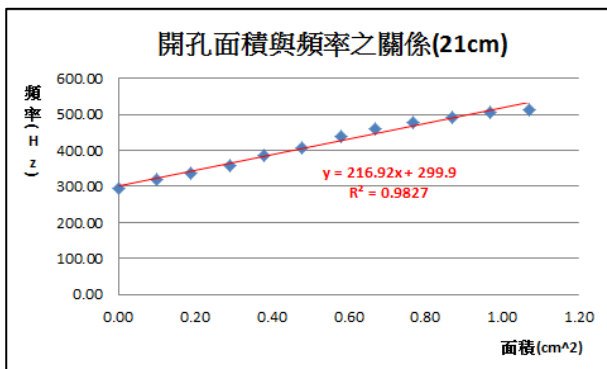
$$y = 217.64x + 367.34$$



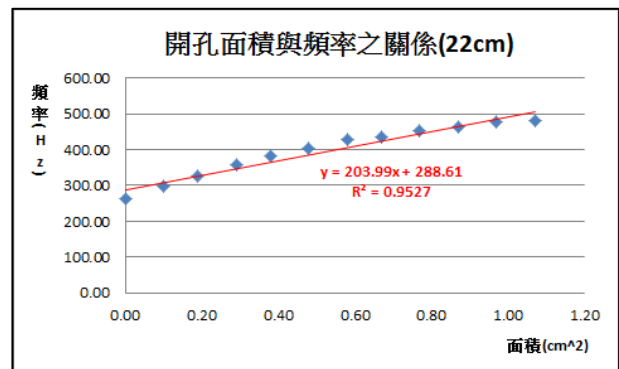
$$y = 213.4x + 344.83$$



$$y = 212.19x + 324.8$$



$$y = 216.92x + 299.9$$



$$y = 203.99x + 288.61$$

(四)討論：

1. 本實驗製作出長短兩種伸縮塑膠笛，並鑽上指孔。經過完整的測試後，找到 12 個各種不同長度下，塑膠笛的面積與頻率的關係式。
2. 雖然透過這些方程式就可以求得各種不同長度下，指孔面積和頻率之關係，但是否有更好的通式可以推算頻率？為了完成通式，我們假設頻率(f)和指孔面積(A)有 $f = a \times A + b$ 的關係存在，其中 A 項係數 a 與其塑膠笛長度有關，b 代表指孔全關時的頻率，以此為基礎，我們作了以下的嘗試。

探討 3、伸縮塑膠笛的通式推導

(一)目的：推導出伸縮塑膠笛的頻率通式。

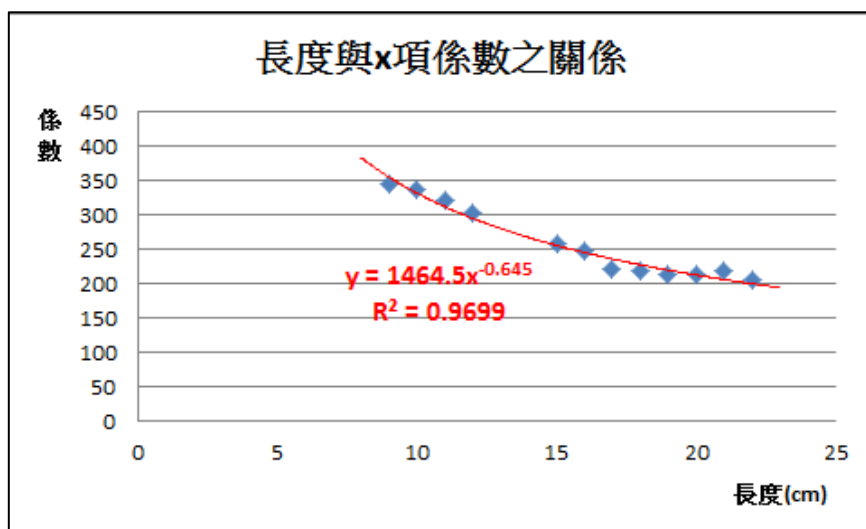
(二)步驟：

1. 將探討 2 中的方程式中 x 項的係數和塑膠笛長度比較，找出長度和係數的關係圖。
2. 將探討 1 中未開孔的頻率方程式加入通式中，作為此通式的 y 軸截距 b，此即為指孔全關時的頻率值。

(三)結果：1. 數據

長度(cm)	9	10	11	12	15	16	17	18	19	20	21	22
x 項係數	344.18	335.87	321.43	303.58	257.14	246.12	220.56	217.64	213.4	212.19	216.92	203.99

2.關係圖



(四)討論：

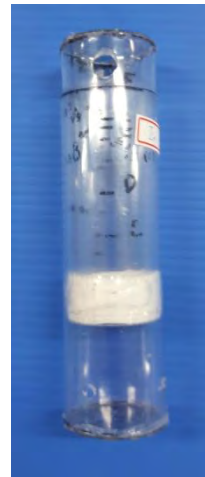
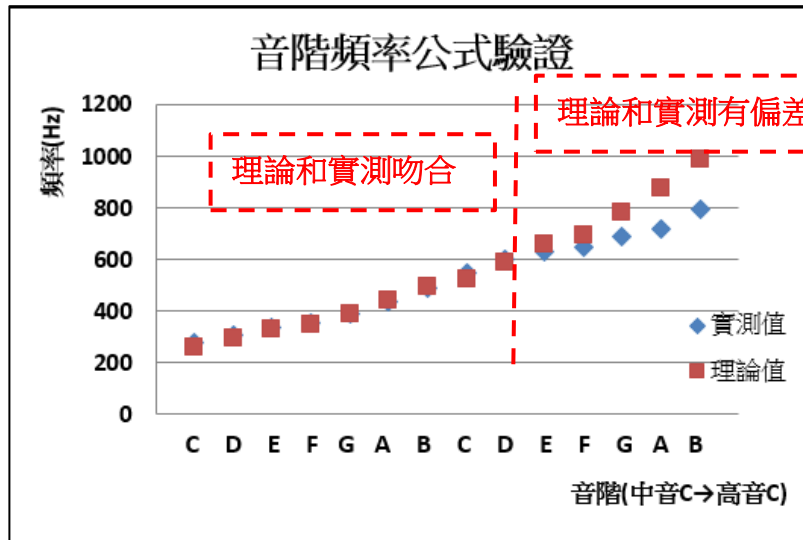
1. 由上圖可以求得係數 a 的關係式可表示為： $a = 1464.5 * l^{-0.645} \dots \dots \textcircled{1}$
2. y 軸的截距 b 則以探討 1 之方程式表示為： $b = 6029.2 * l^{-0.991} \dots \dots \textcircled{2}$
3. 將①、②兩式放入 $f = a \times A + b$ 中可得其通式為：

$$f = (1464.5l^{-0.645})A + 6029.2l^{-0.991} \quad (A : \text{開孔面積})$$

利用此通式，只要知道伸縮管長度及開孔面積就可以推出其頻率大小。

4. 配合音階頻率表，可以找出下列的組合來設計塑膠笛。

中央 C	音階		C	D	E	F	G	A	B
	頻率(Hz)	理論	262	294	330	349	392	440	494
		實測	275.18	305.18	336.11	356.21	390.35	438.28	488.28
	長度(cm)		23.5	21	18.8	17.7	15.8	15	15
	指孔(cm ²)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.32
高八度	音階		C	D	E	F	G	A	B
	頻率(Hz)	理論	524	588	660	698	784	880	988
		實測	549.32	602.35	645.35	640.35	686.35	721.39	792.42
	長度(cm)		15	15	15	15	15	15	15
	指孔(cm ²)		0.44	0.69	0.97	1.12	1.46	1.84	2.26



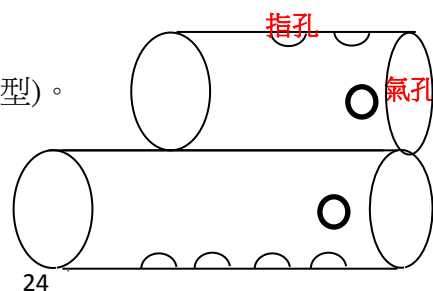
5. 長管長度 23.5cm~15cm 間，再配合指孔就可以吹出從中央 C 到高八度 F 的音階，中間配合長度的伸縮，也可以輕易地吹出 C#、D#及 F#等升半音的音階，不再受限於指孔的音階。為了方便吹奏，所以在上面標上音階，其成果如右圖所示。

6. 經過實測與理論的互相比較，我們求出的趨勢方程可以準確預測中央 C ~ 高八度 D 的範圍，而音階 E ~ B 則與理論有些偏差，顯示此公式推論上的限制。

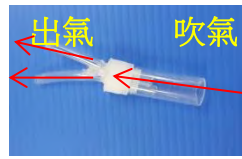
探討、4 陶笛的製作(開孔型)

(一)目的：製作可以吹出合音的塑膠笛(開孔型)。

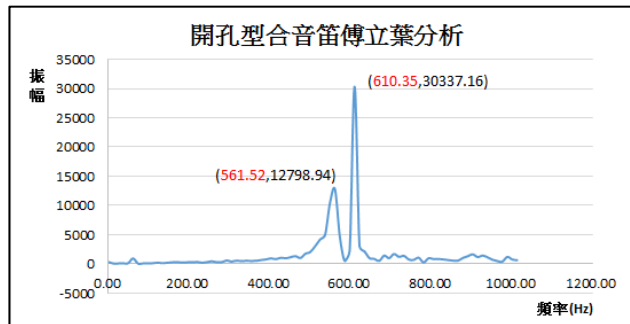
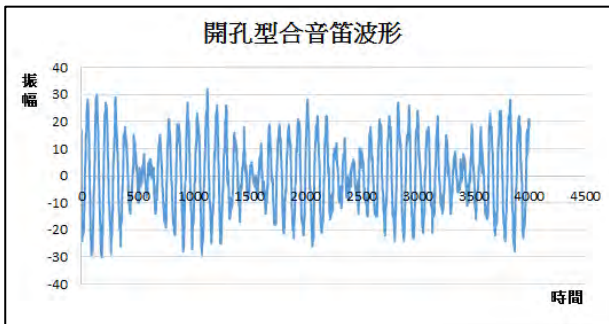
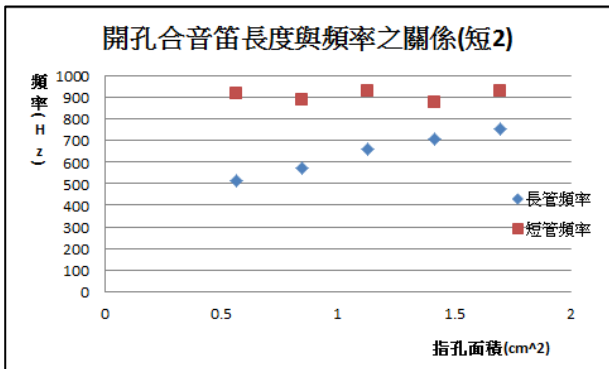
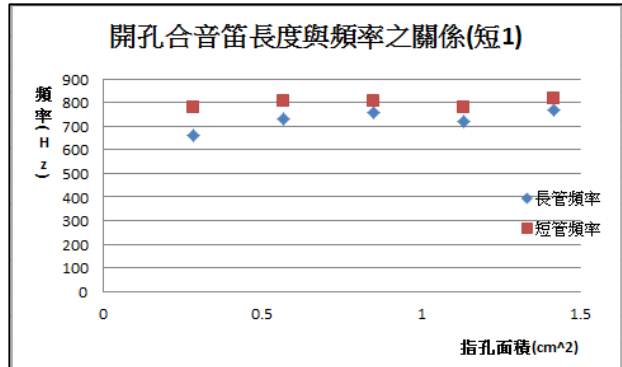
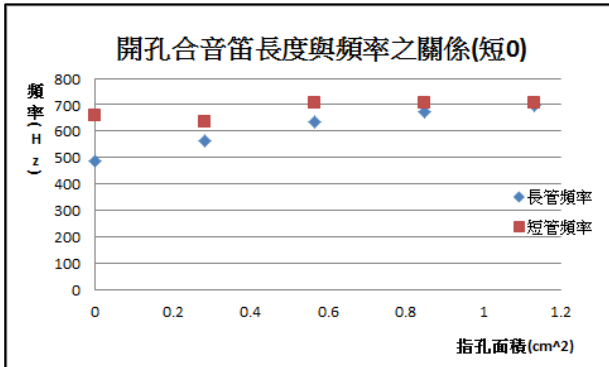
(二)步驟：



1. 製作長、短塑膠笛並開孔。
2. 將兩種塑膠笛用熱溶膠黏在一起(如右圖)。
3. 製作可一次吹兩孔的吹嘴(如右圖)。



(三)結果：



(四)討論：

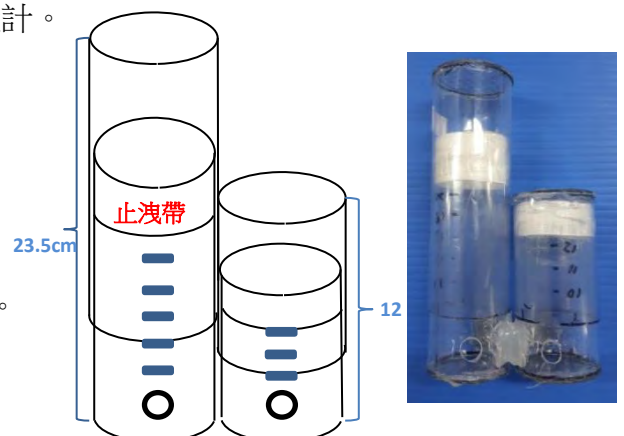
1. 利用特殊的吹嘴可一次吹兩管塑膠笛，並同時發出高、低兩種音階，造成合音的效果。
2. 開孔型合音笛吹奏方便，但音階受限於音孔的設計。

探討 5、合音陶笛的製作(伸縮型)

(一)目的：製作可以吹出合音的塑膠笛(伸縮型)。

(二)步驟：

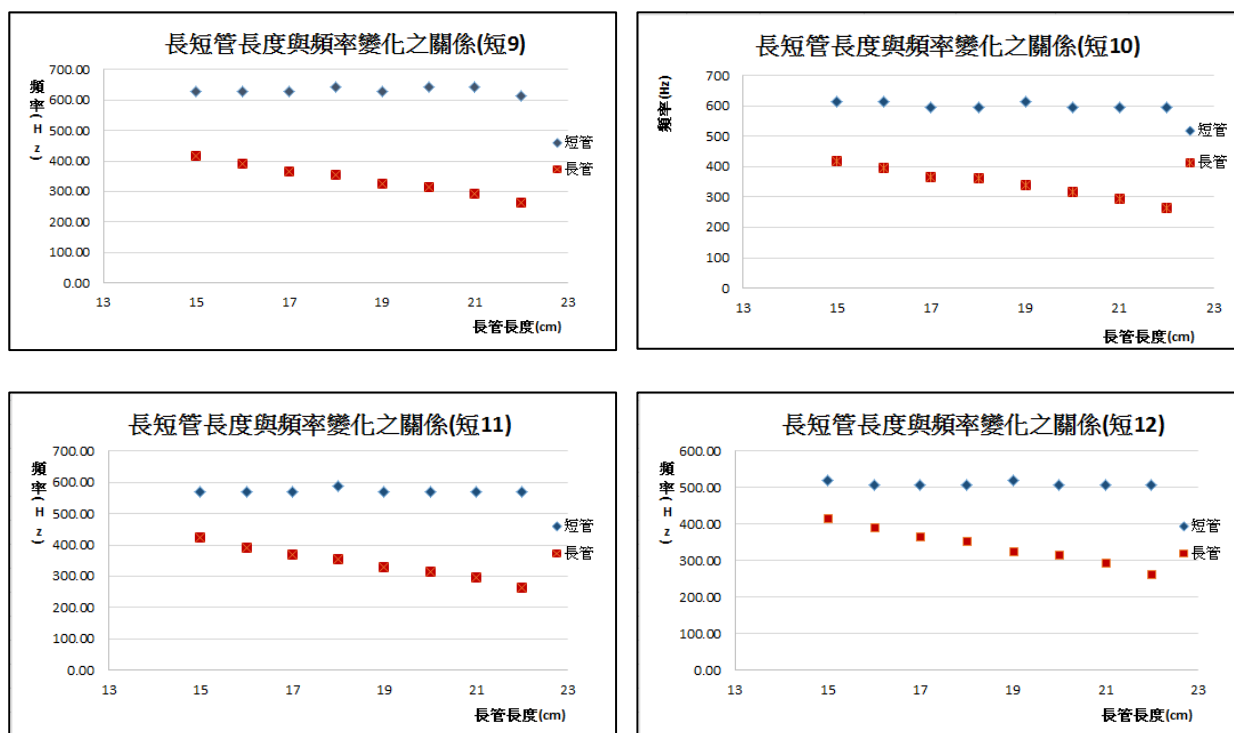
1. 製作長伸縮(15~23.5cm)及短伸縮(9~12cm)塑膠笛。



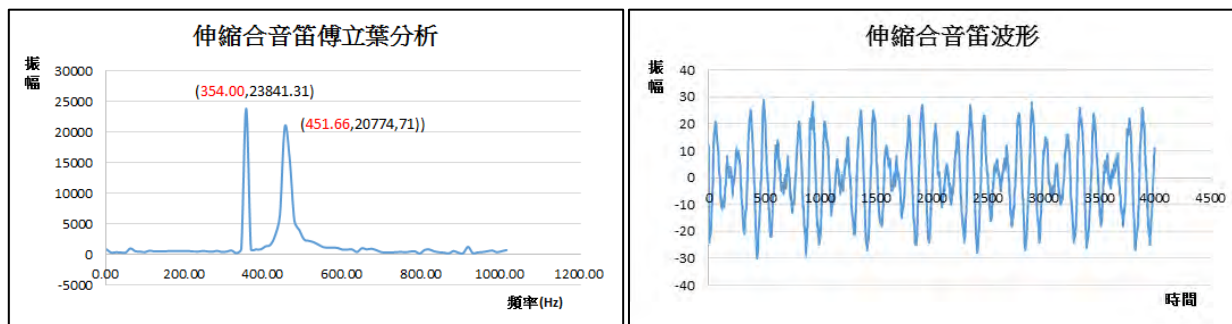
- 將兩種塑膠笛用熱溶膠黏在一起(如右圖)。
- 製作可一次吹兩孔的吹嘴(如右圖)。
- 利用示波器測試並進行傅立葉分析。



(三)結果：1. 音調分析圖如下：



2. 波形與傅立葉分析圖



(四)討論：

- 伸縮形的合音笛較不受指孔的限制，可在音階範圍內配出各種頻率。
- 由示波器傳送的波形中可以發現，合音波主要為一個低音波中間夾著高音波所形成的複合波形。利用傅立葉分析後就可以將兩種波的頻率找出來。
- 為了更加了解塑膠笛內部的氣流流動情形，並和原理的推論互相結合，因此我們又進行了以下的測試。

研究九、自製塑膠管笛空腔內氣流流動之情形

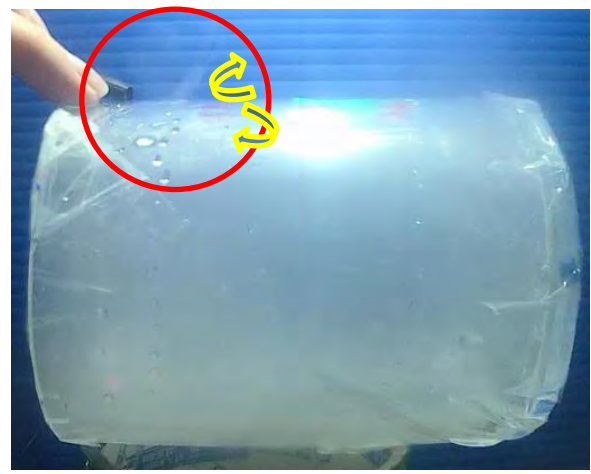
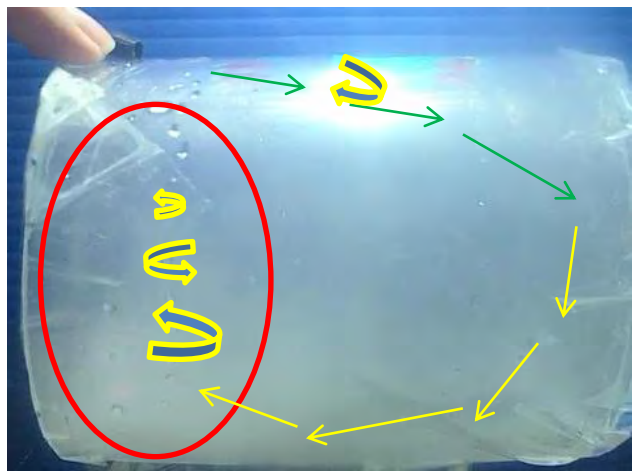
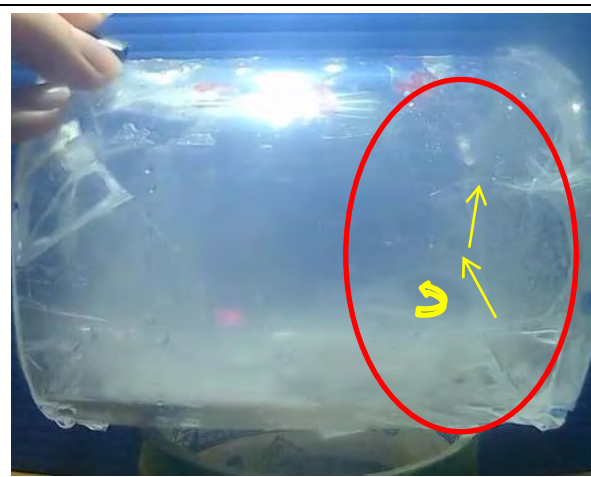

探討 1、塑膠管空腔內氣流流動之情形

(一)目的：測試塑膠管空腔內部氣流流動情形。

(二)步驟：

1. 將塑膠管內部放置一些乾冰及熱水使其產生煙霧。
2. 利用打氣機調到合適的流速使其產生共鳴。
3. 用攝影機將煙霧流動情形拍攝下來並分析。

(三)結果：

	
<p>氣流分成內外產生渦流。</p>	<p>內部撞擊的氣流在氣孔下方產生螺旋上升的氣流。</p>
	
<p>指孔下方的氣流，亦呈現螺旋上升，並產生渦流，指孔的出現，也提高內部氣流流出量。</p>	<p>氣流由氣孔進入，指孔衝出。指孔數越多面積越大，氣流流量也越多，氣孔流速越快。</p>

(四)討論：

1. 透過煙霧的觀察發現，只有氣孔而沒有指孔時，氣流的進出都只靠氣孔，這會減少進入空腔，氣流會在內部撞擊一圈後由尖劈對面衝出，衝出時，因為垂直上升氣流及左右撞擊的氣流互相作用，造成氣流螺旋上升的情況。而氣流衝出和進入兩種力量交互作用會造成空氣的振動，產生類似簧片振動的效果，因而產生聲音，再透過空腔的共鳴，可以將音量放大。
2. 配合前面研究的結果，氣流的流速會影響音調高低，因此當指孔增加時，可提高氣孔氣流進入空腔的量，所以內部的流速上升，因此音調也跟著提高。
3. 此氣流的研究也讓我們對於原理有更加深入的理解。



陸、結論

一、如何測試聲音。

- (一)用簡易的麥克風來可以收取聲音的訊號，再透過示波器將波形資料擷取下來，並用 Excel 的傅立葉分析功能，就可輕易地將波形的頻率完整的分析出來。
- (二)我們使用自製的排水集氣裝置及自動排水系統，解決排水集氣法造成水面上升出氣口流速降低的影響，成功將打氣機的氣流流速測試出來。

二、市售陶笛的性質。

- (一)過去作品多認為陶笛就像音叉一樣是屬於單音樂器，但透過傅立葉分析後我們發現，陶笛除了主要的音調特別大聲外，還是有一些數倍音存在，只是因為響度太小，所以單純看波形不易發現。
- (二)我們發現市售陶笛的音階和理論的音階有些高半音，有些則低半音，後來發現是因為氣流大小造成音階變化所造成的結果。

三、如何自製塑膠管陶笛。

- (一)利用常見的塑膠管製作成塑膠笛，不僅製作方便，而且可以任意控制變因，以便我們日後做更深入的研究。

四、氣孔對自製塑膠管笛頻率之影響。

(一)我們發現氣孔的大小、形狀皆會影響共鳴的產生，氣孔太小共鳴不易發生，而同樣的大小的氣孔中，以圓形和正方形比較容易產生共鳴。

(二)氣孔的位置不同時，也會影響共鳴的頻率，我們推論是與氣流撞擊壁面的距離有關，當距離壁面越近時，音調越高，波長越小。

五、氣流對自製塑膠笛頻率之影響。

(一)氣流的角度測試中，以 20~40 度的範圍造成的共鳴效果最好，探討其原因是因為共鳴的產生是因為邊稜音造成的結果，當氣流通過尖劈時會被分成上下兩邊並各自產生渦流，兩渦流互相影響而引起振動，並和空腔產生共鳴。

(二)氣流大小也會造成頻率的差異，且其變化是在某一流速範圍內逐漸增加，有些範圍無法產生共鳴，到達某一流速時頻率會忽然變大，這與過去的作品發現的關係並不相同。

六、指孔對自製塑膠管笛頻率之影響。

(一)指孔的開孔位置並不影響頻率的大小，開孔的面積越大，產生的音調越高。

(二)我們也發現，單一開孔面積如果和數個小孔的總面積相等時，會產生差不多的音調高低。顯示音調的高低只和指孔總面積，配合其原理可推輪，指孔主要是讓氣流排出，使空腔內部流速改變，因而使頻率發生變化。此推論在研究九時得到了呼應。

七、空腔大小對自製塑膠管笛頻率之影響。

(一)研究中發現，空腔的孔徑大小以及長度皆會影響音調，當孔徑越大或長度越長時，體積變大，所以音調就變低了。

(二)將孔徑大小以及長度等變音和頻率互相比較，即可得到孔徑或長度和頻率的關係式。

八、自製樂器之研發。

(一)利用前面的研究成果，我們設計了伸縮型的塑膠笛，接著測試不同空腔長度後得到其關係式： $f = 6029.2 \times l^{-0.991}$ 。

(二)我們將伸縮塑膠笛鑽上指孔後進行測試，找出種不同長度下，指孔面積和頻率之關係，共有 12 條方程式，比較係數後，做出係數和長度的關係圖，再加入伸縮塑膠笛的方程式，最後得到最終的方程式： $f = (1464.5l^{-0.645})A + 6029.2l^{-0.991}$ 。

利用此方程式，只要輸入管長和指孔面積等資訊，就可以直接推算出音調之頻率大小。

(三)利用此上述方程式，我們設計出伸縮加指孔合一的塑膠笛，使塑膠笛的音域更廣，並可吹

出像滑溜音等陶笛無法吹出的技巧。

(四)我們將兩種伸縮塑膠笛黏在一起，再用特殊的吹嘴，可以同時吹出兩種聲音，設計出第二種可以吹出合音的塑膠笛。

九、自製塑膠管笛空腔內氣流流動之情形。

(一)我們將乾冰加上熱水後放入塑膠笛空腔內產生煙霧，以便觀察氣體的流動情形。

(二)透過煙霧的觀察發現，只有氣孔而沒有指孔時，氣流的進出都只靠氣孔，這會減少進入空腔的氣流，氣流會在內部撞擊一圈後由尖劈對面衝出，衝出時，因為垂直上升氣流及左右撞擊的氣流互相作用，造成氣流螺旋上升的情況。而氣流衝出和進入兩種力量交互作用會造成空氣的振動，產生類似簧片振動的效果產生聲音，並透過空腔共鳴。

(三)當氣孔太小時，氣體不易進入空腔，內部渦流也不易產生，內外壓力差不大，因此所以共鳴的聲音較小，所以氣孔太小不易產生共鳴。當氣孔大到某一程度，氣流進出達到最佳平衡，氣體產生的振幅最大，所以共鳴聲最大。

(四)另外從氣流觀察中發現，指孔的氣流主要都是流出而不流入，故並不會在指孔處產生空氣振動效果，因此指孔的位置並不會影響頻率的大小。指孔面積越大，氣流越容易流出所以需要的氣流越大，氣流越大則內部流速越快，氣流撞擊到器壁的時間越短，造成共振的波長被壓縮，所以音調也跟著變高了。

柒、未來展望

本次研究我們開發出了新的樂器，並找出其通式，若能增加不同口徑等變因加入通式，一定可以設計出更多，更具變化性的樂器。

捌、參考資料

- 一、康軒文教事業(2018)。自然與生活科技第三冊。第三章 波與聲音。台北：康軒文教事業。
- 二、黃昱彰等。中華民國第 56 屆中小學科學展覽作品輯「聽蛤蜊在唱歌-蛤笛樂器之研發」。
- 三、李欣朋等。中華民國第 55 屆中小學科學展覽作品輯「瞭解它，笛確可以 DIY」。
- 四、張毓屏。臺灣 2008 年國際科學展覽會作品輯。「全民攻笛」
- 五、邱惠芳等(2014)。低速邊稜音的振動特性。聲學技術。(33 卷 3 期)。2014 年 6 月。
- 六、來玩陶笛。<http://www.scjh.tc.edu.tw>

【評語】 030106

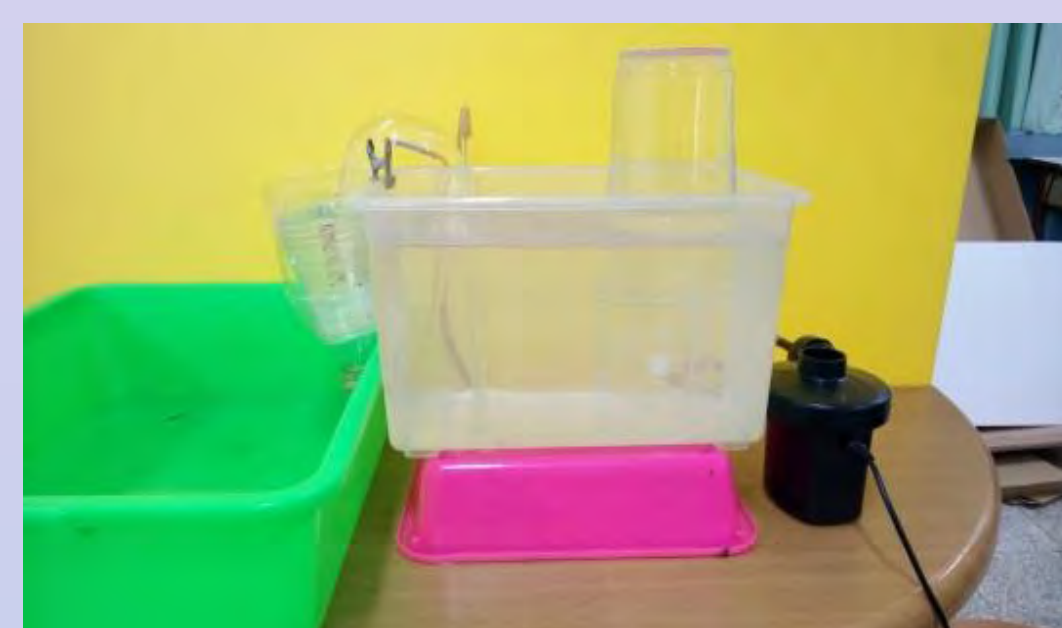
本作品針對自製塑膠管樂器之開發與原理之探討，雖然陶管或管樂器的科展作品不少，但本作品做的很完整，除了有更深入的研究之外，還能對新發現給予合理的解釋，彌補了原創性的不足。本作品發現氣流大小也會造成頻率的差異，且其變化是在達某一流速時頻率會忽然變大，此一發現相當有趣。此外，本研究使用了科學分析法取得了樂器音調的特性及排水 急氣法測流速，也算是相當有創意。期許同學們能保持此科學精神，探討更多未被討論過的問題。

壹、摘要

本次研究利用打氣機及簡易的變壓器製作可調整流速的裝置，透過自製的排水集氣及水位平衡裝置，成功測量出流速大小。利用示波器截取聲波的資訊，進行傅立葉分析，可以找出複合音的頻率。我們自製塑膠發現，頻率的大小與氣流流速、氣流到尖劈的距離、空腔體積、指孔大小皆有關聯，我們製作不同的塑膠笛，最後推出頻率之通式再用此方程式找出音階，設計了伸縮笛、合音笛伸縮版及指孔版等三種樂器。並且利用透明塑膠管和乾冰，觀察空腔共鳴時，內部氣流的流動情形，找出塑膠笛頻率振動的原理，和實驗結果互相呼應。

貳、器材

游標尺、熱熔槍、電鑽、風速計、線鋸機、碼表、打氣機、麥克風、示波器、陶笛、自製塑膠管笛、排水集氣裝置



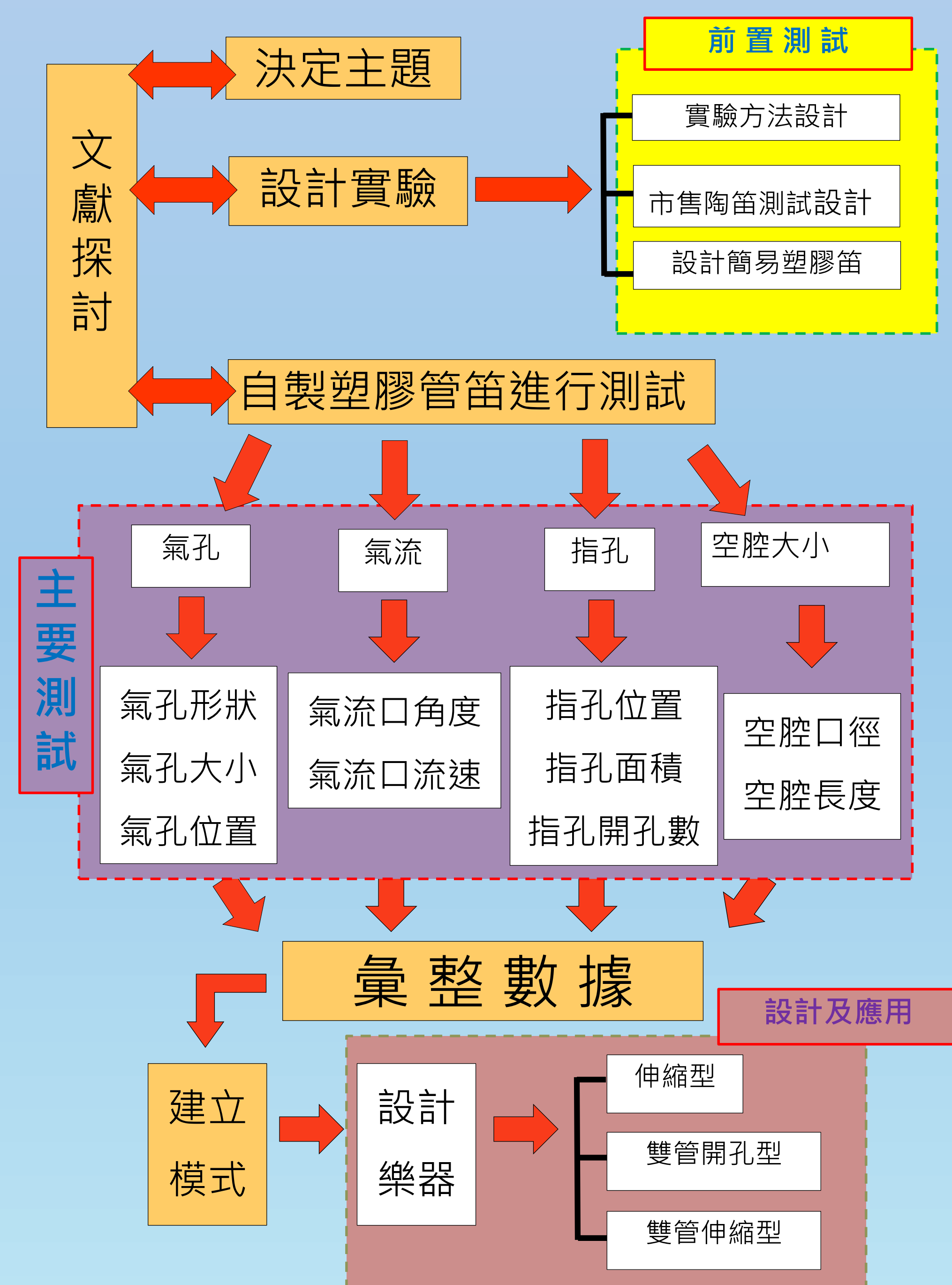
自製塑膠管笛

排水集氣裝置

參、目的

- 一、如何測試聲音。
- 二、市售陶笛的性質。
- 三、如何自製塑膠管陶笛。
- 四、氣孔對自製塑膠管笛頻率之影響。
- 五、氣流對自製塑膠管笛頻率之影響。
- 六、指孔對自製塑膠管笛頻率之影響。
- 七、自製塑膠管笛空腔內氣流流動之情形。
- 八、空腔大小對自製塑膠管笛頻率之影響。
- 九、自製樂器之研發。

肆、研究架構



伍、原理

一、聲波(Sound Wave)：
 聲波為縱波，發生體震動使介質產生縱向（與波行進方向平行的方向）來回的運動。
 $V(\text{波速}) = f(\text{波長}) \times \lambda(\text{頻率})$
 聲波的波速約為 $V = 331.5 + 0.607T$ (其中T為氣溫以°C為單位，V以m/sec為單位。)

二、亥姆霍茲共振(Helmholtz resonance)：

Helmholtz共振腔式一個內部充滿氣體(通常是空氣)並有著開孔的中空腔體聲學裝置，腔體與開孔會因為內部空氣振動跟著產生振動，可以類比為一個質塊-彈簧系統。其原因就是因為頸部的渦流溢放產生共振。

$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V_0 L_{eq}}}$$

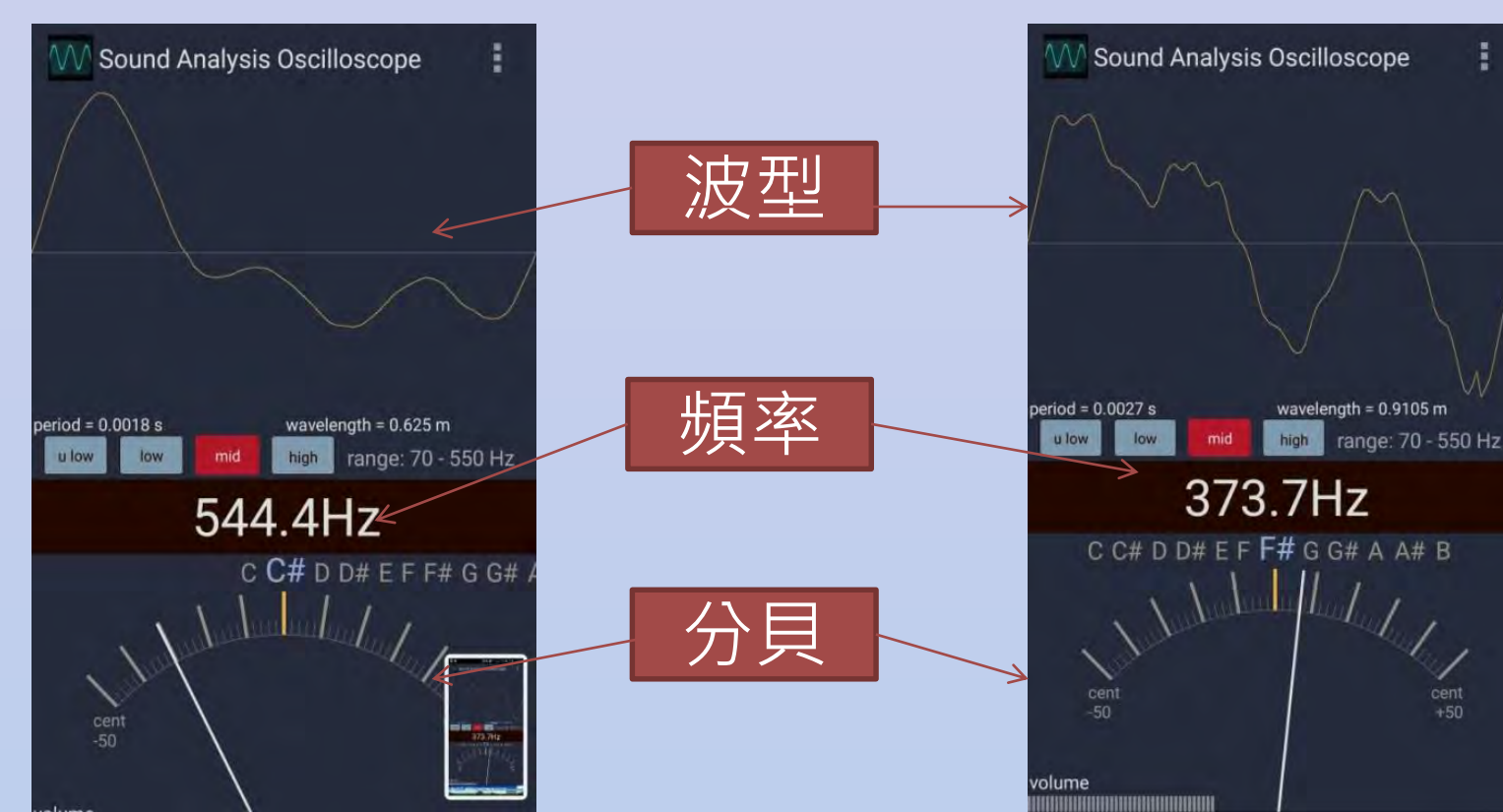
三、管中駐波：

在同一介質中，如果有兩個相同的波長，相向而行，其相位差為1/2時，即可干涉形成駐波。當在共鳴管中形成駐波的頻率與管口外的音叉頻率相同時，則會產生共鳴的現象。當共鳴管中形成駐波時，在開口端處為波腹，在閉口端處則形成節點。

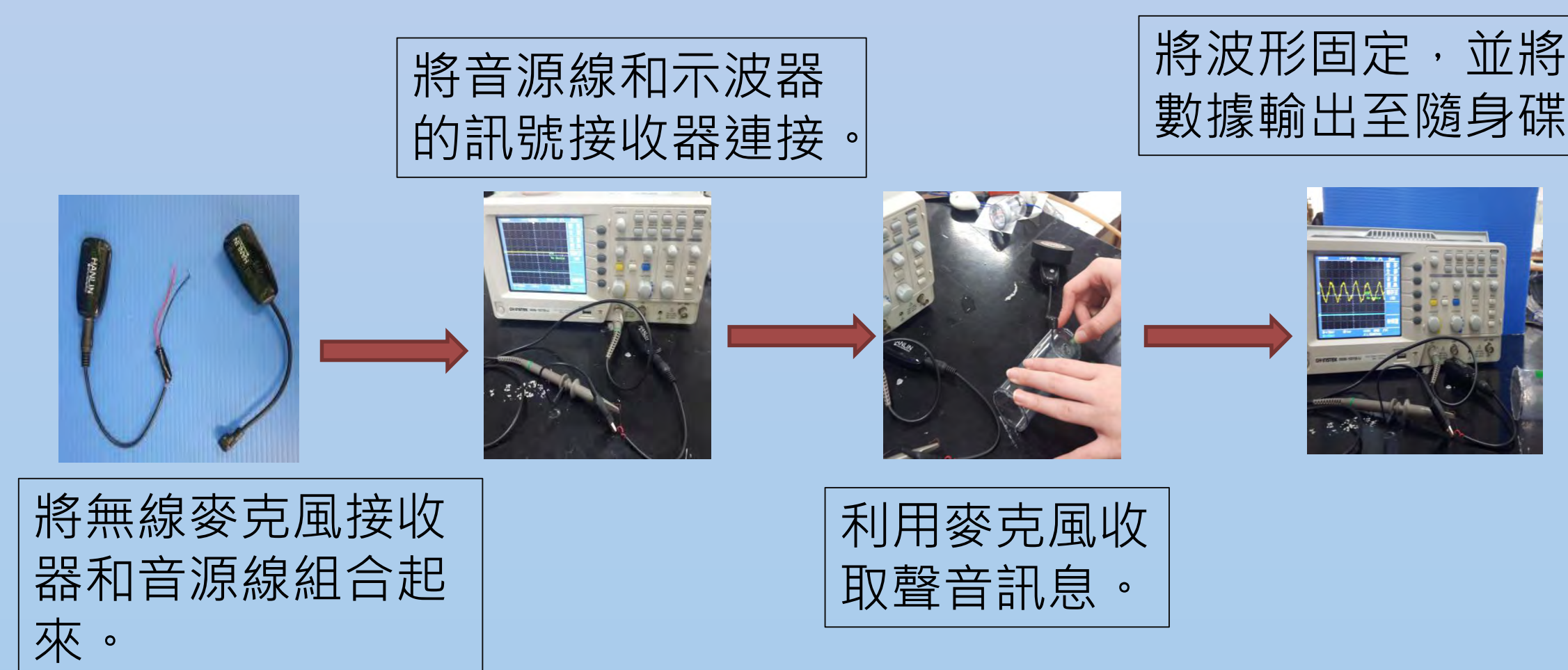
閉管的駐波	管長/波長	駐波頻率	名稱	名稱	節點	腹點
	$n=1, L = \frac{1}{4}\lambda$	$f_1 = \frac{v}{4L}$	第一諧音	基音	1	1
	$n=3, L = \frac{3}{4}\lambda$	$f_3 = \frac{3v}{4L}$	第三諧音	第一泛音	2	2
	$n=5, L = \frac{5}{4}\lambda$	$f_5 = \frac{5v}{4L}$	第五諧音	第二泛音	3	3

陸、研究方法

一、使用APP測試聲音



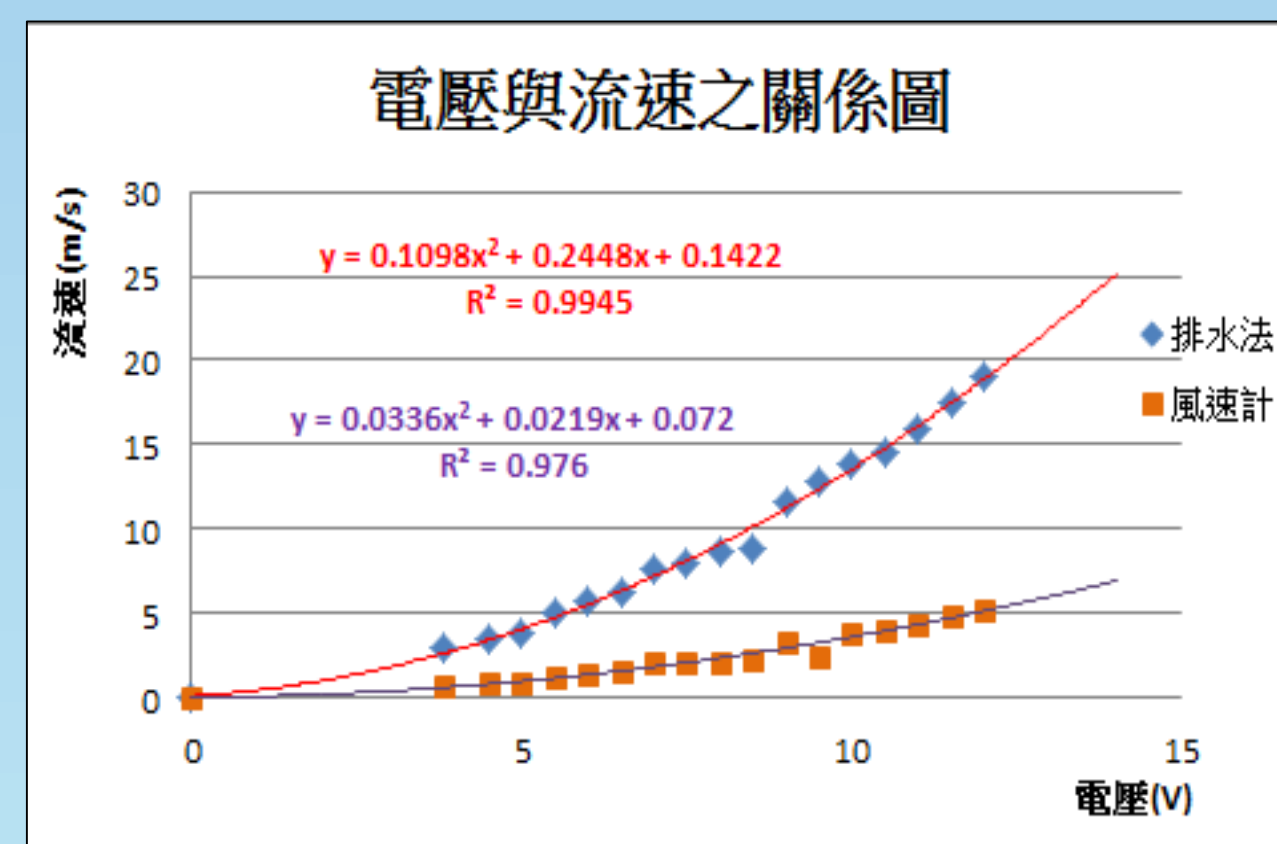
二、利用示波器測試聲音的性質



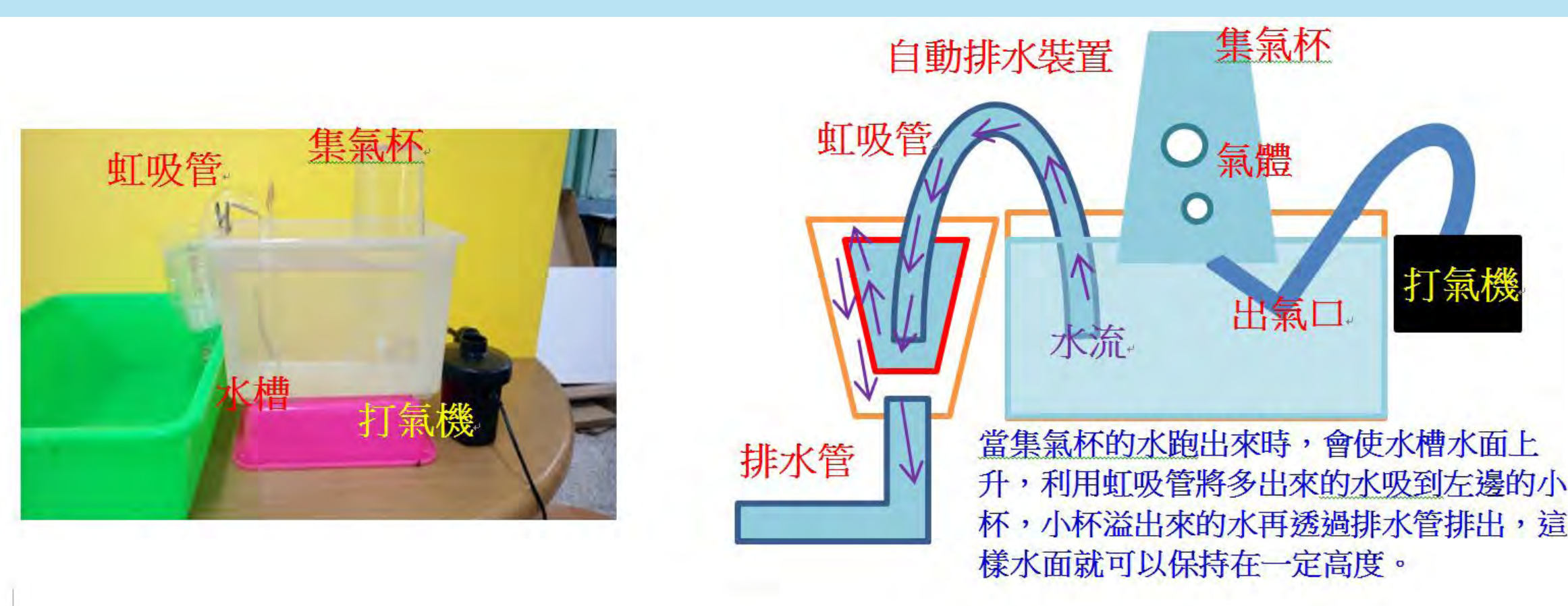
三、測試氣流大小與電壓的關係

步驟：

1. 將打氣機和變壓器連接起來，並調整電壓為4.0伏特。
2. 將氣體用排水及氣法及自動排水裝置收集起來，用碼表測量其收集至2000ml之時間。
3. 改變電壓為4.0、4.5、5.0、...、11.0、11.5、12.0並重複步驟2



當集氣杯的水跑出來時，會使水面上升，利用虹吸管將多出來的水吸到左邊的小杯，小杯溢出來的水跑到外杯排出，這樣水面就可以保持在一定高度。



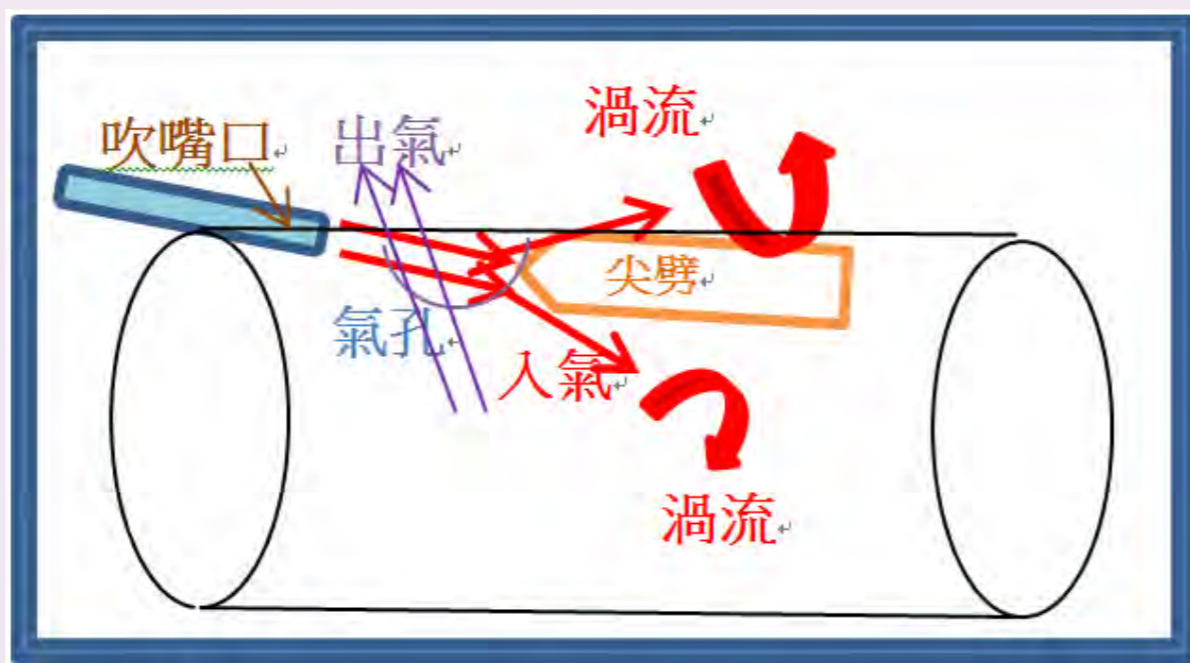
柒、結果與討論

探討1、氣孔形狀對笛音音調的影響

氣孔形狀	○	□	△	▽	◻	◻
測試情形	容易發聲	容易發聲	不易發聲	吹不出聲	不易發聲	不易發聲
頻率(Hz)	610.35	610.35	610.35	X	610.35	610.35
響度(dB)	77.5	76.8	58.9	X	61.3	65.2

討論：

- 由塑膠笛發聲的原理推論，當吹嘴口的氣流衝出時遇到一尖劈將氣流分成兩邊，兩邊的氣流交替形成渦流而產生共鳴，若尖劈附近的空間不足，入氣不夠，則分離的氣流太少或無法有效分離，共鳴的效果就會大大地降低。另外出氣的空間不足，入氣和出氣兩者互相擠壓，也會降低共鳴效果。
- 根據上述想法，我們推測3號氣孔的出氣面過小；4號氣孔的入氣過小；5號氣孔的入氣面及尖劈皆過小；6號氣孔的出氣及入氣之間的距離不足，因此這些形狀的氣孔皆不容易產生共鳴。



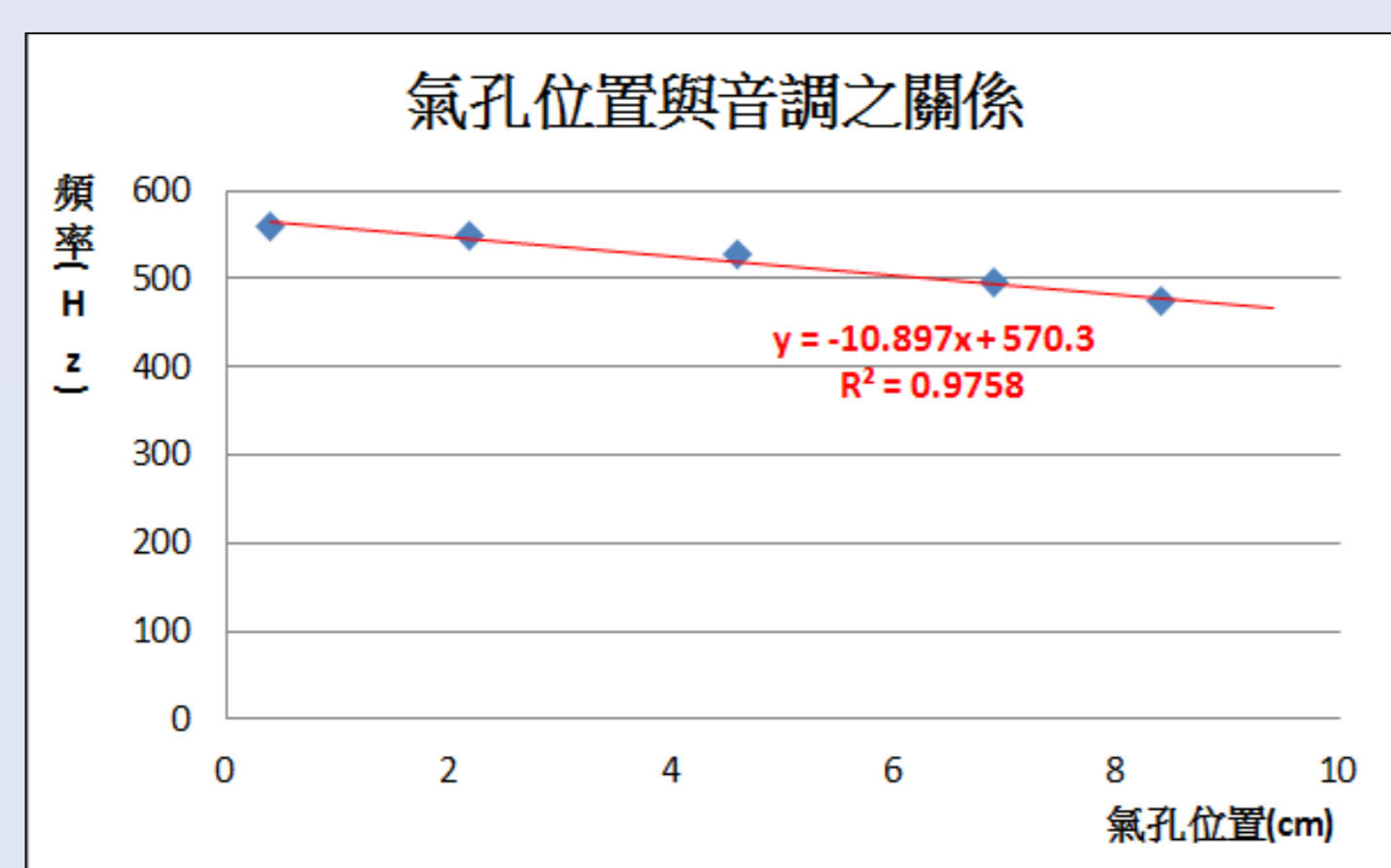
探討2、氣孔大小對笛音音調的影響

氣孔面積 (cm ²)	0.07	0.13	0.20	0.28	0.38	0.64	0.79
測試情形	●	●	●	●	●	●	●
頻率(Hz)	X	X	X	416.12	438.11	460.24	460.24
響度(dB)	X	X	X	59.2	65.2	69.8	70.2

討論：

- 從數據中發現，當氣孔面積需大於0.28cm²時才產生共鳴，且氣孔越大，音調與響度也會慢慢變大，大約到了0.64cm²以上時會達到穩定。

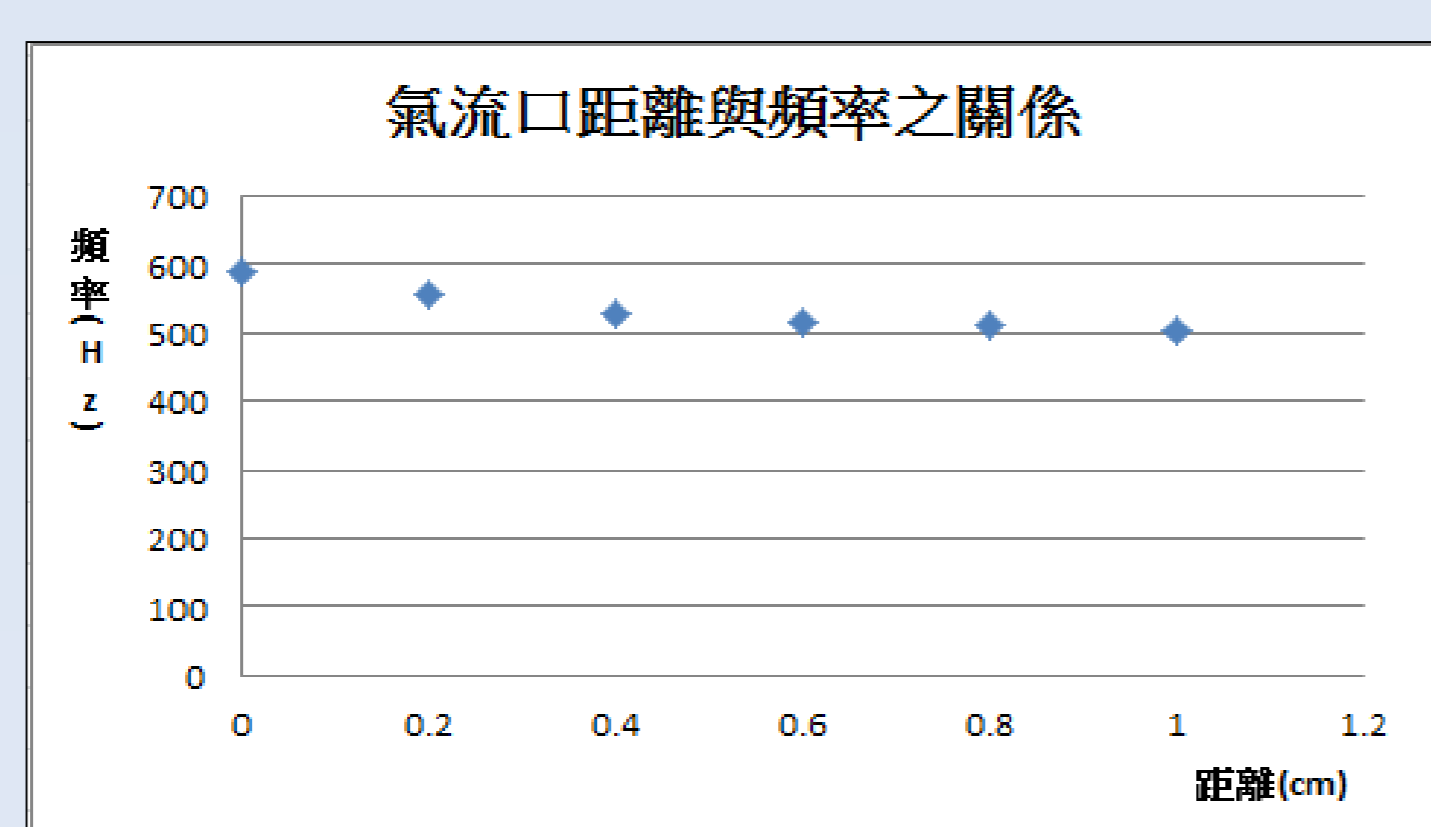
探討3、氣孔位置對塑膠笛音調的影響



討論：

- 由數據中的趨勢我們發現，當氣孔位置距離底部越近時，其音調就越高，我們推測其原因可能是氣流進入空腔後，碰撞壁面的距離縮小，造成內部共鳴的駐波波長被壓縮，根據課本中學到 $v=f \times \lambda$ 公式，在波速不變的情況下，波長變小時，音調就變高了。

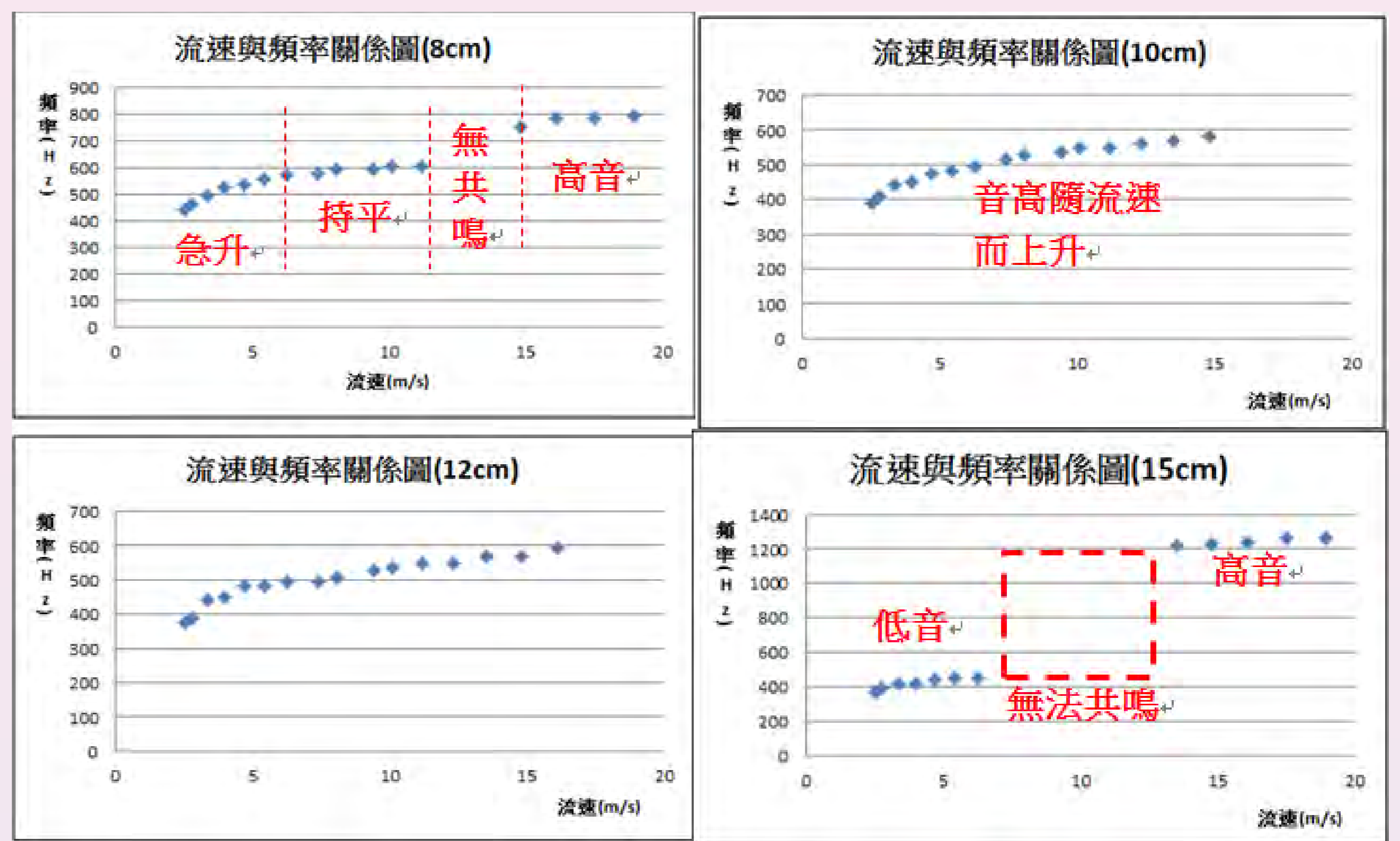
探討4、氣流口位置對塑膠笛頻率的影响



討論：

- 氣流口距離與頻率之關係可以用Helmholtz和Rayleigh曾經發展出的管口修正量來說明，因為和氣孔的距離改變，使其管口修正量增加，造成波長變大，因此頻率就變小了。

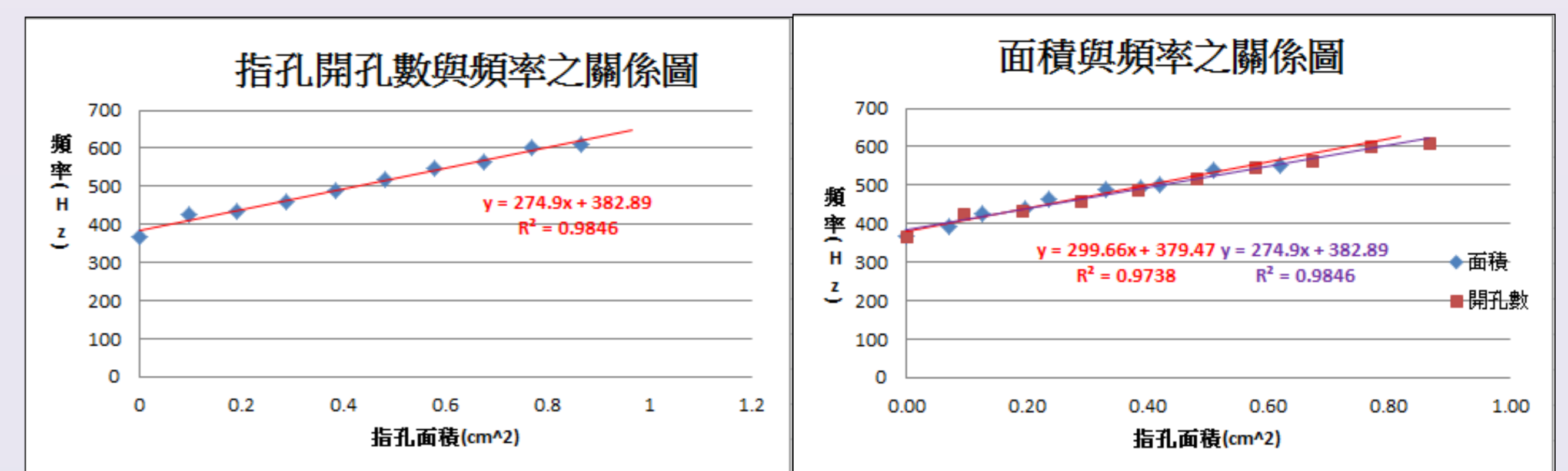
探討5、氣流口流速對塑膠笛頻率的影響



討論：

- 由實驗結果中發現，頻率的大小並不是固定不變的，它會隨著氣流口流速的增加而增加，而到了某些流速時共鳴會忽然消失，加大到某一個流速時，共鳴又出現，但出現的是頻率高好幾倍的泛音。這樣的結果與一般人認知氣流的大小只是影響響度的大小，並不會影響音調的高低有明顯的不同。
- 由以上的發現也可以解釋，為什麼我們之前測試的陶笛，音高會高半音或低半音，主要是受到氣流流速的影響，若高半音表示氣流流速過快，所以要降低流速，若低半音表示流速過慢，要加大流速，故這類的樂器，還需透過事前的練習及校正，才可以真的吹出準確的音高。

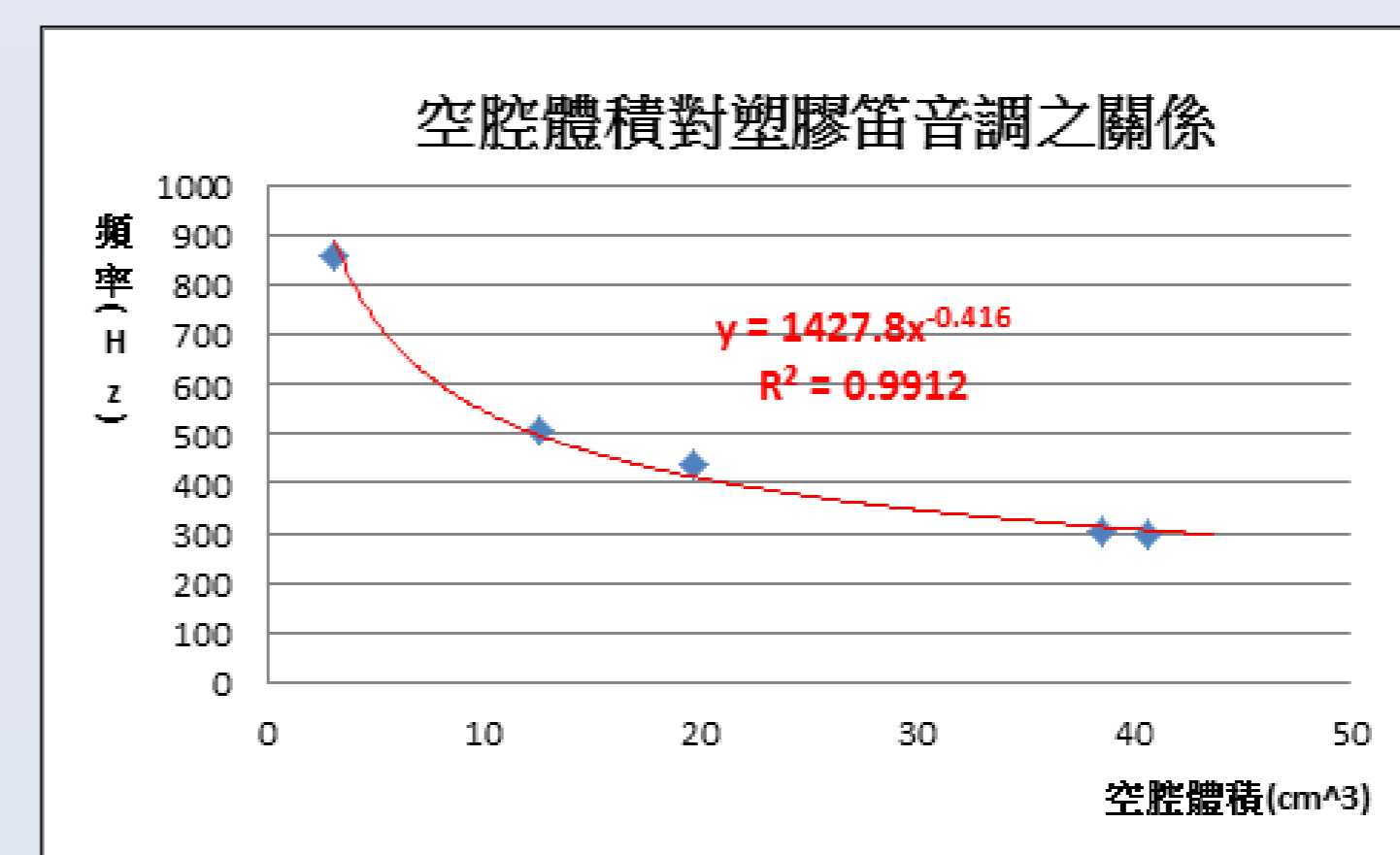
探討6、指孔位置對塑膠笛音調的影響



討論：

- 由實驗結果我們發現，開孔數越多、總開孔面積越大時，頻率也跟著越大。
- 將兩種趨勢線放在一起相比，沒想到兩條線竟然幾乎重疊在一起，顯示音調的高低只和開孔的總面積有關，和開孔的位置及方式並沒有關係。

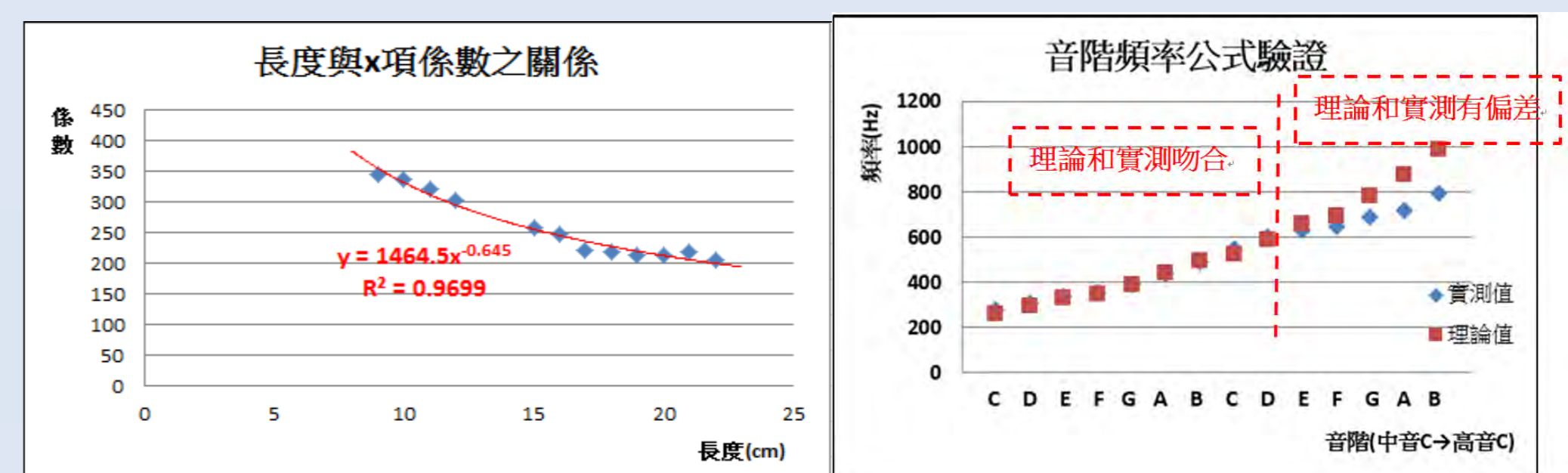
探討7、空腔口徑與長度對塑膠笛音調的影響



- 由實驗結果中發現，塑膠笛的音調會隨著空腔的體積增加而變小，其關係式為：

$$y = 1427.8x^{-0.416} \quad (y: \text{頻率}; x: \text{體積})$$

探討8、伸縮塑膠笛的通式推導



音階	C	D	E	F	G	A	B	
								中央
C	長度(cm)	275.18	305.18	336.11	356.21	390.35	438.28	488.28
	指孔(cm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.32
	高八度	頻率(Hz)	理論 524	588	660	698	784	880
度	長度(cm)	549.32	602.35	645.35	640.35	686.35	721.39	792.42
	指孔(cm)	0.44	0.69	0.97	1.12	1.46	1.84	2.26

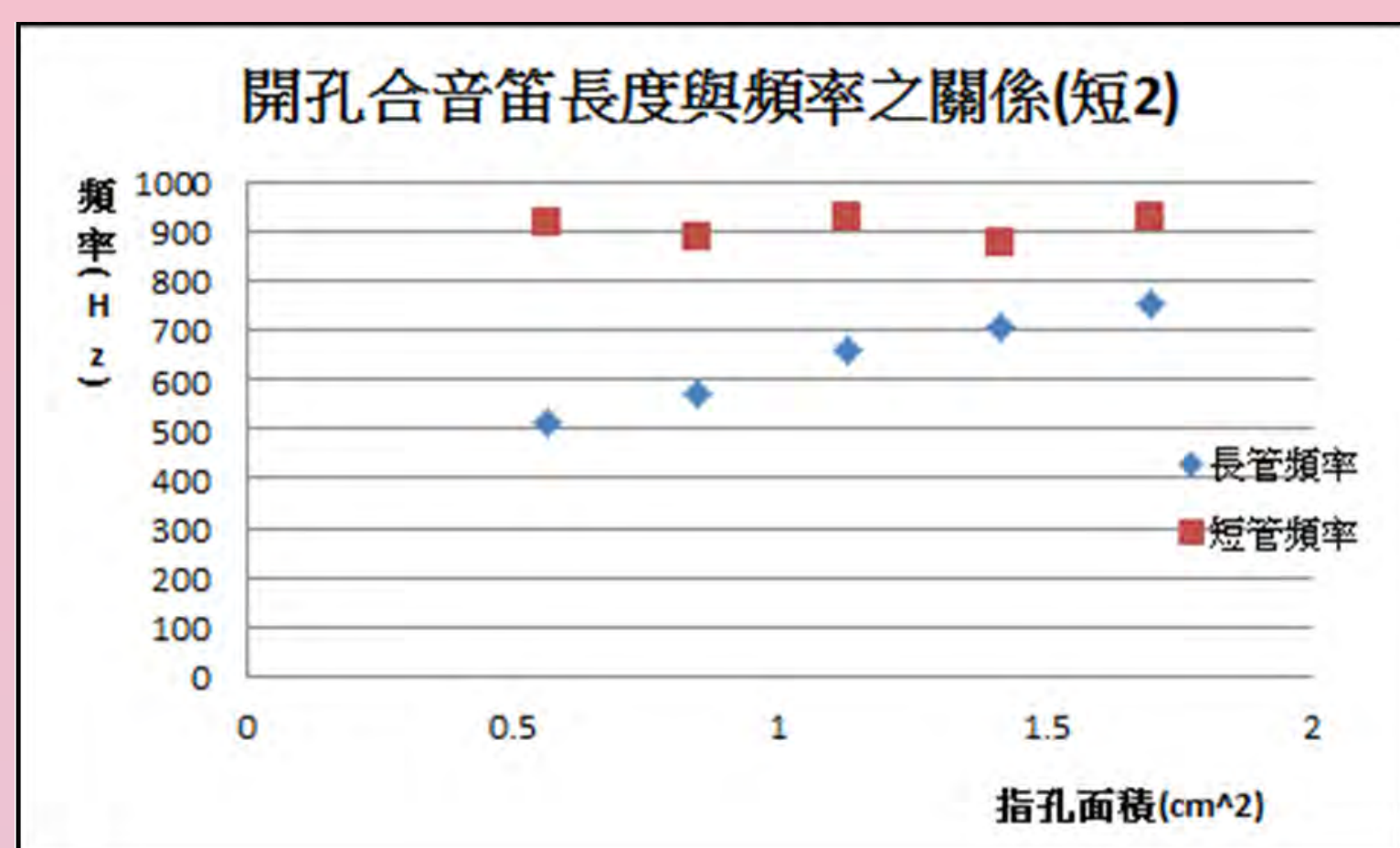
- 由上圖可以求得其通式為

$f = (1464.5l^{-0.645})A + 6029.2l^{-0.991}$ (A: 開孔面積) 利用此通式，只要知道伸縮管長度及開孔面積就可以推出其頻率大小。

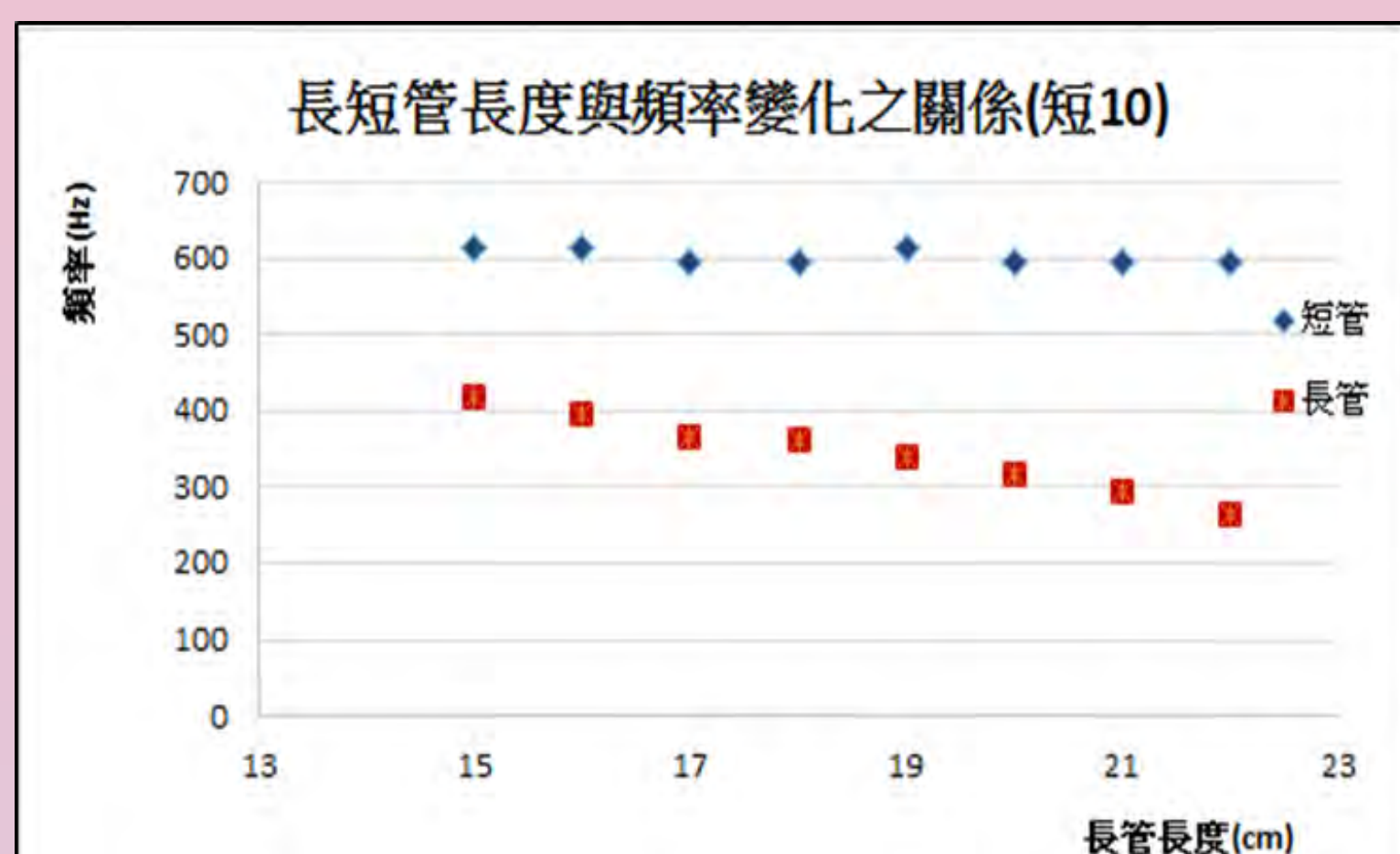
- 經過實測與理論的互相比較，我們求出的趨勢方程可以準確預測中央C~高八度D的範圍，而音階E~B則與理論有些偏差，顯示此公式推論上的限制。

探討7、合音陶笛的製作

開孔型



伸縮型



討論：

1. 伸縮形的合音笛較不受指孔的限制，可在音階範圍內配出各種頻率。
2. 由示波器傳送的波形中可以發現，和音波主要為一個低音波中間夾著高音波所形成的複合波形。利用傅立葉分析後就可以將兩種波的頻率找出來。

七、結論

二、市售陶笛的性質

(一)過去作品多認為陶笛就像音叉一樣是屬於單音樂器，但透過傅立葉分析後我們發現，陶笛除了主要的音調特別大聲外，還是有一些數倍音存在，只是因為響度太小，所以單純看波形不易發現。

(二)我們發現市售陶笛的音階和理論的音階有些高半音，有些則低半音，後來發現是因為氣流大小造成音階變化所造成的結果。

四、氣孔對自製塑膠管笛頻率之影響

(一)我們發現氣孔的大小、形狀皆會影響共鳴的產生，氣孔太小共鳴不易發生，而同樣的大小的氣孔中，以圓形和正方形比較容易產生共鳴。

(二)氣孔的位置不同時，也會影響共鳴的頻率，我們推論是與氣流撞擊壁面的距離有關，當距離壁面越近時，音調越高，波長越小。

五、氣流對自製塑膠管笛頻率之影響

(一)氣流的角度測試中，以20~40度的範圍造成的共鳴效果最好，探討其原因是因為共鳴的產生是因為邊稜音造成的結果，當氣流通過尖劈時會被分成上下兩邊並各自產生渦流，兩渦流互相影響而引起振動，並和空腔產生共鳴。

(二)氣流大小也會造成頻率的差異，且其變化是在某一流速範圍內逐漸增加，有些範圍無法產生共鳴，到達某一流速時頻率會忽然變大，這與過去的作品發現的關係並不相同。

六、指孔對自製塑膠管笛頻率之影響

(一)指孔的開孔位置並不影響頻率的大小，開孔的面積越大，產生的音調越高。

(二)我們也發現，單一開孔面積如果和數個小孔的總面積相等時，會產生差不多的音調高低。顯示音調的高低只和指孔總面積有關，配合其原理可推論，指孔主要是讓氣流排出，使空腔內部流速改變，因而使頻率發生變化。此推論在研究九時得到了呼應。

七、空腔大小對自製塑膠管笛頻率之影響

(一)研究中發現，空腔的孔徑大小以及長度皆會影響音調，當孔徑越大或長度越長時，體積變大，所以音調就變低了。

(二)將孔徑大小以及長度等變音和頻率互相比較，即可得到孔徑或長度和頻率的關係式。

八、自製樂器之研發

(一)利用前面的研究成果，我們設計了伸縮型的塑膠笛，接著測試不同空腔長度後得到其關係式： $f = 6029.2 \times l^{-0.991}$ 。

(二)我們將伸縮塑膠笛鑽上指孔後進行測試，找出種不同長度下，指孔面積和頻率之關係，共有12條方程式，比較係數後，做出係數和長度的關係圖，再加入伸縮塑膠笛的方程式，最後得到最終的方程式：

$$f = (1464.5l^{-0.645})A + 6029.2l^{-0.991}$$

利用此方程式，只要輸入管長和指孔面積等資訊，就可以直接推算出音調之頻率大小。

(三)利用此上述方程式，我們設計出伸縮加指孔合一的塑膠笛，使塑膠笛的音域更廣，並可吹出像滑溜音等陶笛無法吹出的技巧。

(四)我們將兩種伸縮塑膠笛黏在一起，再用特殊的吹嘴，可以同時吹出兩種聲音，設計出第二種可以吹出合音的塑膠笛。

九、自製塑膠管笛空腔內氣流流動之情形

(一)我們將乾冰加上熱水後放入塑膠笛空腔內產生煙霧，以便觀察氣體的流動情形。

(二)透過煙霧的觀察發現，只有氣孔而沒有指孔時，氣流的進出都只靠氣孔，這會減少進入空腔的氣流，氣流會在內部撞擊一圈後由尖劈對面衝出，衝出時，因為垂直上升氣流及左右撞擊的氣流互相作用，造成氣流螺旋上升的情況。而氣流衝出和進入兩種力量交互作用會造成空氣的振動，產生類似簧片振動的效果產生聲音，並透過空腔共鳴。

(三)當氣孔太小時，氣體不易進入空腔，內部渦流也不易產生，內外壓力差不大，因此所以共鳴的聲音較小，所以氣孔太小不易產生共鳴。當氣孔大到某一程度，氣流進出達到最佳平衡，氣體產生的振幅最大，所以共鳴聲最大。

(四)另外從氣流觀察中發現，指孔的氣流主要都是流出而不流入，故並不會在指孔處產生空氣振動效果，因此指孔的位置並不會影響頻率的大小。指孔面積越大，氣流越容易流出所以需要的氣流越大，氣流越大則內部流速越快，氣流撞擊到器壁的時間越短，造成共振的波長被壓縮，所以音調也跟著變高了。

八、參考資料

- 一、康軒文教事業(2018)。自然與生活科技第三冊。第三章 波與聲音。台北：康軒文教事業。
- 二、黃昱彰等。中華民國第56屆中小學科學展覽作品輯「聽蛤蜊在唱歌-蛤笛樂器之研發」。
- 三、李欣朋等。中華民國第55屆中小學科學展覽作品輯「瞭解它，笛確可以DIY」。
- 四、張毓屏。臺灣2008年國際科學展覽會作品輯。「全民攻笛」
- 五、邱惠芳等(2014)。低速邊稜音的振動特性。聲學技術。(33卷3期)。2014年6月。
- 六、來玩陶笛。<http://www.scjh.tc.edu.tw>

九、未來展望

本次研究我們開發出了新的樂器，並找出其通式，若能增加不同口徑等變因加入通式，一定可以設計出更多，更具變化性的樂器。