

# 中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 物理與天文學科

051803

多多笛的發聲原理及各種因素對頻率之探討

學校名稱：國立臺灣師範大學附屬高級中學

作者：  高二 許呈瑄  高二 許晨星  高二 曾晟捷	指導老師：  高銘宏  黃裕修
---	-----------------------------

關鍵詞：多多笛、airhorn、共振

## 摘要

多多笛的構造大致上可以分為內管、外管、孔洞和膜四個部分。它是藉由孔洞吹入氣體，氣體在內部流動，而造成膜的振動發出聲音。本實驗探討多多笛的發聲原理，了解是管子產生共鳴還是膜的振動影響聲音的頻率及探討哪些變因會影響多多笛的頻率。由於多多笛的外形構造複雜，於是我們用 PVC 管製作多多笛的模型，方便我們之後的研究。經實驗發現：多多笛發出的聲音頻率並不單純，當氣壓小時，它發出的頻率會越接近空氣柱共鳴，而不論氣壓大小，管長與頻率倒數皆呈正比關係，因此我們推測多多笛的發生機制是膜與空氣柱共振的結果，且經由分析，我們發現基音是符合閉管的基音，但是泛音皆為基音的連續整數倍，因此推測它產生的頻率是開管及閉管疊合而成。

## 壹、 研究動機

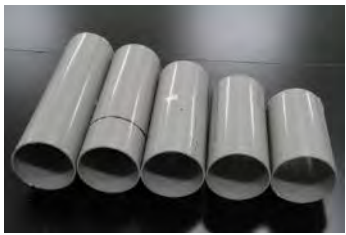
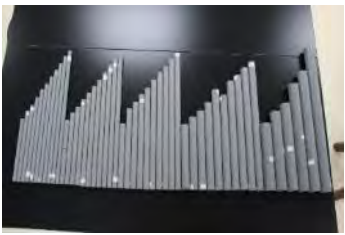






多多笛是小朋友的玩具，它是利用氣球膜、多多瓶和吸管製作。當物理老師上課講到駐波那一單元時，有位同學突然想到小時候玩的多多笛是否也是利用這個原理發出聲音的？多多笛雖然小，但卻沒有想像中的這麼簡單，小小的瓶子卻藏了很多我們不知道事，包括吹入的氣體是如何在裡頭流動、氣體是如何帶動膜的振動、發出的聲音是怎麼產生的？這一連串的問題挑起了我們的好奇心，於是開始著手研究這小小的多多笛。

## 貳、 研究目的

- 一、 多多笛的發聲機制
- 二、 探討不同的膜對於頻率的影響
- 三、 研究各種因素對多多笛發聲頻率的影響
  - (一) 外管管長對頻率的影響
  - (二) 內管管長對頻率的影響
  - (三) 了解改變吹孔位置對頻率的影響
  - (四) 了解改變膜面積對頻率的影響
  - (五) 了解改變內管底面面積對頻率的影響
  - (六) 了解改變內管頂面面積對頻率的影響

- (七) 了解內管開孔與頻率的影響
- (八) 了解氣壓對可樂果膜與氣球膜的影響  
(研究一般多多笛的實際情形)
- (九) 氣壓對多多笛發聲頻率的影響
- (十) 實際多多笛的吸管與頻率的影響

### 參、 研究設備及器材

<p>粗 PVC 管</p> 	<p>細 PVC 管</p> 	<p>空壓機</p> 
<p>調壓閥、噴槍</p> 	<p>可樂果包裝+壓克力板</p> 	<p>雷射測距機</p> 
<p>氣球、吸管、橡皮筋</p> 	<p>養樂多瓶</p> 	

### 肆、 研究過程或方法

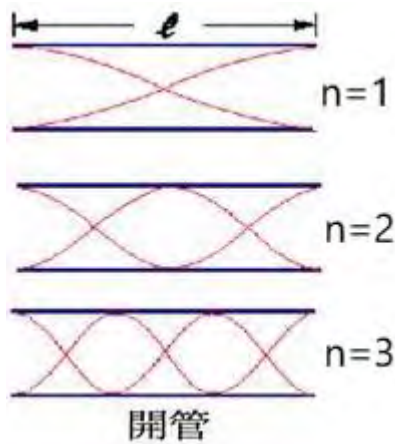
#### 一、文獻探討

(一) 我們閱讀了高中物理課本以及普通物理關於對駐波理論的說明：

1. 氣體通過管子會產生共振，而發出特定的頻率。
2. 當管子的開口開起時，可視為波腹，而管子的開口封閉時，則可視為節點。

3. 當管子兩端皆開起時，稱之為開管狀態；一端開一端閉，稱之為閉管狀態。

(1) 開管狀態：



$$L = n \lambda / 2 \dots (n=1, 2, 3 \dots)$$

$$\rightarrow \lambda = 2L/n$$

$$\rightarrow f = nv/2L$$

n=1 時，稱為第一諧音，又稱為基音

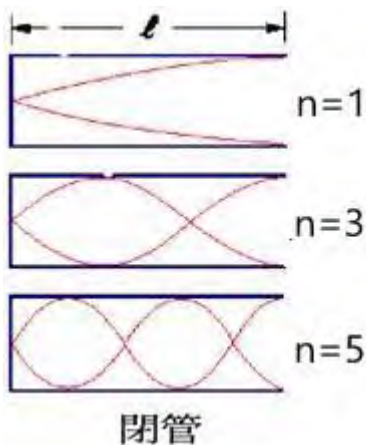
n=2 時，稱為第二諧音，又稱第一泛音

以此類推……

n=3 時，稱為第三諧音，又稱第二泛音

$f_1, f_2, f_3 \dots$  成整數倍關係

(2) 閉管狀態：



$$L = n \lambda / 4 \dots (n=1, 3, 5 \dots)$$

$$\rightarrow \lambda = 4L/n$$

$$\rightarrow f = nv/4L$$

n=1 時，稱為第一諧音，又稱為基音

n=3 時，稱為第三諧音，又稱第一泛音

以此類推……

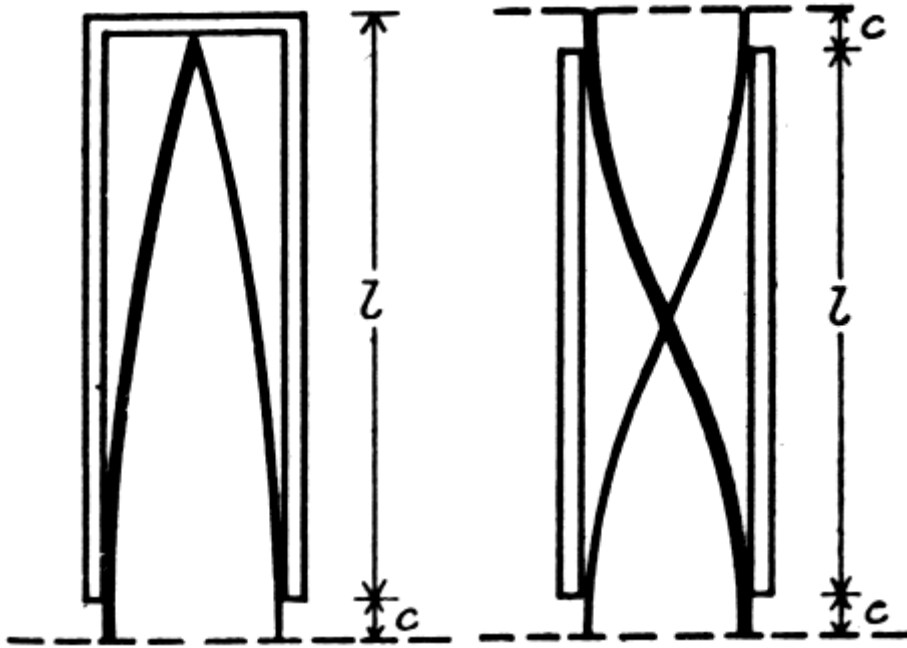
n=5 時，稱為第五諧音，又稱第二泛音

$f_1, f_2, f_3 \dots$  成奇整數倍關係

(二) 管口修正量：Helmholtz和Rayleigh曾經發展出管口修正量的數學理論中提到：當管內的空氣柱形成駐波時，通常管口並非會是駐波的波腹，波腹會再管口外一小段距離  $c$ ，此段距離稱之為管口修正量，並且原本的管長加上管口修正量即稱之為等效管長，在閉管的情況下等效管長為  $L+c$ ，在開管的情況下等效管長為  $L+2c$ 。

一般是採用內管半徑為  $r$ ，則管口修正量  $c=0.6r$ 。

但是修正量與波長有關，當波長越小，修正量也越小。



所以空氣柱共鳴的公式可改寫成：

1. 開管公式： $\lambda = 2(L+2c)$

$$\rightarrow f = nv/2(L+2c)$$

2. 閉管公式： $\lambda = 4(L+c)$

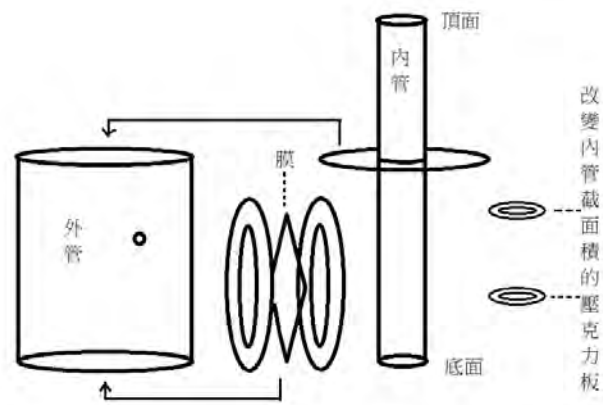
$$\rightarrow f = nv/4(L+c)$$

## 二、實驗步驟

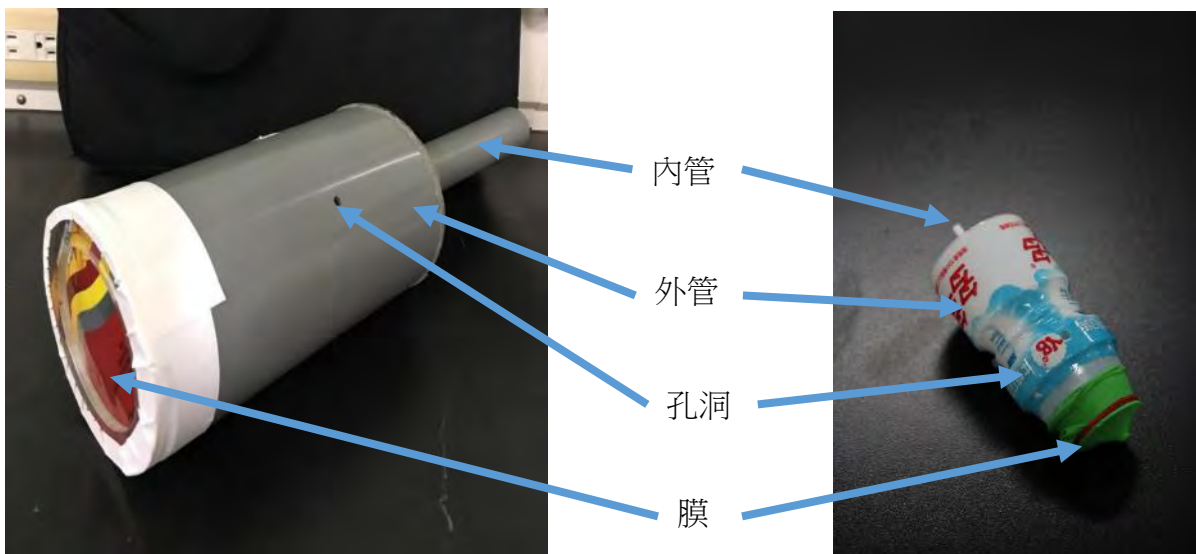
### (一) 模型製作

1. 準備粗細不同的兩個 PVC 管作為外管及內管，在外管上打一個洞。
2. 把兩片壓克力板中心切除一個圓，用來夾住膜。
3. 在拿一塊壓克力板中心切除一個圓讓內管插入。
4. 最後將膜、外管及內管用熱融膠接上便完成。

(接合處都要緊密的黏合，不可有任何的漏縫)

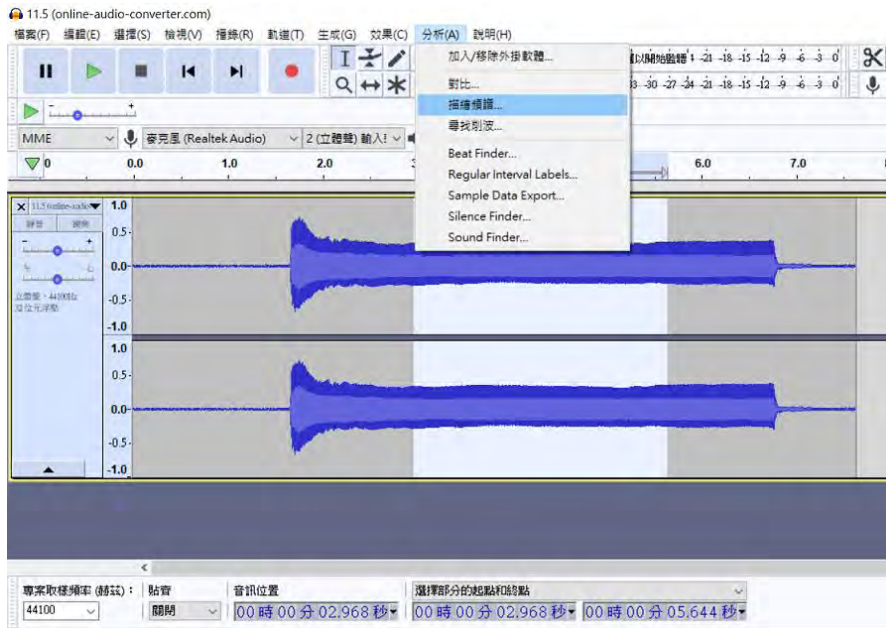


## (二) 實驗裝置



## (三) 實驗流程

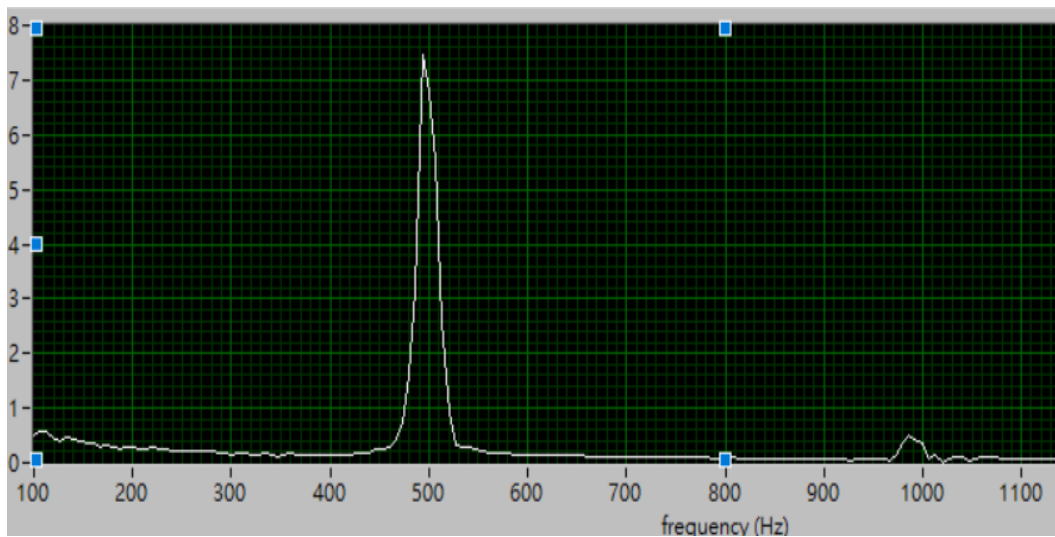
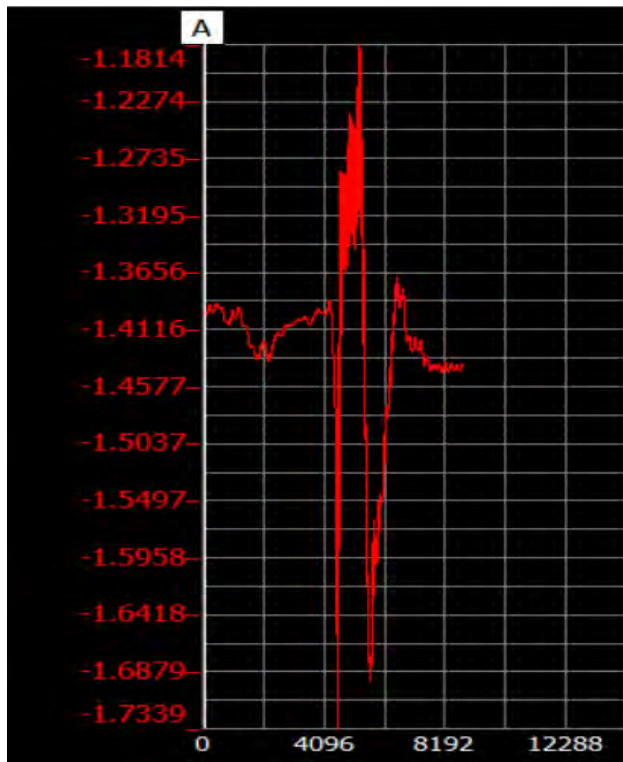
1. 我們所做的實驗皆是以以下的步驟來進行
  - (1) 改變欲探討的項目(例：要探討外管長度對聲音頻率的影響便改變外管長度)
  - (2) 儀器架設好之後，利用噴槍對準孔洞吹氣，並錄下聲音，並轉成 wav 檔
  - (3) 將錄下來的音檔匯入軟體 Audacity 進行分析
  - (4) 在音檔上選取適當的長度，按下分析後，選取描繪頻譜
  - (5) 在頻譜上找到高峰的位置並記錄其頻率數值



## 2. 測量氣球膜震動的步驟

- (1) 架設實驗儀器，將雷射測距儀的雷射光對準薄膜中心，並調整到適當位置 (距離雷射光焦點正負 2mm)。
- (2) 於吹氣時儲存下位置訊息(取樣率為 4000Hz)。
- (3) 選擇適當的長度並利用軟體進行頻譜分析。
- (4) 在頻譜上找到高峰並記錄其頻率數值。





(四) 每個實驗需改變的地方

實驗(一)： 改變外管的長度

實驗(二)： 改變內管的長度

實驗(三)： 在外管上不同位置鑽洞，改變吹孔位置

實驗(四)： 在兩片壓克力板中心切出不同大小的圓，改變膜的面積

實驗(五)： 將壓克力板中心切出一個圓，並與內管底部接上，改變內管底面面積

實驗(六)： 將壓克力板中心切出一個圓，並與內管頂部接上，改變內管頂面面積



實驗(七)： 在內管是鑽出許多孔洞

實驗(八)： 改變氣壓的大小

實驗(九)： 換成實際的多多笛，改變氣壓大小

實驗(十)： 換成多多瓶子、吸管、氣球及橡皮筋，製作一般的多多笛。我們選用兩種大小不同的多多瓶子和三種不同管徑的吸管來測試吸管長度與頻率的影響

## 伍、 研究結果

一、 推論多多笛發聲方式為空氣柱共鳴

二、 探討不同的膜對於頻率的影響

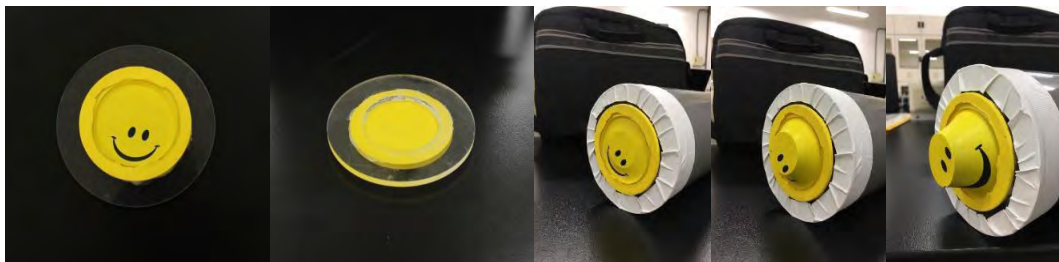
(一) 由於多多的瓶身較不規則而且瓶身柔軟會影響實驗，所以我們選擇用形狀較規則且材質較硬的 PVC 管來代替多多瓶

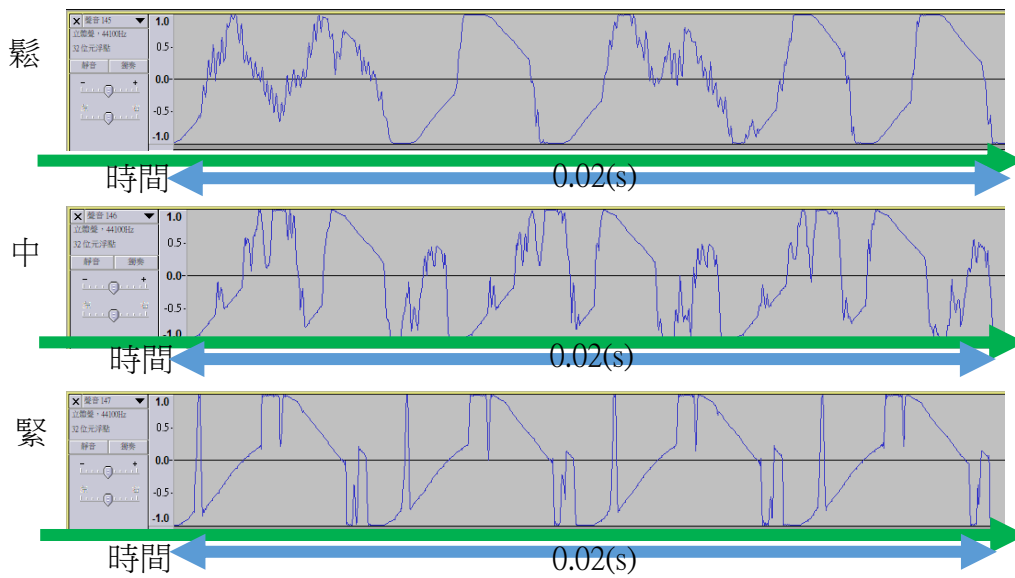
(二) 由於氣球膜較有彈性，在內管按壓膜時，無法固定壓入的深淺，會影響到實驗操作，所以我們選了以下不同的材質來當膜，測試其穩定度。



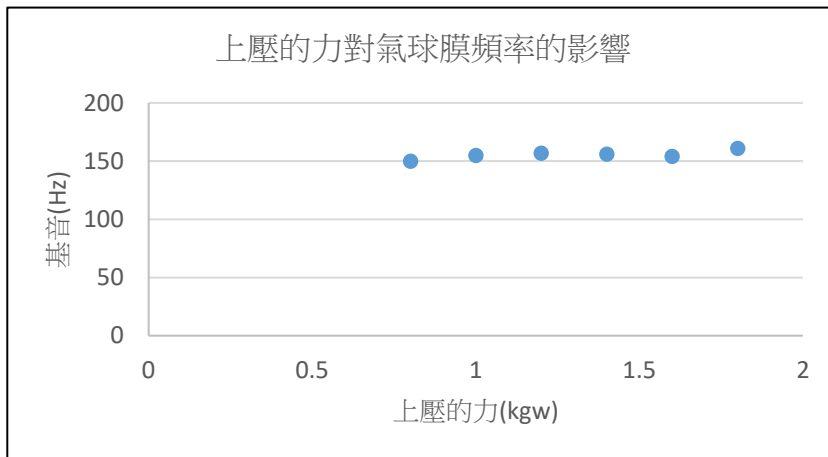
1. 氣球膜
2. 塑膠袋
3. 手搖杯膜
4. 紙
5. 品客膜
6. 可樂果膜

1. 氣球膜

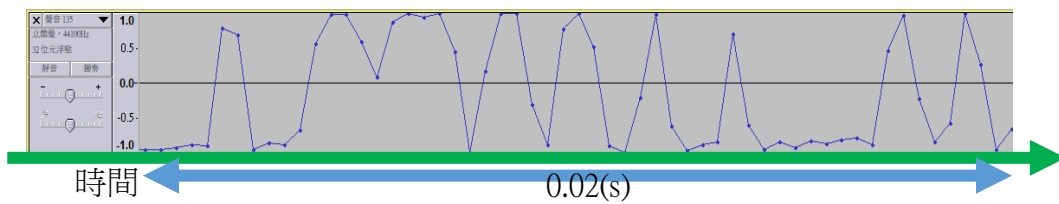
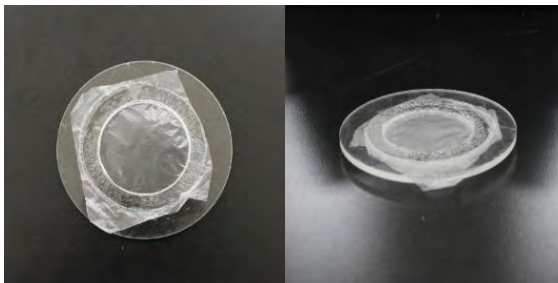




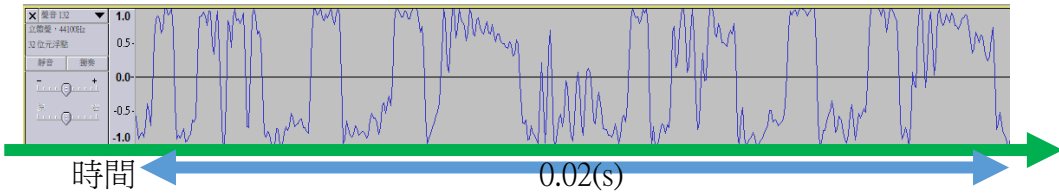
上壓的力(kgw)	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
基音(Hz)	150	155	157	156	154	161



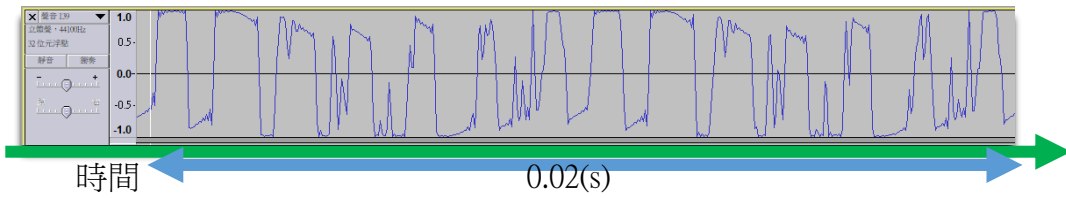
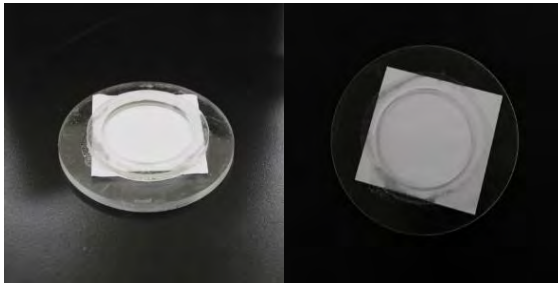
## 2. 塑膠袋



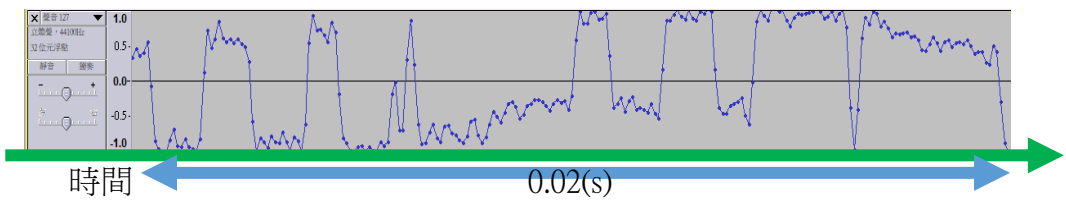
### 3. Coco 膜



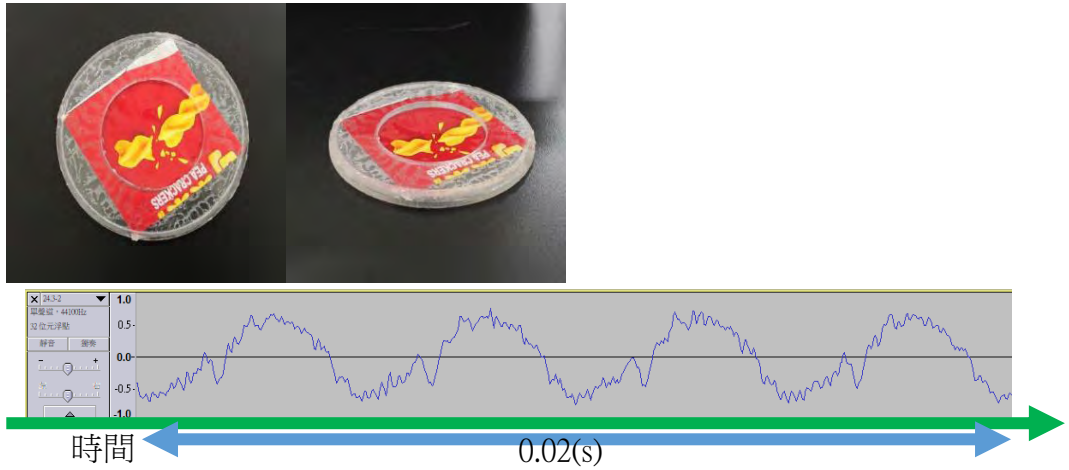
### 4. 紙



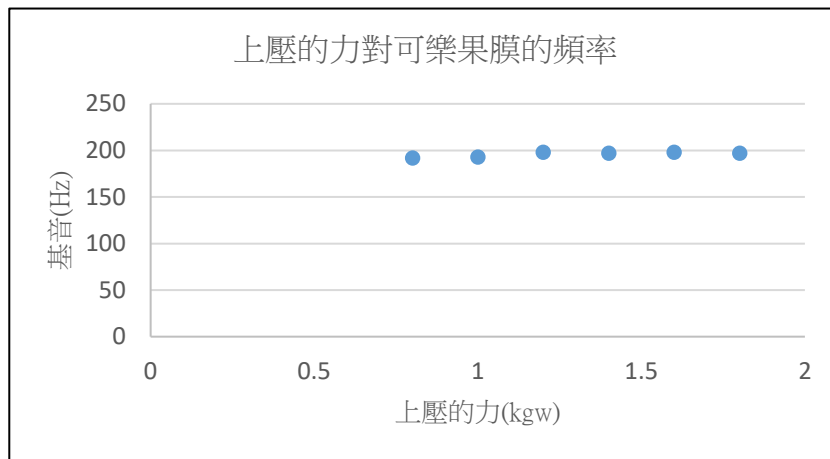
### 5. 品客膜



## 6. 可樂果膜



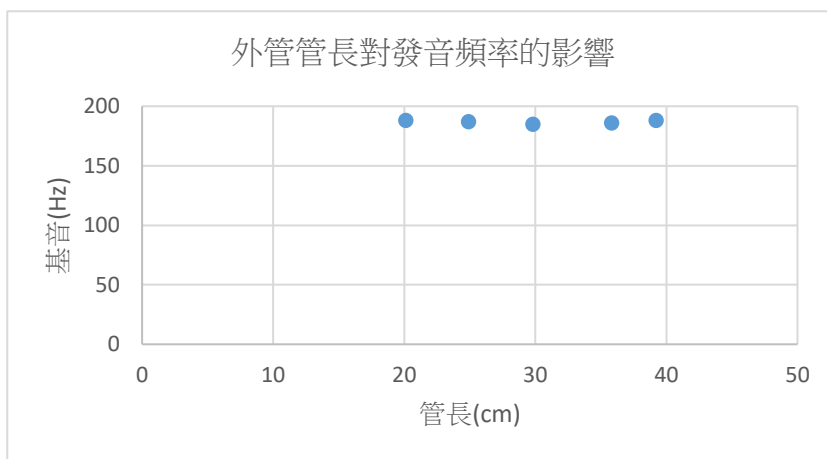
上壓的力(kgw)	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
基音(Hz)	192	193	198	197	198	197



## 三、 研究各種因素對多多笛發聲頻率的影響

### (一) 外管管長對頻率的影響

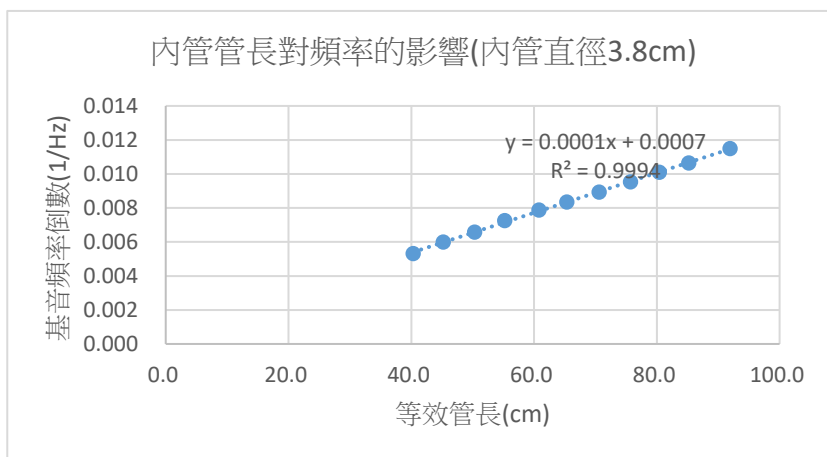
管長(cm)	20.1	24.9	29.8	35.8	39.2
基音(Hz)	188	187	185	186	188



(二) 內管管長對頻率的影響

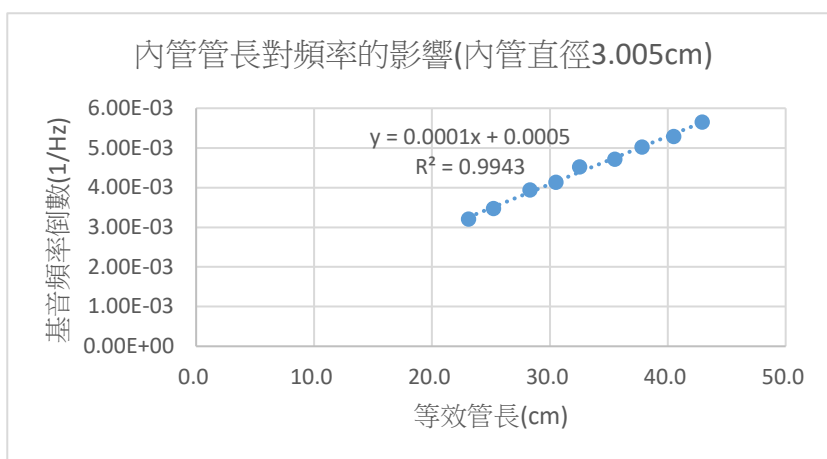
1. 內管直徑 3.8cm

管長(cm)	91.6	84.9	80.1	75.4	70.3	65.0	60.5	54.9	50.0	44.9	40.0
等效管長(cm)	92.7	86.0	81.2	76.5	71.4	66.1	61.6	56.0	51.1	46.0	41.1
基音(Hz)	87	94	99	105	112	120	127	138	152	167	188



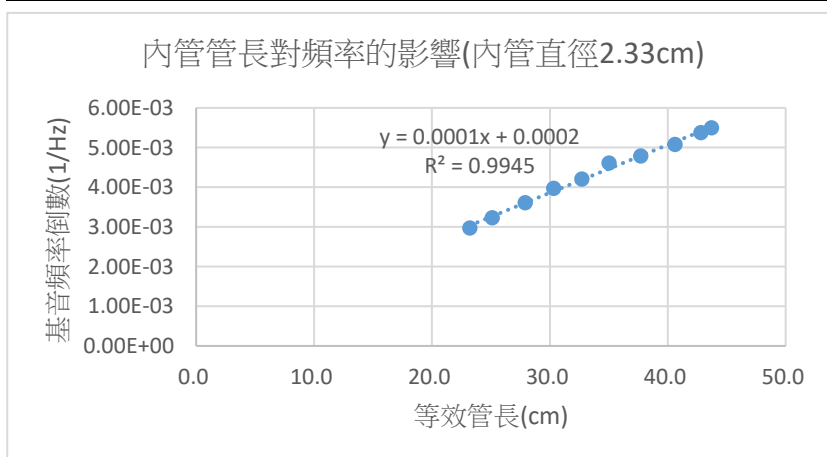
2. 內管管徑 3.005cm

管長(cm)	42.0	39.6	36.9	34.6	31.6	29.6	27.4	24.3	22.2
等效管長(cm)	42.9	40.5	37.8	35.5	32.5	30.5	28.3	25.2	23.1
基音(Hz)	177	189	199	212	221	242	254	288	312



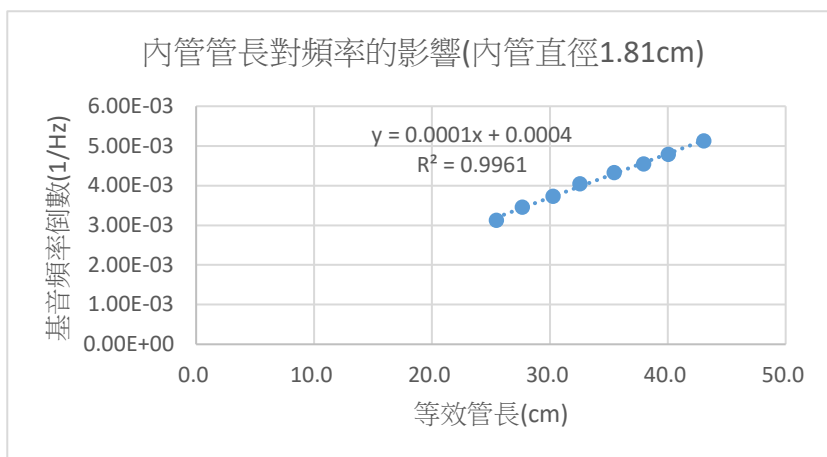
### 3. 內管管徑 2.33cm

管長(cm)	42.1	43.0	39.9	37.0	34.3	32.0	29.6	27.2	24.4	22.5
等效管長(cm)	42.8	43.7	40.6	37.7	35.0	32.7	30.3	27.9	25.1	23.2
基音(Hz)	186	182	197	209	217	238	252	277	310	337



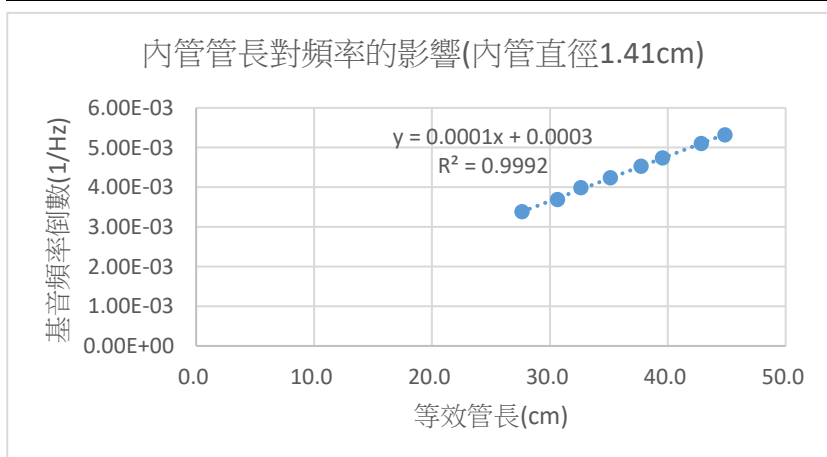
### 4. 內管管徑 1.81cm

管長(cm)	24.9	27.1	29.7	32.0	34.9	37.4	39.5	42.5
等效管長(cm)	25.4	27.6	30.2	32.5	35.4	37.9	40.0	43.0
基音(Hz)	320	289	268	247	231	220	209	195

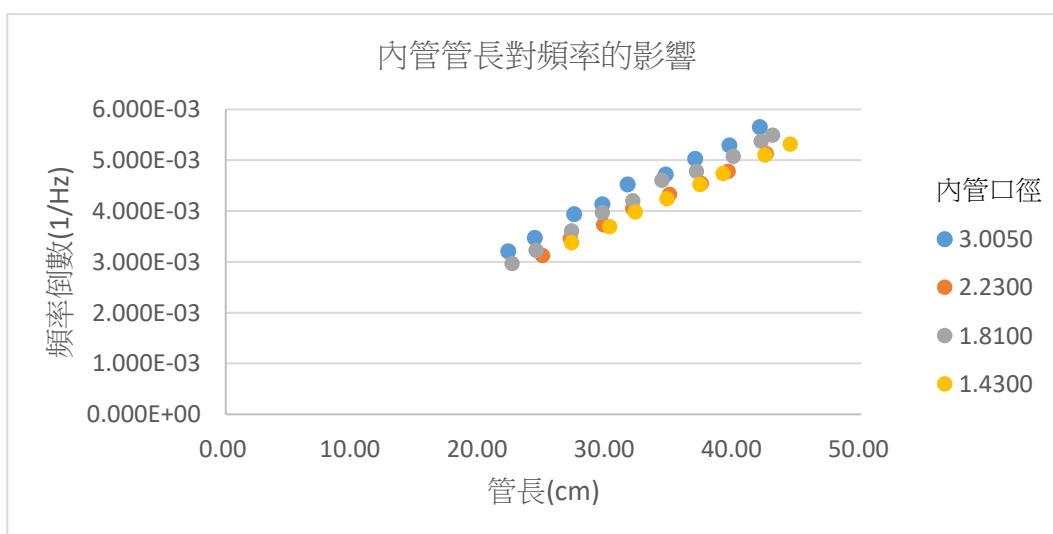


### 5. 內管管徑 1.41cm

管長(cm)	44.4	42.4	39.1	37.3	34.7	32.2	30.2	27.2
等效管長(cm)	44.8	42.8	39.5	37.7	35.1	32.6	30.6	27.6
基音(Hz)	188	196	211	221	236	251	271	296



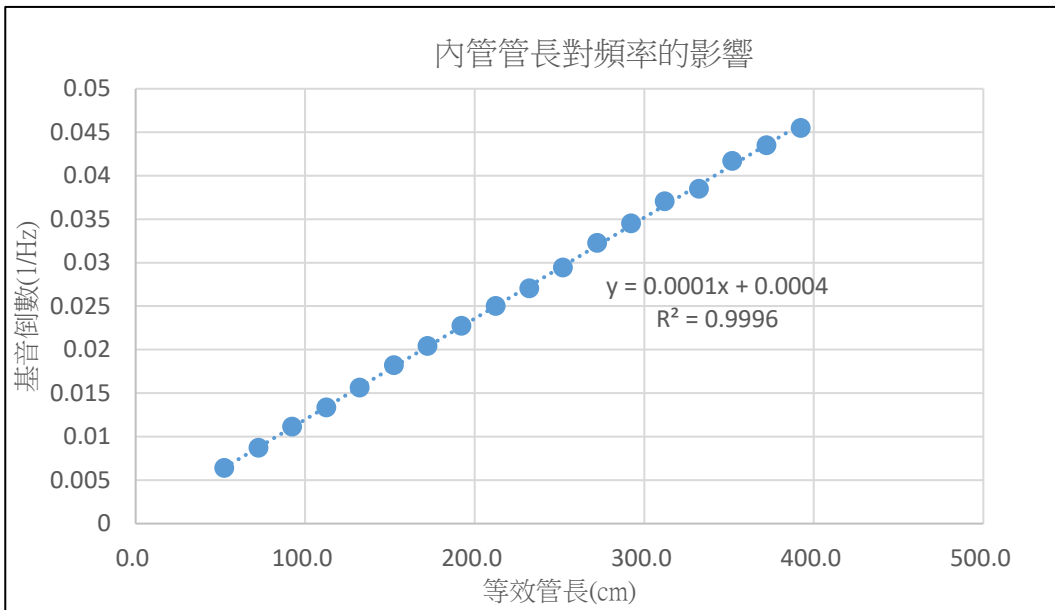
### 6. 不同管徑下內管管長與頻率關係圖





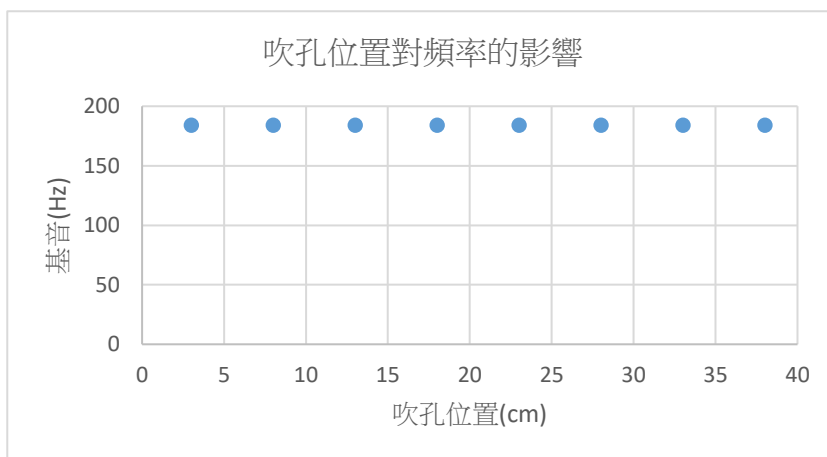
### 7. 內管管長與頻率之關係

管長(cm)	391.0	370.8	350.7	331.0	310.8	291.0	271.0	250.8	231.0
等效管長(cm)	392.2	372.0	351.9	332.2	312.0	292.2	272.2	252.0	232.2
基音(Hz)	22	23	24	26	27	29	31	34	37
基音理論值(Hz)	21.67	22.85	24.15	25.59	27.24	29.09	31.23	33.73	36.61
相對誤差	1.51%	0.66%	0.64%	1.61%	0.89%	0.31%	0.73%	0.80%	1.08%
管長(cm)	211.1	190.9	170.9	151.2	131.0	111.2	91.1	71.2	51.1
等效管長(cm)	212.3	192.1	172.1	152.4	132.2	112.4	92.3	72.4	52.3
基音(Hz)	40	44	49	55	64	75	90	115	157
基音理論值(Hz)	40.04	44.25	49.39	55.77	64.30	75.62	92.09	117.40	162.52
相對誤差	0.09%	0.56%	0.79%	1.39%	0.46%	0.82%	2.27%	2.05%	3.40%



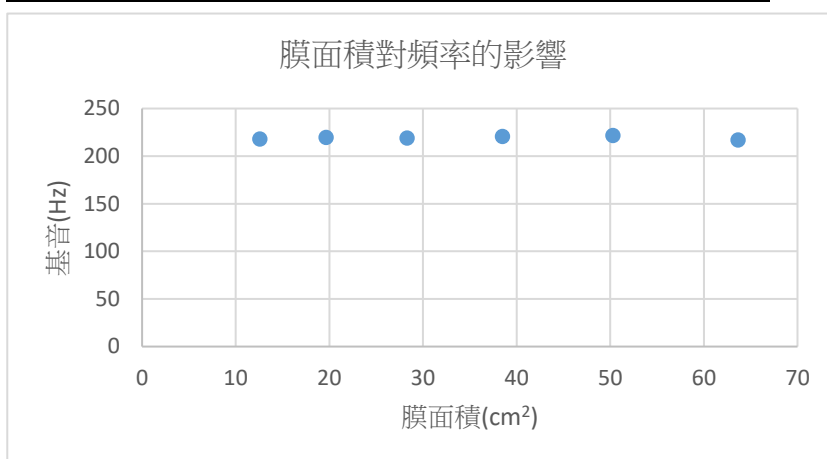
### (三) 改變吹孔位置對頻率的影響

孔洞距離底面(cm)	3	8	13	18	23	28	33	38
基音(Hz)	184	184	184	184	184	184	184	184



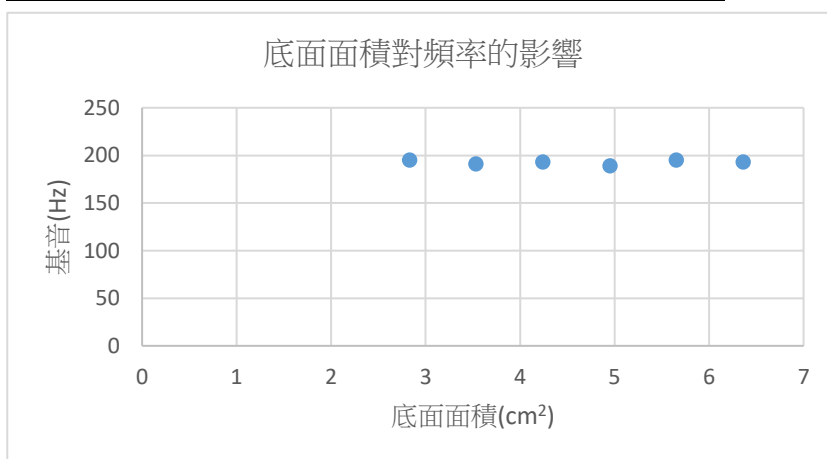
(四) 改變膜面積對頻率的影響

膜面積(cm <sup>2</sup> )	12.57	19.63	28.27	38.48	50.27	63.62
基音(Hz)	218	220	219	221	222	217



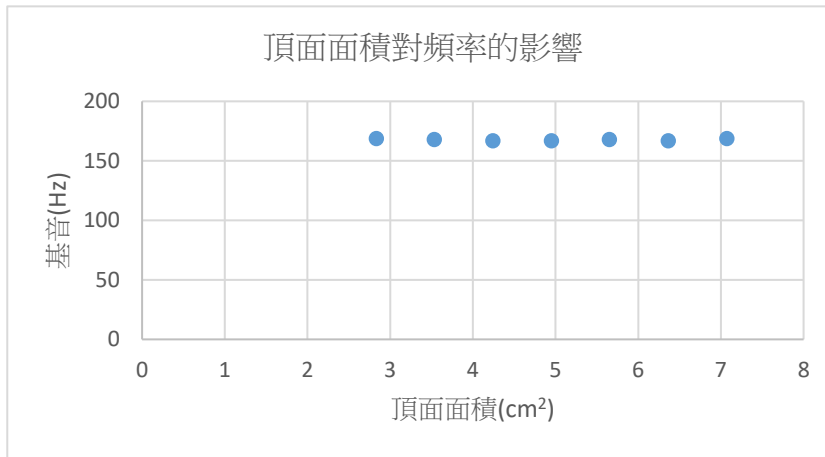
(五) 改變底面面積對頻率的影響

底面面積(cm <sup>2</sup> )	2.83	3.53	4.24	4.95	5.65	6.36
基音(Hz)	195	191	193	189	195	193



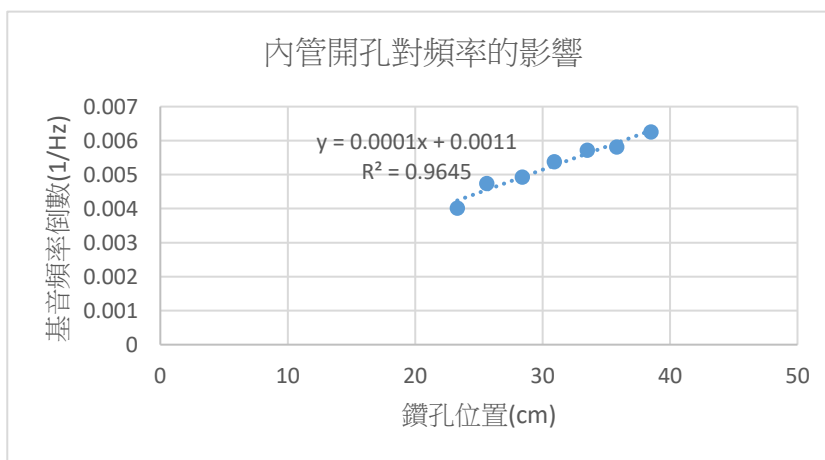
(六) 改變頂面面積對頻率的影響

頂面面積(cm <sup>2</sup> )	2.83	3.53	4.24	4.95	5.65	6.36	7.07
基音(Hz)	169	168	167	167	168	167	169



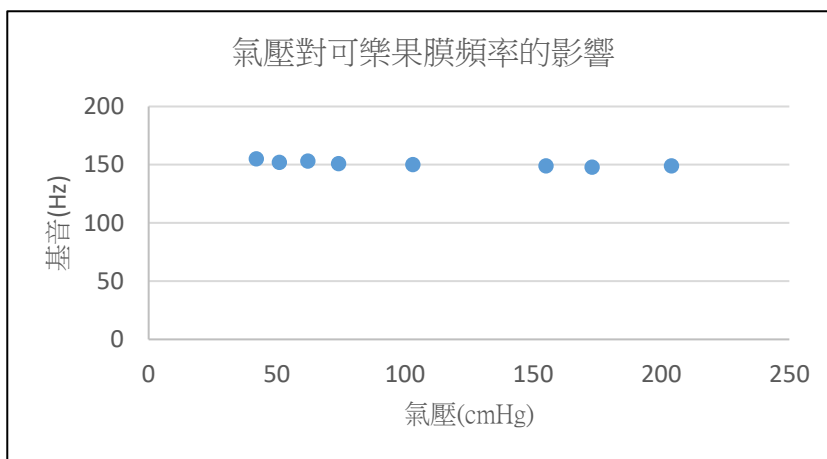
(七) 內管開孔與頻率的影響

鑽孔位置(cm)	23.3	25.6	28.4	30.9	33.5	35.8	38.5
基音(Hz)	249	211	203	186	175	172	160



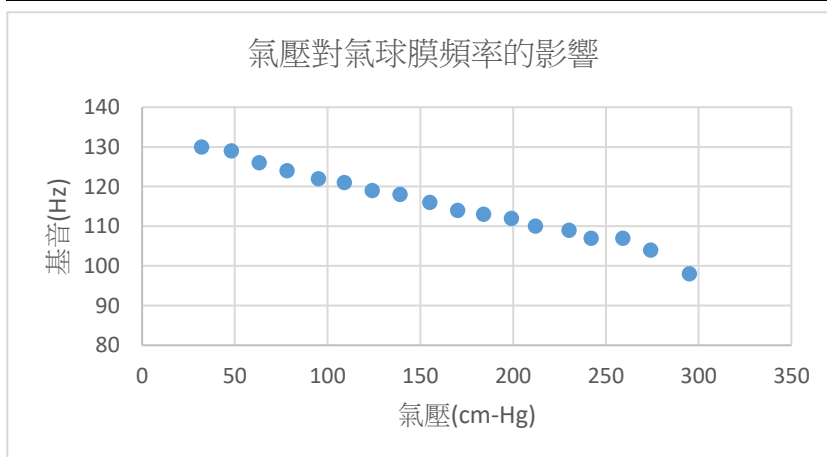
(八) 了解氣壓對可樂果膜與氣球膜的影響

氣壓(cmHg)	42	51	62	74	103	155	173	204
基音(Hz)	155	152	153	151	150	149	148	149



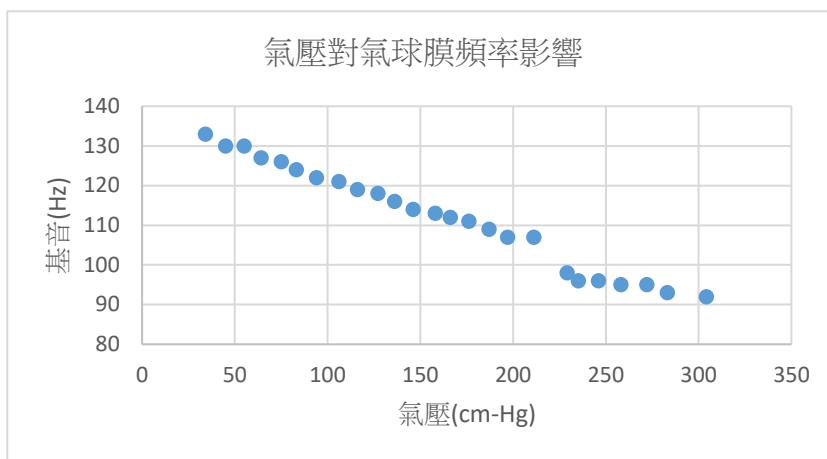
(氣球膜上壓 0.8kg 伸長 0.4cm)

氣壓(cm-Hg)	32	48	63	78	95	109	124	139	155
基音(Hz)	130	129	126	124	122	121	119	118	116
氣壓(cm-Hg)	170	184	199	212	230	242	259	274	295
基音(Hz)	114	113	112	110	109	107	107	104	98



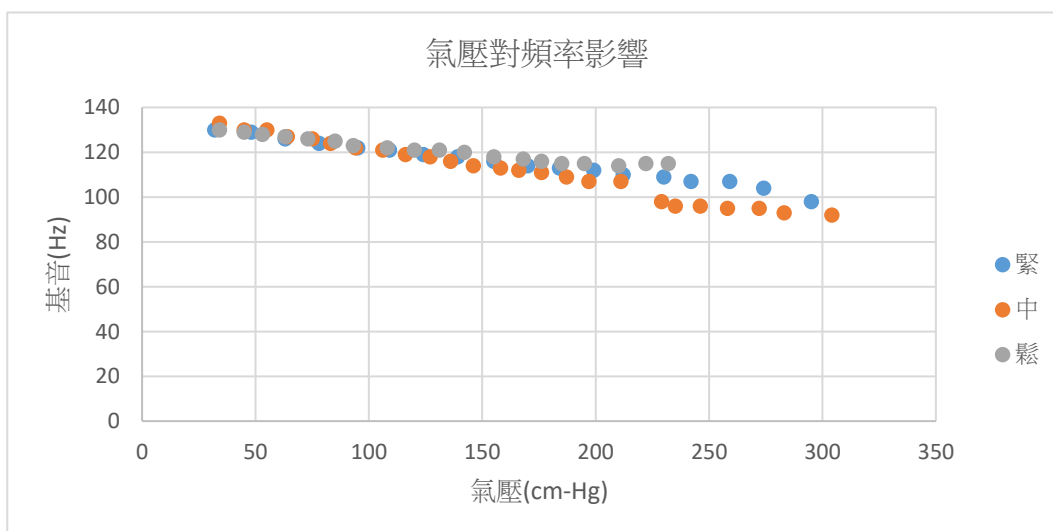
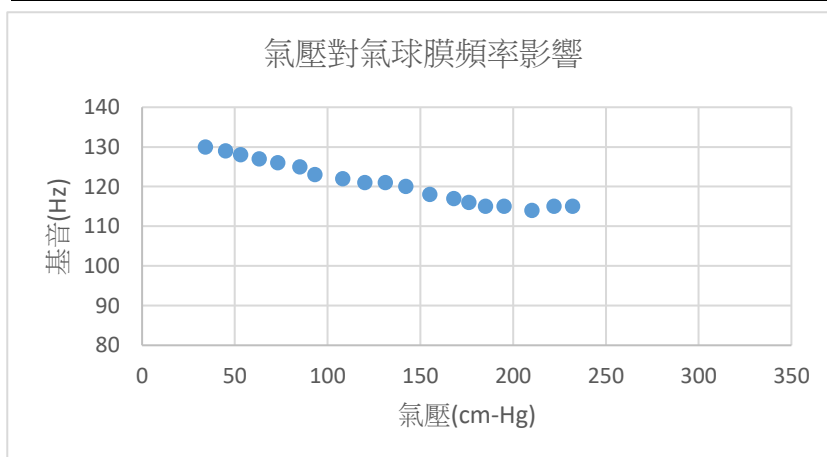
(氣球膜上壓 0.8kg 伸長 0.6cm)

氣壓(cm-Hg)	34	45	55	64	75	83	94	106	116	127	136	146	158
基音(Hz)	133	130	130	127	126	124	122	121	119	118	116	114	113
氣壓(cm-Hg)	166	176	187	197	211	229	235	246	258	272	283	304	
基音(Hz)	112	111	109	107	107	98	96	96	95	95	93	92	



(氣球膜上壓 0.8kg 伸長 0.7cm)

氣壓(cm-Hg)	34	45	53	63	73	85	93	108	120	131
基音(Hz)	130	129	128	127	126	125	123	122	121	121
氣壓(cm-Hg)	142	155	168	176	185	195	210	222	232	
基音(Hz)	120	118	117	116	115	115	114	115	115	



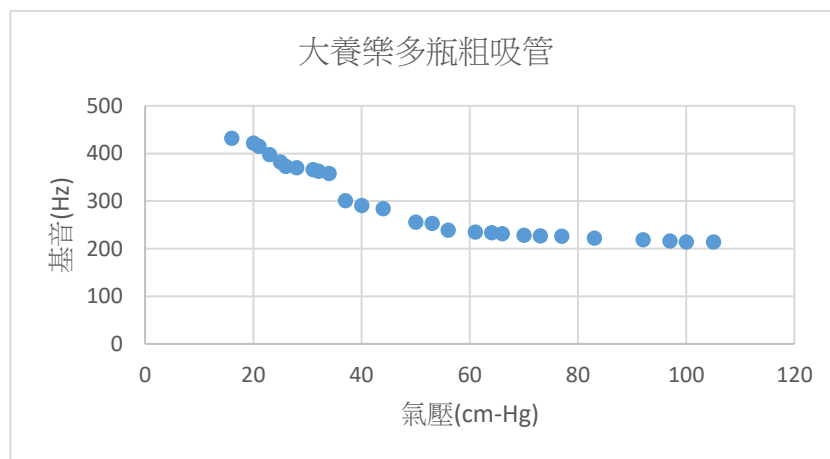
(研究一般多多笛的實際情形)

(九) 氣壓對多多笛發聲頻率的影響

(以下氣壓為相對氣壓，1 代表筆外界氣壓多 1cm-Hg)

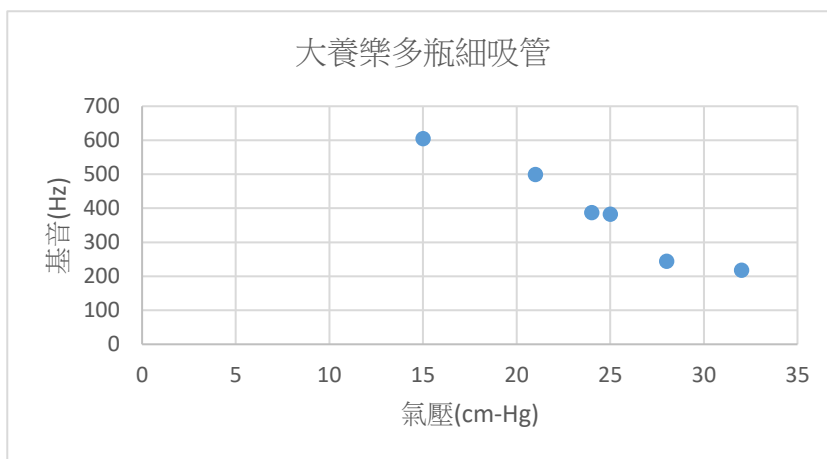
1. 大養樂多瓶粗吸管(吸管長度 18cm)

氣壓(cm-Hg)	16	20	21	23	25	26	28	31	32	34
基音(Hz)	432	422	415	398	382	373	370	366	363	358
氣壓(cm-Hg)	37	40	44	50	53	56	61	64	66	70
基音(Hz)	301	291	284	256	253	239	235	234	232	228
氣壓(cm-Hg)	73	77	83	92	97	100	105	109	115	
基音(Hz)	227	226	222	219	216	214	214	212	209	



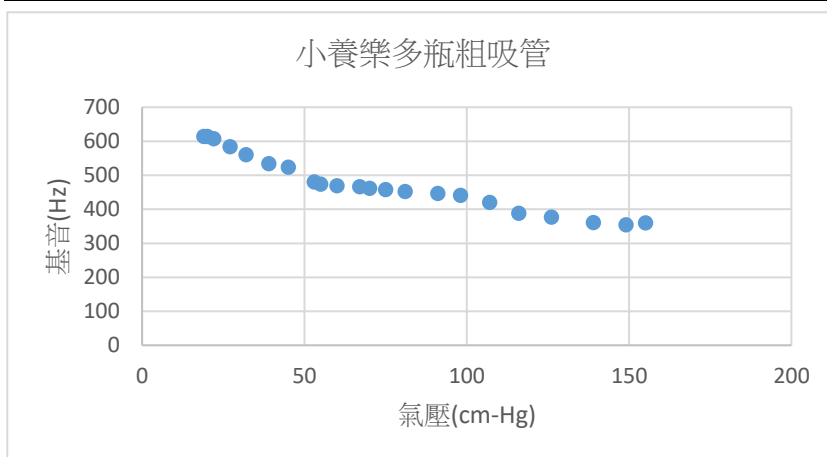
2. 大養樂多瓶細吸管(吸管長度 14cm)

氣壓(cm-Hg)	15	21	24	25	28	32	以下氣壓過大無法 發出聲音
基音(Hz)	605	499	387	383	244	218	



3. 小養樂多瓶粗吸管(吸管長度 12cm)

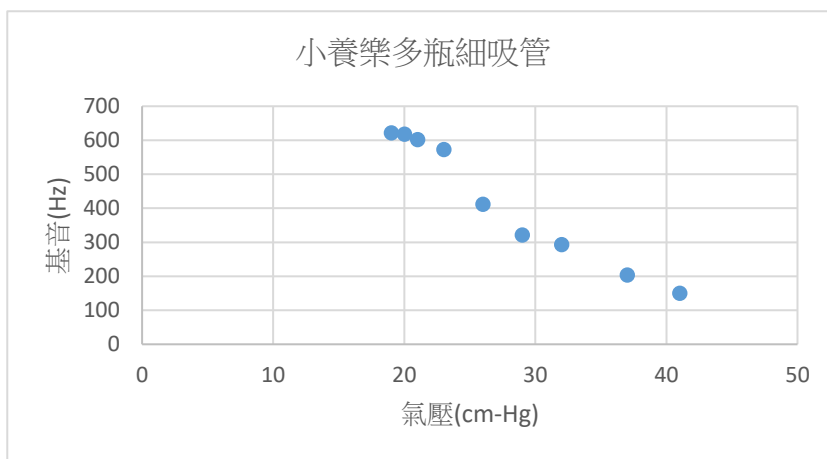
氣壓(cm-Hg)	19	20	22	27	32	39	45	53	55	60	67
基音(Hz)	614	614	607	584	560	534	524	480	474	469	466
氣壓(cm-Hg)	70	75	81	91	98	107	116	126	139	149	155
基音(Hz)	461	458	452	446	441	420	388	377	361	354	360



4. 小養樂多瓶細吸管(吸管長度 13cm)

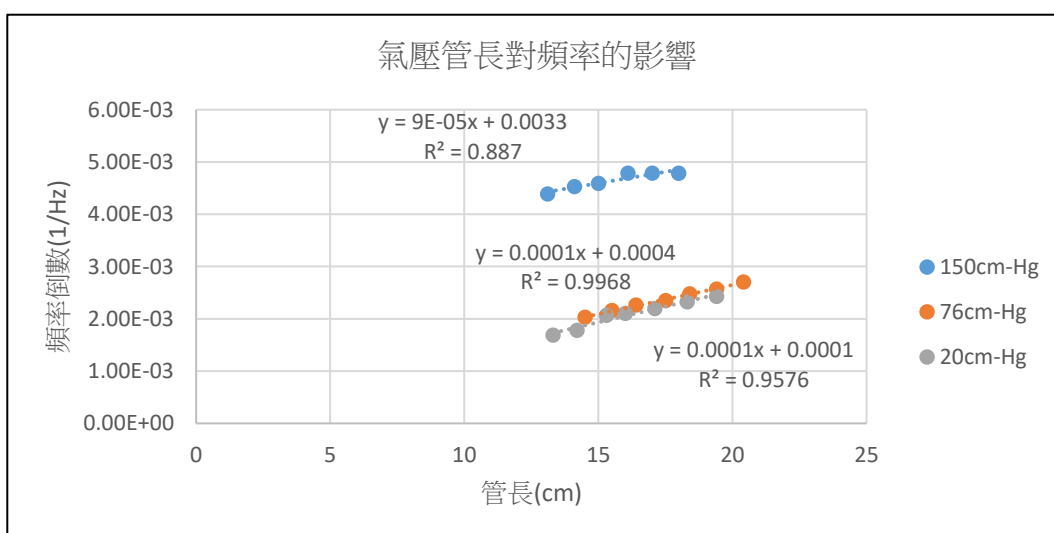
氣壓(cm-Hg)	19	20	21	23	26	29	32	37	41	以下氣壓過大無法發出聲音
基音(Hz)	622	618	602	573	412	321	293	204	150	





### 5. 大養樂多瓶粗吸管

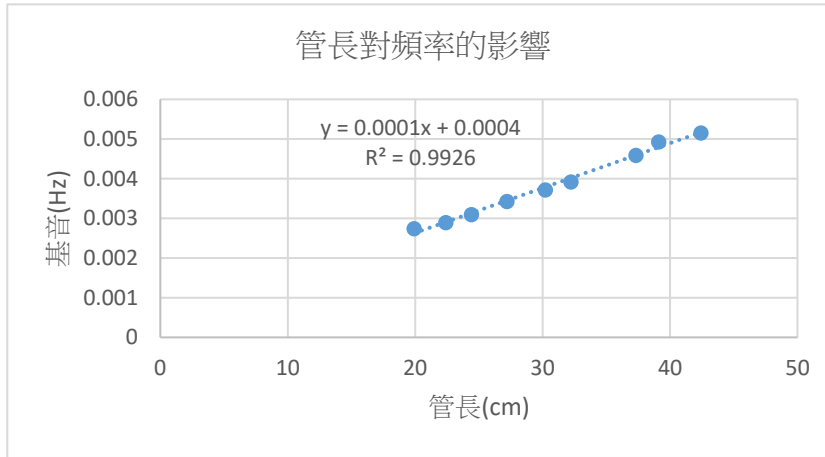
氣壓 20cm-Hg	管長(cm)	19.4	18.3	17.1	16	15.3	14.2	13.3
	基音(Hz)	412	431	456	475	484	562	593
	膜震動基頻(Hz)	412	431	456	474	484	560	591
氣壓 76cm-Hg	管長(cm)	20.4	19.4	18.4	17.5	16.4	15.5	14.5
	基音(Hz)	370	389	404	426	442	464	493
	膜震動基頻(Hz)	372	384	400	424	440	460	493
氣壓 150cm-Hg	管長(cm)	18	17	16.1	15	14.1	13.1	
	基音(Hz)	209	209	209	218	221	228	



(十) 實際多多笛的吸管與頻率的影響

1. 在進入真實的多多笛之前，我們先使用接近多多比例的模型做測試

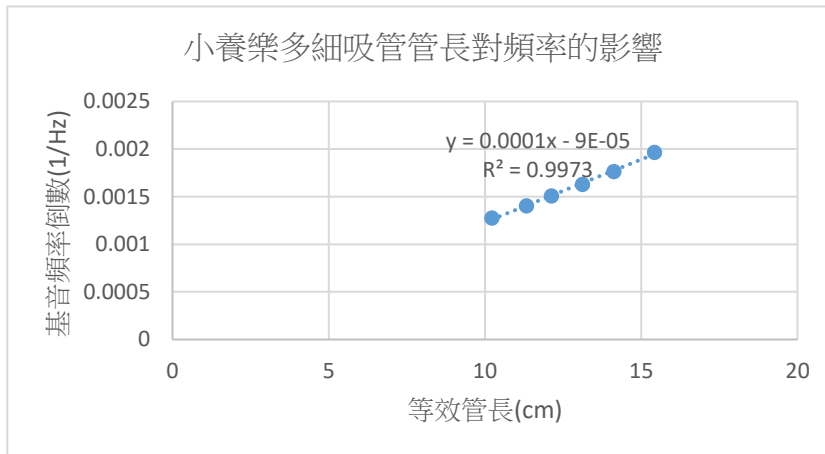
管長(cm)	42.4	39.1	37.3	32.2	30.2	27.2	24.4	22.4	19.9
基音(Hz)	194	203	218	255	269	292	323	345	365



分析：由數據可看出內管長度與頻率倒數成正比

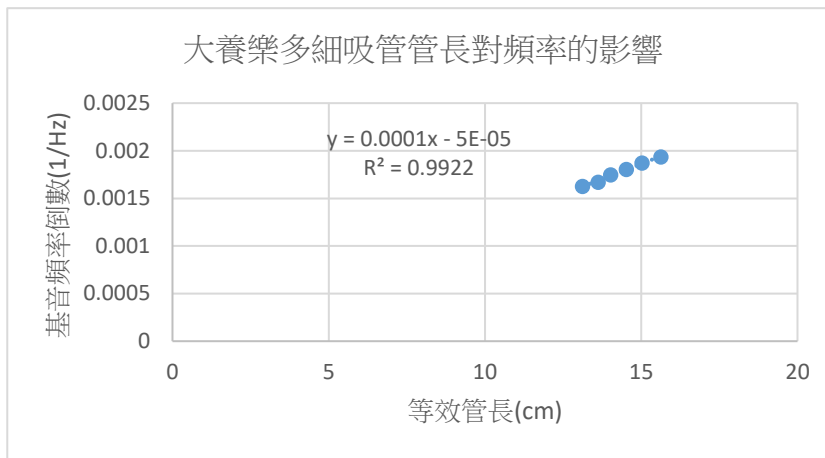
2. 小養樂多細吸管

管長(cm)	15.3	14.0	13.0	12.0	11.2	10.1
等效管長(cm)	15.42	14.12	13.12	12.12	11.32	10.22
基音(Hz)	509	567	614	663	713	785
第一泛音(Hz)	1016	1133	1228	1328	1428	1583
第二泛音(Hz)	1524	1699	1850	1991	2141	2357
基音理論值(Hz)	551	602	648	701	751	832
誤差百分比	7.66%	5.81%	5.23%	5.46%	5.05%	5.62%



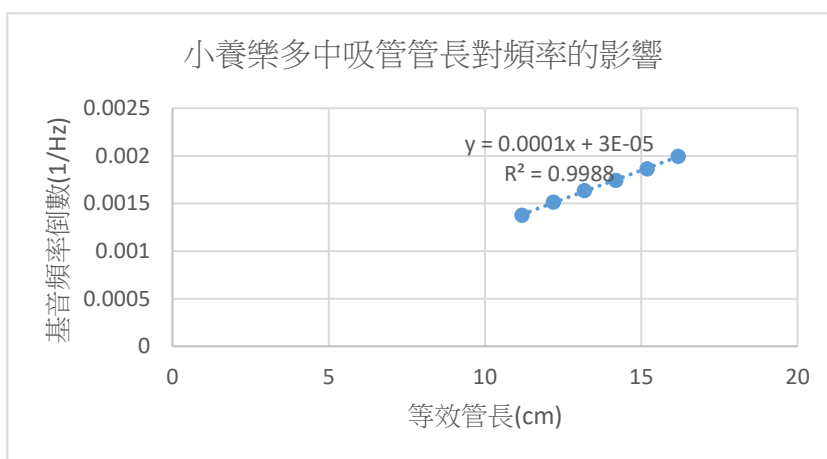
### 3. 大養樂多細吸管

管長(cm)	15.5	14.9	14.4	13.9	13.5	13
等效管長(cm)	15.62	15.02	14.52	14.02	13.62	13.12
基音(Hz)	517	534	554	572	599	615
第一泛音(Hz)	1035	1069	1100	1152	1196	1241
第二泛音(Hz)	1553	1602	1664	1718	1797	1847
基音理論值(Hz)	544	566	585	606	624	648
誤差百分比	4.99%	5.64%	5.36%	5.65%	4.02%	5.07%



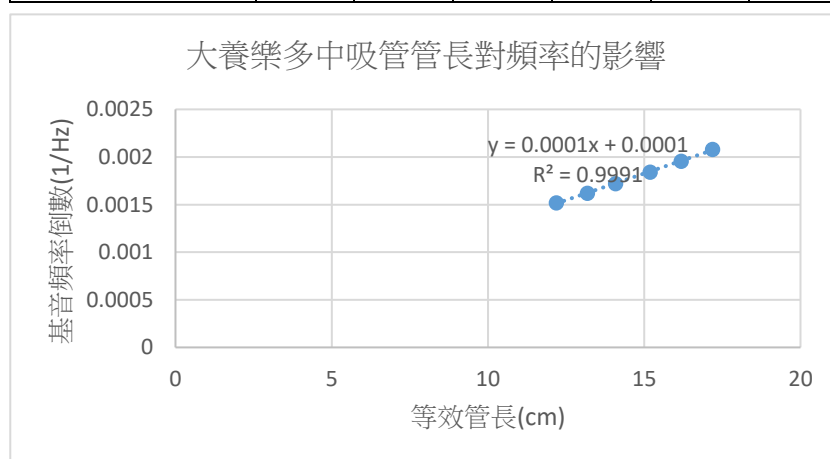
### 4. 小養樂多中吸管

管長(cm)	16	15	14	13	12	11
等效管長(cm)	16.18	15.18	14.18	13.18	12.18	11.18
基音(Hz)	501	537	574	611	661	726
第一泛音(Hz)	1003	1075	1149	1223	1322	1469
第二泛音(Hz)	1504	1612	1723	1834	1979	2176
基音理論值(Hz)	525	560	599	645	698	760
誤差百分比	4.63%	4.10%	4.24%	5.26%	5.28%	4.51%



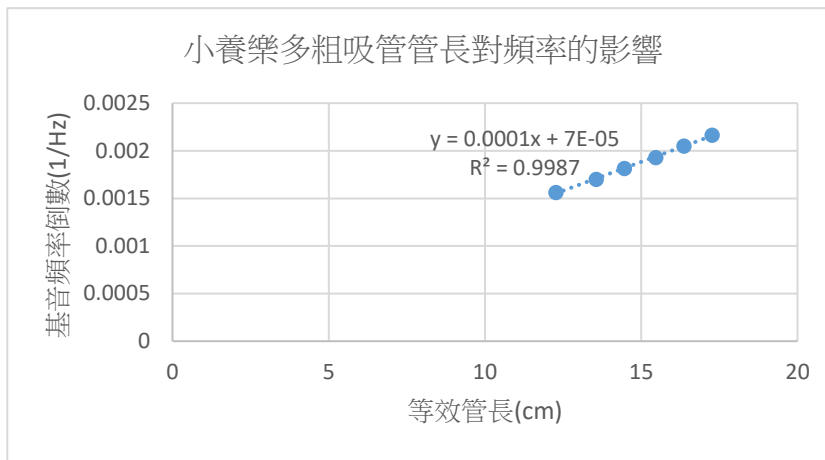
### 5. 大養樂多中吸管

管長(cm)	17	16	15	13.9	13	12
等效管長(cm)	17.18	16.18	15.18	14.08	13.18	12.18
基音(Hz)	481	511	543	581	618	658
第一泛音(Hz)	963	1030	1086	1174	1241	1338
第二泛音(Hz)	1444	1532	1627	1744	1854	1976
基音理論值(Hz)	500	531	567	612	654	708
誤差百分比	3.80%	3.81%	4.18%	4.99%	5.48%	7.11%



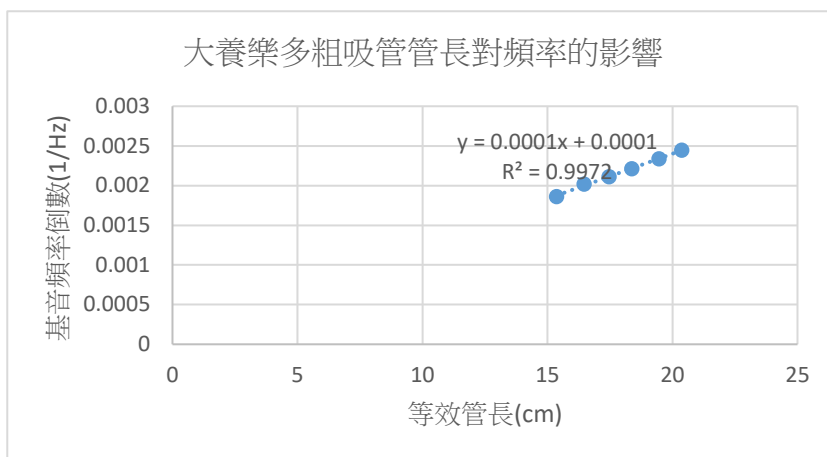
### 6. 小養樂多粗吸管

管長(cm)	17.3	16.4	15.5	14.5	13.6	12.3
等效管長(cm)	16.9	16	15.1	14.1	13.2	11.9
基音(Hz)	462	488	518	551	588	640
第一泛音(Hz)	938	976	1037	1102	1174	1288
第二泛音(Hz)	1389	1469	1554	1643	1770	1908
基音理論值(Hz)	503	531	556	595	635	704
誤差百分比	8.14%	8.14%	6.88%	7.43%	7.44%	9.04%



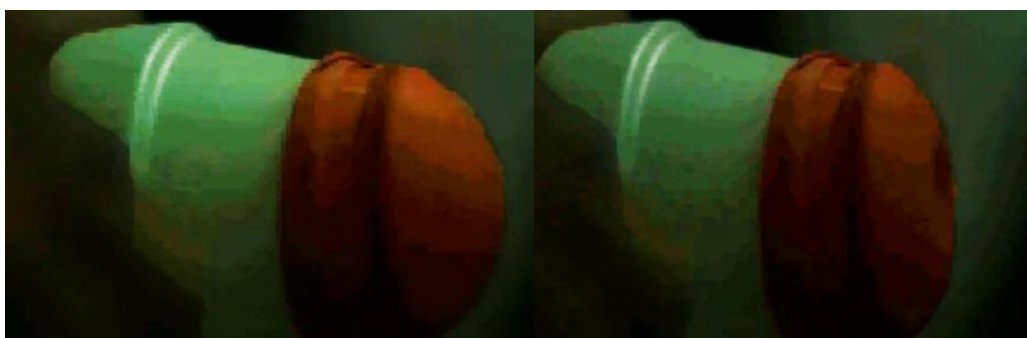
### 7. 大養樂多粗吸管

管長(cm)	20	19.1	18	17.1	16.1	15
等效管長(cm)	20.36	19.46	18.36	17.46	16.46	15.36
基音(Hz)	409	428	452	474	495	537
第一泛音(Hz)	819	857	902	944	990	1074
第二泛音(Hz)	1224	1284	1357	1418	1486	1611
基音理論值(Hz)	421	441	472	497	528	567
誤差百分比	2.90%	2.92%	4.28%	4.64%	6.24%	5.24%



## 陸、 討論

- 一、 我們推論膜會產生震動的原因是因為當氣吹入時，膜被撐開，撐開時氣體由內管向外排出，因而造成管內氣壓下降，所以膜因而往內縮，這樣來回造成振動。而且我們用高速攝影機拍攝有發現到膜撐開及往內縮的情況，且膜往內縮時會再次接觸內管將管關閉。



- 二、 根據頻譜分析結果是連續整數比(n=1,2,3,4...)，但發現它的基音並非兩邊開管的狀況，而是符合一開一閉的狀況，且經由高速攝影機拍到的照片也看到膜縮回去時會再次貼合內管，所以我們推測它是由兩邊開管及一開一閉兩種狀況的疊合，而一開一閉的狀況即為膜往內縮的狀況，兩端開管則是膜被撐開的狀況。

取大養樂多細吸管為例：管長 15.5cm 時，我們所錄到的頻率是 517Hz，  
(溫度設在攝氏 15 度，聲速為 340m/s)

由開管公式帶入： $340 \times 100 / 2(15.5 + 2 \times 0.2 \times 0.6) = 1080(\text{Hz})$

由閉管公式帶入： $340 \times 100 / 4(15.5 + 0.2 \times 0.6) = 544(\text{Hz})$

錄到的結果比較接近閉管情形，但第一泛音卻是 1035(Hz)，之後的共振頻率皆是

517(Hz)的整數倍，所以我推論我們所錄到的聲音為開管及閉管的頻率所疊合而成的。

三、 根據內管管長改變所得到的結論更可證明多多笛的發聲機制為空氣柱共鳴

取大養樂多細吸管為例：

管長(cm)	15.5	14.9	14.4	13.9	13.5	13
等效管長(cm)	15.62	15.02	14.52	14.02	13.62	13.12
基音(Hz)	517	534	554	572	599	615
第一泛音(Hz)	1035	1069	1100	1152	1196	1241
第二泛音(Hz)	1553	1602	1664	1718	1797	1847
基音理論值(Hz)	544	566	585	606	624	648
誤差百分比	4.99%	5.64%	5.36%	5.65%	4.02%	5.07%

管長改變後所測得的頻率與空氣柱共鳴閉管狀態計算出來的理論值差異不大，推測此誤差來源來自空氣柱共鳴的理論是由一維空間推導出來的，而實際上的吸管是三維空間。

四、 根據內管管長改變和氣壓改變可以看出發生機制為內管與膜共振的結果

氣壓 20cm-Hg	管長(cm)	19.4	18.3	17.1	16	15.3	14.2	13.3
	基音(Hz)	412	431	456	475	484	562	593
	膜震動基音(Hz)	412	431	456	474	484	560	591
氣壓 76cm-Hg	管長(cm)	20.4	19.4	18.4	17.5	16.4	15.5	14.5
	基音(Hz)	370	389	404	426	442	464	493
	膜震動基音(Hz)	372	384	400	424	440	460	493

不論氣壓大小，改變管長皆會改變基音，且與管長成倒數正比關係，改變管長還會影響到膜的震動頻率，且膜的震動基頻與我們所錄製到的基音吻合，所以可以確定它的發生機制並非單獨為內管或膜，而是兩者共振的結果。



## 柒、結論

### 一、探討不同的膜對聲音的影響：

由以上六種不同的膜所分析出的數據中可看出：

塑膠袋、Coco 膜、紙、品克膜所分析出的波形較不規律，可樂果相較之下較有規律，而氣球膜雖然波形也相對穩定，但內管壓入的程度在實驗上比較難控制且會影響聲音的頻率，所以最後我們選用可樂果膜來進行實驗。

### 二、實驗(一)：由圖表可看出改變外管管長不會影響聲音的頻率

實驗(二)：由圖表可看出改變內管管長會影響頻率，且頻率的倒數與等效管長成正比

實驗(三)：由圖表可看出改變吹孔位置不會影響聲音的頻率

實驗(四)：由圖表可看出改變膜的面積不會影響聲音的頻率

實驗(五)：由圖表可看出改變內管底面面積不會影響聲音的頻率

實驗(六)：由圖表可看出改變內管頂面面積不會影響聲音的頻率

實驗(七)：由圖表可看出在內管管上鑽洞會影響聲音的頻率，且頻率倒數與鑽孔位置成正比

實驗(八)：由圖表可知氣壓對於膜的振動是有影響的，但對於可樂果膜的影響不明顯，而氣球膜則是呈現氣壓越大頻率越低的現象，但頻率與氣壓不是線性關係

實驗(九)：我們發現跟模型的結果相似，氣壓越大頻率越低，且氣壓與頻率並非呈現性關係

實驗(十)：我們將模型換成一般的多多笛後，還是可以看出吸管長度與頻率倒數成正比

### 三、總結：

1. 當我們吹入氣體時造成內部壓力變大，使膜撐開得以讓氣體由內管排出，又因裡面空氣流動比外面空氣快，根據白努利定律，流速慢壓力較大，膜又被推回去，反覆作用之下使膜產生振動。
2. 利用高速攝影機拍攝膜的振盪時發現：膜會因為充氣而被撐開，形成開管的狀態，縮回去時又會接觸吸管底部，形成閉管的狀態，所以我們認為錄到的聲音、分析出的頻譜是開管及閉管的頻率所疊合而成的。

3. 以上實驗我們發現多多笛模型所發出的聲音頻率與內管管長有關，符合空氣柱共鳴，且與外管管長、吹孔位置、膜的面積大小、內管頂面及底面的面積無關，換成一般的多多笛時也發現吸管長度確實會影響聲音頻率，且符合空氣柱共鳴。
4. 由於氣壓與頻率並沒有線性的關係，我們將它分段討論，當氣壓極小的時候它的頻率是非常接近空氣柱共鳴的頻率，因此我們推測在能發出聲音的情況下，氣壓越小越符合空氣柱共鳴，而氣壓調大時就不符合空氣柱共鳴，而發生機制不論在氣壓小還是氣壓大時，皆為內管與膜共振的結果。

## 捌、 參考資料

- 一、 駐波與共振：<普通物理學·上>第 16 章、高中選修物理(上)\_3-2
- 二、 管口修正量：張仁昌·聲波的波形與頻率的關係·取自  
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/html.php?html=teacher/sound/index>
- 三、 李唐安。horn horn horn-氣動式喇叭之頻率研究。中華民國第 57 屆中小學科學展覽會，高級中等學校組 物理與天文學科。
- 四、 嚴光晨等。開洞駐波的探討。中華民國第 47 屆中小學科學展覽會，高中組 物理科。
- 五、 陳映竹等。音調的迷思-長笛管中駐波模式之探討。中華民國第 56 屆中小學科學展覽會，高級中等學校組 物理與天文學科。

## 【評語】 051803

本作品研究多多笛（空氣喇叭）的發聲原理，探討其發聲頻率與內管長度，鑽孔位置以及氣壓的關係。實驗設計認真，但有些變因（例如內管口徑）未列入探討，研究較不周全。本作品題材亦屬常見，較欠缺創新想法。建議作者以其實驗精神與能力，繼續努力、再接再厲。



# 摘要

目的：為了了解多多笛的發聲原理及各種因素對頻率的影響

方法：(1)利用PVC管製作多多笛的模型方便測量及計算 (2)錄下聲音並利用軟體分析，尋找不同變因下對頻率的影響

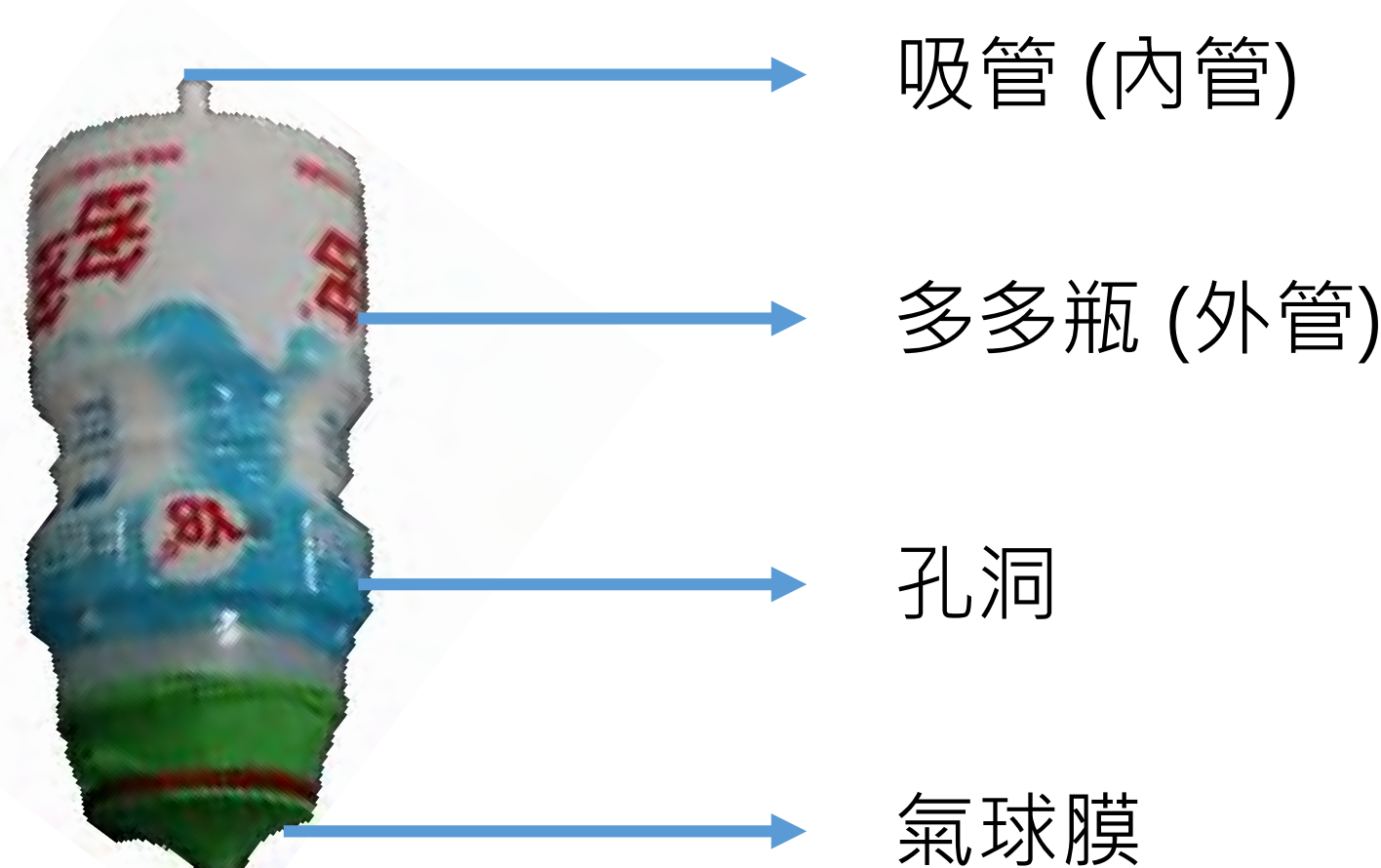
研究結果：改變內管長度時，頻率會改變，符合空氣柱共鳴；改變氣壓也會對頻率造成影響，但頻率與氣壓非線性關係。其他因素的改變皆不會影響頻率。

結論：多多笛發出的聲音頻率並不單純，當氣壓小時，它發出的頻率會越接近空氣柱共鳴，而不論氣壓大小，管長與頻率倒數皆呈正比關係，因此我們推測多多笛的發生機制是膜與空氣柱共振的結果，且經由分析，我們發現基音是符合閉管的基音，但是泛音皆為基音的連續整數倍，因此推測它產生的頻率是開管及閉管疊合而成。

# 研究動機

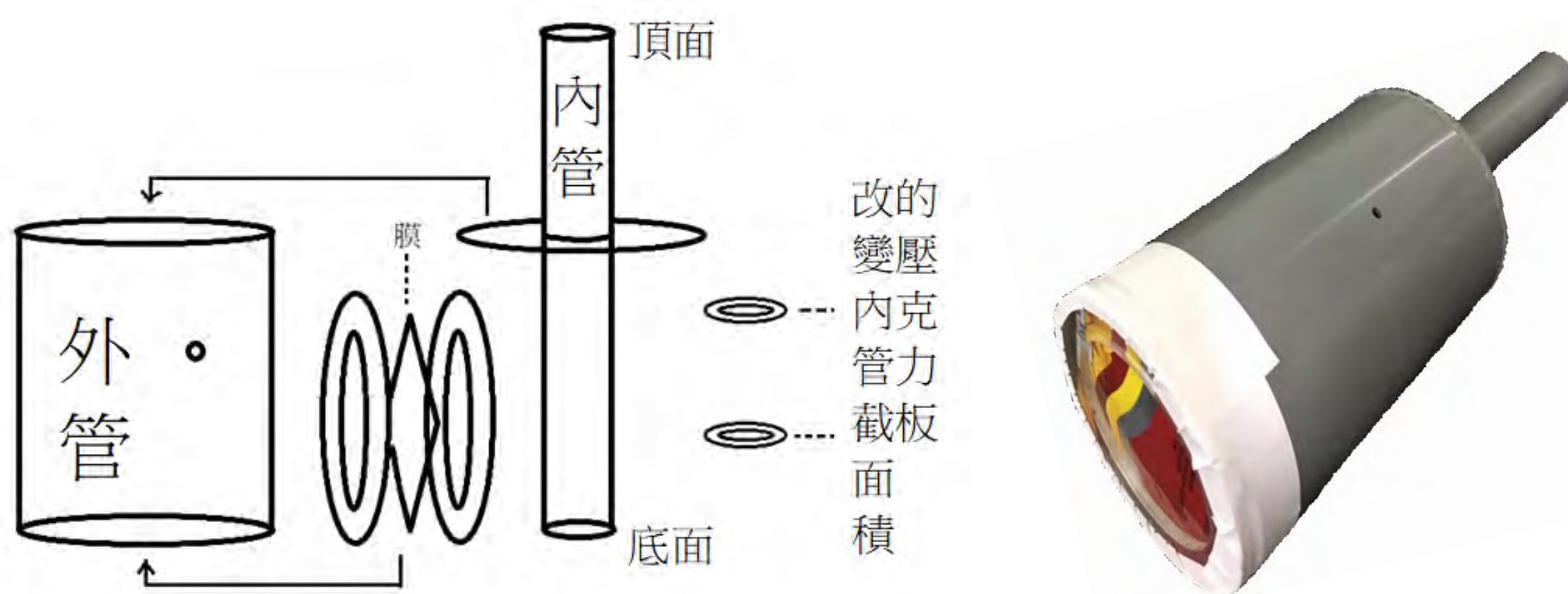
多多笛是小朋友的玩具，它是利用氣球膜、多多瓶和吸管製作。當物理老師上課講到駐波那一單元時，有位同學突然想到小時候玩的多多笛是否也是利用這個原理發出聲音的？多多笛雖然小，但卻沒有想像中的這麼簡單，小小的瓶子卻藏了很多我們不知道事，包括吹入的氣體是如何在裡頭流動、氣體是如何帶動膜的振動、發出的聲音是怎麼產生的？這一連串的問題挑起了我們的好奇心，於是開始著手研究這小小的多多笛。

# 介紹



多多笛本身的構造簡單，分為內管、外管、孔洞和膜四個部分。對準孔洞吹入氣體，氣體在內部流動，進而造成膜的振動而發出聲音。

# 模型製作



- (1)準備粗細不同的兩個PVC管作為外管及內管，在外管上打一個洞。
- (2)把兩片壓克力板中心切除一個圓，用來夾柱膜。
- (3)在拿一塊壓克力板中心切除一個圓讓內管插入。
- (4)最後將膜、外管及內管用熱融膠接上便完成。(接合處都要緊密的黏合，不可有任何的漏縫)

# 研究目的

- 一、多多笛的發生機制
- 二、探討不同的膜對於頻率的影響
- 三、研究各種因素對多多笛發生頻率的影響
  - 1.了解改變外管管長對頻率的影響
  - 2.了解改變吹孔位置對頻率的影響
  - 3.了解改變內管管長對頻率的影響
  - 4.了解改變內管底面面積對頻率的影響
  - 5.了解改變內管頂面面積對頻率的影響
  - 6.了解改變膜面積對頻率的影響
  - 7.了解內管開孔與頻率關係
  - 8.了解氣壓對可樂果膜與氣球膜頻率的影響
- 四、研究一般多多笛的實際情形
  - (一)實際多多笛的膜、吸管管長與頻率關係
  - (二)氣壓對多多笛發聲頻率的影響

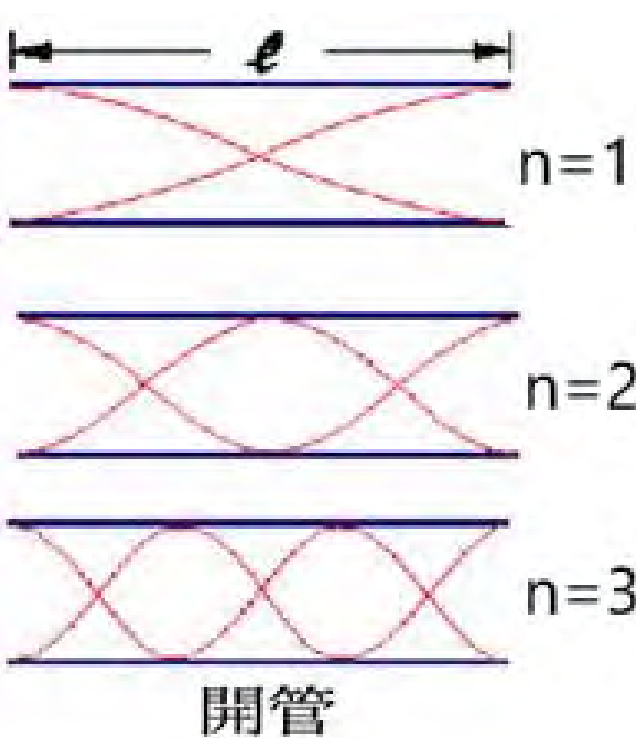
# 設備及器材

粗PVC管 	細PVC管 	空壓機 
調壓閥、噴槍 	可樂果包裝+壓克力板 	雷射測距機 
氣球、吸管、橡皮筋 	養樂多瓶 	

# 文獻探討

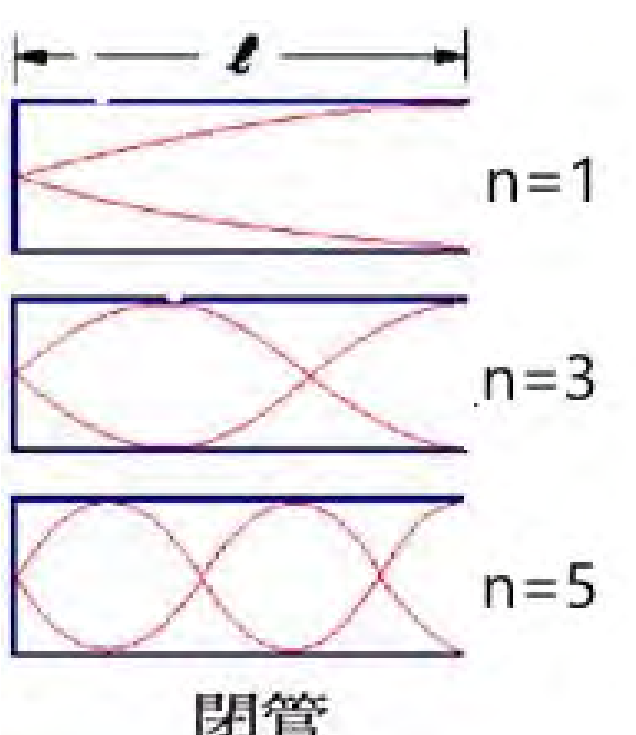
空氣柱共鳴：(開管視為波腹；閉管視為節點)

開管狀態：



$L = n\lambda/2 \dots (n=1, 2, 3, \dots)$   
 $\rightarrow \lambda = 2L/n$   
 $\rightarrow f = nv/2L$   
 n=1時，稱為第一諧音，又稱為基音  
 n=2時，稱為第二諧音，又稱第一泛音  
 以此類推.....  
 n=3時，稱為第三諧音，又稱第二泛音  
 $f_1, f_2, f_3 \dots$  成整數倍關係

閉管狀態：



$L = n\lambda/4 \dots (n=1, 3, 5, \dots)$   
 $\rightarrow \lambda = 4L/n$   
 $\rightarrow f = nv/4L$   
 n=1時，稱為第一諧音，又稱為基音  
 n=3時，稱為第三諧音，又稱第一泛音  
 以此類推.....  
 n=5時，稱為第五諧音，又稱第二泛音  
 $f_1, f_2, f_3 \dots$  成奇整數倍關係

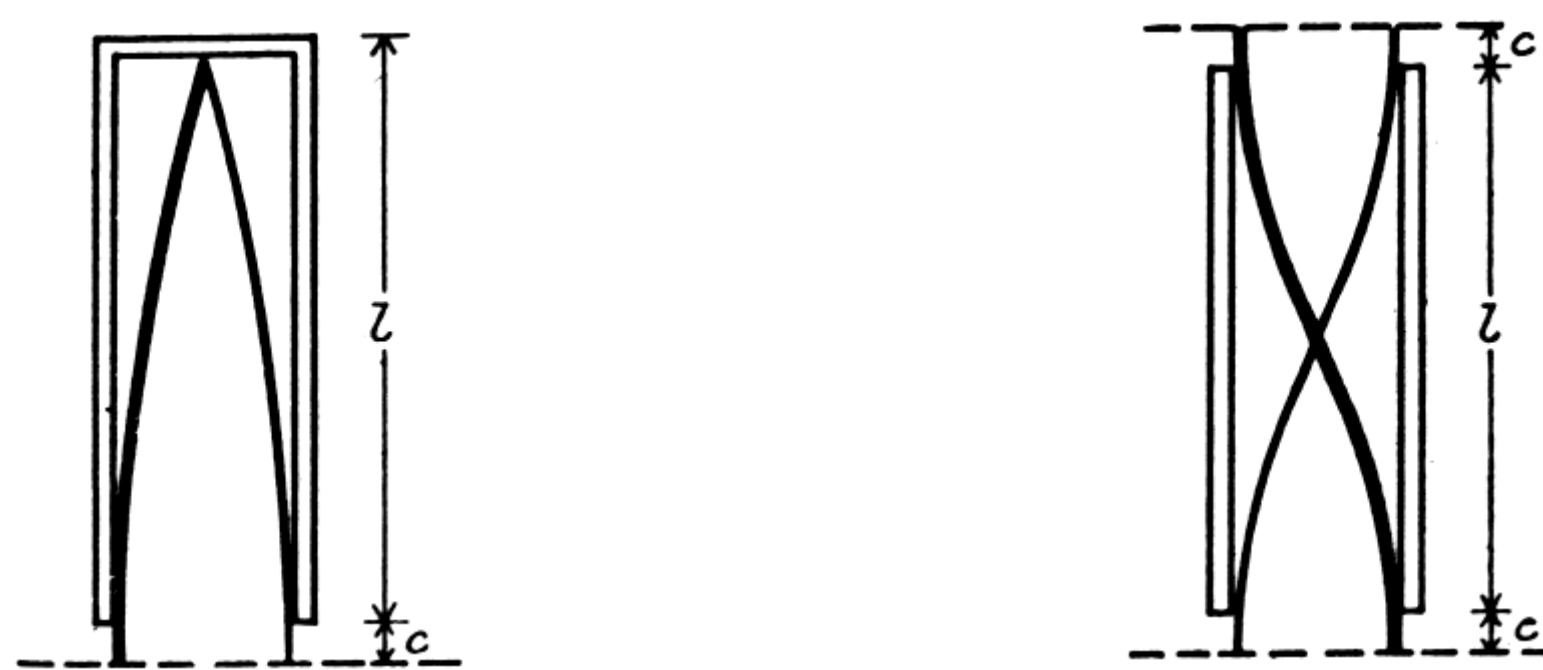
管口修正量：

當管內的空氣柱形成駐波時，通常管口處並非會是駐波的波腹，波腹會再管口外一小段距離c，此段距離稱之為管口修正量。

等效管長：閉管的情況下為 $l + c$ ；開管的情況下為 $l + 2c$ 。

(一般是採用內管半徑為r，則管口修正量 $c = 0.6r$ 。)

但是修正量與波長有關，當波長越小，修正量也越小。



所以空氣柱共鳴的公式可改寫成：

閉管公式： $\lambda = 4(L+c)$

$\rightarrow f = nv/4(L+c)$

開管公式： $\lambda = 2(L+2c)$

$\rightarrow f = nv/2(L+2c)$

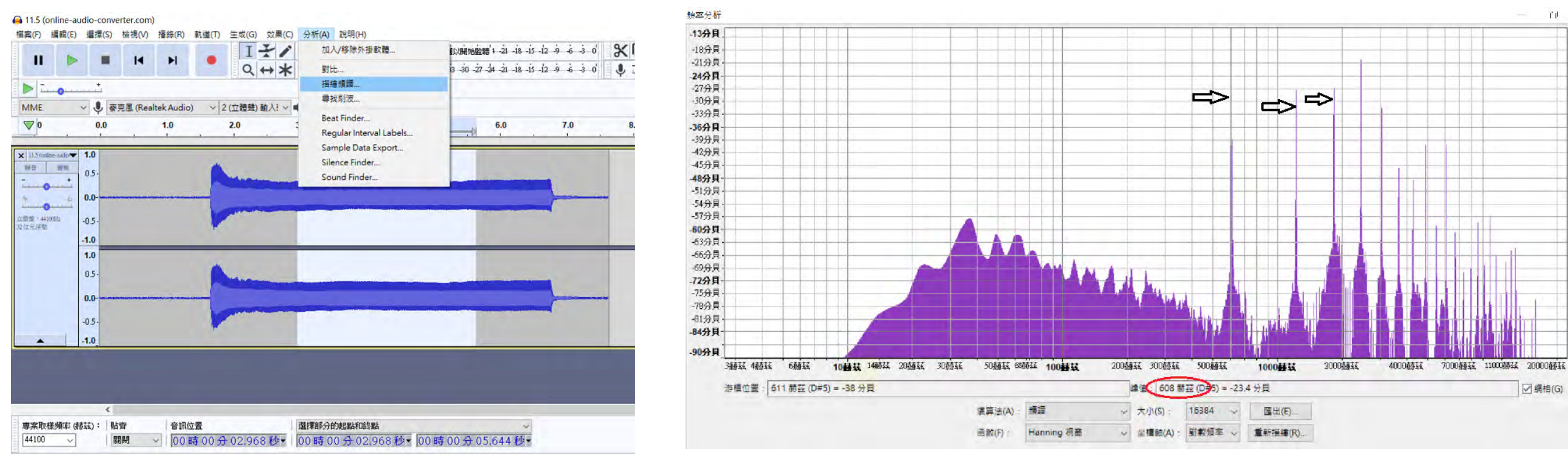


# 實驗流程

## 實驗一、

我們所做的實驗皆是以以下的步驟來進行

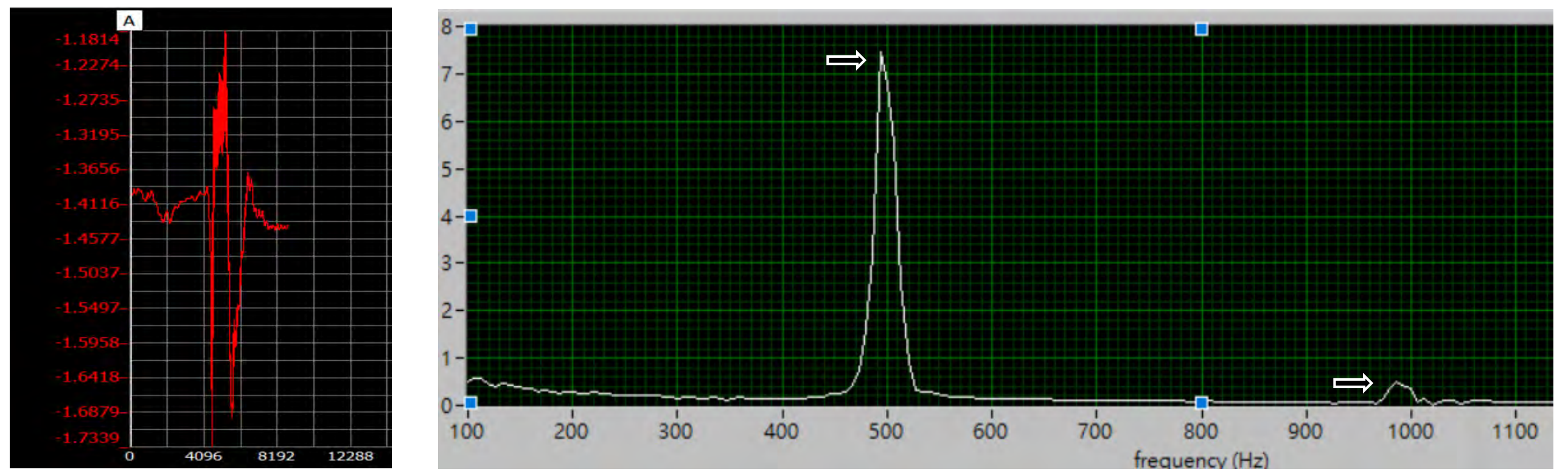
1. 改變欲探討的項目(例：要探討外管長度對聲音頻率的影响便改變外管長度)
2. 儀器架設好之後，利用噴槍對準孔洞吹氣，並錄下聲音，並轉成wav檔
3. 將錄下來的音檔匯入軟體Audacity進行分析
4. 在音檔上選取適當的長度，按下分析後，選取描繪頻譜
5. 在頻譜上找到高峰的位置並記錄其頻率數值



## 實驗二、

測量氣球膜震動是以以下的步驟來進行

1. 架設實驗儀器，將雷射測距儀的雷射光對準薄膜中心，並調整到適當位置(距離雷射光焦點正負2mm)。
2. 於吹氣時儲存下位置訊息(測量次數為每秒4000次)。
3. 選擇適當的長度並利用軟體進行頻譜分析。
4. 在頻譜上找到高峰並記錄其頻率數值。



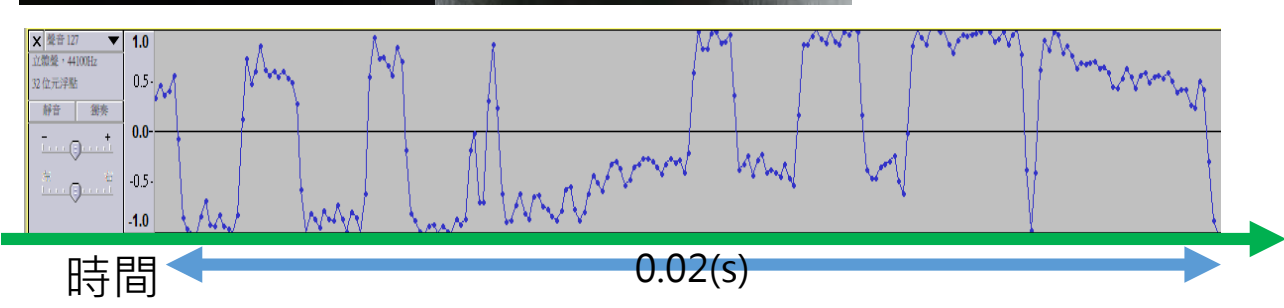
# 研究結果

## 二、探討不同的膜對於頻率的影响

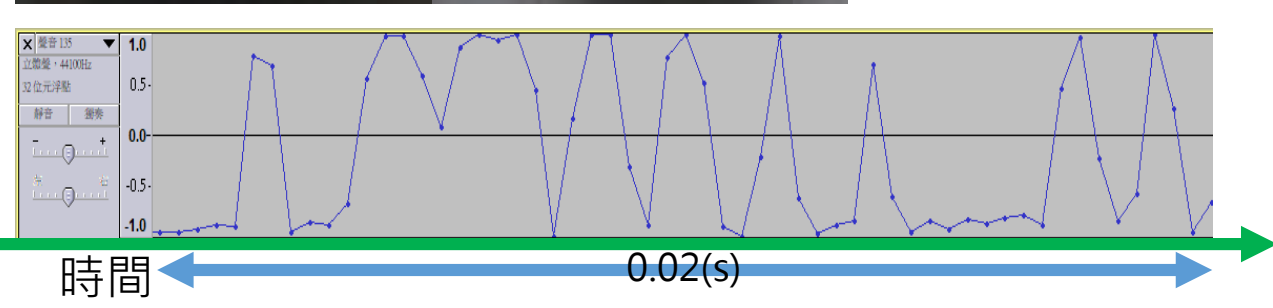
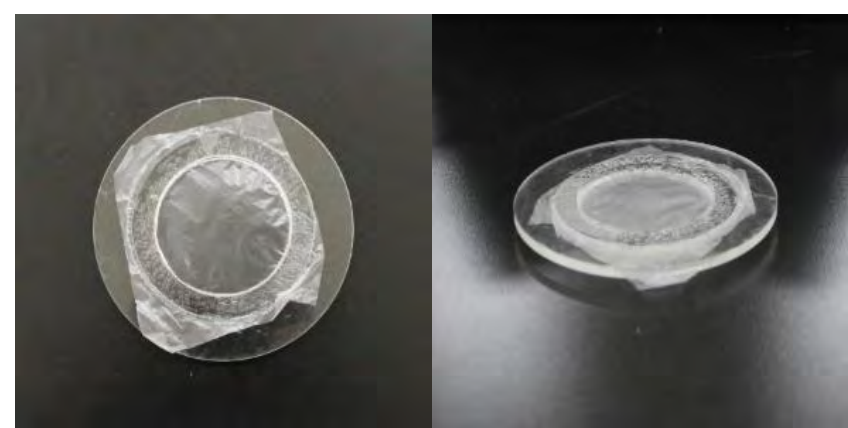
(一)由於多多的瓶身較不規則而且瓶身柔軟會影響實驗，所以我們選擇用形狀較規則且材質較硬的PVC管來代替多多瓶

(二)由於氣球膜較有彈性，在內管按壓膜時，無法固定壓入的深淺，會影響到實驗操作，所以我們選了以下不同的材質來當膜，測試其穩定度。

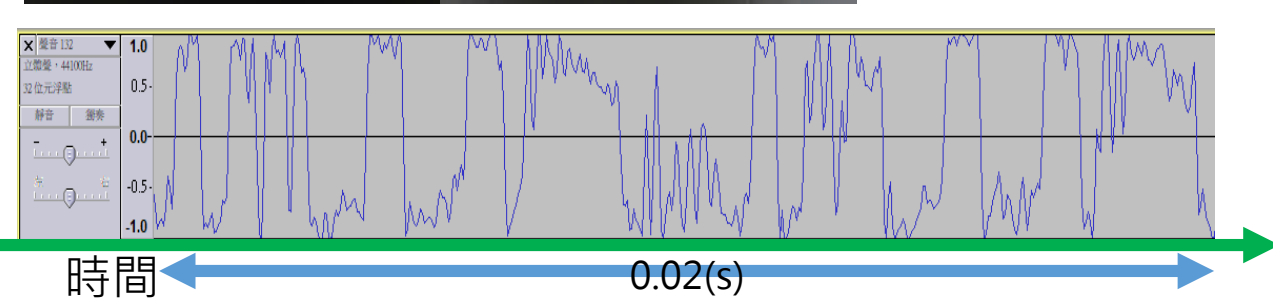
### 1. 品克膜



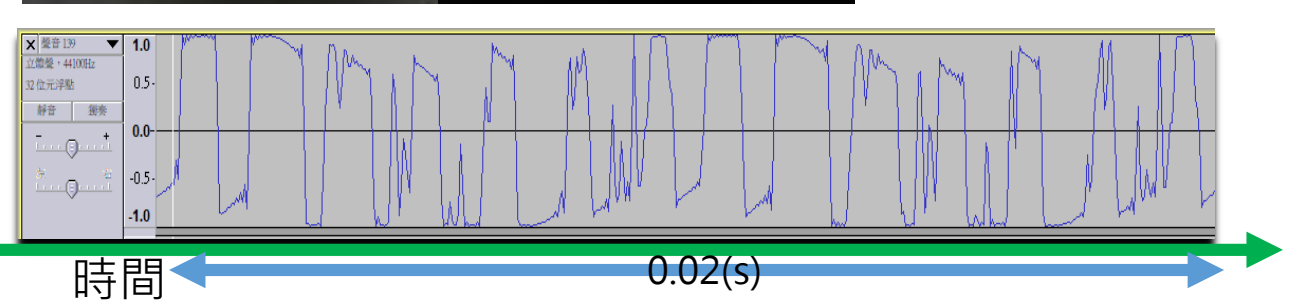
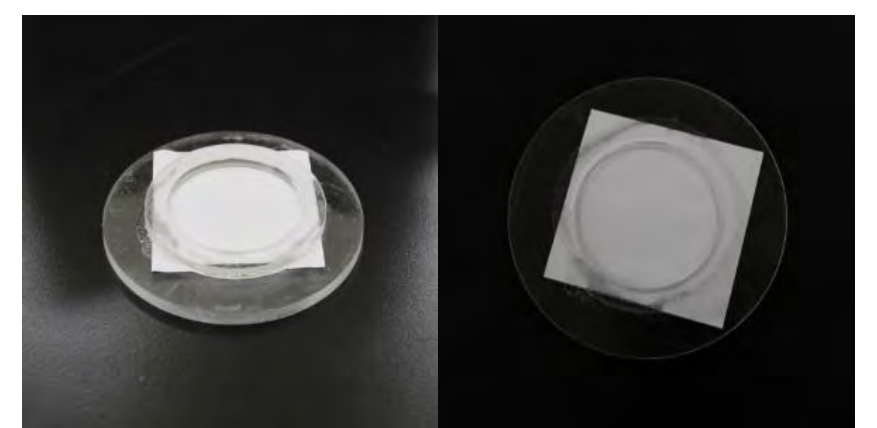
### 2. 塑膠袋



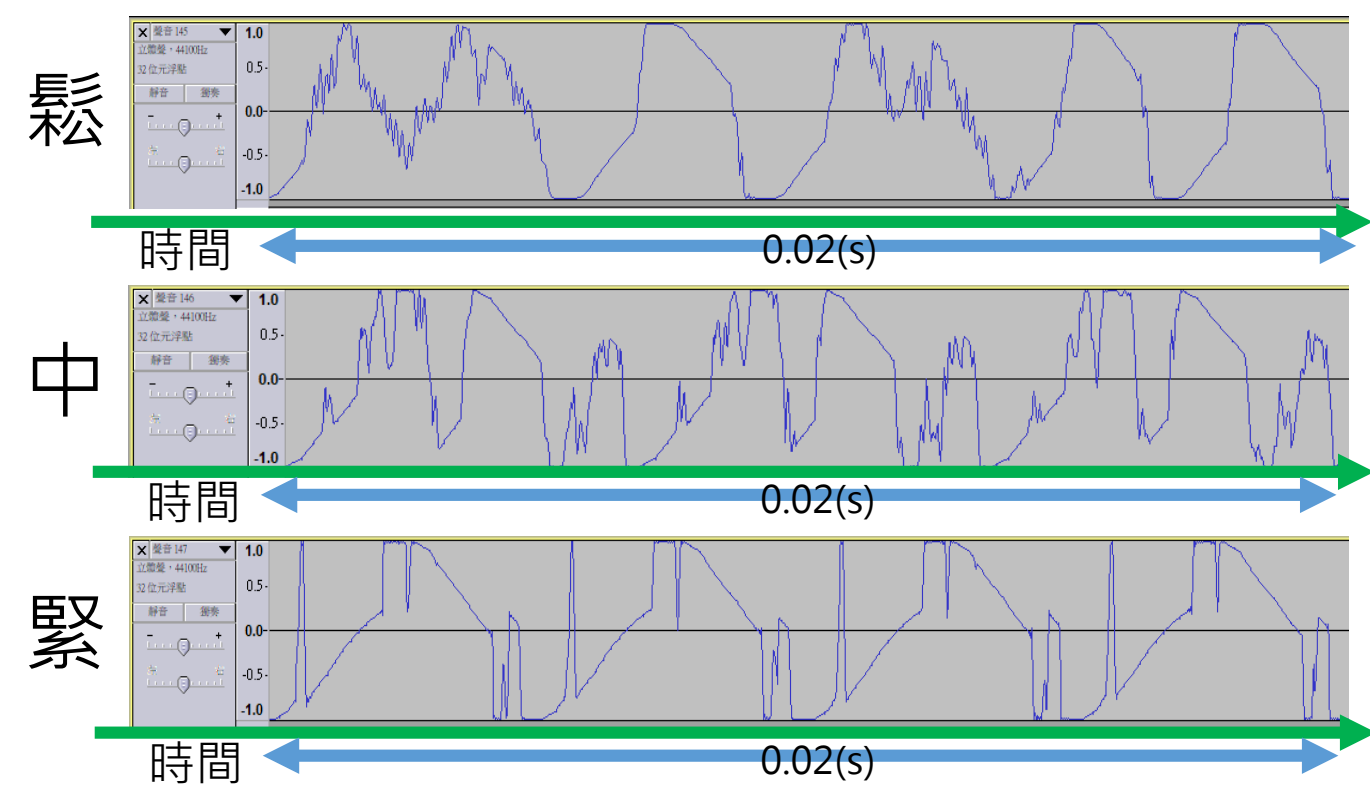
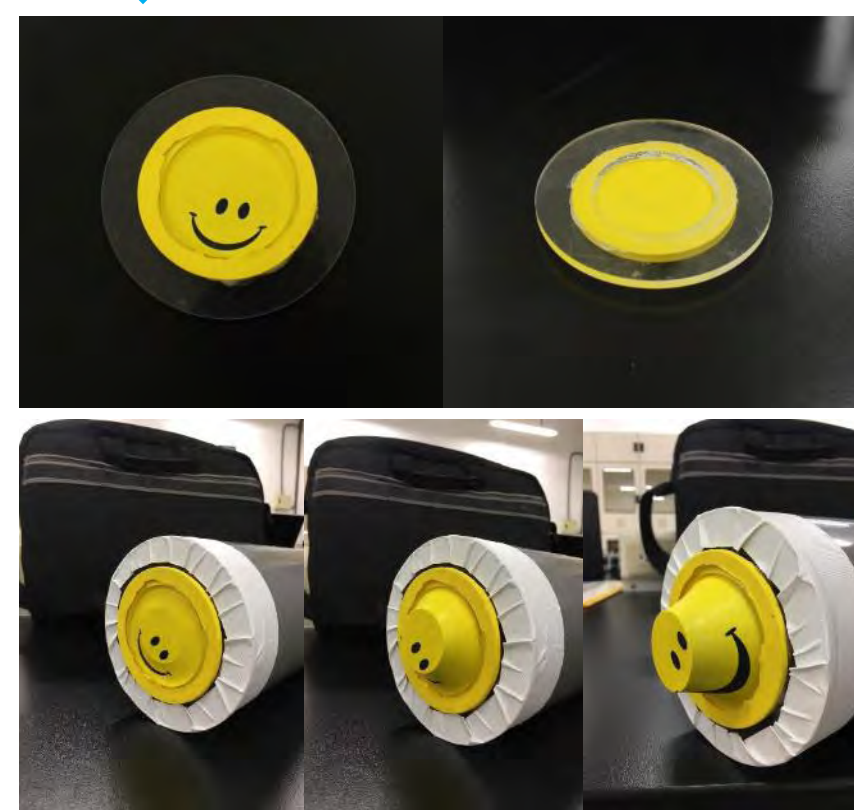
### 3. 手搖杯膜



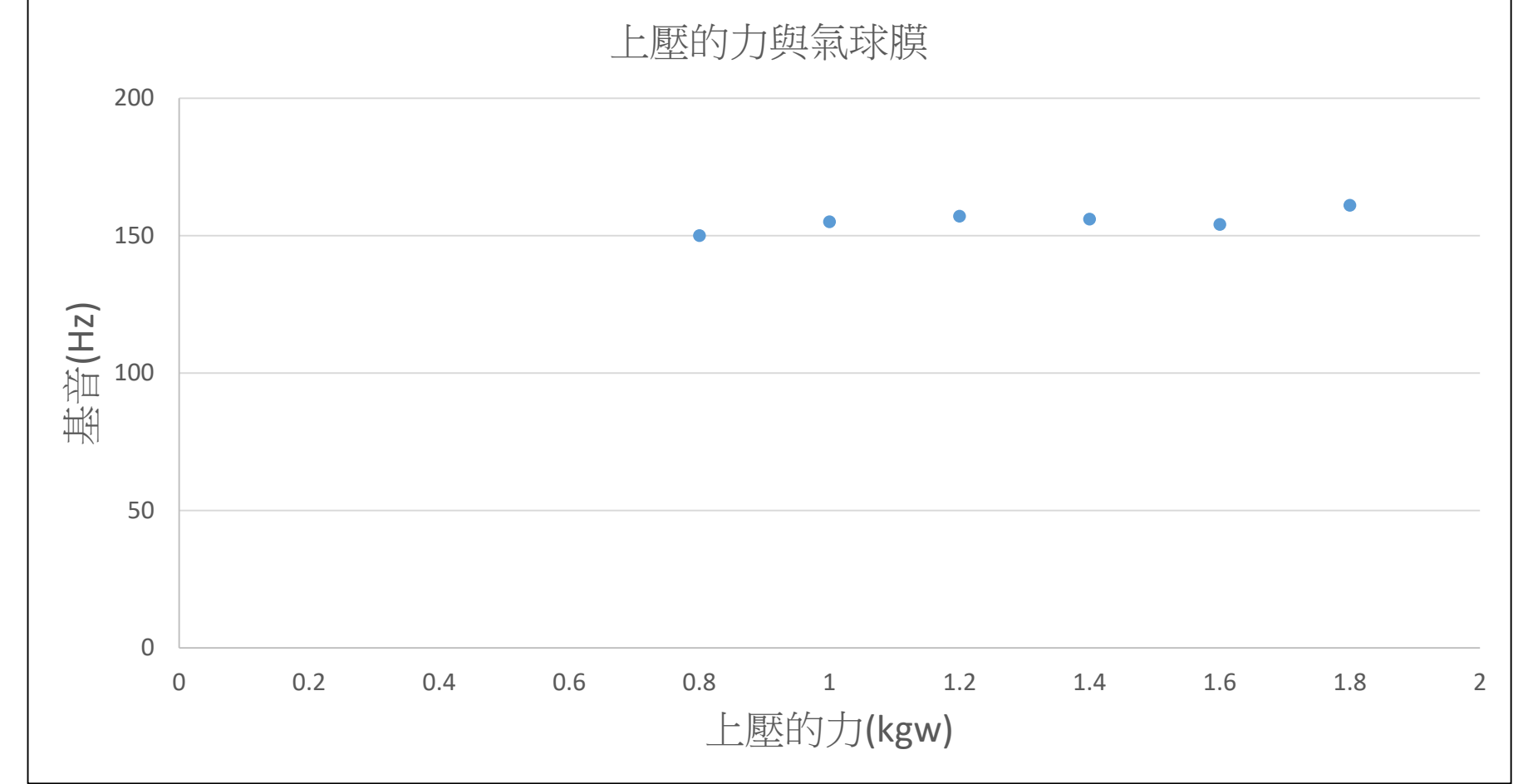
### 4. 紙



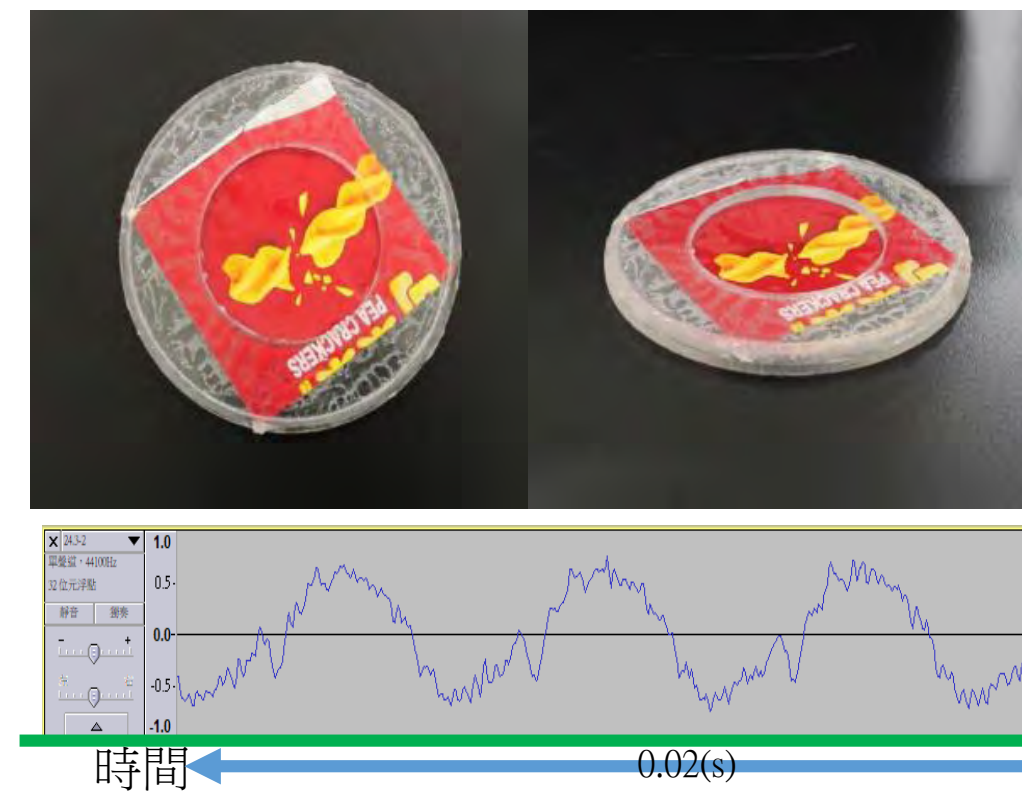
### 5. 氣球膜



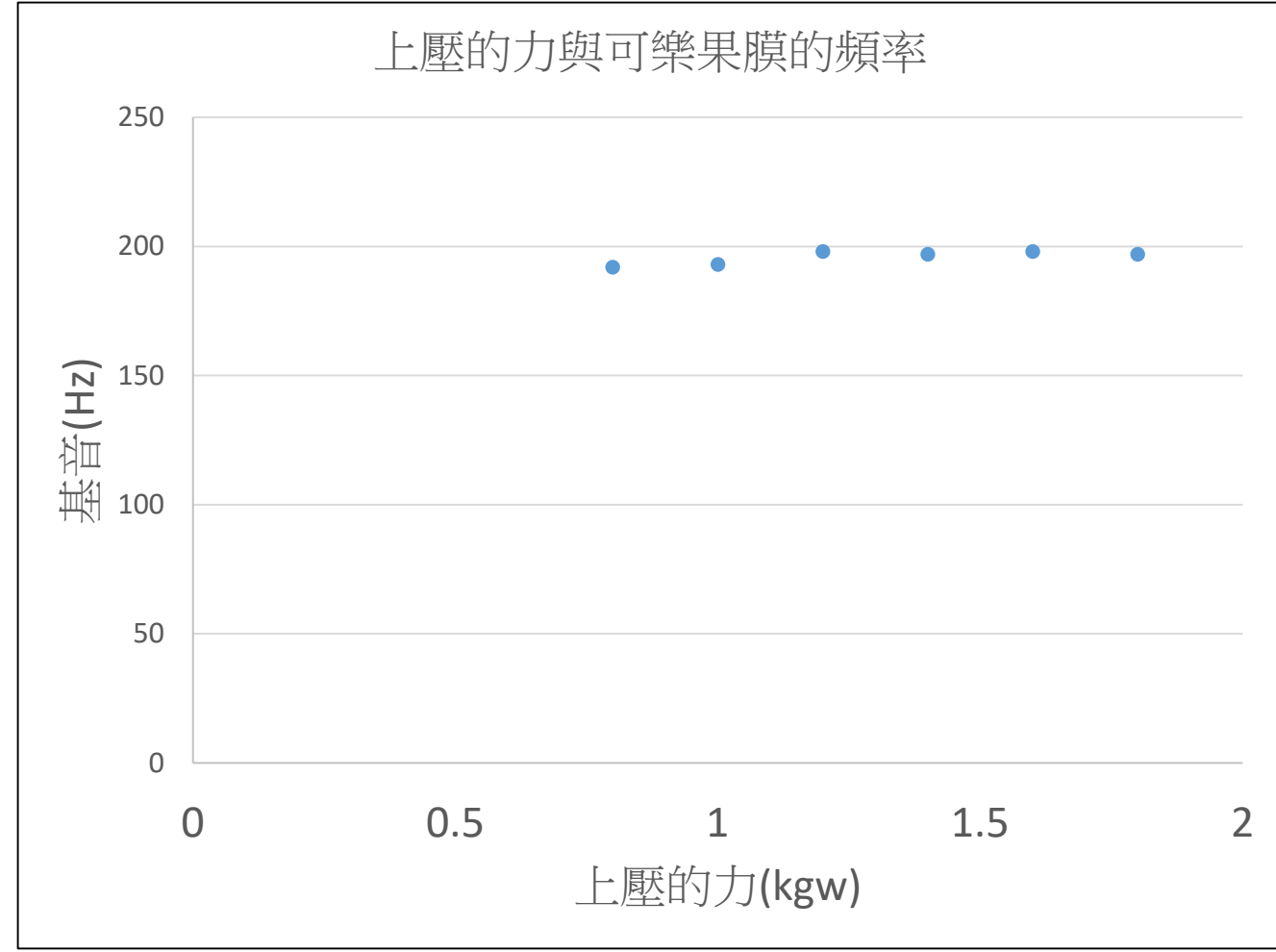
上壓的力(kgw)	基音(Hz)
0.8	150
1.0	155
1.2	157
1.4	156
1.6	154
1.8	161



### 6. 可樂果膜



上壓的力(kgw)	基音(Hz)
0.8	192
1.0	193
1.2	198
1.4	197
1.6	198
1.8	197

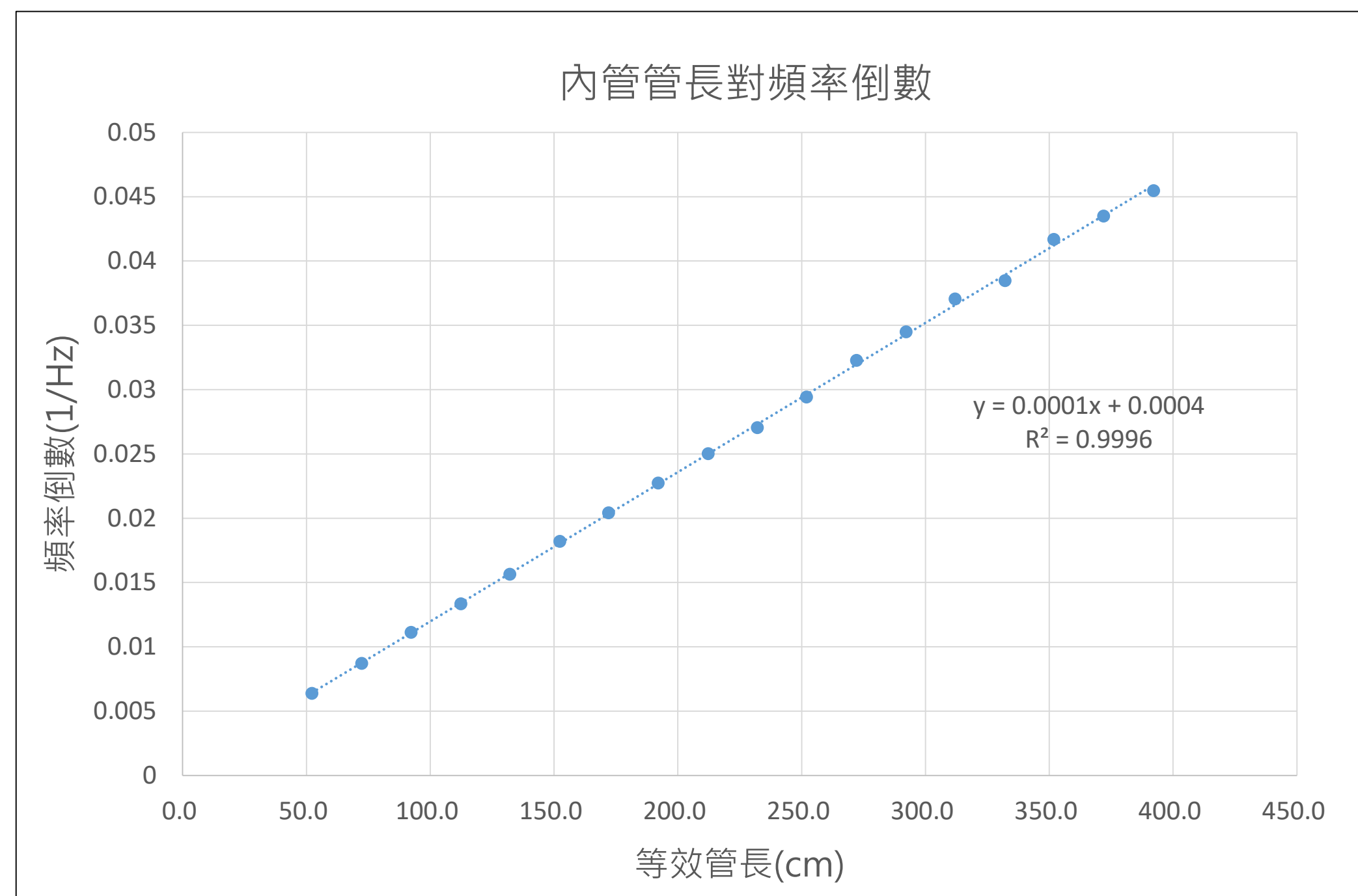


分析：品克膜、塑膠袋、手搖杯膜、紙所分析出的波形較不規律，可樂果相較之下較有規律，而氣球膜雖然波形也相對穩定，但內管壓入的程度在實驗上比較難控制且跟可樂果膜比較可以發現在上壓的力較大時，可樂果膜是穩定的，而氣球膜一直處於不穩定的狀態。

## 三、研究各種因素對多多笛發生頻率的影响

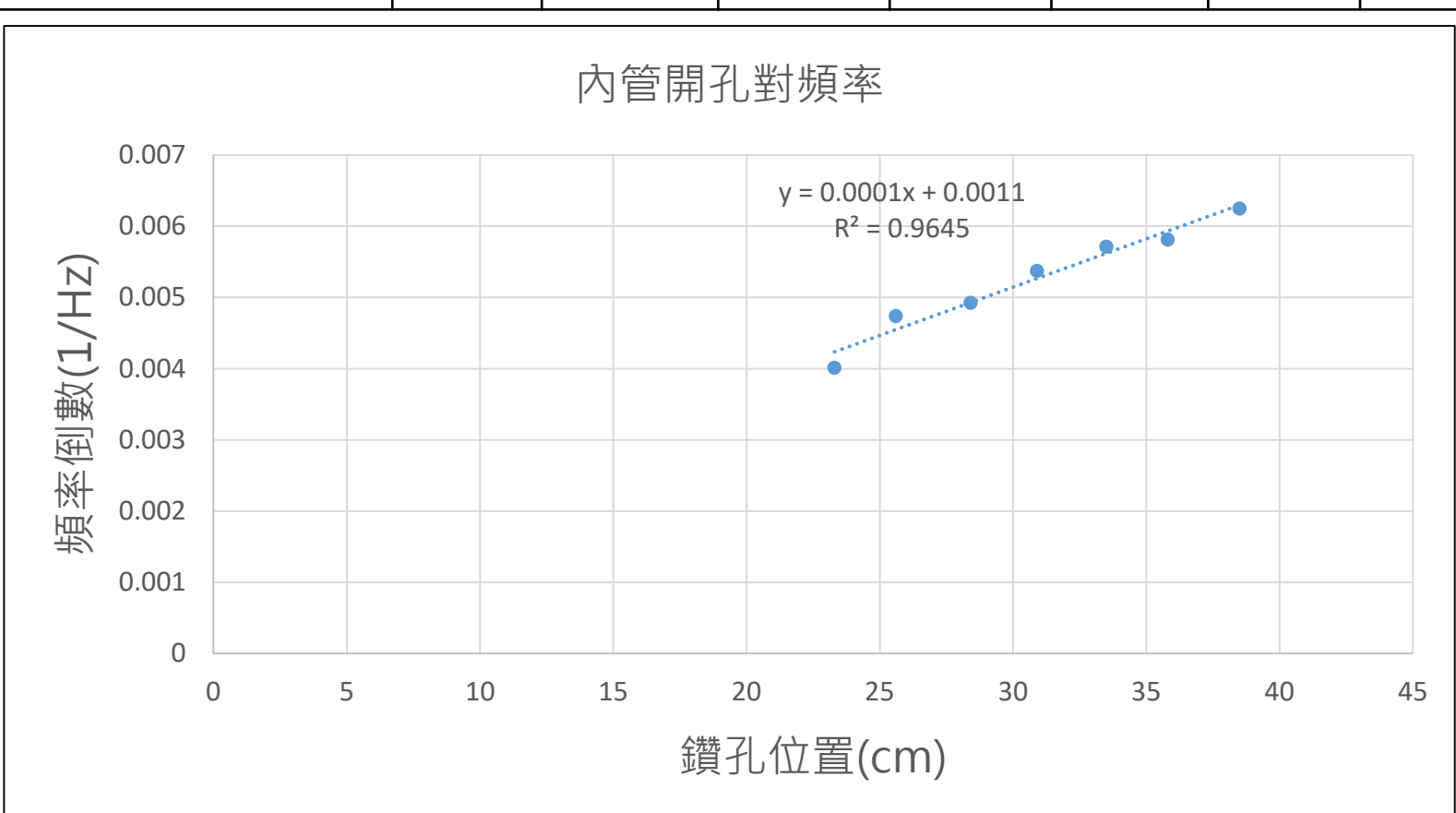
### (一)內管管長與頻率關係

管長(cm)	391.0	370.8	350.7	331.0	310.8	291.0	271.0	250.8	231.0
等效管長(cm)	392.2	372.0	351.9	332.2	312.0	292.2	272.2	252.0	232.2
基音(Hz)	22	23	24	26	27	29	31	34	37
基音理論值(Hz)	21.7	22.9	24.2	25.6	27.2	29.1	31.2	33.7	36.6
相對誤差	1.51%	0.66%	0.64%	1.61%	0.89%	0.31%	0.73%	0.80%	1.08%
管長(cm)	211.1	190.9	170.9	151.2	131.0	111.2	91.1	71.2	51.1
等效管長(cm)	212.3	192.1	172.1	152.4	132.2	112.4	92.3	72.4	52.3
基音(Hz)	40	44	49	55	64	75	90	115	157
基音理論值(Hz)	40.0	44.3	49.4	55.8	64.3	75.6	92.1	117.4	162.5
相對誤差	0.09%	0.56%	0.79%	1.39%	0.46%	0.82%	2.27%	2.05%	3.40%



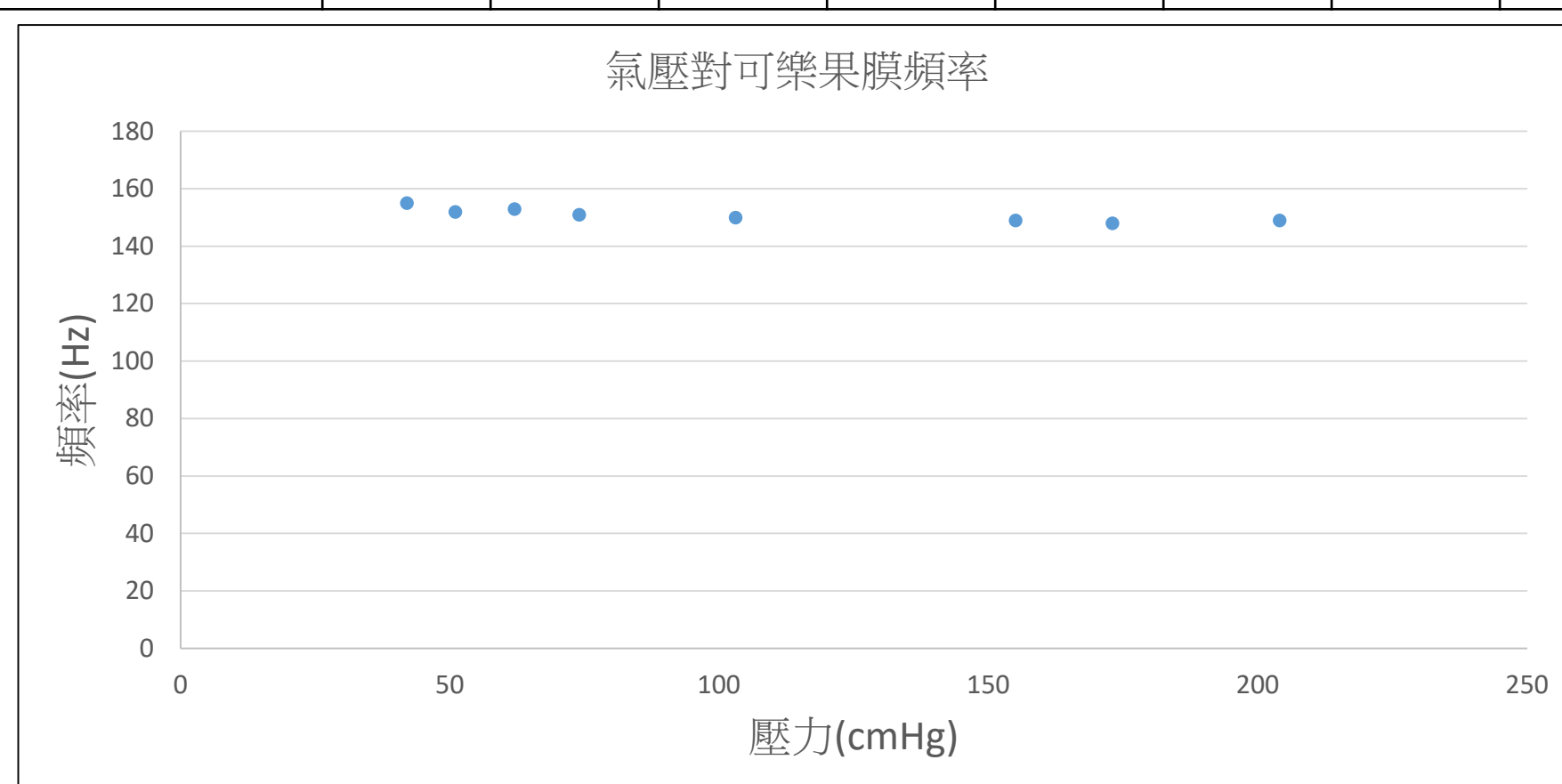
### (二)內管開孔與頻率關係

鑽孔位置(cm)	23.3	25.6	28.4	30.9	33.5	35.8	38.5
基音(Hz)	249	211	203	186	175	172	160



### (三)氣壓對可樂果膜頻率的影響\_管長52.3cm

氣壓(cmHg)	42	51	62	74	103	155	173	204
基音(Hz)	155	152	153	151	150	149	148	149



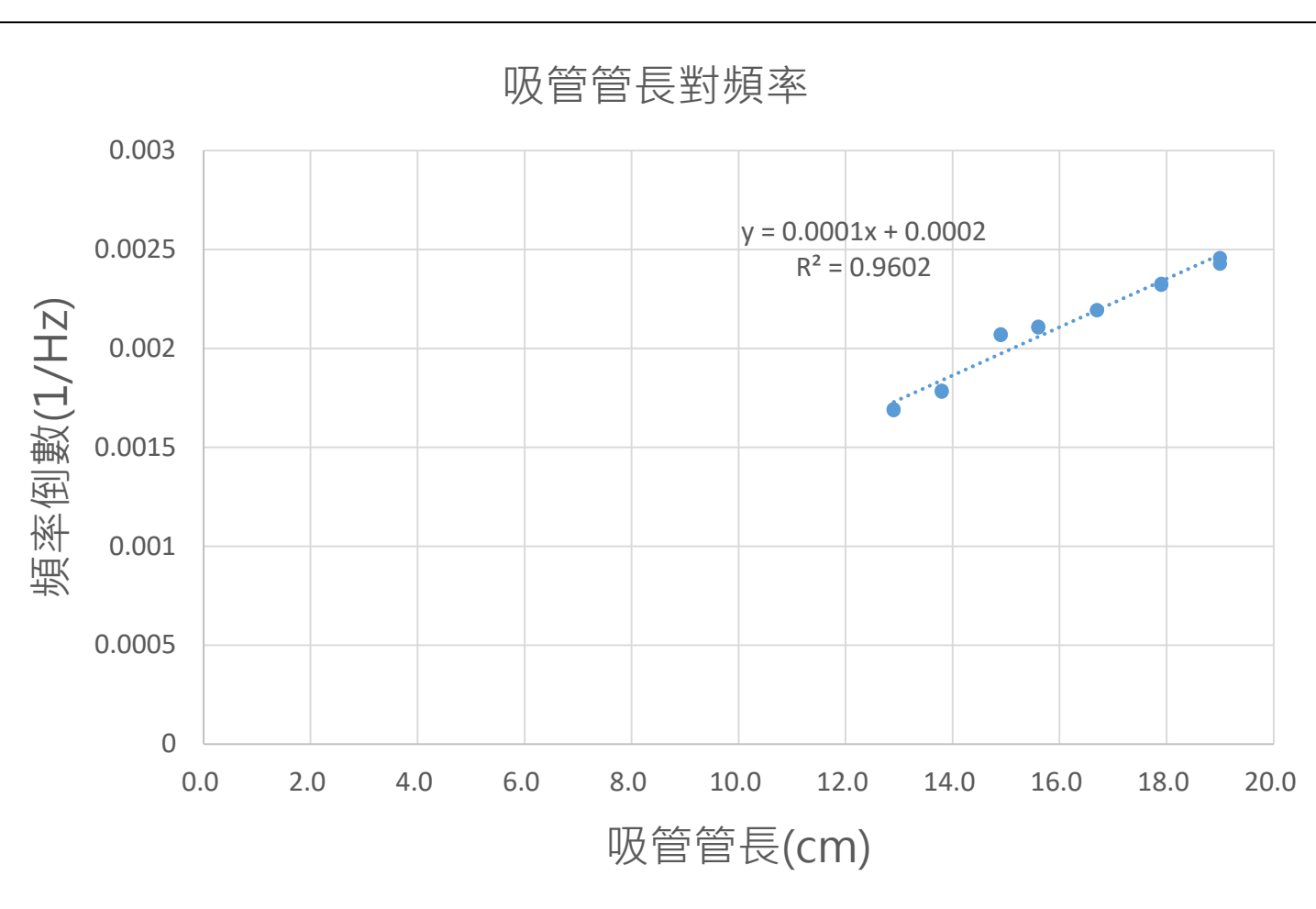
分析：我們將以上變因分別對頻率或頻率倒數作圖。實驗後得知：改變外管長度、吹孔位置、膜的面積、內管的底面及頂面面積是不會影响頻率。改變內管的管長及在內管上鑽孔則會對頻率造成影响，且頻率倒數會與有效管長成正比。而在使用可樂果膜的情況下，改變氣壓對頻率沒有太大的影响。



## 四、研究一般多多笛的實際情形

### (一)實際多多笛的膜、吸管管長與頻率關係

長度(cm)	膜振動基音(Hz)	聲音基音(Hz)	基音理論值(Hz)	誤差百分比
19.0	412	412	447	7.91%
17.9	431	431	475	9.24%
16.7	456	456	509	10.41%
15.6	474	475	545	12.82%
14.9	484	484	570	15.16%
13.8	560	562	615	8.76%
12.9	591	593	658	10.00%



由左圖可以看出吸管長度與頻率倒數成正比關係，且測到的結果與理論值的誤差不大，而且空氣柱與膜的基頻吻合，所以我們推測多多笛的頻率是內管和膜產生共振的結果。

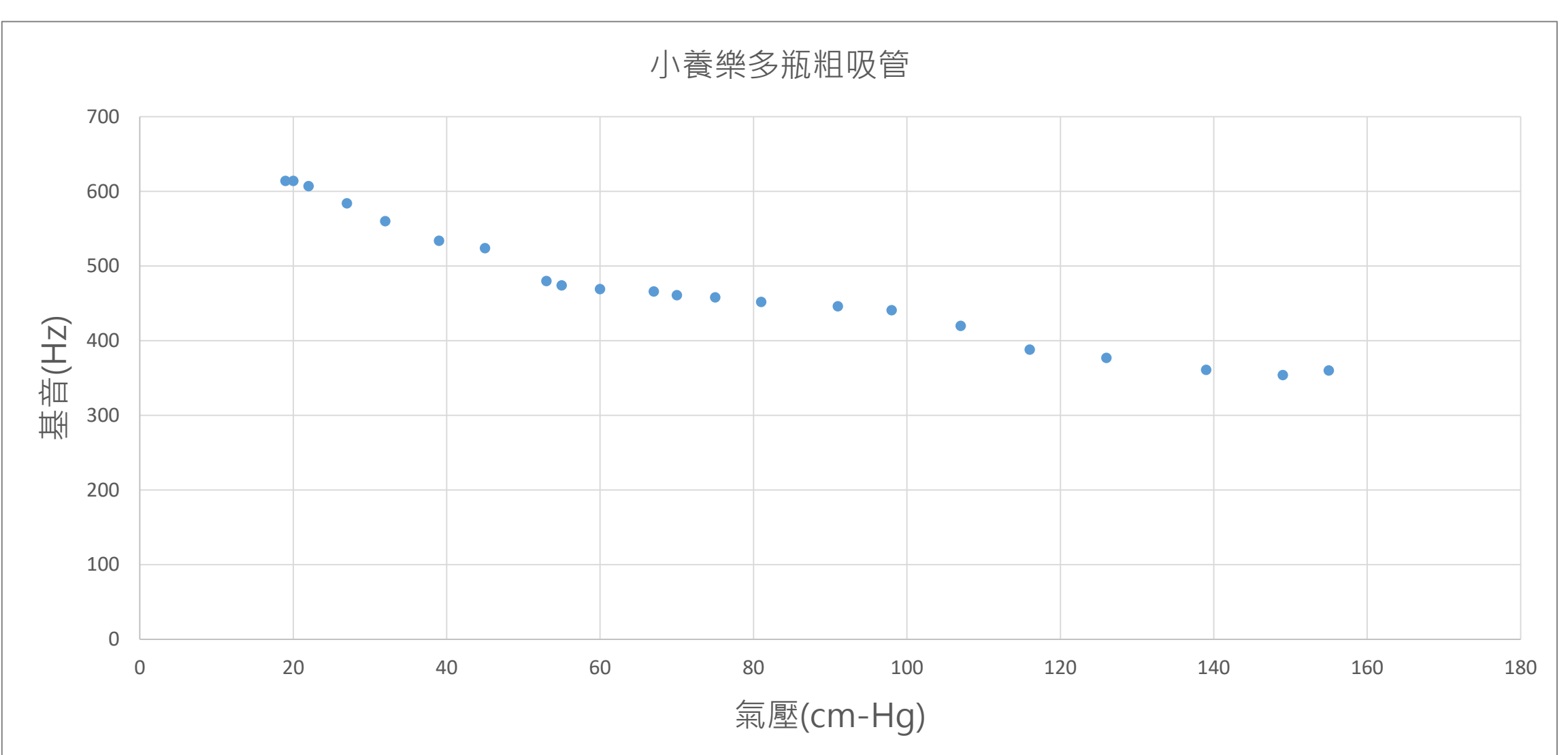
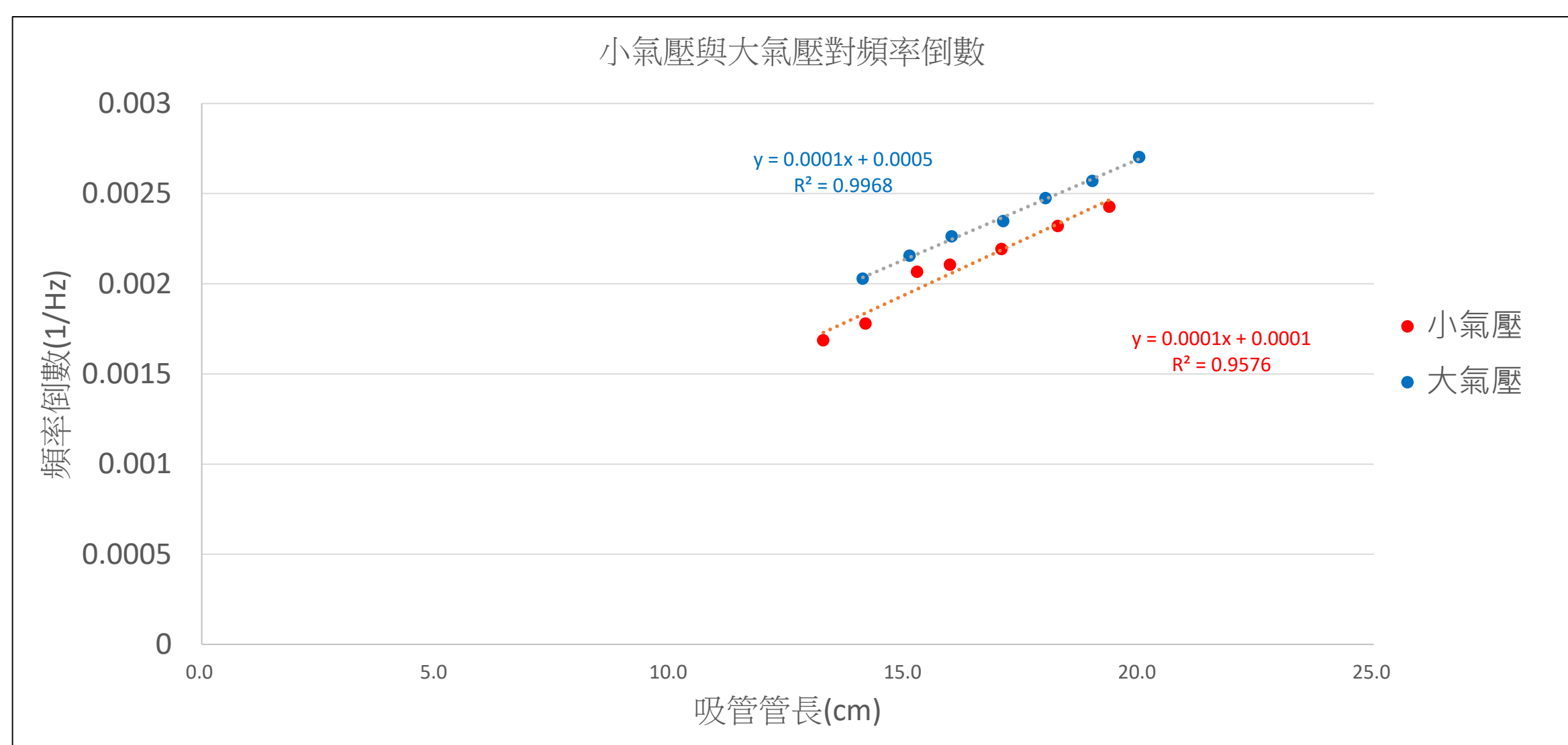
### (二)氣壓對多多笛發聲頻率的影響

#### 大養樂多瓶粗吸管

氣壓 20cm-Hg	管長(cm)	19.4	18.3	17.1	16.0	15.3	14.2	13.3
	基音(Hz)	412	431	456	475	484	562	593
	膜振動基音(Hz)	412	431	456	474	484	560	591
氣壓 76cm-Hg	管長(cm)	20.4	19.4	18.4	17.5	16.4	15.5	14.5
	基音(Hz)	370	389	404	426	442	464	493
	膜振動基音(Hz)	372	384	400	424	440	460	493

#### 小養樂多瓶粗吸管(吸管長度12cm)

氣壓(cm-Hg)	19	20	22	27	32	39	45	53	55	60	67
基音(Hz)	614	614	607	584	560	534	524	480	474	469	466
氣壓(cm-Hg)	70	75	81	91	98	107	116	126	139	149	155
基音(Hz)	461	458	452	446	441	420	388	377	361	354	360



分析：由上圖可知氣壓對於頻率是有影響的，但頻率與氣壓不是線性關係，在能發出聲音的情況下，氣壓越小越符合空氣柱共鳴。而從左圖可以看出，不論氣壓大小，管長與頻率倒數皆呈正比關係，再加上與膜振動的頻率吻合，所以更能確定它發出的頻率是由內管與膜共振的結果。

## 討論

一、我們推論膜會產生振動的原因是因為當氣吹入時，膜被撐開，之後氣體由內管向外排出，造成管內氣壓下降，膜因而往內縮，這樣來回造成振動。

二、右圖：我們用高速攝影機拍攝有發現到膜撐開及往內縮的情況，且膜往內縮時會再次接觸內管將管關閉。

三、根據頻譜分析結果是連續整數比(n=1,2,3,4...)，但發現它的基音並非兩邊開管的狀況，而是符合一開一閉的狀況，且經由高速攝影機拍到的照片也看到膜縮回去時會再次貼合內管，所以我們推測它是由兩邊開管及一開一閉兩種狀況的疊合，而一開一閉的狀況即為膜往內縮的狀況，兩端開管則是膜被撐開的狀況。

取大養樂多細吸管為例：管長15.5cm時，我們所錄到的頻率是517Hz，(溫度設在攝氏15度，聲速為340m/s)

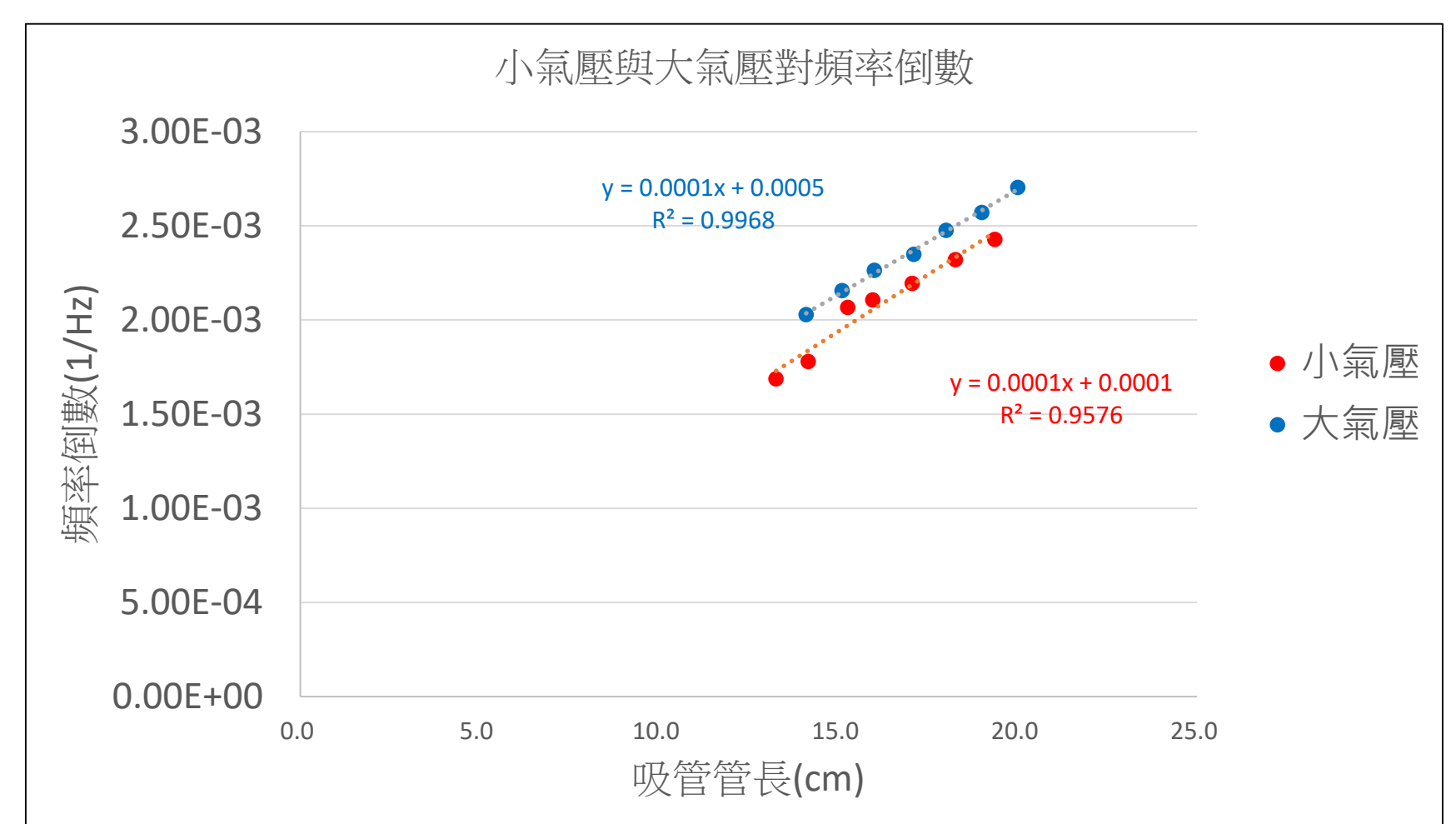
$$\text{由開管公式帶入：} \frac{340 \times 100}{2 \times (15.5 + 2 \times 0.2 \times 0.6)} = 1080(\text{Hz})$$

$$\text{由閉管公式帶入：} \frac{340 \times 100}{4 \times (15.5 + 0.2 \times 0.6)} = 544(\text{Hz})$$

錄到的結果比較接近閉管情形，但第二泛音卻是1035(Hz)，之後的共振頻率皆是517(Hz)的連續整數倍，所以我推論我們所錄到的聲音為開管及閉管的頻率所疊合而成的。

#### 四、根據內管管長改變和氣壓改變可以看出發生機制為內管與膜共振的結果

氣壓 20cm-Hg	管長(cm)	19.4	18.3	17.1	16.0	15.3	14.2	13.3
	基音(Hz)	412	431	456	475	484	562	593
	膜振動基音(Hz)	412	431	456	474	484	560	591
氣壓 76cm-Hg	管長(cm)	20.4	19.4	18.4	17.5	16.4	15.5	14.5
	基音(Hz)	370	389	404	426	442	464	493
	膜振動基音(Hz)	372	384	400	424	440	460	493



不論氣壓大小，改變管長皆會改變基音，且與管長成倒數正比關係，改變管長還會影響到膜的振動頻率，且膜的振動基頻與我們所錄製到的基音吻合，所以可以確定它的發生機制並非單獨為內管或膜，而是兩者共振的結果。

## 結論

1. 當我們吹入氣體時造成內部壓力變大，使膜撐開得以讓氣體由內管排出，又因裡面空氣流動比外面空氣快，根據白努利定律，流速慢壓力較大，膜又被推回去，反覆作用之下使膜產生振動。
2. 利用高速攝影機拍攝膜的振盪時發現：膜會因為充氣而被撐開，形成開管的狀態，縮回去時又會接觸吸管底部，形成閉管的狀態，所以我們認為錄到的聲音、分析出的頻譜是開管及閉管的頻率所疊合而成的。
3. 以上實驗我們發現多多笛模型所發出的聲音頻率與內管管長有關，符合空氣柱共鳴，且與外管管長、吹孔位置、膜的面積大小、內管頂面及底面的面積無關，換成一般的多多笛時也發現吸管長度確實會影響聲音頻率，且符合空氣柱共鳴。
4. 氣壓與頻率並沒有線性的關係，當氣壓極小的時候它的頻率是非常接近空氣柱共鳴的頻率，因此我們推測它在能發出聲音的情況下，氣壓越小越符合空氣柱共鳴，而氣壓調大時他的誤差百分比就會增加，而他的發生機制不論在氣壓小還是氣壓大時，皆為內管與膜共振的結果。