

新竹市第四十三屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：物理科

組 別：國中甲組

作品名稱：樂音奇緣~匿藏在波紋裡的音符

—探討各種波紋管的發聲情形

關鍵詞：邊稜音、波紋管

編號：

摘要

利用空氣泵連接波紋管讓氣流流過產生共鳴，使用平板操作 Phyphox 可以準確量測共鳴頻率，並將測量到的頻率進行傅立葉轉換。考慮管口平滑管長、波紋長度、波紋長度比例、波紋寬度、波紋組合、波紋管口大小、風速等對共鳴頻率造成影響。利用本實驗的裝置，模擬旋音管發聲情況。最後，觀察波紋管內氣流流動情形，推測波紋管產生共鳴的原因。

壹、 動機

有一次理化老師請我們喝飲料時，提供了我們帶有波紋造型的吸管。我們發現對這支波紋吸管吹氣時，它會發出不同音調的聲音；而對一般的平滑吸管吹氣，卻不會聽到這種聲音。這讓我們想要進一步探索，為什麼不同形狀的管子會在空氣流動時產生不同的聲音？我們預計透過實驗來比較各種波紋管的音頻範圍、音量以及其相關因素，了解空氣在波紋管內的流動情形與其聲音產生的機制。

貳、 目的

- 一、選定測量聲音頻率的實驗方式
- 二、探討波紋管管口平滑長度對頻率的影響
- 三、探討波紋管的各種波紋性質對頻率的影響
- 四、探討波紋管的各種波紋性質對頻率的影響
 - (一)探討波紋長度對頻率的影響
 - (二)探討波紋長度比例對頻率的影響
 - (三)探討波紋寬度對頻率的影響
 - (四)探討波紋組合對頻率的影響
 - 1. 探討不同波紋長度對頻率的影響
 - 2. 探討波紋位置對頻率的影響
 - (五)探討波紋管口大小對頻率的影響
- 五、探討風速對頻率的影響
- 六、模擬旋音管發聲情況
- 七、波紋管內氣流流動情形

參、 研究設備及器材

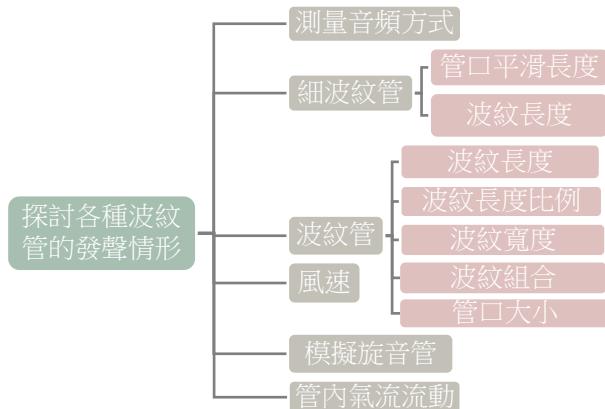
				
風速計	游標卡尺	桌上型虎鉗	可調式電阻	空氣泵
				
細波紋管	可伸縮白管	粉紅管	黑管	灰管
				
水霧機	鐵架	彩色迷你保麗龍球	iPad	透明壓克力管

管子種類	管徑 (mm)	內部波紋寬度 (mm)	管長 (cm)				
細波紋管	7.8	3.0	15	19.8	29.5	48	67
可伸縮白管	21.6	2.1 (壓縮) 5.7 (拉伸)					
粉紅管	23.1	2.0	15	19.8	29.5	48	67
黑管	28.8	1.9	15	19.8	29.5	48	67
灰管	28.8	2.7	15	19.8	29.5	48	67

表一 波紋管規格

肆、研究過程或方法

一、概念圖



二、原理與相關名詞

(一) 聲波

聲波是一種由物體振動產生並透過介質（如空氣、水或固體）傳遞能量的波動。當物體振動時，會推動鄰近粒子產生疏密交替的壓力變化，這種變化沿著波的傳播方向逐步影響更多粒子，使能量向外傳遞。聲波的頻率決定音高，振幅決定音量，而其傳播速度則取決於介質的種類與物理性質。

(二) 聲速 (v)

聲速是指聲波在介質中傳播的速度，聲波在空氣中傳播時的聲速公式：

$$v=331+0.6t \text{ (註 : } t \text{ 為溫度 } (\text{°C}) \text{)}$$

(三) 駐波及兩端開口駐波

駐波是指波在某一空間內因為波的反射與傳播波相互作用，形成固定波形。波的振幅在「節點」始終為零，而在「腹部」有最大值。兩端開口駐波是指波在兩端開口的管道中所形成駐波。此時兩個開口端是腹部，而波的節點出現在波形中間的位置。設兩端開口的管子管長為 L，由於節點到腹部的距離為駐波波長的 $\frac{1}{4}$ ，因此兩端開口駐波之波長為 $2L$ 。

(四) 管子發聲之頻率理論值算法 (考慮駐波)

兩端開口且長度為 L 的管子，產生駐波的條件為：

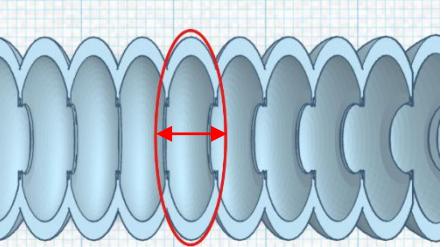
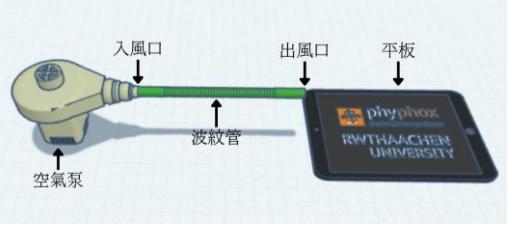
$$L = \frac{\lambda}{2} \times n = \frac{n}{2} \times \frac{v}{f}, n=1,2,3\cdots\cdots, f = \frac{nv}{2L}, n=1,2,3\cdots\cdots$$

(註：λ：波長、f：頻率、v：聲速)

我們利用空氣泵讓空氣流過波紋管，需要考慮在管中空氣的流速。因此駐波的頻率需修正為：

$$f = \frac{n(v+v')}{2L}, n=1,2,3\cdots\cdots \text{ (註 : } f \text{ : 頻率, } v \text{ : 聲速, } v' \text{ : 空氣泵出口的空氣流速, }$$

$L' = L + 0.6r$, r 為管子半徑)

<p>(五) 內部波紋寬度</p>  <p>圖一中紅色圓圈所圈選的寬度為一個「內部波紋寬度」。</p> <p>圖一 波紋管的剖面圖</p>	<p>(六) 波紋管入風口位置、出風口位置</p>  <p>圖二 波紋管入風口位置、出風口位置</p>
--	--

(七) 旋音管

旋音管又稱 whirly tube、bloogle resonator，是一種實驗性樂器。通常由開放兩端的波紋（帶有凹槽）塑膠管或軟管組成。當旋音管固定一端時，另一端被快速旋轉，氣流會在管內形成渦流，並在管內激發駐波，共振發出聲音。旋轉速度越快，音調就越高；旋轉速度越慢，音調就越低。其產生的音調符合「泛音系列（harmonic series）」的規律，是一組特定的音高，而非依照轉速增加而連續變化。

(八) 邊稜音

當高速氣流撞擊到一個稜邊時：氣流被分成兩部分，一部分繞過稜邊向上，另一部分向下。由於流體不穩定，這些分離的氣流會產生交替的渦流。這些渦流會對周圍的空氣造成壓力波動，形成聲音。如果這些壓力波動具有一定的頻率，便會產生穩定的聲音，例如笛子的音高。

(九) 涡流

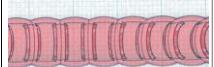
渦流是指流體順著某個方向運動，例如環形曲線運動時形成的區域，渦旋形成後可以移動、沿伸、扭曲，並且和其他的渦流交互作用。

三、利用 3D 列印製作波紋管

(一) 說明：使用 3D 列印軟體「Tinkercad」

繪製波紋管的設計圖，並用 3D 列印機列印出來。

(二) 製作 3D 列印波紋管過程

3D 列印 波紋管	3D 設計圖	說明
第一代		管子波紋間的空隙太密，且波紋起伏不大，可能導致無法發出波紋管會發出的聲音。
第二代		主要改變波紋間的空隙密度。我們設計出了四種不同的管子。但由於太著重在改變波紋間的空隙密度，導致我們沒注意到管子的內壁波紋不如外壁的波紋明顯。
第三代		改良第一、二代的問題。管子波紋之間的空隙、管長等，都是參照市售波紋管的規格，且內壁也有明顯的波紋狀，但仍然無法發出波紋管會發出的聲音。我們推論是 3D 列印線材的材質問題，在接縫處會產生縫隙，會有漏氣的現象，導致無法發出聲音，這是製作上無法克服的問題，經過嘗試後，我們決定用市售的波紋管進行實驗。

表二 3D 列印波紋管

四、實驗流程

- (一) 實驗架設如圖三
- (二) 空氣泵連接插座並開啟電源，將波紋管與空氣泵管口接在一起
- (三) 利用可調控電阻裝置調整空氣泵的電壓大小來改變風速
- (四) 用平板軟體 phyphox 的聲譜錄製功能，測量聲音頻率
- (五) 依序更換不同規格的波紋管，重複步驟(二)、(三)、(四)



圖三 實驗裝置圖

伍、結果與討論

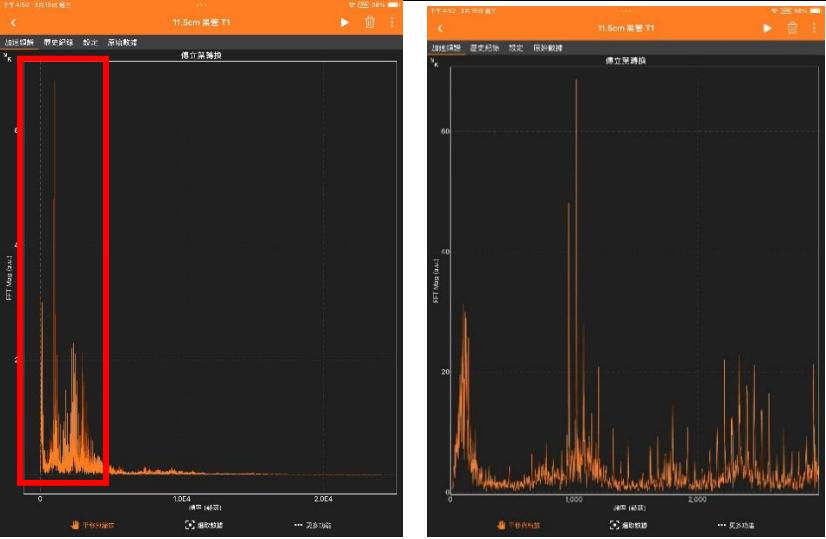
一、實驗一：選定測量聲音頻率的實驗方式

- (一) 收音軟體的測試

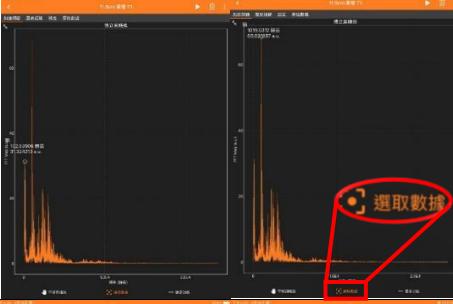
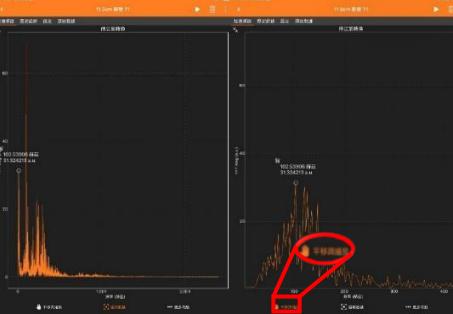
1. Audacity

軟體名稱	Audacity
圖示	
說明	<p>圖示為 Audacity 依照我們錄製的音檔內容所繪製出的頻譜圖。（x 軸為聲音頻率，y 軸為相對音量大小）</p> <p>1. Audacity 是一款介面較舊式、只能安裝在電腦上使用的音檔分析軟體。使用時易延遲、卡頓。實驗時需外接麥克風，實驗結果易受到所連接的麥克風之狀況影響，不穩定性高且較不方便。</p> <p>2. 經過測試發現 Audacity 對於音量大小是以數值「0」為基準，上下取一定區間的數字當作相對的音量單位，而非使用實際上的單位「分貝」。</p> <p>3. 在量測聲音頻率的方面，雖其有多軌錄音的功能（可同時在介面上顯示多個錄音檔），卻無法同時對比多個音檔的數據。欲匯出圖表還需另開視窗。</p> <p>因此我們認為 Audacity 這個軟體不適合作為本次實驗的收音軟體。</p>
表三收音軟體 Audacity 測試結果	

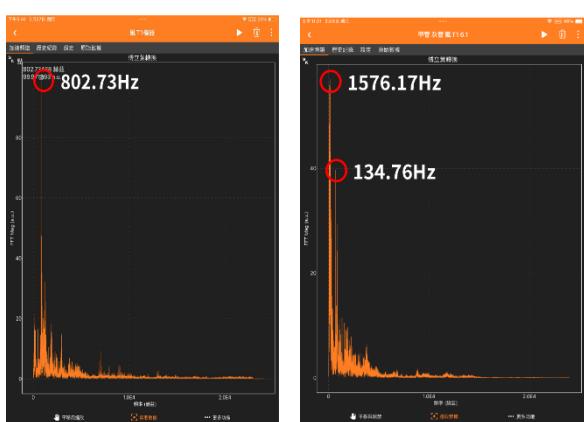
2. Phyphox

軟體名稱	Phyphox
圖示	
說明	<p>圖示為為 Phyphox 將音頻相關數據經傅立葉轉換後，所繪製出的頻譜圖。右圖為左圖紅框處經放大後所顯示的結果。</p> <p>1.我們使用平板操作 Phyphox，不須外接麥克風，可直接量測聲音頻率，且可將測量到的聲音頻率進行傅立葉轉換，便於實驗記錄。</p> <p>2.Phypyox 內建圖表可同時顯示多種頻率及音量大小，也可依據使用者需求繪製各類型圖表。所選取的圖表定點數據會直接顯示在其旁邊，不須另外對照座標。還可選取兩數據點自動連線，查看其音頻差值、斜率。</p> <p>3.Phypyox 可以用多種方式處理數據，如：傅立葉轉換、最高單一頻率、原始數據.....等，並可匯出其 Excel 檔。</p> <p>4. Phyphox 所使用的音量單位「arb」透過數值顯示出每次實驗所測得的音量之比例關係。arb 和計量單位「分貝（dB）」在數值上並無直接關聯。其數值必須和同一次實驗中所測得的 arb 進行比較，不同實驗之間的 arb 數值並無關聯。arb 的數值皆為正數，相較於 Audacity 所顯示的音量數值較容易計算。</p> <p>因此在本實驗中，以 Phyphox 作為測量共鳴頻率的軟體</p>
表四 收音軟體 Phyphox 測試結果	

3. Phypox 測量聲音頻率說明

圖示	說明
	實驗前，在設定功能中可設定一定單位時間內所紀錄的樣本數。樣本數越多，可以得到清晰度越高的頻譜，但相對的系統處理數據之速度會變慢。因此我們的實驗皆使用一定單位時間內紀錄 16384 個樣本的選項，可以分析較細緻的頻率情況，軟體進行實驗時也不會過於緩慢。點選右上角紅圈內的三角形圖示即可開始、暫停實驗。
	若欲查看圖表中任意一點的音頻與音量，可點選頁面正下方的「選取數據」功能，再點選圖表中的點位置，其數值即會直接顯示於點旁邊。我們使用此功能來得知圖中的峰值數據。左側兩圖為選取各峰值數據的圖示。
	點選頁面左下角的「平移與縮放」功能，可放大欲檢視的區域圖表，查看更細部、清晰的數據變化情形。左側二圖為原圖表與平移放大後之圖表的前後對照示意圖。
	此為 Phypox 依照經傅立葉轉換後之數據所繪製的「聲音頻率與音量大小之關係圖」。點選頁面右下角的「更多功能」，即可自由決定所顯示出的圖表中之 x、y 軸是否要取對數呈現。若取對數，x、y 軸之單位間距會以倍率的方式分布，數據在圖表中均勻分布，但並非依照數據實際之比例顯示，不易找出峰值和判斷分析。因此我們在查看數據圖表時，皆會將取對數功能關閉。左側二圖為圖表在取對數與否的情況下所顯示的畫面。
	左側二圖為經傅立葉轉換後之數據所繪製的「時間、聲音頻率與音量大小之關係圖」。可查看一時間時，其所接收到的各頻率聲音之音量大小。其 x 軸聲音頻率，y 軸為時間軸，表中的有色區域為其所對應的音量之大小。其定點顏色明度越高，音量越大；反之顏色明度越低，音量就越小。另一圖為「時間與峰時頻率關係圖」，可查看一時間時，其所接收到的最高頻聲音之音頻高低。

4. 數據選取方法



圖四灰管甲管在風速 9.4 (m/s) 下所發出聲音頻率 Phypyox 截圖



圖五灰管甲管在風速 9.4 (m/s) 下所發出聲音頻率 Phypyox 截圖

(3)我們發現在波紋管發出的聲音頻率中可以找到機器發出的聲音頻率但音量會變得非常小，對於主要的聲音頻率沒有影響，所以不用考慮機器發出的聲音頻率。

二、實驗二、探討波紋管管口平滑長度對頻率的影響

(一) 說明：細波紋管兩端都有四公分沒有皺褶的管長，我們每次以一公分為單位進行多次裁剪，並將裁剪後的平滑管放在入風口及出風口，測量其聲音頻率，分析比較頻率的變化。

(二) 實驗裝置圖

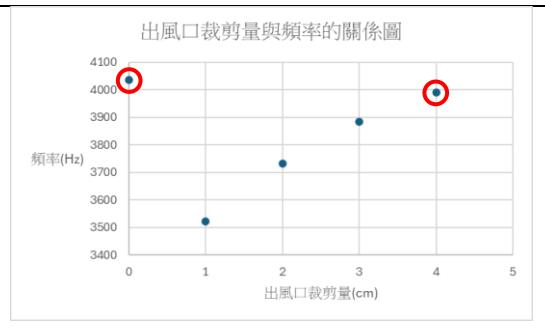


實驗裝置圖

(三)結果

入風口裁剪量 (cm)	出風口裁剪量 (cm)	頻率 (Hz)
0	0	4037.11
0	1	3521.48
0	2	3732.42
0	3	3884.76
0	4	3990.23

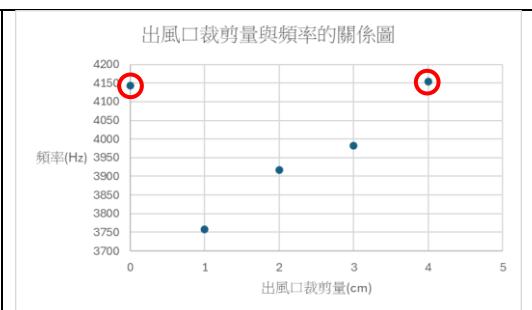
表二-1 出風口裁剪量與頻率的關係



圖二-1 出風口裁剪量與頻率的關係圖

入風口裁剪量 (cm)	出風口裁剪量 (cm)	頻率 (Hz)
1	0	4142.57
1	1	3758.79
1	2	3916.99
1	3	3981.44
1	4	4154.29

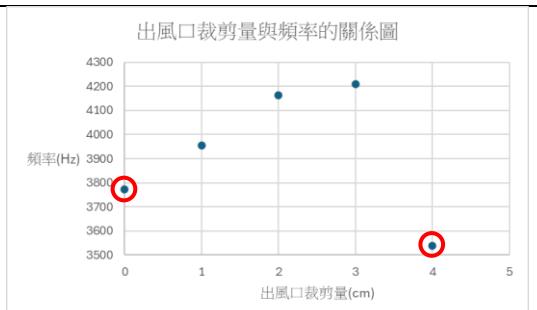
表二-2 出風口裁剪量與頻率的關係



圖二-2 出風口裁剪量與頻率的關係圖

入風口裁剪量 (cm)	出風口裁剪量 (cm)	頻率 (Hz)
2	0	3773.43
2	1	3955.07
2	2	4163.08
2	3	4209.96
2	4	3539.06

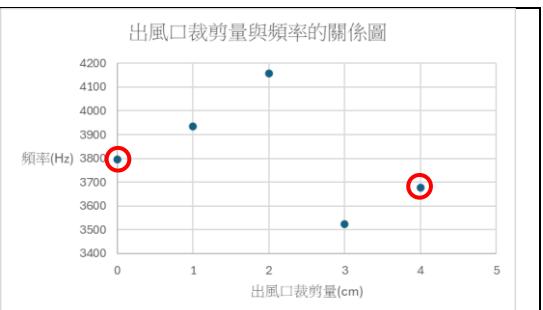
表二-3 出風口裁剪量與頻率的關係



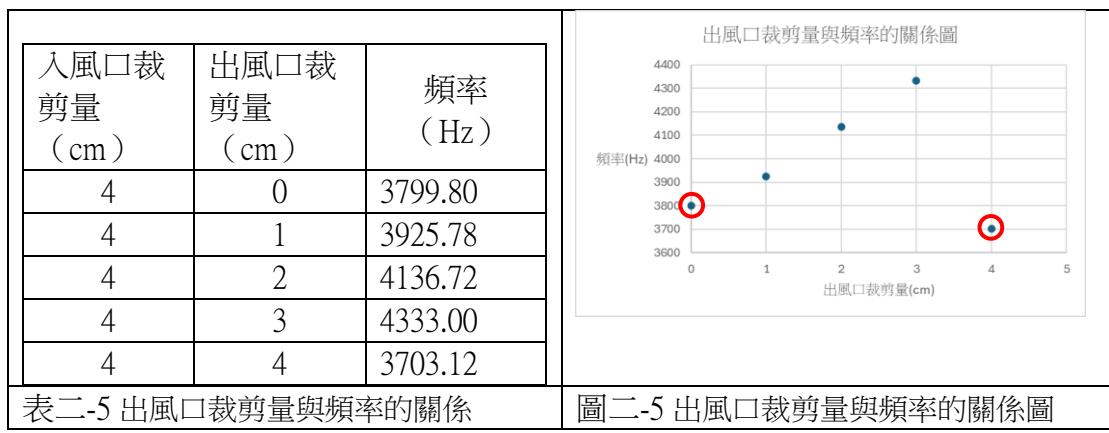
圖二-3 出風口裁剪量與頻率的關係圖

入風口裁剪量 (cm)	出風口裁剪量 (cm)	頻率(Hz)
3	0	3796.87
3	1	3934.57
3	2	4157.22
3	3	3524.41
3	4	3676.75

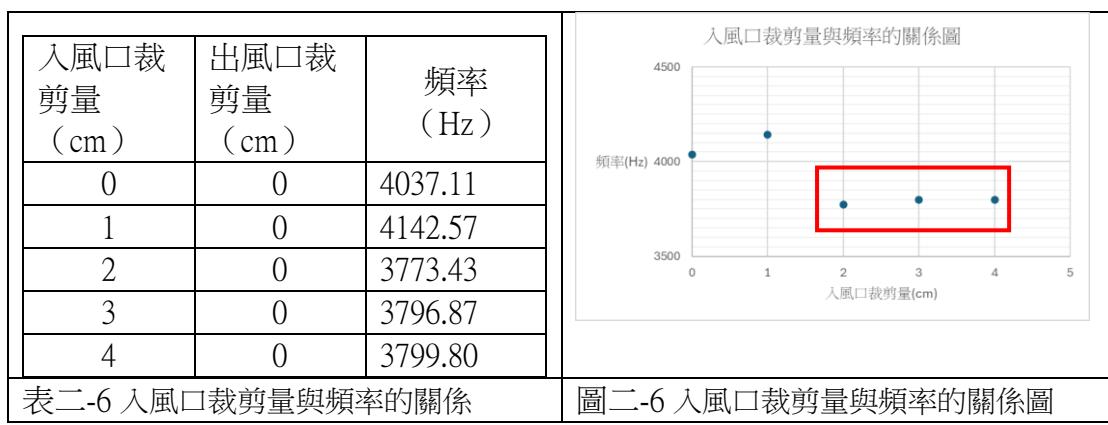
表二-4 出風口裁剪量與頻率的關係



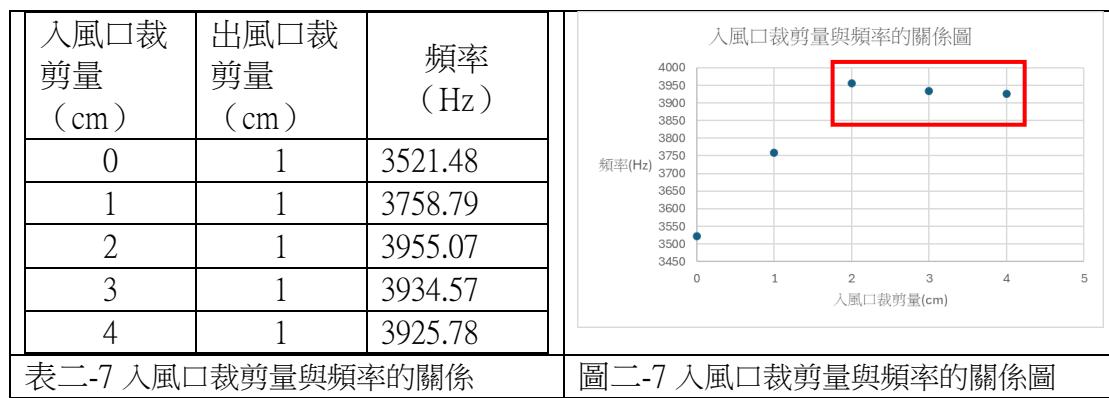
圖二-4 出風口裁剪量與頻率的關係圖



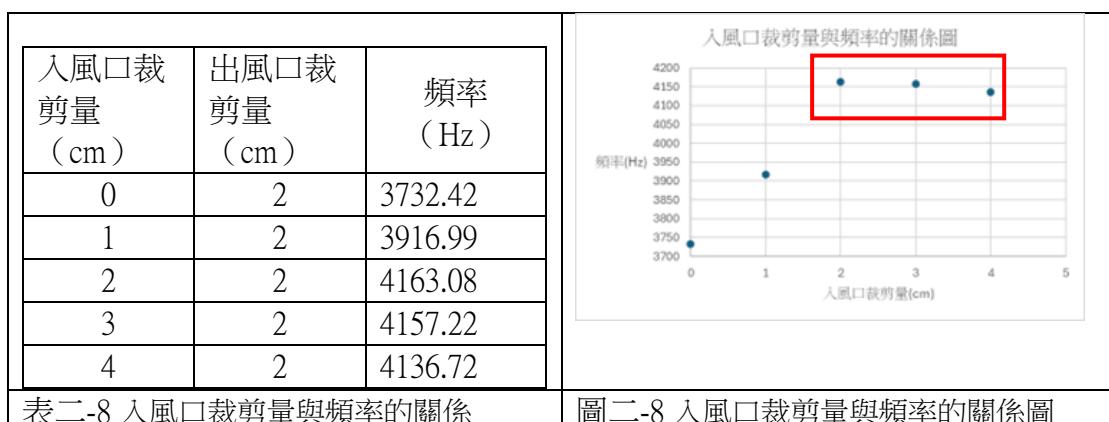
圖二-5 出風口裁剪量與頻率的關係圖



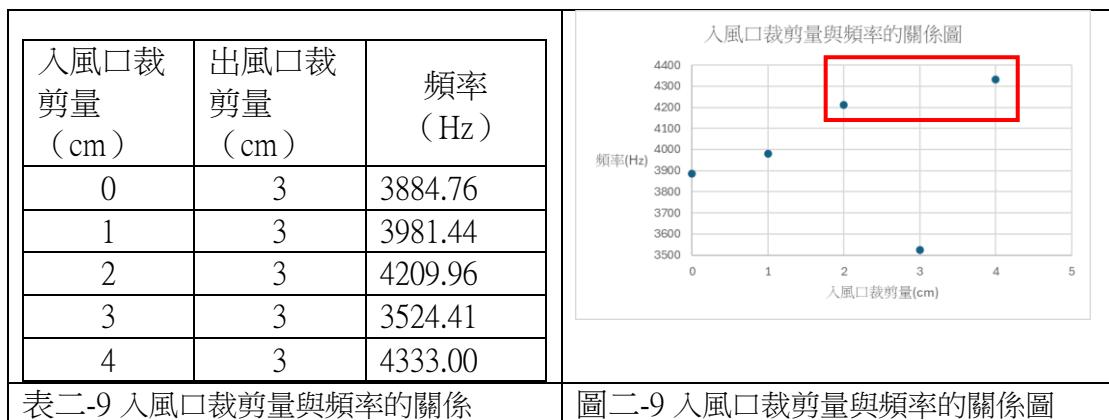
圖二-6 入風口裁剪量與頻率的關係圖



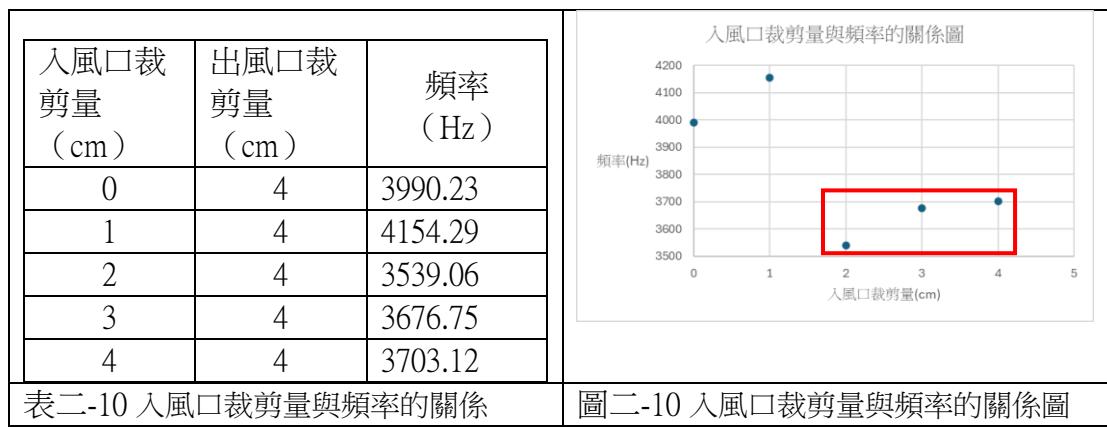
圖二-7 入風口裁剪量與頻率的關係圖



圖二-8 入風口裁剪量與頻率的關係圖



圖二-9 入風口裁剪量與頻率的關係圖



圖二-10 入風口裁剪量與頻率的關係圖

(四) 討論

- 平滑長度在兩端管口有 4 公分，出風口的長度裁減，測量到的共鳴頻率並無一致的規律，在圖二-1~圖二-5 可看出，裁減前的共鳴頻率和完全裁剪後只剩下波紋時的共鳴頻率相近，如紅色圈圈所示。
- 入風口的長度裁減 2~4 公分，頻率的數值會趨於穩定，如圖二-6~圖二-10 的紅色框所示，表示在入風口完全沒有平滑部分對於實驗結果沒有很大的影響。（3）為了避免平滑管長對測量結果造成影響，所以在後續的實驗中，入風口及出風口，僅有波紋沒有平滑的部分。

三、實驗三、探討波紋管的各種波紋性質對頻率的影響

(一) 說明：我們使用不同管長的黑管、灰管、粉紅管及可伸縮的白管進行實驗，探討波紋長度、波紋長度比例、波紋寬度、不同波紋組合、波紋位置及波紋管口大小，對共鳴頻率的影響。

(二)結果

黑管										
風速 (m/s)	9.4	arb	12.9	arb	16.2	arb	19.5	arb	22.7	arb
甲管(管長15cm)										
頻率(Hz)	213.86	34.95	1130.85	120.04	1400.39	332.17	1649.41	729.7	1866.21	1250.15
	799.8	61.65	1397.46	227.26			3298.82	341.41	3732.42	1165.86
	1781.25	39.14	2264.64	112.67			4948.24	216.27		
							6597.65	101.25		
通過管子後 風速 (m/s)	8.9		11.9		14.4		18.8		20.2	
乙管(管長19.8cm)										
頻率(Hz)	114.25	29.73	163.06	53.99	1368.16	1018.62	1623.04	599.81	1875	537.46
	808.59	102.37	1072.26	84.7			3246.09	495.07	3752.92	836.1
	1617.18	45.2	1388.67	57.47					5627.92	341.81
	1819.33	34.03	1854.49	52.84						
			2144.53	116.32						
通過管子後 風速 (m/s)	8.6		11.8		14		18.8		20.8	
丙管(管長29.5cm)										
頻率(Hz)	152.34	94.58	123.04	89.56	1365.23	351.97	199.21	269.1	1877.92	1212.57
	975.58	35.26	1078.12	121.31	1763.67	126.47	1628.9	412.45	3755.85	1232.48
	1664.06	79.13	1731.44	77.26			2024.41	186.04		
	2496.09	49.31	2156.25	100.64			3257.81	416.19		
	2697.77	32.93								
通過管子後 風速 (m/s)	8.2		11.7		13.6		17.5		20.3	
丁管(管長48cm)										
頻率(Hz)	937.5	84.01	1081.05	88	1365.23	327	1637.69	523.7	1880.85	1351.28
	1227.53	47.48	1514.64	75.21	1957.03	140.82	3274.46	289.8	3761.71	1710.47
	1564.45	42.93	1757.81	73	2730.46	123.65	4910.15	133.4	5642.57	398.23
	1757.81	33.07	2162.1	96.41	5463.86	174.29	6544.92	124.59		
	2440.42	25.31								
	2941.4	26.68								
通過管子後 風速 (m/s)	7.9		11.1		13.3		17.1		19.5	
戊管(管長67cm)										
頻率(Hz)	840.82	27.2	1125	300.77	128.9	87.99	1649.41	674.85	1883.73	3040.74
	1681.64	49.38	2247.07	121.48	1409.17	249.64	3301.75	721.99	3767.57	1942.47
	1875	24.15			4866.21	31.34	4951.17	125.75		
	2267.57	24.83					6603.51	167.58		
通過管子後 風速 (m/s)	7.7		9.8		12.6		15.4		17.0	
表三-1 不同規格黑管的實驗結果										

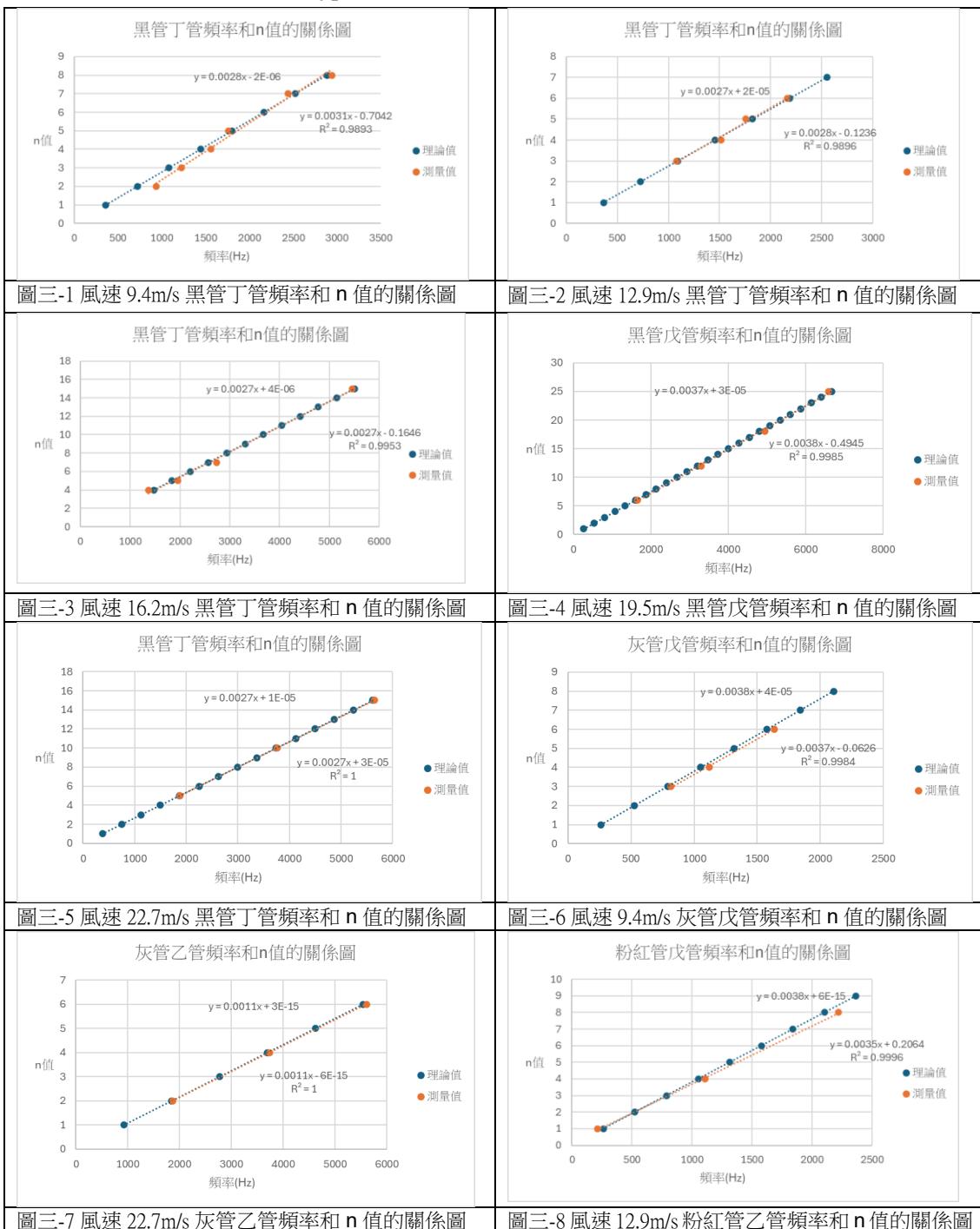
灰管										
風速 (m/s)	9.4	arb	12.9	arb	16.2	arb	19.5	arb	22.7	arb
甲管 (管長 15cm)										
頻率	134.76	97.03	175.78	78.55	1368.16	474.58	1625.97	584.36	3767.57	1793.02
	1576.17	128.72	1057.61	98.88			3254.88	372.39		
			2112.3	180.2						
通過管子後 風速 (m/s)	8.8		11.8		15.1		19.3		21.8	
乙管 (管長 19.8cm)										
頻率	149.41	208.88	1104.49	175.49	1371.09	455.48	1623.04	684.11	1869.14	2176.6
	216.79	227.6	1883.78	148.93	1833.98	110.3	3249.02	585.04	3738.28	1272.15
	832.03	112.86	2211.91	159.33			4872.07	193.38	5607.42	637.49
通過管子後 風速 (m/s)	8.5		11.3		14.3		18.3		21.3	
丙管 (管長 29.5cm)										
頻率	102.53	96.82	1119.14	167.88	164.06	130.4	208	424.64	1863.28	1103.94
	960.93	76.27	1397.46	96.5	1371.09	264.93	1620.11	806.4	3729.49	1321.1
			2238.28	130.75	1798.82	171.5	3237.3	453.59		
通過管子後 風速 (m/s)	8.3		11.1		14		17.3		21.3	
丁管 (管長 48cm)										
頻率	108.39	43.84	2223.63	215.52	1368.16	415.52	1623.04	1054.59	1869.14	620.45
	952.14	43.25			5472.65	184.04	3243.16	825.8	3741.21	843.21
	2255.85	49.69								
通過管子後 風速 (m/s)	7.3		10		13.3		16.8		20	
戊管 (管長 67cm)										
頻率	817.38	52.4	1078.12	107.69	1376.95	1523.7	3266.6	1293.26	1892.57	1209.79
	1119.14	53.31	1139.64	114.36					3788.08	1585.02
	1634.76	68.32	2156.25	114.97						
通過管子後 風速 (m/s)			9.9		12.8		15.6		19.7	
表三-2 不同規格灰管的實驗結果										

粉紅管										
風速 (m/s)	9.4	arb	12.9	arb	16.2	arb	19.5	arb	22.7	arb
甲管 (管長 15cm)										
頻率	958	35.26	2021.48	246.12	2572.27	244.18	1623	1035.61	1904	982.46
	1101.56	29.86			1286	372.86	3249	463.47	3808	1886.58
乙管 (管長 19.8cm)										
頻率	603.52	36.48	1400.39	100.17	1362	748.29	1643	813.58	1907	1044.58
	958	48.84	1795.9	91.8			3287	569.63	3817	1420.5
	875.98	56.48	2041.99	107.04						
丙管 (管長 29.5cm)										
頻率	960.94	21.96	1423.83	29.61	1344	154.72	1658	421.99	1924	334.31
	1001.95	22.38	2132.81	55.48			3319	213.51	3846	1066.48
	1409.18	16.53								
丁管 (管長 48cm)										
頻率	682.62	3.33	2085.94	1.94	1382	6.22	1710	4.55	1945	15.76
	972.66	3.79					3351	4	3914	10.03
	852.54	4								
戊管 (管長 67cm)										
頻率	881.84	32.2	131.84	24684	1394	331.79	1708	1228.39	1980	999.51
	940.43	27.68	213.86	252.45	164.06	243.08	3418	1101.45	3958	1561.86
			1110.35	199.27						
			2220.7	183.9						
表三-3 不同規格粉紅管的實驗結果										

註：紅色字體顏色為符合泛音規律的共鳴頻率，其餘黑色字體顏色為沒有規律的頻率

(三) 討論

- 由表三-1、表三-2 及表三-3 可看出，經由傅立葉轉換後的數據，除了有符合泛音規律的共鳴頻率外，還有音量較低人耳不容易察覺或是沒有規律的頻率存在。
- 符合泛音規律的共鳴頻率與理論值比較，實驗的結果也相當吻合，如圖三-1~圖三-8，表示利用軟體 Phyxox 能準確呈現波紋管的共鳴頻率。



(四) 實驗三-1、探討波紋長度對頻率的影響

1. 說明：將黑管、灰管及粉紅管裁剪出了五種管長，放在入風口的位置，記錄頻率的結果。

管子名稱	甲管	乙管	丙管	丁管	戊管
管長 (cm)	15	19.8	29.5	48	67

表三-1-1 選定的五種管長

2. 結果

管長 (cm)	15	19.8	29.5	48	67
頻率 (Hz)			1664.06	937.5	840.82

表三-1-2 黑管 風速 9.4 (m/s) 管長與頻率的關係

管長 (cm)	15	19.8	29.5	48	67
頻率 (Hz)	2264.64	1854.49	1078.12		

表三-1-3 黑管 風速 12.9 (m/s) 管長與頻率的關係

管長 (cm)	15	19.8	29.5	48	67
頻率 (Hz)	4948.24	3246.09	2024.41	1637.69	

表三-1-4 黑管 風速 19.5 (m/s) 管長與頻率的關係

管長 (cm)	15	19.8	29.5	48	67
頻率 (Hz)	2112.3	1883.78	1119.14		

表三-1-5 灰管 風速 12.9 (m/s) 管長與頻率的關係

管長 (cm)	15	19.8	29.5	48	67
頻率 (Hz)	1101.56	875.98		682.62	

表三-1-6 粉紅管 風速 9.4 (m/s) 管長與頻率的關係

管長 (cm)	15	19.8	29.5	48	67
頻率 (Hz)	2021.48	1795.9	1423.83		

表三-1-7 粉紅管 風速 12.9 (m/s) 管長與頻率的關係

3. 討論

(1) 由表三-1、表三-2 及表三-3 可看出，同一種管子，若管長較長，則可以在較低風速下產生較高的共鳴頻率。

(2) 由表三-1-2~表三-1-7 可知，同一種管子，管長變長，共鳴頻率下降且與理論值相符。

(五) 實驗三-2、探討波紋長度比例對頻率的影響

1. 說明：我們將一個固定長度的平滑管子與細波紋管接在一起，形成一段平滑，一段有波紋的管子，改變波紋的長度進行實驗。

2. 實驗裝置圖



3. 結果

平滑長度 (cm)	波紋長度 (cm)	頻率 (Hz)	音量 (arb)
20	6	2510.74	865.67
20	8	2513.67	458.41
20	10	2510.74	726.09
20	12	3990.23	7227.93
20	14	3779.29	3395.31
20	16	3544.92	4325.93

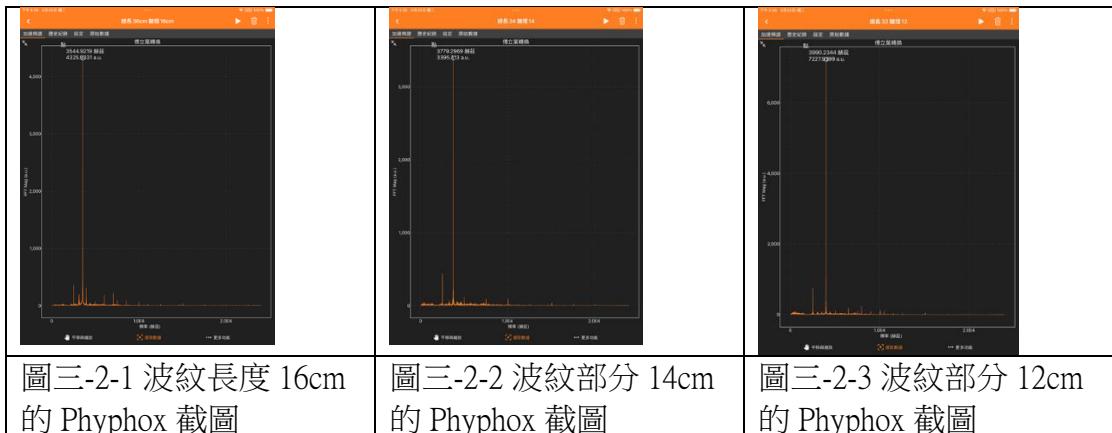
表三-2-1 波紋長度比例與頻率的關係

4. 討論

(1) 當波紋長度與平滑長度相近時，共鳴聲音的音量非常明顯，從圖三-2-1~圖三-2-3 中可看出是頻率單一一個峰值，且共鳴頻率會隨著波紋長度減少（管長變短）而上升。

(2) 當波紋長度下降到平滑長度的二分之一及二分之一以下時，共鳴聲音的音量明顯下降，從圖三-2-4~圖三-2-6 中可看出頻率有多個峰值，表示有多個共鳴聲音互相影響，不是那麼穩定。

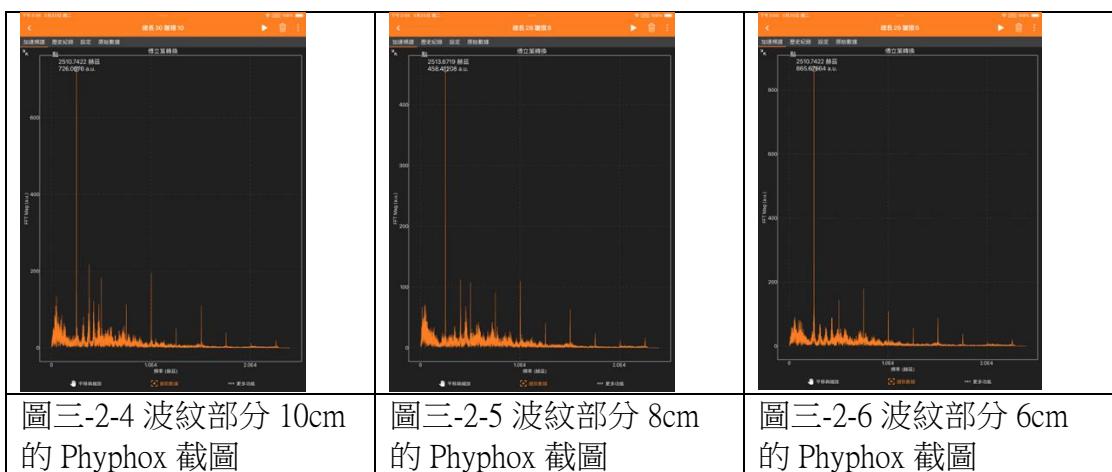
(3) 只有平滑的管子不會產生共鳴，需要有波紋的部分才會有共鳴，若要產生響亮的共鳴聲音，波紋的長度不可過短，需有一定的完整度。



圖三-2-1 波紋長度 16cm 的 Phyphox 截圖

圖三-2-2 波紋部分 14cm 的 Phyphox 截圖

圖三-2-3 波紋部分 12cm 的 Phyphox 截圖



(六) 實驗三-3、探討波紋寬度對頻率的影響

- 說明：我們利用桌上型虎鉗和膠帶將灰管拉長至 48cm 固定，使其波紋寬度從 2.7mm 變至 3.9mm，比較相同管長的黑管、灰管及拉長灰管，不同波紋寬度對其頻率的影響。

管子種類	內部波紋寬度 (mm)	管長 (cm)
黑管	1.9	48
灰管	2.7	48
拉長灰管	3.9	48

表三-3-1 波紋管規格

- 拉長灰管實驗裝置圖



3. 結果

黑管										
風速 (m/s)	9.4	arb	12.9	arb	16.2	arb	19.5	arb	22.7	arb
丁管 (管長 48cm)										
頻率	937.5	84.01	1081.05	88	1365.23	327	1637.69	523.7	1880.85	1351.28
	1227.53	47.48	1514.64	75.21	1957.03	140.82	3274.46	289.8	3761.71	1710.47
	1564.45	42.93	1757.81	73	2730.46	123.65	4910.15	133.4	5642.57	398.23
	1757.81	33.07	2162.1	96.41	5463.86	174.29	6544.92	124.59		
	2440.42	25.31								
	2941.4	26.68								
通過管子後 風速 (m/s)	7.9		11.1		13.3		17.1		19.5	
表三-3-1 黑管丁管的實驗結果										

灰管										
風速 (m/s)	9.4	arb	12.9	arb	16.2	arb	19.5	arb	22.7	arb
丁管 (管長 48cm)										
頻率	108.39	43.84	2223.63	215.52	1368.16	415.52	1623.04	1054.5 9	1869.14	620.45
	952.14	43.25			5472.65	184.04	3243.16	825.8	3741.21	843.21
	2255.85	49.69								
通過管子後 風速 (m/s)	7.3		10		13.3		16.8		20	
表三-3-2 灰管丁管的實驗結果										

拉長灰管										
風速 (m/ s)	9.4	arb	12.9	arb	16.2	arb	19.5	arb	22.7	arb
丁管 (管長 48cm)										
頻率	292.96	12.85	301.75	52.17	87.89	45.76	61.52	52.37	292.96	78.06
	307.61	15.83	656.25	31.61	292.97	47.69	298.82	57.53		
	583	11.48	832.03	20.88	319.33	53.4	606.44	46.23		
	635.74	9.54	943.35	24.13	612.3	32.56	966.79	33.02		
					946.28	27.69	1286.13	61.43		
					966.79	27.26	1851.56	35.7		
					1089.84	23.95	1892.57	36.91		
表三-3-3 拉長灰管的實驗結果										

註：紅色字體顏色為符合泛音規律的共鳴頻率，其餘黑色字體顏色為沒有規律的頻率

4. 討論

- (1) 內部波紋寬度較小，可在較低風速下產生較高的共鳴頻率。
- (2) 表三-3-3 中，波紋寬度拉長後，沒有規律且音量小的頻率會變多。

- (3) 由表三-3-1 與表三-3-2 可知，大部分的泛音頻率是灰管>黑管，而沒有規律的頻率則是黑管>灰管。

(七) 實驗三-4、探討波紋組合對頻率的影響

1. 實驗三-4-1、探討不同波紋長度對頻率的影響

- (1) 說明：我們將可伸縮的白管，利用壓縮及拉長，形成前段小波紋（寬度 2.1mm）、後段大波紋（寬度 5.7mm）的管子，總長度 35 公分，依序改變大波紋寬度的長度，記錄共鳴聲音的頻率。
- (2) 實驗裝置圖



(3) 結果

大波紋寬度的長度 (cm)	共鳴頻率 (Hz)	音量 (arb)	共鳴頻率 (Hz)	音量 (arb)
9	1951.17	1477.72	3905.27	1603.94
18	1962.89	1592.23	3922.85	1361.93
26	1959.96	1093.87	3925.78	1539.66
30	1995.12	1614.61	3993.16	2613.97
35 (全大波紋)	1980.46	1569.42	3960.93	2242.88

表三-4-1 風速 22.7 (m/s) 不同波紋組合與頻率的關係

(4) 討論

- (a) 當風速較大時，產生 2 個音量較大的共鳴頻率。
- (b) 利用大、小波紋的組合，可以達到放大或是縮小音量的效果。例如：35 公分的全大波紋，變成 5 公分小波紋、30 公分大波紋的組合，可以放大共鳴頻率的音量；若變成 9 公分小波紋、26 公分大波紋的組合則反之。

2. 實驗三-4-2、探討波紋位置對頻率的影響

- (1) 說明：我們將可伸縮的白管，利用壓縮及拉長，形成一段小波紋（寬度 2.1mm）、一段大波紋（寬度 5.7mm）的管子，並將小波紋寬度的部分放在管子的前、前中、中、中後及後五個位置，記錄共鳴聲音的頻率。

(a) 小波紋寬度位置分布

小波紋寬度的位置	圖示
前（距入風口 0cm）	
前中（距入風口 16.5cm）	
中（距入風口 41cm）	
中後（距入風口 65.5cm）	
後（距入風口 82cm）	
無（距入風口 98cm）	

註：機器皆在管子左側

(2) 結果

小波紋寬度的位置	頻率 arb							
前	1201.17	5669.97			2083	2213.25	4168.95	2037.51
前中	1315.43	628.9			2059.57	2550.73	4119	1801.07
中	1309.57	211.07			1992.19	536.65	3987.3	466.41
中後	1306.64	3976.43	1429.68	1331.98	2077.14	1982.85	4157.22	2658.41
後					2036.13	1523.07	4075.2	1599.71
無	1347.65	2372.98	1470.7	1100.78	2077.14	2260.9	4157.22	3942.88

表三-5-1 風速 22.7 (m/s) 不同波紋位置與頻率的關係

(3) 討論

- (a) 移動小波紋到中間位置，產生共鳴的音量下降很多，移動到後面的位置，則無法產生較低頻率的聲音，由此可知，移動波紋的位置，會影響到音量的大小及共鳴頻率的有無。
- (b) 移動波紋的位置對較高的共鳴頻率沒有影響。

(八) 實驗三-5、探討波紋管口大小對頻率的影響

1. 說明：分別取 11.5 公分的可伸縮白管、粉紅管及黑管進行實驗

管子種類	管徑 (mm)	管口面積 (cm^2)	管長 (cm)
可伸縮白管	21.6	366	11.5
粉紅管	23.1	419	11.5
黑管	28.8	651	11.5

表三-6-1 三種波紋管規格

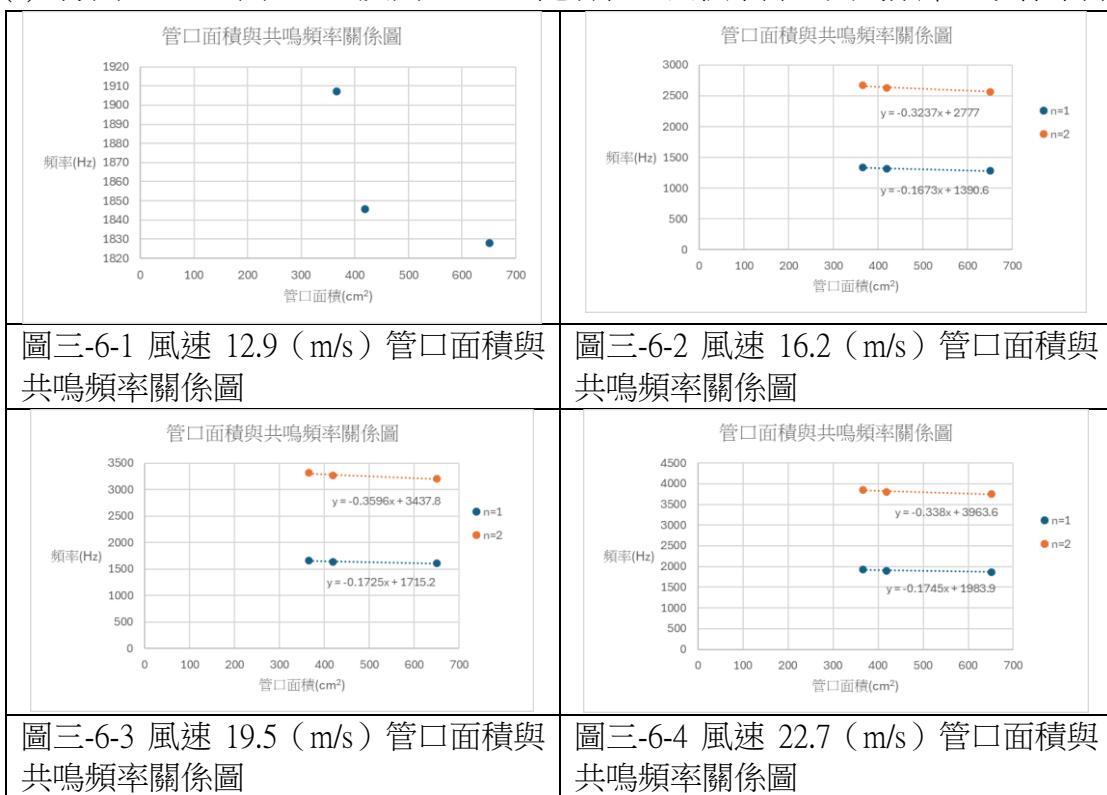
2. 結果

入風口 風速	可伸縮 白管共鳴頻率 (Hz)	音量	粉紅管共鳴頻 (Hz)	音量	黑管共鳴頻率 (Hz)	音量
9.4 (m/s)			120.11	18.35	102.53	31.32
	240.23	22.46				
	960.93	31.51				
			987.3	30.6		
					1019.53	68.62
	2159.17	27.1				
			2370.11	20.56		
12.9 (m/s)	348.63	55.63	301.75	99.28		
			922.85	98.04	914.06	119.91
	1168.94	56.1				
			1209.96	100		
	1907.22	94.01	1845.7	198.41	1828.12	192.25
16.2 (m/s)	1335.93	290.65	1312.5	559.82	1283.2	467.55
	2671.87	185.21	2625	269.7	2569.33	331.57
	4007.81	157.92			3852.53	199.98
19.5 (m/s)	1661.13	1017.37	1631.83	643.77	1605	939.77
	3325.19	895.43	3263.67	289.16	3208	375.49
22.7 (m/s)	1927.73	989.3	1901.36	1016.53	1872.07	950.33
	3855.46	1181.56	3802.73	1999.82	3747.07	1547.92
	5786.14	502.76			5619.14	677.6

表三-6-2 可伸縮白管、粉紅管、黑管不同風速的共鳴頻率

3. 討論

- (1) 當聲速較慢，在 9.4 (m/s) ~12.9 (m/s) 之間，產生共鳴的音量較低，且可伸縮白管、粉紅管及黑管的頻率數據呈現不同 n 值的結果，不易比較出其規律。
- (2) 當聲速的範圍在 16.2 (m/s) ~22.7 (m/s) ，產生共鳴聲音的音量較高，且測量結果 n 值分布一致，分析比較後可發現，波紋管的管口較大，共鳴聲音的頻率會較小。
- (3) 據圖三-6-4、圖三-6-5 及圖三-6-6，隨著管口面積下降，共鳴頻率也規律下降。



四、實驗四、探討風速對頻率的影響

(一) 說明：利用可調控電阻裝置調整空氣泵的電壓大小來改變入風口風速，入風口五種不同風速： 9.4 (m/s) 、 12.9 (m/s) 、 16.2 (m/s) 、 19.5 (m/s) 、 22.7 (m/s) 。

(二) 結果：據表三-1-2~表三-1-7，同一種管子，管長變長，共鳴頻率下降且符合理論值。

風速 (m/s)	9.4	12.9	16.2	19.5	22.7
頻率 (Hz)	1617.18	1854.49			1875

表四-1 黑管 管長 11.5 (cm) 風速與頻率的關係

風速 (m/s)	9.4	12.9	16.2	19.5	22.7
頻率 (Hz)	975.58	1078.12	1365.23		
頻率 (Hz)	1664.06	1731.44	1763.67		1877.92

表四-2 黑管 管長 11.5 (cm) 風速與頻率的關係

風速 (m/s)	9.4	12.9	16.2	19.5	22.7
頻率 (Hz)	960.93	1119.14	1371.09		

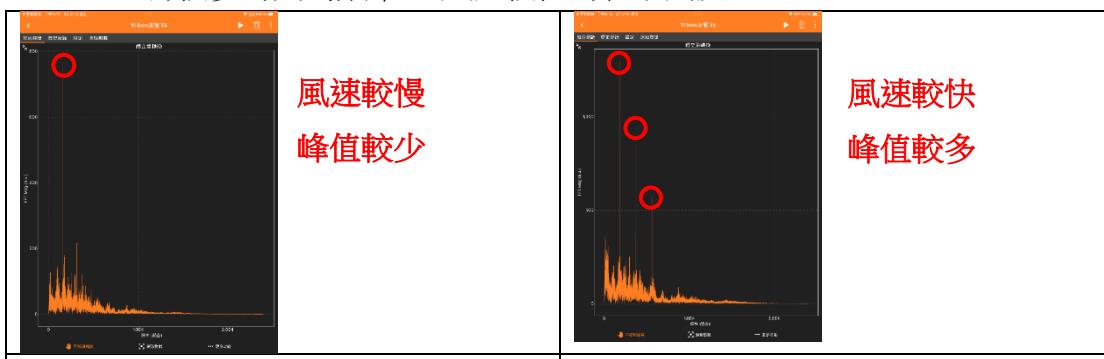
表四-3 灰管 管長 11.5 (cm) 風速與頻率的關係

風速 (m/s)	9.4	12.9	16.2	19.5	22.7
頻率 (Hz)	1001.95	1423.83	1344		

表四-4 粉紅管 管長 11.5 (cm) 風速與頻率的關係

(三) 討論：

- 由表四-1~表四-4 可知，同一種管子，風速變大，可得到較高的共鳴頻率且與理論值相符。
- 由圖四-1、圖四-2 可看出，相同管長，風速較大的管子，波形經傅立葉轉換，有較多的共鳴頻率，風速較低的管子則反之。



圖四-1 風速較小的傅立葉轉換結果

圖四-2 風速較大的傅立葉轉換結果

- 大部分的情況，較低風速的共鳴音量較低。
- 在風速超過 16.2 (m/s) 的情況下，共鳴頻率會出現 2 個峰值，且音量在風速越大時越顯著。

五、實驗五、模擬旋音管發聲情況

(一) 實驗五-1、探討波紋管管口至空氣泵距離變化對頻率的影響

1. 說明：波紋管在旋轉時會發出聲音，稱其為旋音管，在轉速越快的時候，聲音頻率越高，會發出很明顯的聲音。我們想用我們的實驗裝置，模擬出旋音管發出聲音的情況，探討影響旋音管發聲頻率的因素。

2. 實驗步驟

- (1) 將黑管的丁管放置在距離空氣泵 0cm 處進行實驗。
- (2) 空氣泵連接插座並開啟電源，吹氣進管中，使其發出聲音。
- (3) 用 ipad 中的軟體 Phyphox 的聲譜錄製功能，測量出其聲音頻率。
- (4) 依序距離空氣泵 2cm、4cm…直到 20cm
- (5) 重複步驟 (1)、(2)、(3)
- (6) 更換黑管的戊管，重複步驟 (2)、(3)、(4)

3. 實驗裝置圖



4. 結果

0cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm	12 cm	14 cm	16 cm	18 cm	20 cm
丁管										
1584.96	1476.56	585.93	580.07	577.14	577.14	無	無	無	無	無
	2071.28	1500	1183.59	1192.38		1183.59				
戊管										
2021.48	656.25	424.80	225.58	219.72	219.76	225.58	216.79	208	216.79	210.93
	1564.45	1362.3	1335.93		1125	1122.07	1116.21	1107.42		436.52
	1772.46	1555.6	1335.93			1341.79	1333			896.48

5. 討論

- (1) 波紋管距離空氣泵一段距離，共鳴頻率會趨於穩定，變化不大。
- (2) 波紋管距離空氣泵管口 6cm 時，共鳴頻率的數據都穩定，所以皆以 6 公分的距離進行實驗五-2。

(二) 實驗五-2、模擬旋音管發聲情況

1. 說明：我們將黑管和灰管，置於距離入風口 6 公分處，測量其在不同風速下的共鳴頻率，用以了解旋音管的發聲情況。

2. 實驗步驟

- (1) 將可調控電阻裝置連接空氣泵與插座。將空氣泵裝上粗吹口，開啟電源，吹氣進欲進行實驗之管中，使其發出聲音。
- (2) 將甲~戊管長之黑管、灰管置於距離入風口 6 公分處。
- (3) 將風速依序調整至 9.4 (m/s) 。
- (4) 用 ipad 中的軟體 Phyphox 的聲譜錄製功能，測量出其聲音頻率。
- (5) 依序調整風速至 12.9 (m/s) 、16.2 (m/s) 、19.5 (m/s) 、22.7 (m/s) 。
- (6) 重複步驟 (2)、(3)、(4)

3. 實驗結果

黑管										
風速/ 管長	9.4		12.9		16.2		19.5		22.7	
	Hz	arb.	Hz	arb.	Hz	arb.	Hz	arb.	Hz	arb.
甲管	61.52	60.29	99.6	139.32	58.59	236.5	79.1	166.26	73.24	441.92
	73.24	61.87	187.5	158.88	125.97	287.56	893.55	99.78	99.6	413.57
	155.27	60.5	316.4	137.73	152.34	295.52	937.5	104.59	161.13	417.65
	187.5	60.29	345.7	187.41	251.95	228.08	966.79	105.86	1907.22	1044.95
	237.3	44.17	1092.77	76.28	401.36	168.36	1359.37	206.51	3817.38	201.29
	785.15	28.52	2645.5	47.21	421.87	165.61	1649.41	390.75		
				629.88	120.64	1875		107.04		
				1104.49	102.24	2712.89		73.87		
				1866.21	92.32	3301.75		116.82		
						4951.17		105.98		
通過管子後 風速 (m/s)	5.3		7.7		9.5		11.6		11.8	
乙管	193.35	211.26	90.82	87.78	82.03	244.84	700.19	126.45	111.32	291.19
	240.23	196.56	131.83	95.87	111.32	246.34	1300.78	179.78	708.98	460.87
	395.51	161.7	140.62	90.55	125.97	218.7	2601.56	74.6	1371.09	146.25
	462.89	110.35	366.21	58.61	292.96	159.37	3313.47	64.07	1385.74	140.92
	577.14	93.8	703.12	89.29	706.06	132.52			1435.54	157.57
	682.61	88.32	711.91	87.09	1095.7	90.03			1910.15	779.98
	802.73	73.22	1415.03	35.5	1382.81	258.46			2147.46	137.49
	3020.5	36.35	1892.57	41.19	1965.82	49.82				
			2176.75	40.34	2155.23	52.01				
通過管子後 風速 (m/s)	5.5		7.4		9.5		11.2		11.8	
丙管	70.31	47.26	70.31	26.93	465.82	134.65	500.97	173.46	459.96	211.21
	357.42	48.47	489.25	51.12	477.53	117.56	1259.76	96.4	477.53	217.91
	498.04	44.56	843.75	32.32	492.18	129.58	1265.62	93.88	500.97	269.42
	987.3	38.04	990.23	36.91	1028.32	56.14	1526.36	101.69	1004.88	110.41
	2953.12	22.36	1083.98	52.89	1075.19	62.8	1535.15	111.75	1476.56	249.51
			2976.56	18.67	1502.92	45.6	1962.89	59.41	1904.29	327.38
			3029.29	19.03	1921.87	44.04	1995.11	56.84		
					3225.58	21.18	2525.39	61		
					4599.6	17.81	3785.15	46.01		
							4230.46	38.35		
通過管子後 風速 (m/s)	5.2		7.5		9.2		10.8		12.5	
丁管	333.98	17.68	298.82	43.56	298.82	118.9	292.96	145.71	298.82	144.61
	521.48	17.9	1078.12	43.66	621.09	46.53	322.26	116.01	316.4	143.63
	644.53	12.57	1514.64	13.02	963.86	44.74	632.81	63.3	626.95	76.25
	2238.28	9.5	2159.17	13.66	1382.81	168.82	1180.66	102.34	1341.79	80.42
	3755.85	6.01	2712.89	13.74	1579.1	28.21	2361.32	41.27	1576.17	66.09
			3679.68	14.12	3697.26	20.02	3316.4	105.57	1907.22	314.12
							6635.74	48.74	2686.52	75.36
通過管子後 風速 (m/s)	4.8		6.7		8.6		10.2		11.5	
戊管	70.31	69.18	219.72	117.85	222.65	153.99	225.58	261.7	216.79	119.44
	105.46	66.48	697.26	80.49	454.1	61.22	442.38	139.66	454.1	123.77
	125.97	82.8	1552.73	37.78	943.35	53.82	1171.87	70.25	717.77	63.59
	193.35	68.86	2167.96	38.12	952.14	58.5	1400.39	102.56	1160.15	62.45
	234.37	73.87	2604.49	63.45	1154.29	58.81	1825.19	58.58	1283.2	144.08
	465.82	52.79	3035.15	35.8	1848.63	29.17	3319.33	57.67	1397.46	96.14
	559.57	27.38	3468.75	41.63					1901.36	169.66
通過管子後 風速 (m/s)	4.1		6.9		7.5		9.3		11	

表五-2-1 不同規格黑管距離空氣泵 6 公分的實驗結果

灰管										
風速/ 管長	9.4	arb.	12.9	arb.	16.2	arb.	19.5	arb.	22.7	arb.
甲管	84.96	54.2	49.8	123.91	61.52	294.97	82.03	184.26	108.39	147.91
	93.75	55.93	99.6	135.02	102.53	343.91	1394.53	206.14	820.31	143.79
	137.69	55.53	123.04	116.04	272.46	205.77	1623.04	224.82	1693.35	150.18
	161.13	55.94	228.51	90.4	357.42	171.76	2794.92	51.82	1895.5	295.06
	670.89	57.04			594.72	137.61				
通過管子後 風速 (m/s)	6.1		7.4		9		11.3		14.2	
乙管	685.54	70	64.45	147.7	43.95	205.23	87.89	148.51	67.38	288.48
	776.36	17.05	193.35	145.4	79.1	209.58	108.4	119.24	87.89	280.39
	1371.09	19.07			723.63	86.94	228.51	131.83	117.18	286.09
					1872.07	44.33	673.82	94.61	1895.5	631.15
					1907.22	47.09	1412.1	125.91		
通過管子後 風速 (m/s)	6.1		7.5		9		12.2		12.7	
丙管	64.45	27.26	67.38	73.2	64.45	153.38	67.38	168.56	442.38	386.92
	767.57	10.82	114.25	65.65	114.25	126.53	82.03	157.81	489.25	376.21
	987.3	11.94	468.75	43.29	146r.48	124.3	162	219.65	1546.87	271.08
			486.32	45.15	187.5	132.52	451.17	114.26	1564.45	262.76
			1013.67	30.22	1028.32	87.91	489.25	119.88	1898.43	428.24
						512.69	117.02			
						990.23	57.85			
						1327.14	56.38			
通過管子後 風速 (m/s)	5.6		7.8		8.8		11.4		11.9	
丁管	292.96	12.85	301.75	52.17	87.89	45.76	61.52	52.37	292.96	78.05
	307.61	15.83	656.25	31.61	292.97	47.69	298.82	57.53	316.4	75.67
	583	11.48	832.03	20.88	319.33	53.4	606.44	46.23	1889.64	218.65
	635.74	9.54	943.35	24.13	612.3	32.56	966.79	33.02		
			1083.98	60.09	946.28	27.69	1286.13	61.43		
					966.79	27.26	1851.56	35.7		
					1089.84	23.95	1892.57	36.91		
					1365.23	66.13				
通過管子後 風速 (m/s)	5.3		7.3		9.3		10.8		11.8	
戊管	208	17.27	222.66	52.18	76.17	49.68	210.93	26.93	222.65	280.02
	228.51	16.81	459.9	28.5	213.86	54.23	427.73	34.34	468.75	283.5
	454.1	12.32	682.62	44.08	465.82	44.81	931.64	41.21	606.44	289.29
	670.89	8.2			694.33	37.61	1253.9	60.61	911.13	251.27
					919.92	38.31	1625.97	72.09	1142.57	238.15
					1136.71	31.7			1356.44	262.45
									1561.52	123.89
									2039.06	130.21
通過管子後 風速 (m/s)	5		6.5		8.5		9.3		11	

表五-2-2 不同規格灰管距離空氣泵 6 公分的實驗結果

註：紅色字體顏色為符合泛音規律的共鳴頻率，其餘黑色字體顏色為沒有規律的頻率

4. 討論

- (1) 旋轉波紋管造成壓力差，使得氣流流過波紋管進而產生共鳴頻率，這是旋音管發聲的情況。在轉動的情況下測量風速、頻率會有些困難，透過我們的實驗裝置，可以方便進行測量。
- (2) 旋音管是氣流進入波紋管發聲，氣流進入的方式是比較複雜的，利用空氣泵讓氣流過波紋管，可以簡化變因，提供研究旋音管的一個實驗方式。
- (3) 我們利用空氣泵距離波紋管 6 公分的實驗方式模擬旋音管的發聲情況，經實驗得到表五-2-1 及表五-2-2，結果顯示產生的共鳴頻率符合泛音的規律，另外也產生沒有規律的頻率，和本實驗的實驗結果類似。

六、實驗六、波紋管內氣流流動情形

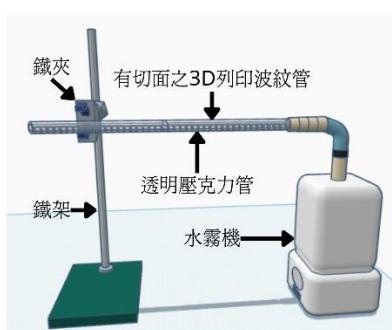
(一) 實驗六-1、以小紙片探討波紋管內氣流流動情形

1. 說明：我們推測氣流會在波紋管內的波紋凹槽裡打轉，導致其發出聲音，因此我們設計了此實驗來印證此想法。我們採用 3D 列印出一根有切面波紋管，貼一小紙片垂直於波紋凹槽底部，放進平滑的壓克力管中，再用水霧機製造水霧進壓克力管內，藉由觀察紙片的擺動情況推測氣流走向。

2. 實驗步驟

- (1) 裁切一小紙片（材質為影印紙）。並將其一面塗成紅色，另一面塗成黑色，以便於觀察小紙片之擺動。
- (2) 將熱熔膠直線塗抹在小紙片底邊，並用鑷子將其垂直黏於中心波紋底部。
- (3) 打開水霧機並用手堵住壓克力管的出風口，維持 2 分鐘，使水霧集中。
- (4) 將堵在壓克力管出風口的手移開，讓水霧流過管子，並用平板相機之慢動作模式錄製此過程，後觀看影片觀察小紙片的改變。

3. 實驗裝置圖



4. 結果

影片秒數	0.01	0.55	1.01
影片畫面			

表六-1-1 實驗影片截圖

5. 討論

從 0.01 秒的影片畫面可得知，一開始拍攝到的是小紙片的黑色面。接著水霧流過壓克力管，影片畫面來到 0.55 秒，小紙片被水霧流壓制而後傾，因而拍攝到了小紙片之紅色面。1.01 秒的影片畫面中，小紙片傾斜程度更為明顯，且可觀察到小紙片在後傾時呈現了一個弧度（圖中紅色標記處）。

(二) 實驗六-2、以彩色迷你保麗龍球探討波紋管內氣流流動情形

1. 說明：接續實驗六-1，我們為了解釋小紙片在後傾時呈現的弧度，便想更進一步觀察氣流在波紋凹槽內的流動走向，預計將彩色迷你保麗龍球放置在有切面之 3D 列印波紋管凹槽內，再將其整個放入透明壓克力管內。而後利用空氣泵吹氣進壓克力管，觀察保麗龍球被氣流帶動而進行的運動情況

2. 實驗步驟：

- (1) 將相同顏色的二個迷你保麗龍球置於同一波紋凹槽內，距離入風口開始，每隔二個波紋凹槽放置一組，共計三組。
- (2) 將空氣泵連接插座開啟電源，對準壓克力管入風口吹氣。
- (3) 用 ipad 相機之慢動作模式錄製此過程，後觀看影片觀察迷你保麗龍球的運動情況。

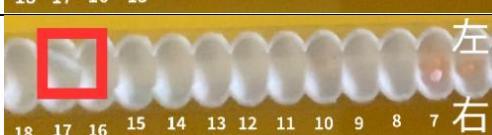
3. 結果

(1) 第一次實驗

影片秒數	影片畫面	說明
0.00		尚未開始吹氣時，編號 1、2 的綠色迷你保麗龍球位在波紋凹槽中央。
0.01		開始吹氣，氣流首次進入波紋凹槽，將 2 號的綠色迷你保麗龍球帶至波紋邊緣圓弧處。

表六-2-1 實驗影片截圖

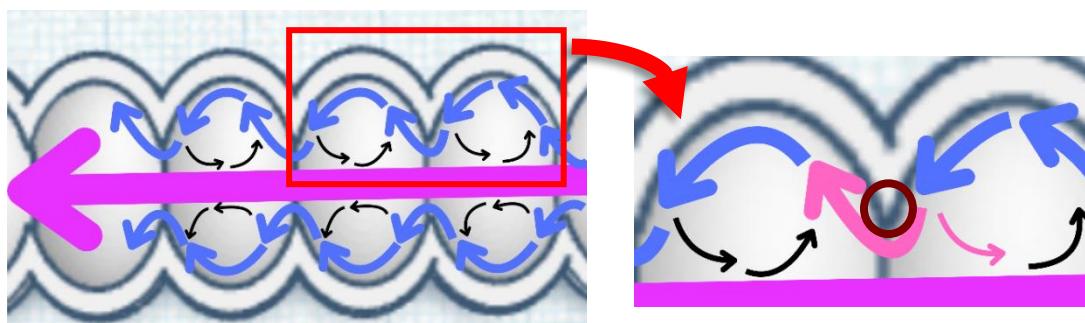
(2) 第二次實驗

影片秒數	影片畫面	說明
3.61		藍色迷你保麗龍球已被氣流吹送至管子的第 14 個波紋左側。
3.72		藍色迷你保麗龍球被氣流繼續吹至管子第 15 個波紋之中央。
3.79		藍色迷你保麗龍球被氣流繼續吹至管子第 16 個波紋之中央。
3.88		藍色迷你保麗龍球被氣流繼續吹至管子第 17 個波紋之左側。

表六-2-2 實驗影片截圖

4. 討論

- (1) 由第一次實驗之結果可得知，氣流開始進入波紋左右側處後，會帶動迷你保麗龍球向波紋邊緣移動。因此我們可推測，氣流會流經各個波紋的邊緣圓弧處。
- (2) 由第二次實驗可得知，氣流會帶動迷你保麗龍球以 S 形路徑在波紋管內向前移動，而非固定靠著其中一側的管壁移動。所以我們推測氣流會分成兩路以 S 形沿著波紋邊緣圓弧處前進，如圖六-2-1 中的藍色及黑色箭頭所示。



圖六-2-1 氣流流經波紋示意圖

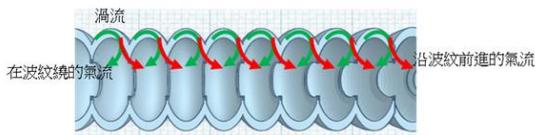
圖六-2-2 氣流流經波紋稜角示意圖

- (3) 在圖六-2-1 中，當氣流進入波紋內時，會有一個主流（圖中紫色箭頭部分），藍色箭頭為支流，會沿著波紋管壁流動。當藍色支流進入下一個波紋時，會經過棕色稜角。通過稜角時，會岔成兩個如同圖六-2-2 中的粉色二箭頭一樣的兩個氣流，而其中一個支流會進到下個波紋內，另一個支流會回到原本的波紋形成渦流（圖中的各箭頭的寬度表示其流速，箭頭越寬流速越大）

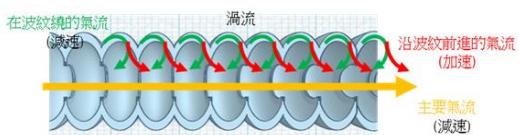
(4) 波紋管產生共鳴頻率分析：

- (a) 從表三-1~表三-3 可看出，測量到的頻率有 2 種，一種是符合泛音規律的共鳴頻率，另外一種則是沒有明顯規律的頻率。我們根據氣流實驗，推測產生這兩種頻率的原因，當氣流進入波紋的時候，會在波紋形成渦流，渦流會分成兩股氣流，一股在波紋裡繞，另外一股進入鄰近的下一個波紋，如圖六-2-3。

(b) 涡流會和主要流過波紋管的氣流在波紋轉折處發生交互作用，使得主要氣流的流速產生變化，有減速的效果，但對於利用波紋向前進的氣流反而是會造成加速，如圖六-2-4。



圖六-2-3 涡流的形成與流動



圖六-2-4 氣流的交互作用

- (c) 主要氣流的通過，會形成符合泛音規律的共鳴頻率，沿著波紋前進的氣流則是產生沒有明顯規律頻率的聲音。考慮相同管長的管子，若波紋寬度較小，則波紋數目會較多，波紋轉折也較多，所以和主要氣流的交互作用較多，所以減速的效果會比較明顯，從出風口風速的數據可以知道，黑管主要氣流的流速降低的幅度大過灰管，所以灰管的泛音規律共鳴頻率會大於黑管。相較利用波紋向前進的氣流反而會是加速的效果，因此黑管的不規律頻率會大於灰管。

陸、 結論

- 一、 使用平板操作 Phyphox，不須外接麥克風，可直接量測聲音頻率，且可將測量到的聲音頻率進行傅立葉轉換，便於實驗記錄。
- 二、 管口平滑管長會對共鳴頻率的測量造成影響，所以在本實驗中，管口沒有平滑的部分，僅有波紋。
- 三、 共鳴頻率的測量結果，除了有符合泛音規律的共鳴頻率外，還有音量較低人耳不容易察覺或是沒有規律的頻率存在。
- 四、 同一種管子，若管長較長，則可以在較低風速下產生較高的共鳴頻率。而當管長變長，共鳴頻率會下降且與理論值相符。
- 五、 只有平滑的管子不會產生共鳴，需要有波紋的部分才會有共鳴，若要產生響亮的共鳴聲音，波紋的長度不可過短，需有一定的完整度。
- 六、 利用大、小波紋的組合，可以達到放大或是縮小音量的效果。
- 七、 移動波紋的位置，會影響到音量的大小及共鳴頻率的有無。
- 八、 波紋管的管口較大，共鳴聲音的頻率會較小，隨著管口面積下降，共鳴頻率也會規律下降。
- 九、 同一種管子，風速變大，可得到較高的共鳴頻率且與理論值相符。相同管長，風速較大的管子，波形經傅立葉轉換，有較多的共鳴頻率。
- 十、 利用空氣泵讓氣流過波紋管，可以簡化變因，提供研究旋音管的一個實驗方式。
- 十一、 根據氣流實驗，推測產生兩種共鳴頻率的原因，主要氣流的通過，會形成符合泛音規律的共鳴頻率，沿著波紋前進的氣流則是產生沒有明顯規律頻率的聲音。

捌、參考文獻資料

註：內文所有圖表都自行製作

一、深入「笛」境～自製塑膠管樂器之開發與原理之探討 <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/59/pdf/NPHSF2019-030106.pdf>

二、Arbitrary unit - Wikipedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Arbitrary_unit

三、駐波

<https://smallcollation.blogspot.com/2014/02/standing-waves.html#gsc.tab=0>