

新竹市第四十四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：「蝕」破天「莖」-探討植物受傷時發聲的物理機制

關鍵詞：空蝕現象、水錘效應、維管束

編號：115JA-P006

摘要

過往研究指出植物在受到傷害時會發出超聲波，但是其物理機制尚不明確。因此本研究嘗試以簡易吸管模型來模擬植物維管束在輸送水流時所遭遇的壓力變化或氣泡進入，產生振動或聲音的效應。以壓電片與麥克風感測器測量各變因對發聲的影響，如吸管材質，紙與塑膠吸管差異不大，因此使用塑膠吸管進行實驗；氣泡從底部與從頂部進入管內的差異，後者產生的衝擊較大，即氣泡從植物受傷的剖面進入時，產生的震動和聲音較大；水流流速的差異對發聲影響大，即維管束的蒸散作用強度會影響發聲；氣泡與管壁密合度差異證實氣泡的摩擦影響發聲大，推測出氣口的氣泡在被水流沖散前與管壁摩擦，振動再與吸管共振產生聲音，因此植物發聲機制之一為氣泡摩擦。

壹、前言

一、研究動機

生物課時，老師講到了植物的維管束，植物維管束具有支撐及運輸作用，經查後發現學長姐曾對植物會尖叫而感到好奇，進而針對被子植物在受到傷害時的超聲波差異進行探討，但學長姐的研究並未明確指出植物會發出超音波的原因，因此我們想要進一步了解其發聲原理。

二、研究目的


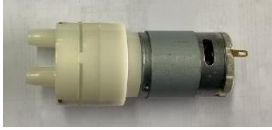





- (一)探討水流驟停對水錘效應產生之影響
- (二)比較吸管材質對發聲的影響
- (三)比較有無接觸空氣時切斷吸管的發聲差異
- (四)比較氣泡進入吸管的位置對發聲的差異
- (五)比較氣泡進入吸管後水流速度對發聲的差異
- (六)比較氣泡與吸管的密合度對發聲的差異

三、文獻探討

Khait 等人（2023）及第 64 屆中小學科學展覽會「莖聲尖叫－探討被子植物在受到傷害時的超聲波差異」的研究指出，植物在面臨乾旱或受傷壓力時會發出可偵測的超音波。從既有研究觀察到此發聲現象與維管束內的「空蝕現象」、「水錘效應」與氣泡的形成具高度相關，植物超聲波的測量已有相當多的研究，但關於氣泡在管路內運動引發聲波的具體物理機制仍有待進一步實驗釐清，在生活中觀察到水錘效應及空蝕效應造成的聲波是可聽到的，因此我們使用巨觀模組及普通麥克風、壓電片進行實驗。

貳、研究設備及器材

一、實驗器材

			
麥克風 MTARDALL 13	Arduino Uno	抽水馬達	電源供應器
			
抗壓水管	普通軟水管	塑膠吸管	水盆
			
H0010 氣體幫浦	壓電片	麥稈吸管	紙吸管

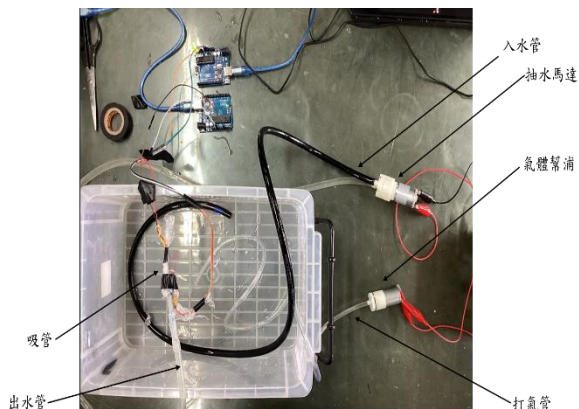
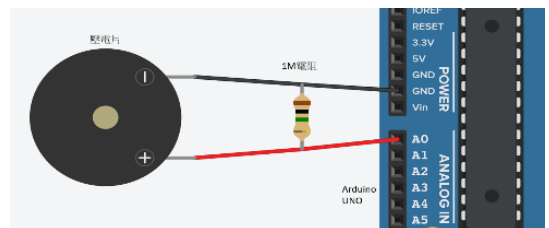
二、實驗裝置

(一) 壓電片實驗組製作方式

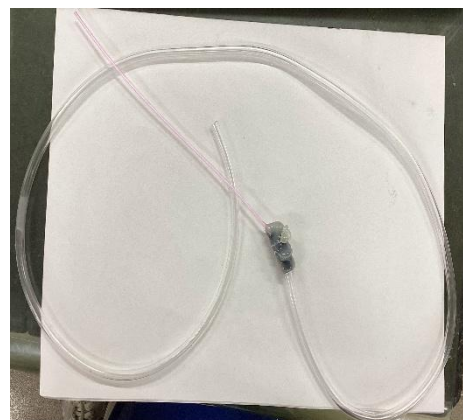
接線法如右圖，壓電片程式碼請見附錄 1

(二) 組裝氣泡實驗裝置，其程式碼請見附錄 2

1. 將電源供應器連上抽水馬達
2. 馬達入水端接上抗壓水管，出水端連軟水管
3. 將吸管接上軟水管，並將氣體幫浦接上軟水管或打氣管(見圖一)
4. 將麥克風(和壓電片)連上 Arduino Uno 和電腦後，包上保鮮膜防水(見圖一)



(圖一)



(圖二)

參、研究過程或方法

一、實驗步驟及研究方法

前置實驗、探討水流驟停對水錘效應*產生之影響

- (一) 將壓電片*黏在吸管管壁上
- (二) 開啟沉水馬達電源
- (三) 測量水流經吸管時管壁所受的壓力數值
- (四) 關閉沉水馬達電源
- (五) 測量關閉電源後管壁所受的壓力數值

*附註 1.水錘效應:水流在管線中因為突然停止或改變方向，造成壓力瞬間升高，就像被錘子敲到一樣。常見於關水龍頭或關閥門時，會聽到「砰！」一聲。而本實驗利用水錘效應會產生振波並在管子內來回震盪的特性，來讓壓電片偵測。

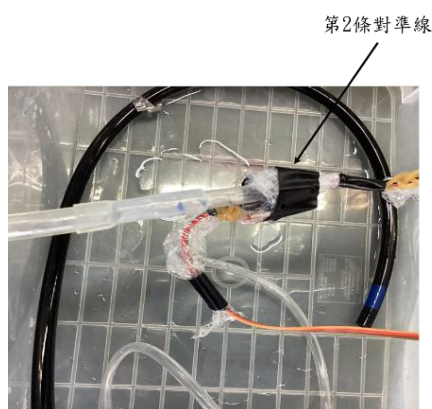
*附註 2.壓電片:一種偵測壓力的元件，反應速度快且十分敏感，經濟又實惠，非常適合用於進行水錘實驗之測量。

實驗一、探討不同材質吸管對於發聲的差異

- (一)將麥克風和壓電片用絕緣膠帶黏在距離吸管口 1 公分的位置上
- (二)開啟抽水馬達電源(12V)
- (三)測量水流經吸管時的數值 10 秒鐘作為環境雜訊
- (四)將氣體幫浦(6V)連接打氣管插入吸管(從出水口進入)
- (五)測量打入氣泡後的數值

實驗二、比較有無接觸空氣時切斷吸管的發聲差異(模擬植物莖受傷狀態)

- (一)將麥克風用絕緣膠帶黏在距離吸管口的 2cm 處，如圖三
- (二)開啟抽水馬達電源
- (三)測量水流經吸管時的數值 10 秒鐘作為環境雜訊
- (四)分別測量在空氣中的剪斷(距出口 1cm 處)及在水中剪斷(距出口 1cm 處)的數值



圖三

實驗三、比較氣泡進入吸管的位置對發聲的影響

- (一)將麥克風和壓電片用絕緣膠帶黏在距離吸管口的 1cm 處，如圖三
- (二)開啟抽水馬達電源(4.5V)
- (三)測量水流經吸管時的數值 10 秒鐘作為環境雜訊
- (四)分別測量將氣體幫浦(6V)連接軟水管後，從入水口進入及從出水口進入的數值

實驗四、比較氣泡進入吸管後水流速度對發聲的差異

- (一)將麥克風和壓電片用絕緣膠帶黏在距離吸管口的 1cm 處
- (二)開啟抽水馬達電源(分別使用 4.5V、6V、9V 及 12V)
- (三)測量水流經吸管時的數值 10 秒鐘作為環境雜訊
- (四)測量將氣體幫浦(6V)連接軟水管後從出水口進入的數值

實驗五、比較氣泡與吸管的密合度對發聲的差異

- (一)將麥克風和壓電片一起黏在出水口或一起黏在出氣口並用絕緣膠帶黏在吸管上
- (二)開啟抽水馬達電源(12V)
- (三)測量水流經吸管時的數值 10 秒鐘作為環境雜訊
- (四)分別測量將氣體幫浦(6V)連接打氣管，插入吸管並緊貼管壁(高度密合)及置於管中央(低度密合)的數值

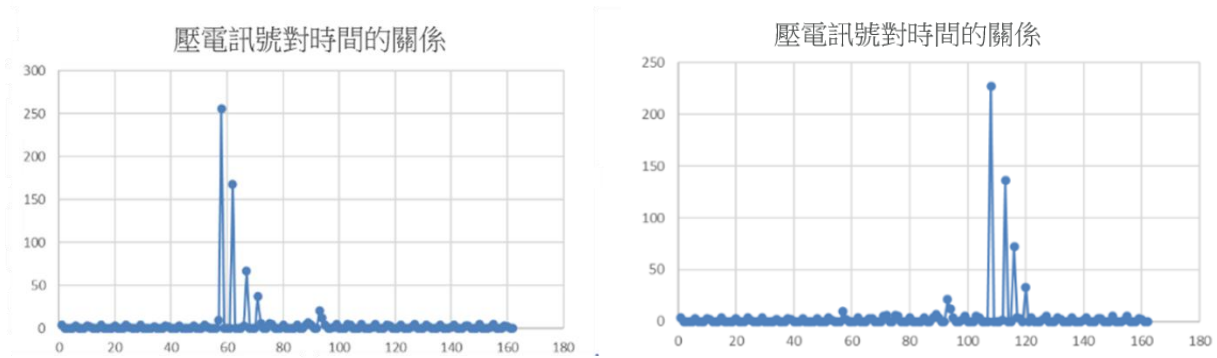
二、數據分析方法

- (一) 將數據後十五秒減去前十秒的平均並會成折線圖
- (二) 為更明顯的看出聲音(震動)的大小差異，將第九到第十一秒的數據去除後，分別計算後十四秒數據及前八秒數據的標準差
- (三) 為更明顯的觀察聲音大小，計算原始數據的平均

肆、研究結果

前置實驗、探討水流驟停對水錘效應產生之影響

下兩圖為水流驟停造成的管壁相對壓力圖。從兩張圖中可發現，水流驟停造成的水錘效應有能量遞減的情形，推測是因為能量波由管子底部產生而引起的第一振波，向上傳遞，傳遞至頂部後反射時會有能量消耗的情況。(縱軸為壓電片的類比值:無單位、橫軸為:數值*20=時間(ms))



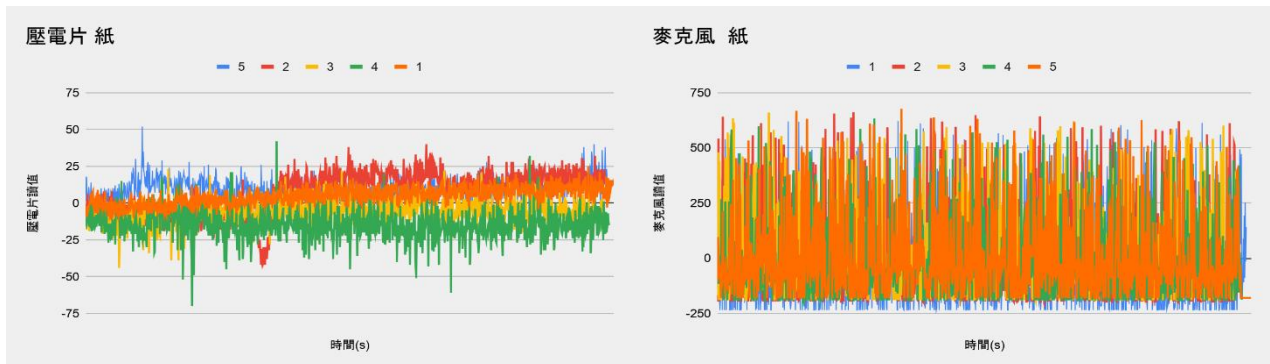
討論:

- (一)在文獻中有提到植物在受傷時會發聲可能是由於切斷莖時的水錘效應，但在此實驗中發現水錘效應的衝擊具備瞬時性(大概 $20 \times 20 = 400$ 毫秒 = 0.4 秒)且發聲毫無延遲，但文獻中不同種類植物受傷後所呈現的發聲模式是在發超音波之前先延遲 1~13 秒，而不同維管束數量則會有持續發聲 2~14 秒的特性，與此實驗結果不相符。
- (二)我們推測水錘效應並非引發該聲波的主導機制，轉而探討維管束內氣泡摩擦共振發聲之可能性。

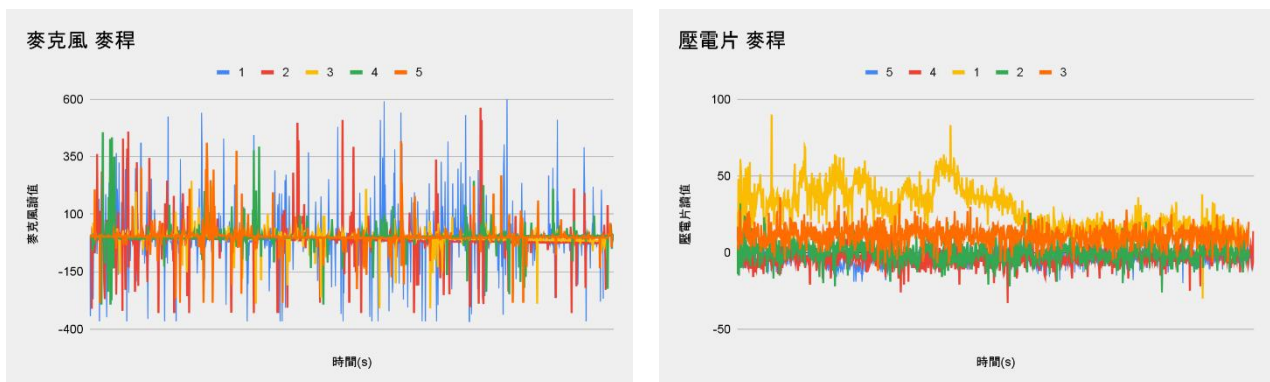
實驗一、比較吸管材質對發聲的差異

因植物維管束的材質較難複製，我們使用了較貼近植物維管束材質的紙吸管與麥稈吸管，以及容易操作的塑膠吸管進行實驗。而紙吸管及麥稈吸管的管徑較小，所以我們使用較細的出氣管進行實驗。

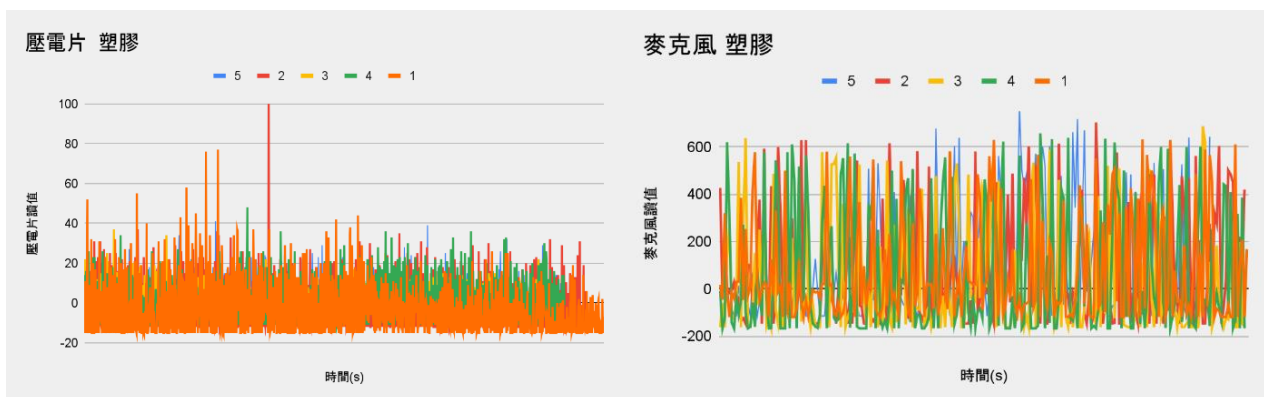
首先使用紙吸管在出水口處製造穩定氣泡，如下二圖。



接著使用麥稈吸管在出水口處製造穩定氣泡，如下二圖。



最後使用塑膠吸管從出水管製造穩定氣泡，如下二圖。



接著將數據進行整理後製作表格如下

表 1-表示麥克風在三種材質下所監測到的訊號與雜訊，皆為標準差數據

麥克風	1	2	3	4	5	平均
紙	228.14	199.07	192.46	187.74	191.77	199.83
紙雜訊	226.66	178.99	205.06	221.77	202.21	206.94
麥稈	115.34	76.51	35.20	49.10	49.36	65.10
麥稈雜訊	140.45	21.55	33.13	38.01	16.55	49.94
塑膠	221.84	245.64	240.54	273.93	239.35	244.26
塑膠雜訊	90.43	131.59	110.18	113.98	111.57	111.55

表 2-表示壓電片在三種材質下所監測到的訊號與雜訊，皆為標準差數據

壓電片	1	2	3	4	5	平均
紙	6.01	14.32	7.66	10.25	8	9.20
紙雜訊	5.40	11.58	5.88	7.13	6	7.17
麥稈	14.56	6.18	6.00	5.13	4.35	7.25
麥稈雜訊	3.30	2.70	4.90	1.98	3.11	3.20
塑膠	12.85	11.81	5.24	10.31	6.28	9.30
塑膠雜訊	13.60	11.36	3.16	7.66	2.31	7.62

表 3-表示麥克風在三種材質下所監測到的訊號與雜訊，皆為原始數據

麥克風	1	2	3	4	5	平均
紙	165.76	182.83	200.09	200.09	196	189.03
紙雜訊	161.37	182.14	206.67	212.03	208	194.08
麥稈	103.02	71.53	76.89	68.36	70.05	77.97
麥稈雜訊	74.81	71.71	66.36	71.51	73.98	71.67
塑膠	198.02	228.53	199.33	238.54	213.45	215.57
塑膠雜訊	109.46	140.43	155.75	140.91	110.54	131.42

表 4-表示壓電片在三種材質下所監測到的訊號與雜訊，皆為原始數據

壓電片	1	2	3	4	5	平均
紙	221.06	214.47	193.35	186.24	191	201.20
紙雜訊	232.86	196.96	186.32	188.78	180	196.89
麥稈	363.29	318.31	305.38	294.44	286.79	313.64
麥稈雜訊	364.17	325.79	309.16	292.32	285.06	315.30
塑膠	198.02	228.53	199.33	238.54	213.45	215.57
塑膠雜訊	109.46	140.43	155.75	140.91	110.54	131.42

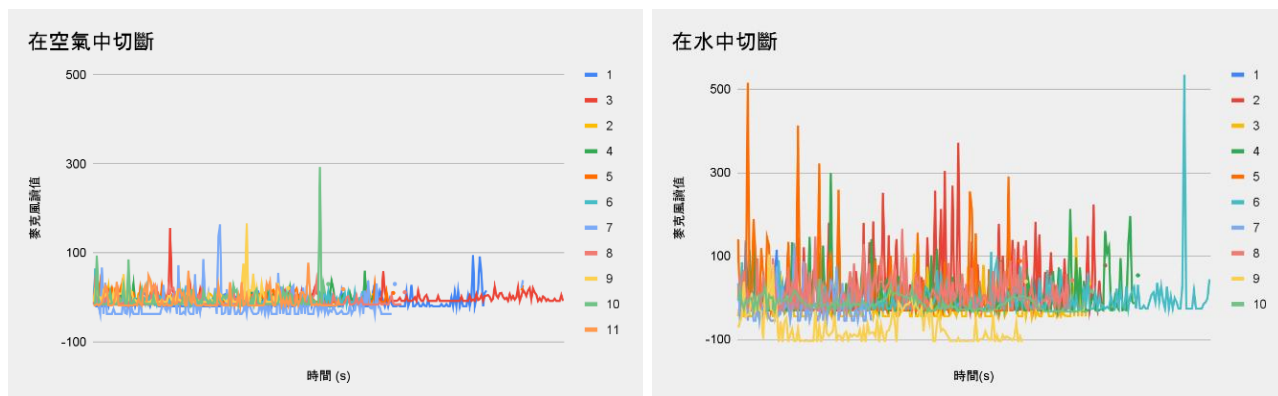
由上述圖表可知，紙吸管麥克風標準差平均為 199.83，雜訊平均 206.94；塑膠吸管麥克風標準差平均為 244.26，雜訊平均 111.55；麥稈吸管麥克風標準差平均為 65.10，雜訊平均 49.94；紙吸管壓電片標準差平均為 9.20，雜訊平均 7.17；塑膠吸管壓電片標準差平均為 9.30，雜訊平均 7.62；麥稈吸管壓電片標準差平均為 7.25，雜訊平均 3.20。

討論:

- (一)從實驗數據中我們發現紙吸管的數據較麥稈吸管更接近塑膠吸管，推測是因為紙吸管的構造與塑膠吸管較相近，且紙吸管的內部有一種類似塑膠的光滑觸感。
- (二)我們發現麥稈吸管的聲音(震動)的大小差異較塑膠吸管的聲音(震動)的大小差異較小，同時我們也觀察到麥稈吸管內部有許多孔洞，可以達到緩衝的作用所較容易吸音，氣泡摩擦產生的聲音較不易傳至感測器，因而造成此現象。
- (三)因麥稈吸管和紙吸管較不易操作且數據與塑膠吸管差異不會過大，為方便操作，接下來將使用塑膠吸管進行實驗。

實驗二、比較有無接觸空氣切斷吸管的發聲差異

為觀察切斷吸管的聲波波型，我們將多次實驗的振幅變化，經去除前端空白平均雜訊後，繪製成圖。為比較在有無接觸空氣狀態下切斷吸管的振幅變化，我們將兩圖的尺度調整相同並進行比較，結果如下。由下圖可知，波型並無明顯的規律。



接著計算出兩者的標準差，四捨五入到小數點第二位，如下表。

種類	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
空氣	15.36	8.78	12.44	10.40	9.87	10.55	29.95	11.47	20.95	29.78	15.96
水	27.53	77.57	34.48	53.60	88.01	44.32	42.84	42.00	38.71	15.40	46.45

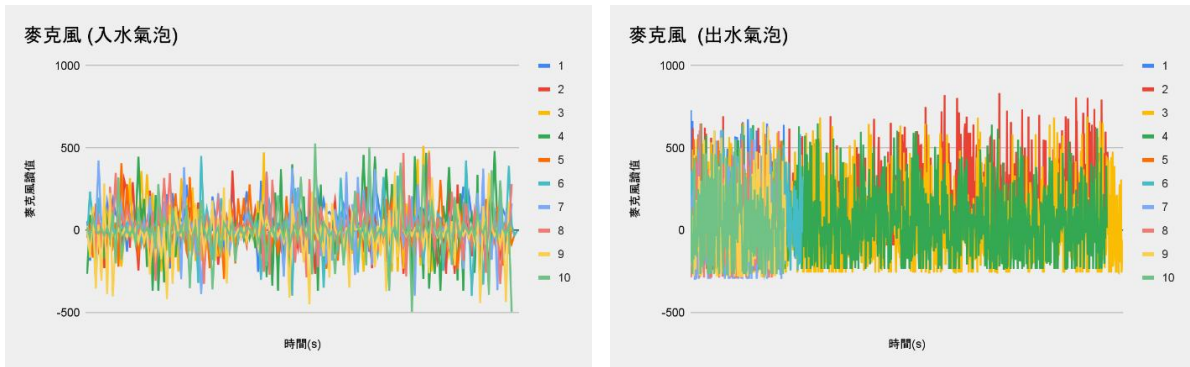
由上表可知，在有接觸空氣下切斷吸管的麥克風標準差平均為 15.96；在未接觸空氣下麥克風標準差平均為 46.45。在未接觸空氣下切斷吸管的標準差明顯較有接觸空氣大，代表：在未接觸空氣下切斷吸管的振幅起伏較有接觸空氣大。

討論：

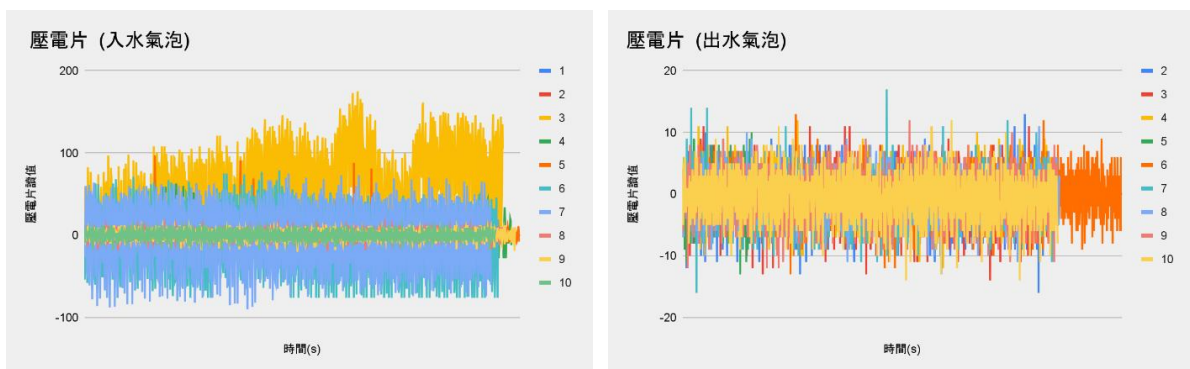
- (一) 原先假設在水中切斷吸管會因水隔離掉空氣中雜訊而起伏較在空氣中切斷吸管小，但實驗後發現在水中切斷吸管聲波聲音的大小差異反而較在空氣中切斷吸管大，此與原先假設不同，推測是由於水的密度較高且具不可壓縮性，能更有效地傳遞機械應力波；反之空氣中能量易散失，造成在水中接收到的振幅較大。
- (二) 在進行實驗時肉眼並未觀察到氣泡明顯進入吸管的現象，且切吸管的動作並未造成明顯的數據變化，因此設計了以下實驗，主動製造氣泡，且不切斷吸管。

實驗三、比較氣泡進入吸管的位置對發聲的差異

此實驗中的壓電片數據代表氣泡在管壁摩擦造成的管壁振動。



從上兩圖可知，氣泡從出水口進入的數值較從入水口進入的數值大。



接著將數據進行整理後製作表格如下

表 5-入水管製造穩定氣泡狀態下，麥克風數據的標準差

麥克風	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
入水口	104.79	130.58	152.93	193.09	109.39	130.04	144.35	140.53	156.72	150.62	141.3
雜訊	23.59	25.98	22.36	19.40	16.25	17.48	41.07	13.80	49.42	16.66	24.6

表 6-入水管製造穩定氣泡狀態下，壓電片數據的標準差

壓電片	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
入水口	6.80	6.61	55.79	13.90	10.42	41.60	42.75	6.14	6.30	6.14	19.65
雜訊	6.09	6.50	5.38	5.92	6.91	40.07	43.76	6.16	6.00	5.78	13.26

表 7-入水管製造穩定氣泡狀態下，麥克風數據的原始數據平均

麥克風	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
入水口	440.74	260.11	250.55	387.16	508.05	502.02	497.20	485.23	156.19	492.87	398.01
雜訊	340.56	261.15	241.96	362.12	508.85	506.76	493.61	457.17	494.53	496.90	416.36

表 8-入水管製造穩定氣泡狀態下，壓電片數據的原始數據平均

壓電片	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
入水口	27.81	28.33	89.60	28.49	27.08	73.49	94.36	27.25	45.53	26.14	46.81
雜訊	27.80	27.59	27.32	27.65	27.10	81.37	87.89	27.26	27.42	26.61	38.80

藉由表 7 及表 8 可進一步驗證：在未主動打入氣泡的聲音(震動)的大小差異較有主動打入氣泡的聲音(震動)的大小差異小。

表 9-出水口製造穩定氣泡狀態下，麥克風數據的標準差

麥克風	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
出水口	197.12	208.26	218.81	199.08	205.59	204.00	212.73	190.61	215.39	202.65	205.42
雜訊	33.11	44.20	23.56	18.41	96.62	91.21	79.63	32.15	36.55	49.38	50.48

表 10-出水口製造穩定氣泡狀態下，壓電片數據的標準差

壓電片	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
出水口	3.91	4.02	4.14	3.74	3.64	3.68	3.82	3.35	3.65	3.80	3.78
雜訊	2.92	3.25	3.11	2.81	2.93	3.18	2.75	2.96	3.09	2.75	2.97

表 11-出水口製造穩定氣泡狀態下，麥克風數據的原始數據平均

麥克風	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
出水口	159.45	228.77	297.77	280.58	287.35	301.77	315.62	308.37	214.92	295.91	269.05
雜訊	42.02	86.44	257.00	234.52	232.96	243.65	282.64	272.53	275.12	253.00	217.99

表 12-出水口製造穩定氣泡狀態下，壓電片數據的原始數據平均

壓電片	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
出水口	61.49	62.40	61.48	61.76	62.06	59.93	60.47	60.87	61.05	60.60	61.21
雜訊	61.08	62.59	61.82	61.70	60.12	60.99	61.05	60.65	60.65	61.12	61.18

由上述圖表可知，從入水管製造氣泡麥克風標準差平均為 141.30，雜訊平均 24.6；從出水管製造氣泡麥克風標準差平均為 205.42，雜訊平均 50.48。入水管製造氣泡壓電片標準差平均為 19.65，雜訊平均 13.26；出水管製造氣泡壓電片標準差平均為 61.21，雜訊平均 61.18。

而從上述及實驗二可觀察並進一步驗證：未主動打入氣泡的振幅起伏較有主動打入氣泡的振幅起伏小，且從出水口打入氣泡的振幅起伏較從入水口打入氣泡大。

討論：

- (一)從入水管製造氣泡與出水管製造氣泡的標準差表格中可看出，打入氣泡後的標準差明顯較前 10 秒(無氣泡時)雜訊大，這可進一步驗證，有無氣泡對產生聲波及振動高度相關。
- (二)從實驗的圖表及標準差可明顯觀察出，從出水口打入氣泡的聲音(振動)的大小差異較從入水口打入氣泡大，推測可能是：
 - 1.感測器距離出水口較近，氣泡產生的衝擊未因距離而減少，因此測到的值較大。

2.從出水口打入的氣泡會匯聚在一起，產生的衝擊較大，因此測到的值較大。

3.從出水口打入的氣泡與吸管管壁較密合，氣泡產生的衝擊較大，因此測到的值較大。

(三)由於實驗中明顯可見從出水口打入氣泡的數據較從入水口打入大，故後面實驗我們皆從出水口打入氣泡。

實驗四、比較氣泡進入吸管後水流速度對發聲的差異

此實驗中的壓電片數據代表氣泡在管壁摩擦造成的管壁振動。

先將從出水口製造穩定氣泡的所有數據去除前端空白平均雜訊。再開啟抽水馬達並測量 10 秒，然後再將打氣機開啟測試 25 秒(不關抽水馬達)，共計 35 秒。抽水馬達測試 4.5V、6V、9V、12V 四種電壓(伏特數愈高；流速愈快)，每種電壓測試 5 次。

先將抽水馬達調整至 4.5V 並從出水管製造穩定氣泡的所有數據去除前端空白平均雜訊，如下圖，並再將數據整理成表 13、14。

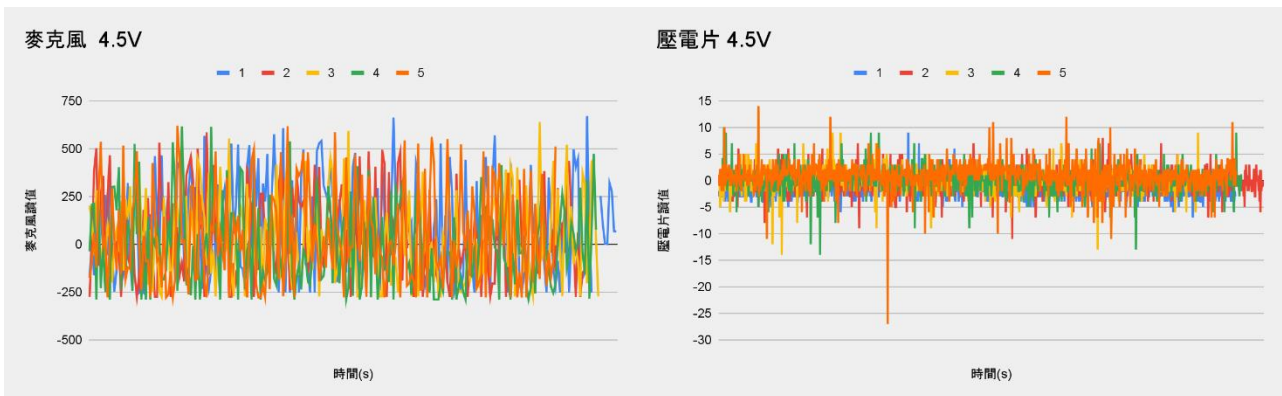


表 13-在抽水馬達 4.5V、從出水口製造穩定氣泡狀態下，麥克風原始數據的平均

麥克風	1	2	3	4	5	平均
4.5v	339.32	321.60	315.70	282.06	319	315.60
雜訊	253.10	268.82	259.39	284.15	278	268.63

表 14-在抽水馬達 4.5V、從出水口製造穩定氣泡狀態下，壓電片原始數據的平均

壓電片	1	2	3	4	5	平均
4.5V	69.00	70.90	72.94	73.00	68	70.76
雜訊	70.56	71.24	73.37	73.36	67	71.13

接著將抽水馬達調整至 6V 並從出水口製造穩定氣泡的所有數據去除前端空白平均雜訊，如下圖，並再將數據整理成表 15、16。從下兩圖中可見訊號具有極大的振盪幅度，且數個離散且大幅度的峰值。

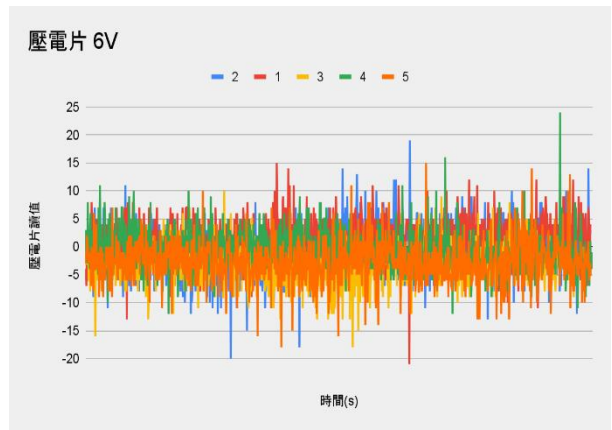
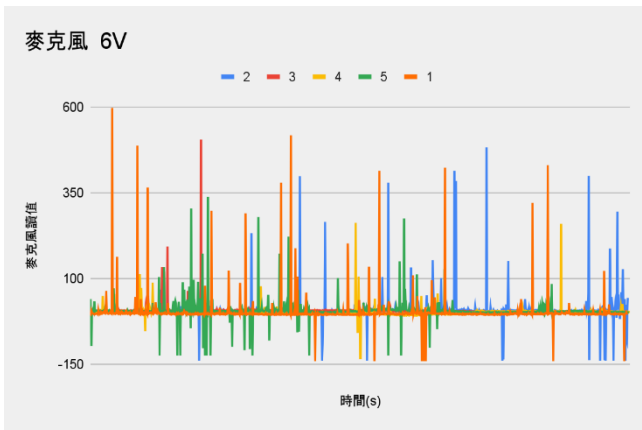


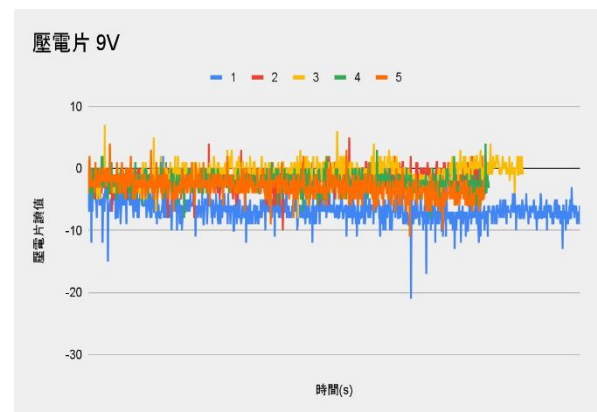
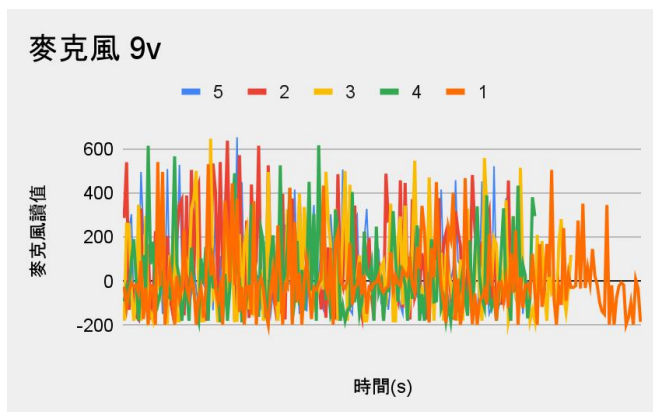
表 15-在抽水馬達 6V、從出水口製造穩定氣泡狀態下，麥克風原始數據的平均

麥克風	1	2	3	4	5	平均
6V	143.32	148.43	135.03	133.62	131.55	138.39
雜訊	139.93	140.24	128.22	132.18	124.82	133.08

表 16-在抽水馬達 6V、從出水口製造穩定氣泡狀態下，壓電片原始數據的平均

壓電片	1	2	3	4	5	平均
6V	72.28	75.43	77.86	78.55	77.35	76.29
雜訊	70.82	76.19	80.98	78.98	79.96	77.38

再將抽水馬達調整至 9V 從出水管製造穩定氣泡的所有數據去除前端空白平均雜訊，如下圖。



從壓電片的圖中可見，其波型有一定的規律性，振盪幅度不大且數據較集中。

表 17-在抽水馬達 9V、從出水口製造穩定氣泡狀態下，麥克風原始數據的平均

麥克風	1	2	3	4	5	平均
9V	201.88	269.43	218.33	203.31	203.31	219.25
雜訊	175.94	169.96	163.72	174.15	144.63	165.68

表 18-在抽水馬達 9V、從出水口製造穩定氣泡狀態下，壓電片原始數據的平均

壓電片	1	2	3	4	5	平均
9V	78.29	74.03	71.18	64.69	59.99	69.64
雜訊	85.15	76.60	71.72	66.84	63.34	72.73

最後將抽水馬達調整至 12V 從出水管製造穩定氣泡的所有數據去除前端空白平均雜訊，如下圖。

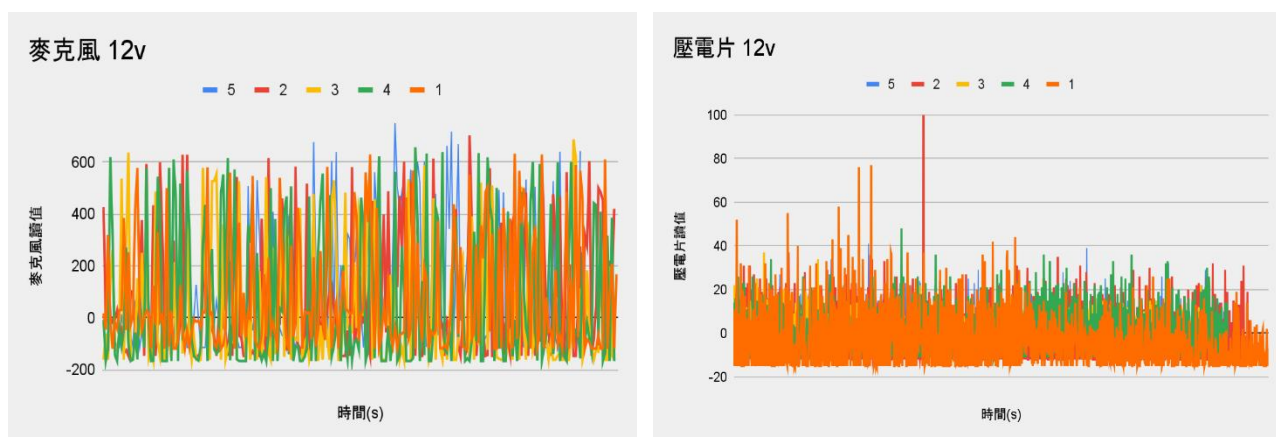


表 19-在抽水馬達 12V、從出水口製造穩定氣泡狀態下，麥克風原始數據的平均

麥克風	1	2	3	4	5	平均
12V	198.02	228.53	199.33	238.54	213.45	215.57
雜訊	109.46	140.43	155.75	140.91	110.54	131.42

表 20-在抽水馬達 12V、從出水口製造穩定氣泡狀態下，壓電片原始數據的平均

壓電片	1	2	3	4	5	平均
12V	11.83	9.60	5.03	12.35	6.52	9.07
雜訊	14.76	12.35	1.69	11.19	1.46	8.29

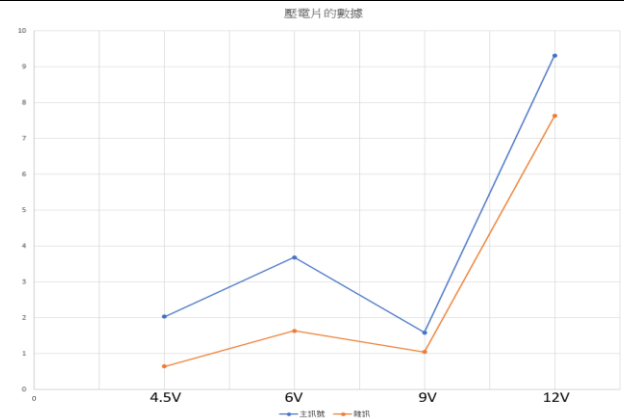
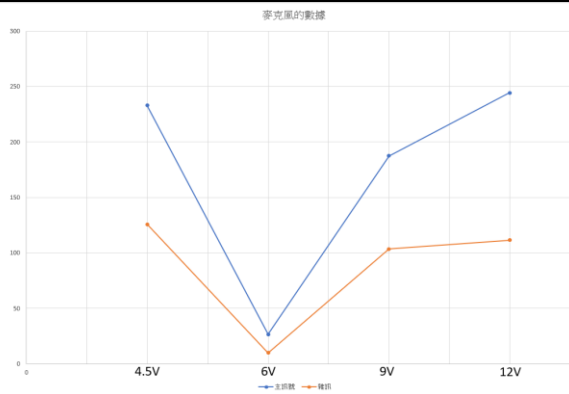
為比較馬達在不同電壓下的標準差，將所有數據整理如下表 3-9、3-10，並繪製折線圖，以利分析

表 21-抽水馬達在不同電壓、從出水口製造穩定氣泡狀態下，麥克風數據的標準差

麥克風	1	2	3	4	5	平均
4.5V	255.13	219.00	215.04	223.56	252	232.97
4.5V 雜訊	134.54	125.87	89.56	174.14	104	125.71
6V	46.21	38.63	17.68	15.04	15.04	26.52
6V 雜訊	4.42	26.68	4.73	2.45	11.95	10.05
9V	161.72	214.07	196.82	184.14	179.99	187.35
9V 雜訊	124.23	78.51	95.95	117.49	100.83	103.40
12V	221.84	245.64	240.54	273.93	239.35	244.26
12V 雜訊	90.43	131.59	110.18	113.98	111.57	111.55

表 22-抽水馬達在不同電壓、從出水口製造穩定氣泡狀態下，壓電片數據的標準差

壓電片	1	2	3	4	5	平均
4.5V	1.34	2.05	2.08	2.10	3	2.02
4.5V 雜訊	0.64	0.66	0.58	0.56	1	0.64
6V	3.68	4.08	3.40	3.53	3.72	3.68
6V 雜訊	1.39	1.33	1.64	1.53	2.27	1.63
9V	1.78	1.53	1.60	1.33	1.67	1.58
9V 雜訊	1.36	0.78	1.16	1.00	0.92	1.04
12V	12.85	11.81	5.24	10.31	6.28	9.30
12V 雜訊	13.60	11.36	3.16	7.66	2.31	7.62



討論：

實驗中觀察到 6V 及 9V 的數據平均及聲音(震動)大小差異的遞增現象較不明顯，推測原因如下：

- (一)由於抽水馬達的正常工作電壓為 12V，因此小於 12V 的數據較不穩定。
- (二)由最後兩張圖觀察發現，當電壓處於特定中介區間（麥克風 6V、壓電片 9V）時，聲音(震動)的大小差異出現明顯凹陷。本研究推測此現象源於兩組動力系統的拮抗作用：在低電壓時，抽水馬達產生的阻力較小，打氣馬達能輕易將氣泡推入並使其快速移動；而在高電壓時，則由抽水馬達強效帶動氣泡。當電壓處於中間過渡狀態時，兩者的推動力可能趨於平衡或產生相互干擾，導致氣泡運動特徵變得平緩，進而使聲音(震動)的大小差異降至最低。
- (三)因主訊號在不同電壓下的聲音(震動)的大小差異較雜訊大，可知氣泡對振動及發聲有影響。

實驗五、比較氣泡與吸管的密合度對發聲的差異

為更好地控制氣泡從出水口的打入位置，我們改為使用較細的出氣管進行實驗。先將從出水管中央製造穩定氣泡的所有數據去除前端空白平均雜訊，如下圖。

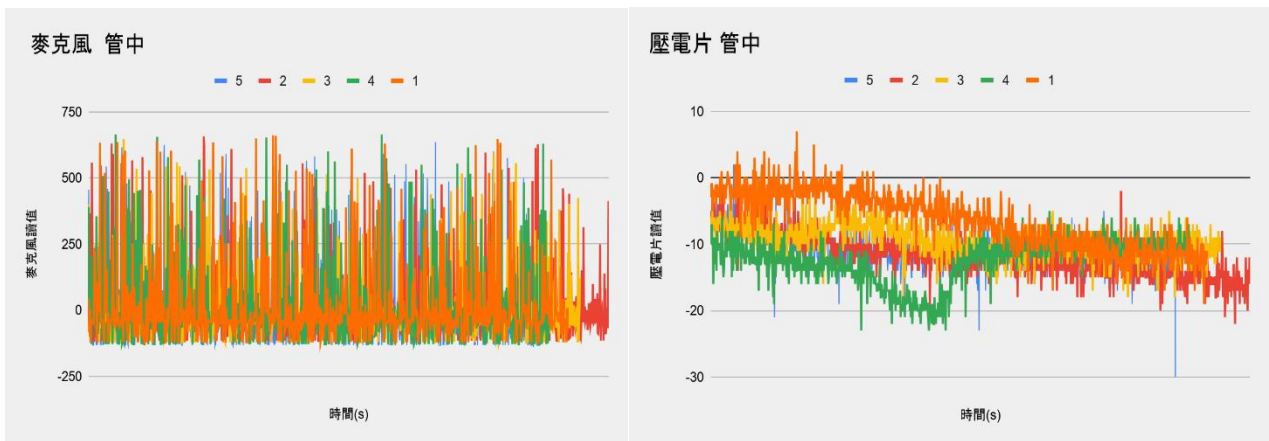


表 23-從出水管中央製造穩定氣泡狀態下，麥克風原始數據的平均

麥克風	1	2	3	4	5	平均
主訊號	127.30	99.18	119.38	141.60	136.72	124.84
雜訊	120.69	114.59	119.63	124.90	128.60	121.68

表 24-從出水管中央製造穩定氣泡狀態下，壓電片原始數據的平均

壓電片	1	2	3	4	5	平均
主訊號	85.57	99.18	74.59	73.46	86.23	83.81
雜訊	92.61	111.08	84.12	86.85	96.72	94.27

接著將從出水管壁製造穩定氣泡的所有數據去除前端空白平均雜訊，如下圖。

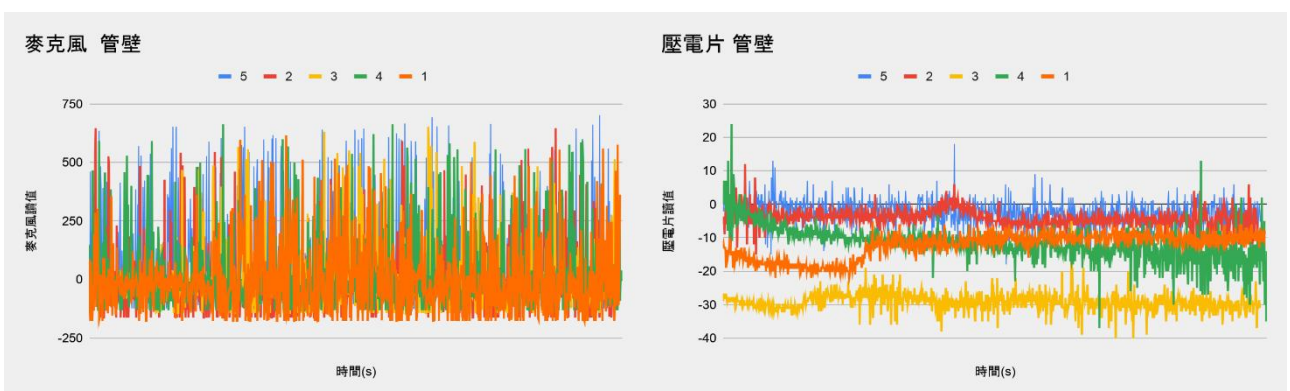


表 25-從出水管壁製造穩定氣泡狀態下，麥克風原始數據的平均

麥克風	1	2	3	4	5	平均
管壁	144.30	135.32	127.77	145.22	188.11	148.14
雜訊	127.30	151.93	132.86	120.32	112.30	128.94

表 26-從出水管壁製造穩定氣泡狀態下，壓電片原始數據的平均

壓電片	1	2	3	4	5	平均
管壁	112.58	97.99	106.80	102.47	94.42	102.85
雜訊	126.02	102.74	137.35	113.79	96.51	115.28

表 27-從出水口不同位置製造穩定氣泡狀態下，麥克風數據的標準差

麥克風	1	2	3	4	5	平均
管壁	144.30	135.32	127.77	145.22	188.11	148.14
管壁雜訊	127.30	151.93	132.86	120.32	112.30	128.94
管中	136.90	130.65	116.92	147.48	147.56	135.90
管中雜訊	119.93	119.59	127.80	132.55	137.97	127.57

表 28-從出水口不同位置製造穩定氣泡狀態下，壓電片數據的標準差

壓電片	1	2	3	4	5	平均
管壁	3.70	2.52	2.64	5.21	3.68	3.55
管壁雜訊	7.42	2.60	3.56	10.86	2.17	5.32
管中	4.28	3.12	2.34	3.39	8.09	4.25
管中雜訊	2.12	3.28	1.83	3.62	6.73	3.52

為比較管壁和管中的標準差，我們將訊號標準差的平均減去雜訊標準差平均，如下表

標準差	麥克風	壓電片
管壁	19.20	-1.77
管中	8.33	0.73

由於上述實驗中感測器距離氣泡打入口較遠，氣泡貼近管壁的效果未如預期且共振較難傳遞至靠近出水口的感測器，為確認結果並非來自實驗裝置誤差，我們將感測器位置移至氣泡打入處，再進行一次實驗。下圖為從出水管壁製造穩定氣泡並將感測器放置在出氣泡口的所有數據去除前端空白平均雜訊，如下圖。

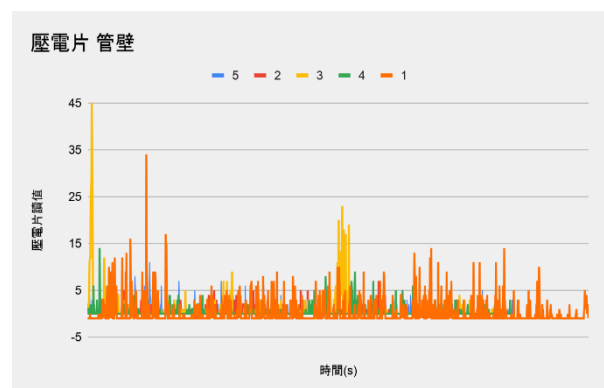
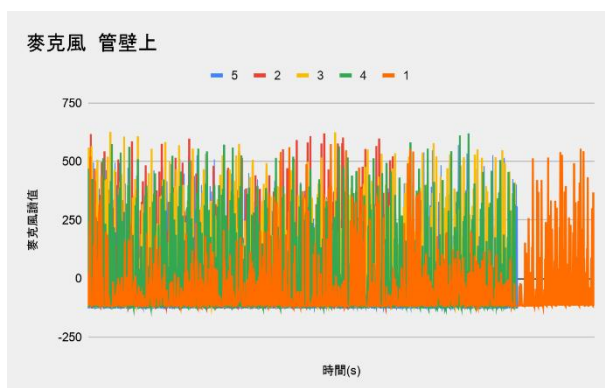


表 29-從出水口管壁製造穩定氣泡並將感測器貼在氣泡出氣口狀態，麥克風數據的標準差

麥克風	1	2	3	4	5	平均
位於出氣口	125.72	190.79	190.05	180.98	176.03	172.71
雜訊	192.17	196.61	189.39	187.57	193.96	191.94

表 30-從出水口管壁製造穩定氣泡並將感測器貼在氣泡出氣口狀態，壓電片數據的標準差

壓電片	1	2	3	4	5	平均
位於出氣口	2.79	0.86	3.06	1.07	1.01	1.76
雜訊	1.12	1.24	0.57	0.96	0.61	0.90

表 31-從出水口管壁製造穩定氣泡且感測器貼在氣泡出氣口狀態下，麥克風原始數據的平均

麥克風	1	2	3	4	5	平均
位於出氣口	65.61	119.47	126.04	118.21	116.65	109.20
雜訊	113.84	121.33	115.74	121.71	127.00	119.92

表 32-從出水口管壁製造穩定氣泡且感測器貼在氣泡出氣口狀態下，壓電片原始數據的平均

壓電片	1	2	3	4	5	平均
位於出氣口	1.43	0.26	0.78	0.36	0.40	0.65
雜訊	0.33	0.33	0.13	0.27	0.19	0.25

討論：

從上述實驗中可見，沿管壁打入氣泡的聲音(震動)的大小差異略大於自管中央打入氣泡的數據振盪幅度，推測原因如下：

- (一)因打氣裝置在運作時亦會有振動的情況，在沿管壁打入氣泡組中又將打氣管直接貼緊黏有感測器的管壁，故收到的訊號較大。
- (二)在實驗中我們有發現出氣孔的周圍有一小塊的區域皆為空氣，所以可能是因為氣泡摩擦管壁，或受水流衝擊時產生振動，而此振動再共振傳遞至感測器。

伍、討論

- 一、從實驗一可發現，紙吸管的聲音(震動)的大小差異及平均較塑膠吸管的聲音(震動)的大小差異及平均大，推測是由於紙吸管較軟且內壁仍略較塑膠吸管粗糙，因此氣泡與管壁摩擦所造成的振動較明顯，因而造成此現象的發生。
- 二、文獻顯示植物在乾旱情況下發聲有明顯週期性，而在受傷情況下發聲隨機性較強，與我們在實驗三結果中氣泡從入水管進入聲音(震動)的大小差異較小、從出水管進入聲音(震動)的大小差異較大，波型較雜亂的實驗結果呼應，因此推測植物在乾旱情況下，氣泡是在根部吸收水分時，因水分不足而造成其在維管束中產生氣泡，進而發聲；而受傷時氣泡則由受傷處的維管束進入。
- 三、從實驗四與實驗五可發現，實驗五中的標準差及平均皆略小於實驗四同為 12V 電壓的數據，推測是由於實驗五中使用的出氣管口徑較小，所產生的氣泡較小，而造成氣泡與管壁摩擦的現象較不明顯，因而造成此現象；此項結果亦證明我們收取到的數據與氣泡相關。
- 四、從實驗二和三中可觀察到，未主動打入氣泡的聲音(震動)的大小差異較有主動打入氣泡的振幅起伏小，這與我們原先的假設相符，推論是因為氣泡經過吸管時造成振動。
- 五、從實驗四中我們發現水流速度越快，氣泡摩擦所產生的訊號及聲音(震動)的大小差異將會越大，推測原因如下：
 - (一)水流速度的不同可能會造成氣泡與水流撞擊的力道不同進而影響發出的聲音大小。
 - (二)水流的流速越快，被帶動向前的氣泡速度越快，所以與管壁的摩擦力道也會越大。

陸、結論

一、依照我們實驗結果分析，我們得到以下幾點結論：

- (一) 水錘效應僅具備瞬間振動特徵，與植物受傷後「持續發聲」的現象不符，證實水錘非主要發聲成因。
- (二) 水中切斷產生的振幅大於在空氣環境切斷的振幅，主因是水的密度高且具不可壓縮性，能比空氣更有效地傳遞機械應力波，支持了維管束液體環境對發聲的重要性。
- (三) 從出水口打入氣泡產生的衝擊較從入水口打入氣泡大，代表氣泡從植物受傷的剖面進入時，產生的振動和聲音較氣泡從根部進入維管束時更大。
- (四) 抽水馬達在 12V 時接收到的訊號最大，表示氣泡的流速及與管壁的摩擦對發聲及聲音(震動)大小差異的影響大，此結果表示植物維管束內的蒸散作用強度會影響空蝕發聲。當植物受壓迫導致流體劇烈變動時，氣泡在導管的快速位移可能是造成「尖叫」訊號被偵測到的主要物理原因。
- (五) 將感測器放置於出氣口可得較大的訊號，證實氣泡的摩擦影響發聲及振盪大，推測造成原因為出氣口的一圈氣泡再被水流沖散前與管壁摩擦，摩擦的振動再經與吸管共振產生聲音及擴大振盪。
- (六) 綜合壓電片與麥克風數據特徵，推論植物發聲機制之一為氣泡摩擦的結果。

二、未來展望

- (一) 為了減少實驗環境內繁雜且無序的背景雜訊，我們希望在未來可以研究並製作聲音隔離屏蔽系統，盡量將每一分細微的噪音干擾降至最低。透過噪訊控管，希望可以採集到具備高度代表性的實驗數據，讓最終呈現的研究成果與現實中的植物維管束之數據可以有高度相關性。
- (二) 因植物維管束所產生的原始訊號多為超聲波，為了精確地擷取氣泡在微小管徑中震盪的原始波形，我們希望未來能使用超聲波感測器。透過提升採樣頻率至 20kHz 以上，將能進一步證實植物維管束發聲的機制。
- (三) 透過調整光照、溫度等，藉由改變環境來更改植物的蒸散速度，觀察蒸散速度不同時是否會造成如實驗結果所述的情形發生。

柒、參考文獻資料

1. Itzhak Khait 和 Ohad Lewin-Epstein(2023), Sounds emitted by plants under stress are airborne and informative, Cell, from:

<https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674%2823%2900262-3>

2. 劉詠鯤（2021）。香檳聲音哪裡來？。台大科學教育發展中心 CASE 報科學。取自：

<https://case.ntu.edu.tw/blog/?p=36218>

3. 羅云煊，曾怡璇，劉義凡（2024）。莖聲尖叫—探討被子植物在受到傷害時的超聲波差異。新竹市第 42 屆中小學科學展覽會作品說明書（國中組生物科第一名）。取自：

<https://science.hc.edu.tw/fileUpload/winningEntries/113年度國中組生物第一名1030-04373674.pdf>

4. 羅云煊，曾怡璇，劉義凡（2024）。莖聲尖叫—探討被子植物在受到傷害時的超聲波差異。中華民國第 64 屆中小學科學展覽會作品說明書(國中組生物科第二名)。取自：

<https://science.hc.edu.tw/fileUpload/winningEntries/113年度國中組生物第一名1030-04373674.pdf>

5. 胡中行（2023）。植物也會渴到「尖叫」？科學家發現植物受壓迫時會發出超音波。泛科學。取自：<https://pansci.asia/archives/363748>

【作品內圖表照片說明】

本作品『「蝕」破天「莖」-探討植物受傷時發聲的物理機制』內容之所有照片、圖片、圖表，皆由作者自行拍攝、繪製。

附錄 1：壓電片程式碼

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  Serial.println("CLEARDATA");  
  Serial.println("LABEL,Time(ms),Piezo");  
}  
void loop() {  
  int v = analogRead(A0);  
  
  Serial.print("DATA,TIME,");  
  Serial.println(v);  
  
  delay(20);  
}
```

附錄 2：總裝置程式碼

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  
  Serial.println("CLEARDATA");  
  Serial.println("LABEL,Time(ms),Piezo,Mic");  
}  
  
void loop() {  
  int piezoValue = analogRead(A0); // 壓電片  
  int micValue = analogRead(A1); // 麥克風  
  
  Serial.print("DATA,TIME,");  
  Serial.print(piezoValue);  
  Serial.print(",");  
  Serial.println(micValue);  
  
  delay(20); // 取樣間隔  
}
```