

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

080110

笛管新聲-探討簧片對笛子聲音之影響

學校名稱： 臺中市龍井區龍海國民小學

作者：	指導老師：
小六 潘政韋	李義評
小六 陳彥霖	李國甄
小六 林哲宇	
小六 王湧玹	
小六 林鎧瑄	
小五 吳禹叡	

關鍵詞： 簧片、直笛、頻率

笛管新聲-探討簧片對笛子聲音之影響

摘要

直笛是每位學生必學樂器，加上簧片巧思，創作出簧片直笛。實驗變因控制為形狀（三角形、梯形、長方形），厚度以及材質。運用問題解決，開發出雷射切割簧片及板擦機吹氣，將人為誤差去除。實驗發現，三角形簧片會將頻率往上移動，上升最大 59.2%。梯形簧片，當簧片寬度越寬，振動頻率越低。長方形簧片，簧片長度越長，振動頻率越高。當厚度越厚，頻率會變低。不同材質簧片，發現投影片簧片頻率變化最佳。從共振分析得知，當簧片振動頻率接近笛子自然頻率，音量增加。當簧片振動頻率沒有接近笛子自然頻率時，無法發出聲音。原本學生常用的高音笛，配合簧片替換創新，可吹出超高音笛的聲音。「笛管新聲可創造出不同音域的巧妙變化」。

壹、前言

一、研究動機

從國小三年級，人手一支直笛，上音樂課可以吹，下課時，也看到同學練習交流，教室與走廊常聽到悅耳的直笛聲。在自然課有一個單元介紹聲音，科學營也有自製吸管直笛，吸管長度改變導致聲音高低的變化。當吸管長、吹出聲音低；而吸管短、聲音會變高。學校快閃活動時，表演同學用口琴吹出響亮的樂音，查詢資料，發現口琴發聲是因簧片振動，於是突發奇想，想研究是否可以將直笛加上簧片，吹出不同的樂音？我們想在此次科展，深入的探討直笛+簧片，是否能生成「笛管新聲」-簧片直笛。

二、研究目的與問題

資料收集與本研究之目的透過不同形狀、長度、寬度、厚度材質，來分析自製「簧片直笛」使音高及音量產生了什麼變化。研究問題如下：

- (一)、三角形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響？
- (二)、三角形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響？
- (三)、梯形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響？
- (四)、梯形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響？
- (五)、長方形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響？
- (六)、長方形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響？
- (七)、不同厚度對「音調」、「音量」的影響？
- (八)、不同材質對「音調」、「音量」的影響？

貳、資料收集與文獻閱讀

一、國小直笛簡介

常用音域與指法：

序號	音域	指法
1	1:0	1234567
2	2:0	123456
3	3:0	12345
4	4:0	123467
5	5:0	123
6	6:0	12
7	7:0	1



二、Audacity

Audacity 是一款免費、跨平台的多音軌聲音編輯與錄製軟體。可在 macOS、Microsoft Windows 和其它作業系統上運作。

三、頻率音名唱名對照表：

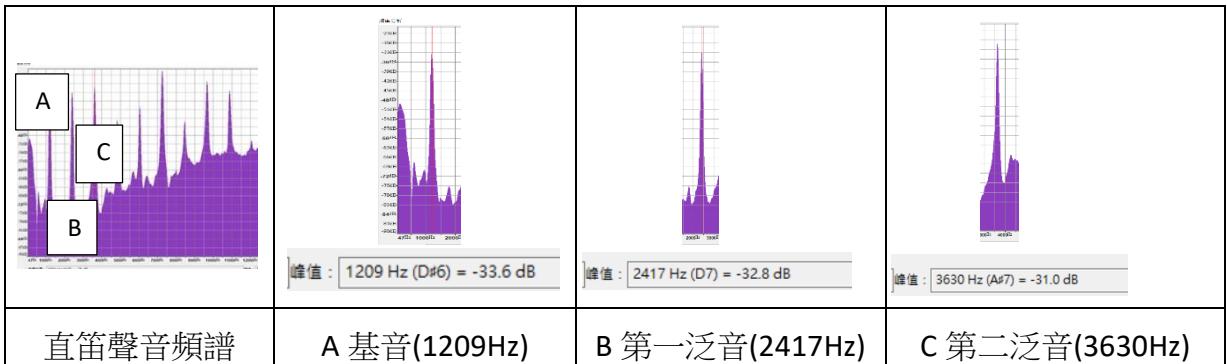
唱名	Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si
音名	C2	D2	E2	F2	G2	A2	B2
頻率 Hz	65.4	73.4	82.4	87.3	98.0	110.0	123.5
音名	C3	D3	E3	F3	G3	A3	B3
頻率 Hz	130.8	146.8	164.8	174.6	196.0	220.0	246.9
音名	C4	D4	E4	F4	G4	A4	B4
頻率 Hz	261.6	293.6	329.6	349.2	392.0	440.0	493.9
音名	C5	D5	E5	F5	G5	A5	B5
頻率 Hz	523.2	587.3	659.3	698.5	784.0	880.0	987.8

四、空氣柱：

音調是由發音體振動的頻率來決定的，發音體每秒的振動頻率愈大，發音的音調就會愈高。空氣柱振動發出聲音。空氣柱愈長，波長愈大，頻率愈小，音調愈低；反之，空氣柱愈短，波長愈短，頻率愈大，音調愈高。

五、基音、泛音：[9]

當發聲體由於振動而發出聲音時，聲音一般可以分解為許多單純的波，也就是說所有的自然聲音基本都是由許多頻率不同的波組成的，其頻率是呈倍數關係，其中頻率最低的波即為基音，而其他頻率較高的波則為泛音。



六、共振:[10]

當外界擾動頻率，恰好與物理的固有頻率(自然頻率)相同，即時很小的擾動，也會讓物體產生很大的振盪。

七、文獻閱讀

表 1:歷屆文獻探討

資料來源	主題簡稱	與本研究相關的研究文獻
2009 原住民科展	泰雅口簧大樂隊	不同 長度 的簧片會不會影響音高的表現? 不同 厚度 的簧片會不會影響音高的表現?
108 學年度中小學科學教育專案	「Lubuw」~泰雅口簧琴的科學[4]	探討不同「簧片 長短 」和「音調」、「音量」的變化關係 探討不同「簧片 寬度 」和「音調」、「音量」的變化關係 探討不同「簧片 厚度 」和「音調」、「音量」的變化關係 探討不同「簧片 材質 」和「音調」、「音量」的變化關係 探討不同「簧片 形狀 」和「音調」、「音量」的變化關係
第九屆原住民雲端科展	創客新契機 一童一口簧[5]	1. 簧片長度愈長，音調愈低，簧片長度與音調呈反比。 2. 簧片厚度愈厚，音調愈高，簧片厚度與音調呈正比。 3. 頭尾寬比率 愈大，音調愈低，頭尾寬比率與音調呈反比。

參考表 1，整理出科展相關文獻，得出操縱變因有 1.簧片長度。2.簧片寬度。3.簧片厚度。4.簧片材質。5.簧片形狀。6.簧片頭尾寬比率共 6 項。

應變變因的部分，包含 1.音調(音高)。與 2.音量。

本屆科展的創新點如下：

1.目前跟簧片樂器相關的文獻，揭示原住民傳統樂器：口簧琴。此次科展取材中國傳統樂器：巴烏的簧片進行相關研究。

表 2 口簧琴簧片與巴烏簧片比較

口簧琴簧片(文獻)	巴烏簧片(此次科展)
	

2.將操縱變因進行彙總，以另一種觀點規劃，進行研究。將 1.簧片長度。2.簧片寬度。5.簧片形狀。6.簧片頭尾寬比率轉化成簧片三角形、簧片梯形、簧片長方形。如表 3 所示。

表 3 實驗規劃

簧片形狀	頭寬	尾寬	相關實驗規劃
三角形	0	1	三角形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響
			三角形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響
梯形	0~1	1	梯形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響
			梯形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響
長方形	1	1	長方形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響
			長方形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響

參、研究設備與器材

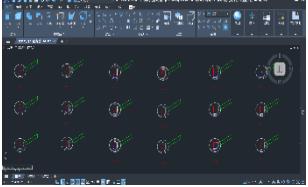
			
平板錄音	MY Edit	Audacity 軟體	Zwcad 繪圖軟體
			
板擦機	雷切機	笛子	PET(投影片)

圖 1 研究設備與器材

肆、研究流程與方法

一、研究流程

步驟一:控制送氣

使用板擦機固定送氣，送氣處連接水管，延伸水管到教室外送氣，使用平板錄音(如圖 2)。

		
透過板擦機送氣	使用水管連接教室外送氣	教室外測音頻

圖 2 板擦機送氣說明圖

步驟二:控制簧片

使用 Zwcad 畫簧片設計圖，將簧片雷切，原本手切簧片全部改為雷切，降低人為誤差，讓簧片更精準(如圖 3)。

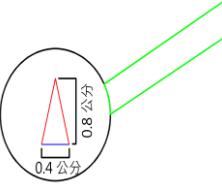
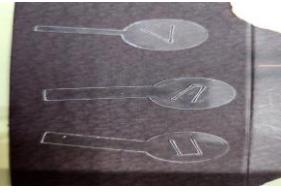
			
Zwcad 畫簧片設計圖	雷切機雷切簧片	各種形狀的簧片	按照實驗順序排列雷切片

圖 3 控制簧片雷切簧片說明圖

步驟三:控制音孔

原本是手按音孔，後改成貼紙貼住音孔，為誤差。

步驟四:放置簧片

將雷切簧片放置笛頭與笛身中間(如圖 4)。

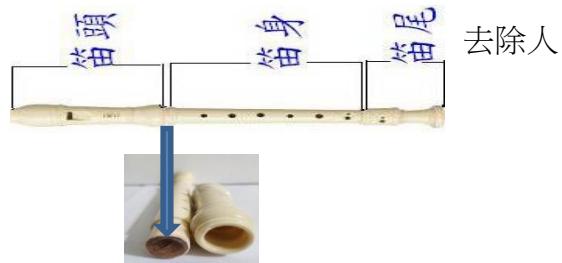
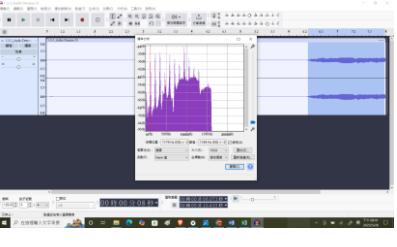


圖 4 簧片位置圖

步驟五:測音頻

消除背景噪音使用 MY Edit 軟體去除背景噪音，將消除噪音的音檔使用 Audacity 軟體測音頻(如圖 5)。

		
MY Edit 去除噪音	Audacity 分析音頻	分析頻譜圖

步驟六:改良笛子抽換式簫片(如圖 6)

將笛子吹頭切出一條細縫，方便更換簫片，細縫處用膠帶貼住以防聲音從隙縫跑出。



圖 6 笛子抽換簫片說明圖

步驟七:原始笛子(未加簫片)測出音頻為基準音

進行實驗前，對直笛不同唱名進行頻率及音量檢測，每一種唱名，進行三次實驗，所得結果如表 5 及表 6 所述，作為實驗一到實驗八比較基準。

表 4:直笛不同唱名頻率、音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	539	24.1	598	29.1	675	22.1	712	23.5	803	16.0	897	18.4	1019	17.0
第二次	539	24.8	594	23.1	676	22.5	713	23.5	805	16.2	903	19.6	1009	22.5
第三次	538	26.0	593	18.0	673	22.6	710	24.6	801	20.8	898	21.0	1005	23.9
平均	538.7	25.0	595.0	23.4	674.7	22.4	711.7	23.9	803.0	17.7	899.3	19.7	1011.0	21.1

笛子分類與音域如下表。

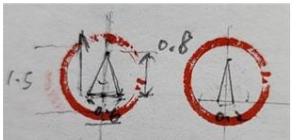
表 5 直笛音域表

制式	英文名	音域	照片
最高音笛 (短笛)	garklein	C ³ - d ⁵ 1046HZ- 4698HZ	
超高音笛	sopranino (octave flute)	f ² - g ⁵ 698HZ- 3136HZ	
高音笛	soprano (descant / fifth flute)	c ² - d ⁴ 523HZ- 1174HZ	
中音笛	alto (treble / consort flute)	f ¹ - g ⁴ 349HZ- 784HZ	

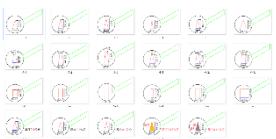
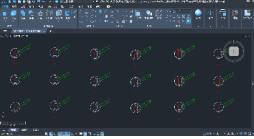
二、研究流程問題解決

1. 簗片製作

第一代簗片

問題解決	說明		
(1) 觀察與定題	製作不同形狀簗片，如何加工？		
(2) 計劃與執行	<p><1>預放置簗片位置的笛子先在紙上蓋印，主要用意是要清楚知道裝置簗片的直徑範圍</p> <p><2>蓋印出圓形圖案後，在紙上設計出實驗一到實驗六所有的簗片形狀與尺寸</p> <p><3>再將笛子放置在投影片上，沿著笛子周圍描繪在投影片上。之後，將描繪笛子周圍外框後的投影片套上剛剛在紙上畫好的設計圖，用油性筆描繪在投影片上</p> <p><4>將描繪的簗片小心地沿著邊緣剪下，再將剪下的簗片放在切割墊上，簗片周圍用膠帶黏貼以防在切割簗片的時候滑脫。</p>		
(3) 分析與發現	<p><1>簗片大小不一致，有時剪完發現太大笛頭闔不上去，或是太小會有空隙就要重做一次。</p> <p><2>其次，在切割簗片的時候，施力太大力簗片切壞，所以人為的施作會有太多的誤差。</p>		
(4) 討論與傳達	是否能找到減少人為的施作會有太多的誤差方法		
			
紙上蓋印	設計簗片形狀與尺寸	描繪笛子外框片	沿著邊緣剪下

第二代簗片

問題解決	說明		
(1) 觀察與定題	雷切機方式製作不同形狀簗片是否可行？		
(2) 計劃與執行	<p><1>先在電腦 Zwcad 繪圖軟體繪製所有的簗片</p> <p><2>將繪製好的簗片，進行雷切</p>		
(3) 分析與發現	用雷切機，雷切邊緣整齊且誤差少		
(4) 討論與傳達	後續實驗使用雷切機切割簗片，增加實驗過程中簗片的穩定性		
			
Zwcad 軟體繪製簗片	雷切機製作簗片	雷切簗片	

2. 笛子吹氣方式

第一代人為吹氣

問題解決	說明
(1) 觀察與定題	每位同學吹出來的笛子聲音，是否會影響音頻？
(2) 計劃與執行	<1>每個人都有負責自己的實驗部分，發現有人會吹不出聲音， <2>固定一個人吹試試看，還是有些音吹不出聲音來。
(3) 分析與發現	以實驗一三角形簧片長度 0.6 公分的實驗數據來比較，之前不同人吹的音頻是 1109.7HZ；固定一個人吹是 1184HZ；音頻是大致一樣。
(4) 討論與傳達	吹氣部份，是否能找到減少吹不出聲音及減少人為誤差方法

第二代 氣球吹氣

問題解決	說明
(1) 觀察與定題	以氣球吹氣，是否能穩定吹出音頻？
(2) 計劃與執行	<1>用打氣機打氣，氣球套住直笛的笛頭，進行吹奏。 <2>用打氣機打氣，氣球套住簧片直笛的笛頭，進行吹奏。
(3) 分析與發現	發現直笛能順利吹奏，但送氣量不太穩定；簧片直笛無法吹出聲音
(4) 討論與傳達	吹氣部份，是否能找到較大送氣量方法

第三代 板擦機吹氣

問題解決	說明
(1) 觀察與定題	用板擦機吹出來的笛子聲音，是否會影響音頻？
(2) 計劃與執行	用板擦機改良人為吹氣方式，優點是送氣過程中不費力，而且可以吹出之前人為吹不出的聲音來。
(3) 分析與發現	以實驗一三角形簧片長度 0.6 公分的實驗數據來比較，機器吹的是 1209HZ；音頻與人為吹氣 1109.7HZ 一致。
(4) 討論與傳達	缺點是機器發出聲聲音太大聲，送氣過程中機器需要隔離，加上去除噪音程式 MY Edit，去除背景聲音。



氣球	打氣筒打氣	套住笛頭吹氣	板擦機吹氣	去除噪音 MY Edit
----	-------	--------	-------	--------------

三、實驗設計架構圖

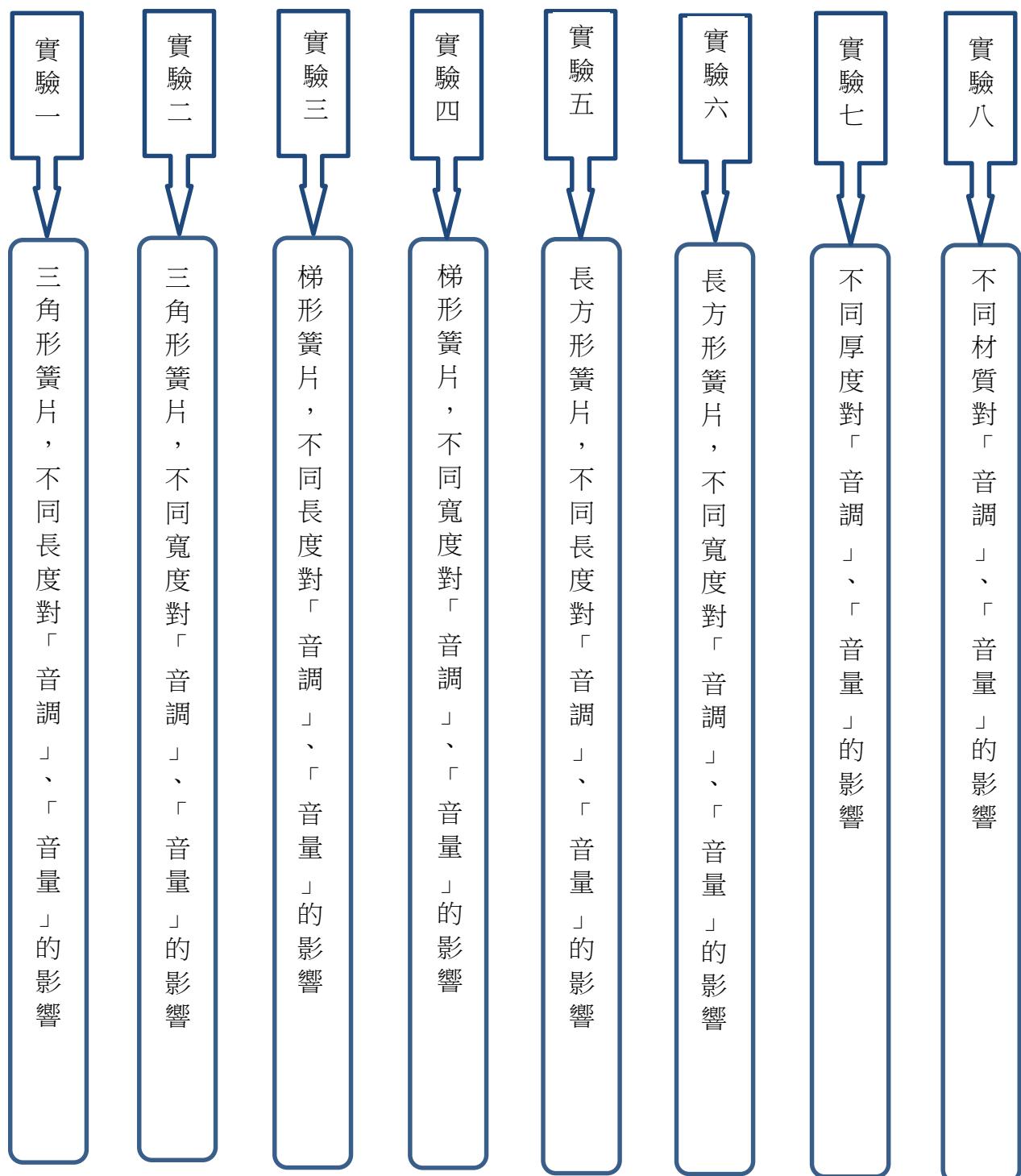


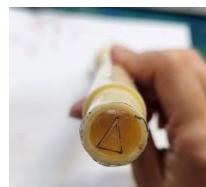
圖 7 實驗設計架構圖

伍、研究結果

實驗一：三角形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響

甲：操縱變因:不同長度(0.6 公分、0.8 公分、1 公分)

乙：控制變因:三角形簧片寬度 0.4 公分，簧片材質，簧片厚度。



丙：實驗結果：如下。

表 6:三角形簧片長度 0.6cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	1109	-19.0	765	-31.3	820	-32.9	826	-29.3	915	-33.5	982	-23.1	1092	-24.1
第二次	1109	-16.1	768	-38.0	823	-31.0	824	-28.6	947	-33.9	950	-23.5	1091	-24.7
第三次	1111	-47.7	768	-36.1	818	-32.1	850	-28.9	926	-27.6	1022	-30.8	1096	-23.3
平均	1109.7	-27.6	767.0	-35.1	820.3	-32.0	833.3	-28.9	929.3	-31.7	984.7	-25.8	1093.0	-24.0

附註:「-」是無法吹出聲音。

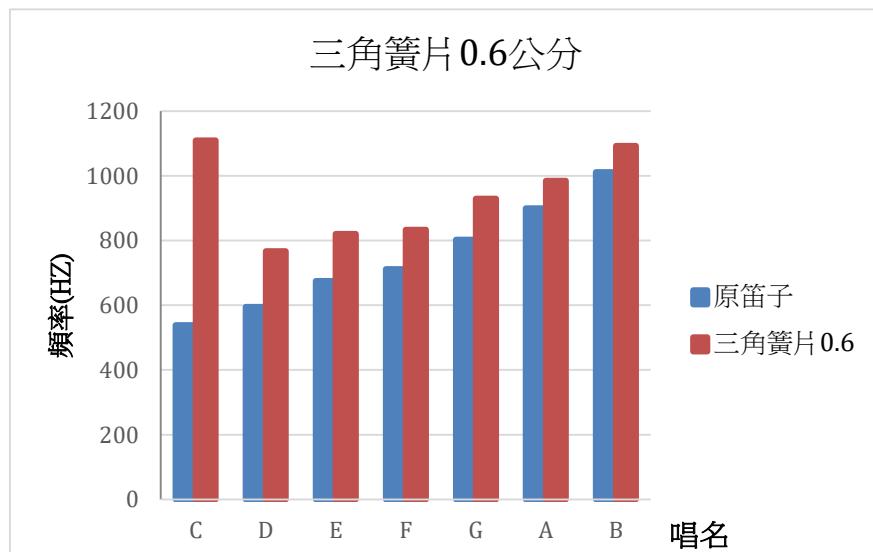


圖 8 三角形簧片長度 0.6cm 與原笛子音頻對照圖

表 7:三角形簧片長度 0.8cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	1038	-20.8	1145	-19.4	-	-	-	-	-	-	1041	-22.7	1113	-17.8
第二次	1051	-22.2	1113	-17.7	-	-	-	-	-	-	1044	-24.0	1145	-19.5
第三次	1044	-23.8	1170	-18.5	-	-	-	-	-	-	1044	-24.0	1170	-18.6
平均	1044.3	-22.3	1142.7	-18.5	-	-	-	-	-	-	1043.0	-23.6	1142.7	-18.6

附註:「-」是無法吹出聲音。

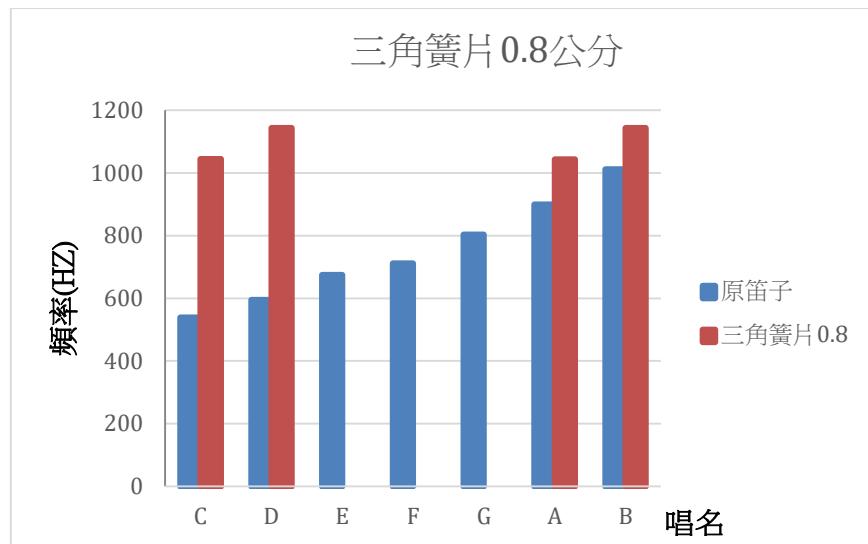


圖 9 三角形簧片長度 0.8cm 與原笛子音頻對照圖

表 8:三角形簧片長度 1.0cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	701	-28.9	689	-39.8	688	-32.8	697	-27.0	849	-22.1	907	-21.3	-	-
第二次	698	-29.7	688	-43.0	688	-28.4	696	-30.9	848	-21.5	907	-21.5	-	-
第三次	694	-30.0	687	-47.4	687	-36.0	696	-33.2	847	-21.8	910	-19.9	-	-
平均	697.7	-29.5	688.0	-43.4	687.7	-32.4	696.3	-30.4	848.0	-21.8	908.0	-20.9	-	-

附註:「-」是無法吹出聲音。

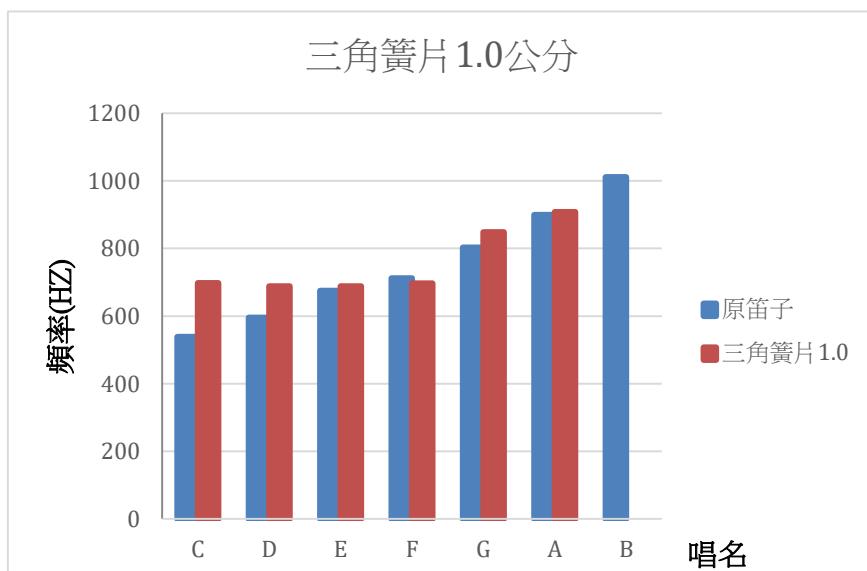


圖 10 三角形簧片長度 1cm 與原笛子音頻對照圖

丁、討論：

從實驗結果整理如下：

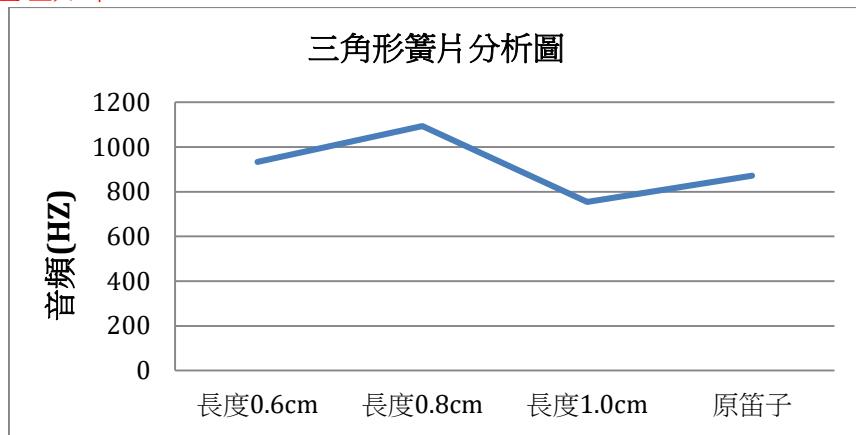


圖 11 三角形簧片分析圖

表 9 三角形簧片不同長度分析表

三角形簧片不同長度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
長度 0.6cm	933.9	-29.3	7	7.1%
長度 0.8cm	1093.2	-20.8	4	25.3%
長度 1cm	754.3	-29.7	6	-13.5%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上三角形簧片(不同長度)時，會產生(1)頻率移動(2)指法無法吹出聲音。長度 1cm 與長度 0.8cm，分別吹出 6 個音及 4 個音。長度 0.8cm 與 0.6cm 三角形簧片與一般直笛比較，會將頻率往上移動，分別上升 25.3% 與 7.1%。

實驗二：三角形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響

甲：操縱變因:不同寬度(0.2 公分、0.4 公分、0.6 公分)

乙：控制變因:三角形簧片長度 0.8 公分，簧片材質，簧片厚度。

丙：實驗結果：如下。

表 10: 三角形簧片寬度 0.2cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	1135	-17.5	1296	-17.9	1774	-23.3	1771	-24.4	1784	-21.8	921	-26.5	1047	-19.1
第二次	1134	-18.7	1296	-17.0	1772	-24.6	1757	-23.2	1783	-22.7	923	-26.7	1048	-18.8
第三次	1135	-19.5	1293	-16.3	1772	-27.9	1778	-26.5	1776	-25.2	921	-26.1	1046	-23.3
平均	1134.7	-18.6	1295.0	-17.1	1772.7	-25.3	1768.7	-24.7	1781.0	-23.2	921.7	-26.4	1047.0	-20.4

附註：「-」是無法吹出聲音。

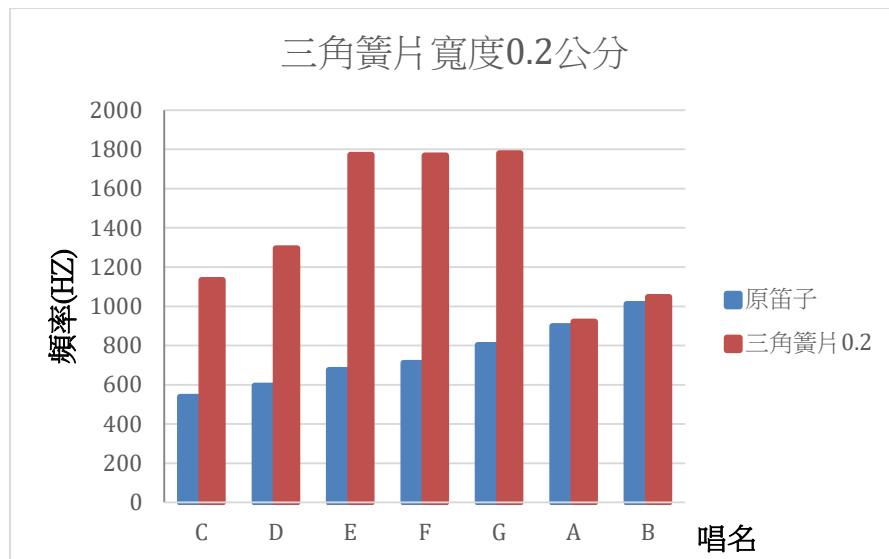


圖 12 三角形簫片寬度 0.2cm 與原笛子音頻對照圖

表 11: 三角形簫片寬度 0.4cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	1124	-34.8	1145	-19.4	847	-27.6	1373	-24.3	888	-29.1	909	-22.6	1018	-16.8
第二次	1116	-36.5	1113	-17.7	864	-27.5	1852	-19.3	882	-25.0	908	-22.0	1021	-17.0
第三次	1114	-37.6	1170	-18.5	877	-27.3	1791	-26.1	883	-27.8	909	-19.6	1026	-17.4
平均	1118.0	-36.3	1142.7	-18.5	862.7	-27.5	1672.0	-23.2	884.3	-27.3	908.7	-21.4	1021.7	-17.1

附註:「-」是無法吹出聲音。

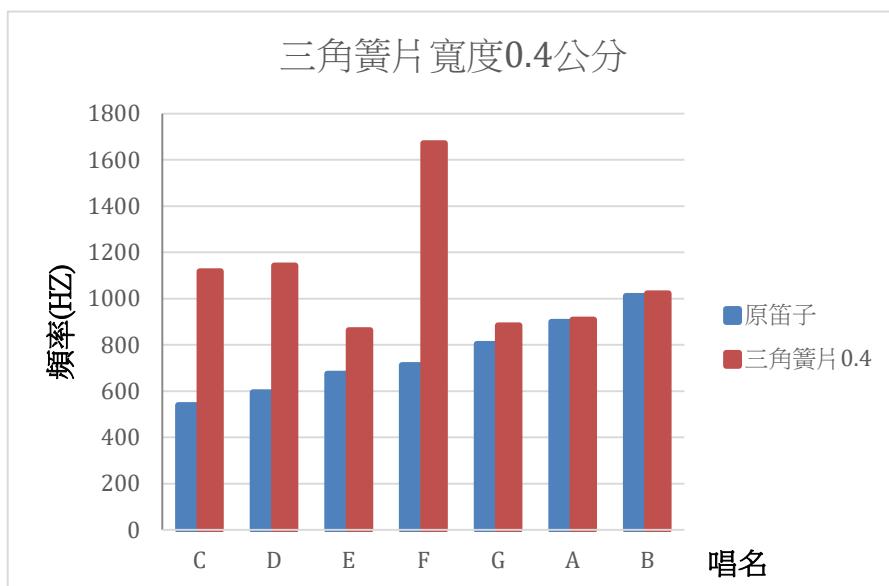


圖 13 三角形簫片寬度 0.4cm 與原笛子音頻對照圖

表 12:三角形簧片寬度 0.6cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	1190	-30.1	1281	-18.7	-	-	-	-	1012	-25.2	1091	-25.6	1161	-22.7
第二次	1193	-34.8	1229	-22.1	-	-	-	-	1039	-27.1	1047	-27.5	1152	-22.5
第三次	1195	-19.1	1289	-19.1	-	-	-	-	1021	-25.8	1059	-25.9	1163	-24.3
平均	1192.7	-28.0	1266.3	-20.0	-	-	-	-	1024.0	-26.0	1065.7	-26.3	1158.7	-23.2

附註:「-」是無法吹出聲音。

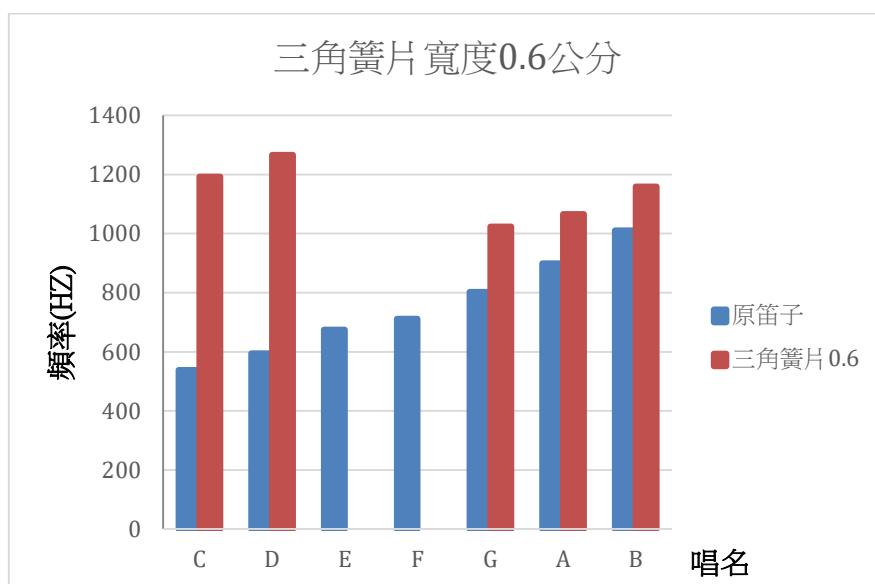


圖 14 三角形簧片寬度 0.6cm 與原笛子音頻對照圖

丁、討論：

從實驗結果整理如下：

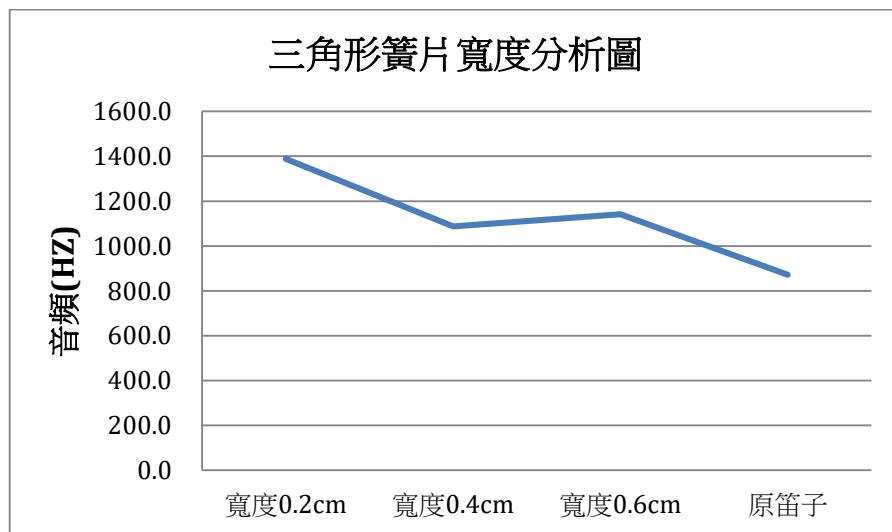


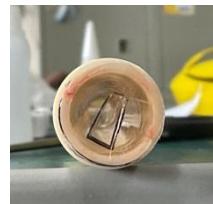
圖 15 三角形簧片寬度分析圖

表 13 三角形簧片不同寬度分析表

三角形簧片不同寬度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
寬度 0.2cm	1388.7	-22.2	7	59.2%
寬度 0.4cm	1087.2	-24.5	7	24.6%
寬度 0.6cm	1141.5	-24.7	5	30.9%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上三角形簧片(不同寬度)時。寬度由 0.2cm 到 0.8cm 變化時，與一般直笛比較，會將頻率有往上移動，上升 24.6%-59.2%。寬度 0.6cm 時，吹出音名數只有 5 個音。

實驗三：梯形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響



甲：操縱變因:不同長度(0.6 公分、0.8 公分、1 公分)

乙：控制變因: 梯形簧片下寬度 0.4 公分，上寬度 0.2 公分簧片材質，簧片厚度。

丙：實驗結果：如下。

表 14:梯形簧片長度 0.6cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	1385	-19.9	1391	-35.5	911	-39.5	909	-25.1	1147	-25.1	1221	-23.7	1364	-21.2
第二次	1382	-18.0	1409	-36.8	915	-34.2	909	-25.9	1148	-25.9	1207	-22.4	1356	-21.7
第三次	1275	-19.9	1397	-31.9	915	-35.3	909	-25.8	1148	-29.8	1198	-20.3	1217	-28.5
平均	1347.3	-19.3	1399.0	-34.7	913.7	-36.3	909.0	-25.6	1147.7	-26.9	1208.7	-22.1	1312.3	-23.8

附註:「-」是無法吹出聲音。

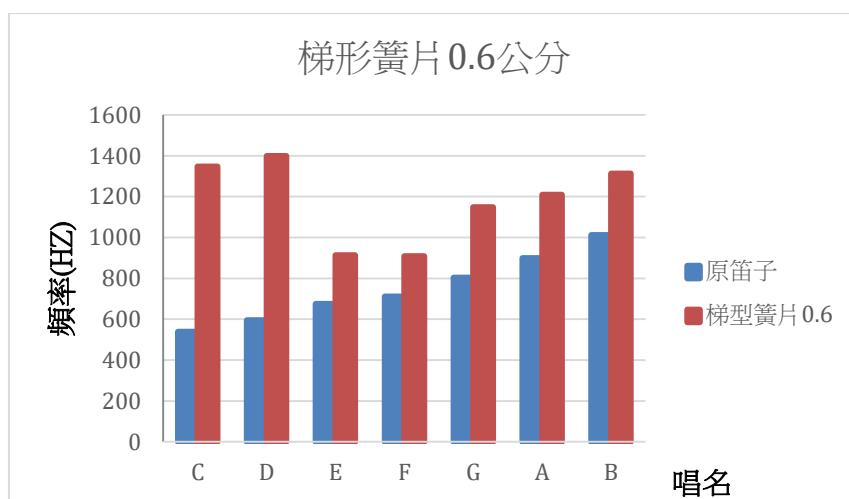


圖 16 梯形簧片長度 0.6cm 與原笛子音頻對照圖

表 15: 梯形簫片長度 0.8cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	784	-37.6	781	-34.6	811	-29.8	818	-26.8	855	-22.1	877	-18.0	1364	-21.2
第二次	767	-34.8	778	-33.3	807	-29.6	818	-26.3	855	-22.2	867	-19.0	1356	-21.7
第三次	775	-36.1	780	-33.4	811	-29.8	820	-27.2	858	-23.2	877	-18.7	1217	-28.5
平均	775.3	-36.2	779.7	-33.6	809.7	-29.7	818.7	-26.8	856.0	-22.5	873.7	-18.6	1312.3	-23.8

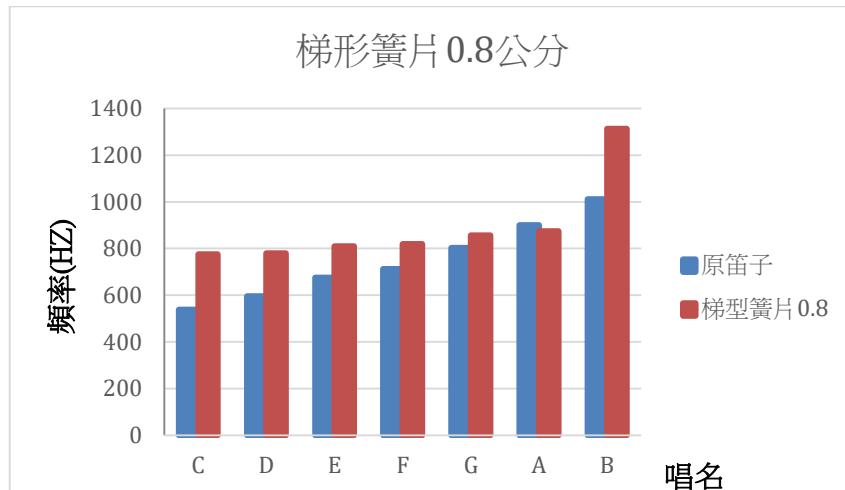


圖 17 梯形簫片長度 0.8cm 與原笛子音頻對照圖

表 16: 梯形簫片長度 1cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	439	-41.8
第二次	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	434	-39.5
第三次	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	437	-44.8
平均	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	436.7	42.0-

附註:「-」是無法吹出聲音。

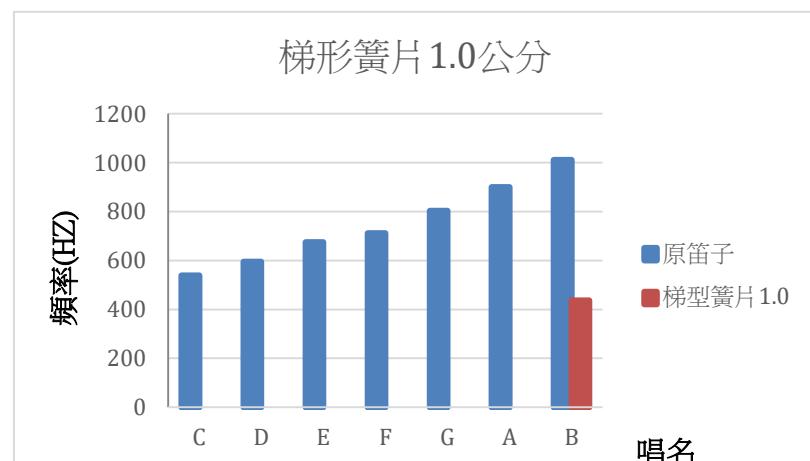


圖 18 梯形簫片長度 1.0cm 與原笛子音頻對照圖

丁、討論：

從實驗結果整理如下：

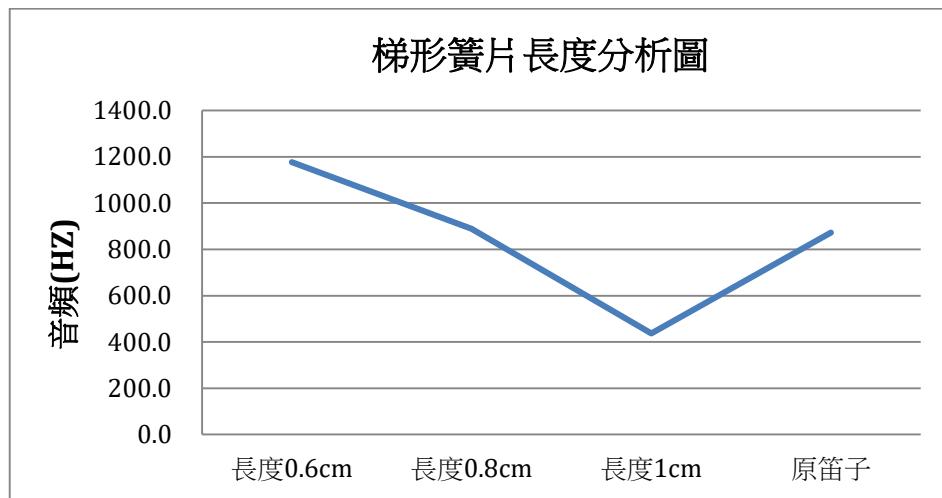


圖 19 梯形簧片長度分析圖

表 17 梯形簧片不同長度分析表

梯形簧片不同長度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
長度 0.6cm	1176.8	-27.0	7	34.9%
長度 0.8cm	889.3	-27.3	7	2.0%
長度 1cm	436.7	-42.0	1	-49.9%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上梯形簧片表明簧片長度越長，振動頻率越低，導致音高下降。而寬度 1 公分平均音頻 436.7HZ (其中有 6 個音吹不出聲音)，簧片直笛與直笛音頻比較，有明顯的變化。且平均音量變小。

實驗四：梯形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響

甲：操縱變因:不同上寬度(0.1 公分、0.2 公分、0.3 公分)

乙：控制變因: 梯形簧片長度 0.8 公分，底寬 0.4 公分，簧片材質，簧片厚度。

丙：實驗結果：如下。

表 18:梯形簧片寬度 0.1cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
	指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1
		頻率 (Hz)	音量 (dB)	頻率 (Hz)										
第一次	1316	-30.2	1386	-26.4	1532	-18.0	1420	-18.1	730	-35.6	1275	-26.9	1378	-19.1
第二次	1316	-30.1	1384	-22.5	1531	-18.9	1420	-16.7	728	-40.9	1277	-23.7	1365	-19.2
第三次	1301	-31.3	1387	-31.3	1527	-17.2	1421	-17.2	728	-35.6	1284	-20.5	1358	-22.4
平均	1311.0	-30.5	1385.7	-26.7	1530.0	-18.0	1420.3	-17.3	728.7	-37.4	1278.7	-23.7	1367.0	-20.2

附註:「-」是無法吹出聲音。

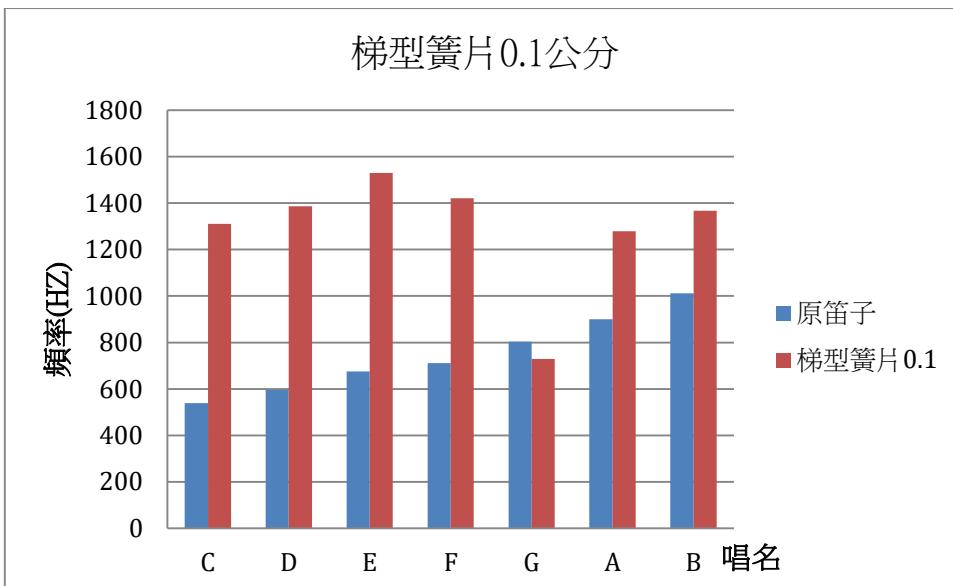


圖 20 梯形簫片寬度 0.1cm 與原笛子音頻對照圖

表 19:梯形簫片寬度 0.2cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	680	-39.1	718	-30.7	751	-32.1	752	-24.0	733	-22.1	-	-	-	-
第二次	687	-31.4	719	-32.9	744	-33.1	758	-24.7	769	-21.3	-	-	-	-
第三次	684	-33.7	723	-29.1	751	-31.5	758	-24.8	778	-21.2	-	-	-	-
平均	683.7	-34.7	720.0	-30.9	748.7	-32.2	756.0	-24.5	760.0	-21.5	-	-	-	-

附註:「-」是無法吹出聲音。

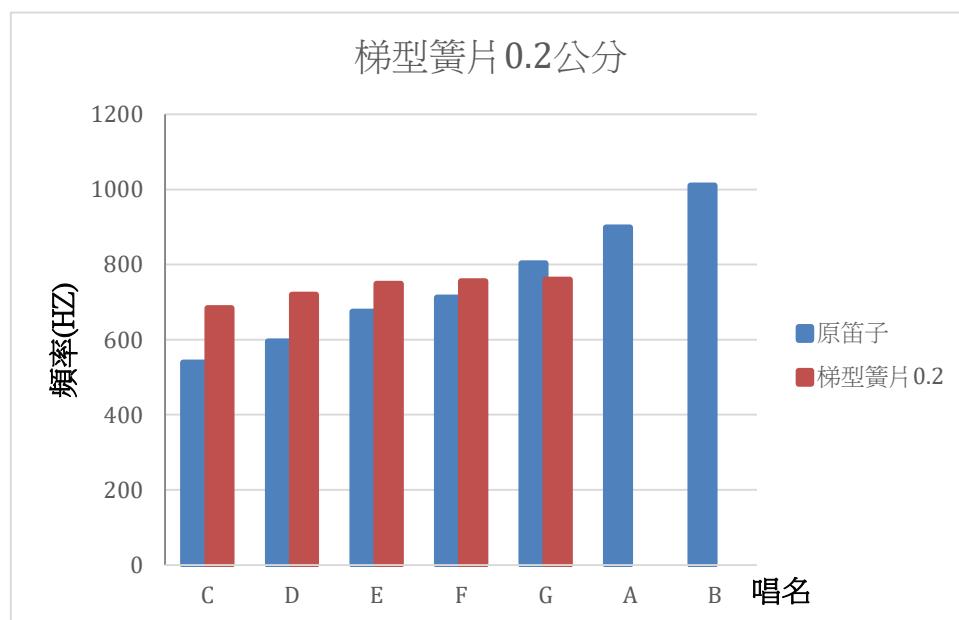


圖 21 梯形簫片寬度 0.2cm 與原笛子音頻對照圖

表 20:梯形簧片寬度 0.3cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	545	-32.4	550	-30.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第二次	541	-45.9	548	-33.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第三次	539	-42.4	547	-35.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
平均	541.7	-40.2	548.3	-33.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

附註:「-」是無法吹出聲音。

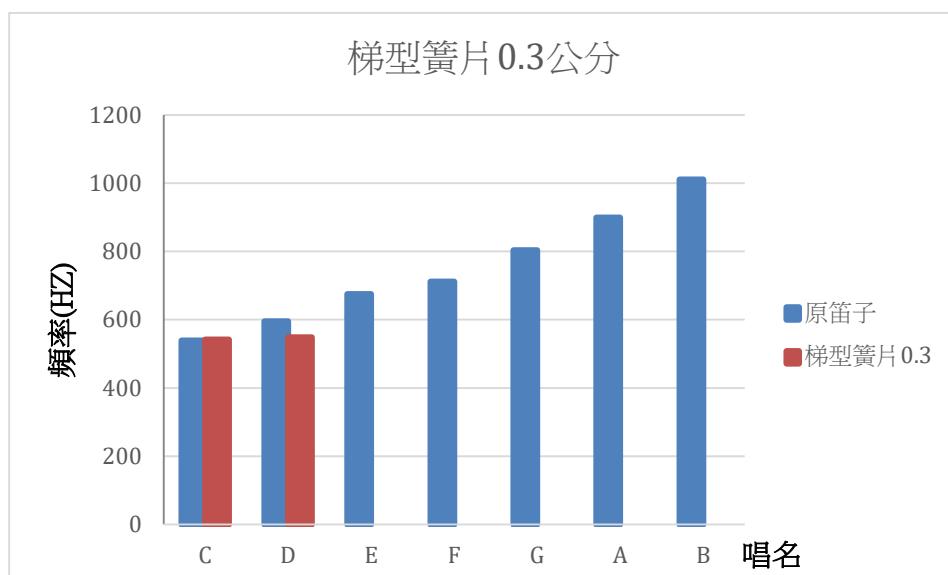


圖 22 梯形簧片寬度 0.3cm 與原笛子音頻對照圖

丁、討論：

從實驗結果整理如下：

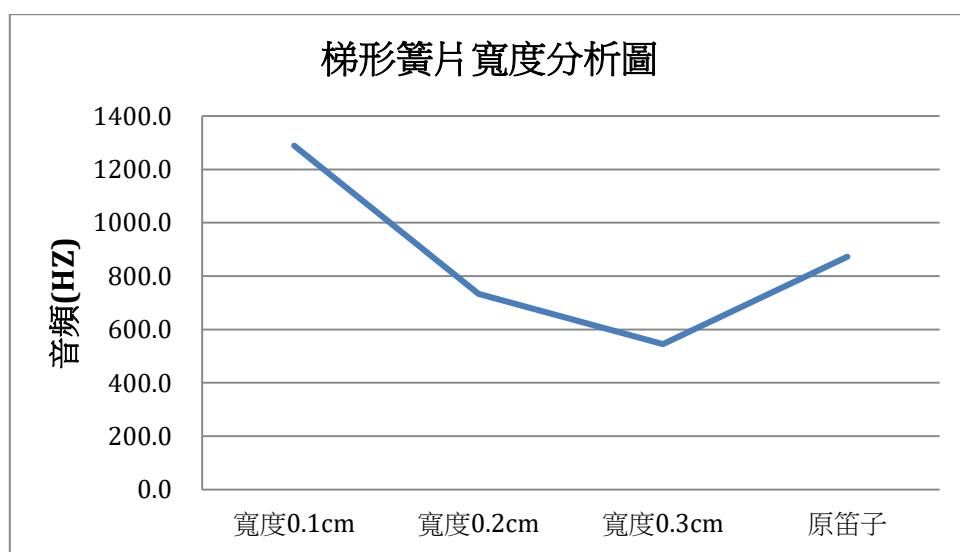


圖 23 梯形簧片寬度分析圖

表 21 梯形簫片不同上寬度分析表

梯形簫片不同上寬度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
上寬度 0.1cm	1288.8	-24.8	7	47.8%
上寬度 0.2cm	733.7	-28.8	5	-15.9%
上寬度 0.3cm	545.0	-36.6	2	-37.5%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上梯形簫片表明簫片寬度越寬長，振動頻率越低，導致音高下降。寬度由 0.1cm 到 0.3cm 變化時，發現可吹出的音名數目逐步減少，與一般直笛比較，頻率有顯著變化。

實驗五：長方形簫片，不同長度對「音調」、「音量」的影響

甲：操縱變因:不同長度(0.6 公分、0.8 公分、1 公分)

乙：控制變因: 長方形簫片寬度 0.4 公分，簫片材質，簫片厚度。

丙：實驗結果：如下。

表 22:長方形簫片長度 0.6cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	765	-20.1	779	-19.2	765	-34.1	725	-24.5	787	-32.1	-	-	-	-
第二次	752	-19.8	781	-22.2	781	-22.7	731	-18.6	786	-33.1	-	-	-	-
第三次	756	-18.3	780	-21.1	777	-17.5	765	-21.4	787	-32.3	-	-	-	-
平均	757.7	-19.4	780.0	-20.8	774.3	-24.8	740.3	-21.5	786.7	-32.5	-	-	-	-

附註:「-」是無法吹出聲音。

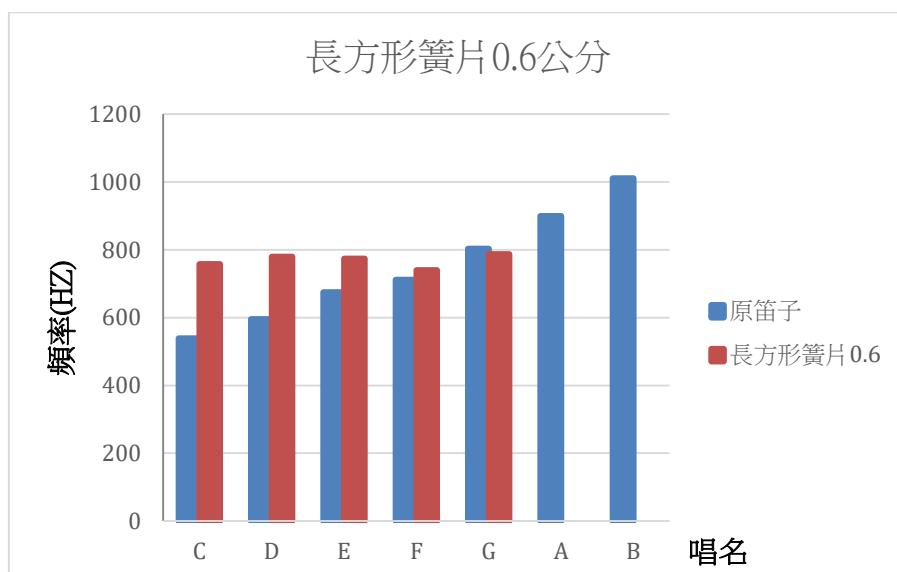


圖 24 長方形簫片長度 0.6cm 與原笛子音頻對照圖

表 23:長方形簧片長度 0.8cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	765	-22.2	772	-19.2	806	-25.4	838	-21.1	901	-26.1	981	-19.4	-	-
第二次	731	-18.7	787	-23.3	847	-24.2	812	-21.2	867	-27.6	965	-22.4	-	-
第三次	752	-20.1	786	-24.1	865	-23.2	878	-24.0	859	-19.5	986	-19.1	-	-
平均	749.3	-20.3	781.7	-22.2	839.3	-24.3	842.7	-22.1	875.7	-24.4	977.3	-20.3	-	-

附註:「-」是無法吹出聲音。

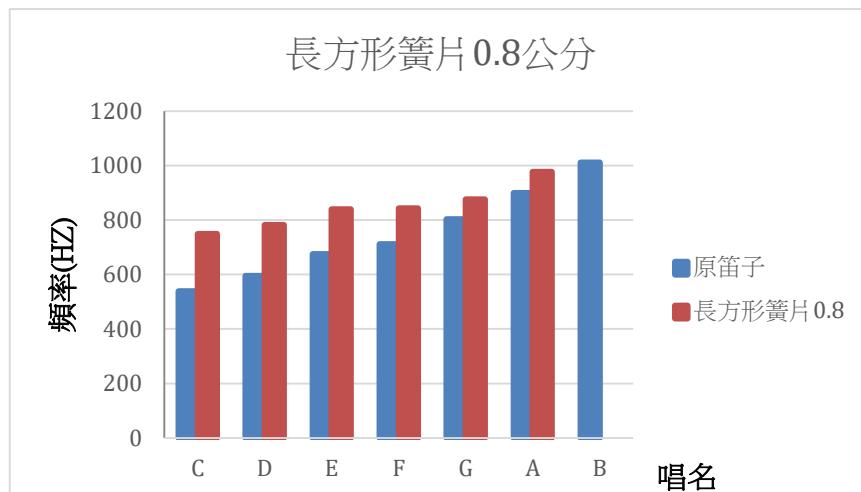


圖 25 長方形簧片長度 0.8cm 與原笛子音頻對照圖

表 24:長方形簧片長度 1cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	1234	-25.2	1290	-23.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第二次	1243	-23.3	1250	-19.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第三次	1215	-22.8	1239	-19.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
平均	1230.7	-23.8	1259.7	-20.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

附註:「-」是無法吹出聲音。

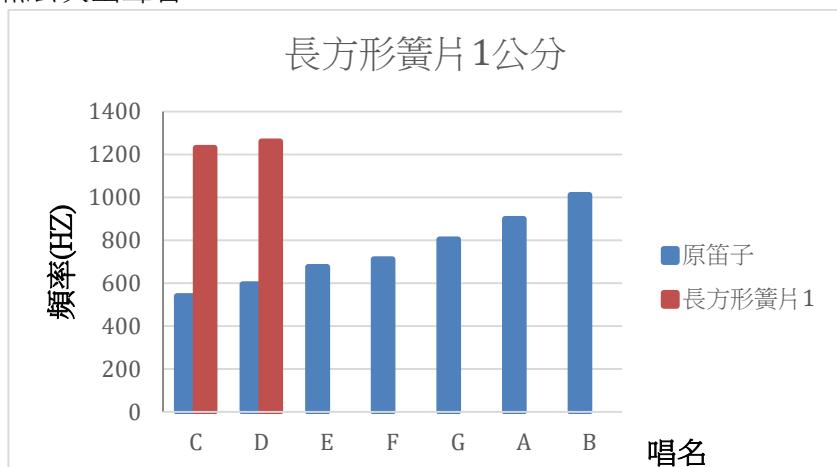


圖 26 長方形簧片長度 1cm 與原笛子音頻對照圖

丁、討論：

從實驗結果整理如下：

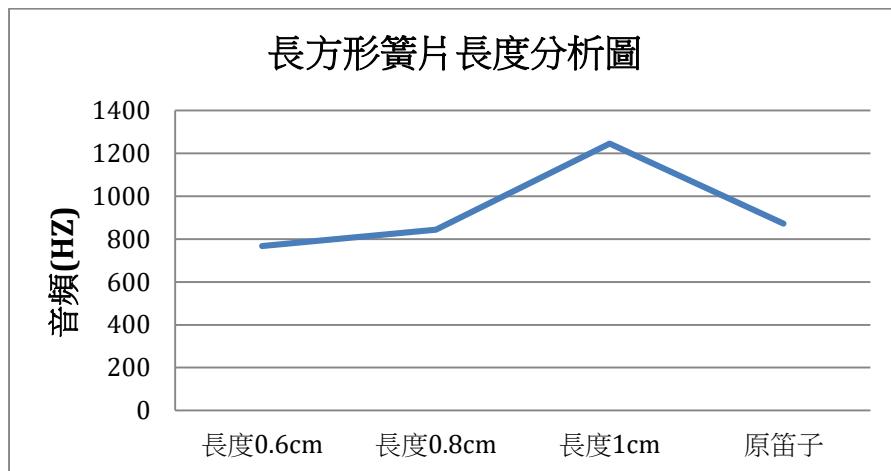


圖 27 長方形簫片長度分析圖

表 25 長方形簫片不同長度分析表

長方形簫片不同長度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
長度 0.6cm	767.8	-23.8	5	-12.0%
長度 0.8cm	844.3	-22.3	6	-3.2%
長度 1cm	1245.2	-22.3	2	42.8%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上長方形簫片表明簫片長度越長，震動頻率越高，導致音高上升。而長度 0.6 公分平均音頻 757.8HZ，(其中有 2 個音吹不出聲音)，長度 0.8 公分平均音頻 844.3HZ，(其中有 1 個音吹不出聲音)，長度 1 公分平均音頻 1245.2HZ，(其中有 5 個音吹不出聲音)。

實驗六：長方形簫片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響

甲：操縱變因:不同寬度(0.2 公分、0.4 公分、0.6 公分)

乙：控制變因:長方形簫片長度 0.8 公分，簫片材質，簫片厚度。

丙：實驗結果：如下。

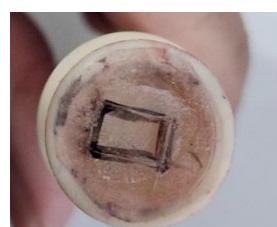


表 26:長方形簫片寬度 0.2cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	1843	-33.6	1344	-24.7	1987	-24.3	597	-29.8	744	-17.0	813	15.4	961	-23.7
第二次	1858	-26.5	1344	-23.5	1324	-21.0	599	-31.0	813	-18.9	805	-12.5	935	-21.6
第三次	1258	26.0	2080	-27.7	1319	-18.8	597	-40.4	783	-15.9	813	-17.7	891	-20.9
平均	1653.0	-11.4	1589.3	-25.3	1543.3	-21.4	597.7	-33.7	780.0	-17.3	810.3	-4.9	929.0	-22.1

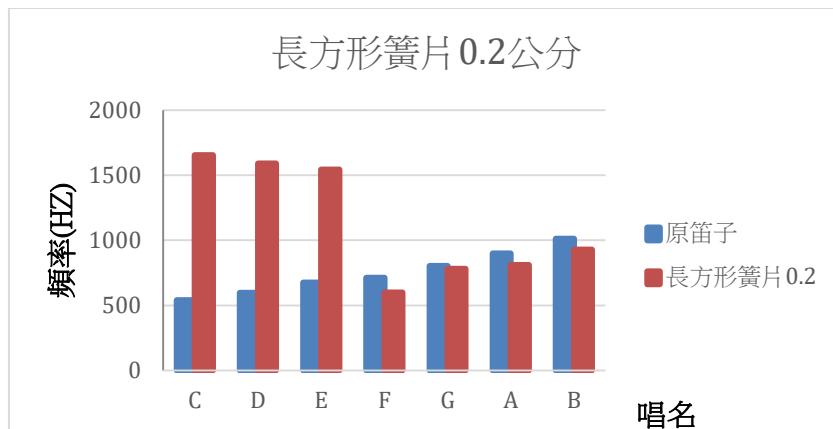


圖 28 長方形簧片寬度 0.2cm 與原笛子音頻對照圖

表 27:長方形簧片寬度 0.4cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第二次	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第三次	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
平均	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

附註:「-」是無法吹出聲音。

表 28:長方形簧片寬度 0.6cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	561	-22.7	-	-	-	-	-	-	-526	-20.9	427	-64.9	746	-35.3
第二次	550	-27.2	-	-	-	-	-	-	-523	-23.7	426	-72.6	747	-34.7
第三次	-562	-20.2	-	-	-	-	-	-	-526	-26.7	426	-69.6	754	-30.7
平均	557	-23.4	-	-	-	-	-	-	525.0	-23.8	426.3	-69.0	749.0	-33.6

附註:「-」是無法吹出聲音。

丁、討論：

從實驗結果整理如下：

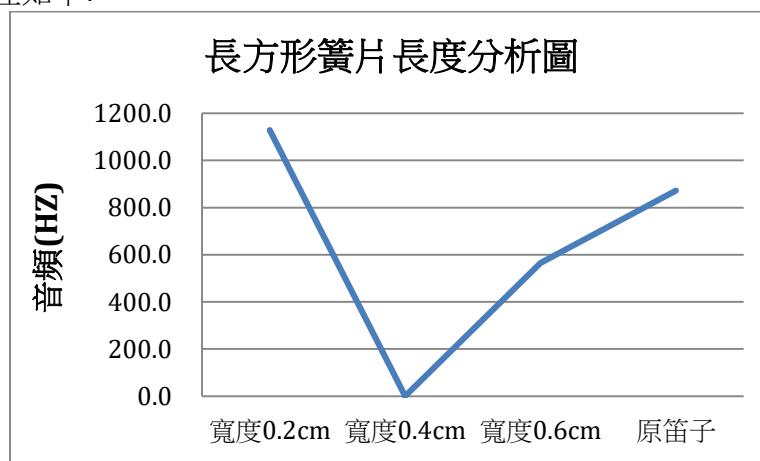


圖 29 長方形簧片長度分析圖

表 29 長方形簫片不同寬度分析表

長方形簫片不同寬度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
長度 0.2cm	1128.9	-19.4	7	29.4%
長度 0.4cm	0	0	0	0%
長度 0.6cm	564.5	-37.4	4	-33.3%
一般笛子	846.7	-28.4	7	0.0%

從實驗結果得知，長度 0.4cm 長方形簫片，無法發出聲音。加上簫片的笛子與原笛子的音頻比較，從表格中發現數據顯示長方型簫片長 0.2 公分與原笛子音頻提高 29.43%。

實驗七：不同厚度對「音調」、「音量」的影響

甲：操縱變因:不同厚度(0.1 公分、0.2 公分、0.3 公分)

乙：控制變因:三角形簫片寬度 0.4 公分，長度 0.8 公分，簫片材質。

丙：實驗結果：如下。



表 30:不同厚度簫片厚度 0.1cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	1109	-19.0	765	-31.3	820	-32.9	826	-29.3	915	-33.5	982	-23.1	1092	-24.1
第二次	1109	-16.1	768	-38.0	823	-31.0	824	-28.6	947	-33.9	950	-23.5	1091	-24.7
第三次	1111	-47.7	768	-36.1	818	-32.1	850	-28.9	926	-27.6	1022	-30.8	1096	-23.3
平均	1109.7	-27.6	767.0	-35.1	820.3	-32.0	833.3	-28.9	929.3	-31.7	984.7	-25.8	1093.0	-24.0

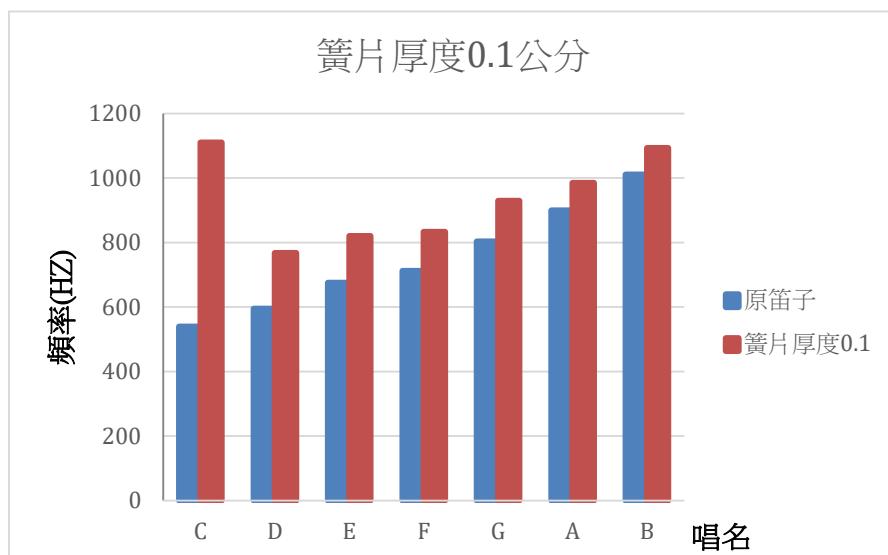


圖 30 不同厚度簫片厚度 0.1cm 與原笛子音頻對照圖

表 31:不同厚度簫片厚度 0.2cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	343	-36.9	305	-41.6	307	-40.1	521	-40.4	531	-35.4	737	-37.2	926	-38.5
第二次	281	-37.9	273	-39.1	315	-40.3	522	-38.4	526	-38.4	738	-35.6	770	-36.7
第三次	284	-39.7	281	-42.6	313	-37.9	521	-38.3	531	-35.5	763	-34.4	764	-35.7
平均	302.7	-38.2	286.3	-41.1	311.7	-39.4	521.3	-39.0	529.3	-36.4	746.0	-35.7	820.0	-37.0

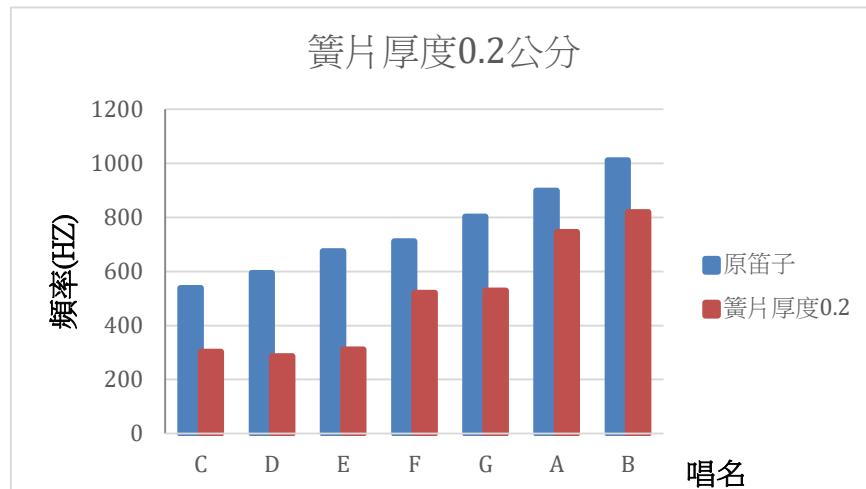


圖 31 不同厚度簫片厚度 0.2cm 與原笛子音頻對照圖

表 32:不同厚度簫片厚度 0.3cm 不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	327	-23.6	341	-22.2	407	-39.2	220	-44.7	213	-39.9	210	-44.1	219	-39.2
第二次	325	-15.7	336	-29.4	407	-36.4	213	-40.3	219	-47.1	212	-41.2	219	-38.5
第三次	318	-18.6	321	-30.1	408	-37.7	214	-41.7	215	-41.5	214	-38.4	213	-39.8
平均	323.3	-19.3	332.7	-27.2	407.3	-37.8	215.7	-42.2	215.7	-42.8	212.0	-41.2	217.0	-39.2

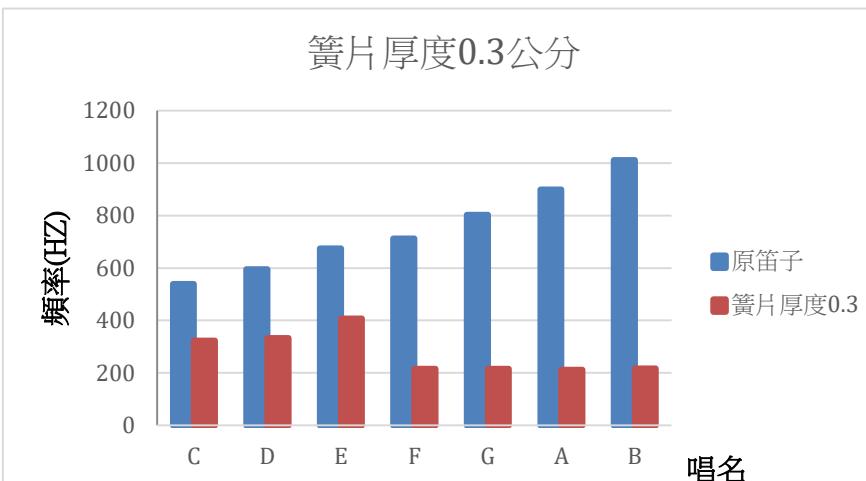


圖 32 不同厚度簫片厚度 0.3cm 與原笛子音頻對照圖

丁、討論：

從實驗結果整理如下：

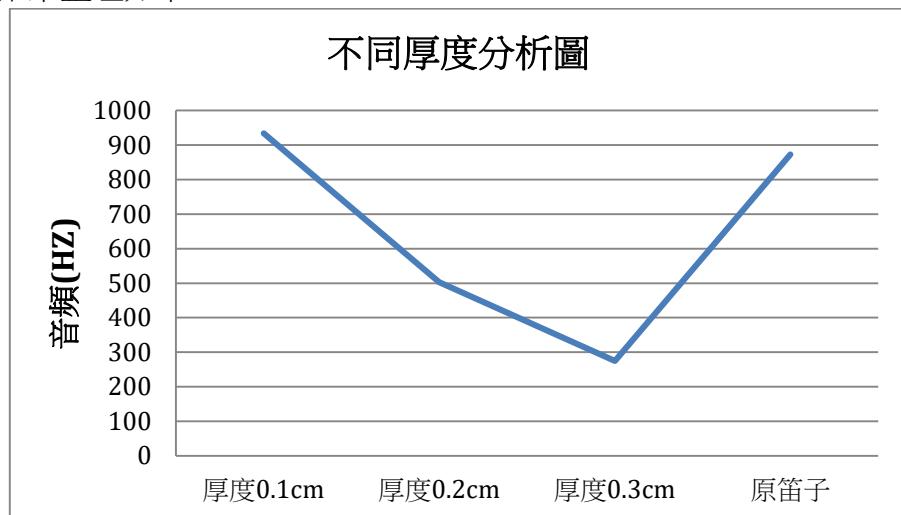


圖 33 不同厚度分析圖

表 33 不同厚度分析表

不同厚度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
厚度 0.1cm	933.9	-29.3	7	7.1%
厚度 0.2cm	502.5	-38.1	7	-42.4%
厚度 0.3cm	274.8	-35.7	7	-68.5%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上不同厚度的簫片表明簫片厚度越厚，振動頻率下降，加上簫片的笛子與原笛子的音頻比較，當厚度的變大時，音量變小。

實驗八：不同材質對「音調」、「音量」的影響

(一)

甲：操縱變因:不同材質(銅片)。



乙：控制變因:三角形簫片長度 0.8 公分，寬度 0.4 公分，簫片厚度 0.15 公分。

丙：實驗結果：如下。

表 34:不同材質簫片銅片不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	-	-	1996	-14.2	2017	-16.4	-	-	-	-	-	-	-	-
第二次	-	-	1997	-16.4	2011	-14.5	-	-	-	-	-	-	-	-
第三次	-	-	2001	-15.2	2008	-13.7	-	-	-	-	-	-	-	-
平均	-	-	1998.0	-15.3	2012.0	-14.9	-	-	-	-	-	-	-	-

附註:「-」是無法吹出聲音。

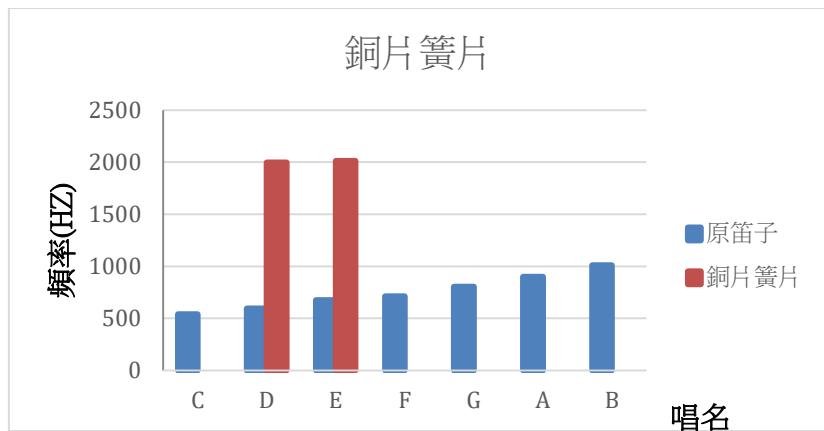


圖 34 不同簧片材質銅片與原笛子音頻對照圖

(二)

甲：操縱變因:不同材質(不鏽鋼片)。

乙：控制變因:三角形簧片長度 0.8 公分，

寬度 0.4 公分，簧片厚度 0.15 公分。

丙：實驗結果：如下。



表 35:不同材質簧片不鏽鋼片不同唱名頻率音量檢測表

唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第二次	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
第三次	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
平均	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

附註:「-」是無法吹出聲音。

丁、討論：

從實驗結果整理如下:

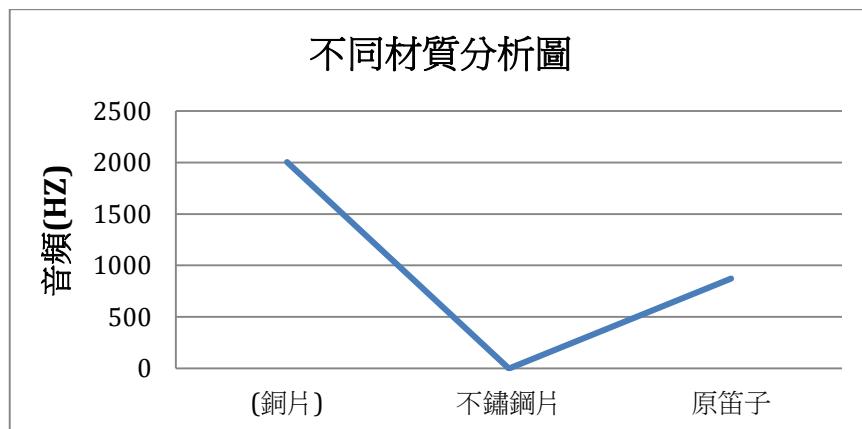


圖 35 不同材質分析圖

表 36 不同材質分析表

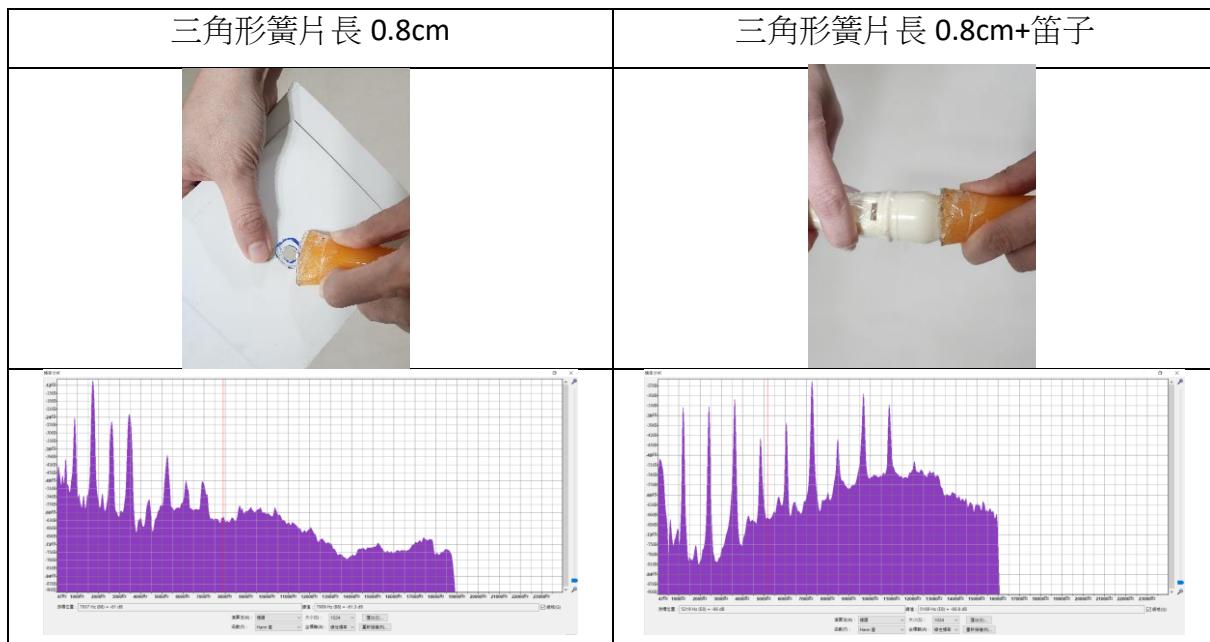
不同材質	平均頻率	平均音量	笛子形式	指法吹出音名數	+-%
銅片	2005.0	-15.1	超高音笛	2	129.9%
不鏽鋼片	0	0		0	
一般笛子	872.2	-21.9	高音笛	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上不同材質的簫片表明簫片銅片材質平均頻率 2005.0HZ(有 5 個音吹不出聲音)，而不鏽鋼簫片是完全吹不出聲音。

陸、總結

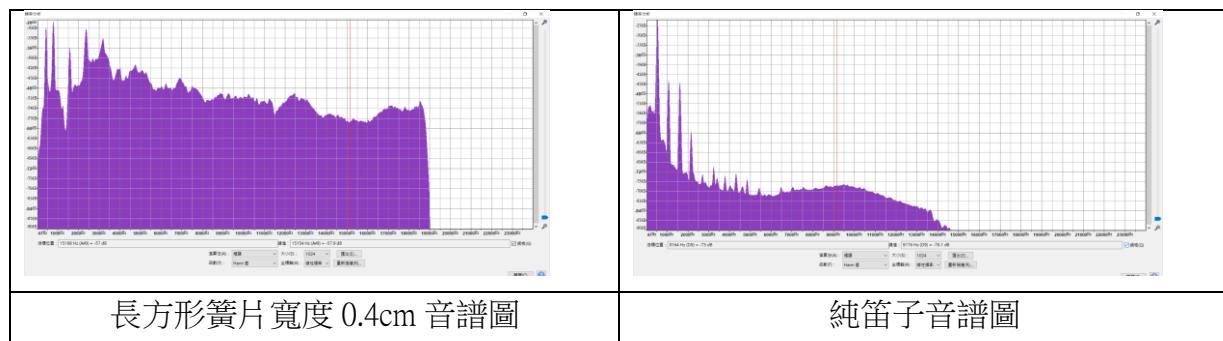
1. 當直笛加入簫片，有的可吹出聲音，有的無法出聲，以頻譜分析，是否與共振有關。

(1) 三角形簫片長 0.8cm 加入直笛，可吹出聲音，以頻譜分析如下



簫片 1500Hz12 分貝，加上笛子 7500Hz27 分貝，符合共振原理，共振使振幅加大。管長是複合音波長的整倍數且固定開管長度，複合音最大共振頻率是原來的五倍

(2) 長方形簫片寬度 0.4cm 加入直笛，無法吹出聲音，分別測出簫片及笛子頻譜



發現簫片測出音頻第一峰值 435HZ、第二峰值 789HZ、第三峰值 1582HZ。純笛子音譜，音頻第一峰值 539HZ、音頻第二峰值 1082HZ。兩者比對，音頻沒有接近，不會產生共振，所以無法發出聲音。

2. 將實驗結果整理如下，依據頻率，發現簧片直笛可以從高音笛變成超高音笛。

表 37 總整理表

實驗項目	簧片形狀 / 尺寸	吹出音名的打勾							平均頻率(HZ)	笛子形式
		C	D	E	F	G	A	B		
實驗一	三角形/長 0.6 公分	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	933.9	高音笛
	三角形/長 0.8 公分	✓	✓				✓	✓	1093.2	高音笛
	三角形/長 1 公分	✓	✓	✓	✓	✓	✓		754.3	高音笛
實驗二	三角形/寬 0.2 公分	✓	✓			✓	✓	✓	1388.7	超高音笛
	三角形/寬 0.4 公分	✓	✓				✓	✓	1087.2	高音笛
	三角形/寬 0.6 公分	✓	✓			✓	✓	✓	1141.5	高音笛
實驗三	梯形簧片/長 0.6 公分	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1176.8	高音笛
	梯形簧片/長 0.8 公分	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	889.3	高音笛
	梯形簧片/長 1 公分							✓	436.7	高音笛
實驗四	梯形簧片/寬 0.1 公分	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1288.8	超高音笛
	梯形簧片/寬 0.2 公分	✓	✓	✓	✓	✓			733.7	高音笛
	梯形簧片/寬 0.3 公分	✓	✓						545.0	高音笛
實驗五	長方形簧片/長 0.6 公	✓	✓	✓	✓	✓			767.8	高音笛
	長方形簧片/長 0.8 公	✓	✓	✓	✓	✓			844.3	高音笛
	長方形簧片/長 1 公分	✓	✓						1245.2	超高音笛
實驗六	長方形簧片/寬 0.2 公	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1128.9	高音笛
	長方形簧片/寬 0.4 公								0	
	長方形簧片/寬 0.6 公	✓				✓	✓	✓	564.5	高音笛
實驗七	不同厚度/0.1 公分	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	933.9	高音笛
	不同厚度/0.2 公分	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	502.5	高音笛
	不同厚度/0.3 公分	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	274.8	高音笛
實驗八	不同材質 / 銅片		✓	✓					2005.0	超高音笛
	不同材質 / 不鏽鋼片									高音笛

柒、結論：

- 由實驗一發現，當直笛加上三角形簧片(不同長度)時。長度 1cm 與長度 0.8cm，分別吹出 6 個音及 4 個音。長度 0.8cm 與 0.6cm 三角形簧片與一般直笛比較，會將頻率往上移動，分別上升 25.3% 與 7.1%。。
- 由實驗二發現，加上三角形簧片(不同寬度)時。寬度由 0.2cm 到 0.8cm 變化時，與一般直笛比較，會將頻率有往上移動，上升 24.6%-59.2%。寬度 0.6cm 時，吹出音名數只有 5 個音。
- 由實驗三發現，當直笛加上梯形簧片表明簧片長度越長，振動頻率越低，導致音高下降。而寬度 1 公分平均音頻 436.7HZ，(其中有 6 個音吹不出聲音)，簧片直笛與直笛音頻比較，有明顯的變化。且平均音量變小。

4. 由實驗四發現，當直笛加上梯形簧片表明簧片寬度越寬長，振動頻率越低，導致音高下降。寬度由 0.1cm 到 0.3cm 變化時，發現可吹出的音名數目逐步減少。
5. 由實驗五發現，當直笛加上長方形簧片表明簧片長度越長，振動頻率越高，導致音高上升。而長度 0.6 公分平均音頻 757.8HZ (有 2 個音吹不出)，長度 0.8 公分平均音頻 844.3HZ (有 1 個音吹不出)，長度 1 公分平均音頻 1245.2HZ，(有 5 個音吹不出)。
6. 由實驗六發現，長度 0.4cm 長方形簧片，無法發出聲音。加上簧片的笛子與原笛子的音頻比較，從表格中發現數據顯示長方型簧片長 0.2 公分與原笛子音頻提高 29.43%。
7. 由實驗七發現，當直笛加上不同厚度的簧片表明簧片厚度越厚，振動頻率下降，加上簧片的笛子與原笛子的音頻比較，當厚度的變大時，音量變小。
8. 由實驗八發現，當直笛加上不同材質的簧片表明簧片銅片材質平均頻率 2005.0HZ(有 5 個音吹不出聲音)，而不鏽鋼簧片是完全吹不出聲音。
9. 運用問題解決模式，開發製作簧片及吹氣方法，將人為誤差去除，增加實驗可靠性。
10. 從共振分析得知，當簧片峰值頻率接近笛子自然頻率時，音量會增加。但當簧片峰值頻率沒有接近笛子自然頻率時，無法發出聲音。
11. 只要加上簧片，直笛吹出頻率可以從高音笛變成超高音笛。同一直笛，兩種功能。

捌、參考資料

- [1]張芸嫚 中音直笛指法 <https://www.youtube.com/watch?v=EUOfF3agYA>
- [2]康軒版 自然與生活科技 五下 聲音與樂器
- [3] audacity 取自維基百科 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/Audacity>
- [4]陳英傑 「Lubuw」~泰雅口簧琴的科學 教育部 108 學年度中小學科學教育專案
- [5]太魯閣族創客 創客新契機 一童一口簧 第九屆原住民雲端科展
- [6] 音頻對照表 <https://ithelp.ithome.com.tw/articles/10317470?sc=rss.iron>
- [7] 《振動噪音科普專欄》 http://aitanhv.blogspot.com/2018/03/blog-post_19.html
- [8]音高頻率表 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%9F%B3%E9%AB%98>
- [9]基本頻率
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E9%A0%BB%E7%8E%87>
- [10]共振 均一教育平台 <https://www.junyiacademy.org/junyi-science/science-high/main-seniphy/main-seni-ph-ele3/main-seni-ph-ele3-2/v/U2HCtZH2xAM>

[作品說明書中所有照片皆為作者自行拍攝]

【評語】080110

從學生熟悉的直笛出發，過程中將它加上簧片創作出簧片直笛，來產生出新的樂音，極具探究實作精神。不但詳細分析不同形狀、尺寸、厚度及材質的簧片對音調與音量產生的影響，更成功的將高音笛的音域轉換為超高音笛，是一大亮點。雖然實驗數據十分完整，但研究內容的科學性和創意性還可更好，若後續能有不同的研究變因或測量方式來進一步分析聲音的其他現象，將更具聲學深度及參考價值。

作品海報



管樂新聲-探討管樂

對管子聲音之影響

摘要

直笛是每位學生必學樂器，加上簧片巧思，創作出簧片直笛。實驗變因控制為形狀（三角形、梯形、長方形），厚度以及材質。運用問題解決，開發出雷射切割簧片及板擦機吹氣，將人為誤差去除。實驗發現，三角形簧片會將頻率往上移動，上升最大 59.2%。梯形簧片，當簧片寬度越寬，振動頻率越低。長方形簧片，簧片長度越長，振動頻率越高。當厚度越厚，頻率會變低。不同材質簧片，發現投影片簧片頻率變化最佳。從共振分析得知，當簧片振動頻率接近笛子自然頻率，音量增加。當簧片振動頻率沒有接近笛子自然頻率時，無法發出聲音。原本學生常用的高音笛，配合簧片替換創新，可吹出超高音笛的聲音。「笛管新聲」可創造出不同音域的巧妙變化。

壹、前言

一、研究動機

從國小三年級，音樂課人手一支直笛，教室與走廊常聽到悅耳的直笛聲。在自然課有一個單元介紹聲音，科學營也有自製吸管直笛，吸管長度改變導致聲音高低的變化。當吸管長、吹出聲音低；而吸管短、聲音會變高。學校快閃活動時，表演同學用口琴吹出響亮的樂音，查詢資料，發現口琴發聲是因簧片振動，於是突發奇想，想研究是否可以將直笛加上簧片，吹出不同的樂音，我們想在此次科展，深入的探討直笛加簧片，是否能生成「笛管新聲」-簧片直笛。

二、研究目的與問題

本研究之目的透過不同形狀、長度、寬度、厚度材質，來分析自製「簧片直笛」使音高及音量產生了什麼變化。研究問題如下：

- (一)、三角形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響？
- (二)、三角形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響？
- (三)、梯形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響？
- (四)、梯形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響？
- (五)、長方形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響？
- (六)、長方形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響？
- (七)、不同厚度對「音調」、「音量」的影響？
- (八)、不同材質對「音調」、「音量」的影響？

貳、資料收集與文獻閱讀

一、國小直笛簡介

常用音域與指法：

序號	唱名	指法
1	Do	1234567
2	Re	123456
3	Mi	12345
4	Fa	123467
5	Sol	123
6	La	12
7	Si	1



二、Audacity

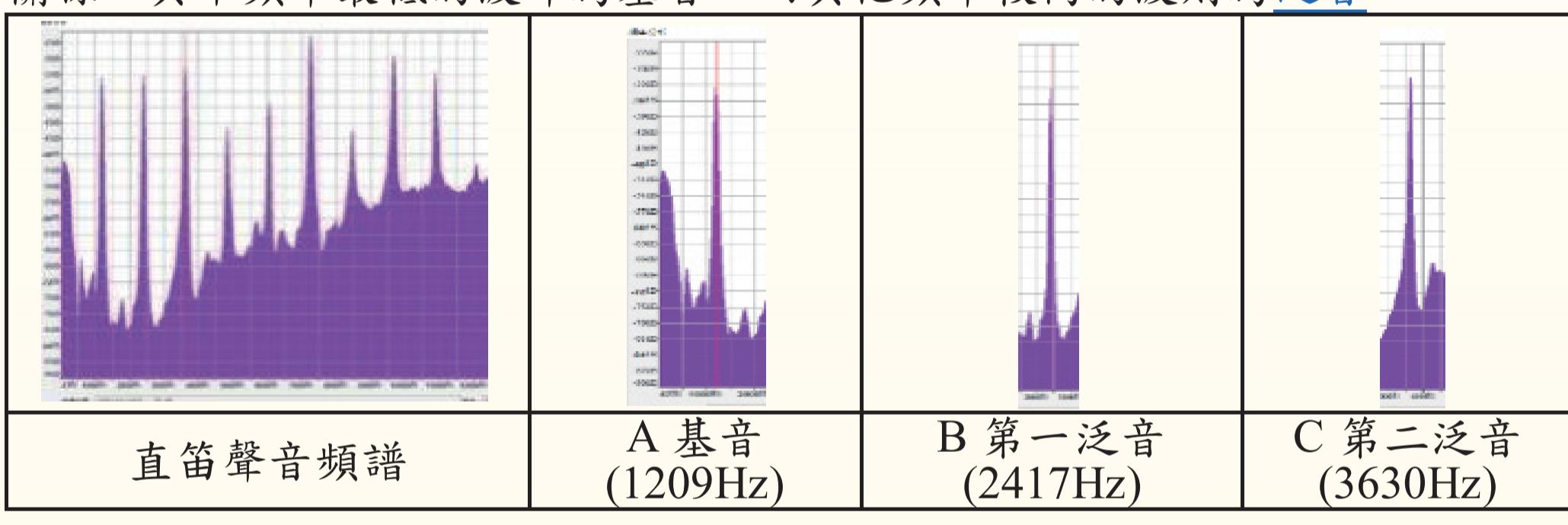
Audacity 是一款免費、跨平台的多音軌聲音編輯與錄製軟體。可在 macOS、Microsoft Windows 和其它作業系統上運作。

三、空氣柱：

音調是由發音體振動的頻率來決定的，發音體每秒的振動頻率愈大，發音的音調就會愈高。空氣柱振動發出聲音。空氣柱愈長，波長愈大，頻率愈小，音調愈低；反之，空氣柱愈短，波長愈短，頻率愈大，音調愈高。

四、基音、泛音：[9]

當發聲體由於振動而發出聲音時，聲音一般可以分解為許多單純的波，也就是說所有的自然聲音基本都是由許多頻率不同的波組成的，其頻率是呈倍數關係，其中頻率最低的波即為基音，而其他頻率較高的波則為泛音。



五、共振：[10]

當外界擾動頻率，恰好與物理的固有頻率(自然頻率)相同，即時很小的擾動，也會讓物體產生很大的振盪。

參之一、文獻閱讀

資料來源	主題簡稱	與本研究相關的研究文獻
2009 原住民科展	泰雅口簧大樂隊	結果發現： 簧片厚度愈厚，頻率愈高，所以厚度確實會影響頻率大小。 引發思考： 不同長度的簧片會不會影響音高的表現？ 不同厚度的簧片會不會影響音高的表現？
108 學年度科學教育專案	「Lubuw」～泰雅口簧琴的科學[4]	結果發現： 1.簧片越長、厚度越薄、寬度越寬，音調越低；簧片越短、厚度越粗、寬度越窄，音調越高。 2.簧片的形狀以三角形較佳，美觀且音量會比較大。 引發思考： 不同「簧片長短」和「音調」、「音量」的變化 不同「簧片寬度」和「音調」、「音量」的變化 不同「簧片厚度」和「音調」、「音量」的變化 不同「簧片材質」和「音調」、「音量」的變化 不同「簧片形狀」和「音調」、「音量」的變化
第九屆原住民雲端科展	創客新契機一童一口簧[5]	結果發現： 簧片長度愈長，音調愈低。 簧片厚度愈厚，音調愈高。 頭尾寬比率愈大，音調愈低。

整理歸納後，本研究的創新點如下：

1.依據簧片樂器相關的文獻，本研究採用原住民傳統樂器口簧琴簧片以及傳統樂器巴烏的簧片創意的發想進行相關研究。

表 2 口簧琴簧片與巴烏簧片



2.將操縱變因進一步彙整進行研究：將(1).簧片長度。(2).簧片寬度。(3).簧片形狀。(4).簧片頭尾寬比率轉化成簧片三角形、簧片梯形、簧片長方形。如表 3 所示。

表 3 實驗規劃

形狀	頭寬	尾寬	相關實驗規劃
三角形	0	1	三角形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響
			三角形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響
梯形	0~1	1	梯形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響
			梯形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響
長方形	1	1	長方形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響
			長方形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響

參之二、研究設備與器材

平板錄音	MyEdit	Audacity 軟體	Zwcad 繪圖軟體
板擦機	雷切機	笛子	投影片

肆、研究流程與設計

一、研究流程

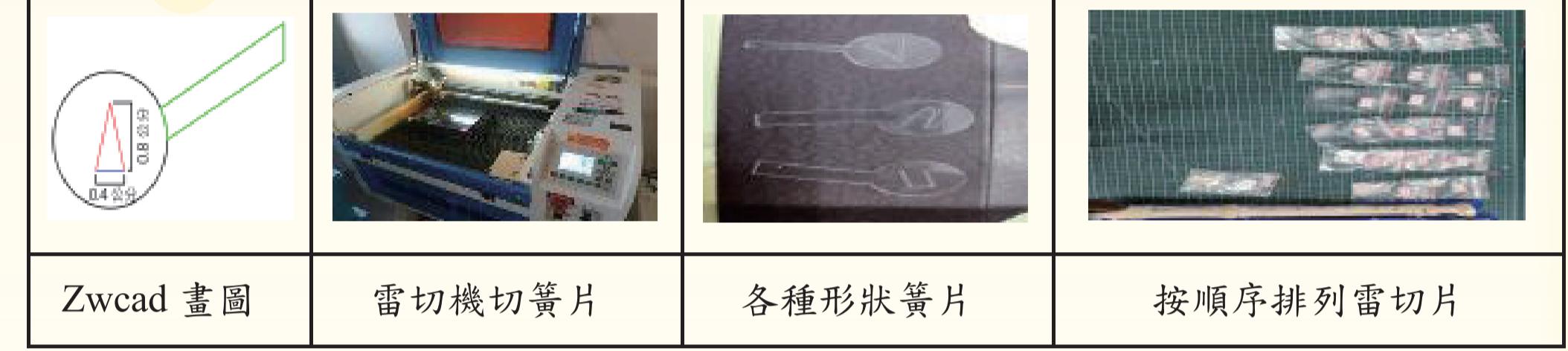
步驟一：控制送氣

使用板擦機固定送氣，送氣處連接水管，延伸水管到教室外送氣，使用平板錄音（如圖 2）。



步驟二：控制簧片

使用 Zwcad 繪圖，將簧片雷切，原本手切簧片全部改為雷切，降低人為誤差，讓簧片更精準。



步驟三：控制音孔

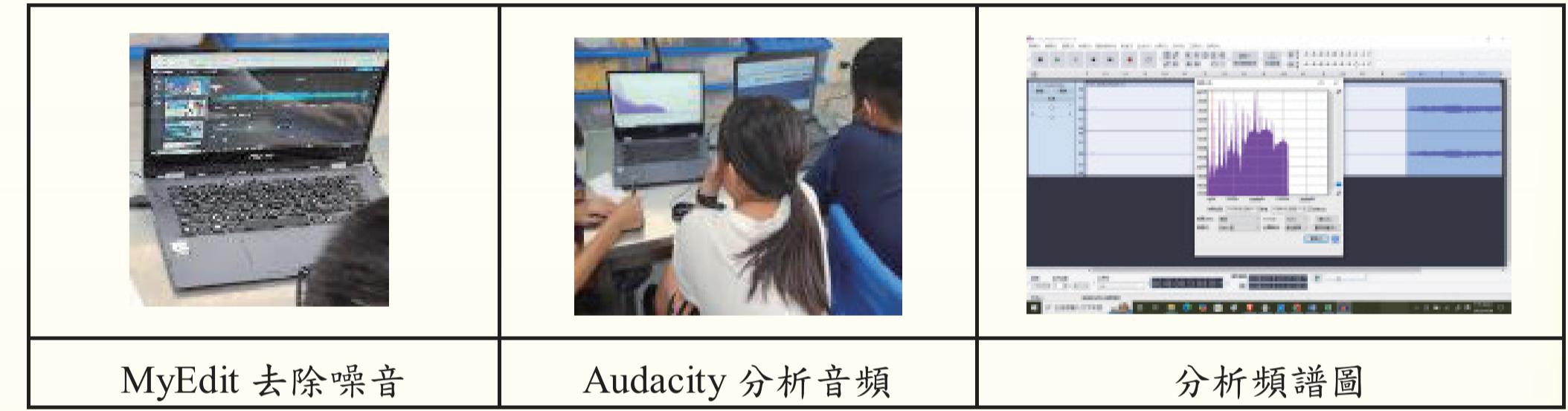
原本是手按音孔，後改成貼紙貼住音孔，去除人為誤差。

步驟四：放置簧片

將雷切簧片放置笛頭與笛身中間。

步驟五：測音頻

消除背景噪音使用 MyEdit 軟體去除背景噪音，將消除噪音的音檔使用 Audacity 軟體測音頻。



步驟六：改良笛子抽換式簧片

將笛子吹頭切出一條細縫，方便更換簧片，細縫處用膠帶貼住以防聲音從隙縫跑出。



步驟七：原始笛子(未加簧片)測出音頻為基準音

進行實驗前，對直笛不同唱名進行頻率及音量檢測，每一種唱名，進行三次實驗，所得結果如表 4 及表 5 所述，作為實驗一到實驗八比較基準。

表 4: 直笛不同唱名頻率、音量檢測表

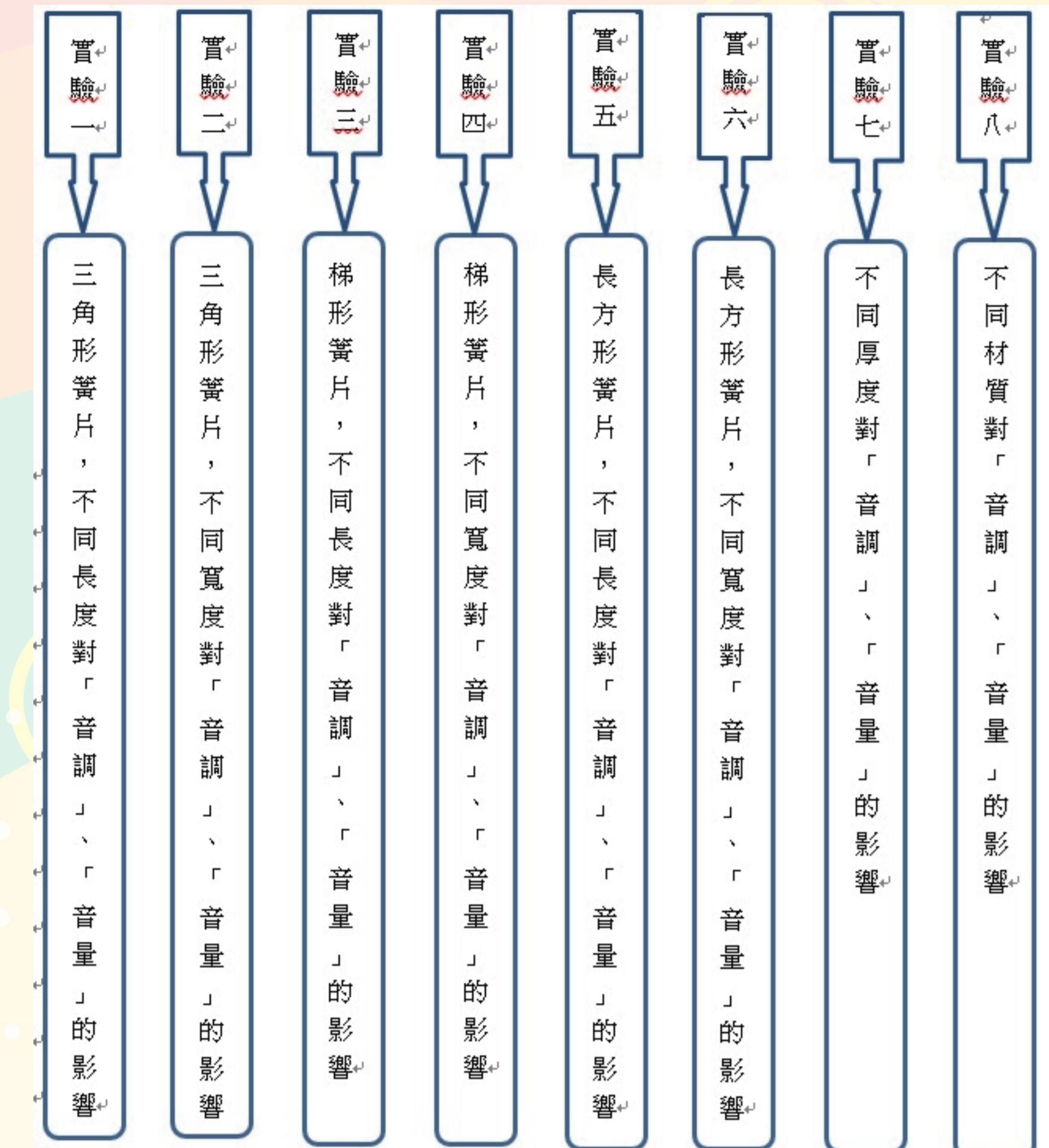
唱名	C		D		E		F		G		A		B	
指法	1234567		123456		12345		123467		123		12		1	
	頻率 (Hz)	音量 (dB)												
第一次	539	24.1	598	29.1	675	22.1	712	23.5	803	16.0	897	18.4	1019	17.0
第二次	539	24.8	594	23.1	676	22.5	713	23.5	805	16.2	903	19.6	1009	22.5
第三次	538	26.0	593	18.0	673	22.6	710	24.6	801	20.8	898	21.0	1005	23.9
平均	538.7	25.0	595.0	23.4	674.7	22.4	711.7	23.9	803.0	17.7	899.3	19.7	1011.0	21.1

笛子分類與音域如下表。

表 5 直笛音域表

制式	英文名	音域	照片
最高音笛 (短笛)	garklein	c ³ - d ⁵ 1046HZ-4698HZ	
超高音笛	soprano (octave flute)	f ² - g ⁵ 698HZ-3136HZ	

二、實驗設計



三、研究流程問題解決

1. 笛子吹氣方式

第一代人為吹氣

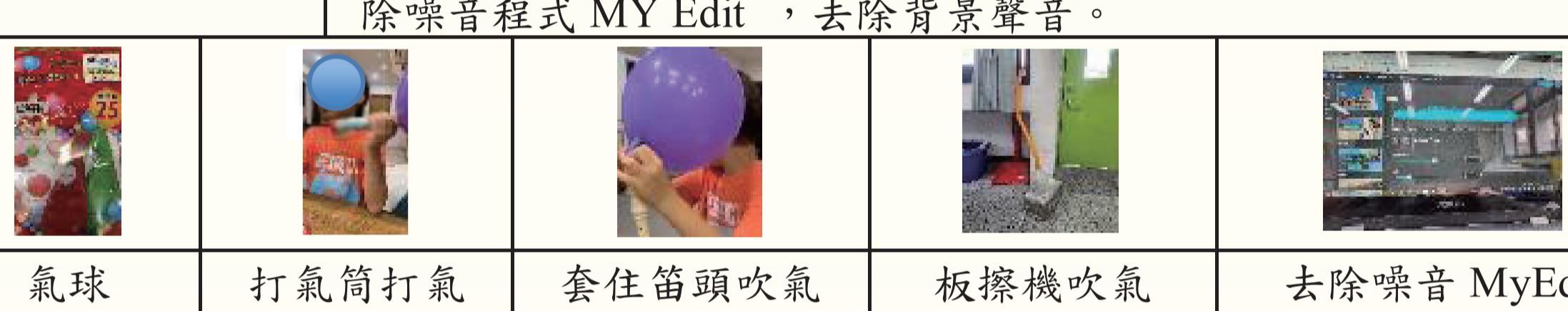
問題解決	說明
(1) 觀察與定題	每位同學吹出來的笛子聲音，是否會影響音頻？
(2) 計劃與執行	<1>每個人都有負責自己的實驗部分，發現有人會吹不出聲音， <2>固定一個人吹試試看，還是有些音吹不出聲音來。
(3) 分析與發現	以實驗一三角形簧片長度 0.6 公分的實驗數據來比較，之前不同人吹的音頻是 1109.7HZ；固定一個人吹是 1184HZ；音頻是大致一樣。
(4) 討論與傳達	吹氣部份，是否能找到減少吹不出聲音及減少人為誤差方法

第二代 氣球吹氣

問題解決	說明
(1) 觀察與定題	以氣球吹氣，是否能穩定吹出音頻？
(2) 計劃與執行	<1>用打氣機打氣，氣球套住直笛的笛頭，進行吹奏。 <2>用打氣機打氣，氣球套住簧片直笛的笛頭，進行吹奏。
(3) 分析與發現	發現直笛能順利吹奏，但送氣量不太穩定；簧片直笛無法吹出聲音
(4) 討論與傳達	吹氣部份，是否能找到較大送氣量方法

第三代 板擦機吹氣

問題解決	說明
(1) 觀察與定題	用板擦機吹出來的笛子聲音，是否會影響音頻？
(2) 計劃與執行	用板擦機改良人為吹氣方式，優點是送氣過程中不費力，而且可以吹出之前人為吹不出的聲音來。
(3) 分析與發現	以實驗一三角形簧片長度 0.6 公分的實驗數據來比較，機器吹的是 1209HZ；音頻與人為吹氣 1109.7HZ 一致。
(4) 討論與傳達	缺點是機器發出聲音太大多，送氣過程中機器需要隔離，加上去除噪音程式 MyEdit，去除背景聲音。



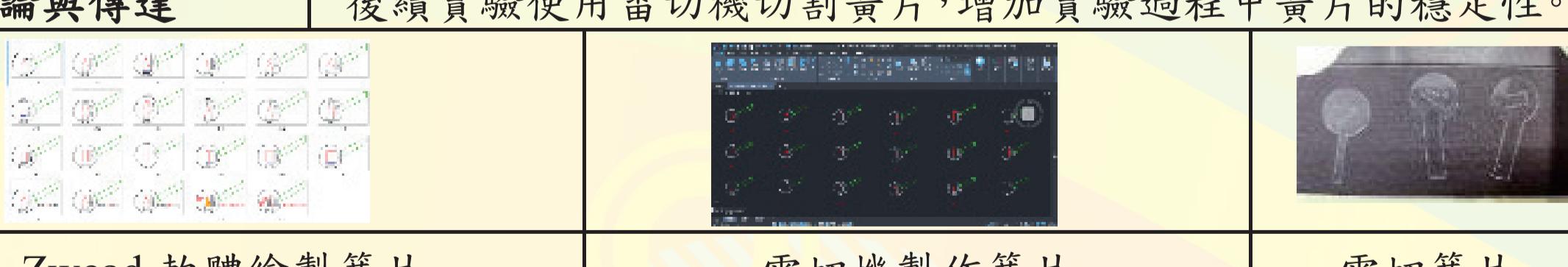
2. 簧片製作

第一代簧片

問題解決	說明
(1) 觀察與定題	製作不同形狀簧片，如何加工？
(2) 計劃與執行	<1>預放置簧片位置的笛子先在紙上蓋印，主要用意是要清楚知道裝置簧片的直徑範圍 <2>蓋印出圓形圖案後，在紙上設計出實驗一到實驗六所有的簧片形狀與尺寸 <3>再將笛子放置在投影片上，沿著笛子周圍描繪在投影片上。之後，將描繪笛子周圍外框後的投影片套上剛剛在紙上畫好的設計圖，用油性筆描繪在投影片上 <4>將描繪的簧片小心地沿著邊緣剪下，再將剪下的簧片放在切割墊上，簧片周圍用膠帶黏貼以防在切割簧片的時候滑脫。
(3) 分析與發現	<1>簧片大小不一致，有時剪完發現太大笛頭闔不上去，或是太小會有空隙就要重做一次。 <2>其次，在切割簧片的時候，施力太大力簧片切壞，所以人為的施作會有太多的誤差。
(4) 討論與傳達	是否能找到減少人為的施作會有太多的誤差方法？

第二代簧片

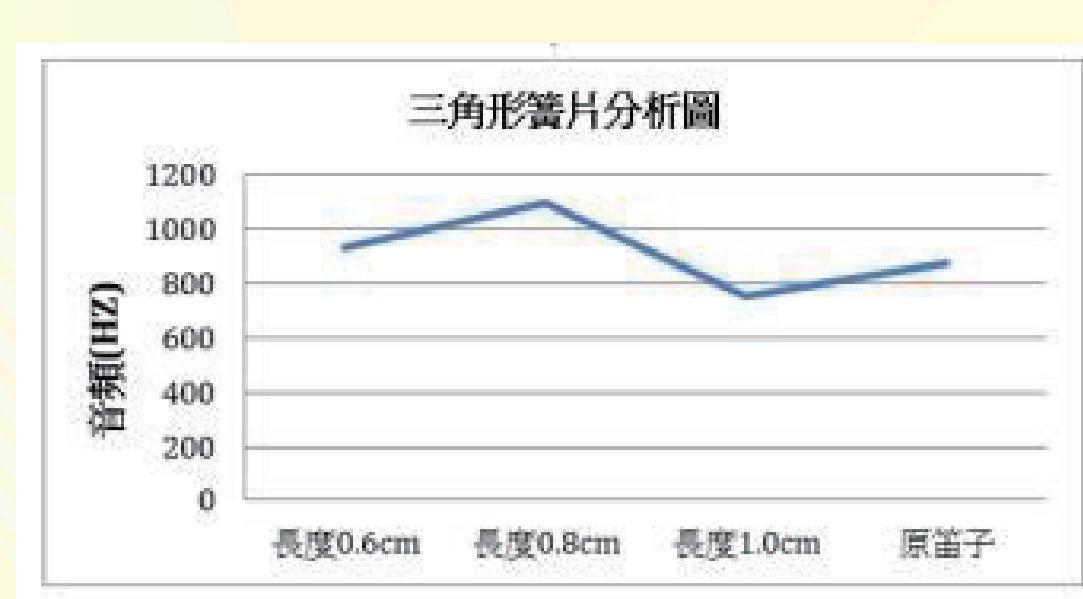
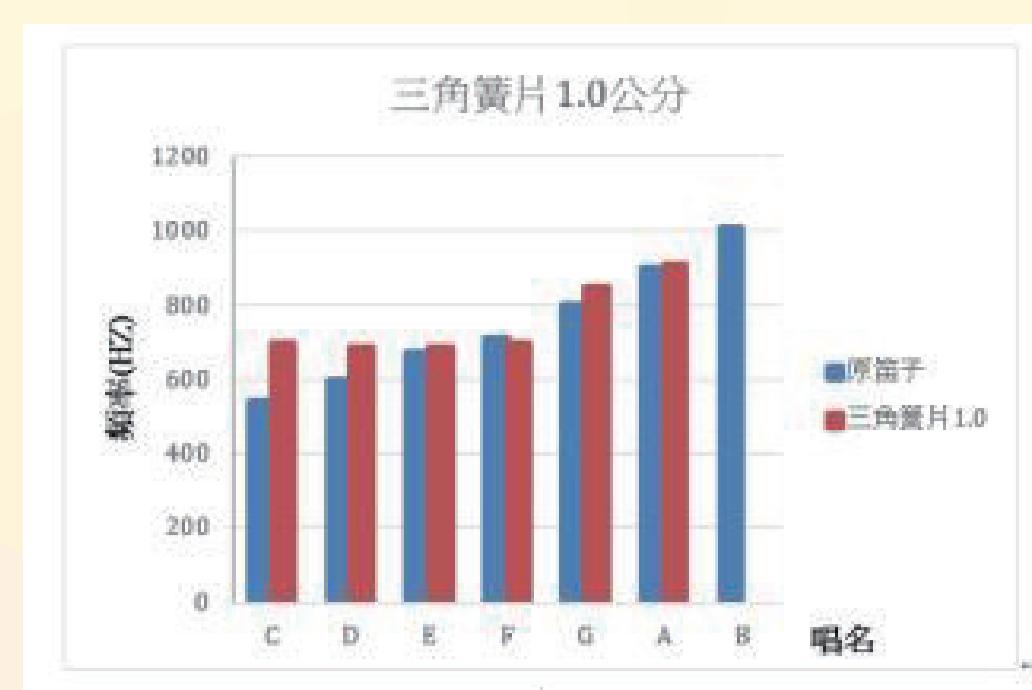
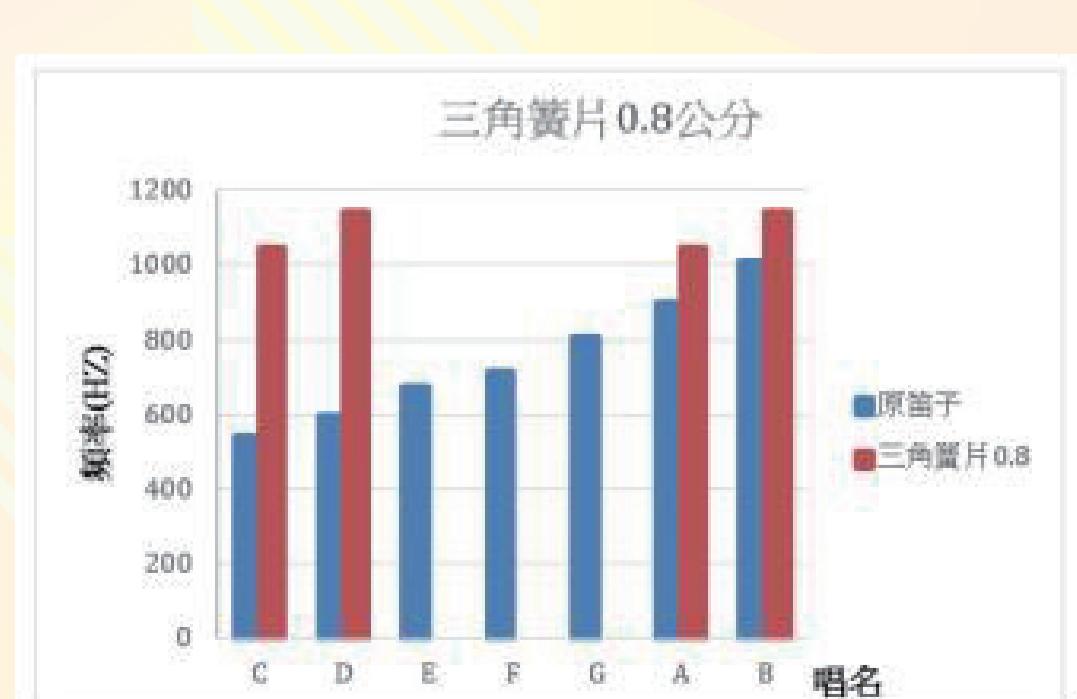
問題解決	說明
(1) 觀察與定題	雷切機方式製作不同形狀簧片是否可行？
(2) 計劃與執行	<1>先在電腦 Zwcad 繪圖軟體繪製所有的簧片。 <2>將繪製好的簧片，進行雷切。
(3) 分析與發現	用雷切機，雷切邊緣整齊且誤差少。
(4) 討論與傳達	後續實驗使用雷切機切割簧片，增加實驗過程中簧片的穩定性。



伍、研究結果

實驗一：三角形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響

- 甲、操縱變因:不同長度(0.6 公分、0.8 公分、1 公分)
乙、控制變因:三角形簧片寬度 0.4 公分，簧片材質，簧片厚度。
丙、實驗結果整理如下。



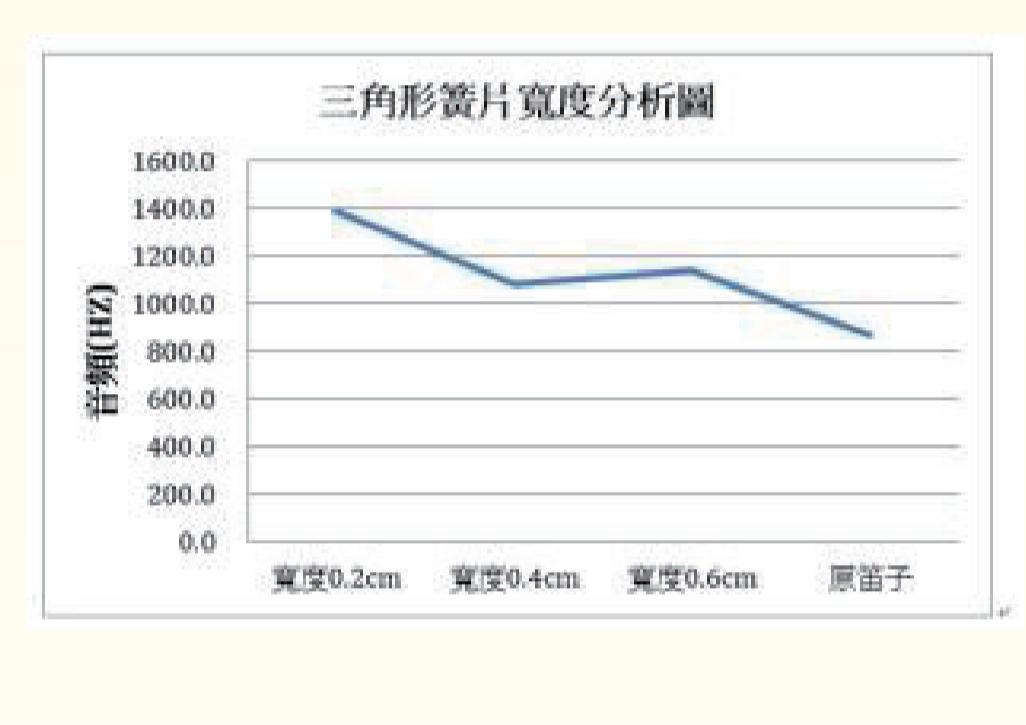
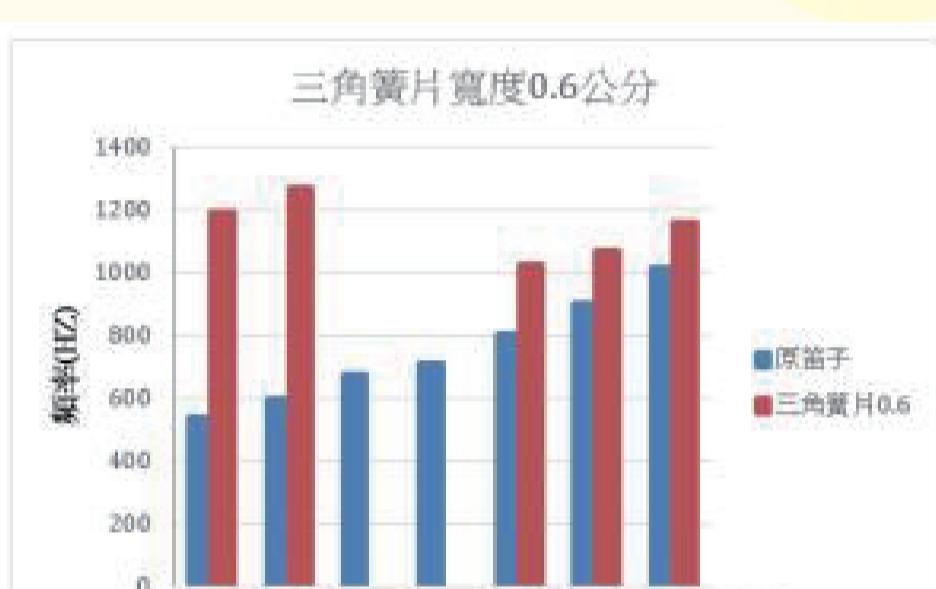
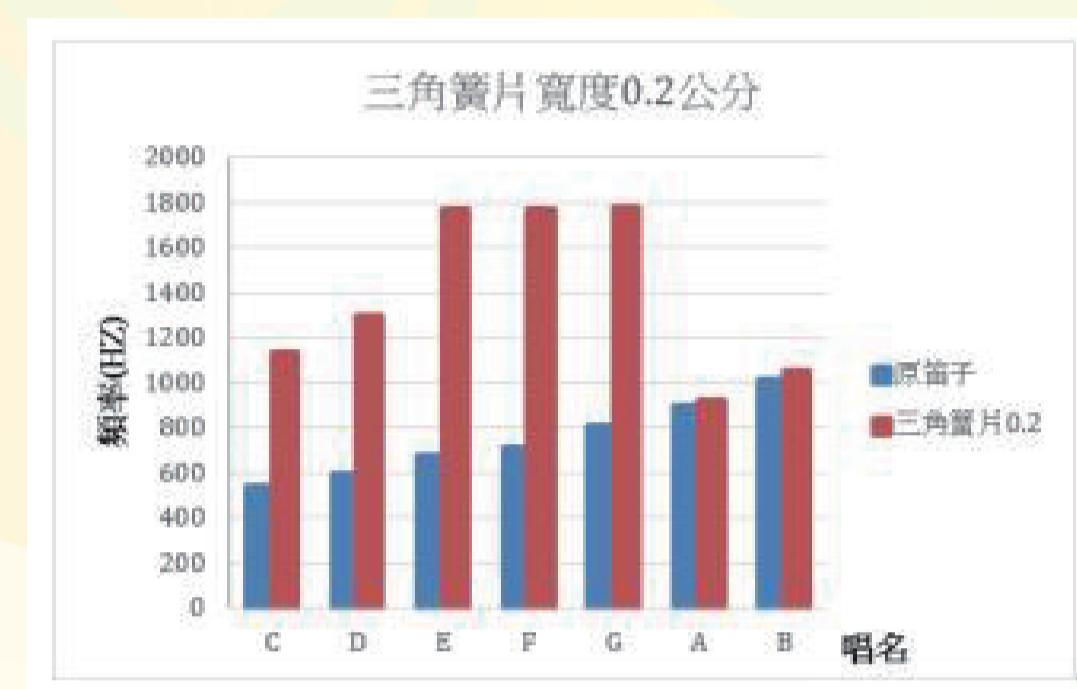
丁、討論：

三角形簧片長度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
長度 0.6cm	933.9	-29.3	7	7.1%
長度 0.8cm	1093.2	-20.8	4	25.3%
長度 1cm	754.3	-29.7	6	-13.5%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上三角形簧片(不同長度)時，會產生(1)頻率移動(2)指法無法吹出聲音。長度 1cm 與長度 0.8cm，分別吹出 6 個音及 4 個音。長度 0.8cm 與 0.6cm 三角形簧片與一般直笛比較，會將頻率往上移動，分別上升 25.3% 與 7.1%。

實驗二：三角形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響

- 甲、操縱變因:不同寬度(0.2 公分、0.4 公分、0.6 公分)
乙、控制變因:三角形簧片長度 0.8 公分，簧片材質，簧片厚度。
丙、實驗結果整理如下。



丁、討論：

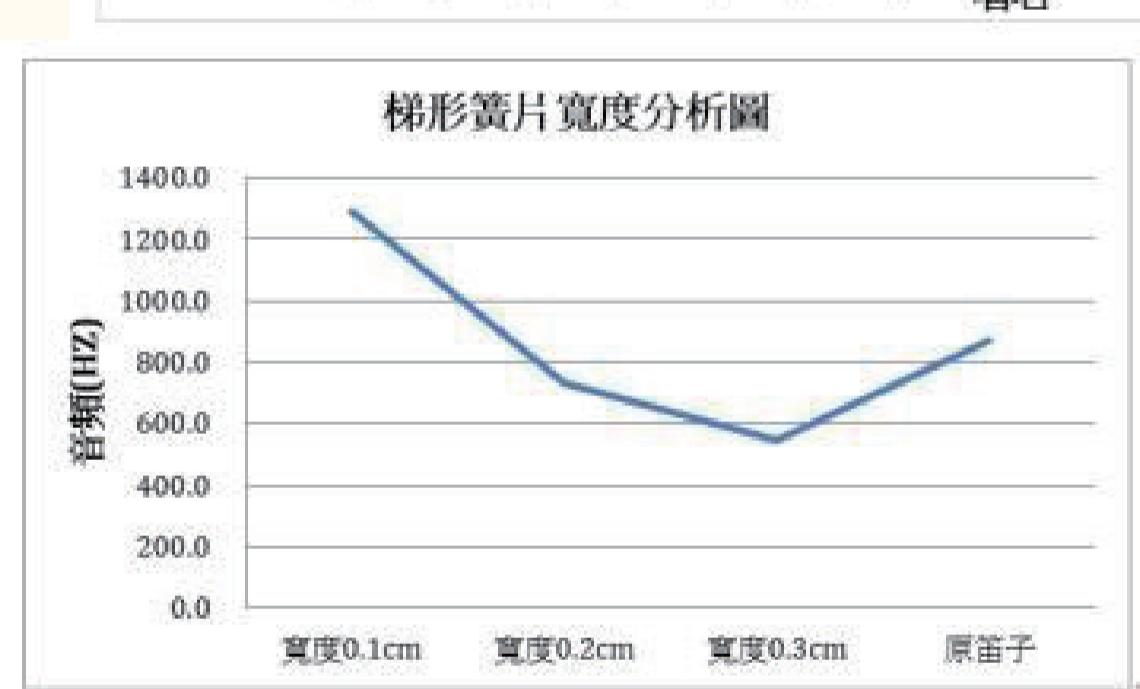
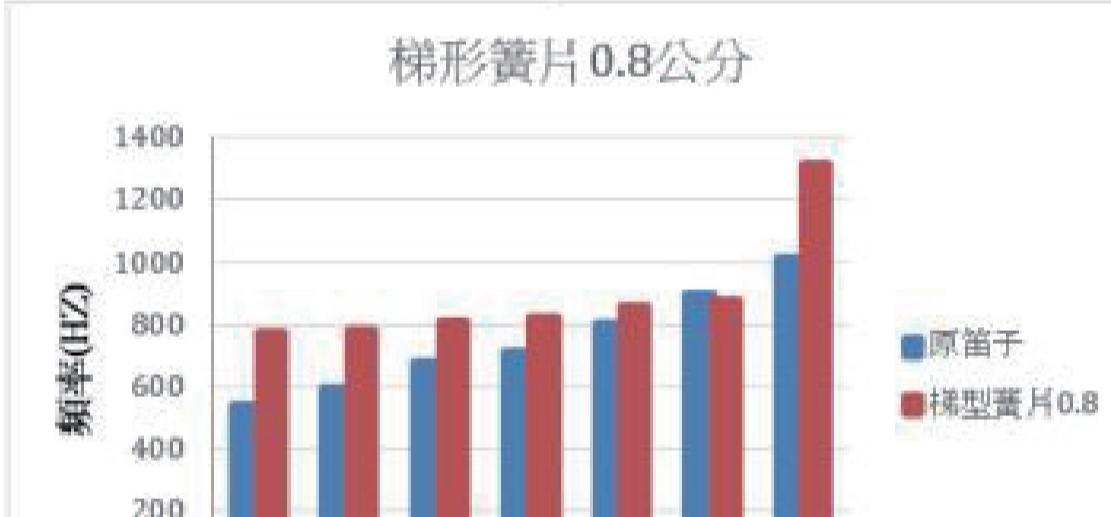
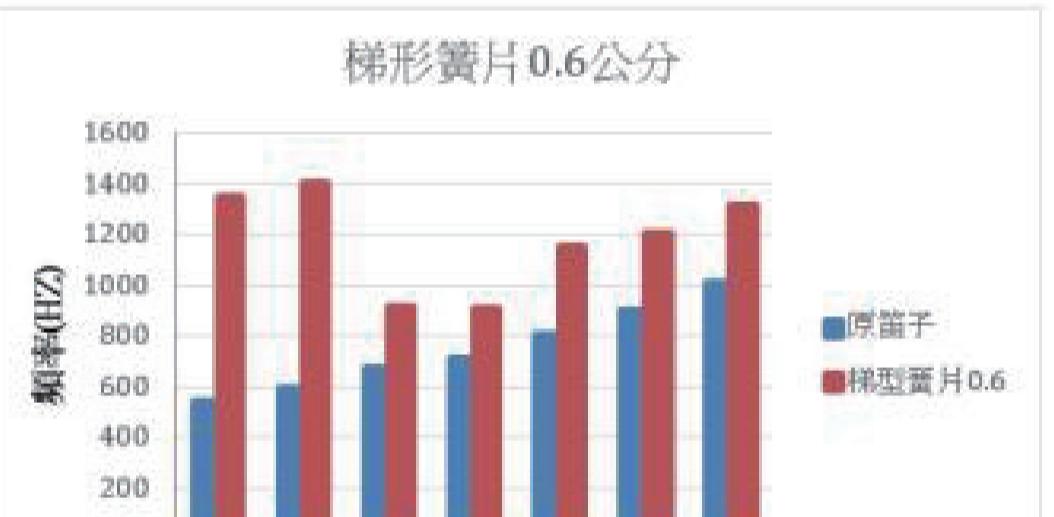
從實驗結果整理如下:

三角形簧片寬度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
寬度 0.2cm	1388.7	-22.2	7	59.2%
寬度 0.4cm	1093.2	-20.8	4	25.3%
寬度 0.6cm	1141.5	-24.7	5	30.9%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上三角形簧片(不同寬度)時。寬度由 0.2cm 到 0.6cm 變化時，與一般直笛比較，會將頻率有往上移動，上升 25.3%-59.2%。寬度 0.4cm 時，吹出音名數只有 4 個音。

實驗三：梯形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響

- 甲、操縱變因:不同長度(0.6 公分、0.8 公分、1 公分)
乙、控制變因: 梯形簧片下寬度 0.4 公分，上寬度 0.2 公分簧片材質，簧片厚度。
丙、實驗結果整理如下。



丁、討論：

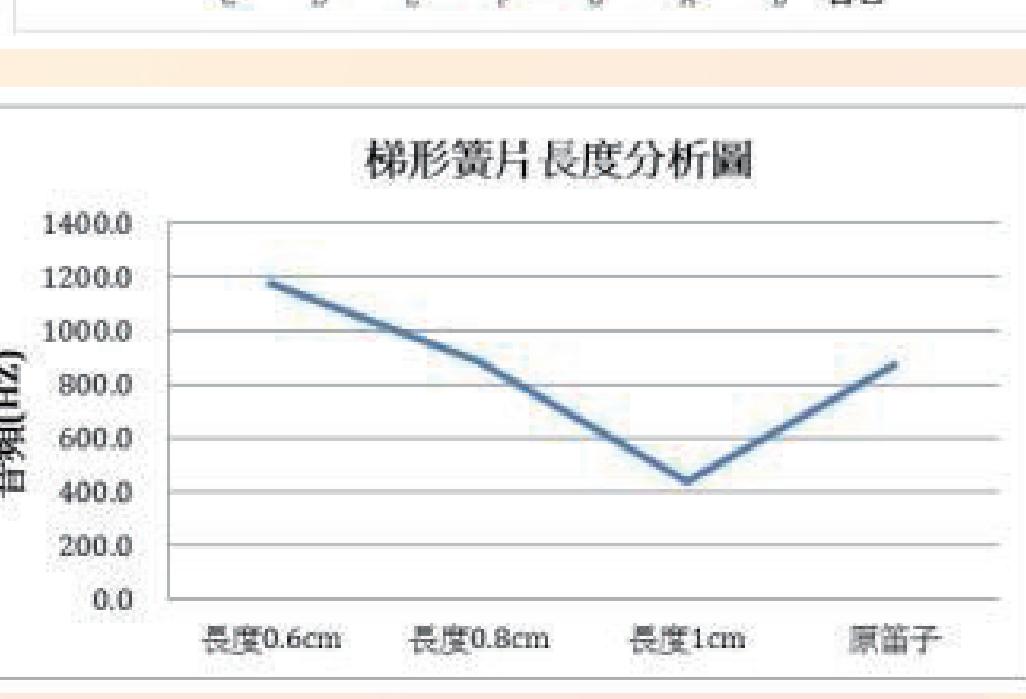
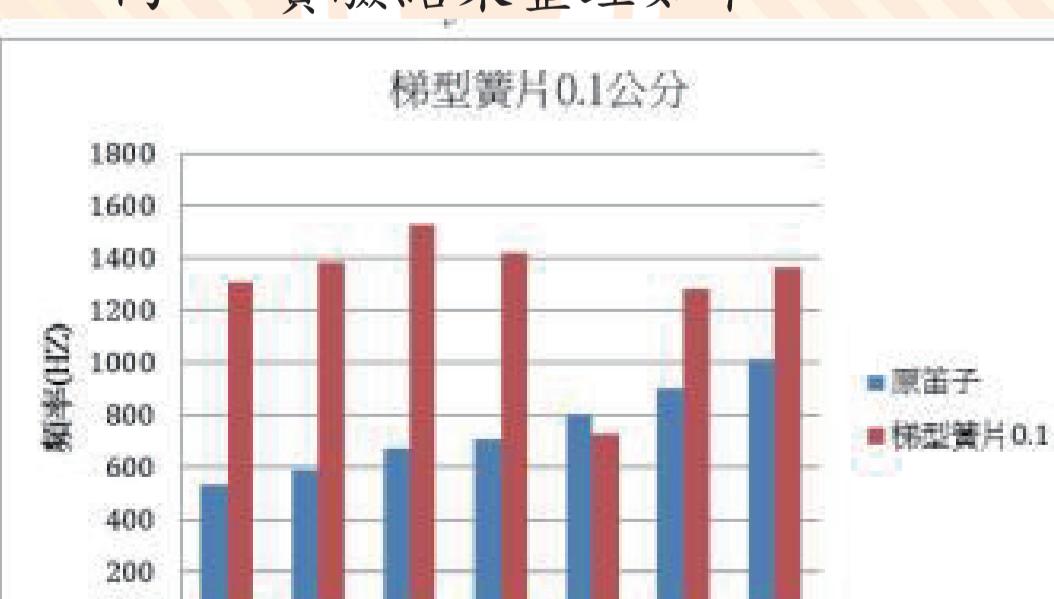
從實驗結果整理如下:

梯形簧片不同長度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
長度 0.6cm	1176.8	-27.0	7	34.9%
長度 0.8cm	889.3	-27.3	7	2.0%
長度 1cm	436.7	-42.0	1	-49.9%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上梯形簧片表明簧片長度越長，振動頻率越低，導致音高下降。而寬度 1 公分平均音頻 436.7HZ (其中有 6 個音吹不出聲音)，簧片直笛與直笛音頻比較，有明顯的變化。且平均音量變小。

實驗四：梯形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響

- 甲、操縱變因:不同上寬度(0.1 公分、0.2 公分、0.3 公分)
乙、控制變因: 梯形簧片長度 0.8 公分，底寬 0.4 公分，簧片材質，簧片厚度。
丙、實驗結果整理如下。



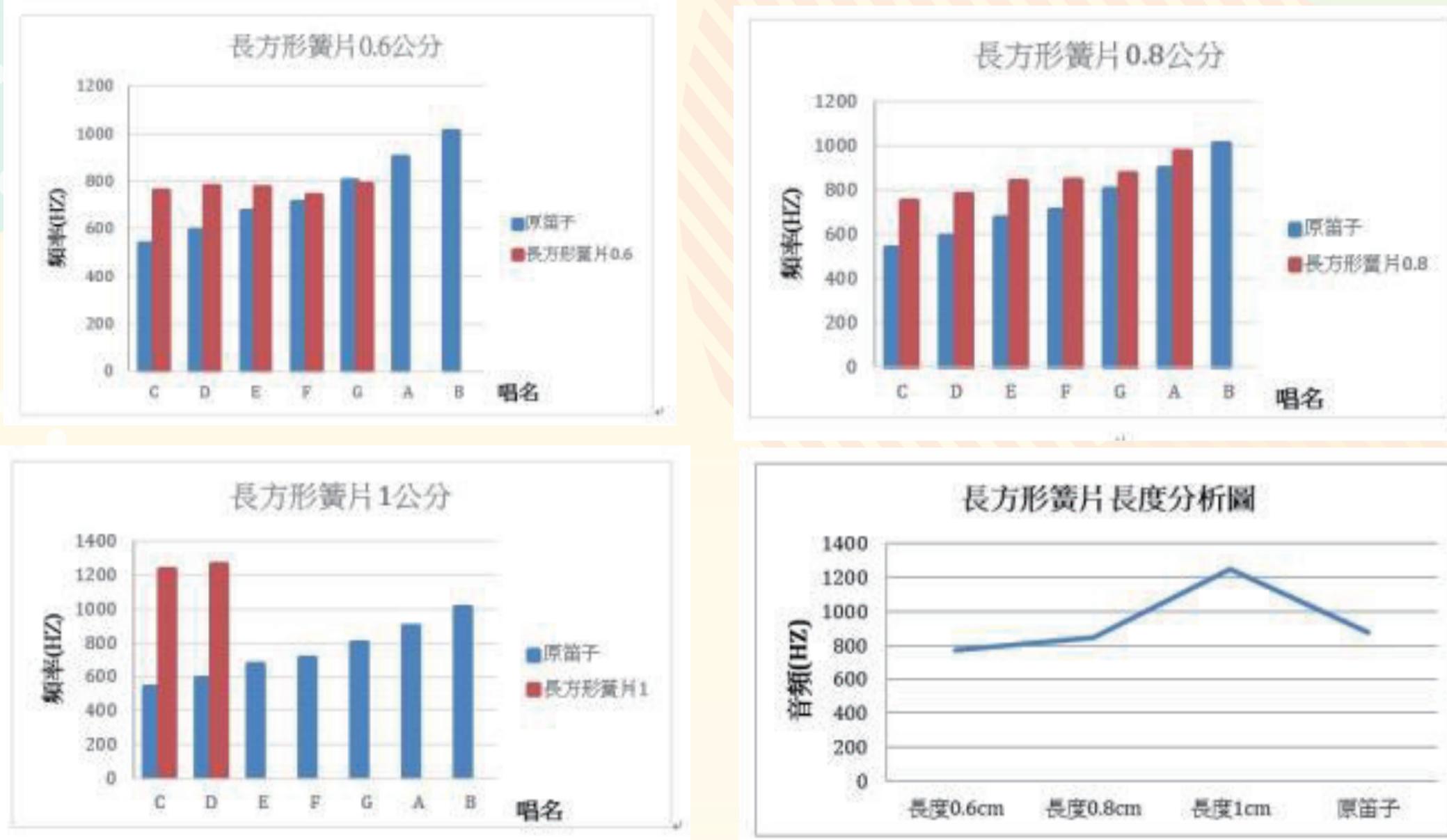
丁、討論：

梯形簧片上寬度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
上寬度 0.1cm	1288.8	-24.8	7	47.8%
上寬度 0.2cm	733.7	-28.8	5	-15.9%
上寬度 0.3cm	545.0	-36.6	2	-37.5%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上梯形簧片表明簧片寬度越寬長，振動頻率越低，導致音高下降。寬度由 0.1cm 到 0.3cm 變化時，發現可吹出的音名數目逐步減少，與一般直笛比較，頻率有顯著變化。

實驗五：長方形簧片，不同長度對「音調」、「音量」的影響

- 甲、操縱變因：不同長度(0.6公分、0.8公分、1公分)
乙、控制變因：長方形簧片寬度 0.4 公分，簧片材質，簧片厚度。
丙、實驗結果整理如下。



丁、討論：

從實驗結果整理如下：

長方形簧片長度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
長度 0.6cm	767.8	-23.8	5	-12.0%
長度 0.8cm	844.3	-22.3	6	-3.2%
長度 1cm	1245.2	-22.3	2	42.8%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上長方形簧片表明簧片長度越長，震動頻率越高，導致音高上升。而長度 0.6 公分平均音頻 757.8HZ，(其中有 2 個音吹不出聲音)，長度 0.8 公分平均音頻 844.3HZ，(其中有 1 個音吹不出聲音)，長度 1 公分平均音頻 1245.2HZ，(其中有 5 個音吹不出聲音)。

實驗六：長方形簧片，不同寬度對「音調」、「音量」的影響

- 甲、操縱變因：不同寬度(0.2 公分、0.4 公分、0.6 公分)
乙、控制變因：長方形簧片長度 0.8 公分，簧片材質，簧片厚度。
丙、實驗結果：如下。



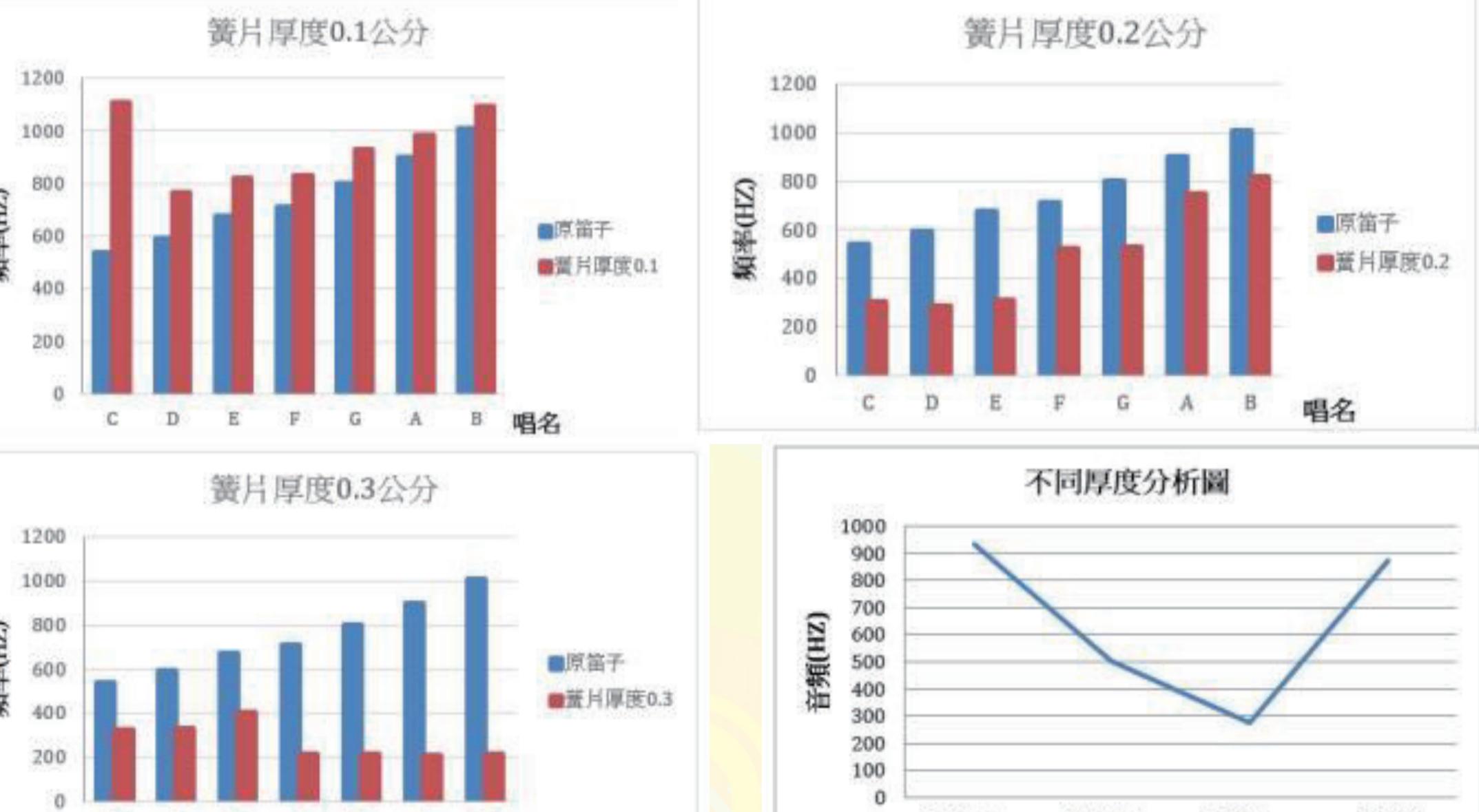
丁、討論：

長方形簧片	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
長度 0.2cm	1128.9	-19.4	7	29.4%
長度 0.4cm	0	0	0	0%
長度 0.6cm	564.5	-37.4	4	-33.3%
一般笛子	846.7	-28.4	7	0.0%

從實驗結果得知，長度 0.4cm 長方形簧片，無法發出聲音。加上簧片的笛子與原笛子的音頻比較，從表格中發現數據顯示長方型簧片長 0.2 公分與原笛子音頻提高 29.43%。

實驗七：不同厚度對「音調」、「音量」的影響

- 甲、操縱變因：不同厚度(0.1 公分、0.2 公分、0.3 公分)
乙、控制變因：三角形簧片寬度 0.4 公分，長度 0.8 公分，簧片材質。
丙、實驗結果：如下。



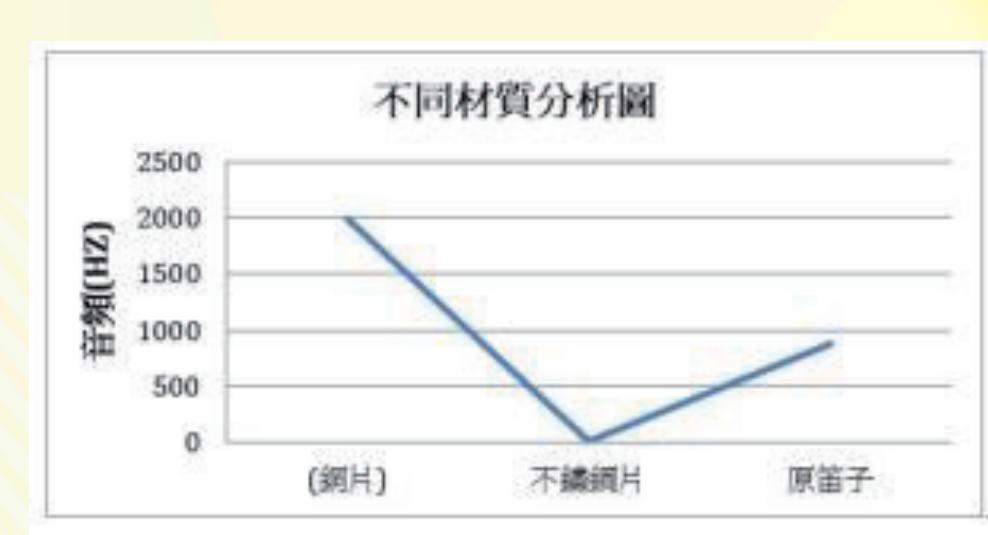
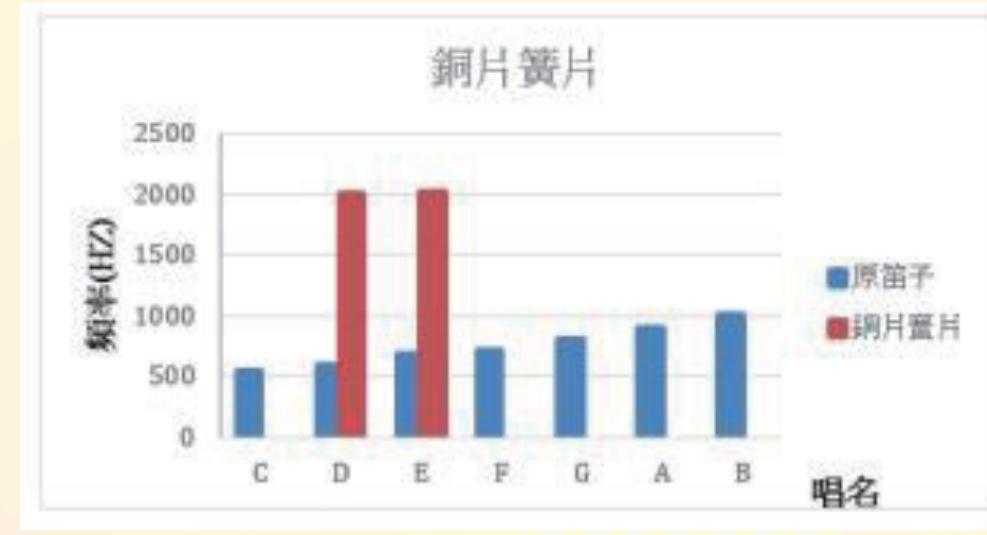
丁、討論：

不同厚度	平均頻率	平均音量	指法吹出音名數	+-%
厚度 0.1cm	933.9	-29.3	7	7.1%
厚度 0.2cm	502.5	-38.1	7	-42.4%
厚度 0.3cm	274.8	-35.7	7	-68.5%
一般笛子	872.2	-21.9	7	0.0%

從實驗結果得知，當直笛加上不同厚度的簧片表明簧片厚度越厚，振動頻率下降，加上簧片的笛子與原笛子的音頻比較，當厚度的變大時，音量變小。

實驗八：不同材質對「音調」、「音量」的影響

- 甲、操縱變因：不同材質(銅片)。
乙、控制變因：三角形簧片長度 0.8 公分，寬度 0.4 公分，厚度 0.15 公分。
丙、實驗結果整理如下：



陸、小結

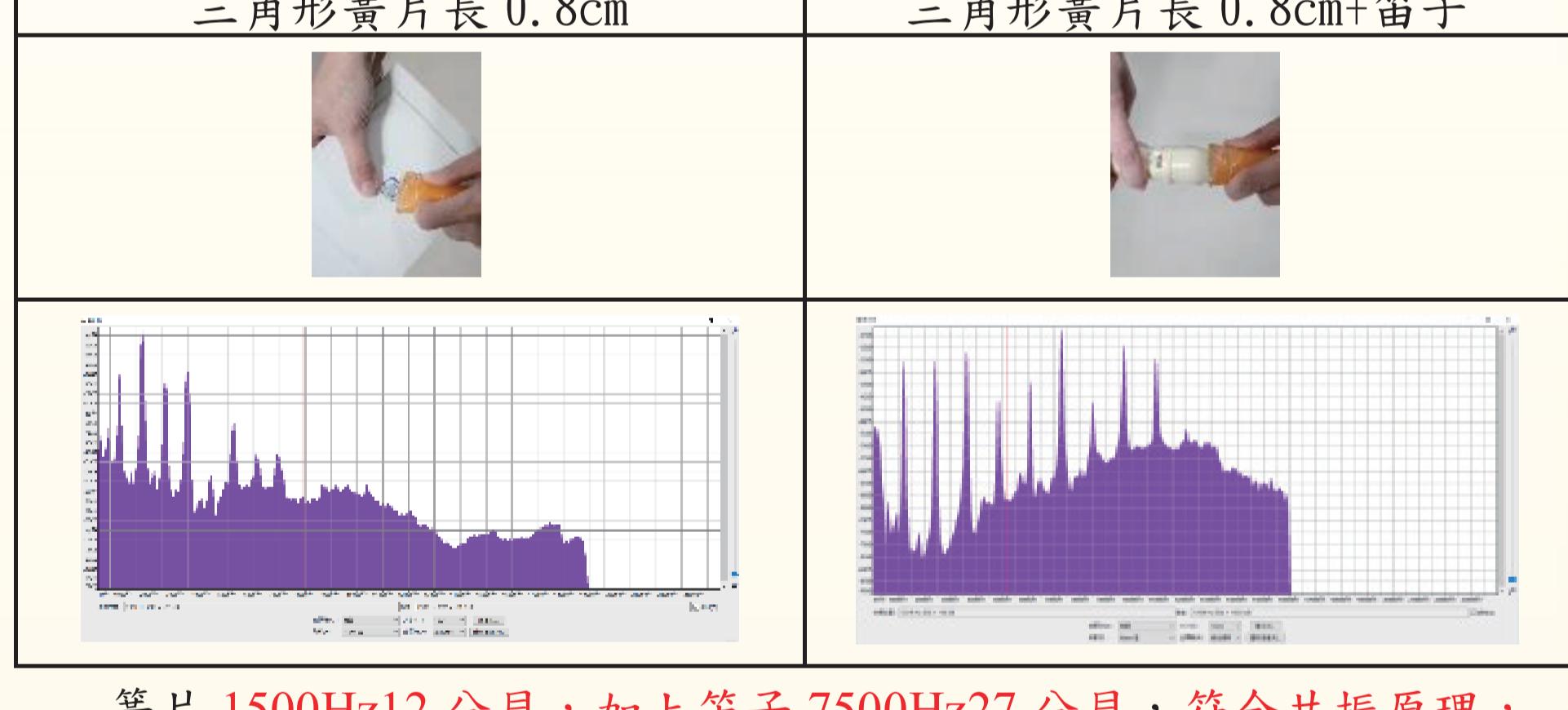
- 由實驗一發現，當直笛加上三角形簧片(不同長度)時。長度 1cm 與長度 0.8cm，分別吹出 6 個音及 4 個音。長度 0.8cm 與 0.6cm 三角形簧片與一般直笛比較，會將頻率往上移動，分別上升 25.3% 與 7.1%。。
- 由實驗二發現，加上三角形簧片(不同寬度)時。寬度由 0.2cm 到 0.8cm 變化時，與一般直笛比較，會將頻率有往上移動，上升 24.6%-59.2%。寬度 0.6cm 時，吹出音名數只有 5 個音。
- 由實驗三發現，當直笛加上梯形簧片表明簧片長度越長，振動頻率越低，導致音高下降。而寬度 1 公分平均音頻 436.7HZ，(其中有 6 個音吹不出聲音)，簧片直笛與直笛音頻比較，有明顯的變化。且平均音量變小。
- 由實驗四發現，當直笛加上梯形簧片表明簧片寬度越寬長，振動頻率越低，導致音高下降。寬度由 0.1cm 到 0.3cm 變化時，發現可吹出的音名數目逐步減少。
- 由實驗五發現，當直笛加上長方形簧片表明簧片長度越長，振動頻率越高，導致音高上升。而長度 0.6 公分平均音頻 757.8HZ(有 2 個音吹不出)，長度 0.8 公分平均音頻 844.3HZ(有 1 個音吹不出)，長度 1 公分平均音頻 1245.2HZ，(有 5 個音吹不出)。
- 由實驗六發現，長度 0.4cm 長方形簧片，無法發出聲音。加上簧片的笛子與原笛子的音頻比較，從表格中發現數據顯示長方型簧片長 0.2 公分與原笛子音頻提高 29.43%。
- 由實驗七發現，當直笛加上不同厚度的簧片表明簧片厚度越厚，振動頻率下降，加上簧片的笛子與原笛子的音頻比較，當厚度的變大時，音量變小。
- 由實驗八發現，當直笛加上不同材質的簧片表明簧片銅片材質平均頻率 2005.0HZ(有 5 個音吹不出聲音)，而不鏽鋼簧片是完全吹不出聲音。
- 運用問題解決模式，開發製作簧片及吹氣方法，將人為誤差去除，增加實驗可靠性。
- 從共振分析得知，當簧片峰值頻率接近笛子自然頻率時，音量會增加。但當簧片峰值頻率沒有接近笛子自然頻率時，無法發出聲音。
- 只要加上簧片，直笛吹出頻率可以從高音笛變成超高音笛。同一直笛，兩種功能。
- 將實驗結果整理如下，依據頻率，發現簧片直笛可以從高音笛變成超高音笛。

形狀尺寸	吹出音名的打勾						HZ	笛子形式	
	C	D	E	F	G	A	B		
三角寬 0.2	✓	✓			✓	✓	✓	1388.7	超高音笛
梯寬 0.1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	1288.8	超高音笛
長方長 1	✓	✓						1245.2	超高音笛
材質銅		✓	✓					2005.0	超高音笛

柒、討論

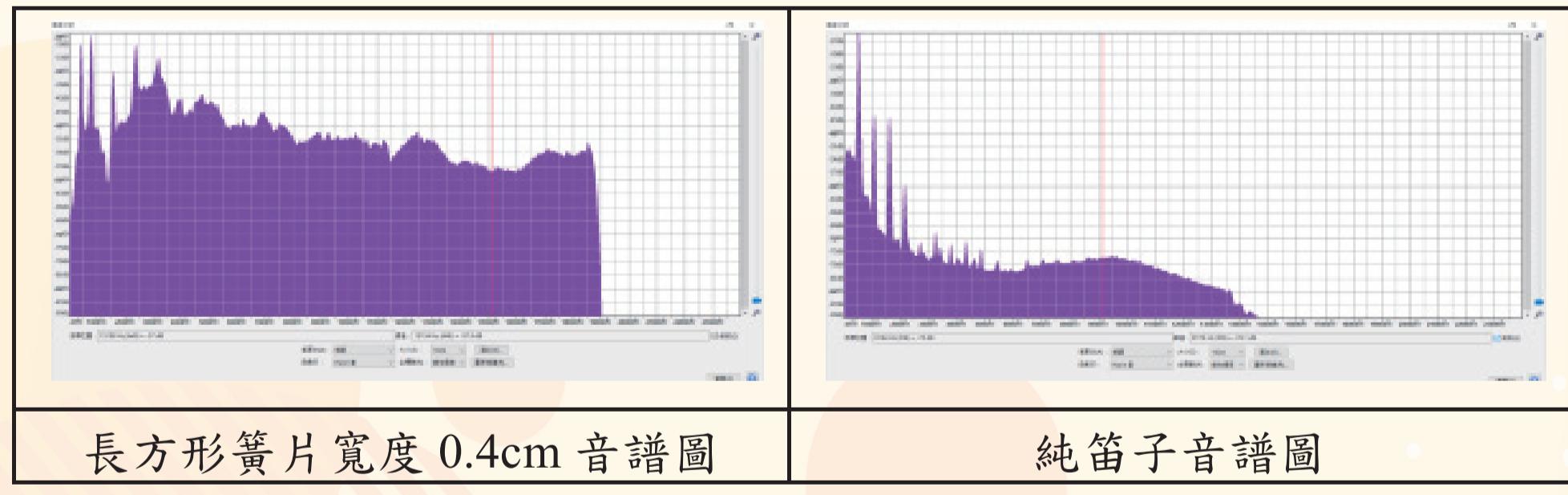
當直笛加入簧片，有的可吹出聲音，有的無法出聲，以頻譜分析，是否與共振有關。

(1)三角形簧片長 0.8cm 加入直笛，可吹出聲音，以頻譜分析如下



簧片 1500Hz 12 分貝，加上笛子 7500Hz 27 分貝，符合共振原理，共振使振幅加大。管長是複合音波長的整倍數且固定開管長度，複合音最大共振頻率是原來的五倍。

(2)長方形簧片寬度 0.4cm 加入直笛，無法吹出聲音，分別測出簧片及笛子頻譜



發現簧片測出音頻第一峰值 435HZ、第二峰值 789HZ、第三峰值 1582HZ。純笛子音譜，音頻第一峰值 539HZ、音頻第二峰值 1082HZ。兩者比對，音頻沒有接近，不會產生共振，所以無法發出聲音。

捌、參考資料

- [1]張芸嫚 中音直笛指法 <https://www.youtube.com/watch?v=EUOfF3agYA>
- [2]康軒版 自然與生活科技 五下 聲音與樂器
- [3]audacity 取自維基百科 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/Audacity>
- [4]陳英傑 「Lubuw」～泰雅口簧琴的科學 教育部 108 學年度中小學科學教育專案
- [5]太魯閣族創客 創客新契機 一童一口簧 第九屆原住民雲端科展
- [6]音頻對照表 <https://ithelp.ithome.com.tw/articles/10317470?sc=rss.iron>
- [7]《振動噪音科普專欄》 http://aitanhv.blogspot.com/2018/03/blog-post_19.html
- [8]音高頻率表 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%9F%B3%E9%AB%98>
- [9]基本頻率 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E9%A0%BB>
- [10]共振 均一教育平台 <https://www.junyiacademy.org/junyi-science/science-high/main-seni-phy/main-seni-ph-ele3/main-seni-ph-ele3-2-v/U2HCtZH2xAM>

[作品說明書中所有照片皆為作者自行拍攝]