

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 物理科

最佳團隊合作獎

080104

中國五聲音階打哪來？

—從雲南古老樂器「吐良」中找答案

學校名稱：桃園市中壢區新明國民小學

作者： 小五 周書妤 小五 張靖瑜 小五 朱宏家 小五 陳鵬文	指導老師： 吳佳瑾 周文壕
---	-------------------------

關鍵詞：吐良、單孔笛、頻率

摘要

我們以 PVC 水管複製還原雲南古老樂器「吐良」，雖然看似簡單的只有單一吹孔，但在管子的兩端開口用不同按法及吹入不同氣流下，音高會有不同的表現！最後歸納出它可呈現的音階排列。發現：中國古老樂器沒有 Fa 音和 Si 音，只有 Do、Re、Mi、Sol、La，果然就是我們中國音樂裡說的「宮、商、角、徵、羽」中國五聲音階。

研究動機

四年級時，藝術與人文課介紹到「中國五聲音階—宮、商、角、徵、羽」，我們看到音樂老師吹著一支只有一個孔的笛子，他竟然可以只改變手勢和吹氣力量，就吹出一首首美妙的樂曲，這讓我們看得目瞪口呆！一問之下，才知道這種樂器叫做「吐良」它是一種來自中國雲南(景頗族)原生態特色民族樂器。而老師也仿效似的把自己的笛子(橫)壓住靠外端的五個洞口、只剩最中央一洞時吹奏，竟可多吹出 Sol、Sol、Re、Sol、Si 五個音！可見單孔的管子是可以在條件不同之下吹奏出許多不同聲音的，於是便展開了我們對此的研究。

● 中國五聲音階

五聲音階	宮	商	角	徵	羽
唱名	Do	Re	Mi	Sol	La

圖 1.中國五聲音階，截取自六下康軒版藝術與人文課本

研究目的

- 一、探討「吐良」的演奏方式。
- 二、設法以 PVC 水管複製還原吐良。
- 三、探討吸管的吹入條件對複製吐良所發出之聲音的影響。
- 四、測量不同按法及不同氣流下，各音高及響度的表現。
- 五、探討改變遮蔽出音孔的範圍比例時，對音高的影響。
- 六、歸納複製吐良可呈現的音階排列。

研究設備及器材

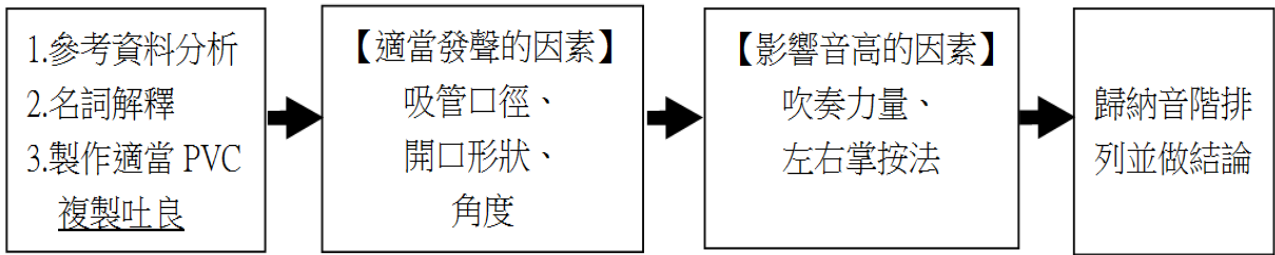
PVC 水管、游標尺、筆電、分貝計、調音軟體 AP Tuner、波形偵測軟體 TureRTA、吸管、球針、空壓機、單球浮子流量計、以木板及三爪夾自製固定座。



補充：調音設備選用「調音軟體 AP Tuner」，可明確換算出所表現的音高(頻率)數值。



研究過程或方法

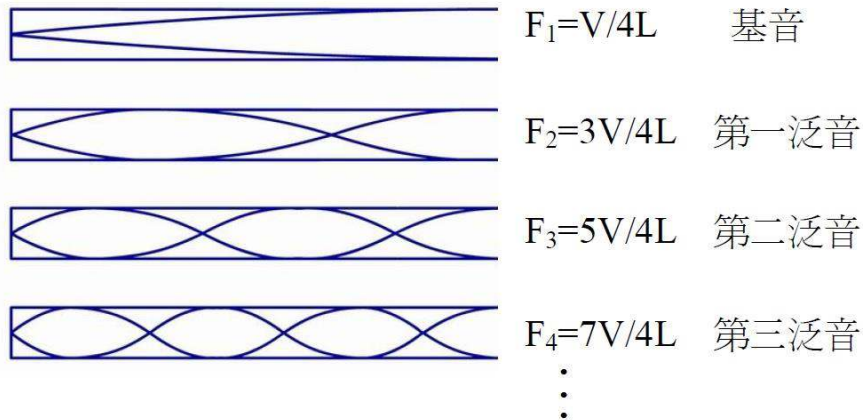


參考資料分析

1. 聲波在閉管及開管內所生成的駐波位移模式：【參考一】

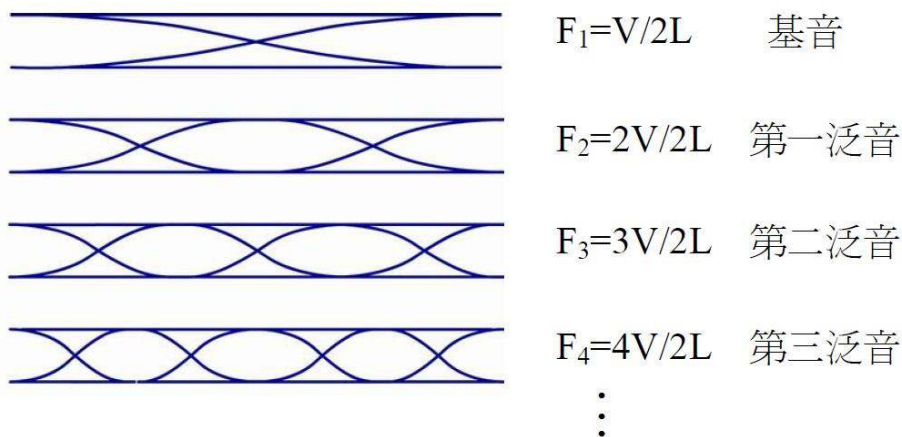
F 頻率(振動次數/時間)=V(波速：距離/時間)/波長，以下基音和泛音有不同波長，頻率為：

(1) 閉管：



閉管樂器中，頻率 F 的表現通式為： $F_n = \frac{nV}{4L}$ ， $n=1、3、5\dots$ ，V 為聲速，L 為共振管長。

(2) 開管



開管樂器中，頻率 F 的表現通式為： $F_n = \frac{nV}{2L}$ ， $n=1、2、3\dots$ ，V 為聲速，L 為共振管長。

2. 中國管樂的發展歷程：(從一孔到多孔)【參考二】

(1) 單孔：骨哨 → 吐良

(2) 多孔：

(A) 雙手捧吹(橫)：拱宸管、雁飛簾。

(B) 吹向一側：笛(橫)、簫(橫)、日本尺八(直吹)。

名詞解釋

【參考三、四】

1. 唱名與音名：

(1) 以圖 2 來說明，「唱名」Do、Re、Mi、Fa、So、La、Si、Do，相對應的「音名」是 C、D、E、F、G、A、B、C，第 2 個 Do 比第 1 個 Do 聲音高，假如第 1 個 Do 叫 4C(頻率 261.63Hz)，則第 2 個 Do 就叫 5C(頻率 523.25Hz)，5C 的頻率是 4C 的 2 倍；4C 一般稱為中央 Do，5C 稱為高音 Do，所以 3C 稱為低音 Do。

(2) 從圖 1 可看出：聲音越高，音與音的頻率差距越大。

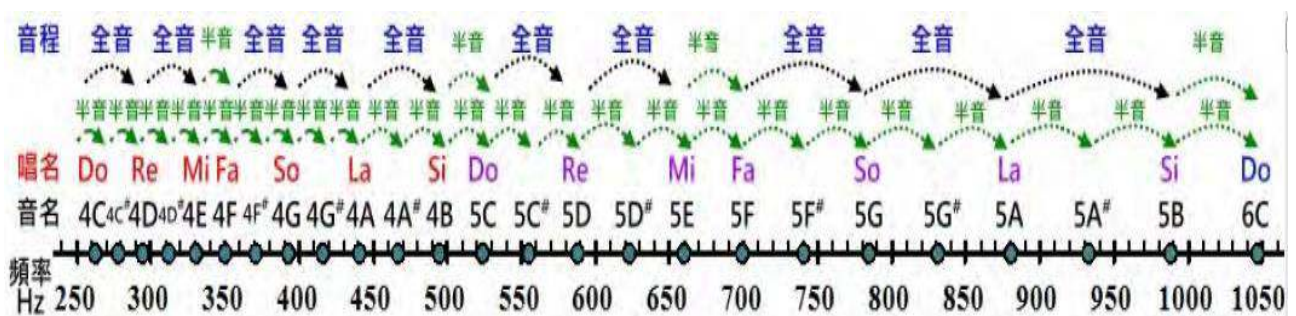


圖 2：以頻率數線說明唱名、音名、音程

2. 音高：

以圖 3 來說明，調音軟體所顯示的 4C+20 的 +20 意思是聲音比 4C 高了從 4C(261.63Hz) ~ 4C# (277.63Hz) 的 20%，頻率為 264.74Hz(算式 1)；而 4C-20 的頻率比 4C 低了從 3B (246.94Hz) ~ 4C (261.63Hz) 的 20%，頻率為 258.69Hz(算式 2)；當聲音的頻率比 4C 高過「4C# - 4c」的 50%時，調音軟體的顯示會從 4C+X 變成 4C#-X, X ≤ 50, 例如 4C#-45；當音高在 ±49.9 內，都算在標準音高人耳誤差範圍內，以 4C 為例，4C ± 49.9，音高仍判定為 4C。4C 的標準頻率為 261.63Hz，所以頻率範圍在 254.28(4C+49.9)~269.40(4C-49.9)之間，都算 4C。

(1) 算式 1： $4C+20=4C+(4C\#-4C)\times 20\%=261.63+(277.18-261.63)\times 20\%=264.74$

(2) 算式 2： $4C-20=4C-(4C-3B)\times 20\%=261.63-(261.63-246.94)\times 20\%=258.69$

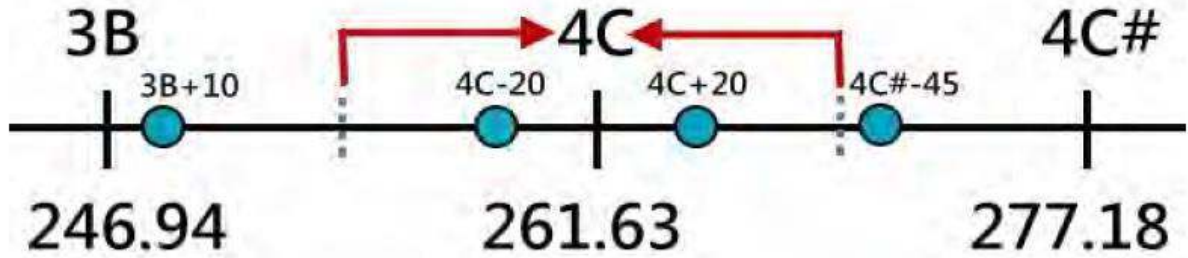


圖 3：調音軟體數據說明

3. 音程：

看圖 4， $4C \rightarrow 4C\#$ 為半音， $4C\# \rightarrow 4D$ 為半音， $4C \rightarrow 4D$ 相隔 2 個半音為全音，以 C 大調為例， $4C \sim 5C$ 的音程為「全音→全音→半音→全音→全音→全音→半音」，若以 $4Bb$ 當做 Do 時，當音程與 C 大調相同時，標準音高「 $4Bb \rightarrow 5C \rightarrow 5D \rightarrow 5Eb \rightarrow 5F \rightarrow 5G \rightarrow 5A \rightarrow 5Bb$ 」，此八音唱名即為 Do、Re、Mi、Fa、Sol、La、Si、Do 稱降 B 大調；所以不論對應的標準音高是不是 $4C \sim 5C$ ，只要音程與 C 大調相同，都能吹出 Do~Do。

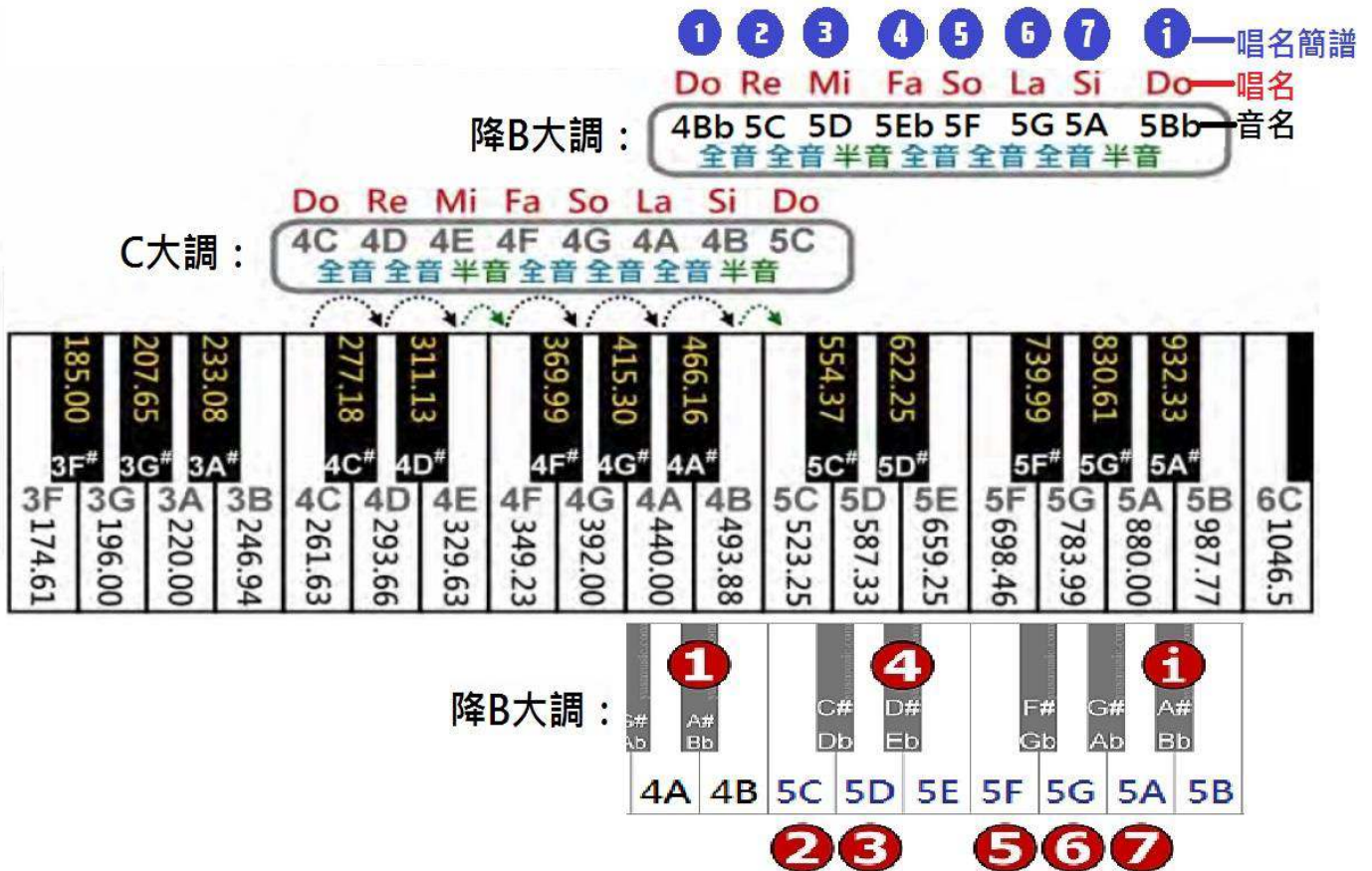


圖 4：以鋼琴鍵說明 C、降 B 大調的音程

4. 泛音 (Overtone):

也稱陪音、諧音，在聲學和音樂中，指一個聲音中除了基頻外其他頻率的音。樂器或人聲等自然發出的音，一般都不會只包含一個頻率（稱純音），而是可以分解成若干個不同頻率的音的疊加。聲音的波形是具有周期性的，可以分解成若干個不同頻率純音的疊加。這些頻率都是某一頻率的倍數，這一頻率就稱作基頻(基音)，也就決定了這個音的音高。

除了本說明書 P.4 的駐波圖中，泛音頻率皆是基音頻率的整數倍(倍頻泛音)外，其實泛音列中也有許多頻率與基頻為「非整數」關係。

而由於管樂器以嘴唇震動發聲，因此，如銅管樂器可以讓樂手調準自己嘴唇的情況而吹出不同的泛音（諧音）。一個常見的銅管泛音列：

1. 低音 Do (基頻)
2. 中音 Do
3. 中音 Sol
4. 高音 Do
5. 高音 Mi
6. 高音 Sol
- ⋮

查頻率表得知：

唱名	音名	頻率 (Hz)
Do	C4	261.63
$\dot{D}o$	C5	523.25
$\overset{\circ}{S}ol$	F5	698.46
$\ddot{D}o$	C6	1046.5
$\overset{\circ}{M}i$	D6	1174.7
$\overset{\circ}{S}ol$	F6	1396.9

其中只有中音 Do、高音 Do 頻率為基頻 Do 的整數倍，稱倍頻泛音。其餘如中音 Sol、高音 Mi、高音 Sol 之頻率皆「非基頻的整數倍」的也統稱為泛音。

一、 探討「吐良」的演奏方式。

吐良，是景頗、傣、拉祜等民族的一種吹管樂器，至今仍流行於雲南景頗族、怒江傣族、臨滄地區人民手中。景頗語又稱特令、拉庫。雖起源年代已不可考，但許多相關研究說明此物已有超過七千年以上的歷史，且於景頗族遷徙遺跡中發現的「紅山文化遺址」中曾有「單孔玉笛」的出土。

紅山文化是距今一個五、六千年間的部落集團創造的農業文化。最早發現於 1921 年。

在景頗族民間有一傳說：很早以前，有一戶農家曾派兩個兒子去守衛旱谷地，驅趕野獸和鳥雀，保護莊稼。但都先後失蹤了。農家苦尋不到孩子，卻聽到覓食中的猴子叫聲和林中的蟬鳴。於是隨手砍來竹子，中間挖個洞，吹出模仿的音調，以表示這裡的旱谷地有人守護。

這就是最早的吐良。此後，每逢早穀成熟時節，到田邊守護莊稼的孩童，都要吹響吐良。此即預示著即將來臨的豐收。

在景頗山，吐良都由吹奏者自製自用，因選材不同，管身的長短和管徑的大小也各異！管身長而粗者，音色較潤厚；管身短而細者，音色較清朗。

現仍流行於景頗族中的吐良為竹製，管身長短與大小等形制不一，可用 1 根約長 45 公分的細竹管，也有用粗細相差不大，長度相等的 2 支竹管套接而成。它在管身中開一吹孔，其他處無指孔，演奏時，左手拇指至左管口，右手掌心至右管口，兩手做各種悶、放組合，改變管內空氣柱的長短，並配合以吹氣的力度變化而獲得不同的音高，可吹出 2 個八度以上的音。無簧哨管樂器(吐良)又稱(妥任)流行於雲南省德宏州。【參考 5】



圖 5.中國雲南籍任俊宇先生於聖彼得堡

參與「2010 俄羅斯漢語年」的演出截取畫面【參考六】

1. 看圖 5.影片截取畫面討論：

- (1) 樂團演奏所使用的吐良長度不只上文提及的 45 公分長。以一個男性大人的拳頭約有 9 公分寬計算，演奏用的吐良約有 60 公分。
- (2) 吐良的吹孔並非在管身的正中央，而是在靠近演奏者左手較近的地方，即：吹孔距離左出音孔較近、距離右出音孔較遠。

二、設法以 PVC 水管複製還原吐良。

實驗 2-1 → 吹奏吐良試音實驗需多測幾次，最後求平均值？

在科學方法上，若實驗數值可測到小數第一位，則求取十次實驗數值而平均後，可多計一位估計值而至小數第二位。

1. 方法：以音樂老師的竹製吐良來實驗，並請音樂老師試吹十次後記錄。
2. 結果：

表 2-1-1：音樂老師試吹十次的音高結果(左右全開)(平吹)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
音高	Bb4+0.2	Bb4+0.2	Bb4+0.2	Bb4+0.2	Bb4+0.2
	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次
音高	Bb4+0.2	Bb4+0.2	Bb4+0.2	Bb4+0.2	Bb4+0.2

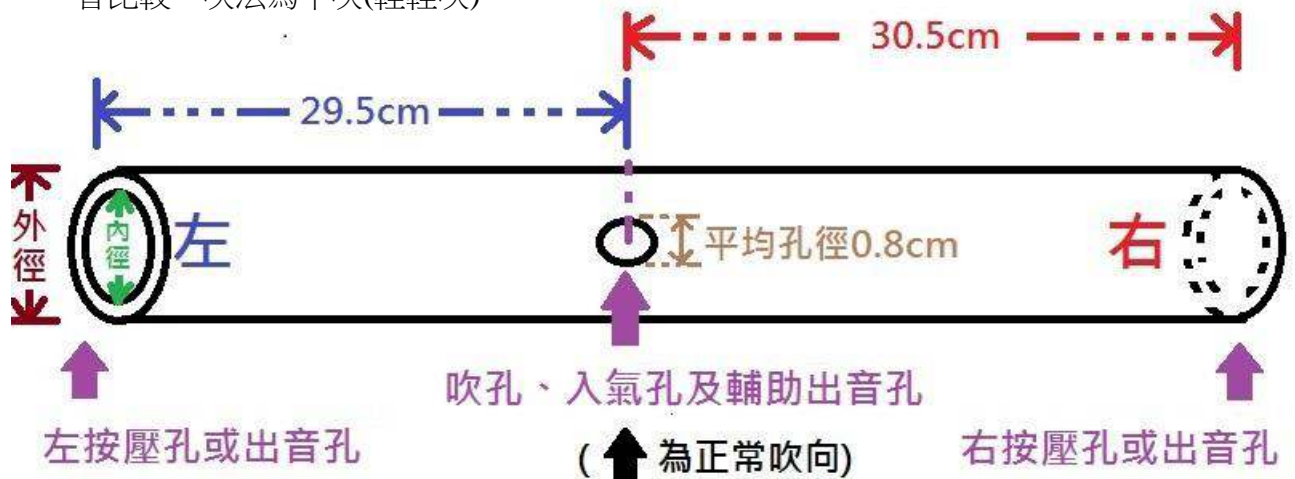
3. 實驗討論：

- (1)音樂老師吹的「氣息」很穩定，故所測音高無改變，之後的實驗可只測一次即可，無需多測後求平均。

實驗 2-2 → 找尋適合的 PVC 管做複製吐良：

雖然【參考五】表示，一般民間流傳的吐良長度約為 45 公分，此可演奏出樂曲但音準只為相對音。故我們採用雲南樂團演奏時使用的 60 公分長度做基準。

1. 方法：以音樂老師當時吹奏的 60 公分長吐良作參考，選擇五金行現有最為相近的四分 PVC 水管和四分 PVC 電管、並加入管徑較窄三分電管、管徑較寬的六分水管做試音比較。吹法為平吹(輕輕吹)。



2. 結果：

表 2-2-1：四個長度同為 60 公分的 PVC 材質管的音高表現比較

	左右全開	左右全按	右按左開	左按右開
三分電管：內徑 1.4cm、外徑 1.8cm(薄)	B4-27.8	F#5+0.4	C6+23.6	E6+37.4
四分電管：內徑 1.8cm、外徑 2.2cm (薄)	Bb4-48	F5+40.0	C5-22.0	G5+26.0
四分管：內徑 1.6cm、外徑 2.2cm (厚)	Bb4-1.2	F5+0.4	C5-5.1	G5+23.6
六分管：內徑 2.0cm、外徑 2.6cm(厚)	G#4-42.5	E5+19.8	B4-29.4	F#5+42.8

3. 實驗討論：

- (1) 雖 P.4 的駐波位移模式圖【參考一】及泛音頻率 F 公式表示：頻率 F 只和管長 L 有關，但由上實驗結果顯示：音高表現也和管徑的寬、窄有關。
- (2) 三分電管為相對較窄的管徑，音高表現較高；六分管為相對較寬的管徑，音高表現較低。
- (3) 四分 PVC 水管音對降 B 大調而言較準，適合此研究。故以下實驗皆以此管做探討。

實驗 2-3 → 確認複製吐良的「吹孔」在音高較為準確的位置：

1. 方法：統一使用 60 公分長的四分 PVC 水管，各在不同位置鑽「吹孔」。
2. 結果：

表 2-3-1：吹孔在同位置所吹出的音高(平吹)

吹孔與左出音孔的距離	左右全開	左右全按	右按左開	左按右開
28 公分	Bb4-11.0	F5-9.3	C5-33.7	F#5+20.9
28.5 公分	Bb4-8.3	F5-4.5	C5-14.8	F#5+31.3
29 公分	Bb4-8.2	F5-2.5	C5-7.0	G5-21.5
29.5 公分	Bb4-1.2	F5+0.4	C5-5.1	G5+23.6
30 公分(吹孔在正中央)	Bb4+5.6	F5+9.1	G4-3.6	

3. 實驗討論：

- (1)吹孔在正中央時，「右按左開」和「左按右開」都是 G4 音，因管內的環境相同，空氣振動模式也會一樣，所以音高表現會比「吹孔非正中央」的吐良少了許多變化，故一般吐良的吹孔與左右兩端出音孔的距離的不相等的。
- (2)吹孔與左端出音孔距離 28 公分、28.5 公分、29 公分、29.5 公分所吹出的音人耳聽起來都差不多，皆為降 B 調的四個音 Bb4(Do)、F5(Sol)、C5(Re)、G5(La)。但由調音軟體 AP Tuner 確認了一吹孔與左端出音孔距離 29.5 公分為音準最佳位置。

三、 探討吸管的吹入條件對複製吐良所發出的聲音的影響

實驗 3-1 →如何用吸管吹出聲音？

1. 方法：在複製吐良左右出音孔全開之下，用吸管來吹複製吐良的氣孔，改變吸管吹入方向與水平面的夾角，觀察對聲音有何影響。



2. 結果：

表 3-1-1：吸管以不同角度吹氣時的音高變化

吸管角度	同學 A	同學 B	同學 C	同學 D
60°	吹不出聲音	吹不出聲音	吹不出聲音	吹不出聲音
45°	吹不出聲音	Bb3 + 47.9(氣)	吹不出聲音	吹不出聲音
30°	B5 - 37.4(氣)	Bb4 + 15	氣音太重	Bb4 + 4.5
15°	Bb4 + 43.2	Bb4 - 6.5	氣音太重	Bb4 + 0.8(氣)
接近 0°	B5 - 46.3(氣)	B5 - 15.2(氣)	氣音太重	氣音太重

備註：「氣音」，為音樂領域用語，聽起來像人呼氣時，氣散開來的聲音。而非有穩定呼出氣流而吹奏出有明確音高的音。

3. 實驗討論：

- (1) 吸管角度應介於 30 度至 15 度之間，且接近 15 度，才能吹出較準確 Bb4 音。
- (2) 同學 B 的氣較足，且穩定，故以下實驗 3-2、實驗 3-3、實驗 3-4 吹試音實驗時，皆由同學 B 負責。
- (3) 若不計「氣音」部分，吸管角度對音高影響不明顯。此「左右出音孔全開」之下的音為 Bb4。

實驗 3-2 → 吸管吹入方向不同時，音高是否改變？

1. 方法：同學 B 固定吸管與水平面夾角接近 15 度，但在吹口處以不同方向吹入氣。



2. 結果：僅以耳朵聽之，發現吹入方向對音高影響不明顯。(聽起來皆同)

實驗 3-3 → 吸管内徑大小對聲音的影響

1. 方法：在複製吐良左右出音孔全開之下，用不同粗細的吸管來吹複製吐良的入氣孔，將結果記錄後平均，觀察對聲音的影響。



2. 結果：

表 3-3-1：以不同口徑(內徑)吸管吹入氣孔的音高變化

吸管口徑(內徑)	音高	響度(dB)
11.1mm	B5-47.1(氣音多)	66.5
8.9mm	Bb5+18.2(氣音多)	60.8
7.9mm	Bb4+35.2(氣)	68.1
5.5mm	Bb5+11.3(氣)	69.7
4.1mm	Bb4+18.0	69.9

3. 實驗討論：

- (1) 11.1mm 和 8.9mm 的口徑太大，吹出的氣音多且音高不準。
- (2) 口徑 7.9mm 和 5.5mm 的，有些許氣音。
- (3) 4.1mm 口徑吸管所吹出的音，最接近以口吹出的音 Bb4。

實驗 3-4 → 吸管開口的形狀對聲音的影響

1. 方法：在複製吐良左右按壓開口全開之下，將口徑 4.1mm 的吸管，剪成不同的開口來吹氣孔，接著壓扁後再吹，觀察對聲音的影響。



2. 結果：

表 3-4-1：在不作壓扁處理下，不同開口形狀的吸管吹入吹孔的音高變化

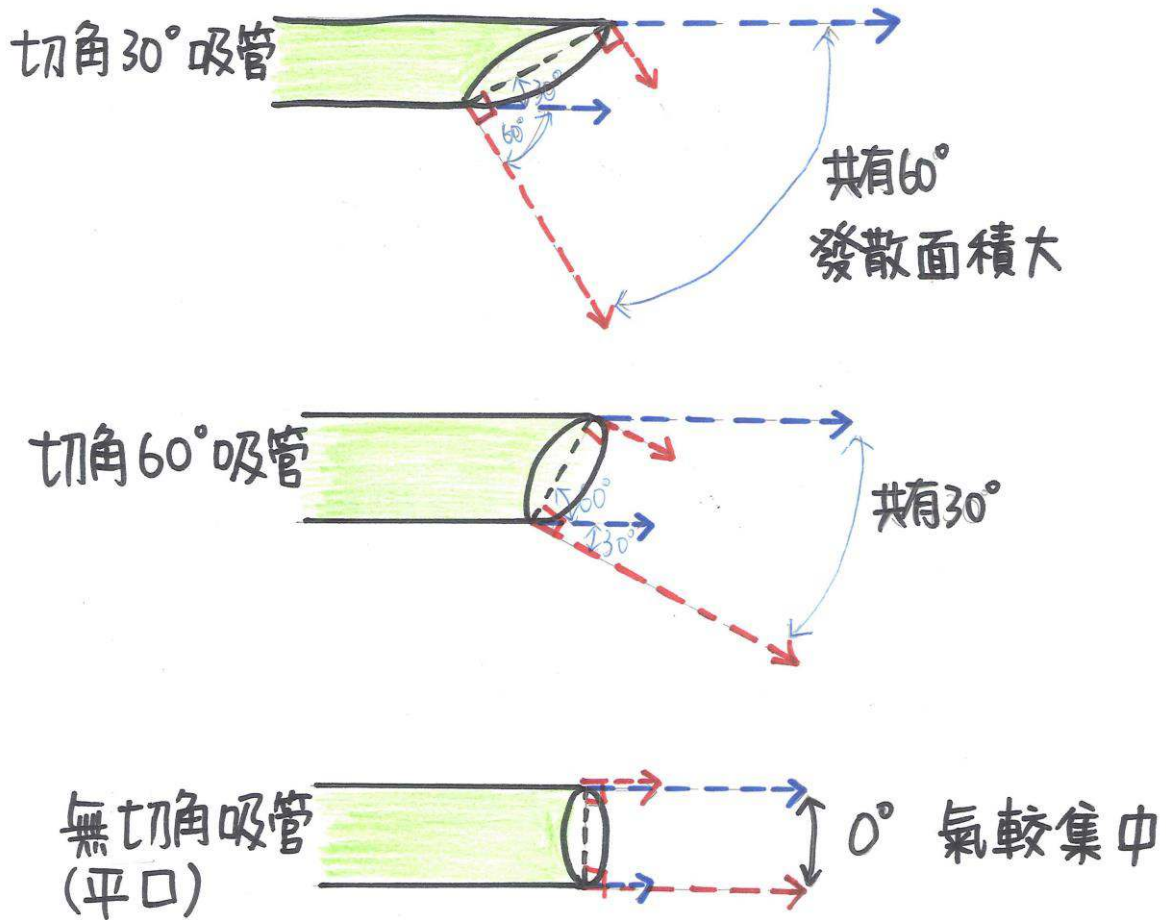
吸管開口形狀	有沒有壓扁	音高	響度(dB)
平口	正常	Bb4+29.0	74.9
尖口 60 度	正常	(氣音)G6+44.5	51.2
尖口 30 度	正常	(氣音)C#5-40.3	65.9

表 3-4-2：在有作壓扁處理下，不同開口形狀的吸管吹入吹孔的音高變化

吸管開口形狀	有沒有壓扁	音高	響度(dB)
平口	壓扁	B4-40.6	71.8
尖口 60 度	壓扁	(氣音)G#3-5.4	56.2
尖口 30 度	壓扁	(氣音)Bb6+32.9	73.5

3. 實驗討論：

(1) 吸管開口還是維持「平口」即可。做切角使形狀改變不會使音較佳，反而因為開口面積變大及出氣角度發散而使氣流散開，造成氣音。(下圖藍色虛線為沿著管壁發散出的方向，紅色虛線為垂直開口截面發散出的方向。有切角的吸管氣都會散掉，所以造成氣音。)



(2) 吸管開口也不需要作壓扁處理來穩定氣流。

四、 測量不同按法及不同氣流下，各音高及響度的表現

實驗 4-1 →不同按壓法及不同吹氣力道下，音高及響度的表現。

1. 方法：

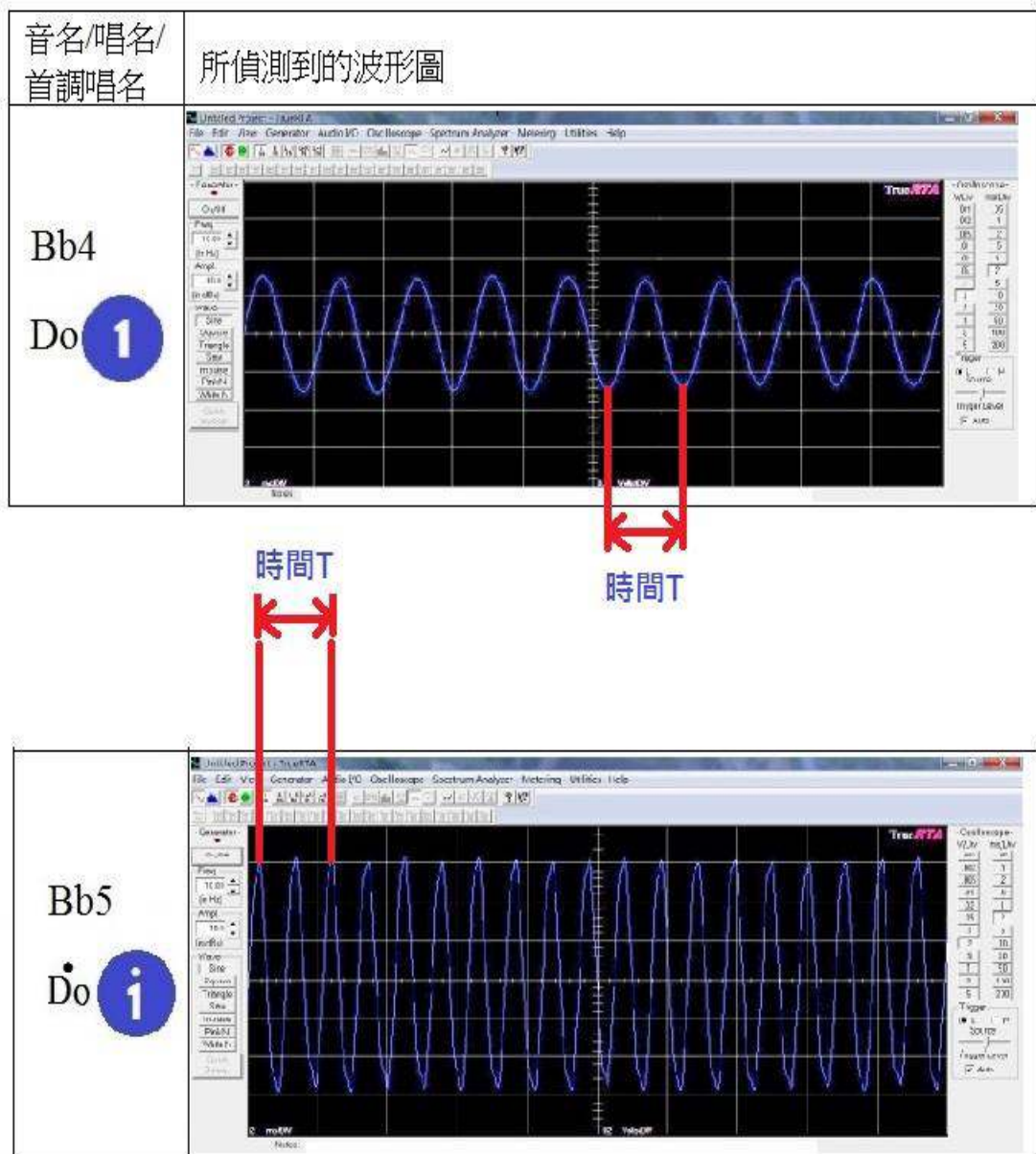
- (1) 以音樂老師穩定又好聽的吹音，配合左右出音孔不同按法，以及改變吹氣力道，記錄音高及響度的表現。
- (2) 吹氣力道分為三段，在音樂領域的用語稱為：平吹(正常、輕輕吹)、超吹一(比正常狀態用力些許)、超吹二(比超吹一用力些)。

2. 結果：

表 4-1-1：不同按法及不同吹氣力道下，音高與響度的表現

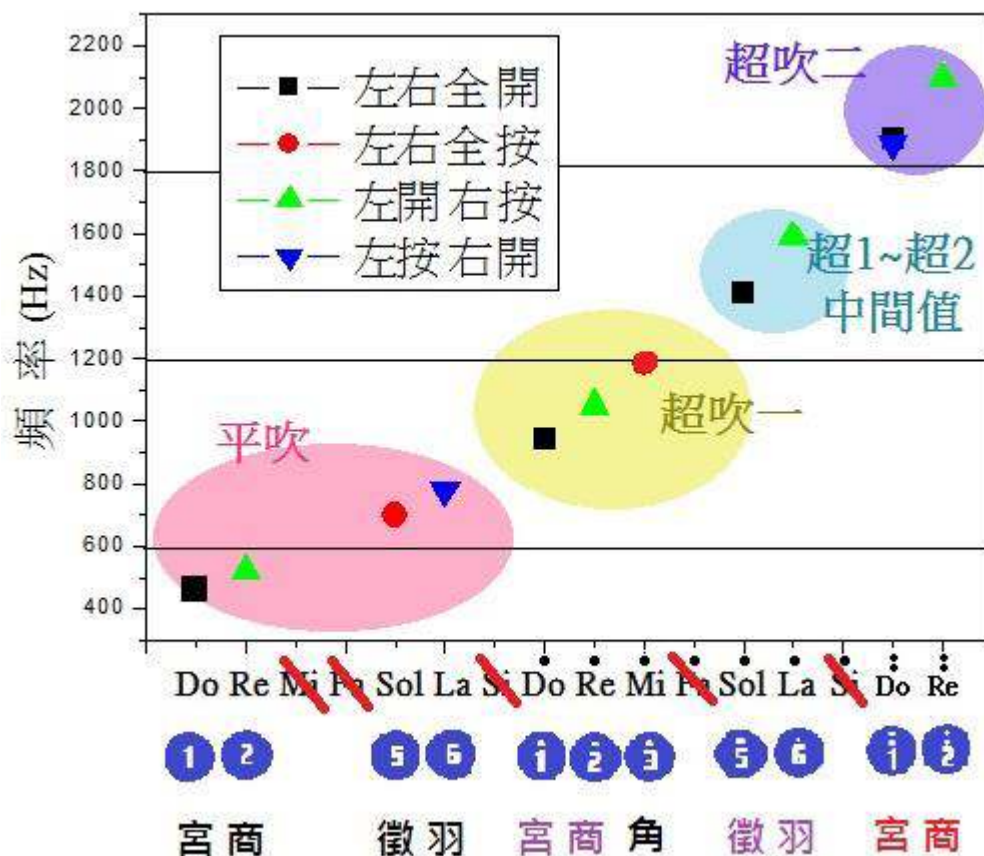
按壓法 \ 吹氣力道		平吹	超吹一	中間音	超吹二
		音高	Bb4 - 1.2 ¹	Bb5 + 20 ¹	F6 + 16.8 ⁵
左右全開	頻率(Hz)	465.8	942.8	1410.9	1902.8
	響度(dB)	66.5	86.2	94.1	101.3
	音高	F5 + 0.4 ⁵	D6 + 6.4 ³	吹不出音 (破音)	
左右全按	頻率(Hz)	698.6	1183.9		
	響度(dB)	87.8	99.7		
	音高	C5 - 5.1 ²	C6 + 7.1 ²	G6 + 12.9 ⁶	C7 - 20.0 ²
左全開右全按	頻率(Hz)	521.75	1050.9	1592.0	2069.5
	響度(dB)	84.1	101.6	103.3	107.0
	音高	G5 - 12.6 ⁶	Bb6 + 20.5 ¹	吹不出音 (破音)	
左全按右全開	頻率(Hz)	778.4	1887.4		
	響度(dB)	88.5	102.3		

圖 4-1-1：以左右全開為例，使用波形偵測軟體 TureRTA 來看此吹法之下的四種泛音波形



在相同時間 T 間隔內，Do 出現一個波，而高音 Do 出現兩個波。

圖 4-1-2：整理表 4-1-1 作圖



3. 實驗討論：

- (1) 音高等同頻率，我們做此圖在橫軸部分以等距分開各唱名，發現唱名與音高(頻率)做圖不是直線關係，也就是指頻率不是等量的增加。看同一吹法下所得到的音對應的頻率數值約是「倍數」的關係，符合「基音」與「泛音」的關係。
- (2) 平吹(輕輕吹)之下，響度較低且音高(頻率)也較低。
- (3) 越用力吹，響度越高且音高(頻率)也越高。
- (4) 圖 4-1-1 列出左右全開吹法下的兩種音的波形。Bb5(高音 Do)單位時間 T 內振動次數為 Bb4(Do)的 2 倍，查頻率表的：Bb5(高音 Do)頻率 932.33Hz 正為 Bb4(Do) 頻率 466.16Hz 的兩倍。故 Do 是基音，高音 Do 是它的泛音。
- (5) 人為口吹之下，已可吹出：Do、Re、Sol、La、Do、Re、Mi、Sol、La、Do、Re 11 個不同的音。
- (6) 發現音列中從未曾出現 Fa 和 Si。此兩音應不在以四種按壓法平吹為「基音」之後的泛音列之中。

實驗 4-2 →人為吹氣力道如何定量？

1. 方法：

- (1) 以簡易塑膠袋測量吹氣體積、以廚餘上篩桶壓入下桶的水中，記錄水位上升變化後，配合攝影機截取吹氣時間，即可知道單位時間內所吹出的的空氣體積有多少。
- (2) 以空壓機固定出氣壓力 40psi、單球浮子流量計(2~20 l/min)等設備【參考七】，和人為吹氣力道做比較。



簡易塑膠袋密封

吹氣後壓入雙層桶

量筒測量體積

配合攝影截取時間

球針

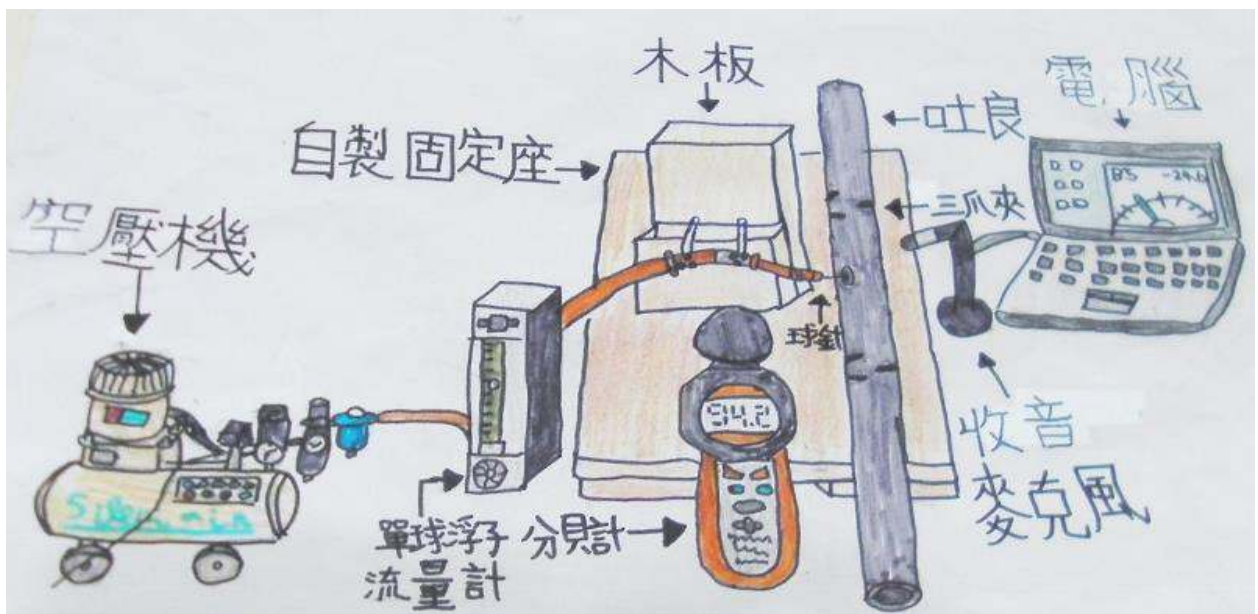
1.5mm 2.65mm 2.9mm

使用不同口徑吹氣孔

單球浮子流量計

空壓機

我們的實驗裝置：



2. 結果：

表 4-2-1：簡易測量法之氣流量

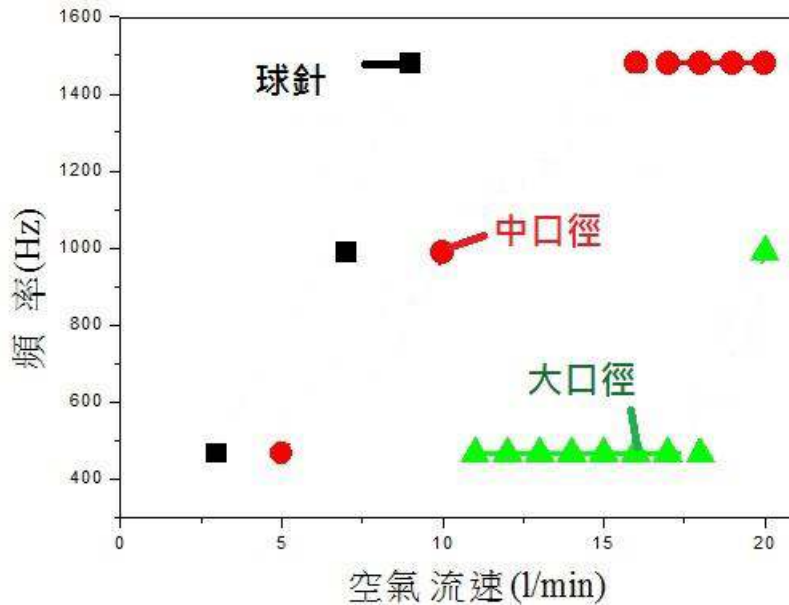
吹法	實驗	體積 (ml)	吹氣流速 ml/sec	平均流速 (ml/sec)	換算流速 (l/min)
平吹	(1)	565	459.3	471.7	28.3
	(2)	620	476.9		
	(3)	685	479.0		
超吹 1	(1)	780	600	601.3	36.1
	(2)	840	613.1		
	(3)	845	590.9		
超 1~超 2 中間值	(1)	1180	983.3	961.6	57.7
	(2)	940	940		
	(3)	1250	961.6		
超吹 2	(1)	1790	1098.2	1319.8	79.2
	(2)	1420	1327.1		
	(3)	1580	1534.0		

表 4-2-2：左右按壓口全開之下，以空壓機、單球浮子流量計配合不同吹口的紀錄

	球針 1.5mm			中口徑 2.65mm			大口徑 2.9mm			口吹
	音高	流速	響度	音高	流速	響度	音高	流速	響度	音高
第一 明顯音	Bb4 + 30.2	3.5	85.9	Bb4 + 28.2	5	84.1	Bb4 + 14.3 ↓ Bb4 + 29.9	11 ↓ 18	81.8 86.8	Bb4
第二 明顯音	B5 - 0.7	7	83.7	B5 + 10.6	10	93.7	B5 - 45.7	20	97.5	Bb5
第三 明顯音	F#6 + 30.4	9	105.8	F#6 + 6.8 ↓ F#6 + 15.4	16 ↓ 20	102.6 103.5	/			F6

圖 4-2-1：空氣流速與頻率關係

以上表 4-2-2 簡易換算($Bb4 + 30.2 \doteq Bb4 \rightarrow$ 記為頻率 466.16)



3. 實驗討論：

- (1) 簡易塑膠袋測量吹氣體積、時間，可稍微看出超吹比平吹氣流速大，但人為誤差因素太多：如塑膠袋壓入水中時所記的上升水位看不準、截取時間難辨別等。
- (2) 以空壓機、單球浮子流量計偵測，可明確知道氣流量。和中口徑所測結果比較，人為平吹約為：5(l/min)，超吹一約為：10(l/min)，超吹二約為：16(l/min)。但又由於不知人口吹時的口徑大小，因此立足點比較不強。
- (3) 表 4-2-2 箭頭「 \downarrow 」處表示：此範圍皆穩定。如中口徑氣流速 16~20 之間，音高穩定皆為 F#6。
- (4) 依照圖 4-2-1 所示流速分布廣窄，以下實驗選擇「中口徑」2.65mm 測試。

實驗 4-3 → 偵測各氣流流量之下，音高及響度(音量大小)表現

1. 方法：承實驗 4-2，選擇「中口徑」2.65mm，詳細流量分布，記錄音高、響度。



選擇中孔徑 2.65mm 的出氣孔

使用自製木板、三爪夾固定出氣設備的角度 ≤ 15 度，空壓機固定壓力 40psi 流出

2. 結果：

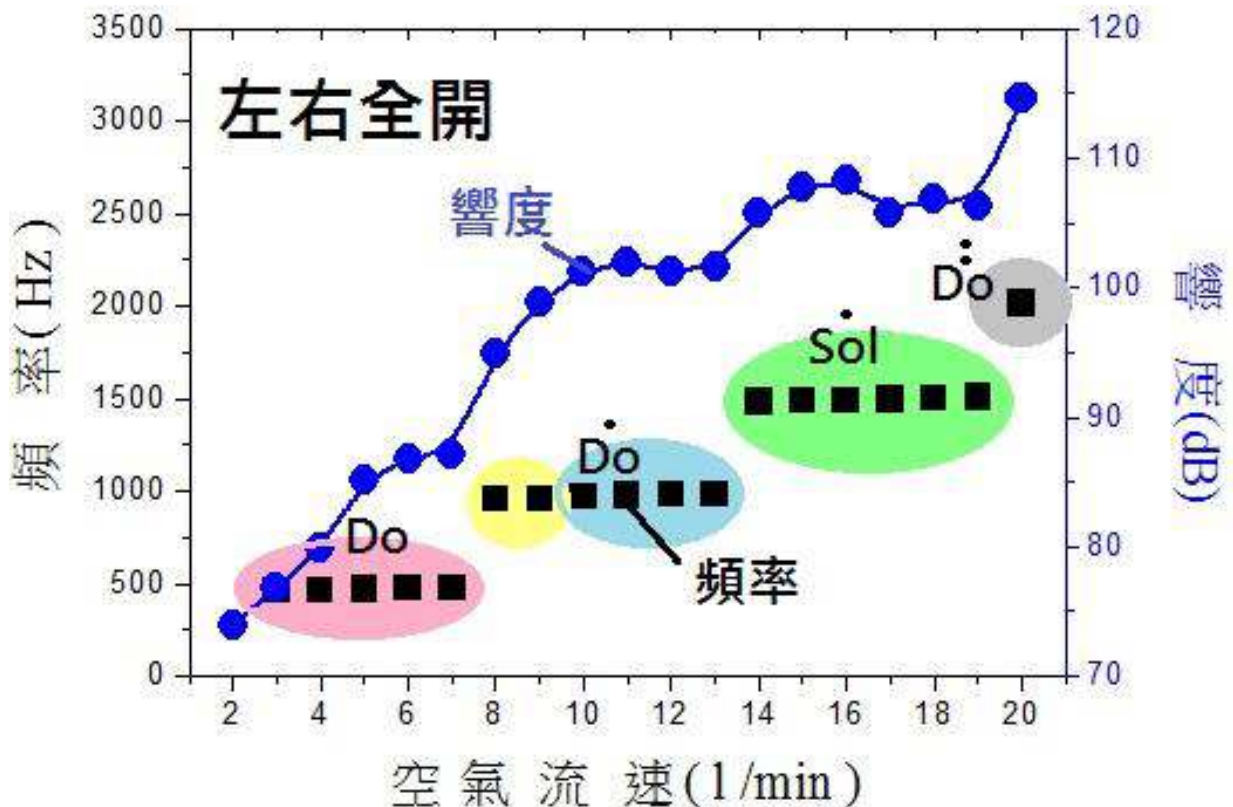
(1) 左右按壓口全開，人為口吹時為：

Bb4 (唱名 Do **1**) → Bb5 (Do **i**) → F6 (Sol **5**) → Bb6 (Do **i**)

表 4-3-1：左右全開之下，空氣流速與音高(頻率)的關係

流速 (l/min)	音高	頻率 (Hz)	響度 (dB)	流速 (l/min)	音高	頻率 (Hz)	響度 (dB)
				11	B5-25.2	973.8	101.9
2	音太弱	-	74.0	12	B5-8.4	983.1	101.2
3	Bb4-1.5	465.8	76.8	13	B5-2.5	986.4	101.5
4	Bb4-6.2	464.5	79.8	14	F#6+1.8	1481.6	105.7
5	Bb4+21.3	472.1	85.2	15	F#6+7.4	1486.5	107.7
6	Bb4+33.0	475.3	86.8	16	F#6+12.8	1491.3	108.2
7	Bb4+46.1	478.9	87.2	17	F#6+17.2	1495.1	105.8
8	Bb5+45.8	957.7	94.9	18	F#6+23.4	1500.6	106.8
9	Bb5+47.2	958.5	98.9	19	F#6+29.7	1506.1	106.3
10	B5-26.5	973.1	101.3	20	B6+36.1	2017.6	114.6

圖 4-3-1：承表 4-3-1 做圖



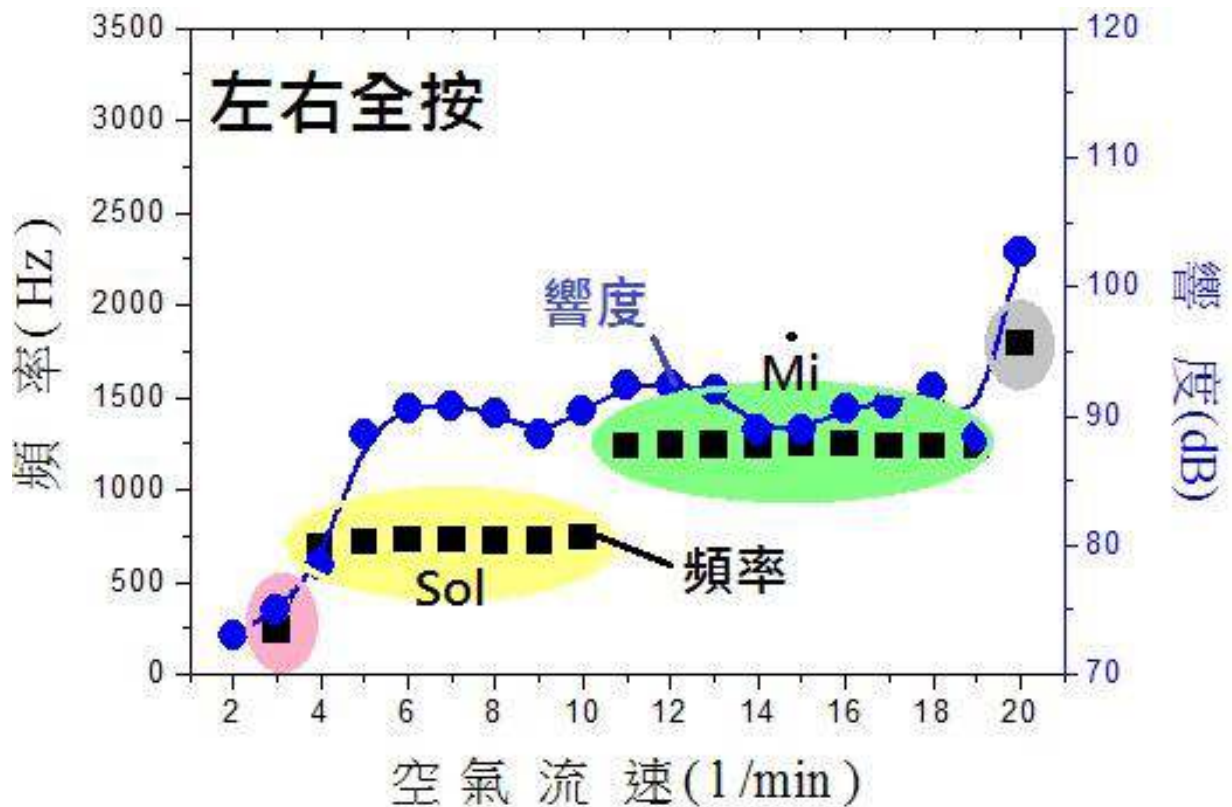
(2) 左右按壓口全按，人為口吹時為：

F5(唱名 Sol **5**) → D6(Mi **3̇**)

表 4-3-2：左右全按之下，空氣流速與音高(頻率)的關係

流速 (l/min)	音高	頻率 (Hz)	響度 (dB)	流速 (l/min)	音高	頻率 (Hz)	響度 (dB)
2	音太弱	-	73.0	11	Eb6-13.1	1235.4	92.3
3	B3-35.6	242.0	75.0	12	Eb6-2.2	1243.0	92.4
4	F5-8.7	695.0	78.4	13	Eb6-6.1	1240.2	92.0
5	F5+42.2	716.0	88.6	14	Eb6-1.6	1243.4	89.0
6	F#5-20.6	731.4	90.6	15	Eb6+0.1	1244.6	88.9
7	F#5-29.6	727.7	90.8	16	Eb6+6.4	1249.3	90.5
8	F#5-47.3	720.4	90.2	17	Eb6-16.4	1233.1	91.
9	F#5-39.3	723.7	88.5	18	Eb6-7.4	1239.3	92.1
10	F#5-2.1	739.1	90.4	19	Eb6-0.4	1244.2	88.4
				20	A6+33.7	1795.3	102.7

圖 4-3-2：承表 4-3-2 做圖



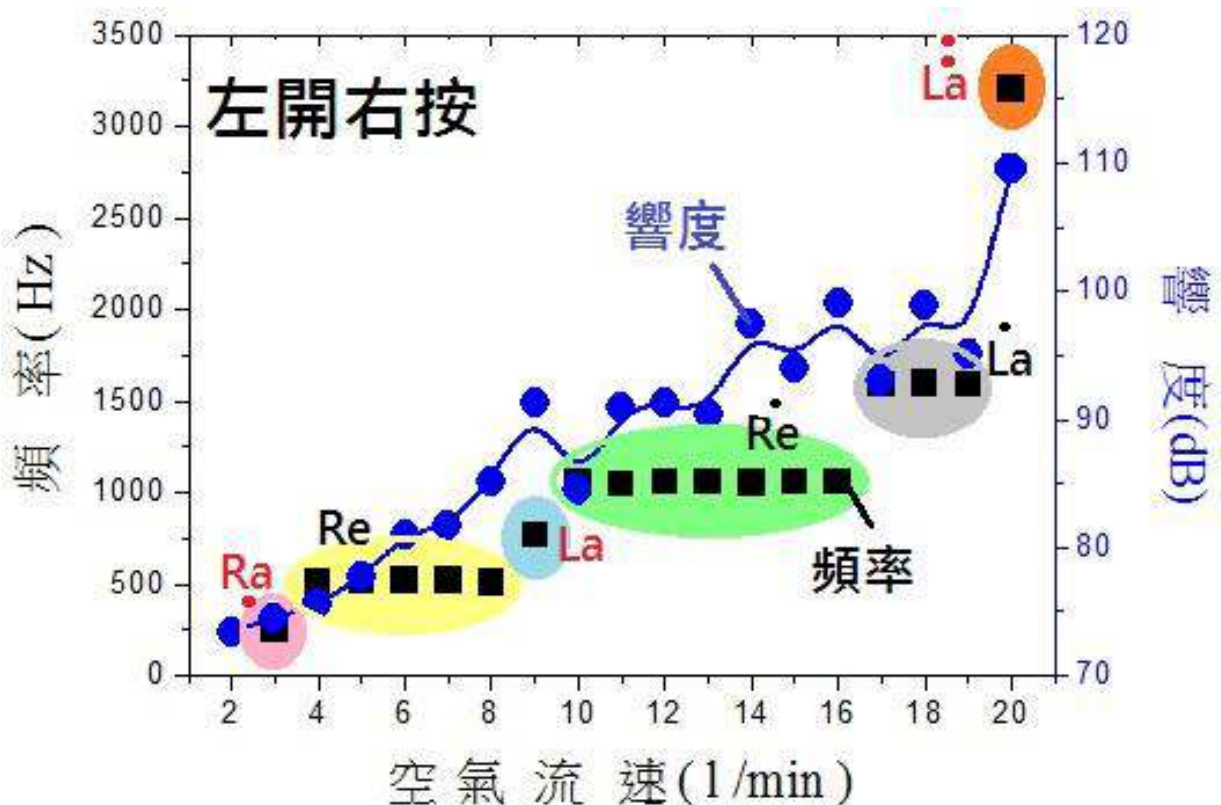
(3) 左按壓口全開，右按壓口全按，人為口吹時為：

C5(唱名 Re **2**) → C6(Re **2̇**) → G6(La **6̇**) → C7(Re **2̇̇**)

表 4-3-3：左開右按之下，空氣流速與音高(頻率)的關係

流速 (l/min)	音高	頻率 (Hz)	響度 (dB)	流速 (l/min)	音高	頻率 (Hz)	響度 (dB)
				11	C6+1.6	1047.5	90.9
2	音太弱	-	73.4	12	C6+20.5	1059.3	91.2
3	C4-33.6	256.7	74.5	13	C6+24.2	1061.6	90.3
4	C5-45.0	510.0	75.5	14	C6+9.6	1052.5	97.5
5	C5-27.3	515.2	77.7	15	C6+23.9	1061.4	94.0
6	C5-14.4	519.0	81.0	16	C6+25.0	1062.1	99.0
7	C5-13.3	519.3	81.7	17	G6+21.3	1587.9	93.0
8	C5-47.4	509.3	85.2	18	G6+28.9	1594.9	98.9
9	G5-32.0	769.9	91.3	19	G6+21.1	1587.7	95.1
10	C6+5.9	1050.2	84.5	20	G7+37.7	3206.1	109.6

圖 4-3-3：承表 4-3-3 做圖



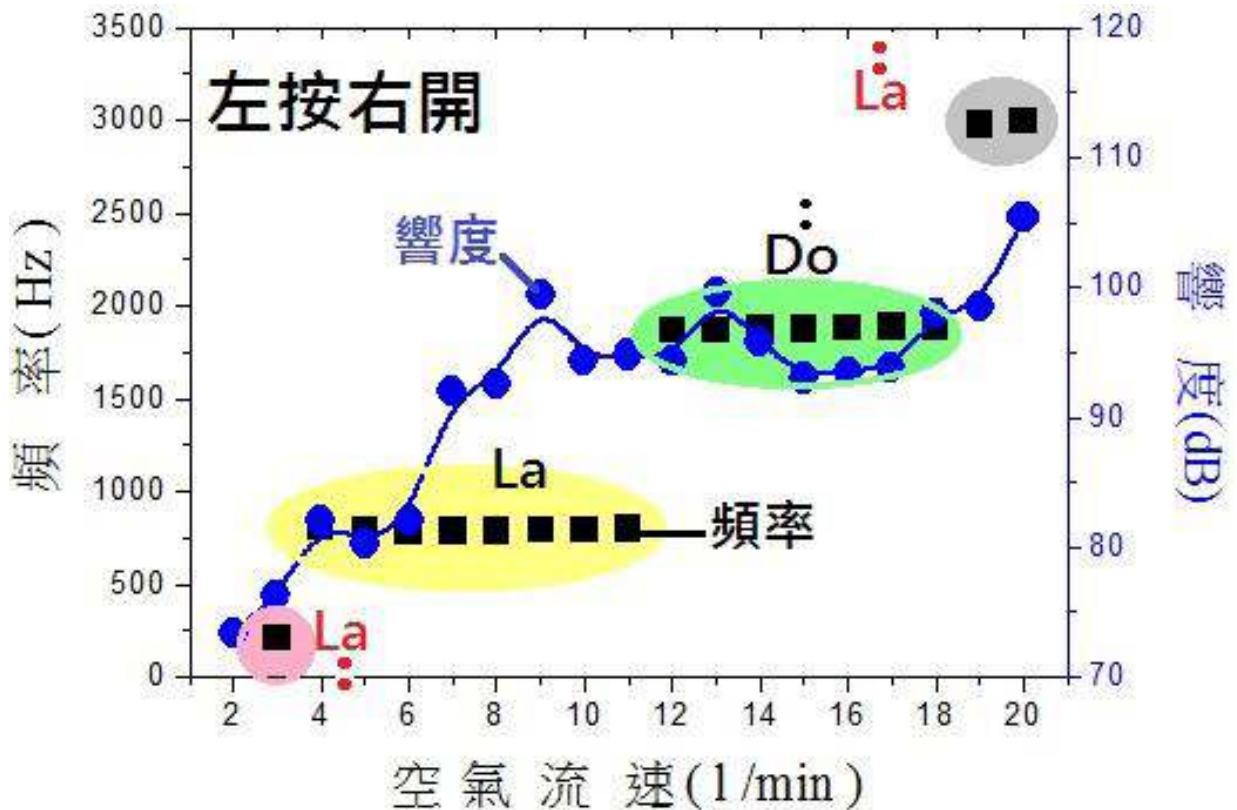
(4) 左按壓口全按，右按壓口全開，人為口吹時為：

G5(唱名 La **6**) → Bb6(Do **i**)

表 4-3-4：左按右開之下，空氣流速與音高(頻率)的關係

流速 (l/min)	音高	頻率 (Hz)	響度 (dB)	流速 (l/min)	音高	頻率 (Hz)	響度 (dB)
				11	G5+33.6	799.7	94.8
2	音太弱	-	73.4	12	Bb6+0.2	1864.9	94.3
3	G#3+33.5	211.8	76.2	13	Bb6+6.9	1872.3	99.6
4	G5+46.2	805.5	82.0	14	Bb6+10.4	1876.2	95.7
5	G5+23.0	794.7	80.2	15	Bb6+7.6	1873.1	93.0
6	G5-2.6	782.8	82.0	16	Bb6+14.8	1881.1	93.5
7	G5+4.1	785.9	92.0	17	Bb6+19.6	1886.4	93.8
8	G5+7.5	787.5	92.6	18	Bb6+21.8	1888.9	97.9
9	G5+15.0	791.0	99.5	19	F#7+8.8	2975.5	98.5
10	G5+12.7	789.9	94.3	20	F#7+19.6	2994.5	105.3

圖 4-3-4：承表 4-3-4 做圖



3. 實驗討論：

- (1) 實驗皆有做隨著空氣流速改變之下，頻率的變化與響度變化的疊圖。(圖 4-3-1、圖 4-3-2、圖 4-3-3、圖 4-3-4)
 - (A) 如圖 4-3-1，隨著空氣流速增加，出現四種不同音高，而非不同空氣流速即有不同音高。
 - (B) 圖中同一色塊表音高為同一群組之意。空氣流速增加，會在適當時出現更高頻率的群組。
 - (C) 隨著音高群組的遞升，所對應的音量(響度)也越大。所以用同一按壓法吹奏吐良時：「吹奏力道加大」是可以讓吐良發出的音高(頻率)升高，由基音變為它(此基音)的各種泛音。與吹奏事實符合。

- (2) 實驗 4-3-1，左右全開之下：
 - (A) 前兩音(Do)(高音 Do)符合口吹音。
 - (B) 後兩音 F#6、B6 雖與口吹不同，但也相近，人耳辨別同，在圖上亦記為(高音 Sol)(高兩八度 Do)。

- (3) 實驗 4-3-2，左右全按之下：
 - (A) B3 音太低、A6 音太高，人為皆吹不出。
 - (B) Eb6 雖非五聲音階之音，但人為吹不出此音，且相近(高音 Mi)。

- (4) 實驗 4-3-3，左開右按之下：
 - (A)(低音 Re)音太低、(高兩八度 La)音太高，人為皆吹不出。
 - (B) 實驗所示，(La)音在此按壓法下是有機會被吹出的！
 - (C) (低音 Re)、(La)、(高兩八度 La)此三音雖人為吹時未出現但皆可理解，頻率上都有倍數關係，是泛音列之一。亦屬於五聲音階之音。

- (5) 實驗 4-3-4，左按右開之下：
 - (A) G#3 音太低、F#7 音太高，人為皆吹不出。
 - (B) G#3 音接近(低兩八度 La)、F#7 音接近(高兩八度 La)，與(La)頻率有倍數關係，實驗設備測出可理解。

五、 探討改變遮蔽出音孔的範圍比例時，對音高的影響

實驗 5-2 → 遮蔽出音孔的面積比例不同，對音高的影響

1. 方法：剪裁 2cm X 2cm 的軟塑膠片，分別遮蔽不同範圍比例的出音孔，記錄音高。



使用廢棄的隔熱杯套(軟塑膠片)做出音孔擋材

2. 結果：

表 5-2-2：遮蔽不同位置及比例之下所測得音高

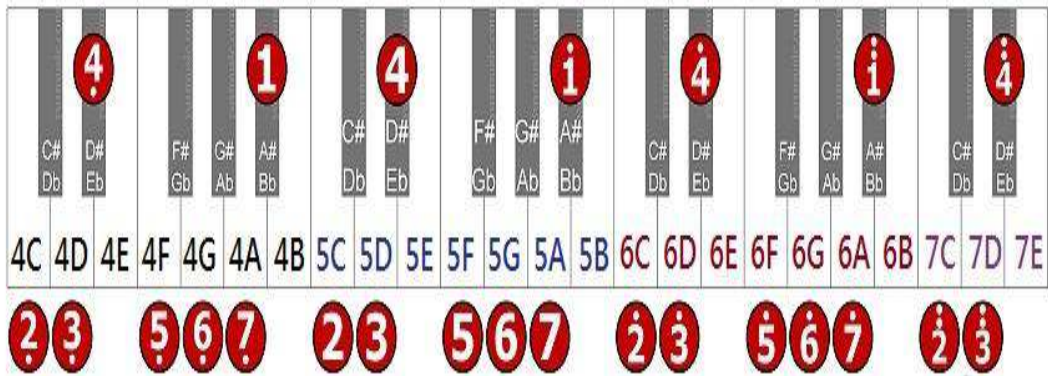
遮蔽位置圖說	遮蔽比例	音高
	無遮蔽	Bb4-1.2
	遮 1/3	Bb4-22.7
	遮 1/2	Bb4-22.3
	遮 3/4	Bb4-19.5
	全遮蔽	G5-12.6
	無遮蔽	Bb4-1.2
	遮 1/3	Bb4-30.2
	遮 1/2	Bb4-33.0
	遮 3/4	Bb4-23.0
	全遮蔽	C5-5.1

3. 實驗討論：

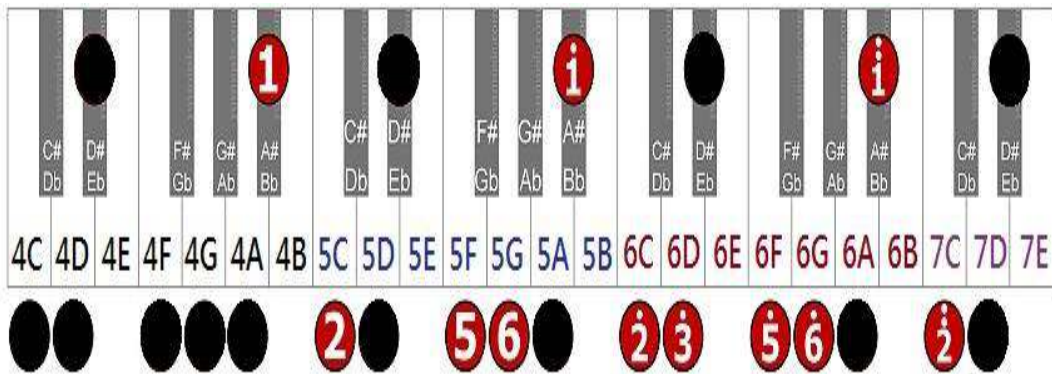
不論遮多遮少，只要還有空間讓管內空氣流出，即和左右按壓口全開時相同，音高都還在人耳辨別誤差內的 Bb4。(聽起來都一樣)

六、 歸納複製吐良可呈現的音階排列。

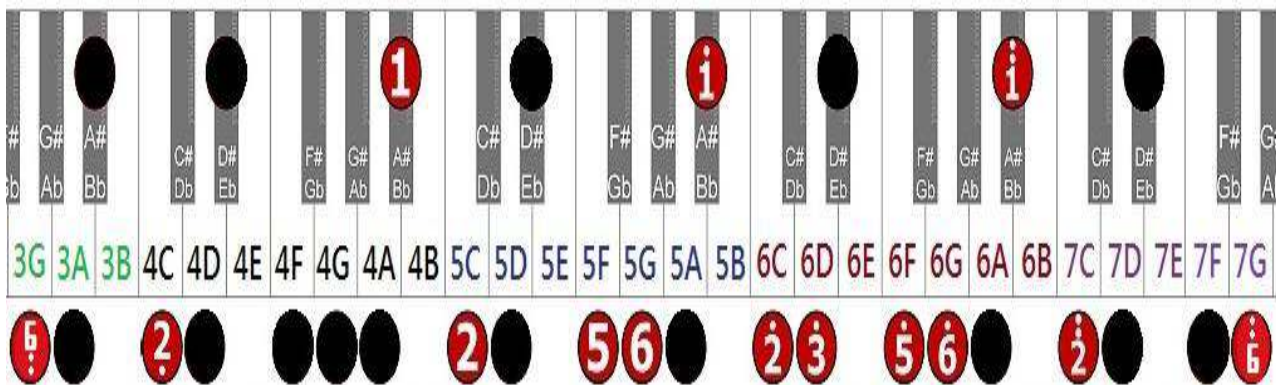
1. 鋼琴中，降 B 大調的簡譜首調唱名如下紅色圈所示：



2. 人為可在複製吐良吹出之音，如下紅色圈所示：



3. 以空壓機、單球浮子流量計偵測，複製吐良可多發出頻率更高、更低的音，如下：



4. 結論：中國古老單孔管樂器如複製吐良，可發出之音沒有 4、7 音(Fa 和 Si)，只有 1、2、3、5、6(Do、Re、Mi、Sol、La)，即為流傳久遠之五聲音階「宮、商、角、徵、羽」。

結論

- 一、吐良演奏時，全靠口中氣息變化，及控制兩端出音口的雙手，不斷開合調節，改變管內空氣柱的長短而獲得不同的音高。
- 二、一段 60 公分長的四分水管，靠左端 29.5 公分處鑽一孔，即可做一音高頗為準確的降 B 大調五聲音階複製吐良。
- 三、口吹吐良的方法如以口徑 4.1 公分的吸管朝吹孔傾斜 15 度，吹入集中的氣。
- 四、不同按法及不同氣流下，各音高及響度的表現不同：

(1)音樂老師吹吐良在不同按壓法之下可達：

Do、Re、Sol、La、Do、Re、Mi、Sol、La、Do、Re

共 11 個音。但因演奏者的不同，專業的演奏家可能可吹出其他泛音，如空壓機配合流量計所測得的 、、。

- (2) 空氣流速變大時，音高(頻率)變大，音量(響度)也變大。
 - (3) 可由 4-3 實驗的疊圖中得知：當吹氣力道越來越大(響度越來越大)時，吐良所發出的頻率會在適當時上升至另一群組。即力道加大會出現各個泛音。
- 五、手按左右出音孔時，只要沒有完全緊閉，即視為開孔，和沒有遮蔽時效果同。
 - 六、中國古老單孔管樂器如複製吐良，可發出之音沒有 4、7 音 (Fa 和 Si)，只有 1、2、3、5、6 (Do、Re、Mi、Sol、La)，這就是流傳久遠的一中國五聲音階「宮、商、角、徵、羽」。

參考資料及其他

- 一、休伊特(民 97)。觀念物理學IV聲學光學。天下文化出版社。
- 二、鄭德淵(民 73)。中國樂器學。生韻出版社。
- 三、楊庭堯等(民 102)。綠色寶笛。中華民國第五十三屆中小學科展國小組生活與應用科學科。
- 四、維基百科。泛音 <http://zh.wikipedia.org/wiki/>
- 五、百度百科。吐良 <http://baike.baidu.com/view/>
- 六、優酷網。任俊宇先生參與 2010 俄羅斯漢語年演奏活動。 <http://www.youku.com>
- 七、林奕竹等(民 99)。「差」之毫釐，失之千里一直笛誤差之探討。中華民國第五十屆中小學科展國中組物理科。

【評語】 080104

具有團隊合作精神，並利用 PVC 來製作吐良具方便性，但對於實驗本身內容的了解與操作可以更加確實。