

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生活與應用科學(二)科

佳作

032907

庶民的管樂器-吹笛產生薩克斯風的聲音

學校名稱：嘉義縣私立協同高級中學

作者： 國一 林家羽	指導老師： 陳佩賢
---------------	--------------

關鍵詞：吹笛、聲音、薩克斯風

摘要

音樂可以陶冶性情但是購買樂器費用不低，自製樂器時要注意振動的薄膜和共鳴腔體積影響聲音的產生，氣體移動距離會影響駐波的波長導致音調變化、樂器的出氣孔大小會影響薄膜振動持續時間，出氣管深入共鳴腔的距離會影響共鳴腔內氣體振動的持續性，自製的吹笛利用開孔的距離和按孔的指法位置來調節共鳴腔的出氣量比例，就可吹奏出常見低音薩克斯風相同音階的基音，若是利用電腦聲音分析程式則發現二者組成聲音的三要素結果是有差異的，尤其是泛音差異更大，但是一般人的聽覺是不太容易分辨的。

壹、研究動機

管樂節聽到了許多管樂器的演奏，詢問老師所使用的管樂器除了上課用的直笛外，其餘的樂器價格都不便宜，於是和指導老師討論想要創作一支所有人都買得起的管樂器，就必須由管樂器發聲的著手，根據自然課本的 3 冊聲音產生的原理並利用日常容易取得的材料來製作庶民管樂器。

貳、研究目的

- 一、樂器的振動薄膜對聲音產生的影響
- 二、樂器的共鳴腔體積對聲音產生的影響
- 三、樂器內氣體移動距離對聲音產生的影響
- 四、樂器的出氣孔大小對聲音產生的影響
- 五、樂器的出氣管深入共鳴腔距離對聲音產生的影響
- 六、自製吹笛與薩克斯風所產生的聲音比較

參、研究器材

寶特瓶 400 ml、養樂多瓶 100 ml、小國旗中空塑膠旗桿、花袋、珍珠奶茶吸管、直尺、簽字筆、剪刀、美工刀、熱熔膠、熱熔膠槍、電工膠帶、雙面膠、電烙鐵、風速計、錄音筆、聲音分析程式(AudacityPortable、solo Explorer 1.0、Praat)、游標尺、密集板、氣球膜、氣球打氣筒、薩克斯風、量筒、滴管

肆、研究步驟

一、自製樂器的方法

(一)改良型多多笛製作

1. 取 2 個養樂多瓶利用電烙鐵在底部正中心及上方凸唇區加熱各穿一個小洞(如照片 1)。並利用游標尺測量珍珠奶茶吸管和小國旗中空塑膠旗桿的管徑。
2. 再利用剪刀單邊刀刃旋轉擴充洞口大小，直到底部洞口略大於珍奶吸管管徑(1.05 公分)，上方凸唇洞口則與吹嘴管徑(0.73 公分)相同(如照片 1)。
3. 先將 3 支珍奶吸管斜尖處剪除，其中 2 支吸管利用電工膠帶連接加長，在距頂端 3 公分處利用簽字筆畫一條線。先將沒加長的吸管由養樂多瓶口穿入通過瓶底小孔，直到所作記號與養樂多瓶口切齊。利用熱熔膠從瓶底固定吸管及封閉接縫後，再利用剪刀貼平在養樂多瓶口將凸出的吸管剪除(如照片 2a,2b)。
4. 將剪下的 11 公分吹嘴由上方凸唇開孔插入碰觸到中央吸管就好，再利用熱熔膠固定吹管和封閉接縫(如照片 2c)。
5. 使用雙面膠環繞養樂多瓶開口側緣一圈，前後端必須重疊，去除雙面膠油紙，然後將花袋膜平鋪洞口，微拉緊拉平後固定，從側面檢查花袋膜是否緊貼在凸出的吸管開口(如照片 2d)。吹吹看是否能順利發出聲音，編號為樂器 1(如照片 4a)。
6. 將加長吸管依樂器 1 的製作方式製作成樂器 2(如照片 4b)。利用直尺量取養樂多底部露出的吸管保留 18.60 公分，其餘剪除。在露出的吸管與吹嘴相對位置由養樂多瓶底算起依序在 3.40 公分、1.75 公分、1.80 公分、2.90 公分、1.80 公分、2.30 公分處做記號(如照片 2e)，用電烙鐵加熱戳洞作為音調調節孔。



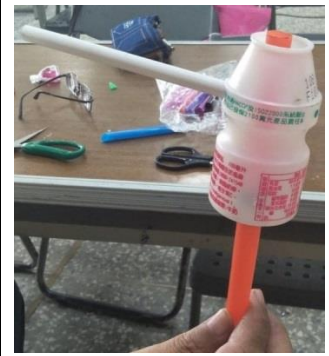
照片 1：箭頭所指的地方要加熱穿孔處，圓圈則是要擴充的洞口範圍



照片 2a：多多笛；將加長的吸管穿入通過瓶底小孔



照片 2b：多多笛；利用剪刀貼齊瓶口剪除露出多餘的吸管



照片 2c：多多笛；將吹嘴由上方凸唇插入



照片 2d：多多笛；養樂多開口側緣環繞雙面膠，花袋膜緊貼在凸出的吸管開口



照片 2e：多多笛；音階洞口記號

(二)改良氣笛製作

- 1.將養樂多瓶的底部切割下來後，然後把去底的養樂多瓶，套在無蓋子的 400ml 寶特瓶口上。沿交接處在寶特瓶上畫出與養樂多瓶底部大小的圓圈；並沿線裁剪下來(如照片 3a,3b)。
- 2.把去底的養樂瓶罐倒插入已割好的保特瓶裡，檢測是否能夠緊密接合。
- 3.將開了口的寶特瓶倒立於桌上，並在少於養樂多瓶的高度 1.5 公分處做記號，再把它裁剪下來。共需剪裁 4 個寶特瓶。
- 4.將剪裁好的寶特瓶正放於桌面邊緣墊 2 塊密集板，將去底的養樂多瓶到插入瓶內瓶口要碰觸到桌面。利用電工膠帶將交接縫緊密連貼防止漏氣並固定 2 個瓶子。檢查養樂多瓶口是否露出寶特瓶底部(如照片 3c)。
- 5.接著於寶特瓶瓶壁上對準養樂多弧形腰部挖一個吹嘴大小的小孔，然後把小國旗

中空塑膠旗桿剪下 10 公分的吹嘴插入寶特瓶瓶壁的小孔中，並以熱熔膠加以密封，做為吹氣的入口。樂器雛型共製作 2 組預備。

6.將花袋剪裁一片可以覆蓋寶特瓶切口大的薄膜，在 1 組雛形的寶特瓶切口外側黏貼一圈雙面膠，前後端必須重疊，去除雙面膠油紙，然後將花袋膜平鋪洞口，微拉緊拉平後固定在雙面膠上，從側面檢查花袋膜是否緊貼在凸出的吸管開口(如照片 3d)。吹吹看是否能順利發出聲音，編號為樂器 3(如照片 4c)。

7.另 1 組雛形樂器則是黏貼氣球膜，編號為樂器 4(如照片 4d)。

	
<p>照片 3a：氣笛製作；將養樂多瓶的底部切割下</p>	<p>照片 3b：氣笛製作；把去底的養樂多瓶，套在無蓋子的寶特瓶口上，用簽字筆在接觸圓畫記號</p>
	
<p>照片 3c：氣笛製作；沿線裁剪下來後，把去底的養樂瓶罐，插入已割好的保特瓶裡</p>	<p>照片 3d：氣笛製作；將塑膠膜黏貼在雙面膠上</p>



照片 4a：樂器 1



照片 4b：樂器 2



照片 4c：樂器 3



照片 4d：樂器 4



照片 4e：樂器 5



照片 4f：樂器 6



照片 5：固定吹氣量樂器發出聲錄音



照片 6：樂器出氣孔氣體流速測量

(三)進化型庶民管樂器吹笛製作

- 1.將 2 個養樂多瓶利用電烙鐵在底部正中心再利用剪刀單邊刀刃旋轉擴充洞口大小，直到底部洞口略大於珍奶吸管管徑(1.05 公分)。
- 2.依照樂器 3 製作方法製作 2 組雛形。
- 3.將 3 支珍奶吸管斜尖處剪除，其中 2 支吸管利用電工膠帶連接加長，在距頂端 3 公分處利用簽字筆畫線。單支的吸管另外在距頂端 1 公分及 5 公分處做記號。
- 4.將單支吸管插入 1 個製作好的雛型小孔，不要固定吸管，可以伸縮移動吸管，編號為樂器 5(如照片 4e)。
- 5.將加長的吸管插入最後 1 個雛形樂器 3 公分，然後利用熱融膠固定並封住隙縫。量取養樂多底部露出的吸管長 20.70 公分，其餘剪除。在養樂多瓶底露出的吸管與吹嘴相對位置算起依序在 2.00 公分、1.20 公分、1.80 公分、3.50 公分、1.15 公分、1.90 公分處做記號，用電烙鐵加熱戳洞作為音調調節孔，編號為樂器 6(如照片 4f)。
- 6.音階調音孔位置確定：先依照直笛開孔距離在吸管上開孔，以聽覺作為判定，音階過高則先將原開孔用電工膠帶貼住，然後往下微調在開孔直到適合位置。反之音調過低則微調開孔則往上移，最後找到固定的位置。

(四)吹奏方式

音階 唱名	Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si
第 1 孔	●	●	●	●	●	●	○
第 2 孔	●	●	●	●	●	○	●
第 3 孔	●	●	●	●	○	○	○
第 4 孔	●	●	●	○	○	○	○
第 5 孔	●	●	○	○	○	○	○
第 6 孔	●	○	○	○	○	○	○

圖 1：自製樂器吹奏指法，塗黑處為按住孔，白色則不按住

最靠近養樂多瓶的孔為第一孔，依此類推共有 6 孔；左手食指負責第 1 孔，中指負責第 2 孔，無名指負責第 3 孔，右手食指負責第 4 孔，中指負責第 5 孔，無名指負責第 6 孔。指法配置如圖 1 所示。

(五)實驗測量所使用的樂器編號整理(見表 1)

表 1：樂器編號整理

樂器編號	樂器描述	備註
樂器 1	單 1 粗吸管的多多笛	參考嘉義市科學 168 活動製作，修改振動薄膜
樂器 2	加長粗吸管的多多笛	改良成有調音孔，依開孔全打開和全按住測量
樂器 3	花袋膜底部全開的氣笛	參考嘉義市科展氣笛製作，改變罐子連接方式
樂器 4	氣球膜底部全開的氣笛	參考嘉義市科展氣笛製作，改變罐子連接方式
樂器 5	花袋膜底部僅開 1 孔的氣笛	自製，可插入單支沒有調音孔粗吸管，分未插入吸管，插入吸管 1cm、3 cm、5 cm 時測量
樂器 6	花袋膜底部僅開 1 孔加長粗吸管的氣笛	自製，依指法測量 Do、Re、Mi、Fa、Sol、La、Si 七個音階及開孔全打開
樂器 7	薩克斯風	測量 Do、Re、Mi、Fa、Sol、La、Si 七個音階

(六)自製樂器所使用材料基本測量結果

- 1.打氣筒每次輸入氣體容積 267.5 ml。
- 2.氣笛吹嘴到花袋膜距離 4.20 cm，到密封處 3.80 cm。

表 2：自製樂器所使用材料基本測量結果

測量項目	寶特瓶	養樂多瓶	粗吸管	吹嘴
管徑	6.02cm	4.06 cm	1.05 cm	0.73 cm
長度	7.00 cm	7.90 cm	16.00 cm	11.00 cm
容積	202.0ml	104.0 ml	0.941 ml/ cm	0.682 ml/ cm

二、測試及分析方法

(一)將氣球打氣筒的拉柄拉至作記號的位置，每次輸出固定氣體量。出口處對準 10 公分處風速計風扇中心點，瞬間推出氣體紀錄吹出的氣體流速。

(二)每次先將拉柄拉至作記號的位置，出氣口插入自製樂器的吹嘴，樂器的出氣口則對準 10 公分處風速計風扇中心點，瞬間推出氣體紀錄吹出的氣體流速，錄音筆置於樂器側面 20 公分處進行錄音(如照片 5,6)。

(三)依序測量並錄音樂器 1、樂器 3、樂器 4 所吹奏的單音，樂器 5 則測量及錄音未加吸管、吸管插入 1 公分、3 公分及 5 公分時所吹奏的單音，樂器 2 和樂器 6 則分別測量及錄音所吹奏出的七個音階。重複測量及錄音 5 次。

(四)以錄音筆錄音薩克斯風所吹奏出的七個音階。

(五)將錄音筆所錄到的聲音檔輸入電腦後利用聲音分析程式轉換成音波圖形，進行波形、振幅、音調的比較。

1. 樂器的振動薄膜對聲音三要素的影響

(1)薄膜種類不同

比較樂器 3 與樂器 4 所記錄的波形、振幅、音調。

(2)薄膜振動面積不同

比較樂器 1 與樂器 5 吸管插入 5 公分時所記錄的波形、振幅、音調。

2. 樂器的共鳴腔體積對音調及響度的影響

比較樂器 2 與樂器 6 所記錄的振幅和音調。

3. 樂器內氣體移動距離對音調及響度的影響

比較樂器 1 與樂器 2 所記錄的振幅和音調。

4. 樂器的出氣量對音調及響度的影響

比較樂器 3 與樂器 5 未插入吸管時所記錄的振幅和音調。

5. 樂器的出氣管深入共鳴腔距離對音調的影響

比較樂器 5 未加吸管、吸管插入 1 公分、3 公分及 5 公分時所吹奏記錄的振幅和音調。

6. 自製吹笛與薩克斯風音階及音色比較

樂器 6 及薩克斯風吹奏七個音階所記錄的波形、振幅和音調。

7. 利用程式進行分析

- (1)利用 solo Explorer 1.0 程式分析振動頻率和標準化後音階位置與節拍數。
- (2)利用 Audacity Portable 程式分析高振幅區的持續時間。
- (3)利用 Praat 程式分析平均振幅、振動總時間、強振動區域個數、波峰個數。
- (4)利用聲音轉檔程式將錄音筆所錄得的 mp3 檔轉成可分析的 wav 檔。

伍、研究結果與討論

一、樂器的振動薄膜對聲音產生的影響

(一)響度比較

由表 3 可知樂器 3 的平均振幅>樂器 4，也就是樂器 3 較樂器 4 大聲，總振動時間樂器 4 較短，2 種樂器均可發出 2 次間隔的強音，標準化後節拍數、音符種類、音階位置並沒有差異(如照片 7a)。

(二)音調比較

由圖 2 可知，發出 2 次間隔強音所佔的時間百分比樂器 4>樂器 3，在不同振動頻率所造成波峰數樂器 3 在 2 次強音區的波峰數均相同，樂器 4 則是第二次強音區大於第一次強音區；所以花袋膜的振動較氣球膜的振動穩定，但是整個發聲過程氣球膜強音所佔的時間比例較長。

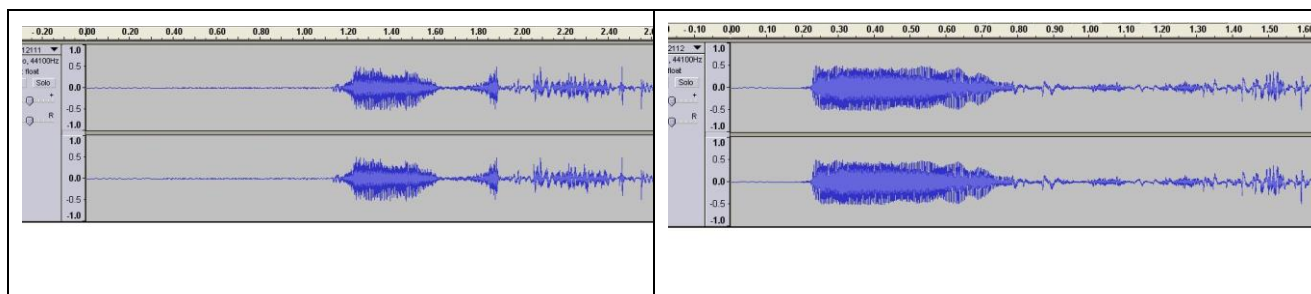
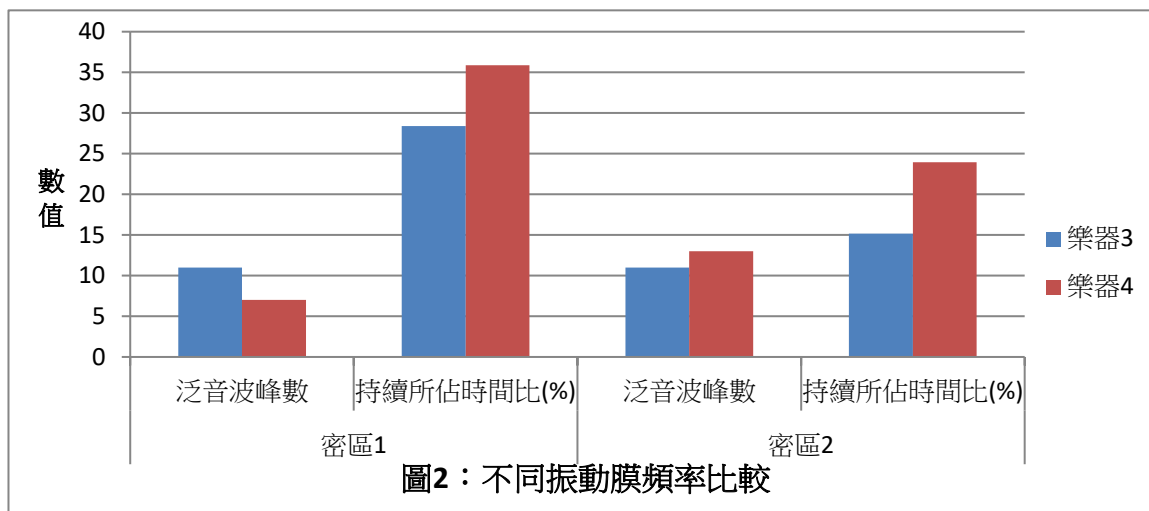
(三)音色比較

由照片 7b 發現前半段波形氣球膜振動泛音出現較少，比較接近單音，後半段的振動則泛音較多。塑膠膜的強音出現較晚，泛音的混合最高頻率(波峰高度)較一致。

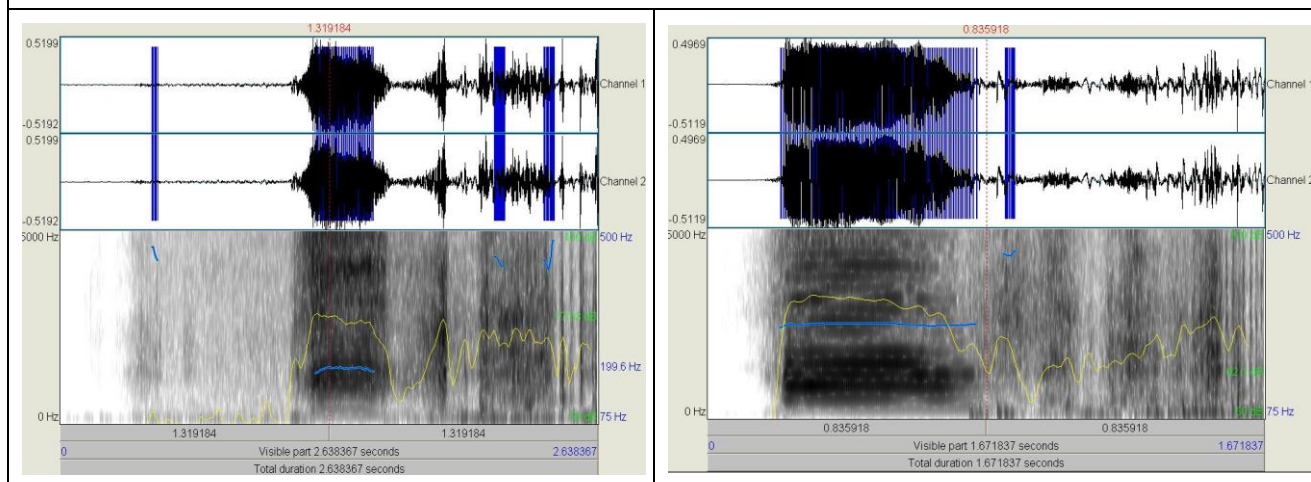
表 3：花袋膜與氣球膜振動的比較

編號	操縱變因	平均振幅(dB)	總振動時間(秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	標準化音階位置
樂器 3	花袋膜	77.68	2.638367	2	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
樂器 4	氣球膜	62.1	1.671837	2	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階

(四) 花袋膜的彈性較氣球膜差，來回振動幅度較氣球膜少，來回振動快所以振動總時間、平均振幅較高。氣球膜柔軟有彈性可以反應不同大小的作用力所以後半段的振動頻率就更容易顯現。



照片 7a：樂器 3(左)、樂器 4(右)錄音檔經分析程式分析振幅頻率結果



照片 7b：樂器 3(左)、樂器 4(右)錄音檔經分析程式分析波形結果

二、樂器的共鳴腔體積對聲音產生的影響

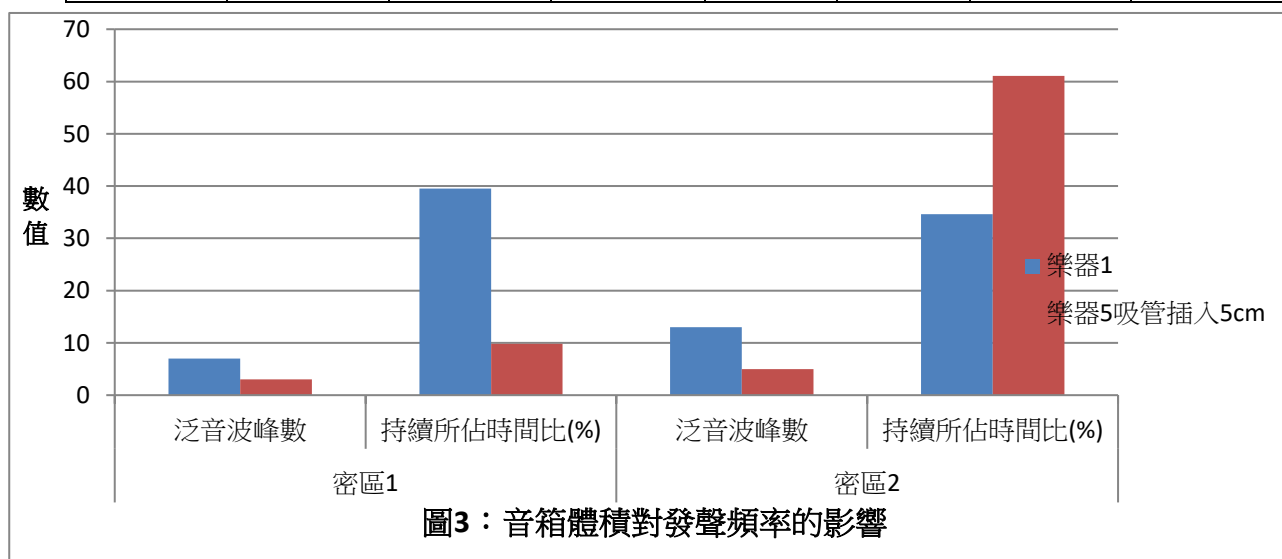
(一) 響度比較

由表 4 發現輸入相同體積的氣體時，薄膜產生振動引導樂器內部空氣共振，樂器 1

養樂多瓶容積 104.0 ml 加上粗吸管容積 10.4 ml 總共 114.4 ml。樂器 5 吸管插入 5cm 由保特瓶包覆養樂多瓶其體積 202.0 ml 加上粗吸管容積 10.4 ml 總共 212.4 ml，所以樂器 5 吸管插入 5cm 產生的平均振幅>樂器 1(如照片 8a)。根據波以耳定律容積大的樂器輸入相同氣體量時總氣體壓力較小，能產生的總振動時間較小，所形成的標準化節奏也較短促。

表 4：樂器的共鳴腔體積對聲音產生的比較

編號	操縱變因	平均振幅 (dB)	總振動時間(秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	標準化音階位置
樂器 1	共鳴腔體積小	54.89	1.645714	2	1 拍	四分音符	高音譜記號：Sol
樂器 5 吸管插入 5cm	共鳴腔體積大	77.07	1.227755	2	1/2 拍	八分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階

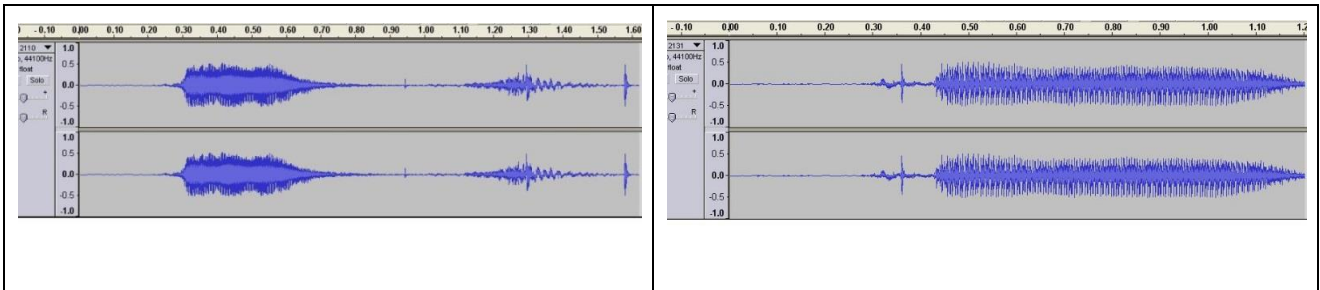


(二) 音調比較

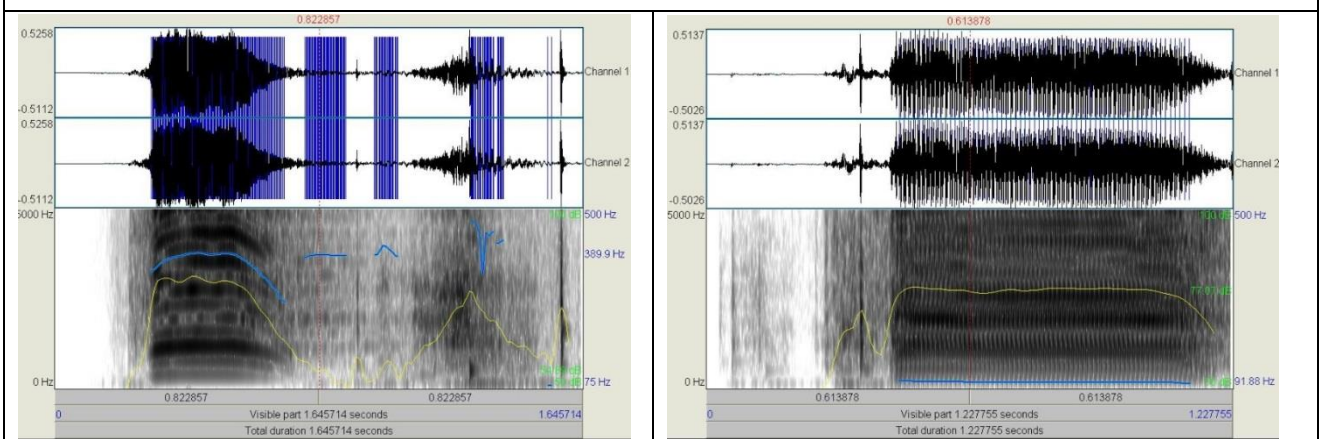
由圖 3 發現樂器 1 總容積較小氣體進入後產生的瞬間壓力大較容易振動薄膜所以第 1 密集區持續時間比例較大，薄膜受力較大比較繃緊產生的泛音振動波峰較的 2 密集區少。樂器 5 吸管插入 5cm 則是第 2 密集區密集區持續時間比例較大代表發聲的主要振動較慢發生，振動力量較小所產生的泛音波峰數也較少。

(三) 音色比較

由照片 8b 波形也可發現樂器 5 吸管插入 5cm 產生持續的相同頻率區間比例高薄膜的小振動較少。



照片 8a：樂器 1(左)、樂器 5 吸管插入 5cm(右) 錄音檔經分析程式分析振幅頻率結果



照片 8b：樂器 1(左)、樂器 5 吸管插入 5cm(右) 錄音檔經分析程式分析波形結果

三、樂器內氣體移動距離對聲音產生的影響

(一) 響度比較

由表 5 樂器 1 和樂器 2 開孔全按為 1 組、樂器 5 吸管插入 1cm 和樂器 6 開孔全按為 1 組比較，樂器 1 較樂器 2 開孔全按出氣管較短、總容積略小所產生的平均振幅較小、總振動時間較長、振動節奏經標準化後節拍數較長，樂器 5 吸管插入 1cm 和樂器 6 開孔全按的比較樂器 5 吸管插入 1cm 其出氣管較短總容積略小產生的平均振幅較大、總振動時間較短、振動節奏經標準化後節拍數較小，二組比較得到相反結果。

(二) 音調比較

1. 由圖 4-1 發現多多笛其出氣管長度較短的樂器 1 所產生的 2 次振動密集區持續時間比例均較出氣管長度較長的樂器 2 開孔全按大。泛音波峰數樂器 1 第 2 密集區較第

1 密集多，樂器 2 開孔全按時 2 次振動產生的泛音波峰數則是相近。

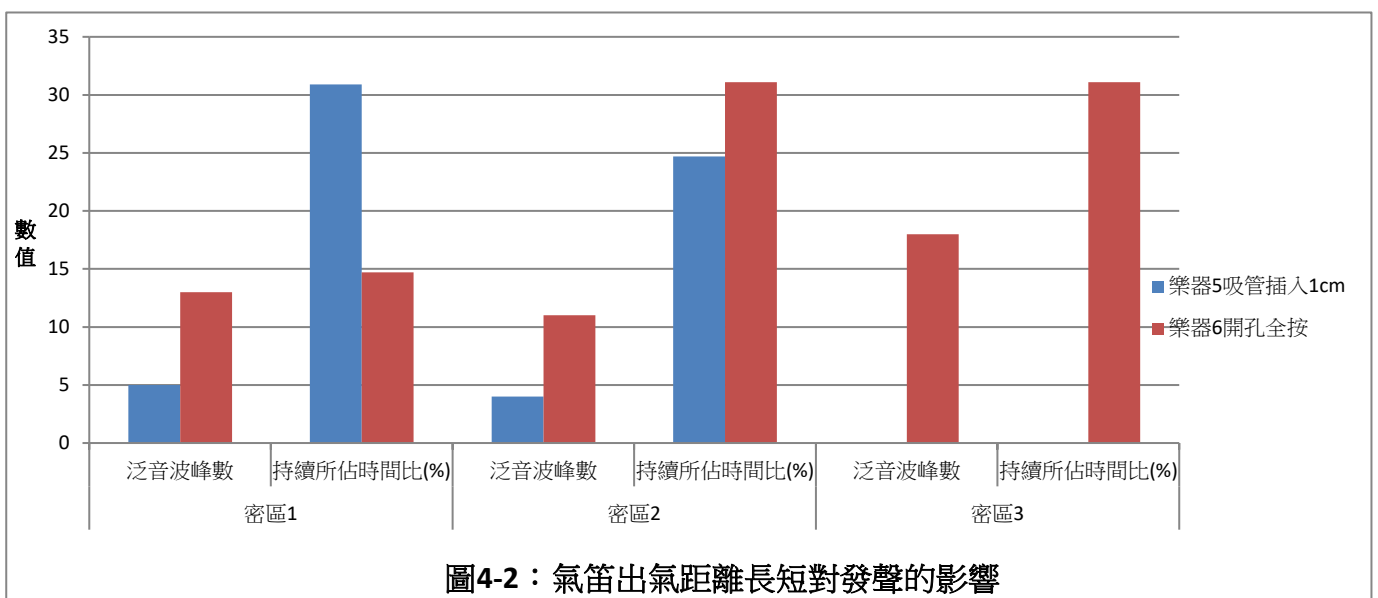
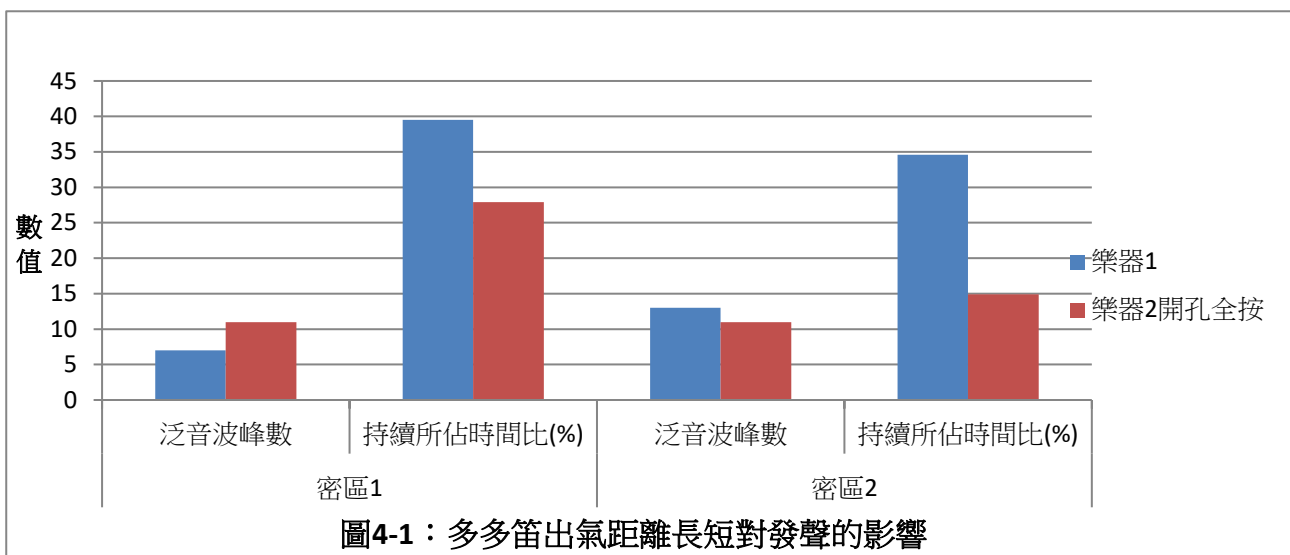
2. 由圖 4-2 發現氣笛出氣管長度較短的樂器 5 吸管插入 1cm 其振動密集區個數較樂器 6 開孔全按少 1 次、持續時間所佔比例除了第 1 密集較大外，第 2 密集區就比較小。泛音波峰數則是樂器 6 開孔全按>樂器 5 吸管插入 1cm。

(三) 音色比較

由照片 9-1 及 9-2 的圖形發現多多笛出氣管長度較短的樂器 1 其波形較早出現穩定的同頻率振動區域，隨後的振動較無規律性，出氣管長度較長的樂器 2 開孔全按出現相同振動頻率高峰次數多波形起伏較穩定，主要振動產生時間也較慢；樂器 5 所產生的振動較樂器 6 開孔全按所產生的振動較具穩定性。

表 5：樂器內氣體移動距離對聲音產生的比較

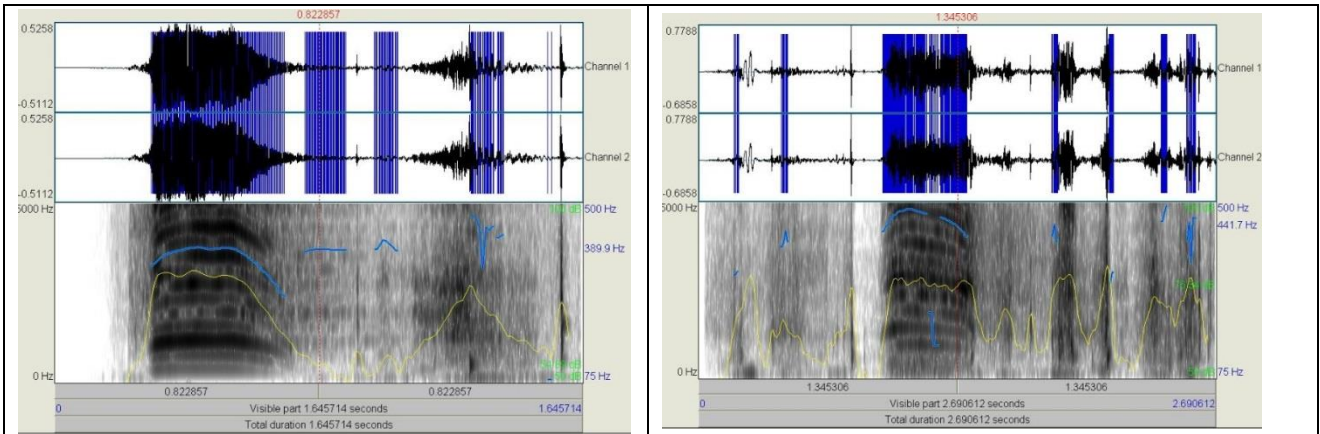
編號	操縱變因	平均振幅(dB)	總振動時間(秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	出氣孔最大風速(m/sec)
樂器 1	距離短	54.89	1.645714	2	1 拍	四分音符	1.1
樂器 2 開孔全按	距離長	62.33	1.306122	2	1/2 拍	八分音符	1.9
樂器 5 吸管插入 1cm	距離短	77.12	0.809796	2	1/8 拍	三十二分音符	1.1
樂器 6 開孔全按	距離長	64.44	3.056327	3	4 拍	全音符	2.7



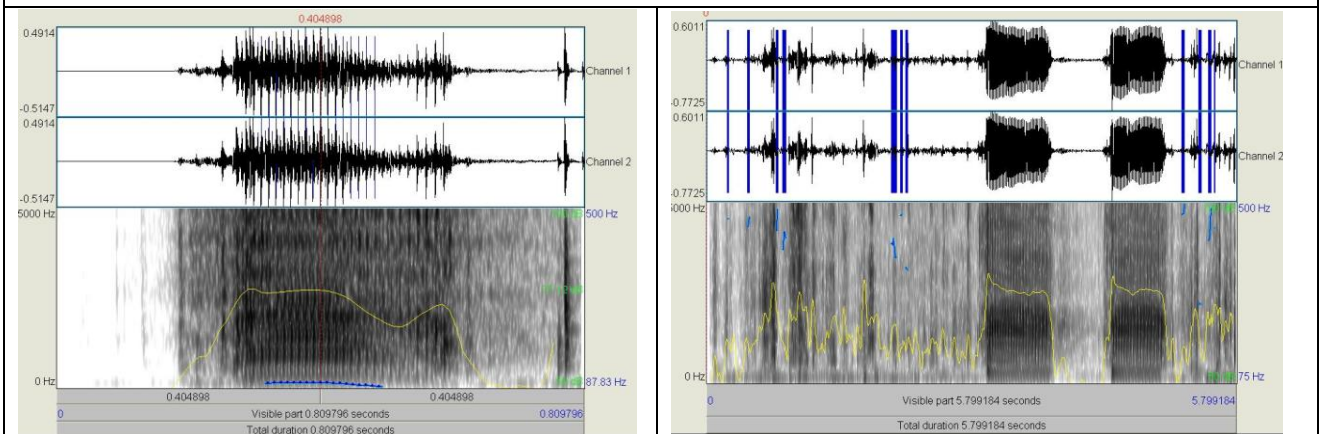
(四) 根據所查到的資料推測

1. 出氣管長度較短單位時間氣體流出的次數較多，頻率較高音調也較高。由於吹氣經由此端使管內的空氣柱發生振動形成駐波，以管內空氣分子的振動位移而言，當空氣柱形成駐波時，管長為四分之一個波長的奇數倍，公式為 $f=n*v/4*l$
 $n=1.2.3.....$ ， v 為波速， l 為管長；所以氣體移動距離越長所產生的聲音頻率就越小，音調就越低。
2. 出氣管長度較長其「煙囪效應」較明顯，由出氣孔最大風速可以證實出氣管長度較長樂器內部氣體導流較順暢。泛音的波峰數和波形都較有規律，比較適合樂器吹奏的穩定性。

3. 至於 2 組出氣管長度比較結果所造成的差異，是因多多笛為只有單一共鳴腔的樂器，氣流動向單純，出氣管長度比較長時，氣體流失快作用時間和持續時間就較小。氣笛是由 2 個共鳴腔所組成，氣體的導流較複雜薄膜必須上舉產生空隙時外腔氣體才能進入內槍，內腔氣體無法一次就由出氣管排出，殘留氣體就會在共鳴腔中來回運動，並可作用於薄膜才會形成樂器 6 開孔全按總振動時間較長。



照片 9-1：樂器 1(左)、樂器 2 全按(右) 錄音檔經分析程式分析結果樂器 2 全按



照片 9-2：樂器 5 吸管插入 1cm(左)、樂器 6 開孔全按(右) 錄音檔經分析程式分析結果

四、樂器的出氣孔大小對聲音產生的影響

(一) 響度比較

由表 6 發現樂器的出氣孔大小對聲音響度的影響不明顯，只有總振動時間有差異，大出氣孔的樂器 3>樂器 5 未插入吸管。推論是因出氣孔小的樂器內腔的氣體無法立即排除，會來回在內腔中作用於薄膜使得外腔氣體容易進入內腔排除，大出氣孔的樂器其內腔的氣體可迅速排出，只能依賴外腔氣體推動薄膜，所需的作用時間就加長。由於沒有出氣管導引，排出的氣體容易發散風速測量不易。

(二) 音調比較

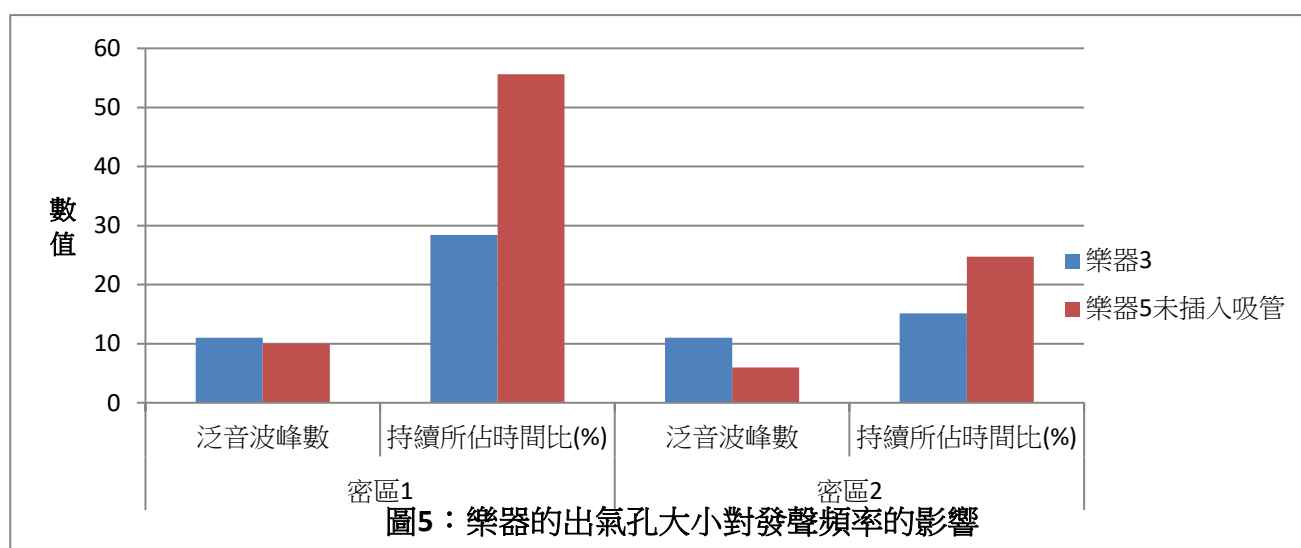
由圖 5 發現 2 次振動密集區持續時間比例樂器 5 未插入吸管>樂器 3，出氣孔小的樂器內腔的氣體無法立即排除，會來回在內腔中作用於薄膜所造成，導致不同振動頻率的波峰數較少。

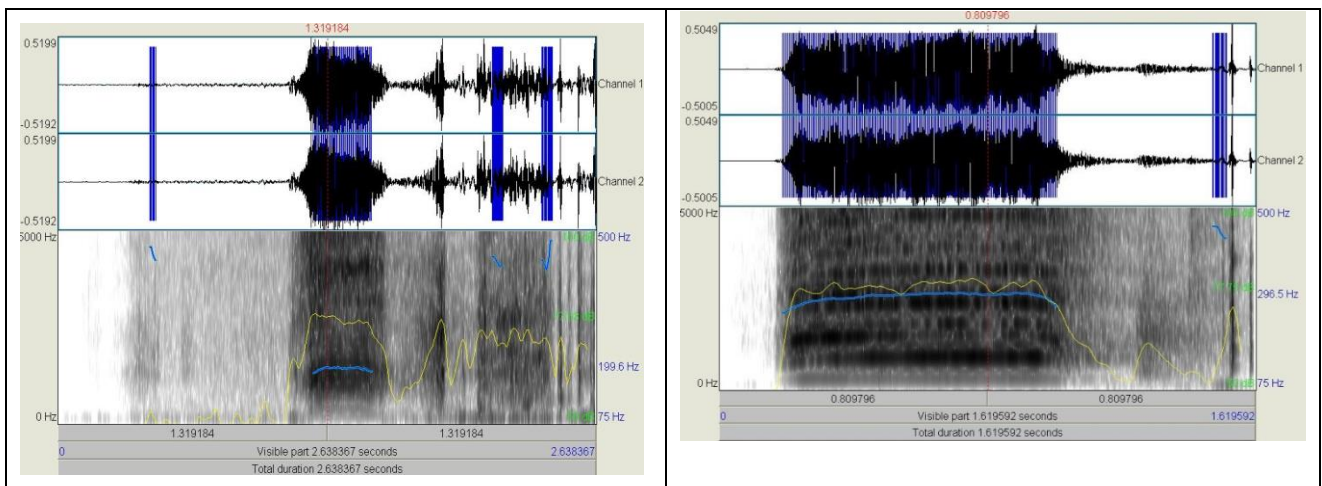
(三) 音色比較

由照片 10 可發現大出氣孔的樂器 3 振動頻率斷斷續續，小出氣孔的樂器 5 未插入吸管維持同頻率的時間較長比較容易形成樂音。

表 6：樂器的出氣孔大小對聲音產生的比較

編號	出氣孔	平均振幅(dB)	總振動時間(秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	標準化音階位置	出氣孔最大風速(m/sec)
樂器 3	大	77.68	2.638367	2	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階	0.3
樂器 5	小	77.75	1.619592	2	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階	0.3





照片 10：樂器 3 (左)、樂器 5 未插吸管(右) 錄音檔經分析程式分析結果

五、樂器的出氣管深入共鳴腔距離對聲音產生的影響

(一) 響度比較

由表 7 發現平均振幅差異不大，是因為薄膜和出氣孔大小相同，由於出氣管深入共鳴腔的距離越大代表距離振動薄膜越近，深入 5 cm 時就抵住薄膜，所以薄膜一振動就直接將氣體送入出氣管，離薄膜越遠共鳴腔內氣流就會有發散的現象，由出氣孔所測得的最大風速可以證實距離薄膜越遠送出的氣流速度越小，吸管插入距離 0 cm 氣體流出量較少氣體在共鳴腔內來回作用的時間加長，所以總振動時間較長，吸管插入距離 5 cm 時只能直接送出吸管與薄膜接觸面積同大小的氣體，較難產生導引氣流，吸管插入距離 3 cm 總振動時間最小也就是引導氣流較順暢。

(二) 音調比較

由圖 6 發現吸管插入距離 0 cm 時 2 次的振動密集區持續時間比例均比較大，除了吸管插入距離 5 cm 時第 2 次振動密集區持續時間比例外。所產生的泛音波峰數較多也是因為氣體導流較慢氣體在共鳴腔內來回作用推動薄膜所造成的。

(三) 音色比較

由照片 11 的波形發現除了吸管插入 1 cm 的波形相同振動頻率的較不明顯外，其餘 3 種方式都可以有規律的聲音，但是吸管插入距離 0 cm 時還是會有些微顫抖音。

表 7：樂器的出氣管深入共鳴腔距離對聲音產生的比較

樂器 5 吸管插入距離	平均振幅(dB)	總振動時間(秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	標準化音階位置	出氣孔最大風速(m/sec)
0 cm	77.75	1.619592	2	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階	0.3
1 cm	77.12	0.809796	2	1/8 拍	三十二分音符	高音譜記號；高音 La12 階	1.1
3 cm	77.17	0.653061	2	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階	1.5
5 cm	77.07	1.227755	2	1/2 拍	八分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階	1.6

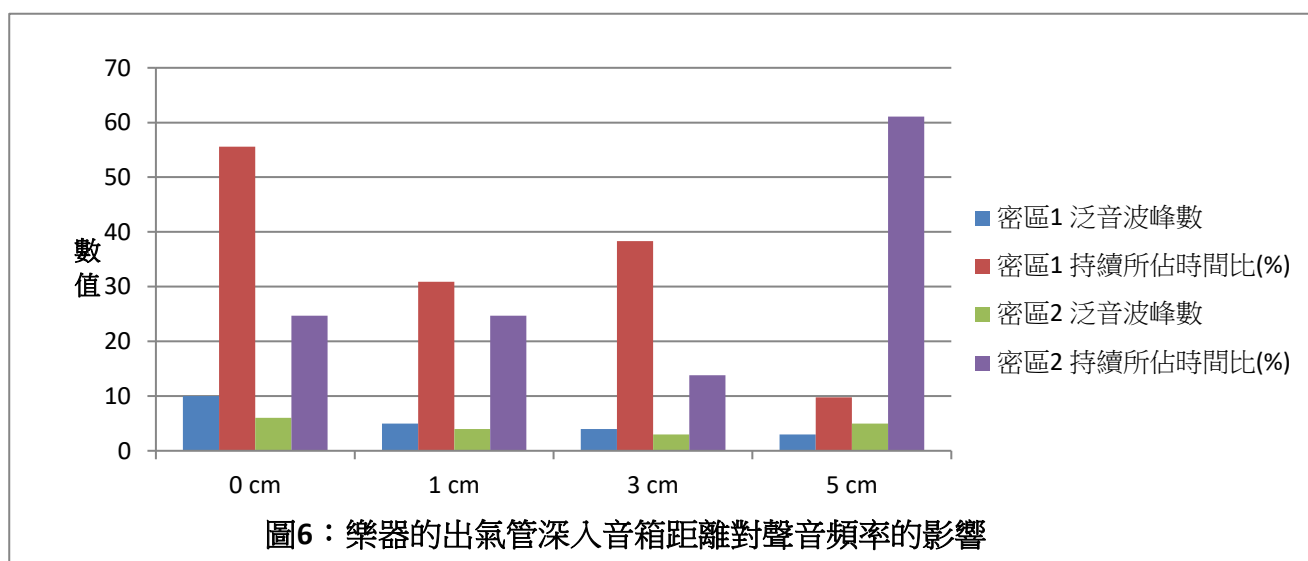
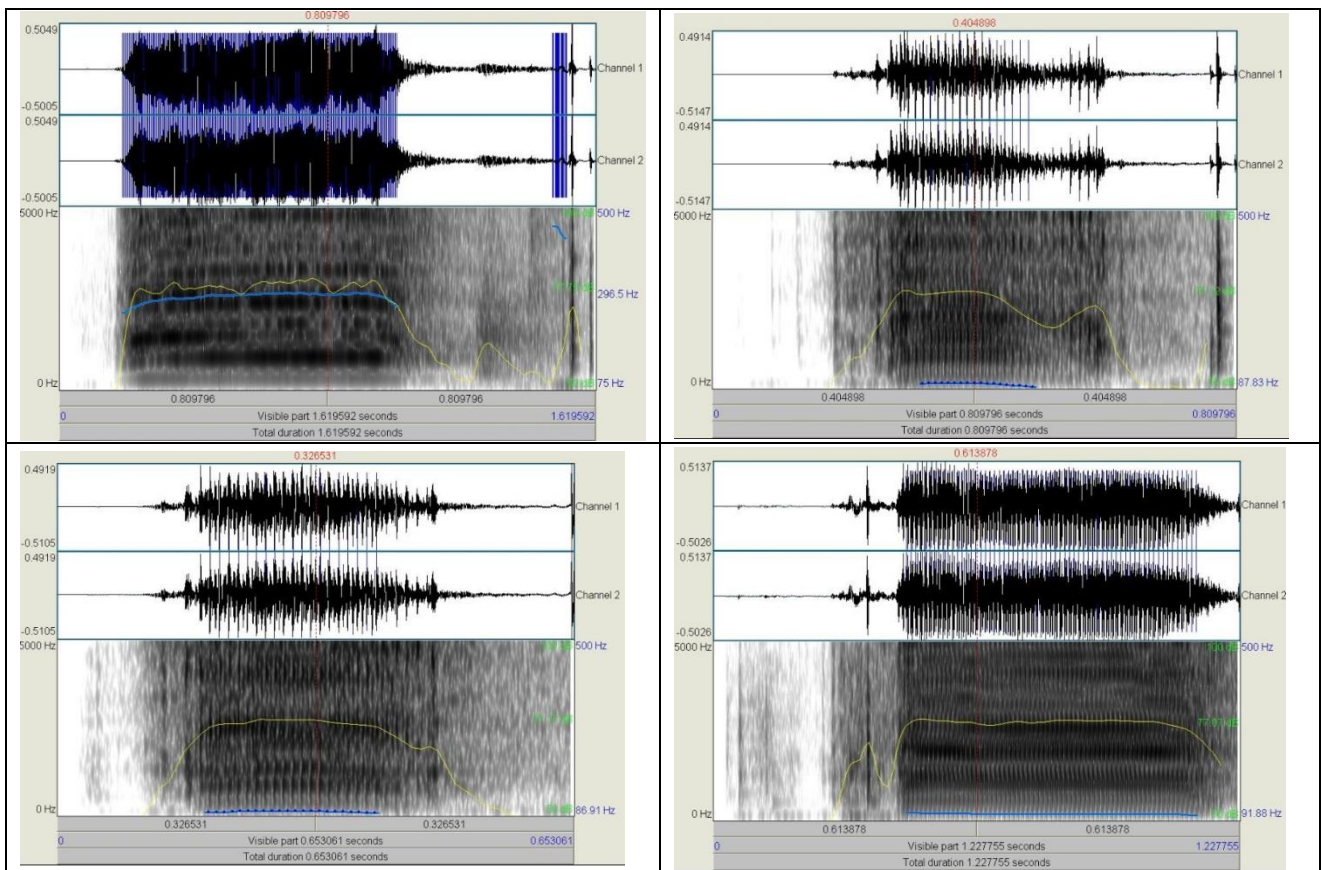


圖 6：樂器的出氣管深入音箱距離對聲音頻率的影響



照片 11：樂器 5 未插吸管（上左）、插吸管 1cm（上右）、插吸管 3cm（下左）、插吸管 5cm（下右）錄音檔經分析程式分析結果

六、自製吹笛與薩克斯風所產生的聲音比較

（一）響度比較

由表 8 可發現樂器 6 利用氣球打氣筒送入固定量的氣體吹奏出的 7 個音階所產生的平均振幅均較薩克斯風所吹奏出的 7 個音階小。薩克斯風所吹奏的音階較有規律性只形成 1 個密集強波區，樂器 6 至少會形成 2 個密集強波區。經標準化後的節拍數只有 Do 的音階差異較大。

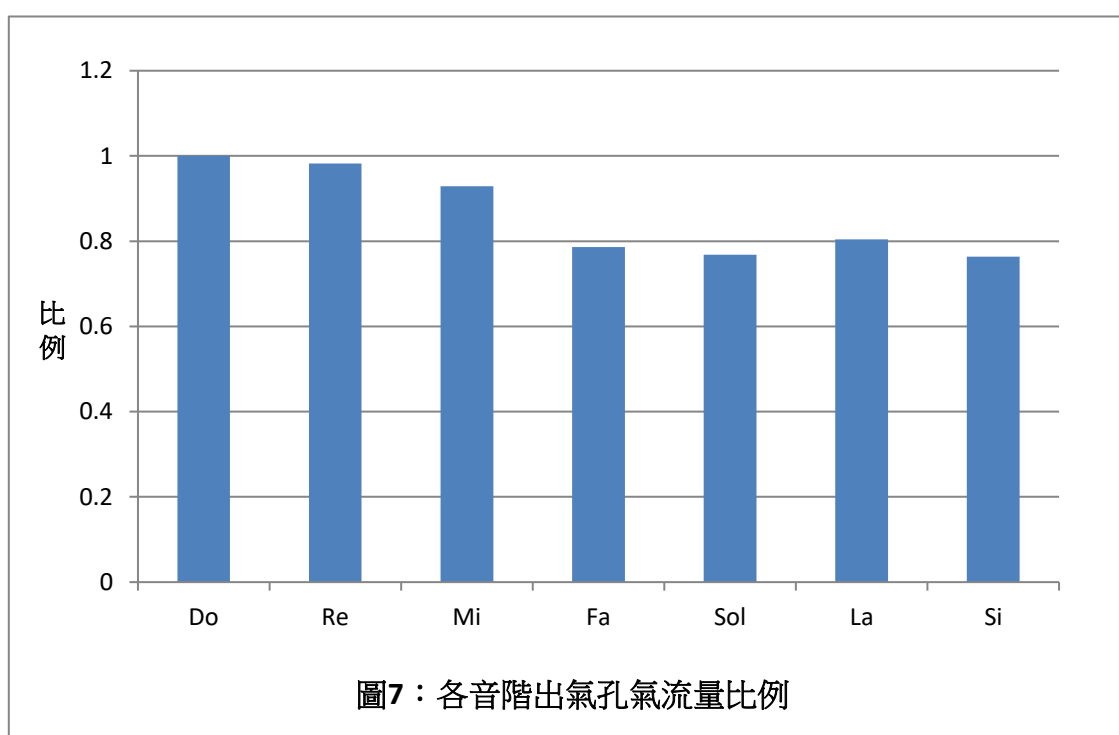
表 8：自製吹笛與薩克斯風所產生的聲音比較

編號	平均振幅(dB)	總振動時間(秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	標準化音階位置
樂器 6 Do	60.42	5.799184	3	4 拍	全音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階

薩克斯風		73.5	1.854694	1	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
樂器 6	Re	76.62	2.246531	3	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
薩克斯風		77.68	2.194286	1	1 拍	四分音符	高音譜記號：Re
樂器 6	Mi	58.03	3.657143	3	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
薩克斯風		72.99	2.507755	1	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
樂器 6	Fa	76.12	1.724082	2	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
薩克斯風		77.54	2.821224	1	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
樂器 6	Sol	75.02	1.854694	2	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
薩克斯風		72.97	2.638367	1	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
樂器 6	La	75.47	2.037551	2	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
薩克斯風		76.03	2.45551	1	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
樂器 6	Si	75.12	2.246531	2	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階
薩克斯風		79.15	2.951837	1	1 拍	四分音符	低音譜記號：低音 Mi 下 12 階

(二) 音調比較

1. 由圖 7 發現自製吹笛吹奏 Do 時所有開孔全按住，共鳴腔內的氣體均由出氣管末端排出，所排出的氣體量轉換成風速計旋轉圈數為標準，其他音階出氣管口風速計旋轉圈數均較 Do 小代表有氣體由開孔排出，未按住開孔的個數和位置均會改變出氣量，導致閉管空氣柱所形成的駐波數產生差異，形成不同音階。
2. 由圖 8 發現自製吹笛和薩克斯風吹奏 Re 和 Mi 時泛音個數較相近外，吹奏 Do 和 Fa 時泛音個數差異最大，各種樂器由於材料和共鳴腔長度均會影響閉管空氣柱所形成的駐波不同導致泛音不同。



(三) 音色比較

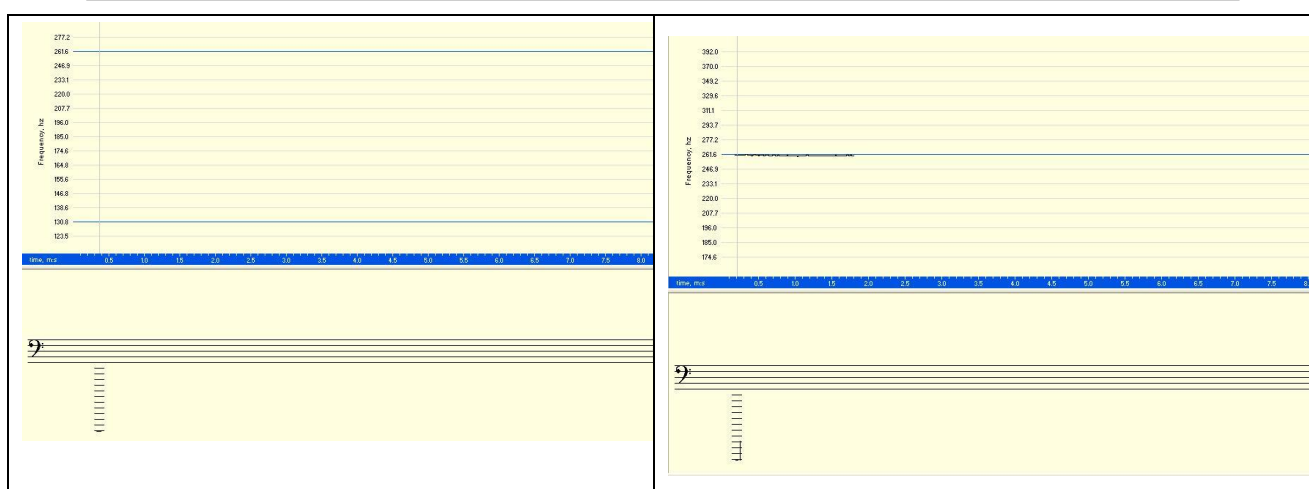
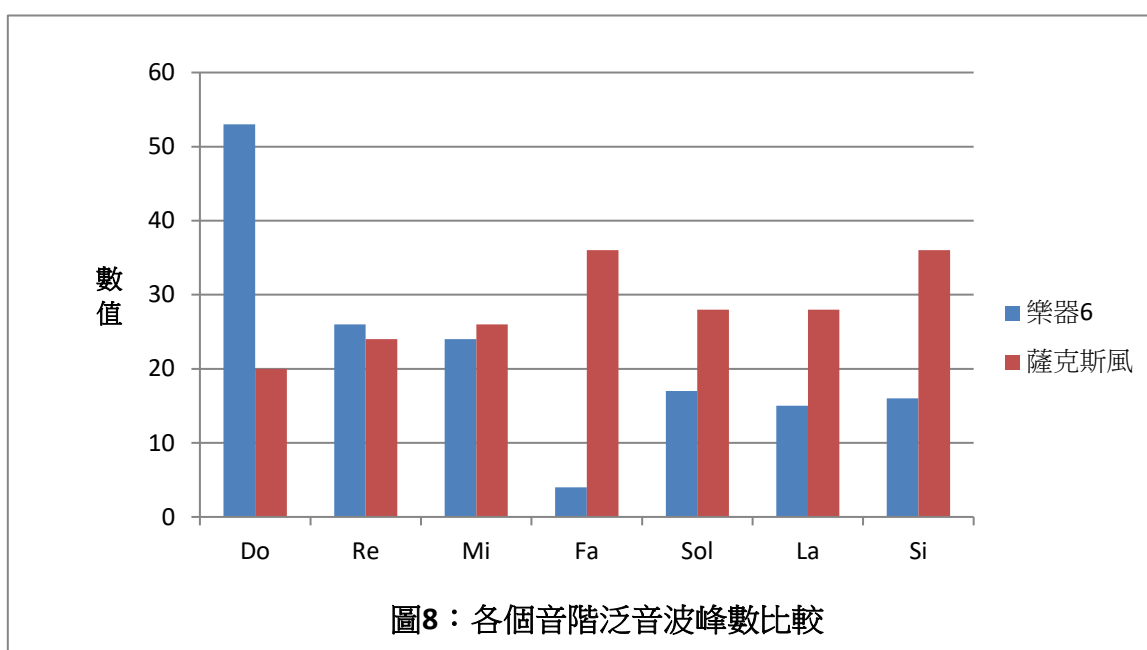
由照片 12 的波形比較自製吹笛和薩克斯風所吹奏的 7 個音階形成的基音其波形出現相同頻率較密集位置相似，薩克斯風基音較有規律泛音數量較多。

(四) 根據所查到的資料推測

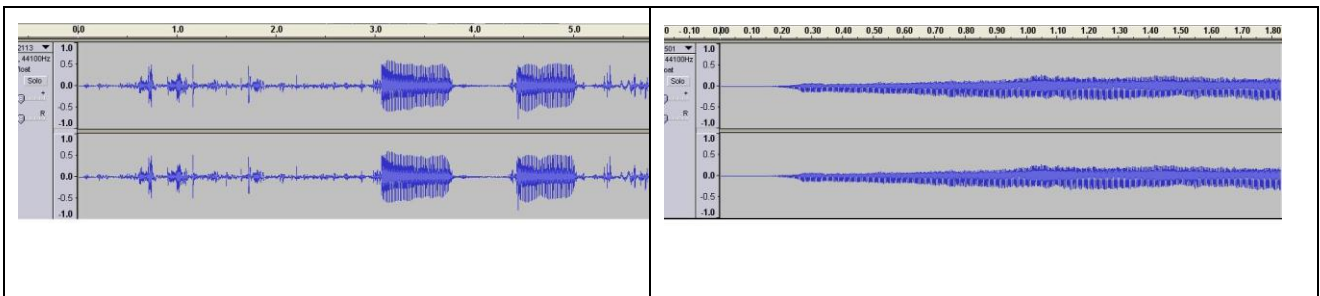
1. 人的聽覺系統辨別聲音頻率的高低反映在人類的的主觀感覺上成為音調的高低，「正常人的音調辨別閾在 1000 赫以下時為 1~2 赫，在 1000 赫以上時約為頻率的 0.1~0.2%」，較容易分辨各種樂器所演奏的基音，個別的泛音就不容易分辨，但是基

音和泛音結合一起而形成的複合音成為各種樂器獨特的發聲，我們又可分辨。所以自製吹笛和薩克斯風所吹奏的 7 個音階其基音相近。

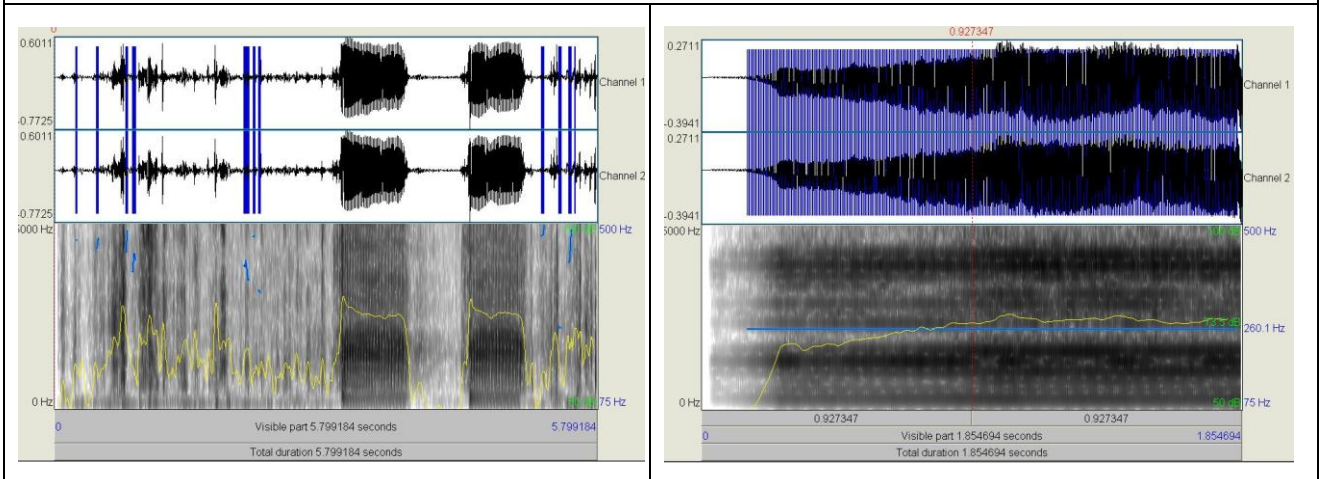
2. 最常見的薩克斯風是由一個共鳴腔的空氣柱震動產生聲音，喇叭直徑比其他木管樂器大，音量也就比較大，改變從吹嘴到最近打開的孔，其他孔閉合的距離即整個管身長度，管身的有效長度控制了聲波的波長，於是產生了不同的音高，單簧管構造由於較低的泛音使聲音柔和豐滿，通常吹奏出的聲音為降 E 調，實際音高比記譜低大 6 度。自製吹笛也是利用相同原理製作，只是利用手指按孔而非薩克斯風使用蓋板緊密度較差。



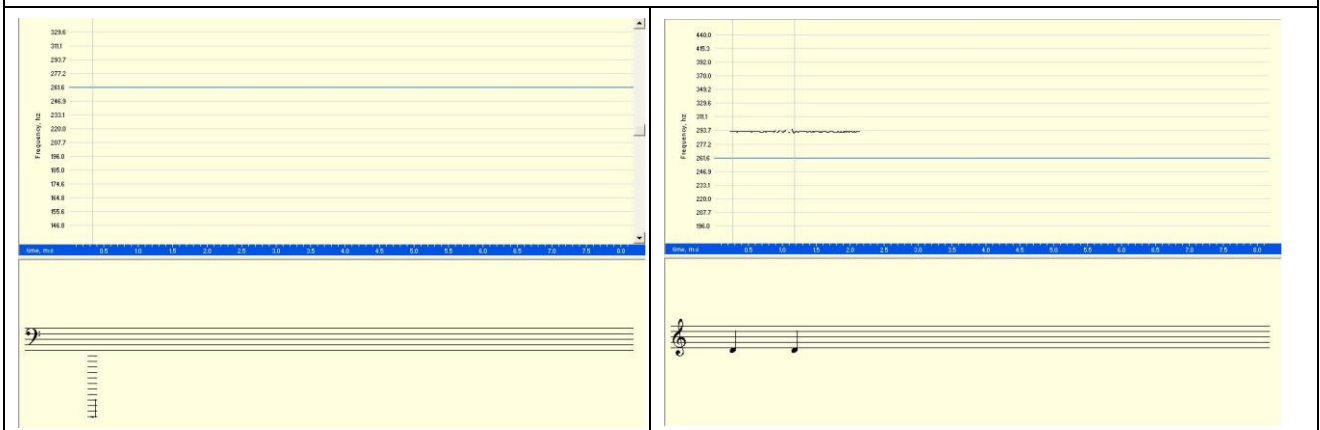
照片 12 a-1：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Do 錄音檔經分析程式標準化音階結果



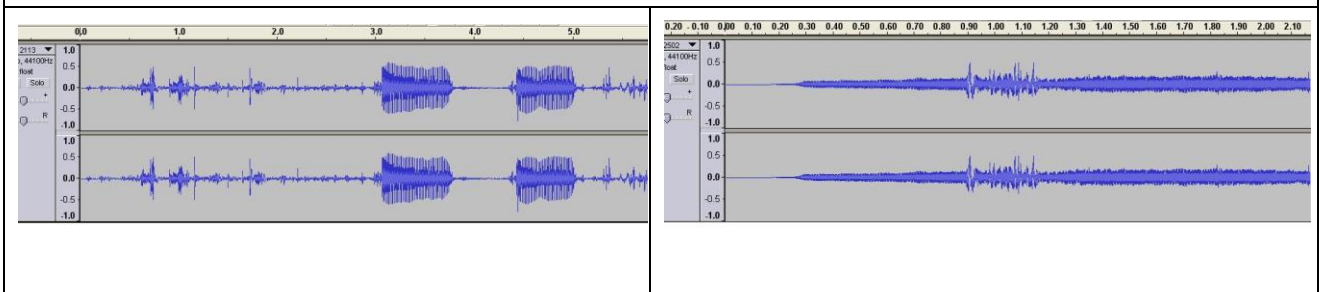
照片 12 a-2：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Do 錄音檔經分析程式振幅分析結果



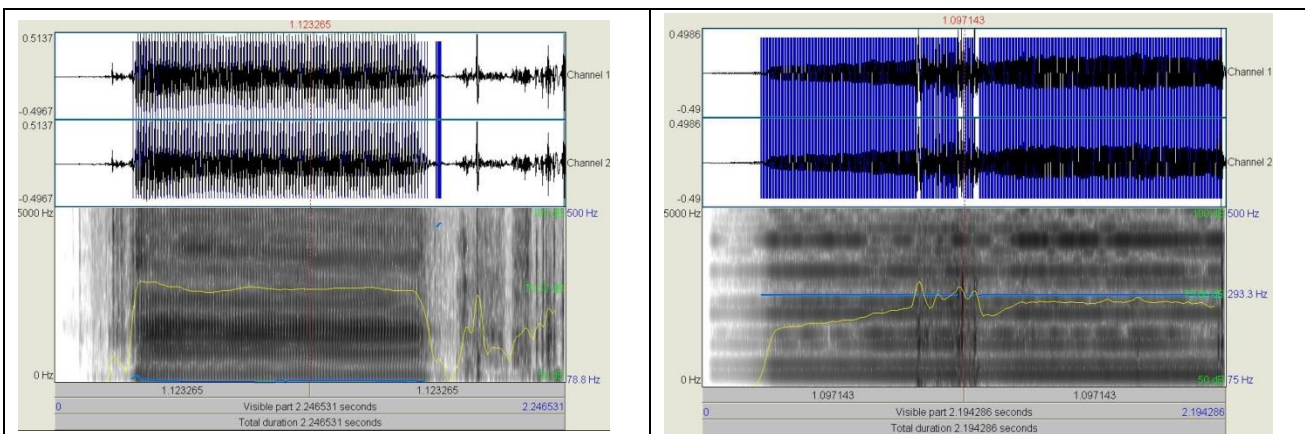
照片 12 a-3：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Do 錄音檔經分析程式波形結果



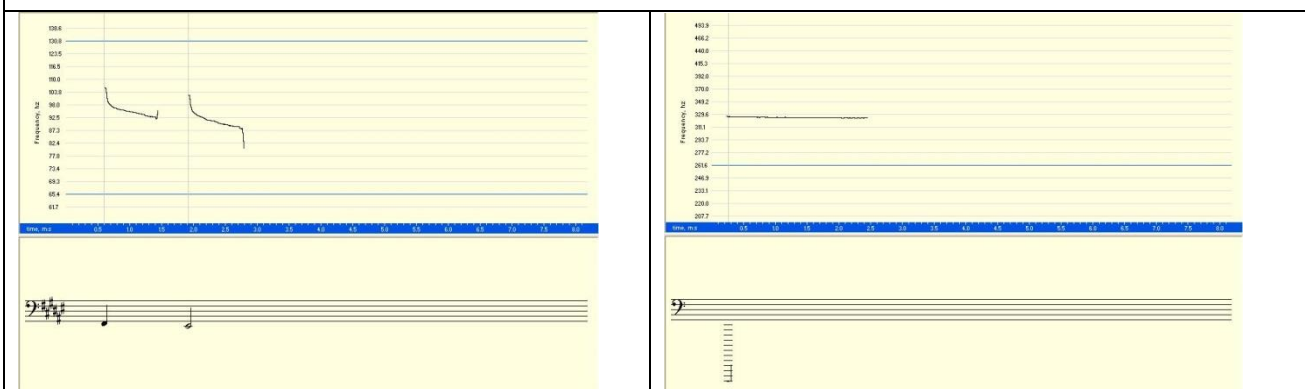
照片 12 b-1：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Re 錄音檔經分析程式標準化音階結果



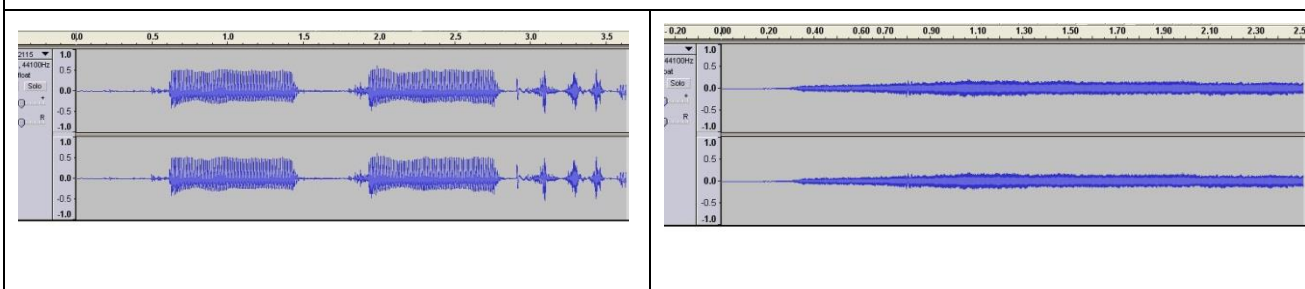
照片 12 b-2：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Re 錄音檔經分析程式振幅分析結果



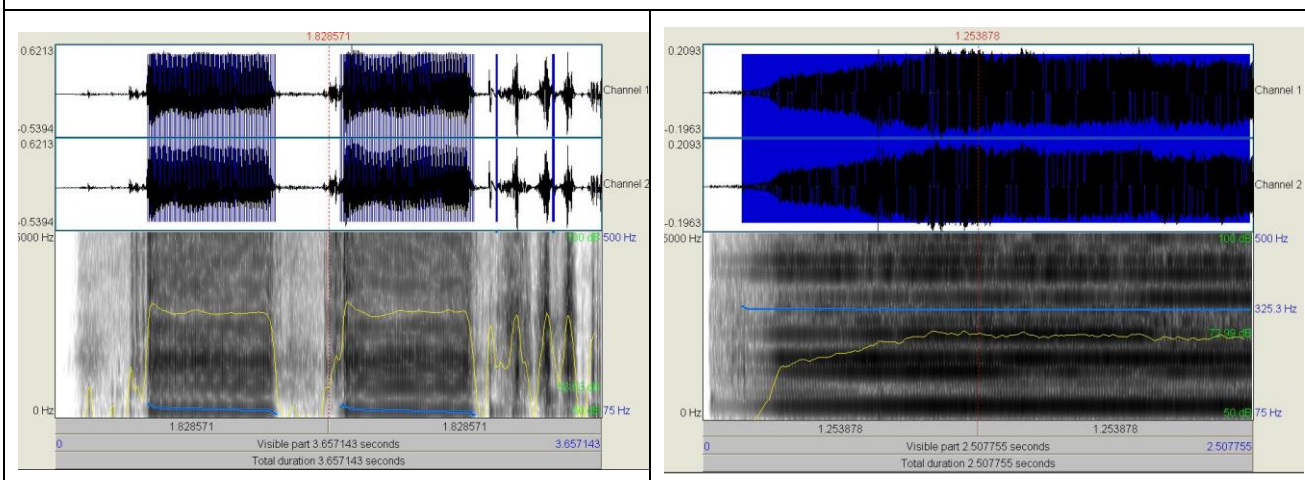
照片 12 b-3：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Re 錄音檔經分析程式波形結果



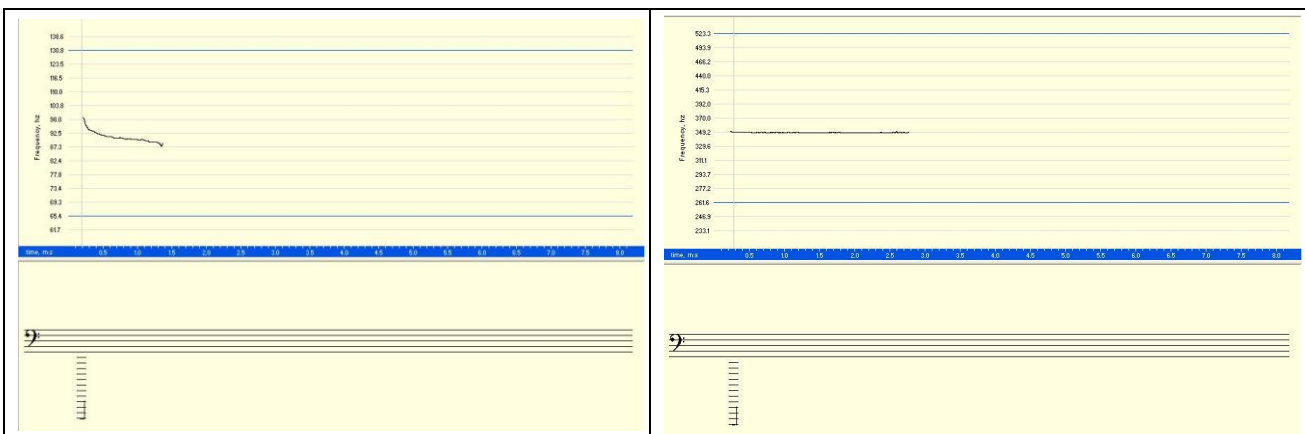
照片 12c-1：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Mi 錄音檔經分析程式標準化音階結果



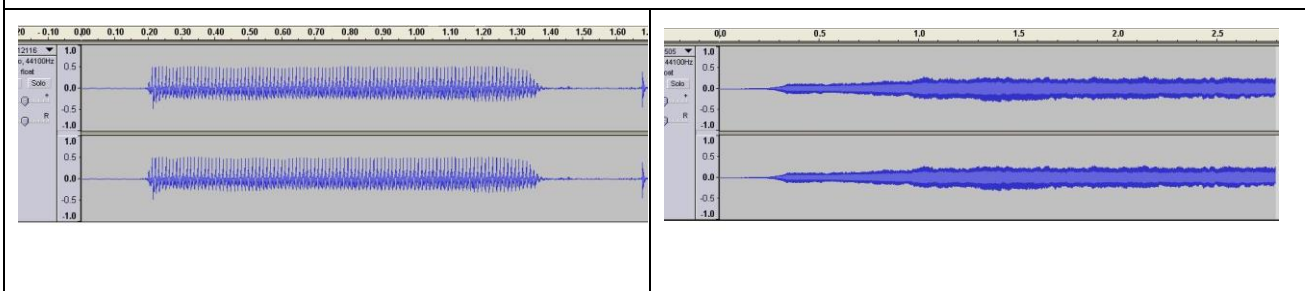
照片 12c-2：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Mi 錄音檔經分析程式振幅分析結果



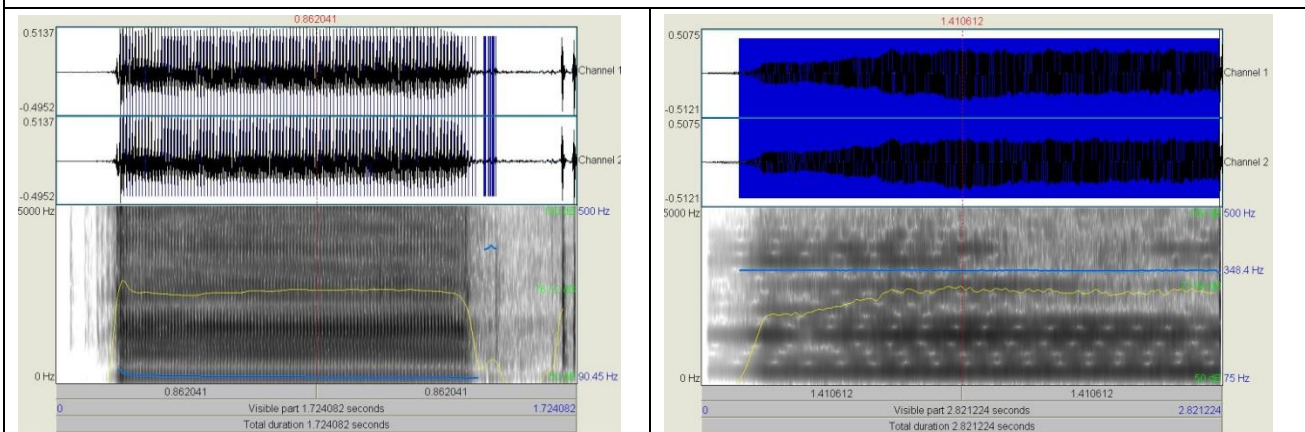
照片 12c-3：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Mi 錄音檔經分析程式波形結果



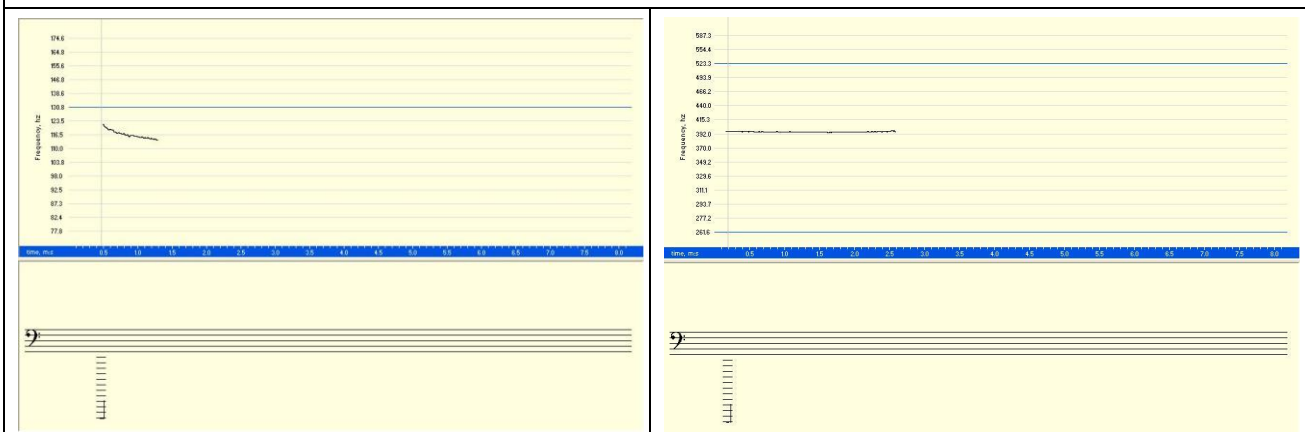
照片 12d-1：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Fa 錄音檔經分析程式標準化音階結果



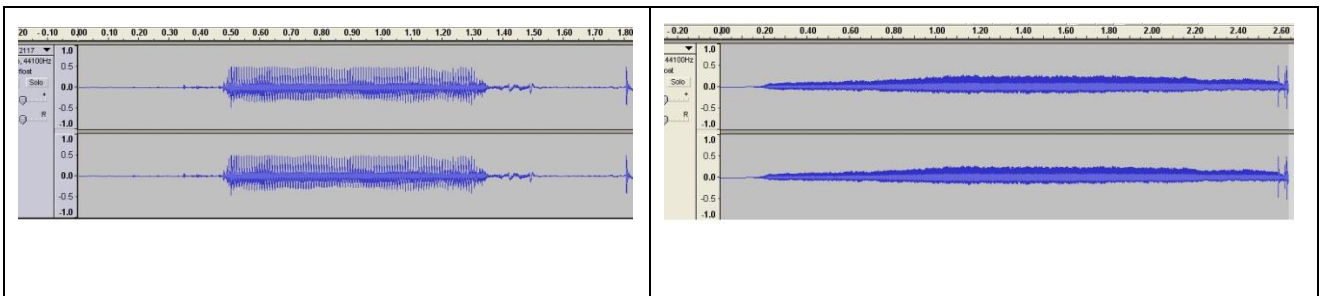
照片 12d-2：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Fa 錄音檔經分析程式振幅分析結果



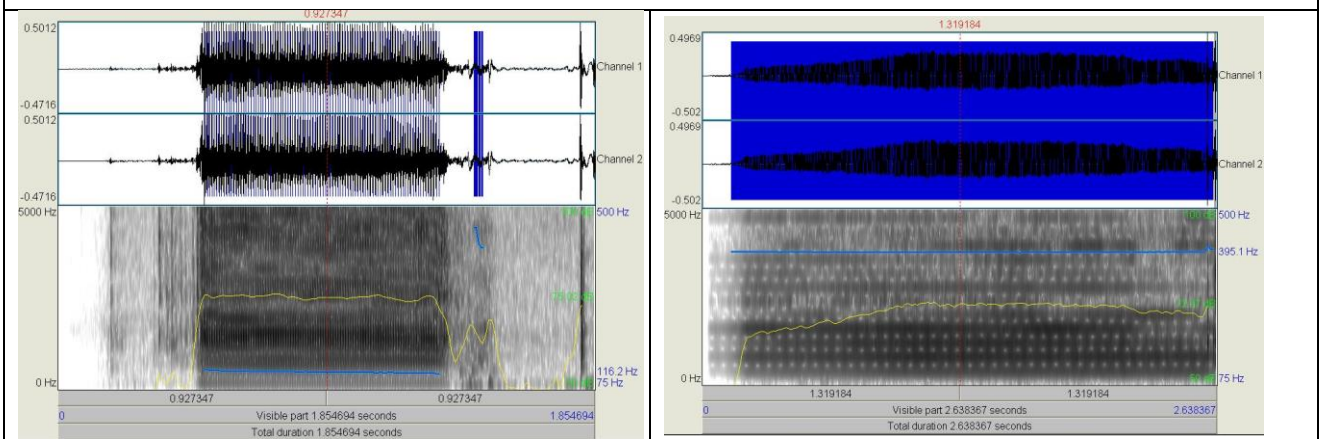
照片 12d-3：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Fa 錄音檔經分析程式波形結果



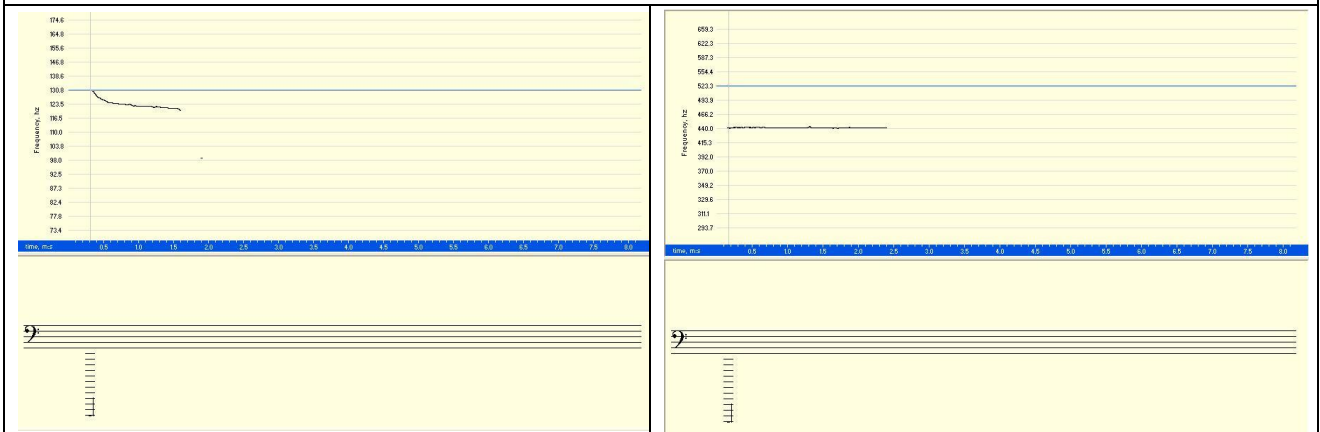
照片 12e-1：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Sol 錄音檔經分析程式標準化音階結果



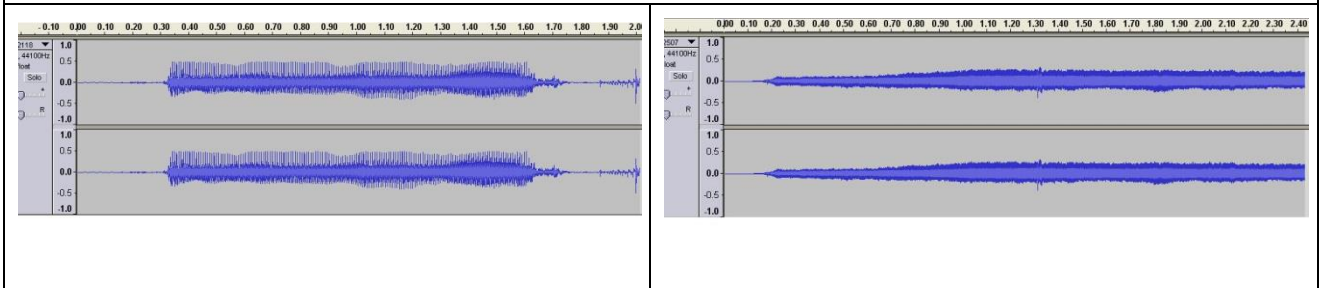
照片 12e-2：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Sol 錄音檔經分析程式振幅分析結果



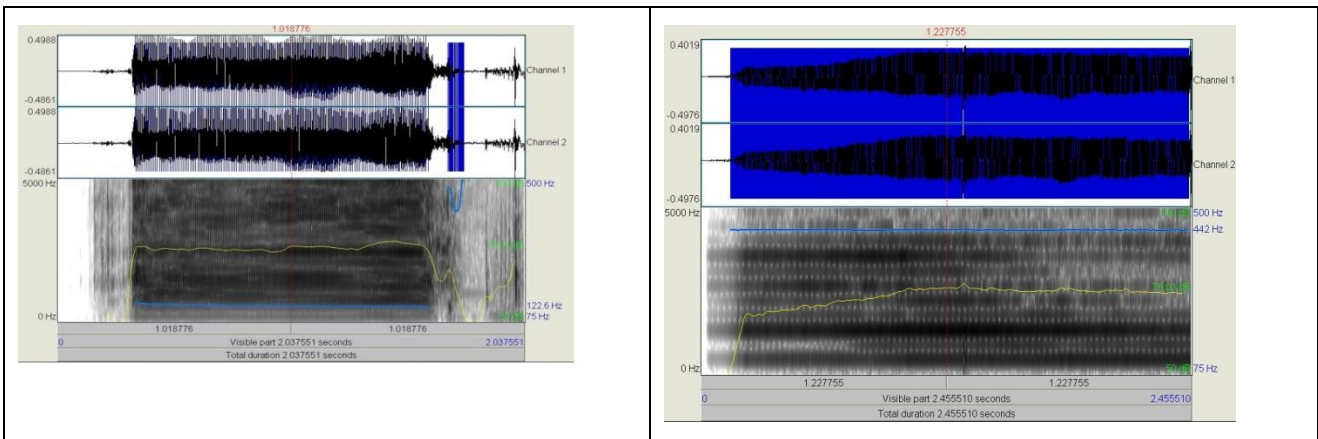
照片 12e-3：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Sol 錄音檔經分析程式波形結果



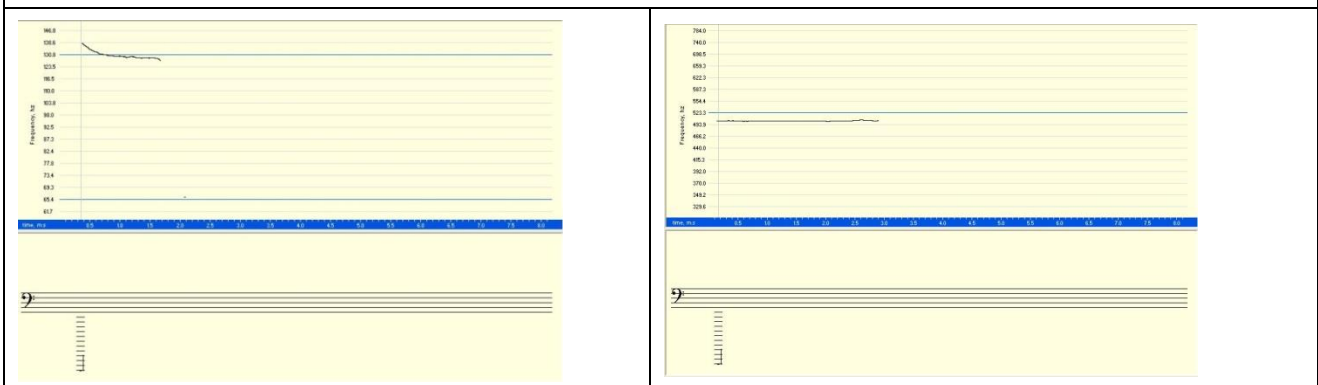
照片 12f-1：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 La 錄音檔經分析程式標準化音階結果



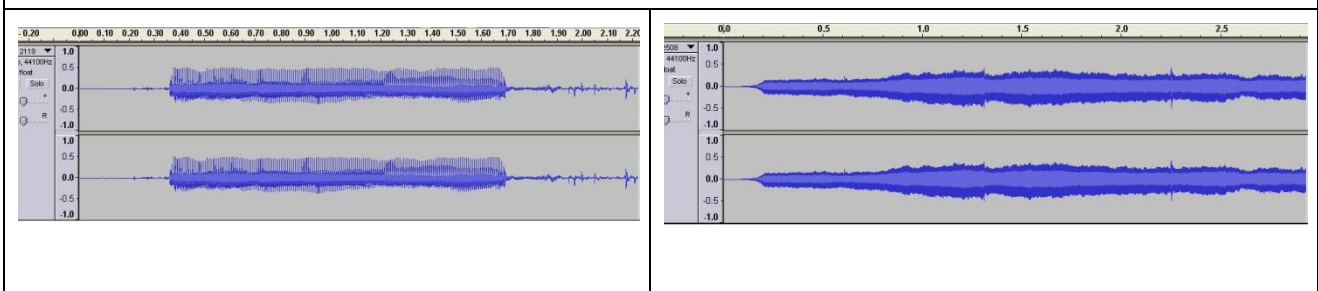
照片 12f-2：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 La 錄音檔經分析程式振幅分析結果



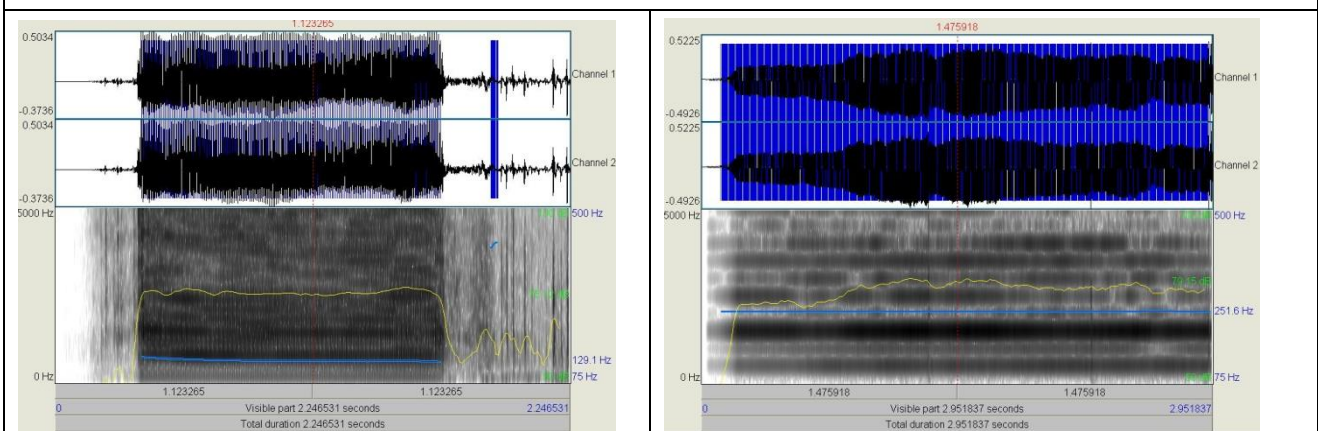
照片 12f-3：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 La 錄音檔經分析程式波形結果



照片 12g-1：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Si 錄音檔經分析程式標準化音階結果



照片 12g-2：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Si 錄音檔經分析程式振幅分析結果



照片 12g-3：樂器 6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Si 錄音檔經分析程式波形結果

陸、結論

一、聲音的產生需要具備振動體、發音體的結構和材質和傳播介質(空氣)與聲音組成的三要素響度、音調、音色之間有密切的影響關係。由自製的樂器可以發現以下特性：

(一) 薄膜狀振動體較容易產生聲音，彈性較差的薄膜，來回振動幅度會較少周期較短，比較不會像彈性體會抵消部分能量，所以振動總時間、平均振幅較大。但是彈性模所產生的聲音前半段波形出現的泛音較少，比較接近單音，後半段的振動因作用力減弱與彈性恢復力的影響導致不同頻率的振動增加所產生的波峰就較多。

(二) 樂器的共鳴腔體積大同時產生氣體共振使得振動產生的振幅較大，但是輸入相同氣體量時因體積變大總氣體壓力變小能推動薄膜的次數會減少，整個總振動時間較小，產生的標準化節奏也較短促。

(三) 樂器內氣體移動的距離大小會影響閉管空氣柱所形成駐波，使得發音體產生的泛音改變，共鳴腔越狹長氣體移動距離大所發出的音調會較低。

(四) 大出氣孔的樂器因內共鳴腔氣體流失快，導致振動頻率斷斷續續，小出氣孔的樂器內腔未排除的氣體回流作用於薄膜，維持同頻率振動的時間較長，比較容易形成規律的波形。

(五) 樂器的出氣管深入共鳴腔距離會影響共鳴腔內氣體的導流，導流順暢氣體流失快，薄膜振動持續性變少。

二、自製吹笛與薩克斯風所產生的聲音比較可得到以下結論：

(一) 利用開孔的距離與按孔的位置改變共鳴腔末端出口的排氣量比例，可以創造相近音階的基音和節奏，讓聽覺感受到相近的音調。

(二) 但是經由電腦程式的分析自製吹笛與薩克斯風所產生的泛音頻率及波形其實還是有差異的，只是我們的聽覺不容易分辨出來。

柒、參考文獻

一、 維基百科。2020/01/05。薩克斯風

<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E8%96%A9%E5%85%8B%E6%96%AF%E9%A2%A8>

二、 維基百科。2020/01/05。聽覺 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%90%AC%E8%A7%89>

三、 國立臺灣師範大學物理系。2020/01/03 聲波的波形與頻率的關係。

<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/html.php?html=teacher/sound/sound5>

四、 自然與生活科技(3)。2019。聲音。翰林出版社。台南市。

五、 mp3 轉 mav。 <https://online-audio-converter.com/tw/>

【評語】 032907

本作品以養樂多罐、寶特瓶、吸管等隨手可得之物品作為材料，製作吹笛樂器，模仿薩克斯風聲音，主題貼近生活。雖然過去科展已有以吸管自製排笛樂器的作品，但本研究深入探討許多變因對樂聲造成之影響，以聲音分析程式研究響度、音調、和音色，具有實作精神。以打氣筒固定吹氣量產生聲音後錄音，但人為操作的變異可能會使結果產生偏差；過多變因同時分析，可能會影響結論。

摘要

音樂可以陶冶性情但是購買樂器費用不低，自製樂器時要注意振動的薄膜和共鳴腔體積影響聲音的產生，氣體移動距離會影響駐波的波長導致音調變化、樂器的出氣孔大小會影響薄膜振動持續時間，出氣管深入共鳴腔的距離會影響共鳴腔內氣體震動的持續性，吹笛利用開孔距離和按孔的指法調節共鳴腔的出氣量比例可吹奏出常見薩克斯風相同音階的基音，若是利用電腦聲音分析程式則發現組成聲音的三要素結果是有差異的，尤其是泛音差異更大，但是一般人的聽覺是不太容易分辨的。

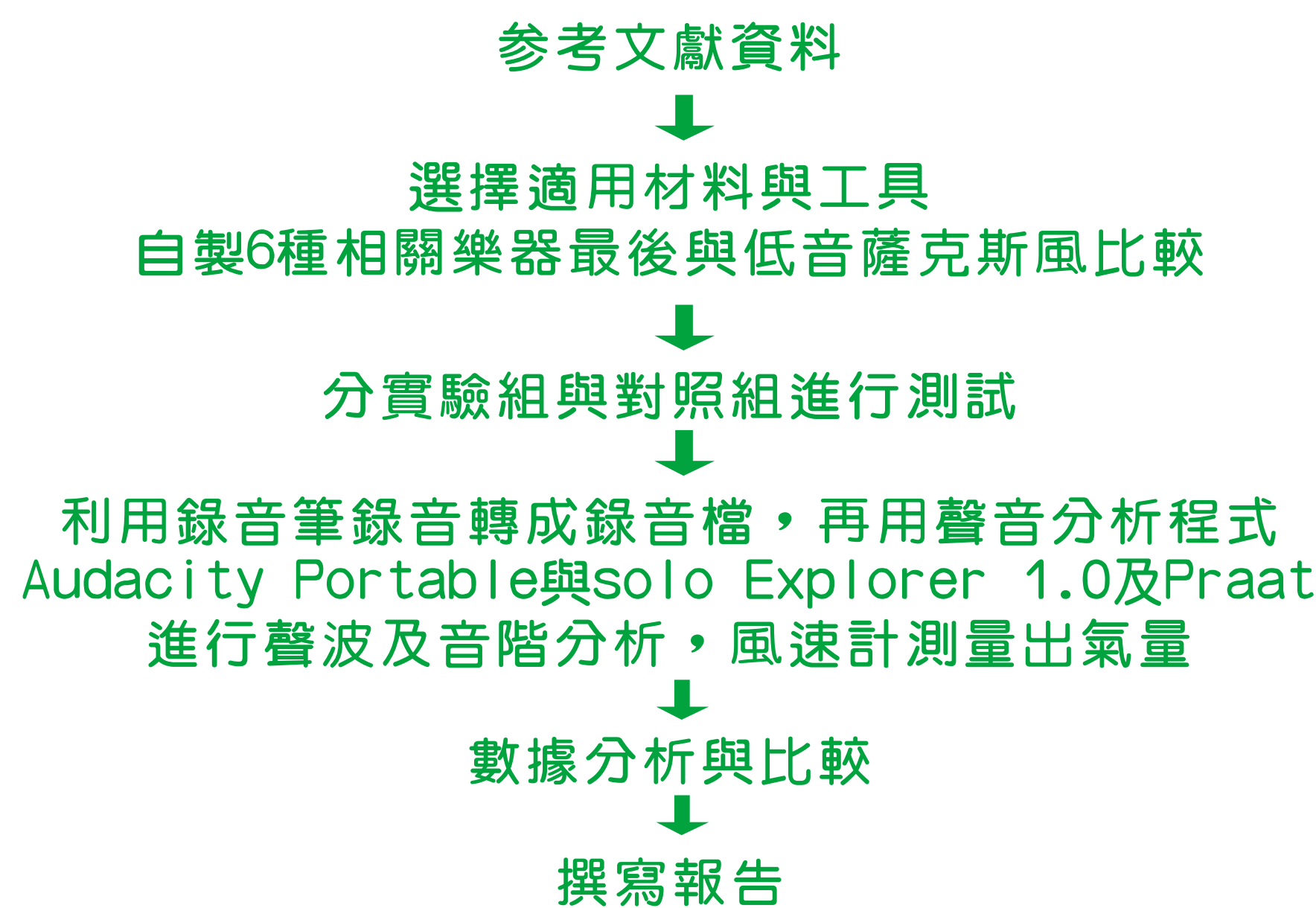
一、研究動機

管樂節聽到了許多管樂器的演奏，詢問老師所使用的管樂器除了上課用的直笛外，其餘的樂器價格都不便宜，於是和指導老師討論想要創作一支所有人都買得起的管樂器，就必須由管樂器發聲的著手，根據自然課本的3冊聲音產生的原理並利用日常容易取得的材料來製作庶民管樂器。

二、研究目的

- 一、樂器的振動薄膜對聲音產生的影響
- 二、樂器的共鳴腔體積對聲音產生的影響
- 三、樂器內氣體移動距離對聲音產生的影響
- 四、樂器的出氣孔大小對聲音產生的影響
- 五、樂器的出氣管深入共鳴腔距離對聲音產生的影響
- 六、自製吹笛與薩克斯風所產生的聲音比較

三、研究流程



四、研究步驟

一、自製樂器的方法

(1) 改良型多多笛製作



(2) 改良氣笛製作



(3) 進化型庶民管樂器吹笛製作

- ① 將2個養樂多瓶利用電烙鐵在底部正中心再利用剪刀單邊刀刃旋轉擴充洞口大小，直到底部洞口略大於珍奶吸管管徑(1.05公分)。
- ② 依照樂器3製作方法製作2組雛形。
- ③ 將3支珍奶吸管斜尖處剪除，其中2支吸管利用電工膠帶連接加長，在距頂端3公分處利用簽字筆畫線。單支的吸管另外在距頂端1公分及5公分處做記號。
- ④ 將單支吸管插入1個製作好的雛形小孔，不要固定吸管，可以伸縮移動吸管，編號為樂器5(圖8)。
- ⑤ 將加長的吸管插入最後1個雛形樂器3公分，然後利用熱融膠固定並封住隙縫。量取養樂多底部露出的吸管長20.70公分，其餘剪除。在養樂多瓶底露出的吸管與吹嘴相對位置算起依序在2.00公分、1.20公分、1.80公分、3.50公分、1.15公分、1.90公分處做記號，用電烙鐵加熱戳洞作為音調調節孔，編號為樂器6(圖9)。
- ⑥ 音階調音孔位置確定：先依照直笛開孔距離在吸管上開孔，以聽覺作為判定，音階過高則先將原開孔用電工膠帶貼住，然後往下微調在開孔直到適合位置。反之音調過低則微調開孔則往上移，最後找到固定的位置。



(5) 自製樂器吹奏指法

音階唱名	Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si
第1孔	●	●	●	●	●	●	
第2孔	●	●	●	●	●		●
第3孔	●	●	●	●			
第4孔	●	●	●				
第5孔	●	●					
第6孔	●						

表1：樂器編號整理

樂器編號	樂器描述	備註
樂器1	單1粗吸管的多多笛	科學研習教授的製作法(圖4)
樂器2	加長粗吸管的多多笛	有調音孔，依開孔全打開和全按住測量(圖5)
樂器3	花袋膜底部全開氣笛	嘉義市科展會展示的製法(圖6)
樂器4	氣球膜底部全開氣笛	改良製作(圖7)
自創樂器5	花袋膜底部僅開1孔的氣笛	可插入單支沒有調音孔粗吸管，分未插入吸管，插入吸管1cm、3 cm、5 cm時測量(圖8)
自創樂器6	花袋膜底部僅開1孔加長粗吸管的氣笛	依指法測量Do、Re、Mi、Fa、Sol、La、Si七個音階及開孔全打開(圖9)
樂器7	薩克斯風	測量Do、Re、Mi、Fa、Sol、La、Si七個音階

(5) 自製樂器所使用材料基本測量結果

1. 打氣筒每次輸入氣體容積267.5 ml。
2. 氣笛吹嘴到花袋膜距離4.20 cm，到密封處3.80 cm。

表2：自製樂器所使用材料基本測量結果

測量項目	寶特瓶	養樂多瓶	粗吸管	吹嘴
管徑	6.02cm	4.06 cm	1.05 cm	0.73 cm
長度	7.00 cm	7.90 cm	16.00 cm	11.00 cm
容積	202.0ml	104.0 ml	0.941 ml/cm	0.682 ml/cm

二、測試及分析方法

- (一) 將氣球打氣筒的拉柄拉至作記號的位置，每次輸出固定氣體量。出口處對準10公分處風速計風扇中心點，瞬間推出氣體紀錄吹出的氣體流速(如圖10)。
- (二) 每次先將拉柄拉至作記號的位置，出氣口插入自製樂器的吹嘴，樂器的出氣口則對準10公分處風速計風扇中心點，瞬間推出氣體紀錄吹出的氣體流速，錄音筆置於樂器側面20公分處進行錄音(如圖11)。
- (三) 依序測量並錄音樂器1、樂器3、樂器4所吹奏的單音，樂器5則測量及錄音未加吸管、吸管插入1公分、3公分及5公分時所吹奏的單音，樂器2和樂器6則分別測量及錄音所吹奏出的七個音階。重複測量及錄音5次。
- (四) 以錄音筆錄音薩克斯風所吹奏出的七個音階。
- (五) 將錄音筆所錄到的聲音檔輸入電腦後利用聲音分析程式轉換成音波圖形，進行波形、振幅、音調的比較。



伍、研究結果與討論

一、樂器的振動薄膜對聲音產生的影響

(一) 響度比較

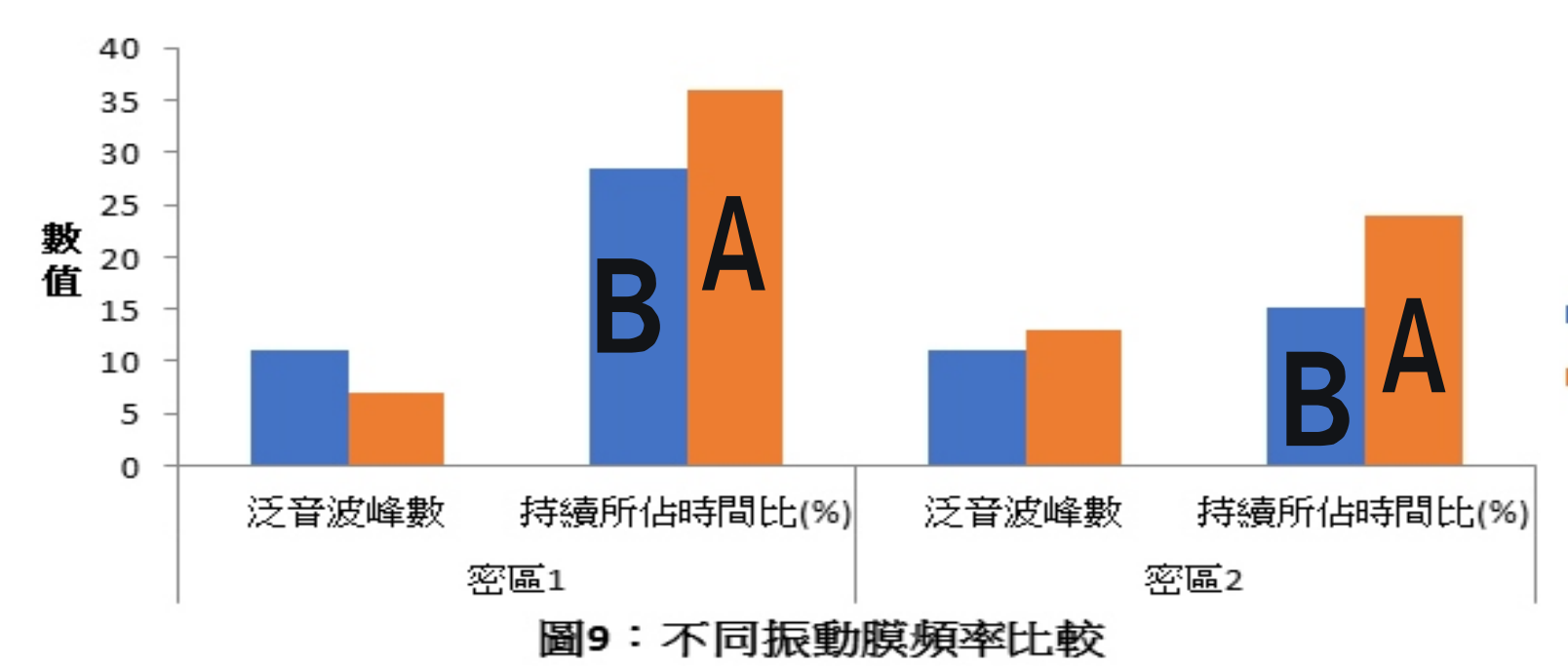
樂器3的平均振幅>樂器4，也就是樂器3較樂器4大聲(如表3所示)。總振動時間樂器4較短，2種樂器均可發出2次間隔的強音，標準化後節拍數、音符種類、音階位置並沒有差異。

表3：花袋膜與氣球膜振動的比較

編號	操縱變因	平均振幅 (dB)	總振動時間 (秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	標準化音階位置
樂器3	花袋膜	77.68	2.638367	2	1拍	四分音符	低音譜記號 低音Mi下12階
樂器4	氣球膜	62.1	1.671837	2	1拍	四分音符	低音譜記號 低音Mi下12階

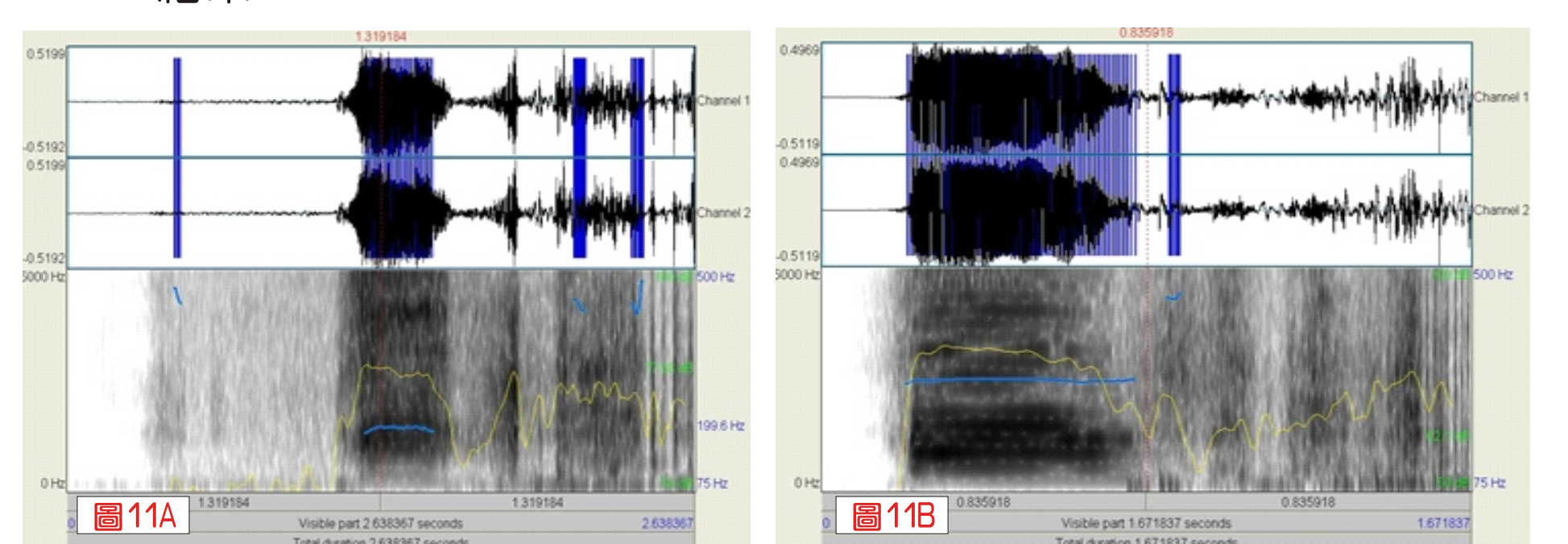
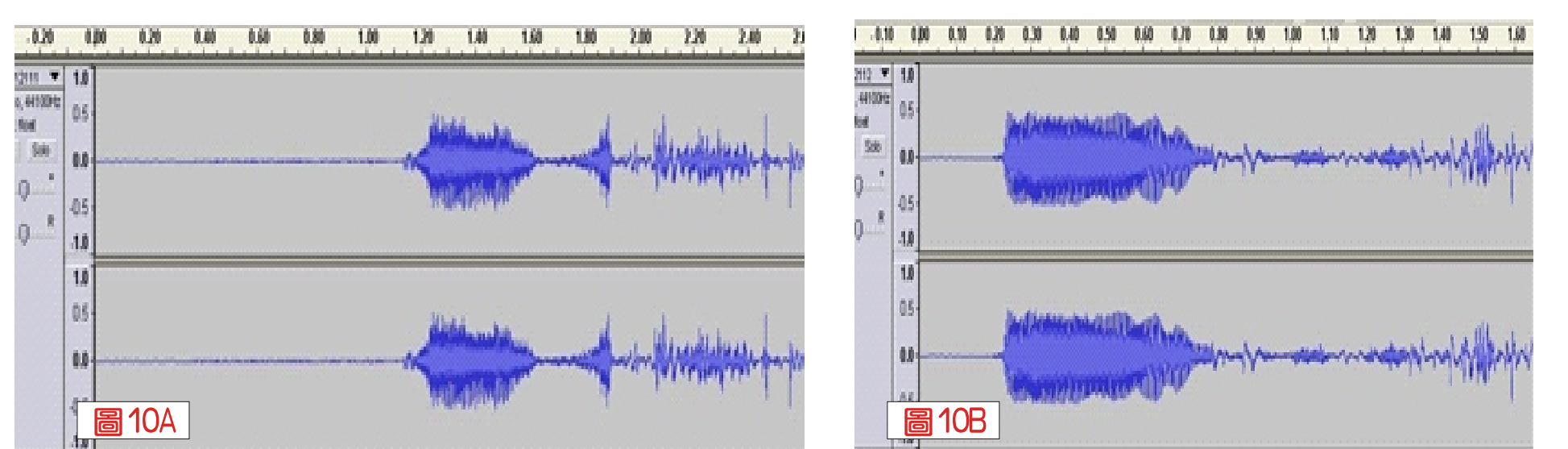
(二) 音調比較

發出2次間隔強音所佔的時間百分比樂器4>樂器3(如圖9)，在不同振動頻率所造成波峰數樂器3在2次強音區的波峰數均相同，樂器4則是第二次強音區大於第一次強音區，所以花袋膜的振動較氣球膜的振動穩定；但是整個發聲過程氣球膜強音所佔的時間比例較長。



(三) 音色比較

前半段波形氣球膜振動泛音出現較少，比較接近單音，後半段的振動則泛音較多。花袋膜的強音出現較晚，泛音的混合最高頻率(波峰高度)較一致。



二、樂器的共鳴腔體積對聲音產生的影響

(一) 響度比較

樂器5吸管插入5cm產生的平均振幅>樂器1(如表4)。根據波以耳定律容積大的樂器輸入相同氣體量時總氣體壓力較小，能產生的總振動時間較小，形成的標準化節奏較短促。

表4 樂器的共鳴腔體積對聲音產生的比較

編號	操縱變因	平均振幅 (dB)	總振動時間 (秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	標準化音階位置
樂器1	共鳴腔體積小 (114.4ML)	54.89	1.645714	2	1拍	四分音符	低音譜記號 SOL
樂器5	吸管插入5cm	77.07	1.227755	2	1/2拍	八分音符	低音譜記號 低音Mi下12階

(二) 音調比較

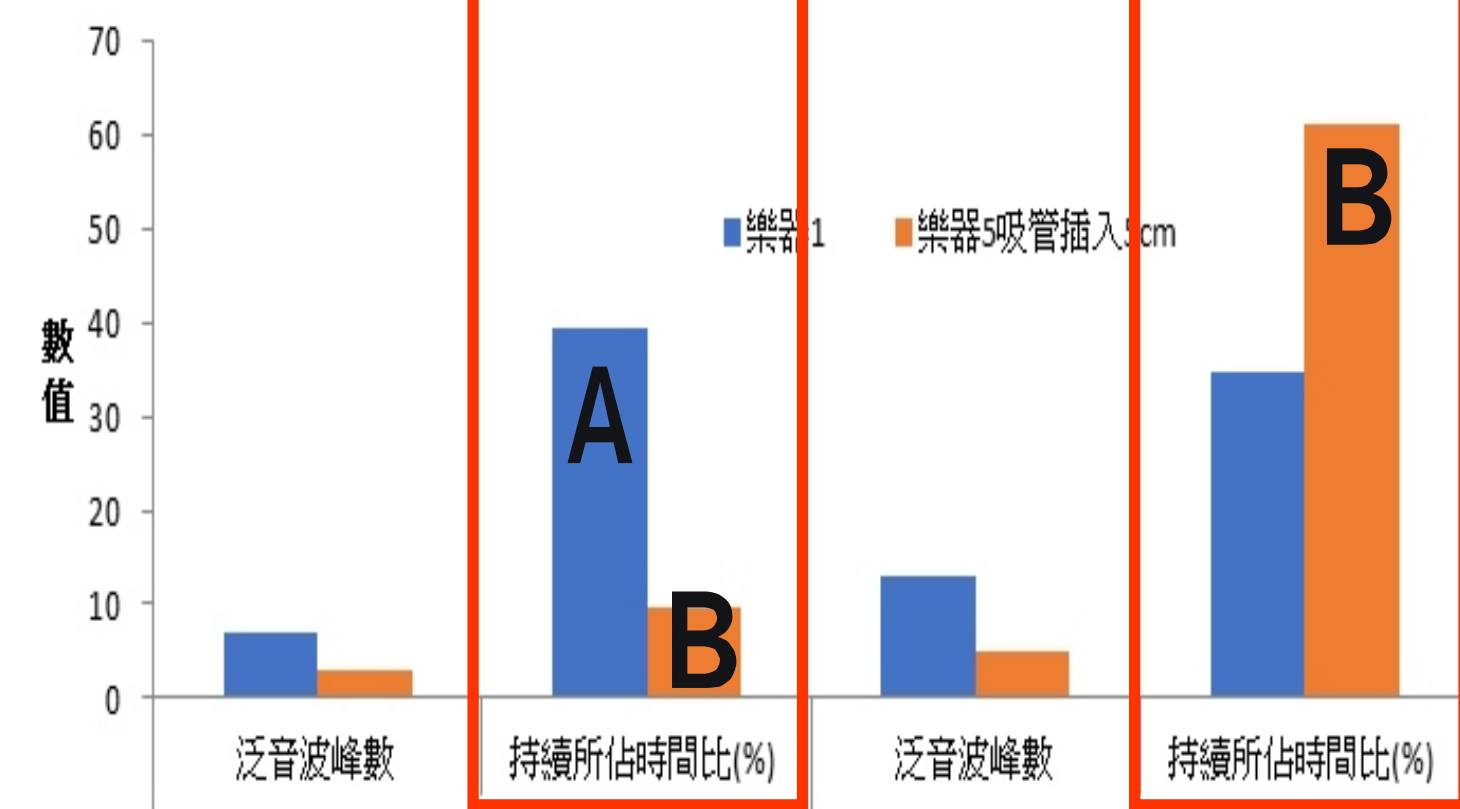


圖12 音箱體積對發聲頻率的影响

由圖12發現樂器1總容積較小，氣體進入後產生的瞬間壓力大較容易振動薄膜，所以第1密集區持續時間比例較大(標示A)，薄膜受力較大比較容易產生的泛音波峰較多的2密集區少(標示A)。樂器5吸管插入5cm則是第2密集區密集區持續時間比例較大，代表發聲的主要振動較慢發生，振動力量較小所產生的泛音波峰數也較少(標示B)。

(二) 音色比較

由圖13B及14B發現樂器5吸管插入5cm，產生持續的相同頻率區間比例高，薄膜的小振動較少。

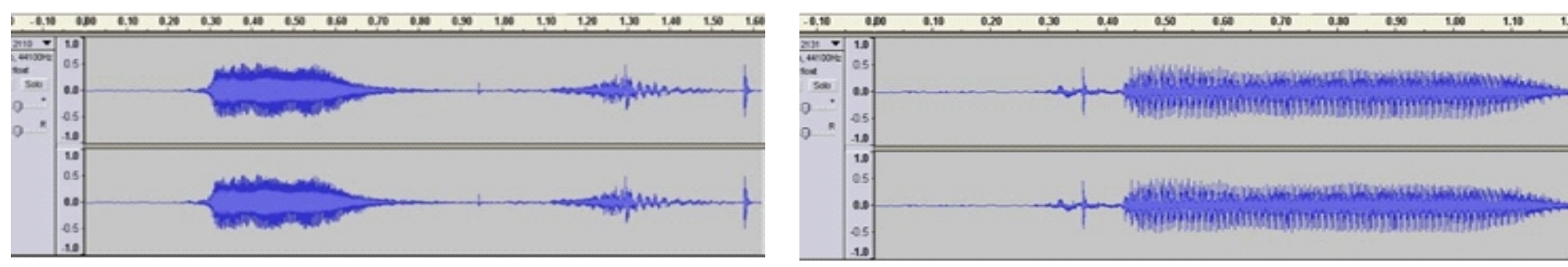


圖13 樂器1(圖13A)、樂器5吸管插入5cm(圖13B) 錄音檔經分析程式分析振幅頻率結果

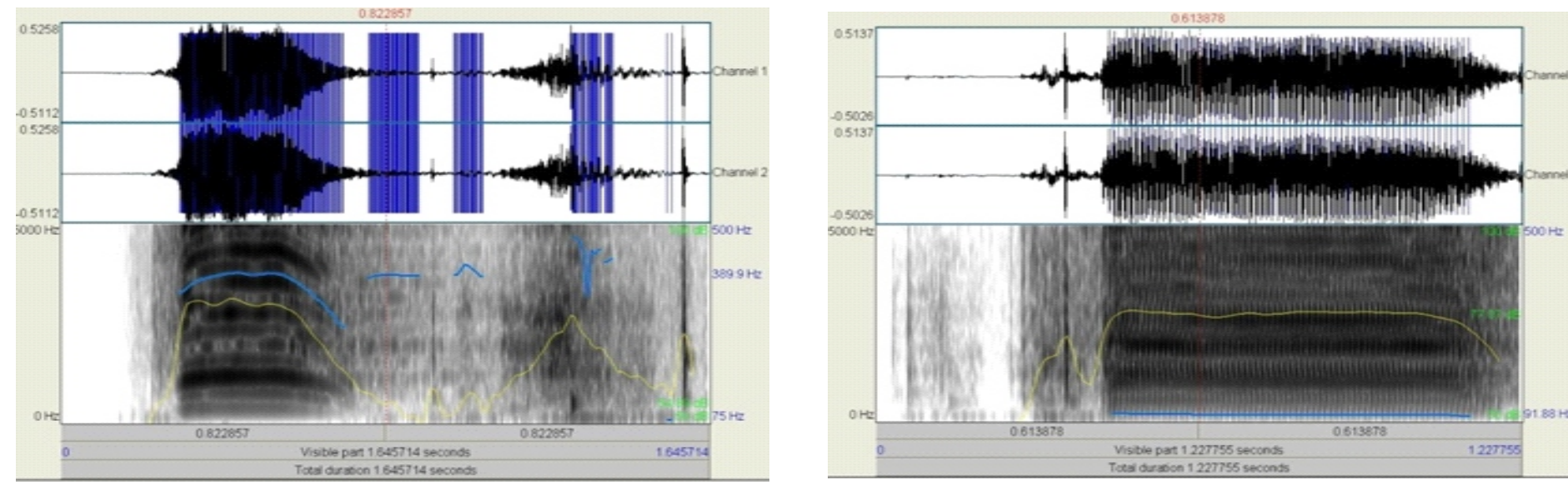


圖14 樂器1(圖A)、樂器5吸管插入5cm(圖B) 錄音檔經分析程式分析波形結果

三、樂器內氣體移動距離對聲音產生的影響

(一) 響度比較

將樂器1和樂器2開孔全按分為A組、樂器5吸管插入1cm和樂器6開孔全按分為B組比較，樂器1較樂器2開孔全按出氣管較短、總容積略小所產生的平均振幅較小、總振動時間較長、振動節奏標準化後節拍數較長；樂器5吸管插入1cm和樂器6開孔全按的比較，樂器5吸管插入1cm其出氣管較短總容積略小產生的平均振幅較大、總振動時間較短、振動節奏標準化後節拍數較小，二組比較得到相反結果(如表五)。

表5：樂器內氣體移動距離對聲音產生的比較

組別	編號	操縱變因	平均振幅 (dB)	總振動時間 (秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	標準化音階位置	出氣孔最大風速 (m/sec)
A組	樂器1	距離短	54.89	1.645714	2	1拍	四分音符	低音譜記號 低音Mi下12階	1.1
	樂器2	距離長	62.33	1.306122	2	1/2拍	八分音符	高音譜記號 高音La12階	1.9
B組	樂器5	吸管插入1cm	77.12	0.809796	2	1/8拍	三十二分音符	低音譜記號 低音Mi下12階	1.1
	樂器6	開孔全按	64.44	3.056327	2	4拍	全音符	低音譜記號 低音Mi下12階	2.7

(二) 音調比較

1. 由圖15多多笛出氣管長度較短的樂器1，所產生的2次振動密集區持續時間比例均較出氣管長度較長的樂器2開孔全按大。泛音波峰數樂器1第2密集區較第1密集多，樂器2開孔全按時2次振動產生的泛音波峰數則是相近。
2. 由圖16發現樂器5吸管長度較短的樂器5吸管插入1cm，其振動密集區個數較樂器6開孔全按少1次，持續時間外所佔比例除了第1密集區外，第2密集區就比較小。泛音波峰數則是樂器6開孔全按>樂器5吸管插入1cm。

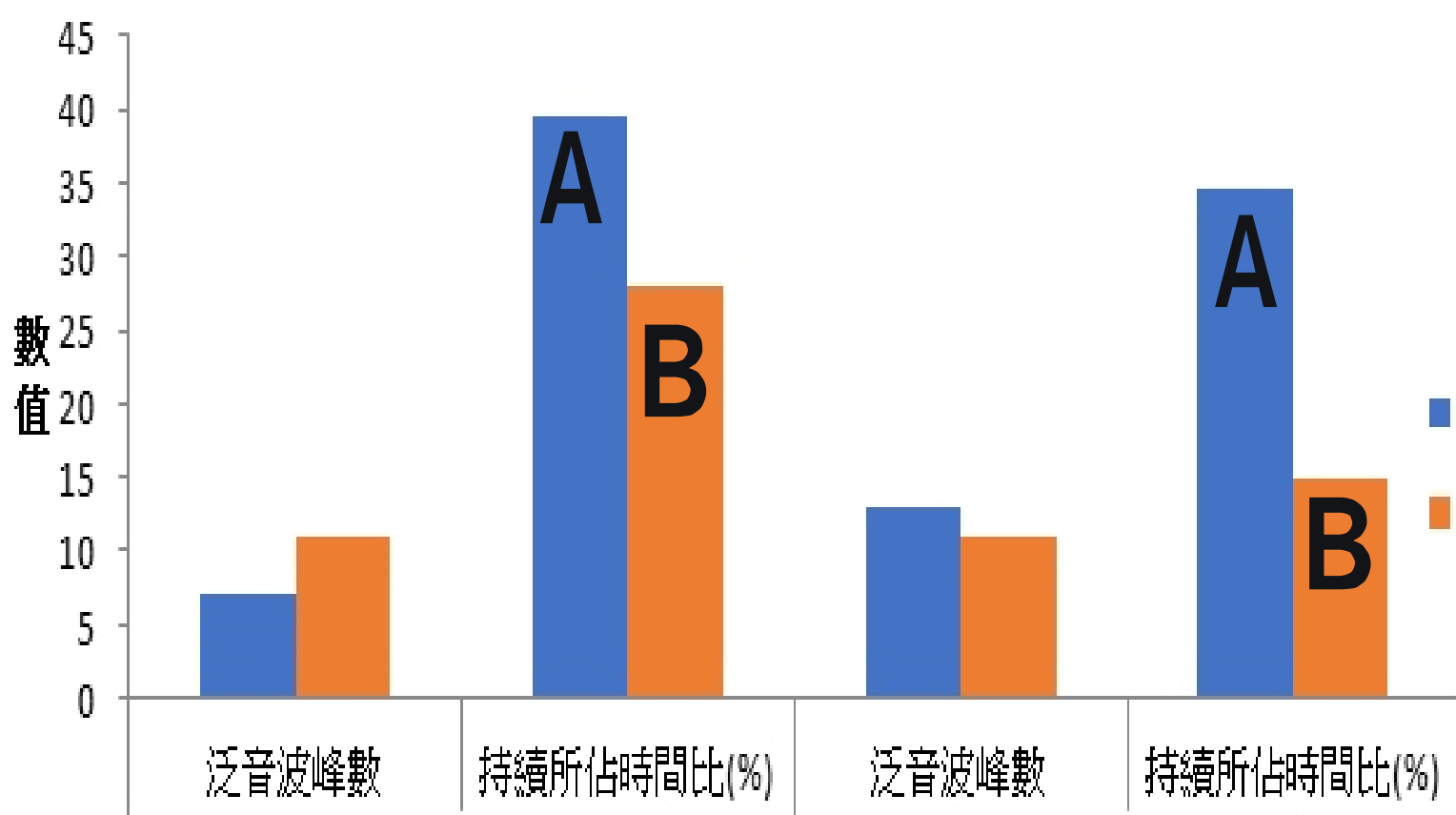


圖15 多多笛出氣管距離長短對發聲的影响

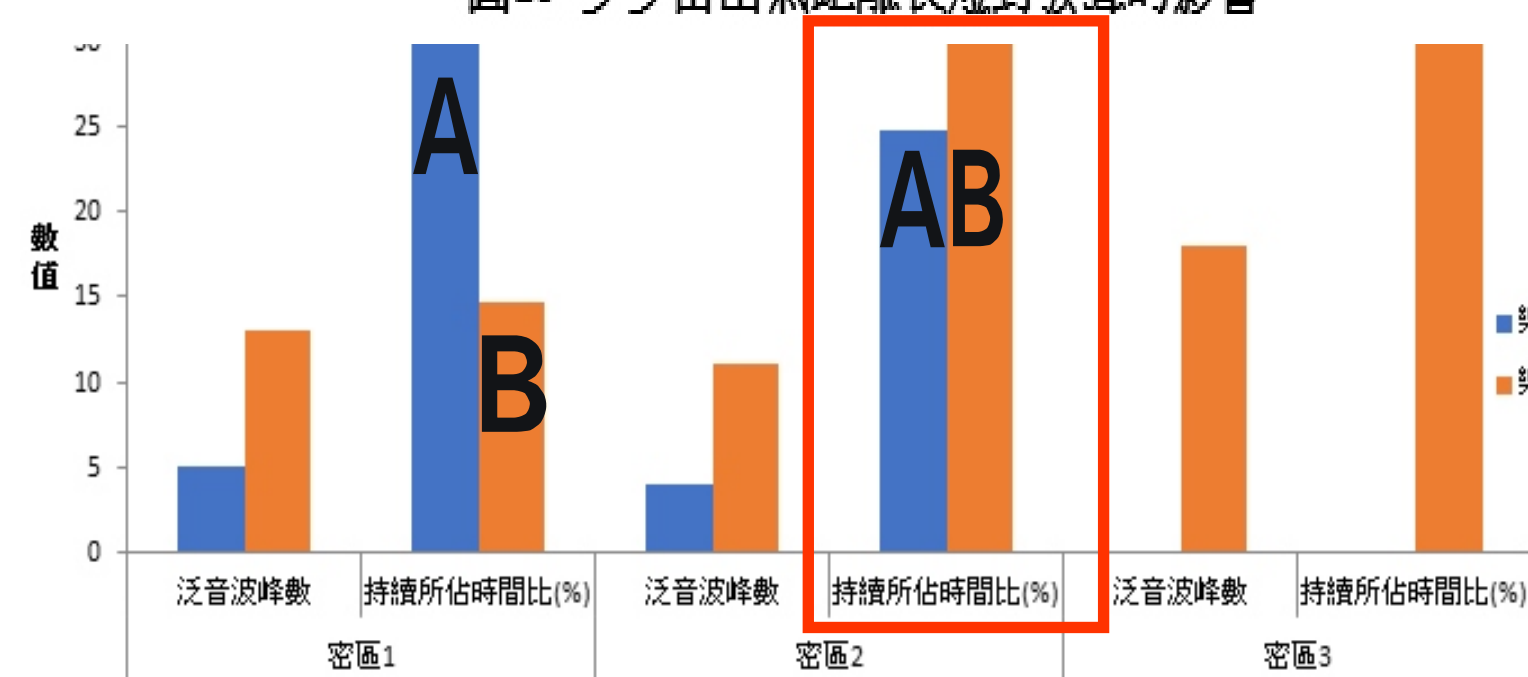


圖16 氣笛出氣距離長短對發聲的影响

(三) 音色比較

由圖17及圖18發現多多笛出氣管長度較短的樂器1，其波形較早出現穩定的同頻率振動區域，隨後的振動較無規律性；出氣管長度較長的樂器2，開孔全按出現同振動頻率高峰次數多波形起伏較穩定，主要振動產生時間也較慢。樂器5所產生的振動較樂器6開孔全按所產生的振動較具穩定性。

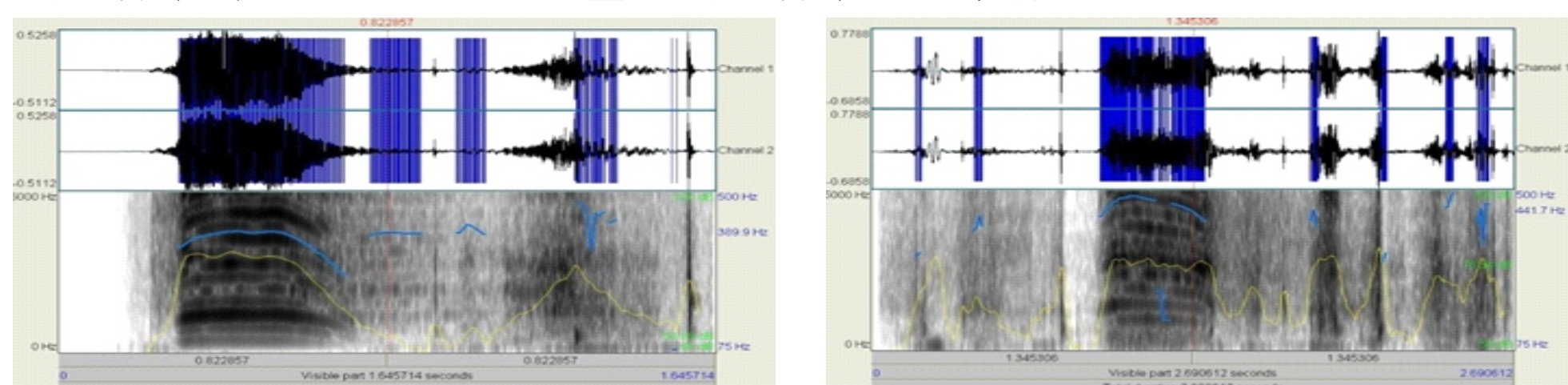


圖17 樂器1(左)、樂器2全按(右) 錄音檔經分析程式分析結果

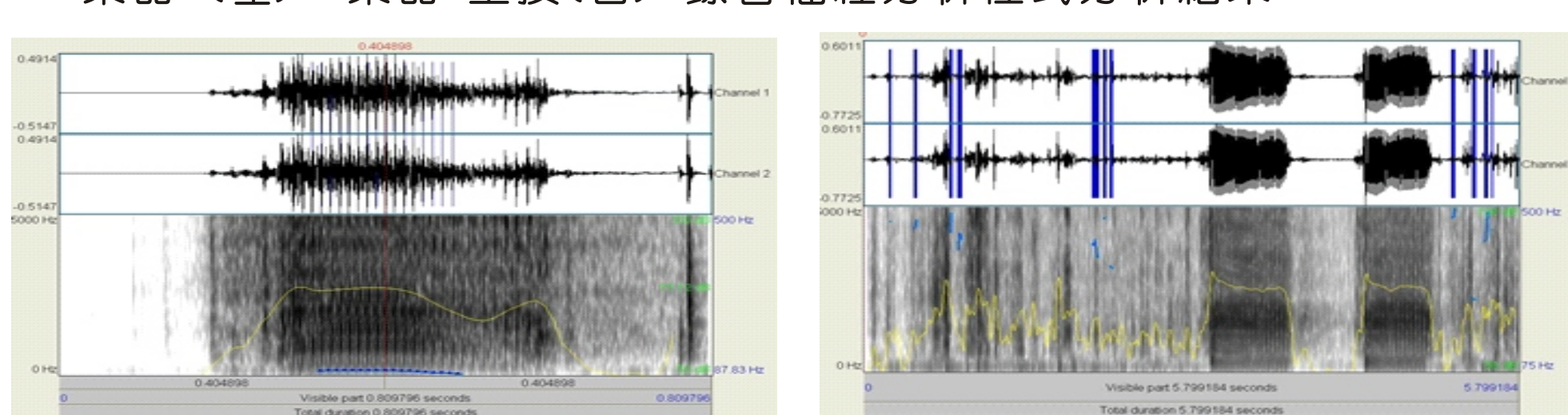


圖18 樂器5吸管插入1cm (左)、樂器6開孔全按(右) 錄音檔經分析程式分析結果

(四) 根據所查到的資料推論

- 出氣管長度較短時，單位時間氣體流出的次數較多，頻率較高、音調也較高。由於吹氣經由此端使管內的空氣柱發生振動形成駐波，以管內空氣分子的振動位移而言，當空氣柱形成駐波時，管長為四分之一個波長的奇數倍，公式為 $f=n \cdot v/4 \cdot l$ $n=1,2,3, \dots$ (v為波速，l為管長)；所以氣體移動距離越長所產生的聲音頻率就越小，音調就越低。
- 出氣管長度較長時，其「煙囪效應」較明顯，由出氣孔最大風速可以證實出氣管長度較長樂器內部氣體導流較順暢。泛音的波峰數和波形都較有規律，比較適合樂器吹奏的穩定性。

- 推測2組出氣管長度比較結果造成的差異，是因多多笛為只有單一共鳴腔的樂器，氣流動向單純，出氣管長度較長時，氣體流失快作用時間和持續時間就較小。氣笛是由2個共鳴腔所組成，氣體的導流較複雜薄膜必須上舉產生空隙時外腔氣體才能進入內腔，內腔氣體無法一次就由出氣管排出，殘留氣體就會在共鳴腔中來回運動，並可作用於薄膜才會形成樂器6開孔全按總振動時間較長。

四、樂器的出氣孔大小對聲音產生的影響

(一) 響度比較

樂器的出氣孔大小對聲音響度的影響不明顯，只有總振動時間有差異，大出氣孔的樂器3>樂器5未插入吸管(如表6)。推論是因出氣孔小的樂器內腔的氣體無法立即排除，會來回在內腔中作用於薄膜，使得外腔氣體容易進入內腔，大出氣孔的樂器其內腔的氣體可迅速排出，只能依賴外腔氣體推動薄膜，所需的作用時間就加長。由於沒有出氣管導引，排出的氣體容易發散，風速測量不易。

表6：樂器的出氣孔大小對聲音產生的比較

編號	出氣孔	平均振幅 (dB)	總振動時間 (秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	標準化音階位置	出氣孔最大風速 (m/sec)
樂器3	大	77.68	2.638367	2	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階	0.3
樂器5	小	77.75	1.619592	2	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階	0.3

(二) 音調比較

由圖19發現2次振動密集區持續時間比例樂器5未插入吸管(標示B)>樂器3(標示A)，出氣孔小的樂器內腔的氣體無法立即排除，會來回在內腔中作用於薄膜所造成，導致不同振動頻率的波峰數較少。

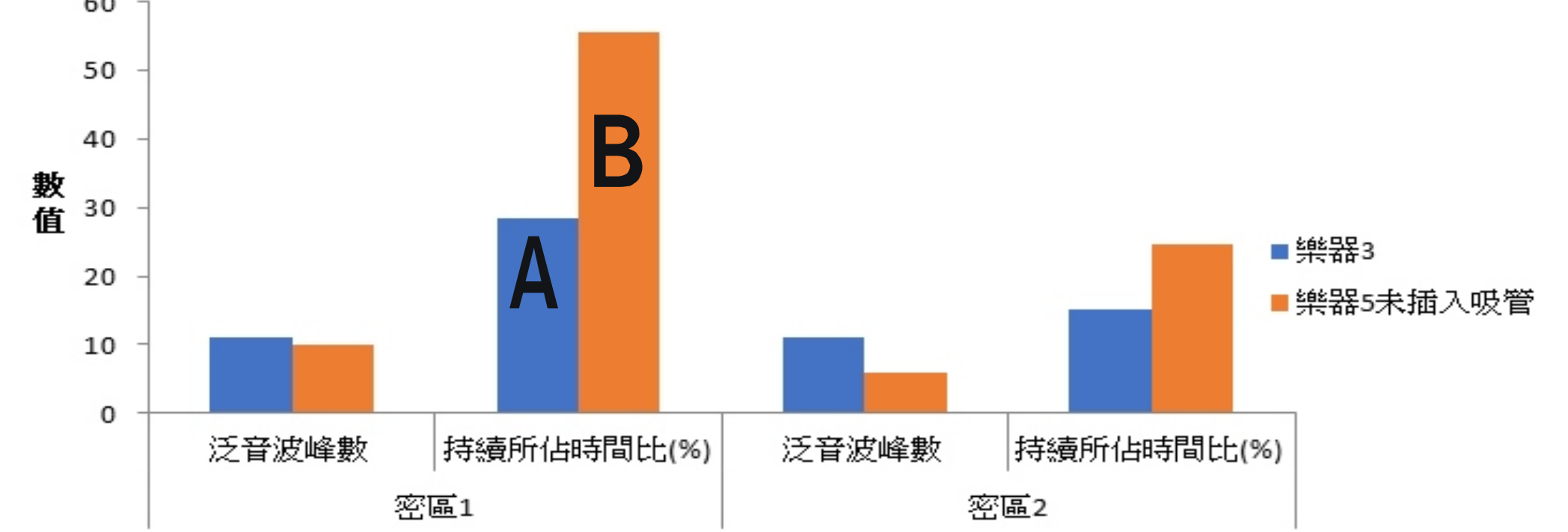


圖19 樂器的出氣孔大小對發聲频率的影响

(三) 音色比較

由圖20可發現大出氣孔的樂器3(左圖)振動頻率斷斷續續，小出氣孔的樂器5未插入吸管(右圖)維持同頻率的時間較長，比較容易形成樂音。

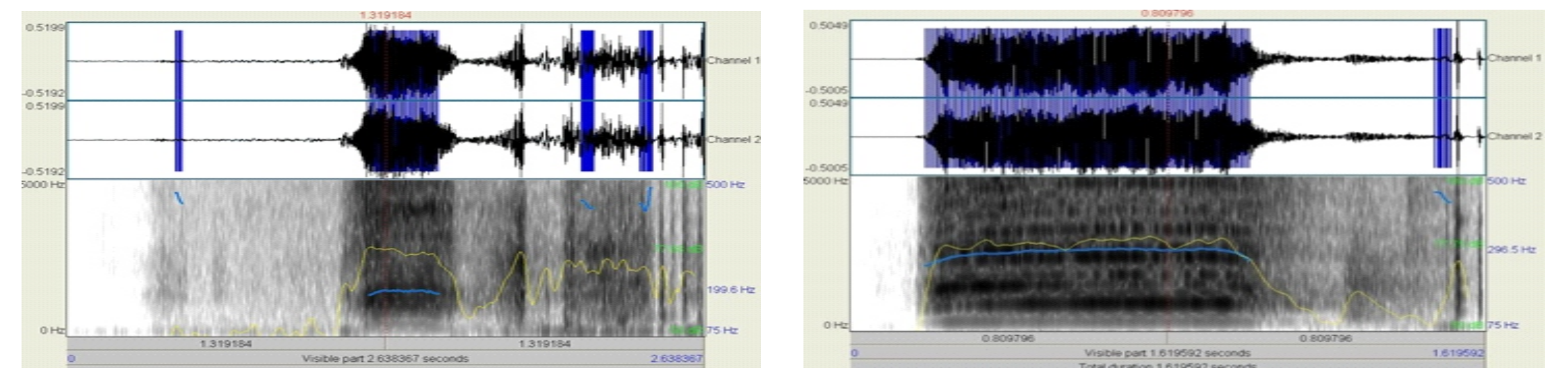


圖20 樂器3 (左)、樂器5未插吸管(右) 錄音檔經分析程式分析結果

五、樂器的出氣管深入共鳴腔距離對聲音產生的影響

(一) 響度比較

實驗結果發現平均振幅差異不大(如表7)，推測因為薄膜和出氣孔大小相同，由於出氣管深入共鳴腔的距離越大代表距離振動薄膜越近，深入5 cm時就抵住薄膜，所以薄膜一振動就直接將氣體送入出氣管，離薄膜越遠共鳴腔內氣流就會有發散的現象。由出氣孔所測得的最大風速可以證實距離薄膜越遠送出的氣流速度越小，吸管插入距離0cm氣體流出量較少氣體在共鳴腔內來回作用的時間加長，所以總振動時間較長，吸管插入距離5 cm時只能直接送出吸管與薄膜接觸面積同大小的氣體，較難產生導引氣流，吸管插入距離3 cm總振動時間最小也就是引導氣流較順暢。

表7：樂器的出氣管深入共鳴腔距離對聲音產生的比較

樂器5吸管插入距離	平均振幅 (dB)	總振動時間 (秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	標準化音階位置	出氣孔最大風速 (m/sec)
0 cm	77.75	1.619592	2	1拍	四分音符	低音譜記號 低音Mi下12階	0.3
1 cm	77.12	0.809796	2	1/8拍	三十二分音符	高音譜記號 高音La12階	1.1
3 cm	77.17	0.653061	2	1拍	四分音符	低音譜記號 低音Mi下12階	1.5
5 cm	77.07	1.227755	2	1/2拍	八分音符	低音譜記號 低音Mi下12階	1.6

(二) 音調比較

由圖6發現吸管插入距離0 cm時，2次的振動密集區持續時間比例均比較大。除了吸管插入距離5 cm時，第2次振動密集區持續時間比例例外。所產生的泛音波峰數較多，可能是因為氣體導流較慢，氣體在共鳴腔內來回作用，推動薄膜所造成的。

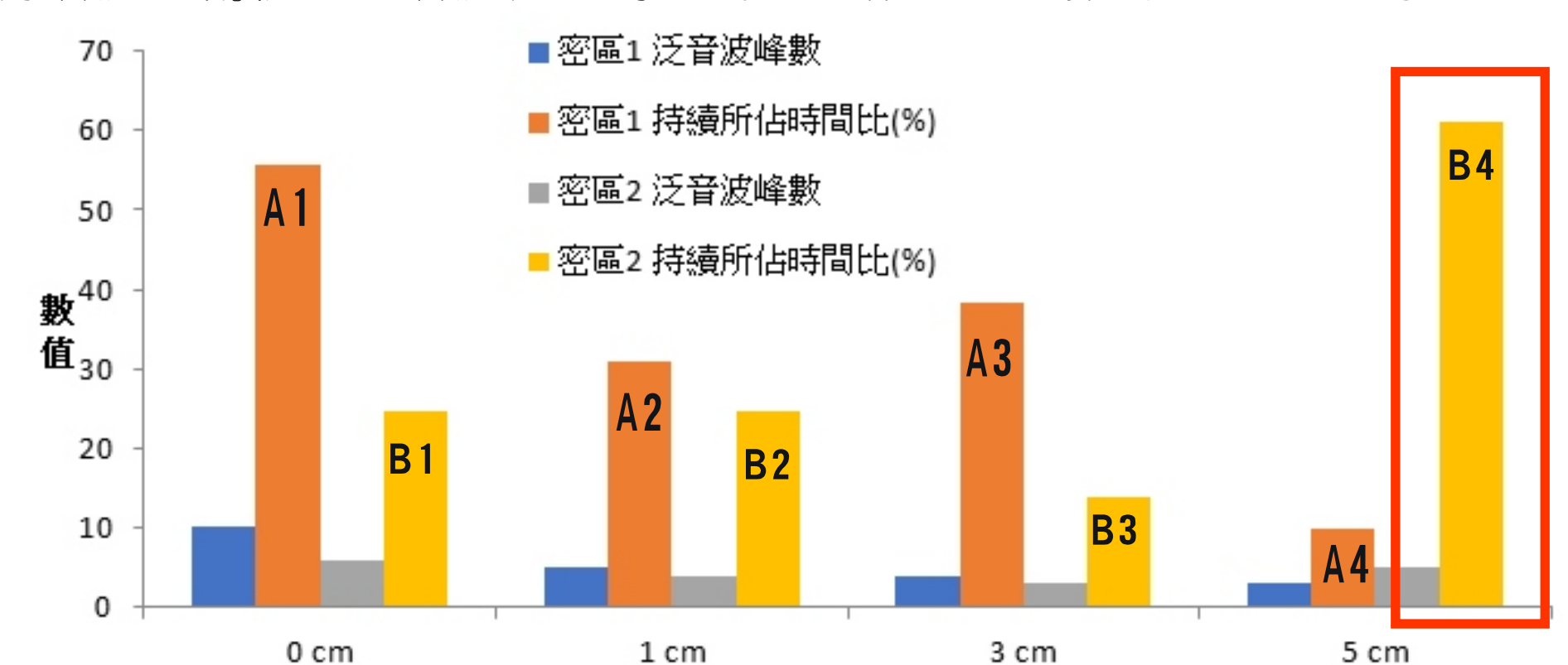


圖21 樂器的出氣管深入音箱距離對聲音频率的影响

(三) 音色比較

由照片11的波形發現除了吸管插入1cm的波形，相同振動頻率較不明顯外，其餘3種方式都可以有規律的聲音，但是吸管插入距離0 cm時，還是會有些微顫抖音。

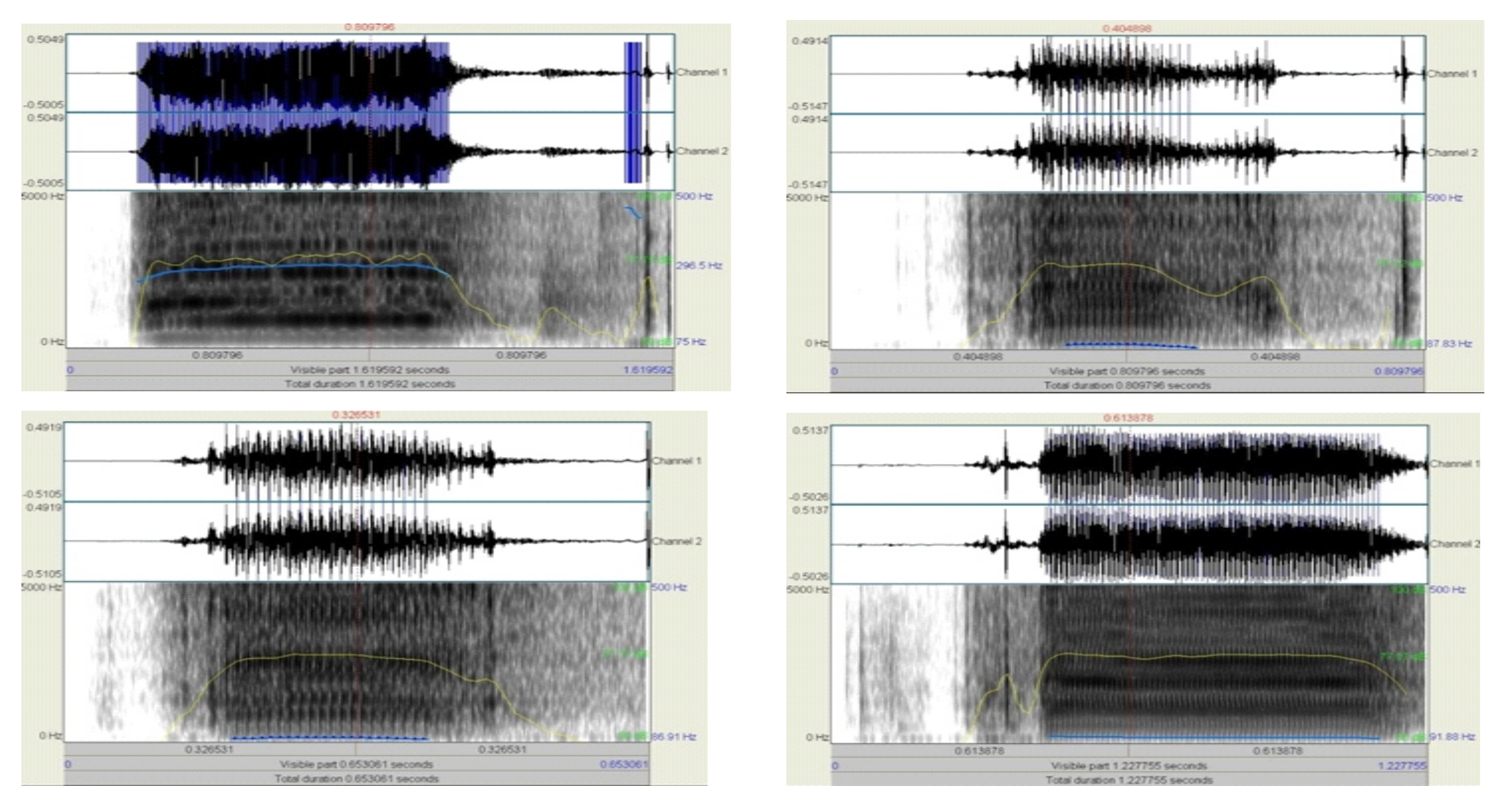


圖23 樂器5未插吸管 (上左)、插吸管1cm (上右)、插吸管3cm (下左)、插吸管5cm (下右) 錄音檔經分析程式分析結果

六、自製吹笛與薩克斯風所產生的聲音比較

(一) 響度比較

樂器6利用氣球打氣筒送入固定量的氣體，吹奏出的7個音階所產生的平均振幅均較薩克斯風所吹奏出的7個音階小(如表8)。薩克斯風所吹奏的音階較有規律性，只形成1個密集強波區，樂器6至少會形成2個密集強波區。經標準化後的節拍數只有Do的音階差異較大。

表8：自製吹笛與薩克斯風所產生的聲音比較

編號	平均振幅 (dB)	總振動時間 (秒)	密集強波區數	標準化節拍數	標準化音符種類	標準化音階位置
樂器6	60.42	5.799184	3	4拍	全音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
薩克斯風	73.5	1.854694	1	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
樂器6	76.62	2.246531	3	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
薩克斯風	77.68	2.194286	1	1拍	四分音符	高音譜記號： Re
樂器6	58.03	3.657143	3	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
薩克斯風	72.99	2.507755	1	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
樂器6	76.12	1.724082	2	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
薩克斯風	77.54	2.821224	1	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
樂器6	75.02	1.854694	2	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
薩克斯風	72.97	2.638367	1	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
樂器6	75.47	2.037551	2	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
薩克斯風	76.03	2.455511	1	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
樂器6	75.12	2.246531	2	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階
薩克斯風	79.15	2.951837	1	1拍	四分音符	低音譜記號： 低音Mi下12階

(二)音調比較

- 1.自製吹笛吹奏Do時所有開孔全按住，共鳴腔內的氣體均由出氣管末端排出，所排出的氣體量轉換成風速計旋轉圈數為標準，其他音階出氣管口風速計旋轉圈數均較Do小，代表有氣體由開孔排出，未按住開孔的個數和位置均會改變出氣量，導致閉管空氣柱所形成的駐波數產生差異，形成不同音階(如圖24)。
- 2.自製吹笛和薩克斯風吹奏Re和Mi時泛音個數較相近(圖25)，吹奏Do和Fa時泛音個數差異最大。推測各種樂器由於材料和共鳴腔長度，均會影響閉管空氣柱所形成的駐波不同導致泛音不同。

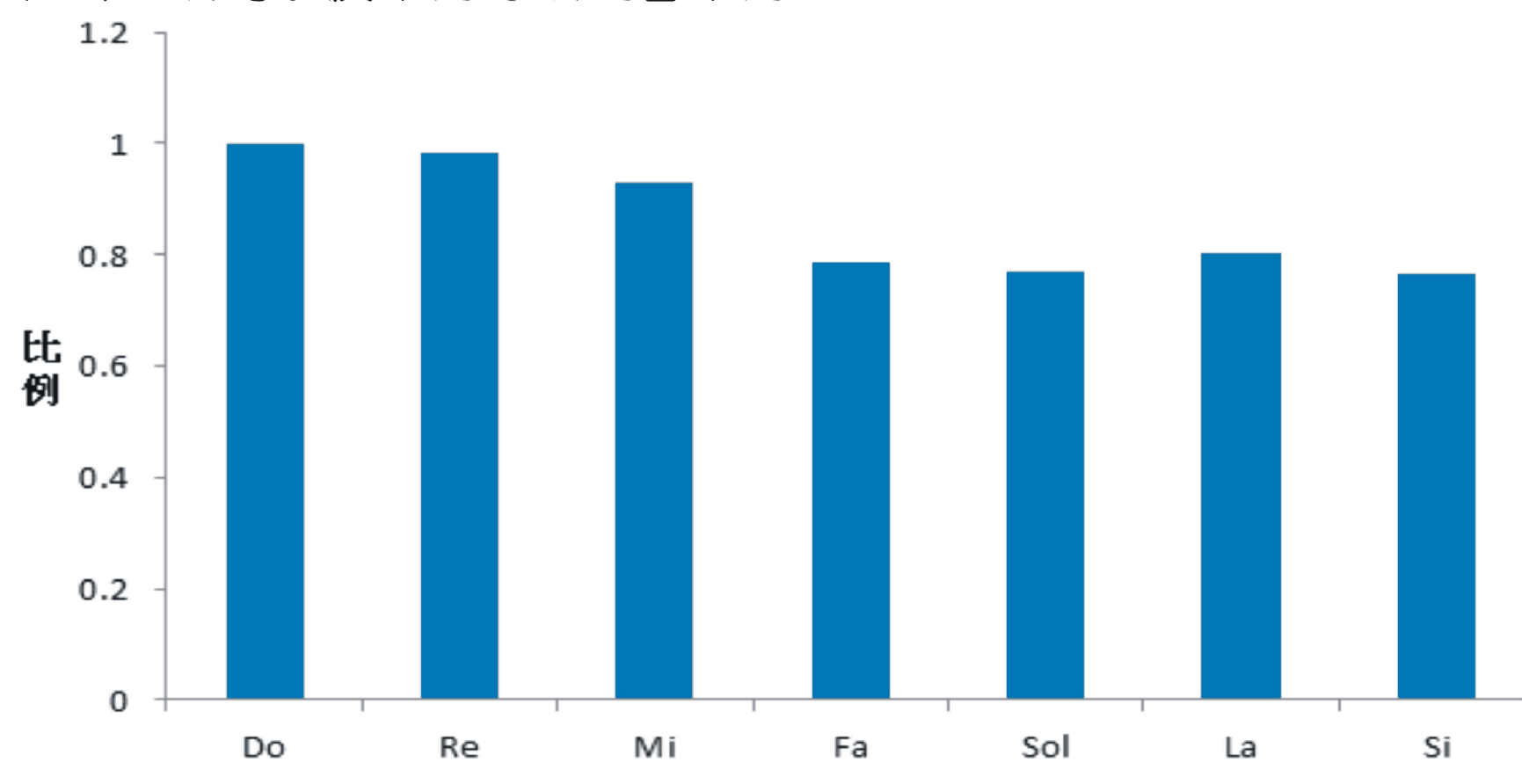


圖24 各音階出氣孔氣流量比例

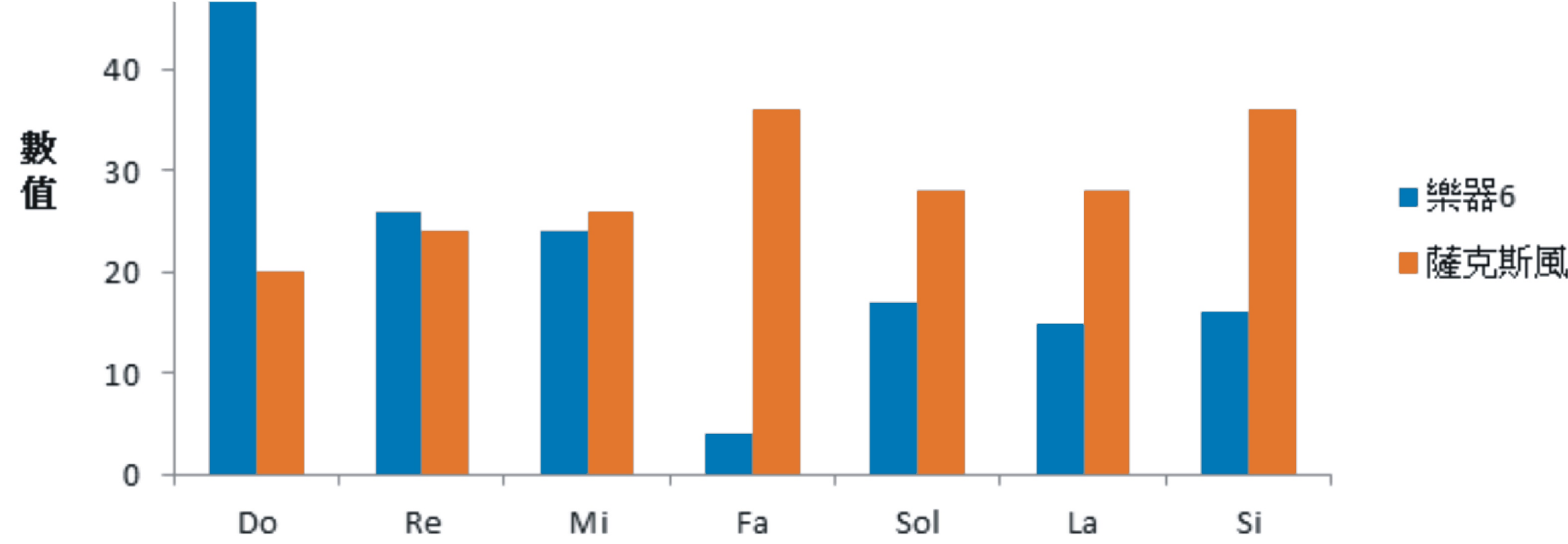


圖25 各個音階泛音波峰數比較

(三)音色比較

由圖26的波形比較自製吹笛和薩克斯風所吹奏的7個音階形成的基音，其波形出現相同頻率較密集位置相似，但薩克斯風基音較有規律且泛音數量較多。

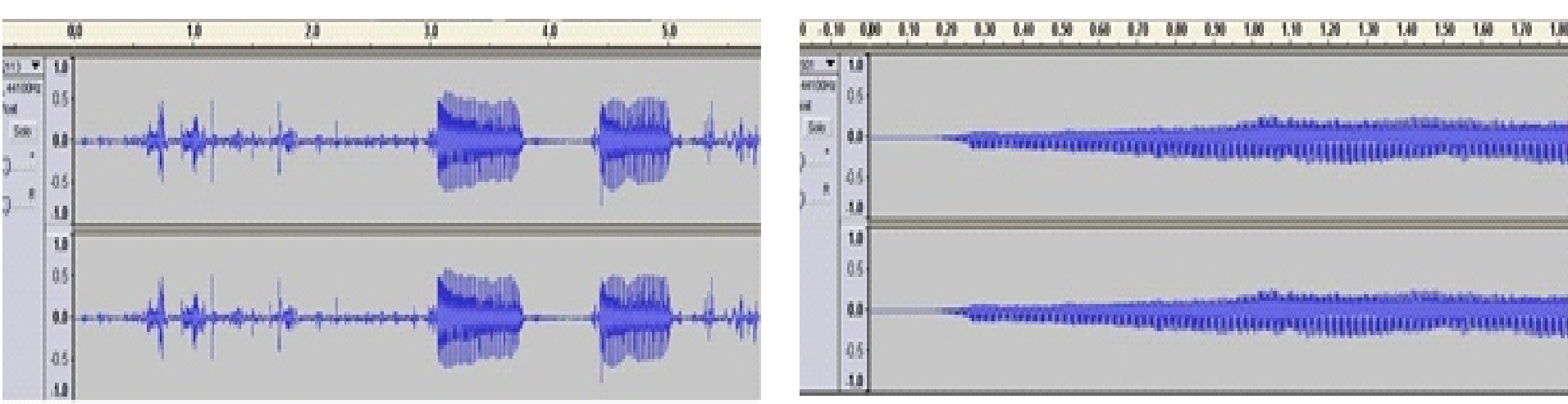


圖26-1A 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Do錄音檔經分析程式振幅分析結果

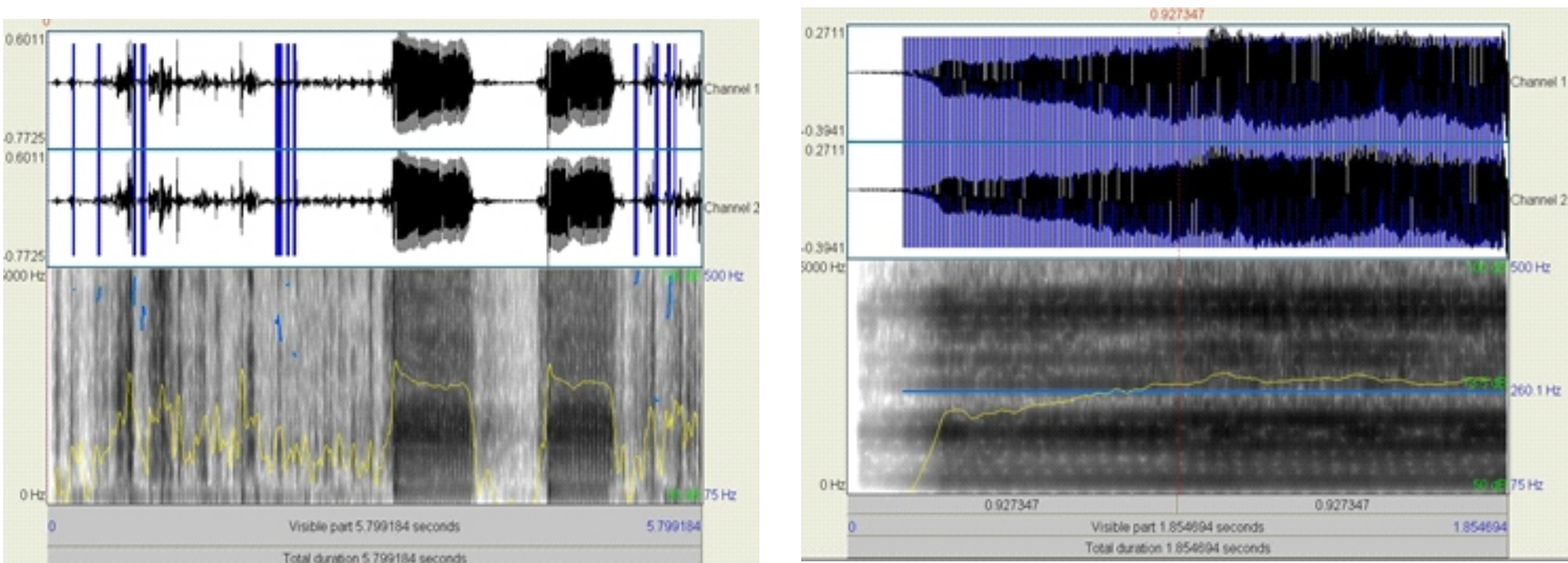


圖26-1B 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Do錄音檔經分析程式波形結果

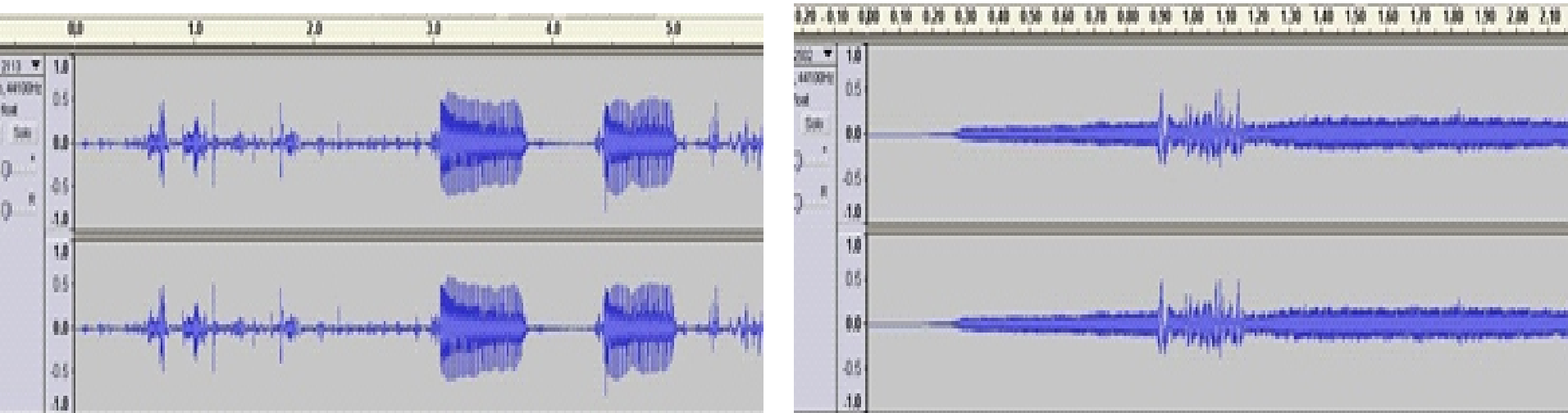


圖26-2A 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Re錄音檔經分析程式振幅分析結果

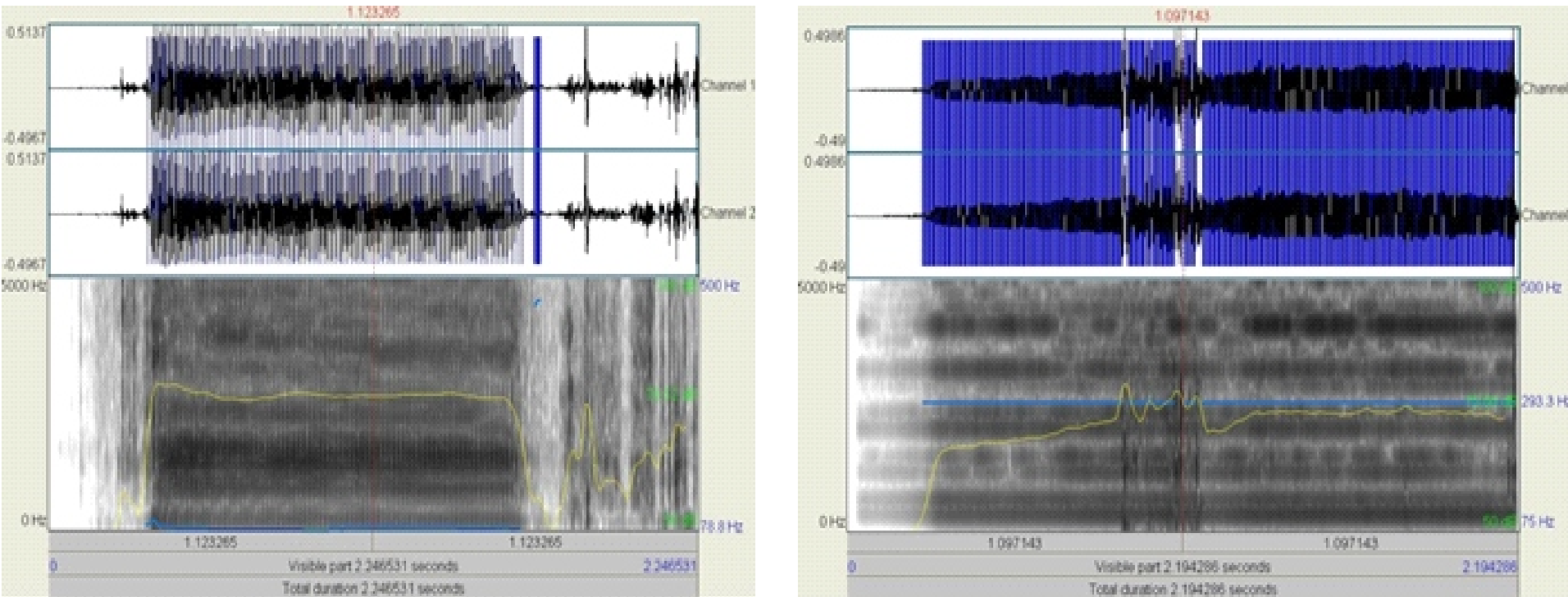


圖26-2B 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Re錄音檔經分析程式波形結果

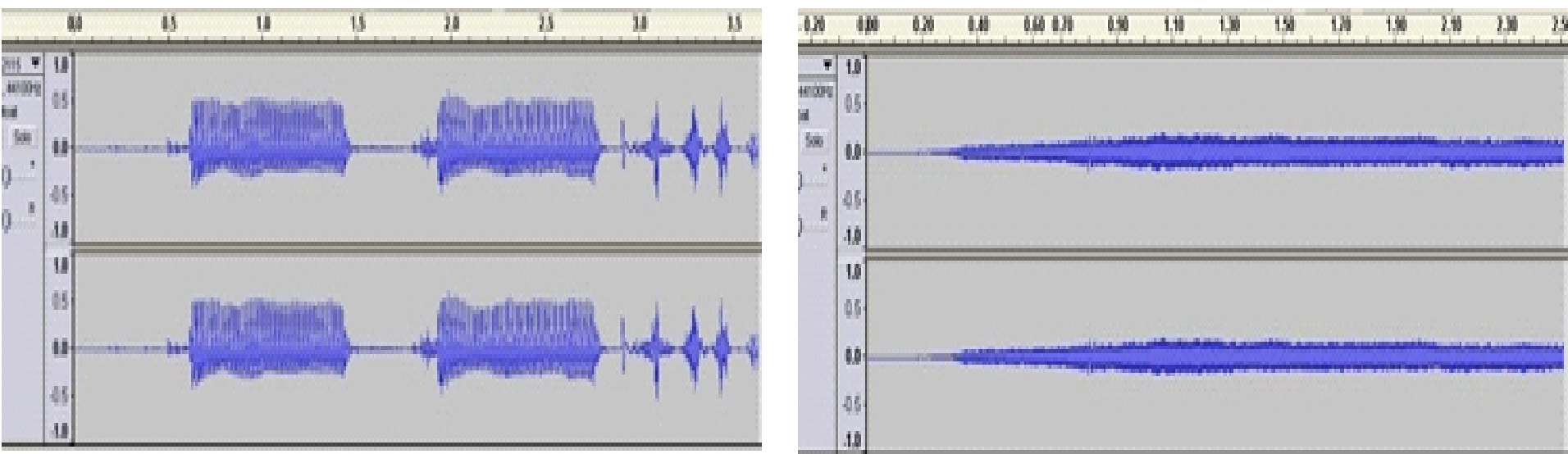


圖26-3A 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Mi錄音檔經分析程式振幅分析結果

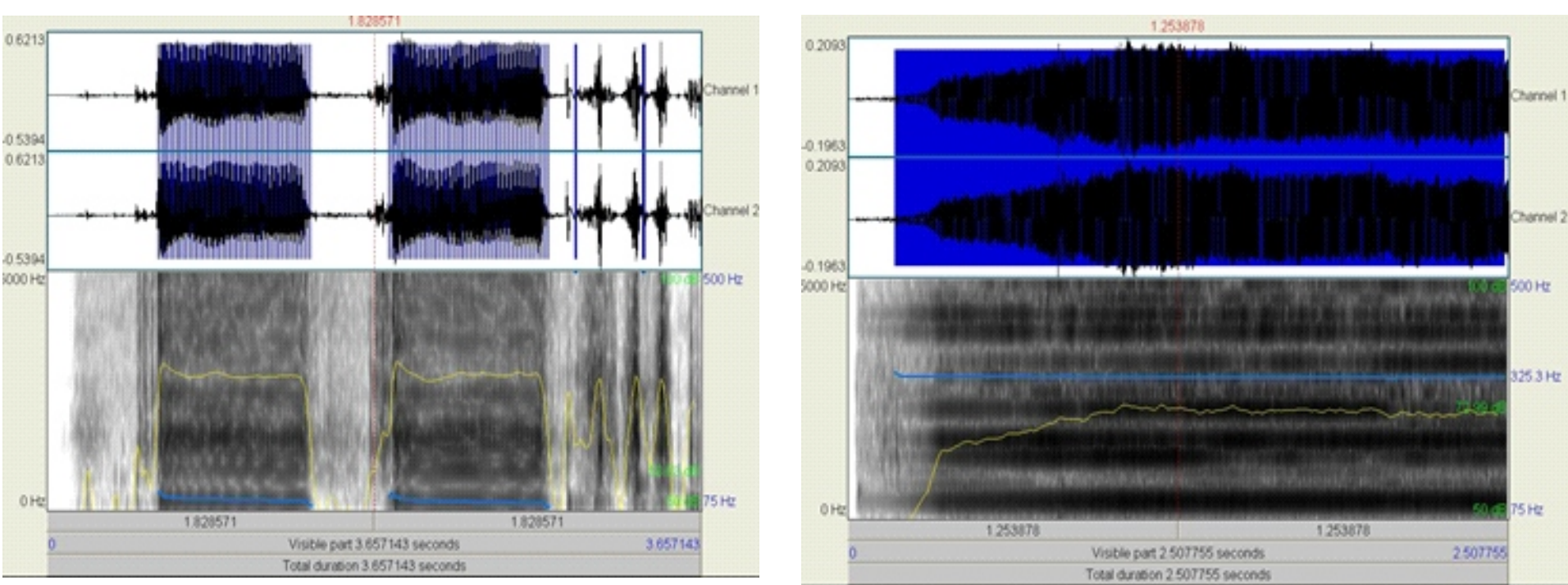


圖26-3B 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Mi錄音檔經分析程式波形結果

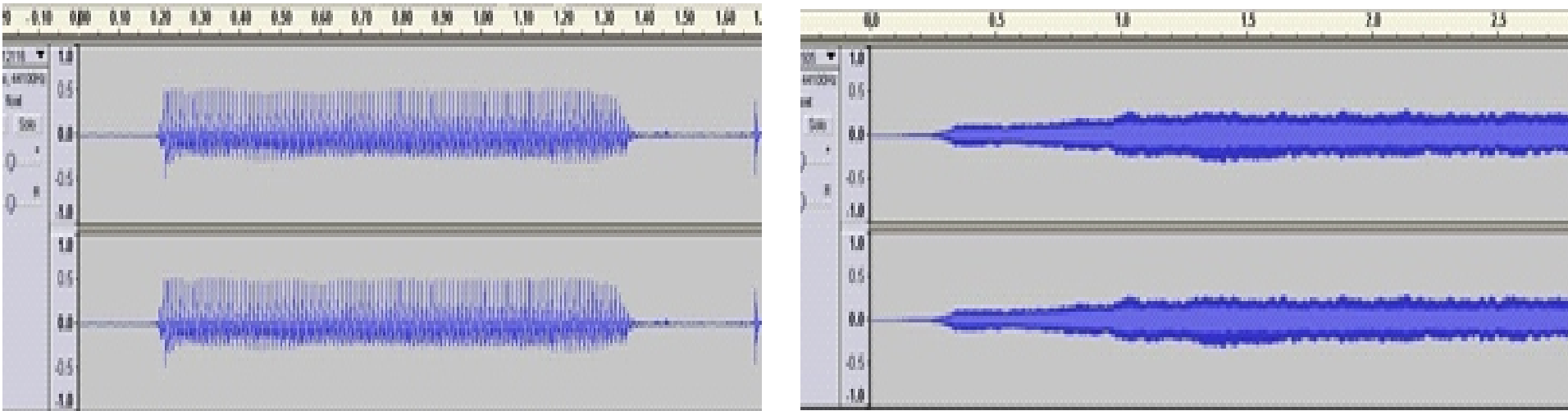


圖26-4A 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Fa錄音檔經分析程式振幅分析結果

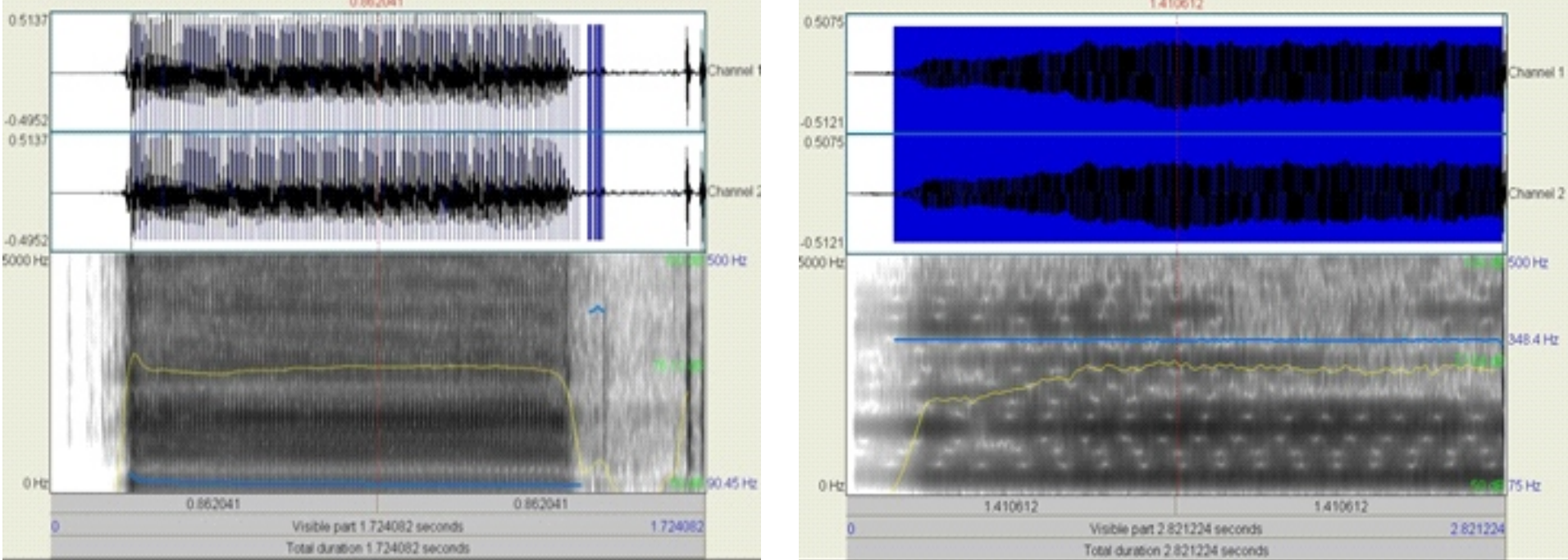


圖26-4B 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Fa錄音檔經分析程式波形結果

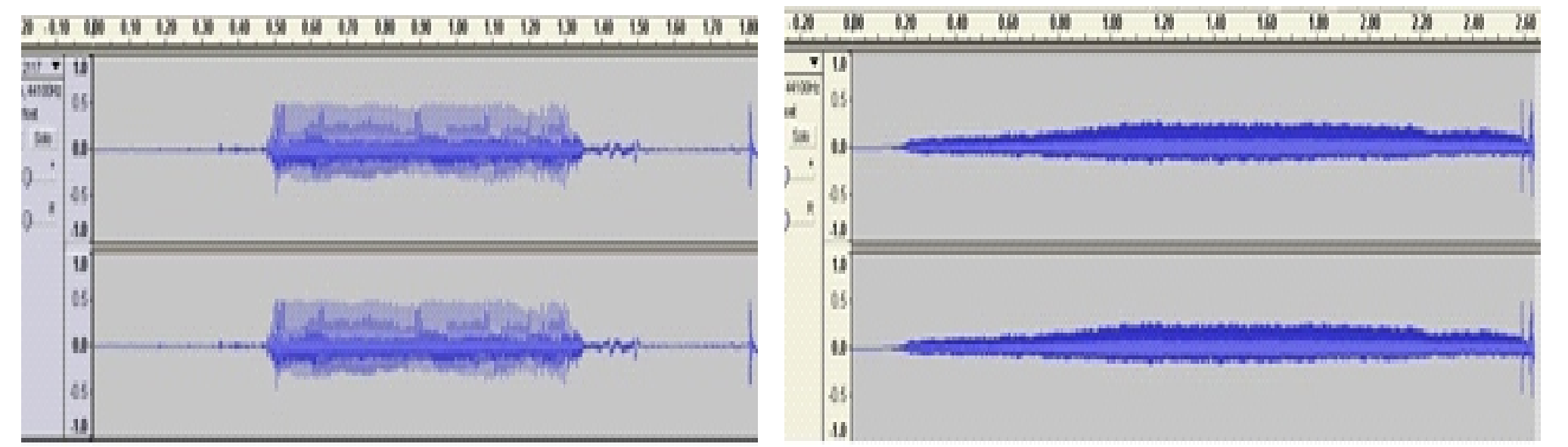


圖26-5A 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Sol錄音檔經分析程式振幅分析結果

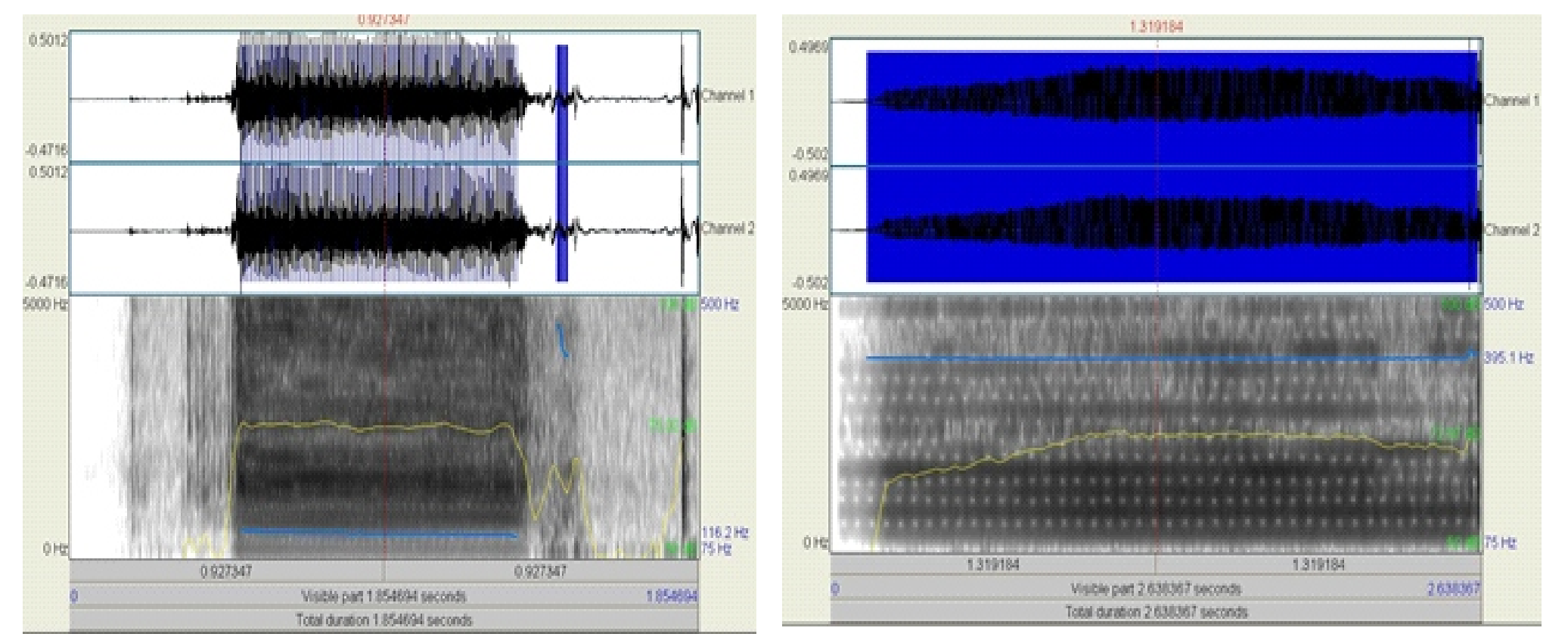


圖26-5B 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Sol錄音檔經分析程式波形結果

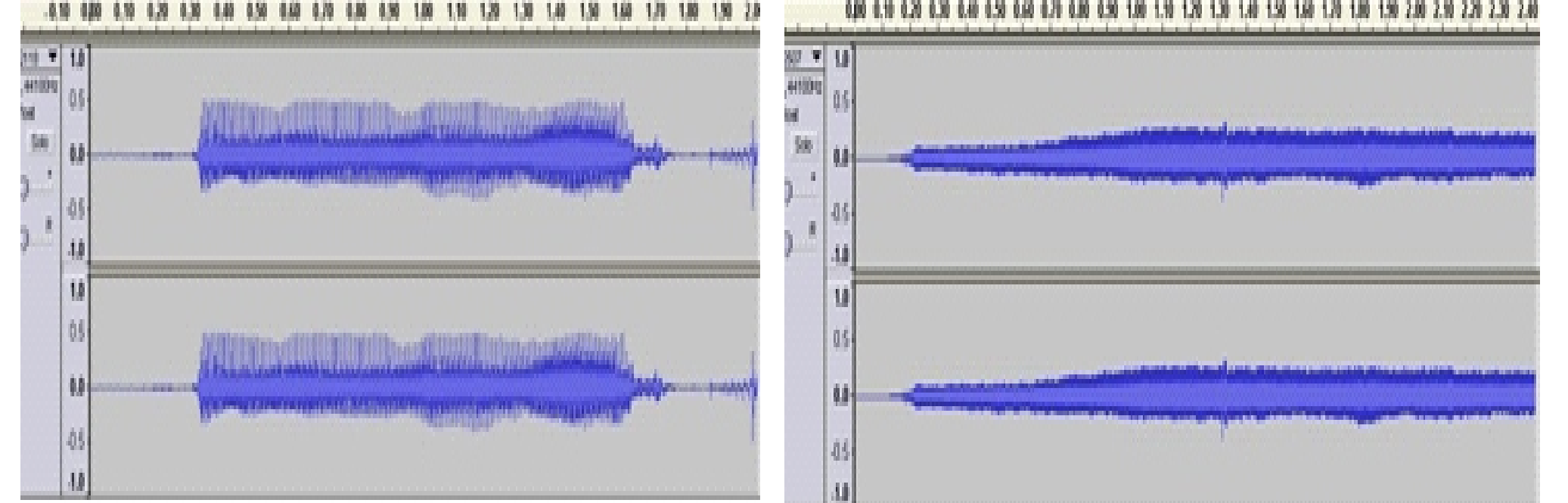


圖26-6A 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 La錄音檔經分析程式振幅分析結果

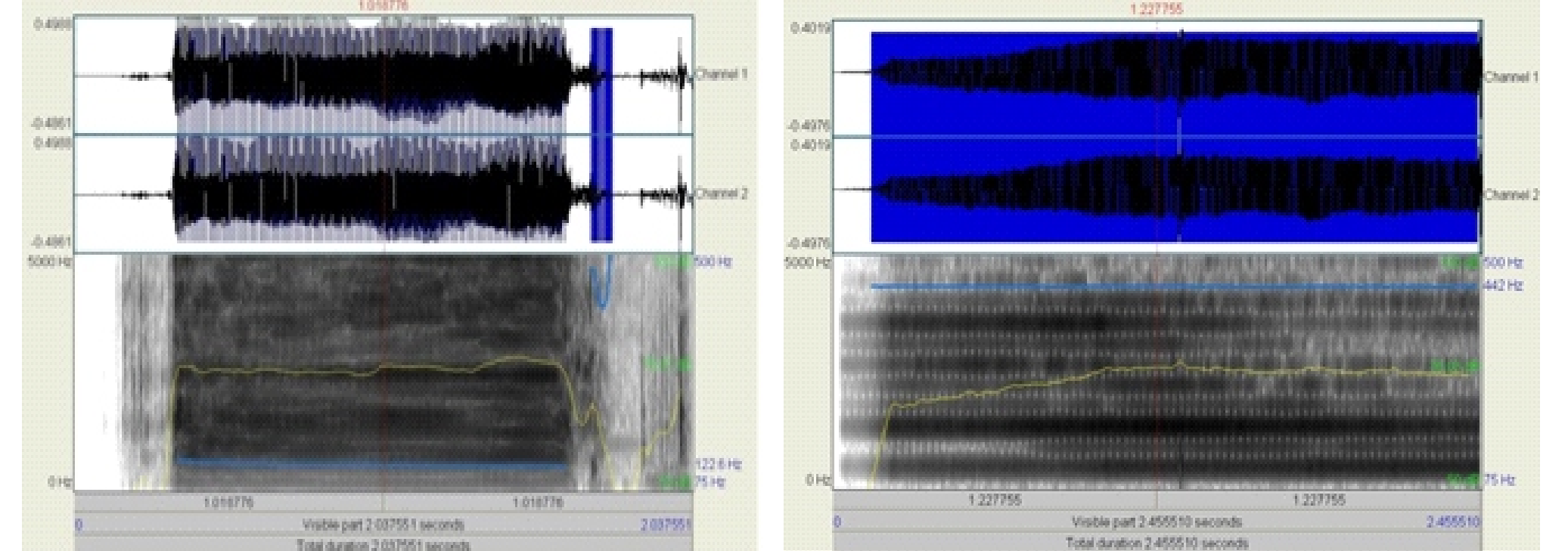


圖26-6B 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 La錄音檔經分析程式波形結果

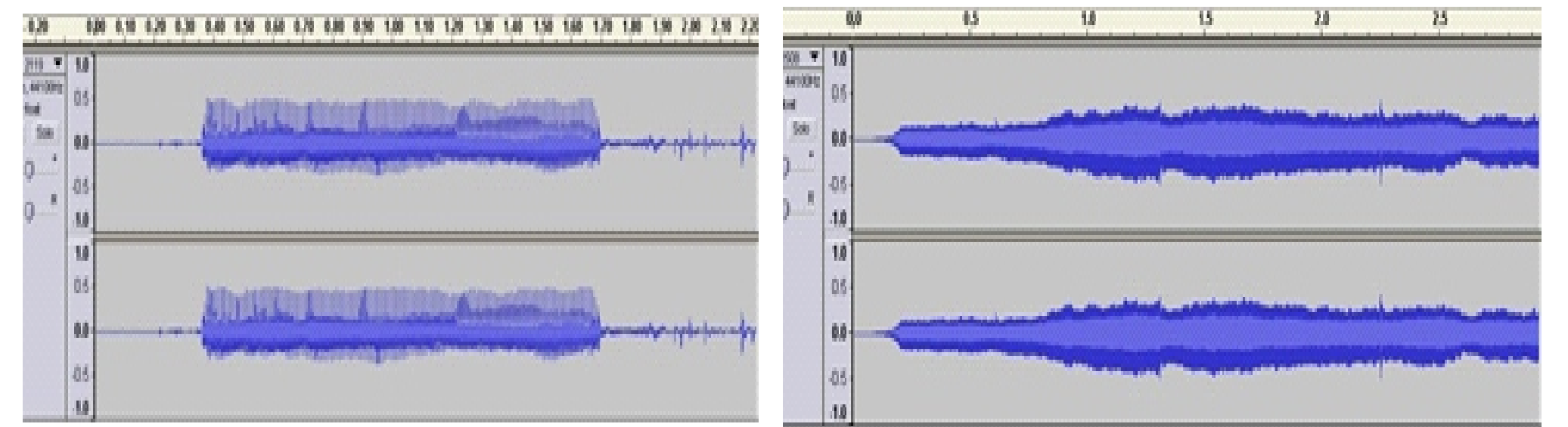


圖26-7A 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Si錄音檔經分析程式振幅分析結果

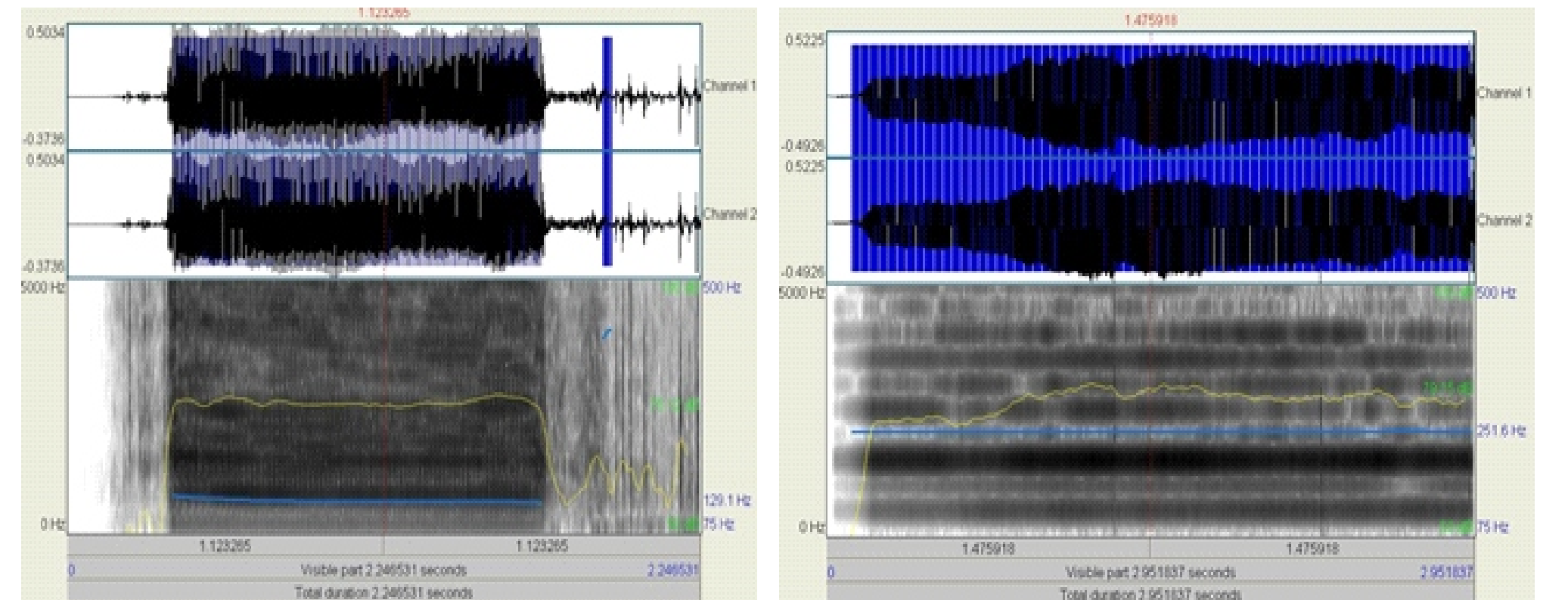


圖26-7B 樂器6(左)、薩克斯風(右)吹奏 Si錄音檔經分析程式波形結果

(五)根據所查到的資料推論

- 1.人的聽覺系統辨別聲音頻率的高低，反映在人類的主觀感覺上成為音調的高低，「正常人的音調辨別閾在1000赫以下時為1~2赫，在1000赫以上時約為頻率的0.1~0.2%」，較容易分辨各種樂器所演奏的基音，個別的泛音就不容易分辨，但是基音和泛音結合一起而形成的複合音成為各種樂器獨特的發聲，我們又可分辨。所以自製吹笛和薩克斯風所吹奏的7個音階其基音相近，一般人不容易分辨。
- 2.最常見的薩克斯風是由一個共鳴腔的空氣柱震動產生聲音，喇叭直徑比其他木管樂器大，音量也就比較大，改變從吹嘴到最近打開的孔，其他孔閉合的距離即整個管身長度，管身的有效長度控制了聲波的波長，於是產生了不同的音高，單簧管構造由於較低的泛音使聲音柔和豐滿，通常吹奏出的聲音為降E調，實際音高比記譜低大6度。自製吹笛也是利用相同原理製作，只是利用手指按孔而非薩克斯風使用蓋板緊密度較差。

陸、結 論

一、聲音的產生需要具備振動體、發音體的結構和材質和傳播介質(空氣)與聲音組成的三要素響度、音調、音色之間有密切的影響關係。由自製的樂器可以發現底下特性：

- (一)薄膜狀振動體較容易產生聲音，彈性較差的薄膜，來回振動幅度會較少周期較短，比較不會像彈性體會抵消部分能量，所以振動總時間、平均振幅較大。但是彈性模所產生的聲音前半段波形出現的泛音較少，比較接近單音，後半段的振動因作用力減弱與彈性恢復力的影響導致不同頻率的振動增加所產生的波峰就較多。
- (二)樂器的共鳴腔體積大同時產生氣體共振使得振動產生的振幅較大，但是輸入相同氣體量時因體積變大總氣體壓力變小能推動薄膜的次數會減少，整個總振動時間較小，產生的標準化節奏也較短促。
- (三)樂器內氣體移動的距離大小會影響閉管空氣柱所形成駐波，使得發音體產生的泛音改變，共鳴腔越狹長氣體移動距離大所發出的音調會較低。
- (四)大出氣孔的樂器因內共鳴腔氣體流失快，導致振動頻率斷斷續續，小出氣孔的樂器內腔未排除的氣體回流作用於薄膜，維持同頻率振動的時間較長，比較容易形成規律的波形。
- (五)樂器的出氣管深入共鳴腔距離會影響共鳴腔內氣體的導流，導流順暢氣體流失快，薄膜振動持續性變少。

二、自製吹笛與薩克斯風所產生的聲音比較可得到以下結論：

- (一)利用開孔的距離與按孔的位置改變共鳴腔末端出口的排氣量比例，可以創造相近音階的基音和節奏，讓聽覺感受到相近的音調。
- (二)但是經由電腦程式的分析自製吹笛與薩克斯風所產生的泛音頻率及波形其實還是有差異的，只是我們的聽覺不容易分辨出來。