

# 中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高中組 生物(生命科學)科

040708

蟬聯冠軍之蟬聲特性分析研究

學校名稱：桃園縣私立新興高級中學

作者：  高二 王馨云  高二 林沂蓁  高二 陳昌憲	指導老師：  呂建興  楊文心
---	-----------------------------

關鍵詞：蟬聲、頻率、再播放實驗

## 摘要

蟬聲的頻率及時間特性雖有部分重疊，但仍有許多特性可相互區別。而從雄蟬發音構造中也發現，其共鳴腔體積、鳴膜及腹瓣面積都會影響到蟬的鳴唱音量，但以共鳴腔體積與鳴膜面積影響較大，而鳴膜除了影響音量外，鳴膜厚度還會影響音頻高低，且摺皺數愈多，蟬聲的音調變化愈多，而腹瓣則還有保護發音構造的功能。另外，我們也可以確認蟬具有多樣的聲音，且引起發音的情境也不同，雖然目前無法明確指出其功能，但不論同種或異種蟬的召喚音都能引起蟬的群鳴，但同種比異種的召喚音更能引起群鳴。棲地與活動時間重疊的蟬，其聲音的變化性愈高。從這些特性分析中發現親緣關係愈接近的蟬，其蟬聲特性愈相似，其聲音親緣樹枝圖大致上也符合蟬的親緣關係。

## 壹、研究動機

臺灣的面積雖然不大，但因地形、氣候富於變化，因此孕育出多種的昆蟲。就單位面積來說，鄰近的日本面積雖比臺灣大十倍，但昆蟲種類卻比臺灣少很多。各種昆蟲為適應其不同的生活環境與習性，其外部形態有所差異，更發展出各種的聲音變化。尤其是蟬，其聲音的變化更是豐富（貢，1991）。臺灣蟬的種類繁多，而蟬的分類地位上屬於動物界(Animalia)；節肢動物門(Arthropoda)；昆蟲綱(Insecta)；同翅目(Homoptera)，且棲息於不同的生活環境中，其聲音亦因棲息環境之差異而略有差異。雄蟬的腹部都具有鳴膜發音器（雌蟬沒有發音器），發音器是非常有效率的器官，可以產生持續且音量大的鳴唱聲音，蟬就是藉由發出鳴唱聲音來傳遞訊息的，這是發音的主要作用。蟬的鳴唱聲音具有相當高的專一性，每一種蟬的鳴唱聲音都不同，也是分類上重要的依據（陳，2007），蟬的鳴聲種類包含召喚音、驚嚇音、警戒音、攻擊聲、求偶聲及交尾聲等。通常我們聽到的都是召喚聲，雌蟬對同種的雄蟬具有趨聲性，雄蟬會藉由召喚聲吸引雌蟬前來交配。但是目前都是描述性的聲音資料，缺乏量化的聲音特性分析。

會進行這次的科展研究起因於某天某節的國文課，讀到簡媜女士的夏之絕句，道出蟬鳴是如何陪伴她度過歡愉的童年，而我們也同樣的聽著，聽著那亙古不變的蟬鳴，哼唱著童年的小曲：「池塘邊的榕樹上知了在聲聲叫著夏天……」，曾幾何時，知了已成為夏天的代名詞，而他為何而唱？為誰高歌？令我們深深好奇，查閱了一下相關文獻發現專門研究蟬的資料少之又少，研究蟬聲的資料更少。因此萌生了研究蟬與蟬聲的念頭，而在開始做這項科展研究前，從來不曾仔細的看過這些在樹上辛勤鳴唱著的小小音樂家，每每在上課中聽到的總是牠們的盛大音樂會，淹沒老師們的講解聲，伴隨著炎熱的空氣流動，迴盪於教室及人們的耳中。而某日的炎熱午後，在煩躁地拋開厚重的課本與參考書後，坐在樹下仔細聆聽，原本覺得有些吵雜的蟬唱，現在覺得牠們的鳴聲有一定的旋律與節奏，但究竟牠們是利用什麼發出聲音的？為什麼會有不同的聲音？為什麼會有不同的旋律與節奏？又是怎樣的構造影響牠們的鳴

唱聲音呢？鳴唱的小小音樂家長什麼樣子呢？牠們叫什麼名字呢？腦袋中突然奇妙的幻想著，想像是否有一種儀器可將蟬聲錄下，快速分析比對後就顯現出蟬的長相（照片）和名字呢？（就像有些手機可利用語音辨識查詢手機通訊錄中的電話號碼與照片一樣）。這引起了我們的好奇心，於是我們便向生物老師提出以蟬和蟬聲為主題的生物科展實驗計畫，一連串有趣的研究就這麼開始了。

在科展進行的初期（正在為抓不到蟬而頭痛的時期），生物課正好上到動物行為這個章節，其中說到孔雀的雄鳥為了吸引雌鳥會將尾羽展開，展示其美麗的羽毛，而有些鳥類會跳舞或唱歌來引起異性的注意（莊等，1997）。而教室外頭那些大聲鳴唱的蟬難道也是為了吸引異性嗎？但是這樣大聲鳴唱不會引來天敵嗎？牠們只有這種聲音嗎？蟬聲的功能性又是什麼呢？當我們慢慢改良抓蟬工具與方法後，我們終於抓到蟬了，接著我們又發現蟬的外觀及腹瓣有很大的區別，想起了之前生物課上過的「生物的多樣性」（莊等，1997），既然外觀都不同了，那勢必牠們的發音構造應該也已經有許多差異了吧？而查了文獻發現熊蟬屬的蟬親緣關係比較接近（陳，2007），那聲音特性也可以顯現出牠們的關係嗎？一個接一個問題從我們的腦袋中蹦出來，而我們也一一的尋找相關的文獻，設計一連串的實驗，試圖一一解答我們的疑問？

## 貳、研究目的

- 一、了解蟬聲頻率特性之差異。
- 二、了解蟬聲時間特性之差異。
- 三、利用蟬聲頻率及時間特性之差異建立蟬聲檢索表
- 四、利用蟬聲檢索表並以蟬的形態親緣關係為基礎建立蟬聲親緣關係樹。
- 五、了解蟬的發聲構造與蟬聲特性之關聯性。
- 六、記錄蟬聲種類並分析其差異性。
- 七、瞭解不同蟬聲（召喚音、驚戒音與驅趕音）之功能性。
- 八、棲地與活動時間變化對蟬聲多樣性之影響。

## 參、實驗材料、研究設備及器材

### 一、實驗材料、研究設備及器材：

寶特瓶、絲襪、衛生紙、夾鏈袋、橡皮筋、捕蝦網、伸縮釣竿、打火機、飼養瓶、錄音筆(VR-W240 SERIES、SONY ICD-UX200F)、指向性麥克風、保麗龍板、電子秤（精準至小數點下 4 位）、電子游標尺（精準至小數點下 2 位）、微量吸管、昆蟲針（0 號及 3 號）、尖鑷子、珠針、電腦、捕蟲網、聲音分析軟體（Audition）、解剖用小剪刀及指甲油。

### 二、實驗物種

這次的實驗物種選擇以平地至低地山林常見的蟬種為主，包括高砂熊蟬、紅脈熊蟬、臺灣熊蟬、草蟬、寒蟬、端黑蟬、騷蟬、薄翅蟬八種蟬（陳，2007），在採集及調查過程中也有採集記錄到其他蟬種，例如：螻蛄、北埔蟬，但因為樣本數太少或沒有錄到聲音，因此沒有列入這次的實驗中。

我們選擇平地至低海拔山林常見的蟬種為主，是因為那是我們在採集與調查期間最容易發現與觀察到的蟬，查了許多相關的文獻，大多是牠們的形態特徵，生態活動時間，但是對於聲音的描述幾乎沒有，而且平時我們都只聽到蟬聲，並不容易直接清楚觀察到蟬。因此，能清楚的分辨蟬聲對應上蟬的種類，可讓大家更能欣賞蟬之美。所以我們選擇這些常見的蟬，針對牠們的聲音進行詳細的記錄與研究，希望大家能對牠們美妙的聲音有多一點的瞭解，找出一些簡單易辨識的聲音特性，讓人們可以更清易的分辨蟬聲對上蟬的種類，讓大家更能欣賞蟬聲與蟬之美。

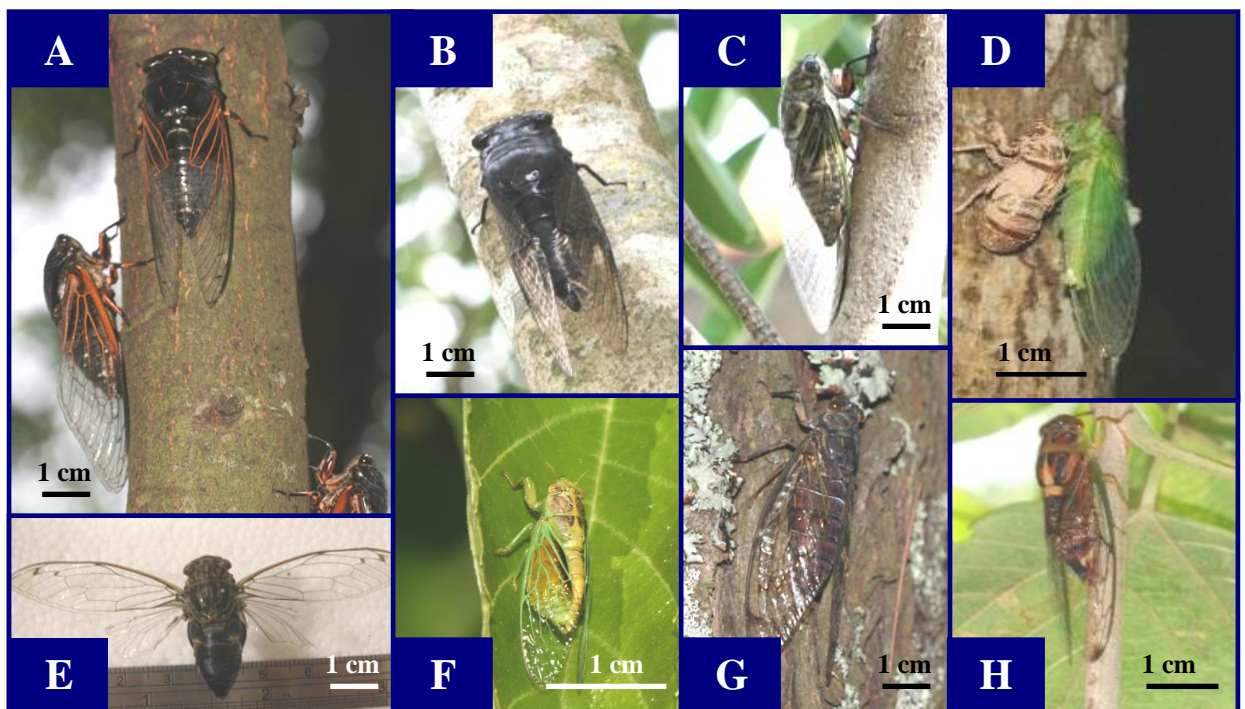
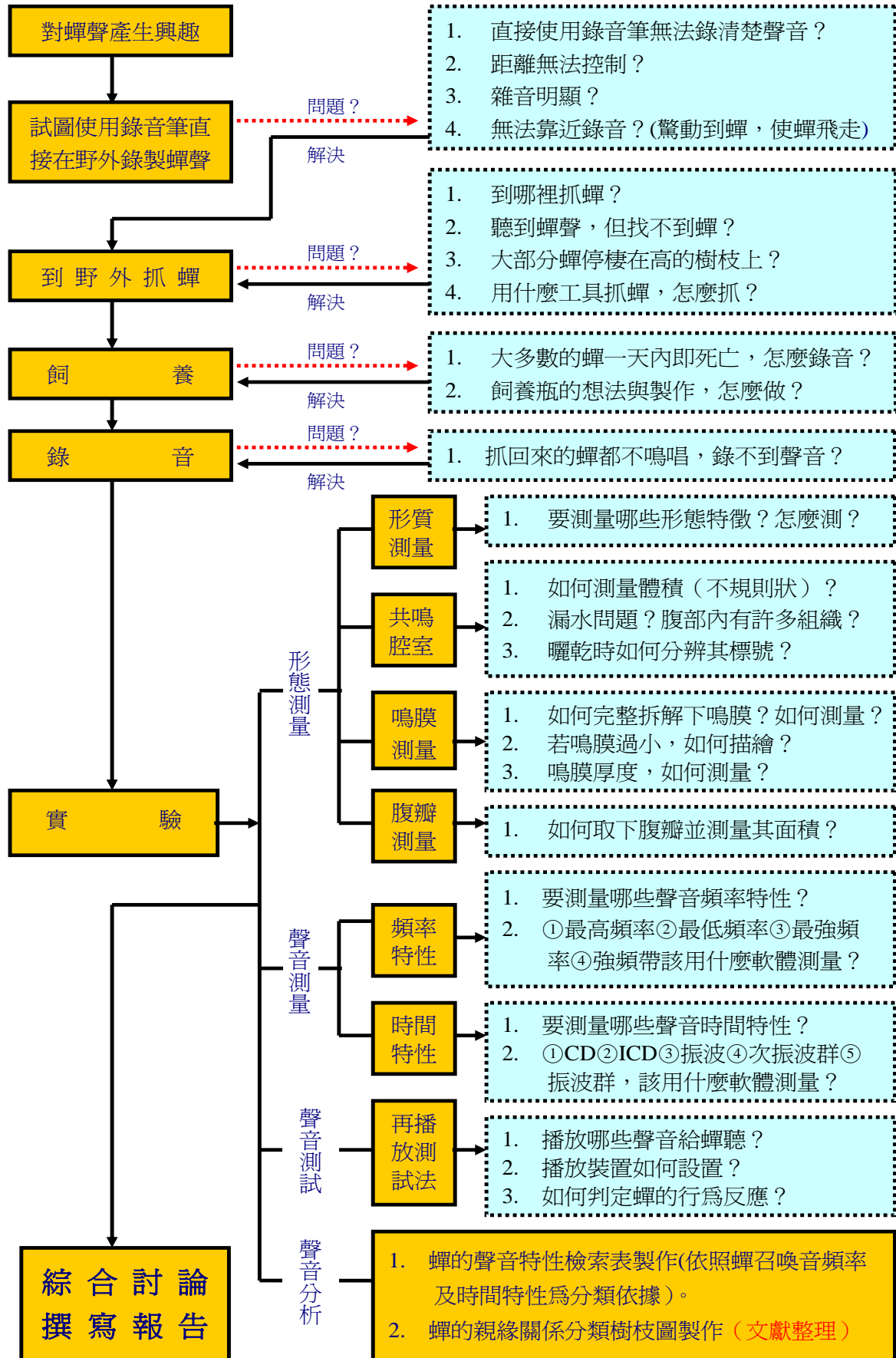


圖 1、這次實驗的研究對象：A：紅脈熊蟬、B：臺灣熊蟬、C：高砂熊蟬、D：薄翅蟬、E：寒蟬、F：草蟬、G：騷蟬、H：端黑蟬。

# 肆、研究過程或方法

## 一、思考及研究流程圖





## 二、蟬的採集及飼養

### (一) 實地採集：

1.採集地點：桃園虎頭山（圖 2A）（紅脈熊蟬、臺灣熊蟬、高砂熊蟬）、桃園龜山（寒蟬、草蟬）、南投埔里蓮華池（寒蟬、草蟬、高砂熊蟬）、桃園大溪（草蟬）、桃園八德（紅脈熊蟬）、桃園大園（高砂熊蟬）。

### 2.採集方式：

(1.) 自製採集器具：因為考慮蟬大部分都在較高的樹上，所以我們用可伸縮又方便攜帶的釣竿製作成主要的採集器具。將捕蝦網截短，再使用打火機將尾端燒軟後，趁熱組裝在伸縮釣竿上，待其冷卻，再使用水管膠帶加強即完成。

(2.) 採集方式：

①日間聽聲辨位採集：大部分的蟬停棲於高高的樹枝上或草叢中，總是聽到蟬聲後才知道其大概位置。因此，日間採集時需先專注聆聽蟬聲位置，直到鎖定的聲音達到最大聲的地方，再以肉眼加以搜尋，許多時候蟬大部分都停留在樹幹分支的下緣（可以清楚看見明顯的突起物），再以先前製作的採集網，調整成適當的長度後緩慢的接近目標物捕捉（圖 2B）。



圖 2、A：採集地點。與 B~D：採集方式。

②夜間採集剛羽化的成蟲：蟬都是在夜間（大約 18:00~21:00），尤其是剛天黑的那段時間爬上樹幹羽化為成蟲。因此，可利用蟬的此種特性，在天剛黑時，拿手電筒到公園或道路周邊的路樹樹幹上尋找剛羽化的成蟲（圖 2C）。

③夜間燈光誘集：利用部分蟬夜間具趨光性的特性，夜間點亮燈泡（400W 水銀燈泡）吸引趨光的蟬（圖 2D）。

### (二) 蟬的飼養：

1. 飼養器具製作：①選擇透明寶特瓶（易於觀察），使用美工刀將瓶身由 1/2 處向上及下剪開（圖 3A）。②底部鋪上紙巾（注意：將紙巾盡量貼緊底部以免較小的蟬鑽進），避免水流出（圖 3B）。③剪一段木本或草本植物，在水中（避免氣泡產生）將其剪成適當長度，修剪時需留下幾片葉片（促進光合與蒸散作用），放入裝有水的夾鏈袋中（延長植物的壽命），並用橡皮筋綁緊袋口至袋內的水不露出（圖 3C）。④將蟬從剪出的大洞放入，讓牠攀爬於枝條上，套上絲襪之類具彈性且透氣之布料即完成（圖 3D~E）。



圖 3、飼養器具製作步驟 A~E。

## 2. 飼養方法：

飼養期間若放在飼養瓶中的植物不新鮮了就需更換，通常如此可將蟬飼養一段時間才死亡，但每種蟬可飼養的時間長度不一，其中以草蟬的時間最長，可飼養超過二週。從圖 4 紅色箭頭指處可以看到飼養的高砂熊蟬以刺吸式口器深入植物莖部吸食植物汁液，可以明顯看到飼養的蟬有吃東西。我們藉這樣的飼養方法，成功的延長蟬的壽命，大幅增加錄到蟬聲的機會，這對我們此次科展實驗能順利進行是一大關鍵。



圖 4、高砂熊蟬以刺吸式口器（紅色箭頭指處）深入植物莖部吸食植物汁液。

## 三、外部形態及內部發音構造測量（陳，2001）：

（一）外部形態之測量（圖 5）：使用電子游標尺測量項目包括—頭長、胸長、腹長、翅長、翅寬、腹瓣長、腹瓣寬、全長以及全寬(William&John, 1994)。其中胸長及腹長則依照圖 5 中的胸部及腹部距離測量，翅長以連接處開始測量至翅尾端，翅寬及全寬以最寬之處為測量標準，腹瓣長及寬也以最寬最長之處為測量標準，並記錄於測量紀錄表中。

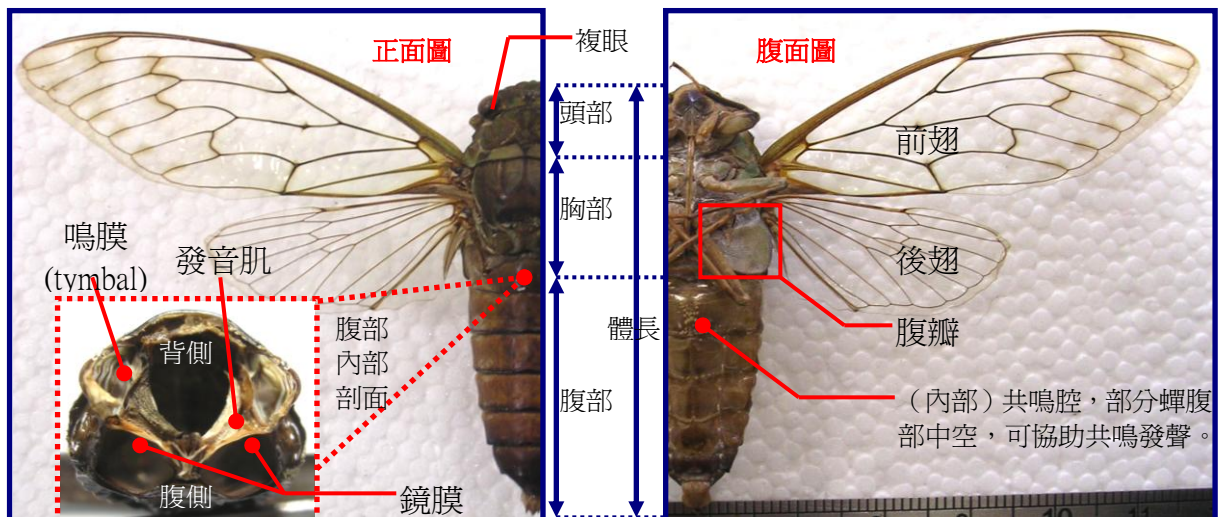


圖 5、蟬的外部形態及內部構造說明。

（二）共鳴腔體積之測量（圖 6）：

1. 將翅膀、腳、腹部分解。翅膀部分需於關節處使用鑷子夾斷，即可容易且完整的取下。腳則折下後即可丟棄（避免造成拆解過程的阻礙）。腹部則以左手與右手的食指及中指分別扳住其頭胸部及腹部，自關節處分解。分解完成後，放入標有編號的塑膠袋（圖 6A）。

- 2.在腹部外部塗上透明指甲油。以避免測量時滴入腹腔之液體（水）自氣門及體節交界處流出，塗抹指甲油時，均勻的塗在整個腹部，特別注意腹部節與節之間的連接處，必要時可塗兩層，確保其安全性（圖 6B）。
- 3.爲了將蟬的腹部穩定的直立在電子秤內（避免傾倒時水流出），使用具可塑形、質地不會過於柔軟及不會產生碎屑特性的軟橡皮當作基座。再將實驗物在軟橡皮中固定好，確定其不會傾倒後，放入電子秤中，歸零（圖 6C~D）。
- 4.使用微量滴管吸取清水後，緩慢滴入腹部，直至全滿而不會溢出時，讀取電子秤中的重量數值，並記錄於紀錄表中（圖 6E）。
- 5.將測量得之重量經換算而得其體積（假設水的密度爲 1）。
- 6.測量完畢後，將其中的水甩出，並倒立在紙巾上，待其乾燥即可回收。



圖 6、共鳴腔體積的測量方法與步驟 A~E。

**(三)腹瓣面積之測量**(參考高中生物上冊 Ch3 植物蒸散作用----葉子面積的估算的方法):

- 1.自先前分解下的胸部上，使用鑷子將腹瓣小心的取下，要將其完整的取下，不可從其上緣平直處直接折下，而要自其上緣的彎曲處折下，因爲彎曲處是與胸部連接之處，所以若自平直處直接折下，會將其彎曲處的部分腹瓣留在胸部上，而未取下，造成測量的誤差。
- 2.將取下得腹瓣在白紙上描繪出其形狀，若腹瓣有些許弧度，則必須壓平後在描繪其形狀；若其腹瓣小到無法測出其重量，則將其影印並放大數倍。將描繪或影印完成的圖形剪下。
- 3.將此紙張與剪下的紙腹瓣放入電子秤中測量其重量，取出後再將紙腹瓣單獨放入電子秤中測量，將所得之數據記錄於紀錄表中。
- 4.腹瓣面積 (cm<sup>2</sup>) = 紙腹瓣面積 (cm<sup>2</sup>) = [ 紙張總面積 (cm<sup>2</sup>) \* 紙腹瓣重 (g) ] / 紙張總重 (g) (莊，高中生物上冊 Ch3)。

**(四)鳴膜 (tymbal) 面積之測量**(參考高中生物上冊 Ch3 植物蒸散作用----葉子面積的估算的方法):

- 1.測量方法與腹瓣面積之測量方法相同。
- 2.鳴膜面積 (cm<sup>2</sup>) = 紙鳴膜面積 (cm<sup>2</sup>) = [ 紙張總面積 (cm<sup>2</sup>) \* 紙鳴膜重 (g) ] / 紙張總重 (g) (莊，高中生物上冊 Ch3)。

**(五)鳴膜厚度之測量**(參考高中選修生物上冊 Ch1 顯微測量技術的方法):

- 1.取八種實驗樣本蟬用小鑷子及小剪刀小心的取下鳴膜。
- 2.鳴膜石蠟包埋：①先取八個試管分別依物種貼上標籤，在置入相對應的物種鳴膜樣本。②清水洗滌數次。③30%酒精 20 分鐘。④50%酒精 20 分鐘。⑤70%酒精 20 分鐘。⑥95%酒精 20 分鐘。⑦無水酒精 20 分鐘 2 次。⑧無水酒精：二甲苯 = 1：1 浸泡 20 分鐘。⑨二甲苯：石蠟 = 1：1，60°C 浸泡 30 分鐘。⑩二甲苯 20 分鐘。⑪將組織倒於組織包埋盒內，加石蠟至蓋過鳴膜以上。



3. 組織切片(圖 7A~D)：A：將包埋在石蠟中的樣本放入手動切片台內→B、C：石蠟切片→D：以載玻片將組織從水槽中撈起。

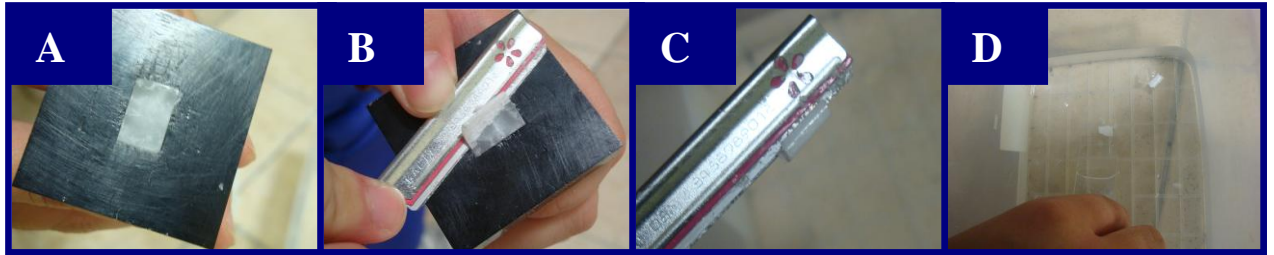


圖 7、鳴膜石蠟包埋切片方法與步驟 A~D。

4. 鳴膜厚度測量與紀錄：光學顯微鏡下觀察，參考高中選修生物上冊 Ch1 顯微測量技術的方法，計算出八種蟬（雄蟬）的鳴膜厚度。

- (1)將目鏡測微器置於目鏡的兩鏡片之間。
- (2)將載物台測微器置於顯微鏡的載物台上，載物台測微器上有一段 1mm 直線，劃分為 100 小格，每 1 小格寬度為  $10\mu\text{ m}$  (圖 8A~B)。
- (3)以 100X 檢視，使目鏡及載物台測微器的一端刻度重疊為一直線 (圖 8C)，在檢視另一端刻度重疊處，則目鏡測微器每一小格的大小，即可計算如下：  

$$10\mu\text{ m} \times (\text{載物台測微器的格子數} / \text{目鏡測微器的格子數}) = \text{目鏡測微器每一小格的大小} (\mu\text{ m})。$$
- (4)移去載物台測微器，將八種要測量的蟬鳴膜樣本置於載物台上，即可利用目鏡測微器測量樣本的精確格子數，在乘以目鏡測微器每一小格的大小，即可測出八種蟬鳴膜 (圖 8D 紅色箭頭) 的厚度 ( $\mu\text{ m}$ )。

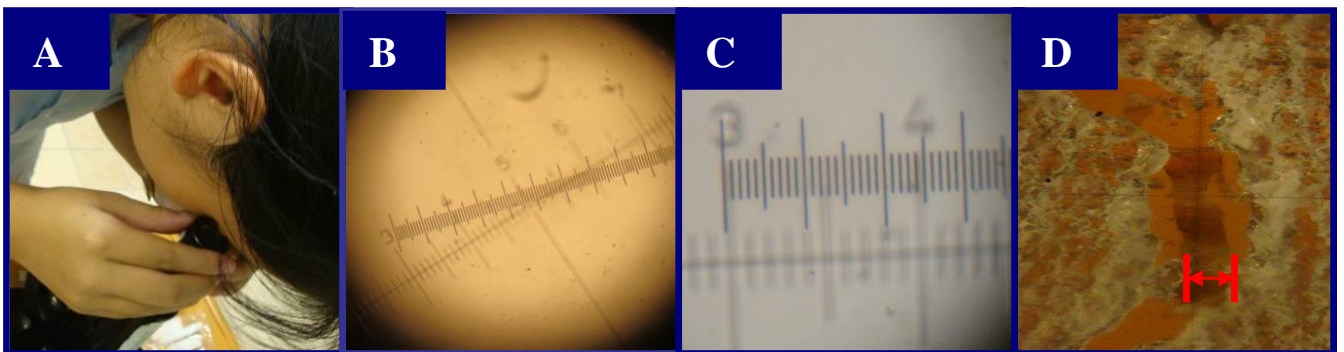


圖 8、八種蟬（雄蟬）的鳴膜厚度測量方法與步驟 A~D。

四、標本製作：將已死亡的屍體陰乾後用溫水將各關節泡軟，放在保麗龍板上使用 3 號昆蟲針從右胸筆直插下固定後，再使用珠針及鑷子輕輕挑開翅膀然後使用 0 號昆蟲針固定前翅，翅膀需與身體垂直；後翅亦用珠針挑開後用 0 號昆蟲針固定，同樣需與身體垂直，待乾後將固定翅膀的 0 號昆蟲針拔除即完成 (保存樣本，以利後續比對需要)。

五、聲音的錄製 (圖 9)：將飼養瓶擺放於桌面，並將喇吧置於其前，播放同品種之蟬鳴，待其鳴叫之後，將播放的聲音停止並開啓已接上指向性麥克風的錄音筆錄音，同時距離一公尺測量其分貝，至其停止鳴叫時停止錄音，即完成一個聲音檔的錄製。

## 六、聲音分析 (圖 10、11。楊，1999；林，1997)：

- (一) 最強頻率：頻譜能量最強處的頻率。
- (二) 最高頻率：一段唧聲頻率的最高處。
- (三) 最低頻率：一段唧聲頻率的最低處。
- (四) 主要頻率範圍：為頻譜能量最強處的頻率範圍。
- (五) 振波：鳴膜震動一次所發出的聲音 (弦樂器一次磨擦所發出的聲音)。
- (六) 振波群：一段 CD 中所有的振波合稱振波群 (楊，1999)。
- (七) 次振波群：一段 CD 內的分段振波合稱次振波群 (楊，1999)。
- (八) 唧聲 (CD)：一個唧聲開始到結束的連續時間 (楊，1999)。
- (九) 唧聲間隔 (ICD)：兩個唧聲 (CD) 之間隔時間 (楊，1999)。
- (十) 振波比 (pulse rate)：每秒出現的振波數目，又稱振波重複頻度 (pulse repetition rate, PRF) (楊，1999)。



圖 9、聲音的錄製設備與裝置。

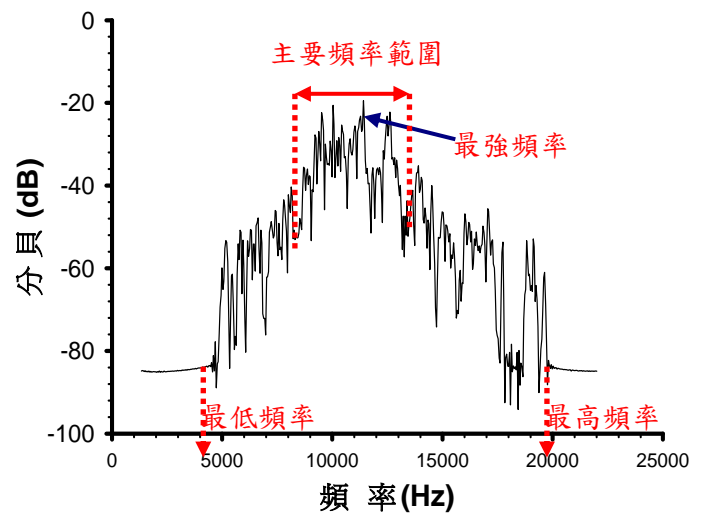


圖 10、聲音分析：主要頻率範圍、最低頻率、

## 七、再播放 (playback) 測試實驗：

- (一) 製作播放帶：將蒐集到的蟬聲，包括召喚、驚戒及驅趕音一段完整唧聲為單位製成聲音播放帶 (mp3 格式)。
- (二) 播放設備：筆記型電腦外接喇叭。
- (三) 播放距離：外接喇叭距離測試對象 1 公尺的距離。
- (四) 播放時間：每種蟬的一段完整唧聲 (一段播放帶) 時間。
- (五) 播放對象：1. 同種之間 (例如：將錄製來源是草蟬的召喚音播放給草蟬聽)。2. 異種之間 (錄製來源與播放對象不同物種)。
- (六) 記錄測試對象的反應及是否鳴唱：若有鳴唱則以錄音設備錄下鳴唱聲音 (以聲音分析軟體分析)，並利用噪音計 (分貝計) 測量其發出的聲音音量。

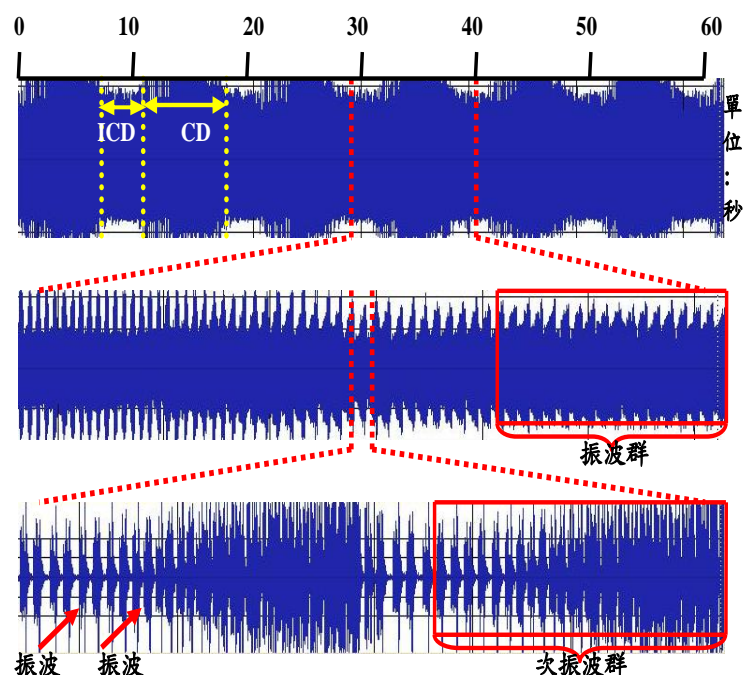


圖 11、聲音分析：唧聲 (CD)、唧聲間隔 (ICD)、振波群、次振波群、及振波之測量方法。

## 伍、研究結果

### 一、蟬聲頻率特性分析：

#### (一) 最高頻率 (Hz)：

從圖 12 中可以看出寒蟬的最高頻率最高 ( $19502.0 \pm 411.0$ )，最低則為臺灣熊蟬 ( $13146.3 \pm 205.2$ )。從圖 12 中可以看出，臺灣熊蟬可與其他七種蟬區別，而高砂熊蟬 ( $13681.7 \pm 281.7$ ) 則可與除了騷蟬 ( $14930.6 \pm 2742.5$ ) 以外的蟬加以區別。另外，紅脈熊蟬 ( $14496.8 \pm 516.3$ ) 也可與騷蟬、端黑蟬 ( $17326.3 \pm 2189.2$ ) 及草蟬 ( $15151.7 \pm 358.5$ ) 之外的蟬分別，端黑蟬則可再與薄翅蟬 ( $18981.3 \pm 1277.9$ ) 及寒蟬加以分別，寒蟬亦可再與端黑蟬及薄翅蟬分別，其餘則無法清楚的分別。

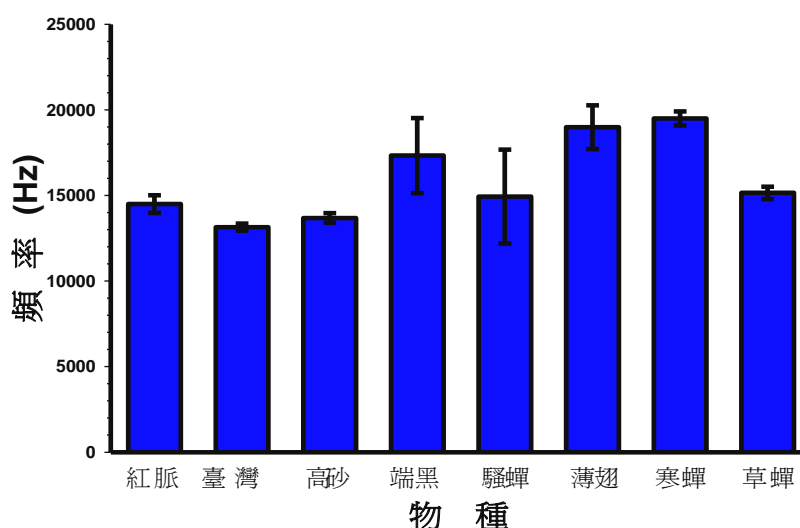


圖 12、蟬召喚音最高頻率，紅脈=紅脈熊蟬、臺灣=臺灣熊蟬、高砂=高砂熊蟬、端黑=端黑蟬、薄翅=薄翅蟬。

#### (二) 最低頻率 (Hz)：

從圖 13 中可以明顯的看出最低頻率以薄翅蟬 ( $41.0 \pm 5.8$ ) 及臺灣熊蟬 ( $41.3 \pm 18.4$ ) 為明顯較低，可以明顯與其他蟬區別，最低頻率以端黑蟬為最高 ( $4485.6 \pm 707.0$ )，除了草蟬 ( $4184.2 \pm 203.2$ ) 以外，都可以和其他六種蟬區別。而高砂熊蟬 ( $1227.0 \pm 445.1$ ) 與騷蟬 ( $1025.3 \pm 159.5$ ) 最低頻率有相互重疊，無法相互區別，紅脈 ( $2316.4 \pm 339.2$ ) 與寒蟬 ( $2256.1 \pm 443.6$ ) 最低頻率也相互重疊，無法相互區別。最後，我們也可以明顯看出草蟬的最低頻率 ( $4184.2 \pm 203.2$ ) 與端黑蟬相互重疊，無法相互區別，但可以和其他的六種蟬區別。

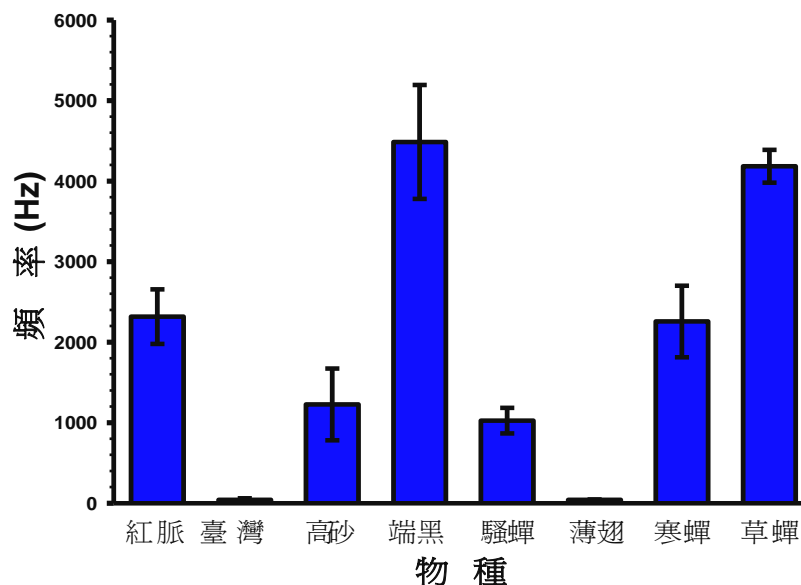


圖 13、蟬召喚音最低頻率，紅脈=紅脈熊蟬、臺灣=臺灣熊蟬、高砂=高砂熊蟬、端黑=端黑蟬、薄翅=薄翅蟬。

### (三) 最強頻率 (Hz):

從圖 14 中可以明顯的看出最強頻率以端黑蟬 (10697.5±615.4) 為最高，可以和其他七種蟬的最強頻率區別。而最強頻率以騷蟬 (3489.3±1249.1) 為最低，可以和端黑蟬、薄翅蟬 (5818.3±333.3) 及草蟬 (9075.8±317.2) 區別。臺灣熊蟬 (5097.5±2752.3)、高砂熊蟬 (5081.5±2008.8) 及寒蟬 (5295.0±174.2) 的最強頻率較為接近，無法相互區別。另外，我們也可以明顯看出端黑蟬及草蟬可與其他六種蟬區別，薄翅則可與騷蟬 (3489.3±1249.1) 分別，其餘則重疊性高，沒辦法清楚區別。

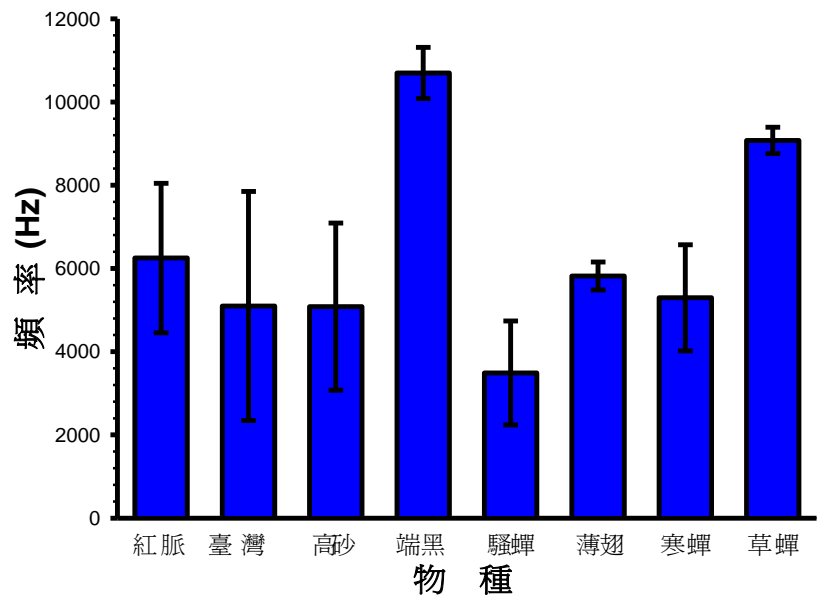


圖 14、蟬召喚音最強頻率，紅脈=紅脈熊蟬、臺灣=臺灣熊蟬、高砂=高砂熊蟬、端黑=端黑蟬、薄翅=端薄翅蟬。

## 二、蟬聲時間特性分析：

### (一) CD (唧聲，單位：秒)：

從圖 15 中可以明顯的看出 CD 長度以薄翅蟬 (59.4±35.0) 最高，草蟬 (51.8±23.8) 其次，而此二種蟬的 CD 長度標準偏差都較大，顯示其二種蟬的鳴唱的唧聲 (CD) 持續時間變化性較大，且此二種蟬的 CD 長度重疊性高，無法相互區別，但它們可和其他蟬的 CD 長度區別。CD 長度最低的是端黑蟬 (1.5±0.2)，可與其他種蟬的 CD 長度

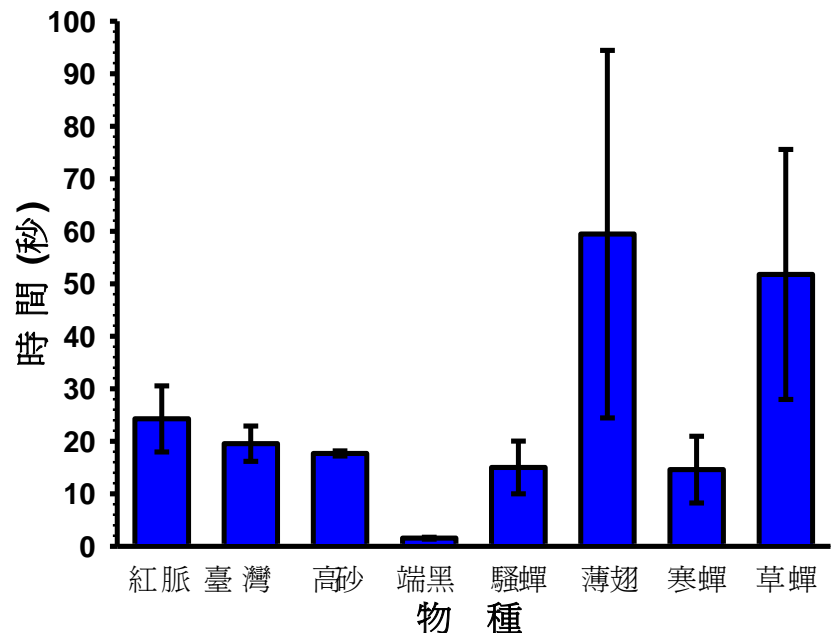


圖 15、蟬召喚音唧聲 (CD) 持續時間，紅脈=紅脈熊蟬、臺灣=臺灣熊蟬、高砂=高砂熊蟬、端黑=端黑蟬、薄翅=薄翅蟬。

區別，而薄翅蟬可與草蟬及紅脈熊蟬 (24.3±6.3) 以外的蟬區別。另外，我們也可以看出臺灣熊蟬 (19.5±3.3)、高砂熊蟬 (17.7±0.5)、騷蟬 (15.0±5.0) 及寒蟬 (14.6±6.3) 的唧聲 (CD) 持續時間則因為重疊性高，無法相互區別。



## (二) ICD (唧聲間隔, 單位: 秒):

從圖 16 中可以明顯的看出紅脈熊蟬、薄翅蟬、寒蟬及草蟬的唧聲連續無間隔 (無 ICD), 而臺灣熊蟬 ( $2.30 \pm 0.14$ )、高砂熊蟬 ( $4.02 \pm 0.05$ )、端黑蟬 ( $0.60 \pm 0.08$ ) 及騷蟬 ( $0.58 \pm 0.44$ ) 的唧聲具有間隔 (有 ICD)。唧聲間隔時間 (ICD) 長度以高砂熊蟬最長, 可和臺灣熊蟬、端黑蟬及騷蟬區別, ICD 長度其次為臺灣熊蟬, 可和端黑蟬及騷蟬區別。而端黑蟬與騷蟬的唧聲間隔時間 (ICD) 則因重疊性高, 無法相互區別。

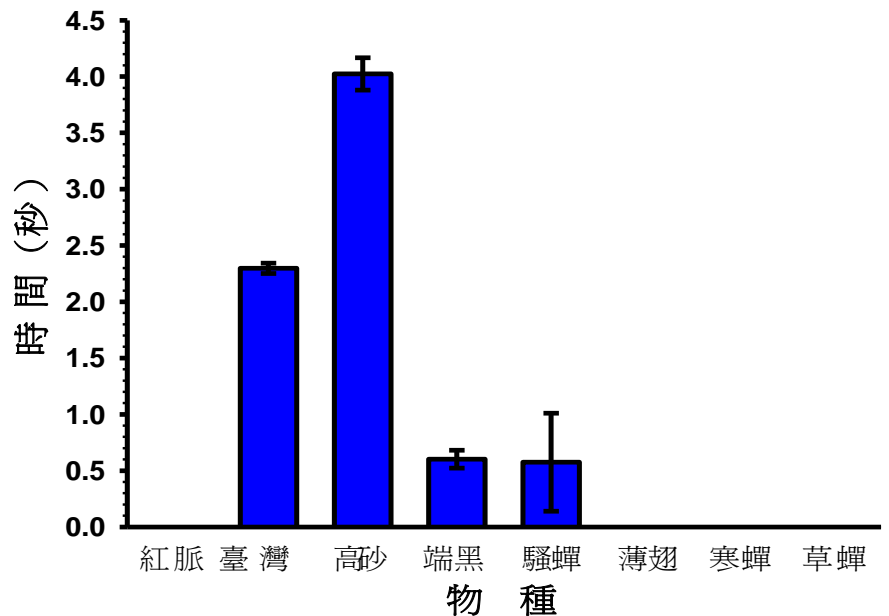


圖 16、蟬召喚音唧聲間隔 (ICD) 時間, 紅脈=紅脈熊蟬、臺灣=臺灣熊蟬、高砂=高砂熊蟬、端黑=端黑蟬、薄翅=薄翅蟬。

## (三) 振波比 (個 / 秒):

從圖 17 中可以明顯的看出蟬的唧聲中每秒的振波數以臺灣熊蟬 ( $186.3 \pm 28.3$ )、端黑蟬 ( $205.7 \pm 46.2$ )、騷蟬 ( $214.9 \pm 57.2$ )、及薄翅蟬 ( $207.5 \pm 93.8$ ) 較多, 且每秒產生的振波數量重疊性高, 無法相互區別。另外, 唧聲中每秒的振波數最少的是紅脈熊蟬 ( $46.5 \pm 9.4$ ), 可藉此與其他七種蟬區別, 而臺灣熊蟬的每秒產生的振波數量則還可和高砂熊蟬 ( $106.7 \pm 24.9$ ) 及草蟬 ( $133.8 \pm 14.5$ ) 加以區別, 高砂熊蟬則可再與端黑蟬及騷蟬加以區別, 其餘則重疊性高, 無法相互區別。

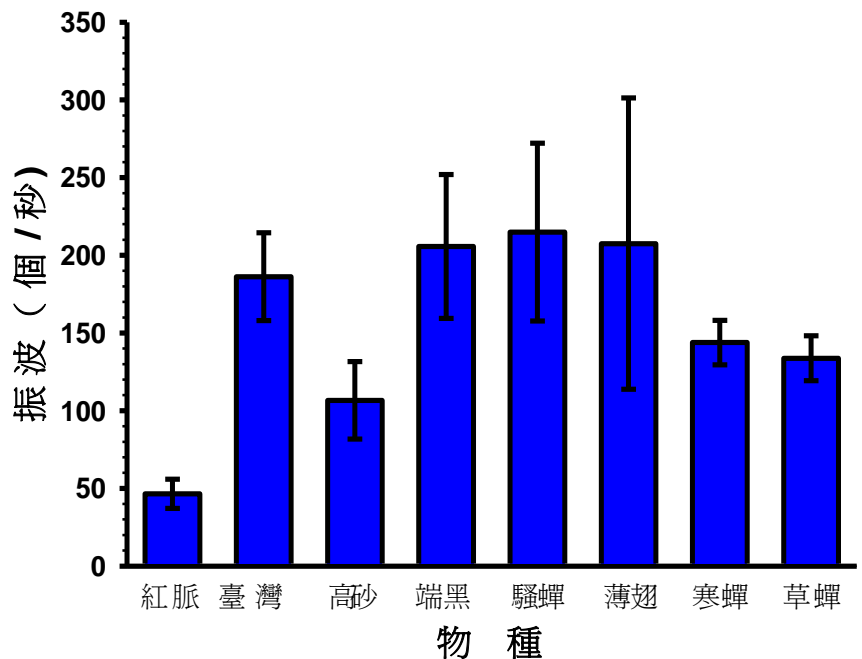


圖 17、蟬召喚音 (振波比) 每秒振波數量, 紅脈=紅脈熊蟬、臺灣=臺灣熊蟬、高砂=高砂熊蟬、端黑=端黑蟬、薄翅=薄翅蟬。

(四) 強頻圖與主要頻率範圍：

1. 紅脈熊蟬、臺灣熊蟬、高砂熊蟬及薄翅蟬的強頻圖與主要頻率範圍：

從圖 18 中可看出紅脈熊蟬、臺灣熊蟬、高砂熊蟬及薄翅蟬的強頻圖都略有差異，尤其是薄翅蟬與其他三種（紅脈熊蟬、臺灣熊蟬及高砂熊蟬）差異最大，而紅脈熊蟬、臺灣熊蟬及高砂熊蟬的強頻圖則十分相似。

圖 18A 為紅脈熊蟬，第一段主要頻率範圍為  $2750.51(\pm 634.74)$  Hz ~  $6232.80(\pm 690.27)$  Hz，第二段主要頻率範圍為  $7476.42(\pm 624.81)$  Hz ~  $10190.65(\pm 1421.32)$  Hz；圖 18B 為臺灣熊蟬，第一段主要頻率範圍為  $2569.40(\pm 336.70)$  Hz ~  $7018.40(\pm 349.51)$  Hz，第二段主要頻率範圍為  $7139.00(\pm 256.4)$  Hz ~  $9917.67(\pm 418.74)$  Hz；圖 18C 為高砂熊蟬，第一段主要頻率範圍為  $1900.67(\pm 620.23)$  Hz ~  $7674.42(\pm 559.21)$  Hz，第二段主要頻率範圍為  $8505.33(\pm 97.42)$  Hz ~  $10010.67(\pm 87.78)$  Hz；圖 18D 為薄翅蟬，主要頻率範圍為  $3724.75(\pm 349.76)$  Hz ~  $7086.25(\pm 358.20)$  Hz。我們可以從這四種蟬的主要頻率發現，紅脈熊蟬、臺灣熊蟬與高砂熊蟬皆有兩段主要頻率，且第二段範圍通常較小。

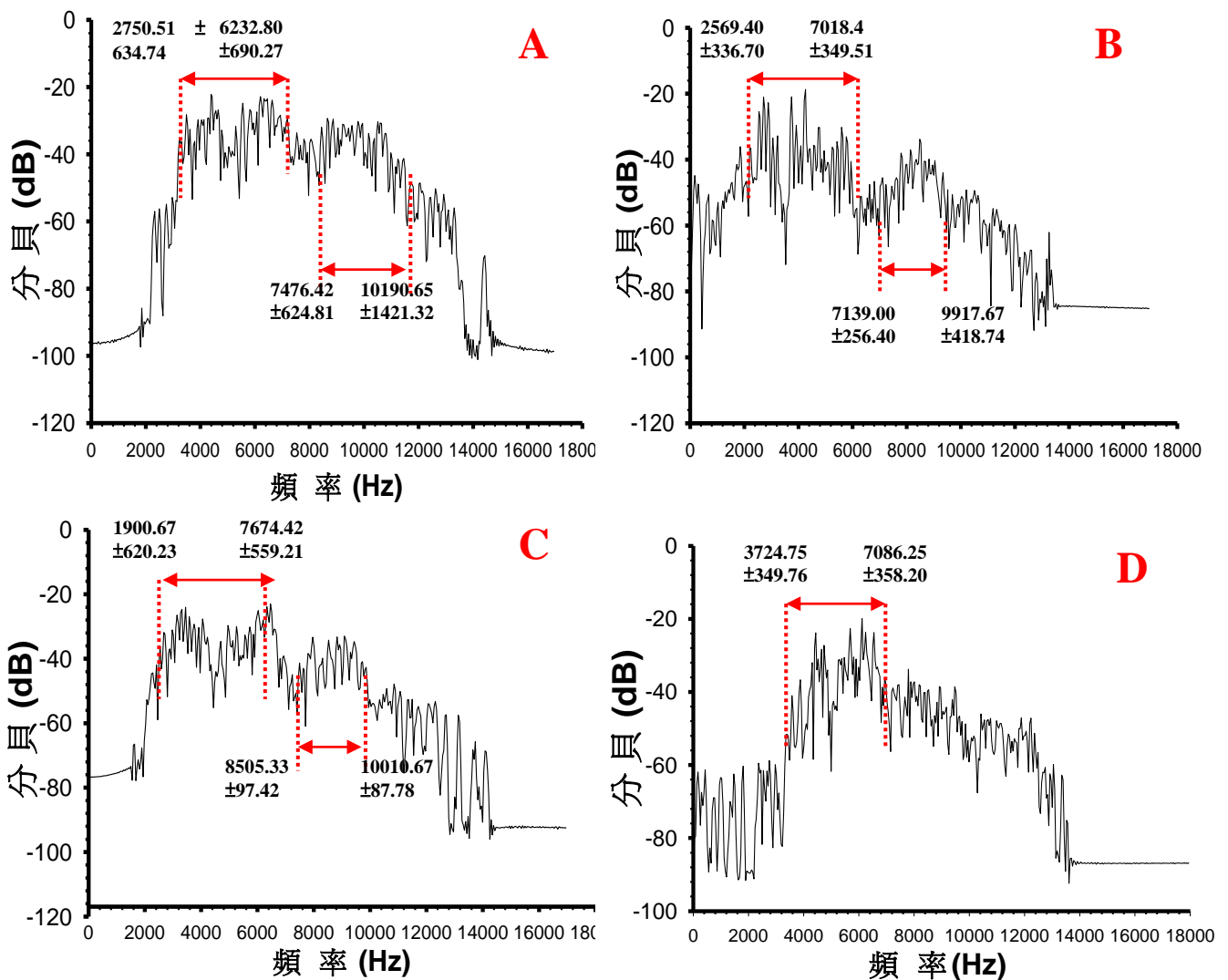


圖 18、A=紅脈熊蟬、B=臺灣熊蟬、C=高砂熊蟬、D=薄翅蟬的強頻圖與主要頻率範圍。

## 2. 騷蟬、寒蟬、端黑蟬及草蟬的強頻圖與主要頻率範圍：

從圖 19 中可看出騷蟬、寒蟬、端黑蟬及草蟬的強頻圖都略有差異，尤其是草蟬與其他三種（騷蟬、寒蟬及端黑蟬）差異最大，可以顯看出草蟬的主要頻率範圍集中而明顯。而騷蟬與寒蟬的強頻圖較為相似，且其主要頻率範圍均較低（約為 1300~5500Hz），而端黑蟬及草蟬的強頻波形雖有些為差異，但其主要頻率範圍均較高（約為 7500~13000Hz）。

圖 19A.B.C.D 分別為騷蟬、寒蟬、端黑蟬及草蟬的主要頻率範圍，若和圖 18 相互比對，可以發現薄翅蟬、騷蟬、寒蟬、端黑蟬及草蟬都只有一段主要頻率範圍。圖 19A.B.C.D 的強頻圖中可以看出騷蟬其主要頻率範圍為 1416.92 ( $\pm 227.50$ )~5474.21 ( $\pm 527.94$ )，寒蟬其主要頻率範圍為 1362.87( $\pm 234.56$ )~5486.07( $\pm 349.76$ )，端黑蟬其主要頻率範圍為 9189.63( $\pm 477.89$ )~12775.67( $\pm 1132.63$ )，而草蟬其主要頻率範圍為 7604.33( $\pm 182.24$ )~11249.17( $\pm 620.04$ )。從上述的四種蟬的主要頻率範圍中可以看出寒蟬的主要頻率範圍最大。

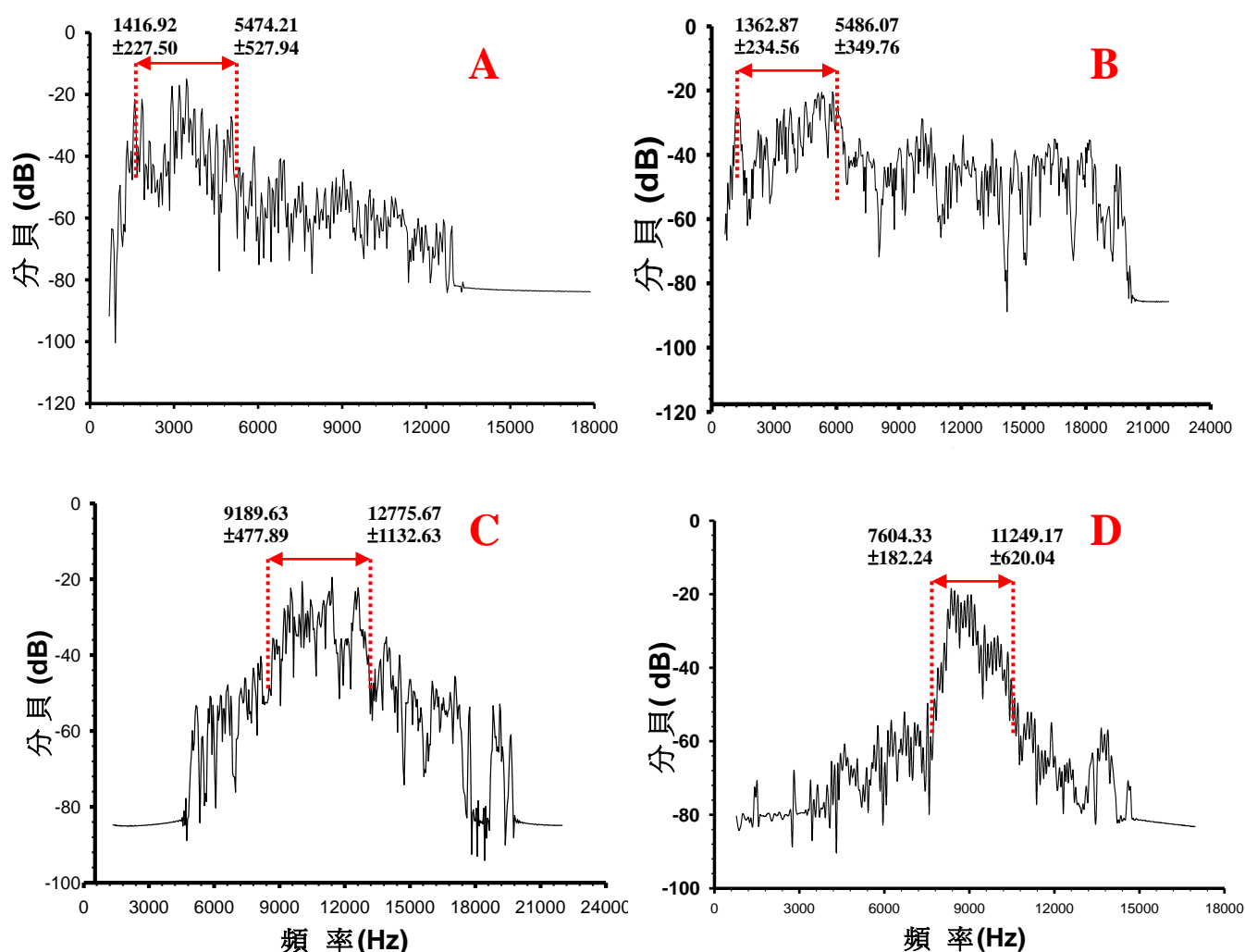


圖 19、A=騷蟬、B=寒蟬、C=端黑蟬、D=草蟬的強頻圖與主要頻率範圍。

三、以聲音特性製作八種蟬的聲音檢索表：

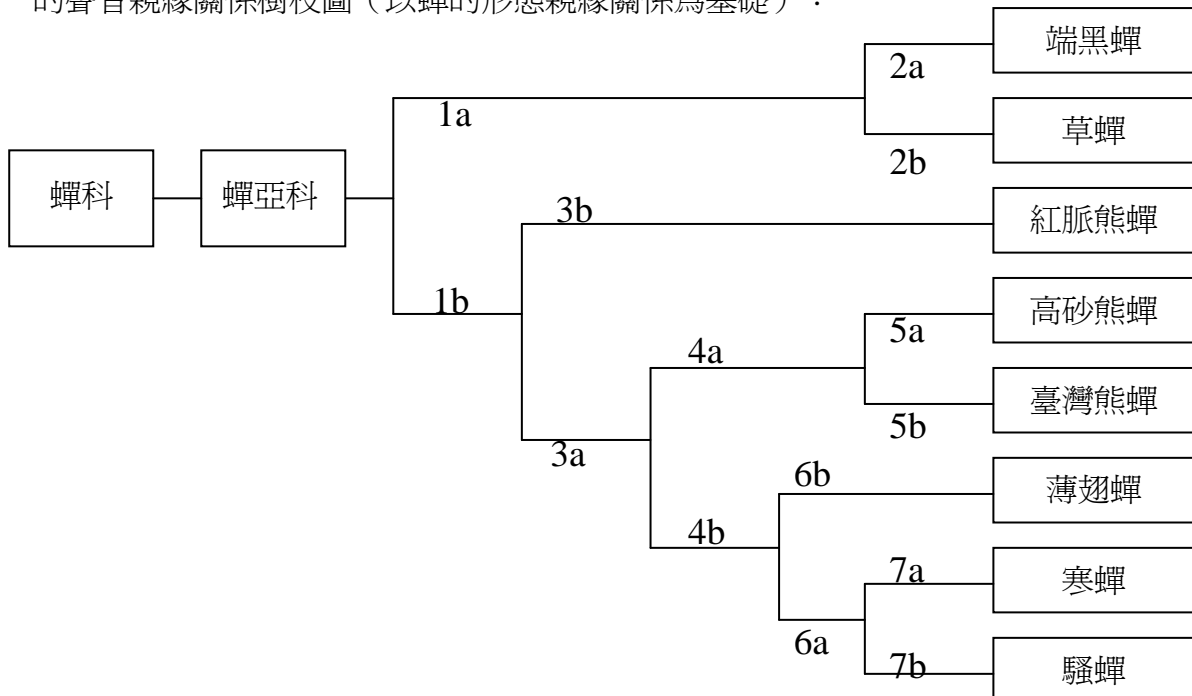
1. 重新繪製最接近八種蟬親緣關係的聲音檢索表：

我們依照前述的蟬鳴召喚音的頻率（最高頻率、最低頻率、最強頻率、主要頻率範圍）與時間（CD、ICD、振波比）特性分析結果並繪製八種蟬的聲音檢索表。依照蟬鳴召喚音的頻率與時間特性繪製的聲音檢索表有多種的分類檢索方式，我們參考文獻中八種蟬親緣關係（依照形態特徵分類）的樹枝圖（陳，2007），重新繪製最接近八種蟬親緣關係的聲音檢索表。

- 1a.一段連續召喚音中的最強頻率大於 8500 Hz.....2
- 1b.一段連續召喚音中的最強頻率小於 8500 Hz.....3
  - 2a.一段連續召喚音的持續時間小於 5 秒.....端黑蟬
  - 2b.一段連續召喚音的持續時間大於 5 秒.....草蟬
  - 3a.一段連續召喚音的振波比大於 60 個/1秒.....4
  - 3b.一段連續召喚音的振波比小於 60 個/1秒.....紅脈熊蟬
  - 4a.二段連續召喚音間的時間間隔大於 2 秒.....5
  - 4b.二段連續召喚音間的時間間隔小於 2 秒.....6
    - 5a.二段連續召喚音間的時間間隔大於 3 秒.....高砂熊蟬
    - 5b.二段連續召喚音間的時間間隔小於 3 秒.....臺灣熊蟬
    - 6a.一段連續召喚音中的最低頻率大於 50 Hz.....7
    - 6b.一段連續召喚音中的最低頻率小於 50 Hz.....薄翅蟬
      - 7a.一段連續召喚音中的最高頻率大於 18000 Hz.....寒蟬
      - 7b.一段連續召喚音中的最高頻率小於 18000 Hz.....騷蟬

2. 重新繪製最接近八種蟬親緣關係的聲音親緣樹枝圖（對照蟬的形態分類）：

我們依照自己繪製最接近八種蟬親緣關係（陳，2007）的聲音檢索表，繪製出八種蟬的聲音親緣關係樹枝圖（以蟬的形態親緣關係為基礎）：





#### 四、鳴唱音量與共鳴腔體積、腹瓣面積及鳴膜面積之關聯性：

從表一可以看出召喚音音量以騷蟬為最大，而草蟬的音量是最小的。共鳴腔體積亦是騷蟬最大，而草蟬最小。腹瓣面積及鳴膜面積都是召喚音音量第二大的臺灣熊蟬為最大，而草蟬的兩者面積皆最小。

表一：召喚音音量與共鳴腔體積、腹瓣面積及鼓膜面積的平均值與標準偏差。

物種	召喚音音量 (dB)	共鳴腔體積 (mm <sup>3</sup> )	腹瓣面積 (mm <sup>2</sup> )	鳴膜面積 (mm <sup>2</sup> )
騷蟬	97.940 (±0.317)	1.980 (±0.289)	0.989 (±0.242)	0.581 (±0.129)
臺灣熊蟬	94.733 (±0.380)	1.489 (±0.183)	1.938 (±0.381)	0.590 (±0.044)
高砂熊蟬	87.260 (±3.120)	0.999 (±0.134)	1.681 (±0.150)	0.481 (±0.013)
紅脈熊蟬	86.638 (±3.316)	0.946 (±0.229)	1.322 (±0.176)	0.406 (±0.114)
寒蟬	83.500 (±1.556)	0.410 (±0.045)	0.668 (±0.045)	0.270 (±0.046)
薄翅蟬	67.600 (±1.738)	0.370 (±0.017)	0.876 (±0.115)	0.258 (±0.061)
端黑蟬	61.511 (±1.760)	0.147 (±0.005)	0.561 (±0.116)	0.150 (±0.071)
草蟬	60.562 (±3.124)	0.073 (±0.017)	0.103 (±0.027)	0.092 (±0.014)

##### 1. 唧聲音量 (dB) 與共鳴腔體積 (mm<sup>3</sup>):

從圖 20 中可以清楚的看出八種蟬的共鳴腔體積與唧聲音量成正相關。其中，雖然草蟬 (60.562±3.124 dB) 的唧聲音量及端黑蟬 (61.511±1.760 dB) 的唧聲音量較為接近，但是二種蟬的共鳴腔體積與唧聲音量還是成正相關的。而雖然高砂熊蟬 (87.260±3.120 dB)、寒蟬 (83.500±1.556 dB) 及紅脈熊蟬 (86.638±3.316 dB) 的唧聲音量也是比較接近，但是這三種蟬的共鳴腔體積與唧聲音量還是正相關。比較特別的是寒蟬的共鳴腔體積 (0.410±0.045 mm<sup>3</sup>) 只比薄翅蟬 (0.370±0.017 mm<sup>3</sup>) 的大一點而已，但寒蟬 (83.500±1.556 dB) 的唧聲音量卻比薄翅蟬 (67.600±1.738 dB) 的大很多。

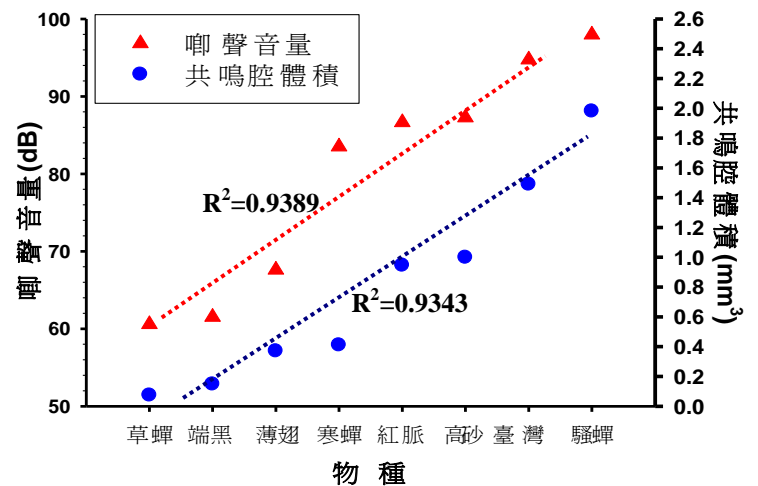


圖 20、唧聲音量與共鳴腔體積。

##### 2. 唧聲音量 (dB) 與腹瓣面積 (mm<sup>2</sup>):

從圖 21 中可以看出八種蟬的腹瓣面積與唧聲音量雖然大致上可以看出有正相關的趨勢，但是我們也發現端黑蟬 (0.561±0.116 mm<sup>2</sup>) 的腹瓣面積比草蟬 (0.103 ± 0.027 mm<sup>2</sup>) 增大

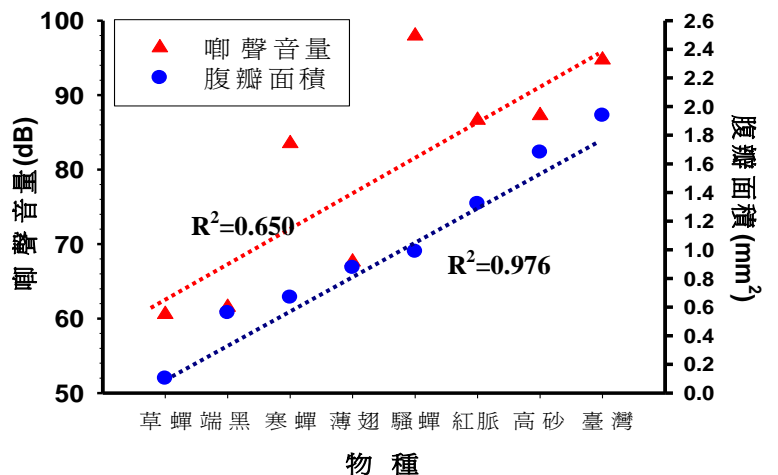


圖 21、唧聲音量與腹瓣面積。

許多，但是端黑蟬 ( $61.511 \pm 1.760$  dB) 的唧聲音量卻與草蟬 ( $60.562 \pm 3.124$  dB) 差不多。另外，我們也發現寒蟬 ( $0.668 \pm 0.045$  mm<sup>2</sup>) 與騷蟬的腹瓣面積 ( $0.989 \pm 0.242$  mm<sup>2</sup>) 並不大，但是寒蟬 ( $83.500 \pm 1.556$  dB) 與騷蟬 ( $97.940 \pm 0.317$  dB) 的唧聲音量都比和牠們腹瓣面積差不多的蟬明顯大很多。

### 3. 唧聲音量 (dB) 與鳴膜面積 (mm<sup>2</sup>) :

從圖 22 中可以清楚的看出八種蟬的鳴膜面積與唧聲音量成正相關 (付等, 2009)。其中較特別的是寒蟬的鳴膜面積 ( $0.270 \pm 0.046$  mm<sup>2</sup>) 只比薄翅蟬 ( $0.258 \pm 0.061$  mm<sup>2</sup>) 大一點而已，但寒蟬 ( $83.500 \pm 1.556$  dB) 的發聲音量卻比薄翅蟬 ( $67.600 \pm 1.738$  dB) 的大很多，這樣的結果與唧聲音量與共鳴腔體積的結果相似。另外，臺灣熊蟬 ( $0.590 \pm 0.044$  mm<sup>2</sup>) 的鳴膜面積比騷蟬 ( $0.581 \pm 0.129$  mm<sup>2</sup>) 的大一點，但是臺灣熊蟬 ( $94.733 \pm 0.380$  dB) 的唧聲音量卻比騷蟬 ( $97.940 \pm 0.317$  dB) 的唧聲音量低，但差異不大。

### 4. 鳴膜厚度 (μ m) 與最高及低頻率 :

從圖 23 中可以看出八種蟬中，臺灣熊蟬 ( $650.0 \pm 288.31$  μ m) 的鳴膜厚度最厚，而寒蟬 ( $180.0 \pm 51.23$  μ m) 的鳴膜最薄，而除了草蟬和紅脈熊蟬外，蟬的鳴膜厚度與最高頻率呈現負相關。另外，從圖 24 中也可以看出除了薄翅蟬、寒蟬和紅脈熊蟬外，蟬的鳴膜厚度與最低頻率也呈現負相關。草蟬 ( $350.0 \pm 106.07$  μ m) 及紅脈熊蟬 ( $295.0 \pm 141.86$  μ m) 的鳴膜較薄，但發音的音頻卻不高，而薄翅蟬 ( $468.75 \pm 195.12$  μ m) 的鳴膜厚度在八種蟬中屬於中等的厚度，但其最低音頻卻是相對較低的。

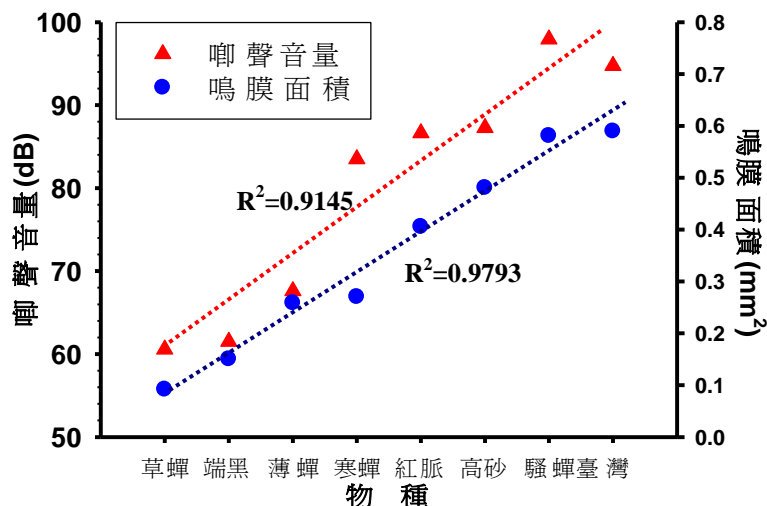


圖 22、唧聲音量與鳴膜表面積。

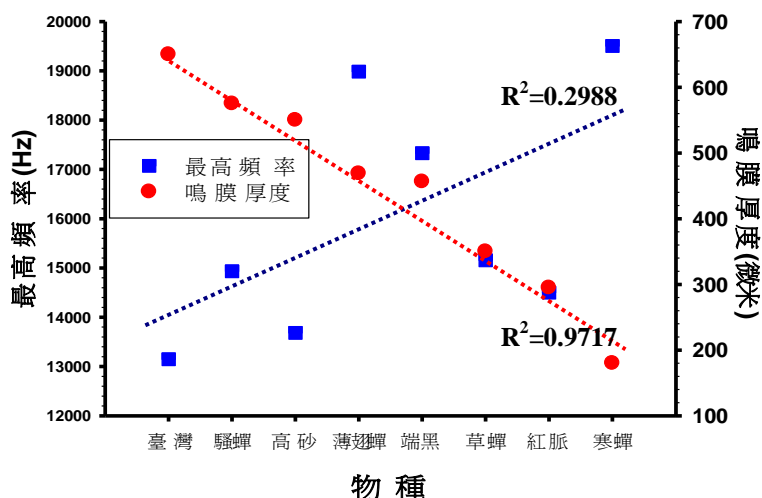


圖 23、最高頻率(Hz)與鳴膜厚度(μ m)。

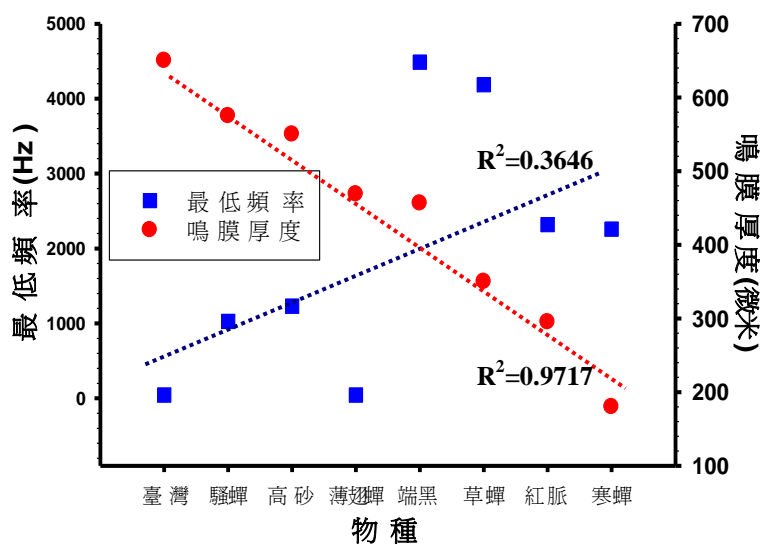


圖 24、最低頻率(Hz)與鳴膜厚度(μ m)。

## 5. 腹瓣外觀：

從圖 25 可以看出蟬的腹瓣形狀的變異性很大，例如雖然同為熊蟬屬（圖 25A、B、C），但其腹瓣之形狀仍有差異。我們依照腹瓣末端形狀大致將腹瓣分為兩大類：第一類是末端圓盾狀，包括高砂熊蟬、紅脈熊蟬、薄翅蟬、騷蟬、端黑蟬及草蟬，第二類是末端細、尖狀，包括臺灣熊蟬、與寒蟬。若依照腹瓣基部形狀分類，可以看出只有端黑蟬的靠近基部處凹陷形狀較為特殊。另外，我們觀察蟬的外觀時也發現，八種蟬中以騷蟬的腹瓣對鳴膜的包覆性最差，鳴膜有外露的情形，而且騷蟬的腹瓣相對較薄。

在觀察及實驗時也發現薄翅蟬的腹瓣很薄而易破，且相較於其他七種蟬，牠的比較細長（寬度較窄）。

在觀察與實驗時也記錄到八種蟬的腹瓣顏色：臺灣熊蟬顏色為深黑色；高砂熊蟬為橘色有時為褐色；紅脈熊蟬為偏深的褐色。薄翅蟬為淺綠或淺橘；寒蟬的多為黑色；騷蟬的多為淺綠色；草蟬多為黃綠色或黃褐色。

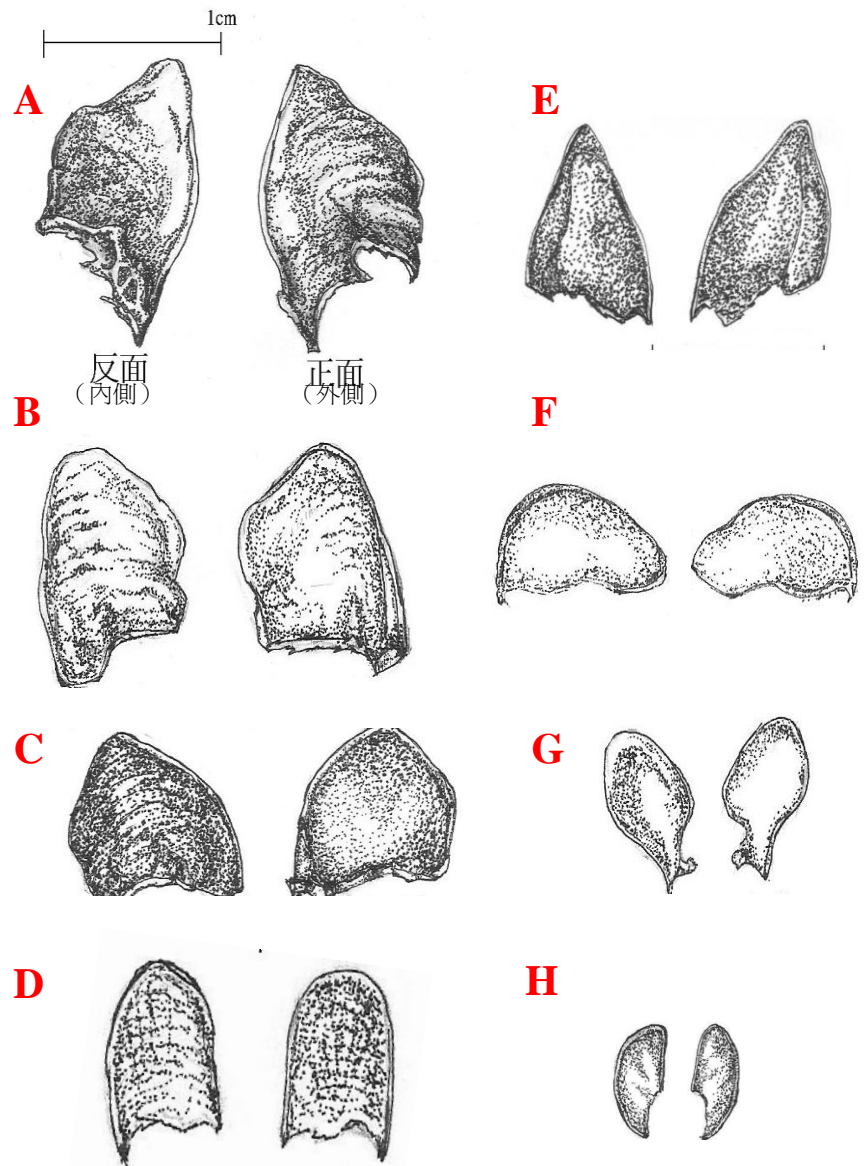


圖 25、八種蟬的腹瓣外觀繪圖：A：臺灣熊蟬、B：高砂熊蟬、C：紅脈熊蟬、D：薄翅蟬、E：寒蟬、F：騷蟬、G：端黑蟬、H：草蟬。



### 5. 鳴膜外觀：

從圖 26 可以看出蟬的鳴膜上具有明顯的摺皺。因此，我們用鳴膜上的摺皺數量將八種蟬來分可分為三類，分別為第一類（摺皺三～四條）：薄翅蟬、臺灣熊蟬、高砂熊蟬及紅脈熊蟬；第二類（摺皺五～六條）：寒蟬及騷蟬；第三類（摺皺七～八條）：草蟬及端黑蟬。另外，在鳴膜整體型態上也略有差異，我們也觀察到臺灣熊蟬、高砂熊蟬、紅脈熊蟬及寒蟬的鳴膜在下方處有明顯的圓形泡泡狀突起。

### 五、召喚音波形圖與蟬聲描述：

從圖 27 中可以看出八種蟬的波形圖均有所差異，尤其以騷蟬、寒蟬

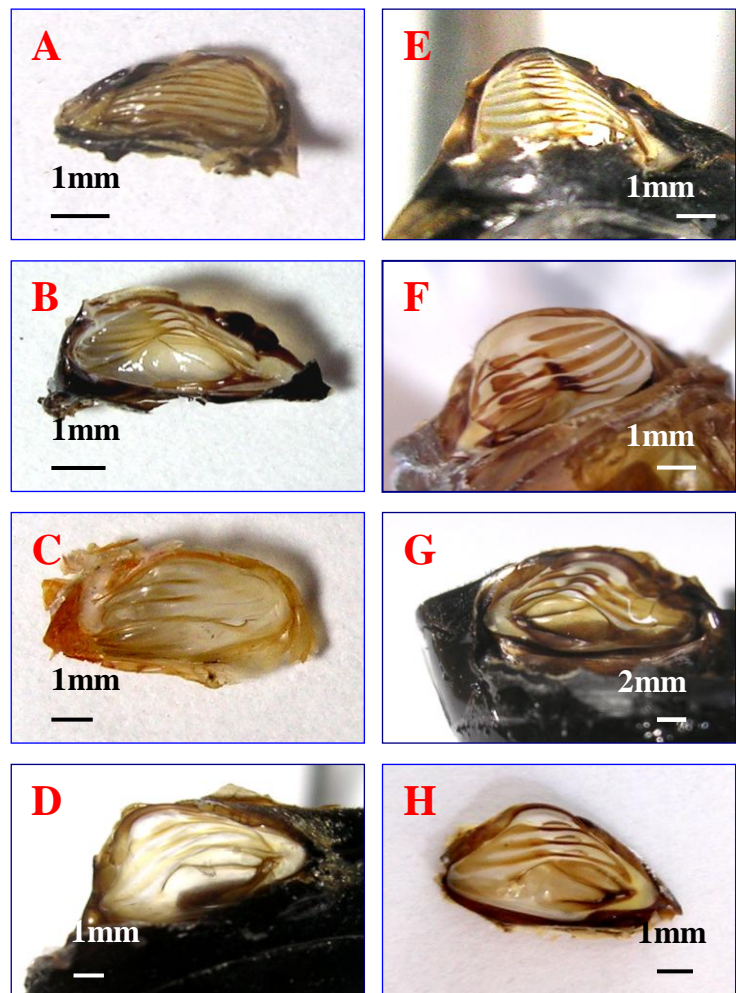


圖 26、八種蟬的鳴膜 (tymbal) 外觀：A：草蟬、B：寒蟬、C：薄翅蟬、D：高砂熊蟬、E：端黑蟬、F：騷蟬、G：臺灣熊蟬、H：紅脈熊蟬。

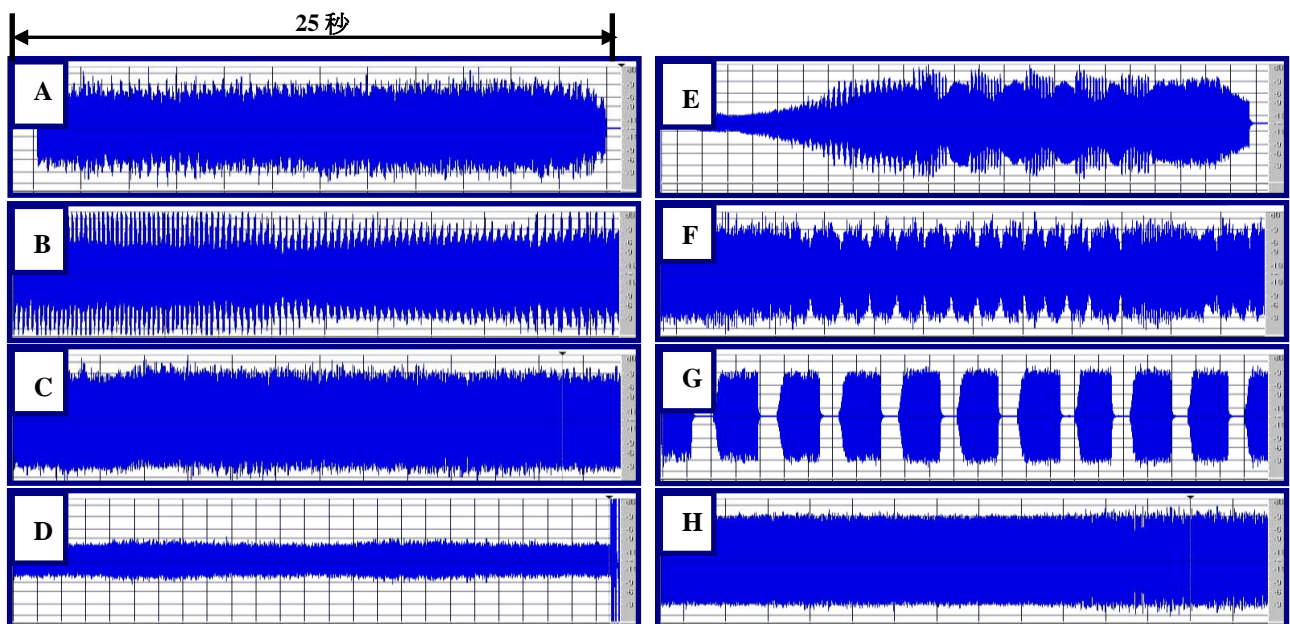


圖 27、八種蟬的召喚音波形圖。A：臺灣熊蟬、B：高砂熊蟬、C：紅脈熊蟬、D：薄翅蟬、E：騷蟬、F：寒蟬、G：端黑蟬、H：草蟬。



及端黑蟬的召喚音音調變化特別多樣。以下為八種蟬的召喚音描述說明：

- (一) 高砂熊蟬：召喚音只有一種音調，但會一陣較快的之後，接著較慢的，但並不會中斷。
- (二) 端黑蟬：召喚音只有一種音調，唧聲很平均，不會忽高忽低，且中間有間斷。
- (三) 草蟬：召喚音只有一種音調，唧聲很平均，不會忽高忽低，通常可以持續很久。
- (四) 薄翅蟬：召喚音只有一種音調，唧聲很平均，不會忽高忽低，鳴聲有種在室內迴盪的感覺，持續且不中斷。
- (五) 紅脈熊蟬：召喚音只有一種音調，聲音比其他種響亮，唧聲平均且不中斷。
- (六) 臺灣熊蟬：召喚音只有一種音調，聲音較他種響亮，由兩種音色交錯，起伏很大，頻率頗快，但到了唧聲末會逐漸慢下來且音量變小。
- (七) 寒蟬：召喚音有三種音調，第一段為平均且低的鳴聲，快達第二段時會慢慢開始有些起伏，第二段由迴旋音、一小段音調較高及一小段音調較低組合而成，變化性大，但仍有規律性，第三段為一長段的迴旋音，即將結束時會恢復平均的單音。
- (八) 騷蟬：召喚音有兩種音調，先一段從小聲到大聲的平均預備音後，便是有較大起伏的鳴聲和一小段平均的唧聲間隔。唧聲並不長，頂多 20 幾秒，中間會間隔約 5 秒，才再開始鳴叫。

## 六、蟬聲（草蟬）種類：

### (一) 草蟬三種聲音的波形圖：

在我們實驗調查過程中，我們只成功記錄到草蟬發出三種不同的聲音，其餘七種蟬則記錄到一～二種聲音，因此我們針對草蟬的三種聲音進行分析與比較。我們先針對三種蟬聲加以區別並查文獻與分類（圖 28）：①召喚音：雄蟬用於召喚雌蟬所發出的聲音（我們發現文獻中只有召喚音有資料可以比對）。②驚戒音：雄蟬受到驚嚇（例如遭遇掠食者、搖動飼養瓶或捕捉時）時所發出的聲音，這個聲音沒有文獻可以比對，但比對召喚音的波形圖可加以區別（圖 28A、B）。③驅趕音：雄蟬遭遇其他競爭對手（實驗時將 2~3 隻雄蟬飼養在同一個飼養瓶）時所發出的聲音，若將雄蟲與雌蟲飼養在一起則沒有記錄到此聲音，這個聲音也沒有文獻可以比對，但也可與召喚音的波形圖比對，加以區別（圖 28A、C）。從圖 28 中我們明顯看出草蟬這三種聲音的波形圖明顯不同、召喚音聲音持續時間頗長，且每 0.3 秒有 8 個振波，而驚戒音與驅趕音則較急短，每 0.3 秒都只有 4 個振波，但驚戒音與驅趕音在波形上還是有明顯的差異。

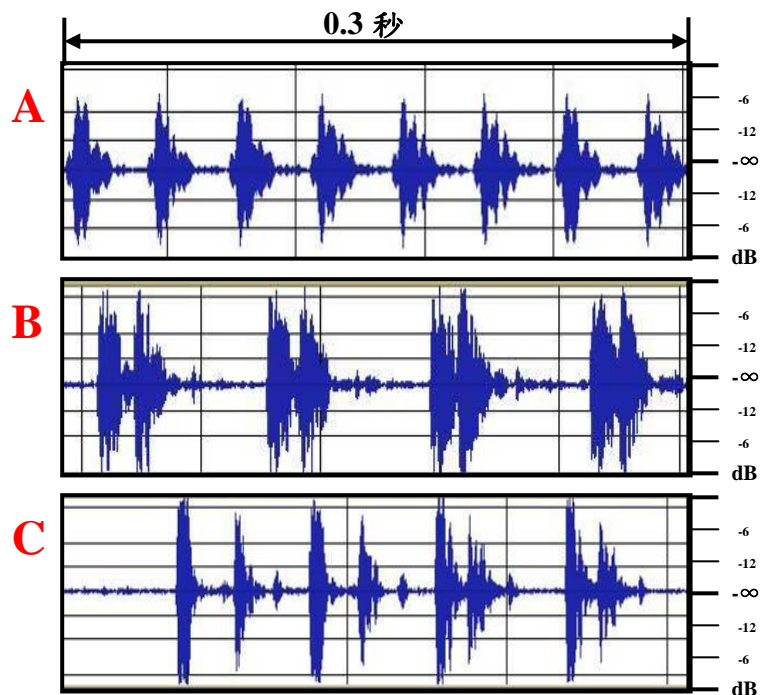


圖 28、草蟬 A：召喚音，B：驚戒音，C：驅趕音的波形圖。

## (二) 草蟬三種聲音的強頻圖與主要頻率範圍：

從圖 29 可以看出草蟬的召喚音、驚戒音及驅趕音的主頻範圍分別為  $7604.333 (\pm 182.240) \sim 11249.167 (\pm 620.036)$  Hz、 $7288.111 (\pm 316.814) \sim 10887.667 (\pm 985.800)$  Hz 及  $7930.833 (\pm 231.850) \sim 11128.333 (\pm 479.767)$  Hz。我們可以看出草蟬的三種聲音的主要頻率範圍差異並不大（約為 7000 ~ 12000Hz）。

雖然草蟬的三種聲音的主要頻率範圍差異並不大，但是我們發現草蟬的召喚音、驚戒音及驅趕音強頻圖都略有差異，尤其是召喚音與其他二種（驚戒音及驅趕音）差異最大，可以明顯看出草蟬召喚音的音頻強度變化範圍較小且與前後音頻強度較為連續漸變（強度逐漸升高或逐漸降低，藍色箭頭指處）。而驚戒音及驅趕音的強頻圖較為相似，音頻強度變化範圍較大，而且與前後音頻分界清楚（強度突然升高或突然降低，紅色箭頭指處）。

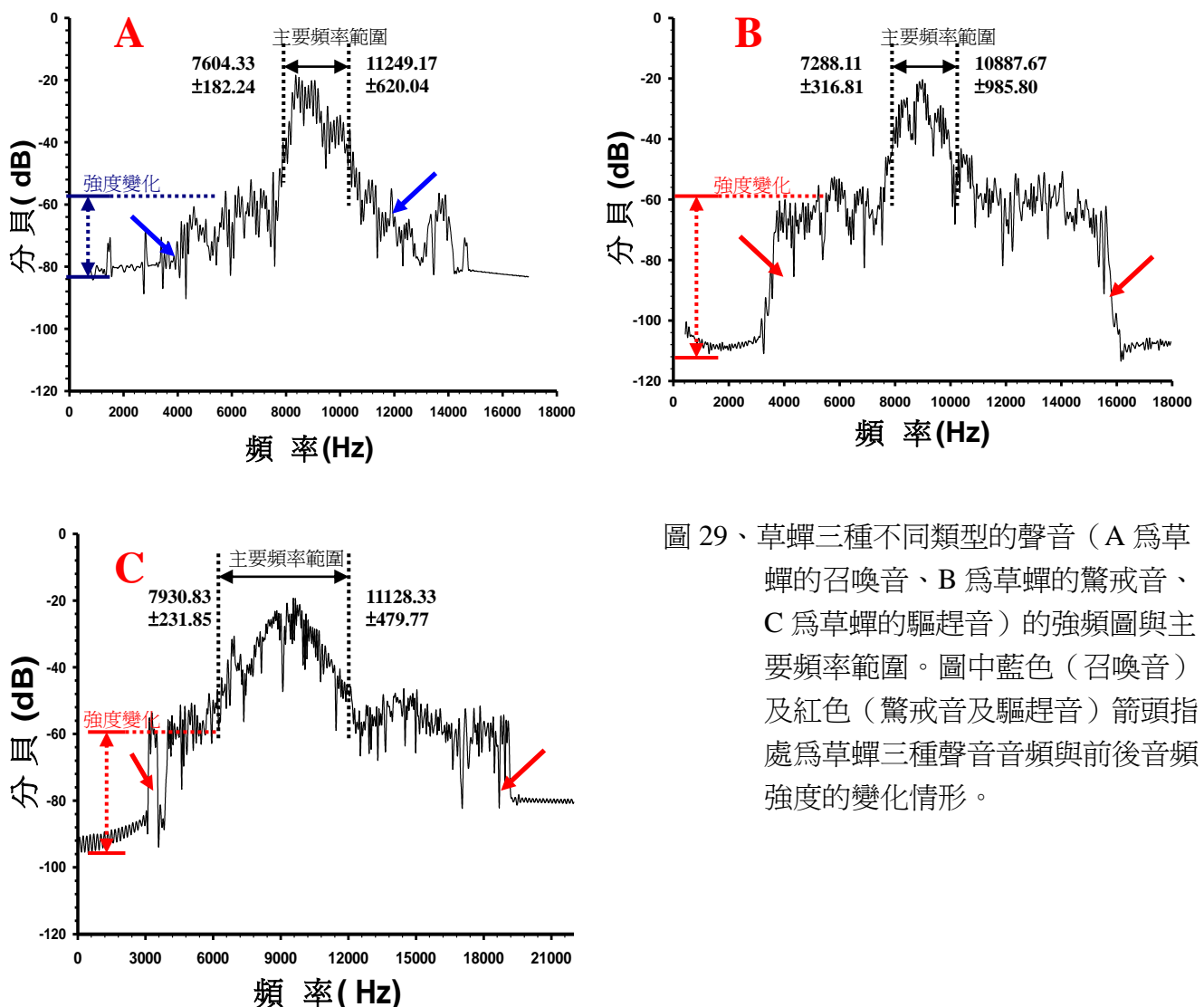


圖 29、草蟬三種不同類型的聲音（A 為草蟬的召喚音、B 為草蟬的驚戒音、C 為草蟬的驅趕音）的強頻圖與主要頻率範圍。圖中藍色（召喚音）及紅色（驚戒音及驅趕音）箭頭指處為草蟬三種聲音音頻與前後音頻強度的變化情形。

## (三) 草蟬三種聲音的頻率(Hz)特性（最高頻率、最低頻率與最強頻率）：

在圖 30A 中可以看出草蟬的驚戒音 ( $19120.0 \pm 593.5$ ) 與驅趕音 ( $19890.0 \pm 203.0$ ) 的最高頻率較高，分別可與召喚音 ( $15151.7 \pm 358.5$ ) 的最高頻率區別。而召喚音 ( $4184.2 \pm 203.2$ ) 的最低頻率（圖 30B）最高，可與驚戒音 ( $3423.8 \pm 328.6$ ) 與驅趕音 ( $3241.2 \pm 611.0$ ) 的最低頻率

區別；在圖 30C 中草蟬驅趕音 (9819.0±47.1) 的最強頻最高，可與召喚音 (9075.8±317.2) 及驚戒音 (8561.7±178.5) 的最強頻率區別。

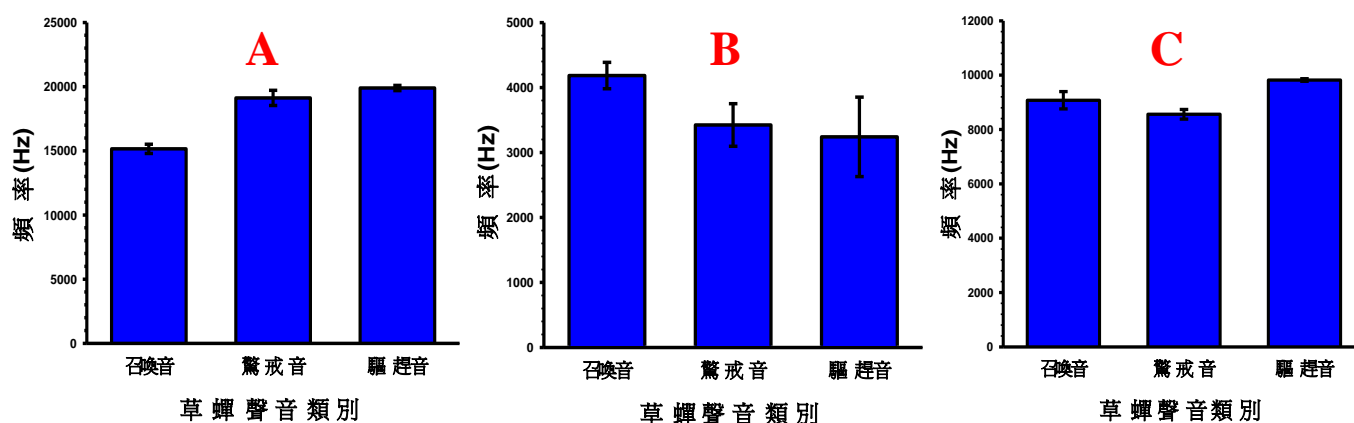


圖 30、草蟬召喚、驚戒及驅趕音的頻率特性 (A=最高頻率、B=最低頻率、C=最強頻率)。

#### (四) 草蟬三種聲音的唧聲時間 (秒)、唧聲間隔時間 (秒) 與振波比 (個 / 秒)：

由圖 31 可明顯看出其草蟬的三種聲音在時間特性有差異。從圖 31A 中可以看出草蟬召喚音 (51.76±23.79) 的唧聲持續時間明顯比驚戒音 (0.51±0.18) 與驅趕音 (1.74±0.25) 的唧聲持續時間長很多，可明顯區別。另外，我們也發現草蟬的召喚音連續無間斷 (圖 31C)，沒有唧聲間隔時間，而驚戒音 (0.35±0.06) 與驅趕音 (2.16±0.40) 的唧聲有間隔，可將草蟬的三種聲音相互區別。最後我們也可從圖 31C 中看出草蟬的驅趕音 (19.90±7.71) 的振波比明顯比召喚音 (133.75±14.48) 及驚戒音 (114.43±7.46) 小很多，其每秒所產生的振波平均還不到 20 個，可明顯區別。

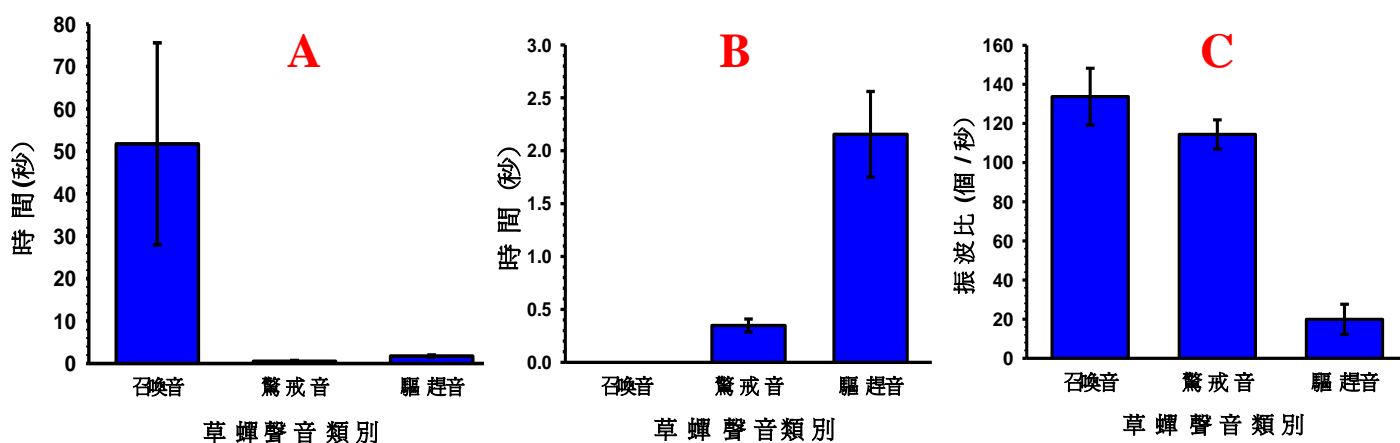


圖 31、草蟬召喚、驚戒及驅趕音的時間特性 (A=唧聲時間、B=唧聲間隔時間、C=振波比)。

### 七、再播放 (playback) 測試實驗

在召喚音再播放測試實驗的結果中 (表二.a) 發現若播放同種的召喚音時，八種蟬都有 55% 以上的測試對象發出召喚音，尤其以騷蟬和草蟬的發音比例最高 (≥80%)。若播放的召喚音來源與測試對象為不同物種時，騷蟬與草蟬有發出召喚音，而紅脈熊蟬與端黑蟬沒有鳴唱。我們分別播放來自臺灣熊蟬、高砂熊蟬及薄翅蟬的召喚音給騷蟬聽，騷蟬也只對來自薄翅蟬的召喚音有鳴唱。但是播放來自端黑蟬的召喚音給草蟬聽時，有 75% 的測試對象有鳴唱 (鳴唱的聲音為召喚音)。

表二、蟬聲再播放測試實驗：(a) 召喚音再播放測試實驗。(b) 驚戒音再播放測試實驗。(c) 驅趕音再播放測試實驗（紅色：聲音來源與測試對象為相同物種；藍色：聲音來源與測試對象為不同物種）。

(a)

播放的召喚音來源物種	播 放 對 象													
	臺灣熊蟬		紅脈熊蟬		高砂熊蟬		騷蟬		薄翅蟬		端黑蟬		草蟬	
	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)
臺灣熊蟬	60.0 (3/5)	40.0 (2/5)	0 (0/1)	100 (1/1)			0 (0/1)	100 (1/1)						
紅脈熊蟬			57.1 (8/14)	42.9 (6/14)										
高砂熊蟬					60.0 (3/5)	40.0 (2/5)	0 (0/1)	100 (1/1)						
騷蟬							80.0 (8/10)	20.0 (2/10)						
薄翅蟬							100 (1/1)	0 (0/1)	62.5 (5/8)	37.5 (3/8)				
端黑蟬											64.3 (9/14)	35.7 (3/14)	75.0 (3/4)	25.0 (1/4)
草蟬											0 (0/5)	100 (5/5)	87.5 (7/8)	12.5 (1/8)

(b)

播放的驚戒音來源物種	播 放 對 象									
	紅脈熊蟬		騷蟬		薄翅蟬		端黑蟬		草蟬	
	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)
紅脈熊蟬	0 (0/4)	100 (4/4)								
騷蟬			0 (0/1)	100 (1/1)						
薄翅蟬					0 (0/2)	100 (2/2)				
端黑蟬							100 (2/2)	0 (0/2)		
草蟬									100 (5/5)	0 (0/5)

(c)

播放的驅趕音來源物種	播 放 對 象	
	草蟬	
	鳴唱 (%)	不鳴唱 (%)
草蟬	100 (3/3)	0 (0/3)

在驚戒音再播放測試實驗的結果中（表二.b）發現若播放驚戒音來源與播放對象為同種的蟬時，端黑蟬與草蟬有發出鳴唱（召喚音），而紅脈熊蟬、騷蟬與薄翅蟬都沒有鳴唱。最後，在驅趕音再播放測試實驗的結果中（表二.c），因為只有草蟬錄到驅趕音，因此只針對草蟬測試，在三次的測試中，測試對象都發出了召喚音。



## 陸、討論

### 一、蟬聲頻率特性分析：

我們從蟬聲的頻率特性分析中可以看出八種蟬的最強頻率、最低頻率、最高頻率及主要頻率範圍有些物種有重疊情形，但是也有許多特性是可以相互區別的。參考文獻後我們更發現同為熊蟬屬的臺灣熊蟬、高砂熊蟬及紅脈熊蟬（陳，2007）的最高頻率與最強頻率十分相似，重疊性高。但是這三種蟬的最低頻率卻差異非常大，可以相互區別。更進一步檢視親緣關係發現，熊蟬屬以外的四種蟬中，以薄翅蟬與熊蟬屬的親緣關係較為接近，我們也可以看出薄翅蟬的最強頻率與熊蟬屬三種蟬重疊性高，且其最低頻率與臺灣熊蟬十分接近（最低頻率平均都是 40Hz 左右）。雖然薄翅蟬的最強頻率與熊蟬屬三種蟬重疊性高且最低頻率與臺灣熊蟬十分接近，但是我們也可以看出其最高頻率則明顯高於熊蟬屬的三種蟬，顯現出其聲音的區隔與多樣性。

另外，我們也發現在八種蟬中，端黑蟬與草蟬的親緣關係較為接近，從蟬聲頻率特性分析中我們也發現這兩種蟬在最強頻率、最低頻率、最高頻率都有很高的相似性，重疊性高，無法相互區別。在實驗中，我們還發現騷蟬與寒蟬都有一個共同的外部特徵：腹部中空。但我們比對騷蟬與寒蟬的頻率特性後發現，這兩種蟬在最高頻率、最低頻率及最強頻率都有明顯的差異，並沒有顯現出共同的頻率特性。

從強頻圖與主要頻率範圍的結果中我們可以看出熊蟬屬的三種蟬的強頻圖都十分相似，都有二段主要頻率範圍，其中只有高砂熊蟬的第一段主要頻率範圍的低頻處與其他兩種略有差異，其餘重疊性都很高。而薄翅蟬的強頻圖與主要頻率範圍則與熊蟬屬明顯不同，其主要頻率的低頻處明顯高於熊蟬屬，且只有一段明顯的主要頻率範圍。另外一組親緣關係較為接近的端黑蟬與草蟬在強頻圖與主要頻率範圍的結果中，可以明顯看出二者的強頻圖有明顯差異，且二者的主要頻率範圍在高頻處是相似的，但是端黑蟬在低頻處的頻率則明顯高於草蟬。而比對騷蟬與寒蟬的強頻圖發現，這兩種蟬的強頻圖十分相似，且主要頻率範圍也重疊。

綜合上述的蟬聲的頻率特性分析與討論，我們認為親緣關係愈接近的蟬，其蟬聲的頻率特性相似度較高，但是也因其他因素（演化造成構造上、體型上、同域性演化區隔等產生差異）而漸漸產生蟬聲頻率特性上的差異性（陳，2007）。因此，相信不同種蟬可藉由召喚音的頻率特性的差異來作為識別是否為同類的依據，而我們也可以利用此頻率特性交叉比對當作區別不同種的依據，更甚至比對出牠們的親緣關係（陳，2008）。

### 二、蟬聲時間特性分析：

我們從蟬聲的時間特性分析中可以看出八種蟬的 CD、ICD 及振波比有些物種有重疊情形，但是也有許多特性是可以相互區別的。我們像比對頻率特性一樣，比對了同為熊蟬屬的臺灣熊蟬、高砂熊蟬及紅脈熊蟬的蟬聲時間特性，發現三種蟬在 CD 上重疊性高，但是這三種蟬在 ICD 及振波比的差異非常大，而且紅脈熊蟬的唧聲連續無中斷，三種蟬在這二項時間特性上都可以相互區別。而與熊蟬屬的親緣關係較為接近的薄翅蟬，我們也可以看出薄翅蟬的振波比與臺灣熊蟬十分接近，但是在 CD 及 ICD 部分則與熊蟬屬有很大的差異。端黑蟬與草蟬親緣關係雖然較近，但是我們發現牠們的在 CD、ICD 及振波比都有很大的差異而。騷蟬與寒蟬在 CD 這個蟬聲時間特性上十分相似，重疊性高，但是在 ICD 及振波比上則有明顯差異。

綜合上述的蟬聲的時間特性分析與討論，親緣關係愈接近的蟬，其蟬聲的時間特性相似度較高，而且我們也發現蟬聲時間上的特性變異比頻率上的變異性更大性。因此，相信不同種蟬可藉由召喚音的時間特性的差異來作為識別是否為同類的依據，而我們也可以利用此時間特性交叉比對當作區別不同種的依據，更甚至比對出牠們的親緣關係。

### 三、以聲音特性製作八種蟬的聲音檢索表蟬聲親緣關係樹枝圖：

我們參考文獻中八種蟬親緣關係（圖 28、A）並依照前述的蟬鳴召喚音的頻率（最高頻率、最低頻率、最強頻率、主要頻率範圍）與時間（CD、ICD、振波比）特性分析結果重新繪製八種蟬的鳴音親緣關係樹枝圖（圖 28、B）。其實我們可以利用蟬鳴召喚音的頻率（最高頻率、最低頻率、最強頻率、主要頻率範圍）與時間（CD、ICD、振波比）特性分析結果繪製許多種的召喚音鳴音檢索表，但是因為無法確認哪些是屬於蟬聲的原始特徵或衍生特徵，因此只能依照文獻中八種蟬親緣關係進行重建，找出最符合目前蟬的親緣分類的聲音檢索與聲音親緣樹枝圖。而我們從這樣的聲音親緣樹枝圖可以看出，雖然大致

上是符合八種蟬親緣關係（楊，2010），但是仍有些無法符合部分蟬的親緣關係。（例如：騷蟬、寒蟬的與薄翅蟬的親緣上太接近，而紅脈熊蟬與另外兩種熊蟬的關係太遠），這可能是我們所測量分析的聲音特徵不足，將來如果可以利用在生物聲學方面更專業的分析軟體，相信應可找到更多細微的聲音特徵提供比對。應該更能符合蟬的親緣關係。

雖然這次利用蟬聲特徵無法完全重建蟬的親緣關係，但是這些蟬聲特徵還是提供了我們可以完全區別八種蟬的聲音特徵（陳，2008）。這也提供了我們分類檢索蟬聲的依據，希望未來可以更進一步學習編寫電腦程式，有朝一日有可能將蟬聲在野外錄製後經過電腦簡單分析後就可以直接判別蟬種了。

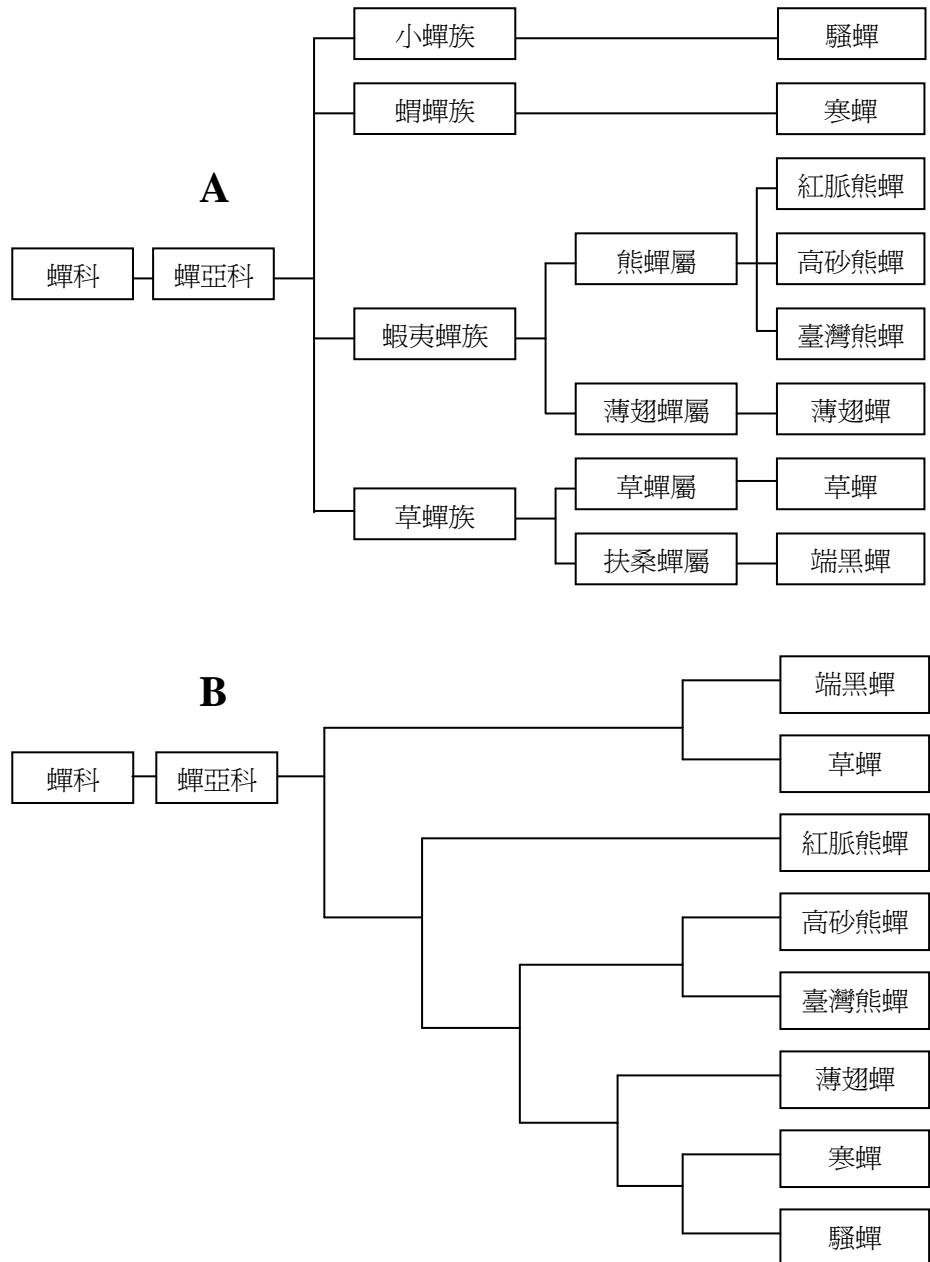


圖 28、A：八種蟬的親緣樹枝圖（文獻整理；陳，2007）。B：我們繪製最接近八種蟬親緣的鳴音親緣關係樹枝圖。

#### 四、鳴唱音量與共鳴腔體積、腹瓣面積、鳴膜面積及鳴膜厚度之關聯性：

從共鳴腔體積對召喚音音量之影響實驗中可發現共鳴腔體積大小與召喚音音量大小有正相關。由實驗數據中可知，草蟬與端黑蟬召喚音音量大小相差不大，共鳴腔體積端黑蟬卻比草蟬大一倍，而薄翅蟬的共鳴腔體積與端黑蟬差了一倍多，召喚音音量大小卻只差了一點（5~6dB）。因此，以整體來看共鳴腔體積越大，召喚音音量也越大是可以確定的，這可以說明共鳴腔體積大小對召喚音音量大小有明顯影響。

從鳴膜面積對召喚音音量之影響實驗中所得數據可以發現一點，蟬的鳴膜面積大小與召喚音音量大小有正相關，但有部分物種雖然仍有正相關之趨勢，但是並不明顯。例如：寒蟬的鳴膜面積只比薄翅蟬的大一點而已，但寒蟬的發聲音量卻比薄翅蟬的大很多（15 dB 以上），這樣的結果與唧聲音量與共鳴腔體積的結果相似。另外，臺灣熊蟬的鳴膜面積比騷蟬的大一點，但是臺灣熊蟬的唧聲音量卻與騷蟬的唧聲音量差不多。而據文獻指出鳴膜就是蟬發聲的重要的構造之一（陳，2007），因此，以整體來看鳴膜面積越大，召喚音音量也越大也是可以確定的（付等，2009）。

在文獻中（陳，2007）有提到腹瓣的功能之一為保護發音構造及調整音量大小，而我們從腹瓣面積對召喚音音量之影響實驗中可發現整體來說唧聲音量與腹瓣面積成正相關，但有部分蟬種的差異大，騷蟬為其中之一，騷蟬的腹瓣面積在八種蟬只排到第四而其召喚音音量卻為最大聲者，顯示對於騷蟬而言，還有比腹瓣對召喚音音量影響更大的，而另一種寒蟬的腹瓣面積比薄翅蟬來的小但音量卻較為大聲，然而這兩種蟬都有一共同特性為其腹部中空，可能因此增加了聲音共鳴腔體積而使音量增大。而這二種蟬的召喚音波形較為多變：騷蟬召喚音有兩段而寒蟬召喚音有三段不同的音色。而就保護發音構造而言，實驗的八種蟬有七種都有此項特徵，鳴膜被腹瓣完全覆蓋，但是騷蟬的鳴膜面積小，並無法完全將鳴膜覆蓋，有鳴膜外露的現象（陳，2006），值得深入探討。

從實驗結果中大致上可以看出鳴膜的厚度與最高頻率及最低頻率呈現負相關的關係，雖然有一些種並不符合此結果，在鳴膜切片的過程中有發現同一片鳴膜的位置不同其厚度也有可能不相同，且有些種還會有凹凸不平的情形，這可能是造成部分物種的音頻變化的原因。但大多數的實驗物種仍是符合負相關的關係，當鳴膜愈厚，發音的音頻相對較低，這與吉他的琴弦相似，欲細的發出的音頻較高，相反則發出的音頻較低是相似的。

綜合鳴唱音量與共鳴腔體積、鳴膜面積、鳴膜厚度及腹瓣面積之結果與討論後，我們認為共鳴腔體積、鳴膜面積及腹瓣面積都會影響到蟬的鳴唱音量，但是主要影響的是共鳴腔體積與鳴膜面積，鳴膜的厚度則影響到發聲的頻率變化，而腹瓣對鳴唱音量的影響較小，但它有另一個重要的功能，那就是保護發音構造（鳴膜）。

#### 五、鳴膜與腹瓣形態變化與蟬聲之關聯性：

我們又比對了蟬的腹瓣形狀及鳴膜的摺皺數量，發現蟬的腹瓣形狀與鳴膜摺皺數量雖然變化大，但是並無法歸納出其與鳴唱音量之關聯性。但是當我們比對蟬的鳴膜摺皺數與蟬的召喚音波形圖中發現，似乎蟬的鳴膜摺皺數愈多，蟬聲有較多的音調變化，例如當蟬的鳴膜摺皺數 $\geq 5$ 個（寒蟬、騷蟬、端黑蟬及草蟬）時的召喚音，除了草蟬外都有明顯的音調變化。當然其他蟬的召喚音還是會有音調變化，但是這三種蟬的變化則特別多樣。

## 六、蟬聲（草蟬）種類：

從實驗結果中我們發現草蟬的召喚音最高頻率最低，而最低頻率最高，因此我們推測也許草蟬是爲了延長鳴叫的時間所以如此，又因草蟬的三種聲音中以召喚音的鳴唱時間爲最長且鳴唱持續無間隔，我們更確信這個推測，而且三種聲音中以召喚音的振波比爲最大，就如同叫賣的小販般連續的、多次喊叫的聲音較容易吸引顧客的注意。驚戒音的唧聲間隔爲最短，推測其因爲是被驚嚇到所以唧聲時間較短，在生死一瞬間鳴叫聲自然短而急，所以唧聲間隔亦短，雖其最強頻率爲最低但卻也相當接近其他兩種鳴聲，爲了警告其他蟬所以最強頻率高、振波比也頗高。驅趕音爲在一次機會下我們因飼養器皿不足，而將兩隻以上的草蟬放置在一起偶然發現的，爲了驅趕其他蟬所以其最高頻率及最強頻率爲最高，當然爲了嚇著其他蟬必須強而有力且急促，所以其唧聲時間很短，但也許因爲一次放出了太多能量所以其唧聲間隔亦長，爲什麼振波比會如此小呢？就拿叫人走開爲例好了，如果說：「滾～滾～滾～（小聲連續）」就顯得較沒有魄力，但如果說：「滾！」（大聲加重音）就顯得很有魄力，蟬可能也是這樣，所以他不需要那麼多的音調變化（許多振波）。

## 七、蟬聲功能性探討（再播放測試實驗）：

從蟬聲再播放實驗中我們可以看出，同種蟬所發出的召喚音會引起同種蟬發出召喚音（陳，2001），這與文獻中所記錄的蟬具有群鳴性相吻合。而實驗中也發現不同種的蟬的召喚音則不一定能引起群鳴的效果，但仍有一些不同種的蟬會因此引起群鳴效應。在實驗中，我們發現，草蟬及騷蟬的群鳴性特別明顯，尤其是草蟬，在實驗過程中還有記錄到當家中有人使用吸塵器或吹風機時所產生的噪音也會引起草蟬發出召喚音，而且重複試了幾次都有相同的結果（發出召喚音）。而召喚音的功能到底是什麼呢？只是引起群鳴嗎？群鳴的作用呢？原本我們設計實驗時想把召喚音播給雌蟲聽，更甚至變化音調或播放音量，試圖瞭解雌蟬是否會被吸引，或被哪樣的召喚音吸引，但是雌蟬的成蟲壽命似乎比雄蟬短很多（或是我們的飼養方式不適合雌蟬），我們的召喚音還沒錄製好，雌蟬就死亡了（好幾隻雌蟬都有一樣的情形，不同種的蟬都一樣）。等到我們準備好已經到了季節末或抓不到雌蟬（捕捉雌蟬比雄蟬困難，因爲無法在白天用聽聲辨位的方式捕捉）。希望今年可以在進行這個實驗，以釐清這個問題。

而在驚戒音再播放實驗中則明顯沒有引起蟬的群鳴效應，這可能是因爲當有蟬受到驚嚇（例如遭遇掠食者而逃命）時，其他蟬接受警告而不發出聲音，避免暴露出自己停棲的位置而遭遇危險。而在草蟬驅趕音再播放實驗中雖然有引起草蟬的群鳴效應，但並無法確認其爲何發聲，也無法確認驅趕音的功能，因爲在前面中我們已經發現草蟬群鳴性極佳，連吸塵器或吹風機時所產生的噪音也會引起召喚音，因此，未來還可更進一步設計實驗，來確認驅趕音的功能性（楊等，1999）。

實驗中大致上可以確認蟬具有多種的聲音變化，且有明顯的發聲差異，引起其他蟬的發聲效應也有差異，且同種或不同種蟬的召喚音都可引起群鳴的效應，但仍無法很明確的指出其明確的功能性。未來應再進一步進行相關實驗，並改良實驗設計，或增加觀察蟬本身細微的行爲變化，以釐清蟬聲功能性的問題。

## 八、蟬聲多樣性探討：

綜合以上對於蟬的發音器構造與蟬聲各項特性的研究與討論，我們認爲蟬聲的特性



確實與其親緣關係有關聯性，且親緣關係愈接近的蟬彼此之間能找到較多相同的蟬聲特性，且利用蟬聲特性分析結果並參考文獻中八種蟬親緣關係（依照形態特徵分類）的聲音檢索表中也可以看出其相關性，但是仍無法和形態分類的親緣關係完全吻合。另外，再比對蟬的發音器構造與蟬聲各項特性時也有許多問題需要克服，因為無法完全確定其發音器構造的細微改變是否就影響到某個音頻的變化。但雖然如此，我們還是發現共鳴腔體積、鳴膜面積及腹瓣面積與鳴唱音量都成正相關。

當我們實驗結果分析後，我們發現蟬聲有好多的變化，就算是同一屬的蟬的蟬聲都有一些差異，為什麼蟬聲有這麼多變異呢？我們查了文獻後發現了我們實驗分析的八種蟬廣泛分佈在全臺灣全島的平地至低海拔山區，且成蟲活動月份與召喚音鳴唱的時間都有重疊現象，因此大家都生活在一起，當然聲音必需發展出多樣性，這樣才容易辨識同種物種，才容易吸引到同種雌蟲前來交配。對照此次實驗的結果發現此八種蟬的召喚音容易找到不同的聲音特性，這也說明了棲息於同一段時間與棲地內的蟬有較多的聲音多樣性。未來需要再增加秋、冬季節活動及不同海拔的棲息環境下的物種，這樣才能相互比較出是否棲息及活動時間重複性愈高的物種其聲音特性的多樣性也愈高，相反的，棲息及活動時間重複性愈低的物種其聲音特性的多樣性也愈低（陳，2006）。

我們也發現蟬聲的時間特性比在頻率的特性上有更多的變化（陳，2006）這可能是因為同屬的蟬在演化過程中要造成發聲構造的改變是需要累積到更多的遺傳上的變異，因此，若改變鳴唱時的時間特性應該是比較容易的，例如：一個人發出連續的「啊~~~~~」和發出間斷的「啊\_!啊\_!啊\_!啊\_!啊\_!」，在聽覺上應該是容易區別的，而且應該比改變一個人的喉部聲帶容易的多（施，1998）。

表三、八種蟬的棲息環境及成蟲活動月份，（文獻整理，陳，2006），淡藍色格子處表示在天然棲息環境有零星的活動紀錄，深藍色格子表示在天然棲息環境中的主要活動紀錄。

	棲息地 (文獻資料整理)	召喚音鳴唱時間 (文獻資料整理)	成蟲活動月份 (文獻資料整理)								
			3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
臺灣熊蟬	全臺灣平地至低海拔山區	白天				淡藍	深藍	深藍	深藍	淡藍	
高砂熊蟬	全臺灣平地至低海拔山區	白天				淡藍	深藍	深藍	深藍	淡藍	
紅脈熊蟬	全臺灣平地至低海拔山區	白天、黃昏				淡藍	深藍	深藍	淡藍		
薄翅蟬	全臺灣平地至低海拔山區	白天、黃昏		淡藍	深藍	深藍	深藍	深藍	淡藍		
騷蟬	全臺灣平地至低海拔山區	白天、黃昏		淡藍	深藍	深藍	深藍	深藍	淡藍		
寒蟬	全臺灣平地至低海拔山區	白天				淡藍	深藍	深藍	深藍	淡藍	
端黑蟬	全臺灣平地至低海拔山區	白天			淡藍	深藍	深藍	深藍	淡藍		
草蟬	全臺灣平地至低海拔山區	白天	淡藍	深藍	深藍	深藍	深藍	深藍	淡藍		

## 柒、結論

- 一、蟬聲的頻率特性分析中可以看出八種蟬的最強頻率、最低頻率、最高頻率及主要頻率範圍有些物種有重疊情形，但是也有許多特性是可以相互區別
- 二、我們從蟬聲的時間特性分析中可以看出八種蟬的 CD、ICD 及振波比有些物種有重疊情形，但是也有許多特性是可以相互區別的。
- 三、蟬聲的頻率特性分析與討論後，我們認為親緣關係愈接近的蟬，其蟬聲的頻率特性相似度較高。
- 四、聲音親緣樹枝圖大致上符合八種蟬親緣關係。
- 五、共鳴腔體積、鳴膜面積及腹瓣面積都會影響到蟬的鳴唱音量，但是主要影響的是共鳴腔體積與鳴膜面積，而腹瓣對鳴唱音量的影響較小，但它有另一個重要的功能，那就是保護發音構造
- 六、鳴膜的厚度影響蟬聲的音頻高低，鳴膜的厚度與發音頻率呈現負相關。
- 七、蟬的鳴膜摺皺數目愈多，蟬聲有較多的音調變化
- 八、可以確認蟬具有多種的聲音變化，且有明顯的發聲差異，引起其他蟬的發聲效應也有差異，且同種蟬的召喚音可引起群鳴的效應，但仍無法很明確的指出其明確的功能性。
- 九、蟬的棲息地與活動時間重疊性愈高，則蟬聲有較高的多樣性。
- 十、未來到野外出遊時利用儀器將蟬聲錄下，快速分析比對後就顯現出蟬的長相（照片）和名字（像有些手機可利用語音辨識查詢手機通訊錄中的電話號碼與照片一樣）的構想是可能成真的。

## 捌、未來展望

- 一、利用在生物聲音學方面更專業的分析軟體，分析更多細微的聲音特性（頻率及時間等）。
- 二、增加高海拔或不同活動時間的蟬，以分析蟬的棲息地、活動時間重疊性與蟬聲多樣性。
- 三、找更多文獻比對蟬的發聲器官與聲音特徵之關聯性。
- 四、找出蟬聲構造與蟬聲的原始特徵與衍生特徵。
- 五、找出更多的更多細微的聲音特性（頻率及時間）建立聲音檢索表及更符合蟬的親緣關係的蟬聲親緣關係樹。
- 六、改良實驗設計再播放，或增加觀察蟬本身細微的行為變化，以釐清蟬聲功能性的問題。
- 七、增加雌蟲為再播放對象，試圖瞭解雌蟬是否會被吸引，或被哪樣的召喚音吸引。
- 八、設計變化音調或播放音量的再播放實驗，更加釐清蟬聲功能性的問題。

## 玖、參考文獻

- 一、王翊丞，2007。第六屆旺宏科學展。蟋蟀對話—悅耳叫聲的秘密。
- 二、付榮恕、鄭延慧，2009。蟲言蟲語。豐閣專業文化出版社。
- 三、施河，1998。高中生物下冊。南一書局出版。
- 四、莊雪芬、鐘淑紅，1997。高中基礎生物。全華圖書出版。
- 五、林明瑞，1997。高中基礎物理。南一書局出版。
- 六、莊雪芬、蔡欣蓉、余宛真、施方蕓、陳婉茹、陳妙嫻，1999。高中選修生物上冊。全華圖書出版。
- 七、貢毅紳，1991。昆蟲學上冊，國立中興大學農學院
- 八、陳建宏，2001。國立成功大學生物學研究所 (Institute of Biology National Cheng Kung University) 碩士論文，北埔蝸之晨昏合唱模式與光週期對鳴叫活動的影響 (Crepuscular chorus pattern of *Taiwanosemai hoppenensis* and effects of photoperiods on calling activities)。
- 九、陳奕勳、吳哲榕，2004。第四十四屆中小學科學展覽會。唧唧復唧唧—蟋蟀的聲音分析與聲音行為探討。
- 十、陳振祥，2006。陽明山國家公園蟬科鳴聲之研究 (Analysis of Calling Song in Cicadas **【Hemiptera : Cicadidae】** from Yangmingshan National Park)。
- 十一、陳振祥，2007。台灣賞蟬圖鑑，天下文化出版。
- 十二、陳振祥，2008。國立台灣大學生物資源暨農學院昆蟲學系碩士論文 (Department & Graduate Institute of Entomology Collage of Bioresources and Agriculture National Taiwan University Master Thesis)，台灣產姬春蟬屬之親緣關係及其輻射適應與鳴聲探討 (Phylogeny of the genus *Euterpnosia***【Hemiptera,Cicadidae】** from Tawain : adaptive radiations and acoustic behaviour)。
- 十三、楊正澤、蔡尙熹，1999。鳴蟲調查技術及其應用—直翅目昆蟲 (Survey technique of acoustic insects and its application- Orthoptera **【Insecta】**)。
- 十四、楊正澤，1999。昆蟲分類及進化研討會專刊。蟋蟀聲學特徵分析，中興大學昆蟲學系。
- 十五、楊正澤，2010。鳴蟲展。台灣直翅目研究概況，中興大學昆蟲學系。
- 十六、William S. Romoser, John G. Stoffolano Jr. , 1994 ,The science of entomology, 3rd Edition.

## 【評語】 040708

研究目的在了解蟬聲頻率，時間之差異性，利用蟬聲檢索表分析是否有親緣關係。

1. 類似的研究已很多，創新稍嫌不足。
2. 蟬聲的不同其代表的意義為何？需更進一步探討。