

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生物科

第三名

030316

探究球鼠婦屬(*Genus Armadillidium*)的發聲
行為及對其行為模式的影響

學校名稱： 臺中市私立華盛頓高級中學(附設國中)

作者：	指導老師：
國二 涂采萱	江宏惟
國二 施郁琪	劉純如
國一 鍾承祐	

關鍵詞： 球鼠婦、生物聲學、卷積神經網路

摘要

昆蟲常藉由聲音或振動進行溝通，但等足目間的聲音研究相對稀少，正露丸鼠婦是少數能在受刺激時捲曲並發聲的陸生等足目，本研究探討其聲音特性及對其行為的影響。經頻譜分析後發現，叫聲的頻率多集中於2kHz、12kHz與16 kHz，且波形可分為急促型與規律型，研究中透過卷積神經網路進行影像辨識，建立鼠婦聚集行為與聲音頻率的關聯，在T字迷宮及J字迷宮中，正露丸鼠婦受16 kHz聲音吸引大於12 kHz與2 kHz，與對照組有顯著差異，我們提出正露丸鼠婦其聲音的頻率高低與刺激強度有關，且會導致鼠婦產生不同行為的假說，本研究期望可透過聲音進行生態監控或害蟲防治，本研究結果可以作為生物防治策略之參考。

壹、前言

一、研究動機

在自然界中，聲音不僅是動物溝通的工具，更可能是傳遞訊息的重要關鍵。然而，大多數陸生等足目(Isopoda)並不具有發聲能力。我們閱讀文獻發現，正露丸鼠婦(*Armadillidium officinale*)是其中極少數已知能夠發聲的陸生節肢生物。參考Giuseppe Montesanto(2018.)的文獻發現，正露丸鼠婦在受到威脅時，會透過捲曲行為發出聲音，其聲音可能與個體間的溝通或防禦機制等息息相關(Sofia Cividini, Spyros Sfenthourakis& Giuseppe Montesanto, 2019.)然而，學界至今仍未能完整解釋其發聲行為意義，這成為生物行為學上一個未解的謎題。為了揭開這個未知的領域，我們希望藉由分析正露丸鼠婦叫聲的不同波形與頻率，並透過這次的研究更加了解球鼠婦屬(*Genus Armadillidium*)的發聲行為及對其轉向行為的影響，我們期待這項研究能為生物聲學(Bioacoustics)與行為生態學提供新的研究視角。

二、目的

(一) 探討正露丸鼠婦受到刺激後是否會發出聲音。

1. 觀察正露丸鼠婦捲曲型態及構造
2. 探討鼠婦發聲的頻率及波形

(二) 探討聲音對鼠婦聚集行為的影響

(三) 探討聲音的波形及頻率是否會影響鼠婦T字路口的選擇

(四) 探討聲音的波形及頻率對鼠婦交替性轉向反應的影響

三、文獻回顧

(一) 背景介紹

鼠婦是一種屬於潮蟲亞目(Oniscidea)的小型陸生節肢動物，是少數能夠適應陸地環境的甲殼類動物，廣泛分布於全球各地的潮濕環境。其名稱又稱為潮蟲、西瓜蟲，英文俗名為 Woodlice，鼠婦的分類地位如下：

甲殼動物亞門 Subphylum Crustacea

軟甲綱 Class Malacostraca

等足目 Order Isopoda

潮蟲亞目 Suborder Oniscidea

鼠婦的身體呈扁平狀，依種類不同體長約 1.5cm~2.5cm，胸部由 7 個胸節 (pereonite) 組成，有七對胸肢 (pereopod)、五個腹節(pleonite)及兩對尾肢 (uropod)，具二對觸角 (antenna) 及咀嚼式口器。雄性第一及第二腹節具生殖突；雌性胸節則具抱卵板 (oostegite) 位於胸節板基部，供卵及幼體孵化。喜愛吃腐植質，屬於雜食性動物，在生態系中為分解者(Decomposer)的角色。牠生長在陰暗潮溼處，具有負趨光性(Cloudsley-Thompson, J. L., 1956)，適合其生長的溫度及溼度因種類而略有差異。且鼠婦在行進時有交替性轉向反應 (turn alternation reaction) 的行為。

在本次研究中，我們選用二種鼠婦進行實驗，分別是正露丸鼠婦 (*Armadillidium officinale*) 及法國四紋球鼠婦 (*Armadillidium gestroi*)。正露丸鼠婦屬於中小型鼠婦，分布於法國、德國、及西班牙等地。正露丸鼠婦在遇到危險時能夠完全捲曲成球狀，而因為當牠們捲曲時外型與日本大幸藥品株式會社的腸胃用藥正露丸(せいろがん)十分相似，所以在台灣多稱其為正露丸鼠婦。



圖1.腸胃用藥正露丸



圖2.正露丸鼠婦捲曲狀態

(圖1.引用自wikipedia)

(圖2.引用自AntsScandinavia.com - All Rights Reserved,2020.)

另一種為法國四紋球鼠婦，其發源於法國。其體型較大，最大可達到 2~2.5cm，且身體上具有黃色或淡黃色斑點。身體具有較光滑的甲殼，在受到威脅時如同正露丸鼠婦一般也能夠完全捲曲成球狀以便保護自己，下表為兩種鼠婦的比較：

鼠婦名稱	正露丸鼠婦 (<i>Armadillidium officinale</i>)	法國四紋鼠婦(<i>Armadillidium gestroi</i>)
鼠婦外型		
捲曲行為	有	有
發聲行為	有	無
體長	平均1.28公分*	平均1.53公分*
體寬	平均0.62公分*	平均0.57公分*

*本研究中所飼養鼠婦的平均體長、體寬

表1.正露丸鼠婦和法國四紋球鼠婦之差異(作者繪製、拍攝)

(二) 文獻探討

本研究中想探討正露丸鼠婦為何發出聲音，以及該聲音對於鼠婦間溝通是否具有意義，我們查閱文獻的過程中發現，生物學家對於探討動物所發出的聲音及探討其意義具有獨特的研究領域，其稱為生物聲學(Bioacoustics)。最早由科學家Ivan Regen提出，他開始系統性研究昆蟲的叫聲，近代我們除了討論昆蟲發出的聲音外，科學家也進一步分析當動物發出的聲音是如何透過基質傳遞的振動來進行溝通與行為表現，因此逐漸形成新的領域稱為生物振學(Biotremology)。與生物聲學(Bioacoustics)的區別在於，生物聲學研究的是透過空氣或水傳播的聲波，而生物振學則專注於基質的振動。

動物產生振動信號的方法，主要透過摩擦(Stridulation)、敲擊(Percussion)及顫動(Tremulation)。而動物感知振動的方法主要透過受器，例如大多數昆蟲腿部的受器、哺乳類的骨傳導等。振動信號可能用來傳達不同的訊息，如利用振動吸引異性，達到求偶的目的，如螳螂和螞蟻。亦可用來作為禦敵信號，利用振動警告掠食者或同伴，如白蟻和蜘蛛。某些社會性昆蟲也會透過振動協調群體行動。

一項文獻進一步探討了關於正露丸鼠婦(Armadillo officinalis)的叫聲，探討其是否像昆蟲一樣，能夠利用聲音和基質振動進行溝通和禦敵。文獻指出正露丸鼠婦會在「捲曲」行為中利用位於第四和第五節步足前突上的鱗片邊緣發出摩擦音。文獻中的實驗結果顯示，正露丸鼠婦會遠離聲音振動源，表現出對威脅的防禦反應。學者認為摩擦音可能是提醒附近同類的警告信號，而對振動的高度敏感性則可以幫助牠們提前預測危險(Sofia Cividini,2019)。然而對於正露丸鼠婦的叫聲並沒有詳細的分析。

目前學界對於正露丸鼠婦的叫聲尚未進行完整的分析，且對發聲的目的以及與交替性轉向反應之間的關聯並未有學者解釋。因此我們想藉由此研究來更進一步探討聲音對於鼠婦的影響。

別人研究與我們的比較

Sofia Cividini等人記錄到了9 kHz、單一波形的正露丸鼠婦叫聲。研究結果表明，正露丸鼠婦對振動有著明顯的反應，它們會遠離振動源。他們認為正露丸鼠婦的發聲行為可能是在聚集的過程中，用來阻止掠食者捕食的次級防禦形式，並且可能被附近的同類視為警告訊號。

然而在我們的實驗中發現，正露丸鼠婦的叫聲有不同的頻率及波形，且不同頻率及波形的叫聲對其以及法國四紋鼠婦的影響皆不相同；高頻的鼠婦聲音會吸引並聚集正露丸鼠婦，而較低頻的叫聲則對兩種鼠婦皆沒有統計上的顯著差異。

(三) 交替性轉向反應 (Turn alternation reaction)

交替性轉向反應被發現於草履蟲、鼠婦、麵包蟲等無脊椎動物中，此種反應會使生物總是朝著與先前轉彎相反的方向轉彎(方誌鈞，民111)。當鼠婦移動時，若連續遭遇左、右轉的T字路口，其轉向方向會與上一次相反(方誌鈞，民111)。此外，交替性轉向反應可以使鼠婦進行有效率的移動，避免移動回到起點，有利於從原先不適合生存或是有天敵的地方逃離，若鼠婦叫聲為一種警告訊息，交替性轉向反應的頻率應會隨之提高。

四、數據處理

(一) 深度學習與卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)

在實驗中我們必須計算每段時間各區域有多少鼠婦分布，一開始我們將照片中每個區域以人工計算在進行加總，但我們發現隨著我們實驗時間拉長，人工計算漸漸不符合效率，因此我們找尋其他方式來取代人工計算，我們首先考慮使用ImageJ及Tracker，但是因為ImageJ是圖像處理軟體，無法一次處理大量的資料；然而Tracker是影像追蹤軟體，雖然可以將鼠婦在時間內的移動途徑繪製出來，但無法同時追蹤高達30隻的鼠婦。我們在文獻搜尋時發現呂顥天(2022)曾藉由卷積神經網路來判讀核磁共振影像中多發性硬化症的病兆，我們發現此方法剛好能解決我們所面臨判讀鼠婦的問題。所謂深度學習(Deep Learning)是人工智慧的一個重要分支，它透過類神經網路(Neural Network)來模擬人類視覺系統，讓電腦能夠自動學習並識別圖像中的特徵。近年來，深度學習已經廣泛應用於各種圖片辨識(Image Recognition)的領域。在處理圖像部分主要使用卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)來進行，透過多層的運算學習影像特徵。

CNN會先比對影像各個位置，這些局部位置稱為特徵(feature)。接下來會進行將該特徵比對整張影像，計算整張圖片裡有多少相符的特徵，這種篩選機制的數學原理被稱為卷積(convolution)。而池化(pooling)一個壓縮圖片並保留重要資訊的方法，它可以將一張圖片池化成更小的圖片。最終我們會得到一樣數量、但包含更少像素的圖片，有助於減少運算的時間。系統不斷進行卷積及池化直到整張照片處理完畢，再依據權重來投票兩張照片是否一致，這種深度學習可以應用在圖像分類、人臉辨識、物

件偵測及自動駕駛上，也在本研究中協助我們判斷影像中的鼠婦數目。

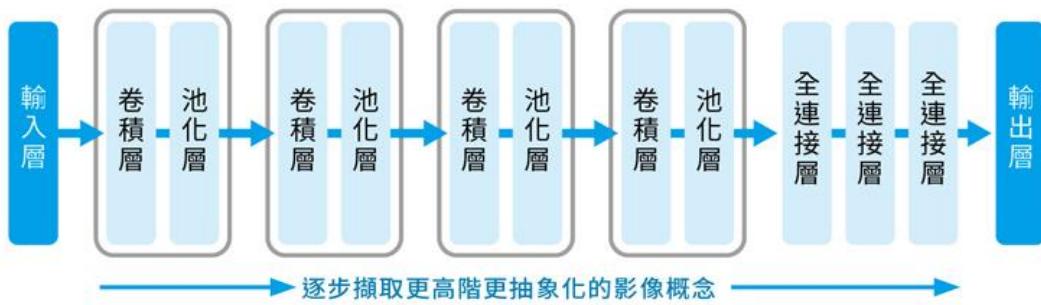


圖3.CNN流程圖

(引用AI大局：鳥瞰人工智慧技術全貌，重塑AI時代的領導力，旗標，2020年08月。)

貳、研究設備及器材

一、研究儀器與設備

Raspberry Pi 4B、25 cm × 17 cm 飼養盒、3M透氣膠帶、水苔、園藝用培養土、BOYA BY-M1Pro 麥克風、SONY有線耳機、SONY ICD-PX470錄音筆、IPEVO V4K 視訊教學攝影機、解剖顯微鏡、複式顯微鏡、150mm圓形培養皿、150mm濾紙、喇叭、電腦、27mm壓電片、三軸加速度計MMA7361、UCA222 錄音介面。

二、軟體及開發環境

Google Colaboratory、Yolo v5、labelImg、Audacity、Sound Measurement System 聲音量測系統、Arduino IDE。

參、研究過程或方法

一、鼠婦飼養環境

我們在鼠婦社團與社員購買自行繁殖的正露丸及法國四紋鼠婦，並將鼠婦分別以體寬區分成四盒，正露丸鼠婦體寬 0.5cm（含）以上視為體型大，體寬 0.3cm以下視為體型小；法國四紋體寬0.5cm（含）以上視為體型大，體寬0.3cm以下視為體型小。飼養在 17×25 cm 的塑膠飼養盒中，並在飼養盒內鋪設園藝用土壤和放置木頭，定期添加飼料和羊蹄甲。並放置墨魚骨，讓鼠婦可以補充鈣質，幫助鼠婦脫皮。為了維持環境的濕度，我們設置水苔且定期加

水。飼養盒的側面有開透氣孔，我們在內側貼上透氣膠帶以避免鼠婦脫逃。將飼養盒放入恆溫培養箱中(光照12hr、溫度25°C)保持適合鼠婦的溫度及日照。

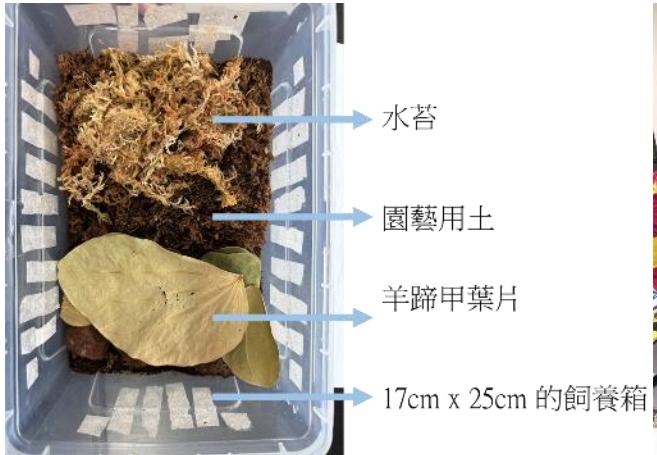


圖4.飼養箱內部配置 (作者拍攝)



圖5.作者們維護飼養盒環境 (作者拍攝)

二、 鼠婦外觀拍攝

為了觀察鼠婦捲曲的形態，我們利用手機連接解剖顯微鏡的目鏡對正露丸鼠婦和法國四紋鼠婦進行外觀的拍攝，觀察不同鼠婦的捲曲型態，分別拍攝其腹部、背部及有、無捲曲的側面，藉以觀察正露丸鼠婦可能的發聲構造及兩者間差異。



圖6.作者利用顯微鏡觀察鼠婦外觀(作者拍攝)

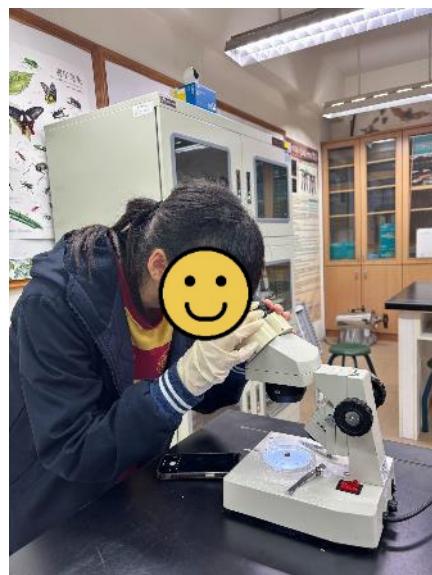


圖7.作者利用顯微鏡觀察鼠婦外觀(作者拍攝)

三、錄音設備及方式

我們想了解不同大小的正露丸鼠婦其聲音是否有差異，因此我們將正露丸鼠婦依照體寬分為大、小兩種類別。先查詢文獻中正露丸鼠婦平均體寬紀錄，並將區分為兩個區間大為0.5 cm(含)以上，小為0.5cm以下，不同大小隨機各採10隻進行錄音。我們同時使用麥克風及自製 Ilia Gjonov (2024) 發表的壓電片接觸式麥克風紀錄鼠婦捲曲時發出的聲音，先以用手指搓揉刺激正露丸鼠婦並以裝置中的鑷子僅輕夾背甲不夾軀幹，並使用錄音筆(SONY ICD-PX470)連接外置麥克風同時進行錄音 (24位元速率192kbps)，另一方面將壓電片連結UCA222錄音介面以Audacity軟體同時進行錄製。

(一) 壓電片接觸式麥克風

接觸式麥克風的原理是因為基質振動時會直接帶動壓電片彎曲，進而產生電壓變化，其頻率響應為2 kHz~5 kHz且對共振點附近的頻率增益可高出數十 dB，因此可以收錄到不同於一般麥克風的低頻。經過錄音並進行頻譜分析後，發現**鼠婦透過基質傳遞的振動多分布在2 kHz左右**。

(二) 收音麥克風

一般的麥克風其原理為聲波經空氣傳到振膜，主要量測對象為空氣中的聲壓 (P a)，其頻率響應範圍廣可從30 Hz – 18 kHz，但容易受到風切、環境回響及背景音影響。這項實驗為確保能收錄鼠婦完整聲音頻率，故採用兩種方式收錄聲音，避免叫聲被環境噪音掩蓋。因此透過其所收錄到的鼠婦聲音多分布在10 kHz以上。

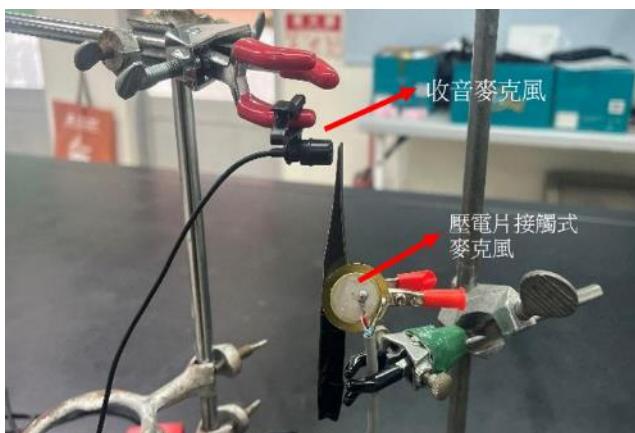
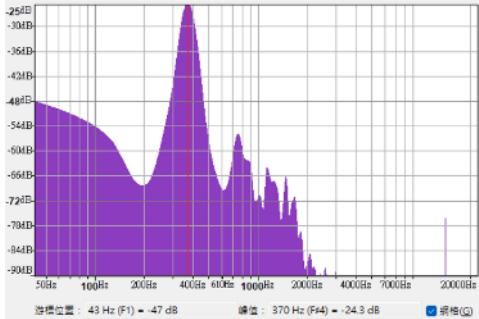


圖8.壓電片接觸式麥克風裝置(作者拍攝)



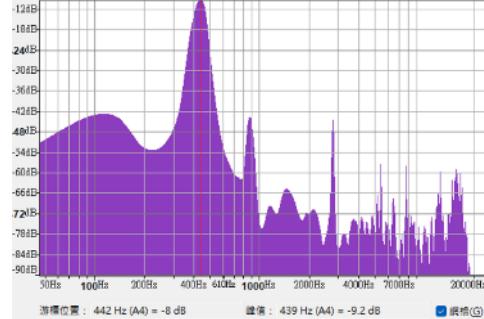
圖9.作者使用軟體分析鼠婦叫聲(作者拍攝)

實驗前我們先利用麥克風各錄製環境中的背景音進行FFT頻譜分析，並為確保自製的接觸式麥克風能正確紀錄鼠婦發出的頻率，我們實驗前會以440Hz音叉進行儀器校正，如圖10及圖11，我們發現不管藉由接觸式麥克風或是一般麥克風皆能記錄正確頻率。



接觸式麥克風(壓電片)

圖10.接觸式麥克風頻譜圖分析(作者繪製)



麥克風(BOYA BY-M1Pro)

圖11.收音麥克風頻譜圖分析(作者繪製)

四、鼠婦叫聲處理及頻譜分析

為了分析鼠婦發出的聲音，我們使用Audacity軟體將錄製的鼠婦聲音檔案剪裁並輸出為Wav格式，之後利用聲音量測系統將聲音以快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)繪製頻譜圖，並以實驗室背景頻率進行濾波(3000Hz)，將濾波後的聲音檔案作成時頻圖，分析其振幅與波形，並記錄最高波峰的頻率。

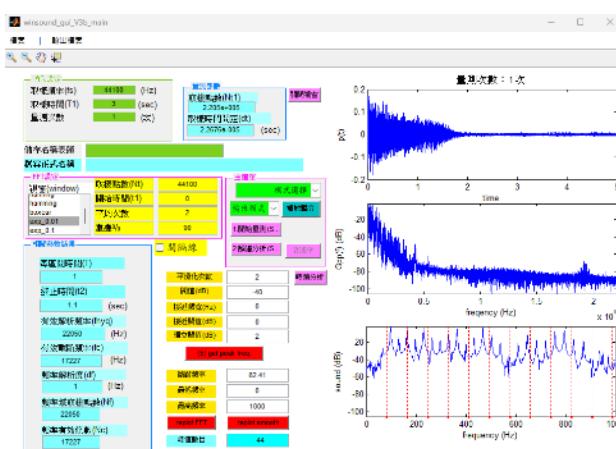


圖12.時頻圖及頻譜圖分析(作者繪製)

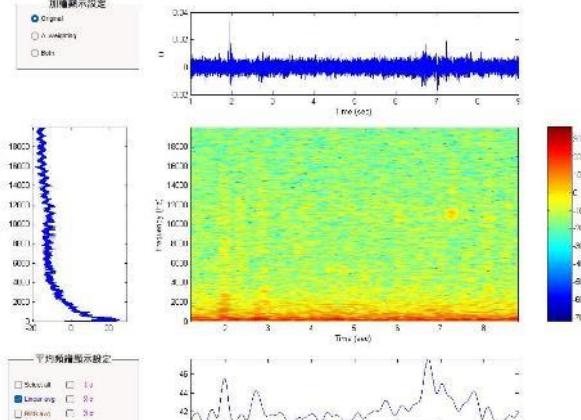


圖13. 實驗室背景音(作者繪製)

五、叫聲對不同鼠婦聚集行為的影響實驗

我們想探討正露丸鼠婦的叫聲對於正露丸鼠婦行為是否有影響，甚至對其他種鼠婦是否有相同影響，因此進行此實驗。

(一) 【實驗步驟】

1. 將長 37cm、寬 26.5cm、高 21.7cm 的紙箱中貼滿吸音海綿，並放置另一塊吸音海綿在底部，使其平整可放置音響於上方；將IPEVO V4K 視訊教學攝影機連接平板，固定時間進行拍攝照片。
2. 將鼠婦自飼養盒中取出，放置於15cm培養皿中清除身上土屑，再放置入清理乾淨的實驗用15cm培養皿裡分為36格的柵欄之中，以確保鼠婦實驗前在培養皿中分布均勻。
3. 培養皿放置於鐵架上，耳機則以黏土固定於於培養皿側邊下方。

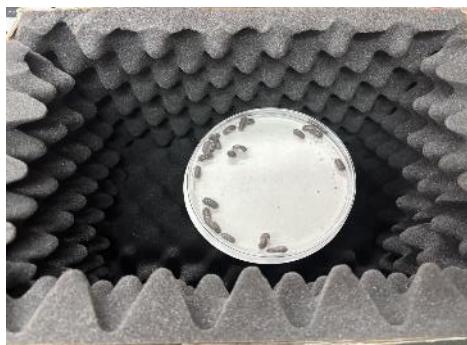


圖14.實驗裝置圖(作者拍攝)

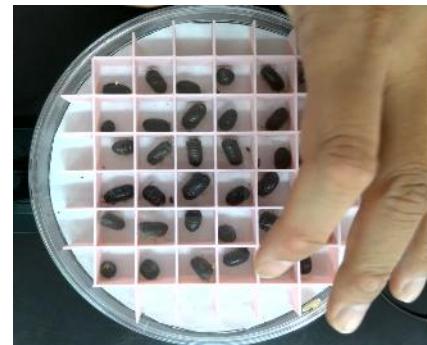


圖15.實驗裝置圖(作者拍攝)

4. 將柵欄拿起，並靜置15分鐘紀錄鼠婦的移動或是聚集情形，如圖14。接下來以電腦利用耳機撥放叫聲，控制固定的音量撥放大小。並紀錄鼠婦接收到叫聲後15分鐘內的移動情形。
5. 將實驗時間內所拍攝的照片上傳至雲端空間以便後續分析。



圖16.作者製作隔音箱(作者拍攝)



圖17.作者製作隔音箱(作者拍攝)

六、利用卷積神經網路（Convolutional Neural Network, CNN）進行影像辨識

為了處理鼠婦聚集實驗中產生的大量照片，我們選擇使用圖像辨識軟體You Only Look Once (YOLO)來進行深度學習，並將Yolo v5建置在免費的Google colab平台上。我們先使用 LabelImg影像標註工具標記正露丸鼠婦、法國四紋鼠婦的實驗照片各150張，並進行訓練模型，使程式能自動分辨培養皿中8個區域的鼠婦種類及數目，搭配定時拍照系統使我們可以計算每個時間點鼠婦在培養皿中的分布狀況。

(一) 【實驗步驟】

1. 先在Google Colab中架設Yolo，程式碼如下：

```
[ ] !pip install -U -r /content/drive/MyDrive/yolov5/requirements.txt
```

2. 利用LabelImg 標記正確的兩種鼠婦照片各150張並上傳至系統進行訓練，程式碼：

```
!python /content/drive/MyDrive/yolov5/train.py --img 640 --batch 16 --epochs 50 --data /content/drive/MyDrive/yolov5/woodlice.yaml --we
```

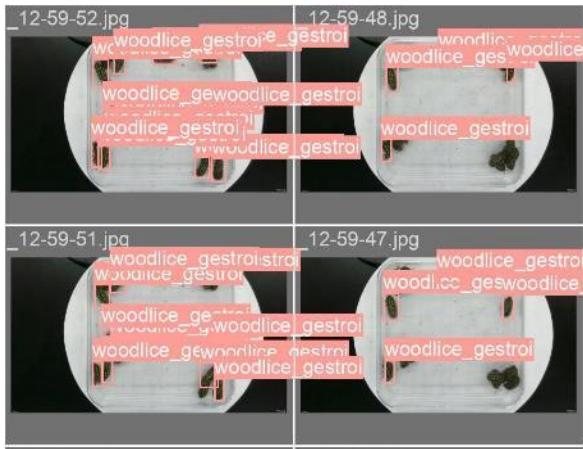


圖18.法國四紋鼠婦yolo系統辨識(作者拍攝)



圖19. 正露丸鼠婦yolo系統辨識(作者拍攝)

3. 進行圖片辨識並將辨識後的結果切割為八塊區域分別為Inner1~4及Outer1~4計數，並將計數結果除以面積轉換成每cm²上有多少隻鼠婦，最後將結果保存及輸出為Csv檔案。
4. 利用Python將Csv檔案數值進行視覺化處理轉換為熱力圖或折線圖。



圖20.軟體辨識前(作者拍攝)

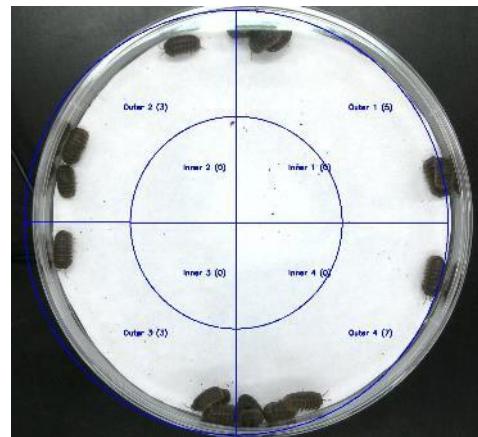


圖21.軟體辨識後(作者拍攝)

七、叫聲對不同鼠婦在迷宮中對方向選擇的影響實驗

我們想了解叫聲是否會影響鼠婦轉向且鼠婦本身即具有交替性轉向反應的行為，因此我們利用FreeCad設計 J字型及 T字型迷宮進行檢驗，我們根據鼠婦的體寬修改去年學長姐的鼠婦迷宮，將走到拓寬至15mm，使正露丸鼠婦及法國四紋鼠婦可以在走道中移動，並將檔案匯出成Stl檔案以3D列印機進行列印。

(一) 【實驗步驟】

1. 利用Freecad草圖工具繪製迷宮平面設計圖，填充20mm高度繪出為Stl檔案，使用Bambu P1P列印機以PLA填充率20%進行列印。
2. 將體寬0.5cm（含）以上，體型大的鼠婦放入培養皿中等待進行實驗。

實驗組

在T字型迷宮和J字型強制右轉迷宮的右側放置耳機，並播放正露丸鼠婦特定的頻率及波形的叫聲。實驗過程中叫聲持續播放，沒有設定時間限制，直到鼠婦實驗完成。

對照組

T字型迷宮的右側和J字型迷宮中不放置耳機，讓鼠婦實驗中在轉向時不會受到叫聲影響。

3. 一次放入一隻鼠婦在迷宮中進行實驗，實驗過程中叫聲持續播放，且沒有時間限制，直到鼠婦完全抵達T字或J字迷宮中的左右其中一邊才進行紀錄。每組做20隻，進行3重複，共60隻。觀察並記錄鼠婦的轉向方向。
4. 記錄三組的實驗結果，計算鼠婦的左右轉比例，並使用Excel進行統計及製作長條圖。

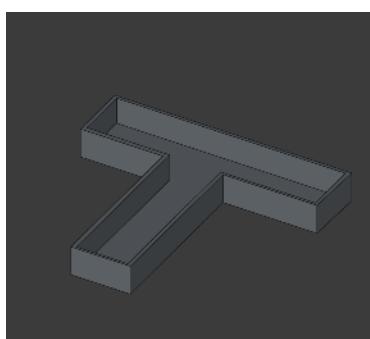


圖22.利用Freecad繪製裝置

(作者拍攝)



圖23.J字型迷宮

(作者拍攝)



圖24.T字型迷宮

(作者拍攝)

肆、研究結果

一、鼠婦外觀比較

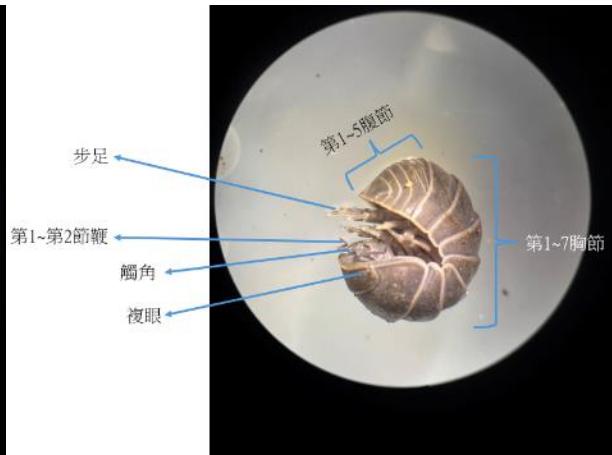


圖25.正露丸鼠婦腹面構造(作者拍攝)

圖26.正露丸鼠婦捲曲形態(作者拍攝)

藉由複式顯微鏡觀察，我們發現當正露丸鼠婦受到驚嚇進行捲曲時，其第五腹節會與頭部靠近，且第一到第七對步足及觸角皆會藏入甲殼之下，我們認為此種行為有助於鼠婦保護自己柔軟腹部避免受到天敵攻擊。

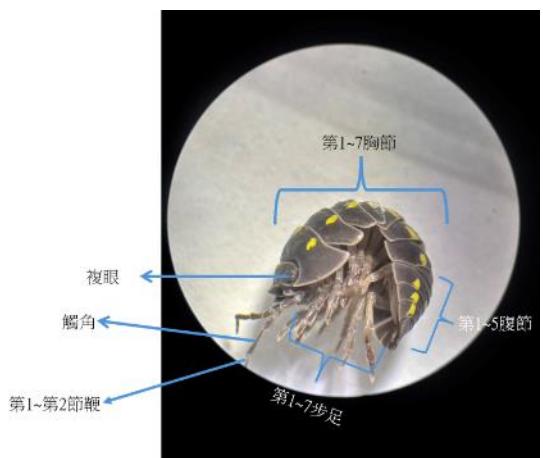


圖27.法國四紋鼠婦(作者拍攝)

圖28.法國四紋鼠婦捲曲形態(作者拍攝)

法國四紋鼠婦受到驚嚇時，捲曲行為沒有正露丸鼠婦頻繁。當鼠婦捲曲時其觸角及所有步足皆與正露丸鼠婦相同收入甲殼之下以便保護自己，此在顯微鏡下並無明顯差異。

二、頻譜分析

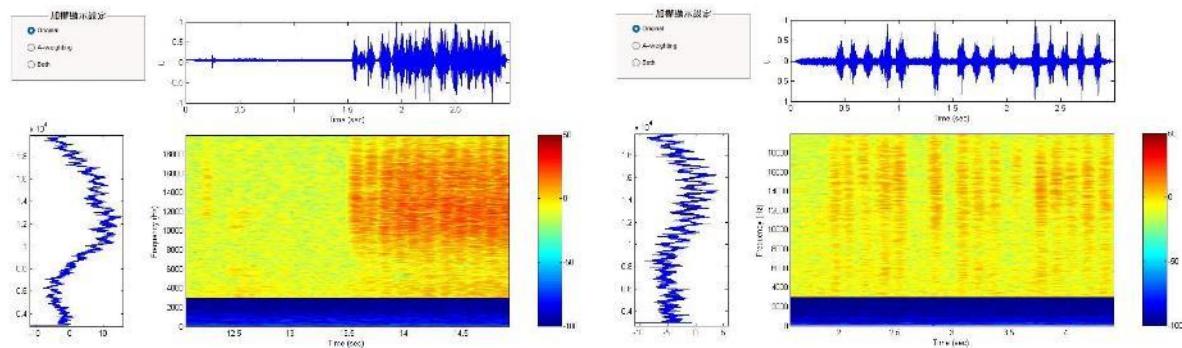


圖29.大型鼠婦(0.5cm以上)叫聲分析 (作者繪製)

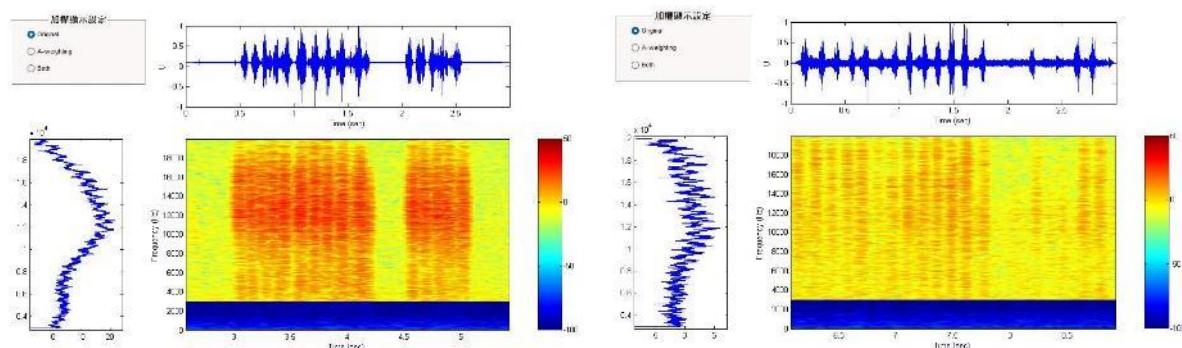


圖30.中型鼠婦(0.3-0.5cm之間)叫聲分析(作者繪製)

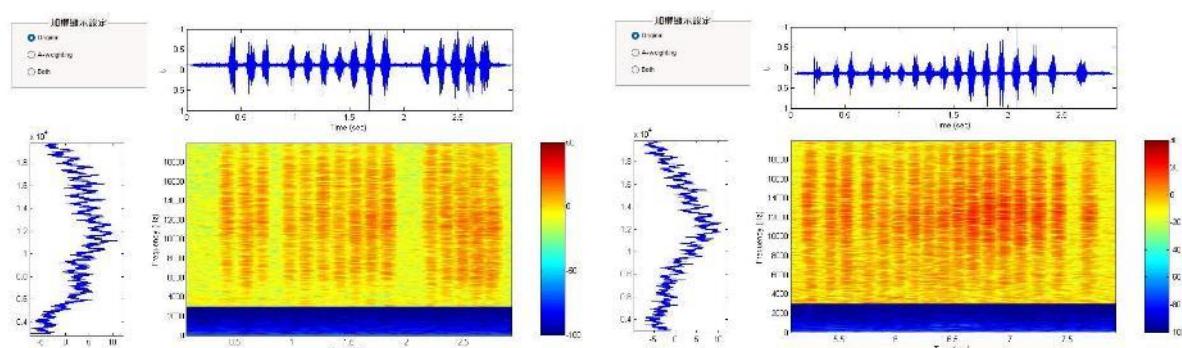


圖31.小型鼠婦(0.3cm以下)叫聲分析(作者繪製)

我們依照鼠婦的體型分為三種並錄製叫聲進行比較，根據時頻圖分析所有體型鼠婦的叫聲。經分析，其叫聲頻率多為10 kHz以上以及2 kHz。我們依頻率、波形各分為三種聲音。第一種為頻率在15 kHz到17 kHz間的高頻(我們取主要的頻率16 kHz為名)和在12 kHz較多的次高頻，與較低頻的2 kHz(圖32、圖33)。

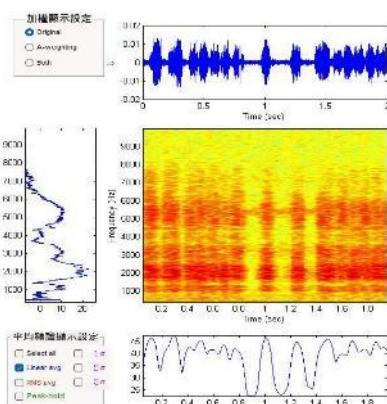


圖32.接觸式麥克風錄製大型鼠婦叫聲分析

(作者繪製)



圖33.接觸式麥克風錄製大型鼠婦叫聲分析

(作者繪製)

另外我們分析其聲音的波形上可以分為相鄰週期差(ΔT)較長且規律的聲音，我們取名為「規律聲」(圖29右)；以及相鄰週期差(ΔT)較短且急促的聲音，我們取名為「急促聲」(圖29左)。

在體型與頻率、波形的關係中我們發現，體型較小的鼠婦發出的聲音波形較為規律，然而中型及大型鼠婦其波形會呈現急促及規律兩種類型。在頻率方面，急促聲多為次高頻為主(12 kHz)；規律聲則有12 kHz及16 kHz兩種。透過接觸式麥克風所收錄到的聲音則是在2 kHz有明顯高峰，接下來我們將探討16 kHz、12 kHz及2 kHz對於鼠婦轉向的意義。

論文指出，在所有其他變因保持不變的情況下，鼠婦的大小、性別或蛻皮階段與轉向反應之間並沒有統計上的顯著關連(Sofia Cividini et al.,2019)，且正露丸鼠婦的成年個體無論在有無基質振動或播放聲音的情況下，相較幼蟲都表現出更好的交替性轉向反應 (Sofia Cividini et al.,2019)，因此在後續的研究中，我們皆選用大型鼠婦來進行實驗。

三、不同頻率及波形的叫聲對鼠婦聚集行為的影響

(一) 叫聲對正露丸鼠婦行為的影響

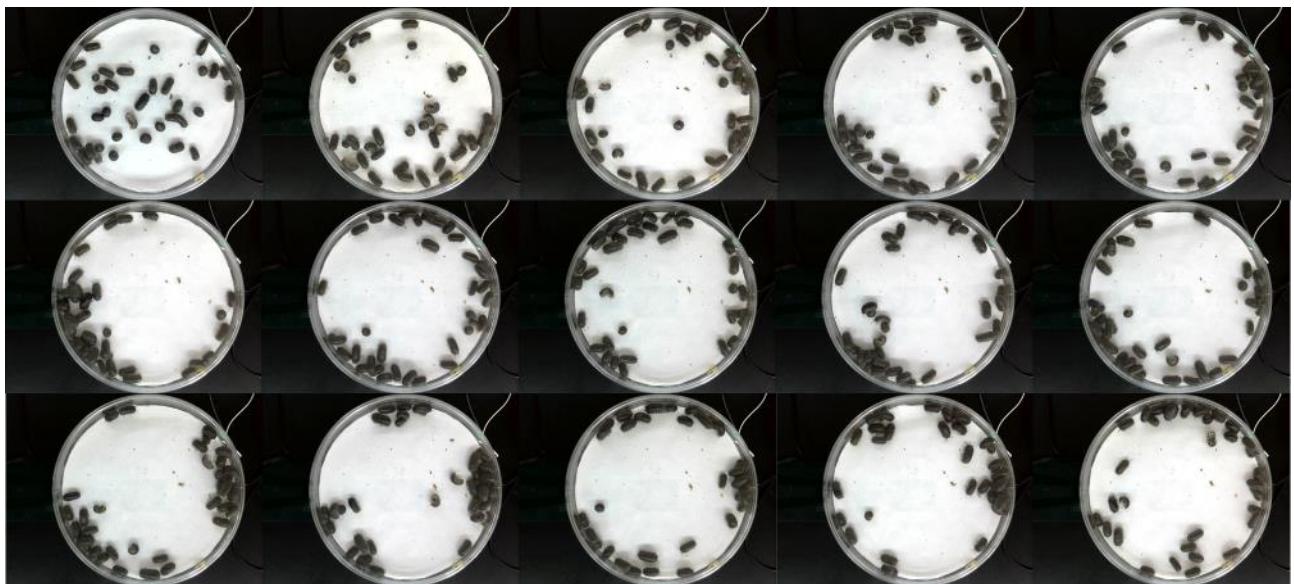


圖34.無聲音情形 *每分鐘擷取一張 (作者拍攝)

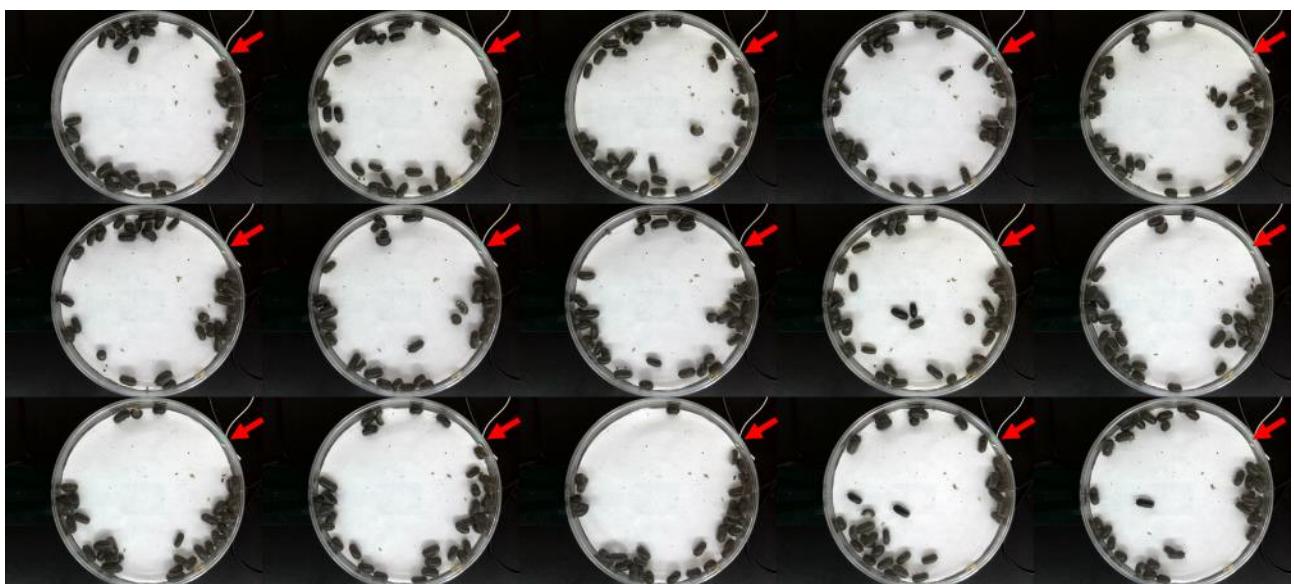


圖35. 12 kHz規律聲 *每分鐘擷取一張(作者拍攝)

圖35中我們將鼠婦叫聲以耳機撥放的方式放置於圖中紅色箭頭處並持續撥放，並讓鼠婦自由移動，以攝影機記錄15分鐘內其移動狀況。實驗結果顯示，播放聲音並不會造成鼠婦逃離，而是有**聚集的情形**，我們進一步比較不同頻率及不同鼠婦間的差異。

(二) 頻率不同對正露丸鼠婦及法國四紋鼠婦聚集行為的影響

我們將培養皿分為內圈(Inner_Region)及外圈(Outer_Region)並切割成八個區域，紀錄兩種鼠婦在靜置時及撥放聲音時的移動狀況，並將照片以Yolo分析，並繪製成熱力圖其結果(如圖36-圖45)，從實驗結果中發現，兩種鼠婦皆偏好在外圈(outer_Region)移動。

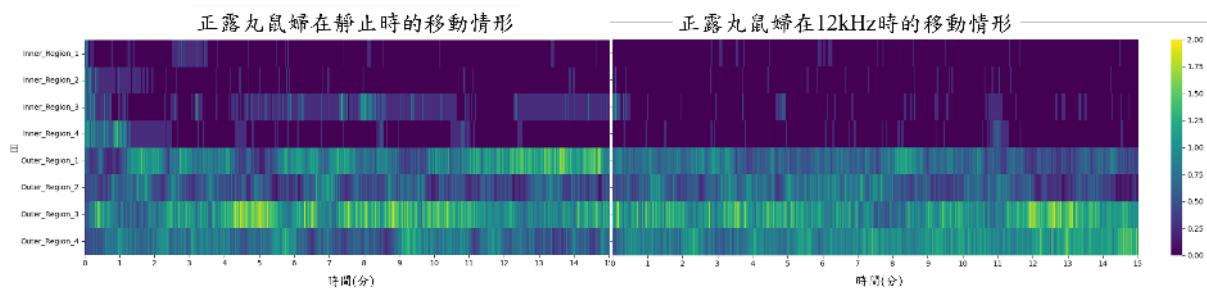


圖36.未撥放聲音 (作者繪製)

圖37.播放12 kHz叫聲 (作者繪製)

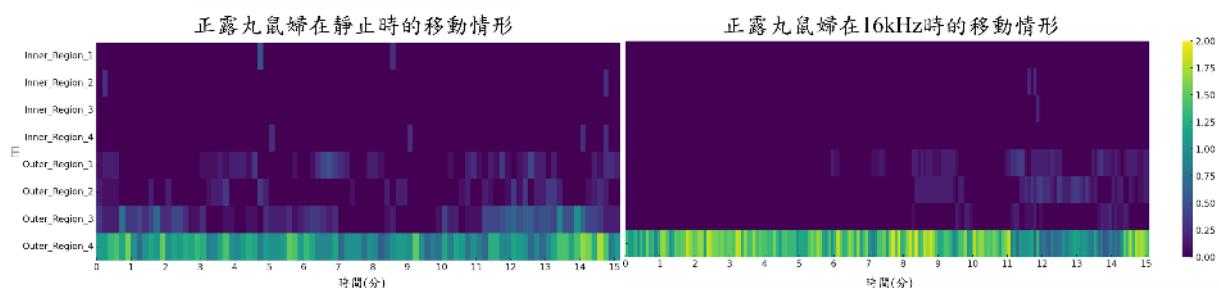


圖38.未撥放聲音 (作者繪製)

圖39.播放16 kHz叫聲 (作者繪製)

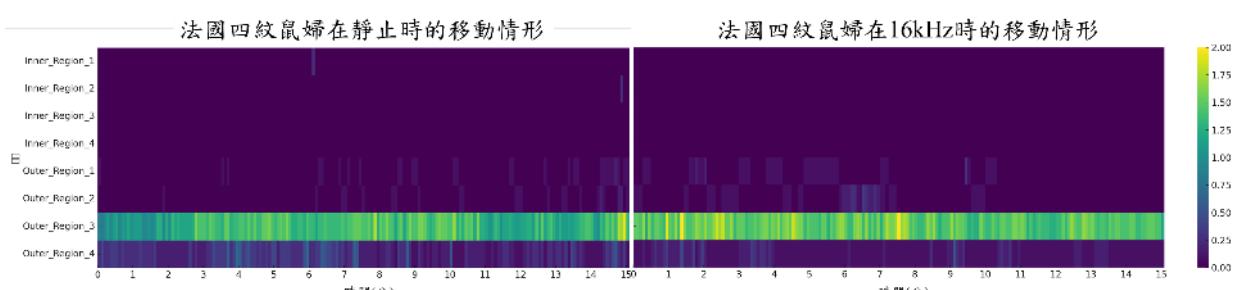


圖40.未撥放聲音 (作者繪製)

圖41.播放16 kHz叫聲 (作者繪製)

在12 kHz結果中，當撥放聲音時內圈Inner_Region_3 的正露丸鼠婦會往外圈移動，且外圈鼠婦彼此聚集(如圖36、圖37)；在16 kHz下，0~6分鐘間正露丸鼠婦集中

於outer_Region_4 (如圖39)，直到6分鐘後才開始持續移動；然而法國四紋鼠婦中，在撥放聲音時並沒有明顯聚集的現象 (如圖40、圖41)。

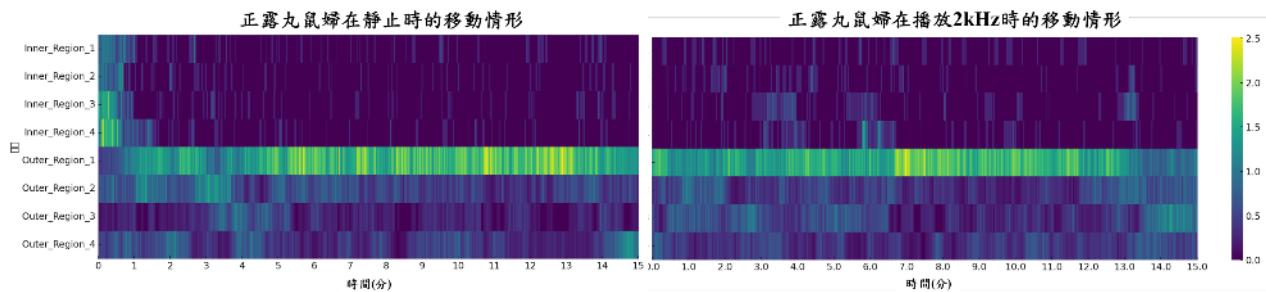


圖42.未撥放聲音 (作者繪製)

圖43.播放2kHz鼠婦叫聲(作者繪製)

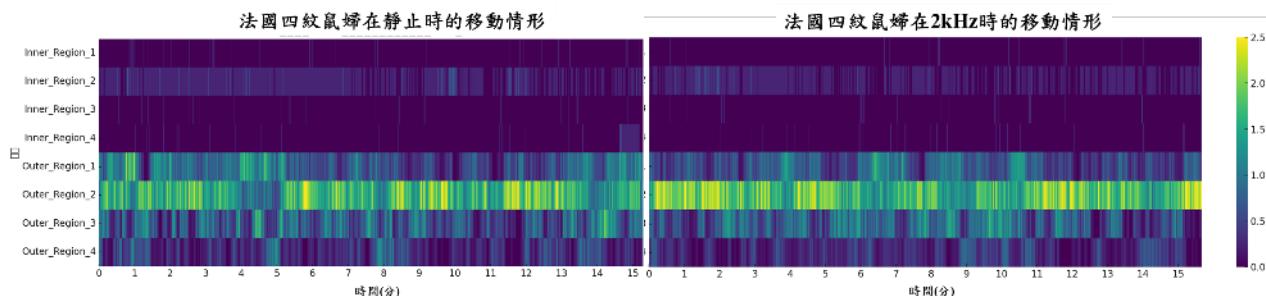


圖44.未撥放聲音(作者繪製)

圖45.播放2kHz鼠婦叫聲(作者繪製)

另一方面，我們使用接觸式麥克風錄製基質中的聲音，並以此進行聚集實驗。結果顯示，當未播放聲音時，正露丸鼠婦大多集中於外圈區域1與其他實驗結果相符同聚集於外圈 (圖42、圖43)，在播放2 kHz的聲音後，外圈區域1的鼠婦密度下降，並分散到其他區域，其呈現出遠離聲源的行為變化。因此我們推測2 kHz可能具有警告的作用，或作為一種促使鼠婦分散的聲音信號。相對地，在法國四紋鼠婦的實驗中，有無撥放2kHz的聲音對法國四紋鼠婦的行為模式並無明顯差異。

從實驗中我們發現聲音頻率會影響正露丸鼠婦的聚集行為且16 kHz的聚集效果比12 kHz明顯，我們將進一步以實驗來驗證。

四、鼠婦聲音對T字迷宮轉向行為的影響

(一) 對照組：T字型迷宮對鼠婦左、右轉比率

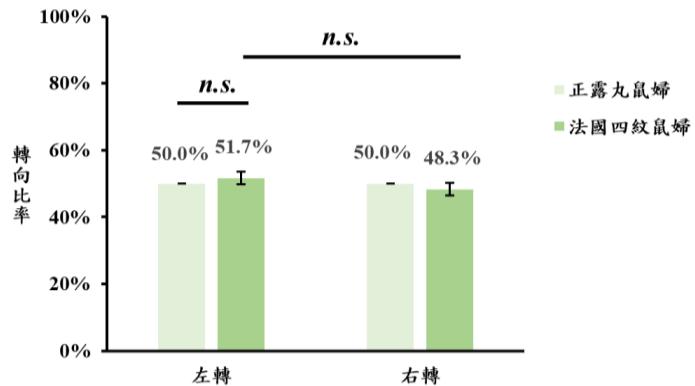


圖46.T字迷宮對兩種鼠婦左、右轉的影響 (作者繪製)

我們以未撥放聲音的T字型迷宮實驗作為對照組，其結果顯示左、右轉的比率皆約為1:1，經卡方檢定顯示無論是正露丸鼠婦或法國四紋鼠婦，其轉向方向不具有顯著差異(正露丸鼠婦 $\chi^2=0.000$, $p=1$ ；法國四紋鼠婦 $\chi^2=0.067$, $p=0.796$)，由此可知鼠婦在未撥放聲音前其左轉與右轉的機率為隨機。

(二) 實驗組：頻率及波形對鼠婦在T字型迷宮轉向的影響 (右側播放聲音)

【12 kHz急促聲】

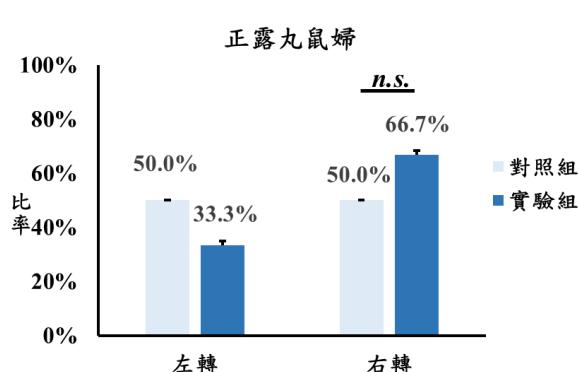


圖47. 12 kHz急促聲對鼠婦T字迷宮轉向影響

$$\chi^2 = 0.133, p = 0.715 > 0.05 \text{ (作者繪製)}$$

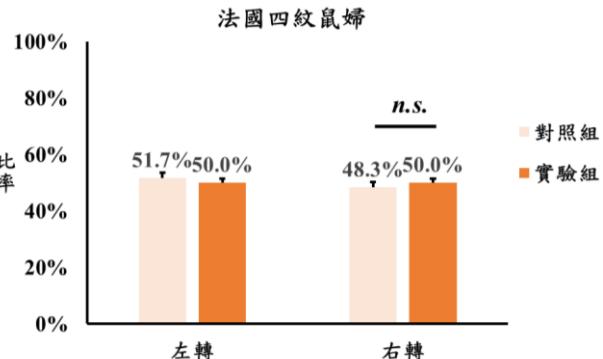


圖48. 12 kHz急促聲對鼠婦T字迷宮轉向影響

$$\chi^2 = 0.033, p = 0.855 > 0.05 \text{ (作者繪製)}$$

圖47中，我們在T字迷宮的右邊播放正露丸的12 kHz急促聲，正露丸鼠婦右轉比率從對照組50%上升至66.7%，法國四紋鼠婦右轉比率從48.3%上升到50%，提高1.7% (圖48)，經卡方檢定，正露丸鼠婦、法國四紋鼠婦左右轉皆無顯著差異 ($p>0.05$)。

【12 kHz規律聲】

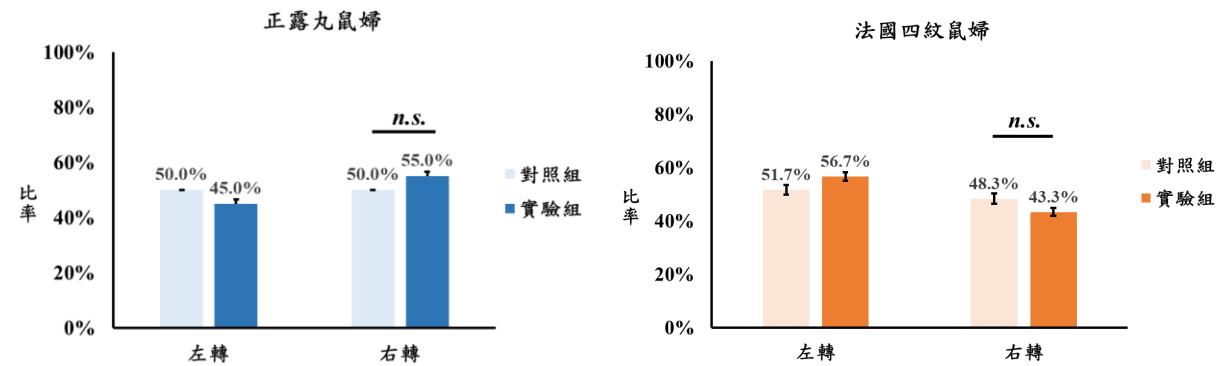


圖49. 12 kHz規律聲對鼠婦T字迷宮

$\chi^2 = 0.301$, $p = 0.583 > 0.05$ (作者繪製)

圖50. 12 kHz規律聲對鼠婦T字迷宮

$\chi^2 = 0.302$, $p = 0.582 > 0.05$ (作者繪製)

圖49中，我們在T字迷宮的右邊播放正露丸的12 kHz規律型叫聲，正露丸鼠婦右轉比率從對照組50%上升至55%，而法國四紋鼠婦的右轉比率從對照組的48.3%下降到43.3% (圖50)。經卡方檢定發現兩種鼠婦在12 kHz規律型聲音影響下，左、右轉沒有顯著差異 ($p>0.05$)，顯示12 kHz對兩種鼠婦無顯著吸引。

【16 kHz規律聲】

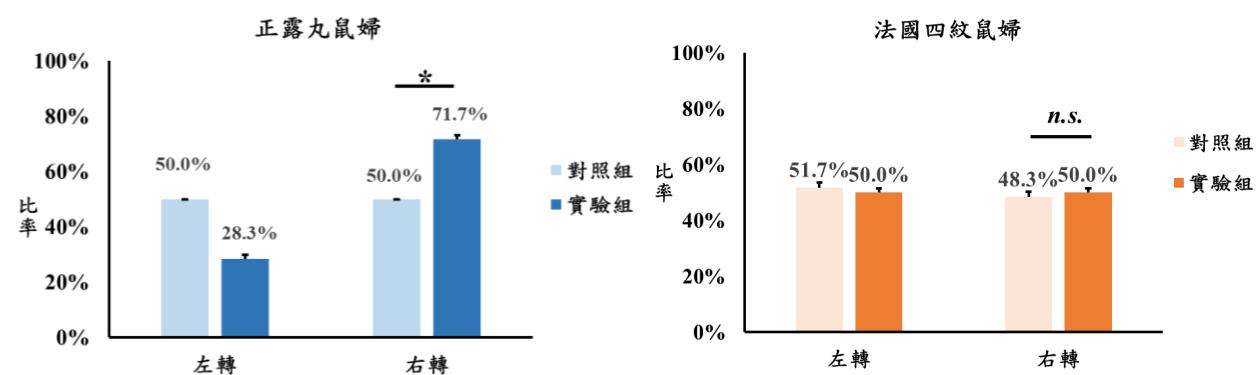


圖51. 16 kHz規律聲對鼠婦T字迷宮轉向影響

$\chi^2 = 5.91$, $p=0.0150 < 0.05$ (作者繪製)

圖52. 16 kHz規律聲對鼠婦T字迷宮轉向影響

$\chi^2 = 0$, $p=1 > 0.05$ (作者繪製)

由圖51可見，當播放正露丸鼠婦的16 kHz規律聲時，右轉比例從50%上升至 71.7%，經卡方檢定($p<0.05$)具有顯著差異，顯示該聲音對於正露丸鼠婦轉向有明顯的吸引作用，然而圖52顯示該聲音對法國四紋鼠婦對轉向無明顯影響 ($p=1> 0.05$)。

【2 kHz 基質傳遞】

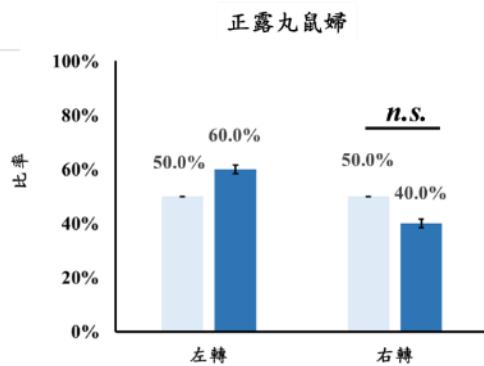


圖53. 2 kHz對鼠婦T字迷宮轉向影響

$$\chi^2 = 1.21, p = 0.271 > 0.05 \text{ (作者繪製)}$$

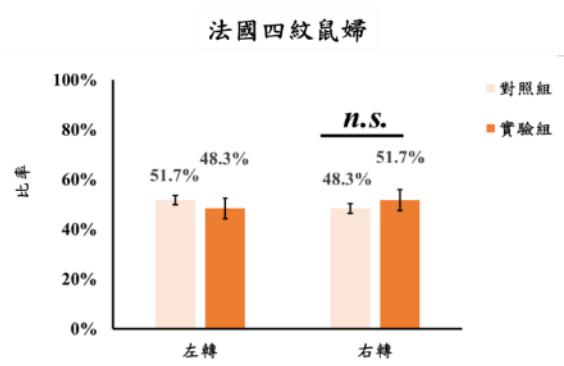


圖54. 2 kHz聲對鼠婦T字迷宮轉向影響

$$\chi^2 = 0.13, p = 0.715 > 0.05 \text{ (作者繪製)}$$

我們將耳機緊貼在T字迷宮的右邊側底部上，模擬藉由基質傳遞正露丸鼠婦 2 kHz 的叫聲，實驗結果經卡方檢定顯示此種叫聲對於兩種鼠婦左右轉向的影響無顯著差異 ($p > 0.05$)

五、J字型迷宮中聲音對鼠婦交替性轉向比率的影響

(一) 對照組：J字型迷宮對鼠婦交替性轉向比率的影響

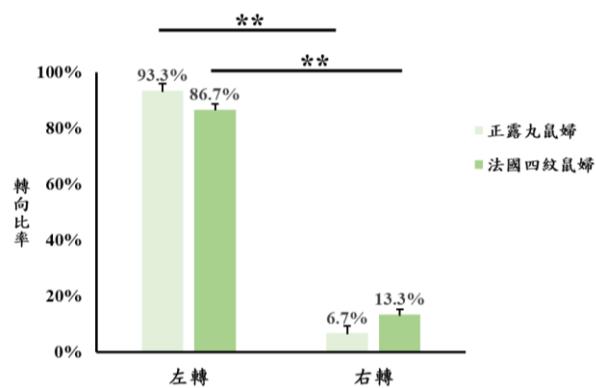


圖55. J字型迷宮對鼠婦交替性轉向比率 (作者繪製)

$$\text{正露丸鼠婦 } \chi^2 = 45.07, p < 0.001 ; \text{ 法國四紋鼠婦 } \chi^2 = 32.27, p < 0.001$$

J字型迷宮中會先強制鼠婦右轉一次，在交替性轉向反應下，鼠婦會在下一次轉向時選擇與上次相反的左轉。從圖55結果顯示兩種鼠婦左轉與右轉比率皆具有顯著

差異，表示兩者皆呈現交替性轉向反應，與其他研究結果相符。接下來我們探討若在強制轉向的J字型迷宮中加入鼠婦叫聲，探討其結果會有何改變。

(二) 實驗組：J字型迷宮中鼠婦聲音對其轉向比率的影響(右轉後右側播放聲音)

【12 kHz規律聲】

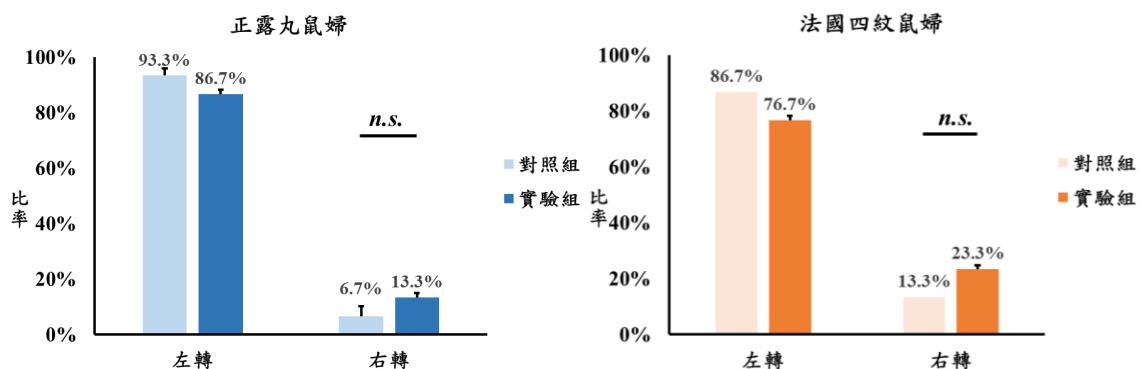


圖56.12 kHz規律聲對正露丸鼠婦J字迷宮轉向影響

$\chi^2=0.30$, $p=0.583>0.05$ (作者繪製)

圖57.12 kHz規律聲對法國四紋鼠婦J字迷宮轉向影響

$\chi^2=0.30$, $p=0.583>0.05$ (作者繪製)

在J字型迷宮的右邊播放正露丸鼠婦12 kHz的規律型叫聲，圖56.、圖57.顯示經卡方檢定顯示此種叫聲對於兩種鼠婦轉向無明顯差異 ($p>0.05$)。

【12 kHz急促聲】

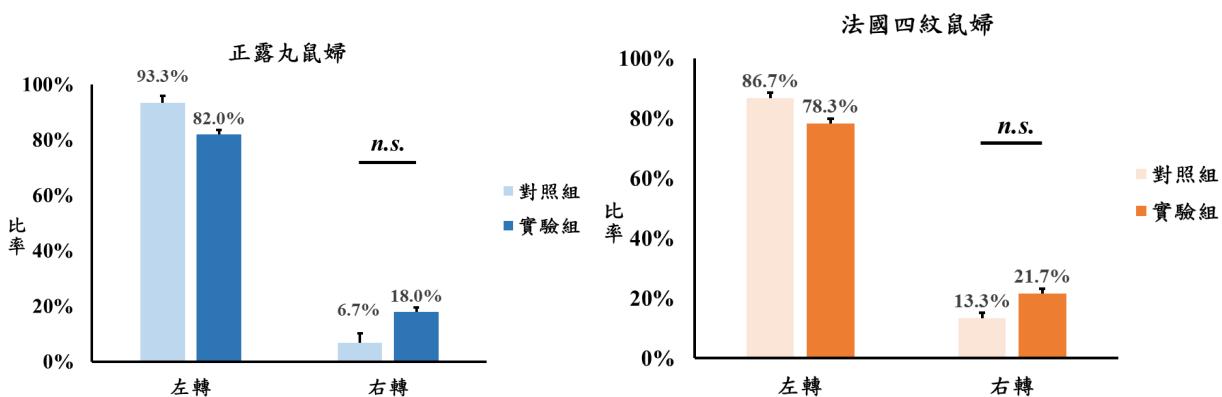


圖58. 12 kHz對正露丸鼠婦J字迷宮轉向影響

$\chi^2=0.13$, $p=0.715 > 0.05$ (作者繪製)

圖59. 12 kHz對法國四紋鼠婦J字迷宮轉向影響

$\chi^2=1.44$, $p\approx0.23 > 0.05$ (作者繪製)

當播放12 kHz急促聲時，實驗結果顯示，正露丸鼠婦右轉比率從6.7%上升至18%，經過卡方檢定($p>0.05$)並無顯著差異。法國四紋鼠婦從13.3%上升至21.7%，經卡方檢定未達顯著差異。由圖58.、圖59.結果可知，當正露丸鼠婦及法國四紋鼠婦受交替性轉向的影響下，12 kHz的聲音並無明顯吸引轉向的現象，且12 kHz規律音與急促音沒有差異。

【16 kHz規律聲】

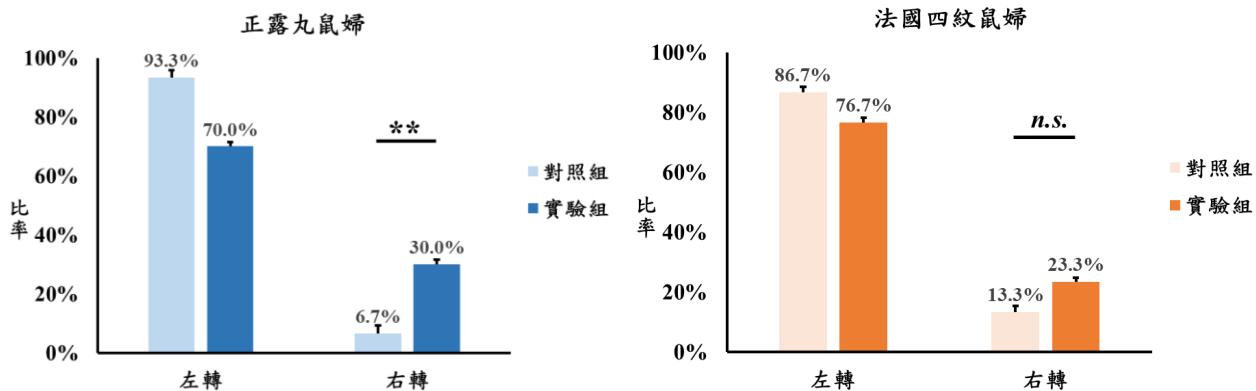


圖60.16 kHz規律聲對鼠婦J字迷宮轉向影響

$\chi^2=10.91$, $p=0.001<0.01$ (作者繪製)

圖61.16 kHz規律聲對鼠婦J字迷宮轉向影響

$\chi^2\approx2.00$, $p\approx0.157$ (作者繪製)

在播放16 kHz規律聲吸引轉向中的鼠婦，圖60.實驗結果顯示正露丸鼠婦右轉的比率從6.7%提高到30.0%，經卡方檢定後顯示具有顯著差異 ($p<0.01$)；而圖61中，法國四紋鼠婦的轉向比率從13.3%提高到23.3%，經卡方檢定後無顯著差異($p>0.05$)。

此結果顯示16 kHz比起12 kHz對正露丸鼠婦較有吸引作用；而聲音的波形對於鼠婦選擇轉向並無明顯影響。

【2 kHz聲 基質傳遞】

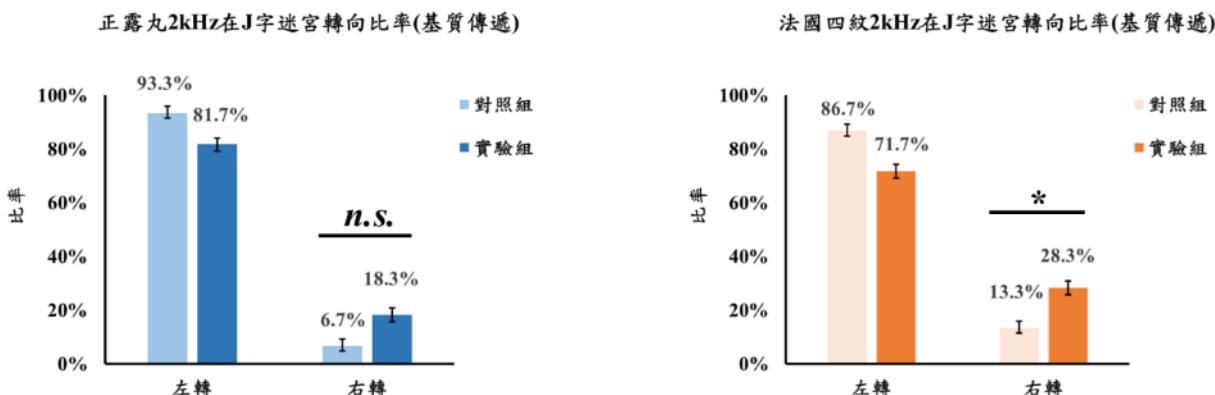


圖62.2 kHz聲對鼠婦J字型迷宮轉向影響

$\chi^2\approx3.73$, $p\approx0.053>0.05$ (作者繪製)

圖63. 2 kHz聲對鼠婦J字型迷宮轉向影響

$\chi^2\approx4.09$, $p\approx0.043<0.05$ (作者繪製)

我們在J型迷宮中當鼠婦強制右轉後，將耳機貼在下一個轉向的右邊的基質上，利用基質傳遞 2 kHz聲音來吸引鼠婦，實驗結果經卡方檢定顯示對於正露丸鼠婦不具顯著差異，然而法國四紋鼠婦具有顯著差異 ($p<0.05$)。

伍、討論

一、正露丸鼠婦的發聲構造

根據文獻指出正露丸鼠婦在捲曲時會利用**第四對與第五對步足**(pereopods)前端的螺旋狀鱗片(ledge of scales)摩擦來產生摩擦音(stridulations)，此方式類似蝗蟲、蟋蟀及螞蟻的發聲方式。實驗中我們嘗試利用複式顯微鏡觀察正露丸鼠婦的第四、第五對步足前端，但由於顯微鏡倍率不足導致無法拍攝清晰影像，而在Giuseppe Montesantol(2018)的研究中有利用電子顯微鏡清楚拍攝到鼠婦步足前端的鋸齒突起，如圖64。

目前研究仍未紀錄或是模擬鼠婦在捲曲情況下是如何摩擦產生聲音，未來我們將嘗試將螢光粉末沾在鼠婦第四對或第五對步足的前端，進而觀察其摩擦發聲的部位，並會嘗試將指甲油塗抹在鼠婦的第四對與第五對步足上，待風乾後撕下，此法能夠翻模拓印出鼠婦步足上的構造，以利使用複式顯微鏡觀察其步足上的細微構造。

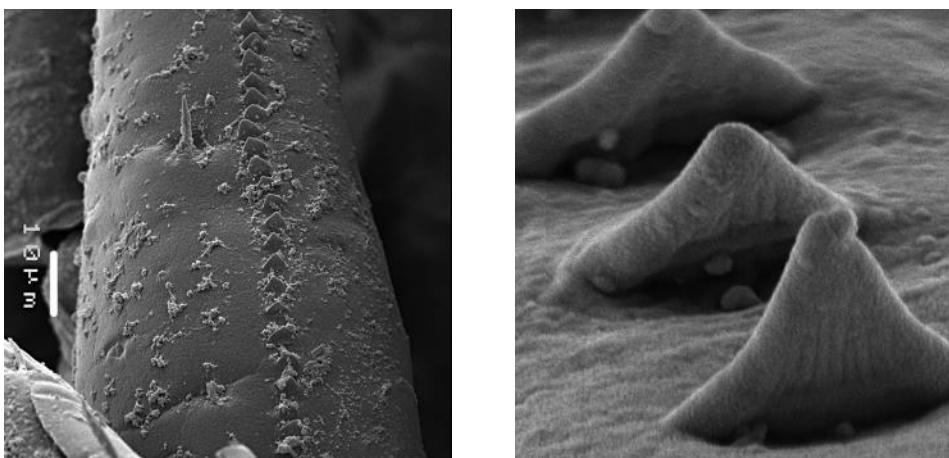


圖64. 正露丸鼠婦步足電子顯微鏡照 (引用自Giuseppe Montesanto,2018)

二、聲音波形及頻率對於鼠婦聚集行為的影響

Sofia Cividini利用毛筆刺激正露丸鼠婦捲曲並發出聲音，在研究中以頻譜圖分析該聲音中最高強度為9 kHz (圖65)，並只有單一種波形 (Sofia Cividini,2020)；在本研究中我們紀錄的鼠婦聲音最頻繁的頻率有16 kHz、12 kHz、2 kHz共三種(圖29、圖32)、波形有兩種形式(圖66)，這是別的研究中所未提及的，從毛筆刺激到搓揉鼠婦，我們推測**刺激強度與鼠婦發出聲音的頻率有關**，我們也更進一步比較該聲音與鼠婦的交替性轉向反應之間的關係。

交替性轉向反應是目前已知鼠婦逃避天敵及逃離惡劣環境的行為，若聲音會導致鼠婦產生逃避反應，則在J型迷宮實驗中其結果應呈現交替性轉向反應率上升或T字迷宮中有聲音側轉向率下降，然而在我們研究中實則相反。圖51、圖60顯示，正露丸鼠婦在T字及J字型迷宮

中皆會受到16 kHz高頻叫聲的影響而被吸引，進而轉向有聲音的方向。我們推測造成此實驗差異可能為聲音頻率高低之故，我們提出假說：叫聲頻率與外界刺激有關，正露丸鼠婦的低頻與次高頻聲(9 kHz、2 kHz)為警告信號促使遠離振動源，然而高頻(16 kHz)則被其視為聚集信號。

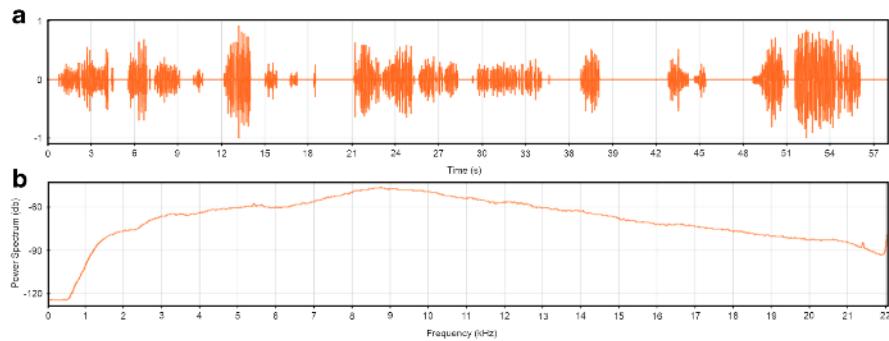


圖65. 引用自Sofia Cividini (2020)

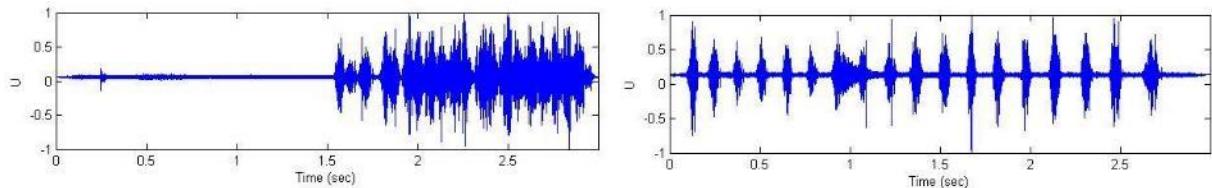


圖66. 正露丸鼠婦兩種波形 (作者繪製)

三、正露丸鼠婦發出叫聲對其生存上的意義

我們從實驗中發現當正露丸鼠婦發出16 kHz高頻聲音時，鼠婦會受到聲音吸引甚至短暫聚集在一起，有別於一般的逃避現象，我們認為這種現象類似於**稀釋效應(Dilution Effect)**，此效應能夠降低個體被捕食的機會並提高他們的生存率，然而16 kHz的高頻聲比12 kHz及2 kHz更容易吸引鼠婦(圖51、圖52)。在12 kHz下，急促聲與規律聲在統計上並沒有顯著的差異(圖56、圖58)，我們推測兩種波形的差異可能和鼠婦受到的外界干擾程度有關，刺激較大時鼠婦即會發出週期較短且較急促的聲音。

四、聲音對鼠婦交替性轉向反應的影響

正露丸鼠婦在受到威脅時其發聲行為被視為一種警告訊號，然而交替性轉向反應也是鼠婦為了逃避天敵、惡劣環境等而有的一種防禦機制。在本研究中，16 kHz的高頻聲會影響正露丸鼠婦的交替性轉向反應，而對法國四紋鼠婦無影響，顯示出正露丸鼠婦有接受此頻率的受器且能產生反應。

有趣的是在2 kHz的頻率時，法國四紋鼠婦的交替性轉向反應卻會受到影響(圖63)，並具有統計上的意義，此結果與我們的預期不符；然而雖然正露丸鼠婦在統計上並沒有顯著差

異(圖62)，然而卻能發現具有吸引的趨勢。以上結果我們推測2 kHz可能不是刺激正露丸鼠婦的特殊受器，而且影響到鼠婦產生交替性轉向的行為，但整體而言，交替性轉向反應對鼠婦行為的影響仍大於發聲的吸引力。

五、如何定義鼠婦發聲的急促音及規律音

我們將錄製的聲音利用Python偵測聲音中的波峰(圖69、圖70)並計算其波峰間的距離求平均得 ΔT ，並將結果繪製成盒鬚圖(圖71)，圖中顯示規律音 ΔT 平均值為1.37 ms、急促音 ΔT 平均值為-0.15 ms，規律音明顯波峰與波峰間隔大於急促音。

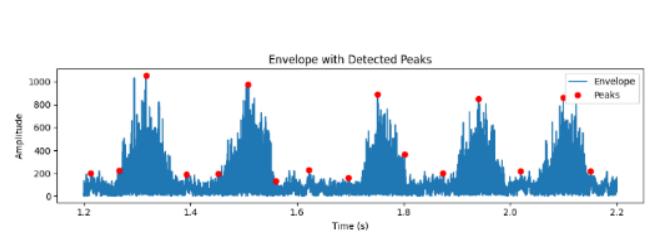


圖69.規律音($T \approx 62.52 \pm 10.66$ ms)

(作者繪製)

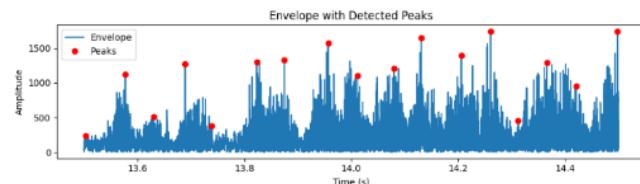


圖70.急促音($T \approx 62.19 \pm 11.82$ ms)

(作者繪製)

規律音及急促音的相鄰週期差

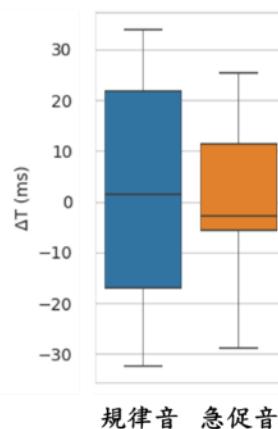


圖71.規律音及急促音的相鄰週期差

(作者繪製)

陸、結論

- 一、正露丸鼠婦在受到刺激或是驚嚇時身體會捲曲，且能夠發出聲音。
- 二、鼠婦聲音其波形可以藉相鄰週期差(ΔT)區分為急促聲與規律聲，然而2kHz聲音的波型無明顯分別。
- 三、鼠婦聲音經頻譜分析頻率在12 kHz、16 kHz最多，藉接觸式麥克風錄製的聲音，其頻率以2kHz出現最多。
- 四、正露丸鼠婦12 kHz-16 kHz的叫聲中，頻率越高對同類的吸引力越強，在相同的波形(規律聲)下亦是如此。
- 五、12 kHz下，急促聲與規律聲對正露丸鼠婦及法國四紋鼠婦皆無吸引力。

六、正露丸及法國四紋鼠婦皆具有交替性轉向反應，16 kHz的叫聲會影響正露丸鼠婦轉向比率，但交替性轉向反應的影響仍大於聲音的吸引力。

七、2 kHz對兩種鼠婦在T字路口的左、右轉皆無吸引力，但對法國四紋鼠婦的交替性轉向反應有顯著影響。

柒、未來展望

一、聲音與基質振動對於鼠婦行為的影響

本研究提出一個關於正露丸鼠婦聲音的想法，我們認為除了聲音頻率會造成不同的鼠婦行為模式外，基質振動也會影響其行為，未來我們希望能嘗試利用精密加速度規進一步測量鼠婦發聲產生的基質振動來進行實驗，深入探討鼠婦叫聲與其行為模式之間的關聯。

二、害蟲防治

在農業方面，鼠婦被視為一種害蟲，常常在菜園裡啃食農作物的枝葉，且它們還會食用農作物的嫩根，造成缺苗斷莖的現象，對農業產生一定程度的負面影響。本研究中提出聲音能夠吸引鼠婦聚集的行為，未來可以利用這一特性進行**害蟲數量控制**，譬如設計特定的聲波來吸引或驅趕鼠婦，從而避免依賴化學農藥達到防治效果。

三、生態監控

鼠婦的發聲行為也可能可作為評估生態系統狀態的指標。且鼠婦對環境變化敏感，其聲音頻率和波形可能隨著微氣候、土壤濕度或其他環境參數的改變而有所變化。透過長期監測鼠婦的聲音特徵，可評估城市或鄉村生態系統的退化與恢復情況，進而為城市綠化、土地利用規劃與生態保育提供數據支持。

捌、參考文獻資料

一、外國文獻

- (一) Peggy S. M. Hill,(2009).How do animals use substrate-borne vibrations as an information source?
- (二) Pierre Broly, Romain Mullier, Jean-Louis Deneubourg, Cédric Devigne(2012).Aggregation in woodlice: social interaction and density effects
- (三) Peggy S. M. Hill,Reinhard Lakes-Harlan,Valerio Mazzoni,Peter M. Narins,Meta Virant-Doberlet,Andreas Wessel(2019).Biotremology: Studying Vibrational Behavior

- (四) R. N. HUGHES, (1967). TURN ALTERNATION IN WOODLICE (PORCELLIO SCABER)
- (五) Sofia Cividini, Giuseppe Montesanto(2018). Aggregative behavior and intraspecific communication mediated by substrate-borne vibrations in terrestrial arthropods: An exploratory study in two species of woodlice
- (六) Kristi Houghtaling and Scott L. Kight,(2006). TURN ALTERNATION IN RESPONSE TO SUBSTRATE VIBRATION BY TERRESTRIAL ISOPODS, PORCELLIO LAEVIS (ISOPODA: ONISCIDEA) FROM RURAL AND URBAN HABITATS IN NEW JERSEY, U.S.A
- (七) Sofia Cividini & Giuseppe Montesanto,(2020). Biotremology in arthropods
- (八) Giuseppe Montesanto,(2018). Presence of a stridulatory apparatus in the manca stages of isopods (Crustacea, Isopoda, Oniscidea)
- (九) Sofia Cividini, Giuseppe Montesanto(2018). Changes in turn alternation pattern in response to substrate-borne vibrations in terrestrial isopods
- (十) Sofia Cividini & Spyros Sfenthourakis & Giuseppe Montesanto(2019). Are terrestrial isopods able to use stridulation and vibrational communication as forms of intra and interspecific signaling and defense strategies as insects do? A preliminary study in Armadillo officinalis
- (十一) Peggy S.M. Hill, Andreas Wessel(2016). Primer Biotremology, Current Biology Magazine
- (十二) M. Cazentine, R. Bonuti , and S. Morato (2023). Comparison of exploratory behavior of male and female woodlice (Armadillidium vulgare)
- (十三) Cloudsley-Thompson, J. L. (1956). Rhythmic activity in woodlice. Journal of Experimental Biology, 33(4), 533 – 548.

二、中文文献

- (一) 顧祥龍（2021年10月31日）。電腦如何看懂一張圖？CNN基礎與概念。知勢。<https://edge.aif.tw/about-cnn/>
- (二) 方誌鈞、許韶恩、黃名禎，民111。多霜蠟鼠婦、光滑鼠婦的交替性轉向反應行為。中華民國第62屆中小學科學展覽會國中組生物科第二名。
- (三) Cinnamon AI Taiwan（2019年06月05日）。深度學習：CNN原理。Cinnamon AI台灣官方部落格。

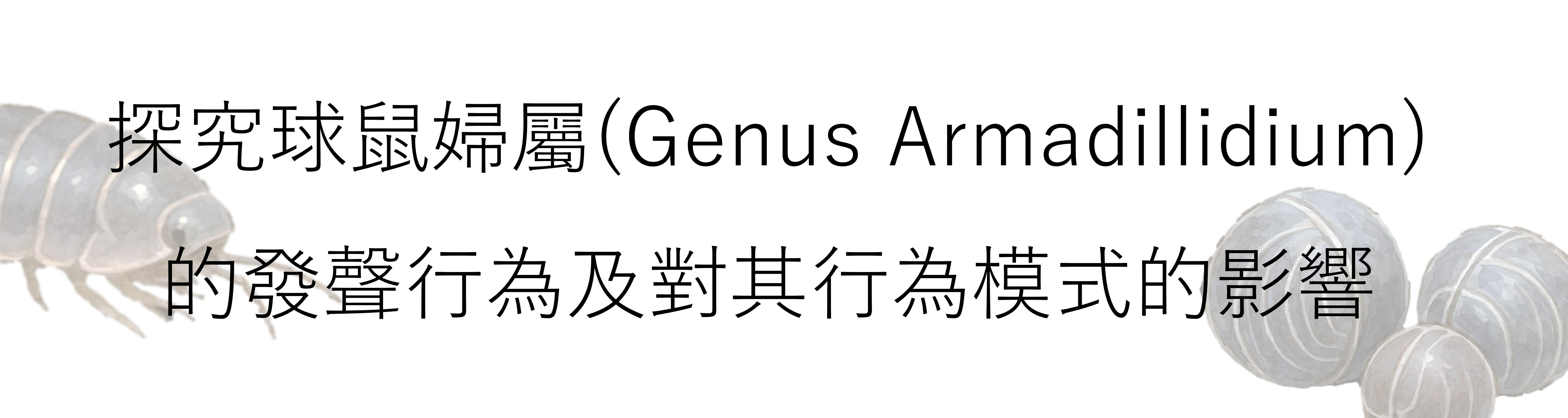
【評語】030316

1. 此研究針對正露丸鼠婦與法國四紋鼠婦，探討其發聲行為與聚集、轉向等行為間的關聯，結合頻譜分析、卷積神經網路進行行為影像辨識與迷宮實驗，證實正露丸鼠婦的發聲頻率以 16 kHz 為主，對同種具有顯著吸引作用，並對交替性轉向行為產生影響，推論發聲行為與防禦、群體聚集及溝通有關，結果可應用於害蟲防治與生態監控。
2. 多測試不同頻率的音頻對其行為之影響，並且可以加入距離等變因提升實際應用的可行性。
3. 本研究中提出聲音能夠吸引鼠婦聚集的行為，未來可以利用這一特性進行害蟲數量控制，譬如設計特定的聲波來吸引或驅趕鼠婦，從而避免依賴化學農藥達到防治效果。
4. 研究設計包含多頻率、波形、基質傳遞與空氣傳遞對比，並採 T 字及 J 字迷宮交叉驗證，然而在實驗如迷宮實驗部分未說明樣本數目，未來可針對不同迷宮、短期記憶、動物行為以及個體競爭等來進行討論。
5. 本實驗提及「生物聲學」與「生物振學」，未來可更明確劃分何種聲音資料對應何種行為、不同基質或空氣傳遞或傳播之差異性為何。
6. 為何正露丸鼠婦對聲音似乎較法國四紋鼠婦來得敏感？若有兩隻同種或是不同種鼠婦在同一個迷宮中，或是在左右兩側

皆撥放聲音，可能的情況如何？這些都是很有趣可以探討的議題。

7. 建議應要使用臺灣生態可見之鼠婦進行研究。

作品海報



探究球鼠婦屬(Genus Armadillidium)

的發聲行為及對其行為模式的影響

摘要

本研究分析鼠婦的叫聲及對行為的影響，頻譜分析顯示叫聲集中於2kHz、12kHz和16kHz，波形有急促型與規律型，且鼠婦聚集行為與聲音頻率的有關。迷宮實驗發現鼠婦對16kHz聲音的吸引力高於12kHz與2kHz，我們提出其發聲頻率與刺激強度具有相關。未來可應用於聲音監控與害蟲防治，作為生物防治策略的參考。

研究動機

聲音在自然界中不僅是動物溝通的工具，也可能承載重要訊息。大多數陸生等足目無發聲能力，唯正露丸鼠婦（*Armadillidium officinalis*）為少數例外。根據文獻，牠在受威脅時會捲曲並發出聲音，可能與溝通或防禦有關，但其意義未被完整解釋，為生物行為學的一大謎題。本研究透過分析正露丸鼠婦叫聲的波形與頻率，探討其發聲與轉向行為間的關聯，期望為生物聲學與行為生態學帶來新視角。

目的

(一) 探討正露丸鼠婦受到刺激後是否會發出聲音。

1. 觀察正露丸鼠婦捲曲型態及構造

2. 探討鼠婦發聲的頻率及波形

(二) 探討聲音對鼠婦聚集行為的影響

(三) 探討聲音的波形及頻率是否會影響鼠婦T字路口的選擇

(四) 探討聲音的波形及頻率對鼠婦交替性轉向反應的影響

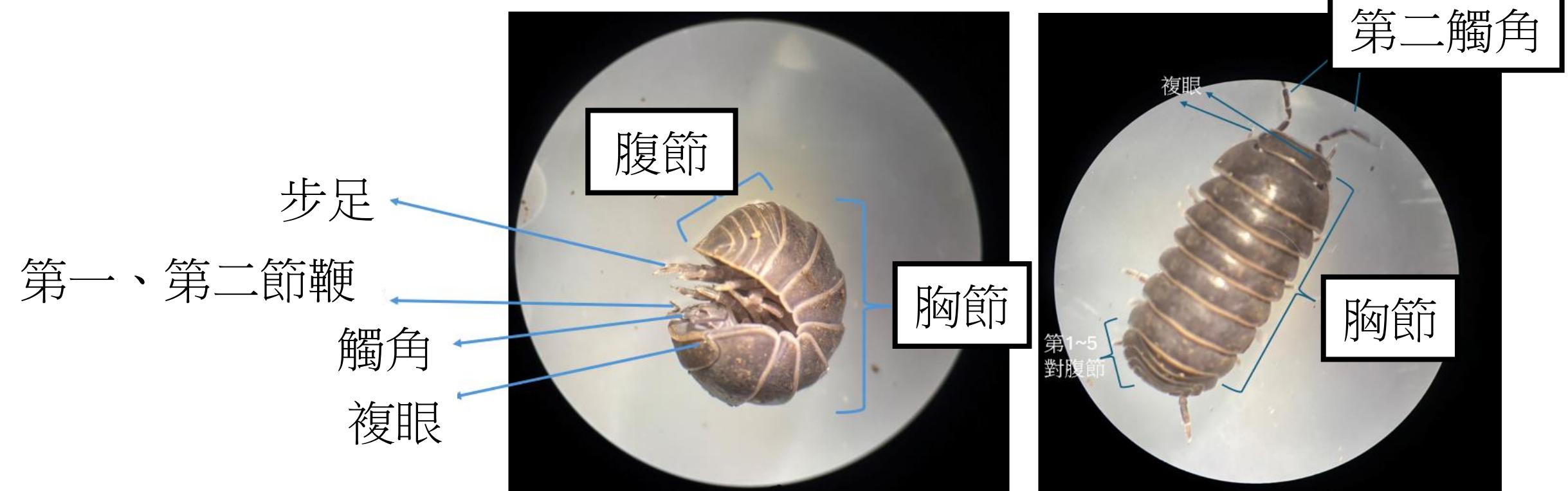


圖1.正露丸鼠婦(由作者拍攝)

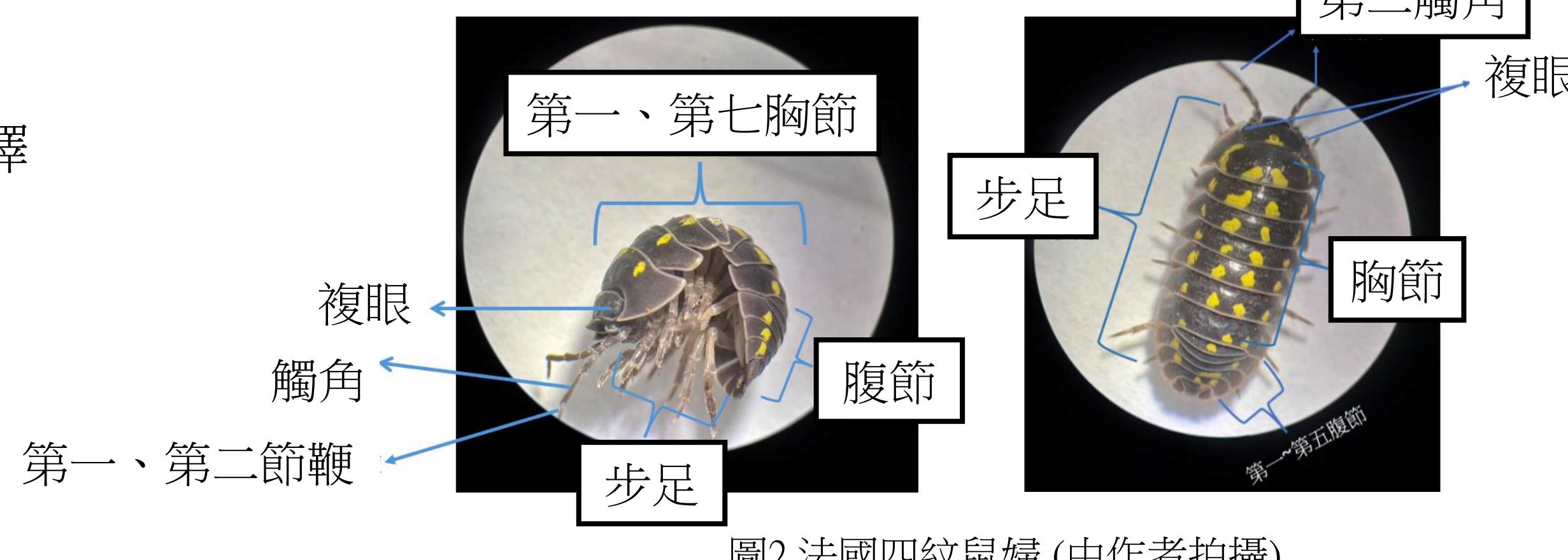


圖2.法國四紋鼠婦(由作者拍攝)

研究器材及方法

一、研究器材

Raspberry Pi 4B、25 cm×17 cm 飼養盒、3M透氣膠帶、水苔、園藝用培養土、BOYA BY-M1Pro 麥克風、SONY ICD-PX470錄音筆、IPEVO V4K 攝影機、解剖顯微鏡、喇叭、27mm壓電片、UCA222 錄音介面

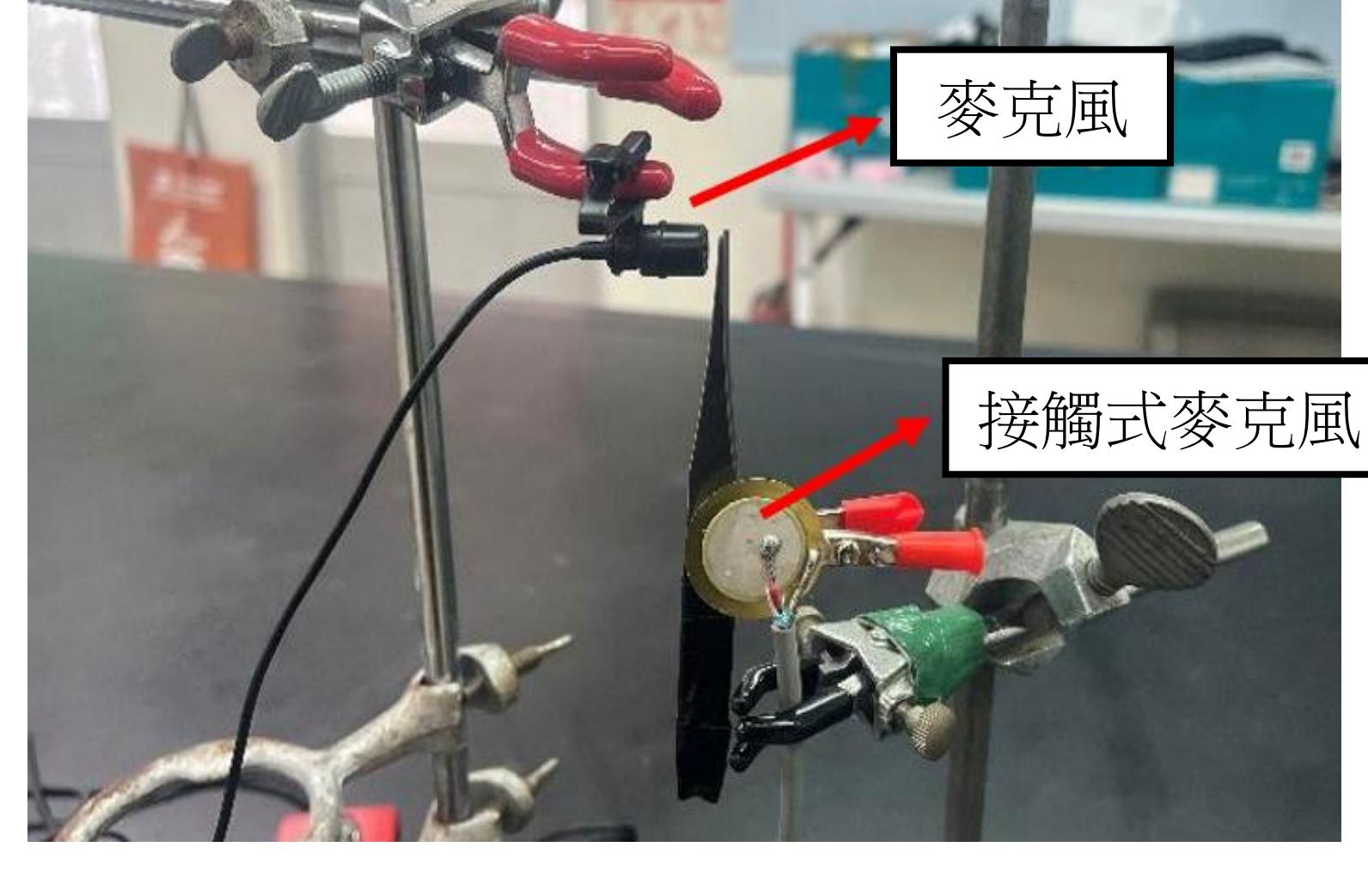
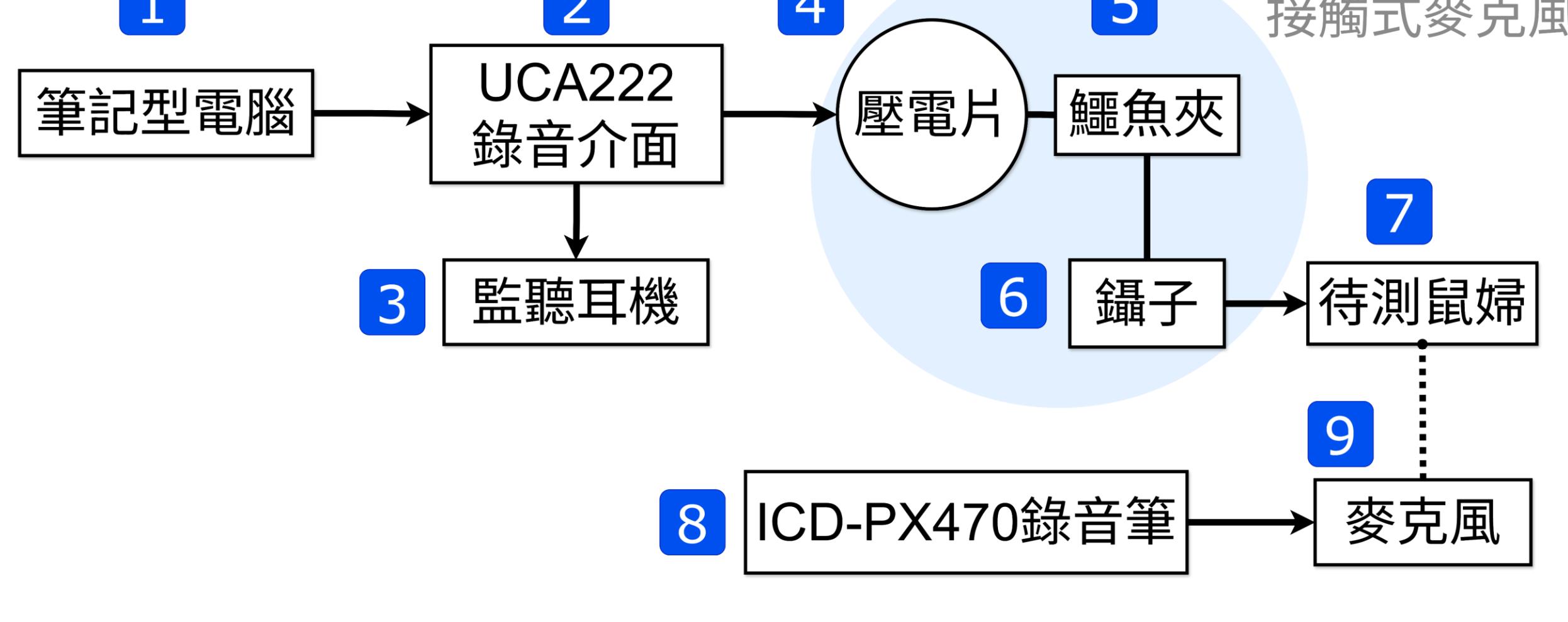


圖4.錄音裝置(由作者拍攝)

二、實驗設計

圖3.錄音裝置示意圖(由作者繪製)

聚集實驗

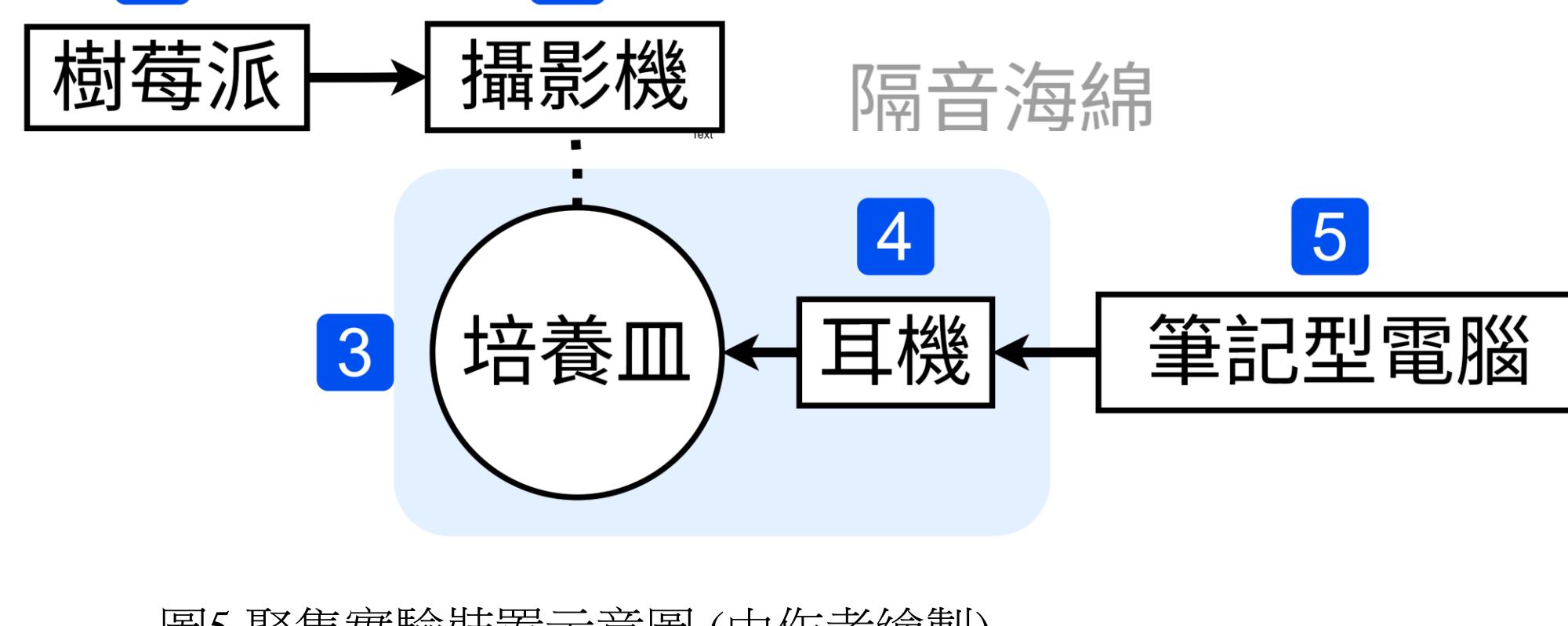


圖5.聚集實驗裝置示意圖(由作者繪製)

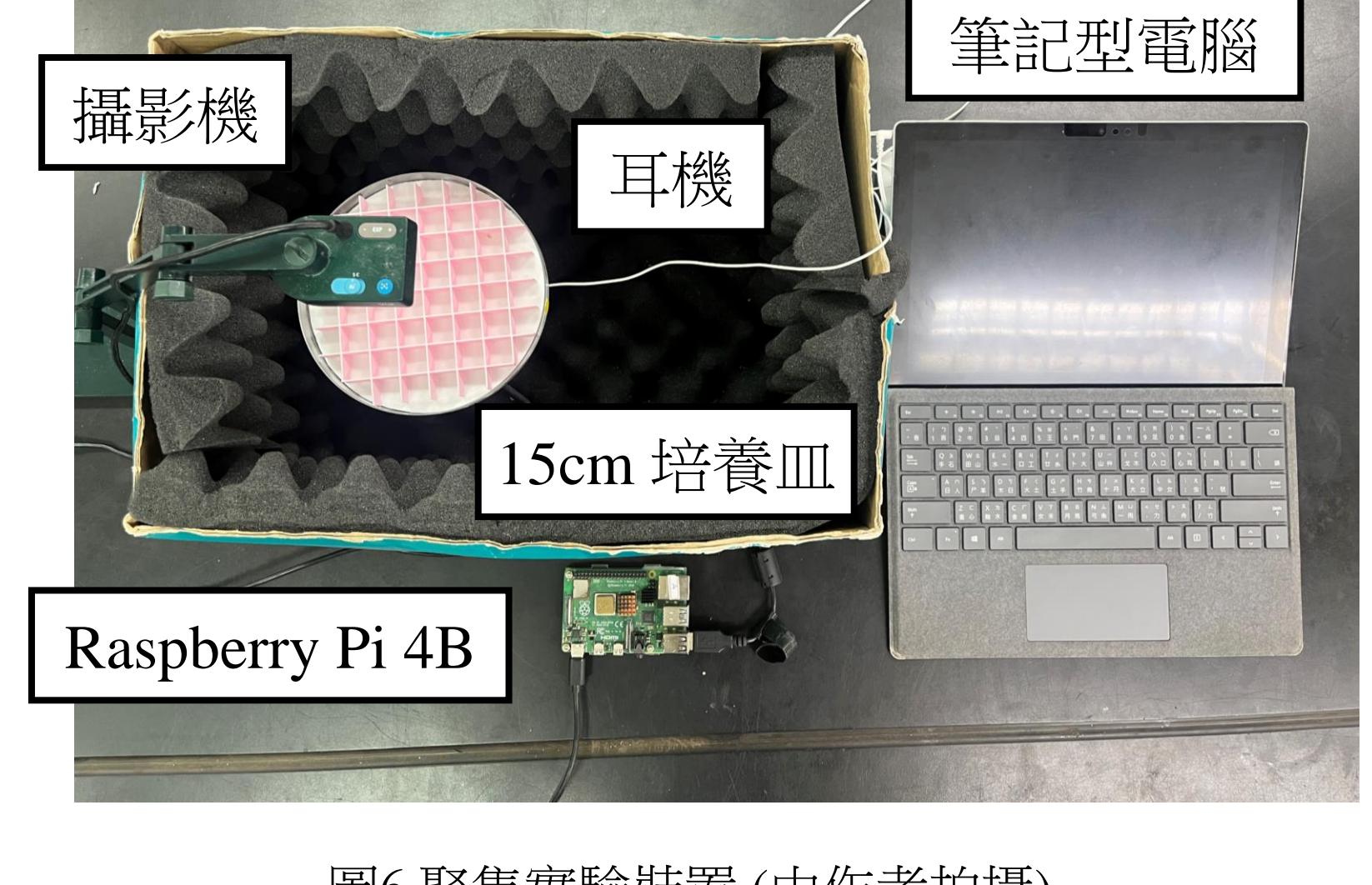


圖6.聚集實驗裝置(由作者拍攝)

卷積神經網路影像辨識

在Google Colab佈署Yolo，並標記150張照片中的鼠婦訓練模型，如圖7。並將實驗結果上傳雲端進行辨識，計算八個區域中每cm²上有多少隻鼠婦，匯出成Csv檔案進行繪圖。

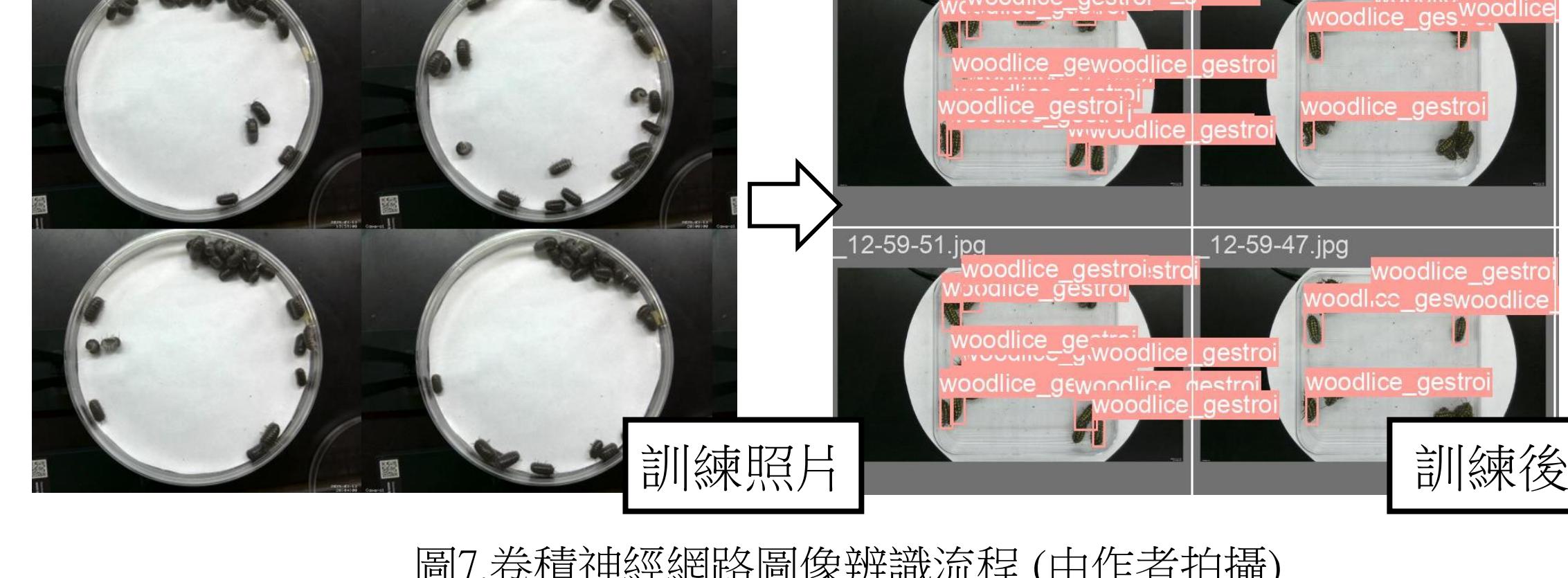


圖7.卷積神經網路圖像辨識流程(由作者拍攝)

T字迷宮及J型迷宮設計

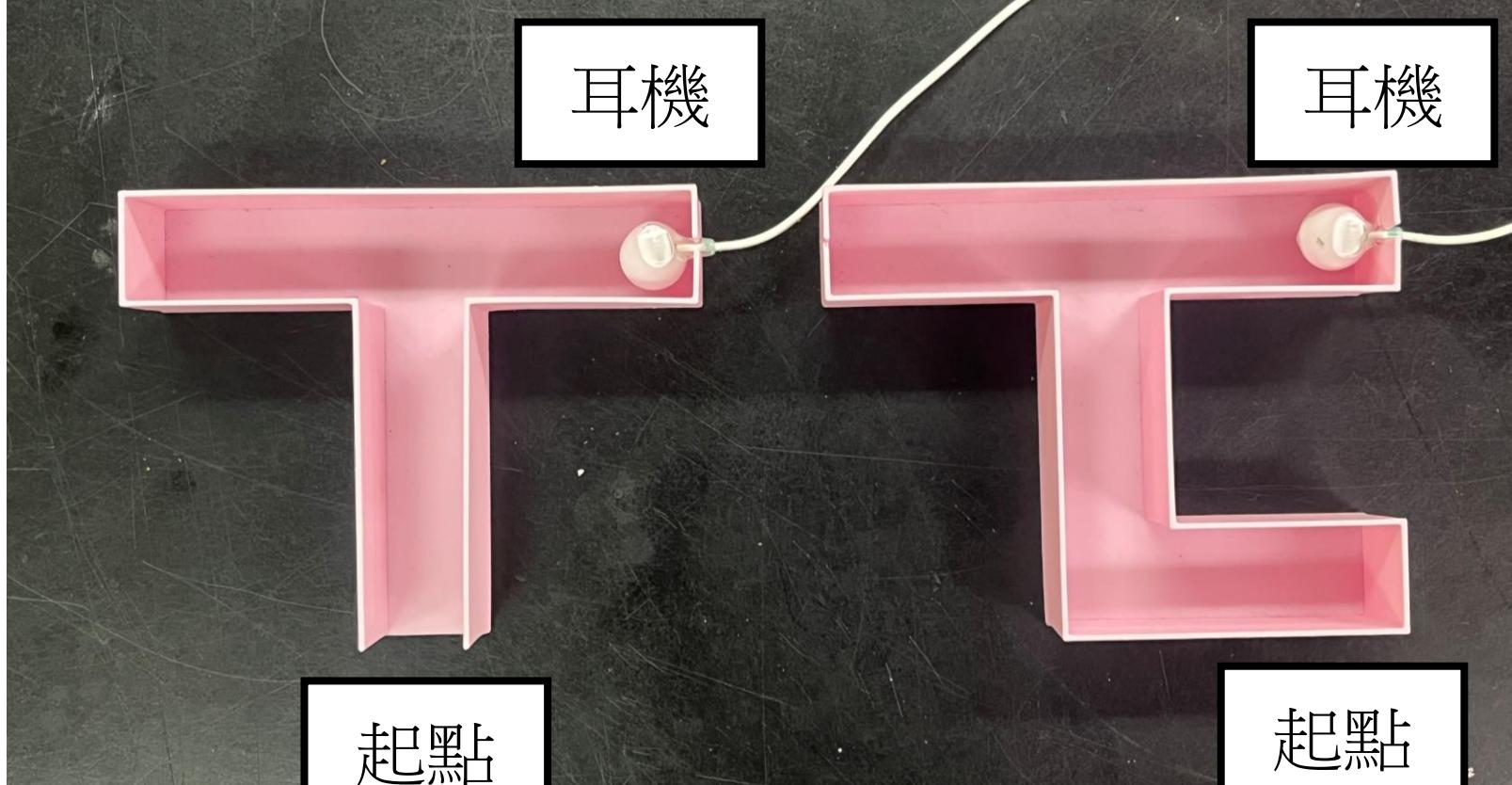


圖8.T字型與J字型迷宮(由作者拍攝)

1. 在T字型迷宮及J字型迷宮右側播放聲音
2. 每次放入一隻鼠婦在起點，直至鼠婦選擇轉向方向
3. 清理迷宮走道
4. 每組做20隻，並進行3重複

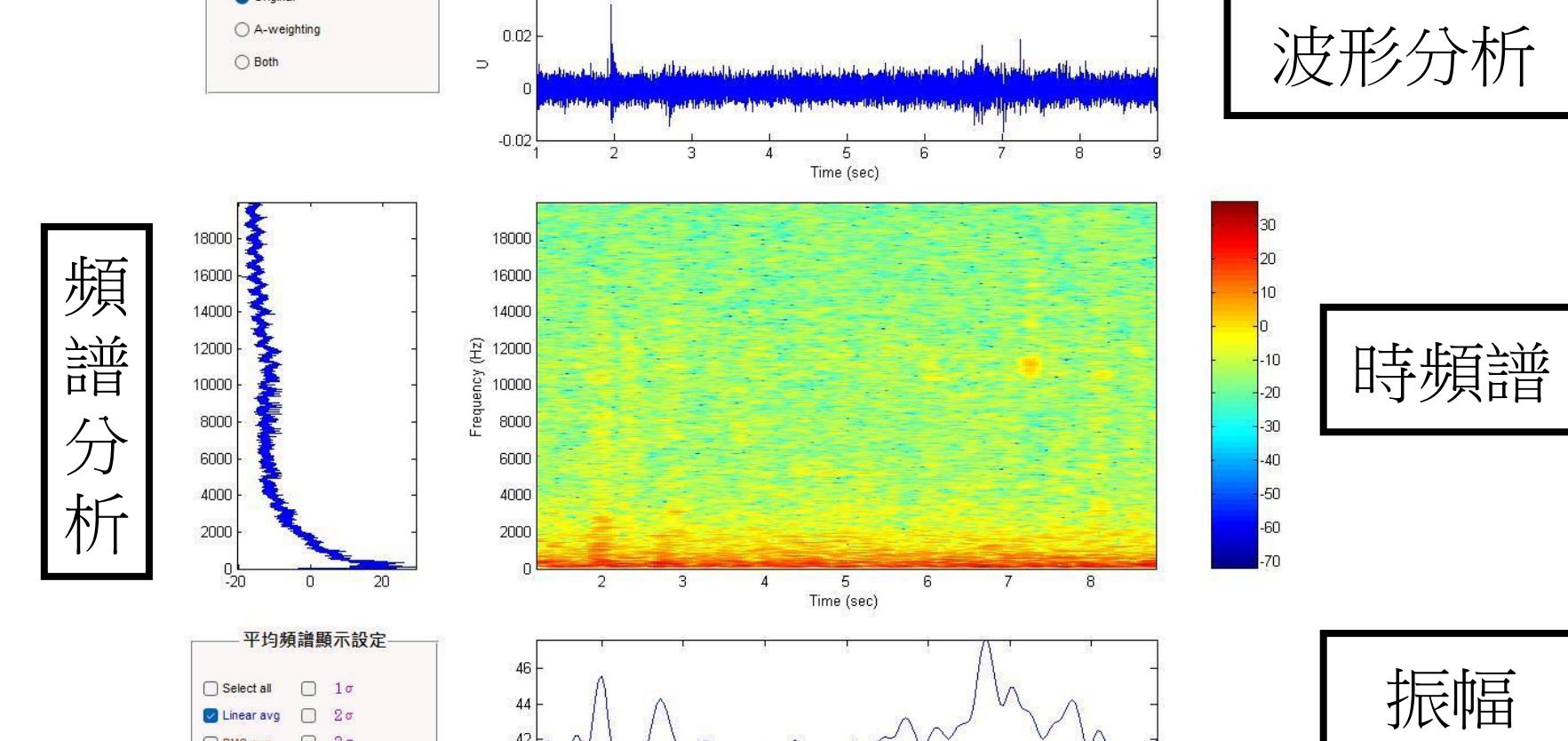


圖9.頻譜分析程式(由作者繪製)

實驗結果

一、頻譜分析

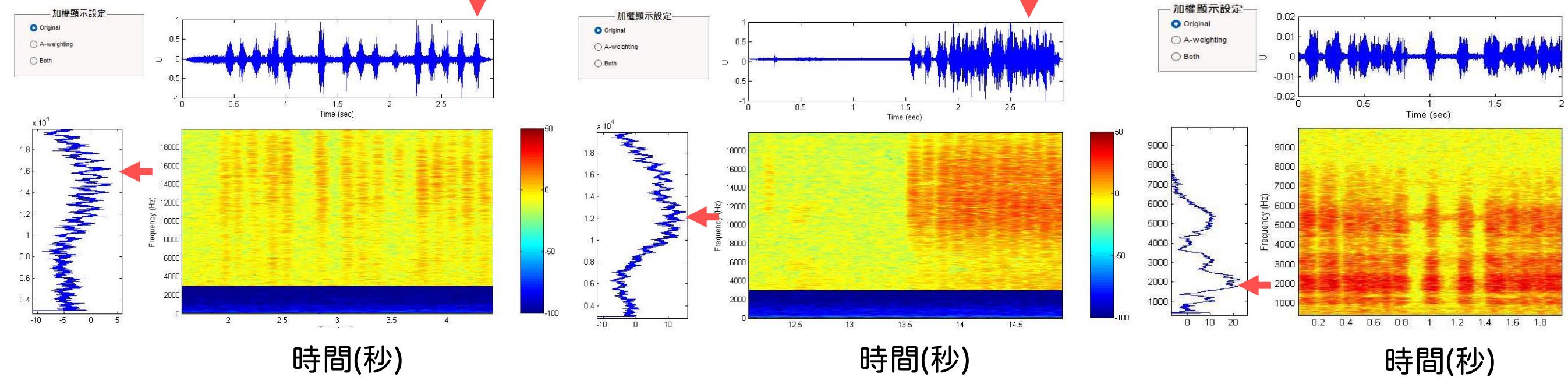


圖10.鼠婦叫聲圖譜分析(由作者繪製)

我們依頻率、波形分為三種聲音。第一種為頻率在15 kHz到17 kHz間的高頻和在12 kHz較多的次高頻，與較低頻的2 kHz

二、不同頻率及波形的叫聲對鼠婦聚集行為的影響

(一) 對照組：叫聲對正露丸鼠婦行為的影響

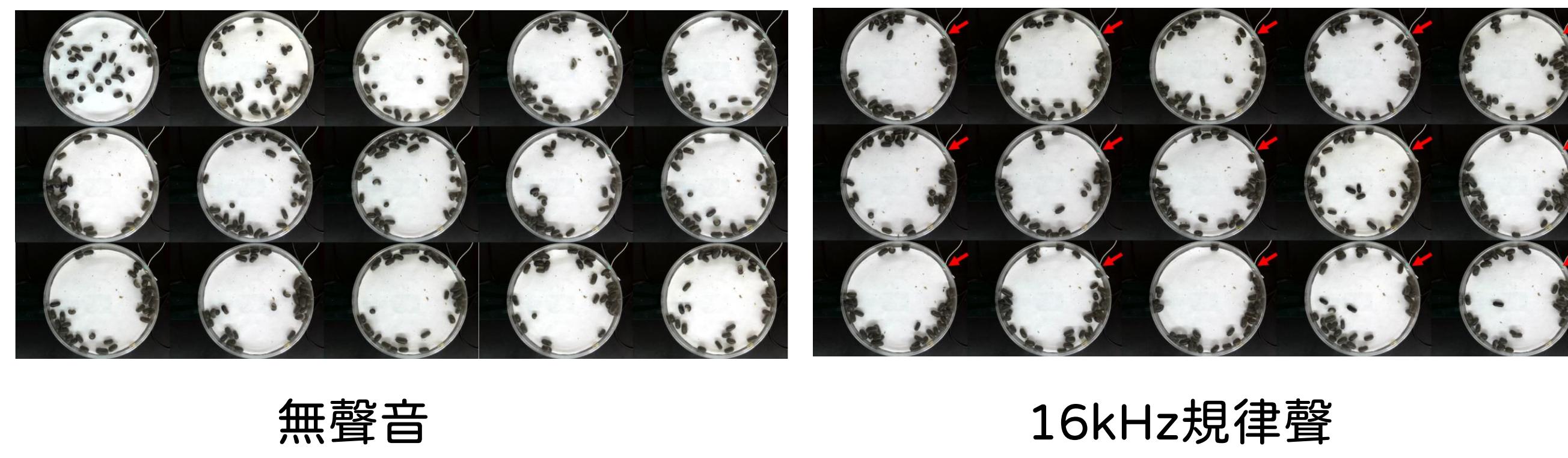


圖11.聲音對正露丸鼠婦聚集情形的影響(由作者拍攝)

(二) 頻率不同對正露丸鼠婦及法國四紋鼠婦聚集行為的影響

【正露丸鼠婦】

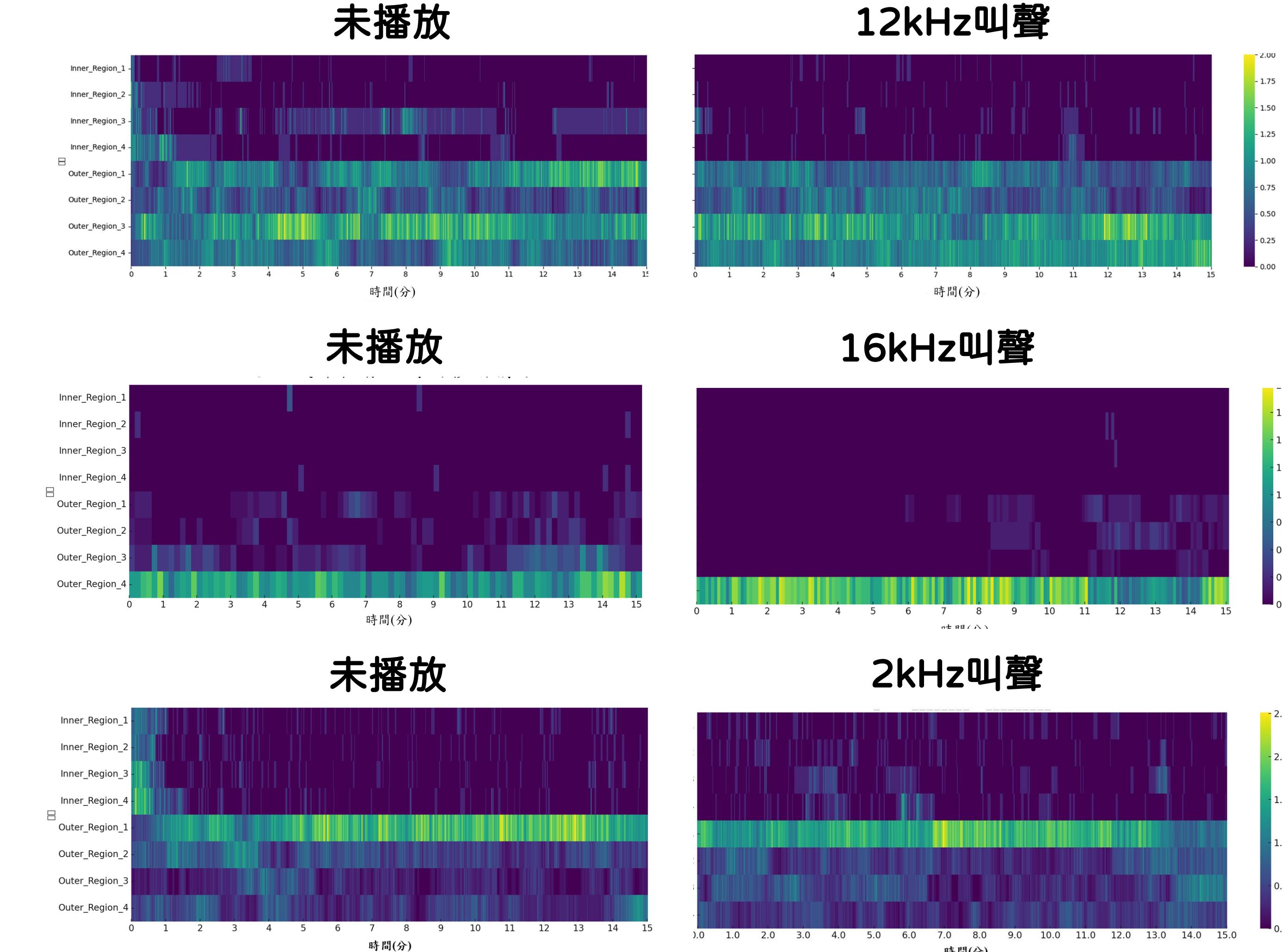


圖12.鼠婦移動情形之熱力圖分析(由作者拍攝)

【法國四紋鼠婦】

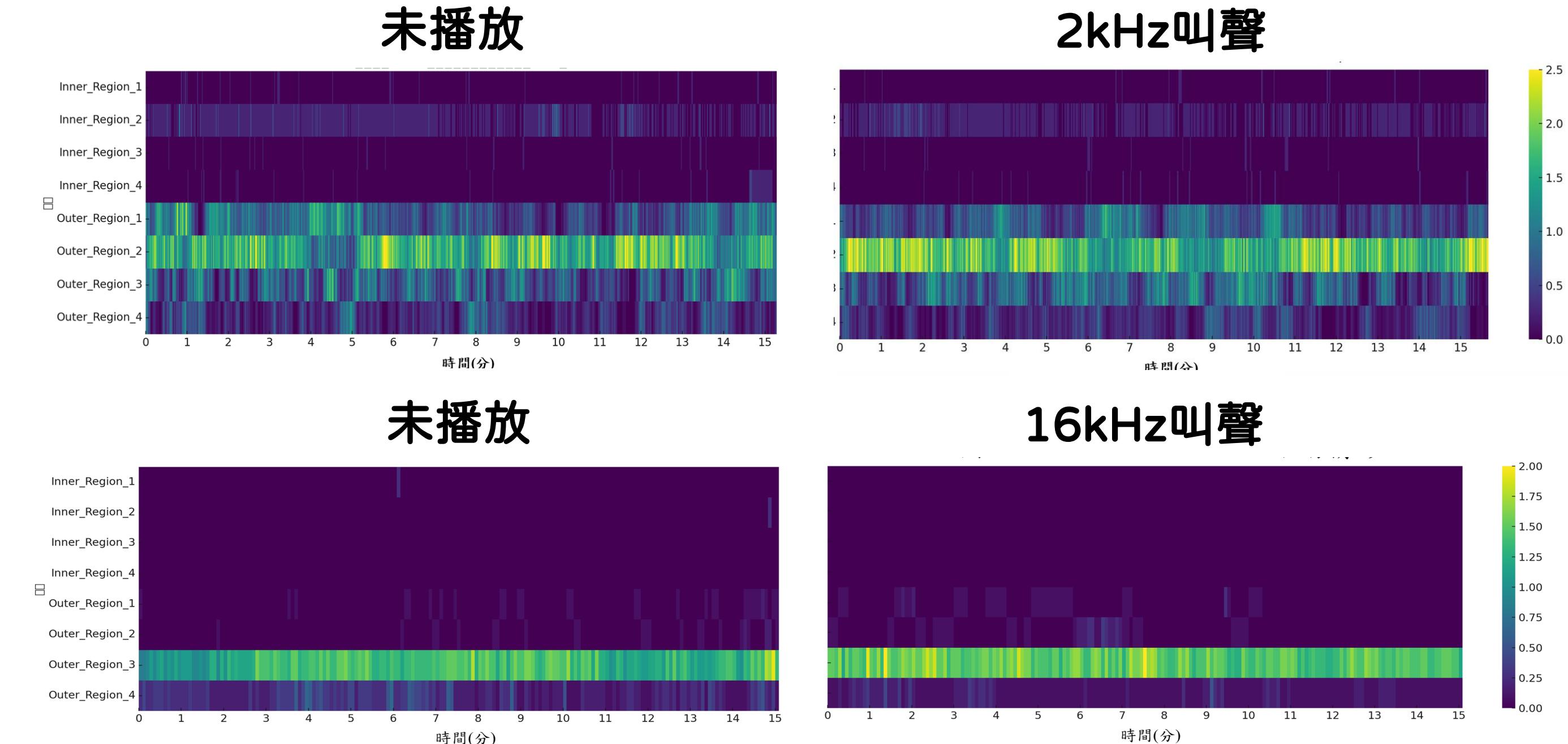


圖13.鼠婦移動情形之熱力圖分析(由作者拍攝)

三、播放鼠婦聲音對T字迷宮轉向行為的影響

【12 kHz規律聲】

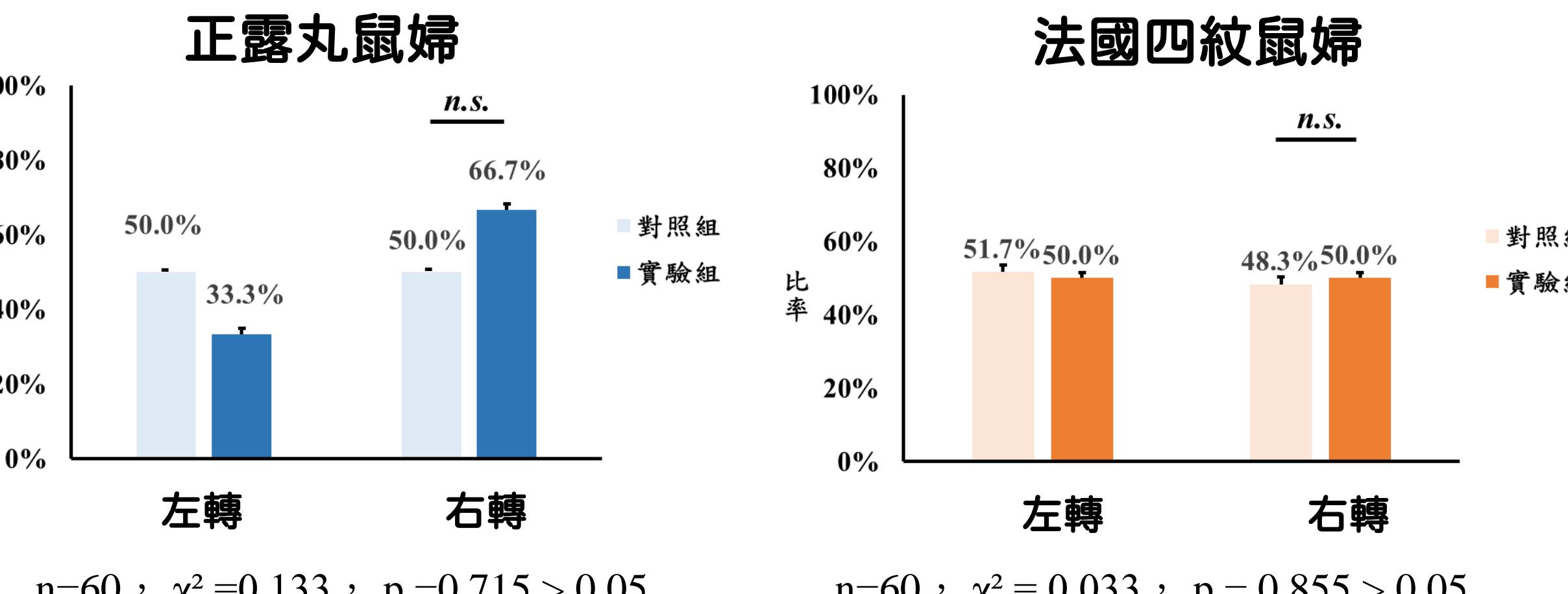


圖14.12 kHz規律聲對鼠婦T字迷宮轉向影響(由作者繪製)

正露丸鼠婦右轉比率從對照組50%上升至66.7%，法國四紋鼠婦右轉比率從48.3%上升到50%，提高1.7%，經卡方檢定，正露丸鼠婦、法國四紋鼠婦左右轉皆無顯著差異($p>0.05$)。

【12 kHz規律聲】

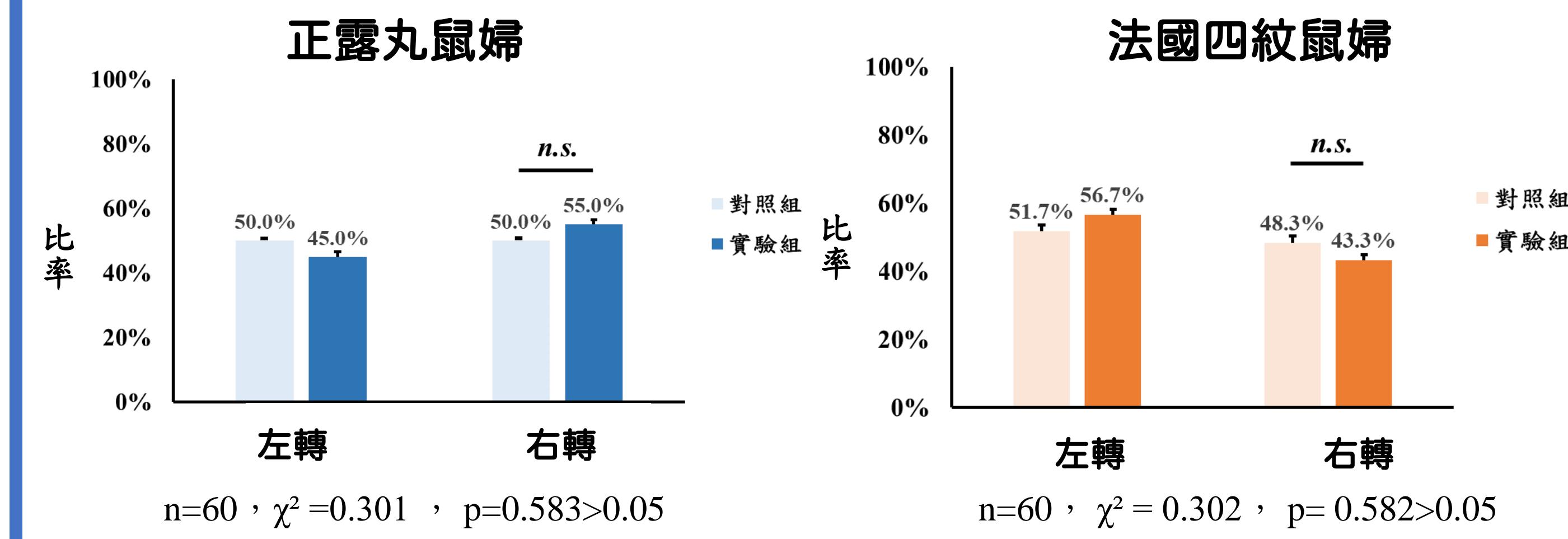


圖15.12 kHz規律聲對鼠婦T字迷宮轉向影響(由作者繪製)

發現兩種鼠婦在12 kHz規律型聲音影響下，左、右轉沒有顯著差異($p>0.05$)。

【16 kHz規律聲】

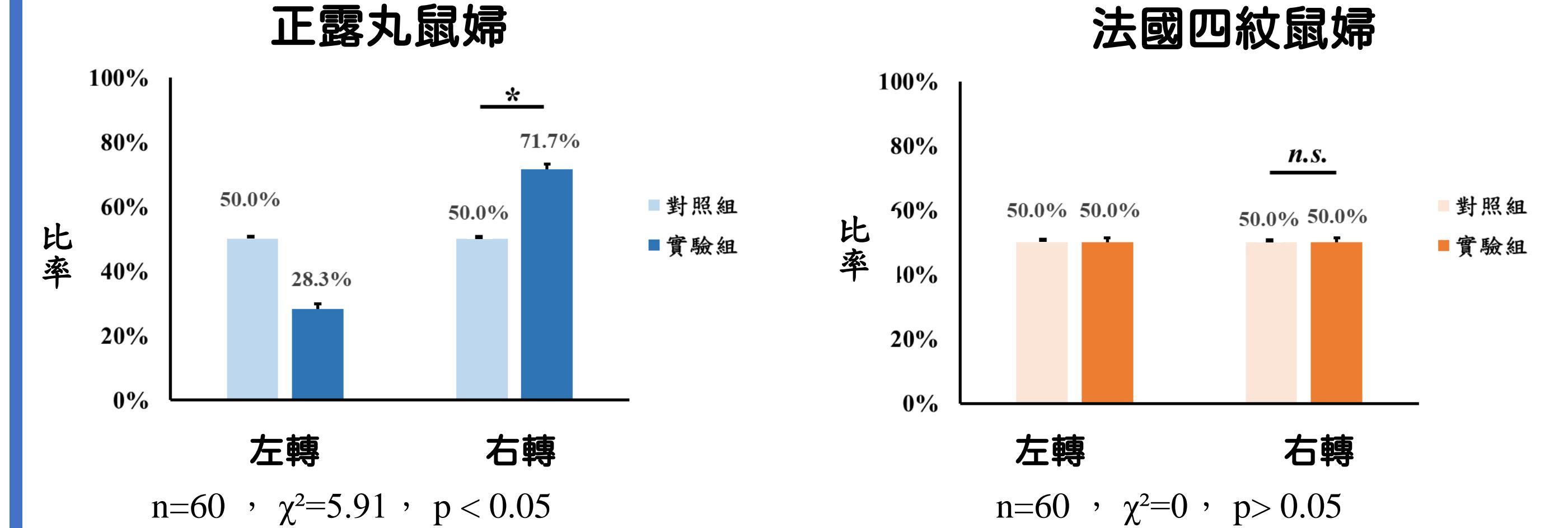


圖16.16 kHz規律聲對鼠婦T字迷宮轉向影響(由作者繪製)

兩種鼠婦相比，經卡方檢定 $p<0.05$ 具有顯著差異，法國四紋鼠婦實驗中該聲音沒有明顯影響。

【2 kHz基質傳遞】

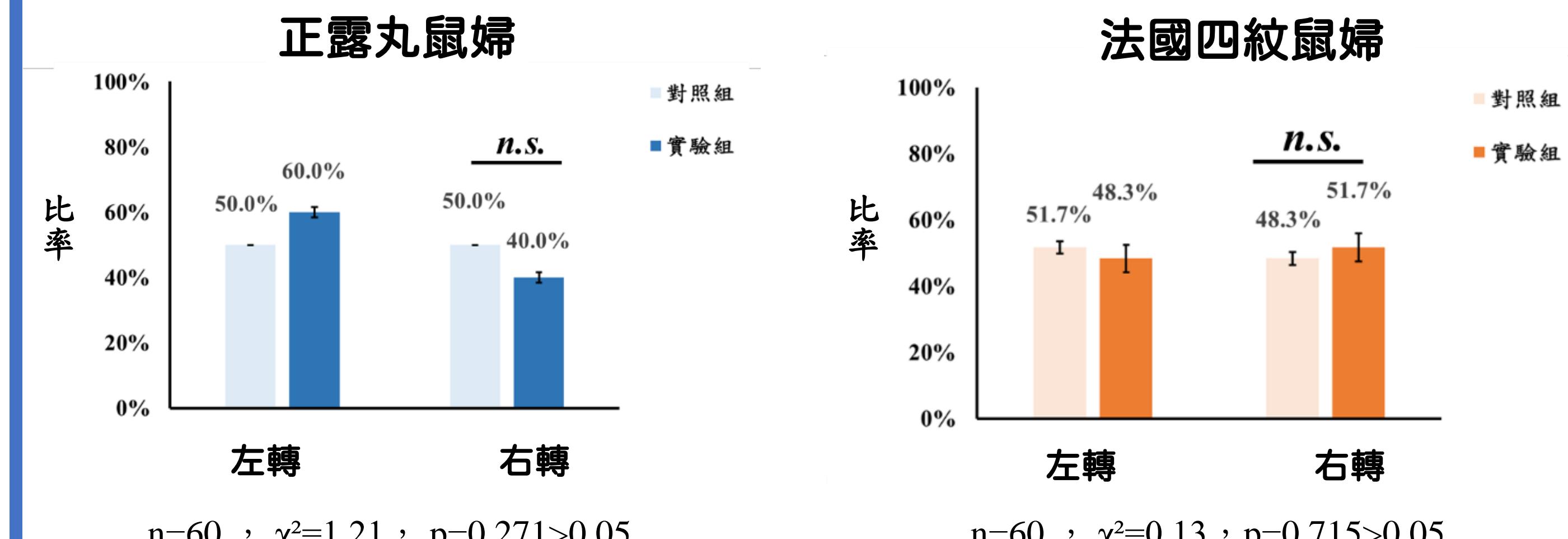


圖17.16 kHz規律聲對鼠婦T字迷宮轉向影響(由作者繪製)

實驗結果經卡方檢定顯示此種叫聲對於兩種鼠婦左右轉向的影響無顯著差異($p>0.05$)。

四、播放鼠婦聲音對鼠婦交替性轉向比率的影響

【12 kHz規律聲】

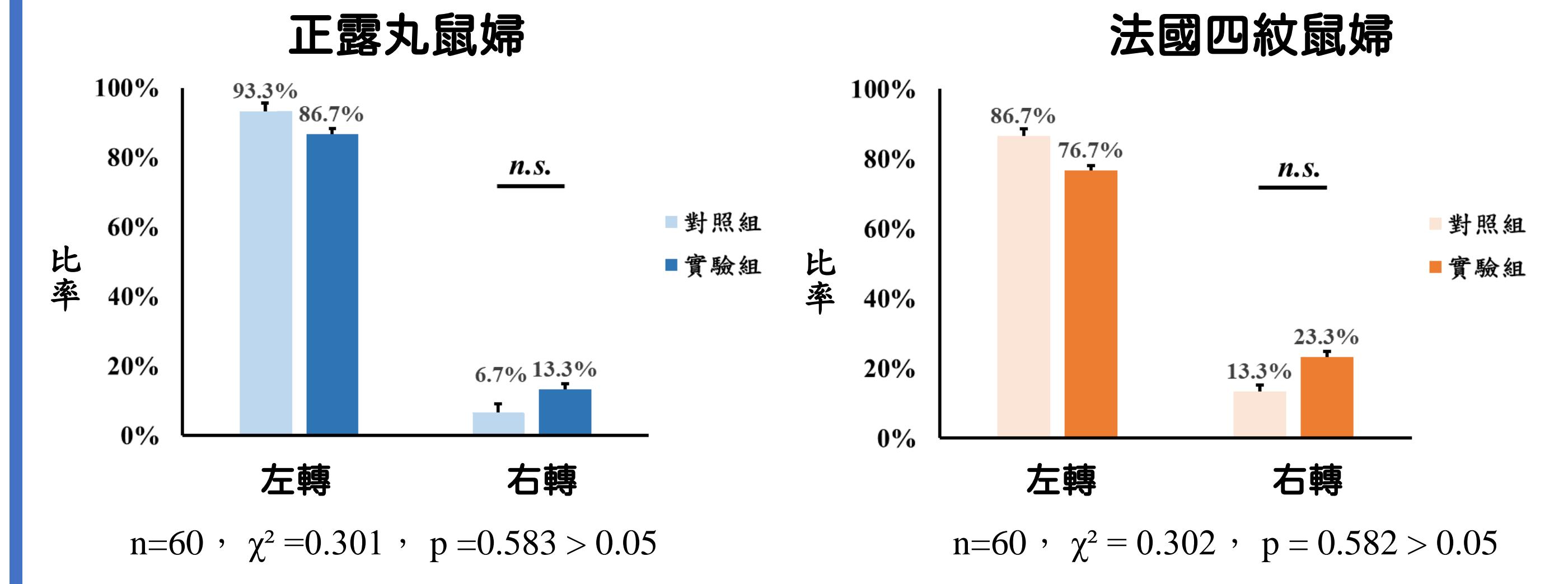


圖18.12 kHz規律聲對鼠婦J字迷宮轉向影響(由作者繪製)

在J字迷宮的右邊播放正露丸鼠婦12 kHz的規律型叫聲，實驗結果經卡方檢定顯示此種叫聲對於兩種鼠婦轉向無明顯差異。

【12 kHz急促聲】

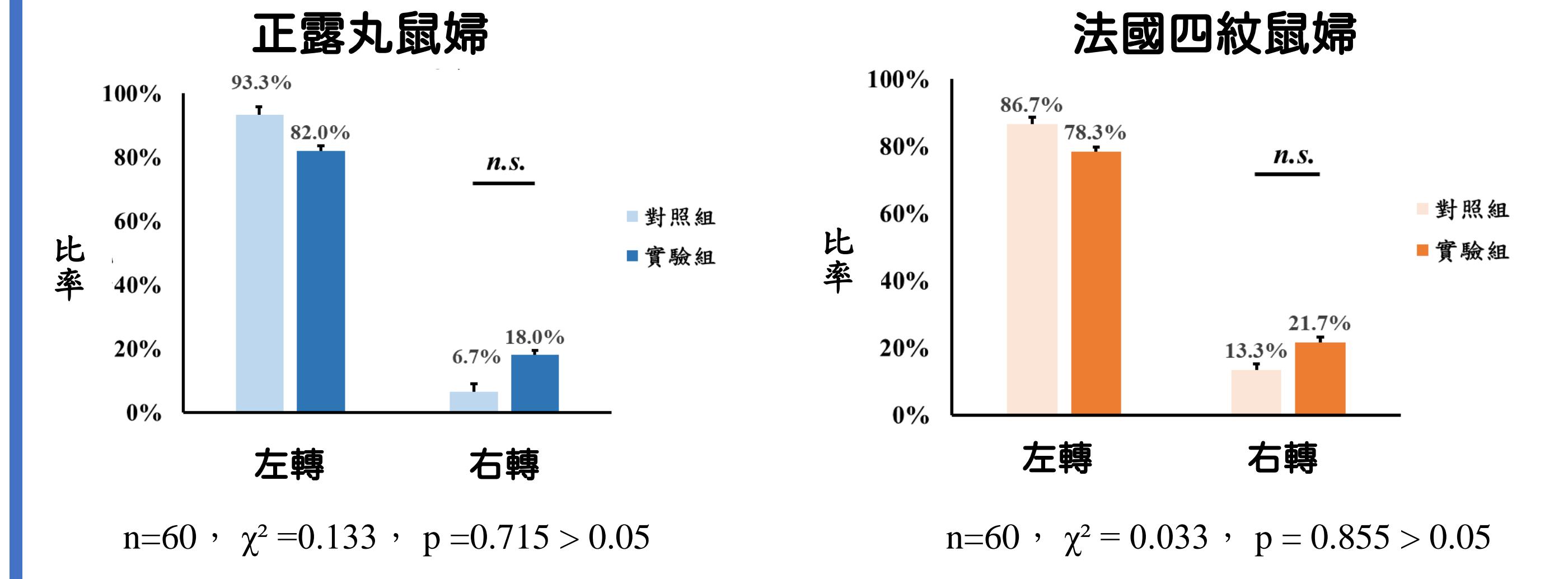


圖19.12 kHz急促聲對鼠婦J字迷宮轉向影響(由作者繪製)

正露丸鼠婦右轉比率從6.7%上升至18%，法國四紋鼠婦從13.3%上升至21.7%，經卡方檢定皆未達顯著差異。因此當鼠婦受交替性轉向的影響下，12 kHz的聲音並無明顯吸引轉向的現象。

【2 kHz聲基質傳遞】

正露丸鼠婦

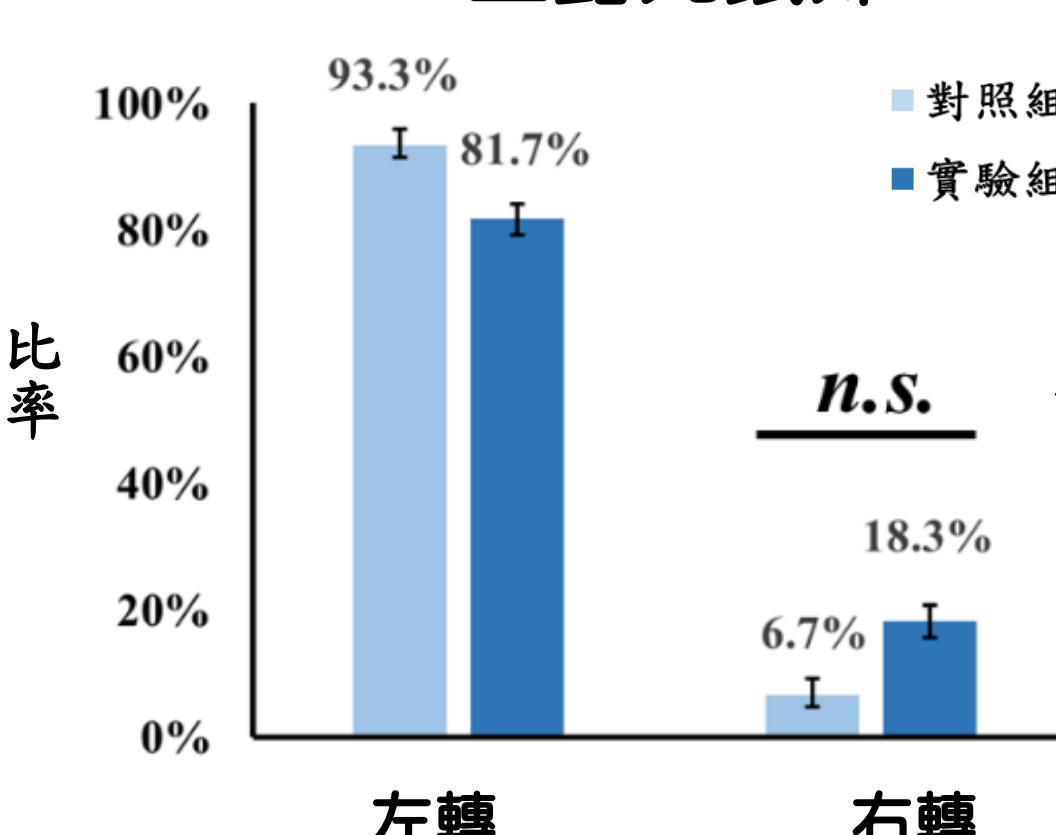


圖20. 16 kHz規律聲對鼠婦J字迷宮轉向影響(由作者繪製)

卡方檢定顯示對於正露丸鼠婦不具顯著差異，然而法國四紋鼠婦具有顯著差異 ($p<0.05$)。

【16 kHz規律聲】

正露丸鼠婦

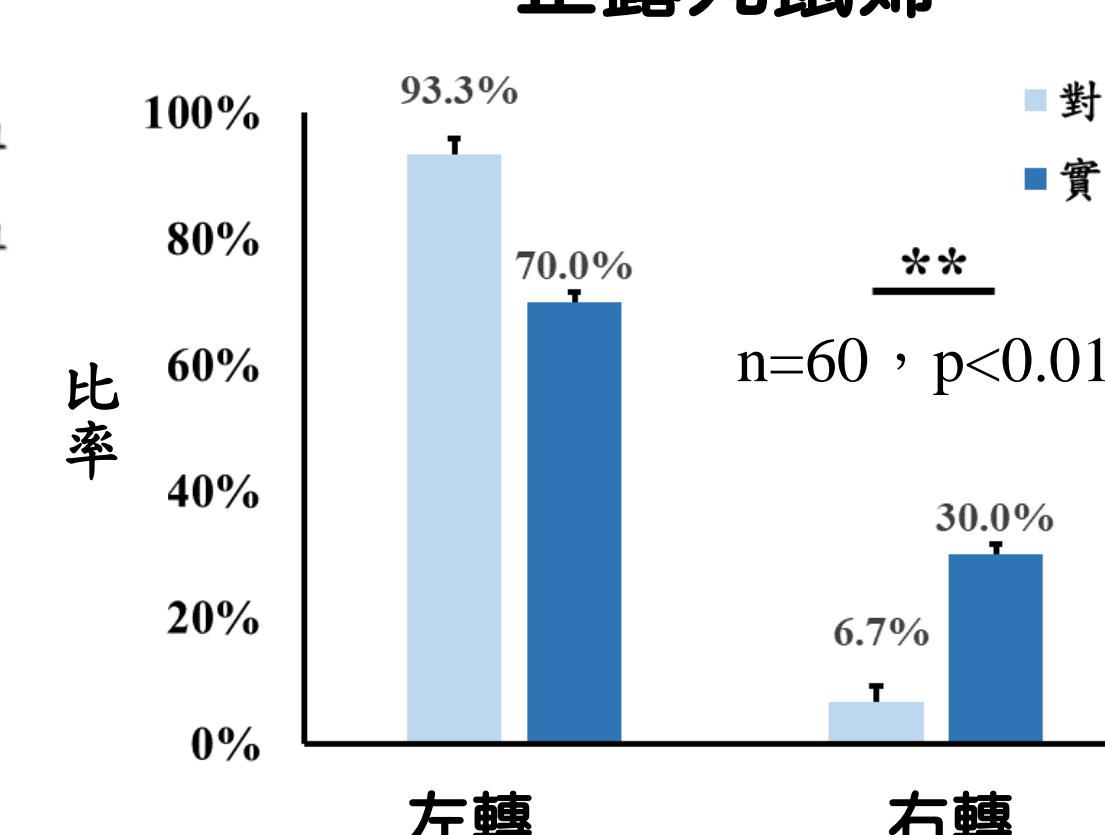


圖21. 16 kHz規律聲對鼠婦J字迷宮轉向影響(由作者繪製)

高頻(16 kHz)比起低頻(12 kHz)對正露丸鼠婦較有吸引作用；然後聲音的波形對於鼠婦選擇轉向並無明顯影響。

研究討論

一、聲音頻率對於鼠婦聚集行為的影響

Cividini (2020) 以毛筆刺激正露丸鼠婦發聲，記錄到單一波形、9 kHz 的聲音。本研究則觀察到 12 kHz 與 16 kHz 的高頻聲，並首次發現其與轉向行為相關。在 J 型與 T 型迷宮中，鼠婦皆傾向轉向聲源，顯示高頻聲具吸引效果。我們推測低頻為警告訊號，高頻聲為聚集訊號，頻率高低可能與外界刺激強度相關。

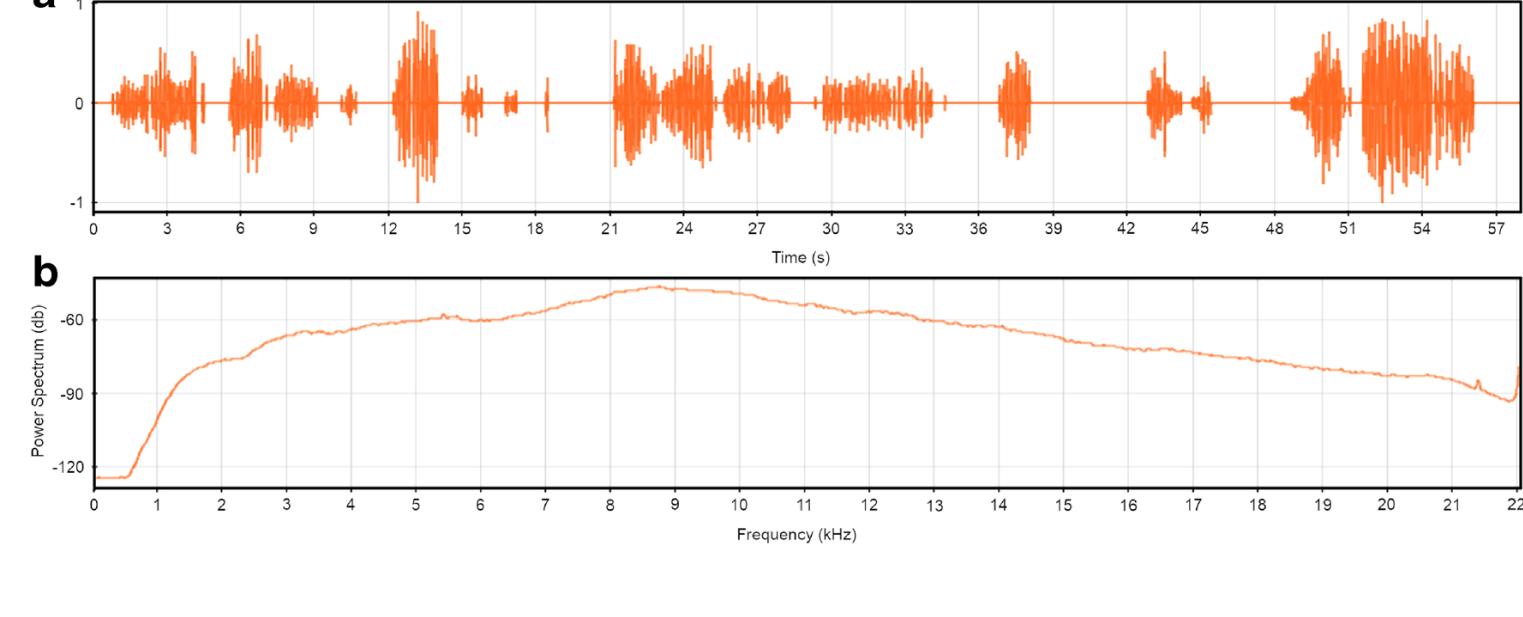


圖22. 以毛筆刺激時的頻譜圖(引用自Sofia Cividini , 2020)

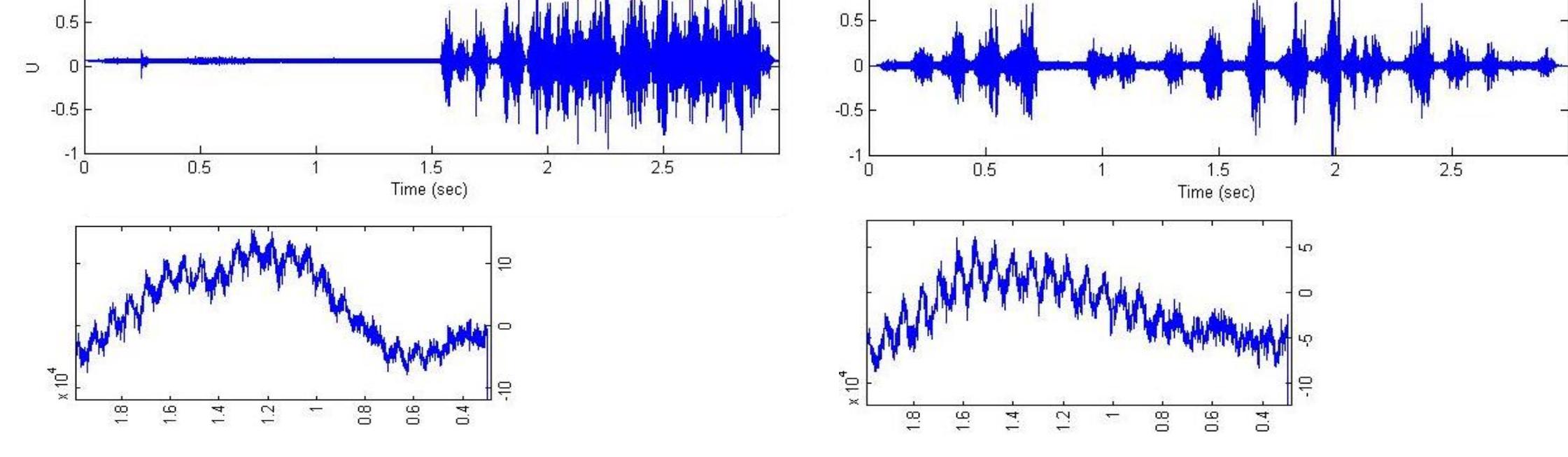


圖23. 本研究中正露丸鼠婦叫聲的頻譜分析(由作者繪製)

二、正露丸鼠婦發出叫聲對其生存上的意義

本研究中顯示，正露丸鼠婦發出 16 kHz 高頻聲時，其他個體會被吸引並短暫聚集，我們推認可能與稀釋效應 (Dilution Effect) 有關，有助於降低被捕食風險。圖 42 與圖 44 顯示，相較之下 16 kHz 比 12 kHz 更具吸引力，我們推測波形差異與外界刺激強度相關，干擾越強，發聲越急促。

三、聲音對鼠婦交替性轉向反應的影響

在本研究中，16 kHz 的高頻聲會影響正露丸鼠婦的交替性轉向反應，而對法國四紋鼠婦無影響，顯示出正露丸鼠婦有接受此頻率的受器且能產生反應。2 kHz 的頻率，法國四紋鼠婦的交替性轉向反應卻會受到影響(圖 20.)，此結果與我們的預期不符；然而雖然正露丸鼠婦在統計上並沒有顯著差異，然而卻能發現具有吸引的趨勢。

以上結果我們推測 2 kHz 可能不是刺激正露丸鼠婦的特殊受器，而且影響到鼠婦產生交替性轉向的行為，但整體而言，交替性轉向反應對鼠婦行為的影響仍大於發聲的吸引力。

研究結論

- 正露丸鼠婦在受到刺激或是驚嚇時身體會捲曲，且能夠發出聲音。
- 鼠婦聲音其波形可以藉相鄰週期差(ΔT)區分為急促聲與規律聲，然而 2 kHz 聲音的波型無明顯分別。
- 鼠婦聲音經頻譜分析頻率在 12 kHz、16 kHz 最多，藉接觸式麥克風錄製的聲音，其頻率以 2 kHz 出現最多。
- 正露丸鼠婦 12 kHz-16 kHz 的叫聲中，頻率越高對同類的吸引力越強，在相同的波形(規律聲)下亦是如此。
- 12 kHz 下，急促聲與規律聲對正露丸鼠婦及法國四紋鼠婦皆無吸引力。
- 正露丸及法國四紋鼠婦皆具有交替性轉向反應，16 kHz 的叫聲會影響正露丸鼠婦轉向比率，但交替性轉向反應的影響仍大於聲音的吸引力。
- 2 kHz 對兩種鼠婦在 T 字路口的左、右轉皆無吸引力，但對法國四紋鼠婦的交替性轉向反應有顯著影響。

未來展望

- 本研究探討正露丸鼠婦的聲音與基質振動對行為的影響，未來將以加速度規深入分析其行為模式。
- 鼠婦為農業害蟲，研究發現其會受聲音吸引，未來可利用聲波設計取代農藥進行害蟲控制。
- 鼠婦發聲受環境變化影響，聲音特徵可作為生態監測指標，反映微氣候與棲地變動。
- 長期聲音監測有助評估生態系統退化與恢復，並支援綠化與保育決策。

參考文獻

- Peggy S. M. Hill,(2009).How do animals use substrate-borne vibrations as an information source?
- Daniel Beam,(2015).Pill Bug Concert: A Look at Pill Bugs Musical Preference
- Pierre Broly, Romain Mullier, Jean-Louis Deneubourg, Cédric Devigne(2012).Aggregation in woodlice: social interaction and density effects