

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 動物與醫學科

佳作

052004

視覺訊息與精選熊蜂學習行為的關係

學校名稱：高雄市立高雄高級中學

作者： 高二 廖本恩 高二 劉柏賢 高二 鄞振祐	指導老師： 謝佳昌
---	------------------

關鍵詞：精選熊蜂、視覺訊息、學習行為

摘要

本實驗藉著給予精選熊蜂不同視覺訊息以了解其學習行為，並驗證臺灣精選熊蜂 (*Bombus eximius*) 是否也能像國外的歐洲熊蜂 (*B. terrestris*) 一樣具有學習更複雜行為的潛能。臺灣精選熊蜂最偏好藍色、直徑 3.2cm 的花。接著藉不同視覺訊息理解其學習行為，發現經訓練後，受顏色刺激前往較不偏好人造花的比例高於尺寸的刺激（顏色：94.92%、62.5%，尺寸：37.07%、36.84%）；在認知回復方面，因顏色刺激產生的反應改變較快（顏色：75.53%、41.53%，尺寸：8.78%、13.76%），說明熊蜂對顏色刺激較敏感，且其對顏色刺激的認知改變較快，有較明顯學習行為。在驗證精選熊蜂能否學習更複雜行為實驗中，發現精選熊蜂能透過人為訓練學習複雜行為。綜上所述，期望能對熊蜂學習行為更深入了解，將其應用於農業。

壹、研究動機

蜜蜂對人類社會是不可缺少的物種，但近年來因為人類對環境的破壞導致蜜蜂數量快速減少，盡快找到解決方法就是當務之急；而學校老師也在研究代替蜜蜂授粉的物種——臺灣精選熊蜂。在查詢資料後得知熊蜂因為體型大、耐力好等因素，能採集比蜜蜂更多的花粉(生態農業高效節能技術，2016)，在台灣也有使用熊蜂為溫室番茄授粉的例子(郭，宋，2013)。

比較熊蜂與蜜蜂的不同，我們從阮長春等人(2007)的研究中得知熊蜂的社會化程度沒有像蜜蜂這麼高，訊息交流也不發達。Chittka 等人(2016)的研究中指出歐洲熊蜂(*B. terrestris*)能藉由觀察周遭事物發展出新行為，在 Chittka(2017)的另一個研究中則指出歐洲熊蜂可以被人為教導學會複雜的行為，引發了我們對於熊蜂學習行為的好奇。Spaethe & Weidmüller(2002)的研究中指出視覺訊息會影響歐洲熊蜂的覓食及飛行行為，我們就想以視覺訊息探討臺灣精選熊蜂的學習行為，以及臺灣精選熊蜂是否能像歐洲熊蜂一樣，藉由人為教導完成複雜的行為。

貳、研究目的

一、了解精選熊蜂對不同視覺訊息之偏好程度

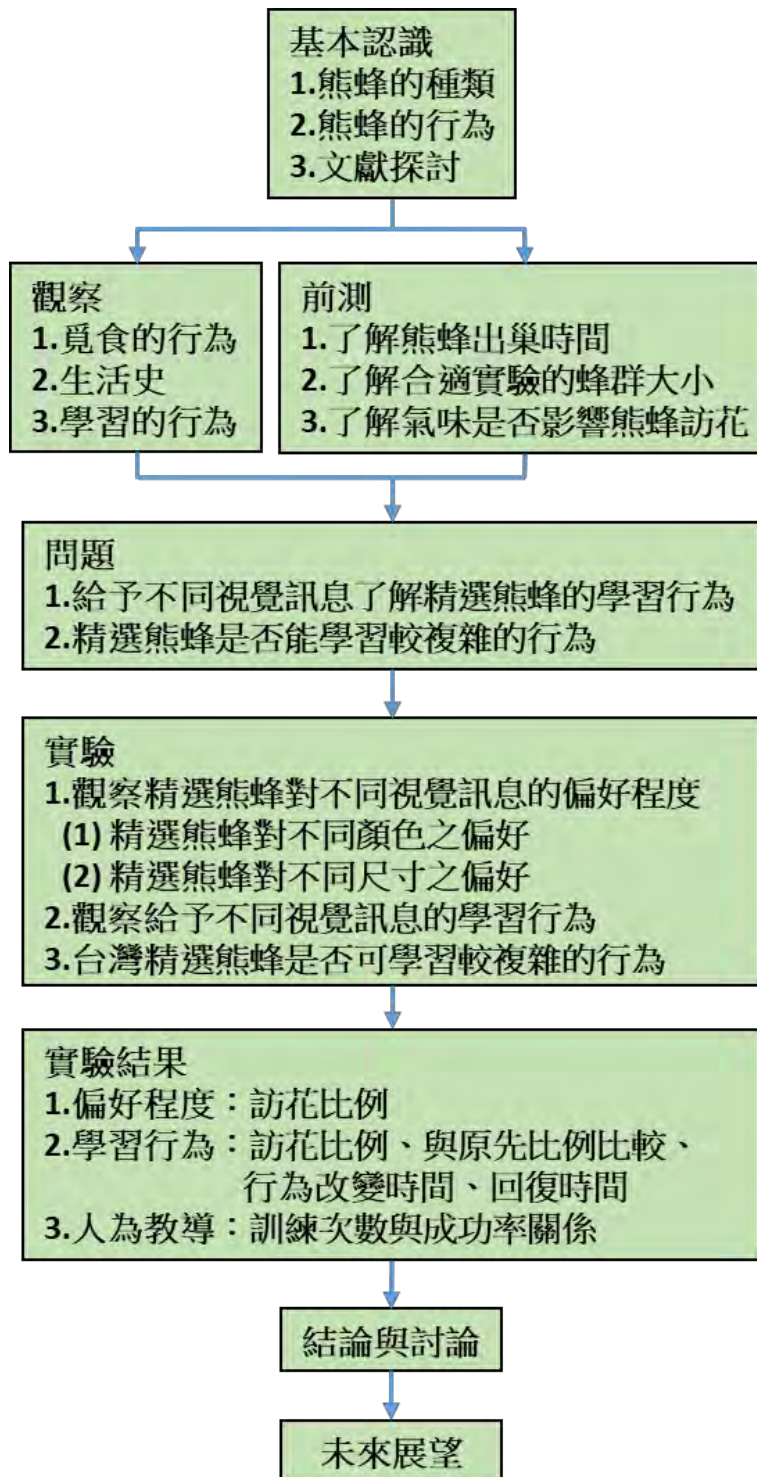
(一) 精選熊蜂對不同顏色之偏好程度

(二) 精選熊蜂對不同尺寸之偏好程度

二、透過不同視覺刺激，了解精選熊蜂的學習行為

三、了解台灣精選熊蜂是否能藉由人為教導學會複雜行為

參、實驗架構



肆、實驗物種介紹

一、實驗物種：精選熊蜂 *Bombus eximius*(圖一)

二、生物學分類：

三、生活史：熊蜂為膜翅目、蜂科、熊蜂屬，全球約有 250 個以上物種，臺灣已知 9 種(郭，宋，2013)。熊蜂的生活史以一年為一個週期。蜂后交配後鑽入土壤休眠，開始築巢，一開始蜂后会先建造蠟蜜罐及花粉庫，並且將一些花粉與蜜混合製成球，於其上產下 4~6 個卵，以花粉餵養幼蟲，經過約 20 天之後羽化成第一批工蜂，工蜂的壽命約四周，一巢精選熊蜂可達 100 隻蜂以上(江，宋等，2006)。蜂巢會持續發展並在約四個月開始出現雄性，在成年雄性出現約一至二周後會誕生新的蜂后(江，宋等，2006)，最終蜂巢崩解。

四、特徵：

熊蜂與蜜蜂有很多不同處，後腳具有脛距，能沾黏更多花粉(郭，宋，2013)，而蜜蜂則無；熊蜂和蜜蜂一樣是社會性昆蟲，但社會化程度較低，像是熊蜂不能像蜜蜂用跳舞傳遞訊息；在授粉上，熊蜂訪花效率較好，體型較大，採粉量也較多；熊蜂在陰天也出巢訪花，而蜜蜂在陰天的訪花行為較不明顯。

五、農業運用

(一) 運用方式：目前熊蜂主要被運用於溫室授粉

(二) 授粉作物：苜蓿、番茄、茄子、甜椒、蘋果、草莓、甘藍…等(Brodie, 1996)

(三) 授粉優點(與使用蜜蜂相比)

1. 熊蜂在 8°C 以上即可出巢訪花，蜜蜂則需要 16°C 以上(郭，宋，2013)
2. 口器(9~17mm)比蜜蜂長(5~7mm)，可以對具有長而窄的花冠的花授粉
3. 熊蜂全身披覆絨毛，且毛具有分支，容易沾上更多花粉(Brodie, 1996)
4. 翅膀聲震大(郭，宋，2013)，可對如番茄、茄子、草莓等花需要被振動才釋出花粉的植物具有較良好的授粉效果。

(四) 全球使用情況：

熊蜂自 1987 年開始被商業化飼養後，在溫帶地區農業的應用日益增加，到 2004 年，

商業飼養的熊蜂已經突破百萬群。在日本、荷蘭、紐西蘭等多國都有採用，而其中日本使用熊蜂授粉的溫室番茄已經突破全國的 70%，顯示出熊蜂對許多國家的農業有不可忽視的幫助。

(五) 臺灣目前應用情形：

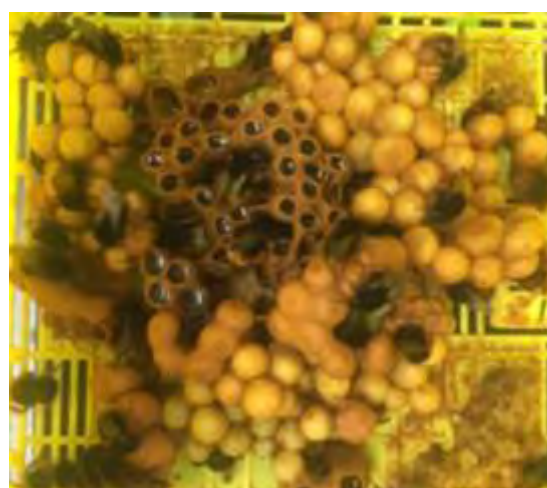
臺灣目前主要將熊蜂應用在番茄的溫室授粉(郭，宋，2013)，在 1994 年臺灣省政府農林廳蠶蜂業改良場就已從荷蘭引進熊蜂用於網室授粉，目前全台都有使用熊蜂授粉的番茄溫室農場。

六、實驗動物(精選熊蜂)取得：

自臺灣中部山區捕捉休眠後的蜂后，並在實驗室養殖成一完整蜂群(工蜂 20-30 隻)，以進行實驗(圖二)。



圖一 精選熊蜂蜂后



圖二 可進行實驗的熊蜂蜂群

伍、實驗器材

一、熊蜂飼養用具（圖三）：

（一）目的：培育出適合實驗（工蜂 15~35 隻）的蜂群

（二）器材：

1. 3D 列印蜂箱（相較木箱較易清理及觀察）
2. 糖水罐
3. 糖水（濃度 50%）
4. 吸水棉
5. 花粉泥（濕花粉+糖水）
6. 報紙（墊於蜂箱下方承接排泄物）



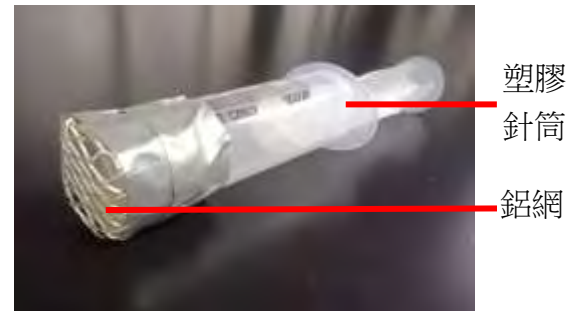
圖三 蜂箱

二、熊蜂標記用具（圖四）：

（一）目的：觀察個體的學習行為

（二）器材：

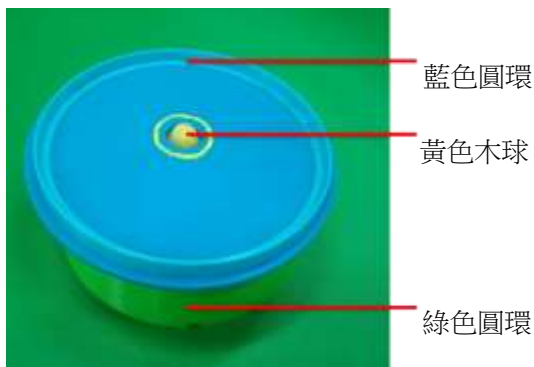
1. 塑膠針筒（切除封閉端）
2. 鋁網（黏於塑膠針筒已切除的封閉端位置）
3. 強力膠（氰基丙烯酸甲酯）
4. 尖嘴鉗
5. 藍色圓形標籤
6. 紅色油性筆
7. 厚紙板
8. 打洞器（能打出直徑 0.2cm 之圓形）



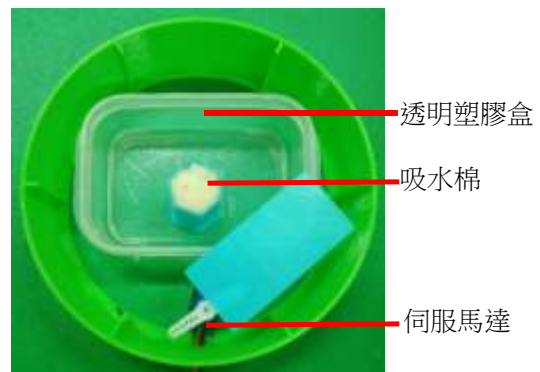
圖四 標記器

三、圓盤組（圖五）：

（一）目的：作為觀察及訓練熊蜂將球推至指定點的場地



圖五 圓盤細部介紹



圖六 圓盤內部構造

(二) 器材：

1. 藍色壓克力圓盤（直徑 14cm，厚 0.3cm，中心有一直徑 1.5cm 的孔洞）。孔洞周圍以黃色油漆筆畫一直徑 2.5cm 圓圈，該圓圈為判定成功標準。底下放有糖水
2. 3D 列印綠色圓環（直徑 12cm，高 3.5cm，架高藍色壓克力圓盤，使裝有糖水的塑膠盒可放入，底部有一小孔使 Arduino 電線可穿出）
3. 3D 列印藍色圓環（直徑 12cm，高 1.2cm），為防止木球掉落。
4. 黃色木製半圓球
5. 透明塑膠盒（長 8cm、寬 4.4cm、高 3cm，內放有糖水）
6. 吸水棉

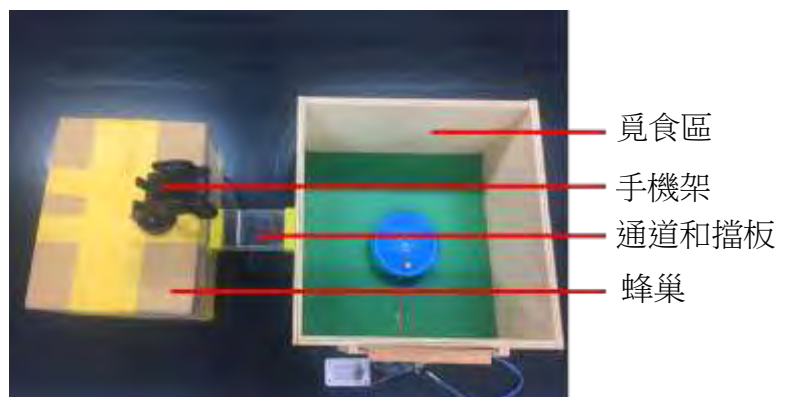
(三)器材設置:將裝有糖水的透明塑膠盒放入 3D 列印綠色圓環(為模擬自然環境使用綠色，並且與底部珍珠板顏色相同，使熊蜂注意藍色圓盤)內，並蓋上藍色壓克力圓盤，使熊蜂可從圓盤中央孔洞吸食糖水。

四、小木箱組（圖七）：

(一) 目的：較小的活動空間，熊蜂一進入後，較容易注意到中央的圓盤組，可提升前往圓盤組的機率。

(二) 器材：

1. 紙箱（罩住飼養箱，僅留一洞，利用光引導熊蜂出巢）
2. 透明壓克力通道（長 7.4cm、寬 3.1cm、高 24.7cm，每距離 4.7cm 隔出一長 7.4cm、寬 0.3cm 之空隙以插入裁切好的珍珠板作為擋板，控制熊蜂進出實驗木箱）
3. 白色珍珠板（作為擋板，控制熊蜂進出實驗木箱）
4. 木箱(長 40cm、寬 40cm、高 25cm，兩側具有拉門以利手進入訓練熊蜂)
5. 透明壓克力板(長 45cm、寬 45cm、厚 0.2cm，蓋於木箱上)



圖七 實驗場地及裝置

6. 綠色珍珠板（鋪於木箱底部模擬自然環境）
7. 檯燈（在實驗時利用熊蜂趨光性引導熊蜂出巢，以及避免過暗導致熊蜂爬行，無法完整看到實驗裝置）
8. 攝影機

（三）器材設置：將飼養箱用一個挖有洞的紙箱罩住並用透明壓克力通道連接實驗木箱，將糖水罐移除提升熊蜂出巢找尋食物的機率。

五、大木箱組：

（一）目的：為了避免熊蜂直接前往離通道口最近的人造花，而不是因為對顏色的偏好進行選擇，故提供較大的飛行空間，讓熊蜂可利用視覺選擇人造花，又考慮到熊蜂視角（俯角 5~15 度，左右角 150 度）的限制，所以選用大的木箱（長 100cm、寬 93cm、高 35cm）

（二）器材：

1. 木箱（長 100cm、寬 93cm、高 35cm），內部放置假花，讓熊蜂有足夠的空間飛行和吸食糖水）
2. 以一個挖有洞(長 7.4cm、寬 3.1cm)的紙箱罩住飼養箱，並以透明壓克力通道連接至木箱。利用熊蜂趨光性引導其出巢。
3. 壓克力通道（長 24.7cm、寬 7.4cm、高 3.1cm，連接飼養箱與實驗木箱，通道上有 4 個 7.4cm*0.3cm 的空隙可將裁切好的珍珠板插入當成隔板）
4. 白色珍珠板（插於壓克力通道間，以阻隔熊蜂進入木箱）
5. 綠色珍珠板（鋪於木箱底部，為模擬自然環境）
6. 壓克力板（長 97cm、寬 36cm、厚 0.3cm，覆蓋於實驗木箱之上）
7. 木條（長 90cm、寬 3cm、厚 1.5cm，為防止壓克力片因過大而凹陷）

六、人造花組：

（一）目的：提供視覺訊息刺激，並給予其糖水。

（二）人造花設計：3D 列印圓盤製成的人造花，圓

盤上有直徑 0.1cm 的洞，底部有

一塑膠容器存放糖水，使蜂能吸食瓶蓋中的糖水（圖八）



圖八 人造花

(三) 器材：

1. 不同顏色的人造花：

(1) 3D 列印直徑 3.2cm 圓盤，作為假花(圖九)

(2)顏色選擇：

粉紅、黃、檸檬綠、藍、白色、棕色。

選擇依據：參考 Chittka(2001) 論文中以歐洲熊蜂作為實驗物種，將上述五種顏色進行光學分析，並記錄歐洲熊蜂對其的訪花情況。我們加入棕色，因在自然界中較少出現棕色花朵，探討自然界少見的花朵顏色與熊蜂的學習行為關係與造訪行為。



圖九 各種不同顏色的人造花

2. 不同尺寸的人造花：

(1)3D 列印藍色圓盤，作為假花：直徑 2.3cm、3.2cm、4.5cm、5.5cm、6.4cm)(圖十)

(2)選擇依據：熊蜂體長約為 3.2cm，故以直徑

3.2cm 圓形作面積 0.5、2、3、4 倍的尺寸。



圖十 各種不同尺寸的人造花

(四)擺放方式：距蜂巢出口 75cm 與 100cm 處，離左右木箱壁 12.5cm，離上方木箱壁 5cm。

(五)位置更換：每天早上七點半與下午五點半更換擺放位置與內部糖水，位置由亂數決定。

七、訓練用具：

(一)目的：以假蜂訓練真正的熊蜂學習推球動作

(二)器材：

1.假蜂（透明吸管、保麗龍球、壓克力筆、塑膠片製成)(圖十一)

2.木製圓球（直徑 1.4cm，以黃色油漆筆塗色)



圖十一 假蜂

陸、實驗過程與方法

一、熊蜂飼養

(一) 目的：培育適合實驗的蜂群（工蜂 15~35 隻）

(二) 飼養方式：

1. 飼養方式：將精選熊蜂飼養在 3D 列印成之蜂箱中。
2. 飼食及整理：每兩天更換糖水罐、糖水、吸水棉、蜂箱內的花粉泥以及報紙。
3. 器具清理：糖水罐及吸水棉換下後浸泡於水中四小時，將殘存糖水全部泡出並晾乾。
4. 病死蟲處理：每天巡視蜂巢內有無死亡成蟲或幼蟲並將其夾出。

二、前測

(一) 了解熊蜂出巢時間及挑選標記的個體

1. 目的：觀察精選熊蜂的出巢時間，以決定後續作其他實驗的時間，並選擇出巢熊蜂標記以利觀察個體行為。
2. 樣本數：6 巢蜂群
3. 實驗器材：小木箱組
4. 實驗方法：
 - (1)場地設置：打開蜂箱上的拉門使蜂能自由進出，並將攝影機架設於壓克力通道上方。
 - (2)實驗時間：一周（因在一周時每天出巢的蜂數漸趨平穩，故實驗時間為一周）
 - (3)記錄方式：使用錄影機錄影 6：00~19：00
 - (4)記錄項目：出巢時間及每次出巢的蜂數

(二) 了解適合實驗之蜂群大小

1. 目的：了解蜂群大小是否會影響實驗結果
2. 樣本數(4 巢)
 - (1)一巢大型蜂群（工蜂 > 35 隻）
 - (2)兩巢中型蜂群（工蜂 25~35 隻）
 - (3)一巢小型蜂群（工蜂 15~25 隻）
3. 實驗器材：
 - (1) 大木箱組
 - (2) 人造花組（只使用顏色組）

4. 實驗方法：

(1)記錄時間：每天上午七點與下午五點半，持續三天。

(2)記錄項目：訪花次數及糖水消耗量

5.分析：將蜂群的訪花次數與糖水消耗量繪製成長條圖及散布圖，比較兩者的決定係數 (R^2)，並且錄影觀察蜂行為。

6.蜂群決定：選擇訪花次數足夠，且訪花次數與糖水消耗量呈現正相關進行後續實驗。

(三) 了解氣味是否影響熊蜂訪花

1. 目的：了解氣味是否影響熊蜂的訪花行為

2. 樣本數：1 巢

3. 實驗器材：

(1)大木箱組

(2)藍色人造花 12 朵（直徑皆為 3.2cm，擺於距蜂巢出口 75cm 與 100cm 處，離左右木箱壁 12.5cm，離上方木箱壁 5cm）

4. 實驗方法：

(1)氣味裝置：將人造花分別放入糖水、砂糖，以及不放東西三種，使有糖水及砂糖的人造花散發食物（糖水）氣味讓熊蜂注意到。

(2)位置更換：為了避免熊蜂因為記住糖水位置而只前往有糖水的人造花，導致數據無法分辨氣味是否影響熊蜂訪花。在每天早上七點半、中午十二點以及下午五點都更換一次擺放位置，且每次糖水的位置與上一次不同。

(3)紀錄時間：使用錄影機錄影三天

(4)紀錄項目：每朵花的訪花次數

5. 分析方式：以卡方適合性檢定(chi-square test)判斷氣味是否會影響熊蜂訪花

三、觀察精選熊蜂對於不同視覺(顏色、尺寸)刺激的偏好

(一) 目的:了解精選熊蜂對特定視覺刺激的偏好

(二) 實驗器材:

- 1.人造花組
- 2.大木箱組

(三) 樣本數:

1. 顏色訊息: 2 巢
2. 尺寸訊息: 2 巢

(四) 實驗方法:



1. 精選熊蜂對人造花“顏色”的偏好:

圖十二 顏色實驗場地圖

- (1) 顏色種類: 六種不同顏色(粉紅、黃、檸檬綠、棕、藍、白色, 直徑 3.2cm)。
- (2) 擺放方式: 距出口 75cm 與 100cm 處, 離左右木箱壁 12.5cm, 離上方木箱壁 5cm。
- (3) 記錄時間: 每天上午七點與下午五點半, 持續三天。
- (4) 記錄方式:
 - A. 觀看錄影, 記錄各朵花被熊蜂造訪次數。
 - B. 於每日早上七點半及下午五點半各紀錄一次糖水消耗量。

2. 觀察精選熊蜂對人造花“尺寸”的偏好:

- (1) 尺寸種類: 五種不同尺寸(直徑 2.3、3.2、4.5、5.5、6.4cm, 顏色根據顏色偏好實驗結果, 決定為最偏好的藍色)
- (2) 擺放方式: 距出口 75cm 與 100cm 處, 離左右木箱壁 12.5cm, 離上方木箱壁 5cm。
- (3) 記錄時間: 因發現本巢蜂上午較不會出巢, 故往後實驗記錄 24 小時, 持續三天。
- (4) 記錄方式:
 - A. 觀看錄影, 記錄各朵花被熊蜂造訪次數。
 - B. 於每日早上七點半及下午五點半各紀錄一次糖水消耗量。

(六) 分析方法: 以卡方適合性檢定(chi-square test)判斷人造花尺寸是否會影響熊蜂訪花。

四、比較不同視覺刺激對熊蜂學習的影響

(一) 目的：了解何種視覺刺激(顏色 vs. 尺寸)對精選熊蜂影響較顯著。

(二) 實驗器材：

1. 人造花組
2. 大木箱組

(三) 樣本數：

1. 顏色訊息：2 巢
2. 尺寸訊息：2 巢

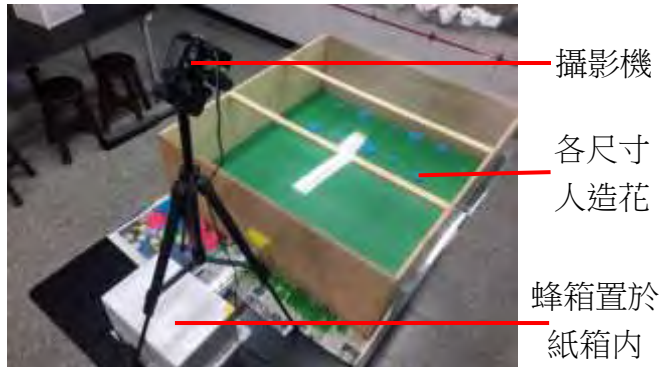


圖 13 尺寸實驗場地圖

(四) 實驗方法：

1. 實驗設計：

分成二組實驗(顏色組、尺寸組)，每組實驗再分成二階段(反認知訓練、認知回復)進行，以了解熊蜂對不同視覺訊息刺激(顏色訊息、尺寸訊息)的認知改變情形。

2. 階段一：反認知訓練

(1)目的：使熊蜂喜歡上原本不喜歡的人造花

(2)訓練方式(反認知設置)：僅於熊蜂不喜歡的人造花中放置糖水

(3)訓練時間：5 天。(因發現熊蜂需要較長時間才會增加造訪最不喜歡的人造花的次數)

3. 階段二：認知改變(回復)時間

(1)目的：

A. 觀察熊蜂在反認知訓練後之訪花行為，偏好是否會回復到原先的狀態，抑或是有所改變。

B. 比較並了解何種視覺訊息對於熊蜂的影響較大。

(2)設置：於每朵花中都放置糖水。

(3)記錄時間：3 天。(因熊蜂在第一階段時已經熟悉實驗環境，所以觀察 3 天)

4. 記錄項目：

(1)所有人造花的訪花次數

(2)計算熊蜂對每種花的偏好程度：

偏好程度 = 最不偏好的花之訪花次數 / 全部的訪花次數

(3)學習能力評估(行為改變)

第七天時，記錄每朵花的造訪比例，了解熊蜂的訪花行為是否因反認知訓練而發生改變，以驗證熊蜂是否具有學習能力。

(六) 分析方式：

1. 迴歸關係：計算出一迴歸方程式，了解偏好程度、回復程度與時間之關係。
2. 視覺訊息影響程度：比較顏色與尺寸的偏好程度減少速率（迴歸方程式斜率絕對值大小），了解何者對熊蜂的影響較大。
3. 偏好回復程度：比較顏色與尺寸的回復程度回復情形（迴歸方程式斜率正負），了解原最偏好的花經過反認知訓練後的訪花情形

五、臺灣精選熊蜂對更複雜學習的可能性

(一) 目的：驗證精選熊蜂是否能藉由人為教導完成複雜的行為

(二) 實驗器材：

1. 假蜂（透明吸管、保麗龍球、壓克力筆、塑膠片製成）
2. 木製圓球（直徑 1.4cm，以黃色油漆筆塗色）
3. 小木箱組

(二) 樣本數：

1. 實驗組（有訓練，共標記 25 隻，以觀察個體學習狀況）：1 巢
2. 對照組（無訓練，共標記 25 隻）：1 巢

(三) 實驗方法：

1. 標記精選熊蜂

(1)目的:將精選熊蜂編號以觀察個別個體的學習行為

(2)標記方法：

A. 熊蜂挑選與固定：

取出觀察精選熊蜂出巢時間時有出巢的個體，將其放入由針筒及鋁網製成的標記器中(Hagler,2001)，將熊蜂背部朝向鐵網時將針筒的活塞推上，將熊蜂固定在活塞及鐵網之間。



圖十四 蜂的標記結果
圖十四 蜂的標記

B. 黏貼方式：

用尖嘴鉗夾取寫上編號的圓形藍色標籤，沾取少許強力膠後黏於精選熊蜂背部一介於兩翅之間（圖十四），以減少標記對於其行動及飛行的影響。

C. 標記後處理：

為了不讓精選熊蜂因標記被驚嚇後立即回巢影響群體行為，在標記完後立刻將活塞拉下使精選熊蜂能自由活動，並靜置一段時間至其冷靜後再放回巢。

2. 使熊蜂認知木球與獎勵之間的關聯性：

(1)建立連結階段：

使實驗組及對照組熊蜂能自由進出實驗木箱，並打開中央洞口開關，使熊蜂能自由吸食糖水，於中央洞口處放置黃色半圓球，以強化熊蜂對木球與糖水的連結。

(2)連結建立時間：2 天。

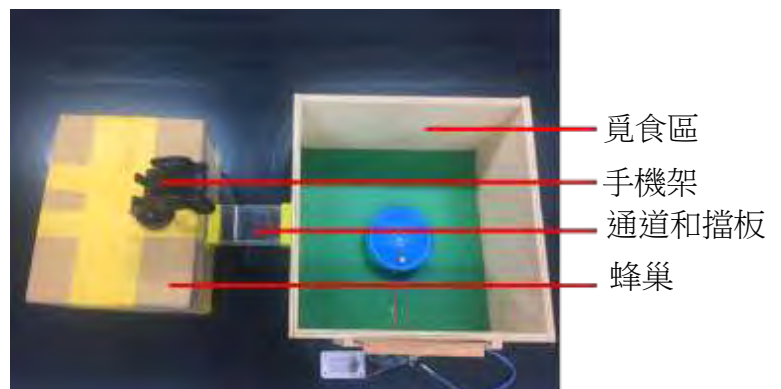
(3)標記蜂隻：為了了解每隻蜂的學習狀態，找出有出巢且到圓盤中央黃球取食的蜂，並將其標記。

3. 實驗組（訓練組，與對照組比較訓練是否有效）：

(1)目的：使台灣精選熊蜂學會將木球推至指定位置

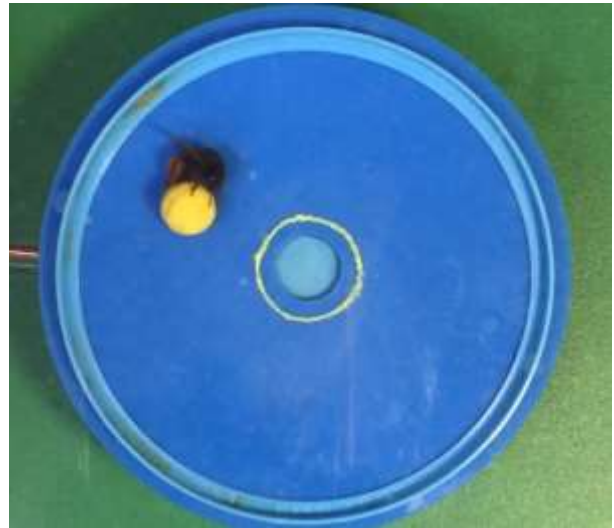
(2)器材設置：

熊蜂自由進出實驗木箱，但關閉設置中央糖水洞口開關，於藍色壓克力圓盤六點鐘方向放置黃色木球。每次實驗中一次只允許一隻熊蜂進入實驗場地，一但有熊蜂進入後即將珍珠板插入通道的空隙，阻隔其他熊蜂。（圖十五）



圖十五 實驗場地圖

(3)錄影時機：熊蜂出巢且離開通道要進入木箱時開始錄影，至蜂完成動作或經人為教導結束，以完整觀察熊蜂成功推球至指定位置及接受訓練的完整反應，並藉錄影觀察並分析熊蜂爬上圓盤後的軌跡。



圖十六 熊蜂推球照片

(4)成功判定：在熊蜂碰觸圓盤上的球時

開始計時五分鐘，若熊蜂在五分鐘內將木球推入中央孔洞周圍畫的黃色圓圈即判定成功。

(5)成功獎勵：蜂若成功將木球推入中心，立即利用機器裝置打開開關，使蜂吸食糖水，給其獎勵，以強化該行為的發生。(圖十六)

(6)失敗：若在五分鐘之內沒有成功，則用一個吸管及保麗龍球製成的假蜂示範一次將球推入孔洞中，並打開開關使熊蜂能吸食糖水，再讓其回巢。

(7)紀錄項目：

- A. 熊蜂尋找木球的隻數與次數
- B. 個體成功次數
- C. 繪製熊蜂從不同方位爬上圓盤後的軌跡

3. 對照組(無訓練組)

(1)目的：了解無訓練的熊蜂是否也能成功將球推至指定位置

(2)器材設置：熊蜂自由進出實驗木箱，但關閉設置中央糖水洞口開關，於藍色壓克力圓盤六點鐘方向放置黃色木球。每次實驗中一次只允許一隻熊蜂進入實驗場地，一但有熊蜂進入後即將珍珠板插入通道的空隙，阻隔其他熊蜂。

(3)錄影時機：熊蜂出巢且離開通道要進入木箱時開始錄影至蜂完成動作或經人為教導結束，以完整觀察熊蜂成功推球至指定位置及接受訓練的完整反應，並藉錄影觀察並分析熊蜂爬上圓盤後的軌跡。

(4)紀錄項目：

- A. 熊蜂尋找木球的隻數與次數
- B. 個體成功次數
- C. 繪製熊蜂從不同方位爬上圓盤後的軌跡

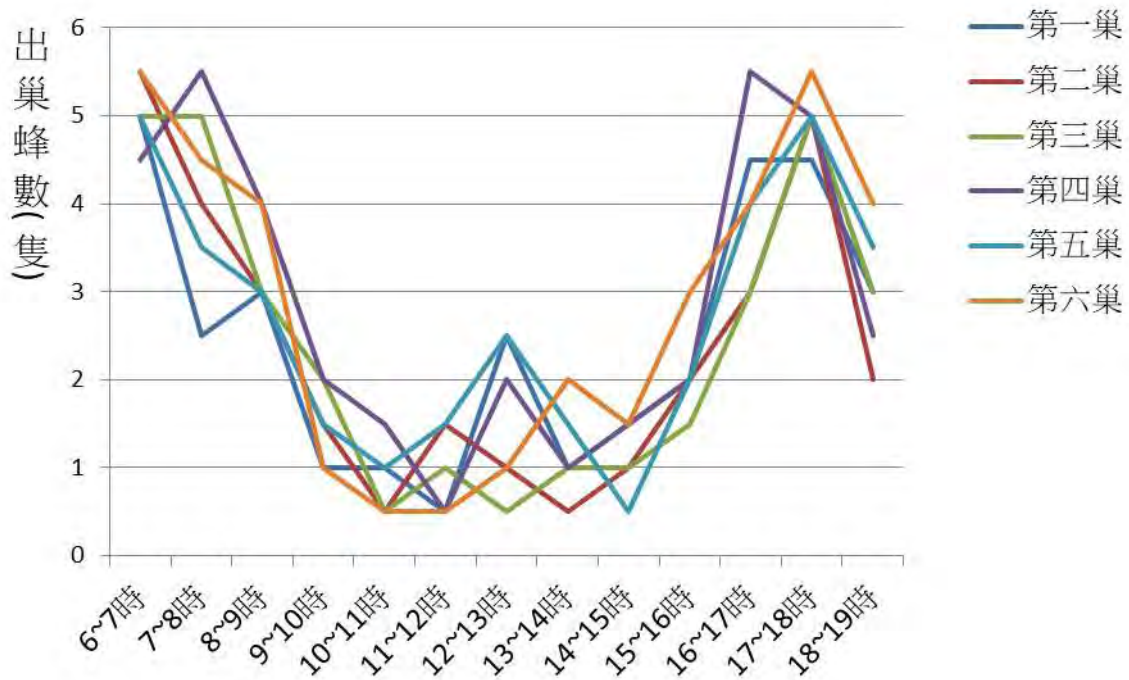
5. 分析方式

- (1)將訓練組與對照組前往木球及中心孔洞的比例繪製成長條圖，並比較差異
- (2)將訓練組前往不同目標的比例與訓練次數繪製成長條圖，並觀察有無關聯性
- (3)將訓練組在不同訓練次數的成功比例繪製成折線圖並比較關聯性
- (4)比較熊蜂從不同方位爬上圓盤後的軌跡圖，觀察前往的地點（木球或中央洞口）以了解是否有真正學習

柒、研究結果

一、前測：

(一) 了解熊蜂出巢時間

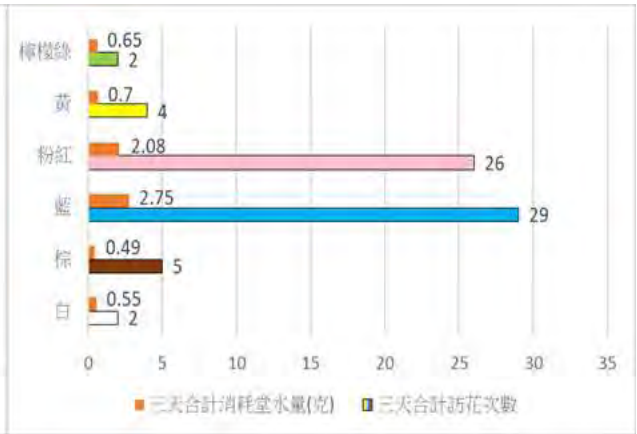
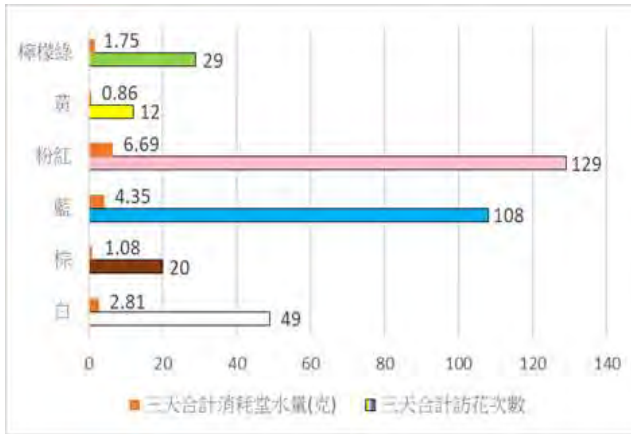


圖十七 熊蜂出巢隻數與時間關係圖

結論：熊蜂在一天中主要出巢的時間集中於清晨 6:00 到早上 8:00，及下午 16:00 到晚上 18:00 之間，在日後的訓練實驗中可用此數據為基準，在以上時間進行實驗。

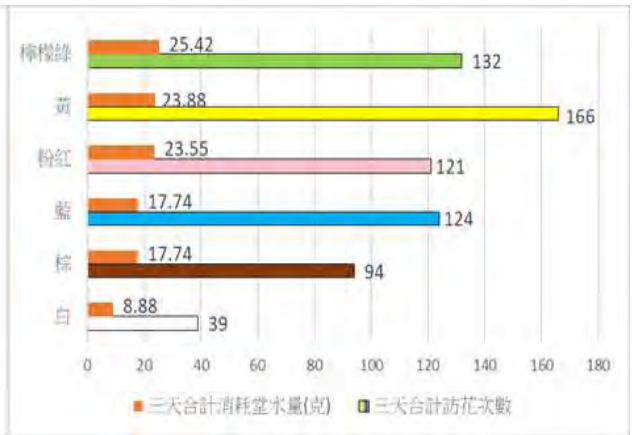
(二) 了解適合實驗之蜂群大小

(小型蜂群：工蜂 15~25 隻、中型蜂群：25~35 隻、大型蜂群：35 隻以上)



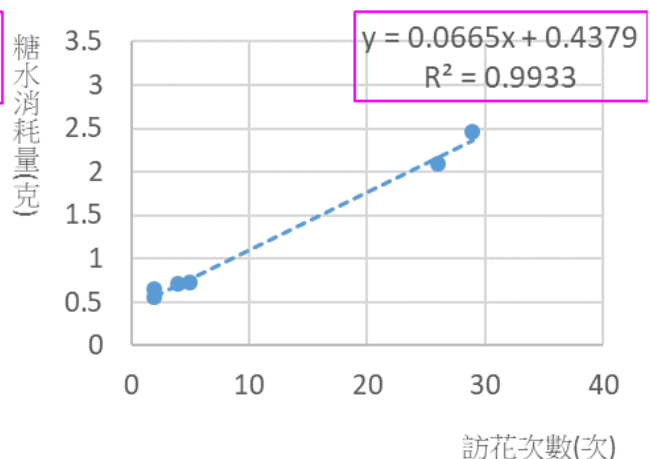
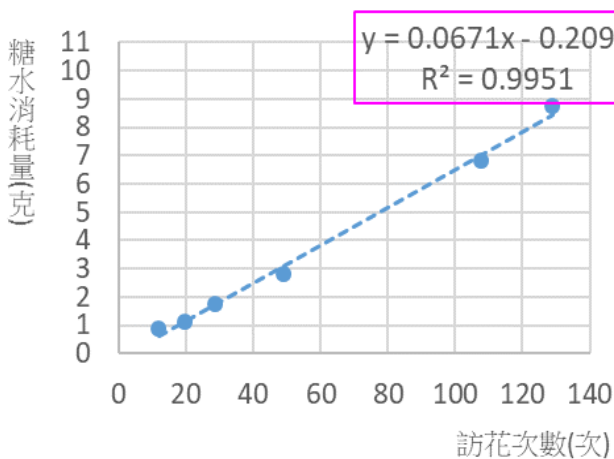
圖十八 小型蜂群訪花次數與糖水消耗量

圖十九 中型蜂群一訪花次數與糖水消耗量



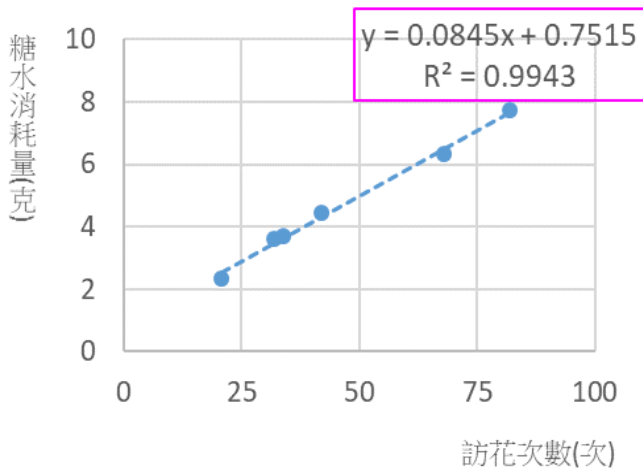
圖二十 中型蜂群二訪花次數與糖水消耗量

圖二十一 大型蜂群訪花次數與糖水消耗量

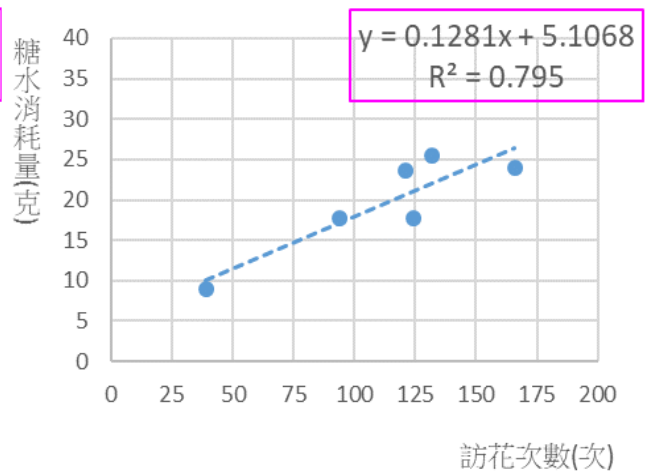


圖二十二 小型蜂群訪花次數與糖水消耗量

圖二十三 中型蜂群一訪花次數與糖水消耗量



圖二十四 中型蜂群二訪花次數與糖水消耗量

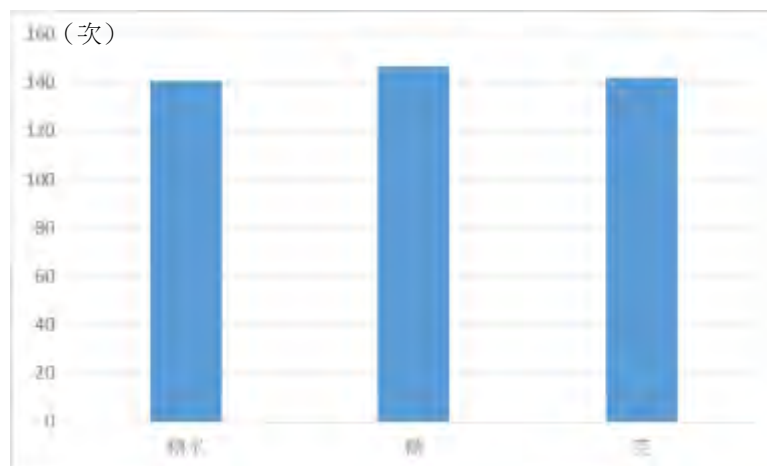


圖二十五 大型蜂群訪花次數與糖水消耗量

結論：

- (1)比較四巢蜂群訪花次數與糖水消耗量散布圖的 R^2 ，發現除了大型蜂群外，都有到達 0.99，得知工蜂數 15~35 隻的中小型蜂群的訪花次數與糖水消耗量較相關。
- (2)大型蜂群會在更換糖水前，將糖水消耗殆盡，之後工蜂會發生競爭行為，蜂以非正常方式發生訪花行為。
- (3)綜合以上，實驗應採用工蜂數量 15~35 隻的蜂群。

(三) 檢測氣味是否影響熊蜂訪花



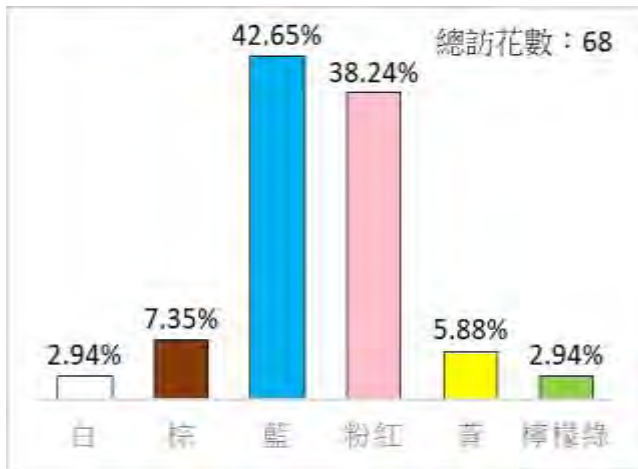
圖二十六 各氣味人造花訪花次數

經卡方適合性檢定($\chi^2 = 0.18 < \chi^2_{0.05} = 5.99$, $df=2$)，發現精選熊蜂不受氣味影響，而在訪花行為上沒有顯著差異。

結論：訪花行為沒有受氣味影響，故實驗可針對視覺訊息對熊蜂產生的影響進行討論。

二、觀察精選熊蜂對於不同視覺刺激的偏好：

(一) 觀察精選熊蜂對“顏色”的偏好：



圖二十七 人造花顏色偏好比例第一巢

圖二十八 人造花顏色偏好比例第一巢

結論：

(1) 卡方適合性檢定

經卡方適合性檢定($\chi^2 = 70.19$, $59.34 > \chi^2_{0.05} = 11.07$, $df=5$)，熊蜂訪不同顏色的人造花有顯著差異。

(2) 兩巢精選熊蜂，各巢對顏色訊息的偏好順序：

第一巢(訪花總次數：68次)：藍>粉紅>棕>黃>檸檬綠>白。

第二巢(訪花總次數：279次)：藍>粉紅>棕>黃>檸檬綠>白。

(3)精選熊蜂對顏色訊息的偏好：

A.二巢蜂均最偏好藍色花，其次為粉紅色

B.對於花色的偏好呈現相同喜好趨勢：藍>粉紅>棕>黃>檸檬綠>白。

(二) 觀察精選熊蜂對“尺寸”的偏好：



圖二十九 人造花尺寸偏好比例第一巢



圖三十 人造花尺寸偏好比例第二巢

結論：

(1)卡方適合性檢定結果

經卡方適合性檢定($\chi^2 = 51.54$ ， $23.43 > \chi^2_{0.05} = 9.49$ ， $df=4$)，熊蜂訪不同尺寸的人造花有顯著差異。

(2)兩巢精選熊蜂，各巢對尺寸訊息的偏好順序：

第一巢(訪花總次數：184 次)：3.2cm > 5.5cm > 6.4cm > 2.3cm > 4.5cm。

第二巢(訪花總次數：746 次)：3.2cm > 6.4cm > 5.5cm > 4.5cm > 2.3cm。

(3)精選熊蜂對尺寸訊息的偏好：

A.二巢蜂均最偏好尺寸為 3.2cm 的花。

B.對花的尺寸未呈現相同的喜好趨勢。



圖三十一 蜂對不同尺寸花表現出偏好性

三、比較不同視覺刺激對熊蜂學習的影響：

(一)顏色部分：

1. 觀察熊蜂在反認知訓練後的訪花比例



圖三十二 第一巢訪各顏色人造花比例



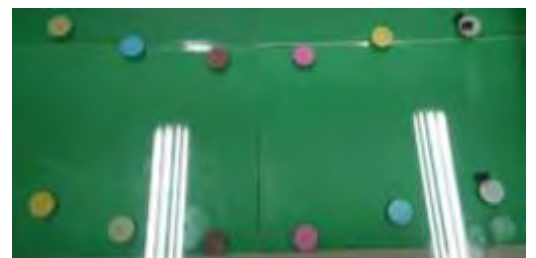
圖三十三 第二巢訪各顏色人造花比例

結論：

(1)經過反認知訓練後，兩巢熊蜂原本最不偏好的白色花訪花比例分別到達 36.04%、25.05%，顯示反認知訓練有效果。

(2)精選熊蜂能透過學習，改變其行為，造訪原本最不偏好的花色（白色）。

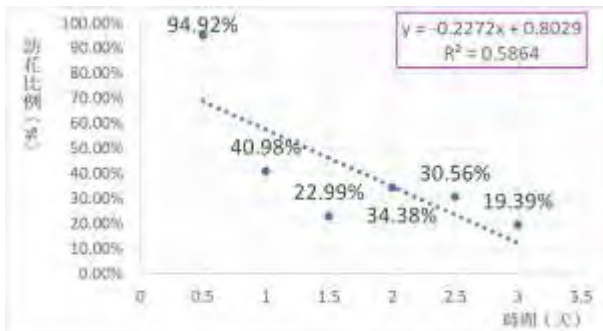
(3)即使蜂對最偏好的花色發生改變，對其餘顏色的的偏好程度仍無大幅度變動（只有第二巢黃色與檸檬綠偏好有改變）



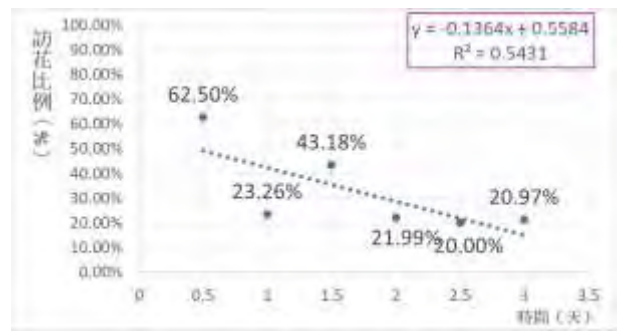
圖三十四 反認知訓練中蜂訪白色人造花

2. 認知改變(回復)時間：

(1) 不偏好程度的回復



圖三十五 第一巢訪白色人造花比例與時間之回歸直線

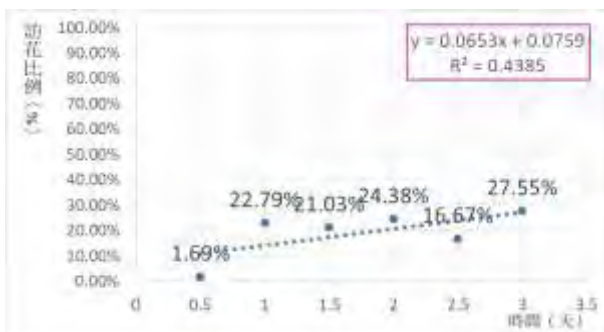


圖三十六 第二巢訪白色人造花比例與時間之回歸直線

結論：A.第一天的訪花比例中，二巢蜂對白色偏好的忠誠度高(94.92%、62.5%)，此代表反認知訓練對蜂的行為有明顯的影響，蜂可以學會造訪新顏色的花。

B.連續三天的時間中，可看到蜂對白色花的偏好程度開始下降。

(2) 偏好程度的回復



圖三十七 第一巢訪藍色人造花比例與時間之回歸直線



圖三十八 第二巢訪藍色人造花比例與時間之回歸直線

結論：A.熊蜂對於藍色花(原本最偏好的花)的造訪比例有回復（斜率為正）。

B.比較「不偏好程度」與「偏好程度」的回復，偏好程度的回復較慢。

3. 學習能力評估



圖三十九 顏色回復最後一天訪花比例



圖四十 顏色回復最後一天訪花比例

結論：經過訓練後，熊蜂的訪花行為發生改變，同時偏好藍色及白色的花，結果顯示熊蜂具有學習能力。

(二) 尺寸部分：

1. 觀察熊蜂訪 2.3cm 花比例是否增加



圖四十一 第一巢各尺寸訪花比例



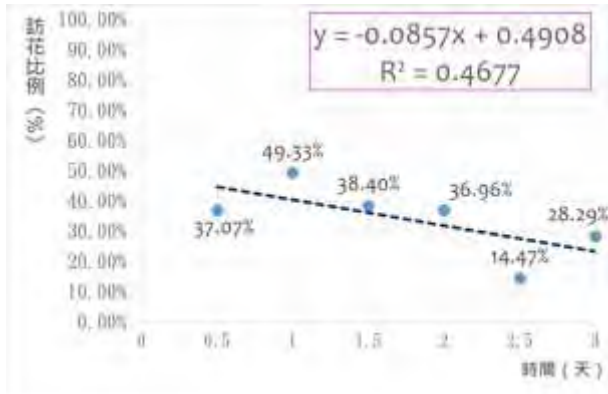
圖四十二 第二巢各尺寸訪花比例

結論：

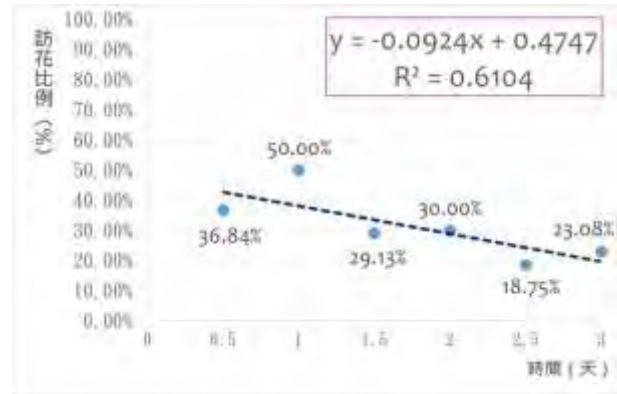
- (1)經過反認知訓練後，兩巢熊蜂原本最不偏好的 2.3cm 花訪花比例分別到達 30.27%、31.55%，顯示反認知訓練有效果。
- (2)熊蜂能透過學習，改變其行為，造訪原本較不偏好的尺寸（2.3cm）。
- (3)即使蜂對最偏好的尺寸發生改變，對其餘尺寸的偏好則沒有顯著差異。

2. 認知改變(回復)時間：

(1)不偏好程度的回復



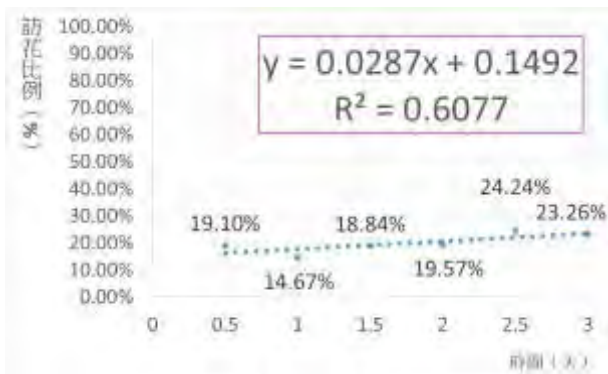
圖四十三 第一巢訪 2.3cm 人造花比例與時間之回歸直線



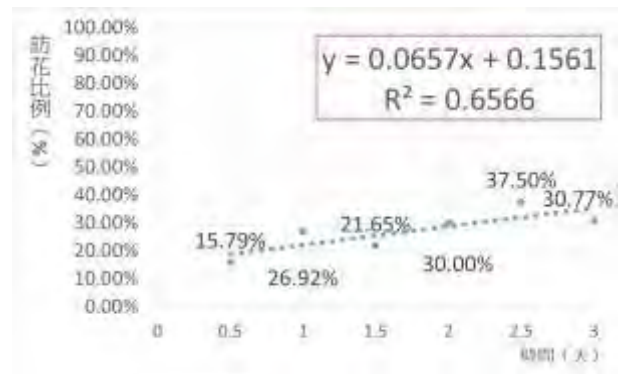
圖四十四 第二巢訪 2.3cm 人造花比例與時間之回歸直線

結論：A.第一天的訪花比例中，二巢蜂對 2.3cm 偏好的忠誠度較低(37.07%、36.84%)，此代表反認知訓練對蜂的行為較無明顯影響，但蜂可以學會造訪新尺寸的花。
B.連續三天的時間中，可看到蜂對 2.3cm 花的偏好程度開始下降。

(2)偏好程度的回復



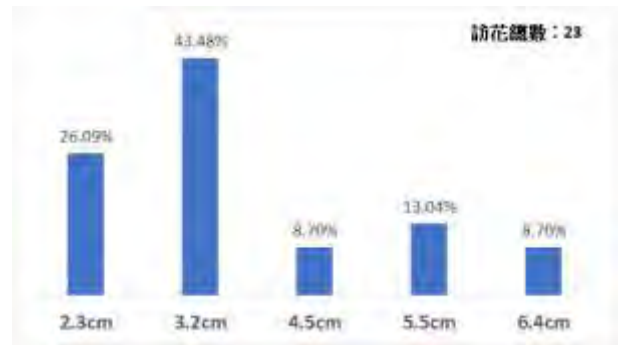
圖四十五 第一巢訪 3.2cm 人造花比例與時間之回歸直線



圖四十六 第一巢訪 3.2cm 人造花比例與時間之回歸直線

結論：A.第一天的訪花比例中，二巢蜂對 2.3cm 的忠誠度較低(37%、36.84%)
B.對於原本最不偏好的花，熊蜂對於尺寸訊息的認知回復較顏色的慢(斜率較小)
C.原本最偏好 3.2cm 的花訪花比例有稍微回復(斜率為正)

3. 學習能力評估

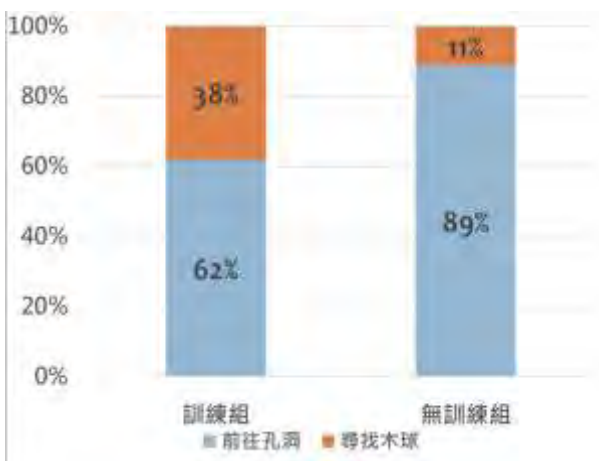


圖四十七 尺寸回復最後一天訪花比例

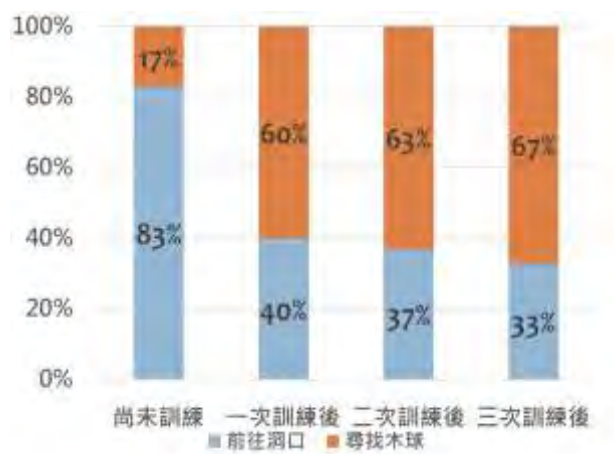
圖四十八 尺寸回復最後一天訪花比例

結論：經過訓練後，熊蜂的訪花行為發生改變，熊蜂同時偏好 3.2cm 及 2.3cm 的花，但對其他尺寸的偏好順序發生改變，結果顯示熊蜂具有學習能力。

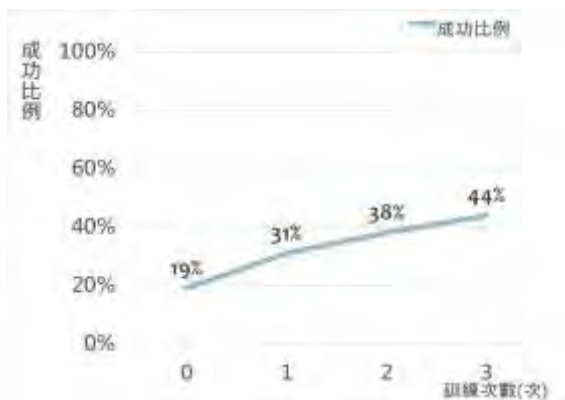
四、熊蜂學習複雜行為的可能性：



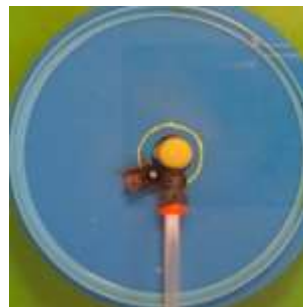
圖四十九 尋找木球比例的差異



圖五十 訓練次數與尋找木球比例



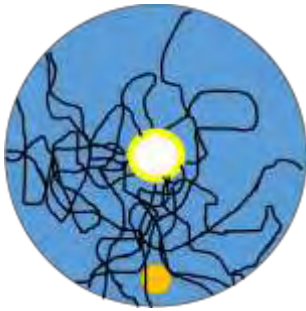
圖五十一 訓練次數與成功比例關係



圖五十二 假蜂訓練



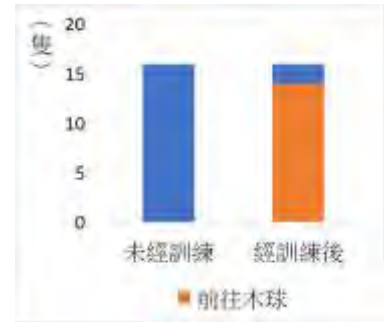
圖五十三 推球成功



圖五十四 未經訓練熊蜂移動軌跡



圖五十五 訓練後熊蜂移動軌跡



圖五十六 訓練前後，蜂前往木球比例

結論：

- (1) 經訓練後，熊蜂會前往尋找木球，代表其了解木球與糖水的關聯。(圖四十九)
- (2) 在訓練一次後，前往木球的比例即高於六成，我們認為這表示熊蜂理解推球才是獲得糖水的唯一方法。(圖五十)
- (2) 熊蜂不只改變尋找的目標，也能獨自將球推至指定位置，受訓練的 16 隻熊蜂中，有 7 隻熊蜂獨自完成，顯示臺灣精選熊蜂也能藉由人為教導完成複雜的行為。(圖五十一)
- (3) 隨著訓練次數增加，熊蜂由前往關閉的孔洞尋找糖水改為前往尋找木球（訓練前 0 隻，訓練後 14 隻），且不論從哪一方位爬上圓盤都有此行為（圖五十四、五十五）。

捌、討論

一、精選熊蜂對人造花顏色偏好情形

在 Chittka 等人(2001)的研究中，發現熊蜂有兩套視覺通道系統，分別為顏色通道（紫外線、藍色、綠色受體）及綠色通道（僅有綠色受體），熊蜂會根據視角選擇使用這兩套系統，在視角為 5~15 度選擇使用綠色通道，我們的實驗視角介於 6.3~8.5 度。使用綠色通道時，熊蜂搜尋人造花時間會被顏色的綠色對比度影響，綠色對比度越小則搜尋時間越短，這是因為綠色受體只會吸收綠光，所以顏色與綠色越接近，熊蜂能看得越清楚，搜尋時間就會降低。

白色的綠色對比度較大，導致熊蜂需要花費更多的時間才能偵測到。在 Perkin(2017)的研

究中，發現歐洲熊蜂在外多野造訪藍、紫、粉紅色系的花，如薰衣草（紫）、櫻花（粉紅）等，推測歐洲熊蜂與臺灣精選熊蜂在演化過程中，對花色的偏好相同。

二、精選熊蜂對人造花尺寸的偏好情形

在此實驗中，我們發現熊蜂對最小的花偏好程度較低，可能是因為自然界中越大的花能提供的花蜜越多，且在 Chittka 等人(2001)的研究中指出花朵越大，搜尋時間也會越短，所以熊蜂對於較大的花偏好程度較高。但在實驗中發現精選熊蜂最偏好直徑 3.2cm 的人造花，而其他尺寸沒有明顯偏好差異。

我們認為造成精選熊蜂較不偏好大花，反而偏好 3.2cm 人造花的原因，可能是因為大花的外形結構不利於熊蜂利用震動方式採粉，如：

（一）雄蕊太長，不利於熊蜂沾取花粉

（二）花瓣太大，採粉及吸食花蜜時難以找到可抓住的地方

所以熊蜂不會偏好大花，而熊蜂工蜂大小約略等同於 3.2cm 的人造花，為較適合熊蜂採粉的尺寸，所以熊蜂最偏好直徑 3.2cm 的人造花。

三、熊蜂對不同視覺訊息表現出學習行為上的差異

在我們的實驗結果中，熊蜂對於改變造訪的人造花顏色的改變比例相較人造花尺寸的改變比例多，但在回復時間上卻是改變造訪人造花尺寸維持的較久。我們認為導致這個結果的原因是不同的訪花行為會影響生存，而在原本作為食物的花朵不足時，熊蜂能選擇：

（一）顏色

1. 造訪相同顏色的花：可能遇到其他工蜂導致激烈競爭→食物減少
2. 造訪不同顏色的花：其他工蜂尚未學習到不同顏色的花也有食物→增加新的食物來源
3. 因此熊蜂對於改變訪花顏色愈快，就能減少愈多競爭，故其對顏色差異較為敏感，且對顏色改變學習較快

（二）尺寸

1. 造訪相同尺寸的花：在自然界中有許多尺寸相近，但卻是不同物種的花朵，所以熊蜂能找到新的食物來源
2. 造訪不同尺寸的花：在自然界中花朵的尺寸有非常多種，若熊蜂改變造訪的尺寸也能成功找到新食物來源

3. 熊蜂不論造訪相同或不同尺寸的花都能找到新食物來源，因此對尺寸差異較不敏感，且對尺寸改變的學習能力較差

食物不足	顏色	選擇一	相同顏色的花	相遇其他工蜂	競爭愈激烈	改變愈快，競爭愈少	1. 對顏色差異較敏感 2. 對顏色改變學習較快
	顏色	選擇二	不同顏色的花	發現新食物來源	獲得新資源		
	尺寸	選擇一	相同尺寸的花	發現新食物來源	獲得新資源	改變並未帶來明顯益處	1. 對尺寸差異較不敏感 2. 對尺寸的學習較差
	尺寸	選擇二	不同尺寸的花	發現新食物來源	獲得新資源		

四、臺灣精選熊蜂能否像歐洲熊蜂一樣學會更複雜的行為

在以推球至指定位置的實驗中，我們看到熊蜂從一開始只往原本有糖水的孔洞前進，到後來隨著訓練而理解唯有推動木球才是得到糖水的唯一辦法而轉往尋找木球，我們認為它們是真正的理解並自己推論出我們所要教導的事物並聯想到解決辦法。因此我們認為臺灣精選熊蜂也是可以像歐洲熊蜂一樣能學習更複雜的行為，且人為教導是一種可行的方法。

玖、結論

實驗證明精選熊蜂能夠透過給予視覺訊息、自我探索及人為訓練進行學習

1. 熊蜂最偏好的人造花顏色是粉紅色及藍色，最不偏好白色；最偏好的尺寸為直徑 3.2cm 的人造花，最不偏好直徑 2.3cm 的人造花。
2. 經由給予不同視覺訊息，了解蜂群能進行簡單學習行為，對不同視覺訊息有不同的反應。
3. 透過推球實驗，我們可以進一步發現精選熊蜂不只能處理簡單訊息，以探索方法學習，更可以透過強化認知，進行更複雜的訓練且理解訓練本身所帶來的訊息。

拾、展望

本次實驗主要是藉由不同視覺訊息了解精選熊蜂的學習行為，但其他視覺或感官的訊息對於與其學習行為的關係因能力及設備的不足而尚未探討，故我們期望在未來有機會能夠更深入的研究，並期望未來在進行熊蜂的學習或訓練時根據所需要的成效來選擇顏色或尺寸這兩種視覺訊息。

從本次實驗我們可以知道，熊蜂對於學習的能力遠遠超乎人們的想像，故我們希望未來能應用於農業受粉上，如使熊蜂先了解特定顏色能夠獲得獎勵，並將此種顏色置於遠方，以增加其出巢飛行距離，提升訪花效率，授粉成功率亦隨之提升。

拾壹、參考文獻與資料

- Loukola OJ, Perry CJ, Coscos L, Chittka L (2017) Bumblebees show cognitive flexibility Mechanisms Allow for Social
- Alem S, Perry CJ, Zhu X, Loukola OJ, Ingraham T, Sørvik E, Chittka L (2016) Associative and color affect search time And flight behavior. PNAS 98(7): 3898-3903
- Brodie L (1996) BUMBLEBEE FORAGING PREFERENCES: DIFFERENCES BETWEEN SPECIES AND INDIVIDUALS.
- Hagler RJ, Jackson GC (2001) METHODS FOR MARKING INSECTS: Current in an Insect. PLOS Biology
- Konzmann S, Lunau K (2014) Divergent Rules for Pollen and Nectar Foraging
- Gavin J Taylor, PierreTichit, Marie D Schmidt, Andrew J Bodey, Christoph Rau, Emily Baird (2019) Bumblebee visual allometry results in locally improved resolution and globally improved sensitivity Learning and Cultural Transmission of String Pulling Requirements for the Degree of B. Sc.(Hons.)in Ecology) University of Aberdeen
- Spaethe J, Tautz J, Chittka L (2001) Visual constraints in foraging bumblebees: Flower size Substitute and Pollen Surrogate. PLoS One 9(3): e91900Techniques and Future Prospects. Annu Rev Entomol 46:511-43
- 江敬皓 (2009) 臺灣產精選熊蜂與楚南熊蜂之生物學研究。(出版的博士論文) 臺北：國立臺灣大學昆蟲學研究所
- 郭宏遠，宋一鑫 (2013) 熊蜂授粉於農業生產之應用。種苗 科技專訊，No.82: 21-23
- 江敬皓，宋一鑫，陳裕文，楊平世，何鎧光 (2006) 臺灣本土熊蜂室內飼養與應用。臺灣昆蟲特刊，8: 111-117

【評語】 052004

1. 本研究以精選熊蜂不同視覺訊息以了解其學習行為，分析台灣精選熊蜂(*Bombus eximius*)是否像國外熊蜂(*B terrestris*)有學習複雜行為。結果台灣精選熊蜂對顏色刺激之認知改變較快，有較明顯學習行為。
2. 了解精選熊蜂對不同視覺訊息之偏好程度及透過不同視覺刺激，了解精選熊蜂的學習行為。
3. 有些類似的實驗在不同的蜜蜂上已經做了，作者有能力比較他們的結論跟文獻上結果的異同點，是其優點。

摘要

本實驗藉著給予精選熊蜂不同視覺訊息以了解其學習行為，並驗證臺灣精選熊蜂(*Bombus eximius*)是否也能像國外的歐洲熊蜂(*B. terrestris*)一樣具有學習更複雜行為的潛能。臺灣精選熊蜂最偏好藍色、直徑3.2cm的花。接著藉不同視覺訊息理解其學習行為，發現經訓練後，受顏色刺激前往較不偏好人造花的比例高於尺寸的刺激(顏色：94.92%、62.5%，尺寸：37.07%、36.84%)；在認知回復方面，因顏色刺激產生的反應改變較快(顏色：75.53%、41.53%，尺寸：8.78%、13.76%)，說明熊蜂對顏色刺激較敏感，且其對顏色刺激的認知改變較快，有較明顯學習行為。在驗證精選熊蜂能否學習更複雜行為實驗中，發現精選熊蜂能透過人為訓練學習複雜行為。綜上所述，期望能對熊蜂學習行為更深入了解，將其應用於農業。

壹、研究動機

1. 熊蜂較蜜蜂而言，耐力好，體型較大，採粉量也較多(生態農業高效節能技術，2016)
2. 熊蜂蜂群的社會化程度與蜜蜂相比較低，信息交流較不發達(阮長春等，2007)
3. 臺灣目前主要將熊蜂應用在番茄、彩椒的溫室授粉(郭，宋，2013)
4. 歐洲熊蜂(*B. terrestris*)能藉由觀察周遭事物發展出新行為(Chittka等，2016)
5. 歐洲熊蜂可以被人為教導學會複雜的行為(Chittka等，2017)
6. 視覺訊息會影響歐洲熊蜂的覓食及飛行行為(Spaethe & Weidmüller, 2002)

貳、研究目的

- 一、了解精選熊蜂對不同人造花顏色、尺寸之偏好
- 二、透過不同視覺訊息刺激，了解精選熊蜂的學習行為
- 三、了解臺灣精選熊蜂能否經過人為教導學會複雜行為

參、實驗過程與方法

一、前測

(一) 了解適合實驗之蜂群大小(1大巢、2中巢、1小巢)

- 1.目的：了解蜂群大小是否會影響實驗結果
- 2.做法：記錄不同蜂群對各人造花的造訪次數及糖水消耗量，並錄影觀察熊蜂的行為
- 3.分析：將蜂群的訪花次數與糖水消耗量會製成長條圖及散佈圖，比較兩者的決定係數(R^2)

(二) 了解熊蜂出巢時間(6巢)

- 1.目的：決定實驗進行時間及選擇標記個體
- 2.做法：記錄熊蜂出巢時間及隻數
- 3.分析：製成折線圖(出巢時間vs.隻數)

(三) 了解氣味是否影響熊蜂訪花(1巢)

- 1.目的：了解氣味是否影響熊蜂的訪花行為
- 2.做法：準備不同氣味人造花(糖水、砂糖、空白)，每天變換三次人造花位置
- 3.記錄：每朵花被造訪的次數
- 4.分析：以chi-square test了解氣味是否有顯著影響

二、觀察精選熊蜂對不同視覺刺激(顏色、尺寸)的偏好

(一) 目的：了解精選熊蜂對特定顏色及尺寸偏好(各2巢)

(二) 做法：

- 1.人造花製作：
3D列印出不同顏色及尺寸的圓盤，上有孔洞(直徑1mm)，下方塑膠瓶蓋內有糖水(圖5)
- 2.顏色：6色(圖6)，白、棕、藍、粉紅、黃、檸檬綠
- 3.尺寸：5尺寸(圖7)，2.3cm、3.2cm、4.5cm、5.5cm、6.4cm
- 4.記錄：每朵花被造訪的次數
- 5.分析：以chi-square test判斷顏色及尺寸是否顯著影響

三、比較不同視覺刺激對熊蜂學習的影響

(一) 目的：找出何種視覺刺激對精選熊蜂影響較顯著(4巢)

(二) 做法：第1天，在最不偏好的人造花中放糖水，使熊蜂喜歡上原最不喜歡的花 第6天，將所有人造花都放糖水，觀察反認知訓練後的訪花行為

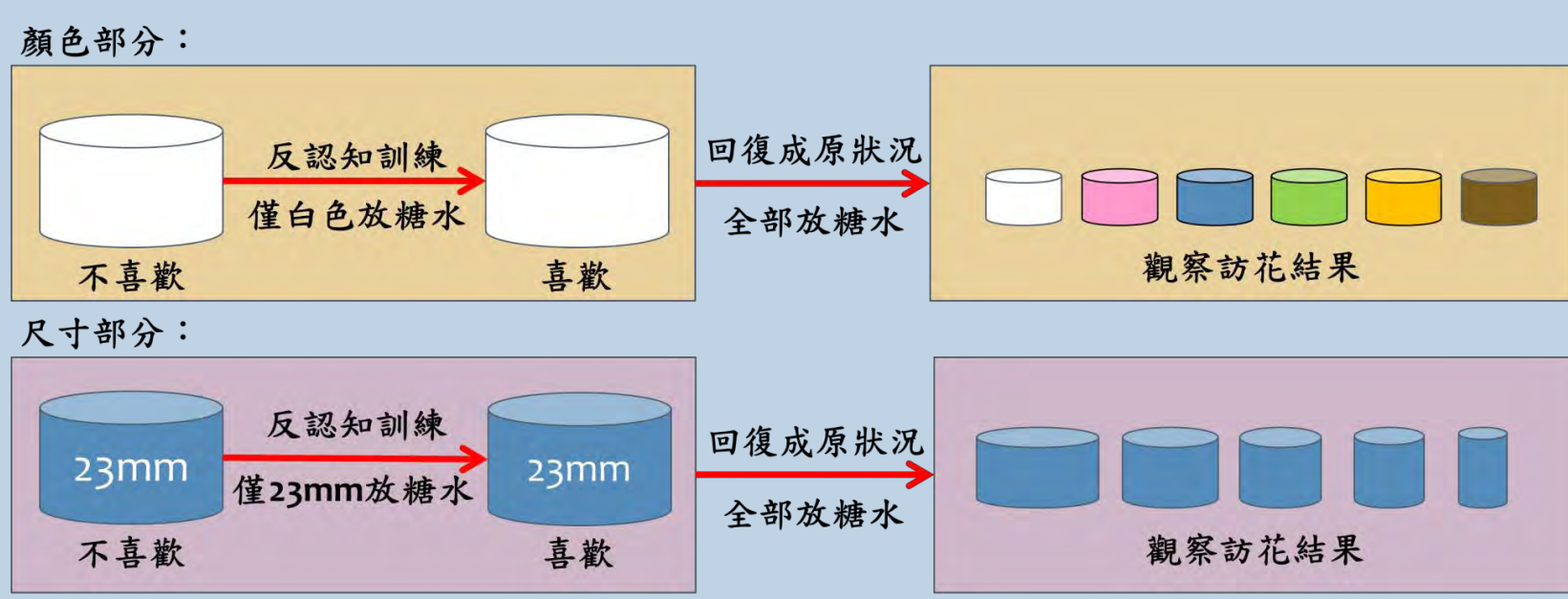


圖10 比較不同視覺刺激作法

(三) 記錄：每朵花被造訪的次數

(四) 分析：

- 1.各種花的偏好程度
= 個別訪花次數 / 全部的訪花次數
- 2.迴歸關係：
計算出迴歸方程式，了解偏好程度與時間關係
- 3.視覺訊息影響程度：
比較顏色與尺寸偏好程度減少速率，了解何者影響較大
- 4.偏好回復程度：
比較顏色與尺寸的偏好程度回復情形，了解原最偏好的花經過反認知訓練後的訪花情形
- 5.學習能力評估：
將各種花的偏好程度繪製成長條圖，比較實驗前後差異，了解熊蜂的訪花行為是否因反認知訓練而發生改變

四、臺灣精選熊蜂對更複雜學習的可能性

(一) 目的：驗證臺灣精選熊蜂是否能被人為教導(2巢)

(二) 標記精選熊蜂

- 1.目的：將每一個體編號以觀察個體行為(各25隻)
- 2.做法：用自製標記器(圖12)將藍色標籤黏在蜂的背部(圖13)

(三) 建立連結階段：

- 1.目的：使熊蜂了解木球與獎勵之間的關聯性
- 2.做法：於中央洞口處放置黃色半圓球，並打開洞口(圖15)使熊蜂能自由吸食糖水

(四) 了解人為訓練是否影響熊蜂行為(圖17)

- 1.做法：給予熊蜂五分鐘，若失敗，巢A以假蜂(圖18)示範將球推入洞口(圖19)，巢B則不示範
- 2.分析：(1)比較兩巢熊蜂前往木球及中央洞口的比例差異
(2)觀察訓練組往不同目標及成功比例與訓練次數關聯
(3)比較熊蜂爬上圓盤後的軌跡圖觀察前往的地點以了解是否真正學習



圖1 精選熊蜂蜂后(*Bombus eximius*)

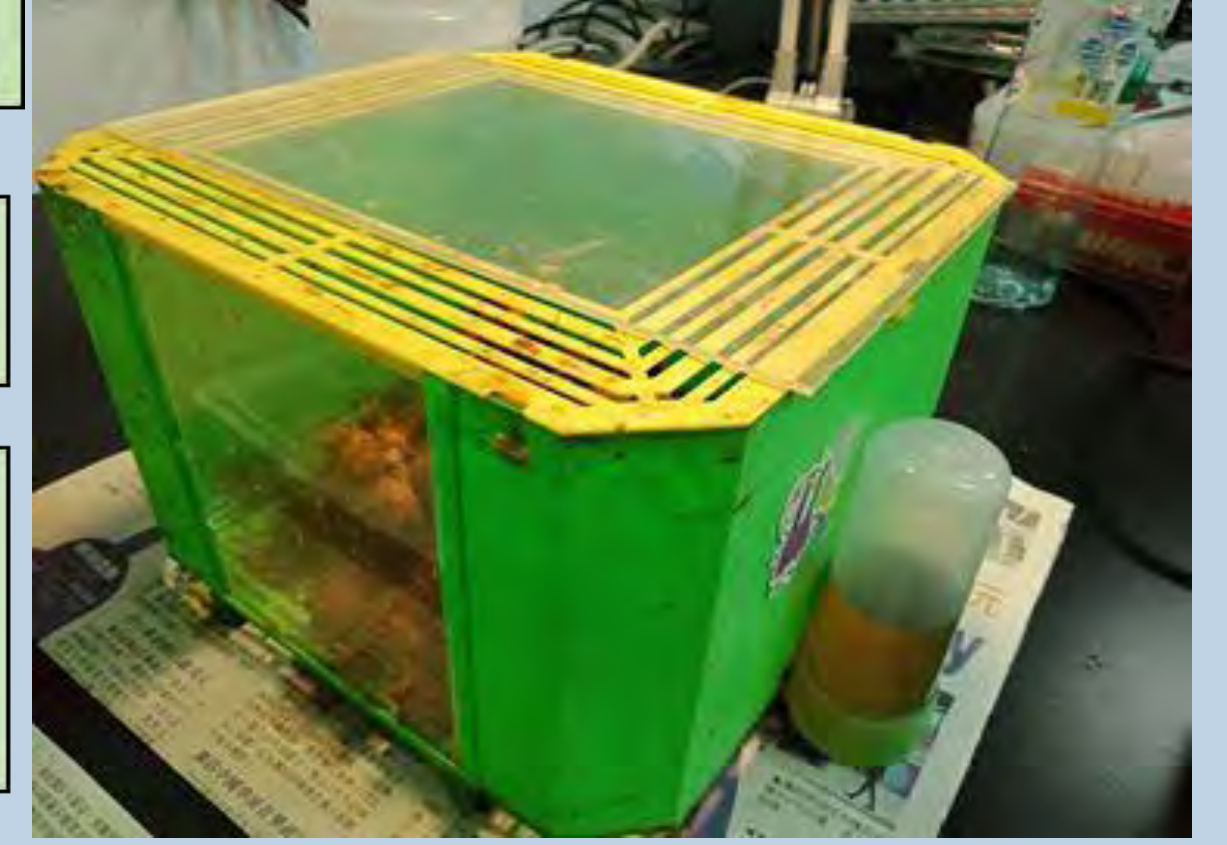


圖2 蜂箱



圖3 可進行實驗的熊蜂蜂群

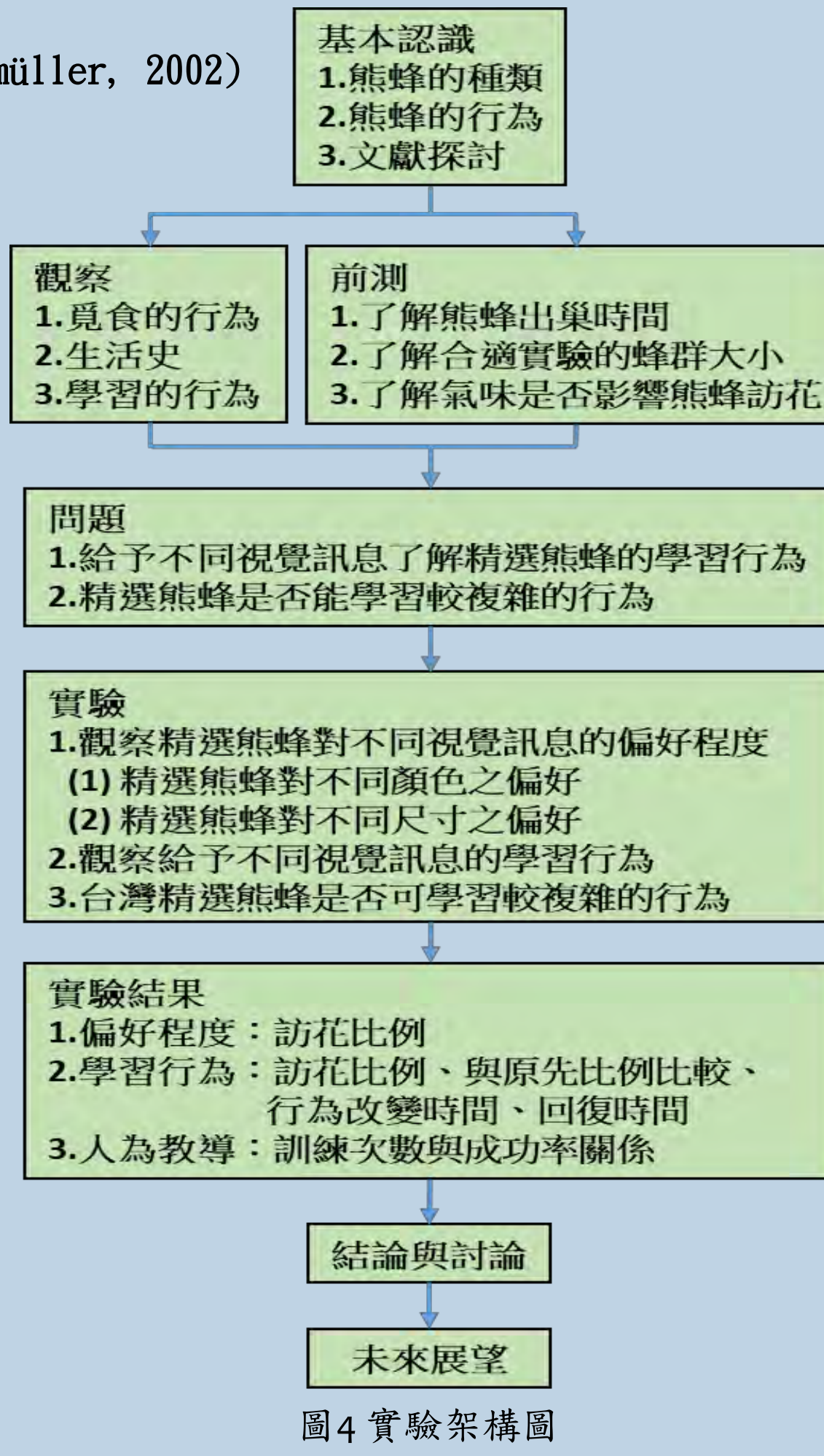


圖4 實驗架構圖

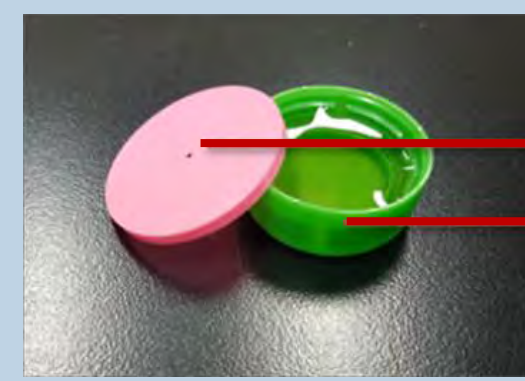


圖5 人造花



圖6 各種不同顏色的人造花(直徑3.2cm)



圖7 各種不同尺寸的人造花(藍色)



圖8 顏色實驗場地(長100cm、寬93cm、高35cm)

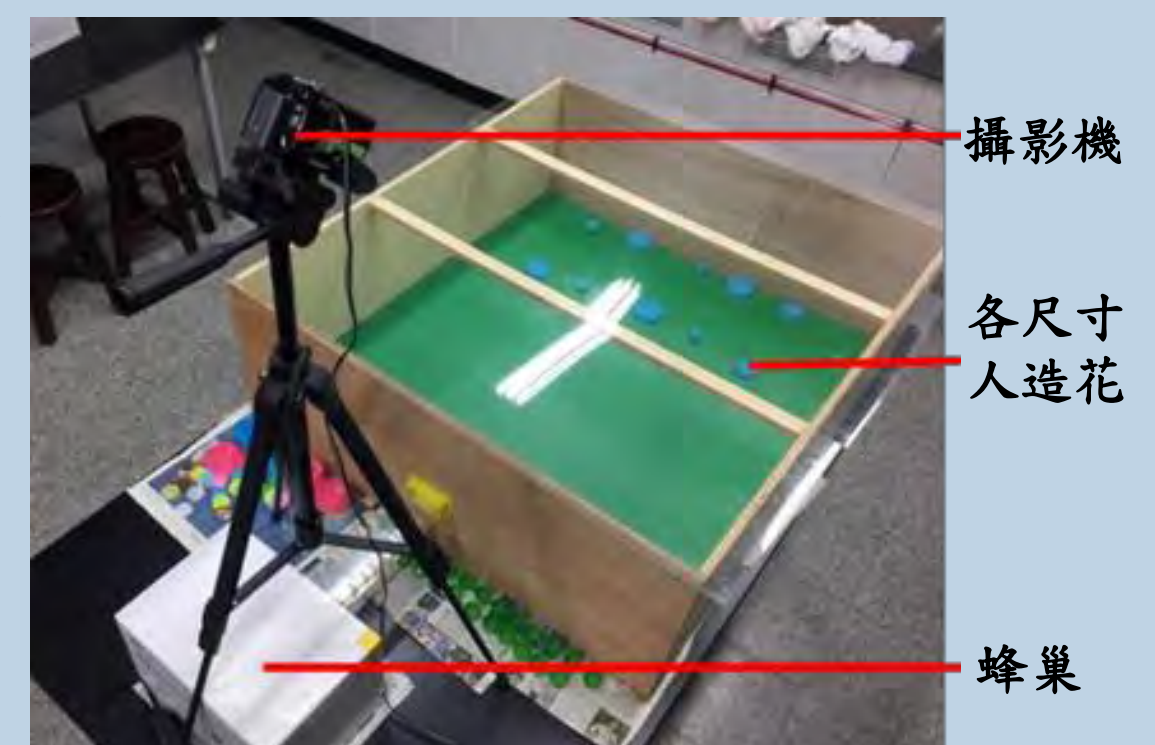


圖9 尺寸實驗場地(長100cm、寬93cm、高35cm)

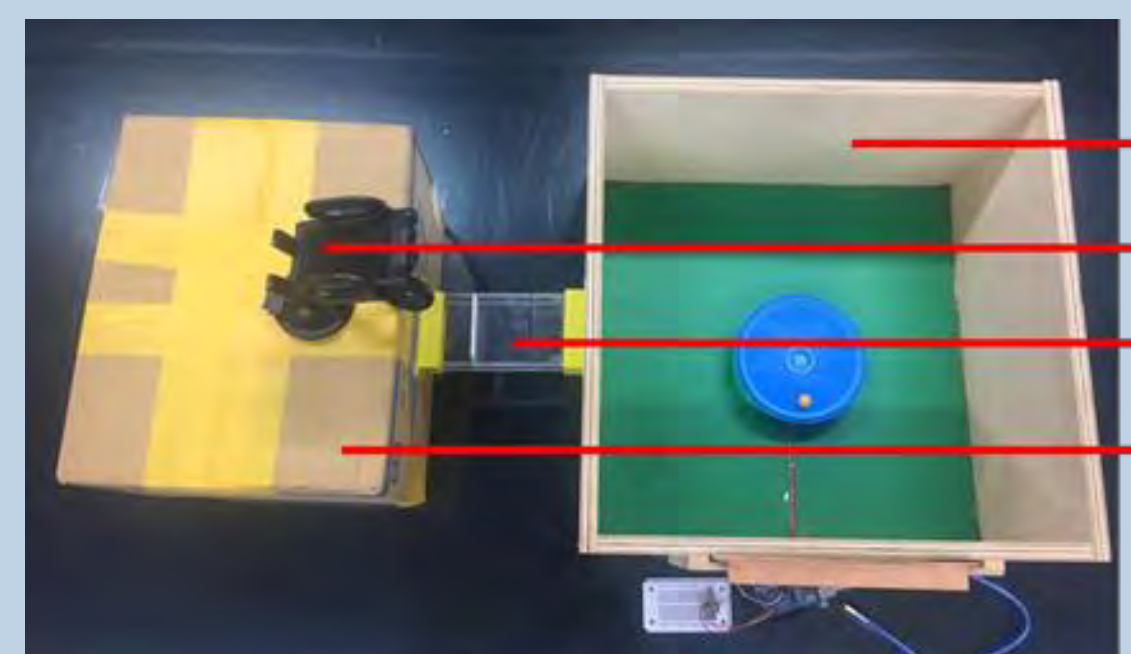


圖11 訓練推球場地(長40cm、寬40cm、高25cm)

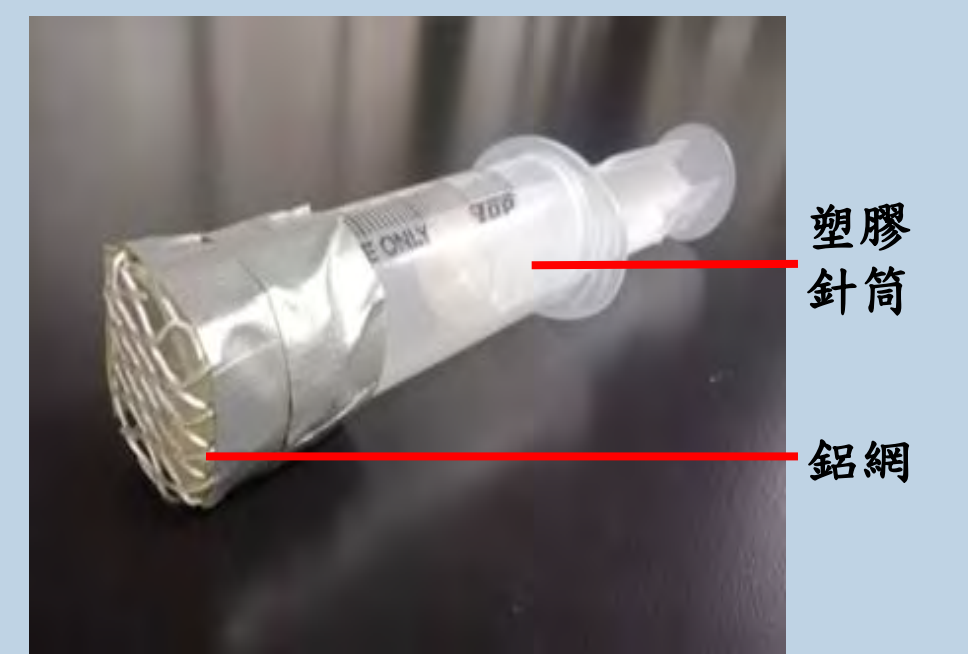


圖12 標記器

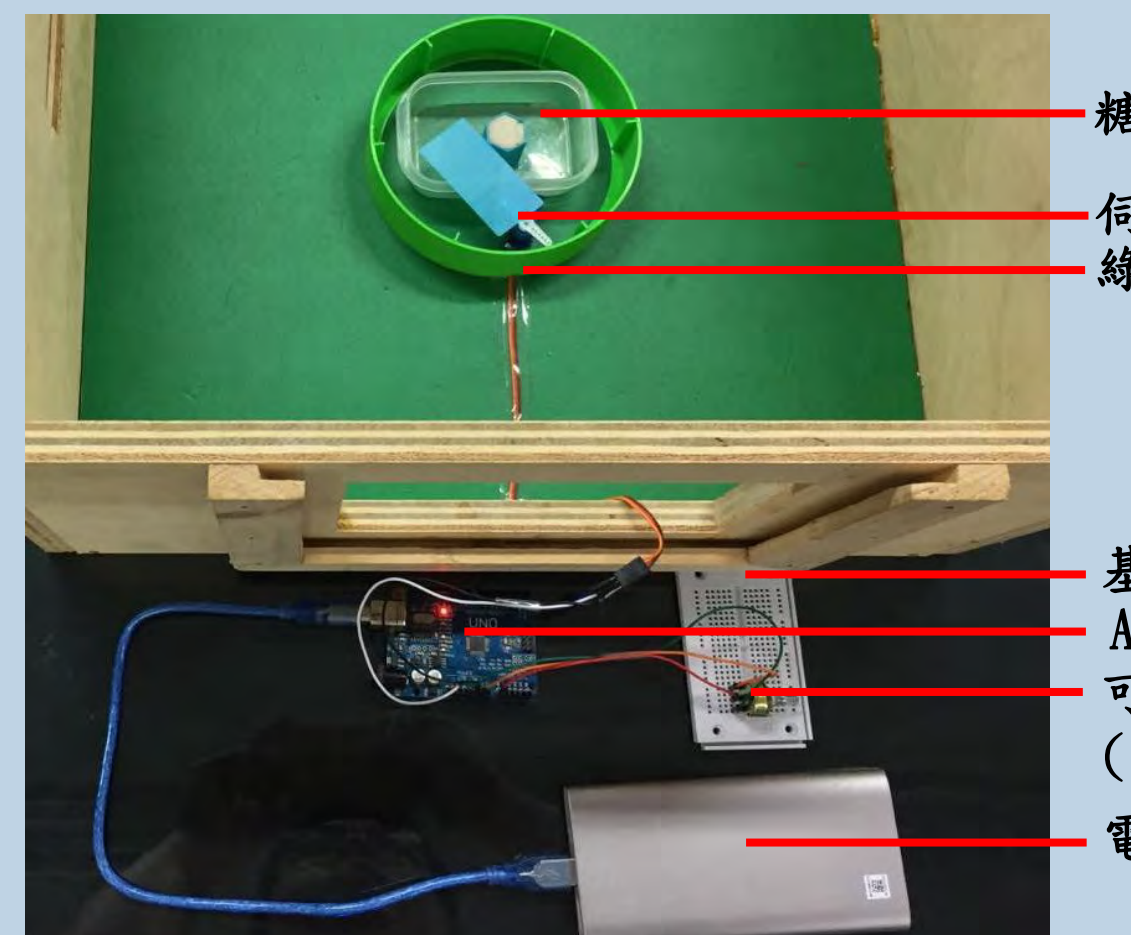


圖13 Arduino裝置設置

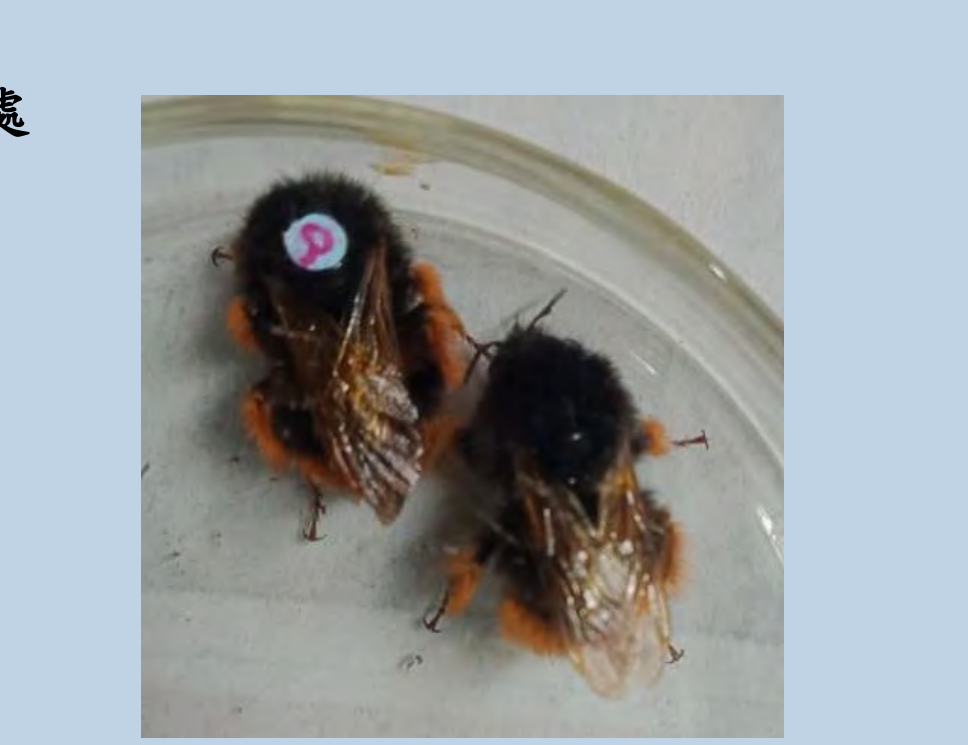


圖14 蜂的標記結果

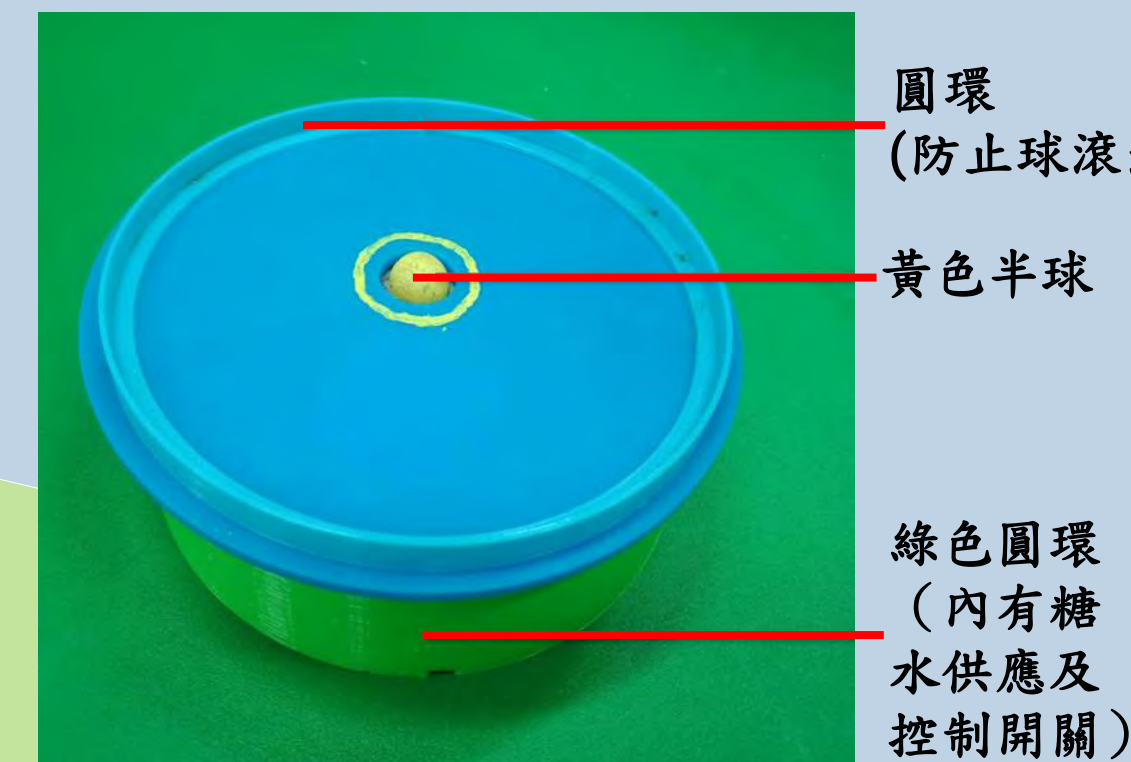


圖15 圓盤組細部介紹

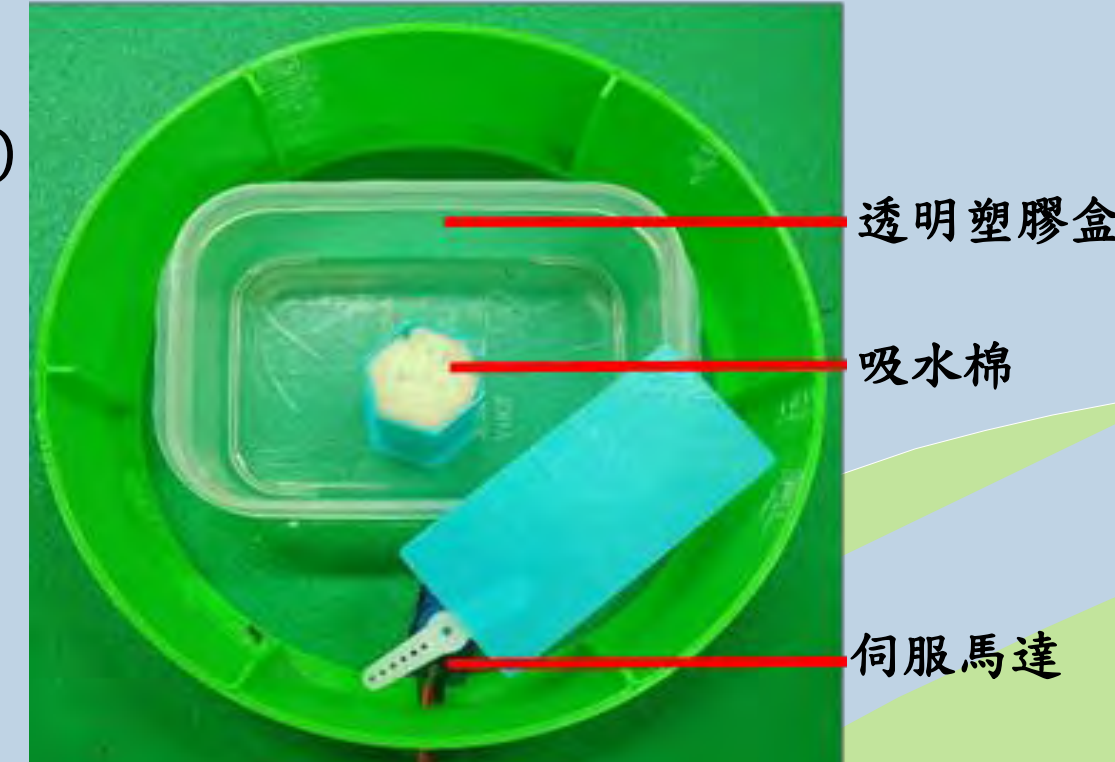


圖16 圓盤內部結構

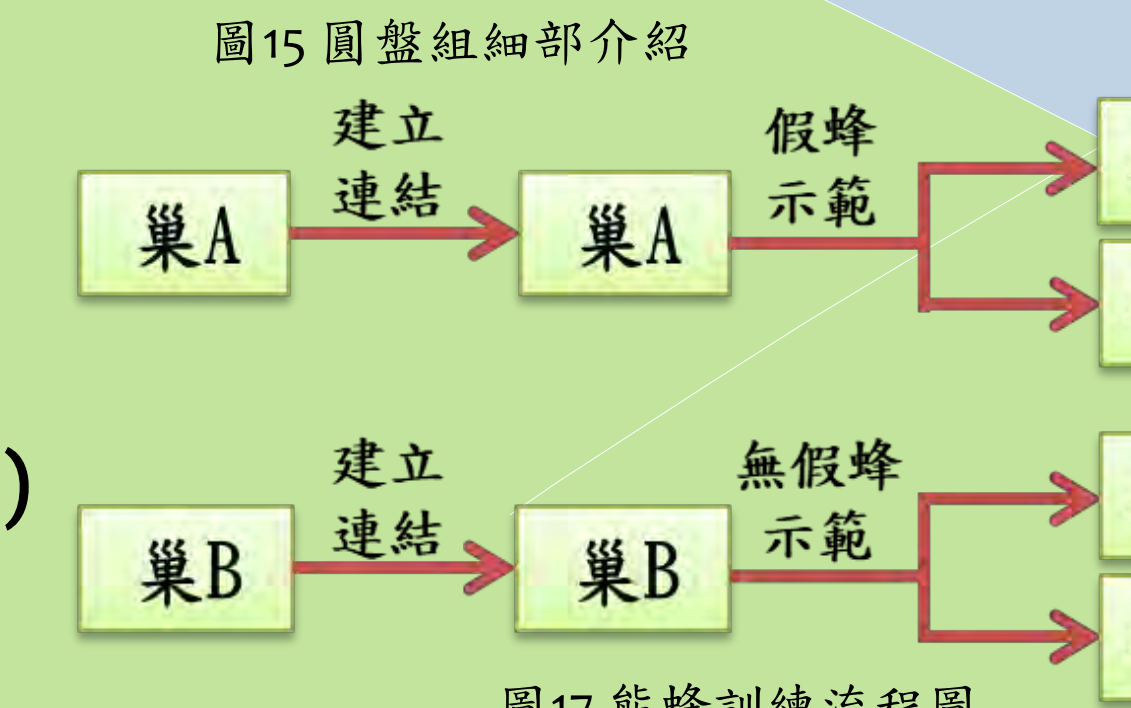


圖17 熊蜂訓練流程圖



圖18 假蜂

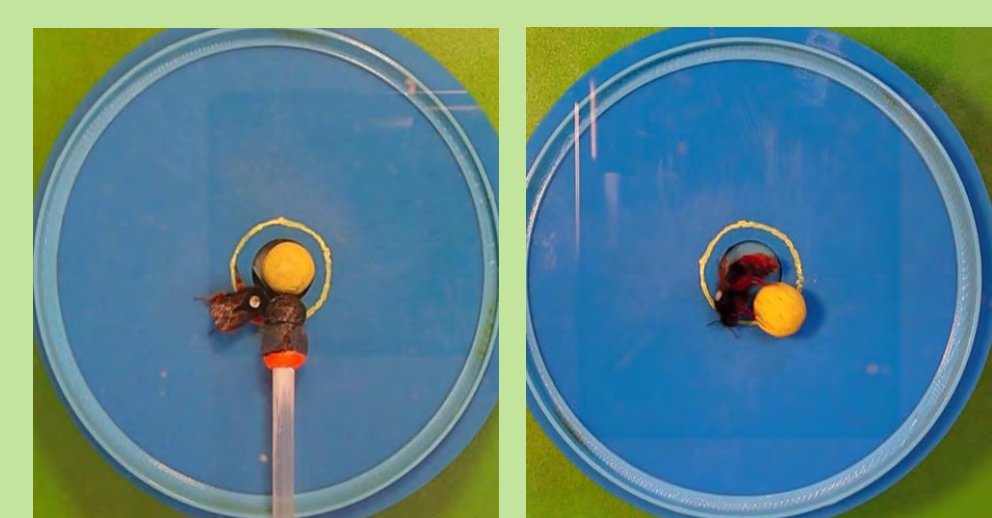


圖19 假蜂訓練

圖20 推球成功

四、熊蜂對更複雜學習的可能性

(一) 訓練有無對熊蜂的影響 (二) 訓練次數對學習行為的影響

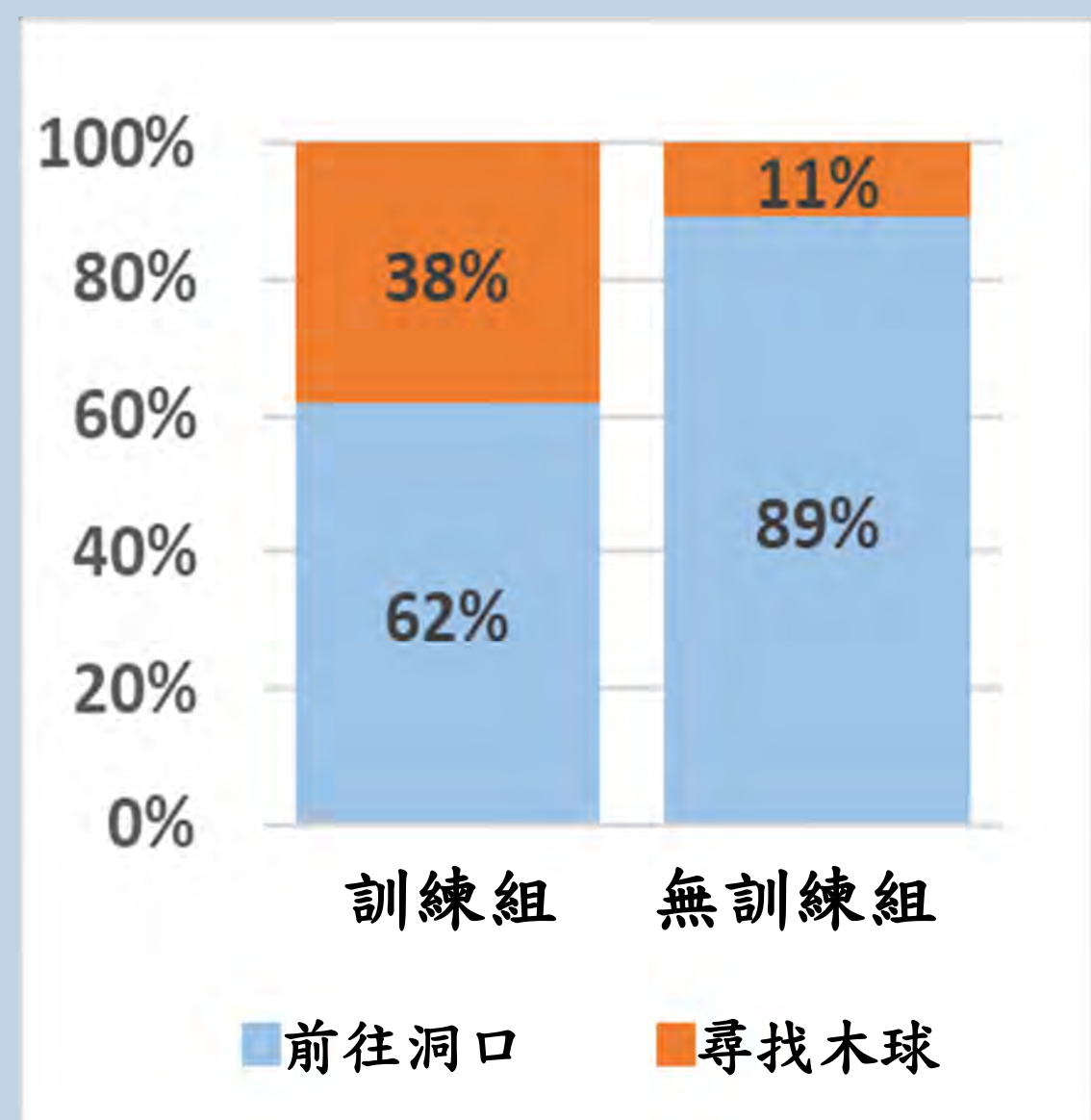


圖43 訓練有無與前往不同目標比例

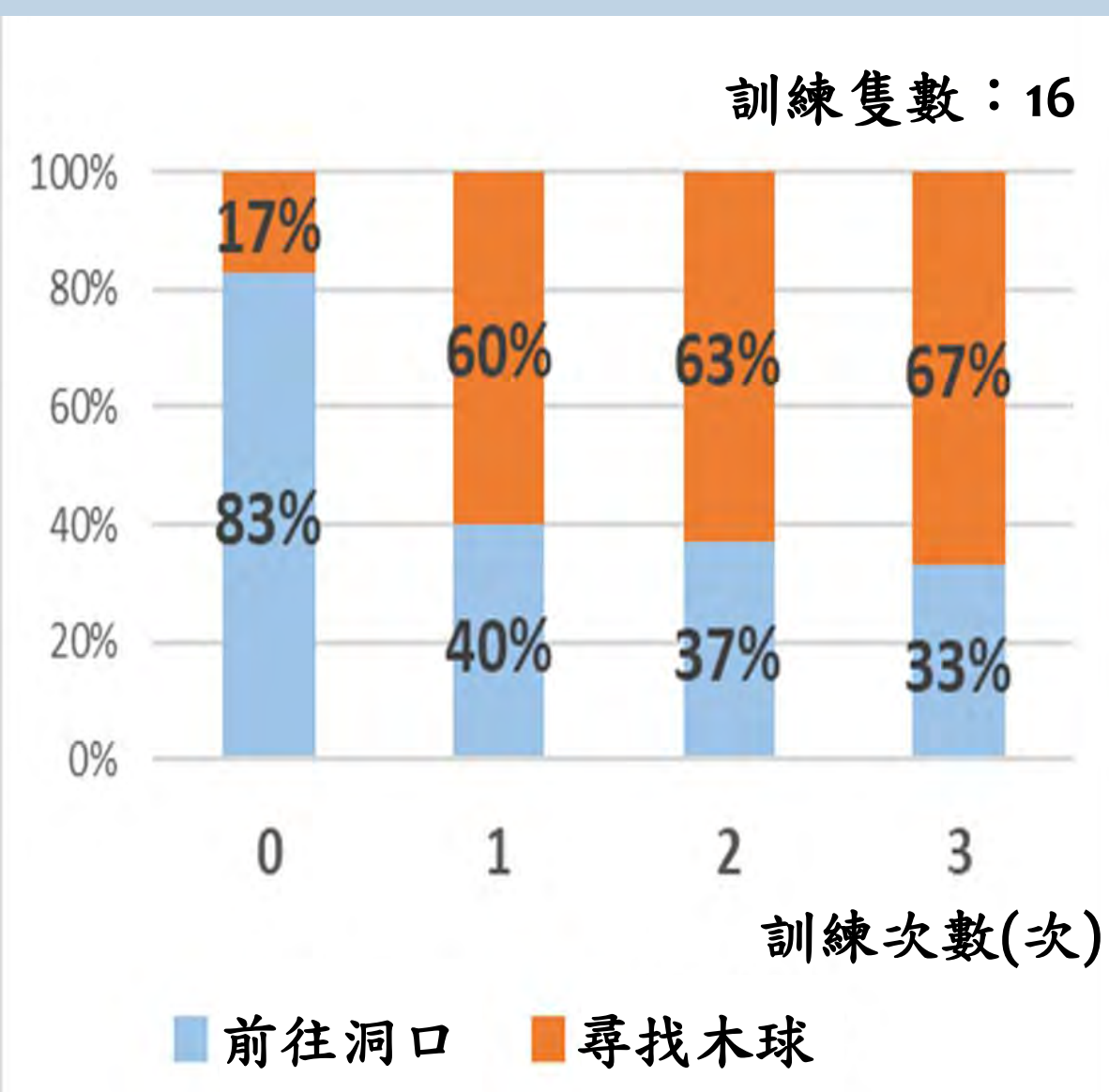


圖44 訓練次數與前往不同目標比例

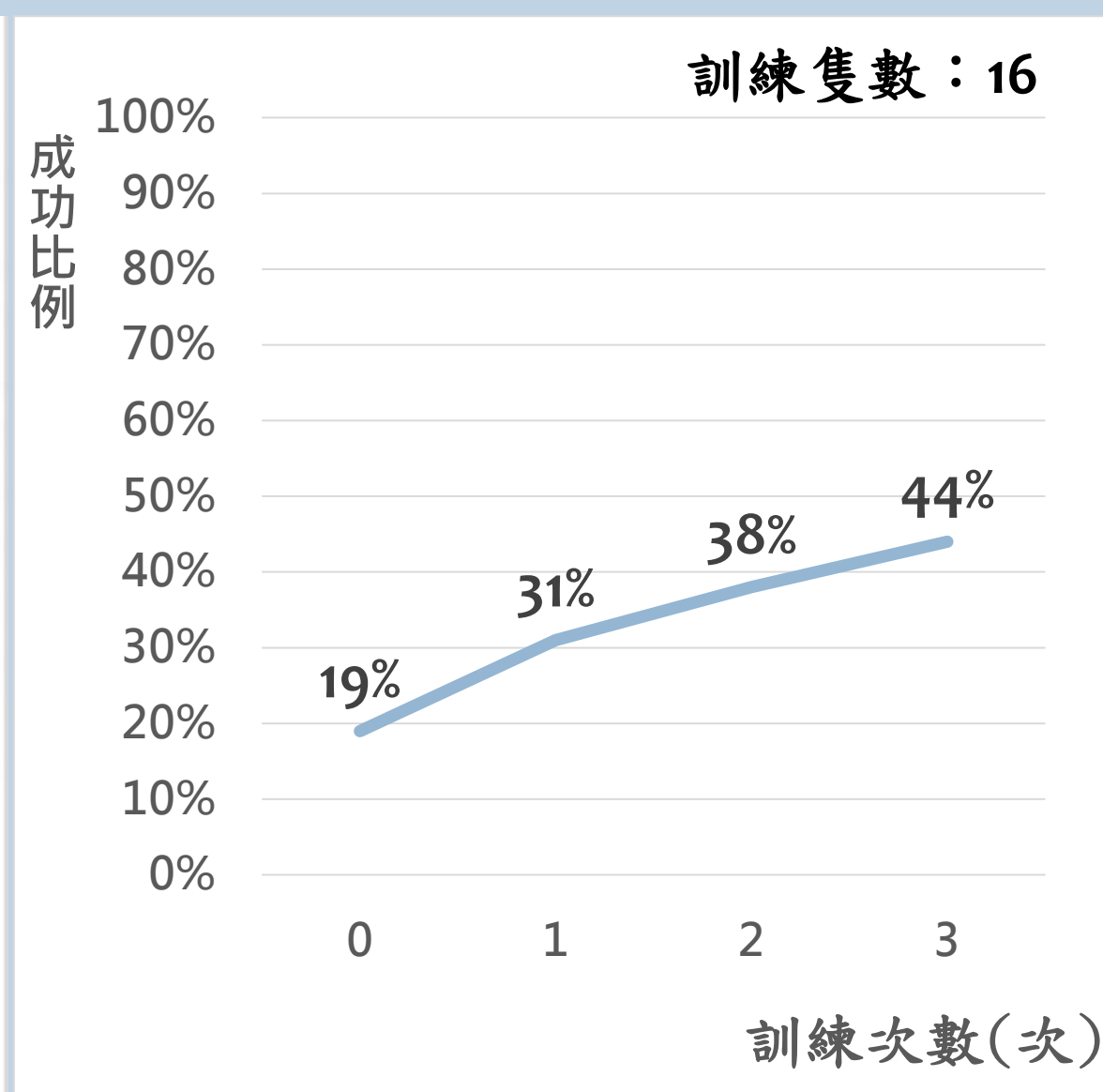


圖45 訓練次數與成功比例關係

(三) 熊蜂上圓盤後爬行軌跡

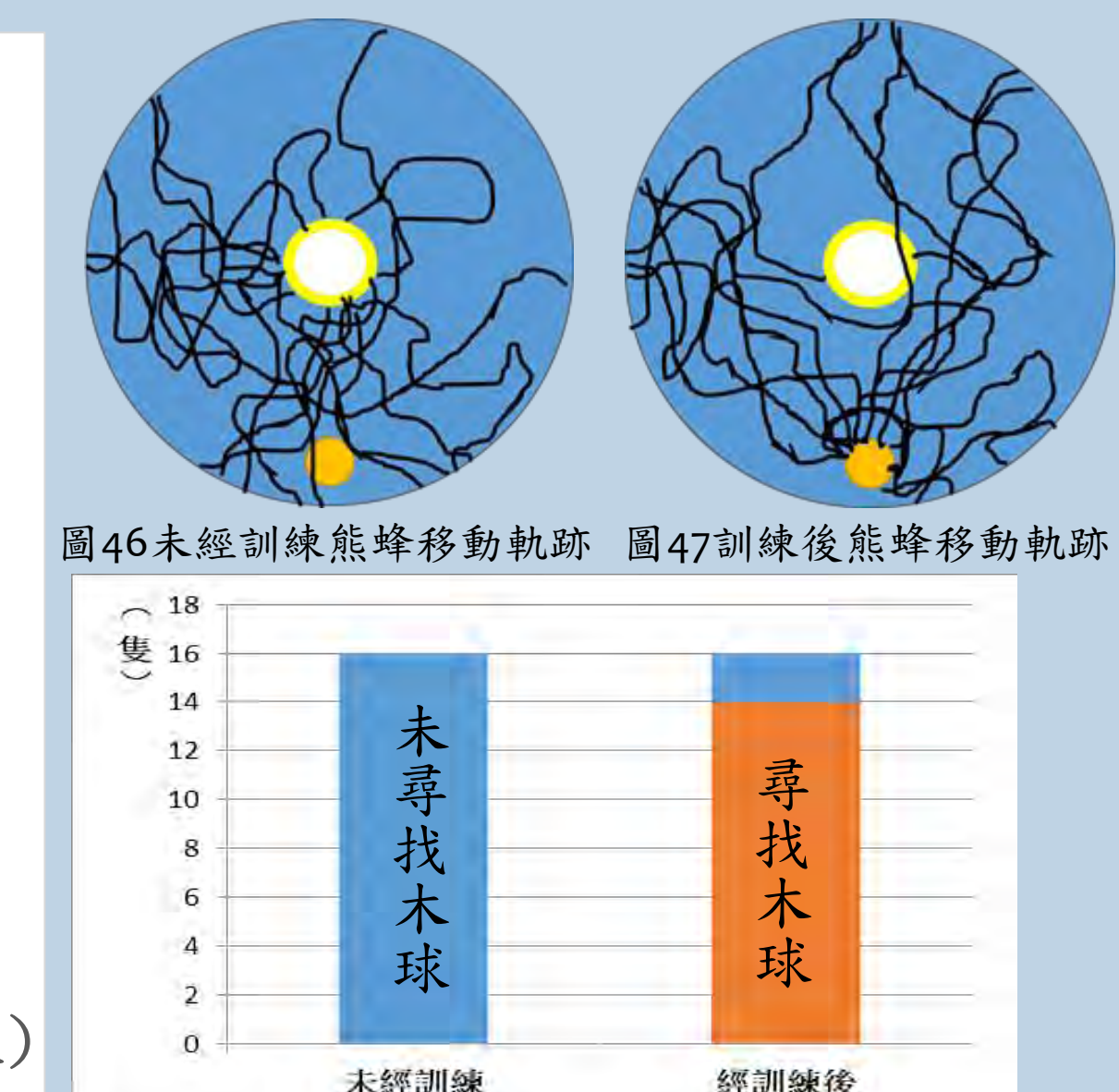


圖48 訓練前後，蜂前往木球比例

結果：

- 若不用假蜂示範，精選熊蜂工蜂僅有11%前往木球找尋糖水；若有經過假蜂示範，則有38%前往木球(圖43)
- 隨著訓練次數增加，熊蜂由前往關閉的孔洞尋找糖水改為前往尋找木球(訓練前0隻，訓練後14隻)，且不論從哪一方位爬上圓盤都有此行為。在訓練一次後，前往木球的比率高於六成(圖44)
- 熊蜂在訓練後不只能尋找木球，也能獨立完成推球，受訓練的16隻熊蜂中，有7隻熊蜂獨自完成
- 在接受訓練的16隻精選熊蜂中，成功比例隨著訓練次數增加(圖45)

結論：

- 熊蜂能透過假蜂示範，逐漸理解推動木球與糖水間的關聯，而學習到更複雜的行為
- 熊蜂前往木球尋找糖水的比例隨著訓練次數提高，代表熊蜂有成功學習並保持成果，且有真正理解學習的事物

伍、討論

一、為何精選熊蜂對不同顏色訊息會有不同偏好？

文獻一：(Chittka,2001)

- 熊蜂有兩套視覺通道系統，分別為顏色通道(紫外線、藍色、綠色受體)及綠色通道(僅有綠色受體)，在視角為5~15度時會使用綠色通道，我們的實驗視角介於6.3~8.5度，故熊蜂使用綠色通道
- 使用綠色通道時，熊蜂搜尋人造花時間會被顏色的綠色對比度影響，綠色對比度越小則搜尋時間越短，這是因為綠色受體只會吸收綠光，所以顏色與綠色越接近，熊蜂能看得越清楚，搜尋時間就會降低
- 本次實驗各色的綠色對比度：白>檸檬綠>黃>藍>紅
- 顏色愈容易被搜尋到，歐洲熊蜂愈可節省能量→理論上偏好程度：紅>藍>黃>檸檬綠>白

文獻二：(Perkin,2017)

歐洲熊蜂多訪紫、藍及紅色花，如：薰衣草(紫)、櫻花(粉紅)

實驗結果：

精選熊蜂對人造花顏色偏好：藍>粉紅>棕>黃>檸檬綠>白

討論：

歐洲熊蜂和精選熊蜂在演化過程中，對花色的偏好相同

二、為何精選熊蜂對不同尺寸訊息會有不同偏好？

文獻：(Chittka,2001)

- 花越大，越容易看見，搜尋時間越短
- 理論上偏好程度：
6.4cm > 5.5cm > 4.5cm > 3.2cm > 2.3cm

實驗結果：

- 3.2cm 的人造花為最偏好尺寸
- 精選熊蜂對於其餘尺寸的偏好沒有明顯差異

討論：

大花的構造(雄蕊太長、花瓣太大等)會造成熊蜂採粉及吸食花蜜時的困難，故熊蜂不偏好大花。最適合採粉的尺寸3.2cm略大於工蜂(2.5~3cm)

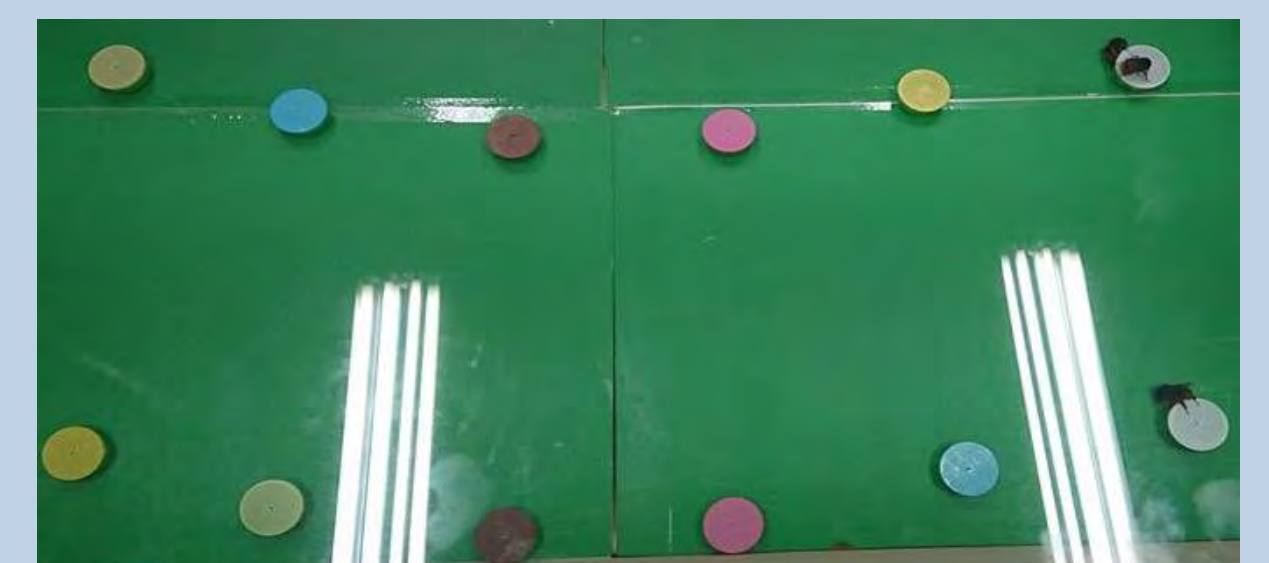


圖49 反認知訓練中蜂訪白色人造花

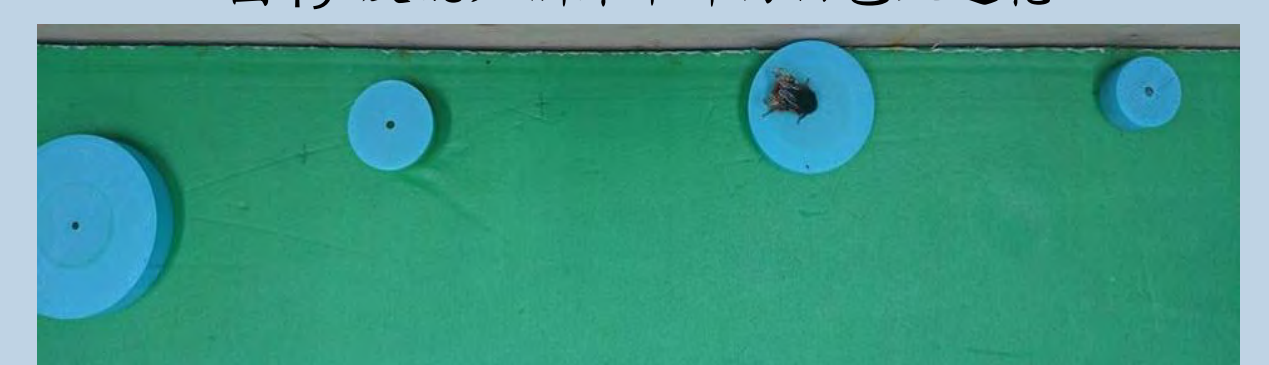
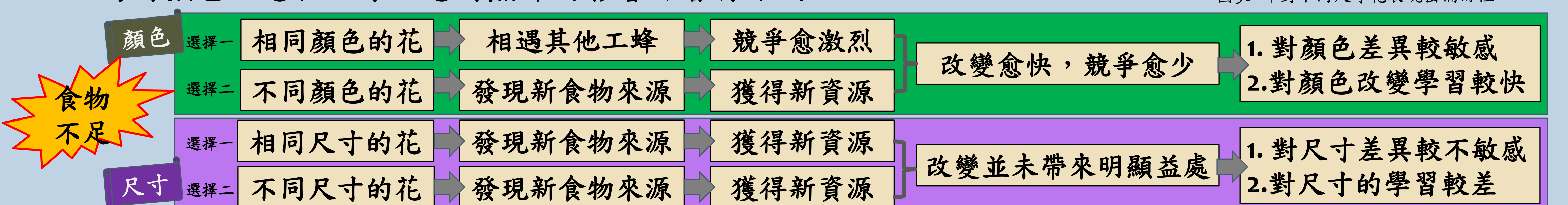


圖50 蜂對不同尺寸花表現出偏好性

三、為何顏色訊息和尺寸訊息對熊蜂的影響力會有不同？



四、臺灣精選熊蜂能否像歐洲熊蜂一樣學會更複雜的行為？



圖51 訓練前熊蜂前往中央洞口



圖52 訓練後熊蜂推動木球

- 訓練後，精選熊蜂從不同方位爬上圓盤後，都能尋找木球並試圖推至中央
- 訓練次數愈多，尋找球的次數愈多
- 7隻精選熊蜂能獨自成功完成推球

討論：

- 牠理解推球才是獲得糖水的唯一方法
- 精選熊蜂也能如歐洲熊蜂，透過人為教導學會更複雜的行為

陸、結論

實驗證明精選熊蜂能夠透過給予視覺訊息、自我探索及人為訓練進行學習

- 熊蜂最偏好的人造花顏色是粉紅色及藍色，最不偏好白色；最偏好的尺寸為直徑3.2cm的人造花，最不偏好直徑2.3cm的人造花
- 經由給予不同的視覺訊息，了解蜂群能進行簡單的學習行為，並對不同視覺訊息有不同的反應
- 透過推球實驗，我們可以進一步發現精選熊蜂不只能處理簡單訊息，以探索方法學習，更可以透過強化認知，進行更複雜的訓練且理解訓練本身所帶來的訊息

柒、展望

- 本次實驗僅探討顏色及尺寸兩種刺激，其他視覺或感官刺激對學習可能會有不同的結果，希望日後能以其他刺激探討熊蜂的學習行為
- 在進行熊蜂的學習或訓練時根據所需要的成效來選擇顏色或尺寸這兩種視覺訊息
- 進階探討熊蜂的學習能力及應用
- 將熊蜂對某些視覺訊息的敏感反應應用在農作物授粉上

捌、參考資料

- Spaethe J, Tautz J, Chittka L (2001) Visual constraints in foraging bumblebees: Flower size and color affect search time and flight behavior. PNAS 98(7): 3898-3903
- Loukola OJ, Perry CJ, Coscos L, Chittka L (2017) Bumblebees show cognitive flexibility by improving on an observed complex behavior. Science 355(6327): 833-836
- Alem S, Perry CJ, Zhu X, Loukola OJ, Ingraham T, Søvik E, Chittka L (2016) Associative Mechanisms Allow for Social Learning and Cultural Transmission of String Pulling in an Insect. PLOS Biology
- Konzmann S, Lunau K (2014) Divergent Rules for Pollen and Nectar Foraging Bumblebees – A Laboratory Study with Artificial Flowers Offering Diluted Nectar Substitute and Pollen Surrogate. PLoS One 9(3): e91900
- Brodie L (1996) BUMBLEBEE FORAGING PREFERENCES: DIFFERENCES BETWEEN SPECIES AND INDIVIDUALS. (A thesis submitted as part of the Requirements for the Degree of B.Sc. (Hons.) in Ecology). University of Aberdeen
- Hagler RJ, Jackson GC (2001) METHODS FOR MARKING INSECTS: Current Techniques and Future Prospects. Annu Rev Entomol 46:511-43
- Gavin J Taylor, PierreTichit, Marie D Schmidt, Andrew J Bodey, Christoph Rau, Emily Baird (2019) Bumblebee visual allometry results in locally improved resolution and globally improved sensitivity. eLife 2019;8:e40613
- 江敬皓 (2009) 台灣產精選熊蜂與越南熊蜂之生物學研究。(出版的博士論文) 臺北：國立臺灣大學昆蟲學研究所
- 郭宏遠, 宋一鑫 (2013) 熊蜂授粉於農業生產之應用。種苗科技專訊, No.82: 21-23
- 江敬皓, 宋一鑫, 陳裕文, 楊平世, 何鐘光 (2006) 台灣本土熊蜂室內飼養與應用。台灣昆蟲特刊, 8: 111-117