

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生物科
(鄉土)教材獎

030318

白疏巨山蟻工蟻在新建蟻巢階段職務轉換

學校名稱：新北市私立竹林高級中學(附設國中)

作者： 國二 蔡舒涵	指導老師： 顏嘉怡
-------------------	------------------

關鍵詞：白疏巨山蟻、新建蟻巢、工蟻職務

摘要

前人大多研究大型蟻群的職務 (task) 分配，但對於新建蟻巢階段的研究少，因此本實驗想了解白疏巨山蟻 (*Camponotus albosparsus*) 新建蟻巢階段的職務分配。研究發現，在大空間中，蟻群會增加偵查時間，但不影響蟻群整體的職務數量，但工蟻數量增加時，會使每隻工蟻負責較少職務，然而在新建蟻巢階段的工蟻負責的職務不固定，不同時間工蟻會負責不同職務。本實驗以肉眼觀察，發現其耗費時間及人力，因此開發 Tracker 追蹤工蟻職務，雖然 Tracker 無法觀察工蟻細微的職務，但可更快速的分析工蟻主要的職務。未來資訊人員可使用 Tracker 觀察蟻群職務後，並參考蟻群分配職務的模式，評估最佳化的職務分配模型，運用在人類的企業管理。

壹、前言

一、研究動機

螞蟻為社會性昆蟲，前人多研究大蟻群或將一個大蟻群的工蟻分成多個小蟻群後的分工方式，例如「懶螞蟻效應」是觀察螞蟻的分工行為，發現部分工蟻不會負責職務，卻能在蟻群危機時領導蟻群 (Charbonneau *et.al.*, 2017)。歷年研究亦探討了不同種類的螞蟻職務分工，如 King & Trager (2007)研究在野外數量龐大的悍蟻屬 (Genus *Polyergus*)和山蟻屬 (Genus *Formica*)的職務。

然而過去的研究主要探討「大族群螞蟻」(1000 隻以上)的職務分工，其分工細緻，因此本研究好奇在蟻后交配後的「新建新巢」中，蟻巢空間大小和工蟻數量對新建蟻群分配職務的影響以及蟻群在不同時間的職務分配方式。

本實驗以前人常使用的「肉眼觀察」分析工蟻的職務 (King&Trager, 2007;Gordon, 1989)，但分析實驗結果後發現肉眼分析過程耗時，且主觀判斷可能造成誤差，因此想評估創新觀察蟻群職務的模式，改以追蹤軟體 Tracker 分析，Tracker 能將工蟻的移動軌跡量化，將數據進一步統計後未來可讓不理解生物的資訊人員使用 Tracker 觀察蟻群的職務分配，並參考蟻群分配職務的模式評估最佳化的職務分配模型，運用在人類的企業管理。

二、文獻探討

(一) 名詞定義

1. 新建蟻巢階段

蟻后在新地方產下一至三批卵時為新建蟻巢階段（一批卵約有 10 顆，但最終只有 1~5 顆卵能成為工蟻），若蟻群越龐大，工蟻改變職務的原因則越多（如工蟻的年齡差距大，工蟻數量多），為了方便觀察，本研究將新建蟻巢階段定義為蟻后產下一至三批卵的期間。

2. 職務 (task)

工蟻的工作項目，如疏理和搬運卵、交哺、偵查、覓食、自行清潔和偕同清潔等。

3. 職務轉換

工蟻改變職務，如工蟻原先負責疏理，但後來改為偵查。

4. 亞階級 (subcastes)

依照工蟻的職務可分為不同的亞階級，例如：工蟻的職務為疏理卵，則此工蟻的亞階級為哺育工蟻（圖 1）。

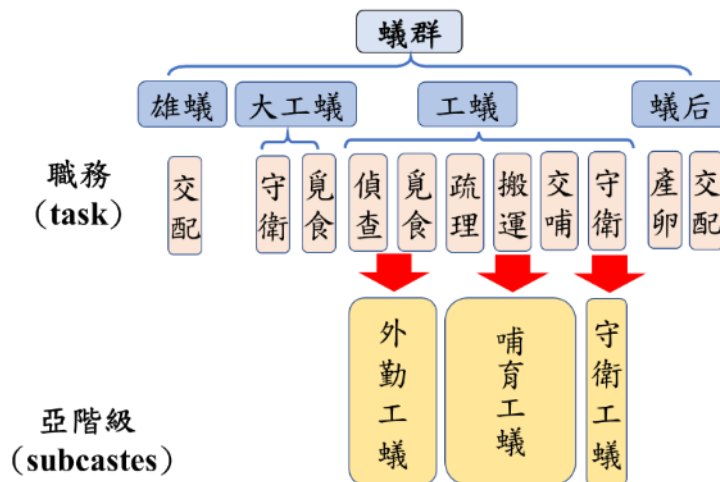


圖 1 螞蟻的分類階級（作者自行繪製）

(二) 螞蟻的分類

螞蟻為膜翅目 (Hymenoptera) 的螞蟻科 (Formicidae)，全世界螞蟻共有約 260 屬，16000 種，且細分 20 個亞科 (Wilson & Holldobler, 2000)。台灣有 8 個亞科，64 屬，270 種。多數為山螞蟻亞科 (Formicinae) (48 種)，家螞蟻亞科 (Myrmicinae) (89 種)，針螞蟻亞科 (Ponerinae) (40 種)，剩下的迷螞蟻亞科、粗腳螞蟻亞科、琉璃螞蟻亞科、昔螞蟻亞科、擬家螞蟻亞科 5 科則只有 24 種。本次實驗動物白疏巨山螞蟻為山螞蟻亞科的巨山螞蟻屬 (*Camponotus*) (王，2013)。

(三) 螞蟻的繁殖

螞蟻后在繁殖期間會和雄螞蟻一起飛到空中交配，此行為稱作婚飛 (mating flight)。婚飛後螞蟻后会選擇一個安全的地方準備產卵，並將自己的翅膀拔下，讓自己的飛行肌成為營養來源並餵給第一批工螞蟻 (Wilson & Holldobler, 2000)。在交配後，螞蟻后会將雄螞蟻的精子存放在自己的儲精囊，螞蟻后能夠藉由控制儲精囊瓣膜的開合，決定是否讓精子和卵結合，有受精的卵為雌螞蟻，未受精的卵則為雄螞蟻。

(四) 螞蟻的一生 (圖 2)

螞蟻屬於完全變態的昆蟲，生活史約 6~8 週，包括「卵 → 幼蟲 → 蛹或繭 → 成蟲」等四階段。螞蟻的幼蟲不超過 5mm，外層包覆著透明的卵殼。幼蟲呈半透明、無足狀，體表具保護功能的體毛，幼蟲分為五個齡期分別為一齡、二齡、三齡、四齡和五齡，每蛻一次皮為一個齡期 (Wilson & Holldobler, 2000)，視螞蟻種類不同可分為結繭與不結繭兩種，本實驗使用白疏巨山螞蟻是屬於會結繭的螞蟻；五齡幼蟲後會先進入預蛹、蛹等階段，再發育為成蟲 (工螞蟻變成成蟲後體型不會再改變)。

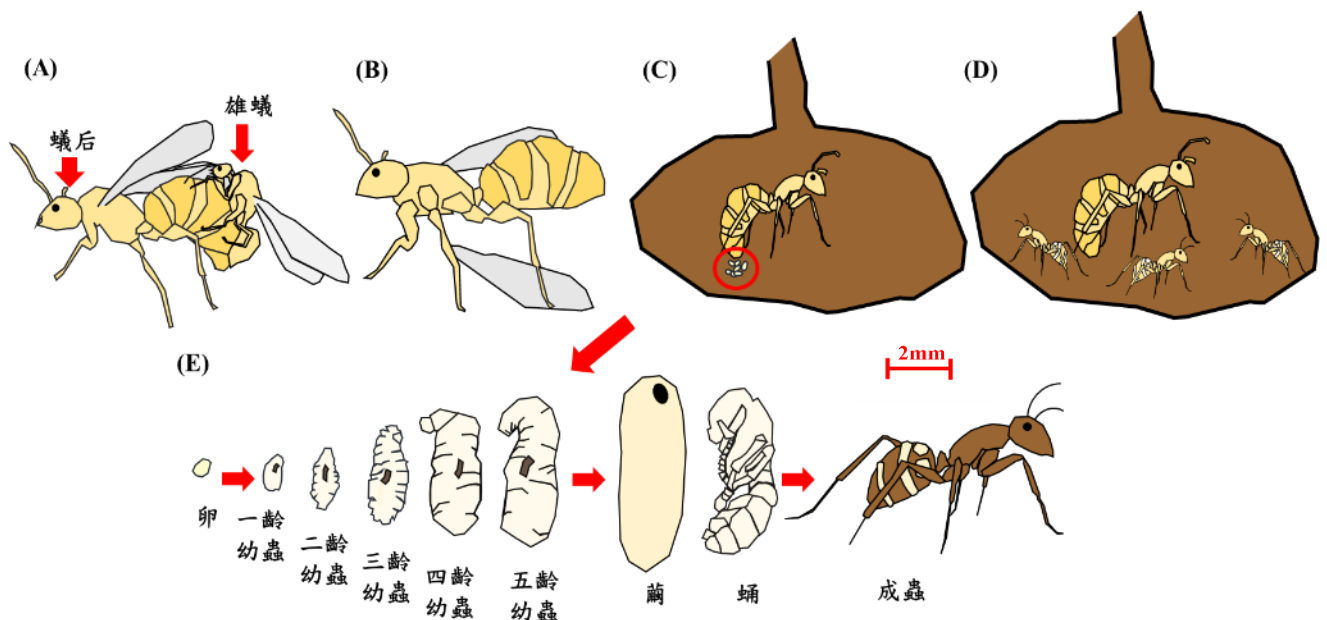


圖 2 螞蟻群建立過程 (作者自行繪製)

(A) 螞蟻后和雄螞蟻婚飛 (mating flight); (B) 螞蟻后扭動身體將翅膀拔下 (C) 螞蟻后会尋找安全的地方產卵 (D) 卵孵化成工螞蟻，螞蟻群擴大 (E) 卵孵化成工螞蟻的過程

(五) 螞蟻的階級制度 (圖 1)

白疏巨山蟻屬於社會性昆蟲，會有分工行為。其蟻群分為蟻后 (reproductive female)、雄蟻 (reproductive male)和工蟻 (non-reproductive female)。而白疏巨山蟻無兵蟻只有大工蟻，兵蟻和大工蟻的職務皆包含守衛及侵略，但只有大工蟻有覓食的行為。蟻群中工蟻的數量最多，負責的職務最多元，而亞階級 (subcastes)為依照工蟻的職務分類，例如:工蟻的職務為疏理卵，則此工蟻的亞階級為哺育工蟻。

1. 蟻后 (圖 3)

蟻后在蟻群中體積最大且壽命最長，由於蟻后只負責生育，因此多數時間不會離開蟻巢或是移動，只會待在蟻巢內產卵，白疏巨山蟻的蟻后體長為 10~15mm。

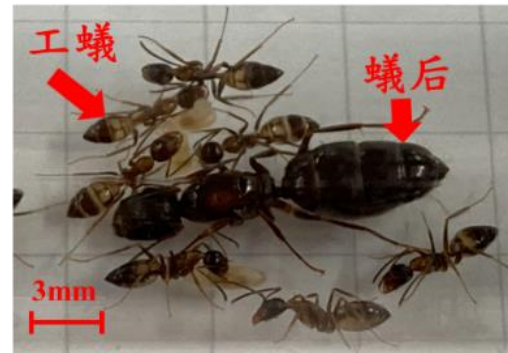


圖 3 工蟻和蟻后 (作者自行攝影)

2. 雄蟻

蟻后大多在蟻群的規模夠龐大後才會產下雄蟻，且雄蟻在蟻群中比例極少 (Wilson & Holldobler, 2000)。具有翅膀，唯一的工作為和蟻后交配，因此在婚飛後，約兩三天內便會死亡，也是蟻群中壽命最短的螞蟻。

3. 工蟻 (圖 3)

皆為雌蟻，在蟻群中個體最小但數量最多的螞蟻，工蟻負責的職務最多元，為群落中的核心，白疏巨山蟻的工蟻體長為 0.4~0.7 cm。

(六) 工蟻的職務

King & Trager (2007)的研究列出工蟻的職務，並且列出山蟻屬 (*Formica*)和悍蟻屬 (*Polyergus*)職務出現的次數和比例 (表 1)，但同為山蟻亞科的山蟻屬和悍蟻屬，工蟻的職務種類差異大，山蟻屬的工蟻出現 22 種，悍蟻屬只出現 8 種。

表 1 山蟻屬與悍蟻屬工蟻職務工作出現次數與頻率 (King & Trager, 2007)

工蟻職務	山蟻屬工蟻 (次數 / %)	悍蟻屬工蟻 (次數 / %)
梳理卵 Groom egg	2(0.001)	0
搬運卵 Carry or roll egg	16(0.01)	0
梳理幼蟲 Groom larva	61(0.04)	0
搬運幼蟲 Carry or roll larva	168(0.1)	0
交哺幼蟲 Trophallaxis w/ larva	10(0.01)	0
餵幼蟲固體食物 Feed larva solids	6(0.003)	0
梳理蛹 Groom pupa	14(0.01)	0
搬運蛹 Carry or roll pupa	42(0.02)	0
幫助蛹脫殼 Assisst ecdysis to pupa	0	0
移動繭 Remove cocoon	24(0.01)	0
搬運死掉的成蟲 Carry dead adult	55(0.03)	6(0.05)
搬運成蟲(同巢)Carry adult nestmate	0	0
交哺 Trophallaxis w/ Formica worker	151(0.09)	0
交哺 Trophallaxis w/Polyergus worker	47(0.03)	3(0.02)
交哺 Trophallaxis w/ Polyergus queen	12(0.01)	0
自行清潔 Self-grooming	615(0.36)	59(0.48)
協同清潔 Allogroom Polyergus queen	20(0.01)	0
協同清潔 Allogroom Polyergus worker	75(0.04)	2(0.02)
協同清潔 Allogroom Formica worker	269(0.36)	1(0.01)
侵略(拖曳或攻擊)Aggression(drag or attack)	21(0.01)	41(0.33)
守衛蟻巢入口 Guard nest entrance	17(0.01)	4(0.03)
覓食 Forage	50(0.03)	0
偵查 Scout	0	8(0.07)
將食物搬回 Retrieve food	47(0.03)	0
肛門交哺 Anal trophallaxis	1(0.001)	0
職務次數總數	1721	124

以下簡單介紹幾種常見工蟻的職務

1. 梳理 (groom)

工蟻會利用口器舔舐卵、幼蟲、蛹和繭或者是用大顎將整理幼蟲的身體，工蟻協助將蛹撕破後，也會梳理剛孵化的成蟲。

2. 搬運 (carry or roll) (圖 4)

工蟻會利用大顎將卵、幼蟲、蛹和繭舉起並搬運到溫度、濕度和光線適合的地方避免卵發霉或受損。



圖 4 工蟻搬運幼蟲 (綠色力量, 2016)

3. 交哺 (trophallaxis) (圖 5)

並非每隻螞蟻都會外出覓食，出去覓食的工蟻會將食物吃下並存放在嗉囊 (crop)，嗉囊是在胃前方的構造，能夠暫時存放食物，回到巢內後才將嗉囊中的食物吐出給同一巢的工蟻。



圖 5 工蟻交哺 (蟲之森, 2018)

4. 清潔 (圖 6)

分為自行清潔 (self-grooming) 和協同清潔 (allogroom)。前者主要是螞蟻使用前足的脛節到跗節關節上的清潔器清潔觸角 (Hackmann *et.al.*, 2015)。後者是工蟻利用口器舔舐彼此的身體。



圖 6 協同清潔 (黃與楊, 2009) 自行清潔 (Heiman, 2012)

5. 覓食行為

覓食行為分為偵查 (scout)、覓食 (forage)、將食物搬回 (retrieve food) 工蟻離開蟻巢到野外找尋食物，在找到食物前的行為，稱作偵查。而其他工蟻會等負責偵察的工蟻安全返回後再沿著偵查蟻沿路留下的費洛蒙前往，找到食物後會選擇在現場覓食後再經由交哺，將食物吐出給其他工蟻，也可選擇將食物搬回蟻巢，此行為稱作食物搬回。

6.守衛 (guard) (圖 7)

巨山蟻屬為山蟻亞科能夠分泌蟻酸也能利用大顎攻擊，但在受到攻擊時會優先逃跑，也不會主動發動攻擊或侵略 (aggression) 其他的蟻群。



圖 7 守衛 (取自文獻三 - 6)

(七) 亞階級

依照工蟻的職務去分類，亞階級分類有哺育工蟻、守衛工蟻、外勤工蟻等。哺育工蟻包含梳理和搬運卵、幼蟲、蛹和繭以及哺育，外勤工蟻包含偵查、將食物搬回和覓食，守為工蟻包含守衛蟻巢。

(八) 追蹤方法

追蹤動物的方法有許多種，如 Hristov 等人 (2008) 使用紅外線熱像儀觀測蝙蝠，而 Klarica (2011) 利用紅外線觀測蟻群，並運用在物種辨識，也可使用市售的小動物影像追蹤機器，分析斑馬魚或老鼠等動物的行為，但其價格高，若使用網路上的辨識系統追蹤工蟻較困難，因螞蟻的體積小，追蹤成功率低。而 Sclocco 等人 (2021) 和 Mersch 等人 (2013) 使用矩陣碼標記，可追蹤蟻巢中工蟻移動軌跡。兩者皆在螞蟻的胸部黏上矩陣碼掃描後追蹤螞蟻，Sclocco 等人比較矩陣碼追蹤和人類觀察兩種方法，發現矩陣碼追蹤會有拍攝角度限制、標籤脫落和螞蟻互相啃食標籤等問題導致無法追蹤，若追蹤動物的體型小，標籤製作難度則會提高 (邊長 < 0.8mm)。在 Mersch 等人的研究中發現在螞蟻的胸部黏上矩陣碼會使死亡率自 4% 提升至 12%，對新建蟻群階段的蟻群 12% 的死亡率很高，因此不適合用在本實驗。由上述文獻可知目前追蹤動物的方法不適合用於新建蟻巢階段的工蟻，因此這次實驗嘗試使用 Tracker 觀察新建蟻巢階段工蟻的職務分配來解決問題。

貳、研究目的與問題

一、蟻巢大小對蟻群職務分配的影響

假設蟻群在大空間的蟻巢中出現的職務種類多，小空間則相反。

二、不同工蟻數對蟻群職務分配的影響

假設工蟻數量越多，每隻工蟻負責的職務數量越少，工蟻數量少則相反。

三、蟻群在不同時間的職務分配方式是否相同

假設工蟻在不同時間負責的職務相同。

四、破繭的新工蟻對蟻群職務分配的影響

假設蟻群出現新生工蟻後，其他年長工蟻職務是否會改變。

五、評估創新觀察蟻群職務的方法

利用 Tracker 人工以及自動追蹤觀察工蟻的職務。

參、研究設備及器材

一、實驗動物-白疏巨山蟻 (*Camponotus albosparsus*)

成熟的白疏巨山蟻聚落由單蟻后與數千隻到數萬隻工蟻組成，棲息地為低海拔草原，屬於土棲型螞蟻，會往土底下建巢，食性為雜食偏素食。工蟻外觀為黃褐色且在腹部有兩個白色斑點，在覓食後，腹部充滿食物而膨脹，讓白色原點更明顯（圖8）。蟻后外觀為黑色或深褐色褐色條紋。

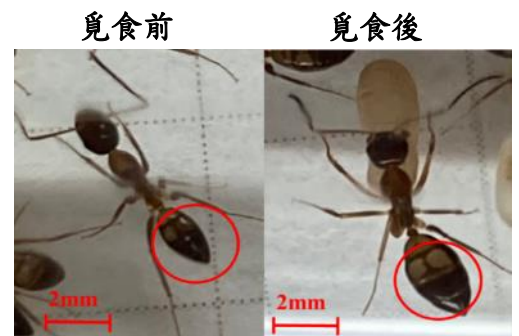


圖8 工蟻的腹部（作者攝影）

本研究以台灣本土種白疏巨山蟻 (*Camponotus albosparsus*)作為實驗動物，其特性方便取得，且體型龐大能清楚觀察工蟻的職務，白疏巨山蟻的行為也不易受外在環境影響（如：光線、溫度和濕度），因此選擇白疏巨山蟻作為實驗對象，能降低實驗時外在干擾因素。

二、實驗器材 (表 2)

表 2 實驗器材

名稱	備註
白疏巨山蟻	網路上購買
壓克力顏料	標記螞蟻的腹部
試管	試管巢
過濾棉	試管巢
石膏粉	石膏巢
方形培養皿(12*12 cm)	石膏巢

肆、研究過程及方法

一、實驗架構圖 (圖 9)

蟻群放入不同大小的環境 (試管巢和石膏巢)，用肉眼觀察蟻群分配職務的差異，並推測大空間中是否出現更多職務。由於每個蟻群的工蟻數量皆不同，因此本研究想探討在工蟻數量多的條件下每隻工蟻是否分配到較少職務，以及在不同時間 工蟻所負責的職務是否改變，在實驗中發現有部分蟻巢內的繭孵化，因此探討破繭的新工蟻對蟻巢分配職務的影響。本研究一開始使用肉眼觀察，但流程耗費時間和人力，因此本研究想利用 Tracker 觀察工蟻行走的軌跡，提供更快速分辨工蟻職務的方式。



圖 9 架構圖

假設

二、不同空間大小對蟻群職務分配的影響

(一) 對照組與實驗組實驗環境

對照組: 試管巢

實驗組: 石膏巢

(二) 試管巢 (圖 10) (小空間)

1. 使用直徑 1.5 cm 長度 20 cm 的試管。
2. 將試管裝 1/3 的水，並塞入過濾棉，
水需超過過濾棉的 1/2。
3. 將試管內裝入水是為保持濕度。



圖 10 試管巢

(三) 石膏巢 (圖 11) (大空間)

1. 使用寬度 12 cm，長度 12 cm 的盒子。
2. 使用油土黏在方形培養皿上，並倒入石膏（石膏和水的比例
3.5:1）。
3. 石膏凝固後取出黏土。
4. 將石膏放入鑽洞的方形培養皿內並用膠帶固定。

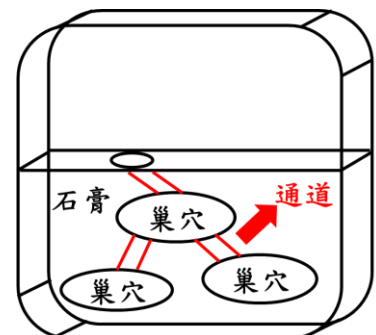


圖 11 石膏巢

(四) 實驗步驟

1. 將蟻群分別放入試管巢和石膏巢（各三巢）
2. 放入食物並錄影觀察工蟻的行為（實驗時間: 一小時，並使用縮時攝影）
3. 使用肉眼觀察工蟻在影片中的職務
4. 分析蟻群中出現的職務種類以及每隻工蟻平均負責的職務數量

平均職務公式: 每隻工蟻負責的職務數量相加 / 工蟻數量

三、不同工蟻數量的蟻群對蟻群職務分配的影響

(一) 對照組和實驗組

對照組:一隻工蟻

實驗組:一、二、三、四、八和十二隻工蟻

(二) 實驗步驟

- 1.將不同工蟻數量的蟻群放入蟻巢(各一巢,三重複)
- 2.放入食物並錄影觀察工蟻的行為(實驗時間:一小時,並使用縮時攝影)
- 3.使用肉眼觀察工蟻在影片中的職務
- 4.分析蟻群中出現的職務種類以及每隻工蟻平均負責的職務數量與工蟻改變職務的比例

平均職務公式:每隻工蟻負責的職務數量相加 / 工蟻數量

四、不同時間對蟻群分配職務的影響

(一) 對照組和實驗組(表3)

對照組:第一天蟻群的職務

實驗組:相隔1、7和14天觀察蟻群的職務

(每次實驗個使用三巢)

(二) 實驗步驟

- 1.使用壓克力顏料標記工蟻的腹部(為了分辨工蟻的編號)(表4)

表4 工蟻的編號

編號	顏色	標記位置	編號	顏色	標記位置
第一隻	藍	腹部	第七隻	藍	胸部和腹部
第二隻	粉	腹部	第八隻	粉	胸部和腹部
第三隻	黃	腹部	第九隻	黃	胸部和腹部
第四隻	白	腹部	第十隻	白	胸部和腹部
第五隻	綠	腹部	第十一隻	綠	胸部和腹部
第六隻	橘	腹部	第十二隻	橘	胸部和腹部

- 2.將不同工蟻數量的蟻群放入蟻巢
- 3.放入食物並錄影觀察工蟻的行為(實驗時間:一小時,並使用縮時攝影)
- 4.使用肉眼觀察工蟻在影片中的職務

表3 實驗條件

	第一巢	第二巢	第三巢
第一天	三隻工蟻	八隻工蟻	十二隻工蟻
第二天	三隻工蟻	八隻工蟻	十二隻工蟻
第三天	三隻工蟻	八隻工蟻	十二隻工蟻
第十天	三隻工蟻	八隻工蟻	十二隻工蟻
第二十四天		尚未實驗	

5.分析蟻群中出現的職務種類以及每隻工蟻平均負責的職務數量

平均職務公式:每隻工蟻負責的職務數量相加 / 工蟻數量

6.分析工蟻改變職務的比例

改變職務比例公式:改變職務的工蟻數量/工蟻數量

五、破繭的新工蟻對蟻群職務分配的影響

目前已觀察到有部分蟻群有繭孵化成新工蟻，本實驗想觀察蟻群的繭孵化後對新生工蟻和成熟工蟻的職務分配影響。目前已完成實驗，但尚未分析實驗結果，未來將持續進行分析。

(一) 對照組和實驗組

對照組:繭未孵化的蟻群

實驗組:繭孵化後(工蟻數量增加)的蟻群

(二) 實驗步驟

- 1.將蟻群放入蟻巢
- 2.放入食物並錄影觀察工蟻的行為(實驗時間:一小時，並使用縮時攝影)
- 3.使用肉眼觀察工蟻在影片中的職務
- 4.分析每隻工蟻的職務，並觀察工蟻是否改變職務

六、評估創新觀察蟻群職務的方法

由於肉眼觀察耗費時間和人力，因此本研究想使用不同方式觀察蟻群的職務，像是利用 Tracker 軟體進行分析。Tracker 大多應用於物理實驗分析，例如週期運動和二維運動等，本研究則嘗試將 Tracker 應用在生物領域追蹤螞蟻的位置，並繪製出螞蟻行走的軌跡。

(一) Tracker 使用方式(圖 12)

- 1.拉出座標軸和校正桿
- 2.在校正桿上輸入實際長度
- 3.設坐標軸的原點為蟻后
- 4.新增質點，每一隻螞蟻代表一個質點
- 5.將螞蟻的移動路徑標出

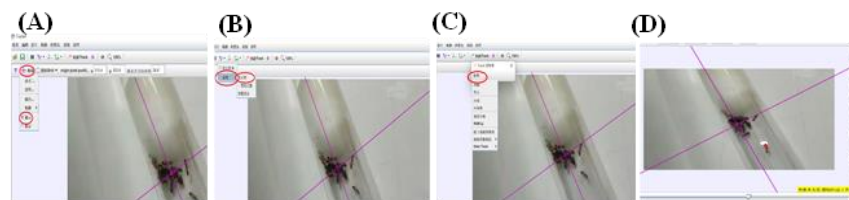


圖 12 Tracker 職務分析

(A)劃出坐標軸(B)新增校正桿(C)新增質點(D)點出每隻工蟻的位置

(二) 對照組和實驗組

對照組:使用肉眼觀察分析工蟻的職務(使用試管巢以及石膏巢)

實驗組:使用 Tracker 自動和人工分析工蟻的職務(使用試管巢以及石膏巢)

(三) 自動追蹤和人工追蹤

自動追蹤

- 1.由 Tracker 軟體的系統自行判斷工蟻位置並繪製出軌跡圖
- 2.使用一般攝影拍攝工蟻的行為(無法使用縮時攝影,因 Tracker 無法追蹤到工蟻)

人工追蹤

- 1.手動將工蟻的位置點出並繪製出軌跡圖
- 2.使用縮時攝影拍攝工蟻的行為

(四) 實驗步驟

- 1.將蟻群放入試管巢以及石膏巢
- 2.使用肉眼觀察工蟻的職務
- 3.使用 Tracker 觀察工蟻的職務
 - (1)利用 Tracker 追蹤工蟻的位置
 - (2)統計工蟻多數時間的位置
 - (3)藉由工蟻的位置推測工蟻的職務(圖 13)

不同亞階級的工蟻負責不同職務,如外勤工蟻負責覓食和偵查,須離開蟻巢(於第三區活動時間多),而哺育工蟻須待在蟻巢照顧卵(於第一區活動時間多),藉由 Tracker 軟體追蹤工蟻在實驗時行走的軌跡,並分析工蟻多數時間的位置,可判斷工蟻的亞階級和職務。

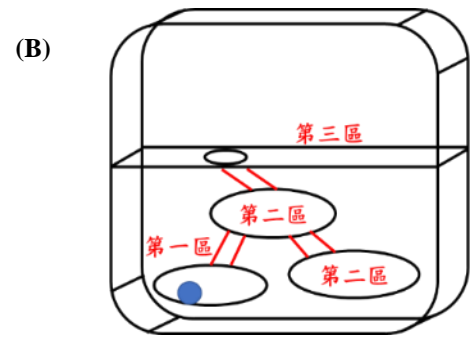
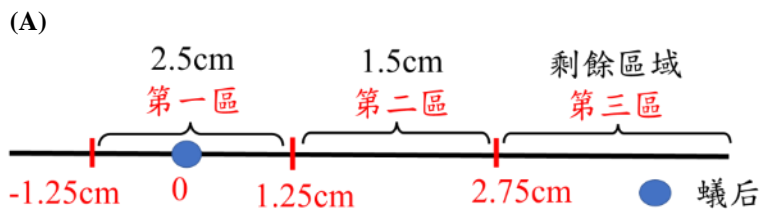


圖 13 Tracker 軌跡圖分析方式

(A) 試管巢 (距離蟻后 1.25cm 為第一區, 1.25~2.75cm 為第二區, 其餘為第三區)

(B) 石膏巢 (蟻后所在的巢穴為第一區其餘為第二區, 巢穴以外為第三區)

將工蟻的軌跡圖分成三段, 判斷工蟻距離蟻后的遠近分段的方式依據工蟻的體長 (5mm)。

4. 統計利用 Tracker 觀察工蟻職務的準確率

利用 Tracker 判斷職務的準確率公式: 利用 Tracker 成功判斷職務的工蟻數量 / 全部工蟻數量

5. 統計不同職務出現在蟻巢的位置, 並利用卡方檢定-獨立性檢定(The Chi-Squared Test of Independence)分析工蟻職務與蟻后距離的關係 ($p < 0.05$) 表示工蟻的不同職務出現在不同區域的比例不同。

伍、研究結果

一、白疏巨山蟻新建蟻巢階段出現的職務

本研究發現白疏巨山蟻工蟻出現 9 種職務: 搬運、梳理、自行清潔、協同清潔、交哺、覓食、溝通、偵查和搬運成蟲，拍到工蟻職務如圖 14。

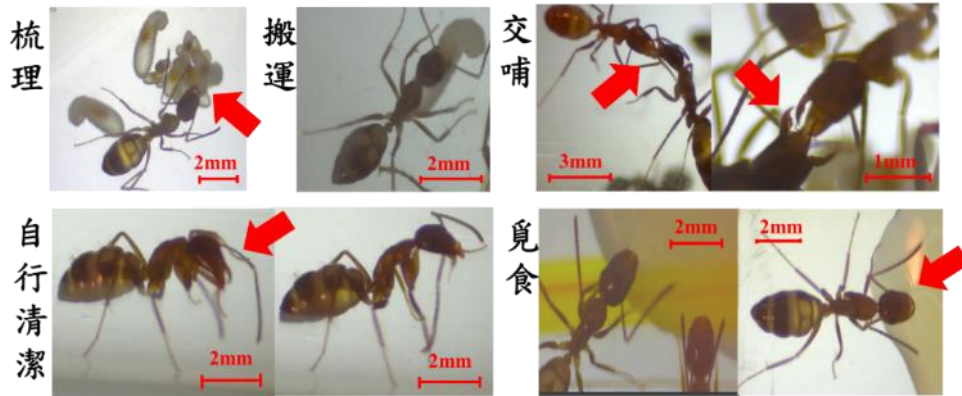


圖 14 工蟻出現的職務

在實驗過程中觀察到工蟻有溝通和協同清潔的行為但解析度低，而拍攝期間未發現工蟻出現此職務，因此目前尚未有溝通以及偕同清潔的照片，而偵查為工蟻尋找食物的路徑，因此無法拍攝。

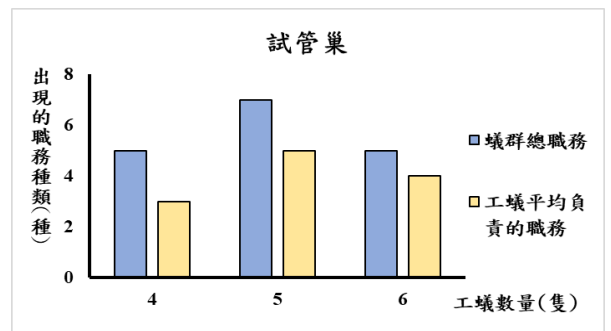
二、不同空間大小對蟻群職務分配的影響

實驗結果發現在不同大小的蟻巢中，蟻群負責的總職務和平均職務差異不大（圖 15），但兩者偵查比例差異大，石膏巢中蟻群每小時平均偵查 480 次，但試管巢每小時平均只有 89 次，且石膏巢和試管巢中，偵查工蟻數量占比差距大（試管巢:33%；石膏巢:73%）（表 5）由此可知蟻群在大空間中不會出現更多的職務，但工蟻的職務以偵查為主。在不同大小的蟻巢中發現蟻群在石膏巢中多數時間在偵查，使用試管巢，較容易觀察蟻群各項職務，因此使用試管巢完成後續實驗。

表 5 不同蟻巢工蟻偵查的次數和偵查

	偵查次數 (次/小時)	偵查工蟻的比例
石膏巢	480	73%
試管巢	89	33%

(A)



(B)

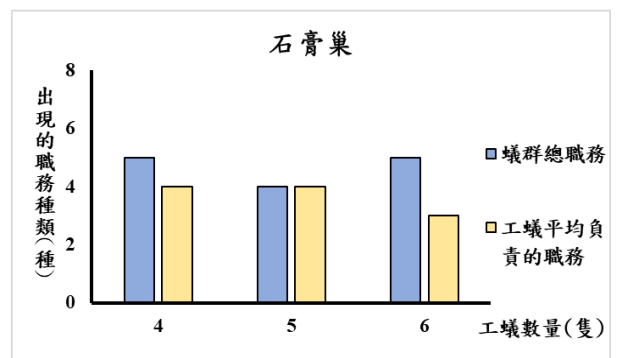


圖 15 空間大小不同對工蟻分配職務的影響

(A)石膏巢 (B)試管巢

(平均職務:每隻工蟻負責的職務數量相加 / 工蟻數量)

三、不同工蟻數量的蟻群對蟻群職務分配的影響

本實驗假設工蟻族群數越大時每隻工蟻可負責越少職務，初步研究發現每隻工蟻在一段時間內會負責多種職務，若工蟻數量較多，每隻工蟻負責的職務趨向單一化，如工蟻數量為一或二隻時，每隻工蟻平均負責五種職務，而工蟻數量增加至三或四隻時，每隻工蟻負責四種職務，當蟻群內有八隻工蟻時，工蟻只需負責三種職務，若蟻群中有十二隻工蟻，則工蟻平均負責的職務只需兩種，但蟻群的總職務數量不隨工蟻數量改變（總職務數量皆為五或六種職務，差距較小）（圖 16）。

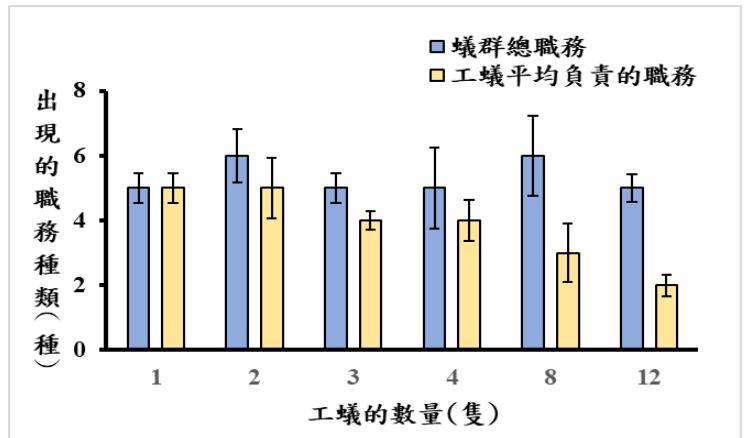


圖 16 工蟻數量對蟻群內職務分配影響

(平均職務:每隻工蟻負責的職務數量相加 / 工蟻數量)

四、不同時間對蟻群職務分配的影響

每次實驗相隔一天，一共實驗三次，相隔七天後再時驗一次，初步實驗結果發現不同時間雖然不會使蟻群的總職務數量和每隻工蟻平均負責的職務數量改變(總職務皆為五或六種，每隻工蟻平均負責二或三種職務)（圖 17）。而觀察每隻工蟻的主要職務後（表 6）並分析工蟻改變職務的比例，發現工蟻改變職務的比例高，例如在具有三隻、八隻和十二隻工蟻的蟻群中，分別有 33%、50%和 66%的工蟻在第一和第二天負責不同職務，第三天負責和第二天不同職務的工蟻分別有 66%、63%和 50%，而相隔七天後，工蟻改變職務的比例為 33%、63%和 42%（表 7）。藉由實驗結果可知多數時間，在新建蟻巢階段的工蟻職務不固定，在不同時間會負責不同職務。

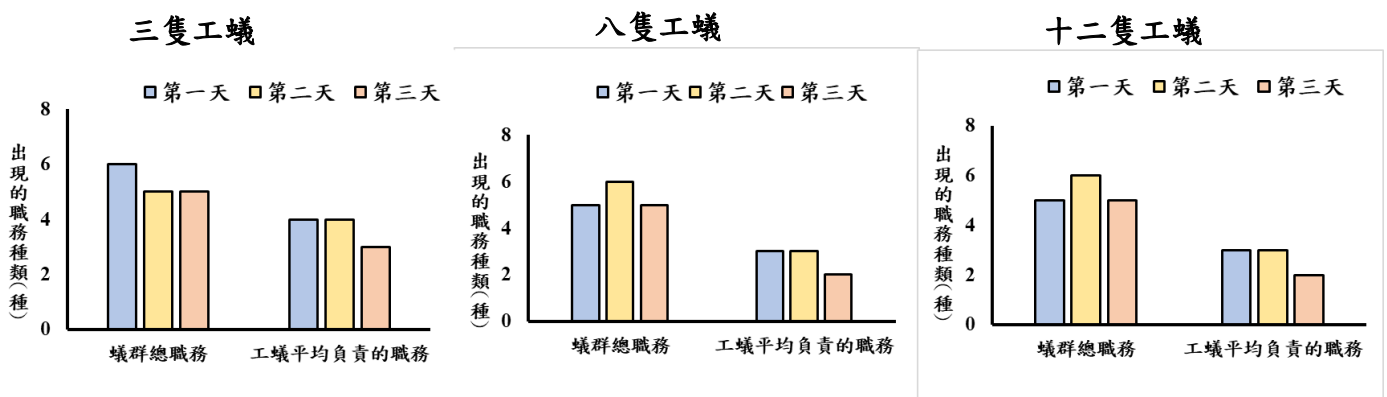


圖 17 不同時間對蟻群分配職務的影響

表 6 工蟻負責的主要職務

(A)	第一天	第二天	第三天	第十天	(C)	第一天	第二天	第三天	第十天
第一隻	外勤	外勤	哺育	哺育	第一隻	外勤	外勤	外勤	外勤
第二隻	哺育	哺育	外勤	外勤	第二隻	哺育	哺育	外勤	外勤
第三隻	清潔	外勤	外勤	清潔	第三隻	清潔	外勤	外勤	外勤
(B)	第一天	第二天	第三天	第十天	第四隻	外勤	哺育	哺育	哺育
第一隻	哺育	外勤	外勤	哺育	第五隻	外勤	哺育	哺育	哺育
第二隻	外勤	外勤	哺育	外勤	第六隻	哺育	哺育	外勤	哺育
第三隻	哺育	哺育	外勤	哺育	第七隻	外勤	哺育	外勤	外勤
第四隻	哺育	外勤	外勤	外勤	第八隻	哺育	外勤	清潔	哺育
第五隻	清潔	外勤	外勤	外勤	第九隻	哺育	哺育	哺育	外勤
第六隻	外勤	清潔	外勤	外勤	第十隻	哺育	外勤	外勤	外勤
第七隻	哺育	哺育	外勤	清潔	第十一隻	哺育	外勤	外勤	哺育
第八隻	外勤	外勤	哺育	外勤	第十二隻	外勤	清潔	外勤	哺育

(A)三隻工蟻；(B)八隻工蟻；(C)十二隻工蟻

表 7 工蟻改變職務的比例

	三隻工蟻	八隻工蟻	十二隻工蟻
第一至二天	33% (一隻)	50% (四隻)	66% (七隻)
第二至三天	66% (二隻)	63% (五隻)	50% (六隻)
第三至十天	33% (一隻)	63% (五隻)	42% (五隻)

五、破繭的新工蟻對蟻群職務分配的影響

目前已觀察到有部分蟻群有繭孵化，本實驗想觀察蟻群的繭孵化後對蟻群的職務分配有什麼影響。目前已完成實驗，但尚未分析實驗結果，未來將持續進行分析。

六、評估創新觀察蟻群職務的方法

(一) 自動和人工追蹤的差異

使用肉眼分析上述實驗後，發現肉眼分析耗費人力以及時間，因此本實驗想利用 Tracker 自動和人工追蹤更快速觀察工蟻的職務和亞階級，兩者的軌跡圖因錄影方式而有差異，自動追蹤使用一般攝影，因此需分析更長的影片，但其軌跡圖能判斷工蟻行走的路徑，人工追蹤系統使用縮時攝影，軌跡圖能判斷工蟻大部分時間的位置 (圖 18)。

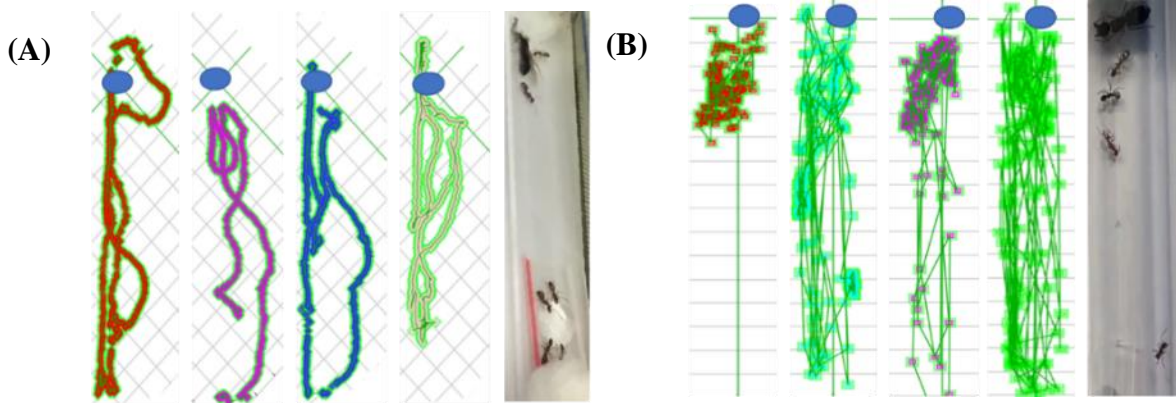


圖 18 自動和人工追蹤的差異

(A)使用 Tracker 自動追蹤觀察蟻群的職務；(B) 使用 Tracker 人工追蹤觀察蟻群的職務

(二) 使用 Tracker 觀察工蟻職務

使用 Tracker 的自動和人工追蹤工蟻後，將數據統計後觀察工蟻多數時間的位置並推測工蟻的職務和亞階級（圖 19、20 和 21）初步實驗發現距離蟻后較近（第一區）的工蟻為哺育工蟻（如圖 19 第三隻工蟻），而距離蟻后遠（第三區）的為外勤工蟻（如圖 20 第二隻工蟻）。（第一區距離蟻后最近第三區最遠）。

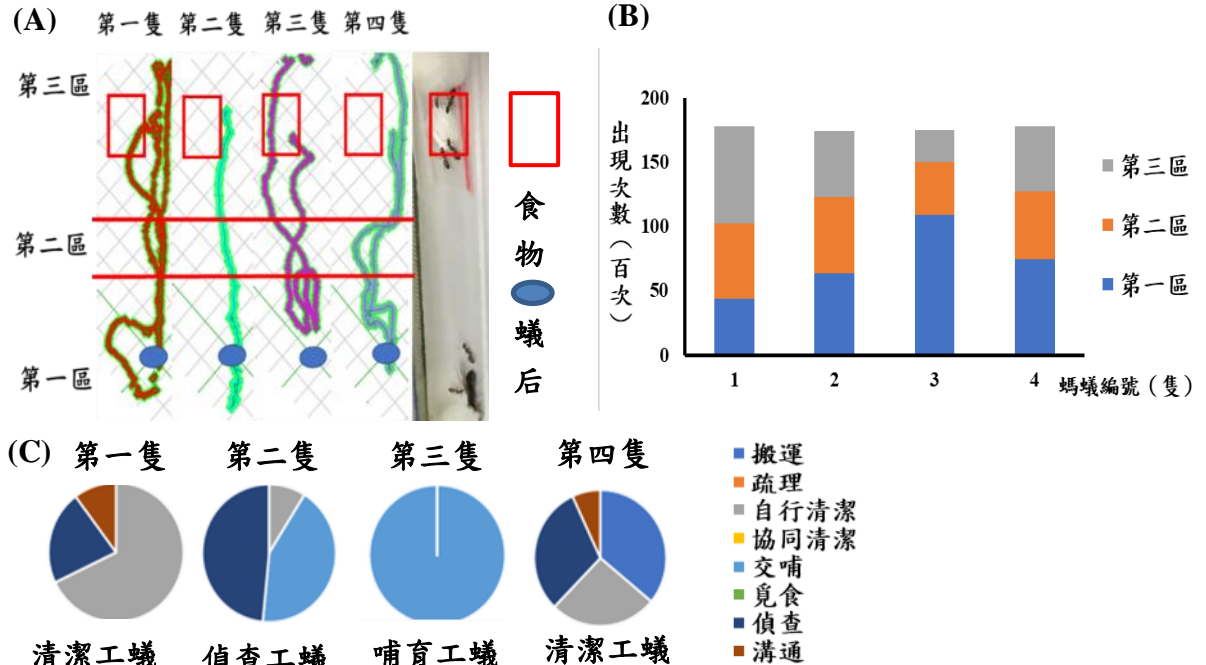


圖 19 使用 Tracker 自動追蹤觀察試管巢中的蟻群

(A)使用 Tracker 自動追蹤觀察工蟻的位置；(B)分析工蟻多數時間的位置；(C)肉眼觀察工蟻的職務

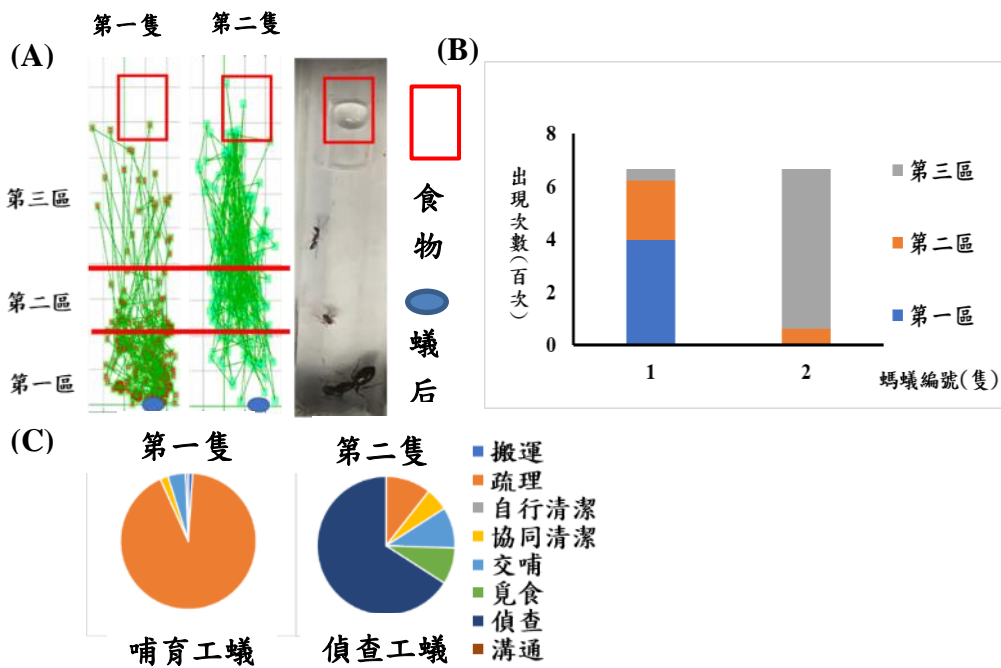


圖 20 使用 Tracker 人工追蹤觀察試管巢中的蟻群

(A) 使用 Tracker 人工追蹤觀察工蟻的位置；(B) 分析工蟻多數時間的位置；(C) 肉眼觀察工蟻的職務

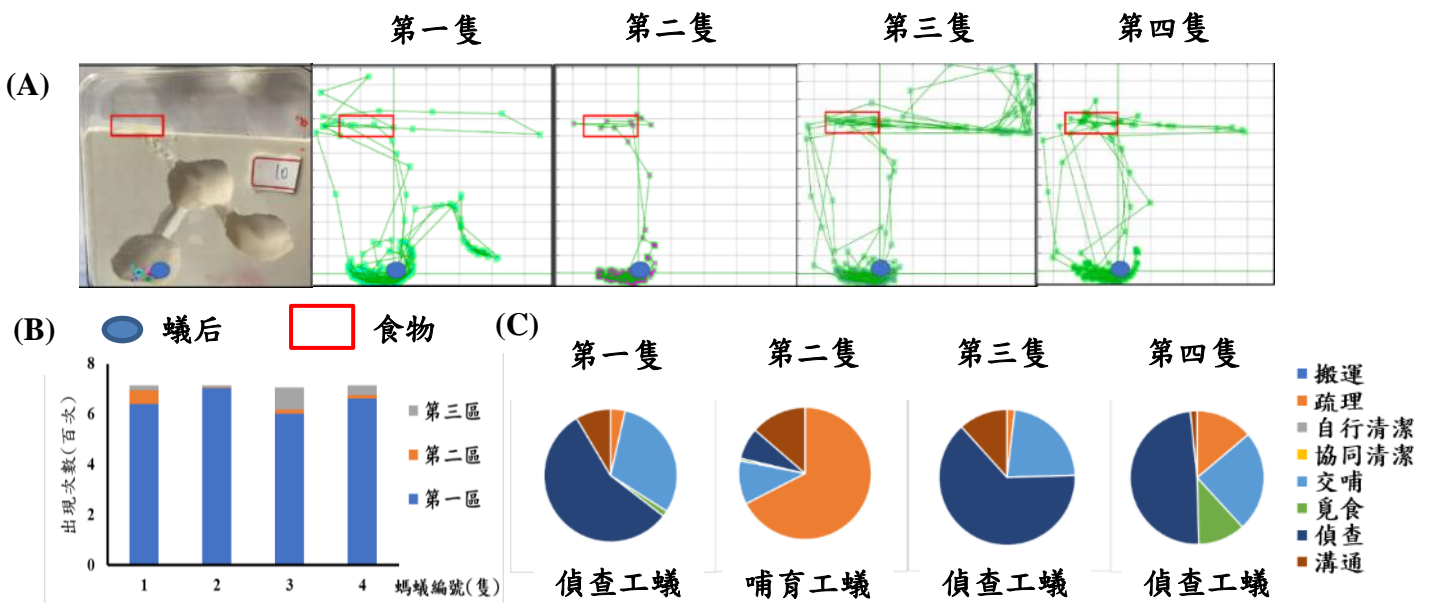


圖 21 使用 Tracker 人工追蹤觀察職務石膏巢中的蟻群

(A) 使用 Tracker 人工追蹤觀察工蟻的位置；(B) 分析工蟻多數時間的位置；(C) 肉眼觀察工蟻的職務

(三) Tracker 分析工蟻亞階級的準確率

本研究嘗試使用 Tracker 觀察工蟻的亞階級和職務，然而並非每次都能成功利用 Tracker 推測出工蟻的亞階級和職務(表 8)，在石膏巢中，Tracker 的準確度低 (10%)，但在試管巢中，準確率高 (89%)。

表 8 使用 Tracker 分析的準確率

蟻巢	追蹤方式		
	人工追蹤 試管巢	自動追蹤 試管巢	人工追蹤 石膏巢
使用 Tracker 追蹤的準確率	89%	50%	10%

(四) 不同職務出現在蟻巢的位置

藉由卡方統計後可發現不同職務出現在不同區域的比例不同 ($p < 0.05$)。當工蟻負責搬運和疏理卵、幼蟲、蛹或繭時會在距離蟻后較近的區域(在第一區的比例分別為 72%和 94%)，因卵、幼蟲、蛹或繭大多在蟻后身邊。當工蟻負責覓食和偵查時則距離蟻后遠(在第三區的比例皆為 100%)，因工蟻必須離開蟻巢才能進行偵查，而其餘的職務(自行清潔、協同清潔、交哺和溝通)大多分布在距離蟻后近的地方(在第一區的比例分別為 52%、60%、52%和 54%)，但在其他區域中仍然會出現(表 9)。

表 9 不同工蟻職務出現在各區域的次數

	距離蟻后近 (第一區)	(第二區)	距離蟻后遠 (第三區)
搬運	36 (72%)	8 (16%)	6 (12%)
疏理	47 (94%)	3 (6%)	0
自行清潔	26 (52%)	16 (32%)	8 (16%)
協同清潔	30 (60%)	14 (28%)	7 (14%)
交哺	26 (52%)	18 (36%)	6 (12%)
覓食	0	0	50 (100%)
偵查	0	0	50 (100%)
溝通	27 (54%)	13 (26%)	10 (20%)

陸、研究討論

一、白疏巨山蟻新建蟻巢階段出現的職務

本實驗，發現白疏巨山蟻有 9 種職務，而 King & Trager (2007) 時研究山蟻屬和悍蟻屬螞蟻的職務，發現山蟻屬的螞蟻出現了 20 種的職務，悍蟻屬的螞蟻出現 8 種職務。而巨山蟻屬、悍蟻屬和山蟻屬皆為山蟻亞科的螞蟻，但職務卻差異大，因此不同種類的螞蟻出現的職務不同。

悍蟻屬的職務少是因悍蟻屬的工蟻不擅長築巢和照顧卵、幼蟲、蛹和繭，因工蟻的大顎為鏈刀狀且帶有細鋸齒，尖端鋒利，因此在覓食時也較麻煩。由於工蟻不會築巢和照顧幼蟲，因此悍蟻屬會侵略附近的蟻巢，將其他品種的卵、幼蟲、蛹和繭搬回自己的巢內，當這些繭孵化後，悍蟻屬的工蟻會將他們視為奴隸，讓這些不同品種的螞蟻為自己築巢、偵查、覓食和清潔等，因此悍蟻屬的工蟻職務不多（王，2013）。

目前研究推測白疏巨山蟻工蟻出現的職務物數量少是因此實驗為新建蟻巢，而上述文獻研究的悍蟻屬和山蟻屬皆使用野外大型蟻群進行分析，推測除了不同種類以外工蟻數量也會影響職務種類的多寡。

二、不同空間大小對蟻群職務分配的影響

蟻群在大空間（石膏巢）時不會出現更多職務且也不會使每隻工蟻負責的職務數量增加或減少，但大部分工蟻的主要職務為偵查，推測因石膏巢的空間比試管巢大，若工蟻要在石膏巢中尋找食物（尋找食物的過程稱作偵查）需花費較長時間，因此偵查工蟻的數量多且偵查時間長。若將此概念應用在企業營運，則環境空間大不一定能使新建立的公司帶來好處，甚至花費更多時間在某些職務。

三、不同工蟻數量的蟻群對蟻群職務分配的影響

初步研究發現當蟻群中工蟻的數量增加時，雖然蟻群蟻群中的總職務數量不變，但每隻工蟻負責的職務更趨向單一化，而蟻群分配職務的模式和目前人類使用的企業管理模式有部分相似（運用越多人力每位員工可負責越少工作），未來若將蟻群分配職務的模式運用在企業管理時則較具說服力。

四、不同時間對蟻群職務分配的影響

本研究發現雖然蟻群總職務數量和工蟻平均負責的職務數量在不同時間皆未改變，但工蟻負責的職務不一定相同，文獻中發現工蟻的職務分配可能隨著年齡大小而改變，年紀小的工蟻多從事巢內的職務（梳理和搬運卵），年齡大的工蟻多負責巢外的工作（偵查和覓食）(Muscedere & Traniello, 2012)但在新建蟻巢階段的工蟻年齡差異小，因此排除本研究的工蟻職務變化為年齡造成。

而 Gordon (1989)研究收割蟻 *Pogonomyrmex barbatus* 發現工蟻的職務受到外在人為影響後會轉換成其他的職務，例如增加外勤工蟻（覓食、偵查、守衛和清理垃圾）的數量（增加 50 隻工蟻），多數工蟻為了應對，會將職務轉為覓食，而守衛工蟻則轉為其他的職務，而本研究在實驗時雖然工蟻的數量沒有增加，但是否受到其他外在影響而導致工蟻在不同時間負責不同職務，或新建蟻巢階段的職務分配不固定，在未來可探討其改變職務的原因。

五、評估創新觀察蟻群職務的方法

藉由實驗可發現 Tracker 軌跡圖分析，不同職務會在蟻巢中不同位置出現，但部分職務出現的區域重疊，因此無法判斷工蟻細微的職務，只能利用 Tracker 分析工蟻的亞階級（例如哺育工蟻或偵查工蟻等），並推測工蟻主要的職務，雖然 Tracker 不能觀察到細微職務，但可以更快速的找到工蟻大多數時間負責的職務，未來可使用 Tracker 分析蟻群的職務分配。而使用 Tracker 分析石膏巢中工蟻職務的準確率低，經觀察後發現石膏巢中的工蟻多數時間待在蟻后附近但未出現職務行為，因此實驗結果顯示工蟻的主要職務為偵查，但工蟻多數時間卻靠近蟻后。

六、觀察工蟻方式的比較(表 10)

Sclocco 等人 (2021)和 Mersch 等人 (2013)皆使用矩陣碼追蹤螞蟻，能同時追蹤多隻工蟻，可快速追蹤大型蟻群，但矩陣碼若脫落、被遮擋會導致無法追蹤工蟻。本次的實驗使用的 Tracker，一次只能追蹤一隻工蟻，適合用在小型蟻群的實驗，人工追蹤花費人力，且實驗前須標記工蟻，但藉由軌跡圖可發現工蟻多數時間距離蟻后的遠近，並判斷亞階級和職務，而自動追蹤雖花費較少人力，但須另外統計工蟻多數時間的位置。肉眼觀察雖然花費時間多，但能觀察到工蟻細微的職務。

表 10 不同觀察方式的比較

	Tracker	肉眼觀察	矩陣碼追蹤	紅外線觀測	影像辨識系統
缺點	無法觀察細微職務	1.耗費人力 2.人為誤差	1.標記被啃咬 2.人為誤差	1.無法觀察細微職務 2.價格高	工蟻體積小 成功率低
適合使用的情況	小蟻群觀察 亞階級	小蟻群觀察細 微職務	大蟻群觀察亞階級		大型動物
參考資料	本實驗	本實驗	(Sclocco <i>et.al.</i> , 2021) (Mersch <i>et.al.</i> , 2013)	(Klarica <i>et.al.</i> , 2011)	

七、工蟻死亡後對蟻群職務分配的影響 (圖 22)

本研究在實驗過程中有工蟻死亡，而和螞蟻同為社會性昆蟲的蜜蜂，當覓食的大黃蜂被移除後，其餘的大黃蜂會增加覓食次數取代被移除的蜜蜂 (Crall *et.al.*, 2018) (此實驗和本實驗皆為初期的群落)。但本實驗部分工蟻死亡後，剩下的工蟻未取代死去工蟻的職務 (剩下的工蟻偵查和疏理的比例並未提升)，推測即使蜜蜂和螞蟻皆有分工方式，且部分職務內容相似，但對於職務分配仍然有差異，未來可探討兩者分工方式的差異和共通點。

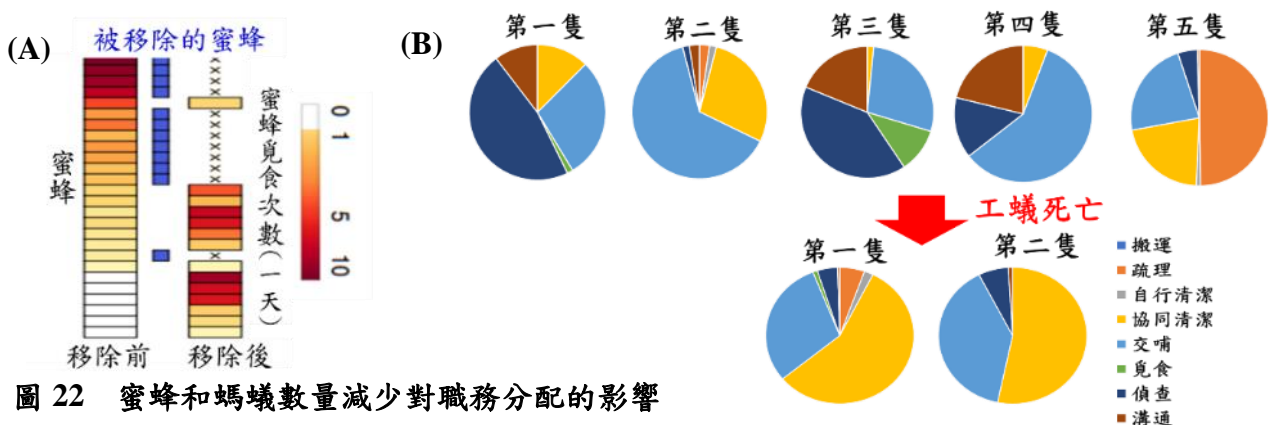


圖 22 蜜蜂和螞蟻數量減少對職務分配的影響

(A) 部分大黃蜂被移除 (Crall *et.al.*, 2018); (B) 部分工蟻死亡

柒、結論

- 一、空間大使蟻群出現更多偵查行為，但不影響蟻群整體的職務數量。
- 二、工蟻數量越多，每隻工蟻負責的職務趨向單一化。
- 三、在不同時間，新建蟻巢階段的工蟻會負責不同職務，初步推測在新建蟻巢階段時，蟻群職務分配不固定。
- 四、使用 Tracker 雖然無法觀察工蟻細微的職務，但可更快速分析工蟻主要的職務(亞階級)。

捌、未來展望

- 一、目前發現新建蟻巢階段的工蟻會改變職務，但原因尚未確定，未來將探討工蟻在初期聚落改變職務分配的原因。
- 二、同為社會性昆蟲的螞蟻和蜜蜂皆有分工的行為，但本次實驗發現兩者的職務分配並非完全相同，未來可研究兩者職務分配的共同點以及差異。
- 三、目前觀察到部分蟻群職務分配的方式，未來若研究更多種職務分配的模式可交由資訊人員參考，並評估最佳化的職務分配模型運用在人類的企業管理。

玖、參考資料

一、期刊

- 1.Charbonneau, D., Sasaki, T., & Dornhaus, A. (2017). Who needs 'lazy'workers? Inactive workers act as a 'reserve'labor force replacing active workers, but inactive workers are not replaced when they are removed. *PloS one*, 12(9), e0184074.
- 2.Crall, J. D., Gravish, N., Mountcastle, A. M., Kocher, S. D., Oppenheimer, R. L., Pierce, N. E., & Combes, S. A. (2018). Spatial fidelity of workers predicts collective response to disturbance in a social insect. *Nature communications*, 9(1), 1201.
3. Gordon, D. M. (1989). Dynamics of task switching in harvester ants. *Animal Behaviour*, 38(2), 194-204.
4. Hackmann, A., Delacave, H., Robinson, A., Labonte, D., & Federle, W. (2015). Functional morphology and efficiency of the antenna cleaner in *Camponotus rufifemur* ants. *Royal Society Open Science*, 2(7), 150129.
- 5.Hristov, N. I., Betke, M., & Kunz, T. H. (2008). Applications of thermal infrared imaging for research in aeroecology. *Integrative and Comparative Biology*, 48(1), 50-59.
- 6.King, J. R., & Trager, J. C. (2007). Natural history of the slave making ant, *Polyergus lucidus*, sensu lato in northern Florida and its three *Formica pallidefulva* group hosts. *Journal of Insect*

Science, 7(1).

7. Klarica, J., Bittner, L., Pallua, J., Pezzei, C., Huck-Pezzei, V., Dowell, F., Schied, J., Bonn, G. K., Huck, C., Schlick-Steiner, B. C., & Steiner, F. M. (2011). Near-infrared imaging spectroscopy as a tool to discriminate two cryptic *Tetramorium* ant species. *Journal of chemical ecology*, 37, 549-552.
8. Mersch, D. P., Crespi, A., & Keller, L. (2013). Tracking individuals shows spatial fidelity is a key regulator of ant social organization. *Science*, 340(6136), 1090-1093.
9. Muscedere, M. L., & Traniello, J. F. (2012). Division of labor in the hyperdiverse ant genus *Pheidole* is associated with distinct subcaste- and age-related patterns of worker brain organization. *PLoS One*, 7(2), e31618.
10. Sclocco, A., Ong, S. J. Y., Pyay Aung, S. Y., & Teseo, S. (2021). Integrating real-time data analysis into automatic tracking of social insects. *Royal Society Open Science*, 8(3), 202033.

二、書籍

1. Hölldobler, B., & Wilson, E. O. (1990). *The ants*. Harvard University Press.

三、網站

1. 王秉誠 (2013)。台灣螞蟻族群結構-螞蟻軍團 ANTS SQUAD。2022 年 7 月取自：<https://reurl.cc/28OakE>
2. 王秉誠 (2013)。武士蟻(佐村悍蟻)*Polyergus samurai* - 螞蟻軍團 ANTS SQUAD。2022 年 11 月取自：<https://reurl.cc/X58EXM>
3. 黃尚偉、楊嘉慧 (2009)。在縫隙中拓展勢力的家屋螞蟻。2022 年 9 月取自：<https://reurl.cc/oZ3Xng>
4. 綠色力量 (2016)。真·社會性—螞蟻。2022 年 7 月取自：<https://reurl.cc/kqgQ8q>
5. 蟲之森 (2018)。螞蟻的交哺。2022 年 7 月取自：<https://reurl.cc/MXV8rm>
6. David, L.Q. (2011). *Pogonomyrmex anzensis* worker engaging in self-grooming. *Pogonomyrmex anzensis* 2022 年 10 月取自：https://bugguide.net/node/view/723022_
7. shutterstock 2022 年 9 月取自：<https://reurl.cc/aaAKd9>

【評語】 030318

優點：

本研究報告文句流暢，可讀性高，藉此得以了解社會性昆蟲螞蟻合作建立新巢時，蟻群的分工行為。本研究以兩種類型場域，進行參照比對探究工蟻的職務分配情形，是很好的實驗設計，且能以肉眼細膩觀察並描述定義工蟻職務分工，開發與使用 Tracker 來追蹤螞蟻職務具有創新性，為開發與使用新技術應用於資料獲取，可快速與高效獲取數據以進行分析，是很好的想法。

建議及檢討：

1. 建議在實驗中進行更深入的資料統計分析，以確定不同職務分配之間的顯著差異，這可以增加研究結果的可信度和可解釋性。此外，如果要將研究結果運用在人類的企業管理上，建議加入新創企業相關的人力數據。這樣的資料可以提供更直接的應用場景，使研究結果更具實用價值。

2. 此研究認為利用 Tracker 可以讓資訊人員在人類企業管理方面應用，提出建議可以基於工蟻數量和可用空間的不同職務分配策略來進行，此部分是否適合或是過度推論，宜審慎。
3. 以 Tracker 追蹤的準確率部分，在不同蟻巢類型會是一潛在的限制，不同類型蟻巢因為穿透蟻偵測難度將導致準確度的下降，此部分有改善空間。

作品海報

白疏巨山蟻工蟻在新建蟻巢階段職務轉換

前言

科幻電影中利用機器人進行無人自動化建設，而機器人需要一套職務分配的演算法維持運作，本研究希望透過觀察新建蟻巢階段的職務分配與數據分析，在未來建立一套演算法。前人多研究大型蟻群的職務 (task) 分配 (圖1)，如 King&Trager (2007)，對新建蟻巢階段的研究少，因此本研究想了解白疏巨山蟻 (*Camponotus albosparsus*) 新建蟻巢階段職務分配。使用肉眼觀察工蟻

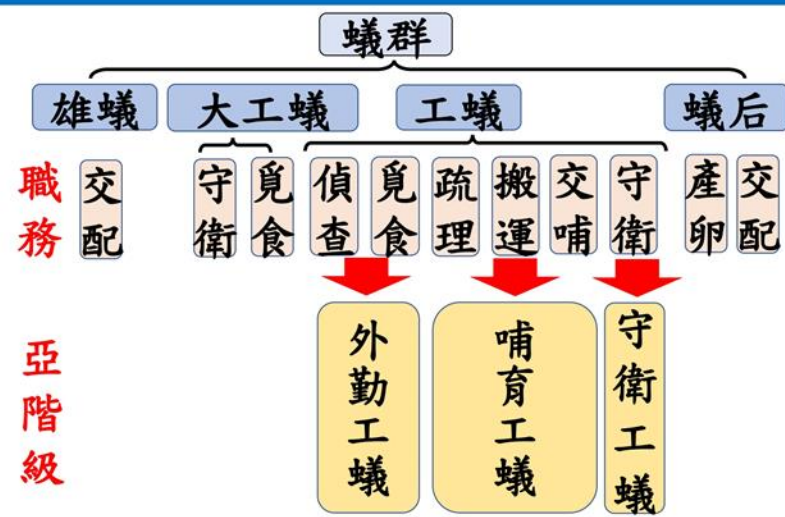


圖1 蟻群的職務與階級 (Wilson & Hölldobler, 1990)

在不同大小蟻巢、工蟻數量、時間和新工蟻羽化分別對職務分配的影響。實驗後發現肉眼觀察耗時，嘗試Tracker軟體更快速分析工蟻的職務，未來希望減少基礎實驗的研究時間。

研究器材與方法

一、研究器材

白疏巨山蟻 (圖2)、石膏巢、試管巢以及軟體Tracker6.0。



圖2 研究動物

二、實驗架構圖 (圖3)



圖3 實驗架構圖

三、實驗方法

(一) 不同空間對職務分配的影響

工蟻對不同大小蟻巢喜好不同 (Franks *et.al.*, 2006)，將蟻群放入石膏巢 (大空間) 及試管巢 (小空間) (圖4) 並觀察工蟻的職務 (表1)

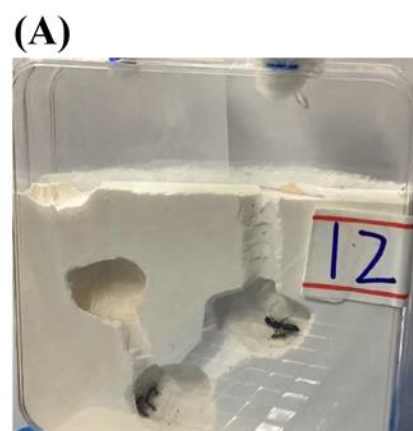


圖4 不同大小蟻巢 (A)石膏巢(B)試管巢



表1 實驗條件

蟻巢編號	一	二	三	四	五	六
蟻巢	石膏巢			試管巢		
工蟻數量	4	5	6	4	5	6

(二) 不同工蟻數量對職務分配的影響

分別觀察一、二、三、四、八和十二隻的工蟻的蟻群，縮時攝影後使用肉眼觀察工蟻的職務 (實驗採三重複)。

(三) 不同時間對職務分配的影響

在第一、二、三、十和二十四天時使用肉眼分別觀察三隻、八隻和十二隻工蟻的職務。

(四) 破繭的新工蟻對職務分配的影響

將有破繭新工蟻的蟻巢使用縮時攝影紀錄後，用肉眼觀察工蟻的職務。

(五) 評估創新觀察蟻群職務的模式

Tracker分為人工以及自動追蹤，藉由Tracker分析工蟻行走軌跡圖。本研究推測工蟻工蟻的職務與工蟻的位置有關，如哺育工蟻須待在蟻巢照顧卵和幼蟲 (第一區) (圖5)，因此利用卡方分析工蟻各職務與位置關係， $p < 0.05$ 表示職務在不同區域的比例不同。

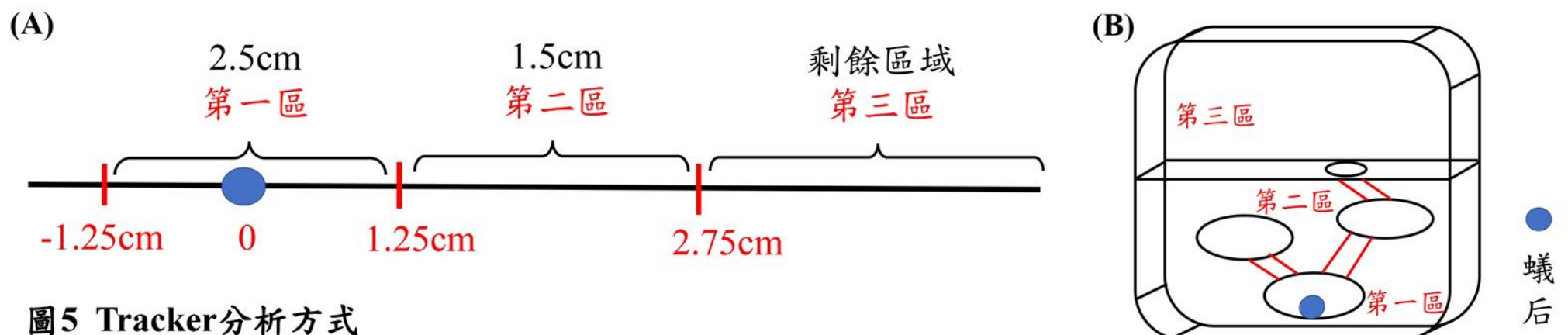


圖5 Tracker分析方式

(A) 試管巢 (距離蟻后1.25cm為第一區, 1.25~2.75cm為第二區, 其餘為第三區)
(B) 石膏巢 (蟻后所在的巢穴為第一區其餘為第二區, 巢穴以外為第三區)

研究結果

一、不同空間對蟻群職務分配的影響 (表2)

表2 工蟻偵查次數和偵查工蟻比例

	石膏巢 (大空間)	試管巢 (小空間)
偵查次數 (次/小時)	480	89
偵查工蟻比例	73%	33%

二、不同工蟻數量對蟻群職務分配的影響 (圖6)

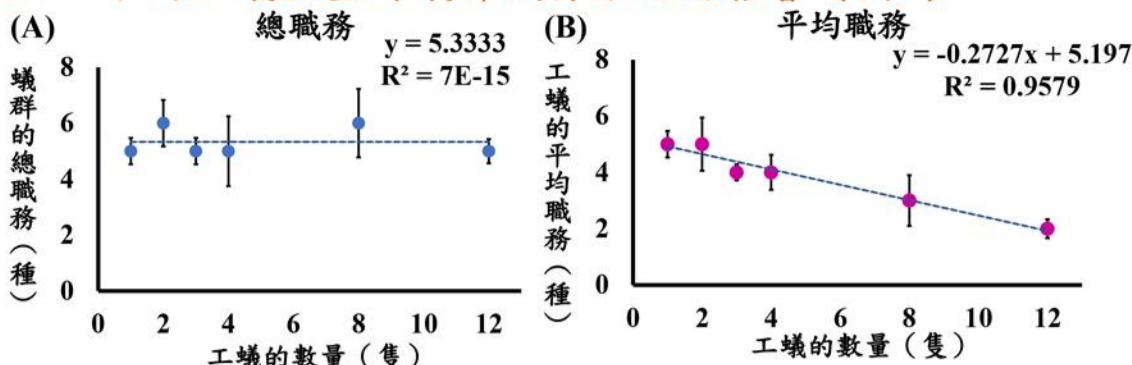


圖6不同工蟻數量對蟻群職務分配的影響

三、不同時間對蟻群職務分配的影響 (圖7、8和表3)

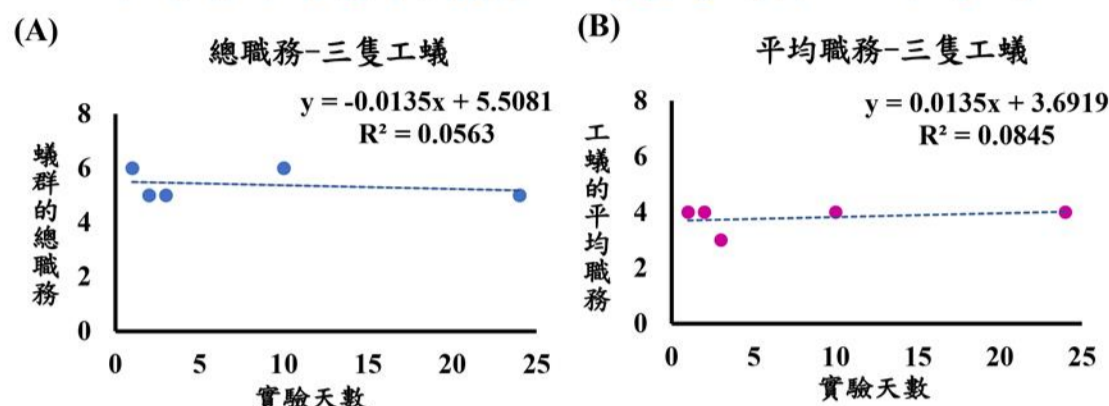


圖7不同時間對蟻群職務分配的影響

表3 工蟻改變職務的比例

	三隻工蟻	八隻工蟻	十二隻工蟻
第1至2天	33% (一隻)	50% (四隻)	66% (七隻)
第2至3天	66% (二隻)	63% (五隻)	50% (六隻)
第3至10天	33% (一隻)	63% (五隻)	42% (五隻)
第10至24天	66% (二隻)	50% (四隻)	50% (六隻)

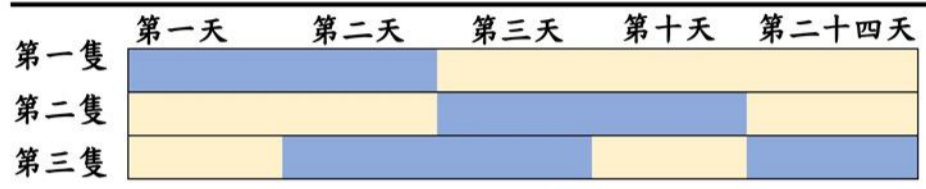


圖8 不同時間工蟻改變職務

四、破繭的新工蟻對蟻群職務分配的影響 (圖9)

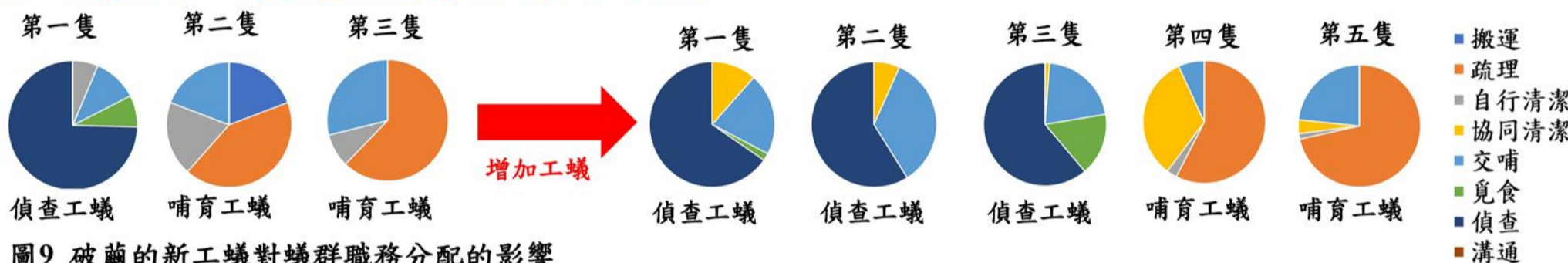


圖9 破繭的新工蟻對蟻群職務分配的影響

五、評估創新觀察蟻群職務的模式 (圖10、11和表4)

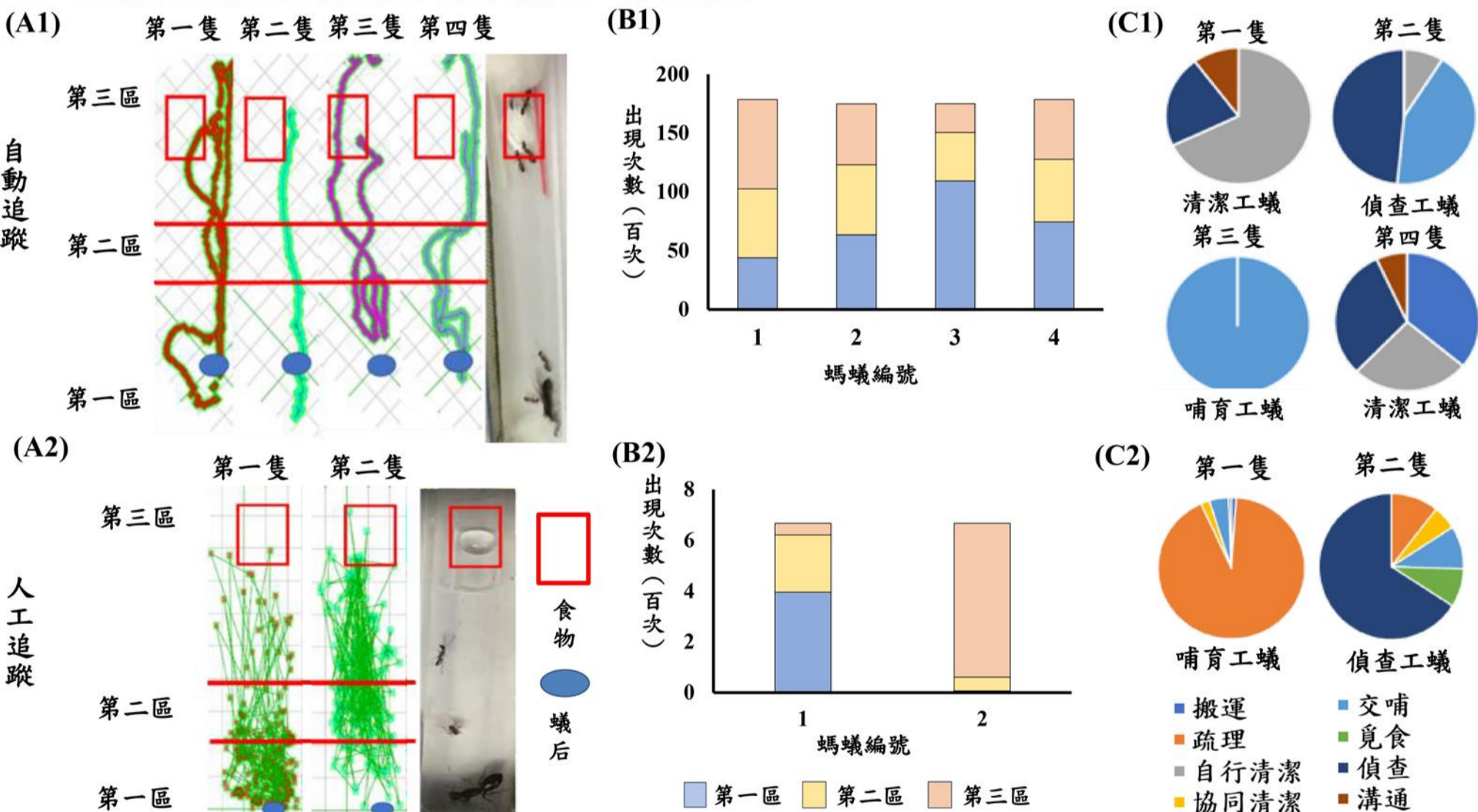


圖10 利用Tracker分析工蟻職務的方式

(A) Tracker追蹤工蟻移動軌跡圖; (B) 工蟻多數時間位置; (C) 肉眼觀察工蟻職務

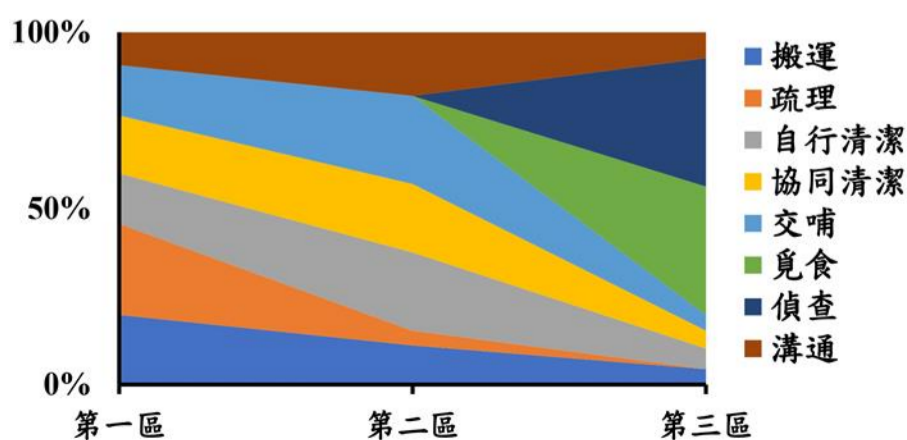


圖11 工蟻職務出現在不同區域的比例
不同職務會出現在不同區域 ($\chi^2=284, df=14, p < 0.01$)

表4 利用Tracker判斷工蟻職務的準確率

準確率	追蹤方式		
	人工追蹤	人工追蹤	自動追蹤
Tracker判斷職務	*10%	89%	50%

*利用Tracker成功判斷工蟻職務的數量/全部工蟻數量

研究討論

一、不同時間對蟻群職務分配的影響

職務分配受年齡及工蟻數量影響 (Gordon,1989;Muscedere & Traniello, 2012)，但本研究工蟻年齡和數量固定，推測工蟻改變職務頻繁原因為新建蟻巢階段工蟻數少。

二、破繭的新工蟻對蟻群職務分配的影響

新工蟻導致職務分配改變，年長工蟻改為偵查而新工蟻負責哺育，而大蟻群中也運用此方法分配職務 (Seid & Traniello, 2006)。

三、工蟻死亡對蟻群職務分配的影響 (圖12和13)

移除部分覓食蜜蜂其餘蜜蜂增加覓食次數 (Crall *et.al.*, 2018) (圖12)，本實驗剩下工蟻未代替死去工蟻的職務 (圖13)，推測即便兩者皆為社會性昆蟲，但職務分配仍有不同處。

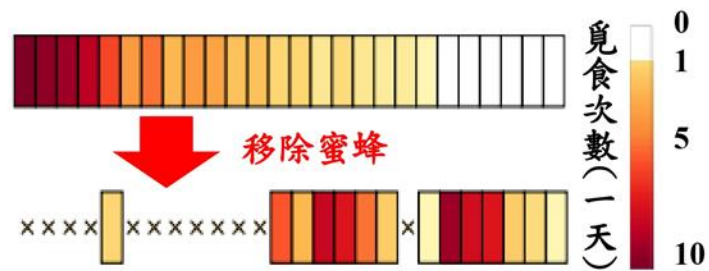


圖12 覓食蜂移除後的變化 (Crall *et al.*, 2018)

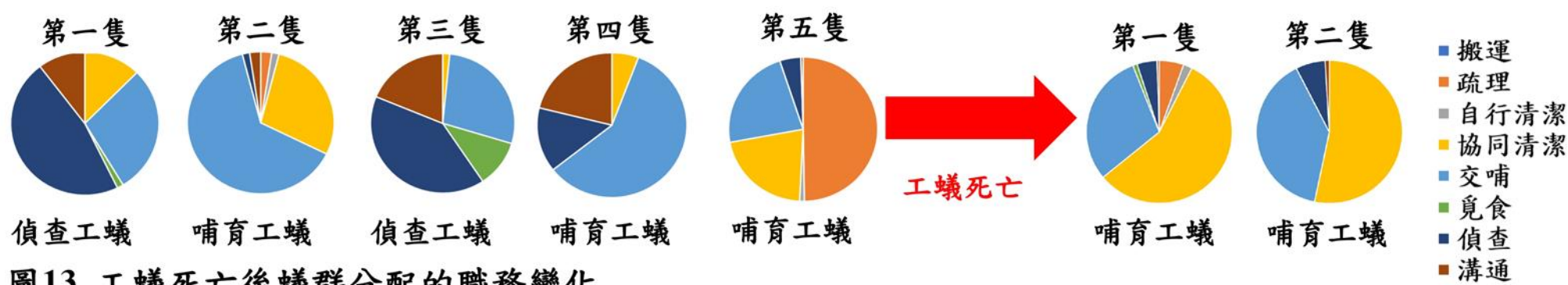


圖13 工蟻死亡後蟻群分配的職務變化

四、白疏巨山蟻新建蟻巢階段出現的職務

白疏巨山蟻有9種職務，山蟻屬和悍蟻屬各有8和20種職務 (King & Trager, 2007)，推測白疏巨山蟻工蟻出現職務少是因本實驗使用新建蟻巢。

五、評估創新觀察蟻群職務的模式

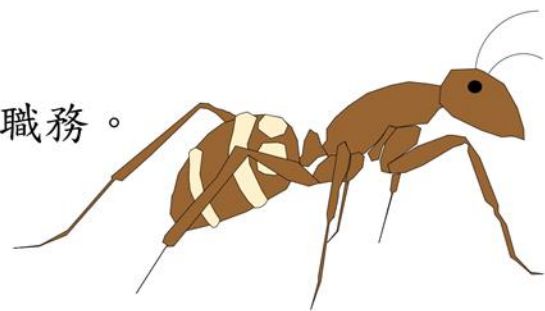
部分職務出現的區域重疊，因此無法藉Tracker判斷細微職務，但相較肉眼可更快觀察工蟻亞階級 (表5)。此方法不適用於石膏巢，因石膏巢空間過大導致準確率低。

表5 不同觀察蟻群職務的模式

	Tracker	肉眼觀察	影像辨識系統	矩陣碼追蹤	紅外線觀測
適用情況	小蟻群 觀察亞階級	小蟻群 觀察細微職務	大型動物		大蟻群 觀察亞階級
實驗限制	無法觀察 細微職務	耗費人力 人為誤差	工蟻體積小 成功率低	標記被啃咬	無法觀察細微職務 價格高
參考資料		本實驗		Mersch <i>et.al.</i> , 2013 Sclocco <i>et.al.</i> , 2021	Klarica <i>et.al.</i> , 2011

研究結論

- 一、蟻群在大空間出現更多偵查行為。
- 二、工蟻數量多每隻工蟻負責的職務趨向單一化。
- 三、新工蟻使蟻群職務分配改變且大小蟻群皆由年齡小的工蟻負責內勤職務。
- 四、新建蟻巢階段工蟻改變職務頻繁。
- 五、使用Tracker無法觀察工蟻細微職務，但可快速分析主要職務。



未來展望

- 一、探討工蟻在初期聚落改變職務分配的原因。
- 二、分析蟻群職務分配特性，訓練出最佳化統計模型，並運用在無人自動化建設。
- 三、利用Tracker分析更多數據進行AI深度學習，建立自動判斷工蟻主要職務的模型。

參考資料

- 1.Crall, J. D. *et.al* (2018). *Nature communications*, 9(1), 1201.
- 2.Franks, N. R. *et.al* (2006). *Animal behaviour*, 72(3), 611-616.
- 3.Gordon, D. M. (1989). *Animal Behaviour*, 38(2),194-204.
- 4.King, J. R., & Trager, J. C. (2007). *Journal of Insect Science*, 7(1), 41.
- 5.Klarica, J. *et.al* (2011). *Journal of chemical ecology*, 37, 549-552.
- 6.Mersch, D. P. *et.al* (2013). *Science*, 340(6136), 1090-1093.
7. Muscedere, M. L., & Traniello, J. F. (2012). *PLoS One*, 7(2), e31618.
- 8.Sclocco, A. *et.al* (2021). *Royal Society Open Science*, 8(3),202033.
9. Seid, M. A., & Traniello, J. F. (2006). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 60, 631-644.
10. Wilson, E. O., & Hölldobler, B. (1990). *The ants*. Harvard University Press.