

2018 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

- 作品編號 050013
- 參展科別 動物學
- 作品名稱 Social child labor? — Preliminary study of non-cocooning silk from larvae of Gray-Black Spiny ant, *Polyrhachis dives*(*Hymenoptera Formicidae*)
- 得獎獎項 大會獎：四等獎

就讀學校 臺北市立建國高級中學

指導教師 鍾兆晉、曾靖夫

作者姓名 鍾承典

關鍵詞 *Polyrhachis dives*、non-cocooning silk、silk protein

作者簡介



從國小三年級開始，科展就進入了我的生活，我由父親指導，先後研究了綠繡眼、台灣馬口魚、臺灣灰樹鵲、及樹蕨隙蛛的各種行為。國中七年級時我研究黑棘蟻的蟻絲蛋白的形成，也正是我這次作品的前身，八年級時，我則研究了沙岸的生物多樣性及碎屑食物鏈。這次的研究我要先感謝兩位指導老師的用心指導，一位是我的父親鍾兆晉博士，另一位是我高中物理老師曾敬夫。我也要感謝母親的陪伴和班導盧佳欣老師的支持。最後，還有建中 126 班的同學們，沒有你們，就沒有今日的我，謝謝你們！

摘要

大部分會吐絲的昆蟲都是幼蟲時期為了結繭化蛹而從絲腺分泌絲，僅少數昆蟲利用幼蟲吐絲作為巢材，例如織工蟻。並非所有的螞蟻幼蟲都會吐絲，而像黑棘蟻工蟻調控幼蟲吐絲形成巢室內壁則非常罕見。本研究即探討黑棘蟻工蟻對非結繭蟻絲之行為調控，並分析蟻絲成份，比較蟻絲與其他有絲昆蟲的異同。結果顯示，無論從物理、化學或生理學的證據來說，黑棘蟻非結繭蟻絲都呈現特殊的適合性，用以維護蟻巢內環境的穩定。本研究為首次發表黑棘蟻幼蟲非結繭蟻絲的游離胺基酸之報告，富含丙胺酸和甘胺酸的蟻絲蛋白，是否繼蠶蜂之後可為人類所用，則有待更進一步的研究。

Abstract

Most kinds of insects that can spin secret silk from glands for cocooning and pupation in the larva stage, but a very few species using their larvae to build silk nests like weaver ant. Not all species of ants can spin and the behavior about the workers of the gray-black spiny ant, *Polyrhachis dives* (Formicidae) conducting the larvae to build silk nests is very special and rare. The purposes of this study were research on the gray-black spiny ant, *Polyrhachis dives* (Formicidae) to inquiry how the workers conduct the larvae to build silk nests, analysis of the ant-silk, the similarities & differences comparing to other insects that can spin.

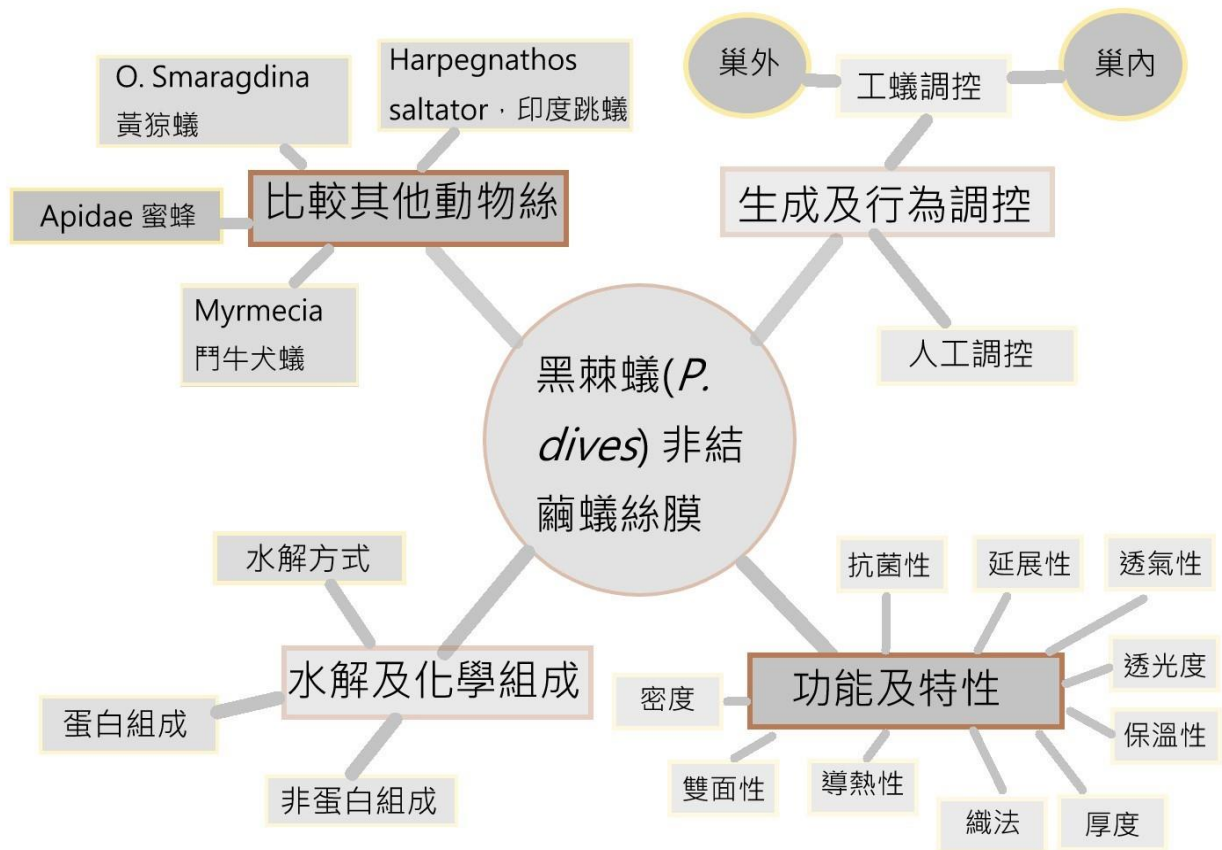
According to the results of experiments in physical, chemical or physiological ways, the non-cocooning ant silk spun by *Polyrhachis dives* (Formicidae) displays its particularity to maintain the stability of the nest inside. The study first shows the hydrolyzed amino acids of the non-cocooning ant-silk spun by the *Polyrhachis dives* (Formicidae) rich in Ala and Gly. It needs further research to know if the non-cocooning ant silk can be developed to product application in human life like bees or silkworms.

壹、 研究動機

黑棘蟻(*P. dives*)是台灣中低海拔地區常見的螞蟻，在我先前的實驗裡，發現到最特別的是黑棘蟻的幼蟲會吐絲，且蟻絲的用途不只是形成蟻繭，更是黑棘蟻蟻巢的主要巢材，因而形成我這次主要要探討的主題-非結繭蟻絲膜。因為工蟻能控制幼蟲吐絲築巢，對於幼蟲而言是不是一種犧牲?讓我總想到童工問題是否也存在螞蟻的社會行為中?幼蟲吐絲但是卻非為結繭，有無造成剝削?是社會性的利他行為嗎?或者對成幼蟲雙方皆有利?這種特殊的行為至今少有人研究，而這種天然產物也尚未被人類廣泛運用。在先前的研究中，我已經知道如何調控黑棘蟻工蟻控制幼蟲吐絲，但是否可以進行人工控制呢?水解後的蟻絲蛋白，其胺基酸成分組成為何，又跟其他昆蟲的絲蛋白的組成又有什麼不同?蟻絲的物理性質又有什麼特點?如何提升絲蛋白的量，也是本次研究的一大重點。以下，就是我對這種特殊的黑棘蟻非結繭蟻絲膜所做的實驗以及研究。

貳、 研究目的及研究問題

- 一、探討黑棘蟻(*P. dives*)非結繭蟻絲膜的生成技術及行為調控。
- 二、探討水解黑棘蟻(*P. dives*)非結繭蟻絲膜並分析其化學組成。
- 三、解析黑棘蟻(*P. dives*)非結繭蟻絲膜之功能及特性。
- 四、分析黑棘蟻(*P. dives*)非結繭蟻絲與其他動物性絲織混合物的比較。
- 五、綜論「社會性童工」現象存在可能性。



圖一、黑棘蟻(*P. dives*)非結繭蟻絲研究概念圖。

參、 研究設備及器材

一、本研究所使用的各項設備及器材詳如表一。

表一、黑棘蟻(*P. dives*)蟻絲蛋白探祕各項研究設備與器材

編號	設備名稱	型號	數量	用途	單位
1.	養殖盒	中型	6	養殖黑棘蟻	盒
2.	分裝盒(圓)	塑膠	4	養殖黑棘蟻	盒
3.	離心管	中型	9	養殖黑棘蟻	個
4.	圓形筒	中型	6	養殖黑棘蟻	個
5.	長夾	中型	1	養殖黑棘蟻	個
6.	鑷子	小型	2	養殖黑棘蟻	個
7.	解剖針	中型	1	養殖黑棘蟻	支
8.	丁烷直沖機	DC-789	1	養殖黑棘蟻(殺菌)	台
9.	蜂蜜	溶液	1	餵食黑棘蟻	罐
10.	麵包蟲	一條	1	餵食黑棘蟻	盒
11.	吸管	大吸管	2	餵食黑棘蟻	個
12.	紗布	醫療用殺菌型	1	餵食黑棘蟻	包
13.	瓶蓋	中型瓶	6	餵食黑棘蟻(放置蜂蜜水)	個
14.	針筒	10cm	1	餵食黑棘蟻(注射蜂蜜水)	個
15.	溴化鋰	溶液	100	水解黑棘蟻絲	cc
16.	碳酸鈉	結晶	1	水解黑棘蟻絲	公克
17.	透析膜	60mm	1	過濾絲蛋白溶液	捲
18.	二氧化碳	氣體(<i>Disposable Cartridge</i>)	1	麻醉黑棘蟻	瓶
19.	溫度計	水銀溫度計	1	測量溫度	個
20.	共聚焦高深高解析度 高放大倍數三維數位 記憶量測顯微鏡	Keyence VHK- 5000	1	拍攝蟻絲的織法及清楚 的分層	台
21.	燒杯	150毫升	5	水解蟻絲蛋白	杯
22.	便利貼	一盒	2	製作檢測用具	個
23.	培養皿(滅菌)	塑膠	8	分析蟻絲蛋白抗菌之效 果使用	組
24.	培養基	洋菜	1	分析蟻絲蛋白抗菌之效 果使用	包
25.	O.K 蹦	一盒	1	製作蟻絲纖維 O.K 蹦	包
26.	黑色膠布	一卷	1	觀察黑棘蟻喜好光暗的	包

				環境	
27.	數位顯為攝影機	Dino-Light	1	拍攝黑棘蟻的生活型態	分
28.	層析管柱	30cm	1	測量蟻絲中的微量金屬	支
29.	冰醋酸(conc. HAc)	Acetic acid 1L/CA	100	測量蟻絲中的微量金屬	g
30.	鹽酸	Hydrochloric acid	100	測量蟻絲中的微量金屬	g
31.	陽離子專用梨子交換樹酯	Bioray	500	測量蟻絲中的微量金屬	g
32.	六角螺絲組	3/8*1-1/2	1	進行蟻絲物理性質的實驗	盒
33.	長尾夾	5cm 密合式	6	進行蟻絲物理性質的實驗	個
34.	資料分析收集器	LabOuest	1	進行蟻絲物理性質的實驗	臺
35.	雙向力學感應器	Vernlar	1	進行蟻絲物理性質的實驗	台
36.	砝碼組	5-20mg	1	進行蟻絲物理性質的實驗	組
37.	加壓打氣機	大型	1	進行蟻絲物理性質的實驗	台
38.	磁鐵	小圓	1	進行蟻絲物理性質的實驗	包
39.	Logger Per	3.14.1	1	進行資料分析並繪製圖表	組
40.	Image J	pro	1	進行資料分析並繪製圖表	組
41.	sigmaplot	14.0	1	進行資料分析並繪製圖表	組

肆、 研究過程或方法

一、探討黑棘蟻(*P. dives*)非結繭蟻絲膜的生成技術及行為調控。

(一)養殖黑棘蟻蟻巢

1. 我這次改良以往養殖黑棘蟻的方法，以大離心管三個為一組，用黑色膠帶黏好後裝進大圓桶，並將桶緣防止黑塗抹隔離膏棘蟻在打開蓋子時逃走。
2. 對於餵食黑棘蟻的方式，為了固定食物來源，當作實驗組的黑棘蟻巢都是固定(三天一次)餵食稀釋蜂蜜為主，餵食的方法如下：
 - (1) 先配出百分之五十濃度的蜂蜜水，再來分成小蓋成裝法及吸管虹吸式
 - (2) 小蓋成裝法:直接將配好的蜂蜜水裝入離心管蓋中，並放入蟻巢。
 - (3) 吸管虹吸式:將大吸管每五公分剪成一段，將紗布捲起並剪成五公分吸管的長度，讓紗布吸滿蜂蜜水，最後放入蟻巢中。

(二)觀察黑棘蟻工蟻調控幼蟲吐絲

- 1.幾齡的幼蟲專門吐絲？
 - (1)將幼蟲分為初齡幼蟲、中期幼蟲及終齡幼蟲三群。
 - (2) 隨機選擇時段觀察工蟻選擇何種齡期幼蟲吐絲。
 - (3) 該齡期幼蟲被選擇吐絲數除以巢中該齡期數，為被選擇率。
- 2.幼蟲吐絲的方式是什麼？
 - (1)以移動式數位解剖顯微鏡貼近人工蟻巢壁觀察幼蟲吐絲行為
 - (2)計算移動距離及吐絲方向。
 - (3)重複觀察，計算平均值進行討論。
- 3.一隻幼蟲單位時間內可以吐多少絲？
 - (1) 以移動式數位解剖顯微鏡貼近人工蟻巢壁計算幼蟲吐絲速率。
 - (2)觀察時以碼表計時十秒，再乘以6作為記錄資料。
 - (3) 重複觀察紀錄，計算平均值並分析。
- 4.探討黑棘蟻覓食食物種類和蟻絲有無關連。
 - (1)我們將養殖的黑棘蟻分為三組，一組只吃蜂蜜如圖；一組只吃麵包蟲；另一組則 蜂蜜和麵包蟲都吃。
 - (2)我們將各組都分配兩盒人工養殖巢來測試。
 - (3) 經過一個月後，觀察各組產出膜狀蟻絲的量與質是否有差異。

5.探討黑棘蟻幼蟲在有光及無光的環境中分泌的蟻絲多寡

(1)我們將養殖的黑棘蟻分為兩組，一組是在有光的環境生活，一組是在無光的環境生活，一樣都是餵麵包蟲和蜂蜜。

(2)經過一個月後，觀察到黑棘蟻在有光及無光的環境中分泌的蟻絲有無不同。

(6)依下列步驟進行觀察並計算統計

一、我們先將所有蟻巢換成第三巢型。

二、並用相機和筆記本進行一個月的觀察記錄。

三、計算方式:吐絲十秒中，寬度(mm)乘以次數再乘以0.6，等於一分鐘寬度(cm)。

四、最後統計資料並用 SigmaPlot 軟體程式來製作圖表。

7.什麼時候工蟻會銜咬幼蟲來吐絲？

(1)架設數位錄影機，連續記錄觀察區工蟻與幼蟲的互動行為。

(2)連續記錄七天，並於同時間點紀錄。

(3)重複三個蟻巢，最後統計數據並討論。

8..工蟻咬幼蟲的哪個部位會加速或控制幼蟲吐絲

(1)以移動式數位解剖顯微鏡貼近人工蟻巢壁觀察工蟻銜咬幼蟲的部位。

(2)以幼蟲的體節作為記錄銜咬位置的標示，並記錄方向（頭的方向）。

(3)重複記錄一百次。

9.工蟻會怎麼處理吐絲後的幼蟲？

(1)追蹤吐完絲後的幼蟲，看工蟻放至何處。

(2)追蹤吐完絲後的幼蟲，工蟻再利用的情形。

10.光線會不會加速幼蟲吐絲？

(1)實驗將人工蟻巢分別置全暗、正常光週期及全暗的環境中，其餘因素維持一致，讓黑棘蟻聚落運作。

(2)兩星期後，比較各組蟻巢巢壁吐絲情形。

11.一天之中，哪時候幼蟲會大量吐絲(高峰期)？

(1)計錄不同蟻巢一天之中最多幼蟲被工蟻銜咬至巢壁吐絲的時間(錄影觀察)。

(2)在三個人工蟻巢重複步驟一5天，分析其結果。

12.幼蟲所在的人工蟻巢的層數會不會改變(第三巢型)？

(1)本實驗主要在瞭解黑棘蟻工蟻對幼蟲的控制是隨機選取鄰近幼蟲或者有目標地的搬運幼蟲至欲其吐絲處。

(2)實驗分兩組，一組自然讓幼蟲分佈，記錄幼蟲自然位置改變與吐絲層數的變化，另一組以人為的方式，移動幼蟲，將幼蟲集中在某一層巢室，看是否蟻絲只集中在該巢室之巢壁出現。

13.黑棘蟻聚落中哪一個分工亞階級的工蟻專門控制幼蟲吐絲？

(1)實驗中依分工亞階級將黑棘蟻工蟻分為：初生工蟻、內勤工蟻和外勤工蟻，記錄在觀察區的幼蟲由何類工蟻銜咬吐絲。

(2)分別在三個蟻巢記錄重複記錄一個月。

14.不同發育時期的黑棘蟻與蟻絲的分佈情形有甚麼不同？

(1)我們先製作一個中心鏤空，邊長3cm的正方形邊框。

(2)再來，我們將邊框移置一處蟻群聚集地，便記錄邊框中不同發育時期的黑棘蟻的數量(工蟻、蛹、三齡幼蟲、二齡幼蟲及一齡幼蟲)

15.黑棘蟻蟻絲的利用有自巢跟他巢的分別嗎？

(1)我們首先編號A B兩巢，並準備一個空巢。

(2)接下來，我們便把B巢移入空巢，A巢移入原本B巢的巢箱裡。

(3)最後用第9問題的方法觀察記錄一次。

(三)觀察單獨工蟻及幼蟲在巢外是否吐絲

1. 為了明白工蟻調控幼蟲的行為是否基於其蟻巢社會性，我設計了以下的調控實驗。

(1) 將專門叨幼蟲的工蟻從蟻巢挑出。

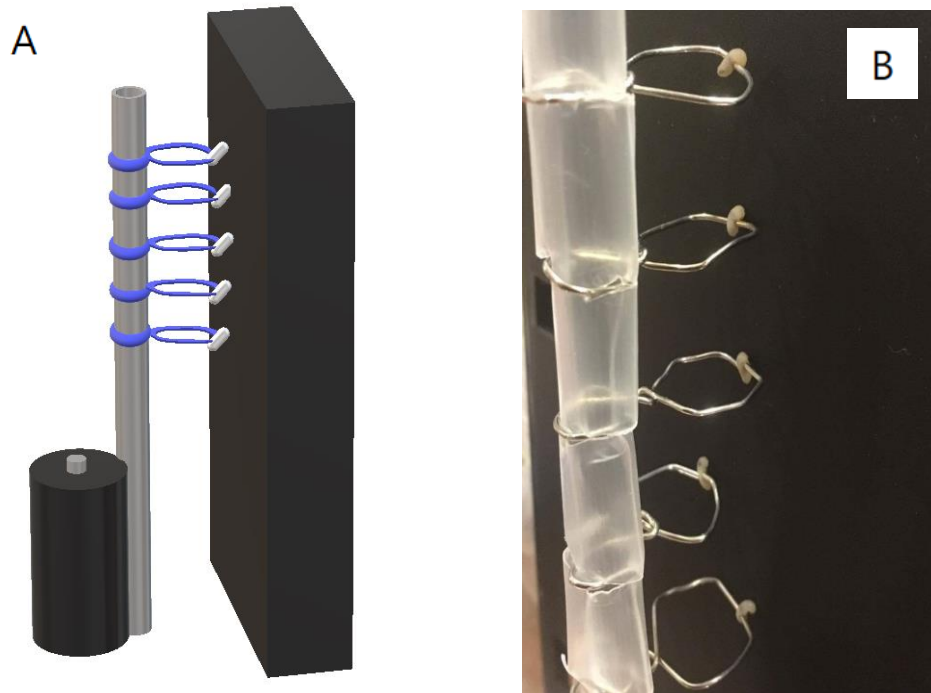
(2) 再從蟻巢挑出三齡幼蟲。

(3) 將挑出的工以及幼蟲放入空的離心管，並觀察其行為(重複兩次，一次十組)。

(四)實驗人工是否能調控幼蟲吐絲

1.黑棘蟻的幼蟲是否能以人工控制的方式產絲?

(1)先製作人工刺激幼蟲吐絲器(詳如圖二)



圖二、人工刺激幼蟲吐絲器示意圖(A)，實際實驗人工刺激幼蟲吐絲器的近照(B)。

(2)再來將四齡幼蟲從蟻巢挑出並夾入人工吐絲器中(詳如圖二 B)。

(3)經過十二小時，觀察其吐絲情形(重複五組，一組五隻)

二、探討水解黑棘蟻(*P. dives*) 非結繭蟻絲膜並分析其化學組成。

(一)水解蟻絲蛋白

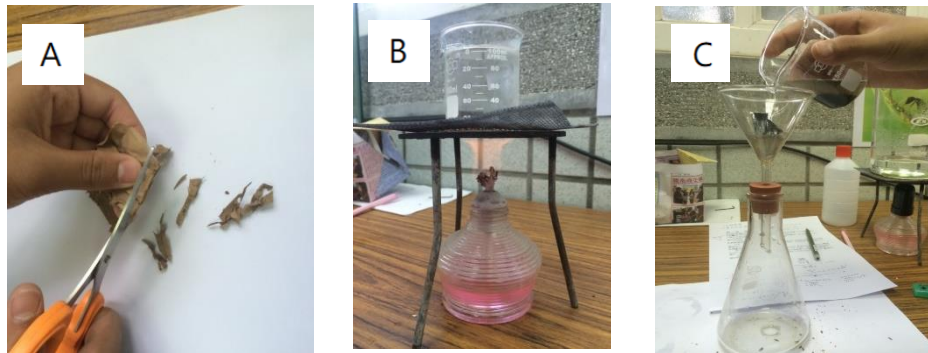
1.削下蟻絲去雜質，並脫膠：先把用野外採集法和室內養殖法所採集到的蟻絲

脫膠裁絲，將蟻絲中的雜質剔除如圖七。然後在0.05M的弱鹼(Na_2CO_3)溶液中

煮沸30分鐘。再取出蟻絲，用去離子水漂洗數次脫膠。

2.水解：將脫膠後的蟻絲放入濃度9.3M的LiBr水溶液中，以60°C水浴(水解裝

置如圖三 A、B)。觀察至蟻絲蛋白溶解後停止水浴，將上述溶液靜置回溫。



圖三、水解實驗流程圖 A 將較大的黑棘蟻蟻絲蛋白膜剪成小塊的蟻絲條。B

黑棘蟻蟻絲水解實驗配置。 C 利用透析膜過濾水解黑棘蟻(*P.dives*)蟻絲。

3.過濾提純：如圖三 C。

4.pH 調整：用 pH 調節劑調整 pH 在6.5~7.0左右。

5.將蟻絲蛋白水溶液放入冰箱儲存，供後續實驗用。

(二)檢驗是否為蛋白水溶液。

1、Biuret 法

(1) 將儲存的黑棘蟻絲用9g 酒石酸鈉溶入於40ml 0.2N 的氫氧化鉀中。

(2) 再來加入1g 硫酸銅混合使之溶解。

(3) 並且加入1g 碘化鉀混合使之溶解。

(4) 最後使用0.2N NaOH 稀至200ml。

(5) 然後便將水解後的蟻絲蛋白水溶液檢測於此溶劑中。

(6) 若呈現紫色，則是試劑中的銅離子與蛋白質的胺根結合而呈現的。

(7) 相同步驟以純水及黑棘蟻幼蟲全蟲體液再測試。

2、Lowry 法:

- (1) 將藥劑 A 加入藥劑 B(50:1)作成 A1水溶液。
- (2) 再來將待測物(蟻絲蛋白)原液、稀釋1/10蟻絲蛋白溶液及水5ml 加上 A1水溶液25ml，形成先驅產物。
- (3) 最後將先驅產物加上藥劑 B 如圖十，避光十五分鐘完成。
- (4) 檢查液體顏色，若為紫色，即是有蛋白質。



圖四、將蟻絲水解溶液先驅產物加上藥劑 B 之示意圖。

(三)分析水解黑棘蟻非蟻繭蟻絲蛋白的胺基酸構成

1. 質譜儀檢測法

- (1) Determined by ethyl chloroformate derivatization and GC-MS determination

2. 電泳凝膠法

- (1) 以洋菜粉與 PH 水以一定比例製作凝膠並加熱。
- (2) 將固定長度的插梢固定在冷凝合裡。
- (3) 將加熱的凝膠溶液加入冷凝盒中冷卻。
- (4) 拔除插梢並移入電泳池中加入電解液。
- (5) 在小格子裡以 micropipette 加入代檢定的水解蟻絲蛋白溶液。

(6) 通電使胺基酸分子開始進行電泳。

(7) 使用 UV 照射檢驗實驗結果並比對其屬於何種胺基酸。

(四)分析水解黑棘蟻非結繭蟻絲的非蛋白成分(微量金屬)

(1) 使用感應偶和電漿質譜儀檢測水解溶液中的微量金屬。

(2) 利用霧化器將待測樣品霧化處理。

(3) 將樣品氣膠輸送至電漿中。

(4)經過原子化及離子化將待分析樣品形成單價正離子。

(5)透過真空介面傳輸送入質譜儀。

(6)配合質量分析器將各特定荷質比進行分析找出其所屬分子。

(五)比較黑棘蟻非結繭蟻絲與動物性膠原蛋白的不同

(1)查詢有關其他動物性的蛋白並與蟻絲蛋白進行比較。

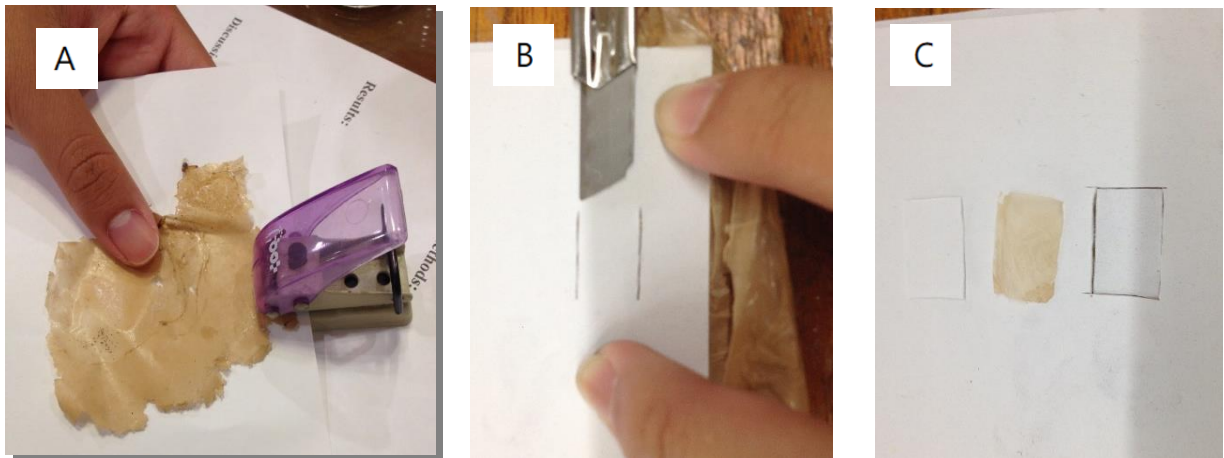
三、解析黑棘蟻(*P. dives*) 非結繭蟻絲膜之功能及特性。

(一)我們推測蟻絲的性質與功能大略分為以下幾種，便提出問題加以討論。

1. 蟻絲及水解蟻絲蛋白是否具有抗菌及防發黴性

(1) 蟻絲是否擁有抗菌的效果之實驗。

A、我們先將蟻絲用打動機剪裁出一個一個的小圓片(詳圖五)。



圖五、黑棘蟻(*P. dives*)非蟻繭蟻絲膜取樣圖。

B、再來將柚子皮、麵包、洋菜凍已適當大小裝入觀察盒中。

C、將剪裁好的蟻絲放在已置入菌原體的觀察盒中。

D、最後將觀察盒放在陰暗的櫃子裡靜置一個星期。

E、觀察菌絲的分布及種類。



圖六、黑棘蟻(*P. dives*)非蟻繭蟻絲抗菌實驗流程圖。

(2)水解蟻絲蛋白是否抗菌之實驗。

- A、先將蟻絲蛋白水解。
- B、再來製作洋菜凍培養基。
- C、分為實驗組及對照組，實驗組滴三滴蟻絲蛋白水解液，對照組滴水。
- D、觀察一周後及四周後，菌絲的分布及種類。

2. 幼蟲吐完絲的盒壁可否讓幼蟲輕易的附著

(1)觀察有蟻絲蛋白塗布的盒壁是否有助於幼蟲的附著。我們將所有蟻巢放入重新開發的第三巢型內的最底層，第二三層由已經由原巢吐絲的巢區。讓工蟻自由搬運幼蟲，計算幼蟲數。討論並注寫觀察記錄。

3. 蟻絲蛋白是否能做到保溫保冷的性質

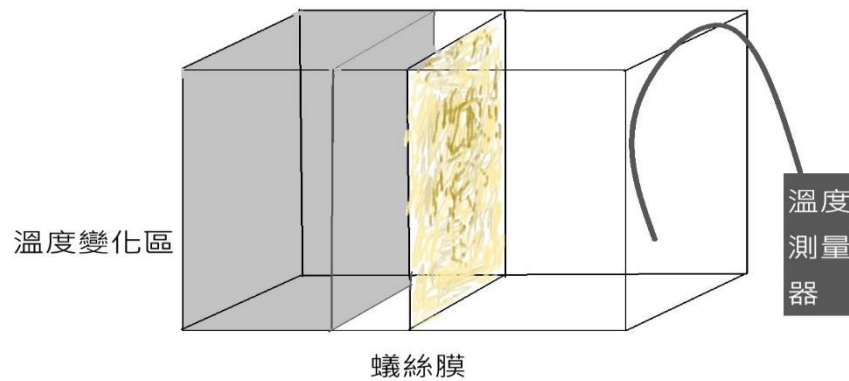
(1)觀測蟻絲是否能保溫的效果:將第三巢型分為四層。並觀察有蟻絲的那一層和沒有的壁溫是否相近。

(2)觀測蟻絲是否能保冷的效果:將取出的蟻絲蛋白膜搜集起來。再來便將蟻絲蛋白膜成正方形。再來在最上方挖出一個孔，並放入溫度計。最後把正方體放入冰箱，觀察裡面的溫度盒和外面的溫度有無不同。

(3)為了精準的測出黑棘蟻非蟻繭蟻絲的導熱係數，我設計了以下的實驗。

- A.利用壓克力板及熱熔膠製作測量盒的基型。
- B.將非蟻繭蟻絲膜卡入測量盒中間的位置，分開給溫端及測溫端。
- C.將溫度測量器的測量頭放入測量盒的測溫端。

D.將給溫端放入冰塊或熱水，測量給溫端的溫度與測量端一開始的差距
急需多久才能平衡溫度(詳圖七)。



圖七、黑棘蟻(*P.dives*)非蟻繭蟻絲隔離溫度測量盒裝置示意圖。

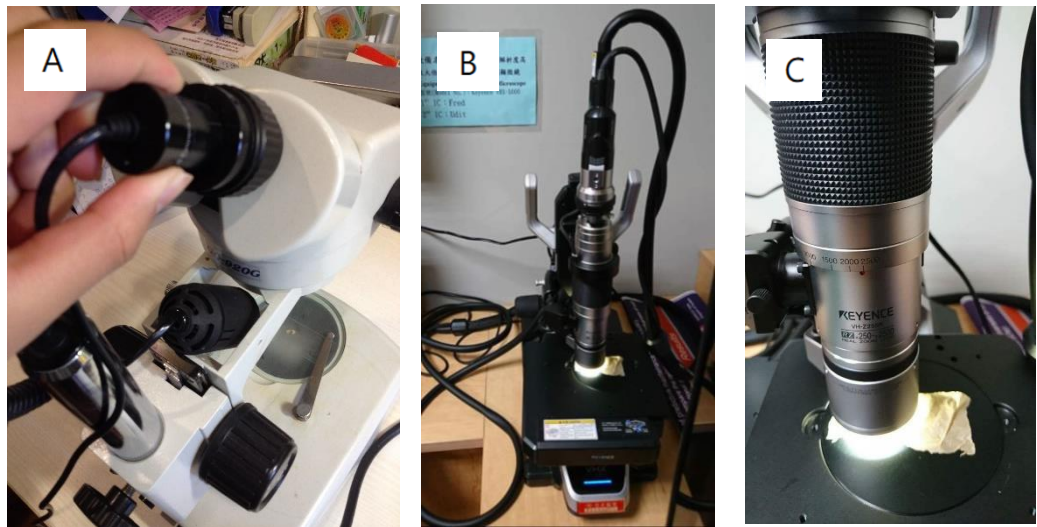
4. 幼蟲吐的絲有什麼樣的織法。

(1) 分析蟻繭的織法與非蟻繭蟻絲膜的織法有無不同。

- A. 將蟻繭與非蟻繭蟻絲膜剪成小塊。
- B. 使用 DinoEye 及 DinoLite 拍出其顯微鏡下放大40倍的織法分析。
- C. 觀察兩者的不同處並進行比較和製作圖表。

(2) 檢測非蟻繭蟻絲膜放大更大倍率的織法。

- A. 將非蟻繭蟻絲膜剪裁成特定的大小。
- B. 並用共聚焦高深高解析度高放大倍數三維數位記憶量測電子顯微鏡進行拍照及分析。



圖八、將 DinoEye 及 DinoLite 搭配顯微鏡進行拍攝蟻絲照片 A、共聚焦高深
高解析度高放大倍數三維數位記憶量測電子顯微鏡進行拍照及分析 B。

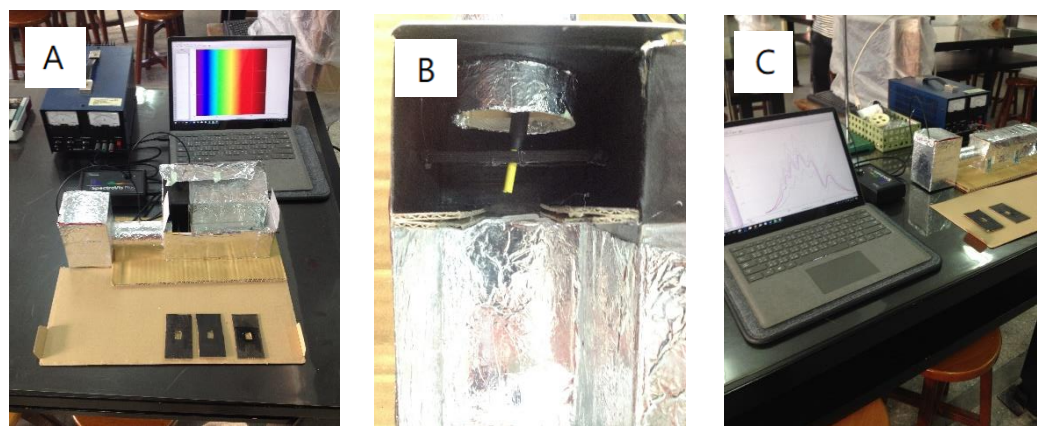
5. 黑棘蟻蟻絲膜的透光程度。

(1) 實驗蟻絲的透光性。

A. 自製測光器組。

B. 使用測光器組、分光光度計及燈泡組進行實驗。

C. 測出蟻絲對連續光譜的通透性並使用程式 Logger Pro 進行製圖分析。



圖九、黑棘蟻非蟻繭蟻絲測光器組及實際的實驗配置(B 為光纖在機組之方
位)。

(2)黑棘蟻蟻絲膜的透光度比較其他動物絲有何不同。

(3)工蟻讓幼蟲吐絲是不是為了提升飼養盒的遮亮度?

6. 蟻絲比較其他動物絲韌性和延展性的不同。

(1) 為了得知蟻絲的延展性，我設計了以下的實驗來進行檢測(詳如圖十)。

A. 將兩個長尾夾(以砂紙加大摩擦力)夾住一大片黑棘蟻非蟻繭蟻絲膜(10

*10)

B. 使一端固定並接上力感應器。

C. 另一端用一條線綁住螺絲。

D. 固定螺帽並將螺絲緩緩轉入螺帽中。

E. 測出蟻絲因力量過大崩斷時螺絲轉的圈數並求出其最大延展性。

(2) 比較其他動物絲的韌性。

A. 使用相同的方法測出其他昆蟲絲的延展性。

B. 比較黑棘蟻非蟻繭蟻絲膜與其他昆蟲蟻絲延展性的不同處並製圖表。



圖十、檢測黑棘蟻非蟻繭蟻絲膜延展性之裝置示意圖

(3) 為了更精準測量，我改良了一代實驗方法，製作了二代的測力器組。

- A. 製作固定螺絲的底座。
- B. 用漆包線固定兩個夾子以及螺絲組。
- C. 以釣魚線連接滑輪、夾子與螺絲底座。
- D. 將力感應器接在夾子下並測量其受力與伸長量的比較，繪製成圖表進行分析



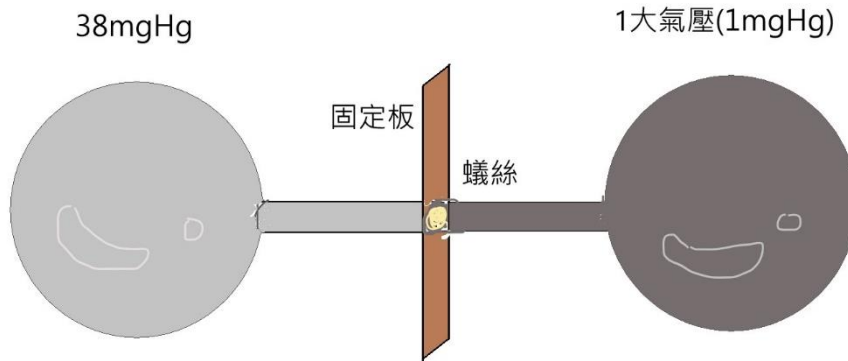
圖十一、改良後的黑棘蟻(*P. dives*)非蟻繭蟻絲膜延展性實驗配置。

7. 黑棘蟻蟻絲的透氣性質及造成之滲透壓特性。

(1) 為了得知黑棘蟻非蟻繭蟻絲膜的透氣性質及滲透壓，我設計了以下的實驗來驗證(詳如圖十一)。

- A. 製作檢測機(兩壓克力圓球及長直管)。
- B. 將兩顆壓克力球的氣壓固定為38mgHg:1mgHg 並鎖上氣閥。
- C. 再來將黑棘蟻非蟻繭蟻絲膜固定在兩管之間並打開氣閥。

D. 計算兩氣球氣壓平均穩定需要的時間並分析製作成圖表。



圖十二、黑棘蟻(*P. dives*)非蟻繭蟻絲透氣性質及滲透壓檢測機示意圖。

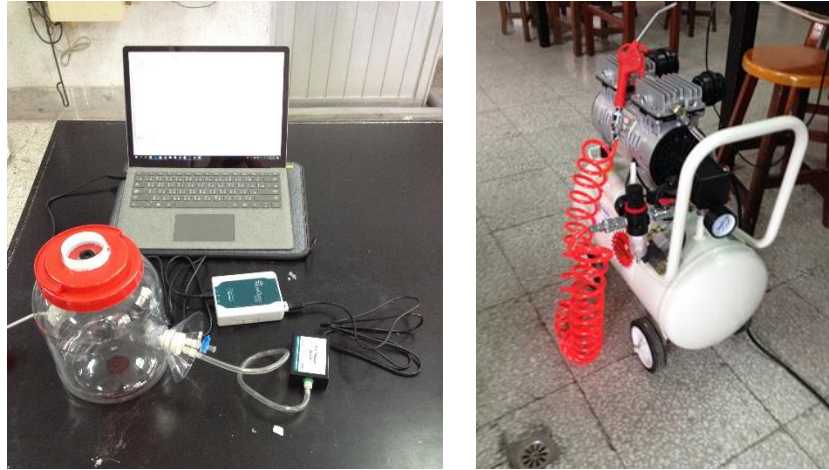
(2) 為了更的測量黑棘蟻絲蛋白膜的氣體通透性，我跟指導老師討論並設計了第二個實驗方法，如下。

- A. 以3D 列印技術印出兩個半徑2cm 的圓環，並將強力磁鐵黏在對邊上以砂紙覆蓋使兩個圓環可以密合。
- B. 用支架固定下圓環在上面並裝上伸縮氣囊。
- C. 將非蟻繭蟻絲膜固定在兩個圓環之間。
- D. 紀錄氣體通過非蟻繭蟻絲膜並充滿氣囊的時間及分子種類並製作成圖表進行分析。

(3) 因為第二版的實驗還是無法精準地測量出氣體的壓力(會漏氣)，所以我再次設計了第三個版本的實驗。

- A. 將有蓋圓桶的蓋子挖出一個剛好可以接上塑膠墊片的孔洞，並將塑膠墊片以熱熔膠黏上去。

- B. 在桶身挖一個大小為一公分的洞使微量氣壓機能放入，并用熱溶膠將邊緣便平整。
- C. 在桶身另一邊挖一個剛好能讓氣體壓縮機能以打氣槍送氣。



圖十三、第三版本的透氣性實驗配置及實驗儀器。

8. 黑棘蟻蟻絲的密度及厚度

- (1) 使用共聚焦高深高解析度高放大倍數三維數位記憶量測顯微鏡拍攝並分析黑棘蟻非蟻繭蟻絲膜的厚度集體積，並將其製作成圖表分析。
- (2) 測量黑棘蟻非蟻繭蟻絲蛋白單位面積的質量，並算出其密度，以利於往後的計算量。

9. 探討黑棘蟻非蟻繭蟻絲的雙面性

- (1) 將正反兩面蟻絲膜分別放暗箱(木盒)。
- (2) 用手電筒照射蟻絲膜，使手電筒的燈成為唯一光源。
- (3) 用手機下載照度計軟體 APP「Light Meter」測蟻絲的反射光，反射光越多，蟻絲膜越光滑。重覆上述步驟五次，分析蟻絲膜雙面性是否存在。

四、分析黑棘蟻(*P. dives*)非結繭蟻絲與其他動物性絲織混合物的比較。

(一) 整理黑棘蟻非結繭蟻絲的蛋白胺基酸分析，並以種類性質及多寡進行排序。

(二) 查詢網路資料及書本的到值得相信的其他動物性絲織混合物的胺基酸分析。

(三) 將黑棘蟻非結繭蟻絲的蛋白胺基酸分析與其他動物性絲織混合物進行分析及比較，並製作成圖表。

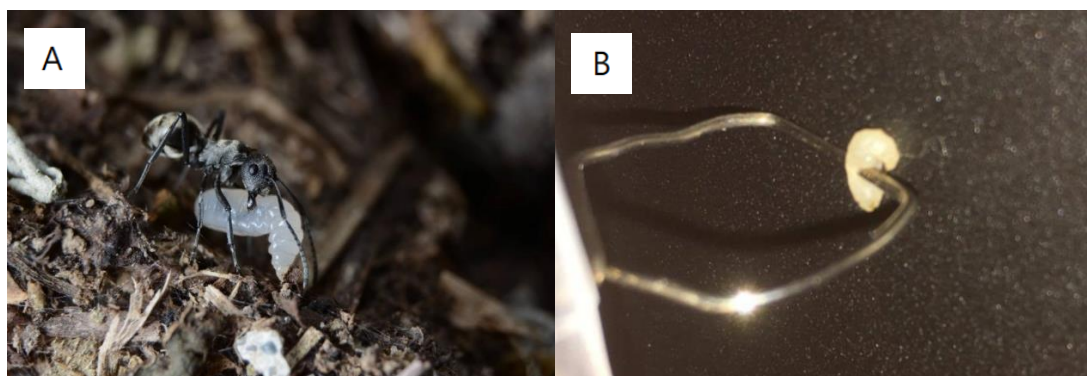
伍、 研究結果

一、探討黑棘蟻(*P. dives*)非結繭蟻絲膜的生成技術及行為調控。

(一)在本研究的觀察中，我發現黑棘蟻工蟻能有效控制其幼蟲吐絲並製造非蟻繭蟻絲膜，也就是黑棘蟻蟻巢的巢材，而工蟻調控的方式也分為化學費洛蒙的刺激方式及物理性的觸碰刺激模式。

(二)在我的觀察紀錄中，黑棘蟻在極度飢餓時，也能利用已經製作成以絲膜的以絲來製造能量，這也顯示黑棘蟻非蟻繭蟻絲不但是當作巢材，保護黑棘蟻巢，更是黑棘蟻儲存能量的一個特殊來源。

(三)為了知道人工以物理性刺激是否能造成黑棘蟻幼蟲吐絲，我做了一系列的實驗，而實驗結果顯示，人工的確可以刺激幼蟲吐絲，而其吐絲率平均為20%，且吐絲範圍為2mm²，吐絲時間僅限15分鐘內，另外在刺激時，必須刺激幼蟲的七、八結體結中間，才能最有效的使其發生吐絲行為。



圖十四、黑棘蟻(*P. dives*)野外蟻巢工蟻叨幼蟲吐絲(A)及人工刺激幼蟲吐絲局部圖(B)。

(四)為了知道黑棘蟻工蟻刺激幼蟲吐絲是否為社會性行為，我將黑棘蟻工蟻及幼蟲單獨取出蟻巢並觀察工蟻是否會刺激幼蟲吐絲，結果顯示工蟻並不會在巢外以任何方法刺激幼蟲，連它抱住幼蟲的方式都不會像在蟻巢中以固定頭前尾後的模式抓住幼蟲。

表二、黑棘蟻在有無刺激幼蟲吐絲時叼住幼蟲的部分分析

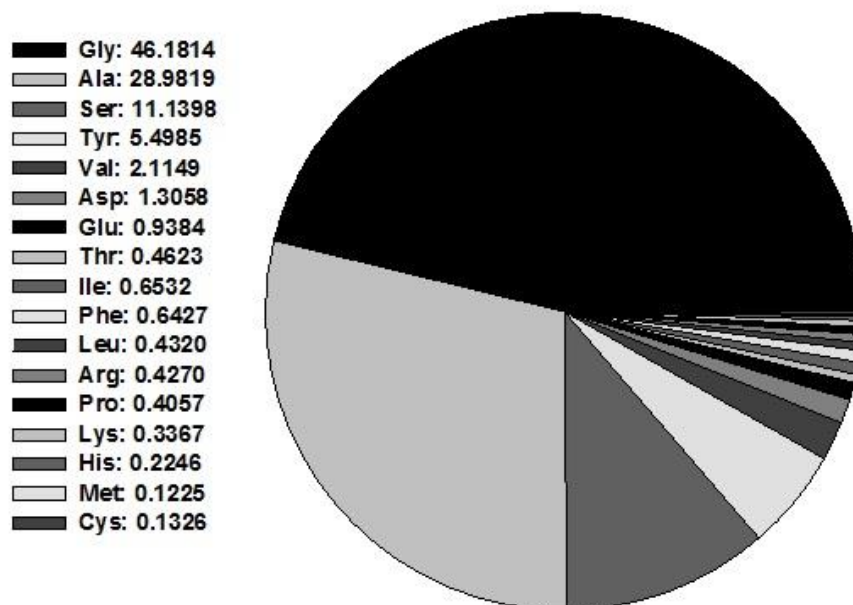
	Carry larva to weave non-cocooning silk	Carry larva to move
Carrying position	Back 100%	Front 10% back 30% tail 40% head 5% lateral 15%
Carrying period(hrs)	1-3	< 1
Larval instar	3	1 - 3



圖十五、黑棘蟻(*P. dives*)管狀人工蟻巢。 圖十六、附著在巢壁的黑棘蟻幼蟲。

二、探討水解黑棘蟻(*P. dives*)非結繭蟻絲膜並分析其化學組成。

(一)經過水解分析黑棘蟻非結繭蟻絲膜後，在蛋白質方面，我發現其組成分為十七種，其中主要構成胺基酸為甘胺酸、丙胺酸及絲胺酸，而最少的則是胱胺酸及甲硫胺酸，而必要胺基酸為纈胺酸 (Valine) (Val)、苯丙胺酸 (Phenylalanine) (Phe)、離胺酸(賴胺酸) (Lysine) (Lys)、組胺酸 (Histidine) 和甲硫胺酸(蛋胺酸) (Methionine) (Met)，其他成分詳如圖。



圖十七、水解黑棘蟻(*P. dives*)非蟻繭蟻絲蛋白的胺基酸組成。(1=甘胺酸；2=丙胺酸；3=絲胺酸；4=酪胺酸；5=纈胺酸；6=天門冬胺酸；7=麩胺酸；8=羥丁胺酸；9=異白胺酸；10= 苯丙胺酸；11= 白胺酸；12 =精胺酸；13 =脯胺酸；14 =離胺酸；15= 組胺酸；16=胱胺酸；17=甲硫胺酸。)

(二)黑棘蟻的蟻絲蛋白與動物性(牛)的膠原蛋白比較。

1. 經過水解蟻絲蛋白的分析，我比較牛(Collagen from bovine mass fraction)的膠原蛋白(詳如表三)，發現其組成主要不同在甘胺酸的比例及脯胺酸的比例，在膠原蛋白裡，脯胺酸對動物是一個相當重要的胺基酸，它能加快傷口癒合，是氨基酸輸液的重要原料。而在蟻絲中它主要的用途就是以環狀構造將脯氨酸的氨基的角度限制，造成蛋白質裡面的脯氨酸以二級結構(如 α -螺旋或 β -折疊)為主，常出現在蛋白質結構上轉角的地方：包括 β -轉角也可以看到脯氨酸的出現。

(三)黑棘蟻成蟲及水解黑棘蟻非蟻繭蟻絲微量金屬的比較，成蟲以矽元素及鉀元素為主(詳如表三)。

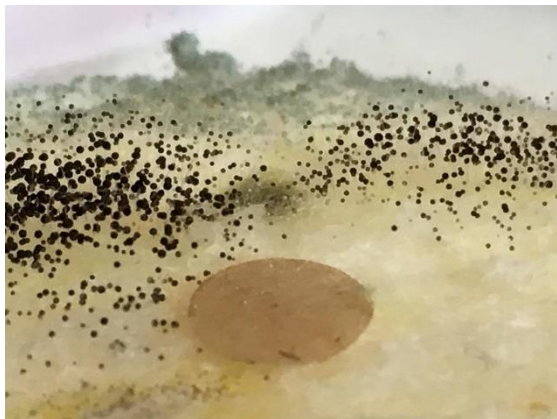
表三、黑棘蟻(*P. dives*)成蟲及水解黑棘蟻非結繭蟻絲微量金屬的比較表(克/微克)

元素名稱	黑棘蟻成蟲微量元素	黑棘蟻非結繭蟻絲之微量元素
Zn	119	0.003500
Cu	13.1	--
Fe	557	0.010900
Ca	980	0.118400
Mg	777	0.028000
Mn	498	0.001000
Co	8.41	0.001400
Ni	9.78	0.001100
K	3028	0.073900
Na	1297	0.000000
Li	0.72	0.002600
Cr	0.12	0.001290
As	0.49	0.005200
Se	130	--
Cd	0.03	--
Al	551	0.045600
B	2.07	0.074100
Ba	28.7	0.035400
Ti	29.31	0.000065
Sr	11.3	0.001000
P	5221	0.003370
Hg	0.03	--
Au	--	0.001310
Nd	--	0.001099
Nb	--	0.002940
La	--	0.001087
Rb	--	0.004516

三、解析黑棘蟻(*P. dives*) 非結繭蟻絲膜之功能及特性。

(一)解析黑棘蟻(*P. dives*) 非結繭蟻絲膜之抗菌性質。

1. 對於蟻絲抗菌性的實驗，我發現蟻絲對於青黴菌落、黑黴菌落及其他多種菌種均有抗菌性，菌絲都會在蟻絲旁生長而掠過蟻絲的部分(詳如圖十八)。



圖十八、黑棘蟻(*P. dives*)蟻絲蛋白膜抗菌性的實際照片。



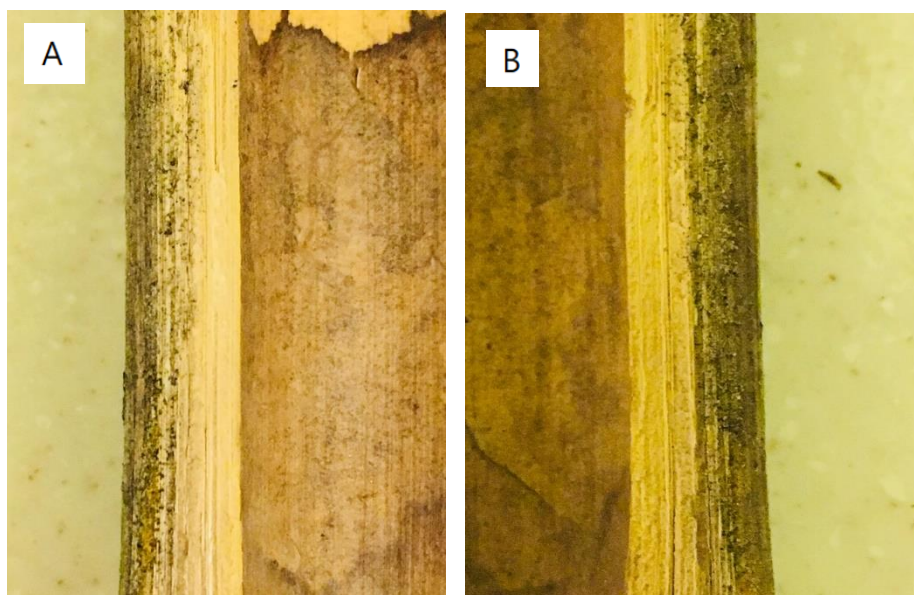
圖十九、水解黑棘蟻非結繭蟻絲膜與對照組的比較(左二為對照組；右二為實驗組)。

2. 在水解黑棘蟻(*P. dives*) 非結繭蟻絲膜的檢驗上，我發現黑棘蟻水解蟻絲具有強大的抗菌性，經過幾個星期與對照組具有顯著的差異在菌落上大約與對照組成1:49的差距。

表四、水解黑棘蟻(*P. dives*) 非結繭蟻絲膜與對照組的抗菌性比較(一個月)

	Distilled water + get(N=8)	Hydrolyzed protein + get(N=6)
CFU(colony-forming unit)	3.5±1.9	1.67±0.52
No. Species	1.5±0.53	1±0
Area ratio	0.85±0.12	0.132±0.062

3. 在野外的實際觀察中，我也發現到築巢在竹筒裡的黑棘蟻巢具有明顯的抗菌效果，一般來說菌絲會在竹子死亡後侵入其纖維，可是當黑棘蟻將蟻絲覆蓋內部的竹心部分，就會產生對菌類的抑制效果(詳如圖二十)

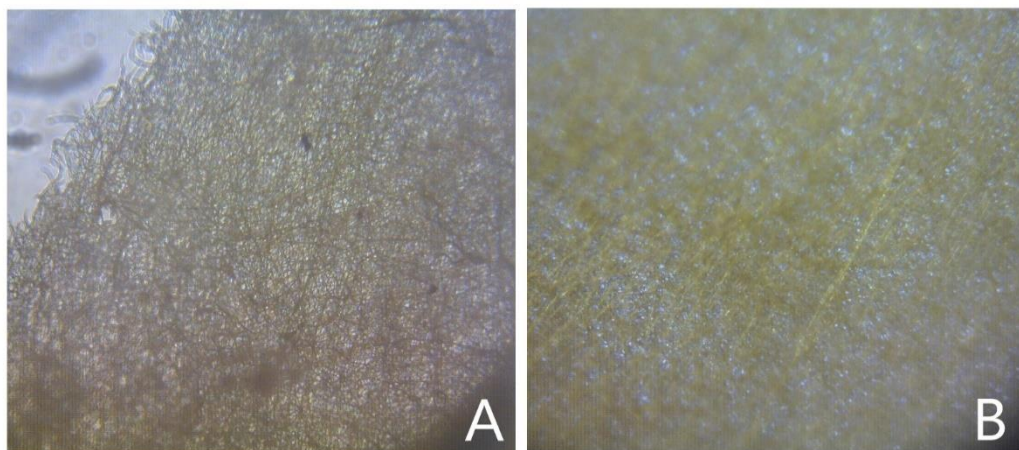


圖二十、黑棘蟻(*P. dives*)在野外竹中的蟻巢，內層覆蓋非蟻繭蟻絲膜，使之不易長菌。

4. 在非蟻繭蟻絲膜對麵包、柚子皮的實驗上，我發現其都有顯著的抗菌效果，其生長的菌絲都不會非蟻繭蟻絲膜上附著，而接觸蟻絲膜的部分也只會少量菌絲附著。

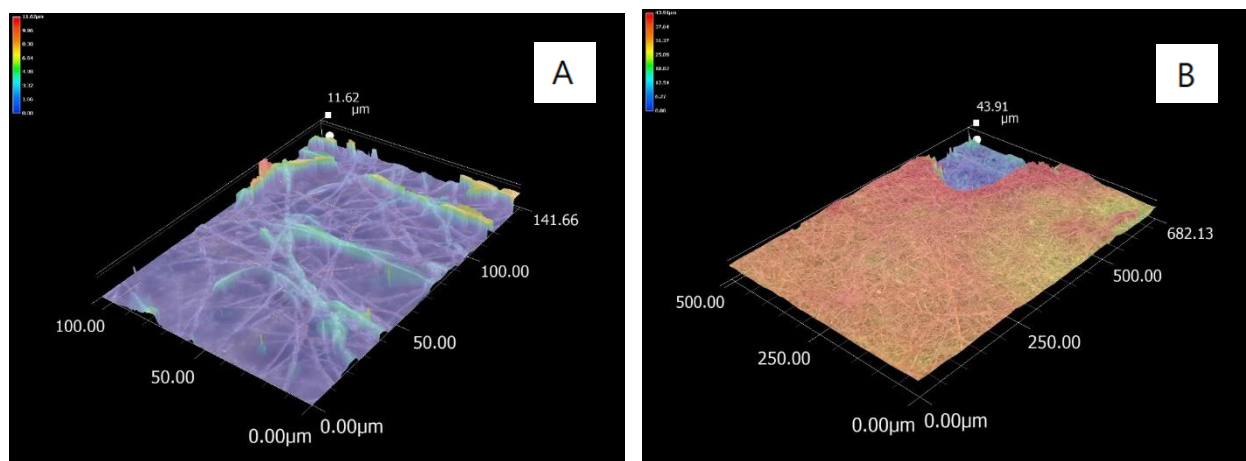
(二)在蟻絲的織法上我分析了以下兩點的性質。

1. 在利用複式顯微鏡拍攝分析蟻繭及非蟻繭蟻絲膜的織法後，我發現蟻繭具有明顯縱橫交叉的織法，較規律；而非蟻繭蟻絲膜則是以似不織布的方式織成，並沒明顯的規律。



圖三十四、蟻繭及非蟻繭蟻絲的織法分析(A=蟻繭 B=非蟻繭蟻絲)。

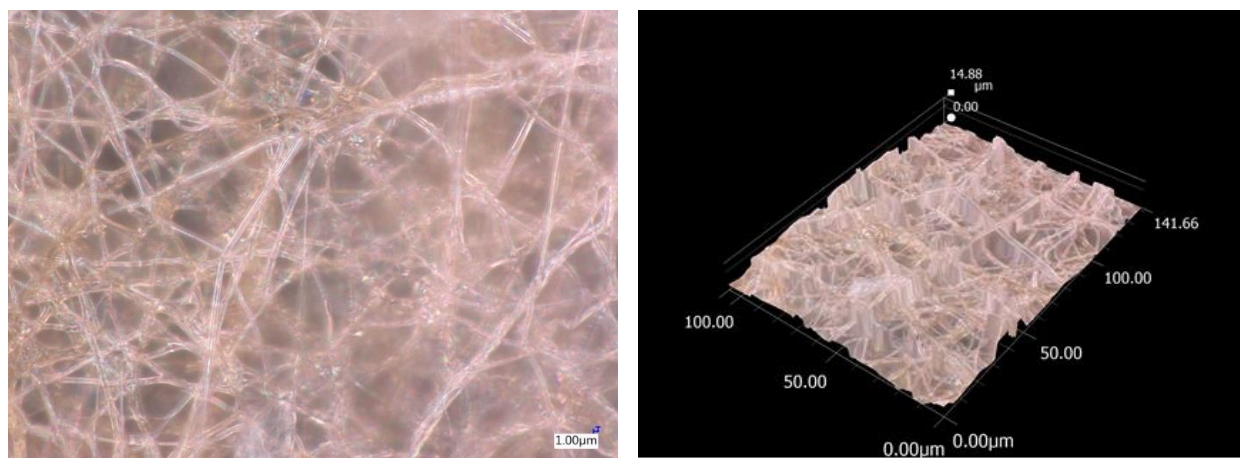
2. 另外，以共聚焦高深高解析度高放大倍數三維數位記憶量測顯微鏡拍出更精細的非蟻繭蟻絲的織法(如圖二十二)。



圖二十二、使用電子顯微鏡拍攝出的黑棘蟻(*P. dives*)蟻繭蟻絲 A 及非蟻繭蟻絲 B 織法及厚度分析。

(三)對於蟻絲的厚度

1. 關於非結繭蟻絲膜的厚度，我發現其平均落在 $24.99 \pm 20 \mu\text{m}$ (詳如圖二十三)



圖二十三、使用電子顯微鏡拍出黑棘蟻(*P. dives*)非結繭蟻絲膜2D 及3D 的厚度及織法。

2. 而一條絲的大約直徑為 $1.2 \pm 0.9 \mu\text{m}$ ，但其實蟻絲是具有相當好的可塑性，所以其直徑的範圍相當大，但可以確定的是蟻絲最少至少有 $0.1 \mu\text{m}$ 的直徑(詳如圖二十三)。

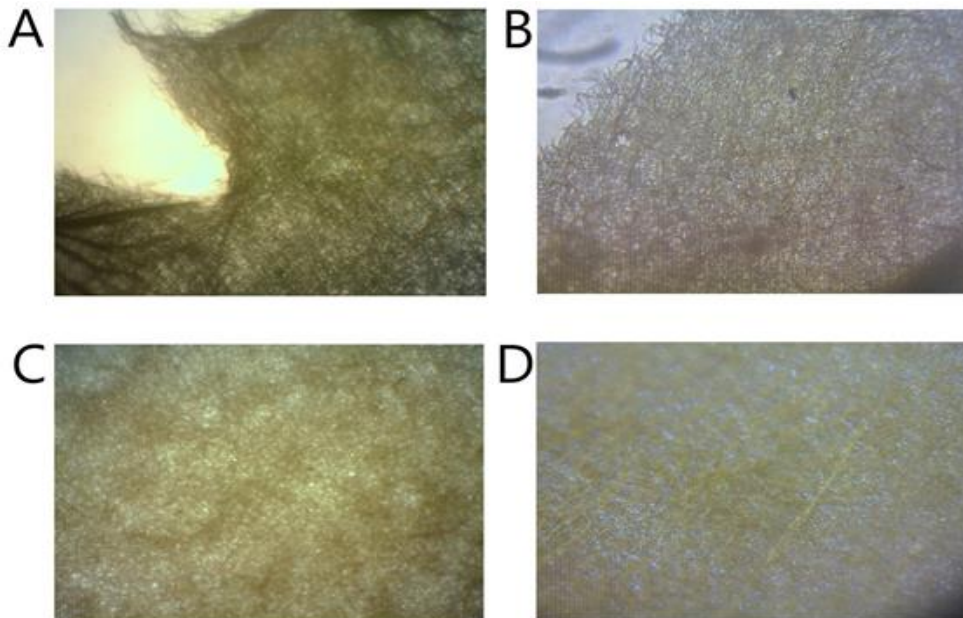
(四)關於蟻絲的雙面性

1. 在非蟻繭蟻絲膜上，我發現其具有明顯的雙面性，背面緊貼人工巢壁的是非常光滑的一面，且具有高反光性及絲綢般的觸感；相反的，腹面則具有一定的粗糙度，且也不太能反光(詳如圖二十四)



圖二十四、黑棘蟻(*P. dives*)非蟻繭蟻絲膜的雙面性分析(左為腹面；又為背面)。

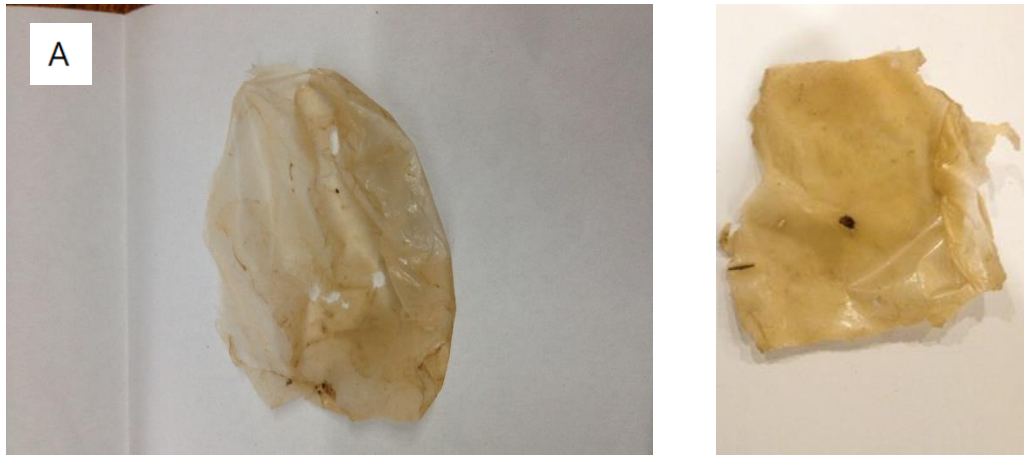
2. 另外我也分析蟻繭及非蟻繭蟻絲膜是否具有一樣的雙面性，實驗結果顯示，蟻繭並沒有明顯的雙面性，兩面都是以類似的織法織成的；而非蟻繭蟻絲膜在顯微鏡下也可看出其具有不同的織法，雖然都是似不織布，但背面的部分會織的更細更密(詳如圖二十五)。



圖二十五、蟻繭及非蟻繭蟻絲膜是否具有一樣的雙面性分析(A=cocoon dorsal view B=cocoon ventral view C= non-cocooning silk dorsal view D= non-cocooning silk ventral view)

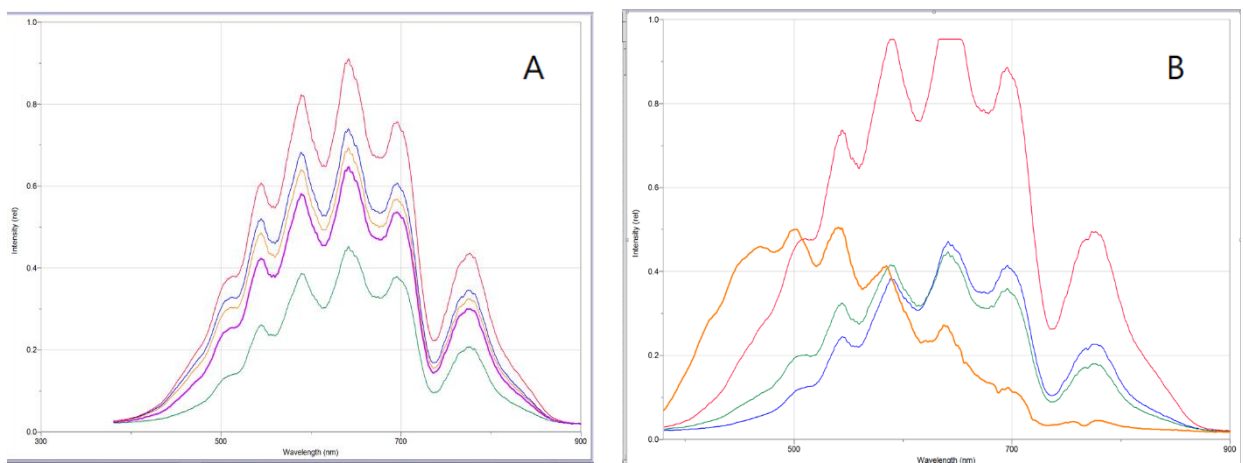
(五)蟻絲的透光度

1. 經過光解析 APP-Ray Detection 分析出蟻繭透光度為 35 ± 15 ；非蟻繭蟻絲膜透光度為 55 ± 38 ；而自然光光度為 38 ± 7 ，因此得出蟻絲纖維具有聚光的效果，而非蟻繭蟻絲膜的聚光性還要更勝於蟻繭。



圖二十六、單獨蟻絲會反光，蟻絲聚在一起更會有聚光的效果。

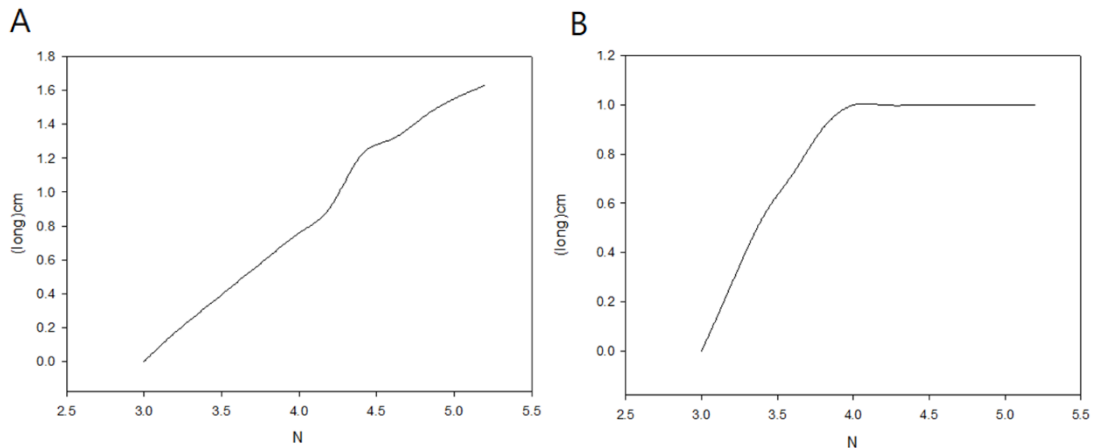
2. 在測光組光譜實驗中，經過 logger pro 軟體的繪圖，我發現到黑棘蟻非蟻繭蟻絲膜能在連續光譜照射下濾下藍光色系及紅光色系的光，幾乎只保留黃光，甚至有加強的趨勢(如圖二十七)。



圖二十七、經過 logger pro 軟體繪製出通過蟻絲膜的光譜波形圖，A 為與不同厚度的蟻絲膜盒連續光譜做的比較，B 圖則是與紫外線光譜以及日光的比較。

(六)黑棘蟻非結繭蟻絲的延展性

1. 在延展性的實驗中，我將經由力感應器測量後的數據畫成圖表，並發現黑棘蟻非結繭蟻絲具有明顯的彈力係數，且係數非常小，表示其延展性非常好，另外其彈性疲乏時會突然增加其彈力係數，使圖形的斜率增加(如圖二十八)。



圖二十八、A 黑棘蟻非結繭蟻絲膜的延展力(彈性係數)，為了確認不是測量組的釣魚線使之產生明確的彈性位移，測量了釣魚線之彈性係數(B)。

四、分析黑棘蟻(*P. dives*)非結繭蟻絲與其他動物性絲織混合物的比較。

(一)黑棘蟻成蟲蛋白與幼蟲吐之絲蛋白

1. 我將黑棘蟻非結繭蟻絲與黑棘蟻成蟲的胺基酸分析做比較發現其差距最大的是 Gly 甘胺酸，而在成蟲中並沒有 Gln 麩胺酸，在蟻絲膜中沒有 Glu 麩胺醯胺，另外在成蟲中最多的是 Ala 丙胺酸(詳如表五)。
2. 黑棘蟻幼蟲產生的絲蛋白單位重量總胺基酸含量(5836.29mg/100g)比成蟲(4691.20mg/100g)高出1145mg/100g。

表五、黑棘蟻非結繭蟻絲與黑棘蟻成蟲的胺基酸含量分析比較

Amio acid Conc(mg/100g)	larval silk protein	whole worker protein (李典忠, 2004)
Gly	2695.28	58.77
Ala	1691.47	604.47
Ser	650.15	583.61
Tyr	320.91	97.56
Val	123.43	273.21
Asn	76.21	168.34
Gln	54.77	0.00
Thr	26.98	303.92
Ile	38.12	133.33
Phe	37.51	561.12
Leu	25.21	356.22
Arg	24.92	198.11
Pro	23.68	864.11
Lys	19.65	3.33
His	13.11	19.51
Met	7.15	27.04
Cys	7.74	54.83
Glu	0	383.72
Total	5836.29	4691.20

(二)黑棘蟻蟻絲與其他三種蟻科絲蛋白的差異

1. 我將黑棘蟻非結繭蟻絲和其他三種蟻(鬥牛犬蟻 *Myrmecia*、印度跳蟻 *Harpegnathos saltator*、黃猄蟻 *O. smaragdina*)進行比較(表六)，發現黑棘蟻非結繭蟻絲與其他蟻絲有著非常不同的組成，尤其在甘胺酸上，黑棘蟻非結繭蟻絲的含量比其他種蟻絲多很多，而其他蟻絲則以 Ala 丙胺酸為主要組成。
2. 另外我發現黑棘蟻非蟻繭蟻絲蛋白與其他三種蟻只有三種氨基酸含量是類似的，分別為 Ala、Ser 及 Phe。

表六、黑棘蟻非結繭蟻絲游離胺基酸成分和其他三種蟻(鬥牛犬蟻 *Myrmecia*、印度跳蟻 *Harpegnathos saltator*、黃猄蟻 *O. smaragdina*)的比較

Amio acid Fraction(%)	<i>Polyrhachis dives</i>	<i>Myrmecia forficata</i>	<i>Oecophylla smaragdina</i>	<i>Harpegnathos saltator</i>
Gly	46.22	7.7	7.3	10.6
Ala	29	29.1	31.8	21
Ser	11.15	11.5	14.2	8.6
Tyr	5.5	0.5	1.1	2.6
Val	2.12	4.5	4.3	5.5
Asn	1.31	0	0	0
Gln	0.94	0	0	0
Thr	0.81	3.4	4.2	4.8
Ile	0.65	3.3	3.8	5.3
Phe	0.64	0.5	0.6	1.4
Leu	0.44	6.5	5.6	5.3
Arg	0.42	4.4	3.3	3.4
Pro	0.41	0	0	0
Lys	0.34	4.8	4	5.3
His	0.22	0	0	0
Met	0.12	1.4	0.4	1.5
Cys	0.13	0	0	0
Glu	0	0	0	0
Asp	0	8.2	7.2	9.1
Glx	0	13.3	11.7	9.9

(三)黑棘蟻蟻絲與不同科之動物蛋白構成的差異

1. 我將黑棘蟻非結繭蟻絲與蜜蜂、兩種草蛉、菜蝶絨繭蜂(*Cotesia glomerate*)的生物絲作比較(表七)，發現除了菜蝶絨繭蜂外，主要成分胺基酸都有 Ala 丙胺酸，而黑棘蟻非結繭蟻絲是胺基酸含量最多的物種；反之則為蜜蜂的絲，另外這五種昆蟲都會以絲來做繭但只有其中一種草蛉(*Mallada*)才會跟黑棘蟻一樣將絲用在其他用途。
2. 另外五種生物的氨基酸種類重11到17種皆有，而黑棘蟻非蟻繭蟻絲膜卻是擁有最多的。

表七、黑棘蟻(*P. dives*)蟻絲與不同科之動物蛋白構成的差異表

	<i>P. dives</i> silk	Honeyee silk	Euaculeatan silk	Mallada silk	<i>Cotesia</i> <i>glomerata</i>
Most abundant amino acid	Gly, Ala	Ala	Ala	Ala	Asn, Ser
No. amino acid	17	11	16	16	15
cocoon silk	yes	yes	yes	yes	yes
non-cocooning silk	yes	no	no	yes	no

陸、討論

- 一、經過這次的實驗，我知道蟻絲具有相當好的抗菌性，但蟻絲的抗菌性來源又是什麼呢?是胺基酸嗎?還是微量金屬?又或者是黑棘以所分泌的以酸或費洛蒙?這些都帶我的
- 二、蟻絲觀察的實驗中，我發現當工蟻和幼蟲結完絲後，工蟻會讓幼蟲在整個絲質的區域範圍邊吐上一層較厚的框，這樣絲質部分就不容易脫落飼養盒的壁面。
- 三、做幼蟲吐絲習性這個實驗時，我發現到正中午天氣較熱，而幼蟲吐絲的速度也變得比較快些，我推測不止是光線，溫度亦可能是幼蟲吐絲品質的促進因素。
- 四、我們也在研究中，發現到薩瑟蘭博士2007的一篇文章中描述到螞蟻蟻絲和蜜蜂絲的分子結構與飛蛾和蜘蛛絲中較大的蛋白質、薄片結構非常不同。螞蟻的繭和巢絲是由一種捲曲螺旋(一種蛋白質排列結構，由多種螺旋狀絲彼此纏繞狀結構組成)。這種結構讓蟻絲的重量更輕、韌度更強。同時，薩瑟蘭博士已經鑒別出蜜蜂的絲蛋白基因，但蟻絲蛋白卻還未進行深入的研究。
- 五、在前人的研究中發現，天然蠶絲在自然生態中屬於非污染的天然纖維，具有其他加工纖維無可替代的獨特性質。而水解後的蠶絲蛋白對人體則有許多的好處，而我也在黑棘蟻的巢中發現類似蠶絲，但比蠶絲更密的蟻絲，那麼水解之後的蟻絲蛋白是否也有蠶絲蛋白的效果呢?還是比蠶絲蛋白還有更多對人體有益的功效?
- 六、在收集蟻絲時，我發現黑棘蟻非蟻繭蟻絲是用不規則方式來織成的不織布，而

蟻繭是由規則的直橫線編織的，這也讓黑棘蟻非蟻繭的蟻絲非常堅韌，顏色也比較深。

- 七、我發現黑棘蟻幼蟲把蟻絲織出一片偌大的空間時，蟻群就只會在蟻絲上活動，但是工蟻會把蛹放入蟻巢的最下方，而且會放在沒有吐絲的地方，我們推測這是因為蛹狀態下的黑棘蟻不能一直劇烈搖動，所以沒有被掛在半空的蟻絲上。
- 八、更換蟻巢時，觀察到新的蟻群會在舊有的蟻絲上繼續生活，並不會排斥其他蟻群幼蟲吐的絲，而且還會在原本的基礎下繼續吐絲，所以蟻絲膜是通用的，沒有使用的專一性，但這種通用性要等上一窩蟻巢在其蟻絲膜上分泌的化學氣息逸散後才會適用。
- 九、除了少數像馬來西亞的琉璃蟻是成蟻分泌蟻絲外，其餘的織工蟻科類(Weaver ant)都是螞蟻幼蟲專門吐絲(Maschwite 等，1991)。而在前人的研究中，非洲織工蟻(*Oecophylla Longinoda*)工蟻是咬著終齡幼蟲(final-instar larvae)去吐絲建巢，但在我的實驗裡，黑棘蟻工蟻在選擇幼蟲齡期上，並沒有專一性，幾乎所有蟻期的幼蟲，在需要的時候，都會被工蟻叼去吐蟻絲，另外織工蟻的蟻絲蛋白包含非纖維網纖維(nonwoven mesh of fiber)平均直徑為 $0.7666\pm 0.338\mu\text{m}$ ，比之黑棘蟻的蟻絲纖維大的相當多。
- 十一、在黑棘蟻巢中幼蟲吐絲形成蟻絲膜是一種被動行為，研究中甚至觀察到工蟻為搶奪幼蟲到不同地域吐絲而將幼蟲拉扯死亡的情況，我也發現幼蟲在已織好的蟻絲膜上停留的時候，是背部用著勾毛掛在蟻絲膜上，並不會主動吐絲。

十二、科學家 Reddy 等人(2011)研究織工蟻(*Oecophylla*)獨特的奈米纖維，發現該蟻的蟻絲蛋白膜具有31%的伸展彈性約4兆帕(MPa)的拉伸長度，可承受沸點和呈現弱鹼性，更能比一般的絲質材料裝在4.7倍的藥物，我研究的黑棘蟻蟻絲，往後也可以做類似的研究。

十三、甘胺酸（英語：glycine，簡寫為 Gly 或 G），即氨基乙酸，是20個蛋白胺基酸中分子量最小的一個。甘胺酸因為含有羧基，所以水溶液呈酸性，可以用 PH 試紙測出來。它又能與鹼發生中和反應，因此可以測出它的羧基數目。另外甘胺酸常出現在肽鏈中的 β 摺疊。在中樞神經系統，尤其是在脊椎裡，甘胺酸是一個抑制性神經遞質。假如甘胺酸受體被激活，氯離子通過離子接受器進入神經細胞導致抑制性突觸後電位。

十四、丙胺酸(原文為 alanine，簡寫為 ala)在胺基酸序列中可簡寫為 A。於1879年首度被分離出來。鳥類和哺乳類可經由食物中的糖分解所得的丙酮酸合成得到丙胺酸，因此對這些動物來說，丙胺酸為非必需胺基酸。對體內蛋白質合成過程很重要，是肌肉組織及腦部中樞神經之能源之一，可幫助產生抗體，協助葡萄糖代謝，及有機酸的代謝。能協助腦下垂體發揮正常功能，刺激生長激素、提高免疫系統功能、清除體內毒素、協助傷口復元、預防腎結石、緩和低血糖症、消耗脂肪、穩定細胞構造、保持 DNA 完整性。

十五、絲胺酸（Serine, 簡寫為 Ser, S）是由絲蛋白的水解物中分離出來的，也因此被稱為 serine，來自於拉丁文的 sericum（絲）。在二十一個基本胺基酸裡面，絲

胺酸與蘇胺酸（threonine）是唯二兩個具有羥基（hydroxyl group）的胺基酸。它對嘌呤（purines）與嘧啶（pyrimidines）的合成很重要，而它們都是核苷酸（nucleotides）的原料。同時，甘胺酸（glycine）、半胱胺酸（cysteine）與色胺酸（tryptophan）的合成也都需要它。除此之外，絲胺酸的羥基使它成為在許多酵素的活化位址（catalytic site）參與反應的主要胺基酸。

十六、在幼蟲在人工刺激後吐絲的方面，我發現到約25%會被人工刺激而吐絲，而吐絲的時間也不長，所以我想，是不是還能再改良成更好的型態，因為工蟻調控時會有時鬆有時緊，所以人工的刺激也應該要設計成那樣。

十七、在養殖黑棘蟻的過程中，我發現到黑棘蟻會把巢裡的髒東西和碎屑堆到吃完蜂蜜水後的小瓶蓋中，這顯示黑棘蟻是相當愛乾淨的，但為何要乾淨，這一點也是我往後可以探討的問題。

十八、對於未來的展望我發現在野外的空巢蟻絲膜會消失，這是否也顯示蟻絲蛋白會受日照降解，蟻絲是受何種力量降解，又是如何降解呢?這是一個相當好的問題。

十九、蜘蛛會吐不同類型的絲，但是在前人的研究中，大部分會產絲的昆蟲都只有一型絲蛋白，在 Weismann 等人(2008)的研究中，則發現草蛉會吐兩種型式的絲，這讓我想到了，是否黑棘蟻幼蟲吐絲結繭的絲和製作巢材的絲也是不同形式的呢?在我目前的研究中，只能證實他們具有不同的物理性質，但在這種不同形式絲的組成，還需要我更深入探討。

二十、經過物理透光性的分析後，發現到黑棘蟻非結繭蟻絲膜可以讓透過的黃光增強，使蟻巢裡的光線只剩黃光，而這樣的特性也不禁讓我對於黑棘蟻複眼的感光能力有所疑惑，為什麼只要黃光呢??黃光的波長不短也不長，能量算是中上的，那其他色光為什麼不適合黑棘蟻呢?

二十二、經過物理性延展力及韌性的分析，游數據化出的 X-N 圖可知其具有固定斜率，表示黑棘蟻非結繭蟻絲膜具有一定的彈力係數，而這個彈力係數比較其他絲織品算是相當好的，有趣的是，蟻絲膜在彈性疲乏後，並不會出現維持斜率為零最後繃斷，而是一到彈性疲乏就繃斷，這樣的特性是否能被我們運用，我想也是一個好問題。

二十三、Fountain 和 Hughes (2011)在他們研究黑棘蟻蟻絲抗菌的報告中，僅針對 *Mrtarhizium* 菌株做測試，認為蟻絲不具抗菌效果，這樣的結果和本研究發現非結繭蟻絲膜無論水解胺基酸溶液或膜本身都有抗菌效果有差異，這是值得我再深入研究的地方。

二十四、非結繭蟻絲雖然是黑棘蟻幼蟲非主動性產出的，但是幼蟲並未因此而犧牲，抑或減損生長發育，且為工蟻調節輪流吐絲，非窮盡少數幼蟲藏絲量，再者，非結繭蟻絲對聚落微環境調節有極大的貢獻，幼蟲吐絲結繭換成非結繭蟻絲膜，可以拿【原本租帳篷保暖，後來換成整房空調】來形容，對照人類對非法童工的剝削及利用，及超過體能負荷的工作，黑棘蟻的「社會性童工」，其存在則是一種對族群發展的共好。

柒、結論

黑棘蟻幼蟲在非自願及受外力(工蟻的大顎)的情況下吐出非結繭性蟻絲，超過蟻絲原來的生物性功能，這是由於社會性生活演化出來的結果。黑棘蟻幼蟲在個體尚未成熟時就對聚落作出貢獻，此一行為類似人類社會存在的童工，但是做出貢獻的幼蟲仍成功化蛹，完成生活史，且讓聚落的適存性提高，並沒有受到剝削傷害，與人類的童工有定義上的不同。研究結果顯然支持非結繭性蟻絲不同於蟻繭，其胺基酸成分分析後也與其他產絲昆蟲不同。研究中運用許多物理及化學方法針對非結繭性蟻絲的分析後，發現此種蟻絲應該是有助人類生活的天然材料。雖然目前為止，以人工的方式只能控制黑棘蟻幼蟲產生少量的非結繭性蟻絲，但是在未來我相信可以再針對更多變項的操控下，找到大量生產非結繭性蟻絲的訣竅。

捌、參考資料

一、書籍

- (一) 王林瑤、張立峰。 2002。 藥用昆蟲養殖。 金盾出版社。
- (二) 石達愷。 1991。 臺灣社會性昆蟲。 國立自然科學博物館。
- (三) 李典忠。 2004。 螞蟻生產技術。 中國農業出版社。
- (四) 魏永平。 2004。 藥用昆蟲養殖與利用技術大全。 農業出版社。
- (五) 龔泉福。 2001。 螞蟻養殖利用。 上海文獻科技出版社。
- (六) 鍾兆晉。 2008。 黑棘蟻聚落分工機制及生物時鐘表現。 臺灣大學博士論文。

二、網路資料

- (一) big5.39kf.com/yyjj/biotechnology/ol/2007-11-23-431798.shtml。
- (二) <http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=3190>
- (三) <http://www.thinkerstar.com/WSLF/AA/AA09.htm>
- (四) <http://journal.dyu.edu.tw/dyujournal/document/setjournal/s12-1-21-30.pdf>

三、期刊論文

- (一) Dorow, W.H.O, U. Maschwitz and S. Rapp. 1990. The natural history of *Polyrhachis (Myrmhoph) muelleri* Forel 1893. (Formicidae Formicinae), a weaver ant with mimetic larvae and an unusual nesting behaviour *Tropical Zoology* . 3: 181-190.

- (二) Maschwitz, U., K. Dumpert, T. Botz, and W. Rohe. 1991. A silk-nest weaving Dolichoderine ant in a Malayan rain forest. *Ins. Soc.* 38:307-316.
- (三) Sutherland, T.D., Weisman S., Trueman H.E, Sriskantha A., Trueman JW. ,Haritos VS. 2007. Conservation of essential design features in cailed coil silks. *Mol.Biol. evo* 124(11):2424-32.
- (四) Campbell, PM, Trueman H.E., Zhang Q, Kojima K, Kameda T, and Sutherland TD. 2014. Cross-linking in the silks of bees , ants and hornets, *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 48:40-50.
- (五) Weisman, S., H.E. Trueman, S. T. Mudie, J. S. Church, T. D. Sutherland and V.S. Haritos. 2008. An unlikely silk: the composite material of green lacewing cocoons. *Biomacromolecules*. Nov;9(11):3065-9.
- (六) Fountain T. and Hughes W. O. H. 2011. Weaving resistance: silk and disease resistance in the weaver ant *Polyhachis dives*. *Insectes Sociaux* 58:453-458.

【評語】 050013

- 一、蛋白質含量測定實驗中，對於初始成蟻重量以及蟻絲蛋白重量是否有進行定量？
- 二、抗菌實驗已初步證實蟻絲具有抗細菌及抗黴菌的能力，但如果可以再修正方式，使數據更科學化會更好。

本實驗研究主題具延續性；有關蟻絲物理特性的分析結果很令人驚艷，但抗菌實驗的設計有待商榷。胺基酸成分與重金屬測量的實驗方法部分闕如；但整體來說是一份完整且龐大的實驗報告。另，研究報告有相當高比例的錯字，甚至第 28 頁討論的第一點不是一個完整的句子，顯示作品在初稿完成後並無校稿就送出。