

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 生物科

第一名

030309

避債蛾的防護衣—探討幼蟲建造蓑巢的防禦行為及蓑巢對卵、幼蟲、蛹、成蟲的防護研究

學校名稱：南投縣立宏仁國民中學

作者： 國一 林芊融 國一 劉語昕	指導老師： 李季篤 李宜芳
-------------------------	---------------------

關鍵詞：蓑巢、伯努利雙扭線、絲束

## 得獎感言

### 2022 年「巢」向成功的目標前進

「生物科第一名~南投縣宏仁國中！」當我聽到我們是第一名的時候，當下真的覺得超級感動，上台領獎的時候雙手捧著的獎杯，背後都是我們的辛苦還有汗水交織而成的光榮。

在將近一年的時間裡，從無到有，一路上坎坎坷坷遇到了許多困難，雖然這個過程很辛苦，卻讓我們的作品不斷再精進，也讓我們在其中學習到團隊的重要性，完成了這一次的作品。讓我們從縣賽一路過關斬將，到達了全國賽的殿堂。在頒獎典禮上聽到成績是第一名時，真不敢相信，我們成功達到了看似那遙不可及的目標。

能獲得全國第一名，首先要感謝的是我們的指導老師:李季篤老師，因為有了他的教導才有了現在的我們、有了這份榮譽，感謝李宜芳老師、宋昌諭博士的實驗統計分析教導、林志南老師、鎧爸老師、林志隆老師、陳冠安老師、白均合老師以及謝明佑主任，他們總是在我們實驗遇到困難時，毫不猶豫地伸出援手，提供我們專業知識與建議；接著要感謝一起合作、一起快樂、一起難過的合作夥伴，有了彼此的互相鼓勵，克服了重重的困難；更要感謝從開始到最後默默支持我們的父母與家人，還有在課業上不斷協助我們的班導陳星如老師和同學，他們的鼓勵讓我覺得，即使之後的道路會多顛簸，不到最後一刻不要放棄，畢竟只有努力耕耘，未來結出來的果實才會是甜的呀。

在整個過程中，科展讓我們學習到的不單單是去做研究這件事而已，包含了團隊之間的合作，以及研究上需要的耐心和抗壓性，是我們不同的收穫。

因此~勇敢挑戰、大膽嘗試，這就是科展帶給我們最珍貴的領悟，2022 年我們終於「巢」向成功，完成目標！

## 大會獎：國中組 生物科

全國科學展覽會  
第62屆  
在新北  
National Primary & High School  
Science Fair in New Taipei City

名次	第一名
編號	030309
作者	林芊融 劉語昕
學校名稱	南投縣立宏仁國民中學
作品名稱	避債蛾的防護衣—探討幼蟲建造 蓑巢的防禦行為及蓑巢對卵、幼蟲、蛹、成蟲的防護研究



我們是國中一年級的劉語昕、林芊融(左、右)，與指導老師李季篤合影



觀察避債蛾做蓑巢的行為，是認識研究避債蛾的第一步



即使是視訊口試、即使沒有任何文字圖稿，我們仍然表現出專業與熟練的口頭報告。

## 摘要

本研究探討避債蛾(*Eumeta japonica*(Heylaerts)) 幼蟲做蓑巢進行防禦與蓑巢對成長各階段的防護。結果一濕度達 80%以上與受到重壓因素，幼蟲會脫離蓑巢，離巢後能重做 3~10 個新蓑巢，幼蟲體重平均是巢重 2.348 倍、蓑巢長平均是幼蟲長的 1.542 倍，可使在內幼蟲獲得保護。結果二幼蟲以 12.5±4.3gw 拉力封住巢口，阻擋天敵入侵；排出軟便混體液含少許鹼性物，對螞蟻有忌避效果；當天敵入侵，體長可縮小 0.92±0.23cm，可增加巢內移動或逃避的空間。結果三初齡幼蟲做蓑巢生存率為 26%，塗抹體液後升到 88%。結果四結蛹絲束能承受 589.3±63.5g，保護蛹體安全蛻變到成蟲。

## 壹、研究動機

避債蛾幼蟲會建造蓑巢，並帶著蓑巢一起生活，是一種很特殊的蛾類，對於牠身上蓑巢的由來與功能，令我們感到很好奇。看著蓑巢，我們聯想到幼蟲有了蓑巢之後，會離開蓑巢嗎？一生只做一個蓑巢嗎？蓑巢能夠用來防禦天敵嗎？幼蟲做蓑巢跟吃的食物有沒有關係？蓑巢內與蓑巢外有何不同？沒有蓑巢幼蟲能夠存活嗎？等等問題。

在這些疑問下，我們曾多次觀察到懸掛在枝條上的蓑巢，旁邊總會有許多隻螞蟻在那邊走來走去(如下圖樣本)，不禁好奇：螞蟻為何不直接攻擊幼蟲？是蓑巢把螞蟻阻隔在外的關係嗎？還是螞蟻在等待機會伺機獵捕蓑巢內的幼蟲？為了解開心中許多的疑惑？我們決定從避債蛾的蓑巢開始進行研究，探索牠們是如何利用蓑巢在大自然中求生存。



## 貳、研究目的

- 一、研究避債蛾幼蟲『會離開蓑巢嗎？會重建蓑巢嗎？』
- 二、研究『幼蟲如何利用蓑巢』進行防禦行為
- 三、研究蓑巢對『卵與初齡幼蟲』的防護
- 四、研究幼蟲建造蓑巢對未來的『蛹體與成蟲』之防護

## 參、研究設備及器材

- |                          |              |          |                      |
|--------------------------|--------------|----------|----------------------|
| 1.數位相機 (SONY RX100IV)    | 5.test paper | 9.電風扇    | 13.微量分注器(MS Pipette) |
| 2.電子天秤 (ATY124、SNUG-300) | 6.砝碼         | 10.溼度計   | 14.夾鏈袋(340x450mm)    |
| 3.顯微鏡 (DinoCapture2.0)   | 7.量角器        | 11.水彩筆   | 15.自製負重平台            |
| 4.彈簧秤、樂高轉盤               | 8.筆電         | 12.自製測力器 | 16.手機(SAMSUNG A32)   |

## 肆、文獻整理

作者	研究題目	研究論點
廖韋俐, 2014	衣窺宅蟲-何處是蛾家	一、歸納出衣蛾的家多在潮濕、棉絮多的環境。 二、實驗證明築巢的材料及食性，作者認為衣蛾在生態上扮演清道夫的角色。
黃靖峰, 2017	穿梭衣的毛毛蟲-認識避債蛾	一、觀察幼蟲身上穿著袋狀蓑衣巢，是幼蟲、蛹或雌性成蟲藏身移動的地方，會將袋狀的巢固定在枝頭上，並以倒懸身體的姿態化蛹。 二、雌蟲無翅、雄蟲有翅，因此雄蟲羽化不久後，會飛到雌蟲的袋狀巢上交尾。
謝雨彤, 2020	移動城堡-避債蛾應用蓑巢生存策略之探討	一、觀察初齡幼蟲離開母巢的時候已經做好蓑巢，幼蟲利用蓑巢成長直到成蟲的生存策略。 二、歸納出幼蟲築巢步驟，發現巢越大越具有多樣形態，幼蟲用蓑巢棲息在葉背之上。
陳以晏, 2020	大屯火山區魔法帽-巫帽蓑蛾 (Striglocyrbasiameguae) 筒巢之研究	一、研究筒巢的三層結構，發現筒巢表面積、頭部角度與幼蟲的移動有關連性。 三、發現筒巢有保暖性、疏水性，因此仿作筒巢特徵，應用在未來防護和保暖材料之上。
林沂嫻, 2021	避債非躲債-探討避債蛾之蓑巢與幼蟲生存間關係	一、研究發現幼蟲吐絲建造蓑巢，而絲線含有蛋白質的成分，幼蟲與蓑巢之間有相關性。 二、幼蟲把蓑巢固定後，可以吃到葉片、利用蓑巢爬行，證明蓑巢與幼蟲的生存有關係。
我們的見解	<p>閱讀了上述多篇報告之後，我們訂立的研究方向，朝向觀察到的避債蛾行為，以實驗方式去證明看到的訊息緣由，例如看到空蓑巢，去實驗找出幼蟲與離巢是否有關？看到幼蟲排出體液，去驗證裡面是否含天敵討厭的成分？<b>用實驗區隔與前人觀察的不同，所設計的研究架構，也是前人不曾研究過的內容：</b></p> <div style="text-align: center;"> <pre> graph TD     Root[研究架構] --&gt; C1[一幼蟲離巢]     Root --&gt; C2[二幼蟲防禦]     Root --&gt; C3[三蓑巢防護]     Root --&gt; C4[四蛹與成蟲]          C1 --&gt; C1_1[環境]     C1 --&gt; C1_2[重建]     C1 --&gt; C1_3[互換]     C1_1 --&gt; C1_1_1[溫度]     C1_1 --&gt; C1_1_2[濕度]     C1_2 --&gt; C1_2_1[重壓]     C1_3 --&gt; C1_3_1[小中互換]     C1_3 --&gt; C1_3_2[中大互換]          C2 --&gt; C2_1[上方]     C2 --&gt; C2_2[下方]     C2 --&gt; C2_3[破壞]     C2 --&gt; C2_4[入侵]     C2_1 --&gt; C2_1_1[拉力]     C2_2 --&gt; C2_2_1[忌避率]     C2_3 --&gt; C2_3_1[修補]     C2_4 --&gt; C2_4_1[體長變化]          C3 --&gt; C3_1[卵防護]     C3 --&gt; C3_2[初齡防護]     C3_1 --&gt; C3_1_1[卵數量]     C3_1 --&gt; C3_1_2[蛹殼負重]     C3_2 --&gt; C3_2_1[離巢方式]     C3_2 --&gt; C3_2_2[爬行速度]     C3_2 --&gt; C3_2_3[築巢]     C3_2 --&gt; C3_2_4[被捕食率]          C4 --&gt; C4_1[巢外]     C4 --&gt; C4_2[巢內]     C4 --&gt; C4_3[蓑巢負重]     C4 --&gt; C4_4[雌性蛹體]     C4 --&gt; C4_5[雌性蛹體]     C4_1 --&gt; C4_1_1[絲束]     C4_2 --&gt; C4_2_1[絲絨]     C4_3 --&gt; C4_3_1[形變量]     C4_4 --&gt; C4_4_1[羽化雄蟲]     C4_5 --&gt; C4_5_1[羽化雌蟲]                 </pre> </div>	

## 伍、研究方法

### 研究一、避債蛾幼蟲『會離開蓑巢嗎？會重建蓑巢嗎』？

#### (一) 觀察：

為了研究避債蛾，我們採集 82 隻野生幼蟲，用 340×450mm 的大夾鏈袋戳洞後分 8 袋飼養，每週一與週五 2 次為避債蛾清理與更換食物。過程中我們在糞堆裡意外發現了多個空蓑巢，可是翻遍夾鏈袋卻找不到幼蟲蹤跡（圖 1），而蓑巢的數量經計算後，竟增加到 88 隻。



圖 1、避債蛾飼養與空蓑巢的發現。圖 A、採集野生樣本後用夾鏈袋飼養。圖 B、每週 2 次清理葉片、記錄蓑巢的數量。圖 C、我們發現糞堆之中出現不明的空蓑巢。

#### (二) 提出疑問？

飼養的避債蛾為什麼會多出 6 個空蓑巢呢？根據我們的觀察，一個蓑巢裡面只會有一隻幼蟲，因此我們懷疑多出來的空蓑巢，會不會是幼蟲離開後所留下來的？

(三) 提出假設：因棲息環境的改變，幼蟲出現離巢行為，並在離巢後會重新建造新蓑巢。

#### (四) 求證假設與實驗方法：

##### 步驟 1. 幼蟲會離開蓑巢嗎？

分別以 16°C、25°C、45°C 不同溫度；40%、60%、80% 不同濕度；平均以 20gw 壓住或擠壓蓑巢，記錄幼蟲是否會因環境的改變而離巢，各組實驗以初齡蟲與熟齡蟲等共 59 隻幼蟲進行實驗。

##### 步驟 2. 幼蟲會重新做新的蓑巢嗎？

隨機取 27 隻幼蟲，依照 1.9cm 以下、2.0-2.9cm、3.0-3.9cm、4.0-4.9cm、5.0cm 等不同體型幼蟲分成五組。實驗順序為測量蓑巢長度→剪開蓑巢測量幼蟲體長→取出幼蟲用小數點四位的電子秤秤幼蟲重與蓑巢重→放到裝有大葉欖仁樹葉片的盒內飼養→每第 7 天、第 14 天、第 21 天把幼蟲取出來，進行三次重建實驗。

##### 步驟 3. 不同環境下成長的幼蟲與蓑巢長度、重量之間的倍率會一樣嗎？

(1) 我們採集野生 45 隻與 110 年 9 月 7 日孵化的幼蟲，在人工飼養中隨機取不同階段 45 隻共 90 隻實驗，以上一個步驟 2 的方法進行實驗分組與測量。

(2) 統計野生、人工與重建前後，共四種不同環境，求蓑巢長是幼蟲長的倍率=  $\frac{\text{蓑巢長}}{\text{幼蟲長}}$   
、幼蟲重是蓑巢重的倍率=  $\frac{\text{幼蟲重}}{\text{蓑巢重}}$  進行分析。

##### 步驟 4. 幼蟲難道不會做出太大或太小的蓑巢嗎？因此進行蓑巢與幼蟲的交換實驗。

(1) 小體型幼蟲與中體型幼蟲互換蓑巢：分別取小體型、中體型的幼蟲與蓑巢進行測量，打開蓑巢後秤體重與蓑巢重，再把兩者互換，每隔 7 天分別進行測量，持續 35

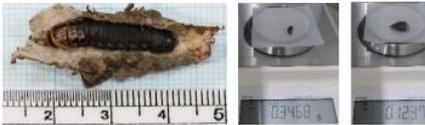
天共 5 次的測量。(如表一)

(2) 中體型幼蟲與大體型幼蟲互換蓑巢：分別取中體型與大體型互換，依步驟 4-(1)方法進行實驗測量，實驗共以 10 隻樣本為例實驗。(如表一)。

### 步驟 5. 幼蟲與蓑巢之間長度的比例實驗

根據上述步驟 2~步驟 4 實驗所獲得數據，以公式長度間的比例 =  $\frac{\text{蓑巢長} + \text{幼蟲長}}{\text{蓑巢長}}$ ，比較幼蟲(1)重建前蓑巢、(2)重建後蓑巢、(3)野生成長蓑巢、(4)人工飼養蓑巢、(5)互換蓑巢等五種不同環境下，幼蟲與所建造的蓑巢之間的比例關係。

表一、「小、中、大不同體型的幼蟲與蓑巢之間的互換」實驗操作步驟

小體型避債蛾				中體型避債蛾				
體長	體重	蓑巢長	蓑巢重	互換	體長	體重	蓑巢長	蓑巢重
0.65	0.0101	1.1	0.0055	↔	1.7	0.1522	2.5	0.0365
								
中體型避債蛾				大體型避債蛾				
體長	體重	蓑巢長	蓑巢重	互換	體長	體重	蓑巢長	蓑巢重
2.25	0.3468	3.4	0.1237	↔	3.3	1.0328	5.3	0.1293
2.4	0.5669	4.0	0.1076	↔	3.7	1.3408	5.7	0.2394
2.3	0.3796	3.5	0.0879	↔	3.8	1.4952	5.7	0.1927
								

## 研究二、探討『幼蟲如何利用蓑巢』進行防禦行為

### (一) 觀察：

我們看到避債蛾的蓑巢有 2 個開口，上方的開口較大，是幼蟲頭胸伸出的地方，稱為巢口。下方的開口較小，是糞便排出的地方，稱為排糞口。(如圖 2)



圖 2、蓑巢開口的觀察記錄。A、A-1 是幼蟲爬出來的開口。B、B-1 是糞便排出來的開口。

### (二) 提出疑問？

蓑巢 2 個開口這麼大，難道天敵不會從開口進去獵捕幼蟲嗎？幼蟲有防禦的對策嗎？

(三) 提出假設：幼蟲平時會把蓑巢口封起來，阻擋天敵進入。

#### (四) 動手實驗：

**實驗 2-1 假設天敵從『上方萼巢口入侵』，幼蟲的防禦行為實驗？**

**步驟 1. 拉力實驗與器材設計：**利用彈簧測力計、樂高、木板等，設計一組拉力計。

**步驟 2. 儀器操作測試方法：**分別將前、後方萼巢口用針線固定在自製拉力計的前後 2 端，當轉動後方樂高轉盤，使萼巢與拉力計向後拉，直到縮在裡面的萼巢口被拉出扯平為止，並記錄拉力計上的數值、測量萼巢重與幼蟲體重，以體長 2.3~3.8 cm 共 6 隻樣本進行實驗，每隻重複三次檢測(如圖 3)。

**步驟 3. 研究拉住巢口的構造：**用顯微鏡放大 50X，觀察抓住萼巢口的特徵與方式。



圖 3、天敵從萼巢口入侵實驗操作過程。A、設計一組拉力計。B、用顯微鏡觀察幼蟲構造。

**實驗 2-2 上述實驗，我們發現上方巢口雖然被封住，但是下方排糞口仍然是開著，天敵仍然有機會潛入，因此提出第二種假設，天敵從『下方萼巢口入侵』幼蟲的防禦實驗？**

**步驟 1. 第一次實驗：幼蟲『排放物的種類』與『酸鹼性』？**

- (1) 記錄幼蟲排放物有哪些種類？
- (2) 『實驗組：為幼蟲排放物』、『對照組：幼蟲吃的食物葉片汁液』，以 46 隻幼蟲的排放物放到 test paper(pH0-14) 進行酸鹼檢測。

**步驟 2. 第二次實驗：幼蟲的排放物對天敵螞蟻『有忌避』效果嗎？**

- (1) **實驗前檢測：**把乾燥 test paper 放在螞蟻出沒地，確定螞蟻對試紙沒有排斥行為。
- (2) **排放物對螞蟻忌避效果實驗：**把步驟 1 沾有排放物的 test paper，放在螞蟻出沒地，記錄螞蟻的反應，每種排放物進行三次實驗測試(如圖 4)。
- (3) **不同濃度的排放物對螞蟻忌避效果實驗：**①取 5ml 原液，進行濃度調配、②將 5ml 原液加入 45 ml 清水調成 1/10 濃度、③再從 1/10 濃度溶液中加入 45 ml 的清水調成 1/100 濃度，對照組也以此方式調配。④分別滴在螞蟻出沒地，求螞蟻忌避率(%)= $[1 - (\text{總數} - \text{忌避數量} / \text{總數})] \times 100\%$ 、忌避距離，每種濃度重複三次檢測。



圖 4、天敵從『下方萼巢口入侵』實驗操作過程。A、實驗前確定螞蟻對乾燥的 test paper 沒排斥行為。B、實驗組用 test paper 檢測箭頭指示的體液。C、利用 Ms pipette 吸取體液進行實驗。D、對照組是把大葉欖仁樹葉片搗碎後，再放上 test paper 檢測。

實驗 2-3 經由上述 2 個實驗，對於蓑巢上下 2 個開口，幼蟲都有防禦的方法，因此我們再提出第三種假設，如果『蓑巢被破壞』，幼蟲有何防禦行為？

步驟：當幼蟲處在無法進食的情況下，用剪刀剪開蓑巢，模擬蓑巢受到破壞。連續 7 天重複剪開蓑巢，並秤蓑巢重與幼蟲重，以體型接近的 5 隻幼蟲樣本進行實驗。

實驗 2-4 第四種假設，如果天敵『入侵蓑巢內』，幼蟲還有防禦的能力嗎？

步驟 1：『實驗組幼蟲受到干擾』：打開蓑巢用毛筆刷輕輕觸碰幼蟲身體，模擬天敵攻擊。

步驟 2：『對照組幼蟲沒有受干擾』：為觸碰前、後蓑巢長、幼蟲長，拍下照片匯入 ImageJ 軟體，計算身體變化，實驗中以 31 隻不同體型分 5 組，重複三次實驗。

### 研究三、探討蓑巢對『卵與初齡幼蟲』的防護

#### (一) 觀察：

110 年 9 月 1 日我們發現避債蛾把『卵產在蓑巢內的雌性蛹殼裡面』，因卵很小用顯微鏡 75X 觀察，看到卵是橙黃色、橢圓形，110 年 9 月 7 日記錄到卵孵化為初齡幼蟲(圖 5)。



圖 5、避債蛾產卵的位置與孵化。A、①雌性蛹殼，②卵被產在蛹殼裡面；B、橙黃色的卵粒，呈橢圓形；C、9 月 7 日卵孵化成為初齡幼蟲。

#### (二) 提出疑問？

觀察後我們產生 2 個疑問？第 1：卵產在蛹殼內有什麼好處？第 2：看到這麼多隻小幼蟲的孵化令我們震驚，當下曾想過這麼多小幼蟲聚集，難道不會引來天敵注意而來捕食嗎？

(三) 提出假設：卵在蛹殼內可獲得更安全的保護，孵化的小幼蟲也會做蓑巢防禦天敵。

(四) 動手實驗：實驗 3-1 卵產在『蛹殼內』受到何種保護實驗？

步驟 1. 儀器設計與卵被保護方式實驗：打開有卵的 2 個蓑巢，記錄卵受到那些構造保護

。再設計一組壓力計，用 ImageJ 軟體，計算蛹殼受壓面積，代入  $P = \frac{F}{A}$  分析。假

設 P 為外力對蓑巢造成的壓力；F 是蓑巢接受的外力；A 是蓑巢受壓的面積，求外加的施力是否造成蓑巢的變形，而影響到蓑巢裡面的卵。

步驟 2. 蛹殼保護下的「產卵數」與「孵化數」實驗：第一種估算法，利用 ImageJ 軟體，計算出卵的大小，再以蛹殼長×寬×高÷卵的大小，預估卵數量。第二種蓑巢計算法，讓剛孵化的初齡幼蟲建造好蓑巢後，計算蓑巢的數量，再往回推估卵的數量。

實驗 3-2 上述實驗確定卵被保護的方式，接著研究數量龐大的幼蟲如何離開蓑巢與防禦行為

步驟 1. 行為一、初齡幼蟲『離開雌性蓑巢』的實驗

(1) 在『無風』狀態下離巢：設計 1cm、10 cm、20 cm、30 cm 四種不同高度，模擬幼蟲碰到周圍不同高度的葉片障礙環境下的行為，各組用 30 隻共 120 隻進行實驗。

(2) 在『有風』情況下離巢：以方格紙護貝模擬初齡幼蟲體長與重量，同樣設計上述四種不同高度，分別用軟風(0.3-1.5m/s)、微風(3.4-5.4m/s)不同陣風吹襲，記錄 100 隻模擬幼蟲可能被吹離的距離，重覆進行三次實驗。

### 步驟 2. 行為二、初齡幼蟲『觸碰到地面或葉片後』的實驗

比較「無蓑巢」、「有蓑巢」的初齡幼蟲、蠶蛾、紋白蝶初齡幼蟲、螞蟻等四種昆蟲

每分鐘爬行距離，以公式  $a = \frac{S}{t}$  求爬行速度。以 10 隻初齡幼蟲重覆三次實驗。

步驟 3. 行為三、初齡幼蟲『停止爬行後』，記錄建造蓑巢花費的時間，以 10 隻進行實驗。

步驟 4. 行為四、初齡幼蟲在『有蓑巢』與『沒有蓑巢』情況下被捕食率實驗：各 50 隻隨意向 6 盆大葉欖仁樹盆栽上，每個盆栽有 20 隻螞蟻，記錄 3 天幼蟲的被捕食率。

## 研究四、探討幼蟲建造蓑巢對未來的『蛹體與成蟲』之防護

### (一) 觀察：

蛹是幼蟲成長後的下一個階段，我們觀察並比較 14 個熟齡幼蟲蓑巢與有蛹體的蓑巢，發現幼蟲要進入蛹的階段時，會把上方巢口與下方的排糞口封住。(圖 6)



圖 6：「蛹體與幼蟲」之間蓑巢外觀比較。A、B、C 左邊有蛹體的蓑巢，蓑巢口與排糞口都封閉，右邊有幼蟲的蓑巢，巢口與排糞口仍然打開，幼蟲身體可以伸出與排出糞便。

### (二) 提出疑問？

幼蟲除了封住 2 個開口之外，還有哪些防護措施能夠保護蛹體？

(三) 提出假設：幼蟲從外到內會吐絲進行防護，讓幼蟲能在蓑巢內安全的進行蛻變。

### (四) 動手實驗：

**實驗 4-1：研究要進入蛹期階段的幼蟲，在蓑巢『外面』與『裡面』所做的防護實驗？**

步驟 1. 蓑巢外、內的防護：比較結蛹期、熟齡幼蟲期在蓑巢『外面』的『絲束』、『裡面』的『絲絨』的差異。

步驟 2. 蓑巢外『絲束的負重』實驗：把結蛹期、熟齡幼蟲期蓑巢上的絲束綁上絲線，分別用 1g、5g、10g、20g、50g、100g 的砝碼秤重，另外用腳抓住葉片的形式負重當『對照組』，以 19 隻樣本做實驗。

步驟 3. 蓑巢內『絲絨承受外力』的實驗：用實驗三所設計的壓力計，去測量蓑巢能承受的壓力，把所拍攝的照片放到 ImageJ 軟體，計算受壓的面積，代入  $P = F/A$  分析。

**實驗 4-2：蓑巢對雌、雄蛹體『羽化』蛻變為『成蟲』的防護實驗？**

步驟 1. 測量雌、雄蛹體蠕動速度：以雌、雄各 3 隻蛹體，進行每分鐘三次重覆實驗。

步驟 2. 觀察蛹體構造、蓑巢內絲絨、羽化成蟲三者之間的關係：使用顯微鏡 400X 觀察，去證明為何雄蛹要在蓑巢外羽化，而雌蛹卻留在蓑巢內羽化，共 25 隻蛹體進行實驗。

## 陸、研究結果

### 研究一、避債蛾幼蟲會『離開蓑巢嗎？會重建蓑巢嗎』結果分析？

1. 環境中濕度超過 80%以上與重壓蓑巢，幼蟲會跑出蓑巢外，但溫度上升不會離巢(表二)。

表二、環境改變後「避債蛾幼蟲離巢行為」結果與圖照(單位：隻)

	濕度改變( $n=39$ )	溫度改變( $n=10$ )	重壓蓑巢 ( $n=10$ )
幼蟲行為	初齡蟲與熟齡蟲都會因蓑巢潮濕而離開蓑巢。	不會離巢，但會噴出大量體液(箭頭指出)。	蓑巢一旦被重物壓住，幼蟲因行走會離開蓑巢。
結果圖照	 幼蟲離開蓑巢	 高溫排出體液痕跡	 幼蟲離開蓑巢

2. 濕度增加後，幼蟲會跑出蓑巢外之結果如圖 7 所示：

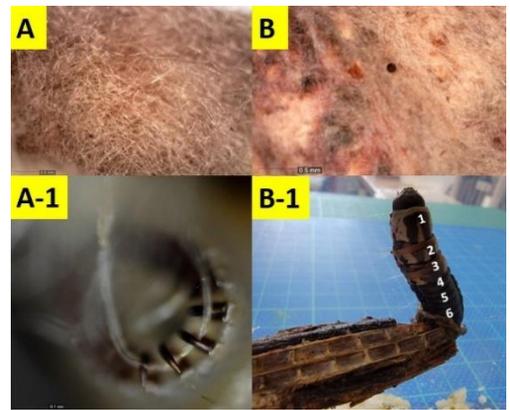
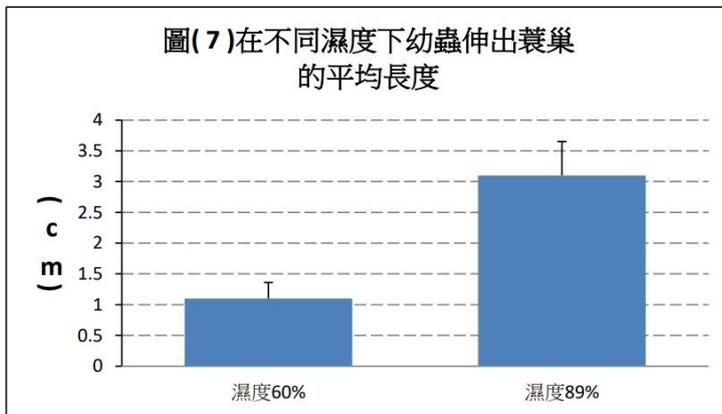


圖 7. 濕度平均在 60% 間蓑巢內絲線蓬鬆(圖 A)，幼蟲頭胸平均伸出  $1.1 \pm 0.26$  cm，腹足可以勾住蓑巢內的絲線(A-1)，而帶著蓑巢走。但是當環境中平均濕度在 89% 時，蓑巢潮濕，內部絲線全都緊密黏在一起(圖 B)，幼蟲爬行時因腹足勾不到絲線，導致身體不斷向前伸展平均  $3.1 \pm 0.55$  cm(B-1)，而掉到蓑巢外面( $n=39$ )。

3. 幼蟲重建蓑巢結果分析：不管幼蟲體型與蓑巢大小，經過 21 天三次實驗，幼蟲離開蓑巢後，3 次都成功重新做了新蓑巢，其中，體型越小、重做能力越強，體長、體重、蓑巢長、蓑巢重都越來越大。體型越大、重做蓑巢能力越弱。結果如表三、表四所示：

表三、幼蟲重建蓑巢前、後「體長」與「蓑巢長」平均長度結果(單位：cm)

	第一組( $n=6$ )		第二組( $n=4$ )		第三組( $n=3$ )		第四組( $n=8$ )		第五組( $n=6$ )	
	體長	蓑巢長								
重建前	$0.33 \pm 0.06$	$0.49 \pm 0.1$	$1.7 \pm 0.08$	$2.6 \pm 0.1$	$2.17 \pm 0.45$	$3.53 \pm 0.5$	$2.71 \pm 0.43$	$4.28 \pm 0.7$	$3.19 \pm 0.25$	$5.06 \pm 0.4$
第 7 天	$0.78 \pm 0.13$	$1.26 \pm 0.3$	$2.01 \pm 0.47$	$3.05 \pm 0.8$	$2.43 \pm 0.33$	$4.2 \pm 0.3$	$3.2 \pm 0.38$	$5.03 \pm 0.9$	$3.47 \pm 0.27$	$5.5 \pm 0.5$
第 14 天	$1.46 \pm 0.4$	$2.23 \pm 0.4$	$1.9 \pm 0.27$	$2.68 \pm 0.2$	$2.42 \pm 0.19$	$3.85 \pm 0.8$	$3.36 \pm 0.42$	$5.43 \pm 0.6$	$3.36 \pm 0.34$	$4.56 \pm 0.9$
第 21 天	$2.01 \pm 0.4$	$3.51 \pm 0.6$	$2.4 \pm 0.55$	$3.8 \pm 0.6$	$2.82 \pm 0.28$	$4.1 \pm 0.26$	$2.79 \pm 0.59$	$4.13 \pm 1.2$	$2.96 \pm 0.54$	$4.42 \pm 0.9$

表四、幼蟲重建蓑巢前、後「體重」與「蓑巢重」平均重量結果(單位：g)

	第一組(n=6)		第二組(n=4)		第三組(n=3)		第四組(n=8)		第五組(n=6)	
	體重	蓑巢重	體重	蓑巢重	體重	蓑巢重	體重	蓑巢重	體重	蓑巢重
重建前	0.0025±0.002	0.001±0.003	0.1387±0.041	0.0701±0.037	0.2698±0.09	0.1151±0.05	0.5089±0.19	0.1092±0.04	0.6848±0.11	0.172±0.1
第 7 天	0.0187±0.07	0.0095±0.004	0.2261±0.116	0.1434±0.069	0.3635±0.13	0.1547±0.03	0.7568±0.24	0.2328±0.16	0.8892±0.21	0.2552±0.06
第 14 天	0.0979±0.06	0.0423±0.03	0.2128±0.07	0.0719±0.027	0.4255±0.12	0.1221±0.06	0.8306±0.32	0.2035±0.09	0.7226±0.22	0.2212±0.1
第 21 天	0.197±0.08	0.0791±0.03	0.3901±0.183	0.1776±0.129	0.4906±0.11	0.1426±0.03	0.6514±0.31	0.1711±0.08	0.7204±0.24	0.2326±0.16

4. 重建蓑巢過程，幼蟲體長、體重、蓑巢長、蓑巢重的結果分析：

- (1) 幼蟲在重建過程中，仍然不斷的攝食與成長，在第 14 天與第 21 天，遇到了脫皮蛻變的過程，相關的體長、體重與蓑巢的大小成長會暫停而遞減(圖 a,b,c,d)。一旦完成脫皮後，成長與蓑巢建造的行為就會繼續進行(n=27)。
- (2) 21 天的實驗，幼蟲雖然三度失去蓑巢，卻都能順利完成建造新的蓑巢。平均體長、體重與蓑巢大小持續增加(圖 e,f,g,h)。圖 i 箭頭所指為要脫皮的幼蟲特徵(n=27)。

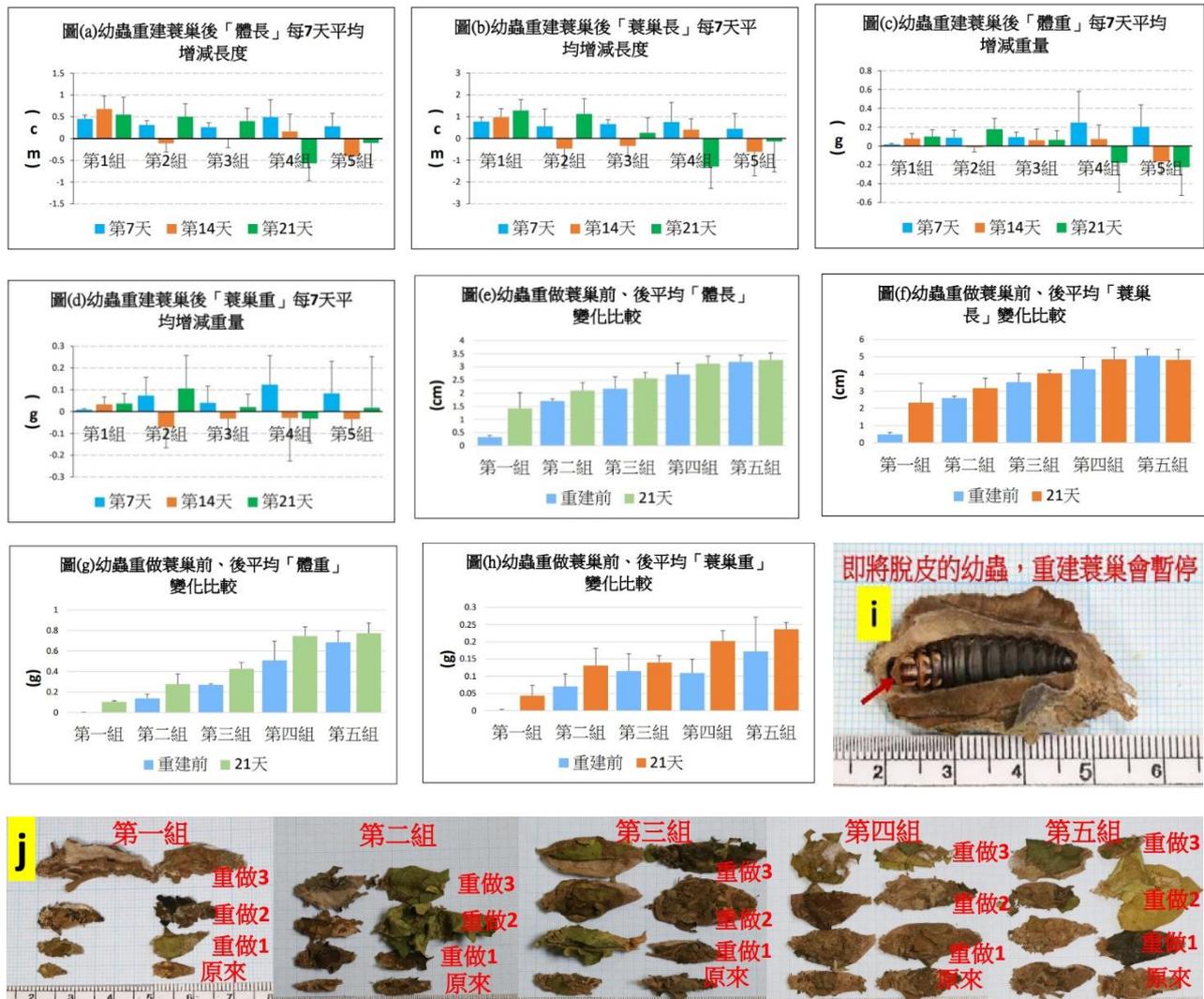
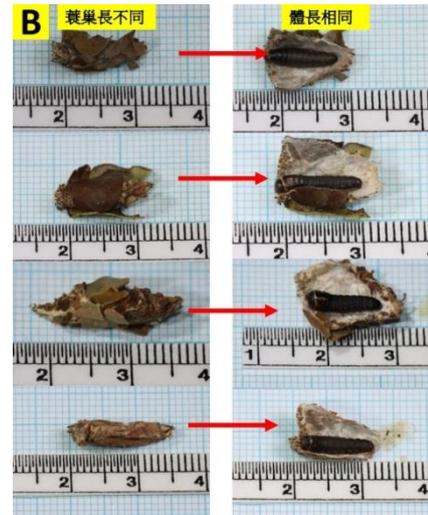
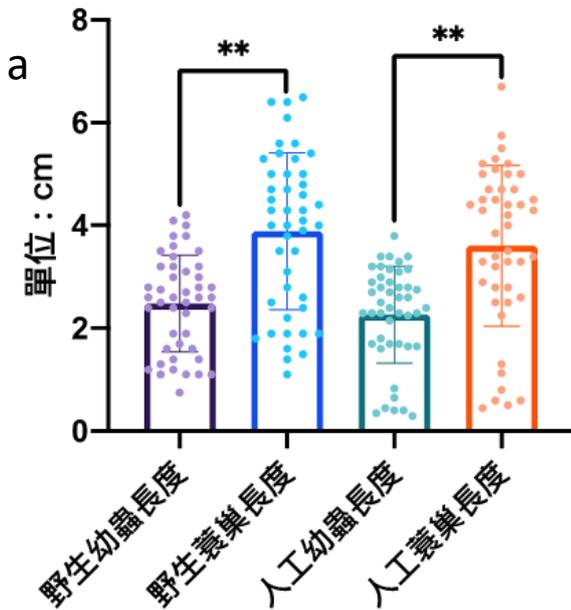


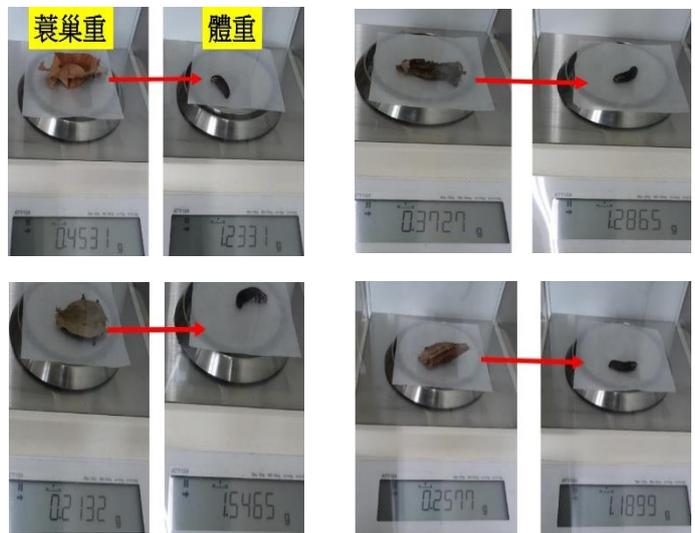
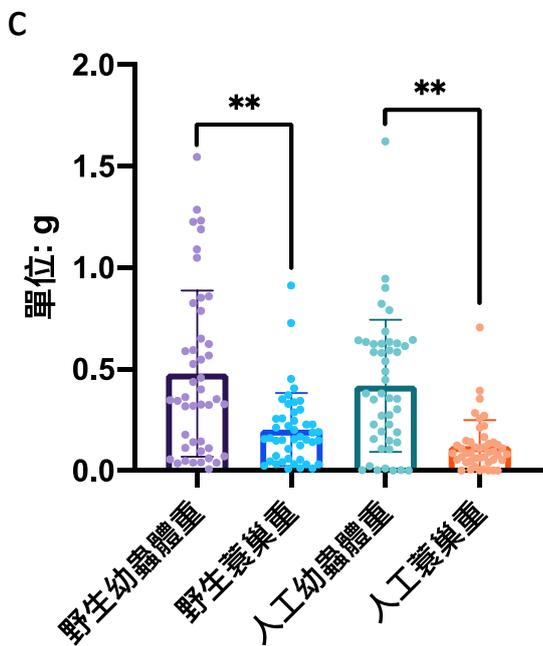
圖 j 為小、中、大五組不同體型，每組三次都成功重建新蓑巢的結果。

5. 不同環境下幼蟲與蓑巢之間的關係結果分析：

(1) 幼蟲長與蓑巢長、幼蟲重與蓑巢重的結果：

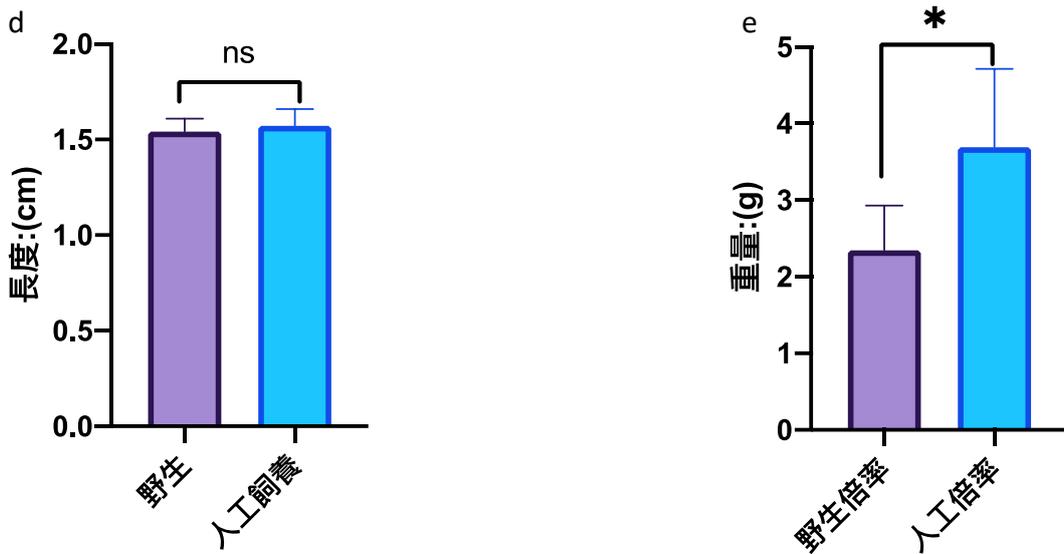


圖(8-a、B) 不管是野生或人工飼養的幼蟲，從初齡到熟齡體長平均分別為  $2.482 \pm 0.9417\text{cm}$ 、 $2.267 \pm 1.565\text{cm}$ ，而建造的蓑巢長平均為  $3.889 \pm 1.524\text{cm}$ 、 $3.607 \pm 0.9448\text{cm}$  (圖 8-a)，顯示幼蟲體型越大，蓑巢會越做越大趨勢，但是同體型的幼蟲，所做的蓑巢不一定會一樣大，體長與所建造的蓑巢長度之間， $p < ** 0.05$  有非常顯著的差異 (n=90)。



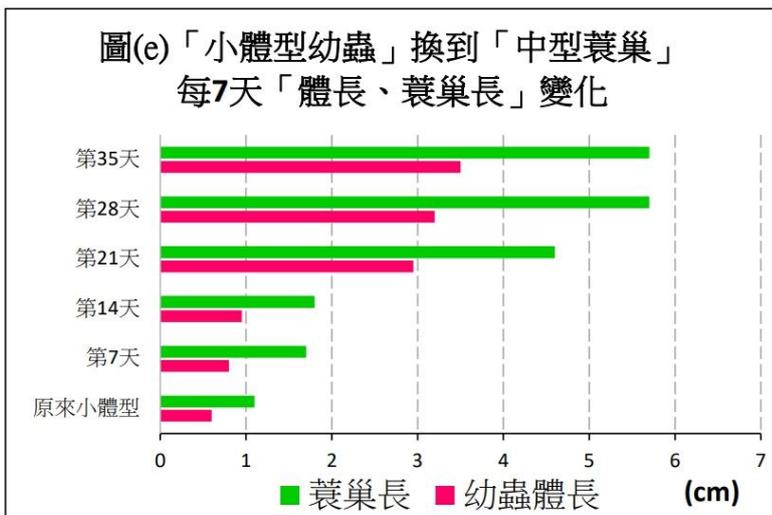
圖(8-c) 關於初齡到熟齡體重平均分別為  $0.4786 \pm 0.4087\text{g}$ 、 $0.4186 \pm 0.3262\text{g}$ ，蓑巢重平均為  $0.2026 \pm 0.1798\text{g}$ 、 $0.1207 \pm 0.1281\text{g}$ ，顯示幼蟲體重 > 蓑巢重，即使體重增加，所做的蓑巢並不會越來越重， $p < ** 0.05$  有非常顯著性差異 (n=90)。

(2) 蓑巢長與幼蟲體長之間的倍率、幼蟲重與蓑巢重之間的倍率結果：

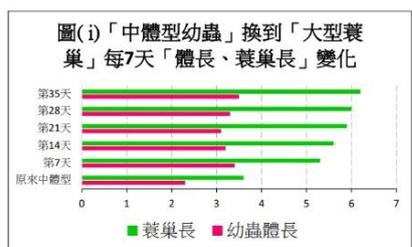
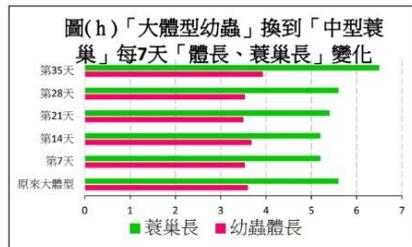


圖(8-d) 不管在何種環境下與體型大小不同的幼蟲，牠們所做的「**蓑巢長度是幼蟲體長的**」 $1.542 \pm 0.07$  倍~ $1.572 \pm 0.09$  倍，兩者之間沒有顯著性差異( $n=90$ )；圖(8-e)而「**幼蟲體重是蓑巢重的**」 $2.348 \pm 0.58$  倍~ $3.692 \pm 1.02$  倍， $p < * 0.05$  具顯著性差異 ( $n=90$ )。

### 6. 蓑巢與幼蟲的交換實驗結果分析：(圖 9-e~9-i)

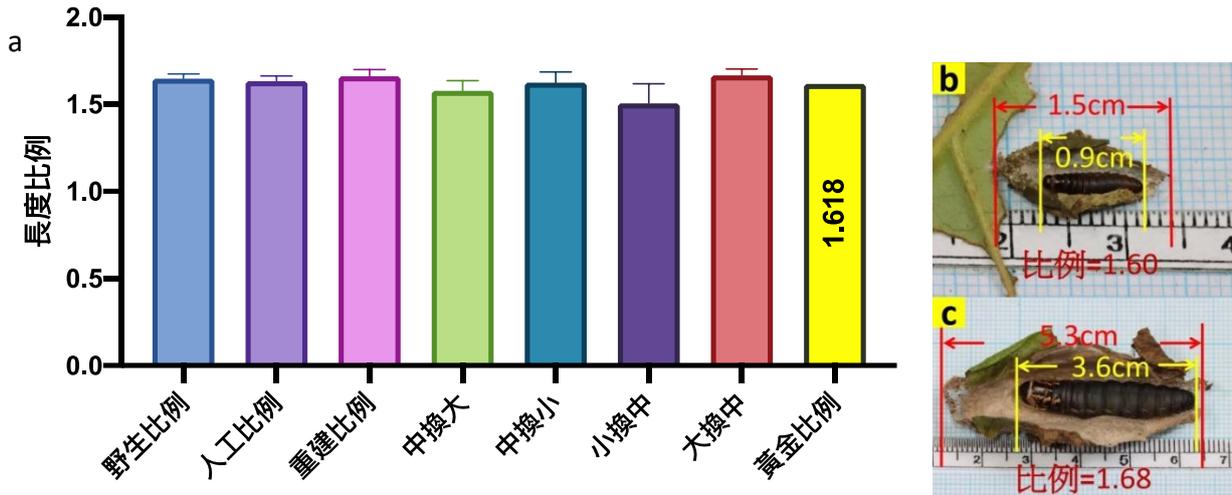


圖(e)、小幼蟲換到中蓑巢後，會在裡面重新再做一個適合體長的**雙蓑巢**；圖(f)為 35 天不同體型幼蟲交換蓑巢後，每隔 7 天體長與蓑巢長增長的過程( $n=10$ )。



圖(g、h、i)不管何種體型幼蟲換到大小不同的蓑巢後，體長與蓑巢長都有明顯增長的跡象。

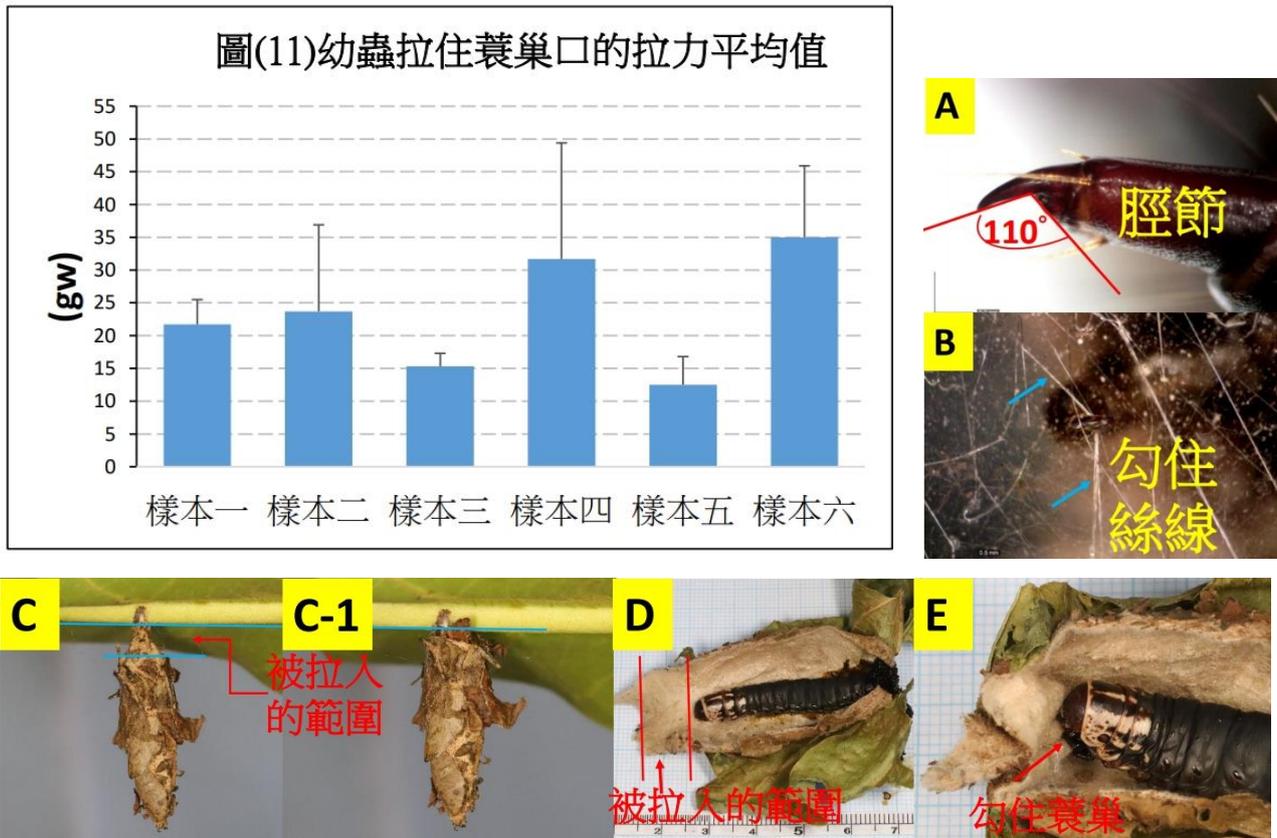
7. 蓑巢長度與幼蟲長度之間的比例關係結果分析：



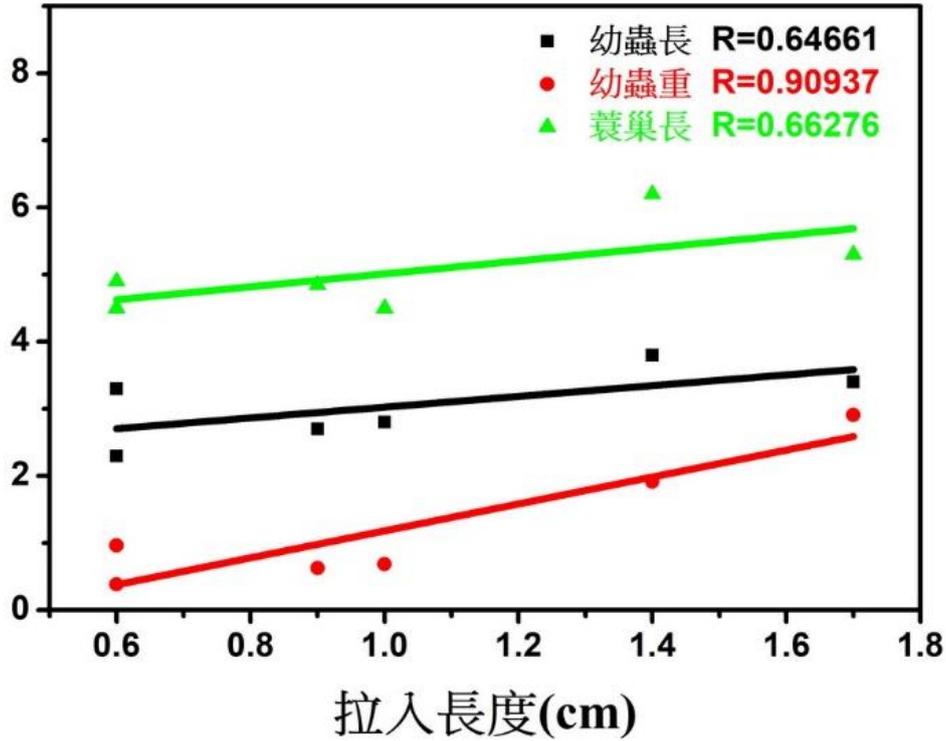
圖(10-a)根據多次實驗結果，我們發現野生環境下幼蟲自然做的蓑巢、人工飼養下幼蟲做的蓑巢、幼蟲重新做的蓑巢、各種不同體型幼蟲互換蓑巢下，幼蟲做的蓑巢大小跟自己體型大小比例，有 95%接近黃金比例的 1.618 值。(n=121)

研究二、探討『幼蟲如何利用蓑巢』進行防禦行為實驗結果

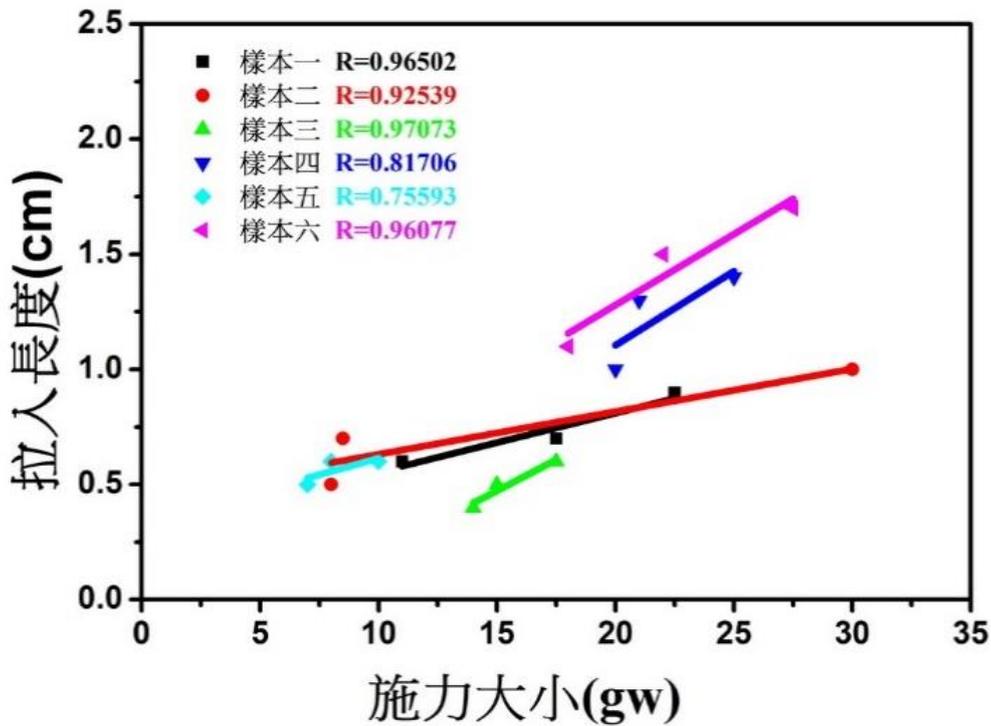
1. 實驗 2-1 假設天敵從『上方蓑巢口入侵』，結果分析：



圖(11)幼蟲每次拉住蓑巢的力量都不同，平均為  $12.5 \pm 4.3 \sim 35 \pm 10.9 \text{gw}$ ；圖 A 是幼蟲腳部脛節末端爪狀呈  $110^\circ$ 、圖 B 勾住絲線時呈現一股拉力；圖 C 休息狀態、圖 C-1 受到干擾，腳勾住蓑巢，讓蓑巢貼住主葉脈、圖 D 打開蓑巢後，幼蟲休息狀態、圖 E 幼蟲把蓑巢向內拉入。



圖(12)幼蟲拉入蓑巢與體長間為中度相關，而與體重為高度相關。可推測當體長越長或體重越重，拉入的長度有越長的趨勢(n=6)。

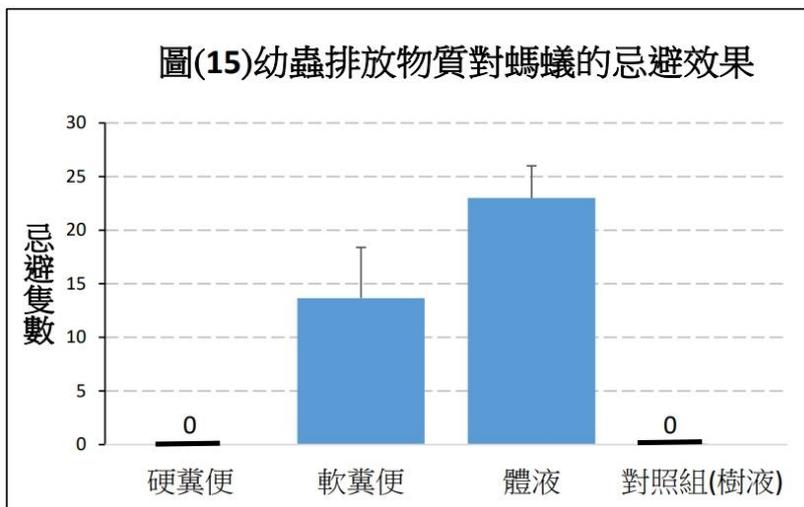


圖(13)幼蟲施力與被拉入長度間成正比，當幼蟲的施力越大被拉入的蓑巢也越長。天敵要從這進入至少要施力  $15.3 \pm 2.0 \sim 35.0 \pm 10.9$  gw 的力量，才能打開巢口，因此幼蟲把巢口往蓑巢裡面拉，能達到一定的阻擋效果(n=6)。

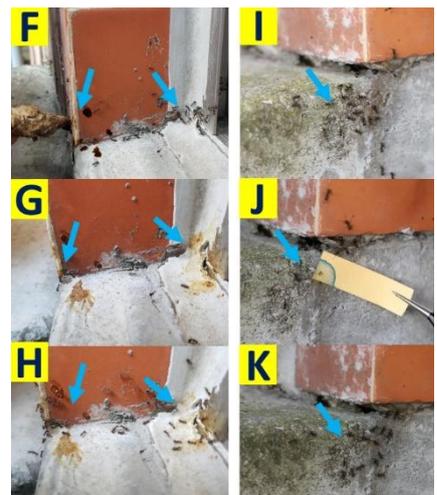
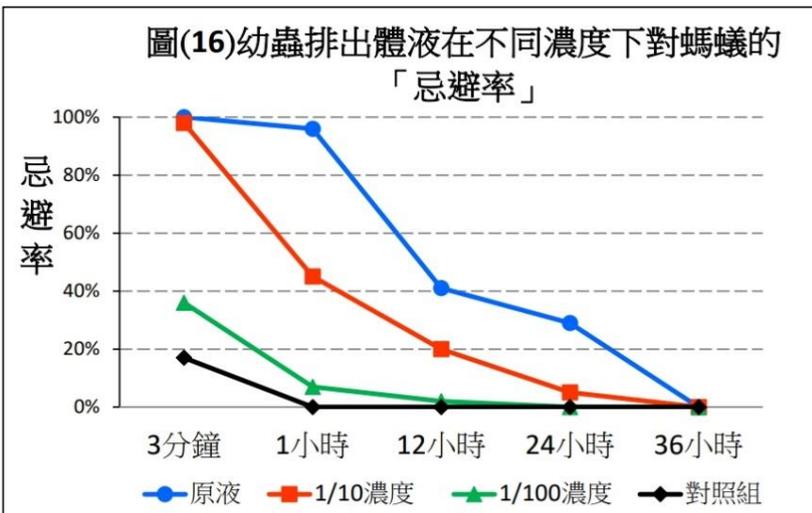
2. 實驗 2-2 假設天敵從「下方蓑巢口入侵」，結果分析：



圖(14)A 避債蛾幼蟲從下方蓑巢口排出(1)硬糞便→(2) 帶有軟糞混體液→(3)體液；圖 B 如果強行移走幼蟲還會從大顎吐出體液；圖 C 檢測體液部分呈現藍色，證明體液含少許鹼性成分；圖 D 實驗組，全呈現藍色線條，而右邊以大葉欖仁葉片汁液的對照組對試紙沒有反應。



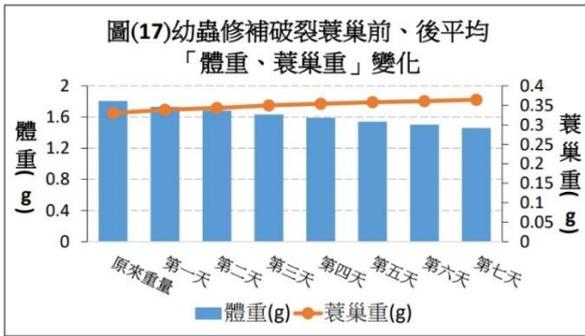
圖(15)幼蟲排放的軟糞便與體液對螞蟻有忌避的效果；圖 E 硬糞便對螞蟻不會產生影響，且還會移走硬糞便；圖 F 顯示螞蟻停止前進後、紛紛走避，說明體液對螞蟻有忌避效果 (n=36)。



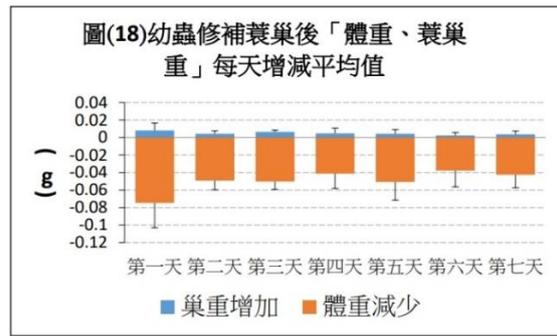
圖(16)顯示幼蟲的體液對螞蟻的忌避效果，會隨著時間而減落，濃度越低、效果也越差，到了 36 小時，已經對螞蟻沒有忌避效果(n=80)；圖 F 箭頭指塗上體液；圖 G 箭頭指出螞蟻全跑走；圖 H 經過 36 小時後，牆壁上雖然殘留體液痕跡，但體液已經完全揮發，看見螞蟻全回來了。圖 I~K 螞蟻聞到體液的鹼性味道，紛紛走散，經過 36 小時後，螞蟻又回來過程。

### 3. 實驗 2-3 假設天敵『破壞蓑巢』，結果分析：

(1) 當蓑巢被外力破壞：



圖(17)顯示幼蟲修補蓑巢，體重逐漸減少，蓑巢重量逐漸增加(n=5)。

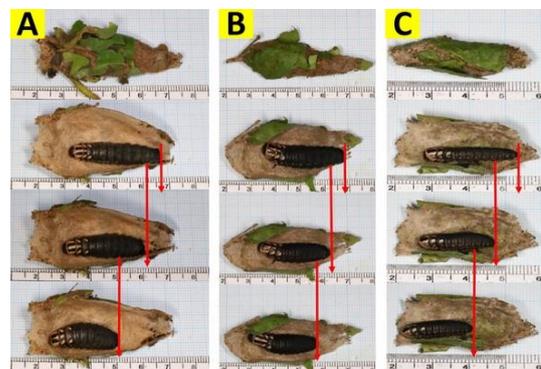


圖(18)第一天體重減少最多，推測消耗能量最多；同時獲得最多修補，重量增加(n=5)。

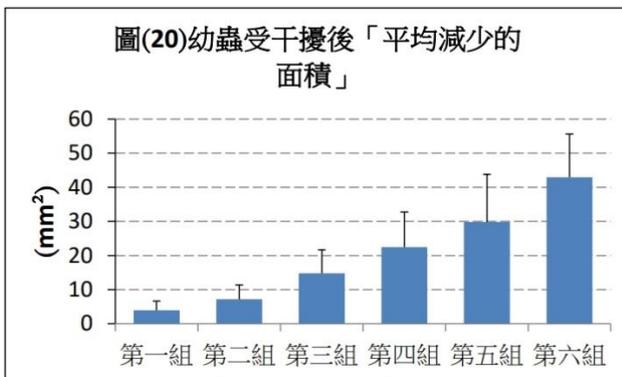


圖 A 蓑巢被打開；圖 B 箭頭指幼蟲修補後留下一條修補痕跡；圖 C、D 修補前體重為 1.0686g，經過 7 天修補，體重剩 0.8538g。

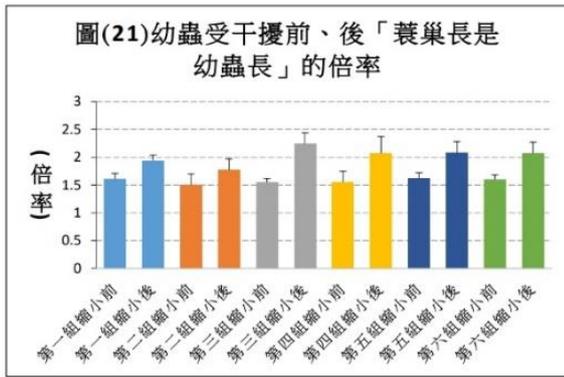
### 4. 實驗 2-4 假設天敵『已經侵入蓑巢內』，結果分析：



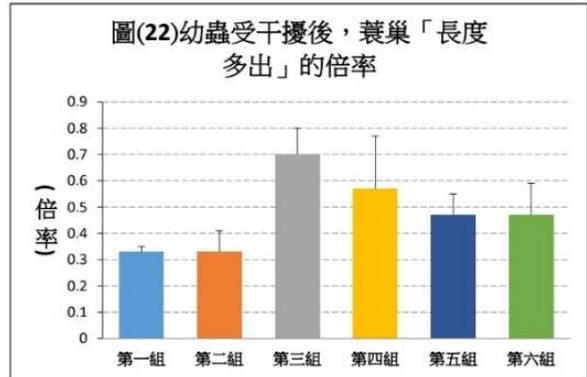
圖(19)幼蟲遇干擾，不同體型縮小範圍從  $0.19 \pm 0.02 \sim 0.92 \pm 0.23 \text{cm}$ 。圖 A、B、C 體長縮小圖。(n=31)



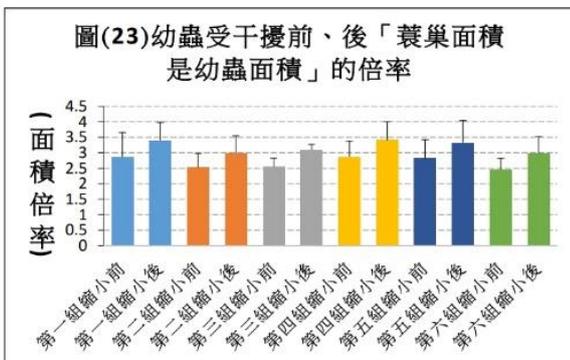
圖(20)幼蟲遇干擾，不同體型面積縮小  $3.93 \pm 2.73 \sim 42.96 \pm 12.68 \text{mm}^2$ 。圖 D~F 面積縮小(n=31)。



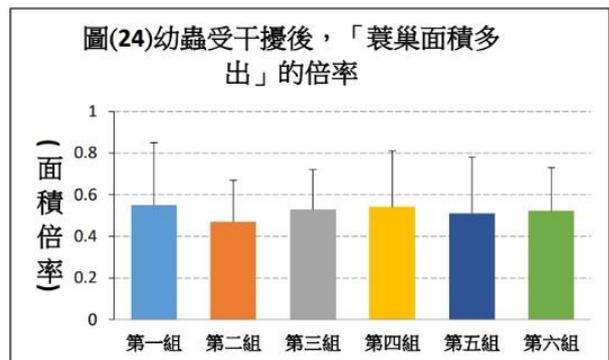
圖(21) 蓑巢長度是幼蟲體長的倍率從  $1.5 \pm 0.2$  倍，增加到  $2.24 \pm 0.2$  倍(n=31)。



圖(22) 受到干擾後蓑巢長度倍率多出  $0.33 \pm 0.02 \sim 0.7 \pm 0.12$  倍(n=31)。



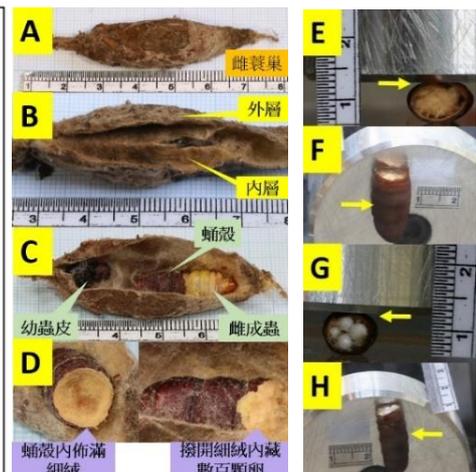
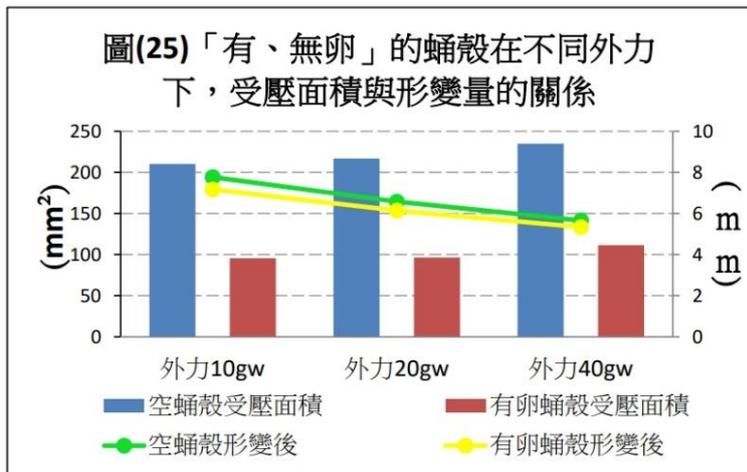
圖(23)蓑巢面積是幼蟲面積的倍率從  $2.46 \pm 0.3$  倍，增加到  $3.41 \pm 0.5$  倍(n=31)。



圖(24)受干擾後，蓑巢面積倍率多出  $0.47 \pm 0.2 \sim 0.55 \pm 0.3$  倍(n=31)。

### 三、研究蓑巢對『卵與初齡幼蟲』的防護結果

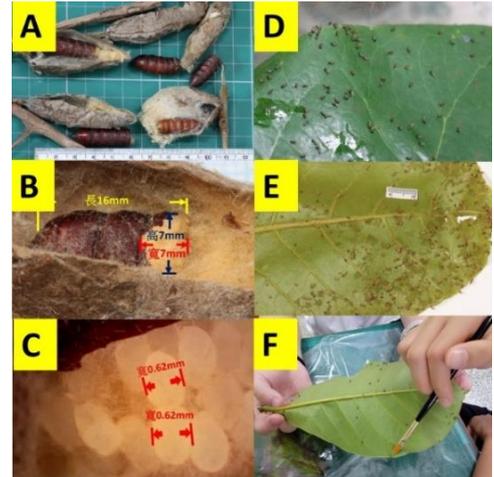
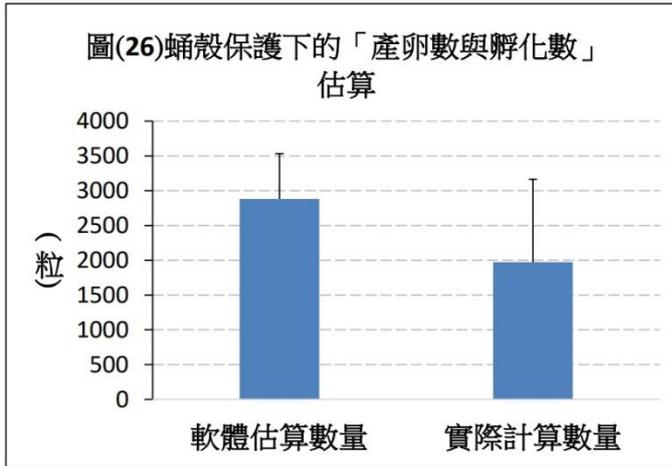
#### 1. 卵產在蛹殼內受到何種保護，實驗結果分析：



圖(25)當外力施加在蓑巢時，因為『**蛹殼形變量不大**』，而降低了外力對卵的傷害。

圖 A~D 從外到內，卵受到蓑巢→內層絲絨→蛹殼→細絨保護。圖 E、F 為蛹殼的形變量與受壓面積的改變；圖 G、H 為模擬有卵蛹殼的形變量與受壓面積的改變。

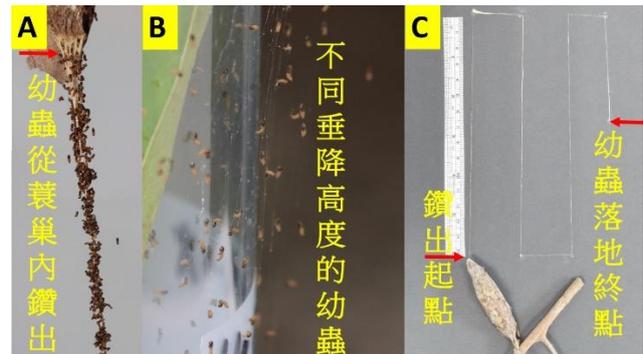
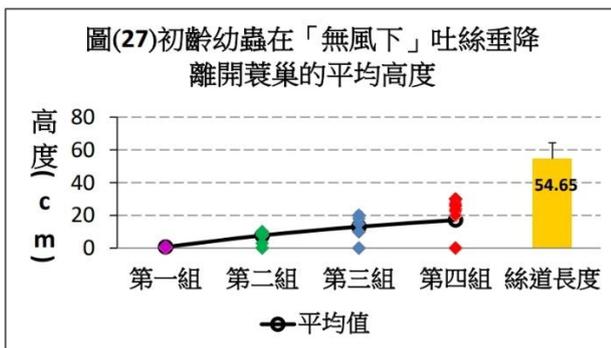
## 2. 蛹殼保護下卵的數量與孵化數，實驗結果分析：



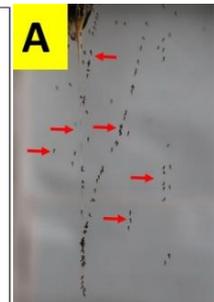
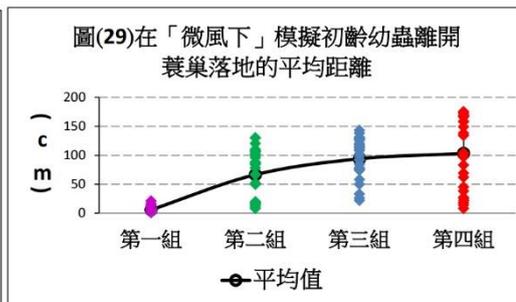
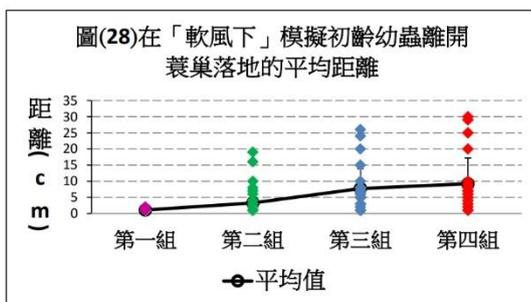
圖(26)軟體預估產卵平均數為  $2881 \pm 650$  粒，孵化的幼蟲且已做好蓑巢數目，平均為  $1971 \pm 1193$  隻，我們推估卵的數量約有 1971 粒( $n=7$ )。圖 A 取 5 隻雌蟲卵殼；圖 B、C 利用 ImageJ 軟體計算大小，卵約 0.62mm；圖 D 孵化後放在葉片；圖 E、F 幼蟲做好蓑巢計算數量。

## 2. 初齡幼蟲防禦的方式，實驗結果分析：

(1) 初齡幼蟲離開蓑巢的方式結果：(1)破卵殼→(2)鑽出蓑巢→(3)吐絲垂降落地。



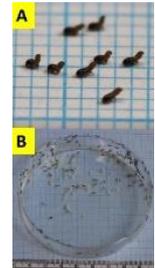
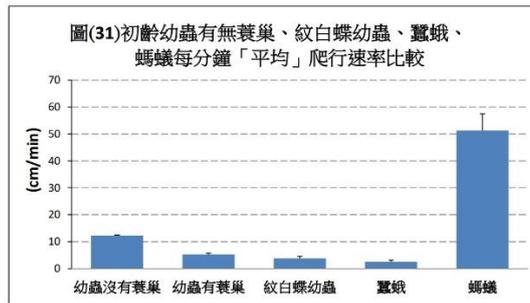
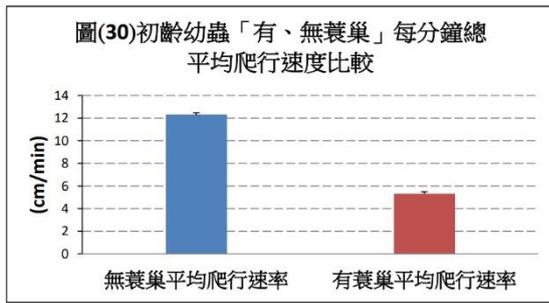
圖(27)、A、B、C 在無風情況下，上千隻的幼蟲平均形成一條長 54.65cm 的絲線向下垂降，幼蟲沿著絲線離開；但是過程中只要碰到葉片或其他障礙物平均以  $0.75 \pm 0.4 \sim 17.1 \pm 11$ cm 就提前落地，分散離開( $n=120$ )。



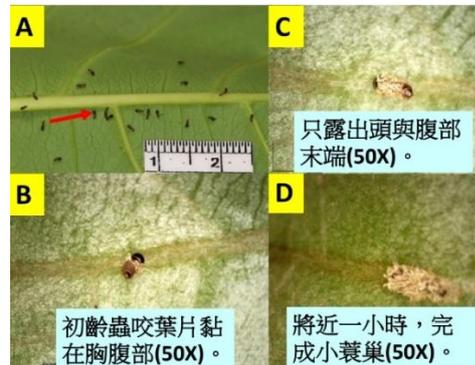
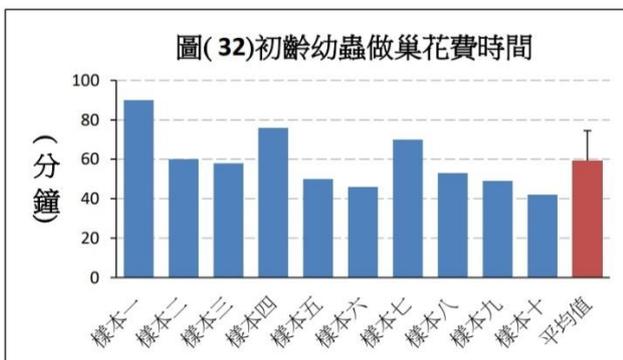
圖(28、29)遇到軟風、微風，幼蟲可能被吹到  $1.1 \pm 0.27 \sim 9.2 \pm 8.0$ cm 與  $5.8 \pm 4.6 \sim 103 \pm 62$ cm；圖 A 不同風速幼蟲垂降的絲道被吹散成數條，幼蟲也因此會被帶離，散落到各地( $n=100$ )。

## (2) 初齡幼蟲接觸地面後的防禦結果分析：

初齡幼蟲接觸到地面後的行為順序：(1)快速爬行→(2)建造蓑巢→(3)帶蓑巢攝食與爬行。

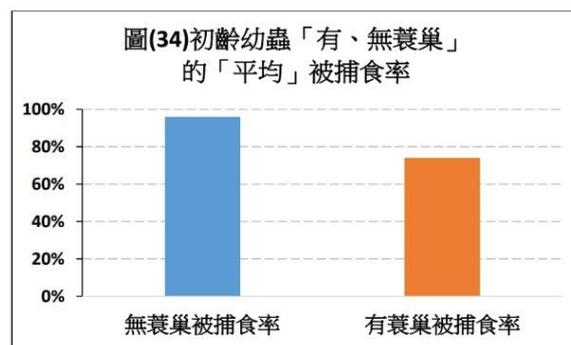
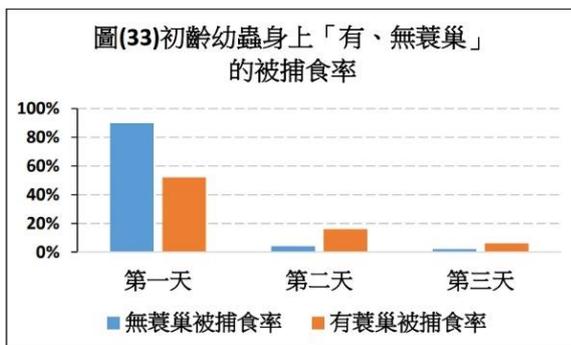


圖(30)無蓑巢的幼蟲每分鐘爬行  $12.28 \pm 0.18 \text{ cm}$ ，但是當蓑巢建好之後，每分鐘只爬  $5.3 \pm 0.44 \text{ cm}$  ( $n=20$ )；圖 31 爬行速度快慢比較，螞蟻>無蓑巢幼蟲>有蓑巢幼蟲>紋白蝶幼蟲>蠶蛾初齡幼蟲 ( $n=50$ )。



圖(32)初齡幼蟲平均花費  $59.4 \pm 15.1 \text{ min}$  就做好一個蓑巢；圖 A~D 初齡蟲做蓑巢過程。

## (3) 初齡幼蟲有、無蓑巢的防禦分析：



圖(33)第二天有蓑巢後被捕食率降低；圖(34)有蓑巢的被捕食率從 96% 降到 74% ( $n=100$ )。

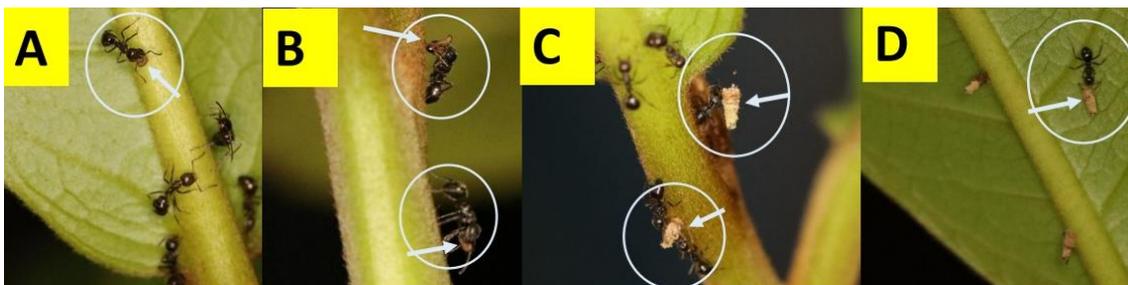


圖 A、B 沒有蓑巢的幼蟲遭螞蟻捕食；圖 C、D 初齡蟲雖有蓑巢保護但仍會遭到螞蟻捕食。

## 實驗過後的疑問與想法？

經由上述實驗，我們產生了一些疑問，為什麼幼蟲做蓑巢，被捕食率就會降低？根據研究 2-2 獲得的實驗結果，幼蟲排出的體液對螞蟻有忌避效果，如果改用不同葉片餵養，排出體液同樣具有忌避效果嗎？再把體液塗抹在初齡蟲身體或蓑巢表面上，能提升生存率嗎？

## 再次實驗，解決疑問？

提出新假設：初齡幼蟲「做蓑巢+體液」，能增加生存率。

**步驟 1. 初齡蟲利用蓑巢降低被捕食率策略：**記錄幼蟲帶蓑巢垂降逃離、及模擬螞蟻大顎夾住蓑巢時，幼蟲拋棄蓑巢垂降逃離的可能性。各以 5 隻共 10 隻幼蟲，重複 6 次實驗。

**步驟 2. 塗抹體液與不同種植物餵養：**分別在「無蓑巢與有蓑巢」的初齡幼蟲身上與蓑巢表面「塗抹體液」，分別使用 50 隻初齡幼蟲，各放到螞蟻出沒的春不老葉片上，統計 3 天後的被捕食率與生存率(如表五)。

## 再次實驗的結果：

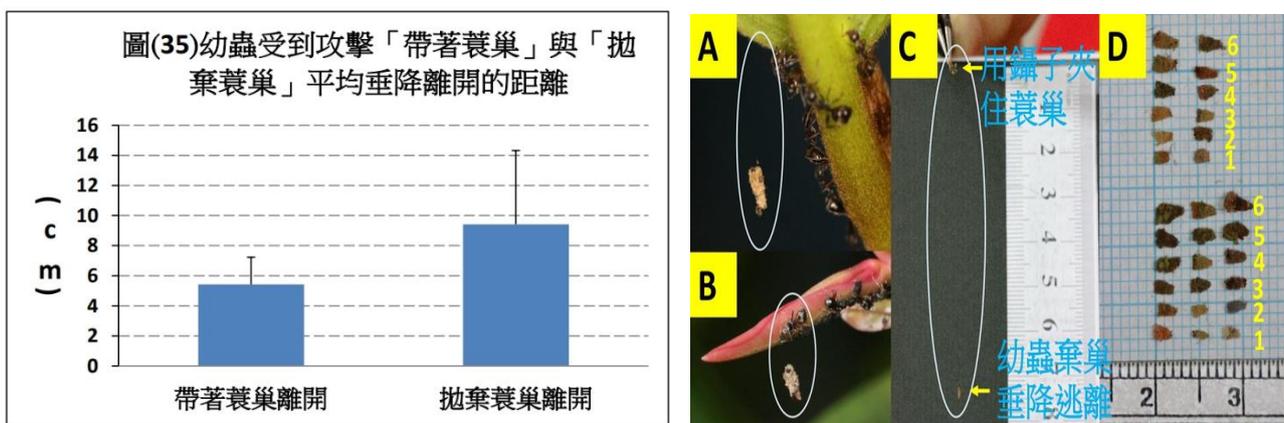


圖 35 當幼蟲受到攻擊，帶著蓑巢垂降 5.43±1.8cm 離開，如果蓑巢被螞蟻夾住，幼蟲會拋棄蓑巢彈跳吐絲以 9.42±4.9cm 離開。圖 A、B 幼蟲帶蓑巢垂降離開過程；圖 C 模擬蓑巢被螞蟻夾住，幼蟲拋棄蓑巢垂降離開；圖 D 幼蟲重做蓑巢後再遇到攻擊，重複 6 次實驗，幼蟲都會棄巢逃離。(N=10)

表五.初齡幼蟲「有無蓑巢」、「有無蓑巢+體液」被捕食結果(單位：隻)

	無蓑巢(n=50)		無蓑巢+體液(n=50)		有蓑巢(n=50)		有蓑巢+體液(n=50)	
	被捕食量	被捕食率	被捕食量	被捕食率	被捕食量	被捕食率	被捕食量	被捕食率
第一天	45	90%	17	34%	26	52%	5	10%
第二天	2	4%	9	18%	8	16%	1	2%
第三天	1	2%	7	14%	3	6%	0	0%



圖 A~C 螞蟻聞到體液都快速離開，幼蟲被捕食率降低了。圖 D 放到春不老葉片餵養的幼蟲，排出的體液同樣具有忌避效果，外加塗抹體液一個月後，多數幼蟲存活下來逐漸長大，也提高了生存率。

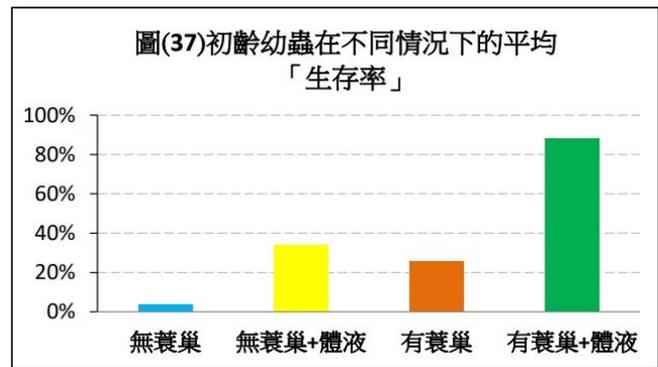
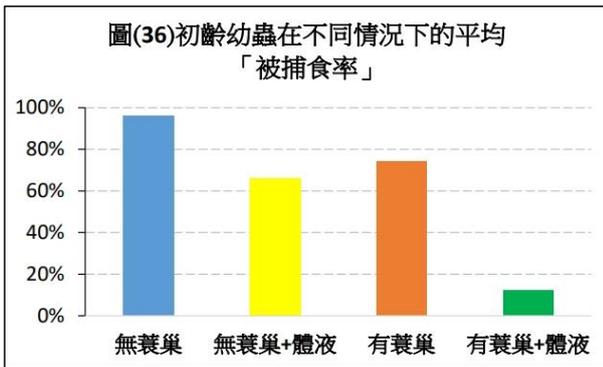


圖 36 塗抹體液後，無蓑巢的初齡蟲被捕食率降低 30%、有蓑巢的被捕食率降低 62%。 圖 37 塗上體液後，無蓑巢的初齡蟲生存率從上升 30%、有蓑巢生存率上升 62%。(n=200)

#### 研究四、幼蟲建造蓑巢對未來的『蛹體與成蟲』之防護的結果

##### 4-1(1) 絲束的特徵與承受負重的結果分析:

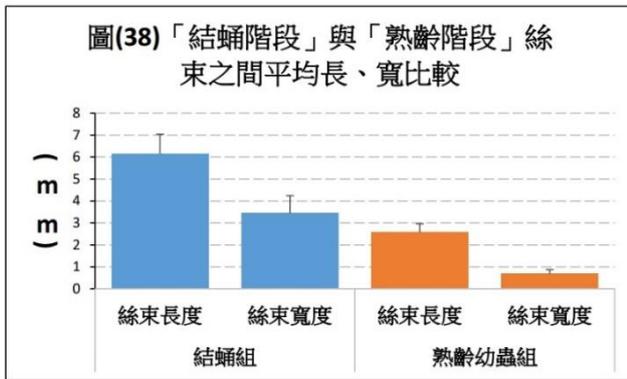
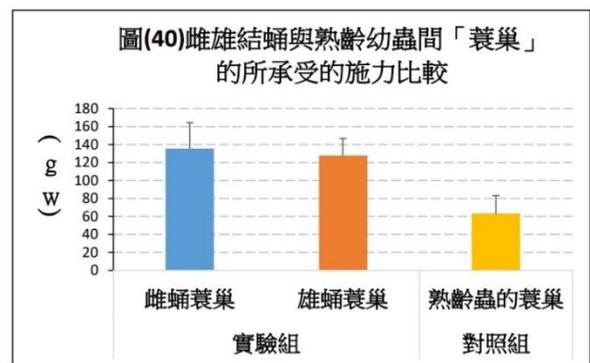
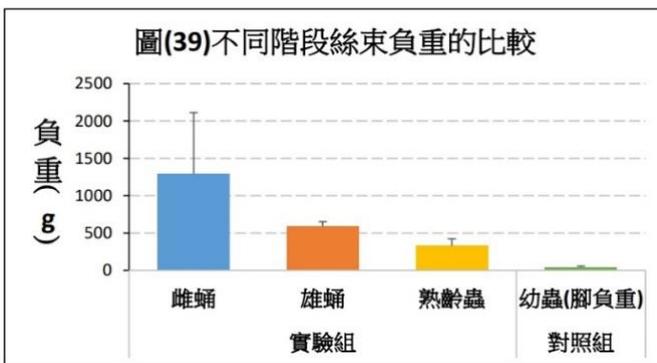


圖 38、A、B 要進入蛹期階段的幼蟲，在蓑巢「外面」吐出長  $6.41 \pm 0.9 \text{ mm}$ 、寬  $4.4 \pm 0.8 \text{ mm}$  的大絲束，長寬是熟齡蟲的 2 倍；圖 C、結蛹組的絲束，能夠承受數十個 5g、10g 砝碼重量，相較於圖 D 顯示，6 隻腳抓住葉片，只能承受幾個 1g、5g 小砝碼而已 (n=16)。



圖(39)雌蛹負重  $1292.2 \pm 821 \text{ g}$  最大、雄蛹負重  $589.3 \pm 63.5 \text{ g}$ 、熟齡幼蟲負重  $326 \pm 96.4 \text{ g}$ ，熟齡幼蟲腳的負重為  $42 \pm 15.1 \text{ g}$  負重最小，所以實驗組的結蛹幼蟲，能把蓑巢非常穩定的固定在枝條上，讓蓑巢不會掉落地面。(n=19)

圖(40)雌蛹與雄蛹蓑巢分別能承受  $135.74 \pm 28.6 \text{ gw}$ 、 $127.42 \pm 19.5 \text{ gw}$ ，熟齡蟲蓑巢只能承受  $62.92 \pm 20.3 \text{ gw}$ ，雌雄蛹蓑巢能承受較大的施力，蓑巢形變較小，推測與保護蛹體及未來蛻變成蟲、甚至保護交配後產下的卵粒都有關聯。(n=18)

## 實驗過後的疑問與想法？

為什麼在結蛹期的蓑巢可以承受較大的負重？我們再去觀察熟齡幼蟲期與結蛹期幼蟲行走時留下的絲線痕跡，發現兩者間有差異，因此推測這可能與承受較大的負重有關。如下圖



圖 A、B 熟齡蟲行走留下不纏繞的絲線；圖 C~E 結蛹期幼蟲留下重疊纏繞的緞帶絲線痕跡。再次實驗，解決疑問？

提出新假設：結蛹期的緞帶型絲線能夠穩固蓑巢，讓幼蟲安全的在蓑巢內蛻變成蛹體。

- 步驟 1. 利用 PicPick 圖片編輯器，描繪結蛹期幼蟲建造緞帶型絲線的路線。
- 步驟 2. 利用 ImageJ 軟體，求出結蛹期幼蟲建造的緞帶型絲線的長、寬。
- 步驟 3. 利用 GeoGebra 應用程式，模擬劃出緞帶型絲線形成的型態。

### 再次實驗的結果：

1. 結蛹期幼蟲佈下的緞帶型絲線，像許多數字 8 重疊再一起，如同一個「類伯努利雙扭線」。
2. 伯努利雙扭線主要由  $(x^2+y^2)^2=a^2(x^2-y^2)$  四次多項式表示，在直角坐標系下，假設半徑為  $a$  (指中心到最遠端點的距離)， $x$ 、 $y$  (分別代表在  $x$  軸上與  $y$  軸上的值)。當  $a=1$  時，我們可以求出雙扭線的高( $h$ )為  $\sqrt{2}/4$ 。

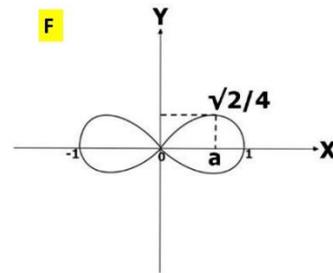


圖 F 模擬伯努利雙扭線

3. 我們依照結蛹期幼蟲佈下的緞帶型絲線，測量每一條絲半徑與扭線高，如下圖：

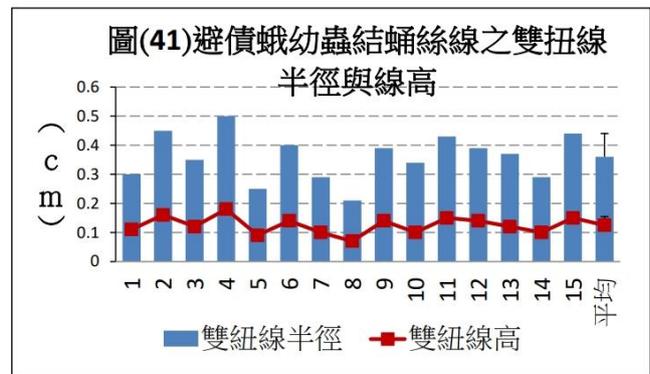
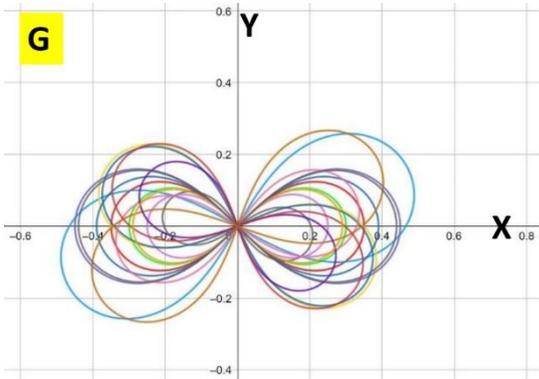


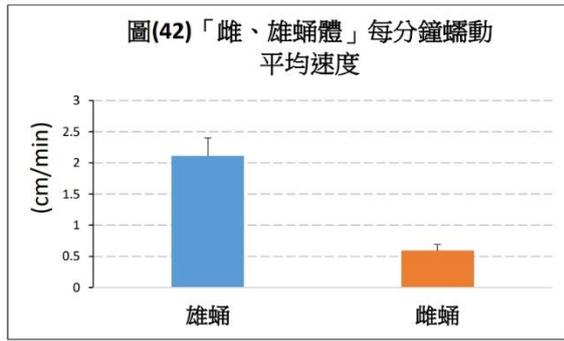
圖 G 結蛹期幼蟲吐的絲線，像多條「類伯努利雙扭線」，越接近中心點越多絲線纏繞。

圖 41 「類伯努利雙扭線」，隨著絲線的半徑越大、扭線高越高、絲線纏繞範圍越大。(n=15)



圖 H 準備進入結蛹期時的幼蟲，大量吐出 8 字型的類伯努利雙扭線，纏繞形成一條粗大絲線，即使在不同環境下，重疊的扭線仍然可形成強大的絲環，牢牢的把蓑巢固定在結蛹處。

4-2 (1) 「雄蛹鑽出蓑巢外羽化」而「雌蛹留在蓑巢內」蛻變為成蟲的結果「理由一」:



圖(42)雄性蛹體蠕動快速，能鑽出蓑巢外；圖 A、C 雄性蛹體除了快速蠕動之外，腹部還由外向內彎曲 100°，能夠勾住蓑巢內絲絨，最後蛹體只露出頭胸腹的 2~3 節於蓑巢之外；圖 B、D 雌蛹蠕動慢，彎曲角度只有 50°，因此只在蓑巢內羽化蛻變成蟲(n=6)。

表六、「雄蛹露出頭胸腹第 2~3 節」到蓑巢外，「雌蛹留在蓑巢內」羽化的結果「理由二」: 雄蛹腹部各節有上、下腹鉤，經由快速蠕動而勾住絲絨，讓雄蛹停止在蓑巢外羽化成蟲。雌蛹蠕動較慢，腹鉤又不凸出，比較無法勾住絲絨，因此會停留在蓑巢內羽化。

「雄蛹」特徵(在 400 倍下)

「雌蛹」特徵(在 400 倍下)

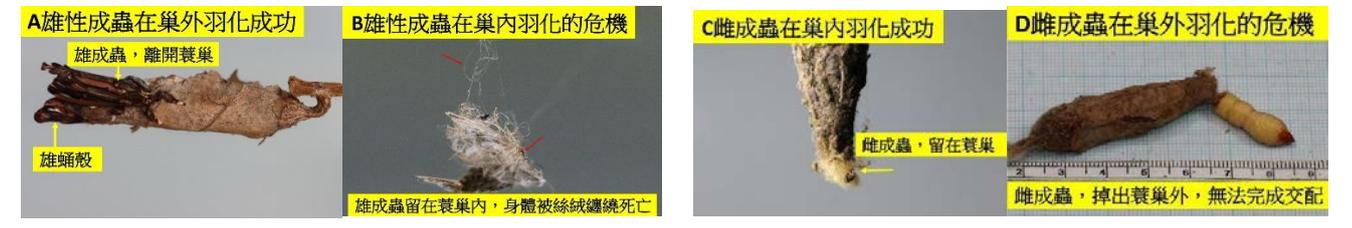
	「雄蛹」特徵(在 400 倍下)	「雌蛹」特徵(在 400 倍下)
腹部 3~5 節 (腹部第 1 節無腹鉤、2 節腹部末端有前鉤但非常不明顯)	<p><b>第3與第4腹節之間</b> 第四腹節前端，有一排上鉤 第三腹節末端，有一排下鉤</p> <p><b>第4與第5腹節之間</b> 第五腹節前端，有一排上鉤 第四腹節末端，有一排下鉤</p>	<p><b>第3腹節</b> 第三腹節末端，有一排凹洞 凹洞內，有一排下鉤</p> <p><b>第4腹節</b> 第四腹節末端，有一排凹洞 凹洞內，也有一排下鉤</p>
腹部 5~7 節	<p><b>第6腹節</b> 只有上鉤 第六腹節前端，有一排上鉤</p> <p><b>第7腹節</b> 只有上鉤 第七腹節前端，有大小不一的上鉤</p>	<p><b>第5腹節</b> 第五腹節末端，有一排凹洞 第五腹節末端，凹洞內有下鉤</p> <p><b>第6腹節</b> 無鉤子</p> <p><b>第7腹節</b> 無鉤子</p>
腹部 10 節 (第 8~9 節無腹鉤)	<p><b>第10腹節</b> 只有上鉤 第10腹節末端，有一對向上大臀鉤</p>	<p><b>第10腹節</b> 第10腹節，有一對向上小臀鉤</p>

表七、為何**雄性成蟲一定要在蓑巢外羽化**，而**雌蟲要留在蓑巢內羽化**的結果「理由三」：

圖 A、B 雄蟲具有翅膀，所以蛹體羽化的時候，必須鑽出蓑巢外才能將翅膀撐開，如果留在蓑巢內羽化，全身會被絲絨纏繞而死亡。圖 C、D 雌性成蟲沒有翅膀，留在蓑巢內，一方面等待雄蟲飛來交配，另一方面把卵產在蛹殼裡，卵在蛹殼內能獲得較安全的保護。

「雄性」成蟲(n=17)

「雌性」成蟲(n=8)



## 柒、問題與討論

### 一、關於避債蛾幼蟲『會不會離開蓑巢』的問題討論

前人研究指出，衣蛾的幼蟲是不會離開筒巢（廖，2014）；幼蟲齡期成長漸大時，並不會換新巢（黃，2017）；避債蛾一個完整的世代只用同一個蓑巢（謝，2019）；巫帽蓑蛾一生都離不開筒巢（陳，2019），這些文獻裡卻都沒有任何實驗證明其原因或理由。

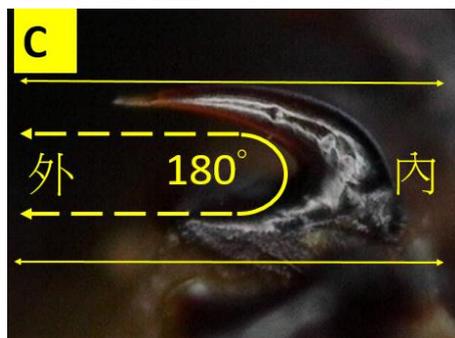
我們的實驗，證實幼蟲因濕度關係離巢，除此推測應該也與本身足部的構造有關。所以針對腹足的顯微觀察，發現在腹部第三節~第六節底部的每一對腹足，都呈現「U 字型」，而且每一個 U 字型足上各有 18 支由內往外彎約 180°的「腹足鉤」，另外在腹部第十節還有一對「數字 9 字型的臀鉤足」，這第十節的腹足上也有 16 支由內往外彎曲的「臀鉤」。就是這些腹足鉤與臀鉤緊緊勾住蓑巢內的絲線，因此只要一連幾日的雨天高濕度環境下，在腹足鉤勾不到絲線的情況，幼蟲就有可能與蓑巢分開，出現離巢的行為。



A、每一個腹足呈 U 字形、腹足上有 18 個足鉤。



B、220 倍下看到的腹足型態。



C、放大 450 倍，看到每個足鉤由內往外呈 180°。



D、第十腹節腹面有 16 個呈數字 9 的臀鉤

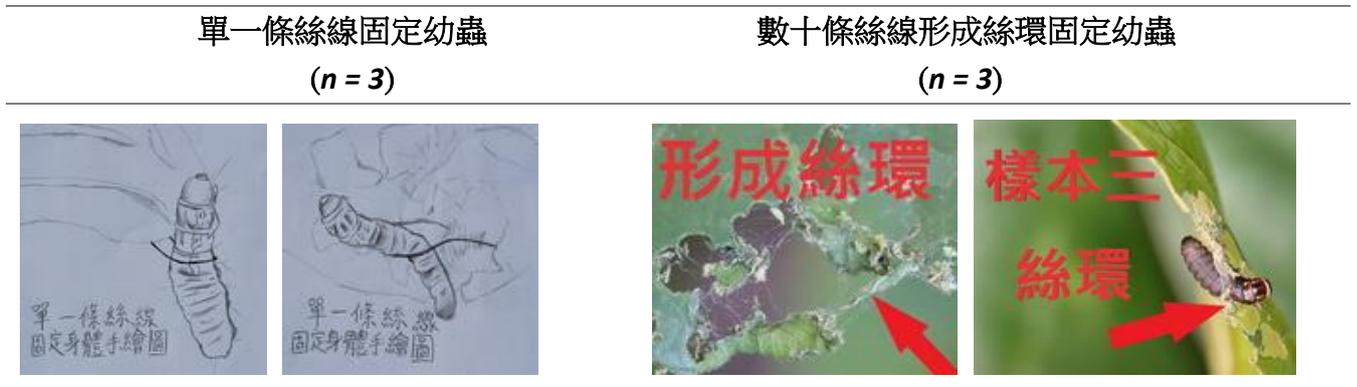
## 二、關於避債蛾幼蟲『重新建造蓑巢』的問題討論

第一次看到幼蟲掉到蓑巢外的時候，就發現幼蟲不斷往潮濕的衛生紙內鑽，剛開始以為是幼蟲怕光，但是不一會兒又鑽出來再鑽回去，推測不像怕光，像似在做新蓑巢，只是衛生紙太過潮濕，無法把蓑巢建造起來，只能看著牠在那裏鑽來鑽去。

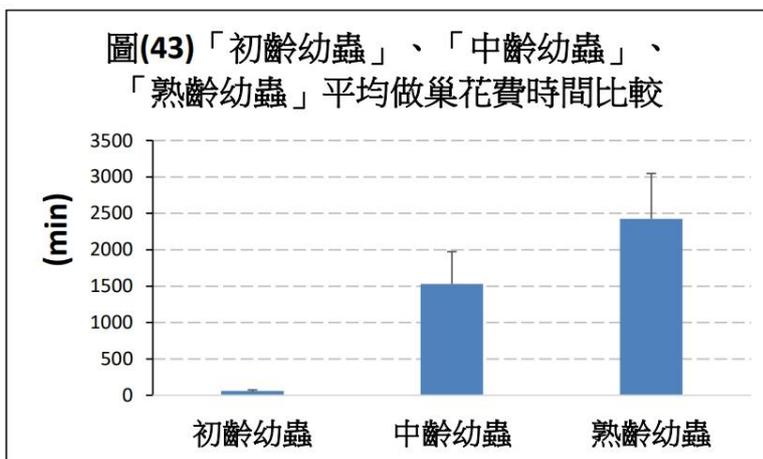
我們這個實驗，成功的讓 27 隻體型大小都不同的幼蟲，每一隻都重新做了三個新蓑巢。過程中，我們一直有許多的想法，例如幼蟲是如何把巢做起來？小幼蟲和大幼蟲之間做巢時間會一樣嗎？又想到既然幼蟲可以重新做三個新蓑巢，那麼牠到底可以做幾個蓑巢呢？以及做蓑巢需要那些材料？於是我們把這四個想法，再做個完整的記錄與求證。

**第一、避債蛾幼蟲是怎樣把巢做起來？**結果如下：(一)幼蟲會先吐一條絲線把身體固定。(二)絲線被固定在胸部與腹部間，接著重疊吐絲讓絲變粗，同時不斷咬食葉片黏在變粗的絲線上，形成『絲環』。(三)完成一個體節的絲環，只要身體向前蠕動，就會往後套住身體一節，直到全身被絲線與碎葉包裹，最後成為蓑巢形狀。(如表八)

表八。「單一絲線與絲圈」固定幼蟲的觀察與記錄



**第二、不同體型的幼蟲做巢時間會一樣嗎？**我們測量初齡蟲與熟齡蟲的蓑巢，獲得熟齡蟲蓑巢長度是初齡蟲蓑巢長度的 19.3 倍，重量是 1668 倍；而做蓑巢的時間，初齡幼蟲只需花費  $59 \pm 15.1 \text{min}$ 、中齡幼蟲  $1529 \pm 444.8 \text{min}$ 、熟齡  $2424 \pm 622.8 \text{min}$ (如圖 43)，所以齡數越小，做巢時間越短、齡數越大，做巢時間越長，甚至熟齡幼蟲接近結蛹階段，已經沒有完成做新巢的能力。因此我們推測體型越大的幼蟲，做巢需要花費更多食物與養分，才能吐出更多的絲以完成蓑巢，而體型越小的幼蟲，越容易被天敵捕食，因此做巢時間越短，可以爭取到較多的生存機會。



第三、避債蛾幼蟲階段到底能重做多少蓑巢？實驗一幼蟲可以重做 3 個新蓑巢，加上一開始完成的蓑巢，加起來就有 4 個蓑巢了。原本 21 天後實驗完成就告一段落，但是在好奇心的驅使下，心想不如再持續進行實驗，記錄幼蟲到底可以做幾個蓑巢？就因這個想法，我們仍然每 3 天為幼蟲換新葉片並清理糞便，每 7 天取出來測量，再讓幼蟲重新做巢，最後實驗發現幼蟲大約花了 60 天的時間才停止做巢動作，期間除了遇到脫皮成長過程，蓑巢無法增大或無法成型之外，可以確定的是，幼蟲不僅可以離巢，還可以重新做 9~10 個新蓑巢。

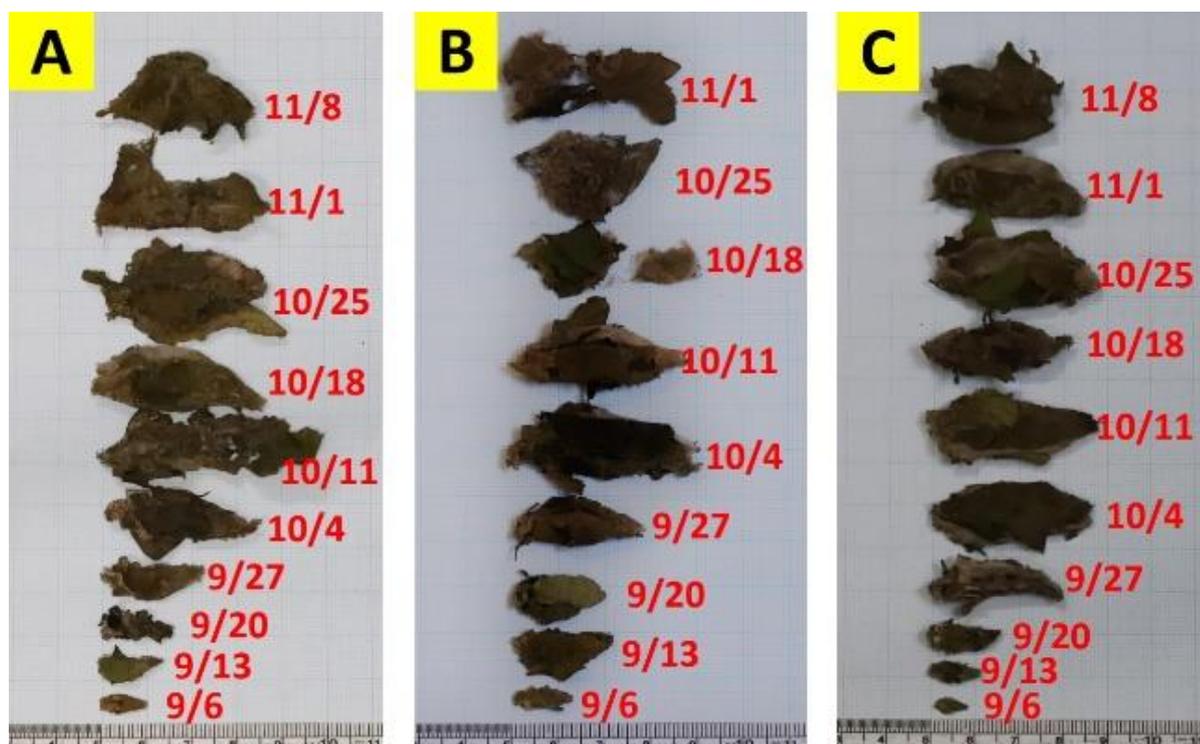


圖 A~C 三個樣本，可以做出 9~10 個蓑巢。但是做到 6 個以上時常出現蓑巢不成形情況。

第四、避債蛾幼蟲做蓑巢的材料只有葉片嗎？剛孵化的初齡幼蟲建造蓑巢的材料有哪些？實驗三我們算出初齡幼蟲平均只花費 59 分就能做好一個蓑巢，可見幼蟲會在最短時間之內為自己做好防護的蓑巢。既然如此剛孵化的初齡幼蟲是不是會就地取材，遇到任何物質都可以拿來做蓑巢？於是我們做了個實驗，隨機準備粉彩紙、衛生紙、保麗龍泡棉、木板等，記錄初齡幼蟲會拿這些東西來做蓑巢。結果發現，性質較軟的物品，幼蟲會暫時拿來做蓑巢。

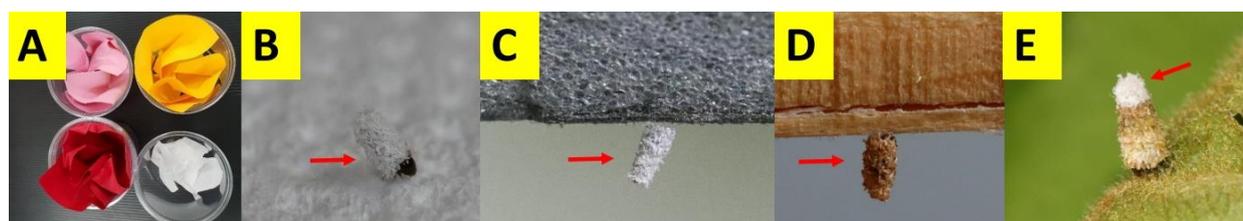


圖 A 初齡幼蟲不會用粉彩紙做蓑巢；圖 B 用衛生紙做成白色蓑巢；圖 C 用灰色泡棉做成灰色蓑巢；圖 D 用木屑做成的褐色蓑巢；圖 E 當幼蟲攝食時，會把之前做的蓑巢給覆蓋在裡面。

### 三、如果用不同種類食物餵養，避債蛾幼蟲經攝食所排放體液，對螞蟻還有忌避效果嗎？

前人指出避債蛾(*Eumeta japonica*)會攝食番石榴、柑橘、棉及大花紫葳等植物(謝, 2019)。而我們對 *Eumeta japonica* 的食性調查, 發現主要以大葉欖仁樹、野牡丹、水柳、蓮霧、春不老等為食, 雖與前人資料不同, 但卻可證實避債蛾食性的複雜與多樣。

研究 2-2 我們主要以大葉欖仁樹葉片餵養幼蟲, 所排出的體液對螞蟻有忌避的效果。但面對避債蛾幼蟲能夠吃多種食物的關係, 我們在想, 如果吃了不同的植物, 幼蟲做的蓑巢還會一致嗎? 所排放的體液, 對螞蟻也有忌避效果嗎? 於是我們用野牡丹、水柳、蓮霧、春不老等植物餵食後, 進行體長、蓑巢長測量, 用酸鹼試紙測體液與體液對螞蟻的忌避等實驗。

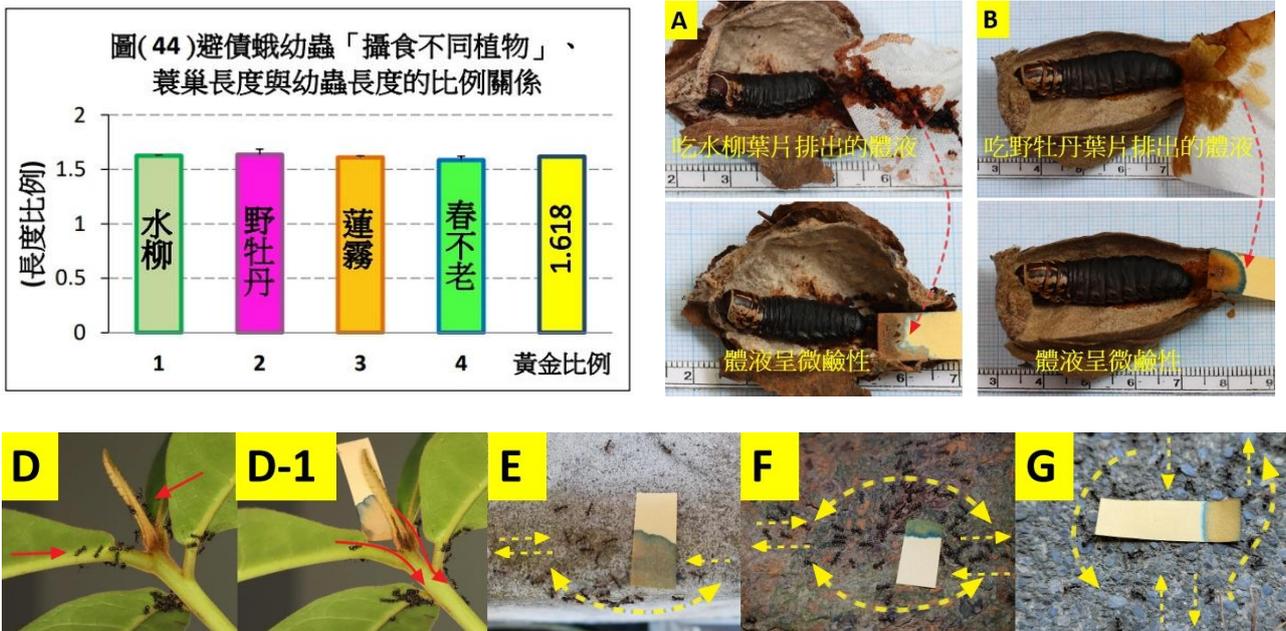


圖 44 避債蛾幼蟲即使吃不同的食物, 牠所做的蓑巢長與體長間的比例, 仍然接近黃金比例 1.618(n=8)。圖 A~C 幼蟲吃野牡丹、水柳、蓮霧葉片, 排出體液皆為褐色, 都呈現微鹼性。圖 D~G 所排出的體液, 對螞蟻同樣具有忌避效果。因此只要幼蟲能吃的植物, 不論體型大小, 所做的蓑巢比例非常相似, 而排出的糞便混合液都呈微鹼性, 同樣對螞蟻有忌避效果。

### 四、沒有蓑巢, 對避債蛾幼蟲有何影響?

第一沒有蓑巢, 會影響幼蟲行動嗎? 鱗翅目幼蟲, 主要以腹足固定在葉片, 身體蠕動緩慢前進。而避債蛾幼蟲的腹足無法固定於葉片, 只能靠那 6 隻胸足抓住葉片垂吊行走, 但是此種方式無法支撐太久, 因此幼蟲需要靠絲束把蓑巢固定在枝條或葉片上, 移動時再咬斷絲束, 短暫行走, 再吐絲束固定, 所以沒有蓑巢, 會影響幼蟲的行動能力。

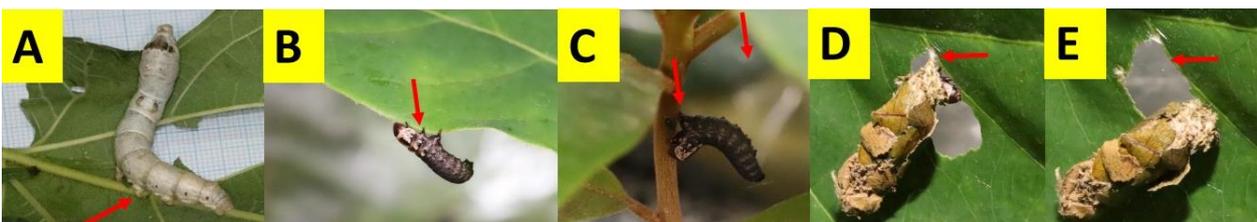
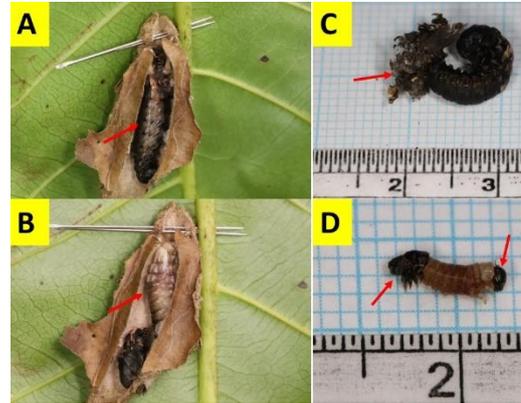
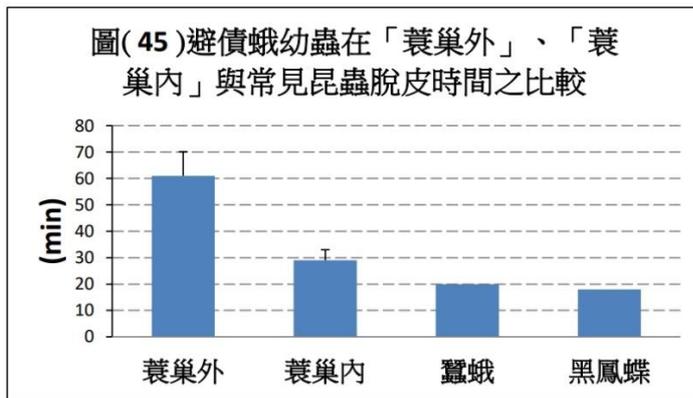


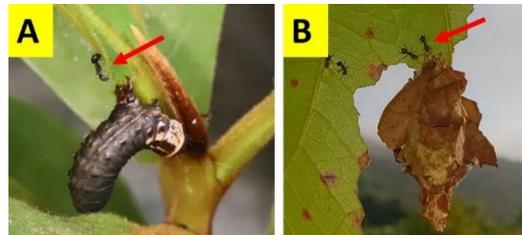
圖 A、B 蠶蛾幼蟲箭頭指用腹足固定在葉片; B~C、箭頭指出幼蟲沒有蓑巢, 只用胸足在葉片行走及枝條上行走; D~E、箭頭指出絲束, 移動時, 咬斷絲束才能大幅度移動。

**第二沒有蓑巢，會影響幼蟲脫皮成長嗎？**脫皮是幼蟲身體長大的關鍵，而昆蟲在脫皮階段通常無法移動，是最脆弱的階段，所以能在短時間內完成，早日恢復行動能力，以減少被捕食的機會(如圖 45、A~G)。我們做了個實驗，比較避債蛾幼蟲在蓑巢外與蓑巢內脫皮，對幼蟲有何影響？我們發現，在蓑巢外的幼蟲，脫皮時因腹足無法固定，在地面上不斷滾動，需花費 51~69min，還無法將舊皮脫下，而黏在身上造成身體無法伸展而死亡，而在蓑巢內只花 25~33min。**因此沒有蓑巢，會影響避債蛾幼蟲的成長與生存。**



圖(45)說明:幼蟲在蓑巢外與蓑巢內脫皮時間平均為  $61 \pm 9.17 \text{min}$ 、 $29 \pm 4 \text{min}$  (N=6)。圖 A~B 把蓑巢微微打開，記錄幼蟲在蓑巢內成功脫皮過程；圖 C~D 在蓑巢外脫皮，造成舊皮或舊頭殼黏在身上，新的身體無法正常伸展，將造成死亡。

**第三沒有蓑巢，會影響幼蟲生存嗎？**螞蟻是我們實驗過程中最常見到的天敵。實驗二結果，初齡幼蟲在沒有蓑巢情況下，很容易被螞蟻大量捕食。如果把蓑巢移走，面對體型小螞蟻，幼蟲還會受到攻擊嗎？答案很明確，即使避債蛾蟲體型再大，仍然敵不過螞蟻的攻擊(圖 A)；有蓑巢一旦遇到螞蟻攻擊，迅速躲入巢內(圖 B)，**因此蓑巢的有無，能決定幼蟲的被捕食率。**



### 五、經由上述的實驗，獲得避債蛾能利用蓑巢進行保護，是否也意味沒什麼天敵了嗎？

整個實驗過程，我們發現避債蛾繁殖數雖多，但生存率卻不高，探究其原因發現天敵種類眾多為主因。我們曾記錄到螞蟻、肉蠅、繭寄生蜂、蜘蛛、攀木蜥蜴等對避債蛾幼蟲進行捕食或寄生而導致牠們死亡。加上這 2 年因為新冠肺炎疫情的關係，我們校園內及周邊的環境，經常不斷地進行大面積的消毒，這讓避債蛾與其他昆蟲的生存雪上加霜。我們期待疫情能夠早日結束，讓大自然恢復生機，讓所有生物皆能減少傷亡、增加生存的機會。



圖 A 蓑巢內的繭寄生蜂；圖 B 跳蛛不斷捕食飼養盒內避債蛾幼蟲；圖 C 螞蟻群起圍攻避債蛾；圖 D 發現蓑巢內已經死亡的幼蟲與肉蠅蛹殼；圖 E 校園內不斷的消毒也造成避債蛾死亡。

研究總結：我們與前人研究報告的差異結論比較

	前人的研究	與前人不同的研究與新發現
一、避債蛾幼蟲會不會離開蓑巢與重新做蓑巢	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 避債蛾一個世代用同一蓑巢（文獻四）。</li> <li>2. 幼蟲齡期漸大並不會棄舊巢換新巢（文獻六）。</li> <li>3. 衣蛾的幼蟲不會離開筒巢（文獻八）。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.新發現：在濕度 80%以上、還有蓑巢被重物壓住，2 種因素導致幼蟲會離開蓑巢，且可重做 3~10 個新蓑巢。</li> <li>2.新發現：體重至少是巢重 2.348 倍。</li> <li>3.新發現：蓑巢長是幼蟲長 1.542 倍，兩者間長度比例接近 1.618 黃金比例。</li> </ol>
二、避債蛾幼蟲如何利用蓑巢進行防禦的行為	無研究	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.新發現：幼蟲會以 <math>12.5 \pm 4.3 \sim 35 \pm 10.9</math> gw 的拉力封住巢口，阻擋天敵進入</li> <li>2.新發現：幼蟲排出的體液含鹼性成分，對螞蟻有 24~36 小時的忌避效果。</li> <li>3.新發現：天敵入侵，幼蟲會縮小身體，讓蓑巢多出原來的 <math>0.33 \pm 0.02 \sim 0.7 \pm 0.12</math> 倍，獲得更多移動的空間。</li> </ol>
三、蓑巢對卵有哪些防護措施	無研究	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.新發現：在蓑巢內受到蓑巢→內層絲絨→蛹殼→細絨保護，且因蛹殼形變量不大，而有了多重保護。</li> <li>2.新發現：產卵的數量平均有 1971 粒。</li> </ol>
四、初齡幼蟲離巢的方式、被捕食率與生存率	無研究	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.新發現：千隻初齡蟲聚集垂降，平均形成一條長 54.65cm 的絲線道路。</li> <li>2.新發現：以 <math>59.4 \pm 15.1</math> min 做好一個蓑巢，有、無蓑巢的被捕食率從 96% 降到 74%。</li> <li>3.新發現：幼蟲排出糞便混體液呈微鹼性，蓑巢加上體液讓生存率從 26% 上升到 88%。</li> </ol>
五、蓑巢對蛹體與成蟲的防護	無研究	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.新發現：結蛹期幼蟲在蓑巢外，會做多條「類伯努利雙扭線」纏繞，及長 <math>6.41 \pm 0.9</math>mm、寬 <math>3.44 \pm 0.8</math>mm 絲束，能承受 <math>89.3 \pm 63.5 \text{g} \sim 1292.2 \pm 821 \text{g}</math> 負重。</li> <li>2.新發現：在蓑巢內吐絲線，形成大量絲絨狀態，能承受 <math>127.42 \pm 19.5 \text{gw} \sim 135.74 \pm 28.6 \text{gw}</math> 外力，蓑巢形變量小。</li> <li>3.新發現：雄性蛹體有明顯朝上與朝下相反的腹鉤，以 <math>2.11 \pm 0.29 \text{cm/min}</math> 的速度鑽出蓑巢外；雌蛹蠕動緩慢，且腹鉤不明顯。</li> </ol>

## 捌、結論

### 研究一、避債蛾幼蟲會『離開蓑巢嗎？會重建蓑巢嗎？』的結論：

- (1) 幼蟲會離開蓑巢的二種情況原因是：第一濕度達到 80%以上時，巢內絲線全都緊密黏在一起，幼蟲爬行時因腹足勾不到絲線，最後掉到蓑巢外面；第二蓑巢一旦被重物壓住後，幼蟲在無法移動蓑巢的情況下，身體不斷往前蠕動，最後也會出現離開蓑巢行為。
- (2) 幼蟲離開蓑巢後，會重建蓑巢：幼蟲階段通常有 3 次以上重建蓑巢的能力，齡數越小，重建蓑巢能力越強，60 天內最多可以重建 3~10 個新蓑巢。
- (3) 蓑巢長比幼蟲長大：兩者之間接近 1.618 黃金比例，幼蟲有足夠空間在巢內翻轉移動。
- (4) 幼蟲體重比蓑巢還重：幼蟲體重是蓑巢重的  $2.348 \pm 0.58$  倍~ $3.692 \pm 1.02$  倍。

### 研究二、『幼蟲如何利用』蓑巢進行『防禦行為』的結論：

- (1) 上方蓑巢口防禦：幼蟲會以  $12.5 \pm 4.3 \sim 35 \pm 10.9$ gw 的拉力封住巢口，阻擋上方天敵進入。
- (2) 下方蓑巢口防禦：先排出硬糞便堵住下方出口，再排軟糞便混合體液，因內含有少許鹼性成分，對螞蟻有 24~36 小時的忌避效果，以阻擋下方天敵進入。
- (3) 蓑巢被破壞與天敵入侵時防禦：幼蟲有修復破裂蓑巢的能力，可是天敵一旦入侵巢內，幼蟲體長會縮小  $0.19 \pm 0.02 \sim 0.92 \pm 0.23$ cm，讓原本蓑巢長是幼蟲長只有  $1.5 \pm 0.2$  倍，增加到  $2.24 \pm 0.2$  倍，蓑巢也因此多出了  $0.33 \pm 0.02 \sim 0.7 \pm 0.12$  倍，獲得更多移動逃避空間。

### 研究三、蓑巢對『卵與初齡幼蟲』的『防護』結論：

- (1) 對卵的保護：卵分別受到外面的蓑巢→內層絲絨→蛹殼→細絨等四層保護，其中因『蛹殼形變量不大』，降低了外力對卵的傷害，而保護了蓑巢內至少 1971 粒的卵。
- (2) 初齡幼蟲的離巢方式，減少群聚與分散天敵的注意：無風情況千隻幼蟲平均形成一條長 54.65cm 絲線垂降離開。但遇到軟風或微風吹襲，幼蟲可被吹到  $103 \pm 62$ cm 遠的距離。
- (3) 初齡幼蟲做蓑巢防護：以每分鐘  $12.28 \pm 0.18$ cm 快速爬行，但遇到每分鐘走  $51.25 \pm 6.2$ cm 的螞蟻仍然被攻擊捕食，因此在  $59.4 \pm 15.1$ min 就能做好一個防護蓑巢，使被捕食率從 96% 降到 74%，如果有充足或大量的體液可讓生存率從 26% 上升到 88%。

### 研究四、研究幼蟲建造蓑巢對未來的『蛹體與成蟲』之『防護』結論：

- (1) 絲束的功能：蛹期之前吐出多條「類伯努利雙扭線」緊緊纏繞枝條，及長  $6.41 \pm 0.9$ mm、寬  $3.44 \pm 0.8$ mm 的絲束，至少能夠承受  $589.3 \pm 63.5 \sim 1292.2 \pm 821$ g 的負重，讓蓑巢內的幼蟲安全進行蛻變成為蛹體。
- (2) 蓑巢能承受的外力：進入蛹期之前，幼蟲會在蓑巢內吐絲線，呈現絲絨狀態，並將蛹體層層包裹在裡面，使蓑巢能承受  $127.42 \pm 19.5$ gw~ $135.74 \pm 28.6$ gw 的外力，蓑巢形變量小，能讓蓑巢內的蛹體安全蛻變為成蟲。
- (3) 雄蛹需鑽出蓑巢外羽化：雄蛹以每分鐘  $2.11 \pm 0.29$ cm/min 快速蠕動，腹部呈  $100^\circ$  由外往內勾，蛹體還有第 3~4 節、第 4~5 節之間，具有朝下與朝上相反的腹鉤與第 6、7、10 節的朝上腹鉤，因此當雄蛹蠕動時，腹鉤在一上一下互相拉扯勾住絲線，最後雄蛹能鑽出蓑巢外，並停止露出頭胸腹 2~3 節，當蛹殼破裂，雄成蟲就在蓑巢外羽化。

(4) 雌蛹留在蓑巢內羽化：雌蛹每分鐘  $0.59 \pm 0.1 \text{ cm/min}$  緩慢蠕動，腹鈎只朝下且藏在凹洞內，另外雌蟲需在巢內才能交配成功，把卵產在蛹殼內，因此雌蛹必須留在蓑巢內羽化。

## 玖、參考資料及其他

- 一、盧耽（2008）·圖解昆蟲學·臺北市：商周。
- 二、翰林出版社（2016）·自然與生活科技 國一自然與生活科技 上冊、下冊生物篇。
- 三、林沂嫻（2021）·避債非躲債-探討避債蛾之蓑巢與幼蟲生存間關係·南投縣第 61 屆中小學科學展覽會作品說明書
- 四、謝雨彤（2020）·移動城堡-避債蛾應用蓑巢生存策略之探討·中華民國第 60 屆中小學科學展覽會作品說明書
- 五、陳以晏（2020）·大屯火山區魔法帽-巫帽蓑蛾（*Striglocyrbasiamegae*）筒巢之研究·中華民國第 60 屆中小學科學展覽會作品說明書
- 六、黃靖峰（2017）·穿梭衣的毛毛蟲-認識避債蛾·金門地區第 56 屆中小學科學展覽會
- 七、黃振聲（2017）·Tacotacola 國產的避債蛾簡介
- 八、廖韋俐（2014）·「衣」窺宅蟲-何處是「蛾」家·中華民國第 55 屆中小學科學展覽會作品說明書
- 九、趙榮台（2010）·台灣十大外來入侵物種·行政院農業委員會林務局 中華民國自然生態保育協會印行
- 十、嘎嘎昆蟲網·避債蛾欠誰的債·取自 gaga，<http://gaga.biodiv.tw/9708bx/887.htm>
- 十一、Geek 學院，哆嗒數學網群友 <https://kknews.cc/zh-tw/education/qxvya4g.html>

## 拾、待研究的問題

- 1.對於避債蛾幼蟲所排出來的體液呈現鹼性，未來想研究這鹼性物質有哪些成分？
- 2.避債蛾幼蟲所吐出來的絲線，是一種蛋白質，未來想研究是哪一種蛋白質？

## 【評語】 030309

本研究針對避債蛾幼蟲建構蓑巢的行為進行了深度的觀察與分析，本研究值得讚賞的優點如下：

1. 探討避債蛾之蓑巢與幼蟲間生存關係的研究雖然已經有相關發表，但學生基於先前研究，設立出不同的研究探索方向，值得嘉許，例如：幼蟲離開蓑巢後是否重建、結蛹期幼蟲所吐絲線的形態以及發現蓑巢具有驅蟻效果都是創新發現。
2. 實驗設計縝密且觀測的蟲隻數量足夠，讓整體研究成果具有代表性。
3. 各項研究間邏輯關係清晰，有很不錯的串聯。
4. 報告整理清楚，讓人易讀易懂。

## 作品簡報

# 避債蛾的防護衣一

探討幼蟲建造蓑巢的防禦行為及蓑巢對

卵、幼蟲、蛹、成蟲的防護研究

組別：國中組

科別：生物科

# 壹、研究動機與目的

本實驗探討避債蛾幼蟲利用蓑巢做防禦行為與蓑巢對各不同成長階段防護之研究。

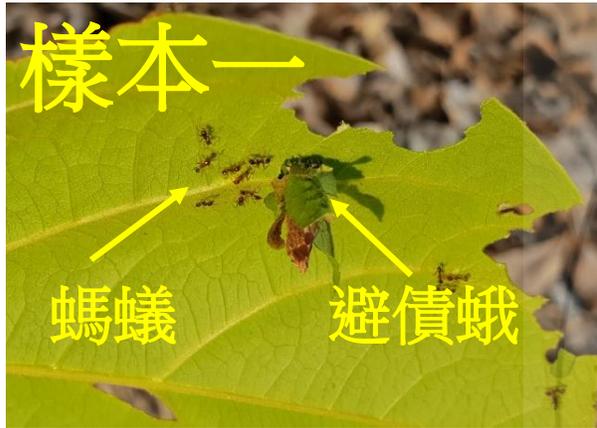


Fig1. 螞蟻圍繞在蓑巢邊



Fig2. 螞蟻與蓑巢間保持距離



Fig3. 上方巢口被封住



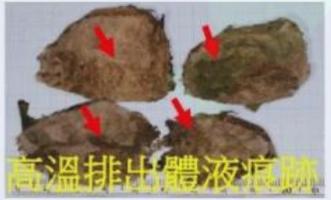
Fig4. 下方巢口排糞便堵住



# 貳、研究結果(1-1)：環境會影響幼蟲離巢

■ 我們發現，幼蟲受環境影響離開蓑巢的原因與離開後能重建蓑巢的次數。

表一、環境改變後「避債蛾幼蟲離巢行為」結果與圖照(單位：隻)

	濕度改變( $n=39$ )	溫度改變( $n=10$ )	重壓蓑巢 ( $n=10$ )
幼蟲行為	初齡蟲與熟齡蟲都會因蓑巢潮濕而離開蓑巢。	不會離巢，但會噴出大量體液(箭頭指出)。	蓑巢一旦被重物壓住，幼蟲因行走會離開蓑巢。
結果圖照			

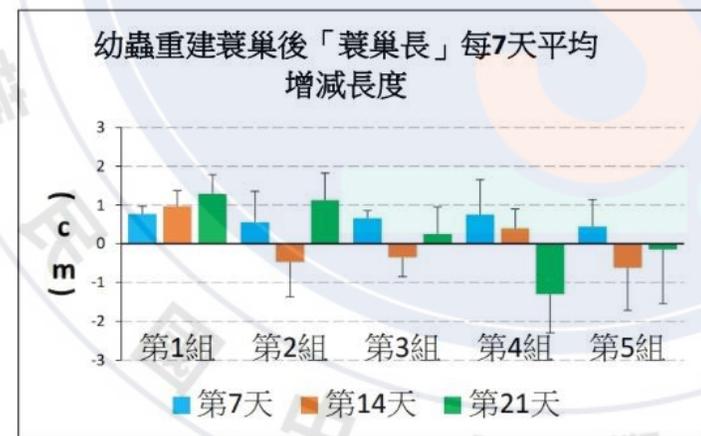
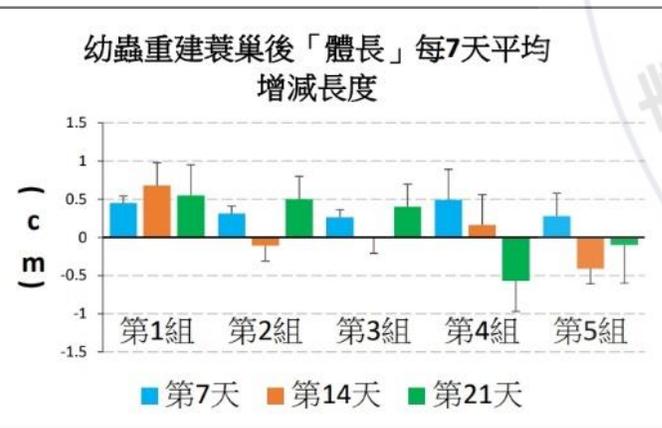


Fig5.21天重建過程，只要遇到脫皮，體長成長會暫停。

Fig6.重建中遇到脫皮，幼蟲停止攝食、蓑巢重建也停止。

Fig7.不管體型大小，幼蟲每7天重做蓑巢過程中，其體長與蓑巢的長度都越來越大。

# 研究結果(1-2)：不同環境下幼蟲與蓑巢間的關係

我們發現，不管何種體型的幼蟲與建造之蓑巢，有一定比例的關係。

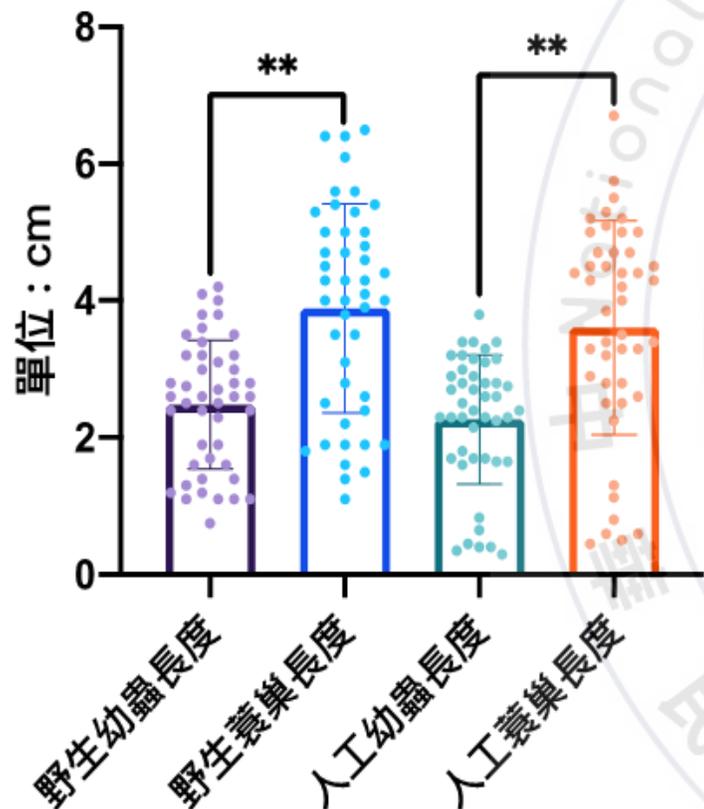


Fig8. 不管野生或飼養之幼蟲所做蓑巢與體長間  $p < **0.05$ ，具顯著差異(n=90)。

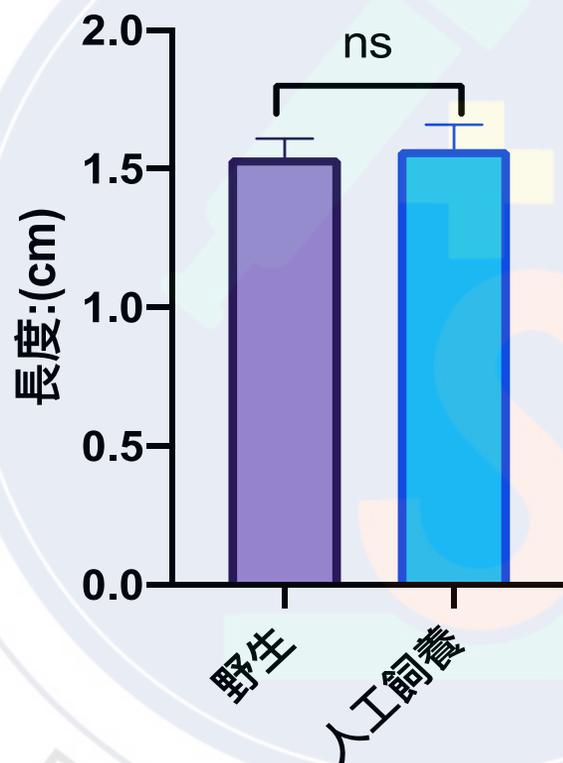


Fig9. 蓑巢的長度是幼蟲體長的1.542~1.572倍，兩者間無顯著性差異(n=90)。

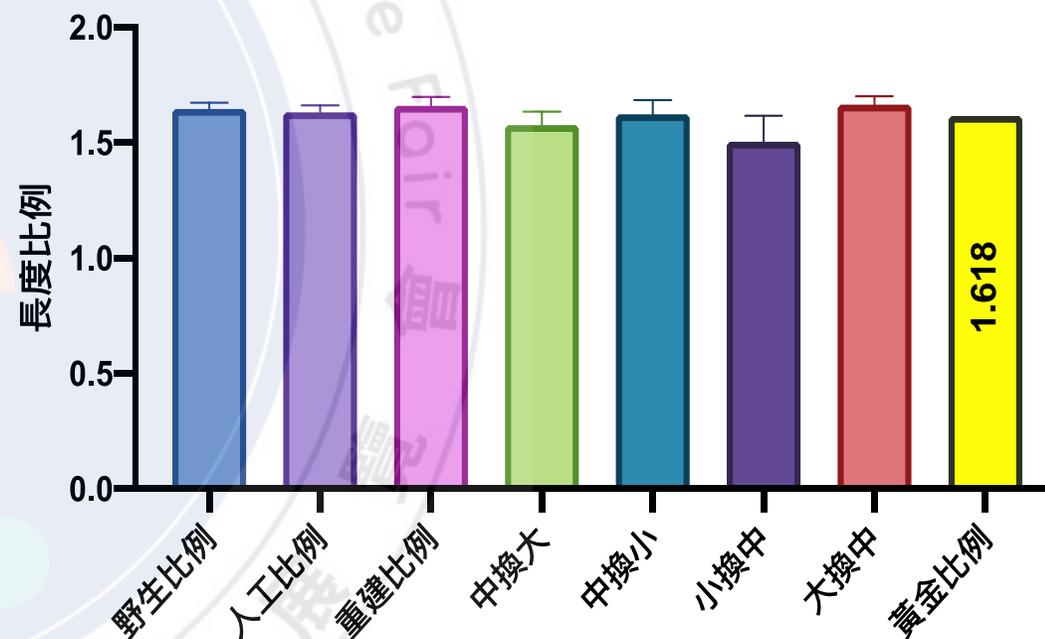


Fig10. 在7種不同環境下，幼蟲做的蓑巢大小跟體長的比例，都接近黃金比例1.618 (n=121)。

# 研究結果(2-1)：幼蟲對『上方』蓑巢口的防禦行為

我們發現，幼蟲利用封住蓑巢口方式，抵禦想從蓑巢上方入侵的天敵。

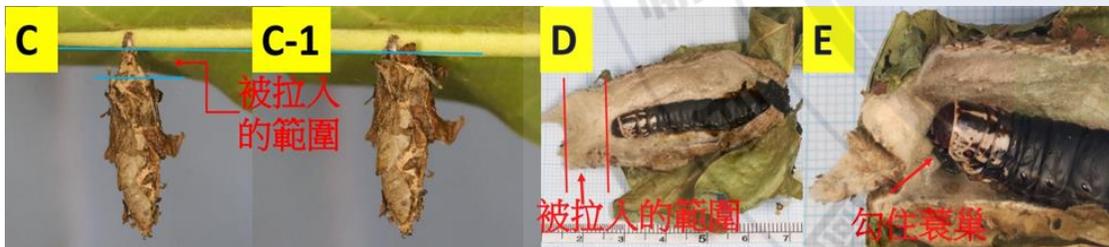
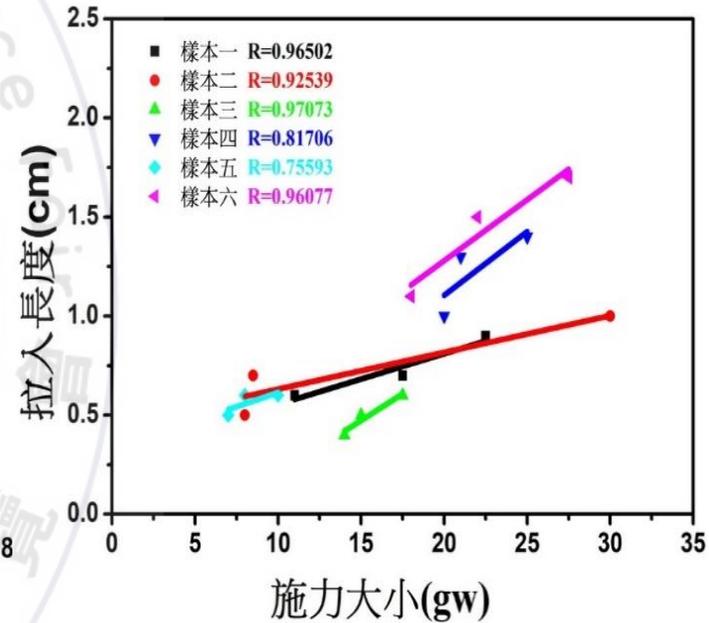
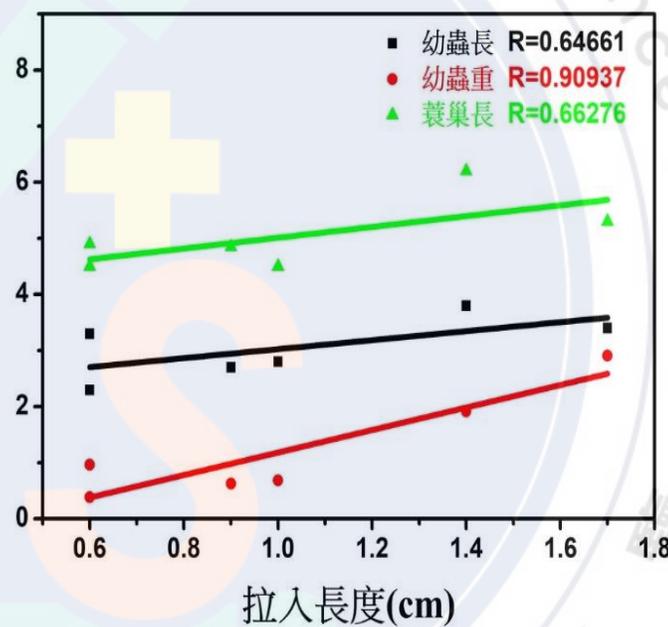
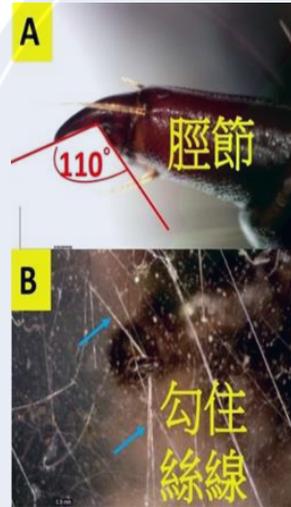
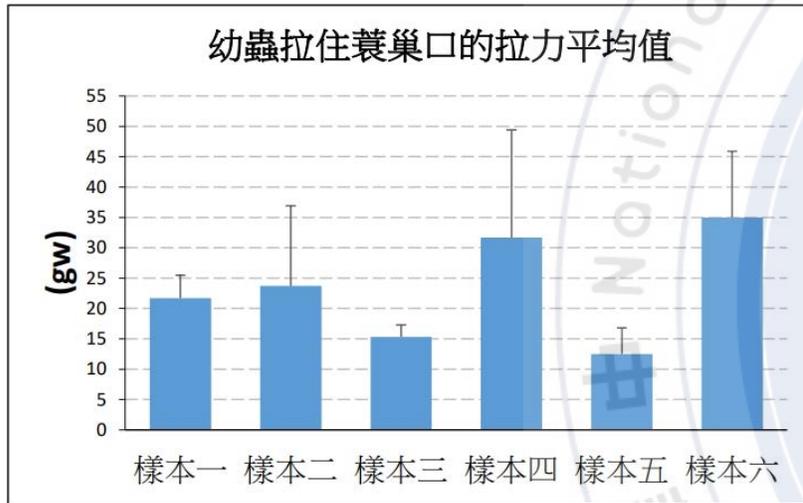


Fig11.幼蟲拉住蓑巢的力量，平均為12.5~35gw。FigA~E幼蟲利用腳部脛節勾住絲線形成拉力，而將蓑巢前端向內拉入。

Fig12.幼蟲拉入的蓑巢與體長長度為中度相關、與體重為高度相關。因此體長越長、體重越重與蓑巢被拉入的長度有關。(n=6)

Fig13.幼蟲施力與被拉入長度成正比。因此施力越大、被拉入的蓑巢也越長，能達到一定的阻擋效果。(n=6)

# 研究結果(2-2)：幼蟲對『下方』蓑巢口的防禦行為

■ 我們發現，幼蟲利用排放體液方式，抵禦想從蓑巢下方入侵的天敵。



FigA~D受干擾的幼蟲由下方蓑巢口依序排出(1)硬糞便→(2)軟糞便混體液→(3)體液，若強行移走幼蟲，牠還會從大顎排出體液，經由test paper測試這些體液，含有少許鹼性成分。

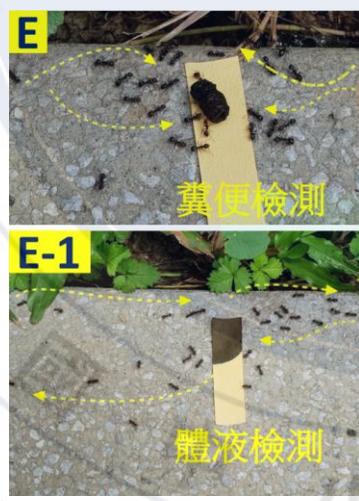
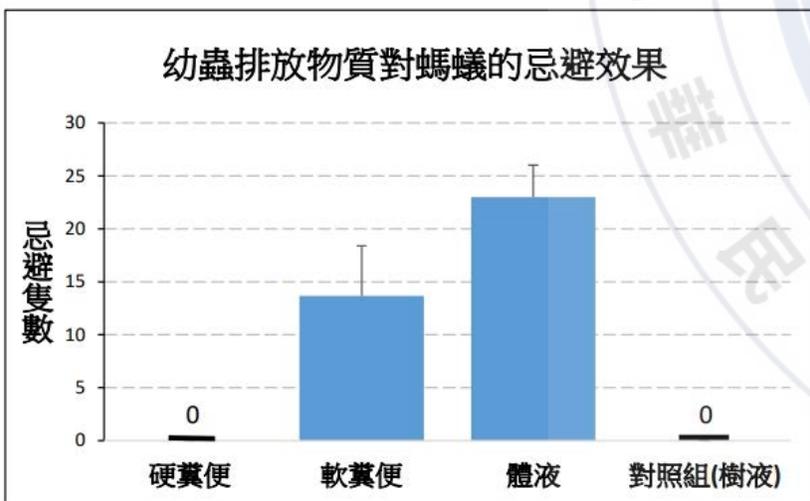


Fig14、E~E1.幼蟲排放的糞便與體液對螞蟻的忌避過程 Fig15、F~K.不同體液濃度與時間對螞蟻的忌避效果皆不同6

# 研究結果(2-3)：蓑巢『被破壞與天敵入侵』防禦行為

■ 我們發現，幼蟲修補蓑巢、改變身形，抵禦破損的蓑巢與入侵的天敵。

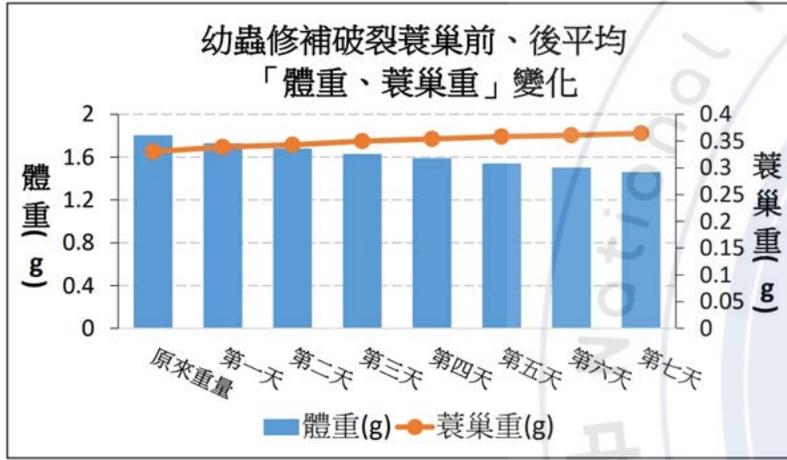


Fig16. 體重逐漸減少，巢重逐漸增加

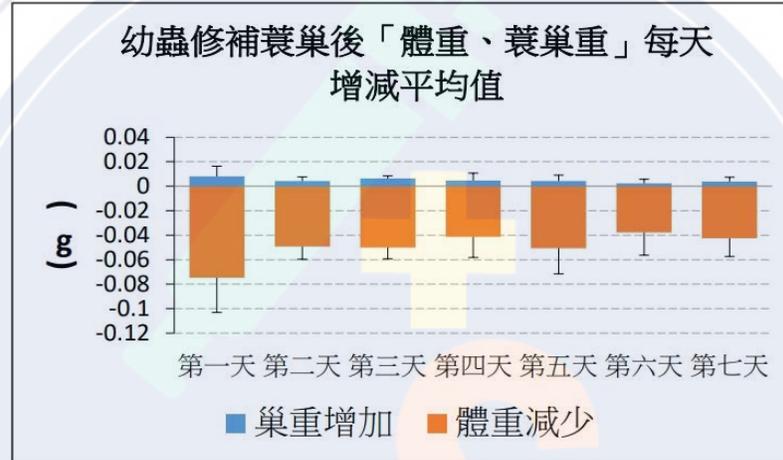


Fig17. 第一天體重減少最多，修補量最多

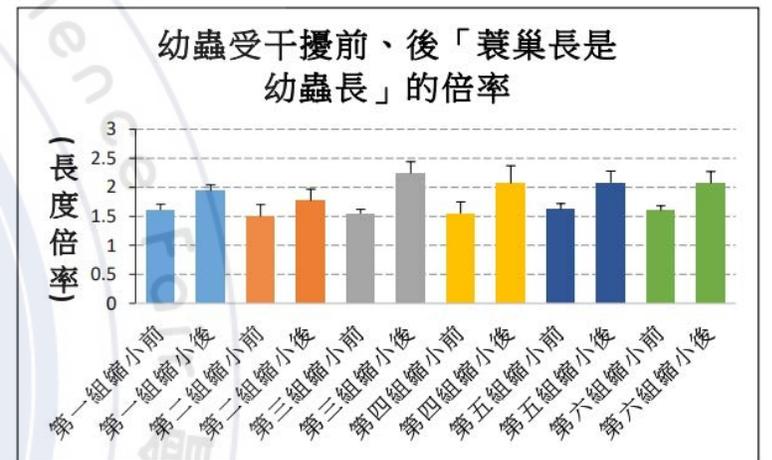


Fig18. 受干擾後「長度倍率」增加

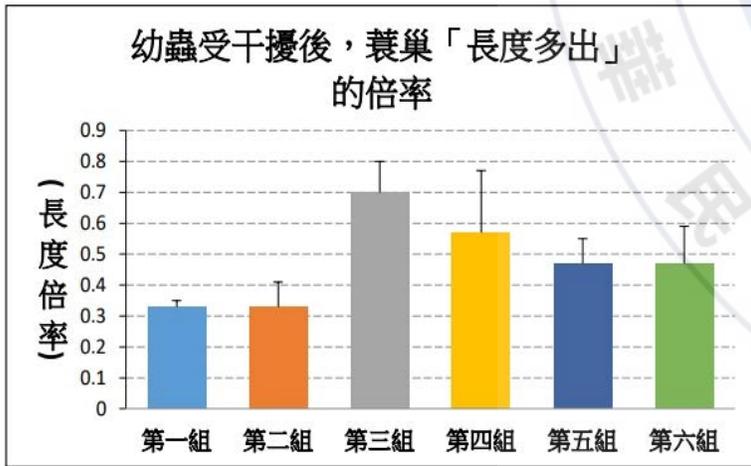


Fig19. 巢內「長度」多出的倍率

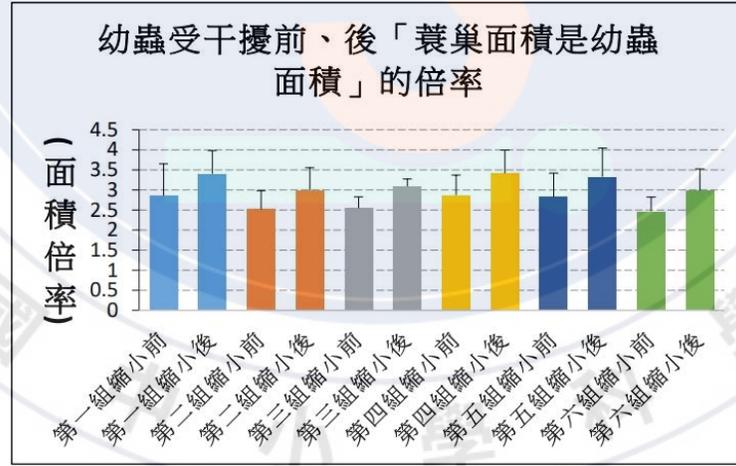


Fig20. 受干擾後「面積倍率」增加

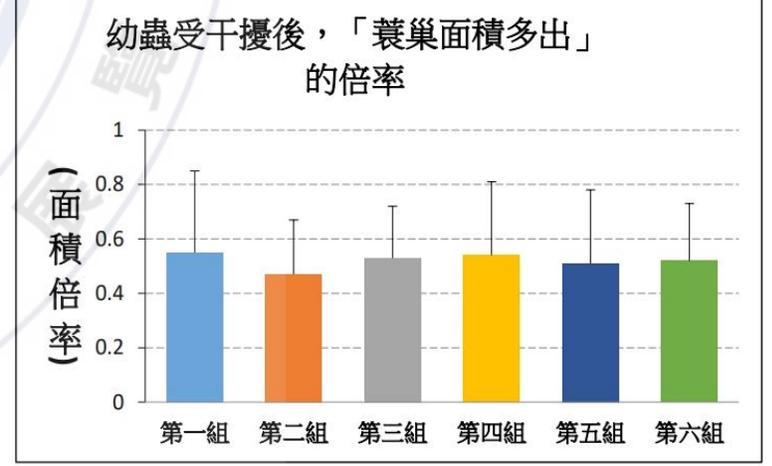


Fig21. 巢內「面積」多出的倍率

# 研究結果(3-1)：蓑巢對卵、初齡蟲的防護

我們發現，蓑巢能保護卵直到孵化、初齡蟲再度為自己做上蓑巢防護。

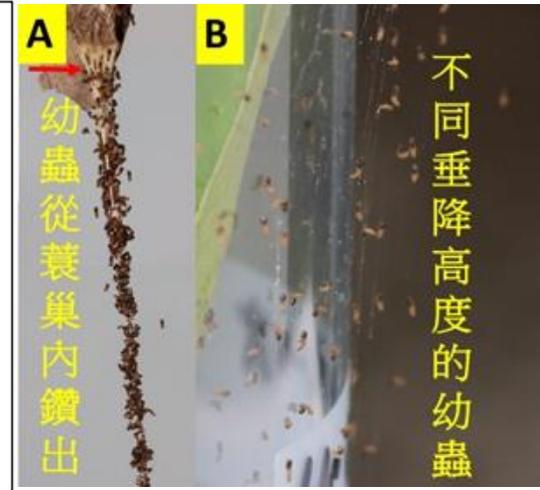
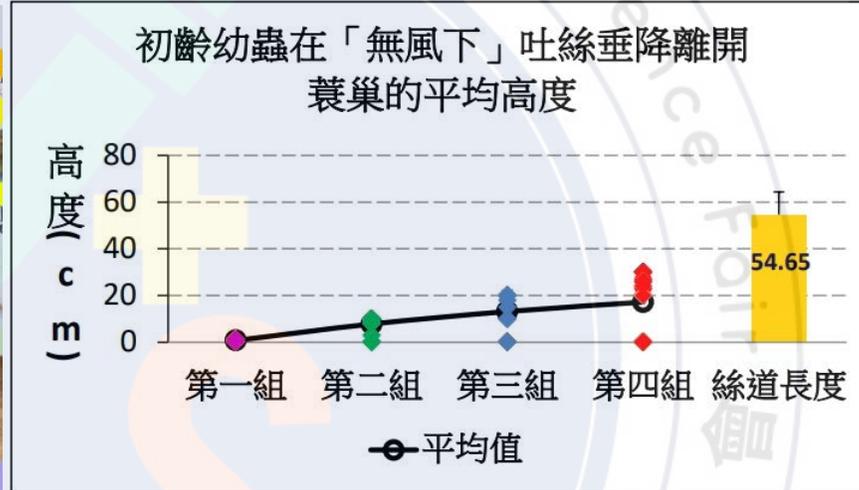
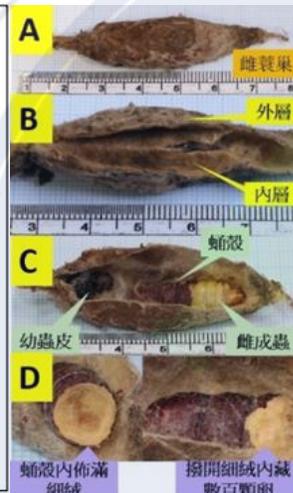
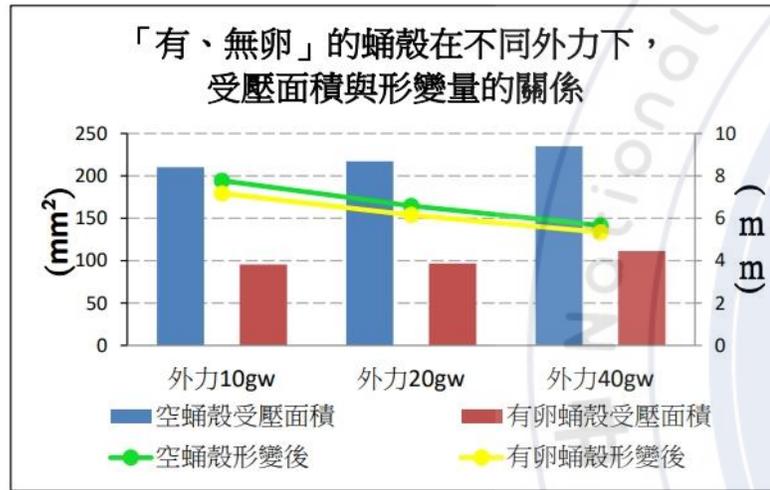


Fig22、A~D.因蛹殼形變量不大，能降低外力傷害

Fig23、A~B.在無風情況下，初齡蟲吐絲形成絲道，垂降離巢

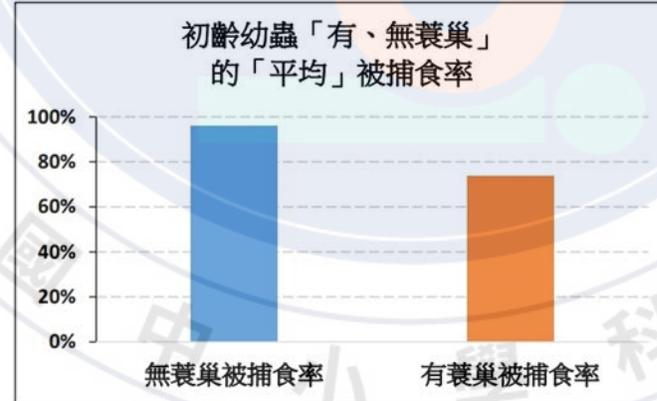
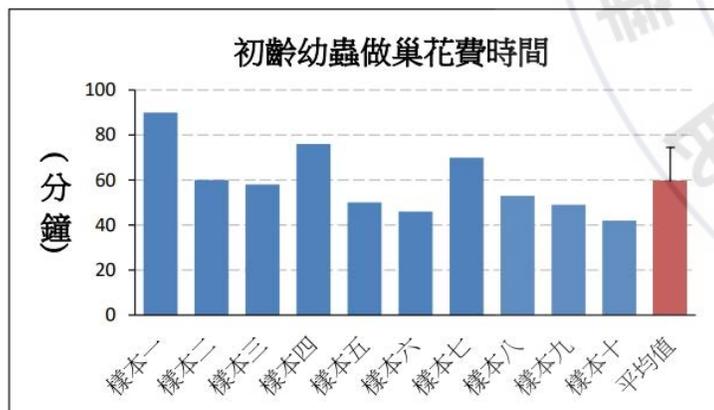


Fig24.初齡蟲平均花59.4min 完成蓑巢

Fig25. A~B剛孵化幼蟲處於無蓑巢時被捕食率較高、有蓑巢後被捕食率較低

# 研究結果(3-2)：如何增加剛孵化為初齡蟲的生存率

我們發現，初齡幼蟲能利用蓑巢逃脫，降低被補食率與提高生存率。

表二.初齡幼蟲「有無蓑巢」、「有無蓑巢+體液」被捕食結果(單位：隻)

	無蓑巢(n=50)		無蓑巢+體液(n=50)		有蓑巢(n=50)		有蓑巢+體液(n=50)	
	被捕食量	被捕食率	被捕食量	被捕食率	被捕食量	被捕食率	被捕食量	被捕食率
第一天	45	90 %	17	34%	26	52%	5	10%
第二天	2	4%	9	18%	8	16%	1	2%
第三天	1	2%	7	14%	3	6%	0	0%

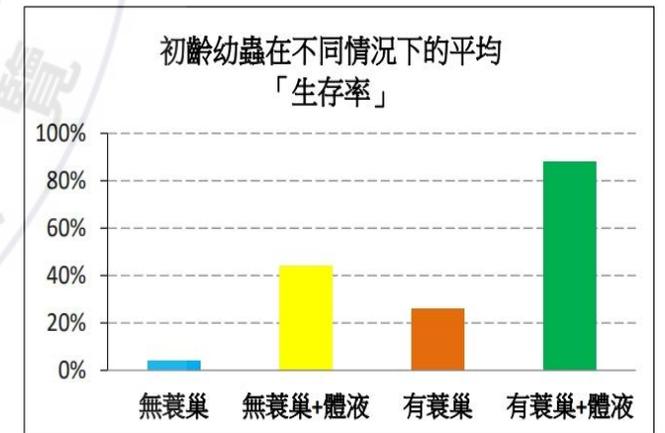
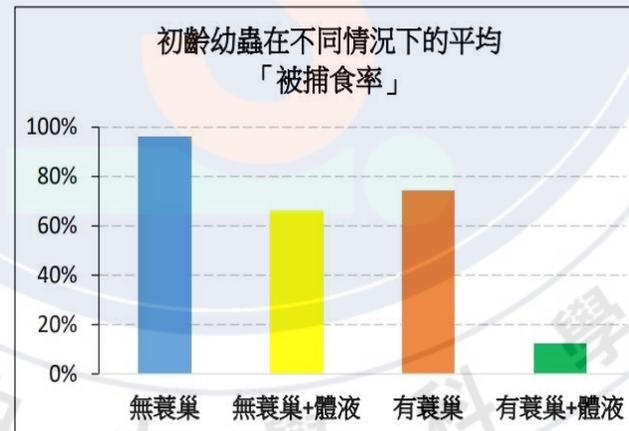
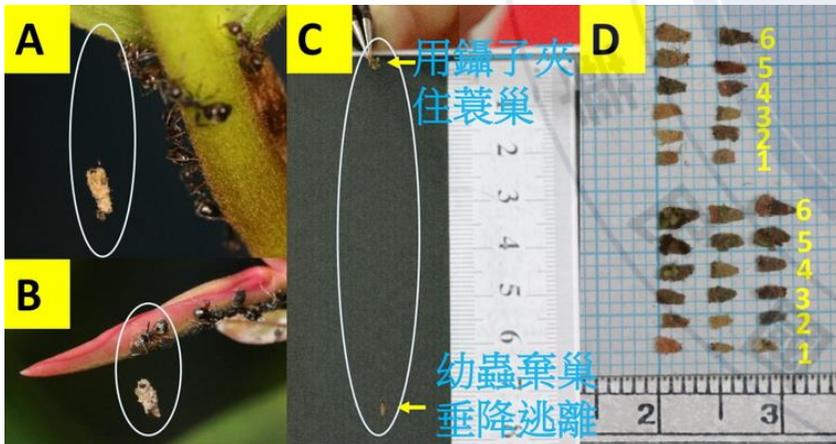
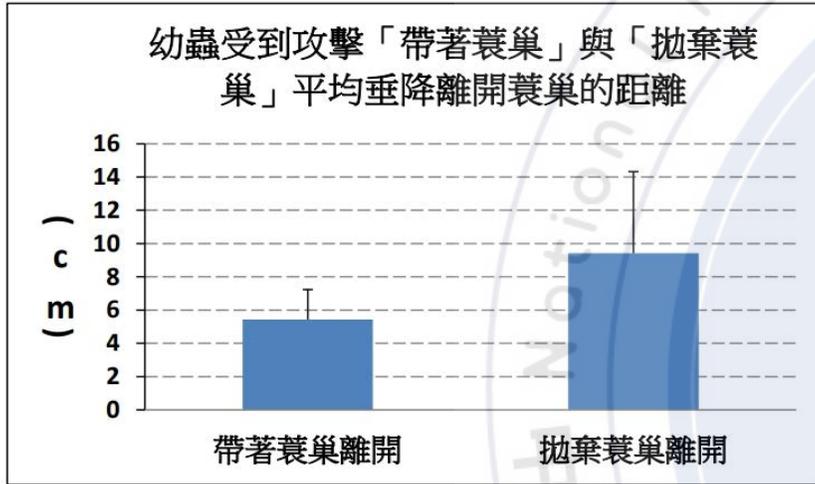


Fig26、A~D.幼蟲受攻擊，會帶蓑巢垂降離開。重複6次模擬，蓑巢被螞蟻夾住，也會棄巢、吐絲離開。

Fig27.塗抹體液後，無蓑巢初齡蟲被捕食率降低30%。

Fig28.塗抹體液後，有蓑巢初齡蟲生存率上升了62%。

# 研究結果(4)：蓑巢對蛹體的防護

■ 我們發現，要進入結蛹階段的幼蟲，能利用蓑巢承受較大的負重與施力。

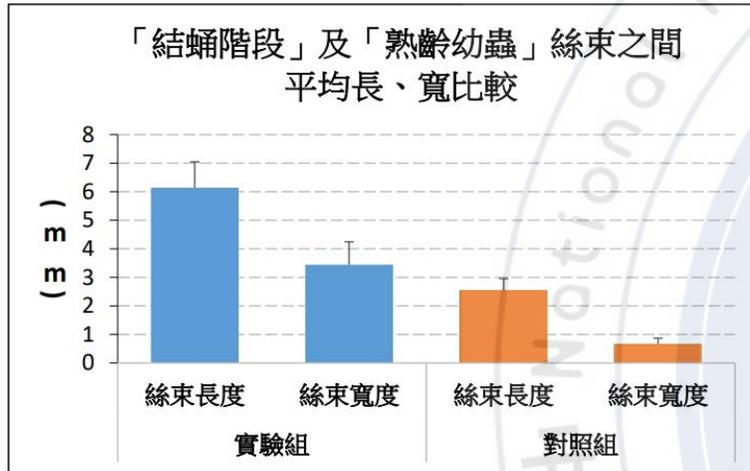


Fig29. 結蛹絲束大於熟齡蟲絲束

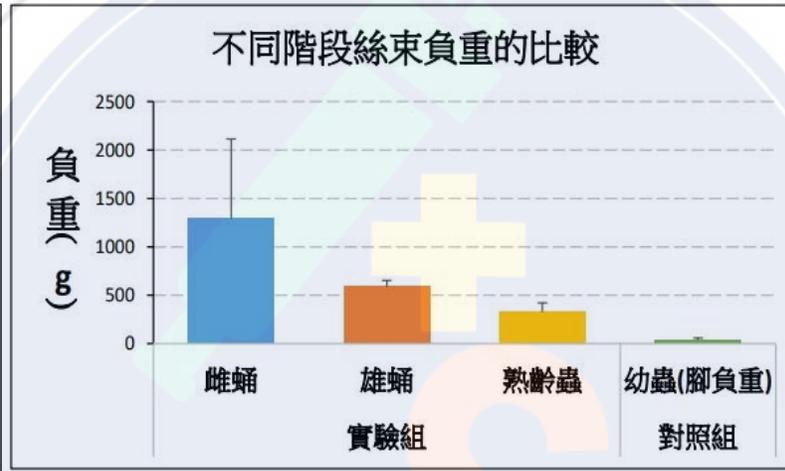


Fig30. 雌蛹負重大於腳的負重

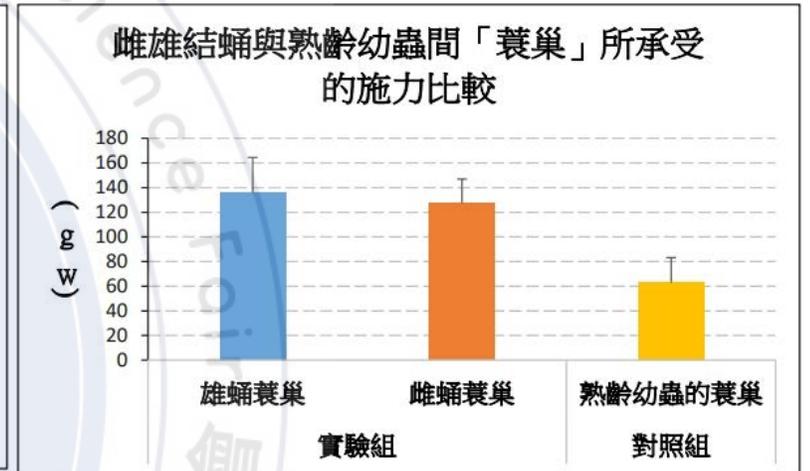


Fig31. 雌雄蛹蓑巢可以承受較大施力



Fig32. 蛹期幼蟲吐出緞帶型絲線

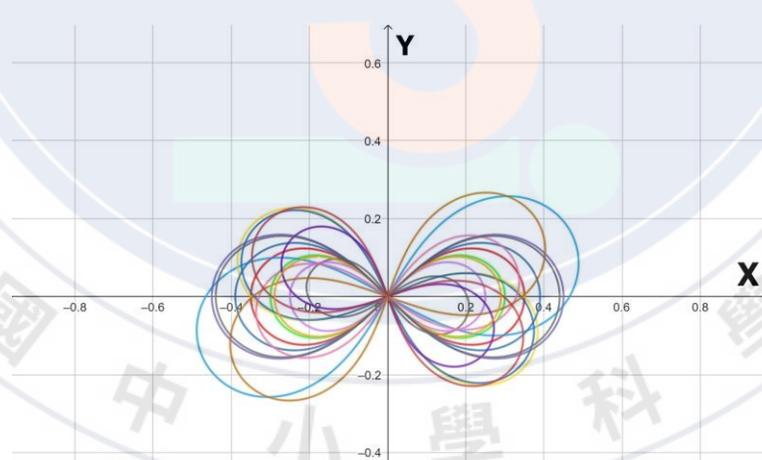


Fig33. 重疊絲線呈現類柏努利雙扭線



Fig34. 諸多重疊雙扭線能穩住蓑巢

# 研究結果(5)：蓑巢對成蟲的防護

我們發現，雄蛹在蓑巢外羽化、雌蛹留在蓑巢內羽化的原因。

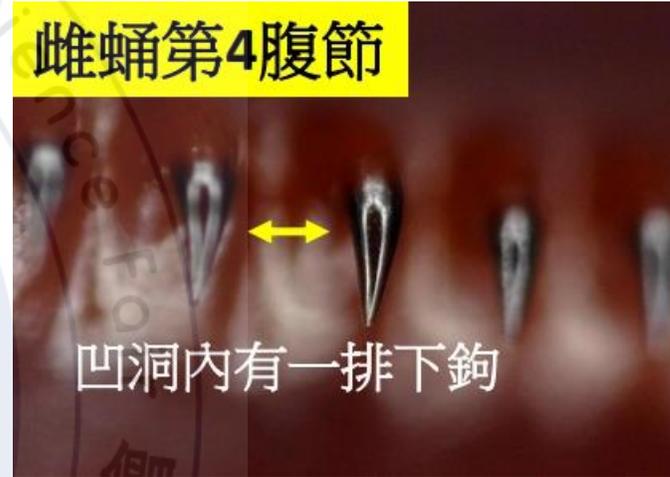
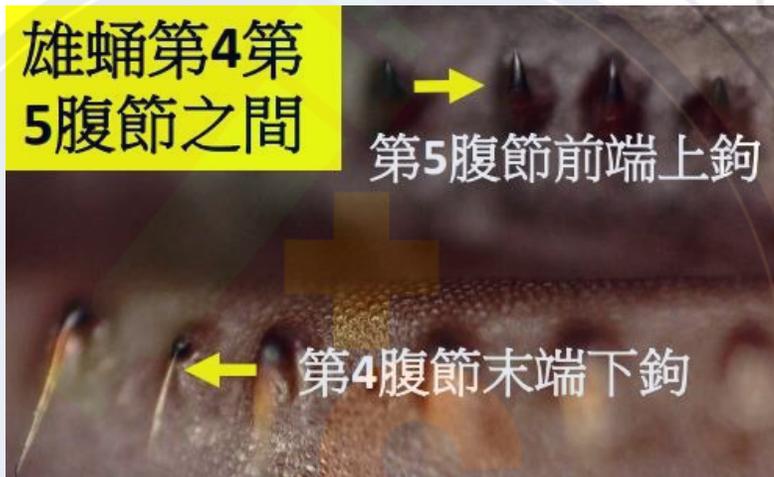
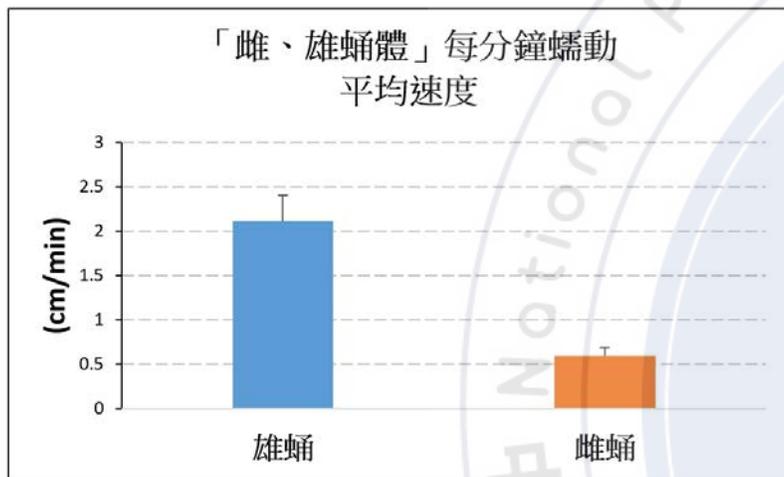


Fig35.雄蛹受干擾時，平均每分鐘以2.11cm快速蠕動，再由上、下相反的腹鉤勾住蓑巢，此時就能鑽出巢外，卻又不會掉落地面的蛻變為成蟲；雌蛹腹鉤隱藏凹洞內，蠕動速度又慢，因此會留在巢內羽化。



FigA、B.雄蟲必須在蓑巢外羽化，才能撐開翅膀，如果留在巢內，則會被蓑巢內絲絨纏繞而死亡。

FigC、D.雌蟲因沒有翅膀必須在巢內羽化，才能將卵產在蛹殼內而獲得保護，如果在巢外則無法完成交配。 11

# 參、結論

- 一、不同前人研究新發現
  - 環境 — 濕度**80%以上**、重壓→幼蟲會離開蓑巢
  - 行為 — 離開蓑巢後幼蟲能夠重建**3-10個**新蓑巢
- 二、首發現幼蟲防禦行為
  - 對外 — 1.封住巢口、2.排體液→對螞蟻有忌避效果
  - 對內 — 改變身形→增加蓑巢內移動空間
- 三、首發現蓑巢防護方式(1)
  - 對卵 — 蓑巢內的蛹殼形變小→可保護卵
  - 對初齡蟲 — 快速做蓑巢→降低被捕食率
- 四、首發現蓑巢防護方式(2)
  - 對蛹 — 幼蟲做的類伯努利雙扭線型絲線→使蓑巢更穩固
  - 對成蟲 —
    - 雄性巢外羽化
    - 雌性巢內羽化在蓑巢內繁殖下一代

肆、參考資料：

一、謝雨彤 (2020)·移動城堡-避債蛾應用蓑巢生存策略之探討·中華民國第60屆中小學科學展覽會作品說明書