

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生物科

第一名

030304

「蛹」恆的約定

學校名稱：新北市立中山國民中學

| | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 作者： 國一 楊 頤 國二 葉之晴 | 指導老師： 陳佑華 吳志成 |
|---------------------------------|-----------------------------|

關鍵詞：樺斑蝶、蛹、結蛹點

得獎感言

成功的大門，總是為堅持到最後的人開啟。在研究的過程中，我們遇到許多疑惑、困擾，甚至是一次又一次失敗的實驗，還好有指導老師，總是帶領我們一關又一關的解決問題。在研究討論中，每個人都要絞盡腦汁，大腦裡整天都在想著問題和解決途徑，每當產生新的想法或找到解決辦法時，都會令人雀躍和興奮，這鼓雀躍便成為我們探索研究的最大動力。

回顧整個研究，驚覺報告書上的每一頁、每一句、每一字.....都是我們努力後的珍寶，也代表著我們在這次研究過程中，鑽研過後的價值，是真正屬於我們流過汗水的果實，是獨一無二的經驗！在這當中，我們深深的體會到「合作」的力量，即便研究中也曾因為實驗失敗或想法不同，而有放棄、爭執的念頭，但是在合作夥伴、指導老師的陪伴、砥礪與鼓舞下，整個研究才能向前邁進。人們常說：「關關難過關關過」的確，我們真的做到了！

頒獎典禮上，聽到主持人宣布第一名：「新北市板橋區中山國中-蛹恆的約定」心中充滿無限的驚喜和感動，感謝評審委員對本研究的肯定，這份榮耀得來不易，這份成功得之於太多人的協助。感謝師大生命科學系謝秀梅教授、黃嘉龍博士的指導。在我們遇到難題困惑時，謝教授更是多次指引我們，並且鼓勵我們、幫我們打氣。感謝東華大學吳慶軍教授、台北市立大同高中趙家興老師為我們解惑；感謝今日儀器公司、漳和國中實驗室提供觀察儀器的協助；感謝文德國小生態園，以及生態園的所有志工們。最重要的是感謝一路帶我們走來的指導老師，給予我們支持協助的校長、主任和組長，還有無怨無悔陪伴我們的家人。

科學研究，需要更多的魔術師，感謝這些魔術師的魔法棒讓這份研究能有甜美的果實。探索與研究是生命中最好的投資，整個研究過程的點點滴滴是我們永生難忘的記憶，最大的收穫是探索新知的動力和永不放棄的研究精神，我們兩位作者便是最大的獲益人。在此，我們將這份榮耀分享給大家，也期許我們兩位作者，在未來能夠持續探索和研究的的精神，激起生命更多的漣漪！



到大漢溪溼地尋找蟲寶寶的足跡



在生物實驗室留影紀念



佈展後，充滿成就感的與作品合照

摘要

我們好奇樺斑蝶幼蟲如何找尋適合結蛹之處，於是我們設計實驗，觀察樺斑蝶幼蟲找尋結蛹位置、前蛹、蛻皮、化蛹到羽化的行為現象，分析結蛹位置後，發覺蛹重與葉柄所產生力矩與物理學的靜力平衡有關連，進而設計實驗與器材測量及驗證。發現結蛹位置葉長與蝶蛹結構符合黃金比例。其次，探索不同結蛹環境對蛹體懸掛的影響、絲座與懸絲器所能負載重量的關係，以及大氣溼度是否會影響幼蟲的結蛹選擇與改變絲座的負重。由結果得知蛹的負重比值、幼蟲選擇結蛹在葉長黃金比例位置、葉片重心 ± 1 公分、切角 110 度和柄角 130 度產生力矩最大值，促使結蛹葉片易被吹拂搖動而不會和其他葉片有所不同，更對蛹具有穩固、隱蔽的保護意義，令我們讚嘆生物為生存所做的精密計算。

壹、研究動機

暑假中，有一次到溼地騎腳踏車，看到樺斑蝶飛舞，我們停下腳踏車觀察。在馬利筋旁的稻子葉片上發現了一個樺斑蝶的蛹，學姊問我：「樺斑蝶為什麼會在稻子葉片上結蛹呢？」(圖 1)我脫口便說：「這隻小毛毛蟲一定是調皮，迷路了！找不到回家的路」學姊不以為然的說：「才不是呢！或許是稻子葉片傾斜的角度？或許是稻子葉背粗糙的接觸面吸引了他？」我們經過一番討論卻沒有結果，那個蛹在我們心中產生了一個大問號，開學後我向生物老師提問，生物老師鼓勵我繼續研究樺斑蝶結蛹環境的選擇，於是學姊和我便一起投入樺斑蝶結蛹的探索活動。

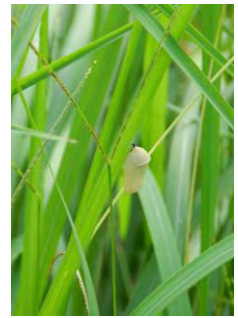


圖 1：結在稻葉上的蛹

貳、研究目的

- 一、探索樺斑蝶幼蟲找尋結蛹位置、前蛹、蛻皮、化蛹到羽化的行為現象。
- 二、探討葉片的重心、力矩大小關係，是否為影響樺斑蝶幼蟲對結蛹位置選擇的因素。
- 三、探討生物數學在樺斑蝶幼蟲結蛹位置葉長以及蝶蛹結構的黃金比例。
- 四、認識絲座與懸絲器，並探討蛹重與懸絲器鉤子數、面積的關係。
- 五、探索在不同的結蛹點，絲座負重能力的差異情形。
- 六、探索空氣溼度對絲座負重能力的影響。

參、研究設備及器材

1. 飼養箱、馬利筋植株、量角器、尺、數位相機、放大鏡、砝碼、黑色書面紙、迴紋針、大頭針。樺斑蝶、大白斑蝶、淡小紋青斑蝶、琉球青斑蝶、枯葉蝶的幼蟲
2. 觀察儀器 (圖 2a~d)



圖 2a: 顯微鏡



圖 2b: 電子顯微鏡
(儀器公司商借)



圖 2c: 數碼放大鏡



圖 2d: 電子天平

肆、研究過程與方法

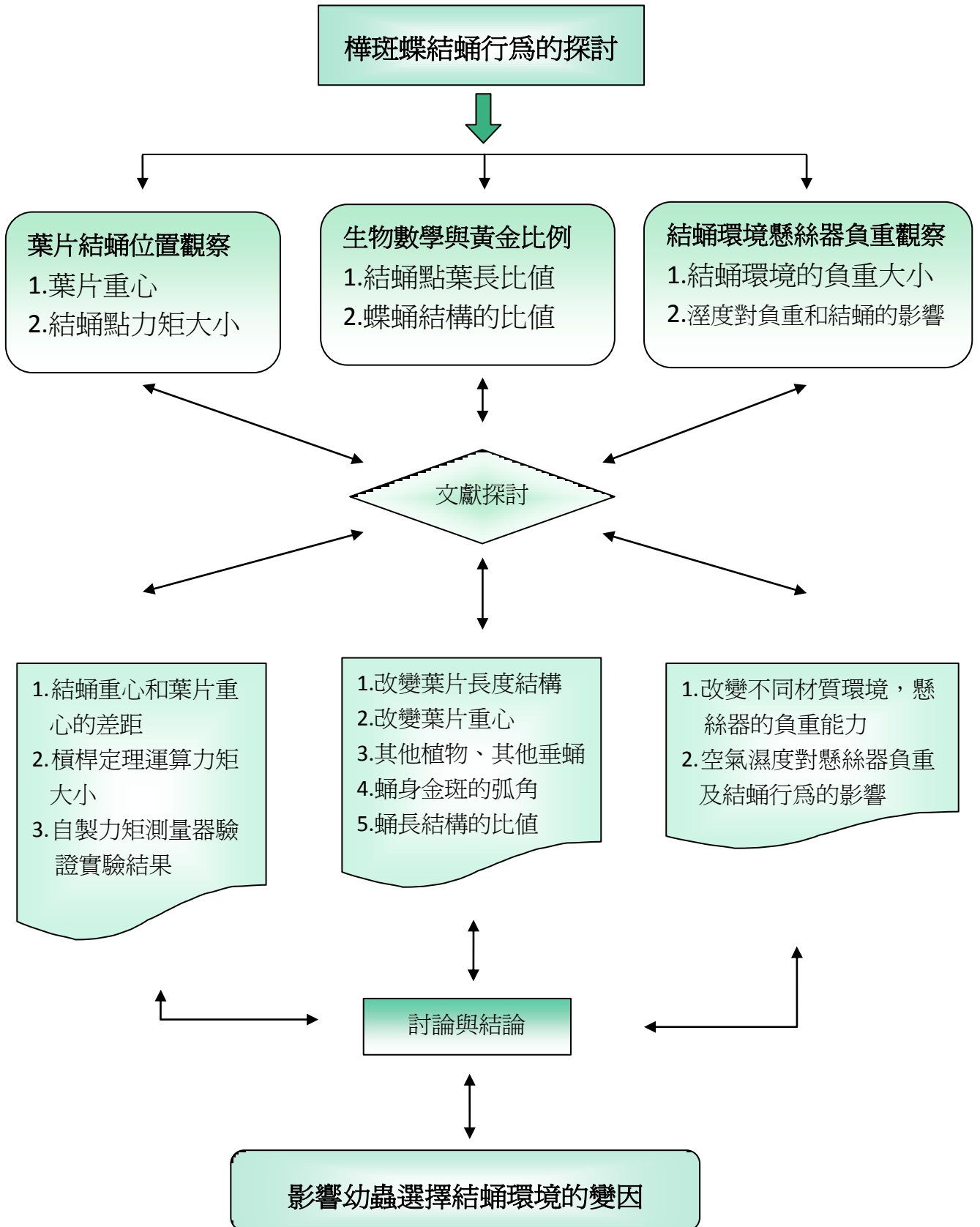


圖 3:研究架構圖

研究一：觀察樺斑蝶幼蟲結蛹～羽化的過程

動機：樺斑蝶的幼蟲在馬利筋的植物上結出漂亮如寶石般的蛹，一隻幼蟲是如何把自己包起來幻化成蛹。

觀察過程：觀察→找尋結蛹位置→吐絲建立絲座→蛻皮結蛹過程→蛹的構造→羽化過程。

研究二：探討樺斑蝶幼蟲結蛹位置的力矩與重心

動機：觀察發現樺斑蝶終齡幼蟲，在植物上結蛹的位置大都在葉背葉脈中肋的地方，牠似乎呈現了力的平衡，讓我們很好奇想一探究竟是什麼原因。(圖 4a~e)



圖 4a



圖 4b

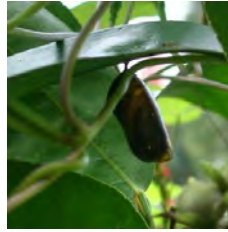


圖 4c



圖 4d



圖 4e

研究方法：1.製作測量垂直距離、夾角、重心和高度的工具尺。(圖 5a~d)

2.隨機在馬利筋盆栽的葉或莖上放置樺斑蝶幼蟲，觀察並記錄結蛹行爲。

3.以槓桿定理運算觀察紀錄的力矩大小，自製力矩測量器，驗證觀察結果。



圖 5a: 垂直距離



圖 5b: 夾角測量



圖 5c: 力矩測量



圖 5d: 重心測量

研究三：生物數學在幼蟲結蛹位置葉長以及蝶蛹結構的黃金比例

動機：幼蟲在葉片結蛹位置的選擇以及蝶蛹結構是否和黃金比例有關，於是進行改變葉子結構、葉片重心、結蛹環境、以及其他垂蛹蝴蝶結蛹點的實驗與黃金比例的關係。

研究方法：

(一)探索結蛹點〔(葉長+蛹柄距)/葉長〕比值的關係

(二)改變葉片重心，觀察對結蛹位置的影響：在葉子上放迴紋針，觀察對結蛹位置的影響。(圖 6a)

(三)改變葉片長度，觀察對結蛹位置的影響。(圖 6b)

(四)不同植物對結蛹位置的影響：

選用不同植物作為結蛹的環境。

(五)其他垂蛹蝴蝶，結蛹位置的探索

1.飼養其他垂蛹幼蟲來觀察。

2.紀錄終齡幼蟲結蛹位置的選擇。

(六)蝶蛹結構與黃金比例

1.樺斑蝶蛹構造的探索

2.蝶蛹結構的黃金比例



圖 6a 改變重心



圖 6b 改變長度

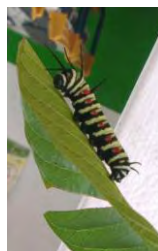


圖 6c 大白斑蝶



圖 6d 琉球青斑蝶



圖 6e 淡紋青斑蝶



圖 6f 枯葉蝶

研究四：觀察懸絲器與絲座，並探討蛹重與懸絲器鉤子數、面積的關係

動機：樺斑蝶懸掛的懸絲器和一大片的絲座在顯微鏡下可以看到麼呢？

研究方法：

1. 準備 2 個觀察箱。
2. 在觀察箱內側四周貼上黑色書面紙，放入幼蟲，待其結蛹。(圖 8)
3. 以電子顯微鏡(160 的倍率)觀察蛹的絲座和懸絲器。
4. 計算懸絲器的面積、鉤子數及鉤子密度。



圖 8: 觀察箱

研究五：探索在不同的結蛹點，絲座負重能力的差異情形

動機：有一次，一個掛在牆壁上的蛹，經過了三個星期都沒羽化，我們要將牠取下來觀察，原以為輕輕一扯便能讓蛹和牆壁分開，結果並不如預期。後來還是拿了針，從周遭的絲線挑起，蛹黏結了一大片絲座一起取下來。懸絲器、絲座讓蛹與接觸點牢牢固著，懸絲器與絲座黏結後，產生的負重能力有多少呢？

研究方法：

(一) 不同結蛹點，絲座的負重情形

1. 測量蛹在葉背中肋、磁磚牆壁、飼養箱和枯樹枝上的負重能力(圖 9a~g)
(將棉線綁於蛹最堅固的位置—懸絲器尾端，棉線下端為環狀，以供懸掛砝碼。)
2. 以電子天平測量蛹淨重。

(二) 以魔鬼氈的負重情形，探討結蛹角度如何影響絲座的負重

1. 製作魔鬼氈負重測量器：以魔鬼氈模擬絲座與懸絲器。
2. 在白色魔鬼氈上，標記黃色魔鬼氈黏貼處。
3. 調整測量器的傾角，垂掛砝碼，測量不同傾角產生的負重能力(同一傾角實驗 3 次，取平均值)。



圖 9a



圖 9b



圖 9c



圖 9d



圖 9e



圖 9f



圖 9g

研究六：探索空氣溼度對絲座負重與結蛹行為的影響。

動機：「研究五」在做絲座負重觀察時，有幾天連續下雨，空氣中的溼度極高，看見幼蟲辛苦編織的絲座與接觸面黏著狀況不佳，絲座掉下來，脫離接觸面已經 1 cm(圖 10)。有的在測量中也發現絲座的負重特別低，追溯其結蛹日期，大多為雨天，因此推測空氣溼度會影響絲座與接觸面的黏著性，且影響幼蟲的結蛹行為。



圖 10

研究方法：

(一)溼度對絲座負重的影響

- 1.準備甲、乙兩個飼養箱。
- 2.甲為一般常態，記錄其溫度與溼度。
- 3.乙每隔 2 小時噴水一次，溼度維持在 99%。(圖 11a~c)



圖 11a

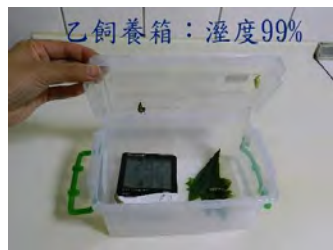


圖 11b



圖 11c

(二)溼度對幼蟲結蛹行為的影響

- 1.完成溼度實驗箱，右側為丙飼養箱(常態)，左側為丁飼養箱(噴水，提高溼度)

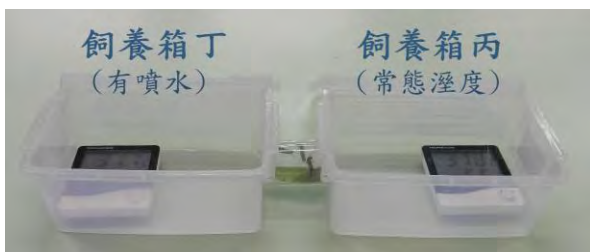


圖 11d 溼度實驗箱

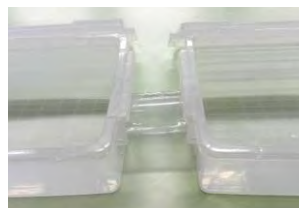


圖 11e 中間以管狀連接



圖 11f 將幼蟲放在透明管狀處

- 2.將終齡幼蟲放在中間透明管狀處，觀察溼度對結蛹選擇的影響。

伍、研究結果

研究一結果：觀察樺斑蝶幼蟲結蛹～羽化的過程

(一)樺斑蝶幼蟲找尋結蛹位置的行為觀察與記錄

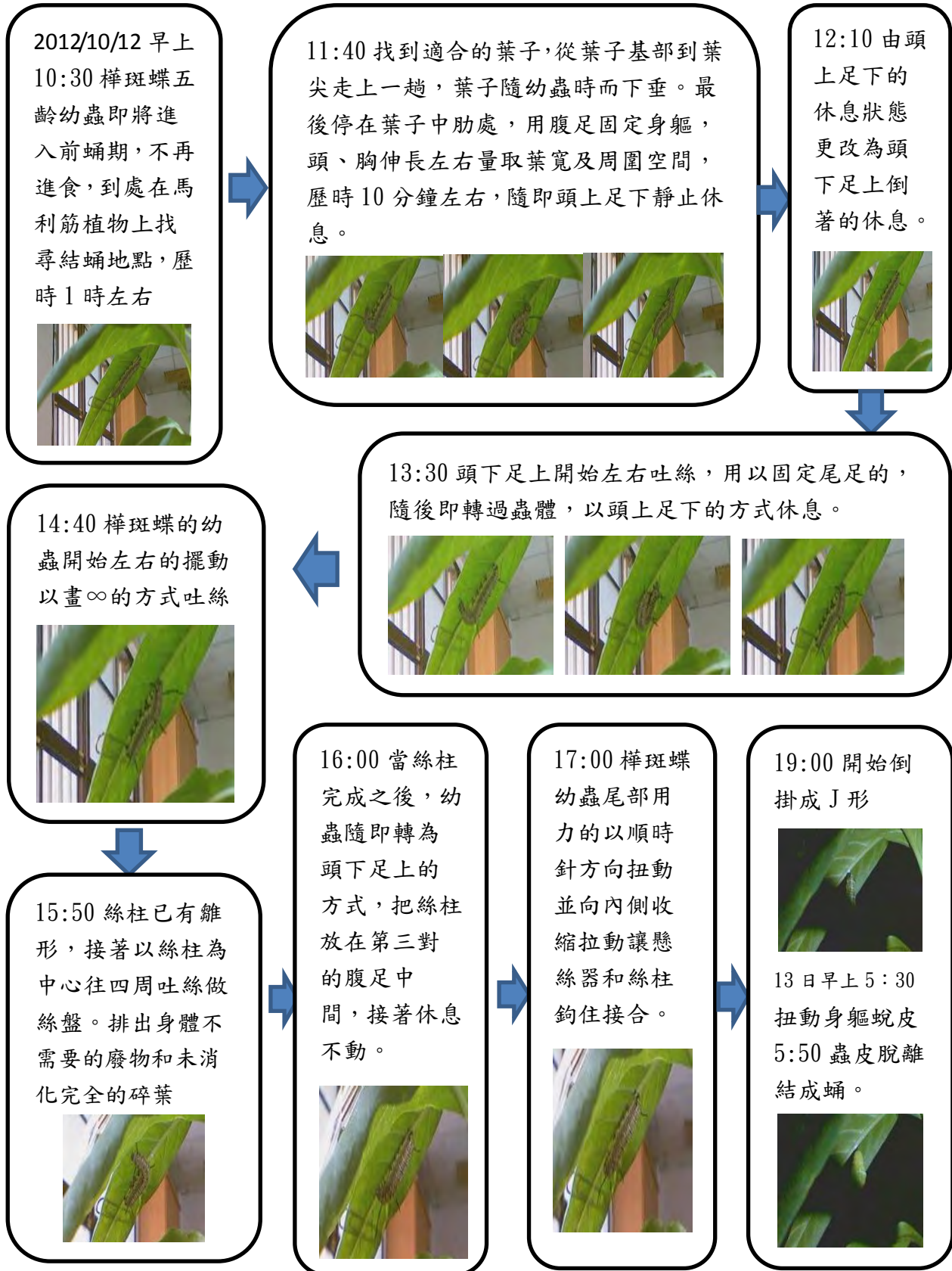


圖 12: 幼蟲找尋結蛹位置的行為

(二)樺斑蝶幼蟲吐絲行為觀察

樺斑蝶終齡幼蟲因為蟲體腹足的假足沒有吸盤固定身軀，蟲體前後兩端向背方彎曲，蟲體成「C」字型先以口器如畫“∞”形狀的方式吐絲，再以胸部真足鉤住絲線固定身軀，防止蟲體在光滑的的物體上滑落。腹足向內收縮鉤住絲線固定軀體之後，在伸長頭胸的範圍內左右吐絲盤，以利在物體上行走自如。(圖 13a~h)

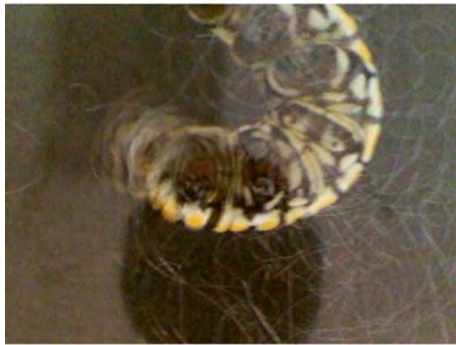


圖 13a



圖 13e



圖 13b



圖 13f



圖 13c



圖 13g

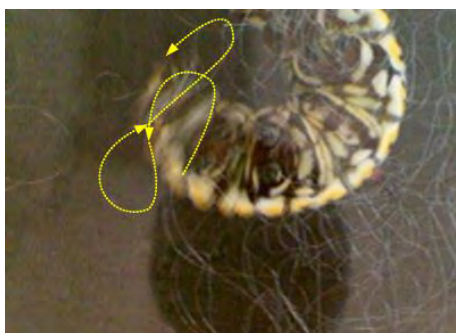


圖 13d

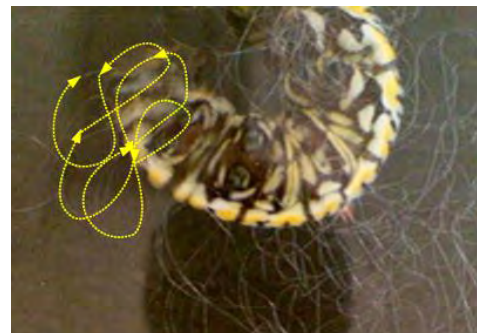


圖 13h

(三)樺斑蝶幼蟲蛻皮～化蛹觀察

1、前蛹期約 12 小時→蛻皮化蛹過程約 20 分鐘)

表 1：樺斑蝶幼蟲蛻皮～化蛹

| | | | | |
|---|---|---|--|---|
| 10/12 下午 5：30 | 10/12 下午 7：00 | 10/13 早上 5：30 | 10/13 早上 5：33 | 10/13 早上 5：35 |
| 進入「前蛹期」 | 蟲體倒掛成 J 字 | 外皮被用力撐開 | 從頭、胸處裂開 | 蠕動撐開外皮 |
|  |  |  |  |  |
| 10/13 早上 5：37 | 10/13 早上 5：39 | 10/13 早上 5：40 | 10/13 早上 5：42 | 10/13 早上 5：43 |
| 觸角隱約可見 | 不斷蠕動蛹體 | 蛻下外皮 | 蛹體左右扭動 | |
|  |  |  |  |  |
| 10/13 早上 5：45 | 10/13 早上 5：46 | 10/13 早上 5：48 | 10/13 早上 5：50 | 10/13 早上 8：50 |
| | | 腹部往上推擠 | 蛹色淡黃柔軟 | 蛹色為皮膚色 |
|  |  |  |  |  |

2、樺斑蝶幼蟲的結蛹行為時間表

| 表 2：樺斑蝶幼蟲的結蛹時間表 (氣溫約 24~27°C) | | | | | | |
|---|---|---|---|--|---|---|
| 10/12 早上 10：30 | 10/12 下午 2：40 | 10/12 下午 5：30 | 10/12 下午 7：00 | 10/13 早上 5：30 | 10/13 早上 5：50 | 10/22 早上 7：53 |
| 找尋結蛹 位置 | 吐絲建立 絲座 | 進入前蛹 期 | 倒吊成 J 字 形 | 蠕動蛻皮 | 成蛹 | 蛹色變深 即將羽化 |
|  |  |  |  |  |  |  |



(四)樺斑蝶蟲蛹羽化的過程觀察

1. 樺斑蝶蛹羽化紀錄

表 3：樺斑蝶蛹羽化紀錄

| | | |
|---|---|---|
| 經歷時間：5 秒 | 經歷時間：24 秒 | 經歷時間：27 秒 |
| 從蛹的腹面下方裂開，形成三角形開口，探出頭部。 | 用腳和翅膀將蛹殼開口撐得更大。(蛹殼呈現透明) | 成蟲繼續往下蠕動，蟲體腹部體節膨大 |
|  |  |  |
| 經歷時間：33 秒 | 經歷時間：2 分 54 秒 | 經歷時間：6 分 59 秒 |
| 蟲體完全脫離蛹殼 | 蟲體腹部依然膨大，翅膀呈現捲曲 | 不斷蠕動腹部體節，將腹部體液流入翅脈。 |
|  |  |  |
| 經歷時間：7 分 24 秒 | 經歷時間：41 分 17 秒 | 經歷時間：4 時 05 分 |
| 後翅上緣尚未完全展開，腹部體節已經縮小 | 翅膀已經平整，翅脈清晰可見，停息在蛹殼上晾翅膀。 | 開始輕輕拍動翅膀。 |
|  |  |  |
| 經歷時間：4 時 18 分 | 經歷時間：4 時 25 分 | 經歷時間：4 時 52 分 |
| 排出多餘體液。 | 練習展翅飛翔，但因重心不穩而滑倒。 | 展翅飛翔 |
|  |  |  |

2. 樺斑蝶羽化時間表

| 表 4 樺 斑 蝶 羽 化 時 間 表 (10/22 氣 溫 約 24~27°C) | | | | | | |
|---|---|---|---|--|---|---|
| 10/22 早上 7:53 | 10/22 早上 7:53 | 10/22 早上 7:53 | 10/22 早上 8:34 | 10/22 早上 11:58 | 10/22 下午 12:11 | 10/22 下午 12:45 |
| 蛹殼裂開 探出頭部 | 用腳和翅 膀將蛹殼 撐得更大 | 脫離蛹殼 | 體液流入 翅脈, 翅膀 平整 | 伸展翅膀 晾乾翅膀 | 排出多餘 體液 | 展翅飛翔 |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 33 秒 | | | 41 分 | 3 小時 | 5 小時 | |

研究二結果：探討樺斑蝶幼蟲結蛹位置的力矩與重心

根據觀察資料做下列分析 (樣本數 71, 附件 2-1)

(一) 結蛹處葉子的切線角度與力矩大小的關係

原為靜止的物體, 受到數個外力的作用, 仍然能夠保持靜止狀態, 稱此數個外力達成靜力平衡並滿足拉密定理:

(圖 14)

$$\frac{F_1}{\sin \theta_1} = \frac{F_2}{\sin \theta_2} = \frac{F_3}{\sin \theta_3}$$

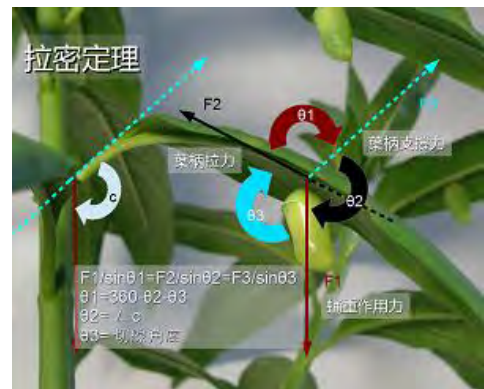


圖 14：拉密定理

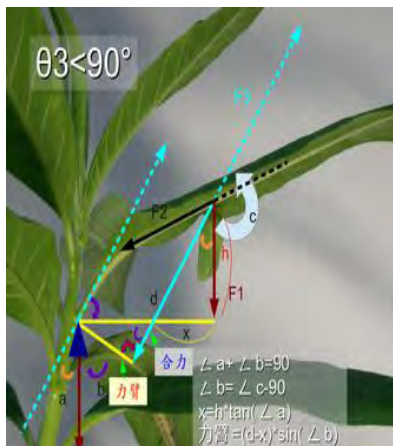


圖 15a

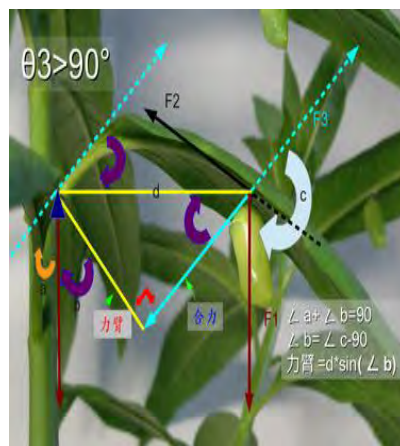


圖 15b

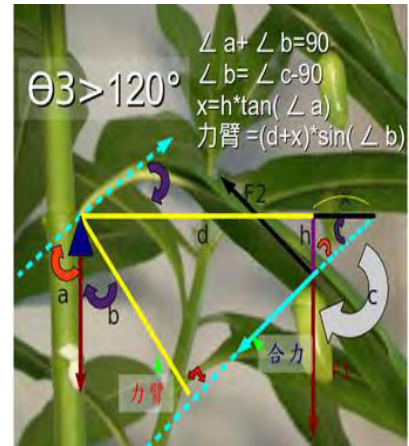


圖 15c

$$F_3(\text{合力}) = F_1(\text{蛹重}) * \sin(\theta_3) / \sin(\theta_1)$$

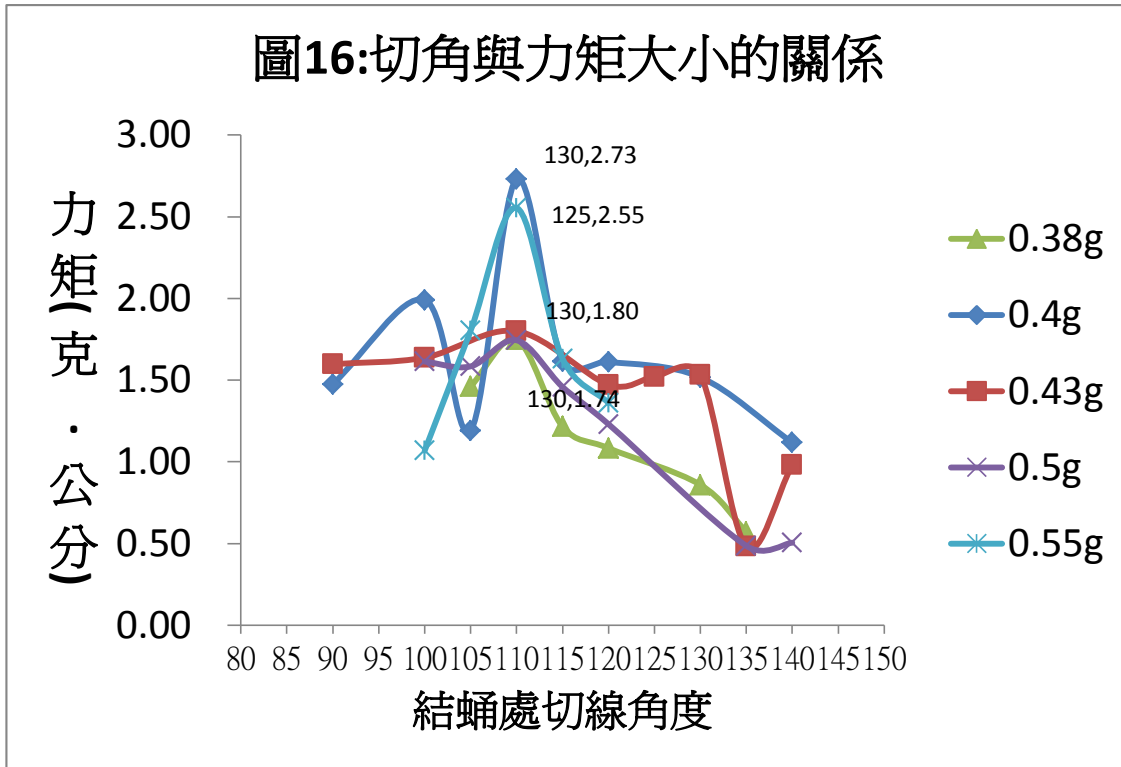
$$D(\text{力臂}) = (d \pm x)(\text{蛹距}) * \sin(\angle b)$$

$$\angle \theta_3 : \text{切角}; \theta_1 : 360^\circ - (\text{切角} + \text{柄角}) >$$

$$x = \tan(\angle a) * h(\text{高度})$$

$$M(\text{力矩}) = F_3 * D$$

1、觀察記錄分析



說明：

- (1)、蛹重所形成的合力作用力隨切角越大而有越小的趨勢。(圖 15a~c)
- (2)、不同蛹重所產生的力矩最大值產生在切角 110 度柄角 130 度。(圖 16)
- (3)、不同蛹重的蛹柄距最大值也幾乎是在切角 110 度柄角 130 度。
- (4)、蛹柄距隨切角越小或切角越大則越小的趨勢。
- (5)、力臂最大值在柄角 130 度或隨柄角越小或柄角越大則越小的趨勢。

2、以力矩測量器驗證觀察結果(圖 17a~b)

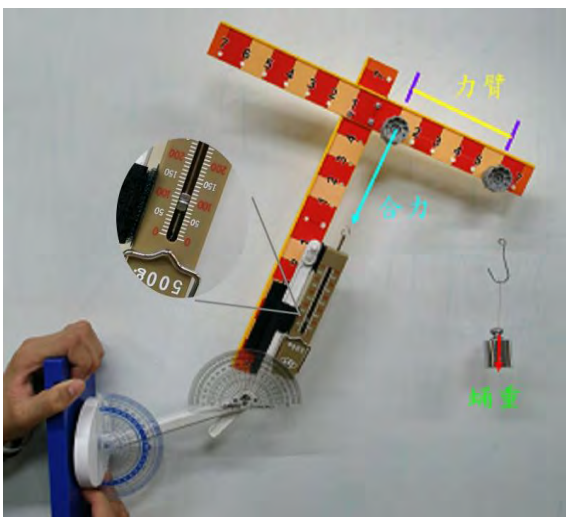


圖 17a：力矩測量

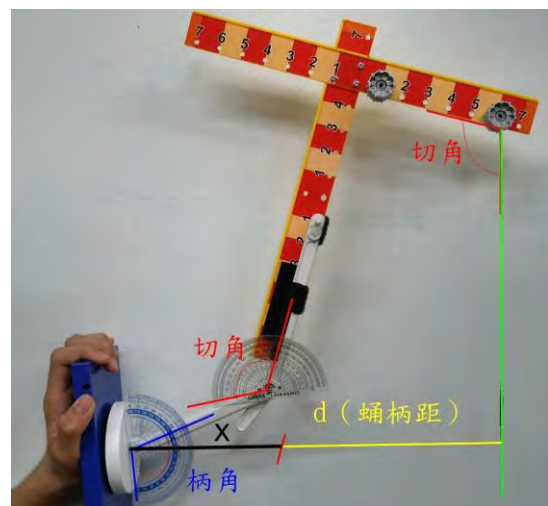


圖 17b:蛹柄距測量

(1)、「力矩測量器」實驗結果

| 蛹重(g) 柄角 切角 | | 合力 | | | | | 切角 力臂 | 力矩 | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 |
| 100 | 90 | 100 | 90 | 85 | 80 | 75 | 2 | 200 | 180 | 170 | 160 | 150 |
| 100 | 100 | 90 | 85 | 80 | 75 | 70 | 3 | 270 | 255 | 240 | 225 | 210 |
| 100 | 110 | 85 | 80 | 75 | 70 | 65 | 4 | 340 | 320 | 300 | 280 | 260 |
| 100 | 120 | 80 | 75 | 70 | 65 | 60 | 5 | 400 | 375 | 350 | 325 | 300 |
| 100 | 130 | 75 | 70 | 65 | 60 | 65 | 6 | 450 | 420 | 390 | 360 | 390 |
| 100 | 140 | 70 | 65 | 60 | 65 | 70 | 5 | 350 | 325 | 300 | 325 | 350 |

* 力臂隨切角大小而改變(紅色結蛹點不存在)

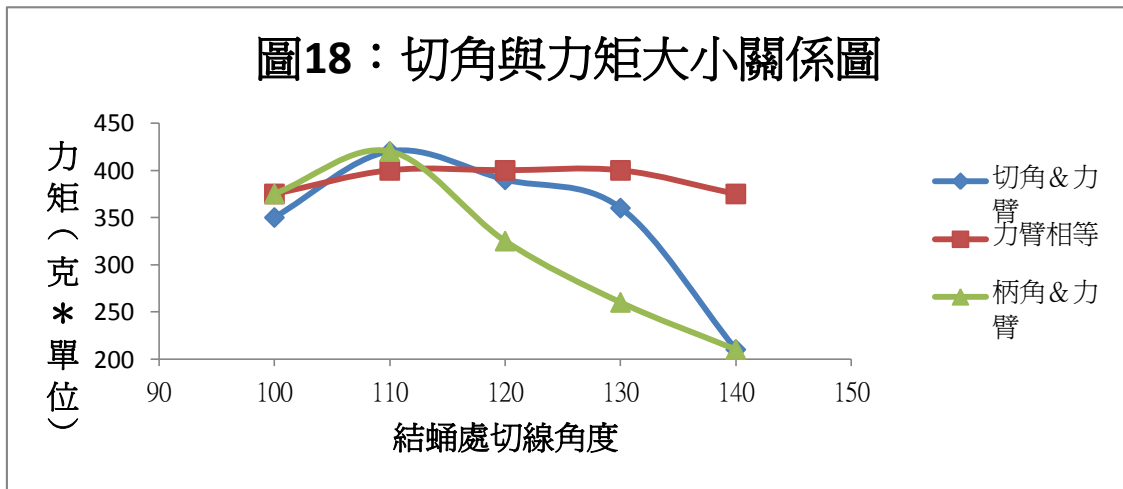
| 蛹重(g) 柄角 切角 | | 合力(切角) | | | | | 切角 力臂 | 力矩 | | | | |
|-------------|-----|--------|-----|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 |
| 100 | 90 | 100 | 90 | 85 | 80 | 75 | 5 | 500 | 450 | 425 | 400 | 375 |
| 100 | 100 | 90 | 85 | 80 | 75 | 70 | 5 | 450 | 425 | 400 | 375 | 350 |
| 100 | 110 | 85 | 80 | 75 | 70 | 65 | 5 | 425 | 400 | 375 | 350 | 325 |
| 100 | 120 | 80 | 75 | 70 | 65 | 60 | 5 | 400 | 375 | 350 | 325 | 300 |
| 100 | 130 | 75 | 70 | 65 | 60 | 65 | 5 | 375 | 350 | 325 | 300 | 325 |
| 100 | 140 | 70 | 65 | 60 | 65 | 70 | 5 | 350 | 325 | 300 | 325 | 350 |

* 力臂固定不隨切角大小而改變(紅色結蛹點不存在)

| 蛹重(g) 柄角 | | 力臂 | | | | | 力矩 | | | | |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 |
| 100 | 90 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 300 | 270 | 170 | 160 | 150 |
| 100 | 100 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 360 | 340 | 240 | 225 | 210 |
| 100 | 110 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 340 | 320 | 300 | 210 | 195 |
| 100 | 120 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 400 | 375 | 280 | 260 | 180 |
| 100 | 130 | 5 | 6 | 5 | 4 | 4 | 375 | 420 | 325 | 240 | 260 |
| 100 | 140 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 350 | 325 | 300 | 260 | 280 |

* 力臂隨柄角大小而改變(紅色結蛹點不存在)

將上述力矩測量器實驗結果繪成「切角與力矩大小關係圖」如下：



說明：

- (1)、蛹重所形成的合力作用力隨切角越大而有越小的趨勢。
- (2)、蛹柄距隨切角越小或切角越大則越小的趨勢。
- (3)、自製實驗器材實驗的結果(表 5a~c)和觀察資料分析結果一致，力矩的最大值在切角 110 度柄角 130 度。(圖 18)。

(二) 幼蟲結蛹點葉片的切線角度與蛹距與葉片重心距差的關係 (樣本數 40, 附件 2-2)

距離差 = 結蛹重心 - 葉片重心(d-k) (圖 19a~c)



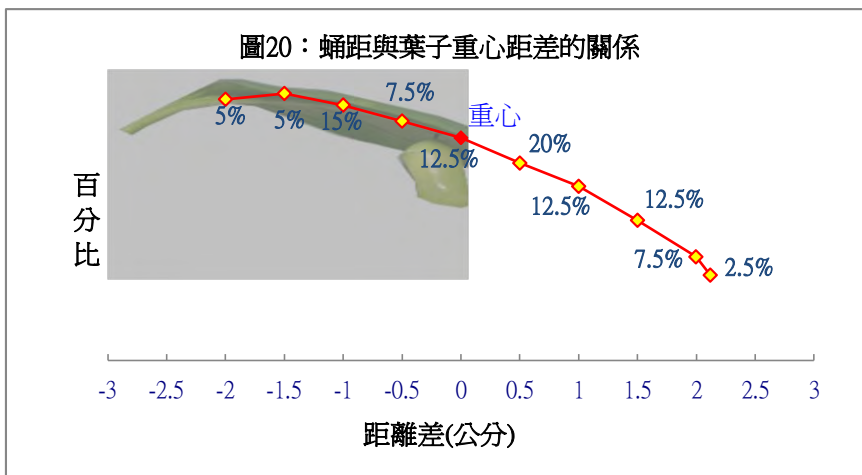
圖 19a 結蛹時的重心



圖 19b 葉子的重心



圖 19c



說明：從圖 20 中明顯看出，幼蟲選擇的結蛹點 67.5%集中在葉子重心(± 1) 公分處，恰巧在切線角度 100~130 度的範圍。(27/40)

研究三結果：生物數學在結蛹點葉長以及蝶蛹結構的黃金比例

(一) 結蛹點葉子的切線角度與〔(葉長+蛹柄距)/葉長〕比值的關係 (樣本數 111)

在此所求之比值 m :

$$[(葉長+蛹柄距)/葉長] = h+d/h=m$$

h : 長邊即葉尖到葉柄基部垂線的距離

d : 短邊即結蛹點到葉柄基部垂線的距離



圖 21a

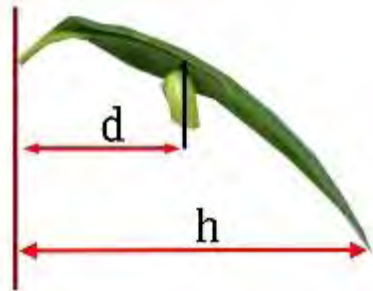
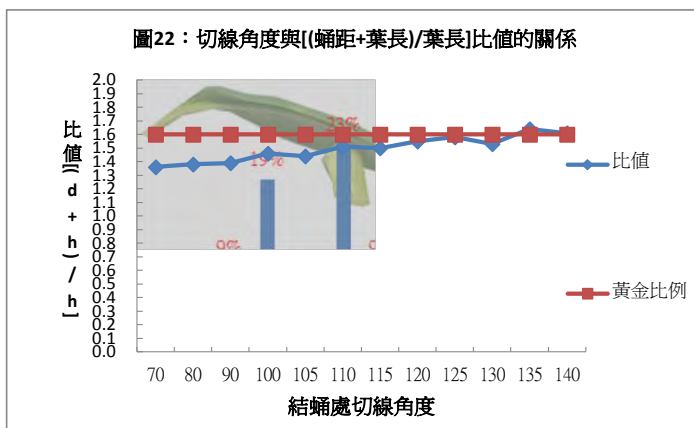


圖 21b



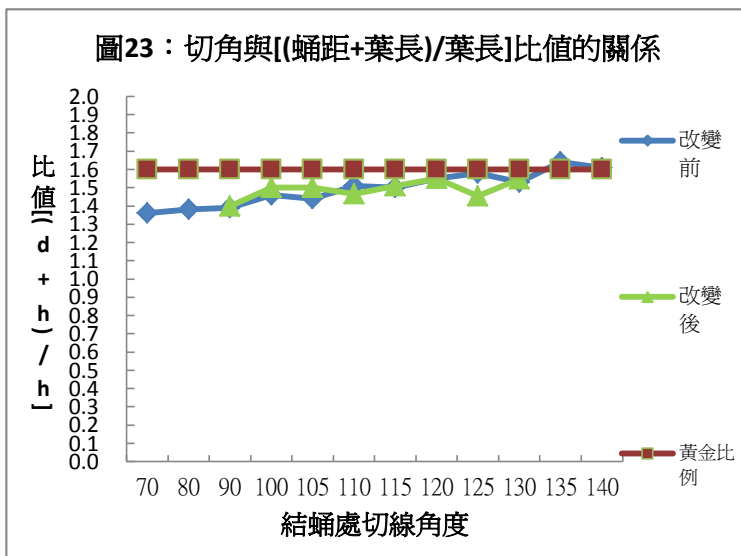
說明：圖 22 資料顯示：

1. $(d+h)/h$ 的比值：80% 在 1.5 到 1.7 的範圍。(89/111)

2. 不管結蛹點與葉片切線角度如何，幼蟲找尋的結蛹點，其 $(d+h)/h$ 的比值都很接近黃金比例 1.618。

3. $(d+h)/h$ 比值線性趨勢線斜率非常接近零，顯示 $(d+h)/h$ 的趨勢線和黃金比例線非常接近。

(二) 改變葉片重心後結蛹點的切線角度與蛹距和葉子長度的關係 (樣本數 18，附件 3-1)

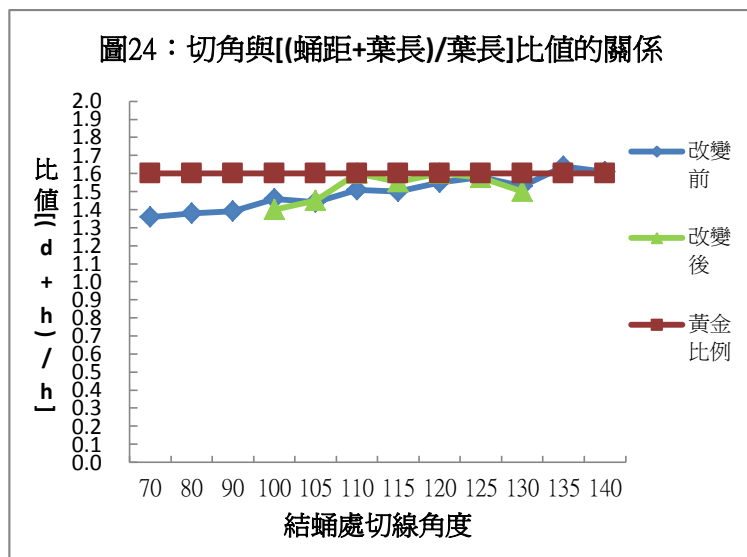


說明：圖 23 資料顯示：

1. $(d+h)/h$ 的比值：83% 在 1.5 到 1.7 的範圍(15/18)。

2. 改變葉子重心之後，不管結蛹點與葉片切線角度如何，幼蟲找尋的結蛹點，其 $(d+h)/h$ 的比值都很接近沒有改變重心前的比值。顯示改變葉子重心前後之 $(d+h)/h$ 的線性趨勢線彼此非常接近。

(三) 改變葉片長度後結蛹點的切線角度與蛹距和葉子長度的關係 (樣本數 17, 附件 3-2)



說明：圖 24 資料顯示：

1. $(d+h)/h$ 的比值：88%在 1.5 到 1.7 的範圍內。(15/17)
2. 改變葉子長度結構之後，不管結蛹點與葉片切線角度如何，幼蟲找尋的結蛹點，其 $(d+h)/h$ 的比值幾乎都很接近「原本葉子長度結構」時的比值。
3. 顯示幼蟲找尋結蛹點的 $(d+h)/h$ 比值，不會因為葉片長度結構而改變。

(四) 不同植物結蛹點的切線角度與蛹距和葉子長度的關係 (樣本數 37, 附件 3-3)



圖 25a



圖 25b



圖 25c

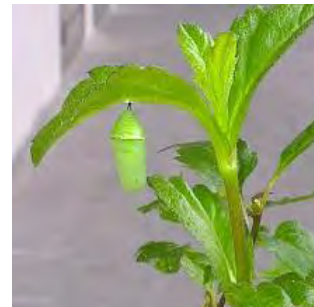
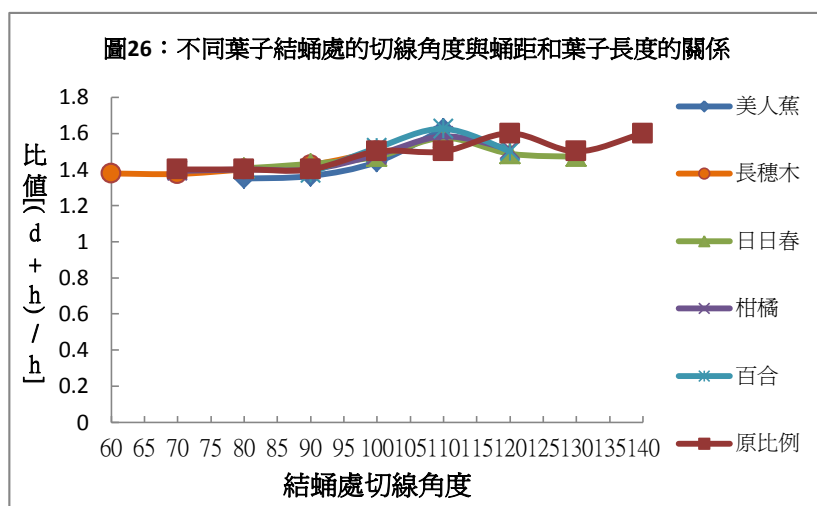


圖 25d



說明：圖 26 資料顯示：

幼蟲在不同植物葉子上結蛹，不管結蛹點的葉片切線角度如何，幼蟲找尋的結蛹點位置，其 $(d+h)/h$ 的比值：54%都結蛹在接近黃金比例 1.618 的趨勢。(20/37)

(五) 其他垂蛹蝴蝶結蛹點的切線角度與蛹距和葉子長度的關係 (樣本數 31, 附件 3-4)



圖 27a 大白斑蝶蛹



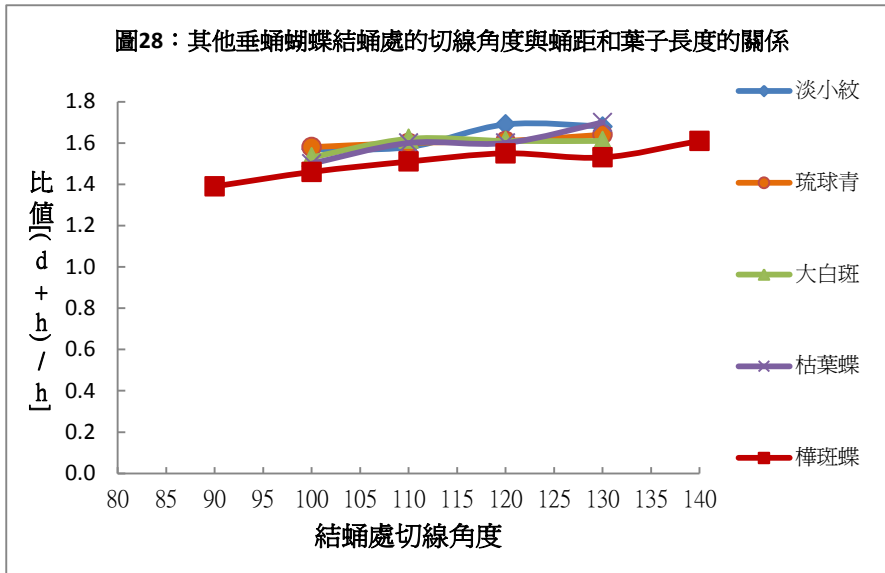
圖 27b 淡小紋青斑蝶蛹



圖 27c 琉球青斑蝶蛹



圖 27d 枯葉蝶蛹



說明：圖 28 資料顯示：其他垂蛹蝴蝶幼蟲找尋的結蛹點，有 83.88% 其 $(d+h)/h$ 的比值，接近黃金比例 1.618 的趨勢。(26/31)

(六) 蝶蛹結構與黃金比例

1、樺斑蝶蛹的構造觀察

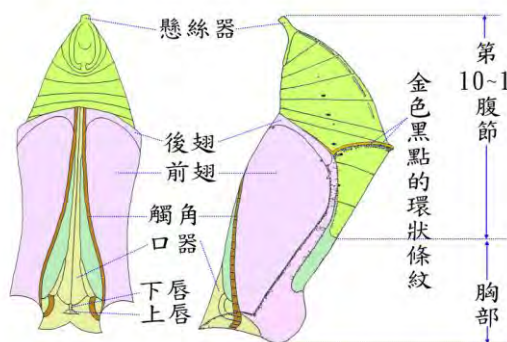
(1).認識蝶蛹的形態：

垂蛹：以尾端的懸絲器垂掛蛹體，蛹體頭部朝下之倒吊狀。樺斑蝶的蛹正是「垂蛹」。

帶蛹：以第 10 腹節尾端的懸絲器，在第二、三腹節間以絲帶支撐蛹體，蛹體頭部朝上。

(2).蝶蛹表面摸起來的質感：光滑的、油的，像塗了一層蠟在上面，可以防水。剛化蛹時，蛹是軟的，化蛹 12 小時後，蛹才逐漸變硬。(圖 29)

(3).樺斑蝶蛹的構造：(李俊延、張玉珍著。1988 年。台灣蝶類圖說(一)。)(圖 30)



蛹的形態：腹面(左)，側面(右)

圖 30 蛹的形態圖



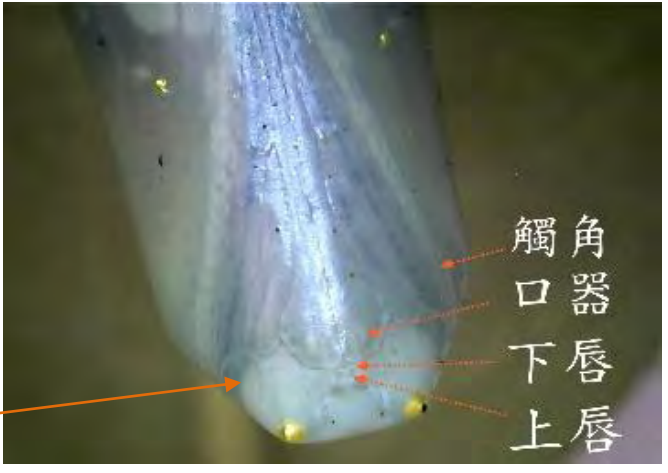
圖 29 即將羽化的蛹

(4). 蛹分為頭、胸、腹三部分

表 6：樺斑蝶蛹的構造

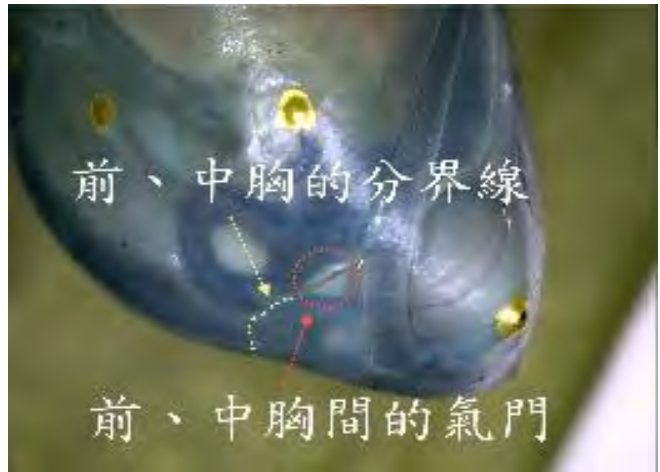
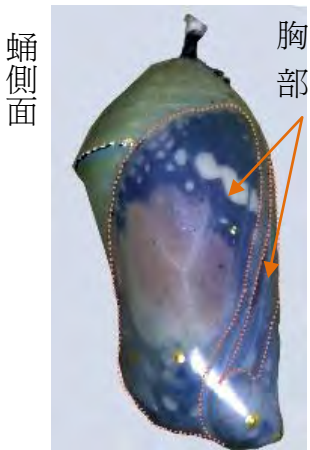
頭部有一對複眼；上唇面有 v 字形裂紋，裂紋下方為下唇；口器由頭部腹面的中央經胸部延伸到腹部中央(口器因種類不同而長短不一)。頭、胸附近有散佈 10 個金點，腹面有 4 個，背面 6 個。

頭部



胸部有三個體節，分為前、中、後三個胸節，以中胸最大。後翅大部分被覆於前翅下。前、中胸間有氣門。

胸部



腹部有 10 個體節，第 10 腹節尾端有懸絲器，第 3、4 腹節間有金色黑點的環狀條紋突起。第 2~8 腹節體側有氣門。

腹部



2. 蝶蛹結構的黃金比例 (樣本數 31)

(1)、蝶蛹構造金斑弧角與黃金比例

在觀察蛹的結構之後，發現有一個很特別的現象。我們試著把蛹的金色斑點的環狀條紋和氣門所形成的弧形角度(圖 31)和整個蛹的圓角做比值(圖 32)，令人驚訝的是這個比值和圓角的黃金比例類似。圓角的黃金比例： $360 \times 0.618 = 222.48$ 其補角 = 137.52 。

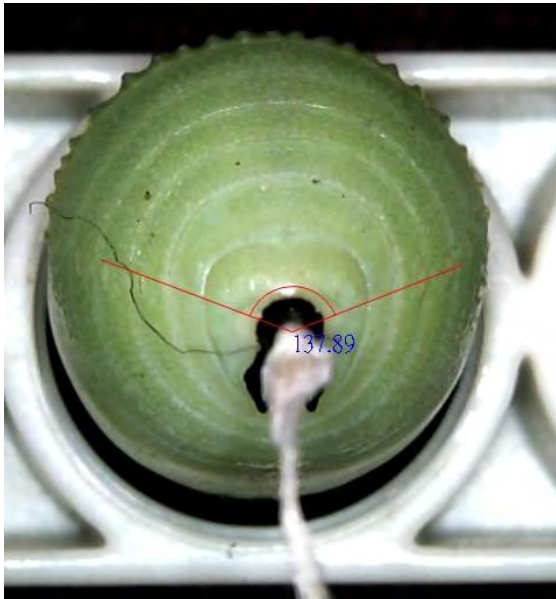


圖 31:金斑弧角

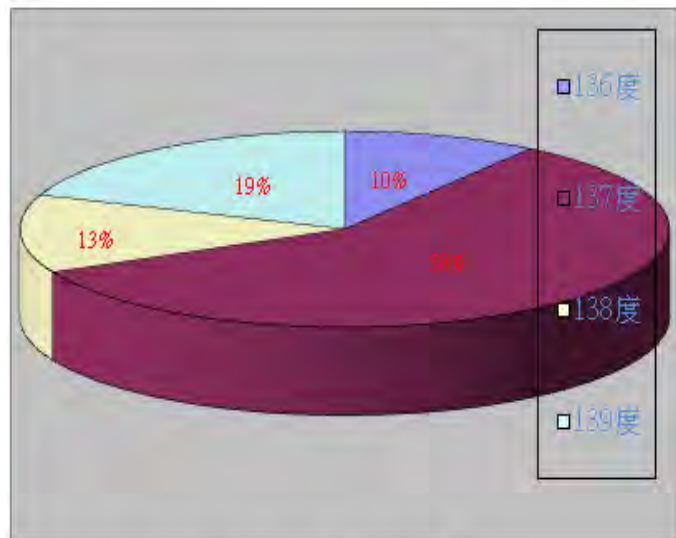


圖32:蝶蛹結構金斑弧角

(2)、蝶蛹構造與黃金比例

其次在蛹長結構的黃金比例，我們也發現蝶蛹結構的頭胸與腹部體節也把蛹分個成二個部分(圖 33)，這二個長度的比值也非常接近黃金比例(圖 34)。 $(a+b)/a = 1.618$

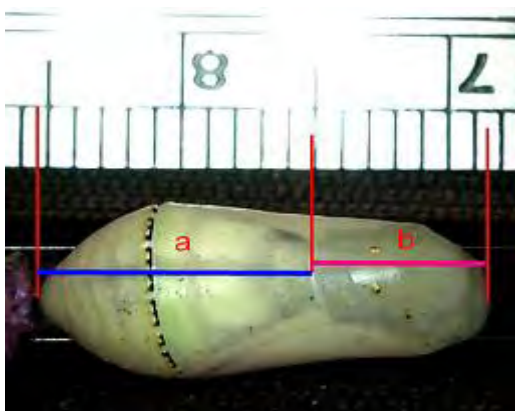


圖 33: 蝶蛹結構

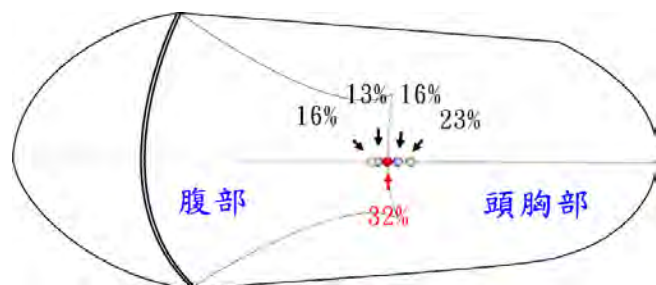


圖 34: 蛹長比值

表 7 蝶蛹結構統計表 (樣本數 31)

| 金斑弧角 | 136 度 | 137 度 | 138 度 | 139 度 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 個數 | 3 | 18 | 4 | 6 |
| 蛹長比值 | 1.57 | 1.58 | 1.62 | 1.64 |
| 個數 | 5 | 4 | 18 | 7 |

研究四結果：觀察懸絲器與絲座，並探討蛹重與懸絲器鉤子數、面積的關係

(樣本數 10，附件 4-1)

(一)觀察絲座與懸絲器 (圖 35)

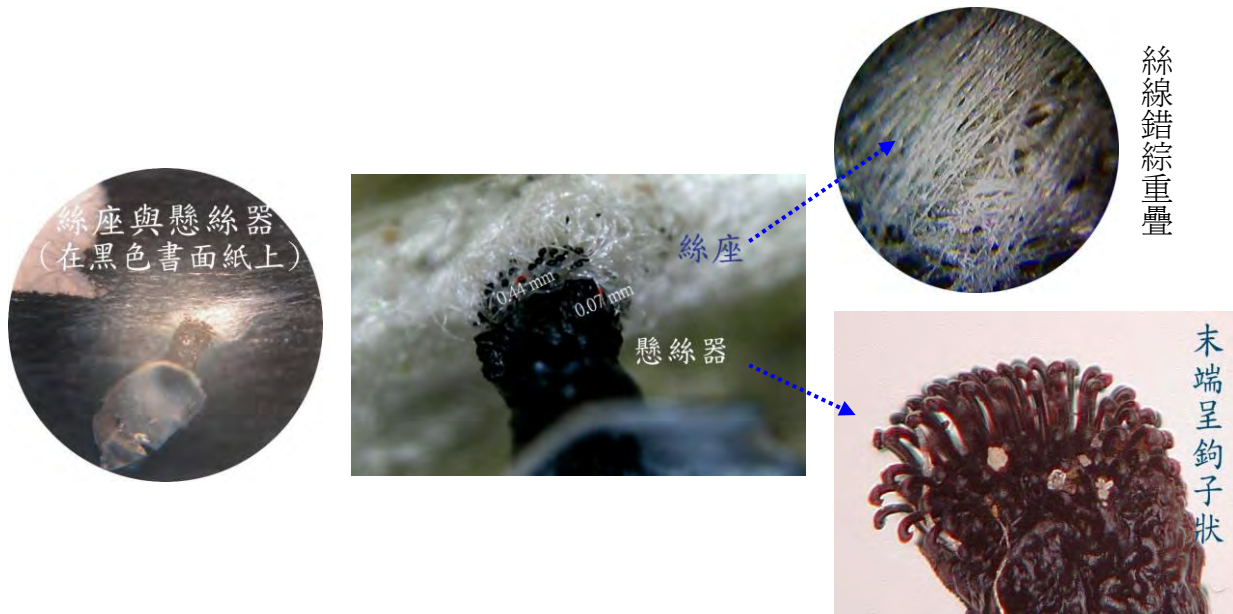


圖 35：樺斑蝶蛹的絲座和懸絲器(電子顯微鏡：160 的倍率觀察)

1. 絲座：也稱為絲墊，是終齡幼蟲在化蛹前所完成的絲團。

樺斑蝶蛹的絲線寬大約是0.07mm，絲線剛吐出來的時候可能具有黏性，絲團會黏附在接觸面積。懸絲器的鉤子鉤附在纏繞的絲團上，穩定蛹體的垂掛。

2. 懸絲器：蝶蛹的一個構造，樺斑蝶蛹的懸絲器由數個鉤毛密集排列而成，寬大約是0.44mm，每個鉤毛終端強烈彎曲。是幼蟲轉化為蛹時所形成的，使蛹吊掛或附著於樹葉、樹枝或牆面的重要構造。

(二)計算懸絲器的面積、鉤子數並記錄蛹重

1. 懸絲器的面積：以「像素」作為懸絲器面積的表示方法(圖 36)。觀察時以「電子顯微鏡放大 160 的倍率、相同焦距為原則。(電腦中的影像設定像素尺寸為 1600*1200 像素)

2. 計算懸絲器的鉤子數：將算過的鉤子點上綠點，避免重覆計算。

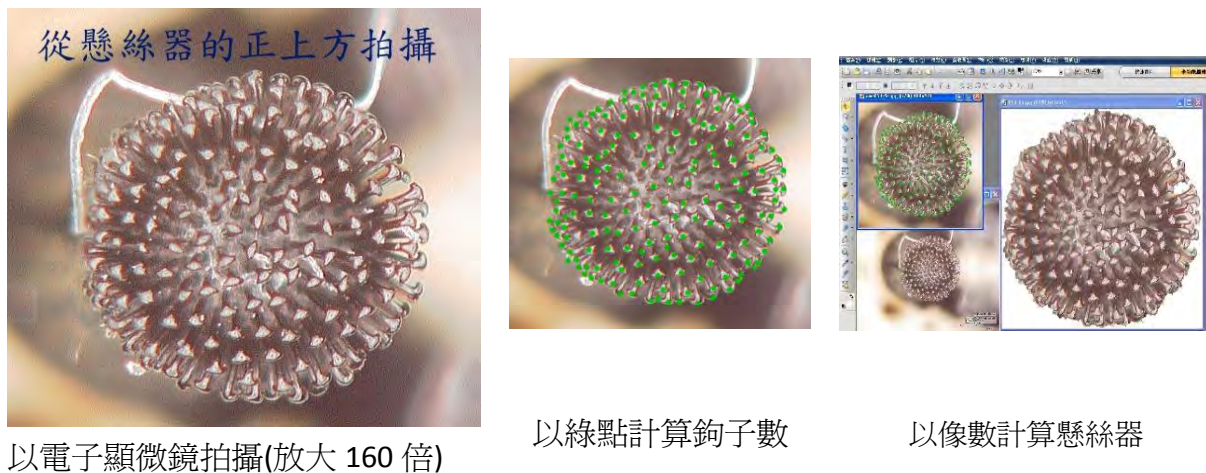


圖 36：懸絲器放大圖

4.分析蛹重與懸絲器鉤子數關係

表 8：蛹重與懸絲器鉤子數關係表

| 樣本 | m10 | m02 | m03 | m01 | m04 | m09 | m06 | m05 | m07 | m08 |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 蛹重(mg) | 432 | 465 | 485 | 490 | 500 | 525 | 545 | 562 | 575 | 580 |
| 鉤子數 | 156 | 155 | 166 | 167 | 171 | 184 | 181 | 196 | 189 | 189 |

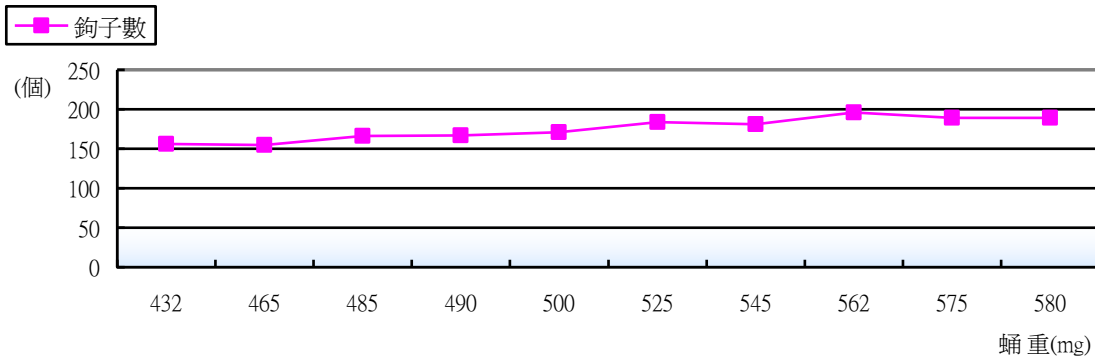


圖 37：蛹重與懸絲器鉤子數關係圖

5.分析懸絲器面積與鉤子數的關係

表 9：懸絲器面積與鉤子數關係表

| 樣本 | m02 | m10 | m03 | m01 | m04 | m06 | m09 | m07 | m08 | m05 |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 鉤子數 | 155 | 156 | 166 | 167 | 171 | 181 | 184 | 189 | 189 | 196 |
| 表面積(像素) | 351568 | 346060 | 355568 | 352110 | 368504 | 385612 | 380328 | 395445 | 398157 | 393646 |

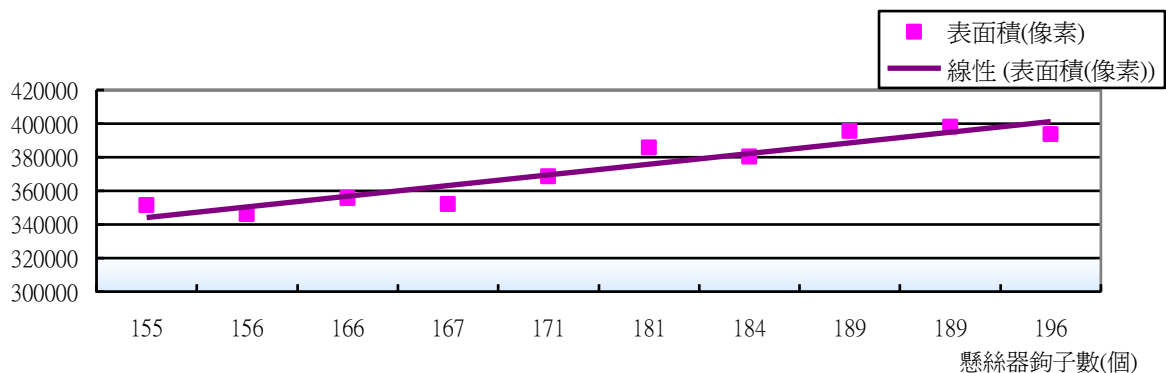


圖 38：懸絲器面積與鉤子數關係圖

6.懸絲器的鉤子密度：(鉤子數/面積)

表 10：蛹重與懸絲器鉤子密度關係表

| 樣本 | m10 | m02 | m03 | m01 | m04 | m09 | m06 | m05 | m07 | m08 |
|---------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 蛹重(mg) | 432 | 465 | 485 | 490 | 500 | 525 | 545 | 560 | 575 | 580 |
| 鉤子數 | 156 | 155 | 166 | 167 | 171 | 184 | 181 | 196 | 189 | 189 |
| 表面積(像素) | 346060 | 351568 | 355568 | 352110 | 368504 | 380328 | 385612 | 393646 | 395445 | 398157 |
| 鉤子密度 | 4.51 | 4.41 | 4.67 | 4.74 | 4.64 | 4.84 | 4.69 | 4.98 | 4.78 | 4.75 |
| | $\times 10^{-4}$ | $\times 10^{-4}$ | $\times 10^{-4}$ | $\times 10^{-4}$ | $\times 10^{-4}$ | $\times 10^{-4}$ | $\times 10^{-4}$ | $\times 10^{-4}$ | $\times 10^{-4}$ | $\times 10^{-4}$ |

結果分析：




- 1.懸絲器最頂端的鉤毛終端有彎曲倒鉤，鉤住絲座；絲線錯綜複雜交織在附著面上，形成絲座，因此能將蛹體懸掛於葉背、樹枝或牆面。
- 2.樺斑蝶蛹懸絲器的倒鉤處寬(0.44mm)大約是絲線寬(0.07mm)的 6 倍。
- 3.樺斑蝶蛹重與懸絲器鉤子數關係：
蛹重愈重，鉤子數有愈多的趨勢，鉤子數大約在 155 至 196 之間。
- 4.懸絲器面積與鉤子數的關係：
懸絲器面積愈大，鉤子數大致上有愈多的趨勢。
- 5.以像素作為懸絲器的面積，，蛹重愈重，鉤子密度有愈大的趨勢。

研究五結果：探索在不同的結蛹點，絲座負重能力的差異情形

(一)不同結蛹點，絲座的負重情形 (樣本數 68，附件5-1)

- 1.將負重接近的樣本，求其平均值，如下表：

表11：不同結蛹點的負重、蛹重關係表

| 蛹重(g) 絲座負重(g) | 葉背中肋 (樣本數：23)  | 磁磚牆壁 (樣本數：15)  | 飼養箱 (樣本數：21)  | 枯樹枝 (樣本數：9)  |
|------------------|--|--|--|--|
| 54 | | | 0.405 | |
| 64 | | | 0.460 | 0.398 |
| 69 | | | | 0.439 |
| 73 | | 0.432 | | |
| 74 | | | 0.462 | |
| 75 | | | | 0.458 |
| 78 | 0.476 | | | |
| 79 | | | 0.480 | |
| 83 | | 0.459 | | |
| 87 | | | 0.518 | |
| 88 | 0.503 | | | |
| 89 | | 0.493 | | |
| 96 | 0.498 | 0.488 | | |
| 105 | | 0.514 | | |
| 113 | 0.584 | | | |

2.根據上面四組測量記錄，完成「絲座負重與蛹重關係圖」。

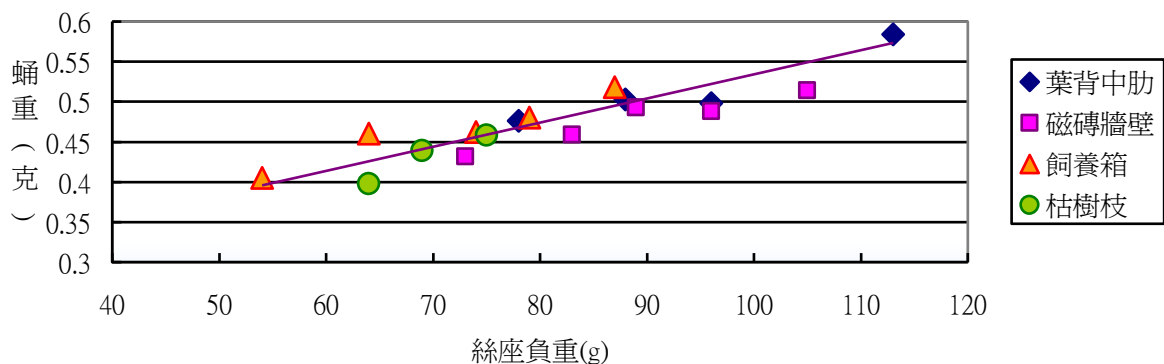


圖 39：不同結蛹點的絲座負重、蛹重關係圖

3.絲座負重、蛹重、負重比值平均值：

表12：不同結蛹點的負重、蛹重、負重比值平均值的關係表

| | (絲座負重)平均值(g) | (蛹淨重)平均值(g) | (負重比值)平均值 |
|--------|--------------|-------------|-----------|
| 蛹在葉背中肋 | 84.23 | 0.492 | 171.094 |
| 蛹在磁磚牆壁 | 89.4 | 0.477 | 187.624 |
| 蛹在飼養箱 | 71.86 | 0.467 | 153.948 |
| 蛹在枯樹枝 | 69.4 | 0.432 | 160.875 |
| 平均值 | 78.72 | 0.467 | 168.565 |

(二)以魔鬼氈的負重情形，探討結蛹角度如何影響絲座的負重 (圖40a~c)

1.將魔鬼氈負重測量器，測得砝碼拉力的平均值及其垂直分力、平行分力分析如下
(同一傾角實驗 3 次，取平均值)

表13：魔鬼氈在不同傾角的負重拉力、垂直分力、平行分力分析表

| 傾角(度) | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 負重砝碼(g) | 390 | 373 | 353 | 292 | 280 | 276 | 270 |
| 垂直分力(g) | 0 | 96.54 | 176.50 | 206.48 | 242.49 | 266.60 | 270.00 |
| 平行分力(g) | 390.00 | 360.29 | 305.71 | 206.48 | 140.00 | 71.43 | 0 |

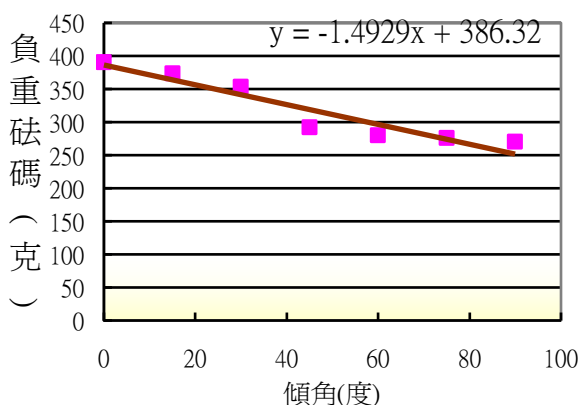


圖 40a 傾角與負重關係圖



圖 40b 魔鬼氈負重情形

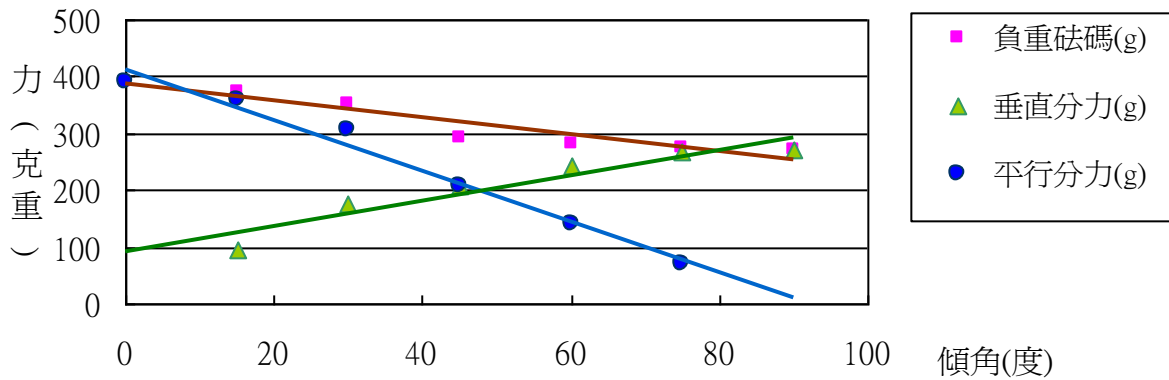


圖 40c：魔鬼氈負重與分力關係圖

結果分析：

(一)不同結蛹點，絲座的負重情形

- 1.絲座的負重：牆壁磁磚 > 葉背中肋 > 飼養箱 > 枯樹枝。
- 2.絲座的負重比值：牆壁磁磚 > 葉背中肋 > 枯樹枝 > 飼養箱。
- 3.絲座的總平均負重是 78.72 克，負重比值總平均值是 168.565，故樺斑蝶蛹絲座大約可以負重本身重量的 169 倍
- 4.蛹重愈重，絲座的負重能力有愈重的趨勢。
- 5.蛹在磁磚牆壁時，絲座負重和負重比值的平均值都最大；在枯樹枝時，絲座負重最小；可能是絲座「接觸面的光滑或粗糙」、「接觸面的大小」，還有「力的方向」都有可能是影響負重的因素。

(二)以魔鬼氈的負重情形，探討結蛹角度如何影響絲座的負重

- 1.傾角愈小(0~90 度之間)，魔鬼氈能負重的砝碼拉力愈大，即愈不易拔下魔鬼氈。
- 2.由圖 40c 顯示：垂直分力主導魔鬼氈能否被取下，傾角愈大(0~90 度之間)，魔鬼氈負重力愈小，垂直分力愈大，魔鬼氈愈易被取下。
- 3.圖 40a 顯示，點點接近趨勢線，傾角與負重受力密切相關。
- 4.施力夾角(傾角)在 0~90 度之間時：施力 0 度，魔鬼氈最不易被取下；施力 90 度，魔鬼氈最容易被取下
- 5.如果接觸面材質相同，施力與接觸面的夾角愈小(0~90 度之間)，絲座負重力愈大。

研究六結果：探索空氣溼度對絲座負重與結蛹行爲的影響。

(一)溼度對絲座負重的影響 (樣本數 44，附件 6-1，同一溼度有多組樣本時，取其平均值)

甲：常態溼度，乙：溼度 99%

表 14：溼度與負重關係表

| 常態中的溼度 | 70% | 71% | 72% | 73% | 74% | 75% | 76% | 78% | 79% | 82% | 84% | 86% | 平均負重 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 飼養箱甲絲座負重(g) | 85 | 88 | 85 | 75 | 67 | 80 | 73 | 85 | 78 | 70 | 70 | 55 | 73.1 |
| 飼養箱乙絲座負重(g) | 38 | 35 | 50 | 42 | 19 | 48 | 27 | 48 | 52 | 25 | 50 | 35 | 31.9 |

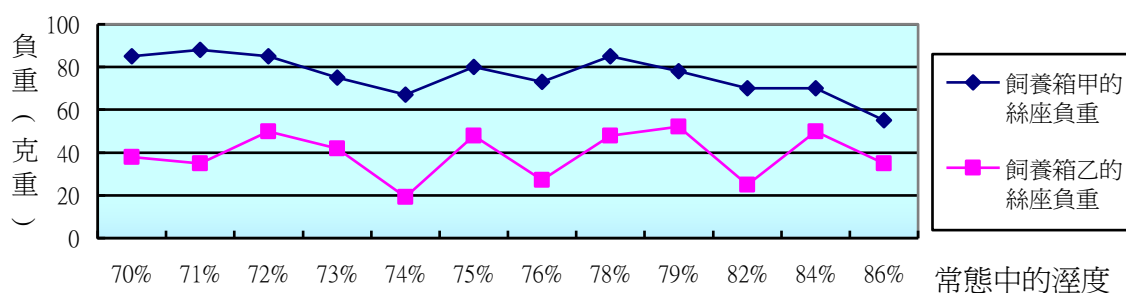


圖 41a 溼度與負重關係圖

結果分析：

- 1.甲：絲座最高負重為 88 克，最低 55 克(溼度為 86%)；平均負重：73.1 克。
- 2.乙飼養箱絲座最高負重為 52 克，最低 5 克；平均負重：31.9 克。
- 3.以平均負重來說：乙 < 甲，故：溼度會影響絲座與接觸面的黏著性，導致絲座的負重力降低。
- 4.從「甲飼養箱」的負重情形可以看出：溼度愈高，負重能力愈低。
- 5.以「乙飼養箱」來說，溼度皆為 99%，然而絲座的負重能力最高 52 克、最低只有 5 克，負重能力偏低，由此可知「空氣溼度」是影響絲座負重能力的重要因素。

(二)溼度對幼蟲結蛹行爲的影響 (樣本數 38，附件 6-2)

1.將實驗結果以 28°C 分為 A、B 兩組 (A 組低於 28°C；B 組高於 28°C)

實驗結果分析如表

| | | 丙飼養箱(常態) | | 丁飼養箱(有噴水，提高溼度) | |
|------------------|------|----------|--------------|----------------|-------------|
| | | 個數 | 比例 | 個數 | 比例 |
| A 組 (低於 28°C) | 結蛹選擇 | 13 | 13/18 = 72% | 5 | 5/18 = 28% |
| | 成功結蛹 | 13 | 13/13 = 100% | 2 | 2/5 = 40% |
| B 組 (高於 28°C) | 結蛹選擇 | 5 | 5/20 = 25% | 15 | 15/20 = 75% |
| | 成功結蛹 | 3 | 3/5 = 60% | 5 | 5/15 = 33% |
| A+B 組 | 成功結蛹 | 16 | 16/18 = 89% | 7 | 7/20 = 35% |

2.將 A、B 兩組幼蟲的結蛹選擇依其百分比繪成圓形圖

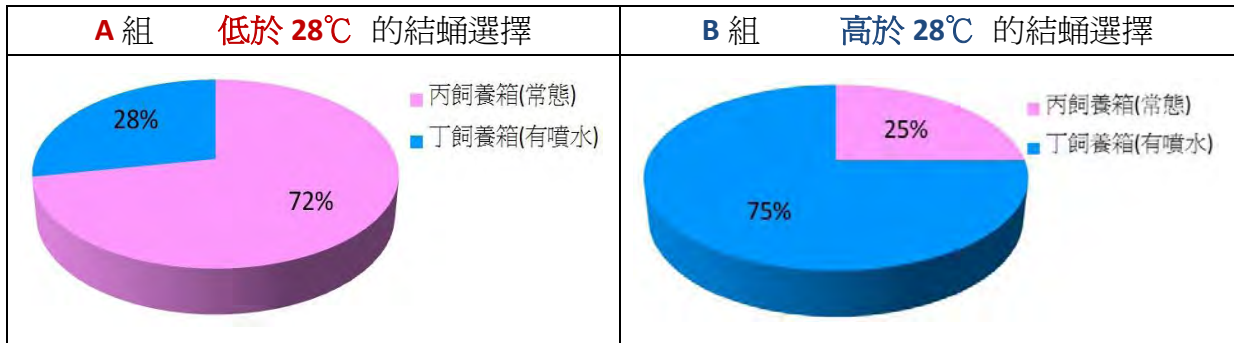


圖 41b 溼度對幼蟲結蛹選擇的影響情形圖

3.將各組實驗中成功結蛹的情形繪成長條圖如下

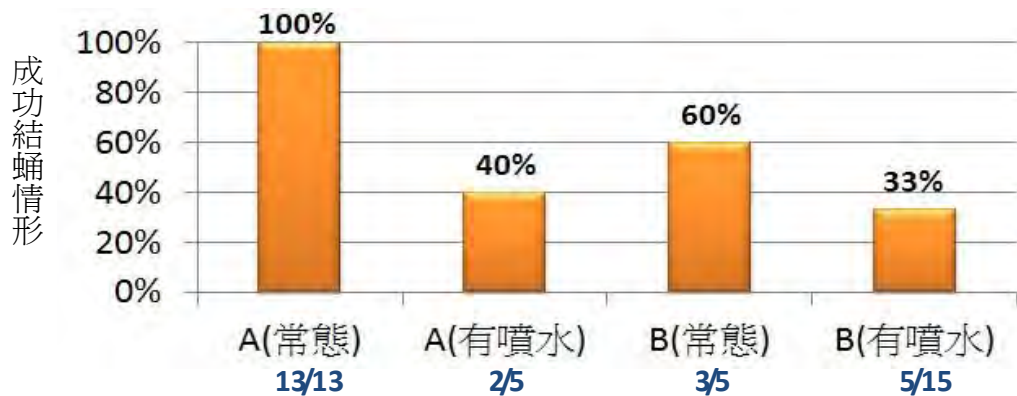


圖 41c 不同環境成功結蛹的情形

結果分析：

- 當溫度低於 28°C ，幼蟲 72%選擇丙飼養箱(常態)；溫度高於 28°C ，幼蟲 25%選擇丙飼養箱(常態)，75%的幼蟲選擇丁飼養箱(有噴水)。
- 丁飼養箱(有噴水)成功結蛹：A 組-40%；B 組-33%。綜合 A、B 組實驗，共有 20 個樣本在丁飼養箱結蛹，成功的只有 7 個，佔 35%，比例偏低。
- 丙飼養箱(常態)成功結蛹：A 組-100%；B 組-60%。綜合 A、B 組實驗，共有 18 個樣本在丙飼養箱結蛹，成功的有 16 個，佔 89%，比例較高。



圖 41d 成功結蛹的情形



圖 41e 結蛹失敗的蛹

陸、問題與討論

一、幼蟲吐絲時是從哪一個部位進行這份工作？吐絲的口和咬食葉片的口是同一個嗎？為什麼樺斑蝶的幼蟲結蛹時要以畫∞的方式吐絲作絲盤，原因為何？

蝴蝶幼蟲口器下方有吐絲器(圖 42)，會吐出液態絲蛋白，遇到空氣後即變成絲，化蛹時形成絲座用以固定蛹。蝴蝶口器是咀嚼式，在頭的下方，上唇前緣有一缺刻；上顎 1 對，發達，有齒，主要功能是咬食葉片或食物；下顎、下唇與舌合併成複合體，保留有下顎須及下唇須，中央有一突起叫吐絲器，是由下唇葉變成的；幼蟲吐絲便是由吐絲器完成其工作。



圖 42：樺斑蝶幼蟲的頭部構造

(上方左圖為電子顯微鏡下拍攝的影像，放大 160 倍；上方右圖參考周堯，蝴蝶的生活習性)

蠶吐絲結繭時，頭不停擺動，將絲織成一個個排列整齊的∞字形絲圈。每織 20 多個絲圈（稱一個絲列）便動一下身體的位置，然後繼續吐織下面的絲列。絲腺內的分泌物完全用完才化為蛹。因此，我們推測：∞字形的絲圈有助於絲線間的纏繞和堆疊，樺斑蝶幼蟲為了穩固自己的蛹不致於稍微震動就掉下來，所以採用畫∞字形的的方式做絲盤，緊緊附著在接觸面上。(林詩珣，2005 年，台灣國際科學展覽會，彩色蠶繭之研究)

二、樺斑蝶為什麼要在葉背中肋的地方結蛹？

從實驗觀察中可以看到終齡幼蟲在蛻皮和化蛹時，身體都要不斷扭動，如果只是在葉片上，葉片恐怕不足以支撐蛻皮化蛹時身體的扭動，而且這個結蛹點，必須支撐蛹體 10~18 天，所以幼蟲會在葉背中及葉片重心找尋一個最穩固的地方。

三、樺斑蝶幼蟲是不是都在黃金比例 1.6 附近結蛹？

「研究三」(一)探索樺斑蝶幼蟲找尋的結蛹點是否就在葉片的黃金比值上的實驗，結蛹點所求之比值〔(葉長+蛹柄距)/葉長〕= $h+d/h=m$ 接近葉長黃金比例 1.6 的附近結蛹。接著，以迴紋針改變葉片重心、改變葉片結構，剪短葉片、改變結蛹植物植株，其結蛹點都在接近葉長的黃金比例 1.6；「研究三」(五) 其他垂蛹蝴蝶觀察幼蟲結蛹位置實驗，其結蛹點在接近葉長的黃金比例 1.6，更讓我們驚嘆！（黃金比例是 1.618，「接近黃金比例」指的是 1.6 ± 0.1 ）

(參考：呂志宗，2013，自然界裏的黃金比例及其應用 <http://www.tychurch.org.tw/bible/04-5.htm>)

四、樺斑蝶幼蟲結蛹處的選擇，為什麼大都在切線角度為 120 度左右？

三力皆相等的靜力平衡條件下，由拉密定理得知，此三力相等所對應的夾角也相等為120度，恰巧位在此一矩形範圍內。樺斑蝶的生活史在蛹期時最為脆弱，除了讓自己的蛹色和環境顏色相近易於隱藏之外，沒有其他方式來抵抗天敵的傷害。所以我們的根據實驗結果，推論如下：

1. 蛹期大約為 10 天左右，這段期間一直掛在葉子上，所以幼蟲會選擇對葉子傷害最小的地方，即合力(葉子對蛹的支撐力)最小的地方，就實驗數據顯示大約是在切線角度為 110 度的地方蛹重所形成的合力最小，葉子才不會折斷掉落。
2. 切線角度為 110 度時蛹重所形成的合力力矩最大，可以讓很小的外力(風力)吹拂飄動，讓結蛹處的葉子和其他葉子一般搖動不至於太突兀，以防止天敵的發現而造成自己的傷害。

五、懸絲器讓蛹固著於絲座上，懸絲器(圖 43)是幼蟲時就具備的構造?或是在終齡化蛹時才產生的?抑或是幼蟲身體的哪個構造轉變的?

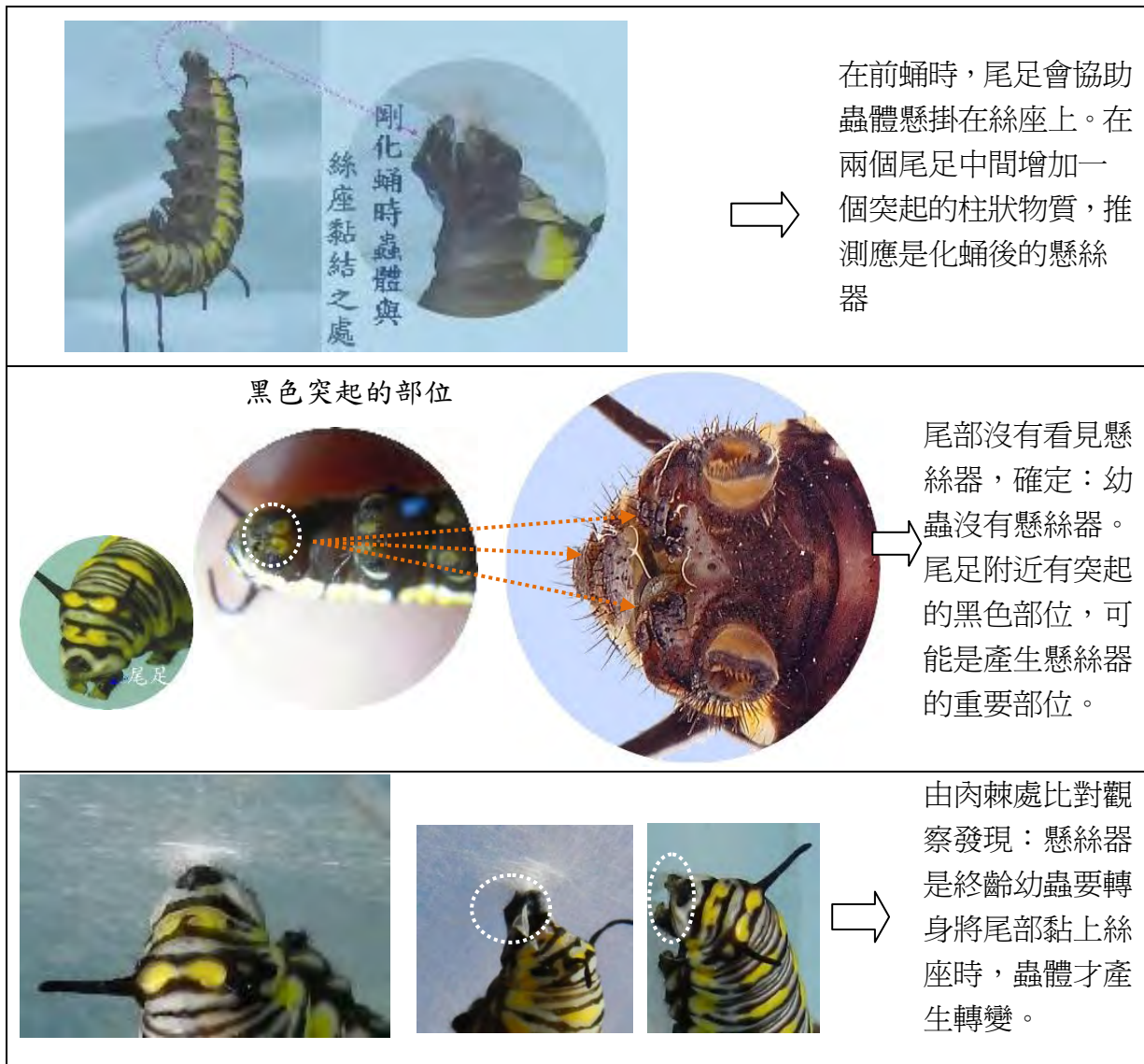


圖 43：懸絲器構造說明圖

由觀察得知：終齡幼蟲的尾部沒有發現懸絲器。故：懸絲器是終齡幼蟲在完成絲座，要轉身將尾部黏上絲座時，才轉變產生的構造。

六、研究中發現：蛹在牆壁時，絲座的負重明顯比其他三個地方佳，影響絲座負重能力的原因有哪些？

「研究五」的實驗中常常會觀察到：在飼養箱的絲座與接觸面會有一些沒有完全黏著的地方(圖44a)，我們推測是接觸面的材質（飼養箱的接觸面光滑，牆壁接觸面粗糙）影響了絲座與接觸面的黏著，再間接影響絲座的負重。



圖 44a：絲座脫離

對絲座的「施力方向角度不同」(圖44b)，也是造成絲座負重差異的一個變因。經由魔鬼氈的負重實驗，我們發現，垂直分力為主導拔下魔鬼氈的力量。若接觸面為相同材質，則蛹在「磁磚牆壁」的施力傾角<在「枯樹枝」的施力傾角，故絲座在磁磚牆壁的負重力較大。

「研究六」，溼度影響了絲座與接觸的黏著性，溼度高的環境使絲座的負重能力大大的降低，無法安全的將蛹體懸掛在接觸面。甚至影響幼蟲無法成功化蛹，他們的身體機制似乎讓他繼續再等待一個較安全的大氣狀態。

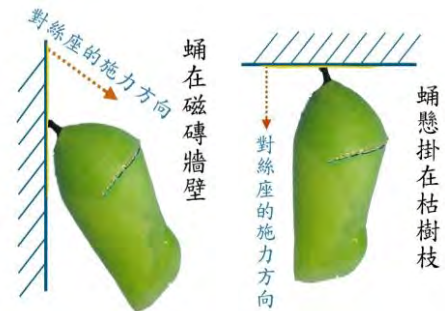


圖 44b 絲座受力圖

經過我們討論分析，發現「蛹本身的重量」，接觸面的「粗糙平滑」、「大小」、「穩定性」，大氣環境的「溼度」，還有對絲座的「施力方向角度」都會影響絲座的負重能力，也間接的影響了幼蟲對結蛹環境的選擇。

七、「研究五」絲座纏繞極為緊密繁複，實驗結果發現：樺斑蝶蛹絲座大約可以負重本身重量的 169 倍，為什麼牠需要建構這樣大負重比值的絲座？

我們將討論的結果歸納成以下幾點

- 1.對抗環境外力：風力、雨水產生的晃動。
- 2.來自昆蟲或其他動物的干擾：在牠結蛹那段時間，也有可能會有其他昆蟲夥伴爬行經過牠選擇的結蛹點，也有可能會受到其他昆蟲或動物的干擾。
- 3.承載自己結蛹時身體扭動、羽化時肢體伸展所需的力量。

八、溼地中，那隻樺斑蝶幼蟲為何在稻子葉背結蛹？

溼地中結在稻子葉背的樺斑蝶蛹(圖 45)，切角小，產生的合力大，但因力臂短，合力矩小，產生的結蛹點不易晃動，穩定性高。這是大漢溪旁風大的環境下，較佳的結蛹選擇，且稻子葉背粗糙的質感可能也是吸引幼蟲結蛹的條件之一，或是周圍環境的食草殆盡，必然的結果。



圖 45 結蛹點受力圖

柒、結論

一、綜合研究一，我們的結論是：

- 1.樺斑蝶終齡幼蟲要結蛹時，以口器如畫" ∞ "形狀的方式吐絲，最後在尾部形成懸絲器，將蛹體垂掛。(「樺斑蝶幼蟲」，在研究中以「幼蟲」簡稱之)
- 2.終齡幼蟲從蛻皮到成蛹全程約20分鐘；從開始找尋結蛹點到吐絲，到完成蛻皮進入蛹期大約20小時。
- 3.蛹具備頭、胸、腹三部分，具備成蟲的形態。前、中、後胸節區分明顯，以中胸最大。腹部有十個體節，前、中胸間，與第2~8腹節體側有氣門，第10腹節尾端有懸絲器。在頭、胸部散佈了10個金點；在腹部第3、4腹節間有金色黑點的環狀條紋突起。

二、綜合研究二，我們的結論是：

- 1.結蛹處葉子切線角度越大，蛹重形成的作用力越小；反之，結蛹處葉子切線角度越小，蛹重形成的作用力越大。
- 2.蛹重作用力對葉子產生的合力，合力力矩的最大值是產生在切線角度為110度。
- 3.幼蟲在切線角度為100~130結蛹個數最多，說明了樺斑蝶幼蟲會選擇在靜力平衡角度為120時的附近地方結蛹的趨勢；推測可能是合力最小，對植物的影響傷害減至最低，有於自己安全度過蛹期。

三、綜合研究三，我們的結論是：

- 1.綜合研究三，(蛹垂線到葉柄基部垂線的距離 + 葉尖到葉柄基部垂線距離)/葉尖到葉柄基部垂線距離的比值，即 $(d+h)/h$ 的比值]有80%結蛹點都在黃金比例1.6範圍內 (1.6 ± 0.1)。
- 2.樺斑蝶幼蟲選擇結蛹點大致上有三個主要的原則：
(1)葉背中肋重心附近(2)葉片切線角度100~130度(3)(蛹垂線到葉柄基部垂線的距離 + 葉尖到葉柄基部垂線距離)/葉尖到葉柄基部垂線距離的比值，有80%在黃金比例1.6範圍內(1.6 ± 0.1)
- 3.蝶蛹結構在金斑所形成的弧角以及頭胸、腹體節的劃分，都與黃金比例1.618相關。

四、綜合研究四，我們的結論是：

- 1.懸絲器的頂端由數個小鉤子組成，鉤毛終端有彎曲倒鉤，鉤子數量大約在155~196之間。
- 2.懸絲器是終齡幼蟲吐完絲要將自己尾部掛上去，是蛹期的重要構造。
- 3.當蝶蛹淨重愈重，懸絲器的表面積有愈大的趨勢，鉤子數有愈多的趨勢。

五、綜合研究五，我們的結論是：

- 1.「蛹在磁磚牆壁」時，絲座的負重和負重比值都最大；「蛹在枯樹枝」時，絲座的負重、負重比值最小。
- 2.蛹重愈重，絲座的負重能力有愈重的趨勢。
- 3.傾角愈小(0~90度之間)，魔鬼氈能負重的砝碼拉力愈大，即愈不易拔下魔鬼氈。
- 4.垂直分力主導魔鬼氈能否被取下，傾角愈大(0~90度之間)，垂直分力愈大，魔鬼氈愈易被取下。
- 5.如果接觸面材質相同，施力與接觸面的夾角愈小(0~90度之間)，絲座負重力愈大。

六、綜合研究六，我們的結論是：

- 1.甲平均負重：73.1 克(溼度：70%~86%)；乙平均負重：31.9 克(溼度：99%)。
以平均負重來說：乙<甲，故：溼度會影響絲座與接觸面的黏著性，導致絲座的負重力降低。
- 2.以「乙飼養箱」來說，溼度皆為 99%，然而絲座的負重能力最高 52 克、最低只有 5 克，負重能力偏低，由此可以推測「空氣溼度」會影響絲座負重能力。
- 3.溼度高於 93%的環境，幼蟲成功結蛹的機率是 35%。
- 4.溫度低於 28.1°C時，72%的幼蟲選擇常態溼度的環境結蛹；但溫度高於 28.1°C時，只有 25%的幼蟲選擇常態溼度的環境結蛹。

捌、參考資料及其他

- 一、水波 誠編著，陳玉華翻譯(2008)。嗅覺構造。載於探索昆蟲微小腦(113-140 頁)。台北縣：世茂。
- 二、法布爾著，吳模信等譯(2002)。昆蟲的幾何學。載於昆蟲的幾何學(332-347 頁)。台北市：遠流。
- 三、李俊延、張玉珍(1988)。台灣蝶類圖說(一)(二)。台灣省立博物館。
- 四、徐堦峰(1999)。台灣蝶圖鑑(一)。國立鳳凰谷鳥園。
- 五、徐堦峰(2004)。近郊蝴蝶。台北市：聯經。
- 六、陳燦榮(2006)。彩蝶飛。台北市：民生報。
- 七、李平篤(2008 年 5 月)。臺大校園的蝴蝶。椰林風情台大校園雙月刊，第 57 期。2012 年 10 月 23 日，取自 <http://www.alum.ntu.edu.tw/read.php?num=57&sn=1506&check=>
- 八、呂志宗(2013)，自然界裏的黃金比例及其應用。2012 年 11 月 17 日，取自 <http://www.tychurch.org.tw/bible/04-5.htm>
- 九、童維德、楊平世(1991)。樺斑蝶之生物學：產卵行為與各蟲期的發育。台大植物研究所碩士論文，71-76 頁。
- 十、莊迪喬、李岱勳(2005)。「蛹」「帶」生命，中華民國第 45 屆國中小學科展，高雄市立五福國民中學，指導老師：李正媚、陳富堅。
- 十一、林大為、吳旻軒、謝承佑(2010)。蛹往直前--蛹吊能力，中華民國第 50 屆國中小學科展，高雄市立高雄高級中學，指導老師：謝佳昌。

待研究的問題

- 1.幼蟲結蛹時，所吐的絲線材質為何？有何特性？是否還有其他有效價值？
- 2.大氣溼度如何影響幼蟲的結蛹狀況？

【評語】 030304

本作品對樺斑蝶的結蛹行為進行探討，並能藉力學原理探討歸納結果的規律性，具有基礎研究的學術價值。建議再接再厲分析探討樺斑蝶何以能確定結蛹位置，此外樺斑蝶結蛹～羽化的過程於參考文獻中已多有描述，無需再重複前人的研究結果。