

花蓮縣第 62 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：生物科

組 別：國小組

作品名稱：紋蜂不動-紅足細腰蜂飛翔懸停能力探究

關 鍵 詞：紅足細腰蜂、 翅膀、飛翔懸停

編 號：

紋蜂不動-紅足細腰蜂飛翔懸停能力探究

研究摘要

本研究透過形態、野外觀察及室內實驗等方式，探討紅足細腰蜂的翅膀構造與飛翔懸停之間的關係。研究發現紅足細腰蜂共 12 段體節。前後翅從第 2 胸節長出。翅脈各由 14 及 8 塊三角、四邊及圓形的翅區構成。野外飛行可歸納為「抬身展翅」、「離地彈飛」、「飛行懸停」及「落地降落」四階段。飛行懸停時，翅膀夾角介於 135-180 度之間。會使用口器及六足叨抓物體，進行負重飛行。



圖 1.紅足細腰蜂的翅脈紋路

實驗研究發現，當前後翅張開到 180 度時，翅膀與空氣接觸面積最大，其抬升的高度、速度以及下降速度等表現最佳。據此推論紅足細腰蜂飛行時，會藉由擺動翅膀角度來控制翅膀與空氣接觸面積，達成懸停之目的。翅脈紋路會影響翅膀抬升高度、速度及下降速度，有紋路的翅膀有較佳的懸停表現。

關鍵字:紅足細腰蜂 懸停 翅膀紋路

壹、研究動機

2021 暑假，研究團隊到鯉魚潭觀察紅足細腰蜂育



圖 2.我們正在認真觀察紅足細腰蜂的行為

雛，意外發現母蜂會飛進矮樹叢間尋找獵物，讓我們驚訝的是，牠在狹小的空間中上下、左右穿梭飛行，也會懸停在空中，飛行能力讓團隊的成員大感驚訝。記得五年級下學期，康軒版第六冊的自然教材提到，飛行的動物身體型態與其運動方式有高度的相關。紅足細腰蜂擁有的傑出飛行能力，跟牠的翅膀形狀、翅脈紋路究竟存在哪些關係?團隊成員非常想要了解紅足細腰蜂卓越的飛行能力以及懸停的原因，探討其中蘊藏了哪些生物及科學知識，於是組隊，進行此一研究。

貳、研究目的

依照以上的動機，我們的研究有以下三個目的：

目的一：觀察野外紅足細腰蜂飛行方式，了解紅足細腰蜂的身體構造如何影響其飛行。

目的二：聚焦觀察紅足細腰蜂的翅膀構造，設計並製作仿真紅足細腰蜂翅膀。

目的三：進行紅足細腰蜂仿真翅膀懸停實驗，了解其懸停能力。

參、文獻探討

一、昆蟲翅膀的分類

昆蟲翅膀的形式可分成八類，舉例說明如後。(一)膜翅:翅膀呈現透明的膜質，翅脈清晰可見，例如蜜蜂。(二)鱗翅：翅膀表面有一層鱗片。例如蛾、蝶。(三)翅覆：翅膀呈現半透明的皮革狀，兼具飛翔和保護功能。例如蝗蟲、蟋蟀的前翅。(四)毛翅：翅面表皮長滿細毛，例如石蛾。(五)纓翅：翅膀呈膜質，翅膀邊緣生出很多細長的纓狀系毛，例如薊馬。(六)鞘翅：前翅呈現角質堅硬狀，已經沒有翅脈，僅具保護作用，例如甲蟲、天牛。(七)半鞘翅：翅膀基部呈鞘翅狀，後半呈膜質，如椿象前翅。(八)平衡棒:翅膀已經退化成小棍棒，僅用於協助飛翔平衡作用，例如蚊、蠅的後翅。

紅足細腰蜂屬於膜翅目的昆蟲，翅膀由兩對透明的膜質構成，翅脈紋路清晰可見。以下繼續探討昆蟲翅膀的構造，進一步認識紅足細腰蜂的飛行原理。

二、膜翅目昆蟲的翅膀構造

膜翅目昆蟲有前、後兩對翅，且前翅比後翅大。翅膀呈透明及膜質構造，上面布滿各種造型紋路的翅脈。翅脈是翅膀氣管加厚所形成的粗厚紋路，功能就像風箏的骨架一樣，能夠提供翅膀收縮、支撐等作用，並在飛行時與空氣產生摩擦，對昆蟲飛行扮演關鍵的角色。除此之外，翅脈也具備氣管及血管的功能，可提供氣體與養份的輸送交換。

從結構來觀察，昆蟲在飛行時，翅脈前緣最先面對空氣的衝擊力，因此翅脈的前緣結構比末端粗厚。此外，翅膀透過翅脈由昆蟲的胸部構造延伸長出，翅基部的翅脈最粗，沿著身體向外長，越來越細。

小結：本研究的焦點以及研究限制

透過野外的觀察，我們發現紅足細腰蜂具有上下、左右快速飛行及懸停的能力。當牠的翅膀向外展開之後，靠著上、下快速拍擊震動，與空氣產生摩擦，藉此形成抗力與升力來抬升、推進身體。這實在很神奇奧妙，紅足細腰蜂飛行時前、後翅膀如何擺動？前後翅膀的擺動角度對於其飛行懸停的能力有沒有影響？清晰可見的翅脈紋路究竟長怎樣？紋路的造型對於飛行懸停能力有沒有影響？閃亮亮的翅脈紋路究竟只是生來美麗？還是對於飛行扮演著實質的功能？這都是我們想要藉由這次的研究釐清的問題。

由於我們無法在野外透過肉眼清楚觀察紅足細腰蜂懸停時的翅膀構造、紋路等細節與飛行之間的關係，因此以室內的模擬實驗為主，並且以翅膀受風後的**抬升高度**、**抬升速度**以及**下降速度**作為**飛翔懸停的指標**。**抬升高度越高**、**抬升速度越快**及**下降速度越慢**代表翅膀在單位風力的作用下，能在空中停留得越久，亦即懸停能力越好。因我們的研究能力、時間與設備不足，因此對於影響昆蟲飛行的肌肉、動力來源及空氣浮力的概念無法進行研究探討，此為我們的研究限制。

肆、研究問題

依照研究目的與文獻說明，本研究探討的問題有以下七個：

研究問題一：紅足細腰蜂身體構造觀察與測量。

研究問題二：紅足細腰蜂如何飛行？

研究問題三：如何製作紅足細腰蜂的仿真翅膀？

研究問題 3-1 仿真翅膀的設計、製作、測試、改良與進化。

研究問題 3-2 仿真翅膀的製作步驟。

研究問題四：仿真翅膀的夾角角度，是否會影響翅膀的升降速率及抬升高度？

研究問題五：仿真翅膀有沒有翅脈紋，是否會影響翅膀的升降速率及抬升高度？

研究問題六：仿真翅膀翅脈紋路形狀，是否會影響翅膀的升降速率及抬升高度？

研究問題七：翅膀相關變因影響紅足細腰蜂懸停能力的綜合討論。

伍、研究方法

(一)研究架構

本研究自 2021 年 7 月開始進行，透過野外紅足細腰蜂的行為觀察記錄、影像檔的分析整理、身體形態認識及仿真翅膀製作實驗及研究資料分析與報告撰寫等歷程，至研究截稿，約進行了 10 個月。研究歷程如研究架構圖。

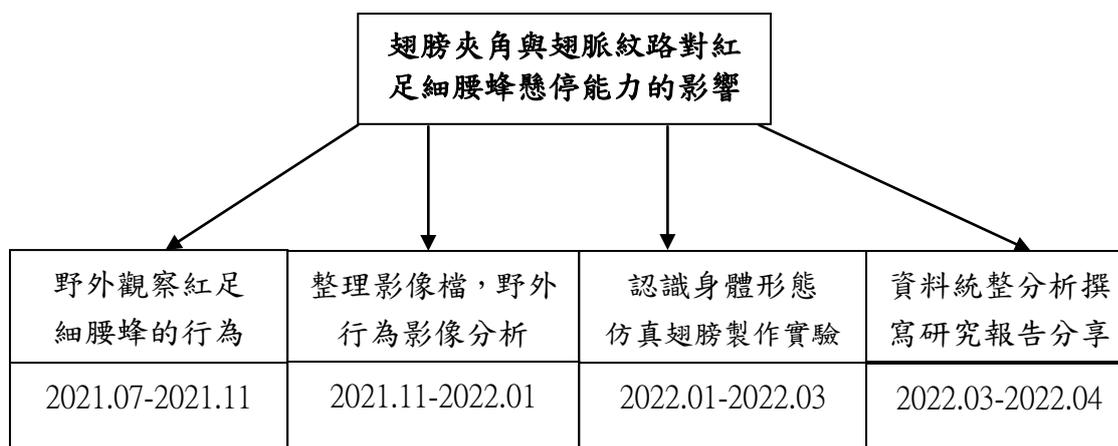


圖 3 本研究架構圖

(二)紅足細腰蜂的觀察地點與觀察方式說明

研究團隊觀察紅足細腰蜂的地點有以下兩個：

觀察點一：位於花蓮縣壽豐鄉鯉魚潭登山步道。鯉魚潭的登山步道共有六條，我們選擇位於環潭公路 1.7k 處的登山口，上行約 150 公尺(後稱 1 號棲地)及 300 公尺(後稱 2 號棲地)兩個點，做為研究團隊野外長期觀測紅足細腰蜂的位置。

觀察點二：位於鯉魚潭環潭步道 1.7 公里左側的平台公園(後稱 3 號棲地)。

以上兩個位置，皆位於背陽坡，日照時間約自上午 8:30 到下午 17:30 止。同時，這裡屬於螢火蟲復育的自然保育區，棲地範圍內未使用任何農藥。可以讓生活在土洞下方的紅足細腰蜂幼蟲獲得安全的保障，母蜂因此願意高頻率的在這裡獵捕蠱斯，進行育雛。

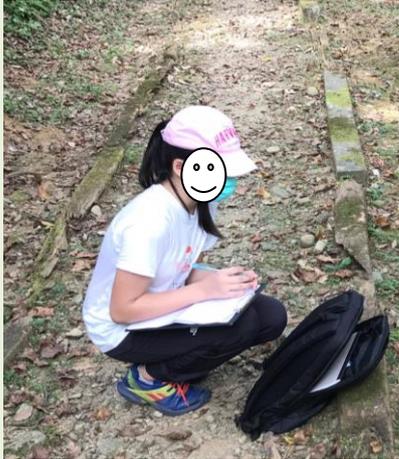
以上的兩個棲地，附近都有豐富的植被，細心觀察發現，有許多苧麻科植物，吸引大量的蠱斯在這裡生活，也吸引了紅足細腰母蜂在棲地附近獵捕。可見這裡是紅足細腰蜂重要的生活範圍。



3 號棲地有許多芋麻科植物，是蠱斯取食的主食，我們在這個位置採集許多蠱斯。



2 號棲地也有許多芋麻科植物。足以提供蠱斯充足的食物。



2 號棲地。鯉魚潭 1.7k 登山口 300 公尺處是我們設定的第二觀察點，這裡有母蜂經常會為了育雛而出沒。



鯉魚潭 1.7k 登山口 150 公尺處是我們的 1 號棲地，這裡有母蜂經常會為了育雛而出沒。



地上的旗標，是我們用來定位母蜂挖掘育雛孔的策略。它幫助我們輕易找到觀察焦點。



從停車場，大概要步行 50 分鐘，才能到達我們所設定的觀察點，很辛苦的野外觀察。



組員與指導老師正在鯉魚潭 1.7 公里處的登山口討論觀察的路線。



從這裡開始上山，繼續往上步行 150 公尺及 300 公尺，就會到達我們的觀察基地。

(三)在棲地的觀察程序說明

研究調查期間，研究隊員分成 A、B 兩組同時進行觀察。A 組 2 位組員定點觀察 1 號棲地的紅足細腰蜂。B 組 2 位組員定點觀察 2 號棲地的紅足細腰蜂。由於 3 號棲地範圍比較大，因此團隊成員一起觀察 3 號棲地。觀察的程序如下：

1.先在學校製作旗標。2.現場肉眼觀察紅足細腰蜂。如遇見紅足細腰蜂育雛，則在育雛孔左上 3 公分處插上編號的旗標。3.以編號的旗標，依照母蜂的習性，預先架好攝影機，做定點的攝影觀察。

			
在學校自製旗標。旗桿長 5 公分，寫上編號。	自製旗標：用於標記野外紅足細腰蜂的育雛孔。	完工後的旗標。裝好後就出發往棲地前進。	在學校預先學習各種攝影工具的使用方法
			
學習遠處觀察，並以不驚擾母蜂育雛作為觀察原則，細心觀察母蜂的行為。	已經習慣觀察後，我們可以很接近母蜂而不會打擾到牠的育雛行為。	母蜂離開之後，插上旗標，同時測量育雛孔的大小與深度。	觀察完成，討論彙整我們今日的調查收穫與結果。
			
一到棲地，我們就開始分工，進行育雛孔調查插旗。	每個人都有任務，都很忙，分工合作很棒。	下雨天，仍舊要進行棲地觀察。	每天到棲地觀察紅足細腰蜂的行為。
			
紅足細腰蜂的育雛孔長在地上，圓形。插上旗標之後的育雛孔。	我們發現，陽光與育雛孔的數量有正相關。	50 號育雛孔讓我們觀察到許多母蜂的行為。包括育雛、獵捕螽斯與飛行。	母蜂剛挖好育雛孔，飛走，去獵捕螽斯了。



圖 5.我們在進行各種研究觀察與準備工作

(四)棲地使用攝影機輔助觀察方式說明

為蒐集細腰蜂野外的行為與飛行資料，研究團隊除了使用肉眼觀察之外，亦使用攝影機、單眼相機、手機與蛇管攝影機輔助觀察。觀察的策略分成腳架定點觀察與手持機器機動觀察兩種策略。定點觀察:攝影機架設在細腰蜂育雛孔前方 1 公尺處，觀察育雛孔周邊約 1 公尺的範圍，等細腰蜂出現，記錄其行為。包括使用 GOPRO 的廣角攝影及 SONY 攝影機的焦點攝影。機動觀察：細腰蜂飛回育雛孔後，觀察者儘可能慢速接近母蜂的活動範圍，手持手機，使用慢速的方式進行追焦攝影。將鏡頭聚焦在母蜂的飛行行為，持續紀錄到飛遠、無法追蹤到牠的行蹤停止。



(五)紅足細腰蜂樣本取得說明

本研究採用野外自然觀察與模擬實驗兩種方式進行。飛行的策略採用野外觀察的方式蒐集資料。為了釐清翅膀與懸停能力的關係，研究者於 2021 年 8 月 3 日從棲地採集了 5 隻紅足細腰蜂活體，進行體型測量記錄及觀察。觀察完成後，於 2021 年 8 月 6 日將 4 隻成蟲放回棲地，並將 1 隻死亡的個體製作成標本，作為後續觀察的材料。

			
我們在 50 號洞用肉眼自然觀察加上攝影的方式，記錄到紅足細腰蜂獵捕螽斯的行為。	第二天，母蜂還是繼續在 50 號洞獵捕螽斯，並把螽斯埋進洞中。	第三天，母蜂繼續獵捕螽斯，把螽斯埋進洞中。	我們在 8 號洞用肉眼自然觀察加上攝影的方式，記錄到紅足細腰蜂獵捕螽斯的行為。
			
細腰蜂挖洞時很專心，只要觀察者動作放慢，並不會影響細腰蜂的行為，也不會引起細腰蜂的攻擊。挖洞的動作(1)	細腰蜂挖洞時很專心，只要觀察者動作放慢，並不會影響細腰蜂的行為，也不會引起細腰蜂的攻擊。挖洞的動作(2)	細腰蜂挖洞很專心，只要觀察動作放慢，不會影響細腰蜂的行為，也不會引起細腰蜂攻擊。挖洞的動作(3)	細腰蜂挖洞時很專心，只要觀察動作放慢，不會影響細腰蜂行為，也不會引起細腰蜂攻擊。挖洞的動作(4)
			
母蜂像在表演特技一樣，會用口器銜著石頭，蓋住育雛的洞口。	母蜂用口器咬著樹葉，以倒退走的方式，拖拉樹葉往育雛孔方向走。	母蜂用口器咬住乾樹枝，邊飛邊跳往育雛孔方向。	母蜂用口器夾著石塊，邊飛邊跳往育雛孔方向前進。
			

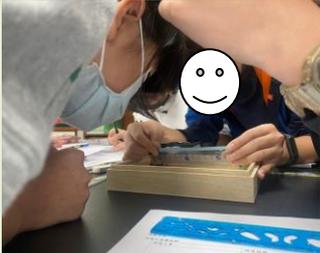
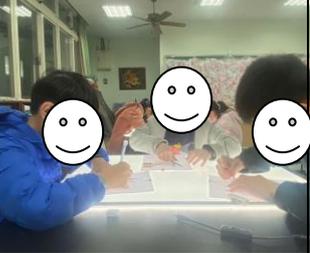
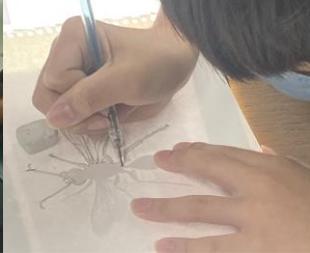
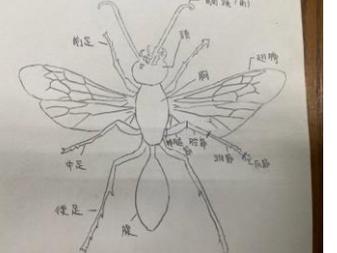
<p>震動著翅膀的母蜂，似乎準備要飛走了。</p>	<p>棲地偶爾會出現 2 隻紅足細腰蜂共同出現有雜挖洞的現象。</p>	<p>母蜂抬高身體時，表示牠正在警戒中。</p>	<p>有時候母蜂也會壓低身體，觀察眼前的狀況。</p>
			
<p>野外利用採集罐，採集 5 隻紅足細腰蜂，使用二氧化碳暫時麻醉，並測量基本體長後放回棲地。</p>	<p>留下 1 隻，細心將其製作成標本。</p>	<p>為了觀察翅膀細節，我們將前後翅拆下來觀察翅膀紋路。拆完翅膀後的紅足細腰蜂看起來有點像螞蟻。</p>	<p>將其依照比例，組裝成仿真的模擬翅膀。這對翅膀幫助我們能夠精細的觀察到實際的翅脈紋路構造。</p>
			
<p>將製作成標本的長腳蜂細心放進標本盒中，研究過程經常拿出來觀察與測量。</p>	<p>為了學習製作標本，我們練習觀察與拆解許多種類蜜蜂，探討不同類蜜蜂構造的差異。</p>	<p>聚精會神的觀察與拆解虎頭蜂的狀況。</p>	<p>觀察虎頭蜂的腹部與長腳蜂腹部的差異。</p>

圖 7. 野外觀察與教室裡認識細腰蜂身體形態

(六) 模擬仿真翅膀的實驗方式說明

1. 設計理念

仿真，顧名思義就是要盡可能模仿真的翅膀。為了達到這個目標，研究團隊決定要使用紅駟細腰蜂真正的翅膀為基底，將標本的翅膀拆下來，拍照放大 2 倍影印之後，再使用描圖紙一邊細心觀察翅膀的形狀、紋路，一邊畫出模擬翅膀的底圖，再使用 32 號的漆包電線，模擬翅膀紋路設計，盡可能製作出仿真的翅膀構造。本段僅說明設計理念與過程概述，詳細的製作步驟，將於研究問題三說明。

			
<p>我們請藝文老師指導我們透過光板學習昆蟲形態素描的技巧，大家聚精會神作畫。</p>	<p>透過光板素描，可以清楚的觀察到昆蟲構造的細節，我們從這個過程學習細節的重要性。</p>	<p>一筆一畫，細心的觀察，細心的描繪，就能看見重點。</p>	<p>我們的作品完成了，很有成就感。</p>

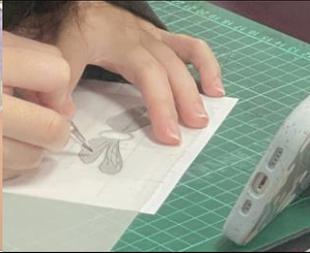
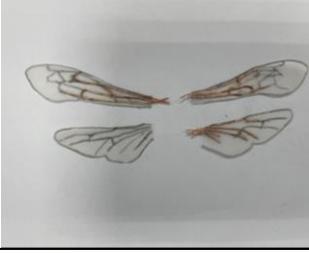
			
描翅膀也是用同樣的方法，一邊素描，一邊觀察細節。	一張圖，需要花費 50 分鐘，才能順利完成。	細心的剪下素描的作品。	完成左右各一對前、後翅。
			
使用 32 號漆包線，製作翅脈。	細心的貼上紋路。	完成 50%。	完成 90%了。最後的作品，將於研究結果說明。

圖 8.製作仿真翅膀的過程

2.設計與測試翅膀抬升實驗平台

為讓翅膀角度與紋路設計的實驗能夠精準穩定，研究團隊設計了**仿真翅膀抬升實驗平台**，透過實驗架、吹風機、漆包線、兩塊木板及延長線組裝成平台如圖。經過穩定性測試，確認了平台能夠穩定達成我們的研究效果。

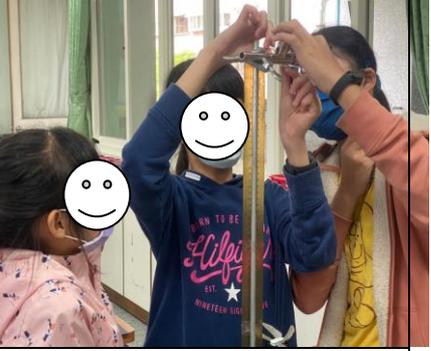
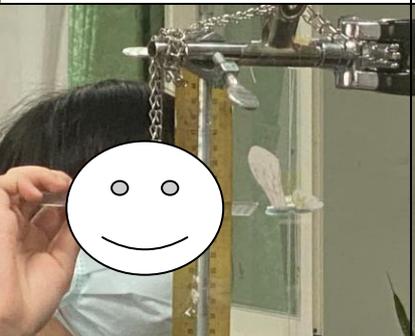
		
	調整抬升導線的穩定性。	繼續調整導線的穩定性。
		
仿真翅膀實驗平台經過測試之後，能夠穩定且精準的測出翅膀抬升效果。	觀測抬升測量高度的穩定性。	模擬測試翅膀的抬升效果。

圖 9.實驗平台設計與操作過程

陸、研究過程、發現與結果

研究問題一：紅足細腰蜂身體構造觀察與測量

研究方法：觀察與測量

研究過程：

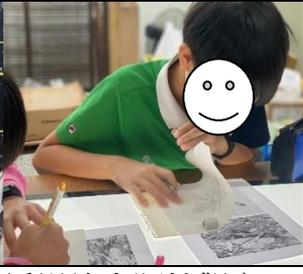
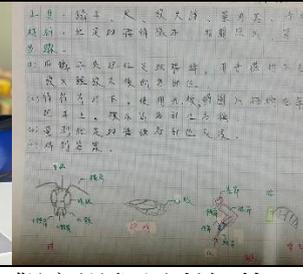
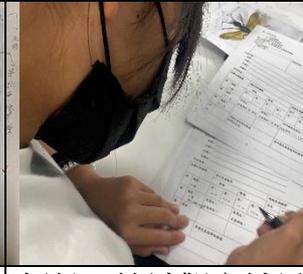
			
觀測紅足細腰蜂標本的身體構造	觀察紅足細腰蜂飛行系統	觀察紅足細腰蜂跑步系統	觀察足部各關節的靈活度。
			
翅區觀察與計算。	透過放大照片觀察。	觀察過程思考紀錄。	歸納、統計觀察結果

圖 10. 觀測細腰蜂身體構造的過程

研究結果：

表 1. 紅足細腰蜂身體各部位測量統計紀錄(長度單位為 mm)

身體主幹觀察		飛行系統觀察				跑動系統觀察		
		前翅		後翅		前足	中足	後足
頭 4	觸鬚：13 口器：3	長：20	寬：6	長：15	寬：6	長：15	長：20	長：28
胸 10	胸節：4 節	生長部位： 第 2 胸節		生長部位： 第 2 胸節		前足:第 1 胸節。中足:第 3 胸節。後足：第 4 胸節 前中後足長度比約 3:4:6 後足與體長比約 1:1。		
		14 個翅區 長寬比：3:1		8 個翅區 長寬比：2.5:1				
		前後翅長度比為 4:3						
腹 1.1	腹節：7 節 (含腹柄節)	腹柄節構造特殊，可能與飛行有關。				腹柄節構造特殊，可能與跑動系統有關。		
備註		前、後翅翅脈由三角形、橢圓形、四邊形及不規則形圍成的翅區所構成。						

紅足細腰蜂的身體由頭(1段)、胸(4段)腹(7段)體節構成，從頭到腹部尾端共計 12 段體節。我們測量了 5 隻紅足細腰蜂，獲得平均體長為 29mm(max:31; min:27, n=5, 單位 mm)。頭長:4mm、胸長:11mm、腹長 11mm(扣除腹柄節 3mm)。頭胸腹比約：1:3:3。頭部器官包括 1 口器、1 對大顎、1 對觸鬚、1 對複眼、2 對小顎鬚、3 顆單眼所構成。

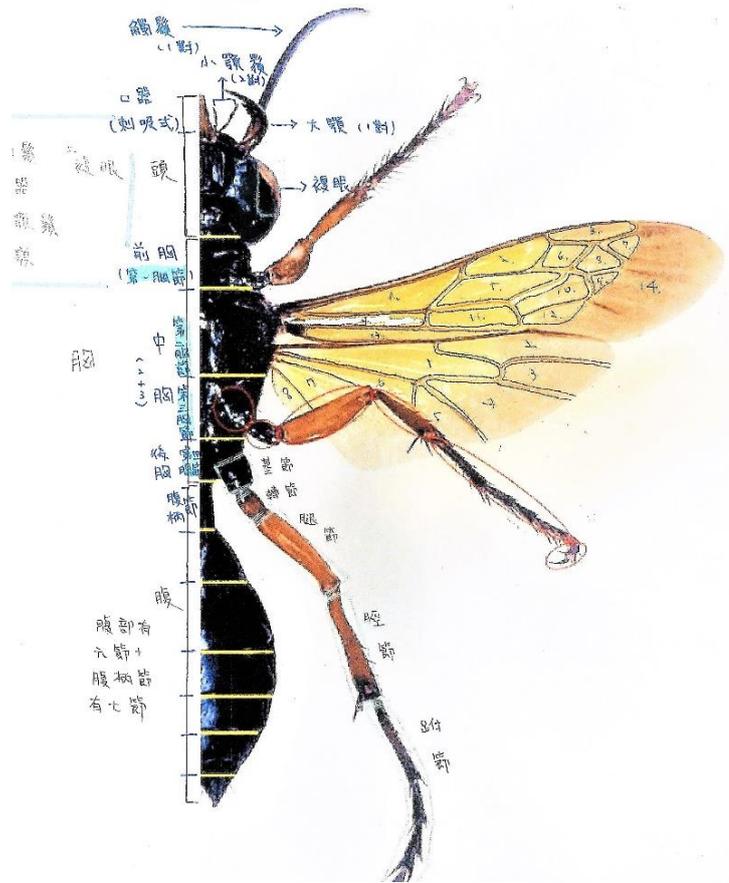


圖 11 細腰蜂的身體構造

胸部器官由六足及兩對翅膀構成，同側前中後足分別位於胸部第 1、3、4 段體節。足部構造由內而外，由基節、轉節、腿節、脛節、跗節、爪

構成。前翅與後翅沿著第 2 胸節長出三角、四邊與橢圓形狀的翅脈。

腹部藉由細長的腹柄節連結胸部，呈紡錘狀，由六段體節構成。

討論：從以上的觀察，我們發現紅足細腰蜂的身體構造有以下 2 點特色：

特色 1：紅足細腰蜂共有 12 段體節。頭、胸與腹部比 1:3:3。桿狀、細長的腹柄節為其特色，其功能為何值得後續觀察。

特色 2：兩對翅膀及六足，分別生長於胸部。前、後翅生長在第 2 胸節；前、中、後足生長在第 1、第 3 及第 4 胸節。這與我們從盧耿(2013)的圖解昆蟲學所閱讀到的昆蟲的運動器官生長在胸部文獻一致，我們更進一步觀察到胸部與六足及翅膀生長的相對位置。此外，我們很好奇連結紅足細腰蜂胸部與腹部的細長腹柄節在飛行時扮演哪種功能?為了解答此一問題，後續研究將聚焦觀察腹柄節在飛行時的功能。

紅足細腰蜂的前後翅翅脈紋路觀察發現，前翅由 14 塊三角形、四邊形、長方形、橢圓形等幾何圖形圍成的翅區組成。翅長 20mm，寬 6mm，長寬比約為 3:1。後翅由 8 塊三角形、

四邊形、長方形、橢圓形等幾何圖形所圍成的翅區所構成。翅長 15mm，寬 6mm，長寬比約為 2.5:1。綜合以上，我們發現紅足細腰蜂的翅膀具有以下兩點特色:特色 1：前後翅的翅寬都一樣是 6mm，但翅長不一樣長。前翅與後翅的長度比為 4:3。特色 2：翅膀是由三角形、四邊形、長方形、橢圓形等不規則的幾何圖形構成。翅脈由內到外側逐漸由粗轉細。

討論：我們在野外觀察時曾經發現，紅足細腰蜂會在樹叢間及人類的面前懸停一些時間，我們當時就在想，他的懸停能力怎麼這麼好。觀察翅膀構造之後，更想要探討其懸停能力是否跟前後翅的夾角角度及翅脈紋路設計有關。如果我們設計實驗改變前後翅的夾角，並觀察、比較翅膀的不同角度設計是否影響其懸停能力，應有機會獲得明確的解答。另外，翅脈紋路也可能是造成懸停的原因之一，我們想要試看看有紋路的翅膀跟沒有紋路的翅膀是否會造成懸停能力的差異?不同形狀的紋路設計是否影響其懸停能力，期待藉由實驗發現翅膀紋路設計與懸停能力之間的關係。

研究問題二：紅足細腰蜂如何飛行?

研究方法：觀察法

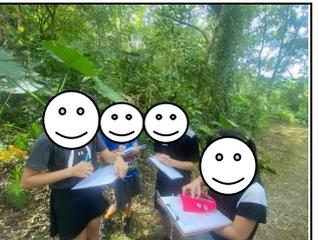
研究小組先使用肉眼觀察紅足細腰蜂的飛行，再使用 I-PHONE 手機每秒 240 張的慢速攝影功能，紀錄紅足細腰蜂的飛行行為，回到學校時，再透過軟體(PowerDirector、Photoimpact)擷取紅足細腰蜂飛行的影像，進行分析觀察。

研究工具與材料：

表 2 前後翅的翅膀面積計算。

研究工具	研究材料
Sony 攝影機 I-Phone 手機 Gopro 攝影機 手提電腦 PowerDirector、Photoimpact 軟體	自製旗標 學習單

研究過程：

			
在棲地遇見紅足細腰蜂，我們會先以肉眼觀察，再以攝影機進行觀察。	團隊成員趁著母蜂飛走之後，使用蛇管攝影機觀察土洞內部狀況。	等待母蜂出現的空檔，團隊成員會稍微休息一下，喝水，補充體力。	用心的討論與紀錄母蜂的飛行行為。

			
下雨天，仍舊需要到棲地，觀察母蜂的行為。	用肉眼與 I Phone 手機，同步觀察母蜂的飛行行為。	GoPro 攝影機可以拍攝大範圍的區域，對我們的研究很有幫助。	Sony 與 GoPro 兩部攝影機同步，可同時觀察母蜂廣角及焦點行為。
			
透過肉眼的觀察，能夠清楚掌握母蜂的行蹤，對於追蹤母蜂的行動很有幫助。	Sony 攝影機拍攝到的焦點影像，能清楚看到母蜂的行為。	團隊成員正在準備旗標，也在交流討論野外觀察攝影的技術問題。	使用電腦觀看錄影結果，同時節錄重要的母蜂飛行影像。

圖 12. 觀察細腰蜂飛行的材料準備與實際觀測過程

研究結果：

結果一：紅足細腰蜂的飛行模式，可歸納為「抬身展翅」、「離地彈飛」、「飛行」、「落地降落」四階段。

(一)抬身展翅：紅足細腰蜂起飛時，抬升前、中足，只有後足著地，接著展開翅膀，準備起飛。

(二)離地彈飛：我們觀察到母蜂起飛當時，後足用力彈起，同時抬高腹部，快速振翅拍打，起飛。

(三)飛行：我們在母蜂飛行時觀察到「飛行懸停」、「轉彎飛行」及「負重飛行」等行為。

(四)落地降落：母蜂降落時，中後足首先著地，緊接著收翅，完成降落。

	
抬身展翅 ：紅足細腰蜂起飛時，先抬升前足與中足，僅後足採地，接著展開翅膀，準備起飛。	離地彈飛 ：後足彈起，腹部抬升，六足自然下擺，振翅起飛。



圖 13.細腰蜂飛行的四個階段

結果二：紅足細腰蜂運用腹柄節抬升及左右移位控制身體運動

我們透過慢速影片觀察，發現紅足細腰蜂會藉由左右移動腹柄節的方式，向左向右轉彎飛行。除此之外，起飛時，紅足細腰蜂也會抬升腹柄節，讓身體隨著翅膀的快速振動起飛。

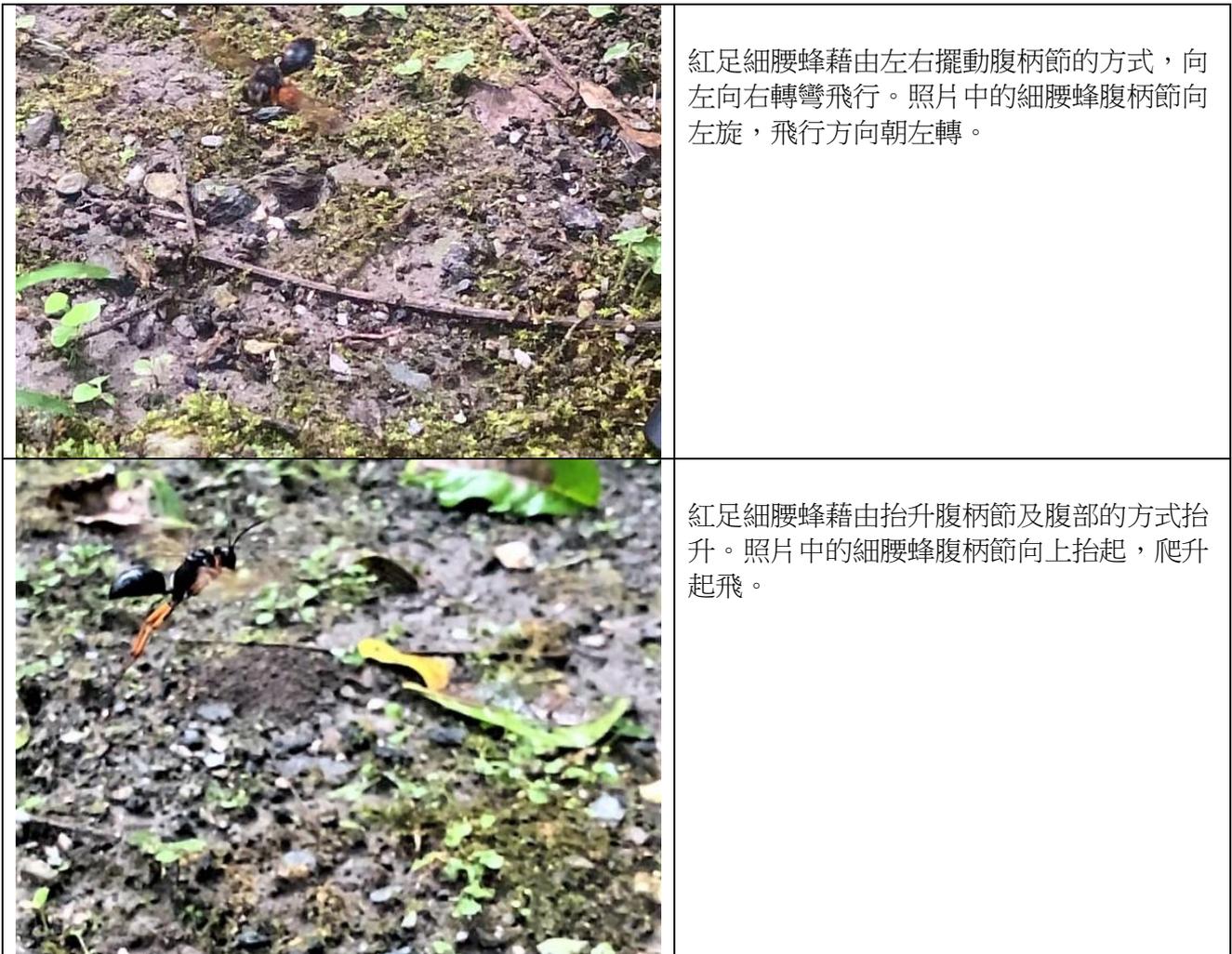


圖 14.細腰蜂運用腹柄節抬升與轉彎。

結果三：懸停飛行時，翅膀夾角介於 135-180 度

從肉眼觀察以及慢速影片的撥放得知，紅足細腰蜂懸停飛行時翅膀夾角介於 135-180 度。



圖 15.細腰蜂飛行懸停時的夾角介於 135-180 度。

結果四：飛行時，紅足細腰蜂透過口器及六足搬運重物

(1) 口器叼取負重：使用口器叼著小石頭、樹枝、樹葉等物品，用來掩蓋育雛孔。



圖 16.細腰蜂用口器叼著石塊負重飛行。

(2) 六足抓取負重:獵捕蠱斯，使用六足抓取獵物。



圖 17.細腰蜂用腳抓住蠱斯飛行。

研究問題三：如何製作紅足細腰蜂的仿真翅膀?

研究問題 3-1 仿真翅膀的設計、製作、測試、改良與進化

製作工具與材料：

製作工具	製作材料
熱熔槍、錐子、剪刀、電子磅秤(精準到 0.01 克)、美工刀、鑷子。	熱熔膠條、描圖紙、漆包線、超輕黏土、塑膠片、膠帶、吸管。

製作步驟：

步驟一：使用描圖紙，同比例放大 2 倍，描繪紅足細腰蜂的前、後翅構造。

步驟二：將翅膀剪下，依照翅脈的構造，使用漆包電線製作翅脈。

步驟三：使用漆包電線製作第二胸節，再用超輕黏土包覆胸節。

步驟四：放到實驗平台上，使用吹風機吹抬，測試翅膀能不能漂浮。





測量單一片翅膀的重量。

組裝翅膀結構，紅足細腰蜂翅膀逐漸成形。

使用超輕黏土作為第二胸節，紅足細腰蜂仿真翅膀完工。

圖 18 製作仿真翅膀的過程。

研究結果：經過 2 次的修正與改良，第 3 代仿真翅膀具有容易製作、穩定，且能夠符合容易調控翅膀角度的優勢，符合我們的實驗需求。

表 仿真翅膀 3 次的改良修正過程

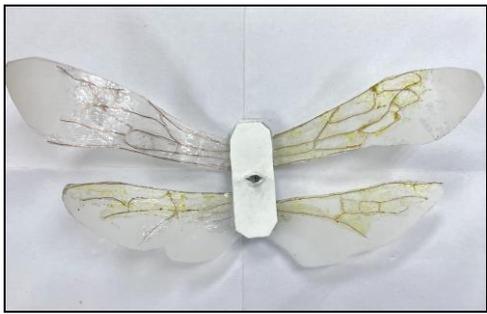
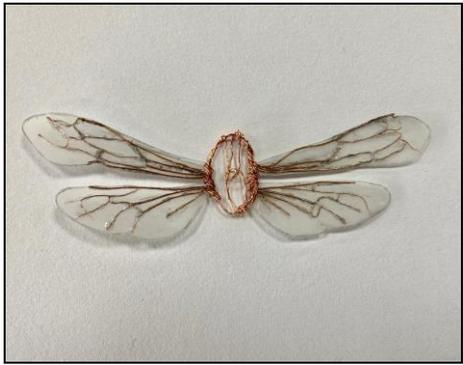
	實際設計成果	測試結果	修正方向
第一代 仿真翅膀 設計與測 試		優點:翅膀能夠順利抬升。 缺點: 1.翅脈的構造不夠精準。 2.無法區辨抬升的原因究竟是翅膀的功能或者胸部的保麗龍材質所造成，造成實驗效果混淆。宜再修正。	1.修正修部構造。 2.修正翅脈紋路，盡可能做到精準。
第二代 仿真翅膀 設計與測 試		優點：翅脈設計精準，已達仿真的水準。 缺點：胸部設計雖然可以排除因過輕導致抬升效果混淆的可能性，卻因為穩定性不足而導致測試時翅膀呈現晃動、旋轉及飄移不定的缺點。	宜增加細腰蜂胸部構造的穩定設計。
第三代 仿真翅膀 測試與定 案		優點： 1. 翅脈紋路設計精準，且測試時可以穩定抬升。 2. 翅膀角度可以因實驗需求進行簡易的調整。	定案，符合本研究的實驗需求。

圖 19.三代仿真翅膀的樣態。

研究問題 3-2 仿真翅膀的製作步驟

製作方法：觀察與實作

製作過程：

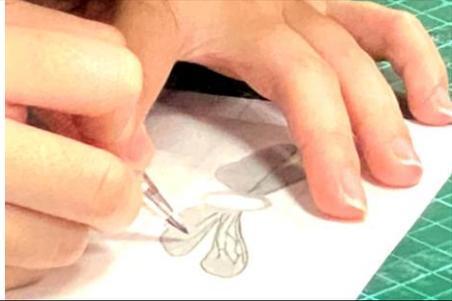
		
<p>第一步：觀察實體翅膀標本，紋路與形狀。</p>	<p>第二步：利用描圖紙畫出翅膀外觀並剪下，再畫出翅脈。注意：翅脈較細緻不易觀察。可以用拍照的方式進行描摹，也可以使用描圖紙直接描摹。</p>	<p>第三步：用 31 號漆包線模擬翅脈。注意：同樣使用 31 號漆包線，才能控制翅脈的粗細與重量，才不會影響實驗結果。</p>
		
<p>第四步：仔細地將漆包線黏至描圖紙上。漆包線不易黏貼，需要細心進行。</p>	<p>第五步：將翅膀與胸部構造組合起來。注意組合時，要留意胸節的大小。</p>	<p>第六步：用超輕黏土製作細腰蜂的第二胸節，並置放中空的細管作為導線裝置。</p>

圖 20 仿真翅膀的詳細製作步驟。

製作結果：我們運用六個步驟製作紅足細腰蜂的仿真翅膀。1.觀察翅脈構造、2.描圖紙描繪翅膀、3.剪刀剪下翅膀、4.漆包線黏貼翅脈、5.漆包線串聯成形、6.超輕黏土製作胸節。

研究問題四：仿真翅膀的夾角角度，是否會影響翅膀的升降速率及抬升高度？

研究方法：實驗法

研究步驟：

步驟一：依序調整紅足細腰蜂前後翅夾角各為 180、180 度(設計一)；135 度、180 度(設計二)；180 度、135 度(設計三)及 135 度、135 度(設計四)。

步驟二：將不同角度設計的仿真翅膀，依序放上實驗平台上。

步驟三：開開關，每個設計測試 5 次，紀錄其抬升高度、時間與下降高度、時間。

步驟四：統計不同角度設計的翅膀其上升與下降速率。

研究過程：

			
設計一:前翅、後翅的夾角各為 180 度的翅膀設計。	設計二:前翅夾角 135 度，後翅 180 度的翅膀設計。	設計三:前翅夾角 180 度後翅 135 度的翅膀設計。	設計四:前後翅夾角各為 135 度的翅膀設計。

圖 21 不同角度仿真翅膀的變因控制。

研究結果:

抬升高度表現，由高到低，依序為設計一(平均 33.3 公分，max35;min31)、設計三(平均 25.6 公分，max26.8；min24.3)、設計四(平均 24.4，max25.7；min23.4)、設計二(平均 23.8 公分，max25.3；min21.2)。

上升速率表現：由快到慢依序為設計一(每秒上升 8.3 公分)、設計三(每秒上升 7.8 公分)、設計二(每秒上升 7 公分)及設計四(每秒上升 6 公分)。

下降速率表現：由慢到快依序為設計一(每秒下降 28 公分)、設計三(每秒下降 29.77 公分)、設計二(每秒下降 34 公分)、設計四(每秒下降 42.1 公分)。

表 3 不同角度的翅膀設計是否會影響飛行懸停能力

		設計一(180 度；180 度)					設計二(135 度；180 度)					設計三(180 度；135 度)					設計四(135 度；135 度)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
抬升 測 試	高度	33	33.9	33.5	31	35	21.2	23.3	21.2	25.3	25.2	26.8	25.8	25.7	24.3	25.4	25.7	24.3	23.7	25	23.4
	平均 時間	33.3 公分					23.8 公分					25.6 公分					24.4 公分				
	時間	3.1	3.1	4.0	5.0	4.0	3.2	4.3	3.2	2.8	3.4	3.8	3.8	3.2	2.9	2.9	3.1	4.0	4.0	4.1	5.6
	平均 速率	4.0 秒					3.4 秒					3.3 秒					4.1 秒				
	速率	8.3 公分/秒					7 公分/秒					7.8 公分/秒					6 公分/秒				
下降 測 試	時間	0.9	1.1	0.9	0.8	1.1	0.7	0.6	0.7	0.8	0.5	1.0	0.8	0.9	0.8	0.8	0.6	0.5	0.6	0.5	0.7
	平均 速率	1.16 秒					0.7 秒					0.86 秒					0.58 秒				
	速率	28 公分/秒					34 公分/秒					29.77 公分/秒					42.1 公分/秒				
備註																					

綜合以上升降速率表現，翅膀夾角不同，會影響翅膀的升降速率與抬升高度。設計一前後翅同為 180 度的設計，受風後的抬升速度最快，下降速度最慢，抬升高度也最高。反觀設計四，前後翅左右兩側翅膀的夾角同為 135 度的設計，上升速率最慢(每秒 6 公分)，下降速率最快(每秒 42.1 公分)。

研究問題五：仿真翅膀有沒有翅脈紋，是否會影響翅膀的升降速率及抬升高度?

研究方法：實驗法

研究步驟:

步驟一：將有紋路及沒有紋路的翅膀，依序放上實驗平台。

步驟二：有紋路及沒有紋路的翅膀各測 5 次，紀錄其抬升高度、時間與下降時間。

步驟三：歸納統計結果，計算有沒有紋路的翅膀其上升高度、速率與下降速率。



圖 22 有沒有紋路的仿真翅膀樣態。

研究結果：紋路會影響翅膀爬升的速度。有紋路的翅膀爬升較快，較高，下降較慢。

抬升高度比較：有紋路的抬升高度比較高。有紋路抬升平均高度 32.1 公分(max33.6；min29.2)沒有紋路的平均抬升高度 26.8 公分(max27.7；min25.3)。

上升速率比較：有紋路的翅膀上升速率比較快。有紋路的翅膀平均上升速率為每秒 8.23 公分，沒有紋路的翅膀平均上升速率為每秒 5.28 公分。

下降速率比較：有紋路的翅膀下降速率較慢，平均為每秒 31.5 公分，沒有紋路的翅膀下降速率為每秒 41.88 公分。

表 4 有沒有紋路是否會影響飛行懸停能力

		有紋路					沒有紋路				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
抬升測試	上升高度	29.2	30.3	33.6	33.4	34.2	25.3	27.4	26.5	27.7	27.1
	平均	32.1					26.8				
	上升時間	3.6	4.1	4.0	4.0	3.8	4.6	4.8	5.2	5.2	5.4
	平均	3.9					5.04				
	平均上升速率	8.23 公分/秒					5.28 公分/秒				
下降測試	下降時間	1.1	1.2	1.0	0.9	1.0	0.7	0.8	0.5	0.6	0.6
	平均	1.02					0.64				
	平均下降速率	31.5 公分/秒					41.88 公分/秒				

研究問題六：仿真翅膀翅脈紋路形狀，是否會影響翅膀的升降速率及抬升高度？

研究方法：實驗法

研究步驟：

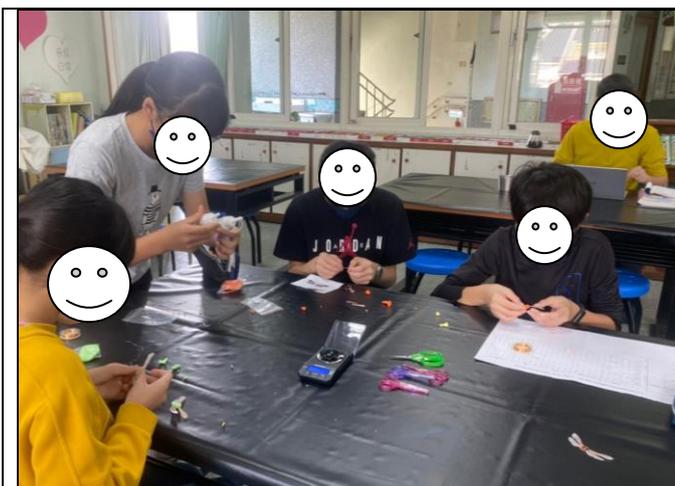
步驟一：以仿真紅足細腰蜂的翅脈紋路總長度為基準，分別製作原形、正三角形、正方形及正圓形四種不同翅脈紋路形狀的翅膀。

步驟二：控制翅膀角度(前後翅皆為 180 度)與總重量(誤差在 0.001 克內)後，將不同形狀的翅膀，依序放上實驗平台上。

步驟三：每個不同紋路形狀翅膀測試 5 次，紀錄其抬升高度、時間與下降時間。

步驟四：統計結果，並計算其上升與下降速率。





團隊成員翅正在努力製作不同紋路的仿真翅膀，務必控制翅脈紋路的長度與重量，以排除干擾變因。



我們製作的不同紋路仿真翅膀，都必須謹慎的控制翅脈紋路長度與重量，每一對翅膀都要秤重，排除因為不同的重量而干擾實驗效果的可能。

原形		0.955g
正方形		0.954g
正三角形		0.954g
正圓形		0.954g
不規則形		0.955g

完工後不同紋路翅脈重量，都在 0.954-0.955 克之間，誤差 0.001 克，非常精準。



我們製作的五個不同紋路構造翅膀與原翅膀的合照。完成後，很有成就感。

圖 23 不同紋路形狀的仿真翅膀。

研究結果：

抬升高度表現：由高到低，依序為原紋路設計(平均抬升 32.56 公分，max：27.2 公分，min24.8 公分)、正方形紋路設計(平均抬升 32.56 公分，max：27.2 公分，min24.8 公分)、正三角形紋路設計(平均抬升 24.2 公分，max：25.2 公分，min23.4 公分)、正圓形紋路設計(平均抬升 23.8 公分，max：25.42 公分，min22.6 公分)。上升速率表現：原紋路設計最快(每秒上升 8.39 公分)、其次依序為正方形紋路(每秒上升 5.29 公分)、正三角形紋路(每秒上升 4.31 公分)及正圓形紋路(每秒上升 4.02 公分)。下降速率表現：原紋路設計最慢(每秒下降 16.96 公分)、其次依序為正方形紋路(每秒下降 18.37 公分)、正圓形紋路設計(每秒下降 19.83 公分)、正三角形紋路設計(每秒下降 20.16)。

表 5 不同角度的紋路設計是否會影響飛行懸停能力

		原紋路設計					正三角形紋路設計					正方形紋路設計					正圓形紋路設計				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
上升測試	上升高度	30.2	30.4	34.6	34.4	33.2	25.2	24.4	24.2	23.6	23.4	27.2	26.0	25.4	24.8	25.2	25.4	24.0	24.4	22.6	22.6
	平均	32.56					24.2					25.72					23.8				
	上升時間	3.2	3.4	3.8	4.4	4.6	4.9	5.4	5.8	5.8	6.2	4.4	4.5	5.0	5.4	5.0	5.4	5.8	6.0	6.2	6.2
	平均	3.88					5.62					4.86					5.92				
	平均上升速率	8.39					4.31					5.29					4.02				
下降測試	下降時間	2.0	1.8	1.8	2.2	1.8	1.2	1.2	1.4	1.0	1.2	1.4	1.2	1.4	1.4	1.6	1.0	1.2	1.2	1.2	1.4
	平均	1.92					1.2					1.4					1.2				
	平均下降速率	16.96					20.16					18.37					19.83				

研究問題七：翅膀相關變因影響紅足細腰蜂懸停能力統整

研究方法：歸納統整研究四、五、六問題的實驗發現

研究過程：

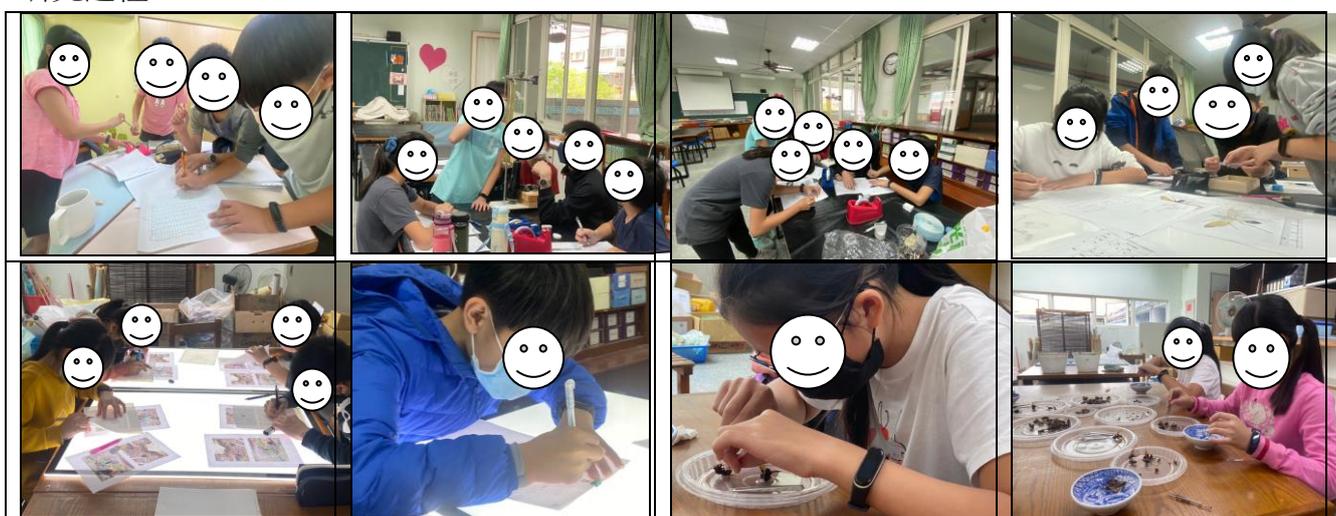


圖 24 統整最後的結果，探討紅足細腰蜂的懸停能力。

研究結果:透過資料的統整之後，我們發現翅膀展開角度、翅膀有沒有紋路以及紋路的形狀，皆會影響紅足細腰蜂上升高度、速率以及下降速率。原紋路設計、前後翅的翅膀展開 180 度的實驗結果顯示，不論其在抬升高度、抬升速率以或是下降速率上的表現，都是各組最優。另，我們也發現，在角度測試實驗上，前翅展開 180 度的設計，其表現優於前翅展開 135 度的表現。造成這現象的原因，將在綜合討論進行探討。

表 6 翅膀相關變因影響飛行懸停的綜合表

	翅膀展開角度				翅脈紋路		紋路形狀			
	設計 1	設計 2	設計 3	設計 4	有紋路	沒有紋路	原形狀	正三角形	正方形	正圓形
	前 180 後 180	前 135 後 180	前 180 後 135	前 135 後 135						
上升高度	1	4	2	3	1	2	1	3	2	4
上升速率	1	3	2	4	1	2	1	3	2	4
下降速率	1	3	2	4	1	2	1	4	2	3
說明	1.前翅角度為 180 度的設計一及設計三，不論在上升高度、上升與下降速率上都比前翅角度 135 度的設計二、設計四還佳。				翅脈有紋路的設計，不論在上升高度、上升與下降速率的表現都比沒有紋路的設計佳。		翅脈紋路的不同形狀，會有不同的結果。原紋路設計，明顯優於正三角形、正方形及正圓形設計。			

柒、綜合討論與結論建議

一、綜合討論

本研究旨在探討紅足細腰蜂翅膀構造是否會影響其飛翔懸停表現。研究透過形態觀察、野外觀察及室內實驗等策略，探討其翅膀與飛翔懸停之間的關係。研究團隊假設紅足細腰蜂在飛翔時，展開翅膀所形成的夾角及翅膀本身的紋路構造會影響紅足細腰蜂的懸停能力。實驗透過測量研究團隊自製的仿生翅膀在固定的風力大小下，翅膀的抬升高度、抬升速率及下降速率，用以推論了解紅足細腰蜂的懸停能力。以下分成「翅膀夾角，如何影響紅足細腰蜂的飛翔懸停表現」、「翅脈紋路如何影響紅族細腰豐的飛翔懸停表現」兩部分，進行綜合討論。

討論一：翅膀夾角如何影響紅足細腰蜂的飛翔懸停表現

會飛的昆蟲如蜜蜂、蜻蜓等可以向上飛、垂直下降，甚至可以懸停在空中，也可以突然側飛或者旋轉倒飛，他們的靈活程度是當前任何飛機都做不到的。我們觀察紅足細腰蜂飛行時的表現，並透過仿真實驗發現紅足細腰蜂前後翅所形成的夾角，會影響翅膀的上升高度、上升速度以及下降速度。當紅足細腰蜂前後翅張開到 180 度的水平角度時，不論在抬升高度、抬升速度以及下降速度的表現上，均是最佳表現。簡單的說，紅足細腰蜂在飛行懸停時，翅

膀張得越開，牠的上升高度就越高、上升的速度越快、下降的速度就越慢。此外，我們也發現，當紅足細腰蜂的前翅角度張開到 180 度時，其翅膀的抬升高度、抬升速度及下降速率，明顯比後翅張開 180 度的表現好。這讓研究團隊產生了疑問，究竟是何原因，導致這樣的落差?研究團隊逐項檢視研究過程的每一個環節，發現前翅與後翅的翅膀面積大小不同。

我們估算研究所設計的仿真翅膀，前翅面積大約為 4.8 平方公分，後翅的面積大約為 3.6 平方公分。如果以前翅面積做為基準，後翅翅膀的面積僅約前翅的 75%。這樣的現象，導致前翅受到來自下方的風力吹拂時，其抬升高度、速度以及下降的速度，均會與後翅產生落差。綜合以上，本實驗發現翅膀夾角大小所造成的實驗差異，是因翅膀面積大小不同所致，間接影響作後的實驗結果。由此推論，紅足細腰蜂在飛行懸停時，藉由擺動前後翅的夾角角度來控制翅膀與空氣接觸面積的量，以達成調控升降時間與速度之需求。

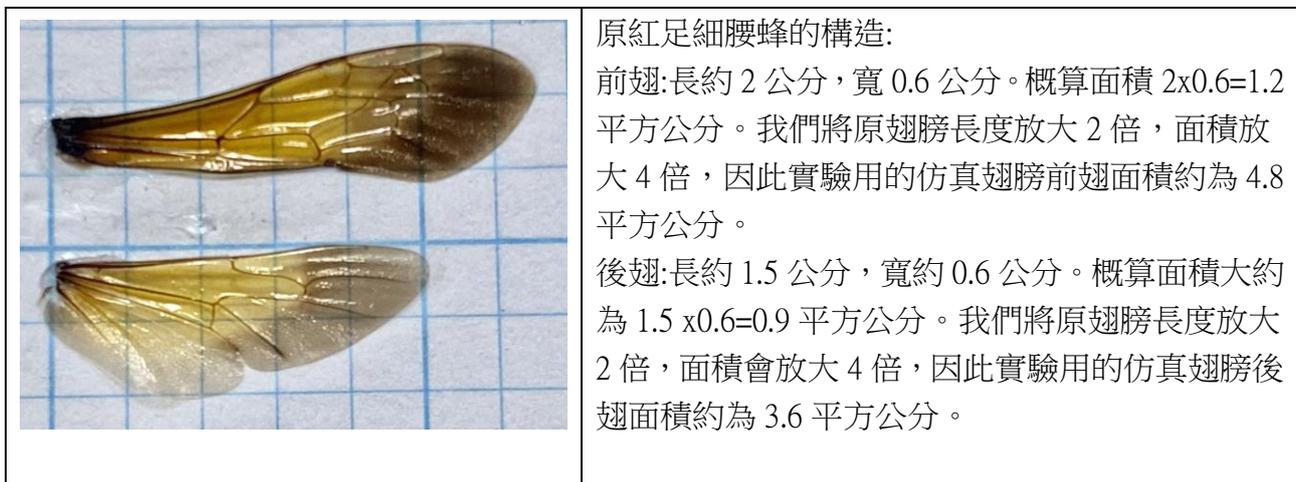


圖 25 前後翅的翅膀面積計算。

討論二：翅脈紋路如何影響紅足細腰蜂的飛行懸停表現

昆蟲翅膀有沒有立體的翅脈紋路，會影響翅膀的抬升高度、速度及下降速度，有紋路設計的翅膀表現在懸停能力的三項指標均較佳。如果以有紋路設計的平均抬升速度為基礎，沒有紋路設計的翅膀抬升表現僅達有紋路設計的 64%(5.28/8.23)。沒有紋路設計的翅膀下降速度比有紋路設計的快了 1.33 倍，翅膀有沒有紋路設計對於紅足細腰蜂的飛行懸停能力影響很大。

盧酖(2008)提到，昆蟲拍擊翅膀時，能夠製造複雜的空氣環流，藉由這些環流產生抗力或提升力，將昆蟲向上、向前推進，產生飛行的浮力與動力。藤期憲治(2017)也提到，蜻蜓翅膀的表面結構呈現鋸齒狀凹凸不平狀態，在蜻蜓飛行的過程，凹下去的部分會產生微小的空

氣漩渦，讓外側的空氣順暢的流向翅膀後方，就算只是微小的風也能產生蜻蜓懸浮的浮力。遇見強風時，空氣在凹凸表面產生規律的漩渦，流經翅膀的氣流仍然整齊不會紊亂，亦可幫助蜻蜓穩定的飛行(藤期憲治，2017)。

我們的研究發現翅膀的紋路，能幫助昆蟲懸浮與飛行，至於為何不同形狀的紋路設計會產生不一樣的抬升效果，仍待後續研究加以探究解答。

二、研究結論

依據我們的形態觀察、田野觀察及室內實驗，我們提出以下五點結論：

結論一：紅足細腰蜂身體共有 12 段體節。頭胸腹體節數量比為 1:4:7，長度比為 1:3:3。胸部為昆蟲運動中心，前後翅從第二胸節長出。前中後足從第 1、3、4 段胸節長出。前翅與後翅的翅脈各由 14 及 8 塊三角、四邊及圓形的翅區所組成。左右兩側的翅脈紋路呈對稱圖形。

結論二：紅足細腰蜂飛行區分為「抬身展翅」、「離地彈飛」、「飛行懸停」及「落地降落」等四個階段。懸停飛行時，翅膀夾角介於 135-180 度之間。會使用口器及六足叨抓物體，進行負重飛行。

結論三：經過了三代的設計測試，我們成功使用描圖紙及漆包電線設計並製作出紅足細腰蜂的仿真翅膀。製作過程為(1)觀察翅脈構造(2)描圖紙描繪翅膀(3)剪下翅膀(4)漆包線黏貼翅脈(5)串聯成形及(6)使用超輕黏土製作胸節六個步驟。

結論四：前後翅張開到 180 度時，三項飛翔懸停指標均呈現最佳表現。這是因為翅膀張開 180 度時，翅膀與空氣氣流的接觸面亦最大，提升了紅足細腰蜂的飛翔懸停表現。由此推論，紅足細腰蜂飛行懸停時，會藉由擺動前後翅的夾角角度來控制翅膀與空氣接觸面積，達成飛行懸停之目的。

結論五：昆蟲翅脈紋路，會影響翅膀的抬升高度、速度及下降速度，有紋路設計的翅膀在懸停能力的三項指標表現均較佳。沒紋路的翅膀抬升表現僅達有紋路的 64%。下降速度則比有紋路的快 1.33 倍，不利於飛翔懸停。

日記

11. 2. 9 (2)

NO. 22118

呈。我折個自己用為定趕到後力所就用途及

改。一也成實意用在周之物後上，最致，折致

：美點在翅膠慢回，，定勻一動事部聚些起線

：實則成力大，細定同明有明胡的已一翅把線

點：的時完放度子太日時，竿樣妙脈漆多其點讓又身

地瓶多作用速鑄線互替膠，一隻翅妙脈漆多其點讓又身

，一隻台人為身已置子力處，竿樣妙脈漆多其點讓又身

着：了是個國子漆位左強界並致上再次力子

來：了月始一漆左的線始下交覆使紙了一折的

天：改們肩，後我月也交一之反會圓能可它我了！

日：天，我一定，我漆動流紙，件描狀樣定用好！

月：今振，們同來製之紙，我漆動流紙，件描狀樣定用好！

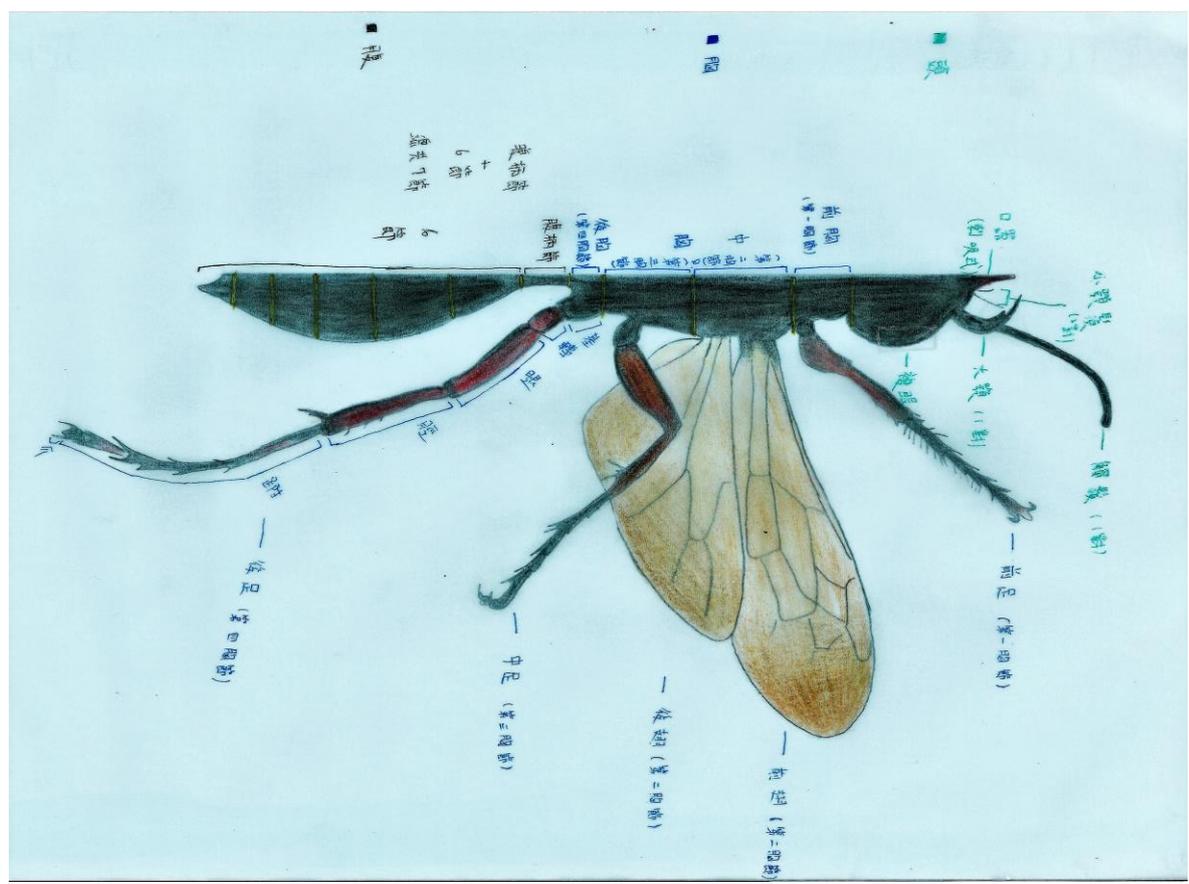
我：着膠月紙一足確，手線托現塗塗至了！直夫雙

ok 一足轉

心 朱漆包線折好翅版別狀再好上志。

心 時間越來越少了！ 翅膀呢！

研究日記節錄。



研究日記節錄。