

# 中華民國第 61 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 生物科

第二名

080313

「稻」高一「齒」、「磨」高一丈- 探討褐飛蟲  
的齒輪構造與運動方式的相關性

學校名稱：康橋學校財團法人新竹市康橋國民中小學

作者： 小六 宋其軒 小六 游艾娜 小六 簡琬融 小六 郭品誼	指導老師： 黃丰乃 許志遠
---	---------------------

關鍵詞：褐飛蟲、齒輪、運動方式

## 摘要

好奇褐飛蟲齒輪的秘密，實際飼養並觀察牠的身體形態與習性，進一步製作 3D 紙模型認識結構。以顯微鏡找出齒輪在若蟲後足轉節處，為正齒輪占轉節角度 60~80 度，齒數隨蟲體變大增加。成蟲沒有齒輪，轉節較若蟲大，腿節、脛節和跗節比例較長助於運動和抓握，六足連動跳躍時平均距離長，平面移動三足步式。驗證蟲體轉彎上下安全又省力，3D 列印製作齒輪模型模擬蟲體運動，比對步足模式找出與齒輪相關性。若蟲腿部短、步行較緩慢，平面移動步足模式和成蟲相似；順逆時針轉彎以 5 或 6 足齒輪帶動其他足轉動。跳躍時轉節和 5,6 足開啟後，齒輪瞬間合起卡住，5,6 足拉直跳躍。齒輪讓若蟲順利步行、跳躍逃生，推測是為了適應水稻的構造。

## 壹、研究動機

「哇！原來生物也有齒輪！」社團課時，看到一篇有關於一種昆蟲的報導(參考資料 2)，內容提到劍橋大學的科學家發現了齒輪位於若蟲“*Issus*”的後腿上，將它們嚙合在一起，以便在跳躍時使它們同步運動，目前還不確定為什麼 *Issus* 在成年後會失去齒輪的構造，科學家推測可能是成蟲具有較大的轉節，可以產生足夠的摩擦力驅動他們跳躍，而不需要具備相互嚙合的齒輪。於是我們查閱和核對資料後，確認它的名字是褐飛蟲，好奇的想知道它的外形、生活史和運動方式是什麼？如何透過齒輪進行運動？這其中一定隱藏著許多的秘密，於是開始著手進行實驗。

褐飛蟲(*Nilaparvata lugens* (Stål))為同翅目(Homoptera)，稻蟲科(Delphacidae)，為台灣水稻的害蟲，專家運用水稻的改良、妥善處理具有褐飛蟲的水稻、水稻幼苗期就以藥劑預防蟲體入侵和減少某些藥劑對天敵的傷害(參考資料 1.4)等方法，讓它們對於水稻的危害降低許多；此外，它的結構很特別，若從生態環境和演化的角度來看，相當值得探討，於是我們運用所學過「昆蟲家族」，認識昆蟲各部位的構造，知道它們具有不同的外形特徵；「力與運動」，認識力的作用、物體運動快慢和摩擦力；以及這學期學過「簡單機械」，認識滑輪、輪軸和動力傳送(參考資料 6~8)，透過這些背景知識並閱讀相關資料進行一系列的研究，希望能夠解開「生物的齒輪」秘密！

## 貳、研究目的

- 一、認識褐飛蝨的分類與基本資料
  - (一) 認識褐飛蝨的分類與基本資料
  - (二) 觀察並記錄褐飛蝨的構造與外形特徵
- 二、褐飛蝨的飼養與水稻的培育
  - (一)製作褐飛蝨的飼養箱
  - (二)認識並進行水稻的育苗與栽種
  - (三)褐飛蝨的觀察與紀錄-生活史、外形和數量變化
- 三、探究褐飛蝨的後足構造與運動方式
  - (一)觀察並記錄褐飛蝨若蟲與成蟲階段後足構造
  - (二)觀察與紀錄褐飛蝨若蟲與成蟲階段步行與跳躍時的情形
  - (三)觀察與紀錄褐飛蝨若蟲與成蟲階段運動轉彎時的步足模式
  - (四)探討褐飛蝨在水稻上轉彎向上與向下運動的意義
- 四、探究褐飛蝨後足轉節上的齒輪構造與運動方式的相關性
  - (一)分析褐飛蝨後足轉節上的齒輪種類與模型製作。
  - (二)分析褐飛蝨後足轉節上的齒輪構造和步行與跳躍的相關性。
  - (三)推測褐飛蝨後足轉節上的齒輪功能與意義

## 參、研究設備及器材

### 一、樣本：

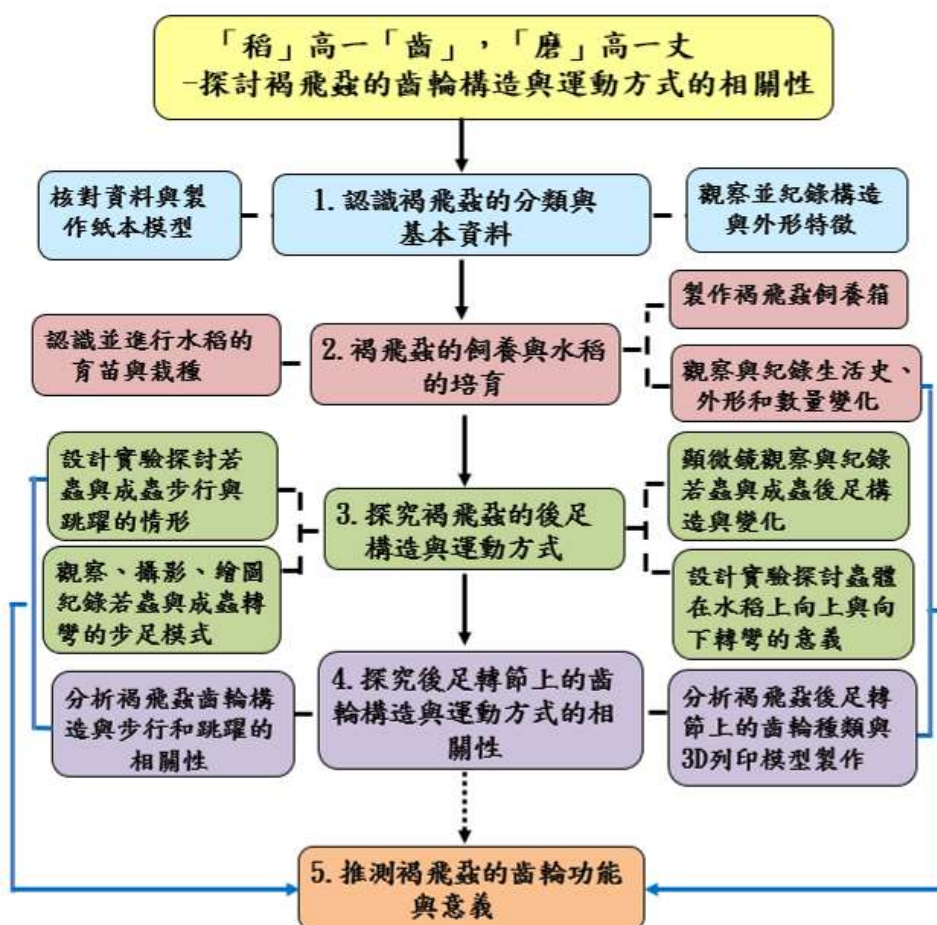
褐飛蝨(*Nilaparvata lugens* (Stål))、水稻(台農 67)

### 二、研究設備與用品：

目的	儀器與用品
1.飼養褐飛蝨	紙箱、膠帶、筆、剪刀、尺、釘書機、紗網
2.水稻栽培	盆栽、土壤(取自稻田)、培養皿、種子、幼苗
3.觀察與紀錄	顯微鏡(Microtech V-2000LED、uHandy)、攝影機、電腦、手機、i-pad、昆蟲探針、放大鏡、滴管、蓋玻片、載玻片、紀錄紙、Geogebra 軟

	體、自製吸蟲器(紗網、吸管、膠帶、培養盒)
4.步行與跳躍的測量	1.自製吸蟲器、海報、昆蟲探針、尺、筆(紅、藍、黑)、鉛筆 2.塑膠管、鋼珠、滑輪、膠帶、碼表、砝碼(10 克)、棉線、量筒、不鏽鋼圓頭文件夾(小)
5.模型製作	保麗龍球、3D 列印(123D)、免洗筷、西卡紙、剪刀、雙腳釘、紗網、保麗龍膠、竹籤、紙箱、卡榫、美工刀、細鐵絲、橡皮筋

## 肆、研究過程與方法



### 一、認識褐飛蝨的分類與基本資料

#### (一)認識褐飛蝨的分類與外形特徵

查詢文獻了解褐飛蝨的分類、主要分布、生活習性、棲息地和特徵後，我們從

農業試驗分所老師取得褐飛蝨活體(蟲體約 20 隻左右，成蟲與若蟲都有)

(圖 1.2)，請教他有關褐飛蝨的來源、生活環境和習性等資訊，有助於日後進行飼養。

## (二)觀察並記錄褐飛蟲的構造與外形特徵

我們將它們放在飼養箱中，以放大鏡觀察褐飛蟲的外觀，更進一步以顯微鏡拍照與記錄他的外形特徵(圖 3.4)。



## 二、褐飛蟲的飼養與水稻的培育

### (一)製作褐飛蟲的飼養箱(圖 5.6)

為了長時間的觀察與實驗，決定用紙箱製作一個褐飛蟲的飼養箱。思考如下：

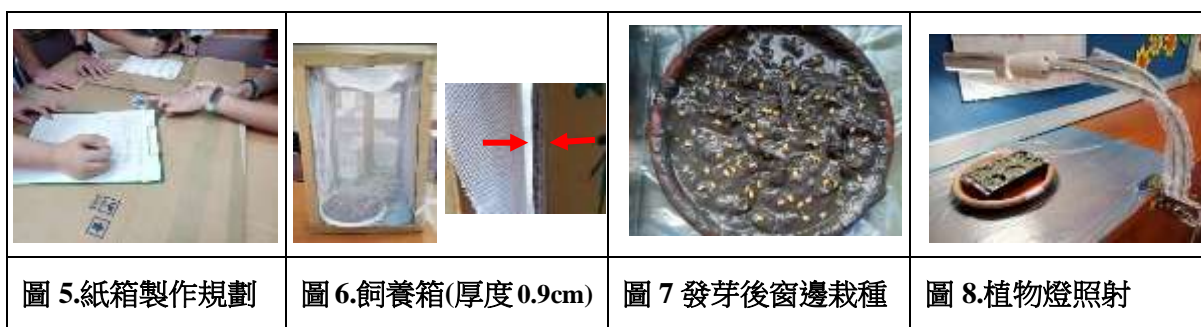
- 1.褐飛蟲的數量和水稻的高度與數量-決定長、寬和高(大小為 33x33x50)。
- 2.紗網覆蓋保持四面通風，以及一扇利於開啟、觀察的門(厚度 0.9 公分)，此扇門關起來後紗網會突出並卡住，避免褐飛蟲跑出來和其他生物進出。步驟如下：
  - (1)完成 33x33x50 的紙箱在側面剪下 26.5x42 的洞(不能太小)
  - (2)在底面上剪下 24.5x24 的洞
  - (3)剪下三個比 26.5x42 大一點的紗網，再剪下兩個比 24.5x24 大一點的紗網
  - (4)貼上紗網，留下一面當門，並且把剛切下的紙板用膠帶黏上去當門
  - (5)在門上內側貼上一層比門大的紗網，在紙箱內部的下面用膠帶黏上一層垃圾袋

### (二)認識並進行水稻的育苗與栽種(參考資料 5、圖 7.8)

從 [ ] 農業試驗分所 [ ] 老師取得水稻(品種:台農 67)，秧苗為兩叢(平均一叢為 20~30 株，種子重量約 200 克(粗估 2000~3000 顆)，進行育苗與栽種，步驟如下：

- 1.種子先泡水 5 天以進行催芽，並靜待其發芽。
- 2.發芽後的種子種植於事先收集並混合好的田土，為了確保有植株能順利成長給褐飛蟲食用，我們同時放在靠窗的地方，以及室內植物生長燈進行照射。
- 3.紀錄水稻成長高度後，發現兩個地方水稻生長情形差異小，之後都放在靠窗處。





### (三)褐飛蟲的觀察與紀錄-生活史、外形和數量變化

查詢相關文獻(參考資料 1)後，放大鏡觀察蟲體，了解褐飛蟲的生活史，再以顯微鏡觀察並拍攝他的外形，並依據觀察到的外形特徵製作模型；此外，從 9 月份(9/9)開始測定蟲數直到 2 月；為了持續控制能有蟲體進行研究，必須隨時注意溫度的變化，因為溫度的變化會影響褐飛蟲的繁殖，最後再以電腦紀錄與整理(圖 9~12)。



## 三、探究褐飛蟲的後足構造與運動方式

### (一)觀察並記錄褐飛蟲若蟲與成蟲階段後足構造

由文獻(參考資料 2)得知後足有齒輪的構造，我們用顯微鏡觀察並拍攝褐飛蟲若蟲與成蟲的足部。此外，在這個實驗中，我們也思考成蟲與若蟲的後足構造可能有所不同，內容如下：

#### 1.取樣方法:

- (1)選取飼養箱中已經死亡的蟲體，觀察後足構造。
- (2)選取中的活的蟲體:我們思考蟲體很輕、很小，因此決定用吸的方式取蟲，於是設計並製作了一個吸蟲器步驟如下:(圖 13.14)
  - a.先將培養盒上、下各挖一個和吸管大小一樣的洞。
  - b.把一根吸管剪一半，一半黏貼在底部，另一段覆蓋紗網(防止蟲體吸到嘴巴內)，就可順利的吸到蟲。

2.以自製吸蟲器分別吸若蟲和成蟲，再以行動顯微鏡觀察和拍照足部構造的差別，將拍照好的照片，匯入 Geogebra 繪圖軟體中，在後足的各節交界處共點上三個點，接著畫線並以軟體量出腿節、脛節和跗節的比例後，將他們進行比較。

### (二)觀察與紀錄褐飛蝨若蟲與成蟲階段步行與跳躍時的情形

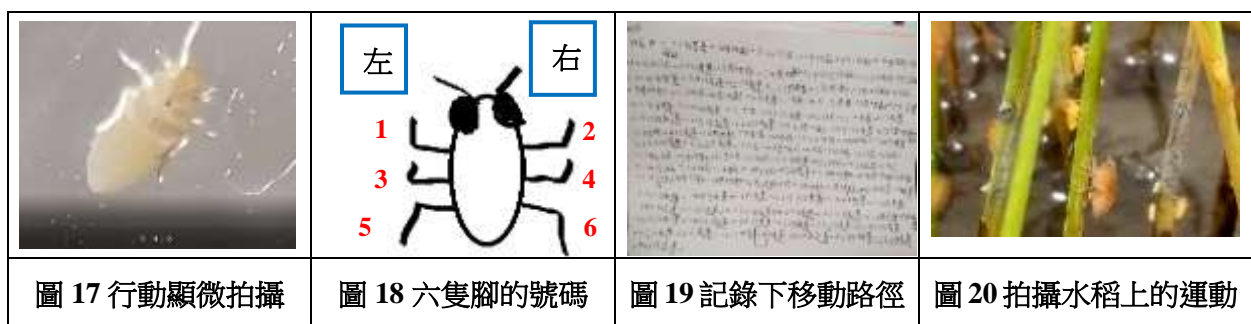
1.我們思考齒輪與褐飛蝨步行與跳躍有關，以自製吸蟲器將若蟲和成蟲兩組各取 10 隻，每一隻以昆蟲探針輕輕刺激蟲體 15 次，再以不同顏色的筆畫出並測量步行或跳躍的平均距離並紀錄次數(圖 15.16)，其中步行是測量刺激後開始行走到停止的距離，跳躍則是刺激後開始到落下的距離，比較若蟲與成蟲的差異。



2.探討步行的步足模式:以顯微鏡和攝影機拍攝以紀錄蟲體活動的過程(圖 17~20)，並標示褐飛蝨六隻腳的號碼(左單、右雙)進行紀錄。

### (三)觀察與紀錄褐飛蝨若蟲與成蟲階段運動轉彎時的步足模式

先觀察哪個時間褐飛蝨活動量較大，再以攝影機和手機觀察和記錄在水稻上的運動情形，包含六足移動的順序、轉動的情形(順、逆時針)。



### (四)探討褐飛蝨在水稻上轉彎向上與向下運動的意義

我們觀察並發現褐飛蝨在水稻上不是完全直直向上或向下，而是採用斜斜並間歇性轉彎的方式；先將影片中褐飛蝨若蟲與成蟲在水稻上移動畫面截圖後，以 Geogebra 測量移動的角度(圖 23~29)，最後設計了二個實驗，以模擬褐飛蝨在水稻上轉彎向上與

向下運動，探討物理因素可能對牠運動的影響:

1. 向下: 以五個量杯的高度(學校找到的並考量不能太低)模擬水稻桿，以此高度剪兩條 62 公分長的塑膠管，分為連續直直往下與轉彎向下兩組，以鋼珠代替褐飛蟲，同一時間和高度通過相同長度的塑膠管，以碼表計時比較落地的時間(圖 21.22)



- 2.向上:以 18 公分長塑膠管(搭配量杯)，設計不同角度(0 度、15 度、30 度、45 度、60 度、75 度和 90 度)進行實驗，取一顆鋼珠代表褐飛蟲黏在棉線上，先貼上量角器對準量杯中心刻度，再以將塑膠管順著量杯貼上(微微彎曲，模擬實際行走的路線)。接著，將棉線穿過塑膠管，注意在棉線穿過後要對準量角器的角度(圖 30~32)。最後，先放上一個夾子再逐漸加上砝碼，測量 5 次後取平均值，比較分別要放上幾克砝碼可以讓鋼珠落下(圖 30~32)。



#### 四、探究褐飛蟲後足轉節上的齒輪構造與運動方式的相關性

以顯微鏡拍攝後，我們找到了後足轉節上的齒輪構造，並且發現若蟲與成蟲齒輪構造的差異；接著，再由所得到的平面上移動、跳躍和水稻上運動轉彎時的步足模式，進



一步的分析齒輪構造與運動方式的相關性；最後，更希望這個研究可以提供昆蟲構造或運動，甚至於在演化方面的參考。

(一)分析褐飛蝨後足轉節上的齒輪種類與模型製作。

1.判斷齒輪類型:回想這學期所學的輪軸和齒輪概念後查詢書籍，認識齒輪的類型和功能後，再分析觀察到的褐飛蝨齒輪構造，判斷可能屬於哪一種齒輪。

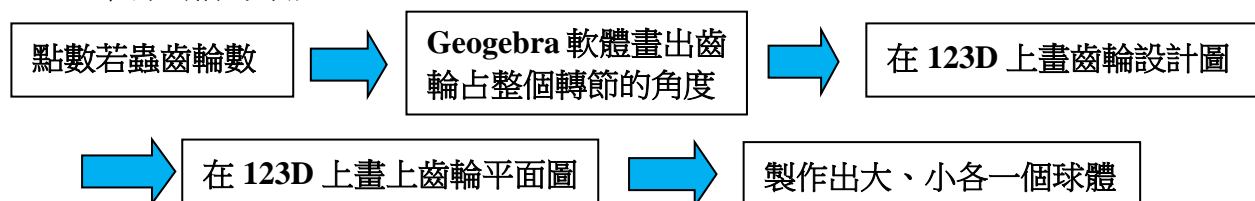
2.模型製作:

(1)蟲體:透過製作模型深入了解褐飛蝨的構造。製作方法如下:

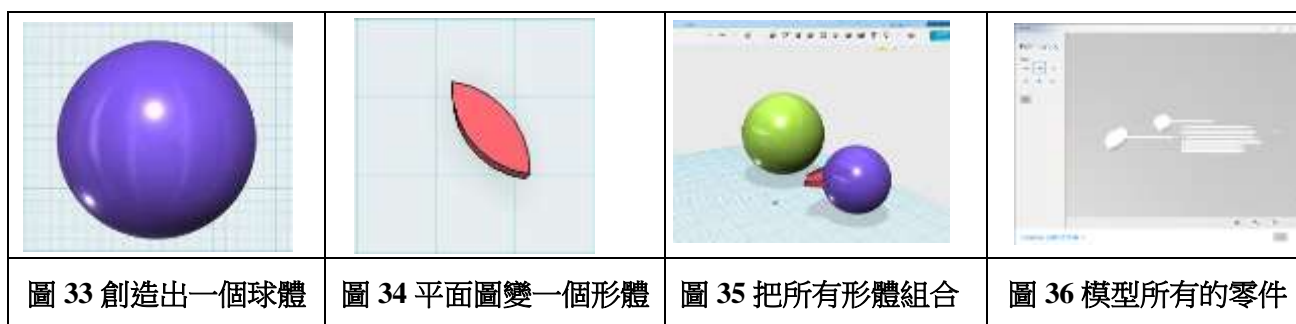
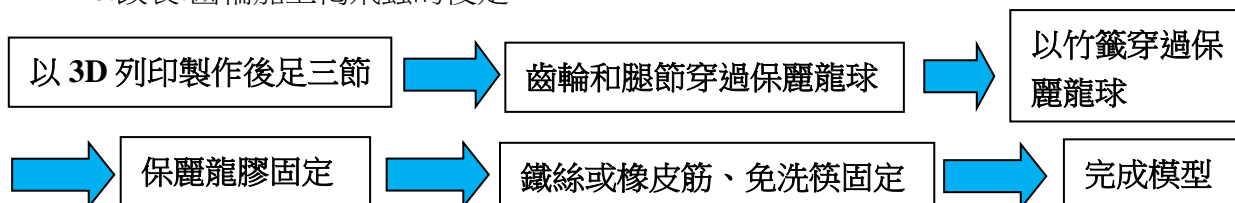
- a.觀察褐飛蝨的足部構造，畫出模型草圖。
- b.剪下模型，並描邊後將身體的各部位用釘子固定起來。
- c.將事先完成的刺吸式口器黏上，最後標示各部位的結構。

(2)齒輪製作:思考可以透過操作此模型更深入的了解褐飛蝨的步行與跳躍，以及齒輪如何運作。此外，顯微鏡拍攝後，點數轉節上的齒數為 10,12,13 齒和 15 齒(與參考資料 2 中的 10 和 12 齒相同)，選擇 13 和 15 齒進行製作，流程如下:(圖 33~36)

a.帶有齒輪的球體



b.改良:齒輪加上褐飛蝨的後足



## (二)分析褐飛蝨後足轉節上的齒輪構造和步行與跳躍的相關性

從文獻上得知褐飛蝨跳躍時會開啟齒輪，完全打開後兩個齒輪會卡住，透過這個力量跳出；思考是否在水稻上轉彎時齒輪會發揮功能？若蟲和成蟲時期是否不同？

1.齒輪運作: 觀察和分析所拍攝到褐飛蝨在水稻上運動的影片，以繪圖呈現和並透過操作模型了解。

2.若蟲與成蟲時期的區別: 觀察和分析步行或跳躍的次數和距離等數據，以及影片上移動的情形，找出他們的不同處。

## (三)推測褐飛蝨後足轉節上的齒輪功能與意義

文獻上提到這是生物結構中的機械齒輪，我們從以上的實驗結果分析褐飛蝨齒輪結構與運動方式的相關性、功能和意義。

# 伍、研究結果

## 一、認識褐飛蝨的分類與基本資料

### (一)認識褐飛蝨的分類與外形特徵

查詢文獻(參考資料 1) 後，針對研究內容將分類、寄主植物、分布、形態和習性進行整理(表一)。依據林試所黃老師所提供的資訊，本次實驗樣本是在實驗室累代飼育很久(飼養有 10 年以上)，主要的來源是從野外抓取，在實驗室大量繁殖。台灣雖然有一些本地族群但數量少。圖 37~40 是我們飼養後拍攝的結果。

表一：褐飛蝨的分類和基本資料

動物名	褐飛蝨
學名	<i>Nilaparvata lugens</i> (Stål)
分類	同翅目(Homoptera)，稻蝨科(Delphacidae)
寄主植物	水稻及野生稻，褐飛蝨嚴重時危害導致局部「蝨燒」，更嚴重時可致使水稻全部枯萎(圖 37.38)。
分布	分佈東亞、東南亞、南亞和大洋洲部分地區的水稻種植區域。在中國、日本、越南等西太平洋沿岸國家為主要的水稻害蟲。
形態	1.卵：呈香蕉型。 2.一齡蝨：約 0.11 公分，淡黃白至淡灰褐色，腹部背面中央有 T 字形淺色斑紋。 3.二齡蝨：約 0.15 公分，淡黃褐至灰褐色，腹部背面中央 T 字形斑紋較不清晰。 4.三齡蝨：約 0.20 公分，淡黃褐至褐色，中後胸兩側向後突出翅芽，腹部第三、四節背面各有一個山字形粉狀白斑。 5.四齡蝨：約 0.24 公分，褐色，翅芽長過第三腹節，腹部斑紋更清晰 6.五齡蝨：約 0.30 公分，褐色，端部尖，翅斑不明顯，與短翅型成蟲易混淆。

	7.成蟲：長翅型雄蟲約 0.38~0.42 公分，長翅型雌蟲約 0.44~0.48 公分，翅狹長半透明稍帶褐色，其後緣近中央處有黑褐色翅斑。後翅扇形。短翅型成蟲(雄蟲約 0.20~0.31 公分，雌蟲約 0.27~0.35 公分)，翅端圓，翅斑明顯，雌蟲腹部肥大。若蟲第三齡為影響翅型的分化的關鍵時期，當食物不足或品質不良，且族群密度太高時，會產生長翅型。
習性	長翅型成蟲能長距離遷移，成蟲和若蟲群集在稻叢下部莖稈上(圖 39)，利用口器插入稻稈，吸取稻株養液(圖 40)，遇驚擾即跳落水面或逃離。



圖 37 水稻枯萎



圖 38 蟲燒



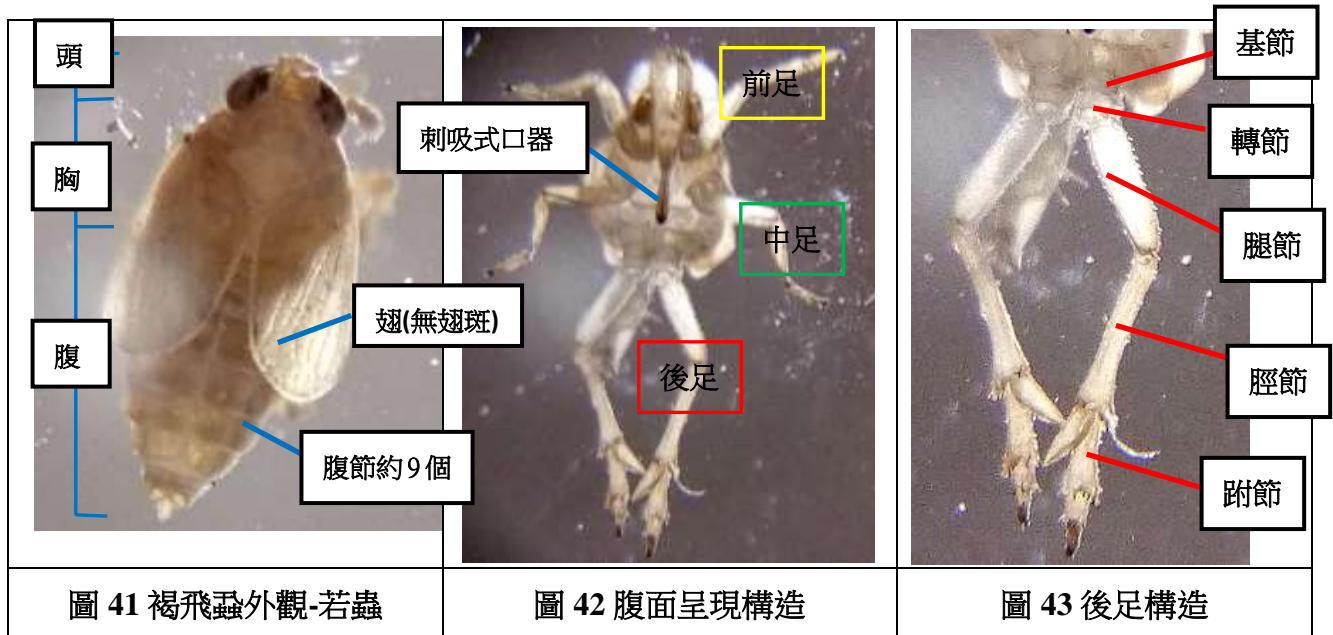
圖 39 群集莖稈上



圖 40.吸取稻株養液

## (二)觀察並記錄褐飛蟲的構造與外形特徵

以行動顯微鏡拍照與記錄外形特徵，下圖 41~43 為若蟲時期褐飛蟲的基本構造與外形特徵說明。根據我們選取自然死亡的樣本(捨棄發霉的樣本)進行測量身長，若蟲的大小為 0.10~0.36 公分，成蟲(包含長翅)為 0.38~0.43 公分(附錄一)。



## 二、褐飛蟲的飼養與水稻的培育

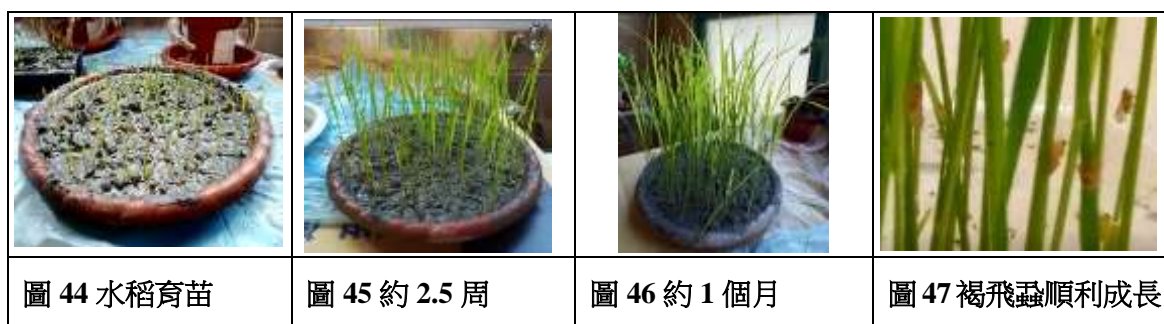
我們的實驗從 9 月至今進行褐飛蟲的飼養與水稻的栽培，在實驗過程中記錄褐飛蟲的數量變化和水稻生長情形，是為了要持續的有蟲體可以觀察。

### (一)褐飛蟲的飼養:

褐飛蟲活動時間不長，成蟲和若蟲平時群集在稻叢下部莖稈上，大多停在上面吸食稻桿的汁液，大約在下午一~三點或者當天溫度較高，活動量較大一點。溫度較低時要放於室內避免凍死，還要特別注意蜘蛛或其他昆蟲的入侵。

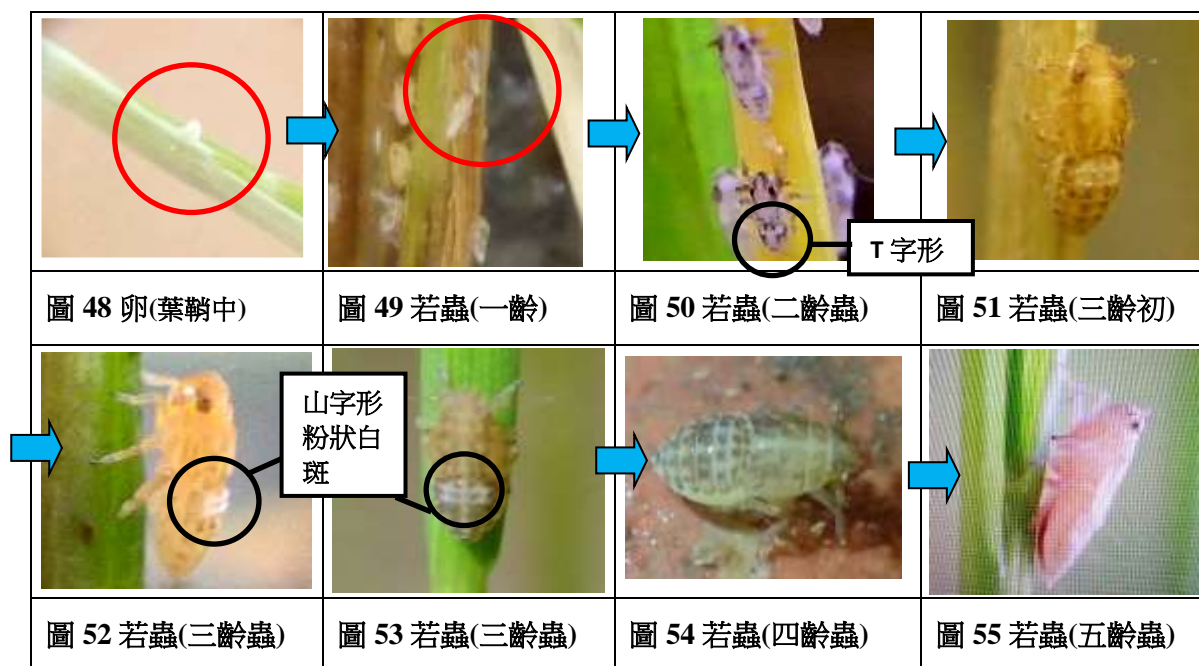
## (二)水稻(*Oryza sativa*)栽培的結果

台農 67 經過催芽、育苗和栽種後，能順利的在教室的窗邊生長(9 月份~10 月份,圖 44~46)，褐飛蟲也順利的適應和成長(圖 47)；1.2 月份的時候，溫度較低，發芽率較低，植物生長也很緩慢，所以蟲數也降低。

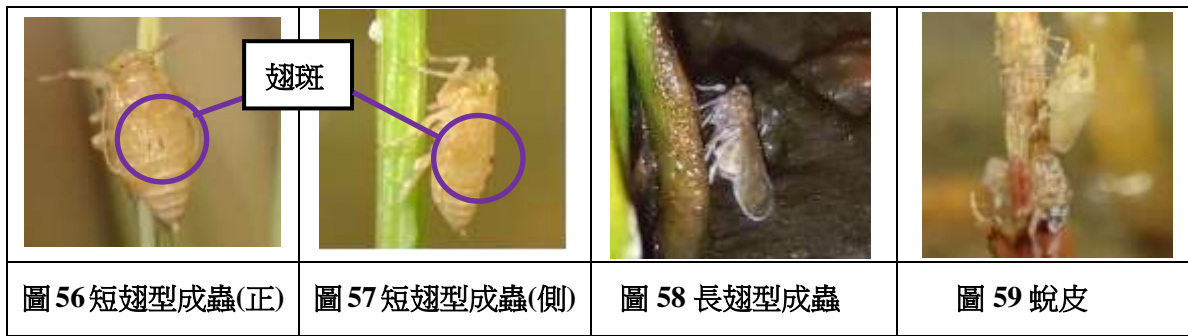


## (三)褐飛蟲的觀察與紀錄-生活史、外形和數量變化

1.褐飛蟲為不完全變態，整個生活史平均約 51 天，其中卵(約 2 週)、若蟲(約 3 週)和成蟲(在室內約 15-20 天)，不同溫度各個時期存活時間不同。由於本實驗在於後足構造和運動方式的探討，因此各階段生長沒有做深入的探討，著重於認識與紀錄褐飛蟲的不同階段和外在外特徵，所拍攝的圖片如下(圖 48~59): 「○」標示或呈現蟲體重要的特徵







## 2.數量變化:

下表二、圖 60 為去年 9 月到今年 2 月的數量統計和變化的情形，12 月份時數量較多，1 月月份溫度較低(甚至達 9 度)蟲數變少。數量減少的原因，有一部分是因為水稻數量變少。查詢參考資料 1(p.80)中提到在冬季時，於 12 月下旬到 1 月上旬族群數量急速下降。雖然我們在室內飼養，但空調低於約 21 度即關閉，只有比室外溫度高約 2~3 度。

表二: 九月~二月褐飛蟲平均數量統計表

月份	九月	十月	十一月	十二月	一月	二月
平均總數(隻)	42	25	129	329	40	92

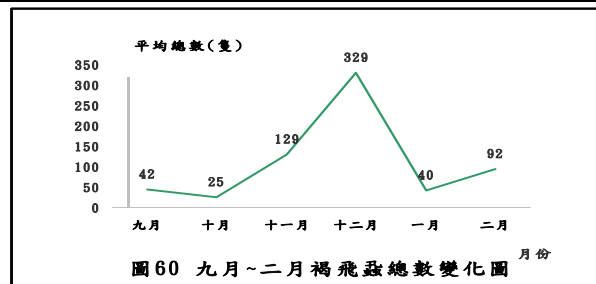


圖 60 九月~二月褐飛蟲總數變化圖

## 三、探究褐飛蟲的後足構造與運動方式

### (一)觀察並記錄褐飛蟲若蟲與成蟲階段後足構造

1.以自然死亡後的昆蟲為樣本，發現若蟲的轉節靠內側的地方有齒輪的構造，而且後足雙腳轉節閉合時，齒輪藏在裡面只有看到斜斜的紋路(圖 61.62)；當把轉節打開時，齒輪就會跑出來(圖 63~66)。成蟲階段則沒有看到齒輪的構造(圖 67.68)。

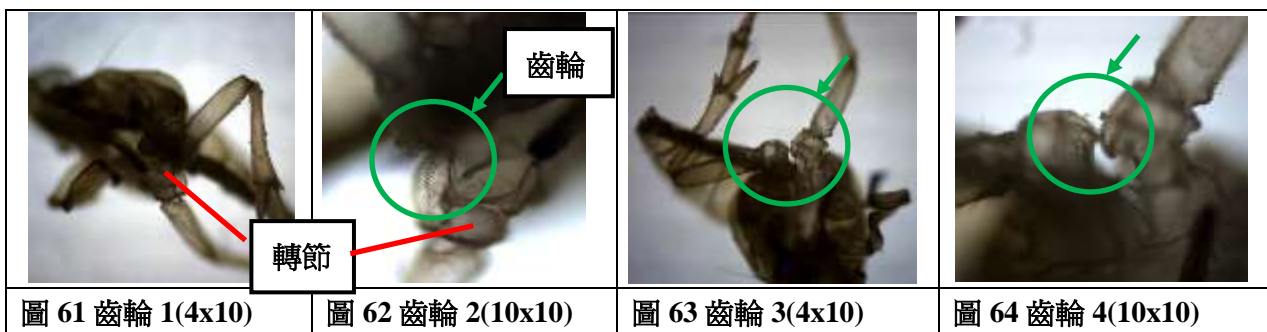


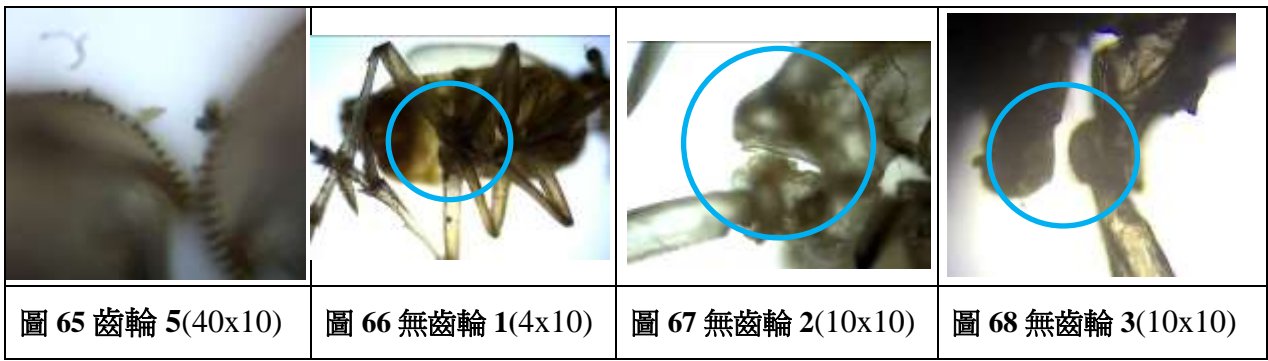
圖 61 齒輪 1(4x10)

圖 62 齒輪 2(10x10)

圖 63 齒輪 3(4x10)

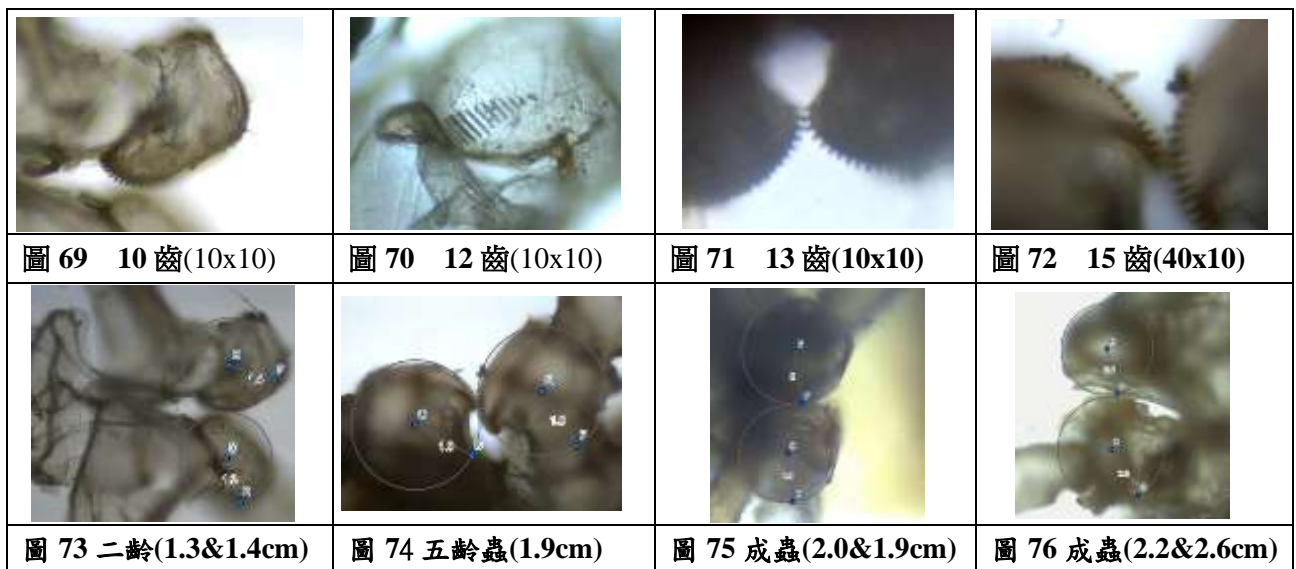
圖 64 齒輪 4(10x10)





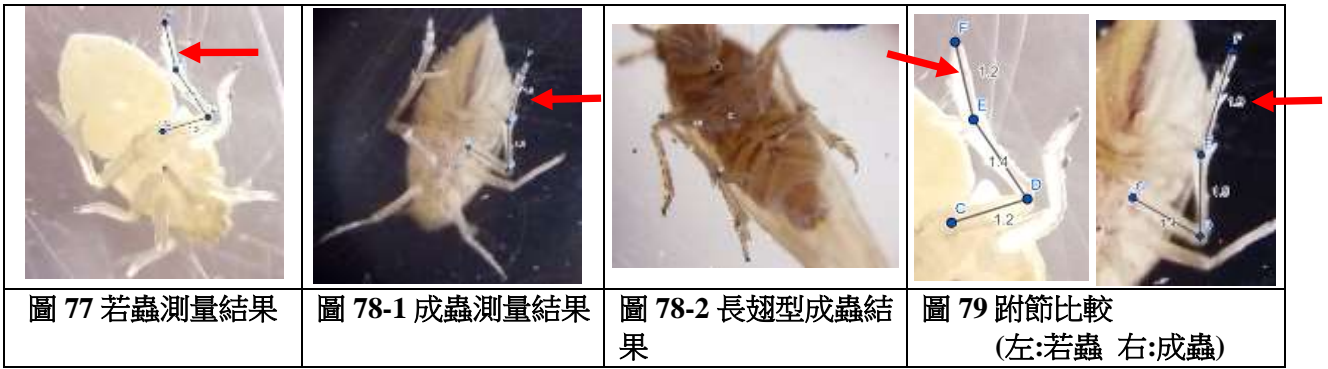
2.透過顯微鏡的觀察，我們觀察到 4 種不同齒數的褐飛蟲(10,12,13,15 齒)，和文獻中相同的為 10 和 12 齒，經過紀錄和歸納發現，隨著蟲體變大齒數會變多，身長分別為 0.10 公分(約一齡蟲),0.28 公分(約三齡蟲),0.32 和 0.34 公分(約五齡蟲)(圖 69~72)，若有誤差之處，未來可以再確認。推測可能隨著蛻皮，下一次長出來的轉節齒數便增加了，但到了成蟲後則齒輪便消失了。

3.轉節半徑的測定：文獻提到可能是因成蟲的轉節變大，產生足夠摩擦力驅動跳躍而不需齒輪，以 Geogebra 測量若蟲和成蟲的轉節半徑(放大後)，發現後者相對較長。推測若蟲轉節較小，需要齒輪以避免在轉彎時沿著水稻稈滑出，也就是降低離心力(圖 73~76)，以及跳躍時透過齒輪摩擦驅動跳躍。



4.成蟲沒有觀察到齒輪，除了發現轉節變大再思考其他原因。以 Geogebra 軟體放大後測量後足的腿節、脛節和跗節的比例(圖 77~79)。結果顯示，若蟲此三節比例平均為 1.32:1.39:1.31(表三左下)；成蟲此三節比例平均為 2.52:2.72:3.13(表三,右下)。我們發現若蟲階段三個節比例相差不大，到了成蟲階段各節會變長，特別是長翅型的成蟲。

(「←」跗節)



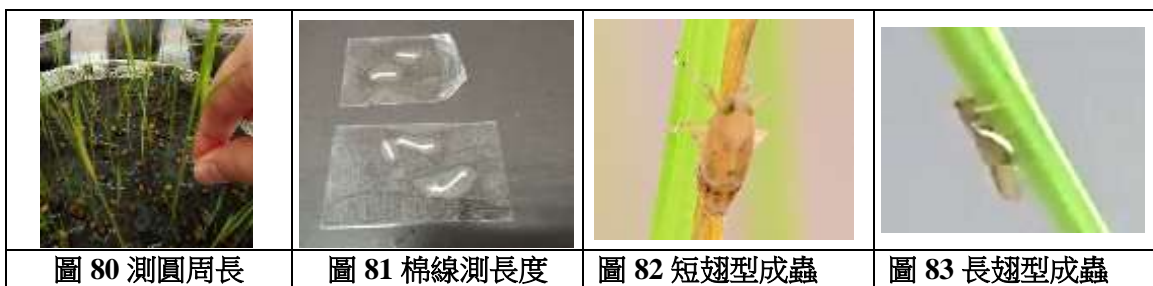
表三:若蟲(左下)與成蟲(右下)腿節、脛節和跗節比例平均值的比較表

分節	腿節	脛節	跗節
(A)若蟲	2.4	2.8	1.2
(B)若蟲	1.2	1.1	1.4
(C)若蟲	1.7	2.1	1.6
(D)若蟲	1.1	1.1	1.5
(E)若蟲	1.1	0.9	1.4
(F)若蟲	1.2	1.4	1.2
(G)若蟲	1.4	1.4	1.5
(H)若蟲	0.8	0.7	0.7
(I)若蟲	1	1	1.3
平均	1.32	1.39	1.31

分節	腿節	脛節	跗節
(A)成蟲(長翅)	3.5	4.3	4.7
(B)成蟲	4.7	5.2	5.3
(C)成蟲(長翅)	3.3	3	3.7
(D)成蟲	2.2	2.6	3.3
(E)成蟲(長翅)	3.8	4.1	4.1
(F)成蟲	1.3	1.5	1.6
(G)成蟲	1.4	1.5	1.9
(H)成蟲	1.3	1.2	2
(I)成蟲	1.2	1.1	1.6
平均	2.52	2.72	3.13

5.測定水稻稈的直徑: 想了解成蟲各節比例變長, 是否有利於抓握水稻稈, 特別是跗節。

我們以棉線為繞稻稈求出圓周長後(共 5 次), 再除以 3.14 算出直徑後再求平均值為 0.162 公分, 比對我們測量到若蟲(0.10~0.36 公分)與成蟲(0.38~0.43 公分)的體長, 成蟲抓握和固定水稻稈相對較為容易。(圖 80~83)(附錄三)

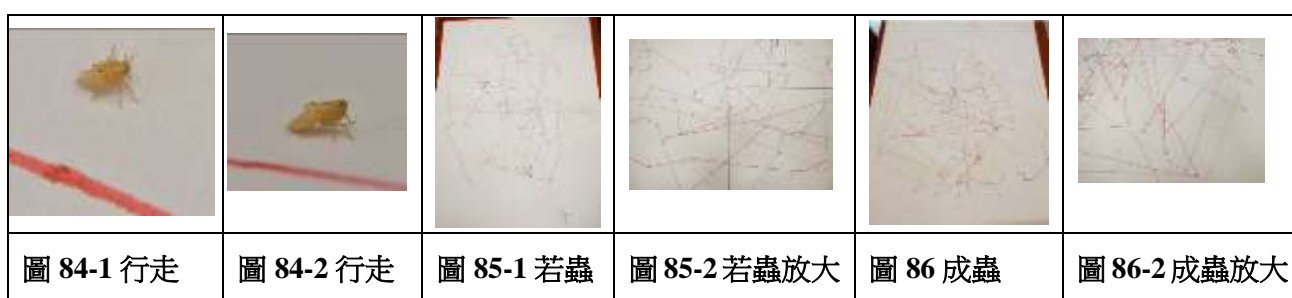


(二)觀察與紀錄褐飛蝨若蟲與成蟲階段步行與跳躍時的情形

1.以自製吸蟲器吸蟲後, 輕輕的刺激若蟲與短翅型成蟲就會步行與跳躍; 有時只要輕輕靠近, 就會立刻移動, 記錄方式是碰到蟲才算(圖 84~86)。以 A~J 表示蟲體的編號, 此實驗是六足完成步行(從開始移動到停止)或跳躍(起跳到落下)的結果如下(附錄二):

(1)平均次數: 兩個階段步行的平均次數為 8.5 次，比跳躍的平均次數高。我們實際飼養箱中觀察，褐飛蟲在水稻上大多數也呈現步行的狀態，推測在外來的刺激下會誘發它跳躍(表四、圖 87)。

(2)平均距離: 若蟲與短翅型成蟲步行的距離分別為 1.71 公分和 1.62 公分，前者大於後者。短翅型成蟲平均跳躍的距離 34.91 公分明顯大於若蟲的距離 13.07 公分；根據觀察隨著蟲體的成長，成蟲與若蟲後足的腿節、脛節和跗節變長(表三)。查詢資料發現昆蟲後足若為跳躍足，腿節較粗長、脛節較長，而褐飛蟲跗節變長推測與水稻的固定和抓握有關。至於跳躍的時間，紀錄中也顯示，從跳躍到落地，35.3 公分的距離僅約 1 秒鐘(表五、圖 88)。



表四:短翅型成蟲與若蟲步行與跳躍的平均次數比較表

運動方式 編號	成蟲步行	若蟲步行	成蟲跳躍	若蟲跳躍
A	4	11	11	4
B	12	8	3	7
C	7	8	8	7
D	5	11	10	4
E	7	14	8	1
F	9	12	6	3
G	9	7	4	8
H	11	8	4	7
I	10	3	5	12
J	11	3	4	12
平均次數	8.5	8.5	6.3	6.5

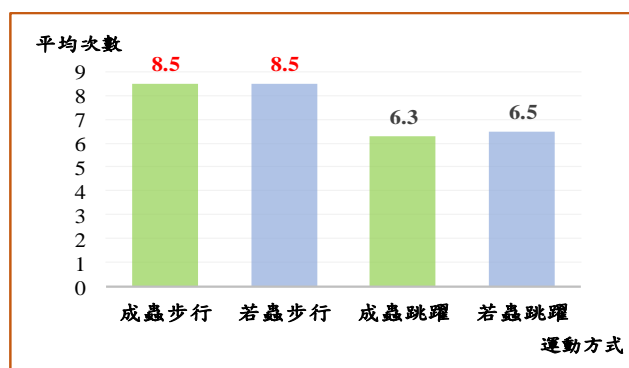


圖 87 短翅型成蟲與若蟲步行和跳躍平均次數比較圖

表五:短翅型成蟲與若蟲步行與跳躍的平均距離比較表

運動方式 編號	成蟲步行	若蟲步行	成蟲跳躍	若蟲跳躍
A	0.73	1.23	33.65	5.75
B	0.68	1.01	30.3	11.7
C	1.01	2.1	9.79	20.2
D	2.28	2.34	44.1	18.4
E	3.6	0.8	22.9	1.5
F	2.19	2.7	22.65	25.9
G	2.24	1.09	35.1	16.5
H	1.66	1.38	20.8	4.63
I	1.71	1.87	93	11.99
J	0.98	1.63	36.9	13.8
平均距離(cm)	1.71	1.62	34.91	13.07

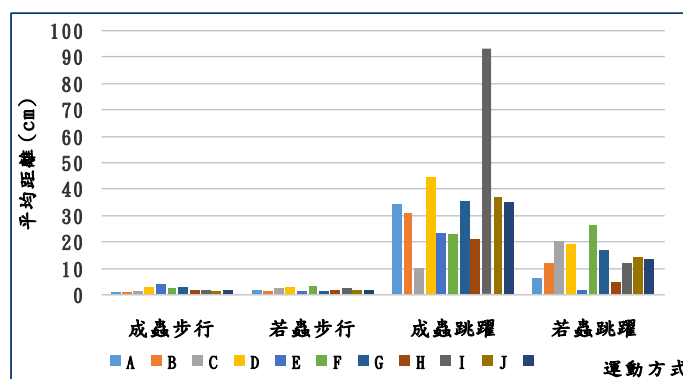


圖 88 短翅型成蟲與若蟲步行和跳躍平均距離比較圖

### (3)長翅型成蟲與短翅型成蟲的測量結果說明:

以吸蟲器吸出長翅型成蟲後，放在圖畫紙上以針輕刺，牠們會立刻飛走，因此沒有測量到步行和跳躍的平均距離；所以在表四和表五的數據，呈現的都是短翅型成蟲。但是，在水稻稈上，我們有拍攝並記錄長翅型成蟲的步行。

### 2.步行:

探討褐飛蟲平面上移動的路徑，以及步足移動時的規律性，哪幾隻腳會一起移動，是否符合三足式步行等。結果如下(表六):

#### (1)步行模式

a.成蟲(圖 89、90)發現具有三足式步行，在水面上固定以(1,5,4)或(3,2,6)三足式步行，其餘則不一定都按照這樣的方式。長翅型為 1→5→4→3→6→2。


b.若蟲:3→4→1→5→6→2

(2)比較參考資料 3 提到，蟑螂等昆蟲的步行不一定從後腳開始運動，普通步行的順序為 1→4→5→2→3→6(或者倒過來反覆進行)。褐飛蟲有自己的一套行走的模式，也不一定從前腳開始運動，雖然也會有三足式步行，但思考褐飛蟲在水稻上生活，以及有齒輪的存在，他的步行順序和這些昆蟲有所不同。



### (三)觀察與紀錄褐飛蟲若蟲與成蟲階段運動轉彎時的步足模式

1.結果顯示，轉彎前，若蟲和成蟲在水稻上都先直直的上或下，接著再斜斜的往上或往下，但角度不是很大，轉彎時順時針和逆時針交錯進行(圖 91~95)。此外，若蟲轉一個彎的時間較長，隨著蟲體長大時間變短，短翅型成蟲時間更短，長翅型轉彎不太明顯但由於蟲體很小，我們努力的看許多次影片，想要找到答案，結果整理於下表六。

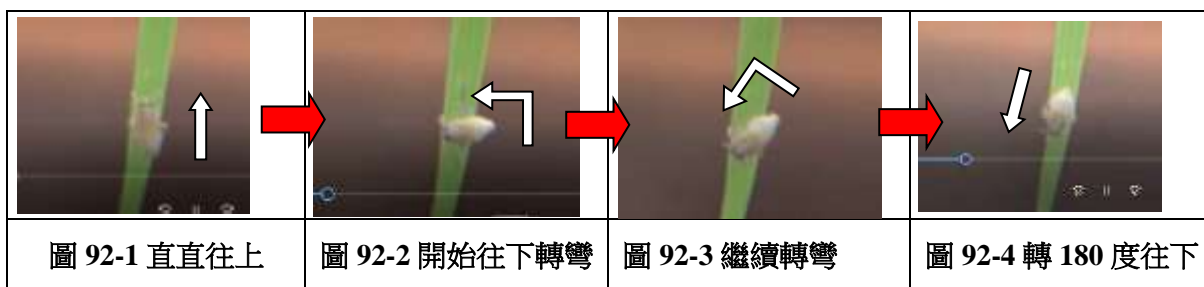
2.影片整理如下: 「 為移動順序」「白色箭頭為移動過程」

(1)若蟲(二齡)轉彎: 正面到旁邊完成一個轉彎，紀錄為 7~11 秒(圖 91-1~4)

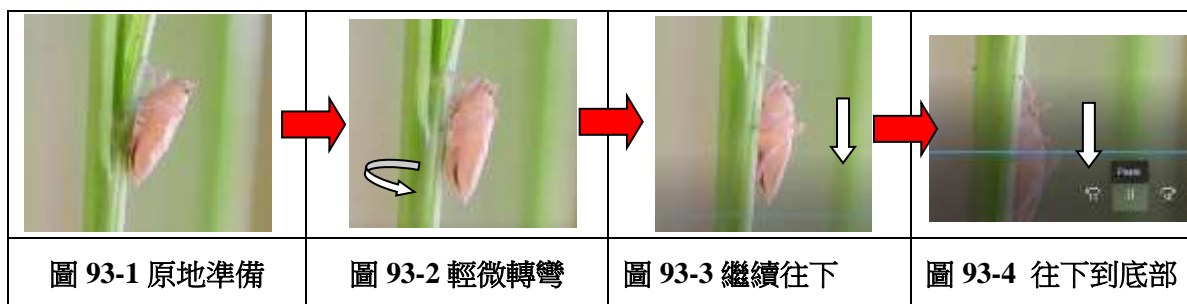




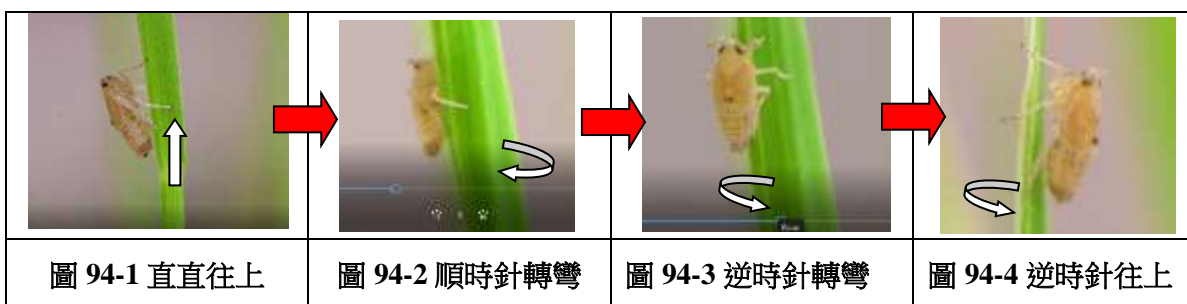
(2)若蟲(往下)-I: 蟲體往下，會轉 180 度讓頭朝下再繼續往下步行和轉彎(圖 92-1~4)



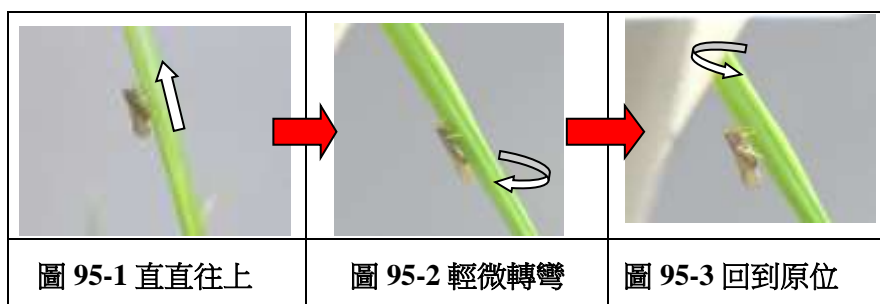
(3)若蟲(往下)-II: 直直往下後輕微轉彎，往下到莖桿底部，時間為 5 秒(圖 93-1~4)。



(4)短翅型成蟲(往上轉彎):往上 9 秒後，順時針 5 秒完成，逆時針 2 秒完成，再逆時針轉斜上 2 秒完成，接著往上 2 秒後停止(圖 94-1~4)。



(5)長翅型成蟲:在水稻桿上直直往上，輕微轉彎後回到原位，之後到頂端(圖 95-1~4)。





3.觀看影片並記錄所觀察到褐飛蟲在水稻上的所有步足模式，整理於表六(綠色為左單、紅色為右雙)，並說明如下:

- (1)直直往上: 若蟲會先把前兩對足往上伸，再將後足向後伸直，把身體往上推；短翅型成蟲與若蟲相似但前、中足有交替的情形，長翅型成蟲則是將左前足往上，以中足固定稻稈往上。但三者的後足都是最後往上。
- (2)直直往下: 若蟲會先往下蹲讓後足先向下、前足往下，左右中足再隨著移動，但有幾種情形；短翅型與長翅型成蟲則是兩足為一對，一對足離開稻稈時，另兩對足抓住避免下墜。
- (3)順時針轉彎:若蟲會先由左前足(1)開始，其他足再移動，再將右後足(6)推過去；短翅型成蟲以 1.3.5 為一組往左邊延伸，再把 2.4.6 拉過去。長翅型則輕微轉彎。
- (4)逆時針轉彎:若蟲會先由右足(2 或 6)開始，其他腳移動再推動(5)；右後足先過去，其他腳移動再推動(5)；短翅型成蟲以 2.4.6 為一組往右，再把 1.3.5 拉過去。
- (5)若蟲運動較緩慢，步足移動較不具規律；成蟲運動速度較快，中間 3 和 4 兩足會緊緊抓握水稻稈，5 和 6 緊靠水稻稈並做為轉動時推動的力量。

表六 若蟲與成蟲運動方式分析與比較表

運動方式 階段	平面上移動 (詳見 p16)	直直往上	順時針	逆時針	直直往下
1.若蟲	◎步足模式: 3 4 1 5 6 2	◎步足模式: 1 2 3 4 5 6	◎步足模式 (1)153614642 (2)13214513465 (3)154614642	◎步足模式 (1)2641236425 (2)62424121423412 35	◎步足模式 (1)6135234 (2)5623416 (3)5234516
2.短翅型成蟲	◎三步足式: 水面(1,5,4)或 (3,2,6)	◎步足模式: 4 1 2 3 6 5	◎步足模式: 3 1 5 2 6 4	◎步足模式 4 2 6 3 1 5	◎步足模式 (1, 4)(3, 6)(2, 5)
3.長翅型成蟲	◎步足模式: 1 5 4 3 6 2	◎步足模式 1 4 3 2 5 6	僅輕微轉彎	僅輕微轉彎	◎步足模式 (1, 4)(3, 6)(2, 5)

(四)探討褐飛蟲在水稻上轉彎向上與向下運動的意義

為了了解褐飛蟲在水稻上採用斜斜轉彎和直直上下交替的方式運動，探討物理因素可能對他的影響，兩組實驗的結果如下:

- 1.向下:連續直直往下與轉彎向下測定時間，前者為 0.19 秒，後者為 0.9 秒，思考在生活中比較車子在筆直與彎曲山路行駛，後者安全性較高，因此推測褐飛蟲在圓柱狀稻稈狀稻上往下移動，特別是若蟲時期，緩慢轉彎向下提升安全性，避免垂直落下。

2.向上:從學呀教育資源網頁 <https://www.zetria.org/view.php> 可以獲得斜面會比較省力。用 Geogebra 測量牠們在水稻上運動的角度(圖 96~100)，與實驗結果比較，顯示 0 度~45 度和 90 度較省力(圖 101)，我們也曾試著用長、短吸管進行測試，斜面長度越長越省力)所以在水稻上看到褐飛蟲以斜上 0~45 度轉彎和直上 90 度交替進行，使牠們更為省力，如此也想到我們在山路行走或車子在山路轉彎的情形。

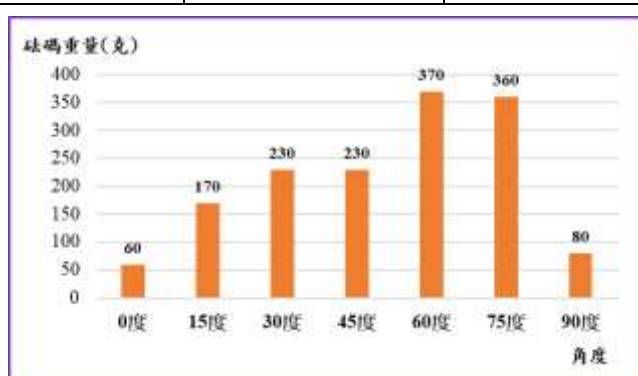
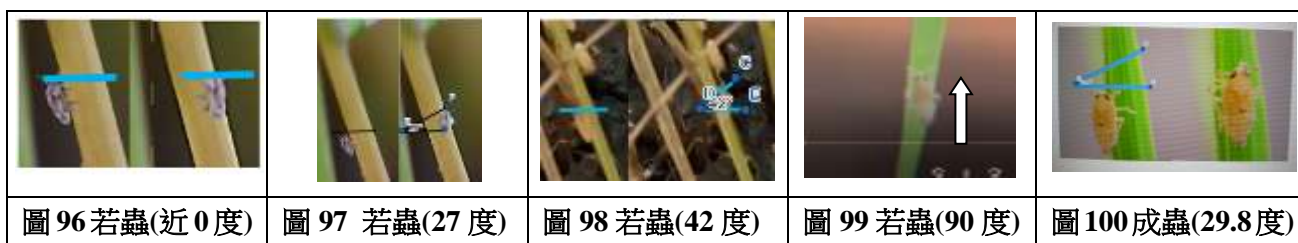


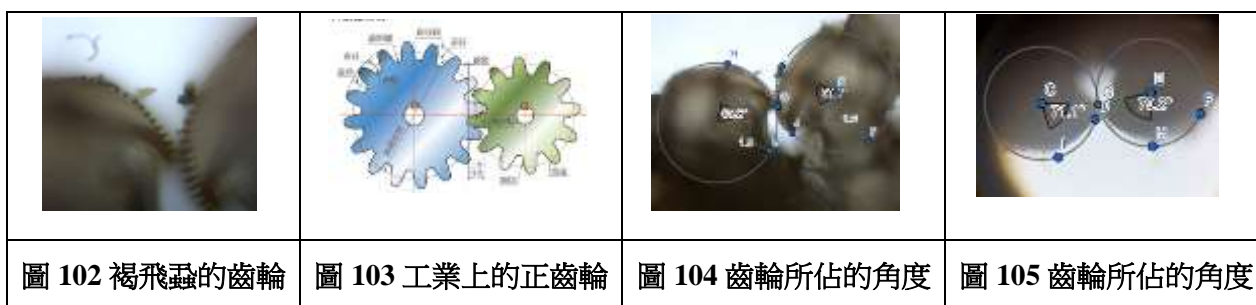
圖 101 斜面角度與砝碼重量大小(省力)關係圖

#### 四、探究褐飛蟲後足轉節上的齒輪構造與運動方式的相關性

##### (一)分析褐飛蟲後足轉節上的齒輪種類與模型製作

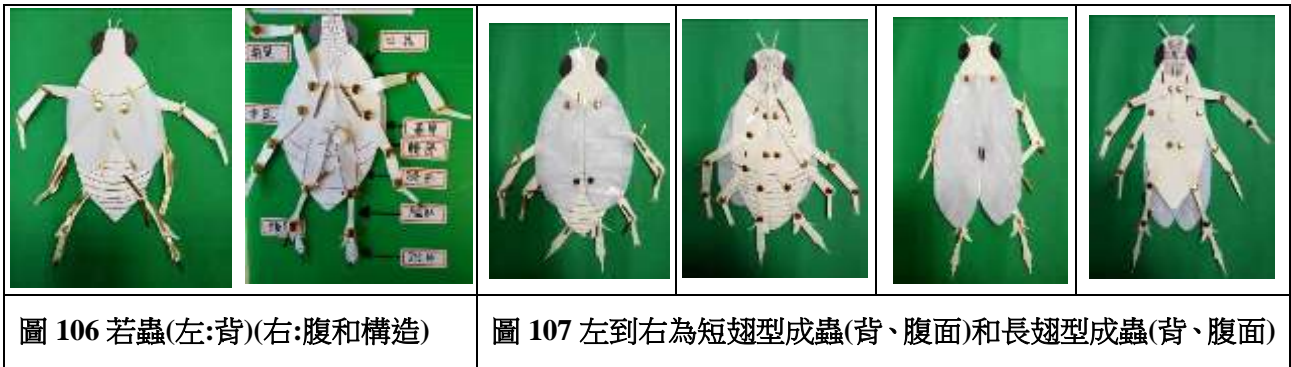
##### 1.判斷齒輪類型:

- (1)查詢資料 5 後，了解到齒輪是在摩擦輪表面，可以互相嚙合以傳達動力、旋轉和避免滑動。根據我們觀察到褐飛蟲的齒輪(圖 102)並經過核對後，發現應該是「正齒輪-輪齒與軸互相平行」，這種齒輪在工業上最常用，也最易加工(圖 103)。
- (2)以 Geogebra 軟體測量齒輪佔轉節角度是 60~80 度(圖 104.105)，思考可能和褐飛蟲在水稻上轉彎的角度有關，我們依據這個結果製作模型。

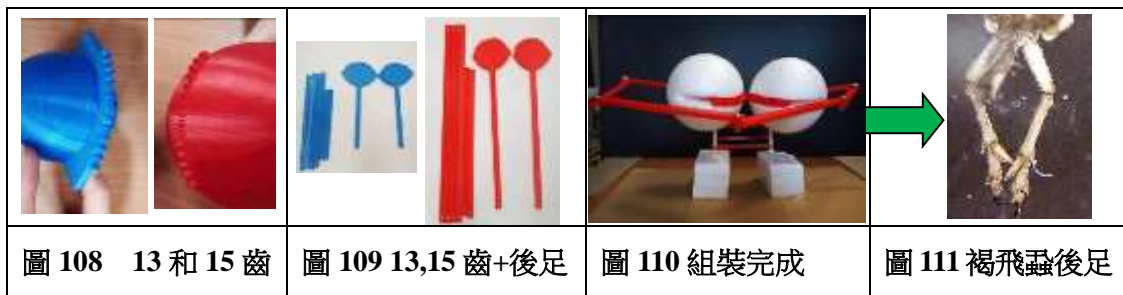


## 2.模型製作:

(1)完成的蟲體外觀模型(圖 106、107)(背:背面；腹:腹面)



(2)123D 製作出的後足的齒輪(橡皮筋固定並彈跳出去)，模擬後足的構造(圖 108~111)



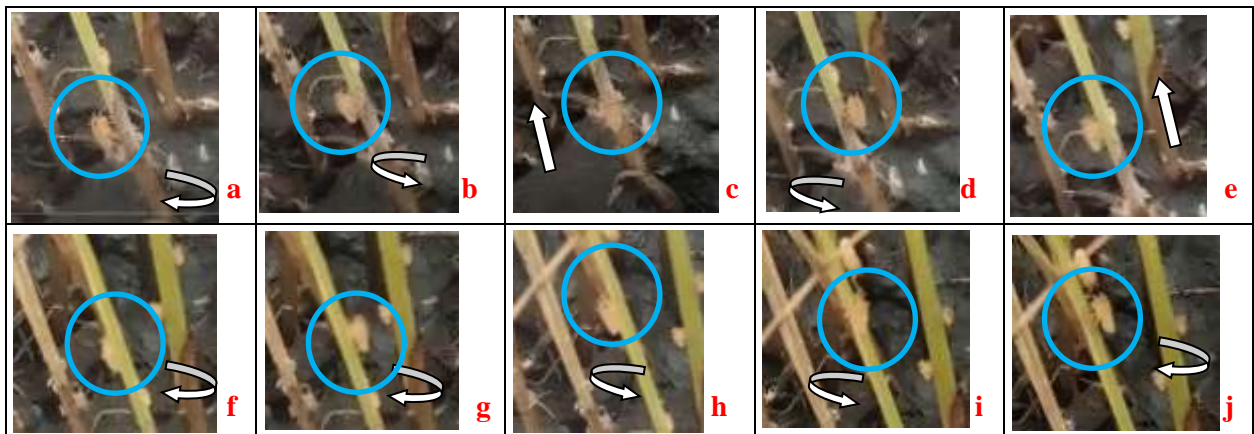
### (二)分析褐飛蟲後足轉節上的齒輪構造和步行與跳躍的相關性

1.若蟲: 以齒輪模擬運動(逆時針，圖 112~115) 並進行分析(表八)

(1)我們推測由於若蟲時期各腿節較短，抓握、固定和旋轉時較為緩慢，較小的若蟲(二齡蟲)齒輪一格一格搭配其他腳移動。往上伸時，把齒輪卡至最緊，56 向後伸直，可以把身體往上推，往下時會先向下蹲。順、逆時針轉彎時，由 5 或 6 帶動慢慢的完成整個動作。隨著蟲體長大，齒輪變多，速度變快。

(2)較大的若蟲(四~五齡)，行走較為快速，轉彎情形也較為順暢，推測齒輪運作也較為

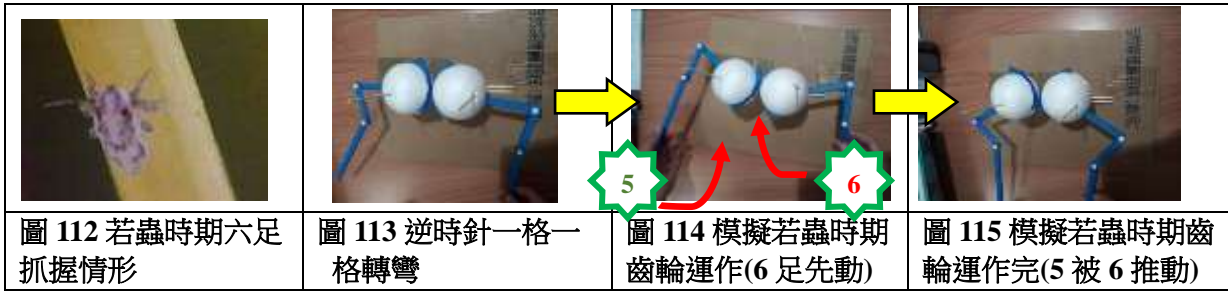
靈活，圖 116-a-j 為 35 秒內所完成的連續動作。「◁ 移動方向」「○為褐飛蟲」



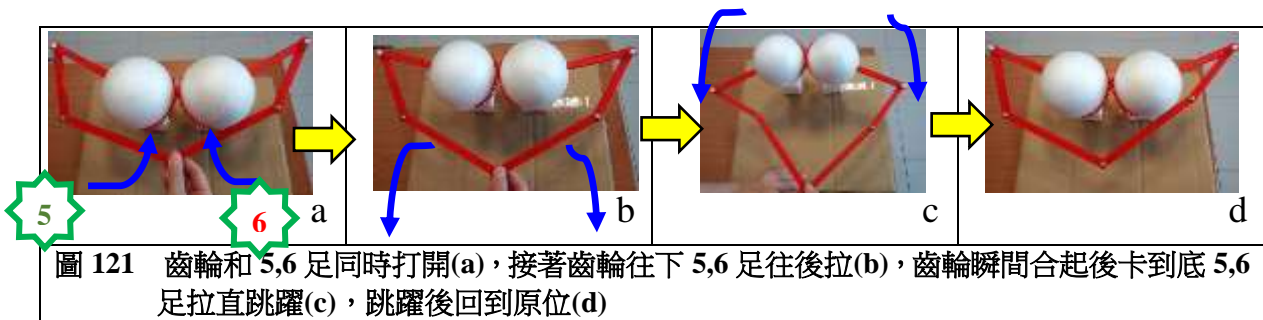
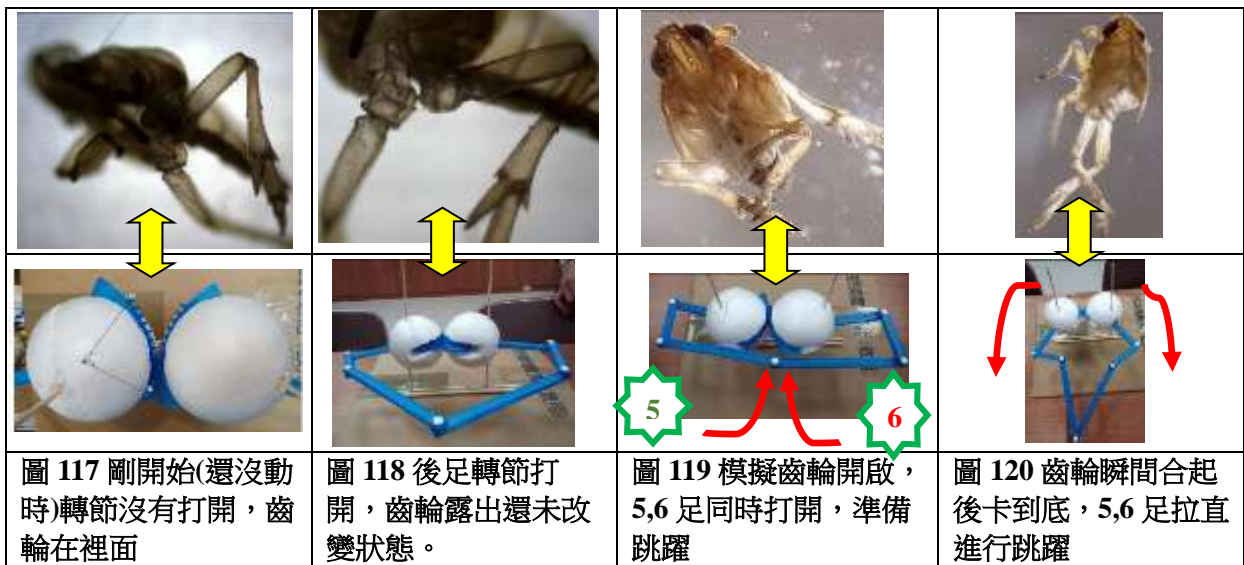


表八 若蟲運動方式與齒輪的相關性分析表

運動方式 階段	平面上移動	直直往上	順時針	逆時針	直直往下
若蟲	◎步足模式: 3 4 1 5 6 2	◎步足模式: 1 2 3 4 5 6	◎步足模式 (1)153614642 (2)13214513465 (3)154614642	◎步足模式 (1)2641236425 (2)62424121423412 35	◎步足模式 (1)6135234 (2)5623416 (3)5234516



2.跳躍:根據我們的實驗結果跳躍時非常的快速，同時我們搭配參考資料 2 思考後，將所拍攝的照片和自製模型模擬跳躍時齒輪的運作(圖 117~120)與連續過程(圖 121)如下:



3.成蟲:結果顯示，後足不具齒輪，以直直或斜斜轉彎上下，具規律性，腿節、脛節和跗節變長，能順利的抓握、固定或轉彎。此外，實驗結果也顯示轉節會變大，參考資料 2 提

到能增加摩擦力協助跳躍；以及，轉節與腿節之間緊密相連而通常不活動，可劃分為腿節的一部分，推測或許是當腿節變長或變粗時，轉節隨著變大兩足間空隙變小。

### (三)推測褐飛蝨後足轉節上的齒輪功能與意義

- 1.褐飛蝨在水稻上運動時，以直直往上與順逆交錯來回，可以較為省力，並且在此過程中，齒輪的構造幫助他們可以在水稻上順利的生存。
- 2.齒輪的功能: 若蟲時期出現齒輪，功能如下:
  - (1)步行與轉彎:
    - a.實驗結果顯示若蟲各腿節和跗節比例較短，轉節半徑較成蟲短(轉節較小)，在圓柱狀的水稻莖稈上順利的步行，特別是轉彎時，由於齒輪的摩擦可以傳達動力並避免滑動而掉落。
    - b.若蟲在平面移動時會慢慢轉動，轉彎時較小的若蟲齒輪以一格一格慢慢移動，順逆時針分別以 5 足和 6 足齒輪帶動，其他足搭配與調整完成整個轉動。
  - (2)跳躍:齒輪的開啟與 5,6 足搭配，當跳躍時摩擦卡住以完成跳躍的動作，在此階段由於後足各節較短，齒輪的存在有助於若蟲在遇到敵人時跳躍逃生。
  - (3)水稻稈較平滑，當蟲體在上面活動時，後足的開啟使兩個齒輪卡住，也可以避免滑落。
- 3.褐飛蝨齒輪的占整個轉節的 60~80 度，這是整步行和跳躍的範圍，因此沒有使用全部此外，一般的齒輪在運作時會持續的轉動，但褐飛蝨並非持續的轉動，而是有間斷性。
- 4.成蟲沒有齒輪，根據實驗後足腿節、脛節和跗節的比例變長，協助運動與抓握。
- 5.思考齒輪出現的原因，可能是因為寄主植物水稻的解剖構造，讓它們可以順利的在莖稈上生活。未來將進一步的觀察其他與褐飛蝨親源關係較近的昆蟲，例如蚜蟲等，更深一層的了解齒輪出現的意義。

## 陸、討論

### 一、認識褐飛蝨的分類與基本資料

- (一)起源：我們非常好奇在生物界被發現具有齒輪構造的生物，所出現的齒輪和生活中我們所看到的有什麼不同，這麼神奇的構造對它們有什麼幫助呢？
- (二)研究材料確認：查詢文獻並確認它們，雖知道目前新竹市香山稻田較多，但不容易找



到樣本。後來透過 █████ 農業試驗分所黃老師提供褐飛蟲蟲體和水稻植株開啟研究之門。

## 二、褐飛蟲的飼養與觀察

(一)思考歷程：對於褐飛蟲和水稻沒有飼養與栽培經驗的我們，思考必須從認識褐飛蟲的習性和生活史開始，接著考慮生存的環境，最後則思考為了長期觀察，必須同時掌握持續性的讓褐飛蟲生存和水稻生長。

(二)研究方法確認：飼養期間進行各生活史的觀察、記錄和拍照；我們以珍惜生命為前提，決定以自然死亡的蟲體做為觀察齒輪的樣本；再者，由於蟲體很小，很容易不小心就捏死，所以自製吸蟲器，透過吸蟲體入培養盒中，減少蟲體的死亡。

## 三、探究褐飛蟲的後足齒輪構造與運動方式相關性

(一)思考歷程：在了解昆蟲的後足詳細的構造後，但到底在後足的哪裡？由於文獻中使用的是掃描式電子顯微鏡和高速攝影機，由於設備上的限制，只能用光學顯微鏡尋找。

(二)研究困境：以光學顯微鏡觀察無法直接看到齒輪，於是假設是否在前足或中足，之後顯微鏡觀察確認找不到。

(三)深入探討：鎖定後足觀察，試著解剖並以側拍和昆蟲探針輕輕撥開後足，在轉節處發現有斜斜的紋路，大膽假設可能是齒輪後，再輕輕的拉開後足，齒輪慢慢的露出，於是順利的找到，開始進行以下的探討：

**1.齒輪的結構：** 拍攝和觀察齒輪→計算齒輪數→比較不同時期齒輪的有無

(1)齒輪種類：從文獻中了解生活中齒輪的種類，確認褐飛蟲齒輪的種類，希望對於後續探討它們的齒輪運作能有助益。



(2)齒輪類數目：我們從顯微鏡下點數齒輪的數目，確認的數目為 10、12、13 齒和 15 齒，隨著蟲體變大而增加。10 和 12 齒齒數，以及齒輪只存在若蟲時期與參考資料 2 一樣。

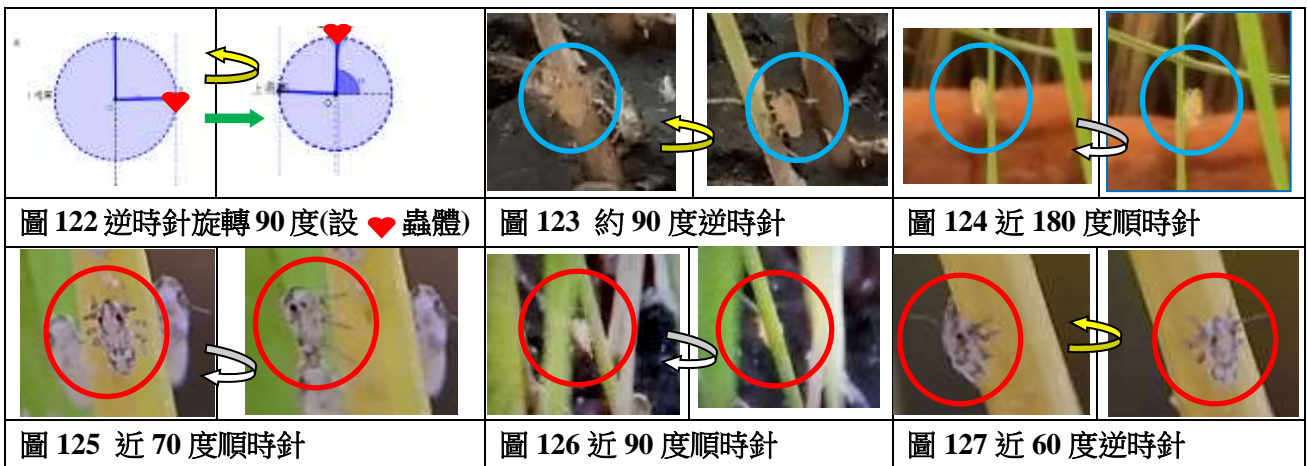
**2.齒輪運作機制：** 拍攝褐飛蟲運動方式→紀錄六足順序→製作模型探討→分析齒輪運作

(1)拍攝褐飛蟲水稻上的運動：在褐飛蟲活動較多的時間拍攝，紀錄步行和轉彎六足的順序，蟲體實在很小，即使在二齡蟲速度也很快，轉換影片速度後，竭盡所能多次觀察與紀錄，希望能找到和齒輪運作的相關性。此外，二齡若蟲後足很短，轉彎時要克服重力並避免因離心力掉落，兩邊齒輪的摩擦或卡緊也就相形重要。

(2)平面上步行與跳躍測量：由於褐飛蟲也會跳躍，平時不易觀察到，設計此實驗並測量完成六足的步行距離與跳躍的平均次數與平均距離，同時比對若蟲與成蟲時期的不同，進一步確認齒輪存在對於若蟲的意義。在實驗結果發現若蟲也會跳躍，齒輪的摩擦和驅動力可以幫助它們。

(3)水稻上斜斜轉彎向上與向下運動的意義：

- a.從實驗中得知成蟲轉節較若蟲大、腿節、脛節和跗節比例增加，驗證跳躍距離較遠的結果，而若蟲同樣有跳躍的行為。另外，也觀察到牠們以直直向上和斜斜向上交替進行，設計實驗並發現 0~45 和 90 度較省力，連續直上或斜上轉彎反而較費力。
- b.由於儀器和時間受限，目前未能拍照和驗證褐飛蟲轉彎角度、齒輪的實際運作情形和齒輪所占轉節的 60~80 度是否有關連，目前想到透過照片擷取和軟體(參考資料 9) (圖 123 褐飛蟲由水稻稈正面旋轉到水稻稈側面為 90 度)，協助推測轉彎角度的範圍，大部分觀察到的大多不會大於 90 度，但也有拍攝到 180 度(少數)。未來可以透過由上往下攝影進行記錄與探討；至於齒輪實際的運作，必須透過更精密的儀器進行拍攝。  
(「」逆時針；「」順時針)(圖 122~127)



(4)齒輪模型製作的意義：從實驗中得知步行和跳躍的步足模式，我們感覺到很抽象，透過此模型的製作，得以模擬實際蟲體的運動方式。

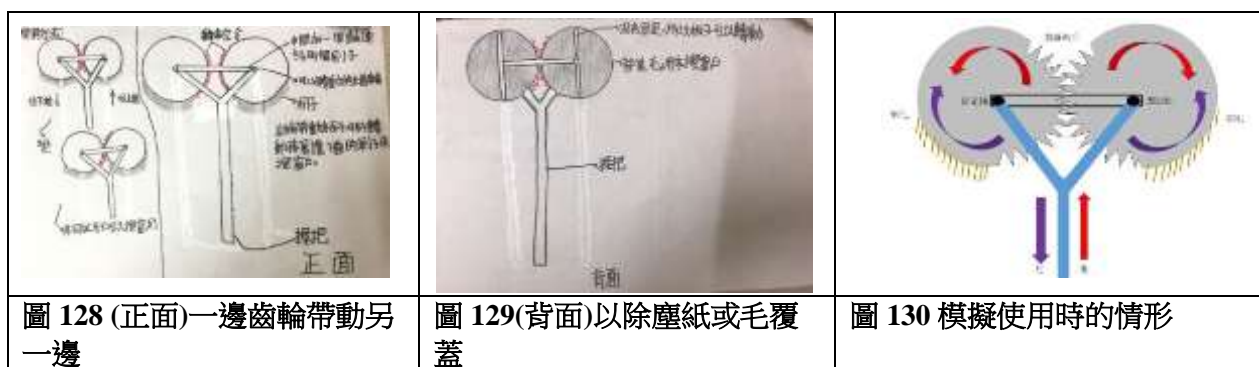
### 3.齒輪的功能與意義：

(1)參考文獻中提到尚未確認為何齒輪要在成蟲時期消失，我們透過本次的研究，初步找到答案，希望能提供他人參考。

(2)生活中的應用：

1.依據褐飛蟲齒輪構造，我們設計一種擦地板或玻璃的裝置(手繪圖 128~130)，兩根毛

刷子中間有一個軸相連，運用部分齒輪帶動毛刷子，當一個刷子往上推，另一個毛刷子向下推，使擦拭範圍變大且省力，同時碰到其他物品能轉動方向擦到縫隙處，未來可以再進一步製作。



2.有些人為了攀上高而光滑的椰子樹上採椰子，會先準備一塊環形的布，然後扭成麻花狀，之後纏在腳上，便可借力讓腳併攏且更為腳撐住樹幹、更容易施力，似乎有相同意義。

(3)從生物生存和演化的角度來看，褐飛蟲可能因為棲地和主食演化出特定的結構未來若能從親緣關係較近的物種進行探討，相信可以找到類似的結構或者發現整個演化的歷程。

## 柒、結論

- 一、褐飛蟲(*Nilaparvata lugens* (Stål))為同翅目(Homoptera)，稻蟲科(Delphacidae)，以水稻為寄主植物，屬於不完全變態，生活史為卵、若蟲和成蟲，若蟲從初齡到五齡，成蟲分為短翅型和長翅型。
- 二、褐飛蟲的身體分為頭、胸和腹部，腿部有前足、中足和後足，後足可分為基節、轉節、腿節、脛節和跗節。若蟲與成蟲腿節、脛節和跗節的比例分別為 **1.32:1.39:1.31** 和 **2.52:2.72:3.13**，成蟲各節變長，推測成蟲時，在水稻上有助於抓握、固定和轉彎。
- 三、運用顯微鏡觀察褐飛蟲若蟲的後足，發現轉節內側具有齒輪的構造，成蟲則不具有此構造。這種齒輪為正齒輪，以 Geogebra 軟體測量齒輪占轉節的角度是 60~80 度，齒數為 10、12、13 和 15 齒，隨著蟲體變大而增加。

#### 四、比較若蟲與成蟲在輕刺之下六足的運動情形:

(一)平均次數: 兩階段步行的平均次數為 8.5 次, 比跳躍的平均次數高。實際觀察發現,

褐飛蟲在水稻上大多呈現步行的狀態, 推測外來刺激下會誘發它跳躍。

(二)平均距離:成蟲平均跳躍的距離 34.91 公分明顯大於若蟲的距離 13.31 公分; 成蟲

時腿節、脛節和跗節變長有助於跳躍與抓握。

#### 五、褐飛蟲在水稻上轉彎向上或向下的原因:

(一) 向下時: 直直往下與轉彎向下的時間, 前者為 0.19 秒, 後者為 0.9 秒, 思考並

推測褐飛蟲在圓柱狀的水稻桿上往下移動時, 特別是若蟲時期, 緩慢的轉彎向下提升安全性。

(二) 向上時: 褐飛蟲在水稻上以 0~45 度轉彎斜上和 90 度直上交替進行, 設計實驗

結果顯示 0~45 度和 90 度較省力。

#### 六、探討褐飛蟲的運動方式與齒輪的關係: 若蟲與成蟲都會直直往上或往下再斜斜轉彎

比較整理如下:

(一)若蟲階段:平面移動步足模式為(1,4)(3,2)(5,6), 二齡蟲步行緩慢, 順逆時針轉彎

分別以 5 足和 6 足齒輪帶動, 其他足進行搭配完成整個轉動。跳躍時, 轉節開啟, 5,6 足打開, 齒輪瞬間合起後卡到底, 5,6 足拉直進行跳躍。

(二)成蟲階段: 平面移動出現三足步式(1,5,4)或(3,2,6), 後足不具齒輪, 三節變長能順

利的運動或抓握, 轉彎時以 135 或 246 為一組, 向左或右延伸。從跳躍到落地, 35.30 公分的距離僅約 1 秒鐘。

(三) 褐飛蟲有自己的一套行走的模式, 也不一定從前腳開始運動, 雖然也會有三足式步行, 但思考褐飛蟲在水稻上生活, 以及有齒輪的存在, 它的步行模式和這些昆蟲有所不同。

#### 七、成蟲與若蟲的後足構造與運動方式相關性分析(表九), 未來可以再進一步探討:

表九成蟲與若蟲的後足構造與運動方式相關性分析表

項目 \ 時期	若蟲	成蟲	研究結果與可能的運動相關性分析
1 轉節大小	較小	較大	增加摩擦力和驅動
2.齒輪的有無	有	無	增加摩擦力、驅動力和減

			少滑動
3.腿節、脛節、跗節比例	較短	較長	步行、轉彎和抓握有關
4.平均步行次數和距離	8.5 次/1.62 公分	8.5 次/1.72 公分	次數和距離差異不大
5.平均跳躍次數和距離	6.5 次/ 13.07 公分	6.3 次/34.91 公分	成蟲跳躍距離較遠與腿節、脛節長度有關
6.水稻上轉彎花費時間	較長	較短	與各腿節長度有關

八、運用 3D 列印製作齒輪模型，可以模擬並了解蟲體實際步行與跳躍等運動情形。

九、褐飛蝨的齒輪功能與意義：

- (一) 助於步行、轉彎與跳躍：使若蟲時期可以在水稻莖稈上順利的步行，齒輪的摩擦可以傳達動力並避免掉落。後足各節較短，助於若蟲在遇到敵人時跳躍逃生。
- (二) 齒輪占整個轉節的 60~80 度，這是整個步行和跳躍的範圍，褐飛蝨並非持續的轉動，而是有間斷性。若蟲時期轉節較成蟲小，齒輪的存在可增加摩擦力。
- (三) 齒輪出現的原因，可能是因為寄主植物水稻的解剖構造，讓它們特化出這樣的結構，可以順利的在莖稈上生活。未來將進一步的觀察其他的昆蟲，更深一層的了解齒輪出現與存在的意義。

## 捌、參考文獻資料

- 一、林慶元等(2007)。植物保護圖鑑系列 8-水稻保護(上冊)。台北市：行政院農業委員會動植物防檢局。
- 二、Mechanical gears seen for the first time in nature by Astrobiology Magazine. (2013,September 18) ,from <https://phys.org/news/2013-09-functioning-mechanical-gears-nature.html>
- 三、昆蟲馬拉松-昆蟲步行模式建立之研究(2010)。全國中小學科展作品第 42 屆作品。
- 四、李成章等。1986。四十年來台灣地區稻作生產改進專輯。204-205、209。黃正驊先生農學獎學金基金會。
- 五、劉承揚(2019 年 12 月 23 日)·齒輪·取自 <http://www.ym.edu.tw/cyliu66>
- 六、康軒文教事業(民 109)。自然與生活科技四下教師手冊。新北市：康軒文教事業



七、康軒文教事業(民 109)。自然與生活科技五上教師手冊。新北市：康軒文教事業

八、康軒文教事業(民 109)。自然與生活科技六下教師手冊。新北市：康軒文教事業

九、官長壽·阿壽工坊-模擬 3D 坐標軸原理·取自

<https://www.geogebra.org/m/W5kJ3g6O#material/sIff1HCh>

◎附錄一：褐飛蟲身長測量表

編號	身長	照片編號	倍率(目鏡)
A	0.31	978	4
		769	4
		909	10
		238	10
編號	身長	照片編號	倍率(目鏡)
B (長翅)	0.34	457	4
		542	4
	0.38	441	4
翅長	0.63		

編號	身長	照片編號	倍率(目鏡)
C	0.33	556	4
		459	4
翅長	0.36		

編號	身長	照片編號	倍率(目鏡)
D	0.35		
E	0.36	285	4
F	0.3	817	4
G	0.34	351	4
H	0.39	654	4
		212	4
I (若蟲)	0.25	199	4
	0.14	982	4
		488	4
		33	4
J	0.33		4

編號	身長	照片編號	倍率(目鏡)
K (有腹輪)	0.34	906	4
		294	4
		492	4
		257	4
		785	10
		225	10
		199	4
		600	4
		887	4
		272	10
		863	4
		927	10
		100	10
		109	10
		317	10
		98	10
		419	40
		529	40
		124	40
		5	10
		198	10
		711	10
		437	10
		641	10

◎附錄二：褐飛蟲平均步行次數和平均距離統計表

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
	ARAM	ARAB	BRAM	BRAC	CRAM	CRAB	DRAM	DRAC	ERAM/ARUM	ERAC/ARUC	FRAM/ARUM	FRAC/ARUC	GRAM	GRAC	HRAM	HRAC	IRAM	IRAC	JRAM	JRAC	KRAM	KRAC	L	
1	41.5	0.5	6.5	2.5	22.5	1	21.1	1.1		6.5	0.5	9	0.9	20	1.5	44.1	6.8	1.5	0.9	26.3	1.2	4	6.7	
2	41	1.5	3.5	1	34.2	1	31.1	0.5		7	6	9.3	1.1	17.8	2.7		3.2	0.5	25.06	3.5	1.3		6.7	
3	45	0.5	8	1	7.5	0.8	33.5	0.4		4.2	1.1	19.5	1.5	15.9	1.8		2.1	0.7	36.5	3.5	0.4		6.2	
4	18.7	0.4	5	1	2.4	1.3		0.5		47.5	2.4	8	0.8	17.7	2.8		1.5		1		5.5	1.9		4.5
5	24.5			1	8	0.9				5.5	2.4	10.7	0.9		1.1		1.6	0.5		4.3	2.6		2.9	
6	54			1	4	1.2	0.8			64.9	0.8	13.1	1		2		9.4	0.2		2.7	1.6		2.8	
7	3.7			0.5	8.5	0.4		0.5		5.9	1.3	8.5	0.9		2.1		0.6	0.3		3.5	3.4		3.4	
8	27.5			1		1.5		1.2			2.7	0.2			2.5		0.9	0.9		1.9			5	
9	42.4			1				0.5			1.7				2.5		0.7	0.6		1.2				
10	36.3			1				0.4							4		0.6	0.8		2.5				
11	31.4			2.5				1.2							2.9		2			0.7				
12								0.3									0.8			0.9				
13																	0.9			2			2.5	
14																	0.8			1.2				
	33.6455	0.725	5.75	1.2275	13.726	1.0125	30.2667	0.68333		20.21428571	2.1	9.7875	1.014285714	18.35	2.38636364	44.1	2.27857	1.5	0.8	25.9	2.7	2.3		5.025

(續上頁)

X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ
L成蟲(長翅)	L成蟲(長翅)	M成蟲	M成蟲	N成蟲	N成蟲	O成蟲	O成蟲	P成蟲	P成蟲	Q成蟲	Q成蟲	R成蟲	R成蟲	S成蟲	S成蟲	T成蟲	T成蟲	U成蟲	U成蟲
0.9	7.6	1.2	50.9	1	20	0.5	5.9	1.5	43.2	1.4	31.1	1.3	5.1	1.9	16.1	1.3	21.2	2.7	10.2
1.4	21.7	2.5	2.2	1.3	23.3	0.7	34.1	1.6	51.2	0.8	42	2.1	3.7	1.3	15	1.4	16.7	5.6	24.5
1.9	23.7	1.8	39.7	0.5	16.3	1.5	33	1.9	5.3	0.5	35.3	0.9	2	2.4	10.6	2.2	20.1	2.2	28.9
3.2	26.7	2.5	47.8	2	17.4	1.3	10.2	2	45.5	0.9	39.3	1.7	1		24.4		22.4	5	15
3.1	29.6	1.8		0.8	9	2.3		0.9	49.8	0.8		0.7	7.2		6.5		8.1	2.5	29.3
3.7	26.6	2		1	14.1	1.5		1.1		1		1.1	5.4		22.8		6.9		9.2
1.9		3.2		1	18.4	2.3		2.4		1.1		1.5	8		7.5		12.7		31.2
2		2.7			13.5	1.5		1.4		1.4		1.7			2.5		11.3		51.11
1.9		2.5				3.3		1.7		1.1					1.5		14.8		6.8
1.9						1.9		2.6		1							9.1		22.9122
						1.5				0.8					15.9		8.8		
																	7		
2.19	22.65	2.24	35.1	1.09	16.5	1.66	20.8	1.71	39	0.98	36.9	1.375	4.63	1.87	11.99	1.63	13.8	3.6	22.9

◎附錄三:測量水稻稈直徑

次數	圓周長(cm)	直徑(cm)
1	0.7	0.22
2	0.25	0.08
3	0.7	0.22
4	0.5	0.16
5	0.4	0.13
平均	0.51	0.162

## 【評語】 080313

1. 作品探討褐飛蝨若蟲後足轉節上的齒輪構造與其行動方式的相關性，研究主題明確有趣。
2. 利用 3D 列印製作齒輪模型，驗證觀察所得推論，實驗設計值得鼓勵，具有科學意義。
3. 建議可以更深入探討兩後足因為齒輪的聯動性增加所增加的跳躍效益。

## 作品簡報



「稻」高一「齒」、「磨」高一丈  
—探討褐飛蟲的齒輪構造與運動方式的相關性

- 組 別：國小組
- 科 別：生 物

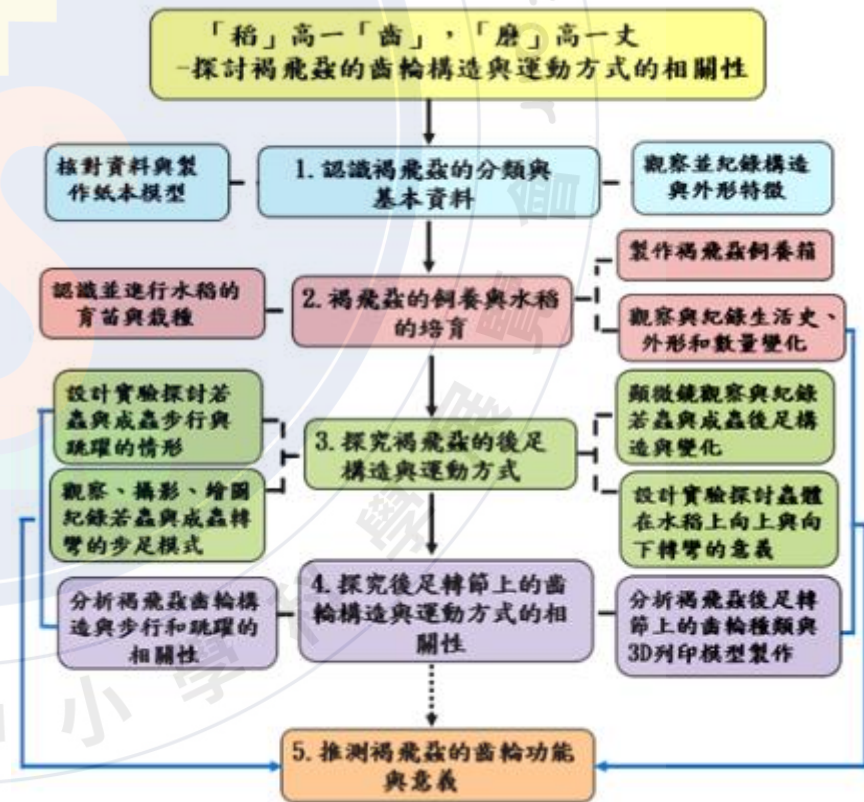
# 前言

## ➤ 文獻探討:

- 劍橋大學科學家發現齒輪在若蟲 “*Issus*” 後足，跳躍時會同步運動；沒有齒輪的成蟲推測因具有較大的轉節，產生足夠的摩擦力驅動跳躍。
- 褐飛蝨 (*Nilaparvata lugens* (Stål))，為同翅目 (Homoptera)，稻蝨科 (Delphacidae)，水稻的害蟲；它的結構很特別，從生態與演化角度來看，相當值得探討。

## ➤ 研究目的:

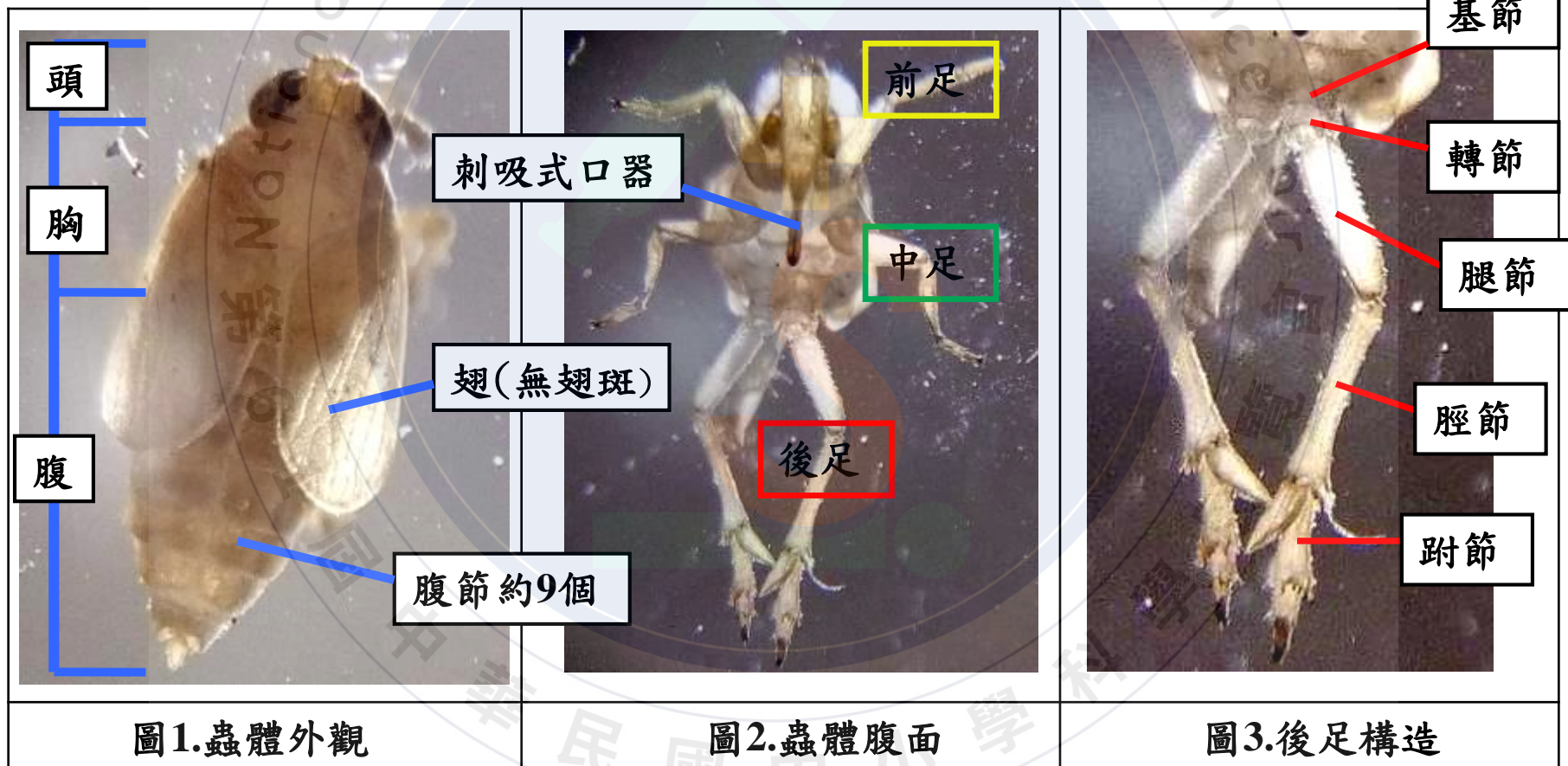
- 認識褐飛蝨的分類與基本資料
- 褐飛蝨的飼養與水稻的培育
- 探究褐飛蝨的後足構造與運動方式
- 探究褐飛蝨後足轉節上的齒輪構造與運動方式的相關性



# 研究結果

## □ 認識褐飛蝨的分類與基本資料

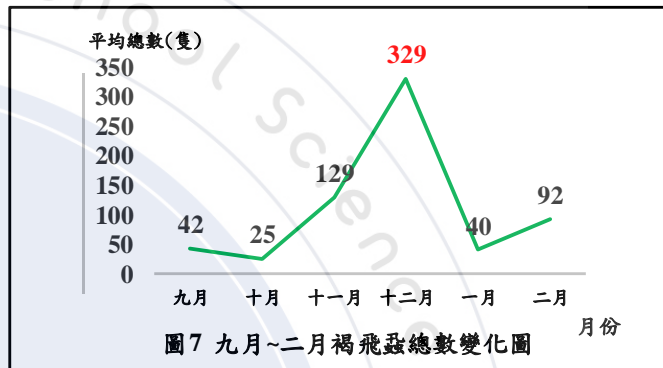
◆ 認識褐飛蝨的分類與外形特徵(圖1~3):若蟲的大小為0.10~0.36公分，成蟲(包含長翅)為0.38~0.43公分。



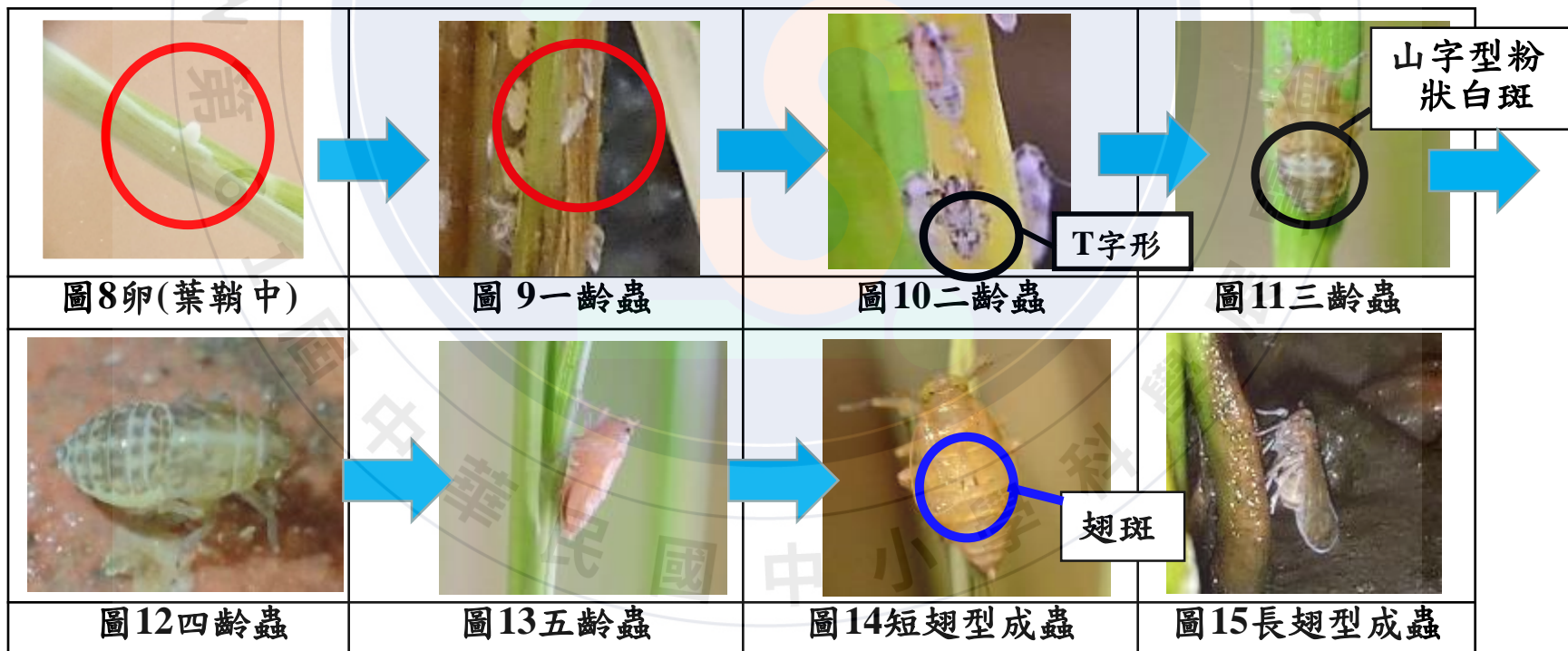


# □ 褐飛蟲的飼養與水稻的培育

## ◆ 褐飛蟲的飼養、水稻栽培與維持蟲體成長(圖4~7)



◆ 褐飛蟲的生活史和外形變化:平均約51天，卵(約2週)、若蟲(約3週)和成蟲(在室內約15-20天)，不同溫度各個時期存活時間不同(圖8~15)



山字型粉狀白斑

T字形

翅斑



## □ 探究褐飛蟲的後足構造與運動方式

### ◆ 觀察並紀錄褐飛蟲若蟲與成蟲後足構造與變化

- **齒輪的觀察**:當若蟲後足轉節閉合，齒輪藏在裡面只看到斜斜的紋路(圖21)；轉節打開時，齒輪出現。觀察到4種齒數，**隨著蟲體變大齒數變多**，身長分別為0.10公分(約一齡蟲)，0.28公分(約三齡蟲)，0.32和0.34公分(約五齡蟲)，**推測隨著蛻皮，下次長出來的齒輪數增加**；但成蟲沒有齒輪。(圖16~23)「○」標示齒輪有無



圖16若蟲齒輪(10x10)

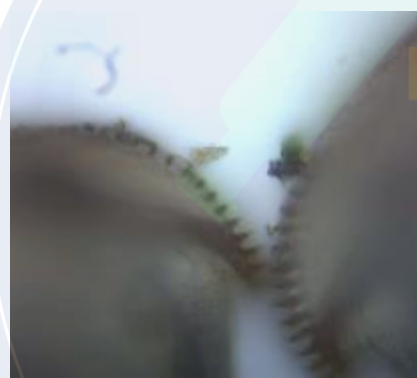


圖17若蟲齒輪(40x10)



圖18成蟲無齒輪(4x10)



圖19無齒輪(10x10)



圖20 10齒(10x10)

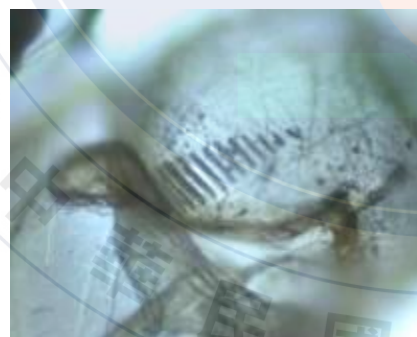


圖21 12齒(10x10)

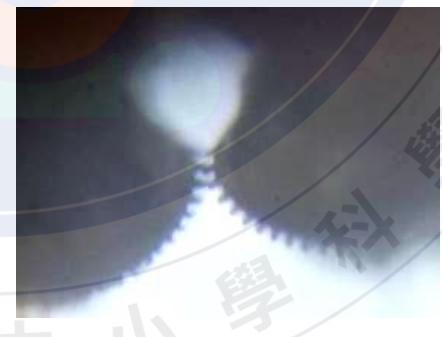


圖22 13齒(10x10)



圖23 15齒(40x10)

## ◆觀察並紀錄褐飛蝨若蟲與成蟲後足構造與變化

- **轉節半徑的測定**:以Geogebra實際測量發現成蟲較大。推測**若蟲**轉節較小，**步行**時需要**齒輪**避免沿水稻稈滑出，**跳躍**時透過**齒輪**摩擦驅動。(圖24~27, 10x10)



- **後足三節測量與比較**:以Geogebra軟體放大後測量腿節、脛節和跗節比例。結果顯示，若蟲三節比例較短，成蟲階段各節會變長，特別是長翅型成蟲。**推測成蟲各節變長助於步行與抓握，齒輪存在對於若蟲則相形重要**(表一)。

表一:若蟲(左下)與成蟲(右下)腿節、脛節和跗節比例平均值的比較表

分節 階段	腿節	脛節	跗節
(A)若蟲	1.2	1.1	1.4
(B)若蟲	2.4	2.8	1.2
(C)若蟲	1.7	2.1	1.6
(D)若蟲	1.1	1.1	1.5
(E)若蟲	1.1	0.9	1.4
(F)若蟲	1.2	1.4	1.2
(G)若蟲	1.4	1.4	1.5
(H)若蟲	0.8	0.7	0.7
(I)若蟲	1	1	1.3
平均	1.32	1.39	1.31

分節 階段	腿節	脛節	跗節
(A)長翅	3.5	4.3	4.7
(B)成蟲	4.7	5.2	5.3
(C)長翅	3.3	3	3.7
(D)成蟲	2.2	2.6	3.3
(E)長翅	3.8	4.1	4.1
(F)成蟲	1.3	1.5	1.6
(G)成蟲	1.4	1.5	1.9
(H)成蟲	1.3	1.2	2
(I)成蟲	1.2	1.1	1.6
平均	2.52	2.72	3.13

## ◆觀察與紀錄褐飛蝨若蟲與成蟲階段步行與跳躍時的情形

- **刺激蟲體實驗**：步行平均次數比跳躍高，在水稻上也大多是步行；若蟲會跳躍且平均距離較成蟲短，比較表一結果成蟲三節比例較長，助於在水稻上運動，推測齒輪對若蟲步行和避敵很重要。(圖28)

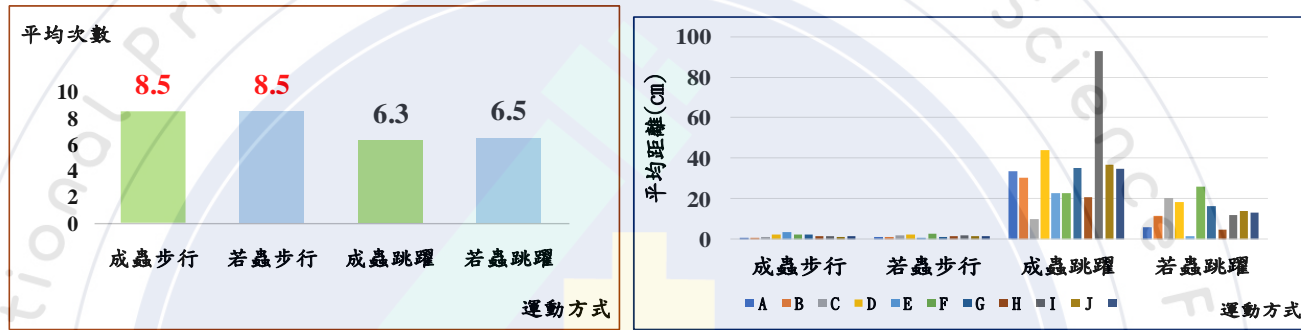


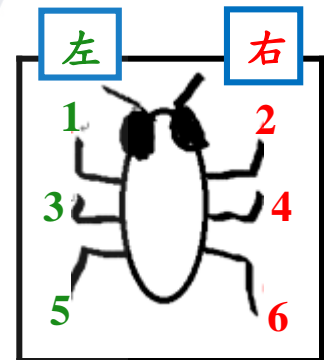
圖28:短翅型成蟲與若蟲步行和跳躍平均次數(左)與平均距離(右)比較圖

## ◆觀察與紀錄褐飛蝨若蟲與成蟲運動時的步足模式(表二)

- **平面上**:成蟲出現三足式步行，若蟲沒有。
- **直直往上**:若蟲前兩對足往上伸，後足向後伸身體往上推，成蟲相似但前、中足交替情形。
- **直直往下**:若蟲先往下蹲依序後、前足，左右中足。成蟲兩足一對，一對足離開另兩對足抓住。
- **順、逆時針轉彎**:若蟲以5或6帶動，成蟲以135或246一組帶動轉彎。
- **若蟲運動較緩慢，步足模式較不具規律性。**

表二:若蟲與成蟲運動方式分析與比較表

階段 \ 運動方式	平面上移動	直直往上	順時針	逆時針	直直往下
1. 若蟲	◎步足模式: 3 4 1 5 6 2	◎步足模式 1 2 3 4 5 6	◎步足模式 (1)153614642 (2)13214513465 (3)154614642	◎步足模式 (1)2641236425 (2)6242412142 341235	◎步足模式 (1) 6135234 (2) 5623416 (3) 5234516
2. 短翅型成蟲	◎三足步式: (1,5,4)或(3,2,6)	◎步足模式 4 1 2 3 6 5	◎步足模式: 3 1 5 2 6 4	◎步足模式 4 2 6 3 1 5	◎步足模式 (1, 4)(3, 6)(2, 5)
3. 長翅型成蟲	◎步足模式: 1 5 4 3 6 2	◎步足模式 1 4 3 2 5 6	僅輕微轉彎	僅輕微轉彎	◎步足模式 (1, 4)(3, 6)(2, 5)





- **相同模式**:若蟲和成蟲都會直直的上或下，斜斜的往上或往下；轉彎時，順時針和逆時針交錯進行，**後者速度較快**(圖29)。

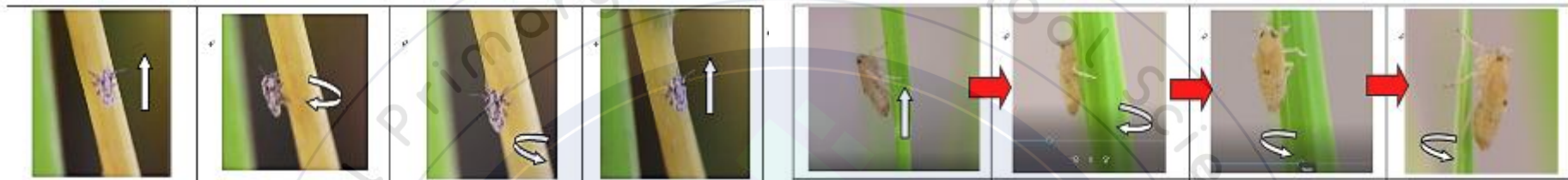


圖29: 若蟲(左)與成蟲(右)在水稻上運動的情形

### ◆探討褐飛蟲在水稻上轉彎向上與向下運動的意義

了解褐飛蟲在水稻上以斜斜轉彎和直直上下交替運動，探討物理因素對牠的影響，設計向下與向上實驗：

- **向下**:直直與轉彎分別為**0.19秒**和**0.9秒**，**緩慢轉彎向下提升安全性，特別是若蟲**。
- **向上**:測量在水稻上運動的角度，斜上**0~45度**轉彎和直上**90度**交替進行，與實驗結果比較顯示**0度~45度**和**90度**較**省力**(圖30~36)。

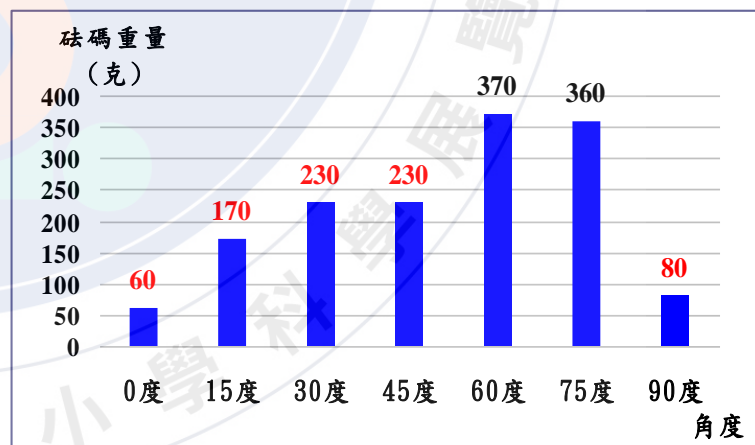
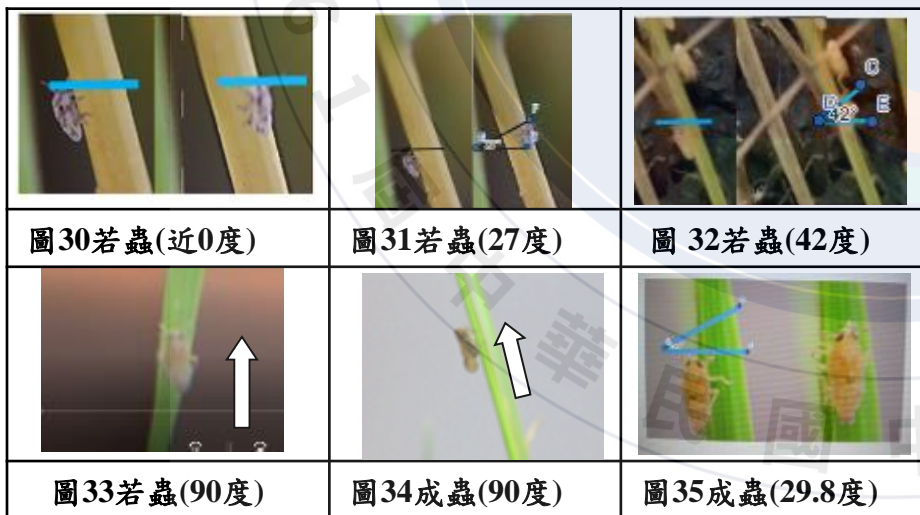


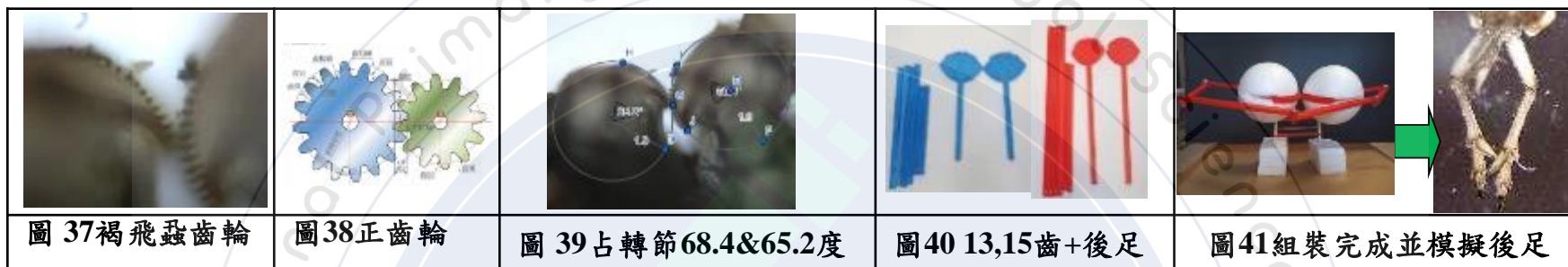
圖36: 斜面角度與砝碼重量大小(省力)關係圖



## □ 探究褐飛蟲後足轉節上的齒輪構造與運動方式的相關性

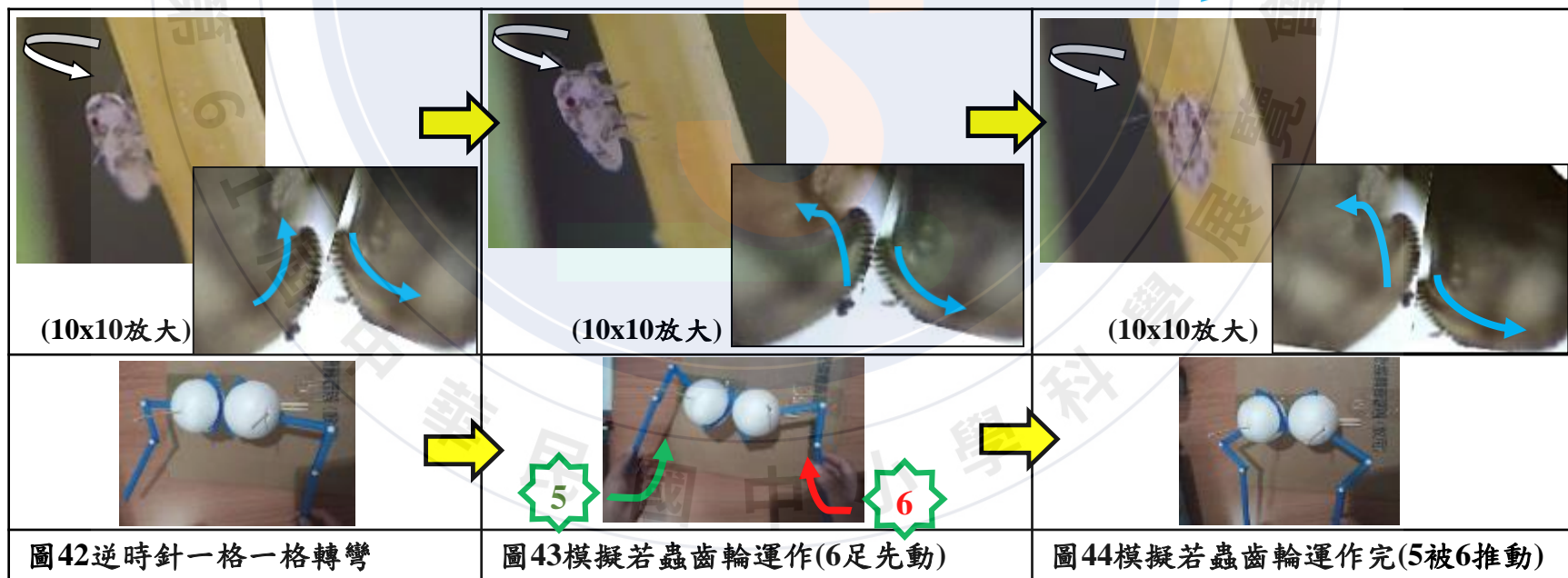
### ◆ 分析褐飛蟲後足轉節上的齒輪種類與模型製作

- 判斷齒輪類型和模型製作: 正齒輪、齒輪占轉節60~80度(圖37~41 & 10x10)



### ◆ 分析褐飛蟲後足的齒輪構造和步行與跳躍的相關性

- 若蟲步行: 各腿節較短，抓握和轉彎時較緩慢，推測較小若蟲齒輪一格一格搭配其他腳移動，轉彎時，由5或6帶動完成動作(圖42~44)。較大若蟲行走快速，轉彎順暢，推測齒輪運作也較為靈活。「↺」逆時針「↻」模擬齒輪轉動



- **若蟲跳躍**:實驗結果顯示跳躍時非常的快速，同時搭配參考資料思考，將拍攝的照片和自製模型模擬跳躍時齒輪的運作(圖45)，齒輪和5,6足同時打開，之後兩足往後拉，瞬間合起後齒輪卡到底跳躍，最後回到原位。

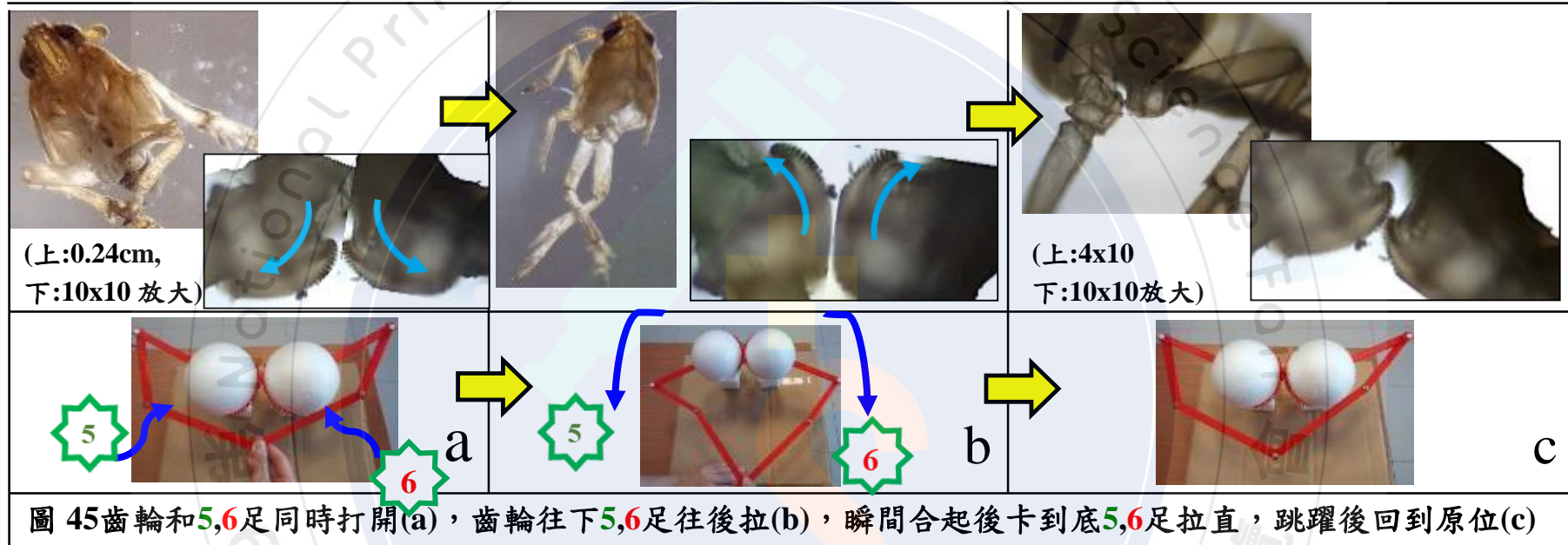


圖 45齒輪和5,6足同時打開(a)，齒輪往下5,6足往後拉(b)，瞬間合起後卡到底5,6足拉直，跳躍後回到原位(c)

- **成蟲**:此時期不具齒輪，後足三節且跗節比例變長，測量、計算和比較水稻桿直徑平均為0.162公分，推測沒有齒輪之下，能順利的運動與抓握。

#### ◆推測褐飛蟲後足轉節上的齒輪功能與意義

- **助於步行、轉彎與跳躍**:齒輪的摩擦傳達動力並避免掉落並得以逃生。
- 齒輪占整個轉節的60~80度，透過**間斷性的轉動**進行步行和跳躍。若蟲轉節較小，齒輪的存在可增加摩擦力。
- 齒輪的出現，推測是因為**寄主植物水稻的解剖構造**。

# 結論

□ 成蟲與若蟲的後足構造與運動方式相關性分析下表三：

項目	時期	若蟲	成蟲	研究結果與可能的運動相關性分析
1.轉節大小		較小	較大	增加摩擦力和驅動
2.齒輪的有無		有	無	增加摩擦力、驅動力和減少滑動
3.腿節、脛節、跗節比例		較短	較長	步行、轉彎和抓握有關
4.平均步行次數和距離		8.5次/1.62公分	8.5次/1.72公分	次數和距離差異不大
5.平均跳躍次數和距離		6.5次/ 13.07公分	6.3次/34.91公分	成蟲跳躍平均距離較遠與腿節、脛節長度有關
6.水稻上轉彎花費時間		較長	較短	與各腿節長度有關

- 若蟲後足三節比例較成蟲短，推測齒輪的存在助於在水稻上運動和抓握。
- 若蟲運動時，順、逆時針轉彎以5或6單足推動，或跳躍時兩足同時進行，推測齒輪在步行時有助於增加摩擦力，跳躍時助於驅動而避敵。
- 褐飛蟲上、下運動時，以0~45度和90度直線與順逆交錯既安全又省力，特別是若蟲時期搭配齒輪構造，克服各腿節較短的情況。
- 運用3D列印製作齒輪模型，可以模擬並了解蟲體實際步行與跳躍等運動情形。
- 齒輪讓若蟲順利步行、跳躍逃生，推測是為了適應水稻的解剖構造。



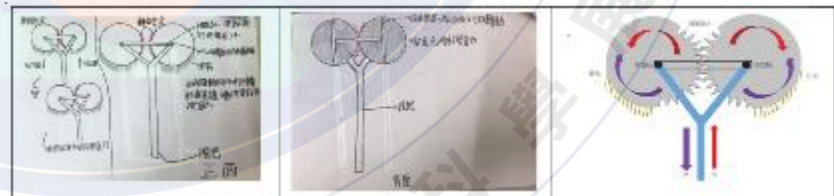
## ➤ 展望

- 褐飛蟲各時期蟲體結構的分析、與其他昆蟲比較或演化的角度探討。
- 齒輪占轉節角度與蟲體轉動角度是否具相關性(圖46)。儀器和時間受限，目前透過照片擷取和軟體，大多不會大於90度，但少數拍攝到180度，推測可能和蟲體大小有關。未來可以透過由上往下攝影進行記錄與探討。



圖46「♥」蟲體  
「↺」逆時針；「↻」順時針

- 蟲體齒輪實際運作，找尋更精密的儀器進行拍攝。
- 生活中的應用與創意發明：
  - ◆ 為攀上高而光滑的椰子樹上採椰子，準備一塊布扭成麻花狀纏在腳上，便可借力讓腳併攏並撐住樹幹、也更容易施力，似乎有相同意義。
  - ◆ 我們設計一種擦地板或玻璃的裝置。當一個刷子往上推，另一個毛刷子向下推，使擦拭範圍變大且省力(右圖47)。



## ➤ 參考資料:

Mechanical gears seen for the first time in nature by [Astrobiology Magazine](https://phys.org/news/2013-09-functioning-mechanical-gears-nature.html). (2013,September 18) ,from <https://phys.org/news/2013-09-functioning-mechanical-gears-nature.html>