

# 2011 年臺灣國際科學展覽會

## 優勝作品專輯

編號：050016

### 作品名稱

足下天地大，掌中有乾坤—橙斑大龍蝨抱握足的形態與吸附力

### 得獎獎項

三等獎

作者姓名：許家樺、羅聖興、陳則丞

就讀學校：國立武陵高級中學

指導教師：蔡靜宜

關鍵字：橙斑大龍蝨、吸盤、吸附力

## 作者簡介



### 第一作者:許家樺

我的名字是許家樺，來自桃園市，目前就讀國立武陵高中。國小、國中時，生活重心以課業為主，對於團體活動或校外活動較少參加。直到升上了高中，才真正增廣見聞，學了很多東西。我開始接觸學科的專業領域，譬如大學的生物學和普通物理。另外，我也參加過許多校外競賽或全國性的學科比賽，這些經驗都使我對科學有更深層的瞭解與滿懷的熱忱。

### 第二作者:羅聖興

我的名字是羅聖興，目前就讀國立武陵高中三年級的學生。由於從小對觀察大自然有濃厚興趣，因此我和同學們一起參與有關生物方面的專題討論、科展，曾參加生物科桃竹苗地區科展、全國科展。未來將會朝向和生物相關科系發展，或許會致力於生物研究方面，因此參加科展，希望藉此提升自己能力，並從中學習從事研究的方法與精神。

第三作者:陳則丞

我是來自武陵高中數理資優班的陳則丞。進資優班之前，一直不清楚學習的意義何在，只知道在課業上用心。做了科展之後才發覺自己先前的學習太過於膚淺，發現了讀書並不是學習的唯一途徑，亦可從各式管道著手。科展便是其中一項，學會從實驗中創造知識，不再是一味的吸收知識。希望這次參加國際科展能讓我的學習有更大的突破。

## 摘要

有別於大多數龍蝨抱握足上所具有的圓形吸盤，橙斑大龍蝨具有特殊的掌形吸盤，吸盤內具有四排舌墊狀構造。藉由吸盤吸附與脫離機制的探討，發現吸盤內跗節的關節與舌墊在吸附時會發生形變以增加吸盤的吸附，而舌墊的不對稱性構造則可以使吸盤在脫離時較為容易。我們也利用自製的實驗裝置測量吸盤在水中的吸附力，結果顯示吸盤吸附力的主要來自於舌墊，其切向力大於法向力，且切向力具有方向性，推測與舌墊之不對稱性有關。這種掌形吸盤除了可重複在水中進行吸附之外，也具有方便脫離，以及可吸附不規則平面等特性，在仿生學上的應用極具潛力。

## ABSTRACT

Unlike most of diving beetles their tarsus of the forelegs is modified in males to form a circular sucker, the first three tarsal segments of the two front clasping legs in male *Cybister rugosus* dilated to form a pair of palm-like suckers. There are four columns of tongue-shaped pads in each palm-like sucker. Observation of the pad attachment to a surface in water shows that the deformation of the pad and the joints between the tarsal segments increases the adhesive force, and the structural asymmetry of pad helps the suckers detach from surface easily. By measuring the in-water adhesive force with the device designed by ourselves, we demonstrated that the major adhesive force of suckers is from the pad's contribution. Our result also shows that the tangential force on the sucker is much larger than the normal force, and the tangential force is directional, indicating the directionality is related to the asymmetric structure of pad. With the biophysical features mentioned above, it is believed that the palm-like sucker has high potentiality in bio-mimics.

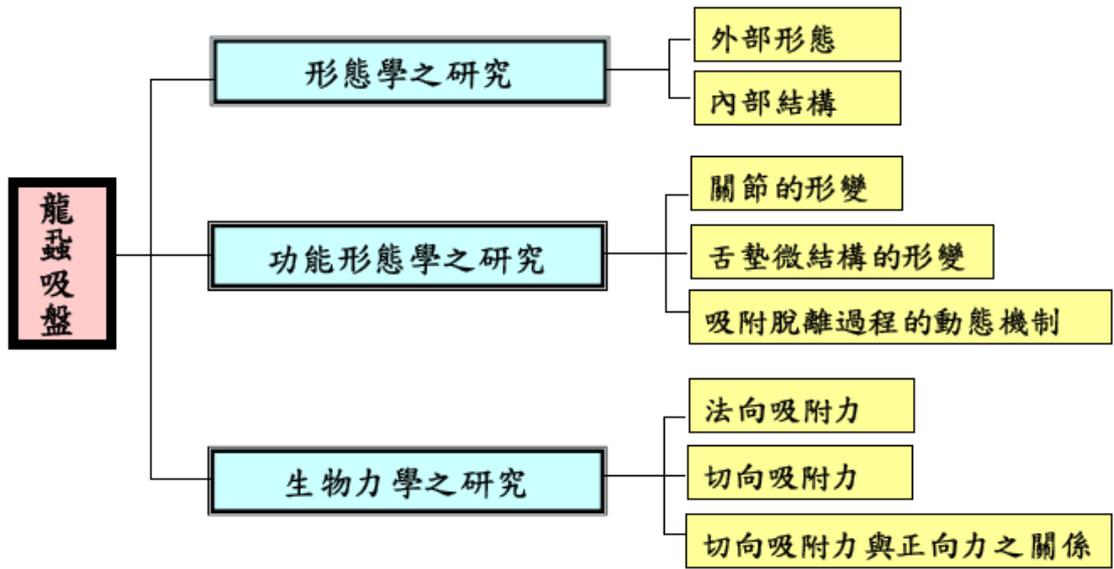
# 壹、前言

## 一、研究動機

在日常生活中，吸盤的運用十分廣泛，從浴室掛勾到清洗大樓的爬壁機器人都有它的身影。在自然界中，吸盤對生物而言也扮演著重要的功能角色。然而，大部分生物的吸盤要能吸附與脫離，其吸盤構造需要有複雜的肌肉組織來調節。在水生昆蟲中，龍蝨抱握足所特化出的吸盤並不具備肌肉組織，但卻能產生吸附與輕易脫離。這種特殊的吸盤引起我們的好奇，配合高一基礎生物學的生物多樣性教材，於是我們決定以龍蝨為題材，探討龍蝨吸盤的微結構與其吸附力，以期提供未來在仿生學上應用的新思維。

## 二、研究目的

目前所知道的龍蝨吸盤多為圓形吸盤，橙斑大龍蝨的掌形吸盤至今尚未有任何研究報導，因此我們首先進行吸盤的形態學研究，藉由觀察吸盤的細微構造以了解其形態特質。由於雄龍蝨是在水中利用吸盤吸附雌龍蝨背板，究竟吸盤在水中的吸附特性為何？在吸盤的功能形態學研究中，我們也探討吸盤吸附與脫離時的動態機制。最後，為了瞭解吸盤吸附力與構造的相關性，我們藉由自製簡單的測量設備以量測吸盤的吸附力，期望能從形態觀察到功能性研究，揭開這個特殊吸盤的神秘面紗。



## 貳、研究設備及器材

一、橙斑大龍蝨 (*Cybister rugosus*)：桃園縣的埤塘採集取得。



《取樣的埤塘》



《龍蝨的主要棲息環境》

二、誘捕龍蝨相關器具：蝦籠、餌食、保麗龍、橡皮筋、投影片、沼澤衣、封口袋。



《改良後的蝦籠（繫上保麗龍）》



《改良後的蝦籠（外覆投影片、保鮮膜）》



《深入埤塘放置蝦籠》



《將蝦籠放置於龍蝨的生態棲地》



《誘捕龍蟲所需的器材》



《將收集到的龍蟲各別放入封口袋內》

三、龍蟲飼育缸：水族相關設備（水族箱、燈源、過濾馬達）、底沙、水生植物。



《龍蟲飼育缸》



《橙斑大龍蟲（上為雄龍蟲；下為雌龍蟲）》

四、製備 SEM 標本：超音波震盪、100% 丙酮。

五、掃描式電子顯微鏡（scanning electron microscope, SEM）與解剖顯微鏡。



《掃描式電子顯微鏡》



《解剖顯微鏡》

六、SEM 相關設備：標本台、臨界點乾燥儀 (critical point dehydration, CPD)、覆膜儀。



《標本台》



《臨界點乾燥儀》



《覆膜儀》

七、自製道具相關器材：滑輪、投影片、釣魚線、砝碼、小水瓶、載玻片、熱熔槍、熱熔膠。

八、其他器材：微量吸取器、微量電子秤、微調器、培養皿、攝影機。

## 參、研究過程或方法

### 一、龍蝨吸盤形態學之研究

#### (一) 吸盤外部形態

1. 以肉眼仔細觀察龍蝨吸盤外部結構，並加以拍照、繪圖。
2. 測量吸盤微結構面積的方法：
  - (1) 在解剖顯微鏡下利用顯微測量計算出視野下吸盤與實際大小之比例。
  - (2) 測量一張均勻 A4 影印紙的重量、面積，求出其面密度。
  - (3) 將欲計算面積之大、小吸盤圖片影印，並剪下一塊相同面積的白紙，利用重量計算剪下白紙面積。
  - (4) 利用圖上比例尺，可以回推大、小吸盤之原面積。



《微量電子秤》



《待秤重的吸盤圖片》

#### (二) 吸盤內部結構

1. 以解剖顯微鏡觀察雄龍蝨抱握足。

2. 以掃描式電子顯微鏡觀察已經 SEM 前置作業處理完的雄龍蝨抱握足：
  - (1) 將龍蝨抱握足置於蒸餾水中，以超音波震盪清洗數次。
  - (2) 將清洗後的標本置於 100% 丙酮內固定 24 小時以上。
  - (3) 以 CPD 儀進一步脫水：將標本置於 CPD 中 1 小時，並將丙酮置換為液態二氧化碳，再將二氧化碳汽化形成乾燥標本。
  - (4) 取出後將抱握足標本黏附於標本台上。
  - (5) 將標本台置於覆膜儀中鍍上金膜後，即可以 SEM 觀察吸盤內部結構。

## 二、龍蝨吸盤功能形態學之研究

### (一) 關節的形變

1. 取雄龍蝨抱握足，並以防水膠帶固定在載玻片上。
2. 直接觀察未吸附狀態抱握足；吸附狀態抱握足則是取另一載玻片進行按壓吸附。
3. 以肉眼仔細觀察並記錄、拍照。

### (二) 舌墊微結構的形變

1. 取雄龍蝨抱握足，並以防水膠帶固定在載玻片上，以解剖顯微鏡仔細觀察乾燥狀態的抱握足，並加以記錄、拍照。
2. 由於真實狀態下吸盤是在水中進行運作，所以我們也觀察吸盤在水中時的構造：
  - (1) 將上述含有抱握足的載玻片黏附固定於培養皿底部。

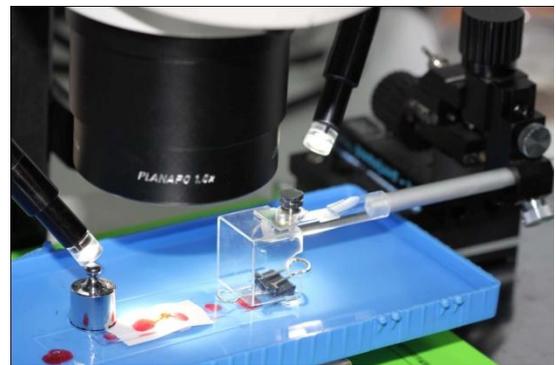
(2) 置於解剖顯微鏡下，並緩慢在培養皿內注入蒸餾水，直至蒸餾水完全覆蓋住整個吸盤，並於逐步加水過程時，以解剖顯微鏡觀察舌墊微結構所產生的形變。

### (三) 吸附脫離過程的動態機制

1. 以黏土、防水膠帶將雄龍蝨抱握足固定在載玻片上。
2. 再以黏土將上述含有抱握足的載玻片以吸附面朝上，固定在另一器皿底部。
3. 於器皿內注入蒸餾水，直至蒸餾水完全覆蓋住整個吸盤的吸附面。
4. 架置另一載玻片，使其與微調器相連。
5. 緩慢調動微調器，使載玻片向下緩慢浸入水中，直至與吸盤接觸。
6. 以解剖顯微鏡觀察，搭配同步錄影設備，記錄吸盤吸附和脫離的情形。



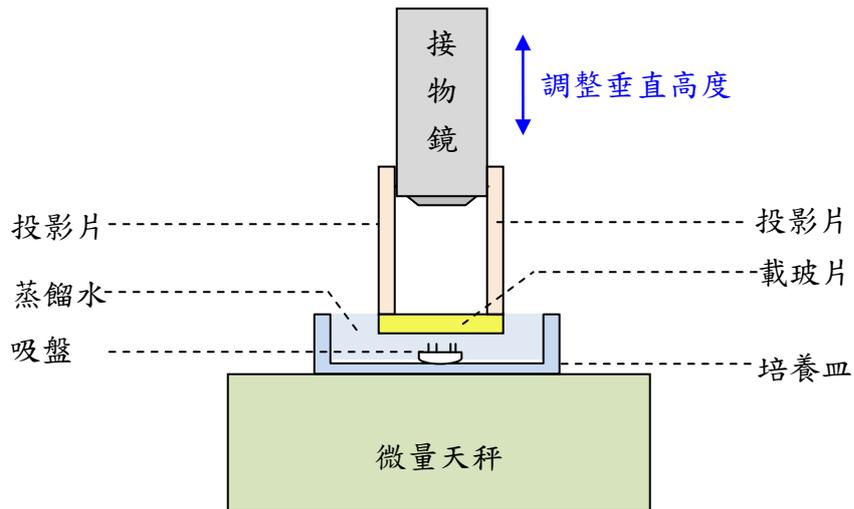
《將雄龍蝨抱握足固定在載玻片上》



《觀察吸盤吸和附脫離機制的裝置》

## 三、龍蝨吸盤生物力學之研究

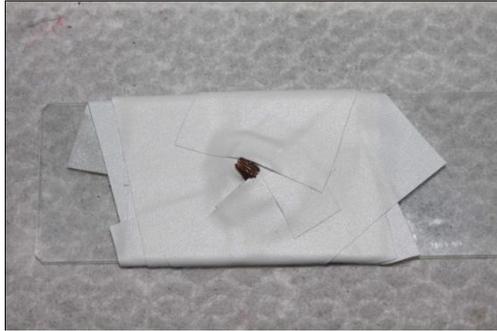
### (一) 測量吸盤之法向吸附力



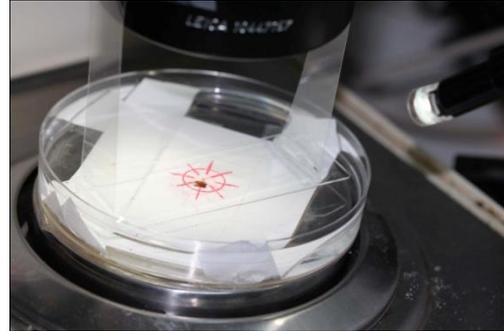
《自製法向力測量裝置示意圖》

1. 實驗目的：測量吸盤之法向吸附力，並探討其與不同舌墊區面積之差異。
2. 實驗過程：
  - (1) 分別測量大、小吸盤舌墊區面積。
  - (2) 分別將不同吸盤大小的抱握足吸附面朝上，以防水膠帶固定在載玻片上。
  - (3) 將含有抱握足的載玻片固定於培養皿正中央。
  - (4) 於培養皿內裝滿蒸餾水，並放置於微量電子秤上。
  - (5) 取另一載玻片，以長條投影片黏附於解剖顯微鏡的接物鏡上，調整聚焦後，保持其水平。
  - (6) 調整接物鏡旋鈕，使黏附於解剖顯微鏡上的載玻片緩慢沒入水面下。
  - (7) 歸零微量電子秤。

- (8) 將黏附於解剖顯微鏡上的載玻片下壓吸盤，至微量電子秤顯示一固定重量。
- (9) 以等速率緩慢調高，使載玻片脫離吸盤，以解剖顯微鏡觀察，搭配同步錄影設備，觀察微量電子秤上所顯示的數據變化，記錄並分析其結果。



《固定好的龍蟲吸盤》



《測量法向力的裝置》

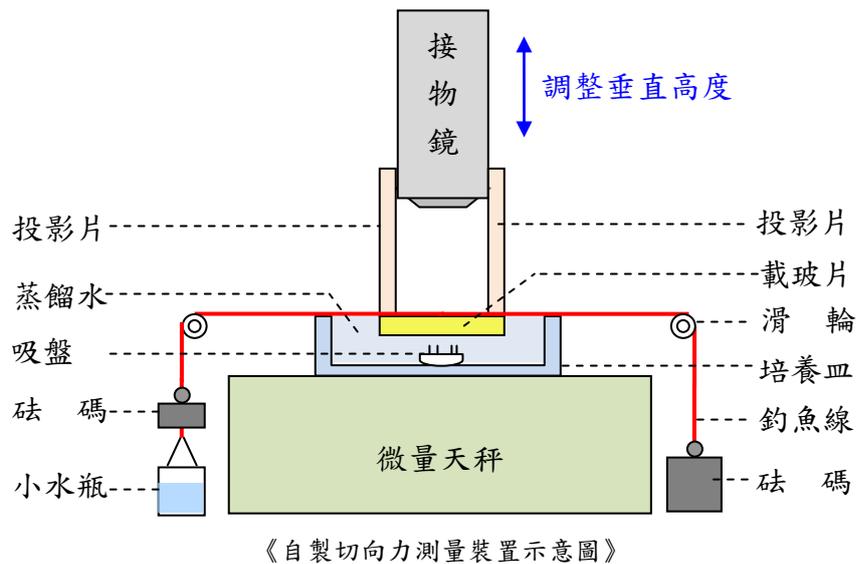
### 3. 測量單排舌墊之法向吸附力，並探討其與整組吸盤之差異：

- (1) 將抱握足吸盤的腹面朝上，以防水膠帶固定在載玻片上。
- (2) 在小吸盤的舌墊區域以解剖專用的鑷子將額外的舌墊拔除，僅留下單排舌墊。
- (3) 同上述實驗裝置，將含有抱握足的載玻片固定於培養皿正中央。
- (4) 於培養皿內裝滿蒸餾水，並放置於微量電子秤上。
- (5) 取另一載玻片，以長條投影片黏附於解剖顯微鏡的接物鏡上，調整聚焦後，保持其水平。
- (6) 調整接物鏡旋鈕，使黏附於解剖顯微鏡上的載玻片緩慢沒入水面下。
- (7) 歸零微量電子秤。

(8) 將黏附於解剖顯微鏡上的載玻片下壓吸盤，至微量電子秤顯示一固定重量。

(9) 以等速率緩慢調高，使載玻片脫離吸盤，以解剖顯微鏡觀察，搭配同步錄影設備，觀察微量電子秤上所顯示的數據變化，記錄並分析其結果。

## (二) 測量吸盤之切向吸附力



1. 實驗目的：測量吸盤之切向吸附力，並比較不同方向角之切向力和探討不同舌墊區面積與切向力的關係：

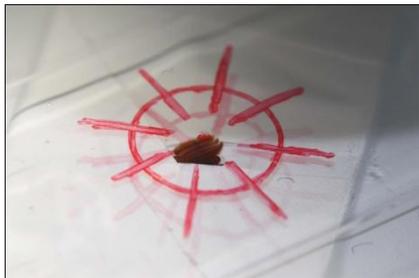
2. 實驗過程：

(1) 分別將不同吸盤大小的抱握足吸附面朝上，以防水膠帶固定在載玻片上。

(2) 將含有抱握足的載玻片固定於培養皿正中央。

(3) 於培養皿內裝滿蒸餾水，並放置於微量電子秤上。

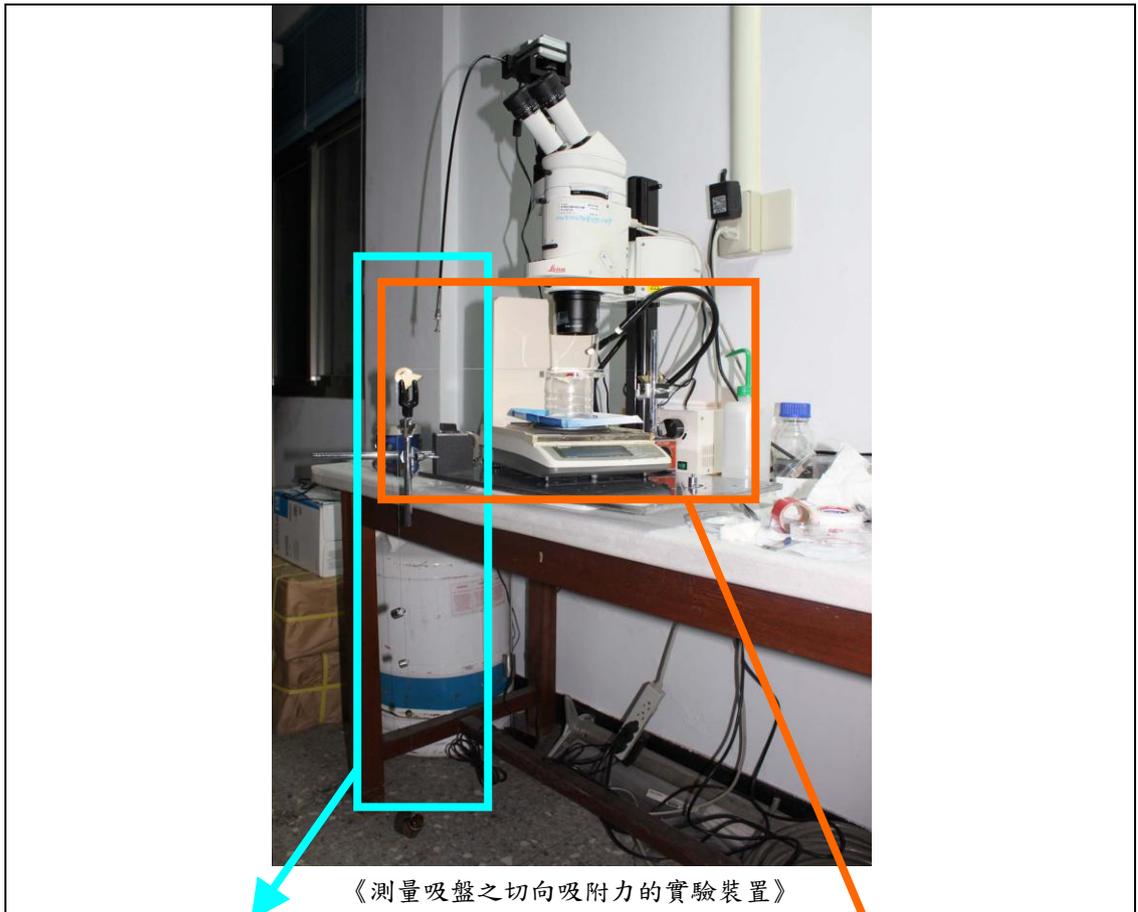
- (4) 取另一載玻片，以長條投影片黏附於解剖顯微鏡的接物鏡上，調整聚焦後，保持其水平。
- (5) 於微量電子秤兩側架置滑輪組，把釣魚線放置在滑輪上，一端黏附較大砝碼，另一端則以小水瓶和較小砝碼黏附使之平衡，並將釣魚線系統固定在載玻片上緣。
- (6) 調整接物鏡旋鈕，使黏附於解剖顯微鏡上的載玻片緩慢沒入水面下，歸零微量電子秤。
- (7) 將黏附於解剖顯微鏡上的載玻片下壓吸盤，至微量電子秤顯示一固定重量。
- (8) 等速率緩慢調高載玻片，至微量電子秤顯示吸盤與玻片面恰剝離前的重量即停止。
- (9) 以微量吸取器吸取每次一毫升的蒸餾水注入至小水瓶內，待小水瓶累積之重量恰可使吸盤與玻片面剝離時即停止。分別進行八個不同方向進行吸盤切向吸附力大小的測量。觀察注入的水量和施力方向並記錄與分析其結果。



《標有八個方向角的載玻片》



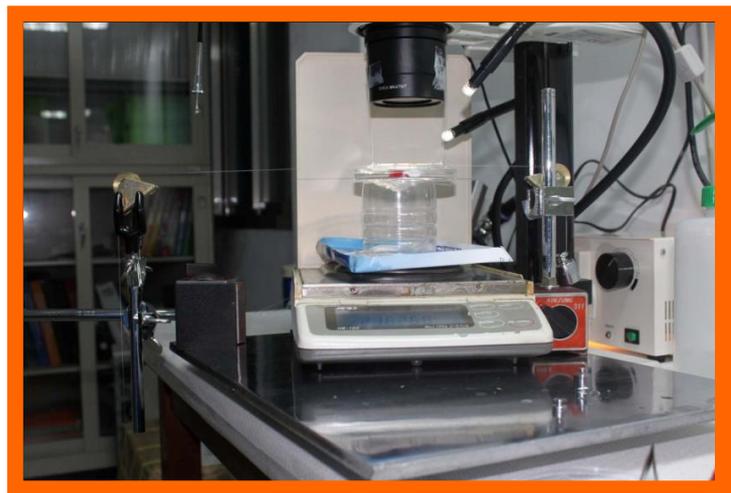
《微量吸取器與小水瓶》



《測量吸盤之切向吸附力的實驗裝置》



《裝置局部放大  
(小砝碼與小水瓶)》



《裝置局部放大(吸盤與微量天秤)》

### (三) 測量吸盤之切向吸附力與正向力之關係

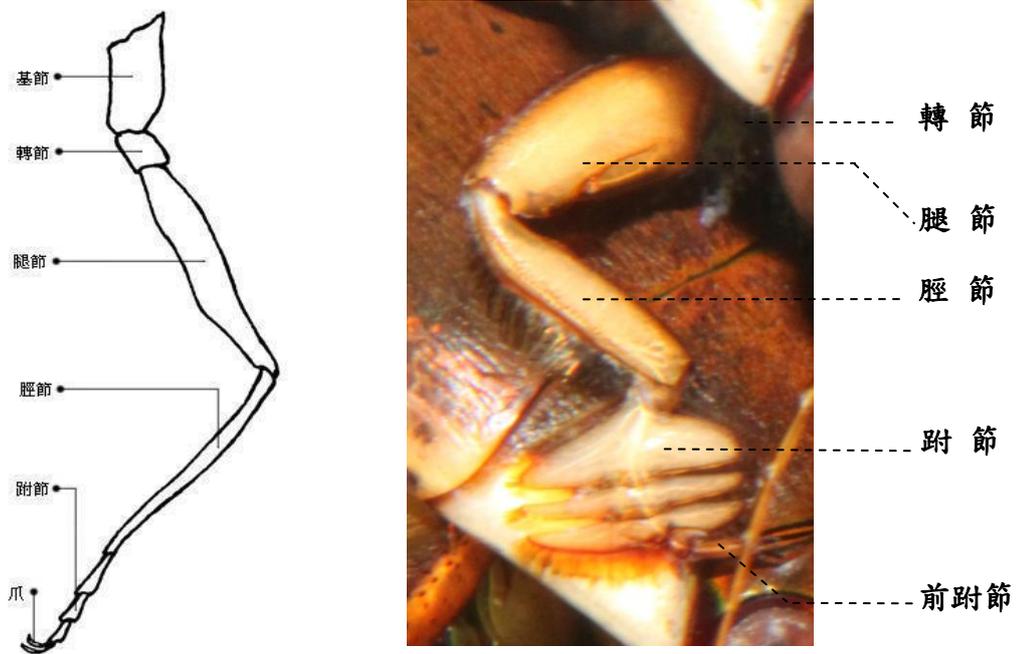
1. 實驗目的：施予吸盤不同的正向力，比較其和最大與最小切向吸附力之相關性。
2. 實驗過程：
  - (1) 先將抱握足吸附面朝上，以防水膠帶固定在載玻片上。
  - (2) 將含有抱握足的載玻片固定於培養皿正中央。
  - (3) 於培養皿內裝滿蒸餾水，並放置於微量電子秤上。
  - (4) 取另一載玻片，以長條投影片黏附於解剖顯微鏡的接物鏡上，調整聚焦後，保持其水平。
  - (5) 於微量電子秤兩側架置滑輪組，把釣魚線放置在滑輪上，一端黏附較大砝碼，另一端則以小水瓶和較小砝碼黏附使之平衡，並將釣魚線系統固定在載玻片上緣。調整接物鏡旋鈕，使黏附於解剖顯微鏡上的載玻片緩慢沒入水面下，歸零微量電子秤。
  - (6) 將黏附於解剖顯微鏡上的載玻片下壓吸盤，至微量電子秤顯示一固定重量。
  - (7) 等速率緩慢調高載玻片，至微量電子秤顯示吸盤與玻片面恰剝離前的重量即停止。再次以載玻片下壓吸盤，並逐一增加正向力。
  - (8) 以微量吸取器吸取每次一毫升的蒸餾水注入至小水瓶內，待小水瓶累積之重量恰可使吸盤與玻片面剝離時即停止。
  - (9) 用最大與最小切向力的方向測量吸盤的切向吸附力大小。觀察注入的水量和正向力的大小，並探討正向力與切向力之相關性。

## 肆、研究結果

### 甲、龍蝨吸盤形態學之研究

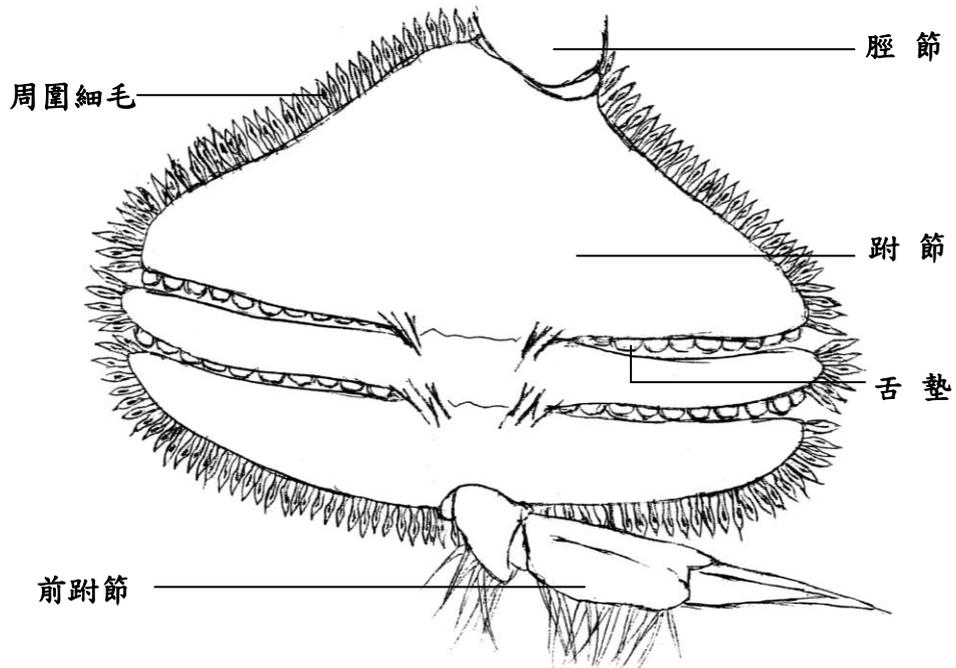
#### i. 吸盤外部形態

1. 橙斑大龍蝨的前足由基節（圖中未標識，位於轉節之另一端）、轉節、腿節、脛節、跗節、前跗節所構成，而吸盤則是由前三節跗節共同特化而成；經肉眼觀察得知，若雄龍蝨無使用吸盤時，其會將吸盤整個收納在脛節內側的凹陷處。



圖一 大部分的昆蟲前足（左圖）與龍蝨前足（右圖）的分節對照圖

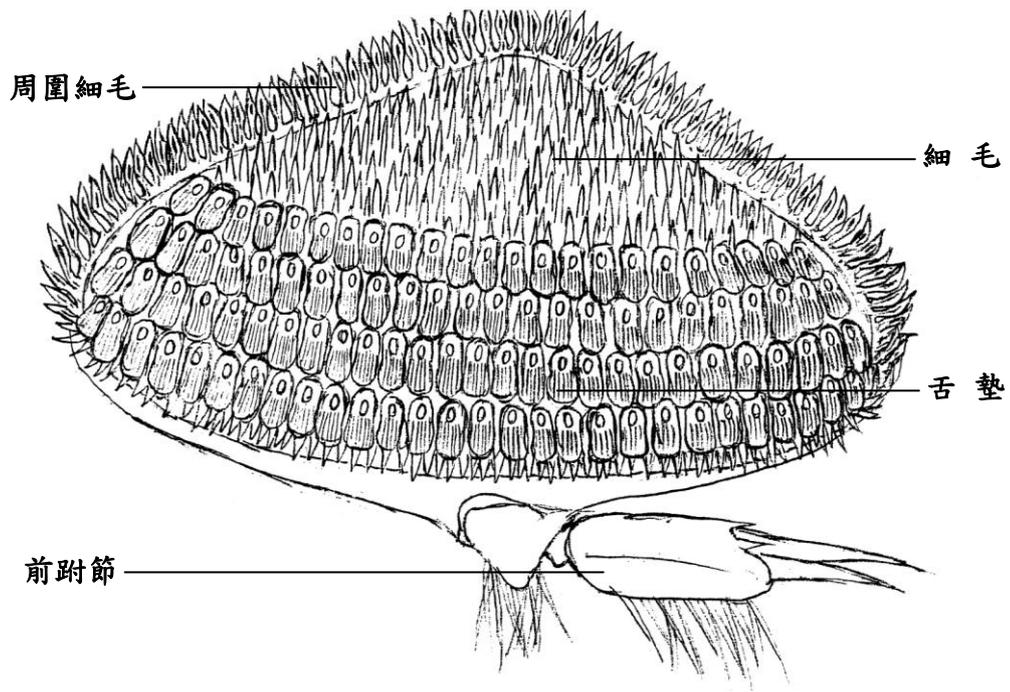
2. 取下前足，仔細觀察吸盤的外部構造後，進行生物繪圖：



圖二 吸盤背面的手繪圖

## ii. 吸盤內部結構

1. 以解剖顯微鏡觀察，吸盤構造共分為三小節，整個吸盤外圍具有一圈細毛構造，與脛節相接處的第一跗節具有細毛密佈的倒三角區和兩排舌墊狀的構造，而第二、三跗節則各具有一排舌墊狀構造。舌墊呈不對稱狀，其長軸方向垂直於跗節長軸的方向。舌墊底部具有支持柄，可供支持並附著於跗節上。
2. 仔細觀察吸盤的內部構造後，進行生物繪圖：



圖三 吸盤腹面的手繪圖



537 $\mu$  m



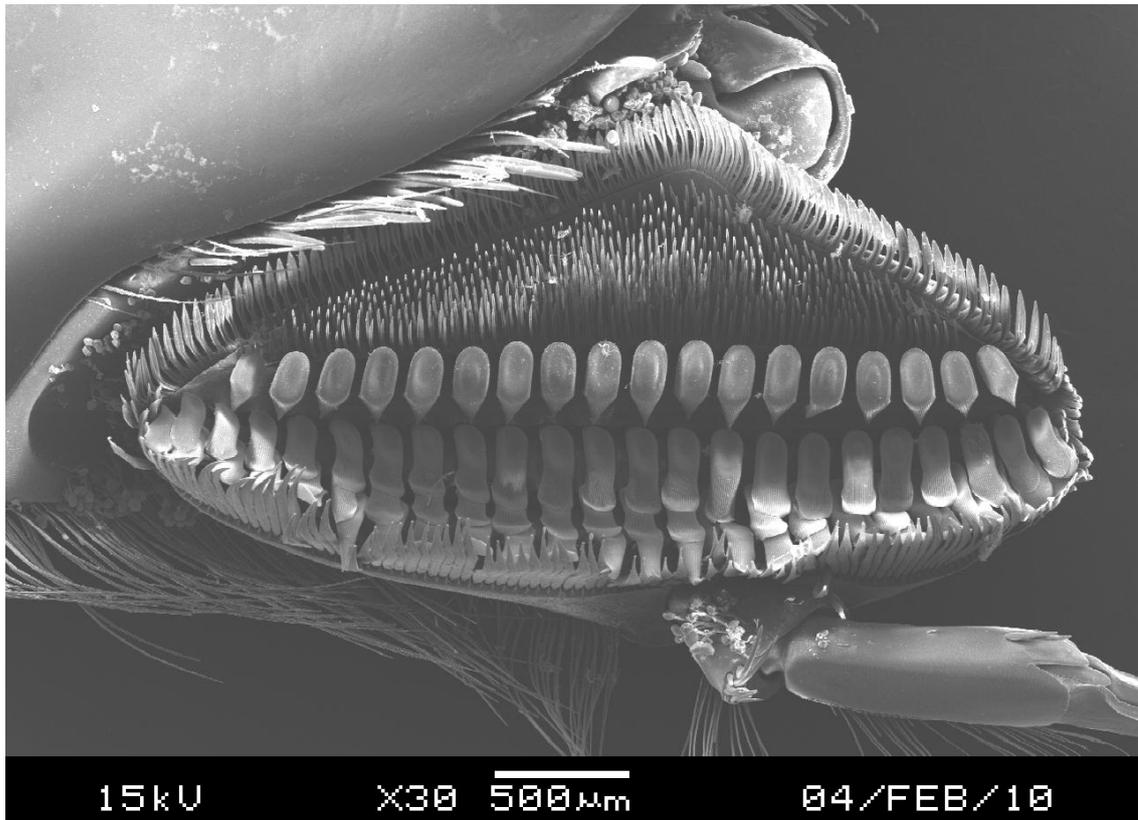
245 $\mu$  m

圖四 吸盤的內部構造

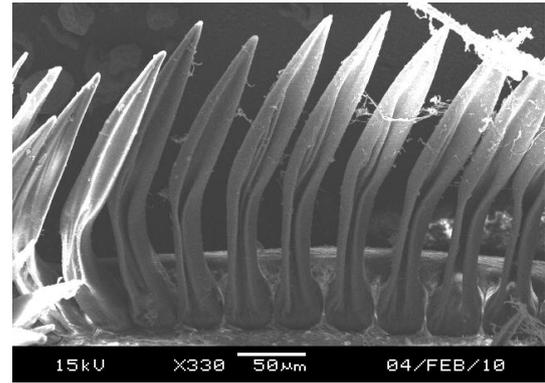
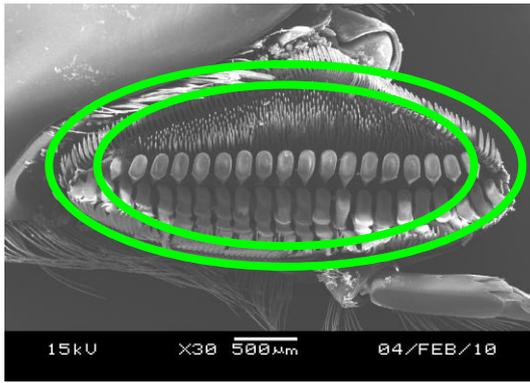
3. 以掃描式電子顯微鏡進一步觀察並量測吸盤的內部微結構：

- (1) 周圍細毛區：周長約為 7740~9160 $\mu$ m，平均由 203~210 個細毛組成，面積約為 1.12mm<sup>2</sup>，細毛單位結構為長條狀，基部直徑約 36.4 $\mu$ m，高約 236 $\mu$ m。

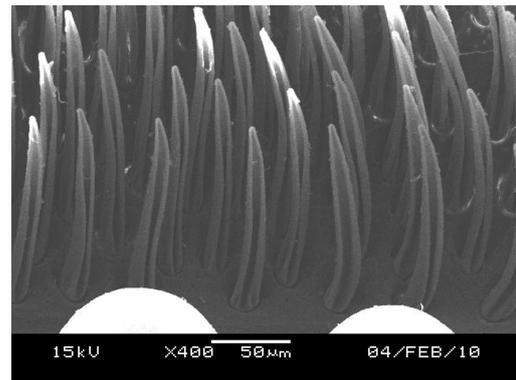
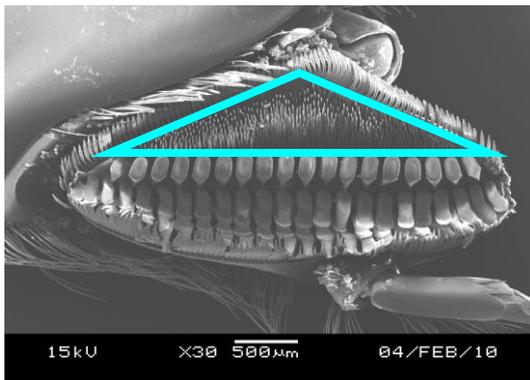
- (2) 細毛區：最大縱徑約為  $627\mu\text{m}$ ，細毛個數約為 430~450 個，面積約為  $0.94\text{mm}^2$ ，其單位結構與周圍細毛相似，基部直徑約  $18\mu\text{m}$ ，高約  $118\mu\text{m}$ ，但大小約僅為周圍細毛的一半。
- (3) 舌墊區：平均面積約  $2.21\text{mm}^2$ ，最大縱徑約  $853\mu\text{m}$ 、最大橫徑約  $3490\mu\text{m}$ 。單個完整的吸盤共具有四排舌墊，每排舌墊上的舌墊個數約為 18~22 個，單一舌墊的長度約  $306\mu\text{m}$ 、寬約  $121\mu\text{m}$ ，面積約  $0.034\text{mm}^2$ 。而每個舌墊微結構上均具有 17~20 條數量不等的條紋，條紋長約  $178\mu\text{m}$ 、寬約  $1.96\mu\text{m}$ 、相鄰兩條紋間距約為  $4.36\mu\text{m}$ ，條紋凸起於舌墊面，條紋高度約為  $7\text{nm}$ 。單一舌墊底部與直徑約  $50.5\mu\text{m}$  的支持柄相連，由於兩者相接處靠近舌墊面的基部，因此單一舌墊呈不對稱狀的結構。



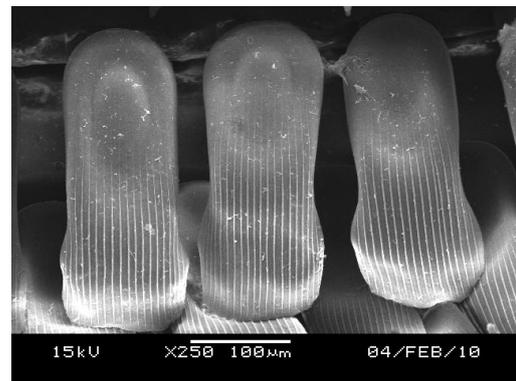
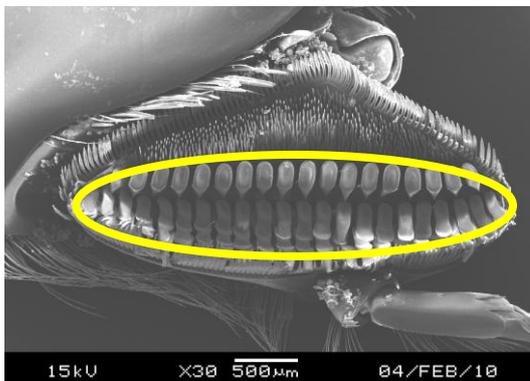
圖五 以電子顯微鏡觀察的吸盤微結構



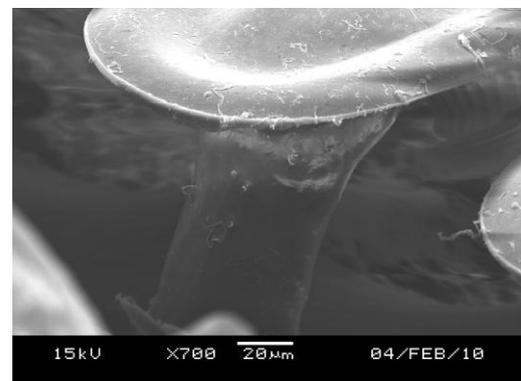
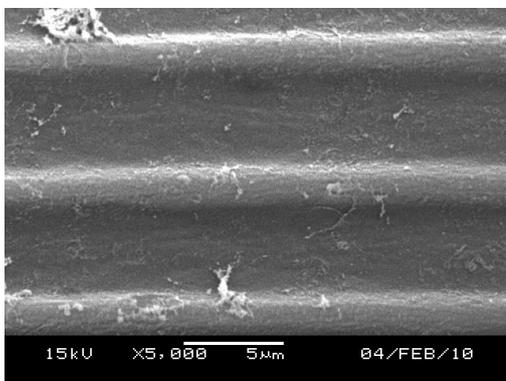
圖六 以電子顯微鏡觀察周圍細毛區（左圖）與周圍細毛（右圖）



圖七 以電子顯微鏡觀察細毛區與（左圖）細毛（右圖）



圖八 以電子顯微鏡觀察舌墊區（左圖）與舌墊（右圖）



圖九 以電子顯微鏡觀察舌墊的細微構造：舌墊條紋（左圖）與支持柄（右圖）

## 乙、龍虱吸盤功能形態學之研究

### i. 關節的形變

1. 吸盤在未吸附狀態時，跗節之間的關節並未形變，因而使得跗節的前三小節緊密排列，並朝向吸盤腹面內縮，此時舌墊區內的舌墊彼此之間將有部分會重疊。
2. 當吸盤吸附時，跗節之間的關節將可藉由形變而使跗節的前三小節撐開，此時舌墊區內的舌墊彼此之間將不會重疊，因而形成舌墊區的最大作用面積。
3. 由於在觀察吸盤吸附實驗時，我們發現周圍細毛區與細毛區並沒有緊貼在吸附物上，且無論是否有吸附，周圍細毛區與細毛區均沒有明顯的吸附面積變化，所以我們合理推測吸盤的吸附力應與舌墊較相關，於是本研究以舌墊為主軸，進行吸附機制與吸附力的探討。

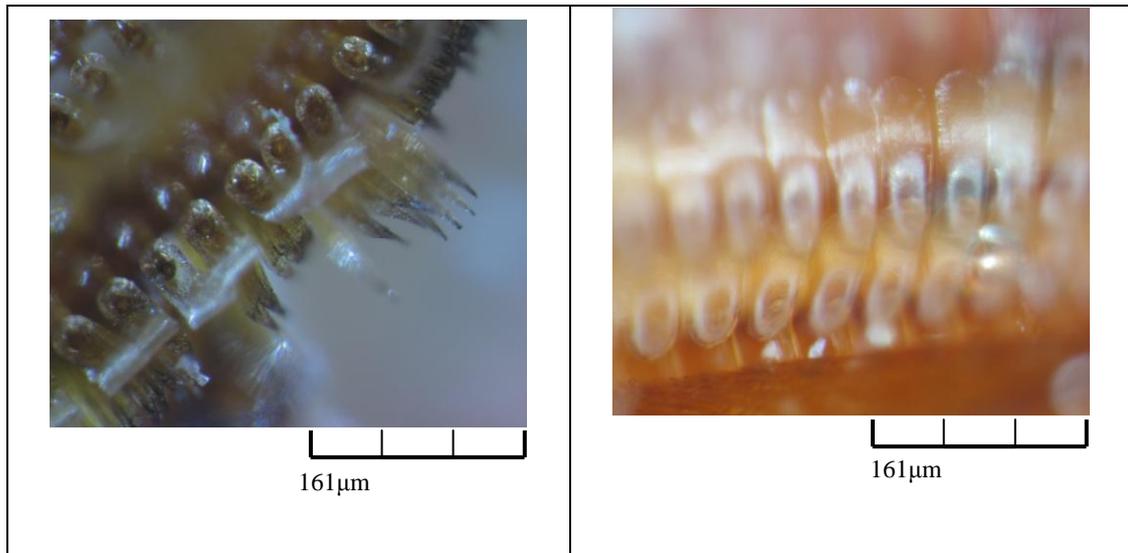


圖十 未吸附狀態（左圖）與吸附狀態（右圖）的關節形變

### ii. 舌墊微結構的形變

1. 當吸盤放置在乾燥環境下時，舌墊明顯呈現塌陷狀。

2. 然而，當吸盤放置在水中時，舌墊立即呈現豎立狀，舌墊面形成傾斜角度，舌墊面的末端翹起，舌墊面末端的垂直高度大於支持柄高度。
3. 由於雄龍蟲是水生昆蟲，平時吸盤也是在水裡面進行運作，所以在水中所觀察到的舌墊結構應較符合實際情況。

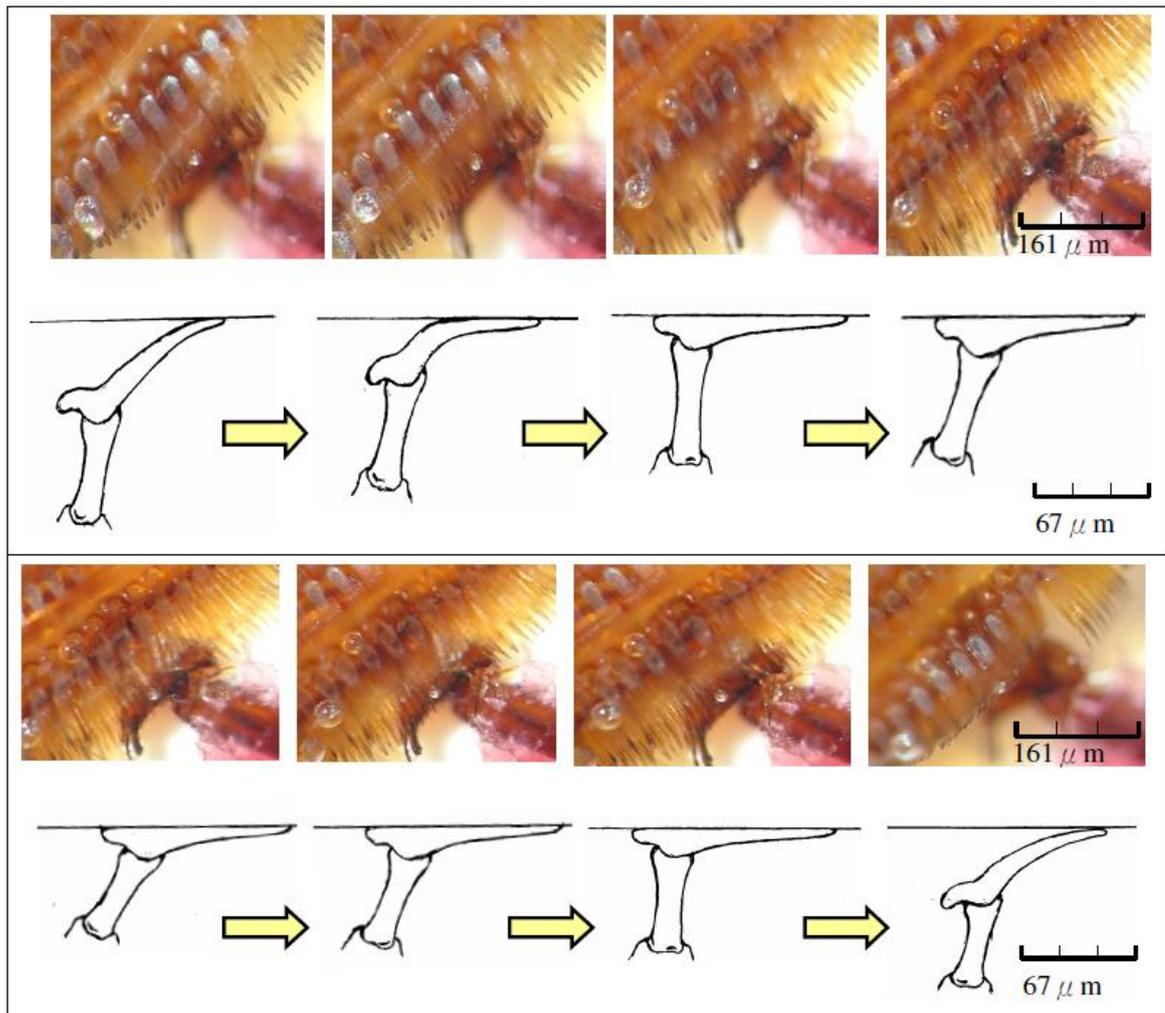


圖十一 乾燥環境（左圖）與水中環境（右圖）的舌墊形變

### iii. 吸附脫離過程的動態機制

1. 由於雄龍蟲的吸盤實際上是在水中進行運作，所以本實驗設計在水中環境進行，藉由調整吸附物與吸盤的相對位置探討吸附脫離機制，並以解剖顯微鏡實際觀察吸盤在水中的吸附與脫離過程。
2. 起初位在水中的舌墊將呈豎立狀，並且舌墊面形成傾斜角度，舌墊面的末端翹起。當吸盤開始進行吸附時，舌墊面末端會最先接觸到吸附物。接著，舌墊面由末端朝向基部支持柄端將漸漸貼服吸附物，直至整個舌墊面完全吸附在吸附物上。隨後，舌墊的支持柄會轉動並向前傾斜，此過程帶動舌墊面往前方移。待支持柄傾斜至一飽和角度時，舌墊面即難再向前移動，此時即為舌墊在吸附時所產生的最大形變。

3. 將吸附物開始脫離吸盤時，舌墊的支持柄轉動，傾斜角度也逐漸減少，帶動舌墊面發生後移，直至支持柄與舌墊面呈接近垂直的狀態時，舌墊面與吸附面將瞬間剝離，剝離後的舌墊構造具有明顯的彈性恢復能力，並恢復為原本未吸附時的舌墊狀態。



圖十二 龍蝨吸盤的吸附與脫離機制示意圖

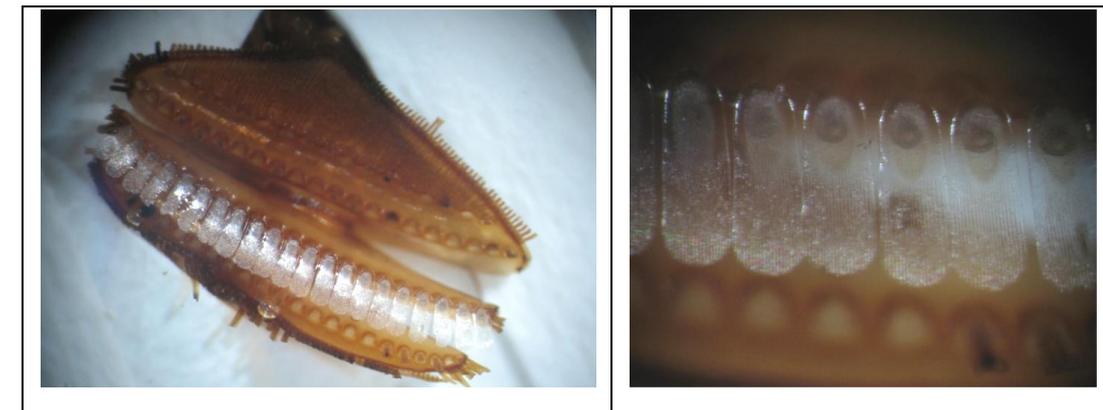
### 丙、龍蝨吸盤生物力學之研究

#### i. 測量吸盤之法向吸附力

1. 藉由自製的法向力測量裝置，我們以面積大小區分大、小吸盤，測得

大吸盤的平均法向吸附力是  $21.3 \pm 1.8$  mN，而小吸盤的平均法向吸附力為  $24.0 \pm 2.5$  mN。由實驗結果得知大、小吸盤在法向吸附力的差異並不大。

2. 為了證實吸盤的吸附力是否與舌墊較為相關，所以我們再次以單排舌墊為材料，進行法向吸附力的量測。在實驗中，為了使單排舌墊更接近真實的狀態，所以我們是以拔除其餘非相關舌墊的方法，維持整個吸盤跗節關節的正常運作，然後同樣以自製的法向力測量裝置進行量測。由測量結果得知，小吸盤單排舌墊的平均法向吸附力為  $4.8 \pm 0.3$  mN，吸附力約為單個小吸盤的四分之一，此結果恰與單個吸盤具有四排舌墊的構造相呼應。此結果再度印證舌墊區為吸盤的主要吸附區。



圖十三 單排舌墊（左圖）與單排舌墊放大圖（右圖）

## ii. 測量吸盤之切向吸附力

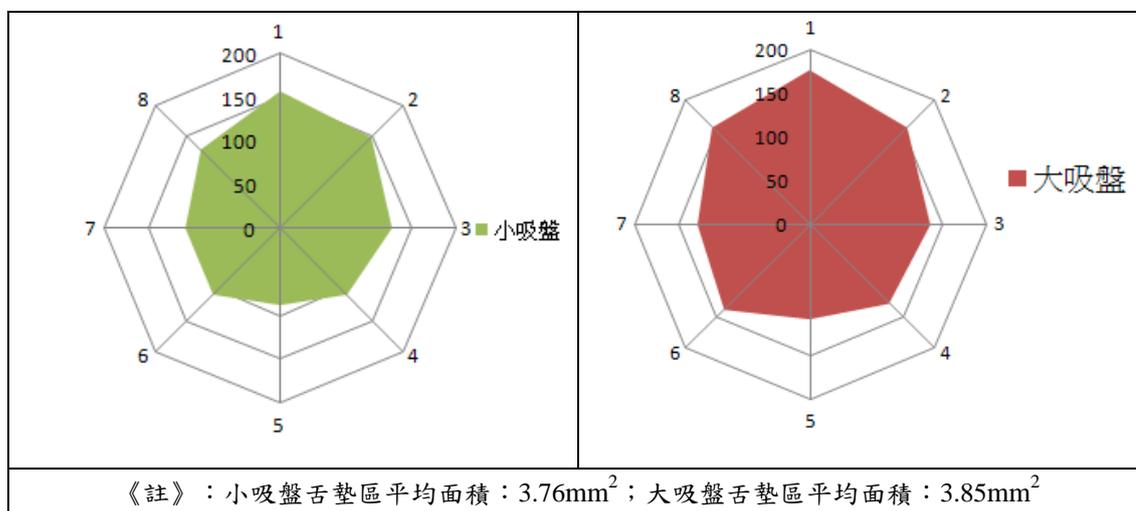
1. 藉由自製的切向力測量裝置，我們以面積大小區分大、小吸盤，並分別量測大、小吸盤在不同作用方向的切向吸附力。
2. 由結果得知，不論大、小吸盤，最大切向吸附力皆出現於垂直跗節向內夾零度角的方向《圖十四，代號 1》；而最小切向吸附力皆出現於垂直跗節向外的方向《圖十四，代號 5》。

3. 若比較大、小吸盤的切向吸附力，可以得知大吸盤在每個方向的切向吸附力，均大於小吸盤與其相對應方向的切向吸附力，而吸盤的面積與舌墊的數量有正相關的趨勢，所以舌墊區域面積的增加，也會使得切向吸附力也隨之增大《圖十六，左圖》。
4. 我們以大小吸盤的最大切向吸附力定為標準，把其它不同方向的切向吸附力依照此標準作成比例圖，由結果中顯示大吸盤各個方向的切向吸附力與小吸盤各個方向的切向吸附力的比例十分相近。所以，不論吸盤的面積大小，其吸附功能皆能維持一定的特性《圖十六，右圖》。

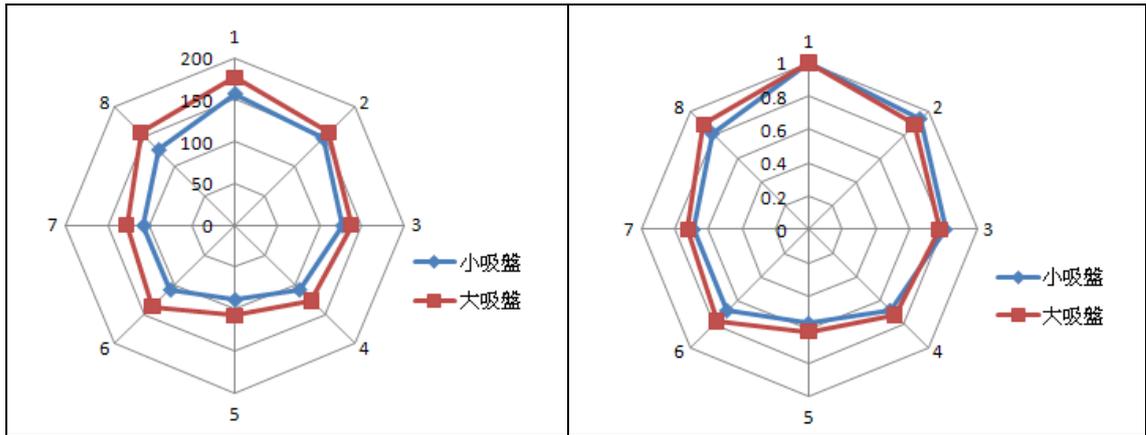
代號	示意圖	文字敘述	大吸盤/小吸盤
代號 1		垂直跗節朝向體軸，夾零度角的方向	176.4/156.8 mN
代號 2		垂直跗節朝向體軸，順時針夾四十五度角的方向	156.8/147.0 mN
代號 3		垂直跗節朝向體軸，順時針夾九十度角的方向	137.2/127.4 mN
代號 4		垂直跗節朝向體軸，順時針夾一百三十五度角的方向	127.4/107.8 mN
代號 5		垂直跗節遠離體軸，夾零度角的方向	107.8/88.2 mN
代號 6		垂直跗節遠離體軸，順時針夾四十五度角的方向	137.2/107.8 mN
代號 7		垂直跗節遠離體軸，順時針夾九十度角的方向	127.4/107.8 mN
代號 8		垂直跗節遠離體軸，順時針夾一百三十五度角的方向	156.8/127.4 mN

《註》：示意圖中下方是載玻片，上方是吸盤，而箭頭方向即是吸盤移動的方向

圖十四 吸盤在不同方向的切向吸附力大小



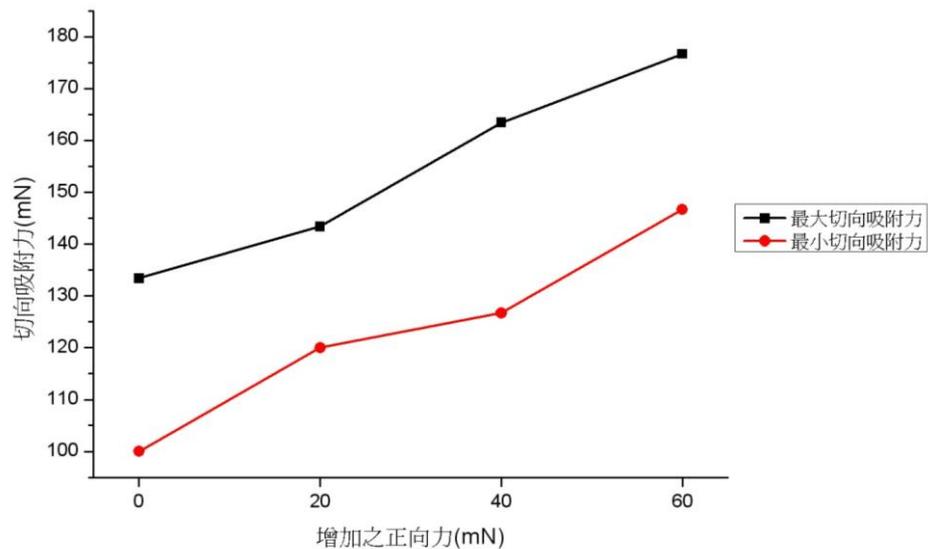
圖十五 大、小吸盤在各個方向切向吸附力的雷達圖



圖十六 大、小吸盤在各個方向切向吸附力的疊合雷達圖

### iii. 測量吸盤之切向吸附力與正向力之關係

1. 若施予吸盤正向力，並逐一增加正向力的大小，可以測得最大切向力與最小切向力皆有遞增的趨勢，顯示出正向力的大小與切向力呈現明顯的正相關。
2. 最大切向力與最小切向力兩者增加的幅度相當接近，再次顯示出了吸盤功能構造具有一定特性，是十分穩定規律的機能構造，適用於仿生學的應用材料。



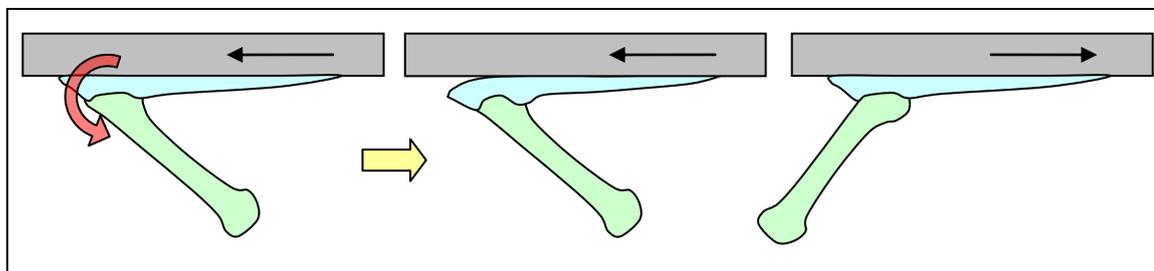
圖十七 最大、最小切向吸附力與正向力之相關性

## 伍、討論

- 一、早在達爾文提出性擇理論時就已經以龍蝨吸盤為例。由於在交配過程中雌龍蝨往往會不願意去配合雄龍蝨完成交配行為，因此雄龍蝨勢必要演化出這種的構造來避免雌龍蝨的脫逃，雌龍蝨則在背板上演化出刻痕，使背板形成不平整表面以降低吸盤吸附力。這又使雄龍蝨演化出更多樣化的吸盤來克服。
- 二、龍蝨吸盤可以分成兩類，一類種是圓形吸盤，另外一類種則是掌形吸盤。達爾文所觀察的吸盤是屬於圓形吸盤，而我們所研究的橙斑大龍蝨則具有掌形吸盤。掌形吸盤和圓形吸盤最大的差異就是對稱與否。圓形吸盤呈現輻射對稱，它的支柱位於中央，因此往哪一個方向施力皆無差別，就如市面上的吸盤一樣，壓下去就不太容易拔除；而掌形吸盤則具有不對稱性，支持柄位於舌墊其中一端的下方，因此就會產生不同方向的切向力。
- 三、由實驗結果可知，大、小吸盤的法向力差異不大，而吸盤的切向力又大於法向力，因此便可以推測切向力為主要吸附力作用力；另外，吸盤的最大切向力為垂直跗節朝向體軸的方向，而最小切向力為垂直跗節遠離體軸的方向，由於最大切向力的方向與雌龍蝨游泳足推進的方向相反，所以可以阻止雌龍蝨向前衝而脫逃，該方向符合實際上吸盤吸附與脫離方向的需求，因此龍蝨吸盤是一個相當有效率的構造。



四、由切向吸附力的實驗結果得知吸盤本身具有不同方向的切向吸附力，且在先前吸盤內部微結構的觀察實驗中，我們得知舌墊本身即具有不對稱的特性，意喻著不同方向的切向吸附力來源極有可能是因為舌墊為不對稱的構造。下圖為最大與最小切向力的示意圖，我們推測舌墊不對稱構造對吸附力大小的影響如下：由於支持柄位於舌墊的左端，當被吸附物往左移動時，支持柄受力會以逆時針方向旋轉，導致舌墊從左端被剝離，接著逐漸剝離下整個舌墊，然而若被吸附物往右移動時，支持柄受力會以順時針方向旋轉，由於在支持柄右邊的舌墊較長，舌墊右端不易被剝離，所以這個方向的切向吸附力較大。



最小切向力方向（易於脫落）

左端開始剝離的情況

最大切向力方向（易於吸附）

《施力方向示意圖》

五、若比較大、小吸盤的切向吸附力，可以得知大吸盤在每個方向的切向吸附力，均大於小吸盤與其相對應方向的切向吸附力，而吸盤的面積與舌墊的數量有正相關的趨勢，所以舌墊區域面積的增加，也會使得切向吸附力也隨之增大。本實驗的結果再次證明吸盤的主要吸附力來自於舌墊的假設。

六、舌墊區的薄膜上有細微條紋刻痕，其從舌墊與支持柄相接的凹陷處延伸至舌墊末端，我們推測其功能可能是要將舌墊近支持柄相接的凹陷處的水排開，增加其與接觸面的吸附力。

七、舌墊區靠支持柄的區域呈現下凹，推測這區域能產生真空吸力，其餘部分可能藉由凡得瓦爾力吸附物體表面。

八、龍蝨吸盤中舌墊區在水中會呈豎立狀，加上其十分柔軟，能自動配合欲吸附

表面的高低起伏，因此龍蝨吸盤可以適用於不規則的平面。

九、龍蝨可控制跗節前三小節的展開與內縮，當吸附時，跗節前三小節處於展開狀態，推測若龍蝨將三小節內縮，第一小節靠近細毛區的舌墊處於易脫離方向，第二小節內縮，垂直遠離接觸面，可有助於脫離。

十、跗節前三小節於吸附時才展開，而平時為內縮狀態，由於支持柄相對於舌墊來的細小很多，所以舌墊可交疊，這樣的結構除了可以減少舌墊不使用時所佔用的空間，也可減少平時舌墊裸露的面積，降低舌墊受損的機率。

十一、細毛區對於法向吸附無明顯助益，但從其形態觀察得知這些細毛朝龍蝨身體方向微彎，這樣的結構對於粗糙表面能增加切向吸附力（機械互鎖作用），而雌龍蝨的背甲上亦有粗糙的結構。細毛區的另一個功能，推測是可用於清潔欲吸附的表面，由於這些細毛位於第一小節，對於最大切向吸附力方向，這些細毛位於最前端，可刮除欲吸附表面的污染物，以利舌墊吸附。

十二、一般市面上具有吸附力的物品皆有缺點，如一般膠帶一旦沾黏上塵污，吸附力就會下降，亦無法在水中使用。3M 無痕掛勾雖然解決了以往黏膠脫離不易的問題，但使用次數有所限制。而一般吸盤僅適用於平整表面，更不易移除，工業上抽氣產生吸附力的吸盤也須作功，氣壓控制也較複雜。相較之下，龍蝨吸盤相當具有優勢。

十三、龍蝨吸盤可以乾溼兩用，又可以產生不同方向的切向力使其易吸附也易脫離，也不會因為黏灰塵而失去吸附力，更因為其上有許多舌墊狀構造，即使沒有全部舌墊狀構造都吸住，但只要有部分吸住就有吸附力的產生，不像一般吸盤只要沒有吸住，就會脫落。我們曾推算出 1×1 公分的正方形面積大小就可以吸住約五百毫升的水，相當於九十公斤重的人只需兩個吸盤手套即可爬牆，吸附力相當的驚人。龍蝨吸盤具有以上各種特性，因此在仿生學上的應用極具潛力。

## 陸、結論

- 一、雄橙斑大龍蝨的抱握足上具有吸盤，推測吸盤吸附力主要來自於舌墊構造。
- 二、舌墊呈不對稱狀，底部與支持柄相連，配合支持柄的運作有助於舌墊面吸附與容易脫離。
- 三、吸盤的切向吸附力大於法向吸附力，且具有方向性，實驗中所測得的最大切向力方向與龍蝨實際交配吸附時的吸盤角度吻合。
- 四、施予吸盤的正向力愈大，所得到的切向力愈大，推測雄龍蝨可能在交配吸附時，可能以增加施力的方式阻止雌龍蝨向前逃脫。
- 五、龍蝨吸盤的材質、不對稱性構造的吸附特性，適合應用於仿生學研究。

## 柒、應用與未來展望

在學術方面，除了可藉由剪去部分舌墊面後，再次測量吸附力，以得知舌墊面條紋的功能之外，亦可移除吸盤上的周圍細毛區與細毛區，以探討這些區域在龍蝨交配吸附時的相關功能。另外，也希望可以找到舌墊支持柄傾斜角度與切向力之相關性，更期望能推導吸盤形成吸附力的主要物理性成因。在生物方面，期望能利用精密的量測工具，測量龍蝨在實際交配吸附過程中，吸盤所產生的吸附力大小，並探討吸盤與雌龍蝨背甲構造對於龍蝨的系統演化的影響。在仿生應用方面，期望能測量吸盤在乾燥環境、不同介質中的吸附力，並檢測舌墊的材質與其他吸盤相關特性等。藉由相關研究，期望能從仿生的角度，開發出乾濕兩用、易吸附易脫離、不怕灰塵，且可重複使用的新型吸盤。

## 捌、參考資料

- 一、周群、何斌、岳繼光 (2007)。仿生柔性表面的結構設計及吸附力試驗分析。  
力學季刊，28，400- 404。
- 二、林益在 (2005)。紅邊大龍蝨之產卵行為與各蟲期的發育 (鞘翅目：龍蝨科)。  
國立台灣大學昆蟲學研究所碩士論文，未出版，台北市。
- 三、楊志賢、戴振東、王衛英 (2009)。東方龍蝨\_雄性\_抱握足形態學及吸附特性。  
複合材料學報，26，213–218。
- 四、趙維福 (2006)。龍蝨吸盤的仿生學特性及其真空吸盤組的仿真模擬研究。吉  
林大學碩士研究論文，未出版，吉林省，中國。
- 五、Bergsten, J. (2005). *Taxonomy, phylogeny, and secondary sexual character evolution of diving beetles, focusing on the genus Acilius*. Unpublished doctoral dissertation, Umeå University, Sweden.
- 六、Bergsten, J. and Miller, K. B. (2007). Phylogeny of diving beetles reveals a coevolutionary arms race between the sexes. PLoS ONE, 2(6), e522.
- 七、Darwin, C. (1871). *Descent of man*. Berkely Library, New York.

## 評語

1. 科展作品的主題活潑有趣，研究期間工作的辛勞更值得嘉許。
2. 作者對科展作品的內容說明清楚流暢，且有輔助教具幫忙說明與介紹。
3. 爾後如將本研究成果，實際運用在仿生學上的利用，將可大大提升研究成果的份量與重要性。