

# 中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 物理與天文學科

第三名

(鄉土)教材獎

051803

探討鼓甲外型對下潛運動的影響

學校名稱：臺中市立臺中第一高級中等學校

作者： 高二 徐士展	指導老師： 張建鴻 梁敏芳
---------------	---------------------

關鍵詞：鼓甲、下潛、3D 模型

## 摘要

豉甲為棲息於水面的昆蟲，中、後足為扁平槳狀的游泳足，體長約 17mm。在水面上快游速度達 1.08 m/s，潛游時速度約 0.57 m/s；豉甲潛水平均速度約 0.83 m/s，下潛僅需 41 ms。以 Ansys 模擬豉甲潛水，發現會在背部隆起與腹側形成壓力差，產生向下的作用力以利其下潛。製作隆起高度比例不同的模型，發現在破水時，1 與 1.5 倍的法向作用力較小，入水後 1 倍的作用力矩較大，使其更快旋轉向下潛。施力的角度越小，破水時法向作用力也越小，但不影響作用力矩的大小，模型的形狀、運動狀態才是影響作用力矩的主要因素。下潛時蟲體先具一定大小的初速度，有助於下潛，破水時速度越快總作用力越大，但作用力矩正比初速的 2.1 次方，速度越快使其更快旋轉，令用於下潛的有效分量提升。

## 壹、研究動機

梅氏圓豉甲是一種在水面運動很靈敏的昆蟲，具有兩對複眼，可同時觀察水面上與水面下的環境變動，能迅速的迴轉、衝刺、下潛等變換運動狀態，以因應牠特殊的生態區位。在探討豉甲蟲奇特的運動模式後，其中優異的下潛能力最吸引我的注意，我認為這可能與牠獨特的外型有關係，於是展開以下的研究，藉由建置各式模型，探討外型與下潛運動的關聯，並經由軟體模擬下潛時模型所受的流場變化，期望找到物體型態與下潛能力的關聯，可運用於改良潛艇或水面機器人等的設計。

## 貳、實驗目的

- 一、觀察並測量豉甲的游泳運動
- 二、以流場分析軟體探討豉甲的下潛運動
- 三、探討外型的高度比例對下潛運動的影響
- 四、探討不同角度對下潛運動的影響
- 五、探討初始速度對下潛運動的影響

## 參、研究設備

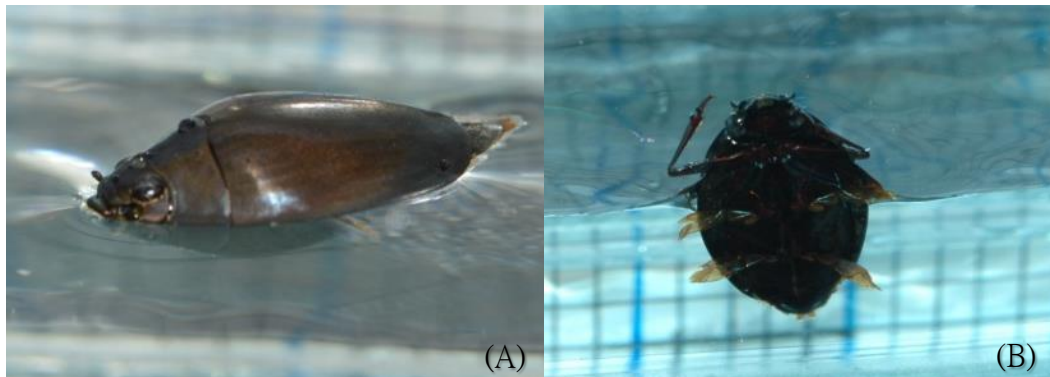
### 一、研究器材

豉甲(30 隻)、飼養物(麵包蟲)、高速攝影機(Sony RX 10 II)、水族箱、游標尺、螺旋測微器、顯微鏡、掃描式電子顯微鏡 (Hitachi TW3000, Japan)、游泳速度測量箱(30x5x10cm)、方格紙、電腦、Tracker 軟體、Ansys15.0 軟體(3D 繪圖軟體 ICEM CFD 及流場分析軟體 Fluent)、SPSS 25.0 版、3D 列印機(CR-5 Pro)、3D 列印線材 (PLA)、0 號釣魚線、滑輪、砝碼、軸承、螺絲、套筒、電鑽、細鑽頭(寬 1.5mm)、六角起子、白鐵墊片

### 二、實驗物種介紹

臺灣目前已紀錄的有三屬六種豉甲科昆蟲(吳怡欣等, 2002)，我觀察的種類是梅氏圓豉甲(*Dineutus mellyi*)，屬於鞘翅目(*Coleoptera*) 豉甲科(*Gyrinidae*) 圓豉甲屬(*Dineutus*)，下文的梅氏圓豉甲皆以豉甲來稱呼。豉甲體長  $17.96 \pm 1.43$  mm，為生活在塘沼或河川流域水面的甲蟲，因外型似豆豉而稱為豉甲，於水面上下各具一對複眼，可以同時觀察水面上下的情況。平時在水面上浮游，屬於半水生性昆蟲，遇到驚嚇會不停的轉圈圈，或潛入水中；幼蟲為水生，棲息在水生植物之間，化蛹前會爬到岸邊，在土中化蛹。成蟲與幼蟲皆為肉食性，主要以水中的小魚、蝦、水蟲等水中小動物為食。

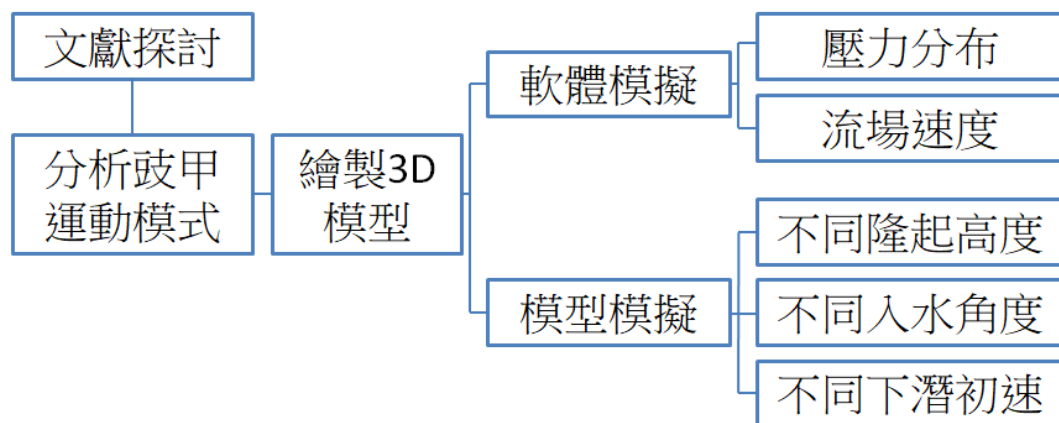
豉甲外型分為頭胸腹三部分，在胸腹部交界有明顯凸起，前足細長，前方有爪，可用於捕食、交配與協助轉彎，中足及後足為薄片槳狀，厚度約 0.2 mm，為特化的游泳足(圖一 B)。腹部尾端有兩根很短的呼吸管，在水中潛水時，常可看到氣泡連在尾端。



圖一：(A)豉甲外型(B)六足型態不同

目前對於豉甲的研究並不多，在國外多研究豉甲屬(*Gyrinus*)的昆蟲，體型較梅氏圓豉甲(圓豉甲屬)小，主要探討牠在水面上運動的物理分析，Fish(2003)研究豉甲(*Gyrinus*)在水面的旋轉運動，豉甲可利用兩側之壓力差提供向心力，完成半徑極小的圓周運動。Voise(2010)發現豉甲(*Gyrinus*)會利用三種不同的足部運動模式控制其游泳速度，以調控流體阻力及波阻力之大小。在國內僅有一篇關於梅氏圓豉甲的飼養方法的研究(吳怡欣等，2002)。我的實驗是以外型的觀點切入，探討豉甲游泳運動的方法及下潛迅速的原因。

## 肆、研究方法



### 一、觀察並測量豉甲的游泳運動

#### (一)豉甲的飼養

我在南投縣魚池鄉蓮華池(23°54'49"N, 120°52'43"E)附近的池塘(圖二)分批採集共三十隻豉甲並飼養於水族缸，平日以麵包蟲每兩日餵食一次。



圖二：採集豉甲的水池

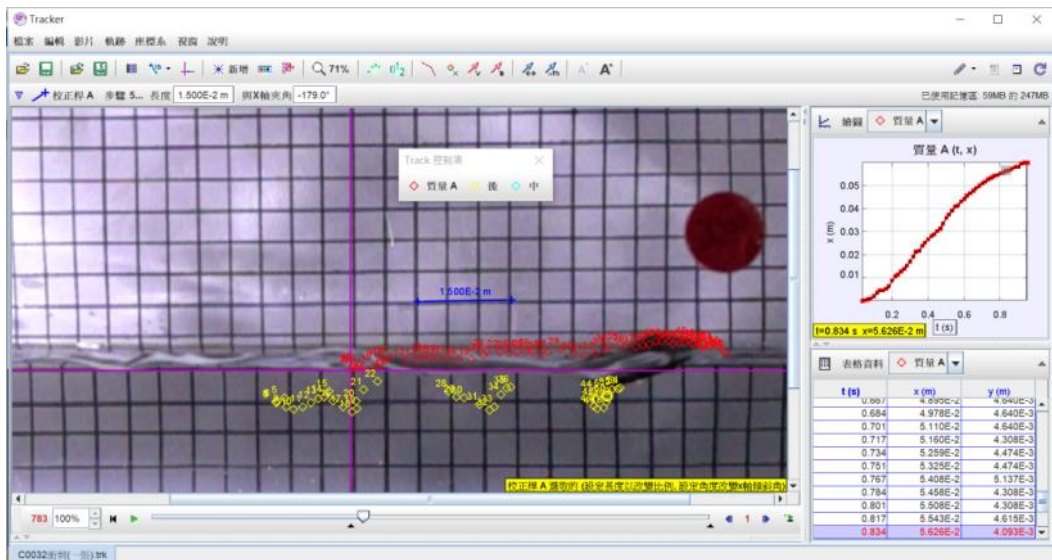
### (二) 測量豉甲的游泳運動

我將豉甲放置於狹長游泳觀察箱，使用 Sony RX 10 II 相機，以高速攝影模式從側面拍攝豉甲各種運動的影片(圖三)。我將豉甲的游泳運動形式分為快游(水面上快速游動)、潛水以及潛游(水面下快速游動)，共拍攝 10 隻豉甲，每隻皆拍攝三種運動方式。

影片拍攝完畢後，我使用 Tracker 軟體進行軌跡分析，先將影片匯入，再設定座標軸之原點於運動起點以及比例尺的長度，每一幀(1/960 秒)做一個軌跡的記號，我共追蹤了豉甲的頭部軌跡及足部運動(圖四)，再將數據用 Excel 計算速度。



圖三：拍攝豉甲運動的實驗裝置



圖四：使用 Tracker 分析的狀況

## 二、以流場分析軟體探討豉甲的下潛運動

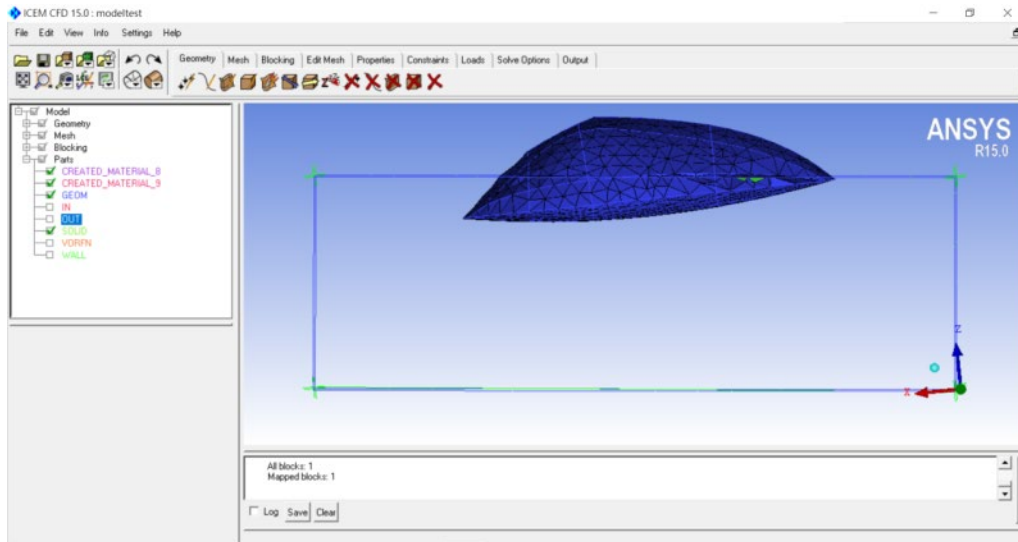
我觀察到豉甲可迅速潛入水下，並且在豉甲背部前方有明顯隆起(圖五)，我推測這種外型有助於其在潛水的表現，因此以軟體模擬來驗證。



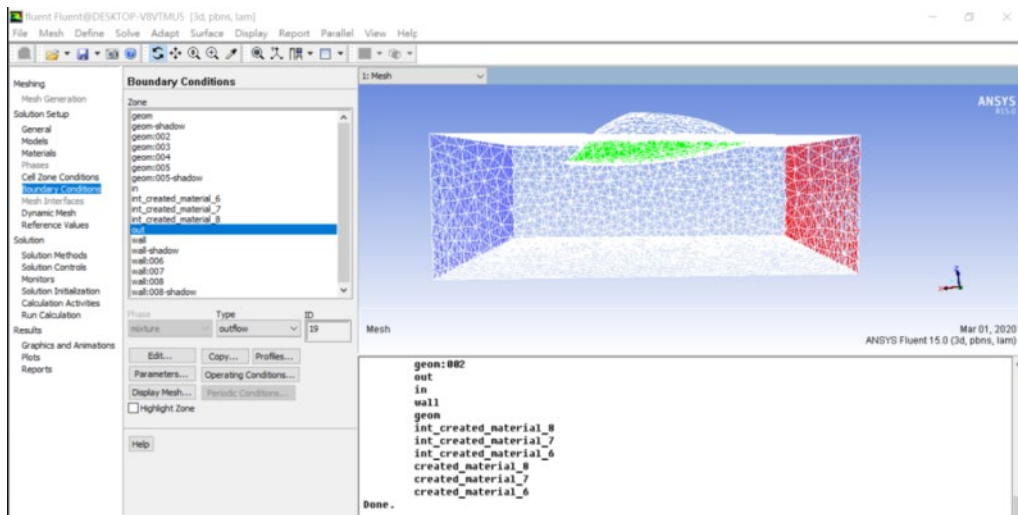
圖五：豉甲的背部具有凸起，背、腹兩側不對稱

我以 Tracker 測量潛水過程中豉甲頭尾連線與水平面夾角的變化，接著以 ICEM CFD 製作豉甲的 3D 模型並生成網格檔(圖六)，網格檔指的是將 3D 模型劃分為許多小單元，用於後續的有限元計算。再依據豉甲下潛角度的變化以 Fluent 模擬豉甲於潛水受壓的情形(圖七)，水流初速設為 1m/s，我在分析時是設定豉甲不動水流動，依據相對運動，此情況等效於水體靜止豉甲往前下潛。經 500 次迭代計算後，以模擬豉甲潛入水中後，所受的壓力圖及其附近水流的流場圖。





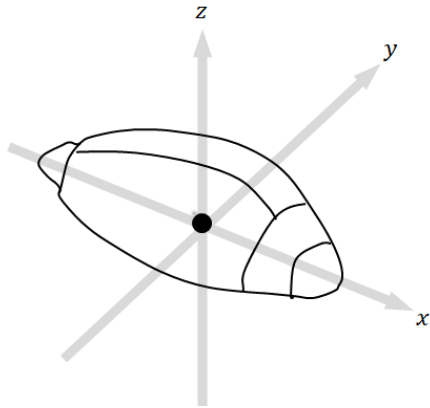
圖六：以 ICEM CFD 製作潛水過程的 3D 模型並生成網格檔



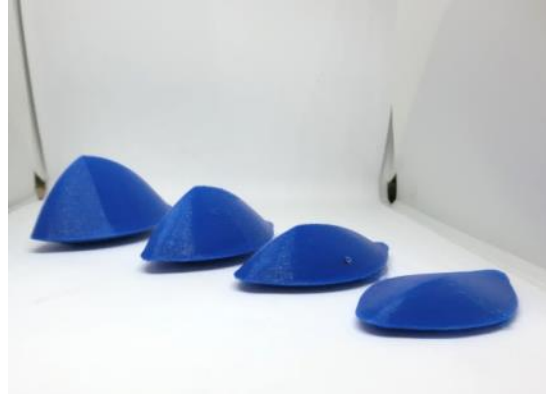
圖七：以 Fluent 模擬潛水時的情形

### 三、探討外型的高度比例對下潛運動的影響

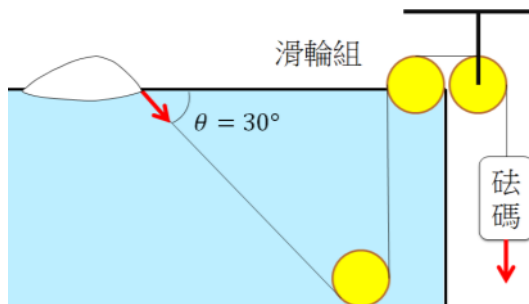
我使用 ICEM CFD 製作鼓甲蟲的 3D 模型，以此為基準，延 z 軸方向(圖八)伸縮背部隆起高度至 0.5、1.5、2 倍 (圖九)。將這四種模型以 3D 列印機印出實體模型，於側面標記質心再於頭端連上 0 號釣魚線，以滑輪組及砝碼來模擬鼓甲下潛的情況(圖十)。將水注入直至水深 20 公分，調整模型至滑輪的距離使釣魚線與水面夾角為  $30^\circ$ ，接著使用一臺高速攝影機拍攝模型的下潛過程，另一臺同時拍攝砝碼的下墜過程，最後將影片以 Tracker 追蹤軌跡並分析。每個比例的模型要下潛至水面下所需的最小砝碼重不同，因此分析一模型所使用的砝碼重是從使該模型下潛的最小砝碼重(以 10 克為單位)向上每次遞增 10 克，一個模型共取五個重量，每個重量重複三次。



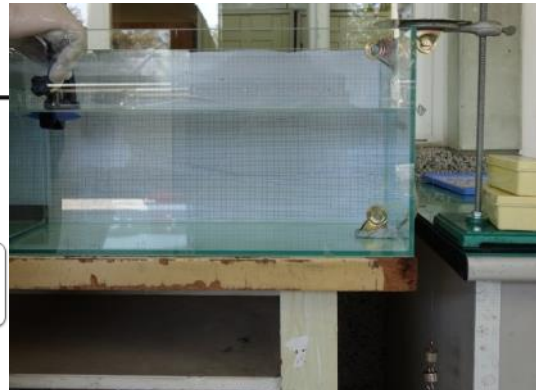
圖九：莢甲模型的三軸方向



圖八：不同高度比例的莢甲模型  
(由左至右依序為 2、1.5、1、0.5 倍)



圖十：以模型模擬莢甲下潛的實驗裝置



(一)繩張力

由牛頓第二運動定律，砝碼的下墜過程滿足

$$m_1 \vec{a}_1 = \vec{T} + m_1 \vec{g}$$

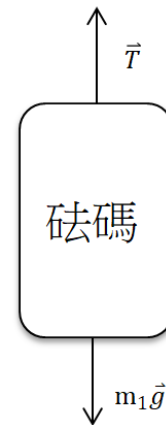
$$|\vec{T}| = |m_1(\vec{g} - \vec{a}_1)|$$

$m_1$ =砝碼質量

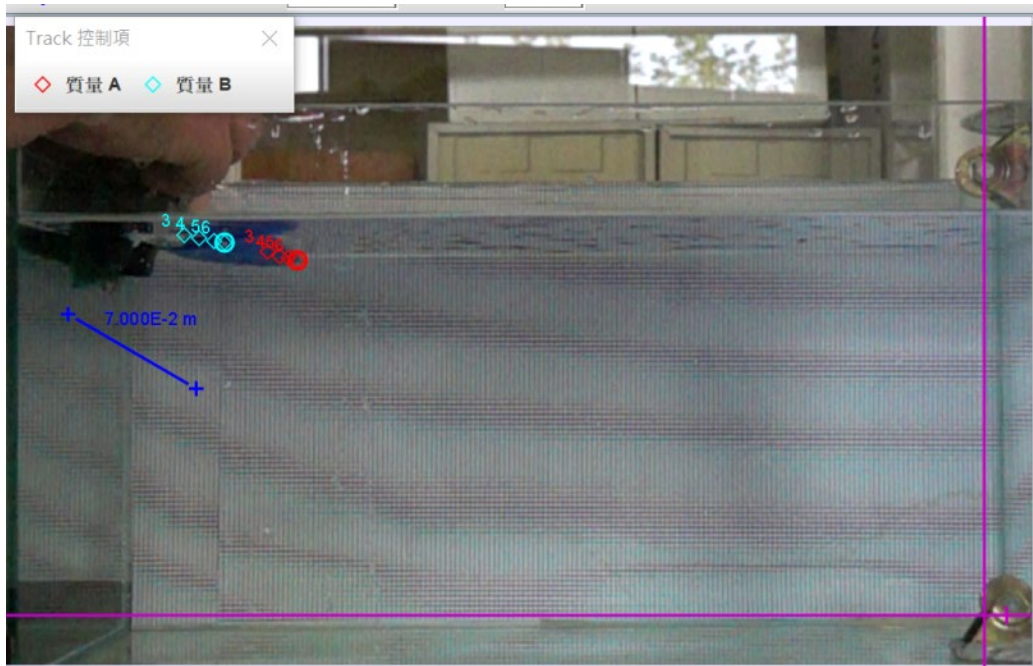
$\vec{a}_1$ =砝碼下墜的加速度(每 10 幀(1/96s)測量一次)

$\vec{T}$ =繩張力

$\vec{g}$ =地表附近的重力加速度



分析模型下潛時，將坐標軸原點設定於釣魚線與滑輪交接處，追蹤模型的頭端及質心軌跡(圖十一)，每 1/96 秒測量質心速度( $\vec{v}_c$ )及質心加速度( $\vec{a}_c$ )。頭端的座標除以點到原點距離可求出繩張力的方向向量，但此時方向為原點指向頭部，故要加上負號才代表張力的方向。



圖十一：以 Tracker 分析模型下潛的情形(質量 A 為頭部軌跡、質量 B 為質心軌跡、粉色十字架為平面座標的原點)

## (二)模型受力情形

因運動過程中模型水面下的體積不易估計，且在入水時模型周圍的流體運動情況較為複雜，故將浮力、升力與阻力合併為一項總作用力  $\vec{f}$ ，模型上下兩側的流速不同，進而形成壓力差，造成與運動方向垂直的升力；同時，也會造成與運動方向平行的阻力，此阻力包括水的黏滯阻力和壓力阻力。在本實驗中，因雷諾數較大，故不考慮黏滯阻力產生的影響(雷諾數高時，黏滯力的影響遠不及壓力)。將  $\vec{a}_c$  分別投影至  $\vec{v}_c$  及  $\vec{v}_c'$ ，求出切線加速度及法向加速度，另將  $m_2\vec{g}$ 、 $\vec{T}$  分別投影至  $\vec{v}_c$  及  $\vec{v}_c'$ ，可由關係式求  $\vec{f}$  的切向分量( $\vec{f}_t$ )及法向分量( $\vec{f}_n$ )。我測量突破水面瞬間的法向作用力與繩張力的關係，並使用 SPSS 做單因子變異數分析(ANOVA) 比較不同高度比例對下潛時作用力的影響。

模型受力滿足

$$m_2\vec{a}_c = m_2\vec{g} + \vec{T} + \vec{f}$$

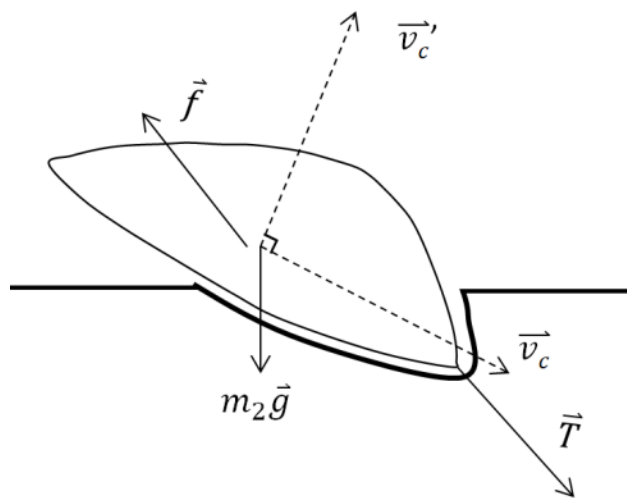
$m_2$ =模型質量

$\vec{v}_c$ =模型的質心速度

$\vec{v}_c'$ =質心速度的法向量  
(以方向向右上為正)

$\vec{a}_c$ =模型的質心加速度

$\vec{f}$ =水體造成的諸多作用力  
之總和

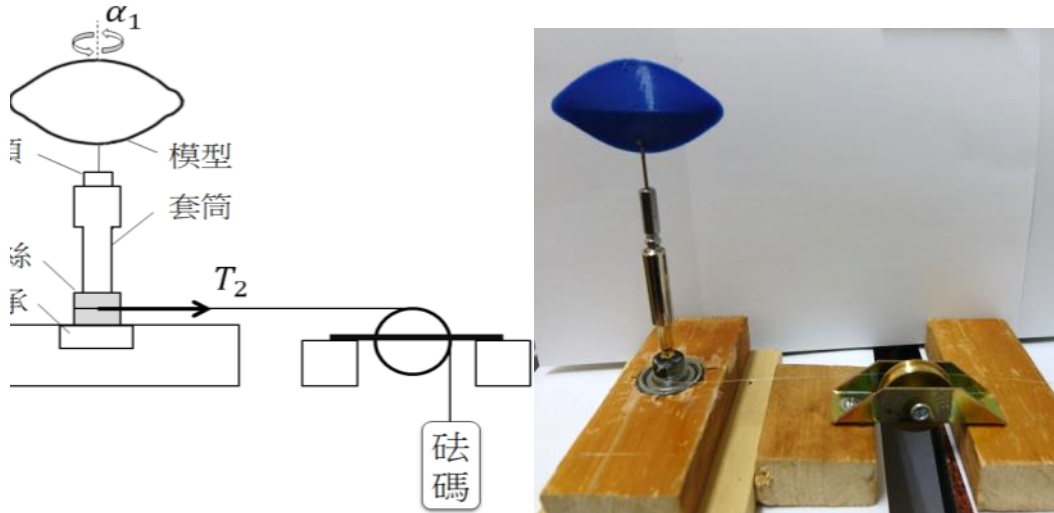




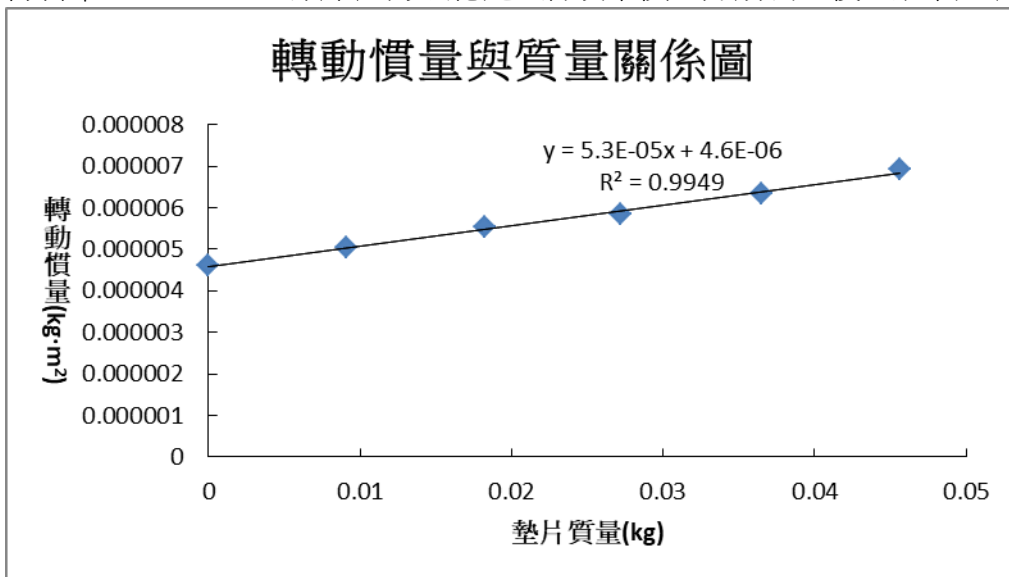
### (三)模型的轉動慣量

經水平儀校正後，我使用軸承、螺絲及套筒為轉軸，以細鑽頭由側面鑽入模型的質心，利用滑輪及砝碼測量模型過質心 y 軸的轉動慣量(圖十二)。

我將細繩固定並纏繞在螺絲上，利用砝碼下墜對其施力，繩張力  $T_2 = |m_1(\vec{g} - \vec{a}_1)|$  其中  $m_1$ =砝碼質量， $\vec{a}_1$ =砝碼的加速度。轉動力矩  $\vec{\tau} = \vec{r}_1 \times \vec{T}_2$  其中  $\vec{r}_1$  是力臂，即螺絲半徑(7mm)。又  $\vec{\tau} = I \times \vec{\alpha}_1$  其中  $I$ =轉動慣量，包含套筒、螺絲、鑽頭及模型， $\vec{\alpha}_1$ =模型的角加速度。測量砝碼的加速度及模型的角加速度後可由  $I = \frac{r_1 m_1 (g - a_1)}{\alpha_1}$  求出整體的轉動慣量，將模型取下後再重複步驟可求出剩餘物品的轉動慣量，兩者相減後即為模型的轉動慣量  $I_m$ 。



首先我利用六角起子與白鐵墊片測試此方法的準確性，白鐵墊片可視為均質中空圓柱，其轉動慣量  $I = \frac{1}{2}(r_o^2 + r_i^2)m$  其中  $r_o$ =外半徑=1cm， $r_i$ =內半徑=0.3cm。經實驗測得  $I = 5.3 \times 10^{-5}m + 4.6 \times 10^{-6}$  ( $R^2 = 0.9949$ ) (圖十三)常數項為螺絲、套筒及六角起子的轉動慣量，而將墊片的半徑帶入轉動慣量公式得斜率= $5.4 \times 10^{-5}$ ，顯示此方法穩定。將肢甲模型分別測量後，結果如表一。



表一：莖甲模型規格

	長度(cm)	高度(cm)	質量(g)	y 軸的轉動慣量 (kg· m <sup>2</sup> )
0.5 倍高	7	0.91	4.77	6.29×10 <sup>-7</sup>
1 倍高	7	1.82	7.63	7.89×10 <sup>-7</sup>
1.5 倍高	7	2.73	10.18	1.20×10 <sup>-6</sup>
2 倍高	7	3.64	12.41	2.15×10 <sup>-6</sup>

(四)模型所受力矩情形

莖甲在下潛時，除了向下運動，蟲身也會由原本的水平旋轉至與水面夾約 50° 角。在同樣沿蟲身 x 軸方向前進的情況下，旋轉至較大角度改變了運動方向，使作用於向下潛的有效分量提升，因此我也討論了模型所受力矩情形。由(二)的受力分析，重力作用於質心，故僅需考慮張力  $\vec{T}$  及水體總作用力  $\vec{f}$  對旋轉的影響，我使用 Tracker 可求出質心指向頭端的力臂向量  $\vec{r}_2$  及模型沿 y 軸旋轉的角加速度  $\vec{\alpha}_2$ ，可由關係式求出總作用力  $\vec{f}$  造成的力矩  $\vec{\tau}_f$ 。我測量開始下潛至模型完全入水的水體總作用力矩與繩張力的關係，並使用 SPSS 做單因子變異數分析(ANOVA)比較不同高度比例對  $\vec{\tau}_f$  的影響。

$$\vec{\tau}_T = \vec{r}_2 \times \vec{T}$$

模型所受力矩滿足

$$I_m \vec{\alpha}_2 = \vec{\tau}_T + \vec{\tau}_f$$

$\vec{\tau}_T$ =張力形成的力矩

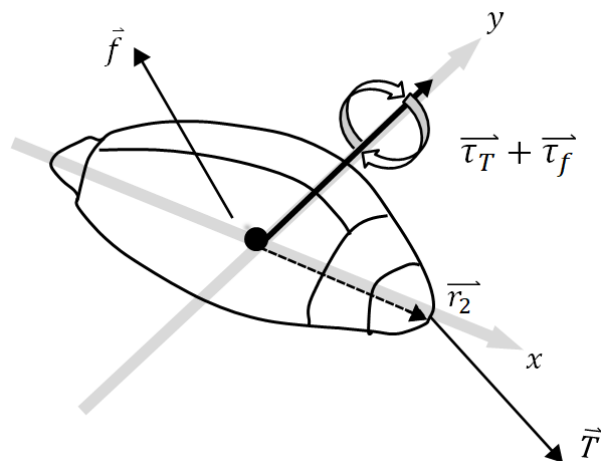
$\vec{r}_2$ =力臂向量

$I_m$ =模型過質心 y 軸的轉動慣量

$\vec{\alpha}_2$ =模型沿 y 軸旋轉的角加速度

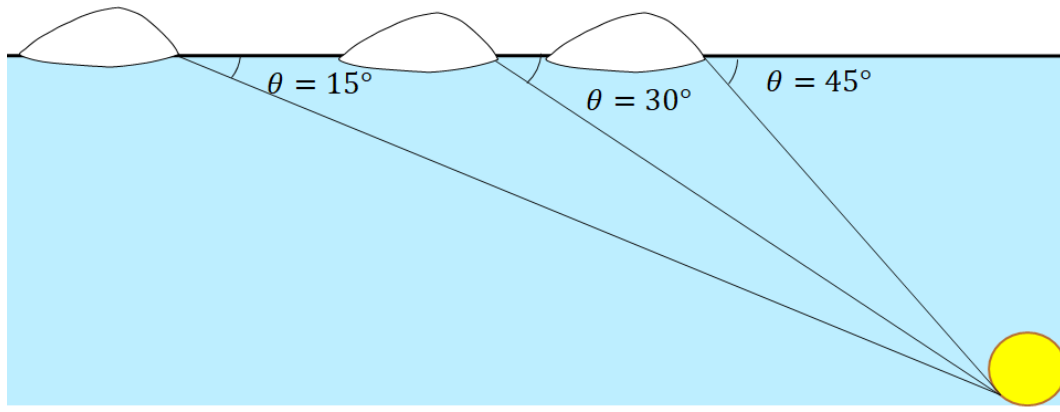
$\vec{\tau}_f$ =總作用力形成的力矩

(力矩以 y 軸正向為正)



四、探討不同角度對下潛運動的影響

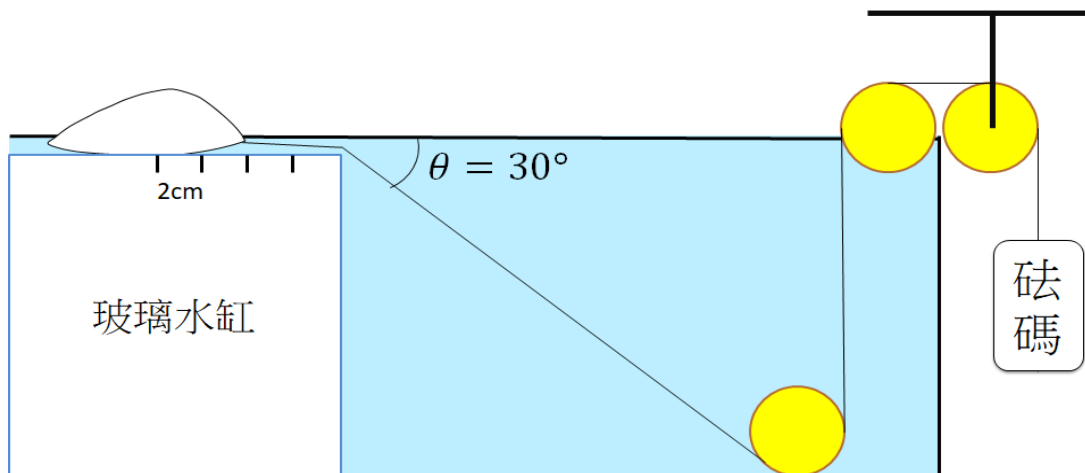
我使用 1 倍高的莖甲模型，調整起始狀態時模型至滑輪的距離以控制釣魚線與水面的夾角，依序分析 15°、30° 及 45° 的下潛情形(圖十四)，每個角度取五個重量的砝碼分析，每個重量重複三次，我測量突破水面瞬間的法向作用力與繩張力的關係，以及開始下潛至模型完全入水的作用力矩與繩張力的關係，並使用 SPSS 做單因子變異數分析(ANOVA) 比較不同角度對下潛運動的影響。



圖十四：不同施力角度的示意圖

### 五、探討初始速度對下潛運動的影響

豉甲蟲在下潛前，會先在水面上快游一小段才潛入水中，因此我設計以下實驗探討速度對下潛運動的影響。我以 1 倍高的豉甲模型及 70 克砝碼，利用玻璃水缸作為加速的跑道(圖十五)，透過調整加速段的距離來改變下潛時的初速。加速段的距離每次遞增 2cm，含無水道總共五個距離，每個距離分析三次，脫離加速段時會確保在下潛時不撞到水缸，以入水角度  $30^\circ$  下潛。由於模型幾乎不與玻璃水缸摩擦且摩擦係數小，故忽略與水缸的摩擦力。我測量突破水面瞬間的法向作用力與速度的關係，以及開始下潛至模型完全入水的作用力矩與速度的關係。



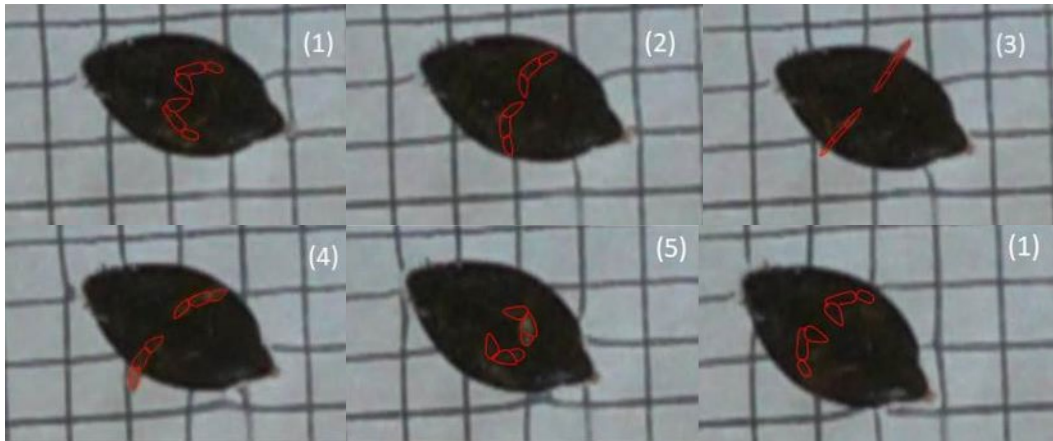
圖十五：不同下潛初速的實驗裝置示意圖

## 伍、研究結果

### 一、觀察並測量豉甲的游泳運動

#### (一)豉甲的足部運動

豉甲是使用中足及後足進行水中的運動，於是我以高速攝影機由下往上拍攝來觀察足部運動。以中足為例，我將運動過程分為五個步驟，依次循環。結果如圖十六，由圖(1)至(2)足部保持水平伸展，以減少阻力，由圖(2)至(3)足部旋轉為與水面垂直，以推進更多水量，圖(3)至(5)為加速期，足部向後划動並由垂直轉回水平，最後保持水平收回，完成一次足部運動的循環，後足也是以相同的方式運動。



圖十六：肢甲足部運動的分解步驟

## (二) 肢甲的游泳方式

### 1. 快游：

我將快游定義為游泳時身體與水平面的角度達到 20~25 度左右，此時肢甲主要使用後足划動，中足協助(圖十七)。



圖十七：肢甲快游的運動模式

### 2. 潛游：

肢甲潛游定義為蟲體在水面下，接近水平線的直線運動方式，大部分是使用中後足交互划動(圖十八)。

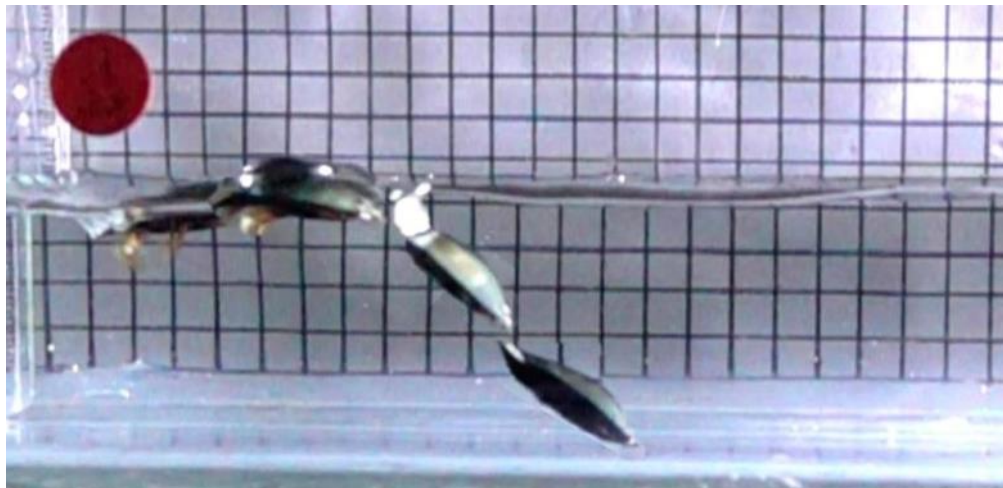


圖十八：肢甲潛游的運動模式



### 3.潛水：

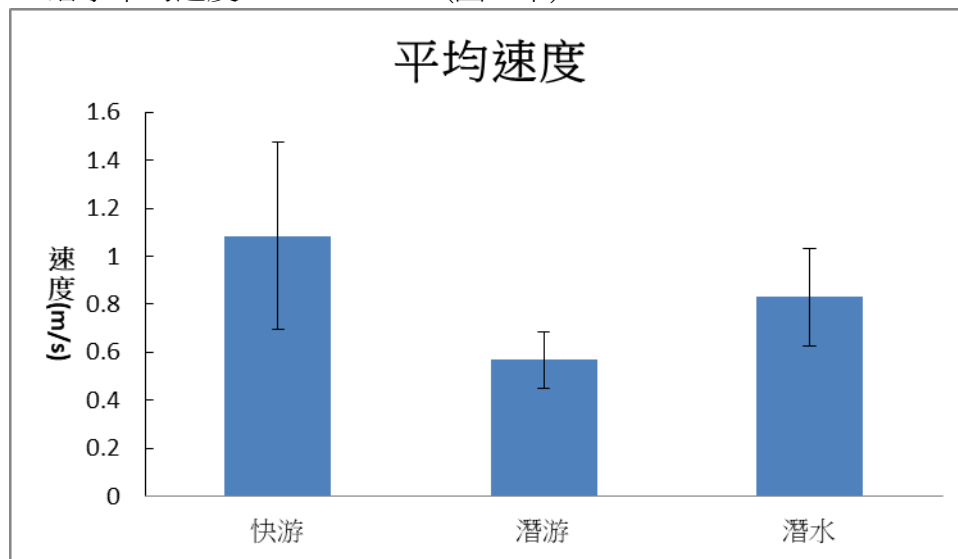
豉甲潛水定義為身體轉動至全身潛入水中的過程。經由觀察我發現豉甲潛水時大多會先在水面游一段距離，再快速的潛下去，先將頭部朝下，使用中足和後足進行划動，有時也會使用前足平衡(圖十九)，下潛時間約為  $41.14 \pm 1.807$  ms。



圖十九：豉甲潛水的運動模式

### (三)速度計算

我以高速攝影機拍攝豉甲的運動影片，以 Tracker 進行分析後，再用 Excel 算出速度，發現豉甲快游平均速度  $1.08 \pm 0.389$  m/s，潛游平均速度  $0.57 \pm 0.117$  m/s，潛水平均速度  $0.83 \pm 0.204$  m/s (圖二十)。



圖二十：豉甲三種運動模式的平均速度統計圖 (N=10)

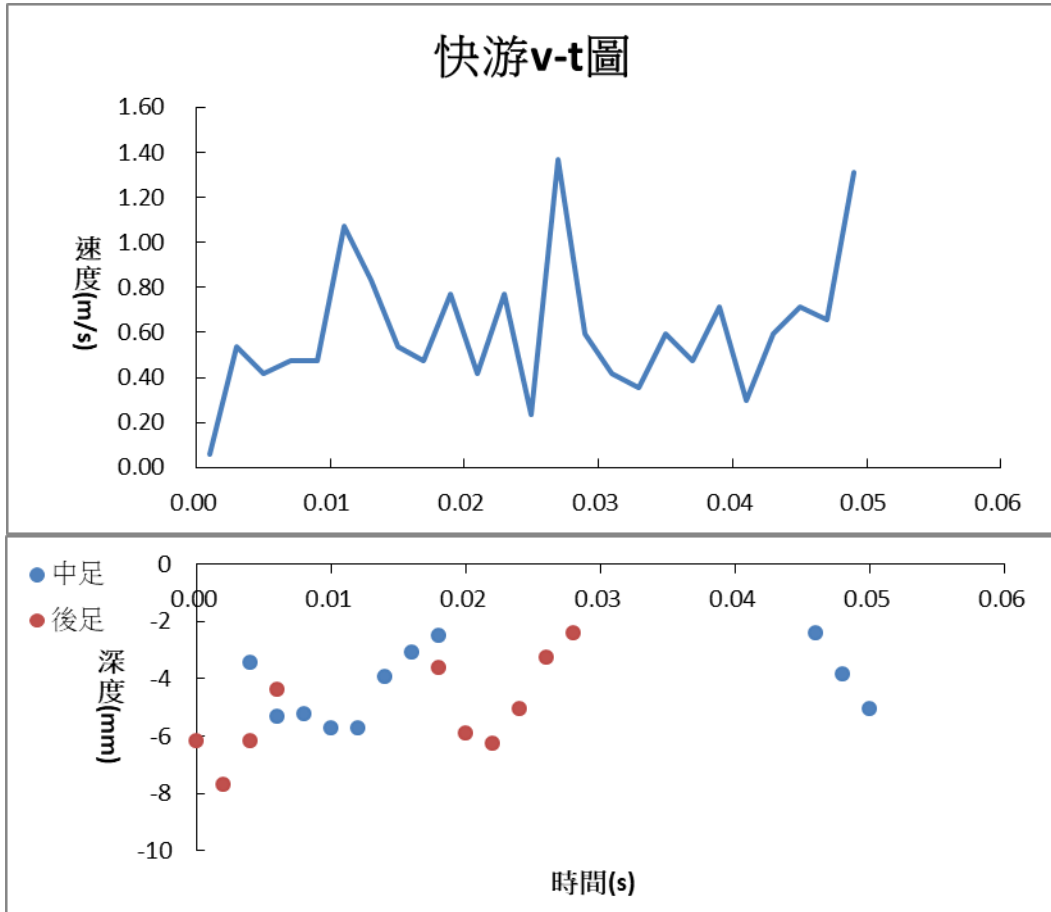
### (四)快游、潛游與足部運動的關聯

我以 Tracker 分析豉甲的三種運動時，也追蹤了足部的軌跡，但潛水過程因受限於拍攝角度，足部動作不易觀察，因此並無進行分析，只對快游、潛游進行分析。我將足部運動的軌跡與此時蟲體的 v-t 圖進行比對，每隻豉甲在同一種運動模式之下，足部運動與速度變化趨勢都很相近，因此我由十隻蟲的分析中，選擇一隻作為代表說明。



### 1.快游

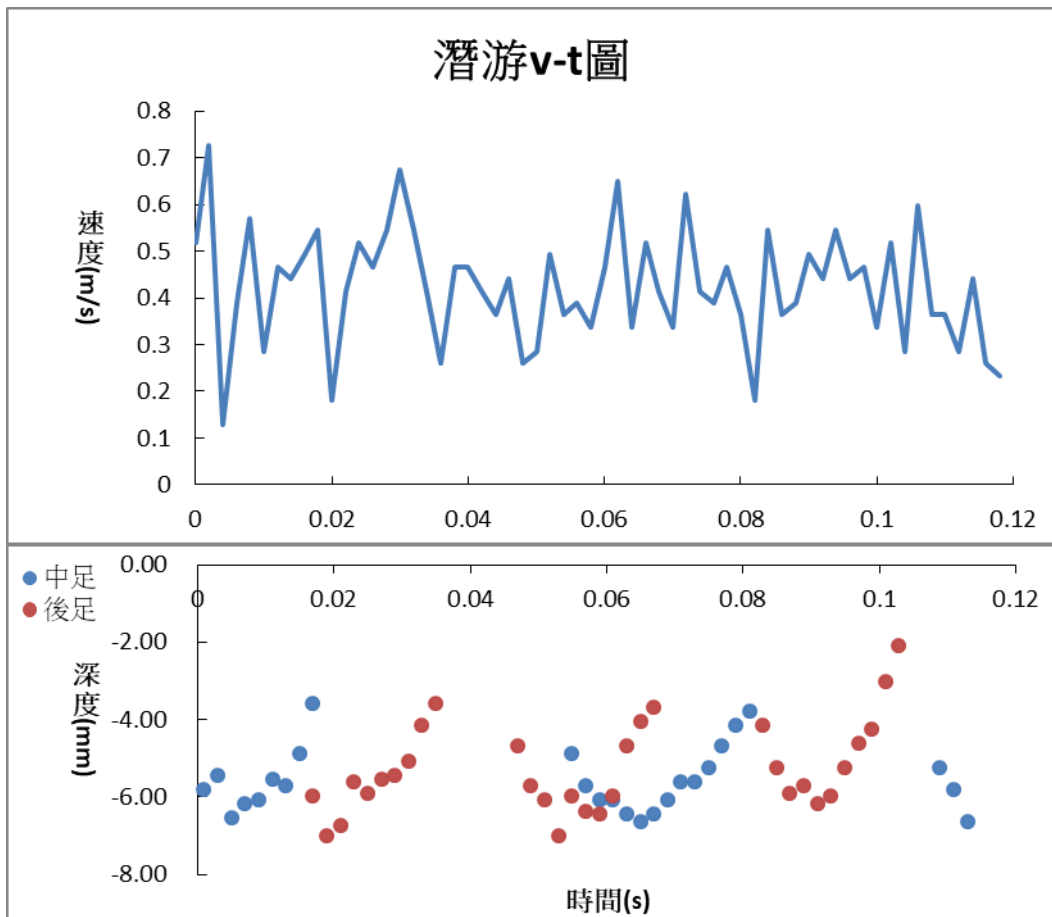
豉甲在快游時，主要是使用後足加速，中足輔助，我將 v-t 圖搭配上足部動作，可以發現當後足達到最深處後，會使速度攀升。中足運動一次的深度約為  $2.67\pm 0.58$  mm，後足運動一次的深度為  $3.84\pm 1.28$  mm，循環一次足部運動的時間為  $16.01\pm 4.53$  ms(圖二十一)。快游時的足部運動深、快且頻繁，在我分析的十隻豉甲中，最快速度可達到 2.00 m/s，相對於豉甲的體長 18mm，這樣的速度相當驚人。



圖二十一：快游速度與足部運動的關聯

### 2.潛游

豉甲在潛游時，大多為中後足交互划動，我將 v-t 圖搭配上足部動作，可以發現當中足或後足達到最深處後，速度就會上升，中足運動一次的深度為  $2.65\pm 0.33$  mm，後足運動一次的深度為  $2.96\pm 0.22$  mm，循環一次足部運動的時間為  $22.77\pm 3.89$  ms(圖二十二)。潛游時，中後足在循環所需時間、深度及足部運動的頻率都略小於快游，而在我分析的十隻豉甲中，最快速度可達到 0.86 m/s。



圖二十二：潛游速度與足部運動的關聯

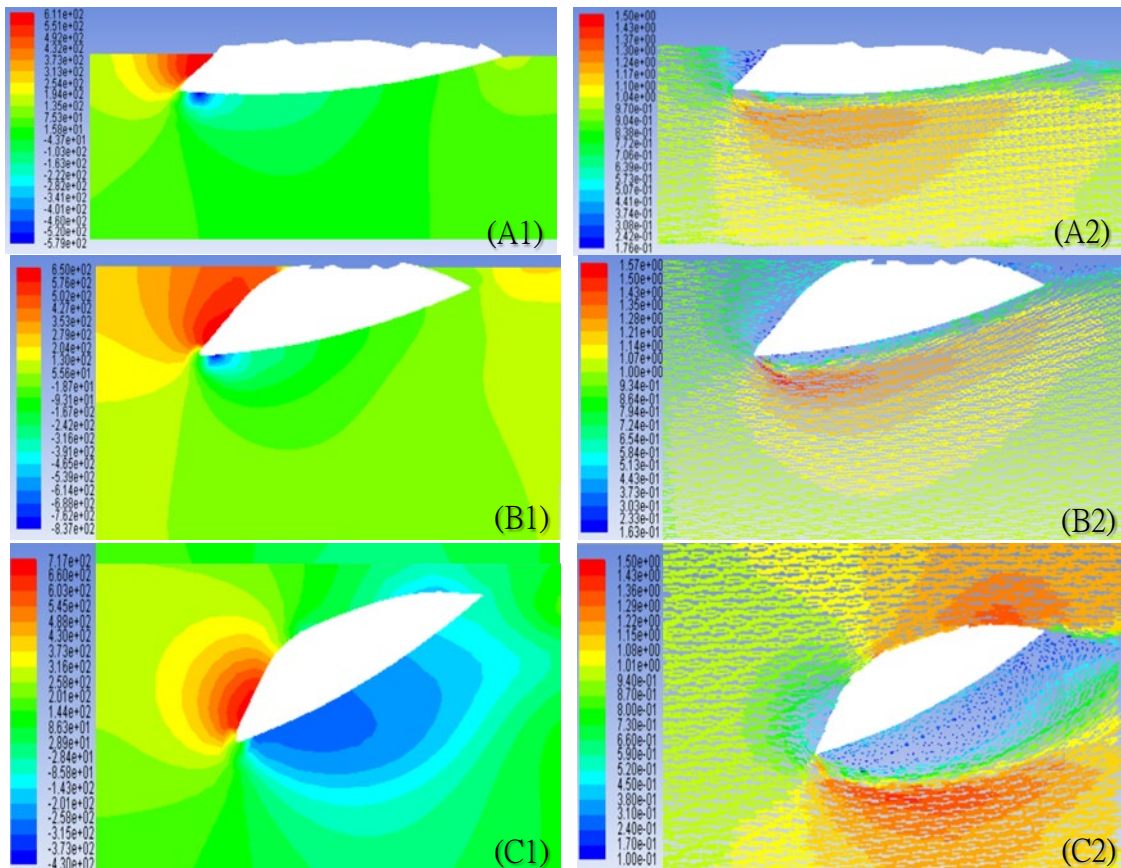
## 二、以流場分析軟體探討莖甲的下潛運動

我以 Tracker 測量莖甲潛水的角度，其中在  $6^\circ$  時莖甲開始入水(圖二十三 A)， $14^\circ$  時莖甲背部的凸起入水(圖二十三 B)， $30^\circ$  時整隻蟲入水(圖二十三 C)，因此我選用這三個角度進行後續模擬分析此時的壓力圖及流場圖。



圖二十三：以 Tracker 測量莖甲潛水的角度(A)  $6^\circ$  (B)  $14^\circ$  (C)  $30^\circ$

我以 Fluent 模擬後，發現莖甲在下潛的過程中，由壓力圖(圖二十四 A1、B1、C1)可以看出，莖甲背部凸起處，壓力最大，上緣為高壓區，下側為負壓區，此時受力向下，而隨著下潛的角度變大，兩側的壓力差也越大。由流場圖(圖二十四 A2、B2、C2)可發現，在凸起處的前側流速較慢，而於下緣的區域流速較快，水流會順著莖甲的型態出現分層現象，由內向外速度漸慢，隨著下潛時角度逐漸變大，下緣流速快的區域也跟著變大。因此，我認為莖甲背部前方凸起的型態，在下潛時，可造成較大的壓力差進而改變上下兩側的速度變化，可以幫助牠更容易下潛。



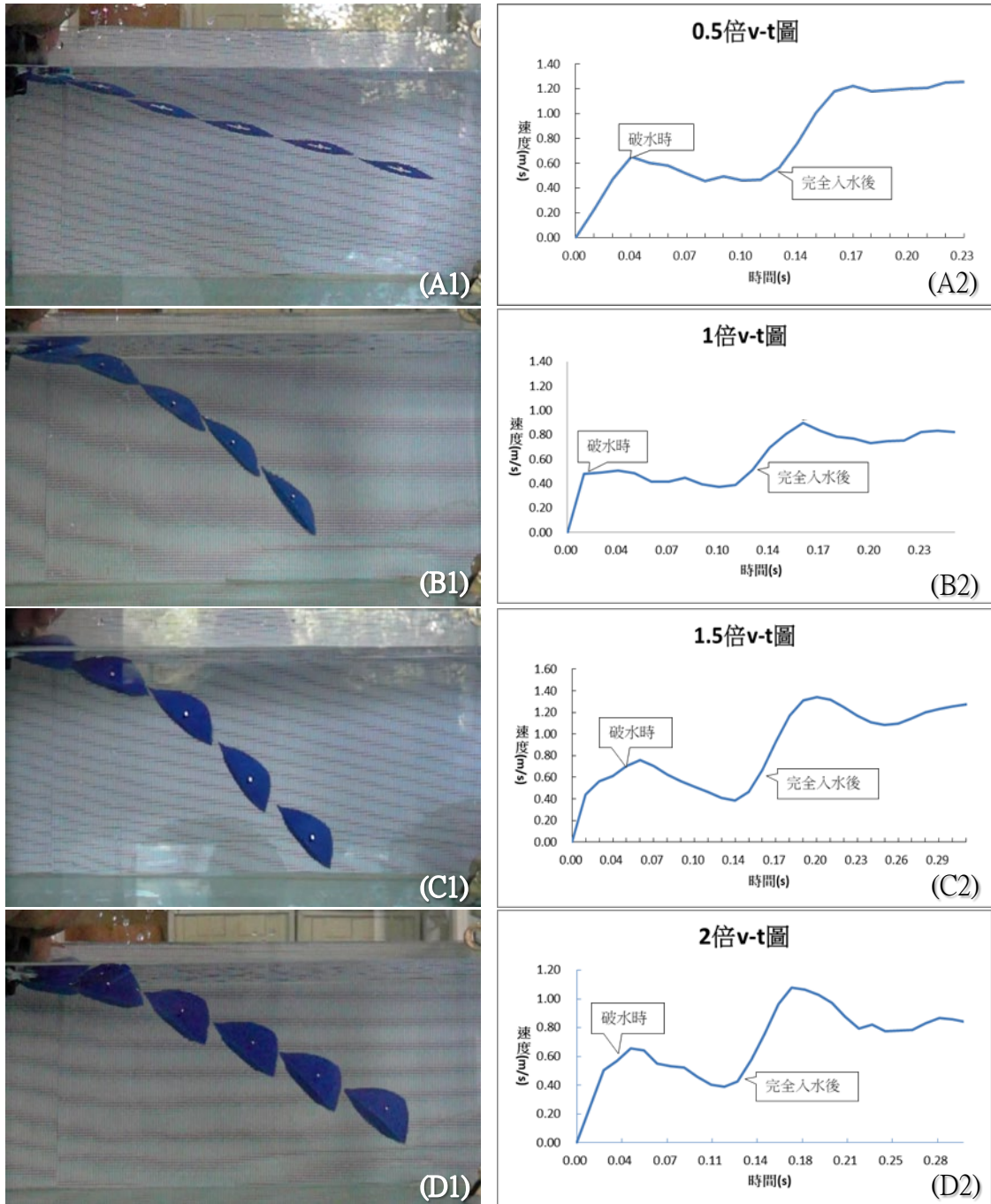
圖二十四：模擬莖甲下潛結果 (A1) 6° 壓力圖 (A2) 6° 流場圖 (B1) 15° 壓力圖 (B2) 15° 流場圖 (C1) 30° 壓力圖 (C2) 30° 流場圖

### 三、探討外型的高度比例對下潛運動的影響

#### (一)軌跡與速度

0.5 倍高的模型在下潛過程中，因破水時的法向作用力大，使其難以下潛至水缸底部，最終撞上水缸側邊，潛水過程中也幾乎無旋轉，保持小角度下潛運動(圖二十五 A1)。1 倍與 1.5 高的模型在潛水過程中，會觀察到旋轉的情形，在抵達滑輪前就下潛至水缸底部(圖二十五 B1、C1)。2 倍高的模型在下潛過程中，亦會觀察到旋轉的情形，但旋轉到約 50° 便保持這個夾角，運動到靠近滑輪處，此外，2 倍高模型不會潛至水缸底部(圖二十五 D1)。

0.5 倍高模型下潛的速度起初會上升直到破水時下降，待模型完全入水後，速度便再次上升並保持終端速度(圖二十五 A2)。1、1.5 及 2 倍高模型下潛的速度起初會上升，破水過程速度略微降低，待模型完全入水後，速度便再次上升，因為這段過程中釣魚線與蟲身的夾角逐漸減小，切線方向的張力隨之增加，因此在達終端速度前有一個速度的高點(圖二十五 B2、C2、D2)。



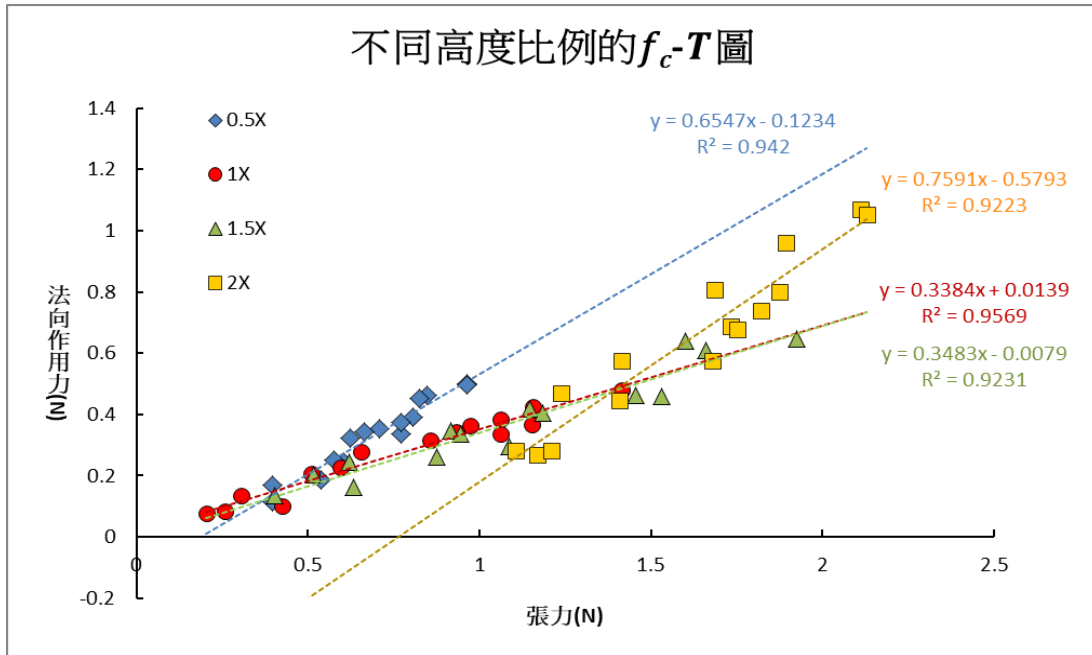
圖二十五：不同高度比例的軌跡及速度時間關係圖

(A1) 0.5 倍高軌跡 (A2) 0.5 倍高 v-t 圖 (B1) 1 倍高軌跡 (B2) 1 倍高 v-t 圖  
 (C1) 1.5 倍高軌跡 (C2) 1.5 倍高 v-t 圖 (D1) 2 倍高軌跡 (D2) 2 倍高 v-t 圖

## (二)作用力與力矩

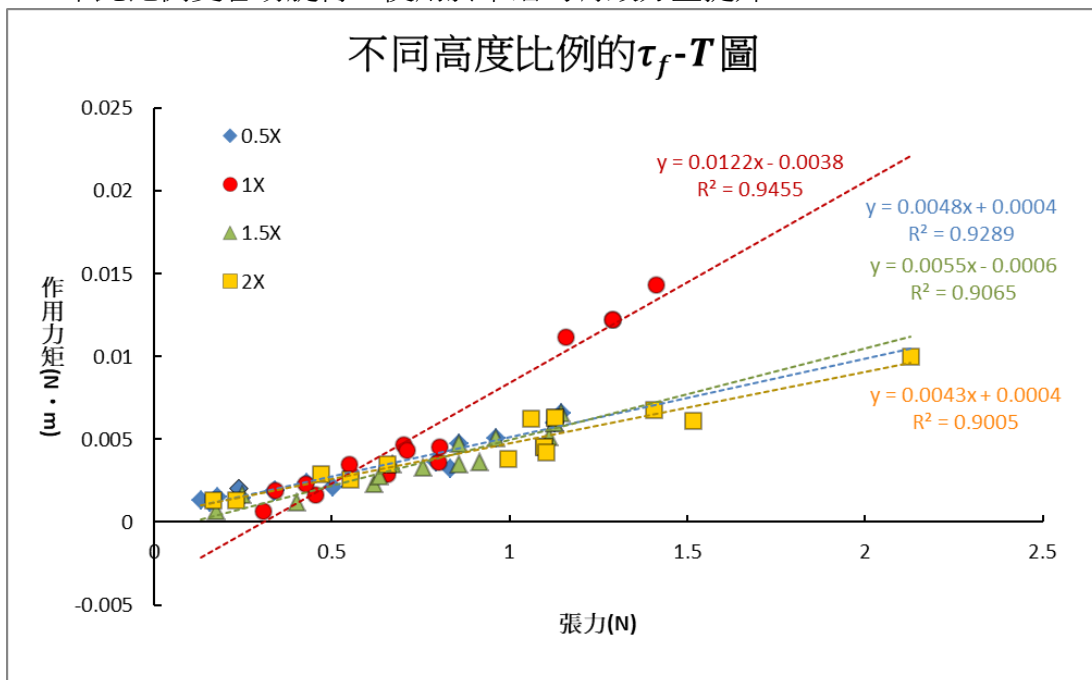
實驗測量發現，破水時的法向作用力會與繩張力呈線性關係，經最小平方方法可求得迴歸方程式，方程式的斜率代表代表單位繩張力的法向作用力增加量。0.5 倍與 2 倍模型在入水時法向作用力較大，且兩者斜率皆大於 1 與 1.5 倍(圖二十六)，表示 1 與 1.5 倍高模型較容易破水，潛入水中。





圖二十六：不同高度比例的法向作用力與張力關係圖

入水後的作用力矩與繩張力亦是呈線性關係，在小張力的情況下，四個高度比例的作用力矩大小接近，隨著繩張力的增加，1 倍高的作用力矩漸大於其他三個比例(圖二十七)，1 倍高模型受到水體總作用力的力矩較大，表示此比例更容易旋轉，使用於下潛的有效分量提升。



圖二十七：不同高度比例的作用力矩與張力關係圖

### (三)統計比較

我將迴歸線平移至原點，計算每個數據點的法向作用力與繩張力的比值，經由 ANOVA 比較不同高度比例的模型，施加單位張力的法向作用力變化量。結果發現 1 倍與 0.5 倍及 2 倍有顯著差異(表二)，1 倍與 1.5 倍的比值



小於 0.5 倍及 2 倍，顯示在高度比例為 1~1.5 倍時有較佳的破水效果。重複方法比較作用力矩與繩張力的比值，發現 1 倍與 0.5、1.5 及 2 倍有顯著差異(表二)，1 的比值大於 0.5 倍、1.5 倍及 2 倍，顯示 1 倍高度比例作用力矩的增加量較大，使其在潛水過程中能更快旋轉向下潛。

表二：不同高度比例的單因子變異數分析表(LSD)

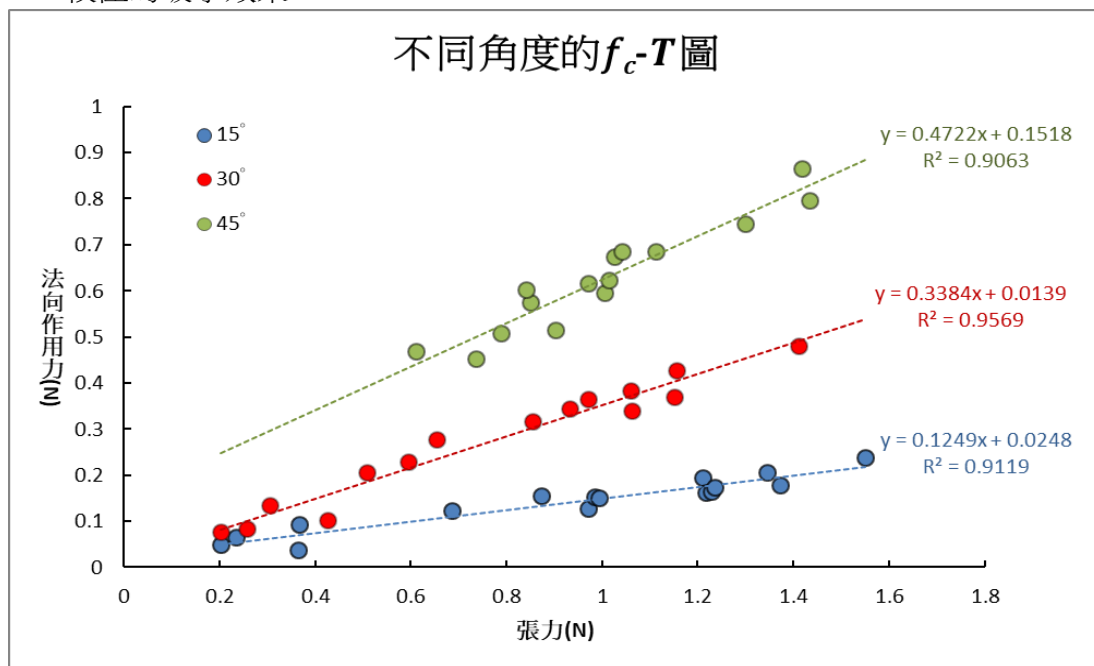
	$\frac{\Delta f_c}{\Delta T}$	平均數	標準差	顯著性	$\frac{\Delta \tau_f}{\Delta T}$	平均數	標準差	顯著性
1 倍	0.5 倍	0.76	0.108	<0.001*	$4.9 \times 10^{-3}$	$8.03 \times 10^{-4}$	<0.001*	
	1 倍	0.36	0.027	—	$1.2 \times 10^{-2}$	$2.44 \times 10^{-3}$	—	
	1.5 倍	0.35	0.031	0.867	$4.6 \times 10^{-3}$	$6.97 \times 10^{-4}$	<0.001*	
	2 倍	0.79	0.236	<0.001*	$4.8 \times 10^{-3}$	$6.94 \times 10^{-4}$	<0.001*	

\*表示 P<0.05

#### 四、探討不同角度對下潛運動的影響

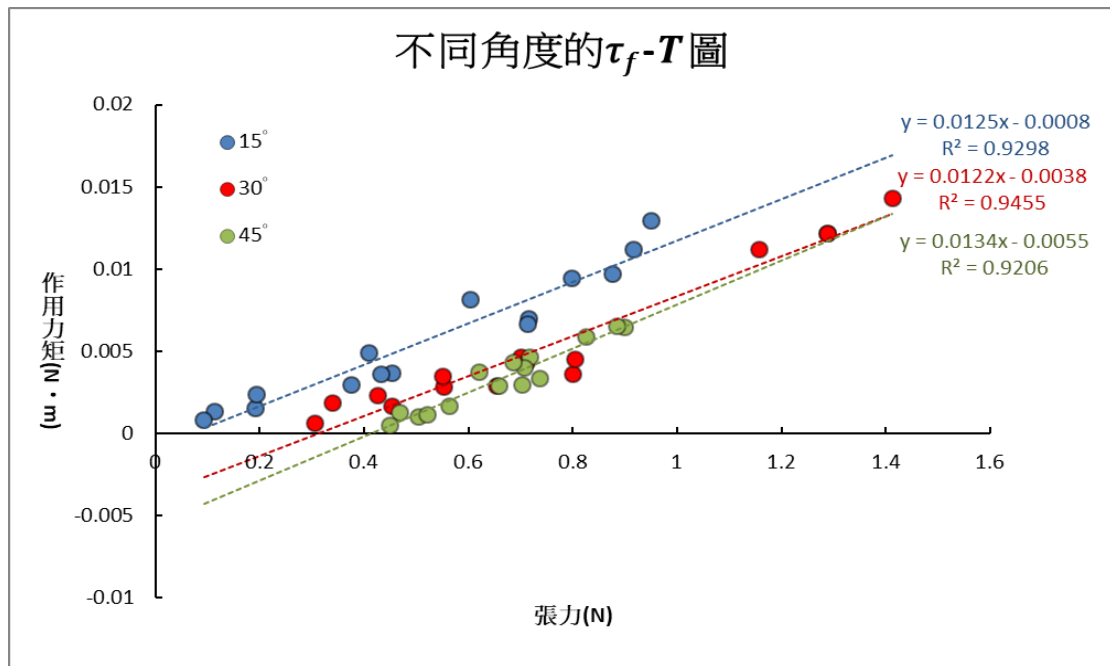
##### (一)作用力與作用力矩

以 1 倍高模型為例，探討不同初始施力角度對下潛運動的影響。結果發現角度越大，法向作用力及迴歸線的斜率也越大(圖二十八)，表示小角度有較佳的破水效果。



圖二十八：不同施力角度的法向作用力與張力關係圖

實驗發現，施力角度越小，作用力矩的量值越大，但三者的數值差異不大，由迴歸線可看出，即使改變施力角度，三條方程式的趨勢仍十分接近(圖二十九)，代表施力角度對於作用力矩的影響不大。



圖二十九：不同施力角度的作用力矩與張力關係圖

## (二)統計比較

我將迴歸線平移至原點，計算每個數據點的法向作用力與繩張力的比值，經由 ANOVA 比較不同施力角度，施加單位張力的法向作用力變化量。結果發現 30° 與 15° 及 45° 有顯著差異(表三)，隨著角度的增加，法向作用力的變化量也越大，顯示小角度有較佳的破水效果。重複方法比較作用力矩與繩張力的比值，發現 30° 與 15° 及 45° 皆無顯著差異(表三)，顯示不同施力角度，即不同外力矩的大小對作用力矩無顯著的影響。

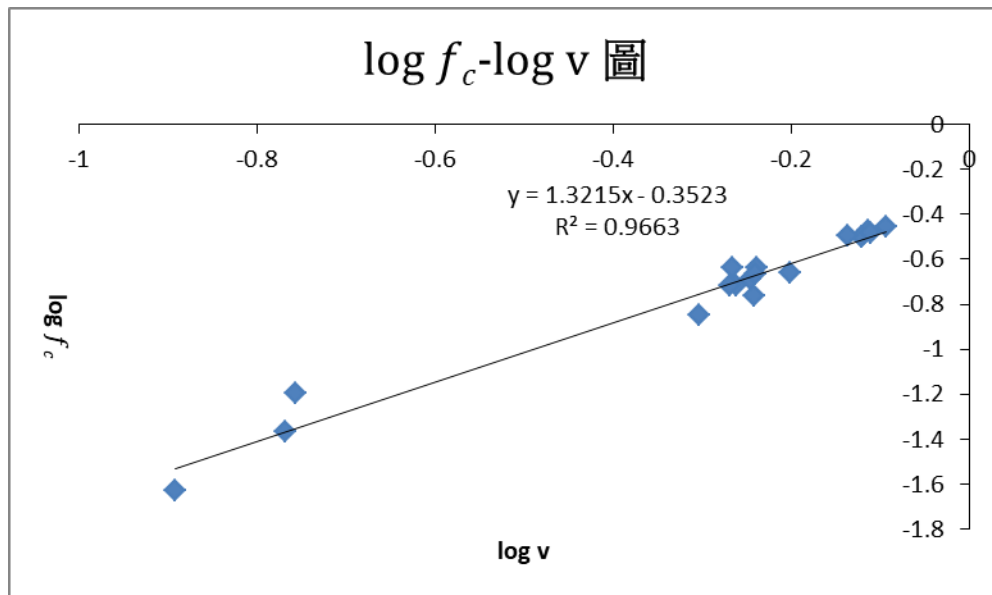
表三：不同角度的單因子變異數分析表(LSD)

	$\frac{\Delta}{\Delta}$	平均數	標準差	顯著性	$\frac{\Delta\tau_f}{\Delta T}$	平均數	標準差	顯著性
30°	15°	0.13	0.012	<0.001*		$1.2 \times 10^{-2}$	$1.73 \times 10^{-3}$	0.163
	30°	0.36	0.027	—		$1.2 \times 10^{-2}$	$2.44 \times 10^{-3}$	—
	45°	0.49	0.027	<0.001*		$1.3 \times 10^{-2}$	$6.23 \times 10^{-4}$	0.161

\*表示  $P < 0.05$

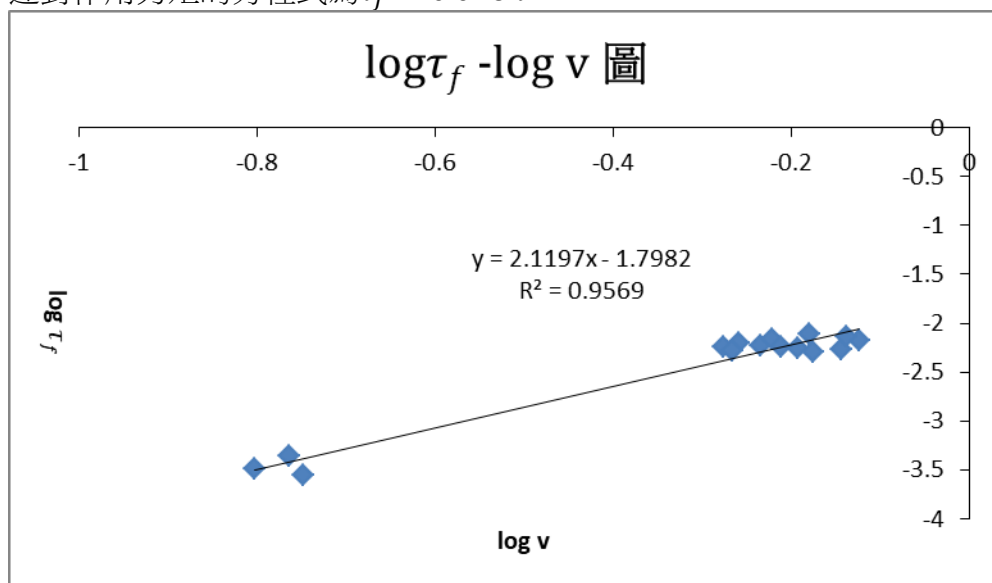
## 五、探討初始速度對下潛運動的影響

我以一倍高模型為例，玻璃水缸作為加速道，測量五個下潛初速對法向作用力的影響。我將初速及法向作用力取對數值( $\log_{10}$ )後作圖(圖三十)，得迴歸方程式  $\log f_c = 1.3215 \log v - 0.3523$  ( $R^2 = 0.9663$ )，將左右兩邊同樣以 10 為底數，可還原初速對法向作用力的方程式為  $f_c = 0.44 v^{1.32}$ 。



圖三十：速度與法向作用力關係圖(取對數值)

將初速及作用力矩取對數值後作圖(圖三十一)，得迴歸方程式  $\log \tau_f = 2.1197 \log v - 1.7982$  ( $R^2 = 0.9569$ )，將左右兩邊同樣以 10 為底數，可還原初速對作用力矩的方程式為  $\tau_f = 0.016 v^{2.12}$ 。



圖三十一：速度與作用力矩關係圖(取對數值)

## 陸、討論

### 一、比較豉甲與其他水生昆蟲的游泳速度

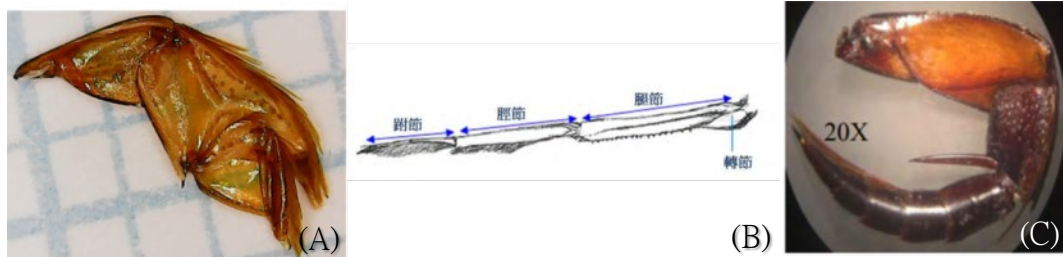
根據葉盛暘等(2012)及古秉正等(2013)對水蟲運動的研究發現，相較於其他水蟲，梅氏圓豉甲的潛游速度是十分迅速的(表四)。另外，我還測量了梅氏圓豉甲在水面上的直線運動，最快能達到 2.01 m/s，在潛水時最快能達到 0.98 m/s，下潛到蟲體完全沒入水中，所需時間只要 41.14ms。目前關於水蟲下潛的研究並不多，在國外 Zhonghua Xu (2010)記錄到豉甲屬(*Gyrinus*)的其他種豉甲，下潛時間約為 89ms，根據上述比較可發現梅氏圓豉甲的水上運動能力是十分優異的。

表四：梅氏圓豉甲與各種水蟲潛游速率比較

水蟲名	體長(cm)	潛游平均速度 mm/s
梅氏圓豉甲	1.8	570
紅邊大龍蟲	2.2	106
點刻三線大龍蟲	2.8	134
姬龍蟲	1.0~1.2	57
姬牙蟲	1.0~1.1	60
小仰蝽	0.5	1.2

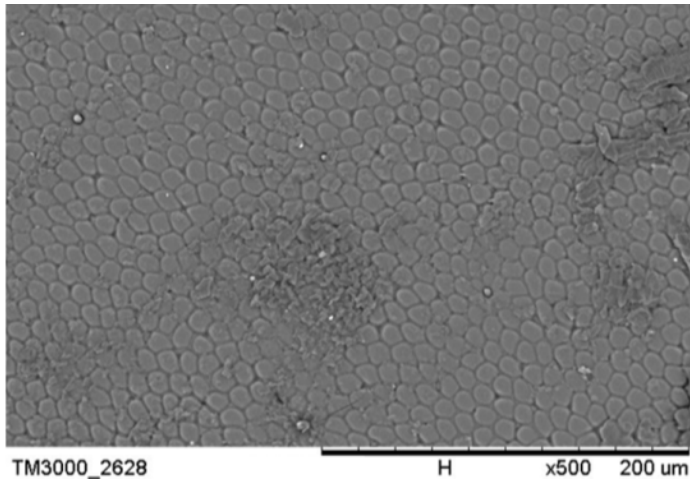
## 二、影響豉甲蟲運動迅速的因素

許多水生昆蟲是以特化的泳足運動，其中大多的型態為細長的後足，以跗節上的剛毛來回划動前進，如龍蟲、仰泳蝽等(圖三十二 B、C)，剛毛雖增加了與水的接觸面積，然而當足部縮回時，剛毛也會使反方向的阻力產生，古秉正等(2013)也發現小仰蝽在將足部收回時，剛毛造成的阻力是有可能使蟲身後退的。而我研究的豉甲有兩對特化的游泳足，中足、後足為扁平槳狀，以寬大的脛節推進，豉甲的足部運動比起其他水蟲多了旋轉的步驟(圖十六)，施力時保持足部與來流方向垂直，收回時將足部旋轉為與來流方向平行以減少阻力。與小仰蝽鬚狀的剛毛不同，豉甲中足、後足上的扁平剛毛與足部平行(圖三十二 A)，在增加與水接觸面積的同時，也可避免於收回的過程中造成阻力。豉甲槳狀的足部結構、特殊的足部運動模式、再加上泳足划動的頻率可達每秒 60 次，這些特性都使得豉甲能比其他水蟲的運動迅速許多。



圖三十二：(A)豉甲的泳足 (B)仰泳蝽的泳足 (C) 龍蟲的泳足  
(資料來源：豉甲照片自攝，仰泳蝽古秉正等(2013)，龍蟲葉盛鳴等(2012))

我使用掃描式電子顯微鏡觀察豉甲蟲鞘翅的外觀(圖三十三)，發現整體表面光滑，由橢圓狀的小單元拼接而成，並未發現如鯊魚的盾鱗等特殊疏水結構，因此我認為豉甲的表面結構並非影響其運動迅速的主要原因。

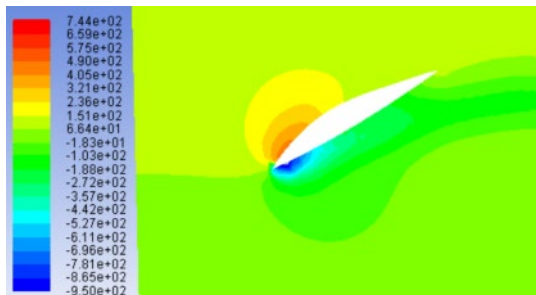


圖三十三：豉甲蟲鞘翅的外部表面

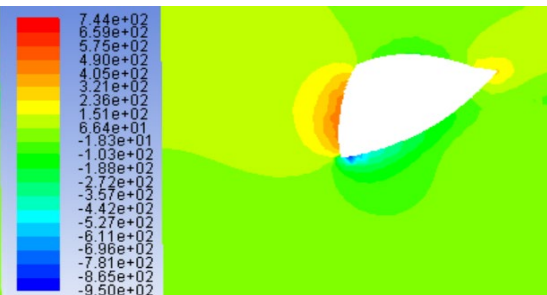
### 三、背部隆起對下潛運動的影響

豉甲下潛速度達 0.98m/s，除了與足部的運動相關，背部隆起的型態可能也有所助益，經 Fluent 模擬豉甲下潛時的壓力變化，發現豉甲下潛時會在背部隆起處與腹部形成壓力差(圖二十四)，產生向下的作用力，有助於豉甲下潛。

在實驗三我發現與豉甲蟲等比例(1 倍模型)和 1.5 倍的模型，在下潛過程中表現最好，法向作用力較小且作用力矩較大，而 0.5 倍的模型(較矮的)或 2 倍模型(較高的)，下潛的法向作用力較大且作用力矩較小(表二)，太小的隆起使背腹兩側無法形成明顯的壓力差(圖三十四)，過高的隆起又會使壓力差作用於運動方向(圖三十五)，令阻力過大，顯示要在適當隆起高度比例時才会有較佳的下潛效果。



圖三十四：0.5 倍高模型的壓力圖

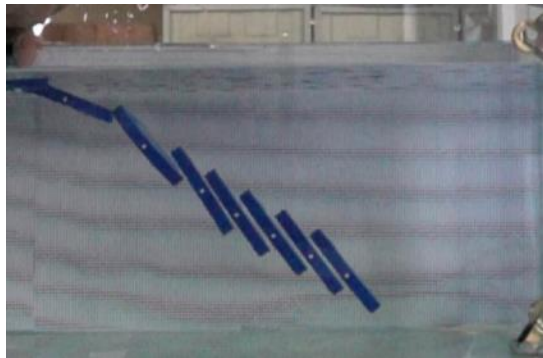


圖三十五：2 倍高模型的壓力圖

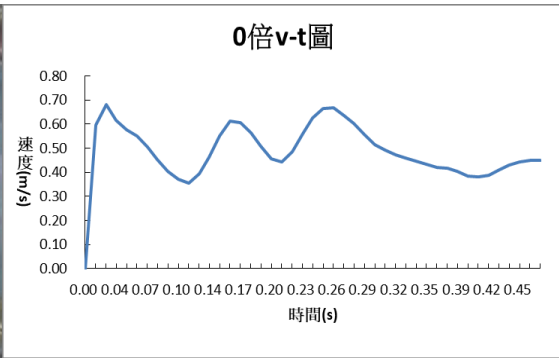
我繪製一個背、腹面皆為平面的模型，測試完全無隆起模型(後簡稱為 0 倍)的下潛情形。0 倍模型在下潛過程中，模型迅速旋轉至約 45° 便保持這個夾角下潛(圖三十六)。下潛的速度在入水的過程便立刻下降，後續的速度反覆的先增後降(圖三十七)，顯示張力與阻力有互相拉扯，彼此牽動的情形。

我測量在破水瞬間繩張力與法向作用力的關係(圖三十八)，得迴歸方程式  $f_c = 0.6823T - 0.2012$  ( $R^2 = 0.9228$ )。而在模型開始下潛直至完全入水之作用力矩與繩張力(圖三十九)經統計得迴歸方程式  $\tau_f = -0.0106T + 0.0066$  ( $R^2 = 0.9482$ )。與實驗三不同高度比例的模型相比，0 倍模型是唯一作用力矩與繩張力呈負相關的模型，顯示在入水後總作用力使得模型不易向下旋轉。

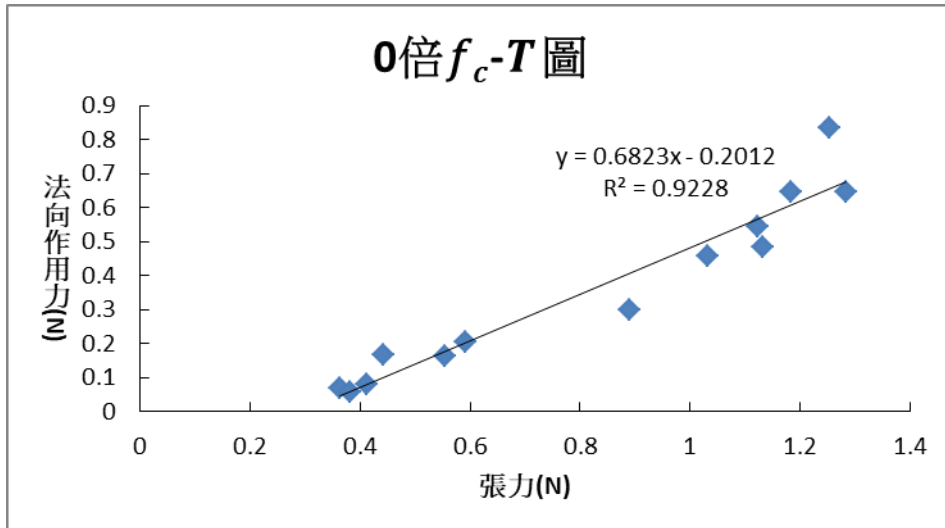




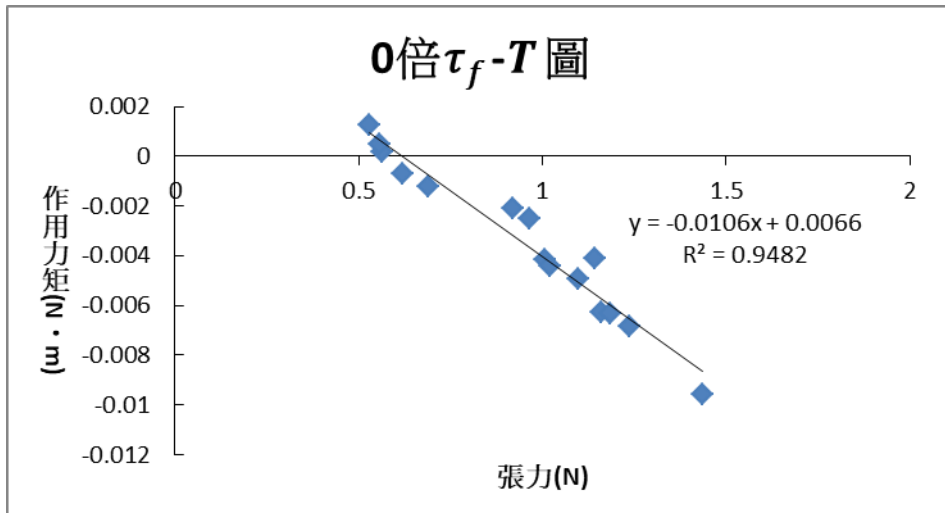
圖三十六：0 倍高模型的下潛軌跡



圖三十七：0 倍高模型速度與時間關係圖



圖三十八：0 倍法向作用力與張力關係圖



圖三十九：0 倍作用力矩與張力關係圖

由以上的實驗可知，梅氏圓肢甲的背部隆起型態有助於下潛過程，且體長與高度的比例，具有其生態意義。當肢甲下潛時，使用中、後足對水施力獲得的反作用力向前推進，在模擬實驗中，我以繩張力大小類比，根據實驗三中表二的結果，若有一隻隆起特高(似 2 倍高模型)或幾乎沒有隆起的肢甲(似 0.5 倍高模型)，它要下潛時，施加單位外力的法向作用力增加量較大( $f_c$ - $T$ 圖斜率較大)，使其難以下潛，除了不利於捕食水中生物，也增加了被天敵捕食的風險，因此，現今肢甲的外型比例可能也是天擇作用後得到的最佳結果。

#### 四、影響下潛過程中旋轉的因素

在實驗四中我發現改變施力角度對作用力矩無顯著的影響(表三)，因  $\vec{\tau}_T = \vec{r}_2 \times \vec{T} = r_2 T \sin\theta$ ，故此結果亦代表不同外力矩對作用力矩無顯著的影響。在實驗三中我發現 1 倍高度比例的模型作用力矩的增加量較大(表二)，使其在潛水過程中能更快旋轉向下潛。而在實驗五中我測得  $\tau_f = 0.016 v^{2.12}$  (圖三十一)，顯示模型本身的形狀、運動狀態才是對作用力矩的主要影響因素。

豉甲蟲在下潛之前通常會在水面上快游一小段，我透過模型模擬的方式測得法向作用力正比於初速的 1.3 次方，表示破水瞬間的速度越快阻力也會越大，但又因為作用力矩正比於初速的 2.1 次方，速度越快使其可以更快旋轉，蟲身的轉動使足部推進的方向向下，使豉甲蟲能迅速潛入水中。

#### 五、應用的方向

豉甲下潛的速度十分迅速，只需 41ms 即可由水面潛入水下，其背部上的隆起使得上緣壓力較大(圖二十四)，進而更容易下潛，因此我們可以模仿豉甲的外型來設計水中載具或探測器，應用於水域活動，如水面遊憩及水下觀光，也可運用於警急救難，例如製成小型的探測器，結合水底攝影機，可靈活的在水面與水下來回穿梭。透過模仿豉甲的外型，可減少破水的阻力並利用下潛時的作用力矩協助其更快向下旋轉，增加機械的敏捷度。

普通的水中載具如潛水艇要花時間注入、排出水來調整密度，而豉甲就不用多花蓄水這個過程，可以利用背部隆起產生壓力差，透過改變游泳速度來調控等效比重。在設計小型機械時可能會面臨空間不足的問題，沒有辦法設置抽水馬達和蓄水槽，這時只要模仿豉甲的外型，控制運動速度即可決定要上浮或下潛，使機具的運動更加靈活多變，用於應對各種狀況。

### 柒、結論

- 一、豉甲快游時呈現約  $20^\circ$  仰角，使用中、後足，足部運動較深頻率快，平均速度達 1.08 m/s；潛游時使用中後足，足部運動的深度與頻率略小於快游，速度約 0.57m/s；豉甲潛水十分迅速，平均速度約 0.83 m/s，下潛僅需 41 ms。
- 二、以 Ansys 模擬豉甲下潛，發現在背部隆起處，會與腹部形成壓力差，產生向下的作用力，以利其下潛。
- 三、改變豉甲背部隆起的高度比例，發現在破水時，1 與 1.5 倍的法向作用力較小，入水後 1 倍的作用力矩較大，使其更快旋轉向下潛。
- 四、施力的角度越小，破水時法向作用力也越小，但不影響作用力矩的大小，模型本身的形狀、運動狀態才是對作用力矩影響的主要因素。
- 五、下潛時蟲體先具備一定大小的初速度，有助於下潛運動，破水時法向作用力正比於初速的 1.3 次方，代表速度越快阻力越大，但作用力矩正比於初速的 2.1 次方，速度越快可使其更快旋轉，令足部下潛方向的作用力變大。

### 捌、參考文獻

- 一、Frank E. Fish ,& Anthony J. Nicastro(2003). Aquatic turning performance by the whirligig beetle: constraints on maneuverability by a rigid biological system. *The Journal of Experimental Biology* ,206, 1649-1656.

- 二、Jonathan Voise, & Jérôme Casas(2010). The management of fluid and wave resistances by whirligig beetles.*J. R. Soc. Interface*,7, 343-352.
- 三、Zhonghua Xu ,&Scott C. Lenaghan ,&Benjamin E. Reese ,&Xinghua Jia,&Mingjun Zhang (2010). Experimental studies and dynamics modeling analysis of the swimming and diving of whirligig beetles (Coleoptera: Gyrinidae). *PLOS Computational Biology*,8(11),1-15
- 四、吳怡欣、何嘉浩、楊平世(2002)。大菱甲 (Dineutus mellyi Regimbart) 之形態與生活史研究。動物園學報，14，1-8。
- 五、葉盛暘、羅羽晴、劉汶宜、劉袁志、連志憲、楊佺澍(2012)。犀利水龜-點刻三線大龍蝨全記錄。中華民國第五十二屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 六、古秉正、劉正文、戴辰芳(2013)。『蝽蝽』欲動--小仰蝽運動模式之探討。中華民國第五十三屆中小學科學展覽會作品說明書。

## 【評語】 051803

本作品探討昆蟲豉甲游泳運動的方法及下潛迅速的原因，特別是以流場分析豉甲蟲的下潛運動，探討其外型的高度比例、不同角度以及初始速度對下潛運動的影響。本實驗在設計、數據、分析上雖均能顯現所要探討議題，並找出影響豉甲蟲破水潛入的機制，結果算是不錯，若能更進一步在豉甲受的流體之阻力、浮力、衝力與力矩與其幾何參數之分析上做得更明確，將是個對豉甲游泳潛水運動有具體貢獻的工作。

## 作品簡報



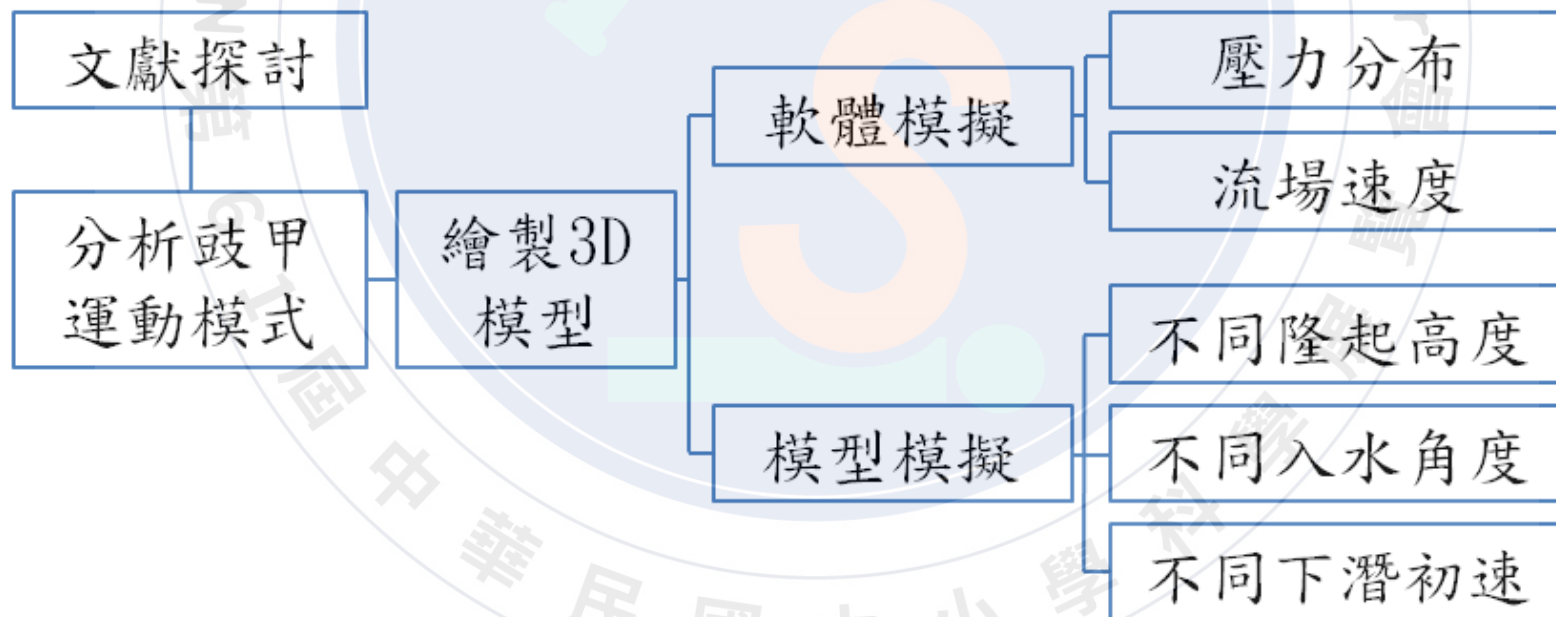


高中組 物理與天文學科

探討鼓甲外型對下潛運動的影響

# 前言

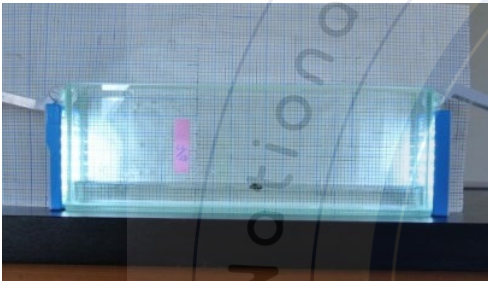
- 鼓甲蟲能在水中靈活且迅速的游動，Fish et al(2003)針對分析水面的旋轉運動，Voise et al(2010)分析足部運動與阻力的關係。
- 經由分析鼓甲蟲的運動，並透過軟體及模型模擬，希望找到鼓甲的外型對下潛能力的影響。



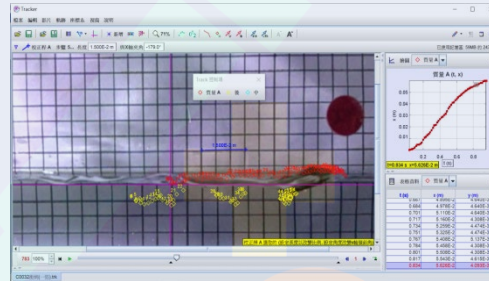
# 研究方法

## 1. 分析運動模式

拍攝影片



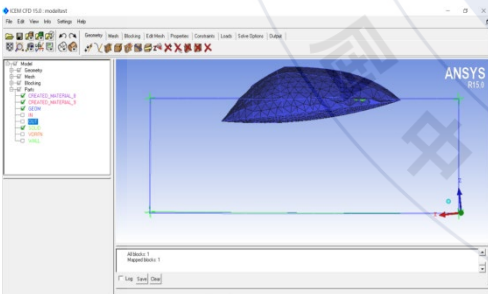
Tracker追蹤



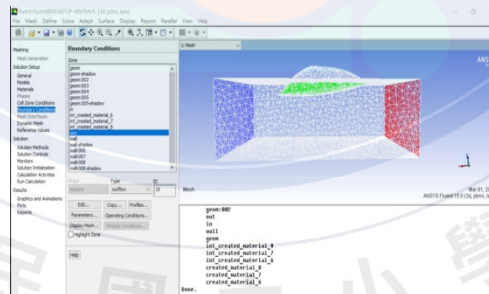
計算游泳速度  
追蹤游泳足軌跡

## 2. 流場軟體 (Ansys15.0) 模擬下潛

繪製模型  
(ICEM CFD)



模擬運算  
(Fluent)

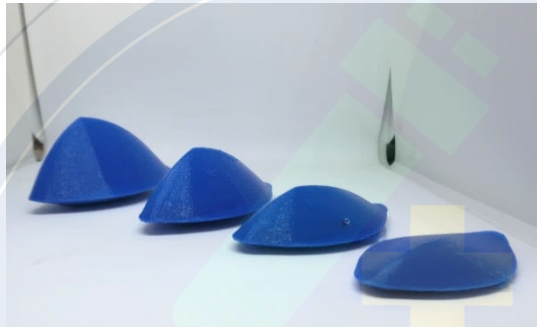


流場速度圖  
壓力分佈圖

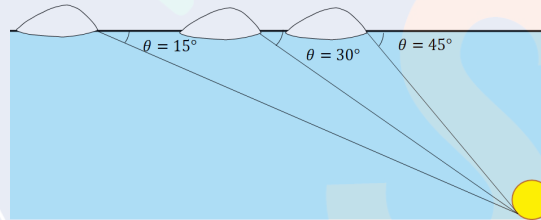
# 研究方法

## 3. 模型模擬

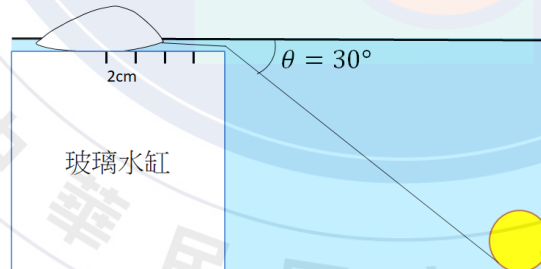
高度比例



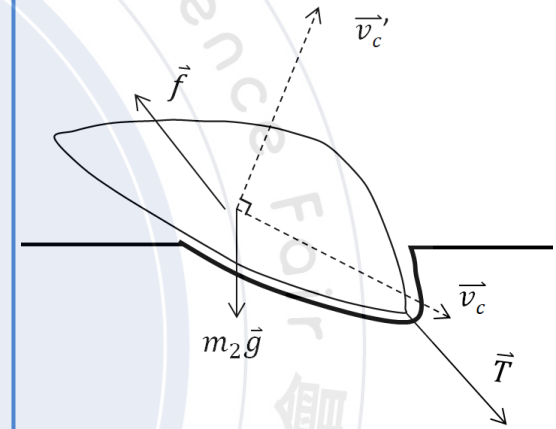
施力角度



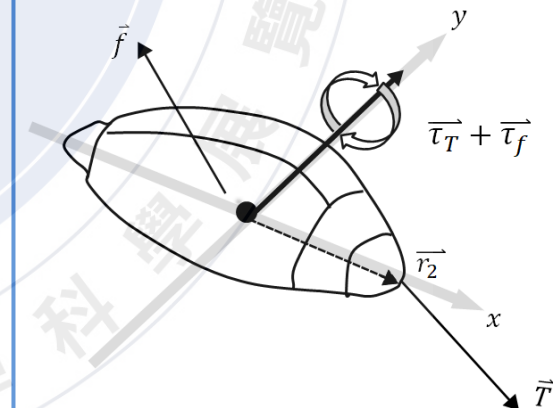
下潛初速



法向作用力

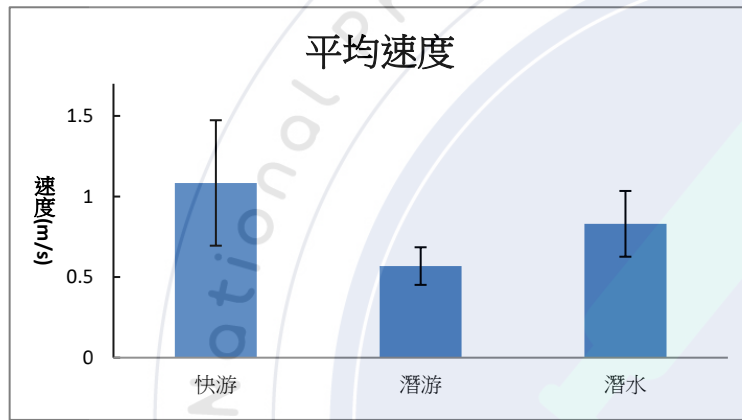


作用力矩



# 研究結果一

- 鼓甲於水面快游速度約1m/s，潛水速度約0.8m/s，十分迅速。



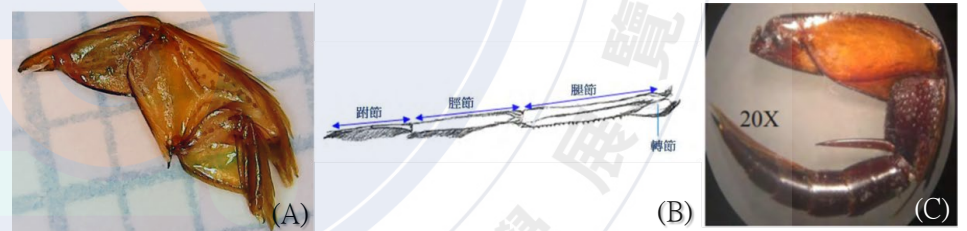
圖一：鼓甲三種運動的平均速度統計圖

表一：梅氏圓鼓甲與各種水蟲潛游速率比較

水蟲名	體長(cm)	潛游速度(cm/s)
梅氏圓鼓甲	1.8	57.0
紅邊大龍蝨	2.2	10.6
小仰蝽	0.5	0.12

- 討論：影響游泳迅速的因素

1. 游泳足
2. 足部運動
3. 鼓甲外型



圖二：(A)鼓甲 (B)仰泳蝽 (C) 龍蝨的泳足 (圖源：參考資料[3][4])

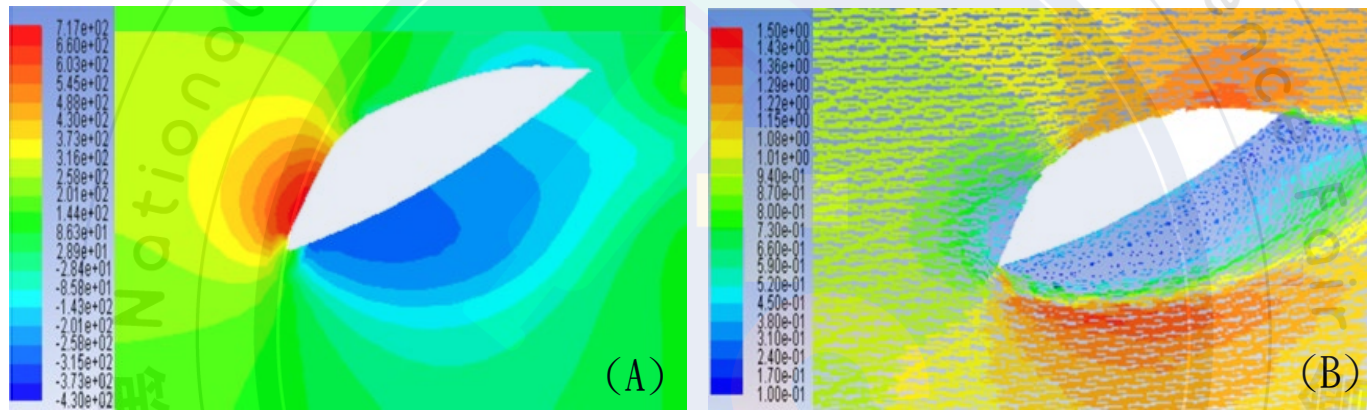


圖三：鼓甲足部運動



## 研究結果二

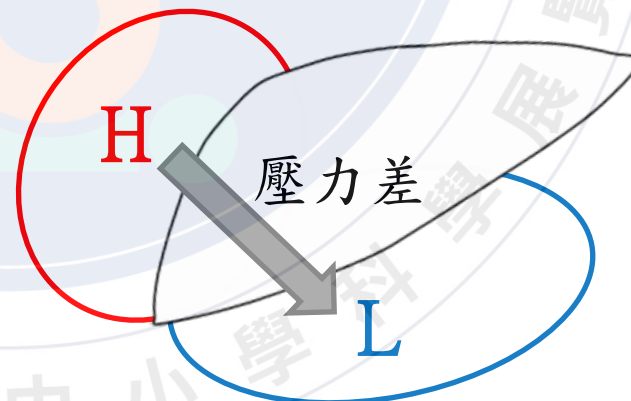
- 當下潛角度越大，背部受壓也隨著越大。
- 受壓越大，流速越慢，於下緣的區域流速較快。



圖四：軟體模擬鼓甲下潛的結果(A)壓力圖

(B)流場圖

- 上緣為高壓區，下側為負壓區，此時受力向下。

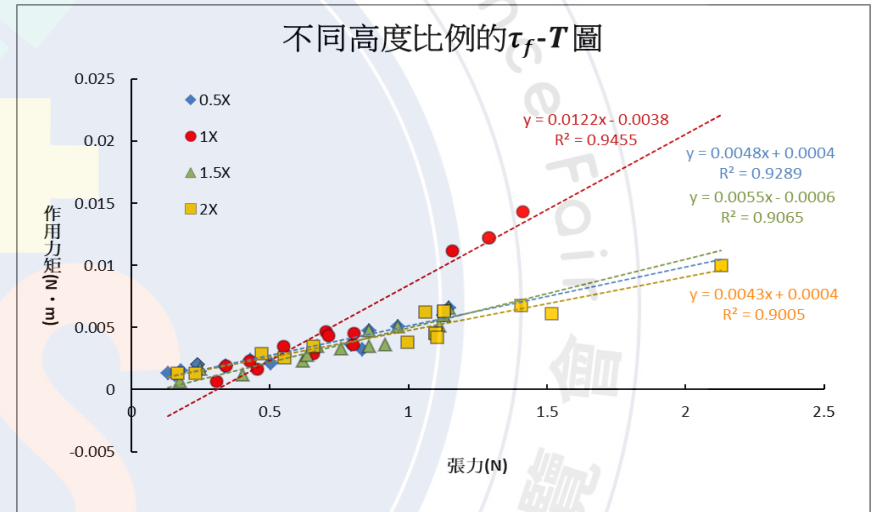
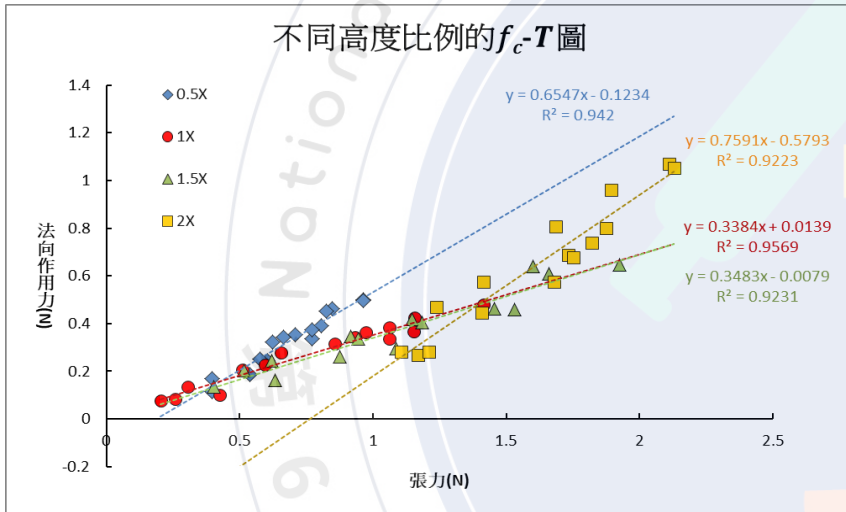


圖五：鼓甲下潛時會於隆起處產生向下的壓力差



# 研究結果三

- 1倍與1.5倍模型所受法向作用力較小，斜率較小，有顯著差異。
- 1倍模型受到的作用力矩較大，斜率較大，有顯著差異。



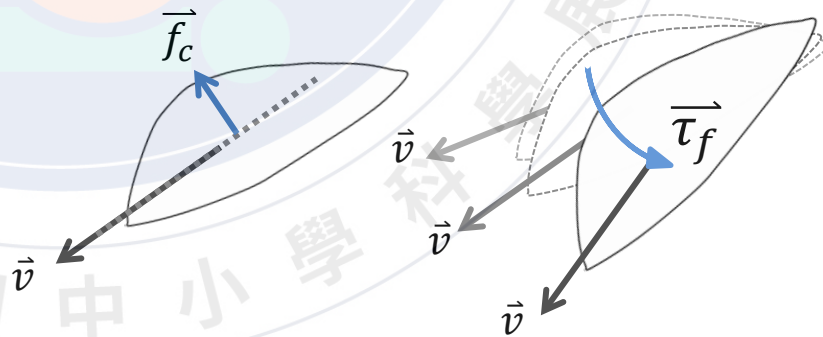
圖六：不同高度比例的法向作用力與張力關係圖

圖七：不同高度比例的作用力矩與張力關係圖

法向作用力小

作用力矩大

有助下潛

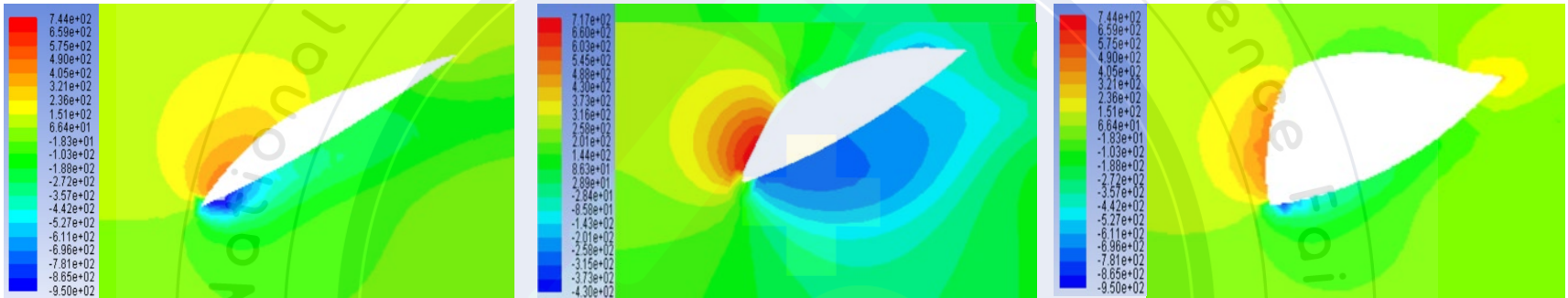


圖八：法向作用力與作用力矩的作用方向

# 研究結果三

## ■ 探討隆起對下潛的影響

### 1. 隆起高度



圖九：(A) 0.5倍高的壓力圖

(B) 1倍高的壓力圖

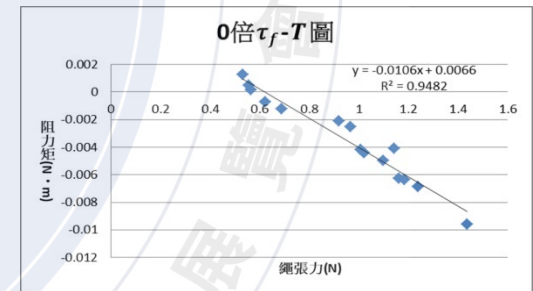
(C) 2倍高的壓力圖

### 2. 無隆起模型

- 作用力矩與繩張力呈負相關。

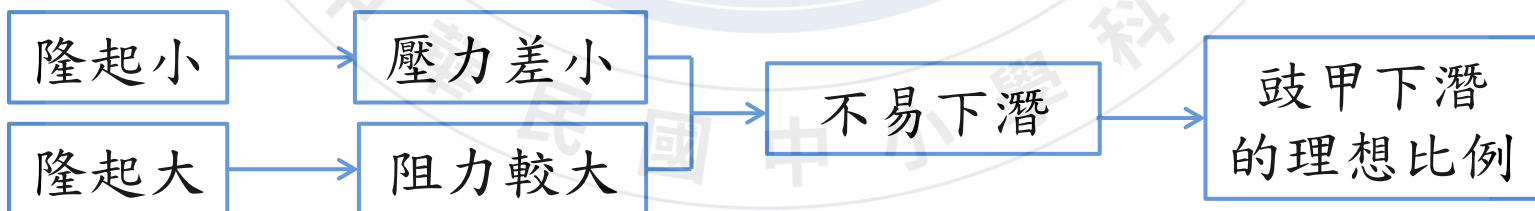


圖十：無隆起模型



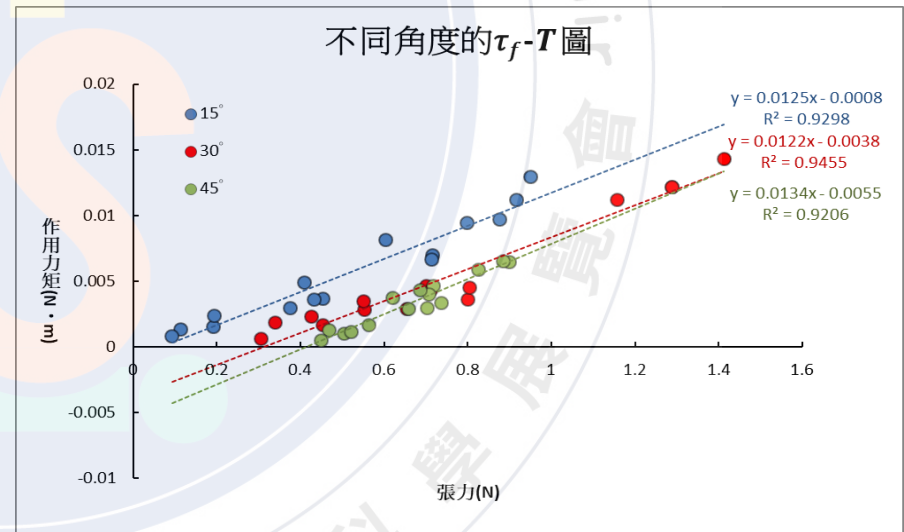
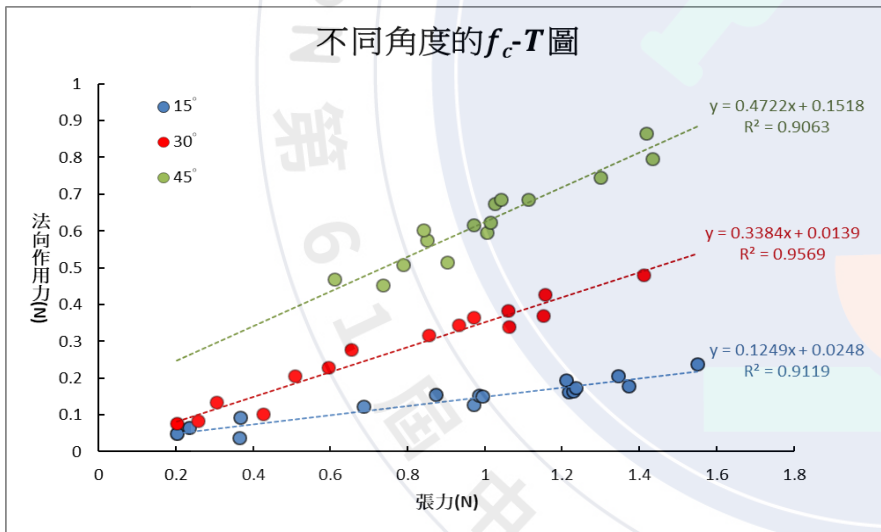
圖十一：0倍作用力矩與張力關係圖

### 3. 演化意義



## 研究結果四

- 角度越小，法向作用力及迴歸線的斜率也越小，表示小角度有較佳的破水效果。
- 改變施力角度，三條方程式的趨勢仍十分接近，斜率不具有顯著差異，代表施力角度對於作用力矩的影響不大。

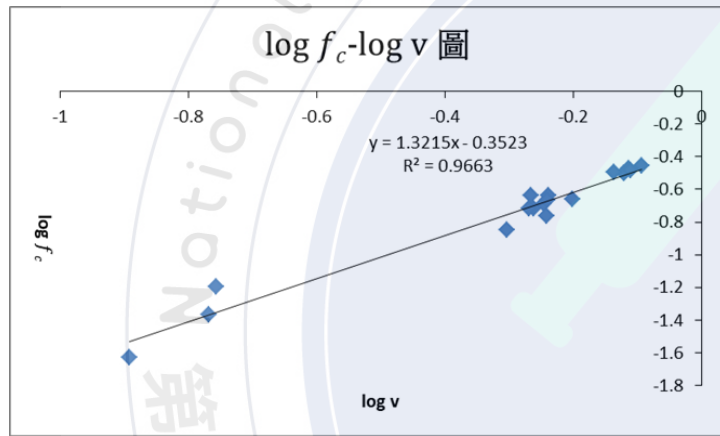


圖十二：不同施力角度的法向作用力與張力關係圖

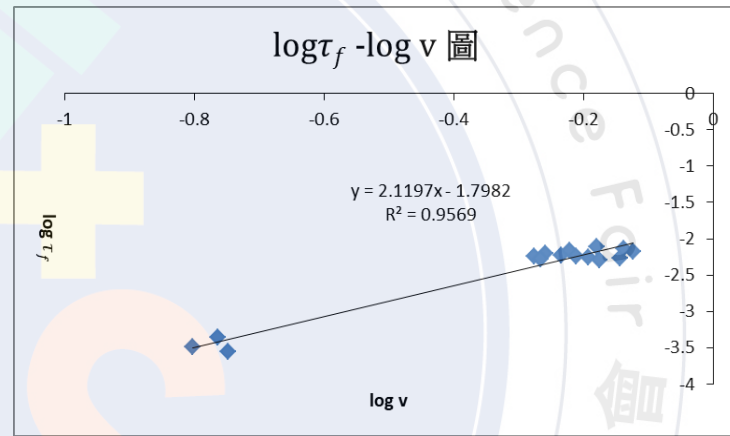
圖十三：不同施力角度的作用力矩與張力關係圖

## 研究結果五

- 初速對法向作用力的方程式為  $f_c = 0.44 v^{1.32}$
- 初速對作用力矩的方程式為  $\tau_f = 0.016 v^{2.12}$

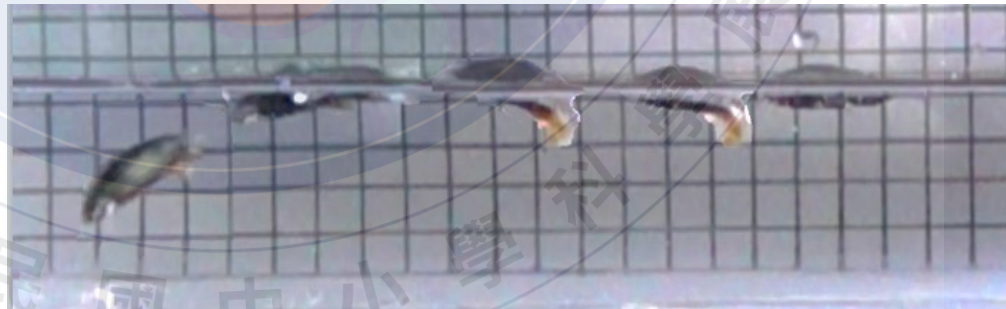


圖十四：不同施力角度的法向作用力與張力關係圖



圖十五：不同施力角度的作用力矩與張力關係圖

- 探討影響作用力矩的因素
  1. 隆起高度
  2. 下潛初速



圖十六：鼓甲在下潛前會先在水面快游，提升下潛初速

# 結論

1. 鼓甲利用特化的游泳足，在水面快游速度約  $1\text{m/s}$ ，潛水速度約  $0.8\text{m/s}$ ，十分迅速。
2. 以Ansys模擬鼓甲下潛，發現會在背腹兩側形成壓力差，產生向下的作用力，以利其下潛。
3. 改變鼓甲隆起的高度比例，發現在破水時，1倍與1.5倍的法向作用較小，入水後1倍的作用力矩較大，使其更快旋轉向下潛。
4. 施力的角度越小，破水時法向作用力也越小，但不影響作用力矩的大小；模型的隆起比例、下潛的速度才是影響作用力矩的主要因素。
5. 下潛時，蟲體先具有初速度，有助於下潛運動，速度越快使蟲身越容易旋轉，讓足部下潛方向的作用力變大。



## 未來的應用

- 1.我們可模仿鼓甲的外型來設計水中載具或探測器，運用於遊憩、救災、學術研究等用途。
- 2.我們可設計鼓甲造型的小型機械，透過調控運動速度和方向，形成背腹的壓力差控制上浮或下潛，使機具的運動更加靈活多變。

## 參考文獻

- [1] F. E. Fish ,& A. J. Nicastro(2003). Aquatic turning performance by the whirligig beetle: constraints on maneuverability by a rigid biological system. *The Journal of Experimental Biology* ,206. 1649-1656.
- [2] J. Voise, & Jérôme Casas(2010). The management of fluid and wave resistances by whirligig beetles.*J. R. Soc. Interface*,7. 343-352.
- [3] 葉盛暘、羅羽晴、劉汶宜、劉袁志、連志憲、楊佺澂(2012)。犀利水龜-點刻三線大龍蝨全記錄。中華民國第五十二屆中小學科學展覽會作品說明書。
- [4] 古秉正、劉正文、戴辰芳(2013)。『蝽蝽』欲動--小仰蝽運動模式之探討。中華民國第五十三屆中小學科學展覽會作品說明書。