

# 臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：工程學

作品名稱：蝌蚪游泳能力之探討

得獎獎項：赫伯特胡佛青年工程獎：第一名

學校 / 作者：國立台東女子高級中學  
國立台東女子高級中學

葉善茹  
陳妍妤

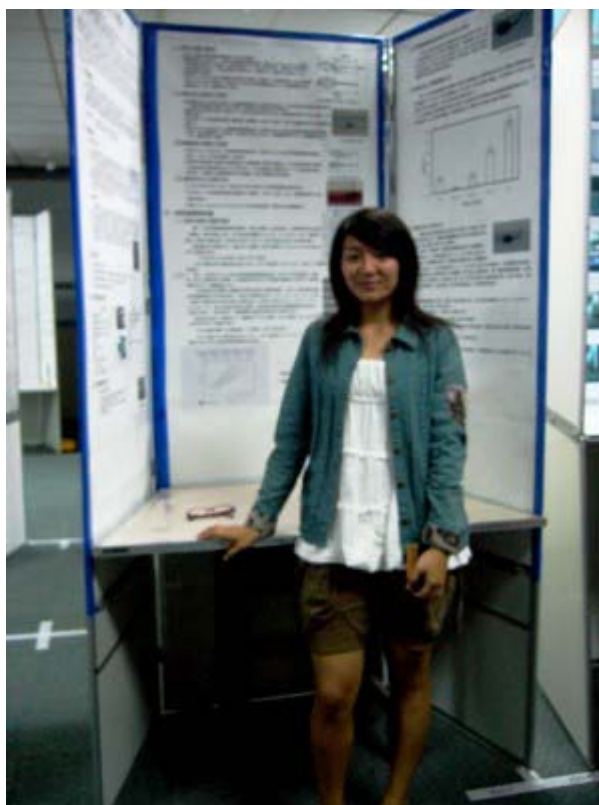
## 作者簡介及照片



我是葉善茹，來自美麗的台東，從小有很多的機會親近大自然，深刻的體驗到大自然壯闊之美，小時候喜歡在放假時和家人去爬山、在山中的溪邊玩耍，至今都成為兒時美好的回憶，以前熟悉的小蝌蚪今天成了我們研究的主題，在做科展的過程中著實學到了不少東西，培養了好的研究精神、態度。

從國中開始就很喜歡自然學科，而物理是在高中最喜歡的科目，能用精簡的公式表現出自然間的現象十分吸引人，可不是嗎？希望未來能朝這方面繼續學習發展。

## 作者簡介及照片



我是居住在台東的陳妍矜，目前就讀高中三年級。從小在杉原海邊長大，所以養成了我喜愛親近大自然的個性。從小對動物情有獨鍾，對於自然和理科一直抱持著很大的興趣，喜歡實際動手操作實驗更勝於閱讀。做科學展覽對我來說是個很新奇又具有挑戰性的嘗試，也是提升自己能力的好機會。完成一個科學展覽既需要實驗，也需要提出理論和書面的資料，也需要團體的配合和合作，是個非常難得又珍貴的經驗。

## 摘要

本研究主要探討蝌蚪之游泳運動特性，及游泳速度(V)與尾鰭長度(SL)、尾鰭高度(SH)、身體質量(M)、尾鰭擺動頻率(TBF)、擺動幅度(AMP)之關係，並分析蝌蚪游泳之體軸變化及流場變化。祈能了解蝌蚪之游泳運動特性，進而探討其適應環境之機制。

研究結果顯示：黑眶蟾蜍蝌蚪體重(M)愈重，則鰭長、鰭高亦隨之生長，並呈現高度相關性( $R^2=0.9381$ 、 $R^2=0.9809$ )。另外，尾鰭生長時之長度增加較多。蝌蚪體重(M)與鰭長(SL)、鰭高(SH)之迴歸方程式( $M=0.027SL+0.342SH-0.078$ ， $R^2=0.9832$ )。黑眶蟾蜍蝌蚪之游泳速度，會隨著尾鰭擺動頻率之增加而提高。尾鰭長度愈短之蝌蚪，增加游泳速度時尾鰭擺動頻率增加較多。蝌蚪游泳速度(V)與鰭長(SL)、擺動頻率(TBF)之迴歸方程式( $V=0.480TBF+4.804SL-4.381$ ， $R^2=0.9110$ )。

不同尾鰭長度蝌蚪之擺幅對體長之比率並無明顯變化，其擺動幅度(AMP)的範圍介於 0.45(BL)至 0.56(BL)之間。蝌蚪游泳時各部分體軸之擺動幅度自吻端開始(P=0)至 P 為 0.24 時逐漸遞減，且在 P 為 0.24 時呈現最小擺幅，但 P 超過 0.24 之後直至尾鰭部分卻又大幅遞增，其最大值出現在尾鰭末端(P=1)。蝌蚪游泳是以尾鰭快速向中心軸擺動，產生較大的前進動力，過了軸線則慢速擺動，以減少阻力。

## Abridgement

This investigation is to explore the swimming habits of tadpoles- the relationship between their swimming velocity, length and height of their tails, mass, the frequency at which their tails movement, and the amplitude of the tail's movement, as well as analysis their body axes, and the flow distribution of the water, in order to understand how the swimming patterns of the tadpoles are affected by the changes in their environment.

The results of this investigation have shown that as the mass of the tadpoles increases, both the length and the height of their tails also increase according to the R values of the tail increases according to the R values of 0.9381 and 0.9809. However, it is observed the length of the tail increases at a faster rate than its height during the tadpoles's growth. The formula which models the regression relationship between the tadpole's mass, tail length, and tail height are found to be ( $M=0.027SL+0.342SH-0.078$ ,  $R=0.9832$ ). It's also noted that as the length of the tadpole's tail decreases, the velocity and the frequency of the tail would increase (the length of the tail is inversely proportional to the tadpole's velocity and tail frequency). The formula which models the regression relationship between the tadpole's velocity, tail length and tail frequency is ( $V=0.480TBF+4.804SL-4.381$ ,  $R=0.9110$ )

The different frequency model by tails of different lengths do not appear to have an apparent relationship with the tail length, given that the amplitude is between  $0.45(BL)$  and  $0.56(BL)$ . As the tadpole swims, the angle between its oscillating body axes decrease as the P values increases from 0 to 0.24, their force the angle is at a minimum whom the P is at 0.24. Yet when P exceeds 0.24 the angle would increase dramatically. The maximum value is observed when  $P=1$ . The tadpole's swimming motion mainly relays on the rapid oscillations of the tail about the centre of mass (body axis)-producing a stronger driving force, and slowing down towards the end of each oscillation to minimise the friction forces acting on the tadpole, which in turn, decrease its velocity.

## 目錄

作者簡介及照片.....	1
中文摘要.....	3
英文摘要.....	4
目錄.....	5
壹、研究動機.....	6
貳、文獻探討.....	6
參、研究目的.....	8
肆、研究設備及器材.....	8
伍、研究過程與方法.....	9
陸、研究結果與討論.....	12
柒、結論.....	17
捌、參考文獻.....	18
玖、附錄.....	19

## 壹、研究動機

游泳池畔常聽有人說，游泳時練習打水，要如何用力，深度、姿式如何，才可有效打水，以提高游泳的速度。為什麼我用了所有力量打水，水花四濺，人卻還是在原地不動？

蝌蚪在校園水池中時常出現，為什麼蝌蚪游泳可以不費絲毫力氣？若是舉辦一場蝌蚪運動大會，哪一種體型的蝌蚪可以脫穎而出呢？是否和尾巴面積大小有關呢？或是哪種形狀的尾巴最受歡迎？難道重量大的蝌蚪就會行動緩慢？這些問題讓我們開始思考蝌蚪游泳的奧秘，絕對不是只有尾巴擺一擺那麼簡單。

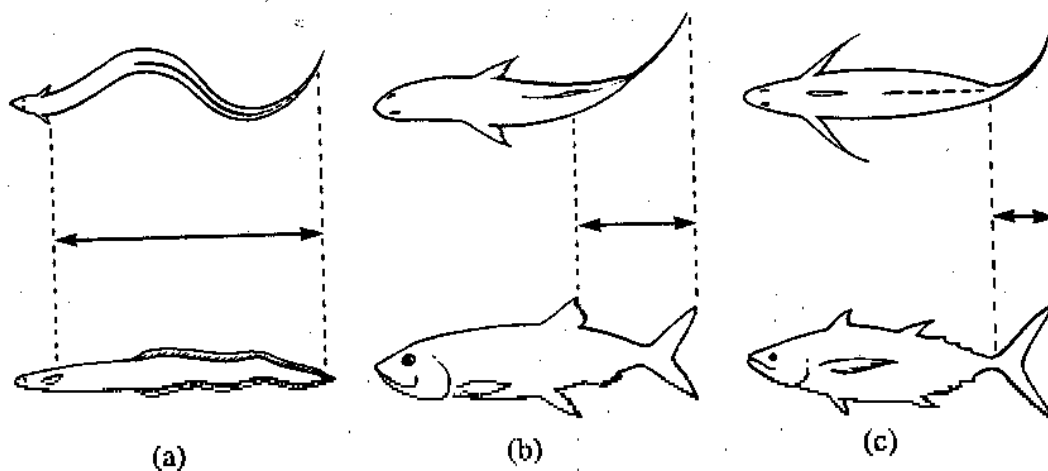
教材相關性：高二生命科學(下) 第六章第四節---動物的行為  
高二物質科學物理篇(下) 第十章---流體的性質

## 貳、文獻探討

### 一、魚類的游泳方式

一般的魚類或鯨豚類游泳方式都是以擺尾為主要推進方式，並輔以其他的鰭作為輔助推力來源及操控方向用。不論是鰭或尾，造成力量的方法都是以製造渦流而得。生物力學家將魚類擺尾的方式依身體擺動範圍分為三大類（圖一），而其命名方式是以各自的典型魚類學名來稱呼的(Vogel, 1994)：

- (一) 鰻行式(anguiliform)：如鰻魚、水蛇等，其行進單位距離所需推力成本最少。
- (二) 鱒行式(carangiform)：如鱒魚、鱸魚、鯡魚等，是最常見的方式，在速度、加速度和操控性有最好的平衡。
- (三) 鮪行式(thunniform)：如鮪魚、鯖魚、馬林魚等，常有高展弦比的尾鰭，在快速運動中最有效率。另外，鯨豚類也應屬於此類，但牠們是哺乳類，因此尾鰭是水平而非垂直的。



圖一 魚類擺尾的方式：(a)鰻行式、(b)鱒行式、(c)鮪行式

## 二、黑眶蟾蜍

黑眶蟾蜍(*Bufo melanostictus*)的頭部從吻端、上眼瞼到前肢基部有黑色隆起稜是牠辨識上的主要特徵(圖二)。它們全身佈滿粗糙的疣，與耳後的腮線形成禦敵的毒腺，當牠遇到危險時，會分泌白色的液體。黑眶蟾蜍最大可達 10 公分，體型肥胖後肢粗短，善於爬行，跳躍能力較差。它們的體色呈一致性的黑色或灰黑色，體長約 6-7 公分，比盤古蟾蜍小很多。黑眶蟾蜍廣泛的分佈於亞洲各地海拔 2000 公尺以下的地區，常出現在平地，尤其喜歡在住宅附近、草澤、稻田、空地等開墾地活動，可以說是最適應都市叢林生活的兩棲類。黑眶蟾蜍白天躲在石縫、洞中休息，晚上到住宅附近、路邊、空地覓食，繁殖期在每年 1 月到 6 月(林春富，2000)。



圖二 黑眶蟾蜍的外型



## 參、研究目的

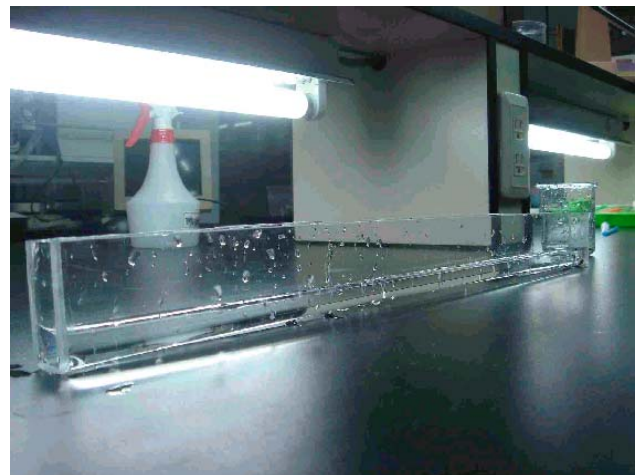
- 一、觀察蝌蚪及尾鰭之外形。
- 二、探討蝌蚪尾鰭長度(SL)、尾鰭高度(SH)及身體質量(M)對游泳速度(V)的影響。
- 三、探討蝌蚪尾鰭擺動頻率(TBF)、擺幅(AMP)對游泳速度(V)的影響。
- 四、分析蝌蚪游泳之體軸變化及流場變化。

## 肆、研究設備及器材

儀器設備	數量	儀器設備	數量
黑眶蟾蜍之蝌蚪	數隻	Adobe ImageReady CS 影片處理軟體	1
數位照相機 (FUJIFILM FinePix 6900)	1	Nero PhotoSnap SE 影像處理軟體	1
數位攝影機 (Panasonic NV-GS500)	1	Ulead PhotoImpact 8 軟體	1
數位攝影機(Canon ELURA85 A)	1	飼養箱	4
腳架	1	打氣機	4
電子天平(圖三)	1	透明長型水道(45×1.5×4cm)(圖四)	1
碼錶	1	紅色墨水	1
Pentium 4 個人電腦(ASUS)	1	針筒	1
MS Excel 軟體	1	採集網	1
CyberLink 威力導演軟體	1		



圖三 電子天平



圖四 透明長型水道(45×1.5×4cm)

## 伍、實驗過程與方法

### 一、蝌蚪採集與飼養

- (一)利用採集網收集校園水池內的黑眶蟾蜍蝌蚪(圖五)，若個體不完整或帶傷，則不予捕捉。
- (二)採集蝌蚪後，帶回實驗室，以電子天平秤重後置於飼養箱內飼養(圖六)。



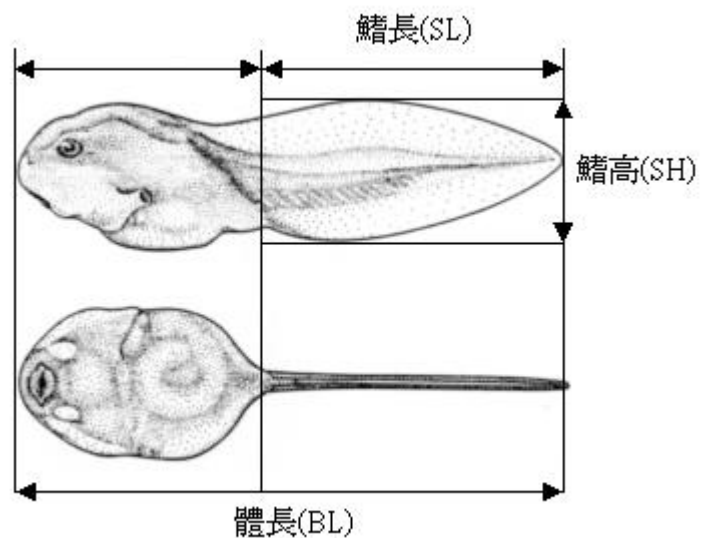
圖五 採集水池內之黑眶蟾蜍蝌蚪



圖六 飼養箱內的黑眶蟾蜍蝌蚪

### 二、蝌蚪尾鰭之觀察

- (一)利用立體解剖顯微鏡觀察蝌蚪之外形並繪圖。
- (二)將蝌蚪置於方格紙上，以數位照相機拍攝側面照。利用 Ulead PhotoImpact 8 軟體分析影像之測量工具選項，先測量影像上之方格長度單位後，換算每一單位所代表的實際長度(cm)，再測量蝌蚪之體長(BL)、鰭長(SL)、鰭高(SH)(圖七)，每一測量值皆三重複。



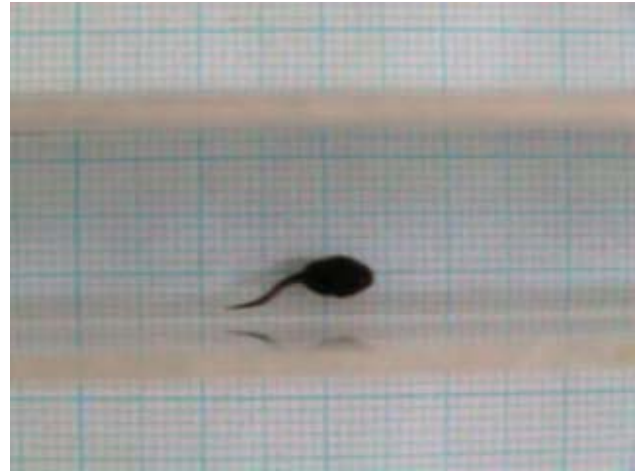
圖七 蝌蚪之體長(BL)、鰭長(SL)、鰭高(SH)

- (三)利用 Ulead PhotoImpact 8 軟體分析影像之測量工具選項，先測量影像上之方格面積(像素,pixels)後，換算每一像素(pixels)所代表的實際面積( $\text{cm}^2$ )，再測量蝌蚪之尾鰭面積(A)，每一測量值皆三重複。

### 三、蝌蚪游泳速度之量測

(一)實驗開始前 24 小時停止餵食，使實驗蝌蚪腹中之食物充分消化，才不致因消化食物而消耗能量，並避免因飽腹之情形下進行實驗，而影響正常游泳能力及狀態。

(二)將透明長型水道平置於方格紙上，注水於水道內至約 1cm 高，以將蝌蚪限制在平面上游泳，並測量水溫。



圖八 蝌蚪游泳之影像

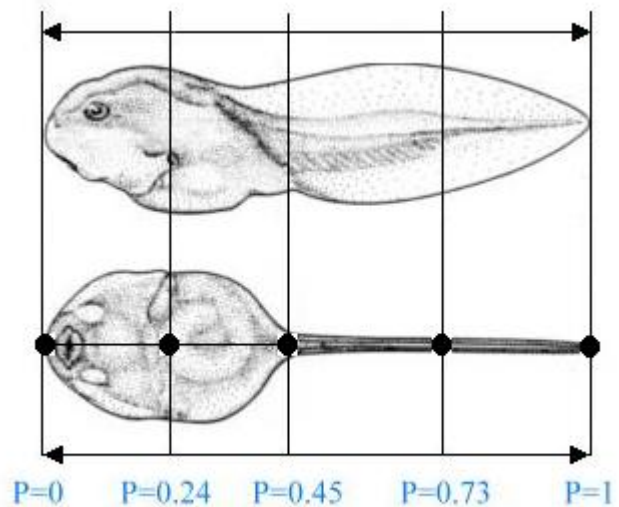
(三)於水道正上方架設腳架與數位攝影機，取蝌蚪一隻放入水道之一端，拍攝蝌蚪游泳之動態影像(圖八)。

(四)利用 Adobe ImageReady CS 軟體處理動態影像，並利用 CyberLink 威力導演軟體慢速播放影像，以每 1/30 秒為間隔取一張影像，檢視並計算其位移量、尾鰭擺動頻率(TBF)、擺動幅度(AMP)，每一測量值皆三重複。

### 四、體軸變化幅度之量測

(一)利用 Adobe ImageReady CS 軟體處理動態影像，並利用 CyberLink 威力導演軟體慢速播放影像，以每 1/30 秒為間隔取一張影像。

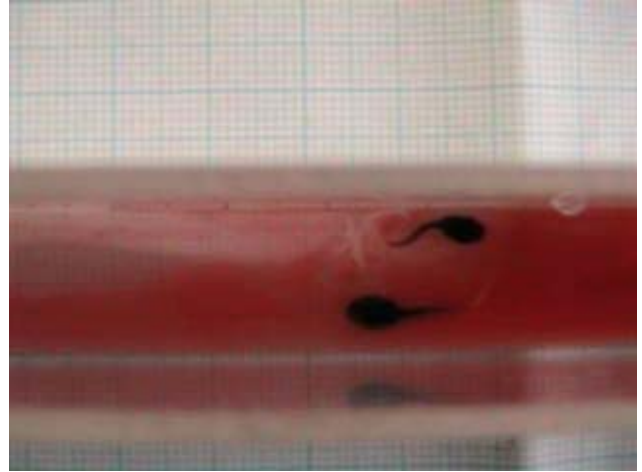
(二)將蝌蚪影像輪廓由吻端至尾鰭描繪出五個體軸代表點位置(圖九)，P 為自蝌蚪吻端至體軸代表點相對於蝌蚪體長(BL)之比例位置，P=0 代表蝌蚪之吻端位置，P=1 代表蝌蚪尾鰭末端位置。各體軸代表點隨時間之位置變動，即可得體軸之變化幅度。



圖九 蝌蚪之體軸代表點位置

## 五、蝌蚪游泳之流場分析

- (一)注水於水道內至約 1cm 高，加紅墨水(以紅色條紋代表流線)數滴並測量水溫。
- (二)於水道正上方架設腳架與數位攝影機，取蝌蚪一隻放入水道之一端，拍攝蝌蚪游泳之動態影像(圖十)。
- (三)利用 Adobe ImageReady CS 及 CyberLink 威力導演軟體，處理並分析動態影像。



圖十 蝌蚪游泳時之流線變化情況

## 陸、研究結果與討論

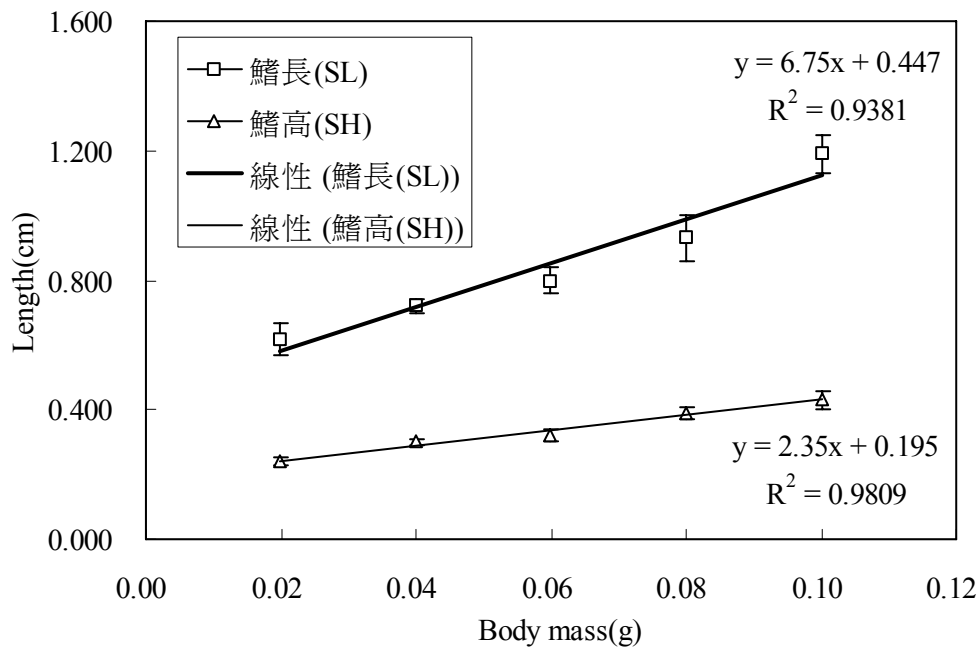
### 一、蝌蚪尾鰭之觀察測量

圖十一為黑眶蟾蜍蝌蚪體重與鰭長、鰭高之關係。由結果顯示，當蝌蚪體重(M)愈重，則鰭長、鰭高亦隨之生長，並呈現高度相關性( $R^2=0.9381$ 、 $R^2=0.9809$ )。另外，體重與鰭長、鰭高之迴歸直線，其斜率分別為 6.75 及 2.35，顯示尾鰭生長時之長度增加較多。

蝌蚪體重(M)與鰭長(SL)、鰭高(SH)之關係(附錄一)，經多元迴歸(multi-regression)分析的結果得下列迴歸方程式：

$$M=0.027SL+0.342SH-0.078, R^2=0.9832$$

由多元迴歸分析 F 觀察統計值是 58.680，大於 F 臨界值 19.0( $\alpha=0.05$ )。因此，上列迴歸方程式可用以預測黑眶蟾蜍蝌蚪體重。

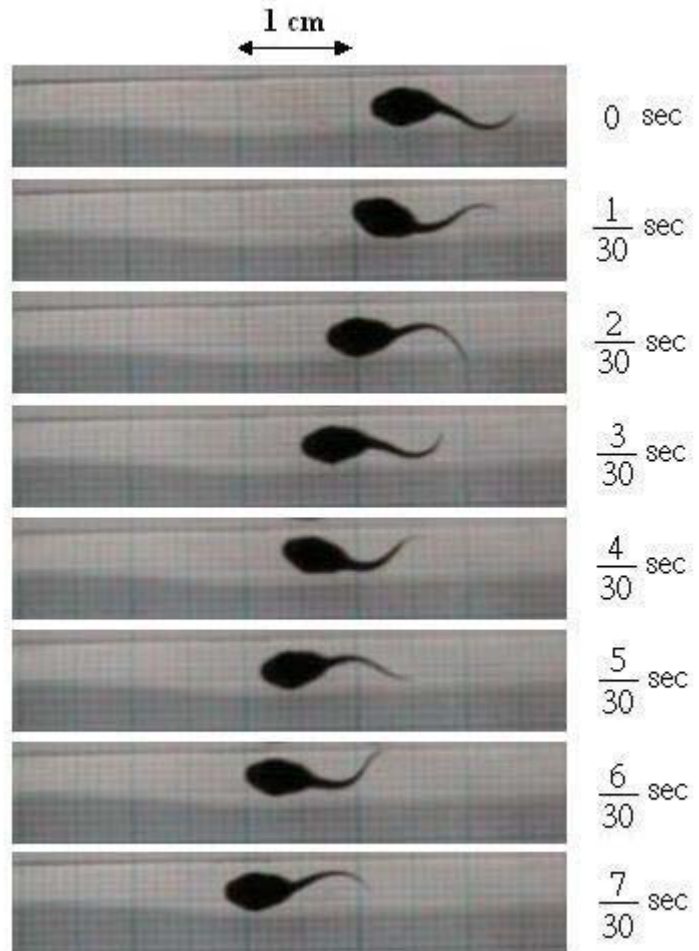


圖十一 黑眶蟾蜍蝌蚪之體重(W)、鰭長(SL)、鰭高(SH)關係曲線

## 二、尾鰭擺動頻率對蝌蚪游泳速度之影響

圖十二為利用 CyberLink 威力導演軟體慢速播放影像，以每  $\frac{1}{30}$  秒為間隔取一張影像，組合之蝌蚪游泳分解圖。以此圖檢視並計算不同尾鰭長度蝌蚪之位移量、尾鰭擺動頻率(TBF)、擺動幅度(AMP)。

不同尾鰭長度的蝌蚪之擺動頻率與游泳速度之關係如圖十三所示。游泳速度會隨著尾鰭擺動頻率之增加而提高。五種不同尾鰭長度(SL5、SL4、SL3、SL2、SL1，見附錄二)蝌蚪之擺動頻率與游泳速度之迴歸直線，其斜率分別為 0.6538、0.5507、0.4779、0.3914 及 0.3258，顯示尾鰭長度愈短之蝌蚪，增加游泳速度時尾鰭擺動頻率增加較多。由圖中亦顯示，相同速度時，尾鰭擺動頻率隨著尾鰭長度之增加而下降。

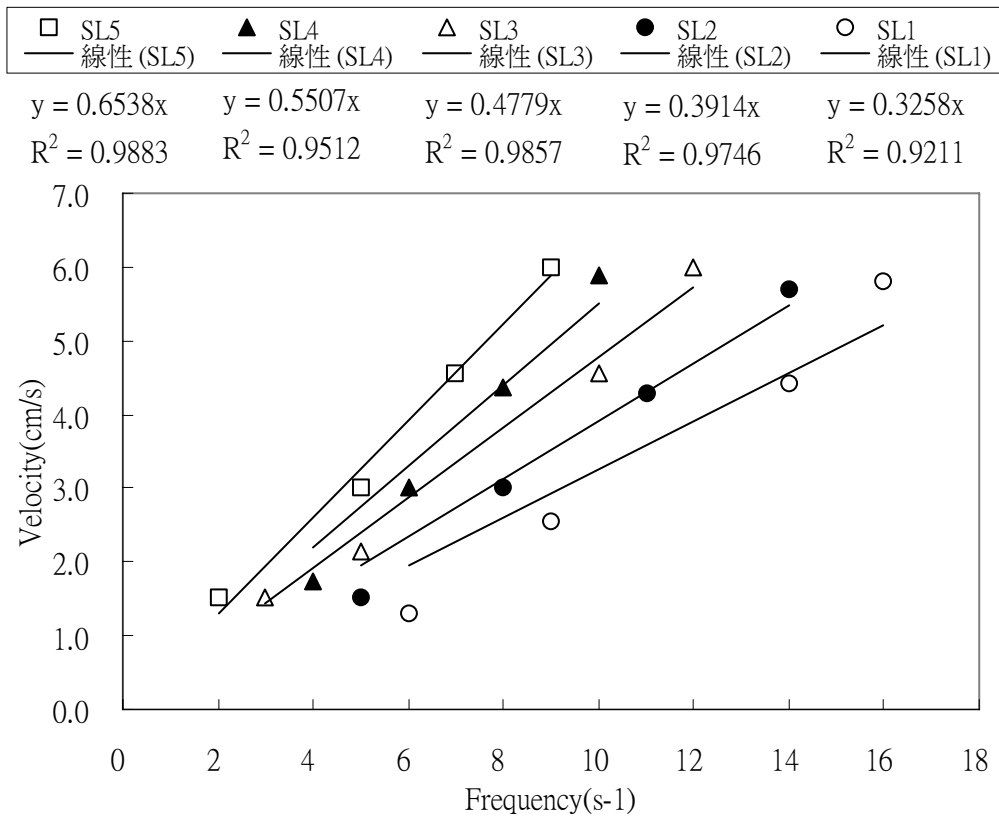


圖十二 蝌蚪游泳動作分解圖

蝌蚪游泳速度(V)與鰭長(SL)、擺動頻率(TBF)之關係，經多元迴歸(multi-regression)分析的結果得下列迴歸方程式：

$$\mathbf{V=0.480TBF+4.804SL-4.381, R^2=0.9110}$$

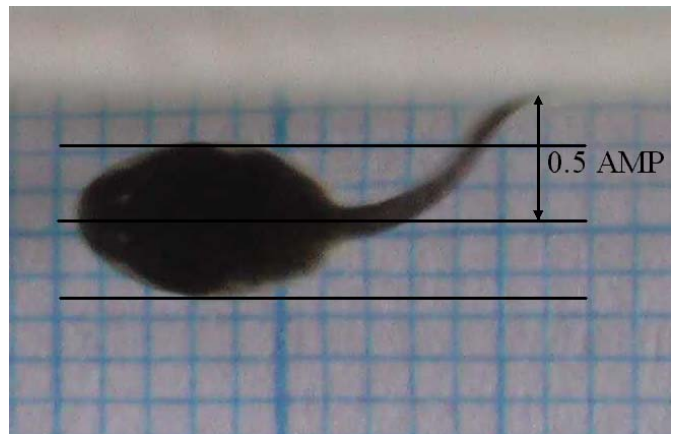
由多元迴歸分析 F 觀察統計值是 86.960，大於 F 臨界值 3.57( $\alpha=0.05$ )。因此，上列迴歸方程式可用以預測黑眶蟾蜍蝌蚪游泳速度。



圖十三 黑眶蟾蜍蝌蚪尾鰭擺動頻率對游泳速度之關係曲線

### 三、尾鰭擺動幅度對蝌蚪游泳速度之影響

比較不同尾鰭長度蝌蚪之擺幅隨著游泳速度而變化之情形，發現其擺幅對體長之比率並沒有明顯的變化，其擺動幅度 (AMP) 的範圍大致介於 0.45(BL) 至 0.56(BL) 之間(圖十四)。由此可知不管尾鰭長或游泳速度如何，蝌蚪之尾部大致維持一樣的形狀，蝌蚪主要靠尾鰭擺動頻率的增加來提高游泳速度。

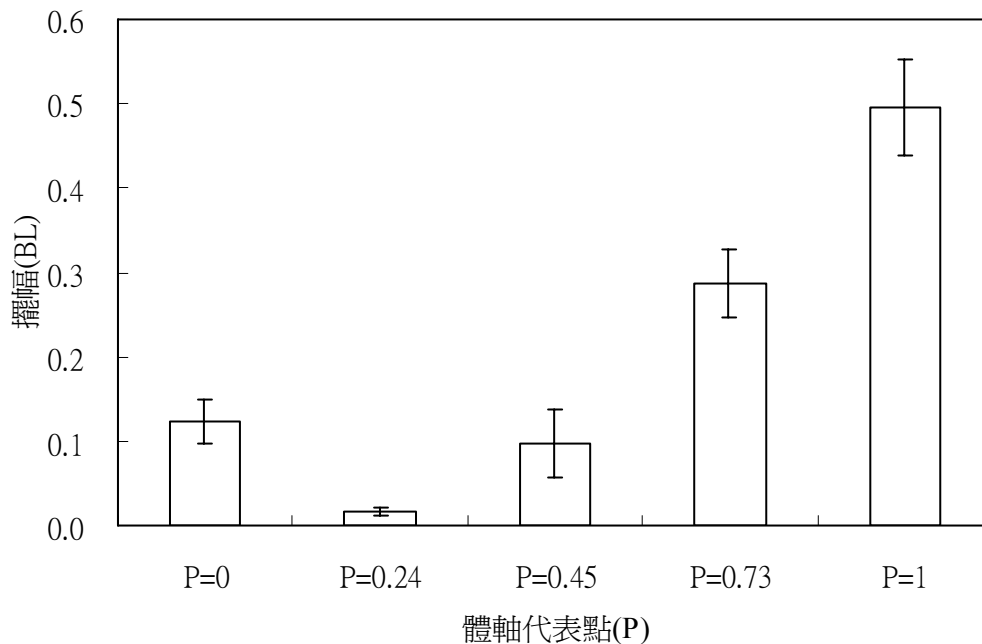


圖十四 蝌蚪尾鰭之擺動幅度

#### 四、蝌蚪游泳之體軸擺動分析

圖十五為黑眶蟾蜍蝌蚪各體軸代表點之擺動幅度。蝌蚪游泳時各部分體軸之擺動幅度自吻端開始( $P=0$ )至  $P$  為 0.24 時逐漸遞減，且在  $P$  為 0.24 時呈現最小擺幅，但  $P$  超過 0.24 之後直至尾鰭部分卻又大幅遞增，其最大值出現在尾鰭末端( $P=1$ )。

$P=0.24$  之體軸代表點為蝌蚪脊椎骨之前端，故從此處之後的體軸所能擺動的範圍亦隨之增大，而吻端至  $P=0.24$  之部份的擺動，推論應該是為了調整方向及維持身體平衡所致。

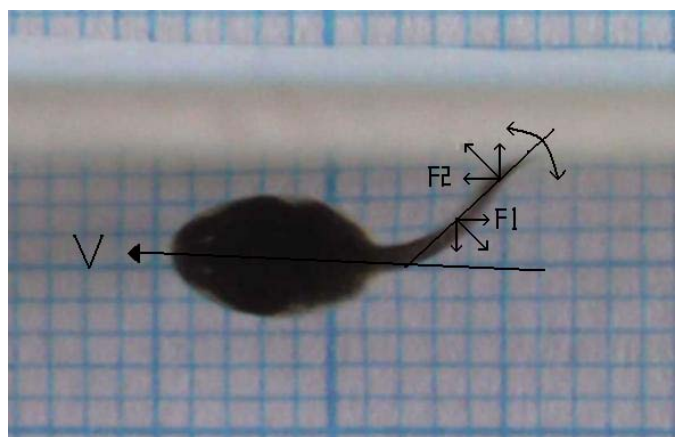


圖十五 黑眶蟾蜍蝌蚪各體軸代表點之擺動幅度

#### 五、蝌蚪游泳之流場分析

蝌蚪游泳時身體與流體之間的作用力模式十分複雜，因此使用紅墨水於水中，藉蝌蚪尾鰭擺動時產生的紅色條紋來代表流線。經由影像分析得出其力學模式(圖十六)。

當蝌蚪尾鰭順時鐘向中心軸擺動時，產生的阻力  $F$ ，可分解成兩個分量，有一分力  $F_1$  與中心軸平行向後推水，推動蝌蚪向前游，當尾鰭反時鐘遠離中心軸擺動時，產生的阻力  $F$ ，可分解成兩個分量，有一分力  $F_2$  與中心軸平行向前推水，此時蝌蚪則會後退。因



圖十六 蝌蚪尾鰭擺動之力場分析



此，蝌蚪游泳是以尾鰭快速向中心軸擺動，產生較大的前進動力，過了軸線則慢速擺動，以減少阻力；當兩力相加減值愈大，則前進速度愈快。

另外，蝌蚪尾鰭擺動時，會出現與中心軸垂直的分力(非前進方向的側向力)，根據其他學者研究發現(Dickinson et al., 2000)，這種側向力能增加運動的穩定性或操縱性。

## 柒、結論

- 一、黑眶蟾蜍蝌蚪體重(M)愈重，則鰭長、鰭高亦隨之生長，並呈現高度相關性 ( $R^2=0.9381$ 、 $R^2=0.9809$ )。另外，尾鰭生長時之長度增加較多。
- 二、蝌蚪體重(M)與鰭長(SL)、鰭高(SH)之迴歸方程式：  
$$M=0.027SL+0.342SH-0.078, R^2=0.9832$$
- 三、黑眶蟾蜍蝌蚪之游泳速度，會隨著尾鰭擺動頻率之增加而提高。尾鰭長度愈短之蝌蚪，增加游泳速度時尾鰭擺動頻率增加較多。
- 四、蝌蚪游泳速度(V)與鰭長(SL)、擺動頻率(TBF)之迴歸方程式：  
$$V=0.480TBF+4.804SL-4.381, R^2=0.9110$$
- 五、不同尾鰭長度蝌蚪之擺幅對體長之比率並無明顯變化，其擺動幅度(AMP)的範圍介於 0.45(BL)至 0.56(BL)之間。
- 六、蝌蚪游泳時各部分體軸之擺動幅度自吻端開始(P=0)至 P 為 0.24 時逐漸遞減，且在 P 為 0.24 時呈現最小擺幅，但 P 超過 0.24 之後直至尾鰭部分卻又大幅遞增，其最大值出現在尾鰭末端(P=1)。
- 七、蝌蚪游泳是以尾鰭快速向中心軸擺動，產生較大的前進動力，過了軸線則慢速擺動，以減少阻力。

## 捌、參考文獻

### (一)期刊論文

- 1.汪靜明 (1991) 台灣河川的生態保育，科學月刊。
- 2.陳政宏 (2002) 鯉魚如何躍龍門—水中生物的推進法，科學發展，360。
- 3.Dickinson, M.H., Farley, C.T., Full, R.J., Koehl, M.A.R., Kram, R., and Lehman, S. (2000) **How Animals Move: An Integrative View.** *Science*. 288, 100-106.
- 4.Drucker, E. G. & Lauder, G. V. (2000) **A hydrodynamic analysis of fish swimming speed : wake structure and locomotor force in slow and fast labriform swimmers.** *J. Exp. Biol.* 203, 2379-2393.
- 5.Hoff, K. & Wassersug, R. J. (1986) **The kinematics of swimming in larvae of the clawed frog, *Xenopus laevis*.** *J. Exp. Biol.* 122, 1-12.

### (二)圖書書籍

- 1.汪靜明 (1997) **流水生態觀—大甲溪之美**，台中縣政府。
- 2.林伯熔 (2003) **基隆河高速游泳魚類之游泳運動**，國立海洋大學漁業科學研究所碩士論文。
- 3.林春富 (2000) **高雄縣市野生動物—兩棲類**，南投：農委會特有生物中心。
- 4.楊平世、賴郁雲、鄭明倫和陳得康 (1998) **認識台灣的自然環境：台灣的野生動物**，台北：教育部。
- 5.Vogel, S. (1994) **Life in Moving Fluids: The Physical Biology of Flow**, 2nd ed., Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

玖、附錄

附錄一 不同編號蝌蚪之重量、尾鰭長度與高度

	SL5	SL4	SL3	SL2	SL1
重量(g)	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02
尾鰭長度(cm)	1.19	0.93	0.80	0.72	0.62
尾鰭高度(cm)	0.43	0.39	0.32	0.30	0.24

附錄二 不同編號蝌蚪之擺動頻率與游泳速度

	尾鰭長度(cm)	擺動頻率( $s^{-1}$ )	游泳速度(cm/s)	
SL5	1.19	2.0	1.53	
		5.0	3.01	
		7.0	4.55	
		9.0	6.00	
SL4	0.93	4.0	1.73	
		6.0	3.00	
		8.0	4.38	
		10.0	5.90	
SL3	0.80	3.0	1.52	
		5.0	2.14	
		10.0	4.56	
		12.0	6.00	
SL2	0.72	5.0	1.53	
		8.0	3.02	
		11.0	4.30	
		14.0	5.70	
SL1	0.62	6.0	1.31	
		9.0	2.54	
		14.0	4.42	
		16.0	5.80	

## 評語

本作品利用數位技術，分析蝌蚪的體形特徵及游泳能力之間的關係。本作品雖然成功地迴歸出能力與體形參數間關係公式，但就應用層面來看，其貢獻強度則較弱。