

# 以無線電量測系統探討池堰式魚道中 臺灣石鱸之溯游行爲

## Investigating the Upstream Migration of *Acrossocheilus Formosanus* in Pool-Weir Type Fishway by a Telemetry System

國立台灣大學農業工程學系所助理教授  
兼水工試驗所助理研究員

吳富春  
Fu-Chun Wu

國立台灣大學農業工程學系  
研究助理

鄭武慎  
Wu-Shen Cheng

### 摘 要

本研究利用無線電量測系統探討台灣石鱸在池堰式魚道中之溯游行爲模式。在實驗進行過程中，裝設在魚隻身上之發報器發出無線電訊號，經由水中天線、訊號接收器及數位頻譜處理器接收及轉換後，其資料可用以監測魚隻所在位置、泳速及加速度之變化情況。本研究為進一步提高資料之正確性及可信度，乃發展一套篩選資料之步驟流程，以排除雜訊亂碼及不合理之訊號。經由實驗觀察發現台灣石鱸大多利用潛孔快速通過隔板，本研究分析結果顯示台灣石鱸之最大突進泳速在 1.5 m/s 以上，最大加速度超過  $14\text{cm/s}^2$ ，魚隻之最大泳速及加速度除與魚隻體長有關外，亦受流量(流況)之影響。水池中靠近下游隔板之緩流區為魚隻休息區域，靠近上游隔板之跌水渦流區為魚隻上溯之最大阻礙，介於兩者之間區域為魚隻加速區，魚隻若能加速並維持適當泳速，則可達成溯游之目的。

**關鍵詞：**無線電量測系統，池堰式魚道，溯游，潛孔，隔板，突進泳速。

### ABSTRACT

This study uses a telemetry system to investigate the upstream migration of *Acrossocheilus formosanus* in the pool-weir type fishway with an orifice on the baffle. The transmitter installed on the testing fish transmits radio signals that can be received by underwater antenna and transformed into readable data by digital spectrum processor. The processed data can be used to monitor the movement of testing fish and investigate the

variations of swimming speed and acceleration. To improve the accuracy of data, we develop procedures for data screening. The erroneous and unreasonable signals can be eliminated through such procedures. It was observed in the experiments that the testing fish tends to pass the baffle through orifice. The experimental results indicate that the burst swimming speed of the testing fish is greater than 1.5 m/s; the maximum acceleration exceeds  $14\text{cm/s}^2$ . The burst swimming speed and maximum acceleration not only vary with body length, but also are influenced by flowrate. The mild-flow region near downstream baffle is the resting area for fish, whereas the free overfall at upstream baffle and the nappe-induced vortex region is the major obstacle for upstream migration. The accelerating area is between the mild-flow and vortex regions. The testing fish can migrate to the upstream pool if proper acceleration and swimming speed are maintained.

**Keywords:** Telemetry system, Pool-weir type fishway, Upstream migration, Orifice, Baffle, Burst swimming speed.

## 一、前言

台灣地區為進行水資源之開發利用及水土保持工程，在河川中建造水庫、攔河堰及防砂壩等水工結構物，除造成魚類棲地正常流量(Instream flow)及水理條件之改變外，也將原有之河川生態環境分割為不連續之封閉區段。為兼顧水資源開發利用與魚類保育，近來常在水工結構物中附設魚道(Fishway)以開闢魚類之通路，使魚類之遷徙不因擋水結構物之存在而受到阻絕。魚道之型式種類繁多，可按其結構型態或水理條件加以區分，一般分為階梯式、水路式及機械式三類。根據 Colavecchia et al. (1996)之實驗結果顯示，魚類在魚道中之溯游過程會調整其泳速以節省體力，在不同之水流速度中其溯游泳速亦不相同。此即表示魚道之水理條件會對魚類之溯游行為造成影響，因此瞭解其相互間之關係對於魚道之有效設計或現有魚道之改善，可提供較為精確之依據及參考。

Katopodis (1990)曾指出，魚類之突進游動(Burst swimming)為魚隻克服阻礙物而前進之重要機制，其泳速主要受到魚種、魚體大小及外形之影響(Webb, 1976; Webb, 1978; Taylor and McPhail, 1985)。近年來利用無線電儀(Telemetry)測試魚類行為表現之研究已蔚為風

潮，例如以編碼式無線電信號(Coded radio signals)測試大西洋鮭魚之突進泳速(Colavecchia et al., 1996)，以無線電儀測試溫度對魚類泳速之影響(Booth et al., 1995)及以EMG (Electromyogram)無線電信號測試野外鮭魚之游泳能力(McKinley, 1995)等。使用無線電儀可完整記錄魚類在自然狀況下自發性之游泳行為，並可求得魚類之平均泳速、最大泳速及泳速之變化情況，這些資料對於魚類溯游行為之研究與魚道設計均具應用價值。

本研究利用無線電儀系統監測魚類在魚道中之溯游行為，以探討魚道水理特性與魚類溯游行為模式之關係。有關無線電量測系統之設置、測試與初步試驗評估已於筆者前文(吳富春等，民國 87 年)中詳述，並初步證實利用無線電儀探討魚類溯游行為之可行性。本研究採用目前台灣地區最常用之池堰式魚道，並以具有溯游習性之台灣石鱸為試驗魚種進行實驗。為針對無線電儀記錄數據進行分析，並提高實驗結果分析之精確性，本研究發展一套資料篩選之流程步驟以去除各類雜訊亂碼。篩選過之數據經一系列之轉換，可得到魚隻之泳速及加速度等資料，並求出魚道各相關位置上出現不同速度及加速度之次數頻率，藉以探討台灣石鱸在池堰式魚道中之溯游行為模式。

## 二、研究方法

### (一) 無線電儀量測系統

本研究使用無線電儀量測系統(Telemetry system)監測魚類在魚道中溯游過程移動之情況，如圖 1 所示，此系統包括下列設備：(1)無線電發報器(Transmitter)，(2)無線電接收器(Telemetry receiver)，(3)數位頻譜處理器(Digital spectrum processor)及(4)水中天線(Underwater antenna)。有關本系統各項儀器之詳細說明參閱筆者前文(吳富春等，民國 87 年)。

### (二) 魚道溯游實驗

#### 1. 實驗場地

本研究使用台灣省特有生物研究保育中心位於台中縣東勢鎮之野外魚道試驗場進行魚道溯游實驗。魚道全長 12 公尺，高 0.9 公尺，寬 1 公尺，坡度 1/15。魚道共分為 10 組池堰，堰板間距 1.2 公尺，堰口寬度為 20cm，高 5cm，堰口斜對角開有潛孔，寬 8cm，高 6cm (詳參閱吳富春等，民國 87 年)。

#### 2. 實驗魚種

本實驗所使用之魚種為臺灣石鱚(*Acrossocheilus formosanus*)，屬淡水迴游魚類，捕捉自當地大甲溪河段，試驗魚隻體長自 7cm~20cm 不等，平均 11cm，平均體重 7.7g。臺灣石鱚喜棲於水流湍急或較清澈之溪潭中，以藻類及水生昆蟲為食，分布本省西部各河川流域，全年均可發現，數量頗多。

#### 3. 實驗步驟

##### (1) 裝設儀器與天線

本實驗所使用之七根水中天線分別佈設於 2 號及 3 號水池中，如圖 1 所示。當無線電發報器之位置介於兩天線之間時，訊號由距離較近之天線接收後予以記錄。天線固定於水池底部，當試驗魚隻進入水池時，便可由所記錄之天線號碼得知實驗魚隻所在位置範圍。在魚道溯游實驗之四個回合中(受試魚群到達上池即視為一回合)，天線皆以 40 公分為間距，當進行下一回合時，所有天線均往上游方向移動 10 公分，試驗完成

之後，理論上相同的受試魚隻應有 4 組資料，將其套疊便可得到以 10 公分為間距之實驗數據，可藉以進行較為詳細之魚類溯游行為模式分析。

##### (2) 魚隻安裝發報器

發報器安裝步驟係按照文獻所建議之標準程序(Colavecchia et al., 1996)施行麻醉及安裝手術，手術後魚隻之休息恢復時間以兩天為佳。時間太長則手術傷口易有感染發炎現象；時間太短則魚隻無法充分適應發報器。

##### (3) 溯游行為監測記錄

上述各項準備工作皆完成時，便將四隻受試魚隻及其餘 100 隻飼養於水槽中之野生台灣石鱚對照魚一同置於下池中，此時無線電儀系統則同時展開監測與記錄。在不影響魚隻之情況下，從旁觀察魚隻所在位置及其溯游行為，以做為分析比較之依據。下池之尺寸為 3.6×3.6×1.2 公尺，因此雖有 100 多隻試驗魚隻，但並無空間不足之情況發生，而魚隻在魚道中溯游時亦無明顯之擁擠現象，在一格水池中同時出現之魚隻數目最多時僅達 3~4 隻，根據判斷此魚群密度對魚隻之溯游並無太大影響。

#### 4. 實驗條件

本研究至目前進行四次魚道溯游試驗，共計有 20 次溯游成功之記錄，其中之 12 次記錄因為較連續完整，故用以分析魚隻之溯游行為，試驗條件如表 1 所示。表 1 中潛孔流速僅與魚道上下兩水池之水位差有關，此水位差由魚道坡度及

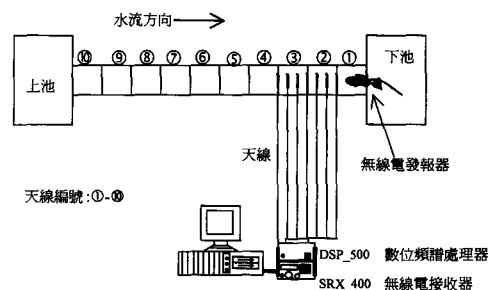


圖 1 無線電儀量測系統

表 1 實驗條件一覽表

實驗編號	實驗天數	溯游成功次數	可用數據組數	流量 (cms)	潛孔流速 (m/s)	水溫 (°C)	可用數據之編號
1-1 1-2 1-3 1-4	3 天	30 號: 1 次 31 號: 1 次 32 號: 2 次 33 號: 2 次	4	0.030	1.1	17	1-3-32 1-3-33 1-4-32 1-4-33
2-1 2-2 2-3 2-4	2 天	30 號: 1 次 31 號: 1 次 32 號: 1 次 33 號: 0 次	1	0.044	1.1	17	2-2-32
3-1 3-2 3-3 3-4	4 天	30 號: 1 次 31 號: 3 次 32 號: 0 次 33 號: 2 次	4	0.022	1.1	18	3-1-31 3-1-33 3-3-31 3-4-33
4-1 4-2 4-3 4-4	4 天	30 號: 0 次 31 號: 2 次 32 號: 2 次 33 號: 1 次	3	0.022	1.1	18	4-1-31 4-2-31 4-2-32

隔板間距決定，與流量大小無關(中村俊六，1992)，潛孔口中央部分之實測流速約 1.1 m/s。本研究試驗進行期間水溫均維持在 17°C~18°C 之間，水溫變化不大，根據觀察台灣石鱸在水溫 15°C~21°C 時活動力較旺，在水溫 14°C 以下時活動能力明顯降低。

### (三) 實驗數據篩選

實驗中裝設在魚隻身上之無線電發報器所發射之訊號先由水中天線接收，再經由無線電接收器與數位頻譜處理器轉換為可讀之資訊，包括接收時間、接收訊號之天線代碼及訊號強弱等。根據這些數據便可對魚類之溯游行為進行分析。惟在訊號接收及轉換過程中會出現一些雜訊亂碼或不合理之訊號，影響數據分析之正確性。故須先針對訊號進行篩選，以提高數據之合理性與分析之正確性。以下針對實驗數據之篩選步驟進行說明。

#### 1. 步驟一：去除不相關之數據

去除事件號碼(No. Event)及終止時間日期(Stop Time & Date)等與本實驗分析不相關之數

據。

#### 2. 步驟二：去除雜訊及亂碼

在無線電訊號接收轉換的過程中，可能因外在干擾而產生若干雜訊及亂碼，對實驗數據之分析造成困擾，故應去除之。資料之刪除與否乃依據下列各項數值之比較：

##### (1) CHANNEL(頻道)

本實驗中無線電頻道設定值為 13，若發現有其他值出現，則可能係屬亂碼，故將該筆資料刪除。

##### (2) CODE(發報器編號)

本實驗中所使用四個發報器之編號為 30、31、32 與 33，分別裝設於四隻魚身上，因此若發現有其他不同之編號，則可能係屬亂碼，故刪除之。

##### (3) ANTENNA(天線編號)

本實驗中七根天線之編號分別為 1 至 7，若出現其他值，則為亂碼，故刪除之。

##### (4) POWER(訊號強度)

一般而言，發報器距離天線越近時，訊號強度則越強，但其彼此間並無明確之關係存在。

理論上，訊號強度之範圍介於 1 與 225 之間，但根據經驗顯示其值過小時，通常以雜訊亂碼之成份居多，故須提高接受訊號強度之門檻值，以刪除雜訊亂碼。根據觀察發現，門檻值定在最大強度之四分之三時(即 Power >180 時)，便可排除大部分之雜訊亂碼，因此本研究中以 180 為訊號強度之下限值進行篩選工作。

### 3. 步驟三：研判是否斷訊並界定資料群

無線電儀所接收之原始資料，理論上應是間隔 5 秒之連續訊號，但實際所接收到之資料記錄會有斷訊之情況出現。尤其當上述之篩選步驟完成時，訊號不連續之情況將更加嚴重。本研究為兼顧實驗數據之可靠性與連續性，乃以 15 秒為最大容許時距，若兩訊號間時距大於 15 秒，則稱其為斷訊。有關資料斷訊發生之時機與斷訊資料之處理方法，詳述如下。

魚隻在魚道中溯游之過程可分為四個階段(如圖 2 所示)，第一階段魚隻在下池中徘徊伺機溯游而上。當魚隻進入魚道開始溯游時便為第二階段，此時無線電儀會記錄魚隻所在位置之改變。第三階段當魚隻到達上池後，會出現休息徘徊之情形。若記錄時間夠久，則在第四階段魚隻可能會由上池順游回到下池中。斷訊可能發生之時機則以魚隻運動過程之四個階段加以區分。

#### (1) 斷訊出現在第一階段

此種情況出現次數最為頻繁，可能係因下池為一自由空間，魚隻游動時若超出天線之收訊範圍，則會產生斷訊或訊號強度太弱之現象。若斷訊發生在第一階段，則僅保留連接第二階段運

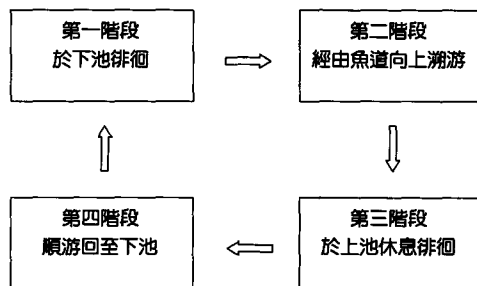


圖 2 魚隻在魚道中之運動過程

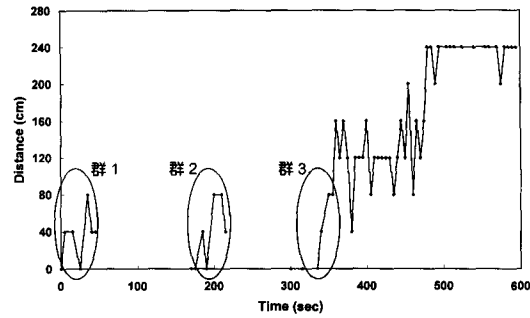


圖 3 斷訊資料示例圖

動之資料群，其他斷訊所分隔出來之資料群因對分析並無幫助，故刪除之。例如圖 3 之資料中有兩處斷訊，即會產生三個資料群，其中群 3 的資料因與第二階段之數據相連結，故加以保留，而群 1 與群 2 資料則刪除之。

#### (2) 斷訊出現在第二階段

此種情況發生機率較小，但若因斷訊造成資料被分割而無法判斷魚隻在此斷訊時間內之活動情形時，則應將斷訊前後之各資料群獨立閱讀，以分析在各段連續時間內魚隻游動之情形。

#### (3) 斷訊出現在第三階段

此種斷訊與出現在第一階段之斷訊原因類似，處理方法亦大致相同，唯一不同處則在於此時應將與第二階段相連之資料群加以保留，而將斷訊後之資料群加以刪除。

#### (4) 斷訊出現在第四階段

此時魚隻由上池往下池移動，以順流而下的情況居多，此種情況因不在本研究之探討範圍，故可略去。但若偶有部份資料為其順流而下之過程中改變方向溯游而上，亦可加以保留。倘若有斷訊的情形發生，則亦應將斷訊所分割之資料群獨立探討。

### 4. 步驟四：去除不合理之數據

經上述篩選過之時間—位置相對關係資料中仍存在若干異常脈衝(Pulse)之情況，為辨別此類訊號是否合理，須建立一套判斷準則，利用連續四筆資料為一資料組進行判斷。假設今有  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、... $A_n$  共  $n$  筆依序接收之連續資料，首

先以  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  與  $A_4$  四筆資料為一資料組開始進行判斷，以  $A_1$  為基準，藉由  $A_2$ 、 $A_3$  與  $A_4$  彼此間的時距及位置相對關係判斷  $A_2$  及  $A_3$  是否合理，如此依序檢查下去便可刪除不合理之訊號(如圖 4 所示)，說明如下：

(1)取最初四筆資料，其所對應之時間與天線號碼分別為  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  與  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 。相鄰兩筆資料間之時距可能為 5、10 或 15 秒，根據試驗實際觀測結果可假設在這三種不同時距內，魚隻所能穿越之最大天線數目分別為 2、3 及 4(即分別移動 80、120 及 160 公分)。今以三筆連續資料之彼此時距皆為 5 秒之情況為例(即  $t_2-t_1=t_3-t_2=5$ )，說明資料篩選之流程：

(a)若  $|a_2 - a_1| \leq 2$ ，表示魚隻在時距  $t_2-t_1$  內的移動距離小於或等於兩根天線間之距離，故  $A_2$  應屬合理，予以保留。此時令  $A_2$  為新的  $A_1$  繼續進行下一組資料的判斷。否則若  $|a_2 - a_1| > 2$ ，則還需進行步驟(B)之檢驗。

(b)若  $|a_3 - a_2| \leq 2$ ，代表雖然前述  $A_2$  與  $A_1$  的距離大於所設定之正常移動距離，但由於魚隻在時距  $t_3-t_2$  內的移動距離小於或等於兩根天線間之距離， $A_3$  可支持  $A_2$  的合理性，故保留  $A_2$ ，並以  $A_2$  為新的  $A_1$  進行下一筆資料合理性的檢驗；否則若  $|a_3 - a_2| > 2$ ，則需進一步檢討。

當資料  $A_2$  及  $A_3$  無法通過前述兩項檢驗時，可利用下列方法進行資料合理性的判斷，分別說明如下：

**第一類：**若  $(a_2-a_1) > 2$  且  $(a_3-a_2) > 2$ ，或是若  $(a_1-a_2) > 2$  且  $(a_2-a_3) > 2$  時，表示魚隻在此兩段時距內，有一致之移動趨勢以支持  $A_2$  之合理性，故保留  $A_2$ ，並以  $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  為新的  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ ，進行下一組資料之檢驗。

**第二類：**若  $(a_2-a_1) > 2$  且  $(a_2-a_3) > 2$ ，或是若  $(a_1-a_2) > 2$  且  $(a_3-a_2) > 2$  時，由於各點之間距離過大，形成一向上或向下之脈衝，且無明顯一致之移動趨勢，無法判斷  $A_2$  及  $A_3$  何者

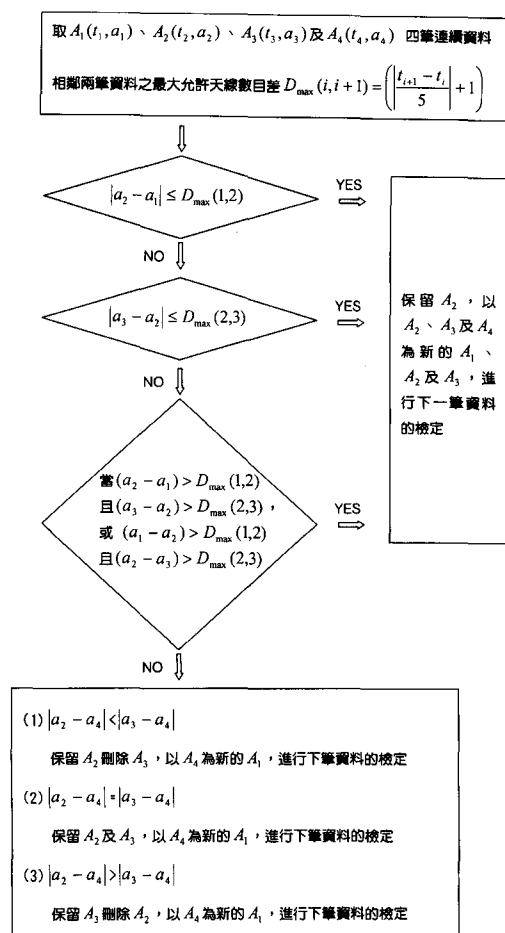


圖 4 刪除不合理數據之流程圖

有誤，故須利用  $A_4$  輔助判別。分別求出  $A_4$  與  $A_2$ 、 $A_3$  之距離，視較接近者為相同之資料群組而加以保留，而另一筆資料則刪除之。其判別式如下：

- (a)  $|a_2 - a_4| < |a_3 - a_4|$   
表示  $A_4$  與  $A_2$  較為相近，故保留  $A_2$  而刪除  $A_3$ ，並以  $A_4$  為新的  $A_1$ ，進行下一組資料之檢驗。
- (b)  $|a_2 - a_4| = |a_3 - a_4|$   
表示  $A_4$  與  $A_2$ 、 $A_3$  之距離相等，此時視此兩筆資料皆屬合理而加以保留，並以  $A_4$  為新的  $A_1$ ，進行下一組資料之檢驗。
- (c)  $|a_2 - a_4| > |a_3 - a_4|$

表示  $A_4$  與  $A_3$  較為相近，故保留  $A_3$  而刪除  $A_2$ ，並以  $A_4$  為新的  $A_1$ ，進行下一組資料之檢驗。

- (2) 依此原理，當連續兩點之時距分別為 10 或 15 秒時，將所能穿越之最大天線數目分別以 3 或 4 替代上例中之 2，即可進行檢驗。
- (3) 經上述篩選步驟後，因刪除了部份資料，可能又造成相鄰兩筆資料之時距超過最大容許時距(15 秒)之情況。此時應用步驟三再將資料群進行分割，並利用上述流程重新進行資料篩選之工作。

經過上述篩選步驟所保留下來之數據具有較高之可信度，可供後續分析之用。

### 三、結果與討論

以上所述之數據代表魚隻移動過程之位置—時間相對關係，但每根天線均有其接收訊號所可能涵蓋之範圍，例如當位於 80cm 之天線接收到訊號時，魚隻之可能所在位置應為  $80 \pm 20$  cm，故將天線號碼轉換為距離座標時應包含此一可能涵蓋之位置範圍，如圖 5、7 與 8 之距離—時間關係圖所示。而利用各點之距離及時間資料計算魚隻移動之速度及加速度值時亦應將魚隻所在位置之不確定性納入考量，求出可能之速度及加速度範圍。某一時間點之速度值是利用下一時間點與該時間點之距離差除以其時間差計算而得，而加速度值乃是利用下一時間點與該時間點之速度差除以其時間差而得，其結果如圖 5、7 及 8 所示，圖中距離座標加框處為池堰之隔板位置，0 至 120cm 間為 1 號池，120 至 240cm 間為 2 號池。透過上述圖像吾人可得知魚隻在不同時間之所在位置、速度及加速度之變化。根據前述 12 組數據計算所得之速度及加速度值範圍如表 2 所示，以上述方法所求得之速度僅為魚隻在水流中之相對泳速，此相對泳速須加上水流速度(例如：潛孔流速 1.1m/s)方為魚隻移動之絕對泳速，即魚隻為達溯游目的所產生之真正突進泳速。

另外本研究為分析魚隻在魚道中溯游是否具有有一定之行為模式，亦即其泳速及加速度是否

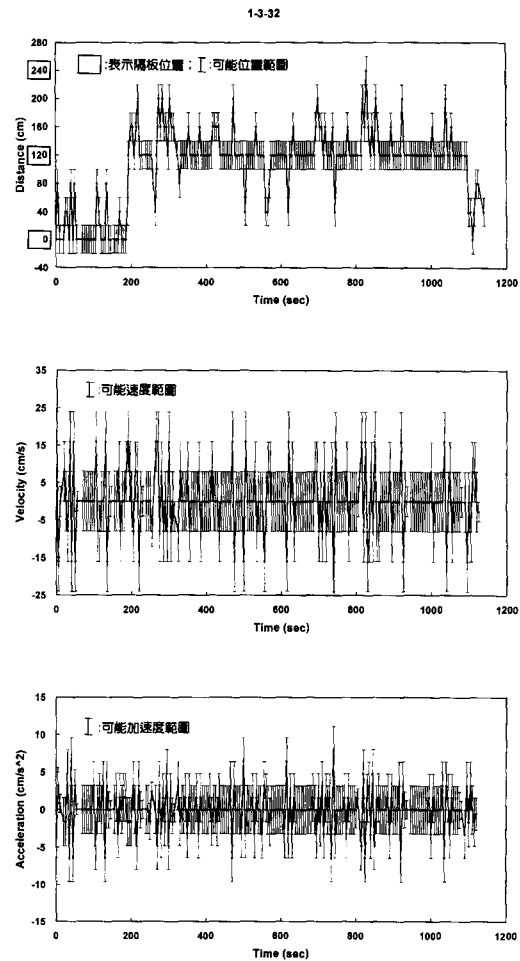


圖 5 1-3-32 溯游過程圖

因其所在位置之不同而有所調整，故將各天線位置之速度及加速度平均值資料經統計後，繪製成速度及加速度之出現次數頻率圖，如圖 6 及圖 9 所示，圖中圓圈之大小比例代表在該位置上出現此種速度或加速度之次數頻率，吾人可藉由此種圖像探討魚隻在魚道中不同位置上出現次數頻率較高或較具代表性之泳速及加速度，以分析魚道中水理流況之分布對魚隻溯游行為之影響。根據前述 12 組資料之分析結果顯示，台灣石鱸在魚道中之溯游行為雖有個體上之若干差異，但皆具有相似之共通特性，故本文僅就其中較具代表性之三組資料進行說明如下。

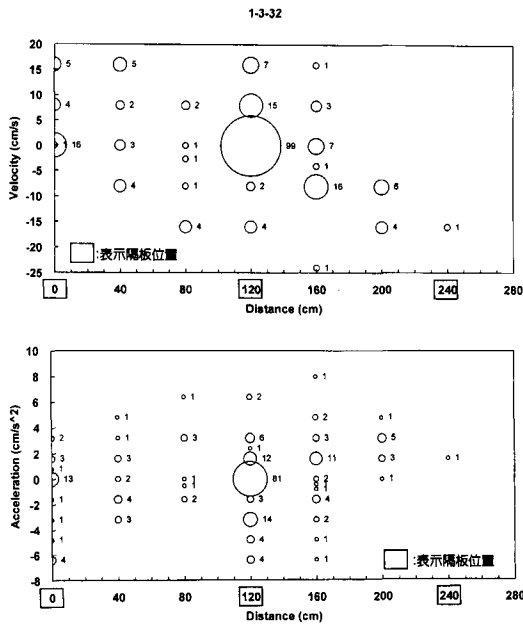


圖 6 1-3-32 速度及加速度出現次數頻率分布圖

(1) 實驗數據 1-3-32 為第一次魚道試驗中編碼 32 號魚隻之第 3 回合溯游記錄，實驗進行時此受試魚隻一開始即在 1 號水池來回游動，根據其位置、速度與加速度之變化圖（圖 5）顯示，在 1 號水池內受試魚隻曾經出現最大可能相對泳速 24cm/s (最大絕對泳速 1.34m/s) 數次，根據研判受試魚隻曾多次試圖上溯通過隔板，但並未成功，並於試驗進行至 55 秒時，停留在 1 號隔板前 50 秒，實驗進行至約 200 秒時，順利通過 2 號隔板，其最大可能相對泳速及加速度分別約為 24cm/s (最大絕對泳速 1.34m/s) 與  $1.6\text{cm/s}^2$ 。此後受試魚隻大部份時間在 2 號水池內活動，並陸陸續續停留在 2 號隔板前，其平均停留時間約 30 秒左右，偶有回游至 1 號水池的情況發生，但總能快速回到 2 號水池，雖亦曾試圖通過 3 號隔板，但始終沒有成功，隨實驗時間的增長，魚隻向上溯游的頻率減少，據判是在多次試圖溯游不成之後，受試魚隻亦感疲憊，故終於在實驗進行 1100 秒之後，順游回到下池。此外根據位置—時間關係圖可發現受試魚隻鮮少

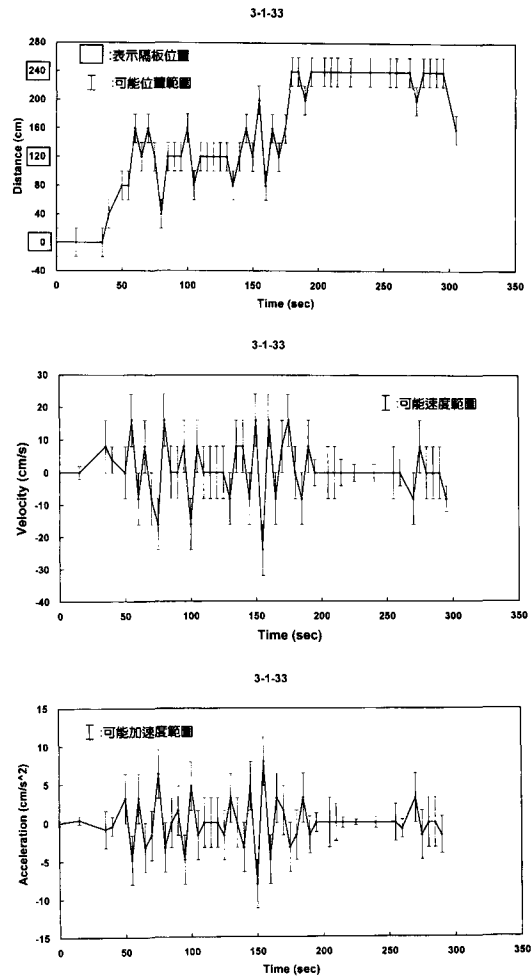


圖 7 3-1-33 溯游過程圖

在距隔板下游 40 公分的區間(如 80-120cm 及 200-240cm 這兩段區間)內活動，可能係因上游水流通過隔板後形成跌水落至水池，在消能過程所形成之渦流不利魚隻活動所致。

根據速度及加速度之出現次數頻率分布圖(圖 6)顯示，在隔板處(圖中距離座標加框處)之相對泳速及加速度之出現頻率以  $0\text{cm/s}$  與  $0\text{cm/s}^2$  居多，即使通過隔板後，受試魚隻亦大部份選擇於隔板上游面停留，故判斷此區域為魚隻之休息區。整體而言，當受試魚隻離開休息區時即有向上溯游之趨勢，此可由 0、



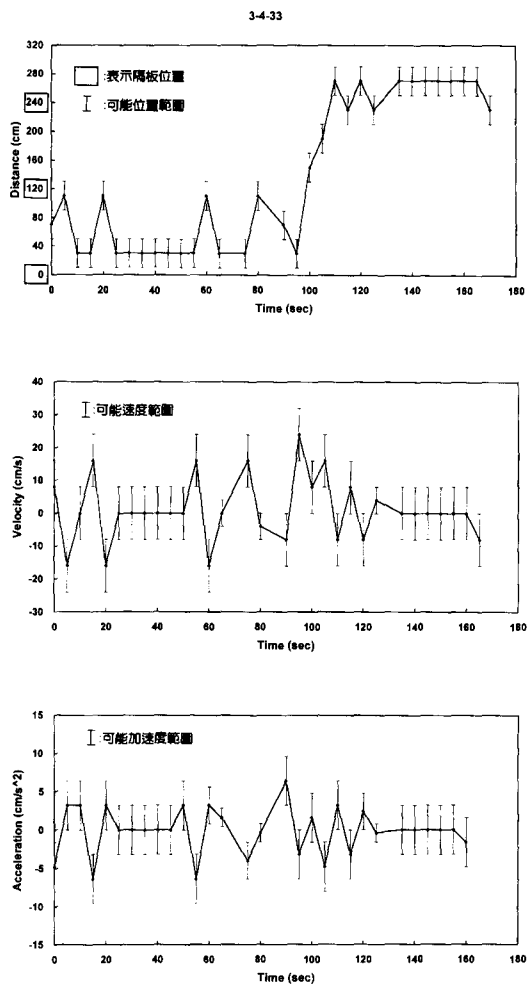


圖 8 3-4-33 溯游過程圖

40、120 及 160cm 這四個位置上具有相當之速度及加速度值而得到驗證。但當受試魚隻溯游至渦流區(80-120cm 及 200-240cm)時，溯游行爲受阻(相對泳速絕大多數爲負值)，因此可推斷隔板下游面爲魚隻能否溯游成功之關鍵區，魚隻若能維持適當之泳速及加速度順利通過隔板，則可進入下一水池繼續其溯游之過程。

在本組數據中所出現之最大可能加速度值爲  $11.2\text{cm/s}^2$  (如表 2 所示)，發生於實驗進行 740 秒時，發生位置在 5 號天線附近(即 200

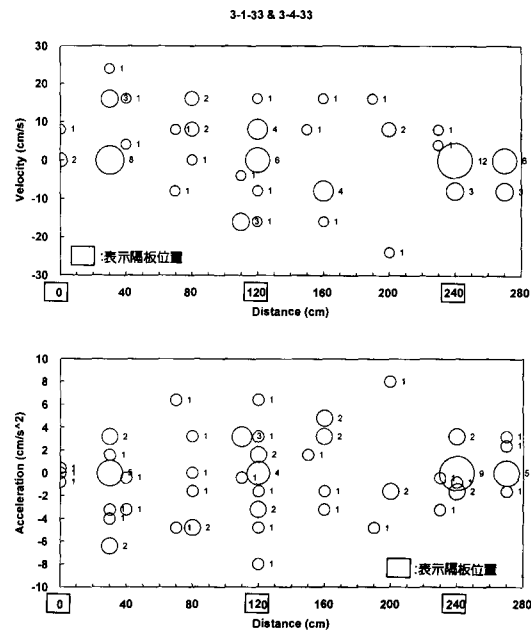


圖 9 3-1-33 & 3-4-33 速度及加速度出現次數頻率分布圖

cm 附近，與上下隔板之距離爲 40 及 80cm，而當時之相對泳速中間值爲  $-24\text{cm/s}$  (最大及最小可能相對泳速分別爲  $-16$  及  $-32\text{cm/s}$ )。此數據顯示魚隻溯游之最大加速度發生在渦流區，而其相對於水流之泳速爲負值。

表 2 魚隻泳速及加速度值範圍

序號	數據編號	相對泳速範圍(m/s)	絕對泳速範圍(m/s)	加速度範圍( $\text{cm/s}^2$ )
1	1-3-32	-0.32~0.24	0.78~1.34	-9.6~11.2
2	1-3-33	-0.32~0.32	0.78~1.42	-11.2~11.2
3	1-4-32	-0.48~0.40	0.62~1.5	-11.2~12.8
4	1-4-33	-0.24~0.32	0.86~1.42	-11.2~11.2
5	2-2-32	-0.48~0.48	0.62~1.58	-19.2~14.4
6	3-1-31	-0.24~0.24	0.86~1.34	-6.4~6.4
7	3-1-33	-0.32~0.24	0.78~1.34	-11.2~11.2
8	3-3-31	-0.32~0.32	0.78~1.42	-11.2~11.2
9	3-4-33	-0.24~0.32	0.86~1.42	-9.6~9.6
10	4-1-31	-0.24~0.40	0.86~1.5	-11.2~12.8
11	4-2-31	-0.24~0.24	0.86~1.34	-9.6~9.6
12	4-2-32	-0.32~0.40	0.78~1.5	-11.2~11.2

(2)實驗數據 3-1-33 為第三次魚道實驗中編碼 33 號魚隻第一回合溯游記錄，其溯游過程、速度及加速度變化如圖 7 所示，此受試魚隻於 60 秒時，以 24cm/s 之最大可能相對泳速(最大可能絕對泳速 1.34m/s)通過 2 號隔板(最大可能加速度 $-1.6\text{cm/s}^2$ )，之後便在 1 號及 2 號水池中來回移動，並於實驗進行 110 秒時，在 2 號隔板上游停留 20 秒，其後又試圖溯游突破渦流區(200-240cm)。當實驗進行 180 秒後終於以上述之突進泳速通過 3 號隔板，並於 3 號隔板(240cm)休息區停留約 80 秒，直到實驗進行約 280 秒時，受試魚隻方才自上游順流而下。

本組數據中所出現之最大可能加速度值亦為  $11.2\text{cm/s}^2$ ，發生於 155 秒時，發生位置亦在 5 號天線附近，當時之相對泳速中間值亦為  $-24\text{cm/s}$ (最大及最小可能相對泳速亦分別為  $-16$  及  $-32\text{cm/s}$ )。這些數據與上組(1-3-32)數據完全吻合。

(3)實驗數據 3-4-33 為第三次魚道實驗中編碼 33 號魚隻第四回合溯游記錄，此時水中天線之擺設位置均向上游方向移動 30cm，魚隻之溯游過程、速度及加速度變化如圖 8 所示。圖中顯示受試魚隻起初於 1 號水池來回移動，途中在距 1 號隔板 30cm 處停留約 30 秒，待實驗進行至 94 秒與 108 秒時，分別以  $32\text{cm/s}$  及  $24\text{cm/s}$  之最大可能相對泳速(即  $1.42\text{m/s}$  及  $1.34\text{m/s}$  之最大可能絕對泳速)，一舉通過 2 號及 3 號隔板而到達 3 號水池(其最大可能加速度分別為  $0\text{cm/s}^2$  與  $-1.6\text{cm/s}^2$ )，並於 270cm 處停留，直到 160 秒左右時訊號中斷，推測此時受試魚隻已到達上池且超越收訊範圍，成功地完成魚道溯游之過程。

圖 9 所示為套疊 3-1-33 與 3-4-33 兩組數據所得之速度與加速度出現次數頻率分布圖。由圖中可知每一水池約可區分為三個區域，即靠近下游隔板之休息區，靠近上游隔板之跌水渦流區，以及介於兩者之間的加速區。在休息區(0-40cm 及 120-160cm)中，正負值相對泳速皆有出現，且加速度之正負值數目相

當，顯示在此區域魚隻有徘徊游動之情況，其中若干較大之負加速度並非魚隻自發性之加速動作，而是魚隻順游而下時受到水流之加速作用而形成。在 40-80cm 及 160-200cm 之加速區中則以正值相對泳速與加速度較多，其中若干較大之負值泳速及加速度亦屬順游而下，並非自發性之加速動作，在 80-120cm 及 200-240cm 之衝刺區中可明顯看出正值相對泳速搭配負值加速度及負值相對泳速搭配正值加速度之情況，此顯示魚隻若以正值相對泳速通過隔板時則試圖減速休息；而魚隻若以負值相對泳速順游而下，則其試圖以加速度動作避免被水流沖回至下池。值得一提的是，1-3-32 與 3-4-33 之魚隻溯游行為模式雖大致相同，但 3-4-33 之最大可能絕對泳速( $1.42\text{m/s}$ )大於 1-3-32 之最大可能絕對泳速( $1.34\text{m/s}$ )，由於潛孔流速均為  $1.1\text{m/s}$ ，而實驗一之流量( $0.03\text{cms}$ )大於實驗三之流量( $0.022\text{cms}$ )，故推測此一差異應係受試魚隻之個體差異所造成。

本組數據中所出現之最大可能加速度值為  $9.6\text{cm/s}^2$ ，發生於 90 秒時，發生位置介於 1 號與 2 號隔板之間(距 1 號與 2 號隔板距離分別為 70 與 50cm)，屬加速衝刺區，當時之相對泳速中間值為  $-8\text{cm/s}$ (最大及最小可能相對泳速分別為 0 及  $-16\text{cm/s}$ )，這些數據亦與上述兩組數據大致吻合。

由表 2 所列之魚隻泳速及加速度值範圍可知本研究所使用之台灣石鱸，最大可能相對泳速介於  $0.24\text{m/s}$  至  $0.48\text{m/s}$  之間，若加上潛孔流速則其最大可能絕對泳速介於  $1.34\text{m/s}$  至  $1.58\text{m/s}$  之間。根據塚本與梶原(1973)所提出之經驗式得知魚類之突進泳速與其體長成正比，即

$$\text{突進泳速}=10 \text{ 倍體長}$$

式中突進泳速之單位為  $\text{cm/s}$ ，體長之單位為  $\text{cm}$ 。本研究所以使用之試驗魚隻體長均在  $15\text{cm}$  以上(選擇較大魚隻以利裝設發報器)，故估計其突進泳速約為  $1.5\text{m/s}$ ，與實驗數據所求得之絕對泳速非常吻合，各組數據之最大可能絕對泳速值可能因魚隻個體差異或流況差異而略有不同，例如

2-2-32 數據所求得之泳速及加速度均較其他組數據為大，可能係因其較大之流量所造成之流況使魚隻須使用較大之泳速及加速度方能達到溯游之目的。

另外由實驗觀察得知，試驗魚隻以三種方式通過隔板，一為自下方水池跳躍至上方水池；二為沿著水舌(Nappe)逆流而上；三為利用潛孔快速通過。台灣石鱸主要係以第三種方式通過隔板，魚隻進入下一個水池後，大多會在氣泡較少、離跌水較遠之緩流區(隔板上游面附近)稍事休息，以調節體力等待繼續上溯。

#### 四、結論

1. 本研究利用無線電量測系統監測魚隻在魚道中溯游行為，並發展一套篩選資料之步驟流程，以去除雜訊、亂碼、斷訊資料以及不合理之脈衝訊號，藉以提高資料之正確性。本研究之分析結果顯示經篩選過之資料可用於分析魚隻泳速及加速度，其結果可提供更精確之魚道溯游行為模式分析。
2. 本研究分析結果顯示魚道之每一水池可區分為三個區域，即靠近下游隔板之休息區；靠近上游隔板之跌水渦流區；以及介於兩者間之加速區。在休息區中魚隻之移動屬於徘徊游動之情況；在加速區中魚隻之移動以正值相對泳速及加速度較多；在跌水渦流區衝刺之魚隻，其加速度之方向與相對泳速之方向相反，顯示魚隻在此區有試圖減速休息或加速避免被水流沖回之傾向。
3. 本研究之分析結果顯示台灣石鱸之最大可能相對泳速介於 0.24~0.48m/s 之間，最大可能絕對泳速介於 1.34~1.58m/s 之間，與日本之經驗公式所求突進泳速非常吻合。最大可能加速度介於 6.4~14.4cm/s<sup>2</sup> 之間。實驗結果亦顯示魚隻之突進泳速除與魚隻體長有關外，亦受流量之影響，較大之流量所造成之流況迫使魚隻產生較大之泳速及加速度，以達成溯游之目的。

#### 五、謝誌

本研究承蒙行政院國科會補助計畫經費(計畫編號 NSC-87-2313-B-002-073)，實驗期間承台灣省特有生物研究保育中心胡通哲博士及于錫亮博士在實驗場地設備及魚類溯游試驗方面提供諸多協助，謹致謝忱。

#### 六、參考文獻

1. 吳富春、李國昇、鄭武慎，1998，魚道水理特性對魚類溯游行為影響之研究，行政院國科會專題研究計畫成果報告。
2. 吳富春、李國昇，1998，無線電量測系統應用在魚道溯游研究之初步實驗評估，中國農業工程學報，44(1)：59-66。
3. 中村俊六，1992，牟呂松原頭首工魚道水理實驗業務報告書，日本豐橋科技大學。
4. 塚本勝巳、梶原武，1973，魚類之游泳速度及游泳能力，水產土木，10(1)：31-36。
5. Booth, R., R. S. McKinley, M. M. Sisak, and F. Ojkabd, 1995, Proc. European Workshop on Biotelemetry, April 1-7, Liege, Belgium. pp. 21-30.
6. Colavecchia, M. V., C. Katopodis, R. Goosney, D. A. Scruton, and R. S. McKinley, 1996, Measurement of Burst Swimming Performance in Wild Atlantic Salmon (*Salmo Salar*) Using Coded Radio-Transmitted Signals. *Ecohydraulics 2000*, Quebec, June.
7. Katopodis, C., 1990, Advancing the Art of Engineering Fishways for Upstream Migrants. Proc. International Symp. on Fishways, Gifu, Japan, pp. 19-28.
8. McKinley, R. S., 1995, *In Situ* Measurement of Swimming performance in Wild Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Using Radio Transmitted Electromyogram (EMG) Signals. Proc. First Conference and Workshop on Fish Telemetry in Europe. Liege, Belgium. April 1-6.
9. Taylor, E. B., and J. D. McPhail, 1985,

- Variation in Burst and Prolonged Swimming Performance Among British Columbia Populations of Coho Salmon, *Oncorhynchus kisutch*, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 42: 2029-2033.
10. Webb, P. W., 1976, The Effect of Size on the Fast-start Performance of Rainbow Trout *S. gairdneri*, and a Consideration of Piscivorous Predator-prey Interactions, *J. Exp. Biol.* 65: 157-177.
11. Webb, P. W., 1978, Fast-start Performance and Body Form in Seven Species of Teleost Fish, *J. Exp. Biol.* 74: 211-226.

收稿日期：民國 88 年 3 月 5 日

修正日期：民國 88 年 5 月 1 日

接受日期：民國 88 年 5 月 21 日