

## 無線電量測系統應用在魚道溯游研究 之初步實驗評估

### **Assessment of Preliminary Experimental Fishway Study on Upstream Migration Applying a Telemetry System**

國立台灣大學農業工程學系助理教授  
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

李國昇

Kao-Sheng Lee

#### 摘要

本文主旨旨在說明無線電儀量測系統在魚道溯游研究上之應用並討論初步實驗之結果。過去有關魚道之研究大多以水工模型試驗量測魚道中流況之分佈，進而探討其水理特性，然而有關魚道水理特性對魚類溯游行為之影響則並未加以探討。本研究之目的即利用編碼式無線電訊號發報器配合數位頻譜處理器、無線電接收器與水中天線所組成之無線電儀量測系統監測魚隻在魚道中之溯游策略與行為，以瞭解魚道中各種不同流速、水深、渦流區及滯流區之分佈與魚類溯游行為之關係，進而找出對魚類溯游有利之水理條件，以提供台灣地區未來魚道設計或現有魚道改善較精確之參考依據。根據魚道溯游初步試驗結果顯示，本系統可確實反應魚隻在魚道中之所在位置及其移動之情況，初步實驗過程中，試驗魚受到外在誘因之影響時，可連續通過四個隔板潛孔，平均溯游速度達 25 cm/s。本初步試驗亦提供後續實驗改進之方向。

**關鍵詞：**無線電量測系統，魚道水理特性，溯游，水工模型。

#### ABSTRACT

Application of telemetry system on fishway study and preliminary experiments of upstream migration are presented. Previous fishway studies mostly deal with scale-down physical models and flow measurements to investigate hydraulic characteristics of fishways. The influences of fishway hydraulics on upstream migration are, however, rarely discussed. The present study employs a telemetry system consisting of coded-signal

transmitters, digital spectrum processor, telemetry receiver, and underwater antennae to monitor the swimming strategy and behavior of the migratory species. The influences of various patterns of current, flow depth, vortex and stagnation area on migratory behavior are to be inspected. Such information provides precise guidelines for modification of existing fishways and future fishway design. The results of preliminary experiments indicate the telemetry system can locate the exact position of testing fish and monitor its migration. The testing fish can continuously move through four baffles with mean speed of 25 cm/s when subjected to stimulation. The preliminary experiments also highlight the possibility of improving future study.

**Keywords:** Telemetry system, Fishway hydraulics, Upstream migration, Physical model.

## 一、前　言

過去四十餘年間，台灣地區共興建了八十餘座水庫及攔河堰以進行水資源之開發與利用，為減少河川輸砂量及土壤沖蝕，保護水工結構物，又設置了近三千座防砂壩。然而河道中的攔水及攔砂構造物，除造成魚類棲地溪內流量(Instream flow)及水理環境的改變外，也將原有連續河川生態環境分割為不連續之片段。這些被分割的河道對本土魚類的自然遷移及洄游性魚類(如鱒魚、鱸鰻、白鰻等)的生命史循環都有不利之影響，造成水生族群在適應及生存上之威脅。為了保護水中生物並且兼顧水資源的開發利用，在國內外常以附設魚道(Fishway)的方式，提供魚類移動及遷徙之通路，以消減水工構造物對魚類族群所造成之衝擊，並保持河川生態系之完整性。

魚道設置主要係為擋水結構物開闢通路，使魚類之遷徙不因擋水結構物之存在而受到完全阻絕，但因擋水結構物之上下游水位有一差距，一般常在魚道內加設隔板(Baffle)以調節流量及減低流速，為洄游性魚類製造易於溯游之環境。魚道之型式可按其結構型態或水理條件加以區分，其中以日本接水理條件劃分之方式包含類型較廣，茲列舉如下：

### (1) 階梯式(Step type)：

①池堰式(Pool-weir type)；②潛孔式(Orifice type)；③豎孔式(Vertical slot type)。

### (2) 水路式(Channel type)：

①丹尼爾式(Denil type)；②粗石面水路(Boulder-mounted channel)；③導流式(Baffled type)；④鰐魚梯(Eel pass)；⑤涵洞式(Culvert type)。

### (3) 機械式(Mechanical type)：

①魚閘式(Fish Locks)；②閘門式(Gate Locks)；③昇降式(Lift type)

不同之魚道類型適用於不同之河川環境及魚類習性，例如：池堰式魚道即需要較穩定之上下游水位，並且適用於跳躍型魚類；豎孔式魚道可適應較大之水位變化，且其消能效果良好；而丹尼爾式魚道可使用於陡坡，但因缺乏休息空間，適合溯游能力較強之魚類。

台灣現有之魚道設計有關魚類游泳能力及其生態之資料，有一部份並未加以考慮，有一部份則是參考日本類似魚種之游泳速度或以粗略之經驗式概估之，依此數據所設計之魚道往往因無法符合魚類溯游習性以致於功效不彰。根據 Colavecchia et al. (1996) 利用無線電儀(Telemetry)測試魚類突進泳速(Burst swimming speed)及游泳距離之實驗結果顯示，魚類在溯游之過程中會調整泳速以節省體力完成溯游，而在不同流速之水流中其最大溯游泳速亦不相同。此即表示魚道之水理特性會對魚類之溯游行為模式有所影響，在不同型式之魚道中，流速、水深、渦流區與滯流區分布等流況之差異會改變魚類之溯游策略，而此種魚道水理特性與魚類溯游行為模式之關係

對於魚道之有效設計或現有魚道之改善可提供較精確之參考準則，換言之，對河川魚類生態之保育亦具有非常大之正面意義。

有關各類型魚道之純水理研究，過去十餘年在國外已有一系列之研究成果，例如豎孔式魚道(Rajaratnam et al., 1986)，丹尼爾式魚道(Rajaratnam and Katopodis, 1984)，潛孔式魚道(Rajaratnam et al., 1989；Kumar et al., 1995)，池堰式魚道(Rajaratnam et al., 1988；Nakamura et al., 1995)，水路式魚道(Rajaratnam and Katopodis, 1991)等，上述研究均使用魚道模型進行水工試驗以量測魚道中之流況，進而探討其水理特性。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，而各種魚類之突進泳速不盡相同，主要受到魚體大小及外形之影響(Webb, 1976; Webb, 1978; Taylor and McPhail, 1985)。例如鯖魚之突進泳速可超過其 10 倍體長/每秒(Wardle and He, 1988)。近年來利用無線電儀測試魚類行為表現之研究亦蔚為風潮，例如以編碼無線電信號(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)，以 EMG(Electromyogram)無線電信號測試野外鮭魚之游泳能力(McKinley, 1995)及量測水力發電設施附近之魚類急性與慢性死亡率(McKinley, 1993)等。使用無線電儀可測得傳統標記號法所無法量測之魚類瞬間泳速、最大泳速及泳速之變化情況，所接收之無線電信號可以數位頻譜儀進行即時頻譜分析或儲存於資料庫中做進一步之統計分析，且因使用無線電儀所量測之泳速均係魚類在自然狀況下自發性之游泳行為，與使用高速攝影法(High-speed cinematography)及加速儀(Accelerometry)刺激魚類游泳之做法有所不同，可測得魚道設計所需要之突進泳速。1995 年 4 月在比利時召開之「第一屆歐洲魚類無線電儀研討及講習會」(1st Conference and Workshop on Fish Telemetry in Europe) 說明了利用無線電儀探討魚類之行為表現在未來具有很大之研究潛力。

過去台灣地區魚道之設計，大多參照日本之設計型式，並以水理設計以及與壩體之配合度為主要考量，對於本土魚類之各種特性如魚種分佈、躍泳能力、泳速、洄游季節、路線、洄游魚隻數目、魚齡、體型及體長等，未加以考慮或無相關資料可循，導致魚道因無魚使用而形同虛設。本研究之目的在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對魚類溯游行為模式之影響，現有魚道之型式繁多，研究中擬以較適合台灣地區水文、地文條件之池堰式、豎孔式及潛孔式魚道進行實驗探討；試驗魚種則以具有溯游習性之本土魚種為主，並針對不同流量、流速、水深及渦流強度等流況變數進行魚道溯游實驗，以溯游率與流況變數之關係做為判斷魚道適用性之依據，而這種關係之建立可提供今後台灣魚道有效設計或現有魚道改進之參考，對於落實台灣河川魚類生態保育具有實質上的效益。

## 二、無線電儀量測系統

本研究使用無線電儀量測系統(Telemetry system)監測魚類在魚道溯游過程中移動之情況，此系統包含下列設備：(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)，如圖 1 所示。以下針對本系統各部儀器之功能加以說明。

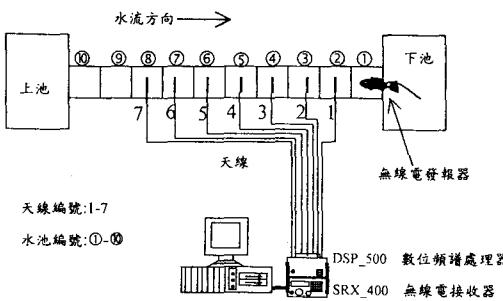


圖 1 無線電儀量測系統

### (一) 無線電發報器(LOTEK MCFT-3HM)：

本實驗使用編碼型無線電發報器(Coded transmitter)，其直徑 9.2mm，長 20.0 mm，空氣中重量為 2.0g，水中重量 1.3g，有一防水性柔鋼絲天線由發報器一端延伸出來，天線長度為 24 公分。發報器包裹在防水的環氧基樹脂膠囊中，以磁鐵控制發報器啟動與關閉。每一發報器所發出的信號具有唯一的一組編碼及對應的頻道和頻率。例如本次實驗所使用的發報器發射頻率為 149.56MHz，對應的頻道為 13，編碼編號為 30，以 5 秒之脈衝發報率(Burst rate)發出一個編碼信號(Coded signal)。傳統的發報器每次僅能發射出一個固定脈寬(Pulse width)的脈衝信號，如圖 2(a)所示，因此每一種頻率只能追蹤一個目標，若追蹤多數個目標時，必須不斷輪替掃描各種頻率。而編碼型發報器所發出的脈衝信號，乃是由不同的小脈衝所組成，如圖 2(b)所示，藉由不同的小脈衝組合與編碼，便可在單一頻率中追蹤多個不同的目標。

### (二) 無線電接收器(SRX\_400)：

SRX\_400 接收器是一部訊號之接收、追蹤及資料交換器，由唯讀型程式記憶體(EPROM)處理器所控制，並具有資料記憶體可供資料的記錄使用。SRX\_400 可以數字或圖形表示量測訊號之強度，以追蹤發報器所在位置，並具有排除干擾及雜訊、辨識訊號編碼、自動轉換天線等功能，可依照使用者需要來收集與處理資料。所記錄的資料內容包括日期、訊號開始及結束時間(時、分、秒)、信號強度、接收天線編號及訊號編碼。所收集的資料可經由 RS232 序列埠以 MS-DOS 相容型電腦配合適當軟體取出，以供後續分析之用。

### (三) 數位頻譜處理器(DSP\_500)：

若單獨使用 SRX\_400 接收器偵測多根天線之訊號時，接收器會由一根天線對所有設定的頻率進行掃描接收，當所有頻率掃瞄完畢後，再由下一根天線進行掃瞄，待所有天線都掃瞄完畢時，再從第一根天線開始掃瞄，如此周而復始。

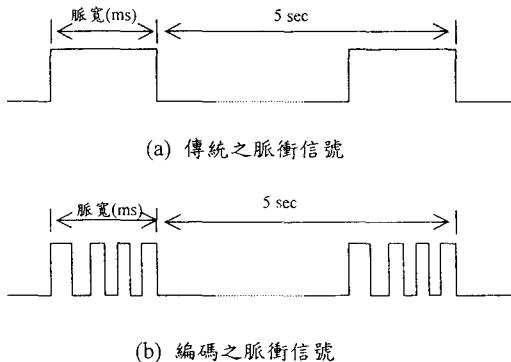


圖 2 傳統與編碼型脈衝信號

在這樣的掃瞄循環下，發報器所發出的訊號頻率可能因不在天線之掃瞄收訊範圍及接收之頻率而漏失。因此為達同時進行多天線及多頻率接收的目標，DSP\_500 數位頻譜處理器便具有接收／共同處理及即時頻率分析確認之能力。經由數位接收器，可將接收之信號經由相位／數位的轉換對應到約 1MHz 頻寬上，並據此求得所要求的頻率資料，以完成各個頻率信號分析與偵測，在內部設定上，DSP\_500 可偵測到一組固定的 25 個頻率 (149.320 至 149.800MHz)，各頻距為 20kHz。當 DSP\_500 配備快速多天線轉換(Fast antenna switch)功能時，便可自動求得發報器與天線陣列之相關位置。因此經由數位頻譜處理器便可達到多天線及多頻率即時訊號接收之功效。為保持與無線電接收器之相容性，DSP\_500 可與 SRX\_400 排列共用，由 SRX\_400 負責脈衝編碼辨別、編碼錯誤修正、資料儲存及與使用者之溝通介面。進行監測時，DSP\_500 偵測設定頻率信號出現後，將有關頻率之資訊及脈衝到達時間經由 RS-232 序列埠傳送到 SRX\_400，由 SRX\_400 接續完成編碼的確認及資料儲存。

### (四) 水中天線

本系統所使用之天線為 Belden RG-58 U 型同軸電纜線，兩端具有 BNC 接頭，一端可與無線電儀系統相接，另一端則與棒型防水天線相連。本實驗所使用之 7 根天線，長度分別為 20m (1 根)，線路損耗 2.9dB；30m (3 根)，線路損耗

4.5dB；40m(1根)，線路損耗6.1dB；50m(2根)，線路損耗7.7dB。

### 三、魚道溯游初步實驗

利用無線電儀量測系統監測魚類行為之研究在國外已頗具成效，但以無線電儀探討魚類在魚道中之溯游行為在國內尚屬起步階段。因此，為測試無線電儀量測系統及評估此系統在魚道溯游行為研究之適用性，本研究進行魚道溯游初步實驗，以做為後續改進與應用之參考，茲將本次實驗之場地、實驗步驟及實驗條件分述如下。

#### (一) 實驗場地：

本次初步實驗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做為實驗場地，如圖3(a)所示。實驗在魚道一中進行，整個魚道設施可分為上池、池堰式魚道及下池三部份。上池尺寸為 $4.8 \times 2.4 \times 1.2$ 公尺，下池尺寸為 $3.6 \times 3.6 \times 1.2$ 公尺；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，隔板型式如圖3(b)所示，堰口寬度為20cm，高5cm，堰口斜對角開有潛孔，寬8cm，高6cm。魚道中5號水邊設有透明壓克力玻璃板做為魚道觀察窗，可以用以觀察魚類在溯游過程中停留及通過隔板之方式。水流乃以重力引水方式由八寶圳引至試驗魚道上池，經魚道及下池後排放回大甲溪。

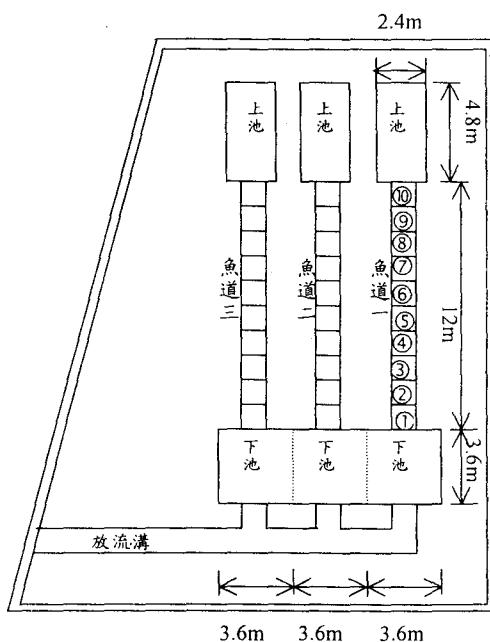
#### (二) 實驗步驟：

##### 1. 安裝與檢測儀器

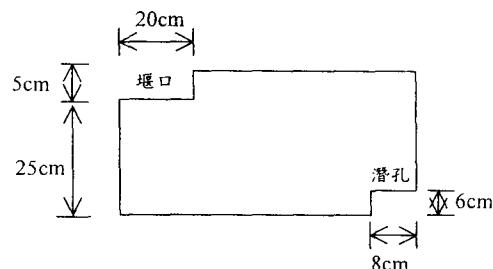
7根天線分別佈置於2號水池至8號水池中，將無線電系統安裝佈置如圖1所示。無線電發報器之位置介於兩天線之間時，訊號由距離較近之天線接收後予以記錄。天線固定於水池底部正中央，當試驗魚進入水池時，便可由記錄的天線號碼得知試驗魚之所在位置。

##### 2. 安裝發報器

本次實驗所使用的魚種為臺灣石鱧(*Acrossocheilus paradoxus*)，捕捉自當地大甲溪河段。臺灣石鱧喜棲於水流湍急或較清澈之溪潭



(a). 試驗場地佈置圖



(b). 隔板型式圖

圖3 實驗場地佈置及隔板型式圖

中，以藻類及水生昆蟲為食，分布於本省西部各河川流域，全年均可發現，數量頗多。本次初步試驗因直接引用八寶圳水流進入試驗魚道，為避免採用其他溪流流域之魚種而出現適應上之問題，故以當地容易捕獲之魚種進行初步測試，而其長度25cm，重量100g，亦合乎發報器重量不得大於魚重2%之要求(Colavecchia et al., 1996)。為求魚體能儘快自手術中復原，本次實驗採用對魚體傷害最小之外載方式安裝發報器(如圖4所示)。安裝完成後，置於養殖池中休息四小時，使

其適應發報器並稍事休息恢復。本次實驗另準備一條體型大小略同之對照魚，與裝有發報器之實驗魚一同進行試驗，一方面可藉以觀察試驗魚與對照魚在溯游過程中行爲之差異，另一方面也可藉此滿足魚類群游(Schooling)之特性。

### 3. 潮游監測記錄

上述準備工作皆完成時，便將試驗魚及對照魚一同置入 2 號水池中，無線電儀系統同時展開監測與記錄。並在不影響魚隻之情況下，從旁觀察魚所在位置及其溯游之行爲，以爲比較之依據。

#### (四) 實驗條件：

本次初步試驗條件如下：流量 0.03cms，越流流速爲 52.6cm/s，屬可調節之範圍內中等流量及流速。試驗過程中保持定流量狀態。惟當魚隻久無溯游行爲時，爲檢測無線電儀系統對溯游行爲之反應，則將流量稍予減小以提供試驗魚溯游之外在誘因，待魚隻移動後再將流量恢復原狀。

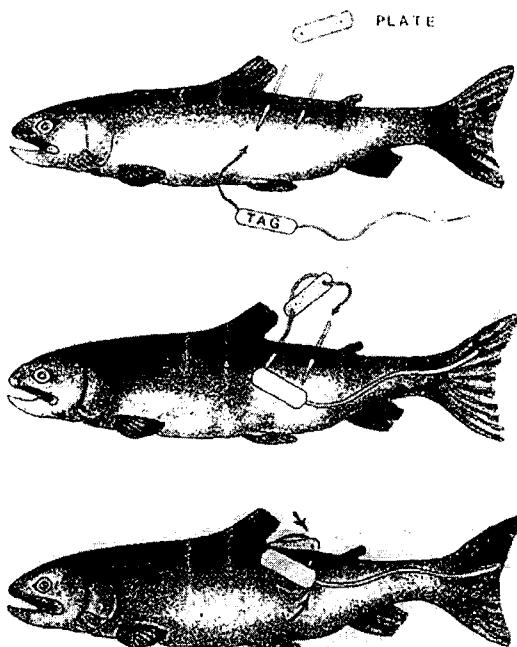


圖 4 外裝發報器程序圖

## 四、結果討論與評估

根據無線電接收器之訊號記錄，便可由接收訊號之天線號碼及訊號強度推測魚隻之所在位置，圖 5 所示爲本次初步試驗中試驗魚所在之水池與時間之關係。圖中顯示魚隻在將近 80 分鐘之魚道溯游試驗過程中有兩次溯游前進之記錄，分別發生 35 分鐘與 51 分鐘之時刻(圖中標示爲(1)及(2)處)，其中第一次溯游由 1 號水池前進至 5 號水池，移動四個水池，平均移動速度爲 25cm/s。第二次溯游由 5 號水池前進至 6 號水池，平均移動速度爲 31.2cm/s，全程共移動了 5 個水池，此與現場觀測到之情形相吻合。在此值得一提者，魚類之溯游固然有其時間性與區域性，但魚隻之溯游行爲有時亦受到外在誘因之影響，例如水位之下降(或流量之降低)會使魚隻產生危機意識，使其往上游水源方向移動。本次初步試驗中，魚隻兩次移動均屬此類溯游行爲。

另外針對試驗魚及對照魚在魚道中之溯游行爲進行觀察與比較，結果發現試驗魚與對照魚之溯游行爲模式有其差異性。在魚道試驗之過程中，魚類常採前進與休息交互運用之溯游策略，以本次初步試驗中之對照魚爲例，其在快速通過隔板潛孔進入下一個水池後，便會選擇在離跌水區(氣泡多且流速快)較遠之緩流區稍事休息，如圖 6(b)所示，待欲溯游前進時則往隔板方向接近，短暫停滯於跌水區中，確定行進路線後即快速通過潛孔，進入下一個水池，並重覆休息與前進之行爲模式。而試驗魚則選擇在跌水區下方氣泡區靠近隔板處停留(如圖 6(a)所示)，當流量改變出現溯游之外在誘因時，試驗魚才從隔板底部之潛孔快速通過數個隔板與水池，發揮其溯游之潛力。

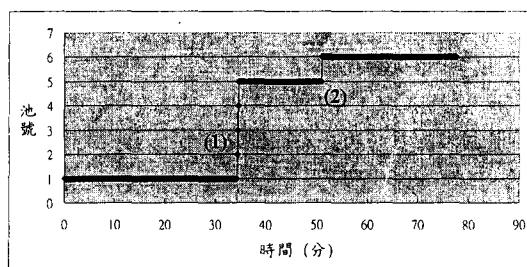


圖 5 試驗魚溯游過程之時間與所在位置關係圖

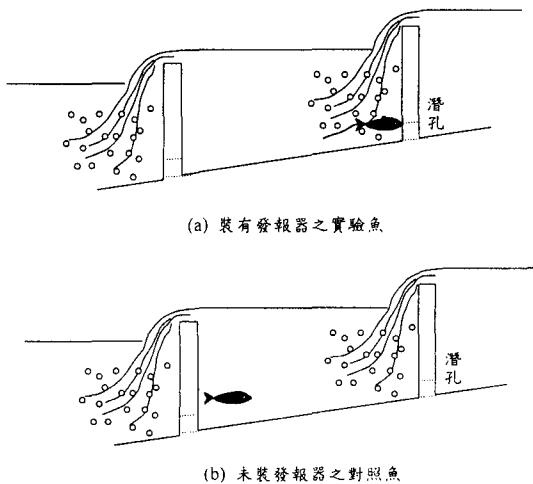


圖 6 實驗魚與對照魚之停留位置示意圖

此次初步試驗所使用之試驗魚與對照魚屬體型大小相近之石鱸，均捕捉自附近大甲溪河段，且一同飼養一段時期，各方面條件應屬相似，故其行為模式之差異究竟屬於個體性差異抑或因裝置發報器而引起者，尚需更多資料以進一步調查。試驗結果顯示，透過接收天線之編號及無線電訊號之編碼，本系統確可反應魚隻所在位置及其移動之情況。本次初步試驗亦提供後續試驗改進之方向，包括(1)延長溯游實驗之時間以減少時間性溯游因素(例如日夜溯游差異)之影響；(2)增加試驗魚及對照魚之數目以排除個體性差異之因素；(3)採用體型較大之魚隻以降低發報器對魚體之影響；(4)按照建議之標準程序(Colavecchia et al., 1996)施行麻醉及發報器安裝手術；(5)增長手術後魚隻之休息恢復時間，使魚隻逐漸適應發報器並消除在裝置過程中所產生之緊迫(Stress)現象。

## 五、謝 誌

本試驗承蒙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. Booth, R., R. S. McKinley, M. M. Sisak, and F. Ojkabd, Proceedings of the European Workshop on Biotelemetry, April 1-7, Liege, Belgium. pp. 21-30, 1995.
2. Colavecchia, M. V., C. Katopodis, R. Goosney, D. A. Scruton, and R. S. McKinley, Measurement of Burst Swimming Performance in Wild Atlantic Salmon (*Salmo Salar*) Using Coded Radio-Transmitted Signals. Ecohydraulics 2000, Quebec, June, 1996.
3. Katopodis, C., Advancing the art of engineering fishways for upstream migrants. Proc. International Symp. On Fishways, October 8-10, Gifu, Japan, pp. 19-28, 1990.
4. Kumar, G. S., H. Nago, S. Maeno, and T. Hoshina, Hydraulics of Ice Harbor Type Fishway, Proceedings of the International Symposium on Fishways '95 in Gifu Japan, 1995.
5. McKinley, R. S., In Situ Measurement of Swimming performance in Wild Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Using Radio Transmitted Electromyogram (EMG) Signals. 1st Conference and Workshop on Fish Telemetry in Europe. Liege, Belgium. April 1-6, 1995.
6. McKinley, R. S., Use of radio transmitted EMG's in determining acute and chronic mortality in white sucker and lake sturgeon in the vicinity of hydroelectric facilities-Portland , Oregon, U.S.A. Invited participant-Special Session of the American Fisheries Society Conference - Telemetry Session, August, 1993.
7. Nakamura , S., N. Azuma, and M. Mizuno, Experimental Study on Pool-Type Fishways with Slope of 1 on 5, Proceeding of the International Symposium on Fishways '95 in Gifu Japan, 1995.
8. Rajaratnam, N. and C. Katopodis, Hydraulics of Denil Fishways, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No.9, pp. 1219-1233, 1984.
9. Rajaratnam, N., and C. Katopodis, Hydraulics

- of Steeppass Fishways, Canadian Journal of Civil Engineering, 18, pp. 1024-1032, 1991.
10. Rajaratnam, N., C. Katopodis, and A. Mainali , Plunging and Streaming Flows in Pool and Weir Fishways, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 8, pp. 939-944, 1988.
11. Rajaratnam, N., C. Katopodis, and A. Mainali, Pool-Orifice and Pool-Orifice-Weir Fishways, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 16, No.5, pp. 774-777, 1989.
12. Rajaratnam, N., G. Vinne, and C. Katopodis, Hydraulics of Vertical Slot Fishways, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 112, No.10, pp. 909-927, October, 1986.
13. Taylor, E. B., and J. D. McPhail, Variation in burst and prolonged swimming performance among British Columbia populations of Coho salmon, *Oncorhynchus kisutch*, Can. J. Fish. Aquat. Sci. 42, pp. 2029-2033, 1985.
14. Wardle, C. S. and P. He, Burst swimming speeds of mackerel, *Scomber scombrus* L. J. Fish. Biol. 32, pp. 471-478, 1988.
15. Webb. P. W., Fast-start performance and body form in seven species of teleost fish, J. Exp. Biol. 74, pp. 211-226, 1978.
16. Webb, P. W., 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, pp. 157-177, 1976.

收稿日期：民國 87 年 2 月 28 日

修正日期：民國 87 年 4 月 21 日

接受日期：民國 87 年 4 月 28 日