

# 迷入防止法の開発 ランダムウォークによる魚の挙動解析とその応用

## Methods for Preventing Ayu from Straying Analysis of the Behavior of Fishes by Random Walk Method

下村 充<sup>1</sup>・白川 裕之<sup>1</sup>・福井 吉孝<sup>2</sup>・関谷 明<sup>3</sup>

Mitsuru SIMOMURA, Hiroyuki SHIRAKAWA, Yoshitaka FUKUI and Akira SEKIYA

<sup>1</sup>学生員 東洋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒350-8585埼玉県川越市鯨井2100)

<sup>2</sup>正会員 工博 東洋大学教授 工学部 環境建設学科(〒350-8585埼玉県川越市鯨井2100)

<sup>3</sup>正会員 建設技術研究所 水理砂防部 (〒300-2651茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)

The unexpected migrations of some living things are caused by the intake and withdrawal from river and lakes. Particularly serious are problems with fish straying from their normal migratory routes.

It is expected that a method in which small pieces of white or red colored cloth are allowed to drift in a flow will be effective in preventing fish from straying. In this paper, some prevention methods are examined through experiments. The authors also seek to clarify the behavior of these fishes, especially Ayu, in a river, by combining the numerical analysis for the flow in the channel, and the random walk method for the behavior of fishes. As a result, the prediction of the behavior of fishes in the flow is now possible.

**Key Words:** Ayu, prevention of straying, random walk model, numerical analysis

### 1. はじめに

魚類の迷入は早急に解決しなくてはならない課題の一つであり、単に水産資源の問題としてだけでなく、水域全体の生物環境保全上の問題でもある。しかし、具体的な有効策は明確になっていないのが現状である。

内水面漁業協同組合連合会及び著者等が行ったアンケートの結果<sup>1)</sup>、魚類の迷入は80%の漁協で生じていることが判った。これに対し、現在、実施されている迷入防止装置は、網などによって迷入を防止する方法が最も多く、その他、電気スクリーンによるものが多くみられることがわかった。また、光、色等を利用した方策が有効であるとの回答もみられた。

このように、対策の種類も多様化していることが判るが、実際の効果については不明という回答が多くみられ、早急な対策方法の確立が必要であることが確認できた。

著者らは、現在まで行ってきた模型水路を用いた実験で、魚特にアユの迷入防止にはリボンを流水中に漂わせる方策が有効であること、そのリボンは白あるいは、赤色が効果を発揮するという結果を得ている。

本研究では、アユ、ウグイを対象に魚に優しい方法としてのリボンによる迷入防止法の効果の詳細な検証を行うと共に、迷入防止装置の規模・形態や設置位置等の決定に要求されるアユの遊泳行動をランダムウォークモデルを用いて求めた。

### 2. リボンを用いた迷入防止装置の検証

#### (1) 検討概要

迷入防止装置は、魚が、色や物の動きに反応することを利用し、複数の白色、赤色のリボンを流水中に漂わせ、その動きにより忌避行動を誘発させる物である(図-1)。この方法は電気をを用いないので魚を傷つけることはない。

実験では、図-1に示した二次元水路の下流に魚を放ち、溯上した魚が水路中央片側に設けられた各防止装置にどのように反応するかをビデオに収録し観察した。

実験は、1回に10尾程度の魚を用い、40回程度の観察を行った。なお、実験施設が屋外であるため、太陽の位置関係で生じる水路内の日陰の影響により結果が偏らないよう、迷入防止装置は左右交互に設置し観察を行った。

#### (2) 実験条件

実験では、図-2-1, 2-2のように平均体長約15cmのアユと平均体長約8cm程度のウグイの稚魚を用いた。

##### a) アユ

アユは、孵化後、川の流れとともに海に降下し、仔稚魚期を沿岸海域で過ごす。海と河川の水温差がなくなる時期に群となり河川を溯上する。

河川の中流から上流域に達すると、一定規模の縄張りを確保し、そこを餌場とし定着する。

稚アユと成長したアユ、或いは溯上期のアユと降下時のアユでは行動特性が非常に異なるが、一般にアユの行動特性について言われていることを表-1に示す。<sup>2), 3), 4), 5), 6), 7), 8)</sup>

##### b) ウグイ

表-1 アユの行動特性

|       |                                                                                                                    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 遊泳速度  | 突進速度は、体長の12.4～18.2倍程度(cm/s)を持つ<br>巡航速度は、体長の6.1～7.6倍程度(cm/s)を持つ<br>静水中より流水中を高速で遊泳する<br>最大泳力を発揮する流速は、体長の6～8倍程度(cm/s) |
| 遊泳行動  | 朝60Lx程度で活動開始<br>12:00～14:00に採食行動が活発になる<br>昼行性、日周活動を示す<br>日の出、日の入りの時間帯での活動が活発                                       |
| 視覚・色覚 | 焦点距離1m程度<br>視覚型の魚である<br>広い範囲が見える<br>物の動きに敏感である<br>遠近の判断が弱い<br>青と緑を好む<br>紫、赤を嫌う                                     |
| 聴覚    | 200～3000HZの音を内耳で感受<br>100HZ以下を側線で感受                                                                                |
| その他   | 敏感な嗅覚を示す<br>水温に敏感に反応する                                                                                             |

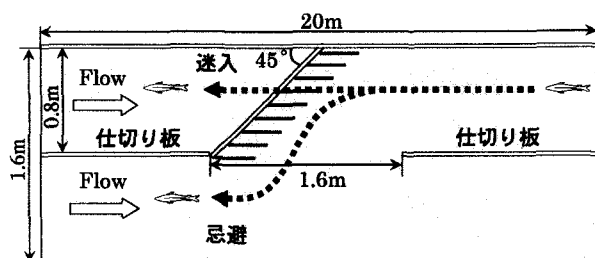


図-1 迷入防止実験用開水路

我が国に生息するウグイは、数種あり降海型と淡水型がある。分布域は、種により若干異なるが酸性の水にも順応できるためアユ等と比較すると生息場が広い魚である。

仔魚は、流速2cm/s以下の上層から中層に生息し、成魚は淵に生息する。

遊泳速度は、アユの0.8倍程度とされているが、資源価値が低いため、アユ<sup>9)</sup>と較べ生理、生態に関する研究事例が少ない魚である。

#### c) 実験装置

実験で用いた施設は、図-1に示すような幅1.6m、長さ20mの二次元水路で、その中央に迷入防止装置を設けたものとした。

リボンは、二次元水路の中央片側に斜め45度のラインで梁を設け、0.15mピッチにリボンの付いた支持棒を取り付けた。

#### d) 水理条件

- ・流量：0.042m<sup>3</sup>/s
- ・水深：0.1m(体高の2倍以上)
- ・流速：0.3m/s(巡航速度で移動可能な流速)
- ・水温：14～15℃
- ・照度：日向：20000～30000Lx  
日陰：50～300Lx

・実験実施期間：2001年7月、11月

#### e) 迷入防止装置の諸元

- ・リボンの長さ：0.3m、幅：0.03m、

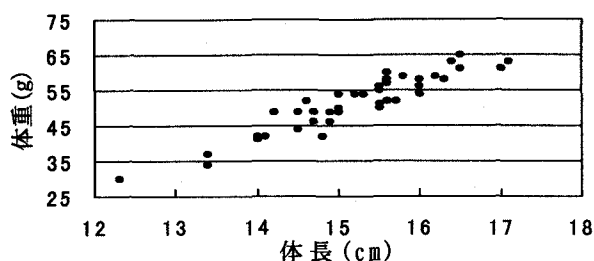


図-2-1 アユの体重・体長

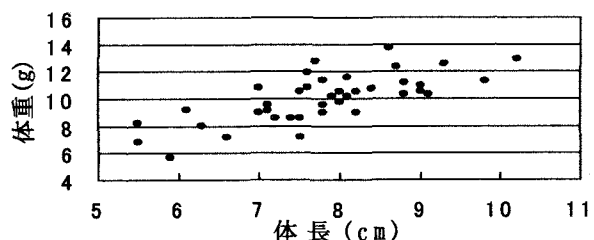


図-2-2 ウグイの体重・体長

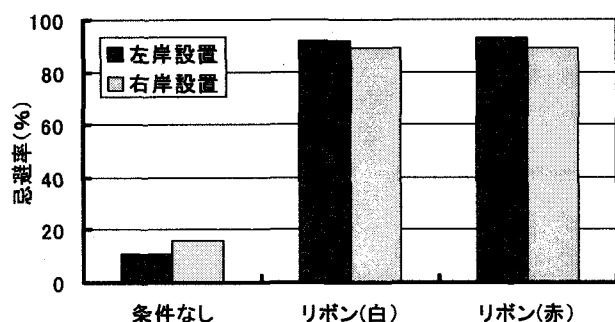


図-3 アユの忌避率

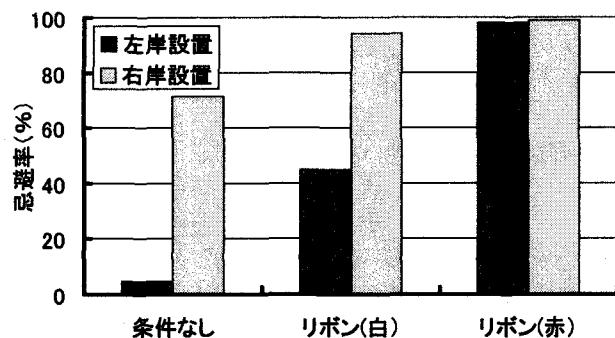


図-4 ウグイの忌避率

設置間隔:0.15m

#### (3) アユの行動観察結果

迷入装置に対するアユの忌避率（対岸へ移動した尾数/放流尾数）を図-3に示す。

##### a) 迷入装置を設けない場合

アユは、図-5に示すように側壁沿いを溯上した。

##### b) 白色のリボンの場合

アユは、図-6に示すように側壁沿いを溯上、白色のリボンの下流側で忌避行動を示し、迷入防止装置の無い対岸に移動する様子が観察された。迷入防止装置を通過しなかったアユは、放流数421尾に対し381

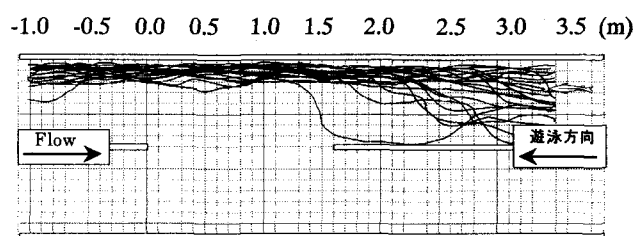


図-5 アユの遊泳軌跡(防止装置のない場合)

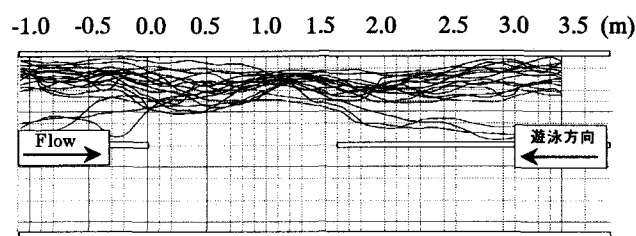


図-8 ウグイの遊泳軌跡(防止装置のない場合)

迷入防止装置

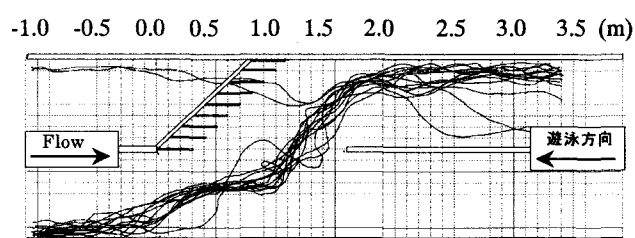


図-6 アユの遊泳軌跡(白色リボン設置)

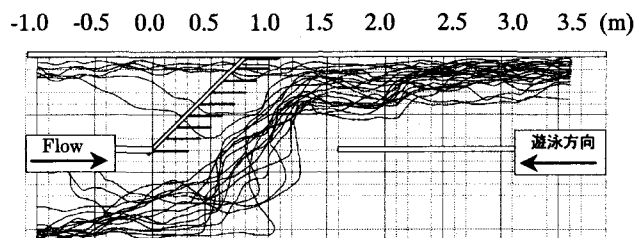


図-9 ウグイの遊泳軌跡(白色リボン設置)

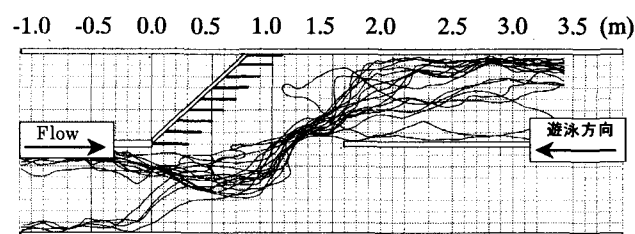


図-7 アユの遊泳軌跡(赤色リボン設置)

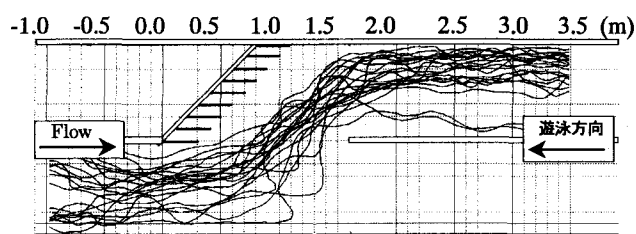


図-10 ウグイの遊泳軌跡(赤色リボン設置)

尾(90.5%)であった。

#### c) 赤色のリボンの場合

アユは、図-7に示すように側壁沿いを溯上、白色リボンの場合と同様に赤色のリボンの下流側で忌避行動を示し、迷入防止装置の無い対岸に移動するものが多かった。

迷入装置を通過しなかったアユは、放流数306尾に対し278尾(忌避率90.8%)であった。

#### (4) ウグイの行動観察結果

ウグイの遊泳軌跡を図-8～10に、防止装置に対する忌避率を図-4に示す。

##### a) 防止装置なしの場合

図-8に示すように先ず水路中央付近をほぼ直進したが、最終的には側壁を進んだ。

##### b) 白色のリボンの場合

図-9に示すように側壁沿いを溯上し、そのまま直進する個体と白色のリボンの下流側で忌避行動を示し、迷入防止装置の無い対岸に移動する個体が観察された。

迷入防止装置を通過しないウグイは、放流数442尾に対し313尾(70.8%)であった。

##### c) 赤色のリボンの場合

白の場合と同様に図-10に示すような忌避行動をした。

迷入装置を通過しないウグイは、放流数446尾に対し439尾(忌避率98.4%)であった。

#### (5) まとめ

以上の結果、赤、白、のリボンの迷入防止装置を設置した場合、アユは90%以上忌避することが観察された。また、ウグイは約70%以上が忌避反応を示し対岸へ移動する様子が観察され、特に赤色に対しては、約98%という高い忌避率を示すことがわかった。

これより、リボンに対して、アユとウグイは、類似した忌避行動を取ること、つまり、リボンはアユ、ウグイの双方に対し迷入防止効果が期待できること、そして、安価なウグイを用いての実験の有効性も期待できることが判った。

#### 5. アユの遊泳行動のモデル化

迷入防止実験から、魚は水路中の構造物などに敏感に反応して遊泳することがわかった。

であるから、魚の動きを予め把握することができたなら、水理構造物の計画・設計に対して役立つと思われる。

##### (1) 流れの場の計算

魚が行動する場の流れの詳細をまず計算する。流れ

は、以下に示すナビエ・ストークスの式に対する浅水2次元流モデルと、連続の式を用いて解析する。

#### <X方向の運動方程式>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial M}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{g}{K^2} M \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (1)$$

#### <Y方向の運動方程式>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial N}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{g}{K^2} N \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (2)$$

#### <連続の式>

$$\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $M(=uh)$  はX方向フラックス、 $N(=vh)$  はY方向フラックス、 $h$ :水位、 $n$ :マンニングの粗度係数、 $g$ :重力加速度、 $K$ :透過係数、 $\varepsilon$ :渦動粘性係数を表している。

そして、計算された流速( $u, v$ )を、(4)より、平均流速 $U$ と、 $U$ と $u$ のなす角 $\phi$ に変換する。

$$\left. \begin{aligned} U &= \sqrt{u^2 + v^2} \\ \phi &= \cos^{-1} \left( \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

#### (2) ランダムウォークモデルによる挙動解析

##### a) モデルの考え方

魚の遊泳行動は、水理条件や環境条件に左右されるが、微小時間における移動は、本質的にはランダムな動きと考えられる。

そこで、ランダムウォークの手法を用いて計算を行った。具体的には、ある地点にいるアユが次の瞬間に移動する方向をランダムに選択させ、移動速度をその場の水理量( $u, v$ )に合わせ、変化させるものとした。

##### b) 魚の存在位置

線型法により小数点以下8桁の乱数 $Z(0 \leq Z \leq 1)$ を発生させ、その乱数 $Z$ に $2\pi$ をかけることで流水中でのアユの移動方向角度 $\theta$  ( $\theta = 2\pi Z$ )を0から $2\pi$ の範囲で得るものとした。この時下流方向にX軸、これと

直角にY軸を定めた。 $\theta$ は移動方向とX座標となす角度とする。

単位時間後の仮想魚のいる地点の座標は、(5)式より求めるものとした。

$$\left. \begin{aligned} X_n &= \alpha \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot (Um - U) \cos \theta + X_{n-1} \\ Y_n &= \alpha \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot (Um - U) \sin \theta + Y_{n-1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$X_n, Y_n$ は現在の各座標を表し、 $X_{n-1}, Y_{n-1}$ は前時刻の各座標を表す。 $U$ は、その場での平均流速を表している。 $\alpha$ は走流性を表わし、 $\beta$ は側壁選好性を表わし、 $Um$ は遊泳速度を表わす。

##### c) 走流性

アユの迷入防止実験より、走流性と側壁選好性があることが伺えた。ここで、走流性とは、流れに逆行する習性のことである。

走流性を考慮すると、ランダムに選ばれた角度 $\theta$ が流向に対し $180^\circ$ のとき、最も移動速度 $V(=Um-U)$ が大きいのと考えられる。そこで、アユのいる地点の流向 $\phi$ (X軸となす角度)を読み取り、 $\alpha$ の計算式(6)に代入し、走流性 $\alpha$ を $0 \leq \alpha \leq 1.0$ の範囲で得るものとした。

$$\left. \begin{aligned} |\phi - \theta| \leq 180 \text{ のとき} \quad \alpha &= \frac{|\phi - \theta|}{180} \\ |\phi - \theta| > 180 \text{ のとき} \quad \alpha &= \frac{360 - |\phi - \theta|}{180} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

##### d) 側壁選好性 $\beta$

側壁選好性とは、側壁近傍を好んで溯上していく習性のことである。そこで、仮想魚に視界を設定し、その視界範囲内に側壁がある場合、側壁選好性 $\beta$ に1.0以上の値を入れる。こうすることにより、側壁に早く到達し、その結果、側壁選好が表現できるものとした。視界範囲は、不明確ではあるが、ここでは0.3mを採用した。

##### e) 遊泳速度 $Um$

遊泳実験より、今回は、遊泳速度  $Um$  を1.4m/sとした。

##### f) 計算方法

・計算上のメッシュは、仮想魚の移動距離と実験水路を考慮し $\Delta X=0.04m, \Delta Y=0.05m$ とした。

・計算のピッチは、仮想魚の移動速度を考慮し、 $\Delta t=0.01sec$ が妥当だと判断した。

・境界条件には、上流から、流量 $Q(=0.032m^3/s)$ を流入させた。擬似植生または側壁を超えた場合、仮想魚は計算を停止し、そこから再計算するものとする。

#### 6. モデルの検証

ここでは、モデルを用いて求めた計算値と実験値との整合性について検証する。

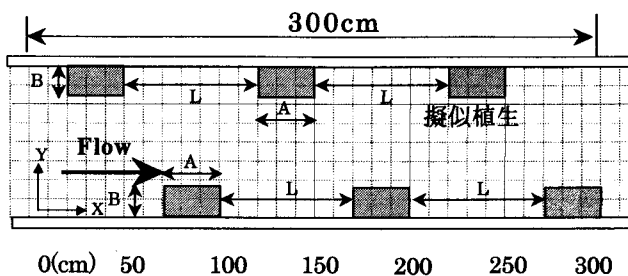


図-11 擬似植生配置図

表-2 植生配置図の数値 (cm)

|       | case-1 | case-2 | case-3 | case-4 |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 植生幅B  | 32     | 16     | 32     | 16     |
| 植生間隔L | 70     | 70     | 170    | 170    |

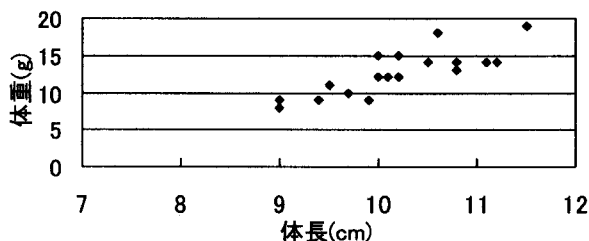


図-12 稚アユの体長と体重

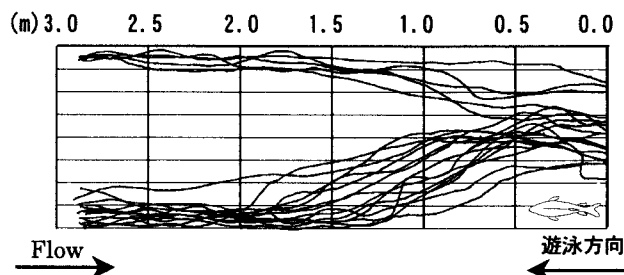


図-13.1 防止装置なしでのアユの遊泳軌跡 実験結果

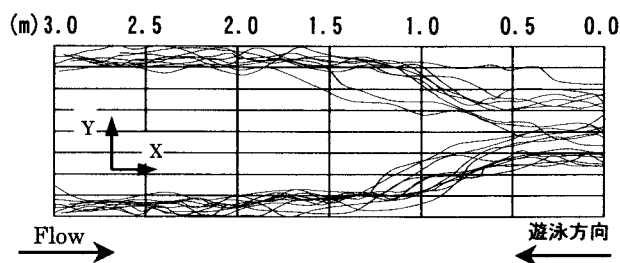


図-13.2 防止装置なしでのアユの遊泳軌跡 計算結果

#### (1) 実験

実験では図-11 に示すようにヘチマロンを擬似植生として千鳥状に配置した。稚アユは一回に10

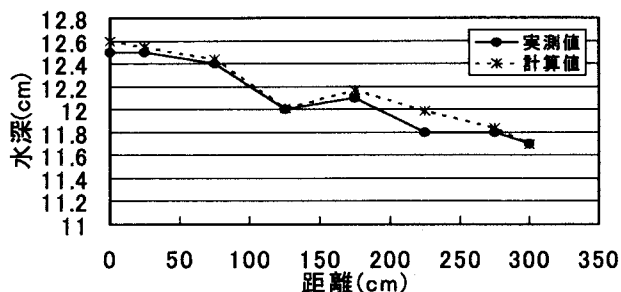


図-14 水深の実測値と計算値の比較

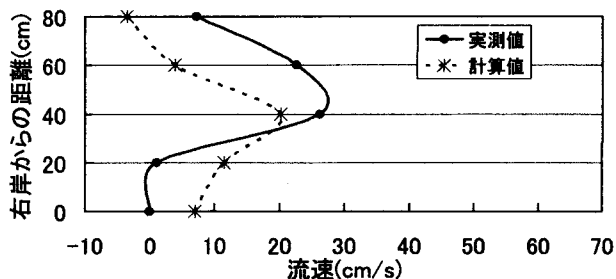


図-15 流速(u)の実測値と計算値の比較  
case-3 X=375cm

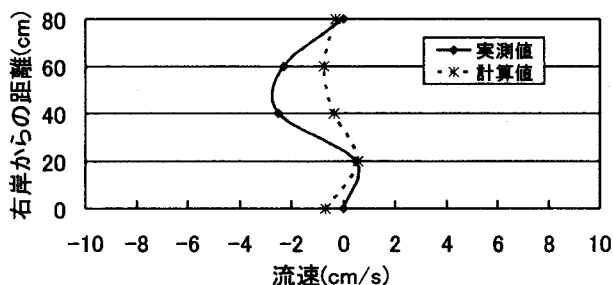


図-16 流速(v)の実測値と計算値の比較  
case-3 X=375cm

～15匹程、水路下流から放流する。

#### a) 水理条件

- ・流量 : 0.042m<sup>3</sup>/s
- ・下流端水深 : 0.085cm
- ・断面平均流速 : 0.2m/s
- ・最大流速 : 0.8m/s

#### b) 実験装置

- ・水路 : 幅 0.8 m, 長さ 20m の二次元水路
- ・擬似植生 : 高さ 20cm のヘチマロン (長さ A=30cm 幅 B=16, 32cm)
- ・設置条件 : 図-11 と表-2 に示す。

#### c) 対象魚

実験では、図-12 のように体長約 8cm ～ 12cm の栃木県産の養殖のアユを用いた。

#### (2) 流れとアユの挙動の計算について

##### a) 水路中に植生がない場合

図-13-1, 2 に水路中に植生がない平行流の場合でのアユの挙動の実測と計算結果を示す。計算で、走流性と側壁選好性を表現できた。

##### b) 擬似植生の幅 B が大きい場合

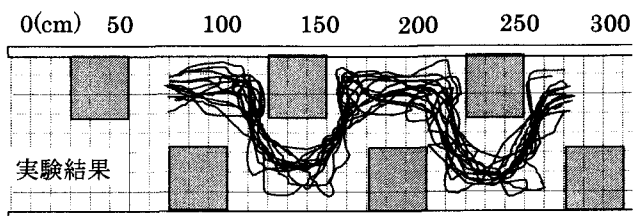


図-17 遊泳軌跡(case-1)の比較

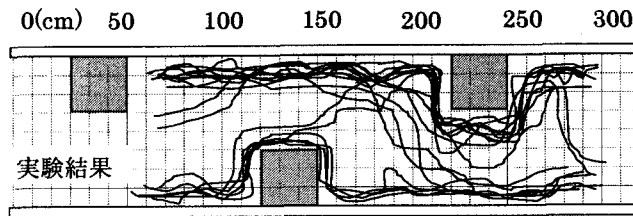


図-18 遊泳軌跡(case-3)の比較

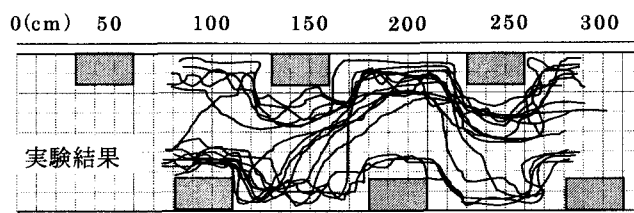


図-19 遊泳軌跡(case-2)の実測

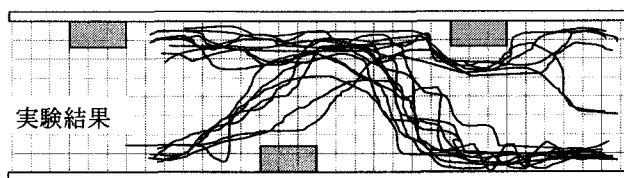


図-20 遊泳軌跡(case-4)の実測

式(1),(2),(3)を連立させて解いた case-1 の 0cm から下流 300cm までの水深と 200cm 付近の断面流速を図-14, 図-15, 図-16 に示す。図-17, 図-18 に  $B=32\text{cm}$  のときの計算結果と実験結果を示す。左右岸から張り出た植生によって主流の幅が極端に狭くなるので、そこでは局所的に流速が大きくなる。稚アユは、植生の後(下流)でしばらくとどまってからその高流速部を溯上した。おが屑を用いた可視化実験から仮想魚が植生の直下流に停留する様子が明らかになった。計算では植生の直下流に回りこみ、停留する行動軌跡を再現できた。

#### (4) 擬似植生の幅 $B$ が小さいとき

図-19, 20 に流速の大きい  $B=16\text{cm}$  のときの実験結果を示す。流れの場の流速は大きい、流速の変化が大きいので、植生の下流でとどまらず一気に溯上するものが多い。側壁選好性と走流性は共に見られる。しかし、時には、植生直下にとどまるものもいた。

## 7. 結論

- 1) 赤色, 白色リボンは、忌避させる効果, 即ち, 迷入防止効果がある。
- 2) 実験から, リボンはアユとウグイに対して, 同様な, 忌避効果を発揮させることがわかった。
- 3) ランダムウォークモデルで, 壁への選好性, 流れに逆らう走流性を考慮することで, 魚の動きを程度良く予測できる。
- 4) 植生がある水路では, 浅水2次元モデルとランダムウォークモデルを組み合わせることにより, 流れとその中の魚の動きを予測できることがわかった。

## 参考文献

- 1) 全国内水面漁業協同組合連合会: 魚の迷入の実体とその対策へのアプローチ, pp.157-185, 1996.
- 2) 関谷明, 福井吉孝, 坂本裕嗣, 湯目吏吉也: 魚類の迷入の実態と防止策について, 河川技術に関する論文集, 第7巻, pp.233-238, 2001.
- 3) (財)ダム水源地環境整備センター編: 最新魚道の設計, 信山社サイテック, pp.353-368, 1998.
- 4) 脇田, 坂野: 長良導水取水口における魚類迷入防止施設的设计検討, 木曽川用水総合事務所報告, 1998.
- 5) 和田吉弘: 長良川のアユづくり, 治水社, pp.51-55, 1993.
- 6) 和田吉弘: アユの遊泳活動の日周変化について, 岐阜大学教育学部研究報告第6巻第5号別冊, 1981.
- 7) 宮地伝三郎, 川那部浩哉, 水野信彦: 原色日本淡水魚類図鑑, 保育社, pp.48-52, 1992.
- 8) 玉井信行, 水野信彦, 中村俊六編: 河川生態環境工学, 東京大学出版会, pp.68-76, 1993.
- 9) 石田力三: アユその生態と釣り, 釣り人社, pp.31-38, 1988.

(2002. 4. 15 受付)