

(10) 局所的な河川環境に着目した室内実験による アユの環境選好性の定量化に関する研究

野口 浩幸^{1*}・関根 雅彦¹・渡部 守義²・浮田 正夫¹

¹山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1)

²明石工業高校専門学校都市システム工学科 (〒674-8501兵庫県明石市魚住町西岡679-3)

* E-mail: noguchi@civil.yamaguchi-u.ac.jp

回遊魚の移動や生息場の価値を評価するには、置石や河川構造物周辺の水の乱れや、落差などでみられる気泡の混入、外敵から身を隠す遮蔽効果等、河川内の局所的な環境の魚に対する影響を把握する必要があると考え、アユ(*Plecoglossus altivelis*)を用いた室内実験をにより、流速、乱れエネルギー、気泡混入率、照度差について環境選好性を定量化し、それぞれの選好曲線を得た。そして同一水路内でそれらの環境因子を複合させた室内実験を行い、環境因子間のウェイトを算出した。ウェイトは気泡：照度差：乱れエネルギー：流速＝1.00：0.78：0.60：0.40であった。また実河川の魚道で養殖アユの遡上調査を行い、その遡上量と選好強度の比較を行い、選好強度式の適用例の一端を提示した。

Key Words : Ayu(*Plecoglossus altivelis*), environmental preference, air bubble, turbulence energy, river environment

1. 研究背景および目的

近年、人々の自然環境への関心の高まりなどから、河川に豊かな自然環境と憩いと潤いのある親水空間としての役割が求められており、水棲生物の生息環境を向上させるために、河川のある区切られた空間内においては、その生息場の価値を評価するモデルが利用されている¹⁾。その中で生物の生息場に対する総合的な選好性は以下のような乗法形で表されることが多い²⁾。

$$P^* = \prod_{j=1}^J P_j \quad (1)$$

ここに、 P_j は環境因子 j (流速、水深、底質)に対する対象生物の選好性を表した適性基準であり、0～1の値をとる。それらを掛け合わせた P^* が合成適性値である。このモデルはその理論の明解さと汎用性から米国やカナダの多くの州において河川環境管理に用いられているが、環境因子間のウェイトを考慮していない³⁾ことや状況によって考慮すべき影響要因を補えていない⁴⁾などの指摘もある。そこで著者らはウェイトを用いた選好性モデル(修正乗法選好強度式)を提案している³⁾。

$$P^* = \prod_{j=1}^J (P_j)^{\frac{W_j}{W_{\max}}} \quad (2)$$

$$W_{\max} = \begin{cases} \max_{j \in V} (W_j) & V \neq \phi \\ \infty & V = \phi \end{cases} \quad (3)$$

$$V = \left\{ j \mid (\exists i, i') (P_{j,i} \neq P_{j,i'}) \right\} \quad (4)$$

ここに、 P_j は因子 j についての選好性の高さを示した選好強度(選好値)、 P^* は複数の環境因子を複合させた総合的な選好強度、 J はある環境条件を構成する因子の数、 W_j は因子 j についてのウェイトである。環境因子が魚に与える影響は環境因子によって異なるが、ウェイトを求めることにより魚がどの環境因子からどの程度影響を受けているかわかる。水域(i)の間で因子 j のに対する選好強度に違いが存在する場合($V \neq \phi$)、関連するウェイトのうち最大のものを $W_{\max}$ としている。この修正乗法選好強度式により、環境因子間のウェイトの違いを適正に評価することができている³⁾。

また、河川において回遊魚の遡上の妨げとなっている箇所が多く存在するが、そのような箇所では、例えば置石周辺の水の乱れや落差によって生じる気泡など、より

小さいスケールの生息場に影響を及ぼす環境因子について考慮すべきである。

そこで本研究では河川の連続性を考慮した評価手法を確立するために、室内実験水路において日本の川魚の代表であるアユ (*Plecoglossus altivelis*) を対象とした選好性実験を行い、局所的な流況での環境因子の影響を定量解析することを目的とする。局所的な流況で大きな影響を及ぼす環境因子として、流速、気泡、水の乱れ、照度差に着目する。これらの因子は前述の回遊魚の遡上の障害部分において、局所的な変化が顕著なものであり、特に気泡の混入や水表面の乱れは、魚類の遡上口の発見や遊泳行動の変化に寄与することも示唆されている⁹⁾。また魚は外敵から身を隠すために、暗いところを好む習性を持つものがあるが、その遮蔽効果を照度差を用いて表したい。これらの単一環境因子について、室内のU字型実験水路を用いた選好性実験によりその選好性を定量化する。さらにそれらのウェイトを、複合環境因子間の実験によって定量化する。そして実河川の魚道での遡上調査を行い、今回の実験結果および修正乗法選好強度式の有効性を検討したい。

2. U字迷路型実験水路における選好性実験

(1) 実験魚および蓄養・馴致方法

実験魚には、山口県榎野川漁業協同組合より購入した体長 11 ± 1 cmおよび 14 ± 1 cmの養殖アユを用い、実験室内の飼育水槽で1週間以上蓄養したものを実験に使用した。実験開始前に蓄養水槽から実験水路に所定数の魚を移動させ、実験区間の環境に慣れさせるためそのまま水路内で1時間の馴致時間を設けてから実験開始とした。

(2) 実験水路

実験水路の概要図を図1に示す。実験水路は透明アクリル製で、2本の水路が平行している。実験区間は水路中央のネット仕切った縦25cm、横20cmの区間（14cmのアユを用いる場合は縦幅35cm）で、魚を所定数ここにに入れて実験を行う。実験区間の一部で2本の水路が接合されており、魚は左右の水路を自由に選択し、行き来することができる。水路を通過した水は冷却水循環装置を設置した下部水槽に集められ、マグネットポンプを用いて水路上部タンクへと循環させ、実験水の温度管理と酸素供給が可能である。また上部タンクと左右実験水路はそれぞれパイプで連結されており、そこに取り付けられたコックの開閉により水路内の流量を変動させることができる。実験水路の周りを暗幕で覆い、視覚的に刺激となるものを極力少なくし、内部照明として白熱灯40Wを1灯

用いる。実験区間上部位置で照度は70～170lxであった。

(3) 実験方法

魚は昼間と夜間で行動モードが異なるため⁷⁾、実験は10:00～18:00の間に行った。1回の実験での実験魚数は3尾、実験時間は1時間とした。実験魚は蓄養槽から無作為に選び、連続して同じ個体を用いないよう配慮した。一つの環境因子について、一方の水路を対照水路側として実験条件を固定しておき、他方の水路を実験水路側として条件を変化させた。この際、対象水路としては右水路と左水路を各実験ごとに交互に使用した。実験水路上部に設置したPCカメラで撮影した1分間隔の画像から魚の左右水路の存在数を計数し、実験に用いた魚の総数で除し魚の分布率を求めた。その値より、実験水路側の魚の分布率の60分間の平均値を、一回の実験結果として求めた。実験回数は基本的には1条件につき3回とし、結果にばらつきが見られた場合にはより近い値2つを採用した。単一環境因子として、流速、水の乱れ、気泡混入率、照度差に対する選好性実験を行う。魚は体長や水温の変化によって遊泳能力や行動パターンが異なるため、アユの体長・水温を変化させた実験も行った。その諸条件を表1に記す。

a) 流速実験方法

対照水路の流速を10cm/sとし、他方を変化させることにより流速に対する選好性を求めた。

b) 水の乱れ実験方法

実験区間の上流に障害物（レンガブロック）を設置し、

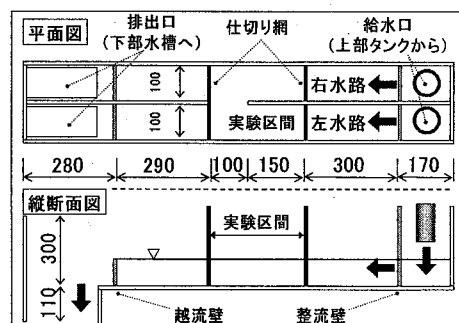


図-1 実験水路概要

表-1 各単一環境因子に対する実験条件

環境因子	流速	乱れ	気泡	照度差
アユの 平均体長 (cm)	11 / 21 ± 1	11 / 21 ± 1	11 / 21 ± 1	11 / 21 ± 1
/ 水温 (°C)	11 / 12 ± 1	11 / 12 ± 1	11 / 12 ± 1	11 / 21 ± 1
流速 (cm/s)	0 ~ 90	35	10	10
水深 (cm)	5.5 ~ 15	3.5	11.5	6

実験区間に水の乱れを発生させた。本実験では対照水路を用いず、乱れの発生を起こした水路のみで実験を行った。また本研究では水の乱れ具合を(5)式の乱れエネルギー(K)で表現した⁸⁾。

$$K = \frac{1}{2} \cdot (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{z^2}) \quad (5)$$

ここに、 $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, $\overline{z^2}$ はそれぞれ x , y , z 方向の流速の分散(乱れ強度)である。実験区間内の乱れエネルギーが平面方向で一様ではなかったため、水路平面を流下方向3区画×横断方向5区画の15分割し、各区画の単位面積あたりのアユの分布率を求めた。なお、水深方向における乱れエネルギーの変化を極力小さくするため、遊泳に必要な最小水深が体高の2倍程度であることを参考に⁹⁾、実験に用いたアユの体高が1.0~1.5cmであったことから、実験時の水深を3.5cmとした。

c) 気泡実験方法

魚に対する気泡の影響を実験水中に含まれる気泡の割合で評価した。以下、気泡混入率と呼ぶことにする。気泡混入率の測定は、60mlのプラスチック製注射器により試験区間の水路の表層・中層・底層の水をそれぞれ3回ずつ引き抜き、その中に含まれている空気量の平均を用いて計算した。なお、測定者および引き抜き時の速度による測定結果の違いには有意な差は認められなかった。左右両水路の実験区間底面に横1cm×縦30cmのエアストーンを敷き詰め、流量計を介して接続したエアレーションポンプあるいは空気ボンベから実験水路側の区間全面に気泡を発生させた。対照水路側には気泡は無しとした。

d) 照度差(遮蔽)実験方法

水路側面及び底面は黒色の塩化ビニール版で覆うことにより、外からの光を遮断した。水路上面および上下流の仕切り網に寒紗を設け、対照水路に対する遮蔽率を変化させることで照度差による選好性を求めた。実際の河川などでは水深が深くなるほど暗くなることを考慮し、上面の覆いが無い場合の照度約75lxを基準に他方の水路の光の遮蔽率を27%~95%に変化させた。

(4) 選好強度式の定式化手法

単一の環境因子実験に対する選好強度の表現には様々な定式化手法があり得るが、本研究では実験精度に対する定式化精度のバランスを考慮し、単純性を重視して実験水路の環境条件に対する魚の分布率をもとに選好値を計算する³⁾。

$$\frac{D_{右}}{D_{左}} = \frac{P_{右}}{P_{左}} \quad (6)$$

ここに、 D はある環境条件における魚の分布率であり、 P はそれに対応する選好値である。 $D_{左}$ は条件を変化させた実験水路側の魚の分布率を表し、 $D_{右} = (1 - D_{左})$ が成り立つ。本研究では、まず同条件下で得られた実験結果の分布率について、その母平均の95%信頼区間をt分布を用いた区間推定法により求め、その信頼区間内を参考にして魚の分布率曲線を作成する。そして各条件(k)について(後述の図2を例にすると、21℃、11cmの場合は $k = 0, 25, 35, 50, 75$ cm/s について)、その曲線上の値を $D_{右,k}$ とする。 $P_{右,k}$ をある一定の値に固定して(どんな値でもよいが、例えば $P_{右,k} = 1$ とするとわかりやすい)環境条件の数値毎に選好値 $P_{左}$ を計算すると、条件 k に対して相対的な選好性を表した曲線が導かれる。このとき、分布率 $D_{左} = 1$ だと式(6)の計算が出来ないため、分布率が1の場合は0.99と置き換えて計算する。そしてこれらの選好値 $P_{右,k}$ のうち最大値が1となるように換算し、選好曲線を導く。

(5) 実験および選好強度式の定式化結果

a) 流速

実験結果より得られた分布率曲線およびそこから導かれた選好曲線をそれぞれ図2、図3に示す。21℃/14cmについては流速65cm/s以上の実験は行っていないが、図2において50cm/sでは低い分布率の値を、65cm/sでは高い値を示している。このことから体長14cmの巡航速度の上限まで実験が至っていないと考えられる。このため本研究では、アユの巡航速度の最大値は体長の4~7倍とされていること⁹⁾、および流速65cm/sの95%信頼区間を参考に、100cm/s時の分布率が0になると仮定して分布率の曲線を引き選好曲線を求めた。

体長が同じで水温が変化すると、選好流速帯はあまり

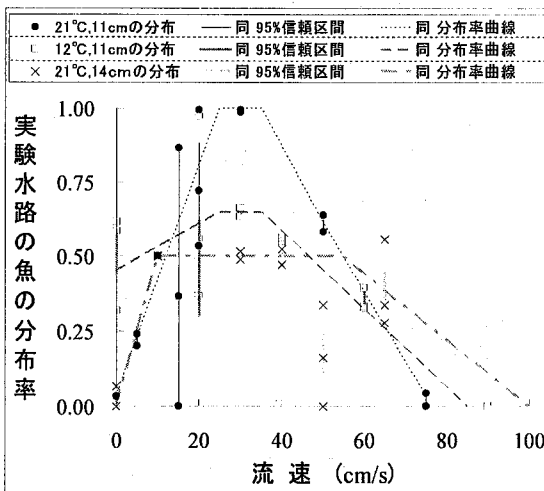


図2 流速実験結果

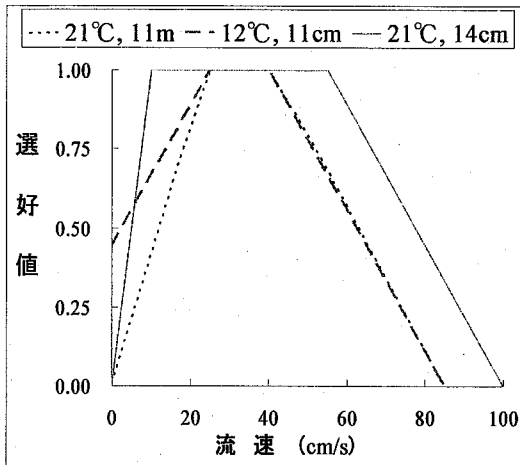


図3 アユの流速に対する選好曲線

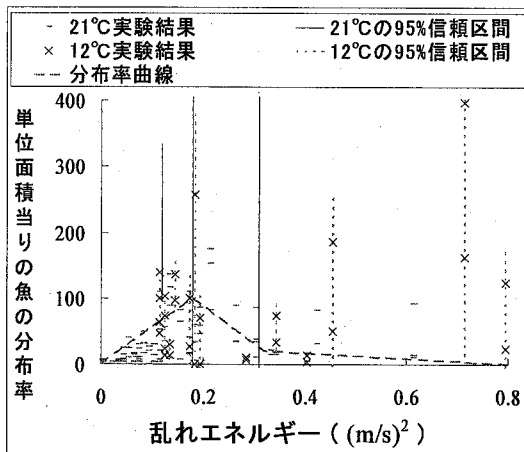


図4 水の乱れ実験結果

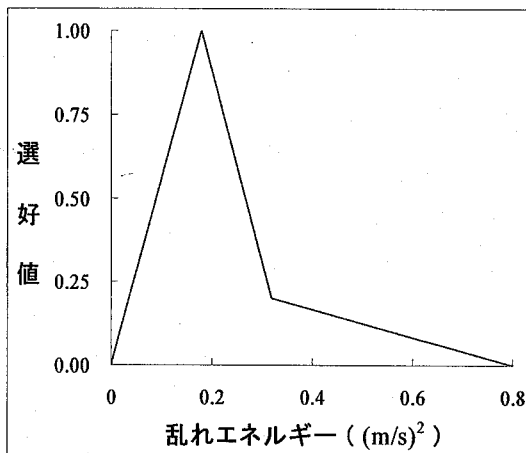


図5 アユ (体長約11cm) の乱れエネルギーに対する選好曲線

変化せず25~40cm/sであったが、水温が低い場合には流遅い流速に関しても高い選好性が得られる結果となった。また体長が大きくなると選好流速帯の幅が広くなるといった選好曲線を作成した。日本水産資源保護協会および中村俊六氏によるアユ成魚の第一種適性基準⁹⁾では選好流速帯は50~100cm/sとされていたが、本研究では体長および水温を変化させた選好曲線を作成した。生息場評価に用いる際は、対象となる現場の状況に合わせて使い分けていきたいと考えている。

b) 乱れエネルギー

実験結果より得られた分布率曲線およびそこから導かれた選好曲線をそれぞれ図4、図5に示す。乱れエネルギーでは水温の変化に対する選好性の違いも考慮したが、図4では両者において分布率の傾向にあまり差は見られなかったため、双方の結果を参考に分布率曲線を作成した。乱れが極小さい場合は選好性が低く、アユは多少乱れた流れを好むという結果になった。この選好曲線により、河川の落差の落ち口周辺などにおける乱れの影響を評価することが可能になったといえる。

c) 気泡混入率

実験結果より得られた分布率曲線およびそこから導かれた選好曲線をそれぞれ図6、図7に示す。河川内の落差などで気泡が発生するような流れは、乱れや鉛直方向の流れなどの影響もあり魚が遡上する上り口を発見する要因のひとつとなりうるが、気泡のみの影響を見た本研究の結果では、どの条件でも極少量の気泡ではその影響は少なかったが、気泡の量が7%あたりからは遊泳の阻害になるためか、急激に忌避の度合いが大きくなるという

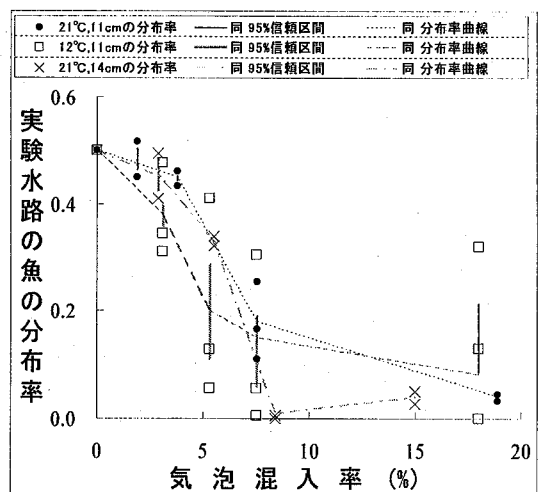


図6 気泡実験結果

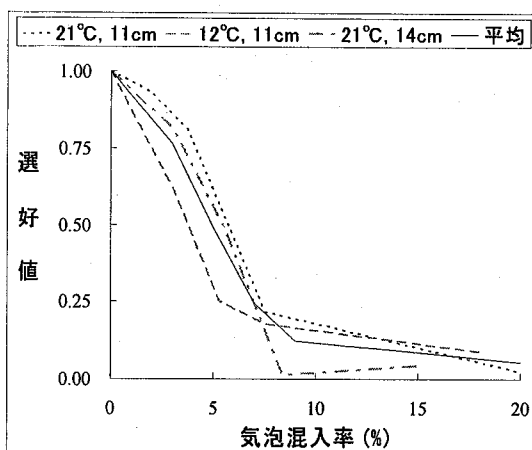


図7 アユの気泡混入率に対する選好曲線

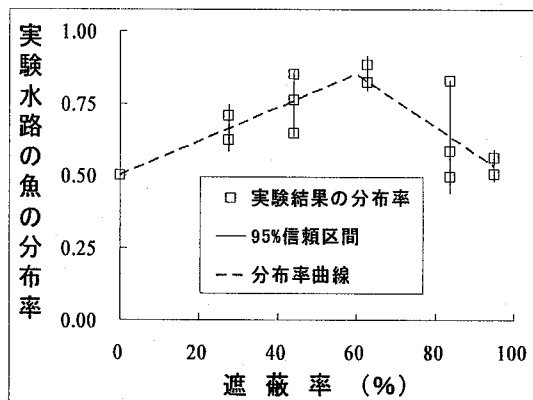


図8 照度差実験結果

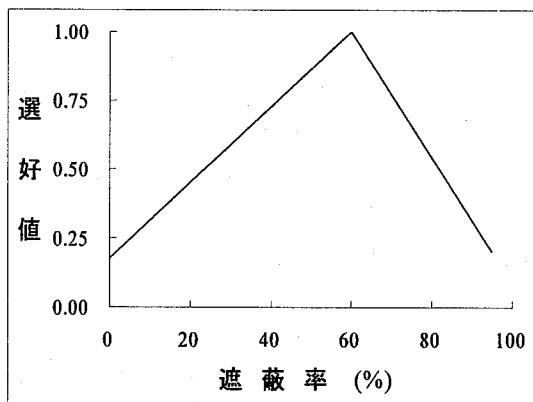


図9 アユ (体長約11cm) の照度差に対する選好曲線

結果が得られた。また体長や水温を変化させて実験を行ったが、得られた選好曲線は3者で顕著な違いは見られなかった。よってこの3者の平均を取った選好曲線も作

成した。アユの気泡混入率に対する選好曲線としては、この平均化したものを用いて生息場評価を行いたい。

d) 照度差

実験結果より得られた分布率曲線およびそこから導かれた選好曲線をそれぞれ図8、図9に示す。アユは外敵から身を隠すためにある程度薄暗い場所を好むが、暗すぎるとその選好性が低くなることが示された。最も選好値が高い遮蔽率は、60%付近であった。しかし実験時の無遮蔽照度(遮蔽率0%)が70lx程度と、屋外に比べて非常に低いため、実河川における適用は難しいかもしれないが、比較的簡単に実験条件を再現できる因子であるため、後述のウェイト算出の際には有用である。

(6) 環境因子ウェイトの算出

流速、乱れエネルギー、気泡混入率、遮蔽率の間のウェイトを求めるために、図1のU字迷路型実験水路を用いて複合環境因子の選好性実験を行う。この実験は2つ環境因子(因子A、因子B)を対象とし、一方の水路を因子Aに関して選好性が高くかつ因子Bに関して選好性が低い流れとし、他方を因子Aに関して選好性が低くかつ因子Bに関して選好性が高い流れという条件にし、単一環境因子のときと同様にして実験を行うことで、どちらの因子がより強い影響を与えるかを定量的に求めることができる実験である。本研究における実験の組み合わせは、乱れと気泡、流速と気泡、および流速と遮蔽率とし、各3回ずつ行った。アユは体長約11cmのものをを用い、水温は21°Cとした。ウェイトの計算には式(2)~(4)および(6)から導いた式(7)を用いる⁷⁾。

$$R = \frac{D_{\text{右}}}{D_{\text{左}}} = \frac{\frac{W_{\text{因子A}}}{W_{\text{max}}} (P_{\text{因子A, 右}})^{\frac{W_{\text{因子B}}}{W_{\text{max}}}}}{\frac{W_{\text{因子A}}}{W_{\text{max}}} (P_{\text{因子A, 左}})^{\frac{W_{\text{因子B}}}{W_{\text{max}}}}} \quad (7)$$

ここに、 R は左右水路の魚の個体比である。分布率 D は複合環境因子実験の結果から、選好値 P は単一実験の結果より求めた選好曲線から値が決まる。 $W_{\text{max}}=W_{\text{因子A}}$ あるいは $W_{\text{max}}=W_{\text{因子B}}$ と仮定することでウェイトが求まる。どちらが正しいかは、計算結果から判断され、得られた値が0~1の範囲内のものをウェイトとして採用する。乱

表2 環境因子ウェイト

水路	乱れE (m/s) ²	P _{乱れE}	気泡 混入率 (%)	P _{気泡}	複合実験 結果の 分布率D
右水路	0.05	0.053	0.00	1.000	0.48
左水路	0.25	0.761	7.55	0.216	0.52

れと気泡の複合実験時の各選好値および実験結果の分布率の平均を表2に示す。 $W_{max} = W_{乱れ} = 1$ と仮定したとき、表2の値を式(7)に代入すると $W_{気泡} = 1.69$ となり、ウェイトが1を超えてしまうので、この仮定は間違いであったことを示している。一方 $W_{max} = W_{気泡} = 1$ として同様に計算すれば、 $W_{乱れ} = 0.604$ となるので、前述の通りこの値をウェイトとして採用する。同様にして算出したウェイトの結果を表3に記す。アユの挙動に最も影響を与える環境因子は、気泡の混入であった。気泡が多いとアユは遊泳を妨げられるので、強い忌避の対象となることが明らかになった。また外敵から身を守るためか、照度差のウェイトも高い。さらに、アユは遡上魚であるため河川の瀬や水の落差を越えて上流へと遡ろうとする習性があるためか、流速よりも乱れエネルギーの方がウェイトは高い結果となった。

3. 選好強度を用いたアユの遡上経路の評価

(1) 遡上調査概要

山口県内の魚道（プールタイプ）および自然の瀬において、アユの遡上調査を行った。調査対象区間の下流端および側面を網で仕切り、下流端に養殖アユ（体長約11cm）100尾を放流し、上流端に設置した採捕網まで遡上してきた個体数を遡上数とした。アユは調査当日に漁協より購入したものをを用い、調査時間は24～48時間とした。その詳細および結果を表4に記す。

(2) 選好強度による遡上経路の評価

調査対象の代表的なプールにおいて、水深方向の表層・中層・底層の3層で流速、乱れエネルギー、気泡混入率を測定し、式(2)～(4)および室内実験の結果を用いてプール内のアユの選好強度を計算した。図10がその1例であり、流速・乱れ・気泡の3因子の影響が複合され、総

合選好値(P^*)に反映されている。このプール内でアユが遡上していく経路は複数考えられるが、魚はその体長相当分の長さしか流れを認識できないという説もあり⁹⁾、よってその自分の周囲の環境の中から最も相対的に選好性が高い場所へ移動する可能性も高い。そこで P^* が最も高かった底層において、下流端から上流端に向けて特に選好性の高い箇所を連ねた経路を求めた（図中の矢印）。この経路を想定遡上経路と呼ぶことにする。ここで想定遡上経路を定める際、上流側の範囲よりも下流側の方が選好値が高い場合があるが、本研究ではあくまで下流側から上流へ向かおうとするアユの経路上において選好値がどのように推移していくかを検討するために、あえて上流側から選好値の高い箇所を選択するようにした。同様に他の調査対象においても想定遡上経路を求めた。それらの想定遡上経路上における選好値と、遡上調査結果を表したのが図11である。アユの遡上を確認した魚道はすべて、上流部において選好値が上昇している。特に遡上数が比較的多かった2002年、2003年の魚道A、および2002年の魚道Bではその傾向が顕著である。

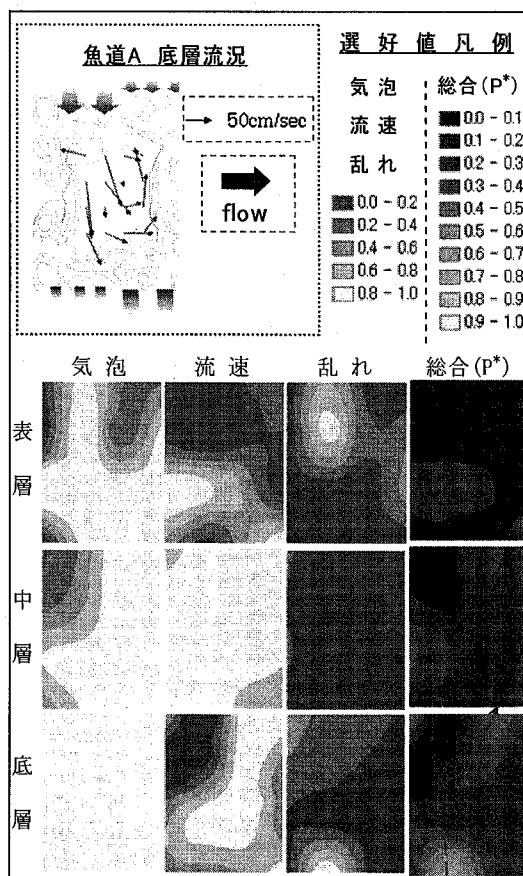


図-10 魚道A (2003)の選好強度

表3 環境因子ウェイト

気泡	照度差	乱れE	流速
1.00	0.78	0.60	0.40

表4 遡上調査対象魚道と調査結果

調査対象	魚道A	魚道B	魚道C	自然の瀬
調査河川	三隅川	三隅川	玉江川	玉江川
1巻当りの プール容積(L)	300	650	250	270
一段の落差(cm)	17.0	10.0	15.5	17.0
段数	8	19	7	4
調査区間(m)	12	50	12	15
勾配	1/9	1/33	1/11	1/15
調査時期	2002年8月	2002年8月	2002年6月	2002年6月
平均流速(m/s)	0.018	0.065	0.089	0.009
平均水温(°C)	27.5	14.0	27.5	14.3
遡上数 (24時間平均)	38 (38)	60 (30)	26 (26)	0 (0)
			20 (10)	15 (7.5)

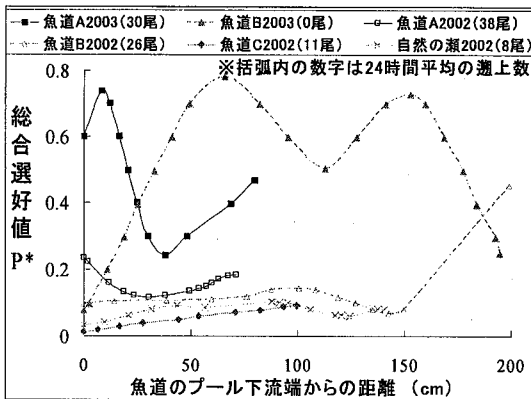


図-11 遡上経路と選好強度

これは上流部分の魚はより選好値が高い方へと移動し、越流部の遡上へとつながったのではないかと考えられる。一方、1尾も遡上しなかった2003年魚道Bでは上流部分では選好値が下降傾向にあり、逆にプール中央部分に選好値が高い箇所が存在する。このため魚は上流部分よりもより居心地のよいプール中央部分に留まり、遡上意欲をおこさなかったのではないかと推察できる。このように、魚道内の魚の移動を選好強度を用いて考察することができる。今回は選好値が低くてもアユは上流側へと向かうといった仮定のもとに想定遡上経路を定めたが、その魚の走流性と実験で求めた環境因子の選好値の間にもウェイトは存在すると思われる。現在は走流性や水深方向への移動などについて研究中であり、回遊魚の遡上の妨げとなる箇所の通過しやすさを、選好値を用いた魚の移動を用いて定量的に評価する手法へと発展できるのではないかと考えている。

5. おわりに

(2007.5.25 受付)

Study on Quantity of Environmental Preference on Ayu with Laboratory Experiments

Hiroyuki NOGUCHI¹, Masahiko SEKINE¹, Moriyoshi WATANABE² and Masao UKITA¹

¹Dept. of Civil Engineering, Yamaguchi University

²Dept. of Civil Engineering, Akashi National College of Technology

We define preference curves of Ayu (*Plecoglossus altivelis*) for velocity, turbulence air bubble and gap of illuminate through laboratory experiments and calculate weights among these factors. Then, we calculate three dimensional preference patterns in four fishways. Based on the possible fish paths presumed from the preference patterns, we draw preference patterns along the fish paths, which can explain field observations of fish migration. Preference pattern along the fish path obtained from our preference model could be an index to evaluate the effectiveness of a fishway quantitatively.

本研究では室内実験によりアユの流速、乱れエネルギー、気泡混入率、照度差について選好強度式を定式化し、それらの環境因子ウェイトを算出した。また実際の魚道における適用例の一端を提示した。想定遡上経路を用いた考え方はまだ発展中のものであり、さらなる現場での適用や既存の研究との比較などは今後の課題ではあるが、局所的な流況において魚の移動や生息場の価値を評価する際に有用な情報を提供できたように考える。

参考文献

- 1) 後藤益滋, 関根雅彦: I ホタル護岸の有効性に関する研究, 土木学会論文集, No. 804, pp. 11-22, 2005.
- 2) アメリカ合衆国内務省/国立生物研究所 (中村俊六, テリー・ワドウ訳): IFIM 入門, 財団法人リバーフロント整備センター
- 3) 楊維東, 関根雅彦: 多自然型河川改修効果予測のための魚の生態環境評価手法, 環境システム研究, Vol. 26, pp. 61-66, 1999.
- 4) 岡本太郎, 須藤達美: PHABSIM の評価精度に関する実証的研究, 土木研究所資料, No. 3873, pp. 261-272, 2002.
- 5) 安田陽一, 大津岩夫, 浜野龍夫, 三矢泰彦: 多様な水生生物の遡上・降河可能な魚道の提案, 河川技術論文集, 第7巻, pp. 221-226, 2001.
- 6) 小出水規行: 魚の遊泳行動に及ぼす水の乱れの影響に関する基礎的研究, 理論応用力学講演会講演論文集, Vol. 50, pp. 51-52, 2001.
- 7) 楊維東, 関根雅彦: 行動モードを考慮した魚の生息環境評価手法に関する研究, 土木学会論文集, No. 671, pp. 13-23, 2001.
- 8) 椿東一郎: 水理学 II 森北出版株式会社, pp. 153-154, 1974.
- 9) 中村俊六: 魚道のはなし, 財団法人リバーフロント整備センター, pp. 169-170,