

アユの休憩場所の水理特性とその挙動との関係

RELATIONSHIP BETWEEN FLOW CHARACTERISTICS IN ORIENTATION AREA OF FISH AND FISH BEHAVIOR

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・森悠輔³・関強志⁴

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yusuke MORI and Tsuyoshi SEKI

¹正会員 博(工) 九州工業大学大学院准教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系

³学生員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

⁴学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

It is necessary to facilitate the fish migration that the maximum velocity in the fishway is lower than the burst speed of fish and also offering the orientation area to the fish where fish can rest. There are a lot of investigations on the migration ratio in several type fishway. However, the characteristics of orientation area have not been investigated so much. In this study, the fish behaviors just behind of the backward-facing step were measured and also velocity measurements were conducted, using ayu. It was found that the ayu wants to rest in the low velocity and low turbulence area. Further, the ayu hates the high shear velocity area, irrespective of low velocity.

Key Words : migration, fishway, orientation area, velocity, turbulence, shear

1. はじめに

ダム、堰、落差工によって生じる水位落差を分割し、魚類の遡上および降下を助ける目的で魚道が設置される。魚道には、階段式、バーチカルスロット式、潜孔式、デニール式、ハイブリット式など様々な形式がある¹⁻³⁾。中村¹⁾は魚が魚道を遡上するためには魚道内最大流速が突進速度以下であること、十分な休憩場所があること等の条件が必要であると述べている。これまで、様々な魚道において遡上数が計測されてきたが⁴⁻¹³⁾、休憩場所について検討している研究はそれほど多くない。

佐合ら¹⁴⁾は大田原堰魚道における底面粗石密度を変化させてアユの挙動を水中ビデオで撮影し、粗石背後にアユが休憩することを指摘した。和田ら^{15,16)}は水中カメラをデニール式およびスティーブパス式魚道に設置し、スティーブパス式魚道では兩岸に連続して設置される阻流板間で魚が休憩することを指摘した。浪平ら^{17,18)}は階段式魚道において幾何学形状や水理量を系統的に変化させてウグイの挙動を側壁方向から撮影し、プランジングフローではプール中央の低流速場で休憩すること、ストリーミングフローでは水面付近を流れる高速流の下部に形成される逆流域において下流向きで休憩すること、す

なわち正の向流性があることを示した。石川ら¹⁹⁾はバーチカルスロット式魚道内におけるウグイの挙動を撮影すると共に3次元電磁流速計で流速計測を行い、流速が異なる場所でも対地速度は一定だが対水速度が変化すること、ウグイの遊泳方向が常に流向の逆方向となることを示した。以上のように、魚は低流速域において正の向流性を示しながら休憩することが明らかにされてきた。

休憩時間についての検討も行われてきた。和田ら²⁰⁾は修正ラリーニア型舟通し魚道を提案し、魚道内の稚アユの挙動を水路上部および側壁方向から撮影した。各阻流板間における休憩時間が対数正規分布に従うことおよび平均休憩時間が90sであることを明らかにした。泉ら²¹⁾はハイブリッド式魚道においてウグイの挙動を水路上部および側壁方向から撮影し、低流速の死水域でウグイが休憩し、休憩時間が3~305sとばらつきがあるが、20s以下が多数であることを明らかにした。

休憩場所の流速を定量的に検討した研究も近年見られるようになった。林田ら^{22,23)}は階段式魚道において幾何学形状を変化させてウグイの挙動を側壁方向から撮影し、休憩場所の流速が体長の0~5倍(cm, sを用いる)であることを解明した。また、休憩場所から遡上に試みる経路にいくつかのパターンがあるが、ほとんどのウグイが同様な経路をたどることを明らかにした。鬼束ら^{24,25)}は階

段式魚道において切り欠き幅および切り欠き位置を変化させても、魚が低流速域を選択して休憩することを定量的に解明した。

以上のように、魚道内における魚の休憩状況を検討した例は幾分存在するが、魚の休憩時における3次元の挙動や水理量と休憩場所との定量的な検討はあまり行われていない。本研究は、段落ち下流部で遊泳しているアユの挙動を撮影すると共に流速測定を行い、休憩時におけるアユの挙動を詳細に分析し、水理量と休憩場所との関係などを解明したものである。

2. 実験条件および実験装置

(1) 実験装置

定量的に証明された定理ではないが、一般に、魚は低流速域で乱れの少ない領域で休憩することが指摘されている。そこで、流速、乱れ、流向などが様々な値を有し、かつ、それらの組み合わせの状態が確保できる段落ち流れを採用した。魚はこれらの複雑な流れの中で選好する領域で休憩すると考えられる。

図-1に示す全長 $L=1.8\text{m}$ 、水路幅 0.4m 、高さ 0.9m の水平な開水路を実験に用いた。ここに、 L_x は段落ち部から下流端までの距離、 L_y は段落ち高さ、 h は水深で、添字 u 、 l はそれぞれ段落ち部よりも上流側および下流側の諸量を意味する。上流端から 0.95m の位置に段落ち部を設置し、 L_x を 0.85m とした。段落ち部から流下方向に x 軸、水路上流端から流下方向に x' 軸、鉛直上向きに y 軸をとる。 $x'=0.5\text{m}\sim 1.5\text{m}$ の右岸側側壁は透明な塩化ビニール製で、その他の部分は木製である。

(2) 実験条件および実験方法

水深 h_u を 0.1m で固定し表-1に示すように $L_y/h_l=0.35\sim 0.80$ の4通りに変化させた。ケース名の数値は L_y/h_l を表す。体長 B_L が $6.5\sim 9\text{cm}$ (平均体長 $\overline{B_L}$ は 7.8cm) のアユ $N=20$ 尾を実験に用いた。小山²⁶⁾はアユの遊泳欲が流速に依存し、体長が $6\sim 8\text{cm}$ 、 $8\sim 9\text{cm}$ のアユはそれぞれ流速が $0.4\sim 0.6\text{m/s}$ 、 $0.5\sim 0.7\text{m/s}$ の時に最も遊泳欲が湧くことを指摘した。本研究で使用するアユの平均体長 $\overline{B_L}$ は 7.8cm であるため、小山の推奨値に基づき段落ち部上流の流速を 0.6m/s に設定した。これは平均体長 $\overline{B_L}$ の 7.7 倍に相当する。アユ20尾を $x=0.7\text{m}$ の位置に放流した状態で、徐々に流速を与える。流れが定常となり、さらに、アユが集団で移動して一定場所に定位していることを確認した後、開水路側壁に設置したビデオカメラを用いてアユの挙動を 30Hz で 15 分間撮影した。撮影後、 1s ごとの 900 枚について全てのアユの吻端位置を抽出した。

x 、 y 軸方向にそれぞれ 10 、 7 点のメッシュをとり、

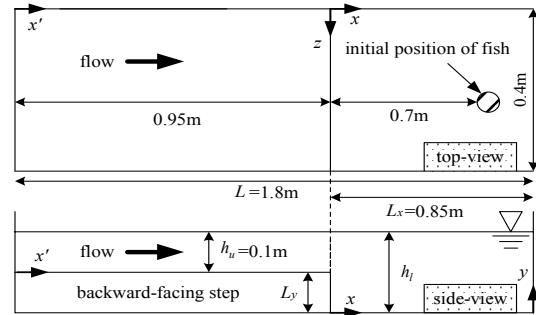


図-1 実験装置

表-1 実験条件

L_y/h_l	0.35	0.50	0.65	0.80
case name	C35	C50	C65	C80

格子点で構成される合計70点において、3次元電磁流速計で x 、 y 軸方向の瞬間流速 $\tilde{u}=U+u$ および $\tilde{v}=V+v$ を 0.05s 間隔で 25.6s 計測した。ここに、大文字は時間平均流速を、小文字は変動成分を示している。なお、流速測定時には開水路内にアユを入れていない。

3. 実験結果および考察

(1) 水理特性

図-2に流速ベクトル (U, V) を示す。流入断面において段落ち部よりも上方で高速流が流入し、段落ち部直下流の底面付近で渦を形成している。渦よりも下流側の流速は、底面付近で遅く水面付近で高速だが、流入断面と比較すると全体的に低流速である。

図-3(a)、(b)に流入断面の断面平均流速 U_{m0} で無次元化された流下方向乱れ強度 u'/U_{m0} および鉛直方向乱れ強度 v'/U_{m0} を示す。段落ち部よりも上流側の底面を流下方向に延長したライン上の上下に乱れ強度が増加し、流下に伴い徐々に減少する様子が観察される。また、開水路等流では v'/u' は約 0.55 であるが²⁷⁾、図-3(a)および(b)を比較すると、 v'/U_{m0} が u'/U_{m0} を上回る箇所も観察され、複雑な乱流構造となっていることが理解される。以上のように、段落ち部を設けることで、順・逆流、高・低流速、高・低乱れ強度、等方・非等方乱流など様々な流れ場を創出することができた。

(2) 魚の休憩場所の定義

図-4に時間平均の魚の存在率を示す。いずれのケースにおいても高い存在率が段落ち部よりも下流部に位置するが、段落ち高さが増加するに伴い徐々に段落ち部に近づいている。いずれのケースも高い存在率は比較的底面付近に位置するが、C80は若干底面から離れた領域となっている。段落ち部下流域には流速、流向、乱れが様々な組み合わせられた流れが存在するが、魚の存在率は特定のエリアに集中している。ただし、C35~C80の存在率の

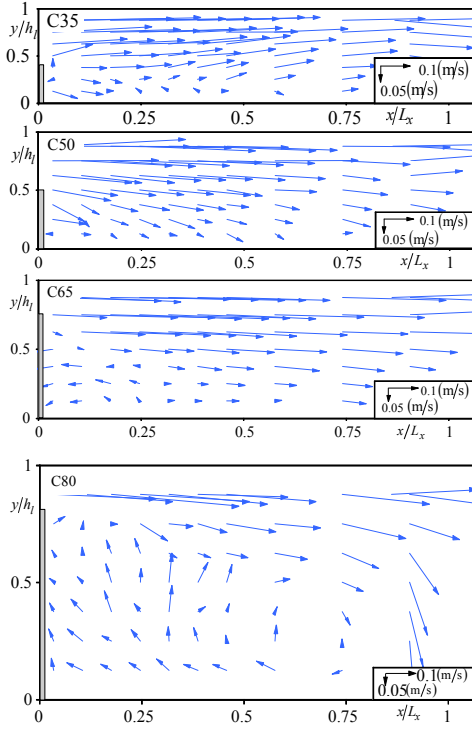


図-2 流速ベクトル

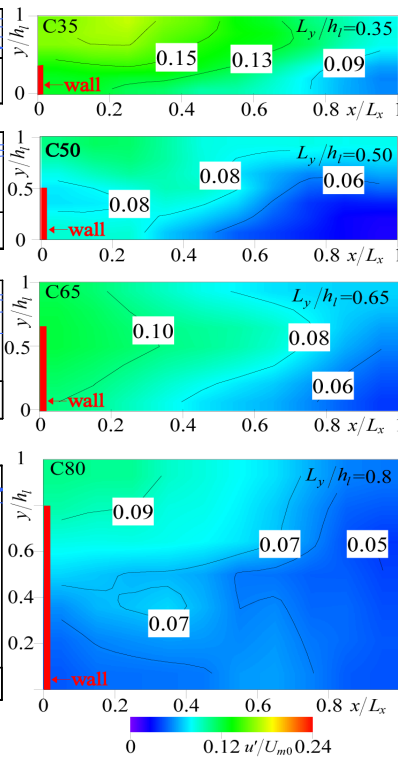


図-3(a) 乱れ強度 u'/U_{m0}

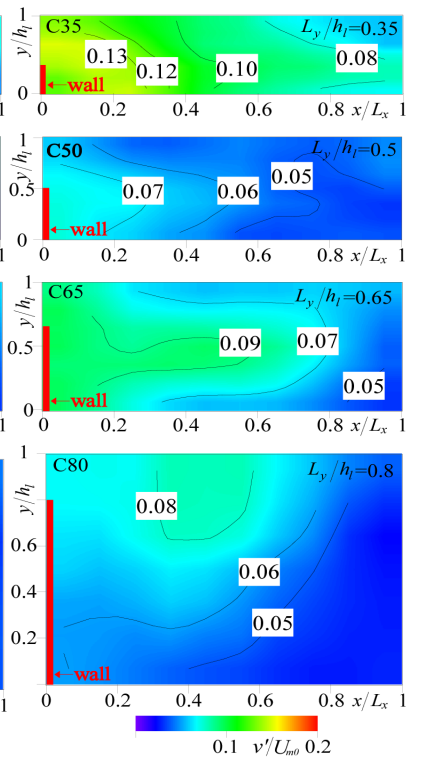


図-3(b) 乱れ強度 v'/U_{m0}

ピーク値はそれぞれ7%, 10%, 10%, 14%で, 特にC35の存在率のピーク値が小さく, 他のケースよりも分散してアユが遊泳していることを示唆している. なお, 図-4は時間平均値であるため, 瞬間的な魚の挙動は理解できない.

魚が独立でランダムに遊泳しているか, または, 魚群として挙動するかを定量的に明らかにするため, 石川²⁸⁾の定義した魚群半径を2次元に拡張した次式を用いる.

$$R_x \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^N \{x_{fi} - G_x\}^2} / N \quad (1.a)$$

$$R_y \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^N \{y_{fi} - G_y\}^2} / N \quad (1.b)$$

ここに, R_x , G_x , x_{fi} はそれぞれ x 方向の魚群半径, 魚群重心の x 座標, 任意 i の魚の x 座標であり, y についても同様な定義である.

図-5に1sごとの魚群の重心位置(G_x, G_y)の60s間における挙動を示すと共に, 図-6に x , y 方向の魚群半径 R_x , R_y を平均体長 $\overline{B_L}$ で除した値および両者の比 R_x/R_y の同時刻の時系列を示す. 図-5よりいずれのケースも魚群重心が時間と共に移動しているが, 流下および水深方向の移動量は微小で, 図-4に示した時間平均の魚の存在率が大きな値を有する場所とほぼ一致する. また, 図-6より魚群半径 $R_x/\overline{B_L}$, $R_y/\overline{B_L}$ は, C35以外のケースではそれぞれ1.0, 0.3程度の値を有し, 時間的

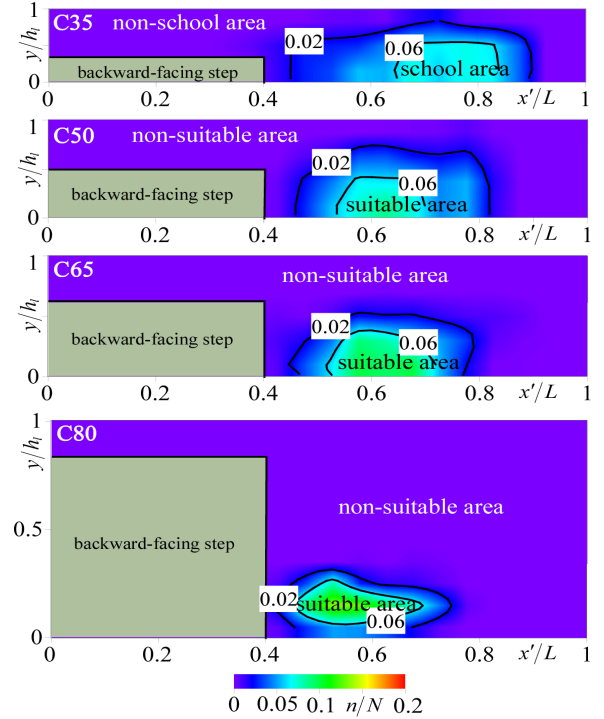


図-4 存在率コンター

変動は余り大きくないことが理解される. その結果, 魚群形状 R_x/R_y は3程度の定常値をとる. また, これらの値は魚群が極めて密集していることを表す. 一方, C35は $R_x/\overline{B_L}$ の時間的変動が大きく, $R_y/\overline{B_L}$ は他のケースと比べ小さな値をとるため, 両者の比は一定値を示さない. そのため, C35における R_x/R_y の最大値は他の

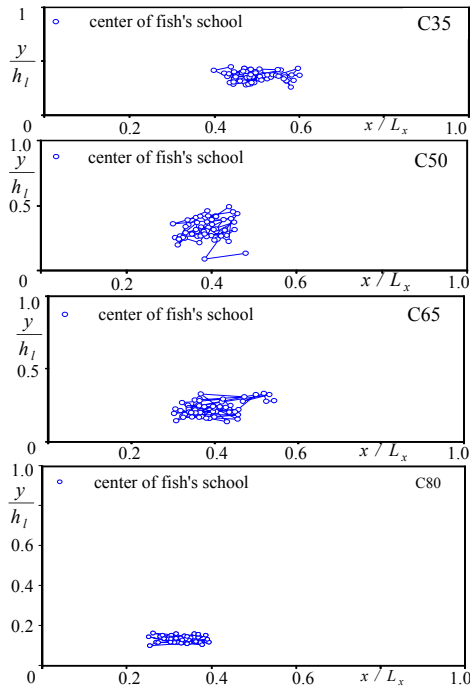


図-5 魚群の重心軌跡

ケースと比較し増加傾向にあり，13にも達する。

図-7に x ， y 方向の魚群半径 R_x ， R_y の変動成分の RMS 値 R_x' および R_y' を平均体長 $\bar{B}_L$ で除した値と段落ち高さ L_y を平均体長 $\bar{B}_L$ で除した値との関係を示す。RMS 値とは標準偏差のことで，以下の式から求められる。

$$R_x' = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (R_x - \bar{R}_x)^2 dt} \quad (2)$$

ここに， R_x は魚群半径の瞬間値， $\bar{R}_x$ は魚群半径の時間平均値で， y 方向についても同様である。C35以外の3ケースは $R_x'/\bar{B}_L$ および $R_y'/\bar{B}_L$ が段落ち高さ $L_y/\bar{B}_L$ に関係なくほぼ一定値を示している。

以上のことから，C35以外の3ケースは魚の存在率，魚群重心の変動量，魚群半径の挙動がほぼ同様であることから，アユの多くが選好して休憩していると見なし，C35については，選好する流れ場に近い条件を遊泳しているものの，必ずしも選好する水理量が確保されておらず，魚群形状が時折崩れると判断した。

図-5の魚群重心位置における存在率を図-4より求めた結果，すべてのケースにおいて6%が下限値であることがわかった。そこで，魚の存在率が6%以上の領域を休憩場所(suitable area)と定義し，図-4中に示した。C35についても比較のため，同様に算出した結果，存在率が他ケースの休憩場所と比べ低いため，suitable areaではなく school area と定義する。一方，非休憩場所(non-suitable area)については，6%未満とするのが一つの方法であるが，図-4より6%未満の領域にもある程度のアユが遊泳していることから，ここでは存在率が2%未満の領域を非休憩場所と定義し，図-4中に示した。C35については non-school area と定義する。ただし，これらの値は魚数

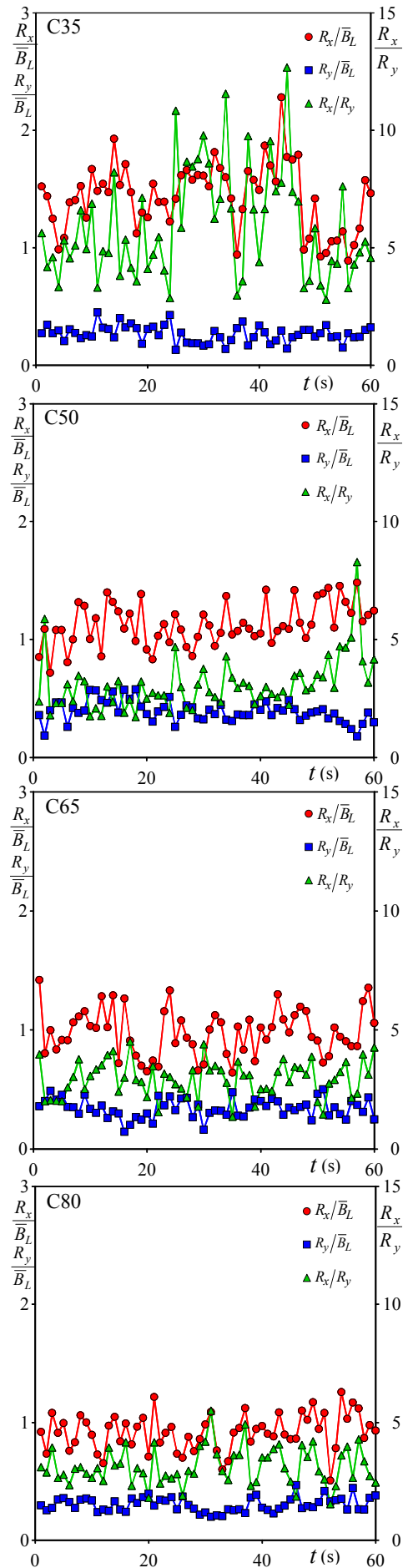


図-6 各魚群半径の時系列およびその比

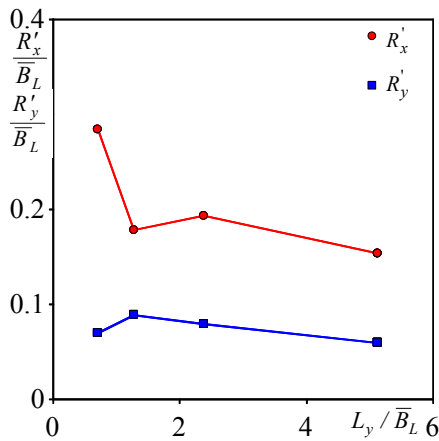


図-7 各魚群半径変動成分のRMS値と段落ち高さの関係

および存在率を算出するメッシュサイズに依存するため、普遍性はない。

(3) 休憩場所および非休憩場所の水理量の比較

休憩場所および非休憩場所における水理量の空間平均値を求め、 $\langle \rangle$ で表示する。図-8(a), (b)に休憩場所および非休憩場所における空間平均された流下方向流速 $\langle U \rangle$ および鉛直方向流速 $\langle V \rangle$ と段落ち高さ L_y との関係それぞれ平均体長 $\overline{B_L}$ で除した値を示す。図-8(a)より、段落ち高さ L_y の増加に伴い非休憩場所の流速 $\langle U \rangle$ も低下しているが、その値には大きな差があることがわかる。C35を除いて考えると、休憩場所の流速は体長の±1.0倍程度の低流速であること、また、流速が正、負両方の値をとっていることから流向に依存しないことが理解される。一方、図-8(b)より、休憩場所および非休憩場所の鉛直方向流速 $\langle V \rangle$ が体長の±1.0倍程度の低流速であること、また、 $\langle U \rangle$ と同様に流向に依存しないことが理解される。

図-9(a), (b)に休憩場所および非休憩場所における空間平均された流下方向乱れ強度 $\langle u' \rangle$ および鉛直方向乱れ強度 $\langle v' \rangle$ と段落ち高さ L_y との関係それぞれ平均体長 $\overline{B_L}$ で除した値を示す。非休憩場所よりも休憩場所の乱れ強度が小さいことが判断される。C35を除いて考えると、休憩場所の流下方向 u' は体長の0.1倍以下、鉛直方向乱れ強度 v' は体長の0.05倍以下であることが解明された。従来、魚は乱れの少ない領域を好むと指摘されていたが、本研究によって初めて定量的に解明された。ただし、本研究では休憩場所を選好する要因について流速と乱れのどちらが支配しているのか解明することはできなかったため、今後検討する必要がある。

4. おわりに

本研究は、段落ち下流部で遊泳しているアユの挙動を撮影すると共に流速測定を行い、休憩時におけるア

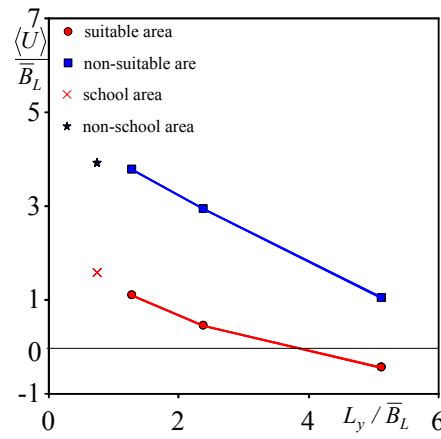


図-8(a) 休憩・非休憩場所の流下方向流速と段落ち高さの関係

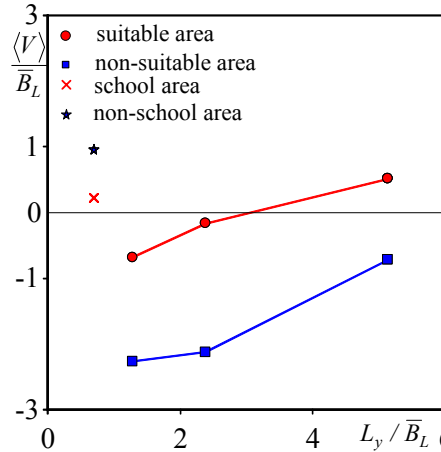


図-8(b) 休憩・非休憩場所の鉛直方向流速と段落ち高さの関係

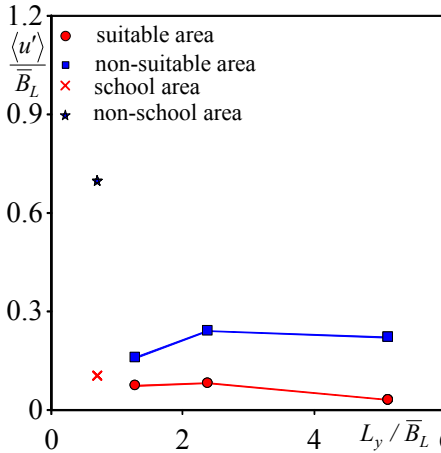


図-9(a) 休憩・非休憩場所の流下方向乱れ強度と段落ち高さの関係

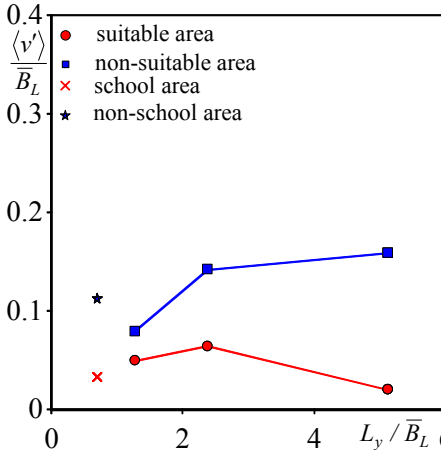


図-9(b) 休憩・非休憩場所の鉛直方向乱れ強度と段落ち高さの関係

ユの挙動を分析し、水量と休憩場所との関係を解明したものである。以下に結論を示す。

(1) 魚群重心の移動状況および魚群半径の変化を観察した結果、段落ち部の高さとアユの平均体長の比が1.28以上あればアユは休憩に適した場所を探して休憩するが、段落ち部の高さとアユの平均体長の比が0.71では休憩に適した場所が確保されていないと考えられる。

(2) 体長7.8cm程度のアユは、流下および鉛直方向の流速が体長の±1倍程度で、流下および鉛直方向の乱れ強度が体長の0.1、0.05倍以下の領域を休憩場所として選択し、流向には依存しないことが解明された。ただし、本実験装置では水路幅および段落ち部上流水深をそれぞれ0.4mおよび0.1mに固定しているため、実河川規模の流れを再現できておらず、狭い条件での結果である。水路幅、水深等を変化させた場合の結果は不明であり、また体長が異なるアユおよび他魚種についても不明であるため、今後の検討課題としたい。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金若手研究(B)19760343(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた。また、魚の飼育方法を御教授いただいた(有)アクアシティの花田一氏、北九州市立水環境館に謝意を表す。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995.
- 2) (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，1998.
- 3) 農林水産省農村振興局整備部設計課監修：よりよき設計のための「頭首工の魚道」設計指針，農業土木学会，2002.
- 4) 高嶋信博，中村俊六：魚道内のアユの挙動に関する実験的研究，第28回水理講演会論文集，pp.353-358，1984.
- 5) 中村俊六，高嶋信博，木村博：実物の魚を用いた河川構造物の模型実験手法について，第31回水理講演会論文集，pp.783-788，1987.
- 6) 金子義明，和泉清，土屋十圀，大竹義男：秋川における魚道の水理特性と遡上効果，水工学論文集，第41巻，pp.265-270，1997.
- 7) 久保田哲也：砂防施設の魚道における溪流魚の行動と魚道の実態，水工学論文集，第42巻，pp.487-492，1998.
- 8) 泉完，工藤明，東信行：三ツ目内頭首工のアイスハーバー型魚道における魚類の遡上実態とその水理特性，水工学論文集，第43巻，pp.989-994，1999.
- 9) 高崎忠勝，土屋十圀，大竹義男：秋川における複合型魚道の効果，河川技術に関する論文集，第5巻，pp.165-170，1999.
- 10) 桜井力，柏井条介，佐々木國隆，岡崎克美，進藤邦雄，岡本俊策：コンクリートブロックを用いた粗石式魚道の水理および遡上特性，水工学論文集，第44巻，pp.1197-1202，2000.
- 11) 泉完，高屋大介，工藤明，東信行：アイスハーバー型魚道における魚類の隔壁遡上特性，農業土木学会論文集，No.217，pp.55-63，2002.
- 12) 泉完，高屋大介，工藤明，東信行：赤石第2頭首工のアイスハーバー型魚道隔壁における魚類の遡上行動，水工学論文集，第47巻，pp.763-768，2003.
- 13) 安田陽一，大津岩夫，三矢泰彦，浜野龍夫：多様な水生生物の遡上・降河に配慮したスリット砂防堰堤に設置する魚道の提案とその効果，河川技術論文集，第9巻，pp.487-492，2003.
- 14) 佐合純造，本多卓志，大木孝志，田中直也：大田原堰魚道におけるアユの遡上実験報告，水工学論文集，第42巻，pp.493-498，1998.
- 15) 和田清，東信行，中村俊六：デニール式およびスティーブス式魚道における流れ場の特性と稚アユの遡上行動，水工学論文集，第42巻，pp.499-504，1998.
- 16) 和田清，東信行，小出水規行，中村俊六：稚アユの遡上行動からみた仮設用ストリーム型魚道に関する一考察，河川技術に関する論文集，第5巻，pp.159-164，1999.
- 17) 浪平篤，後藤真宏，小林宏康：階段式魚道における流量変化に伴うプール毎の流況およびウグイの遡上行動，水工学論文集，第51巻，pp.1291-1296，2007.
- 18) 浪平篤，後藤真宏，小林宏康：勾配1/5の階段式魚道における流況とウグイの遊泳行動，水工学論文集，第52巻，pp.1189-1194，2008.
- 19) 石川雅朗，白井淳治，胡夫祥，東海正：バーチカルスロット型実験魚道におけるウグイ魚群の遡上経路と行動，水産工学，Vol.43，No.1，pp.9-20，2006.
- 20) 和田清，小出水規行，石川雅朗，中村俊六：修正ラーニア舟通し型魚道の流れ場と稚アユの遡上経路，水工学論文集，第43巻，pp.983-988，1999.
- 21) 泉完，工藤明，東信行，佐藤正一：ハイブリット式魚道のプールタイプの流況におけるウグイの遡上行動実験，河川技術に関する論文集，第6巻，pp.131-136，2000.
- 22) 林田寿文，本田隆秀，萱場祐一，島谷幸宏：階段式魚道における落下流と表面流の発生特性とウグイの遊泳行動，環境システム研究論文集，Vol.28，pp.333-338，2000.
- 23) 林田寿文，本田隆秀，萱場祐一，島谷幸宏：階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動，水工学論文集，第44巻，pp.1191-1196，2000.
- 24) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，木内大介，高橋康行，飯國洋平：階段式魚道における切り欠き位置が魚の遡上率に及ぼす影響，水工学論文集，第51巻，pp.1279-1284，2007.
- 25) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，飯國洋平，森悠輔：階段式魚道における隔壁の切り欠き率が遡上率に及ぼす影響，水工学論文集，第52巻，pp.1201-1206，2008.
- 26) 小山長雄：木曾三川河口資源調査団，1965.
- 27) Nezu, I. and Rodi, W.: Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.112, pp.335-355, 1986.
- 28) 石川雅昭：ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究，河川技術に関する論文集，第6巻，pp.101-106，2000.

(2008. 9. 30 受付)