

階段式魚道におけるアユおよびオイカワの 遡上特性の比較

鬼東 幸樹¹・秋山 壽一郎²・武田 知秀³・角田 裕香⁴

¹正会員 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)

E-mail: onitsuka@civil.kyutech.ac.jp

²フェロー会員 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

⁴北九州市建築都市局 (〒803-8501 北九州市小倉北区内 1-1)

同一の魚道であっても魚種によって遡上率は異なる。本研究は、階段式魚道におけるアユおよびオイカワの遡上特性の比較を行った。アユおよびオイカワの遊泳挙動を2台のビデオカメラを用いて撮影した。撮影後、魚の遊泳位置、魚向、遡上経路を解析した。その結果、アユよりもオイカワの方が高い遡上率を示すことが判明した。これは、オイカワはアユと比較して流速が遅い領域を通過して遡上し、遡上経路が短いためであると考えられる。

Key Words: migration rate, fish species, migrating behavior, *Plecoglossus altivelis altivelis*, *Opsariichthys platypus*, pool-and-weir fishway

1. はじめに

ダム、堰などの河川横断構造物には、魚の遡上および降下を助ける魚道の設置が望まれる。魚の遡上可能な魚道の設計指針を確立するために、魚道内の水理特性と魚の挙動を解明する試みが行われてきた¹⁾³⁾。

我が国で最も設置例が多い階段式魚道⁴⁾の水理特性に関しては、流れの形態がプランジングフローとストリーミングフローに分類されること⁵⁾⁷⁾や定在波が発生する場合があること⁸⁾などが実験的に解明された。近年では、数値計算⁹⁾¹¹⁾によって流況予測が可能な状態になった。

魚の遡上特性についても解明が試みられた。高嶋・中村¹²⁾は交互切欠き付き階段式魚道において、切欠きを越流してプールに落下してくる高速流をアユは僅かに避けながら、プール底面から切欠き方向に遡上する様子を図示した。林田ら¹³⁾は階段式魚道において、ウグイの遡上経路がいくつかのパターンに分類できること、および遡上成功率が遡上経路に依存することを解明した。浪平ら¹⁴⁾は階段式魚道の隔壁からプールへの落下流を避けながら遡上するウグイの個体もあれば、プールの上流側壁面に沿って遡上する個体もあることを示した。泉ら¹⁵⁾は水路中央の切欠き部に向かって隔壁天端が傾斜し、また、両側の隔壁に潜孔を有するハイブリッド魚道において、高嶋・中村¹²⁾と同様な結論を得た。また、泉ら¹⁶⁾はアイ

スパーバー型魚道の潜孔において、底面隅角部をウグイが遡上することを明らかにした。

以上のように、階段式魚道内の魚の遊泳挙動の解明が試みられているが、上記の研究は単一魚種を対象としたものがほとんどである。魚道における異魚種間の遡上特性の比較に関しては、Jansen *et al.*¹⁷⁾、中村・尾田¹⁸⁾、安田ら¹⁹⁾、泉ら²⁰⁾、Santos *et al.*²¹⁾、Noonan *et al.*²²⁾によって幾何形状や水理特性が同一であっても、魚種によって遡上数が異なることが指摘された。ただし、遡上数の相違の原因が魚種もしくは魚道入口に接近した尾数の違いに依存するかは不明である。したがって、魚道内における各魚種の遡上特性を解明、比較検討する必要がある。

Baker²³⁾は室内実験を行い、同一の幾何形状および水理条件の魚道であっても、遡上率は魚種に依存することを指摘した。関谷ら²⁴⁾は擬石を用いた魚道において、稚アユ、カジカ、モクズガニの遡上行動を観察した結果、遊泳魚である稚アユは魚道の両側壁付近や流心を遡上するのに対し、底生魚であるカジカは隔壁天端に付着しながら遡上することを解明した。泉ら²⁵⁾もウグイ、アブラハヤ、アユ、オイカワとヨシノボリの遡上行動を観察した結果、関谷ら²⁴⁾と同様な結論を得ている。以上のように、魚道内における遊泳魚と底生魚の遡上経路の相違は幾分解明されつつあるが、遊泳魚における魚種間の遡上特性の相違などはほとんど解明されていない。

我が国では水産資源保全の観点から、通し回遊魚のアユやサケ等を対象として魚道が設置されてきた。しかし、純淡水魚であるオイカワやウグイも洪水時の流失による降下、復帰回帰²⁶⁾による遡上をする。豊かな生態系を支えていくためには通し回遊魚だけでなく純淡水魚の縦断的な移動も重要である。つまり、河川に生息している全ての魚類が魚道を利用できることが望ましい。本研究は、アユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)および河川の優占種になることもあるオイカワ(*Opsariichthys platypus*)²⁷⁾の階段式魚道における遡上特性を比較、検討したものである。

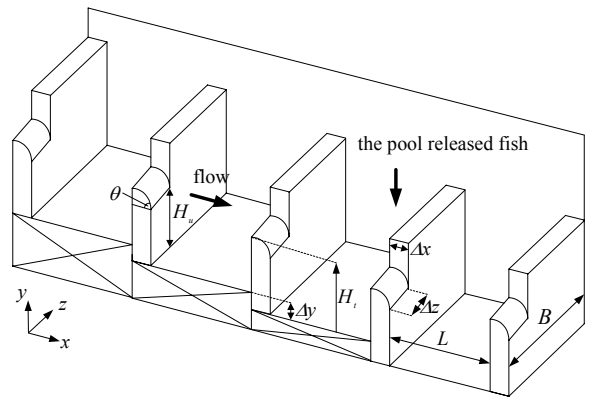


図-1 実験に用いた魚道の概略図

2. 実験装置および実験条件

図-1 に実験装置を示す。プール長 $L=0.7\text{m}$ 、プール幅 $B=0.6\text{m}$ 、プール底面から切欠き天端までの高さ $H_l=0.9\text{m}$ 、プール底面から切欠き下端までの高さ $H_u=0.7\text{m}$ の 4 つのプールを隔壁厚 $\Delta x=0.15\text{m}$ 、落差 $\Delta y=0.15\text{m}$ 、切欠き幅 $\Delta z=0.12\text{m}$ で連結させた木製の階段式魚道を用いた。左岸側壁はプール内を撮影可能にするために、透明なアクリル板で作成した。また、切欠きの角度 $\theta=55^\circ$ とし、R 形の形状とした²⁸⁾。流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸、横断方向に z 軸をとる。

表-1に示すように、流量 Q を 1, 3, 5, 7 および 9 (l/s) の 5 通りに変化させて、アユまたはオイカワを対象とした合計 10 ケースの実験を行った。水温約 17°C で室内実験を行い、観察時間帯は 12 時から 15 時までで、室内の照度は 500lx 程度であった。また、アユは養殖魚で、オイカワは天然魚である。両魚種ともに、体長 B_L は 65~90mm (平均体長 $\overline{B_L}=80\text{mm}$) であった。

流水を開始した後、下流から 2 番目のプールにアユまたはオイカワを $N=30$ 尾放流した。目視で定常を確認した後、遡上防止用ネットを切欠きから除去すると共に、カメラを用いて 30fps、30 分間の撮影を行った。カメラの設置箇所は、側壁から 1.7m 離れた位置および水路上部から 1.7m 離れた位置の 2 箇所とし、鉛直および水平方向から撮影を行った。また、下流から 2 番目のプールで流速測定を行った。 x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ 7 点のメッシュで構成される合計 343 点において、3 次元電磁流速計を用いて流速 3 成分を 0.05s 間隔で 25.6s 計測した。計測後、 x 、 y 、 z 軸方向の時間平均流速 U 、 V 、 W から 3 次元合成流速 $V_r = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ を算出した。

3. 実験結果および考察

(1) アユおよびオイカワの遡上率の比較

遡上率を次式のように定義する。

表-1 実験条件

	$Q=1(\text{l/s})$	$Q=3(\text{l/s})$	$Q=5(\text{l/s})$	$Q=7(\text{l/s})$	$Q=9(\text{l/s})$
<i>P. altivelis altivelis</i>	PIQ1	PIQ3	PIQ5	PIQ7	PIQ9
<i>O. platypus</i>	OpQ1	OpQ3	OpQ5	OpQ7	OpQ9

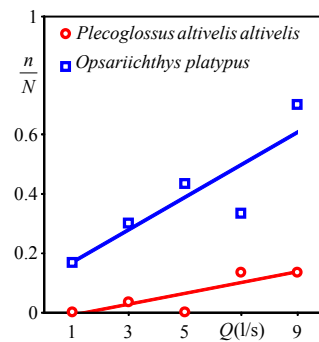


図-2 アユおよびオイカワの遡上率

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上に成功した尾数 } n}{\text{実験に用いた尾数 } N (=30)} \quad (1)$$

図-2 に流量とアユおよびオイカワの遡上率との関係を示す。アユおよびオイカワの両者において、 $Q=1(\text{l/s})$ で最も遡上率が低く、流量の増加に伴い遡上率が高くなる。一方、魚種別の遡上率を比較すると、全流量においてオイカワの遡上率が高い傾向を示している。

(2) プール内の水理特性

図-3(a)に $y/h=0.1$ における水平断面 ($x-z$) の 3 次元合成流速 V_r を表す。流量の増加に伴い右岸側で発生する最大流速が増加し、その位置が下流側に移動している。

図-3(b)に $z/B=0.1$ における鉛直断面 ($x-y$) の 3 次元合成流速 V_r を表す。 $z/B = \Delta z/2/B = 0.1$ は切欠き幅の中央となる位置を示す。上流側隔壁からプールに流出する落下流が確認できる。また、流量の増加に伴い、断面内で落下流の占める範囲が増大している。

図-2 と比較すると、流量の増加に伴い切欠き付近の流速が大きくなったことで呼び水効果²⁹⁾が高まり、遡上率が高くなったと考えられる。

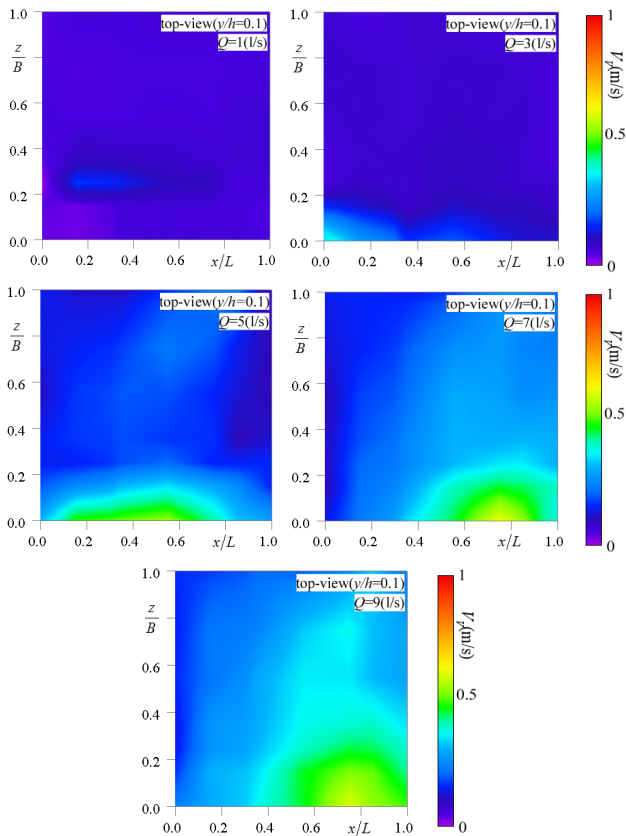


図-3(a) $y/h=0.1$ における水平断面内の流速コンター

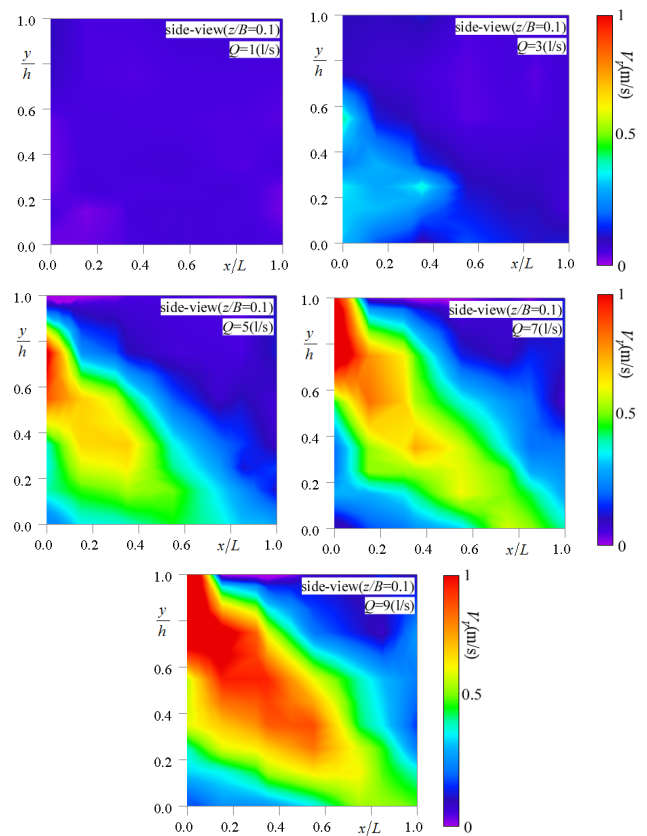


図-3(b) $z/B=0.1$ における鉛直断面内の流速コンター

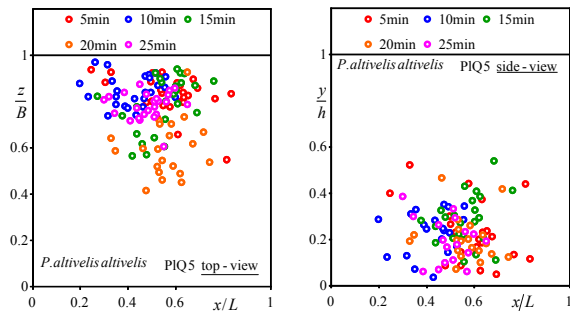


図-4(a) 水平および鉛直断面におけるアユの瞬間遊泳位置

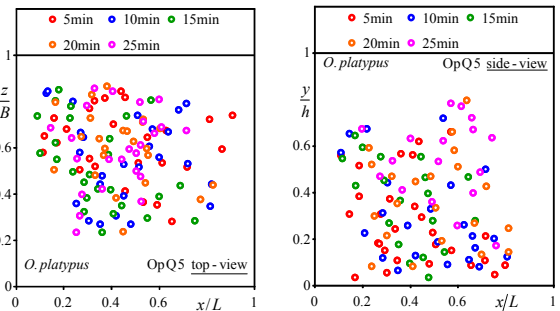


図-4(b) 水平および鉛直断面におけるオイカワの瞬間遊泳位置

(3) プール内の遊泳位置の比較

図-4(a), (b)に流量 $Q=5(1/s)$ におけるアユおよびオイカワの5minごとの瞬間遊泳位置を各5例ずつ色分けして示した。アユは左岸側の半水深以下で主として遊泳している。オイカワの遊泳位置は、プール内で均等に分布している。図-3と比較すると、右岸側に発生する高速な落下流付近にアユは分布していないが、オイカワはプール内に偏りなく分布している。したがって、アユは流速の遅い領域を選択的に遊泳するのに対し、オイカワは散乱して遊泳していると判断される。また、各ケースにおける遊泳位置は経過時間に依存せず規則性を持つことから、瞬間遊泳位置は定位位置と考えられる。

図-5に10sごとに算出した各流量における x 軸方向の魚群半径 R_x を、平均体長 $\overline{B_L}$ で除した値 $R_x/\overline{B_L}$ の頻度分布を示す。縦軸の値は、データ個数 n_{R_x} をデータ総数

$N_{R_x}=180$ で除した値である。アユに着目すると、流量の増加に伴い、魚群半径が増加する傾向がある。また、魚群半径のピーク値はアユよりもオイカワの方が大きい。

(4) プール内の魚向の比較

a) 遊泳位置と魚向との関係

図-6に流量 $Q=5(1/s)$ の瞬間遊泳位置における魚向の例を示す。矢印の終点は魚の頭部の位置を表している。アユの魚向に明瞭な規則性は観察されない。ここで、流速の増加に伴いアユは正の向流性を発揮する³⁰⁾ことが解明されている。しかし、アユは流速の遅い領域に定位しているため、正の向流性の特性を示していないと考えられる。一方、オイカワは底面付近では上流向きを、底面から離れた上流側隔壁付近では鉛直上向きを向いている。

図-3(b)と比較すると、オイカワは落下流に対して正の向

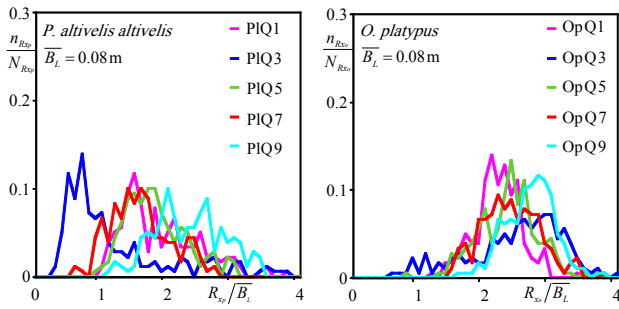


図-5 x 軸方向における魚群半径の頻度分布

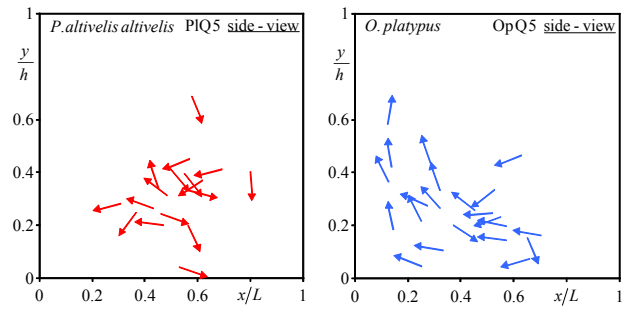


図-6 流量 $Q=5(1/s)$ における瞬間遊泳位置とその魚向

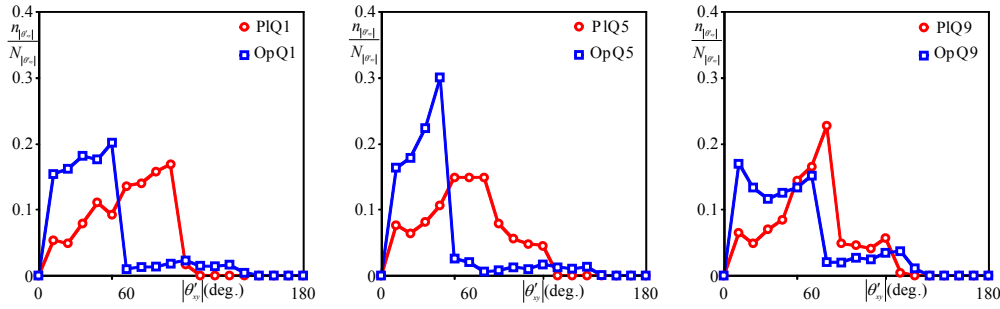


図-7 流量 $Q=1, 5, 9(1/s)$ における魚向偏差の絶対値の頻度分布

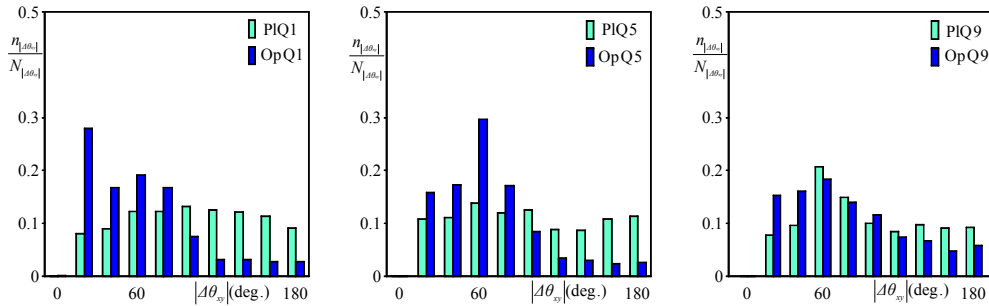


図-8 流量 $Q=1, 5, 9(1/s)$ における魚向と遡上方向との角度差の絶対値の頻度分布

流性の特徴を示していると判断される。上記の結果は実験中において顕著に観察された遊泳位置と魚向との関係であり、最も平均的な指標である。遊泳位置に関しては、図-4において示した結果と凡そ一致している。魚向に関しては次項 3.(4b)で根拠を明示する。

b) 魚向と遡上特性

両魚種において、それぞれ魚向の平均値と各個体の魚向との差をとり、その絶対値を魚向偏差と定義する。図-7に流量 $Q=1, 5$ および $9(1/s)$ における魚向偏差 $|\theta'|$ の頻度分布を示す。オイカワと比較して、アユは魚向偏差が大きな値でピーク値を示している。一方、オイカワはおよそ 60° 以内に値が収束している。したがって、アユは魚向が揃っていないのに対し、オイカワは魚向が揃っている。

両魚種において、それぞれの頭部から切欠きの下流端中央に向かう方向を遡上方向と定義する。図-8に流量 $Q=1, 5$ および $9(1/s)$ における魚向と遡上方向との角度差の絶対値 $|\Delta\theta_{xy}|$ の頻度分布を示す。オイカワはアユと

比較して、角度差の絶対値が小さな値のときに頻度が高い。つまり、魚向と切欠き方向との角度差が小さく、比較的切欠き方向を向いて遊泳している。一方、アユは角度差の絶対値が小さな値のときに頻度が低く、上流側を向いていないと判断される。今回の実験では切欠き方向を向いて遊泳しているアユの個体数は少なかった。

以上より、アユは切欠き方向に対して魚向が揃っておらず明確な規則性を確認できない。一方、オイカワは切欠き方向に対して魚向が揃っており、正の向流性を示している。これは 3.(4a)で示した結果と一致する。

(5) プール内の遡上経路の比較

図-9に各流量におけるアユおよびオイカワの遡上経路を3例ずつ示した。矢印の色はプール内の3次元合成流速を表している。図-3(b)と比較すると、アユは比較的流速が速い経路を遡上していることがわかる。図-6と比較すると、アユは遡上の際に落下流に対して正の向流性を示すようになると判断される。一方、オイカワは上

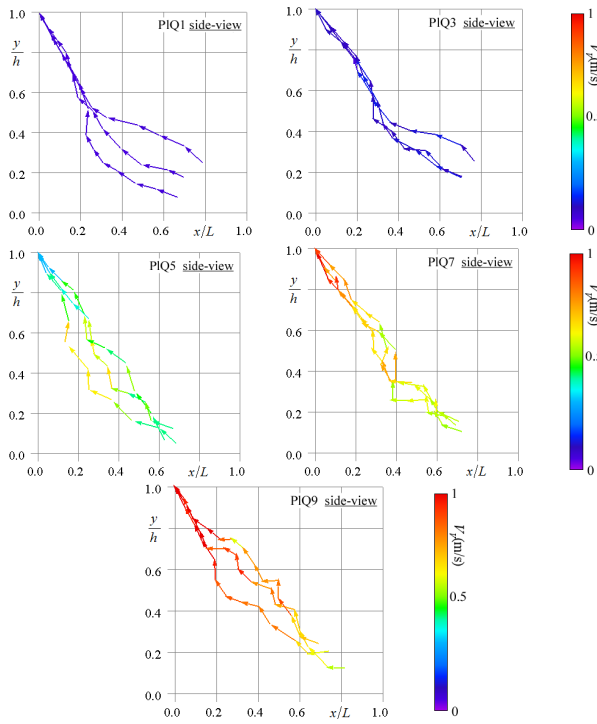


図-9(a) 鉛直断面におけるアユの遡上経路と流速コンター

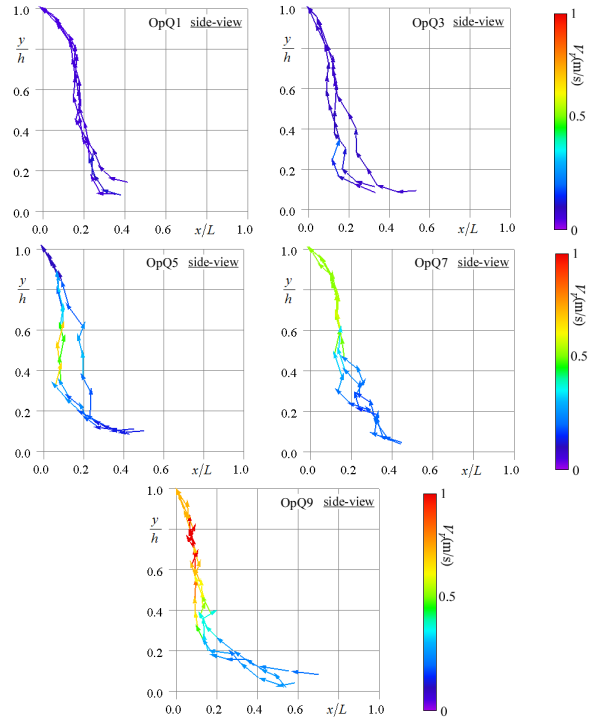


図-9(b) 鉛直断面におけるオイカワの遡上経路と流速コンター

流側隔壁付近，すなわち流速が遅い経路を遡上している。

図-10 にアユおよびオイカワにおける平均遡上経路長 $\overline{L_{mr}}$ を平均体長 $\overline{B_L}$ で除した値 $\overline{L_{mr}}/\overline{B_L}$ を示す。流量の増加に伴い，遡上経路長が増加している。ここで，流量の変化に伴うプール内の流況変化に着目する。図-3(b)より，流量の増加に伴い，落下流の付着点が上流側切欠きから遠い位置に移動していることが理解できる。そのため，開始位置が上流側切欠きから遠い位置に移動し，遡上経路長が増加したと考えられる。また，魚種別に比較すると，アユよりオイカワの遡上経路長の方が短い場合がほとんどである。一般に，遡上時に魚が普通筋を使用すると疲労が蓄積し³⁾，次の遡上が困難になる。本実験において，アユと比べてオイカワの遡上経路は短く，流速が遅い場所を選択していることが判明した。したがって，オイカワの普通筋の使用時間は短く，疲労が比較的蓄積されなかったため遡上率が高くなったと考えられる。

4. おわりに

本研究は，階段式魚道におけるアユおよびオイカワの遡上特性を比較，検討したものである。その結果，以下の知見が得られた。

- (1) 流量が増加すると，アユおよびオイカワの遡上率が増加することが判明した。流量の増加に伴い，プール内の流速が速くなる。そのため，魚が上流方向を認識しやすくなり，遡上が誘発された。
- (2) プール内において，アユは魚向が不揃いで，上流

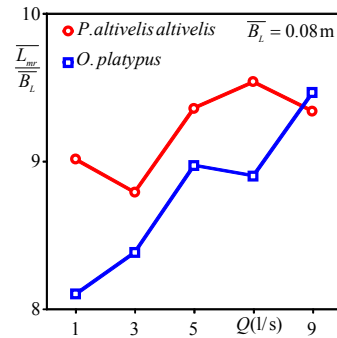


図-10 流量と平均遡上経路長との関係

方向を認識して遊泳していない。一方，オイカワは魚向が揃っており，上流方向を認識して遊泳することが判明した。

- (3) アユは流速が速い落下流内を通過して遡上するのに対して，オイカワは流速が遅い上流側隔壁に沿って遡上する。また，アユはオイカワと比較して遡上経路長が長い。以上の要因により，アユは疲労が蓄積されやすいため遡上率が低く，オイカワは疲労が蓄積されにくいいため遡上率が高くなった。ただし，魚道の流量および勾配等の条件を変更すると異なる結果が生じる可能性もある。また，実験に用いたアユが全て養殖魚，かつ，未成魚であったことが実験結果に及ぼす影響は不明である。今後，実験条件を拡大して研究を発展させる必要がある。

謝辞：本研究を実施するに当たり，科学研究費補助金基盤研究(C)26420500（代表：鬼束幸樹）の援助を受けた。

参考文献

- 1) Gong, L., BaiYin, B. and Mu, X.: Experimental study on hydraulic characteristics of pool-type fishway, *Advanced Materials Research*, Vol.864-867, pp.2065-2068, 2014.
- 2) 浪平篤：魚道内の流況に着目した階段式魚道の設計に関する研究，農村工学研究所報告，第49号，pp.1-48, 2010.
- 3) 安田陽一：技術者のための魚道ガイドライン，コロナ社，2011.
- 4) 井良沢道也，石川芳治，水山高久，本間久枝：砂防における魚道の実態調査，砂防学会誌，第44巻，第6号，pp.12-20, 1992.
- 5) Rajaratnam, N., Katopodis, C. and Mainali, A.: Plunging and streaming flows in pool and weir fishways, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.114, pp.939-944, 1988.
- 6) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，川良典彰，飯國洋平，木内大介：階段式魚道におけるプランジングフローとストリーミングフローの発生予測式の提案，環境工学研究論文集，Vol.44, pp.49-58, 2007.
- 7) Silva, A.T., Santos, J.M., Franco, A.C., Ferreira, M.T. and Pinheiro, A.N.: Selection of Iberian barbel *Barbus bocagei* (Steindachner, 1864) for orifices and notches upon different hydraulic configurations in an experimental pool-type fishway, *Journal of Applied Ichthyology*, Vol.25, pp.173-177, 2009.
- 8) 中村俊六，和田清：全幅越流型階段式魚道内における横波の発生とその制御，土木学会論文集，No.521/II-32, pp.207-215, 1995.
- 9) 浪平篤，後藤眞宏，小林宏康：一般座標系におけるVOF法を用いた階段式魚道内の流況の数値解析，農業土木学会論文集，No.242, pp.207-215, 2006.
- 10) 前野詩朗，富田晃生，玉川勝也：MPS法を用いたプールタイプ魚道の流況解析，応用力学論文集，Vol.12, pp.701-709, 2009.
- 11) Feurich, R., Boubée, J. and Olsen, N.R.B.: Improvement of fish passage in culverts using CFD, *Ecological Engineering*, Vol.47, pp.1-8, 2012.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 浪平篤，後藤眞宏，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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Jansen, W., Kappus, B., Böhmer, J. and Beiter, T.: Fish communities and migrations in the vicinity of fishways in a regulated river (Enz, Baden-Württemberg, Germany), *Limnologica*, Vol.29, pp.425-435, 1999.
- 18) 中村智幸，尾田紀夫：栃木県那珂川水系の農業水路における遡上魚類の季節変化，魚類学雑誌，Vol.50, pp.25-33, 2003.
- 19) 安田陽一，大津岩夫，高橋正行，森永正則，三村進二：透過性パイプを用いた小段式台形断面魚道の提案とその効果，河川技術論文集，第11巻，pp.441-446, 2005.
- 20) 泉完，伊東竜太，矢田谷健一，東信行：岩木川取水堰の全面越流型階段式魚道における魚類等の遡上と水理特性，農業土木学会論文集，No.245, pp.55-64, 2006.
- 21) Santos, J.M., Pinheiro, A.N., Ferreira, M.T. and Bochechas, J.: Monitoring fish passes using infrared beaming: a case study in an Iberian river, *Journal of Applied Ichthyology*, Vol.24, pp.26-30, 2008.
- 22) Noonan, M., Grant, J.W.A. and Jackson, C.D.: A quantitative assessment of fish passage efficiency, *Fish and Fisheries*, Vol.13, pp.450-464, 2012.
- 23) Baker, C.F.: Effect of ramp length and slope on the efficacy of a baffled fish pass, *Journal of Fish Biology*, Vol.84, pp.491-502, 2014.
- 24) 関谷明，宮田司，木村成利，安田陽一：隔壁に擬岩を用いた急勾配魚道の提案，河川技術論文集，第14巻，pp.457-462, 2008.
- 25) 泉完，神山公平，藤原正幸：全面越流型階段式魚道プール内の流況と魚の遊泳行動，農業農村工学会論文集，No.269, pp.127-135, 2010.
- 26) 東信行，鴨下真吾，佐原雄二，関泰夫，渡辺勝栄：増水時における河川魚類の挙動と河川構造，環境システム研究，Vol.27, pp.793-798, 1999.
- 27) 中坊徹次：日本産魚類検索-全種の同定 第三版-，東海大学出版会，2013.
- 28) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，森悠輔，関強志，松田孝一郎：階段式魚道の切欠き角度が魚の遡上特性に及ぼす影響，水工学論文集，第54巻，pp.1303-1308, 2010.
- 29) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995.
- 30) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，竹内光，小野篤志：流速変化が単独アユの遊泳特性に及ぼす影響，水工学論文集，第54巻，pp.1309-1314, 2010.
- 31) 海洋生物環境研究所：新しい遊泳能力測定装置による海産魚類の遊泳能力の評価，1991.

(2016.9.30 受付)

COMPARISON OF MIGRATING BEHAVIORS OF *PLECOGLOSSUS ALTIVELIS* *ALTIVELIS* AND *OPSARIICHTHYS PLATYPUS* IN POOL-AND-WEIR FISHWAY

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Tomohide TAKEDA and Yuka KADOTA

The migration rate changes with fish species in the same fishway type. In this study, migrating behaviors of ayu (*Plecoglossus altivelis altivelis*) and oikawa (*Opsariichthys platypus*) in pool-and-weir fishway were compared. Migrating behaviors of ayu and oikawa were obtained with the aid of two sets of digital video cameras. Swimming position, swimming direction and migration route were investigated. It was found that the migration rate of oikawa takes high value than that of ayu. This is because oikawa choose slow flow area and migration route of oikawa is short distance as compared with that of ayu.