

潜孔の設置位置がアユの遡上特性に及ぼす影響

EFFECT OF ORIFICE LOCATION ON MIGRATION CHARACTERISTICS OF AYU

鬼東幸樹¹・秋山壽一郎²・松田孝一郎³・寺島大輔⁴

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Koichiro MATSUDA and Daisuke TERASHIMA

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

Nakamura pointed out that the notch should be placed on one-side compared with alternate to shorten the amount of staying time of fish in a pool. However, there is little information on the suitable orifice location for shorten the amount of staying time of fish in a pool. In this study, orifice location in a pool-and-weir fishway is changed alternate or one-side. Behaviors of ayu, *Plecoglossus altivelis altivelis*, were obtained with the aid of two sets of digital video cameras. It was found that when orifice location is one-side, the consecutive migration rate becomes high and the amount of staying time of fish in a pool becomes shorten, as compared with those of alternate orifice.

Key Words : Pool-and-weir fishway, one-side orifice, alternate orifice, migration

1. はじめに

ダム、堰などの河川横断構造物によって生じる水位落差は、魚の遡上および降下を妨げる。そのため、水位落差を分割し、魚類の遡上および降下を可能にする魚道の設置が必要となる。我が国の既設魚道の9割以上を占める全面越流型、アイスハーバー型、ノルウェー型などで構成される階段式魚道の隔壁には、切欠きだけでなく堆砂を防ぐために潜孔が設置される¹⁾²⁾。

切欠き部を通過する魚の遡上特性については多くの研究がなされている³⁾。中村⁴⁾は交互切欠きでは魚が循環流内を長く遊泳するために魚道内滞在時間が長いのに対し、片側切欠きでは魚が一気に遡上することが可能なために魚道内滞在時間が短いことを指摘した。浪平ら⁴⁾⁵⁾はプール水深およびプール長の変化に伴うウグイの遡上率の変化を明らかにした。林田ら⁶⁾はウグイを用いた実験によって、プール内を切欠き部に向かって遡上する経路がいくつかのパターンに分類できることを解明した。

一方、潜孔を通過する魚の遡上特性の研究例は余り多くない。そもそも潜孔を設置しても底生魚が利用しないとの和田⁷⁾の指摘もあった。高嶋・中村⁸⁾は切欠きと潜孔の両者を有する魚道において、アユの利用率がそれぞれ約90%、約10%であることを明らかにした。泉ら⁹⁾は二級河川赤石川に設置されたアイスハーバー型魚道におい

て、切欠き部を利用する遊泳魚および底生魚の割合がそれぞれ96%および4%であるのに対し、潜孔を利用する割合がそれぞれ56%および44%であることを示した。また、同魚道において、アユの83%が切欠き部を選択するのに対して、ウグイの64%は潜孔を選択すると泉ら¹⁰⁾は報告した。高崎ら¹¹⁾は多摩川水系秋川に設置されたアイスハーバー型魚道において、渇水のために切欠き部に水が流れず、潜孔のみに水が流れる状態でウグイの遡上を確認している。以上のことから、潜孔は遊泳魚および底生魚の両者に有用であると考えられる。

近年、潜孔を利用した魚の遡上率だけでなく、遡上経路についても研究が開始された。高嶋・中村⁸⁾は潜孔に向かって遡上する魚の経路がほぼ同一であることを指摘した。泉ら¹²⁾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、隔壁の底部両側に潜孔を有するハイブリッド魚道において、高嶋・中村⁸⁾と同様な結論を得ている。泉ら¹³⁾はアイスハ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示した。ただし、オイカワおよびカワムツの場合は潜孔の中心を遡上するという鬼東ら¹⁴⁾の指摘もある。

以上のように、潜孔を利用する魚の遡上特性について研究が開始されているが、そもそも各種魚道マニュアル¹⁾¹⁵⁾¹⁶⁾において、プール長、隔壁厚さ、隔壁形状、切欠き率等については推奨値が提示されているものの、潜孔については適切な形状や設置位置等は記載されていない。

中村¹²⁾は遡上時間を短縮するには切欠きは直線的に配置するべきと述べているが、潜孔の配置位置については言及していない。本研究は潜孔を隔壁の片側または交互に設置し、潜孔内流速を系統的に変化させてアユの遡上特性について検討したものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に示すプール長 $L_x=0.9\text{m}$ 、魚道幅 $B=0.8\text{m}$ の3つのプールを隔壁厚 $\Delta x=0.2\text{m}$ 、落差 $\Delta y=0.15\text{m}$ で連結させた木製の階段式魚道を実験に用いた。ただし、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。下流方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸、横断方向に z 軸をとった。一般に、魚道に設置されている潜孔の形状は正方形が多く、一边の長さはプール幅の10%前後のものが多い^{12),17),18)}。そこで、本研究においても潜孔高 L_{y0} および潜孔幅 L_{z0} にプール幅の約10%相当の0.1mを採用した。また、本研究に用いた階段式魚道の規模は現地魚道(例えば、福岡県久留米市の巨瀬川の5km地点の魚道)と同スケール(プール長 $L_{xi}=0.4\text{m}$ 、魚道幅 $B_i=0.3\text{m}$ 、プール高 $H_i=0.15\text{m}$ 、流量 $Q_i=0.002\text{m}^3/\text{s}$)となっている。ここで、潜孔、隔壁およびプール番号は下流から上流に向かって昇順と定義する。第2隔壁において、第2プールの底面および右岸側壁に接する水平な潜孔を設置した。第3隔壁においては、右岸側または左岸側に潜孔を設置することで片側潜孔(one-side orifice)または交互潜孔(alternate orifice)を再現した。第2プールの水深 L_y は、潜孔内流速および潜孔位置の変化によって0.60~0.63mの範囲で変化する。第2隔壁、第3隔壁ともに越流はなく潜孔のみの通水である。本来切欠きと潜孔を有するような一般的な魚道形状を採用するべきである。しかし、切欠きと潜孔の両者を有する魚道で実験した場合、魚の遡上行動に及ぼす両者の影響を分離できない。そのため、潜孔が遡上行動に及ぼす影響を解明できない。また、潜孔内を遡上する魚の遡上特性に関する報告が少なく、基礎的な知見として必要と考えられる。そこで、本研究では潜孔のみの通水で実験を行った。

表-1に実験条件を示す。2種類の潜孔配置において、潜孔内流速をアユの平均体長 $\overline{B_L}=70\text{mm}$ の3倍(0.21m/s)、5倍(0.35m/s)、7倍(0.49m/s)、10倍(0.70m/s)の4通りに変化した合計8ケースの実験を行った。ケース名の3文字のアルファベットは潜孔配置を示し、末尾の数字は潜孔内の体長倍流速を意味する。例えば、alt3は交互潜孔で、潜孔内流速が平均体長の3倍のケースを意味する。

第1プールに平均体長 $\overline{B_L}$ のアユ $N=20$ 尾を挿入し、流水を開始した。目視で定常を確認した後、潜孔入り口に設置した遡上防止用ネットを除去する。第2プールを対

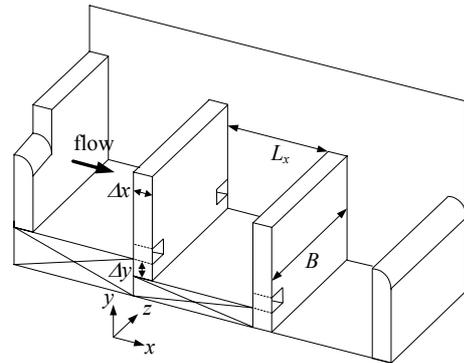


図-1 実験に用いた魚道の概略図

表-1 実験条件

$U_m/\overline{B_L}$ (1/s)	3	5	7	10
alternate orifice	alt3	alt5	alt7	alt10
one-side orifice	one3	one5	one7	one10

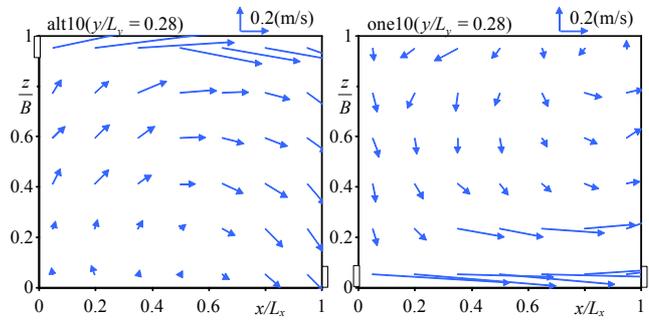


図-2 第2プール内の水平面内流速ベクトル ($y/L_y=0.28$)

象として、側壁および水路上部に設置した1080×810の画素数を有する2台のビデオカメラで60分間の撮影を30Hzで行った。撮影後、アユが第1プールから第2プールに遡上した時刻、第2プールから第3プールに遡上した時刻、および第2プール内の全アユの遊泳位置およびその時刻を解析した。したがって、アユが第1潜孔を遡上してから第2潜孔を遡上するまでの挙動が把握される。

Nakamura *et al.*¹⁹⁾は潜孔および切欠き付き魚道の場合、アユがプール底部を広い範囲で遊泳すると指摘した。本実験においても同様な傾向が確認された。このため半水深以下の範囲($y=0.00\sim0.30\text{m}$)において、 x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ7×7×6のメッシュで構成される合計294点で、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 軸方向の時間的流速 U 、 V 、 W および合成流速 $V_v \equiv \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ を算出した。なお、流速測定時に魚道内にアユを入れていない。

3. 実験結果および考察

(1) 流況の概要

第1潜孔の鉛直範囲は $0 \leq y/L_y \leq 0.17$ 、第2潜孔は

$0.17 \leq y/L_y \leq 0.33$ に位置する．潜孔よりも上部の流速は著しく小さい．また，後述するが連続遡上するアユは $y/L_y > 0.4$ の領域をほとんど利用しない．そこで，交互潜孔および片側潜孔の代表的な流況として，潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L が 10 の場合の $y/L_y = 0.28$ の水平面内の流速ベクトルを図-2 に示す．交互潜孔の場合は第 2 隔壁の潜孔から流下した流れが下流隔壁に衝突した後に右岸側に向きを変え，その後，第 1 潜孔に流入する．片側潜孔の場合は第 2 潜孔を通過した流れが流速を維持したまま第 1 潜孔を通過し，この高速流に誘発されてプール内に循環流が生じている．

(2) 連続遡上率，連続遡上挑戦率，連続遡上成功率

連続遡上率を次式のように定義する．

$$\text{連続遡上率} \equiv n_2/n_1 \quad (1)$$

ここに， n_1 は第1プールから第2プールへの遡上数， n_2 は第2プールから第3プールへの遡上数である．図-3に連続遡上率 n_2/n_1 と潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L との関係を示す．片側潜孔の連続遡上率 n_2/n_1 は交互潜孔の値よりも大きい．これは，切欠きの配置を変化させたときの結果と一致する²⁰⁾．交互潜孔の連続遡上率 n_2/n_1 は潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L の増加に伴い増加する．これは，流速の増加に伴い遡上欲が増すためである²¹⁾．一方，片側潜孔の連続遡上率 n_2/n_1 は潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L が5を越えると減少する．この理由を解明するには，連続遡上に挑戦する尾数およびその成功率を解析する必要がある．

連続遡上挑戦率を以下のように定義する．

$$\text{連続遡上挑戦率} \equiv k/n_1 \quad (2)$$

ここに， k は第2プールから第3プールへの遡上を試みた尾数である．図-4に連続遡上挑戦率 k/n_1 と潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L との関係を示す．片側潜孔の方が常に連続遡上挑戦率 k/n_1 が高い．これは，図-2に示したように，交互潜孔では第1潜孔を遡上した後に高速流に遭遇しないが，片側潜孔では右岸側に沿って流下する高速流に遭遇するため，遡上に挑戦する率が高くなったと考えられる．また，両潜孔において潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L の増加に伴い k/n_1 が増加している．これは，潜孔内流速の増加に伴いアユの遡上欲が誘発されることが原因である．

連続遡上成功率を次式のように定義する．

$$\text{連続遡上成功率} \equiv n_2/k \quad (3)$$

図-5に両潜孔状態における連続遡上成功率 n_2/k と潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L との関係を示す．ここで，潜孔内流速の増加に伴い潜孔付近の剥離渦が増加し，魚の遡上の妨げとなるため両潜孔状態において連続遡上成功率 n_2/k は低下すると考えられる．しかし，交互潜孔においては連続遡上成功率 n_2/k に顕著な変化は見られない．この理由については後に考察する．

以上のことから，片側潜孔では潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L の

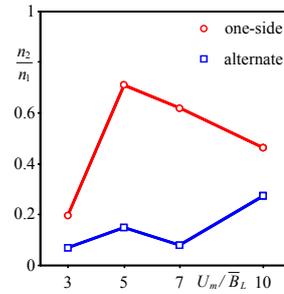


図-3 連続遡上率

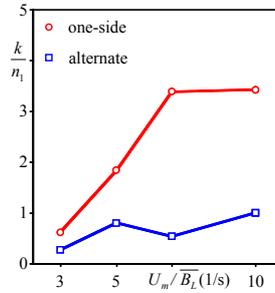


図-4 連続遡上挑戦率

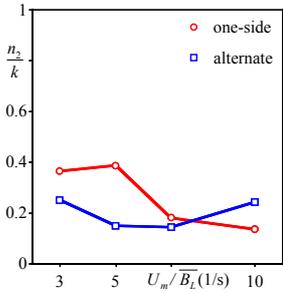


図-5 連続遡上成功率

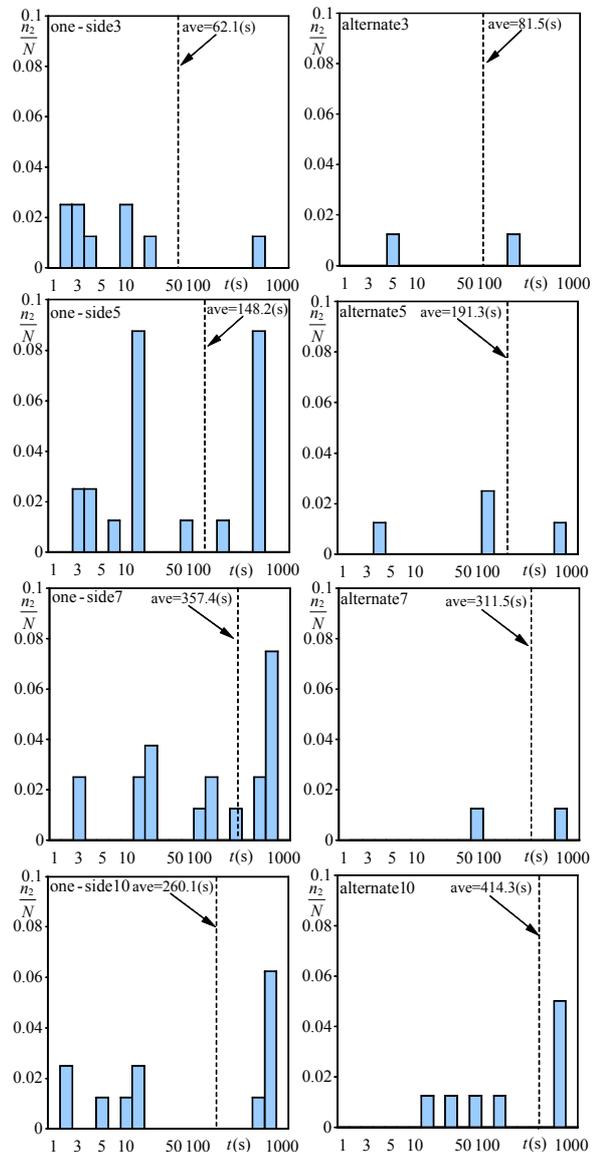


図-6 アユの連続遡上間隔とその平均値

増加に伴い連続遡上を試みる尾数は増加するもの(図-4)、連続遡上成功率が減少するために(図-5)、連続遡上率が低下したと考えられる(図-3).

(3) 連続遡上間隔

図-6に第1プールから第2プールへ遡上した時間から第2プールから第3プールへ遡上するまでの時間、すなわち、連続遡上間隔とその平均値を示す。交互潜孔の場合は連続遡上間隔が比較的長く、10s以下はほとんど観察されないが、片側潜孔では10s以下が数多く観察される。中村¹⁾は交互切欠きよりも片側切欠きの方が連続遡上間隔が減少することを指摘したが、潜孔を用いた場合も同様の傾向が見られることがわかった。

(4) 連続遡上間の遊泳軌跡

図-7に各ケースにおいて最も連続遡上間隔の短い順から3つまでの第2プール内の横断面内および縦断面内の遊泳軌跡を示す。交互潜孔ではいずれの潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L でも横断面内を比較的均等に遊泳している。鉛直方向の遊泳範囲に関しては、多くのケースで $y/L_y < 0.4$ である。片側潜孔ではいずれの潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L でも第2隔壁の潜孔から第3隔壁の潜孔へ比較的直線的に遊泳している。また、鉛直方向については、交互潜孔と同様に多くの場合で $y/L_y < 0.4$ の領域しか利用しない。

図-7で得られたアユの遡上軌跡を全て合算すると対地距離 L_{fG} が算出される。一方、遡上経路上の流速を加味すると実際に遊泳した遊泳距離 L_f が算出される。両値を各ケースにおいて平均した平均対地距離 \bar{L}_{fG} および平均遊泳距離 \bar{L}_f を平均体長 \bar{B}_L で除した値と潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L との関係を図-8に示す。交互潜孔よりも片側潜孔の方がアユの平均対地距離 \bar{L}_{fG}/\bar{B}_L および平均遊泳距離 \bar{L}_f/\bar{B}_L の両者とも低い値を示している。したがって、片側潜孔の方が第1プールから第2プールに遡上した後、プール内であまり遊泳することなく第3プールに遡上していることが定量的に示された。また、交互潜孔では平均対地距離 \bar{L}_{fG}/\bar{B}_L と平均遊泳距離 \bar{L}_f/\bar{B}_L との差が少ないが、片側潜孔ではその差が大きい。

(5) プール内におけるアユの魚向

図-9 にアユの魚向 θ_f の頻度分布を示す。ここで、魚向 θ_f はx軸上流方向を 0° とし、時計回りを正、反時計回りを負とする。交互潜孔では比較的魚向に偏りがなくランダムな値を示している。一方、片側潜孔では魚向が 0° 付近に集中している。図-10 に魚向 θ_f から流向 θ_w を減じた $\theta_f - \theta_w$ の頻度分布を示すと共に最小二乗法により求めた近似曲線を実線で示した。 $\theta_f - \theta_w$ は片側

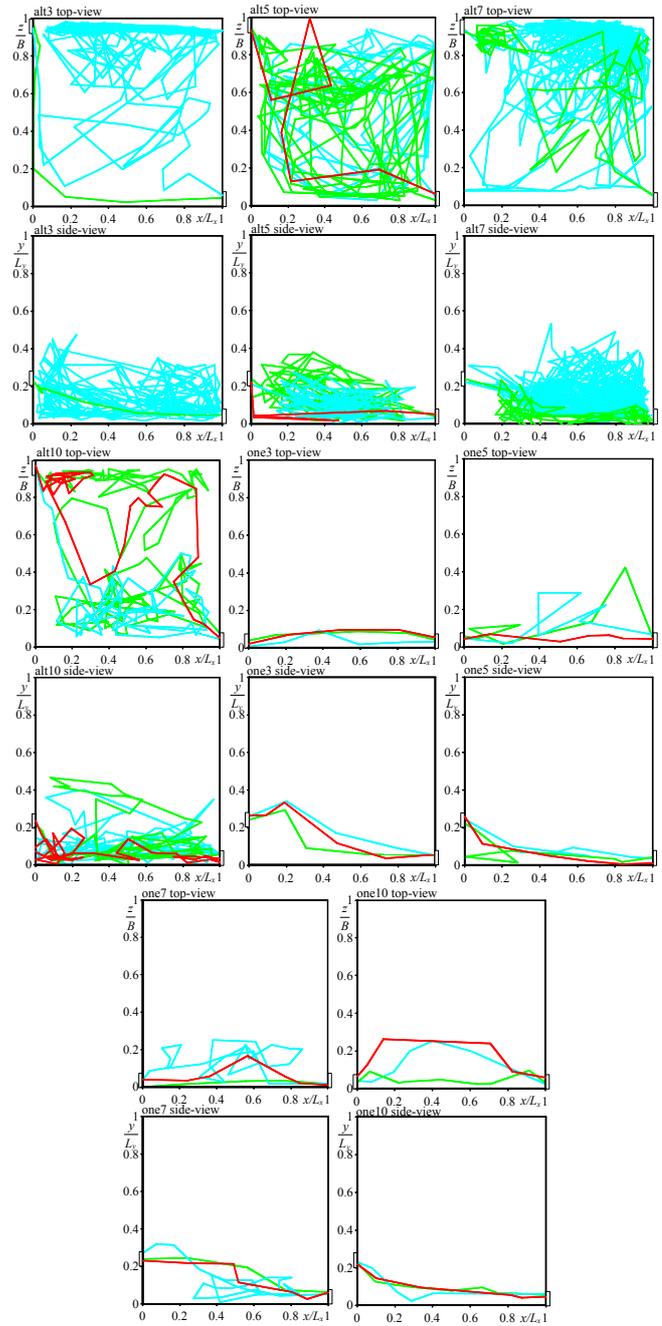


図-7 第2プールにおけるアユの遊泳軌跡

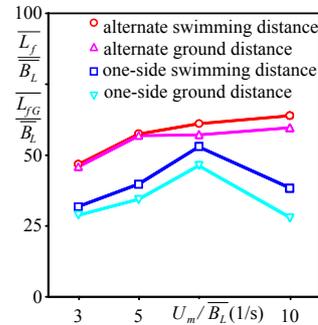


図-8 アユの平均対地距離および平均遊泳距離

潜孔では 0° 付近で最大を示し、交互潜孔では $0 \sim 40^\circ$ で最大を示す。したがって、片側潜孔ではアユは流れに向かって遊泳しており、強い正の向流性を示している。交互潜孔ではこの傾向が低下する。これは、図-2 に示し

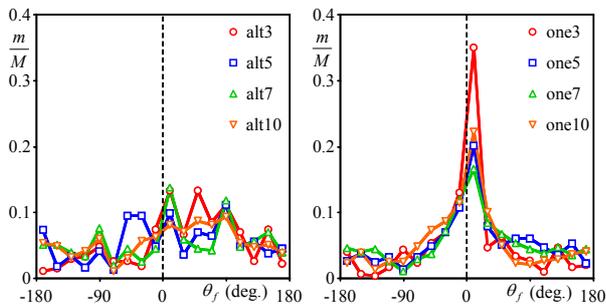


図-9 アユの魚向の頻度分布

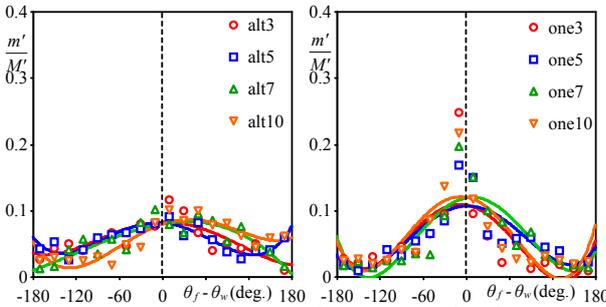


図-10 流向とアユの魚向の差の頻度分布

たように第1プールから第2プールへ遡上した直後、交互潜孔では高速流を発見できないが、片側潜孔では右岸側に沿って流下する高速流を発見できるため、引き続き高速流の中を選択して遊泳することが原因である。

(6) アユの対地速度と遊泳速度

図-11に連続遡上間隔の短い順の5例について、瞬間対地速度 \tilde{V}_{fG}/\bar{B}_L および瞬間遊泳速度 \tilde{V}_f/\bar{B}_L の時系列を示す。すべてのケースにおいて第1プールから第2プールへ遡上した直後の瞬間対地速度 \tilde{V}_{fG}/\bar{B}_L および瞬間遊泳速度 \tilde{V}_f/\bar{B}_L は比較的高く、両者とも時間経過に伴って低下傾向を示す。また、潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L の増加に伴い瞬間対地速度 \tilde{V}_{fG}/\bar{B}_L と瞬間遊泳速度 \tilde{V}_f/\bar{B}_L との差は増加する。

瞬間対地速度 \tilde{V}_{fG}/\bar{B}_L および瞬間遊泳速度 \tilde{V}_f/\bar{B}_L を連続遡上間隔で平均し、さらに各ケースで平均した平均対地速度 \bar{V}_{fG}/\bar{B}_L および平均遊泳速度 \bar{V}_f/\bar{B}_L を図-12に示す。交互潜孔では平均対地速度 \bar{V}_{fG}/\bar{B}_L と平均遊泳速度 \bar{V}_f/\bar{B}_L との差がほとんど無いが、片側潜孔では両者の差が顕著であり、また、潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L の増加に伴いその差が増加する。これは、片側潜孔では比較的高速流中を遊泳する傾向にあり、この傾向が潜孔内流速の増加に伴い顕著となることを意味する。

魚の遊泳速度には巡航速度 V_{fC} と突進速度 V_{fB} がある¹⁾。前者は1時間以上持続できる速度で、後者は数秒しか持続できない速度である。一般に巡航速度 V_{fC} は次式で与えられる¹⁾。

$$V_{fC}/B_L = 2 \sim 4 \quad (4)$$

突進速度 V_{fB} の目安は次式で与えられる¹⁾。

$$V_{fB}/B_L = 10 \quad (5)$$

ただし、 B_L は cm 単位、 V_{fB} は cm/s 単位である。連続遡上を行う間におけるアユの遊泳速度を巡航速度以下 ($V_f < V_{fC}$)、巡航速度と突進速度との中間 ($V_{fC} < V_f < V_{fB}$) および突進速度以上 ($V_{fB} < V_f$) に分類して図-13に示す。巡航速度以下の頻度は、交互潜孔では2~4割を占めるが片側潜孔では1割以下であり、潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L が10の時は存在しない。一方、突進速度以上の頻度は交互潜孔よりも片側潜孔で高く、潜孔内流速 U_m/\bar{B}_L の増加と共に増加し、 $U_m/\bar{B}_L = 10$ では、その占有率が約5割に達する。これは、片側潜孔の場合、第1プールから第2プールへ遡上した後に、そのまま突進速度を維持したまま第2プールから第3プールへの遡上を試みる魚が多いこと、およびその傾向が流速の増加に伴い顕著になることを意味する。

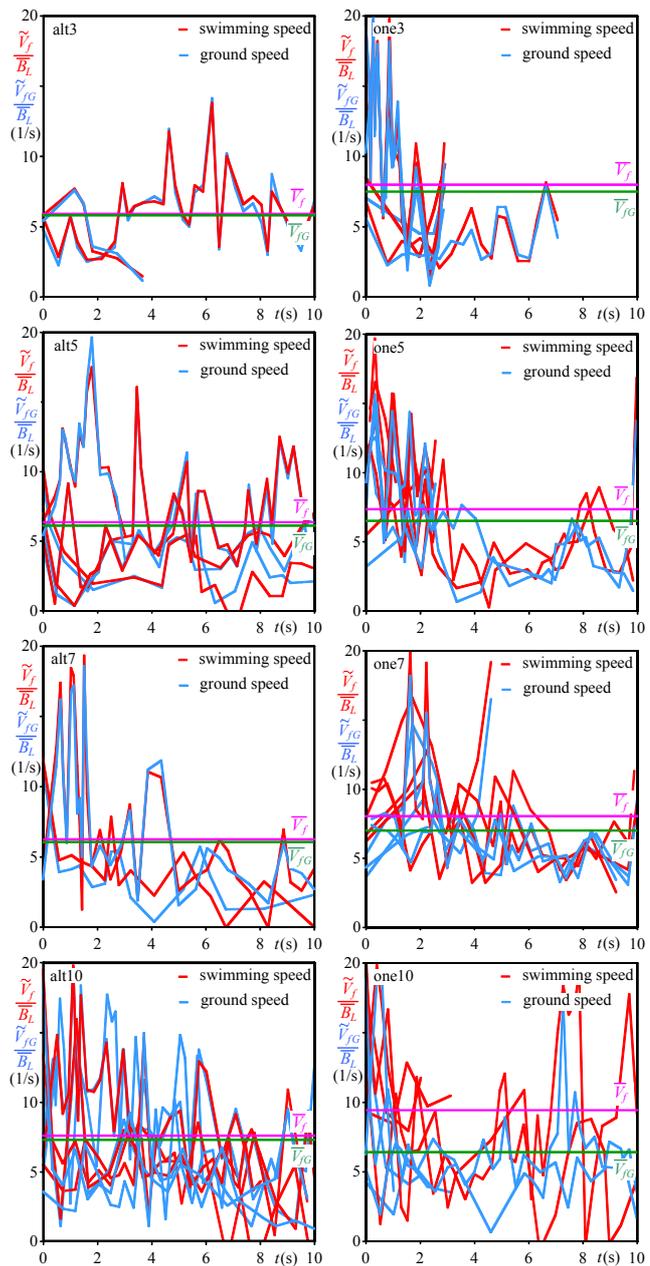


図-11 アユの対地速度および遊泳速度

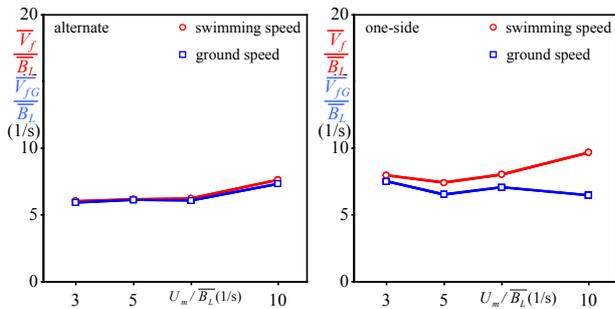


図-12 アユの平均対地速度および平均遊泳速度と流速との関係

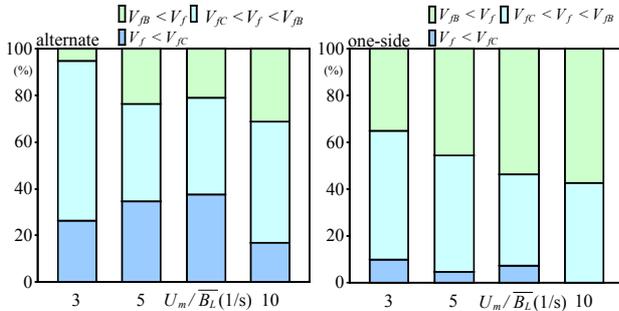


図-13 アユの遊泳速度、巡航速度および突進速度と流速との関係

以上のように、片側潜孔の場合は突進速度を維持する時間が長くなる。突進速度は1秒から数秒しか維持できない。そのため、図-5に示したように片側潜孔の連続遡上成功率が低下したと考えられる。一方、交互潜孔の連続遡上成功率について変化が少ないのは、巡航速度程度となりプール内で休憩してから遡上を試みる魚が多いためであると考えられる。

4. おわりに

本研究は潜孔を隔壁の片側または交互に設置し、潜孔内流速を系統的に変化させてアユの遡上特性について検討したものである。得られた知見を以下に示す。

- (1) 交互潜孔の場合、上流側潜孔を通過した流れが下流側隔壁にぶつかり流れが減勢される。そのため、下流側潜孔を遡上してプールに侵入したアユは高速流を見つことが出来ず、遡上欲が湧かない。一方、片側潜孔の場合、上流側潜孔からプールに流入した流れがそのまま下流側潜孔へと流れ込む。そのため、下流側潜孔を遡上してきたアユは高速流を容易に発見できるため、遡上欲が増す。よって、片側潜孔の連続遡上挑戦率は交互潜孔よりも増加する。
- (2) 片側潜孔および交互潜孔の両者において流速の増加に伴い連続遡上挑戦率は増加する。これは、流速の増加に伴いアユの遡上欲が増すことが原因である。
- (3) 交互潜孔の場合、上流側潜孔から流下してくる高速流を見つけるまでに、アユはプール内の低流速域をランダムに遊泳する。この時アユは体を休ませることになる。一方、片側潜孔の場合、下流側潜孔を遡上してそのまま突進速度を維持した状態で上流側潜孔の遡上に挑む。突進速度は1秒から数秒しか維持できないため、連続遡上成功率が流速の増加と共に減少する。
- (4) 片側潜孔の連続遡上成功率は交互潜孔よりも低い。遡上挑戦率が高いため、連続遡上率は流速に関わらず片

側潜孔の方が高い。

(5) 遡上率の向上および速やかにアユを遡上させるには交互潜孔よりも片側潜孔の方が適切である。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 2) 中村俊六：魚道の設計，水工学に関する夏季研修会講義集，第27巻，A-6，pp.1-24，1991。
- 3) 安田陽一：魚道整備における工学と生態学との連携，日本水産学会誌，第73巻，第1号，pp.116-119，2007。
- 4) 浪平篤，後藤眞宏，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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 和田吉弘：魚道の設計で知っておきたいこと，応用生態工学，Vol.3，No.2，pp.225-230，2000。
- 8) 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，水理講演会論文集，第28巻，pp.353-358，1984。
- 9) 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。
- 10) 泉完，高屋大介，工藤明，東信行：赤石川赤石第2頭首工のアイスハーバー型魚道における魚類等の遡上・水理特性，農業土木学会論文集，第215号，pp.75-84，2001。
- 11) 高崎忠勝，土屋十圓，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。
- 12) 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。
- 13) 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，第217号，pp.55-63，2002。
- 14) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，関強志，森悠輔：魚道隔壁に設置された潜孔内の魚の行動特性，水工学論文集，第54巻，pp.1297-1302，2010。
- 15) 国土交通省河川局：魚がのぼりやすい川づくりの手引き，2005。
- 16) (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。
- 17) 農林水産省農村振興局整備部設計課：よりよき設計のために「頭首工の魚道」設計指針，社団法人 農業土木学会，2002。
- 18) 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。
- 19) 中村俊六，高嶋信博，伊集院博：階段式魚道模型内でのアユの挙動，Proceedings of the International Symposium on Fishways '90 in Gifu，pp.361-366，1990。
- 20) 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。
- 21) 小山長雄：魚道をめぐる諸問題Ⅱ。解説編，木曾三川河口資源調査団，1967。

(2010. 9. 30受付)