

プランジングフローおよびストリーミングフローにおけるアユの挙動の相違と流況との関係

1. はじめに

ダムや堰などの河川横断構造物には魚類等の遡上や降下を助けるために一般に魚道が設置される¹⁾⁶⁾。我が国の既設魚道の9割以上がプールと隔壁によって構成される階段式魚道である¹⁾。階段式魚道の流れの形態は3種類あり、上流側を左手に見た時に流れが反時計回りのプランジングフロー、時計回りのストリーミングフロー、および両者が混在した流れである⁷⁾⁹⁾。中村¹⁾はストリーミングフローよりもプランジングフローの遡上率が高いと指摘したが、その理由を解明するにはプール内の魚の挙動と水理量との関係を解明する必要がある。また、この解明によって、近年開発が進められている魚の挙動のシミュレーターの改良が期待される¹⁰⁾¹⁶⁾。

高嶋・中村¹⁷⁾はプランジングフローにおいて、切り欠きからプールに落下した高速流を避けながらアユが遡上に挑んでいる軌跡を図示した。林田ら^{18,19)}はプール長、プール水深および魚道勾配を変化させてプランジングフローとストリーミングフローの両者をそれぞれ発生させ、ウグイを15尾放流してその挙動を観察した。その結果、遡上に成功および失敗したウグイのプール内の遡上経路がいくつかのパターンに分類できることを指摘した。浪平ら^{20,21)}は林田ら^{18,19)}と類似の実験を行い、プランジングフローの場合はウグイが底面付近で上流向きに遊泳することが多いが、ストリーミングフローの場合は上流向きだけでなく、下流向きに遊泳する個体が発生することを指摘した。

以上のように、プランジングフローおよびストリーミングフローにおける魚の挙動が徐々に解明されつつあるものの、定性的な記述に留まっているのが現状である。プール内の魚の挙動を定量的に評価するには、魚の遊泳位置、遊泳速度、魚向などの諸量を算出して解析することが必要である。鬼東ら²²⁾はプランジングフローを取り上げ、上記の解析を行った。その結果、上流隔壁、底面、下流隔壁および水面付近のエリアによっては、向流性の正・負が逆転する場合があることを示した。しかし、ストリーミングフローにおける魚の挙動を定量的に解析した研究は見あたらない。

本研究では、階段式魚道においてプランジングフローおよびストリーミングフローをそれぞれ発生させ、遊泳するアユの挙動を撮影すると共に流速3成分を計測した。実験結果に基づき、両流れにおけるアユの挙動を比較すると共にアユの挙動に及ぼす流況の影響を検討した。

2. 実験装置および実験条件

(1) 実験装置

図-1に示すプール長 $L_x=0.48\text{m}$ 、プール高さ $L_y=0.4\text{m}$ 、プール幅 $L_z=0.4\text{m}$ の亚克力製プールを5つ連結させた切り欠きのない階段式魚道を実験に用いた。隔壁厚 Δx は 0.1m 、隔壁形状はWada²³⁾が推奨する傾斜角 60° のR型を採用した。既設魚道の平均水路勾配は $1/10\sim 1/20$ であるため、プール間落差 Δy を 0.04m として平均水路勾配を $1/12$ に設定した。流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸、横断方向に z 軸をとった。

(2) 実験条件および実験方法

流量 Q を $0.5, 2.5, 4.5, 6.5, 8.5, 10.5, 12.5$ および

14.5 l/s の8通りに変化させて流れを観察した結果、 $Q=0.5\sim 4.5\text{ l/s}$ ではプランジングフロー、 $Q=10.5\sim 14.5\text{ l/s}$ ではストリーミングフローが発生することを確認した。そのため、 $Q=2.5\text{ l/s}$ (プランジングフロー)および $Q=12.5\text{ l/s}$ (ストリーミングフロー)を採用し、それ

ぞれ、ケースP、ケースSと呼称する。上流から3番目のプール側壁付近にビデオカメラを設置し、同プールに平均体長 $\bar{B}_L=8.3\text{cm}$ のアユを20尾挿入し、 30Hz で20分間の

撮影を行った。撮影後、画像から図-2に定義する魚の x, y 方向の瞬間吻端位置 \tilde{x}_f, \tilde{y}_f 、瞬間対地速度 $\tilde{u}_{fg}, \tilde{v}_{fg}$ および $x-y$ 平面内の瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ (上流方向を 0° とし、時計回りを正、反時計回りを負)を $1/6\text{s}$ ごとに算出し

た。なお、前報²²⁾で流量 Q が 4.5 l/s のプランジングフロー内を遊泳するアユの遊泳挙動に個体差があまりないと判断された。本研究においてもケースPのみならずケースSにおいても同様の結果が得られたため、任意に抽出した5尾の挙動を解析した。

切り欠きのない階段式魚道の水理諸量は横断方向にほぼ一様なため²⁰⁾、 $z/L_z=0.5$ を代表断面として採用し、 x, y 軸方向にそれぞれ12点のメッシュをとった合計144点において、3次元電磁流速計(東京計測株式会社、SF-3013型)を用いて計測間隔 0.05s 、計測時間 51.2s で x, y 方向の瞬間流速 $\tilde{u}=U+u, \tilde{v}=V+v$ を計測した。ここに大文字は時間平均値を、小文字は変動成分を示す。瞬間流速より、 $x-y$ 平面内の瞬間流向 $\tilde{\theta}_{xy}=\Theta_{xy}+\theta_{xy}$ (符号および回転方向は魚向と同様)が算出される。 x 方向の瞬間遊泳速度 \tilde{u}_f については、前報²²⁾と同様に次式で算出した。

$$\tilde{u}_f = \tilde{u}_{fg} - U \quad (1)$$

y 方向の瞬間遊泳速度 \tilde{v}_f も同様に得ることができる。なお、流速測定時にはアユをプールに入れていない。

3. 実験結果および考察

(1) プール内の流れの形態

図-3にケースPおよびケースSにおける流速ベクトルおよび隔壁からの落下流ベクトルを示す。ここに、 V_F は落下流速である。プール内の流れの回転方向より、前者がプランジングフローに、後者がストリーミングフローに属していることが理解される。

(2) 各領域におけるアユの挙動特性と水理量との関係

前報²²⁾で、アユの移動または定位に関して特徴的な挙動を示す4エリアを定義した。本研究でも図-4のように上流隔壁付近(upstream weir area)、プール底面付近(bed area)、下流隔壁付近(downstream weir area)および水面付近(surface area)の4エリアを定義した。アユはbed areaおよびsurface areaでは y 方向に比べ x 方向の挙動が顕著で、upstream weir areaおよびdownstream weir areaについてはその逆である。そこで、bed areaおよびsurface areaについては x 方向の諸量を、upstream weir areaおよびdownstream weir areaについては y 方向の諸量を主として解析する。以下ではエリアごとにケースPとケースSのアユの挙動と水理量との関係を比較する。

a) bed area

図-5(a)にbed areaにおける瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ と x 方向の瞬間遊泳速度 \tilde{u}_f との関係を、図-5(b)に x 方向の時間平均流速 U と x 方向の瞬間遊泳速度 \tilde{u}_f との関係を、図-5(c)に x 方向の時間平均流速 U と x 方向の瞬間対地速度 \tilde{u}_{fg} との関係を示す。

図-5(a)よりケースPの瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ は、ほぼ均等に正値および負値に分布するのに対し、ケースSでは $\tilde{\theta}_{xyf}$ の絶対値が 180° に近い値に分布することが認められる。これはアユがbed areaにおいて、ケースPでは上流および下流の両者を向くのに対し、ケースSでは多くが下流を向くことを意味する。

図-5(b)よりケースPの瞬間遊泳速度 $\tilde{u}_f / \overline{B_L}$ は4~4程度の範囲で、図-5(c)より瞬間対地速度 $\tilde{u}_{fg} / \overline{B_L}$ は2~3程度の範囲であり、両速度に顕著な相違は見られない。一方、ケースSの瞬間遊泳速度 $\tilde{u}_f / \overline{B_L}$ はほとんどが正値で、中には7にも達するのに対し、瞬間対地速度 $\tilde{u}_{fg} / \overline{B_L}$ は2~2程度の0を中心とした範囲に集中している。

したがって、アユはbed areaにおいて、ケースPでは上下流方向を向いて上下流方向に遊泳するが、ケースSでは対地速度が0になるようにほぼ水平な下流向きに遊泳すると理解される。そのため、ケースPは正および負の向流性を示すのに対し、ケースSではほとんどの個体が正の向流性を示すことが明らかとなった。

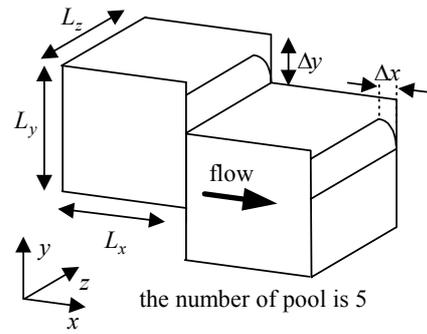


図-1 実験装置

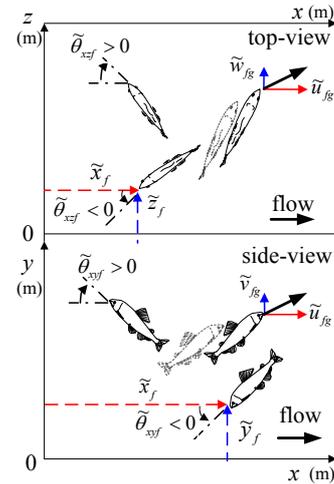


図-2 魚の瞬間諸量の定義模式図

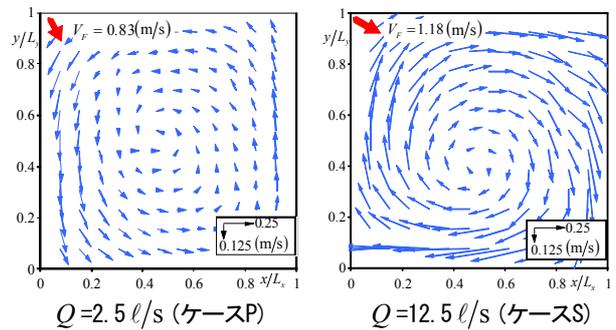


図-3 流速ベクトルおよび落下流ベクトル

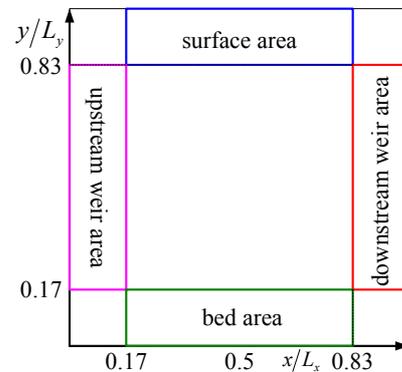


図-4 エリアの定義

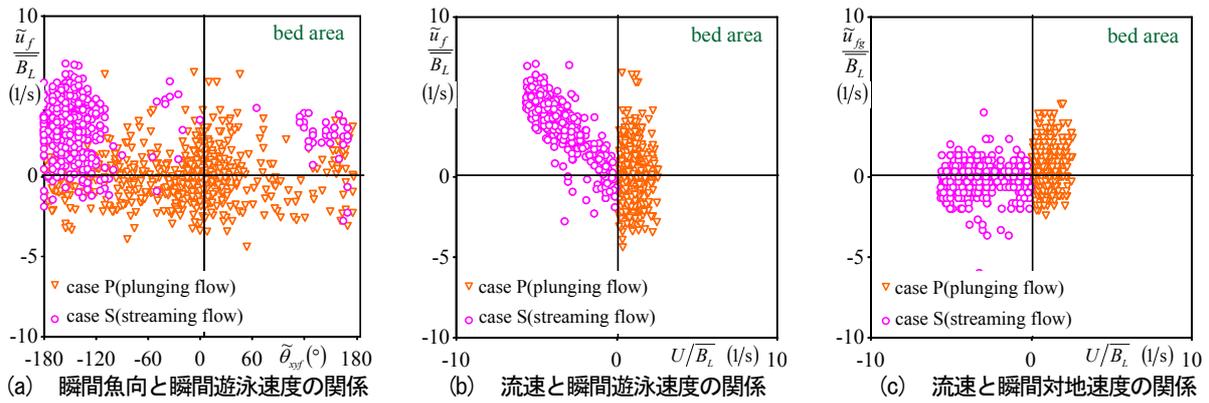


図-5 bed areaにおける諸量関係図

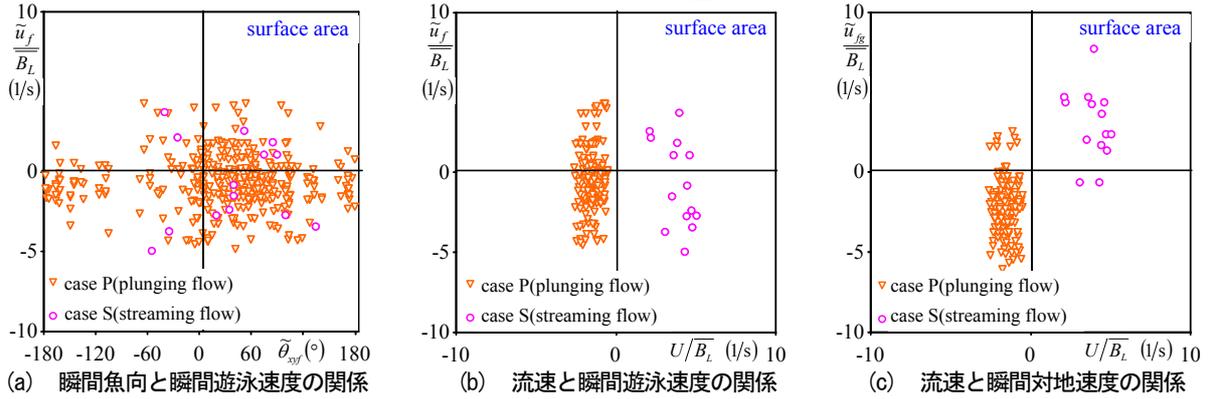


図-6 surface areaにおける諸量関係図

b) surface area

図-6(a)～(c)にsurface areaにおける図-5(a)～(c)と同様な図面を示す。図-6(a)より、ケースPの瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ は正値および負値の広い範囲に分布するが、特に $0\sim60^\circ$ 付近に分布が集中していることがわかる。ケースSについても $\tilde{\theta}_{xyf}$ が $0\sim60^\circ$ 付近に分布が集中している。これは、アユが斜め上方を向いて遊泳することを表す。

図-6(b)よりケースPの瞬間遊泳速度 $\tilde{u}_f/\overline{B_L}$ は0を中心に $-5\sim5$ 程度の範囲に分布するのに対し、図-6(c)より瞬間対地速度 $\tilde{u}_{fg}/\overline{B_L}$ は $-5\sim0$ 程度の範囲を示すことから、アユは自らの遊泳力だけでなく流れの移流を利用して上流方向に遊泳していると判断される。一方、ケースSの瞬間対地速度 $\tilde{u}_{fg}/\overline{B_L}$ は $0\sim5$ 程度の値を示すのに対し、瞬間遊泳速度 $\tilde{u}_f/\overline{B_L}$ は0を中心として分布していることから、アユは流れの移流を利用して下流方向に遊泳していると判断される。

したがって、両ケース共にsurface areaではアユは斜め上方を向いているが、ケースPでは上流方向へ、ケースSでは下流方向に移流を利用して遊泳することが明らかとなった。

c) upstream weir area

図-7(a)にupstream weir areaにおける瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ とy方向の瞬間遊泳速度 \tilde{v}_f との関係を、図-7(b)にy方向の時間平均流速 V とy方向の瞬間遊泳速度 \tilde{v}_f との関係を、図-7(c)にy方向の時間平均流速 V とy方向の瞬間対地速度 \tilde{v}_{fg} との関係を示す。

図-7(a)より、ケースPにおいて瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ は特定の領域に集中しておらず、正負の様々な値を示すことがわかる。これは、アユがランダムな方向を向くことを意味する。一方、ケースSにおいて瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ は -90° 付近に分布が集中していることから、アユはプール底面方向を絶えず向いていると判断される。

図-7(b)よりケースPの瞬間遊泳速度 $\tilde{v}_f/\overline{B_L}$ は0を中心に正負に狭く分布するのに対し、図-7(c)より瞬間対地速度は $-6\sim0$ 程度の値を示すことがわかる。このエリアは下降流($V < 0$)であることから、アユは下降流を利用してプール底面方向に遊泳すると理解される。一方、ケースSの瞬間遊泳速度 $\tilde{v}_f/\overline{B_L}$ は $9\sim0$ 程度の値を示すのに対し、瞬間対

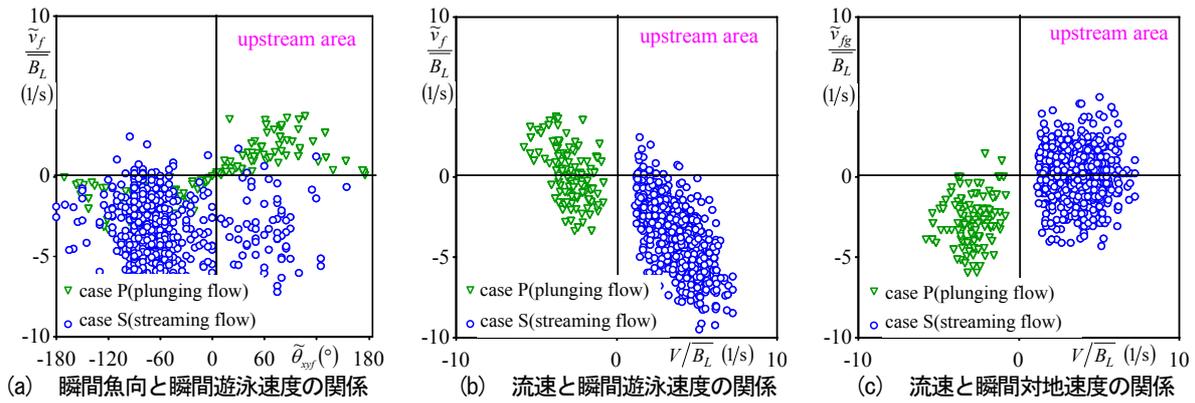


図-7 upstream weir areaにおける諸量関係図

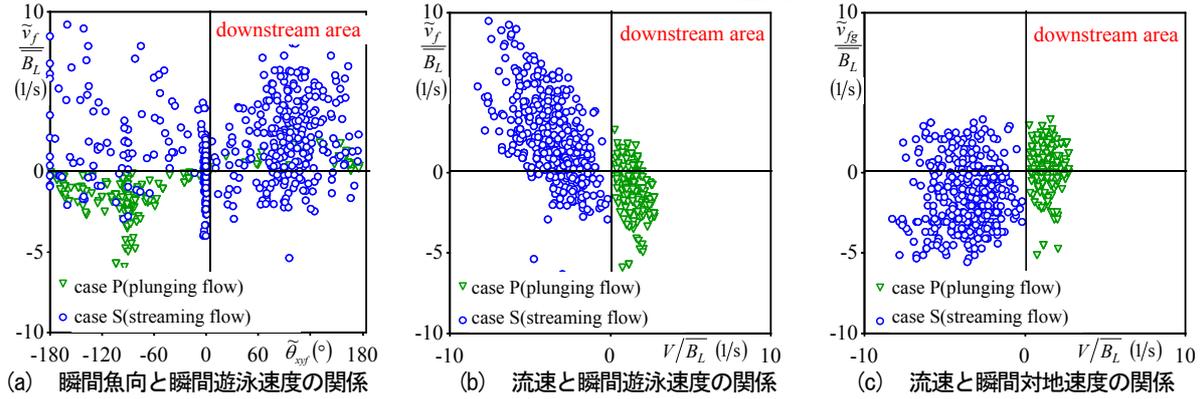


図-8 downstream weir areaにおける諸量関係図

地速度 $\tilde{v}_{fg} / \overline{B_L}$ は-3~3程度の値を示すこと、

およびこのエリアは上昇流 ($V > 0$) であることから、アユは対地速度が0になるように底面を向いて遊泳すると判断される。

したがって、アユはupstream weir areaにおいて、ケースPではランダムな方向を向くがその多くは下降流を利用して下降するのに対し、ケースSでは多くのアユが底面方向を向きながら上昇流中を対地速度が0になるように遊泳していることが明らかとなった。

d) downstream weir area

図-8(a)~(c)にdownstream weir areaにおける図-7(a)~(c)と同様な図面を示す。図-8(a)よりケースPの瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ は-90° 付近に分布が集中しており、主に底面方向を向くと理解される。一方、ケースSの瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ は90° 付近に分布が集中していることから、ケースPとは逆に水面方向を向くと理解される。

図-8(b)よりケースPの瞬間遊泳速度 $\tilde{v}_f / \overline{B_L}$ は-3~2程度で、図-8(c)より瞬間対地速度 $\tilde{v}_{fg} / \overline{B_L}$ は-2~2程度であり、両速度に顕著な相違は見られない。一方、ケースSの瞬間遊泳速度 $\tilde{v}_f / \overline{B_L}$ は-2~10程度の値を示すのに対し、瞬間対地速度 $\tilde{v}_{fg} / \overline{B_L}$ は-5~3程度と0を中心とした値を示すことから、アユは対地速度が0になるように遊泳することがわかる。

したがって、アユはdownstream weir areaにおいて、ケースPでは上昇流中をプール底面に向かって遊泳し、ケースSは下降流中を水面に向かって対地速度が0になるように遊泳していることが明らかとなった。また、両ケースにおいて正の向流性が認められるが、ケースSの方がその傾向が顕著である。

(3) 各領域に対するアユの選好性

図-9にケースPおよびケースSにおけるアユの平均エリア滞在時間を示す。ケースPではupstream weir areaにおいて、ケースSではsurface areaにおける滞在時間が最も短い。これらのエリアは各ケースにおいて落下流が始めに進入する

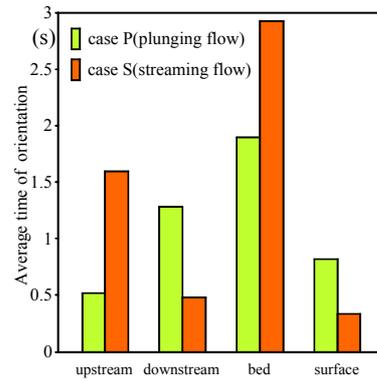


図-9 アユの平均エリア滞在時間

エリアである。そのため、アユは高速な落下流を避ける傾向があると判断される。また、両ケースにおいて surface area における滞在時間が bed area と比較すると極端に短い。したがって、流況が異なってもアユは水面付近を忌避し、底面付近を選好して休憩すると示唆される。中村¹⁾はプランジングフローよりもストリーミングフローの遡上率が低いことを述べたが、これは両者で主として休憩場所となる bed area から遡上する場合、前者では upstream weir area を通過すればよいが、後者では downstream weir area および surface area を通過する必要があり、遊泳距離および各コーナーで屈折する回数が増加するためと推察される。これは、浪平ら^{20,21)}の指摘と一致する。以下では、bed area と surface area の遊泳特性に着目する。

図-10(a) に bed area および surface area における x 方向の瞬間遊泳速度 \tilde{u}_f の正值、負値およびゼロ値の割合を、

図-10(b) に bed area および surface area における x 方向の瞬間対地速度 \tilde{u}_{fg} における同様な図を示す。図-10(a) より、bed area においてケースPでは \tilde{u}_f の約70%が負値でケースSでは約95%が正值である。これは、ケースPでは上流向き、ケースSでは下流向きに遊泳する尾数が支配的なことを意味する。一方、図-10(b) より bed area において、両ケースとも正值と負値の割合がかなり均等になっている。また、両ケースとも瞬間遊泳速度 \tilde{u}_f はゼロの割合が0%なのに対し、瞬間対地速度 \tilde{u}_{fg} は約20%に達している。したがって、アユは流れの形態に関わらず、底面付近を対地速度 \tilde{u}_{fg} が0になるように遊泳する傾向があると判断される。

一方、surface area に着目すると、図-10(a) よりケースPでは \tilde{u}_f の約70%が負値でケースSでは約80%が正值なのに対し、図-10(b) よりケースPでは \tilde{u}_{fg} の約90%が負値でケースSでは約85%が正值である。両ケース共に bed area とは対照的に遊泳速度 \tilde{u}_f よりも対地速度 \tilde{u}_{fg} における正負の割合がさらに偏っている。surface area の流向はケースPでは上流向き、ケースSでは下流向きであることを考慮すると、アユは surface area では bed area と対照的に対地速度を考慮せず、流れの進行方向に遊泳する傾向があると判断される。

4. おわりに

本研究は、プランジングフローおよびストリーミングフローにおけるアユの瞬間的な魚向や遊泳速度を詳細に解析し、アユの遊泳特性に及ぼす流況の影響を検討したものである。その結果、図-11(a), (b) に示すようなアユの遊泳挙動の差異が解明された。

- (1) bed area において、プランジングフローではアユは上下流方向を向いて上下流方向に遊泳するが、ストリーミングフローではほぼ水平で下流向きに遊泳する。両流れとも、対地速度が0になるように遊泳している。
- (2) surface area において、bed area とは対照的に対地速度を意識せずにアユは斜め上方を向きながら、プランジングフローでは上流方向へ、ストリーミングフローでは下流方向に移流を利用して遊泳する。

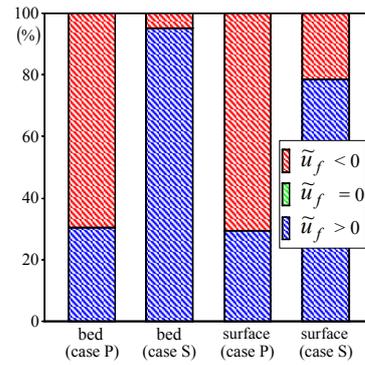


図-10(a) x 方向の \tilde{u}_f の正值、負値およびゼロ値の割合

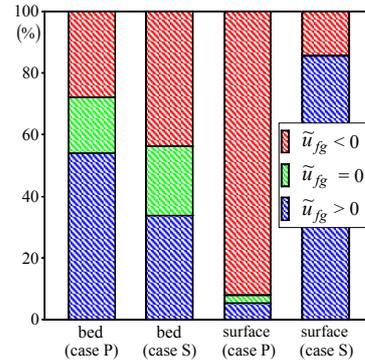


図-10(b) x 方向の \tilde{u}_{fg} の正值、負値およびゼロ値の割合

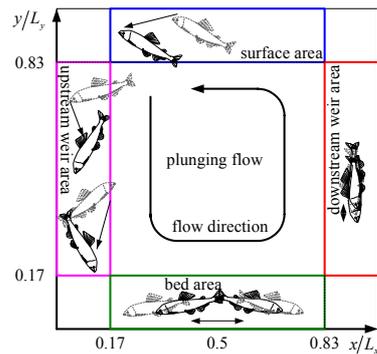


図-11(a) ケースPにおける魚の挙動

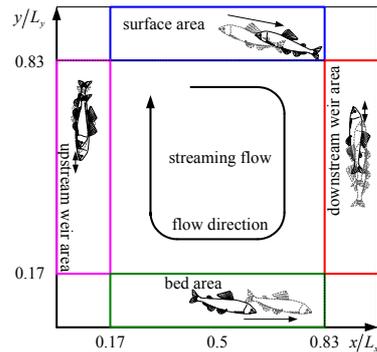


図-11(b) ケースSにおける魚の挙動

- (3) upstream weir areaにおいて、プランジングフローではアユは明確な向流性を示さずランダムな方向を向きながら、下降流を利用して下方に遊泳する。一方、ストリーミングフローでは、上昇流に逆らって対地速度が0になるように遊泳する。このときアユは強い正の向流性を示す。
- (4) downstream weir areaにおいて、プランジングフローではアユは上昇流中を底面に向かって遊泳する。一方、ストリーミングフローでは下降流内を水面に向かって遊泳する。両流れにおいて正の向流性が認められたが、ストリーミングフローの方がその傾向が顕著である。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995.
- 2) 安田陽一，大津岩夫，小出水規行：既設の固定堰に設置する透過型簡易魚道の提案，河川技術論文集，第8巻，pp.349-354，2002.
- 3) 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.
- 4) 前野詩朗，小川信：プールタイプ魚道の流れの数値解析，水工学論文集，第46巻，pp.421-426，2002.
- 5) 辻本哲郎，泉倫光，山本貴章：ストリーム型魚道の流れの構造について，水工学論文集，第40巻，pp.731-736，1996.
- 6) 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.
- 7) Rajaratnam, N., Katopodis, C. and Mainali, A.: Plunging and streaming flows in pool and weir fishways, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.114, pp.939-944, 1988.
- 8) 高須修二，箱石憲昭，村岡敬子，田中和浩，尾寄佳史：階段式魚道の水理特性に関する研究，水工学論文集，第38巻，pp.351-356，1994.
- 9) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，飯國洋平，川良典彰，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の提案，環境工学研究論文集，Vol.44，pp.49-58，2007.
- 10) Sannomiya, N. and Matsuda, K.: A mathematical model of fish behavior in a water tank, *IEEE Transactions of Systems, Man and Cybernetics*, Vol.14, pp.157-162, 1984.
- 11) 大橋弘道，清水康行：数値計算による魚道内における魚の挙動の解析，水工学論文集，第48巻，pp.1597-1602，2004.
- 12) 関谷明，下村充，坂本裕嗣，甲田篤史，福井吉孝：アユの行動特性と迷入防止について，水工学論文集，第46巻，pp.1133-1138，2002.
- 13) 関谷明，福井吉孝，下村充，打田剛：魚類の迷入とその防止方法，土木学会論文集，No.782/II-70，pp.81-91，2005.
- 14) 二瓶泰雄，福永健一，小澤喜治：実際の魚体運動を反映した魚周辺の流動シミュレーション，土木学会論文集，No.768/II-68，pp.55-66，2004.
- 15) 橋本麻未，後藤仁志，原田英治，酒井哲郎：Boid型魚群行動モデルに基づく数値魚道の開発，水工学論文集，第49巻，pp.1477-1482，2005.
- 16) 藤井真一，木村一郎，清水康行，清治真人：密度関数法を用いた階段式魚道における魚の挙動の3次元シミュレーション，水工学論文集，第53巻，pp.1249-1254，2009.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，森悠輔，関強志，杉本寿郎：階段式魚道内のアユの挙動と水理量との関係，水工学論文集，第53巻，pp.1237-1242，2009.
- 23) Wada, Y.: Relation between the ascending path of ayu and fishway structure, *Proc. of the International Symp. on Fishways '90 in Gifu, Japan*, pp.445-450, 1990.