

階段式魚道内のアユの挙動と水理量との関係

RELATIONSHIP BETWEEN BEHAVIOR OF AYU AND FLOW CHARACTERISTICS IN POOL-AND-WEIR FISHWAY

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・森悠輔³・関強志⁴・杉本寿郎⁴

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yusuke MORI, Tsuyoshi SEKI and Hisao SUGIMOTO

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 important to understand the relationship between fish behavior and flow characteristics in fishways. Some researchers investigated on such relationships. However, the detailed nature such as instantaneous swimming direction and instantaneous swimming speed has not been investigated. In this study, fish behaviors in pool-and-weir type fishway were recorded and turbulence measurements were conducted. It was pointed out that the swimming direction is opposite from the flow direction by previous researchers. However, it was conformed that the flow direction is controlled not only by the flow direction but also the position of fish, turbulence intensity and so on.

Key Words : pool-and-weir fishway, fish behavior, swimming direction, turbulence, velocity

1. はじめに

ダムや堰が設置された後でも魚類等が河川を縦断方向に移動できるように魚道が併設される^{1,2)}。魚道の機能に求められるのは高い遡上率である。これまで、遡上にいたる魚道内の魚の挙動が研究されてきた。

古来より、多くの魚には流れに逆らって遊泳する性質、すなわち、「正の向流性」があることが知られている¹⁾。安田ら^{3,4)}は魚道の横断面形状を台形にすることで大小様々な流速場を創出し、アユだけでなく甲殻類も選好する流速場を選択しながら上流向きに遡上すること、すなわち、正の向流性の存在を指摘した。ただし、向流性を確認するには、流向と魚の向いている方向(以後、魚向と表示する)の両者を測定する必要がある。

高嶋・中村⁵⁾は交互切り欠き付き階段式魚道におけるアユの遡上経路を観察すると共に流速測定を行った。その結果、高速流を避けながらアユが流れの上流向きに遡上している様子を図示した。泉ら⁶⁾はハイブリッド式魚道において流速計測を行うと共にウグイの遡上状況を撮影し、高嶋・中村⁵⁾と同様の結論を得ている。和田ら^{7,8)}は修正ラリーニア型舟通し魚道における稚アユの遡上経路を図示すると共に流速ベクトルも図示した。鬼束ら⁹⁾

は交互または片側切り欠き付き魚道におけるオイカワの遡上経路を図示すると共に、流速ベクトルを示した。ただし、これらの研究⁵⁻⁹⁾では流速ベクトルと魚の遡上経路は示しているものの、魚向については余り議論されていない。

浪平ら^{10,11)}は階段式魚道のプール長およびプール間落差を変化させた状態でプール内のウグイの挙動を撮影すると共に流速計測を行い、逆流域では魚向が下流向きになる場合があることを指摘した。林田ら^{12,13)}は階段式魚道のプール長およびプール水深を変化させた状態でプール内のウグイの挙動を撮影すると共に流速計測を行い、プール内の平均的な魚向を図示した。また、魚の遡上経路や遡上に成功あるいは失敗する魚の挙動が詳細に解説されているが、魚向と流向とを定量的には比較していない。

以上のように、遡上に挑む魚道内の魚の挙動を解明した研究は多く存在する。しかし、魚道内の魚の瞬間的な魚向や遊泳速度を詳細に解析し、流速、流向、乱れといった水理量と比較した研究はほとんどない。本研究は階段式魚道内を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、両者の関係を詳細に検討したものである。

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 $L_y=0.4\text{m}$ 、魚道幅 $L_z=0.4\text{m}$ の亚克力製プールを5つ連結させた全面越流型階段式魚道を実験に用いた。隔壁厚 Δx は 0.1m 、隔壁形状はWada¹⁴⁾が推奨する傾斜角 60° のR型を採用した。既設魚道の平均的な魚道勾配は $1/10\sim 1/20$ であるため、魚道勾配が $1/12$ になるようにプール間落差 $\Delta y=0.04\text{m}$ とした。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。

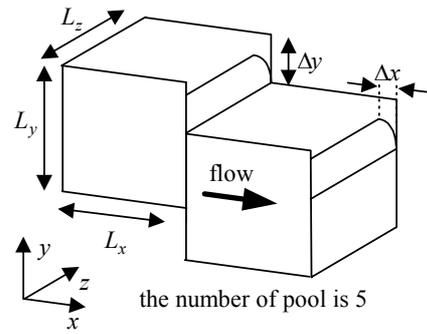


図-1 実験装置

(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、上流から3番目のプールに体長 B_L が $6.5\sim 9\text{cm}$ (平均体長 $\overline{B_L}=8.3\text{cm}$) のアユ $N=100$ 尾を挿入し、20分間の遡上数 n をカウントすることで遡上率 n/N を求めた。その結果、図-2に示すように、流量 Q が $4.5(\text{l/s})$ の時に遡上率が最大となった。

そこで、水路側壁方向および水路下部方向にビデオカメラを設置し、アユを20尾挿入して流量 Q を $4.5(\text{l/s})$ とし、 30Hz で20分間の同時撮影を行う実験を改めて行った。

撮影後、側壁および水路下部方向から得られた画像から、図-3に定義する魚の x, y, z 方向の瞬間吻端位置 $\tilde{x}_f, \tilde{y}_f, \tilde{z}_f$ 、瞬間対地速度 $\tilde{u}_{fg}, \tilde{v}_{fg}, \tilde{w}_{fg}$ および $x-y, x-z$ 平面内の瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}, \tilde{\theta}_{zxf}$ (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。

鬼東ら¹⁵⁾は切り欠きのない魚道の水理諸量は横断方向にはほぼ同様と述べているため、 $z/L_z=0.5$ 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, z 方向の瞬間流速 $\tilde{u}=U+u, \tilde{v}=V+v, \tilde{w}=W+w$ 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。瞬間流速値より、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。なお、流速測定時にはプールにアユを入れていない。

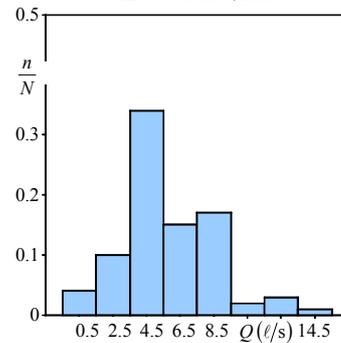


図-2 遡上率

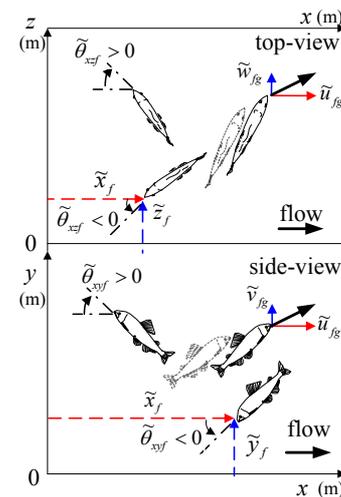


図-3 魚の瞬間諸量の定義図

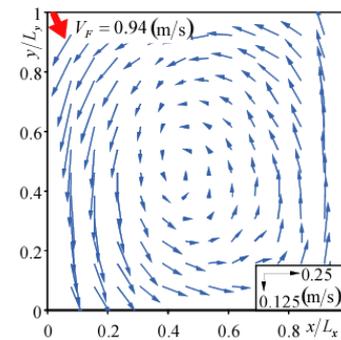


図-4 プール内の流速ベクトル

3. 実験結果および考察

(1) プール全体に対する状況分析

a) プール内の水理特性

図-4に流速ベクトルを示す。隔壁を越流した流れの流

速 V_F は 0.94m/s 、流入角度(上流方向を 0° とし、時計回りを正、反時計回りを負)は 245° 程度であった。隔壁を越流した流れが上流隔壁を伝って下降し、底面にぶつかることで流向を下流方向に向け、さらに、下流側隔壁にぶ

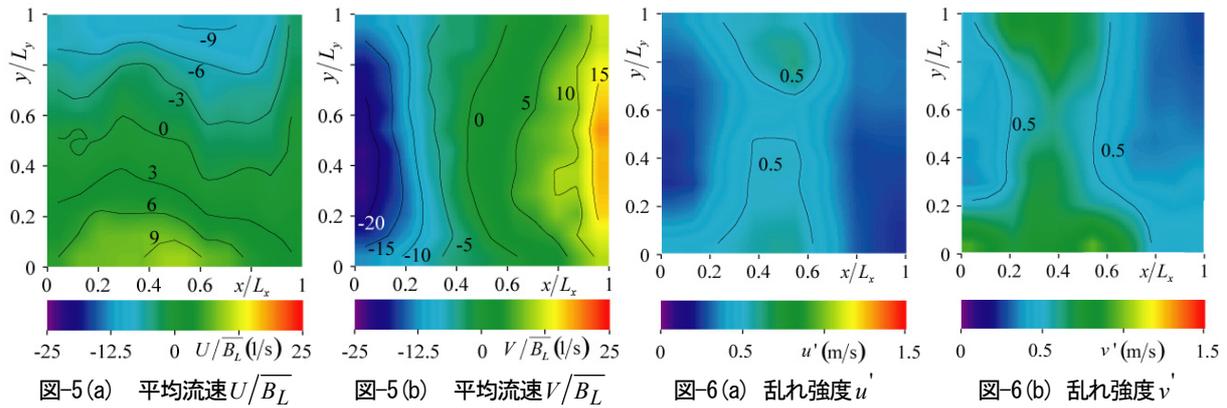


図-5(a) 平均流速 U/\overline{B}_L 図-5(b) 平均流速 V/\overline{B}_L 図-6(a) 乱れ強度 u' 図-6(b) 乱れ強度 v'

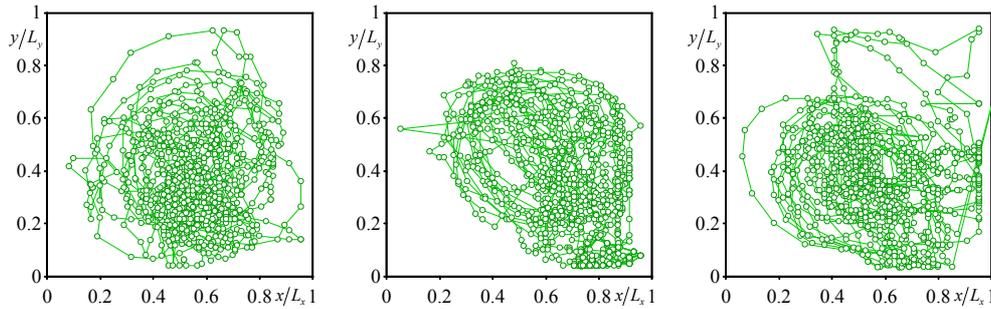


図-7 アユの遊泳軌跡(3分間)

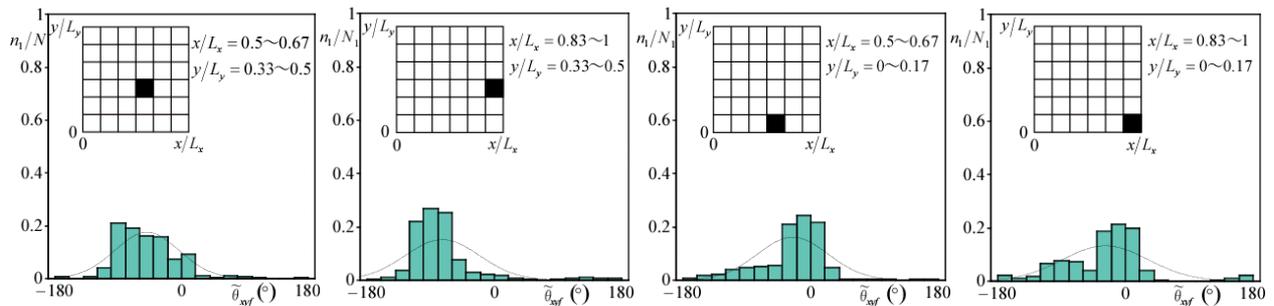


図-8 各エリアにおける瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ のヒストグラム

つかると再び上昇しており、いわゆる、プランジングフローに属することが理解される。

図-5(a), (b)に x , y 軸方向の時間平均流速 U/\overline{B}_L , V/\overline{B}_L の等値線を示す。図-5(a)より、 U/\overline{B}_L は水面付近で負の値、プール底面付近で正の値をとり、両者とも最大で平均体長 \overline{B}_L の10倍弱のオーダーであることがわかる。一方、図-5(b)より、 V/\overline{B}_L は上流隔壁付近で負の値、下流隔壁付近で正の値をとり、前者は \overline{B}_L の20倍以上で後者は15倍程度のオーダーであることがわかる。

図-6(a), (b)に x , y 軸方向の乱れ強度 u' , v' を示す。 $x/L_x = 0.2 \sim 0.7$ の範囲の水面および底面付近の乱れ強度が増加している。これは隔壁を越流してきた流れが水面に衝突することおよび上流隔壁を沿って下降する流れが底面と衝突することで生じていると考えられる。

b) プール内におけるアユの遊泳行動

図-7にプール内に挿入した20尾のアユの中からランダムに選択した3尾のアユの3分間(撮影開始10~13分)の遊泳軌跡をそれぞれ示す。ここで、遊泳軌跡は1/6sごとに

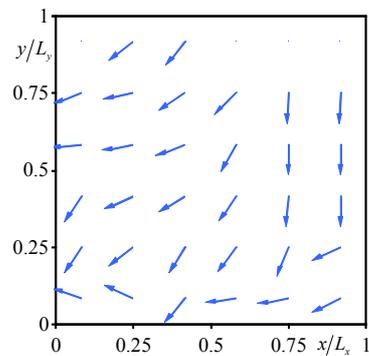


図-9 エリア別平均魚向 Θ_{xyf}

算出した瞬間吻端位置をつなぎ合わせたものである。それぞれのアユの遊泳軌跡は類似しており、個体差はあまりないと判断される。また、観察の結果、アユの挙動は水平断面内($x-z$)よりも鉛直断面内($x-y$)で顕著に異なると判断した。そのため、以下ではアユ1尾の $x-y$ 平面内の挙動を解析する。なお、解析したアユの挙動と目視によるアユの挙動は類似している。

プール内において、 x , y 軸方向をそれぞれ6等分した36エリアを設定し、それぞれの空間におけるアユの挙

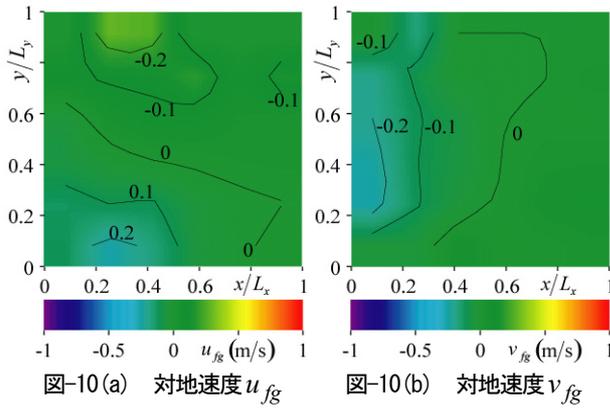


図-10(a) 対地速度 u_{fg} 図-10(b) 対地速度 v_{fg}

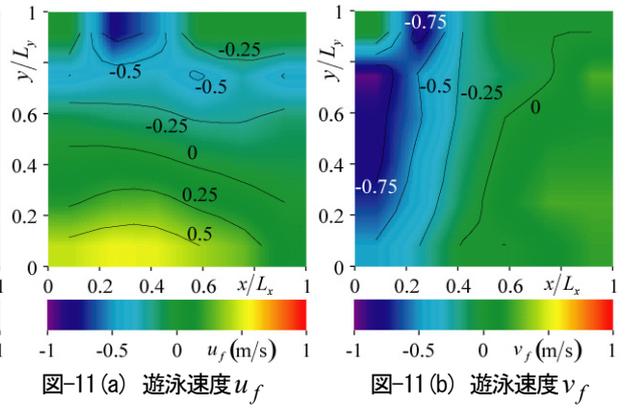


図-11(a) 遊泳速度 u_f 図-11(b) 遊泳速度 v_f

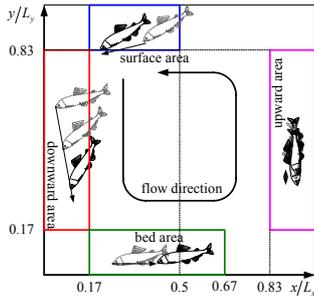


図-12 プール内の領域分割と代表的挙動

動の20分間の平均値およびRMS値を算出した。

図-8に各エリア内の瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ のヒストグラムの例を4ケース示す。 N_1 は各エリアで得られた総魚数、 n_1 は各レンジにおける総魚数であり、各エリアの x 、 y 位置を図中に示した。多少ばらつきがあるものの、分布形状は図中に曲線で示した正規分布に近い。瞬間対地速度についても同様に正規分布を示した。そこで、魚の挙動を各エリアの平均値に基づいて分析することにする。

図-9に各エリアにおけるアユの平均魚向 Θ_{xyf} を示す。プール底面付近ではアユは上流方向を向いている。すなわち、底面に沿って流下する流れに逆らう方向を向いている。一方、上流隔壁から若干下流側の水面付近では、若干下向きで上流方向を向いている。図-4の流速ベクトルを参照すると、流れと同方向となっていることがわかり、底面付近と異なる挙動を示すことが明らかとなった。ただし、魚向は吻端方向を意味するだけで、魚の移動方向を意味するものではない。

x 、 y 軸方向の時間平均の対地速度 u_{fg} 、 v_{fg} を図-10(a)、 (b)に示す。図-10(a)より、上流側の底面付近では u_{fg} が正の値をとり「正の向流性」を示しているのに対し、上流側の水面付近では負の値をとり、「負の向流性」を示している。一方、図-10(b)については上流側隔壁付近で負の値をとり、その他の領域ではほぼゼロとなっている。

ところで、対地速度は静止しているプール壁面に対する速度であり、実際に魚が遊泳している速度ではない。実際の遊泳速度は流速を加算することで得られる。

$$u_f = u_{fg} + U \quad (1)$$

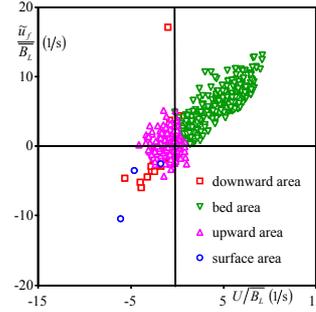


図-13(a) 流速 U と瞬間遊泳速度 \tilde{u}_f の関係

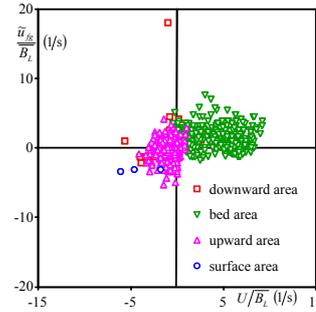


図-13(b) 流速 U と瞬間対地速度 \tilde{u}_{fg} の関係

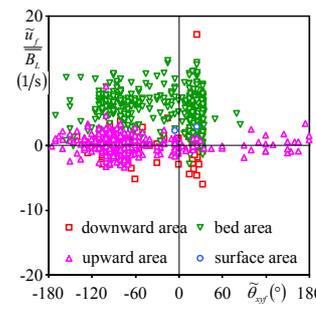


図-13(c) 瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ と瞬間遊泳速度 \tilde{u}_f の関係

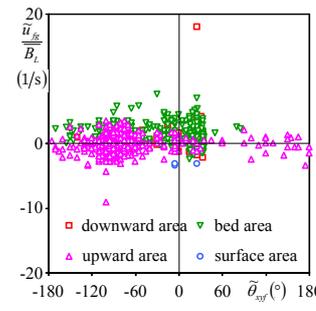


図-13(d) 瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ と瞬間対地速度 \tilde{u}_{fg} の関係

v_f も同様に算出される. 図-11(a), (b)に x , y 軸方向の遊泳速度 u_f , v_f を示す. 図-11(a)より, 上流水面付近および上流底面付近は図-10(a)と同様な結果を示しており, アユは必ずしも「正の向流性」を示さないことが理解される. また, 図-11(b)より, 上流隔壁付近では下向きに高速で遊泳していることが理解されるが, 図-9より, このエリアでは平均魚向 Θ_{xyf} は水平であり, 平均値だけで遊泳形態を理解することは困難である. さらに, 魚道本来の目的である高い遡上率を確保するためには, 空間平均あるいは時間平均の挙動のみならず, 瞬間的な魚向や遊泳速度等の把握が必要となる. なぜなら, 空間平均あるいは時間平均のみでは本来の魚の挙動を再現することは出来ないからである. 以上のことから, 向流性の正負がエリアによって異なること, 時間平均された魚の挙動だけでなく, 瞬間的な挙動を解明する必要があることが示唆された.

(2) プールを領域分割した場合の状況分析

a) プール内の領域区分

前節で特徴的な魚の挙動を示した上流域の底面付近 (bed area) および水面付近 (surface area), 上流側隔壁近傍 (downward area) および下流側隔壁近傍 (upward area) の4エリアを図-12のように定義した. 図中の魚の挙動の模式図は後に説明する.

b) 遊泳速度の特性

瞬間遊泳速度は瞬間対地速度に瞬間流速を加えて求められる. 本研究では魚の瞬間対地速度を算出しているものの, 流速計測を同時に行っていないため算出不可能である. そこで, 厳密性には欠けるが, 瞬間遊泳速度 \tilde{u}_f を次式で算出した.

$$\tilde{u}_f = \tilde{u}_{fg} + U \quad (2)$$

\tilde{v}_f および \tilde{w}_f も同様に得ることができる.

図-13(a), (b)に x 軸方向流速 U と瞬間遊泳速度 \tilde{u}_f および U と瞬間対地速度 \tilde{u}_{fg} との関係を, 図-13(c), (d)に瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ と瞬間遊泳速度 \tilde{u}_f および $\tilde{\theta}_{xyf}$ と瞬間対地速度 \tilde{u}_{fg} との関係を示す. bed area では $\tilde{u}_f / \overline{B_L}$ は0~15程度の値を示すのに対し(図-13(a)), $\tilde{u}_{fg} / \overline{B_L}$ は0~5程度の値しか示さない(図-13(b)). また, $\tilde{\theta}_{xyf}$ が正の場合の角度はそれほど大きくないが, 負の場合の角度の絶対値は極めて大きい(図-13(c, d)). これは, 高速流の中を一般に体長の10倍といわれている突進速度を利用しながら対地速度がゼロになるように遊泳しているが, 若干下流方向に流されていることを意味する. このとき, 魚向が上向きになった時の角度は僅かであるが, 下向きになった時は急角度となっている.

surface areaについては図-13(a) および (b)において

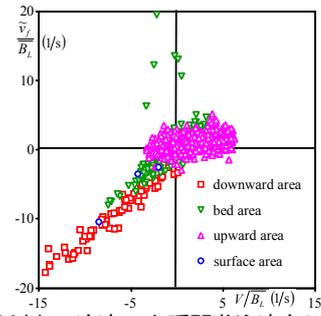


図-14(a) 流速 V と瞬間遊泳速度 \tilde{v}_f の関係

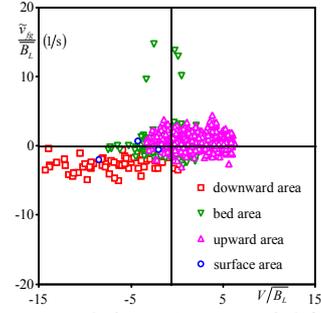


図-14(b) 流速 V と瞬間対地速度 \tilde{v}_{fg} の関係

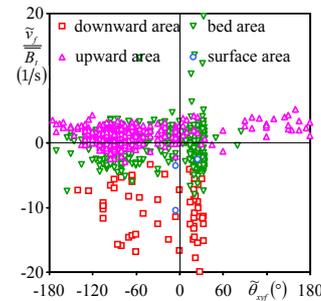


図-14(c) 瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ と瞬間遊泳速度 \tilde{v}_f の関係

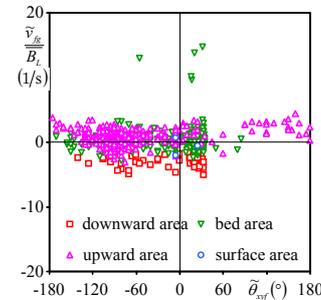


図-14(d) 瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ と瞬間対地速度 \tilde{v}_{fg} の関係

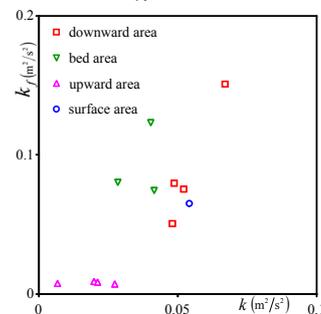


図-15 乱れエネルギー k と遊泳変動エネルギー k_f の関係

$\tilde{u}_f / \overline{B_L}$ および $\tilde{u}_{fg} / \overline{B_L}$ のプロット位置が全て第3象限に位置している. 一方, $\tilde{\theta}_{xyf}$ は 0° 付近の値を示している

(図-13(d)). 従って、ほぼ上流方向を向いた状態で体をぶらすことなく遊泳し、逆流に乗って上流方向に移流していると考えられる。なお、解析により得られたsurface areaのデータ数は他のareaと比べ少ない。これは20分間の撮影中、surface area内に存在したアユの存在確率が小さいためである。

図-14(a), (b)にy軸方向流速 V と瞬間遊泳速度 \tilde{v}_f および V と瞬間対地速度 \tilde{v}_{fg} との関係を、図-14(c), (d)に瞬間魚向 $\tilde{\theta}_{xyf}$ と瞬間遊泳速度 \tilde{v}_f および $\tilde{\theta}_{xyf}$ と瞬間対地速度 \tilde{v}_{fg} との関係を示す。

downward areaについては、図-14(a)および(b)において $\tilde{v}_f / \overline{B_L}$ および $\tilde{v}_{fg} / \overline{B_L}$ はほとんどのデータが第3象限に位置している。 $\tilde{\theta}_{xyf}$ が正になる場合の角度はそれ程大きくないが、負になる場合はその絶対値はかなり大きい。前者は下降流の中を遡上する場合は真上でなく斜め上方を向くが、下降流の流れに乗る場合は底面の方を向いていることを意味する。こうした挙動は、図-9のような平均魚向のみでは確認できない。

upward areaについては、図-14(b)において $\tilde{v}_{fg} / \overline{B_L}$ および $V / \overline{B_L}$ の多くは正である。また、 $\tilde{\theta}_{xyf}$ が負の値を示しているものはエリア内の95%程度であることから(図-14(c, d)), 多くの魚は上昇流の中で底面方向を向いて下降に挑んでいるが、多くが水面方向に流されているといえる。ただし、かなり大きな正の $\tilde{\theta}_{xyf}$ もしばしば見られ(図-14(c, d)), 水面を向いて遊泳する場合は急角度になることがわかった。

これにより、アユの挙動を理解するには時間平均のみではなく、瞬間的な挙動についても解析を行う必要があることが判明した。今回得られた挙動を図-12中に示す。

c) 遊泳変動の特性

図-15に乱れエネルギー $k \equiv (u^2 + v^2 + w^2) / 2$ およびアユの遊泳変動エネルギー $k_f \equiv (u_f^2 + v_f^2 + w_f^2) / 2$ の関係を示す。upward areaでは乱れエネルギー k および遊泳変動エネルギー k_f が共に小さい。なお、アユの存在確率の最も高いupward areaの乱れエネルギー k は $0 \sim 0.025 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$ の範囲であり、他のエリアよりも乱れエネルギーが小さい。ただし、他条件下においても同様な結果が得られるかどうかを確認していないため、今後更なる検討が必要である。一方、downward areaでは両者の大きさが共に大きい。従って、乱れエネルギーの増加に伴い遊泳変動エネルギーも増加すると判断される。これは、流速変動の増加に伴い、アユが移流することで遊泳位置の変動量が増加したために生じたものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、魚道内の魚の瞬間的な魚向や遊泳速度を詳細に解析し、流速、流向、乱れといった水理量との関係を検討したものである。以下に結論を示す。

- (1) 魚の向きおよび対地速度は瞬間的に変動しているが、ほぼ正規分布で再現されることがわかった。ただし、時間平均された魚向や遊泳速度の情報からでは魚の挙動を理解することは困難で、瞬間的な挙動を解析する必要があることが示された。
- (2) 瞬間的には「正の向流性」だけでなく、「負の向流性」を示す場合があり、その頻度はプール内の領域に依存することが明らかとなった。
- (3) 魚道内の乱れエネルギーの増加に伴いアユの遊泳変動エネルギーも増加することが判明した。これは、流れの変動の増加に伴い、アユが移流することで遊泳位置の変動が増加したために生じたものであるが、従来からの「魚は乱れの小さい領域を好む」といった説¹⁾を初めて定量的に証明した。

参考文献

- 1) 中村俊六：山海堂，1995。
- 2) (財)ダム水源地環境整備センター編：信山社サイテック，1998。
- 3) 安田陽一，大津岩夫，浜野龍夫，三矢泰彦：河川技術に関する論文集，第6巻，pp.149-154，2000。
- 4) 安田陽一，大津岩夫，浜野龍夫，三矢泰彦：河川技術論文集，第7巻，pp.221-226，2001。
- 5) 高嶋信博，中村俊六：第28回水理講演会論文集，pp.353-358，1984。
- 6) 泉完，工藤明，東信行，佐藤正一：河川技術に関する論文集，第6巻，pp.131-136，2000。
- 7) 和田清，東信行，小出水規行，中村俊六：河川技術に関する論文集，第5巻，pp.159-164，1999。
- 8) 和田清，小出水規行，石川雅朗，中村俊六：水工学論文集，第43巻，pp.983-988，1999。
- 9) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，木内大介，高橋康行，飯國洋平：水工学論文集，第51巻，pp.1279-1284，2007。
- 10) 浪平篤，後藤眞宏，小林宏康：水工学論文集，第51巻，pp.1291-1296，2007。
- 11) 浪平篤，後藤眞宏，小林宏康：水工学論文集，第52巻，pp.1189-1194，2008。
- 12) 林田寿文，本田隆秀，萱場祐一，島谷幸宏：環境システム研究論文集，Vol.28，pp.333-338，2000。
- 13) 林田寿文，本田隆秀，萱場祐一，島谷幸宏：水工学論文集，第44巻，pp.1191-1196，2000。
- 14) Wada, Y.: Proc. of the International Symp. on Fishways '90 in Gifu, Japan, pp.445-450, 1990.
- 15) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，木内大介，川良典彰：水工学論文集，第49巻，pp.817-822，2005。