

# アユの忌避色を利用した階段式魚道における 遡上率改善策

AN IMPROVEMENT OF MIGRATION RATE WITH EVASION COLOR OF  
*PLECOGLOSSUS ALTIVELIS ALTIVELIS* IN POOL-AND-WEIR FISHWAY

鬼東幸樹<sup>1</sup>・秋山壽一郎<sup>2</sup>・宍戸陽<sup>3</sup>・有須田朋子<sup>4</sup>・高松周平<sup>4</sup>  
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Akira SHISHIDO, Tomoko ARISUDA  
and Shuhei TAKAMATSU

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

<sup>4</sup>学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

Most of fishways installed in Japanese rivers belong to the pool-and-weir fishway type. This fishway is usually made by concrete, so that the color of the pool side-wall and bed are gray. On the other hand, it is pointed out that the fish behavior is affected by the wall color. Unfortunately, the effect of wall color in the fishway on the fish behavior has not been investigated. It has been found that ayu (*Plecoglossus Altivelis Altivelis*) evade red (5R4/14). In this study, the position where painted red were changed into pool side-wall and bed. It was found that the migration rate increases by painting downstream and left bank sidewall. It's because ayu evaded painted sidewall and center of fish's school is located nearby upstream notch.

**Key Words :** pool-and-weir fishway, evasion color, migration rate, center of fish's school, ayu

## 1. はじめに

魚道の形式には、階段式、バーチカルスロット式、潜孔式、デニール式、粗石付き斜曲面式など様々存在するが<sup>1)2)</sup>、国内外共に階段式が多数を占める<sup>3)5)</sup>。Noonam *et al.*<sup>6)</sup>は1960年から2011年までの魚道に関する論文のデータを整理し、階段式魚道においてサケ科の約3割が、非サケ科の約6割が遡上に失敗していることを明らかにした。安田<sup>7)</sup>は既設の魚道の遡上行動と流速場との対応について指摘し、様々な河川の魚道内の流速を測定した。高い遡上率を確保するには、遡上が容易な流況を提供することが望ましいが、既設魚道の幾何学形状を変更することは容易ではない。魚道の幾何学形状の変更をせずに魚の行動を制御する方法として、視覚などの魚の感覚を利用する手法が挙げられる。

魚は主として側線および網膜によってそれぞれ圧力情報および視覚情報を取得する<sup>8)</sup>。網膜視細胞には明条件下で色彩情報を受感する錐体および暗条件下で明暗情報を受感する桿体の2種類がある。ヒトを含む霊長類には赤、緑、青の波長をそれぞれ受感する3つの錐体が存在

する<sup>9)</sup>。魚の錐体の構成についても探索が行われた。Tomita *et al.*<sup>10)</sup>は、金魚やコイが赤、緑および青を受感する3つの錐体を有することを確認した。Hanyu *et al.*<sup>11)</sup>は金魚やニジマスには上記の3つの錐体に加え、紫外線を受感する錐体を有することを確認した。その後、ギギ<sup>12)</sup>、アユ (*Plecoglossus Altivelis Altivelis*)<sup>13)</sup>にも上記の4つの錐体があることが解明された。現在、多くの魚は、赤、緑、青および紫外線の4つの錐体を有し、それらの色の認知が可能と推定されている<sup>14)</sup>。ただし、同じスペクトル分布の視覚情報を網膜でとらえても、魚種によって受感反応が異なる<sup>15)19)</sup>。したがって、視覚情報を用いた魚の行動制御法は、魚種ごとに開発しなければならない。ここでは、我が国でサケと同様に魚道における対象魚種となっているアユに着目する。

関谷ら<sup>20)</sup>は白色と黒色とが隣接した底面を有する水路では、アユが白色の領域を避けることを解明した。関谷ら<sup>21)</sup>および下村ら<sup>22)</sup>は、白色、赤色のテープを開水路中に設置してアユの行動を観察し、9割以上のアユがテープから忌避することを解明した。小山<sup>23)</sup>は稚アユが黄緑色にはほとんど反応しないが、赤色に強い反応を示すこ

とを示した。篠邊<sup>24)</sup>は赤色に相当する波長が600~620nmの光をアユが忌避すると述べた。上記の知見に基づき、取水堰の取水口からアユを忌避させるために、取水口を赤色で塗装する試みが行われているが<sup>25)26)</sup>、漁協に対するアンケート調査によると効果があると感じた例は25%で、効果を感じない例は75%であった<sup>27)</sup>。このように、アユの忌避色と推測される赤色に対する反応に統一の見解が存在しない理由として、次の一因が挙げられる。一般に魚は、片眼視野から入手する画像情報より、前方の両眼視野から入手する画像情報に大きく反応する<sup>28)</sup>。このような反応の大きな視野の中心軸を視軸というが、忌避色が視軸付近に位置するか否かで魚類の反応が変化する可能性がある。中村ら<sup>29)</sup>はアユは上方で生じる現象に対しては極めて敏感だが、側方や下方で生じる現象に対しては全くといっていいほど反応しないと述べている。したがって、アユの忌避色と推定されている赤色とアユの遊泳位置との相対位置関係によって、アユの忌避率が変化する可能性がある。

本研究では、側壁および底面の一部をそれぞれ赤色で塗装し、その他の壁面をグレーで塗装した階段式魚道においてアユの遡上実験を行い、アユの遡上率を向上させる塗装方法を探求した。

## 2. 実験装置および実験条件

図-1に実験に用いた片側切欠き付階段式魚道の概要を示す。プール長 $L=0.7\text{m}$ 、プール水深 $h=0.6\text{m}$ 、プール幅 $B=0.6\text{m}$ 、隔壁厚 $\Delta x=0.15\text{m}$ 、落差 $\Delta y=0.15\text{m}$ 、切欠き幅 $\Delta z=0.12\text{m}$ のプールを4つ連結した。プール左岸はアクリル製で、それ以外はグレー(N4.5)に塗装された木製である。プールの側壁は上流(US: Upstream Sidewall)、下流(DS: Downstream Sidewall)、左岸(LS: Left bank Sidewall)、右岸(RS: Right bank Sidewall)の4つ存在するが、各側壁を $y/h=0\sim 0.2$ の範囲を、各々赤(5R4/14)色で塗装した。図-2(a)に右岸(RS)を赤色で塗装した例を示す。また、図-2(b)に示すようにプール底面を流下方向に二分割し、上流側底面(UB: Upstream Bottom)および下流側底面(DB: Downstream Bottom)を各々赤色で塗装した。さらに、図-2(c)に示すように横断方向に二分割し左岸側底面(LB: Left bank Bottom)および右岸側底面(RB: Right bank Bottom)を各々赤色で塗装した。なお、比較のためベース色のグレーのまま赤色で塗装しないケース(Non: Non color)も含め、表-1に示す合計9ケースの実験を行った。切欠き部の越流流速が体長倍流速で10(突進速度)となるように流量 $Q=5\text{l/s}$ を与えた。下流から2番目のプール内に平均体長 $\bar{B}_l=80\text{mm}$ のアユを $N=30$ 尾放流し、プールの左岸側および上部に設置した2台のカメラを用いて30fpsで20分間の撮影を行なった。撮影後、アユの遊泳位置を10sごとに解析すると共に、遡上数をカウントした。

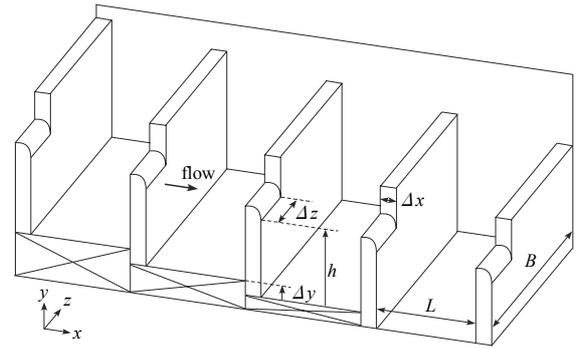


図-1 実験に用いた魚道の概要

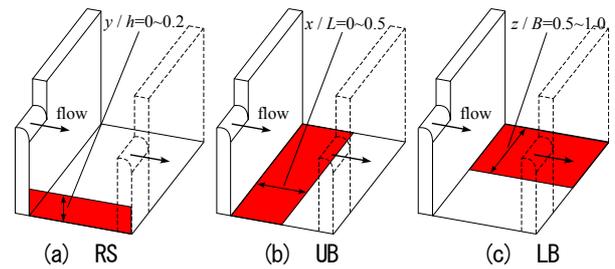


図-2 塗装箇所の一例

表-1 実験条件

Pool condition			Case name
Standard pool (Non color)			Non
Painted wall	Upstream	Sidewall	US
		Bottom	UB
	Downstream	Sidewall	DS
		Bottom	DB
	Left bank	Sidewall	LS
		Bottom	LB
	Right bank	Sidewall	RS
		Bottom	RB

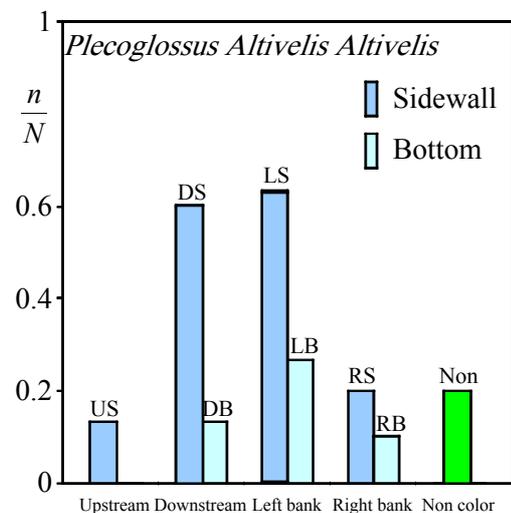
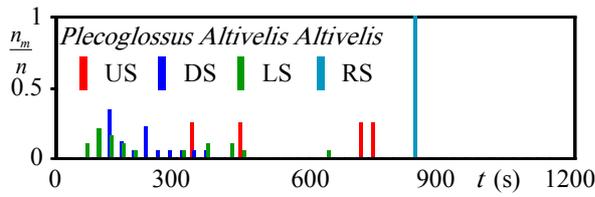
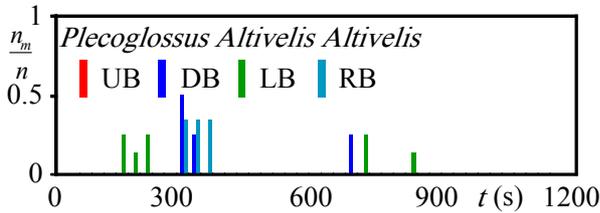


図-3 アユの遡上率



(a) Sidewall



(b) Bottom

図-4 アユの遡上開始時間の頻度分布

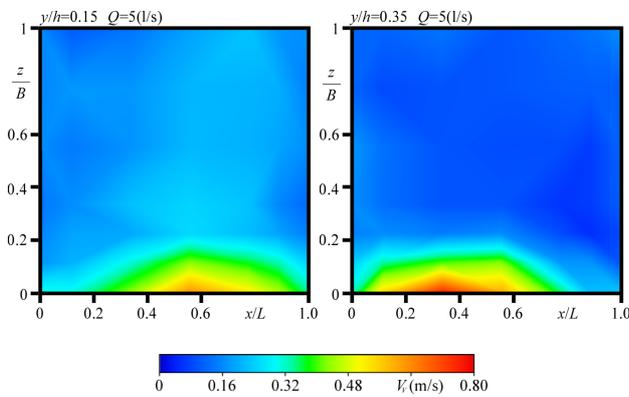
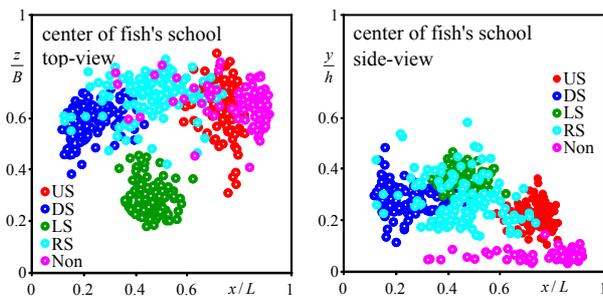
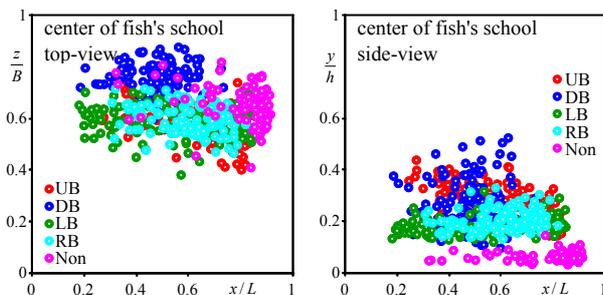


図-5 流速コンター



(a) Sidewall



(b) Bottom

図-6 アユの瞬間魚群重心

$x$ ,  $y$ ,  $z$ 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 $U$ ,  $V$ ,  $W$ を算出し、合成流速 $V_r = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ を得た。なお、流速測定時には魚道にアユを放流していない。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 塗装位置とアユの遡上特性との関係

遡上率を式(1)のように定義する。

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

図-3にアユの遡上率 $n/N$ をケース別に示す。赤色塗装を側壁にした場合(Sidewall)と底面にした場合(Bottom)とを比べると、いずれのケースでもSidewallの遡上率が高い。特に、下流側壁を塗装したDSおよび左岸側壁を塗装したLSのケースで、赤色で塗装しないNonよりも高い遡上率を示した。したがって、忌避色の塗装位置を変化させることでアユの遡上率が変化することが解明された。

図-4(a), (b)に赤色塗装を側壁にした場合(Sidewall)と底面にした場合(Bottom)における、アユの30s間ごとの遡上尾数 $n_m$ を総遡上尾数 $n$ で除した値( $n_m/n$ )の頻度分布をケース別に示す。遡上率の高いDSおよびLSでは、実験時間の比較的前半に遡上数が集中している。他のケースではDSおよびLSを比較すると、実験中にある程度均等に遡上している。

#### (2) プール内流速とアユの定位場所

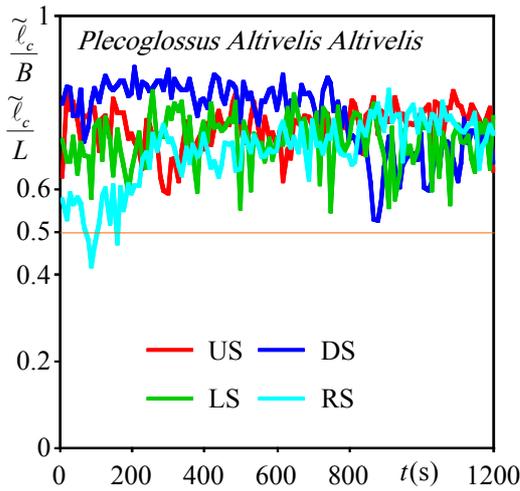
図-5に $y/h=0.15$ ,  $0.35$ の水平断面( $x$ - $z$ )内の流速コンターを示す。右岸付近( $z/B=0 \sim 0.2$ )の流速は $0.5\text{m/s}$ 前後であるが、それ以外の領域はほぼ $0.3\text{m/s}$ 以下となっている。

図-6(a), (b)に赤色塗装を側壁にした場合(Sidewall)および底面にした場合(Bottom)における、水平および鉛直断面内のアユの瞬間魚群重心を示す。図-6(a), (b)の両水平断面に着目すると、図-6(b)のBottomでは魚群重心が比較的左岸側に位置しており、ケース間の相違は顕著ではないのに対し、図-6(a)のSidewallでは魚群重心位置がケースによってばらついている。特に、LSでは魚群重心が他のケースよりも著しく右岸側に位置している。

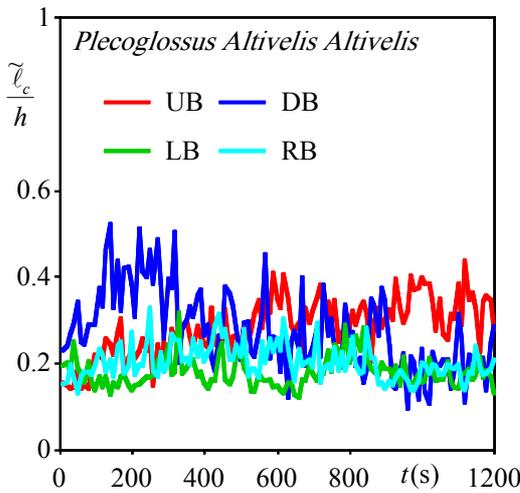
図-6(a), (b)の両鉛直断面に着目すると、上下流方向に若干ばらついているものの明確な傾向は観察されず、ケース間で魚群重心の鉛直位置に明確な差異は観察されない。

#### (3) アユの魚群重心と塗装面との距離

図-7(a), (b)に赤色塗装を側壁にした場合(Sidewall)および底面にした場合(Bottom)における、10sごとのアユの魚群重心から塗装面までの瞬間距離 $\tilde{l}_c$ をプール長 $L$ ,



(a) 水平距離



(b) 鉛直距離

図-7 アユの瞬間魚群重心から塗装面までの距離

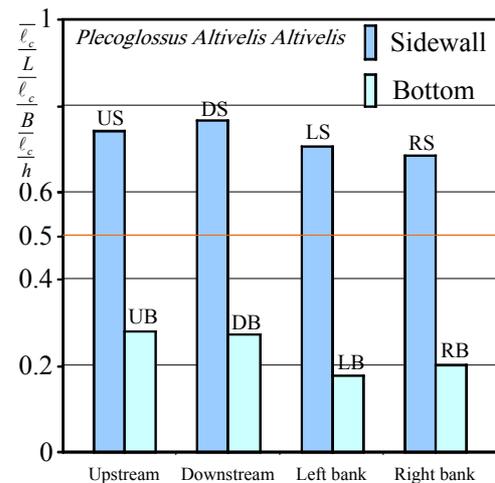


図-8 アユの瞬間魚群重心から塗装面までの距離の平均値

プール幅 $B$ あるいはプール水深 $h$ で除した値( $\tilde{\ell}_c/L$ ,  $\tilde{\ell}_c/B$ ,  $\tilde{\ell}_c/h$ )の時間変化をケース別に示す。図-7(a)では、すべてのケースにおいて魚群重心が塗装面からプール長およびプール幅の半値以上遠ざかっている。これは塗装された側壁をアユが忌避したためと考えられる。一方で図-7(b)を観察すると、すべてのケースで魚群重心が常に半水深以下に位置しており、明確なケース間の差異は観察されない。そのため、図-6(a)ではケースによって魚群重心位置が大幅に異なるのに対し、図-6(b)では全ケースで魚群重心位置が類似していると考えられる。

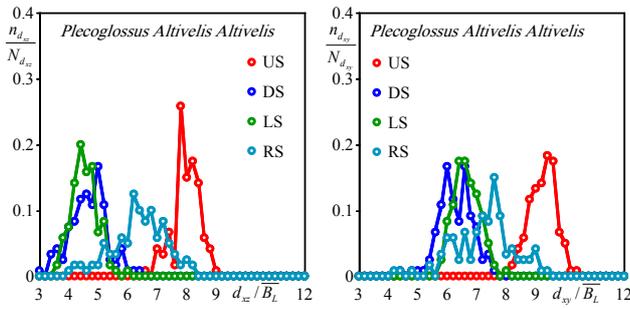
図-8に赤色塗装を側壁にした場合(Sidewall)および底面にした場合(Bottom)における、アユの魚群重心から塗装面との距離の平均値( $\bar{\ell}_c/L$ ,  $\bar{\ell}_c/B$ ,  $\bar{\ell}_c/h$ )を示す。Sidewallの場合、すべてのケースにおいて $\bar{\ell}_c/L$ および $\bar{\ell}_c/B$ が0.5を超えており、明確に塗装された側壁を忌避していると判断される。ところで、鬼束ら<sup>30)</sup>は鏡を開水路の側壁および底面に設置してアユの誘導実験を行った。その結果、鏡を底面に設置してもアユの挙動に変化はないが、側壁に設置すると鏡に映った自身の姿を仲間と誤認して、遊泳挙動を変化させることを解明した。これは、アユが鉛直方向よりも水平方向から得られる視覚情報を重視していることを意味する。本研究においても、底面よりも側壁の塗装情報から大きな影響を受けることが判明した。

#### (4) アユの魚群重心と上流側切欠きまでの距離

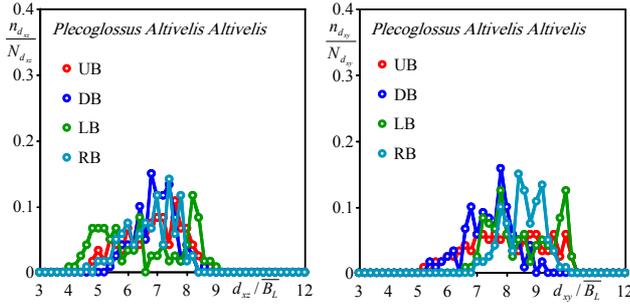
図-9(a), (b)に赤色塗装を側壁にした場合(Sidewall)および底面にした場合(Bottom)における、アユの魚群重心から上流側切欠きまでの水平距離 $d_{xz}$ および鉛直距離 $d_{xy}$ を平均体長 $B_L$ で除した値( $d_{xz}/B_L$ ,  $d_{xy}/B_L$ )の頻度分布をケース別に示す。Sidewallでは、無次元水平距離および無次元鉛直距離の両者において各ケースで分布範囲が異なっている。これは塗装位置を変化させることで、アユの魚群重心から上流側切欠きまでの距離が変化したことを意味する。一方、Bottomでは分布範囲に大きな差は見られない。

図-10(a), (b)にアユの魚群重心から上流側切欠きまでの水平距離 $d_{xz}$ および鉛直距離 $d_{xy}$ の最頻値を平均体長 $B_L$ で除した値( $\hat{d}_{xz}/B_L$ ,  $\hat{d}_{xy}/B_L$ )および、標準偏差を平均体長 $B_L$ で除した値( $d'_{xz}/B_L$ ,  $d'_{xy}/B_L$ )をケース別に示す。図-10(a)に着目すると、遡上率の高いDS, LSにおいて無次元水平距離の最頻値 $\hat{d}_{xz}/B_L$ が低い値を示していることがわかる。これは、DS, LSにおいてアユが塗装面から遠ざかり魚群重心が上流側切欠きに近づいたためと考えられる。一方、赤色塗装を底面にした場合(Bottom)では最頻値に大きな差は見られない。

標準偏差については、Sidewallの値がBottomを多くのケースで下回っていることから、SidewallではBottomよりも魚群重心の移動量が少ないと判断される。



(a) Sidewall



(b) Bottom

図-9 アユの魚群重心から上流側切欠きまでの距離の頻度分布

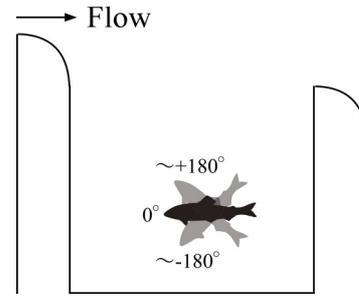
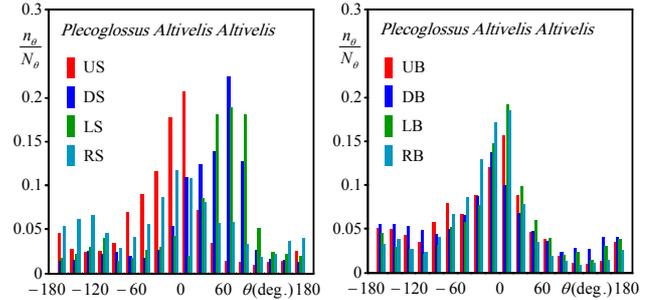


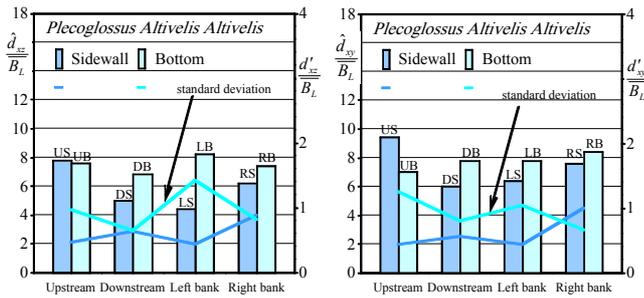
図-12 魚向の定義



(a) Sidewall

(b) Bottom

図-13 アユの魚向頻度



(a) 水平断面

(b) 鉛直断面

図-10 アユの魚群重心から上流側切欠きまでの距離の最頻値および標準偏差

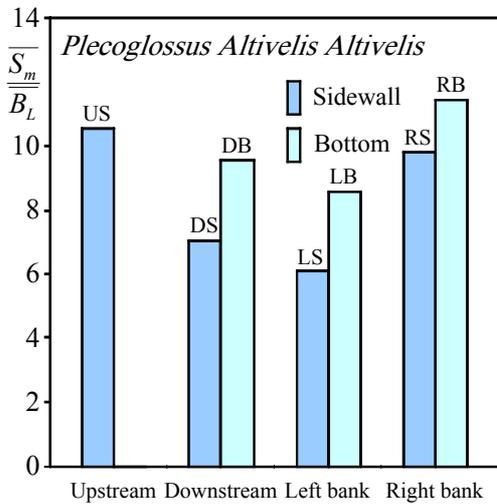


図-11 アユの遡上距離

#### (5) アユの遡上距離

図-11に遡上に成功したアユの遡上距離  $S_m$  を平均した値  $\overline{S_m}$  を平均体長  $B_L$  で除した値 ( $\overline{S_m} / B_L$ ) をケース別に表示。DS, LSの遡上距離が他のケースよりも短い。図-6(a)で観察されたように、DS, LSの魚群重心位置は上流側および左岸側に集中している。多くの個体は魚群重心位置付近から遡上を開始する。そのため、赤色塗装によって魚群重心位置が上流側切欠き付近に移動したDS, LSの両ケースにおいて遡上距離が短くなる。すると、アユの疲労蓄積が抑制され、遊泳力の小さな個体も遡上が容易になるため、DS, LSにおいて遡上率が増加したと考えられる。

#### (6) アユの魚向

図-12に魚向の定義を示す。図-13(a), (b)に赤色塗装を側壁にした場合(Sidewall)および底面にした場合(Bottom)におけるアユの魚向頻度  $n_\theta / N_\theta$  を示す。図-13(a)においてUS, RSでは0°においてピーク値を示している。これは、アユが底面に平行に遊泳していることを示している。一方、DS, LSでは上流側切欠き方向に相当する60~80°においてピーク値を示している。したがって、DS, LSではアユの魚群重心位置が上流側切欠きに近く、また、上流側切欠きから流入する流れを認識し易くなるため、遡上率が増加したと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、プールの側壁および底面の一部をそれぞれ赤色で塗装し、その他の壁面をグレーで塗装した

階段式魚道においてアユの遡上実験を行い、アユの遡上率を向上させる塗装方法を探求したものである。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 赤色をプール底面に塗装してもアユの遊泳にほとんど影響を与えないが、側壁を塗装するとアユの遊泳位置を制御することが可能であることが判明した。これは、アユは底面よりも側壁の視覚情報に強い影響を受けることが原因と考えられる。
- (2) 片側のみに切欠きのある魚道において、赤色をプール内の下流側壁および切欠きのある側壁の対岸に塗装すると、アユは赤色を忌避し、魚群重心位置が上流側切欠き付近に移動する。そのため遡上距離が減少し、アユの疲労の蓄積を抑制することができる。その結果、遊泳力の小さな個体も遡上が容易になり、アユの遡上率を増加させることが可能となる。本研究は各ケース一回の実験にて得られた結果である。今後は複数回実験を行って、結果を得る必要がある。

**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) 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.
- 2) 安田陽一：技術者のための魚道ガイドライン, コロナ社, 2011.
- 3) FAO/DVWK: *Fish Passes, Design*, FAO, Roma, 2002.
- 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) 中村俊六：魚道のはなし, 山海堂, 1995.
- 6) 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.
- 7) 安田陽一：水生生物の遡上行動からみた魚道からの流れ, ながれ, 第33巻, pp.343-348, 2014.
- 8) 有元貴文：光を利用した魚群制御技術, 水産工学, Vol.28, No.1, pp.71-76, 1991.
- 9) Nathans, J., Thomas, D. and Hogness, D.S.: Molecular genetics of human color vision: the genes encoding blue, green, and red pigments, *Science*, Vol.232, pp.193-202, 1986.
- 10) Tomita, T., Kaneko, A., Murakami, M. and Pautler, E.L.: Spectral response curves of single cones in the carp, *Vision Research*, Vol.7, pp.519-531, 1967.
- 11) Hanyu, I., Niwa, H. and Tabata, M.: A slow potential from the epiphysis cerebri of fishes, *Vision Research*, Vol.9, pp.621-623, 1969.
- 12) Meissl, H. and Ekstrom, P.: Dark and light adaptation of pineal photoreceptors, *Vision Research*, Vol.28, pp.49-56, 1988.
- 13) Minamoto, T. and Shimizu, I.: Molecular cloning of cone opsin genes and their expression in the retina of a smelt, Ayu (*Plecoglossus Altivelis*, Teleostei), *Comparative Biochemistry and Physiology - Part B: Biochemistry & Molecular Biology*, Vol.140, pp.197-205, 2005.
- 14) Nakano, N., Kawabe, R., Yamashita, T., Hiraishi, K. and Yamamoto, K.: Color vision, spectral sensitivity, accommodation, and visual acuity in juvenile masu salmon *Oncorhynchus masou masou*, *Fisheries Science*, Vol.72, pp.239-249, 2006.
- 15) Bridges, C.D.B.: Effect of season and environment on the retinal pigments of two fishes, *Nature*, Vol.203, pp.191-192, 1964.
- 16) Chinen, A., Hamaoka, T., Yamada, Y. and Kawamura, S.: Gene duplication and spectral diversification of cone visual pigments of zebrafish, *Genetics*, Vol.163, pp.663-675, 2003.
- 17) Cheng, C.L. and Flammarique, I.N.: Opsin expression: New mechanism for modulating colour vision, *Nature*, Vol.428, pp.279, 2004.
- 18) Parry, J.W.L., Carleton, K.L., Spady, T.C., Carboo, A., Hunt, D.M. and Bowmaker, J.K.: Mix and match colour vision: tuning spectral sensitivity by differential opsin gene expression in Lake Malawi cichlids, *Current Biology*, Vol.15, pp.1734-1739, 2005.
- 19) Matsumoto, Y., Fukamachi, S., Mitani, H. and Kawamura, S.: Functional characterization of visual opsin repertoire in Medaka (*Oryzias latipes*), *Gene*, Vol.371, pp.268-278, 2006.
- 20) 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.
- 21) 関谷明, 福井吉孝, 湯目吏吉也, 坂本裕嗣：魚類の迷入防止策の実態とその迷入防止について, 河川技術論文集, 第7巻, pp.233-238, 2001.
- 22) 下村充, 白川裕之, 福井吉孝, 関谷明：迷入防止法の開発ランダムウォークによる魚の挙動解析とその応用, 河川技術論文集, 第8巻, pp.337-342, 2002.
- 23) 小山長雄：魚道をめぐる諸問題II, 解説篇, 木曾三川河口資源調査団, 1967.
- 24) 篠邊三郎：魚道の水理と魚類の遡上に関する研究, 昭和56~58年度科学研究費補助金研究成果報告書, 弘前大学農学部, 1984.
- 25) (財)ダム水源環境整備センター編：最新魚道の設計, 信山サイテック, 1998.
- 26) 農林水産省農村振興局整備部設計課：頭首工の魚道, 農業土木学会, 2002.
- 27) 全国内水面漁業協同組合連合会：魚の迷入の実態とその対策へのアプローチ, 1996.
- 28) 塩原泰, 有本貴文：マダイの視軸に関する行動実験, 日本水産学会誌, 第64巻, 第4号, pp.728-731, 1999.
- 29) 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.
- 30) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 山本晃義, 池野慎：鏡を用いたアユの選択的誘導に関する研究, 水工学論文集, 第53巻, pp.1231-1236, 2009.

(2014. 9. 30受付)