

階段式魚道の壁面色がアユの遡上特性に 及ぼす影響

鬼東 幸樹¹・秋山 壽一郎²・高松 周平³

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

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学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

わが国における魚道は階段式魚道が多数を占めるが、その多くはコンクリート製である。そのため魚道プールの壁面は灰色であることが多く、表面に塗装が施されることはほとんどない。一方既往の研究で、赤色がアユ(*Plecoglossus Altivelis Altivelis*)の忌避色であることは明かされたが、選好色については明かされていない。魚の忌避色あるいは選好色を魚道内に塗装することで遡上率が向上するのであれば、安価な既設魚道の改良が可能である。本研究では忌避色である赤色とその他三色を魚道プール内に塗装し、遡上率の変化を見た。その結果、上流側切欠き付近を黄色で塗装すると、黄色を選好して遊泳位置が上流側切欠きに移動し、結果的に遡上率の向上が見られた。

Key Words : pool-and-weir fishway, color, fish migration, 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が挙げられるが¹⁾、階段式が多く採用されている²⁾³⁾。しかし既設の魚道において、様々な要因で魚が遡上に失敗していると報告されている。例えば近藤ら⁴⁾は、既設の階段式魚道を調査し、プール内や切欠き部の流況がアユの遡上に適さず、多くが遡上に失敗していることを明らかにした。関谷ら⁵⁾は、調査により漁協の多くが稚魚の迷入を経験していることを明らかにした。他にも、魚道の下流端部を魚が探知できず、滞留してしまうケース⁶⁾が報告されているなど、多くの課題を持ち合わせている。しかし、既設魚道の幾何学形状を変更することは、コスト面からも望まれない。一方で、多くの階段式魚道はコンクリートで施工され、表面に塗装が施されることはほとんどない。魚の忌避色あるいは選好色を魚道内に塗装することで遡上率が向上するのであれば、安価な既設魚道の改良が可能である。

一般に魚は直接網膜で感受する透過光と、光が壁面などに反射して網膜で感受する反射光とで反応が異なる⁹⁾。網膜視細胞には明条件で色彩情報を感受する錐体および暗条件で明暗情報を感受する桿体がある。Tomita *et al.*⁷⁾は金魚(*Carassius auratus auratus*)やコイ(*Cyprinus carpio*)に

は赤色、青色および緑色を感じる3つの錐体が存在することを発見した。Hanyu *et al.*⁸⁾は金魚やニジマス(*Oncorhynchus mykiss*)には上記の3つの錐体に加え、紫外線を感じる錐体を有することを確認した。その後、ギギ(*Pelteobagrus nudiceps*)⁹⁾、アユ¹⁰⁾にも上記の4つの錐体があることが解明された。現在では、多くの魚は人間が識別可能な赤色、青色、緑色だけでなく、紫外線も認知可能と推測されている¹¹⁾。ただし、同色の光でも魚種によって反応が異なる¹²⁾¹⁵⁾。そのため、魚の忌避色あるいは選好色を利用した魚道の遡上率向上法については、魚種別に検討せざるを得ない。ここでは、我が国で魚道における対象魚となることが多いアユに着目する。

関谷ら¹⁶⁾は開水路底面を水路中央で白色と黒色の領域に分割してアユの遊泳挙動を観察した。その結果、アユが白色の領域を避けることを解明した。関谷ら⁵⁾および下村ら¹⁷⁾は、白色、赤色のテープを開水路中に設置してアユの遊泳挙動を観察し、ほとんどのアユがテープを避けて遊泳することを発見した。篠邊¹⁸⁾はアユが赤色の光を忌避することを示した。鬼東ら¹⁹⁾はアユが階段式魚道内において赤色の側壁を忌避し、塗装面から離れて遊泳することを示した。

以上のようにアユは赤色を嫌うという報告が存在するが、アユの選好色についてはあまり解明されていない。これは、これまで壁面を用いた魚の行動制御法が、主と

して迷入防止策であったからである。小山²⁰⁾によって、稚アユが赤色に強い反応を示すが、黄緑色にはあまり反応しないことが解明された。ただし、アユの幼魚の選好色についてはほとんど解明されていない上、魚道に応用した例はまだ少ないと考えられる。

本研究では、右岸側に片側切欠きを有する階段式魚道において、プール内の下流および左岸の壁面、あるいは上流および右岸の壁面にそれぞれ、青色、紫色、赤色、黄色を塗装し、アユの遡上特性への影響を検討した。

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 $L=0.9\text{m}$ 、プール水深 $h=0.3\text{m}$ 、プール幅 $B=0.8\text{m}$ 、隔壁厚 $\Delta x=0.2\text{m}$ 、落差 $\Delta y=0.1\text{m}$ 、切欠き幅 $\Delta z=0.2\text{m}$ のプールを3つ連結した。この緒元は、小規模河川に設置される魚道と同スケールである¹⁾。プール左岸は亚克力製で、それ以外はMunsell表示でN4.5に相当するグレーに塗装された木製である。Munsell表示とは色を色相、明度、彩度の順に表示する方法であり、N4.5は色相がNで明度が4.5で彩度が0であることを示す。プールの壁面は上流(Upstream)、下流(Downstream)、左岸(Left bank)、右岸(Right bank)の4つ存在する。鬼束ら¹⁹⁾は右岸側に片側切欠きを有する階段式魚道において、赤色をプール内の下流壁面および切欠きのある壁面の対岸に塗装すると、アユが両壁面を忌避し、その結果、切欠きに接近するために遡上率が向上することを解明した。そのため、下流と左岸の壁面(DL: Downstream and Left bank sidewall)に忌避色あるいは、上流と右岸の壁面(UR: Upstream and Right bank sidewall)に選好色を塗装すれば遡上率の向上が望まれる。

表-1に実験条件を示す。塗装色にはアユの忌避色¹⁹⁾の赤色(Munsell表示で5R4/14)、およびそれに伴い色相が均等に変化するよう青色(4B4/8)、紫色(2P2/8)、黄色(8Y8/14)の4色を採用した。下流と左岸(DL)および上流と右岸(UR)の2組の各壁面の $y/h=0\sim 0.2$ の範囲をそれぞれ上記の4色で塗装し、合計8ケースの実験を行った。図-2(a)に下流と左岸(DL)、図-2(b)に上流と右岸(UR)を赤色で塗装した例をそれぞれ示す。全ケースにおいて、切欠きの越流流速が体長倍流速で10l/s(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番目のプールに平均体長 $\bar{L}_t=80.0\pm 1.1\text{mm}$ (平均±標準誤差)のアユを $N=30$ 個体放流し、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(1秒間で30コマ撮影)で20分間の撮影を行なった。実験には各ケースにつき新しい30個体を使用した。撮影後、アユの遊泳位置を10秒ごとに解析すると共に、遡上数をカウントした。

x , y , z 軸方向にそれぞれ7点のメッシュで構成される

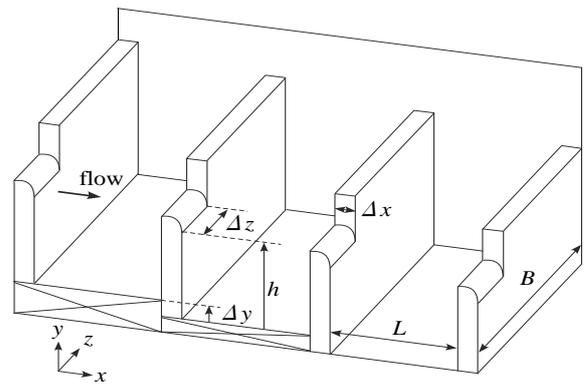


図-1 階段式魚道の概略図

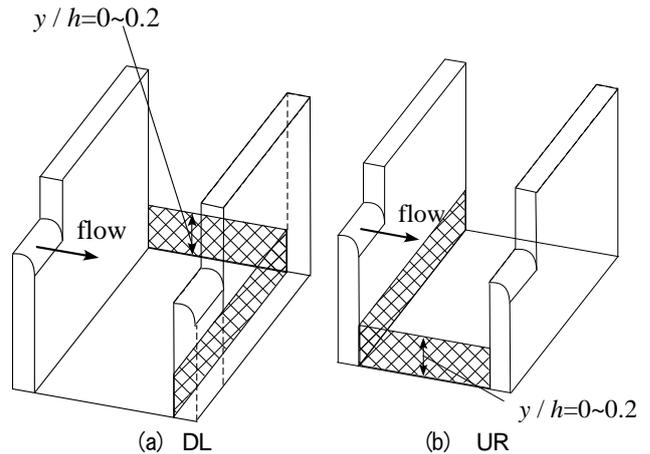


図-2 塗装箇所

表-1 実験条件表

case name	color	hue	value	chroma	Munsell indication	
Bu	DL-Bu	blue	B	4	8	B4/8
	UR-Bu					
Pu	DL-Pu	purple	P	2	8	P2/8
	UR-Pu					
Rd	DL-Rd	red	R	5	14	R5/14
	UR-Rd					
Ye	DL-Ye	yellow	Y	8	14	Y8/14
	UR-Ye					

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0.05秒間隔で25.6秒計測した。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 $V_v = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ 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) 塗装色、塗装位置とアユの遡上率との関係
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。青色(Bu)、紫色(Pu)の両ケースにおいては、DL(下流と左岸)、UR(上流と右岸)の遡上率に大きな差異はない。これは、青色(Bu)および紫色(Pu)の両者をアユが忌避も選好もし

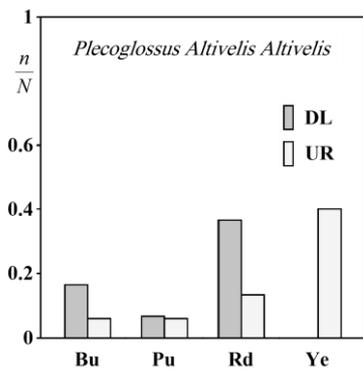
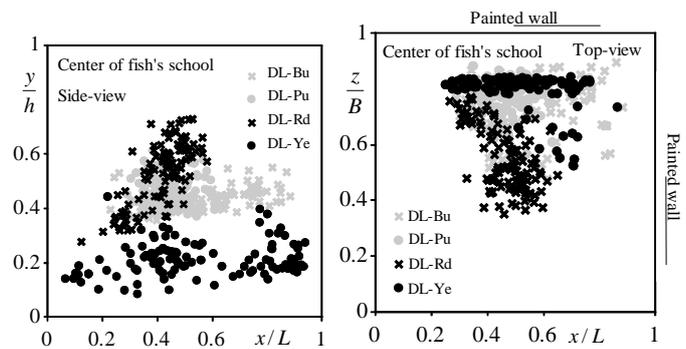


図-3 アユの遡上率



(a) 鉛直断面 (b) 水平断面

図-6 アユの瞬間魚群重心(DL)

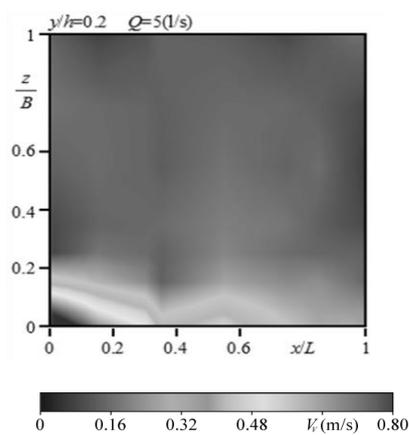


図-4 $y/h=0.2$ における流速コンター図

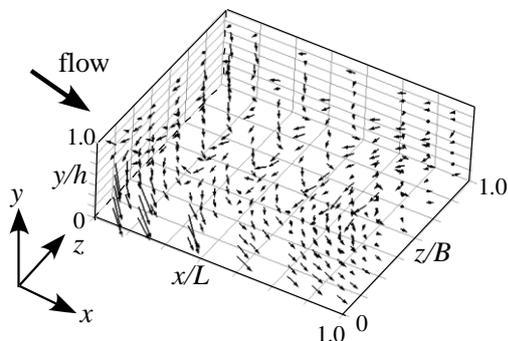
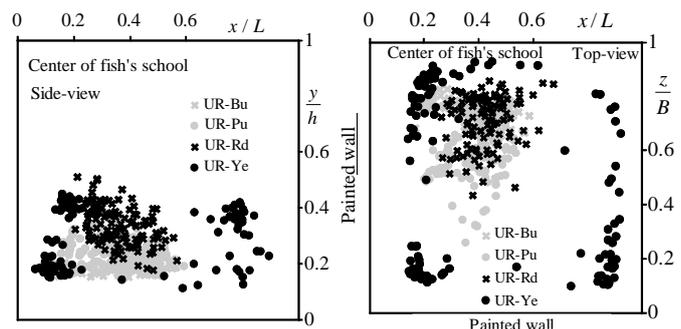


図-5 三次元流速ベクトル図

ないことを示唆する。赤色(Rd)の遡上数は、DL(下流と左岸)の方がUR(上流と右岸)よりも顕著に高くなっている。一方、黄色(Ye)の遡上率は、DL(下流と左岸)ではゼロに対して、UR(上流と右岸)で高い値を示している。従って、図-3より塗装色と塗装位置を変化させることによって、遡上率が変化することが解明された。

(2) プール内流速とアユの定位場所

図-4に水平断面($y/h=0.2$)における、流速コンターを示す。切欠き($z/B=0\sim 0.2$)のある右岸付近の上流領域は、0.5m/s以上の高速流域を形成しているが、左岸付近は比較的低速である。また、図-5にプール内の三次元流速ベクトル図を示す。右岸上流側の切欠き付近では落下流が



(a) 鉛直断面 (b) 水平断面

図-7 アユの瞬間魚群重心(UR)

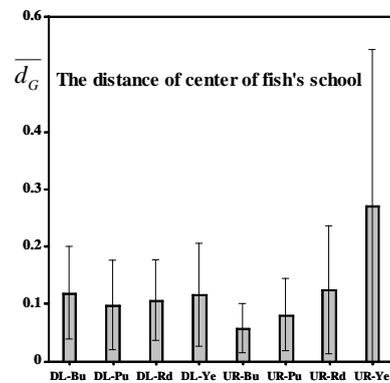
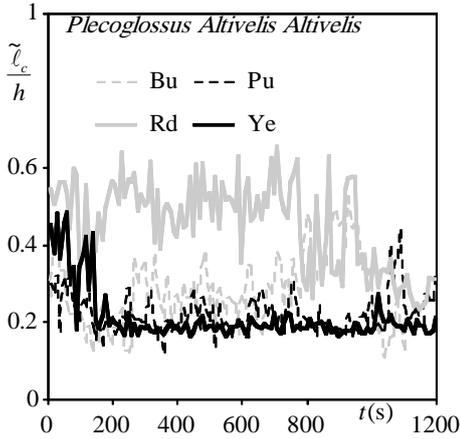


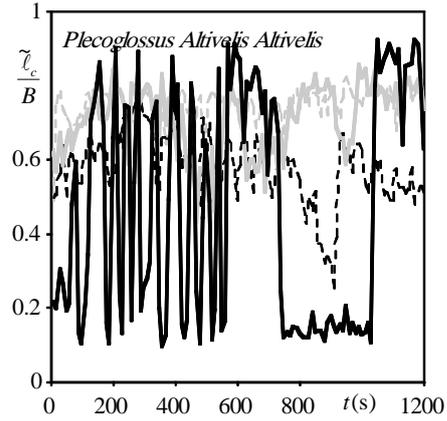
図-8 アユの魚群重心の平均移動距離とその標準偏差

形成されていることが確認できる。図-6(a), (b)に各色を下流と左岸に塗装した場合(DL)および、図-7(a), (b)に上流と右岸に塗装した場合(UR)における鉛直および水平断面内のアユの瞬間魚群重心を示す。

図-6(a)に着目すると、下流と左岸に黄色を塗装したDL-Yeは、他の3ケースに比べて塗装面($y/h=0\sim 0.2$)付近を遊泳している頻度が高いことが分かる。一方、図-6(b)において、下流と左岸に赤色を塗装したDL-Rdは他の3ケースよりも比較的魚群重心が壁面から離れている。また、下流と左岸に黄色を塗装したDL-Yeでは、黄色で塗装した壁面付近にプロットが集中している。このことからアユが黄色(Ye)の壁面付近を好んで遊泳していると推



(a) 左岸塗装面までの瞬間距離(DL:下流と左岸)



(b) 右岸塗装面までの瞬間距離UR(上流と右岸)

図-9 アユの魚群重心から塗装面までの瞬間距離

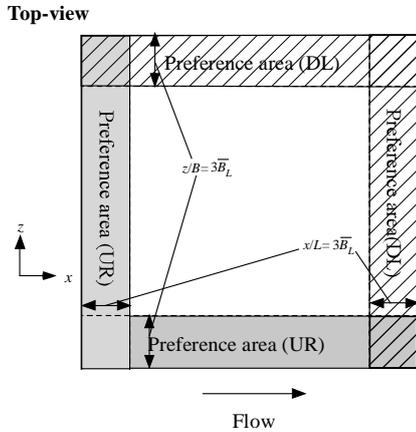


図-10 選好領域の定義

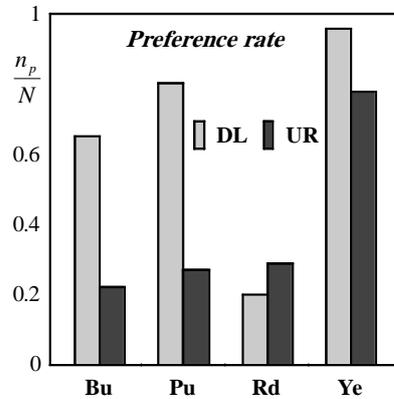


図-11 選好領域におけるアユの存在率

察される。図-7(a)に着目すると、全ケースにおいて類似の高さで遊泳しているが、図-6(a)と比較すると、青色(Bu)、紫色(Pu)、赤色(Rd)の3ケースは底面付近を遊泳していることがわかる。一方、図-7(b)において青色(Bu)、紫色(Pu)、赤色(Rd)では顕著な変化は観察されないが、黄色(Ye)では魚群重心位置がプールの外周のすぐ内側に点在している。以上より塗装箇所を変更することでアユの遊泳位置は鉛直および水平方向に変化し、それは赤色(Rd)、黄色(Ye)塗装の際により顕著であることが確認できる。

図-8に10秒ごとのアユの魚群重心の平均移動距離 \bar{d}_G をケース別に示す。下流と左岸の壁面に黄色を塗装したDL-Yeは、他の7ケースと比較して、10秒ごとの平均移動距離が約2倍になっている。本ケースでは、プール上部から見て反時計回りにアユの魚群が循環する様子が観察された。これは、アユが黄色に塗装した領域を選好するため切欠き付近に接近するが、落下流に流されて下流側隔壁に移動し、再び、壁面に沿って切欠き付近に接近するといった行動を繰り返すことを示している。

(3) アユの魚群重心と塗装面との距離

図-9(a)にDL(下流と左岸)における10秒ごとのアユの魚群重心から左岸塗装面までの瞬間距離 \tilde{l}_c 、また図-9(b)にUR(上流と右岸)における10秒ごとのアユの魚群重心から右岸塗装面までの瞬間距離 \tilde{l}_c を、それぞれプール幅 B で除した値 (\tilde{l}_c/B) の時間変化をケース別に示す。図-9(a)において、赤色(Rd)は実験時間の半分以上を塗装面からプール幅の半値以上遠ざかっているが、他の3ケース、特に黄色(Ye)は、実験時間の80%以上を $\tilde{l}_c/B=0.2$ 付近で遊泳している。一方、図-9(b)に着目すると、青色(Bu)、紫色(Pu)、赤色(Rd)の3ケースでは、概ね \tilde{l}_c/B は0.5~0.8の間で増減しているのに対し、黄色(Ye)では \tilde{l}_c/B の値が0.1~0.8の間で急激な増減を繰り返している。これは、アユが黄色(Ye)の壁面を選好して接近するものの、落下流に流される状況が繰り返されたために生じたものである。

観察の結果、黄色(Ye)に塗装された壁面付近をアユは選好して遊泳することが判明した。そこで、図-10のように、塗装面から体長倍で3の範囲内を遊泳している場合、塗装色を選好していると見なし、選好領域と定義した。

図-11に選好領域の存在率 (n_p/N) を示す。アユが選好も

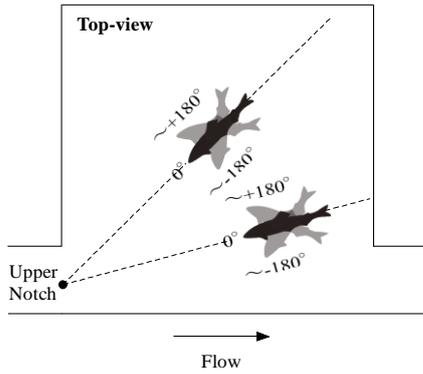


図-12 魚向の定義

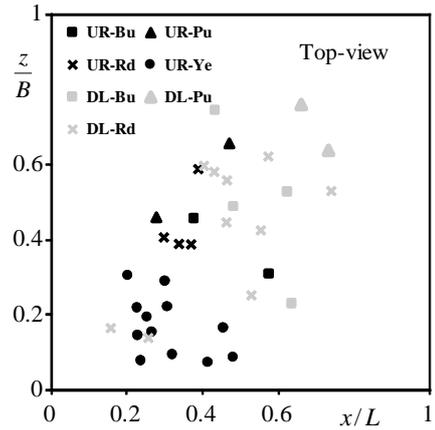
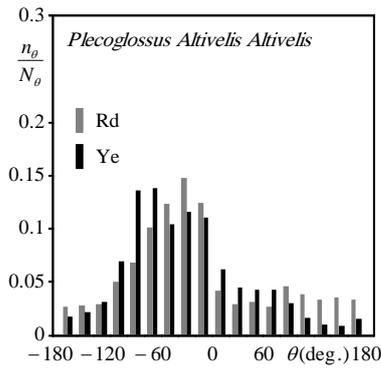
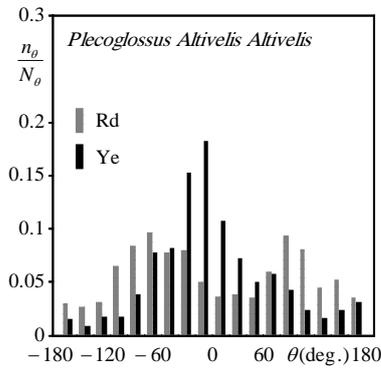


図-14 アユの遡上開始地点



(a) DL(下流と左岸)



(b) UR(上流と右岸)

図-13 アユの魚向頻度

忌避もしなかった青色(Bu), 紫色(Pu)では, UR(上流と右岸)よりもDL(下流と左岸)における存在率が高くなっている。これは, プール内の流速が一樣ではないため, アユが休憩しやすい低流速の領域を選択したために生じた差異と考えられる。一方, 黄色(Ye)の場合, DL(下流と左岸), UR(上流と右岸)ともに選好領域の存在率(n_p/N)が最も高くなっており, 赤色(Rd)の場合では低くなっている。図-6, 図-7の瞬間魚群重心位置を観察しても, アユは黄色(Ye)の場合は塗装面付近を遊泳し, 赤色(Rd)の場合は塗装面から離れたプール中心部を遊泳する様子が確認できる。

(4) アユの魚向と遡上率の関係

アユには正の向流性があるため, 上流側切欠きからの流れを探知すれば, 遡上率は増加すると考えられる。図-12にアユの魚向の定義図を示す。任意のアユの遊泳位置から上流側切欠きの中心地点($x/L=0, z/B=0.125$)をアユが向いている場合を 0° とした。すでに, アユの忌避色が赤色(Rd)で, 選好色が黄色(Ye)であることが示唆されている。そこで, 図-13(a), (b)にDL(下流と左岸)およびUR(上流と右岸)を赤色(Rd)および黄色(Ye)で塗装をした場合におけるアユの魚向頻度 n_θ / N_θ をそれぞれ示す。遡上方向である上流側切欠き方向の 0° 付近にピークを有しているのは, 図-13(a)では赤色(Rd)であるが, 図-13(b)では黄色(Ye)である。したがって, DL(下流と左岸)に赤色を塗装した場合, およびUR(上流と右岸)に黄色を塗装した場合にアユは上流側切欠き方向を向きやすくなる。これらのケースは, それぞれの塗装色で最も遡上率が高かったケースと一致する。

遡上に成功した個体の5秒前における遊泳地点を遡上開始地点とし, 図-14にその地点をケース別に示す。最も高い遡上率を得たUR-Yeは, 多くの個体が上流側切欠き付近のまとまった箇所から遡上を開始している。本ケースでは図-7(b)に示すようにアユが黄色を選好し, 高速流域にも関わらず上流側切欠き付近にも定位していた。そのため, 切欠きからの落下流を認識しやすくなり, まとまった箇所から遡上を開始したと考えられる。一方で次に高い遡上率を得たDL-Rdを見ると, UR-Yeと比較してまとまった箇所から遡上を開始していない。これはアユが赤色を忌避してプール中心部の比較的広い領域で遊泳し, その領域から遡上を開始したためと考えられる。

4. おわりに

本研究では, プールの下流と左岸の壁面および上流と右岸の壁面をそれぞれ赤色, 青色, 黄色, 紫色で塗装し, 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方法を探求したものである。本研究より

得られた知見は以下の通りであり，小規模河川に設置される魚道に対して有用な知見であると考えられる。

- (1) アユは赤色塗装を忌避し，黄色塗装を選好することが判明した。
- (2) 片側切欠き付階段式魚道において，少なくとも，上流および切欠き側の壁面に黄色で塗装すると，アユは黄色を選好するため遊泳位置が切欠き付近に移動すると，落下流を認識しやすくなり，遡上率が向上することが解明された。
- (3) 既設の階段式魚道において，少なくとも上流からの落下流付近の壁面を黄色で塗装することで遡上率の向上が期待できる。

なお実際の魚道に適用する際は，塗装した壁面に藻類の付着等による変色を防ぐため，塗装後に防水加工を施したり，定期的に藻類を除去する等の対策が必要である。

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：鬼東幸樹)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) FAO/DVWK: *Fish Passes*, Design, FAO, Roma, 2002.
- 3) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 4) 近藤正美，増成伸文：簡易な手法による魚道改善の試み，岡山県農林水産総合センター水産研究所資料，2013。
- 5) 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。
- 6) 玉井信行，水野信彦，中村俊六：河川生態環境工学，東京大学出版会，1993。
- 7) 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.
- 8) Hanyu, I., Niwa, H. and Tabata, M.: A slow potential from the epiphysis cerebri of fishes, *Vision Research*, Vol.9, pp.621-623, 1969.
- 9) Meissl, H. and Ekstrom, P.: Dark and light adaptation of pineal

photoreceptors, *Vision Research*, Vol.28, pp.49-56, 1988.

- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) Cheng, C.L. and Flammarie, I.N.: Opsin expression: New mechanism for modulating colour vision, *Nature*, Vol.428, pp.279, 2004.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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。
- 17) 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。
- 18) 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。
- 19) 鬼東幸樹，秋山壽一郎，宍戸陽，有須田朋子，高松周平：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，水工学論文集，第59巻，I_1087-1092, 2015。
- 20) 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。

(2016. 3. 22受付)

INFLUENCE OF WALL COLOR ON MIGRATION CHARACTERISTIC OF *PLECOGLOSSUS ALTIVELIS ALTIVELIS*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA and Shuhei TAKAMATSU

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. It has been found that *ayu (Plecoglossus Altivelis Altivelis)*'s evasion color is red, however, preference color has been unknown. In this study, it have been tried to improve migration rate of *ayu* with the color of sidewall were changed. It was found that most preference color was yellow for *ayu*. It was found that the migration rate increases by painting upstream sidewall and right bank sidewall in yellow. It's because *ayu* prefer painted upstream sidewall and right bank sidewall in yellow, and center of fish's school is located nearby upstream notch.