

階段式魚道の壁面色が魚の遡上に及ぼす影響

EFFECT OF POOL WALL COLOR IN POOL-AND-WEIR FISHWAY ON CHARACTERISTICS OF TWO KINDS OF FISH SPECIES MIGRATION

鬼東幸樹¹・秋山壽一郎²・渡邊拓也³

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA and Takuya WATANABE

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正会員 柿木設計 (〒812-0014 福岡市博多区比恵町1-18)

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 wall is gray. On the other hand, it is pointed out that the fish behavior is affected by the wall color. Munsell found that color consists of hue, value and chroma. Unfortunately, the effect of wall color in the fishway on the fish behavior has not been investigated. In this study, the color of the channel bed and side-wall are changed systematically on the basis of Munsell color system, and recording of fish behavior was conducted with a digital video camera. As a result, it was found that the fish behavior is not influenced by hue and chroma, but influenced by value. Further, the wall color of pool-and-weir fishway was changed systematically and observation of fish behavior was conducted. It was found that the migration rate increases with an increase of value of color so that the migration rate takes maximum when the wall color is black.

Key Words : pool-and-weir fishway, color, fish migration, hue, value, chroma

1. はじめに

治水および利水を目的として床固め、堰およびダムなどの河川横断施設が設置されてきた。こうした河川横断構造物は河川に生息する魚類の遡上および降下の障害となる。この対策として河川横断構造物によって発生する水位落差を分割し、魚類の遡上および降下の助けとなる魚道が設置されてきた。魚道の形式は、階段式、バーチカルスロット式、潜孔式、デニール式および粗石付き斜曲面式など様々なものが提案されているが、我が国の既設魚道の90%以上は階段式である。デニール式はスチールを用いて作成されるため、表面に塗装が施される。一方、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。

一般に魚は透過光と反射光に対する反応が異なる¹⁾。魚道内において透過光をコントロールするには、照明を設置するなどの大がかりな付加工事が必要になり経済的ではない。一方、反射光をコントロールするには魚道内の色を変更するだけでよい。魚道内の壁面を塗装するだけで魚の遡上および降下欲が沸くのであれば、既設魚道の改良を極めて安価に行うことができる。

反射光に対する魚の反応に関する研究は、1960年代から本格的に始められた。Muntz & Cronly-Dillon²⁾は金魚が緑と青および緑と赤を識別できることを証明した。Tomita *et al.*³⁾は金魚やコイには青、緑および赤に最大感度を持つ3つの錐体が存在することを解明した。Hanyu *et al.*⁴⁾は金魚やニジマスには上記の3つの錐体に加え、紫外線(305nm)に最大感度をもつ錐体が存在することを示した。その後、アユおよびギギにも色識別する能力があることがEkstrom & Meissl⁵⁾、やMeissl & Ekstrom⁶⁾によって明らかにされた。現在では、一般論として魚は人が識別可能な波長に加え、紫外線も識別可能といわれている。

魚の反射光に対する行動特性に関する研究も行われた。小山⁷⁾は、稚アユが赤には高い反応を示し、黄緑色にはほとんど反応しないことを示した。篠邊⁸⁾は波長が600～620nmの色がアユの忌避色であることを示した。これらの結果に基づき、落ちアユが取水堰の取水口を忌避することを期待して取水口に赤い塗装を施すことがあるが⁹⁾、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%で効果を感じていない例は75%にも達する¹²⁾。近年、下村ら¹³⁾および関谷ら^{14,15)}は、白色、赤色およびレンズ模様のテープを水路中に設置してアユの忌

避行動を観察し、90%以上のアユがこれらの色のテープから忌避することを明らかにした。また、関谷ら¹⁴⁾は白色と黒色とが隣接した底面をもつ水路では、アユは白色の領域を避けることを解明した。ただし、白色の領域を避ける理由は解明していない。

色は3つの属性、すなわち、色相(hue)、明度(value)および彩度(chroma)によって構成され、マンセル色立体で表示すると図-1のようである¹⁶⁾。既往の研究では、色を波長という1つの属性だけで表現しているため、色に対する魚類の行動特性は幾分解明されているものの、なぜその色に対して反応するのかが不明であった。

本研究では開水路内の色を系統的に変化させて魚の反応特性を観察し、色相、明度および彩度のいずれが魚の行動特性に影響を及ぼすのかを検討した。続いて、魚道内の壁面の色を変化させて魚の遡上に及ぼす影響を観察し、遡上に適した魚道内の色を提案した。

2. 開水路の壁面色が魚の残存率に及ぼす影響

(1) 実験装置および実験条件

マンセル表色系では色相は定量値を持っていないが、明度および彩度はそれぞれ0~10および0~14の定量値を有する。本実験では色相、明度および彩度が均等に变化するように、図-2および3に示した白(white)、黄(yellow)、灰(gray)、赤(red)、青(blue)、緑(green)、茶(brown)、紫(purple)および黒(black)の9色を選んだ。マンセル表色系で定義される名称を表-1に示す。例えば、白を意味するN9.5/0は色相がN、明度が9.5、彩度が0を意味する。

実験魚には北九州市を貫流する2級河川の板櫃川で採取した60匹のオイカワ(*Zacco platypus*)および60匹のカワムツ(*Zacco temminckii*)の成魚を用いた。図-4にオイカワおよびカワムツの体長 B_L のヒストグラムを示す。平均体長 \bar{B}_L はそれぞれ約6.6cm、6.1cmであった。

実験には長さ0.9m、水路幅 $B=0.4m$ 、高さ0.3mの長方形断面水路を用いた。底面および側壁の色を、水路中央線を挟んでそれぞれ異なる色で塗装した。色の組み合わせは表-1に示した9色とし、合計36($=9C_2$)ケースとなった。水理条件としては、水深を0.2m、断面平均流速を5.5cm/sとした。フルード数およびレイノルズ数はそれぞれ0.04および6200であった。また、流下方向に x 、水路幅方向に z 軸をとる。

流水状態でランダムに選んだオイカワおよびカワムツを水路中央付近にそれぞれ20匹放流し、真上から1分間のビデオ撮影を行った。撮影後、魚の軌跡を解析すると共に、右岸および左岸領域で定位している魚数を数えた。

(2) 実験結果および考察

a) 魚の軌跡

図-5に右岸側が黒(black)、左岸側が白(white)の場合の

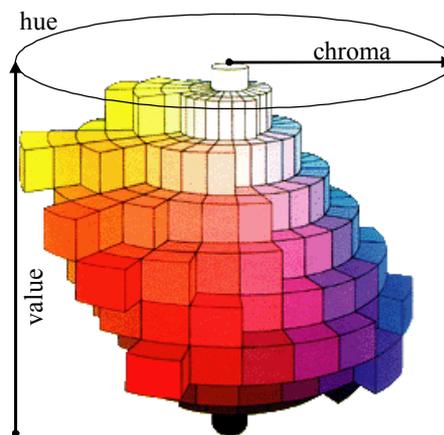


図-1 マンセル色立体

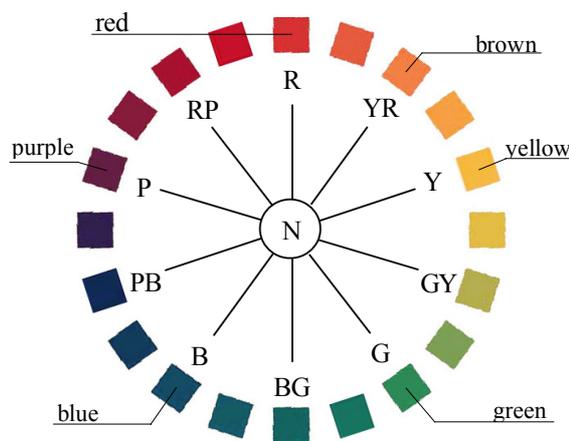


図-2 マンセル色相環

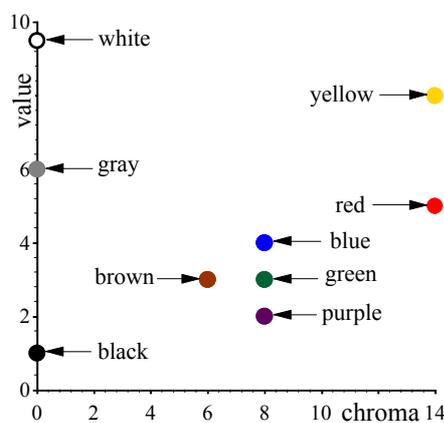


図-3 色の明度および彩度

表-1 実験条件

color	hue	value	chroma	Munsell indication
white	N	9.5	0	N9.5/0
yellow	Y	8	14	Y8/14
gray	N	6	0	N6/0
red	R	5	14	R5/14
blue	B	4	8	B4/8
green	G	3	8	G3/8
brown	YR	3	6	YR3/6
purple	P	2	8	P2/8
black	N	1	0	N1/0

オイカワおよびカワムツの遊泳軌跡の例を示す。図中の矢印は1sごとに示されている。魚種に関わらず黒領域から白領域に接近あるいは越境した直後に黒領域に逆戻りしている様子が観察される。このような傾向は魚種のみならず、体長が変化しても同様であった。

瞬間残存率を次式のように定義する。

$$\text{瞬間残存率} = \frac{\text{対象色の領域内を遊泳している魚数 } n}{\text{水路に入れた魚数 } N} \quad (1)$$

図-6に右岸側が黒、左岸側が白の場合の、黒の瞬間残存率の時間変化を示す。ここに、 t は魚を放流してから経過時間である。放流後、5s程度経過すると、黒の領域に定位していることがわかる。他の色の組み合わせについても同様な結果であった。そこで、放流後10~60sの瞬間残存率の平均値を残存率と定義する。

b) 開水路の壁面色と残存率の関係

図-7に彩度と残存率の関係を、図-8に色相と残存率の関係を、図-9に明度と残存率の関係を示す。彩度の増加に伴う残存率の系統的変化は観察されない。また、色相についても、円周方向に値が変化しているものの、系統的な変化が観察されない。すなわち、Rで大きな残存率が観察されるものの、補色となるBとGの間でも大きな値を示している。仮に、残存率が色相の影響を受けるのであれば、その補色の残存率は逆傾向を示すはずである。一方、図-9に着目すると、明度が低いと残存率は高く、明度が高いと残存率は低いことが明確に読み取れる。これは明度が低いほど、その場所に定位する傾向を示している。したがって、色相において観察された残存率のランダムな変化は明度によって生じたものと判断される。なお、関谷ら¹⁴⁾は白色と黒色とが隣接した底面をもつ水路では、アユは白色の領域を避けることを指摘したが、この原因は明度にあったものと推定される。以上のように、魚の忌避欲に対しては、開水路壁面の色相および彩度よりも明度が支配的であることが解明された。

3. 魚道内の壁面色が魚の遡上率に及ぼす影響

(1) 実験装置および実験条件

階段式魚道において魚の遡上に影響を与える諸量として、水位落差、粗度の有無、隔壁の形状および切り欠き位置などが挙げられる⁹⁾。本実験では片側切り欠き¹⁷⁾を採用し、切り欠きの形状は傾斜角 60° のR型とし¹⁸⁾、切り欠き率(=切り欠き幅/プール幅)は国土交通省¹⁹⁾が推奨する0.17~0.2の範囲内にある0.2を採用した。そのため、プール長 $L=0.48\text{m}$ 、プール幅 0.4m 、プール高 $h=0.4\text{m}$ の亚克力製プールを5つ連結させた平均傾斜角度が1/12の片側切り欠き付き階段式魚道を実験に用いた。各プール間落差は 0.05m で、切り欠き幅 B_n は 0.08m とし、流量を 1.6 l/s とした。

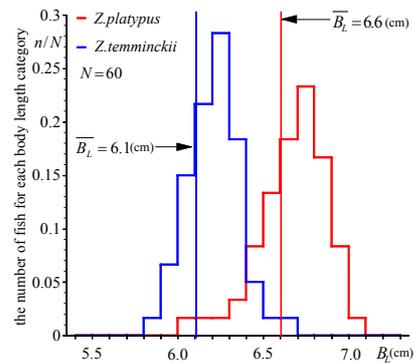


図-4 オイカワおよびカワムツの体長ヒストグラム

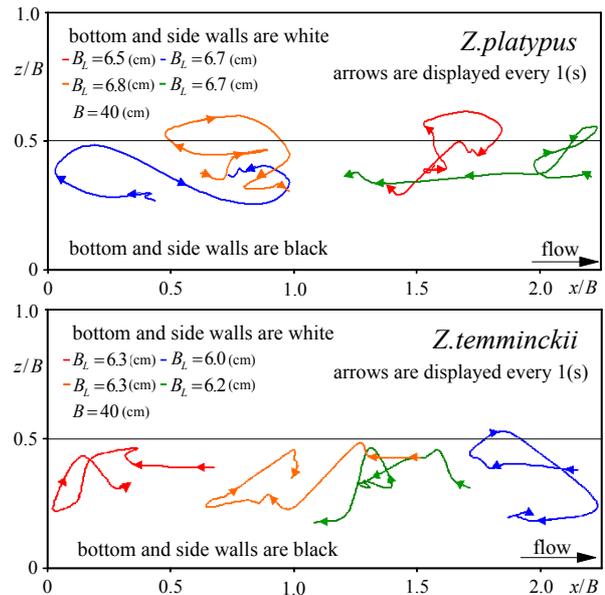


図-5 オイカワおよびカワムツの遊泳軌跡例

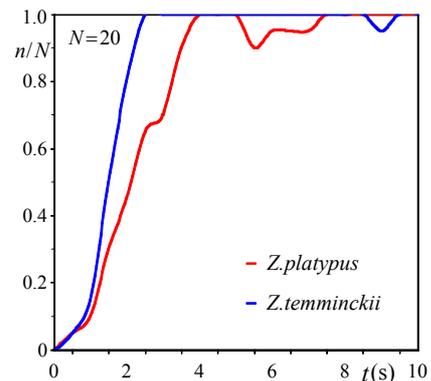


図-6 黒の瞬間残存率の時間変化

魚道内の全ての壁面を表-1に示した9色でそれぞれ塗装し、実験開始時に2. で述べたオイカワおよびカワムツをそれぞれ20匹、上流から3番目のプールに放流し、1段でも遡上した魚をプール内から取り出し計数した。1回の実験時間は20分間である。なお、桜井ら²⁰⁾は100尾程度の実験を行えば信頼に足るデータとなると述べているため、同様の実験をそれぞれ5回(20匹×5回)行い、合

計90(20匹×5回×9色×2魚種)ケースの実験を行った。

(2) 実験結果および考察

図-10に魚道の壁面色をそれぞれ9色にした場合のオイカワおよびカワムツの遡上率を示す。横軸の左から右に向かって明度が高くなっている。オイカワおよびカワムツの両者とも、黒(black)で最大遡上率を示しており、その値はそれぞれ62%および36%である。一方、最小遡上率は両者とも白(white)で12%である。オイカワおよびカワムツ共に、明度が低くなると遡上率が増加するという傾向が確認できる。既記した2.で行った実験において、魚は明度が高い色の領域を避け、明度が低い色の領域を選好して集まるといった結果を得た。よって、本実験結果の要因を次のように推測できる。一般に、多くの魚は水面から差し込む透過光が低照度の領域を好む^{1)9),11)}。本研究では透過光の照度は一定で反射光の色を変化させているが、類似の結果となった。すなわち、明度が高い色の領域では魚の周囲に対する警戒心が強くなるのに対し、明度が低い色の領域では警戒心が弱くなり、周囲に気を取られずに遡上を行えるため、遡上率は増加すると考えられる。

4. 魚道内の壁面および底面色が魚の遡上率に及ぼす影響

(1) 実験条件および実験方法

3. より階段式魚道におけるプール内の反射光の色が魚の遡上特性に及ぼす影響を検討した結果、オイカワおよびカワムツ共に明度が低くなると遡上率が増加する傾向を得た。一般にほとんどの魚類の目は頭部の両側にあり、目の中央部のものが比較的良好に見える¹⁾⁹⁾。今回実験魚に選んだオイカワおよびカワムツも例外ではない。そのため、遡上率が最大および最小であった黒(black)および白(white)の2色を用いて、側壁色と底面色のどちらが遡上を誘発しているのかを実験に基づき検討した。

本実験は3.において遡上率が最大および最小であった黒(black)および白(white)の2色のみを用い、表-2に示す4通りの色の組み合わせを行った。すなわち、プールを構成する底面、前方、後方、左岸および右岸のプール壁面の5面のうち、プール底面のみを黒、底面以外の前方、後方、左岸および右岸のプール壁面の4面を白で塗装したケース(以下、黒底面と呼称)、および、この逆の色の組み合わせのケース(白底面)を選んだ。さらに、魚の遡上および降下経路となる切り欠きに接している側壁のみを黒、その他の壁面4面を白に塗装したケース(黒側面)、および、この逆の色の組み合わせのケース(白側面)を選んだ。なお、表-2に示すcase1, case2, case3およびcase4は、それぞれ黒底面、黒側面、白底面および白側面を示している。

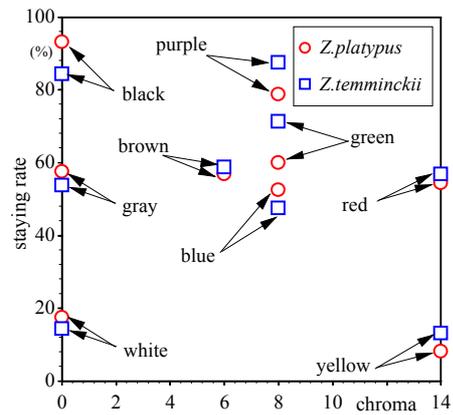


図-7 彩度に対するオイカワおよびカワムツの残存率

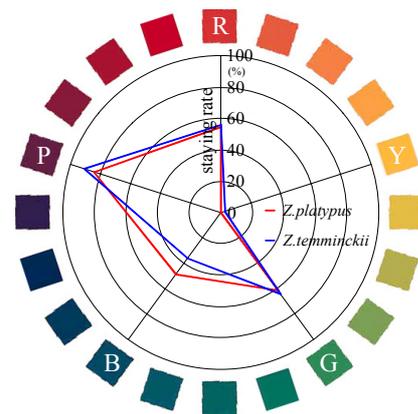


図-8 色相に対するオイカワおよびカワムツの残存率

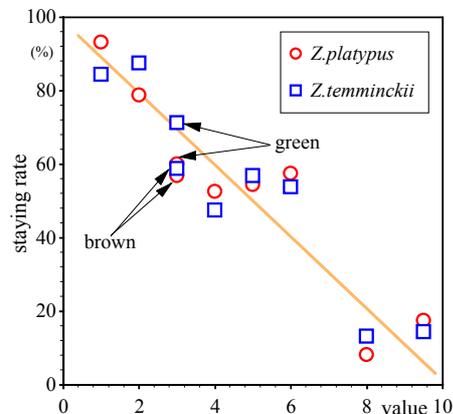


図-9 明度に対するオイカワおよびカワムツの残存率

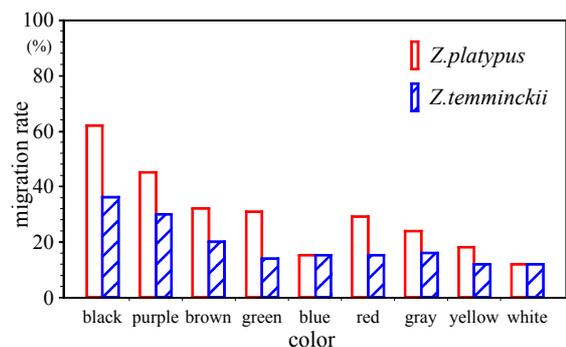


図-10 魚道の壁面色をそれぞれ9色にした場合の遡上率

表-2 色の組み合わせ

case name	bottom	side	others
case1	black	white	white
case2	white	black	white
case3	white	black	black
case4	black	white	black

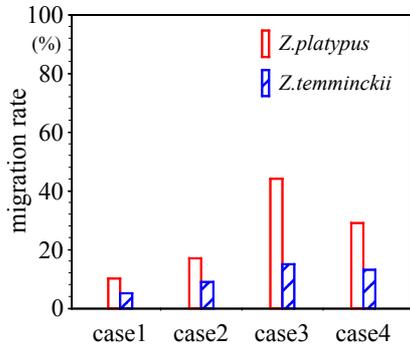


図-11 4ケースの遡上率

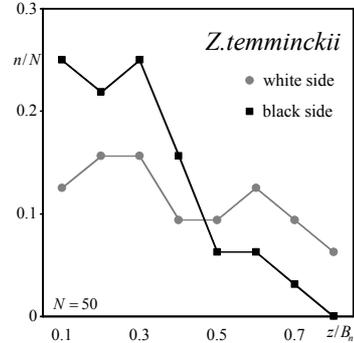
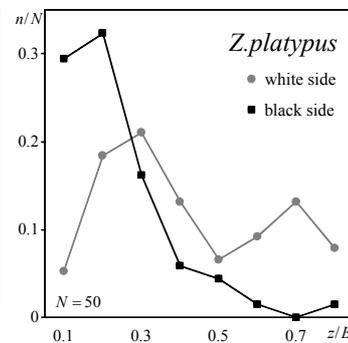


図-12 オイカワおよびカワムツの切り欠き通過位置

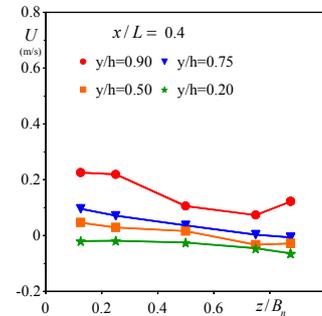
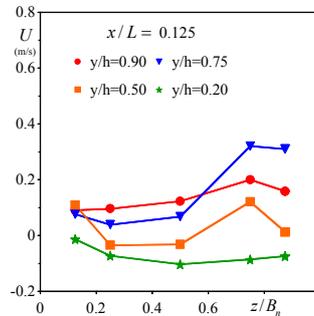
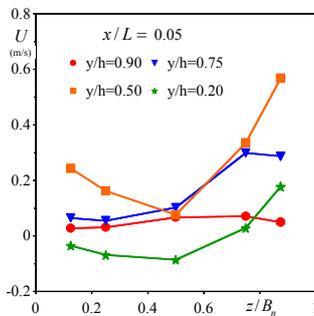


図-13 隔壁からプールに落下している落下点付近における横断方向流速分布の鉛直方向変化

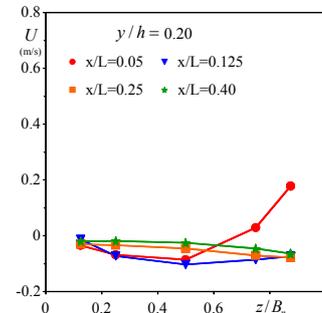
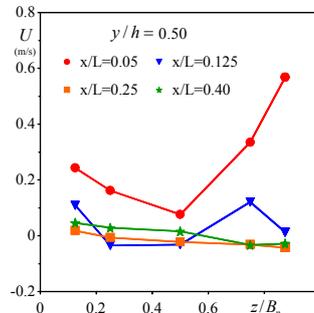
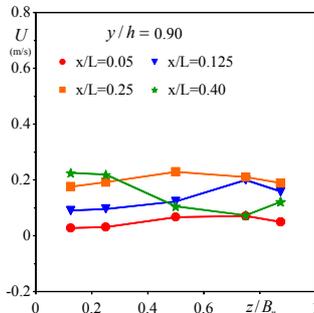


図-14 隔壁からプールに落下している落下点付近における横断方向流速分布の流下方向変化

オイカワおよびカワムツを各100匹用いた3.と同様な実験を行い遡上率を求めた。さらに次のような計測を追加した。オイカワおよびカワムツ20匹を上流から4番目のプールに放流すると同時に、4番目から3番目への遡上経路となる切り欠き部分における魚の軌跡を水路上方からビデオカメラで20分間撮影した。また、データの信頼性を向上させるために、遡上数が50を超えるまで撮影を繰り返し行った。撮影終了後、オイカワおよびカワムツの遡上時における切り欠き部分の通過位置をコマ送りによって解析した。さらに、3次元電磁流速計を用いて流下方向 x 、鉛直上向き y 、横断方向 z にそれぞれ4点、4点、5点のメッシュをとった合計80点において、流速3

成分を0.05s間隔で51.2s計測した。なお、流速測定時にはプール内には魚を入れていない。 x 、 y 、 z 方向の時間平均流速をそれぞれ U 、 V 、 W とする。

(2) 実験結果および考察

図-11に4ケースのオイカワおよびカワムツの遡上率を示す。オイカワおよびカワムツ共に黒底面(case1)・黒側面(case2)の遡上率は白底面(case3)・白側面(case4)と比較すると、やや低い傾向にある。これは、表-2で示したように黒底面・黒側面はプールを構成する5面のうち4面は白であるため、白の影響を受けていると推定される。白底面・白側面についてはこの逆である。また、同図より

黒底面(case1)と黒側面(case2)の遡上率を比較するとオイカワおよびカワムツ共に黒側面の遡上率が高く、白底面(case3)と白側面(case4)の遡上率を比較するとオイカワおよびカワムツ共に白側面の遡上率が低い。この結果は、魚道プール内において底面色よりも側面色の影響を受けて遡上が誘発されることを示唆する。

図-12にそれぞれオイカワおよびカワムツの遡上時の切り欠き通過位置を示す。ここに、 n は遡上数、 B_n は切り欠き幅であり、側壁と接している位置は $z/B_n=0$ である。一般に、魚は側壁付近を遡上するといわれている。室内実験では下村ら¹³⁾および関谷ら^{14,15)}が、野外計測では鬼束ら²¹⁾が確認している。同図より、両魚種は黒側面の場合に側壁に近い領域で遡上していることが理解される。一方、白側面の場合は側壁から離れた領域で遡上する傾向があり、側壁が白色の状態を嫌うと推定される。

一方で、中村¹¹⁾は魚の遡上欲が沸く適切な流速が存在することを述べている。これは本実験においても例外ではなく、魚道内の隔壁を越流する横断方向の流速変化が魚の遡上位置に影響を及ぼす可能性は否定できない。したがって、魚道内の壁面色が魚の遡上位置に及ぼす影響を証明するためには、隔壁からプールに落下している落下点付近の流速分布が横断方向に一樣であることを示す必要がある。図-13および図-14に隔壁からプールに落下する落下点付近における流速分布を示す。プール内で流速が横断方向に必ずしも一樣にはなっていない。ただし、魚が切り欠きにおける遡上位置を決定するのは切り欠き付近の流速に依存すると考えられる。図-13において、切り欠きに最も近い $x/L=0.05$ 、 $y/h=0.9$ の流速分布に着目すると、流速が横断方向にほぼ一樣であることが理解される。したがって、本実験では流速が遡上位置に及ぼす影響は小さいといえる。また、壁面色を変化させても水理条件を一定としているため、流速分布に変化が生じないのは明白である。以上より、魚道内を遡上する魚は、底面よりも側面の色の影響を受けていることが実験に基づき解明された。

5. おわりに

本研究では開水路内の色を系統的に変化させてオイカワおよびカワムツの行動特性を観察し、色相、明度および彩度のいずれが魚の行動特性に影響を及ぼすのかを検討した。さらに、この結果に基づき、魚道内の壁面色を変化させて魚の遡上に及ぼす影響を観察する実験を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

(1) 開水路内を遊泳する場合、周囲の壁面色の色相および彩度よりも明度による遊泳への影響が両魚種の場合は支配的で、低明度の領域に集まることが示された。

(2) 魚道内を両魚種が遡上する場合、魚道内の壁面色の明度が高くなると遡上率は低下し、明度が低くなると遡上率が増加する傾向を確認した。そのため、既設の階段式魚道の改良案として、魚道内の色を明度が最も低い黒に変更することが考えられる。ただし、他魚種についても同様なことが言えるかどうかは不明である。

(3) 魚道内を遡上する魚は、底面よりも側面の色の影響を受けることをオイカワとカワムツについて解明した。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金若手研究(B)19760343(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた。実験を担当した当時大学院生の飯國洋平氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Muntz, W.R.A. and Cronly-Dillon, J.R., *Animal Behavior*, Vol.14, pp.351-355, 1966.
- 3) Tomita, T., Kaneko, A., Murakami, M. and Pautler, E.L., *Vision Research*, Vol.7, pp.519-531, 1967.
- 4) Hanyu, I., Niwa, H. and Tabata, M., *Vision Res.*, Vol.9, pp.621-623, 1969.
- 5) Ekstrom, P. & Meissl, H., *Neuroscience*, Vol.25, pp.1061-1070, 1988.
- 6) Meissl, H. & Ekstrom, P., *Vision Research*, Vol.28, pp.49-56, 1988.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) (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.
- 10) 農林水産省農村振興局整備部設計課監修: よりよき設計のための「頭首工の魚道」設計指針, 農業土木学会, 2002.
- 11) 中村俊六: 魚道のはなし, 山海堂, 1995.
- 12) 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.
- 13) 下村充, 白川裕之, 福井吉孝, 関谷明, 河川技術論文集, 第8巻, pp.337-342, 2002.
- 14) 関谷明, 下村充, 坂本祐嗣, 甲田篤史, 福井吉孝, 水工学論文集, 第46巻, pp.1133-1138, 2002.
- 15) 関谷明, 福井吉孝, 下村充, 打田剛, 土木学会論文集, No.782/II-70, pp.81-91, 2005.
- 16) Munsell, A. H.: *A Color Notation*, GEO. H. ELLIS Co., 1905.
- 17) 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.
- 18) Wada, Y., *Proc. of the Int. Symp. on Fishways '90 in Gifu*, pp.445-450, 1990.
- 19) 国土交通省河川局: 魚がのぼりやすいうづくりの手引き, 2005.
- 20) 桜井力, 柏井条介, 佐々木國隆, 岡崎克美, 進藤邦雄, 岡本俊策, 水工学論文集, 第44巻, pp.1197-1202, 2000.
- 21) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 山口秀和: 応用力学論文集, Vol.6, pp.983-990, 2003.

(2008.9.30 受付)