

# 開水路底面に設置した粗石の流下方向間隔が オイカワの遊泳特性に及ぼす影響

鬼束 幸樹<sup>1</sup>・秋山 壽一郎<sup>2</sup>・定地 憲人<sup>3</sup>・緒方 亮<sup>3</sup>・内山 僚介<sup>4</sup>・  
小柳 雄基<sup>4</sup>・下山 慶大<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 九州工業大学大学院教授 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

<sup>2</sup>フェロー会員 九州工業大学教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

<sup>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 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

<sup>4</sup>学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

魚の休憩場所を確保する方法として、粗石の設置が挙げられるが、水路底面の粗度が魚の遊泳に与える影響は未解明の部分が多い。本研究では、開水路の底面に設置した粗石の流下方向間隔を変化させ、オイカワの遊泳特性への影響の解明を試みた。その結果、オイカワの遊泳位置は粗石頂部以下に集中しており、粗石の流下方向間隔が広がると、オイカワの遊泳位置が高くなることが明らかとなった。また、粗石の流下方向間隔が狭い方が、オイカワが粗石を利用して休憩するため停滞率が高くなる傾向があることが判明した。

**Key Words:** *Zacco platypus*, *Open-channel flow*, *boulders*, *spanwise*, *swimming behavior*

## 1. はじめに

魚道を設計する際、高い遡上率を達成することが求められる。我が国の既設魚道の9割を超える階段式魚道において、魚の遡上率に影響を与える因子として、水位落差、隔壁形状、粗度の有無などが挙げられる<sup>1)</sup>。ドイツ水資源・農業土木協会<sup>2)</sup>はプール間落差は0.15m以下にすべきとしている。Wada<sup>3)</sup>は隔壁の端部を矩形、斜面および円形など様々に変化させて遡上数を計測した結果、斜面や円形の場合の遡上数が高いことを解明した。

金子ら<sup>4)</sup>および高崎ら<sup>5)</sup>は多摩川支流の秋川に設置された粗石付き魚道の魚類遡上調査を行い、粗石の有無が遡上する魚種および尾数に影響を与えることを示した。佐合ら<sup>6)</sup>は大田原堰に設置された階段式魚道において、底面に粗石を設置した場合としない場合とを比較し、前者の方が魚の遡上数が高いことを示した。房前ら<sup>7)</sup>も室内実験において同様な結論を得た。安田<sup>8)</sup>も自然石を設置することで水生生物の生息や移動に貢献すると指摘した。Santos *et al.*<sup>9)</sup>は粒径が0.1mあるいは0.15mの粗石をそれぞれ底面に設置した魚道で遡上実験を行い、大粒径の方が遡上時間が短縮されることを示した。桜井ら<sup>10)</sup>は粗石が多様な流速場を形成し、アユ *Plecoglossus altivelis altivelis* な

どの遊泳魚と同様にヨシノボリ属 *Rhinogobius* などの底生魚の遡上にとっても有益と指摘した。ところが、Muraoka *et al.*<sup>12)</sup>は粗石を設置することでカジカ *Cottus pollux* のような底生魚の遡上には貢献するが、イワナ属 *Salvelinus* のような遊泳魚の遡上には必ずしも貢献しないことを指摘した。以上のように、粗石が魚の遡上率に与える影響は必ずしも明確ではない。そのため、魚の遡上率だけでなく、魚の挙動および流況を明らかにしなければならない。

宮園・戸松<sup>13)</sup>は粗石を有する魚道内でのイワナ *Salvelinus leucomaenis* の挙動を撮影し、イワナは粗石前後を選択的に遊泳していることを指摘した。松木ら<sup>14)</sup>は直径が0.05mの半球を魚道底面に設置し、流量を変化させてウグイ *Tribolodon hakonensis* の挙動を観察し、遡上率が高いケースでは、ウグイが粗石背後の低流速域で休憩することを確認した。鬼束ら<sup>15)</sup>は階段式魚道の底面に直径0.1mの模擬粗石を最密充填で設置した場合と設置しない場合とでオイカワ *Zacco platypus* の遊泳状況を観察した。その結果、底面に模擬粗石を設置すると遊泳位置が低下することや、オイカワが模擬粗石間を選好して遊泳することを確認した。ところが、青木ら<sup>16)</sup>は代表粒径が15mmの礫を階段式魚道のプール底面に敷き詰める場合

と敷き詰めない場合でウグイの遡上実験を行った結果、礫が存在すると遡上率が低下することを示した。このように、底面に粗度が存在することで魚の遡上が容易になるかどうかすら明確でないのが現状である。そのため、魚道のようなプール内で複雑に流れが循環している状況ではなく、よりシンプルな流れにおける魚の遊泳特性に及ぼす粗度の影響を解明することが望まれる。

魚が粗石の背後を利用して遊泳するかどうかは、粗石の間隔と魚の体長との関係が大きく関与することが想像される。そこで、本研究では、開水路底面に設置する粗石の間隔がオイカワの遊泳特性に及ぼす影響を解明した。

## 2. 実験装置および実験条件

図-1 に示す水路長 3.0m, 幅  $B=0.5\text{m}$ , 高さ 0.25m の開水路を実験に用いた。流下方向に  $x$  軸,  $x$  軸に直角上向きに  $y$  軸, 横断方向に  $z$  軸をとる。開水路始端から 0.6m より流下方向に  $L=2.1\text{m}$  の範囲において、白色に塗装した直径  $D=0.1\text{m}$  の発泡スチロール球を配置した。粗石を配置した領域を boulders area, boulders area の上流側および下流側の領域をそれぞれ upstream area, downstream area とした。なお、水路、粗石の寸法は斜路式魚道を参考に設定している。表-1 に実験条件を示す。魚の遊泳には体長の半分程度の幅が必要<sup>17)</sup>であるため、実験に使用したオイカワの平均体長  $\overline{B_L}=70\text{mm}(\pm 10\text{mm})$  を基に、粗石の横断方向の配置間隔  $d_z$  は 0.05m で固定し、粗石の流下方向間隔  $d_x$  を 0.1, 0.2, 0.3, 0.4m の計 4 通りに変化させた。配置した粗石の数は case1 から case4 まで順に、27, 18, 15, 12 個とした。全ケースにおいて、水温は 20°C, upstream area での体長倍流速は  $U_m/\overline{B_L}=7(\text{l/s})$ , 水深は  $h=0.2\text{m}$  であり、発泡スチロール球は完全に水没していた。なお、オイカワが普通筋を使って遊泳するように、巡航速度よりも速い体長倍流速  $U_m/\overline{B_L}=7(\text{l/s})$  を実験条件として設定した。

実験には平均体長  $\overline{B_L}=70\text{mm}(\pm 10\text{mm})$  のオイカワ 400 尾を用意し、実験結果に偏りがないように順番に使用した。オイカワは北海道を除く全国に広く生息するため、得られる実験結果は汎用性が高いものと考えられ、また、貴重な水産資源であるアユと同等の遊泳能力をオイカワは有するため、魚道における魚の遊泳特性を調べる実験魚として適切であると判断した。また、オイカワは、遡上が活発な成長途中の平均体長  $\overline{B_L}=70\text{mm}(\pm 10\text{mm})$  の個体を使用している。水路の下流端から 0.375m の位置の水路中央に直径 0.15m の円形金網を設置し、10 尾のオイカワを挿入する。挿入後 10s 間馴致した後に金網を取り上げ、右岸側および水路上部に設置した画素数

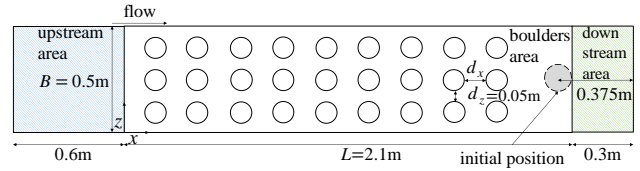


図-1 実験装置

表-1 実験条件

case	boulders diameter $D$ (m)	boulders interval (m)	
		$x$ direction $d_x$	$z$ direction $d_z$
1	0.1	0.1	0.05
2		0.2	
3		0.3	
4		0.4	

1440×1080, 撮影速度 30fps の 2 台のビデオカメラで 90s 間撮影する。上記の実験を各ケースで 10 回, 合計 40 回行った。撮影後, 0.5s ごとの魚の遊泳位置を解析した。boulders area における撮影および解析を行った。なお、流速をオイカワの巡航速度より高く設定しているため、長時間の実験でオイカワに疲労が蓄積されないように馴致時間、実験時間を設定している。

$x$ ,  $y$ ,  $z$  軸方向それぞれ 10, 5, 7.5cm の間隔を取った, 20, 3, 7 点のメッシュで構成される点のうち、粗石が存在する点を除いた合計 366, 384, 390, 396 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 間計測した。計測後,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸方向の時間平均流速  $U$ ,  $V$ ,  $W$  から 3次元合成流速  $V_V = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$  を算出した。なお、流速測定時には開水路にオイカワを放流していない。

## 3. 実験結果および考察

### (1) 開水路の水理特性

図-2 に各ケースの  $y=0.125, 0.075, 0.025\text{m}$  の高さにおける水平断面内の 3次元合成流速  $V_V$  (m/s) をベクトル表示した。なお、図-2 は、水平断面内での 2次元のベクトル表示となっており、ベクトルの色が 3次元合成流速の大きさを表している。図-2(c) に示した底面付近の高さ  $y=0.025\text{m}$  において、 $d_x=0.1\text{m}$  のケースでは粗石の下流側や上流側で局所的に低流速域が確認される。粗石の流下方向間隔  $d_x$  が増加しても粗石の前後の流速は低速を保っているが、流下方向に投影した時に粗石が存在しない領域の流速が速くなっている。図-2(a), (b) より、 $y=0.075, 0.125\text{m}$  と上方に行くにつれ、局所的な低流速域が減少して流速が空間的に均等になると共に、開水路全体の流速が速くなっている。なお、ここでの低流速域は図-2 において青色で表示されている体長倍流速が

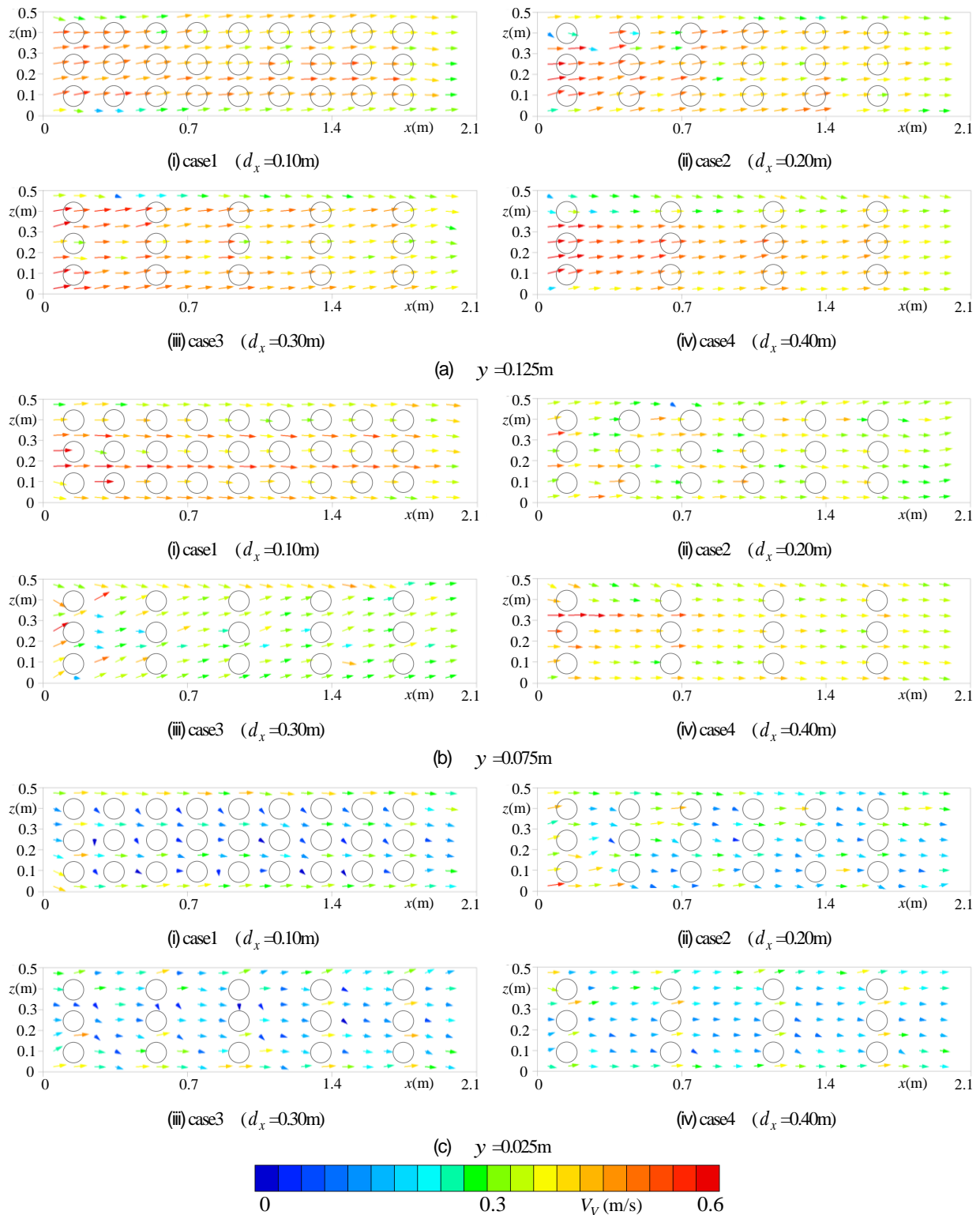


図-2 開水路水平断面内の流況

$U_m / \overline{B_L} \leq 2$  の範囲の流速域を指すものとする。

## (2) オイカワの鉛直方向遊泳頻度

鉛直方向の遊泳位置ごとのオイカワの尾数  $n_y$  を 0.5s ごとにカウントして時間平均尾数  $\overline{n_y}$  を算出し、全尾数  $N$  で除した鉛直方向遊泳位置の頻度  $\overline{n_y} / N$  を求めた。図-3に、各粗石の流下方向間隔  $d_x$  における鉛直方向遊泳位置の頻度  $\overline{n_y} / N$  を示す。全ケースにおいて、多くのオ

イカワが粗石頂部以下を遊泳している。また、 $d_x$  の増大に伴い、鉛直方向遊泳頻度がピーク値を取る位置が粗石の下半から上半へ移動しており、粗石の流下方向間隔の比較的小さい  $d_x = 0.1, 0.2\text{m}$  のケースでは粗石の下半における遊泳が多く、流下方向間隔の比較的大きい  $d_x = 0.3, 0.4\text{m}$  のケースでは遊泳位置が上昇している。これは、粗石の流下方向間隔  $d_x$  の増大に伴い、 $y = 0.075\text{m}$  の高さでの流速が減少するために、オイカワの遊泳位置が上昇し

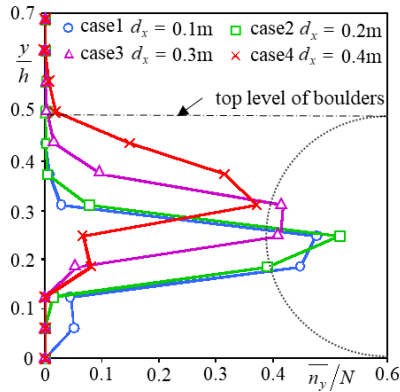


図-3 鉛直方向遊泳頻度

たものと考えられる。

### (3) オイカワの通過率

通過率を次式のように定義した。

$$\text{通過率} = \frac{\text{upstream areaに到達した尾数 } n_p}{\text{実験に用いた尾数 } N = 100} \quad (1)$$

図-4 に粗石の流下方向間隔  $d_x$  と通過率  $n_p/N$  との関係、また各ケースにおける標準偏差を示す。通過率  $n_p/N$  は流下方向間隔  $d_x$  の増加に伴い単調減少を示しており、流下方向間隔  $d_x$  が大きいほど通過率が低下する結果となった。

### (4) 粗石間隔の変化による水平断面内遊泳位置の変化

図-5 に各ケースのオイカワの水平断面内における遊泳位置を、0.5s ごとにプロットで示した。粗石の流下方向間隔の最も小さな  $d_x = 0.1\text{m}$  のケースでは、粗石直下流を集中して遊泳している。  $d_x = 0.2\text{m}$  のケースでは、粗石の下流側だけでなく上流側付近でも遊泳している。  $d_x = 0.3\text{m}$  のケースでは、粗石間の遊泳位置は  $d_x = 0.1, 0.2\text{m}$  のケースに比べ、側壁付近を遊泳するオイカワが多くなっている。  $d_x = 0.4\text{m}$  のケースではオイカワが側壁付近を遊泳する傾向が顕著となっている。

以上より、粗石の流下方向間隔  $d_x$  の増大に伴い、オイカワの主たる遊泳位置は、粗石近傍から側壁付近に変化することが示唆された。

### (5) オイカワの側壁からの体長倍距離

0.5s ごとに  $z$  方向距離別のオイカワの尾数  $n_z$  をカウントして時間平均尾数  $\overline{n_z}$  を算出し、全尾数  $N$  で除したオイカワの  $z$  方向の遊泳頻度  $\overline{n_z}/N$  を求めた。図-6 にオイカワの遊泳横断位置  $z/B_L$  とその遊泳頻度  $\overline{n_z}/N$  との関係を示した。粗石の配置は横断方向に対象であるため、  $0 \leq z/B_L \leq 4.0$  の範囲を考えるものとする。粗石の流下方向間隔  $d_x$  の増加に伴い、水路中央付近の  $2.0 \leq z/B_L \leq 4.0$  の領域での遊泳頻度が減少し、その一方で、側壁付近の  $0 \leq z/B_L < 2.0$  の領域での遊泳頻度が

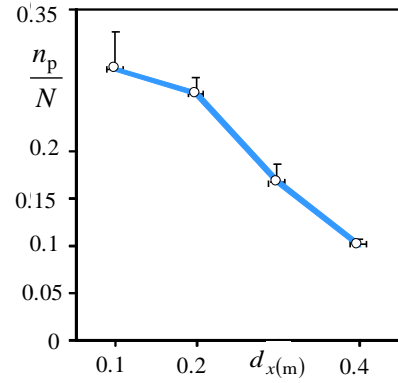


図-4 オイカワの通過率

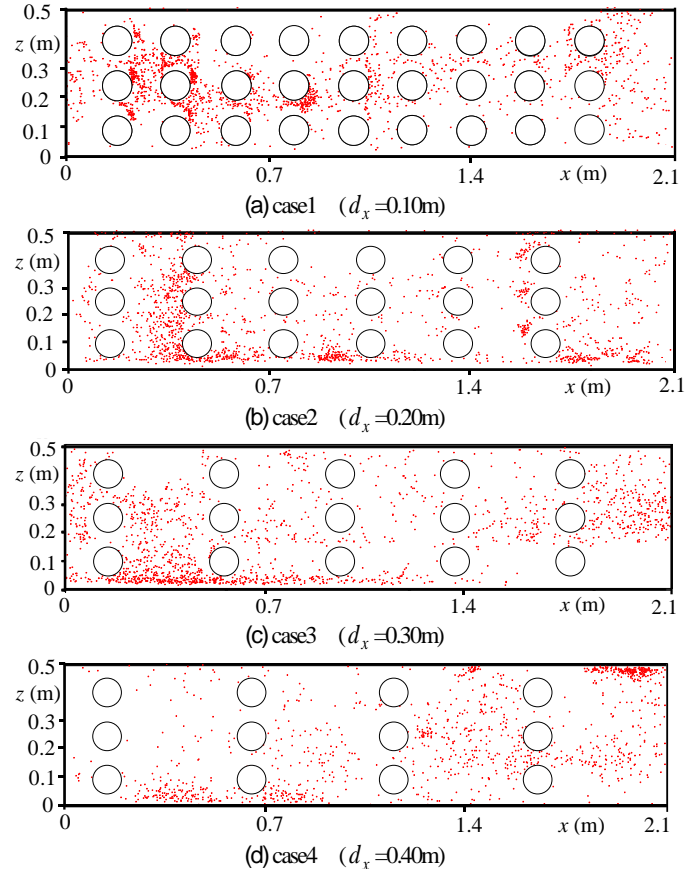


図-5 オイカワの水平断面内遊泳位置

増加している。これは、流下方向間隔  $d_x$  が増加すると粗石間の低流速域が減少し、オイカワが側壁付近の低流速域を集中して遊泳するためと考えられる。

### (6) オイカワの粗石利用率

底面から粗石頂部  $y = 0.1\text{m}$  以下の高さにおいて、流下方向に投影したときに粗石が存在する領域にオイカワが位置する場合を利用と判断し、その領域を遊泳したオイカワの尾数  $n_b$  を0.5sごとに数え、時間平均尾数  $\overline{n_b}$  を算出し、全尾数  $N$  で除したオイカワの粗石利用率  $\overline{n_b}/N$  を求めた。図-7 に粗石の流下方向間隔  $d_x$  とオイカワの粗石利用率  $\overline{n_b}/N$  との関係、また各ケースにおける標準偏差を示す。粗石の流下方向間隔の最も小さな  $d_x = 0.1\text{m}$  のケースにおける粗石利用率  $\overline{n_b}/N$  が最も高く、

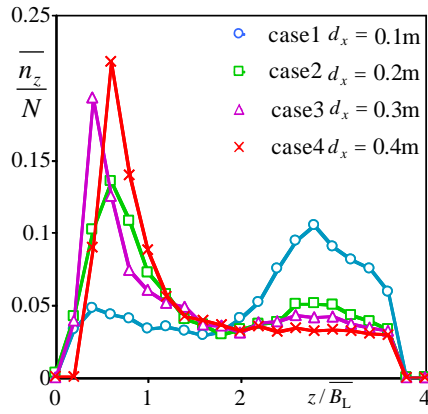


図-6 側壁からの体長倍距離

流下方向間隔  $d_x$  の増加に伴い粗石利用率  $\overline{n_b}/N$  が減少し、 $d_x=0.4\text{m}$  のケースで最も低い値を示した。これは、 $d_x=0.1\text{m}$  のケースでは、粗石頂部以下の低流速域が他の3つのケースより多く存在するために、そこを利用するオイカワの尾数が多いのに対し、 $d_x=0.4\text{m}$  のケースでは同様な領域が少ないために、そこを利用するオイカワの尾数が減少したことを意味する。そのため、図-4に示すように、粗石の流下方向間隔  $d_x$  の増大に伴いオイカワの通過率が減少する理由として、オイカワが利用できる粗石背後の低流速域が減少していることが考えられる。

### (7) オイカワの停滞率

0.5s 間にオイカワが移動した距離が、オイカワの平均体長  $B_L$  の0.1倍以下の場合を停滞と定義して、停滞したオイカワの尾数  $n_s$  をカウントし、時間平均尾数  $\overline{n_s}$  を算出して停滞率  $\overline{n_s}/N$  を求めた。図-8に粗石の流下方向間隔  $d_x$  とオイカワの停滞率  $\overline{n_s}/N$  との関係、また各ケースにおける標準偏差を示す。粗石の流下方向間隔  $d_x$  の増加に伴い、停滞率は低下傾向にある。図-7で示されたように、流下方向間隔  $d_x$  の増加に伴い、粗石背後の低流速域が減少し、粗石間の遊泳頻度も減少するため、停滞率が減少したと考えられる。

### (8) 水平断面における魚向

頭部と尻尾を結んだ線と  $x$  軸とが成す角度の絶対値  $|\theta|$  を魚向と定義した。上流向きが  $|\theta|=0^\circ$ 、下流向きが  $|\theta|=180^\circ$  となる。図-9に粗石の流下方向間隔  $d_x$  とオイカワの魚向  $|\theta|$  の頻度分布  $\overline{n_\theta}/N$  との関係を示す。 $\overline{n_\theta}$  は  $10^\circ$  ごとの尾数  $n_\theta$  の時間平均尾数である。流下方向間隔の比較的小さい  $d_x=0.1, 0.2\text{m}$  の魚向頻度は低角度に集中していることから、オイカワは主として上流側方向を向いていることがわかる。一方、流下方向間隔の比較的大きな  $d_x=0.3, 0.4\text{m}$  のケースでは低角度における魚向頻度は減少すると共に高角度の魚向頻度が増加しており、下流側方向を頻繁に向いていることがわかる。 $d_x=0.1, 0.2\text{m}$  のケースでは  $d_x=0.3, 0.4\text{m}$  のケースに比べ、粗石利

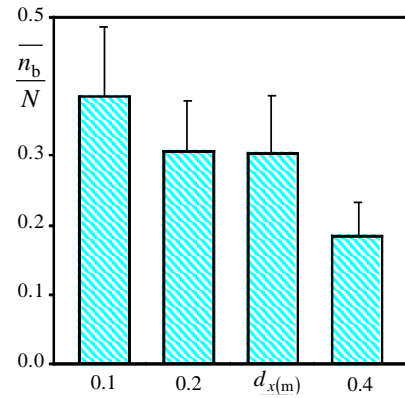


図-7 オイカワの粗石利用率

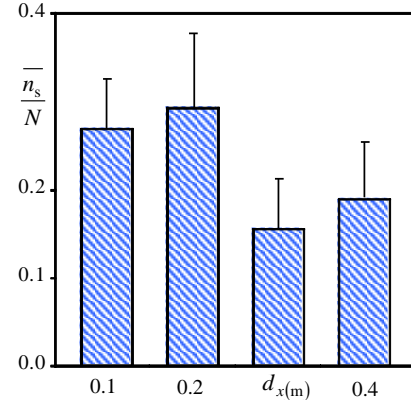


図-8 オイカワの停滞率

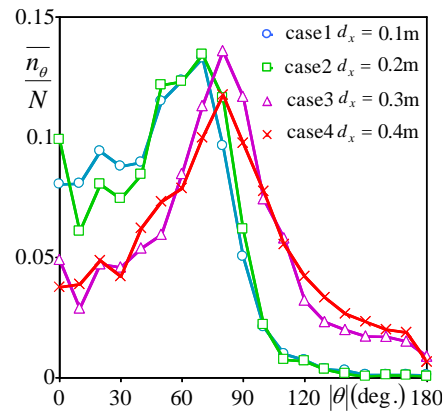


図-9 水平断面における魚向

用率と停滞率が共に高く、粗石近傍の低流速域が比較的多い。そのため、向流性のあるオイカワが粗石前後で上流側方向を向きながらほぼ停滞し、休憩している。一方、 $d_x=0.3, 0.4\text{m}$  のケースでは粗石前後における休憩頻度が少なく、流下方向に粗石を投影したときに粗石のない高流速域を遊泳する。このとき流下方向に流される個体が発生するために、下流側方向の魚向頻度が増加したと考えられる。

## 4. おわりに

本研究では、開水路底面に設置した粗石の流下方向間隔を変化させて、開水路内のオイカワの遊泳特性への影響を解析した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 粗石の流下方向間隔が狭い場合、オイカワの鉛直方向遊泳位置は粗石の下半の高さに集中するが、粗石の流下方向間隔の増加に伴い上昇する。
- (2) 粗石の流下方向間隔の増加に伴い、粗石利用率、停滞率は減少し、オイカワの遊泳位置は側壁付近に集中する。これは、粗石配置が疎になることで、粗石前後における低流速域の減少によりオイカワの遊泳頻度が減少し、側壁付近での遊泳頻度が増加するためである。
- (3) 粗石の流下方向間隔が狭いケースでは、オイカワが粗石前後の低流速域で休憩したため、魚向頻度は上流側方向に集中した。粗石の流下方向間隔の増加に伴い、オイカワの下流側方向の魚向頻度は増加した。これは、粗石の流下方向間隔が広いケースでは、粗石配置が疎になることで、粗石前後の低流速域が減少し、オイカワが休憩をとれずに流下方向に流されたためと考えられる。
- (4) 本研究から導き出される結論として、魚道に設置する粗石の流下方向間隔は 10cm 程度が一番適していると考えられる。これは、粗石背後の低流速域が多い方が、オイカワの遡上に最も有利であるためである。

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)17K06580(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた。

#### 参考文献

- 1) (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，pp.5-326, 1998.
- 2) ドイツ水資源・農業土木協会（中村俊六訳）：多自然型魚道マニュアル，山海堂，pp.72-81, 1998.
- 3) 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.
- 4) 金子義明，和泉清，土屋十囀，大竹義男：秋川における魚道の水理特性と遡上効果，*水工学論文集*，第42巻，pp.265-270, 1997.
- 5) 高崎忠勝，土屋十囀，大竹義男：秋川における複合型魚道の効果，*河川技術に関する論文集*，第5巻，pp.165-170, 1999.
- 6) 佐合純造，本多卓志，大木孝志，田中直也：大田原堰魚道におけるアユの遡上実験報告，*水工学論文集*，第42巻，pp.493-498, 1998.
- 7) 房前和朋，島谷幸宏，萱場祐一，傳田正利：礫河床における魚道の遊泳速度に関する基礎的研究，*水工学論文集*，第41巻，pp.1117-1122, 1997.
- 8) 安田陽一：石組みを利用した減勢工に関する実験から実務への適用とその成果，*河川技術論文集*，第23巻，pp.639-644, 2017.
- 9) Santos, J. M., Branco, P., Silva, A. T., Katopodis, C., Pinheiro, A., Viseu, T. and Ferreira, T.: Effect of two flow regimes on the upstream movements of the Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*) in an experimental pool-type fishway, *Journal of Applied Ichthyology*, Vol.29, pp.425-430, 2013.
- 10) Santos, J. M., Branco, P., Katopodis, C., Ferreira, T. and Pinheiro, A. T.: Retrofitting pool-and-weir fishways to improve passage performance of benthic fishes, *Ecological Engineering*, Vol.73, pp.335-344, 2014.
- 11) 桜井力，柏井条介，佐々木國隆，岡崎克美，進藤邦雄，岡本俊策：コンクリートブロックを用いた粗石式魚道の水理および遡上特性，*水工学論文集*，第44巻，pp.1197-1202, 2000.
- 12) Muraoka, K., Nakanishi, S. and Kayaba, Y.: Boulder arrangement on a rocky ramp fishway based on the swimming behavior of fish, *Limnology*, Vol.62, pp.188-183, 2017.
- 13) 宮園正敏，戸松修：斜路式魚道における粗石の配置について，*砂防学会誌*，Vol.56, No.1, pp.3-12, 2003.
- 14) 松木越，青木宗之，菊池裕太，福井吉孝：全断面粗石付魚道の機能増進および修復について，*土木学会論文集B1(水工学)*，Vol.71, No.4, I\_1105-I\_1110, 2015.
- 15) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，宍戸陽，高松周平，角田裕香，有須田朋子：階段式魚道のプール底面に設置した粗石が魚の遡上特性に及ぼす影響，*土木学会論文集B1(水工学)*，Vol.72, No.4, I\_1135-I\_1140, 2016.
- 16) 青木宗之，向井健朗，菊池裕太，松木越：階段式魚道のプール内における礫の堆積が魚類の行動に及ぼす影響について，*土木学会論文集B1(水工学)*，Vol.71, No.4, I\_1099-I\_1104, 2015.
- 17) 中村俊六：魚道のはなし，*山海堂*，pp.88-89, 1995.

(2017. 9. 29 受付)

## EFFECTS OF BOULDERS INTERVAL IN STREAMWISE DIRECTION OVER OPEN CHANNEL BED ON SWIMMING BEHAVIOR OF *Zacco platypus*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Kento JOJI, Ryo OGATA,  
Ryosuke UCHIYAMA, Yuki KOYANAGI and Keita SAGAYAMA

It is important to keep suitable area by boulders to make rest area for fish. In this study, swimming behavior of *Zacco platypus* in open channel were compared with change of boulders interval in streamwise direction over open channel bed. Swimming behaviors of *Zacco platypus* were obtained with the aid of two sets of digital video cameras. It was found that swimming of *Zacco platypus* was stagnant remarkably in cases where the boulders interval in downstream direction was narrow. It is because that there are more low velocity spaces in this case compared with cases where the boulders interval in downstream direction is wide.