

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

EFFECTS OF BOULDER OVER POOL BED ON MIGRATION RATE
IN POOL-AND-WEIR FISHWAY

鬼東幸樹¹・秋山壽一郎²・宍戸陽³・高松周平³・角田裕香⁴・有須田朋子⁵
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Akira SHISHIDO, Shuhei TAKAMATSU,
Yuka KADOTA and Tomoko ARISUDA

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学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

⁴正会員 北九州市上下水道局水道部配水管理課 (〒803-0814 北九州市小倉北区大手町1-1)

⁵正会員 清水建設㈱ (〒104-8340 東京都中央区京橋2-16-1)

It is important to keep suitable area by boulder for fish in pool-and-weir fishway to make the migration rates high. In this study, migrating behaviors of oikawa by putting boulder on pool bed in pool-and-weir fishway was investigated. The migration rate of oikawa was obtained with the aid of two sets of digital video cameras. In addition, swimming position, swimming direction and migration route was investigated. It was found that migrating behaviors are difference between bed with boulder and flat bed. This is because oikawa swim slow flow area caused by boulder on pool bed. Further, swimming direction of oikawa in the case of flat bed comparatively match with each other, whereas that of it in the case of bed with boulder don't match.

Key Words : migration rate, *Zacco Platypus*, boulder on pool bed, pool-and-weir fishway

1. はじめに

河川にダムや堰が設置されると河川水位が縦断方向に不連続となり、魚類の縦断移動が困難になる。サケやアユなどの通し回遊魚にとって、不連続な水位落差の存在は種の絶滅に直結するため、魚道の併設が望まれる¹⁾²⁾。

魚道は、プールタイプ、水路タイプおよび閘門タイプに大別され、プールタイプはさらに、階段式、バーチカルスロット式、アイスハーバー式、棚田式および潜孔式に分類される²⁾³⁾。以上のように様々な形式の魚道が提案されているが、我が国の既設魚道の90%以上を階段式魚道が占める⁴⁾⁵⁾。中村⁶⁾はプールタイプ魚道を設計する上で留意すべき点を次の5点としている。1)各プールの水理条件が同一なこと、2)最大流速が魚の突進速度以下であること、3)体高の2倍以上あるいは全高の1.2倍以上の水深を確保すること、4)体長の1/2以上の経路幅を確保すること、5)各プールに休息場所を確保することである。

上記の中で5)の必要性は次のように説明される。魚の筋肉には普通筋と血合筋があり、緊急時には主として普

通筋を使用して突進速度(体長の約10倍程度)で遊泳する⁶⁾⁷⁾⁸⁾。ところが、普通筋を使用すると疲労が蓄積するため、緊急度に応じて極力普通筋を使用しないように、魚は普通筋と血合筋との使用割合を変化させる。普通筋を僅かに使う遊泳速度は中間速度と呼ばれ、疲労が蓄積しない血合筋のみを使う遊泳速度は維持速度(体長の約2-4倍程度)と呼ばれる。魚道内の流速が突進速度以下であっても、中間速度以上で遊泳せざるを得ない流況では、疲労が蓄積するため遡上が困難となる。したがって、プール内に休息場所を確保する必要がある。

一方、河川において魚類に休息場所を提供するものとして粗石が挙げられる。小野田・萱場⁹⁾は矢作川に設置された矢作第二ダムから0.7km下流の粗粒化した地点で、自然状態および粒径約2mmの砂を投入した両状態で魚類調査を行った。その結果、両方で優占魚種が異なることを解明した。田代ら¹⁰⁾は木曾川の支流の飯沼川を対象として土砂還元前後の魚類調査を行い、粒径に応じて魚類相が変化することを解明した。渡辺ら¹¹⁾は石狩川支流の真駒内川を対象として、河道形態、河床形態、河岸状態

および底生魚類の生息状況を比較した結果、巨礫や浮き石によって創出された空隙をハナカジカが利用していることを解明した。原田ら¹²⁾は粗粒化した石礫河床における魚の利用可能空間を定量的に算出した。

粗石を魚道に利用する研究も始められた。金子ら¹³⁾および高崎ら¹⁴⁾は多摩川の支流の秋川において、粗石付きの魚道およびアイスハーバー式魚道における魚の遡上調査を行った。その結果、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解明した。佐合ら¹⁵⁾は吉井川の支流の金剛川に当時建設中であった大田原堰に設置された階段式魚道の底面に、粗石を設置しない場合、粗石を点在させた場合、および粗石を密に配置させた場合における魚の遡上調査を行った。その結果、粗石を設置しない場合、粗石を点在させた場合、および粗石を密に配置させた場合の順に遡上率が増加することを解明した。Santos *et al.*¹⁶⁾は粒径が10cmおよび15cmの粗石を底面に設置した魚道で遡上実験を行った結果、粒径の大きな場合の遡上時間が短くなることを示した。ただし、粗石が魚道の河床に大量に堆積し、流水断面積が著しく減少する場合は、逆に遡上率が低下することを青木ら¹⁷⁾は指摘している。以上のように、粗石の有無が遡上特性に影響を及ぼすことは明らかになったが、その理由を解明するには魚道内の流況と魚の挙動を把握しなければならない。

桜井ら¹⁸⁾は魚道底面に碁盤目に設置された粗石周辺の流況を観察し、粗石間を通過する流れが高速であるのに対し、粗石の上下流では低速な死水域が生じることを解明した。八田ら¹⁹⁾は魚道底面の粗石周辺の乱流計測を行い、粗石背後で乱れ強度の極大領域が発生することを解明した。前野ら²⁰⁾はPTV(Particle Tracking Velocimetry)を用いて粗石近傍の水平断面内における流速分布を計測し、魚が休憩可能な領域を推定した。

一方、粗石を有する魚道内の魚の遊泳特性を解明した研究はほとんどない。宮園・戸松²¹⁾は粗石を設置した魚道内でのイワナの挙動をビデオ撮影した。その結果、イワナは粗石前後を遡上経路として選択していることが解明された。松木ら²²⁾は直径が5cmの半球を魚道底面に設置し、流量を変化させた状態で平均体長が93mmのウグイの挙動を観察した。その結果、遡上率が高い場合にはウグイが粗石背後の低流速域で休憩していることを確認した。しかし、粗石周辺の流速計測を行い、魚の挙動と流速場との関係を定量的に解明した研究はほとんどない。本研究は、階段式魚道の底面に粗石を設置した場合および設置しない場合における魚の遡上特性と水理量との関係を定量的に解明したものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に実験に用いたグレーに塗装した木製の片側切欠き付階段式魚道の模式図を示す。わが国におい

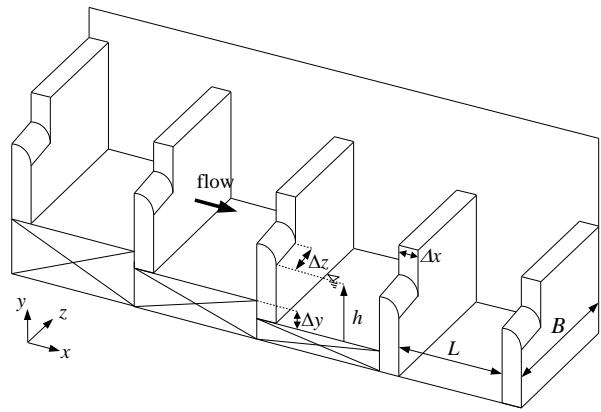


図-1 階段式魚道の概略図

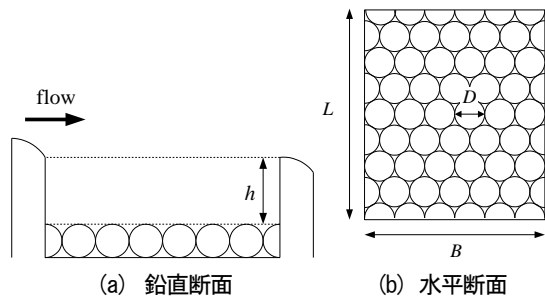


図-2 粗石の配置図

表-1 実験条件

	$Q=1(l/s)$	$Q=3(l/s)$	$Q=5(l/s)$	$Q=7(l/s)$	$Q=9(l/s)$
Boulder on pool bed	BOQ1	BOQ3	BOQ5	BOQ7	BOQ9
Flat bed	FLQ1	FLQ3	FLQ5	FLQ7	FLQ9

て、比較的設置率が高い魚道は片側切欠き付階段式魚道である。したがって、本実験においても同魚道を採用した。ただし、左岸側壁は撮影のため透明なアクリル板で作成した。プール長 L を0.7m、プール幅 B を0.6m、隔壁厚 Δx を0.15m、切欠き幅 Δz を0.12m、落差 Δy を0.15mに設定した。また、流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸、プール横断方向に z 軸をとった。プール底面 $y=0$ から切欠き下端までの高さ h を0.2mとした。各諸元は小規模河川に設置される魚道と類似のスケールである。

粗石形状として、四角柱や三角柱などが存在するが、本研究では基本形状であることおよび自然石に近い形状である球を採用する²³⁾。また、佐合ら¹⁵⁾による粗石の密度が高いほど遡上率が向上するとの指摘から、最密充填の配列方法を採用した。図-2に示すように、階段式魚道のプール底面に直径 $D=0.1m$ の球を配列した。表-1に示すように、底面に粗石がある場合とない場合の2形態について、流量 Q を1~9(l/s)の範囲で5通りに変化させた合計10ケースの実験を行った。ケース名は粗石を設置した場合を“粗石有り(Boulder on pool bed)”，設置していない場合を“粗石無し(Flat bed)”とし、流量の変化に基づき、表-1

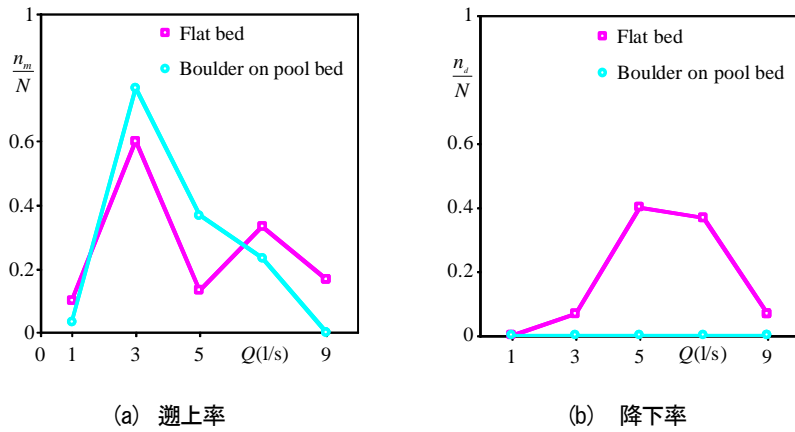


図-3 オイカワの遡上率・降下率

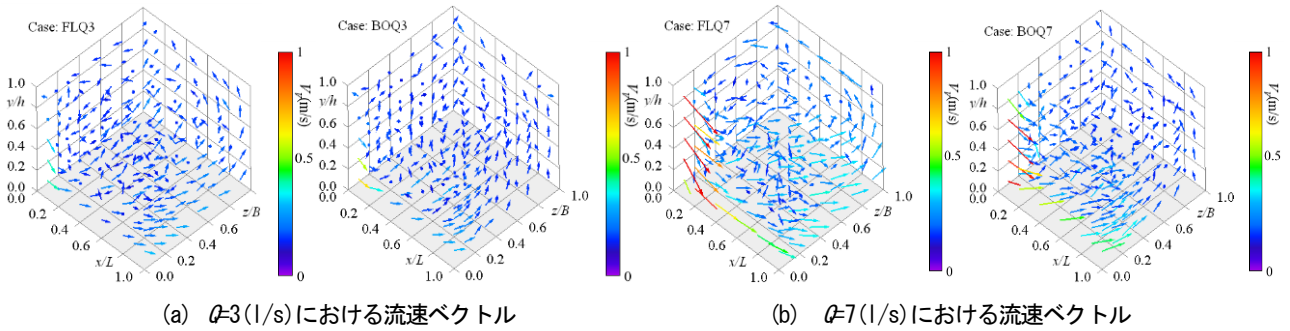


図-4 3次元合成流速ベクトル

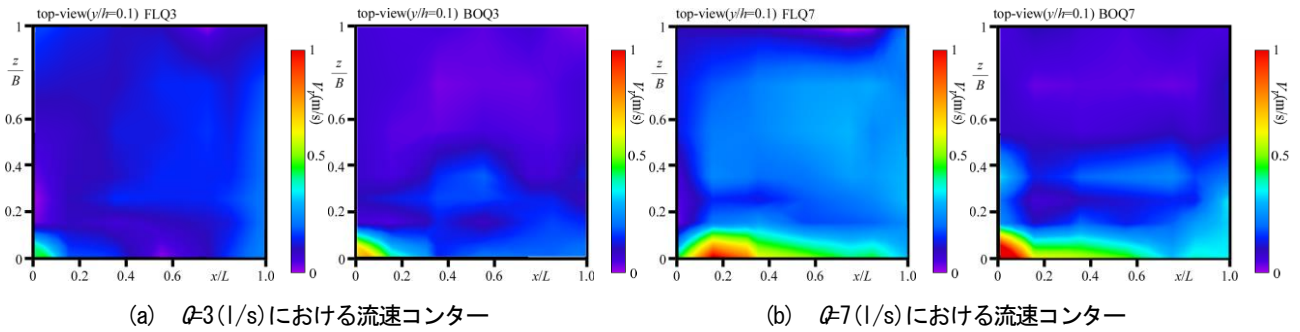


図-5 $y/h=0.1$ における水平断面内の流速コンター

に示すケース名を命名した。粗石無しの場合は底面を $y=0$ とし、粗石有りの場合は粗石最上部を $y=0$ とした。

下流から2番目のプールに平均体長 $\overline{B_L}$ が80mmのオイカワ (*Zacco Platypus*) を $N=30$ 尾放流し、室温20℃、水温17℃の条件で実験を行った。目視で定常を確認した後、切欠きに設置した遡上防止用ネットを除去すると共に、プールの側壁および上部に設置した2台のカメラで30fpsで20分間の撮影を行なった。撮影後、オイカワの遊泳位置を10sごとに解析すると共に、遡上数をカウントした。

x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ7、5、7点のメッシュで構成される合計245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 $V_v = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ を得た。なお、流速測定時には魚道にオイカワを放流していない。

3. 実験結果および考察

(1) オイカワの遡上率および降下率の比較

遡上率および降下率を次式のように定義する。ここで降下率は、魚道内における魚の滞留のしにくさを表す。

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

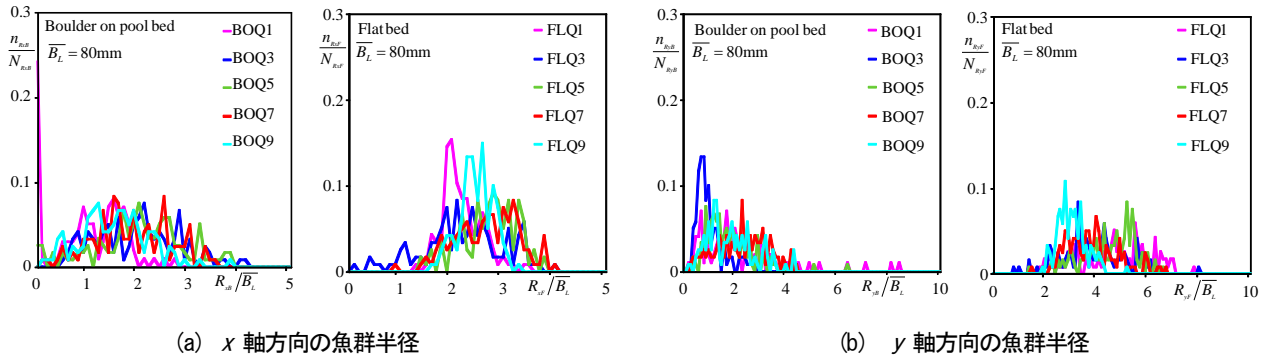


図-6 各流量における魚群半径の頻度分布

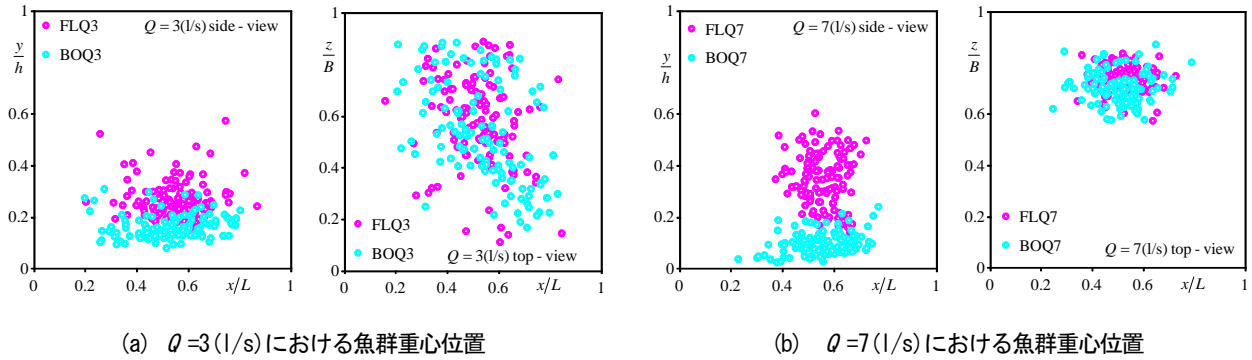


図-7 鉛直断面および水平断面における魚群重心位置

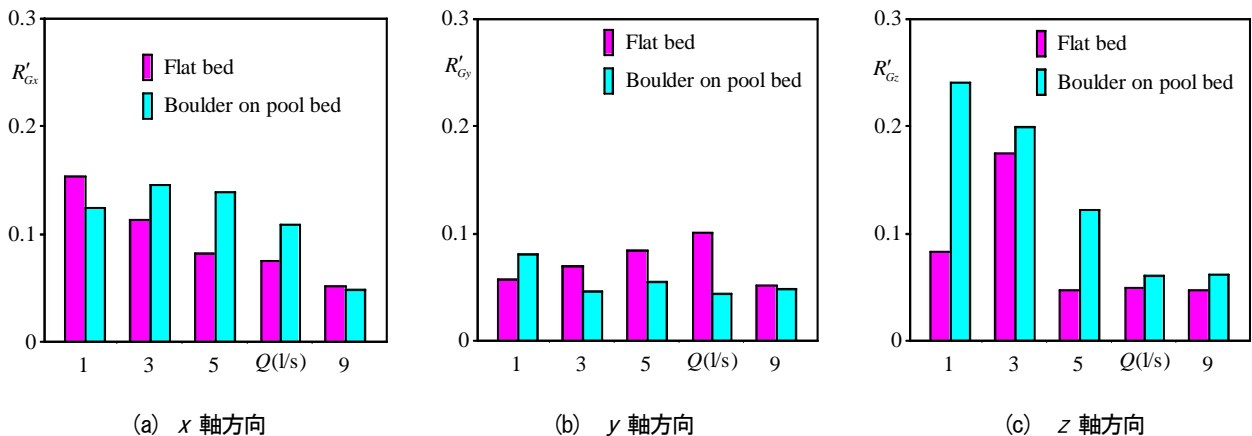


図-8 魚群重心の広がりを表す標準偏差

$$\text{降下率} = \frac{\text{降下した尾数 } n_d}{\text{実験に用いた尾数 } N (= 30)} \quad (2)$$

図-3(a)に粗石有りおよび粗石無しにおける流量とオイカワの遡上率 n_m / N との関係を示す。粗石の有無に関係なく、 $Q = 3$ (l/s) で遡上率が最大を示し、流量の増加に伴い遡上率が低下している。また、遡上率が最大となる流量付近では、粗石無しよりも粗石有りの遡上率が高い。

図-3(b)に粗石有りおよび粗石無しにおける流量とオイカワの降下率 n_d / N との関係を示す。粗石無しの場合の降下率が高いが、粗石有りの場合は降下せず粗石の間で停滞する個体が多く、降下率は全流量でゼロであった。

(2) プール内流況の比較

図-4に粗石有りおよび粗石無しにおける $Q = 3, 7$ (l/s) での3次元合成流速 V_v をベクトル表示した。 $Q = 3$ (l/s) に着目すると、粗石の有無に関わらず上流側切欠きからの落下流がプール底面付近まで潜り込み、下流側隔壁に衝突することで左岸側水面付近に上昇し、循環流を形成していることが確認される。 $Q = 7$ (l/s) で観察される循環流も流速が増加しているが、類似の構造である。

図-5に粗石有りおよび粗石無しにおける $y/h = 0.1$ での水平断面 ($x-z$) の3次元合成流速 V_v コンターを $Q = 3, 7$ (l/s) について示す。いずれのケースにおいても、右岸側壁付近の流速が速いことがわかる。ま

The number of the fish according to position y/h in the case of boulder on pool bed

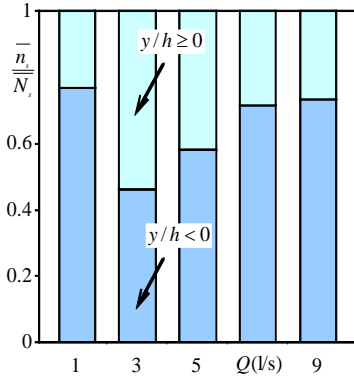


図-9 粗石付きプールにおける流量と y 軸方向の遊泳位置との関係

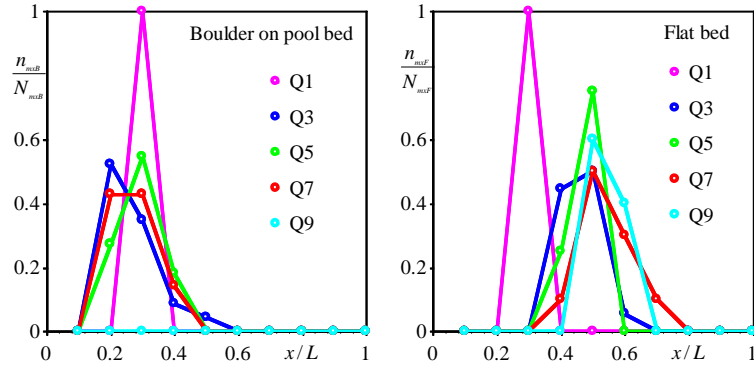


図-10 各流量における x 軸方向の遡上開始位置

The position that started migrating

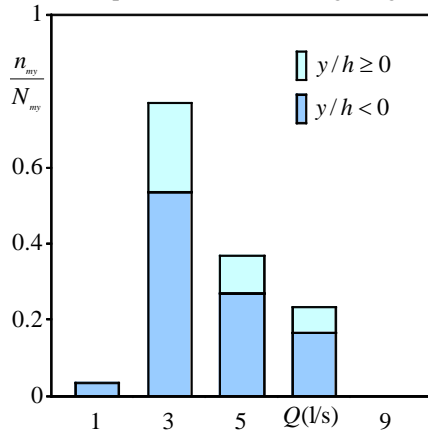


図-11 粗石付きプールにおける流量と y 軸方向の遡上開始位置との関係

た、水平断面内の底面付近で粗石無しよりも粗石有りの流速が低い。

(3) 粗石設置によるプール内の遊泳位置の変化

図-6に各流量における x 、 y 軸方向の魚群半径をそれぞれ平均体長 \bar{B}_L で除した値 R_x/\bar{B}_L および R_y/\bar{B}_L の頻度分布を、粗石有りおよび粗石無しについて示す。粗石有りの方が、 x 軸、 y 軸方向の魚群半径が減少していることが確認できる。

図-7に流量 $Q=3, 7$ (l/s) の鉛直断面 ($x-y$) および水平断面 ($x-z$) における 10 s ごとの魚群の重心位置を、粗石有りおよび粗石無しについて示す。流量の増加に伴って魚群重心の範囲が狭くなっている。図-5を参照すると、流量の増加に伴い比較的流速の遅い場所を選択的に魚が遊泳するために生じたと考えられる。鉛直断面 ($x-y$) に着目すると、粗石有りの方が粗石無しの場合よりも重心が底面付近に接近している。また、水平断面 ($x-z$) においては、底面に粗石を設置した場合よりも設置していない場合の方が、重心が集まる傾向にある。

図-8に x 軸、 y 軸および z 軸の魚群重心位置の標準偏差

R'_G を示す。 x 軸、 z 軸では、粗石無しよりも粗石有りの標準偏差が大きい。ところが、 y 軸では傾向が逆転している。これは、粗石を設置し底面付近の流速が低速なることで、オイカワが底面付近を嗜好して遊泳したためと考えられる。

(4) 粗石設置による遊泳位置の変化

図-9に粗石有りにおける、魚の重心位置の $y/h \geq 0$ および $y/h < 0$ における存在確率の時間平均値 \bar{n}_s/\bar{N}_s を示す。 $Q=1$ (l/s) を除く $Q > 3$ (l/s) では、流量の増加に伴い $y/h < 0$ における存在確率が増加している。これは、流量の増加に伴いオイカワの粗石間の空隙の利用頻度が増加したことを示している。図-5より底面付近では粗石有りが粗石無しに比べて流速が減速されるため、遊泳による疲労を回避するために粗石の隙間を選択的に遊泳したと考えられる。小田ら²⁴⁾、古里・田中²⁵⁾、富永・市川²⁶⁾ は粗石の上下流側の低流速領域が発生することを明らかにし、原田ら¹²⁾ は石礫河床における魚の利用可能空間を定量的に予測した。その結果、粗石近傍で魚が休憩可能と推定した。本実験結果は上記の予測と整合している。

(5) 粗石設置によるプール内の遡上開始位置の変化

図-10に粗石有りおよび粗石無しにおける、 x 軸方向の遡上開始位置の頻度分布を示す。粗石無しよりも粗石有りにおける遡上開始位置 (x/L) が小さな値を示しており、切欠きから近い位置から遡上を開始する傾向が増加する。遡上経路となる切り欠きは $x=0$ にあるため、粗石無しよりも粗石有りの方が遡上経路が短くなる。

図-11に粗石有りの場合のオイカワの遡上開始位置の $y/h \geq 0$ および $y/h < 0$ における各利用数 n_{my} を遡上数 N_{my} で除した n_{my}/N_{my} を示す。遡上数がゼロの $Q=9$ (l/s) を除くと、遡上開始位置の全てあるいは多くが、 $y/h < 0$ となっている。したがって、底面に粗石を設置すると、粗石を利用して遡上を開始するようになることが判断される。

4. おわりに

本研究は、階段式魚道の底面に設置した粗石が魚の遡上特性に及ぼす影響を実験的に解明したものである。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) 階段式魚道のプール内に粗石を設置すると、オイカワの遊泳位置は底面付近に集中し、水平方向に広がることが判明した。
- (2) オイカワは流速の低下した粗石の隙間を嗜好して遊泳する。
- (3) プール内の底面に粗石を設置した場合、オイカワは粗石を利用して遡上していることが判明した。また、短い遡上経路で遡上可能になることが判明した。

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) (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.
- 3) 鬼束幸樹：魚道の流れ特性と魚の遡上特性との関係，ながれ，第31巻，No.1，pp.19-28，2012.
- 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，pp.42-49，1995.
- 6) Blaxter, J.H.S.: Swimming speeds of fish, *FAO Conference on Fish Behaviour in Relation to Fishing Techniques and Tactics*, pp.1-32, 1967.
- 7) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，山本晃義，渡邊拓也，脇健樹：河川に生息する数魚種の突進速度に関する研究，土木学会論文集B，Vol.65，No.4，pp.296-307，2009.
- 8) 泉完，菊地真弘，加藤幸，東信行：河川水を用いたヤマメ稚魚の尾部の動きと遊泳速度，農業農村工学会論文集，No.278，pp.99-107，2012.
- 9) 小野田幸生，萱場祐一：石礫河床への大量の覆砂が魚類生息密度に及ぼす影響について，河川技術論文集，第19巻，pp.525-530，2013.
- 10) 田代喬，奥田千賀子，辻本哲郎：底生魚の生息場所からみたダム下流の河床のアーマー化と土砂還元による機能の回復，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.70，No.4，I_1321-I_1326，2014.
- 11) 渡辺恵三，中村太士，加村邦茂，山田浩之，渡邊康玄，土屋進：河川改修が底生魚類の分布と生息環境におよぼす影響，応用生態工学，Vol.4，No.2，pp.133-146，2001.

- 12) 原田守啓，小野田幸生，萱場祐一：粗粒化した石礫河床への土砂供給が遊泳性魚類の空間利用に及ぼす影響に関する一考察，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.70，No.4，I_1339-I_1344，2014.
- 13) 金子義明，和泉清，土屋十隼，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.
- 14) 高崎忠勝，土屋十隼，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.
- 15) 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.
- 16) Santos, J.M., Branco, P.J., Silva, A.T., Katopodis, C., Pinheiro, A.N., Viseu, T. and Ferreira, M.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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 八田哲郎，鈴木辰規，村山久一，福井吉孝，荻原国宏：横断勾配を持つ粗石付き緩斜路魚道について，河川技術に関する論文集，第5巻，pp.147-152，1999.
- 20) 前野詩朗，名合宏之，野村修治：PTV法による全断面魚道の水理特性の検討，水工学論文集，第42巻，pp.481-486，1998.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 宮園正敏，高氏つぐみ，戸松修：粗石周辺の水理特性と溪流魚の遊泳行動，砂防学会誌，Vol.57，No.5，pp.15-24，2005.
- 24) 小田崇裕，藤田一郎，吉村英人，岡西健史：粗面開水路乱流の水面変動に及ぼす乱流渦構造の条件付き抽出に関する研究，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.70，No.4，I_823-I_828，2014.
- 25) 古里栄一，田中規夫：大礫後部のマイクロハビタット特性と遷移初期の水生昆虫動態，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.70，No.4，I_1333-I_1338，2014.
- 26) 富永晃宏，市川亜也佳：巨石群を底面に配置した開水路流の抵抗特性評価，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.70，No.4，I_661-I_666，2014.

(2015. 9. 30受付)