

# 開水路流の急拡大部の拡大率がオイカワの 休憩特性に及ぼす影響

鬼東 幸樹<sup>1</sup>・秋山 壽一郎<sup>2</sup>・定地 憲人<sup>3</sup>・泉 孝佑<sup>4</sup>  
緒方 亮<sup>4</sup>・西川 貴大<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 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

<sup>2</sup>フェロー会員 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)

<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)

魚にとって低流速の休憩場所が確保されていることは重要である。しかし、低流速域における魚の休憩特性については十分な解明がなされていない。本研究では、開水路急拡大部における拡大率および流速を系統的に変化させ、オイカワの休憩特性に及ぼす影響の解明を試みた。その結果、急拡大部の拡大率および流速の増加に伴い、オイカワの急拡大部の利用率が増加することが判明した。また、急拡大部では魚群重心の対地速度が低下し、拡大率の影響により魚群の形状が円形に近づくことや急拡大部の上流側壁面と魚群重心との距離が増加することが確認された。

**Key Words:** *Opsariichthys platypus, sudden expansion, resting characteristics, open-channel flow*

## 1. はじめに

中村<sup>1)</sup>は魚が川にすめる条件として、流量の確保、水質の確保、餌の確保、天敵からの保護、産卵場の確保、回避路の確保、避難場所の確保を挙げている。この内、避難場所の確保は、次の観点から必要とされる。魚の筋肉には血合筋と普通筋とがあり、平時には疲労の蓄積がない血合筋を使用し、疲労の蓄積がある普通筋は使いたがらない<sup>2)</sup>。遊泳時に血合筋のみを使用する維持速度は、魚種、遊泳型、成長段階、水温などに影響を受けるが、体長倍流速で2~4(1/s)程度といわれている<sup>23)</sup>。ここで、体長倍流速(1/s)は流速(cm/s)を魚の体長(cm)で除したものである。一方、遊泳時に主として普通筋を使用する突進速度も魚種などの影響を受けるが、体長倍流速で10(1/s)以上といわれている<sup>49)</sup>。河川の流速が魚の突進速度を超えると、魚は突進速度で上流方向に遊泳しても下流に流される。そのため、低流速な避難場所が必要となる。また、低流速域を遊泳していても、捕食の危険が迫った場合は突進速度で遊泳するため、疲労の回復が可能な避難場所が必要となる。

洪水時における魚の避難場所の利用形態について、多くの研究がなされている。綾ら<sup>7)</sup>は淀川において水位が上昇すると、フナなどの18魚種がわんどに避難すること

を解明した。佐川ら<sup>8)</sup>は自然共生研究センターの実験河川で人工洪水を発生させ、洪水時に仔魚等がわんどに避難することを観測した。傳田ら<sup>9)</sup>は信濃川水系千曲川の一次水域および本川における魚類調査を行い、洪水時にアユ、ウグイ、オイカワ、ギンブナが一次水域に避難することを示した。東ら<sup>10)</sup>は青森県を貫流する平川において、出水で流下したウグイがわんどや植生帯に避難することを、テレメトリー法を用いて確認した。佐々木ら<sup>11)</sup>は山口県を貫流する大田川において、洪水中はフナがわんど的な低流速域に留まることを、テレメトリー法を用いて確認した。傳田ら<sup>12)</sup>は過去の地形データに基づいて洪水時の流況を再現し、魚の避難可能エリアの経年変化を推定した。

平水時に主眼をおいた魚の避難場所の利用形態についても多くの研究がなされている。福留ら<sup>13)</sup>は高知県を貫流する安田川に水制を設置した結果、水制設置の半年前および半年後の魚の生息密度が約2尾/m<sup>2</sup>から約45尾/m<sup>2</sup>に変化したと報告した。Hartman & Titus<sup>14)</sup>は米国バージニア州の河川に連続水制を設置した結果、様々な魚種の生息空間が確保されるため、魚種数および尾数が増加すること、また、稚魚が顕著に水制間を利用していることを示した。Gaudinnd & Sempeski<sup>15)</sup>はヒメカワマスの子魚は本流ではまったく確認されず、側岸凹部のみで確認されたと

報告した。和田ら<sup>16)</sup>は岐阜県を貫流する根尾川水系の真桑用水において、側岸凹部、魚巢ブロック、植生などが密集して設置されている状況での魚の避難状況を観察した。その結果、避難場所の選択に魚種が大きく依存することを解明した。以上のように河川の側岸に凹部などが存在すると、低流速域が発生するため、魚類の避難場所、産卵場所などとして利用されることが知られている<sup>17)20)</sup>。ただし、低流速域の水理量を定量的に解明した研究は多くない。

傳田ら<sup>12)</sup>はニゴイを千曲川に放流し、165日間に渡りテレメトリー法で追跡した。その結果、平水時には流速約0.6m/s、水深約0.5mの領域を選好することが観測された。石川<sup>21)</sup>は実験水路片側に2つの水制を設置して平均体長約100mmのウグイを10尾放流したところ、ウグイは静水状態では水制間を利用しないが、流水状態では約0.06m/sの流速を有する水制間で休憩することを確認した。福井ら<sup>22)</sup>は実験水路両壁に立体網目状の合成樹脂排水材を交互配置し、断面平均流速が体長倍流速で約3(1/s)に設定して稚アユを放流したところ、遡上中に時折、合成樹脂排水材下流側で休憩することを観測した。和田ら<sup>16)</sup>は実験水路片側に設置された連続水制の長さおよび間隔を変化させ、流速を維持速度の約1.5~2倍にした状態で平均体長83mmのオイカワ5尾の遊泳挙動を観察した。その結果、水制長さおよび間隔が体長以下の場合凹部内での旋回が困難なのでオイカワは凹部を利用しないが、それ以上の場合には頻りに休憩することを示した。

以上のように、魚は低流速域で休憩することが広く知られているものの、流速等の水理量の定量的把握はほとんどなされていない。そのため、休憩場所の適切な幾何学形状も解明されていない。

本研究は、開水路急拡部における拡大率および流速を系統的に変化させ、オイカワ(*Opsariichthys platypus*)<sup>23)</sup>の休憩特性を解明したものである。なお、瀬淵構造も同様に低流速域として魚の休憩場所になっているが、本研究では水制などの河川構造物の設置によって生じる低流速域を避難場所や休憩場所として利用しているオイカワの休憩特性を解明することを目的としている。

## 2. 実験装置および実験条件

図-1 に実験で用いた長さ 3.5m、幅 0.8m、高さ 0.25m の水路の概要を示した。流下方向に  $x$  軸、横断方向に  $z$  軸をとった。水路は上流部(upstream)と本流部(main channel)、急拡部(expanded area)で構成され、本流部右岸を  $z=0.0\text{m}$ 、急拡部の入口を  $x=0.0\text{m}$  とした。したがって、本流部より右岸側の  $0.0 < x < 1.2\text{m}$ 、 $z < 0\text{m}$  の領域が急拡

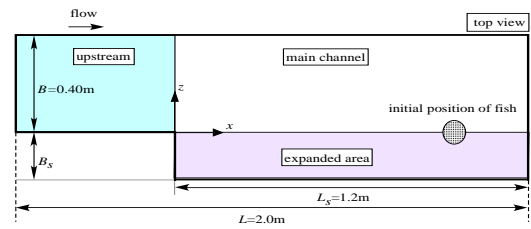
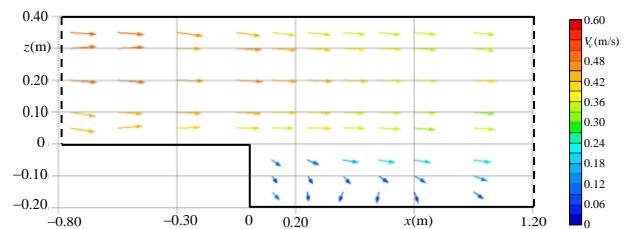


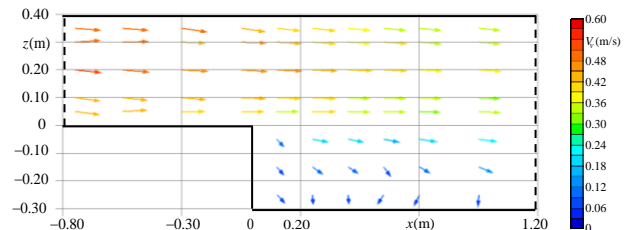
図-1 実験装置の概略図

表-1 実験条件

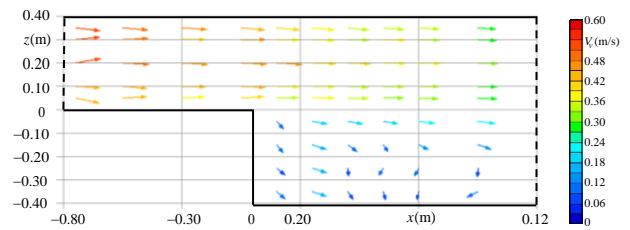
		$U_m / \bar{B}_L$ (1/s)			
		2	4	8	10
$B_s$ (m)	0.2	C02-2	C02-4	C02-8	C02-10
	0.3	C03-2	C03-4	C03-8	C03-10
	0.4	C04-2	C04-4	C04-8	C04-10



(a)  $B_s = 0.2\text{m}$



(b)  $B_s = 0.3\text{m}$



(c)  $B_s = 0.4\text{m}$

図-2 開水路内の流況

部、本流部より上流側の  $-0.80 < x < 0.0\text{m}$ 、 $0 < z < 0.4\text{m}$  の領域が上流部である。上流部と本流部を合わせた流下方向長さを  $L=2.0\text{m}$ 、幅を  $B=0.4\text{m}$ 、急拡部の流下方向長さを  $L_s=1.2\text{m}$ 、幅を  $B_s$  とした。表-1 に実験条件を示す。急拡部の横断方向幅  $B_s$  を 0.2, 0.3 および 0.4m に変化させると共に、断面平均流速  $U_m$  をオイカワの体長倍流速  $U_m / \bar{B}_L$  で 2, 4, 8, 10(1/s) とそれぞれ変化させ、合計 12 通りの実験を行った。ここに、 $\bar{B}_L$  はオイカワの平均体長 70mm である。上流部、本流部および急拡部共に水深

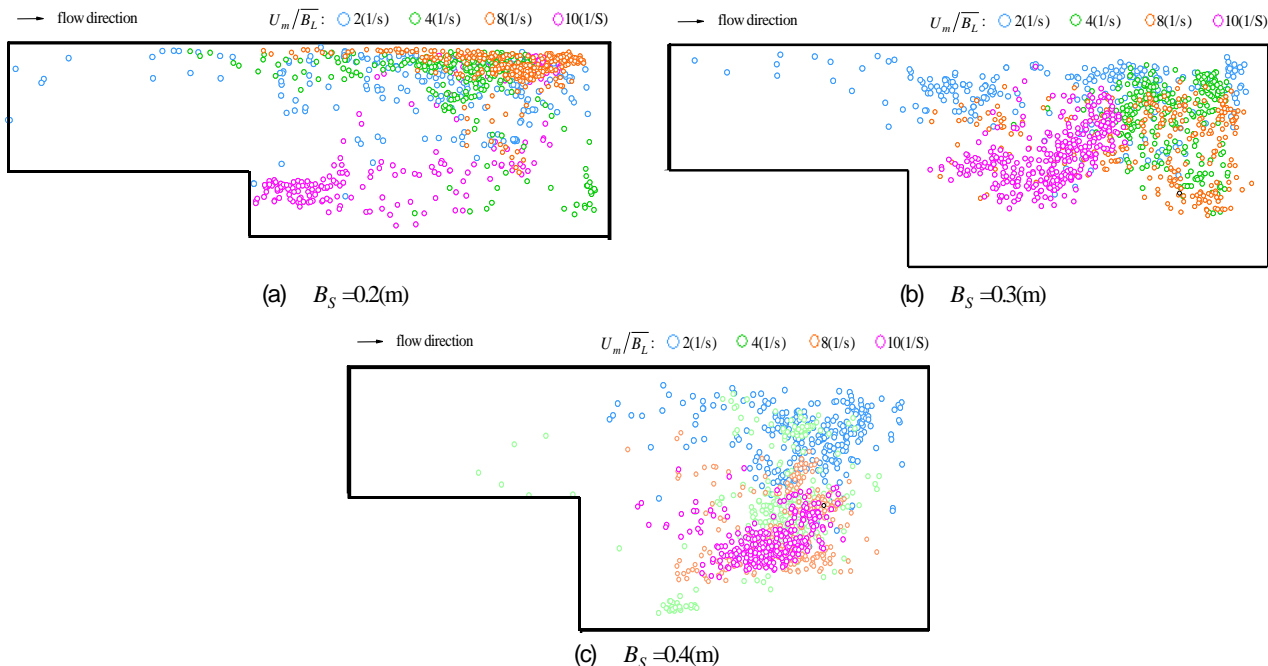


図-3 急拡大部の拡大率の変化に伴う流速別の遊泳位置の変化

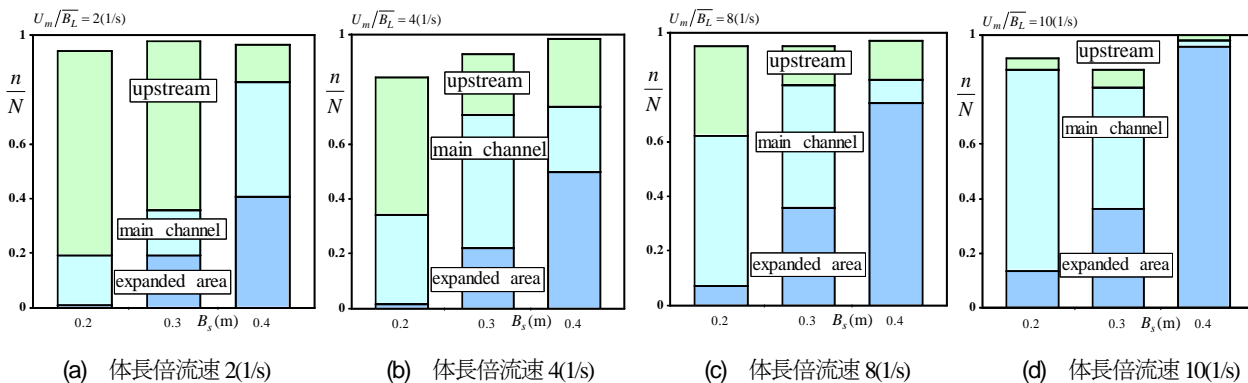


図-4 流速変化に伴う各領域における存在率

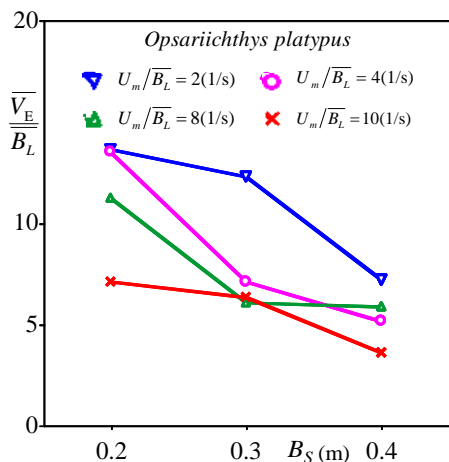


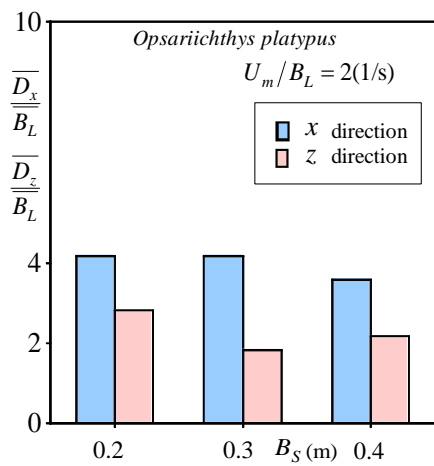
図-5 急拡大部の拡大率の変化に伴う急拡大部における魚群の平均対地速度

$h$  は約 0.07m であった。また、全ケースにおいて水温を約 20°C に保った。

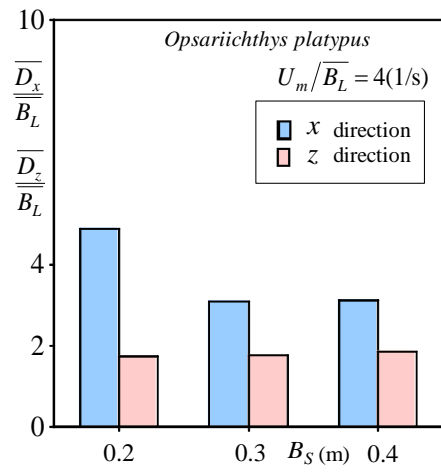
各ケースで、主流部と急拡大部との境界線 ( $z=0.0\text{m}$ ) 上の  $x=1.0\text{m}$  において、直径 0.25m の円形金網を設置し、10尾のオイカワを挿入する。オイカワを 5~10s 間ほど馴

致させた後に金網を取り上げ、水路上部に設置した画素数 1440×1080、撮影速度 30fps のビデオカメラで 120s 間の撮影を行った。これは、120s を超えると魚は他の領域に移動することがほとんどなく、魚群の対地速度や魚群長にほとんど変化がなかったためである。上記の実験を各ケースで 20 回、合計 240 回行った。撮影した動画を 2s ごとにキャプチャーしてオイカワの遊泳位置を解析し、遊泳位置、対地速度、魚群長を算出した。

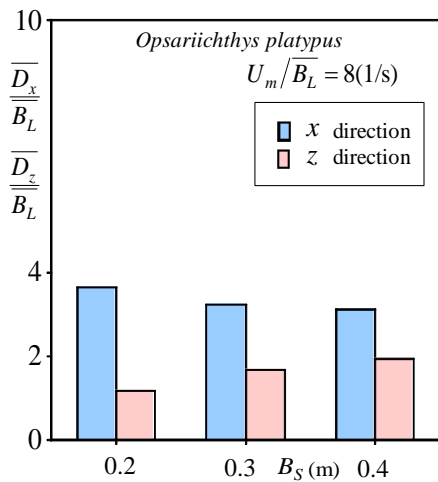
上流部および主流部における流速測定点は、 $x$  軸、 $z$  軸方向に、それぞれ  $4 \times 5 (=20)$ 、 $7 \times 5 (=35)$  の格子点とした。急拡大部における流速測定点は、 $x$  軸、 $z$  軸方向に  $B_s = 0.2, 0.3\text{m}$  では  $7 \times 3 (=21)$ 、 $B_s = 0.4\text{m}$  では  $7 \times 4 (=28)$  の格子点とした。これらの測定点において 3次元電磁流速計を用いて、 $y/h = 0.5$  の流速 3成分を 0.05s 間隔で 25.6s 計測した。計測後、 $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸方向の時間平均流速  $U$ 、 $V$ 、 $W$  および 3次元合成流速  $U_m = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$  を算出した。



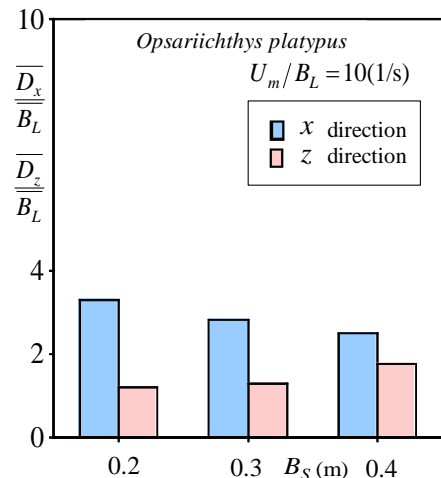
(a) 体長倍流速 2(1/s)



(b) 体長倍流速 4(1/s)



(c) 体長倍流速 8(1/s)



(d) 体長倍流速 10(1/s)

図-6 流速変化に伴う急拡部におけるx方向およびz方向の魚群長

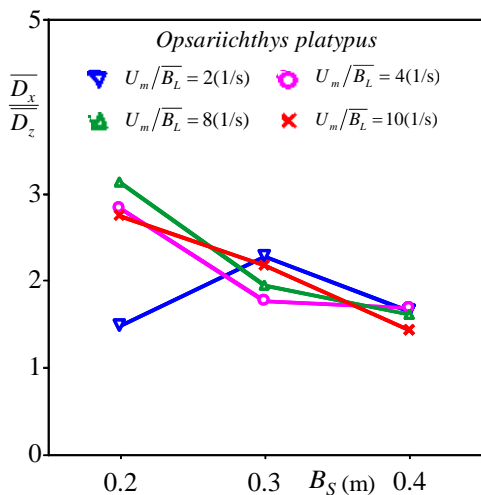


図-7 急拡部幅の変化に伴う流速別の魚群長比  $\overline{D}_x/\overline{D}_z$

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 開水路内の流況

図-2(a)~(c)に各急拡部幅  $B_S$  における体長倍断面平均流速が  $U_m/\overline{B}_L = 8(1/s)$  の流速ベクトルをそれぞれ平面図

で示す。上流部( $-0.80 < x < 0.0m$ ,  $0 < z < 0.4m$ )では、流下方向および横断方向に流速がほぼ一様で、ケース間の差異はほとんどない。本流部( $0.0 < x < 1.2m$ ,  $0 < z < 0.4m$ )では、いずれのケースでも流向がほぼx方向を向いたまま、流速値が流下方向に減少しており、ケース間の差異はほとんどない。一方、急拡部( $0.0 < x < 1.2m$ ,  $z < 0m$ )に着目すると、本流部よりも顕著に流速が減少していることや、右岸側壁付近で逆流が生じていることが観察される。また、急拡部の拡大率の増加に伴い、右岸付近の流速が低下している。

#### (2) 遊泳位置の比較

図-3(a)~(c)にオイカワの2sごとの魚群重心の瞬間位置を各流速ごとに色分けしてプロットしたものを、拡大率別に示す。いずれの急拡部幅においても、流速の増加に伴って、オイカワの魚群重心は本流部左岸から急拡部へと移動していることがわかる。また、急拡部幅が最も小さな  $B_S = 0.2m$  のケースに着目すると、オイカワの魚群重心が左岸側あるいは急拡部壁面付近に密に存在して

いるが、拡大率の増加に伴って、左岸側や急拡部壁面付近で疎に存在するようになる。

### (3) オイカワの存在率

上流部、本流部および急拡部におけるオイカワの存在率を式(1)より算出した。

$$\text{存在率} = \frac{\text{算出する領域に存在した尾数 } n}{\text{実験に用いた尾数 } N (=10)} \quad (1)$$

図-4(a)~(d)に各領域におけるオイカワの存在率を体長倍流速別に示す。全ての流速において、急拡部幅の増加に伴い、急拡部における存在率が増加し、上流部における存在率が低下している。次に体長倍流速別に見ると、体長倍流速の増加に伴い急拡部における存在率が相対的に増加し、上流部における存在率が減少している。したがって、拡大率および流速の増加に伴ってオイカワが急拡部を利用する傾向が顕著となる。

### (4) 魚群重心の対地速度

図-5に急拡部幅と急拡部における魚群の対地速度の平均値  $\overline{V_E}$  を平均体長  $\overline{B_L}$  で除した値  $\overline{V_E}/\overline{B_L}$  との関係体を長倍流速別に示す。いずれの流速においても、急拡部幅の増加に伴い、魚群の対地速度が低下している。これは、急拡部幅の増加に伴い、急拡部内でオイカワが休憩する頻度が増加することを意味している。一方、各急拡部幅における流速の影響に着目すると、流速の増加に伴い魚群の対地速度が低下していることが観察される。これは、流速の増加に伴い、急拡部内でより停滞することを意味している。流速の増加に伴い本流部の流速が増加するので、より多くの疲労が蓄積するため、急拡部内で停滞傾向を示したものと考えられる。

### (5) 急拡部における平均魚群長

図-6(a)~(d)に  $x$  および  $z$  方向の平均魚群長  $\overline{D_x}$  および  $\overline{D_z}$  を平均体長  $\overline{B_L}$  で除した値  $\overline{D_x}/\overline{B_L}$ 、 $\overline{D_z}/\overline{B_L}$  をそれぞれ流速別に示す。いずれの流速においても  $x$  方向の無次元魚群長  $\overline{D_x}/\overline{B_L}$  は急拡部幅の狭い  $B_s = 0.2\text{m}$  のケースで最も大きく、急拡部幅の増加に伴い  $\overline{D_x}/\overline{B_L}$  が減少している。一方、 $z$  方向の無次元魚群長  $\overline{D_z}/\overline{B_L}$  は拡大率の変化に関わらず、ほぼ一定である。また、いずれの急拡部幅においても、流速が変化しても  $x$  および  $z$  方向の魚群長はほとんど変化しない。

図-7に平均魚群長比  $\overline{D_x}/\overline{D_z}$  と急拡部幅との関係を流速別に示す。 $B_s = 0.2\text{m}$  で  $U_m/\overline{B_L} = 2(1/s)$  に例外が見られるものの、全ての流速において平均魚群長比  $\overline{D_x}/\overline{D_z}$  は急拡部幅の増加に伴い減少している。また、流速による平均魚群長比  $\overline{D_x}/\overline{D_z}$  への影響はほとんど認められない。

以上より、急拡部に存在する魚群の形状は、急拡部幅

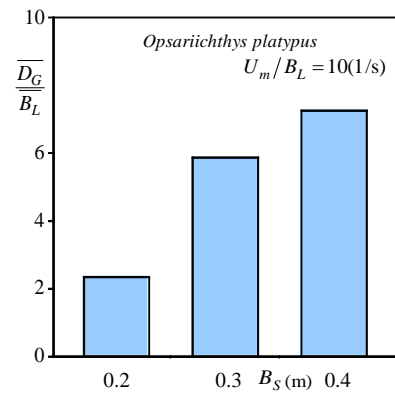


図-8 急拡部幅の変化に伴う急拡部上流側壁面から魚群重心までの平均距離  $\overline{D_G}/\overline{B_L}$

が狭い場合は流下方向に細長い形状で、急拡部幅の増加に伴い徐々に円形に近づくことが明らかとなった。

### (6) 急拡部の上流側壁面と魚群重心の距離

図-8に体長倍流速  $U_m/\overline{B_L} = 10(1/s)$  における急拡部の上流側壁面から急拡部内の魚群重心までの平均距離  $\overline{D_G}$  を平均体長  $\overline{B_L}$  で除した値  $\overline{D_G}/\overline{B_L}$  を急拡部幅別に示す。急拡部幅の増加に伴い、上流側壁面と魚群重心との平均距離  $\overline{D_G}$  が増加している。これは、急拡部幅の増加に伴い、急拡部内の比較的下流域でオイカワが休憩することを意味している。

## 4. おわりに

本研究は、開水路の急拡部幅と流速を系統的に変化させ、オイカワの休憩特性に及ぼす影響を解明したものである。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 急拡部の拡大率および流速の増加に伴い、オイカワの急拡部の利用率が増加する。
- (2) 急拡部の拡大率および流速の増加に伴い、急拡部に存在する魚群の対地速度が低下し、急拡部でオイカワが休憩する頻度が増加する。
- (3) 急拡部幅の増加に伴って、魚群形状は流下方向に細長い形状から円形に近づきながら、下流側に移動する。

したがって、オイカワの低流速域における休憩箇所や急拡部幅が小さい場合の魚群の形状から低流速域において流下方向に十分な長さが必要であることが判明した。実河川における凹部や水制などの河川構造物の設置によって発生する低流速域を魚にとってより効果的な避難場所や休憩場所にすることで、魚のすみやすい川づくりへの応用が期待できる。しかし、本実験では急拡部幅が最大でも0.4mと実河川規模の流れを再現できておらず、実河川急拡部における魚の休憩場所の確保に適切な幾何学

形状については今後の検討としたい。

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) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 2) Webb, P.W.: Hydrodynamics and energetics of fish propulsion, *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, Vol.190, pp.1-159, 1975.
- 3) Deslauriers, D. and Kieffer, J.D.: The effects of temperature on swimming performance of juvenile shortnose sturgeon (*Acipenser brevirostrum*), *Journal of Applied Ichthyology*, Vol.28, pp.176-181, 2012.
- 4) 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.
- 5) 泉完，加藤幸：河川水を用いたヤマメ稚魚の臨界遊泳速度に関する実験，農業農村工学会論文集，Vol.79, No.3, pp.151-156, 2011.
- 6) Sopinka, N.M., Hinch, S.G., Lotto, A.G., Whitney, C.K. and Patterson, D.A.: Does among-population variation in burst swimming performance of sockeye salmon *Oncorhynchus nerka* fry reflect early life migrations?, *Journal of Fish Biology*, Vol.83, pp.1416-1424, 2013.
- 7) 綾史郎，河合典彦，小川力也，紀平肇，中西史尚，竜門俊次：淀川における水位の変化と魚類の産卵行動，河川技術論文集，第10巻，pp.333-338, 2004.
- 8) 佐川志朗，萱場祐一，荒井浩昭，天野邦彦：コイ科稚仔魚の生息場所選択，応用生態工学，第7巻，pp.129-138, 2005.
- 9) 傳田正利，天野邦彦，辻本哲郎：一時的水域の魚類群集多様性向上への寄与とそれを支える物理環境に関する研究，土木学会論文集G, Vol.62, No.73, pp.340-358, 2006.
- 10) 東信行，鴨下真吾，佐原雄二，関泰夫，渡辺勝榮：増水時における河川魚類の挙動と河川構造，環境システム研究論文集，Vol.27, pp.793-798, 1999.
- 11) 佐々木丞，関根雅彦，後藤益滋，浮田正夫，今井剛：多自然型川づくりに資するための魚の行動圏調査，環境工学研究論文集，第38巻，pp.13-19, 2001.
- 12) 傳田正利，天野邦彦，原田守啓：過去の河川氾濫状況の定量的復元と氾濫原が有していた魚類避難場の機能検証，水工学論文集，第53巻，pp.1195-1200, 2009.
- 13) 福留脩文，藤田真二，福岡捷二：淵環境を回復した低水路水制の設計とその環境機能の評価，水工学論文集，第54巻，pp.1267-1272, 2010.
- 14) Hartman, K.J. and Titus, J.L.: Fish use of artificial dike structures in a navigable river, *River Research and Applications*, Vol.26, pp.1170-1186, 2010.
- 15) Gaudinnd, P. and Sempeski, P.: Role of river bank habitat in the early life of fish: the example of Grayling (*Thymallus thymallus*), *Ecology and Hydrobiology*, Vol.1, pp. 203-208, 2001.
- 16) 和田清，桑原真吾，稲川啓太，寺町茂：在来魚類の遊泳能力算定と農業用水路網の避難場所における個体群行動，河川技術に関する論文集，第12巻，pp.371-376, 2006.
- 17) 松波由佳，綾史郎，矢田敏晃：淀川ワンド群の形成・衰退とその生態学的意義，河川技術に関する論文集，第5巻，pp.93-98, 1999.
- 18) 傳田正利，山下慎吾，尾澤卓思，島谷幸宏：ワンドと魚類群集—ワンドの魚類群集を特徴づける現象の考察，日本生態学会誌，第52巻，pp.287-294, 2002.
- 19) Grift, R.E., Buijse, A.D., Van Densen, W.L.T., Machiels, M.A.M., Kranenbarg, J., Breteker, J.P.G.K. and Backx, J.J.G.M.: Suitable habitats for 0-group fish in rehabilitated floodplains along the lower River Rhine, *River Research and Applications*, Vol.19, pp.353-374, 2003.
- 20) 神尾章記，渡辺亮一，山崎惟義，島谷幸宏，河口洋一，渡辺健一：裂田の溝における護岸改修工事が魚類生息量に与える影響，水工学論文集，第53巻，pp.1207-1212, 2009.
- 21) 石川雅昭：ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究，河川技術に関する論文集，第6巻，pp.101-106, 2000.
- 22) 福井吉孝，関谷明，下村充，打田剛：アユの迷入防止装置の計画・設計について，河川技術論文集，第9巻，pp.439-444, 2003.
- 23) 中坊徹次：日本産魚類検索，東海大学出版会，2013
- 24) 田子泰彦，辻本良：河川の浅瀬に人工的に造成した淵における魚類の出現，応用生態工学，Vol. 8, No. 2, pp.165-178, 2006.
- 25) MacArthur, R.H. and MacArthur, J.W.: On bird species diversity, *Ecology*, Vol.42, pp.594-598, 1961.
- 26) 傳田正利，天野邦彦，萱場祐一：出水の水理特性が魚類行動に与える影響，水工学論文集，第49巻，pp.1465-1470, 2005.
- 27) 高水克哉，栗原朋之，青木宗之，内山文哉，福井吉孝：杭水制内外の流れと魚の挙動，水工学論文集，第51巻，pp.1273-1278, 2007.

(2016.9.30 受付)

## EFFECTS OF SPANWISE WIDTH OF EXPANSION AREA IN OPEN-CHANNEL FLOW ON RESTING CHARACTERISTICS OF *OPSARIICHTHYS PLATYPUS*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Kento JOJI, Kousuke IZUMI,  
Ryo OGATA and Takahiro NISHIKAWA

It is important to supply the rest area for fish. However, resting characteristics in low velocity area has not been investigated so much. In this study, an investigation on resting characteristics of *Opsariichthys platypus* was conducted under the condition that the spanwise width of sudden expansion area and also the flow velocity are changed. It was found that many *Opsariichthys platypus* used expansion area with the increase of expansion width and flow velocity. In expansion area, when the spanwise width of expansion increases, ground speed decreases and the form of fish school becomes nearly circular form from a long narrow. Also, the distance between the upstream wall at expansion and the center of gravity of fish school increases.