

# 増水時における流速と加速度がオイカワの 遊泳特性に及ぼす影響

鬼東 幸樹<sup>1</sup>・秋山 壽一郎<sup>2</sup>・定地 憲人<sup>3</sup>・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)

魚類は洪水時に遊泳挙動を変化させ、流速の低い場所や上流へ移動することが解明されている。加速度や流速などの水理量は魚の遊泳挙動に影響を及ぼす要因と考えられる。本研究は加速度および増水後の流速とオイカワの挙動との関係について検討したものである。ベース流速を固定し、加速度と増水後の流速を変化させ、開水路内のオイカワの挙動を撮影した。その結果、増水時の加速度の増加に伴い、増水時と増水完了直後におけるオイカワの降下率が増加することが判明した。また、増水の前半と比較すると、後半における頭部上流向きのオイカワの対地速度が低下することが判明した。

**Key Words:** *Opsariichthys platypus*, swimming behavior, velocity, acceleration

## 1. はじめに

近年、洪水が頻発化しているとの指摘がある<sup>1)</sup>。洪水時には河川流量が著しく増加あるいは減少するため、河川を生活域としている魚類への影響は大きい。流況の変動は産卵や摂餌のために河川を遡上あるいは降下する魚類の移動を妨げる要因の1つと考えられる。洪水時を含めた魚類の生息環境の保全を行うためには、まず、洪水時の魚類の行動特性を把握する必要がある。

佐川ら<sup>2)</sup>は洪水時の木曾川において、階段護岸、練石護岸およびわんど部で魚類調査を行い、わんど部で最大の尾数を確認した。傳田ら<sup>3)</sup>は千曲川中流において魚類を採取し、出水時における本川とわんどとの間の魚類の移動を確認し、冠水頻度がわんどの魚類相に影響を与えることを解明した。Lyon *et al.*<sup>4)</sup>は本川と湿地帯との接合部で魚類調査を行い、魚類は増水期に本川から側岸部へ、減水期には逆の移動を行うことを示唆した。佐川ら<sup>5)</sup>は自然共生研究センターの実験河川の側岸に、わんど部および横断方向に傾斜した水際部を設置し、増水の前後に魚類調査を行った。その結果、増水時に稚仔魚が本川からわんど部あるいは水際部に回避することを解明した。以上のように洪水時における河川横断方向の移動形態は徐々に明らかにならる。

魚類の河川縦断方向の移動の把握にはテレメトリー法

が有用である。東ら<sup>6)</sup>はテレメトリー法を用いて、河川におけるウグイおよびサクラマス<sup>7)</sup>の挙動を追跡し、出水直後に流下したウグイが復帰回帰を試みることや、増水によってサクラマスの遡上が誘発されることを示唆した。佐々木ら<sup>8)</sup>はテレメトリー法を用いて河川におけるカマツカやフナ等の挙動を調査し、増水時にカマツカが下流に流される様子や、洪水中にフナがわんど部で停留している様子を図示した。傳田ら<sup>9)</sup>はテレメトリー法を自動化したATS(Advanced Telemetry System)を開発し、千曲川におけるニゴイの挙動を調査した。その結果、増水期に供試魚は本川から高水敷上に移動しながら流下し、減水期に本川に戻ることを証明した。

以上のように洪水時における魚類の大局的な挙動が明らかにされつつあるが、洪水の水理学的特性を表す流速、加速度、増水(あるいは減水)時間と魚類の遊泳特性との関係はほとんど解明されていない。傳田ら<sup>10)</sup>は自然共生センターの実験河川において、増水時間、ピーク流量、ピーク持続時間を変化させた6ケースにおいて、コイあるいはギンブナの挙動をテレメトリー法で追跡した。その結果、流速を魚の体長で除した体長倍流速が2以下では定位するが、2以上では上流に移動し、さらに、3以上では移動を停止すると述べた。また、体長倍流速が3以上を経験した魚は、流速の加速度が減少中で体長倍流速が2~3になると再移動を行うと述べた。ただし、流速お

よび加速度の両者が同時に変化した実験であるため、得られた魚の挙動が流速あるいは加速度のいずれの影響によるものかを判断するのは難しい。鬼束ら<sup>12)</sup>はベース流速および増水時間を固定し、ピーク流速を変化させて単独で遊泳するオイカワの挙動を観察した。その結果、増水時のオイカワの遊泳特性に及ぼす影響は、加速度よりも流速の方が支配的であることを示した。ただし、ピーク流速を変化させているため、異なる加速度を経験した同様なピーク流速における挙動の相違などは明らかになっていない。

本研究は、ベース流速を固定し、ピーク流速および加速度を変化させた流況において、オイカワの挙動に及ぼす速度、加速度などの影響を解明したものである。なお、本研究で得られた知見は、実験装置の大きさから、実河川をセル分割した際の局所的なオイカワの遊泳挙動と対応していると考えられる。よって具体的には、洪水時を含めた魚類の生息環境保全を考える際に、例えばPHABSIM(Physical Habitat Simulation System)の評価基準に加速度を導入する理由付けとして本研究の知見が寄与すると考えられる。

## 2. 実験装置および実験条件

図-1に示す長さ4.0m、幅0.8m、高さ0.25mの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。流れが一樣になっている領域において、x軸方向に流下方向長さ $L_x=2.0\text{m}$ 、z軸方向に横断方向長さ $L_z=0.8\text{m}$ の範囲をSwimming Areaと命名する。表-1に実験条件を示す。ここに、 $\overline{B_L}$ はオイカワ(*Opsariichthys platypus*)<sup>13)</sup>の平均体長70mmである。なお、オイカワの最小および最大体長はそれぞれ68, 74mmであった。増水完了後のピーク流速を体長倍流速 $U_p/\overline{B_L}$  (peak velocity)で6, 10, 12(1/s)の3通り、加速度 $\alpha$ を0.4, 0.6, 0.8, 1.0(1/s<sup>2</sup>)の4通りに変化させた合計12ケースの実験を行った。なお、流速については、オイカワの遡上が困難となる突進速度より高い値を最大流速に設定し、加速度については、加速度の違いによるオイカワの遡上、降下行為などに関する閾値を知るために、実河川における出水時の加速度よりかなり高い値を設定した。ケース名は加速度 $\alpha$ と増水完了後のピーク流速 $U_p/\overline{B_L}$ に基づいて命名した。例えば、U6-08は増水完了後の流速 $U_p/\overline{B_L}=6(1/s)$ 、加速度 $\alpha=0.8(1/s^2)$ の場合を示す。

各ケースにおいて水深 $h=0.04\text{m}$ としてベース時に断面平均流速が体長倍流速 $U_B/\overline{B_L}$  (base velocity)で2になるように流量を設定した。続いて、Swimming Area中央(Initial Position)に設置した直径0.25mの円形金網にオイカワ1尾

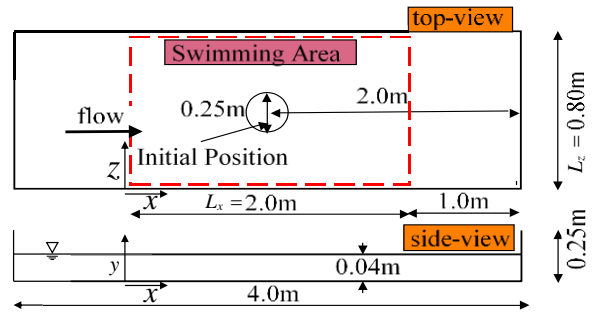


図-1 実験装置の概略図

表-1 実験条件

base velocity $U_B/\overline{B_L}$ (1/s)	peak velocity $U_p/\overline{B_L}$ (1/s)	acceleration $\alpha$ (1/s <sup>2</sup> )			
		0.4	0.6	0.8	1.0
2	6	U6-04 ( $t_\alpha=10\text{s}$ )	U6-06 ( $t_\alpha=6.67\text{s}$ )	U6-08 ( $t_\alpha=5\text{s}$ )	U6-10 ( $t_\alpha=4\text{s}$ )
		U10-04 ( $t_\alpha=20\text{s}$ )	U10-06 ( $t_\alpha=13.3\text{s}$ )	U10-08 ( $t_\alpha=10\text{s}$ )	U10-10 ( $t_\alpha=8\text{s}$ )
	10	U12-04 ( $t_\alpha=25\text{s}$ )	U12-06 ( $t_\alpha=16.7\text{s}$ )	U12-08 ( $t_\alpha=12.5\text{s}$ )	U12-10 ( $t_\alpha=10\text{s}$ )

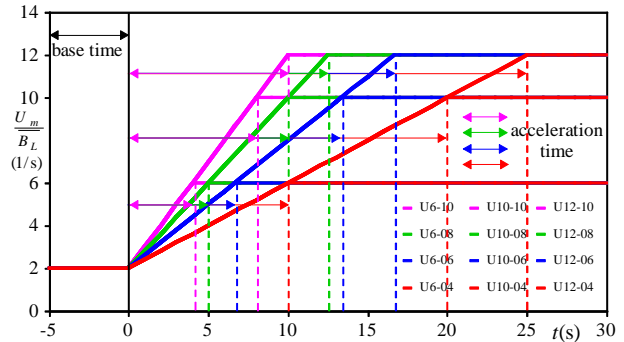


図-2 流速の時間変化

を挿入する。オイカワが流れに馴致したと判断された後、所定の加速度 $\alpha$  (acceleration)で増水を開始する。円形金網付近の流れが定常から非定常に変化するときに円形金網を取り上げ、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Swimming Area内の撮影を開始した。各ケースで等加速度で流速を増加させ、目標のピーク流速 $U_p/\overline{B_L}$ に達した時に、定常状態とした。図-2に流速の時間変化の模式図を示す。各ケースにおいて、ベース時およびピーク時の断面平均流速( $U_B/\overline{B_L}$ ,  $U_p/\overline{B_L}$ )および加速度 $\alpha$ を設定しているため、増水時間 $t_\alpha$ は表-1のケース名の下部に示すように自動的に決定される。上記の実験を各ケースで30回、合計360回行った。なお、実験結果に個体差が影響しないように、200尾のオイカワを順番に使用した。個体を反復して使用する場合は、疲労や慣れが実験に影響しないように3日以上の間隔を設けて実験を行った。実験後、0.5sごとのオイカワの遊泳位置を特定し、遡上率、降下率、対地速度および屈折角度を算出した。

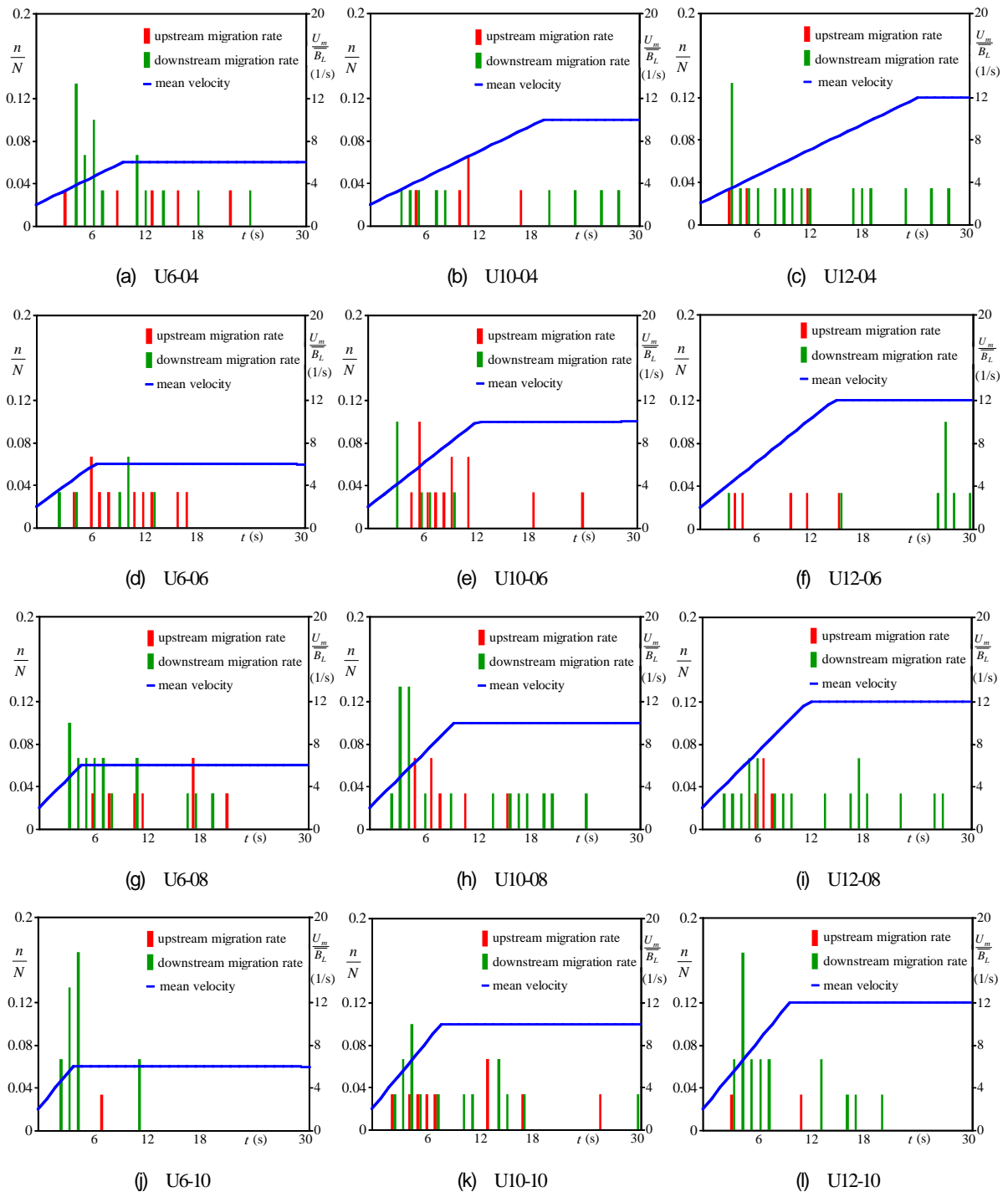


図-3 遡上率・降下率および流速の時間変化

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上回数 } n_m}{\text{実験回数 } N (=30)} \quad (1)$$

$$\text{降下率} = \frac{\text{降下回数 } n_d}{\text{実験回数 } N (=30)} \quad (2)$$

### 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

Swimming Areaの上流境界に到達した場合を遡上、Swimming Areaの下流境界に到達した場合を降下とし、遡上率および降下率をそれぞれ、式(1)、式(2)のように定義する。

図-3に1s間ごとの遡上率(upstream migration rate)および降下率(downstream migration rate)  $n/N$  (左側縦軸)をそれぞれ赤色および緑色の棒グラフで、体長倍流速(mean velocity)  $U_m/\overline{B_L}$  (右側縦軸)を実線でケース別に示す。最も大きな加速度の  $\alpha = 1.0(1/s^2)$  の降下率に着目すると、図-3(j)

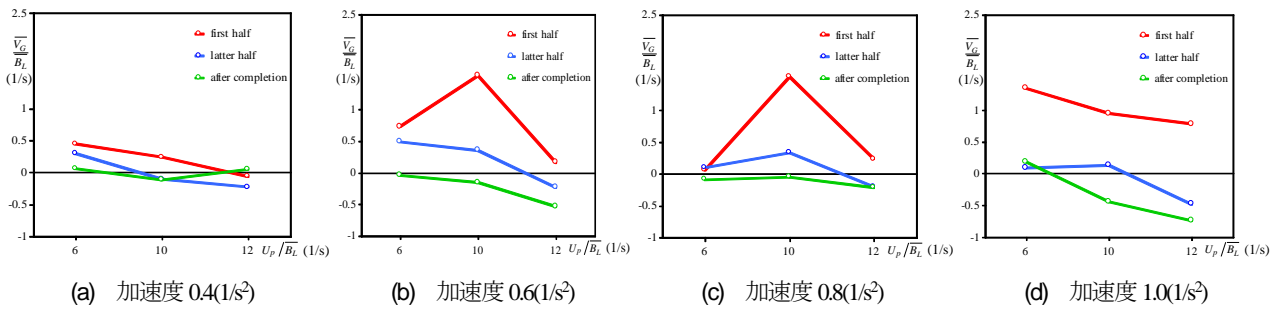


図-4 頭部上流向きのおイカワの対地速度

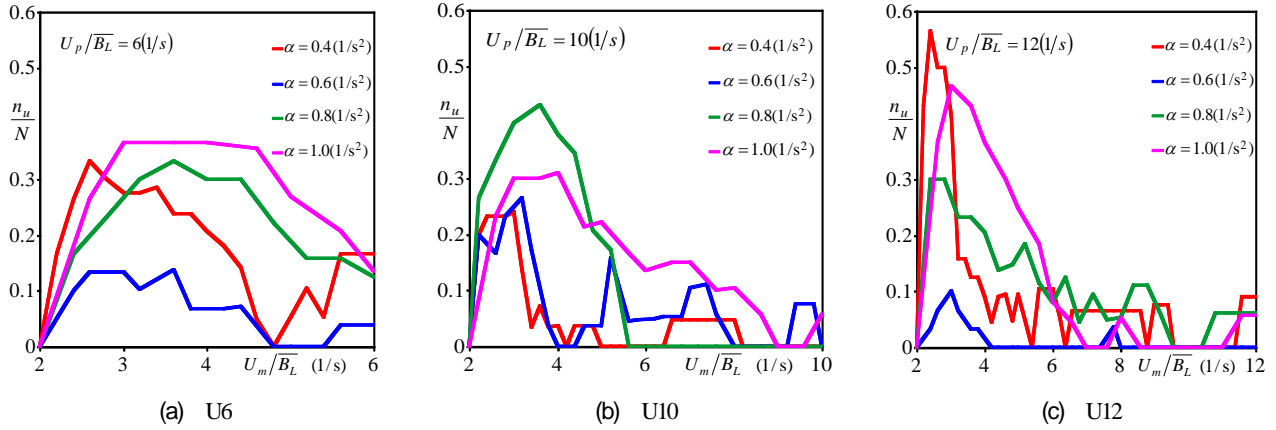


図-5 増水時における頭部下流向き割合

～(j)で観察されるように、増水時および増水完了直後において高い降下率を示している。次に加速度の大きな  $\alpha = 0.8(1/s^2)$  では、図-3(g)～(j)に観察されるように、増水時および増水完了直後において降下した個体は確認できるものの、その個体数は加速度が  $\alpha = 1.0(1/s^2)$  のものより少ない。さらに加速度  $\alpha$  が小さな  $\alpha = 0.6, 0.4(1/s^2)$  では、図-3(a)～(f)に見られるように、増水時および増水完了直後の降下数が減少している。

続いて、遡上率に着目する。最も大きな加速度の  $\alpha = 1.0(1/s^2)$  の遡上率に着目すると、図-3(j)～(l)で観察されるように、増水時および増水完了直後において、遡上している個体が若干確認されるが、同ケースの降下率より極端に少ない。加速度  $\alpha = 0.8, 0.6, 0.4(1/s^2)$  では、図-3(a)～(i)に見られるように、加速度  $\alpha = 1.0(1/s^2)$  の結果と比較して、遡上数が顕著に増加している。したがって、増水の加速度の増加に伴い、遡上率が低下し、降下率が増加することが明らかとなった。

## (2) 頭部上流向きのおイカワの対地速度

図-3 より、遡上および降下が増水中に均等に発生しておらず、例えば、U10-08 では増水の前半に多くの降下が発生していることが認められる。これは、増水の前半と後半でオイカワの遊泳挙動が異なることを示唆している。そこで、増水時間を前半と後半に分けて遊泳特性を区別する。魚向が  $x$  軸正方向を下流向き、 $x$  軸負

方向を上流向きと定義する。図-4 に魚向が上流向きのおイカワにおける、増水前半、増水後半、および増水完了後の平均対地速度  $\overline{V_G}$  を、オイカワの平均体長  $\overline{B_L}$  で除した値  $\overline{V_G}/\overline{B_L}$  を加速度別に示す。図-4(a)の加速度  $\alpha = 0.4(1/s^2)$  では、増水前半と比較して、増水後半のおイカワの対地速度が低下している。図-4(b)～(d)の加速度  $\alpha = 0.6, 0.8, 1.0(1/s^2)$  では  $\alpha = 0.4(1/s^2)$  と比較して、増水前半と増水後半のおイカワの対地速度の差が増加している。これは、増水前半において、オイカワは急な増水に対して反射的に流れに逆らって遡上を試み、増水後半では、加速度が大きいほどより早く高速流に達するため、オイカワは高速流に備えて降下を最小限に留めるように、遡上から定位の行動にシフトしたからと考えられる<sup>10)</sup>。したがって、増水時は前半よりも後半の対地速度が低下するが、この傾向が加速度の増加に伴い顕著になることが判明した。

## (3) 増水時の魚向

増水時においてオイカワの魚向が下流向き尾数  $n_u$  を算出し、総尾数  $N$  に対する割合  $n_u/N$  を図-5 にピーク流速別に示す。いずれのケースも増水開始時に  $n_u/N$  がほぼゼロであることから、ほとんど全てのオイカワは上流を向いていることがわかる。ところが、増水開始と共に  $n_u/N$  の値が急激に増加することから、下流向き個体が急増していることが確認される。これは、増水開

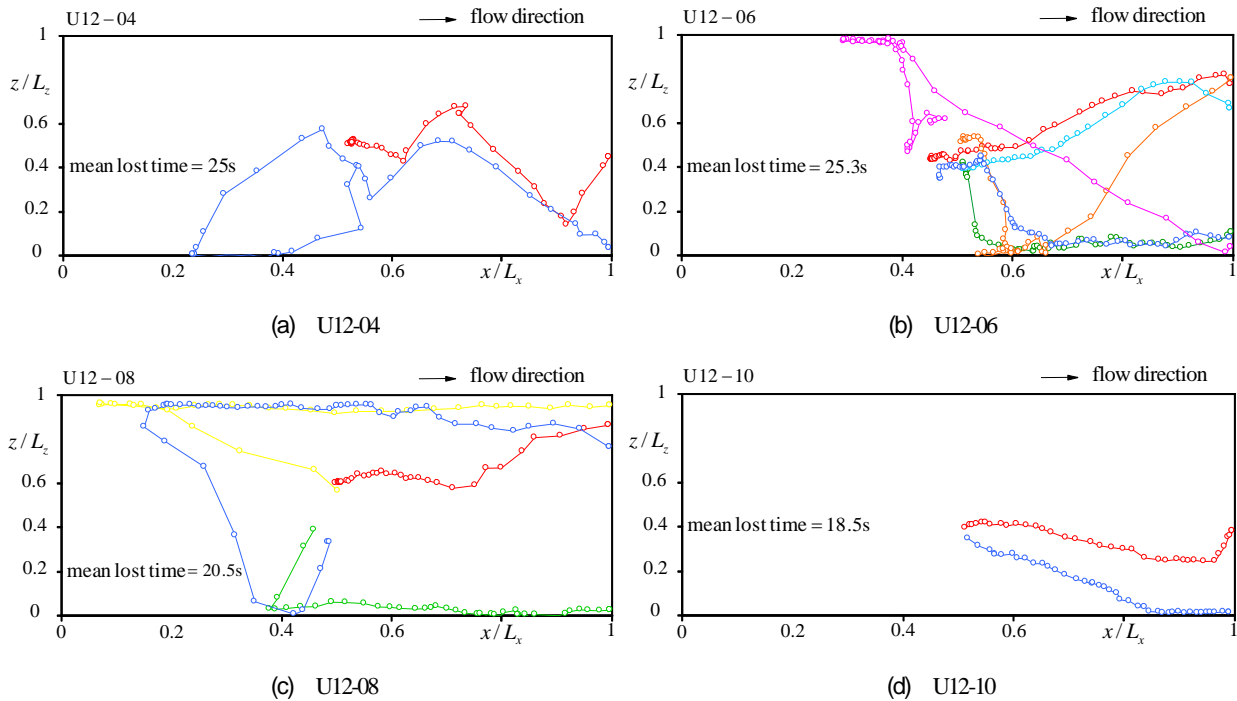


図-6 流失したオイカワの遊泳軌跡

始直後の急な増水に対してオイカワが上流方向で遊泳することが困難となり、下流方向を向いたためと考えられる。こうした傾向は、増水開始直後に顕著であるが、時間の経過と共に流速が増加すると  $n_u/N$  が減少しており、徐々にオイカワが上流方向を向く傾向があることが理解される。これは、正の走流性を有するオイカワが、増水に対して上流方向への遊泳を試みたためと考えられる。また、各ピーク流速の結果に着目すると、概ね加速度の増加に伴いオイカワの下流向きの個体が増加していることが確認される。これは、加速度が増加するとピーク流速に達するまでの時間が短くなり、オイカワはより早く高速流に接するためと考えられる。

#### (4) 流失したオイカワの遊泳挙動

上流を向いた状態で降下した場合を流失と定義する。ピーク流速  $U_p/\overline{B_L} = 6, 10, 12(1/s)$  のケースで流失した個体はそれぞれ 0.5, 14 尾確認された。したがって、最も流失した個体の多いピーク流速  $U_p/\overline{B_L} = 12(1/s)$  のケースについて、0.5s ごとのオイカワの遊泳軌跡を図-6 に示す。加速度の小さな  $\alpha = 0.4, 0.6(1/s^2)$  に比べ、加速度の大きな  $\alpha = 0.8, 1.0(1/s^2)$  における平均流失時間が減少している。また、ピーク流速  $U_p/\overline{B_L} = 10(1/s)$  のケースについても同様の傾向がみられた。これは、加速度が増加するとピーク流速に達するまでの時間が短くなり、早いタイミングで高流速に遭遇して押し流されるからと考えられる。

本解析では、0.5s 間隔で遊泳位置を読み取っているため、連続する画像におけるオイカワの遊泳位置を直線で

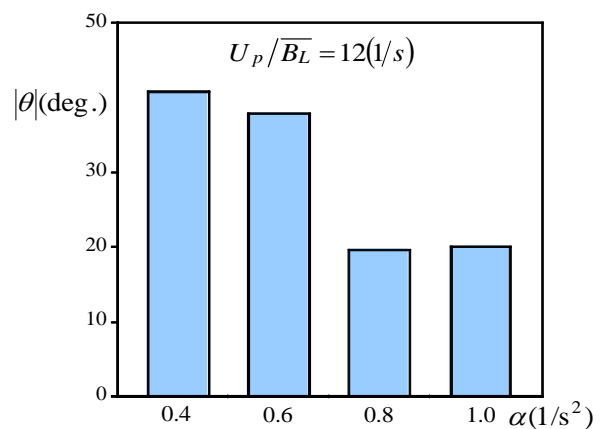


図-7 増水時における流失したオイカワの屈折角度と加速度の関係

結び、これを直線部とした。また、直線部の両端を屈折部とした。屈折部における角度の内、小さな角度を屈折角度と定義した。図-7 に流失したオイカワの増水時における屈折角度の平均値と加速度との関係を、ピーク流速が  $U_p/\overline{B_L} = 12(1/s)$  のケースについて示す。加速度の増加に伴い、屈折角度の平均値が小さくなっていることが分かる。ピーク流速  $U_p/\overline{B_L} = 10(1/s)$  のケースについても同様の傾向がみられたが、これは、加速度が増加すると、より早くオイカワが高速流に遭遇するため、正の走流性を有するオイカワが上流方向を向くためと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究はベース流速を固定し、増水後の流速と加速度を変化させた流況において、オイカワの遊泳挙動に及ぼす増水の影響を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 増水時および増水完了直後において、加速度の増加に伴ってオイカワの降下率が増加する。
- (2) 増水の前半と比較して、後半における頭部上流向きオイカワの対地速度が低下することが判明した。この傾向は加速度の増加に伴い顕著になる。
- (3) 増水開始直後において、オイカワは急な増水によって上流方向を向くことが困難になり、下流方向を向く傾向がある。時間の経過に伴い、上流方向への遊泳を試みるために上流方向を向く傾向を示す。
- (4) 正の走流性をもつオイカワは、加速度が増加するより早く高速流に遭遇し、直線的に流失する。

なお、本研究では前述の通り加速度に大きい値を設定しており、より加速度の小さいケースについては今後検討したいと考えている。また、現状として洪水時における流速および加速度を正確に測定する手法が確立されておらず<sup>14)</sup>、実河川における増水時の遊泳挙動に関する既往研究の中で加速度を扱っているものは数少ない。これにより、本論文の考察が実河川との関連性が希薄になってしまったため、より詳細な増水時のオイカワの遊泳特性の吟味については今後の検討課題としたい。

**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：鬼東幸樹）の援助を受けた。

#### 参考文献

- 1) 文部科学省、気象庁、環境省：温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」、2009.
- 2) 佐川志朗、田代喬、松間充：出水時におけるオイカワ稚仔魚の避難場所、多自然研究, No.114, pp.3-7, 2005.
- 3) 傳田正利, 山下慎吾, 尾澤卓思, 島谷幸宏：ワンドと魚類群集, 日本生態学会誌, Vol.52, pp.287-294, 2002.
- 4) 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.3, pp.340-358, 2006.
- 5) 傳田正利, 天野邦彦, 辻本哲郎：物理生息場モデルを用いた一時的水域内の物理環境特性が魚類生息に与える影響の評価, 水工学論文集, 第51巻, pp.1297-1302, 2007.
- 6) Lyon, J., Stuart, I., Ramsey, D. and O'Mahony, J.: The effect of water level on lateral movements of fish between river and off-channel habitats and implications for management, *Marine and Freshwater Research*, Vol.61, pp.271-278, 2010.
- 7) 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, Vol.1.7, pp.129-138, 2005.
- 8) 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, Vol.27, pp.793-798, 1999.
- 9) 佐々木丞, 関根雅彦, 後藤益慈, 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.
- 10) 傳田正利, 天野邦彦, 辻本哲郎：魚類自動追跡システムの現地実証実験と魚類行動特性の把握, 土木学会論文集B, Vol.65, No.1, pp.1-14, 2009.
- 11) 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.
- 12) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 平野陽一, 鏗敬介, 桃谷和也, 古里佳子：増水がオイカワの遊泳挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.71, No.4, I\_1075-I\_1080, 2015.
- 13) 中坊徹次：日本産魚類検索, 東海大学出版会, 2013.
- 14) 江蔵拓, 笹川幸寛, 手計太一：各種河川流速手法に関する基礎的検討, 河川流量観測の新時代, 第3巻, pp.41-48, 2012.

(2016.9.30 受付)

## EFFECTS OF FLOW VELOCITY AND ACCELERATION IN INCREASING DISCHARGE ON SWIMMING BEHAVIOR OF *OPSARIICHTHYS PLATYPUS*

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

The state of the fish movement changes during the duration and it is shown that fish move to the low velocity zone or migrate upstream. The acceleration and the velocity are the factors that effect on the swimming behavior. The purpose of this study is to make clear that effects of the acceleration and the velocity during acceleration on the swimming behaviours of *Opsariichthys platypus*. The base velocity was fixed, the acceleration and latter velocity was changed. The swimming behavior in open channel was recorded with a digital video camera. As a result, it is found that downstream migration rate of *Opsariichthys platypus* increased with the increase of acceleration during and after the increasing discharge. In addition, when the latter half of acceleration time compared with the first half, ground speed of *Opsariichthys platypus* looking toward upstream decreases.