

# 増水がオイカワの遊泳挙動に及ぼす影響

## EFFECTS OF INCREASING DISCHARGE ON SWIMMING BEHAVIOR OF ZACCO PLATYPUS

鬼東幸樹<sup>1</sup>・秋山壽一郎<sup>2</sup>・平野陽一<sup>3</sup>・鏝敬介<sup>3</sup>・桃谷和也<sup>4</sup>・古里佳子<sup>4</sup>  
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yoichi HIRANO, Keisuke KASUGAI,  
Kazuya MOMOTANI and Yoshiko FURUSATO

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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

<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

<sup>4</sup>学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

The floods sometimes occur so that the discharge, velocity, flow depth are changed. In such situations, fish behaviors may be changed. However, there is little information on the fish behaviors in flood. In this study, the swimming behaviors of *Zacco Platypus* (Oikawa) in the increasing discharge flows were recorded with a digital video camera. It was found that swimming speed of *Zacco Platypus* increased with an increase of velocity. In contrast, the ground speed of *Zacco Platypus* did not so change, irrespective of increasing discharge. The ground speed and swimming distance of *Zacco Platypus* did not change, even if the acceleration of velocity is changed. The effects of the acceleration on the swimming behavior of *Zacco Platypus* was smaller than that of the velocity.

**Key Words :** *Zacco Platypus*, increasing discharge, swimming behavior, velocity, acceleration

### 1. はじめに

2006年に国土交通省より公表された「多自然川づくり基本方針」により、河川が本来有している生物の生息・生育・繁殖環境を保全・創出することが河川管理に位置づけられ、2012年に国土交通省より公表された「中小河川に関する河道計画の技術基準」で生物移動の上下流間の連続性を確保することが求められるようになった。しかし、生物移動の上下流間の連続性を確保できる河道設計を行うことは容易ではない。なぜなら、魚類がいつどのような経路を辿って上下流間を移動しているかが不明瞭だからである。平水時よりも魚類にインパクトを与えると推定される洪水時における魚類の移動形態は、ほとんど解明されていない。

佐川ら<sup>1)</sup>は洪水時の木曾川において、階段護岸、練石護岸およびワンド部においてタモ網を用いた魚類捕獲を行い、ワンド部で突出した尾数を捕獲した。Ward *et al.*<sup>2)</sup>は本川、ワンド、たまりにおける生物層を調査し、洪水時に高水敷上の生物集団のパッチがつながることで種多様性が増加することを示した。Agostinho *et al.*<sup>3)</sup>も洪水時における高水敷上の種多様性の増加を確認した。傳田ら<sup>4)</sup>は千曲川中流において、定置網、投網、電気ショッ

カー、スコープなどを状況に応じて使い分けて魚類を採取し、出水時における本川とワンドとの間の魚類移動を確認し、冠水頻度がワンドの魚類相の形成に影響を与えることを解明した。Lyon *et al.*<sup>7)</sup>は本川と湿地帯との接合部でサデ網を用いて魚類調査を行った結果、魚類は増水期に本川から側岸部へ、減水期に側岸部から本川に移動することを示唆した。Linhoss *et al.*<sup>8)</sup>増水期に成魚は本川から高水敷へ移動するのに対して、稚魚はピーク後に移動を行うことを明らかにした。佐川ら<sup>9)</sup>は自然共生研究センターの実験河川の側岸にワンドゾーンおよび横断方向に傾斜した水際部を設置し、増水の前後にサデ網で魚類を捕獲した。その結果、増水時に稚仔魚が本川からワンドあるいは水際部に忌避することを解明した。以上のように平水時と洪水時における本川と一時水域の魚類の利用状況は解明されつつあるが、上記の研究は個体を個別に追跡した調査ではないため、増水期などに各個体が本川から高水敷へ遊泳したのか、増水中などに上流側で本川から高水敷に流された個体が移流されてきたかの判別は困難である。洪水時の魚類の挙動を把握するには、各個体の遊泳軌跡を個別に追跡する方法が適切と考えられる。

近年、山本・本田<sup>10)</sup>はRFID(Radio Frequency

IDentification:無線周波数認識システム)という小型のICタグを平均体長164mmのアユ13尾に装着し、室内水路での追跡に成功した。ただし、RFIDの魚類への適用事例は少なく、魚類を個別に追跡した事例の多くはテレメトリー法を採用している。河川魚に対するテレメトリー法の使用例として、ゴールドンパーチとコイを追跡したCrook<sup>11)</sup>の研究、カワマスを半年間追跡したKobler *et al.*<sup>12)</sup>の研究、産卵のための高水敷利用状況を観察したBurgess *et al.*<sup>13)</sup>の研究、カワマスの長期移動状況を追跡したBaetens *et al.*<sup>14)</sup>の研究、ナマズの行動の季節変化を追跡した森ら<sup>15)</sup>の研究などが挙げられるが、洪水時における河川魚を追跡した研究は多くない。

佐々木ら<sup>16)</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た。その結果、増水中にカマツカが下流に流される様子や、洪水時にフナがワンド部で停留している様子を図示した。東ら<sup>17)</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の挙動を追跡し、出水直後に流下したウグイがワンドに忌避していることを実証するとともに、増水によってサクラマスの遡上を誘発することを示唆した。傳田ら<sup>18)</sup>は降雨後にゲンゴロウブナが湖沼内を活発に遊泳することを明らかにした。また、傳田ら<sup>19)</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、増水期に本川から供試魚が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。

傳田ら<sup>20)</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、体長倍流速  $U_m/B_L$  ( $U_m$ :流速,  $B_L$ :体長)が2以下では流出回避のために定位するが、体長倍流速  $U_m/B_L$  が2以上では上流に移動し、さらに、 $U_m/B_L$  が3以上では遊泳限界に達するために移動を停止すると述べた。また、体長倍流速  $U_m/B_L$  が3以上を経験した魚は、流速の加速度が減少中で  $2 < U_m/B_L \leq 3$  の条件で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速度あるいは加速度のいずれの影響によるものかを容易に判断できない。

本研究は、ベース流量および増水時間を固定し、ピーク流量を変化させた流況において、オイカワの挙動に及ぼす増水の影響を解明したものである。

## 2. 実験装置および実験条件

図-1に示す水路長4.0m、横断方向幅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。

表-1に実験条件を示す。ここに、 $U_m$ は断面平均流速、 $B_L$ はオイカワ(*Zacco Platypus*)の平均体長70mmである。

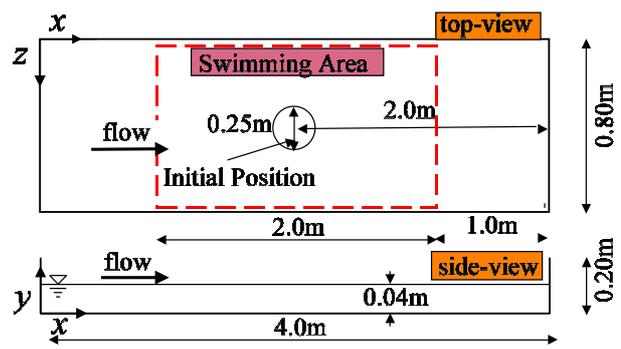


図-1 実験装置の概略図

表-1 実験条件

case name	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-10	
duration time	$T$ (s)							
base velocity	2							
peak velocity	$U_m/B_L$ (1/s)	3	4	5	6	7	8	10

なお、オイカワの最小および最大体長はそれぞれ67mm、72mmであり、体長の標準偏差は1.13mmであった。これより、オイカワの体長の違いによる遊泳挙動への影響はないと考えられる。解析においては平均体長を用いた。本研究では、増水中のオイカワに対する流速と加速度の影響を観察するために増水時間を20sに設定した。水深  $h = 0.04\text{m}$  で体長倍流速  $U_m/B_L$  が2になるように流量を設定した状態で、水路下流端から2.0mの位置の水路中央に設置した直径0.25mの円形金網にオイカワ1尾を挿入する。5~10s間ほど観察し、オイカワが流れに慣れていると判断できた後金網を取り上げ、流速が20s後に体長倍流速で3~10の範囲の7通りの値にそれぞれ到達するように、流量を線形的に増加させた。水路上部に設置した画素数1440×1080、撮影速度30fpsのビデオカメラを用い、水路下流端から1~3mの範囲のSwimming Areaにおけるオイカワの挙動を20s間撮影した。

上記の実験を各ケースで50回、合計350回行った。なお、実験結果に個体差が生じないように、200尾のオイカワを順番に使用した。また、反復して固体を使用する場合は、疲労や慣れが実験に影響しないように最低3日空けて実験を行った。ケース名は表-1に示すように、増水終了後の体長倍流速  $U_m/B_L$  (peak velocity) に基づいた名称とした。

実験後、0.5sごとのオイカワの遊泳位置を求め、遡上率、降下率、対地速度、遊泳速度、総遊泳距離、屈折回数を算出した。

## 3. 実験結果および考察

### (1) 増水時の遡上率および降下率

実験開始から20s間の増水中に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定義し、次式のよう

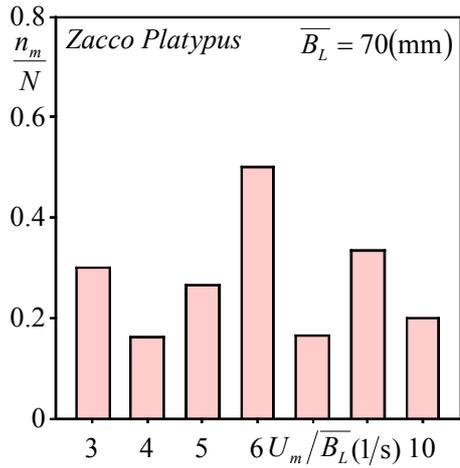


図-2 各ケースにおけるオイカワの遡上率

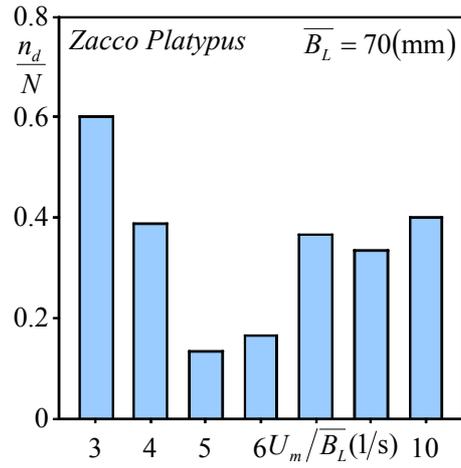


図-3 各ケースにおけるオイカワの降下率

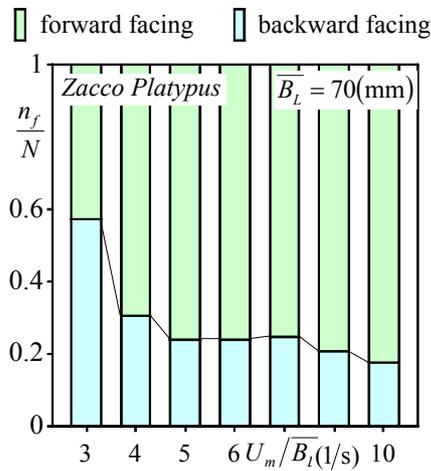


図-4 各ケースにおける降下時のオイカワの頭部方向割合

に各ケースの遡上率および降下率を算出した。

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上回数 } n_m}{\text{実験回数 } N (= 50)} \quad (1)$$

$$\text{降下率} = \frac{\text{降下回数 } n_d}{\text{実験回数 } N (= 50)} \quad (2)$$

図-2に体長倍流速 $U_m/\overline{B}_L$ と遡上率との関係を示す。体長倍流速6で遡上率が最大を示し、この流速よりも低速の場合は遡上率が低い。本研究では体長倍流速3~4を低速流、体長倍流速7~10を高速流と定義する。低速流では、流体からの運動量が小さいため、ランダムに遊泳でき、遡上率が低下したと考えられる。一方、体長倍流速6よりも高速の場合でも、遡上率が低い。高速流では遡上に際して流体から大きな運動量を受けるので、必要な遊泳力が増加する。また、遊泳速度が体長倍流速で2~4の維持速度を越え、魚の最大遊泳速度である

突進速度( $10 B_L$ )に近づくにつれ、普通筋の使用割合が増加し、疲労が蓄積する<sup>21)</sup>。そのため遡上率が低下したと考えられる。しかし、グラフ全体で見ると低速流、高速流でも遡上率の高い箇所があり、明確な傾向とは断定できない。よって今後はより詳細な調査が必要である。

図-3に体長倍流速 $U_m/\overline{B}_L$ と降下率との関係を示す。体長倍流速が3~4および7~10の範囲で降下率が高くなっている。前者は遡上率と同様に、流体からの運動量が小さいため、ランダムな方向に遊泳するために生じたと考えられる。一方、後者は高速流のため、流体から大きな運動量を受けながら遊泳する。また、魚は突進速度を1秒~数秒間しか持続できない<sup>22)</sup>、そのため突進速度に近づくにつれ、遊泳を持続させることが困難となり、下流側に流されたと考えられる。以上の考察は遡上率と同様に、低速流、高速流を分けて考察しており、グラフ全体での考察ではない。降下率においてもより詳細な調査が必要であると考えられる。

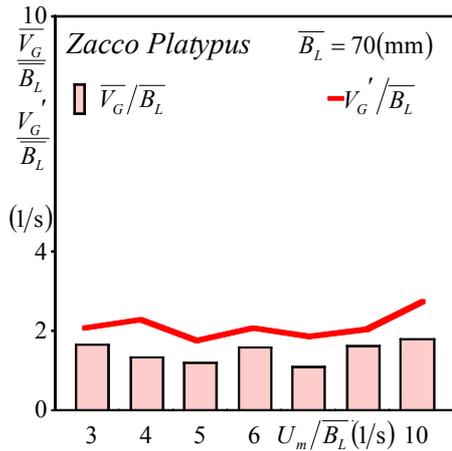


図-5 オイカワの平均対地速度と標準偏差

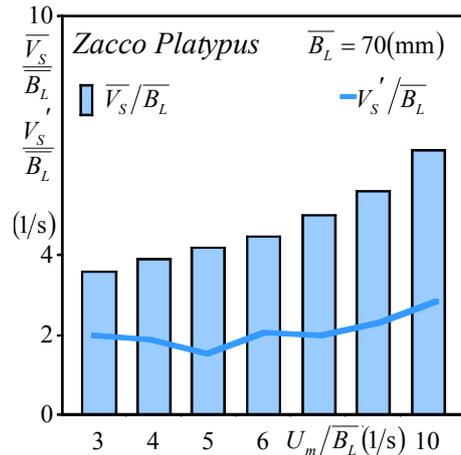


図-6 オイカワの平均遊泳速度と標準偏差

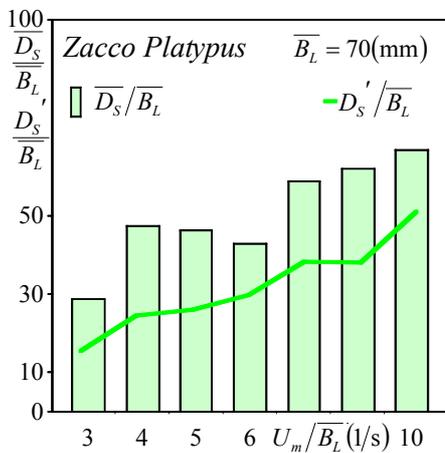


図-7 各ケースにおけるオイカワの平均総遊泳距離と標準偏差

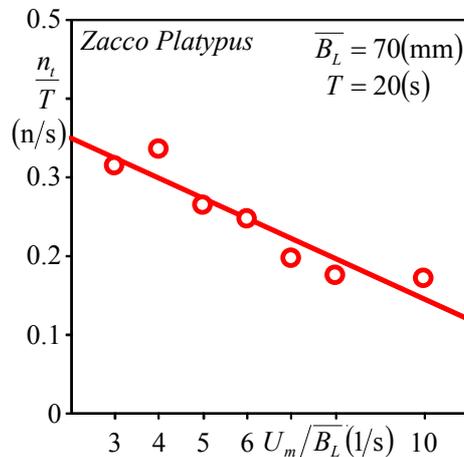


図-8 オイカワの1s当たりの屈折回数

図-4に降下時におけるオイカワの頭部の向きを上流(forward facing)あるいは下流(backward facing)に分類し、それぞれの割合と体長倍流速  $U_m/\overline{B}_L$  との関係を示す。低流速では、魚が下流を向いて降下する割合が多い。これは、魚が意図的に降下していることを意味する。一方、流速の増加に伴い上流を向いた状態で降下する割合が増加する。これは、魚が上流方向に遡上しようと遊泳しながら、下流に流されていることを意味する。

## (2) 増水時の対地速度と遊泳速度

図-5に平均対地速度  $\overline{V}_G$  を平均体長  $\overline{B}_L$  で除した値、平均対地速度の標準偏差  $\overline{V}_G'/\overline{B}_L$  と体長倍流速  $U_m/\overline{B}_L$  との関係を示す。流速の増加に伴い対地速度は若干増加しているが、ほぼ一定値を示す。また標準偏差もほぼ一定値を示す。

図-6に平均遊泳速度  $\overline{V}_S$  を平均体長  $\overline{B}_L$  で除した値、平均遊泳速度の標準偏差  $\overline{V}_S'/\overline{B}_L$  と体長倍流速  $U_m/\overline{B}_L$  の関係を示す。流速の増加に伴い平均遊泳速度は増加し

ており、その増加率は図-5の平均対地速度よりも顕著である。したがって、オイカワは流速が増加すると、周囲の物体との相対位置を一定に保つか、または、上流に向かって遊泳する。標準偏差は体長倍流速10で若干上がっているが、ほとんど変化はない。

## (3) 増水時の総遊泳距離

図-7に増水中のオイカワの平均総遊泳距離  $\overline{D}_S$  を平均体長  $\overline{B}_L$  で除した値、平均総遊泳距離の標準偏差  $\overline{D}_S'/\overline{B}_L$  と体長倍流速  $U_m/\overline{B}_L$  との関係を示す。流速の増加に伴い無次元平均総遊泳距離  $\overline{D}_S/\overline{B}_L$  は増加傾向にある。これは流速の増加に伴い遊泳速度が増加したためと考えられる。同様に、標準偏差も流速の増加に伴い増加傾向にある。

## (4) 増水時の屈折回数

鬼束ら<sup>23)</sup>は静止流体中を1尾で遊泳するアユの軌跡が

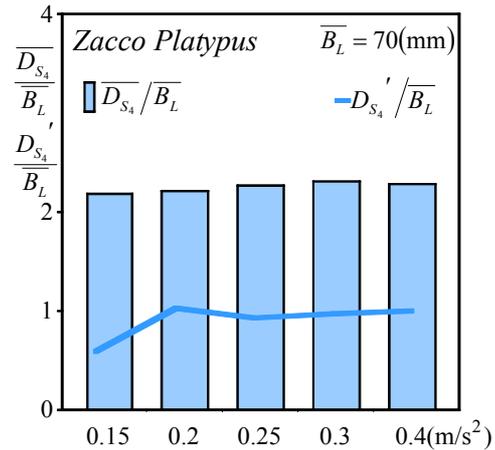
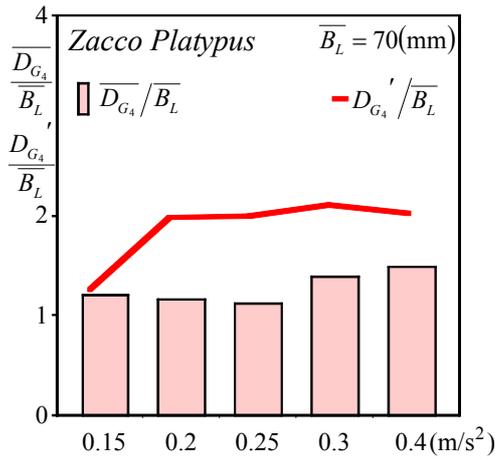


図-9 体長倍流速 $4 \pm 1$ における対地速度と標準偏差 図-10 体長倍流速 $4 \pm 1$ における平均総遊泳距離と標準偏差

直線部(branch)と屈折部(node)で再現できると述べた。本研究では、オイカワの軌跡が直線部から屈折部に変化したときを屈折と定義する。次式のように1s当たりの屈折回数を算出した。

$$\text{1s当たりの屈折回数} = \frac{\text{屈折回数 } n_m}{\text{増水時間 } T (= 20\text{s})} \quad (3)$$

図-8に体長倍流速 $U_m/\overline{B}_L$ と1s当たりの屈折回数 $n_i/T$ との関係をプロットで、両者の関係を線形で表した式を直線で示す。体長倍流速の増加と共に、1s当たりの屈折回数が減少している。これは流速の増加に伴い、流体からの増加する運動量を極力低減させるために、魚体の流下方向の投影面積が小さくなる直線的な遊泳を行った結果と考えられる。

#### (5) 遊泳挙動に及ぼす加速度の影響

本実験ではベース流量および増水時間を固定し、ピーク流量のみを変化させているので、各ケースで増水中の加速度が異なっている。したがって、増水中の同一流速で得られたオイカワの挙動のみをピックアップして比較することで、流速の影響を考慮せず、オイカワの挙動に及ぼす加速度の影響だけを説明することが可能である。

ここでは、増水中の体長倍流速 $U_m/\overline{B}_L$ が $4 \pm 1$ の範囲の挙動のみをピックアップする。解析対象は増水中に体長倍流速 $U_m/\overline{B}_L$ が $4 \pm 1$ の範囲がないC-3、C-4を除く、C-5～C-10である。ただし、流速の範囲を固定することで、平均に用いられるデータ数が加速度の増加に伴い減少することに留意されたい。

図-9に体長倍流速 $U_m/\overline{B}_L$ が $4 \pm 1$ における対地速度の平均値 $\overline{V}_{G_4}$ をオイカワの平均体長 $\overline{B}_L$ で除した値 $\overline{V}_{G_4}/\overline{B}_L$ 、対地速度の標準偏差 $V_{G_4}/\overline{B}_L$ と加速度 $\alpha$ との関係を示す。

加速度 $\alpha$ が増加しても対地速度はほぼ変化していない。低加速度において標準偏差 $V_{G_4}/\overline{B}_L$ は若干低い値をとっているが、他のケースにおいては加速度 $\alpha$ が変化しても2.0付近の値を取っており、ほとんど変化していない。したがって、オイカワの遊泳速度に及ぼす加速度の影響は微小と考えられる。

図-10に体長倍流速 $U_m/\overline{B}_L$ が $4 \pm 1$ における平均総遊泳距離 $\overline{D}_{S_4}$ をオイカワの平均体長 $\overline{B}_L$ で除した値 $\overline{D}_{S_4}/\overline{B}_L$ 、総遊泳距離の標準偏差 $D_{S_4}/\overline{B}_L$ と加速度 $\alpha$ との関係を示す。加速度 $\alpha$ が増加しても無次元平均総遊泳距離 $\overline{D}_{S_4}/\overline{B}_L$ はほぼ変化していない。低加速度において標準偏差 $D_{S_4}/\overline{B}_L$ は若干低い値をとっているが、他のケースにおいては加速度 $\alpha$ が変化しても1.0付近の値を取っており、ほとんど変化していない。

以上より、オイカワの遊泳挙動に及ぼす加速度の影響は小さいと考えられる。図-5～図-8などで観察された遊泳特性は加速度よりも流速の影響が大きいと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、ベース流量および増水時間を固定し、ピーク流量を変化させた流況において、オイカワの挙動に及ぼす増水の影響を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る。

- (1) オイカワは低流速では上流方向を認識しにくいいため、遡上率が減少し、降下率は上昇する。一方、高流速では遊泳速度が突進速度に近づき、疲労が蓄積するため、遡上率は減少し、降下率は上昇する。しかし、今後はより詳細な調査が必要である。
- (2) オイカワは流速が増加すると、周囲の物体との相対位置を一定に保つ、あるいは上流に向かって遊泳する。

- (3) オイカワは流速が増加すると、流体からの運動量を極力低減させるために、魚体の流下方向の投影面積が小さくなる直線的な遊泳を行う。
- (4) 増水中にオイカワの挙動に及ぼす影響は、加速度よりも流速の方が支配的である。

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)26420500（代表：鬼束幸樹）の援助を受けた。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) Ward, J.V., Tockner, K. and Schiemer, F.: Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity, *Regulated Rivers: Research & Management*, Vol.15, pp.125-139, 1999.
- 3) Agostinho, A.A., Gomes, L.C. and Zalewski, M.: The importance of floodplains for the dynamics of fish communities of the upper river Paraná, *Ecology & Hydrobiology*, Vol.1, pp.209-217, 2001.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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 卷, pp.1297-1302, 2007.
- 7) Lyon, J., Stuart, I., Ramsey, D. and O'Mahony, J.: A 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.
- 8) Linhoss, A.C., Muñoz-Carpena, R., Allen, M.S., Kiker, G. and Mosepele, K.: A flood pulse driven fish population model for the Okavango Delta, Botswana, *Ecological Modelling*, Vol.228, pp.27-38, 2012.
- 9) 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.7, pp.129-138, 2005.
- 10) 山本亮介, 本田晴朗：無線認識技術を用いたアユの行動特性実験, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, I\_667-I\_672, 2012.
- 11) Crook, D.A.: Movements associated with home-range establishment by two species of lowland river fish, *Canadian Journal of fisheries and aquatic sciences*, Vol.61, pp.2183-2193, 2004.
- 12) Kobler, A., Kleföth, T., Wolter, C., Fredrich, F. and Arlinghaus, R.: Contrasting pike (*Esox lucius* L.) movement and habitat choice between summer and winter in a small lake, *Hydrobiologia*, Vol.601, pp.17-27, 2008.
- 13) Burgess, O.T., Pine, W.E. and Walsh, S.J.: Importance of floodplain connectivity to fish populations in the Apalachicola River, Florida, *River Research and Applications*, Vol.29, pp.718-733, 2013.
- 14) Baetens, J.M., Van Nieuland, S., Pauwels, I.S., De Baets, B., Mouton, A.M. and Goethals, P.L.M.: An individual-based model for the migration of pike (*Esox lucius*) in the river Yser, Belgium, *Ecological Modelling*, Vol.258, pp.40-52, 2013.
- 15) 森晃, 水谷正一, 後藤章：小河川における超音波テレメトリーを用いたナマズの行動解析, 応用生態工学, Vol.6, pp.23-35, 2013.
- 16) 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 卷, pp.13-19, 2001.
- 17) 東信行, 鴨下真吾, 佐原雄二, 関泰夫, 渡辺勝栄：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.
- 18) 傳田正利, 天野邦彦, 辻本哲郎：魚類行動自動追跡システムの開発と実用性の検証, 河川技術論文集, 第 11 卷, pp.459-464, 2005.
- 19) 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.
- 20) 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 卷, pp.1465-1470, 2005.
- 21) Webb, P.W.: Hydrodynamics and energetics of fish propulsion, *Bull. Fish. Res. Bd. Can.*, Vol.190, pp.1-159, 1975.
- 22) Blaxter, J.H.S.: Swimming speeds of fish, *FAO Conference on Fish Behaviour in Relation to Fishing Techniques and Tactics*, Bergen, Norway, pp.1-32, 1967.
- 23) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 山本晃義, 脇健樹：静止流体中を単独で遊泳するアユの遊泳特性, 水工学論文集, 第 52 卷, pp.1195-1200, 2008.

(2014. 9. 30受付)