

植生密度の変化がオイカワの 遊泳特性に及ぼす影響

鬼東 幸樹¹・秋山 壽一郎²・宍戸 陽³・定地 憲人⁴

¹九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

²九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)

³日鉄住金テックスエンジニアリング株式会社 (〒100-0005 千代田区丸の内2丁目5-2)

⁴九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻博士前期課程 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

魚にとって休憩場所を確保することは重要である。魚は疲労が蓄積する普通筋と疲労が蓄積しない血合筋を有している。魚が普通筋を使用した場合は疲労が蓄積するため、休憩場所が必要となる。本研究は、開水路の植生密度を変化させて、オイカワの遊泳特性の変化を検討したものである。その結果、オイカワは流速の遅い区域を休憩場として活用していることが判明した。また、オイカワは植生密度が高くなるに伴い、植生域内での停滞が確認された。さらに、進入した魚の遡上率は植生密度との明確な関係性は観察されなかったが、植生密度が高くなるにつれて植生域への進入率は増加することが確認できた。

Key Words : rest, ordinary and dark muscle, *Zacco platypus*

1. はじめに

近年、国民の環境に対する関心が高まるなか、河川では環境との調和に配慮した水路整備など、環境に配慮した保全整備が進められている。1990年に「多自然型川づくり」のパイロット事業が開始され、河川生物の生息環境を確保することが重要視されるようになった。1997年に河川法が改正され、「河川環境の整備と保全」が法律化された。さらに2006年には、河川の局所的な事業であった「多自然型川づくり」から、河川全体の生物生息環境を考慮した「多自然川づくり」に展開され、自然の「変化」を視野に入れた河川管理の必要性が明記されることとなった。「河川環境の整備と保全」を実施する具体策の中でも、特に魚の保全に関する検討は精力的に行われている。水生生物に良好な生息場を提供するには、マクロ的のみならずミクロ的な知見が必要となる。

魚の行動範囲はその魚種や季節、体長や年齢などによって異なる。例えば、オイカワは前期仔魚においては河床砂利層の底深く、後期仔魚になると流れの穏やかな浅瀬の表層近くを、稚魚期にはやや深い所を生息場所とする¹⁾。そのため、河岸抽水植物帯、浮き石帯河床(魚礁)、瀬や淵、ワンドなどの設置も含め、各魚種の成長段階に適切な環境を提供する必

要がある²⁾。

中村³⁾は川に魚がすめる条件の一つとして、避難場所の確保を挙げている。魚は平時には疲労が蓄積しない血合筋を使用し、疲労が蓄積する普通筋は使いたがらない³⁾。遊泳速度が体長倍流速で2~4の維持速度を越えると疲労が蓄積されるため⁴⁾、しばしば休憩を要する。この場合、休憩時間は数秒~数10分以内と推定される。また、捕食の危険性のある時や、洪水時に突進速度を超える流速に遭遇した時も避難する必要がある。突進速度とは1秒~数秒しか維持できない魚の最大の遊泳速度のことである。この場合は筋肉疲労が蓄積する普通筋を用いる。そのため、比較的長時間の休憩が必要となる。

水制や植生⁵⁾など、流速が低減される領域では魚の休憩が可能である。和田ら⁶⁾は水路片側に設置した連続水制の長さおよび間隔を変化させ、オイカワ5尾の遊泳を観察した。その結果、旋回が困難な凹部は利用しないが、それ以外の場合は頻繁に休憩することを示した。高水ら⁷⁾は水路側壁付近で円柱密度を系統的に変化させてウグイを放流し、円柱群内に侵入する尾数が円柱密度の増加に伴い低下することを解明した。東ら⁸⁾は青森県を貫流する岩木川支流の平川においてテレメトリー法を用いてウグイを追跡し、出水で流下したウグイはワンドや植生帯に避難することを明らかにした。

以上のように、魚が水制や植生など、流速が低減される領域を、避難場所および休憩場所として利用することが確認されている。また、水制または植生密度の違いにより、魚の遊泳挙動が変化することが確認されているが、水制または植生密度と遊泳挙動の関係について詳細には研究がなされていない。

本研究は、模擬植生の密度を系統的に変化させ、普通筋を使用して疲労が蓄積した後の魚の遊泳特性について検討したものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に本実験で用いた水路長3.5m、幅0.8m、高さ0.3mの開水路の概要を示す。流下方向にx軸、水路底面から鉛直上向きにy軸、横断方向にz軸をとる。本流側の流れが一様になっている領域において、x軸方向に流下方向長さを $L_x=2.0\text{m}$ 、z軸方向に横断方向長さを $L_z=0.8\text{m}$ とした。

水路の $0 < x < 1.0\text{m}$ 、 $0 < z < 0.4\text{m}$ の範囲をvegetation areaとし、直径 $D=0.03\text{m}$ の植生を模した円柱の間隔を変えて配列した。図-2に植生域の一例として円柱間隔が4cmのD-04を示した。表-1に示すように各ケースで水路($0 < x < 1.0\text{m}$ 、 $0.4 < z < 0.8\text{m}$)の平均流速を一定(体長倍流速 $U_m/\bar{B}_L=10(1/\text{s})$)とし、円柱の間隔 d を4, 8, 12, 16および20cmの5通りに変化させて合計5ケース、各5回の実験を行った。円柱の間隔とは、円柱の中心から隣接する円柱の中心までを測った間隔を指す。本研究では平均体長7cmのオイカワを使用して、平均体長以下および平均体長以上を網羅する範囲の円柱間隔で実験を行った。

各ケースで水路($x=1.3\text{m}$ 、 $z=0.4\text{m}$)に直径0.25mの円形金網を設置し、平均体長 $\bar{B}_L=70\text{mm}$ のオイカワ(*Zacco Platypus*)を $N=10$ 尾放流した。円形金網内で5~10s間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1分間撮影した。撮影後、オイカワの遊泳位置を0.5sごとに解析すると共にvegetation areaにおける進入率、遡上率、滞在時間を算出した。進入率は、vegetation areaに進入した個体数 n を実験に用いた個体数 $N (=10)$ で除したものとし、遡上率は、vegetation areaを通過して遡上に成功した尾数 n をvegetation areaに進入した尾数 N で除したものとす。

図-1に流速測定点をプロットした。水路の $0 < x < 0.75\text{m}$ 、および $1.25 < x < 2.0\text{m}$ の区間においてはx軸方向に0.25m、z軸方向に0.1m間隔で構成される9×8の計72点、 $0.90 < x < 1.14\text{m}$ の区間においてはx軸方向に0.08m、 $0.40 < z < 0.60\text{m}$ の区間においてはz軸方向に0.05m間隔、 $0 < z < 0.40\text{m}$ 、および $0.60 < z < 0.80\text{m}$ にお

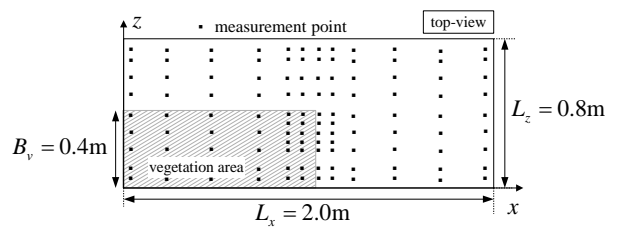


図-1 実験装置の概要

表-1 実験条件

case name	D-04	D-08	D-12	D-16	D-20
equal distance(cm)	4	8	12	16	20
velocity $U_m/\bar{B}_L (1/\text{s})$	10				

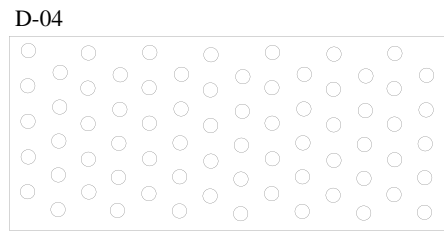
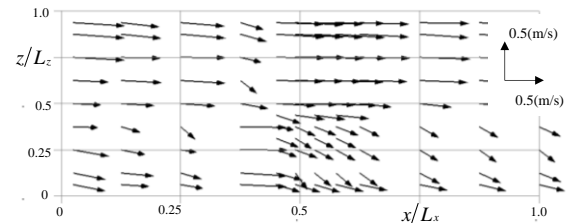
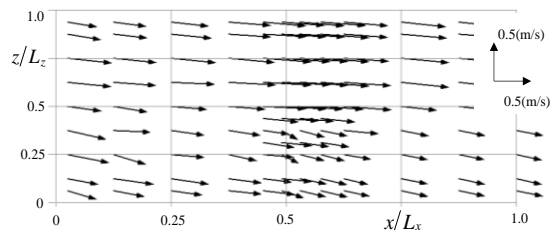


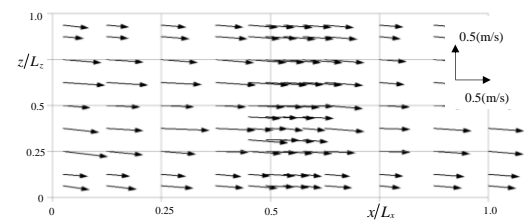
図-2 円柱の配置図



(a) D-04



(b) D-12



(c) D-20

図-3 3次元合成流速ベクトル

いては0.10m間隔で構成される計44点の合計116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。

3. 実験結果および考察

(1) 開水路内の水理特性

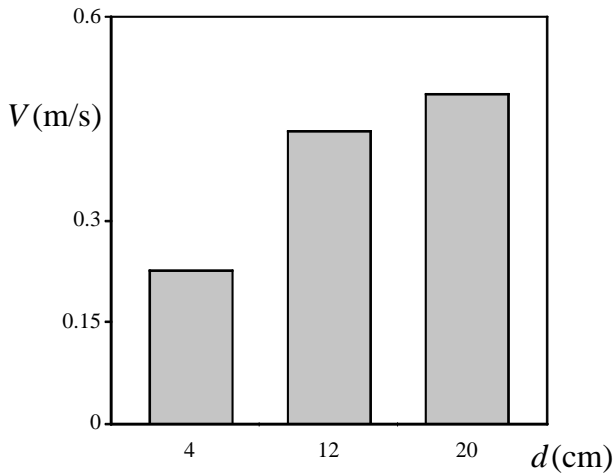


図-4 vegetation area内での平均流速

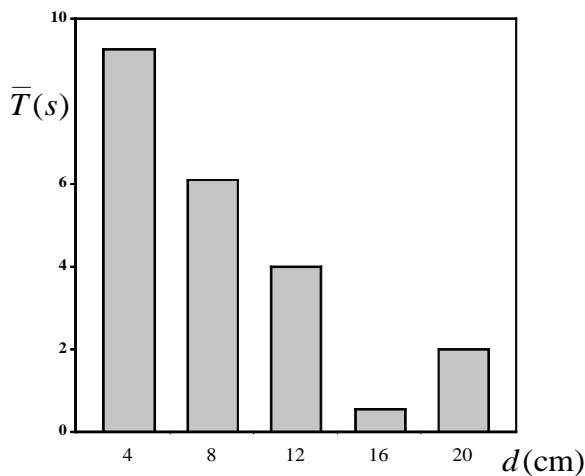


図-5 オイカワ進入率

図-3にD-04, D-12およびD-20の流速ベクトルを示す。いずれのケースにおいても、vegetation areaの対岸側では高速域が、vegetation area下流側に低速域が発生している。円柱の間隔が狭くなるにつれて、vegetation areaおよびその下流域では流速が低下している。また、円柱群の間隔が狭いため、右岸側側壁向きの流れが発生している。いずれのケースにおいても、左岸側の流速が速く、右岸側側壁付近の流速が遅いことが確認できる。また、図-4に円柱間隔 d が4cm,12cm,および20cmにおけるvegetation area内での平均流速 V を示している。円柱間隔が狭くなるにつれて、vegetation area内での平均流速は低下している。左岸側での体長倍流速10において、魚は筋肉疲労が蓄積する普通筋を用いるため、疲労の蓄積を回避するようvegetation areaおよびその下流域で遊泳することが考えられる。

(2) オイカワの進入率

オイカワの進入率を次式のように定義する。

$$\text{進入率} = \frac{\text{進入した尾数}n}{\text{実験に用いた尾数}N(=10)} \quad (1)$$

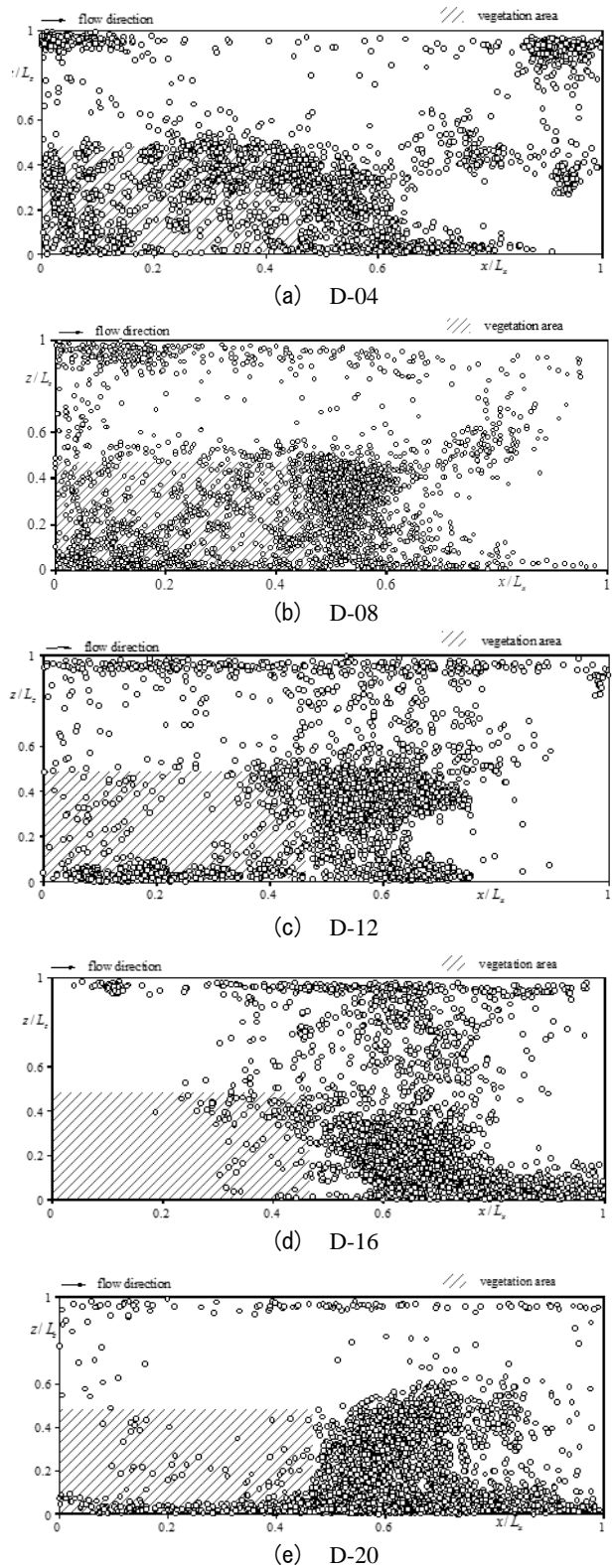


図-6 瞬間遊泳位置

図-5に円柱の間隔とオイカワのvegetation area進入率との関係を示す。また、魚が長時間遊泳しても血合筋のみを使用するため、疲労が蓄積しない維持速度 V_{JC} (Cruising speed)は次式で示される³⁾。

$$V_{JC}/BL = 2 \sim 4 \quad (2)$$

円柱間隔が最も狭いD-04では進入率は8割近くに達しているが、円柱の間隔が広がるにつれて進入率が

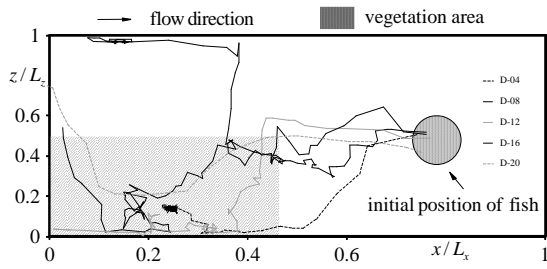


図-7 オイカワの遊泳軌跡

低くなっている。図-3および図-4において、円柱間隔が狭いD-04では、vegetation areaでは流速が0.10～0.24(m/s)程度に抑制され、体長倍流速4(1/s)以下となっている。体長倍速度10での遊泳は魚の疲労を蓄積するものと考えられるため、魚は疲労の蓄積を回避するためにより流速の遅い部分を遊泳する。そのため、疲労の蓄積のない維持速度で遊泳可能と考えられる。このことから、オイカワは円柱が密集するvegetation areaに休憩を好んで進入していることが示される。なお、図-6の(a),(b)よりオイカワの瞬間遊泳位置が植生域内の端のみでなく、均等に分布していることから、植生が密の際の域内の移動に困難は生じないものと考えられる。

(3) 円柱の配置による開水路内の遊泳位置の変化

図-6に0.5sごとの全オイカワの瞬間遊泳位置をケース別にプロットした。全ケースにおいて、オイカワは左岸側の流速の速い部分を避けて遊泳している。円柱間隔が狭いD-04, D-08においてオイカワの瞬間遊泳位置がvegetation areaに存在しているのに対し、円柱間隔が広いD-12～D-20においてはD-04, D-08に比べvegetation areaでの存在数が減少している。円柱間隔が広い場合は、オイカワはvegetation area下流域に停滞する傾向が確認できる。また、円柱の間隔が狭くなるにつれて植生域下流域に停滞するオイカワがvegetation areaに移動していることが確認できる。このことから、オイカワは円柱の間隔が狭くなり円柱間の空隙の流速が減少するのに伴い、空隙を休憩場として活用することが明らかとなった。

図-7に0.5sごとに解析したオイカワの遊泳軌跡の一例を示した。黒色点線、黒色線が示すD-04, D-08での円柱間隔が狭い場合ではオイカワは遊泳時には屈折する頻度が多く、また停滞していることが確認される。一方で、灰色線、黒色太線、灰色点線が示すD-12～D-20での間隔が広い場合では、遡上もしくは本流側へ抜け出す傾向が見られる。このことから、オイカワは円柱間隔が狭い場合ではvegetation areaを休憩場として活用して、円柱の間隔が広くなるにつれてvegetation areaを好まないことが示された。また、普通筋を使うことを避けるために、流速の遅い場所を好んで遊泳することが考えられる。

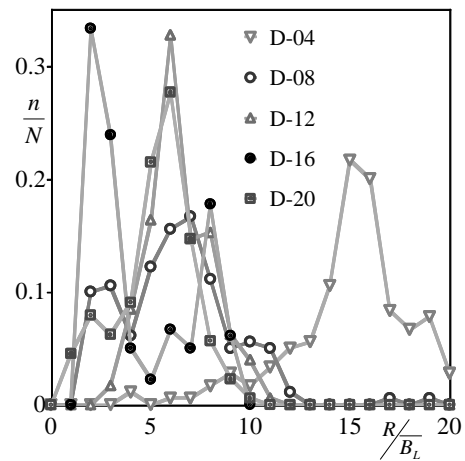


図-8 魚群半径の頻度分布

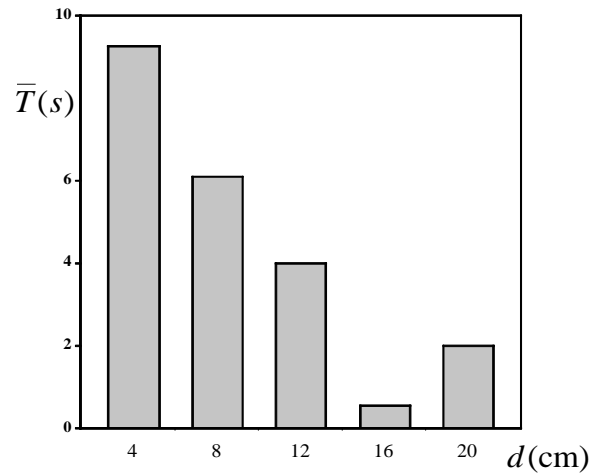


図-9 平均滞在時間

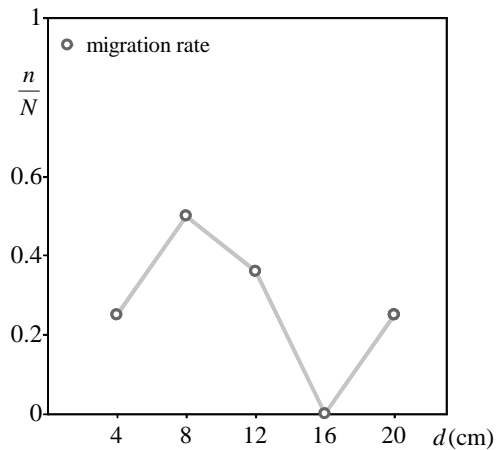


図-10 遡上率

(4) 魚群半径

魚群半径を石川⁹⁾の定義した式(3)より算出した。

$$R \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^N r_i^2 / N} \quad (3)$$

図-8に魚群半径 R を平均体長 B_L で除した値 R/B_L の頻度分布を示した。ここに、 R , r_i , N はそれぞれ魚群半径、魚群重心と各供試魚との距離、各魚群

内の総個体数である。

円柱の間隔が狭くなるにつれて魚群半径が増加する傾向がある。図-6において円柱間隔が広いD12～D20では、オイカワはvegetation area下流域を中心に遊泳していることが確認できる。オイカワは円柱間隔が狭いD04, D08 場合ではvegetation areaに進入後、円柱の空隙に入り込み魚群半径が大きく、密集せずに遊泳している。また、円柱間隔が広いD12～D20ではvegetation area下流域に停滞している。さらに、図-8において円柱間隔が広いD-12～D-20では、魚群半径が体長倍の3～6と小さな値に頻度が集中している。上記で示したことから、オイカワは群れを成して遊泳していることが確認される。以上のことから、円柱間隔が狭い場合ではオイカワは魚群を形成してvegetation area下流域に群れを成して遊泳していることが確認される。

(5) 平均滞在時間

図-9にvegetation areaにおけるオイカワの平均滞在時間を算出し、ケース別に示す。図-9はvegetation areaに進入したオイカワの1尾あたりの平均滞在時間を示している。円柱の間隔が狭くなるにつれて平均滞在時間が増加している。これは、図-7において円柱の間隔が狭くなるにつれてオイカワがvegetation area内を小刻みに遊泳するため、滞在時間が増加したと考えられる。また、図-3において円柱間隔が狭いD-04, D-08場合、vegetation area内での流速は間隔が広い場合に比べて遅いため、オイカワは普通筋を使うことを避け、円柱の空隙を休憩場として利用したことが考えられる。

(6) 遡上率

遡上率を次式のように定義する。

$$\text{遡上率} = \frac{\text{vegetation areaを通過して遡上した尾数}n}{\text{vegetation areaに進入した尾数}N} \quad (4)$$

図-10にvegetation area内に進入したオイカワの遡上率を示した。オイカワの遡上率と円柱の間隔との関係に明確な傾向は確認できない。また、高水⁷⁾は杭水制群の密度を変化させて魚の挙動を観察したが、遡上との関連付けには至っていない。したがって、円柱の存在はオイカワの遡上

を促進させる効果はなく、流速を低下させることにより河川の増水時等に休憩場として効力を発揮するものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、模擬植生の密度を系統的に変化させ、オイカワの遊泳挙動の解明を試みたものである。本研究より得られた知見は以下の通りである。

- (1) オイカワは植生間隔が4～8cm程度の際、植生域を休憩場として利用していることが確認された。
- (2) オイカワは植生密度が高い場合は植生域内に停滞するのに対し、植生密度が低い場合は植生域下流側に停滞することが判明した。
- (3) 植生域内に進入したオイカワ、の遡上率と植生密度との明確な関係性は確認できなかったが、植生密度が高くなるにつれて植生域への進入率は増加したことが判明した。

参考文献

- 1) 中村守純：日本のコイ科魚類，資源科学研究所，業績第1198号，pp.190-192, 229, 236-237, 1969.
- 2) 鈴木興道：魚の住みやすい川づくりに資する魚類の生息分布とその場の流速，土木学会論文集，No.593/II-43，pp.21-29, 1998.
- 3) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995.
- 4) Webb, P.W.: Hydrodynamics and energetics of fish propulsion, *Bull. Fish. Res. Bd Can.*, Vol.190, pp.1-159, 1975.
- 5) 中村俊六，石川雅朗，築坂正美，東信行，中村緩徳：河川における魚類生息環境評価(IFIM適用)のための基礎調査，第2回河道の水理と河川環境シンポジウム，pp.127-134, 1995.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 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，Vol.27, pp.793-798, 1999.
- 9) 石川雅昭：ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究，河川技術論文集，第6巻，pp.101-106, 2000.

(2016.5.20受付)

EFFECTS OF VEGETATION DENSITY ON SWIMMING BEHAVIOR OF *ZACCO PLATYPUS*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Akira SHISHIDO and Kento JOJI

It is important to secure the rest area for fish. Fish has the ordinary and dark muscle. When fish uses

ordinary muscle, fish gets tired. In such a situation, fish needs a rest. In this study, vegetation density in open-channel is changed. The trajectories of *Zacco platypus*'s were observed. It was found that *Zacco platypus* utilized a slow of the speed as rest space. Stay in vegetation area increases with an increase of vegetation density. An approach rate to vegetation area rises with an increase of vegetation density. However, It was not found that clear relationship with a migration rate of *Zacco platypus* and vegetation density.