

アユに対するオイカワの忌避行動に及ぼす 体長の影響

鬼東 幸樹¹・秋山 壽一郎²・三原 和也³・鏝 敬介⁴・定地 憲人⁵

¹正会員 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)

E-mail: onitsuka@civil.kyutech.ac.jp

²フェロー会員 九州工業大学教授 建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

³トヨタプロダクションエンジニアリング プレス・内外装エンジニアリング部

(〒811-4157 福岡県宗像市アスティ1-6)

⁴株式会社 建設技術研究所 九州支社 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12)

⁵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)

河川における魚類の生息特性を把握する上で、単一の魚種だけでなく、複数の魚種が周囲に存在する場合も対象としなければならない。既往の研究より、異魚種の個体群が遭遇した際の魚群の挙動は若干解明されているものの、魚の体長を系統的に変化させてその挙動を解明した研究は少ない。本研究は、静止流体中においてアユの体長を固定した状態でオイカワの体長を系統的に変化させ、両者の行動特性の変化を解明したものである。その結果、オイカワの体長の増加に伴い、オイカワは遊泳距離、遊泳速度および屈折角度を減少させ、アユがオイカワに対して威嚇する傾向は徐々に弱まることが明らかになった。

Key Words : *avoid action, Opsariichthys platypus, Plecoglossus altivelis altivelis, body length*

1. はじめに

2006年に国土交通省河川局が「多自然型川づくり」から「多自然川づくり」に基本指針を変更した。そのため、河川が本来有している生物の生息・育成・繁殖環境の保全・創出を行うことが明文化された。河川が本来有している生物の生息状態を完全に把握することは困難であるが、河川水辺の国勢調査のデータを参照すると、河川の有する水理特性や規模に応じて魚種数および尾数がある程度決定していると推測される。そのため、魚類の生息環境を把握する上で、単一の魚種¹⁾だけでなく、複数の魚種が河川に存在する場合も調査対象としなければならない。

伊藤・水野²⁾は仁淀川で魚類調査を行った。その結果、アマゴ、カワムツおよびタカハヤが生息している場合、まずアマゴが、続いてカワムツが生息領域を選択し、最後に残った空間をタカハヤが利用することを解明した。上野ら³⁾は利根川水系喜怒川においてヤマメの成魚とイワナの稚魚が生息する水域を観察した結果、イワナの稚魚がヤマメの生息領域を避けていることを明らかにした。

長谷川・前川⁴⁾はアメマスの生息領域にブラウントラウトが移入すると、アメマスの生息領域が制限されることを示した。Katano⁵⁾は鴨川においてオイカワとカワムツの生息状況を観察した結果、両魚種とも大型個体が水面付近を占有し、小型個体は大型個体からの攻撃を避けるために他の領域に忌避することを解明した。鬼東ら¹⁰⁾は二級河川板櫃川で魚類調査を行った結果、オイカワはギンブナを、カワムツはギンブナおよび体長が80mm以上のオイカワを忌避することを統計的に証明した。

以上のように異魚種の個体群が遭遇した際の魚群の挙動は若干解明されているものの、魚の体長を系統的に変化させてその挙動を解明した研究はほとんどない。実河川には様々な体長の魚が生息しているが、魚の体長を1パターンのみでなく系統的に変化させ、体長別に解析することにより、各魚の成長過程における挙動が解明でき、より幅広く行動特性を把握することができる。本研究は、静止流体中においてアユの体長を固定した状態でオイカワの体長を系統的に変化させ、両者の行動特性の変化を解明したものである。

2. 実験装置および実験条件

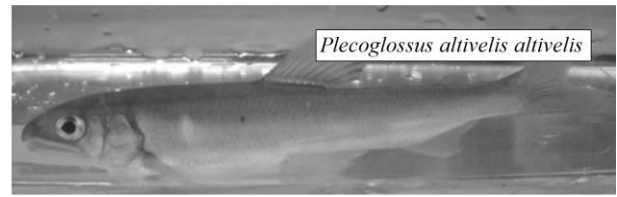
実験には水深を0.05mにした直径1.83mの円形プールを用いた。水深をかなり浅く設定したのは、複雑な三次元解析ではなく、二次元解析を行なうためである。二次元における解析は、既往の魚に関する論文でも多く用いられており¹¹⁾、魚の挙動の解析に適した方法であると考えられる。また、その中でも0.05mに設定した理由は、最浅部の水深は魚の体長の2倍以上あればよいとされているためである¹²⁾。また、鬼束ら^{13),14)}より、側壁の影響は遊泳開始直後と壁面近傍においてはあがるが、その他の領域においては影響がないことが考えられるため、本実験で使用したプールの大きさは妥当であると考えられる。

図-1(a), (b)および表-1に示すように、平均体長 $\overline{B_{LP}}$ (Body Length of *Plecoglossus altivelis altivelis*)が80mmの養殖アユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)を1尾と、平均体長 $\overline{B_{LO}}$ (Body Length of *Opsariichthys platypus*)が60, 80, 100, 120あるいは140mmのいずれかのオイカワ(*Opsariichthys platypus*)¹⁵⁾1尾を実験に用いた。なお、表-1に示すように魚の体長の違いによる解析への影響はないと考えられるため、解析においては平均体長を用いた。以下では、アユの諸量にはP, オイカワの諸量にはOの添字を用いる。プール内にアユ1尾を遊泳させた状態で、なお、各回で利用しているオイカワ、アユは別個体である。1尾のオイカワをプール中心に設置した直径0.25mの円筒状金網内で遊泳させる。オイカワが馴染したことを確認した後に金網を取り上げ、プール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10分間撮影した。各ケースで20回、合計100回の実験を行った。撮影後、0.2s刻みで両魚種の位置を読み取り、遊泳軌跡を直線(branch)と屈折(node)で表現した。図-2のようにアユおよびオイカワの遊泳軌跡における、全ての屈折位置と時刻を読み取り、連続する屈折位置から遊泳距離 L 、屈折角度 θ を求めた。 θ は上方から観察した時の右回転を正、左回転を負と定義した。また、遊泳距離 L と遊泳に要した時間から、遊泳速度 v を算出した。

3. 実験結果および考察

(1) アユとオイカワの遊泳速度

図-3(a), (b)にアユおよびオイカワの遊泳速度 V_p, V_o を、それぞれの平均体長 $\overline{B_{LP}}, \overline{B_{LO}}$ で除した値 $V_p / \overline{B_{LP}}$ と $V_o / \overline{B_{LO}}$ の頻度分布をケース別に示す。体長倍遊泳速度を示すことにより、魚の体長によらず魚の遊泳特性を把握しやすくなる。魚の遊泳速度において0.2s刻みに把握した数を N_v 、そのうち該当範囲内の速度で遊泳している数を n_v とする。いずれのケースも、低値が高頻度で高値方向に裾を持つ形状を示す。そこで、式(1), (2)に示すガンマ分布を採用し図中に曲線で示した。



(a) アユ



(b) オイカワ

図-1 実験に用いたアユとオイカワ

表-1 実験条件

case name	$\overline{B_{LO}}$ (mm) (standard deviation)	$\overline{B_{LP}}$ (mm) (standard deviation)
C6	60 (1.43)	80 (2.71)
C8	80 (2.86)	
C10	100 (3.34)	
C12	120 (2.53)	
C14	140 (4.48)	

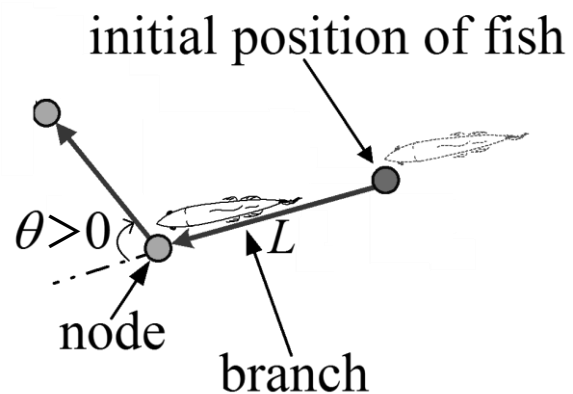


図-2 遊泳軌跡の模式図

$$f\left(\frac{V_p}{\overline{B_{LP}}}\right) = \frac{1}{\Gamma(\lambda)} \alpha^\lambda \left(\frac{V_p}{\overline{B_{LP}}}\right)^{\lambda-1} e^{-\alpha V_p / \overline{B_{LP}}} \quad (1)$$

$$\Gamma(\lambda) = \int_0^\infty e^{-x} x^{\lambda-1} dx \quad (2)$$

係数 α, λ は最小二乗法より算出した。また、オイカワに関しては式(1), (2)において V_p を V_o 、 $\overline{B_{LP}}$ を

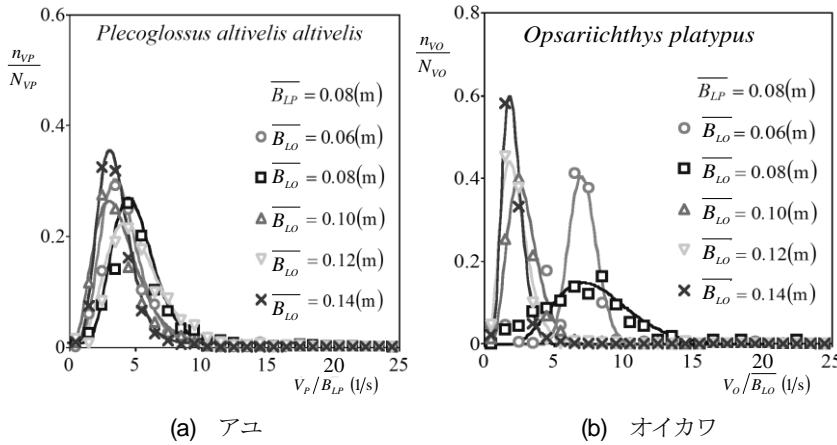


図-3 オイカワの体長変化に伴う遊泳速度の変化

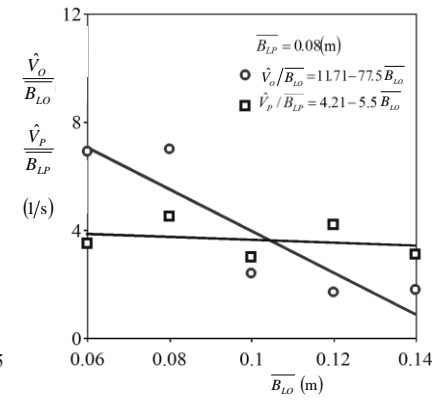


図-4 アユとオイカワの遊泳速度の最頻値

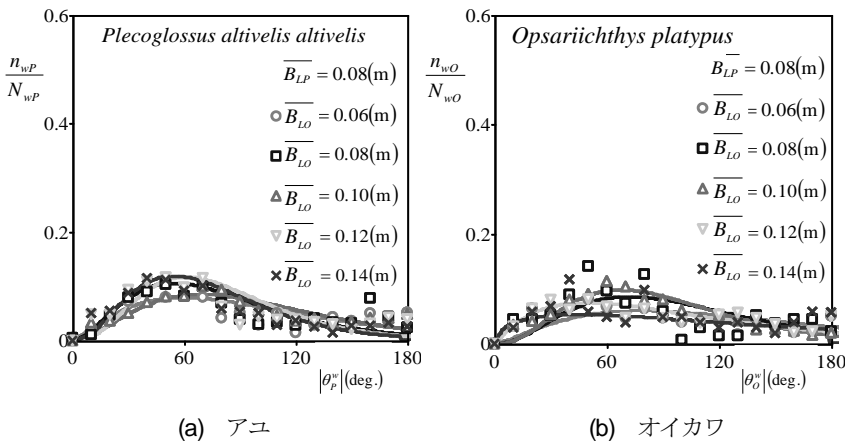


図-5 オイカワの体長変化に伴う屈折角度の変化

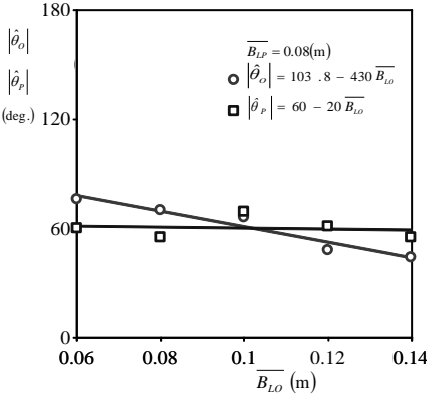


図-6 アユとオイカワの屈折角度の最頻値

B_{LO} に置き換えて同様に解析した。オイカワの平均体長 B_{LO} の増加に伴い、図-3(a)からはアユの遊泳速度 V_p/B_{LP} に顕著な変化は観察されないのに対し、図-3(b)からはオイカワの遊泳速度 V_o/B_{LO} の減少が認められる。

図-4にオイカワの平均体長 B_{LO} とアユおよびオイカワの遊泳速度の最頻値 \hat{V}_p/B_{LP} 、 \hat{V}_o/B_{LO} との関係を示すと共に、両者の関係を最小二乗法で求めて直線で示した。オイカワの平均体長 B_{LO} の増加に伴い、アユの遊泳速度 \hat{V}_p/B_{LP} は一定もしくは若干の減少傾向にあるのに対し、オイカワの遊泳速度 \hat{V}_o/B_{LO} は顕著な減少を示している。なお、オイカワの忌避行動の変化については、オイカワの体長が大きいゆえにアユの攻撃が低下しその結果として忌避の必要性が低下したことが考えられる。

(2) アユとオイカワの屈折角度

図-5(a), (b)にアユおよびオイカワの屈折角度の絶対値 $|\theta_p^w|$ の頻度分布をケース別に示す。魚の屈折角度において0.2s刻みに把握した数を N_w 、そのうち該当範囲内で屈折している数を n_w とする。いずれのケースも比較的低い値に頻度が高く、高値方向に裾を持つ形状を示している。アユは式(1), (2)において V_p/B_{LP} を $|\theta_p^w|$ に置き換え、オイカワは式(1), (2)において V_p/B_{LP} を $|\theta_o^w|$ に置

き換えて求めたガンマ分布を曲線で示した。オイカワの体長 B_{LO} が増加しても、アユの屈折角度 $|\theta_p^w|$ には変化が観察されないのに対し、オイカワの屈折角度 $|\theta_o^w|$ は減少している。

図-6にオイカワの平均体長 B_{LO} とアユおよびアユの屈折角度の絶対値の最頻値 $|\hat{\theta}_o|$ 、 $|\hat{\theta}_p|$ との関係を示すと共に、両者の関係を最小二乗法で求めて直線で示した。オイカワの平均体長 B_{LO} の増加に伴い、アユの屈折角度 $|\hat{\theta}_p|$ には変化は観察されないのに対し、オイカワの屈折角度 $|\hat{\theta}_o|$ は減少してアユの屈折角度を下回っている。これは、オイカワの体長がアユの体長を上回ることにより、アユに対するオイカワの忌避行動が緩慢になったためと考えられる。

(3) アユとオイカワの魚向差

アユとオイカワが遊泳する際の進行方向の交差角を魚向差と定義する。図-7にアユとオイカワの魚向差の絶対値 $|\theta^m|$ の頻度分布をケース別に示す。魚の魚向差において0.2s刻みに把握した数を N_m 、そのうち該当範囲内の魚向差の数を n_m とする。いずれのケースも魚向差は、低値が高頻度で高値方向に裾を持つ形状を示す。そこで、式(1), (2)において V_p/B_{LP} を $|\theta^m|$ に置き換えて求めたガン

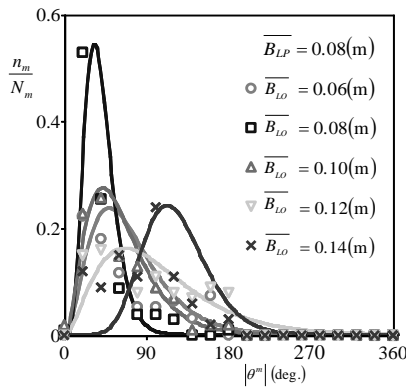


図-7 オイカワの体長変化に伴う
アユとオイカワの魚向差の変化

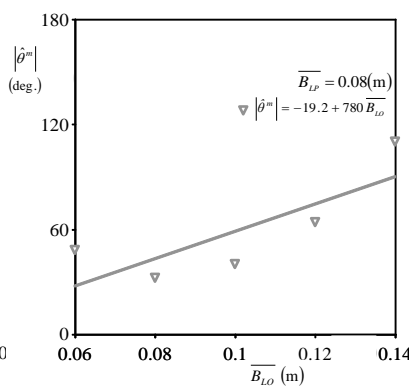


図-8 アユとオイカワの
魚向差の最頻値

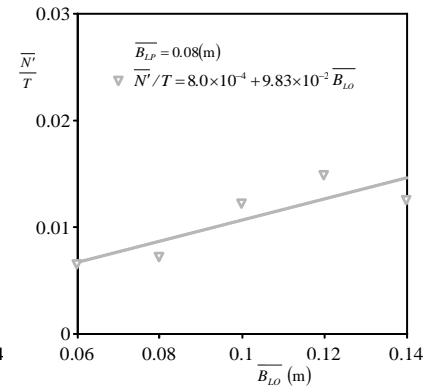


図-9 アユのオイカワに対する平均接近率

マ分布を曲線で示した。オイカワの平均体長 $\overline{B_{Lo}}$ の増加に伴い、魚向差 $|\theta^m|$ の値は増加している。

図-8にオイカワの平均体長 $\overline{B_{Lo}}$ とアユとオイカワの魚向差の絶対値の最頻値 $|\hat{\theta}^m|$ との関係を示すと共に、両者の関係を最小二乗法で求めて直線で示した。仮にアユがオイカワを追尾する状況であれば、オイカワとアユの魚向差は小さくなるはずである。図-8より、オイカワの平均体長 $\overline{B_{Lo}}$ の増加に伴い、魚向差の最頻値 $|\hat{\theta}^m|$ が増加する傾向が観察される。これは、アユはオイカワの存在を確認すると接近し、威嚇する傾向があるが、オイカワの体長の増加に伴い、アユがオイカワを追尾しなくなったためと考えられる。

(4) 平均接近率

アユはオイカワの存在を確認するとしばしば接近し、威嚇する行動を示すことが観察された。そこで、アユがオイカワに向かって遊泳し、アユの体長の2倍以下の距離となった時を接近と定義した。アユがオイカワに接近した回数を実験時間で除した値を接近率として、各ケースにおける平均接近率 \overline{N}/T を求めた。

図-9にオイカワの平均体長 $\overline{B_{Lo}}$ とアユのオイカワへの平均接近率 \overline{N}/T との関係を示す。オイカワの平均体長 $\overline{B_{Lo}}$ の増加に伴い、平均接近率 \overline{N}/T は増加している。また、図-10において、ケースC6ではアユにオイカワが追尾されて、アユとオイカワが共に遊泳しているのに対し、ケースC14ではオイカワのアユに対する忌避行動が緩慢になったために、オイカワの遊泳速度がそれほど増加しなかったことが示唆されている。このことから体長の大きいオイカワに対しては、接近すること自体が威嚇によるものではないことが考えられる。これは、オイカワの平均体長 $\overline{B_{Lo}}$ の増加に伴い、アユがオイカワを追尾する傾向が小さくなったためと考えられる。

以上のことから、オイカワの体長 $\overline{B_{Lo}}$ の増加に伴い、アユがオイカワに対して威嚇する傾向は徐々に弱まることが判明した。

(5) アユとオイカワの最高遊泳速度

図-10(a)~(d)にオイカワの平均体長 $\overline{B_{Lo}}$ が60mmおよび140mmのケースにおいて、アユがオイカワに接近を開始してから5秒間におけるアユおよびオイカワの各代表3尾の0.2sごとの遊泳速度 $V_p/\overline{B_{Lo}}$ 、 $V_o/\overline{B_{Lo}}$ を示す。5秒間の行動解析の時間については、オイカワがアユを認知して行動を変化させ、その行動を継続させる目安として設定した。また、アユとオイカワの代表3尾は任意に選定した。なお、図-10(b)、(d)において、アユが接近した際の平均体長 $\overline{B_{Lo}}$ が60mmのオイカワと140mmのオイカワの挙動を比較するため、各時間ごとに代表3尾のオイカワの遊泳速度の平均値を算出し、5秒間の中で最高値をとる時間を図中に垂直線で示している。図-10(b)、(d)において、アユがオイカワに接近を開始してから、各時間ごとに算出された平均体長 $\overline{B_{Lo}}$ が60mmの代表3尾のオイカワの遊泳速度の平均値が、5秒間の中で最高値に達するまでの時間は、140mmのオイカワに比べて1秒程度短いことが確認される。図-10(a)、(c)において、平均体長 $\overline{B_{Lo}}$ が60mmのオイカワと140mmのオイカワに接近したアユの0.2sごとの遊泳速度を比較すると、各時間における両者各代表3尾の平均値に顕著な差は観察されない。一方、図-10(b)、(d)において、アユが接近した際の平均体長 $\overline{B_{Lo}}$ が60mmのオイカワと140mmのオイカワの0.2sごとの遊泳速度を比較すると、各時間における前者の代表3尾の平均値に対して後者では小さい値をとっていることが確認される。また、図-10(a)、(b)のケースC6におけるアユとオイカワの0.2sごとの遊泳速度の5秒間での最高値を比較すると、両者に大差はないが、図-10(c)、(d)のケースC14では、アユの0.2sごとの遊泳速度の5秒間での最高値がオイカワの値を上回っていることが認められる。これは、ケースC6ではアユにオイカワが追尾されて、アユとオイカワが共に遊泳しているのに対し、ケースC14ではオイカワのアユに対する忌避行動が緩慢になったために、オイカワの遊泳速度がそれほど増加しなかったと考えられる。

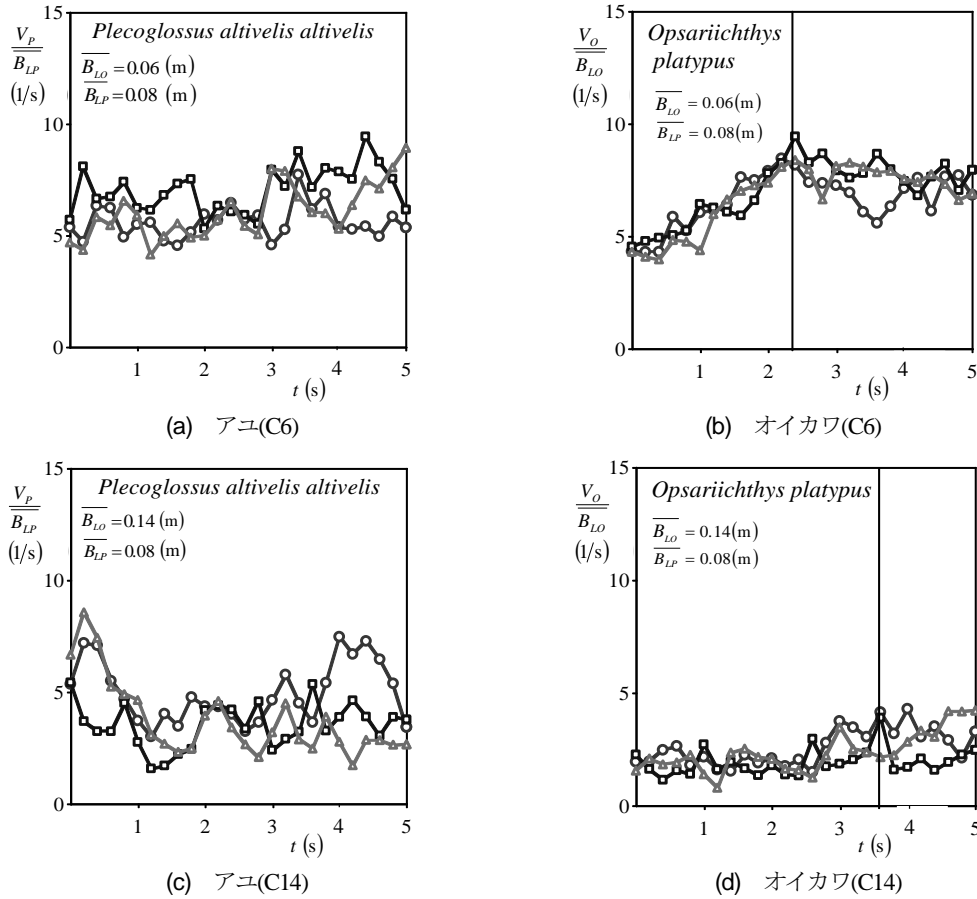


図-10 5秒間のアユとオイカワの遊泳速度

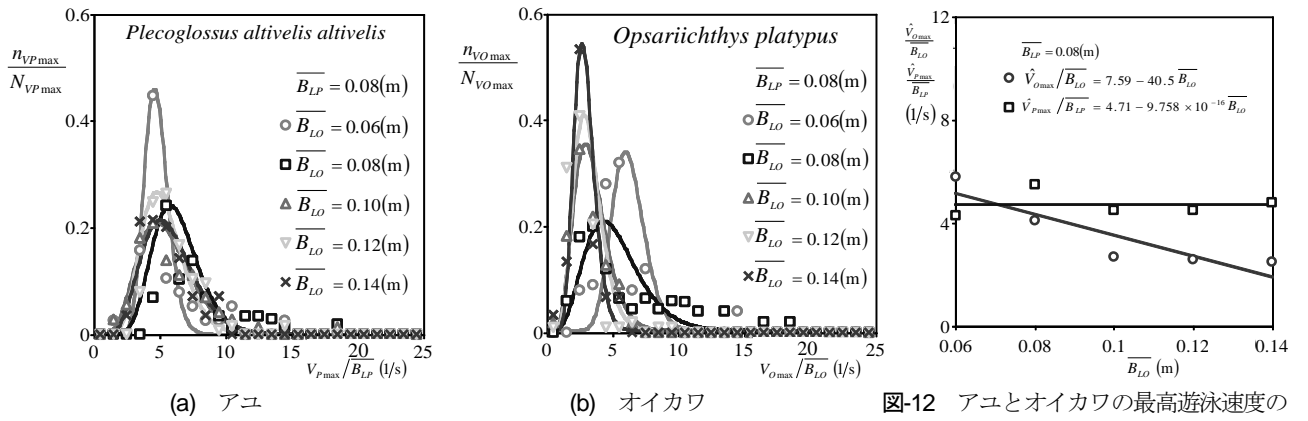


図-11 オイカワの体長変化に伴う最高遊泳速度の変化

図-12 アユとオイカワの最高遊泳速度の最頻値

図-11(a), (b)にアユがオイカワに接近を開始してから5秒間のアユおよびオイカワの最高遊泳速度 V_{Pmax} , V_{Omax} を、それぞれの平均体長, $\overline{B_{LP}}$, $\overline{B_{LO}}$ で除した値 $V_{Pmax}/\overline{B_{LP}}$, $V_{Omax}/\overline{B_{LO}}$ の頻度分布をケース別に示す. アユがオイカワに接近した数 N_{Vmax} , そのうち該当範囲内のアユおよびオイカワの最高遊泳速度の数を n_{Vmax} とする. いずれのケースも, 低値が高頻度で高値方向に裾を持つ形状を示す. アユは式(1), (2)において V_p を V_{Pmax} に置き換え, オイカワは式(1), (2)において V_p を V_{Omax} に, B_{LP} を B_{LO} に置き換え求めたガンマ分布を曲線で示した. オイカワの平均体長 $\overline{B_{LO}}$ の増加に伴い, ア

ユの最高遊泳速度 $V_{Pmax}/\overline{B_{LP}}$ 顕著な変化が観察されないのに対し, オイカワの最高遊泳速度 $V_{Omax}/\overline{B_{LO}}$ は減少している.

図-12にオイカワの平均体長 $\overline{B_{LO}}$ とアユおよびオイカワの最高遊泳速度の最頻値 $\hat{V}_{Pmax}/\overline{B_{LP}}$, $\hat{V}_{Omax}/\overline{B_{LO}}$ との関係を示す. 両者の関係を最小二乗法で求めて直線で示した. オイカワの平均体長 $\overline{B_{LO}}$ の増加に伴い, アユの最高遊泳速度の最頻値 $\hat{V}_{Pmax}/\overline{B_{LP}}$ に変化は観察されないのに対し, オイカワの最高遊泳速度 $\hat{V}_{Omax}/\overline{B_{LO}}$ は減少している. これは, オイカワのアユの接近に対する忌避意識が緩慢になったためと考えられる.

4. おわりに

本研究は、静止流体中における一定長のアユに対する体長の異なるオイカワの行動特性を解析したものである。得られた知見は以下の通りである。なお、対照系無しの際のオイカワの遊泳速度についても魚の平均体長で割るとほぼ一定となり、大幅には変わらないことが推測される。単純に体長の大きいオイカワほどアユに関係なく遊泳している可能性については、今後の研究課題としたい。

- (1) オイカワの体長の増加に伴い、オイカワの遊泳距離、遊泳速度および屈折角度が減少する。
- (2) オイカワの体長の増加に伴い、アユがオイカワに対して威嚇する傾向は徐々に弱まることが判明した。
- (3) アユの接近に対してオイカワは体長の増加に伴い最高速度を減少させ、アユに対する忌避行動が緩慢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)17K06580(代表：鬼東幸樹)の援助を受けた。

参考文献

- 1) Sannomiya, N. and Matsuda, K.: A mathematical model of fish behavior in a water tank, *IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics*, Vol.14, pp.157-162, 1984.
- 2) 三宮信夫, 中峯浩, 岩崎永弥: 魚群行動の群の大きさを推定する自己回帰モデル, システム制御情報学会論文誌, 第2巻, 第1号, pp.23-31, 1989.
- 3) 三宮信夫, 島田亮, 中峯浩: 魚群行動における自律分散機構のモデリング, 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.2, pp.211-219, 1993.
- 4) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 竹内光, 小野篤志: 流速変化が単独アユの遊泳特性に及ぼす影響, 水工学論文集, 第54巻, pp.1309-1314, 2010.

- 5) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 竹内光, 大西浩史: 流速変化が2尾のアユの遊泳特性に及ぼす影響, 水工学論文集, 第55巻, pp.1441-1446, 2011.
- 6) 伊藤猛夫, 水野信彦: 仁淀川水系の河川環境・魚類・漁業実態について, 仁淀川水系水産資源調査会, 1972.
- 7) 上野岳彦, 田中友樹, 丸山隆: 小支流におけるイワナ, ヤマメ稚魚の定位点, 行動圏および摂餌頻度に対する両種成魚の影響, 日本水産学会誌, 第75巻, 第5号, pp.802-809, 2009.
- 8) 長谷川功, 前川光司: 北海道千歳川支流紋別川で起きた在来種アメマス単独生息域への外来種ブラントラウトの侵入, 日本水産学会誌, 第74巻, 第3号, pp.432-434, 2008.
- 9) Katano, O.: Aggressive Interactions between the Dark Chub, *Zacco temminckii*, and the Pale Chub, *Z. platypus*, in Relation to Their Feeding Behaviour, *Japan Journal of Ichthyology*, Vol.40, pp.441-449, 1994.
- 10) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 松田孝一郎, 白杵幸平, 竹内光: 板櫃川における魚類生息域の季節変化の調査, 水工学論文集, 第56巻, pp.703-708, 2012.
- 11) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 藏本更織, 野口翔平, 上田紗奈江: 静止流体中を単独で遊泳するアユの遊泳特性に及ぼす濁度の影響, 土木学会論文集G(環境), Vol.69, No.6, pp.337-342, 2013.
- 12) 国土交通省河川局: 魚ののぼりやすい川づくりの手引き, 2005.
- 13) 鬼東幸樹, 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巻, pp.1195-1200, 2008.
- 14) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 山本晃義, 脇健樹: 静止流体中を2尾で遊泳するアユの遊泳特性, 水工学論文集, 第53巻, pp.1219-1224, 2009.
- 15) 中坊徹次: 日本産魚類検索, 東海大学出版会, 2013.

(2017. 5. 19受付)

BEHAVIOR CHARACTERISTICS OF *OPSARIICHTHYS PLATYPUS* THAT HAVE DIFFERENT BODY LENGTH AGAINST *PLECOGLOSSUS ALTIVELIS ALTIVELIS*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Kazuya MIHARA, Keisuke KASUGAI, and Kento JOJI

Katano pointed out that smaller individuals of *Opsariichthys platypus* and *Nipponocypris temminckii* occasionally leave the region where *Opsariichthys platypus* and *Candidia temminckii* swim in order to avoid attacks by larger individuals of *Opsariichthys platypus* and *Candidia temminckii*. Onitsuka pointed out that *Opsariichthys platypus* avoid *Carassius auratus langsdorfii* and also that *Candidia temminckii* avoid *Carassius auratus langsdorfii* besides *Opsariichthys platypus* which is larger than 80 mm of body length. However, there are few study of the behavior characteristic of the fish to another fish with different body length. In this study, the behavior characteristics of *Opsariichthys platypus* that have different body length against *Plecoglossus altivelis altivelis* in static water was analyzed. It was found that *Opsariichthys platypus* avoid action against *Plecoglossus altivelis altivelis*. This tendency becomes small as *Opsariichthys platypus* body length becomes large.