

# 静止流体中に照射した光の色が ウナギ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>・藤木 翼<sup>3</sup>・窄 友哉<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>フェロー会員 九州工業大学教授 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>非会員 福岡県京築県土整備事務所行橋 (〒824-0005 福岡県行橋市中央1-2-1)

<sup>4</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)

迷入防止や混獲の対策として魚の行動を制御する方法があり、その方法の1つとして光の活用が挙げられる。光に対する反応が魚種によって異なることが示唆されているが、ウナギ等の底生魚を対象とした研究はほとんど行われていない。本研究では静止流体中に照射する光の明暗および色を変化させ、それらがウナギの稚魚であるクロコウナギの遊泳特性に及ぼす影響について検討した。最大全光束4000lmの光の色を紫、青、緑、赤、および白に変化させた結果、明暗および光の色の変化がウナギの行動特性に影響をほとんど与えないことが確認された。体長や尾数、照度、水温等の条件を変化させた際に異なる結果となる可能性もあり、今後の研究の発展が望まれる。

**Key Words :** *Anguilla japonica*, *transmitted light*, *contrasting*, *color light*

## 1. はじめに

ダムや堰などに設置される取水口に魚類が迷入することで、河川に生息する魚類の稚魚が減耗し、多くの水産資源が失われていることが問題となっている。一方で、水産業において、目的外の魚を捕獲する混獲が問題となっている<sup>1)</sup>。両問題を解決するには、魚の行動を制御することが必要となる。迷入防止対策あるいは混獲対策は①物理的に防止する方法②魚の行動特性を利用する方法の2つに大別される<sup>2)</sup>。①として、フローティングスクリーン、カーテンなどを用いる方法が挙げられる。関谷ら<sup>3)</sup>は開水路中に銀色およびレンズ模様のビニール片を設置し、稚アユを放流した結果、両ケースにおいてアユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)の忌避を確認し、特に後者の忌避が顕著であることを解明した。関谷ら<sup>4)</sup>、下村ら<sup>5)</sup>はアユおよびウグイ(*Tribolodon hakonensis*)を対象として、白色、赤色および魚眼レンズ模様のビニール片を用いて関谷ら<sup>3)</sup>と同様の実験を行った。その結果、アユは全色を忌避し、ウグイは白色および赤色に対する忌避効果が高いことを解明した。

②として、光、気泡、電気、磁力などを用いる方法が挙げられる。黒木・中馬<sup>6)</sup>は流水中に光のスリットを底面から照射、あるいは水面上から水中に白色光を照射した状態で、クロゴイ(*Mylopharyngodon piceus*)およびヒゴイ

(*Cyprinus carpio*)を放流した結果、両魚種の挙動は透過光の影響をほとんど受けないことを解明した。一方で、Ono & Simenstad<sup>8)</sup>は河川構造物がカバーになっている状態で光を照射すると、光度が上昇するに伴いサケ(*Oncorhynchus keta*)の稚魚が光の方に近づくことを解明した。また、Juell & Fosseidengen<sup>9)</sup>は水面上から水中に光を照射することで、サケの遊泳位置が水面付近に集中することを発見した。井上ら<sup>10, 11)</sup>はウグイ、カワムツが明環境において活発な向流行動をとるのに対し、マイワシ、イサキは暗環境の方が活発な向流行動をとることを明らかにした。以上より、透過光に対する反応は魚種によって異なることが示唆される。

鬼東ら<sup>12)</sup>は6色の透過光を用いて、透過光がオイカワ(*Opsariichthys platypus*)、カワムツ(*Candidia temminckii*)の行動特性に及ぼす影響を検討した結果、照度が1700lxの条件では、透過光の色がオイカワおよびカワムツの遊泳行動に影響を及ぼさないことを解明した。今村<sup>13)</sup>、小山<sup>14)</sup>は同じ照度であっても透過光の色によって集魚効果が異なることを指摘した。この特性はサンマ漁において活用されている。サンマ(*Cololabis saira*)は赤色光に対して正の走光性があるため<sup>15)</sup>、捕獲の際に水上から赤色光を照射させて水面に誘導させる。また、ダム水源地環境整備センター<sup>16)</sup>によりアユは青色と緑色に対して、イワナ(*Salvelinus leucomaenis leucomaenis*)は赤色と紫色に対して正

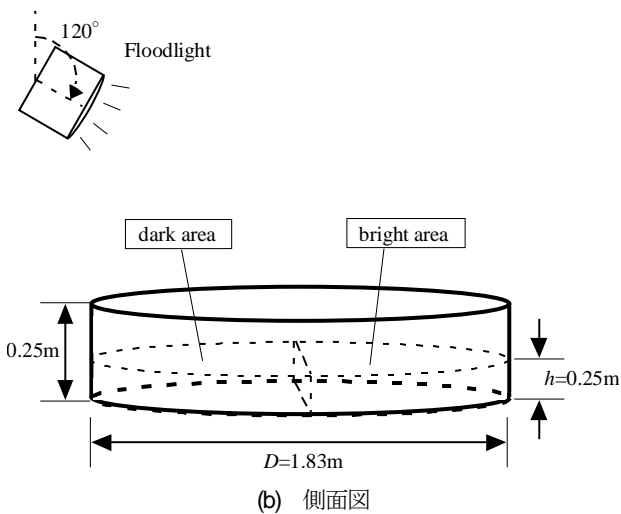
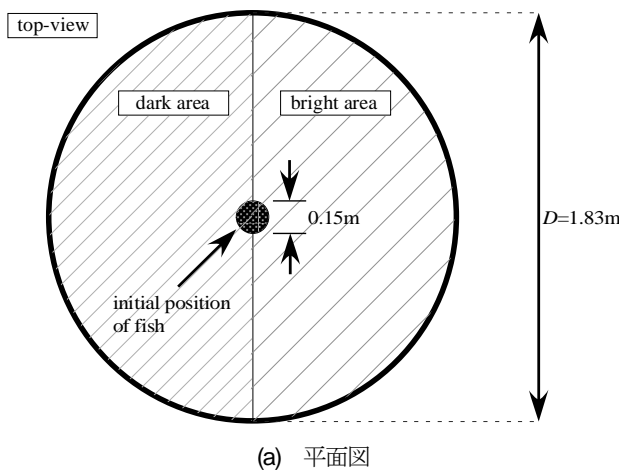


図-1 実験装置の概要

表-1 本実験で使用した光の条件

case name	wavelength(nm)
purple	400
blue	435
green	500
red	610
white	-

の走光性があることが指摘されているが、その他の魚種に対しては明確なデータがないのが現状である。以上のように、遊泳魚の走光性による誘致や行動特性の把握を目的として研究されているものが多く、底生魚の迷入防止を目的とした光の研究は少ない。

底生魚の一種であるウナギ(*Anguilla japonica*)は国際自然保護連合により 2014 年に絶滅危惧種の指定を受けており、詳しい生態の解明と種の保存が求められている。また、水力発電所のタービンの取水口などへの迷入も確認されており<sup>17)</sup>、個体数の減少の一因となっている。一方で、ウナギの仔魚は負の走光性を有している<sup>18)</sup>という報告や、月光を感知し照度と遊泳深度との間に相関があ

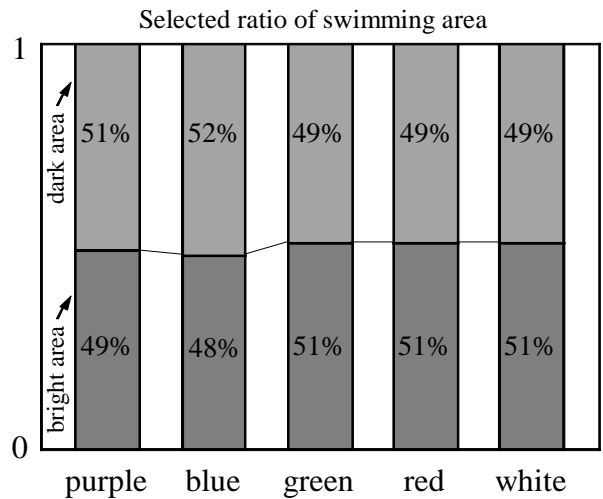


図-2 遊泳エリア選択比率

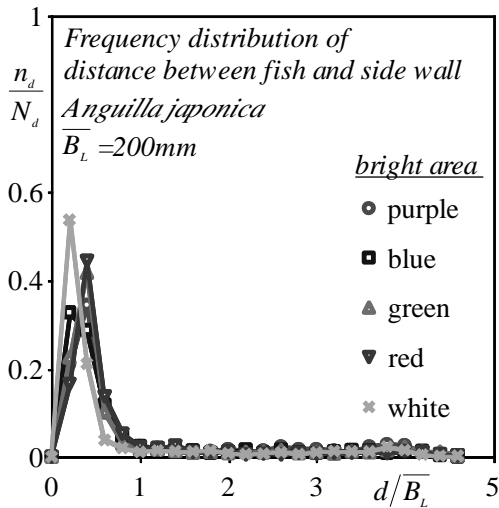
る<sup>19)</sup>という研究結果も存在することから、光を用いた行動制御が可能であると推定される。

本研究では静止流体中に照射する光の明暗および色を変化させ、それらがウナギの稚魚であるクロコウナギの遊泳特性に及ぼす影響を検討した。

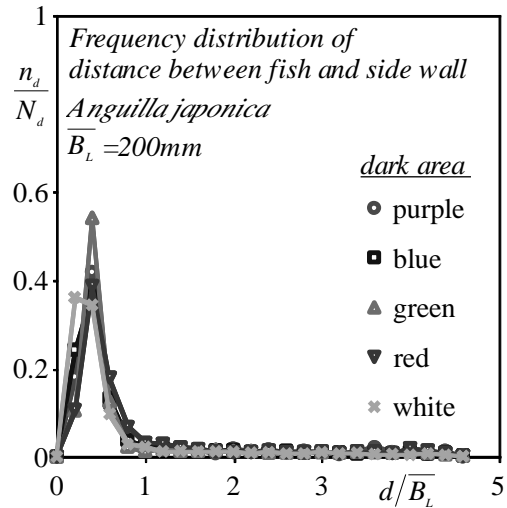
## 2. 実験装置および実験条件

図-1に本実験で用いた実験装置の概要を示す。多角形プールでは隅角部と照射壁面で照度が大きく変わる可能性があるため、bright area内の照度に大きな差が生じないように円形プールを用いた。このとき、円形プールは内径 $D=1.83\text{m}$ 、高さ $0.25\text{m}$ であった。カルキ抜きした水道水をプールに挿入し、水深を $h=0.05\text{m}$ に設定した。このとき、ニホンウナギ同様温帯に生息するヨーロッパウナギを対象とした報告書において魚道の水温が $15\sim 25^\circ\text{C}$ であったことを参考にし、本実験では水温 $19^\circ\text{C}$ に設定した<sup>20)</sup>。暗室に設置した円形プールに、一台の最大全光束が $4000\text{lm}$ の色を可変できるLED投光器(株式会社グッド・グッズ:LED投光器16色イルミネーションLD106)を照射角 $120^\circ$ で投影することで、bright areaとdark areaを作成した。

表-1に実験条件を示す。光の色をpurple, blue, green, redおよびwhiteの5通りに変化させて照射した。なお、白色光は複数の光の色から作成しており、様々な波長が混在しているため、本実験条件のwhiteに波長を記載していない。dark areaおよびbright areaの照度はそれぞれ、 $10\sim 20\text{lx}$ 、 $150\sim 350\text{lx}$ であった。小池<sup>21)</sup>は連続光であっても、 $120\text{lx}$ 以下の低照度ではマアジ(*Trachurus japonicus*)の遊泳特性に影響を与えないことを示した。この結果より、 $120\text{lx}$ 以上では反応する可能性があり、本実験においては下限値を $120\text{lx}$ 以上となるように定めた。



(a) bright area



(b) dark area

図-3 ウナギと側壁との体長倍距離

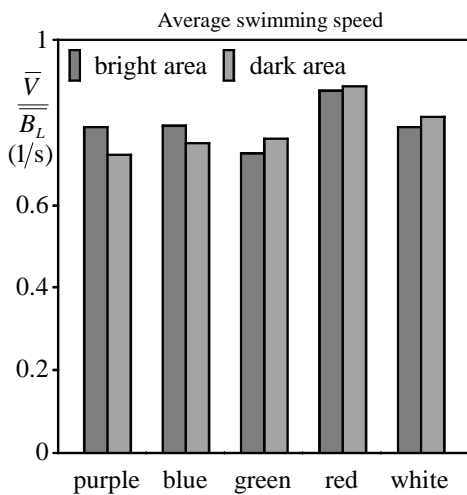


図-4 平均体長倍遊泳速度

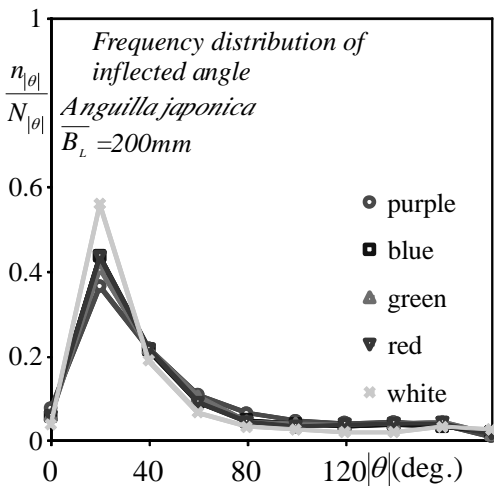


図-5 ウナギの屈折角度

した．円筒金網内に平均体長  $\overline{B_L} = 200\text{mm}$  (最大210mm, 最小190mm)のウナギを1尾挿入し, 各ケースで30回, 合計150回実験を行った．30分間ウナギを馴致させた後, 円筒金網を取り除くと同時に, プールの上方に設置した画素数1440×1080のビデオカメラを使用して撮影速度30fpsで1分間撮影した．なお, 実験で用いたウナギ30尾はクロコウナギとして水温19度の水槽で約2ヶ月間飼育されたものであり, 同個体は同ケース内で用いていない．撮影後, 0.5s間隔で画像をキャプチャーし, ウナギの遊泳位置を解析し, 遊泳速度および屈折角度を算出した．ここに, ある時間のウナギの進行方向とその0.5s後のウナギの進行方向のなす角度を屈折角度とした．

### 3. 実験結果および考察

#### (1) ウナギの明暗および色に対する選好特性

図-2にbright areaとdark areaのウナギの遊泳時間の比率をケースごとに示す．両エリアの遊泳時間はすべての色においてほぼ50%程度となっており, 明暗および特定の色を好んで遊泳している様子は観察されない．

図-3(a), (b)にbright areaおよびdark areaにおけるウナギと側壁との距離  $d$  を平均体長  $\overline{B_L}$  で除した無次元体長倍距離  $d/\overline{B_L}$  における頻度分布をそれぞれ示す．全ケースにおいて無次元体長倍距離  $d/\overline{B_L}$  が0.5程度で高頻度を示し, 1以上では低頻度を示している．図-3(a), (b)を比較すると, 頻度分布の形状は類似しておりピーク値の頻度も両エリアでほぼ同様である．以上より, 本実験条件内においては明暗および光の色の変化はウナギの遊泳位置に影響を与えないことが明らかになった．

一般に, 魚類は側壁付近の遊泳を好む側壁選好性

内径0.15m, 高さ0.2mの円筒金網をプール中心に設置

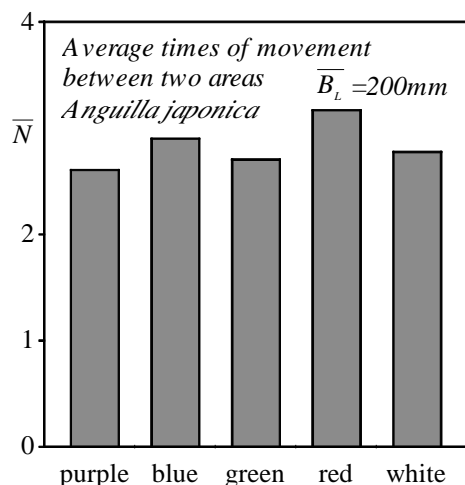


図-6 遊泳エリア平均移動回数

を有している<sup>22)</sup>。図-3(a), (b)からウナギについても側壁選好性が明確に確認される。また、本実験条件内においては明暗および光の色の変化はウナギの側壁選好性に影響を与えないことが明らかになった。

### (2) ウナギの遊泳速度

図-4にbright areaおよびdark areaにおけるウナギの平均遊泳速度 $\bar{v}$  (m/s)を平均体長 $\bar{B}_L$ で除した平均体長倍遊泳速度 $\bar{v}/\bar{B}_L$  (1/s)をケースごとに示す。ここで、平均遊泳速度 $\bar{v}$  (m/s)は遊泳距離を実験時間で除して求めた値である。各ケースにおいてbright areaとdark areaとを比較すると平均体長倍遊泳速度 $\bar{v}/\bar{B}_L$ に明確な差異は観察されない。また、ケース間においても平均体長倍遊泳速度 $\bar{v}/\bar{B}_L$ に明確な差異は観察されない。以上より、本実験条件内においては明暗および光の色の変化はウナギの遊泳速度に影響を与えないことが示唆される。また、谷口ら<sup>23)</sup>は6.1~18.8cmのウナギの体長倍速度が0.43~2.41 $\bar{B}_L$ /秒であることを指摘しており、本実験条件における遊泳速度はこの範囲の比較的遅い方に属しており巡航速度であることが予想される。しかし、ウナギの突進速度および巡航速度に関する研究は少なく、今後の研究の発展が望まれる。

### (3) ウナギの屈折角度

屈折方向を解析した結果、右方向および左方向に屈折する頻度に差異がないことが確認された。そこで、ウナギの屈折角度の絶対値 $|\theta|$ を算出し、図-5にケースごとに頻度分布を示した。いずれのケースにおいても20°付近にピークが存在し、角度が増加すると低頻度を示している。これは、ウナギがほぼ屈折していないことを示しており、また、光の色の変化による違いは確認されなかった。以上より、本実験条件内においては光の色の変化はウナギの屈折特性に影響を与えないことが明らかになった。

### (4) ウナギの平均移動回数

図-6にbright areaとdark areaの境界を通過した回数をカウントして算出した遊泳エリア平均移動回数 $\bar{N}$ を示す。全てのケースにおいて、遊泳エリア平均移動回数 $\bar{N}$ は3回程程度であることが確認できる。これは、光の色の変化が移動平均回数に影響を与えないことを示している。また、今回行った150回の実験で移動回数が0回である例は観察されなかった。これは、bright areaとdark areaのどちらかのエリアに停滞しないことを示しており、明暗の変化が影響を与えないことが確認された。

以上より、本実験条件内においては光の色および明暗の変化はウナギの遊泳エリア移動回数に影響を与えないことが明らかになった。

## 4. おわりに

本研究では、静止流体中で光の色を変化させ、クロコウナギの遊泳特性に及ぼす影響について解明を行った。その結果、明暗および光の色の変化がウナギの遊泳位置、側壁との距離、遊泳速度、屈折特性および遊泳エリア移動回数に与える影響は認められなかった。

ウナギの仔魚は負の走光性を有しており<sup>18)</sup>、シラスウナギ漁では光を利用して集めていることから光に反応して遊泳すると思われた。しかし、本実験条件では明確な傾向は確認されなかった。この原因の一つとして、照度の値が小さいため遊泳行動に影響を与えるまでの刺激でなかったことが挙げられる。また、幼魚は成魚より走光性が著しいとされており<sup>24, 25)</sup>、ウナギの稚魚の段階では明確な変化が確認されなかったことが考えられる。

魚が光に集まる理由には複数の説が提唱されており<sup>26)</sup>、条件を変えて繰り返し研究を進めることで光が魚に及ぼす影響を正確に把握することが可能である。今後は成長過程および体長や尾数、実験装置の大きさや照度、水温などの条件を変化させた研究の発展が望まれる。

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)17K06580（代表：鬼東幸樹）の援助を受けた。また、本研究で用いた実験魚を無償提供していただいた株式会社丸翔に謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 松下吉樹：曳網漁業における混獲防除技術，日本水産学会誌，第66巻，2号，2000.
- 2) 関谷明，漆山敬二，福井吉孝，鈴木辰規：魚類の迷入防止対策について，河川技術に関する論文集，第6巻，pp.137-142，2000.
- 3) 関谷明，福井吉孝，湯目吏吉也，坂本裕嗣：魚類の

- 迷入防止対策の実態とその迷入防止について，河川技術論文集，第7巻，pp.233-238, 2001.
- 4) 関谷明，下村充，坂本裕嗣，甲田篤史，福井吉孝：アユの行動特性と迷入防止について，水工学論文集，第46巻，pp.1133-1138, 2002.
  - 5) 関谷明，福井吉孝，下村充，打田剛：魚類の迷入とその防止方法，土木学会論文集，No.782/II-70, pp.81-91, 2005.
  - 6) 下村充，白川裕之，福井吉孝，関谷明：迷入防止法の開発 ランダムウォークによる魚の挙動解析とその応用，河川技術論文集，第8巻，pp.337-342, 2002.
  - 7) 黒木敏郎，中馬三千雄：漁業用嫌忌灯光の研究，日本水産学会誌，第18巻，10号，pp.468-471, 1953.
  - 8) Ono, K. and Simenstad, C.A.: Reducing the effect of overwater structures on migrating juvenile salmon: An experiment with light, *Ecological Engineering*, Vol.71, pp.180-189, 2014.
  - 9) Juell, J. and Fosseidengen, J.E.: Use of artificial light to control swimming depth and fish density of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in production cages, *Aquaculture*, Vol.233, pp.269-282, 2004.
  - 10) 井上実，任為公，有元貴文：河川魚類の明・暗環境における向流行動，日本水産学会誌，第48巻，12号，pp.1697-1701, 1982.
  - 11) 井上実，有元貴文，任為公：海産魚類の明・暗環境における向流行動，日本水産学会誌，第50巻，1号，pp.63-69, 1984.
  - 12) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，渡邊拓也，飯國洋平，小林達也：透過光および気泡が魚の行動特性に及ぼす影響，水工学論文集，第52巻，pp.1207-1212, 2008.
  - 13) 今村豊：漁業における火光の集魚効果とその操法の研究，うみ，Vol.6, pp.17-43, 1968.
  - 14) 小山長雄：アユの生態，中央公論社，1978.
  - 15) 相沢幸雄：サンマ群の灯付状態と漁獲・魚群との関係，東北区水研報，Vol.23, pp.85-92, 1963.
  - 16) ダム水源地環境整備センター：最新魚道の設計，信山社サイテック，1998.
  - 17) 井田徹治：ウナギ地球環境を語る魚，岩波書店，2007.
  - 18) 友田努，黒木洋明，岡内正典，鴨志田正晃，今泉均，神保忠雄，野村和晴，古板博文，田中秀樹：ウナギ仔魚はマリンスノーの起源物質を摂取する，日本水産学会誌，Vol.81, No.4, pp.715-721, 2015.
  - 19) Chow, S., Okazaki, M., Watanabe, T., Segawa, K., Yamamoto, T., Kurogi, H., Tanaka, H., Ai, K., Kawai, M., Yamamoto, S., Mochioka, N., Manabe, R. and Miyake, Y.: Light-sensitive vertical migration of the Japanese eel *Anguilla japonica* revealed by real-time tracking and its utilization for geolocation, *PLOS ONE*, Vol.10, No.4, 2015.
  - 20) Solomon, D.J. and Beach, M.H.: Fish Pass design for Eel and Elver (*Anguilla anguilla*), *R&D Technical Report W2-070/TR*, 2004.
  - 21) 小池隆：断続光に対する魚類の反応，日本水産学会誌，第51巻，7号，pp.1097-1102, 1985.
  - 22) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，松田孝一郎，野口翔平，竹内光：単独で遊泳するアユの挙動に及ぼす側壁の影響，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.68, No.4, I\_661-I\_666, 2012.
  - 23) 谷口大亮，秋山清二，有元貴文：ウナギの遊泳能力の検討，<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~tarimoto/2005unagi.pdf>, 2005.
  - 24) 井上実：魚類の対光行動とその生理，日本水産学会誌，Vol.38, No.8, pp.907-912, 1972.
  - 25) 宮城美加代，秋山清二，有元貴文：ブリの視力の成長にともなう変化，日本水産学会誌，Vol.67, No.3, pp.455-459, 2001.
  - 26) 有元貴文：魚類の生態からみた漁法の検討，水産の研究，第7巻，6号，pp.33-36, 1988.

(2018.5.17 受付)

## INFLUENCE OF COLOR OF LIGHT IRRADIATED IN STATIC FLUID FOR THE SWIMMING CHARACTERISTIC OF *Anguilla japonica*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Tsubasa FUJIKI and Tomoya SAKO

It is necessarily that behavior of fish is controlled for preventing fish from entering and fishing with other fishes. For example, there are methods of the light, the air bubble, the electricity and the magnetic behavior. *Mylopharyngodon piceus* and *Cyprinus carpio* is not influenced by the transmitted light, and the transmitted light changes the swimming behavior of juvenile *Oncorhynchus keta*. It is suggested that the behavior to the transmitted light is different for fish species. Though the influence for *Opsariichthys platypus* and *Candidia temminckii* with the transmitted light is verified, the influence for benthic fish is hardly verified. This study was made to verify the influence of contrasting and color of the transmitted light for the swimming characteristic of *Anguilla japonica*. It is found that the swimming characteristic of *Anguilla japonica* is not influenced by contrasting and color of the transmitted light.