

# 白色光の配置変化が静水中を遊泳する アユの遊泳挙動に及ぼす影響

鬼東 幸樹<sup>1</sup>・秋山 壽一郎<sup>2</sup>・宍戸 陽<sup>3</sup>・武田 知秀<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 建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>3</sup>日鉄住金テックスエンジニア株式会社 建設事業部 (〒870-0902 大分市大字西ノ洲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)

視覚情報は魚の行動特性に影響を及ぼす一因であるため、光を用いた魚の行動制御が試みられてきた。光に対する反応は魚種によって異なると推定されている。井上らは海洋魚より河川魚の方が視覚を利用して定位する傾向が強いことを指摘した。しかし、光と各魚種の行動特性との関係は十分には解明されていない。本研究では矩形プール内外において白色光の配置を変化させ、静水中を遊泳するアユの遊泳挙動に及ぼす影響の解明を試みた。その結果、白色光の配置を変化させてもアユの魚群半径にほとんど影響を与えないが、プール内で白色光が底面に接近するとアユの遊泳速度が増加することやアユが白色光から遠ざかることが判明した。

**Key Words :** ayu, white lamp, static water, swimming characteristic, rectangular pool

## 1. はじめに

多くの魚は視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚(皮膚感覚、側線感覚)を有する<sup>1)</sup>。これらの感覚能力を利用することで魚の遊泳挙動が制御できれば、既設魚道の遡上率を安価に向上させることが可能となる。水産分野では光を用いた魚の行動制御が試みられてきた<sup>2)</sup>。

舩田ら<sup>3)</sup>は夜間に水中灯を点灯した場合、ウルメイワシ(*Etrumeus teres*)、マサバ(*Scomber japonicus*)、マアジ(*Trachurus japonicus*)、ケンサキイカ(*Uroteuthis edulis*)の漁獲量が増加すると指摘した。この原因として、暗条件よりも明条件で向流性が増して<sup>4)</sup>遊泳速度が増加すること<sup>5)6)</sup>や、照度が増加すると行動が活発になること<sup>7)</sup>などが挙げられた。Miyazaki *et al.*<sup>8)</sup>およびRyer & Olla<sup>9)</sup>は明条件よりも暗条件の方が、シマアジ(*Pseudocaranx dentex*)やスケトウダラ(*Theragra chalcogramma*)が魚群を形成しにくいことを解明した。ただし、ブリ類については水中灯の有無に関わらず、漁獲量に変化しないことが知られている<sup>3)</sup>。以上のことから、光に対する反応は魚種によって異なると推定されている。

河川に生息する魚類についても光に対する反応の解明が試みられている。井上ら<sup>4)10)</sup>は河川魚であるウグイ(*Tribolodon hakonensis*)、カワムツ(*Candidia temminchii*)、ア

ブラハヤ(*Rhynchocypris lagowskii*)、オイカワ(*Opsariichthys platypus*)、ニゴイ(*Hemibarbus labeo*)、タイリクバラタナゴ(*Rhodeus ocellatus*)、ギンブナ(*Carassius auratus langsdorffii*)および海洋魚であるマイワシ(*Sardinops melanostictus*)、カタクチイワシ(*Engraulis japonicus*)、マサバ、マアジ、マルアジ(*Decapterus maruadsi*)、イサキ(*Parapristipoma trilineatum*)、ネンブツダイ(*Apogon semilineatus*)を用いて暗条件および明条件における挙動を観察し、比較的河川魚の方が視覚を利用して定位する傾向が強いことを指摘した。

黒木・中馬<sup>11)</sup>は流水中に光のスリットを底面から照射、あるいは水中に白色光を照射させた状態でコイ(*Cyprinus carpio*)を放流した結果、光が両魚種の挙動にほとんど影響を及ぼさないことを解明した。ところが、Nemeth & Anderson<sup>12)</sup>は照度の高い光がコイに対して威嚇効果を持つと指摘しており、光に対するコイの反応は十分には解明されていない。寺菌ら<sup>13)</sup>は様々な波長の光を実験水路の上部から照射し、サクラマス(*Oncorhynchus masou*)の挙動を観察した。その結果、いずれの波長においてもサクラマスが光に対して集まる性質、すなわち、正の走光性があることを明らかにした。

関谷ら<sup>14)</sup>はアユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)が60lx以上の照度になる朝に行動が活発になることを明らかにした。小山<sup>15)</sup>はアユが青と緑の光に対して正の走光性があるこ

とを示した。鬼束ら<sup>16)</sup>は階段式魚道のプール壁面の塗装箇所および塗装色を変化させ、上流および切欠き側の壁面を黄色で塗装することでアユの遡上率が向上させた。関谷ら<sup>17)</sup>は幅0.6m、長さ1.8m、水深0.1mの水槽を日向、日陰および蓋の有無によって照度が異なるよう4分割し、中央の2重柵から各領域へのアユの移動方向を調査した。98尾に対し77尾(82%)が200~230lxの領域に移動する結果を得た。これらは白色光を用いて階段式魚道のプール内の移動を制御できることを示唆している。中村<sup>18)</sup>はプールタイプ魚道においては、魚は連続してプール間を遡上することは困難なためプール内で休憩をとる必要があると述べている。白色光とアユの遊泳挙動との関係を解明することで、白色光を用いてアユを休憩場所に誘導する方法を検討することが可能になる。

本研究では静水中で白色光の配置を変化させ、矩形プールにおけるアユの遊泳挙動の変化の解明を試みた。

## 2. 実験装置および実験条件

図-1に示す横幅 $L=0.9\text{m}$ 、高さ $H=0.5\text{m}$ 、奥行 $B=0.8\text{m}$ の矩形プールを用い、白色蛍光灯が天井に配置された室内で実験を行った。横方向に $x$ 軸、プール底面から鉛直上向きに $y$ 軸、奥行方向に $z$ 軸を設定した。 $z=0\text{m}$ における $x-y$ 断面はアクリル製で、それ以外はグレーに塗装された木製である。

表-1に実験条件を示す。プール水深 $h$ を0.3m、水温を20°Cに設定した。なお、プール水深 $h$ は国土交通省発行の「魚がのぼりやすい川づくりの手引き」<sup>19)</sup>を参照して、階段式魚道として一般的なスケールとなるよう留意した。白色光として全光束が810lm、配光角が約300°で全長が115mm、外形が65mmの白色電球を用いた。白色光の配置を図-1(a)の鉛直断面( $x-y$ )では水面上(Above water)、水面下(Underwater)およびプール底面(Bottom)の3通りに、図-1(b)の水平断面( $x-z$ )ではアクリル側壁の外側(Outside)および内側(Inside)の2通りに変化させ、合計6ケースの実験を行った。ケース名は鉛直断面( $x-y$ )および水平断面( $x-z$ )における白色光の配置に基づいて命名した。例えば、IA(Inside Above water)は白色光の配置が図-1(a)の鉛直断面( $x-y$ )では水面上(Above water)で、図-1(b)の水平断面( $x-z$ )では側壁の内側(Inside)を意味する。各ケース1回ずつ実験を行った。なお、白色光を長時間の設置すると水温が上昇することが確認されたため、ケースごとに水を入れ替えた。

各ケースで、プールの上部およびアクリル側方に撮影速度30fpsのビデオカメラをそれぞれ1台設置し、水温20°Cで飼育した平均体長 $\bar{B}_l=80\text{mm}\pm 2\text{mm}$ (平均±標準誤

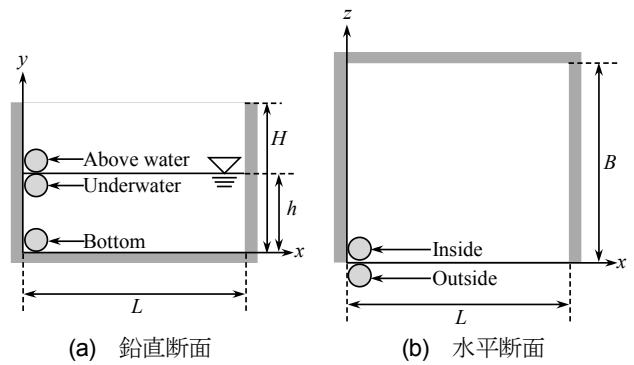


図-1 白色光の配置

表-1 実験ケース

White lamp position		Case name
Outside	Above water	OA
	Underwater	OU
	Bottom	OB
Inside	Above water	IA
	Underwater	IU
	Bottom	IB

差)のアユを $N=10$ 尾放流した。白色光を設置するとアユは暴れるように遊泳するが、30s程度経過すると定常遊泳となった。そのため、白色光を設置して30~40s間後にアユが馴致したことを確認し60s間の撮影を行った。撮影時間を60s間とした理由は、次のようである。同実験条件で3尾のアユを用いて行った仮実験の段階でアユの遊泳挙動を5分間観察したが、1分間と5分間の結果で遊泳挙動に明瞭な差異は観察されなかった。本実験は0.5sごとにアユの遊泳位置を特定する必要があるため、実験時間の増加に伴い解析に要する時間が増大する。これらを踏まえて、1つの目安として撮影時間を60s間とした。撮影後、0.5sごとにキャプチャされた画像をもとにアユの魚群半径、遊泳速度および遊泳位置を解析した。遊泳位置の違いによる魚群半径および遊泳速度の変化は目視では観察されなかったため、魚群半径および遊泳速度の解析には全領域を対象とした。なお、魚群半径は石川<sup>20)</sup>の定義した式(1)より算出した。

$$R_x \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^N r_{xi}^2} / N \quad (1)$$

ここに、 $R_x$ 、 $r_{xi}$ 、 $N$ はそれぞれ $x$ 軸方向瞬間魚群半径、魚群重心と各供試魚との $x$ 軸方向瞬間距離、供試魚数である。

プール内を非注水状態にし、各ケースおよび白色光を配置していない場合(Non)で、 $y/h=0.05$ において $x$ および $z$ 軸方向にそれぞれ0.1m間隔で構成される $8 \times 7=56$ 点での照度 $E$ を分解能が0.1lxの照度計で測定した。 $y/h=0.05$ において照度 $E$ を測定した理由は、白色光の

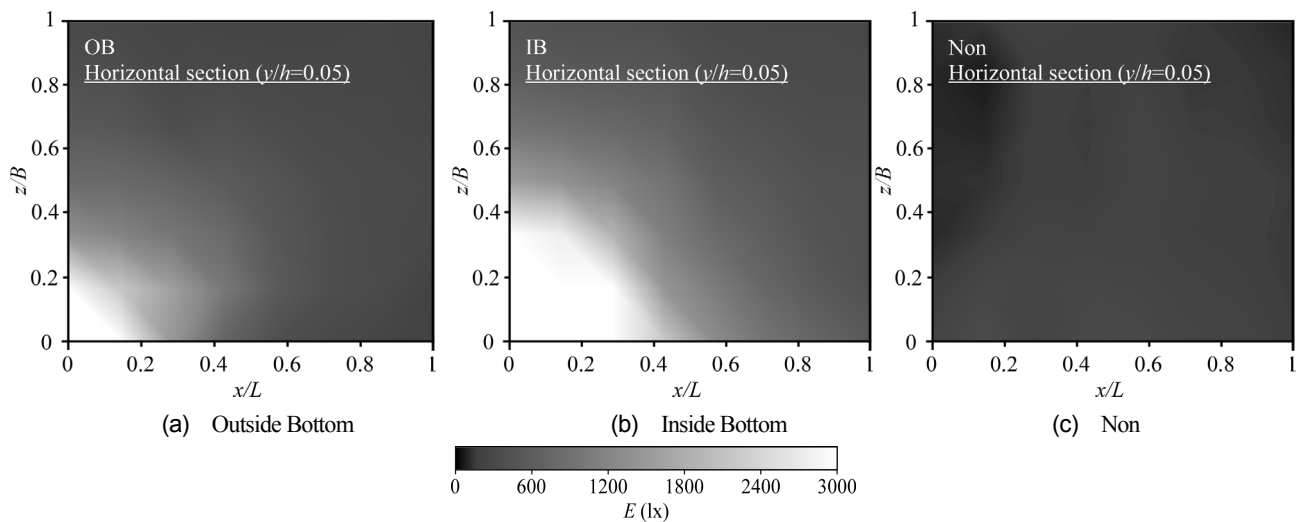


図-2 照度コンター

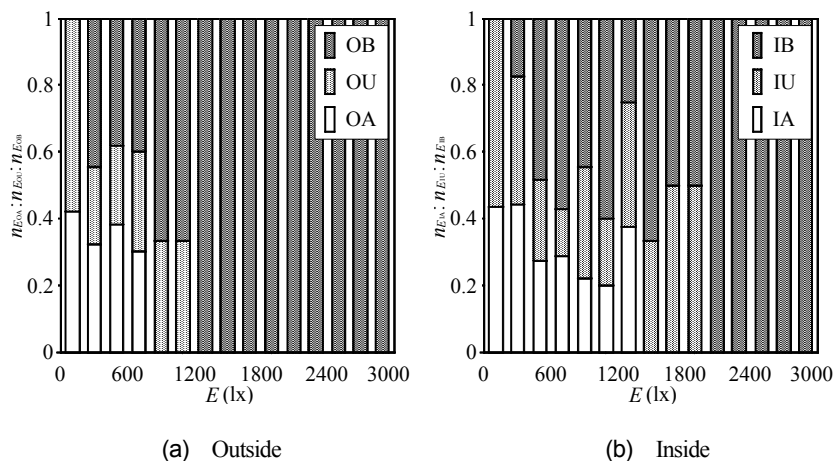


図-3 照度頻度の比較

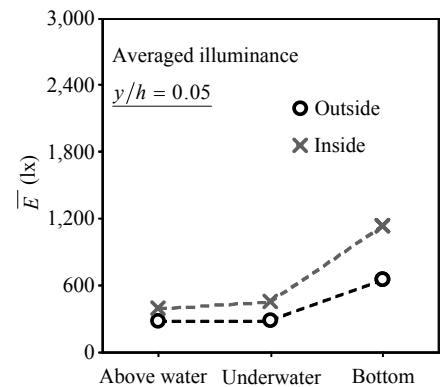


図-4 平均照度

下側において照度変化が大きいこと、多くの魚が底面付近を遊泳することを踏まえ、魚が照度の影響を最も受ける位置であると考えたからである。

本実験の撮影および照度測定の間は12時~15時の間とした。これは、川那部ら<sup>20)</sup>により時間帯によって魚の行動特性に変化が見られ、日中の遡上率がピークとなることが解明されていることを考慮したためである。

### 3. 実験結果および考察

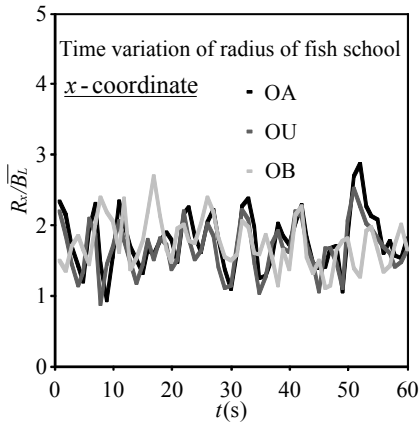
#### (1) プール内の照度

図-2(a)-(c)に白色光を底面に配置した場合(OB, IB)および白色光を配置していない場合(Non)で、 $y/h=0.05$ において計測された照度 $E$ を示す。白色光を底面に配置した場合、白色光を中心に半径  $0 < x/L < 0.2$ , かつ、 $0 < z/B < 0.2$  の範囲で照度 $E$ は3000lx以上を示した。白色光から最も離れたプール隅角部( $x/L=1, y/h=0.05$ ,

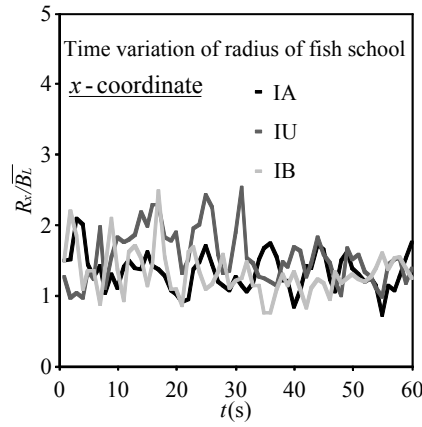
$z/B=1$ )での照度 $E$ は約200lxであった。白色光の鉛直配置(Above water, Underwater, Bottom)が変化したケースでも同様に、白色光の下部で照度 $E$ が高い状態で、プール内の全域で約200lx以上であった。

一方、白色光を配置していない場合(Non),  $y/h=0.05$ における照度 $E$ はプール内全域で約100lxであった。60lxを上回っているため、行動が活発になったアユ<sup>14)</sup>に及ぼす白色光の影響を検討可能であると考えられる。なお、12時~15時の間で北九州市を貫流する2級河川の板櫃川において暗所となりやすい木陰や橋梁の陰に覆われた水際部で照度を計測したところ、最も暗いところで100lx程度であった。

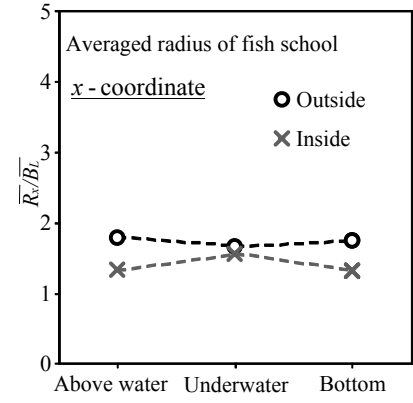
図-3(a), (b)に照度 $E$ を200lxごとに区間分割した頻度 $n_E$ の比を水平配置(Outside, Inside)別に示す。図-3(a)のOutsideに着目すると、OAは1~800lx, OUは1~1200lx, OBは201~3000lxにそれぞれ分布している。図-3(b)のInsideに着目すると、IAは1~1400lx, IUは1~2000lx, OBは201lx~3000lxに分布している。図-4に白色光の鉛直配



(a) Outside



(b) Inside

図-5 アユの無次元  $x$  軸方向瞬間魚群半径の時間変化図-6 アユの無次元  $x$  軸方向時間平均魚群半径

置(Above water, Underwater, Bottom)と平均照度  $\bar{E}$  との関係を示す。Outside, Inside とともに白色光が底面に接近する Above water, Underwater, Bottom の順に平均照度  $\bar{E}$  は増加傾向にある。また、変化の割合は Outside と比較して Inside の方が大きい。

## (2) アユの魚群半径の時間変化

図-5(a), (b)に1sごとのアユの  $x$  軸方向瞬間魚群半径  $R_x$  を平均体長  $\bar{B}_L$  で除した無次元  $x$  軸方向瞬間魚群半径  $R_x / \bar{B}_L$  を水平配置(Outside, Inside)別に示す。ここで、 $x$  軸方向瞬間魚群半径  $R_x$  を平均体長  $\bar{B}_L$  で除したのは、アユの魚群半径はアユの体長により無次元化することで相似則が成り立つと考えられるためである。兼廣ら<sup>22)</sup>は3尾あるいは5尾で静止流体中を遊泳するタイリクバラタナゴの個体間距離が体長の約1.4倍~1.7倍であり、尾数の影響を受けないことを示した。鬼束ら<sup>23)</sup>は3尾以上のアユにより形成される魚群には成群力が働き、個体間距離を一定に保つことを解明した。これらは体長の異なるアユの魚群の大きさは体長に依存し、相似則が成り立つことを示唆している。無次元  $x$  軸方向瞬間魚群半径  $R_x / \bar{B}_L$  は全ケースにおいて約1~3の間で変動しており、ケース間での差異は観察されない。

図-6に白色光の鉛直配置(Above water, Underwater, Bottom)と、アユの  $x$  軸方向瞬間魚群半径  $R_x$  を時間平均した  $x$  軸方向時間平均魚群半径  $\bar{R}_x$  を平均体長  $\bar{B}_L$  で除した無次元  $x$  軸方向時間平均魚群半径  $\bar{R}_x / \bar{B}_L$  との関係を示す。OutsideおよびInsideにおける無次元  $x$  軸方向時間平均魚群半径  $\bar{R}_x / \bar{B}_L$  は約1.7, 1.4の一定値であり、白色光の鉛直配置変化に伴う明瞭な増加あるいは減少傾向は観察されない。したがって、白色光の鉛直配置(Above water, Underwater, Bottom)が変化しても3000lx以下の照度では魚群半径に影響を及ぼさないと考えられる。

## (3) アユの遊泳速度

アユの 0.5s ごとの 3 次元合成遊泳速度  $V$  を平均体長  $\bar{B}_L$  で除した 3 次元合成体長倍遊泳速度  $V / \bar{B}_L$  を算出した。ここで、3 次元合成遊泳速度  $V$  を平均体長  $\bar{B}_L$  で除したのは、魚類の遊泳速度は魚類の体長とおおよそ比例の関係にある<sup>25)</sup>ことを踏まえたためである。続いて、3 次元合成体長倍遊泳速度  $V / \bar{B}_L$  を 1(1/s)ごとに 10 区間に分割し、各区間内の  $V / \bar{B}_L$  を有するアユの個体数  $n_v$  を総データ数  $N_v$  で除した値  $n_v / N_v$  を算出した。アユの最高遊泳速度  $V_{\max} / \bar{B}_L \approx 10(1/s)$ である<sup>25)</sup>ため頻度分布の最大値を 10(1/s)とした。図-7(a), (b)に 3 次元合成体長倍遊泳速度  $V / \bar{B}_L$  の頻度分布を水平配置(Outside, Inside)別に示す。また、3 次元合成体長倍遊泳速度  $V / \bar{B}_L$  は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していることから、式(2), (3)に示すガンマ分布を採用し図中に曲線で示した。

$$f(V/\bar{B}_L) = \frac{1}{\Gamma(\lambda)} \alpha^\lambda (V/\bar{B}_L)^{\lambda-1} e^{-\alpha V/\bar{B}_L} \quad (2)$$

$$\Gamma(\lambda) = \int_0^\infty e^{-x} x^{\lambda-1} dx \quad (3)$$

係数  $\alpha$ ,  $\lambda$  は最小二乗法より算出した。表-2にピアソンのカイ二乗検定  $\chi^2$  を行った計算結果を示す。ここで、標本から推定したガンマ分布の母数の数は2であるため自由度は7であり、有意水準5%に対応するカイ二乗分布の臨界値  $\chi_{0.05}^2 = 14.07$ である。IU以外においてはガンマ分布に従っていると判断される。IUにおいては  $\chi^2 > \chi_{0.05}^2$  となっているが、これはサンプル数が十分でなかったためだと考えられる。

図-7(a)のOutsideに着目する。白色光の鉛直配置(Above water, Underwater, Bottom)と関係なく3次元合成体長倍遊泳速度  $V / \bar{B}_L$  は約0~4(1/s)の範囲にその多くが分布しており、ケース間で顕著な差異は観察されない。図-7(b)のInsideに着目する。IAでは図-7(a)のOutside同様、3次元合

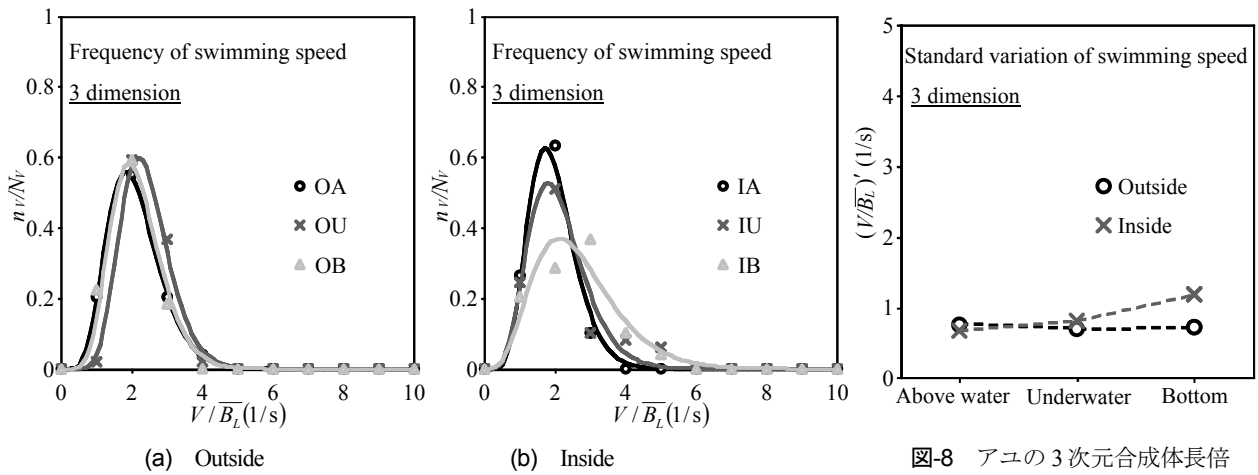


図-7 アユの3次元合成体長倍遊泳速度の頻度分布

図-8 アユの3次元合成体長倍遊泳速度の標準偏差

表-2 遊泳速度への適合度検定結果

Case name	OA	OU	OB	IA	IU	IB
$\chi^2$	0.27	1.94	4.48	2.18	27.02	4.64

成長倍遊泳速度  $V/\bar{B}_L$  は約0-4(1/s)の範囲にその多くが分布している。その他のケースではIU, IBの順に高値方向に分布幅が拡大している。したがって、白色光をプール内部に設置した場合、白色光が底面に接近するにつれてアユの遊泳速度は増加すると考えられる。ただし、照度と遊泳速度の関係に着目すると、底面付近で3000lx以上の照度を示したOBでは遊泳速度の増加は観察されていない。そのため、照度の増加により遊泳速度が増加するとは断定できない。

図-8に白色光の鉛直配置(Above water, Underwater, Bottom)と3次元合成体長倍遊泳速度の標準偏差( $V/\bar{B}_L$ )との関係を示す。Outsideでは3次元合成体長倍遊泳速度の標準偏差( $V/\bar{B}_L$ )は約0.7(1/s)の一定値であり、白色光の鉛直配置(Above water, Underwater, Bottom)の変化に伴う明瞭な増加あるいは減少傾向は観察されない。一方、Insideでは3次元合成体長倍遊泳速度の標準偏差( $V/\bar{B}_L$ )はIA, IU, IBの順に増加傾向にある。

#### (4) アユの分布と白色光の配置

プールの鉛直断面( $x-y$ )および水平断面( $x-z$ )をそれぞれ  $20 \times 6 = 120$  メッシュおよび  $20 \times 20 = 400$  メッシュに区切る。アユの存在位置を頭部と尾部の中間点として各メッシュ内の1sごとの存在尾数  $n_m$  をカウントし、その時間平均尾数  $\bar{n}_m$  を実験に用いた尾数  $N = 10$  で除した時間平均存在率  $\bar{n}_m/N$  を各メッシュで算出した。図-9(a)-(l)に鉛直断面( $x-y$ )および水平断面( $x-z$ )における時間平均存在率  $\bar{n}_m/N$  のコンターを全ケースについて示す。図-9(a)-(f)は白色光の配置が Outside で、図-9(g)-(l)は Inside である。

まず、白色光の配置が Outside である図-9(a)-(f)に着目する。図-9(a)-(c)の鉛直断面( $x-y$ )においては、OA では時間平均存在率  $\bar{n}_m/N$  が  $x$  および  $y$  軸方向の全域にほぼ均等に分布している。OU では時間平均存在率  $\bar{n}_m/N$  が  $x$  軸方向には全域に、 $y$  軸方向には半水深以下の領域に集中的に分布している。OB では時間平均存在率  $\bar{n}_m/N$  が  $x$  軸方向には OA および OU と比較して高値の領域に分布し  $0 < x/L < 0.2$  での分布は少ない。図-2(a)を参照すると( $x/L = 0.24, y/h = 0.05, z/B = 0.06$ )で照度  $E = 2240lx$  であり、アユは 2240lx 以上を示す領域での遊泳を忌避していると考えられる。 $y$  軸方向には全域にほぼ均等に分布している。図-9(d)-(f)の水平断面( $x-z$ )においては、OA, OU, OB の全てにおいて  $0 < z/B < 0.2$  の領域に分布しており、ケース間での顕著な差異は観察されない。

続いて、白色光の配置が Inside である図-9(g)-(l)に着目する。図-9(g)-(i)の鉛直断面( $x-y$ )においては、IA では時間平均存在率  $\bar{n}_m/N$  が  $0 < x/L < 0.7$ , かつ、 $0 < y/h < 0.7$  の領域に集中的に分布している。IU では IA と比較して時間平均存在率  $\bar{n}_m/N$  が  $x$  軸方向には高値の領域に、 $y$  軸方向には半水深以下の領域に集中的に分布している。なお、IU においては白色光の下方( $x/L = 0.06, y/h = 0.05, z/B = 0.06$ )で照度  $E = 1960lx$  であり、この領域での遊泳はほとんど観察されない。IB では時間平均存在率  $\bar{n}_m/N$  が  $x$  軸方向には 3 ケース中で最も白色光から離れた領域に分布し  $0 < x/L < 0.4$  での分布は少ない。図-2(b)を参照すると( $x/L = 0.44, y/h = 0.05, z/B = 0.06$ )で照度  $E = 2010lx$  程度であり、アユは 2010lx 以上を示す領域での遊泳を忌避していると考えられる。 $y$  軸方向には IU と同様に半水深以下の領域に集中的に分布している。図-9(j)-(l)の水平断面( $x-z$ )に着目する。IA では時間平均存在率  $\bar{n}_m/N$  が  $0 < z/B < 0.2$  の領域に集中的に分布している。IU では IA と比較して  $z$  軸方向での分布幅が増加し、IB では 3 ケースの中で  $z$  軸方向の分布幅が最大で

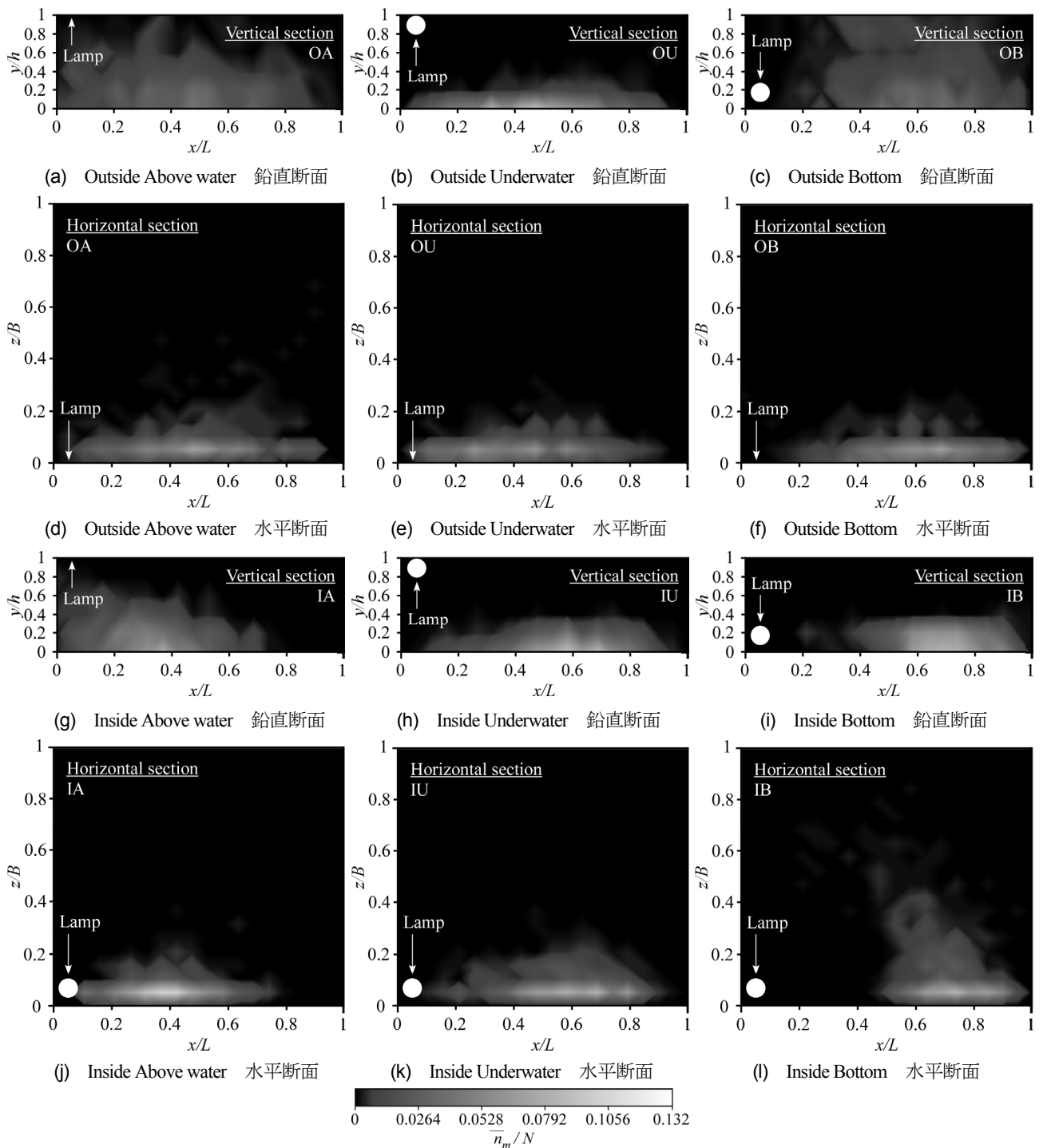


図-9 アユの存在率コンター

ある。

以上より、白色光の配置の変化によって、プール内のアユの遊泳位置が変化することが明らかとなった。また、アユは約 2000lx を閾値として遊泳する領域を選択しており、2000lx 以上の領域を忌避していると考えられる。

#### (5) アユと白色光との距離の関係

各アユから白色光までの 3 次元合成距離  $d$  をアユの平均体長  $\overline{B}_l$  で除した 3 次元合成体長倍距離  $d/\overline{B}_l$  を算出

した。続いて、3 次元合成体長倍距離  $d/\overline{B}_l$  を 1 ごとに 15 区間に分割し、各区間内の  $d/\overline{B}_l$  を有するアユの個体数  $n_d$  を総データ数  $N_d$  で除した値  $n_d/N_d$  を算出した。アユと白色光との距離の最大値は  $d_{\max}/\overline{B}_l \approx 15$  であるため頻度分布の最大値を 15 とした。図-10(a), (b) に 3 次元合成体長倍距離  $d/\overline{B}_l$  の頻度分布を水平配置(Outside, Inside)別に示す。3 次元合成体長倍距離  $d/\overline{B}_l$  は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していることから、式(2), (3)において  $V$  を  $d$  に置き換えて

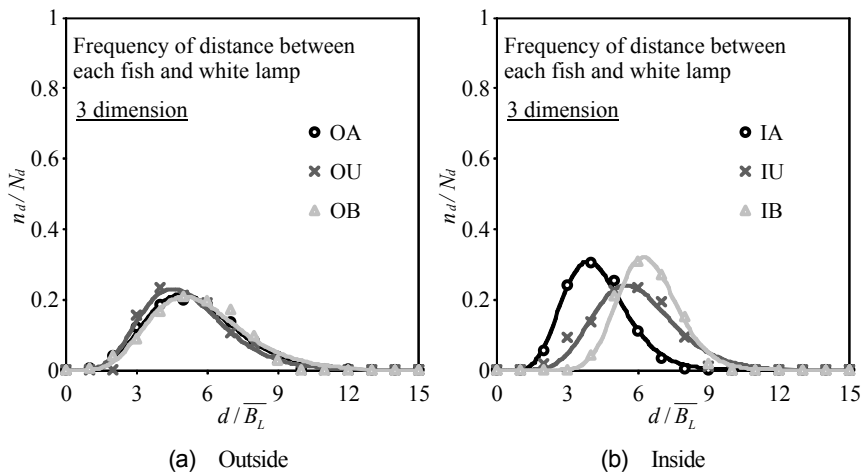


図-10 アユと白色光との距離の頻度分布

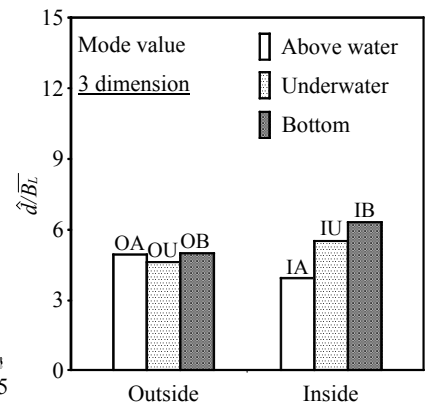


図-11 アユと白色光との距離の最頻値

表-3 アユと白色光との距離への適合度検定

Case name	OA	OU	OB	IA	IU	IB
$\chi^2$	18.73	21.33	33.59	6.86	47.91	12.84

求めたガンマ分布を曲線で示した。表-3 にピアソンのカイ二乗検定  $\chi^2$  を行った計算結果を示す。ここで、標本から推定したガンマ分布の母数の数は 2 であるため自由度は 12 であり、有意水準 5% に対応するカイ二乗分布の臨界値  $\chi_{0.05}^2 = 21.03$  である。OA, IA, IB においてはガンマ分布に従っていると判断される。OU, OB, IU においては  $\chi^2 > \chi_{0.05}^2$  となっているが、これはサンプル数が十分でなかったためだと考えられる。

図-10(a)の Outside では白色光の鉛直配置(Above water, Underwater, Bottom)と関係なく 3 次元合成体長倍距離  $d/\overline{B_L}$  は約 2-9 の範囲にその多くが分布しており、ケース間で顕著な差異は観察されない。図-2(a)を参照すると OB では ( $x/L = 0.24$ ,  $y/h = 0.05$ ,  $z/B = 0.06$ ) で照度  $E = 2240\text{lx}$  であり、白色光からこの地点までの距離は  $d/\overline{B_L} \approx 3$  である。  $d/\overline{B_L} = 3$  までの頻度の累計は約 13% であり、2240lx 以上の照度を示す領域でありあまり遊泳していない。一方、図-10(b)の Inside では IA, IU, IB の順に 3 次元合成体長倍距離  $d/\overline{B_L}$  の分布が高値に移動している。図-2(b)を参照すると IB では ( $x/L = 0.44$ ,  $y/h = 0.05$ ,  $z/B = 0.06$ ) で照度  $E = 2010\text{lx}$  程度であり、白色光からこの地点までの距離は  $d/\overline{B_L} \approx 4$  である。  $d/\overline{B_L} = 4$  までの頻度の累計は約 4% であり、2010lx 以上の照度を示す領域でほとんど遊泳していない。

図-11 にアユから白色光までの 3 次元合成体長倍距離の最頻値  $\hat{d}/\overline{B_L}$  を水平配置(Outside, Inside)別に示す。Outside では OA, OU, OB の全てにおいて 3 次元合成体長倍距離の最頻値  $\hat{d}/\overline{B_L}$  は約 5 の一定値であり、白色光の鉛直配置(Above water, Underwater, Bottom)の変化に伴う明瞭な増加あるいは減少傾向は観察されない。一方、

Inside では IA, IU, IB の順に 3 次元合成体長倍距離の最頻値  $\hat{d}/\overline{B_L}$  が増加している。これらは白色光をプール内部に配置した場合、白色光が底面に接近するにつれてアユの遊泳位置が白色光から遠ざかることを表している。

$y/h = 0.05$  において 2000lx 以上の照度を示す領域が増え、その領域を忌避したためだと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では静水中で白色光の配置を変化させ、矩形プールにおけるアユの遊泳挙動の変化の解明を試みた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 白色光の配置が変化しても、3000lx 以下の照度ではアユの魚群半径にほとんど影響を与えない。
- (2) 白色光をプール外に配置した場合、鉛直配置の変化はアユの遊泳速度にほとんど影響を与えない。一方、白色光をプール内に配置した場合、白色光が底面に接近するにつれてアユの遊泳速度は増加する。ただし、底面付近での照度の増加に起因して遊泳速度が増加したのかは不明なため、今後の検討課題としたい。
- (3) 白色光をプール外に配置した場合、鉛直配置の変化に関わらずアユと白色光との距離は体長の約 5 倍で一定である。一方、白色光をプール内に配置した場合、白色光が底面に接近するにつれてアユと白色光との距離は増加する。
- (4) アユは約 2000lx を閾値として遊泳する領域を選択しており、2000lx 以上の領域を忌避していると考えられる。

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：鬼束幸樹)の援助を受けた。

## 参考文献

- 1) 有元貴文：光を利用した魚群制御技術，水産工学，Vol.28, No.1, pp.71-76, 1991.
- 2) 稲田博史，高山剛：光源の発光特性と漁獲対象種の対光行動制御，日本水産学会誌，第79巻，5号，pp.883, 2013.
- 3) 舛田大作，熊沢泰生，武内要人，甲斐修也，松下吉樹：垣網への水中灯装着による定置網の漁獲の変化，日本水産学会誌，第78巻，5号，pp.870-877, 2012.
- 4) 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.
- 5) Viscido, S.V., Parrish, J.K. and Grünbaum, D.: Individual behavior and emergent properties of fish schools, *Marine Ecology Progress Series*, Vol.273, pp.239-249, 2004.
- 6) 米山和良，安樂和彦，石田拓也，尾上敏幸，加世堂照男：大型水槽における超音波テレメトリーを用いた魚の位置計測の試み，日本水産学会誌，第80巻，5号，pp.677-688, 2014.
- 7) 藤森康澄，塩出大輔，馬場紀彦，清水晋，三浦汀介：スケトウダラ稚魚の時刻と照度による行動，日本水産学会誌，第66巻，1号，pp.26-32, 1999.
- 8) Miyazaki, T., Shiozawa, S., Kogane, T., Masuda, R., Maruyama, K. and Tsukamoto, K.: Developmental changes of the light intensity threshold for school formation in the striped jack *Pseudocaranx dentex*, *Marine Ecology Progress Series*, Vol.192, pp.267-275, 2000.
- 9) Ryer, C.H. and Olla, B.L.: Effect of light on juvenile walleye pollock shoaling and their interaction with predators, *Marine Ecology Progress Series*, Vol.167, pp.215-226, 1998.
- 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) 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.
- 12) Nemeth, R.S. and Anderson, J.J.: Response of juvenile Coho and Chinook salmon to strobe and mercury vapor lights, *North American Journal of Fisheries Management*, Vol.12, No.4, pp.684-692, 1992.
- 13) 寺菌勝二，越澤治，古屋稔：ダム貯水池におけるサクラマス光誘導，ダム技術，No.129, pp.10-17, 1997.
- 14) 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.
- 15) 小山長雄：アユの生態，中央公論社，pp.97-116, 1978.
- 16) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，高松周平：階段式魚道の壁面色がアユの遡上特性に及ぼす影響，土木学会論文集，Vol.72, No.6, pp.127-132, 2016.
- 17) 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，Vol.16, pp.1133-1138, 2002.
- 18) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，pp.42-49, 1995.
- 19) 国土交通省河川局：魚がのぼりやすい川づくりの手引き，pp.39-65, 2005.
- 20) 石川雅朗：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.
- 21) 川那部浩哉，宮地伝三郎，森圭一，原田英司，水原洋城，大串竜一：遡上アユの生態Ⅱ，京大生理生態業績，第79巻，No.2, pp.145-167, 1956.
- 22) 兼廣春之，鈴木誠，松田皓：タイリクバラタナゴの群サイズによる行動特性，日本水産学会誌，第51巻，2号，pp.1977-1982, 1985.
- 23) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，三原和也，白岡敏，臼杵幸平，福田拓也：流速変化がアユの魚群の挙動に及ぼす影響，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68, No.4, pp.655-I\_660, 2012.
- 24) 浪平篤：魚道内の流況に着目した階段式魚道の設計に関する研究，農村工学研究所報告，第49巻，pp.1-48, 2009.

(2017. 5. 19 受付)

## EFFECTS OF POSITION OF A WHITE LAMP ON SWIMMING CHARACTERISTICS OF AYU IN STATIC WATER

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Akira SHISHIDO and Tomohide TAKEDA

Visual information is one of the factors that fish decides actions, so taking control of their behavior by light has been considered. It is thought that reactions against light are depending on fish species. Inoue *et al.* pointed out that river fish had a stronger tendency to decide the swimming position by taking advantage of visual information than oceanic fish. However, effects of light on fish have not been investigated well. In this study, the position of an installed white lamp in the rectangle pool was changed and swimming characteristics of ayu in static water were analysed. It was found that there were few effects on the radius of fish school. On the other hand, the swimming speed increased and ayu got away from the white lamp with the white lamp approaching the bottom in the rectangle pool.