

鏡を用いたアユの選択的誘導に関する研究

GUIDANCE CONTROL OF SCHOOL OF AYU USING A MIRROR

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・山本晃義³・池野慎⁴

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Akiyoshi YAMAMOTO and Makoto IKENO

¹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)

²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

³学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程

⁴学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

Some species of fish have a nature which desire to make a school, especially ayu, *Plecoglossus altivelis altivelis*. The ayu makes a school on the basis of visual information which is obtained by the eyes. If the mirror is put in an open-channel flow, the ayu may recognize that the same species fish is swimming when they look at the mirror. In this study, it is investigated that whether ayu make a school or not when a mirror is put in the open-channel flows and also that the guidance control of school of ayu is possible or not, by making use of some species. It was found that behavior of the school of ayu can be controlled with a mirror, however, behavior of *Zacco platypus*, *Zacco temminckii* and *Carassius gibelio langsdorfi* can not be controlled.

Key Words : *Plecoglossus altivelis altivelis*, mirror, guidance control, open-channel flow

1. はじめに

ダムや堰などに設置される取水口あるいは放水口に魚が迷入し、放流したサケ、マス、アユ等の稚魚が減耗することが古来より漁業関係者を悩ませてきた¹⁻⁵⁾。迷入防止対策には以下の2つの考え方がある⁶⁾。

a) 物理的に防止する方法

b) 魚の行動特性を利用する方法

a)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。フローティングスクリーンを用いる場合、スクリーンメッシュを通過できない大型の魚を確実に迷入阻止できるが、出水時の流出に注意しなければならない³⁾。関谷ら⁷⁾は水路中に銀色あるいは魚眼レンズ模様のビニール片を流下方向に徐々にずらしながら横断方向に複数設置し、稚アユを放流した。その結果、忌避率が前者で40%、後者で88%であることを解明した。両者で差異が生じた理由として、銀色の場合は光を透過しないがレンズ模様の場合は光を屈折することを挙げている。関谷ら^{8,9)}、下村ら¹⁰⁾はアユおよびウグイを対象として、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⁷⁾と同様の実験を行った。その結果、アユの忌避率は全色で約90%、ウグイの忌避率は白色では71%であるが、赤色では98%との結果を得た。

b)として、光、気泡カーテン、電気スクリーンなどを用いる方法が挙げられる。仔アユは紫外線光から忌避するといった負の走光性がある一方で、可視光に対しては正の走光性がある事を利用したもので、既に現地実験が開始されている³⁾。気泡カーテンについても稚シヤマおよび稚サケを対象として製紙工場に、稚アユを対象として水力発電所に設置されている³⁾。また、迷入防止の研究ではないが、Smith¹¹⁾は気泡膜を用いてニシン群の進路を遮断することに、Arimoto *et al.*¹²⁾は気泡膜を用いて定置網内の魚を魚捕部に駆集させることに成功した。

一方、電気スクリーンの効果を検討した例として関谷ら⁶⁾の研究が挙げられる。彼らは稚アユ、コイ、フナを対象として、パルス長およびパルス間隔をそれぞれ1/100s、10Hzの一定な状態で電位勾配を0.1V/cmから1.0V/cmの範囲で系統的に変化させ、稚アユには効果がないが、コイ、フナは電気スクリーンから忌避することを明らかにした。電気スクリーンは国内外で設置例が報告されている¹⁻⁵⁾。

以上のように、b)を利用した様々な迷入防止法が実用段階に成りつつある。ところで、多くの魚は視覚、聴覚、臭覚、味覚、触覚(皮膚感覚、側線感覚)を有しているが¹³⁾、井上ら^{14,15)}は海洋魚よりも河川魚の方が視覚からの情報に依存して行動していることを明らかにした。特に

魚群を形成するアユなどは視覚に対する依存度が高いことが知られている。そのため、魚に鏡を見せた場合、同種の他個体と誤認し、鏡の前で定位する可能性がある。本研究は、鏡を利用した魚群の誘導方法の有効性を検討したものである。

2. 鏡に対する生物の反応に関する既往の研究

生物に鏡を見せた場合、鏡に映った対象が自己と認知できる種と、同種の他個体と誤認する種に分けられる。前者の能力を鏡像認知というが、この能力は人間、チンパンジー、ボノボ、オランウータン^{16,17)}、イルカおよびゾウ¹⁸⁾にしか現在確認されていない。哺乳類以外に鏡を見せた例はほとんどない。Palmer *et al.*¹⁹⁾は雌のヨーロッパコウイカに鏡を見せると、スプロッチという斑点模様を表皮に示すことを発見した。通常、スプロッチは雄に対しては示さず、雌にしか示さないことから、鏡に映ったイカが同種の雌と認識しており、また、鏡像認知をしているのならスプロッチを示さないはずなので、少なくともヨーロッパコウイカは鏡像認知が出来ないことが解明されている。

魚類に関して鏡に対する行動を観察した例はほとんどない。著者らが知る限り、開水路の片岸あるいは両岸に鏡を設置してアブラボテを遊泳させたところ、鏡を設置した領域を選好して遊泳すること解明した関根ら²⁰⁾の研究しか存在しない^{1-5,21-22)}。ただし、鏡像認知に関する研究結果¹⁶⁻¹⁹⁾から、魚類には鏡像認知能力がない可能性が高いと考えられる。河川に生息する魚類の中にはアユのように魚群を形成する種が存在するが、これは視野内に同種が遊泳していることを認知し、互いに接近することで魚群を形成していると考えられる。したがって、水中に鏡を設置した場合、魚種によっては鏡に映った自己像を同種の他個体と誤認し、魚群を形成する可能性がある。

3. 実験装置および実験条件

(1) 実験装置および実験魚

図-1に示す長さが2m、水路幅 B が0.37mの亚克力製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。用いる鏡の幅は0.33m、高さは0.23m、厚さは1.5mmである。

実験に用いたアユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)、オイカワ(*Zacco platypus*)、カワムツ(*Zacco temminckii*)およびギンブナ(*Carassius gibelio langsdorfi*)の平均体長 $\overline{B_L}$ 、最小体長 B_{Lmin} および最大体長 B_{Lmax} を表-1に示す。

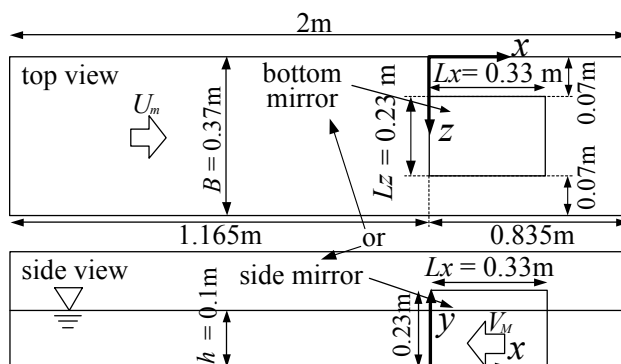


図-1 実験装置

表-1 魚種別の体長

	アユ	オイカワ	カワムツ	ギンブナ
$\overline{B_L}$ (m)	0.081	0.077	0.061	0.084
B_{Lmin} (m)	0.072	0.072	0.047	0.063
B_{Lmax} (m)	0.09	0.09	0.097	0.104

表-2(a) 鏡位置の変化に関する実験

	$U_m / \overline{B_L}$	$V_M / \overline{B_L}$	魚種	鏡位置
条件	0	0	4	底面、側壁

表-2(b) 流速の変化に関する実験

	$U_m / \overline{B_L}$	$V_M / \overline{B_L}$	魚種	鏡位置
条件	1,3,5,7 ギンブナは 1,3,5のみ	0	4	側壁

表-2(c) 鏡移動に関する実験

	$U_m / \overline{B_L}$	$V_M / \overline{B_L}$	魚種	鏡位置
条件	1, 3, 5, 7	0.25	アユ	側壁

(2) 実験条件

魚の遊泳行動に及ぼす因子として、鏡位置(鏡の設置場所が底面あるいは側壁)、魚種、流速 U_m 、鏡の移動速度 V_M を想定した。なお水深、水路幅等についても検討を行うべきだが、因子が多くなり過ぎると実験結果との関係性を解明することが困難なため、すべての供試魚の体長を考慮し、0.1(m)で一定値とした。

鏡を底面に設置する場合は、水路中央で反射面を上向きとし、側壁に設置する場合は左岸側壁で反射面を水路内側とした。両者とも水路上流端から水路長の2/3の位置に鏡の中心を配置し、鏡の上流端を $x=0$ とした。図-1中の L_x 、 L_z は鏡の流下および横断方向の長さである。

流速 U_m を変化させる場合は、平均体長 $\overline{B_L}$ との比 $U_m / \overline{B_L}$ が魚種に関わらず同様に変化するようにした^{3,4)}。

鏡を移動させる場合は、側壁に沿わせた状態で上流方向に速度 V_M で牽引した。なお、牽引する際に発生する音や振動は微小で、ポンプや水路下流端から落下する流

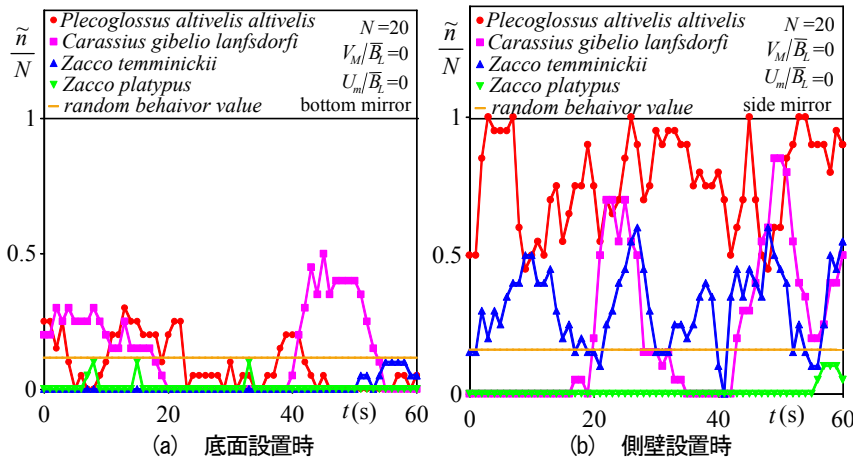


図-2 鏡位置の変化に関する実験の瞬間存在率の時間変化

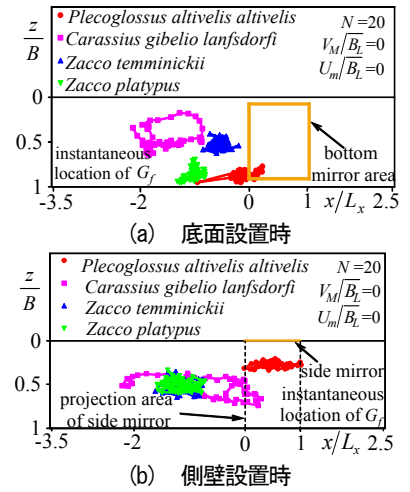


図-3 魚群重心の移動軌跡

速による音や振動の方が遙かに大きい。

表-2(a)～(c)に示す3種類の実験を行った。魚数 N は全て20尾である。

a) 鏡位置の変化に関する実験

表-2(a)は、流速 U_m が0、鏡移動速度 V_M が0の状態では、4魚種を用いて鏡の位置を変化させた実験条件である。

b) 流速の変化に関する実験

表-2(b)は、鏡移動速度 V_M が0、鏡位置は側壁で、4魚種をそれぞれ用いて流速 $U_m / \overline{B_L}$ を1, 3, 5, 7に変化させた実験条件である。ただし、ギンブナについては $U_m / \overline{B_L}$ が7では多くの個体が流されたため実験を中止した。

c) 鏡移動に関する実験

表-2(c)は、鏡位置は側壁で、アユを用いて鏡の移動速度 $V_M / \overline{B_L}$ を0.25とした実験条件である。鏡移動速度が1種類しかないのは、予備実験を行った結果、流速の大小に関わらずこれ以上の鏡移動速度ではアユが鏡を見失ったためである。

以上の3種類の実験を行う際に、鏡の上部に画素数 1440×1080 のビデオカメラを設置し、魚の挙動を30Hzで60s間撮影した。撮影後、1sごとの各画像における全ての魚の吻端位置 (x_{fi}, z_{fi}) を求め、鏡の投影面積上に存在する瞬間魚数 $\tilde{n}$ を算出した。なお、投影方向は底面に鏡を設置した場合は鏡の鉛直上方、側壁に設置した場合は水路横断方向とした。

4. 実験結果と考察

(1) 鏡位置の変化に関する実験結果および考察

図-2(a)および(b)に底面および側壁に鏡を設置した場合の瞬間魚数 $\tilde{n}$ を水路内魚数 N で除した瞬間存在率の時間変化を示す。また、鏡の投影面積を水路の床面積で除した値を線で示した。鏡の位置が底面の場合は0.11、側壁の場合は0.16となり、以下では「ランダム基準値」

と呼称する。魚が鏡に反応せずに、また、群も作らずにランダムに遊泳するのであれば、瞬間存在率 $\tilde{n} / N$ はランダム基準値に類似するはずである。図-2(a)より、鏡の位置が底面の場合はアユ、ギンブナが、側壁の場合はアユ、ギンブナおよびカワムツがランダム基準値より大きな $\tilde{n} / N$ を示すことがある。ただし、これが鏡を選好したものかどうかは明確には判断できない。

そこで、各画像において全ての魚の位置 (x_{fi}, z_{fi}) をそれぞれで平均して魚群重心 G_f ($G_f(x)$, $G_f(z)$) を求めた²³⁾。魚が鏡に反応せずに、また、群も作らずにランダムに遊泳するのであれば魚群重心 G_f は流下および水路幅方向の中央付近に位置するはずである。

図-3(a)および(b)に鏡を底面および側壁においた場合の魚群重心 G_f の水路上($x-z$ 平面)での挙動を示す。図-3(a)より全魚種の魚群重心は流下方向(x)に対しては水路中心付近に存在することがわかる。これは底面に設置された鏡を選好することなく、上下流に遊泳していることを示す。一方、図-3(b)に着目すると、アユ以外の魚群重心は流下方向(x)に対しては水路中心付近に存在するが、アユのみは鏡の投影面積に存在している。また、横断方向位置が水路中央から鏡に近く、鏡付近を選好して遊泳していることが理解される。なお、試しに鏡の上流端が水路上流端から1/3, 1/2地点になる様に設置した場合も、アユのみが同様に鏡の前で遊泳することを確認した。以上のことから、底面に鏡を設置した場合、今回用いた4魚種は鏡の影響を受けずに遊泳すること、側壁に鏡を設置した場合、アユのみが鏡を選好して鏡付近を遊泳することがわかった。

(2) 流速の変化に関する実験結果および考察

図-4(a)～(d)に側壁に鏡を設置して流速 $U_m / \overline{B_L}$ を系統的に変化させた場合の無次元瞬間魚数 $\tilde{n} / N$ の時間変

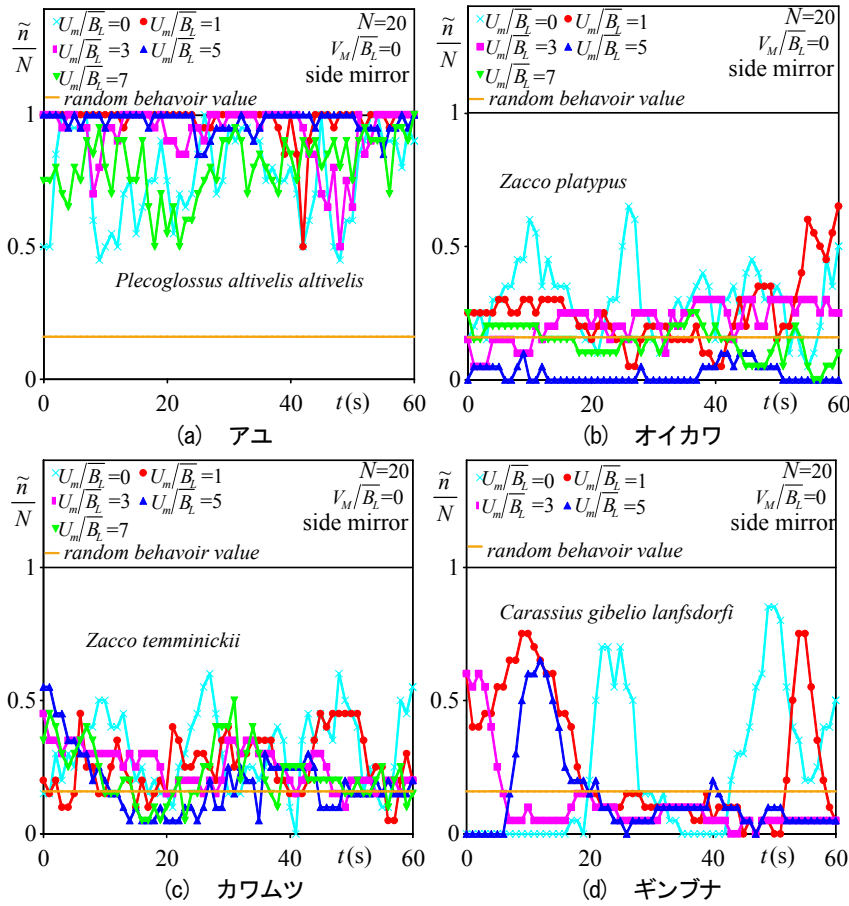


図-4 流速の変化に関する実験の瞬間存在率の時間変化

化を魚種別に示すと共に、ランダム基準値を線で示した。図-4(a)よりアユはランダム基準値よりも常に高い $\tilde{n}/N$ を有することがわかる。ただし、流速の変化による相違は顕著でない。図-4(b), (c)よりカワムツおよびオイカワはランダム基準値よりも時折高い値を示すこと、図-4(d)よりギンブナはこの傾向が顕著になることが認められる。ただし、これら3魚種についても流速変化による影響は認められない。

図-5(a)～(d)に魚群重心 G_f の水路上(x - z 平面)での挙動を魚種別に示す。図-5(a)よりアユの重心が鏡の投影面積に集中して存在していること、また、横断方向位置も水路中央よりも鏡付近に集中していることが確認される。一方、図-5(b)～(d)よりアユ以外の3魚種については流下および横断方向に対しても中央付近に存在している。また、魚群重心の移動範囲は、アユが最も小さくオイカワ、カワムツは若干ばらつきがあり、ギンブナは広範囲になることが理解される。ただし、図-4においてギンブナの無次元瞬間魚数 $\tilde{n}/N$ が時折大幅に上昇し、その値がオイカワおよびカワムツよりも顕著になる理由を説明できない。そこで、石川²³⁾の提案した魚群の密集度を表す魚群半径 R_f を求めた。

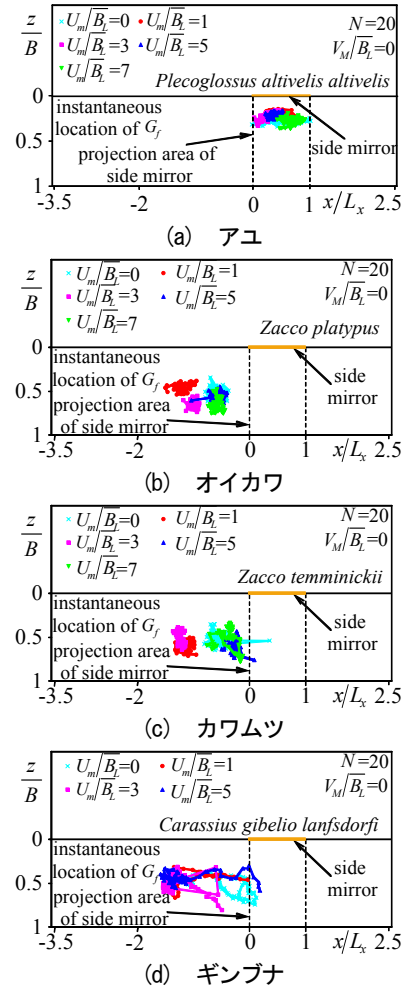


図-5 魚群重心の移動軌跡

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

ここに、 r_i は魚群重心 G_f と各魚との距離である。

図-6(a)～(d)に魚群半径 R_f を平均体長 $\bar{B}_L$ で割った値の時系列を魚種別に示した。図-6(a)よりアユの魚群半径は $R_f/\bar{B}_L$ が1～2程度であり、流速による影響が小さいことが確認される。一方、カワムツおよびオイカワについては、アユより大きな値を有し、変動が大きいことがわかる。これは、魚群の大きさがアユよりも大きく、しかも、時間的に変化することを意味する。そのため、図-5(b), (c)において魚群重心が鏡よりも上流側に位置していても、魚群中心から離れた魚が鏡の投影面積を通過するために、図-4(b), (c)で観察されたように時折、無次元瞬間魚数 $\tilde{n}/N$ が増加したのと考えられる。一方、図-6(d)に着目すると、ギンブナの魚群半径は比較的小さく、群れが密集していることが理解される。図-5(d)より他魚種よりも魚群が水路内を広範囲に移動することが明らかとなったことを勘案すると、密集した魚群が偶然に鏡の投影面積を通過すると図-4(d)で観察されたような大きな瞬間存在率 $\tilde{n}/N$ を示すと考えられる。

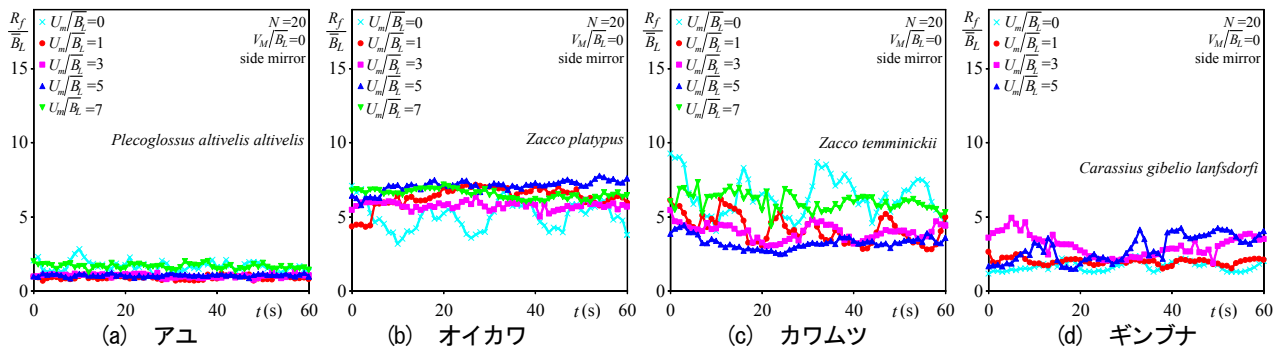


図-6 魚群半径を平均体長で除した値の時間変化

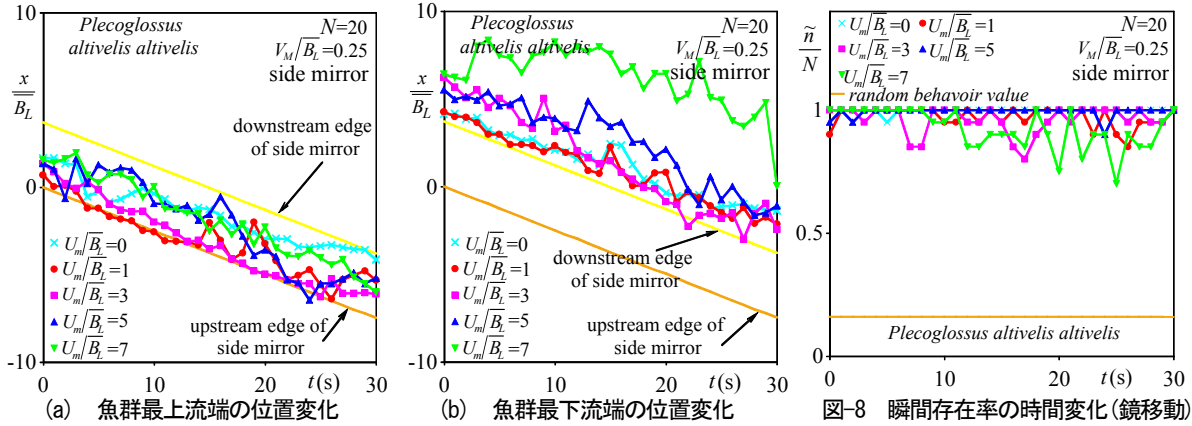


図-7 x 座標を平均体長で除した値の時間変化

図-8 瞬間存在率の時間変化(鏡移動)

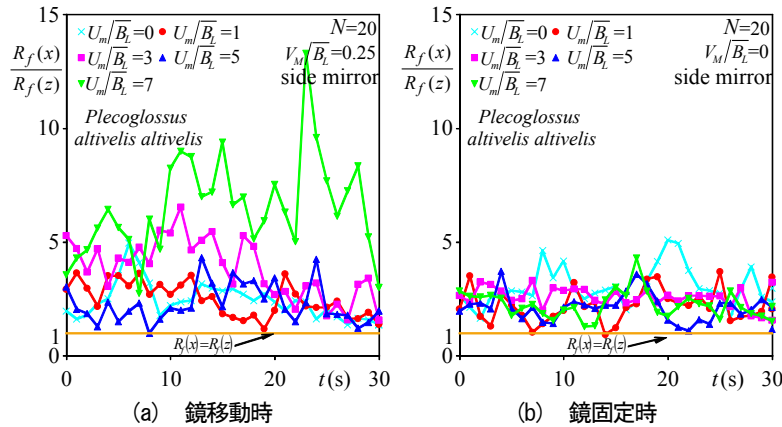


図-9 魚群半径比の時間変化

以上のことから側壁に鏡を設置した場合、流速の有無に関わらず、カワムツ、オイカワ、ギンブナは鏡に反応しないがアユは鏡を選好して鏡付近を遊泳することおよび、アユ、ギンブナ、そして、カワムツとオイカワの順に魚群半径が大きくなることが判明した。

(3) 鏡移動に関する実験結果および考察

図-7(a), (b)に側壁に設置した鏡を上流方向に移動すると共に流速 U_m/B_L を系統的に変化させた場合の最上流および最下流で遊泳するアユの x 座標を平均体長 B_L で除した値の時間変化を示す。図中には鏡の上流端および下流端の位置の変化も線で示している。鏡が上流に移動するに伴い最上流および最下流のアユが鏡の移動速度

とほぼ同様に上流側に移動することが認められる。試しに他の魚種についても同様の仮実験を行ったが、鏡を追跡する様子は見られなかった。今後、実河川でも同様な結果になるかどうかを確認する必要がある。仮に同様な結果が得られれば、アユのみを選択的に誘導して保全できる可能性がある。

図-8に無次元瞬間魚数 $\tilde{n}/N$ の時間変化を示す。いずれの流速でも $\tilde{n}/N$ はランダム基準値よりも高い値を有する。また、流速の増加に伴い $\tilde{n}/N$ の値が時折減少している様子が伺える。観察の結果、鏡を追跡している魚群の形状が流速に応じて変化することが認められた。そこで、魚群の流下方向長さ $R_f(x)$ を次式で求めた。

$$R_f(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \{x_{fi} - G_f(x)\}^2 / N} \quad (2)$$

横断方向長さ $R_f(z)$ も同様に求めてみた。図-9(a)に x および z 方向の魚群半径比 $R_f(x)/R_f(z)$ の時間変化を示す。また、参考のため、図-9(b)に鏡を側壁に固定した実験(表-2(b))の同様な値を示す。まず、鏡を固定した図-9(b)の結果に着目すると、流速の大小にかかわらずおよそ $R_f(x)/R_f(z)$ は1~4程度の値を有している。一方、図-9(a)に着目すると、若干のばらつきがあるものの流速の増加に伴い $R_f(x)/R_f(z)$ が増加し、最も流速の速い $U_m/\overline{B_L}$ が7の場合では、瞬間的には13程度の値に達している。したがって、側壁に設置した鏡を上流側に移動する場合、流速の増加に伴いアユの魚群形状は流下方向に長くなることが明らかとなった。

5. おわりに

本研究は、鏡を利用した魚群の誘導方法の有効性を検討したものである。以下に結論を示す。

- (1) カワムツ、オイカワ、ギンブナは底面または側壁に鏡が設置された場合、流速の有無に関わらず鏡に反応しない。
- (2) アユは底面に鏡が設置された場合は鏡に反応しないが、側壁に設置された場合は、鏡を選好して鏡の周囲にとどまることが明らかとなった。
- (3) 側壁に設置した鏡を移動してもアユは鏡を選好して追跡することが判明した。また、流速が増加すると群れの形状が流下方向に長くなることも解明された。カワムツ、オイカワおよびギンブナは鏡に反応しないため、河川でアユのみを選択的に誘導できる可能性がある。

6. 今後の課題

本研究では、鏡の設置場所によってアユの反応が異なることは認められたが、その理由は解明できなかった。今後は、鏡の設置場所によるアユの反応の違いの原因を解明すると共に、実河川のように他魚種と混在して遊泳している場合にも同様な結果が得られるかを検討したい。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金若手研究(B)19760343(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 全国内水面漁業協同組合連合会：魚の迷入の実態とその対策へのアプローチ, 1996.
- 2) 全国内水面漁業協同組合連合会：魚を取水施設に迷入させないための試み, 2001.

- 3) (財)ダム水源環境整備センター編：最新魚道の設計, 信山社サイテック, 1998.
- 4) 中村俊六：魚道のはなし, 山海堂, 1995.
- 5) Clay, C.H.: *Design of Fishways and Other Fish Facilities*, Lewis Pub., 1994.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Smith, K.A.: *Modern fishing gear of the world 2*, Fishing News Ltd, Surrey, pp.540-544, 1964.
- 12) Arimoto, T., Akiyama, S., Kikuya, K. and Kobayashi, H.: Fish-herding effect of an air bubble curtain and its application to set-net fisheries, *Fish Behaviour in Relation to Fishing Operations*, Vol.196, pp.155-160, 1993.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) Gallup, G.G.: Chimpanzees: Self-Recognition, *Science*, Vol.167, pp.86-87, 1970.
- 17) Inoue-Nakamura, N.: Mirror-self recognition in nonhuman primates: A phylogenetic approach, *Japanese Psychological Research*, Vol.39, pp.266-275, 1997.
- 18) Plotnik, J.M., de Waal, F.B.M. and Reiss, D.: Self-recognition in an Asian elephant. *PNAS*, Vol.103, pp.17053-17057, 2006.
- 19) Palmer, M.E., Calvé, M.R. and Adamo, S.A.: Response of female cuttlefish *Sepia officinalis* (Cephalopoda) to mirrors and conspecifics: Evidence for signaling in female cuttlefish. *Animal Cognition*, Vol.9, pp.151-155, 2006.
- 20) 関根雅彦, 浮田正夫, 中西弘, 内田唯史：河川環境管理を目的とした生態系モデルにおける生物の環境選好性の定式化, 土木学会論文集, No.503/II-29, pp.177-186, 1994.
- 21) 池田譲：頭足類の社会性と知性基盤, 日本水産学会誌, 第70巻, 5号, pp.783-784, 2004.
- 22) May, H.Y. and Mercier, A.J.: Duration of socialization influences responses to a mirror: responses of dominant and subordinate crayfish diverge with time of pairing, *Journal of Experimental Biology*, Vol.210, pp.4428-4436, 2007.
- 23) 石川雅昭：ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp.101-106, 2000.