

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

鬼東 幸樹¹・秋山 壽一郎²・藏本 更織³・野口 翔平³・上田 紗奈江⁴

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)

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

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

E-mail: juichiro@tobata.isc.kyutech.ac.jp

³学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

E-mail: K.saori0607@gmail.com

⁴みくに産業株式会社

E-mail: ueda.sn@gmail.com

河川構造物を建設する際に、濁水などが発生し河川水質に影響を及ぼす。変化した水質において、水生生物が被る影響を調査することが求められ、濁度などが魚類の行動特性に及ぼす影響が研究されてきた。しかし、魚の遊泳速度といった遊泳特性については解明されていない。本研究では、静止流体中の濁度を変化させ、アユの遊泳特性に及ぼす濁度の影響を解明した。その結果、濁度の増加に伴い、遊泳距離が短くなり、遊泳速度が遅くなる事を解明した。

Key Words : turbidity, fish behavior, static water, ayu, swimming speed

1. はじめに

河川構造物を建設する際に、濁水などが発生し河川水質に影響を及ぼす。変化した水質において水生生物が被る影響を調査することが求められる。そのため、濁度などが魚類の行動特性に及ぼす影響が研究されてきた。

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¹⁾、視覚と側線への依存の程度は魚種によって異なる²⁾。一般的に、海洋魚よりも河川魚の方が視覚への依存度が高い^{3,4)}。魚の視覚能力を調べる研究は照度に着目したものと、濁度に着目したものに大別される。

藤森ら⁵⁾は0.05～1000 lxの範囲で照度を変化させて静止流体中のニジマスを観察した結果、0 lxを超えると活動が活発となり、10～100 lxの範囲で活動が顕著に活発となり、100 lxを超えると微増することを示した。鶴田ら⁶⁾はウグイ、スミウキゴリ、およびオイカワのいずれも照度の低下に伴い捕食活動が鈍化し、オイカワは0 lxでは捕食を停止するのに対し、ウグイは明条件より半減するものの捕食を停止しないことを示した。

藤原・北田⁷⁾はニゴロブナの仔魚は照度の高い領域を忌避することを示した。山本・本田⁸⁾は平均体長164mmのアユ13尾にICタグを装着し、室内照度を変化させてアユの行動を観察した。その結果、照度の変化に対してアユの行動特性に変化が見られるものの、統一した見解は得られなかった。以上のように照度の変化に対する魚類の反応は魚種によって大きく異なる。

魚類の行動特性に及ぼす濁度の影響について着目する。物体を見て形状を識別するまでの時間を時間閾値というが、一般に魚の視覚閾値は人間よりも遙かに小さく、例えばブルーギルの場合は人間の値の約1/55である。そのため、濁った水でも人間よりは遠くを観察可能で、人間に10mと感ずる透明度であっても、ブルーギルには約17mに感ずる⁹⁾。Berg & Northcote¹⁰⁾は高濃度の浮遊砂を有する開水路流ではサケの魚群内の順位性が崩壊することを明らかにした。Confer *et al.*¹¹⁾は水中のプランクトン濃度が高まることで濁度が高くなると、マスが餌料を発見したときに反応する最小距離が小さくなることを示した。Gregory & Northcote¹²⁾は濁度の増加に伴ってサケの仔魚の摂食行動が抑制されることを明らかにした。Hazelton & Grossman¹³⁾はロ

ジサイドダース (*Rosyside dace*) を対象として同様の結論を得た。摂食行動が抑制する理由は、濁度が増加すると水中視程が低下するからと Utne-Palm¹⁴⁾ は述べている。ところが、Andersen *et al.*¹⁵⁾ はカワマスについては、濁度が高い方が行動が活発になることを示し、Prchalová *et al.*¹⁶⁾ は静水中と透明度が0.35mの濁水中において、ローチやパーチの活動パターンが同等であることを示した。以上のように、照度と同様に濁度の魚類の行動特性に及ぼす影響は魚種によって異なる。

平成20年における我が国の内水面漁業漁獲高は、1位がサケ類で2位がアユである¹⁷⁾。アユの行動特性と濁度との関係を研究した例は本田¹⁸⁾ および井上³⁾ の例以外にほとんど存在しない。本田¹⁸⁾ は2本の水路が合流する装置を作成し、片側の水路に濃度を変化させた粘土、ケイソウおよびカオリンをそれぞれ挿入し、合流点よりも下流に放流したアユが遡上する水路をカウントした結果、全ての投入物質において15ppm以上では忌避行動が観察されることを示した。一方、井上³⁾ は回転水槽において透明度を28, 17, 13cmの3段階に変化させ、ウグイの向流性を観察した。その結果、濁度の増加に伴い正の向流性が増加することを解明した。しかし、魚の遊泳速度等の遊泳特性に及ぼす濁度の影響はほとんど解明されていない。遊泳特性に及ぼす濁度の影響を解明することは、今後の河川改修の中でも特に魚道設計の際、魚道への濁度の混入を考慮する基準を確立するのに有用的である。

本研究は、静止流体中において単独で遊泳するアユの遊泳特性に及ぼす濁度の影響を検討したものである。なお、濁度が与える影響として、エラなどの呼吸器に与える影響については今回は取り扱っていない。

2. 実験装置および実験条件

本研究は、濁度とアユの遊泳特性の関係に関する初期実験であるため、今回の実験では静止流体中での挙動に着目する。実験には半径0.5m、高さ0.25mの青色の円形水槽を用いた。カルキを抜いた水温24°Cの水道水を水槽に入れ、水深は0.04mとし¹⁹⁾、墨汁を用いて5段階に水を濁らせた。表-1に実験条件を示す。なお、濁度は本来JIS K0101に規定される工業用水試験方法²⁰⁾において計測されるべきだが、本研究においては水の濁りが魚の遊泳特性に及ぼす影響を簡易的に観察するため、濁度の測定は以下のように、容易に入手可能な器具を用いて行った。各種濁水をそれ

表-1 実験条件

| E_n (lx) | $E_n / E_5 \times 100$ | Case name |
|--------------|------------------------|-----------|
| $E_1 = 70$ | 4 | T004 |
| $E_2 = 90$ | 6 | T006 |
| $E_3 = 280$ | 20 | T020 |
| $E_4 = 530$ | 40 | T040 |
| $E_5 = 1510$ | 100 | T100 |

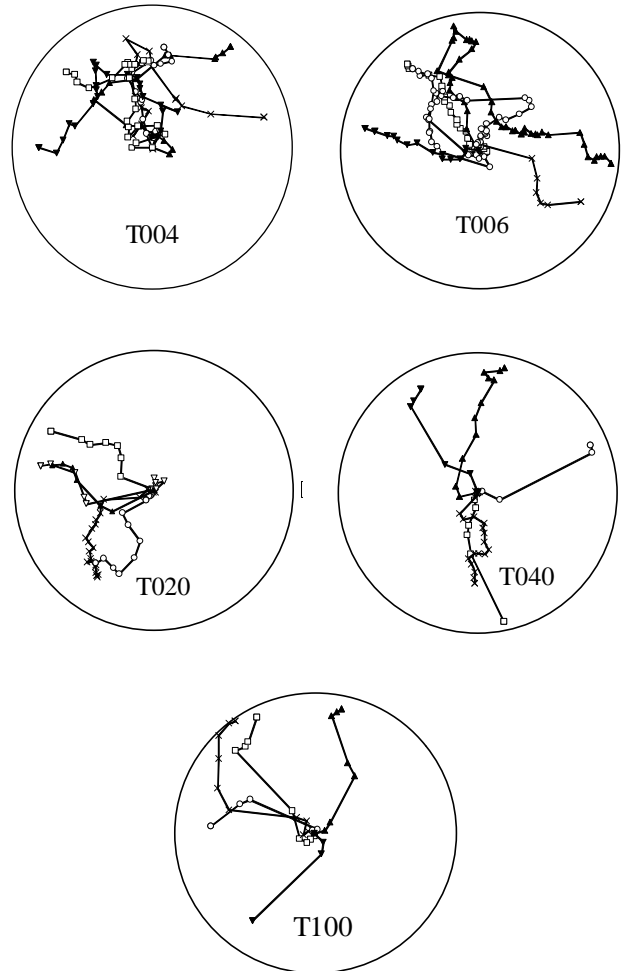


図-1 各濁度でのアユの遊泳軌跡

ぞれ一辺が0.25mの水槽に採取し、120Wの光源からの光が水槽を透過する直前および0.25m透過した後の照度 E を照度計で計測した。ケース名は濁度 (turbidity) の頭文字Tと、墨汁を挿入していない水の照度を100とした場合の照度比をパーセンテージで示している。実験には山口県榎野川漁協から購入した養殖アユ (*Plecoglossus altivelis altivelis*) を100尾用いた。アユの平均体長 $\overline{B_L}$ は70mmである。なお、アユの最小および最大体長はそれぞれ68mm, 73mmであり、体長の標準偏差は1.12mmであった。これより、アユの体長の違いによる遊泳挙動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。内径0.15m、高さ0.2mの円筒金網を円形水槽中心に設置

し、金網に任意のアユを1尾挿入した。馴致後、金網を取り除くと同時に水槽の上方に設置したビデオカメラでアユが側壁に到達するまでの様子を撮影する。この計測を各照度においてそれぞれ20回（合計100回）行った。撮影に使用したビデオカメラ画像の画素数は1440×1080で、撮影速度は30fpsである。遊泳開始からアユが側壁に到達するまでの画像を1/10秒間隔でキャプチャーした。静止画像および座標プロットソフトを用いてアユの遊泳座標を取得し、遊泳距離、遊泳速度、屈折角度の解析を行った。

今回使用した墨汁の主成分は膠である。そのため、アユの挙動の変化が濁度ではなく、膠成分によって引き起こされる懸念があるため、以下の予備実験を行った。まず、墨汁と同色で主成分が異なる食紅を用いて濁度を変化させて本実験と同様な実験を行った。その結果、両者におけるアユの挙動に相違は見られなかった。したがって、以下に示す実験結果は膠成分ではなく、濁度による影響と判断される。

3. 実験結果および考察

(1) アユの遊泳軌跡のモデル化

鬼東ら²¹⁾は静止流体中を1尾で遊泳するアユの軌跡が直線部(branch)と屈折部(node)で再現できると述べた。図-1に各照度におけるアユの遊泳軌跡をそれぞれ5例ずつ示す。図中では、屈折部を丸印で示した。アユは直線遊泳をした後に屈折することを繰り返して遊泳している。したがって、遊泳軌跡を前報²⁰⁾と同様に、図-2のようにモデル化する。屈折点と次の屈折点の間の距離を遊泳距離 L 、遊泳速度を V 、屈折角度を θ とした。 θ は上部から見て右回転を正、左回転を負とした。

鬼東ら²²⁾はアユが静止流体中を1尾で遊泳する場合、遊泳開始から2branchまでは遊泳開始の履歴があると述べた。また、側壁との距離が体長の1倍未満になると遊泳特性が変化することを指摘した。そのため、アユが遊泳開始から3branch以上かつ側壁から体長の1倍以上離れた領域を遊泳する場合を普遍遊泳、アユが側壁から体長の1倍未満の領域を遊泳する場合を側壁遊泳と定義した。本研究においても同様の傾向が見られたため、この定義を採用した。以下の解析では、普遍遊泳のみを対象とする。

(2) 普遍遊泳時の遊泳距離

図-3(a)にアユの遊泳距離 L を平均体長 \overline{B}_L で除した値の頻度分布を濁度別に示す。いずれの濁度におい

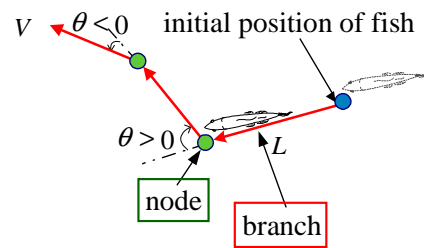


図-2 遊泳軌跡の模式図

ても遊泳距離は、低値が高頻度で高値方向に裾をもつ形状を示している。そこで、次式に示すガンマ分布を採用し、同図中に曲線で示した。

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

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

係数 α 、 λ は最小二乗法により算出した。同図より濁度の増加に伴い、最頻値が減少すると共に、データの分布範囲が狭くなっていることが観察できる。

図-3(b)に照度 E と遊泳距離の最頻値 \hat{L} をアユの平均体長 \overline{B}_L で除した値との関係を示す。また、同図において横軸が低値をとるにつれ、縦軸が著しく減少傾向を示している。そのため、近似線として一次式や多項式ではなく、対数を採用し同図中に示した。照度 E の減少、すなわち濁度の増加に伴い、体長倍遊泳距離 (\hat{L}/\overline{B}_L) は減少傾向を示している。これより、濁度がアユの遊泳特性に明らかに影響を及ぼしていると言える。

図-3(c)に遊泳距離の標準偏差 L' をアユの平均体長 \overline{B}_L で除した値を濁度別に示すと共に、両者の関係を対数曲線で示した。同図より、濁度の増加に伴い標準偏差が減少していることが分かる。これより、濁度が高いほどアユの遊泳距離のばらつきが小さくなることが理解される。

図-3(a)～(c)より、濁水中ではアユの視界が悪くなり、長距離遊泳が困難になるため、短距離で遊泳する傾向が強くなったと考えられる。

(3) 普遍遊泳時の遊泳速度

図-4(a)にアユの遊泳速度 V を平均体長 \overline{B}_L で除した値の頻度分布を濁度別に示す。ここで、魚の遊泳速度は体長の倍数によって大別されるため²⁴⁾、本研究においても体長倍の遊泳速度を考察の対象とした。遊泳速度の頻度は低値が高く、高値方向に裾をもつ形状を示すことがわかる。よって、式(1)、(2)に示すガ

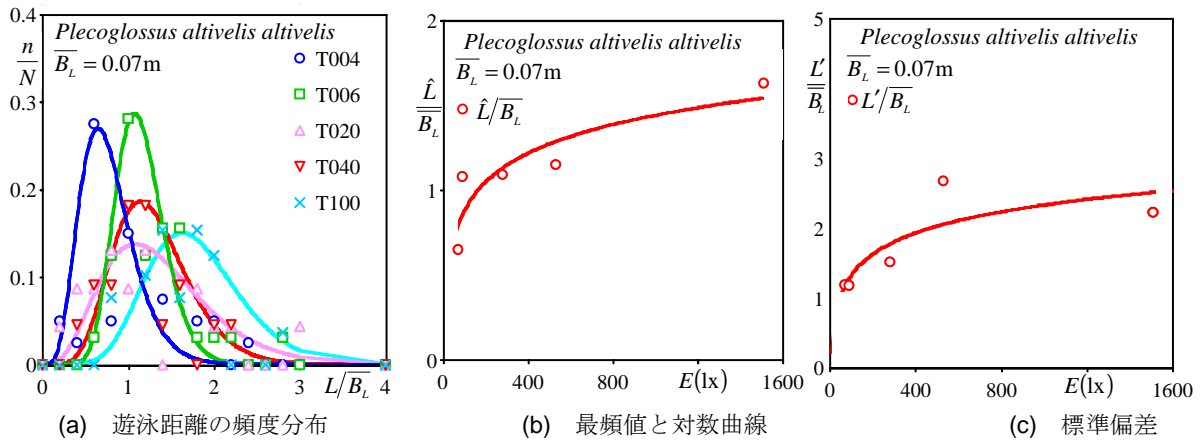


図-3 普遍遊泳における濁度変化に伴うアユの遊泳距離の変化

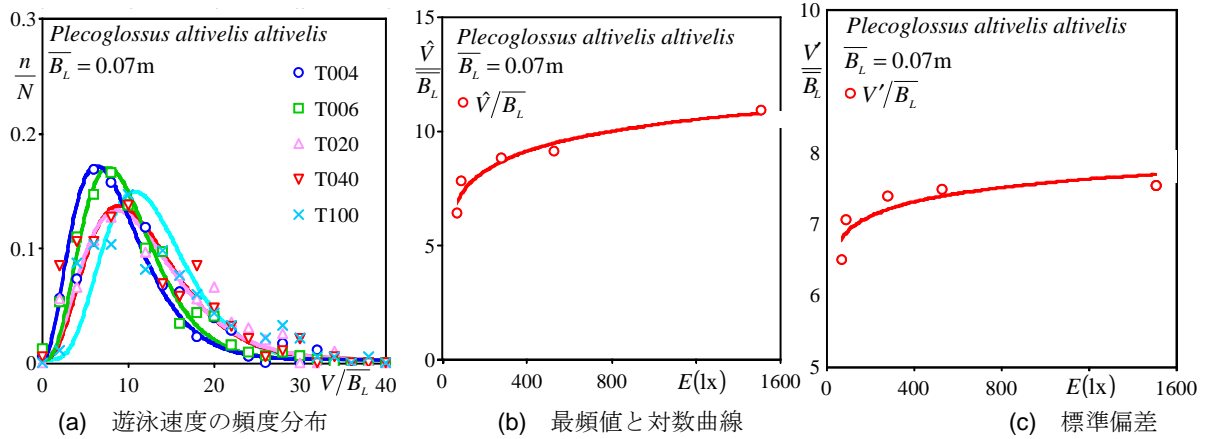


図-4 普遍遊泳における濁度変化に伴うアユの遊泳速度の変化

ンマ分布を採用し、式(1)中の L を V と置き換え、図-4(a)中に曲線で示した。濁度の増加に伴い、最頻値が減少している。

図-4(b)に照度 E と遊泳速度の最頻値 \hat{V} をアユの平均体長 \bar{B}_L で除した値との関係を示すと共に、両者の関係を対数曲線で示した。濁度の上昇に伴い、体長倍の遊泳速度の最頻値 (\hat{V}/\bar{B}_L) は減少傾向にある。これより、濁度が高くなるとアユの遊泳速度が遅くなると言える。これは、図-3(b)と同様に、濁水中では、アユの視界が悪くなり、遊泳挙動が緩慢になったためと考えられる。

図-4(c)にアユの遊泳速度の標準偏差 V' をアユの平均体長 \bar{B}_L で除した値を濁度別に示すと共に、両者の関係を対数曲線で示した。同図から、濁度が高いほどアユの遊泳速度のばらつきが小さくなると言える。これより、濁度の増加に伴って、同様な速度でアユが遊泳する傾向が強くなることが示唆される。

(4) 普遍遊泳時の屈折角度

図-5(a)にアユの屈折角度 θ の頻度分布を濁度別に示す²⁾。アユの屈折角度 θ の頻度は低値で高く、高値方向に裾をもつ形状を示すことが分かる。よって、

式(1)、(2)に示すガンマ分布を採用し、式(1)中の L を θ と置き換え、図-5(a)中に示した。各濁度におけるデータの分布範囲を比較すると、ほとんど差異は見られない。したがって、アユの屈折角度 θ と濁度との相関はないと考えられる。

図-5(b)に照度 E と屈折角度の最頻値 $\hat{\theta}$ との関係を示すと共に、両者の関係を近似線で示した。近似線はおよそ 40° で一定になっており、濁度との明確な相関は見られない。

図-5(c)にアユの屈折角度の標準偏差 θ' を平均体長 \bar{B}_L で除した値を濁度別に示すと共に、両者の関係を近似線で示した。近似線は、 $50 \sim 55^\circ$ で一定である。したがって、濁度はアユの屈折角度に影響を及ぼさないと判断される。

(5) 普遍遊泳時の屈折方向

図-6にアユが右あるいは左に屈折する屈折方向率を示す。いずれの濁度においても右および左に屈折する率が約50%であり、両者に明確な差は観察されない。これより、アユの屈折方向はランダムであると言える。

図-7に2連続する屈折の組み合わせの割合を示す。

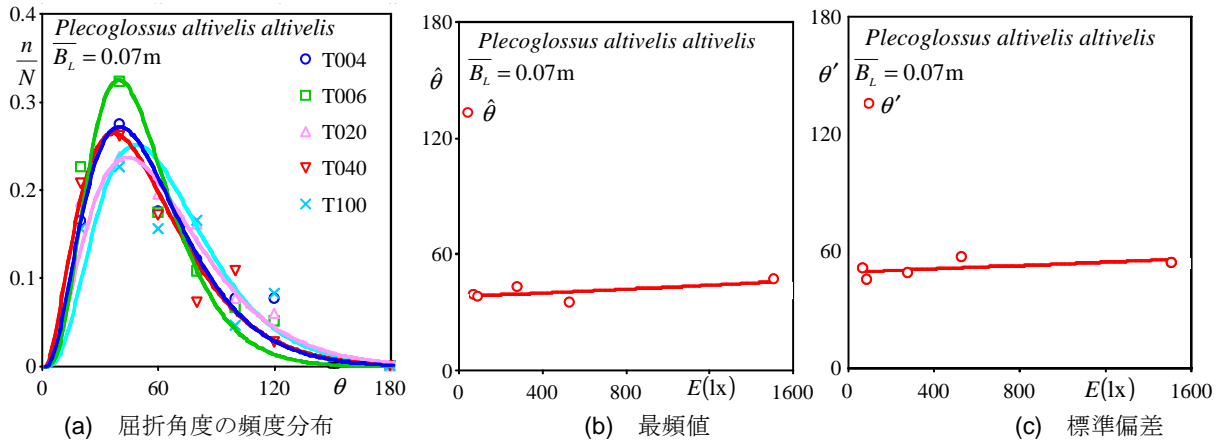


図-5 普遍遊泳における濁度変化に伴うアユの屈折角度の変化

いずれの濁度においても2連続して異方向に屈折する確率が約8割を占めている。アユは濁度に関わらず、異方向に連続して屈折する傾向があると考えられる。したがって、各濁度で多少のばらつきはあるものの、濁度との相関は無いと考えられる。

4. おわりに

本研究では、静止流体中において単独で遊泳するアユの遊泳特性に及ぼす濁度の影響を実験的に解明した。本研究より得られた知見は以下の通りである。

- (1) 濁度の増加に伴い、屈折点間の遊泳距離が短くなるためにアユの遊泳速度は遅くなる。本田¹⁸⁾はアユが濁水を忌避する傾向があることを指摘したが、忌避できない状況下における遊泳特性を明確に示すことができた。これらの遊泳特性の変化は、濁水中でアユの視界が悪化したためと考えられる。
- (2) アユはいずれの濁度でも40°の角度で屈折する頻度が高く、屈折角度と濁度には相関が見られないことを解明した。
- (3) アユの屈折方向は、ほぼ同様な割合で左右に屈折する。また、2連続する屈折方向は、いずれの濁度でも約8割の割合で異方向に屈折することを解明した。これは鬼束ら²²⁾の報告と同様の傾向であり、このことから、濁度と屈折方向との相関はないと考えられる。

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)23560610（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，

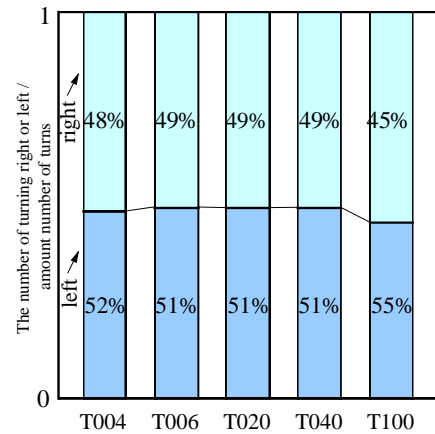


図-6 普遍遊泳における濁度変化に伴うアユの屈折方向率

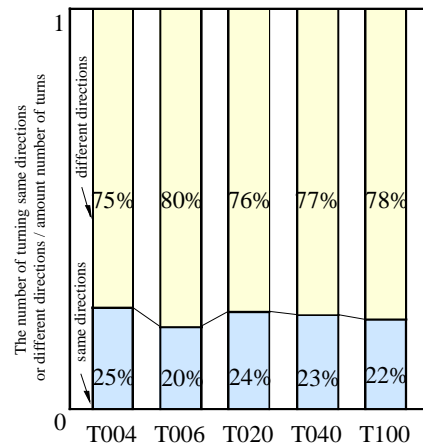


図-7 普遍遊泳における濁度変化に伴うアユの2連続屈折方向率

Vol.28, No.1, pp.71-76, 1991.

- 2) 益田玲爾：魚類の群れ行動の個体発生，日本水産学会誌，第77巻，1号，pp.117, 2011.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 藤森康澄, 東海正, 松田皎: 水槽実験におけるニジマス日周活動と照度の刺網漁獲に及ぼす影響, 日本水産学会誌, Vol.60, No. 5, pp.577-583, 1994.
 - 6) 鶴田哲也, 小池亮人, 武島弘彦, 棗田孝晴, 井口恵一朗: 明・暗条件下におけるオイカワ, ウグイおよびスミウキゴリのアユ仔魚捕食, 魚類学雑誌, 第57巻, pp.51-55, 2010.
 - 7) 藤原公一, 北田修一: ニゴロブナ(*Carassius auratus grandoculis*)仔魚が琵琶湖の発達したヨシ帯岸辺付近へ蟻集する要因, 日本水産学会誌, 第77巻, 5号, pp.853-861, 2011.
 - 8) 山本亮介, 本田晴朗: 無線認識技術を用いたアユの行動特性室内実験, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I_667-I_672, 2012.
 - 9) Kawamura, G. and Shimowada, T.: Optic critical duration and contrast thresholds in the freshwater fish, *Lepomis macrochirus*, as determined behaviourally, *Fisheries Research*, Vol.17, pp.251-258, 1993.
 - 10) Berg, L. and Northcote, T.G.: Changes in territorial, gill-flaring, and feeding behavior in juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) following short-term pulses of suspended sediment, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol.42, pp.1410-1417, 1985.
 - 11) Confer, J.L., Howick, G.L., Corzette, M.H., Kramer, S.L., Fitzgibbon, S. and Landesberg, R.: Visual predation by planktivores, *Oikos*, Vol. 31, pp.27-37, 1978.
 - 12) Gregory, R.S. and Northcote, T.G.: Surface, planktonic, and benthic foraging by juvenile chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) in turbid laboratory conditions, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol.50, pp.233-240, 1993.
 - 13) Hazelton, P.D. and Grossman, G.D.: The effects of turbidity and an invasive species on foraging success of rosyside dace (*Clinostomus funduloides*), *Freshwater Biology*, Vol.54, pp.1977-1989, 2009.
 - 14) Utne-Palm, A.C.: Visual feeding of fish in a turbid environment: Physical and behavioural aspects, *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, Vol.35, 2002.
 - 15) Andersen, M., Jacobsen, L., Grønkjær, P. and Skov, C.: Turbidity increases behavioural diversity in northern pike, *Fisheries Management and Ecology*, Vol.15, pp.377-383, 2008.
 - 16) Prchalová, M., Mrkvička, T., Kubečka, J., Peterka, J., Čech, M., Muška, M., Kratochvíl, M. and Vašek, M.: Fish activity as determined by gillnet catch, *Fisheries Research*, Vol. 102, pp.291-296, 2010.
 - 17) 農林水産省大臣官房統計部生産流通消費統計課: 漁業・養殖業生産統計年報, 2011.
 - 18) 本田晴朗: アユの遡上行動におよぼす濁質濃度および水温低下の影響, 海洋科学, Vol.15, No.4, pp.233-255, 1983.
 - 19) 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.
 - 20) 日本規格協会: JIS工業用語大辞典(第5版), 2001.
 - 21) 鬼束幸樹, 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.
 - 22) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 木内大介, 高橋康行, 飯國洋平: 階段式魚道における切り欠き位置が魚の遡上率に及ぼす影響, 水工学論文集, 第51巻, pp.1279-1284, 2007.
 - 23) 中村俊六: 魚道のはなし, 山海堂, 1995.

(2013.?.?.?.受付)

INFLUENCE OF TURBIDITY ON SWIMMING BEHAVIOR OF ISOLATED AYU IN STATISTIC WATER

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Saori KURAMOTO, Shohei NOGUCHI
and Sanae UEDA

The water includes turbidity during and after the flood. Almost fish uses eyes and lateral line during swimming, so that the turbidity may affect on the swimming behavior of fish. Fish trajectories in open-channel flows with turbidity are not known. In this study, the trajectories of ayu, *Plecoglossus altivelis altivelis*, in static water with turbidity were recorded with a digital video camera and trajectories of an each time were analyzed. It was found that the swimming velocity decreases with an increase of the turbidity, because visibility decreases with an increase of turbidity. The turning angle during swimming is almost constant irrespective of the turbidity.