

流速変化が単独アユの遊泳特性に及ぼす影響

SWIMMING BEHAVIOR OF ISOLATED AYU IN RUNNING WATER

鬼東幸樹¹・秋山壽一郎²・竹内光³・小野篤志³
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Hikaru TAKEUCHI and Atsushi ONO

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 工学府建設社会工学専攻

Swimming behavior of isolated fish in static water has been investigated. However, swimming behavior of isolated fish in running water has not been investigated. In this study, the swimming behavior of isolated ayu in the running water was recorded with a digital video camera with changing the velocity. It was found that the swimming speed in the streamwise direction increases with an increase of the flow velocity. In contrast, the swimming speed in the spanwise direction is constant, irrespective of the flow velocity. The turning angle of swimming trajectory decreases with an increase of the flow velocity.

Key Words : *isolated ayu, node, branch, swimming distance, angle, running water*

1. はじめに

魚がすみやすい川づくりを推進するには、各魚種の生息域や行動特性を把握し、これらを考慮した河川構造物の設計が必要である。魚の行動特性の研究は、(1)魚群の挙動、(2)魚群内における魚の相対挙動、(3)魚群に属さない魚の挙動、を対象としたものに大別される。魚群とは、Partridge & Pitcher¹⁾の定義した「各個体が遊泳速度と遊泳方向を群れの他の個体全てと一致させようと絶えず調整している3尾以上のグループ」が定着している²⁾⁴⁾。

井上⁵⁾はスキヤニングソナーを用いて、サケ、マイワシ、ゴマサバ、ウマズラハギ、トビウオの魚群速度が約0.3m/sであることを解明した。金ら⁶⁾も井上⁵⁾と同様な計測を行い、マアジ、ゴマサバ、カタクチイワシの魚群直進時間の最頻値が約1~2分であることを解明した。近年、テレメトリー法の登場により、河川内の魚類挙動の調査が可能となった。佐々木ら⁷⁾はカワムツ、フナ、コイの瀬と淵の利用形態を解明し、東ら⁸⁾はウグイの昼間と夜間の行動の相違を解明した。傳田ら⁹⁾はテレメトリー法を改良してゲンゴロウブナの実験池内の挙動を追跡し、日出および日没直後に活動が活発になることを解明した。

魚群内における魚の相対挙動の研究例として長谷川・添田²⁾の研究が挙げられる。彼らはバラタナゴ、ウグイ、マサバの挙動を観察し、平行性の高い個体同士は平行性を維持する傾向があると指摘した。三宮・松田¹⁰⁾、Sannomiya & Matsuda¹¹⁾は魚群内の魚の相対位置が、前進

推進力、個体間引力、成群力、壁からの反発力、方向場力および外乱によって決定されるモデルを開発した。

魚群に属さない魚の挙動も近年研究されている。Partridge & Pitcher¹⁾はミノウが2尾で遊泳する場合、1尾が主体的に遊泳して残りの1尾が追従するのに対し、3尾以上では互いの距離を保つことで群れを形成することを発見した。Sakamoto *et al.*¹²⁾は2尾で遊泳するタモロコが接近あるいは離縁する最大周期が約100sであることを解明した。二瓶ら¹³⁾は1尾および2尾のタイリクバラタナゴの魚体各部の加速度等を定量的に示した。鬼東ら¹⁴⁾¹⁵⁾は1尾および2尾で遊泳するアユの遊泳軌跡を直線と屈折でモデル化し、遊泳速度や遊泳距離を定量的に評価した。

以上のように魚の挙動が解明されつつあるが、そのほとんどは静止流体中を対象としている。流水中の魚の挙動は実験的にほとんど解明されておらず、数値計算による検討が先行している。関谷ら¹⁶⁾¹⁷⁾および高水ら¹⁸⁾は走流性、壁面選好性および忌避性を組み込んだランダムウォークを提案し、アユの挙動を計算した。大橋・清水¹⁹⁾は魚の抗力、推進力および加速度で構成される運動方程式を用いて魚の挙動を計算した。橋本ら²⁰⁾はBoidモデル²¹⁾を用いて魚群の挙動を計算した。藤井ら²²⁾は巡航速度と突進速度を使い分けるモデルを提案し、魚道内の魚の挙動を計算した。しかし、計算に用いられるモデル定数や用いた仮定が必ずしも検証されていない。そのため、流水中の魚の遊泳特性を解明することが求められている。

本研究は流速を系統的に変化させて、単独で遊泳するアユの挙動を解析したものである。

表-1 実験条件

case name	C0	C1	C3	C5	C10
U_m (m/s)	0	0.07	0.21	0.35	0.70
$U_m / \overline{B_L}$ (1/s)	0	1	3	5	10

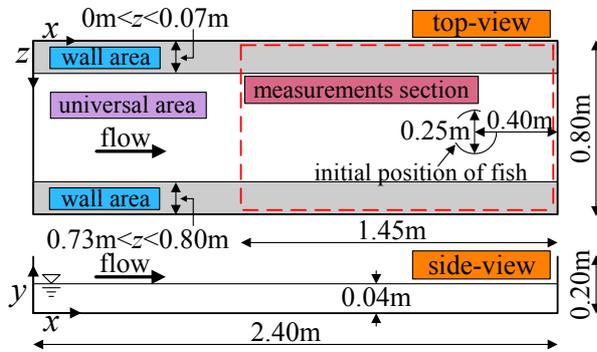


図-1 実験水路の模式図

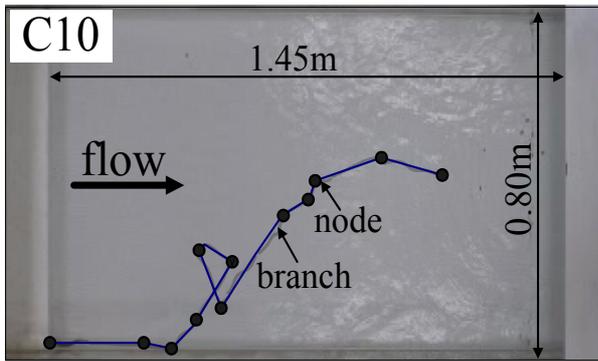


図-2 遊泳軌跡の一例(C10)

2. 実験装置および実験条件

図-1に示す長さ2.4m, 幅 $B=0.8\text{m}$, 高さ0.2mの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. 山口県榎野川漁協から購入した平均体長 $\overline{B_L}=70\text{mm}$ の養殖アユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)を実験に用いた. 実験条件は表-1に示すように, 水深を0.04mに固定して体長倍流速を0~10の範囲で5段階に設定した. ケース名の数字は体長倍流速を表し, 例えばC10は流速が平均体長 $\overline{B_L}$ の10倍を表す. 各ケースで水路始端から2m下流の水路中央($z/B=0.5$)に直径0.25mの円形金網を設置し, 1尾のアユを挿入する. アユが落ち着いたことを確認した後に金網を取り上げ, 水路上部に設置した画素数1440×1080, 撮影速度30Hzのビデオカメラで撮影を開始する. 撮影終了はアユが水路始端に到達あるいは水路終端から流出した時とした. 上記の実験を各ケースで100回, 合計500回行った.

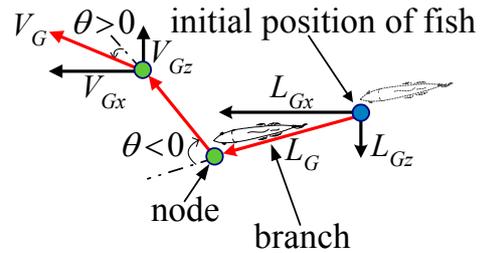


図-3 遊泳軌跡の模式図

鬼束ら^{14,15}は静止流体中を1尾あるいは2尾で遊泳するアユの軌跡が直線(branch)と屈折(node)で表現できると述べた. 本実験でも図-2に一例(C10)を示すように同様の傾向が確認されたため, 撮影後に全アユの遊泳軌跡における全ての屈折位置と時刻を読み取った. 連続する屈折位置から対地距離を L_G および屈折角度 θ が図-3のように求められる. θ は右回転を正, 左回転を負と定義した. 対地距離 L_G を成分分解して, x 方向対地距離 L_{Gx} , z 方向対地距離 L_{Gz} が算出される. また, 上記の3種の対地距離と流速から, 遊泳距離 L , x 方向遊泳距離 L_x , z 方向遊泳距離 L_z が算出される. 一方, 上記の3種の対地距離と遊泳に要した時間から, 対地速度 V_G , x 方向対地速度 V_{Gx} , z 方向対地速度 V_{Gz} が算出され, さらにこれらの対地速度に流速を加算すると, 遊泳速度 V , x 方向遊泳速度 V_x , z 方向遊泳速度 V_z が算出される.

x , z 軸方向にそれぞれ10, 7点のメッシュをとり, 格子点で構成される合計70点において, 3次元電磁流速計で流速3成分を0.05s間隔で25.6s計測した. 計測後, x , z 軸方向の時間平均流速 U および W を算出した. なお, 流速測定時には開水路内にアユを入れていない.

3. 実験結果および考察

(1) 普遍遊泳と壁面遊泳の分離

鬼束ら^{14,15}は静止流体中を1尾あるいは2尾で遊泳するアユは遊泳開始から2branchまでは遊泳開始の履歴があると述べ, 本研究でも同様な傾向が見られた. 一方, 多くのアユは直接水路始端に到達せずに, 一度側壁近傍に接近した後に壁面に沿って遡上する. 観察の結果, 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と判断された. そのため, 遊泳開始から3branch以上かつ側壁からの距離が体長の1倍以上を普遍遊泳, それ以降を壁面遊泳と定義し, 両エリアを普遍領域(universal area)および壁面領域(wall area)と呼称する. 以下の解析では, 普遍遊泳のみを対象とする.

(2) 普遍遊泳時の対地距離

図-4(a)~(c)に x 方向対地距離 L_{Gx} , z 方向対地距離の絶対値 $|L_{Gz}|$ および対地距離 L_G をそれぞれ平均体長

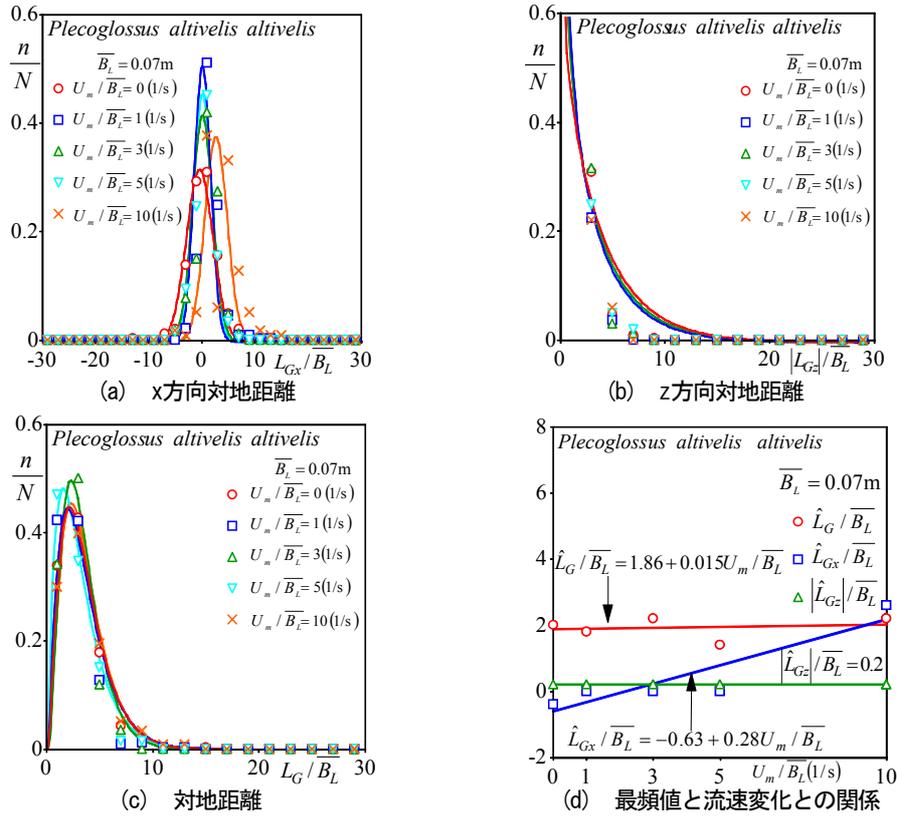


図-4 普遍遊泳における流速変化に伴う対地距離の変化

\bar{B}_L で除した値の頻度分布を流速別に示す. 横断方向の対地距離を絶対値とした理由は, 正值の右岸方向と負値の左岸方向の選択に生理学的意味がないためである.

図-4(a)に示した x 方向対地距離 L_{Gx} は, 各流速において左右対称な分布形を示している. そこで, 分布を再現する関数として次式の正規分布を採用し, 図-4(a)中に曲線で示した.

$$f(L_{Gx} / \bar{B}_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{L_{Gx}}{\bar{B}_L} \right)} \exp \left\{ - \frac{\left(\frac{L_{Gx}}{\bar{B}_L} - \frac{\hat{L}_{Gx}}{\bar{B}_L} \right)^2}{2 \left(\frac{L_{Gx}}{\bar{B}_L} \right)^2} \right\} \quad (1)$$

最小二乗法より平均値 $\overline{L_{Gx}} / \bar{B}_L$ と分散 $\left(L_{Gx} / \bar{B}_L \right)^2 \rightarrow$ 全体におかしい. を算出した. 流速 U_m / \bar{B}_L がゼロの時に, $L_{Gx} / \bar{B}_L = 0$ を中心軸に左右対称な分布形を示すことから, 実験結果が妥当であると判断される. また, 流速の増加に伴い L_{Gx} / \bar{B}_L の最頻値が増加している.

図-4(b)に示す z 方向対地距離の絶対値 $|L_{Gz}|$ は, 全ての流速で $|L_{Gz}| / \bar{B}_L = 0$ 付近で極大値をとり, 高値方向に減少する分布を示している. そこで, 次式のカイ二乗分布を採用し, 図-4(c)中に曲線で示した.

$$f(|L_{Gz}| / \bar{B}_L) = \frac{(1/2) \left\{ \left(\frac{|L_{Gz}|}{\bar{B}_L} \right)^2 \right\}}{\Gamma \left\{ \left(\frac{|L_{Gz}|}{\bar{B}_L} \right) / 2 \right\}} \left(\frac{|L_{Gz}|}{\bar{B}_L} \right)^{\left\{ \left(\frac{|L_{Gz}|}{\bar{B}_L} \right) / 2 - 1 \right\}} e^{- \left\{ \frac{|L_{Gz}|}{\bar{B}_L} \right\} / 2} \quad (2)$$

平均値 $\overline{|L_{Gz}|} / \bar{B}_L$, 分散 $2 \times \left(\overline{|L_{Gz}|} / \bar{B}_L \right)$ は最小二乗法より算出した. 同図より, z 方向の対地距離の絶対値 $|L_{Gz}|$ に関しては流速の影響を受けないと判断される.

図-4(c)に示した対地距離 L_G はいずれのケースも低値が高頻度で, 高値方向に裾をもつ形状を示す. そこで, ガンマ分布を採用し, 図-4(c)中に曲線で示した.

$$f(L_G / \bar{B}_L) = \frac{1}{\Gamma(\lambda)} \alpha^\lambda \left(L_G / \bar{B}_L \right)^{\lambda-1} e^{-\alpha L_G / \bar{B}_L} \quad (3)$$

$$\Gamma(\lambda) = \int_0^\infty e^{-x} x^{\lambda-1} dx \quad (4)$$

係数 α , λ は最小二乗法より算出した. 同図より, 流速の増加に伴う最頻値の増加が観察される. これは, 図-4(a)に示した x 方向対地距離 L_{Gx} の増加によるものである.

図-4(d)に x 方向対地距離 L_{Gx} / \bar{B}_L , z 方向対地距離の絶対値 $|L_{Gz}| / \bar{B}_L$ および対地距離 L_G / \bar{B}_L の最頻値, \hat{L}_{Gx} / \bar{B}_L , $|\hat{L}_{Gz}| / \bar{B}_L$, \hat{L}_G / \bar{B}_L と流速 U_m / \bar{B}_L との関係を示すと共に, 両者の関係を線形式で求めて図中に直線で示した. x 方向対地距離の最頻値 \hat{L}_{Gx} / \bar{B}_L は流速の増加と共に増加傾向にあるが, z 方向対地距離の絶対値の最頻値 $|\hat{L}_{Gz}| / \bar{B}_L$ は一定である. したがって, アユは流速が増加すると, 流速に直角方向の対地距離は変えないが, 上流向きの対地距離を増加させることが明らかとなった.

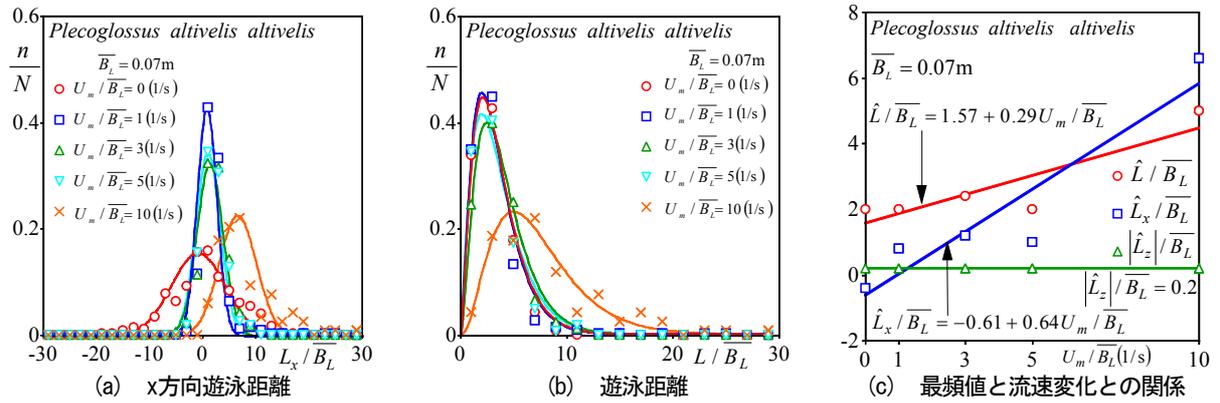


図-5 普遍遊泳における流速変化に伴う遊泳距離の変化

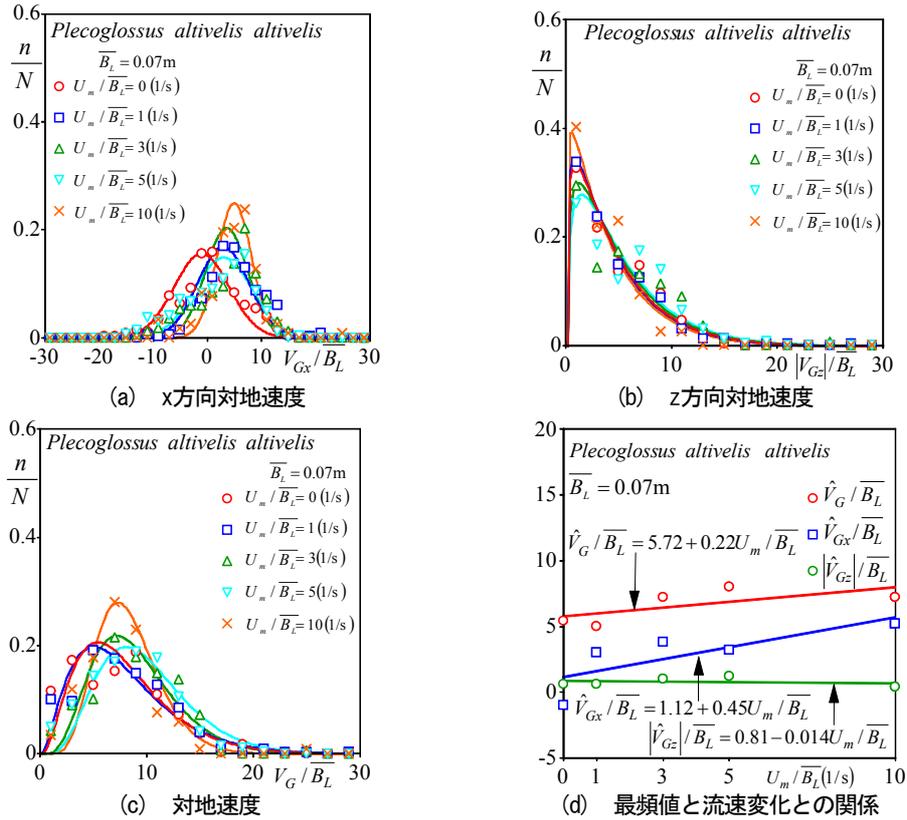


図-6 普遍遊泳における流速変化に伴う対地速度の変化

(3) 普遍遊泳時の遊泳距離

図-5(a), (b)に x 方向遊泳距離 L_x および遊泳距離 L をそれぞれ平均体長 \overline{B}_L で除した値の頻度分布を流速別に示す。なお、横断方向流速がほぼゼロなので、 z 方向遊泳距離 L_z は z 方向対地距離 L_{Gz} とほぼ同値となるために割愛した。

図-5(a)に示した x 方向遊泳距離 L_x は左右対称な分布形を示している。そこで、式(1)において、 L_{Gx} を L_x に置き換えて正規分布を採用し、図中に曲線で示した。流速の増加に伴い、 x 方向遊泳距離は増加している。

図-5(b)に示した遊泳距離 L はいずれのケースも低値が高頻度で、高値方向に裾をもつ形状を示す。そこで、式(3)~(4)において、 L_G を L に置き換えてガンマ分布を再現し、図中に示した。流速の増加に伴い遊泳距離 L は増加している。図-4(b)に示した z 方向対地距離の絶対

値 $|L_{Gz}|$ が流速の変化を受けないことから、遊泳距離 L の増加は L_x の増加によって生じたと考えられる。

図-5(c)に x 方向遊泳距離 L_x / \overline{B}_L 、 z 方向遊泳距離の絶対値 $|L_z| / \overline{B}_L$ 、遊泳距離 L / \overline{B}_L の最頻値、 $\hat{L}_x / \overline{B}_L$ 、 $|\hat{L}_z| / \overline{B}_L$ 、 \hat{L} / \overline{B}_L と流速 U_m / \overline{B}_L との関係を示すと共に、両者の関係を線形式で求めて図中に直線で示した。 z 方向遊泳距離の絶対値の最頻値 $|\hat{L}_z| / \overline{B}_L$ は流速に関わらずほぼゼロであるが、 x 方向遊泳距離および遊泳距離の最頻値 $\hat{L}_x / \overline{B}_L$ および \hat{L} / \overline{B}_L に関しては流速の増加と共に増加を示す。これは、流速の増加に伴い上流方向の遊泳距離が増加し、それに伴い遊泳距離が増加したことが原因と考えられる。

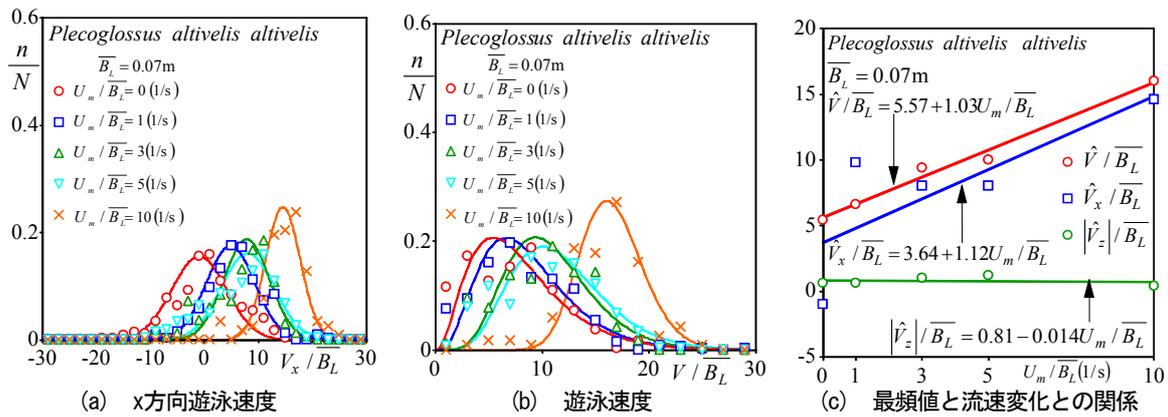


図-7 普遍遊泳における流速変化に伴う遊泳速度の変化

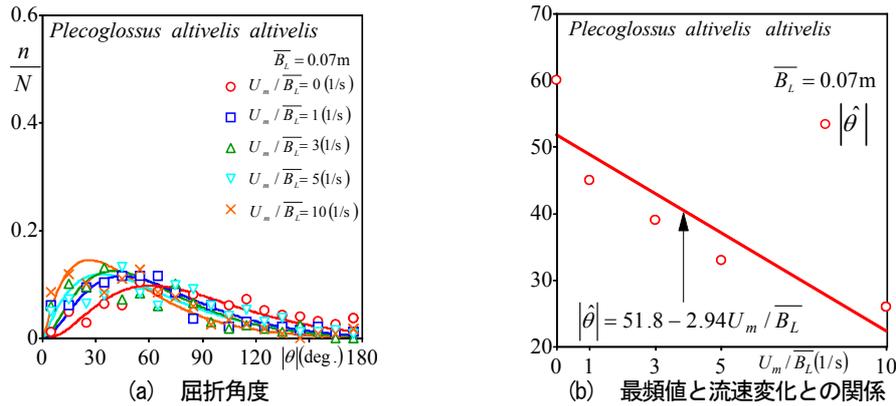


図-8 普遍遊泳における流速変化に伴う屈折角度の変化

(4) 普遍遊泳時の対地速度

図-6(a)～(c)に x 方向対地速度 V_{Gx} 、 z 方向対地速度の絶対値 $|V_{Gz}|$ および対地速度 V_G をそれぞれ平均体長 \bar{B}_L で除した値の頻度分布を流速別に示す。

図-6(a)に示した x 方向対地速度 V_{Gx} は左右対称な分布形を示していることから式(1)の正規分布を採用し、図中に示した。流速の増加に伴い V_{Gx}/\bar{B}_L の最頻値の増加が確認される。アユは流れに逆らって遊泳する正の向流性があるため、流速の増加に伴い x 方向対地速度 V_{Gx} が増加したと考えられる。

図-6(b)に示した z 方向対地速度の絶対値 $|V_{Gz}|$ に関しては、全ての流速で $|V_{Gz}|/\bar{B}_L$ がゼロ付近で極大値をとり、高値方向に減少する分布を示していることから、式(2)のカイ二乗分布を採用し図-6(b)中に曲線で示した。流速の変化に伴う $|V_{Gz}|/\bar{B}_L$ の顕著な変化は観察されない。したがって、流速が増加しても流速に直角方向の対地速度は影響を受けないと考えられる。

図-6(c)に示した対地速度 V_G に関しては、低値が高頻度で高値方向に裾をもつ形状を示すため、式(3)のガンマ分布を採用し、図-6(c)中に曲線で示した。アユの対地速度 V_G は流速の増加と共に増加するが、これは、 x 方向対地速度 V_{Gx} の増加によって生じたものである。

図-6(d)に x 方向対地速度 V_{Gx}/\bar{B}_L 、 z 方向対地速度の絶対値 $|V_{Gz}|/\bar{B}_L$ 、対地速度 V_G/\bar{B}_L の最頻値、

\hat{V}_{Gx}/\bar{B}_L 、 $|\hat{V}_{Gz}|/\bar{B}_L$ 、 \hat{V}_G/\bar{B}_L と流速 U_m/\bar{B}_L との関係を示すと共に、両者の関係を線形式で求めて図中に直線で示した。 z 方向対地速度の最頻値 $|\hat{V}_{Gz}|/\bar{B}_L$ は一定であるが、 x 方向対地速度および対地速度の最頻値 \hat{V}_{Gx}/\bar{B}_L および \hat{V}_G/\bar{B}_L は流速の増加と共に増加する。これは、アユは流速が増加しても横断方向の遊泳速度を変化させないが、正の向流性があるため上流方向の遊泳速度を増加させることを示唆する。

(5) 普遍遊泳時の遊泳速度

図-7(a)、(b)に x 方向遊泳速度 V_x および対地速度 V をそれぞれ平均体長 \bar{B}_L で除した値の頻度分布を流速別に示す。

図-7(a)に示した x 方向遊泳速度 V_x に関しては、左右対称な分布形を示していることから、式(1)の正規分布を採用し、図-7(a)中に曲線で示した。流速の増加に伴い V_x/\bar{B}_L の最頻値の増加が確認される。

図-7(b)に示した遊泳速度 V に関しては、低値が高頻度で高値方向に裾をもつ形状を示すため、式(3)のガンマ分布を採用し、図-7(b)中に曲線で示した。遊泳速度 V の最頻値は流速の増加と共に増加する。図-6(c)に示した対地速度 V_G と比較すると、その増加傾向が顕著なことから、アユは流速の増加に伴い流されまいと対地速度を増加させるため、遊泳速度が顕著に増加すると考えられる。

図-7(c)に x 方向遊泳速度 $V_x/\overline{B_L}$, z 方向遊泳速度の絶対値 $|V_z|/\overline{B_L}$ および遊泳速度 $V/\overline{B_L}$ の最頻値, $\hat{V}_x/\overline{B_L}$, $|\hat{V}_z|/\overline{B_L}$, $\hat{V}/\overline{B_L}$ と流速 $U_m/\overline{B_L}$ との関係を示すと共に, 両者の関係を線形式で求めて図中に直線で示した. z 方向対地速度の最頻値 $|\hat{V}_z|/\overline{B_L}$ は一定であるが, x 方向遊泳速度および遊泳速度の最頻値 $\hat{V}_x/\overline{B_L}$ および $\hat{V}/\overline{B_L}$ に関しては流速の増加と共に増加している. また, 流速 $U_m/\overline{B_L}$ が10の時に $\hat{V}_x/\overline{B_L}$ および $\hat{V}/\overline{B_L}$ は約15に達している. 従来, 魚の突進速度は体長の約10倍が定説であったが, 近年, それ以上であるというデータを泉ら²³⁾は得ている. そのため, 本研究結果は妥当と考えられる.

(6) 普遍遊泳時の屈折角度

図-8(a)に屈折角の絶対値 $|\theta|$ の頻度分布を流速別に示す. 屈折角の絶対値 $|\theta|$ は最頻値よりも高値方向に裾をもつ形状を示すため, ガンマ分布を採用し, 図中に曲線で示した. 流速の増加に伴い屈折角の絶対値 $|\theta|$ の減少が認められる.

図-8(b)に屈折角の絶対値 $|\theta|$ の最頻値 $|\hat{\theta}|$ と流速 $U_m/\overline{B_L}$ との関係を示すと共に, 両者の関係を線形式で求めて図中に直線で示した. 最頻値 $|\hat{\theta}|$ は流速の増加に伴い, 減少傾向にある. これは, 図-7に示されたように, 流速が増加しても横断方向の遊泳速度は変化せず, x 方向の遊泳速度が増加するため, 上流方向に直進性が高まったことで生じていると考えられる.

4. おわりに

本研究は, 流速を系統的に変化させて流水中を単独で遊泳するアユの挙動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.

- (1) 静止流体中だけでなく, 流水中におけるアユの挙動も直線と屈折によって表現できる.
- (2) 流速が増加しても流速に直角方向のアユの対地距離, 遊泳距離, 対地速度および遊泳速度に変化は見られない. 一方, 流速の増加に伴い上流方向の対地速度が増加し, そのため, 遊泳速度や対地距離および遊泳距離が増加する. これは, 正の向流性を有するからと考えられる.
- (3) 流速の増加に伴い正の向流性を有するアユは上流方向に直進しようとするため, 屈折角度は減少することが明らかとなった.

参考文献

- 1) Partridge, B.L. and Pitcher, T.J.: The sensory basis of fish schools, *Journal of Comparative Physiology*, Vol.135, pp.315-325, 1980.
- 2) 長谷川英一, 添田秀男: 魚群中の個体相互の関係, 日本水産学会

誌, 第51巻, 12号, pp.1921-1926, 1985.

- 3) 兼廣春之, 鈴木誠, 松田皎: 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.
- 4) 高木力, 梨本勝昭, 山本勝太郎, 平石智徳: 形状と大きさの異なる水槽内における魚群行動について, 日本水産学会誌, 第59巻, 8号, pp.1279-1287, 1993.
- 5) 井上喜洋: 定置網周辺における魚群の規模と移動状況, 日本水産学会誌, 第53巻, 8号, pp.1307-1312, 1987.
- 6) 金文官, 有元貞文, 松下吉樹, 井上喜洋: 定置網漁場における魚群の移動行動, 日本水産学会誌, 第59巻, 3号, pp.473-179, 1993.
- 7) 佐々木丞, 関根雅彦, 後藤益慈, 浮田正夫, 今井剛: 多自然型川づくりに資するための魚の行動圏調査, 環境工学研究論文集, 第38巻, pp.13-19, 2001.
- 8) 東信行, 鴨下真吾, 佐原雄二, 関泰夫, 渡辺勝栄: 増水時における河川魚類の挙動と河川構造, 環境システム研究論文集, Vol.27, pp.793-798, 1999.
- 9) 傳田正利, 天野邦彦, 辻本哲郎: 魚類行動自動追跡システムの開発と実用性の検証, 河川技術論文集, 第11巻, pp.459-464, 2005.
- 10) 三宮信夫, 松田皎: 魚群の行動のモデリング, 計測と制御, 第19巻, 7号, pp.704-707, 1980.
- 11) 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.
- 12) Sakamoto, W., Aoki, I. and Kuroki, T.: Studies of the schooling behavior of fish-I, spectral analyses of interaction between two individuals of fish in locomotion, *Bull. Jap. Society of Sci. Fish.*, Vol.41, No.9, pp.945-952, 1975.
- 13) 二瓶泰雄, 福永健一, 小澤喜治: 実際の魚体運動を反映した魚周辺の流動シミュレーション, 土木学会論文集, No.768/II-68, pp.55-66, 2004.
- 14) 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.
- 15) 鬼束幸樹, 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 高木克哉, 栗原朋之, 青木宗之, 内山文哉, 福井吉孝: 杭水制内外の流れと魚の挙動, 水工学論文集, 第51巻, pp.1273-1278, 2007.
- 19) 大橋弘道, 清水康行: 数値計算による魚道内における魚の挙動の解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.1597-1602, 2004.
- 20) 橋本麻未, 後藤仁志, 原田英治, 酒井哲郎: Boid型魚群行動モデルに基づく数値魚道の開発, 水工学論文集, 第49巻, pp.1477-1482, 2005.
- 21) Reynolds, C.W.: Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model, *Computer Graphics*, Vol.21, No.4, pp.25-34, 1987.
- 22) 藤井真一, 木村一郎, 清水康行, 清治真人: 密度関数法を用いた階段式魚道における魚の挙動の3次元シミュレーション, 水工学論文集, 第53巻, pp.1249-1254, 2009.
- 23) 泉完, 矢田谷健一, 東信行, 工藤明, 加藤幸: 自然河川流水を用いたスタミナトンネルによるオイカワの突進速度に関する現地実験, 水工学論文集, 第51巻, pp.1285-1290, 2007.

(2009. 9. 30受付)