

# 流速変化が2尾のアユの遊泳特性に及ぼす影響

## EFFECTS OF VELOCITY ON SWIMMING BEHAVIOR OF A COUPLE OF AYU

鬼東幸樹<sup>1</sup>・秋山壽一郎<sup>2</sup>・竹内光<sup>3</sup>・大西浩史<sup>4</sup>  
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Hikaru TAKEUCHI and Hiroshi ONISHI

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>学生員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

<sup>4</sup>学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

Swimming behavior of isolate or a couple of fish in running water has not been investigated. Recently, Onitsuka *et al.* investigated on the swimming behavior of isolated ayu in running water. In this study, the swimming behavior of a couple of ayu in running water was investigated. 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. The swimming speed for each branch decreases in compared with that of isolate ayu.

**Key Words :** a couple of ayu, node, branch, swimming speed, angle, running water

### 1. はじめに

河川環境の維持, 保全のためにも魚が遡上しやすい魚道や迷入しにくい取水口の設計が望まれており, 魚の挙動を把握することが必要である<sup>1,4)</sup>.

魚の行動把握の研究は, 魚群の挙動, 魚群内における魚の相対挙動, 魚群に属さない魚の挙動, の3つに大別される. 魚群とはPartridge & Pitcher<sup>5)</sup>および兼廣ら<sup>6)</sup>が定義した3尾以上の魚のグループのことである.

井上<sup>7)</sup>はスキヤニングソナーを用いてサケなどの5魚種の魚群速度が約0.3m/sであること, 石川<sup>8)</sup>はウグイの動水における魚群半径が静水よりも増加することを解明した. 佐々木ら<sup>9)</sup>はテレメトリー法により, カワムツ, フナ, コイの瀬と淵の利用形態を解明し, 傳田ら<sup>3)</sup>はATS(Advanced Telemetry System)を開発し, ゲンゴロウブナの挙動を追跡し, 詳細な遊泳軌跡を解明した.

魚群内における魚の相対挙動の研究例として, インダイの挙動を観察し, 個体間距離が体長に比例することを解明した長谷川<sup>10)</sup>の研究が挙げられる. 三宮ら<sup>11)</sup>は魚群内尾数の増加に従い, 群れの先頭となるリーダーが存在しなくなることを解明し, Sannomiya & Matsuda<sup>12)</sup>は魚群内の個体位置が, 前方推進力, 個体間引力, 成群力, 壁からの反発力, 方向場力および外乱をモデル定数とし, 魚群の行動をモデル化した.

魚群に属さない魚の挙動の研究例として, 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解明した二瓶ら<sup>13)</sup>の研究が挙げられる. 鬼東ら<sup>14,15)</sup>は静止流体中を1尾および2尾で遊泳するアユの遊泳速度や遊泳距離を定量的に示した.

上記の実験的研究に加え, 数値計算による魚の挙動の研究も多く行われている. 関谷ら<sup>16,17)</sup>および高水ら<sup>18)</sup>は走流性, 側壁選好性および忌避性を組み込んだランダムウォークモデルを提案し, アユの行動を計算した. 橋本ら<sup>19)</sup>はBoid型魚群モデルを用いて魚群の挙動を計算した. Viscido *et al.*<sup>20)</sup>は魚群の形成, 維持に伴う個体間の相互作用をモデル化し, 魚群内の魚の相対挙動を計算した. しかし, 計算に用いられるモデル定数や仮定を検証した実験はほとんど存在しない. 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. 鬼東ら<sup>21)</sup>は, 流水中を単独で遊泳するアユの挙動を解析し, 流速の増加に伴い遊泳速度および遊泳距離が増加することを解明した. しかし, 群れアユには互いに引き付けあう個体間誘引力<sup>11)</sup>が働く. そのため, 2尾で遊泳するアユの遊泳特性は単独の特性と異なると推測される<sup>15)</sup>.

本研究はアユの平均体長の0~10倍の5段階で流速を変化させて, 2尾で遊泳するアユの挙動を解析したものである. この結果を前報<sup>21)</sup>で得られた単独アユの挙動と比較することにより, 流水中におけるアユの個体間誘引力による遊泳特性の変化を把握することができる.

表-1 実験条件

case name	C0	C1	C3	C5	C10
$\overline{B_L}$ (mm)	70				
$h$ (m)	0.04				
$U_m$ (m/s)	0	0.07	0.21	0.35	0.70
$U_m / \overline{B_L}$ (1/s)	0	1	3	5	10

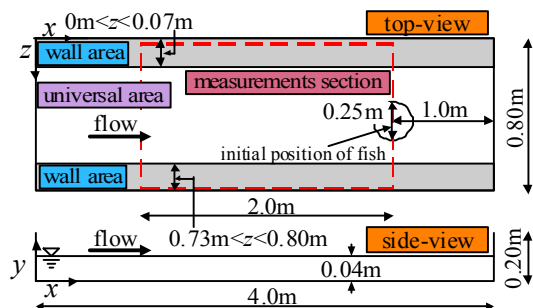


図-1 実験水路の模式図

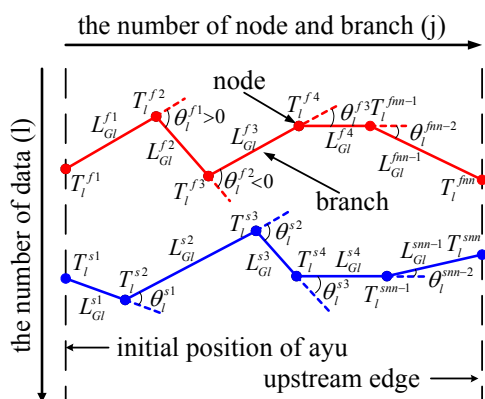
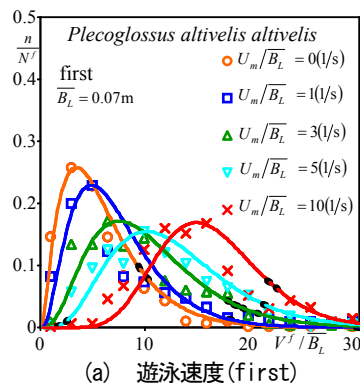


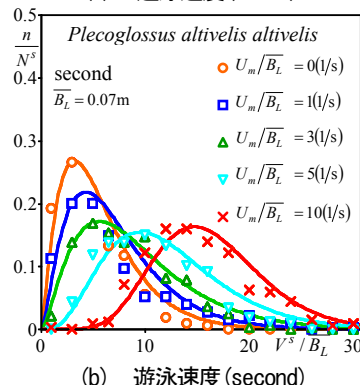
図-2 遊泳軌跡の模式図

## 2. 実験装置および実験条件

図-1に示す長さ4.0m, 幅 $B=0.8$ 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. 平均体長 $\overline{B_L}=70$ 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 $h$ 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. 各ケースで水路始端から3m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, 2尾のアユを挿入する. アユを挿入し, 5~10秒間馴致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2尾とも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. なお, 先に水路始端に到達した個体をfirst, 続いて到達した個体をsecondと呼称する. 上記の実験を各ケースで2尾ともに100回水路始端に到達するまで行った. 一回の実験で使用するアユは50尾とし, 再利用する際には次の実験との時間間隔を十分に空けて使用した. なお, 解析に用いたデータは水路始端に到達したものとし, 各ケー



(a) 遊泳速度(first)



(b) 遊泳速度(second)

図-3 firstとsecondアユの挙動の相違

スで100個の計500個とした.

$x$ ,  $z$ 軸方向にそれぞれ10, 7点のメッシュで構成される合計70の格子点において, 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, 流速測定時には水路内にアユを入れていない.

## 3. 実験結果および考察

### (1) アユの遊泳軌跡のモデル化

鬼束ら<sup>14),15),21)</sup>はアユが静止流体中を1尾あるいは2尾で遊泳する場合, および流水中を1尾で遊泳する場合, 軌跡が直線(branch)と屈折(node)で表現できると述べた. 本実験でも前報と同様の傾向が確認されたため, 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 $T$ から対地距離 $L_G$ および屈折角度 $\theta$ が図-2のように求められる.  $\theta$ は右回転を正, 左回転を負と定義した. 遊泳開始からのbranchおよびnode番号を右上の添字 $j$ で示す. first, secondの諸量は右上の添字 $f, s$ で表す. また, データ番号を右下の添字 $l$ で示す. 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種の対地距離に流速を加味すると, 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, これらの対地速度に流速を加味すると, 遊泳速度(対水速度) $V$ ,  $x$ 方向遊泳速度 $V_x$ ,  $z$ 方向遊泳速度 $V_z$ が算

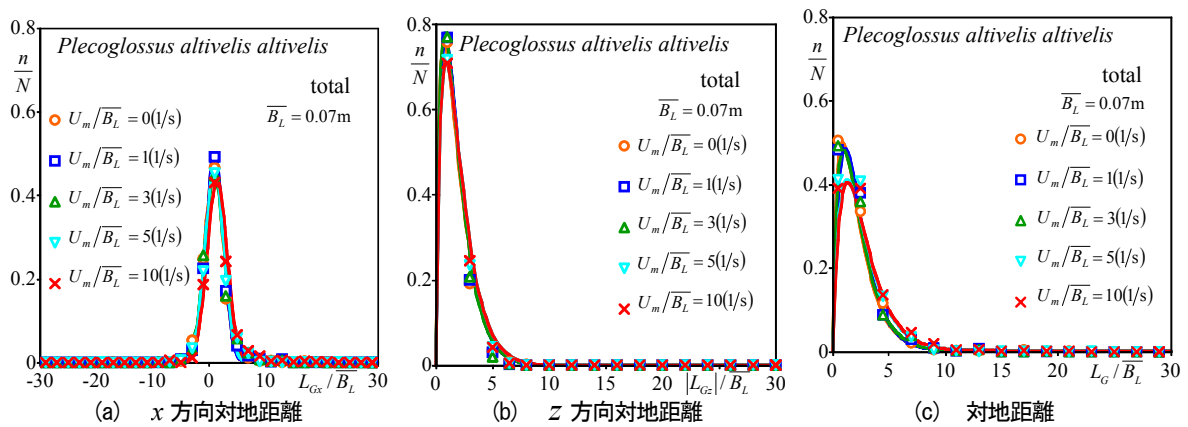


図-4 普遍遊泳における流速変化に伴う対地距離の変化

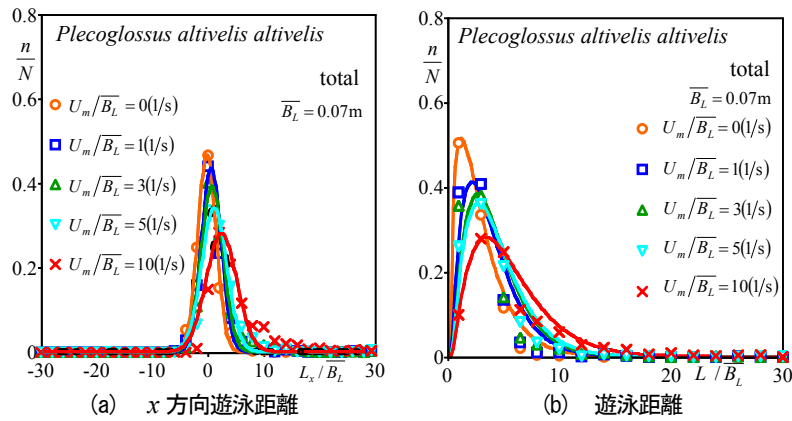


図-5 普遍遊泳における流速変化に伴う遊泳距離の変化

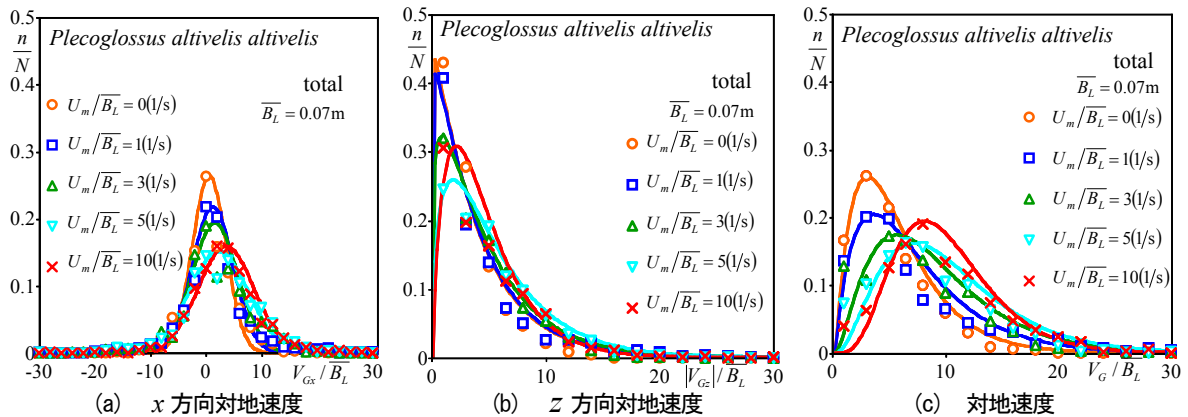


図-6 普遍遊泳における流速変化に伴う対地速度の変化

出される。

鬼束ら<sup>14),15),21)</sup>はアユが静止流体中を1尾あるいは2尾で遊泳する場合、および流水中を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。本実験でも同様な傾向が観察された。一方、多くのアユは直接水路始端に到達せず、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、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倍未満の領域に入れた後の遊泳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。

なお、アユの遊泳特性に関する既存の研究<sup>14),15),21)</sup>では普遍遊泳のみを対象としているため、本研究においても普遍遊泳のみを対象とする。

## (2) firstとsecondアユの挙動の相違

図-3(a), (b)にfirstおよびsecondアユの遊泳速度 $V$ の度数分布をそれぞれ示す。両者の流速頻度分布形状は極めて類似している。そこで、両データに対してウィルコクソンの符号順位検定を0.05水準で行った。その結果、各流速においてfirstとsecondアユに有意差はなかった。したがって、以降ではfirstとsecondアユのデータを合算(total)して解析する。

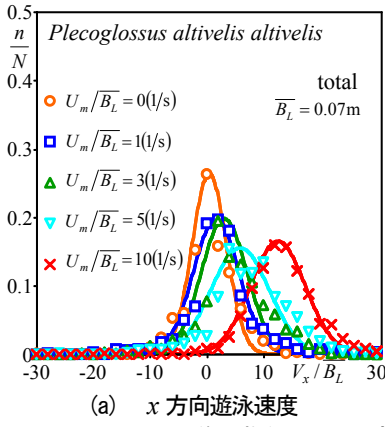


図-7 普遍遊泳における流速変化に伴う遊泳速度の変化

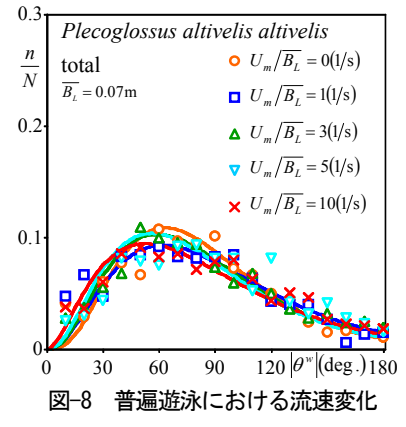
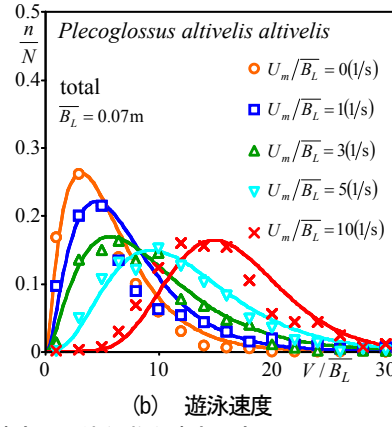


図-8 普遍遊泳における流速変化に伴う屈折角度の変化

### (3) 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 $\overline{B_L}$ 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、流速分布が左右対称であり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。

$$f(L_{Gx}/\overline{B_L}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{L_{Gx}}{\overline{B_L}}\right)} \exp \left\{ -\frac{\left(\frac{L_{Gx}}{\overline{B_L}} - \overline{\frac{L_{Gx}}{\overline{B_L}}}\right)^2}{2 \left(\frac{L_{Gx}}{\overline{B_L}}\right)^2} \right\} \quad (1)$$

最小二乗法より平均値 $\overline{L_{Gx}}/\overline{B_L}$ と分散 $\left(L_{Gx}/\overline{B_L}\right)^2$ を算出した。流速の増加に伴い $L_{Gx}/\overline{B_L}$ の最頻値は増加する。

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 $|L_{Gz}|/\overline{B_L} = 0$ 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(b)中に曲線で示した。

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

平均値 $\overline{|L_{Gz}|}/\overline{B_L}$ 、分散 $2 \times \left(\overline{|L_{Gz}|}/\overline{B_L}\right)^2$ 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、次式のガンマ分布を採用し、図-4(c)中に曲線で示した。

$$f(L_G/\overline{B_L}) = \frac{1}{\Gamma(\lambda)} \alpha^\lambda (L_G/\overline{B_L})^{\lambda-1} e^{-\alpha L_G/\overline{B_L}} \quad (3)$$

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

係数 $\alpha$ 、 $\lambda$ 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、 $x$ 方向対地距離 $L_{Gx}$ の増加によるものである。

以上のように、 $L_{Gx}/\overline{B_L}$ 、 $|L_{Gz}|/\overline{B_L}$ 、 $L_G/\overline{B_L}$ がそれぞれ正規、カイ二乗、ガンマ分布で再現可能という結果は、アユが単独で遊泳する場合の結果<sup>21)</sup>と一致する。

### (4) 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。

### (5) 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 $\overline{B_L}$ 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 $V_{Gx}/\overline{B_L}$ の最頻値の増加が確認される。これはアユが一定の速度を保とうとするため $x$ 方向対地速度 $V_{Gx}$ が増加するような傾向になると考えられる。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、全流速で $|V_{Gz}|/\overline{B_L}$ がゼロ付近で極大

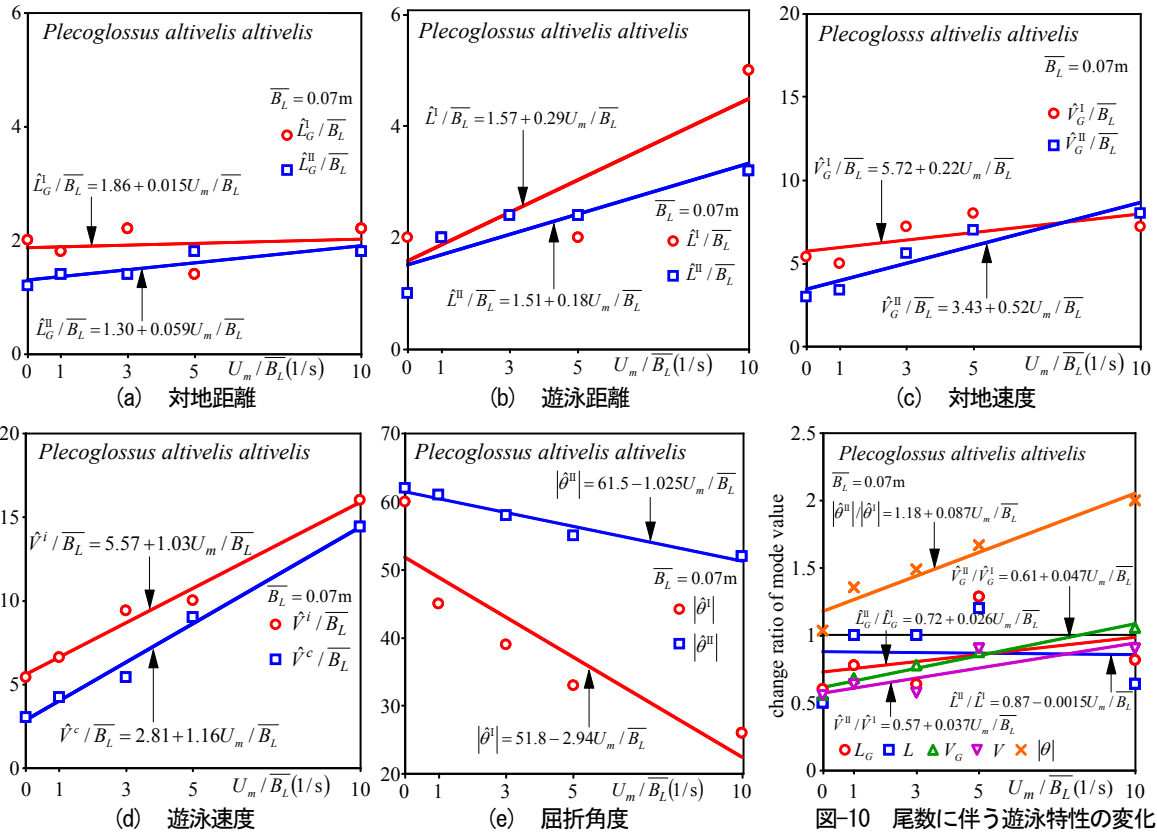


図-9 尾数変化と最頻値との関係

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  $|V_{Gz}|/B_L$  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若干増加するが、これはアユがなるべく対地速度を一定に保とうとするためだと考えられる。

以上のように、 $V_{Gx}/B_L$ 、 $|V_{Gz}|/B_L$ 、 $V_G/B_L$  がそれぞれ正規、カイ二乗、ガンマ分布で再現可能という結果は、単独アユの結果<sup>21)</sup>と一致する。

### (6) 普遍遊泳時の遊泳速度

図-7(a)、(b)に  $x$  方向遊泳速度  $V_x$  および遊泳速度  $V$  をそれぞれ平均体長  $B_L$  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  $V_x/B_L$  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。  $V$  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一定に保とうとするため、遊泳速度が顕著に増加すると考えられる。

### (7) 普遍遊泳時の屈折角度

図-8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  $|\theta|$  の最頻値が減少傾向を示している。なお、単独アユの屈折角もガンマ分布によって再現される<sup>21)</sup>。

### (8) 尾数変化と最頻値との関係

図-9(a)～(e)に今回の2尾実験で得た対地距離  $L_G/B_L$ 、遊泳距離  $L/B_L$ 、対地速度  $V_G/B_L$ 、遊泳速度  $V/B_L$ 、屈折角の絶対値  $|\theta|$  の最頻値をプロットで、最小二乗法で求めたこれらの諸量と体長倍流速  $U_m/B_L$  との関係線を形式で示す。また、前報<sup>21)</sup>の単独アユ実験で得られた同様な値および線形式も併記した。

図-9(a)および図-9(b)に着目すると、2尾の対地距離および遊泳距離が単独アユの値よりも若干減少していることがわかる。これは、アユが2尾で遊泳する場合に他者との個体間距離が遠くならないように遊泳することを意味する。図-9(c)に着目すると、アユが2尾で遊泳する場合は対地速度が概ね減少することが分かる。これもアユが個体間距離を近づけるために対地速度が減少したことを意味する。体長倍流速  $U_m/B_L$  が10の時に逆傾向となっているが、図-9(d)を観察すると遊泳速度自体は減少している。一方、図-9(e)に着目すると、アユが2尾で

図-10 尾数に伴う遊泳特性の変化

遊泳する場合の屈折角度は単独アユの角度よりも急角度になっている。これは、他者との個体間距離が離れたことを察知したアユが、個体間距離を縮めようと屈折したためと考えられる。

図-10に2尾実験で得られた最頻値を単独アユ実験で得た最頻値で除した値、すなわち対地距離比  $\hat{L}_G^2/\hat{L}_G^1$ 、遊泳距離比、 $\hat{L}^2/\hat{L}^1$ 、対地速度比  $\hat{V}_G^2/\hat{V}_G^1$ 、遊泳速度比  $\hat{V}^2/\hat{V}^1$ 、屈折角比  $|\hat{\theta}^2|/|\hat{\theta}^1|$  と流速  $U_m/B_L$  との関係プロットで、またそれらの線形関係式を直線で示した。屈折角比  $|\hat{\theta}^2|/|\hat{\theta}^1|$  以外は全て1以下となっており、2尾で遊泳する方が単独アユが遊泳するよりも対地距離、遊泳距離、対地速度、遊泳速度の最頻値が減少することを示している。流速に対する挙動については、対地距離比  $\hat{L}^2/\hat{L}^1$ 、対地速度比  $\hat{V}_G^2/\hat{V}_G^1$ 、遊泳速度比  $\hat{V}^2/\hat{V}^1$  が増加して1に近づく傾向を示している。これは流速が増加すると遊泳に体力を要するため、他個体との個体間距離を保つ余裕が無くなるために単独アユの値に近づくためと考えられる。対地距離比  $\hat{L}_G^2/\hat{L}_G^1$  については、流速に対して減少する結果となったがデータのばらつきが大きいので、今後再検討が必要である。一方、屈折角度については流速の増加に伴い2尾と単独アユの差が広がり、流速  $U_m/B_L$  が10の時に、2尾が単独アユの約2倍となっている。屈折角度を魚が設定する方法は、頭部を横断方向に僅かに向け、その後、流速の運動量を利用して所定の角度にするために余り体力を要しない。そのため、その他の諸量と逆傾向になったものと考えられる。

#### 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2尾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) 流水中を遊泳する2尾のアユの遊泳軌跡は、単独アユと同様に直線と屈折で再現可能である。
- (2) 先に遡上を終了した個体と続いて遡上を終了した個体の遊泳挙動に有意差はない。
- (3) 横断方向に関する対地距離、遊泳距離、対地速度および遊泳速度は流速による影響を受けない。一方、流速の増加に伴い流下方向の対地速度は一定に保たれる。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。屈折角度は流速の増加に伴い減少する。こうした定性的傾向は、単独で遊泳するアユの挙動と一致する<sup>21)</sup>。
- (4) 単独で遊泳するアユと比べて2尾で遊泳するアユの遊泳距離および遊泳速度は減少し、屈折角度は増加する。これは、2尾がある個体間距離を保とうとするために、遊泳中に他の個体との個体間距離が離れそうになると遊泳速度および遊泳距離を減少させ、また、屈折する際に他の個体に接近するように遊泳するためと考えられる。
- (5) 流速の増加に伴って、2尾で遊泳するアユの対地距離、対地速度および遊泳速度の最頻値は単独で遊泳するアユの挙動に近づく。これは流速が増加すると遊泳に体

力を要するため、他個体との個体間距離を保つ余裕がなくなるためと考えられる。一方、屈折角度に関しては、流速の運動量を利用して変化させるために大きな体力を要せず、その結果、流速の増加に伴い単独アユの角度よりも増加する。

#### 参考文献

- 1) 高嶋信博, 中村俊六: 魚道内のアユの挙動に関する実験的研究, 水理講演会論文集, 第28巻, pp.353-358, 1984.
- 2) 林田寿文, 本田隆秀, 萱場祐一, 島谷幸宏: 階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動, 水工学論文集, 第44巻, pp.1191-1196, 2000.
- 3) 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.
- 4) 浪平篤, 後藤真宏, 小林宏康: 階段式魚道における流量変化に伴うプール毎の流況およびウグイの遡上行動, 水工学論文集, 第51巻, pp.1291-1296, 2007.
- 5) Partridge, B.L. and Pitcher, T.J.: The sensory basis of fish schools, *Journal of Comparative Physiology*, Vol.135, pp.315-325, 1980.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 石川啓昭: 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.
- 9) 佐々木丞, 関根雅彦, 後藤益滋, 浮田正夫, 今井剛: 他自然型川づくりに資するための魚の行動調査, 環境工学研究論文集, 第38巻, pp.13-19, 2001.
- 10) 長谷川英一: 群中個体間の位置関係, 月刊海洋, Vol.15, No.4, pp.203-206, 1983.
- 11) 三宮信夫, 島田亮, 中峯浩: 魚群行動における自律分散機構のモデリング, 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.2, pp.211-219, 1993.
- 12) 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.
- 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: 静止流本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: 静止流本中を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) 高水克哉, 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) 橋本麻未, 後藤二志, 原田栄治, 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.
- 20) Viscido, S.V., Parrish, J.K. and Grünbaum, D.: Factors influencing the structure and maintenance of fish schools, *Ecological Modelling*, Vol.206, pp.153-165, 2007.
- 21) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 竹内光, 小野篤志: 流速変化が単独アユの遊泳特性に及ぼす影響, 水工学論文集, 第54巻, pp.1309-1314, 2010.

(2010. 9. 30受付)