

# 尾数変化における流速変化が アユの遊泳特性に及ぼす影響の比較

鬼束幸樹<sup>1</sup>・秋山壽一郎<sup>2</sup>・三原和也<sup>3</sup>・白岡敏<sup>3</sup>・平野陽一<sup>3</sup>

<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)

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

<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

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

<sup>3</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博士前期課程

E-mail: reaper\_hank@yahoo.co.jp

Partridgeはコイ科のミノウが2尾で遊泳する場合は特定の1尾が主としてリーダーとなって遊泳するのに対し、3尾以上ではリーダーが存在しなくなることを発見し、2尾以下は魚群ではないという定義が定着している。しかし、流水中における魚の挙動を定量的に評価した実験はほとんど行われておらず、魚群内の尾数変化に伴う魚群行動に及ぼす影響を評価した実験はほとんど行われていない。本研究は、流速変化がアユの遊泳特性に与える影響を1, 2, 3, 5, 10尾ごとに解析したものである。その結果、尾数の増加に伴い先頭交代率、対地速度、遊泳速度は増加し、対地距離、遊泳距離は減少することが判明し、3尾以上の尾数から遊泳挙動の変化が緩やかになることが判明した。

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

## 1. はじめに

「治水」、「利水」を目的としてダムや堰等が建設され、これらの構造物が設置されることによって生じる大きな水位落差は、河川に生息する魚類等の遡上や降下を困難にする。そこで、彼らの遡上や降下を容易にするために一般にそのような河川には魚道が設置される場合がある。しかし、既存の魚道において、魚にとって遡上困難なものが多数存在しているのが現状である。そのため、今後の魚道の設計および改修を行う際に河川に存在する魚の遊泳特性を考慮し、遡上および降下できるかを検討する必要がある。魚は主に群れで行動をすることから、河川に生息する魚の魚群内での相対挙動の解明および魚の行動特性の解明が必要である。以下では、魚の行動特性の解明の課題に対して詳しく述べる。

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 & Pitcher<sup>1)</sup>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<sup>2,4)</sup>。

井上<sup>5)</sup>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0.3 m/sであることを解明した。金ら<sup>6)</sup>も井上<sup>5)</sup>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<sup>7)</sup>はカワムツ、フナ、コイの瀬と淵の利用形態を解明し、東ら<sup>8)</sup>はウグイの昼間と夜間の行動の相違を解明した。傳田ら<sup>9)</sup>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<sup>2)</sup>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<sup>10)</sup>、Sannomiya & Matsuda<sup>11)</sup>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 & Pitcher<sup>1)</sup>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.*<sup>12)</sup>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<sup>13)</sup>は1尾および2尾で遊泳する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。鬼束ら<sup>14),15)</sup>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について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。流水中における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<sup>16),17)</sup>および高水ら<sup>18)</sup>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<sup>19)</sup>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<sup>20)</sup>はBoidモデル<sup>21)</sup>を用いて魚群の挙動を計算した。藤井ら<sup>22)</sup>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。

鬼束ら<sup>23),25)</sup>は1尾、2尾および3尾のアユを開水路流に放流し、体長倍流速を0~10倍の範囲で変化させて遊泳挙動を観察した。その結果、流速の増加に伴い上流方向の対地距離が増加すると共に屈折角度が減少することを解明した。また、3尾のアユでは1尾、2尾に比べ、最寄りのアユとの個体間距離を保とうとする魚群特性が働くことが確認された。

以上のように魚の挙動が解明されつつあるが、魚群の挙動に関する研究では3尾以上のある固定された尾数で実験されていることがほとんどで、尾数の変化が魚群行動に及ぼす影響を評価した実験はほとんど行われていない。尾数の増加に伴い魚群の挙動が変化すると予測されるが、ある程度の尾数になると魚群の挙動の変化が緩慢となり、ある特性に収束すると推測される。そこで本研究では、アユの尾数を1, 2, 3, 5, 10と変化させると共に体長倍流速を0~10の範囲で変化させ、アユの遊泳挙動を解析した。

## 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 $0.2\text{m}$ 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。なお、図中のwall areaおよびuniversal areaの定義は後述する。実験魚には10月10日前後に孵化した平均体長 $\overline{B_L}=70\text{mm}$ 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、各ケースにおけるアユの尾数 $N$ を1~10の範囲で5段階に設定した。また、水深 $h$ を $0.04\text{m}$ に固定して体長倍流速 $U_m/\overline{B_L}$ を0~10の範囲で5段階に設定した。水路始端から2m下流の水路中央

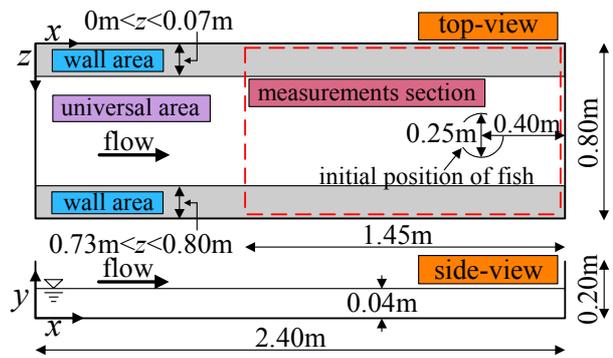


図-1 実験水路の模式図

表-1 実験条件

case name	$N$ (number of fish)	$\overline{B_L}$ (mm)	$h$ (m)	$U_m$ (m/s)	$U_m/\overline{B_L}$ (1/s)
C1-0	1	70	0.04	0	0
C1-1				0.07	1
C1-3				0.21	3
C1-5				0.35	5
C1-10				0.7	10
C2-0	2			0	0
C2-1				0.07	1
C2-3				0.21	3
C2-5				0.35	5
C2-10				0.7	10
C3-0	3	0	0		
C3-1		0.07	1		
C3-3		0.21	3		
C3-5		0.35	5		
C3-10		0.7	10		
C5-0	5	0	0		
C5-1		0.07	1		
C5-3		0.21	3		
C5-5		0.35	5		
C5-10		0.7	10		
C10-0	10	0	0		
C10-1		0.07	1		
C10-3		0.21	3		
C10-5		0.35	5		
C10-10		0.7	10		

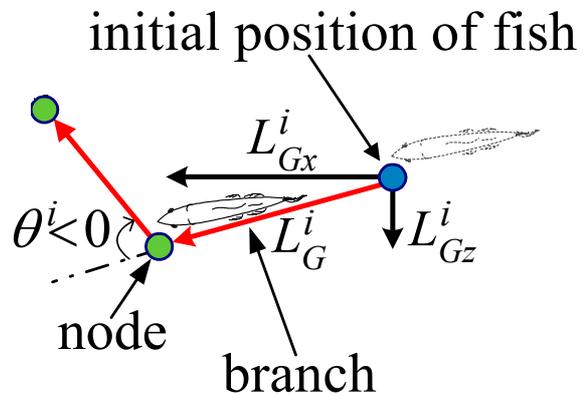


図-2 遊泳軌跡の模式図

( $z/B=0.5$ )に直径0.25mの円形金網を設置し、アユを挿入する。1分経過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30fpsのビデオカメラで図-1中のmeasurement sectionの撮影を開始する。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。上記の実験を室温および水温を19°Cに保ち、5月から約2ヶ月の期間内において正午から午後5時にかけて、1尾および2尾で遊泳する場合には各流速で100ケース、合計500ケース行い、3尾、5尾および10尾で遊泳する場合には各流速で50ケース、合計250ケース行った。

底面から水深の4割の位置の $x$ 、 $z$ 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 $U$ 、 $W$ および $x$ 軸方向の断面平均流速 $U_m$ 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)</sup>はアユが静止流体中を1尾および2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。連続する屈折位置から屈折角度 $\theta^i$ 、 $x$ 方向対地距離 $L_{Gx}^i$ および $z$ 方向対地距離 $L_{Gz}^i$ を求め、対地距離 $L_G^i$ が図-2のように算出される。 $\theta^i$ は上方から観察した時の右回転を正、左回転を負と定義した。対地距離 $L_G^i$ に流速を加味すると、遊泳距離 $L_f^i$ が算出される。一方、対地距離 $L_G^i$ と遊泳に要した時間から、対地速度 $V_G^i$ が算出され、対地速度に流速を加味すると、遊泳速度 $V_f^i$ が算出される。また、上付きの添字 $i$ は尾数ごとにI、II、III、VおよびXで表す。

鬼束ら<sup>14),15)</sup>はアユの遊泳位置から体長の1倍未満の領域に壁面が存在すると、遊泳挙動が壁面の影響を受けることを解明した。本研究でも同様の結果が得られたため、壁面から横断方向にアユの平均体長未満の領域を壁面領域(wall area)とした。また、鬼束ら<sup>14),15)</sup>は、アユは遊泳開始から3branch未満では、それ以降の遊泳挙動と異なることを指摘した。本研究でも同様の結果が得られたため、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と定義し、その領域を普遍領域(universal area)と定義した。本研究ではアユの基礎的な遊泳特性の解析を行うため、以下の解析では普遍領域を遊泳する普遍遊泳のみを対象とする。

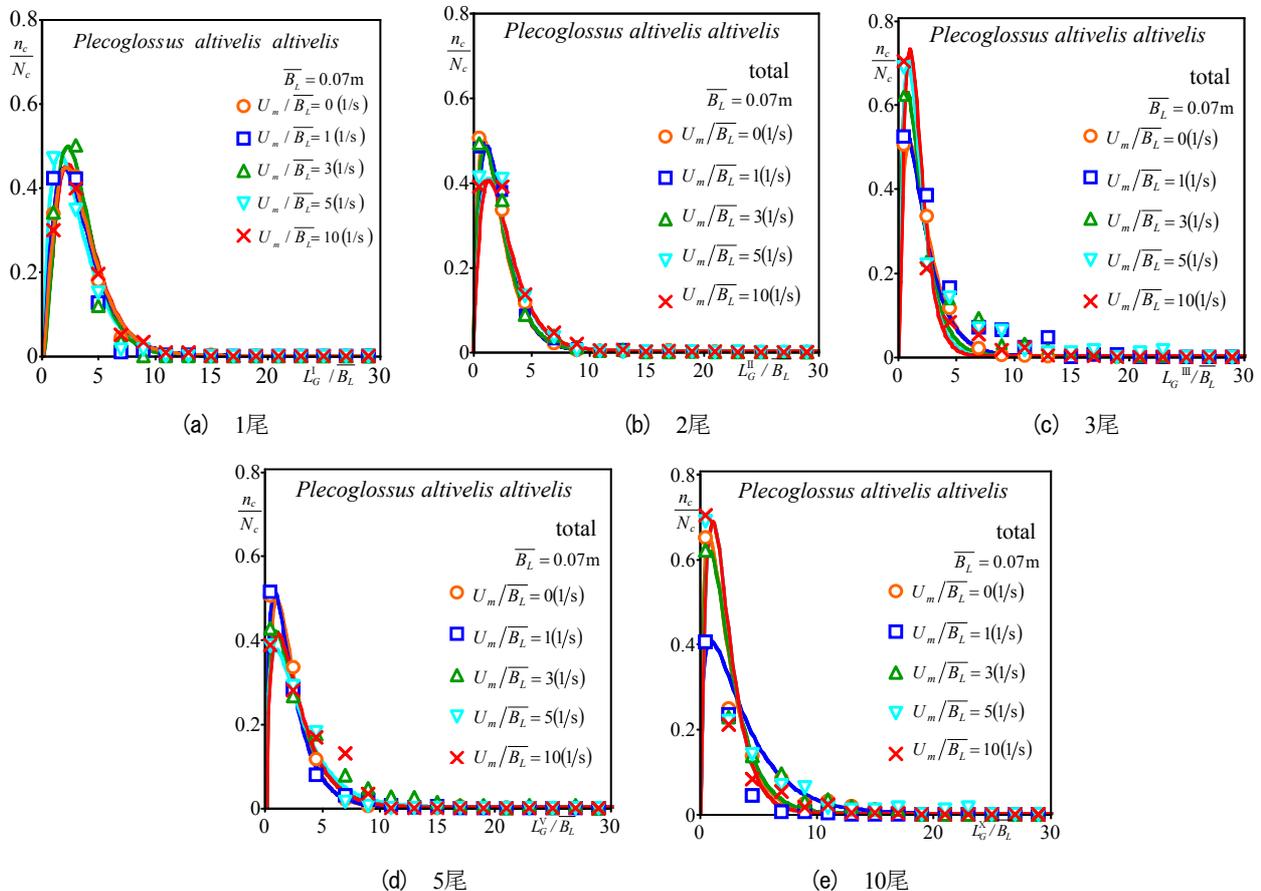


図-3 尾数変化に伴う普遍遊泳時の対地距離

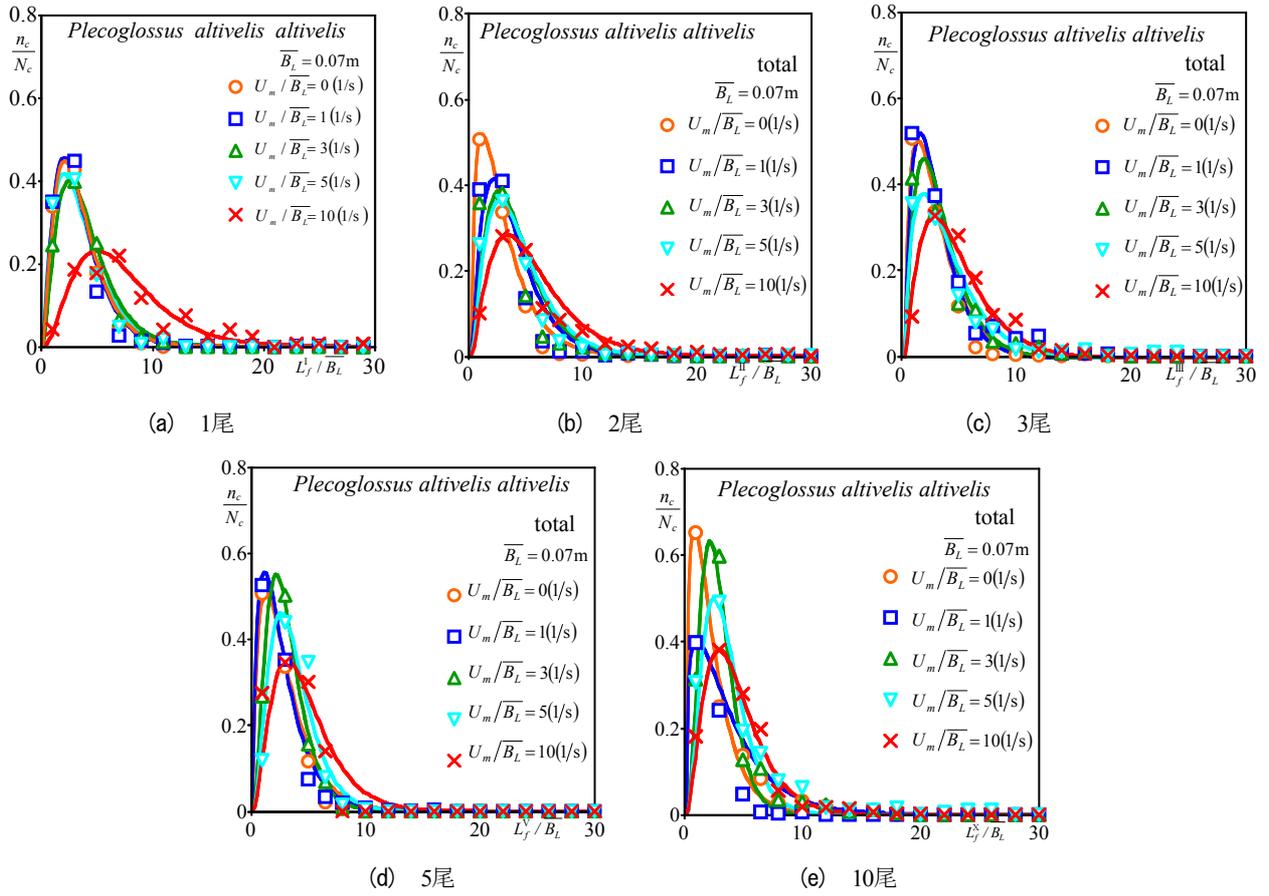


図-4 尾数変化に伴う普通遊泳時の遊泳距離

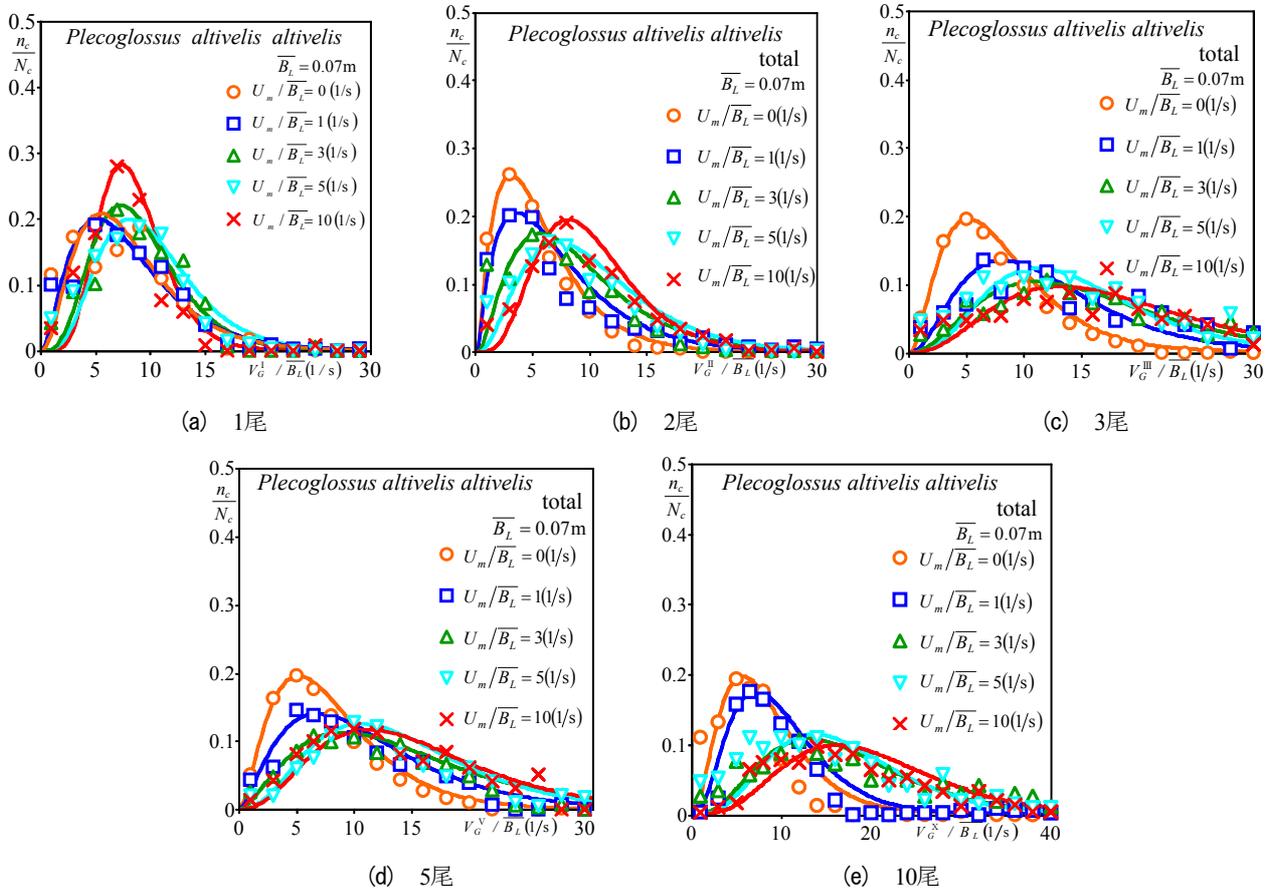


図-5 尾数変化に伴う普通遊泳時の対地速度

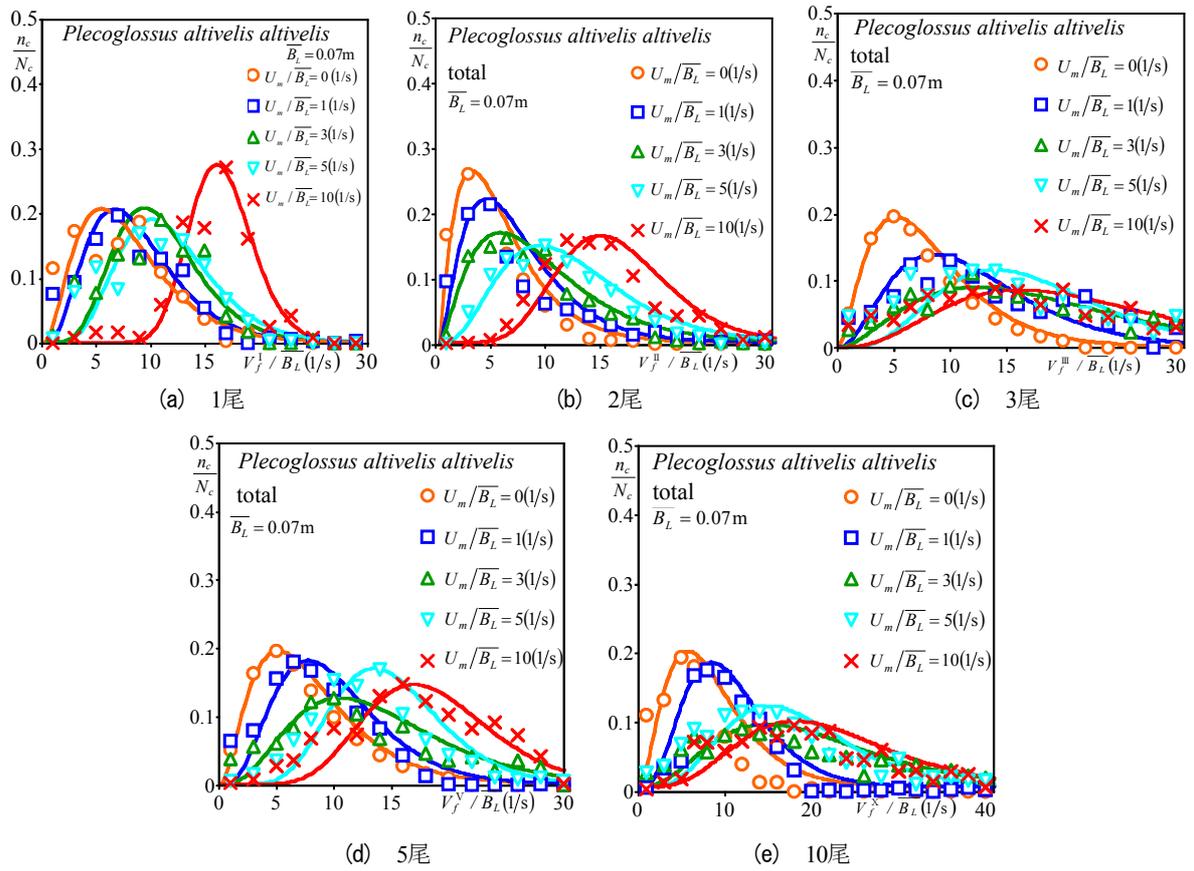


図-6 尾数変化に伴う普遍遊泳時の遊泳速度

## (2) 尾数変化における普遍遊泳時の遊泳特性の変化

### a) 普遍遊泳時の対地距離

図-3(a)～(e)に各尾数における対地距離 $L_G^i$ を平均体長 $\overline{B}_L$ で除した値 $L_G^i/\overline{B}_L$ の頻度分布を流速別に示す。両分布とも低値が高頻度で高値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-3(a)～(e)中に曲線で示した。

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

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

係数 $\alpha$ 、 $\lambda$ は最小二乗法より算出した。

各尾数における対地距離の最頻値は、流速の増加に対してほとんど変化がない。また、尾数の増加に伴い最頻値の値が減少した。これは、尾数の増加に伴い他の個体との個体間距離を保とうと遊泳したためと考えられる。

### b) 普遍遊泳時の遊泳距離

図-4(a)～(e)に各尾数における遊泳距離 $L_f^i$ を平均体長 $\overline{B}_L$ で除した値 $L_f^i/\overline{B}_L$ の頻度分布を流速別に示すと共に、式(1)、(2)において $L_G^i$ を $L_f^i$ に置き換えて求めたガンマ分布を曲線で示した。

各尾数における遊泳距離の最頻値は、流速の増加に伴い増加している。したがって、アユは流速が変化しても対地距離を一定に保とうとするため、流速の増加

と共に遊泳距離が増加すると判断される。

### c) 普遍遊泳時の対地速度

図-5(a)～(e)に各尾数における対地速度 $V_G^i$ を平均体長 $\overline{B}_L$ で除した値 $V_G^i/\overline{B}_L$ の頻度分布を流速別に示すと共に、式(1)、(2)において $L_G^i$ を $V_G^i$ に置き換えて求めたガンマ分布を曲線で示した。

図-5(a)～(e)より各尾数における対地速度の最頻値は、流速の増加と共に増加している。アユは流速があると流れに遡って遊泳する正の向流性を有していると中村<sup>28)</sup>は指摘している。そのため、流速の増加に伴う対地速度の最頻値の増加の理由は、正の向流性にあると判断される。また、尾数の増加に伴い対地速度の最頻値の値が増加した。したがって、尾数の増加に伴い遡上意欲が向上するという、鬼束ら<sup>25)</sup>の指摘が確認された。

### d) 普遍遊泳時の遊泳速度

図-6(a)～(e)に各尾数における遊泳速度 $V_f^i$ を平均体長 $\overline{B}_L$ で除した値 $V_f^i/\overline{B}_L$ の頻度分布を流速別に示すと共に、式(1)、(2)において $L_G^i$ を $V_f^i$ に置き換えて求めたガンマ分布を曲線で示した。

各尾数における遊泳速度は流速の増加と共に増加している。これは、アユは流速が変化しても対地速度を一定に保とうとするため、流速の増加と共に遊泳速度が増加すると判断される。

### e) 普遍遊泳時の屈折角度

アユの屈折角度が正の場合と負の場合に生理学的お

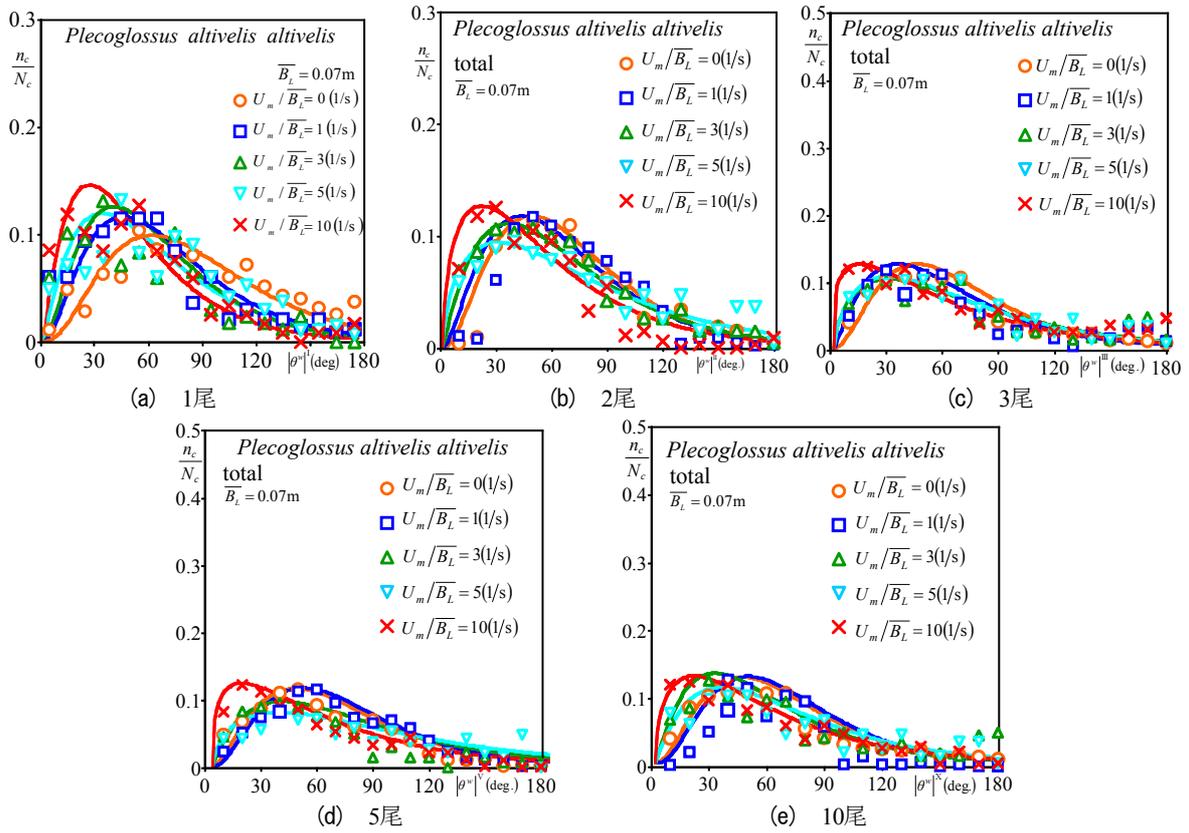


図-7 尾数変化に伴う普遍遊泳時の屈折角度

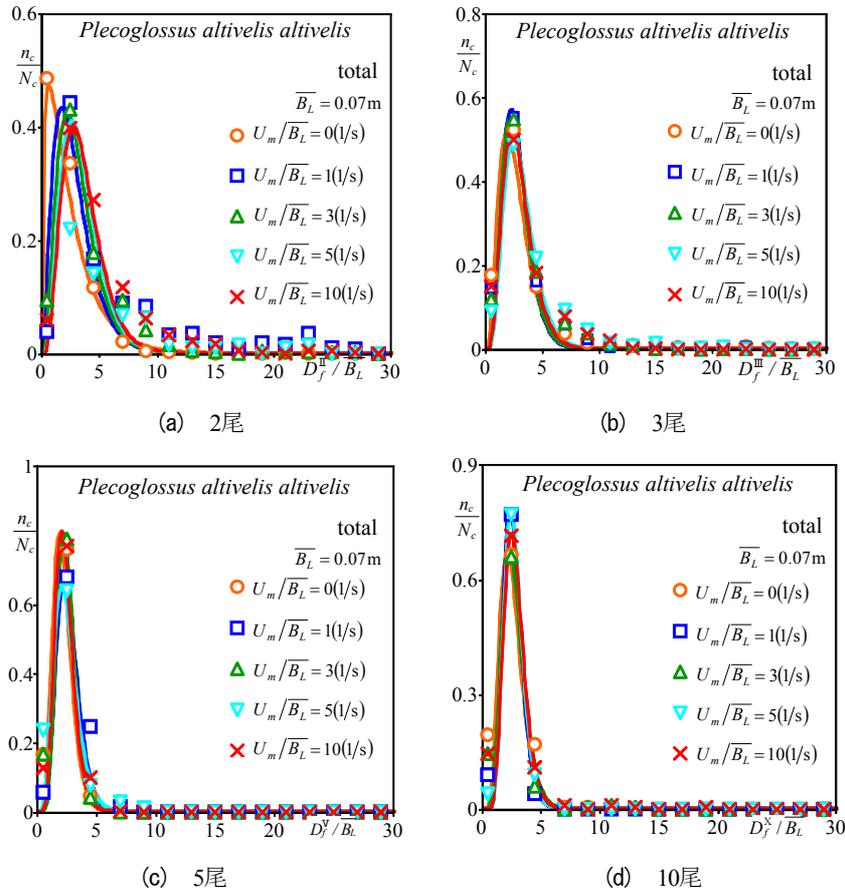


図-8 尾数変化に伴う普遍遊泳時の個体間距離

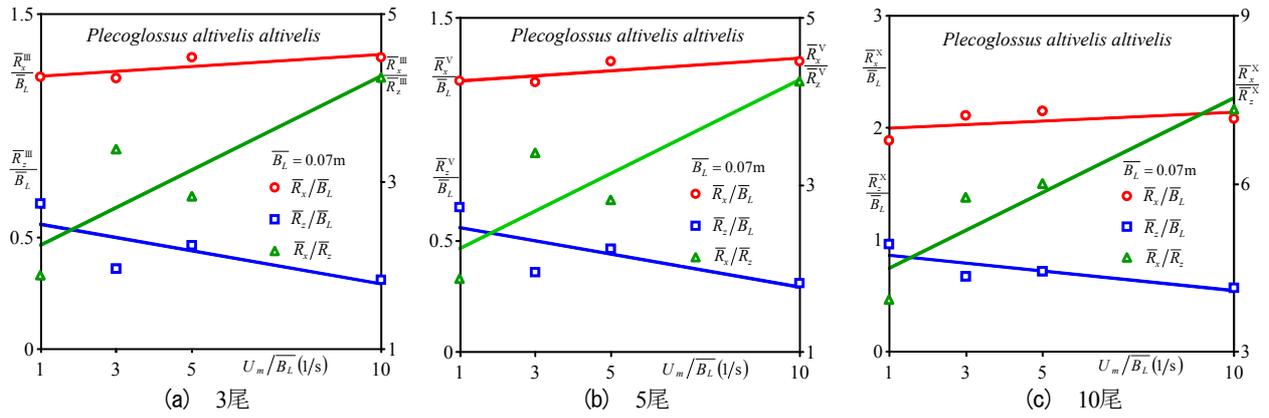


図-9 尾数変化に伴う普遍遊泳時の魚群半径

よび物理的な相違はないため、各尾数における屈折角度の絶対値 $|\theta^w|^i$ を算出し、図-7(a)～(e)に頻度分布を流速別に示すと共に、式(1)、(2)において $L_G^i/B_L$ を $|\theta^w|^i$ に置き換えて求めたガンマ分布を曲線で示した。

各尾数における屈折角度の絶対値 $|\theta^w|^i$ は流速の増加に伴い減少している。これは、流速が増加すると流体から大きな運動量を受け、上流に遊泳するには多くの遊泳力が必要となるため、魚体の $x$ 方向の投影面積を小さくするために屈折角度を減少させていると考えられる。

#### f) 普遍遊泳時の個体間距離

図-8(a)～(d)に0.2秒ごとに算出した各尾数における最寄りのアユとの間の個体間距離 $D_f^i$ を平均体長 $B_L$ で除した値 $D_f^i/B_L$ の頻度分布を流速別に示すと共に、式(1)、(2)において $L_G^i$ を $D_f^i$ に置き換えて求めたガンマ分布を曲線で示した。

2尾アユの個体間距離 $D_f^i/B_L$ は流速の増加に伴い増加した。これは、後方アユが先頭アユに付いていくように遊泳をするため流速の増加に伴い個体間距離が増加したと考えられる。また、3尾、5尾、10尾アユの個体間距離 $D_f^i/B_L$ 、 $D_f^v/B_L$ 、 $D_f^x/B_L$ の分布形状は全ての流速でほぼ一致している。したがって、魚群に属するアユは最寄りの個体間距離を一定に保ち、その距離が魚種によって一定というPartridge & Pitcher<sup>1)</sup>の指摘が確認された。また、各尾数において流速増加に伴う最頻値の変化はみられなかった。したがって、個体間距離が流速に依存しないというPitcher<sup>26)</sup>の指摘が確認された。

#### g) 普遍遊泳時の魚群半径

石川<sup>27)</sup>の定義した魚群半径を2次元に拡張すると次式となる。

$$R_x^i \equiv \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \{x_{fj} - G_x\}^2}{N}} \quad (3)$$

$$R_z^i \equiv \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \{z_{fj} - G_z\}^2}{N}} \quad (4)$$

ここに、 $R_x^i$ 、 $G_x$ 、 $x_{fj}$ はそれぞれ各尾数における $x$ 方

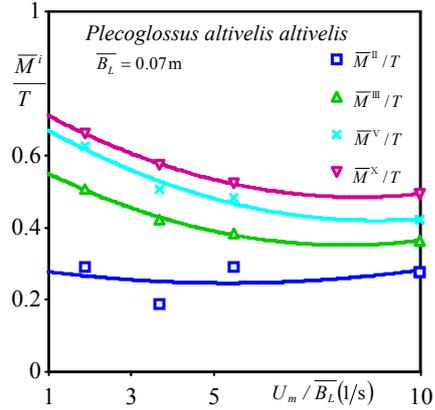


図-10 尾数変化に伴う先頭交代率

向の魚群半径、魚群重心の $x$ 座標、任意 $j$ の魚の $x$ 座標であり、 $z$ についても同様な定義である。図-9(a)～(c)に体長倍流速 $U_m/B_L$ と各尾数の $x$ および $z$ 方向の平均魚群半径 $R_x^i$ 、 $R_z^i$ を平均体長 $B_L$ で除した値 $R_x^i/B_L$ 、 $R_z^i/B_L$ との関係、および両者の比 $R_x^i/R_z^i$ との関係を示し、プロットで、最小二乗法で求められたこれらの諸量と体長倍流速 $U_m/B_L$ との関係を近似直線で示した。

流速の増加に伴い各尾数における $R_x^i/B_L$ は増加し、 $R_z^i/B_L$ は減少する。そのため両者の比 $R_x^i/R_z^i$ が流速の増加と共に増加する。したがって、流速の増加に伴い魚群形状は流下方向に細長くなることが判明した。また、尾数の増加に伴い流速の増加に伴う $R_x^i/B_L$ 、 $R_z^i/B_L$ の変化は小さくなった。これは、尾数の増加に伴い魚群で行動しようとする成群力が強く働いたためと考えられる。

#### h) 普遍遊泳時の先頭交代率

図-10に各尾数における先頭のアユが入れ替わる回数 $\bar{M}^i$ を総遊泳時間 $T$ で除した値の平均値 $\bar{M}^i/T$ をプロットで、最小二乗法で求められたこれらの諸量と体長倍流速 $U_m/B_L$ との関係を線形式で示す。

2尾アユの先頭交代率 $\bar{M}^ii/T$ は3尾、5尾および10尾の値 $\bar{M}^iv/T$ 、 $\bar{M}^ix/T$ よりも顕著に小さく、流速の増加に伴う変化が見られない。これは、2尾の場合は特定の個体が先頭を遊泳する傾向が強いためと考

えられる。3尾、5尾および10尾の先頭交代率  $\overline{M}^{\text{III}}/T$ 、 $\overline{M}^{\text{V}}/T$ 、 $\overline{M}^{\text{X}}/T$  は流速の増加に伴い減少する。これは、魚群である3尾、5尾および10尾には先頭を遊泳するリーダーが存在せず、また流れに遡って遊泳する正の向流性をアユが有しており流速の増加に伴いアユの遡上欲が増加するためであると考えられる。また、10尾の先頭交代率  $\overline{M}^{\text{X}}/T$  は5尾および3尾の先頭交代率  $\overline{M}^{\text{V}}/T$ 、 $\overline{M}^{\text{III}}/T$  よりも高値を示した。これは、尾数の増加に伴い成群力が強くなるため、10尾は3尾および5尾より魚群で行動する時間が増加し、先頭交代率が増加したと考えられる。

### (3) 尾数変化による遊泳特性の相違

図-11(a)～(f)および図-12(a)～(f)に図-3～8で得られた各尾数における対地距離  $L_G^i/\overline{B}_L$ 、遊泳距離  $L_f^i/\overline{B}_L$ 、対地速度  $V_G^i/\overline{B}_L$ 、遊泳速度  $V_f^i/\overline{B}_L$ 、屈折角度の絶対値  $|\theta^w|^i$ 、個体間距離  $D_f^i/\overline{B}_L$  のガンマ分布の係数  $\alpha$ 、 $\lambda$  の値、 $L_{Ga}^i/\overline{B}_L$ 、 $L_{fa}^i/\overline{B}_L$ 、 $V_{Ga}^i/\overline{B}_L$ 、 $V_{fa}^i/\overline{B}_L$ 、 $|\theta_a^i|$ 、 $D_{fa}^i/\overline{B}_L$  および  $L_{Gz}^i/\overline{B}_L$ 、 $L_{fz}^i/\overline{B}_L$ 、 $V_{Gz}^i/\overline{B}_L$ 、 $V_{fz}^i/\overline{B}_L$ 、 $|\theta_z^i|$ 、 $D_{fz}^i/\overline{B}_L$  をプロットで、最小二乗法で求められたこれらの諸量と体長倍流速  $U_m/\overline{B}_L$  との関係を線形式で示す。

#### a) 尾数変化に伴う対地距離と遊泳距離

図-11(a)より尾数に関わらず対地距離  $L_G^i/\overline{B}_L$  は流速の影響をほとんど受けないのに対し、図-11(b)より遊泳距離  $L_f^i/\overline{B}_L$  は流速の増加に伴い増加することが理解される。また、両距離とも尾数の増加に伴い減少している。これは、尾数の増加に伴い成群力が増すため、最寄りの個体から離れすぎると個体間距離を縮めようとするためと考えられる。なお、3尾、5尾および10尾の対地距離および遊泳距離の結果はほぼ一致した。

また、図-12(a)、(b)より1尾、2尾は流速の増加に対して対地距離  $L_{Gz}^i/\overline{B}_L$ 、遊泳距離  $L_{fz}^i/\overline{B}_L$  に変化は見られないのに対し、3尾、5尾、10尾は流速の増加に伴い減少することがわかる。これは、尾数の増加に伴い最寄りの個体との距離を一定に保とうとする魚群特有の特性が働いたためと考えられる。

#### b) 尾数変化に伴う対地速度と遊泳速度

図-11(c)および図-11(d)に着目すると、アユが3尾、5尾、10尾は1尾、2尾と比較して、対地速度  $V_G^i/\overline{B}_L$  および遊泳速度  $V_f^i/\overline{B}_L$  が増加することがわかる。これは、1尾、2尾よりも3尾、5尾、10尾の方が成群力が働き、遊泳中に最寄りの個体から離れた時にアユが最寄りの個体に接近しようと遊泳したためと考えられる。

また、図-12(c)、(d)より尾数の増加に伴い対地速度  $V_{Gz}^i/\overline{B}_L$ 、遊泳速度  $V_{fz}^i/\overline{B}_L$  が増加することがわかる。これは、尾数の増加に伴い最寄りの個体との距離を一定に保とうと各個体が遊泳する速度を変化させたためと考えられる。

#### c) 尾数変化に伴う屈折角度

図-11(e)に着目すると、尾数に関わらず流速の増加に伴い屈折角度  $|\theta_a^i|$  が減少している。これは、流速が増加すると流体から大きな運動量を受け、上流に遊泳するには多くの遊泳力が必要となるため、魚体の  $x$  方向の投影面積を小さくするために屈折角を減少させていると考えられる。また、アユが3尾、5尾、10尾で遊泳する場合の屈折角度  $|\theta_a^i|$  が、1尾、2尾で遊泳する場合の値よりも小さい。これは、アユが3尾、5尾、10尾で遊泳する場合、流速の増加に伴い流下方向に細長い楕円形状となり、この形状を保つために魚向の変化が緩慢になったためと考えられる。

また、図-12(e)よりアユが3尾、5尾、10尾は1尾、2尾と比較して、屈折角度  $|\theta_z^i|$  が増加することがわかる。これは、尾数の増加に伴い最寄りの個体との距離を一定に保とうと各個体が屈折する角度を変化させたためと考えられる。

#### d) 尾数変化に伴う個体間距離

図-11(f)に着目すると2尾の個体間距離  $D_{fa}^{\text{II}}/\overline{B}_L$  は、流速の増加に伴い顕著に増加している。一方、3尾、5尾、10尾の個体間距離  $D_{fa}^{\text{III}}/\overline{B}_L$ 、 $D_{fa}^{\text{V}}/\overline{B}_L$ 、 $D_{fa}^{\text{X}}/\overline{B}_L$  は全てに流速においてほぼ一致した。また、図-12(f)に着目すると2尾の個体間距離  $D_{fz}^{\text{II}}/\overline{B}_L$  は、流速の増加に伴い顕著に減少している。一方、3尾、5尾、10尾の個体間距離  $D_{fz}^{\text{III}}/\overline{B}_L$ 、 $D_{fz}^{\text{V}}/\overline{B}_L$ 、 $D_{fz}^{\text{X}}/\overline{B}_L$  は全てに流速においてほぼ一致した。これは、2尾の場合は魚群でないために個体間誘引力が弱い、3尾、5尾、10尾の場合では最寄りの個体との距離を一定に保とうとする魚群特有の特性によって生じたものと考えられる。

### (4) 尾数変化による遊泳特性の変化率

図-13(a)～(f)に図-11(a)～(f)で得られた尾数変化における各遊泳特性のガンマ分布の係数  $\alpha$  の値、 $L_{Ga}^i/\overline{B}_L$ 、 $L_{fa}^i/\overline{B}_L$ 、 $V_{Ga}^i/\overline{B}_L$ 、 $V_{fa}^i/\overline{B}_L$ 、 $|\theta_a^i|$ 、 $D_{fa}^i/\overline{B}_L$  の各一次直線の傾き  $L_{Ga(\text{gra})}$ 、 $L_{fa(\text{gra})}$ 、 $V_{Ga(\text{gra})}$ 、 $V_{fa(\text{gra})}$ 、 $\theta_{a(\text{gra})}$ 、 $D_{a(\text{gra})}$  および切片  $L_{Ga(\text{int})}$ 、 $L_{fa(\text{int})}$ 、 $V_{Ga(\text{int})}$ 、 $V_{fa(\text{int})}$ 、 $\theta_{a(\text{int})}$ 、 $D_{a(\text{int})}$  をプロットで、最小二乗法で求められたこれらの諸量と各尾数  $N$  との関係を線形式で示す。また、図-14(a)～(f)においても図-12(a)～(f)で得られた尾数変化における各遊泳特性のガンマ分布の係数  $\lambda$  の値から同様に示した。

#### a) 尾数変化に伴う対地距離と遊泳距離の傾きと切片

図-13(a)および図-13(b)に着目すると、尾数の増加に伴い対地距離と遊泳距離の傾き  $L_{Ga(\text{gra})}$ 、 $L_{fa(\text{gra})}$  および切片  $L_{Ga(\text{int})}$ 、 $L_{fa(\text{int})}$  は共に減少した。このことから、尾数の増加に伴い流速の増加による対地距離および遊泳距離の変化が小さくなることが判明した。また、3尾以上で遊泳する場合の対地距離と遊泳距離の変化率は共に小さくなっている。このことから、3尾以上から各流速において対地距離と遊泳距離を一定に保つように

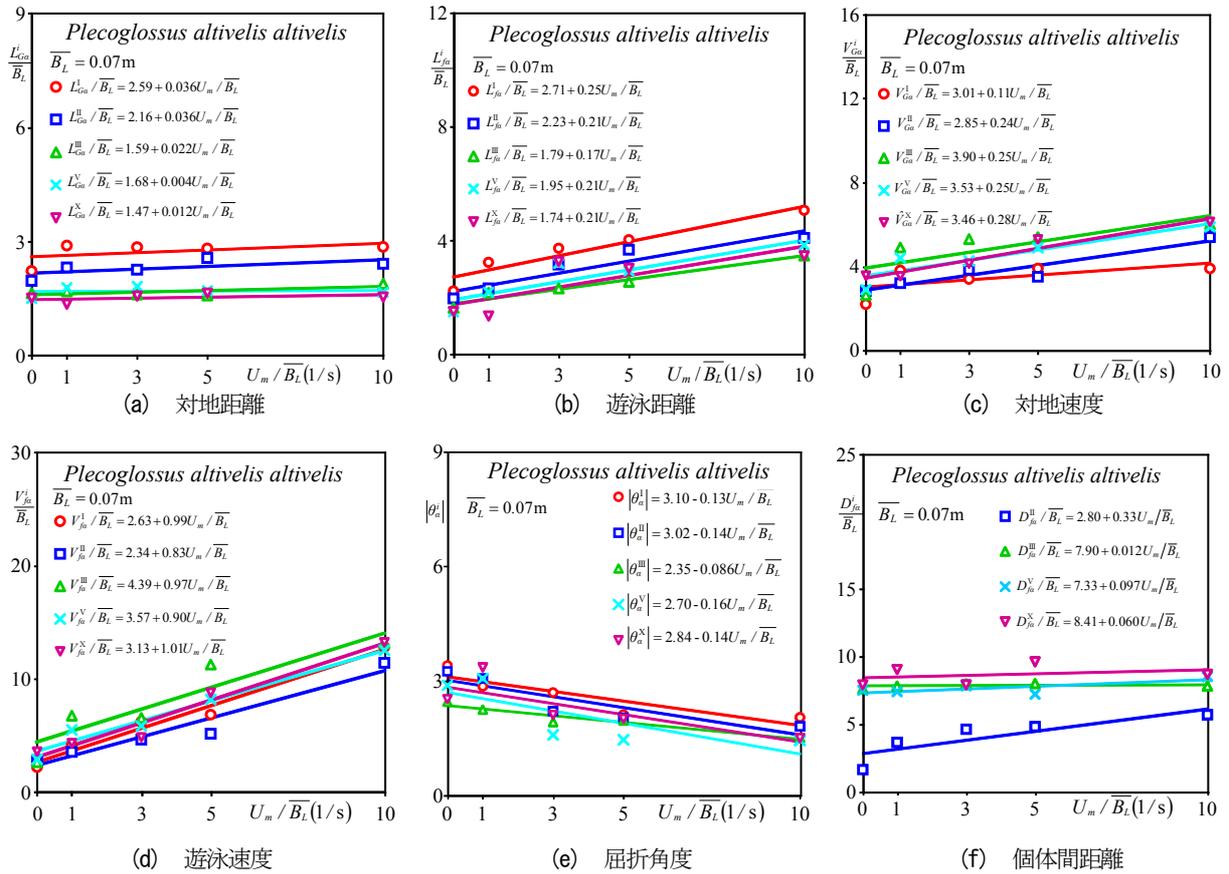


図-11 尾数変化に伴う各遊泳特性の係数 $\alpha$ の値と体長倍流速との関係

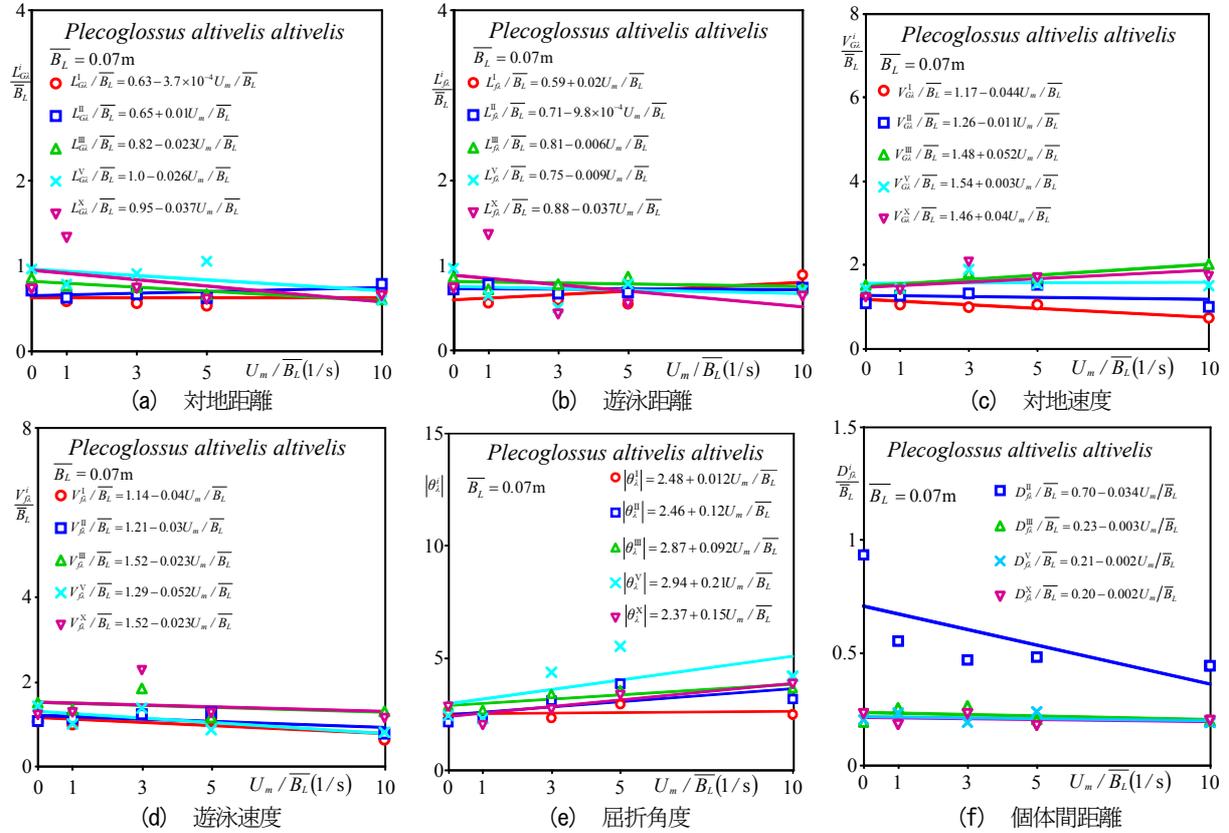


図-12 尾数変化に伴う各遊泳特性の係数 $\lambda$ の値と体長倍流速との関係

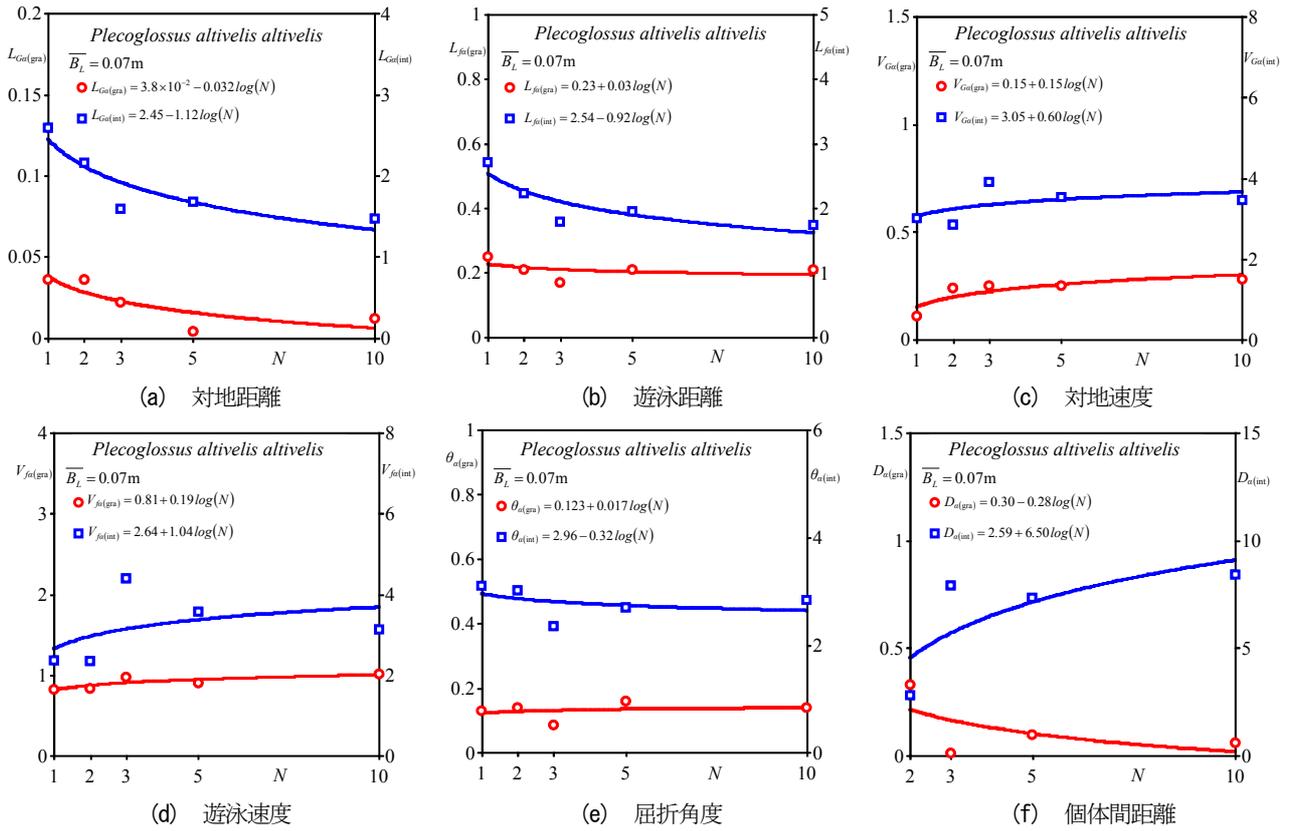


図-13 尾数変化に伴う係数 $\alpha$ の傾きと切片の変化

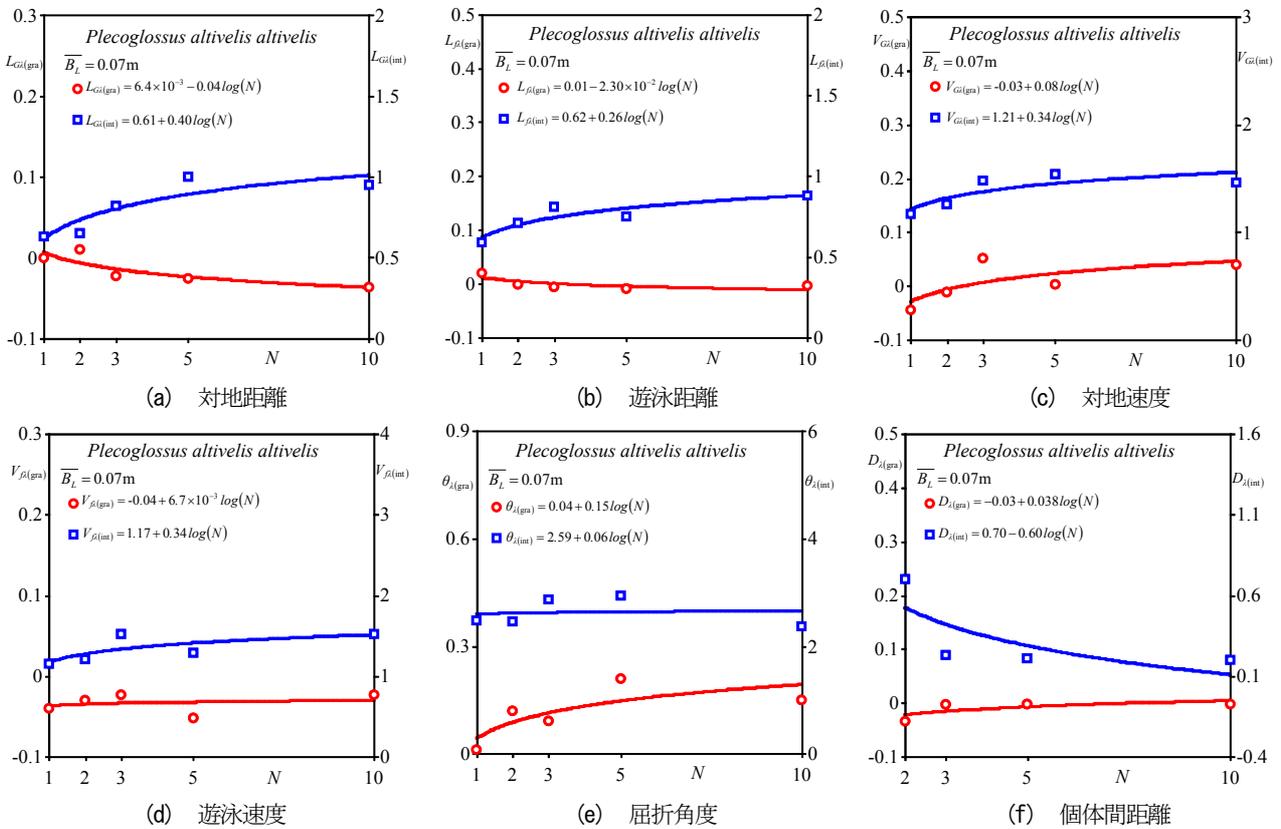


図-14 尾数変化に伴う係数 $\epsilon$ の傾きと切片の変化

遊泳することが判明した。

また、図-14(a), (b)より尾数の増加に伴い対地距離および遊泳距離の傾き $L_{G\lambda(\text{gra})}$ ,  $L_{\beta\lambda(\text{gra})}$ は減少し、切片 $L_{G\lambda(\text{int})}$ ,  $L_{\beta\lambda(\text{int})}$ は増加した。このことから、尾数の増加に伴い流速の増加による対地距離および遊泳距離の変化が小さくなることが判明した。

#### b) 尾数変化に伴う対地速度と遊泳速度の傾きと切片

図-13(c)および図-13(d)に着目すると、尾数の増加に伴い対地速度と遊泳速度の傾き $V_{G\lambda(\text{gra})}$ ,  $V_{\beta\lambda(\text{gra})}$ および切片 $V_{G\lambda(\text{int})}$ ,  $V_{\beta\lambda(\text{int})}$ は共に増加した。このことから、尾数の増加に伴い流速の増加による対地速度および遊泳速度の変化が大きくなることが判明した。これは、尾数の増加に伴いアユの遡上意欲が増し、対地速度と遊泳速度が増加したものと考えられる。

また、図-14(c), (d)より尾数の増加に伴い対地速度と遊泳速度の傾き $V_{G\lambda(\text{gra})}$ ,  $V_{\beta\lambda(\text{gra})}$ および切片 $V_{G\lambda(\text{int})}$ ,  $V_{\beta\lambda(\text{int})}$ は共に増加した。これは、尾数の増加に伴い最寄りの個体との距離を一定に保とうと各個体が遊泳する速度を変化させたためと考えられる。

#### c) 尾数変化に伴う屈折角度の傾きと切片

図-13(e)に着目すると、尾数の増加に伴い屈折角度の傾き $\theta_{\lambda(\text{gra})}$ は増加し、切片 $\theta_{\lambda(\text{int})}$ は減少した。このことから、尾数の増加に伴い流速の増加による屈折角度の変化が大きくなることが判明した。これは、尾数の増加に伴い魚群の形状を保つために魚向の変化が緩慢になったためと考えられる。

また、図-14(e)より尾数の増加に伴い屈折角度の傾き $\theta_{\lambda(\text{gra})}$ および切片 $\theta_{\lambda(\text{int})}$ は共に増加した。これは、尾数の増加に伴い最寄りの個体との距離を一定に保とうと各個体が屈折する角度を変化させたためと考えられる。

#### d) 尾数変化に伴う個体間距離の傾きと切片

図-13(f)に着目すると、尾数の増加に伴い個体間距離の傾き $D_{\lambda(\text{gra})}$ は減少し、切片 $D_{\lambda(\text{int})}$ は増加した。このことから、尾数の増加に伴い流速の増加による個体間距離の変化が小さくなることが判明した。また、3尾以上で遊泳する場合の個体間距離の変化率は共に小さくなっている。これは、魚群に属するアユは最寄りの個体との個体間距離を一定に保とうとする成群力が強く働いたため変化率が小さくなったと考えられる。

また、図-14(f)に着目すると、尾数の増加に伴い個体間距離の傾き $D_{\lambda(\text{gra})}$ は増加し、切片 $D_{\lambda(\text{int})}$ は減少した。これは、魚群に属するアユは最寄りの個体との個体間距離を一定に保とうとする成群力が強く働いたため変化率が小さくなったと考えられる。

## 4. おわりに

本研究は、室内の開水路を用いて流速および尾数を系統的に変化させて、養殖アユの挙動の変化を解析し

たものである。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 体長倍流速を0~10倍の範囲で変化させる流水中における1尾~10尾のアユの挙動は直線(branch)と屈折(node)によって表現した。
- (2) 連続する屈折(node)の位置から屈折角度、対地距離を求め、体長倍流速を加味することで、遊泳距離を算出した。また、対地距離と遊泳に要した時間から、対地速度が算出され、対地速度に体長倍流速を加味することで、遊泳速度を算出した。
- (3) 1尾~10尾のアユの対地距離(遊泳距離)、対地速度(遊泳速度)、屈折角度および個体間距離はガンマ分布で表現した。その結果、流速の増加および尾数の増加がアユの遊泳特性に大きく影響することが確認できた。
- (4) 1尾~10尾のアユの各遊泳特性のガンマ分布の係数 $\alpha$ ,  $\lambda$ と流速の関係を線形式で示した。また、線形式より算出された係数 $\alpha$ ,  $\lambda$ の傾きおよび切片と尾数の関係を線形式で示した。その結果、尾数の増加に伴いアユの遊泳特性の変化が小さくなることが確認できた。また、各遊泳特性の係数 $\alpha$ ,  $\lambda$ の傾きおよび切片に流速を代入することでガンマ分布を再現できた。このことから、導き出した線形式に尾数および流速を代入することによりアユの各遊泳特性を算出し、アユの挙動を予測することができた。

以上のように、流速および尾数の変化に伴う養殖アユの挙動の解明はできた。今後は、実河川の状態を考慮して壁面による影響および周辺魚による影響の解析を行う必要がある。

謝辞：本研究を実行する上で協力頂いた竹内光，白杵幸平，福田拓也の諸氏に謝意を表す。

## 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，有元貴文，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) 鬼東幸樹, 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) 鬼東幸樹, 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) 高水克哉, 栗原朋之, 青木宗之, 内山文哉, 福井吉孝: 杭水制内外的流れと魚の挙動, 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) 鬼東幸樹, 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.
- 24) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 竹内光, 大西浩史: 流速変化が2尾のアユの遊泳特性に及ぼす影響, 水工学論文集, 第55巻, pp.1441-1446, 2011.
- 25) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 三原和也, 白岡敏: 流速変化によるアユの魚群の遊泳特性, 水工学論文集, 第56巻, pp.655-660, 2012.
- 26) Pitcher, T.J.: The three-dimensional structure of schools in the minnow, *Phoxinus phoxinus* (L.), *Anim. Behav. Anim. Behav.*, Vol.21, pp.673-686, 1973.
- 27) 石川雅昭: ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究, 河川技術論文集, 第6巻, pp.101-106, 2000.
- 28) 中村俊六: 魚道のはなし, 山海堂, 1995.

(2014. ? . ?? 受付)

## COMPARISON OF EFFECTS OF VELOCITY ON SWIMMING BEHAVIOR OF AYU BY NUMBER CHANGE

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Kazuya MIHARA,  
Bin SHIRAOKA and Yoichi HIRANO

Partridge showed that a group was formed of three or more and the leader did not exist. However, swimming behavior of changing the number of fish in running water has not been investigated. In this study, the swimming behavior of isolated or couple or trio or quintet or dectet of ayu in running water was investigated. It was found that the top change rate, the ground speed and swimming speed increases with an increase of the number of fish and also that the ground distance and swimming distance decreases with an increase of the number of fish. And, it was found that the change for swimming behavior of ayu became slow of three or more.