

魚群内尾数がアユの遡上特性に与える影響

EFFECTS OF SCHOOL POPULATION ON MIGRATION CHARACTERISTICS OF AYU

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・関強志³・高山輝貴⁴
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Tsuyoshi SEKI and Teruki TAKAYAMA

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

It has been considerably investigated on the factors that ayu are triggered migration from ocean to river. However, there are few studies that observed migration characteristics of ayu in the river. There is no collective view of migration characteristics of ayu in the river, because contradict observation results were obtained in the fishway. One of the reasons may depend on the school population, because ayu has a tendency to follow the swimming front ayu. In this study, the behavior of fish school of ayu in running water was analyzed. It was found that staying tendency increases with an increase of school population, so that the migration rate decreases with an increase of school population. The distance between each ayu decreases with an increase of school population. Further, it was found that the fluctuation of streamwise ground speed in upstream migration type is high and also that the fluctuation of spanwise ground speed in downstream migration type is high.

Key Words : school population, fish school radius, distance between individual fish, ground speed

1. はじめに

アユの遡上を誘発する因子は多数存在する。以下では各因子に着目してアユの遡上特性をレビューする。

アユが海洋から河川に遡上を開始する要因はかなり解明されている。まず、海水温の上昇がアユの遡上を誘発する¹⁾。遡上期のアユは前歴水温よりも5°C以上低い水域を忌避し²⁾、前歴水温程度の水域を選好するため³⁾、河口域で待機していたアユは、河川水温が海水温とほぼ等しくなると河川へと遡上を開始する⁴⁾。上記は月単位の挙動であるが、日単位の挙動も解明されつつある。和田ら⁵⁾は特定の時間に遡上数が増加することを発見した。笹ら⁶⁾および佐藤ら⁷⁾は上げ潮時に遡上量が増加すること、和田⁸⁾は低潮時よりも満潮時の遡上数が増加することを解明した。また、上記の因子の関連性や影響の大きさも解明されつつある⁹⁾。

次に、河川に進入した後のアユの遡上特性に着目する。ところが、河川内でのアユの遡上状況を詳細に観察した研究はほとんど無く、京都府を貫流する宇川ではアユは

夜間に遡上せずに日中に遡上し、12~16時に遡上数が最大になることを解明した川那部ら¹⁰⁾の研究以外は見あたらない。そのため、河川内の中でも魚道という特殊な状態で得られた遡上特性を参考にして河川内での魚の遡上特性を推定せざるを得ない。

まず、時間と遡上数の関係に着目する。佐合ら¹¹⁾は吉井川に設置された大田原堰魚道において、13、16、19時にアユの遡上数がピークになると述べた。泉ら¹²⁾は赤石第2頭首工魚道において、16~18時に遡上数がピークになると述べた。福田ら¹³⁾は信濃川妙見堰魚道において、午後にアユの遡上が集中し、午前中はほとんど遡上しないと述べた。しかし、川越ら¹⁴⁾は岩木川に設置された魚道において8~20時の間、ほぼ定常的に遡上すると述べている。

次に、水温と遡上数との関係に着目する。平野ら¹⁵⁾は五ヶ瀬川の岩熊井堰中央魚道において、遡上数は15~20°Cで多く、17°C前後でピークを示すと述べたが、川那部ら¹⁰⁾は17~18°Cを越えた時にピークを示すと述べた。

続いて、濁度と遡上数との関係に着目する。小田・今

島¹⁶⁾は低濁度よりも高濁度の時に遡上数が増加すると指摘した。ところが、小山・桜井³⁾が55~750ppmの間で3種類の濁度に変化させた水と清流を同時に流してアユを放流したところ、アユは清流を選択することを明らかにした。本田²⁾はさらに低濃度で実験を行い、アユは15ppm以上の水を忌避することを示した。

以上のように、河川中におけるアユの遡上特性については統一の見解がほとんど得られていない。これは、アユの遡上に影響を及ぼす因子が、時刻、水温、濁度、BOD、COD、魚群内尾数等と複数存在するにも関わらず^{17,18)}、現地計測ではこれらの因子が同時に変化した状態で遡上数をカウントすることに一因がある。この中で魚群内尾数の変化が遡上特性に及ぼす影響についてはほとんど解明されていない。一般に、アユには追従性があるため、魚群内尾数が増加すると群れの挙動も変化すると考えられる。既往の研究で一日に観察された遡上数は、福田ら¹³⁾が33尾、佐合ら¹¹⁾が102尾、川越ら¹⁴⁾が185尾、泉ら¹²⁾が472および741尾、平野ら¹⁵⁾が約10,000尾であり、統一した結果が得られないのは、遡上特性が水理および水質の影響だけでなく、魚群内尾数によっても影響を受けたことも一因と推定される。

本研究は開水路流中において、流速を一定にした状態でアユの尾数を1~10尾に変化させて魚群の挙動を解析したものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に示すような長さ4.0m、幅 $B=0.8\text{m}$ 、高さ0.2mの底面が白色で側壁が透明な水路を実験に用いた。流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸、横断方向に z 軸をとる。実験条件は表-1に示すように、水深を0.05mに、体長倍流速を10で固定し、用いるアユの尾数 N を1~10の範囲で5段階に設定した。アユの平均体長 \bar{B}_L は70mmである。水路始端から3.3m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、所定の尾数のアユを挿入する。アユを挿入して5~10秒馴致させ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。全てのアユが水路始端に到達、または全てのアユが水路終端から流出した時に撮影を終了した。ただし、撮影開始から1分以上経過しても水路内に魚群が定位している場合は1分で撮影を中止した。上記の実験を各ケースで100回、合計500回を行い、計測後、全てのアユの遊泳位置を0.2sごとに算出した。ただし、金網を取り上げた直後に1尾以上が水路終端から流下してしまった場合は、魚が意図的に降下したのではなく、金網を除去した影響で降下したと考

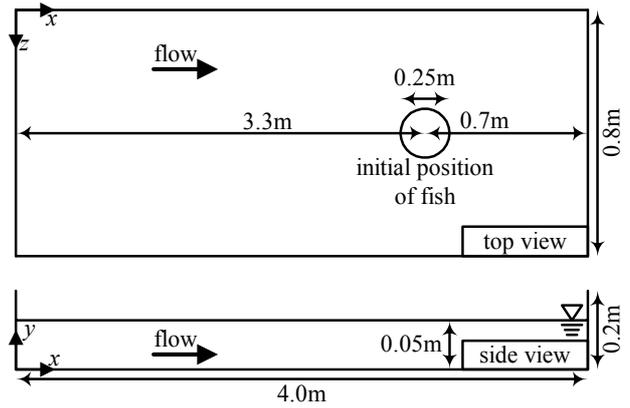


図-1 実験装置模式図

表-1 実験条件

\bar{B}_L (m)	0.07				
h (m)	0.05				
U_m / \bar{B}_L (1/s)	10				
N	1	2	3	5	10

え、解析から除外したため、解析に用いたデータ数はアユの尾数が1尾、2尾、3尾、5尾、10尾のとき、それぞれ41個、71個、61個、73個、82個となった。

3. 実験結果および考察

(1) 魚群挙動の分類

観察の結果、魚群の挙動は図-2に示す5つのタイプに分類されることが分かった。

a) 魚群停滞タイプ(staying type)

流水中において初期尾数を維持した状態で魚群を形成して遊泳しているが、対地速度がほぼゼロの状態でも長時間停滞しているタイプ。

b) 魚群遡上タイプ(upstream migration type)

初期尾数を維持した状態で魚群を形成して遊泳し、水路始端まで遡上するタイプ。

c) 魚群降下タイプ(downstream migration type)

初期尾数を維持した状態で魚群を形成して遊泳し、水路終端まで降下して流出するタイプ。

d) 部分遡上タイプ(partial upstream migration type)

魚群を形成して遊泳し、対地速度がほぼゼロの状態でも長時間停滞しているが、一部の魚だけが魚群から抜けだし、単独で水路始端まで遡上するタイプ。

e) 部分降下タイプ(partial downstream migration type)

初期尾数を維持した状態で魚群を形成して遊泳し、水路終端まで降下して流出するが、一部の魚が水路に留まるタイプ。

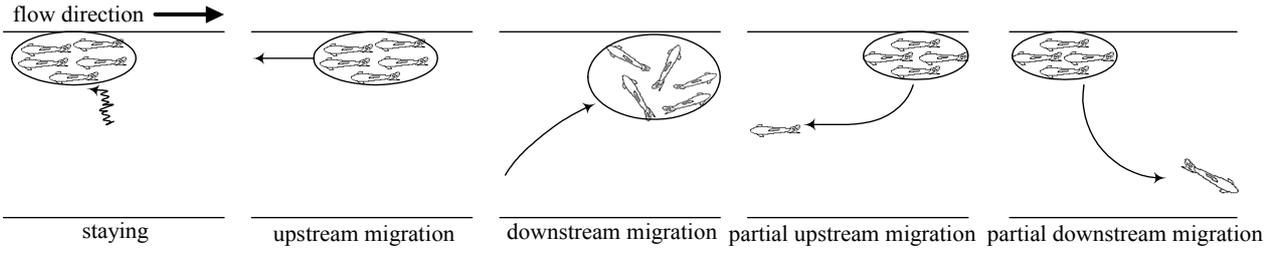


図-2 魚群の遊泳挙動タイプ

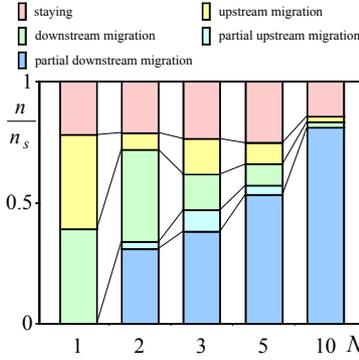


図-3 各挙動タイプの割合

図-3に各実験ケースにおける各タイプ数 n が有効実験数 n_s に占める割合と尾数 N との関係を示す。魚群遡上率、魚群降下率は尾数の増加に伴い低下する。三宮ら¹⁹⁾は静止流体中のタイリクバラタナゴの魚群内尾数が3尾以上の場合、リーダーが存在せずに各個体間距離を一定に保とうとすることを明らかにした。また、尾数が増加すると個体間距離を保つべき対象が増加し、数尾が遡上や降下を開始してもより多くの魚が存在する魚群に停滞すると想定できる。したがって、本実験において尾数の増加に伴って遡上率、降下率が低下したと推測される。

部分遡上率はいずれのケースにおいても少ない。これは上記のように魚群から単独で遡上を行う傾向が少ないためと考えられる。一方、部分降下率については尾数の増加に伴って急激に増加している。この理由については後に考察する。魚群停滞率は尾数による変化が余り見られない。しかし、魚群停滞タイプと部分遡上タイプの違いは、魚群から一部の魚が遡上するか否かであり、両タイプともほとんどの魚は群れに属して停滞している。したがって、両タイプを統合して考えると、魚群内尾数の増加に伴って魚群が停滞する傾向が強まるといえる。

(2) 各魚群タイプの形状

初期尾数を維持した状態の魚群は、魚群停滞、魚群遡上および魚群降下タイプなので、ここではこれら3つのタイプの魚群挙動を解析する。

石川²⁰⁾の定義した魚群半径を2次元に拡張すると次式となる。

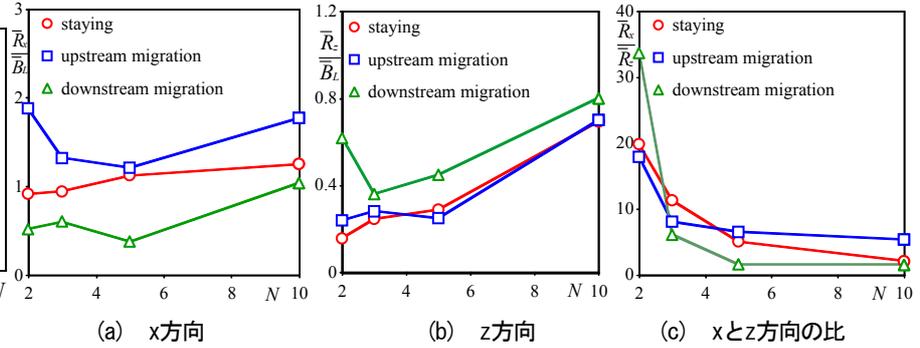


図-4 魚群半径

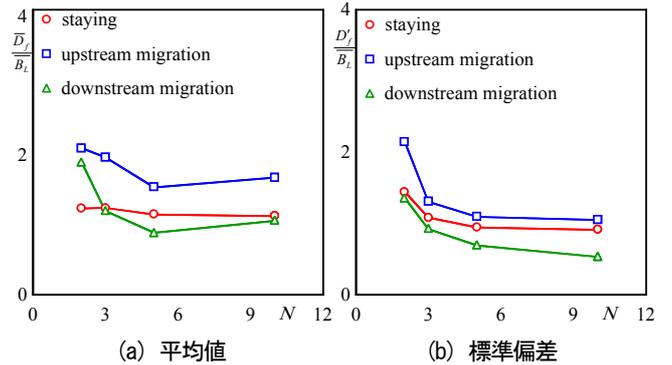


図-5 個体間距離

$$R_x \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{x_{fi} - G_x\}^2}{N}} \quad (1.a)$$

$$R_z \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{z_{fi} - G_z\}^2}{N}} \quad (1.b)$$

ここに、 R_x 、 G_x 、 x_{fi} はそれぞれ x 方向の魚群半径、魚群重心の x 座標、任意 i の魚の x 座標であり、 z についても同様な定義である。図-4(a)~(c)にそれぞれ有効実験回数の平均値 \bar{R}_x 、 \bar{R}_z を平均体長 \bar{B}_L で除した値および両者の比 \bar{R}_x / \bar{R}_z と尾数 N との関係を示す。図-4(a)より \bar{R}_x / \bar{B}_L については魚群遡上が最も大きく魚群降下が最も小さいことがわかる。一方、図-4(b)より \bar{R}_z / \bar{B}_L については逆傾向である。よって、図-4(c)に示されるように、3タイプのいずれも \bar{R}_x / \bar{R}_z は1以上の値を示し流下方向に細長い形状をしているが、尾数が増加

すると魚群遡上タイプは流下方向に細長い形状となり、魚群降下タイプは円に近い形状となる。また魚群停滞タイプは両者の中間的な魚群形状を示すことが確認できる。

瞬間個体間距離 \tilde{D}_f は石川²⁰⁾の定義に従い、各魚の間隔を全て算出してその平均値とした。従って、10尾の場合は45距離の平均となる。各ケースにおいて実験時間で時間平均値 D_f を算出し、さらに、有効実験数の平均値 \bar{D}_f および標準偏差 D'_f を算出し、**図-5**に3タイプの \bar{D}_f / \bar{B}_L および D'_f / \bar{B}_L を示した。**図-5(a)**より、3タイプにおける個体間距離が尾数の増加と共に減少傾向を示すことが認められる。これは、尾数の増加に伴い平均個体間距離 \bar{D}_f / \bar{B}_L を小さくする傾向があるためと考えられる。タイプ別に比較すると、魚群遡上タイプにおける平均個体間距離が他のタイプよりも大きいことが確認される。これは、魚群形状が流下方向に細長い形状であることが原因である。一方、**図-5(b)**より個体間距離の標準偏差はいずれのタイプでも尾数の増加と共に減少していることが認められる。これは、尾数が増加すると周囲に位置する魚の数が増加するために、自由に遊泳できる範囲が減少したことによると考えられる。タイプ別に比較すると、魚群遡上タイプの値が大きく魚群降下タイプの値が小さいことが認められる。魚群遡上する場合は、各個体が流水中で尾鰭を激しく揺らして遡上するため、魚体の相対位置がぶれることが原因と考えられる。魚群降下の値が減少する理由については後に考察する。

(3) 各魚群タイプの移動特性

図-6(a)、**(b)**に0.2sごとに求められた x 、 z 方向の魚群重心の瞬間対地速度 $\tilde{V}_{Gx} / \bar{B}_L$ 、 $\tilde{V}_{Gz} / \bar{B}_L$ のヒストグラムをそれぞれ尾数別に示す。図中には実験値から求めた正規分布も示している。ここで、 \tilde{V}_{Gx} 、 \tilde{V}_{Gz} は上流方向および右岸方向を正とした。**図-6(a)**より魚群停滞タイプは上下流に移動しているが、その平均値がほぼゼロであることがわかる。魚群遡上および魚群降下タイプは正値および負値の両者を有するが、平均値がそれぞれ正および負であること、また魚群停滞タイプに比べてばらつきが大きいことが観察される。一方、**図-6(b)**より、いずれのタイプも左右にランダムに移動しているが、平均値はほぼゼロであることがわかる。魚群降下タイプのばらつきが他の2タイプのものに比べて大きくなっている。

図-7(a)、**(b)**に x 、 z 方向の魚群重心の平均対地速度 \bar{V}_{Gx} / \bar{B}_L および \bar{V}_{Gz} / \bar{B}_L を示す。当然、魚群停滞タイプの平均対地速度 \bar{V}_{Gx} / \bar{B}_L は全尾数でほぼゼロである。魚群遡上タイプおよび魚群降下タイプの平均対地速度 \bar{V}_{Gx} / \bar{B}_L の絶対値は尾数の増加と共に減少する。これは、尾数の増加に伴い周囲に位置する魚の数が増加するため、魚群中央の魚は遡上や降下を開始しにくくなるた

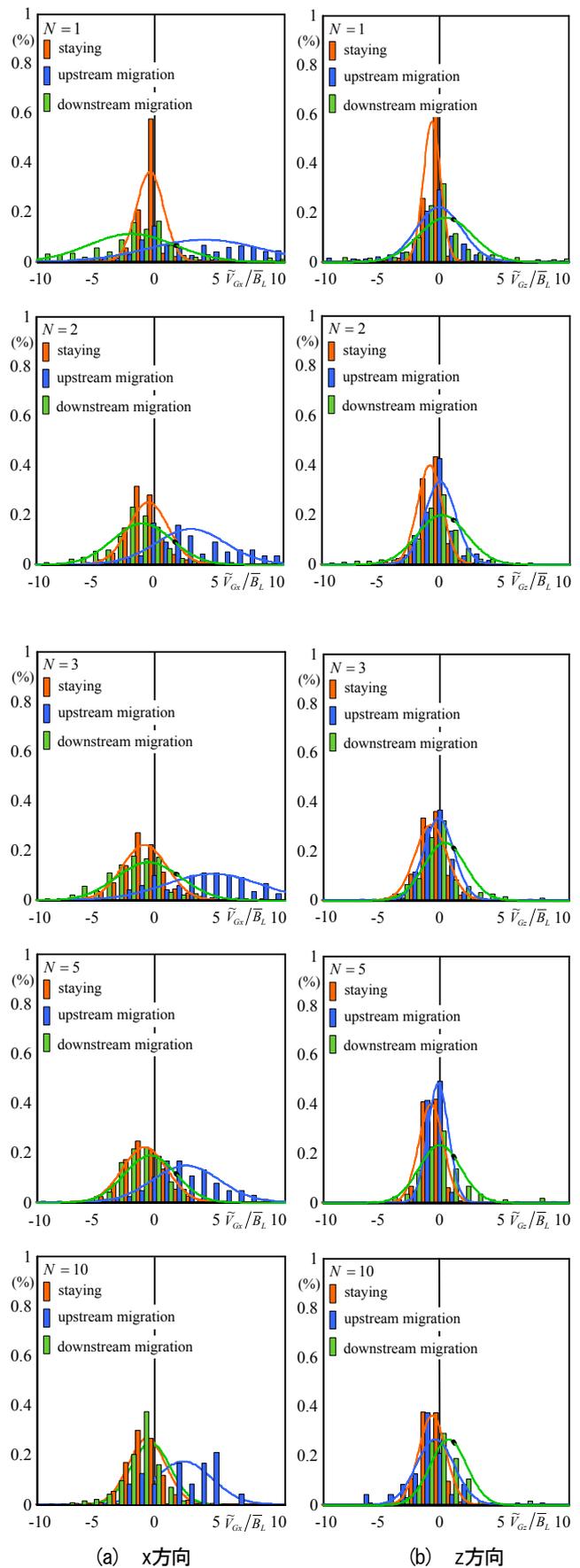


図-6 瞬間対地速度ヒストグラム

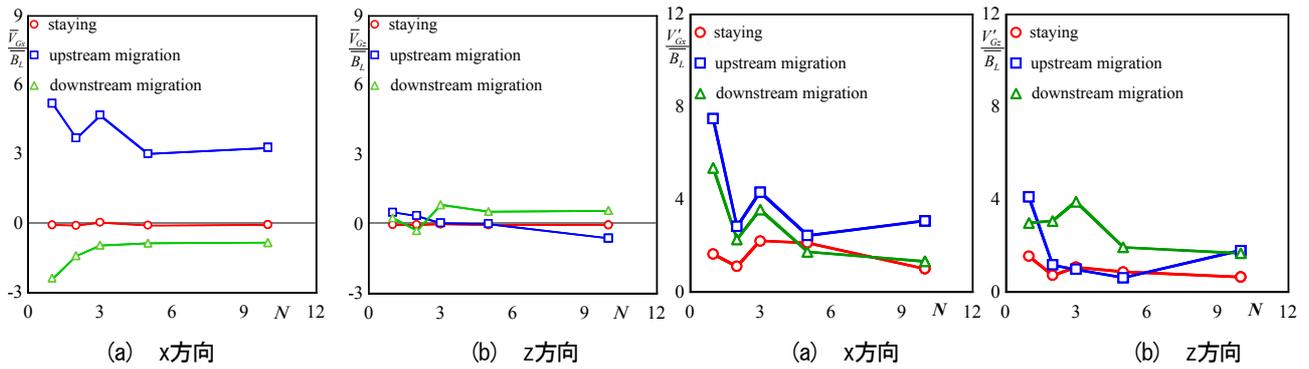


図-7 平均対地速度

図-8 対地速度の標準偏差

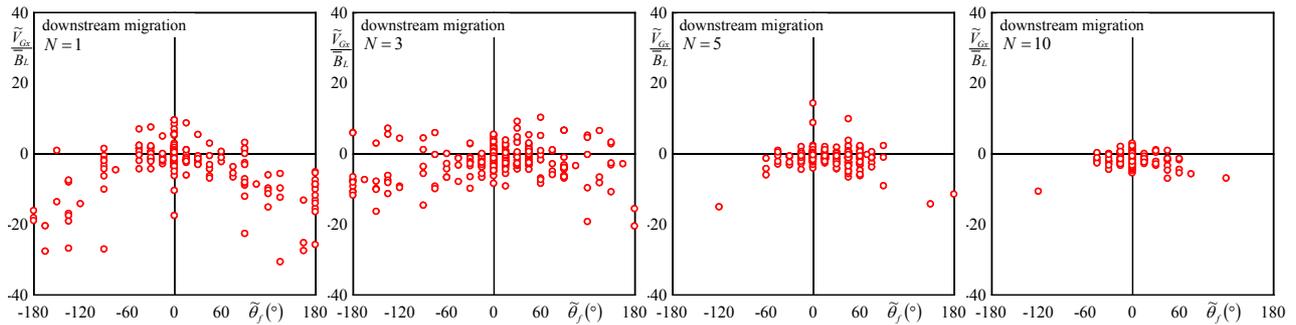


図-9(a) 降下する直前の5秒間における瞬間魚向とx方向の瞬間対地速度との関係

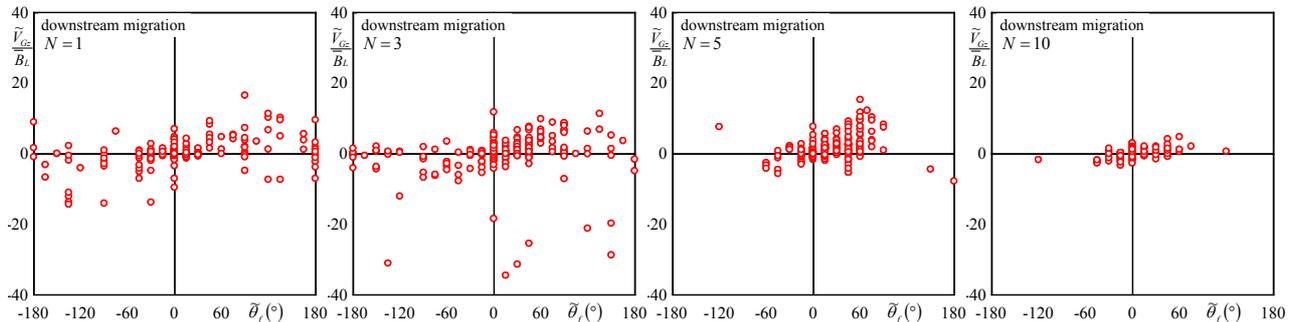


図-9(b) 降下する直前の5秒間における瞬間魚向とz方向の瞬間対地速度との関係

めと想定される。また、個体間距離を一定に保とうとするため、魚群に停滞する傾向が強まった結果と考えられる。一方、平均対地速度 \bar{V}'_{Gz}/\bar{B}_L は多少のばらつきがあるが、全タイプでもほぼゼロである。

図-8(a), (b)に x, z 方向の魚群重心の対地速度の標準偏差 $V'_{Gx}/\bar{B}_L, V'_{Gz}/\bar{B}_L$ と尾数 N との関係を示す。魚群停滞タイプは両標準偏差共に小さな値を示す。よって、魚群は比較的流下方向にも横断方向にも変動せずに停滞している。魚群遡上タイプは V'_{Gz}/\bar{B}_L よりも V'_{Gx}/\bar{B}_L の値が顕著に大きく、魚群降下タイプはその逆となっている。したがって、魚群遡上タイプは横断方向にはあまり変動せずに上下流に大きく変動しながら遡上している。この理由として、横断方向よりも流下方向の乱れ強度が大きい²¹⁾ことが挙げられる。乱れ強度が大きいと、各魚体位置が上下流に変動させられる。すると、

各魚体が選好する個体間距離から差違が生じる。この差違を修正するために各魚体は流下方向の速度調整を行う。その結果、流下方向の標準偏差が大きくなると想定される。しかし、魚群降下タイプが逆傾向となることを解明するには、さらに魚群内の各個体の挙動を解明する必要がある。

(4) 魚群降下タイプの特異性

魚群の形状は、流水抵抗の低減を考慮すると図-4に示した魚群遡上タイプのように、流下方向に細長い形状が有利である。しかし、魚群降下タイプは、円形に近い形状の魚群を形成し(図-4)、横断方向の対地速度が激しく変動している(図-8)。この理由を解明するために、図-9(a), (b)に降下する直前の5秒間における瞬間魚向 $\tilde{\theta}_f$ と x 方向瞬間対地速度 $\tilde{V}'_{Gx}/\bar{B}_L$ 、および瞬間魚向 $\tilde{\theta}_f$ と

z 方向瞬間対地速度 $\tilde{V}_{Gz} / \bar{B}_L$ との関係を示す。図-9(a)より尾数が少ないときの瞬間魚向 $\tilde{\theta}_f$ は広範囲であるのに対し、尾数が増加すると $\tilde{\theta}_f$ の範囲は狭くなる。また、瞬間対地速度 $\tilde{V}_{Gx} / \bar{B}_L$ のばらつきも尾数の増加と共に減少する。これは、尾数の増加に伴い周囲の魚と同様な挙動をとるからである。一方、図-9(b)より、いずれの尾数でも右上がりの傾向を示すことがわかる。これは、右岸方向を向いた魚が右岸方向に、左岸方向を向いた魚が左岸方向に移動していることを表す。すなわち、魚が上流向きから右岸あるいは左岸向きになったとき、流水の運動量を受けるためにその方向に移動することを意味する。また、図-9(a)を見ると、瞬間魚向 $\tilde{\theta}_f$ が 0° からはなれるにつれて $\tilde{V}_{Gx} / \bar{B}_L$ が負値になっていることから、この時魚が下流に流されていることが理解される。尾数の増加に伴い、図-9(b)における右上がり傾向からのばらつきが減少している。よって、尾数の増加に伴い周囲の挙動と同調するために、ある魚が魚向を変化させると周囲の魚も同調する。すると、流体の運動量を受けて下流に流出すると考えられる。

4. おわりに

本研究は、開水路流において体長倍流速を10で固定し、用いるアユの尾数を1~10の範囲で5段階に設定し、魚群行動の特性を解明したものである。以下に結論を示す。

- (1) 魚群の挙動は、①魚群で停滞するタイプ、②魚群で遡上するタイプ、③魚群で降下するタイプ、④魚群で遡上するが一部の魚が水路に留まるタイプ、⑤魚群で降下するが一部の魚が水路に留まるタイプ、の5つに分類される。
- (2) 本実験条件下では尾数が増加すると魚群は停滞傾向が強くなることが確認された。これは、各個体が魚群に属した状態を好み、遡上あるいは降下を挑まないために生じたものと考えられる。
- (3) 魚群の遡上速度および魚群降下速度は尾数の増加に伴い低下する。これは、各魚が個体間距離を一定に保とうとするため、魚群に停滞する傾向が強まった結果と考えられる。
- (4) 魚群で遡上する際は流下方向に細長い形状となる。一方、魚群で降下する際は横断方向の幅が増加する。この場合、各魚の向きが流れと平行でなくなり、流れの運動量を受けて流出する。

参考文献

- 1) Tsukamoto, K. and Uchida, K.: Spacing and jumping behavior of the Ayu *Plecoglossus altivelis*, *Nippon Suisan Gakkaishi*, Vol.56, pp.1383-1392, 1990.
- 2) 本田晴朗：アユの遡河行動におよぼす濁りおよび水温低下の影響，月刊海洋科学，第15巻，第4号，pp.223-225，1983.

- 3) 小山長雄，桜井義雄：木曾三川河口資源調査報告書，第2巻，p.129-134，1965.
- 4) 堀田秀之：海産稚鮎の生態に於いて，魚類学会誌，Vol.19，No.1，pp.15-20，1953.
- 5) 和田清，出水規行，大堀文彦：長良川河口堰の魚道における塩水遡上の動態と水生生物の生息分布・遡上行動に関する一考察，河川技術論文集，第10巻，pp.423-428，2004.
- 6) 笹浩司，後藤浩一，実松利朗，島田啓一，井口謙，和田清：長良川中下流域における稚アユの遡上特性と遡上量調査の効率化に関する一考察，河川技術論文集，第11巻，pp.453-458，2005.
- 7) 佐藤隆平，菅原政一，大塚勝章，安藤享一：鳴瀬堰付設階段式魚道におけるアユ及びサケの遡上調査，水産工学，Vol.29，No.2，pp.123-126，1992.
- 8) 和田吉弘：アユの溯上と魚道構造の関係，ダム技術，No.39，pp.34-42，1990.
- 9) 永矢貴之，白石芳樹，笠瀬明日香，鬼束幸樹，東野誠，高見徹，東均，秋山壽一郎，小野篤志：アユの遡上を誘発および阻害する環境因子の抽出と各環境因子間の関係，河川技術論文集，第15巻，pp.91-96，2009.
- 10) 川那部浩哉，宮地伝三郎，森圭一，原田英司，水原洋城，大串竜一：遡上アユの生態II，京大生理生態業績，第79巻，No.2，pp.145-167，1956.
- 11) 佐合純造，本多卓志，大木孝志，田中直也：大田原堰魚道におけるアユの遡上実験報告，水工学論文集，第42巻，pp.493-498，1998.
- 12) 泉完，高屋大介，工藤明，東信行：赤石川赤石第2頭首工のアイスハーバー型魚道における魚類等の遡上・水理特性，農業土木学会論文集，No.215，pp.75-84，2001.
- 13) 福田晴耕，伊藤弘之，田部成幸，稲川貢，田中衛，片野英喜：信濃川妙見堰における魚道調査，第2回河道の水理と河川環境シンポジウム論文集，pp.135-142，1995.
- 14) 川越信清，泉完，工藤明，三上亘：頭首工魚道における魚介類の遡上と水理，弘大農報，No.61，pp.148-157，1997.
- 15) 平野克己，岩槻幸雄，三村文孝，八木征雄，尾田成幸：岩熊井堰中央魚道におけるアユ遡上について，水産増殖，第44巻，1号，pp.1-6，1996.
- 16) 小田光治，今島要：魚梯ニ於ケル魚梯遡上状況調査，広島水産試験，第13巻，pp.133-153，1936.
- 17) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995.
- 18) (財)ダム水源地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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, 1993.

(2010.9.30 受付)