

静止流体中を2尾で遊泳するアユの遊泳特性

SWIMMING BEHAVIOR OF A COUPLE OF AYU,
PLECOGLOSSUS ALTIVELIS ALTIVELIS, IN STATISTIC WATER

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・山本晃義³・脇健樹⁴

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Akiyoshi YAMAMOTO and Takeshi WAKI

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 工学研究科博士前期課程

⁴非会員 (株)サンリブ (〒804-8550 北九州市小倉北区金田1-3-33)

Fishway is designed to facilitate fish migration over the artificial structures such as weir and dam. Therefore, it is important to understand the design condition of fishway and the behavior of fish. Schooling behavior of fish has been investigated by many researchers. However, the swimming behavior of isolate or a couple of fish has not been investigated. Onitsuka *et al.* investigated on the swimming behavior of isolated ayu, *Plecoglossus altivelis altivelis*, in statistic water. In this study, the swimming behavior of a couple of ayu was investigated. It was found that the swimming trajectory of ayu can be described by nodes and branches. The frequencies of the swimming distance and angle between each branch are modeled by the gamma distribution. The swimming distance for each branch decreases in compared with that of isolate ayu.

Key Words : ayu, node, branch, swimming distance, angle, statistic water, swimming behavior

1. はじめに

堰やダム等の河川横断構造物によって水位落差が発生する。そのため、魚の遡上が困難となった河川には遡上を可能にするために様々な形式の魚道が建設された。遡上可能な魚道を設計する上で、魚道内の魚の挙動を把握することは重要である¹⁻⁵⁾。現在、魚の行動把握の方法は、魚群を1つの物体と捉える方法と個々の魚を追跡する方法に分けられる。魚群とはPartridge⁶⁾および兼廣ら⁷⁾が定義した3尾以上のグループのことである。

魚群の速度はスキニングソナーで計測可能である。井上⁸⁾はサケ、マイワシ、ゴマサバ、ウマズラハギ、トビウオの魚群速度が0.3m/s程度であること、金ら⁹⁾は魚群の直進時間の最頻値がマアジは1分、ゴマサバおよびカタクチイワシは2分であることを明らかにした。

個々の魚の挙動を解明したものととして、フナ、カワムツ、カマツカ、コイおよびウグイに発信機を取り付けて河川に放流し、その挙動を解明した佐々木ら¹⁰⁾の研究が挙げられる。傳田ら¹¹⁾はテレメトリー法を拡張したATS(Advanced Telemetry System)を開発し、面積1haの実験池を遊泳するゲンゴロウブナ¹²⁾の挙動を追跡し、詳細な

遊泳軌跡の解明を行った。二瓶ら¹²⁾はタイリクバラタナゴが1尾あるいは2尾で遊泳している状況を撮影し、魚の遊泳速度および加速度の時系列データを得た。鬼束ら¹³⁾は1尾で遊泳するアユの遊泳軌跡が直線と屈折によって構成されることを解明し、直線部の遊泳速度、遊泳距離および屈折点の屈折角を実験によって求めた。関谷ら¹⁴⁾および下村ら¹⁵⁾はアユおよびウグイの挙動を画像解析を用いて解析し、その結果をランダムウォークの手法に適用することで、アユおよびウグイの遊泳行動のシミュレーションに成功した。大橋・清水¹⁶⁾は魚の抗力および推進力を用いた運動方程式を用いて魚の挙動をシミュレートした。橋本ら¹⁷⁾はBoid型魚群行動モデルを用いて魚群内における個々の魚の挙動をシミュレートした。

以上のように魚群あるいは1尾で遊泳する魚の挙動は徐々に解明されつつある。しかし、2尾で遊泳する魚の挙動は、二瓶ら¹²⁾が行ったタイリクバラタナゴを対象とした研究以外ほとんどない。アユは群れで遡上を行うがアユには互いに引き付けあう力、いわゆる個体間誘引力¹⁸⁾が働く。そのため、群れで遡上する魚の挙動を把握するためには個体間誘引力を解明することが必要となる。

本研究では個体間誘引力が遊泳特性に与える影響を解明するための第一歩として、静止流対中における2尾の

表-1 各ケースのパラメータ

case name	115dII	105dII	95dII	85dII	75dII
d (m)	1.15	1.05	0.95	0.85	0.75
$d / \overline{B_L}$	12.1	11.1	10.0	8.95	7.89
$\overline{n_{fb}}$	11.84	9.51	8.68	8.5	7.74
$\overline{n_{fn}}$	12.84	10.51	9.68	9.5	8.74
$\overline{n_{sb}}$	10.71	9.38	9.06	8.17	7.17
$\overline{n_{sn}}$	11.71	10.38	10.06	9.17	8.17

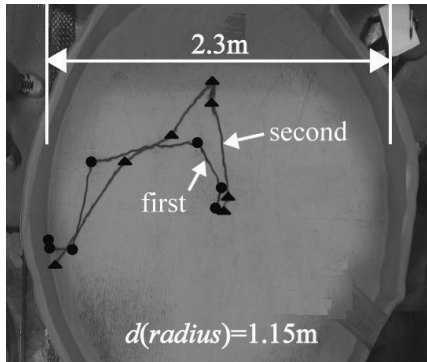


図-1 遊泳軌跡(115dII)

アユの挙動を解明した。この結果を前報¹³⁾で得られた1尾のアユの挙動と比較することで、個体間誘引力による遊泳特性の変化が把握できる。

2. 実験装置および実験条件

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200尾用いた。養殖アユと天然アユは遊泳特性に違いが生じる可能性があるため、本研究結果が天然アユに適応できるかどうかは現時点で不明である。平均体長 $\overline{B_L}$ は0.095m, 最小, 最大体長はそれぞれ0.083m, 0.108mである。

半径1.15m, 高さ0.4mのビニール製円形水槽を実験に用いた。アユは壁面選好性¹⁹⁾を有するため、遊泳特性が水槽半径に影響を受ける可能性がある。そのため、円形水槽内に高さ0.4mの円形段ボールパネル壁を設置することで、表-1に示すように半径 d を0.75m~1.15mの間で5ケースに変化させた。表中の記号の定義は後述する。なお、既往の研究²⁰⁾²¹⁾より反射光の色が異なると魚の遊泳に影響を与える可能性があるため、壁面の色は全て青色で統一した。

本来魚の遊泳は3次元解析を行うことが妥当であるが、解析が困難であり、2次元解析すらあまり行われていないことから、今回は遊泳挙動の2次元解析を行った。カルキを抜いた水温24℃の水道水を水槽に入れ、水深は0.05mとした。内径0.15m, 高さ0.2mの塩化ビニール製の中空パイプを円形水槽中心に設置し、パイプ内に任意のアユを2尾挿入する。挿入直後はパイプ内でアユが激し

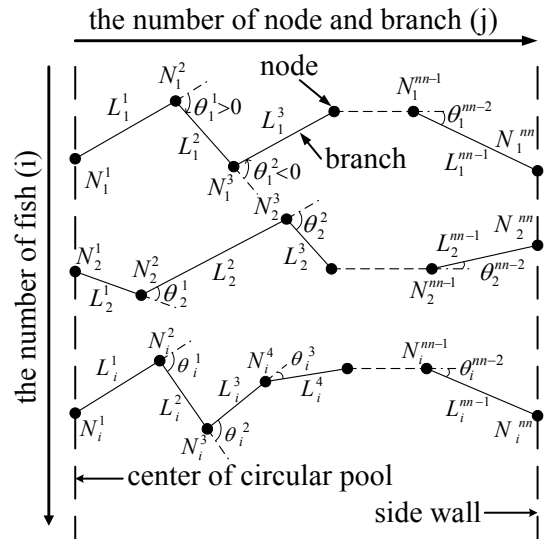


図-2 模式図

く遊泳するが、しばらくすると落ち着きを取り戻す。その後、パイプを取り除くと同時に水槽の3m上方に設置したビデオカメラで2尾のアユが壁面に到達するまでの様子を撮影する。この計測を5つの半径においてそれぞれ100回(合計500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30フレーム/sである。遊泳開始から2尾のアユが水槽壁面に到達するまでの遊泳軌跡を解析した。

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¹³⁾は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に本研究で得られた遊泳軌跡をトレースした一例(115dII)を示す。図中の屈折部に丸印および三角印を示したが、前者が先に壁面に到達した個体(first), 後者が後に到達した個体(second)である。2尾が寄り添いながら遊泳する様子が観察され、他のケースでも同様であった。これは孤立した1尾が遊泳する場合と、2尾で遊泳する場合では各魚の挙動が異なることを示唆する。ただし、両者の挙動は1尾の場合と同様にbranchおよびnodeで再現できると判断される。そのため、遊泳軌跡を前報¹³⁾と同様に、図-2のようにモデル化する。遊泳距離を L , 屈折位置を N , 屈折角度を θ , branch数を n_b , node数を n_n とした。 θ は右回転を正, 左回転を負とした。遊泳開始からのbranchおよびnode番号を右上に添字 j で示す。first, second, 2尾合計の諸量は右下の添字 F , S , B で表す。また、データ番号を i で, i 平均(全魚平均)を $\overline{}$ で, j 平均(全遊泳平均)を $\wedge$ で示す。表-1中にfirst, secondの平均branch数 $\overline{n_{fb}}$, $\overline{n_{sb}}$ および平均node数 $\overline{n_{fn}}$, $\overline{n_{sn}}$ を示す。

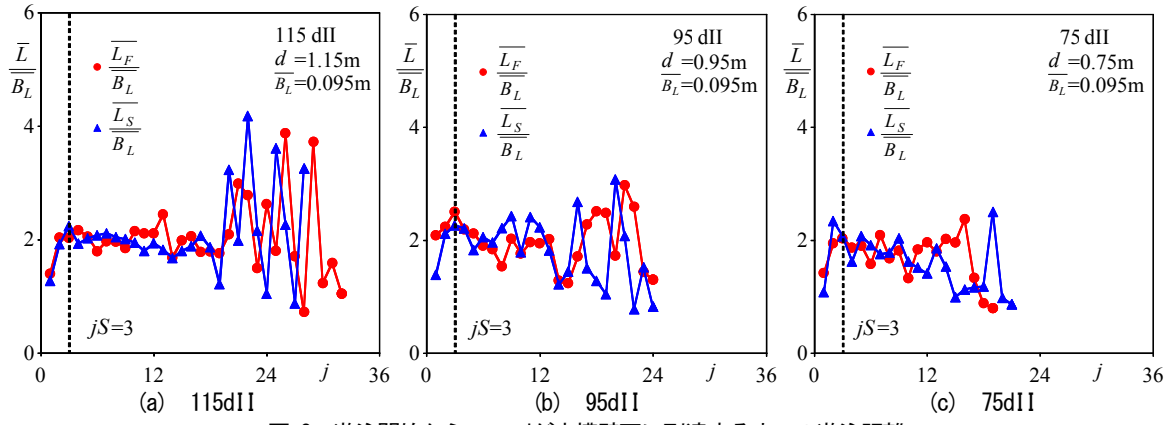


図-3 遊泳開始からsecondが水槽壁面に到達するまでの遊泳距離

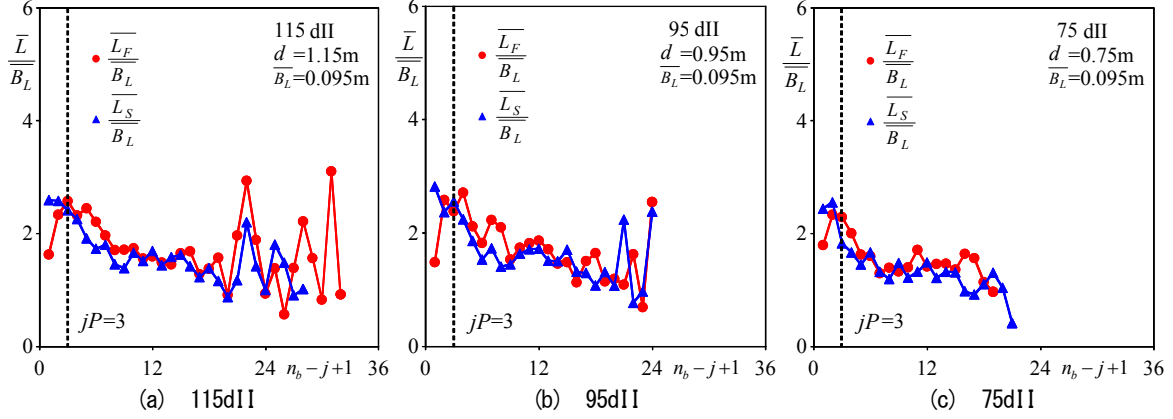


図-4 secondが水槽壁面に到達してから遊泳開始までの遊泳距離

(2) 普遍遊泳状態の抽出

前報¹³⁾では1尾で遊泳するアユの挙動を初期遊泳、普遍遊泳および壁面効果遊泳に分離した。これは、中空パイプを抜き取った後にしばらく状況の急変に動揺すること、また、壁面の存在を確認すると壁面に近づくという性質があること¹⁹⁾を考慮したものである。2尾のアユが遊泳する場合も、同様に初期および壁面による遊泳挙動への影響が懸念される。

図-3に各半径における遊泳開始からsecondが水槽壁面に到達するまでのfirstとsecondの遊泳距離の全魚平均 $\bar{L}$ を平均体長 $\bar{B}_L$ で無次元化した値を115dII, 95dII, 75dIIについて示す。firstおよびsecondとも、各半径における遊泳距離 $\bar{L}/\bar{B}_L$ は遊泳開始直後に急増しその後一定となっている。そこで、遊泳距離が一定になるまでの状態を初期遊泳と判断した。全ケースを観察した結果、初期遊泳は $1 \leq j < 3$ の範囲と判断した。なお、一定値を示した後に変動しているのは、屈折回数の多いデータが少なかったために生じたばらつきである。

図-4に各半径におけるsecondが水槽壁面に到達してから遊泳開始までのfirstとsecondの遊泳距離の全魚平均 $\bar{L}$ を平均体長 $\bar{B}_L$ で無次元化した値を115dII, 95dII, 75dIIについて示す。firstおよびsecondとも、いずれのケースでもsecondが水槽壁面に到達する直前に急増している。そこで、壁面効果遊泳は $n_b - 2 < j \leq n_b$ の範囲と判断した。従って、普遍遊泳は $3 \leq j \leq n_b - 2$ となり、 n_b が4以下の

魚は普遍遊泳が存在しないと判断する。 n_b が4以下の屈折を繰り返さない魚は短時間で壁面に到達していた。初期遊泳と壁面効果遊泳の範囲は単独で遊泳するアユの値¹³⁾と一致する。以後、普遍遊泳を開始するnode番号を jS 、普遍遊泳を終了するnode番号を jP とする。

(3) 普遍遊泳の特性

普遍遊泳での遊泳距離の全魚平均値は次式となる。

$$\text{普遍遊泳の全魚平均遊泳距離} = \frac{1}{jP - jS} \sum_{j=jS}^{jP} \bar{L}_i^j / \bar{B}_L \quad (1)$$

図-5に115dII, 95dII, 75dIIにおける普遍遊泳中間時 ($j = \text{int}((jS + jP)/2)$)におけるfirstとsecondの遊泳距離のヒストグラムを示す。図には各 j nodeにおける全魚平均遊泳距離 $\bar{L}_i^j / \bar{B}_L$ を点線で、普遍遊泳区間における全魚遊泳距離を黄色の実線で示している。いずれのケースも低値で高頻度を示し、高値方向に裾をもつ同様の形状を示している。つまり、普遍遊泳領域の遊泳距離は今回用いた水槽の半径およびnode数に依存しないことおよびfirst, secondの間に差異はないことを示唆する。そこで、この分布形状を再現するために、ガンマ分布を採用した。

$$f(L_i^j / \bar{B}_L) = \frac{1}{\Gamma(\lambda_L)} \alpha_L^{\lambda_L} (L_i^j / \bar{B}_L)^{\lambda_L - 1} e^{-\alpha_L L_i^j / \bar{B}_L} \quad (2)$$

$$\Gamma(\lambda_L) = \int_0^\infty e^{-x} x^{\lambda_L - 1} dx \quad (3)$$

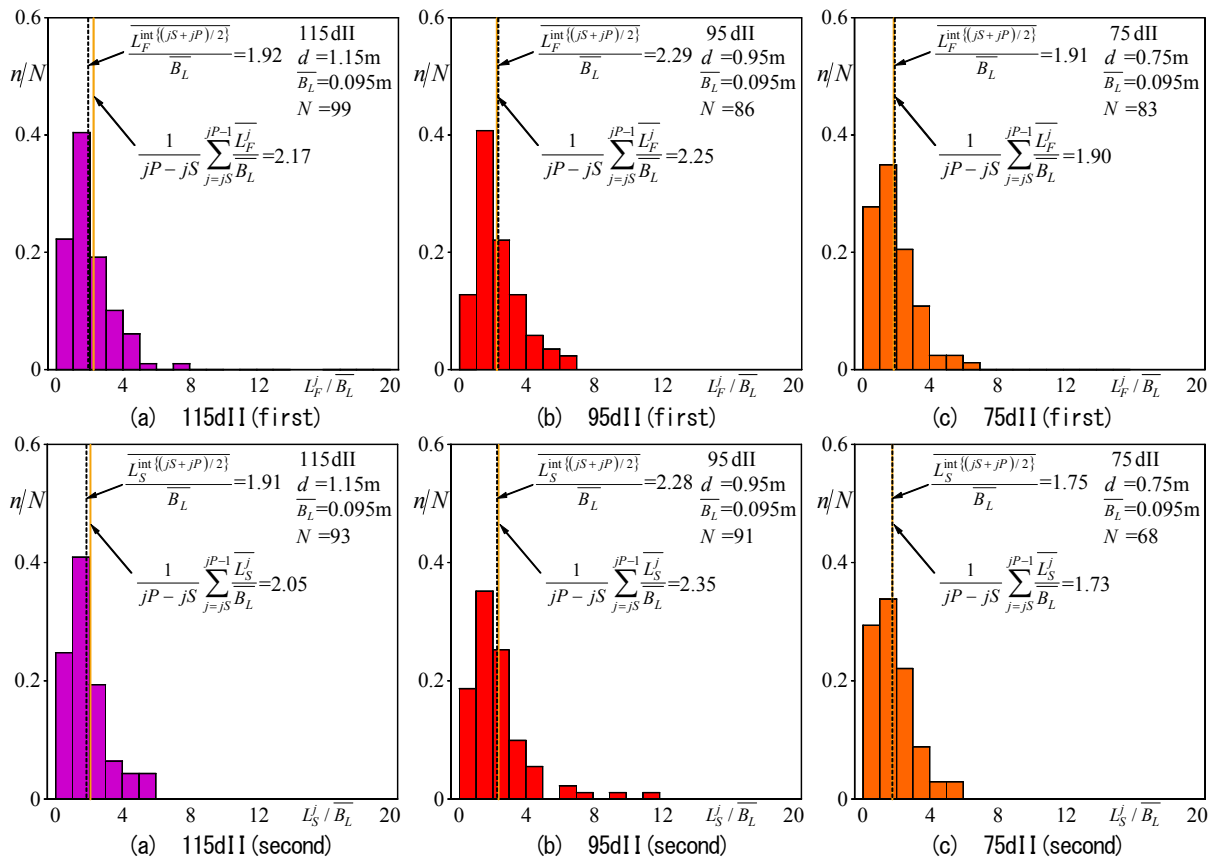


図-5 普遍遊泳中間時における遊泳距離ヒストグラム

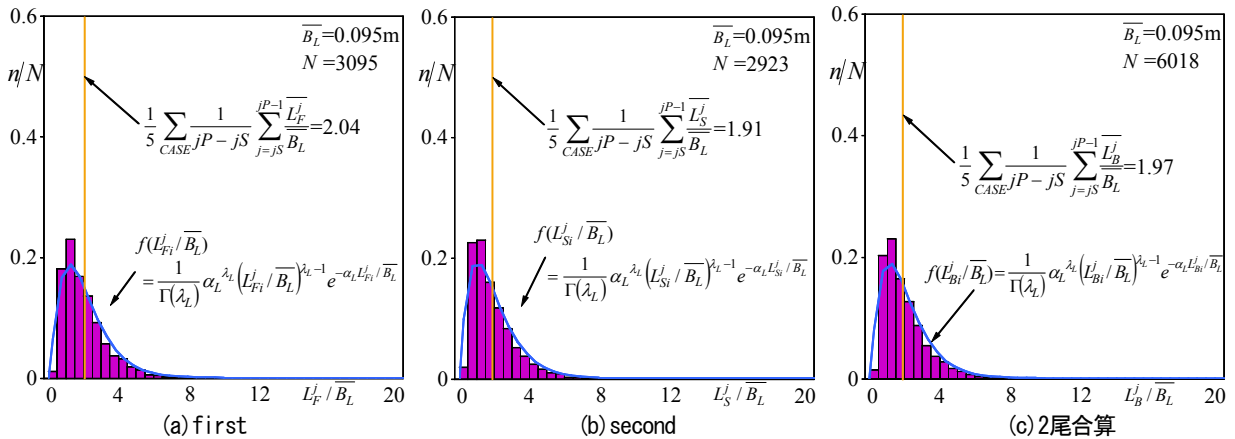


図-6 first, secondおよび2尾合算の遊泳距離ヒストグラム

普遍遊泳における全ての半径における結果を図-6に示すと共に、実測値が式(2)、(3)に最もフィットするように係数 α_L 、 λ_L を算出し、図-6中に曲線で示した。ガンマ分布によって普遍遊泳における魚の遊泳距離が再現されている。表-2にfirst, secondおよび両者の平均値の係数 α 、 λ を示すと共に、孤立した1尾のアユの結果¹³⁾を併示する。2尾の場合の平均値 λ/α は約2.0、分散 λ/α^2 は約1.8に対し、孤立した1尾の λ/α は約2.5、 λ/α^2 は約1.8であり、遊泳距離のばらつきは尾数が増えただけで、遊泳距離は孤立した1尾の場合よりも2尾の方が25%程度減少することが明らかとなった。これは2尾間の誘引力によって生じたものと考えられる。すなわち、アユは個体間の距離を一定に保とうとするため、遊泳距離が減少したと考えられる。

表-2 遊泳距離のガンマ分布の諸量

	α	λ
first	1.19	2.42
second	1.09	2.07
2尾合算	1.13	2.23
1尾単独 ¹³⁾	1.40	3.53

(4) 屈折特性および屈折角

2尾のアユの遊泳における屈折方向がランダムであるかどうかを検討する。図-7に2尾合算の屈折方向率を半径に対して示す。右および左の屈折方向率が半径に関係なくほぼ0.5を示しており、ランダムな方向に屈折することが理解される。

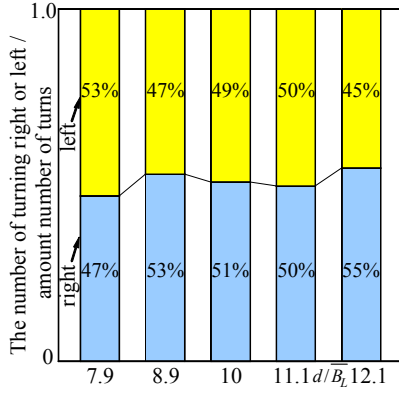


図-7 屈折方向率

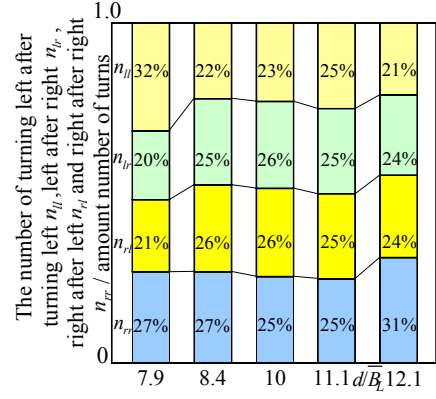
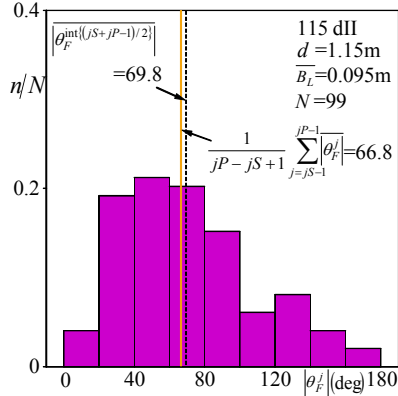
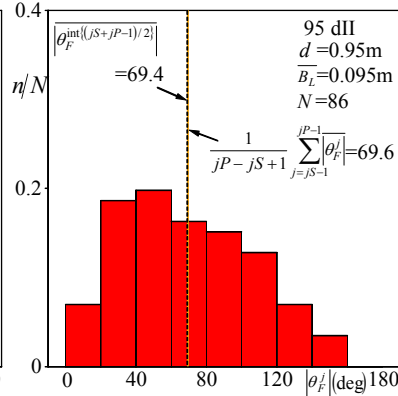


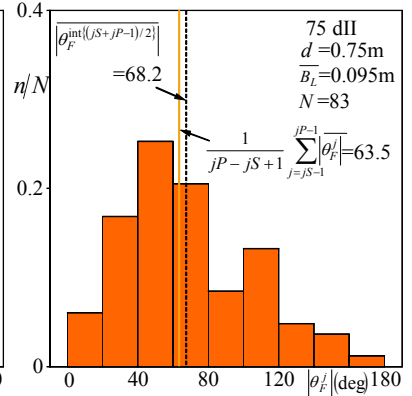
図-8 2連続する屈折方向率



(a) 115dII (first)



(b) 95dII (first)



(c) 75dII (first)

図-9 普遍遊泳中間時における屈折角絶対値ヒストグラム

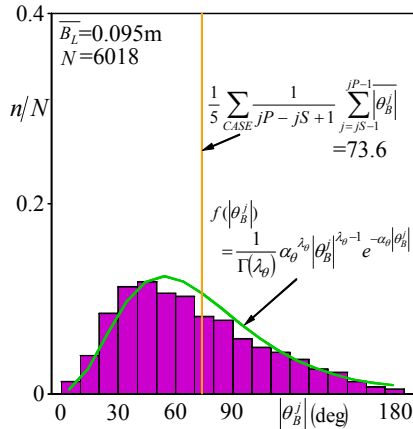


図-10 屈折角絶対値ヒストグラム

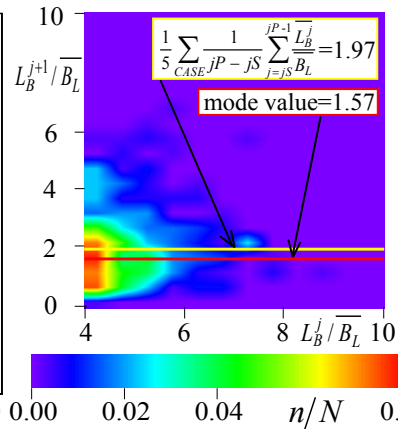


図-11 長距離遊泳後カウンター図

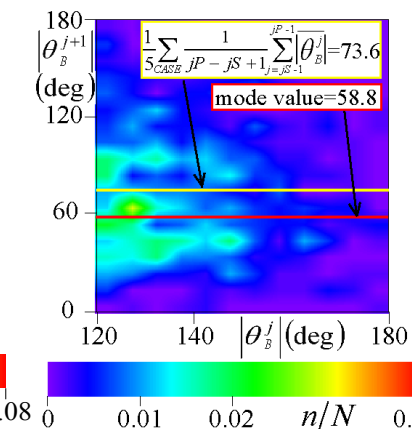


図-12 急屈折後カウンター図

図-8に2尾合算の連続する屈折方向の組み合わせ、すなわち、右右(n_{rr}), 右左(n_{rl}), 左右(n_{lr}), 左左(n_{ll})の割合を示す。図より多少のばらつきはあるが、各値はおおよそ25%前後を示しており、2連続する屈折方向はランダムであると判断される。

図-9に115dII, 95dII, 75dIIにおけるfirstの普遍遊泳中間時($j = \text{int}((jS + jP)/2)$)における屈折角絶対値のヒストグラムを示す。図には各 j nodeにおける屈折角絶対値のnode平均値 $|\theta_i^j|$ を点線で、次式で求められる普遍遊泳における全魚平均を実線で示している。

$$\text{普遍遊泳の全魚平均屈折角} = \frac{1}{jP - jS + 1} \sum_{j=jS}^{jP} |\theta_i^j| \quad (4)$$

これらの図面は遊泳距離と同様に高値方向に裾をもつ形

表-3 屈折角度のガンマ分布の諸量

	α	λ
first	0.052	3.66
second	0.053	4.12
2尾合算	0.053	3.89
1尾単独 ¹³⁾	0.052	3.79

状を示しており、ケース間の差異は認められない。また、図示していないが、firstとsecondに有意な差異は認められなかった。そこで、2尾合算の5ケースの普遍遊泳における屈折角絶対値のヒストグラムを図-10に示すと共に、平均値を直線で示す。図中の曲線はガンマ分布を示し、それにより普遍遊泳における魚の屈折角度が再現されている。表-3に係数 α , λ を示すと共に、孤立した1尾のアユの結果¹³⁾を併示する。平均値 λ/α は2尾が約74°で

1尾が約73° とほぼ同様となった。

(5) 長距離遊泳あるいは急屈折直後の遊泳特性

長距離遊泳あるいは急屈折後の挙動に特徴があるかどうかを検討する。普遍遊泳区間における遊泳距離を降順に並べ替え、上位10%のデータを抽出し、それぞれの遊泳距離を L_i^j とした。続いて、上位10%の遊泳距離の次のbranchの遊泳距離 L_i^{j+1} を抽出した。図-11に2尾合算の両者の関係を示すと共に、普遍遊泳における遊泳距離の平均値および最頻値を線で示した。遊泳距離 $L_i^{j+1} / \overline{B_L}$ の最頻値は普遍遊泳の値1.57に近い値を有している。そのため、長距離遊泳時直後の遊泳距離はランダムと判断される。

屈折角についても同様の解析を行い、屈折角の上位10%の値 $|\theta_i^j|$ および次のnodeの屈折角 $|\theta_i^{j+1}|$ を抽出し、図-12に示した。ややばらつきがあるが、屈折角 $|\theta_i^{j+1}|$ の最頻値は普遍遊泳時の値58.8度に近い値となっている。そのため、急角度で屈折した直後の角度もランダムに発生すると判断される。これは、孤立した1尾のアユの結果と同様である。

4. おわりに

本研究では、静止流体中を2尾で遊泳するアユの挙動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) 2尾のアユの挙動は孤立した1尾と同様に直線と屈折を用いることで再現可能である。また、2尾の遊泳距離、屈折角度などの遊泳挙動はほぼ等しい。
- (2) 遊泳距離の分布はガンマ分布で再現される。遊泳距離の平均値は体長の約2倍であり、孤立した1尾の値の約2.5倍よりも約25%減少する。これは前報¹³⁾との相違点であり、2尾間の誘引力が原因と考えられる。
- (3) 屈折角度はガンマ分布で再現され、平均値は約74°である。これは孤立した1尾の値の約73°とほぼ一致する。
- (4) 長距離を遊泳または急角度で屈折した次の遊泳は直前の遊泳の影響を受けずにランダムな挙動を示す。また、屈折方向もランダムに左右に発生している。

これらの研究結果は静止流体中のものであるため、今後、流水中での遊泳特性を解明する必要がある。

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, 第28回水理講演会論文集, 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) 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.
- 6) Partridge, B.L.(今福道大訳): 魚はどのように群れを維持するか, サイエンス, 日経サイエンス社, Vol.12, No.8, pp.28-38, 1982.
- 7) 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, 12号, pp. 1977-1982, 1985.
- 8) 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.
- 9) 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.473-479, 1993.
- 10) 佐々木丞, 関根雅彦, 後藤益滋, 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 関谷明, 漆山敬二, 福井吉孝, 鈴木辰規: 魚類の迷入防止対策について, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp.137-142, 2000.
- 15) 下村充, 白川裕之, 福井吉孝, 関谷明: 迷入防止法の開発 ランダムウォークによる魚の挙動解析とその応用, 河川技術論文集, 第8巻, pp.337-342, 2002.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 中村俊六: 魚道のはなし, 山海堂, 1995.
- 20) 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.
- 21) 小山長雄: 魚道をめぐる諸問題II, 解説篇, 木曾三川河口資源調査団, 1967.

(2008. 9. 30受付)