

単独で遊泳するアユの挙動に及ぼす側壁の影響

INFLUENCE OF SIDEWALL ON SWIMMING BEHAVIOR OF ISOLATED AYU, *PLECOGLOSSUS ALTIVELIS ALTIVELIS*

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・松田孝一郎³・野口翔平⁴・竹内光⁵
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Koichiro MATSUDA, Shohei NOGUUCHI and Hikaru TAKEUCHI

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

⁴学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

⁵五洋建設株式会社 東京土木支店

Behavior of the fish has been investigated so much. However, the effects of the side-wall on the fish behaviors have not been investigated. In this study, the swimming behavior of isolated ayu in a rectangular open-channel flow was recorded with a digital video camera with changing the velocity. It was found that the fish behavior is affected by the side-wall where the distance from sidewall is less than one time of body length of ayu, so that this area was defined as the side-wall area. The mode value of the ground distance, ground speed, swimming distance and swimming speed in the side-wall area is smaller than those in the universal area, and also that the angle of refraction in the side-wall area is constant, irrespective of flow velocity.

Key Words : *isolated ayu, side-wall area, universal area, angle, running water*

1. はじめに

魚の生息域や行動特性を考慮した河川構造物の設計が望まれており、魚の遊泳挙動を把握することが求められている¹⁻⁴⁾。Sannomiya & Matsuda⁵⁾は魚の遊泳挙動が、前方推進力、個体間引力、側壁との相互作用力、成群力、方向場力、および外乱で構成されるモデルを提案した。魚の前方推進力については、血合筋のみを使用して疲労の蓄積のない持続速度、血合筋および普通筋を使用する中間速度、および主として普通筋を使用する突進速度に分類され⁶⁾、その定量評価も進んでいる⁷⁻¹¹⁾。

個体間引力を検討した研究として兼廣ら¹²⁾の研究が挙げられる。彼らは静止流体中に体長が約46mmのタイリクバラタナゴ(*Rhodeus ocellatus ocellatus*)を2, 3および5尾でそれぞれ放流して観察した結果、尾数と無関係に平均個体間距離が体長の約1.4~1.7倍という結果を得た。

側壁との相互作用力については定性的な指摘は古くからあった。高嶋・中村¹³⁾はアユ(*Plecoglossus altivelis*)

が水路中央ではなく、壁面付近を遊泳することを指摘した。同様な観察例が、松原ら¹⁴⁾、竹内¹⁵⁾、泉ら¹⁶⁾、馬淵ら¹⁷⁾や安田ら¹⁸⁾によっても報告されている。側壁との相互作用力の定量評価は近年始められた。下村ら¹⁹⁾は体長が約150mmのアユ10尾を体長倍流速が2倍(0.3m/s)の開水路流に4回放流したところ、ほぼ全てのアユが壁面付近を遊泳することを解明した。さらにアユの視野が体長の2倍(0.3m)であり、視野内に側壁が存在する場合に壁面に接近するというモデルを提案した。その後、関谷ら²⁰⁾によって、当該モデルにおけるアユの視野が前方および側方視野に分離され、両者の距離は体長の4倍および2倍に変更された。一方、三宮ら^{21,22)}は静止流体中を遊泳する2尾あるいは5尾のタイリクバラタナゴの挙動を観察し、側壁との距離が0.2m以下になると壁面に近づき、0.1m以下になると壁面から遠ざかるというモデルを提案した。

以上のように、魚の遊泳挙動が影響を受ける側壁との距離が定量評価されているものの、魚の遊泳挙動を詳細

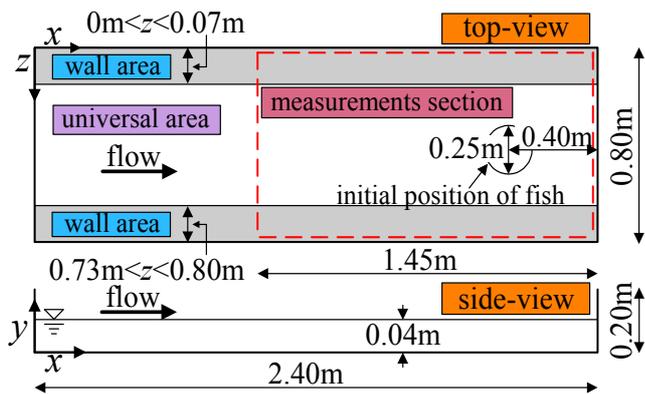


図-1 実験水路概要

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

に解析して得られたものではない。また、これらに及ぼす流速の影響は全くと言っていいほど解明されていない。近年、魚の挙動をシミュレーションすることが試みられているが²³⁻²⁶⁾、この分野においても側壁付近の魚の挙動の解明が望まれている。

本研究は、体長倍流速を0~10の範囲で変化させ、1尾で矩形断面開水路流を遊泳するアユの挙動を観察し、壁面付近の遊泳挙動を解明したものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に示す長さ2.4m、幅 $B=0.8$ 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。水路の上流端から流下方向に0.8mの位置に整流板を設置し、水路の下流端に堰を設置した。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 $h=0.04$ m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。水路床勾配を変化させて等流に設定した。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。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て1尾のアユを挿入し、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30fpsのビデオカメラで撮影を開始する。撮影終了

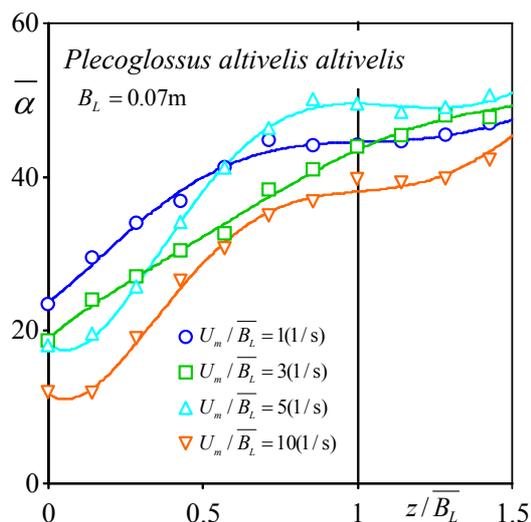


図-2 側壁からの距離と魚向 $\bar{\alpha}$ との関係

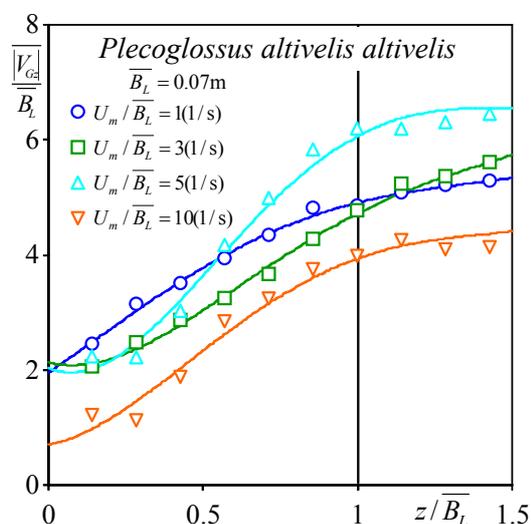


図-3 壁面からの距離と z 方向対地速度との関係

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。 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の格子点で、3次元電磁流速計を用いて流速3成分を0.05s間隔で25.6s計測した。プローブの設置位置は、水深平均流速と同等の流速が発生する底面から水深の4割とした。計測後、 x 、 z 軸方向の時間平均流速 U 、 W および x 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。

鬼束ら^{27,28)}はアユが流水中を1尾あるいは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対地距離 L_G および屈折角度 θ が求められる。 θ は水路を真上から観察した場合の右回転を正、左回転を負と定義した。また、対地距離に流

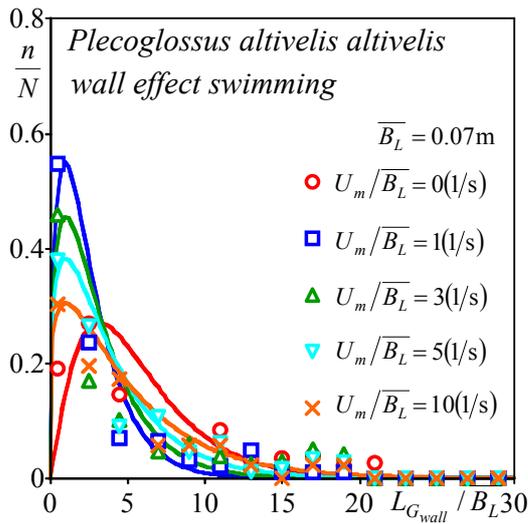


図-4 側壁領域における流速と対地距離との関係

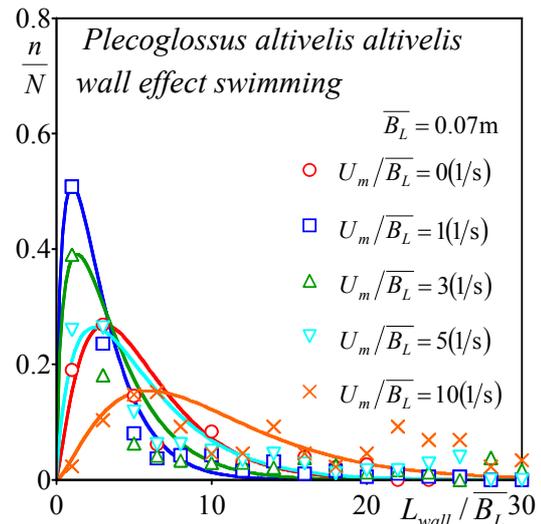


図-5 側壁領域における流速と遊泳距離との関係

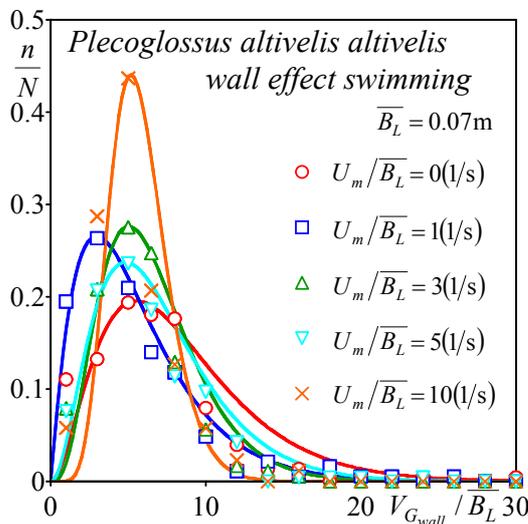


図-6 側壁領域における流速と対地速度との関係

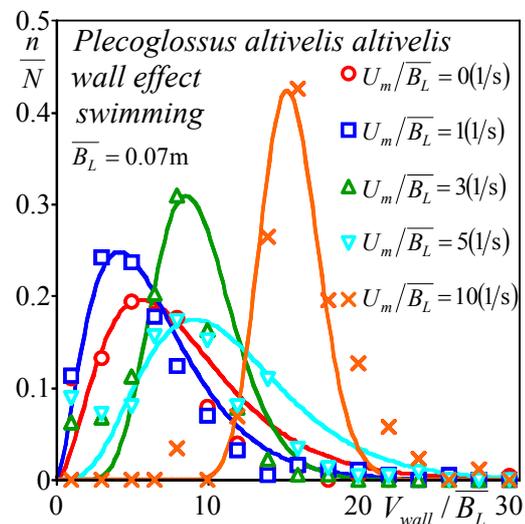


図-7 側壁領域における流速と遊泳速度との関係

速と時間から求めた距離を加算すると、遊泳距離 L が算出される。一方、対地距離と遊泳に要した時間から、対地速度 V_G および z 方向対地速度 V_{Gz} が算出され、この対地速度に流速を加算すると、遊泳速度 V が算出される。

3. 側壁領域と普遍領域の分離

関谷ら²⁰⁾や三宮ら^{21,22)}指摘したように、魚は側壁に接近すると遊泳特性が変化する。しかし、どの程度側壁に接近すると遊泳特性が影響を受けるかは不明である。そこで、普遍領域(universal area)と側壁領域(side-wall area)との境界を解明するため、図-2に側壁からの体長倍距離 z/B_L と魚向の平均値 $\bar{\alpha}$ との関係を示す。ここに、魚向 α は180°から魚の進行方向と x 軸との間の角度を引いた値と定義した。いずれの流速においても、体長倍距離 z/B_L の増加に伴い平均魚向 $\bar{\alpha}$ は増加傾向を示すが、側

壁から体長倍距離 z/B_L が1を超えるとあまり増加傾向は観察されない。これは、側壁付近では側壁への衝突を避けるために魚向を小さくしたと考えられる。

図-3に側壁からの体長倍距離 z/B_L と、 z 方向対地速度 V_{Gz} を平均体長 B_L で除した値 V_{Gz}/B_L との関係を示す。いずれの流速においても、体長倍距離 z/B_L の増加に伴って z 方向対地速度の平均値 $|V_{Gz}|/B_L$ は増加するが、体長倍距離 z/B_L が1を超えるとほぼ一定値を示している。これは、側壁付近では側壁への衝突を回避するために横断方向の遊泳速度を低下させたことを意味する。

以上の結果より、本研究では側壁から体長の1倍未満の領域を側壁領域、それ以上の領域を普遍領域であると定義する。なお、魚は魚群で遊泳する際に、最寄りの魚との間の個体間距離を体長の約1倍の一定値に保つことから、上記の結果が適切であると推定される。また、これ以降、側壁領域および普遍領域の諸量にそれぞれ

wall, uni.の添字を付記する.

4. 実験結果および考察

(1) 側壁領域における対地距離と遊泳距離

図-4に対地距離 L_G を平均体長 \overline{B}_L で除した値の頻度分布を流速別に示す. 対地距離 $L_{Gwall} / \overline{B}_L$ 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, 次式のガンマ分布を採用し, 図-4中に曲線で示した.

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

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

係数 β , λ は最小二乗法より算出した. 同図において, 最頻値は体長倍流速が0(1/s)の場合に多少大きな値を示しているが, それ以上の流速では顕著な変化は観察されない.

図-5に遊泳距離 L を平均体長 \overline{B}_L で除した値の頻度分布を流速別に示すと共に, 式(1), (2)において, L_G を L に置き換えて求めたガンマ分布を曲線で示した. 多少ばらついているものの, 流速の増加に伴う遊泳距離 $L_{wall} / \overline{B}_L$ の最頻値は増加傾向にある. これは, 流速の増加に伴い, 流れを遡ろうとする正の向流性によって遊泳欲が増加した²⁹⁾ことが原因と考えられる.

(2) 側壁領域における対地速度と遊泳速度

図-6に対地速度 V_G を平均体長 \overline{B}_L で除した値の頻度分布を流速別に示すと共に, 式(1), (2)において, L_G を V_G に置き換えて求めたガンマ分布を曲線で示した. 対地速度 $V_{Gwall} / \overline{B}_L$ の最頻値に流速の増加に伴う明確な変化は観察されない.

図-7に遊泳速度 V を平均体長 \overline{B}_L で除した値の頻度分布を流速別に示すと共に, 式(1), (2)において, L_G を V に置き換えて求めたガンマ分布を曲線で示した. 流速の増加と共に遊泳速度 $V_{wall} / \overline{B}_L$ の最頻値が増加している. これは, 正の向流性によって生じたものと考えられる.

(3) 側壁領域における屈折角度

アユの屈折角度が正の場合と負の場合に物理的な相違はないため, 屈折角度の絶対値 $|\theta_{wall}|$ を算出し, 図-8にその頻度分布を流速別に示した. また, 同図に, 式(1), (2)において L_G を $|\theta_{wall}|$ に置き換えて求めたガンマ分布を曲線で示した. 屈折角度の絶対値 $|\theta_{wall}|$ は流速に依存せずほぼ一定である. これは, 流速が増加しても屈折方向

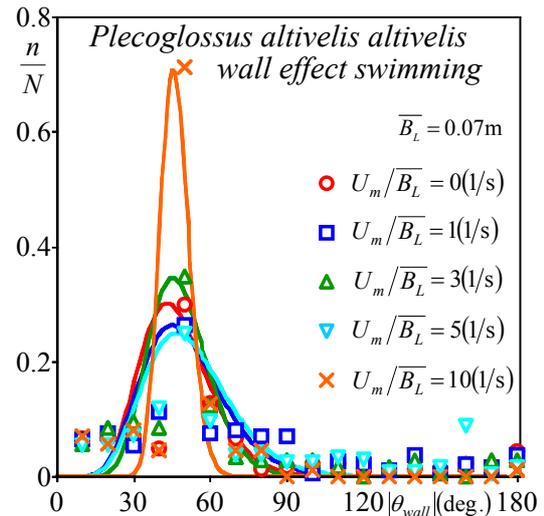


図-8 側壁領域における流速と屈折角度との関係

が側壁で制限され, 側壁に沿って遡上するためと考えられる.

5. 側壁領域と普遍領域の遊泳特性の比較

図-9(a)~(e)に側壁領域および普遍領域における対地距離 L_G / \overline{B}_L , 遊泳距離 L / \overline{B}_L , 対地速度 V_G / \overline{B}_L , 遊泳速度 V / \overline{B}_L , 屈折角度の絶対値 $|\theta|$ 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 / \overline{B}_L との関係を線形式で示す. 記号の^は最頻値であることを表している.

(1) 対地距離と遊泳距離の比較

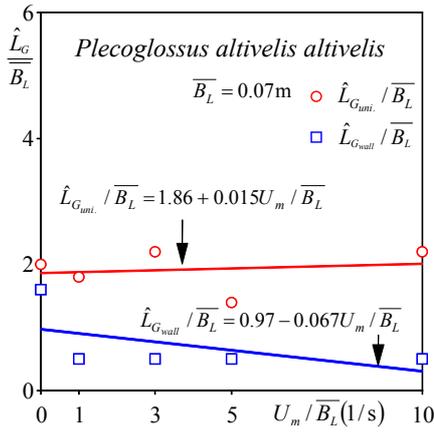
図-9(a)に着目すると, 流速の増加に伴う普遍領域の対地距離の最頻値 $\hat{L}_G / \overline{B}_L$ に系統的变化は観察されない. 一方, 側壁領域については線形式が減少傾向を示しているが, これは体長倍流速が0(1/s)の値に影響を受けたものであり, それ以上の流速では一定となっている.

図-9(b)に着目すると, 流速の増加に伴い遊泳距離の最頻値 \hat{L} / \overline{B}_L は普遍領域, 側壁領域共に増加傾向を示している. これは, アユが正の向流性を有しており, 流速の増加に伴いアユの遡上欲が湧くためと考えられる.

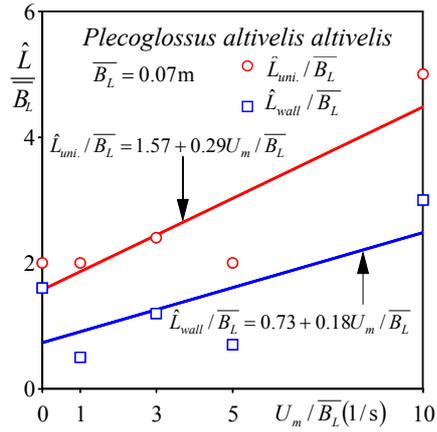
対地距離および遊泳距離の最頻値は共に, 普遍領域よりも側壁領域での値が小さい. これは, 遊泳中に側壁に接近すると屈折して遊泳方向を変化させるためと考えられる.

(2) 対地速度と遊泳速度の比較

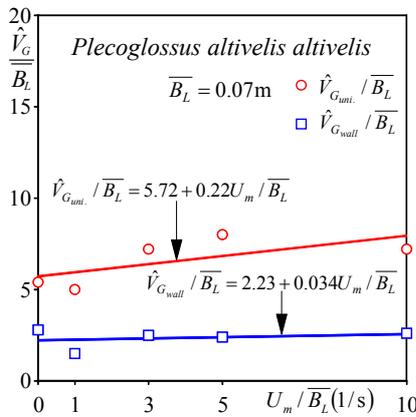
図-9(c)に着目すると, 流速の増加に伴い対地速度の



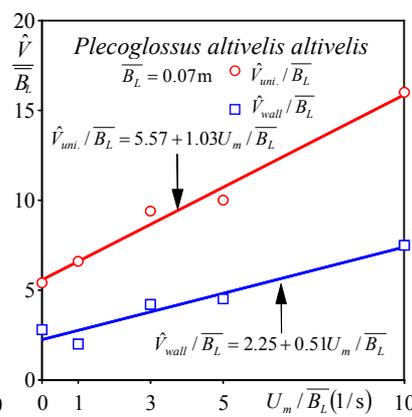
(a) 対地距離



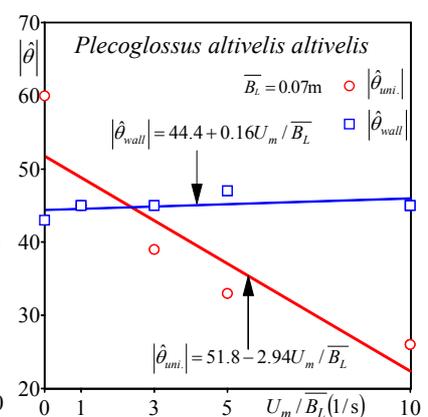
(b) 遊泳距離



(c) 対地速度



(d) 遊泳速度



(e) 屈折角度

図-9 流速と遊泳特性値の最頻値との関係

最頻値 \hat{V}_G / \bar{B}_L は普遍領域では増加しているが、側壁領域ではほぼ一定となっている。これは、アユに正の向流性があるため普遍領域では対地速度を増加させるが、側壁領域では頻りに屈折するため(図-8)、正の向流性を有するにも関わらず対地速度が増加しないと考えられる。

図-9(d)に着目すると、流速の増加に伴い遊泳速度の最頻値 \hat{V} / \bar{B}_L は普遍領域、側壁領域共に増加傾向を示している。

対地速度および遊泳速度の最頻値は共に、普遍領域よりも側壁領域での値が小さい。これは、遊泳中に側壁に接近すると屈折して衝突を避けるので、遊泳速度が減少したためと考えられる。

(3) 屈折角度の比較

図-9(e)に着目すると、流速の増加に伴い普遍領域における屈折角度の最頻値 $|\hat{\theta}|$ は明確な減少傾向を示している。これは、流速が増加した場合に屈折角度を大きくすると、魚体の流下方向に対する投影面積が増加して流水の運動量を多く受けるので、屈折角度を小さくしてこ

れを避けているものと考えられる。一方、側壁領域では流速が増加しても屈折角度はほぼ一定あるいは若干の増加傾向を示している。

6. 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に及ぼす側壁の影響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) 側壁からの距離の増加に伴い、 z 方向対地速度および平均魚向は増加し、体長の1倍の距離を超えるとほぼ一定値となる。これは、側壁付近では側壁への衝突を防ぐため、横断方向へ移動が制限されることが原因である。したがって、側壁領域と普遍領域の定義はそれぞれ、側壁から体長の1倍未満の領域、体長の1倍以上の領域とした。
- (2) 普遍領域よりも側壁領域の値の方が対地距離、遊泳距離、対地速度および遊泳速度のいずれの最頻値も小さ

くなる。これは、アユが遊泳中に側壁に接近すると、衝突を回避するために屈折し、遊泳速度が減少するためである。

(3) 普遍領域における屈折角度は流速の増加に伴い減少する。これは、流体から受ける運動量を小さくするためと考えられる。一方、側壁領域における屈折角度は流速が増加するとほぼ一定あるいは若干の増加傾向を示した。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金基盤研究(C)23560610(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた。

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, 後藤眞宏, 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) 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.
- 6) Webb, P.W. and Weihs, D.: *Fish Biomechanics*, Preger Pub., 1983.
- 7) (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.
- 8) 加藤宗英, 水谷正一, 鈴木正貴, 後藤章: 小規模魚道の設置諸元を検討するための小型魚類の遊泳能力, 農業土木学会論文集, Vol.2005, No.235, pp.59-65, 2005.
- 9) 泉完, 山本泰之, 矢田谷健一, 神山公平: 河川における挿入式スタミナトンネルによるヤマメ稚魚の突進速度に関する実験, 農業土木工学学会論文集, No.262, pp.103-109, 2009.
- 10) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 山本晃義, 渡邊拓也, 脇健樹: 河川に生息する数魚種の突進速度に関する研究, 土木学会論文集B, Vol.65, No.4, pp.296-307, 2009.
- 11) 藤原公一, 白杵崇広, 北田修一: 成長および流水トレーニングに伴うニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* 仔稚魚の遊泳速度の変化, 日本水産学会誌, 第76巻, 6号, pp.1025-1034, 2010.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 松原雄平, 若松哲郎, 野田英明: 魚類の蝸集行動のシミュレーションに関する研究, 海洋開発論文集, Vol.11, pp.133-138, 1985.
- 15) 竹内義幸: 魚ののぼりやすい川づくりをめざして, 環境技術, Vol.24, No.12, pp.736-740, 1995.
- 16) 泉完, 高屋大介, 工藤明, 東信行: アイスハーバー型魚道における魚類の隔壁遡上特性, 農業土木学会論文集, No.217, pp.55-63, 2002.
- 17) 馬淵和三, 平松研, 板垣博: 「棚田式魚道」の水理特性と有効性に関する検証, 雨水資源化システム学会誌, Vol.9, No.1, pp.37-42, 2003.
- 18) 安田陽一, 大津岩夫, 三矢泰彦, 浜野龍夫: 多様な水生生物の遡上・降河に配慮したスリット砂防堰堤に設置する魚道の提案とその効果, 河川技術論文集, 第9巻, pp.487-491, 2003.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 三宮信夫, 田雅杰, 中峯浩: 魚群行動モデルにおける協調行動の創発, 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.11, pp.1370-1376, 1999.
- 22) 三宮信夫, 中峯浩, 岩崎永弥: 魚群行動の群の大きさを推定する自己回帰モデル, システム制御情報学会論文集, 第2巻, 第1号, pp.23-31, 1989.
- 23) 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.
- 24) 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.
- 25) 橋本麻未, 後藤仁志, 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.
- 26) 藤井真一, 木村一郎, 清水康行, 清治真: 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.
- 27) 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.
- 28) 鬼束幸樹, 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.
- 29) 小山長雄: 魚道をめぐる諸問題II. 解説編, 木曾三川河口資源調査団, 1967.

(2011. 9. 30受付)