

開水路流中の気泡に対するアユ魚群の忌避特性

EVASION CHARACTERISTICS OF *PLECOGLOSSUS ALTIVELIS ALTIVELIS* IN FISH SCHOOL AGAINST AIR BUBBLES IN OPEN-CHANNEL FLOWS

鬼東幸樹¹・秋山壽一郎²・鏝敬介³・桃谷和也³・小原徳晃⁴・定地憲人⁴
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Keisuke KASUGAI, Kazuya MOMOTANI,
Noriaki OHARA and Kento JOJI

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学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

⁴学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

Fish sometimes enter into an intake gate of weirs and dams, so that a lot of released larval ayu (*Plecoglossus altivelis altivelis*) are lost. Some techniques with air bubbles, electricity and transmitted light have been developed to avoid fish from the intake gate. However, a lot of fisheries co-operative associations pointed out that the most of such techniques have no effect. It is not known that fish avoid the area which is included air bubbles or not. In this study, the air bubbles are injected from the bottom of channel with changing the flow velocity, and trajectories of fish are recorded. It was found that air bubbles almost effect on the swimming behavior of ayu. The swimming distance and the swimming speed of ayu are decreased in air bubble area.

Key Words : open-channel, air bubbles, ayu,

1. はじめに

ダムや堰には取水口が設置されるが、取水口にサケやマスの稚魚が迷入し減耗することが、古くから漁業関係者の頭を悩ませている¹⁾。魚の迷入防止策として、電流²⁾、透過光³⁾、障害物⁴⁾などを用いた方法が提案されているが、ここでは気泡幕⁵⁾について着目する。

気泡を用いた魚の行動制御に関する研究は1960年代から主として海洋魚について開始された。Smith⁶⁾は気泡膜を用いてニシン群の進路を変更させることに成功した。Arimoto *et al.*⁷⁾は気泡膜を用いて定置網内の魚を魚捕部に駆集させることに成功した。秋山ら⁸⁾および秋山⁹⁾はイシダイ、マアジ、イサキ、カタクチイワシ、トビウオをそれぞれ水槽内に入れ、気泡量の異なる気泡幕をそれぞれ魚に近づける実験を行った。その結果、イシダイは忌避行動を示さないのに対し、マアジ、イサキ、カタクチイワシおよびトビウオは気泡幕に対して忌避行動を示し、この傾向が気泡量に依存することを明らかにした。これは、気泡に対する魚の挙動は魚種に依存するとの江波¹⁰⁾の指摘と一致する。近年、連続で気泡を発生させるよりも、間歇的に気泡を発生させる方が少なくともマダイの

稚魚については忌避率を向上させることを川村ら¹¹⁾が室内実験で明らかにした。

河川魚の挙動に及ぼす気泡の影響に関する研究も開始された。小林・佐々木¹²⁾は実験水路と対照水路とが併設され、下流部が合流した水路において、実験水路のみに気泡を発生させた結果、サケの稚魚が気泡を忌避することを解明した。Patrick *et al.*¹³⁾はキュウリウオやニシン科のエールワイフが気泡幕を忌避することを回転水路を用いた実験で解明した。Zielinski *et al.*^{14),15)}は気泡径の異なる気泡幕に対するコイの挙動を観察した結果、気泡径が増加するとコイが気泡幕を忌避することを解明した。Zielinski & Sorensen¹⁶⁾は米国ミネソタ州の河川に横断方向に気泡発生装置を設置したところ、実験室よりも忌避率が下がるものの、コイが気泡幕を忌避することを示した。

鬼東ら¹⁷⁾は開水路流において、気泡量および流速を系統的に変化させてオイカワおよびカワムツの遊泳特性を観察した結果、体長倍流速が10以下で気泡混入量が $8.7(1/(m^3 \cdot s))$ 以下では両魚種に与える気泡の影響はほとんどないと指摘した。野口ら¹⁸⁾は実験水路の中央を境界線として、気泡混入エリアと非混入エリアを設定し、流

速を0.1m/sに固定した状態でアユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)の遊泳挙動を観察した。その結果、空気混入率が7%以下ではアユは気泡混入エリアをほとんど忌避しないことを解明した。

以上のように、気泡が魚の挙動に及ぼす影響について研究がなされているものの、断片的知見が得られただけで、系統的な知見は得られていない。また、関谷ら¹⁹⁾はエアーカーテンを使用して、気泡を用いた迷入防止事例が必ずしも効果を得ていないことを示した。この一因として次のことが考えられる。魚が気泡を知覚する感覚は視覚および側線であるが²⁰⁾、魚種によって両者への寄与率が異なるため²¹⁾、気泡を忌避する特性を有していても、忌避が明確になる気泡量が魚種に依存すると推定される。さらに、流速、尾数などが変化すると、同様な気泡量でも反応に差異が生じる可能性がある。したがって、気泡に対する魚の挙動を解明するには、各魚種において上記のパラメータを系統的に変化させた実験を行う必要がある。前報²²⁾では、気泡混入量および流速を系統的に変化させて1尾のアユ挙動を観察し、気泡量および流速の増加に伴って気泡に対する忌避率が増加することを解明した。また、魚類は3尾以上で構成される魚群で遊泳する場合と、1尾あるいは2尾で遊泳する場合とはその挙動が異なることが知られている^{23,24)}。そのため、前報²²⁾で得られた結果は河川において魚群で遊泳している魚に対しては必ずしも適用できない。

本研究は、開水路流において流速を変化させ、魚群で遊泳するアユの気泡に対する忌避特性の解明を試みたものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に示す全長 $L=4.0\text{m}$ 、幅 $L_c=0.8\text{m}$ 、高さ0.3mの水路を実験に用いた。流下方向に x 軸、横断方向に z 軸をとった。水路上流端の中央($z/L_c=0.5$)に厚さ0.02m、高さ0.3mの遮蔽板を $0 < x < 0.6\text{m}$ の範囲に設置し、板に対して $0 < z < 0.39\text{m}$ の範囲をbubble area、 $0.41 < z < 0.8\text{m}$ の範囲をnon-bubble areaとした。遮蔽板下端より下流側をnormal areaとし、3つのareaを設定した。bubble areaの底面には x 方向および z 方向にそれぞれ38mm、25mmごとの交点に直径2.5mmの空気孔が設置されている。

表-1に実験条件を示す。気泡混入量を $25.0(1/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ の一定とし、断面平均流速 U_m をアユの体長倍流速 U_m/\bar{B}_p で2, 4, 8(1/s)に変化させた合計3ケースの実験を各20回行った。 \bar{B}_p はアユの平均体長80mmである。流速において、体長倍流速2(1/s)については魚が疲れずに遊泳できる速度、体長倍流速4(1/s)は疲れず筋肉を使い遊泳できる境界の速度であることを理由に設定した。また、体長倍流速10(1/s)になると突進速度となり、遡上しないことが懸念されるため、遡上可能な速度の境界である体長

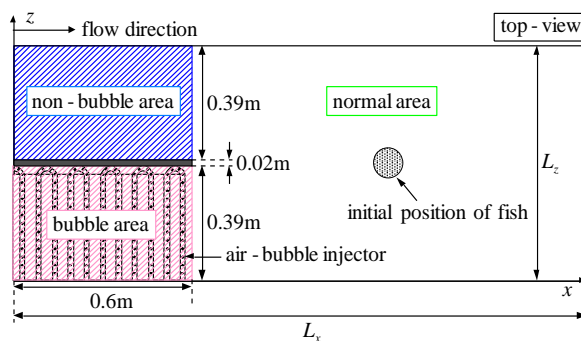


図-1 実験装置の概要

表-1 実験条件

case name		
U_m / \bar{B}_p (1/s)		
2	4	8
V2	V4	V8

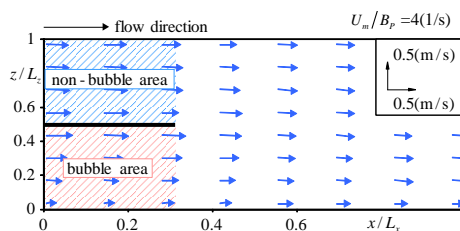


図-2 実験装置内の流速分布の例

倍流速8(1/s)を設定した。実河川における取水溝や堰などの環境は多様であるため、魚類生態に着目し、また実験装置内の水の流速が上記の実験条件になるように流量を設定した。使用する全アユに対し、水温が 20°C の定常状態で飼育し、全ケースにおいて実験時の水温は 20°C に保った。水路下流端の高さを調節して水深を4cmとした。なお、気泡の既往研究において忌避行動は確認されているものの、断片的な知見となっている。よって水深に関しては、系統的な知見を得るために2次元的な解析を行うことを目的として、水深方向の遊泳を排除するために水深を4cmと設定した。各ケースでnormal areaの中央($x=1.3\text{m}$, $z=0.4\text{m}$)に直径0.25mの円形金網を設置し、6尾のアユを挿入する。アユを5~10s間ほど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した。誘致時間を5~10sに設定した理由としては、それ以上で実験を行ったものと比べ変化が見られなかったことに加え、馴致時間を長くすることで魚の疲労が懸念されるためである。撮影終了は使用したアユが全尾遡上した場合、あるいは30s経過した場合とした。bubble area, non-bubble areaの上流部は仕切りの無い一つの空間になっており、全尾遡上時アユは水の流入口から続くこの空間に存在する。今回の実験の最大流速において、30sを超えてからの試験魚の遡上意欲の低下が見られたため、実験時間を30sとした。金網を回収する際は素早く実験装置から離れ、魚に

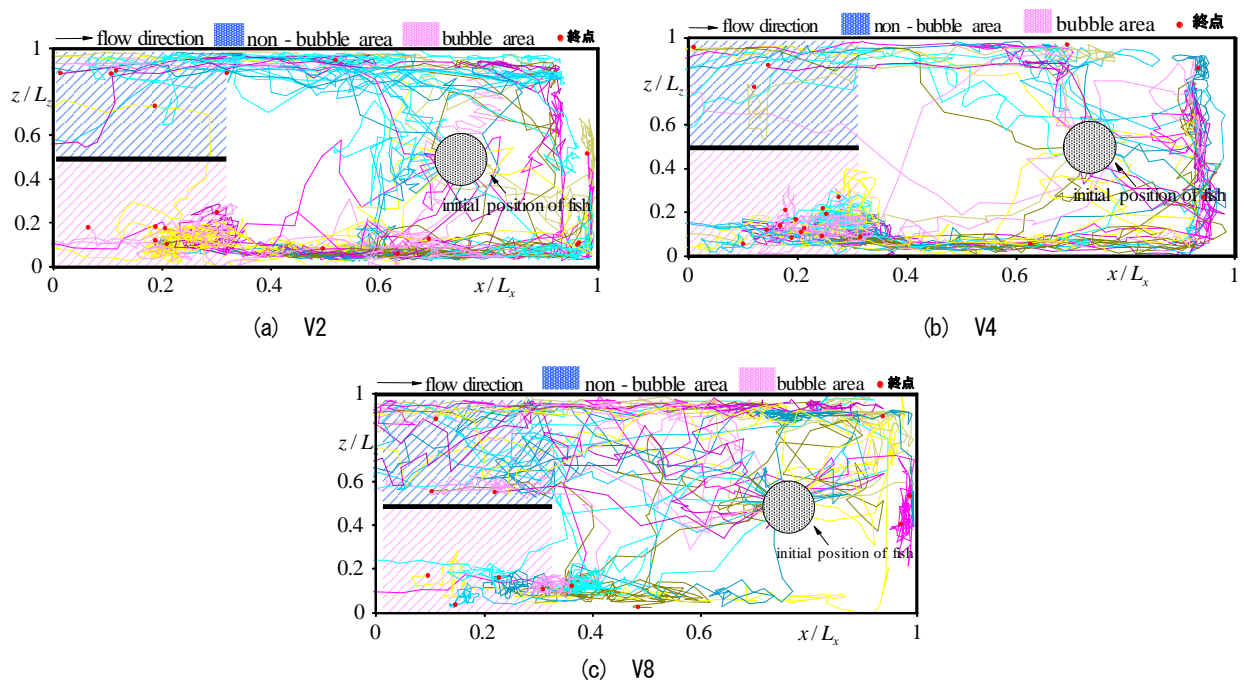


図-3 6尾を放した時の各流速における遊泳軌跡

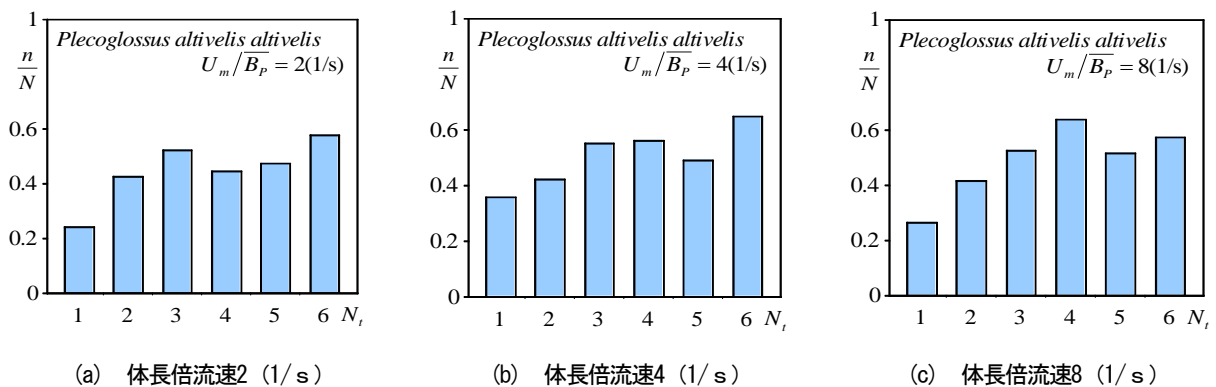


図-4 尾数変化に伴う各流速におけるbubble area進入率の変化

対する影響を最小限にした。上記の実験を各ケースで60回、合計180回行った。撮影した動画を0.2sで画像に分割して魚の遊泳位置を解析し、bubble area進入率、non-bubble, bubble area進入速度、non-bubble, bubble areaにおける遊泳距離と屈折角度、non-bubble, bubble areaにおける滞在時間を算出した。

水路に魚を挿入していない状態で、断面平均流速とほぼ一致する $y/h=0.42$ の高さにおいて、各ケースで流速測定を行った。x軸方向に0.28m、z軸方向に0.11m間隔で構成される 8×8 の計64点で、3次元電磁流速計を用いて流速成分を0.05s間隔で25.6s計測した。

3. 実験結果および考察

(1) 流速分布

図-2に流速分布の一例($U_m/\overline{B_p}=4(1/s)$)を示す。non-bubble areaとbubble areaにおける流速分布に顕著な差異は観察されない。また、合流後のnormal areaに

おける流速分布に偏流なども観察されない。他のケースも同様な結果であった。

(2) アユの遊泳軌跡

図-3(a)~(c)に流速が異なる3ケースについて、各30回の実験におけるアユの遊泳軌跡を示す。赤点は実験開始後30s時点での遡上中の個体位置を指す。いずれのケースにおいても、non-bubble areaに比べ、bubble areaにおいてアユが小刻みに屈折しながら遊泳している割合が高い。この傾向はbubble area入口付近($x/L_x=0.2 \sim 0.4$)において顕著である。これは、アユがbubble areaに進入した際に、アユが気泡と遭遇したために生じたものと考えられる。一方、ケース間の比較をすると、non-bubble areaにおいて流速の増加に伴い、壁面付近を遊泳する割合が増加する傾向を示すが、bubble areaにおける遊泳挙動に大きな差異は観察されない。これは、本実験条件内においては、アユの遊泳挙動に対して流速よりも気泡の影響の方が支配的であることを示している。また、bubble area下流部では頻繁に転回しているが、こ

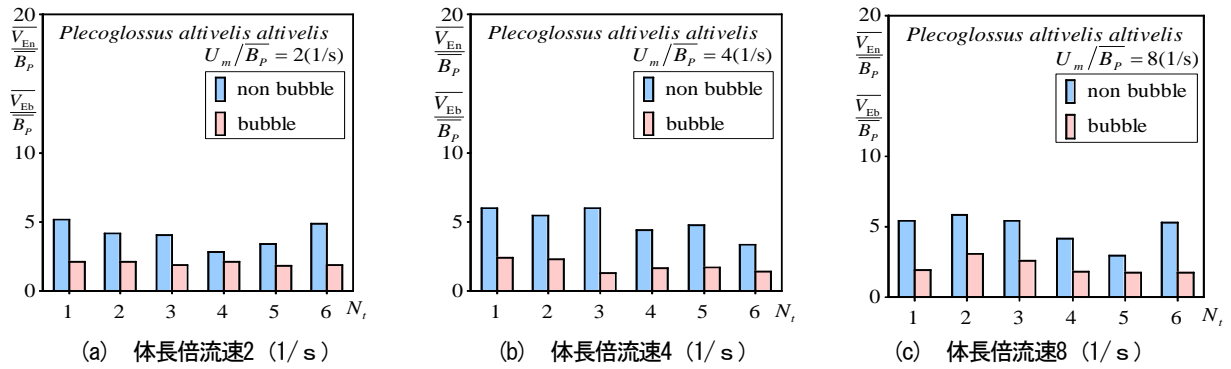


図-5 尾数変化に伴う各流速における進入対地速度の変化

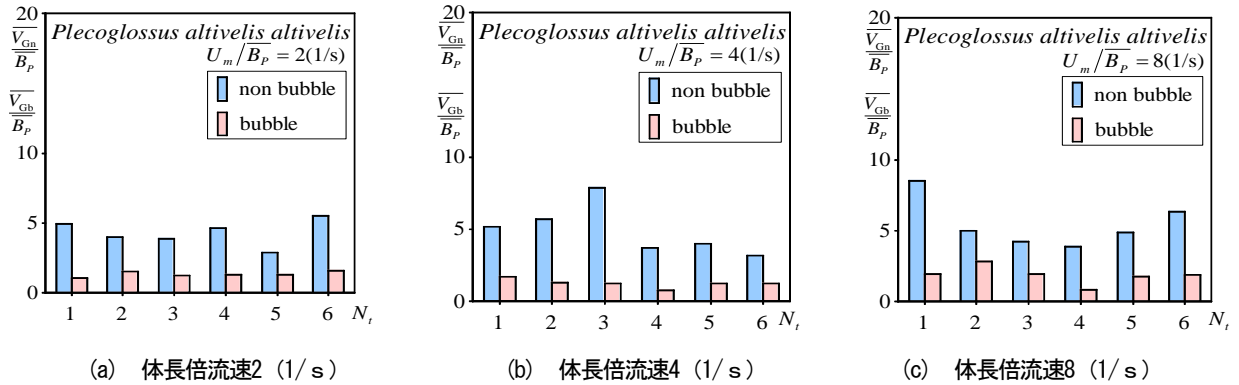


図-6 尾数変化に伴う各流速における対地速度の変化

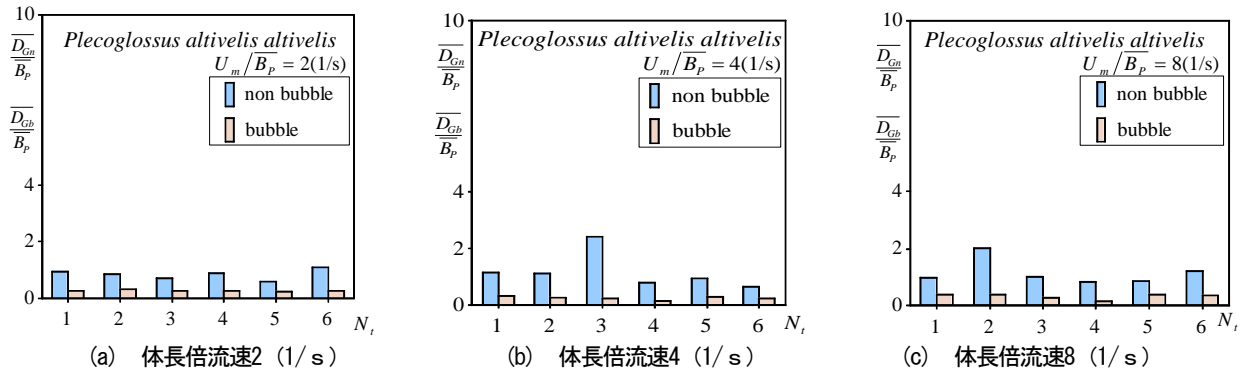


図-7 尾数変化に伴う各流速における対地距離の変化

これは気泡がbubble area外部の下流部に影響しているためであると考えられる。bubble area下流部の壁面付近では速度が低下しており、アユは休憩場所として好むことが考えられる。

本実験では6尾のアユを放流したが、実験開始後に6尾の魚群で遊泳することはまれで、それよりも少ない尾数の複数の魚群または、2尾あるいは1尾で遊泳する 경우가多く観察された。そこで以下では、尾数別($N_i=1\sim 6$)に分類して解析を行う。なお、Partridge²³⁾によると、魚群の定義は「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」であり、2尾以下は魚群ではないが、記述の煩雑さを避けるため、以下では1尾を含む全ての尾数における魚の群れを「魚群」と記述する。

(3) bubble area進入率

アユのbubble area進入率を次式のように定義する。

$$\text{bubble area 進入率} = \frac{\text{bubble area 進入回数 } n}{\text{各area 合計進入回数 } N} \quad (1)$$

ここに、bubble area進入回数 n とはnormal areaからbubble areaへの進入回数のことである。また、各area合計進入回数 N とは実験中にnormal areaからbubble area, non-bubble areaへ進入した合計回数のことである。bubble area進入実験回数 n , 各area合計進入回数 N 共に、尾数別に計算を行った。図-4(a)~(c)にbubble area進入率と尾数との関係を流速別に示す。いずれの流速においても、1尾でのbubble area進入率は $n/N=0.2\sim 0.3$ 程度となっており、気泡を忌避していると考えられる。また、2~6尾におけるbubble area進入率は1尾より増加している。このことから、アユが魚群を形成した場合、いずれの流速においてもnon-bubble areaあるいはbubble areaへ遡上する際のarea選択に対する気泡の影響が低

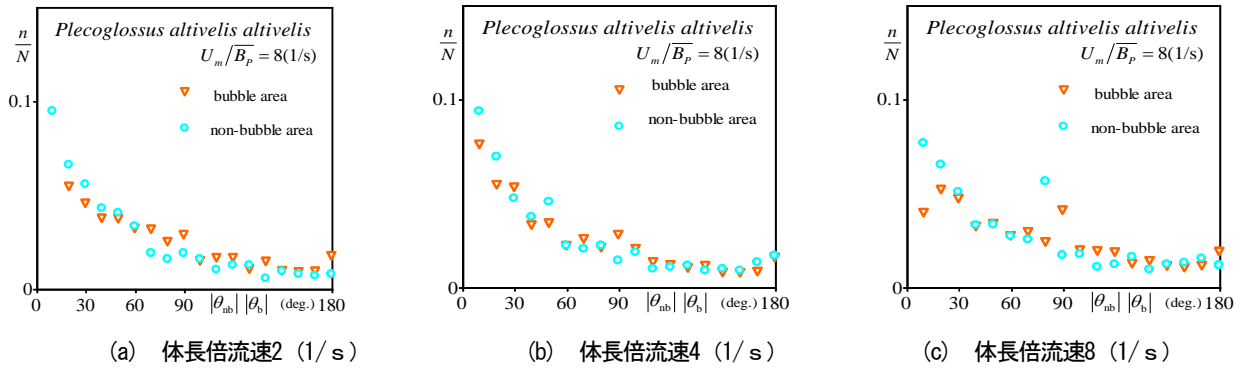


図-8 各流速における屈折角度の頻度分布

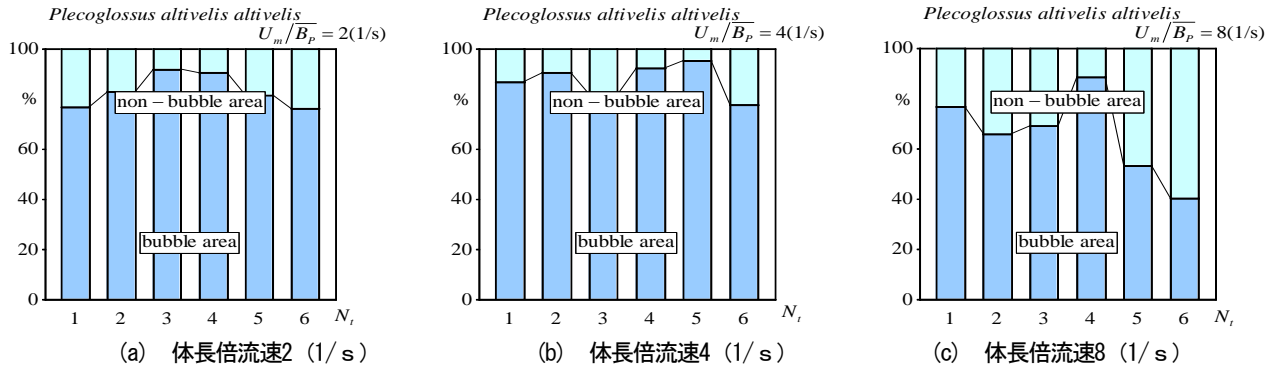


図-9 尾数変化に伴う各流速における平均滞在時間比率の変化

減することを示唆している。

(4) non-bubble, bubble areaにおける対地速度

normal areaからnon-bubble areaあるいはbubble areaへのアユの進入時における対地速度の平均値 \bar{V}_{nb} , \bar{V}_b を、平均体長 \bar{B}_p で除した値 \bar{V}_{nb}/\bar{B}_p , \bar{V}_b/\bar{B}_p と尾数との関係を図-5(a)~(c)に流速別に示す。いずれの流速においても、non-bubble areaへの進入対地速度よりbubble areaへの進入対地速度の方が遅い傾向にある。なお、進入対地速度とは、normal areaからbubble areaへの境界を越える時の速度である。また、この傾向は尾数の変化をほとんど受けない。したがって、アユはnormal areaからbubble areaに進入する際に、流速および魚群内尾数の影響をほとんど受けず、気泡の存在によって対地速度を減少させると考えられる。

non-bubble area内あるいはbubble area内におけるアユの対地速度の平均値 \bar{V}_{nb} , \bar{V}_b を、平均体長 \bar{B}_p で除した値 \bar{V}_{nb}/\bar{B}_p , \bar{V}_b/\bar{B}_p と尾数との関係を図-6(a)~(c)に流速別に示す。いずれの流速においても、non-bubble areaでの対地速度よりbubble areaでの対地速度の方が遅い傾向にある。また、この傾向は尾数の変化をほとんど受けない。

したがって、アユはbubble areaに進入する際だけでなくbubble areaの進入後も流速および魚群内尾数の影響をほとんど受けず、気泡の影響によって対地速度を減少させると判断される。

(5) アユの対地距離と屈折角度

non-bubble areaあるいはbubble areaにおけるアユの対地距離の平均値 \bar{D}_{nb} , \bar{D}_b を、平均体長 \bar{B}_p で除した値 \bar{D}_{nb}/\bar{B}_p , \bar{D}_b/\bar{B}_p と尾数との関係を図-7(a)~(c)に流速別に示す。対地距離とは、底面に対するアユの移動距離である。分割画像からアユの遊泳位置の解析を行い、算出を行った。いずれの流速においても、non-bubble areaよりbubble areaでの対地距離の方が小さい。一方、無次元対地距離 \bar{D}_{nb}/\bar{B}_p , \bar{D}_b/\bar{B}_p と尾数との関係に明確な傾向は観察されない。したがって、アユはbubble areaを遊泳する際に、流速および魚群内尾数の影響をほとんど受けず、対地距離を減少させると判断される。

図-8(a)~(c)にアユの屈折角度 $|\theta_{nb}|$, $|\theta_b|$ の頻度分布を流速別に示す。いずれのケースも、non-bubble areaおよびbubble area共に、比較的低い値に頻度が高く、高値方向に裾を持つ形状を示している。また、non-bubble areaとbubble areaにおける分布形状は類似しており、顕著な差異は観察されない。そのため、気泡が発生しても、遊泳中の屈折角度に影響を与えないと考えられる。

(6) non-bubble, bubble areaにおける平均滞在時間の割合

non-bubble areaおよびbubble areaにおけるアユの平均滞在時間を算出し、その時間比率と尾数との関係を図-9(a)~(c)に流速別に示す。いずれの流速においても、non-bubble areaよりもbubble areaにおける平均滞在時間比率が高い。これは、アユがbubble area内を遊泳する場合、気泡の存在により遡上意欲が低下するため、滞留傾

向となったものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、開水路流において流速を変化させ、魚群で遊泳するアユの気泡に対する忌避特性の解明を試みたものである。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) アユは遡上する際に、気泡が存在するエリアを忌避する傾向がある。この傾向は1尾で遊泳するときに顕著であるが、魚群内尾数の増加に伴い緩慢になる。
- (2) アユは気泡が存在する領域に進入する際に、対地速度を低下させる。気泡の存在するarea内でも同様に遊泳速度を低下させる。
- (3) アユは気泡が存在する領域を遊泳する際に、対地距離を減少させるが、屈折角度は変化させない。
- (4) アユは気泡が存在する領域に進入すると、遡上意欲が減退し、停滞傾向を示す。

本実験装置では水深を4cmに固定しており、水深を変化させた場合の影響、及び結果は本結果に即するかは明らかではないので、今後の検討課題としたい。

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)26420500（代表：鬼束幸樹）の援助を受けた。

参考文献

- 1) 米山洋一, 塚本勝巳, 北田修一: サクラマス降河幼魚の農業用取水口への迷入, 日本水産学会誌, 第64巻, 第3号, pp.398-405, 1998.
- 2) 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.
- 3) Ono, K. and Simenstad, C.A.: Reducing the effect of overwater structures on migrating juvenile salmon, *Ecological Engineering*, Vol.71, pp.180-189, 2014.
- 4) 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.
- 5) Stewart, P.A.M.: An investigation into the reactions of fish to electrified barriers and bubble curtains, *Fisheries Research*, Vol.1, pp.3-22, 1982.
- 6) Smith, K.A.: Air-curtain fishing for *Maine Sardines*, *Comm. Fish. Rev.*, Vol.23, No.3, pp.1-14, 1961.
- 7) Arimoto, T., Akiyama, S., Kikuya, K. and Kobayashi, H.: Fish-herding effect of an air bubble curtain and its application to set-net fisheries, *Fish Behaviour in Relation to Fishing Operations*, Vol.196, pp.155-160, 1993.
- 8) 秋山清二, 有元貴文, 井上実: 小型水槽内における気泡幕の魚類駆集効果, 日本水産学会誌, 第57巻, 第7号, pp.1301-1306, 1991.
- 9) 秋山清二: 小型定置網内における気泡幕の魚群駆集効果, 日本水産学会誌, 第62巻, 第2号, pp.286-287, 1996.
- 10) 江波澄雄: 気泡網に関する研究-II-, 日本水産学会誌, 第26巻, 第3号, pp.269-272, 1960.
- 11) 川村軍蔵, 安楽和彦, 田中榮嗣: 間歇気泡幕によるマダイ群進路阻止, 日本水産学会誌, 第68巻, 第6号, pp.900-902, 2002.
- 12) 小林哲夫, 佐々木正大: 気泡並びに光に対するサケ稚魚の回避について, 北海道さけ・ます化場研究業績, 第186号, pp.33-42, 1964.
- 13) Patrick, P.H., Christie, A.E., Sager, D., Hocutt, C. and Stauffer, J.: Responses of fish to a strobe light/ air-bubble barrier, *Fisheries Research*, Vol.3, pp.157-172, 1985.
- 14) Zielinski, D.P., Voller, V.R., Svendsen, J.C., Hondzo, M., Mensinger, A.F. and Sorensen, P.: Laboratory experiments demonstrate that bubble curtains can effectively inhibit movement of common carp, *Ecological Engineering*, Vol.67, pp.95-103, 2014.
- 15) Zielinski, D.P., Hondzo, M. and Voller, V.R.: Mathematical evaluation of behavioral deterrent systems to disrupt fish movement, *Ecological Modelling*, Vol.272, pp.150-159, 2014.
- 16) Zielinski, D.P. and Sorensen, P.W.: Field test of a bubble curtain deterrent system for common carp, *Fisheries Management and Ecology*, Vol.22, pp.181-184, 2015.
- 17) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 渡邊拓也, 飯國洋平, 小林達也: 透過光および気泡が魚の行動特性に及ぼす影響, 水工学論文集, 第52巻, pp.1207-1212, 2008.
- 18) 野口浩幸, 関根雅彦, 浮田正夫, 渡部守義: 局所的な河川環境に着目した室内実験によるアユの環境選好性の定量化に関する研究, 環境工学研究論文集, Vol.44, pp.75-81, 2007.
- 19) 関谷明, 福井吉孝, 湯目吏吉也, 坂本裕: 魚類の迷入防止対策の実態とその迷入防止について, 河川技術論文集, 第7巻, pp.233-238, 2001.
- 20) 川村軍蔵, 荒牧孝行, 新村巖: 魚の気泡幕への反応感覚, 日本水産学会誌, 第56巻, 第4号, pp.699-699, 1990.
- 21) 益田玲爾: 魚類の群れ行動の個体発生: 反射の連鎖から社会の形成まで, 日本水産学会誌, 第77巻, 第1号, pp.117, 2011.
- 22) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 平野陽一, 鏑敬介, 古里佳子, 桃谷和也: 開水路流中の気泡に対するアユの忌避行動, 水工学論文集, 第59巻, pp.1093-1098, 2015.
- 23) Partridge, B.L. and Pitcher, T.J.: The sensory basis of fish schools, *Journal of Comparative Physiology*, Vol.135, pp.315-325, 1980.
- 24) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 三原和也, 白岡敏, 平野陽一: 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, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.2, pp.37-48, 2014.

(2015. 9. 30受付)