

開水路流中の気泡に対するアユの忌避行動

EVASION BEHAVIOR OF *PLECOGLOSSUS ALTIVELIS ALTIVELIS* AGAINST AIR BUBBLES IN OPEN-CHANNEL FLOWS

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・平野陽一³・鏑敬介³・古里佳子⁴・桃谷和也⁴
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yoichi HIRANO, Keisuke KASUGAI,
Yoshiko FURUSATO and Kazuya MOMOTANI

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 qualitatively known that fish avoid the area which is included air bubbles. 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 ayu avoid the bubble area with an increase of air quantity. The swimming speed of ayu is decreased in air bubble area. In addition, the increase of the flow velocity is promoted evasion behavior of ayu.

Key Words : air bubbles, fish behavior, *Plecoglossus altivelis altivelis*, open-channel flow

1. はじめに

ダムや堰付近に設置される取水口や放水口にサケ (*Oncorhynchus keta*), マス (*Oncorhynchus masou*) 等の稚魚が迷入し, 減耗している. 長良川の北伊勢工業用水道口に, 約140万尾から240万尾の仔アユ (*Plecoglossus altivelis altivelis*) が1年で吸入されたという報告もある¹⁾. 迷入防止策として, 気泡幕²⁾, 電流³⁾, 透過光⁴⁾, 障害物⁵⁾などを用いた魚の行動制御案が提案されている.

気泡が魚の挙動に及ぼす影響に関して, まず海洋魚を対象として研究が始められた. Smith⁶⁾は気泡膜を用いてニシン群の進路を遮断し, 岸の梁への誘導に成功した. 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. 江波⁸⁾は気泡に対する魚の挙動は魚種に依存すると指摘した. 秋山ら⁹⁾および秋山¹⁰⁾はイシダイ (*Oplegnathus fasciatus*), マアジ (*Trachurus japonicus*), イサキ (*Parapristipoma trilineatum*), カタクチイワシ (*Engraulis japonicus*), トビウオ (*Cypselurus agoo*) を水槽内に入れて気泡量を変化させると共に気泡幕を魚に近づけた結果, 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すが, イシダイは忌避行動を示さないと述べている.

河川魚に及ぼす気泡の影響に関する研究例は少ない. Patrick *et al.*¹¹⁾はニシン科 (*Clupeidae*) のエールワイフ (*Alosa pseudoharengus*) やキュウリウオ (*Osmerus mordax dentex*) が気泡幕を避けることを解明した. Zielinski *et al.*^{12),13)}は気泡径の異なる気泡幕に対するコイ (*Cyprinus carpio*) の遊泳特性を観察した結果, 気泡径が微細でない場合はコイが気泡幕を忌避することを解明した. 野口ら¹⁴⁾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の遊泳挙動を観察した. その結果, 空気混入率が7%を超えるとアユは顕著に気泡混入エリアを忌避することを明らかにした.

河川魚が気泡を忌避することを期待し, 気泡膜を用いた迷入防止施設が我が国の河川に建設されている. ところが, 全国内水面漁業協同組合連合会¹⁵⁾が全国の漁協に行ったアンケート調査によると, 12施設の内, 効果があるかどうか不明なものが8施設, 効果がないものが4施設という回答であった. 鬼束ら¹⁶⁾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 (*Zacco platypus*) およびカワムツ (*Nipponocypris temminckii*) 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 $8.7(1/(m^2 \cdot s))$ 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。

以上のように、気泡が魚の挙動に及ぼす影響は解明されているとは言い難い。実際に、Sager *et al.*¹⁷⁾やTaft¹⁸⁾は気泡幕による魚の挙動への影響は明確ではないと述べている。以上のように統一した知見が得られない一因として次のことが考えられる。魚が気泡幕の存在を知覚する感覚は視覚および側線であるが¹⁹⁾、魚種によって両者の寄与率が異なる²⁰⁾。そのため、気泡を忌避する特性を有していても、忌避が顕著になる気泡量が魚種によって異なると推定される。さらに、気泡以外の諸条件、例えば、流速、尾数、水温などが変化すると、同様な気泡量でも反応が変化する可能性がある。したがって、気泡に対する魚の行動特性を解明するには、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。ただし、上記のパラメータを全て変化させて実験を行うことには多大な労力が必要である。そのため、1つあるいは2つ程度の重要なパラメータだけを変化させる実験をせざるを得ない。

本研究では、開水路流において気泡混入量および流速の2つのパラメータを系統的に変化させ、アユの気泡に対する忌避特性の解明を試みた。

2. 実験装置および実験条件

図-1に示す全長 $L_x=2.0\text{m}$ 、幅 $L_z=0.8\text{m}$ 、高さ0.25mの水路を実験に用いた。流下方向に x 軸、横断方向に z 軸をとる。水路上流端の中央 ($z/L_z=0.5$) 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、 $0 < z < 0.39\text{m}$ 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の $x > 0.6\text{m}$ を normal area とした。写真-1に bubble area における気泡発生装置の写真を示す。bubble area の底面には x 方向および z 方向にそれぞれ56mm、30mmごとに構成される交点に直径2.5mmの空気孔を設置した。空気孔から排出された気泡は0.2(m/s)の速度で上昇し、水面に達すると直径2.5mm~10mmほどのサイズのばらつきを生じる。

表-1に示す通り、気泡混入量（以下、気泡量とする）を $0.5 \sim 25.0 (1/(m^2 \cdot s))$ の範囲で4通りに変化させると共に、流量変化させることで体長倍流速 U_m/\overline{B}_p を2, 4, 8(1/s)の3通りに変化させた合計12ケースの実験を行った。ここに、 U_m は断面平均流速（以下、流速 U_m とする）、 \overline{B}_p はアユの平均体長80mmである。気泡量と流速値を反映させたケース名を命名した。気泡量の設定は、アユが bubble area 内を遡上する際に、水に対して気泡が占める割合を算定して行った。割合が最大のケースではおよそ15%となり、気泡がアユに対し十分に影響を与えると予測した。また使用する全てのアユに対し、常に室内の空調を20 にし、水槽の水温を20 に調節した状態で飼育を行うことで個体による状態のばらつきがないよ

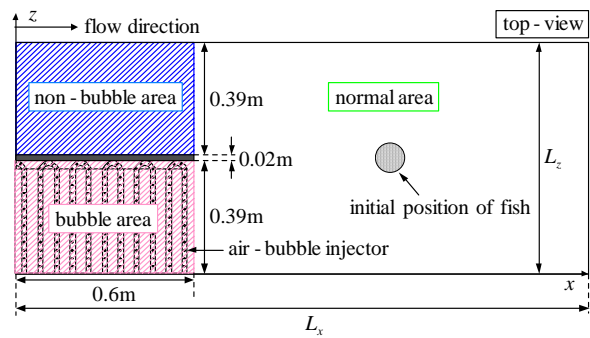


図-1 実験装置の概要



(a) 気泡発生前 (b) 気泡発生後

写真-1 気泡発生装置

表-1 実験条件

case name			
air quantity ($1/(m^2 \cdot s)$)	U_m/\overline{B}_p (1/s)		
	2	4	8
0.5	C005-2	C005-4	C005-8
2.5	C025-2	C025-4	C025-8
12.5	C125-2	C125-4	C125-8
25.0	C250-2	C250-4	C250-8

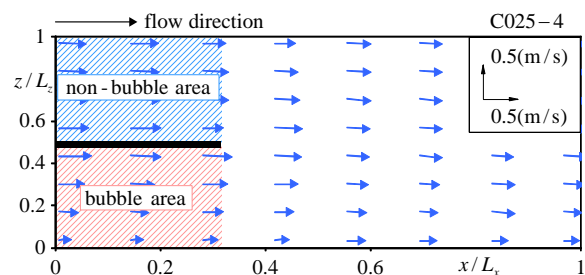


図-2 実験装置内の流速分布の例

う配慮した。実験時の水温は全ケースにおいて20 に保ち、水深は水路下流端の高さを調節することで、全ケースにおいて4cmにした。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、1尾のアユを挿入する。挿入後、アユが十分に流れに慣れている様子が観察できる5~10s間ほど後に、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1分間撮影する。アユ360匹を用いて、各ケースで $N=30$ 回、合計360回行った。動画より、0.2sごとの魚の遊泳位置を解析し、対地速度、魚向を算出した。

断面平均流速と一致すると予測される水路床から0.0168mの高さ付近において、各ケースで流速測定を

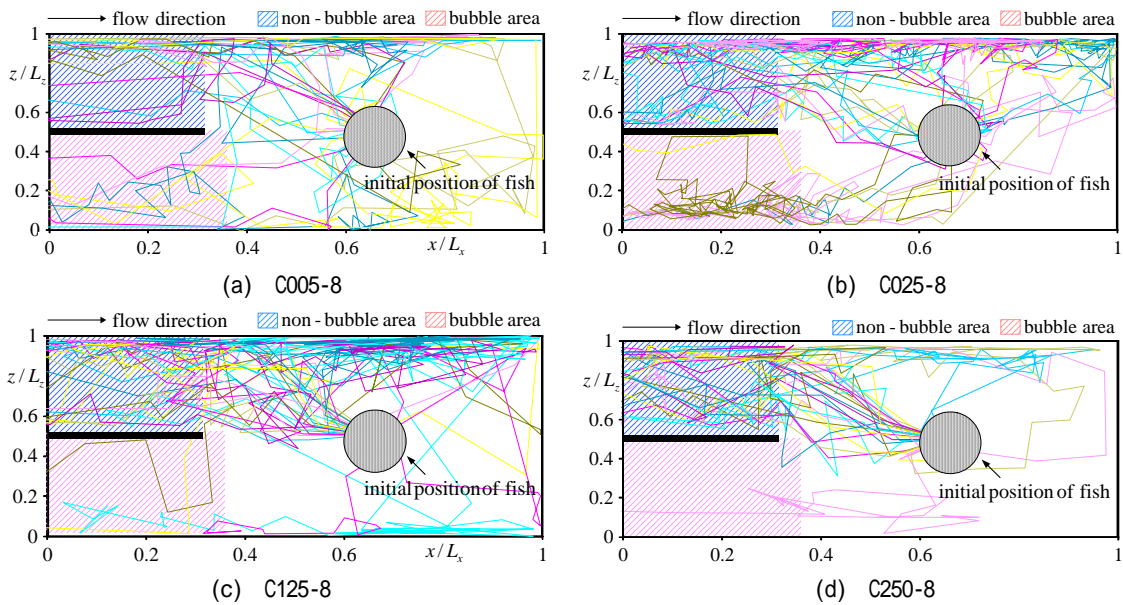


図-3 気泡量変化に伴う遊泳軌跡の変化

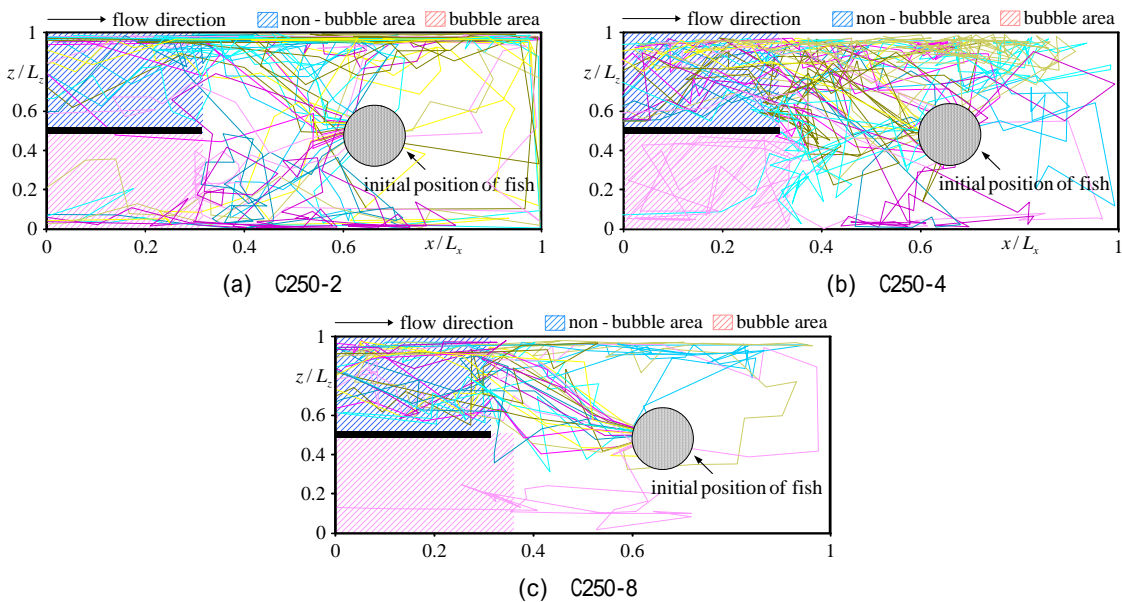


図-4 流速変化に伴う遊泳軌跡の変化

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(C025-4)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．流速および気泡量を変化させても同様の結果となった．

(2) アユの遊泳軌跡

アユは実験開始後に遡上または遊泳し続ける様子

が観察され，遊泳の場合は1分ほどの経過でほとんどのアユがその後も同様の挙動を示した．また，実験時間が長くなるとアユが疲弊し，遊泳が持続できなくなるため観察を打ち切った．

図-3(a)～(d)に流速が一定($U_m/\overline{B_p} = 8(1/s)$)で気泡量が異なる4ケースにおける，各30尾のアユの遊泳軌跡を示す．ここで，本実験では流速増加に伴ってbubble areaからnormal areaへの気泡の流れ込みが視認された為，これを反映し図中のbubble areaを拡大して示している．いずれの気泡量においてもbubble areaよりもnon-bubble areaをアユが遊泳している割合が高い．また，その傾向が気泡量の増加に伴い顕著になっている．

図-4(a)～(c)に気泡量が一定($25.0(1/(m^2 \cdot s))$)で流速が異なる3ケースにおける，各30尾のアユの遊泳軌跡を示す．いずれの流速においてもbubble areaよりもnon-

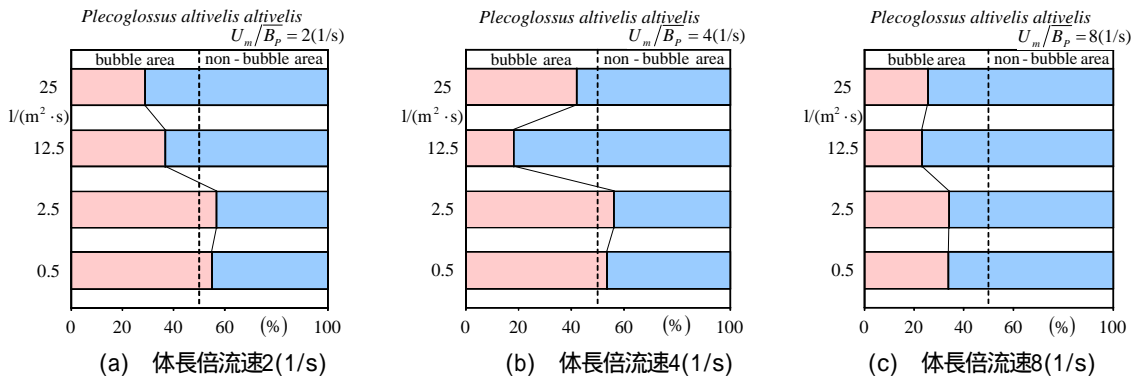


図-5 気泡量変化に伴うnormal areaにおける遊泳方向

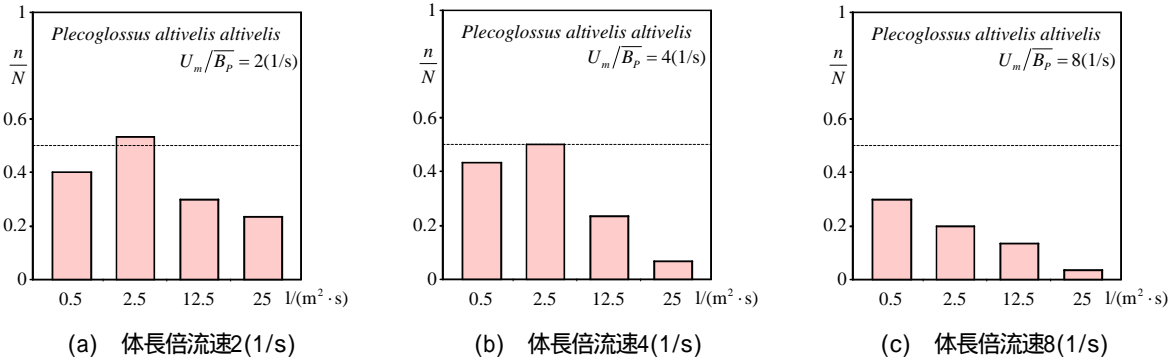


図-6 気泡量変化に伴うbubble area進入率の変化

bubble areaをアユが遊泳している割合が高い．また，
その傾向が流速の増加に伴い顕著になっている．

(3) 気泡領域進入前のアユの挙動

実験開始後に放たれたアユは，non-bubble areaおよびbubble areaの下流に位置するnormal areaを遊泳し始める．このとき，アユの頭部と尾部を直線で結んだ前方に，bubble areaあるいはnon-bubble areaが位置する場合をピックアップし，その比率と気泡量との関係を図-5(a)～(c)に流速別に示す．ほとんどのケースでアユがbubble areaを向く比率が50%を下回っている．また，C125-4のbubble areaを向く比率は他と比べて低いが，全体的にいずれの流速においても，気泡量の増加に伴いbubble areaを向く比率は減少傾向にあるといえる．さらに，流速の増加に伴いbubble areaを向く比率は減少している．これについては，流速増加によるnormal areaでの気泡領域拡大のため，アユが気泡を視認しやすくなったことなどが要因として考えられる．したがってこれらより，アユは遊泳中に進行方向に気泡の存在を確認すると，それを忌避して気泡のない上流領域を選択して遡上することを示唆している．こうした傾向は図-3，図-4からも観察される．

(4) bubble area進入率

アユのbubble area進入率を次式のように定義する．ここで，bubble area進入実験回数 n とは各ケースの中でアユがbubble areaを選択して遡上または遊泳し続ける結果

$$\text{bubble area進入率} = \frac{\text{bubble area進入実験回数 } n}{\text{各ケースでの実験回数 } N} \quad (1)$$

図-6(a)～(c)にbubble area進入率と気泡量との関係を流速別に示す．いずれの流速においても，気泡量の増加に伴いbubble area進入率は減少傾向を示している．また，流速の増加に伴いbubble area進入率が減少している．したがって，アユは気泡を含む領域を忌避し，その傾向が気泡量の増加および流速の増加に伴い顕著になることが明らかとなった．またここでは，流速増加によるnormal areaでの気泡領域拡大も結果に影響していると考えられる．鬼束ら¹⁶⁾はオイカワおよびカワムツを対象とし，本実験と類似の実験を，気泡混入量が $8.7(1/(m^2 \cdot s))$ の条件で行った．その結果，気泡の混入がオイカワおよびカワムツの遊泳特性にほとんど影響を及ぼさないと述べた．この相違が，魚種が異なることによるものか，気泡量が異なることによるものかは不明である．

(5) non-bubble, bubble areaにおける対地速度

アユのnormal areaからnon-bubble areaあるいはbubble areaへの進入対地速度の平均値 \bar{V}_{En} ， \bar{V}_{Eb} と標準偏差 V'_{En} ， V'_{Eb} を算出した．平均値を平均体長 \bar{B}_p で除した値を \bar{V}_{En}/\bar{B}_p ， \bar{V}_{Eb}/\bar{B}_p とし，気泡量との関係を図-7(a)～(c)に流速別に示す．また， $\pm V'_{En}$ ， $\pm V'_{Eb}$ に平均値を加算した値を，平均体長 \bar{B}_p で除した値 $(\bar{V}_{En} \pm V'_{En})/\bar{B}_p$ ， $(\bar{V}_{Eb} \pm V'_{Eb})/\bar{B}_p$ とし，図-7(a)～(c)中にエラーバーを用

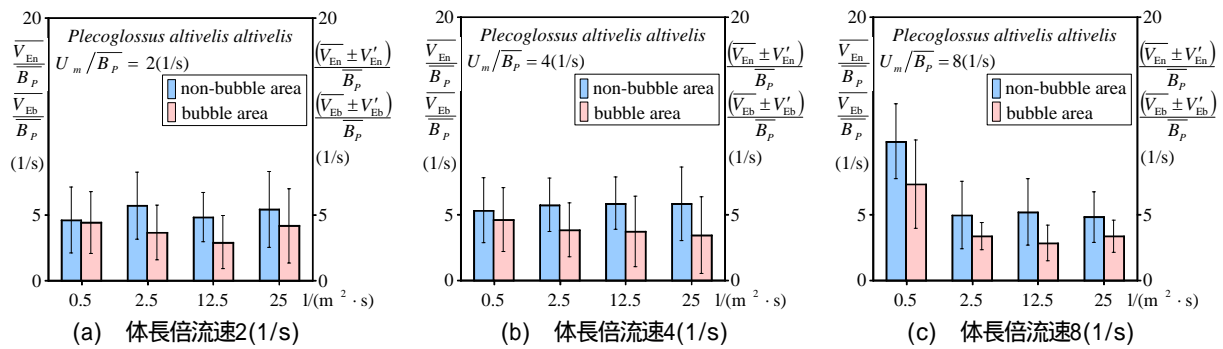


図-7 気泡量変化に伴うnon-bubble area, bubble areaへの進入対地速度の変化

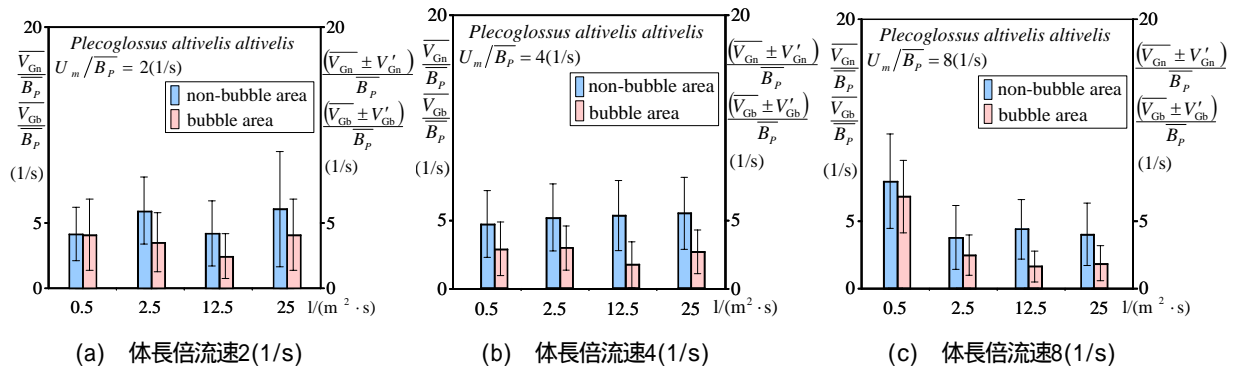


図-8 気泡量変化に伴うnon-bubble area, bubble areaにおける対地速度の変化

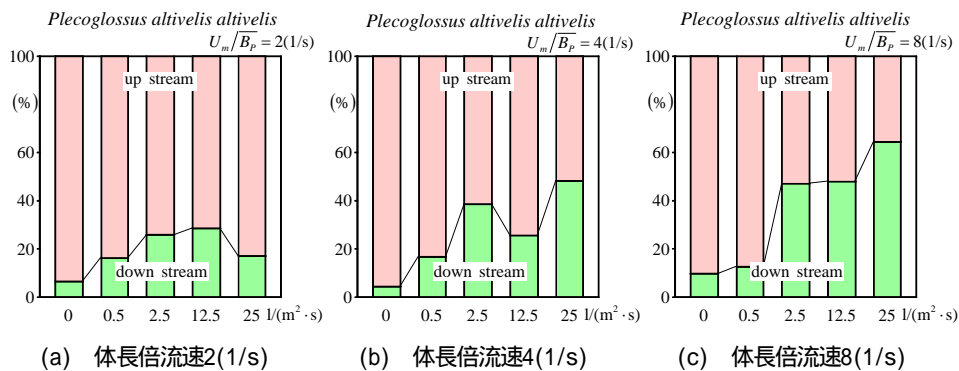


図-9 気泡量変化に伴うbubble areaにおける魚向の変化

いて示している．いずれの流速，気泡量においても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．したがって，アユはnormal areaからbubble areaに進入する際に，気泡の存在によって遊泳挙動を変化させると考えられる．

アユのnon-bubble area内あるいはbubble area内における対地速度の平均値 $\overline{V_{Gin}}$ 、 $\overline{V_{Gb}}$ と標準偏差 V'_{Gin} 、 V'_{Gb} を算出した．平均値を平均体長 $\overline{B_p}$ で除した値を $\overline{V_{Gin}}/\overline{B_p}$ 、 $\overline{V_{Gb}}/\overline{B_p}$ とし，気泡量との関係を図-8(a) ~ (c)に流速別に示す．また， $\pm V'_{Gin}$ 、 $\pm V'_{Gb}$ に平均値を加算した値を，平均体長 $\overline{B_p}$ で除した値 $(\overline{V_{Gin}} \pm V'_{Gin})/\overline{B_p}$ 、 $(\overline{V_{Gb}} \pm V'_{Gb})/\overline{B_p}$ とし，図-8(a) ~ (c)中にエラーバーを用いて示している．ここで，C005-8の実験時に特出して速い個体が多く含まれていたため，対地速度が他のケースに比べて著しく速い結果となったが，原因は不明である．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．

したがって，アユはbubble areaに進入する際だけでなく，進入後も対地速度を減少させると判断される．また明確ではないが，図-8(b)，(c)では気泡量の増加に伴いbubble area内の対地速度の標準偏差が減少している．これは，気泡量の増加に伴い遊泳が緩慢になることを示している．

(6) bubble areaにおける魚向

bubble area内を遊泳しているアユの魚向を，上流向き(up stream)および下流向き(down stream)に分類し，その時間比率と気泡量との関係を図-9(a) ~ (c)に流速別に示す．なお，比較のためにnon-bubble areaでの魚向を，気泡量がゼロ($0 l/(m^2 \cdot s)$)の場合として併示した．気泡量がゼロの場合，9割以上のアユが上流を向いている．一方，気泡がある場合は，上流を向く割合が9割未満となっており，気泡の存在によって下流を向く割合が増加している．また，その傾向は気泡量の増加および流速の増

加に伴い顕著となる。

4. おわりに

本研究では、開水路流において気泡混入量および流速を系統的に変化させ、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。本研究より得られた知見は以下の通りである。

- (1) アユは進行方向に気泡を確認すると、その領域を忌避して気泡のない領域を選択して遡上する。また、この傾向が気泡量および流速の増加に伴って顕著になることが判明した。
- (2) アユは気泡を有する領域に進入する時、対地速度を減少させる。
- (3) 気泡が存在すると、アユは対地速度を減少させ、遊泳が緩慢になる。また、この傾向が気泡量および流速の増加に伴って顕著になることが判明した。

したがって、アユに対して効果的な気泡混入量及び流速が判明されたといえる。本研究では気泡混入量 $12.5(1/(m^2 \cdot s))$ で気泡に対して70%以上の忌避率を示したことから、迷入防止対策などへの応用が期待できる。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) Ono, K. and Simenstad, C.A.: Reducing the effect of overwater structures on migrating juvenile salmon, *Ecological Engineering*, Vol.71, pp.180-189, 2014.
- 5) 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/ -70, pp.81-91, 2005.
- 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) 江波澄雄：気泡網に関する研究 - - , 日本水産学会誌，第26巻，第3号，pp.269-272, 1960.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 全国内水面漁業協同組合連合会：魚の迷入の実態とその対策へのアプローチ，1996.
- 16) 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.
- 17) Sager, D.R., Hocutt, C.H. and Stauffer, J.R.: Estuarine fish responses to strobe light, bubble curtains and strobe light/bubble-curtain combinations as influenced by water flow rate and flash frequencies, *Fisheries Research*, Vol.5, pp.383-399, 1987.
- 18) Taft, E.P.: Fish protection technologies, *Environmental Science & Policy*, Vol.3, pp.349-359, 2000.
- 19) 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.
- 20) 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.

(2014.9.30受付)