

透過光および気泡が魚の行動特性に及ぼす影響

EFFECTS OF TRANSMITTED LIGHT AND AIR BUBBLES ON FISH BEHAVIOR

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・渡邊拓也³・飯國洋平⁴・小林達也⁵
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Takuya WATANABE, Yohei IIGUNI
and Tatsuya KOBAYASHI

¹正会員 博(工) 九州工業大学准教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科

³正会員 柿木設計 (〒448-0806 愛知県刈谷市松栄町2丁目15-8)

⁴学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程

⁵学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

Fish sometimes enters into an intake gate of weirs and dams, so that a lot of released larval ayu and salmon are lost. Some techniques with electricity, transmitted light and air bubbles have been developed to avoid fish from the intake gate. However, a lot of fisheries co-operative associations pointed out that most of such techniques have no effect. In this study, the color types of transmitted light are changed at both sides of a rectangular water tank and swimming area of *Zacco platypus* and *Zacco temminckii* are observed. It was found that the color types do not affect on the swimming behavior of both fish.

Generally, it is known that fish avoid the area which is included air bubbles. In this study, the air bubbles are injected from the channel bottom and trajectories of fish are observed. It was found that air bubbles do not affect on the swimming behavior of *Zacco platypus* and *Zacco temminckii*.

Key Words : fish behavior, transmitted light, air bubbles, open-channel flow

1. はじめに

ダムや堰には取水口が設置されるが、取水口に魚が迷入し、放流したサケ、マス等の稚魚の相当量が減耗することが古くから問題となっている。長良川の北伊勢工業用水道取水口では、一年間におよそ百四十万から二百四十万尾の仔アユが取水口に吸入されていたという報告がある¹⁾。迷入防止や漁獲高向上を目的として、電流²⁾、障害物³⁾⁷⁾、透過光、気泡幕などを利用した魚の行動制御がこれまで試みられてきた。

我が国の電気スクリーンを用いた魚の迷入防止の歴史は古く、1920年代まで遡ることができる⁸⁾。しかし、明確な効果は報告されていないのが現状である。関谷ら³⁾はコイ、フナについては電気スクリーンから忌避するが、稚アユには効果がないことを明らかにした。近年、単列電極スクリーン、2列電極スクリーン、複数底面電極スクリーンなどが開発されているため⁹⁾、効率のよい運用が期待される。

多くの魚は視覚、聴覚、臭覚、味覚、触覚(皮膚感覚、側線感覚)を有しているが¹⁰⁾、Lyon¹¹⁾は視覚目標のある場

合とない場合における魚の向流性を比較し、向流行動には視覚が重要な役割を有していることを明らかにした。井上ら¹²⁾¹³⁾は河川魚であるウグイ、カワムツ、アブラハヤ、オイカワ、ニゴイ、タイリクバラタナゴ、ギンブナおよび海洋魚であるマイワシ、カタクチイワシ、マサバ、マアジ、マルアジ、イサキ、ネブツダイを用いて暗条件および明条件における向流行動を観察し、比較的河川魚の方が視覚を利用して定位する傾向があるものの、魚種によって視覚への依存度が大きく異なることを指摘した。一方で、黒木・中馬¹⁴⁾は流水中に光のスリットを底面から照射あるいは水中に白色光を挿入した状態でクロゴイおよびヒゴイを放流した結果、クロゴイおよびヒゴイには透過光の影響がほとんどないことを明らかにした。井上ら¹²⁾¹³⁾、黒木・中馬¹⁴⁾の結果より、透過光に対する反応は魚種によって異なることが示唆される。

小山¹⁾、今村¹⁵⁾は同じ照度であっても透過光の種類によって集魚効果が異なることを述べている。この特性を利用したものにサンマ漁がある。サンマは赤い光に対して正の走光性があるため¹⁶⁾、捕獲の際には水上から赤い光を照射させて水面に誘導させる。また、アユは青と緑に対して、イワナは赤と紫に対して正の走光性があるこ

とが指摘されているが¹⁷⁾、その他の魚種ではどうかというデータがない。以上のように、魚種によって選好する透過光の種類が異なるが、河川魚についてこうした研究がほとんどなされていないのが現状である。

一方、気泡を用いた魚の行動制御が1960年代から開始された。Smith^{18),19)}は気泡幕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.*²⁰⁾は気泡幕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。しかし、秋山ら²¹⁾はイシダイ、マアジ、イサキ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、マアジおよびイサキは気泡幕に対して忌避行動を示したものの、イシダイは忌避行動を示さなかったことおよび気泡量の影響はほとんどないことを述べている。中村²²⁾は「魚は気泡を嫌う」と述べているが、魚種名を明らかにしていない上、実験的な検討は行っていない。なお、河川においても気泡幕を用いた迷入防止施設が建設されているが、全国内水面漁業協同組合連合会²³⁾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施設という結果であった。以上のことから、気泡に対する行動特性も魚種によって異なると推測されるが、河川魚について気泡に対する行動特性を検討した研究はほとんどない。

本研究では透過光の色の種類を系統的に変化させ、オイカワおよびカワムツの行動特性を解明した。続いて、開水路内において気泡幕を作成し、気泡混入量および流速を系統的に変化させて両魚種の行動特性を解明した。

2. 透過光が魚の行動に及ぼす影響

(1) 実験装置および実験条件

連続光であっても、120lx以下の低照度では魚の反応は照度の影響を受けないことを小池²⁴⁾は明らかにしたが、照度の大きい場合には正の走光性のある魚にとっても威嚇効果になることが今村¹⁵⁾、Nemeth & Anderson²⁵⁾、安・有元²⁶⁾によって解明されている。関谷⁵⁾によっても照度の変化がアユの行動に影響を与えることが解明されている。また、連続光と不連続光とでは反応が大きく異なることが小池²⁴⁾、安・有元²⁶⁾、小池ら²⁷⁾によって指摘され、固定光と移動光とでも反応が異なることが井上²⁸⁾、高橋²⁹⁾によって指摘されている。これらは、実験を行う際に照度や照射条件を一定に保つ必要があることを示している。

a) 実験装置

図-1に示す長さ1.0m、幅0.3m、高さ0.3mの水槽を実験に用いた。底面は塩化ビニル製で側面はアクリル製とした。照明器具に0～500Wの範囲で光量調整可能な白色ハロゲンライトを用いた。白色のハロゲンライトから任意の色の透過光を作るために、6色(紫(purple)、青(blue)、

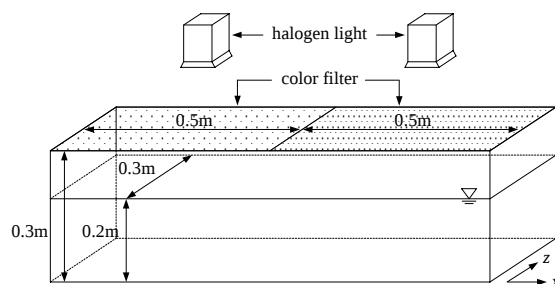


図-1 実験装置概要

表-1 透過光の色と波長

color	wavelength
purple	400～435nm
blue	435～480nm
green	500～560nm
yellow	580～595nm
orange	595～610nm
red	610～750nm

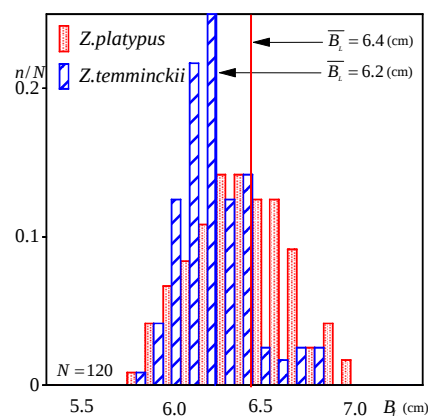


図-2 オイカワおよびカワムツの体長ヒストグラム

緑(green)、黄(yellow)、橙(orange)、赤(red))のポリエステル製カラーフィルターを用意した。表-1に用いた6色の波長を示す。

b) 実験魚

北九州市を貫流する2級河川の板櫃川で採取したオイカワ(*Zacco platypus*)およびカワムツ(*Zacco temminckii*)の成魚を実験に用いた。図-2に両魚種120尾の体長 B_L のヒストグラムを示す。平均体長 $\overline{B_L}$ はそれぞれ約6.4cm、6.2cmであった。

c) 実験条件

水槽の長手方向の左右それぞれにハロゲンライトを設置し、水槽への照射光がそれぞれ異なる色のカラーフィルターを透過するようにした。この時、両者の照度が約1700lxになるよう照度計を利用して光量調節した。表-2に示す5ケースの実験を行った。水深0.2mの静水状態を設定し、片側領域に青の透過光を、反対領域に赤の透過光を照射する。続いて、オイカワ30尾を水路中央に放流し、放流後の60sの挙動を水槽横に設置されたハイビジョンカメラ(画素数1440×1080)で1/30sごとに撮影した。

撮影後、1sごとに赤および青色領域を遊泳する魚数を数えた。赤色の透過光を残りの4色にした場合の同様な4ケースの実験および魚種をカワムツとした5ケースの実験(合計10ケース)を行った。

(2) 実験結果および考察

瞬間残存率を次式のように定義する。

$$\text{瞬間残存率} = \frac{\text{対象色の領域内に存在する魚数 } n}{\text{水槽に入れた魚数 } N} \quad (1)$$

図-3(a)に赤、橙、黄、緑、紫を対照色とした場合のオイカワの瞬間残存率の時間変化をそれぞれ同色の曲線で示した。図-3(b)にカワムツについての同様な図を示す。ここに、 t (s)は魚を放流してから経過時間である。これらの図より、オイカワおよびカワムツの両魚種共に、異なる色の透過光の領域をランダムに往来し、ある色の領域に偏る傾向は見られない。10sあるいはそれ以上の周期で瞬間残存率が増減しているのは、魚が群れとなった状態で水槽内を回遊しているからである。この周期は時間的に変動しており、透過光の色とは無関係であった。以上のことより照度が1700lxの条件では、透過光の色すなわち波長がオイカワおよびカワムツの遊泳に及ぼす影響はないと判断される。今回、実験装置の制約上、1700lx以上の照度における実験が行えなかったが、照度の変化が魚の行動に影響を与えること²⁴⁾⁻²⁶⁾および実河川における照度を考慮すると、1700lx以上の照度における実験が今後必要である。

3. 気泡が魚の行動に及ぼす影響

(1) 実験装置および実験条件

本章では水路中の気泡が魚の行動特性に及ぼす影響を検討する。なお、気泡は流速に応じて開水路内での挙動が異なるため³⁰⁾、本実験では気泡量だけでなく、水路内の流速も変化させて検討を行う。

a) 実験装置

全長4.2m、幅0.4m、高さ0.3mの亚克力製可変勾配型直線水路を実験に用いた。この水路の全区間には高さ0.015mの白色の底上げ板が底面に設置されている。流下方向に x 軸を、水路に直角上向きに y 軸を、横断方向に z 軸をとる。図-4に示すように、水路上流側から1.0m～2.4mの区間の水路中央部に厚さ5mmの白色に塗装されたベニアを設置し、左右対称の区間(1.4m)を作成した。右岸側をbubble area、左岸側をnon-bubble areaとする。両エリア内において底上げ板上に、流下方向0.1mごとに0.015m×0.015mの矩形断面の4本の溝を作成した。この溝に直径0.01m、長さ0.2mの多孔質体を設置した。従って、底面は水理学的滑面ではなく、多少の凹凸を有した状態となっている。ただし、幾何学的には左右対称である。bubble areaに設置された4本の多孔質体に空気排出量が可変なコンプレッサーを接続することで、水中内に任意の

表-2 透過光と色の組み合わせ

case name	left side	right side
case1	red	blue
case2	orange	
case3	yellow	
case4	green	
case5	purple	

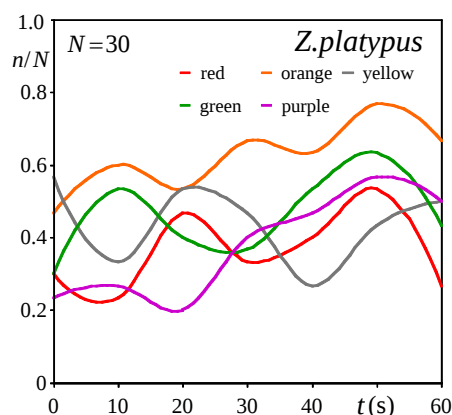


図-3(a) オイカワの瞬間残存率の時間変化

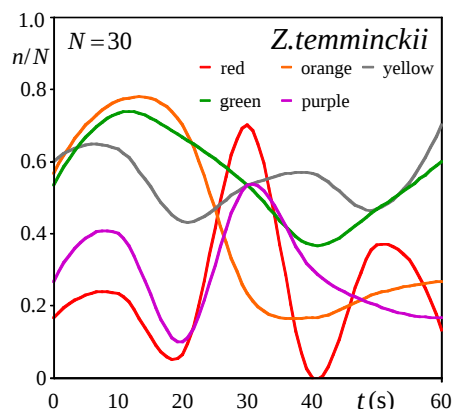


図-3(b) カワムツの瞬間残存率の時間変化

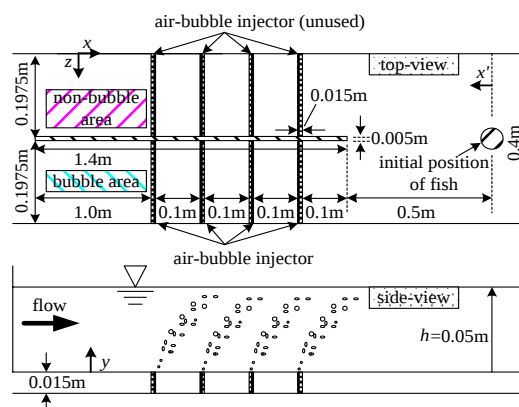


図-4 実験装置概要

速度で気泡が混入される仕組みになっている。

b) 実験条件

魚の最大遊泳速度，すなわち突進速度 B_s は次式で求められる。

$$B_s \text{ (cm/s)} = 10B_L \text{ (cm)} \quad (2)$$

近年，突進速度が魚種および流速に応じて異なるとの指摘もあるが³¹⁾³²⁾，十分な検証がなされていないため，ここでは式(2)を用いる。流速を変化させる上で，流速ゼロから平均突進速度 $\overline{B_s}$ の範囲で均等に分布するように留意した。その結果，気泡混入速度を4通り，流速を4通り，魚種を2通りの合計32ケースの実験を行った。

水深が0.05mの状態では流速および気泡混入量を目的の値に設定した後に，bubble areaおよびnon-bubble areaを分離する境界板の下流端から0.5m下流の位置に，任意の魚を1尾放流した。放流と同時に水路上部に設置されたビデオカメラ(画素数1440×1080)で魚の遊泳軌跡を1/30sごとに撮影し，最上流に設置した多孔質体を通過した後に計測を終了した。同様な実験を各魚種で30尾ずつ(合計960尾)用いて行った。実験後，各フレームに撮影された魚の位置を重ね合わせ，遊泳軌跡を求めた。

c) 流速測定

魚を水路に放流しない状態で，bubble areaおよびnon-bubble areaを分離する境界板の下流端よりも0.25m下流の $z/B=0.25$ および 0.75 において，鉛直方向7点における x 方向流速を電磁流速計を用いて0.05s間隔で51.2s計測した。

(2) 実験結果および考察

図-5(a)，(b)にそれぞれnon-bubble areaおよびbubble areaの流速分布を示す。図中に対数則を直線で示している。ここに， U_* は摩擦速度， ν は動粘性係数である。本来，対数則は $y/h \leq 0.2$ のみで成立するが³³⁾，実験装置の制約で底面近傍の測定ができなかったため，対数則の成立範囲を $y/h \leq 0.4$ とした。non-bubble areaにおける流速はほぼ対数則に従っている。一方，bubble areaの流速分布は水面近傍でやや高速側にシフトしているものの，ほぼ対数則に従っていると判断される。

図-6(a)，(b)にそれぞれnon-bubble areaおよびbubble areaの流下方向乱れ強度分布を示すと共に，Nezu & Rodi³³⁾の提案した普遍式を曲線で示す。non-bubble areaにおける乱れ強度分布はほぼNezu & Rodi³³⁾の普遍式に従っている。bubble areaについても，ほぼ同様であった。すなわち，bubble areaおよびnon-bubble areaを分離する境界板の下流端と魚の放流点とのほぼ中間における水理条件は両領域でほぼ同一である。したがって，魚がいずれの領域かを選択して進入する原因が流速および乱れでないかと推定される。

図-7(a)にbubble areaの気泡混入量が一定(8.30ml/s)で流速が異なる4ケースで得られたオイカワの遊泳軌跡を示す。流速が最も遅い $U_m=0.06\text{m/s}$ において，bubble areaとnon-bubble areaにおける遊泳形態に大きな差は認められない。他の流速についてもbubble areaとnon-bubble areaの間に遊泳形態の差は認められない。ただし，流速別

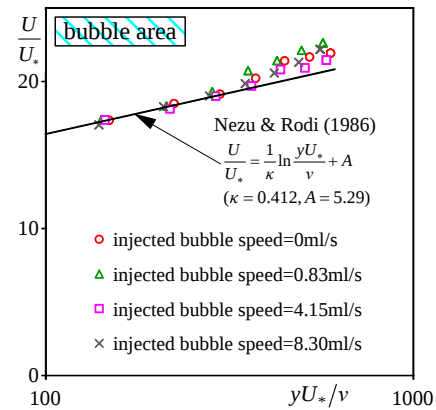


図-5(a) 対数則分布(bubble area)

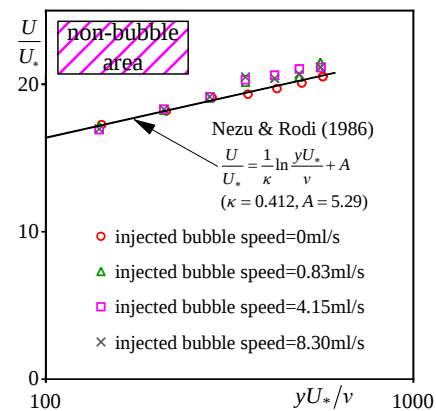


図-5(b) 対数則分布(non-bubble area)

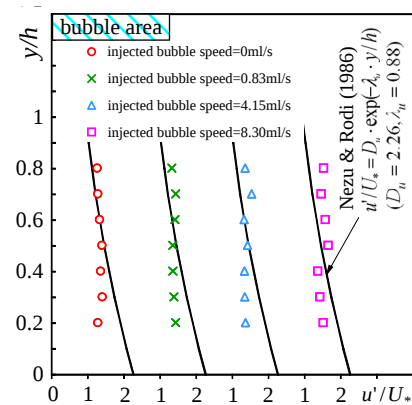


図-6(a) 乱れ強度(bubble area)

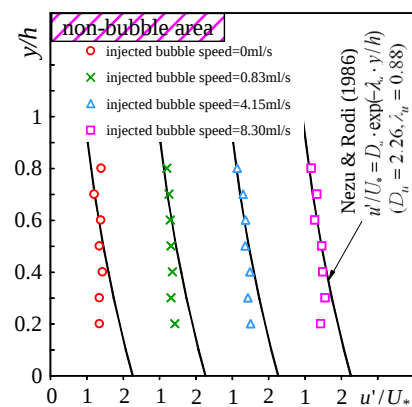


図-6(b) 乱れ強度(non-bubble area)

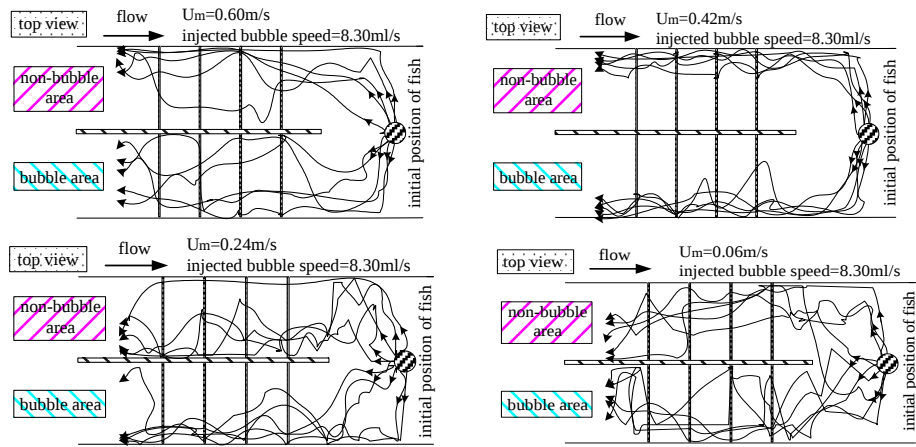


図-7(a) 気泡量一定のときのオイカワの遊泳軌跡

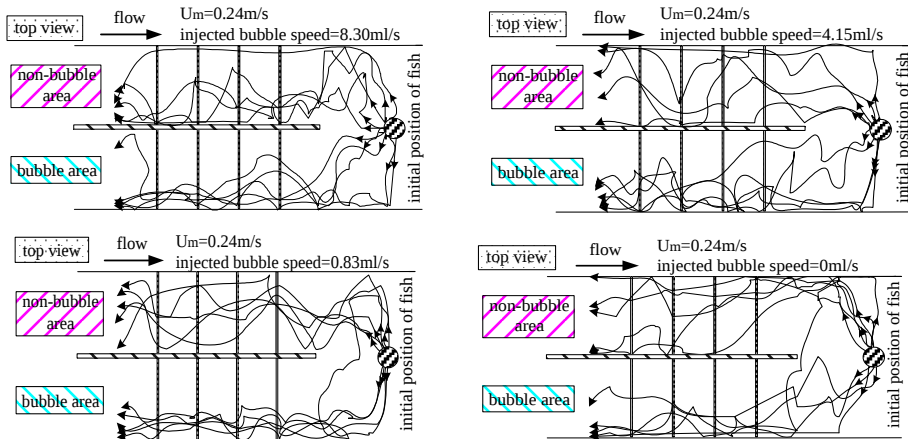


図-7(b) 流速一定のときのオイカワの遊泳軌跡

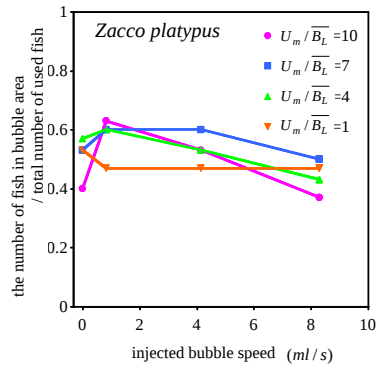


図-8(a) オイカワの流速別bubble area進入率

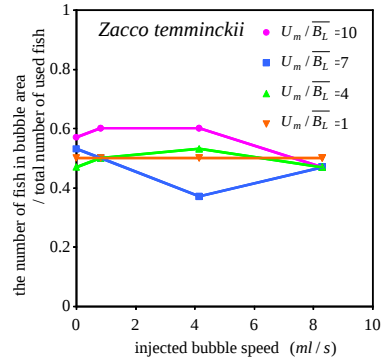


図-8(b) カワムツの流速別bubble area進入率

に比較すると、流速の遅いケースでは壁面からある程度離れた領域を遊泳する様子がみられる。また壁面付近に到達した後再び壁面から離れて遊泳する様子が観察される。一方、流速の増加に伴い壁面付近を遊泳する割合が多くなることおよび一度壁面付近に到達すると壁面から離れにくいことが認められる。すなわち、壁面選好性が流速に依存することが解明された。今後、詳細な検討を行いたい。

図-7(b)に流速が一定($U_m = 0.24 \text{ m/s}$)で気泡混入量が異なる4ケースで得られたオイカワの遊泳軌跡を示す。いずれのケースにおいてもbubble areaとnon-bubble areaにおける遊泳形態に大きな差は認められない。また、気泡混入量が変わってもオイカワの遊泳形態に変化がないと

判断される。カワムツについても同様の結果となった。図-8(a), (b)に気泡混入量の変化に伴うオイカワおよびカワムツのbubble area進入率 (=bubble areaに進入した魚数/総魚数)の変化を流速別にそれぞれ示した。両魚種とも気泡混入量および流速に関わらずbubble area進入率はほぼ0.5となっている。これは、「魚は気泡を嫌う」という説が全ての魚種あるいは全ての環境において必ずしも成立しないことを意味している。今回、少なくともオイカワおよびカワムツについては、気泡混入量0～8.3ml/sにおいては遊泳特性が変化しないことを解明した。今後、水産価値の高いアユについても同様の実験を行いたい。

4. おわりに

透過光の色の種類を系統的に変化させ、オイカワおよびカワムツの行動を観察した。続いて、開水路内において気泡幕を作成し、気泡混入量および流速を系統的に変化させて両魚種の行動特性を解明した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 紫(400~435nm)、青(435~480nm)、緑(500~560nm)、黄(580~595nm)、橙(595~610nm)、赤(610~750nm)の6色については、照度1700lx付近ではオイカワおよびカワムツの行動特性に影響を与えないことが解明された。今後、1700lx以上の照度および他魚種において同様な実験を行う必要がある。
- (2) オイカワおよびカワムツは壁面選好性を有しているが、この特性は流速の変化に依存することを発見した。今後、詳細な検討を行いたい。
- (3) 気泡混入量および流速が変化してもオイカワおよびカワムツは忌避行動を示さないことが解明された。これは、「魚は気泡を嫌う」という従来の説があらゆる条件で成立するとは限らないことを示しており、今後、魚種、水理条件、気泡幕の形状などを変化させ、従来の説が成立する条件を解明したい。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金若手研究(B)19760343(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた。また、魚の飼育方法を御教授いただいた(有)アクアシティの花田一氏、北九州市立水環境館および実験に御協力いただいた本学学部生森悠輔氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 小山長雄：アユの生態，中央公論社，1978.
- 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) 関谷明，福井吉孝，湯目吏吉也，坂本裕嗣：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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 田村光三：電気を応用せる魚道閉塞装置，水産界，No.476，pp.36-37，1922.
- 9) Travade, F. and Larinier, M.: Downstream migration, the problems and the facilities, *Fish Passages*, Conseil superieur de la peche, pp.336, 1994.
- 10) 有元貴文：光を利用した魚群制御技術，水産工学，Vol.28, No.1, pp.71-76, 1991.
- 11) Lyon, E.P.: On rheotropism. i. rheotropism in fishes, *American Journal of Physiology*, Vol.12, pp.149-161, 1904.
- 12) 井上実，任為公，有元貴文：河川魚類の明・暗環境における向流行動，日本水産学会誌，第48巻，12号，pp.1697-1701, 1982.
- 13) 井上実，有元貴文，任為公：海産魚類の明・暗環境における向流行動，日本水産学会誌，第50巻，1号，pp.63-69，1984.
- 14) 黒木敏郎，中馬三千雄：漁業用嫌忌灯光の研究，日本水産学会誌，第18巻，10号，pp.468-471，1953.
- 15) 今村豊：漁業における火光の集魚効果とその操法の研究，うみ，Vol.6，pp.17-43，1968.
- 16) 相沢幸雄：サンマ群の灯付状態と漁獲・魚群との関係，東北区水研報，Vol.23，pp.85-92，1963.
- 17) (財)ダム水源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.
- 18) Smith, K.A.: Air-curtain fishing for maine sardines, *Comm. Fish. Rev.*, Vol.23, No.3, pp.1-14, 1961.
- 19) Smith, K.A.: The use of air-bubble curtains as an aid to fishing, *Modern fishing gear of the world*, Vol.2, pp.540-544, 1964.
- 20) Arimoto, T., Akiyama, S., Kikuya, K. and Kobayashi, H.: Fish-herding effect of an air bubble curtain and its application to setnet fisheries, *Fish Behavior in Relation to Fishing Operations*, Vol.196, pp.155-160, 1993.
- 21) 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，7号，pp.1301-1306，1991.
- 22) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995.
- 23) 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.
- 24) 小池隆：断続光に対する魚類の反応，日本水産学会誌，第51巻，7号，pp.1097-1102，1985.
- 25) Nemeth, R.S. and Anderson, J.J.: Response of juvenile Coho and Chinook salmon to strobe and mercury vapor lights, *North American Journal of Fisheries Management*, Vol.12, No.4, pp.684-692, 1992.
- 26) 安永一，有元貴文：ストロボ光に対するマアジの回避行動，日本水産学会誌，第60巻，6号，pp.713-718，1994.
- 27) 小池隆，山口辰哉，松生洽：光束断続光を利用したマアジの行動制御，日本水産学会誌，第57巻，1号，pp.7-14，1991.
- 28) 井上実：円形水槽における魚の遊泳速度の測定III. 光によるカタクチイワシの遊泳速度，日仏海洋学会誌，第8巻，2号，pp.69-77，1970.
- 29) 高橋正：移動光膜の魚類行動に及ぼす影響について，日本水産学会誌，第44巻，8号，pp.869-874，1978.
- 30) 山上路生，禰津家久：気泡ブルームを含む開水路流れの乱流構造，水工学論文集，第48巻，pp.505-510，2004.
- 31) 泉完，矢田谷健一，東信行，工藤明，加藤幸：自然河川流下水を用いたスタミナトンネルによるオイカワの突進速度に関する現地実験，水工学論文集，第51巻，pp.1285-1290，2007.
- 32) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，山本晃義，飯國洋平：流速および体長別のオイカワの突進速度，水工学論文集，第52巻，2008(投稿中).
- 33) Nezu, I. and Rodi, W.: Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol.112, No.5, pp.335-355, 1986.

(2007. 9. 30受付)