

落下物に対するアユの忌避特性に及ぼす 尾数の影響

EFFECTS OF POPULATION ON AVOIDANCE CHARACTERISTICS OF AYU
FROM A FALLING OBJECT

鬼東幸樹¹・秋山壽一郎²・白岡敏³・三原和也³・大塚寛崇⁴・内田和馬⁴
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Bin SHIRAOKA, Kazuya MIHARA, Hiroataka OTSUKA
and Kazuma UCHIDA

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

Fishermen are embarrassed upon the population reduction of larval fish by the sluice gate which is constructed with dams and weirs. The terror by the falling object from the upward may be valid to make fish avoid from the sluice gate. In this study, the small object was dropped from the upward toward the water surface of a pool, and the fish trajectories were recorded by a digital video camera. It was found that the ayu avoid from the object very quickly during about 1s, and after that ayu make a school of fish gradually. The swimming speed and also the swimming distance during avoiding decreases with an increase of the fish population due to the crowding.

Key Words : fish behavior, evacuation characteristics, falling object, ayu

1. はじめに

ダムや堰などに設置される取水口に魚が迷入し、放流したサケ、アユ、マス等の稚魚が減耗することが漁業関係者を悩ませてきた¹⁾³⁾。関谷ら⁴⁾の調査によると、漁協の約80%が魚類の迷入を経験している。迷入防止対策は以下の2つの方法に大別される⁵⁾。

a) 物理的に防止する方法

b) 魚の行動特性を利用する方法

a)として、フローティングスクリーン、カーテンなどを用いる方法が挙げられる。フローティングスクリーンを用いればスクリーンメッシュを通過できない大型の魚を確実に迷入阻止できる³⁾。カーテンを用いた一連の研究を関谷らが行った。関谷ら⁶⁾は水路中に銀色あるいは魚眼レンズ模様のビニール片を流下方向に徐々にずらしながら横断方向に複数設置し、稚アユを放流して行動特性を観察した結果、稚アユがビニール片を忌避することを確認した。関谷ら⁶⁾⁷⁾、下村ら⁸⁾はアユおよびウグイを対象として関谷ら⁷⁾と類似の実験を行い、同様の結論を得た。しかしながら、実際の河川への適用には装置の工事や維持に時間やコストがかかるという問題点がある。

b)として、光、気泡カーテン、電気スクリーン、落下物などを用いる方法が挙げられる。光については、仔アユに可視光に対する正の走光性がある事を利用した現地実験が開始された³⁾。寺菌ら⁹⁾は光を水中に照射することでサクラマスの集魚が可能であること、および光源を移動させるとサクラマスの誘導が可能であることを示した。しかし、黒木・中馬¹⁰⁾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、両魚種の遊泳挙動に変化がないことを明らかにした。鬼東ら¹¹⁾は1700lx以下の範囲ではオイカワおよびカワムツに及ぼす透過光の影響はないと報告した。

気泡カーテンを利用した迷入防止については稚シヤマモおよび稚サケを対象として製紙工場に、稚アユを対象として水力発電所に設置されている³⁾。また、迷入防止の研究ではないが、Smith¹²⁾は気泡膜を用いてニシン群の進路を遮断することに、Arimoto *et al.*¹³⁾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。川村ら¹⁴⁾は気泡幕によってマダイの進行方向を逆転させることに成功した。一方、江波¹⁵⁾は気泡に対する反応は魚種によって異なること、また、マアジの行動特性には

気泡の影響がほとんど無いことを解明した。鬼束ら¹¹⁾は気泡混入速度が8.30ml/s以下ではオイカワおよびカワムツの遊泳特性に及ぼす影響は観察されないと報告した。

電気スクリーンの効果を検討した例として関谷ら⁵⁾の研究が挙げられる。彼らは稚アユ、コイ、フナを対象として、パルス長およびパルス間隔をそれぞれ1/100s, 10Hzの一定な状態で電位勾配を0.1V/cmから1.0V/cmの範囲で系統的に変化させ、コイ、フナ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。

以上のように様々な迷入防止法が試みられているが、明瞭な迷入防止の効果を上げている例はほとんどない^{4),7),16)}。ところが、b)において、落下物を用いた方法の効果についてはほとんど研究がなされていない。伊奈¹⁷⁾は魚の生理的行動を、集合行動と魚種の識別、生殖行動、回遊と母川回帰の行動、恐怖と忌避行動に分類している。恐怖と忌避行動は身を守るための防衛反応であり、魚が生息していく上で必要な生理的行動である。特に魚の忌避行動を理解することで魚の住みやすい生息環境を提供し、取・排水口などへの迷入を防止し、人工物から魚を保護することが可能になると考えられる。

岡田・吉田¹⁸⁾はプールに四角柱を落下させて1秒後に引き上げた際のメダカ5尾の挙動をカメラで撮影した。その結果、四角柱が水面に着水する直前からメダカが急激に遊泳速度を増加させて逃避を開始すること、四角柱を引き上げる時の遊泳速度は着水前後の速度よりも低下することを明らかにした。また、逃避時は個体間距離が減少することを解明した。しかし、測定時間が2秒しかないため、逃避効果の持続時間が不明なこと、魚群形状を解析していないため落下物による逃避効果の及ぼす範囲などは解明されていない。迷入防止策として利用するには、まず魚の基本的な忌避特性を解明する必要がある。突発的な刺激に対する忌避特性は反射的に起こるものであり、ほぼ同種の刺激を与えた場合には同じ挙動を起こすと考えられ、落下物に限らず忌避特性を利用した迷入防止対策に利用できると思われる。また、岡田・吉田¹⁸⁾のメダカ5尾を用いた研究により、平常時の遊泳と、忌避する際の遊泳とでは遊泳速度、遊泳加速度等に明確な違いがあることが推測される。また、魚群の個体間距離に変化があることより、魚群半径や個体間距離にも変化があると思われる。しかしながら、尾数の変化が忌避特性に及ぼす影響を検討した研究はなく、尾数の変化により忌避特性が変化することも推測される。今後、実用的な迷入防止策を講じるためには、尾数の影響を考慮する必要がある。

そこで本研究は、室内円形プールにおいて、落下物に対する時のアユの忌避特性、及びアユの尾数変化による忌避特性の変化について検討した。

表-1 実験条件

case name	C3	C5	C10
N (尾)	3	5	10

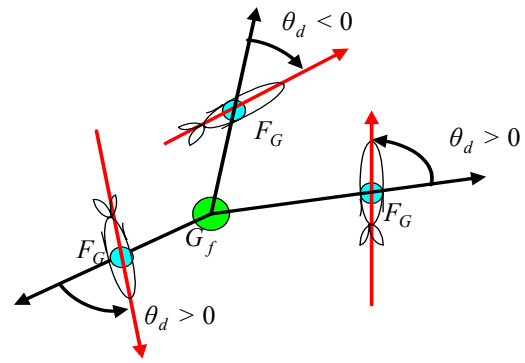


図-1 進行角度の模式図

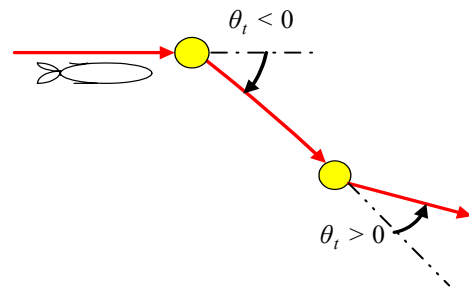


図-2 屈折角度の模式図

2. 実験装置、実験条件および実験方法

実験には山口県榎野川漁協から購入したアユ科アユ属の養殖アユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)を150尾用意して、偏りがないように使用した。一度実験に使用したアユは、最低でも一日の間隔を設けて再度実験に使用した。アユの平均体長は70mmである。なお、水産資源として価値が高いという観点から本実験でアユを使用した。

実験は6月初旬の日中に行った。室内は空調を18°Cに調節し、飼育水槽の水温は19°Cであったため、時期や時間帯による影響はほぼないと考えられる。直径1.83mの円形プールに、水深を0.05mになるように水温19°Cの水を挿入した。

本実験では水深を0.05mとすることで、水深方向の運動を抑制した。魚の遊泳特性は3次的に解析することが望しいが解析が複雑になるため、2次元解析を行った。アユを円形プールに挿入し、1分間馴致させた。アユが魚群を形成した状態でプールの中央付近を遊泳した際に、高さ1mから直径0.01mの鉄球を魚群の中央に落下させた。着水後の魚の遊泳挙動を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分間撮影した。尾数Nを3, 5, 10の3ケースに変化させ、上記の実験を各ケースで30回の合計90回行った。表-1に実験条

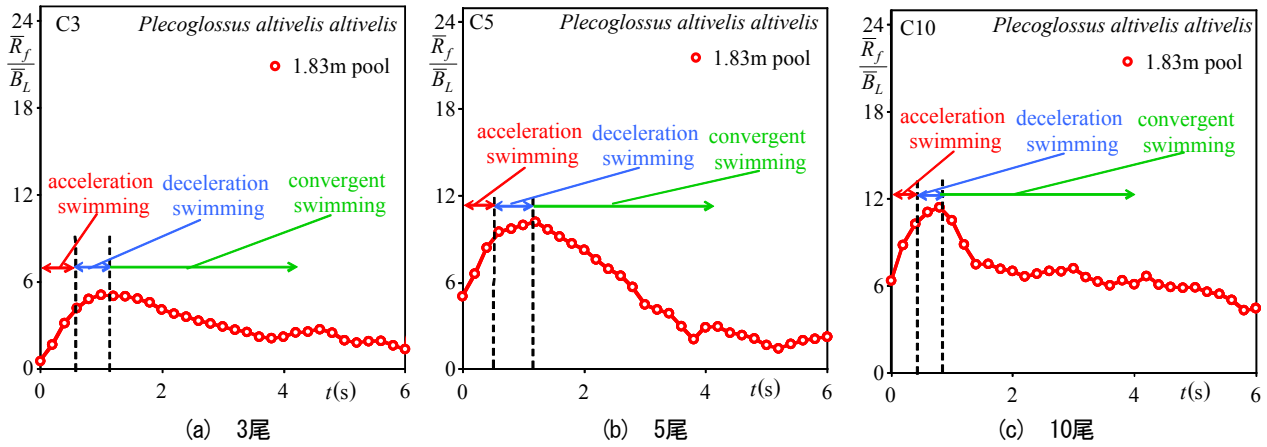


図-3 各尾数における平均魚群半径の時間変化

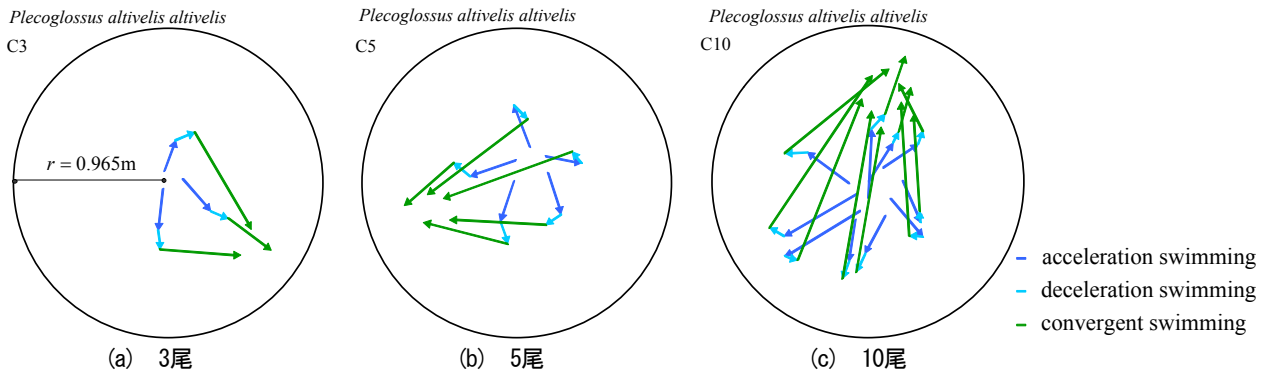


図-4 各尾数における忌避の様子の一例

件を示す。撮影後、0.01 s ごとの魚の遊泳位置を求め、魚群半径、魚群重心、遊泳速度を算出した。また、図-1 に示すように魚群重心から各魚の重心を結んだ線と、各魚の尻尾と頭部を結んだ線とが成す角度 $|\theta_d|$ および図-2 に示す魚が遊泳中に屈折した際の屈折角度 $|\theta|$ を算出した。なお、遊泳速度・遊泳加速度の変化から忌避の持続時間、魚群半径・個体間距離の変化から魚群形状、進行角度や屈折角度から魚の遊泳の線形性がそれぞれ把握できる。

アユの挙動に対して十分に広いプールでなければ、アユの挙動が変化する可能性がある。そのため、直径が1mの円形プールを用いて本実験と同様な実験を数ケース行った。その結果、直径1.83mと1mのプールにおいてアユの挙動が変化は見られなかったため、以下直径1.83mのプールの結果のみ記載する。

3. 実験結果および考察

(1) 魚の遊泳の定義

図-3(a)～(c)に直径1.83mのプールの落下物の着水後の各尾数における平均魚群半径 \bar{R}_f を平均体長 \bar{B}_L で除した値の時間変化を示す。落下物着水後、魚群半径が急激に増加し最大値をとる。その後、魚群半径は減少していき落下物着水前の魚群半径に収束する。

ここで、落下物着水後から魚群半径が最大をとるまでに魚の遊泳加速度の値が正から負に変化している。よって以下、遊泳加速度 0 m/s^2 を基準に区分し、着水時から遊泳加速度が正となり遊泳加速度 0 m/s^2 をとるまでを加速遊泳(acceleration swimming)、遊泳加速度が負となり魚群半径が最大値をとるまでを減速遊泳(convergent swimming)とする。また、最大魚群半径をとった後の魚の遊泳を再魚群形成遊泳(convergent swimming)と定義した。

(2) 落下物に対するアユの忌避特性

図-4(a)～(c)に各尾数における落下物に対する魚の忌避の様子の一例をベクトルで示す。ベクトルはそれぞれ加速遊泳、減速遊泳、再魚群形成遊泳に対応している。落下物の着水後に魚は分散するが、時間経過と共に再び魚群を形成する様子が確認される。

図-5に魚群半径の最大値の各尾数における平均 $\bar{R}_{f \max}$ と標準偏差 $R'_{f \max}$ を平均体長 \bar{B}_L で除した値を示す。尾数の増加に伴い魚群半径の最大値は増加する。これは、尾数が増加すると魚群の規模が拡大することが原因である。また、尾数の増加に伴い標準偏差も増加する。

(3) 忌避特性と平均時間の関係

図-6に落下物の着水時からの平均時間 \bar{t} の関係を尾数

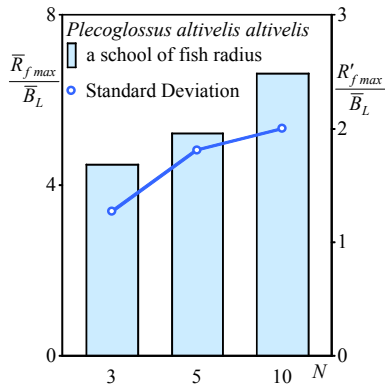


図-5 各尾数における魚群半径の最大値の平均と標準偏差

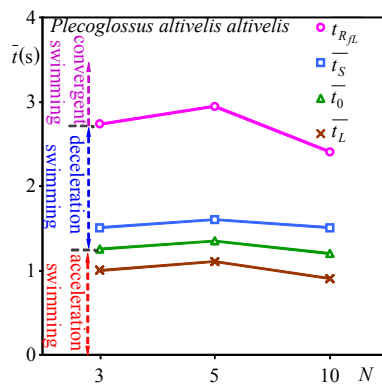


図-6 各尾数における落下物の着水時からの平均時間

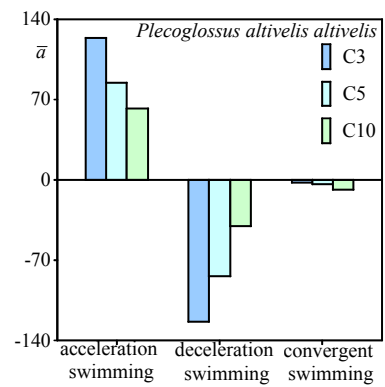


図-7 各遊泳開始から終了までの時間平均加速度の変化

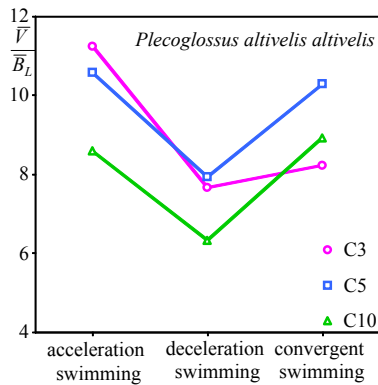


図-8 各遊泳開始から終了までの時間平均遊泳速度

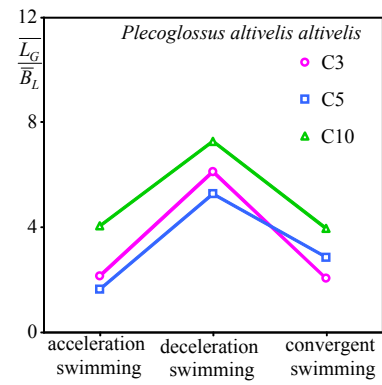


図-9 各遊泳開始から終了までの時間平均個体間距離

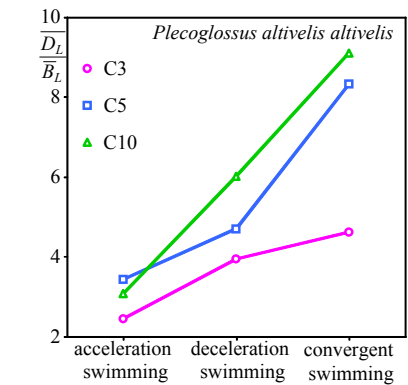


図-10 落下物の着水時の魚群重心から各遊泳時における魚群重心の平均移動距離

別に示す。 $\bar{t}_{R/L}$ は落下物の着水時から魚群半径が最大値になるまでの平均時間、 \bar{t}_L 、 \bar{t}_S 、 \bar{t}_0 はそれぞれ、遊泳加速度が最大値、最小値、 0 m/s^2 になるまでの平均時間を示している。これより、各尾数の平均時間をそれぞれ平均すると、 $\bar{t} \approx 1 \text{ s}$ において遊泳加速度が最大値をとることがわかる。これは落下物が落ちた瞬間に魚が反射的に忌避することが原因である。また、 $\bar{t} \approx 1.5 \text{ s}$ において遊泳加速度が最小値をとっている。これは魚が遊泳速度を減少させていることが原因である。その後、 $\bar{t} \approx 2.6 \text{ s}$ において魚群半径が最大となるが、再び魚群を形成するため、以降魚群半径は減少し収束する。また、各ケースにおいて標準誤差は $0.1 \sim 0.5 \text{ s}$ であった。

(4) 平均遊泳加速度、平均遊泳速度

図-7に各遊泳開始から終了までの時間平均加速度 \bar{a} の変化を各尾数別に示す。加速遊泳の際に遊泳加速度は正の値、減速遊泳の際に遊泳加速度は負の値を示す。一方、再魚群形成遊泳では加速度は 0 m/s^2 程度を示し、魚は等速で遊泳していることがわかる。また、尾数の増加に伴い、加速・減速遊泳時における遊泳加速度の値が減少する。また、加速・減速遊泳時における各ケースにおいての標準誤差は $5 \sim 12 \text{ m/s}^2$ で、再魚群形成遊泳における各ケースにおいての標準誤差は $0.2 \sim 1 \text{ m/s}^2$ であった。

図-8に各遊泳開始から終了までの時間平均遊泳速度

\bar{V} を平均体長 \bar{B}_L で除した値の変化を各尾数別に示す。加速遊泳における平均遊泳速度は他の遊泳時の平均遊泳速度より高い値を示している。これは、実験開始時は落下物を反射的に忌避するために遊泳速度を増加させたことが原因である。また、この傾向は岡田・吉田¹⁷⁾が行なった、プールに四角柱を落下させて1 s後に引き上げた際のメダカの挙動と類似している。次に減速遊泳に着目すると、平均遊泳速度は他の遊泳時の平均速度と比べ低い値を示している。一方、再魚群形成遊泳において平均遊泳速度が再度、高い値を示す。これは、各魚が再び魚群を形成するために遊泳速度を増加させることが原因である。また、各ケースにおいて標準誤差は $0.8 \sim 1.51 \text{ /s}$ であった。

(5) 平均個体間距離、魚群重心の平均移動距離

図-9に各遊泳開始から終了までの時間平均個体間距離 \bar{L}_G を平均体長 \bar{B}_L で除した値の変化を各尾数別に示す。加速遊泳から減速遊泳に達するまでは個体間距離が増加する傾向にある。これは、魚がおおよそ均等に放射状に遊泳していることが原因である。減速遊泳から再魚群形成遊泳に達するまでは個体間距離が減少する傾向にある。これは、魚群の再形成に伴い魚同士の距離が近くなることが原因である。また、各ケースにおいて標準誤差は $0.5 \sim 1.2$ であった。

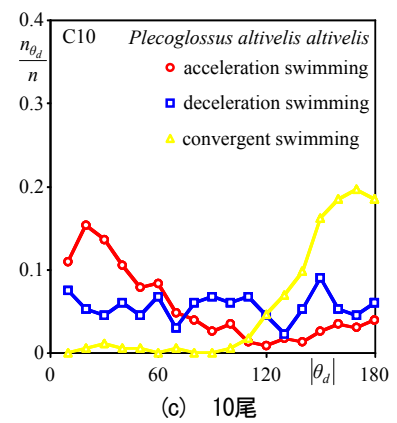
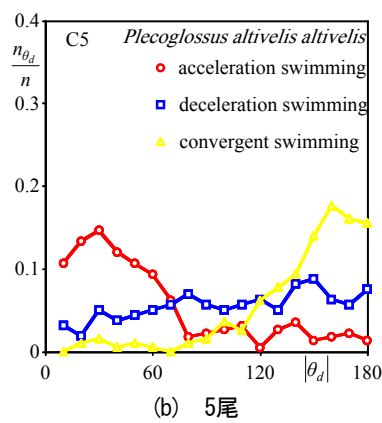
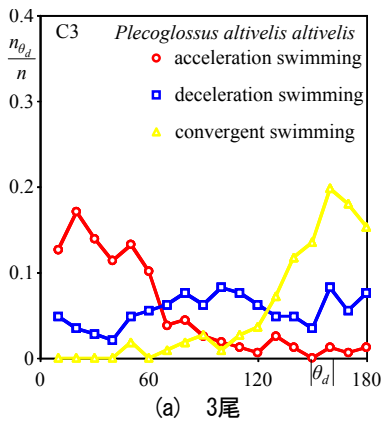


図-11 各尾数における進行角度の頻度分布

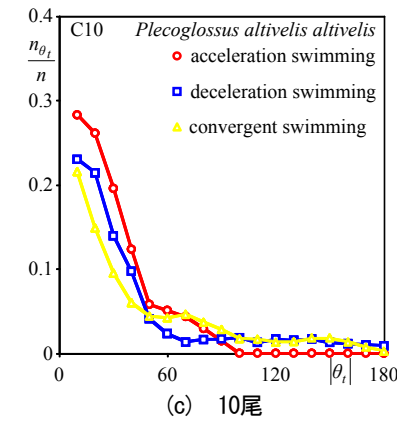
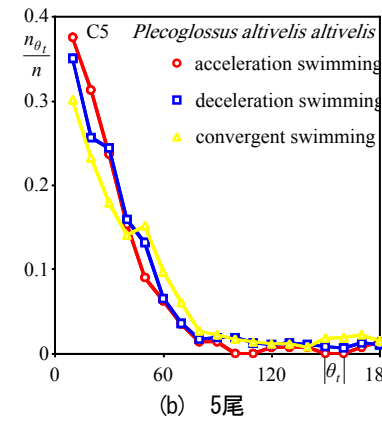
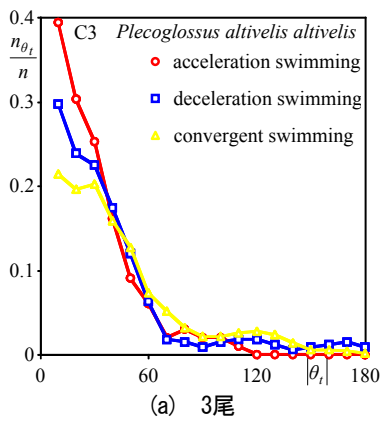


図-12 各尾数における屈折角度の頻度分布

図-10に全ケースにおける落下物の着水時の魚群重心から各遊泳時における魚群重心の遊泳別平均移動距離 \bar{D}_L を平均体長 B_L で除した値を各尾数別に示す。加速遊泳において魚群重心移動距離は小さい値を示している。また、減速運動において魚群重心移動距離は増加している。再魚群形成遊泳においては魚群重心移動距離が顕著に増加している。これは、落下物が落ちた地点から離れた場所で魚群を形成することを示している。この理由として、魚が落下物に対して恐怖を感じる事が原因であると考えられる。また、各ケースにおいて標準誤差は0.4~1.2であった。

(6) 進行角度, 屈折角度

図-11(a)~(c)に各尾数における進行角度 $|\theta_d|$ の全ケースの頻度分布を示す。ここに、 n は屈折回数、 n_{θ_d} は10°ごとの頻度である。すべての尾数において加速遊泳では0°~40°付近でピークを示している。これは、魚が魚群重心から放射状に遊泳していることを意味している。減速遊泳においては頻度分布に偏りがなく、魚が分散している様子を示している。再魚群形成遊泳においては150°~180°付近でピークを示している。これは、魚が魚群重心方向に集まりながら遊泳している様子を示している。つまり広がった魚群が再度、収束している様子を示している。これは、魚が恐怖を感じているために生じ

た挙動である。この傾向は吉田¹⁹⁾の魚は恐怖を感じると魚群を形成するという報告と一致する。一方、尾数変化による差異は観察されなかった。

図-12(a)~(c)に各尾数における屈折角度 $|\theta_l|$ の全ケースの頻度分布を示す。ここに、 n は屈折回数、 n_{θ_l} は10°ごとの頻度である。全ての尾数において加速遊泳時では他の遊泳時より0°~30°付近の値が高い傾向にある。これは反射的に落下物から離れ、直線的に遊泳することが原因である。減速遊泳では、加速遊泳に比べ0°~30°付近の値が低くなり、60°以降の値が高くなる。これは各魚が様々な方向を向いて遊泳していることを示している。再魚群形成遊泳では、他の遊泳時に比べ60°以降の値が高い傾向にある。これは魚群を形成する際、曲折して遊泳することが原因である。一方、尾数変化による差異は観察されなかった。

4. おわりに

本研究は、室内円形プールにおいて、落下物に対するアユの忌避特性に及ぼす尾数の影響について検討したものである。本研究より得られた知見は以下の通りである。
(1) 落下物を落とした際、アユは落下物から忌避するために分散する。そのため魚群半径は増加し、最大値をとる。しかし、恐怖を感じたアユは魚群を形成し、元の魚

群半径に近い値に収束する。

(2) アユは落下物の着水後から約1, 1.5s後にそれぞれ遊泳加速度の最大値, 最小値をとり, 約2.6s後に魚群半径の最大値をとる。

(3) アユは落下物の着水後に落下物を忌避し, 遊泳速度を増加させるが, その後, 遊泳速度を減少させる。また, 再び魚群を形成するときアユはほぼ等速で遊泳をしている。

(4) アユは落下物の着水後の遊泳において, 尾数の増加に伴い, 平均加速度の変化が低くなる。

(5) アユは落下物を忌避する際, 個体間距離は増加するが, 再び魚群を形成する際に個体間距離は減少する。

(6) 落下物を落とした際, アユは落下物を忌避する。アユが再び魚群を形成するとき, 恐怖を感じているため, 元の魚群重心から離れた場所で魚群を形成する。

(7) アユは落下物を忌避する際, 放射状に遊泳する。その結果, アユの進行角度は低い値を示す。なお, 忌避する際, アユは直線的に遊泳するため屈折角度は低い値を示す。

(8) アユが再び魚群を形成する際の進行角度は魚群重心に向かって遊泳するため高い値を示す。なお, アユが魚群を形成する際, アユは曲折して遊泳するため屈折角度は低い値を示す。

(9) アユは分散し, 再び魚群を形成するまでの進行角度および屈折角度の変化に尾数変化の影響を受けない。

以上のアユの忌避特性を簡潔にまとめる。アユは落下物が着水した時, 反射的に忌避して分散する。その後, アユは落下物から離れた地点で再び魚群を形成する。よって, アユに突発的な刺激を与えることで, 取・排水口から遠ざけて迷入防止ができると考えられる。

5. 今後の課題

本研究では, 忌避の持続時間, 魚群形状の変化, アユの遊泳の線形性を解明した。しかしながら, 落下物着水後も落下物がプールの底に存在していることが魚群形成時の遊泳に影響を与えた可能性がある。今後は落下物の種類や音が変化しても同様の忌避特性が得られるか検討し, アユを取・排水口から遠ざけて, 迷入防止策として利用できるか検証する必要がある。

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)23560610 (代表: 鬼東幸樹) の援助を受けた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 全国内水面漁業協同組合連合会: 魚を取水施設に迷入させないための試み, 2001.

- 3) (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.
- 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, 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 寺園勝二, 越沢治, 古屋稔: ダム貯水池におけるサクラマス光誘導, ダム技術, No.129, pp.10-17, 1997.
- 10) 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.
- 11) 鬼東幸樹, 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.
- 12) Smith, K.A.: Modern fishing gear of the world 2, *Fishing News Ltd*, Surrey, pp.540-544, 1964.
- 13) 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.
- 14) 川村軍蔵, 安樂和彦, 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, 6号, pp.900-902, 2002.
- 15) 江波澄雄: 気泡網に関する研究-II, 二, 三の海産魚についての駆集および遮断効果, 日本水産学会誌, 第26巻, 3号, pp.269-272, 1960.
- 16) 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, 3号, pp.398-405, 1998.
- 17) 伊奈和夫: 魚の行動, 日本農芸化学会誌, Vol.14, No.10, pp.648-653, 1962.
- 18) 岡田貴史, 吉田将之: 簡易型魚類行動定量化ソフトウェアの開発と小型魚類の逃避行動解析への適用, 水産増殖, 第59巻, pp.367-373, 2011.
- 19) 吉田将之: 魚類における恐怖・不安行動とその定量的観察, 比較生理生化学, 第28巻, 4号, pp.317-325, 2011.

(2012. 9. 30受付)