

減速時の加速度と流速が カワムツの遊泳挙動に及ぼす影響

鬼束 幸樹¹・秋山 壽一郎²・宍戸 陽³・武田 知秀⁴

¹正会員 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)
E-mail: onitsuka@civil.kyutech.ac.jp

²フェロー会員 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

³非会員 日鉄住金テックスエンジ株式会社 (〒100-0005 千代田区丸の内2丁目5-2)

⁴学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

魚類は洪水時にその遊泳挙動を変化させ、流速の低下する場所や上流へ移動することが解明されている。加速度および流速は魚の遊泳挙動に影響を及ぼす要因と考えられる。本研究は負の加速度および減速後の流速とカワムツの挙動との関係について検討したものである。ピーク流速を固定し、負の加速度と減速後の流速を変化させ、開水路内のカワムツの挙動をビデオカメラで撮影した。その結果、カワムツの移動方向を決定する負の加速度の閾値は $-0.5(1/s^2)$ 程度であり、負の加速度が $-0.5(1/s^2)$ より小さいときは上流側へ、 $-0.5(1/s^2)$ より大きいときは下流側へ移動方向が変化することが判明した。また、減速は遡上を誘発することが示唆された。一方、減速後の流速が変化してもカワムツの遊泳挙動に影響を及ぼさなかった。

Key Words : deceleration, swimming behavior, *Nipponocypris Temminckii*, negative acceleration, velocity

1. はじめに

近年集中豪雨などにより洪水が頻発化している¹⁾。洪水時には河川の流量が急激に増加あるいは減少するため、水中で一生を過ごす魚類にとってその影響力は無視できない。流況の極端な変動は産卵や摂餌のために河川を遡上あるいは降下する魚類の移動を妨げる障害となる。そのため、洪水時の魚類の行動特性の解明が行われている。

佐川ら²⁾は洪水時の木曾川において、階段護岸、練石護岸およびわんど部においてタモ網を用いた魚類確保を行い、わんど部で突出した尾数を確保した。Lyon *et al.*³⁾は本川と湿地帯との接合部でサデ網を用いて魚類調査を行った結果、魚類は増水時に本川から側岸部へ、減水時に側岸部から本川に移動することを示唆した。以上のように、洪水時に魚類はわんどや水際部などに代表される避難所に移動することが明かされている。

洪水時の魚類の挙動を把握する方法として、魚類を個別に追跡するテレメトリー法が挙げられる。東ら⁴⁾はテレメトリー法を用いて河川におけるウグイおよびサクラマス⁵⁾の挙動を追跡し、出水直後に流下したウグイがわんどに避難していることを実証すると共に、増水によってサクラマスの遡上⁶⁾が誘発されることを示唆した。傳田ら

⁵⁾は自然共生センターの実験河川において、増水時間、ピーク流量、ピーク継続時間を変化させ、コイおよびギンブナの挙動をテレメトリー法で追跡した。その結果、小規模出水では供試魚の移動が誘発されないが、大規模出水では上流への移動が誘発されることを解明した。ただし、傳田ら⁵⁾の実験では流速および加速度の両者が同時に変化しているため、得られた魚の挙動が流速あるいは加速度のどちらの影響によるものかを容易には判断できない。

洪水において魚の挙動に影響を与える加速度と流速を個別に制御が野外計測では困難であるが、室内実験ではそれが容易である。鬼束ら⁶⁾は室内実験水路において、ベース流量および増水時間を固定し、ピーク流量を変化させた流況においてオイカワの挙動に及ぼす増水の影響を検討し、増水時のオイカワの遊泳特性の変化は加速度よりも流速の方に大きな影響を受けることを解明した。青木ら⁷⁾は20秒間で流量を増加あるいは減少させる非定常流れにおいて、複断面水路中を遊泳するウグイの挙動を観察した。その結果、ウグイの体長の4倍程度の体長倍流速であれば、流れの加速度の正負に関わらず流速の増加時や減少時に遡上すること、および加速度はウグイの行動に変化を与えるきっかけとなることを示唆した。

以上のように、非定常流れは魚類の挙動に影響を及ぼすと考えられている。また、洪水時の流速は時間だけでなく空間的にも大きく変化することが解明されている⁸⁾。そのため、魚類の体感する水中での流況変動は大きなものだと推測される。

本研究はピーク流速を固定し、負の加速度と減速後の流速を変化させた流況において、カワムツの遊泳挙動に及ぼす減速の影響を検討した。

2. 実験装置および実験条件

図-1に本実験で用いた水路長3.5m、幅0.8m、高さ0.3mの開水路の概要を示す。流下方向に x 軸、水路底面から鉛直上向きに y 軸、横断方向に z 軸をとる。流れが一樣になっている領域において、 x 軸方向に流下方向長さ $L=2.0\text{m}$ 、 z 軸方向に横断方向長さ $B=0.8\text{m}$ の範囲をSwimming Areaと設定する。表-1に実験条件を、図-2に各ケースにおける流速の時間変化を、表-2に実験条件における記号の定義をそれぞれ示す。ピーク流速を体長倍流速 $U_p/\bar{B}_L=10(1/s)$ とし、負の加速度 $a=-1, -0.5, -0.2(1/s^2)$ の3通り、減速後の流速を体長倍流速 $U_l/\bar{B}_L=2, 4, 6(1/s)$ の3通りに変化させた合計9ケースの実験を行った。

ここで、洪水時の流速は時間だけでなく空間的にも大きく変化するため、負の加速度 a の絶対値に大きな値を設定した。ケース名は負の加速度 a と減速後の流速 U_l/\bar{B}_L に基づいて命名し、減速時間 t_d は各ケースによって異なる。例えばa05U4は負の加速度 $a=-0.5(1/s^2)$ 、減速後の流速 $U_l/\bar{B}_L=4(1/s)$ 、減速時間 $t_d=12\text{s}$ の場合を示す。

各ケースにおいて水深 $h=0.07\text{m}$ でピーク流速 $U_p/\bar{B}_L=10(1/s)$ となるように通水させた。定常状態を確認した後に、Swimming Area中央に設置した直径0.2mの円形金網に平均体長 $\bar{B}_L=60\text{mm}$ のカワムツ1尾を挿入した。カワムツが馴致したと判断した後に金網を取り上げた。ピーク流速 $U_p/\bar{B}_L=10(1/s)$ を維持して通水し、各ケースの減速後の流速 U_l/\bar{B}_L になるように所定の減速時間 t_d で流速を線形的に減速させた。さらに、減速時間 t_d と合わせて60s経過するまで減速後の流速 U_l/\bar{B}_L を維持した。ここで、減速後の流速を維持する時間 t_l は以下の式(1)で算出する。

$$t_l = 60 - t_d \quad (1)$$

上記の減速時間 t_d と減速後の流速を維持する時間 t_l の合計60s間、開水路上部に設置した画素数1440×1080、撮影速度30fpsのビデオカメラを用いて、Swimming Area内におけるカワムツの挙動を撮影した。

上記の実験を各ケースで30回、合計270回行った。なお、実験結果に個体差が生じないように100尾のカワム

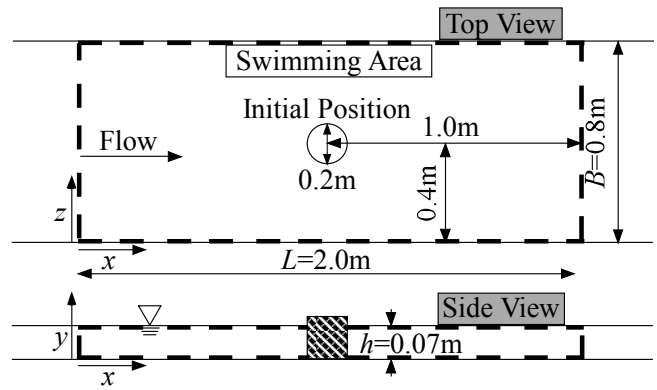


図-1 実験装置

表-1 実験条件

| peak velocity U_p/\bar{B}_L (1/s) | negative acceleration $a(1/s^2)$ | latter velocity U_l/\bar{B}_L (1/s) | | |
|--|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| | | 2 | 4 | 6 |
| 10 | -1 | a1U2 (8s) | a1U4 (6s) | a1U6 (4s) |
| | | a05U2 (16s) | a05U4 (12s) | a05U6 (8s) |
| | -0.2 | a02U2 (40s) | a02U4 (30s) | a02U6 (20s) |

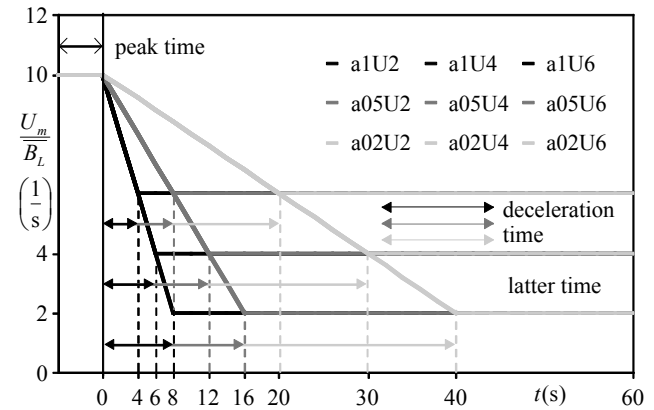


図-2 流速の時間変化

表-2 実験条件における記号の定義

| | | |
|-------------|-----------------------|-------------|
| ピーク流速 | peak velocity | U_p |
| 減速後の流速 | latter velocity | U_l |
| 水路中央での平均流速 | mean velocity | U_m |
| 負の加速度 | negative acceleration | a |
| 平均体長 | averaged body length | \bar{B}_L |
| 減速時間 | deceleration time | t_d |
| 減速後の流速の維持時間 | latter time | t_l |

ツを順番に使用し、反復して個体を使用する場合は疲労

や慣れが結果に影響しないように、1日以上の間隔を設けて実験を行った。実験後、0.5sごとの x 軸および z 軸方向のカワムツの遊泳位置(x_m , z_m)を特定し、カワムツの遊泳挙動を解析した。

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。計測後、 x , y , z 軸方向の時間平均流速 U , V , W および合成流速 $V_r = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ を算出した。

3. 実験結果および考察

(1) 開水路内の流況

図-3に定常時の開水路内の流速ベクトルの例 $U_m/B_L = 10$ を示す。開水路中央部付近($0.3 < z/B < 0.7$)で $U_m/B_L = 10$ 程度の最大流速を示し、壁面付近($z/B < 0.3$, $0.7 < z/B$)で流速が減少している。また、左岸と右岸の流況において明瞭な差異は観察されない。 $U_m/B_L = 2, 4, 6(1/s)$ の場合でも同様で、開水路中央付近で最大流速を示し、壁面に近づくにつれて流速が減少し、左岸と右岸の流況において明瞭な差異は観察されなかった。

(2) カワムツの分布

Swimming Areaを x 軸および z 軸方向について0.1mごとに区切り、合計20×8=160メッシュに分割する。各メッシュ内に存在するカワムツの尾数をカウントし、時間平均存在尾数 \bar{n}_m を算出した。ここで、カワムツの存在位置はカワムツの頭部と尾部の中間点とした。図-4に減速時間 t_d におけるカワムツの存在率 \bar{n}_m/N のコンター図を減速後の流速 $U_i/B_L = 4(1/s)$ のケースについて負の加速度 a ごとに示す。ここで、実験開始の初期位置であるSwimming Area中央付近で $\bar{n}_m/N = 0.04-0.06$ 程度であった。各ケースにおいて初期位置には必ず分布することを考慮すると、カワムツの存在率は $\bar{n}_m/N = 0.04-0.06$ 程度を示す箇所が存在率が高いと考えられる。

図-4(a)~(c)の x 軸方向の分布に着目する。a1U4では $0 < x/L < 0.6$ の領域で $\bar{n}_m/N = 0.04$ 程度を示している。a1U4より負の加速度 a の絶対値が小さいa05U4では分布位置がより高値の $0.2 < x/L < 0.8$ の領域に移動している。さらに負の加速度 a の絶対値が低下しa02U4になると、分布位置がさらに高値に移動し $0.4 < x/L < 1$ の領域で $\bar{n}_m/N = 0.04$ 程度を示している。したがって、 x 軸方向の分布位置は負の加速度 a の絶対値の低下に伴って高値に移動することが判明した。これは減速後の流速 $U_i/B_L = 2, 6(1/s)$ のケースにおいても類似した結果であった。

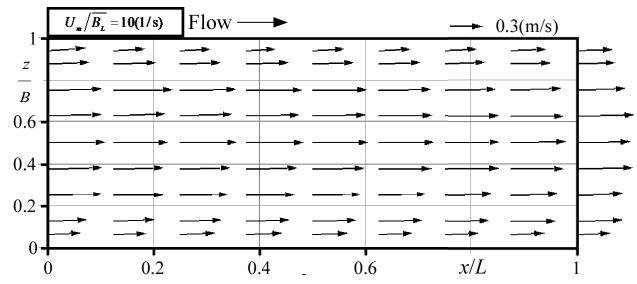


図-3 開水路内の流速ベクトルの例

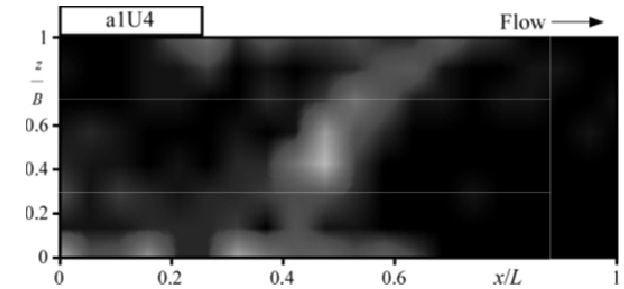


図-4(a) a1U4

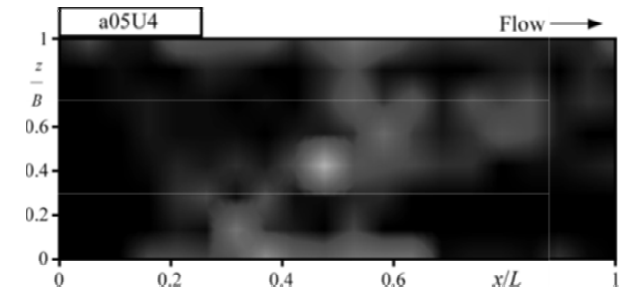


図-4(b) a05U4

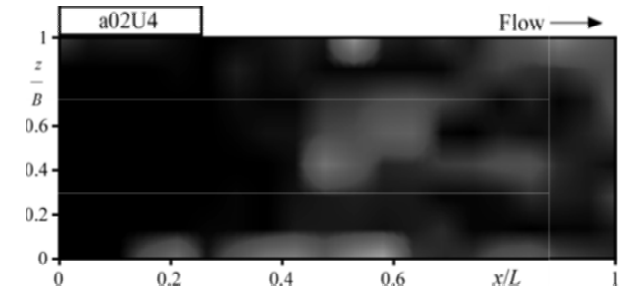


図-4(c) a02U4



図-4 カワムツの存在率コンター

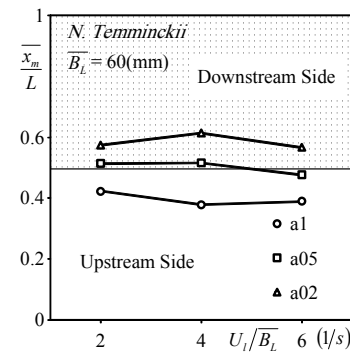


図-5 x 軸についての平均遊泳位置

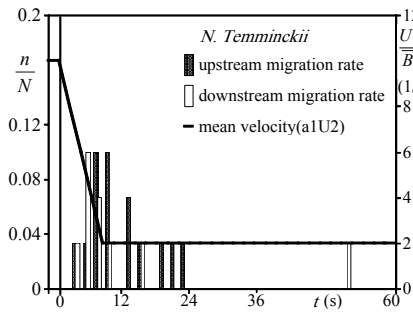


図-6(a) a1U2

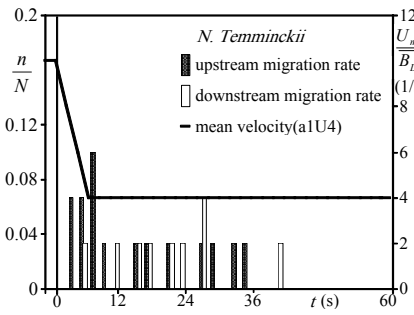


図-6(b) a1U4

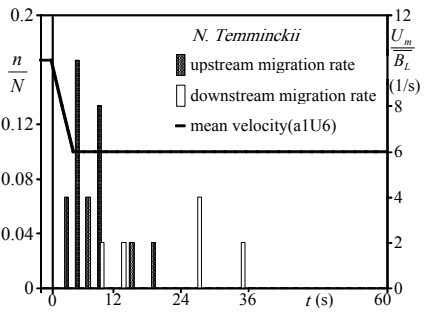


図-6(c) a1U6

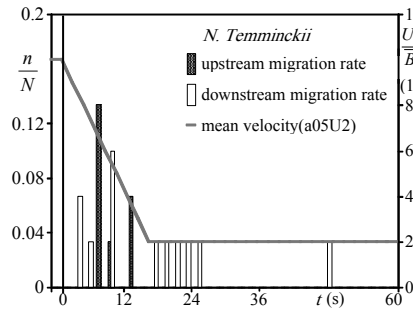


図-6(d) a05U2

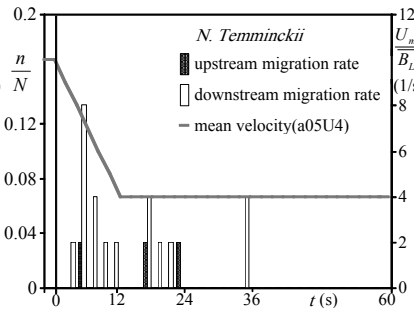


図-6(e) a05U4

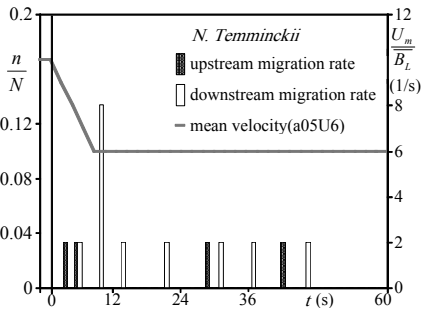


図-6(f) a05U6

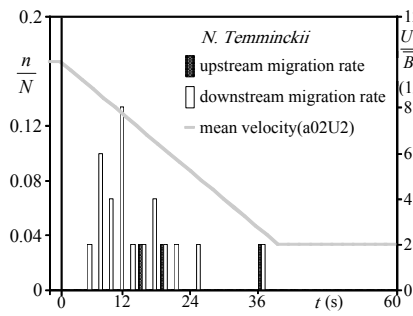


図-6(g) a02U2

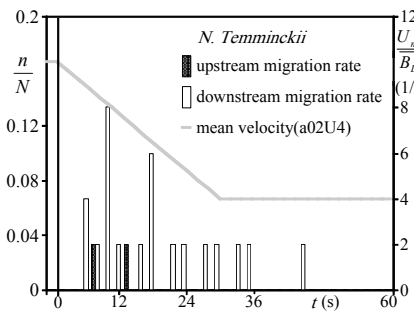


図-6(h) a02U4

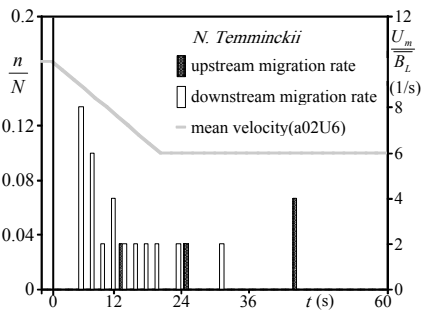


図-6(i) a02U6

図-6 遡上率・降下率および流速の時間変化

(3) カワムツの平均遊泳位置

図-5 に減速時間 t_d の x 軸方向の平均遊泳位置 \bar{x}_m/L と減速後の流速 U_i/B_L との関係を負の加速度 a ごとに示す。ここで、 $\bar{x}_m/L > 0.5$ の場合、初期位置 ($x/L = 0.5$) より下流側で、 $\bar{x}_m/L < 0.5$ の場合、初期位置より上流側でそれぞれ遊泳する割合が高いことを示している。減速後の流速 $U_i/B_L = 2, 4, 6(1/s)$ ごとに着目する。負の加速度 a の絶対値が低下する a1, a05, a02 の順に \bar{x}_m/L 値は約 0.4, 0.5, 0.6 と増加している。これは 3.(2) で前述した負の加速度 a の絶対値の低下に伴って分布位置が x 軸方向の高値に移動する結果と一致している。また、a1 では $\bar{x}_m/L < 0.5$ 、a05 では $\bar{x}_m/L \approx 0.5$ 、a02 では $\bar{x}_m/L > 0.5$ となっている。a05 と比べて速やかに流速の低下する a1 では、比較的早く低速流となる。そのためカワムツが上流側で遊泳する割合が高くなったと考えられる。また、

a05 と比べて a02 では流速が緩やかに低下する。ここで、魚は洪水時に流失を忌避する⁹⁾ことを考慮すると、カワムツは高速流により流失しないようにその場に留まろうとする。しかし、高速流により徐々に押し流され、下流側で遊泳する割合が高くなったと考えられる。上記の理由により、負の加速度 a によってカワムツの遊泳位置が変化すると推察される。一方、負の加速度 a ごとに着目すると、減速後の流速 U_i/B_L の変化による \bar{x}_m/L の明瞭な増加あるいは減少傾向は観察されない。

以上より、本実験結果によると $a < -0.5(1/s^2)$ であれば上流側へ、 $a > -0.5(1/s^2)$ であれば下流側へそれぞれ移動することが示唆された。このように、負の加速度 a によってカワムツの遊泳挙動は変化することが判明した。しかし、今回の実験結果のみでカワムツの移動方向を決定する負の加速度の閾値を断定するには至らない。そのため閾値

は $0.5(1/s^2)$ 程度とし、より確からしい閾値については今後の検討課題としたい。

(4) カワムツの遡上率および降下率

実験中にカワムツがSwimming Areaの上流側境界に到達した場合を遡上、Swimming Areaの下流側境界に到達した場合を降下とし、遡上率を式(2)、降下率を式(3)のようにそれぞれ定義する。

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上回数 } n_u}{\text{実験回数 } N (= 30)} \quad (2)$$

$$\text{降下率} = \frac{\text{降下回数 } n_d}{\text{実験回数 } N (= 30)} \quad (3)$$

図-6に2s間ごとの遡上率・降下率(左側縦軸) n/N および平均体長倍流速 U_m/\overline{B}_L (右側縦軸)をケース別に示す。図-6(a)~(i)の遡上率に着目する。図-6(a)~(c)のa1では減速時および減速完了直後において、高い遡上率を示している。一方、a1より負の加速度 a の絶対値が低下した図-6(d)~(f)のa05では減速時および減速直後に遡上した個体は確認できるものの遡上率がa1と比較して全体的に減少している。さらに負の加速度 a の絶対値が低下した図-6(g)~(i)のa02においても減速中に遡上した個体は確認できるがa05と同様遡上率は低い。

以上より、遡上する個体は減速時に行動することが判明した。これは流速が減少する負の加速度 a によってカワムツの遡上を誘発したことを示唆している。また、負の加速度 a の絶対値の低下に伴って遡上率が減少することが判明した。これは、次のように解釈できる。負の加速度 a の絶対値の低下に伴って魚の最大遊泳速度¹⁰⁾である突進速度($10 B_L$)付近の高速流中の遊泳時間が長くなる。突進速度で遊泳する際には疲労の蓄積する普通筋を使用するため、魚は数秒間しか遊泳を維持できない¹¹⁾。そのため、負の加速度 a の絶対値の低下に伴ってカワムツの疲労が蓄積しやすくなると考えられる。以上のように、負の加速度 a の絶対値の低下に伴ってカワムツが突進速度付近の高速流中を遊泳する時間が長くなり、疲労の蓄積により上流への移動が制限されたと推測される。

図-6(a)~(i)の降下率に着目する。図-6(a)~(c)のa1ではa1U2の減速時において降下率が高くなっているものの他のケースでは偏った分布は見られない。a1より負の加速度 a の絶対値が低下した図-6(d)~(f)のa05では降下率がa1と比較して減速時で高くなっている。さらに負の加速度 a の絶対値が低下した図-6(g)~(i)のa02においては減速時の降下率がa05と比較してさらに高くなっている。

以上より、負の加速度 a の絶対値の低下に伴って減速時にカワムツの降下率が増加することが判明した。先述した通り、負の加速度 a の絶対値の低下に伴ってカワムツが突進速度付近の高速流中を遊泳する時間が長くなる。

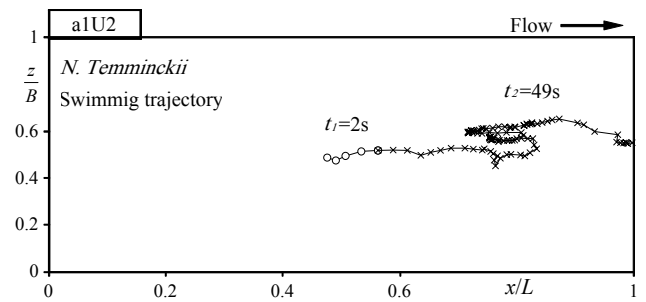


図-7(a) a1U2

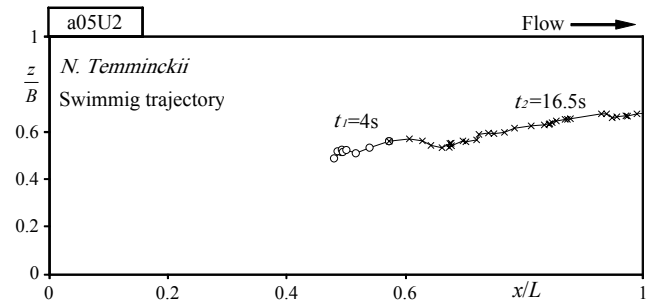


図-7(b) a05U2

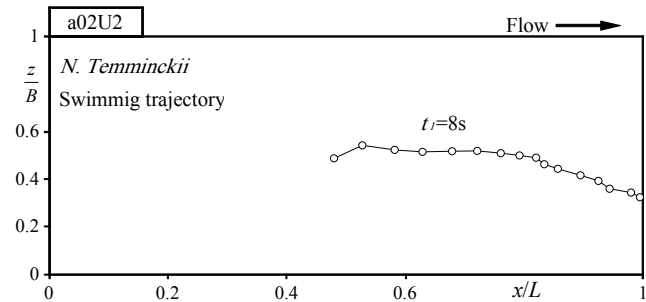


図-7(c) a02U2

図-7 流失したカワムツの遊泳軌跡

このことを考慮すると、疲労の蓄積により減速時間中に押し流されたと考えられる。

(5) 流失したカワムツの遊泳軌跡

上流方向を向いていながら降下した場合を流失と定義する。図-7(a)~(c)に0.5sごとの流失したカワムツの遊泳軌跡の一例を減速後の流速 $U_1/\overline{B}_L = 2(1/s)$ のケースについて示す。突進速度付近($10 B_L \sim 8 B_L$)の流速中での遊泳時間を t_1 、突進速度付近以下($8 B_L \sim 2 B_L$)の流速中での遊泳時間を t_2 とする。選定したカワムツは流速の低下する壁面付近($z/B < 0.3, 0.7 < z/B$)を遊泳せず、流失時間($t_1 + t_2$)が最も長かった個体である。負の加速度 a の絶対値の低下するa1U2, a05U2, a02U2の順に流失時間が51s, 20.5s, 8sと短くなっていることが確認できる。これは前述した通り、負の加速度 a の絶対値の低下に伴って魚の最大遊泳速度である突進速度付近の高速流中の遊泳時間が長くなるためであると考えられる。したがって、疲労が蓄積しカワムツの流失時間が短くなった。

4. おわりに

本研究はピーク流速を固定し、負の加速度と減速後の流速を変化させた流況において、カワムツの遊泳挙動に及ぼす減速の影響を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) カワムツの移動方向を決定する負の加速度の閾値は $-0.5(1/s^2)$ 程度で、負の加速度が $-0.5(1/s^2)$ 程度より小さければ上流側へ、 $-0.5(1/s^2)$ 程度より大きければ下流側へそれぞれ移動することが示唆された。しかし、今回の実験結果のみでカワムツの移動方向を決定する負の加速度の閾値を断定するには至らないため、より確からしい閾値については今後の検討課題とした。
- (2) カワムツは減速時に遡上することが判明した。流速が減少する負の加速度によってカワムツの遡上を誘発したことが示唆された。
- (3) 負の加速度の絶対値の低下に伴って遡上率が減少し、降下率が増加することが判明した。負の加速度の絶対値の低下に伴ってカワムツが突進速度付近の高速流中を遊泳する時間が長くなる。そのため、疲労の蓄積により減速時間中に押し流されたと考えられる。

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) 文部科学省，気象庁，環境省：温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」，2009.
- 2) 佐川志郎，田代喬，松間充：出水時におけるオイカワ稚仔魚の避難場所，多自然研究，No.114，pp.3-7，2005.
- 3) Lyon, J., Stuart, I., Ramsey, D. and O'Mahony, J.: The effect of water level on lateral movements of fish between river and off-channel habitats and implications for management, *Marine and Freshwater Research*, Vol.61, pp.271-278, 2010.
- 4) 東信行，鴨下真吾，佐原雄二，関泰夫，渡辺勝栄：増水時における河川魚類の挙動と河川構造，環境システム研究，Vol.27，pp.793-798，1999.
- 5) 傳田正利，天野邦彦，萱場祐一：出水の水理特性が魚類行動に与える影響，水工学論文集，第49巻，pp.1465-1470，2005.
- 6) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，平野陽一，鏝敬介，桃谷和也，古里佳子：増水がオイカワの遊泳挙動に及ぼす影響，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71，No.4，I_1075-I_1080，2015.
- 7) 青木宗之，瀬崎薫貴，福井吉孝：複断面水路における流量変化と魚の行動に関する実験的研究，土木学会論文集 G(環境)，Vol.69，No.4，pp.166-182，2013.
- 8) 二瓶泰雄：超音波ドップラー流速分布計に基づく実河川流速・流量モニタリング，日本流体力学学会誌「ながれ」，Vol.26，No.1，pp.13-20，2007.
- 9) 傳田正利，天野邦彦，辻本哲郎：一時水域の魚類群集多様性向上への寄与とそれを支える物理環境に関する研究，土木学会論文集 G，Vol.62，No.3，pp.340-358，2006.
- 10) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995.
- 11) Webb, P.W.: Hydrodynamics and enegenetics of fish propulsion, *Bull. Fish. Res. Bd. Can.*, Vol.190, pp.1-159, 1975.

(2016.5.26 受付)

EFFECTS OF ACCELERATION AND VELOCITY DURING DECELERATION ON SWIMMING BEHAVIOR OF *NIPPONOCYPRIS TEMMINCKII*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Akira SHISHIDO and Tomohide TAKEDA

The state of the fish movement changes during the duration and it is shown that fish move to the low velocity zone or swim upstream. The acceleration and the velocity are the factors that effect on the swimming behaviors. The porpose of this study is to make clear that effects of the negative acceleration and the velocity during deceleration on the swimming behaviours of *Nipponocypris Temminckii* (*Kawamutsu*). The peak velocity was fixed, the negative acceleration and the latter velocity were changed. The swimming behaviors in open channel were recorded with a digital video camera. As a result, the threshold value of the negative acceleration that *Nipponocypris Temminckii* decides the migration direction is approximate $-0.5(1/s^2)$. *Nipponocypris Temminckii* migrated upstream when the negative acceleration was smaller than $-0.5(1/s^2)$. On the other hand, *Nipponocypris Temminckii* migrated downstream when the negative acceleration was greater than $-0.5(1/s^2)$. In addition, it is suggested that the deceleration trigger upstream migration. In contrast, there is little effects of the latter velocity on swimming behavior.