

開水路底面の横断勾配がカワムツの 遊泳特性に及ぼす影響

鬼東 幸樹¹・秋山 壽一郎²・緒方 亮³・内山 僚介⁴

¹正会員 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)

E-mail: onitsuka@civil.kyutech.ac.jp

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

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 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

⁴非会員 株式会社あとらす二十一 (〒163-0428 東京都新宿区西新宿2-1-1新宿三井ビル28階)

魚の遡上・降下を促進させるために河川に魚道が設置される。魚道を設計する上で、魚道内の流速、水深や勾配等の魚道の諸条件が魚の遊泳特性に及ぼす影響を把握することは極めて重要である。既往の研究では魚道に一定の横断勾配を持たせることで、少なくともウグイの遡上に対しては有用であることが指摘されている。このように、魚道の横断勾配が魚に及ぼす影響について解明されつつあるが、魚道に適した横断勾配の角度については未解明である。そのため、まずは魚道のような流れが複雑な状況ではなく、開水路のようなシンプルな流れにおいて横断勾配の変化が魚の遊泳特性に及ぼす影響を解明することが望まれる。本研究では、開水路底面の横断勾配および流速の変化がカワムツの遊泳特性に及ぼす影響について検討した。その結果、開水路底面の横断勾配の増加に伴い、最深部付近を遊泳するカワムツの尾数が増加することが判明した。また、横断勾配のないケースと比較すると、横断勾配のあるケースの方が停滞するカワムツの尾数が増加することが判明した。

Key Words: *Candidia temminckii*, open-channel, swimming characteristics, spanwise gradient

1. はじめに

河川生態系の保全を目的として、魚の保全に関する事業が積極的に行われてきた。中村¹⁾は魚が川に生息するための条件として、流量の確保、水質の確保、餌の確保、天敵からの保護、産卵場の確保、回遊路の確保、避難場所の確保を挙げた。また、魚について把握すべき事項として、魚の生活型(回遊魚、純淡水魚、汽水・海産魚等の区分)、遡上・分布範囲(移動範囲)の現況と変遷、産卵場・育成場等の分布の現況と変遷、遡上・降下期(移動期)、移動方向、遡上・降下期の魚体の大きさおよび遡上力(あるいは遊泳力)が挙げられた。

魚道を設計(形式選定、魚道流速、越流水深等)するためには、魚の遡上力や遊泳特性について把握する必要がある。塚本²⁾は、遊泳型および体長が同一であっても、魚種によって遊泳能力が異なることを示した。鬼東³⁾はアユ(*Plecoglossus altivelis altivelis*)、オイカワ(*Opsariichthys platypus*)、カワムツ(*Candidia temminckii*)およびギンブナ(*Carassius auratus langsdorfi*)を対象として、流速および体長に基づき突進速度を求めた。その結果、4種とも突進速度は最大で体長の30倍以上という結果が得られた。鬼

東⁴⁾は、ウグイ(*Tribolodon hakonensis*)、オイカワおよびカワムツを対象に、河川水辺の国勢調査のデータを基に流速に関する選好曲線を求めた。その結果、体長の増加に伴い選好する流速が増加することを指摘した。

流速、水深あるいは勾配等の魚道の諸条件が魚の遊泳特性に及ぼす影響について様々な研究が行われている。小野田⁵⁾は水路の片側に低流速区画を設けて流心部の流速を変化させた。その結果、流心部の流速の増加に伴って、オイカワの緩流域の利用頻度が増加することを発見した。井上⁶⁾は水槽内で傾斜板の角度と水槽内の照度差を変化させ、ギンブナの昇り勾配に対する行動を観察した。その結果、斜面勾配が14°を超えるとギンブナが斜面に向かう割合が著しく低下することを発見した。八田⁷⁾は1/5の横断勾配を持つ開水路の底面に粗石を設置して、縦断勾配を変化させた場合の開水路内の水理特性や魚の挙動についての研究を行った。その結果、縦断勾配が増加すると高速流が発生しやすいことが判明した。松木⁸⁾は粗石付き魚道が横断勾配を有する場合と横断勾配を持たない場合におけるウグイの遊泳挙動の違いについて研究した。その結果、魚道に横断勾配を設けることで横断方向に多様な流速場が形成され、水深が低い水

際部でウグイが休憩することが確認された。青木ら⁹⁾は一定の横断勾配を有した粗石付き魚道の粗度高さを変化させることで、粗度高さとウグイの遡上特性との関係について研究した。その結果、粗度高さが高い場合は塞き上げ効果が働き水深が増加するため、流量の大小に関わらず魚道内に多様な流れ場が形成されることが判明した。それに伴い、遊泳能力が低い未成魚のウグイの遡上率が改善されることを示した。

以上のように、流速、水深、勾配等の諸条件を変化させた検討が行われてきた。開水路では、縦断勾配を変化させているものの、横断勾配は1/5と一定の条件下でしかなされていない。また、魚道では少なくともウグイに対しては横断勾配を持たせることで、小流量から大流量までの流量変化に柔軟に対応できる可能性⁷⁾が指摘されている。しかし、魚道に関しても、一定の横断勾配1/5のみでしか実験が行われていない。このように、横断勾配を有する魚道の最適な幾何学形状を解明する上で、本来、把握しておくべき底面の横断勾配と魚の遊泳特性との関係が未だ不明瞭であることが問題である。そのため、まずは魚道のような複雑な流れ環境下ではなく、開水路を用いて単純な流れ環境下で底面の横断勾配の変化と魚の遊泳特性について研究する必要がある。

本研究では、開水路底面の横断勾配および流速の変化がカワムツの遊泳特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験装置および実験条件

図-1に示す全長 $L=2\text{m}$ 、幅 $B=0.5\text{m}$ 、高さ 0.4m の開水路を実験に用いた。流下方向に x 軸、最深部底面から鉛直上向きに y 軸、左岸から右岸への横断方向に z 軸をとる。遊泳魚の中で遊泳能力が低いカワムツを供試魚に用いた。表-1に実験条件を示す。流量を開水路の横断面積で除し、カワムツの平均体長 $\bar{B}_L=60\text{mm}$ で除した値を断面平均体長倍流速と定義した。開水路底面の横断勾配を0、10、20および30%の4通り、カワムツに対する断面平均体長倍流速を $U_m/\bar{B}_L=2, 4$ および $6(1/\text{s})$ の3通りに変化した合計12ケースの実験を行った。ケース名は横断勾配(0, 10, 20, 30(%))と断面平均体長倍流速 $U_m/\bar{B}_L(2, 4, 6(1/\text{s}))$ との組み合わせによって命名した。図-2に開水路の横断面図を示す。横断勾配が最大のs30のケースにおいて、カワムツが開水路内全域を遊泳できるように水深の最小値をカワムツの平均体長の2倍以上¹⁾である0.05m、最大値を0.2mに設定した。また、全ケースで流積が等しくなるように、s0のケースの水深を0.125m、s10、s20のケースの水深の最小値をそれぞれ0.1m、0.075m、最大値をそれぞれ0.15m、0.175mに設定し

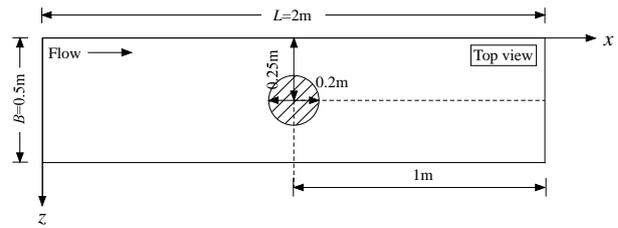


図-1 実験装置

表-1 実験条件

U_m/\bar{B}_L (1/s)	Spanwise Gradient(%)			
	0	10	20	30
2	s0-2	s10-2	s20-2	s30-2
4	s0-4	s10-4	s20-4	s30-4
6	s0-6	s10-6	s20-6	s30-6

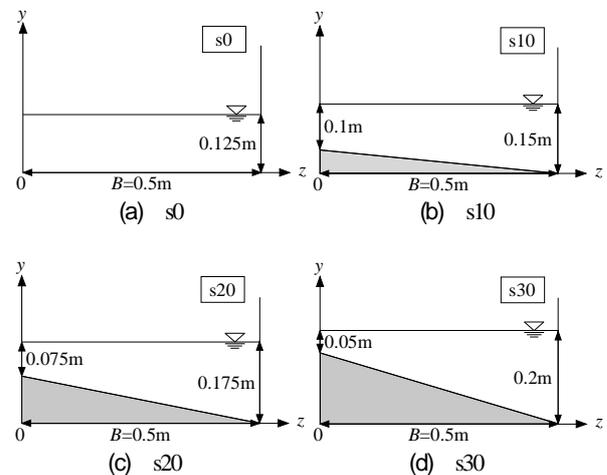


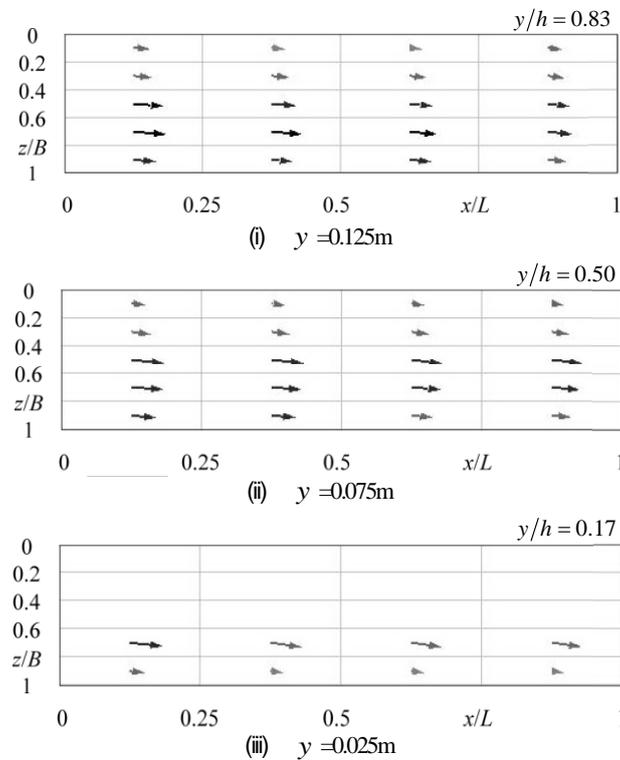
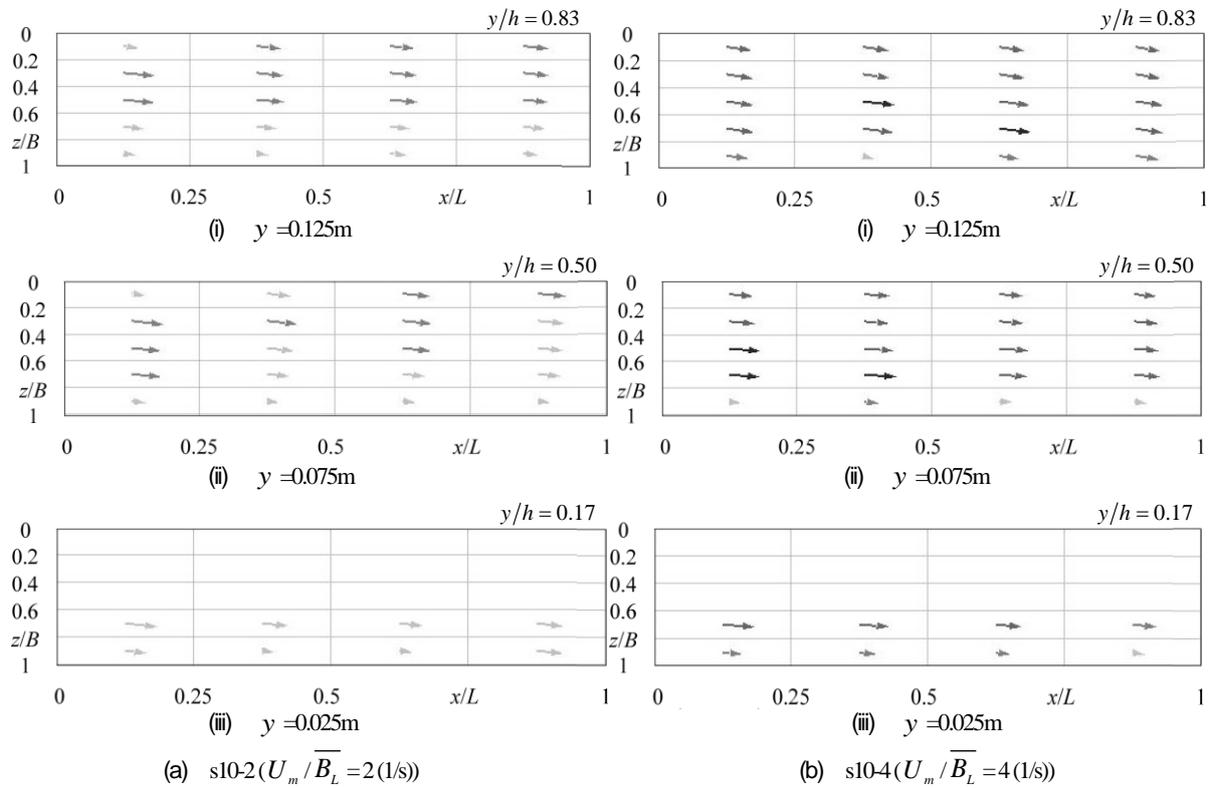
図-2 開水路の横断面図

た。実験時と同じ断面平均体長倍流速の流れにおいて、座標 $(x, z)=(1\text{m}, 0.25\text{m})$ を中心として(図-1参照)、直径0.2m、高さ0.2mの円筒形金網を設置し、1尾のカワムツを挿入した後、1分間馴致させた。カワムツが金網内で定したことを目視で確認し、馴致が完了したと判断して金網を取り上げ、実験を開始した。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1分間撮影した。実験には1ケースにつき1個体のカワムツを使用した。また、1ケースにつき10回の実験を12ケース行い、合計120尾を使用した。撮影後、0.5秒ごとのカワムツの遊泳位置と魚向 θ を解析した。魚向 θ は始線を x 軸と並行にとり、符号は反時計回りを正、時計回りを負とした。

x 軸方向に 0.5m 、 z 軸方向に 0.1m 、 y 軸方向に 0.05m 間隔のメッシュで構成される点のうち、開水路底面より下にある点を除いた合計 48 点において、3 次元

電磁流速計を用いて流速成分を 0.05秒間隔で 25.6秒間計測した。計測後、 x 、 y 、 z 軸方向の時間平均流速 U 、 V 、 W から 3次元合成流速 $V_v = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ を算出

した。なお、流速測定時には開水路にカワムツを放流させていない。



(c) $s10-6 (U_m / \overline{B}_L = 6(1/s))$

図-3 体長倍流速ベクトル

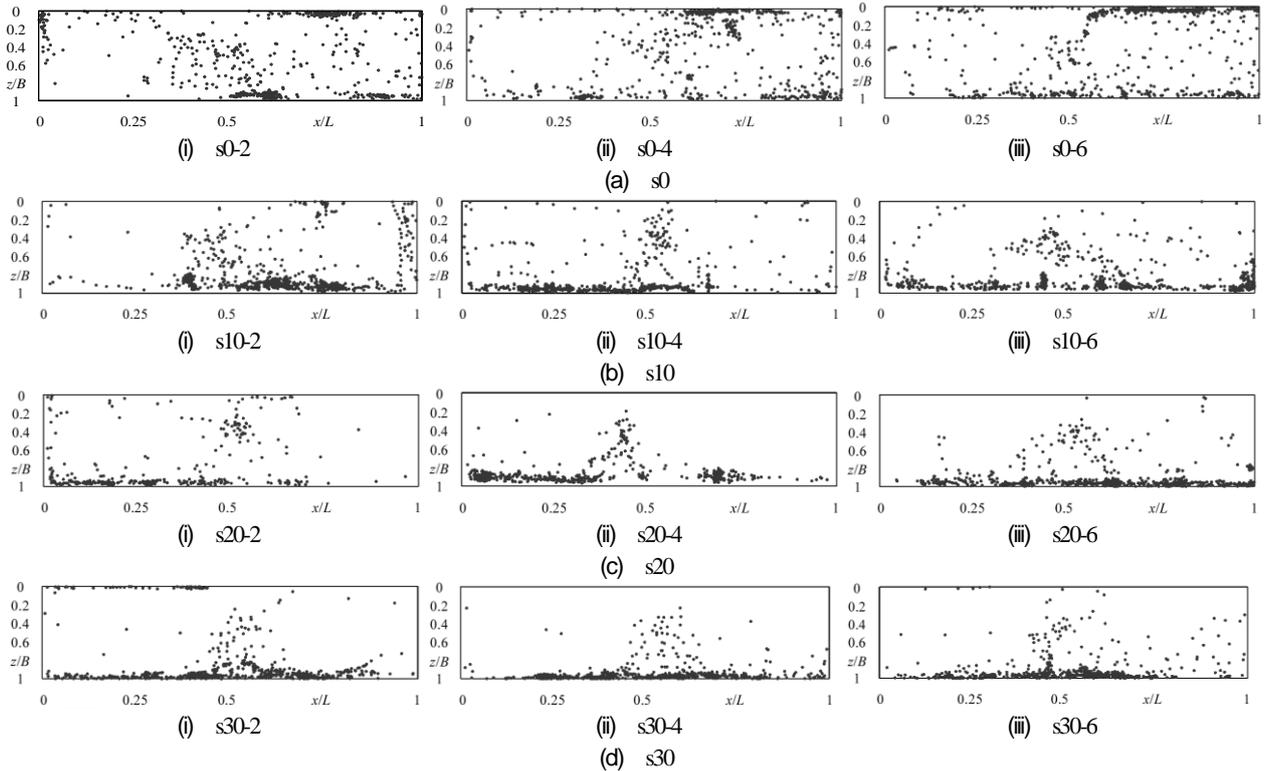


図4 カワムツの遊泳位置

3. 実験結果および考察

(1) 開水路内の流況

図-3に、s10-2, s10-4, s10-6の $y=0.025, 0.075, 0.125\text{m}$ の高さにおける体長倍流速 $V_v/\overline{B_L}$ のベクトル図を水面から近い順に上から並べている。図-3中の h は最深部底面から水面までの距離と定義する。図-3(a)に着目すると、断面平均体長倍流速を $U_m/\overline{B_L}=2(1/s)$ に設定しているのに対し、側壁付近では $V_v/\overline{B_L}=1(1/s)$ 程度と流速が断面平均体長倍流速よりも減少し、流心部では $V_v/\overline{B_L}=3(1/s)$ 程度と増加している。これは、側壁摩擦などによる影響と考えられる。また、 z/B の増加に伴い、 $V_v/\overline{B_L}$ が増加している。これは、 z 軸方向に勾配があり、左岸側から右岸側に向かって下り傾斜となっているため、左岸側側壁付近よりも右岸側側壁付近の方が水深が高く、開水路底面に働く摩擦力が小さいためだと考えられる。なお、紙面の都合上割愛したが、s20, s30 のケースにおいても s10 と同様の傾向が得られた。

(2) カワムツの遊泳位置

図-4(a)に s0-2, s0-4, s0-6, 図-4(b)に s10-2, s10-4, s10-6, 図-4(c)に s20-2, s20-4, s20-6, 図-4(d)に s30-2, s30-4, s30-6 における 0.5s ごとのカワムツの水平断面($x-z$)での遊泳位置を示す。全ケースにおいて、カワムツは開水路底面付近を遊泳していることを目視で確認した。図-4(a)より、

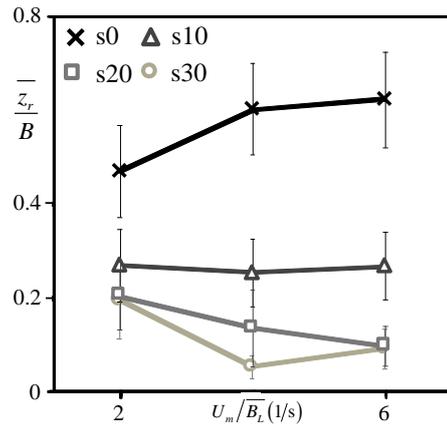


図-5 開水路幅に対するカワムツの右岸からの距離の相対値

開水路底面の横断勾配が 0% の場合はいずれの断面平均体長倍流速 $U_m/\overline{B_L}$ においても、カワムツは開水路のほぼ全域で遊泳しており、特に両岸側壁付近での遊泳が多いことが分かる。そのため、開水路底面の横断勾配が 0% の場合、本実験条件である断面平均体長倍流速 $U_m/\overline{B_L}=2-6(1/s)$ の範囲内では断面平均体長倍流速の変化がカワムツの遊泳位置に与える影響はほとんど無いと考えられる。一方、開水路底面の横断勾配が 10, 20 および 30% の図-4(b), (c) および (d) に着目すると、カワムツは主に水深の高い $0.4 < z/B < 1$ の区間を遊泳していることが分かる。次に、図-4(a)(i), (b)(i), (c)(i), (d)(i) より、断面平均体長倍流速 $U_m/\overline{B_L}=2(1/s)$ の場合、s0 から s10,

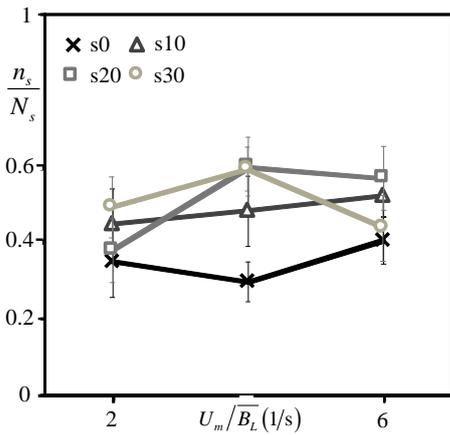


図-6 カワムツの停滞率

s20, s30 と横断勾配が増加するに伴い、開水路の右岸付近の最深部付近でカワムツが遊泳する頻度が増加していることが分かる。また、図-4(a)(ii), (b)(ii), (c)(ii), (d)(ii)および図-4(a)(iii), (b)(iii), (c)(iii), (d)(iii)より、断面平均体長倍流速 $U_m/\overline{B}_L=4$, $6(1/s)$ の場合も $U_m/\overline{B}_L=2(1/s)$ の場合と同様に、横断勾配が増加するに伴い、開水路の右岸付近の最深部付近でカワムツが遊泳する頻度が増加している。

カワムツの遊泳位置と最深部である右岸との距離の平均値 \overline{z}_r を水路幅 B で除し、開水路幅に対するカワムツの右岸からの距離の相対値 \overline{z}_r/B を求めた。図-5 に s0, s10, s20, s30 における断面平均体長倍流速 U_m/\overline{B}_L と開水路幅に対するカワムツの右岸からの距離の相対値 \overline{z}_r/B との関係を示す。横断勾配のない s0 では断面平均体長倍流速の増加に伴い、カワムツの右岸からの距離が増加することが分かる。一方、横断勾配を有する s10, s20 および s30 では断面平均体長倍流速の変化によるカワムツの右岸からの距離の顕著な傾向は見られない。次に、s0, s10, s20, s30 のケース間で比較すると、いずれの断面平均体長倍流速 U_m/\overline{B}_L においても、横断勾配のある s10, s20, s30 では横断勾配が無い s0 よりも \overline{z}_r/B は低い値を示した。また、s10, s20, s30 と横断勾配が増加するにつれて、 \overline{z}_r/B の値が若干減少する傾向が見られる。以上より、開水路底面の横断勾配の増加に伴い、カワムツの遊泳位置は最深部に近づくことが分かった。

(3) カワムツの停滞率

カワムツの 1s ごとの遊泳位置より移動距離を求め、1s 間の移動距離がカワムツの平均体長 \overline{B}_L 以下であるとき、そのカワムツは停滞していると見なした。停滞しているカワムツのデータ数 n_s を 1s ごとのデータ総数 N_s で除し、カワムツの停滞率 n_s/N_s を求めた。図-6 に s0, s10, s20, s30 における断面平均体長倍流速 U_m/\overline{B}_L とカワムツの停滞率 n_s/N_s との関係を示す。s0 のケースと

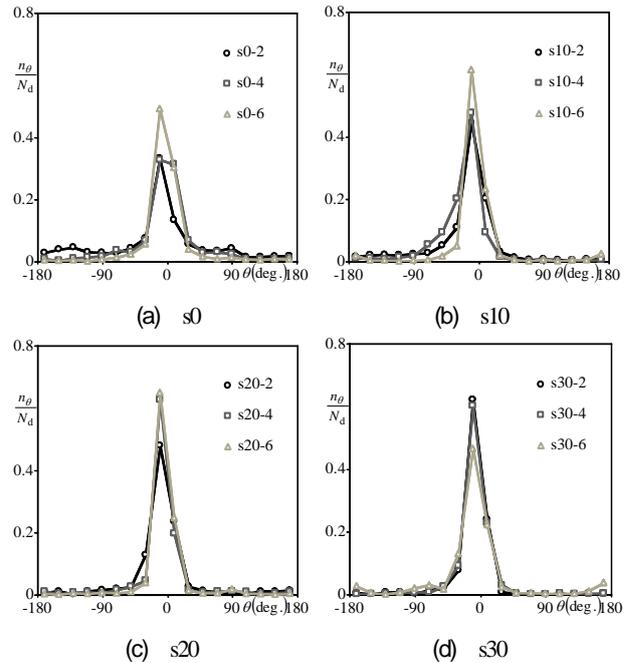


図-7 カワムツの魚向頻度

比較すると、横断勾配を有する s10, s20 および s30 のケースの停滞率は大きな値を示している。ただし、s10, s20 および s30 のケースを比較すると、開水路底面の横断勾配が変化しても、カワムツの停滞率に顕著な傾向は見られない。また、断面平均体長倍流速 U_m/\overline{B}_L が変化しても、カワムツの停滞率に顕著な傾向は見られない。松木ら⁸⁾は魚道内停留時間が長くなると、鳥類や他の魚類等の外敵に捕食される可能性が高くなることを危惧し、横断勾配を変化させ低流速域の拡大を抑えることを提案した。しかし、今回の実験条件である横断勾配 10, 20 および 30% ではカワムツの停滞率に顕著な違いは見られなかった。

(4) カワムツの魚向頻度

カワムツの 20°ごとの魚向別データ数 n_θ を 0.5s ごとのデータ総数 N_d で除し、カワムツの魚向頻度 n_θ/N_d を求めた。図-7 に各ケースのカワムツの魚向頻度 n_θ/N_d を示す。全てのケースにおいて $-10^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ の範囲の魚向頻度が高くなっており、カワムツが主に上流方向を向いて遊泳していることが分かる。図-7(a)より、横断勾配が無い s0 の場合は断面平均体長倍流速 U_m/\overline{B}_L の変化による魚向の顕著な傾向は見られなかった。図-7(b), (c), (d)より、横断勾配がある s10, s20, s30 の場合においても s0 と同様に、断面平均体長倍流速 U_m/\overline{B}_L の変化による魚向の顕著な傾向は見られなかった。また、s10, s20 および s30 のケースでは、 $\theta = -10^\circ$ での魚向頻度が特に高いが、これはカワムツが最深部の開水路右岸に向けて遊泳する頻度が高いことを意味している。

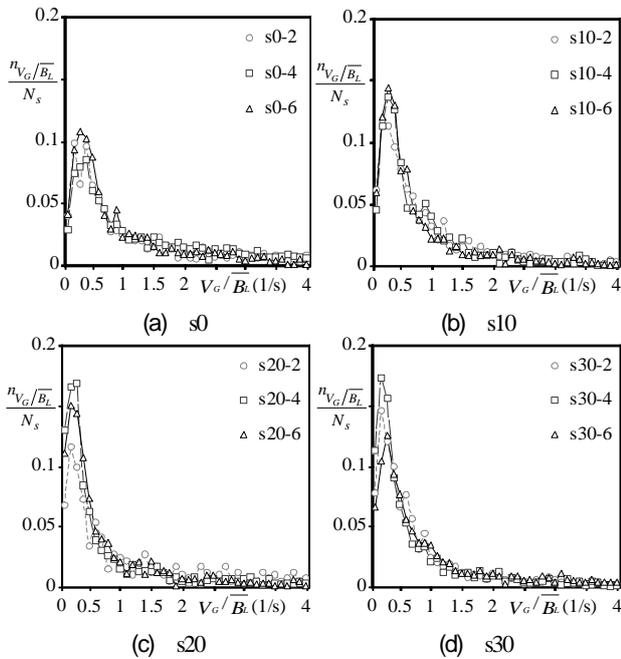


図-8 カワムツの体長倍対地速度の頻度分布

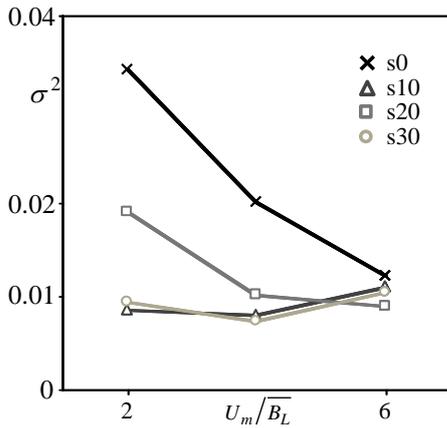


図-9 カワムツの体長倍対地速度の分散

(5) カワムツの対地速度

カワムツの 1s ごとの遊泳位置より対地速度 V_G (m/s) を算出し、カワムツの平均体長 $\overline{B_L}$ で除した体長倍対地速度 $V_G/\overline{B_L}$ (1/s) を求めた。カワムツの体長倍対地速度 $V_G/\overline{B_L}$ ごとのデータ数 $n_{V_G/\overline{B_L}}$ を 1s ごとのデータ総数 N_s で除し、カワムツの体長倍対地速度の頻度 $n_{V_G/\overline{B_L}}/N_s$ を求めた。図-8 に各ケースにおけるカワムツの体長倍対地速度 $V_G/\overline{B_L}$ の頻度分布を示す。ただし、 $4(1/s) \leq V_G/\overline{B_L}$ の頻度は非常に少なかったため省略している。図-8(a)より、横断勾配が無い s_0 の場合、断面平均体長倍流速 $U_m/\overline{B_L}$ が異なっても体長倍対地速度 $V_G/\overline{B_L}$ の頻度分布に顕著な差異は見られず、最頻値は $V_G/\overline{B_L} = 0.2 \sim 0.4(1/s)$ 程度となっている。図-9 に s_0 , s_{10} , s_{20} , s_{30} における断面平均体長倍流速 $U_m/\overline{B_L}$ と体長倍対地速度の分散 σ^2 との関係を示す。いずれの断面平均体長倍流速においても横断勾配を有する s_{10} , s_{20} および

s_{30} では横断勾配の無い s_0 よりも体長倍対地速度の分散は低い値を示している。また、横断勾配の無い s_0 では断面平均体長倍流速の増加に伴い、体長倍対地速度の分散が減少している。一方、 s_{20} で若干例外があるものの、横断勾配を有する s_{10} , s_{20} , s_{30} では断面平均体長倍流速が変化しても、体長倍対地速度の分散に顕著な傾向は見られなかった。以上より、開水路底面の横断勾配を有する場合は横断勾配が無い場合と比較すると、カワムツの対地速度が変化しにくくなると考えられる。

4. おわりに

本研究は開水路底面の横断勾配および流速の変化がカワムツの遊泳特性に及ぼす影響について検討したものである。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 開水路底面の横断勾配の増加に伴い、最深部付近でのカワムツの遊泳が増加する。
- (2) 開水路底面の横断勾配および流速の変化はカワムツの対地速度の最頻値にほとんど影響を及ぼさない。ただし、開水路底面の横断勾配を有する場合は横断勾配が無い場合と比較すると、カワムツの対地速度は次第に変化しにくくなる。

以上のように、本研究では底面の横断勾配がカワムツの遊泳特性に影響を及ぼすことが確認された。また、横断勾配が 0, 10, 20, 30% と増加するにつれて、カワムツの遊泳位置が変化することが確認された。よって、魚道内の横断勾配を増加させることでカワムツのような遊泳力の低い魚が最深部付近で休憩することが可能になると考えられる。

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)17K06580(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 2) 塚本勝巳，梶原武，益田信之，森由基彦：放流時における人工種苗アユの分散，日本水産学会誌，Vol.41, No.7, pp.733-738, 1975。
- 3) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，山本晃義，渡邊拓也，脇健樹：河川に生息する数魚種の突進速度に関する研究-アユ，オイカワ，カワムツ，ギンブナを対象-，土木学会論文集 B，Vol.65, No.4, pp.296-307, 2009。
- 4) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，小野篤志，竹内光，西内教郎：ウグイ，オイカワおよびカワムツの流速に関する選好曲線の提案，環境システム研究，Vol.38, pp.53-61, 2010。
- 5) 小野田幸生，佐川志朗，上野公彦，尾崎正樹，久米学，相川隆生，森照貴，萱場祐一：流速の増大がオイカワによる水際の緩流域利用頻度に及ぼす影響，河川技術論文集，第 17 巻，pp.197-202, 2011。

- 6) 井上実, 王明彦, 有元貴文: 昇り勾配に対する魚の行動に関する水槽実験, 日本水産学会誌, Vol.52, No.3, pp.453-458, 1986.
- 7) 八田哲朗, 鈴木辰規, 村山久一, 福井吉孝, 荻原国宏: 横断勾配を持つ粗石付き緩斜路魚道について, 河川技術に関する論文集, 第5巻, pp.147-152, 1999.
- 8) 松木越, 青木宗之, 福井吉孝, 櫻井龍太郎: 横断勾配を有する粗石魚道の流れと魚の挙動について, 土木学会論文集 G(環境), Vol.72, No.7, pp.III_411-III_417, 2016.
- 9) 青木宗之, 船越智瑛, 吉田翔平: 横断方向に粗度高さを变化させた横断勾配付き粗石魚道におけるウグイの遡上行動について, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_397-I_402, 2018.

(2018.5.17 受付)

EFFECT OF SPANWISE GRADIENT OF OPEN-CHANNEL BOTTOM ON SWIMMING CHARACTERISTICS OF *CANDIDIA TEMMINCKII*

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Ryo OGATA
and Ryosuke UCHIYAMA

Fishway is important structure to expedite the migration of fish. It is necessary to grasp the influence that the conditions of the fishway give on swimming characteristics of the fish in designing the fishway. Therefore, it is necessary to examine the fishway of various shapes. However, the examination that changed a spanwise gradient at the bottom of fishway is not yet carried out. In this study, an investigation on swimming characteristics of *Candidia temminckii* was conducted under the condition that spanwise gradient at the bottom of open-channel and also the flow velocity are changed. It was found that the number of fish that swims at the deepest area in open-channel increases with the increase of the spanwise gradient at the bottom of open-channel. The fish in the case open-channel with the spanwise gradient at bottom is more stagnant than the case open-channel with the flat bottom.