

階段式魚道におけるプール間落差と遡上率の関係

Effects of the difference of the pool level and neighboring one on migration rate in pool-and-weir fishway

鬼束幸樹*・秋山壽一郎**・森悠輔***・小林達也****・飯國洋平*****

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yusuke MORI, Tatsuya KOBAYASHI and Yohei IIGUNI

*博 (工) 九州工業大学大学院准教授, 工学研究院建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

** Ph.D 九州工業大学大学院教授, 工学研究院建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

***学 (工) 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)

****学 (工) (株) 大気社 (〒163-0225 東京都新宿区西新宿 2-6-1 新宿住友ビル)

*****修 (工) (株) 日立製作所 (〒319-1293 茨城県日立市大みか町五丁目 2 番 1 号)

Ministry of Land, Infrastructure and Transport recommends that the water level difference in pool-and-weir fishway must be in the range between 0.1m and 0.2m without any verification. In this study, the water level difference in a pool-and-weir fishway was changed between 0.05m and 0.425m and migration rates were obtained. It was found that *Zacco platypus* and *Zacco temminckii* migrate with swimming under the condition that the water level difference is lower than 0.2m and also that *Zacco temminckii* only migrates with jumping under the condition that the water level difference is in the range between 0.275m and 0.425m. Migration rates concern with the velocity in the orientation area, because the fishes orient in the favorable velocity area.

Key Words: pool-and-weir fishway, difference of water level, migration rate

キーワード: プールタイプ魚道, プール間落差, 遡上率

1. はじめに

ダムや堰等の河川横断構造物により発生する水位落差は、魚類等の河川縦断方向の移動を妨げる。特に、遡上および降下を行うアユやサケなどの通し回遊魚にとっては、季節ごとのハビタット間の移動が阻害されるので、種の存続を左右する深刻な問題となる。そのため、魚道の設置が必要となる。日本の河川は急峡なため、階段式魚道が最も適しているといわれており¹⁾、実際に設置数が最も多い。しかし、既設の階段式魚道の中には、魚類の遡上および降下を十分には助けていないものが存在する¹⁾³⁾。従って、魚類の遡上および降下が容易な階段式魚道を設計する必要がある。そのためには階段式魚道の幾何学形状の適正値を解明する必要がある。

Wada⁴⁾は隔壁形状を直角型、傾斜型、突出型、丸型に変化させた結果、傾斜型の遡上率が最も高いことを解明した。続いて、斜面の傾斜角度を15°~60°の範囲で系統的に変化させ、傾斜角度60°が最も遡上率が高いことを示した。ダム水源地環境整備センター¹⁾は魚道勾配を0.33, 0.2, 0.125, 0.1, 0.05と変化させ、0.1および0.05の時に遡上率が高くなることを示した。国土交通省河川局³⁾は既往の研究に基づき、切り欠き率(=切り欠き幅/魚道幅)は0.17~0.2、魚道

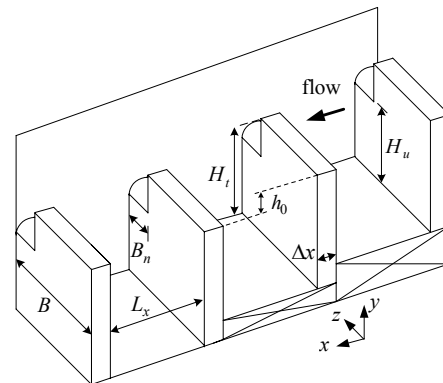


図-1 実験装置

勾配は0.05~0.1、プール間落差は0.1~0.20m、プール長は魚道幅に対して1.5~2倍程度、隔壁形状はR型等の推奨値を提案している。ただし、切り欠き率、プール長およびプール間落差の推奨値については、明確な裏付けデータが存在しないと推定される。近年、鬼束ら⁵⁾は階段式魚道の切り欠き率および流量を系統的に変化させた実験を行い、切り欠き率の推奨値(0.17~0.20)が適切であることを検証した。しかし、プール長およびプール間落差の推奨値が適切かどうかを検証した研究は存在しない。

本研究では、オイカワおよびカワムツを用いて階段式魚道におけるプール間落差および流量を系統的に変化させ、遡上率、休憩場所およびプール内流速を計測した。実験結果に基づき、国土交通省河川局によるプール間落差の推奨値(0.1m~0.20m)が両魚種において適切かどうかを検証した。

2. 実験装置および実験条件

2.1 実験装置

図-1に示す3つのプールで構成される片側切り欠き付き階段式魚道を実験に使用した。プール間落差 h_0 以外の諸量は可能な限り国土交通省河川局の推奨値と一致させるため、プール長 L_x を0.9m、魚道幅 B を0.8m、プール底面から切り欠き下端までの高さ H_u を0.7m、切り欠き幅 B_n を0.16m、隔壁厚 Δx を0.20m、魚道勾配を1/6とした。切り欠き形状はWadaの推奨する傾斜角 60° のR型を採用した。その結果、プール底面から天端までの高さ H_t は0.9mとなった。魚道の材料には黒に塗装した木材を用いたが、側壁方向からの撮影を可能にするため、切り欠きの対岸側の左岸側壁は透明なアクリル板で作成した。流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸、横断方向に z 軸をとった。

2.2 実験魚および実験条件

オイカワ(*Zacco platypus*)およびカワムツ(*Zacco temminckii*)の2魚種をそれぞれ用いて実験を行った。図-2に両魚種における各80尾の体長 B_L のヒストグラムを示す。オイカワの平均体長 $\overline{B_L}$ は約6.4cm、カワムツの平均体長 $\overline{B_L}$ は約6.2cmであった。

国土交通省河川局の推奨するプール間落差(0.1m~0.20m)を網羅する広範囲の6通りのプール間落差 h_0 (=0.05m~0.425m)と5通りの流量 Q (=1ℓ/s~13ℓ/s)を組み合わせた30ケースの実験を行った。実験条件を表-1に示す。0.05Q1といったケース名を用いるが、0.05がプール間落差 h_0 (m)を、1が流量 Q (ℓ/s)を意味している。表中の落下流速 V_F は中村²⁾の提案した算定式より求めた値である。

$$V_F = \sqrt{V_c^2 + 2gh_0} \quad (1)$$

ここに、 V_c は限界流速、 g は重力加速度である。全ケースにおいて、切り欠き部のみから越流する部分越流であった。また、落下流速 V_F (m/s)をオイカワおよびカワムツの平均体長 $\overline{B_L}$ (m)でそれぞれ割った値を表中に示している。なお、表中のflow typeについては後に説明する。

2.3 実験方法

本実験装置において、各プールの形状および大きさは等しく構成されているため、各プールの水理条件はほぼ同一である。ただし、配管から魚道への流入による影響が皆無とは断定できないため、最上流ではなく2番目のプールで実験を行うことにした。80尾のオイカワを上流から2番目のプールに入れた状態で流量を流し始める。このとき、

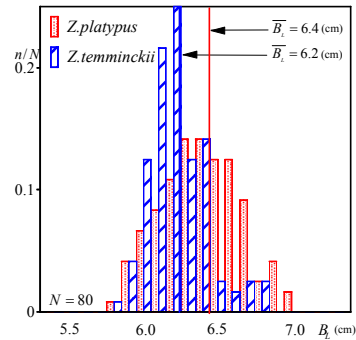


図-2 体長のヒストグラム

表-1 実験条件(Z.p.: *Zacco platypus*, Z.t.: *Zacco platypus*)

h_0 (m)	$Q=1(\ell/s)$	$Q=4(\ell/s)$	$Q=7(\ell/s)$	$Q=10(\ell/s)$	$Q=13(\ell/s)$
0.05	0.05Q1	0.05Q4	0.05Q7	0.05Q10	0.05Q13
flow type	Streaming	Streaming	Streaming	Streaming	Streaming
nap type	non-separation	non-separation	non-separation	non-separation	non-separation
V_F (m/s)	1.005	1.008	1.015	1.02	1.027
$Z.p. V_F / \overline{B_L}$	15.71	15.75	15.85	15.94	16.05
$Z.t. V_F / \overline{B_L}$	16.21	16.26	16.36	16.46	16.56
0.125	0.125Q1	0.125Q4	0.125Q7	0.125Q10	0.125Q13
flow type	Streaming	Plunging	Plunging	Plunging	Plunging
nap type	non-separation	non-separation	non-separation	non-separation	non-separation
V_F (m/s)	1.575	1.577	1.581	1.585	1.589
$Z.p. V_F / \overline{B_L}$	24.61	24.64	24.7	24.76	24.83
$Z.t. V_F / \overline{B_L}$	25.4	25.43	25.5	25.56	25.63
0.2	0.2Q1	0.2Q4	0.2Q7	0.2Q10	0.2Q13
flow type	Plunging	Plunging	Plunging	Plunging	Plunging
nap type	non-separation	non-separation	non-separation	non-separation	non-separation
V_F (m/s)	1.987	1.989	1.992	1.995	1.999
$Z.p. V_F / \overline{B_L}$	31.05	31.08	31.13	31.18	31.23
$Z.t. V_F / \overline{B_L}$	32.06	32.08	32.13	32.18	32.24
0.275	0.275Q1	0.275Q4	0.275Q7	0.275Q10	0.275Q13
flow type	Plunging	Plunging	Plunging	Plunging	Plunging
nap type	non-separation	non-separation	separation	separation	separation
V_F (m/s)	2.328	2.33	2.332	2.335	2.338
$Z.p. V_F / \overline{B_L}$	36.38	36.4	36.44	36.48	36.53
$Z.t. V_F / \overline{B_L}$	37.55	37.57	37.62	37.66	37.7
0.35	0.35Q1	0.35Q4	0.35Q7	0.35Q10	0.35Q13
flow type	Plunging	Plunging	Plunging	Plunging	Plunging
nap type	non-separation	separation	separation	separation	separation
V_F (m/s)	2.625	2.626	2.629	2.631	2.633
$Z.p. V_F / \overline{B_L}$	41.01	41.03	41.07	41.11	41.15
$Z.t. V_F / \overline{B_L}$	42.34	42.36	42.4	42.43	42.47
0.425	0.425Q1	0.425Q4	0.425Q7	0.425Q10	0.425Q13
flow type	Plunging	Plunging	Plunging	Plunging	Plunging
nap type	non-separation	separation	separation	separation	separation
V_F (m/s)	2.891	2.893	2.895	2.897	2.9
$Z.p. V_F / \overline{B_L}$	45.18	45.2	45.23	45.26	45.3
$Z.t. V_F / \overline{B_L}$	46.63	46.65	46.69	46.72	46.76

切り欠き部にはネットを設置しており、遡上および降下ができなくなっている。目視により定常状態に達したことを確認した後にネットを取り除き、側壁および水路上部にそれぞれ設置したビデオカメラを用いてプール内のオイカワの挙動を30分間撮影した。カワムツについても同様な撮影を行った。撮影後、各魚種の遡上数およびプール内の休憩場所を解析した。なお、カワムツのみ跳躍遡上を試みた例があったため、跳躍開始位置、着水位置および跳躍時間を解析した。

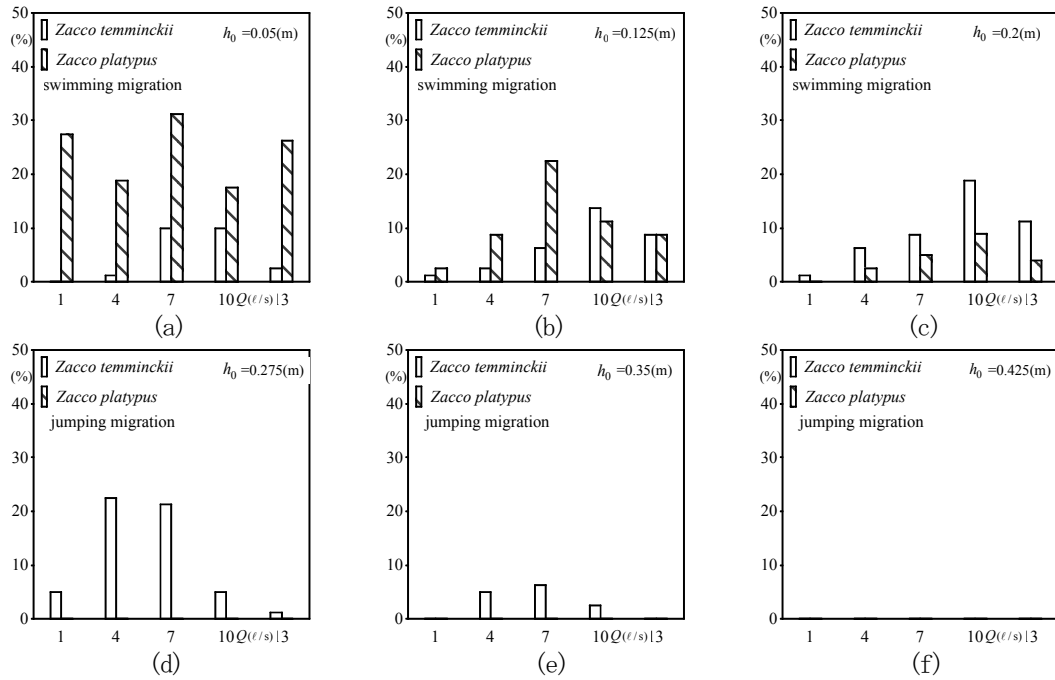


図-3 各水位落差における流量と遡上率の関係

プール内の流れ状態(flow type)は、切り欠き部を越流した流れがプール底面付近まで到達し、その後、流向を下流向きに変化させるプランジングフロー(Plunging flow)と、切り欠き部を越流した流れが水面付近を通過し、次のプールに到達するストリーミングフロー(Streaming flow)の2つに分類されると Rajaratnam *et al.*⁶⁾は指摘した。彼らは運動量式および抗力式を連立させて支配方程式を導き、さらに実験結果に基づき無次元流量が 0.25 よりも大きな場合にストリーミングフローが発生し、逆に小さな場合にプランジングフローが発生することを解明した。しかし近年、林田ら⁷⁾はプランジングフローをさらに、斜め流および落下流に分類するべきと述べている。斜め流は越流部から落下した流れが隔壁に沿って流れる状態を示し、斜め流は越流部から落下した流れが隔壁からはく離して流れる状態を示している。浪平ら⁸⁾は階段式魚道における流量の変化がウグイの遡上行動に与える影響を検討する際に、林田らの分類方法を採用した。その結果、ウグイの遡上には落下流が適切であると述べている。しかし、斜め流と落下流を目視によって明確に判定するのは困難であり、個人誤差も生じやすい。一方、プランジングフローとストリーミングフローの判定については、水面の流向が順流か逆流かを判断するだけでよい。そのため、判定の容易さおよび個人誤差の排除が期待できる Rajaratnam *et al.*の分類法を本研究では採用した。目視によって判定した流れの状態(flow type)および切り欠き部における支配断面通過後の越流状態(nap type)を表-1中に記載した。ここで、「non-separation」はナツが隔壁に沿って流れる状態、「separation」はナツが隔壁からはく離して落下する状態である。

上流から2番目のプール内で、 x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ7点のメッシュをとった合計343(=7×7×7)点において、3次元電磁流速計を用いた流速3成分の計測を、0.05s間隔で25.6s行った。計測後、 x 、 y 、 z 軸方向の時間的流速

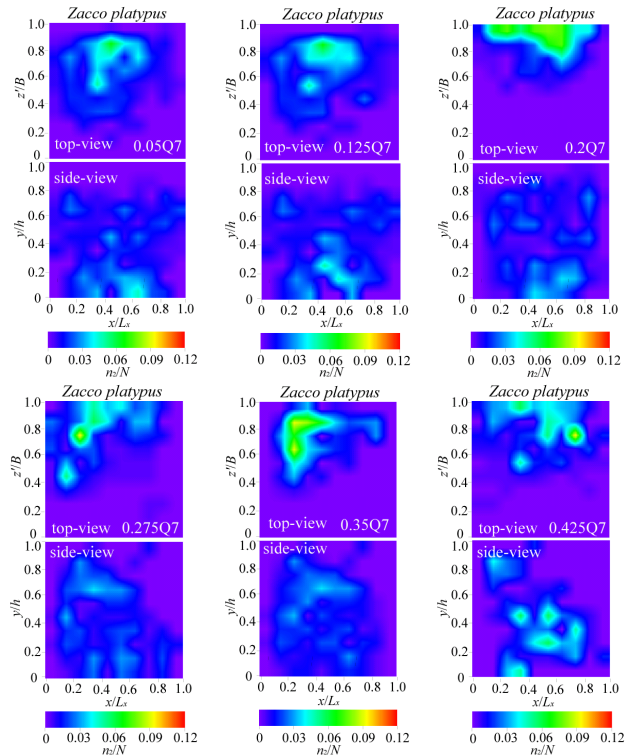


図-4(a) オイカワの遊泳位置($Q=7 \text{ l/s}$)

U 、 V 、 W を算出した。なお、流速測定時にはプール内に魚を入れていない。

3. 実験結果および考察

3.1 プール間落差と流量が遡上率に及ぼす影響

遡上率を次式のように定義する。

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上に成功した魚数 } n_1}{\text{実験に用いた魚数 } N (= 80)} \quad (2)$$

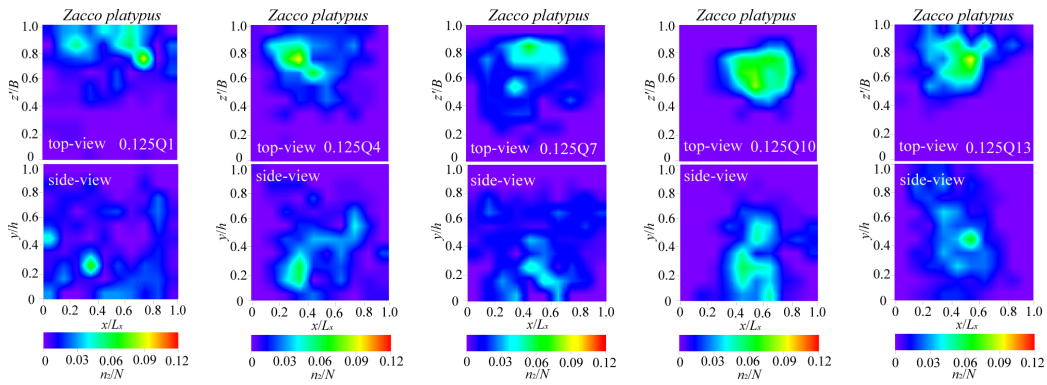


図-4(b) オイカワの遊泳位置($h_0=0.125\text{m}$ (遊泳遡上))

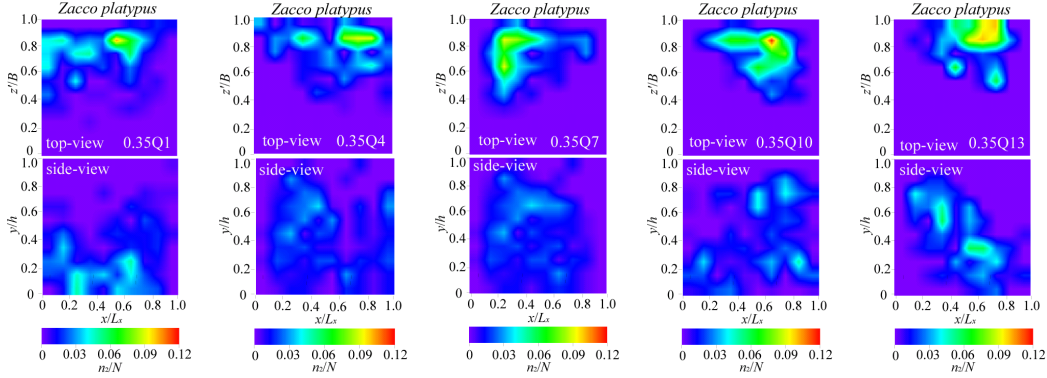


図-4(c) オイカワの遊泳位置($h_0=0.35\text{m}$)

図-3(a)～(f)に、プール間落差($h_0=0.05\text{m}\sim 0.425\text{m}$)ごとの流量($Q=1\sim 13\text{ l/s}$)とオイカワおよびカワムツの遡上率との関係を示す。プール間落差 h_0 が $0.05\text{m}\sim 0.20\text{m}$ の範囲では両魚種とも遡上に成功しているが、プール間落差 h_0 が $0.275\text{m}\sim 0.35\text{m}$ の範囲ではカワムツのみが遡上に成功している。これは、前者では両魚種とも落下流脈中を遊泳して遡上を試みたのに対し、後者ではカワムツのみが跳躍遡上を試みたことに起因する。Wada⁴⁾は落下流にはく離が生じるとアユは遊泳遡上を行わず、跳躍遡上を行う場合があることを指摘している。本研究においても、プール間落差 h_0 が $0.05\text{m}\sim 0.20\text{m}$ の範囲では、切り欠きを越流した流れはR型斜面からはく離することなくプールに流入しており、また、それ以上のプール間落差では流れがく離していた。そのため、カワムツはプール間落差 h_0 が $0.05\text{m}\sim 0.20\text{m}$ の範囲では遊泳遡上を、 h_0 が $0.275\text{m}\sim 0.35\text{m}$ の範囲では跳躍遡上を試みたと考えられる。ただし、後者においてオイカワが跳躍遡上に挑まない理由は不明である。以下では、プール間落差 h_0 が $0.05\text{m}\sim 0.20\text{m}$ の範囲および 0.275m 以上の範囲を区別して議論する。

(I) 遊泳遡上と跳躍遡上

プール間落差 h_0 が $0.05\text{m}\sim 0.20\text{m}$ の範囲である図-3(a)～(c)に着目する。プール間落差 h_0 の増加に伴いオイカワの遡上率が減少している。また、オイカワについてはプール間落差 h_0 が 0.05m のケースを除くと、流量の増加に伴い遡上率が上昇し、ピーク値を示した後に遡上率が減少している。鬼束ら⁵⁾は、階段式魚道において切り欠き率および流量を系統的に変化させ、アユの遡上率を計測した。

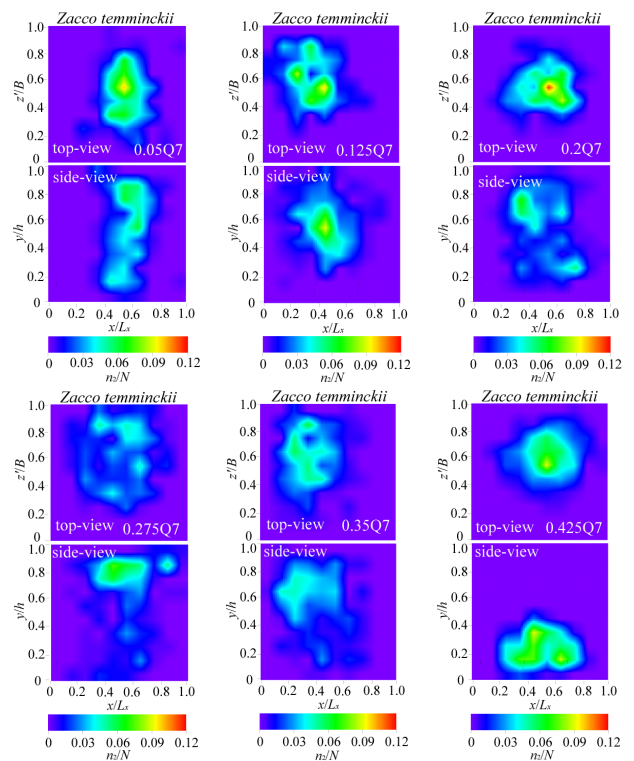


図-5(a) カワムツの遊泳位置($Q=7\text{ l/s}$)

その結果、流量の変化に対し、遡上率がピークを示すことを明らかにした。また、ピークを示す流量が切り欠き率ごとに異なることも明らかにした。本研究においてプール間落差 h_0 が 0.125m および 0.20m ではオイカワの遡上率がピークを示すのに対し、プール間落差 h_0 が 0.05m ではピーク

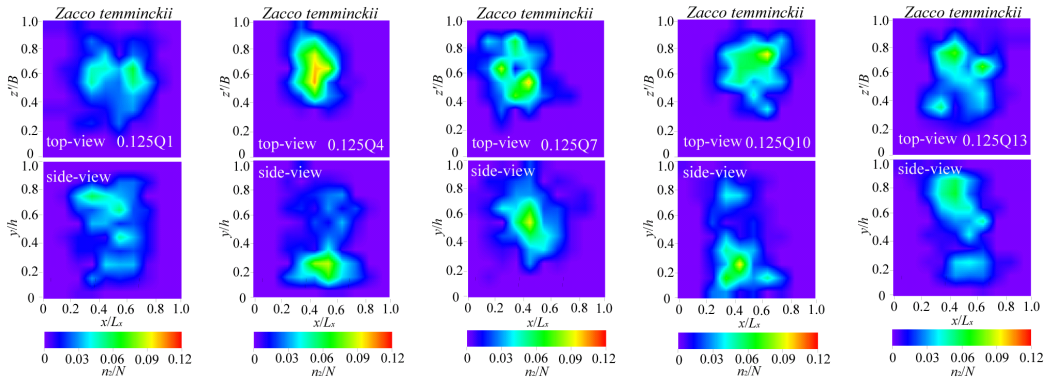


図-5(b) カワムツの遊泳位置($h_0=0.125\text{m}$ (遊泳漕上))

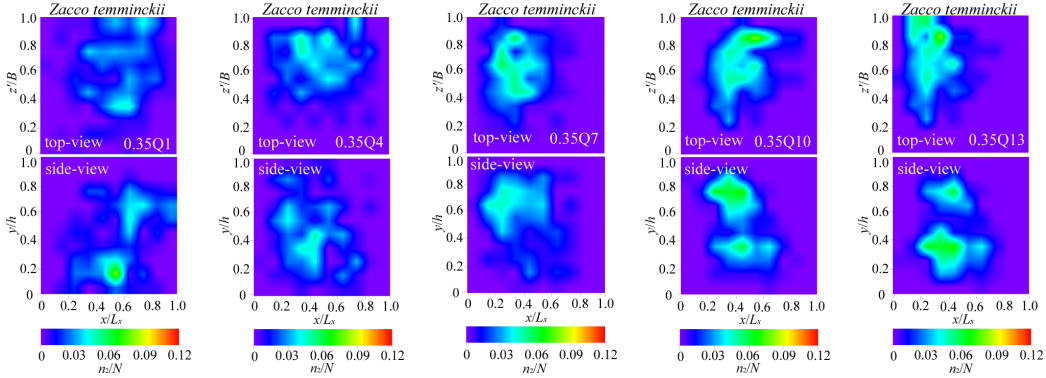


図-5(c) カワムツの遊泳位置($h_0=0.35\text{m}$ (跳躍漕上))

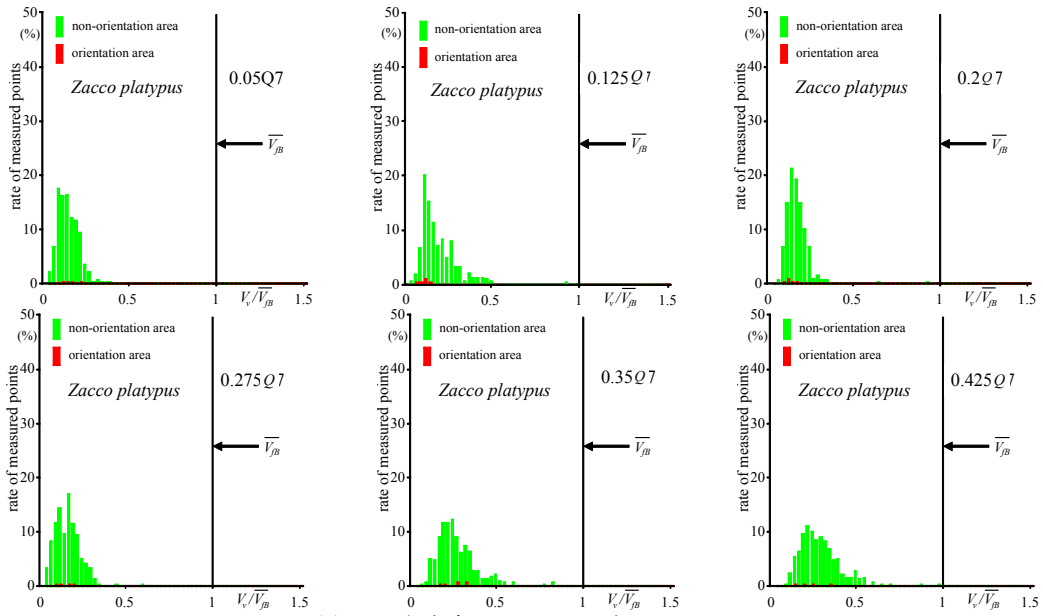


図-6(a) 平均流速 V_v のヒストグラム($Q=7\text{ l/s}$)

クを示さないのは、設定した流量の範囲が狭かったことが原因と考えられる。一方、カワムツについては漕上率に大きな変化は見られなかった。このように魚種間で異なる結果となった原因については、後に検討する。

プール間落差 h_0 が 0.275m 以上の範囲である図-3(d)～(f)に着目する。全てのケースでオイカワの遊泳漕上および跳躍漕上は観察されなかった。また、両形態の漕上に挑む例もオイカワに関しては観察されなかった。一方、カワムツについては、プール間落差 h_0 が 0.275m および 0.35m については跳躍漕上に挑んでいるが、前者よりも後者の方

の漕上率が低くなっており、プール間落差 h_0 の増加に伴い漕上率が減少している。プール間落差 h_0 が 0.275m 以上では切り欠きを越流した流れがR型斜面からはく離するが、流量の増加に伴いR型斜面とナップとの間隔が増加するために漕上が困難となり、漕上率が減少したと考えられる。さらに、プール間落差の大きな $h_0=0.425\text{m}$ になると、跳躍漕上に挑むカワムツがいるものの、すべて漕上に失敗していた。

(2) 落下流速が漕上形態に及ぼす影響

落下流速の増加が漕上率の減少を招くことが知られて

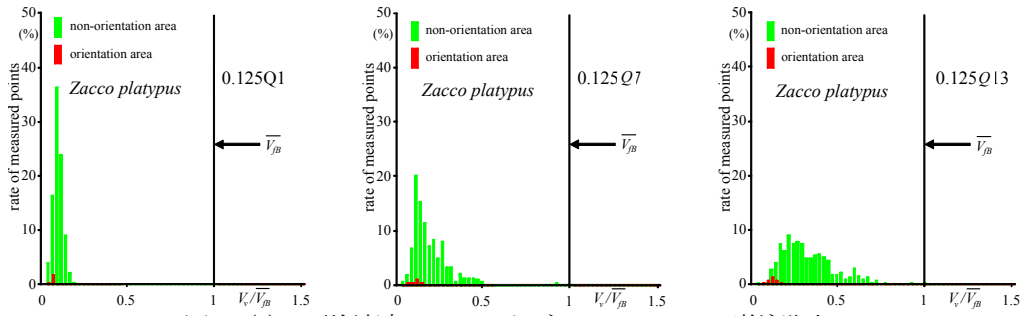


図-6(b) 平均流速 V_v のヒストグラム($h_0=0.125\text{m}$ (遊泳遡上))

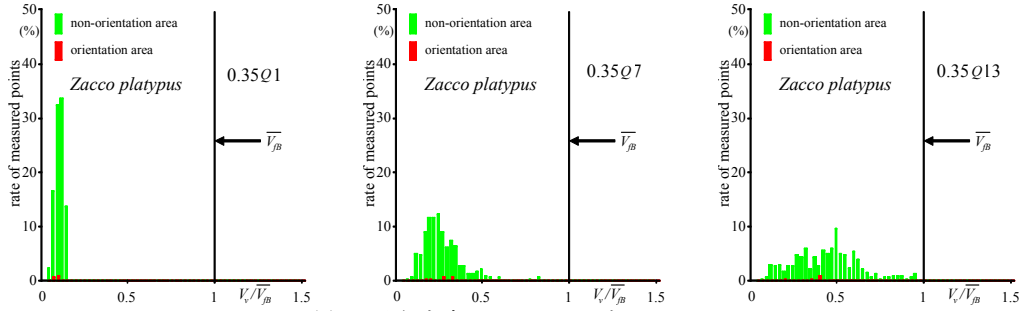


図-6(c) 平均流速 V_v のヒストグラム($h_0=0.35\text{m}$)

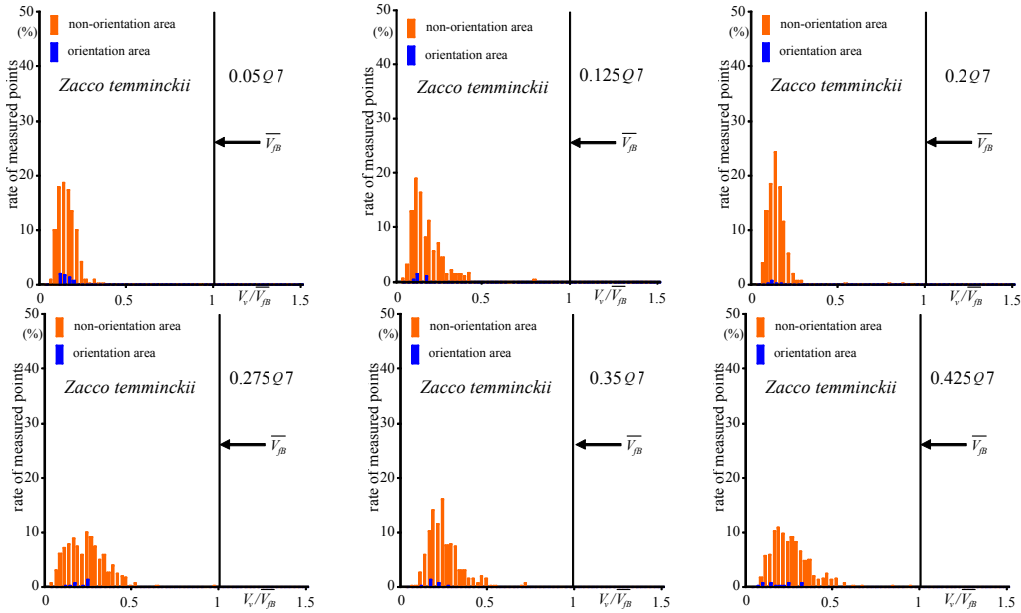


図-7(a) 平均流速 V_v のヒストグラム($Q=7\text{ l/s}$)

いる⁷⁾。表-1中の V_F/\overline{B}_L に着目すると、オイカワ、カワムツ共に落下流速が体長の約15~30倍の場合には遊泳遡上を行うが、落下流速が体長の約40~50倍の場合にはカワムツのみが跳躍遡上を行っていることがわかる。当然、魚は突進速度以上の落下流速に遭遇すると遊泳遡上が不可能になる。魚の突進速度 V_{FB} はこれまで次式で表記されてきた。

$$V_{FB}(\text{cm/s}) = 10B_L(\text{cm}) \quad (3)$$

しかし、魚種、体長および流速によって変化することが指摘されており、上式の精度はそれほど高くないと考えられる。近年、オイカワについては体長および流速を系統的に変化させて突進速度が求められた⁹⁾。その結果に基づくと、本研究で使用した平均体長 \overline{B}_L が6.4cmのオイカワの突進速度は体長の20~30倍と算出される。従って、落下流速

が突進速度以下の場合には遊泳遡上に挑むことが示唆される。カワムツについては同様な研究例がないために突進速度は未解明だが、遊泳型がオイカワと同様にカラギフォームであること、両魚種ともコイ科ダニオ亜科オイカワ属であり遺伝的に極めて類似していることから、両魚種の遊泳能力に顕著な差はないと推測される。この仮説が正しい場合、カワムツは落下流速が突進速度以下では遊泳遡上に挑み、それ以上の流速の場合、跳躍遡上に挑むと判断される。

3.2 オイカワおよびカワムツの遊泳位置の相違

中村²⁾はプールタイプ魚道で魚が遡上するには、「落下流速が突進速度以下」であることや、「休憩場所の確保」が必要であることなどを述べている。また、先述したように「落下流がはく離しないこと」も挙げられる。ここでは、

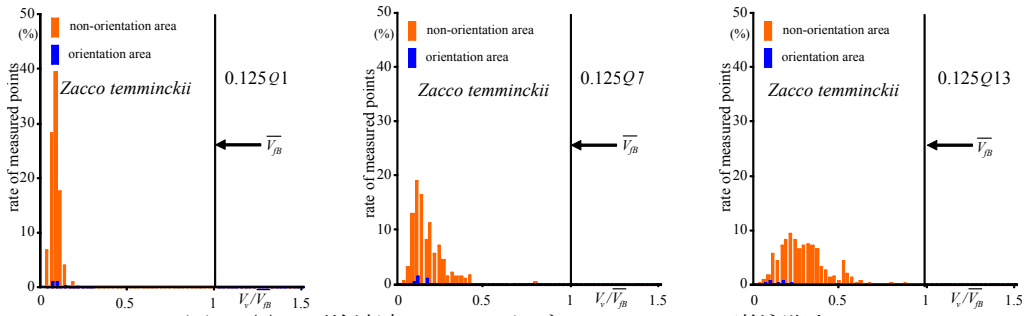


図-7(b) 平均流速 V_v のヒストグラム($h_0=0.125\text{m}$ (遊泳遡上))

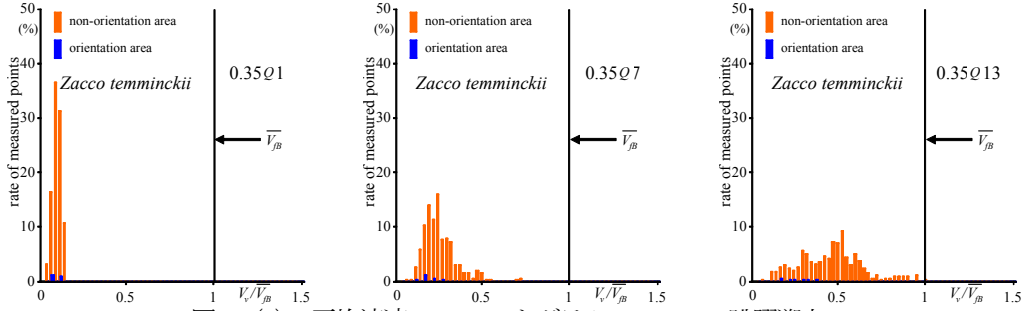


図-7(c) 平均流速 V_v のヒストグラム($h_0=0.35\text{m}$ (跳躍遡上))

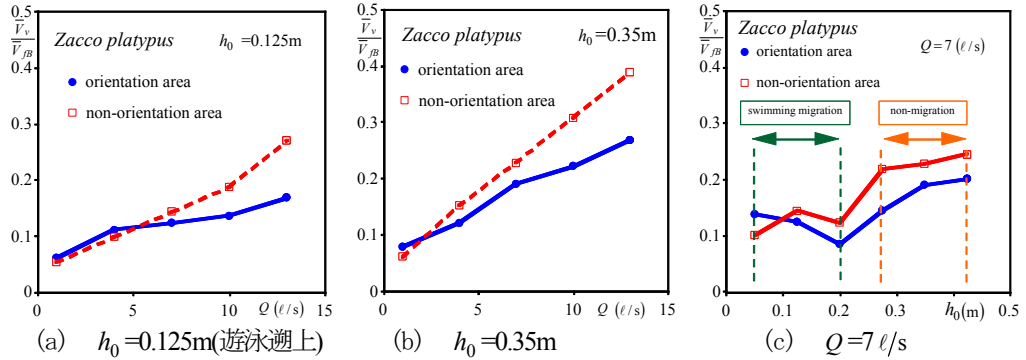


図-8 オイカワの休憩場所における空間平均流速

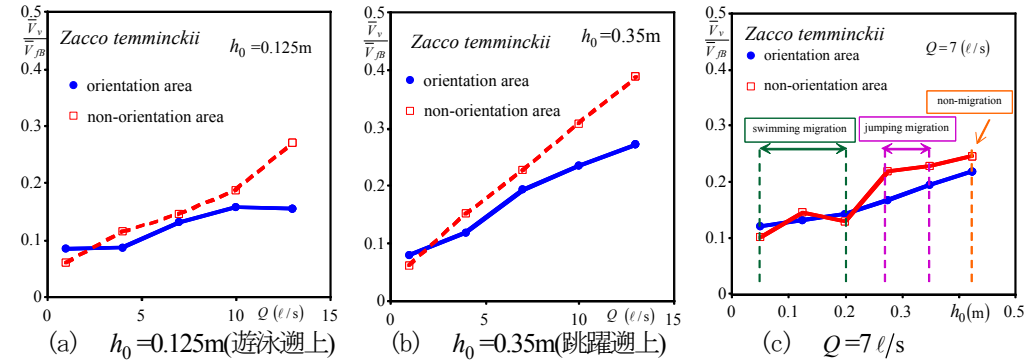


図-9 カワムツの休憩場所における空間平均流速

休憩場所について検討を行う。側壁および水路上部からそれぞれ撮影された画像を解析することによって、オイカワおよびカワムツの瞬間的な遊泳位置が得られる。両魚種の遊泳位置が時間的にほとんど変化していないため、1sごとに10枚の画像を鉛直断面($x-y$)および水平断面($x-z$)からそれぞれ選択し、遊泳位置の平均値を求めた。続いて、鉛直断面($x-y$)および水平断面($x-z$)をそれぞれ 10×10 分割して得られる $100(=10 \times 10)$ メッシュ内のそれぞれの魚数 n_2 を算出した。

(1) オイカワの遊泳位置

図-4(a)に流量が一定($Q=7 \text{ l/s}$)でプール間落差の異なる場合($0.05Q7, 0.125Q7, 0.2Q7, 0.275Q7, 0.35Q7, 0.425Q7$)のオイカワの存在確率 n_2/N を示す。ここに、 z' ($=B-z$)は右岸($z'/B=0$)から左岸($z'/B=1.0$)方向の座標である。オイカワの遊泳位置は、プール間落差が変化しても水平断面内($x-z$)においては左岸付近を保っている。これは落下流から最も遠い位置である。また、鉛直断面内($x-y$)においては分散した状態である。

図-4(b)にプール間落差が一定($h_0=0.125\text{m}$)で、流量の異なる場合(0.125Q1, 0.125Q7, 0.125Q13)のオイカワの存在確率 n_2/N を示し、図-4(c)にプール間落差が一定($h_0=0.35\text{m}$)の同様なケース(0.35Q1, 0.35Q7, 0.35Q13)におけるオイカワの存在確率 n_2/N を示す。オイカワは前者では遊泳遡上を試みたが、後者では遊泳遡上のみならず跳躍遡上も試みなかった。両図より、プール間落差が変化しても、また、遡上が不可能になっても遊泳位置に大幅な変化はなく、落下流から離れた左岸付近において底面から水面にかけて分散して遊泳していることが理解される。

(2) カワムツの遊泳位置

図-5(a)に流量が一定($Q=7\text{ l/s}$)で、プール間落差の異なる場合(0.05Q7, 0.125Q7, 0.2Q7, 0.275Q7, 0.35Q7, 0.425Q7)のカワムツの存在確率 n_2/N を示す。プール間落差が変化してもカワムツの遊泳位置は、水平断面内($x-z$)においてはプール中央付近に固定し、鉛直断面内($x-y$)においても半水深付近に固定している。図-4(a)より、オイカワは鉛直方向に分散して遊泳することが示されたが、カワムツは対照的に半水深付近に密集するといった魚種間の特性の相違が明らかとなった。

図-5(b)にプール間落差が一定($h_0=0.125\text{m}$)で、流量の異なる場合(0.125Q1, 0.125Q7, 0.125Q13)のカワムツの存在確率 n_2/N を、図-5(c)にプール間落差が一定($h_0=0.35\text{m}$)で、流量の異なる場合(0.35Q1, 0.35Q7, 0.35Q13)のカワムツの存在確率 n_2/N を示す。前者では遊泳遡上を、後者では跳躍遡上を行っていた。両図より、プール間落差が変化しても、また、遊泳形態が異なる場合でも遊泳位置はほとんど変化せず、水路中央の半水深付近に位置していることが理解される。

3.3 遊泳位置における水理量の検討

3.2 において、オイカワおよびカワムツは水位落差、流量および遊泳形態が変化しても、各魚種においては遊泳位置がほとんど変化しないことが解明された。しかし、遊泳位置が変化しないものの、その場の水理量が変化している可能性がある。そこで、休憩場所の水理量の変化について検討する。3.2 では魚の遊泳位置を抽出したが、魚が偶然に遊泳していたのか、あるいは休憩していたのかは不明である。「休憩」とは「意識的にある場所に定位している状態」と解釈されるため、ある一定以上に魚が密集して遊泳している状態を抽出することにした。そこで、鉛直断面($x-y$)および水平断面($x-z$)の $100(=10\times 10)$ メッシュ内における存在確率(n_2/N)が 0.05 以上の領域を休憩場所(orientation area)、0.05 未満の領域を非休憩場所(non-orientation area)と定義した。この0.05 というしきい値は、目視によって感覚的に判断される休憩場所とほぼ一致するように調整して得られた値である。

(1) オイカワの休憩場所および非休憩場所の平均流速

図-6(a)に流量が一定($Q=7\text{ l/s}$)で、プール間落差の異なる場合(0.05Q7, 0.125Q7, 0.2Q7, 0.275Q7, 0.35Q7, 0.425Q7)のオイカワの orientation area および non-orientation

area における平均流速 $V_v = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ のヒストグラムを示す。プール間落差が増加すると non-orientation area の流速が若干高速側の値を示すようになる。一方、orientation area の流速は比較的低流速を保っている。

図-6(b)にプール間落差が一定($h_0=0.125\text{m}$)で、流量の異なる場合(0.125Q1, 0.125Q7, 0.125Q13)におけるオイカワの orientation area および non-orientation area の平均流速 V_v のヒストグラムを、図-6(c)にプール間落差が一定($h_0=0.35\text{m}$)で、流量の異なる場合(0.35Q1, 0.35Q7, 0.35Q13)の平均流速 V_v のヒストグラムを示す。オイカワは前者では遊泳遡上を試み、後者では遊泳遡上を試みなかった。同一のプール間落差で流量が増加、あるいは、同一の流量でプール間落差が増加すると、non-orientation area のヒストグラムが高い値を示すようになる。一方、orientation area の流速はプール間落差および流量の変化に関わらず、比較的低流速を保っている。

(2) カワムツの休憩場所および非休憩場所の平均流速

図-7(a)に流量が一定($Q=7\text{ l/s}$)で、プール間落差の異なる場合(0.05Q7, 0.125Q7, 0.2Q7, 0.275Q7, 0.35Q7, 0.425Q7)におけるカワムツの orientation area および non-orientation area の平均流速 V_v のヒストグラムを示す。プール間落差が増加すると non-orientation area の流速が僅かに高速側の値を示すようになる。一方、orientation area の流速は比較的低流速を保っている。

図-7(b)にプール間落差が一定($h_0=0.125\text{m}$)で、流量の異なる場合(0.125Q1, 0.125Q7, 0.125Q13)におけるカワムツの orientation area および non-orientation area の平均流速 V_v のヒストグラムを、図-7(c)にプール間落差が一定($h_0=0.35\text{m}$)で、流量の異なる場合(0.35Q1, 0.35Q7, 0.35Q13)の平均流速 V_v のヒストグラムを示す。前者では遊泳遡上を、後者では跳躍遡上を行っていた。プール間落差 0.125m に着目すると、流量の増加に伴い non-orientation area の流速には大きなばらつきが生じるが、orientation area の流速はある一定の範囲に位置している。

(3) オイカワおよびカワムツによる休憩場所の選択

オイカワおよびカワムツの orientation area および non-orientation area の水理量を定量的に解明するために、各領域における平均流速 V_v の空間平均流速 $\overline{V_v}$ を求めた。図-8(a), (b)にプール間落差一定($h_0=0.125\text{m}$ および 0.35m)で、流量の異なる場合(0.125Q1, 0.125Q7, 0.125Q13)のオイカワの orientation area および non-orientation area の空間平均流速 $\overline{V_v}$ を式(3)より算出した平均突進速度 $\overline{V_{FB}}$ で割った値を示した。ここで、平均突進速度 $\overline{V_{FB}}$ は各魚種の平均体長における突進速度と定義した。仮に、オイカワがランダムに場所を選択して遊泳するのであれば、両空間の平均流速はほぼ一致するはずである。しかし、図-8(a), (b)より、流量の増加に伴い non-orientation area の流速が増加するが、それと比較すると orientation area の流速の増加は顕著でないことが理解される。これは、オイカワが低流速場を見つ

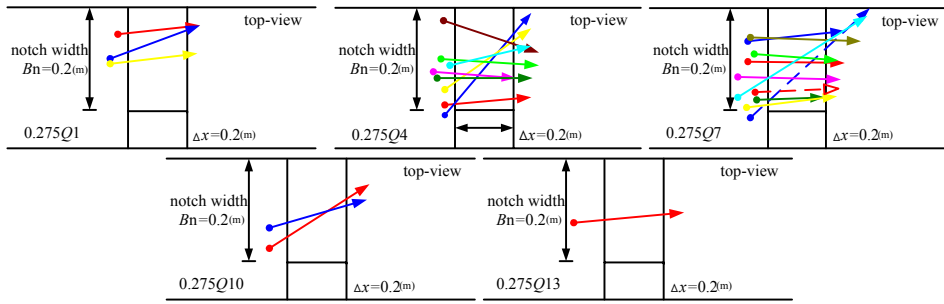


図-10 カワムツの跳躍池上の軌跡

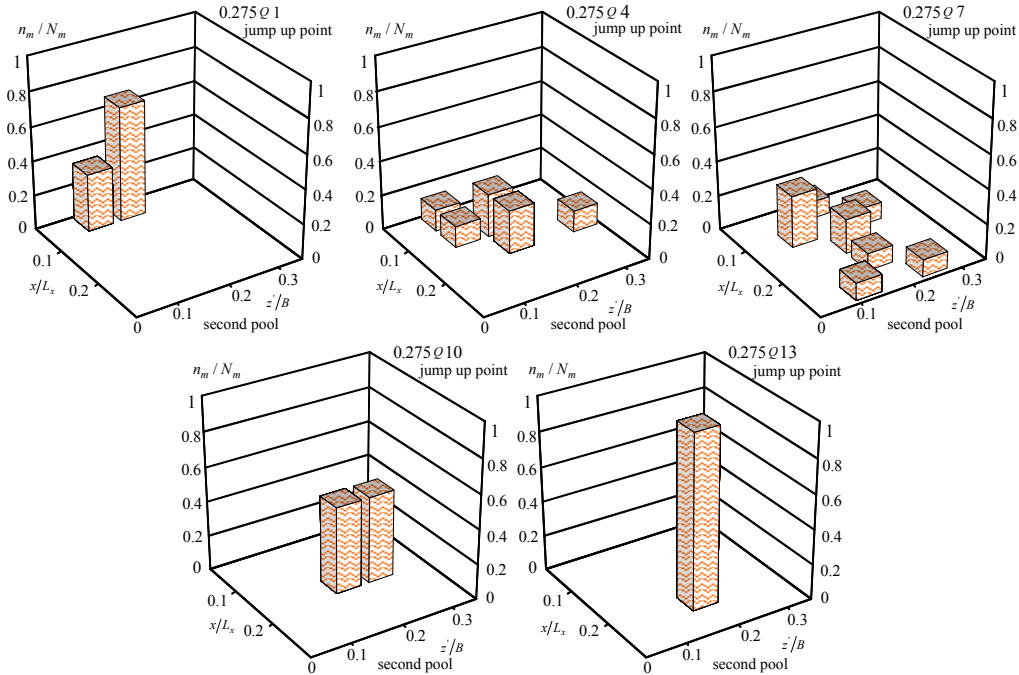


図-11 跳躍池上開始位置

け出し、そこで休憩していることを表している。

図-8(c)に流量が一定($Q=7\ell/s$)でプール間落差 h_0 の異なる場合のオイカワの orientation area および non-orientation area の $\overline{V}_v / \overline{V}_{FB}$ を示した。 $0.05\text{m} \leq h_0 \leq 0.20\text{m}$ は遊泳池上に成功したケース、 $0.275\text{m} \leq h_0 \leq 0.425\text{m}$ は遊泳池上および跳躍池上に挑まなかったケースである。 non-orientation area の $\overline{V}_v / \overline{V}_{FB}$ はプール間落差 h_0 の増加に伴い増加するが、 orientation area の流速は比較的増加率が低く、さらに、 non-orientation area の流速より常に低流速である。従って、遊泳池上に挑まなかった場合も、池上に必要な条件の一つである「休憩場所の確保」は行われていることを意味する。従って、他の要因、すなわち「落下流速が突進速度以下」あるいは「落下流がはく離しないこと」が池上を不可能にした原因と考えられる。

図-9(a), (b)にプール間落差一定($h_0=0.125\text{m}$ および 0.35m)で、流量の異なる場合($0.125Q1$, $0.125Q7$, $0.125Q13$)のカワムツの orientation area および non-orientation area の $\overline{V}_v / \overline{V}_{FB}$ で示した。オイカワの休憩場所の特性と同様に、流量の変化に関わらず orientation area の流速が non-orientation area の流速よりも低流速であることが理解

される。カワムツもオイカワと同様に低流速場を選択して休憩していると判断される。

図-9(c)に流量が一定($Q=7\ell/s$)でプール間落差の異なる場合のカワムツの orientation area および non-orientation area の $\overline{V}_v / \overline{V}_{FB}$ を示した。 $0.05\text{m} \leq h_0 \leq 0.20\text{m}$ は遊泳池上に成功したケース、 $0.275\text{m} \leq h_0 \leq 0.35\text{m}$ は遊泳池上を諦めて跳躍池上に挑み成功したケース、 $h_0=0.425\text{m}$ は跳躍池上に挑んだものの、失敗したケースである。オイカワと同様に orientation area の流速値に顕著な変化は見られない。

図-8, 9より、魚種に関わらずプール内の流速が変化しても魚の好む流速を有する流れ場を選択して休憩していることが解明された。また、この流速は両魚種とも突進速度 \overline{V}_{FB} の7~25%であることが両図から読み取れる。図-4, 5より、オイカワの休憩場所は鉛直方向に分散しているのに対し、カワムツは半水深付近に密集していることが判明した。これは、半水深付近の流速がカワムツの選好流速であること、カワムツは成群性が弱い魚種であることが原因と考えられる¹⁰⁾。

3.4 カワムツの跳躍池上特性

前述したようにプール間落差が $0.275\text{m} \sim 0.35\text{m}$ におい

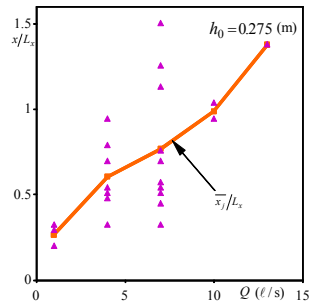


図-12(a) 跳躍遡上の x 座標と流量との関係

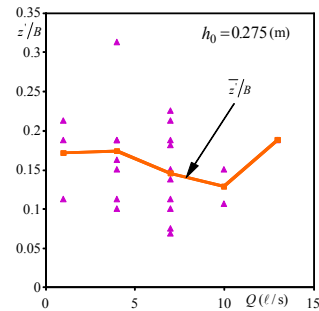


図-12(b) 跳躍遡上の z' 座標と流量との関係

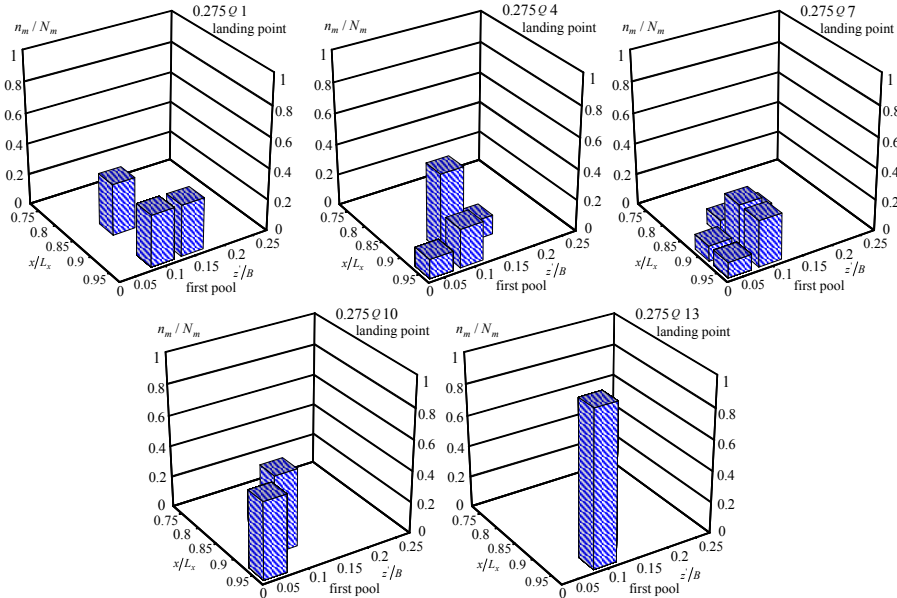


図-13 跳躍遡上の着水位置

てカワムツの跳躍遡上が観察され、プール間落差の増加に伴い遡上率が減少していた。また、プール間落差が 0.425m では跳躍遡上に挑んでいる個体は見られたものの、遡上に成功した個体はゼロであった。

既設魚道の中にはプール間落差が大きく、魚が跳躍せざるを得ない魚道が少なからず存在している¹¹⁾。魚道全体を改修してプール間落差を減少させれば、遡上が容易になるが、経済的理由より速やかな実現は困難である。一方、部分的な改修のみで跳躍遡上が可能になれば、低コストで速やかな遡上率の改善が望める。そのためには魚の跳躍遡上特性を解明する必要がある。

(1) カワムツの跳躍・着水位置

図-10 にカワムツの跳躍遡上の軌跡を表した平面図 ($0.275Q1$, $0.275Q4$, $0.275Q7$, $0.275Q10$, $0.275Q13$)を示す。ただし、第2プールから空中に遡上する瞬間あるいは第1プールに着水した瞬間付近に水面が大きく波立ち、位置の読み取りが困難な場合は示していない。同図より、カワムツは必ずしも上流方向に跳躍しておらず、切り欠き部を横断方向に横切る形で跳躍しているものも観察される。また、目視によって跳躍遡上に挑んでいるものの、第1プールまでの水平距離あるいは鉛直距離が足りずに遡上に失敗しているものも観察された。従って、カワムツは跳躍遡上を行う際に、跳躍する方向および距離を予め考えていないと推測される。

図-11 にプール間落差 h_0 が 0.275m の一定で、流量が異なる場合 ($0.275Q1$, $0.275Q4$, $0.275Q7$, $0.275Q10$, $0.275Q13$) のカワムツの跳躍遡上開始位置を示す。切り欠き部は $0 \leq z'/B \leq 0.2$ である。跳躍遡上開始位置は、流量の少ないケース $0.275Q1$ では $0 < x/L_x < 0.1$ の範囲に存在するが、次に流量の多い $0.275Q4$ では $0 < x/L_x < 0.2$ の範囲となり、さらに、流量の多い $0.275Q7$ では $0 < x/L_x < 0.3$ の範囲となる。これ以上流量の多いケースでは、サンプル数の減少によって傾向が把握しにくいだが、流量の増加に伴い切り欠きよりはなれた下流側に跳躍遡上開始位置が移動していると判断される。

一方、横断位置については、流量の大きな $0.275Q10$ および $0.275Q13$ についてはサンプル数が少ないために明確な傾向が掴めないが、それ以下の流量の3ケースを観察すると、切り欠き部 ($0 \leq z'/B \leq 0.2$) 全体に分布しており、流量の変化が遡上開始横断位置には影響を与えないことが示唆される。こうした特性を詳細に調べるために、隔壁下流側 ($x=0$) から跳躍遡上開始位置までの流下方向距離 x をプール長 L_x で無次元化した値と流量 Q との関係を図-12(a)に、右岸側壁 ($z'=0$) から跳躍遡上開始位置までの横断方向距離 z' を魚道幅 B で無次元化した値と流量 Q との関係を図-12(b)に示す。図-12(a)に着目すると、流量の増加に伴い跳躍遡上開始位置が下流方向に移動していることが確認される。これは、流量の増加に伴って流脈幅が

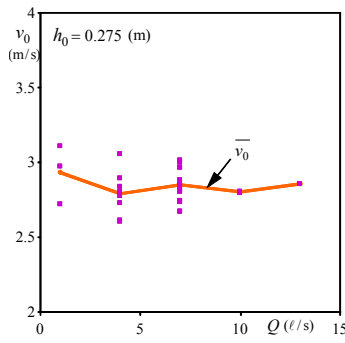


図-14 跳躍遡上の初速度と流量の関係

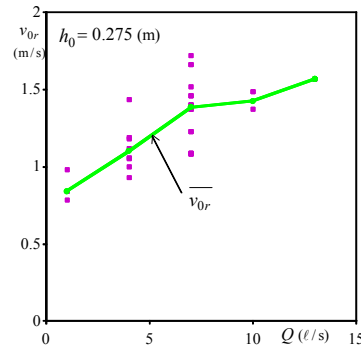


図-15 初速度水平方向成分と流量の関係

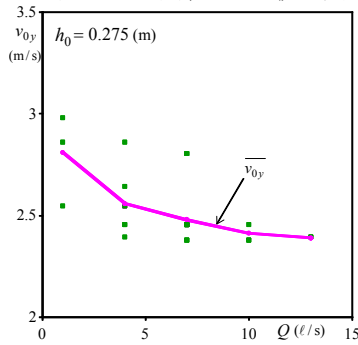


図-16 初速度鉛直方向成分と流量の関係

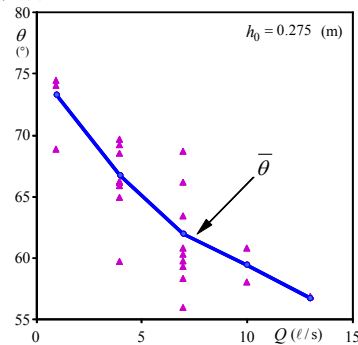


図-17 跳躍角度と流量の関係

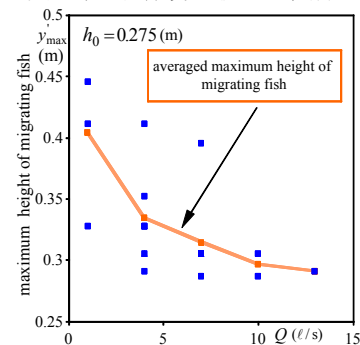


図-18 最高到達位置と流量の関係

増加してより下流側に落下するので、それを避けるために生じたものと考えられる。一方、図-12(b)に着目すると、流量が変化しても跳躍遡上開始の横断位置に系統的な変化は見られず、流量の変化に関わらず切り欠き部の中央 ($z'/B=0.2$) 付近に位置していることが確認される。ところで、高嶋ら¹²⁾、泉ら^{13,14)}および鬼東ら¹⁵⁾は、オイカワ、カワムツおよびアユが遊泳遡上を行う場合、遡上位置は切り欠き部内で均等ではなく、側壁付近に集中することを解明している。従って、少なくともカワムツに関しては、遡上開始横断位置が遊泳遡上と跳躍遡上とで異なることが解明された。

図-13 にプール間落差 h_0 が 0.275m の一定で、流量が異なる場合 (0.275Q1, 0.275Q4, 0.275Q7, 0.275Q10, 0.275Q13) のカワムツの着水位置を示す。着水位置の x 座標に着目すると、流量の小さな順から、 $0.85 < x/L_x < 1.0$ (0.275Q1), $0.90 < x/L_x < 1.0$ (0.275Q4), $0.85 < x/L_x < 1.0$ (0.275Q7) となっており、流量が変化しても着水位置の x 座標に系統的な変化は見られない。着水位置の z 座標についても、ほぼ切り欠き部 ($0 \leq z'/B \leq 0.2$) の全体に分散しており、系統的な変化は見られない。従って、流量が変化しても着水位置は変化せずランダムと判断される。

(2) カワムツの跳躍遡上の初期値特性

水路側壁の脇に設置されたビデオカメラで撮影された画像から跳躍遡上の挙動を解析すれば、跳躍初期速度や最高到達位置が算出可能である。しかし、使用したビデオカメラの撮影間隔が 0.033s でシャッター速度が固定されているため、ぶれが生じ空中における正確な魚の位置を抽出することが困難であった。一方、プール上方に設置されたビデオカメラの画像から、カワムツが第2プールから空中に遡上を開始する瞬間および第1プールに着水した瞬間

の画像を抽出することは、水面の波立ちが極端に大きな場合を除いて可能であった。そのため、剛体の運動方程式を利用してカワムツの跳躍遡上特性を検査する。すなわち、カワムツが空中に飛び出して着水するまでの間、カワムツの体の形状は変形しないことおよび空気抵抗が無視できるという近似を採用する。この近似は厳密には成立しないが、魚の跳躍遡上の挙動を解析した例がこれまで皆無であることから、挙動の解明の第一歩のために採用した。画像解析から跳躍遡上に要した時間 t 、跳躍遡上開始位置 (x_j, z_j)、着水位置 (x_l, z_l) が得られているため、式(4)~式(8)を用いると、跳躍初速度 v_0 、跳躍速度の水平成分 v_r 、跳躍速度の鉛直成分 v_y 、水面と跳躍方向のなす跳躍角度 θ 、最高到達位置 y'_{\max} が算出される。

$$r = \sqrt{(x_l - x_j)^2 + (z_l - z_j)^2} \quad (4)$$

$$r = v_0 \cos \theta \cdot t \quad (5)$$

$$v_r = v_0 \cos \theta \quad (6)$$

$$v_y = v_0 \sin \theta - gt \quad (7)$$

$$y' = v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (8)$$

ここに、 r は跳躍方向の水平座標、 y' ($=y+h$) は第2プール水面から鉛直上方座標、 g は重力加速度である。

図-14に跳躍遡上の初速度 v_0 と流量 Q との関係および各流量における初速度 v_0 の平均値 \bar{v}_0 を示す。流量が増加しても跳躍初速度はほぼ一定である。これは、図-12(a)より明らかとなったように、カワムツが跳躍遡上に挑む場合は高速な落下流の下流側に位置する低流速域を助走区間として選択しているため、流量が変化しても助走区間の

流速に大きな変化がなかったこと、および跳躍開始直前の遊泳速度が突進速度に達しているため一定値をとるために生じたと推測される。

図-15 に跳躍遡上の初速度 v_0 の水平方向成分 v_{0r} と流量 Q との関係および平均値 $\overline{v_{0r}}$ を、図-16 に跳躍遡上の初速度 v_0 の鉛直方向成分 v_{0y} と流量 Q との関係および平均値 $\overline{v_{0y}}$ を、図-17 に水面と跳躍方向のなす跳躍角度 θ と流量 Q との関係および平均値 $\overline{\theta}$ を示す。図-15 および図-16 に着目すると、流量が増加すると初速度の水平方向成分 v_{0r} が増加するのに対し、鉛直方向成分 v_{0y} は減少傾向にあることが理解される。一方、図-15 より流量が変化しても速度 v_0 は一定であることが示されている。これは、図-17 に示されたように、跳躍角度 θ が流量の増加に伴い水平に近づくことが原因である。

図-18 にカワムツの跳躍による最高到達位置 y'_{\max} と流量 Q との関係および平均値 $\overline{y'_{\max}}$ を示す。流量の増加に伴い最高到達位置が減少している。これは、図-16 に見られたように、流量の増加に伴い鉛直方向初速度が減少したことが原因である。そのため、流量の増加に伴い鉛直距離が足りなくなり遡上率が減少したと考えられる。

4. おわりに

本研究はプール間落差の推奨値(0.1~0.2m)が適切かどうかを検証することを目的とし、階段式魚道におけるプール間落差と流量を系統的に変化させ、水理量が魚の遡上特性に及ぼす影響を検討したものである。得られた知見を以下に示す。

(1) 水位落差 h_0 を 0.05~0.425m まで変化させた結果、水位落差 h_0 が 0.05~0.20m の範囲ではオイカワおよびカワムツは共に遊泳遡上したのに対して、水位落差 h_0 が 0.275~0.425m の範囲ではカワムツのみが跳躍遡上した。さらに、水位落差 h_0 が 0.425m ではカワムツが跳躍遡上を試みるが全て失敗していた。従って、国土交通省河川局の水位落差の推奨値である 0.1~0.20m の範囲では遡上が容易であることが実証された。

(2) オイカワの休憩場所は水深方向に分散するのに対し、カワムツは半水深付近に密集している。これは、水深付近の流速がカワムツの選好流速であることに加え、カワムツは成群性が強い魚種であることが原因と推定される。また、オイカワおよびカワムツは突進速度 $\overline{V_{FB}}$ の約 7~25% の流速場で休憩していることが解明された。

(3) 遊泳遡上を行う場合は、遡上開始位置は側壁付近に集中することが知られているが、跳躍遡上を行う場合は切り欠き部に均等に分散することが解明された。

(4) 水位落差が増加すると落下流速が増加するが、これが突進速度以上になった場合にオイカワおよびカワムツ共に遊泳遡上を諦める。オイカワの場合は跳躍遡上を試みないが、カワムツの場合は跳躍遡上を試みる。また、水位落差が増加すると落下流脈がより下流側に移動するが、これを避けるために跳躍遡上位置が下流側にずれる。一方、カ

ワムツの跳躍遡上初期速度は一定のため、水位落差の増加に伴い鉛直方向速度が低下するために遡上率が減少する。

(5) 本研究に用いた各プールの規格は現地魚道の値と同オーダーなため、上記の結論は現地魚道に適応可能と考えられる。ただし、プール数が現地魚道のものよりも少なく、魚道の全長が再現されていないため、魚の体力疲労が考慮されていない。また、オイカワおよびカワムツだけを対象とした検討結果である。今後、体力疲労を考慮することや、アユなどの通し回遊魚を用いた実験を行う必要がある。

参考文献

- 1) (財)ダム水源地環境整備センター編：最新魚道の設計—魚道と関連施設—，信山社サイテック，1998。
- 2) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 3) 国土交通省河川局：魚がのぼりやすい川づくりの手引き，2005。
- 4) Wada, Y.: Relation between the ascending path of ayu and fishway structure, *Proc. of the International Symp. on Fishways '90 in Gifu, Japan*, pp.445-450, 1990.
- 5) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，飯國洋平，森悠輔：階段式魚道における隔壁の切り欠き率が遡上率に及ぼす影響，*水工学論文集*，第52巻，pp.1201-1206，2008。
- 6) Rajaratnam, N. and Katopodis, C. and Mainali, A.: Plunging and streaming flows in pool and weir fishways, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.114, pp.939-944, 1988.
- 7) 林田寿文，本田隆秀，萱場祐一，島谷幸宏：階段式魚道における落下流と表面流の発生特性とウグイの遊泳行動，*環境システム研究論文集*，Vol.28, pp.333-338，2000。
- 8) 浪平篤，後藤真宏，小林宏康：階段式魚道における流量変化に伴うプール毎の流況およびウグイの遡上行動，*水工学論文集*，第51巻，pp.1291-1296，2007。
- 9) 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，pp.1183-1188，2008。
- 10) 川那部浩哉，水野信彦，細谷和海：日本の淡水魚，山と溪谷社，1989。
- 11) 和田吉弘：魚道見聞録，山海堂，2003。
- 12) 高嶋信博，中村俊六：魚道内のアユの挙動に関する実験的研究，第28回水理講演会論文集，pp.353-358，1984。
- 13) 泉完，高屋大介，工藤明，東信行：アイスハーバー型魚道における魚類の隔壁遡上特性，*農業土木学会論文集*，No.217，pp.55-63，2002。
- 14) 泉完，高屋大介，工藤明，東信行：赤石第2頭首工のアイスハーバー型魚道隔壁における魚類の遡上行動，*水工学論文集*，第47巻，pp.763-768，2003。
- 15) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，山口秀和：プールタイプ魚道におけるオイカワの跳躍遡上と水理特性との関係，*応用力学論文集*，Vol.6，pp.983-990，2003。

(2008年4月14日 受付)