

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

EFFECTS OF NOTCH RATIO IN POOL-AND-WEIR FISHWAY ON MIGRATION RATE

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・飯國洋平³・森悠輔⁴
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yohei IIGUNI and Yusuke MORI

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学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程

⁴学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

Most of fishways constructed beside of weirs and dams in Japanese rivers belong to pool-and-weir type. Usually, a notch is placed at the weir. Ministry of Land, Infrastructure and Transport recommends that the ratio between the notch width and fishway one set to in the range between 0.17 and 0.20 without any verification. In this study, the notch ratio in a pool-and-weir fishway was changed in the range between 0.1 and 0.7 and migration rates of ayu, *Plecoglossus altivelis altivelis*, were obtained with the aid of two sets of digital video cameras. Further, three components velocities were measured with a 3-D electromagnetic current meter. It was found that the migration rate changes with respect to the discharge, the migration rate increases with a decrease of the notch ratio and also that the most of migration positions over the weir are located near the side-wall. Those characteristics concern with the flow velocity and orientation area. The position of the orientation area concerns with the flow velocity.

Key Words : pool-and-weir fishway, notch ratio, discharge, orientation, migration

1. はじめに

ダム、堰、落差工によって生じる水位落差は、水生生物の移動の障害となる。そのため水位落差を分割し、魚類の遡上および降下を助ける目的で魚道が設置されてきた。魚道には様々なタイプがある。その中の1つであるプールタイプは、階段式、バーチカルスロット式、潜孔式、デニール式およびハイブリット式などに分類される。以上のように様々なタイプの魚道が提案されているが、我が国では階段式が主流である¹⁾。

魚道の建設計画を行う際、高い遡上率を達成できる設計案を提案すべきである。階段式魚道において遡上に影響を与える要素として、隔壁形状、プール長、隔壁間落差、粗度の有無、切り欠きの有無とその位置、隔壁部の切り欠き率(=切り欠き幅/魚道幅)などがあげられる²⁾。Wada³⁾および農林水産省⁴⁾は、隔壁の天端形状が傾斜型および丸型の方が直角型に比べて遡上率が高いことを示している。久保田⁵⁾はプール長を系統的に変化させてイ

ワナの遡上率を計測した。その結果、プール長が魚の体長の2倍以上のときに、遡上率が最大になることを示した。和田⁶⁾は隔壁間落差の適正値が0.15~0.25mの範囲と述べている。粗度の有無については、底面に粗石を設置した場合が設置しない場合に比べて、遡上数が高いことを佐倉ら⁷⁾が確認している。鬼束ら⁸⁾は階段式魚道において交互切り欠きよりも片側切り欠きの遡上率の方が高いことを実験に基づき示した。一方、隔壁部の切り欠き率に関して、国土交通省⁹⁾は流況を安定させるために、0.17~0.2の範囲に設定することを推奨しているが、これを実証したものはほとんどない。本研究は、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て遡上率の変化を解明した。続いて、流速測定および定位位置を測定し、水理量が遡上特性に及ぼす影響を検討した。

2. 実験条件および実験装置

プール長 $L_x=0.9\text{m}$ 、魚道幅 $B=0.8\text{m}$ 、プール底面から切り欠き下端までの高さ $H_y=0.7\text{m}$ の3つのプールを、落

差 $\Delta y = 0.15\text{m}$ で連結させた片側切り欠き付き階段式魚道を実験に用いた。隔壁上の流れは切り欠き部のみからの越流である。ここに B_n は右岸側に設置された切り欠きの幅、 $\Delta x (=0.2\text{m})$ は隔壁厚である。流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸、横断方向に z 軸をとる。切り欠き形状は Wada³⁾ 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。黒に塗装した木材を魚道の材料に用いたが、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側壁材料に透明なアクリル板を用いた。中村ら¹⁰⁾ は水路上方からの視覚情報にはアユは敏感だが、側壁および底面からの視覚情報には鈍感であると報告している。よって、側壁の一部にアクリル板を用いても実験値に与える影響はほとんどないと考えられる。

本研究は切り欠き率 B_n/B が遡上率に及ぼす影響を解明することを目的としている。そのため、国土交通省の推奨する切り欠き率 ($0.17 \sim 0.2$) を網羅する広範囲の切り欠き率 ($0.1 \sim 0.7$) において、流量 Q を変化させて予備実験を行った。その結果、同一の切り欠き率 B_n/B でも流量 Q によって遡上率が異なること、および遡上率のピークを示す流量が切り欠き率によって異なることが判明した。そのため表-1 に示すような5通りの切り欠き率 $B_n/B (=0.1 \sim 0.7)$ 、6通りの流量 $Q (=0.5 \sim 24 \text{ l/s})$ の組み合わせ (合計 30 ケース) で実験を行った。ここに、 $Q/B_n (\text{m}^2/\text{s})$ は単位幅流量、 $\Delta h (\text{m})$ は越流水深である。0.1Q0.5 といったケース名を用いるが、0.1 が切り欠き率 B_n/B を、0.5 が流量 $Q (\text{l/s})$ を意味している。なお、越流水深が一定 ($\Delta h = 0.047\text{m}$) で、切り欠き率 B_n/B のみが変化するような組み合わせ (ケース 0.1Q1.5, 0.2Q3.3, 0.3Q5, 0.5Q7.5, 0.7Q10) が生じるように工夫している。

体長 B_L が $8 \sim 11\text{cm}$ (平均体長 9.2cm) のアユ 120 尾を実験に用いた。60 尾のアユを上流から 2 番目のプールに入れた状態で流量を流し始める。この時、目的の流量になるまで切り欠き部にネットを設置して遡上ができないようにする。定常状態に達した後、切り欠き部のネットを除去すると同時に側壁および水路上部に設置したビデオカメラを用いてプール内および切り欠き部におけるアユの挙動を 20 分間同時撮影した。続いて、残る 60 尾についても同様な撮影を行い、2 回の実験値に有意な差がないことを確認した後、両者の合計値あるいは平均値を 1 ケースの実験値として採用した。

解析項目は、遡上数、切り欠き部における遡上位置およびプール内の休憩場所である。側壁方向から撮影された画像を解析することで遡上数がカウントされる。続いて、水路上部から撮影された画像から切り欠き部の横断方向遡上位置が判明する。さらに、側壁および水路上部から撮影された画像において、それぞれ 1s ごとに撮影された全てのアユの頭部の位置を抽出した。したがって、奥行き方向あるいは鉛直方向にアユが重なって遊泳している場合は、最もカメラ側に遊泳しているアユの位置のみが抽出される。

表-1 実験条件

	B_n/B =0.1	B_n/B =0.2	B_n/B =0.3	B_n/B =0.5	B_n/B =0.7
name	0.1Q0.5	0.2Q2	0.3Q2	0.5Q2	0.7Q2
$\Delta h (\text{m})$	0.025	0.032	0.030	0.025	0.021
Q/B_n	0.006	0.013	0.008	0.005	0.004
name	0.1Q1.5	0.2Q3.3	0.3Q5	0.5Q7.5	0.7Q7.5
$\Delta h (\text{m})$	0.047	0.047	0.047	0.047	0.039
Q/B_n	0.019	0.021	0.021	0.019	0.013
name	0.1Q2	0.2Q4.25	0.3Q7.5	0.5Q10	0.7Q10
$\Delta h (\text{m})$	0.055	0.054	0.070	0.054	0.047
Q/B_n	0.025	0.027	0.031	0.025	0.018
name	0.1Q4.5	0.2Q6.5	0.3Q11.5	0.5Q13	0.7Q13
$\Delta h (\text{m})$	0.070	0.078	0.085	0.067	0.055
Q/B_n	0.056	0.041	0.042	0.033	0.023
name	0.1Q7	0.2Q8.75	0.3Q13	0.5Q18.5	0.7Q18.5
$\Delta h (\text{m})$	0.100	0.095	0.100	0.085	0.073
Q/B_n	0.088	0.055	0.054	0.046	0.033
name	0.1Q9.5	0.2Q11	0.3Q18.5	0.5Q24	0.7Q24
$\Delta h (\text{m})$	0.115	0.108	0.115	0.098	0.085
Q/B_n	0.119	0.069	0.077	0.060	0.043

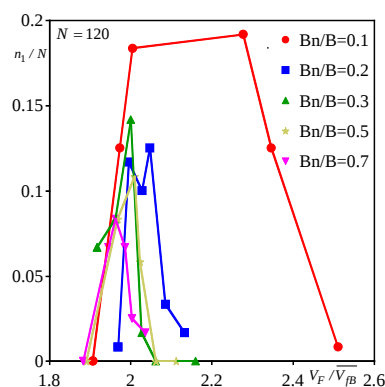


図-1 落下速度と遡上率

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 ($=7 \times 7 \times 7$) 点において、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、それぞれの時間的流速 U , V , W を算出した。なお、流速測定時にはプールにアユを入れていない。

3. 実験結果および考察

遡上率を次のように定義する。

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上に成功した魚数 } n}{\text{実験に用いた魚数 } N (=120)} \quad (1)$$

一般に、遡上率を決定する因子として、落下流速、呼び水および休憩場所が挙げられる¹⁾。

(1) 落下流速が遡上率に及ぼす影響

落下流速 V_F は次式で概略値が求められる¹⁾。

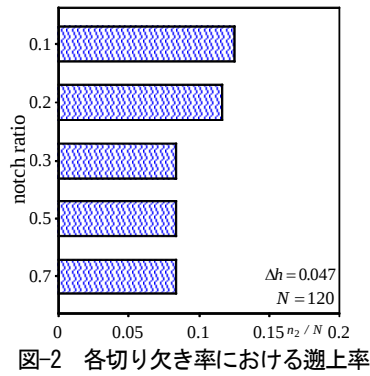


図-2 各切り欠き率における遡上率

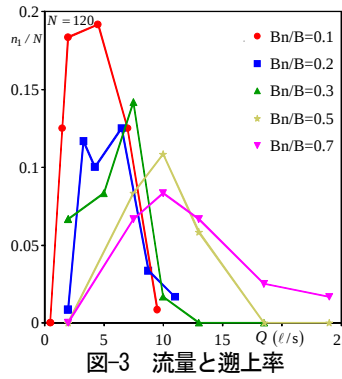


図-3 流量と遡上率

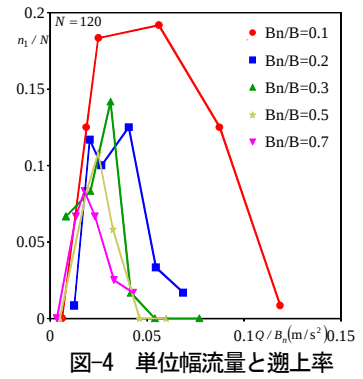


図-4 単位幅流量と遡上率

$$V_F = \sqrt{V_c^2 + 2g\Delta h} \quad (2)$$

V_c は切り欠き部における限界流速、 g は重力加速度である。落下流速 V_F が魚の突進速度以下でなければ遡上不可能である。魚の突進速度 V_B は次式で求められる¹⁾。

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

本研究で使用したアユの平均体長 B_L は9.2cmのため、平均突進速度 $\overline{V_B}$ は92cm/s=0.92m/sとなる。

図-1に落下速度 V_F を平均突進速度 $\overline{V_B}$ で無次元化した値と遡上率 n_1/N との関係を切り欠き率別に示す。いずれの切り欠き率においても、落下速度 V_F が平均突進速度 $\overline{V_B}$ を上回った状態でも遡上している。これは、突進速度の算定に用いた式(3)が適切でないことを意味している。近年、スタミナトンネルを用いてオイカワおよびウグイの突進速度を計測した泉ら^{11),12)}の研究および体長および流速を変化させてオイカワの突進速度を求めた鬼束ら¹³⁾の研究によると、両魚種の突進速度は流速および体長依存するが、おおそ次式であることを述べている。

$$V_B \text{ (cm/s)} = (20 \sim 30)B_L \text{ (cm)} \quad (4)$$

アユについての同様な研究は存在しないが、式(4)で得られる値あるいはそれ以上の突進速度をアユは有していると推測される。従って、一般的に知られているアユの突進速度を求める式(3)を用いて魚道を設計することが必ずしも適切でないことを確認した。

さて、遡上率 n_1/N がピークを示す無次元落下速度 $V_F/\overline{V_B}$ は切り欠き率によって異なる値を示している。

これは同一の落下速度でも切り欠き幅によって遡上特性に相違が生じることを示唆している。そこで、越流水深 Δh が同一(=0.047m)、すなわち、式(2)より求められる落下速度 V_F が等しいケースを各切り欠き率からピックアップし、切り欠き率 B_n/B と遡上率 n_2/N との関係を図-2に示す。切り欠き率 B_n/B の増加に伴い遡上率 n_2/N が低下し、 B_n/B が0.3~0.7では遡上率は一定となっている。以上より、切り欠き率の変化が遡上率に影響を与えていることを解明した。ここで得られた知見は魚道を設計する際の流量等の条件を想定していない限定的な結果である。今後、これらの条件を考慮した場合の遡上率に及ぼす影響についての同様な検討をしていく

い。

(2) 呼び水が遡上率に及ぼす影響

呼び水の物理量は不明であるが、河川を遊泳中の魚に魚道入り口に流れがあることを認知させることが目的なので、流量に関係があると推定される。ただし、魚道幅が広ければ同一の流量でも効果が異なるので、単位幅流量も関係すると推定される。本研究では、呼び水を魚道入り口のみならず、魚道内でもアユの遡上意欲を駆り立てる効果があるものとして定義した。以上の考察に基づき、落下流速および呼び水が遡上率に及ぼす影響を検討するために、流量および単位幅流量と遡上率との関係を検討する。

a) 流量

図-3に流量 Q と遡上率 n_1/N との関係を切り欠き率別に示す。いずれの切り欠き率でも流量 Q の増加に伴い遡上率 n_1/N が増加し、ピークを示した後に減少している。しかし、遡上率がピークを示す流量が各切り欠き率で異なっている。したがって、流量のみでは遡上率の変化を説明できない。

b) 単位幅流量

図-4に単位幅流量 Q/B_n と遡上率 n_1/N との関係を切り欠き率別に示す。流量と遡上率との関係と同様に遡上率がピークを示す時の単位幅流量は各切り欠き率によって異なり、単位幅流量のみでも遡上率の変化を説明できない。

(3) 休憩場所が遡上率に及ぼす影響

a) アユの存在確率の時間的变化

側壁および水路上部から撮影された画像を解析することによって1sごとのアユの位置が得られている。そこで、プールの鉛直断面($x-y$)および水平断面($x-z$)をそれぞれ10分割して得られる100(=10×10)メッシュ内の魚数 n_3 を算出した。図-5に300sごとに得られたアユの存在確率 n_3/N の一例(0.3Q7.5)を示す。ここに、 z' は切り欠きの左岸端から右岸方向の座標である。存在確率が高い領域が多少時間的に流下方向および横断方向に変動しているが、その移動量は魚道内の空間に対して微少である。これは、アユが偶然ここを遊泳しているのではなく、選好する水理環境が存在するために好んで定位(orientation)

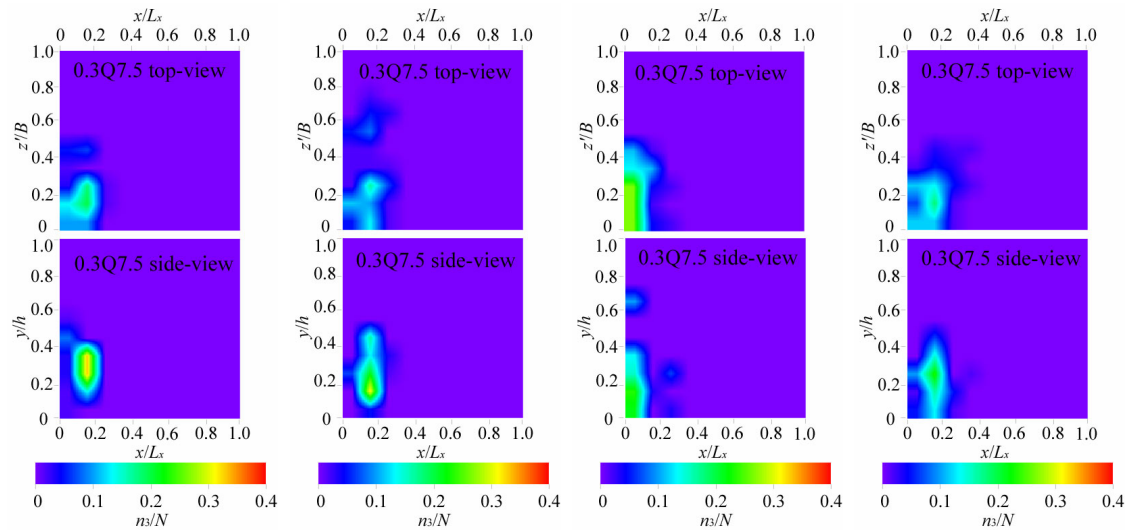


図-5 300sごとの定位場所の瞬間的变化

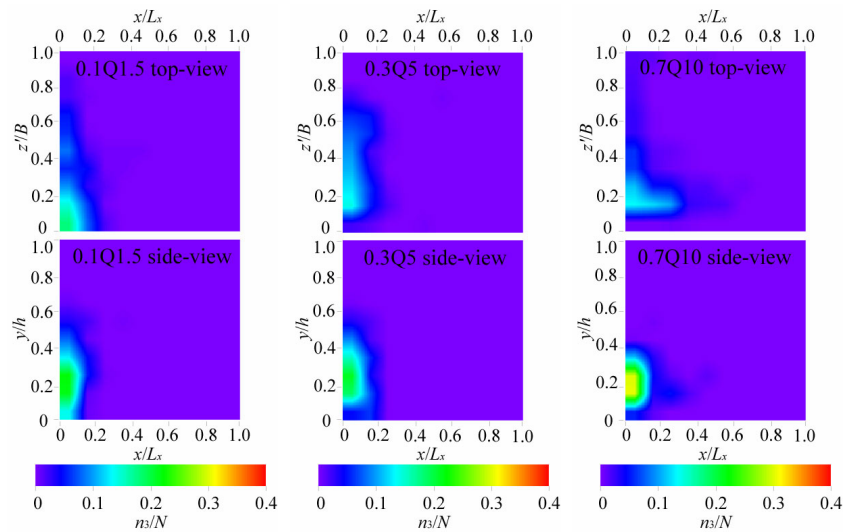


図-6 越流水深一定条件下定位場所

していることを意味する。このような状況は他のケースにおいても観察された。

b) 切り欠き率の変化に伴う定位位置の変化

アユの定位位置がほぼ定常的と判明したため、以下では20分に得られた定位位置を平均したものを用いる。図-6に越流水深が一定($\Delta h = 0.047\text{m}$)で、切り欠き率 B_n / B の異なる場合(0.1Q1.5, 0.3Q5, 0.7Q10)の定位位置を示す。鉛直断面($x-y$)においては、切り欠き率が変化しても定位位置は変化しない。水平断面($x-z$)においては、切り欠き率の増加に伴い定位位置が側壁から離れて分散している。泉ら¹⁴⁾、高嶋ら¹⁶⁾および鬼束ら¹⁷⁾は魚は切り欠き上の遡上位置が横断方向に一樣ではなく、側壁付近に集中していることを明らかにしている。図-7に切り欠き上の遡上位置の頻度分布を切り欠き率別に示す。 n_4 は z'/B が0.1ごとの遡上数である。全ての切り欠き率において、既往の研究で指摘されたとおりに右岸壁面付近を遡上している。切り欠き率が変化しても遡上位置が右岸側壁付近に集中しているに関わらず、定位位置は横断方向に分散傾向にある(図-6参照)。そのため、切り欠き率の増加に伴い、定位位置から遡上場所(右岸側壁付近)への距離が増加するために遡上率が低下(図-2

参照)したものと考えられる。

c) 流量が変化する場合の定位位置の変化

図-8に切り欠き率 B_n / B が一定($=0.3$)で、越流水深の異なる場合($\Delta h = 0.03\text{m}$, 0.07m , 0.10m)の定位位置を示す。水平断面($x-z$)に着目すると、小流量の0.3Q2および大流量の0.3Q13では定位位置が分散しているのに対し、中流量の0.3Q7.5では定位位置が集中している。鉛直断面($x-y$)に関しては、大流量の0.3Q2と中流量の0.3Q7.5の定位位置はほとんど変わらないが、大流量の0.3Q13の定位位置は分散している。図-3を見ると分かるように遡上率は中流量の0.3Q7.5、小流量の0.3Q2、大流量の0.3Q13の順に低くなる。すなわち、定位位置が集中するほど遡上率は増加し、分散するほど遡上率が低下することが判明した。

(4) プール内の定位場所と流速との関係

定位場所と遡上率との関係が求められたが、切り欠き率および流量が変化するとなぜ定位場所が変化するかが解明されていない。魚の定位場所はプール内の流速に大きく依存すると考えられる。そこで、魚の存在確率(n_3 / N)が0.1以上の領域(orientation area)を3次元的に求め、

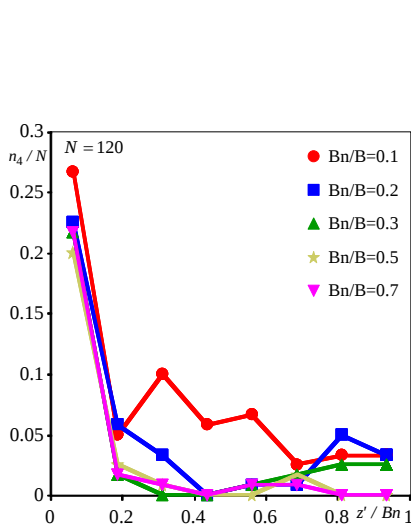


図-7 遡上位置別の遡上率

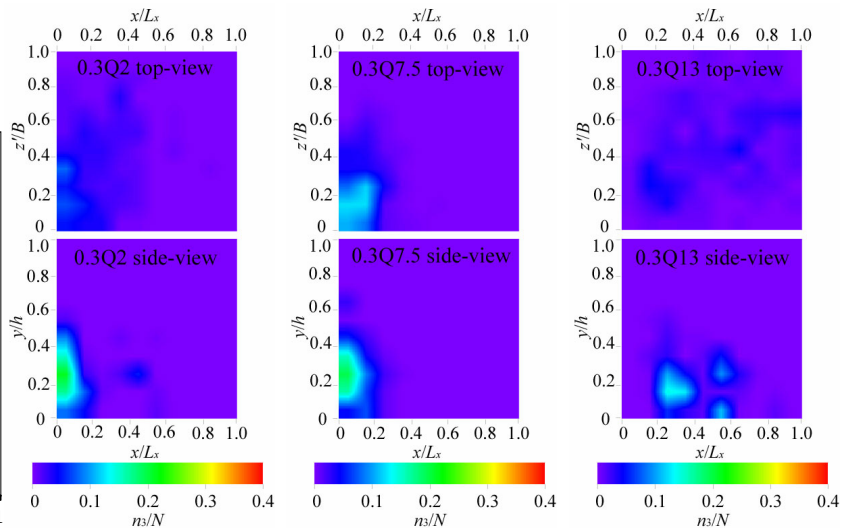


図-8 切り欠き率一定条件下定位場所

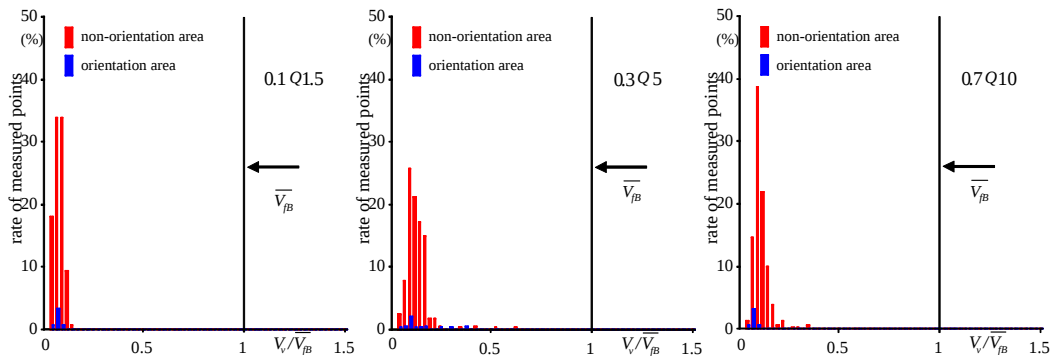


図-9(a) 越流水深一定時の流速ヒストグラム

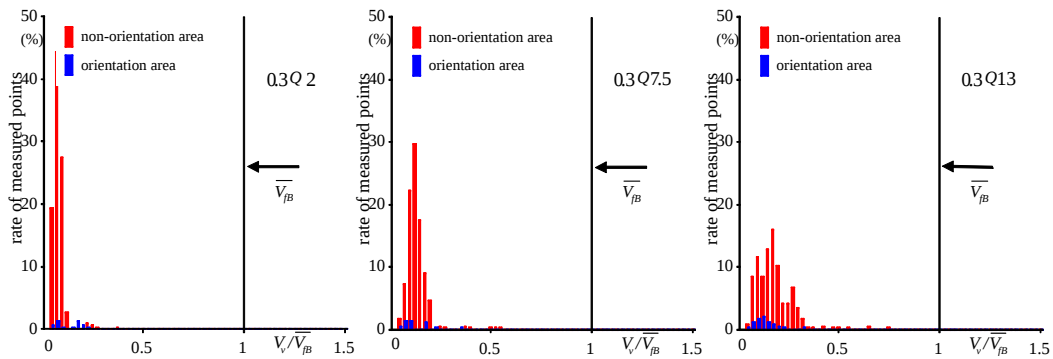


図-9(b) 切り欠き率一定時の流速ヒストグラム

その領域の平均流速 $V_v = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ を算出した。同様に魚の存在確率 (n_3/N) が 0.1 未満の領域 (non-orientation area) における平均流速 V_v も求めた。

図-9(a) に越流水深が一定 ($\Delta h = 0.047\text{m}$) で、切り欠き率 B_n/B の異なる場合 (0.1Q1.5, 0.3Q5, 0.7Q10) の V_v のヒストグラムを示す。切り欠き率が変化しても、orientation area と non-orientation area の流速 V_v に大きな変化は見られない。

図-9(b) に切り欠き率 B_n/B が一定 (=0.3) で、越流水深の異なる場合 ($\Delta h = 0.03\text{m}$, 0.07m , 0.10m) の V_v のヒストグラムを示す。最小流量のケースに着目すると、存在確率 (n_3/N) が non-orientation area の流速よりも orientation area

の流速 V_v の方が大きい傾向がある。一方、最大流量のケースでは逆の傾向を示している。また、流量が増加すると non-orientation area の流速に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。これは、アユがある流速範囲を嗜好して定位していることを示唆している。

orientation area と non-orientation area の空間平均流速 $\overline{V_v}$ をそれぞれ求めた。図-10(a), (b) に越流水深が一定 ($\Delta h = 0.047\text{m}$) で、切り欠き率 B_n/B の異なる場合 (0.1Q1.5, 0.3Q5, 0.7Q10) および切り欠き率 B_n/B が一定 (=0.3) で、越流水深の異なる場合 ($\Delta h = 0.03\text{m}$, 0.07m , 0.10m) の空間平均流速 $\overline{V_v}$ を示した。図-10(b) に着目す

ると、流量の増加に伴い non-orientation area の領域における $\bar{V}_v / \bar{V}_{FB}$ が増加している。一方、orientation area の $\bar{V}_v / \bar{V}_{FB}$ は顕著な増加が見られない。特に、流量が最大と最小の値に着目すると、流速の逆転現象が生じている。両図より、orientation area の流速は突進速度 $\bar{V}_{FB}$ の 5～18% であることが判明した。

以上より、流量が変化してプール内の流速が変化しても、アユは突進速度 $\bar{V}_{FB}$ の 5～18% の流速場を選んで定位する。そのため、流量が増加すると定位位置が水脈の落下位置から遠くなり、遡上が困難となると推測される。

4. おわりに

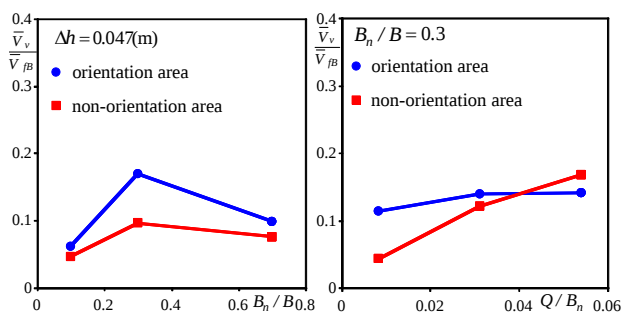
本研究は階段式魚道の切り欠き率および流量を系統的に変化させて遡上率の変化を解明し、流速測定および定位場所を測定し、水理量が遡上特性に及ぼす影響を検討したものである。得られた知見を以下に示す。

- (1) 切り欠き率を 0.1 から 0.7 まで変化させた結果、切り欠き率が 0.1～0.2 付近で遡上率が高く、0.3～0.7 では微減した。したがって、国土交通省⁹⁾の推奨値(0.17～0.20)が妥当なことが初めて実験的に示された。
- (2) アユはある流速の範囲を選好して定位することを確認した。そのため、流量が増加してプール内の流速が増加すると、流脈直下流の流速の速い領域を避けて定位する。一方、流量が変化してもアユは切り欠き上の側壁付近を遡上するため^{14)~17)}、遡上場所への距離が増加するために遡上率が低下すると考えられる。
- (3) 切り欠き率が増加すると落下流の下で定位位置が横断方向に分散する。一方、切り欠き幅が変化してもアユは切り欠き上の側壁付近を遡上するため^{14)~17)}、遡上場所への距離が増加するために遡上率が低下すると考えられる。

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大学院生の津崎周平氏と本学学部生的小林達也氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 2) (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。
- 3) 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。
- 4) 農林水産省農村振興局整備部設計課監修：よりよき設計のた



(a) 越流水深一定時 (b) 切り欠き幅一定時
図-10 プール内平均流速

めの「頭首工の魚道」設計指針，農業土木学会，2002。

- 5) 久保田哲也：砂防施設の魚道における溪流魚の行動と魚道の実態，*水工学論文集*，第42巻，pp.487-492，1998。
- 6) 和田吉弘：長良川のアユづくり，治水社，1993。
- 7) 佐合純造，本多卓志，大木孝志，田中直也：大田原堰魚道におけるアユの遡上実験報告，*水工学論文集*，第42巻，pp.493-498，1998。
- 8) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，木内大介，高橋康行，飯國洋平：階段式魚道における切り欠き位置が魚の遡上率に及ぼす影響，*水工学論文集*，第51巻，pp.1279-1284，2007。
- 9) 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。
- 10) 中村俊六，高嶋信博，木村博：実物の魚を用いた河川構造物の模型実験手法について，第31回水理講演会論文集，pp.783-788，1987。
- 11) 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。
- 12) 泉完，矢田谷健一，東信行，工藤明：河川流下水を用いたスタミナトンネルによるウグイの突進速度について，*農業土木学会論文集*，第244号，pp.171-178，2006。
- 13) 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)。
- 14) 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。
- 15) 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。
- 16) 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。
- 17) 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。

(2007. 9. 30 受付)