

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

EFFECT OF LOCATION OF NOTCH ON MIGRATION RATE IN POOL-AND-WEIR FISHWAY

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・木内大介³・高橋康行⁴・飯國洋平⁵
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Daisuke KIUCHI, Yasuyuki TAKAHASHI
and Yohei IIGUNI

¹正会員 博(工) 九州工業大学助教授 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正会員 修(工) (株)東亜建設工業 土木本部設計部 (〒550-0004 大阪市西区靱本町1-4-12)

⁴西条市役所 建設道路課 (〒793-8601 愛媛県西条市明屋敷164)

⁵学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程

Fishways have been constructed to facilitate migration of fish at dams, waterfalls and rapids. Although a lot of types of fishway are suggested, most of the fishways installed in Japanese rivers belong to the pool-and-weir type. Several values such as a water level difference between the upstream and downstream, the ratio between the flow depth and streamwise pool length, the shape of the weir and so on have an influence on the suitability of migration. In particular, Nakamura pointed out that the suitability of migration is greatly affected by the location of notch. However, this indication is not verified quantitatively. In this study, the trajectories of the migrating fish were recorded with two sets of digital video cameras and also velocity measurements were conducted in the pool-and-weir fishway with alternate notch and also with one-sided notch. It was found that the trajectories are different between alternate notch case and one-sided notch case. This is because the velocity and its direction in the pool is different from each other.

Key Words : pool-and-weir fishway, one-sided notch, alternate notch, migration

1. はじめに

日本の河川は急峻であり、治水および利水を目的としてダムや堰が設置されてきた。こうした構造物を設置すると構造物を挟んだ上下流間で大きな水位落差が生じる。サケやアユのように海洋と河川とを往復する通し回遊魚にとってこの水位落差は深刻であり、産卵場所に到達できない場合は種の絶滅をも意味する。魚の遡上および降下を手助けするものとして魚道が挙げられる¹⁾²⁾。近年では魚道に対して河川に生息する全ての魚類の保護・配慮が求められている³⁾。

魚道はその水理構造の違いから、プールタイプ、ストリームタイプおよびオペレーションタイプに分類される¹⁾。プールタイプはさらに階段式、バーチカルスロット式および潜孔式に分類される。このように様々なタイプの魚道が提案されているが、日本の既設魚道の90%以上

は階段式魚道である¹⁾。

階段式魚道を設計する際、遡上率の高い幾何学形状を採用する必要がある。階段式魚道において魚類の遡上率に影響を与えるものとして、水位落差、粗度の有無、アスペクト比(プール長/水深)、隔壁形状、切り欠きの有無とその位置などが挙げられる³⁾。ドイツ水資源・農業土木協会⁴⁾はプール間落差は0.15m以下にするべきと述べている。佐合ら⁵⁾は大田原堰に設置された階段式魚道において、底面に粗石を設置した場合としない場合とを比較し、前者の方が遡上数が高いことを示した。房前ら⁶⁾も室内実験において同様な結論を得ている。林田ら⁷⁾は階段式魚道のアスペクト比を系統的に変化させて、プール内のウグイの挙動を観察した。その結果、プール内で休憩場所が多い方が遡上数が増加することを示した。Wada⁸⁾は隔壁の端部を矩形、斜面および円形など様々に変化させて遡上数を計測した結果、斜面や円形の場合の

遡上数が高いことを明らかにした。一方、切り欠き位置に関して、交互切り欠きよりも片側切り欠きの方が遡上数が増加すると中村¹⁾は述べているが、これを実証したものはほとんどない³⁾⁹⁾。唯一、真山¹⁰⁾が片側および交互切り欠きの階段式魚道において、サクラマス⁹⁾の遡上数を計測し、片側切り欠きの方が遡上数が高いことを示したが、切り欠き率(切り欠き幅/全幅)が0.5であり、国土交通省⁹⁾が提唱している0.17~0.2とは、かなり異なる。また、流速測定を行っていないため、両者間に生じた遡上数の違いを説明できていない。近年、魚の挙動を数値計算で求める試みも行われており¹¹⁾¹³⁾、遡上行動と水理特性との関係を求めることは極めて重要である。

本研究は、階段式魚道の切り欠き位置を片側および交互に変化させ、遡上特性の違いを解明すると共に流速測定を行い、遡上特性の相違の原因を究明したものである。

2. 実験条件および実験装置

長さ0.48m、幅0.4m、高さ0.4mの亚克力製プールを5つ連続させた階段式魚道を実験に用いた(図-1)。階段式魚道において魚の遡上に影響を与える諸量として、水位落差、粗度の有無、アスペクト比、隔壁形状および切り欠き位置などが挙げられるが³⁾、本実験では切り欠き位置のみを交互および片側に変化させ、その他の幾何学形状は極力、既存の魚道の平均的な値もしくは設計マニュアルの推奨値を用いた。すなわち、切り欠き率は国土交通省⁹⁾が推奨する0.17~0.2の範囲内にある0.2を採用し、切り欠きの形状はWada⁸⁾の推奨する傾斜角60°のR型を採用した。また、実河川に設置されている平均的な魚道勾配は1/10~1/20なので、魚道勾配が1/12になるようにプール間落差を0.04mとした。実験条件を表-1に示す。交互および片側切り欠き状態において、流量 Q を系統的に変化させた。ケース名にQ2.4altなどを使用するが、数字は流量を意味し、末尾の3文字は交互(alternate notch)あるいは片側切り欠き(one-sided notch)を意味する。ケース名の下段にはプール内の平均水深および越流水深を示している。1回の遡上実験に用いた時間は約20分で、実験終了後は魚を数時間休憩させて次の実験を行った。

本研究で用いた魚道のスケールは実河川のものと比較すると1/2~1/3程度である¹⁴⁾¹⁵⁾。そのため、比較的体長の小さなオイカワを用いた。図-2に実験に用いたオイカワ80匹の体長 B_L をヒストグラムで示した。平均体長 $\overline{B_L}$ は約6.7cmであった。したがって、本実験結果を実河川にスケールアップすると、成熟したオイカワ(体長15cm程度)の結果に相当する。前野・小川¹⁶⁾はVOF法を用いて階段式魚道の数値計算を行い、上流から3番目以降のプール内流況が一定となることを明らかにした。そこで

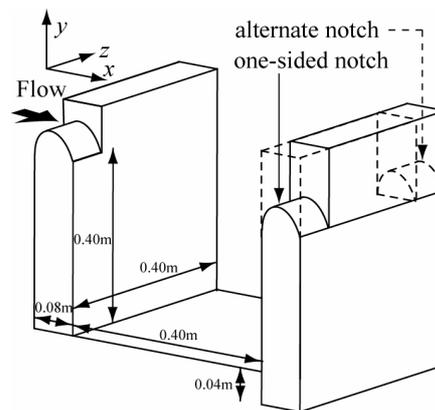


図-1 実験水路概略図

表-1 実験条件

Q (ℓ/s)	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4
alternate notch	Q0.8alt	Q1.2alt	Q1.6alt	Q2.0alt	Q2.4alt
flow depth (m)	0.29	0.30	0.31	0.32	0.33
overflow depth (m)	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
one-side notch	Q0.8one	Q1.2one	Q1.6one	Q2.0one	Q2.4one
flow depth (m)	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
overflow depth (m)	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06

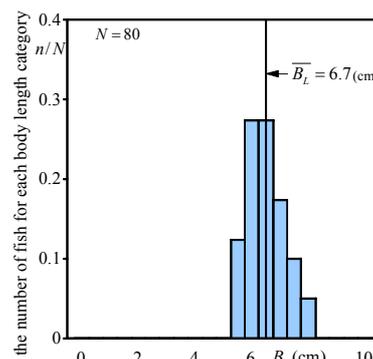


図-2 オイカワの体長ヒストグラム

本研究では以下の計測を上流から4番目のプールで行った。計測項目は、魚の挙動の撮影および流速測定である。40匹のオイカワをプールに入れた状態で側壁および底面方向からデジタルビデオを用いて魚の挙動を20分間同時計測した。この計測では、40匹ずつの異なる2つのグループを交互に用いたが、明瞭な差はないと判断された。計測後、オイカワの3次元軌跡をコマ送りによるPTV解析で算出した。続いて、3次元電磁流速計を用いて流下方向 x 、鉛直上向き y 、横断方向 z にそれぞれ6点のメッシュをとった合計216点において、流速3成分を0.05s間隔で51.2s計測した。なお、流速測定時にはプール内に魚を入れていない。 x 、 y 、 z 方向の時間平均流速を U 、 V 、 W とする。

3. 実験結果および考察

(1) 切り欠き位置と流量が遡上特性に及ぼす影響

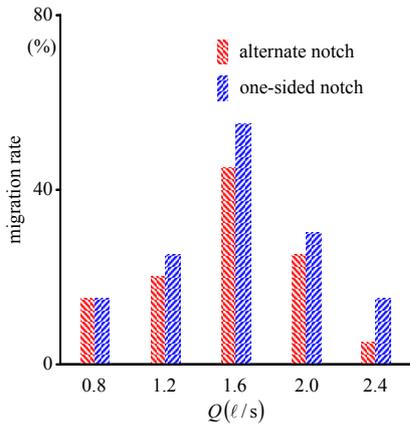


図-3(a) 遡上率

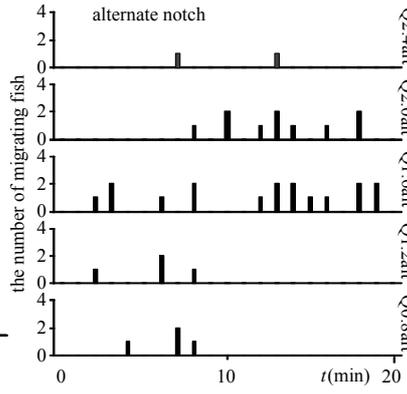


図-4(a) 遡上数の時間変化(交互)

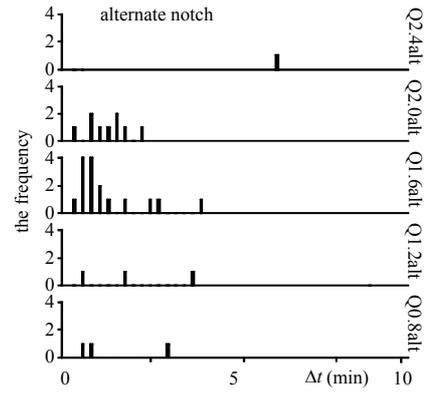


図-5(a) 遡上時間間隔 Δt (交互)

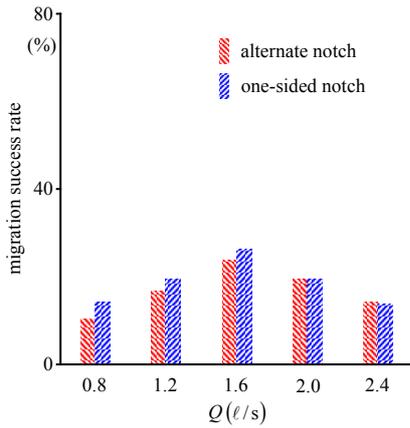


図-3(b) 遡上成功率

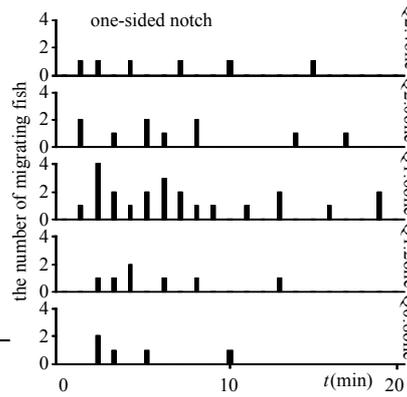


図-4(b) 遡上数の時間変化(片側)

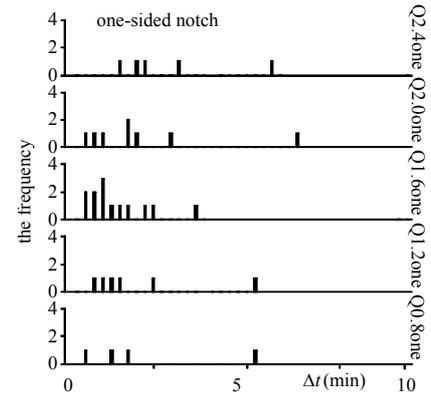


図-5(b) 遡上時間間隔 Δt (片側)

a) 遡上率

遡上率を次式のように定義する。

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

図-3(a)に交互および片側切り欠きにおける遡上率と流量との関係を示す。両者とも流量が1.6 l/sの時に遡上率が最も高く、この流量より小さい場合および大きい場合には交互および片側切り欠きの両者とも遡上率が低下している。また、交互切り欠きと片側切り欠きとの結果を比較すると、片側切り欠きの遡上率の方が高いことがわかる。すなわち、中村¹⁾の定性的指摘を定量的に証明することができた。

b) 遡上成功率

遡上成功率を次式で定義する。

$$\text{遡上成功率} = \frac{\text{遡上に成功した魚数}}{\text{遡上を試みた魚数}} \quad (2)$$

図-3(b)に交互および片側切り欠きにおける遡上成功率と流量との関係を示す。遡上成功率についても遡上率と同様に、流量が1.6 l/sの時に最大値となる。また、交互切り欠きと片側切り欠きの結果を比較すると、片側切り欠きの遡上成功率の方が僅かだが高いことが判明した。

c) 魚の追従性

図-4(a)および(b)に1回の測定時間における1分ごとの

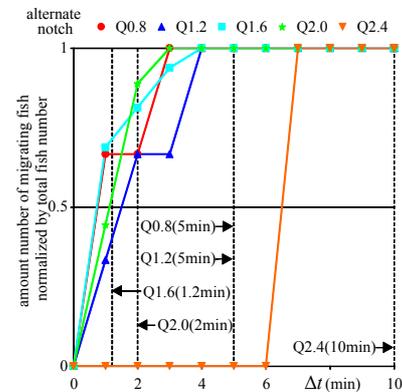


図-6(a) 遡上時間間隔 Δt と無次元累積遡上数(交互)

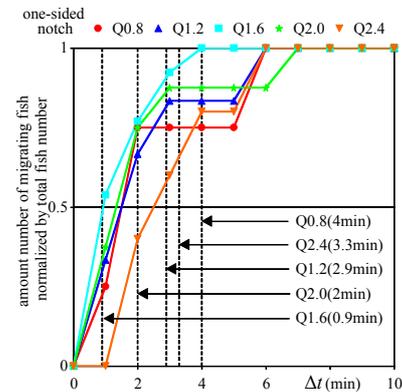


図-6(b) 遡上時間間隔 Δt と無次元累積遡上数(片側)

交互および片側切り欠きの遡上数の時間変化をそれぞれ示す。なお(a)と(b)で用いた魚のグループは同一のものである。tは時刻である。交互および片側切り欠きの両者で1分以内に1尾以上の魚が遡上に成功していることが理解される。魚が全くランダムな時間に遡上を開始しているのであれば、1分以内の遡上尾数が2尾以上になることはほとんどないはずである。特にこの傾向は片側切り欠きで顕著で、交互切り欠きでは1分以内の遡上数の最大値が2となっているのに対し、片側切り欠きでは1分以内の遡上数の最大値は4となっている。ある魚が遡上を開始すると、他の魚がつかれて遡上を開始する特性を追従性と呼ぶ¹⁾。アユに追従性があることは中村¹⁾によって指摘されているが、定量的に示した研究はほとんどなく、さらに、本実験魚であるオイカワの追従性を検討したものはほとんどない。

そこで、この追従性を明らかにするために、ある魚が遡上した時刻と次に魚が遡上した時刻との間隔を遡上時間間隔 Δt と定義する。交互および片側切り欠きにおける遡上時間間隔 Δt の15sごとのヒストグラムを図-5(a)および(b)に示す。また、累積遡上数を総遡上尾数で割った値を無次元累積遡上数と定義し、遡上時間間隔 Δt と無次元累積遡上数との関係を図-6(a)および(b)に示す。同図には総測定時間を総遡上尾数で割った時間を点線で示している。仮に魚がランダムに遡上を開始しているのであれば、無次元化累積遡上数が0.5となる時間と総測定時間を総遡上尾数で割った時間とが一致するはずである。しかし片側切り欠きの流量が1.6 l/sの時を除く、全てのケースで無次元累積遡上数が0.5となる時間は、総測定時間を総遡上尾数で割った時間よりも短くなっている。このことから、実験魚(オイカワ)はランダムに遡上を開始しているのではなく、ある魚が遡上するとそれに誘発されて遡上していることが示唆された。

(2) 魚の挙動と水理特性との関係

3. (1)で遡上率および遡上成功率に及ぼす流量および切り欠き位置の影響が定量的に解明されたが、上記のような差違が生じた理由を明確にするには、魚の挙動と水理特性との関係を解明する必要がある。中村¹⁾は魚が遡上に挑もうとするには、a)遡上を誘発する適度な流速とb)休憩場所が必要と述べている。前者は水理特性を、後者は魚の挙動と深い関係があると判断される。

a) 遡上を誘発する流速についての検討

魚の遊泳速度には巡航速度 V_{JC} と突進速度 V_{JB} がある

¹⁾ 前者は1時間以上持続できる速度で、後者は数秒しか持続できない速度である。一般に、巡航速度 V_{JC} は次式で求められる。

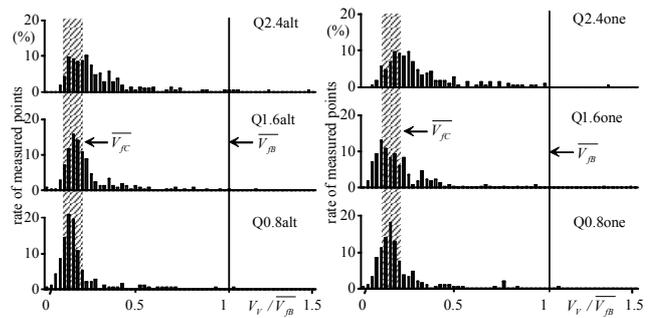


図-7 流速ヒストグラム(左:交互, 右:片側)

表-2 巡航速度以上の領域の割合

Q (l/s)	0.8	1.6	2.4
alternate notch	16%	47%	67%
one-side notch	31%	41%	71%

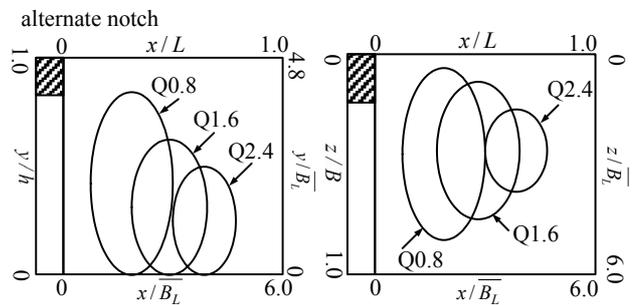


図-8(a) 交互切り欠きにおいて魚が定位している位置

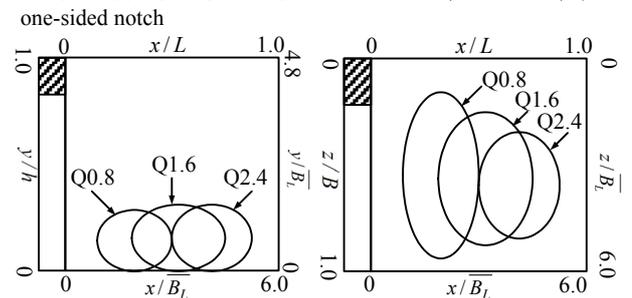


図-8(b) 片側切り欠きにおいて魚が定位している位置

$$V_{JC} = (2 \sim 4)B_L \quad (3)$$

一方、突進速度 V_{JB} は次式で与えられる¹⁾。

$$V_{JB} = 10B_L \quad (4)$$

ただし、 B_L はcm単位で、 V_{JB} はcm/s単位である。

魚道内の流速が式(4)で求められる突進速度よりも速くても魚が遡上するとの報告¹⁵⁾もあり、近年、式(3)、(4)の信憑性に疑問が投げかけられているものの、現時点では両速度の定量的解明が行われていない¹⁷⁾ためここでは式(3)、(4)に基づく検討を行う。

小山¹⁸⁾は体長が8~9cmの稚アユについては、流速の増加に伴い遊泳速度が増し、流速が40~60cm/sの時に遊泳速度の極大値が現れると指摘している。そのため、巡航速度以上で突進速度以下の流速において、流速の増加に

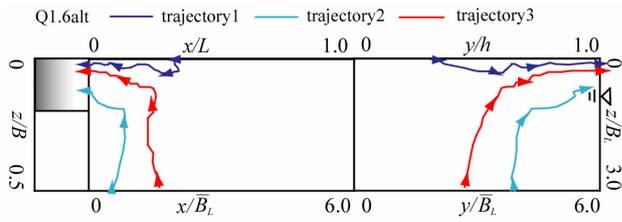


図-9(a) 交互切り欠きにおける魚の軌跡

(左：真上から見た軌跡，右：下流から見た軌跡)

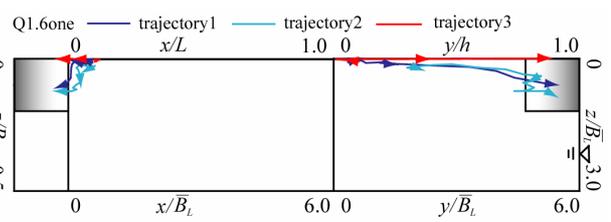


図-9(b) 片側切り欠きにおける魚の軌跡

(左：真上から見た軌跡，右：下流から見た軌跡)

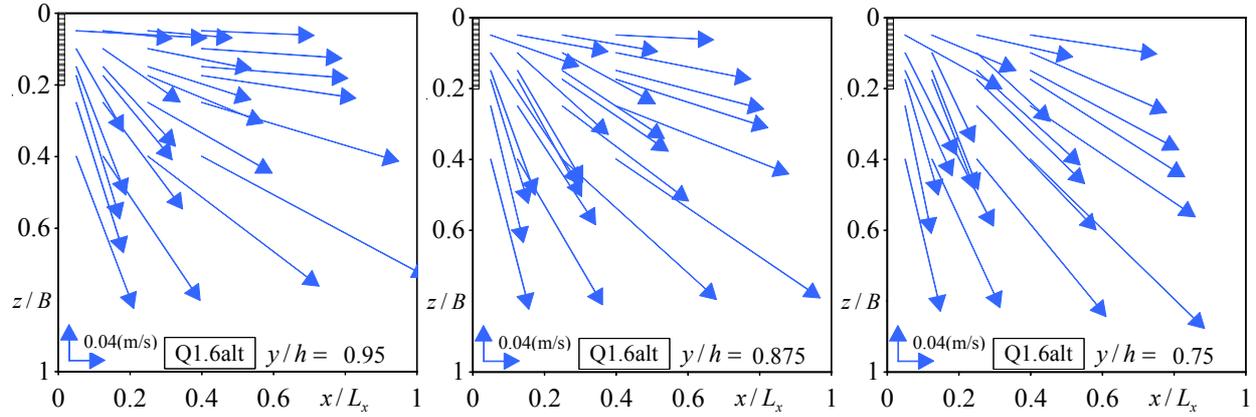


図-10(a) 交互切り欠きにおける合成流速

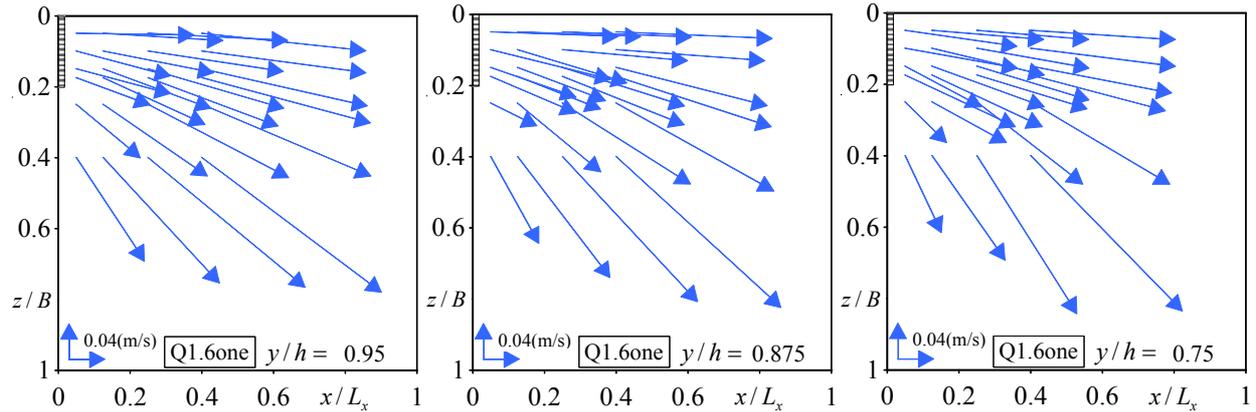


図-10(b) 片側切り欠きにおける合成流速

に伴い遡上欲が増加すると判断される。オイカワについては同様な研究例がないため断言できないが、類似した行動パターンがあると推測される。

プール内で得られた流速3成分(U , V , W)から合成流速 V_V を求めた。

$$V_V = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad (5)$$

216点の計測点で得られた合成流速 V_V を平均突進速度 $\overline{V_{JB}}$ で割った無次元流速のヒストグラムを図-7に示し、巡航速度以上の領域の割合を表-2に示す。なお、平均突進速度 $\overline{V_{JB}}$ および平均巡航速度 $\overline{V_{JC}}$ は平均体長 $\overline{B_L}$ を式(3)および(4)にそれぞれ代入して求めた。図-7および表-2より、交互および片側切り欠きの両者とも流量の増加に伴い巡航速度以上の領域が増大していることが理解される。そのため、流量の増加に伴い遡上率が増加した

(図-3(a)参照)と考えられる。ただし、流量が1.6ℓ/s以上で遡上率が低下することは説明できない。

b) 流量の増加に伴う休憩場所の変化

ビデオを観察した結果、プールのある場所でほとんど全ての魚が集団で定位して休憩し、時折、集団から1尾または数尾の魚が遡上に挑んでいることが判明した。ビデオ解析によって得られた交互および片側切り欠きの平均的な休憩場所を図-8(a)および(b)に示す。なお、座標 x , y , z はプール長 L , 水深 h , プール幅 B で無次元化すると共に平均体長 $\overline{B_L}$ でも無次元化した。交互および片側切り欠きの両者共に、流量の増加に伴い休憩場所が下流方向に押し流されて狭くなっている。これは、図-7に示されたように、流量の増加に伴い巡航速度以下の領域が減少することが原因と考えられる。したがって、流量の増加は遡上欲が湧くというプラス要因があるもの

の、遡上に必要な休憩場所が減少するというマイナス要因も含んでおり、両者のバランスの結果、流量が1.6 l/sの時に遡上率が最大となったと考えられる。

c) 交互および片側切り欠きにおける遡上特性の相違

図-9(a)および(b)には流量が1.6 l/sの時の交互および片側切り欠きにおける遡上の軌跡をそれぞれ3例示す。なお、 x 、 y 、 z 座標はそれぞれプール長 L 、水深 h 、プール幅 B だけでなく、平均体長 \bar{B}_L でも無次元化した。片側切り欠きの場合、遡上軌跡が横断方向 z にほとんど変化していないが、交互切り欠きの場合、遡上軌跡が横断位置 z に変化しているケースが多い。煩雑を避けるために図-9には3例ずつしか遡上軌跡を示していないが、他の例でも上述の傾向が確認できた。

片側切り欠きと交互切り欠きの遡上軌跡が異なるのは両者の流況が異なることが原因と考えられる。そこで、流量が1.6 l/s時の交互および片側切り欠きにおける $x-z$ 平面内流速ベクトル(U 、 W)を、それぞれ図-10(a)および(b)に示す。片側切り欠きの場合は切り欠き部を越流した流れが比較的 x 軸方向に平行に流下するのに対し、交互切り欠きでは上流の隔壁を越流した流れが反対側の側壁に設置された下流側隔壁方向に流れている。魚は遡上行動や索餌行動のために、流れに向かって泳ぐ習性がある。この習性を走流性と呼ぶ¹⁹⁾。実験魚のオイカワには走流性があるので、流れが2次的に流下する片側切り欠きでは遡上軌跡が横断方向に変化しないが、交互切り欠きでは流れが3次的であるために、遡上軌跡も3次的になったものと考えられる。

4. おわりに

本研究は交互切り欠きおよび片側切り欠きにおける遡上特性の相違およびその原因について実験的に検討したものである。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 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明示した。これは中村¹⁾の指摘を定量的に証明するものである。また、片側切り欠きの遡上成功率が交互切り欠きの値よりも高いことを指摘した。
- (2) アユに追従性があることは知られていたが、オイカワにも同様な性質があることを解明した。
- (3) 交互切り欠きと比較すると、片側切り欠きでは切り欠きを越流した流れが横断方向に移流せず、その横断位置を保ったままで次の切り欠きを越流する。一方、交互切り欠きでは、切り欠きを越流した流れが対角線方向に移流する。そのため、走流性¹⁹⁾のある実験魚のオイカワは、前者では遡上軌跡が横断方向にあまり変化しないが、後者では遡上軌跡が横断方向に大幅に変化したと考えられる。
- (4) 流量の増加に伴い遡上欲が増加するために遡上率が

増加する。一方、流量の増加に伴いプール内の流速が増加するために休憩場所が狭くなり、遡上が困難となる。両者のバランスの結果、本実験装置では流量が1.6 l/sの時に遡上率が最大となる。ただし、現時点では魚道の相似則が解明されていないため、この流量の原型での値は不明である。さらに、原型と模型とでは空気混入率が異なる可能性があることや、体長の小さな魚の結果をスケールアップしたものが体長の大きな魚に適応可能かなど、多くの不明点がある。本研究結果を現地に適用するには、これらの点を解明することが必要である。

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)17760408(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた。また、本実験を行うに当たり、本学学部生の渡邊拓也氏の御協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 2) 小山長雄：木曾三川河口資源調査団，1967。
- 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) ドイツ水資源・農業土木協会（中村俊六訳）：多自然型魚道マニュアル，山海堂，pp.72-81，1998。
- 5) 佐合純造，本多卓志，大木孝志，田中直也：水工学論文集，第42巻，pp.493-498，1998。
- 6) 房前和朋，島谷幸宏，萱場祐一，傳田正利：水工学論文集，第41巻，pp.1117-1122，1997。
- 7) 林田寿文，本田隆秀，萱場祐一，島谷幸宏：水工学論文集，第44巻，pp.1191-1196，2000。
- 8) Wada, Y.: *Proc. of the International Symp. on Fishways '90 in Gifu, Japan*, pp.445-450, 1990.
- 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) 真山紘：北海道さけ・ますふ化場研報，Vol.41，pp.137-153，1987。
- 11) 大橋弘道，清水康行：水工学論文集，第48巻，pp.1597-1602，2004。
- 12) 二瓶泰雄，福永健一，小澤喜治：土木学会論文集，No.768/II-68，pp.55-66，2004。
- 13) 橋本麻未，後藤仁志，原田英治，酒井哲郎：水工学論文集，第49巻，pp.1477-1482，2005。
- 14) 久保田哲也：水工学論文集，第42巻，pp.487-492，1998。
- 15) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，山口秀和：応用力学論文集，Vol.6，pp.983-990，2003。
- 16) 前野詩朗，小川信：第46巻，pp.421-426，2002。
- 17) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，飯國洋平，山本晃義：水工学論文集，第51巻，2007（投稿中）。
- 18) 小山長雄：アユの生態，中央公論新社，1978。
- 19) 会田勝美編：魚類生理学の基礎，恒星社厚生閣，2002。

(2006. 9. 30受付)