

# 魚道隔壁に設置された潜孔内の魚の行動特性

## MIGRATION NATURE IN ORIFICE INSTALLED IN WEIR OF FISHWAY

鬼束幸樹<sup>1</sup>・秋山壽一郎<sup>2</sup>・関強志<sup>3</sup>・森悠輔<sup>3</sup>

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Tsuyoshi SEKI and Yusuke MORI

<sup>1</sup>正会員 博(工) 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)

<sup>2</sup>フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 建設社会工学研究系

<sup>3</sup>学生員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻

Most of fishways constructed beside of weirs and dams in Japanese rivers belong to pool-and-weir type. The orifice generally installed in pool-and-weir fishways. However, fish behaviors in orifice have not been investigated. In this study, fish behaviors, i.e., *Zacco platypus* and *Zacco temminckii*, in orifice and pool were recorded by video cameras and the migration number was counted. Further, the swimming position, the ground speed and the swimming speed measurements were conducted. The school migration was observed when the velocity in orifice is low in the case of *Zacco platypus*. On the other hand, such a nature was not observed in the case of *Zacco temminckii*. The swimming positions of both fish species in the orifice were little difference from each other.

**Key Words :** Pool-and-weir fishway, orifice, migration, swimming speed, swimming position

### 1. はじめに

ダムや堰などの河川横断構造物によって生じる水位落差は、魚の遡上および降下を妨げる。水位落差を分割し、魚類等の遡上および降下を助けるために一般に魚道が設置される<sup>1)</sup>。日本の既設魚道の多くはプールと隔壁によって構成される階段式魚道である<sup>2)</sup>。階段式魚道の隔壁には、遡上経路として切欠きだけでなく潜孔が設けられる。これまで、階段式魚道のプール内での魚の挙動や切欠きでの遡上位置などが研究されてきたが<sup>3)-9)</sup>、潜孔内での遡上特性を検討した研究は、アイスハーバー型魚道を対象として数例行われているだけである。

金子ら<sup>10)</sup>は、多摩川水系秋川に設置されたアイスハーバー型魚道においてプールおよび潜孔内の流速を計測し、非越流部下流側の死水域で魚が休憩することを解明した。泉ら<sup>11)-13)</sup>はアイスハーバー型魚道において、水中カメラを用いて潜孔内の遡上状況を撮影すると共に、潜孔内流速を測定した。その結果、潜孔隅角部近傍の流速が中心部よりも低下するため、この領域を魚が選好して遡上することを解明した。

階段式魚道に設置された潜孔が魚の遡上特性に及ぼす影響を検討した研究は、高嶋・中村<sup>14)</sup>のもの以外にほとんど見られない。高嶋・中村<sup>14)</sup>は円形の潜孔径を変化させたケースと潜孔を設けないケースに

おいて、プール内でのアユの挙動をそれぞれ観察した。その結果、潜孔を設置すると切欠きにおける遡上率が増加することや、潜孔からの高速流を避けて底面付近でアユが休憩することを解明した。しかし、潜孔内の魚の挙動とそれに及ぼす水理条件の影響については検討していない。

以上のように潜孔の有無が遡上率に及ぼす影響や潜孔内の魚の挙動が解明されたが、潜孔内流速が固定されているため、潜孔内流速と遡上特性との関係は不明である。本研究では、隔壁に設置した潜孔内の流速を段階的に変化させ、潜孔内流速の変化が遡上および降下特性に及ぼす影響を検討した。

### 2. 実験装置および実験条件

図-1に示すプール長  $L_x=0.9\text{m}$ 、プール幅  $B=0.8\text{m}$  の3つのプールを、隔壁厚  $\Delta x=0.2\text{m}$ 、落差  $\Delta y=0.15\text{m}$  で連結させた木製の階段式魚道を実験に用いた。一般に、潜孔は正方形で一辺の長さがプール幅の10%程度である<sup>1),10)-13)</sup>。そこで、本研究ではプール幅の約10%に相当する0.1mを潜孔幅  $L_{zo}$  として採用し、潜孔高さ  $L_{yo}$  は潜孔幅  $L_{zo}$  と同値とした。上流から2番目の隔壁において、第1プール底面および右岸側壁に接する水平な潜孔を設置した。潜孔底面から鉛直上向きに  $y_o$  軸を、潜孔右岸壁から横断

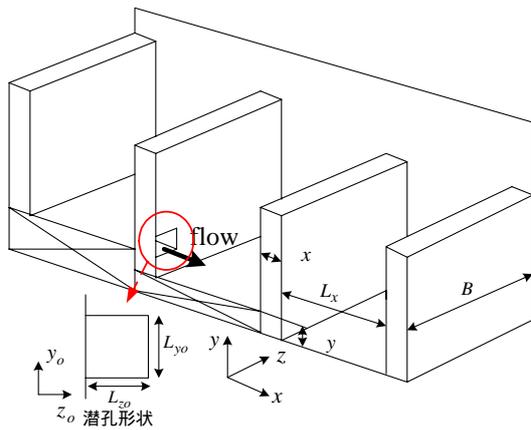


図-1 実験装置

表-1 実験条件

$U_m/\bar{B}_L$	13	10	7	3
case name	C13	C10	C7	C3

方向に  $z_o$  軸をとる．なお，通常の階段式魚道では隔壁を越流する流れと潜孔を通過する流れがあるが，流量が変化すると潜孔内流速だけでなく切欠きを越流する流速も変化する．すると，流量変化に伴う遡上数や休憩場所の変化が，切欠きあるいは潜孔のどちらの影響によるものかを判断できない．そのため，本研究では潜孔のみに流れが通過する状態を採用した．ただし，3，4番目の隔壁は全断面越流とした．側壁方向から魚道内の撮影を可能にするため，左岸側壁を透明なアクリル板で作製した．

北九州市を貫流する二級河川板櫃川から採取したオイカワ (*Zacco platypus*) およびカワムツ (*Zacco temminckii*) を実験に用いた．平均体長  $\bar{B}_L$  はそれぞれ約83mm，約78mmである．採取した実験魚は高さ45cm × 幅90cm × 奥行き45cmの水槽で飼育される．水槽内に最大流出量1.7ℓ/sの水中噴流機(SEIO6000，神池養魚株式会社)を1つ設置し，常に流水状態にした．表-1に実験条件を示す．ここに， $U_m$  は潜孔内断面平均流速である．オイカワ，カワムツの平均体長の約80mmに対して3倍(240mm/s)，7倍(560mm/s)，10倍(800mm/s)，13倍(1040mm/s)の潜孔内流速を設定した．表中のケース名は体長倍流速を表し，例えば，C7は体長の7倍の潜孔内流速を表す．

第2プールの側壁および上部にビデオカメラをそれぞれ1台，潜孔出口より0.7m上流側の第1プール内に水中カメラを1台設置した． $N=50$ 尾のオイカワあるいはカワムツを第2プールに放流した後に流水を開始した．目視で定常を確認した後，遡上防止用ネットを潜孔入口から除去すると共に，3台のカメラを用いた30Hz，60分間の撮影を開始した．プール側壁および上部に設置したカメラの画像から遡上開始時刻，降下開始時刻，遡上数  $n$  および降下数  $n_d$  を算出し，水中カメラの画像から潜孔入口および出口における魚の遊泳位置を解析した．また，潜孔入口および出口間の移動時間から，上流方向を正とし

た魚の対地速度  $v_{fg}$  を算出した．なお，一度遡上した後に降下した魚や，降下した後に再び遡上した魚も全てカウントした．

潜孔入口および出口において， $y_o$ ， $z_o$  軸方向にそれぞれ3測線 ( $y_o/L_{yo} = 0.25, 0.5, 0.75$  および  $z_o/L_{zo} = 0.25, 0.5, 0.75$ ) で構成される合計9点の流速3成分を，3次元電磁流速計を用いて0.05s間隔で25.6s計測した．ただし，流速測定時にはプールに魚を入れていない．魚の潜孔内遊泳速度  $v_f$  は潜孔内断面平均流速  $U_m$  を用いて次式より求められる．

$$v_f = v_{fg} + U_m \quad (1)$$

### 3．実験結果および考察

#### (1) 潜孔内流速が魚の遡上，降下に及ぼす影響

オイカワの遡上，降下は単体によるものと連続的なものが確認された．連続的な遡上，降下は長くても6秒以内であった．図-2(a)の上段，下段にオイカワの6秒ごとの遡上数  $n_6$ ，降下数  $n_{6d}$  を尾数  $N$  で除した値の時間変化を示す．C13，C10では，遡上，降下数は共に少なく，6秒間に2尾 ( $n_6/N$ ， $n_{6d}/N = 0.04$ ) 以上が遡上および降下する例がほとんどない．C7では，遡上，降下数が共に増加し，6秒間に2尾 ( $n_6/N$ ， $n_{6d}/N = 0.04$ ) 以上が遡上および降下する頻度が増加する．C3ではさらに遡上，降下数が増加し，6秒間に2尾 ( $n_6/N$ ， $n_{6d}/N = 0.04$ ) 以上が遡上，降下するケースがさらに頻繁となり，最大値はそれぞれ11尾 ( $n_6/N = 0.22$ )，9尾 ( $n_{6d}/N = 0.18$ ) にも達する．ところが，数分間から約5分間もの間，全く遡上，降下が観察されない時間帯も存在する．これは，オイカワがランダムに遡上あるいは降下するのではなく，魚群で行動していることを示唆する．アユには周囲のアユが遡上を開始するとつられて遡上を開始する追従性があることを中村<sup>2)</sup>は指摘した．鬼束ら<sup>15)</sup>はオイカワにも追従性があることを越流形態の魚道で確認した．本研究によって潜孔内を遡上するオイカワに追従性があること，降下する場合にも追従性があること，また，その性質が流速の増加に伴い見られなくなることが明らかとなった．

図-2(b)にカワムツに関して図-2(a)と同様な図を示す．流速の変化に伴う遡上数および降下数の顕著な変化は観察されない．また，6秒間で2尾以上が遡上あるいは降下する例が全ケースでほとんどない．そのため，流速に関わらずカワムツには追従性が無いと判断される．

追従性を詳細に検討するため，潜孔入口にある魚が進入して1秒以内に別の魚が潜孔入口に進入した場合を連続遡上と定義した．連続降下は出口における同様の定義とした．図-3(a)に潜孔内断面平均流速  $U_m$  とオイカワの遡上数  $n$ ，連続遡上数  $n_1$  を尾数

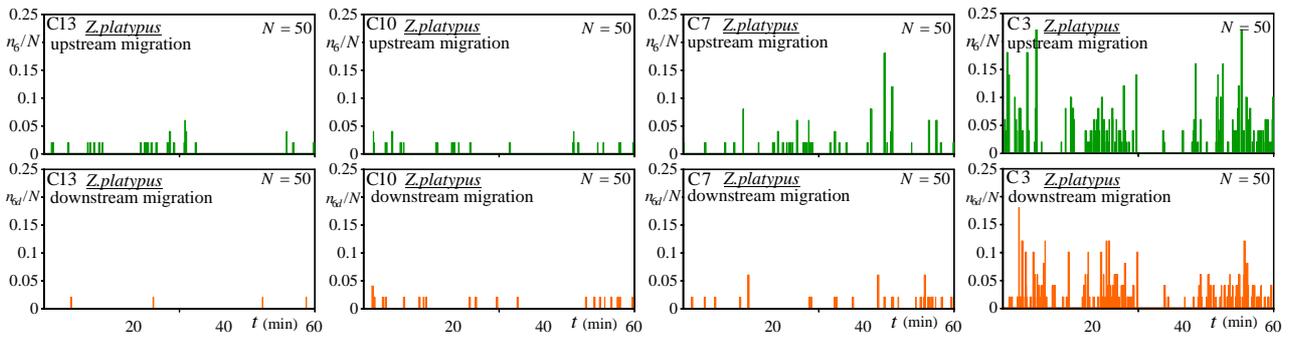


図-2(a) オイカワの遡上(上段)・降下(下段)の時系列

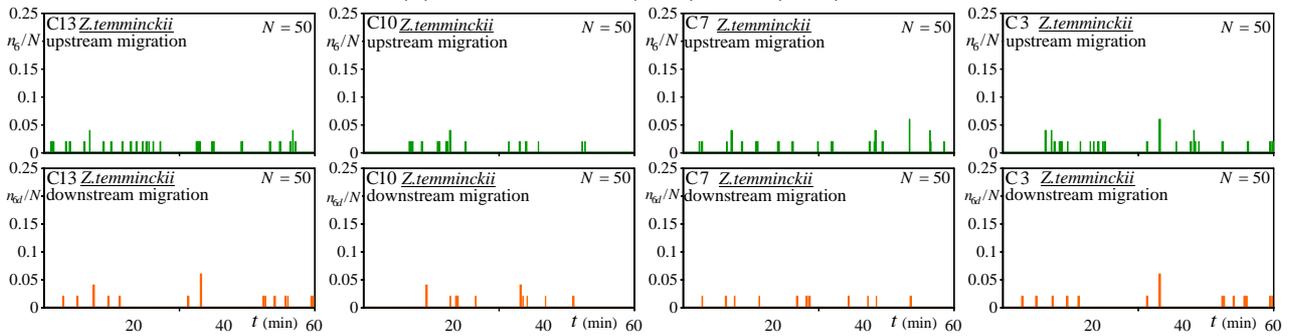


図-2(b) カワムツの遡上(上段)・降下(下段)の時系列

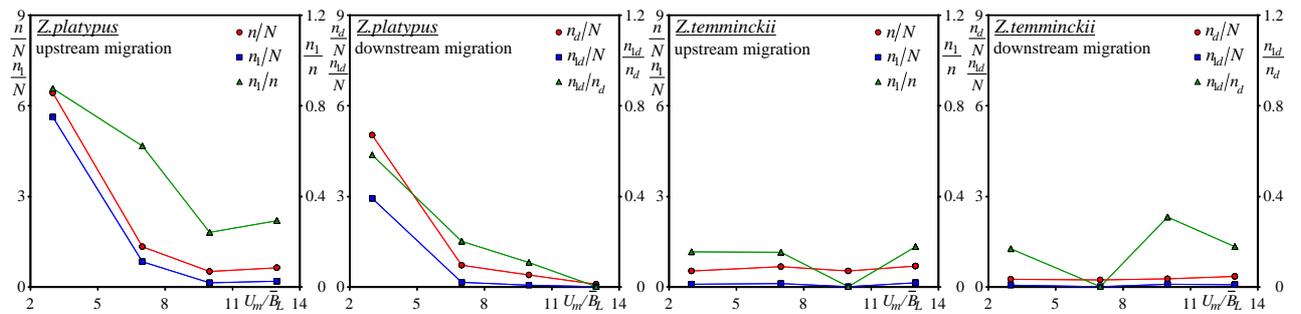


図-3(a) オイカワの遡上数 図-3(b) オイカワの降下数 図-4(a) カワムツの遡上数 図-4(b) カワムツの降下数

$N$  で除した値および連続遡上率  $n_1/n$  との関係を示す。流速の低下に伴いオイカワの遡上数、連続遡上数共に増加しており、C3ではそれらの数が最大となる。連続遡上率  $n_1/n$  は、C13, C10では0.3程度であるが、流速の低下に伴い値が増加し、C3では0.8以上となる。これは、遡上したオイカワの8割以上は追隨性に誘発されて遡上したことを意味する。

図-3(b)にオイカワの降下について図-3(a)と同様な図を示す。降下についても遡上特性と類似した結果となった。ただし、降下数、連続降下数共に遡上時の値よりも少ない。また、連続降下率  $n_{1d}/n_d$  が連続遡上率  $n_1/n$  に比べて半減している。

図-4(a), (b)にカワムツに関して図-3(a), (b)と同様な図を示す。遡上数、降下数共に潜孔内流速の変化に伴う顕著な変化は認められない。また、図-4(a)より連続遡上率  $n_1/n$  は0.17程度の一定値であり、オイカワの値に比べ低い。一方、図-4(b)より連続降下率  $n_{1d}/n_d$  がC10で高いが、分母の降下数  $n_d$  が少ないために生じたばらつきと考えられる。

以上より、オイカワの追隨性によって遡上数および降下数が増加すること、追隨性は流速の増加に伴い低下すること、また、降下時よりも遡上時に追隨

性が顕著になることが解明された。一方、流速に関わらずカワムツに追隨性がないことが解明された。

## (2) 潜孔内における魚の遡上および降下経路

### a) 遡上時の潜孔入口と出口における通過位置

図-5(a)に遡上するオイカワの潜孔入口および出口の通過位置を示す。潜孔入口の通過位置はC13, C10では潜孔中心部付近に集中するが、C7, C3では底面付近にも分布する。一方、潜孔出口の通過位置は全ケースで潜孔中心部付近に集中しており、流速による変化は見られない。

図-5(b)に遡上するカワムツに関して図-5(a)と同様な図を示す。潜孔入口の通過位置は半水深から底面に集中し、流速による変化がほとんどない。また、潜孔出口の通過位置は潜孔入口と類似している。

以上より、オイカワは高流速では潜孔の中心部を比較的直線的に遡上するが、低流速では底面付近から上昇しながら遡上すること、カワムツは半水深以下で直線的に遊泳し、その特性は流速に依存しないことが判明した。なお、泉ら<sup>13)</sup>はアイスハーバー型魚道に設置された潜孔内を遡上するアユおよびウグイの約60%は潜孔底面隅角部を通過することを示し

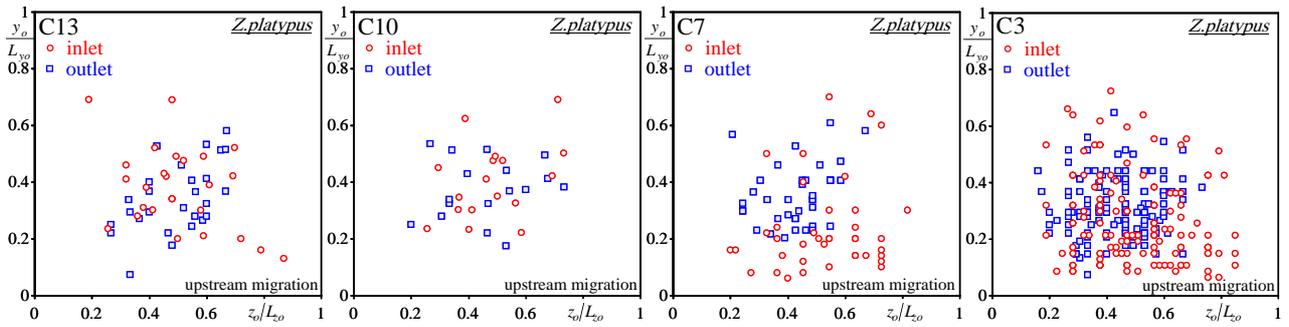


図-5(a) オイカワの遡上時における潜孔出入口通過位置

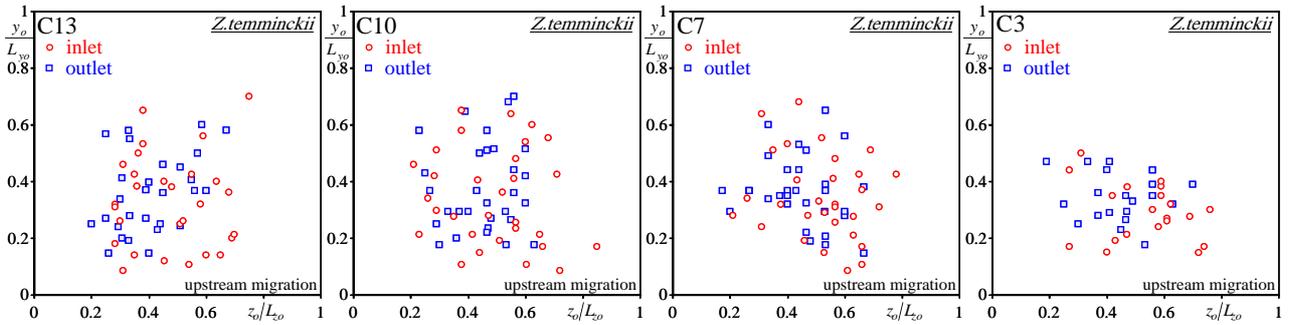


図-5(b) カワムツの遡上時における潜孔出入口通過位置

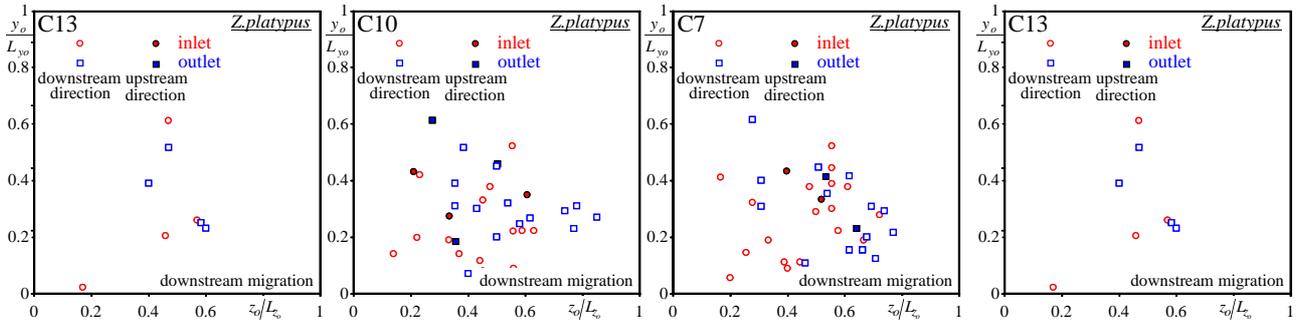


図-6(a) オイカワの降下時における潜孔出入口通過位置

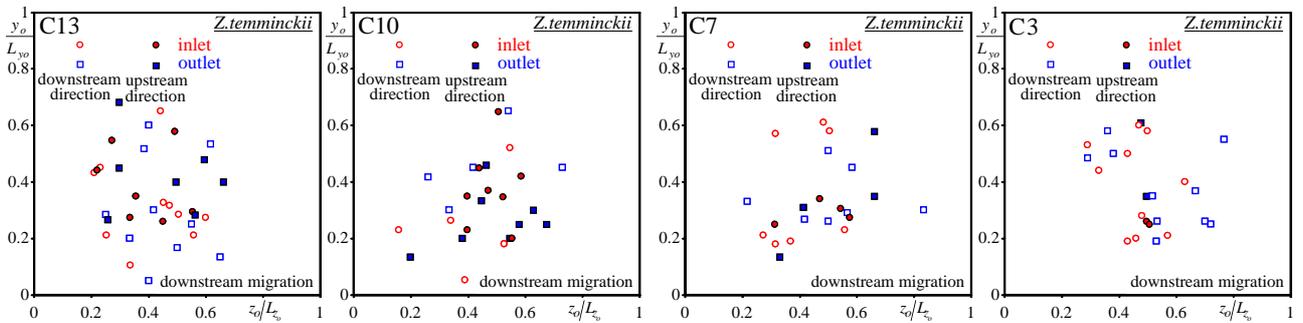


図-6(b) カワムツの降下時における潜孔出入口通過位置

た．したがって、オイカワおよびカワムツに関してはアユおよびウグイと異なる経路を選択することが明らかとなったが、この相違が魚種、魚道形式または水理条件の相違によるものかは不明である．

b) 降下時の潜孔出口と入口における通過位置

図-6(a)に降下するオイカワの潜孔出口および入口の通過位置を示す．図中、白抜きおよび塗潰しプロットはそれぞれ魚向が下流および上流向きを表す．そのため、後者は上流を向きながら潜孔出口から潜孔に侵入し、流れに押し流されて潜孔入口から第2プールに流入することを意味する．図-6(a)より、

下流向きの潜孔出口通過位置はC13、C10ではデータ数が少ないために明確でないが、C7、C3では底面付近に分布することがわかる．潜孔入口の通過位置はC3では底面付近にも認められ、図-5(a)に示された遡上時の潜孔出口の結果と異なる．一方、上流向きで降下するオイカワの通過位置についてはデータ数が少ないために特徴を明言できない．

図-6(b)に降下するカワムツに関して図-6(a)と同様な図を示す．下流向きの潜孔出口通過位置は半水深から底面にかけて集中し、流速による変化が観察されない．また、潜孔入口の通過位置は図-5(b)に

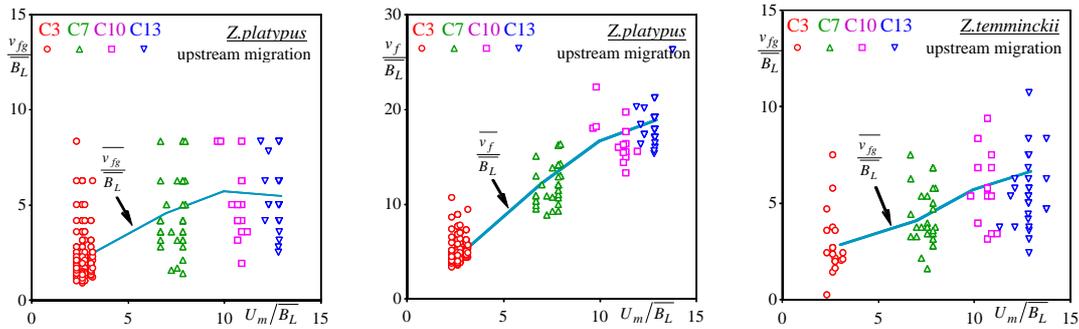


図-7(a) オイカワの遡上時対地速度 図-7(b) オイカワの遡上時遊泳速度 図-8(a) カワムツの遡上時対地速度

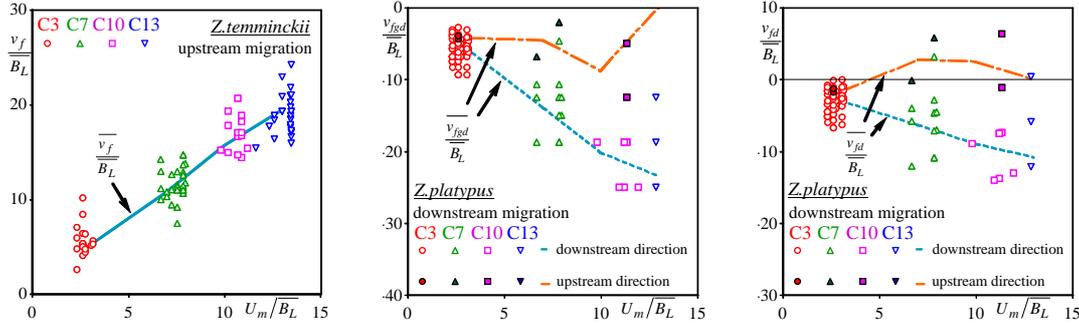


図-8(b) カワムツの遡上時遊泳速度 図-9(a) オイカワの降下時対地速度 図-9(b) オイカワの降下時遊泳速度

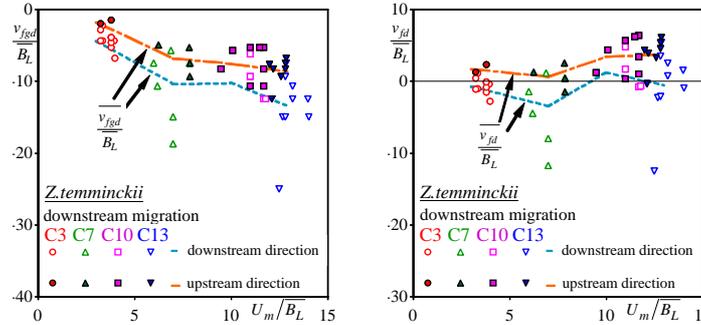


図-10(a) カワムツの降下時対地速度 図-10(b) カワムツの降下時遊泳速度

示された遡上時の潜孔出口の結果と同様である。一方、流速の増加に伴い上流向きで降下するカワムツの尾数が増加しており、図-6(a)のオイカワには見られない特徴である。これは、潜孔内流速が増加すると、流れに押し流される尾数がオイカワは変化しないが、カワムツは増加することを意味する。オイカワとカワムツは同体長であれば突進速度もほぼ等しいため<sup>16)</sup>、意図的に流されている可能性がある。

### (3) 潜孔内における魚の遊泳速度

#### a) 遡上時の潜孔内遊泳速度

図-7(a)に潜孔内断面平均流速  $U_m$  とオイカワの遡上時潜孔内対地速度  $v_{fg}$  との関係を示し、図-7(b)に  $U_m$  と遡上時遊泳速度  $v_f$  との関係を示し、各平均値  $\overline{v_{fg}}/\overline{B_L}$ 、 $\overline{v_f}/\overline{B_L}$  を実線で示した。図-7(a)より潜孔内断面平均流速  $U_m$  の増加に伴い遡上時対地速度  $v_{fg}/\overline{B_L}$  が増加することがわかる。図-7(b)より流速  $U_m$  の増加に伴い、遡上時遊泳速度  $v_f/\overline{B_L}$  の線形的な増加が確認でき、その最大値は約27に達する。従来、魚の突進速度は体長の約10倍が定説<sup>2)</sup>であっ

た。近年、オイカワの突進速度はおおよそ体長の20~30倍という結果が得られており<sup>17)</sup>、本研究結果は妥当と考えられる。また、C3における遊泳速度の平均値は体長の5倍程度であり、突進速度よりも体長の2~4倍とされる巡航速度に近い。

図-8(a)、(b)にカワムツに関して図-7(a)、(b)と同様な図を示す。オイカワの結果と定性的にも定量的にも類似した結果となった。

#### b) 降下時の潜孔内遊泳速度

図-9(a)に潜孔内断面平均流速  $U_m$  とオイカワの降下時潜孔内対地速度  $v_{fgd}$  との関係を、図-9(b)に  $U_m$  と降下時遊泳速度  $v_{fd}$  との関係を示す。図中、白抜きおよび塗り潰しプロットはそれぞれ魚向が下流および上流向きを表し、両者の平均値を点線および一点破線で示した。図-9(a)より  $U_m$  の増加に伴い、下流向きの対地速度  $v_{fgd}/\overline{B_L}$  の絶対値が増加することが確認される。一方、図-9(b)より下流向きの遊泳速度  $v_{fd}/\overline{B_L}$  の絶対値は流速の増加に伴い増加するものの、C13においても体長の10倍程度である。図-7(b)において遡上時には体長の約27倍の遊泳速度を示すことから、降下時は遡上時とは異なり、最

大遊泳速度を用いずに流れの移流を利用していると判断される。一方、図-9(b)より上流向きの遊泳速度  $v_{fd} / \overline{B_L}$  は流速変化による影響は見られず、その絶対値は体長の約0~3倍を示す。これは、巡航速度程度またはそれ以下で遊泳しながら流れに押し流されていることを意味する。

図-10(a), (b)にカワムツに関して図-9(a), (b)と同様な図を示す。図-10(a)より潜孔内断面平均流速  $U_m$  の増加に伴い、下流向き対地速度  $v_{fgd} / \overline{B_L}$  の絶対値が増加することが確認できる。ただし、図-9(a)と比較すると、その値は全ケースでオイカワの値より低い。一方、図-10(b)より、下流向きのカワムツの遊泳速度  $v_{fd} / \overline{B_L}$  の絶対値は流速に影響を受けず、3以下と確認される。図-9(b)よりオイカワの  $v_{fd} / \overline{B_L}$  の絶対値がC10で約10であることを考慮すると、カワムツはオイカワと異なり流れに乗って降下すると判断される。上流向きで降下するカワムツの  $v_{fd} / \overline{B_L}$  の絶対値についても約3以下となっており、流れに乗って降下すると判断される。

#### 4. おわりに

本研究では隔壁に設置された潜孔内流速を段階的に変化させ、オイカワ、カワムツの遡上および降下特性と水理条件との関係を解析した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) オイカワには切欠きを越流する流れを遡上する時だけでなく、潜孔通過時にも追従性があること、およびその性質が流速の低下に伴い顕著なることを解明した。また、降下時よりも遡上時に追従性が顕著である。一方、流速に関わらずカワムツに追従性が無いことが明らかとなった。

(2) オイカワは高流速では潜孔の中心部を比較的直線的に、低流速では底面付近から若干上昇しながら遊泳すること、カワムツは流速に関わらず半水深以下を直線的に遊泳することが明らかとなった。泉ら<sup>13)</sup>はアイスハーバー型魚道の潜孔内を通過するアユ、ウグイの60%は潜孔底面隅角部を利用することを明らかにした。この相違が魚種、魚道形式または水理条件の相違によるものかは現在不明である。

(3) 下流を向いて降下する際、オイカワには体長の10倍程度の遊泳速度で遊泳するものもいるが、カワムツはほとんど遊泳せずに流れに乗って移流する。一方、上流を向いて降下する場合は、両魚種共にほとんど遊泳をせず、流れに乗って移流している。

ただし、本実験は2魚種のみを対象とし、また、右岸潜孔からの流れしか存在しない限定的な条件となっている。他魚種や潜孔と切欠きから構成される流れ等における実験を今後行う必要がある。

#### 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，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) 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.
- 4) 和田清，小出水規行，石川雅朗，中村俊六：修正ラリーニア型舟通し魚道の流れ場と稚アユの遡上経路，水工学論文集，第43巻，pp.983-988，1999.
- 5) 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.
- 6) 安田陽一，大津岩夫，浜野龍夫，三矢泰彦：多様な水生生物の遡上・降下可能な魚道の提案，河川技術論文集，第7巻，pp.221-226，2001.
- 7) 浪平篤，後藤眞宏，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.
- 8) 石川雅朗，白井淳治，胡夫祥，東海正：パーチカルスロット型実験魚道におけるウグイ魚群の遡上経路と行動，水産工学，Vol.43，No.1，pp.9-20，2006.
- 9) Wada, Y.: Relation between the ascending path of ayu and fishway structure, *Proc. of the Int. Symp. on Fishways '90 in Gifu, Japan*, pp.445-450, 1990.
- 10) 金子義明，和泉清，土屋十園，大竹義男：秋川における魚道の水理特性と遡上効果，水工学論文集，第41巻，pp.265-270，1997.
- 11) 泉完，高屋大介，工藤明，東信行：赤石川赤石第2頭首工のアイスハーバー型魚道における魚類等の遡上・水理特性，農業土木学会論文集，No.215，pp.75-84，2001.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，飯國洋平，山本晃義：静止流体中の魚の突進速度に関する実験的研究，水工学論文集，第51巻，pp.1267-1272，2007.
- 17) 泉完，矢田谷健一，東信行，工藤明，加藤幸：自然河川流河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.

(2009.9.30 受付)