

階段式魚道の潜孔位置が魚の遡上特性に及ぼす影響

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・松田孝一郎³・関強志³・森悠輔⁴

¹九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）

²九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）

³九州工業大学大学院，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（株）大林組北陸支店，浅川ダムJV工事事務所

* E-mail: matsukou.61@hotmail.co.jp

切欠きと潜孔を有する魚道を用いた魚の遡上実験は幾分行われている。泉らは遡上魚が潜孔内の底面隅角部を選好することや、潜孔は底生魚だけではなくアユやウグイといった遊泳魚にも利用されることを示した。既設の魚道や既往の研究において潜孔は上流側プールの底面と側壁に摺り付けるように設置されているものがほとんどである。しかし、潜孔位置の横断面内の変化が魚の遡上特性に及ぼす影響を検討した研究は存在しないため、既設の魚道における潜孔の横断面内の位置が最適かどうかは不明である。

本研究では、上流から2番目の隔壁において、潜孔位置を右岸側および中央部で底部、中段、上段のそれぞれ6箇所を設置してオイカワの遡上実験を行い、潜孔位置および潜孔内流速が魚の遡上率に及ぼす影響を実験的に解明した。その結果、遡上に適切な潜孔位置は、底部中央であることを解明した。

Key Words : pool-and-weir fishway, orifice, migration, position of orifice

1. はじめに

ダム、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。そこで、水位落差を分割し、魚類の遡上および降下を助ける魚道の設置が必要となる。階段式魚道には全面越流型、アイスハーバー型、ノルウェー型、傾斜隔壁越流型などの種類があり、越流部の隔壁には通常、切欠きと潜孔が設けられている。切欠きと潜孔を有する魚道を用いて、潜孔内での魚の通過経路と流れ場に対応する遊泳速度との関係の研究は幾分行われている。

泉ら¹⁾は既設のアイスハーバー型魚道において小型水中カメラを用い、潜孔内での魚類の遡上行動を撮影し、遡上魚は潜孔内の底面隅角部を選好し、突進速度に近い遊泳速度で通過すること、潜孔は底生魚だけではなく、アユやウグイのような遊泳魚も利用することを指摘した。鬼束ら²⁾は階段式魚道において潜孔内流速を系統的に変化させ、オイカワとカワムツを用いて遡上実験を行った。その結果、オイカワが追従性を有すること、オイカワは高流速では潜孔内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を示した。佐合ら³⁾は既設の階段式魚道において水中カメラを用いて魚道内部のアユの遡上状況を撮影し、潜孔を設置する場合には側壁および底面に摺り付けることが重要であることを示した。

以上のように潜孔内での魚の挙動については幾分解明されているものの、潜孔の位置を横断面内で変化させ、魚の遡上率との関係を解明した研究は存在しない。本研究では潜孔位置を、隔壁の右岸側および中央部において底部、中段、上部のそれぞれ6箇所を設置し、潜孔内流速を系統的に変化させてオイカワの遡上実験を行い、潜孔位置および潜孔内流速が魚の遡上行動に及ぼす影響を解明した。

2. 実験装置および実験条件

図-1に示すプール長 $L_x = 0.9\text{m}$ 、魚道幅 $B = 0.8\text{m}$ 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。ただし、左岸側壁はプール内を撮影可能にするために透明なアクリル板で作

成した。下流方向に x 軸，鉛直上向きに y 軸，横断方向に z 軸をとった。一般に，魚道に設置されている潜孔の形状は正方形が多く，また，一辺の長さはプール幅の10%前後のものが多い。そこで，本研究においても潜孔の大きさにプール幅の約10%となる10cmを採用し，潜孔形状を $L_{y0}=0.1\text{m} \times L_{z0}=0.1\text{m}$ の正方形とした。隔壁の模式図を図-2に示す。上部潜孔下端と下部潜孔上端との間の y 方向距離 d_y を0.1m，中央の潜孔右岸壁と右岸側の潜孔左岸壁との間の z 方向距離 d_z を0.25mとした。潜孔は上流から2番目の隔壁の右岸側(right)および中央(center)の底部(Bottom)，中段(Middle)，上部(Upper)にそれぞれ1つずつ設置した。また，図中の下線付きの2つのアルファベットは潜孔の上下位置(Upper, Middle, Bottom)および横断位置(center, right)を示し，例えば，Brは右岸側底部(Bottom right)である。上流から1番目のプールから2番目のプールへの流れは潜孔部のみ，2番目のプールから3番目のプールへの流れは全断面越流である。最上流から2番目のプールの水深 L_y は，潜孔内流速および潜孔位置の変化によって0.705~0.715mの範囲で変化する。

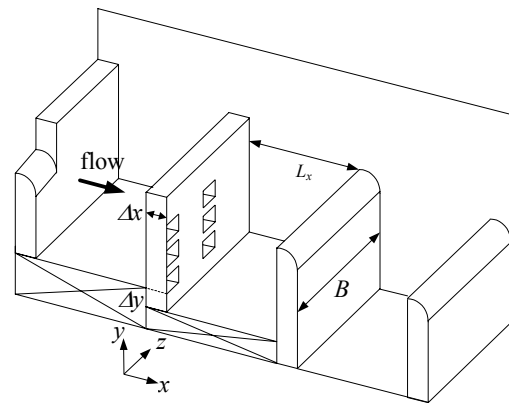


図-1 実験に用いた魚道の概要

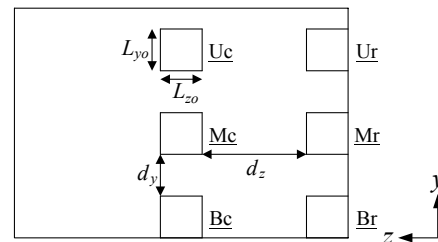


図-2 隔壁の模式図

(Br, Bc, Mr, Mc, Ur, Ucは潜孔位置を表す。)

表-1に実験条件を示す。6種類の各潜孔状態において潜孔内流速をオイカワの平均体長 $\overline{B_L}=7.0\text{cm}$ の3倍(21cm/s)，5倍(35cm/s)，7倍(49cm/s)に変化させた合計18ケースの実験を行った。ケース名の末尾の数字は潜孔内の体長倍流速を意味し，例えば，Br3は潜孔位置が底部右岸側で，潜孔内流速が平均体長の3倍のケースを意味する。

表-1 実験条件

	$U_m/\overline{B_L}=3$	$U_m/\overline{B_L}=5$	$U_m/\overline{B_L}=7$
Bottom right	Br3	Br5	Br7
Bottom center	Bc3	Bc5	Bc7
Middle right	Mr3	Mr5	Mr7
Middle center	Mc3	Mc5	Mc7
Upper right	Ur3	Ur5	Ur7
Upper center	Uc3	Uc5	Uc7

($U_m/\overline{B_L}$: 魚の体長倍流速)

上流から2番目のプールに平均体長 $\overline{B_L}=7.0\text{cm}$ のオイカワ50尾を挿入し，流水を開始した。目視で定常を確認した後，潜孔に設置した遡上防止用ネットを除去した。また，側壁および水路上部に設置した1080×810の画素数を有する2台のハイビジョンカメラで30分間の撮影を30Hzで行った。撮影後，遡上数と50尾のオイカワの遊泳位置を解析した。

x ， y ， z 軸方向にそれぞれ7，7，6のメッシュで構成される合計294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計測した。計測後， x ， y ， z 軸方向の時間的流速 U ， V ， W および合成流速 $V_f = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ を算出した。なお，流速測定時に魚道内にオイカワを入れていない。

3. 実験結果および考察

(1) 魚道内の流速ベクトルと魚の休憩場所

図-3に流速ベクトルを示す。すべてのケースにおいて潜孔面積を x 方向に投影した領域で流速が速くなっており，その他の領域は比較的魚の巡航速度 ($U_{fc}/\overline{B_L} = 2\sim 4$) 程度あるいはそれ以下の流速となって

いる。また，プール内の流れはプール全体を旋回していることがわかる。

10sごとにプール内のオイカワの遊泳位置を確認して算出した存在確率カウンターを図-4に示す。中村⁴⁾は魚の遡上に必要な条件として，遡上を誘発する適切な流速と休憩場所を挙げている。魚は休憩する場合，一定の場所に定位するため，魚の存在確率が高くなる。潜孔位置が横断面内で変化しているにも関わらず，全てのケースにおいてオイカワはプール底面付近を比較的広範囲に遊泳している。ここで，図-3(a)，(b)と比較するとプール底面付近の流速がオイカワの巡航速度程度あるいはそれ以下の領域と一致する。そのため，オイカワはプール底面付近の低流速域で休憩していると理解される。また，中村⁵⁾は潜孔がある魚道の場合，アユは底部を広く遊泳すると指摘している。本実験より，オイカワにも同様な傾向があることがわかった。

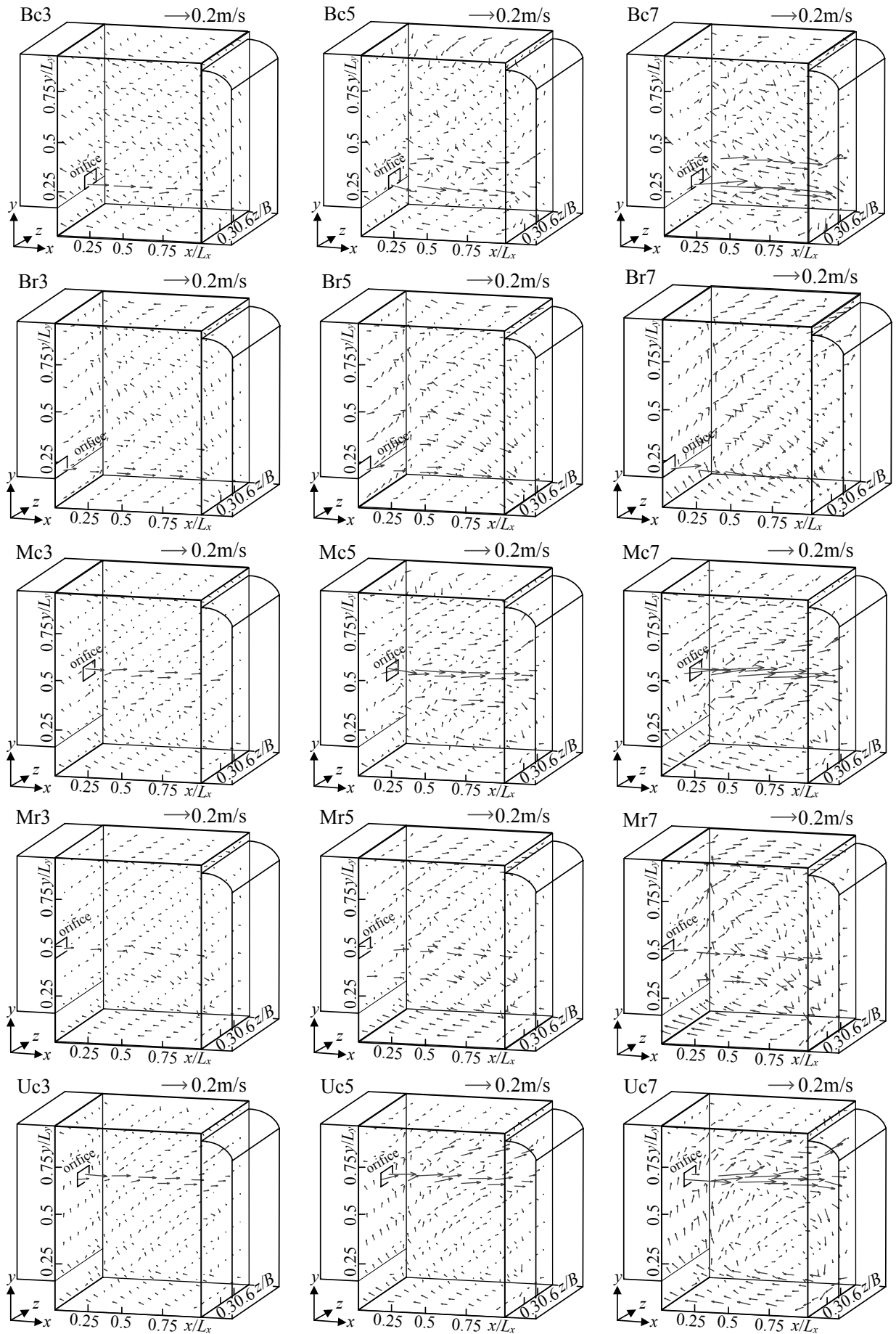


図-3(a) 各実験条件における流速ベクトル(L_y : プール水深, L_x : プール長, B : プール幅)

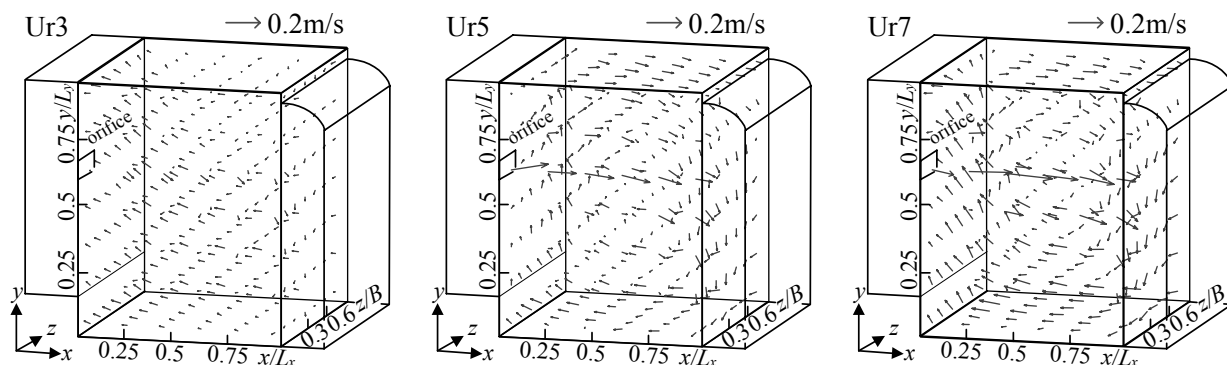


図-3(b) 各実験条件における流速ベクトル(L_y : プール水深, L_x : プール長, B : プール幅)

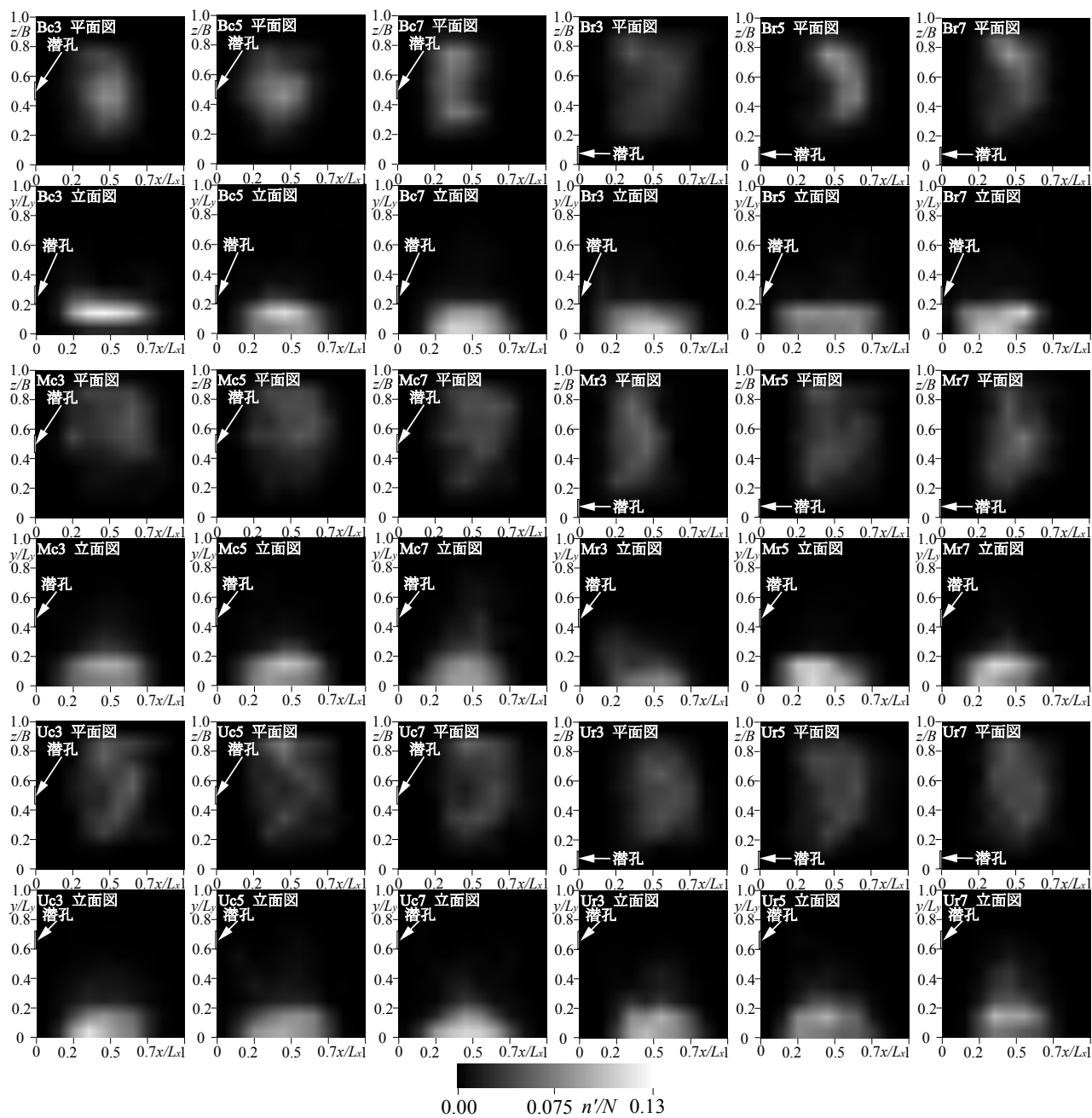


図-4 魚の存在確率コンター

(L_y : プール水深, L_x : プール長, B : プール幅, n'/N : 魚の存在確率)

(2) 潜孔位置および潜孔内流速と遡上率

遡上率を次式のように定義する。

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上に成功した尾数 } n}{\text{実験に用いた尾数 } N (= 50)} \quad (1)$$

図-5(a)に潜孔を中央部の底部, 中段, 上部に設置した場合の, 図-5(b)に潜孔を右岸側の底部, 中段, 上部に設置した場合の潜孔内流速変化に対する遡上率の変化を示す。ここで, 遡上率は第2プールから第1プールに遡上したオイカワを全てカウントしている。そのため, 第1プールに遡上した後に第2プールに降下し, 再び第1プールに遡上した尾数も含まれるため, 遡上率が1を超えるケースも存在する。潜孔の上下位置の変化に伴う遡上率に着目すると, 潜孔位置が中央部および右岸側の両者において, 底部(Bottom)の時に遡上率は高く, 中段(Middle), 上段(Upper)となるにつれ低下傾向を示す。一方, 潜孔位置の横断位置の変化に着目すると, 潜孔位置が右岸側(right)より中央部(center)の場合の方が遡上率が高いことが認められる。したがって, 本実験に用いた装置においてオイカワの遡上に最適な潜孔位置は, プール底部の中央と考えられる。実際の魚道では一般に第2プールの上流側, 下流側隔壁共に潜孔が設置される。

一方, 潜孔内流速の変化に伴う遡上率の変化に着目すると, 潜孔位置が右岸側上部における体長倍流速が5のケース(Ur5)を除くと, 全ケースにおいて潜孔内流速の増加に伴い遡上率が低下している。魚が遡上する場合, 潜孔面積を x 方向に投影した領域に魚が進入し, その後遡上に挑む。ただし, 遡上に成功する魚と失敗する魚が存在する。そこで, 遡上成功率を次式のように定義する。

$$\text{遡上成功率} = \frac{\text{遡上に成功した尾数 } n}{\text{潜孔 } x \text{ 方向下流領域に進入した尾数 } K} \quad (2)$$

なお, 元来式(2)の分母はこの領域内から遡上を試みた尾数にすべきである。しかし, この領域内で単に上流方向に遊泳しているのか遡上を試みているのかを明確に分離することが困難であったため, 実験時間内にこの領域を遊泳する全ての尾数とした。なお, 潜孔 x 方向下流領域に進入した尾数 K については, 2台のビデオカメラの映像から算出した。図-6(a)に潜孔を中央部に設置した場合の, 図-6(b)に潜孔を右岸側に設定した場合の潜孔内流速の変化による遡上成功率の変化を示す。Ur のケースにおいては傾向が確認されないものの, その他のケースにおいては, 潜孔内流速の増加に伴い遡上成功率が低下傾向にある。これは, 流速の増加に伴い遡上するために遊泳力が必要となるため, 遊泳力のない個体が遡上に失敗したものと考えられる。そのため, 潜孔内流速の増加に伴い遡上率は低下したことが理解される。

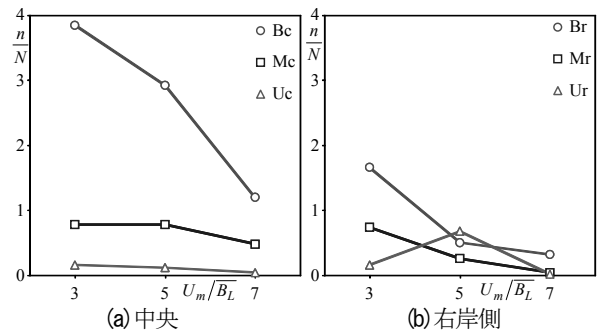


図-5 遡上率 n/N

(Br, Bc, Mr, Mc, Ur, Ucは潜孔位置を表す。 $U_m/\overline{B_L}$: 魚の体長倍流速)

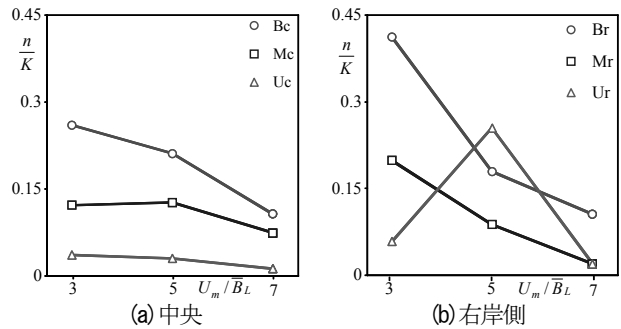


図-6 遡上成功率 n/K

(Br, Bc, Mr, Mc, Ur, Ucは潜孔位置を表す。 $U_m/\overline{B_L}$: 魚の体長倍流速)

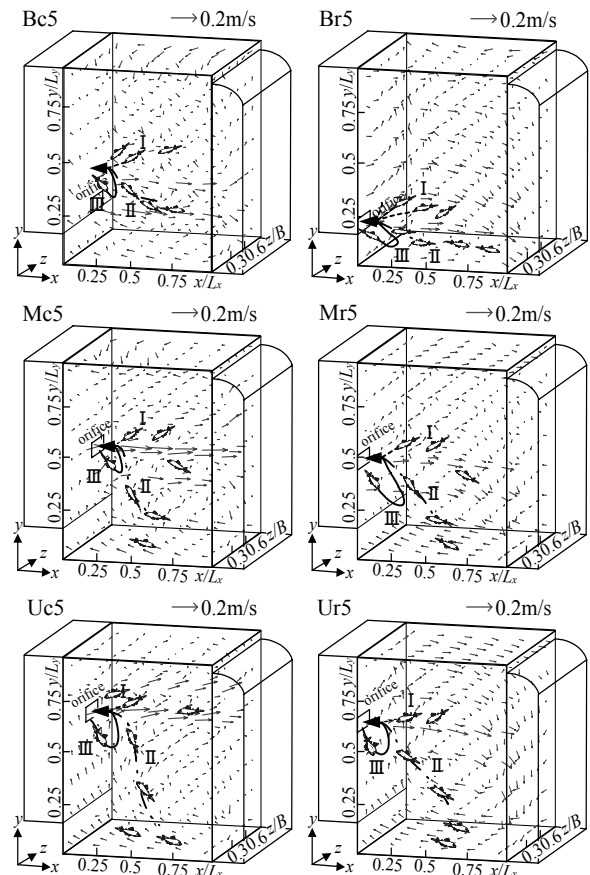


図-7 遡上パターン模式図

(L_y : プール水深, L_x : プール長, B : プール幅)

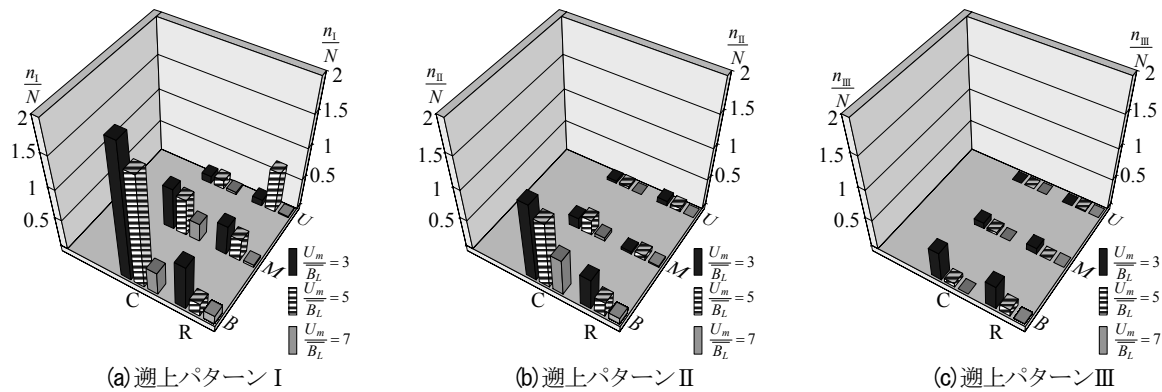


図-8 遡上パターン別遡上率

(B, M, U, C, Rは潜孔位置を表す. n_I/N , n_{II}/N , n_{III}/N : 遡上パターン I, II, IIIにおける遡上率, $U_m/\overline{B_L}$: 魚の体長倍流速,)

(3) 潜孔式魚道におけるオイカワの遡上パターン

各潜孔位置における全遡上魚の軌跡を解析したところ、遡上経路がほぼ3パターンに分類されることが確認された。図-7に各潜孔位置におけるオイカワの遡上パターンを示す。遡上パターン I は底面付近で休憩している魚群から離脱してランダムに遊泳した魚が、偶発的に潜孔流に乗り遡上するもの、遡上パターン II は魚が休憩位置から直接潜孔に向かって遊泳して遡上するもの、パターン III は魚が第1プールから潜孔を降下し、その直後に再び遡上するものである。

図-8に各遡上パターン別の遡上率を示す。ここで、それぞれの遡上パターンにおける遡上数を n_I , n_{II} , n_{III} とする。遡上パターン I, II の遡上率は比較的高く、遡上パターン III の遡上率は低い。このことから、遡上パターン I と II が全体の遡上率をほぼ決定していると判断される。

a) 遡上パターン I

図-9に各潜孔位置における底面付近で休憩している魚群から離脱してランダムにプール内を遊泳している魚の内、潜孔面積を x 方向に投影した領域に進入した尾数 Kr/Nr を示す。ここで、 Nr は底面付近で休憩している魚群から離脱した魚の尾数、 Kr は魚群から離脱してランダムにプール内を遊泳した魚が潜孔面積を x 方向に投影した領域に進入した尾数である。潜孔位置の変化に伴う Kr/Nr の比較を行うと、潜孔内流速に関わらず潜孔位置が Bc, Mc の時の Kr/Nr が高いことが観察される。これは、潜孔が右岸に位置する場合よりも中央部に位置する方がランダムに遊泳する魚が潜孔の下流側領域に進入する率が高くなることを意味する。これは、潜孔が中央部に位置する場合はランダムに遊泳している魚は右岸側領域から左岸側領域へ、また、左岸側領域から右岸側領域へ遊泳する際に潜孔下流の高速流領域を通過する可能性が高くなるのに対し、潜孔が右岸側に設置されている場合は、潜孔のすぐ右岸側が側壁であるため、その可能性が低下することが要因と考えられる。

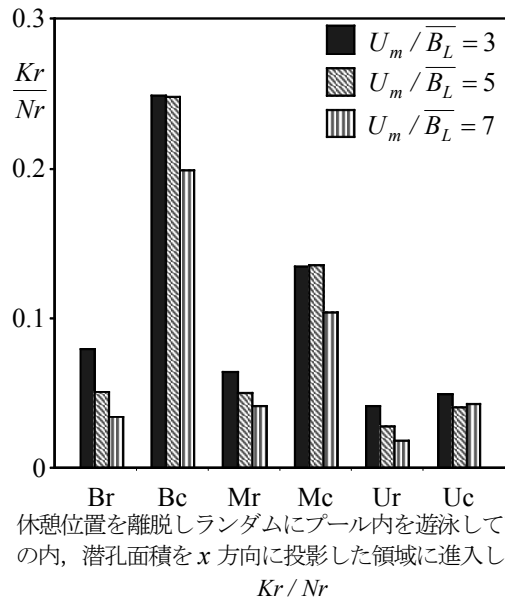


図-9 休憩位置を離脱しランダムにプール内を遊泳している魚の内、潜孔面積を x 方向に投影した領域に進入した尾数 Kr/Nr

(Br, Bc, Mr, Mc, Ur, Ucは潜孔位置を表す. $U_m/\overline{B_L}$: 魚の体長倍流速)

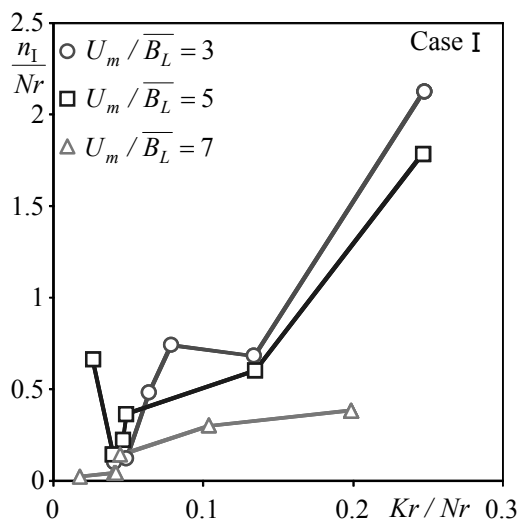


図-10 休憩位置を離脱しランダムにプール内を遊泳している魚の内、潜孔面積を x 方向に投影した領域に進入した尾数 Kr/Nr と遡上パターン I の遡上率 n_I/Nr との関係

($U_m/\overline{B_L}$: 魚の体長倍流速)

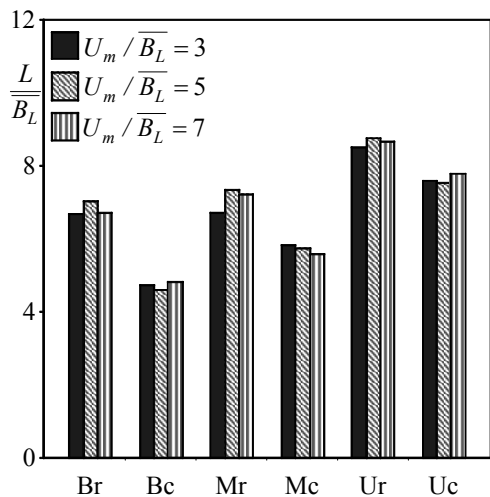


図-11 魚群重心から潜孔中央までの距離 L/B_L

(Br, Bc, Mr, Mc, Ur, Ucは潜孔位置を表す。 U_m/B_L : 魚の体長倍流速)

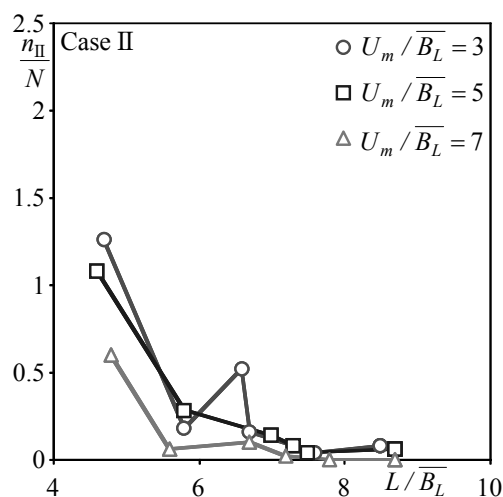


図-12 魚群重心から潜孔中央までの距離 L/B_L と遡上パターン II における遡上率 n_{II}/N との関係

(U_m/B_L : 魚の体長倍流速)

図-10に Kr/Nr と遡上パターン I の遡上率との変化を示す。 Kr/Nr の増加に伴い、遡上パターン I における遡上率は増加傾向にある。これは、潜孔の下流領域に進入する尾数が増加するに伴い、潜孔からの高速流に誘発され魚が遡上する確率が高くなることを意味する。

b) 遡上パターン II

図-4に示したオイカワの存在確率から魚群の重心が算出される。図-11に各潜孔位置における魚群重心から潜孔中央までの距離 L/B_L を示す。Bc, Mc, Brの時に魚群重心から潜孔中央までの距離が比較的小さい。魚群重心から潜孔中央までの距離は遡上パターン II における遡上距離に相当する。

図-12に L/B_L と遡上パターン II における遡上率 n_{II}/N との関係を示す。魚群重心から潜孔中央までの距離の増加に伴い、遡上パターン II における遡上率が減少傾向にあることがわかる。このことから遡上距離が伸びるにつれ遡上率が減少することが理解される。これは、潜孔から離れると図-3に示された高速流を発見しにくくなるからであると考えられる。

c) 遡上パターン III

図-13(a)に潜孔を中央部に設置した場合の、図-13(b)に潜孔を右岸側に設置した場合の降下してきた魚が直ちに遡上する時の遡上成功率 n_{III}/S と潜孔内流速との関係を示す。ここで、 S は降下した魚の尾数である。すべてのケースにおいて、潜孔内流速の増加に伴い降下した魚がそのまま再び遡上する時の遡上成功率が低下していることがわかる。これは、流速の増加に伴い遊泳力が必要になるためである。そのため、潜孔内流速の増加に伴い遡上パターン III における遡上率は低下する。ここで、潜孔を右岸側より中央に設置した場合の方が、降下した魚の尾数 S が高くなるため、 n_{III}/S は低い値となったと考えられる。このため、図-13において右岸側より中

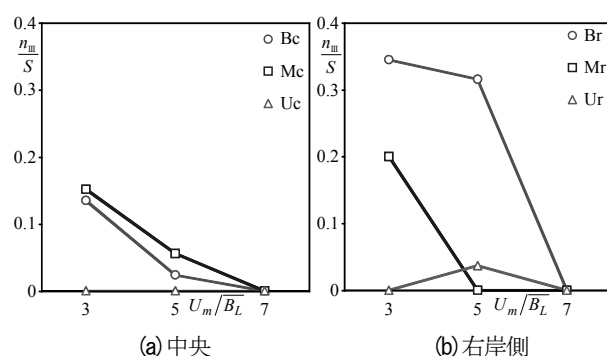


図-13 降下した魚が再び遡上する場合の遡上成功率 n_{III}/S

(Br, Bc, Mr, Mc, Ur, Ucは潜孔位置を表す。 U_m/B_L : 魚の体長倍流速)

央に潜孔を設置した時、 n_{III}/S が低い値を示したと推察される。このことから、図-6においても中央より右岸側に潜孔を設置した方が遡上成功率 n/K が高い値を示したことが理解される。

以上より、遡上率が高くなる条件は潜孔内流速が低いこと、潜孔下流の高速流領域への進入頻度が多いこと、底面付近で休憩している魚群から潜孔までの距離が短いことなどが解明された。その結果、潜孔を底部の中央に設置することで遡上率が最大になることが解明された。

4. おわりに

本研究は、階段式魚道の潜孔位置を、右岸側および中央部で底部、中段、上部のそれぞれ6箇所に設置し、潜孔内流速を系統的に変化させてオイカワの遡上実験を行い、潜孔位置および潜孔内流速が魚の遡上行動に及ぼす影響を検討したものである。その結果、以下のような知見が得られた。

(1) 本実験に用いた装置において、オイカワの遡上に最

適な潜孔の横断位置は、中央部である。これは、ランダムに遊泳している魚はプール内の右岸側領域から左岸側領域へ、また、左岸側領域から右岸側領域へ遊泳する際に潜孔の下流領域を通過する可能性が高くなるが、この時、潜孔からの高速流に誘発されて遡上を試みるためである。一方、潜孔が右岸側側壁に設置されている場合は、潜孔のすぐ右岸側が側壁であるため、ランダムに遊泳している魚が潜孔下流領域を通過する可能性が低下するため遡上率は低くなると考えられる。

(2) 本実験に用いた装置において、オイカワの遡上に最適な潜孔の上下位置は、底部である。オイカワは潜孔の上下位置および横断位置に関係なく、底面付近で休憩している。そのため、休憩場所と潜孔が近いほど高速流に近くなるため遡上誘発されると考えられる。

(3) 潜孔内流速の増加に伴い遡上率は減少する。これは、流速の増加に伴い遊泳力を要するからである。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 関強志, 森悠輔: 魚道隔壁に設置された潜孔内の魚の行動特性, 水工学論文集, 第54巻, pp.1297-1302, 2010.
- 3) 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.
- 4) 中村俊六: 魚道のはなし, 山海堂, 1995.
- 5) Nakamura, S., Takashima, N. and Ijyuin, H.: Behavior of Ayu in a Pool-and-weir fishway Model, *Proc. of the International Symp. on Fishway '90 in Gifu, Japan*, pp.361-366, 1990.

(2010.5.21 受付)

Effects of Changing Position of Orifice on Migration of Fish

Kouki ONITSUKA¹, Juichiro AKIYAMA¹, Koichiro MATSUDA¹, Tsuyoshi SEKI¹ and Yusuke MORI²

¹Civil Engineering, Kyushu Institute of Technology

²OBAYASHI CORPORATION

Izumi pointed out that fish migrates near the corner of orifice. The orifice is located at the corner of the pool in almost fishways. However, there is little information on the suitable location of orifice, due to such researches have not been conducted at all. In this study, the influence of position of orifice and flow velocity in orifice on migration rate is investigated with changing position of orifice and flow velocity systematically in pool-and-weir fishway. It was found that appropriate position of orifice to fish's migration is bottom and near the side wall in pool-and-weir fishway.