

階段式魚道内に設置した仕切り板による オイカワの休憩場所の制御に関する検討

鬼束 幸樹^{1*}・秋山 壽一郎²・藏本 更織³・宍戸 陽⁴・角田 裕香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(株) 日立製作所 情報通信システム社 公共システム事業部 (〒136-8632 東京都江東区新砂1-6-27)

⁴九州工業大学大学院 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)

* E-mail: onitsuka@civil.kyutech.ac.jp

高い遡上率を有する魚道を建設するには、魚の休憩場所を確保することが重要である。本研究では、仕切り板を魚道内でさまざまな位置に変化させ、魚の休憩場所を制御したものである。オイカワの遡上率は二台のビデオカメラによって得られた。そこで、仕切り板を上流側切欠きと下流側切欠きの間に設置した場合にオイカワの遡上率が高い値を示した。これは、オイカワの休憩位置がプールの中央部から仕切り板の上流側に移動する、また、低速な流れの領域からの遡上が誘発される。

Key Words : *Zacco Platypus, partition, pool-and-weir fishway, migration rate, suitable area*

1. はじめに

河川にダムや堰が設置されると、その上下流の水位が不連続となり、水生生物の河川縦断方向の移動が困難になる。回遊魚にとって不連続な水位落差の存在は死活問題につながるため、魚道が併設されることが望ましい。

魚道は、その水理構造の違いによって、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、複数のプールによって構成される魚道で、プール間に落差が設けられている。ストリームタイプは、水路内の流れに急激な流速分布をつけることで、それぞれの魚種に適した流速の遡上経路を与える魚道である^{2,3)}。オペレーションタイプは、人為的な操作が必要な魚道である。いずれのタイプにおいても遡上および降下に適した設計を行うには、魚道内の流況の把握と、その流況内を遊泳する魚の挙動を把握する必要がある。

魚道内の流況を実験に基づき解明した研究としては、高嶋・中村⁴⁾、林田ら⁵⁾、安田ら⁶⁾、浪平ら⁷⁾、泉ら⁸⁾、鬼束ら⁹⁾、小坂ら¹⁰⁾など多くの研究が挙げられる。また、近年では魚道内流況の数値計算も前野ら¹¹⁾、浪平ら¹²⁾、

藤原ら¹³⁾などによって行われている。

一方、魚の挙動についてはビデオ撮影などが多く行われているが⁴⁻¹⁰⁾、遡上に必要な条件などは必ずしも明確には解明されていない。中村⁴⁾は、既往の研究を参照し、魚の遊泳に関する3つの定理を提案した。第1定理は「魚はその体長相当分の長さしか流れを認識できない」、第2定理は「魚は攻撃、逃避、急流遡上などの緊急時以外には普通筋を使わない」、第3定理は「魚の尾の振り幅は体長の1/2を越えない」である。ここで第2定理に着目すると、遡上時は普通筋を使うものの、その前後は疲労の蓄積しない血合筋を使いたがると解釈される。事実、魚道内で定位している魚は体長の2~4倍程度の流速域を選好することが既往の研究で解明されている⁴⁻¹⁰⁾。一方、第1定理に着目すると、魚の定位位置から遠い場所に上流からの高速流が存在する場合、上流方向を認識できない可能性が高くなる。逆に、休憩場所と上流からの高速流が近い場合、上流方向を認識しやすく、なおかつ休憩も可能なために遡上率が向上する可能性がある。

本研究は階段式魚道においてプール内の様々な位置に仕切り板を設置し、休憩場所の位置を制御することによって遡上率の向上を試みたものである。

2. 実験装置および実験条件

図-1に実験に用いた木製の片側切欠き付階段式魚道の模式図を示す。わが国において、比較的設置率が高い魚道は片側切欠き付階段式魚道である。したがって、本実験においても同魚道を採用した。ただし、左岸側壁は撮影のため透明なアクリル板で作成した。各諸元は国土交通省発行の「魚がのぼりやすい川づくりの手引き」¹⁴⁾によって提示されているものを参考にして、プール長 L を0.7m、プール幅 B を0.6m、水深 h を0.7m、隔壁厚 Δx を0.15m、切欠き幅 Δz を0.12m、落差 Δy を0.15mに設定した。これらの値は小規模河川に設置される魚道として一般的なスケールである。また、流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸、プール横断方向に z 軸をとった。

アユの遡上および降下を観察できるように下流から2番目のプール内の様々な位置に仕切り板を設置した。図-2(a)に示すように高さ0.8m、幅0.25mの仕切り板を $x/L=0.5$ の位置に固定し、図-2(b)に示すように横断位置のみを変化させた。図-2(b)中の緑色の矢印が仕切り板の設置範囲を表している。実験は、図-2(b)に示す4ケースと、仕切り板を設置していないケースの計5ケースの実験をそれぞれ一回ずつ行なった。また、図-2(b)に示すように、隔壁において切欠き部を流下方向に投影した領域をNotch area、それ以外の領域をPool areaと定義し、両領域内における仕切り板の設置位置に基づき、表-1に示すケース名を定義した。

下流から2番目のプールに平均体長 \bar{L}_t が80mmのオイカワ (*Zacco Platypus*) を $N=30$ 尾挿入し、切欠き部の越流流速が体長倍流速で9倍(突進速度)となるように3ℓ/sの流量を与えた。一般的な魚道では切欠きの越流流速を遡上させる対象魚の突進速度に一致させることで魚道の全長を短くしつつ、魚類が上流側を認識できる流況が確保できる。目視でアユが魚道に馴致したのを確認した後、切欠きに設置した遡上防止用ネットを除去すると共に、プールの側壁および上部に設置した2台のカメラで30fpsで30分間の撮影を行なった。撮影後、オイカワの遊泳位置を10sごとにキャプチャーされた画像を基にプール内のアユの位置を座標化し、魚群重心および休憩位置を解析した。

x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ7点のメッシュで構成される合計343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 軸方向の時間平均流速 U 、 V 、 W を算出し、合成流速 $V_v = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ を得た。なお、流速測定時には魚道にオイカワを放流していない。

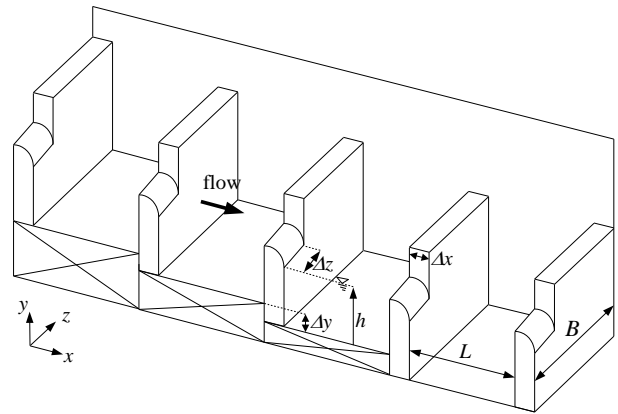


図-1 実験に用いた階段式魚道の概略図

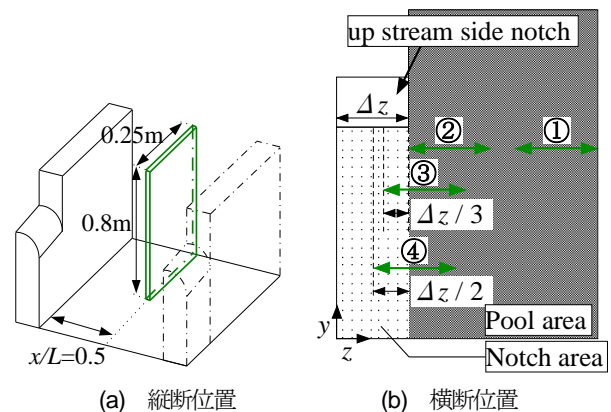


図-2 仕切り板の設置位置

表-1 実験条件

Pool status		Case name
Standard pool		Sp
Installation position of partition	① Pool left	Pl
	② Pool right	Pr
	③ Notch third	Nt
	④ Notch half	Nh

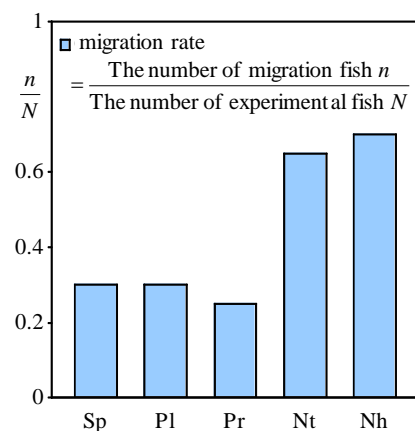


図-3 オイカワの遡上率

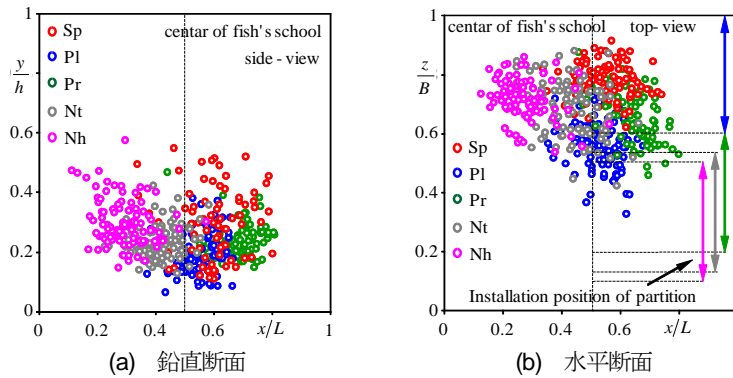


図-4 オイカワの瞬間魚群重心の移動状況

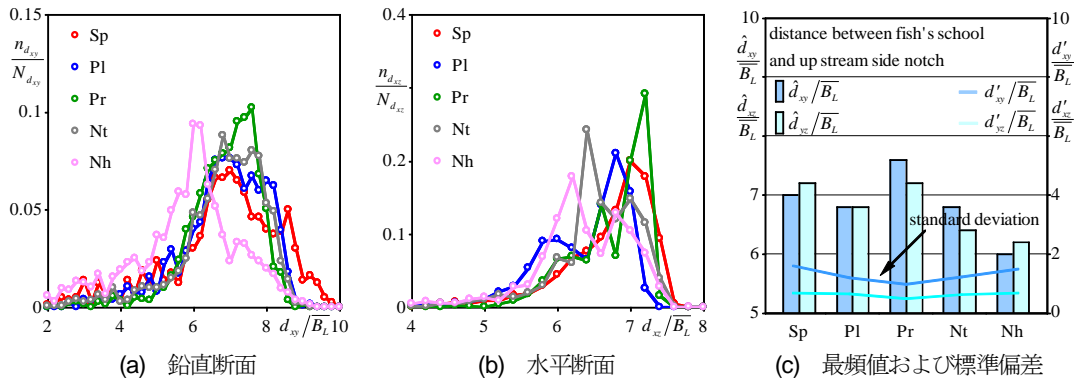


図-5 オイカワの瞬間遊泳位置と上流側切欠きまでの距離

3. 実験結果および考察

(1) 仕切り板の設置位置とオイカワの遡上率との関係

遡上率を次式のように定義する。

$$\text{遡上率} = \frac{\text{遡上に成功した尾数 } n}{\text{実験に用いた尾数 } N (= 30)} \quad (1)$$

図-3にオイカワの遡上率 n/N をケース別に示す。仕切り板を設置していないケース(Sp)とPool areaの左岸側に仕切り板を設置したケース(Pl)とでは遡上率はほぼ同値であった。そのため、プールの左岸側における仕切り板の有無は遡上率に影響を及ぼさないと考えられる。しかし、Pool areaの右岸側に仕切り板を設置したケース(Pr)ではSpに比べて遡上率が低下しており、更にNotch area内に仕切り板を挿入しているケース(Nt, Nh)においては遡上率がSpに比べて増加している。以上の結果から、Pr, Nt およびNhにおいては、仕切り板の設置位置を変化させたことによって、オイカワの遡上率を変化させたと推測される。

(2) オイカワのプール内の休憩場所

図-4(a)に鉛直断面 ($x-y$)、図-4(b)に水平断面 ($x-z$)における10sごとの魚群の重心位置をケース別に示す。ここに、 h は水深である。鉛直断面、水

平面共に、全ケースにおいて重心位置は時間と共に移動しているものの、その範囲はプール内の僅か一部の領域に留まっている。そのため、この一部の領域付近でオイカワは休憩していると判断される。

図-4(a)の鉛直断面に着目すると、全てのケースにおいてオイカワの休憩場所は半水深以下であり、仕切り板を設置していないケース(Sp)とその他のケースとの間に顕著な差異はない。

一方、図-4(b)の水平断面に着目すると、Spでは左岸側壁付近でオイカワが休憩している。PlではSpよりも右岸側で休憩しており、Prでは仕切り板の下流側で休憩している。更に、遡上率の高いケース(Nt, Nh)では休憩場所が $0.1 < x/L < 0.6$ の範囲であり、仕切り板の上流付近で休憩していることが伺える。このことから、仕切り板を設置することにより、オイカワの休憩場所を制御することができたと考えられる。

(3) オイカワの瞬間遊泳位置と上流側切欠きまでの距離

図-5(a), (b)に鉛直断面 ($x-y$) および水平断面 ($x-z$)における、オイカワの瞬間遊泳位置と上流側切欠きまでの鉛直距離 d_{xy} および水平距離 d_{xz} を平均体長 B_L で除した値 (d_{xy}/B_L , d_{xz}/B_L) の頻度分布をケース別に示す。鉛直距離および水平距離の両者とも分布形状および分布範囲がケースによって異なっ

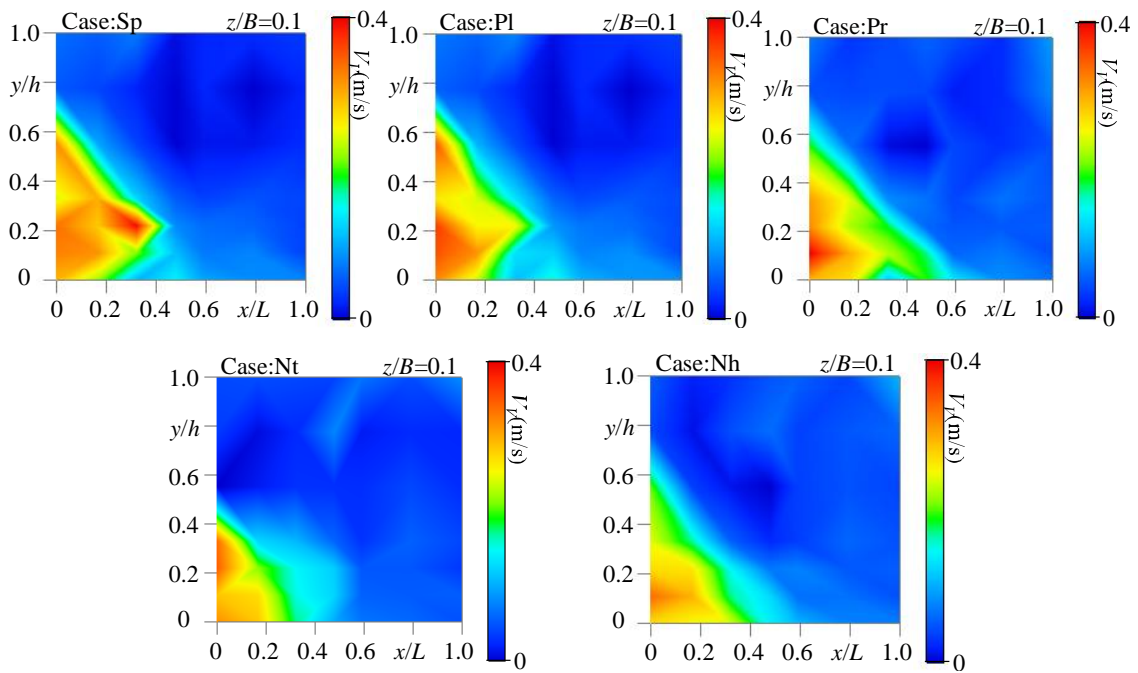


図-6 $z/B=0.1$ における鉛直断面内の流速コンター

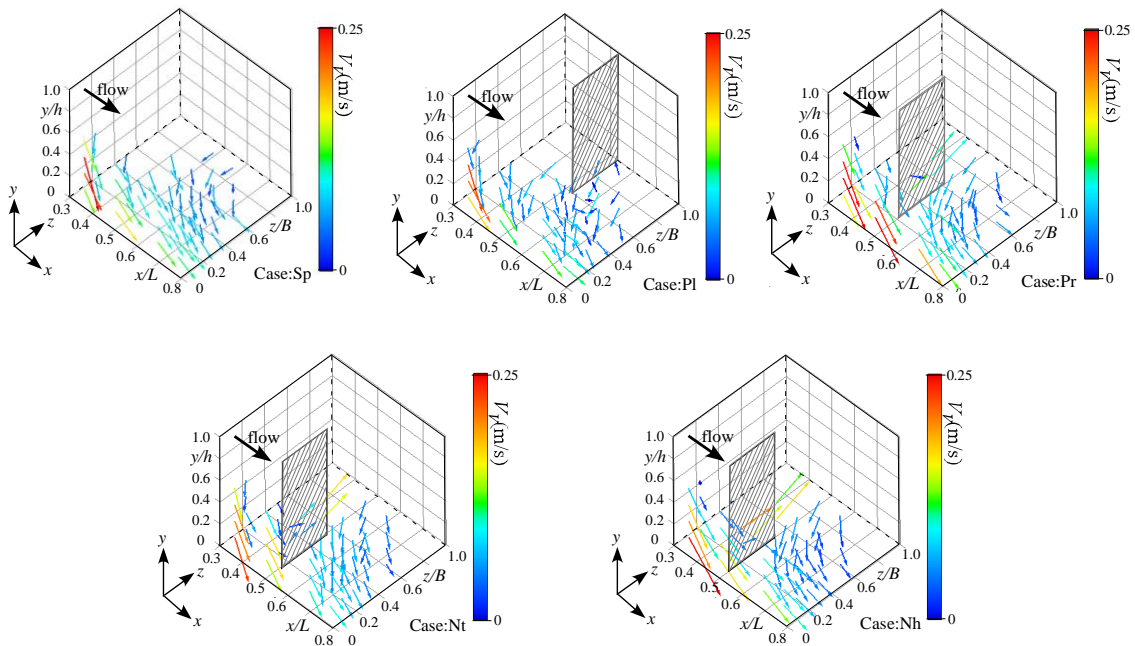


図-7 仕切り板周辺の流速ベクトル

ている。これは、仕切り板を設置することによって、オイカワの瞬間遊泳位置と上流側切欠きとの距離が変化したことを意味する。

図-5(c)に d_{xy} および d_{xz} の最頻値を平均体長 $\overline{B_L}$ で除した値 ($\hat{d}_{xy}/\overline{B_L}$, $\hat{d}_{xz}/\overline{B_L}$) および、標準偏差を平均体長 $\overline{B_L}$ で除した値 ($d'_{xy}/\overline{B_L}$, $d'_{xz}/\overline{B_L}$) をケース別に示す。遡上率が最も高いケース(Nh)において、最頻値が最も低い値となっている。これに対し、遡上率が最も低いケース(Pr)では最頻値が最も高い値となっている。これより、オイカワの瞬間遊泳位置と

上流側切り欠きまでの距離が近い程、遡上が誘発されると判断される。一方、標準偏差についてはケース間の差異が最頻値ほど顕著ではない。これより、仕切り板の設置位置を変化させても、オイカワの瞬間遊泳位置と上流側切欠きまでの距離のばらつきに影響を及ぼさないと考えられる。

(4) プール内流況の比較

図-6に $z/B=0.1$ における鉛直断面($x-y$)の3次元合成流速 V_v のコンターをケース別に示す。全ての

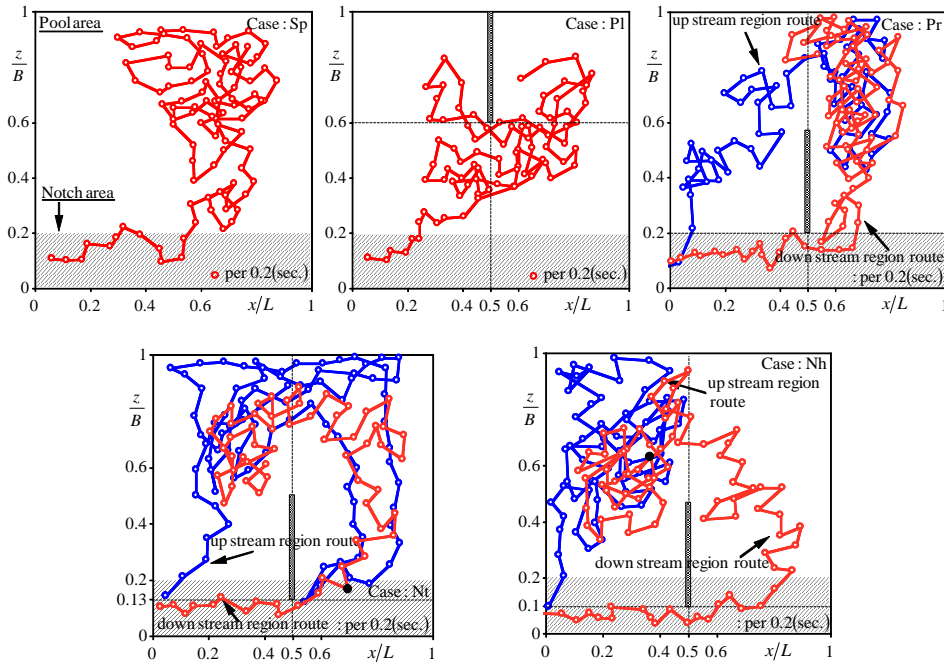


図-8 オイカワの遡上遊泳軌跡

ケースにおいて上流側切欠き直下に高速な流れが存在している。これは、上流側切欠きからプール内に流れ込む落下流である。Sp, PlおよびPrではプール内の流速に顕著な差異は見られないが、NtおよびNhにおいては、他のケースと比較して落下流の流速が若干遅くなっている。NtおよびNhは、上流側切欠きと下流側切欠きとの間の領域に仕切り板を挿入しているケースである。そのため、これらのケースでは落下流が仕切り板に衝突し、流れが減勢されている。

流速測定で得られた各メッシュにおける3次元合成流速 V_v の内、仕切り板周辺の流速を任意に抽出し、図-7にベクトルおよびコンター色でケース別に示した。ケース別に流向を観察すると、Spでは上流側切欠きから下流側切欠きに向かって高速な流れが形成されており、その他の領域では比較的流速が遅くなっている。Plでは、仕切り板の周辺で不規則な流れが観察されるが、Spとの差異はほとんどない。Pr, NtおよびNhでは、落下流が仕切り板に衝突した後、仕切り板の上流側と下流側に流れが二分されている。更に、Pr, Nt, Nhと、Notch area内への仕切り板の挿入割合の増加に伴い、仕切り板の上流側の流速が遅くなっている。ここで図-4(b)より、NtおよびNhにおいて、オイカワは仕切り板の上流側で休憩している。そのため、落下流から仕切り板の上流側に流入してきた流れを発見しやすいと考えられる。ただし、仕切り板の上流側の流速は、落下流の流速よりは遅い。

(5) 仕切り板の設置位置とオイカワの遡上特性との関係

a) オイカワの遡上遊泳軌跡

図-8に遡上前の20s間における水平断面($x-z$)の遊泳軌跡を0.2sごとにプロットした一例をケース別に示す。なお、Pr, NtおよびNhにおいては、仕切り板の上流側から遡上する経路と下流側から遡上する経路の2パターンが存在したため、前者をup stream region route、後者をdown stream region routeと定義し、それぞれ青色および赤色で示した。ケース別に遡上遊泳軌跡を観察すると、SpではNotch areaを通過して遡上しており、図-6および図-7を考慮すると、比較的流速の速い領域を遡上していると判断される。Plでは、Notch areaから若干外れているものの、比較的流速の速い領域を遡上している。Pr, NtおよびNhについては、down stream region routeでは、Sp, Plと同様にNotch areaを通過して遡上しているのに対し、up stream region routeでは、Notch areaをほとんど通過せずに比較的流速が遅い領域から遡上している。

b) 遡上経路の選択率とオイカワの遡上率との関係

図-9にPr, NtおよびNhにおけるup stream region routeおよびdown stream region routeの選択率(n_u/N_m , n_d/N_m)をケース別に示す。Pr, Nt, NhとNotch area内への仕切り板の挿入割合の増加に伴いup stream region routeの選択率が増加している。これは、図-7より、Notch area内への仕切り板の挿入割合の増加に伴い、落下流が仕切り板の上流側に流れ込む割合が増加し、仕切り板の上流側からの遡上が誘発されたと考えられる。更に、図-3と比較すると、up

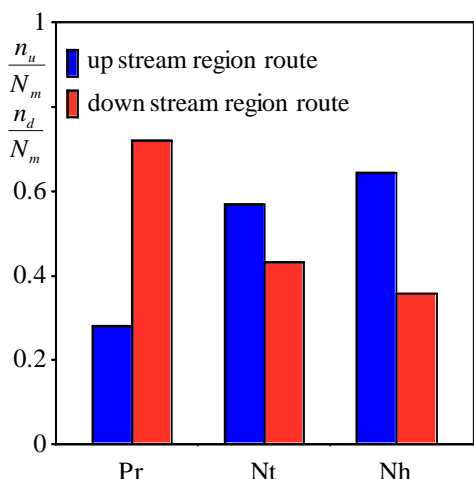


図-9 Pr, Nt, Nhにおけるオイカワの各遡上経路の選別率

stream region routeの選別率が高いケースほど遡上率が高い。これは、up stream region routeでは比較的流速が速いNotch areaをほとんど通過しないため、down stream region routeに比べてオイカワに疲労が蓄積されにくく¹⁵⁾、遡上に成功する個体が増加したためと考えられる。

4. おわりに

本研究は階段式魚道においてプール内の様々な位置に仕切り板を設置し、休憩場所の位置を制御することによって遡上率の向上を試みたものである。本研究より得られた知見は以下の通りであり、小規模河川に設置される魚道に対して有用な知見であると考えられる。

- (1) 階段式魚道のプール内に仕切り板を設置することにより、オイカワの休憩場所の制御が可能であることが判明した。
- (2) オイカワのプール内の瞬間遊泳位置が上流側切欠きに近い程、遡上率が向上することが判明した。
- (3) 上流側切欠きと下流側切欠きとの間の領域に仕切り板を挿入させることにより、落下流は二分される。それに伴い、比較的流速の遅い仕切り板の上流側からのオイカワの遡上が誘発され、オイカワに疲労が蓄積されず、遡上に成功する個体が増加することが判明した。

以上は1回の実験に基づいて得られた知見である。したがって今後は複数回の実験を行った際に同様の結果が得られるかどうかを検討する必要がある。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金基盤研究(C)26420500（代表：鬼束幸樹）の援助を受けた。

参考文献

- 1) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 2) Rajaratnam, N. and Katopodis, C.: Hydraulics of Denil fishways, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110, pp.1219-1233, 1984.
- 3) 和田清，東信行，中村俊六：デニール式およびステープパス式魚道における流れ場の特性と稚アユの遡上行動，水工学論文集，第42巻，pp.499-504, 1998。
- 4) 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。
- 5) 林田寿文，本田隆秀，萱場祐一，島谷幸宏：階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動，水工学論文集，第44巻，pp.1191-1196, 2000。
- 6) 安田陽一，大津岩夫，三矢泰彦，浜野龍夫：多様な水生生物の遡上・降河に配慮したスリット砂防堰堤に設置する魚道の提案とその効果，河川技術論文集，第9巻，pp.487-492, 2003。
- 7) 浪平篤，後藤眞宏，小林宏康：勾配1/5の階段式魚道における流況とウグイの遊泳行動，水工学論文集，第52巻，pp.1189-1194, 2008。
- 8) 泉完，神山公平，藤原正幸：全面越流型階段式魚道プール内の流況と魚の遊泳行動，農業農村工学会論文集，No.269，pp.127-135, 2010。
- 9) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，松田孝一郎，藏本更織，野口翔平：階段式魚道におけるプール水深がアユの遡上特性に及ぼす影響，土木学会論文集 G(環境)，Vol.68, No.6, pp.II_25-II_31, 2012。
- 10) 小坂佑樹，青木宗之，田口裕基，福井吉孝：呼び水式階段魚道における問題点とその対処法について，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.68/No.4, pp.I_679-I_684, 2012。
- 11) 前野詩朗，小川信：プールタイプ魚道の流れの数値解析，水工学論文集，第46巻，pp.421-426, 2002。
- 12) 浪平篤，後藤眞宏，小林宏康：一般座標系におけるVOF法を用いた階段式魚道内の流況の数値解析，農業土木学会論文集，第242号，pp.207-215, 2006。
- 13) 藤原正幸，山中哲志，泉智揮，ラボン・エドワード：多種のパーティカルスロット式魚道の数値流動解析とプールを構成する各隔壁の機能について，水産工学，第49巻，第2号，pp.85-92, 2012。
- 14) 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。
- 15) 塚本勝巳：魚類の遊泳運動：水中への適応，比較生理生化学，Vol.10/No.4, pp.249-262, 1993。

(2015. 3. 20受付)

EXAMINATION OF CONTROL OF SUITABLE AREA OF OIKAWA, *ZACCO
PLATYPUS*, IN POOL-AND-WEIR FISHWAY WITH PARTITION

Kouki ONITSUKA¹, Juichiro AKIYAMA¹, Saori KURAMOTO², Akira SHISHIDO¹
and Yuka KADOTA¹

¹Civil Engineering, Kyushu Institute of Technology

²Hitachi Corporation

It is important to keep suitable area for fish in pool-and-weir fishway to make the migration rates high. In this study, the control of the suitable area was tried by installation of partition with various positions in pool-and-weir fishway. The migration rates of oikawa (*Zacco Platypus*) were obtained with the aid of two sets of digital video cameras. It was found that the migration rates of oikawa take the high value by installation of partition to an area between upstream side notch and downstream one. This is because the suitable area of oikawa was moved to the upstream side of partition from the middle part of the pool, and the migration from the slow flow area was induced.