アイスハーバー型魚道の流れの解析と 低流量・河床低下時の機能改善

NUMERICAL ANALYSIS OF ICE HARVOR TYPE FISHWAY AND MODIFICATION OF ITS
FUNCTION UNDER LOW DISCHARGE AND BED DEGRADATION CONDITION

前野詩朗¹・吉田圭介²・田中龍二³
Shiro MAENO, Keisuke YOSHIDA and Ryuji TANAKA

¹フェロー会員 博士(工) 岡山大学教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)

²正会員 博士(工) 岡山大学准教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)

³学生会員 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)

Ice harbor type fishway has commonly installed in Japan because it is a hybrid type fish ladder which is comprised of weir and orifice. But under severe low discharge and bed degradation condition, only the orifice flow state exists. In this case, fish cannot migrate through the fishways. To operate fishway in such severe flow condition, we proposed to close part of the orifices and put triangular shape blocks on the weir. Function of fishway was investigated by using 3D flow simulation. Numerically obtained flow state in the fishway with ten series of ice harbor type fishway shows in good agreement with the experimental results. And the proposed method can maintain favorable fishway function under low discharge and bed degradation condition.

Key Words: fishway, ice harbor, low discharge, bed degradation, 3D flow analysis

1. はじめに

河川を横断して設置される堰では、魚類や甲殻類などの遡上降下を妨げることがないようにとの目的で近年多くの魚道が設置されるようになった。例えば、魚が上りやすい魚道事業などは、魚道の設置を後押ししてきた。設置されている主な魚道の形式としては、デニール型、バーチカルスロット型、プール型などであるが、プール型の改良である潜孔部の流れと越流が混在するアイスハーバー型の魚道が近年多く設置されている。この魚道の特徴は非越流部の背面に静穏域が形成されているので魚が休息できることである。しかし、写真-1 に示すように、魚道下流側の河床低下により魚道の機能が失われている箇所が見られる。また、今後、地球温暖化により極端気象が起こることが予測されており、これまで以上の渇水や豪雨の頻発が危惧されている。特にアイスハーバー型の魚道では、越流部を遡上する魚類も多くあるため、渇水時のような流量が少ない場合や下流側の河床が低下している場合には、潜孔部だけを流れる場合も生じるため魚道が本来有している機能が失われてしまう。具体的には、後出の図-6 の上側の写真に示すように流量が少なく、下流の河床低下により下流端水位が低下している場合には、魚類は河床付近の潜孔部のみを

写真-1 河床低下による魚道機能の喪失状況¹⁾

使って遡上する必要があるため遊泳力の小さい魚類や幼魚は遡上できなくなる可能性が高い。

以上のような背景を考慮して、本研究は、アイスハーバー型の魚道を取り上げ、渇水による流量の低下や魚道下流側の河床低下が発生した場合においても極端な魚道の機能低下を生じさせないような方策を数値解析による手法を用いて提案することを目的とする。

魚道内の流れを数値解析的に明らかにした研究としては、例えば著者ら^{2) 3)}は、鉛直 2 次元モデルを対象として VOF 法を用いてプールタイプの階段式魚道の数値解析を行い、魚道内の流れを再現できることを明らかにしている。また、浪平ら⁴⁾は、一般曲線座標系を用いて越流部に丸みを持たせたプールタイプ魚道の流況解析

図-1 実験水路

図-2 アイスハーバー型魚道詳細図，単位 mm)

表-1 解析条件

解析	Case	流量(l/s)	下流端水深(m)
検証	1-1	7.10	自由流出(0.03)
	1-3	7.10	0.241
	3-1	12.92	自由流出(0.04)
	3-3	13.08	0.238
改善	1-1-O	7.10	自由流出
	1-2-O	7.10	0.12
	1-2-OW	7.10	0.12
	3-2-OW	13.0	0.12

図-3 解析の初期水位条件

を行い解析の妥当性を示している。藤原ら⁵⁾は、VOF 法を用いて、越流部と潜孔部を有するアイスハーバー型魚道の三次元流況シミュレーションを行い、潜孔及び切り欠きが存在する主流域の速い流れと、水路中央付近の逆流が再現できることを示した。後藤ら⁶⁾は、15 枚の薄肉壁を有するデニール型魚道の流れを 3D-MPS 法を用いて解析し、平均流速分布を良好に再現できることを示した。これらの数値魚道の構築に関する基礎的研究により、魚道内の流れが数値解析的に得られるようになってきたが、プールタイプ魚道については、最大でも 5 程度のプール数を対象としたものである。

図-4 魚道流況の実験と解析の比較 (Case1-1)

図-5 魚道流況の実験と解析の比較 (Case1-1)

本研究では、FLOW-3D (Flow Science Japan 社) を用いた流況解析により、図-2 で示したアイスハーバー型魚道を 10 段設置した流れの再現性を検討すると共に、低流量、河床低下時の魚道の機能維持のための方策を検討する。

2. 解析モデルの検証

(1) 検証に用いた解析モデル

解析に用いたFLOW-3Dは、汎用3次元熱流体解析ソフトウェアで、特に自由表面を高速・高精度に解くことに優れている。本研究では、Kumarら⁷⁾が図-1及び図-2に示すアイスハーバー型魚道模型(太田川の西調子頭首工に設置されている魚道を実物モデルとして実物に対する縮尺1/5)を水路勾配1/10の水路に設置して実施した実験結果を対象として解析の検証を行う。図に示すアイスハーバー型魚道は潜孔2箇所、切り欠き2箇所の形式である。本研究では、Kumarら⁷⁾が実施した実験結果の内、表-1の検証欄に示す4ケースを取り上げて解析の妥当性を検討する。ケース番号はKumarらの実験に合わせた。Case1-1は、流量がかなり小さく、写真-1で示したように下流端の水位が低下して、越流しなくなり魚道機能が発揮されていない場合である。これは設計の際に想定された小流量をフルードの相似則で模型に換算した流量である⁷⁾。Case1-3は、下流端水位を高くして魚道機能が維持されている場合である。Case3-1、Case3-3は、流量が多い場合について下流端条件をCase1と同様に変えた場合である。解析では、図-3に示す10段の魚道を含む領域全体を1cm格子のメッシュで分割して、初期条件として図のように水を貯めた。乱流解析にはSmagorinskyモデ

図-6～図-9 の凡例 Pressure [N/m²]
0 1250 2500

図-6 魚道流況の実験と解析の比較 (Case1-1)

図-7 魚道流況の実験と解析の比較 (Case1-3)

図-8 魚道流況の実験と解析の比較 (Case3-1)

図-9 魚道流況の実験と解析の比較 (Case3-3)

右岸切り欠き部の縦断面流速分布 (右岸から 3.5cm)

底面付近の平面流速分布 (プール底面から 1.5cm)

水面付近の平面流速分布 (プール底面から 21.5cm)

魚道直下流の横断流速分布 (魚道下流面から 0.5cm)

図-10 5 段目の魚道プール内の流況 (Case1-3)

ルを用い、移流項には一次風上差分を用いた。水路側面がガラス、底面と魚道がアクリル板であることを考慮してマンニングの粗度係数 $n = 0.01$ として、マンニングストリクラーの式を用いて、相当粗度 $k_s = 0.00018 \text{ m}$ とした。解析時間は、ケースにより異なるが、流況が安定するまでの200秒から400秒とした。以下で述べる解析結果は計算終了時の瞬間値を示している。

(2) 解析モデルの妥当性の検証

図-4, 図-5 は、Case1 及び Case3 のプール中央の水面形の実測値と解析値を比較したものである。Case1-1 の流量が少ない場合には、魚道中段付近で解析値の方が実験値をやや下回るが、2 段目のプールから潜孔部のみの

図-11 断面改良部（赤色斜線部を付加，単位 mm）

図-12 片側の潜孔を閉じた場合の水面形の変化

流れとなり、流下するにつれてプール内の水位が低下する様子が再現できている。Case1-3, Case3-1 及び Case3-1 では、解析値は実験結果を良好に再現できている。図-6～図-9 は、実験と解析結果の流況を各ケースについて示したものであるが、これらの図からも解析による水面の状況は実験結果を良く再現できていることがわかる。

次に、図-10 は、解析結果得られた 5 段目のプール内の流速分布を示している。縦断図及び底面付近の図より、切り欠き部を越流した流れはプランジングフローとなり、また、潜孔流はそのまま下流の潜孔部へ向かう流れと下流側の魚道の非越流部である U 字部分に向かう流れに分かれることがわかる。水面付近の図（水面付近の乱れは落水水が空気を巻き込んだものである）からわかるように、U 字箇所では流れが上昇し、反時計回りの流れが生じる。魚道直下流の横断面流速より、切り欠き部では流れは下降し、中央部で上昇流となる 2 次流を発生することがわかる。これらの流速分布特性は、藤原ら⁵⁾が現地観測との比較で解析的に示した、アイスハーバー型魚道の流況をよく再現できていると考えられるため、本研究で採用した解析モデルは実験結果の再現性を有しているものと判断できる。

3. 魚道の機能改善の検討

(1) 魚道モデルの提案

本研究では、Case1-1 で示したように、下流水位が低下しても魚道機能が維持される構造を提案する。ただし、下流水深が Case1-1 まで低下してしまうと最下流の潜孔部も遡上できなくなる恐れがあるため、本研究では、下流端水深が Case1-3 の半分程度まで低下（模型での水深の低下量は 12cm で、実物換算 60cm 程度の下流端

図-13 魚道機能改善ケースの流況

における水位低下に相当)しても機能が維持されうること考えた。このような水位条件下では、上流から 5 段目の魚道から潜孔部のみの流れとなることが示されている⁷⁾。そこで、本研究では、両サイドにある潜孔部を片側だけ閉じることを提案する。その際、鬼束ら⁸⁾が遡上率の向上のためには交互潜孔よりも片側潜孔の方が適切であることを示していることを考慮して右岸側の潜孔を全て閉じることとした。さらに、低流量時に越流部の水深を確保するために、水平の越流部の横断方向に傾斜を持たせることで多様な越流水深を確保できるものと考えて、越流部に高さ 4cm の三角柱の構造物を設置した。図-11 は、これらの魚道の改善状況を示している。表-1 の改善欄には解析対象ケースを示している。ケース名の O は潜孔部(Orifice)を閉じた条件を示し、W は越流部(Weir)を改善したケースを示している。

(2) 潜孔部を閉じる効果の検討

図-12 は、Case1-1 で小流量時に潜孔部のみの流れとなることを考慮して、この条件で潜孔の片側を閉じた Case1-1-O の水面形を示している。図より、片側の潜孔を閉じることで、下流端が自由流出であっても 10 段目の魚道まで越流状態が確保できることがわかる。改善モデルケースとして下流端水位を 12cm とした Case1-2-O と、越流部に傾斜を持たせた Case1-2-OW も同様にすべてのプールで越流状態が維持される。図-13 は各ケース

図-14 縦断面流速分布(左岸から 5.5cm)

図-15 切欠部の越流水深の縦断分布
(左右岸の最大越流水深の平均値)

の流況を示しているが、この図からもすべてのプールで水位が上昇し、越流状態となることがわかる。図-14は6段目の魚道より下流側の左岸から5.5cmの断面流速分布を示している。流量が小さいCase1-2-OWの場合には改善後もプランジングフローが維持されるが、流量が大きいCase3-2-OWの場合には、Case3-3がプランジングフローであったのに対しストリーミングフローに変わる。鬼束ら⁹⁾はストリーミングフローの状況であっても魚類の遡上を確認しており、魚道機能は維持されることがえられる。

(3) 越流部の水深の検討

図-15は、Case1-2-Oと、Case1-2-OWについて、切り欠き部を越流する左右岸の最大水深の平均値の縦断分布を示している。10段目の魚道については、流量が少なく下流端水位が低下した状況では魚類は潜孔部を利用するため、9段目までの越流水深で検討する。図より、Case1-2-Oよりも、越流部に三角柱を設置して傾斜を持たせたCase1-2-OWの方が最大越流水深を約1cm程度大

きくすることができることがわかる。解析モデルが、1/5縮尺を想定した魚道であることを考慮すると、Case1-2-Oの場合もある程度の越流水深は確保できるが、越流部に傾斜を持たせる方が越流水深が大きくなるためより遡上しやすいと判断できる。

(4) 越流部、潜孔部の流速の検討

図-16は、Case1-2-O、Case1-2-OW、Case3-2-OWの9段目と10段目の魚道の潜孔部入口から2.5cm下流側の横断面における流速の大きさを示している。まず9段目の魚道の越流部についてみると、流量が小さい場合は越流流速は50cm/s程度であり、魚類は十分越流部を遡上可能と判断できる。流量が大きいCase3-2-OWでは越流流速が1m/s程度になる箇所もあるが、流速が数十cm/sの箇所もあるため、遡上可能と考えられる。潜孔部については、1.3m/s程度と流速が大きな箇所も見られるが、潜孔部の上側で数十cm/sの箇所もあるため遡上可能と判断できる。

次に10段目の魚道は、水位低下時に魚類は潜孔部を通過するため、ここでは潜孔部のみを検討する。10段目の潜孔部の流速は9段目の流速よりも大きくなる。また、越流部に傾斜を持たせるCase1-2-OWとCase3-2-OWの方が潜孔部の流速が大きくなる。潜孔部の上側に流速が1m/s程度の箇所があるが、断面流速は最大で2m/s程度まで達する。魚類の突進速度について、泉ら¹⁰⁾は、淡水魚の遊泳能力の定量的把握を目的として自然河川内で円筒パイプを用いて突進速度に関する遊泳実験を行い、魚種・体長ごとの突進速度及びその持続時間について検討し、イワナ、ウグイ、オイカワ、ヤマメの魚が最も速く通過した50cm区間の遊泳速度を測定したところ、体長の19倍程度の値であることを明らかにした。

図-16 潜孔出口横断面の流速分布
(潜孔入口から 2.5cm の断面)

また、鬼束¹¹⁾も、アユ、オイカワ、カワムツ、ギンブナの突進速度を計測し、一般論として言われている体長の 10 倍が成立せず、4 種とも、20 倍程度で、最大で体長の 30 倍程度以上という結果を得ている。これらの実験結果を参考にすると、体長が 5~6cm の幼魚であっても、1m/s 程度以上の突進速度を有していると考えられるため最下流端にある魚道の潜孔部の角であれば遡上可能であると推察できる。したがって、最下流端の潜孔部を遡上した魚類は、10 段目のプール内で休憩できる上、9 段目は越流部、潜孔部とも遡上可能であるため、提案した魚道の機能は維持できると考えられる。

4. 結論

本研究では、低流量、河床低下時におけるアイスハーバー型魚道の機能改善について 3 次元数値解析を用い

て検討した。以下に得られた主要な結論を示す。

- 1) 越流部と潜孔部を有するアイスハーバー型魚道の流況は、FLOW-3D による 3 次元解析により再現可能である。
- 2) 流量が少なく、河床低下により下流端水深が半分程度低下した場合においてもアイスハーバー型魚道の片側の潜孔部を閉じることでプール水深が確保でき、魚類が遡上可能となる。
- 3) 越流部に三角柱を設置して傾斜を持たせることで流量が少ない場合においても越流水深を確保できる。
- 4) 下流端の水位が低下すると最下流端の潜孔部の流速が大きくなるが、突進速度が体長の 20 倍程度とする研究成果を参考にすると、魚類は潜孔部を遡上可能であると考えられ、提案した魚道は低流量、水位低下時にも機能を維持できると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省:魚がのぼりやすい川づくりの手引き 第 3 章, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/kankyo/sakana_tebiki/pdf/shiryou3.pdf, p.69.
- 2) 前野詩朗, 尾上博則, 宮内洋介: VOF 法による階段式魚道の流れの数値解析, 土木学会水工学論文集, 第 45 巻, PP. 421-426, 2001.
- 3) 前野詩朗, 小川 信: プールタイプ魚道の流れの数値解析, 土木学会水工学論文集, 第 46 巻, pp.421-426, 2002.
- 4) 浪平篤, 後藤真宏: 階段式魚道における汎用的な流況予測のための数値解析手法, 応用力学論文集, Vol.9, pp.833-841, 2006.
- 5) 藤原正幸, 秋元麻衣, 泉 完: VOF 法を用いたアイスハーバー型魚道の三次元流況シミュレーション, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp.160-161, 2007.
- 6) 後藤仁志, 五十里洋行, 酒井哲郎, 望月貴文: 3D-MPS 法による数値魚道の構築に関する基礎的検討, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.853-858, 2006.
- 7) Kumar, G. S., Nago, H., Maeno, S. and Hoshina K. : Hydraulics of Ice Harbor Type Fishway, Proc. of International Symposium on Fishways in Gifu, '95, pp. 79-86, 1995.
- 8) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 松田孝一郎, 寺島大輔: 潜孔の設置位置がアユの遡上特性に及ぼす影響, 水工学論文集, No.55, pp.1429-1434, 2011.
- 9) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 森悠輔, 小林達也, 飯國洋平: 階段式魚道におけるプール間落差と遡上率の関係, 応用力学論文集, Vol.11, pp.677-688, 2008.
- 10) 泉完, 工藤明, 東信行, 矢田谷健一, 伊東竜太: 自然河川水を用いた淡水魚の突進速度に関する遊泳実験, 農業土木学会全国大会講演要旨集, pp.32-33, 2005.
- 11) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 山本晃義, 渡邊拓也, 脇健樹: 河川に生息する数魚種の突進速度に関する研究〜アユ, オイカワ, カワムツ, ギンブナを対象〜, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, pp.296-307, 2009.

(2014. 9. 30 受付)