

アイスハーバー型魚道における潜孔周辺の非定常流れ解析

Numerical study on unsteady flow features around an orifice of Ice Harbor type fishway

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 西岡雄太 (Yuta Nishioka)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 久加朋子 (Tomoko Kyuka)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 木村一郎 (Ichiro Kimura)
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

河川には治水等の目的で、ダムや堰、床止工などの多くの河川横断工作物が設置されている。しかし、魚類の遡上・降下という観点から見ると、河川横断工作物は魚類の自由な往来を妨げる障害となり得る。このような河川工作物が魚類に与える影響を緩和するため、全国各地の河川において魚道が設けられている。魚道は河川の勾配の緩和・段差の解消や流量の調節などを図ることにより魚類の遡上・降下を促す。魚道の形状は数メートル幅の矩形水路の中に隔壁を取り付けたものや斜面状の河床に粗石を配したものなど、その構造は様々である。その中の一種にアイスハーバー型魚道(図-1)がある。これは、河川の流向と平行に設けられた矩形水路内におおよそ一定の間隔で隔壁を設け、隔壁上部の片端および両端もしくは中央に切欠きを配し越流部とし、加えて下部の片端および両端もしくは中央に潜孔を配した魚道である。北海道内では、1級および2級河川に設置された魚道のうち、その27%がアイスハーバー型魚道である²⁾。

隔壁下部に潜孔を配したアイスハーバー型魚道は潜孔の無いタイプの魚道(階段式魚道)に比べて、隔壁を飛び越えるのが難しい非力な小型魚の遡上に有利である。また、隔壁の上下流の水位差が変化しても潜孔を通過する流量は一定であるという利点がある。すなわち、従来の階段式魚道よりも多くの魚種や河川状況において効果的な魚道であると考えられる。実際に、泉ら¹⁾によると、青森県の赤石第2頭首工のアイスハーバー型魚道では、アユやウグイの多くが隔壁下部の潜孔を利用して遡上することも報告されている。

しかし、このような独特の利点を持つアイスハーバー型魚道であるが、実際に稼働している中には、魚類の遡上に関してあまり効果を上げていないものもあるようである。この要因の一つとして、魚道プール内の流況をコントロールすることが難しいということが考えられる。アイスハーバー型魚道では、その構造上、切欠き・潜孔の2か所から流出が生じる。そのため隔壁間の魚道プール内において非常に複雑な流況が発生しやすく、時空間的に非定常な流れ場が形成されやすい。泉ら³⁾やその他幾らかの報告によると、魚類は魚道内にて、何らかの流れのタイミングを見計らって遡上する様子が報告されている。したがって、上述したアイスハーバー型魚道のメリットを活かすためには魚類の遡上に密接にかかわると考えられる魚道内の流況特性を正確に把握することが極めて重要だと考えられる。

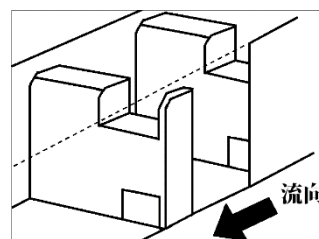


図-1 アイスハーバー型魚道の模式図

アイスハーバー型やその他の魚道における流況の実測および数値シミュレーションは、これまで数多く報告されている^{4),5)}。しかし、その大半は流況の再現性や時間的に平均化された流況を取り上げたものであり、魚道内の流れの非定常性に着目したものは非常に限られている。一般に、魚道のような水理構造物周辺の流れは自由表面の大規模変化が生じるため、現地調査や水路実験から流れの詳細を把握することは容易ではない。しかし、近年ではコンピュータの性能が向上し、数値解析的手法によって構造物周りの非定常三次元流れを予測することも可能となっている。

本研究では、アイスハーバー型魚道の非定常性を扱う方法として、三次元河川シミュレーションソフトウェア iRIC NaysCUBE を用い、格子サイズ、数値解析スキームおよび周期境界条件の境界位置が異なる場合について、非定常流れの再現性の違いを比較検討した。赤石第2頭首工のアイスハーバー型魚道をケーススタディーとするが、将来的には魚道内の流れと魚類の遡上行動の関係まで解明することを目的としている。

2. 数値解析法

本研究における数値解析モデルは iRIC, NaysCUBE v3.20.1 である。数値解析法の詳細については文献⁶⁾を参照されたい。

(1) 計算条件

数値解析にて対象としたモデル魚道は、現地測量結果の存在する、青森県の赤石第2頭首工のアイスハーバー型魚道である。次に述べる数値解析で用いた魚道寸法や水理条件等は、泉ら¹⁾を参考とした。

数値解析の解析領域は、全長 6.0m、全幅 2.6m、勾配 0.05 の水路とした。水路内には、隔壁を2枚設置するものとし、隔壁間距離を 2.7m に固定した。水路上下流に

は主流方向に周期境界条件を与え、境界位置をプール中央と魚道隔壁部の2種類設定した。水路下流端の水深は、いずれのケースも下流端水深0.74mとした。

解析に用いた水理条件を表-1に示す。流量は泉ら¹⁾を参考に0.568 m³/sを与え、定常流れとした。水路底面と側壁には、マニング粗度係数をそれぞれ0.02, 0.01として与えた。乱流モデルには、非定常現象を扱うため、URANS(Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes)計算に適した二次非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いた。

表-1 解析の水理条件

項目	値
魚道水路全長(m)	6.0
水路幅(m)	2.6
水路勾配	0.050
流量(m ³ /s)	0.568
下流端水深(m)	0.740
マニング粗度(m ^{-1/3} s)	0.020

(2) 計算条件

格子サイズ、数値解析スキーム、周期境界の位置の異なる6ケースについて数値解析を行い、潜孔から生じる流れの非定常性を比較した。

計算ケースを表-2に示す。Case1-Case3は移流項の空間差分スキームとして一次風上スキーム法を用い、格子サイズが異なる場合の潜孔からの流れの結果を比較するものである。各ケースの格子サイズは各々10cm, 7.5cm, 5cm 正方形格子とし、水路上下流端の周期境界はいずれのケースも魚道プールの中央に設定した(図-2 a)。一方、Case4は、Case3と同じ格子サイズのもと、水路上下流端の周期境界のみ魚道隔壁部(図-2 b)に設定し、周期境界の場所の決め方が計算結果に及ぼす影響を比較するものである。Case5は、Case3と同じ格子サイズのもと、移流項の空間差分スキームをQUICK法に変更することで、潜孔からの流れの非定常性の違いを比較するものである。Case6は、Case5と同じQUICK法を用いたうえで、水路上下流端の周期境界のみ魚道プールの中央に設定したものである。

表2. 解析ケース

計算ケース	格子サイズ (cm)	数値解析 スキーム	周期境界
1	10	一次風上	魚道中央
2	7.5	一次風上	魚道中央
3	5	一次風上	魚道中央
4	5	一次風上	隔壁
5	5	QUICK	魚道中央
6	5	QUICK	隔壁

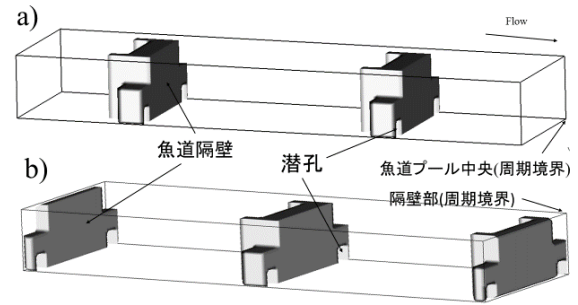


図-2 数値解析を行う水路の概略図

3. 計算結果と考察

(1) 1次風上スキームを用いた場合の比較法

Case1～Case3における右岸潜孔中央部の流速の大きさの時間的変化に関する計算結果を図-3に示す。

泉ら¹⁾によると、潜孔中央部での現地測定流速は240-280cm/sの範囲である。図-3によると、Case1-Case3では、いずれも最大流速は現地測定流速よりも小さく、計算が進むにつれて、流れの非定常性が減衰し、魚道内の流れ場は時空間的に定常流れとなることが分かる。これはCase1-Case3では一次風上スキームを用いて計算したため、数値粘性が大きく、流速変動が過度に平滑化され、非定常流れを再現できなかったと考えられる。なお、計算初期($t=0-30\text{sec}$)に現れる流速の大きな変動は、初期条件からの流況の擦り付けに起因すると考えられ、実現象とは分けて考える必要がある。

その他、Case1(図-3 a)では、Case2(図-3 a)およびCase3(図-3 a)に比べて最大流速が小さくなっている。

これはCase1では格子サイズが大きく、潜孔部の横断・鉛直方向格子がそれぞれ3セルしか存在しないことから、空間的解像度の不足により流速の再現性がその他ケースに比べてより低くなるものと考えられる。しかしながら、Case3では格子サイズがCase2よりも小さいにも関わらず、潜孔通過流速はCase2よりも小さくなっている。このため、格子サイズと通過流速の関係は単純ではなく、さらに検討が必要といえる。

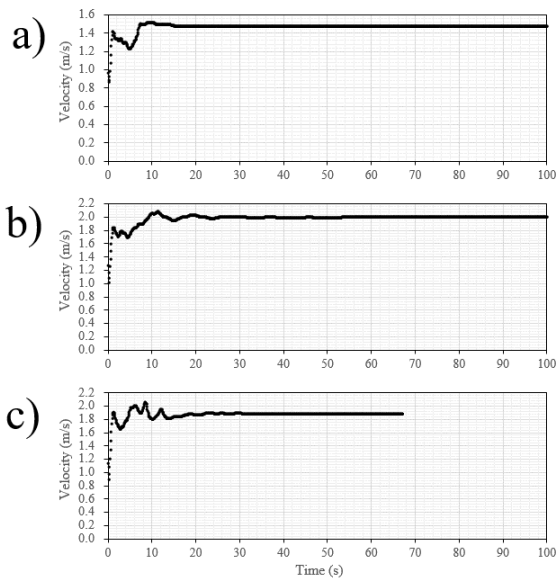


図-3 潜孔中央部流速. a) Case 1, b) Case 2, c) Case 3

次に、周期境界の境界位置の異なる Case4 における、潜孔中央部流速の時間的変化の計算結果を図-4 に示す。Case3 と Case4 を比較すると、Case4 では 15 秒以降に一定周期の非定常な流速の変化が見られる。Case3,4 では、いずれも魚道の二個分のプールを計算領域に組み入れ、周期境界条件を課している。このため、上下流端の水位や流速分布等は等しく置かれる。上下流端の境界が流れの自由度の大きいプール中央に置かれた Case3 では、流れの自由度の小さい隔壁部を境界とする Case4 に比べて流速変動の拘束が大きいと考えられる。このため、Case4 のみで流体振動が再現されたと推定される。

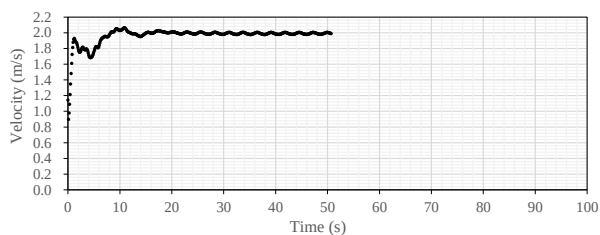


図-4 Case4 における潜孔中央部流速

(2) QUICK 法スキームを用いた場合

数値解析スキームとして QUICK 法を用いた Case5 および Case6 の潜孔中央部流速の時間的変化の計算結果を図-5 に示す。また図-6 には、Case6 における異なる時間の xy 平面流速分布($z=0.15\text{m}$)を示す。図-7 には、これに流線を加え、異なる視点から見たものを示す。図-5 および図-3 より、Case3 と Case5 を比較すると、Case5 では Case3 よりも最大流速が大きく、図-6 から潜孔から流出する流れは現地測定値の $240\text{--}280\text{cm/s}$ に近い値を再現できたことが分かる。さらに、潜孔からの流れの時間的な非定常性も再現されている。これは、Case5 では一次風上スキーム法よりも精度の高い移流項の空間差分スキ

ームである QUICK を用いたために、計算の再現性が向上したものと考えられる。

次に、図 5 より周期境界の位置のみ異なる Case5 および Case6 を比較する。図 5 より、一次風上差分の場合と異なり、QUICK 法を用いた場合は水路上下端による周期境界の位置による流れ場への影響はほとんど認められない。これは、QUICK スキームは数値粘性が無いため 1 次風上法に比べて流体振動を再現しやすく、たとえ自由度の大きいプール中央を境界とした場合にも、流体振動が再現されたと推測される。

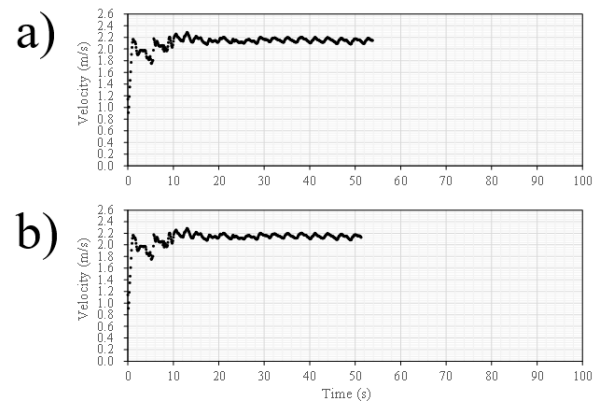


図-5 潜孔中央部流速, a) Case 5, b) Case 6

4. 結論

本研究では、アイスハーバー式魚道の潜孔における非定常な流れについて、数値計算に用いる移流項の空間差分スキーム、格子の大きさや周期境界の位置の種類による結果の相違を比較することで考察した。その結論と課題を以下にまとめる。

- 1) 数値解析時に用いる計算格子に関して、粗すぎる計算格子は潜孔通過流速を過小評価することが示された。
- 2) 数値解析スキームに関して、一次風上スキームよりも QUICK スキームを用いたときのほうが、流速を実測値に近づけることができた。また、QUICK スキームを用いた場合、潜孔付近の流速が一定周期で非定常に変化する様子を示した。
- 3) アイスハーバー型魚道の流況再現の数値解析を周期境界条件を課して行う場合、境界を魚道プール中央部に設定したときは、隔壁上に設定したときに比べても潜孔付近の流体振動が抑制されることが示された。

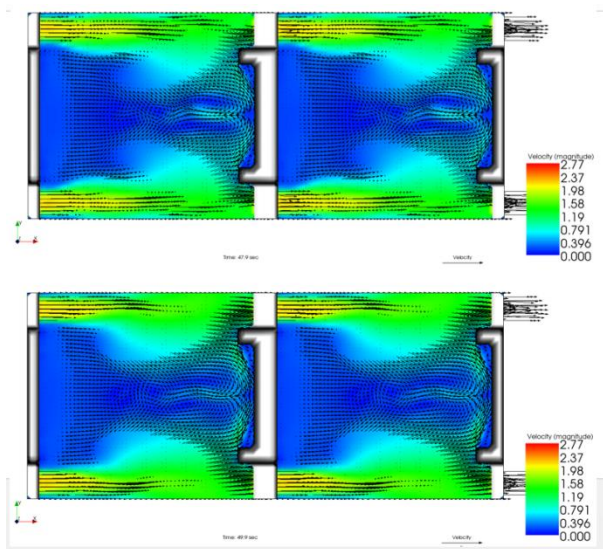


図-6 $z=0.15\text{m}$ 面の流速分布
(上 : 47.9s, 下 : 49.9s)

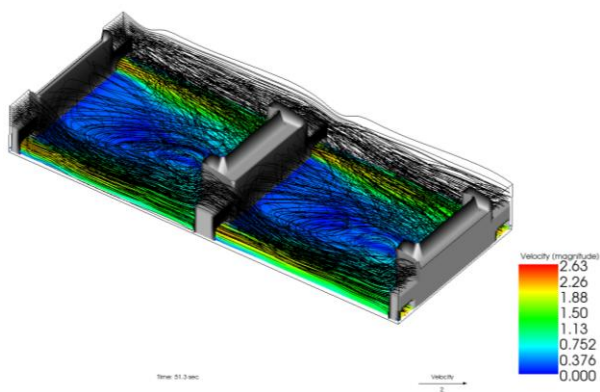


図-7 $z=0.15\text{m}$ 面の流速分布と魚道内の三次元の流線
($t=51.3\text{s}$)

5. 参考文献

- 1) 泉完 : 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, pp.637-646, 2001
- 2) 寒地土木研究所 : 北海道の魚道のデータベースの作成について, 2013
- 3) 泉完 : 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, pp.127-135, 2010
- 4) 前野詩朗 : 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, 土木学会論文集, pp.1081-1086, 2015
- 5) 藤原正幸 : 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, 水工学論文集, pp.421-426, 2007
- 6) 木村一郎 : NaysCUBE Solver Manual, iRIC Project.