VOF 法による魚道の流れの３次元解析

岡山大学環境学研究科博士前期課程　学生会員　○玉川勝也
岡山大学環境学研究科　正会員　　前野詩朗

１．はじめに

河川は，多様な生態系を形成する貴重な空間であり，日本の四季あふれる豊かな自然環境形成に大きな役割を果たしてきた．その一方，我が国でたびたび発生する洪水氾濫に対処するため，河川に水理構造物を構築することによって流れを制御する河川整備が進められてきた．しかし，ダムや堰等の設置による河川の連続性の阻害は河川を遡上，降下する魚の生活に大きな影響を与えた．このような状況の中，魚道は魚類の移動への障害を軽減する手段として重要な水理構造物となっている．H18 年に「多自然川づくり」の基本指針が発表され，河川全体の自然の営みを視野に入れた川づくりが求められる中で，現在の魚道の役割も多様化し，より自然環境に適合した形が求められている．そのためには，あらかじめ魚道設置後の流況を知ることが不可欠である．

このような背景で，自由表面を有する複雑な流れを数値解析で得るために数多くの手法が提案されているが，その中でもVOF法[1),2),3)]と呼ばれる手法が自由表面を最も精度良く再現できるとされる．そこで，本研究では，魚道をはじめとする水理構造物周辺の自由表面を有する複雑な流れを 3 次元的に解析するための基礎として，階段式のプールタイプ魚道と横断方向にも形状の変化のあるアイスハーバー型魚道を対象として3次元VOF法による数値解析を行い，適応性の検討を行った．

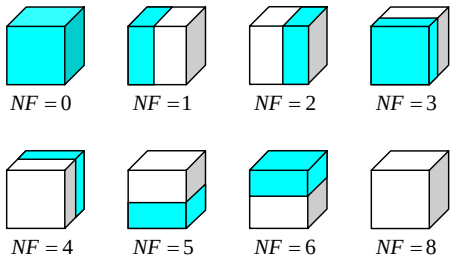


図-2.1　フラグ NF によるセルの分類

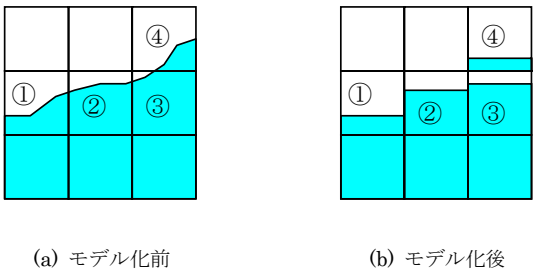


図-2.2　VOF 法による自由表面のモデル化

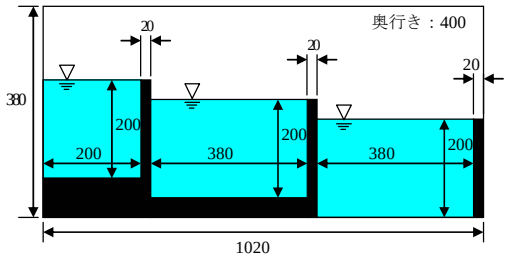


図-3.1　解析対象モデル（単位: mm）

２．VOF 法の概要

VOF 法は，解析空間を離散化したときに得られる差分セルに含まれる流体の存在体積比率を VOF 関数 F として表し，この VOF 関数 F を用いて自由表面の形状を表現する手法である．ここで，F は次のように定義される．

$F = 0$　　：流体が存在しない気体セル

$0 < F < 1$　：セルが自由表面に接している表面セル

$F = 1$　　：流体で満たされている流体セル

また，図-2.1 に示すように，離散化された各計算セル内の F の不均一さを示すパラメータとして表面の向きを示すフラグ NF を定義する．このフラグがあることが VOF 法の特徴ともなっており，VOF 関数 F の移流方程式を計算する際に重要になっている．このモデル化により，差分格子のデカルト座標においても自由表面の形状を近似することが可能である．

VOF 法では，簡易的に 2 次元で表した図-2.2(a)のような自由表面形状を図-2.2(b)に示すように，四方に隣接するセルの内，最も多くの流体を含む方向にセル内の流体を存在させるようにモデル化する．図-2.2 のセル①，②は，下方向に最も多くの流体を含むセルである．セル③のよ

うに，最も多くの流体を含む方向が複数あるような場合には周囲のセルの F 値を用いての水面の勾配を考慮して決める．セル④のように宙に浮いたようなセルも存在する．

３．階段式プールタイプ魚道の流況解析

3.1 解析条件

図-3.1 に階段式プールタイプ魚道を模擬した解析対象モデルを示す．上流端の流入流量が 4.177(l/s)，6.968(l/s)である 2 つケースの解析を行った．下流端は自由流出であり，底面，側面，堰は相当粗度：1.2×10^{-4} (m) を与え完全粗面として解析を行った．

3.2 解析結果

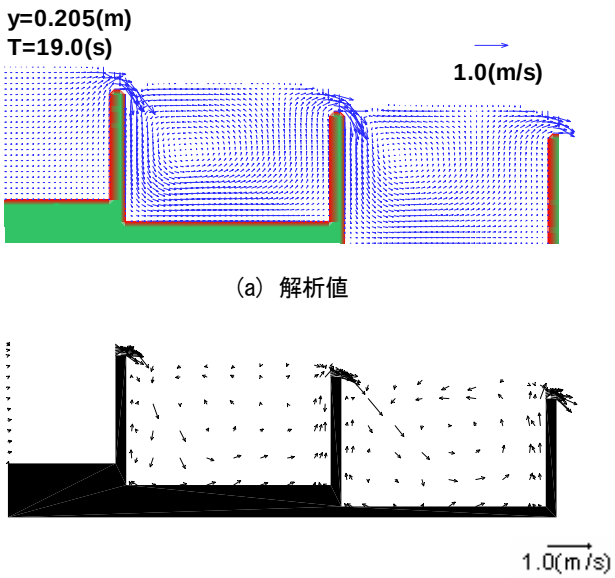
3.2.1 流速分布

図-3.2 は流入流量が 4.177(l/s)で，流れが定常状態に達していると考えられる経過時間 T=19.0(s)の時点の解析値と実験値のプール中央における縦断流速分布図である．この図より，解析結果，実験結果のいずれも潜り流れの状況となっており，全体的な流れは解析によって再現できていることがわかる．しかし，潜り流れの部分における流速の解析値は実験値よりもやや小さく，プール内の渦が明確に再現できていないことがわかる．これは，堰上の流れが次のプールに落下する部分の鉛直下方向の流速が大きくなっており，その方向に流れが引っ張られるため，実験結果のような潜り流れを再現することができなかったと考えられる．

3.2.2 水面形

図-3.3 は定常状態における時点での解析値と実験値の水面形を比較したものである．この図より，水が堰を越え，次のプールに移る場所での水面形はいずれの流量の場合も解析値と実験値はほぼ一致していることがわかる．しかし，解析結果では，いずれの流量においても落下後の各プール内の水深が実験値より高くなっている．これは，縦断流速分布の結果からもわかるように，堰上の流速が解析と実験でほぼ一致しているのに対し，各プール内の流速の解析値が実験値よりも小さくなっているためであると考えられる．また，流入流量が 6.968(l/s)のケースにおいても同様の傾向が得られた．

これらの結果より，今後は，乱流モデルを非線形な取



(a) 解析値

(b) 実験値

図-3.2 縦断流速分布図 (Q=4.177(l/s))

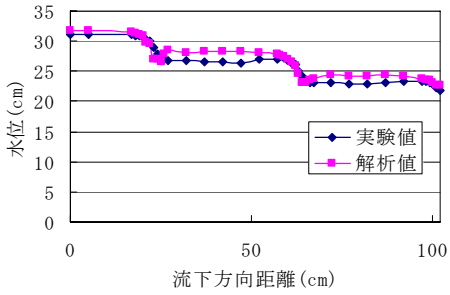
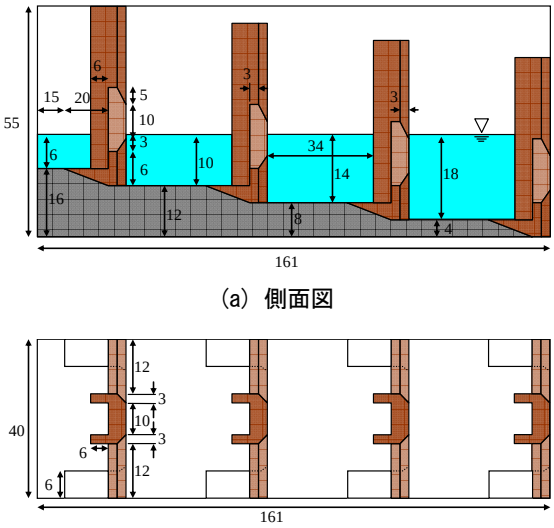


図-3.3 水面形比較図 (Q=4.177(l/s))



(a) 側面図

(b) 平面図

図-4.1 解析対象モデル(単位：cm)

表-4.1　解析条件

	流入流量(l/s)	下流端潜孔幅(cm)
Run-I-1	7.46	6.0
Run-I-2	10.02	6.0

扱いにするなどして，落下流部分の流速の再現性を高めるための検討をする必要がある．また，連続したプールの中流部の流況を計算する場合には，周期境界条件を取り入れるなどして，下流端の自由流出の影響を受けないようにする必要があると考える．

４．アイスハーバー型魚道の流況解析

4.1 解析条件

図-4.1 は，アイスハーバー型魚道を模擬した解析対象モデルを示している．流入流量に関する解析条件を**表-4.1** に示す．なお，初期状態では，下流端は自由流出ではなく閉め切った状態としており，約 2.5 秒経過後に自由流出とした．魚道模型の相当粗度は8.0×10^{-4}(m)，底面，側面は1.2×10^{-4}(m) とした．

4.2 解析結果

4.2.1 平面流速分布

図-4.2 は，Run-I-2 における定常状態に達していると考えられる計算開始後 18.0 秒経過した時点の底面から 29.5(cm)の断面の平面流速分布図である．

この図から，平面流速分布においても堰の上を越流し，次のプールに落下する複雑な流況を呈する場所においても良好に流況を再現できているといえる．

4.2.2 縦断流速分布

図-4.3 は Run-I-1 における右岸から 1.5(cm)の魚道全体の縦断流速分布を経過時間毎に表した図であり，18.0(s)の時点では定常状態に達していると考えられる．この図より，堰の上の越流が始まった直後の時点までは潜孔流が中心であるが，その後潜孔部の流速は小さくなり魚道全体の流れの中心は越流に移り，定常状態に達することがわかる．この流速分布図より，解析結果は越流と潜孔流の分岐の様子，また落下流の流況を良好に再現しているといえる．

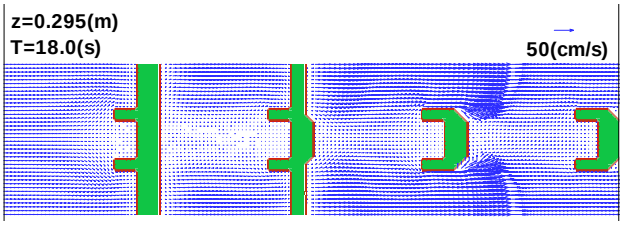
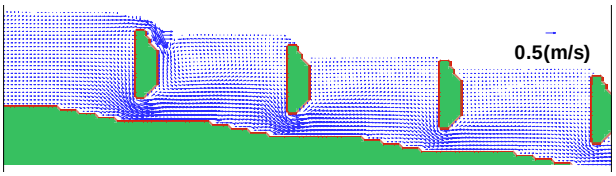
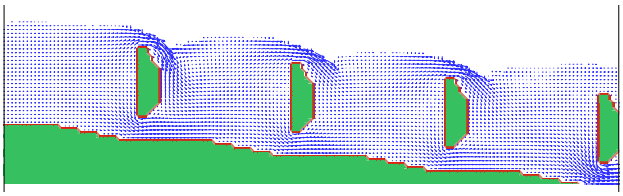


図-4.2　横断流速分布図（Run-I-2）

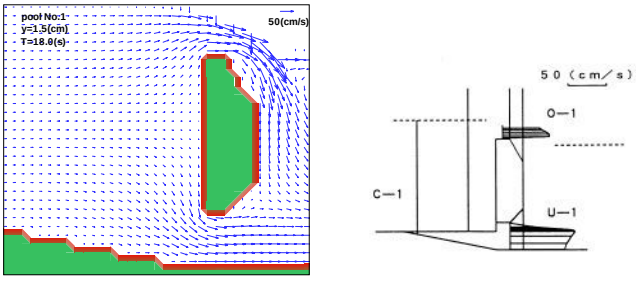


(a) T=8.0 s



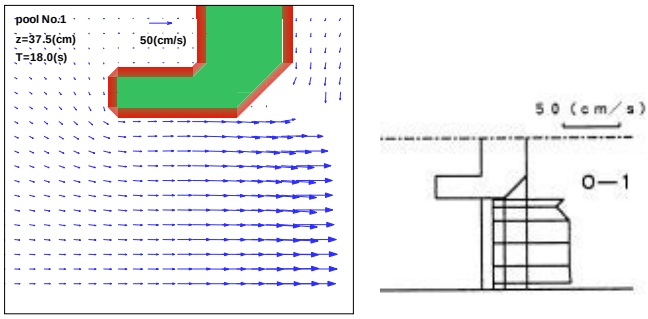
(b) T=18.0 s

図-4.3　縦断流速分布図（Run-I-1，右岸より 1.5cm）



解析結果　　実験結果

図-4.4　縦断流速分布比較図（右岸から 1.5cm）



解析結果　　実験結果

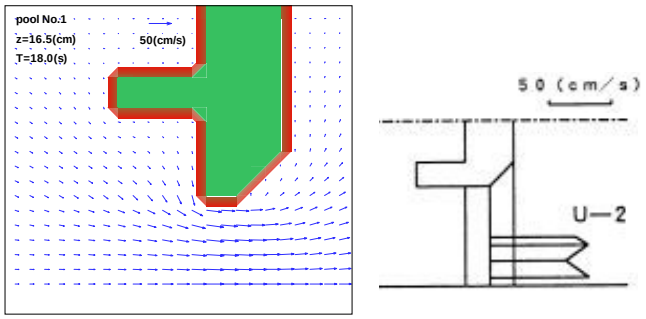
図-4.5　越流部の平面流速分布比較図（堰より 1.5cm 上部）

4.2.3 越流部，潜孔部流速分布

図-4.4～図-4.6 は，それぞれ Run-I-1 における右岸のプール No.1 周辺の縦断流速分布，平面流速分布を解析結果と実験結果で比較した図である．これらの流速分布図の結果より，解析結果は実験結果の堰の近くでは越流，潜孔流の流下方向の流速が小さくなるという傾向を再現していて，流速分布の示す特性は実験値とほぼ一致しているといえる．しかし，解析結果の潜孔部の流速は実験値に比べてやや小さいことがわかる．これは 4.2.2 の結果のより，時間が経過し越流が始まると潜孔部の流速が小さくなり，越流部の流量が大きくなることが主な原因であると考えられるが，プールタイプ魚道の結果でもあったように越流部からの潜り流れの流速が小さく，次のプールの潜孔部にその流れが伝わっていないことも影響したと考えられる．この連鎖により，下流のプールの潜孔部の流速も小さくなっていると考えられる．

4.2.4 水面形

図-4.7 は Run-I-1 における各プールの水面形について解析結果と実験結果を比較した図である．これらの図から，解析結果の水深が実験結果より少し高くなっていることがわかる．これは，階段式プールタイプ魚道の解析結果と同様であり，また，その原因も同様に越流部から次のプールに潜る流れがうまく再現されず，流速が遅くなったためであると考えられる．



解析結果　　実験結果

図-4.6　潜孔部の平面流速分布比較図（底より 4.5cm 上部）

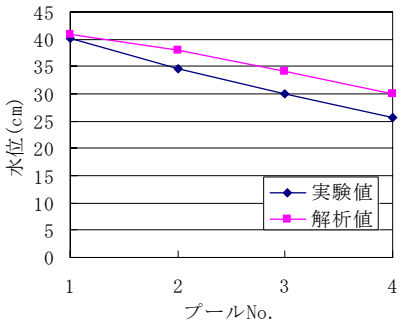


図-4.7　水面形比較図（Run-I-1）

５．結論

本研究では，自由表面を含む複雑な流れを 3 次元的に精度良く解析可能な数値モデルを構築することを目的として階段式プールタイプ魚道とアイスハーバー型魚道を対象として解析モデルの検討を行った．

その結果，明らかにされた事項及び今後の検討課題を以下に示す．

(1) 2 次元での解析手法では困難であったアイスハーバー型魚道のような横断方向に形状の変化のあるモデルに対して，本解析法を適用することにより 3 次元的な流況をある程度再現できる．

(2) 本解析手法により水理構造物周辺の流速分布をある程度再現可能である．流速の大きさなどの再現性を高めるため，今後は非線形乱流モデルを導入するなどの検討が必要である．

(3) 下流端の自由流出条件が上流側の流況に影響するため，中流部の計算には周期境界条件を取り入れるなどして，自由流出の影響を排除する必要がある．

(4) 今後は，より自由表面を精度良く流況を再現するために，特に自由表面付近の VOF 関数 F，流速，乱流エネルギー k，乱流エネルギー拡散率 ε の取り扱いについて検討する必要がある．

参考文献

1) 富士総合研究所：汎用流体解析システム - FUJI-RIC/α-FLOW -，丸善，1993.

2) 前野詩朗，尾上博則，宮内祥介：VOF 法による階段式魚道の流れの数値解析，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，水工学論文集第 46 巻，pp.421-426，2002.