

プールタイプ魚道の流れの数値解析

FLOW ANALYSIS IN A POOL AND WEIR TYPE FISHWAY

前野 詩朗¹・小川 信²
Shiro MAENO and Shin OGAWA

¹正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

²学生員 岡山大学大学院 自然科学研究科環境システム学専攻 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

This paper presents 2-dimensional flow characteristics in a pool type fishway by using the VOF method. The fishway with 5 pools is treated as an object of the study. Considering the flow pattern of a pool type fishway, the analytical region is divided into 3 parts, which are the upstream part, the middle part and the downstream part of the fishway. As a result, the proposed method is able to reproduce the flow in the pool type fishway with many pools. And it is also clarified that the down stream water level condition plays a very important roll to design the pool type fishway.

Key Words : pool type fishway, VOF method, QUICK method, $k-\varepsilon$ turbulence model

1. はじめに

魚類等の生態系を保護する目的で、堰等の河川を横断する水理構造物の付帯施設として魚道が設置されている。魚道の設置に際しては、あらかじめ設置後の流況を十分把握した上で、より魚類が遡上・降下し易い構造を採用する必要がある。しかし、魚道の流れは自由表面を含む大変複雑な流況を呈するため、流れの詳細を把握することは簡単なことではない。従来より、このような水理構造物を設計する際には、縮尺模型を用いた実験が行われてきた。水理模型実験は実際の流況を比較的忠実に再現することが可能であるが、構造条件や境界条件等の変更に対応する時間や費用を要することや、測定上の問題点などから水理構造物を設計する際に必要となる情報を水理実験からのみ得ることには限界がある。

このような背景を考慮して、前野ら¹⁾は、自由表面を含むプールタイプ魚道の流れをVOF法^{2),3),4)}と呼ばれる手法を用いてプール内流況の数値解析を行い、実験結果との比較により解析法の妥当性を検討した結果、上流端から連続した二つのプール内の流況が数値解析可能であることを示している。この研究により、プールタイプ魚道の流況はある程度数値解析的に予測可能になったものと言えよう。しかし、実際の魚道は多くのプールが連結されており、すべてのプールを対象として数値解析的に流況を得

ようとする、大変多くの計算時間とメモリーが必要となり、実用的でない。このような場合にはマルチブロック並列計算法を用いることも考えられるが、プールが数多く連結されている場合には全てのプールについて解析する必要がある。そこで、本研究では、上流端近傍のプール、中流部プールおよび下流端部プールの3つの部分に分け、中流部を1つのプールで代表させることにより複数のプールが連結された魚道全体の流況を得る方法を提案する。また、この解析法を用いて下流端水位の条件の違いによる流況の変化についても検討する。

2. 数値解析法の概要

(1) 基礎式

本研究で用いた2次元非圧縮性流体の基礎式^{6),7)}は、運動方程式、連続式およびVOF関数 F の移流方程式である。また、乱流モデルとしては標準型 $k-\varepsilon$ モデルを採用した^{1),6),7),8)}。

《運動方程式》

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g_x + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (1)$$

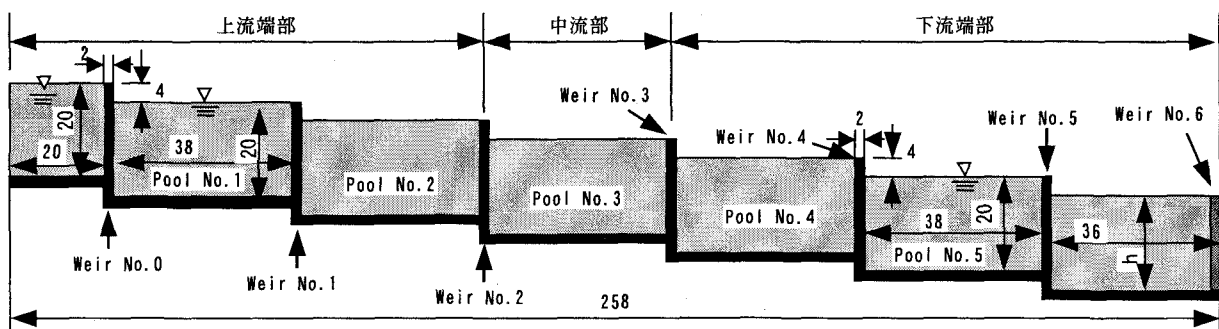


図-1 解析対象モデル (単位: cm)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + g_y + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

《連続式》

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

《VOF関数 F の移流方程式》

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

《 k -方程式》

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_k \left[\frac{\partial k}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_k \left[\frac{\partial k}{\partial y} \right] \right) + G_s - \varepsilon \quad (5)$$

《 ε -方程式》

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_\varepsilon \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_\varepsilon \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_s - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$\nu_t = C_\mu (k^2 / \varepsilon)$, $\nu_k = \nu_m + \nu_t / \sigma_k$, $\nu_\varepsilon = \nu_m + \nu_t / \sigma_\varepsilon$
 $G_s = \nu_t \{ 2(\partial u / \partial x)^2 + 2(\partial v / \partial y)^2 + (\partial v / \partial x + \partial u / \partial y)^2 \}$
 ここに, x, y : 水平, 垂直座標, u, v : x, y 方向の流速成分, g_x, g_y : 物体力, $\nu = \nu_m + \nu_t$: 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和, ρ : 流体密度, $P = p + 2\rho k / 3$, F : VOF関数, k : 乱流エネルギー, ε : 乱流エネルギー散逸率である. なお, 乱流モデル中の定数は磯部ら^{5),6)}の研究を参考にして以下のような値を採用した.

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.00, \sigma_\varepsilon = 1.30,$$

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$$

数値解析法としては, 圧力 p およびVOF関数 F などのスカラー量をセルの中央で, 流速ベクトルをセル界面で定義するスタッガード格子による有限差分法を用いている. 粘性項には二次中央差分^{9),10),11)}を用いている. 移流項の計算にはQUICK法^{2),12),13)}を用いた. VOF関数 F の移流方程式には, セル境界面からの流出入量をセルの種類や向きなどを考慮して決定するドナー・アクセプタ法^{2),10),13)}と呼ばれる移流方

法を用いている. 具体的なVOF関数 F の取り扱い方法ならびに自由表面セルの流速や圧力の取り扱い方法については前野らの研究に¹⁾詳細が示されているのでここでは省略する.

(2) 解析対象モデルおよび解析方法

図-1はプールタイプ魚道をモデル化したものである. 本研究では図に示す連続した5つのプールを有する魚道内の流況の数値解析を試みる. 下流端には水位調節用の堰No.6を設置している. このように幾つかのプールが接続されている魚道全体を一度に解析しようとする, 計算時間が多く必要とされるのみならず, 計算メモリーの面でかなりの制約を受ける. とくに, 本研究では各時刻で圧力のポアソン方程式を満足するように繰り返し計算を行っているため, 多くのプールが連続する領域を対象とすると計算領域が大きくなり, それに伴って計算時間も非常に多く必要とされるようになるため実用的でなくなる. Kumar et al.¹⁴⁾ や Maeno et al.¹⁵⁾ の研究によると, このように同一形状のプールが連続した魚道では, 上流端付近のプール内では上流端の影響が現れるため流下するにつれてプール内の流況が変化するが, 上流端から3つ目程度以降のプール内の流況はほぼ定常になることが示されている. また, 下流端付近では下流端水位の影響を受けてプール内の流況が変化的ことが指摘されている. そこで, 本研究では, 図-1に示すように領域を3つに分け, 複数個の中流部のプールが存在する場合にも一つのプールで代表させて解析することにより全体の流況を効率よく再現することを試みる. 以下にその概要を述べる.

(a) 上流端部分の計算法

本研究では, 上流端部分のプール内流況の遷移区間として, プールNo.1とNo.2を考える. 解析領域は図-1中の上流端から堰No.2までの間とする. 上流端では一様な流速分布を与えている. 下流端は自由流出としている. プール内の流況がほぼ定常状態となった時の堰No.2の断面における解析メッシュ点の流速, 並びにVOF関数 F を中流部分の解析のために用いる. この上流端部分の解析結果の妥当性は前野らの研究により確かめられている.

表-1 計算条件

Run	流量 $Q(l/s)$	下流端の堰高 $h(cm)$
Run1-a	4.18	17
Run1-b	"	20
Run1-c	"	23
Run1-d	"	26
Run2-a	6.97	17
Run2-b	"	20
Run2-c	"	23
Run2-d	"	26

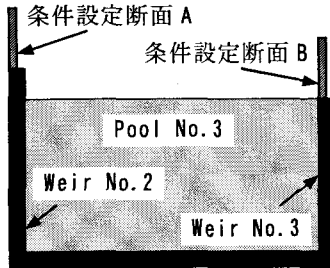


図-2 中流部分の計算法の説明図

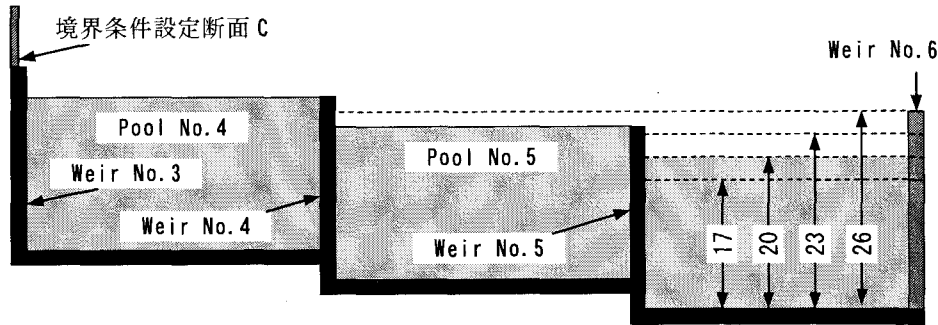


図-3 下流端部分の計算法の説明図（単位：cm）

(b) 中流部分の計算法

本研究では中流部分のプールをNo.3の一つのみ設置したが、前にも述べたように、さらに多くのプールが連続して設置されているような場合には、中流部分ではプール内の流況が流下方向に変化することが殆どないものと考えられることから、周期境界を適用して解析することにする。したがって、中流部分の解析領域は図-2に示すような領域を対象とする。まず、上流端部分の解析により得られる堰No.2の断面の水理量（流速およびVOF関数 F ）を境界条件として図-2に示している断面Aの部分のメッシュ点に与えて計算を開始する。プール内の流況がある程度定常状態になった後、断面Bに上流端部分の解析の結果得られた水理量を与え、その後はプールの下流側の堰No.3と上流端の堰No.2において流速およびVOF関数 F を周期境界条件として与え、圧力はSMAC法により領域内でその都度収束させて計算を進めた。本研究では中流部分のプールが一つ存在する場合を対象としているが、このようにプールの上流端と下流端が周期境界となるように取り扱うことにより、中流部分のプールがさらに多く存在する場合にも1つのプールを解析するだけで良くなり、計算時間を大幅に短縮することができる。

(c) 下流端部分の計算法

下流端部分は図-3で示すように、下流端部分の二つのプールNo.4とNo.5を対象として解析を行った。流入境界条件は中流部分の計算の場合と同様に図中の断面Cのメッシュ点に中流部分の計算の結果得られる堰No.3の断面流速およびVOF関数 F （実際には

中流部のプール内では周期境界として解析しているので堰No.2の断面の条件と同じである）を与えた。最下流端には、下流端水位の違いによる流況を検討するために水位調節用の堰No.6を設けている。

(3) 計算条件

表-1は計算条件を示している。対象流量はプール内において落下流が発生する場合と表面流が発生するような二つの流量条件を与えた。また、下流端に設置している水位調節用の堰No.6の堰高 h を17cm～26cmの範囲で変化させた。 $h=20cm$ は上流側のプール間の水位差と同じにした場合である。 $h=17cm$ はプール間の水位差をやや大きくした場合である。 $h=23cm$ はプールNo.5の水位よりやや小さくした場合であり、 $h=26cm$ はプールNo.5の水位より大きくした場合である。

堰上では完全越流の状況となり下流の影響は上流に伝わらないと考えられるため、全体の計算の流れとしては上流端部から中流部、下流端部と順次計算を進めることとした。上流端部分の計算は堰No.2の断面における流量が安定する15秒間計算を行った。中流部分の計算は15秒間上流端において境界条件を与え、その後周期解として5秒間計算を進めた。下流端部分の計算は全体の流況が安定する20秒間計算を行った。

メッシュ間隔は1cmとした。初期条件は図-1に示すように、水を満たした状態で解析領域全体の流速を0(m/s)とした。

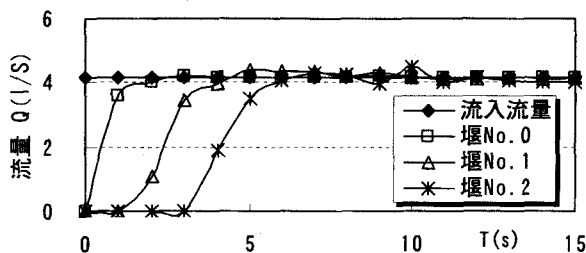


図-4 堰位置の断面流量の変化 Run1, $Q=4.18(l/s)$

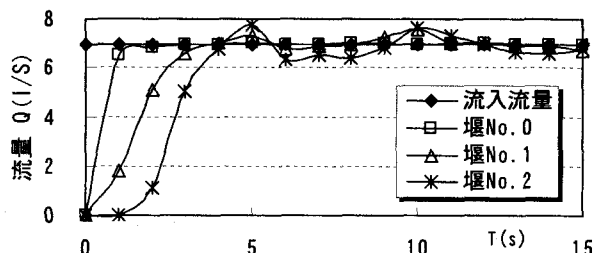
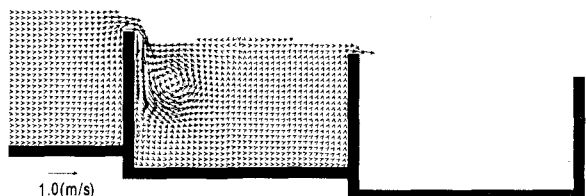
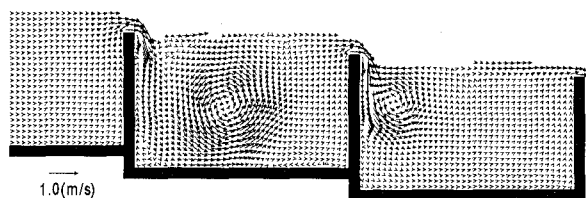


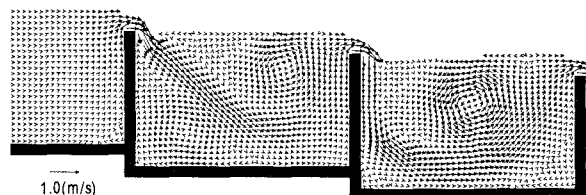
図-5 堰位置の断面流量の変化 Run2, $Q=6.97(l/s)$



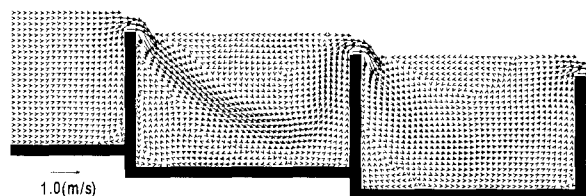
(a) $t=2$ 秒



(b) $t=4$ 秒

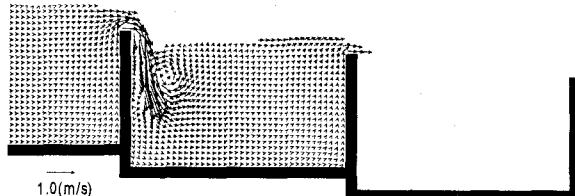


(c) $t=9$ 秒

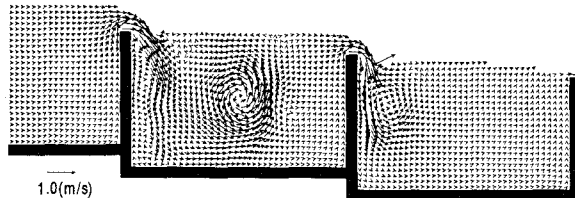


(d) $t=15$ 秒

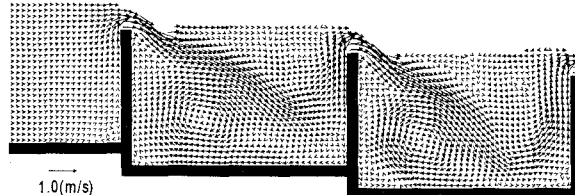
図-6 上流端部分の流速分布 Run1, $Q=4.18(l/s)$



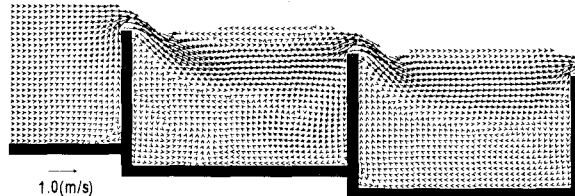
(a) $t=1$ 秒



(b) $t=2$ 秒



(c) $t=7$ 秒



(d) $t=15$ 秒

図-7 上流端部分の流速分布 Run2, $Q=6.97(l/s)$

3. 解析結果および考察

(1) 上流端部分

図-4および図-5は、Run1およびRun2の場合における上流端部分の解析の結果得られた堰位置の断面での流量の時間変化を示している。また、図-6および図-7は、Run1およびRun2の場合における計算開始後のプール内での流況の変化を示したものである。これらの図より、上流端から流入した流れは、まず堰No.0を越えて徐々に下流へ伝播している様子がわかる。プール内に流入した流れは、流入直後は複雑な流況を呈するが、徐々に安定化してくること

がわかる。流量が大きいRun2の場合にはプール内に流水が流入した直後は落下流となっているがその後徐々に表面流へと移行していることがわかる。堰位置の断面流量の時間変化を見ると、流量が少ないRun1の場合には、流れが堰No.2に達するまでの時間はRun2の場合よりも遅いが、堰上の流量が安定するのに要する時間は早くなることがわかる。Run2の場合には計算開始後15秒程度で流況が安定してくることがわかる。

(2) 中流部分

図-8および図-9は中流部分の流速分布を示してい

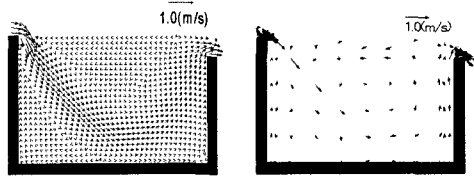


図-8 中流部分の流速分布 Run1, $Q=4.18(l/s)$

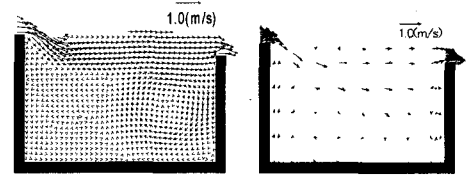
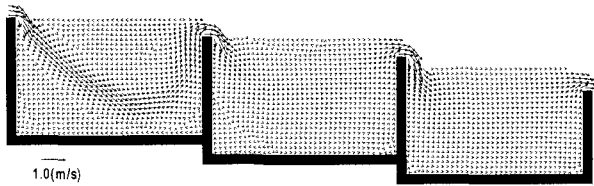
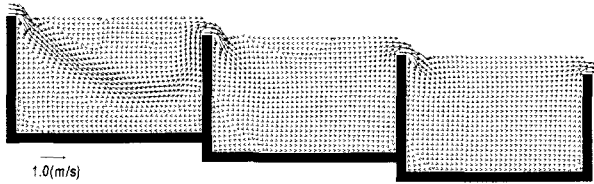


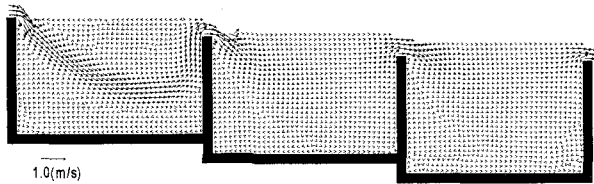
図-9 中流部分の流速分布 Run2, $Q=6.97(l/s)$



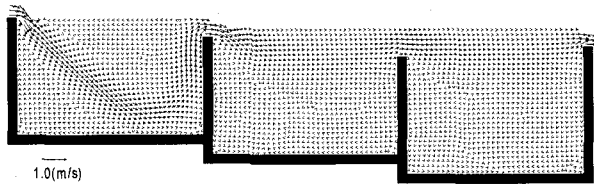
(a) Run1-a $Q=4.18(l/s)$



(b) Run1-b $Q=4.18(l/s)$

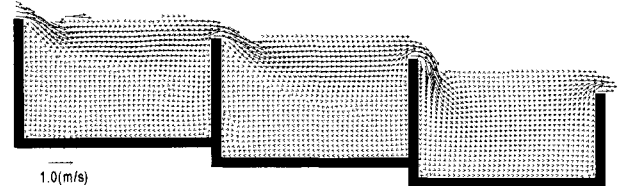


(c) Run1-c $Q=4.18(l/s)$

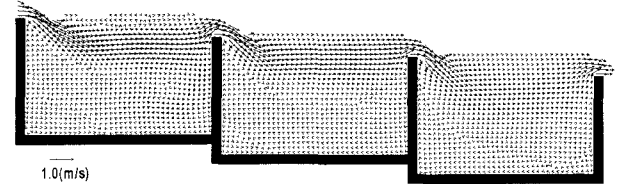


(d) Run1-d $Q=4.18(l/s)$

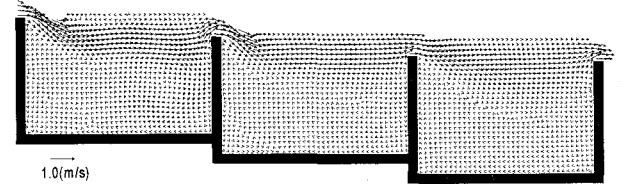
図-10 下流端条件の違いによる流速分布



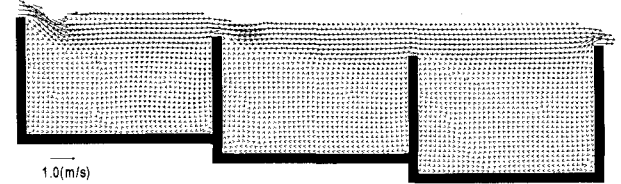
(a) Run2-a $Q=6.97(l/s)$



(b) Run2-b $Q=6.97(l/s)$



(c) Run2-c $Q=6.97(l/s)$



(d) Run2-d $Q=6.97(l/s)$

図-11 下流端条件の違いによる流速分布

る。これらの図より、流量が少ない場合にはプール内で落下流が発生するが、流量が大きい場合には表面流が発生することがわかる。プール内の流況は両者とも実験値をよく説明しており、実際の流況をある程度再現できているものと考えられる。この中流部分の流況は、プールがさらに多く存在する場合にも適用可能であろう。

(3) 下流端部分

図-10および図-11は、下流端部分の解析の結果得られた流況を下流端条件の違いにより示している。これらの図より、下流端水位が小さい場合には堰No.5を越える部分の落差が大きくなり、流れが急な落下流となっていることがわかる。流量が少ない場合には、とくにその傾向が強く現れており、これ以上水位差が大きくなると魚類の遡上が困難になると

考えられる。つぎに、下流端水位が大きくなるとプールNo.5内の主流は表面に近い方に移動する。また、最も下流端水位を高めた条件の場合には堰No.5の箇所での水面変化が見られなくなり、プールNo.5は必要なくなる。

(4) 全体の流況

図-12および図-13は、解析結果得られたRun1-cおよびRun2-cのプール全体の流況について示したものである。これらの図より、流量が少ない場合と多い場合におけるプール内の流況の相違がよくわかる。流量が少ない場合にはプールNo.2内の流れがやや拡散したような状況になっているが、その他のプール内の流況は実現象に近い状況が再現されているものと推察される。

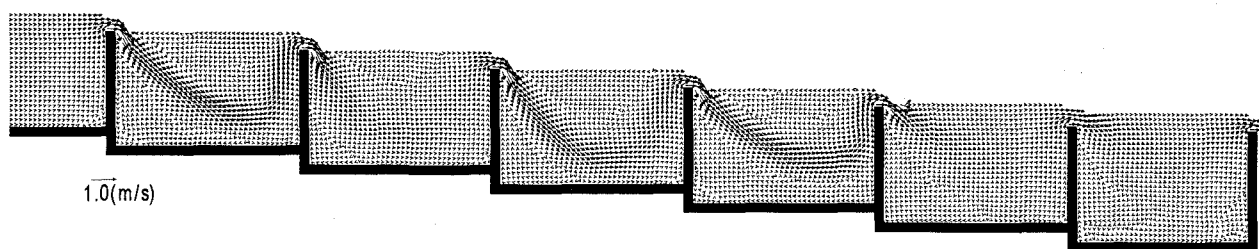


図-12 全体の流速分布 Run1-c, $Q=4.18(l/s)$

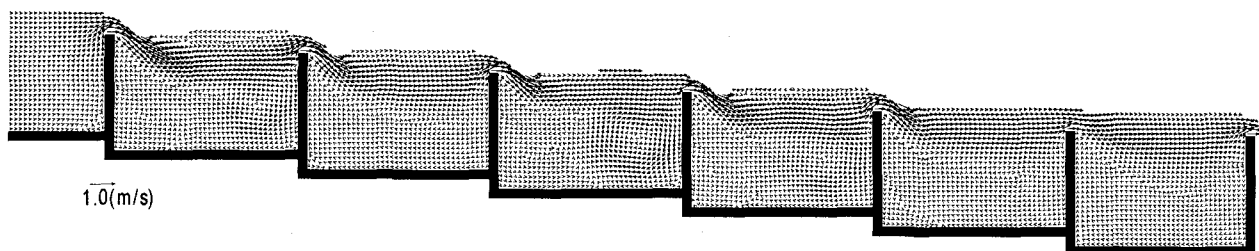


図-13 全体の流速分布 Run2-c, $Q=6.97(l/s)$

4. 結 論

本研究では、プールタイプ魚道の流況を解析可能な数値モデルを構築することを目的として、プールが数多く設置している状況を想定して、上流端部、中流部、下流端部に分けて解析する方法を提案し、魚道内の流況の変化を検討した。その結果、以下のようなことが明らかにされた。

- (1) 提案した魚道を幾つかの部分に分けて解析する方法により、魚道設置後のプール内の流況を再現可能であることが示された。
- (2) 流量の大小によって、プール内の流況が変化すること、および下流端の水位条件によって下流端付近の流況が変化し、堰No.5における水位差が他のプール間の水位差よりも大きくなると、落下流の度合いが激しくなり、魚類が遡上し難くなることが示された。

以上のようなことが明らかにされたが、今後は、実際に現地に設置してある魚道に本解析法を適用することにより、本解析法の問題点や改良すべき点を明らかにして解析方法のさらなる改良を図り、魚道設置のための設計業務に役立てることが出来るようにする必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、東京大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻の磯部雅彦教授から貴重な研究資料を提供していただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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，水工学論文集，第45巻，pp.521-

- 426, 2001.
- 2) 富士総合研究所：汎用流体解析システム－FUJI-RIC/ α -FLOW－，丸善，1993.
- 3) B.D.Nichols, C.W.Hirt and R.S.Hotchkiss：SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-8355, 1980.
- 4) 諏訪好英：らせん魚道における自由表面流の解析， α -FLOWによる熱と流れの解析事例集Ⅰ，pp.66-69, 1995.
- 5) 後藤仁志・酒井哲朗・芝原知樹：急激な水面変動を伴う流速場のLagrange型数値解析，水工学論文集，第43巻，pp.509-514, 1999.
- 6) 磯部雅彦・余錫平・梅村幸一郎・高橋重雄：数値波動水路の開発に関する研究，海岸工学論文集第46巻，pp.36-40, 1999.
- 7) 蔣勤・高橋重雄・磯部雅彦：防波堤の波力算定への数値波動水路の適用性について，海岸工学論文集第46巻，pp.41-45, 1999.
- 8) 米山望・守屋祥一：VOF法を用いた自由液面の数値解析手法，水工学論文集第39巻，pp.373-378, 1995.
- 9) 藤井孝蔵：流体力学の数値計算法，東京大学出版会，1994.
- 10) 高橋亮一・棚町芳弘：差分法，培風館，1993.
- 11) 高橋亮一：コンピュータによる流体力学，構造計画研究所，1981.
- 12) 朝位孝二・細田尚：移流方程式の数値解析，水工学における計算機利用の講習会，pp.13-21, 1999.
- 13) 河村哲也：数値流体力学シリーズ1 非圧縮性流体解析 第1,2章，東大出版会，1995.
- 14) Kumar. G. S., Nago. H., Maeno. S. and Hoshina. T. : Hydraulics of Ice Harbor type fishway, Proceedings of the International Symposium on Fishway, '95 in Gifu, pp.79-86, 1995.
- 15) Maeno S., Kumar G. S. and Nago H. : Discharge equation of Ice Harbor type fishway, Proceedings of 27th Congress of IAHR, pp.411-416, 1997.

(2001. 10. 1受付)