

一般座標系での密度関数法による階段式魚道流れの数値解析

○京都大学大学院 学生員 栗田 祥太郎  
 京都大学大学院 正会員 音田 慎一郎  
 京都大学大学院 フェロー 細田 尚

1. はじめに

様々な型の魚道が設置されている中、現在我が国では階段式魚道が主流となっているが、円弧型、傾斜型といった隔壁形状の変化がプール内の流況に大きく影響することも知られている。したがって、円弧型といった複雑な形状でも容易に格子形成ができる一般座標系での数値解析モデルの構築は重要だと考える。そこで、円弧型や傾斜型隔壁を有する階段式魚道流れへの適用の最初のステップとして、一般座標系での3次元数値解析モデル<sup>1)</sup>を直方型の隔壁を有する階段式魚道流れに適用し、モデルの妥当性を検証した。

2. 数値解析法

3次元流れ解析モデル<sup>1)</sup>には一般座標系を用いるとともに、非定常流れの水面変動を考慮するため密度関数法を用いた。基礎式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial \Phi V^i \sqrt{g}}{\partial \xi^i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V^i}{\partial t} + \nabla_j [V^i V^j] \\ & = F^i - \frac{1}{\rho} g^{ij} \nabla_j p + \nabla_j \left[ -\overline{v^i v^j} \right] + 2\nabla_j S^{ij} \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\rho = \Phi \rho_{liq} + (1 - \Phi) \rho_{gas} \quad (2b)$$

$$\mu = \Phi \mu_{liq} + (1 - \Phi) \mu_{gas} \quad (2c)$$

ここに、 $t$ : 時間、 $\xi^i$ : 計算空間の空間座標、 $\Phi$ : 密度関数、 $V^i$ : 流速ベクトルの反変成分、 $v^i$ : 乱れ速度ベクトルの反変成分、 $p$ : 圧力、 $\rho$ : 流体の密度、 $\rho_{liq}$ : 液相の密度、 $\rho_{gas}$ : 気相の密度、 $\nu$ : 動粘性係数、 $\mu$ : 流体の粘性係数、 $\mu_{liq}$ : 液相の粘性係数、 $\mu_{gas}$ : 気相の粘性係数、 $F^i$ : 重力ベクトルの反変成分をそれぞれ表す。また、乱流モデルには2次非線形  $k-\epsilon^2$  モデルを用いた。

計算法は有限体積法とし、安定性と有限体積法への

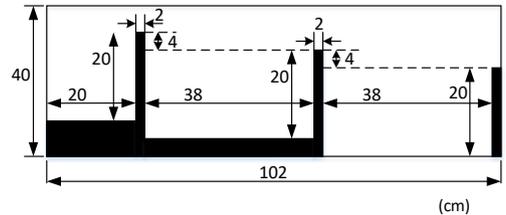


図-1 計算領域

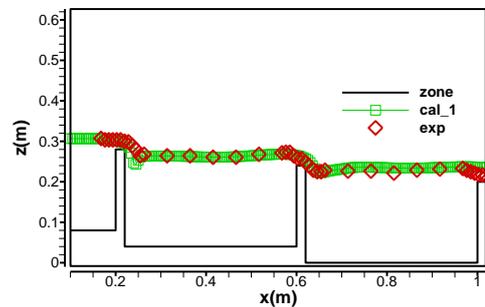


図-2 水面形の比較

親和性を考慮して、圧力  $p$ 、乱れエネルギー  $k$ 、乱れエネルギーの逸散率  $\epsilon$  を直方体の中央で、流速ベクトルを側面で定義する完全スタガード格子系を用いる。計量テンソル、クリストッフェルの記号などは格子点上で定義し、計算の過程で必要となる位置の値についてはその都度内挿して求めた。

運動方程式の移流項の離散化には QUICK スキームを、 $\Phi$  の移流方程式の離散化には TVD-MUSCL 法を用い、 $k$  および  $\epsilon$  方程式の移流項には Hybrid 法を用いた。圧力の収束計算手法などについては参考文献<sup>1)</sup>に記述してあるため、ここでは紙面の都合上は省略する。

3. 階段式魚道流れへの適用

3次元流れ解析モデルの適用性を検証するため、4つのプールを有する階段式魚道模型実験<sup>3)</sup>を対象に計算を行った。奥行きは 40 (cm) となっている。計算領域に関しては前野ら<sup>3)</sup>の研究を参考に図-1のように上流側2プール分を対象とし、計算格子幅は流れ、横断、鉛直方向にそれぞれ 0.5 (cm)、8 (cm)、0.25 (cm) である。初

キーワード 一般座標系、密度関数法、階段式魚道流れ  
 連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-3 TEL075-383-3269

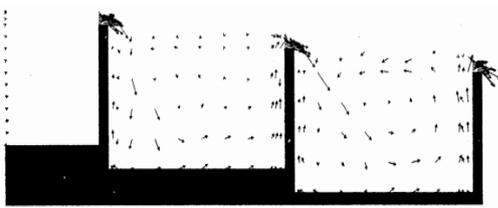


図-3 実験の流況図

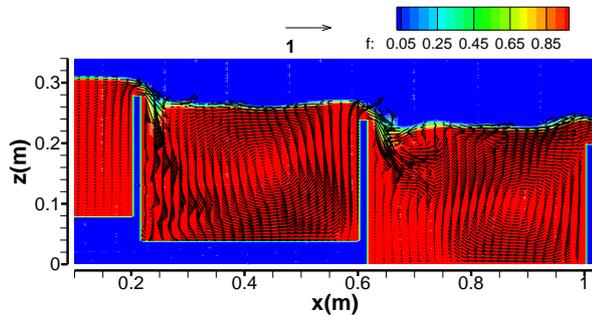
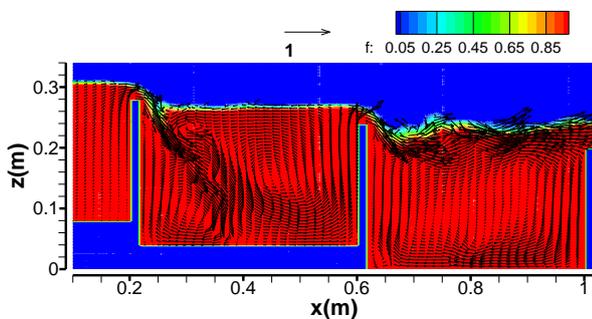
(a)  $t = 10$  (s)(b)  $t = 20$  (s)

図-4 計算結果の流況図

期条件として各プールに 0.22 (m)の初期水深を与えて計算を開始した。これは、計算開始後短時間で越流の流況を再現するためである。境界条件として、上流端で流量 4.18 (l/s)を与え、下流端では物理量の勾配を 0 とした。このモデルを用いて水面形の比較、及び定常状態におけるプール内の流速ベクトル図の比較を行うことでモデルの妥当性について検討を行った。

図-2は定常状態における水位の横断分布を示したものである。両プールともに水面形の良い再現がみられる。ただ、下流端水位に関しては実験値よりも高い値をとっており、これは、実験における後続のプールへの落下流が計算での境界条件では再現できなかったためと考えられる。

図-3、図-4に実験及び計算での流況図を示す。実験値は計算開始から 15 秒での瞬間値を、計算結果については計算開始後 10、20 秒での結果を示した。なお計算においては 13 秒ごろから流況の定常状態がみられた。

$t = 10$  (s)の結果をみると 1 つ目のプールにおける落下流とそれに続く反時計回りの循環流が再現できていることが分かる。2 つ目のプールにおいても実験における斜め流がやや確認できるが、実験よりも表面流が卓越し、プール内においても実験とは逆向きの時計回りの循環流が発生する結果となった。 $t = 20$  (s)の結果をみると、一つ目のプールにおいては斜め流が発生し、実験同様プール内に反時計回りの渦が発生しているのが分かるが、二つ目のプールにおいては表面流が卓越する結果となり、流況の再現性において課題がみられた。原因としては、初期条件として隔壁より高い水深を設定しそこに初期流速を与えた結果、実験時よりも表面流の発生を過度に誘導してしまったことと、自由流出条件によって下流端での水位が実験のように低下しなかったことが考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、一般座標系を用いた 3 次元数値解析モデルの開発を最終目標とし、その第 1 ステップとして直方型隔壁を有する階段式魚道流れへの適用について検討したものである。その結果、水面形について良好な再現性が確認できたものの、流況の再現についてやや課題が残った。また、プール内などにみられる複雑な流況再現には初期条件や境界条件が大きな影響を及ぼすことも分かった。今後、初期条件、境界条件などの改善に取り組むと同時に、複雑な隔壁形状を有する魚道流れにも適用していきたい。

#### 参考文献

- 1) 音田慎一郎, 細田 尚, 木村一郎, Jacimovic, N.: 境界適合座標系での密度関数法を用いた開水路流れ解析法の開発とその検証について, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.I\_505-I\_510, 2016.
- 2) Kimura, I. and Hosoda, T.: A non-linear k- $\epsilon$  model with realizability for prediction of flows around bluff bodies, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Wiley, Vol.42, No. 8, pp.813-837, 2003.
- 3) 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.421-426, 2001.