

京都大学工学部

学生員 ○後藤 敦志

京都大学大学院工学研究科

正会員 五十里 洋行

京都大学大学院工学研究科

正会員 Khayyer Abbas

京都大学大学院工学研究科

正会員 後藤 仁志

1. はじめに

魚道設計を行うにあたって、魚道内流れの流況解析は重要である。魚道が正しく機能するためには、対象とする魚の遡上経路が確保されていることが保証されなければならない。数値シミュレーションによる流況解析は、経済的・効率的な面で有効な手段である。本研究では、MPS法¹⁾を改良した高精度粒子法²⁾(CMPS法, CMPS-HS法, CMPS-HS-HL法)を用いて数値シミュレーションを行う。流れ場について詳しく調査し、魚の遡上経路が確保されていることを示す。また、標準MPS法との比較をして、高精度粒子法の効果を検証する。

2. 数値解析手法

(1) MPS法の概要

本研究で用いたMPS法の概要を示す。MPS法では、流体の挙動を粒子を用いて計算する。具体的には、流体の支配方程式であるN-S式の各項と等価な相互作用力を導入して計算する。また、相互作用力は粒子間の距離によって、影響が異なるように、距離 r に基づく重み関数を導入する。 r_e は、相互作用の計算範囲を与える半径である。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (r \leq r_e) \\ 0 & (r > r_e) \end{cases} \quad (1)$$

(2)CMPS法²⁾の概要

MPS法で用いられている圧力勾配モデルは、粒子間力が逆向き等大とならず、運動量保存が保証されない。そこで、逆向き等大となるように2粒子間の midpoint に仮想的な圧力定義点を設けて、運動量保存を保証した。すなわち、MPS法の圧力勾配モデルに代わり

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{(p_i + p_j) - (\hat{p}_i + \hat{p}_j)}{r_{ij}^2} \cdot r_{ij} \cdot w(r_{ij}) \right\} \quad (2)$$

を用いた。

(3)CMPS-HS法²⁾の概要

CMPS-HS法では、圧力擾乱を低減させるために、圧力の Poisson 方程式(PPE)の生成項を厳密に評価する。すなわち、粒子数密度の定義を用いて、粒子数密度の実質微分を行う。以上より、次式が導かれる。

$$\frac{Dw(r_{ij})}{Dt} = \frac{Dw_{ij}}{Dt} = -\frac{r_e}{r_{ij}^3} (x_{ij}u_{ij}^* + y_{ij}v_{ij}^* + z_{ij}w_{ij}^*) \quad (3)$$

これを用いて、PPEの生成項を導出すると、

$$(\nabla^2 p_{k+1})_i = -\frac{\rho}{n_0 \Delta t} \sum_{i \neq j} \frac{r_e}{r_{ij}^3} (x_{ij}u_{ij}^* + y_{ij}v_{ij}^* + z_{ij}w_{ij}^*) \quad (4)$$

と表される。

(4)CMPS-HS-HL法²⁾の概要

CMPS-HS法では、式(4)の左辺、すなわち Laplacian は、依然として MPS法のままである。高精度の Laplacian モデルを用いることで、より安定した圧力計算を行うことが可能になる。CMPS-HS-HL法で用いる Laplacian は、勾配の発散をとることによって定義する。すなわち、

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \nabla \cdot \langle \nabla \phi \rangle_i \quad (5)$$

となる。これより、粒子 i における Laplacian は、

$$\nabla \cdot \langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{1}{n_0} \sum_{i \neq j} (\nabla \phi_{ij} \cdot \nabla w_{ij} + \phi_{ij} \nabla^2 w_{ij}) \quad (6)$$

と表される。以上より、次式が導かれる。

$$\nabla \cdot \langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{1}{n_0} \sum_{i \neq j} \phi_{ij} \frac{\partial^2 w_{ij}}{\partial r_{ij}^2} \quad (7)$$

ここで、式(1)を適用すれば、高次 Laplacian モデルは、

$$\nabla \cdot \langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{1}{n_0} \sum_{i \neq j} \frac{2\phi_{ij} r_e}{r_{ij}^3} \quad (8)$$

と、表される。

3. 標準デニール型魚道内流れのシミュレーション

(1) 標準デニール型魚道

図-1 に標準デニール型魚道の概要図を示す。Katopodis ら³⁾ による水理実験と同じ条件で計算を行う。水理実験に対する、幾何縮尺は 2/5 とした。

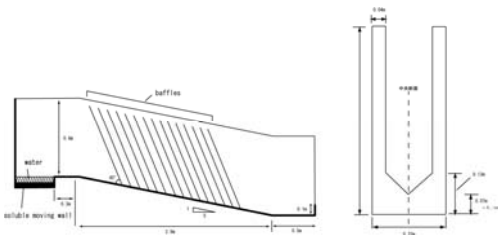


図-1 標準デニール型魚道

(2) 計算結果

(i) 流速解析

図-2 に、水路中央断面における主流方向の鉛直流速分布を Katopodis ら³⁾ の実験結果と比較して示す。検査断面は上流から 9 番目の阻流板における鉛直断面である。実験結果との対応は良好である。底面付近で、実験結果が正の値を取っているにも関わらず、計算結果で負の値を取っているが、Katopodis らの実験にプロペラ式流速計が用いられていることを考慮すると、実験で計測できなかった流速を、本計算で明らかにできたのではないかと考えられる。

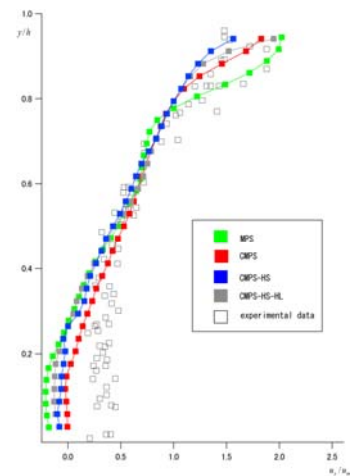


図-2 流速分布

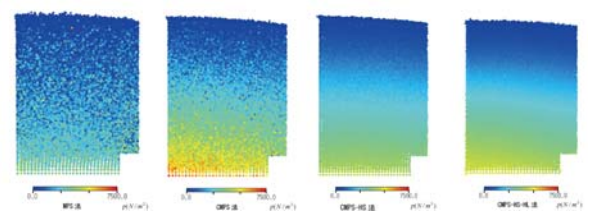


図-3 圧力分布図

(ii) 圧力解析

図-3 に、流入部での圧力分布の瞬間像を示す。流入部は、乱れが少ないため、静水圧分布が見られる。解析結果を見ると、MPS 法ではノイズが多く、圧力の層を形成するに至っていない。しかし、計算モデルが高精度化されていくに従い、ノイズが低減され、明瞭な層が形成されていくのが確認できる。

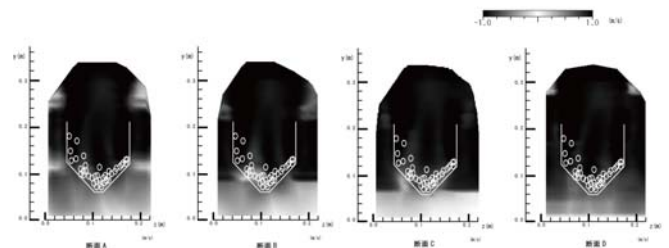


図-4 流速強度図の重ね合わせ

(iii) 流速強度図

図-4 に、CMPS-HS-HL 法での連続した鉛直断面における流速強度分布図の重ね合わせを示す。流速の主流成分、鉛直成分、奥行き成分を重ね合わせた図で、強度スケールは体長 0.1m の魚を対象に設定した。図の黒色領域が、流速の大きい領域となり、魚の遡上に不利な領域である。図中の白線は、阻流板の位置を、白丸は和田ら⁴⁾ の実験による、稚アユの遡上経路を示している。阻流板の切り欠け部に沿って、低流速域が形成され、それが和田らの観測した遡上経路と概ね一致していることがわかる。

4. おわりに

本稿では、高精度粒子法を用いて、標準デニール型魚道の解析を行った。圧力解析において劇的な改善が見られたことをはじめ、流速解析においても詳細な流況を再現することができた。

参考文献

- 1) 越塚誠一：粒子法，丸善，pp.9-35,2005.
- 2) A. Khayyer and H. Gotoh: A higher order Laplacian model for enhancement and stabilization of pressure calculation by the MPS method, *Applied Ocean Research*, pp.124-131, 2010.
- 3) C. Katopodis, N. Rajaratnam, S. Wu, and D. Tovell: Fishways of varying geometry, *Journal of Hydrauluc Engineering*, 123-7, pp.624-631, 1997.
- 4) 和田 清，東 信行，中村俊六：デニール式およびステープパス式魚道における流れ場の特性と稚アユの遡上行動，*水工学論文集*，第 42 巻，pp.499-504, 1998.