

粒子法による半円柱を越える流れの数値計算

国土交通省

早稲田大学大学院理工学研究科

法政大学工学部

早稲田大学理工学部

正会員

学生会員

正会員

フェロー

桑野真一郎

一村貴子

西谷隆亘

鮎川 登*

1. はじめに

多摩川で開発されたハーフコーン型魚道内の流れを解析するための基礎的研究として半円柱を越える流れの粒子法による数値計算を試みた結果について述べる。

2. ハーフコーン型魚道

ハーフコーン型魚道(写真1)は、魚道内の隔壁に傾斜をつけて多様な水深と流速に対応し、傾斜の向きを2本セットで交互に配置し、流速の制御と魚の休み場を確保し、遡上や降下する魚を傷つけないように断面を半円形にすることなどを考慮して考案された魚道である¹⁾。



写真1 ハーフコーン型魚道（多摩川羽村堰）

3. 粒子法による流れの数値計算法

粒子法には幾つかの手法があるが、本計算では MPS (moving particle semi-implicit method) 法を用いる。MPS 法による Navier-Stokes 方程式の解法の概要は次の通りである²⁾。MPS 法では、計算領域に多数の粒子（計算点）を配置し、個々の粒子の周囲に設定した影響域内での粒子間相互作用として Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (1)$$

における移流項、圧力項、粘性項、重力項の各々について離散化が行われる（ $\mathbf{u}$ ：流速ベクトル、 p ：圧力、 ρ ：流体の密度、 $\mathbf{g}$ ：重力加速度ベクトル、 ν ：渦動粘性係数）。移流項は粒子の移動の追跡を通じて自動的に計算される。圧力項および粘性項は、

$$-\frac{1}{\rho} \langle \nabla p \rangle_i = -\frac{1}{\rho} \frac{D_0}{n_0} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{p_j - p_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{w}(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right\} \quad (2)$$

$$\nu \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2\nu D_0}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) \mathbf{w}(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (3)$$

のように、近傍に存在する粒子との相互作用としてモデル化される（ D_0 ：次元数、 $\mathbf{r}_i$ ：粒子 i の位置ベクトル、 λ ：モデル定数）。相互作用を伴う影響範囲は重み関数

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & r \leq r_e \\ 0 & r_e < r \end{cases} \quad (4)$$

により、当該粒子を中心とする半径 r_e の円の内部に限定される。

計算アルゴリズムは2段階法であり、第1段階では粘性項と重力項を与えて仮の流速場を求め、第2段階で圧力に関する Poisson 方程式を解いて流速場を修正するプロセスである。

キーワード：開水路の流れ、数値計算、粒子法、魚道

連絡先*：東京都新宿区大久保 3-4-1

4. 半円柱を越える流れの数値計算

ハーフコーン型魚道内の流れを解析するための基礎的研究として、図1に示すように、半円柱を等間隔に3つ並べた場合の流れをMPS法により数値計算した。計算では、半円柱の半径は0.6m、設置間隔は3.0m、水路勾配1/10に設定した。上流に、初期状態で長さ21m、高さ0.8mの移動壁を配置する。移動壁は初期状態において壁粒子で構成され、流下方向に強制的に2.0m/sで移動させる。移動壁が流入境界を通過する瞬間に壁粒子が水粒子に変化するような特別な処理を行うことにより、常時一定数の水粒子を流入させ、安定した流量を確保することが可能となる。

計算による流速ベクトルを示すと図2のようになり、半円柱の上流側と下流側で渦の形成が認められる。また、3つの断面における流速分布を示すと図3のようになる。

5. おわりに

半円柱を越える流れをMPS法により数値計算した結果、半円柱を越える流れの流速ベクトルおよび流速分布を求めることができた。今後は種々の流量について数値計算を行うとともに、実験を行い、MPS法による数値計算の妥当性について検討することを考えている。

なお、MPS法による流れの数値計算のための計算コードの作成にあたっては東京大学大学院工学系研究科越塚誠一助教授にMPS法のサンプルコードを提供して頂き、参考にさせて頂きました。記して謝意を表します。

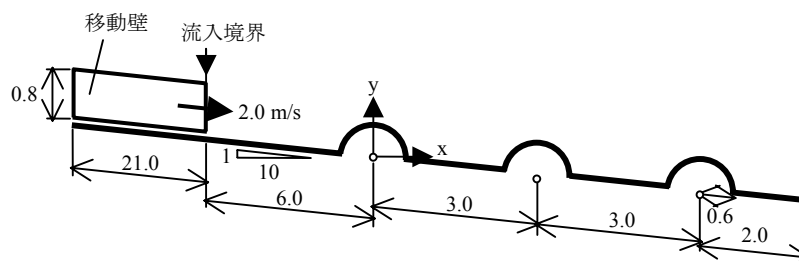


図1 計算領域（図中の単位はm）

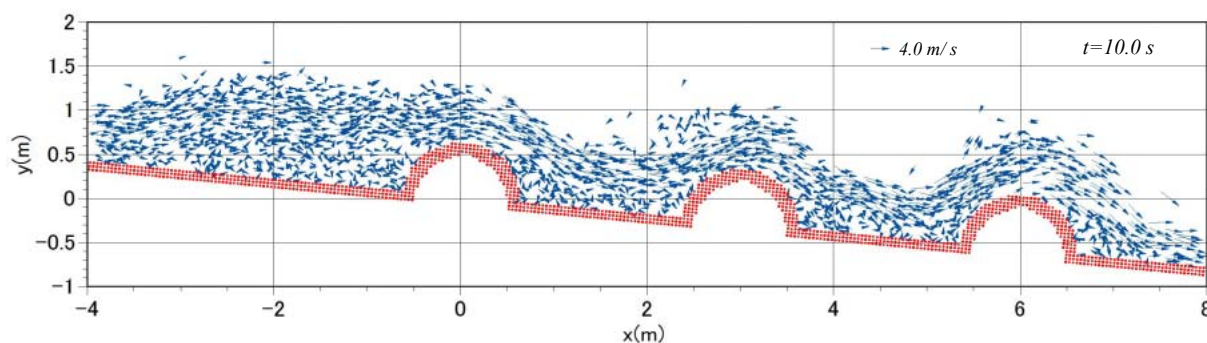


図2 半円柱を越える流れの流速ベクトル図

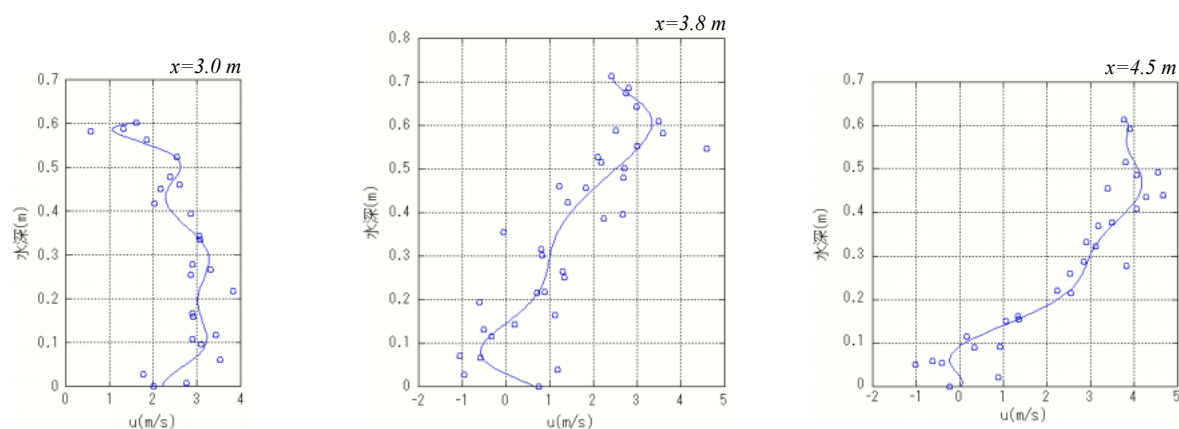


図3 半円柱を越える流れの断面流速分布図

参考文献

- 1) 多摩川魚道改造計画, PORTAL, No.029, pp.26-30, 2003年11月。
- 2) 越塚誠一: 数値流体力学, インテリジェントエンジニアリングシリーズ, 培風館, 1997。