

京都大学工学研究科 正会員 後藤仁志
 京都大学工学研究科 正会員 酒井哲郎
 京都大学工学研究科 学生員 林 稔
 京都大学工学部 学生員 ○安藤 怜

1.はじめに 本研究では、Lagrange 的に Navier-Stokes 式を離散化する粒子法（MPS 法：Koshizuka ら，1995）を用いて、浮氷盤のアイスジャム形成過程の数値シミュレーションを行い、数値流体力学の視点から浮氷盤の挙動を明らかにすることを試みる。

2. Navier-Stokes 式の離散化 MPS 法では、偏微分演算子と等価な粒子間相互作用モデルを構築することによって、Navier-Stokes 式

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

の離散化を行う。ここに、 $\mathbf{u}$ ：流速ベクトル、 ρ ：水の密度、 p ：圧力、 ν ：動粘性係数、 $\mathbf{F}$ ：外力（ここでは重力）である。

移流項は手法が Lagrange 的であるため流体素子の移動として直接計算される。圧力項および粘性項は物理的にはそれぞれ勾配、拡散を意味するので、MPS 法では圧力項や粘性項を直接これらの物理的な勾配および拡散の現象を表すモデルで表現されて離散化される。流体素子 i の圧力項と粘性項を以下に示す。

$$-\frac{1}{\rho} \langle \nabla p \rangle_i = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\text{dim}}{n^0} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{p_j - p_i}{r_{ij}^2} \mathbf{r}_{ij} w(r_{ij}) \right\} \quad ; \quad \nu \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \nu \cdot \frac{2 \text{dim}}{n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} \left\{ (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) w(r_{ij}) \right\}$$

$$w(r_{ij}) = \begin{cases} \frac{r_e}{r_{ij}} - 1 (r_{ij} \leq r_e) \\ 0 (r_{ij} > r_e) \end{cases} \quad ; \quad n_i = \sum_{j \neq i} w(r_{ij}) \quad ; \quad \lambda = \frac{\sum_{j \neq i} \{w(r_{ij}) \cdot r_{ij}^2\}}{\sum_{j \neq i} w(r_{ij})}$$

ここに、 r_{ij} ：粒子 i とその近傍粒子 j との距離、 r_e ：粒子間相互作用の計算半径、 $w(r_{ij})$ ：重み関数、 n_i ：

粒子数密度（非圧縮条件下での粒子数密度の一定値を n^0 とする）、 dim ：空間の次元数、 λ ：変数分布の分散を解析解と一致させるための係数である。

なお、MPS 法を用いた剛体モデルは、Koshizuka ら（1996）と同様の方法を用いる。剛体粒子は、流体との相互作用を計算させるために流体粒子として扱って流体計算を行い、その後、剛体粒子のみに対して座標修正計算を実施し、剛体構成粒子の相対位置を変化させないようにする。

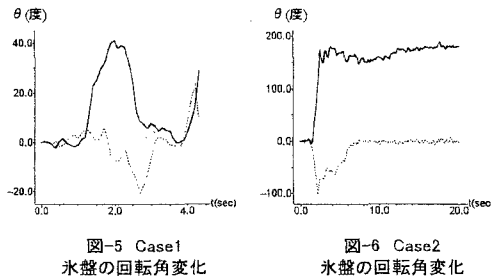
3. 浮氷盤のアイスジャム形成過程の数値シミュレーション Case1 として一定流量のもとでの数値シミュレーション、Case2 として造波した場合の数値シミュレーションを行う。図-1 に Case1 の初期配列図、図-2 に Case2 の初期配列図、表-1 に計算条件を示す。氷盤はいずれも長さ 0.10m、高さ 0.04m、固定障害物は長さ 0.50m、高さ 0.04m であり、氷盤 1 を固定障害物から X_1 m 上流側に、氷盤 2 を氷盤 1 から X_2 m 上流側に設置する。Case1 の場合、上流境界には可溶型移動壁（Gotoh, Shibahara and Sakai, 2001）を設置し、可溶型移動壁を構成する粒子には初期状態で流速 0.10m/sec を与える。この可溶型移動壁粒子が流入境界を通過する瞬間に、壁粒子が水粒子に変換されるような特別な処理を施すことによって、一定の流量を流入させることができる。下流端には貯水槽を設け、自由流出境界として堰を越流した粒子がこの貯水槽に蓄

Hitoshi GOTOH, Tetsuo SAKAI, Minoru HAYASHI and Satoshi ANDOH

積される．Case2の場合，沖側境界にクノイド波型の造波境界条件（移動壁）を設置している．

図-3に Case1の計算結果の一例，図-4に Case2の計算結果の一例，図-5に Case1の氷盤の回転角変化，図-6に Case2の氷盤の回転角変化を示す．氷盤の回転角変化は水平方向から反時計回りを正とし，実線が氷盤1の回転角を，点線が氷盤2の回転角を表している．

図-3および図-5から分かるように，Case1では，氷盤1は流れの作用と氷盤2の押し込みの作用を受けながら，途中まで回転して障害物下に潜り込む．氷盤2は氷盤1とは異なり，流れの作用を受けながらそのまま障害物下に潜り込む．Case2では，移動壁によって起こされた波の作用により，氷盤は障害物の上に乗り上げそうになっている．回転角の変化から見ても分かるように，氷盤1は180°回転して（反転して）障害物下にいったん潜り込むが，浮力の作用によりその後ゆっくりと水面に浮上する．この様に，流れの作用のもとでは氷盤は容易に潜り込むが，波の作用のもとでは潜り込みが生じないという興味深い結果が得られた．



	L(m)	H0(m)(水深)	X1(m)	X2(m)
Case1	2.35	0.40	0.10	0.05
Case2	4.30	0.40	0.05	0.02

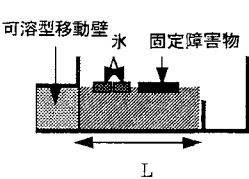


図-1 Case1 初期配列図

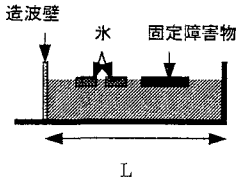
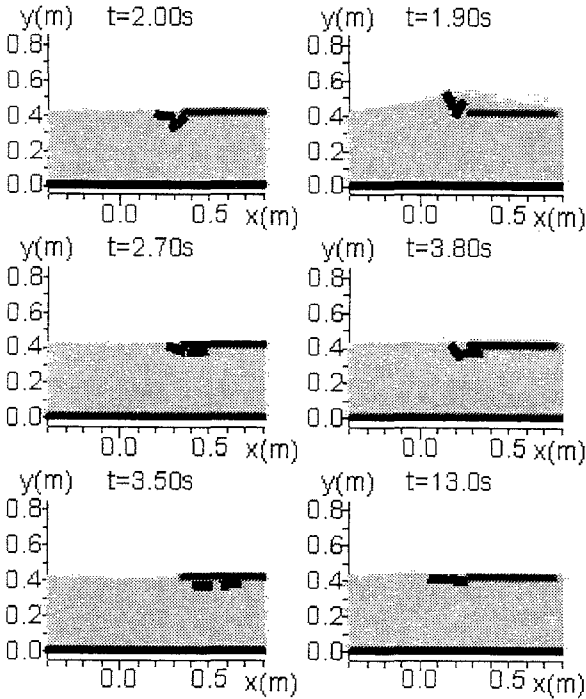


図-2 Case2 初期配列図



参考文献：

Koshizuka, S. Tamako, H. and Oka, Y. (1995) : A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation, *Computational Fluid Dynamics Journal*, Vol.4, No.1, pp.29-46.

Koshizuka, S. and Oka, Y. (1996) : Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nuclear Science and Engineering*, Vol.123, pp.421-434.

Gotoh, H. Shibahara, T. and Sakai, T. (2001) : Sub-particle turbulence model for the MPS method -Lagrangian flow model for hydraulic engineering-, *Computational Fluid Dynamics Journal*, Vol.9, No.4 (inprinting)