

## 吸水性粒子の間隙における自由液面流れの数値解析手法 Computational Method for Free-Surface Flows between Multiple Absorbent Particles

永野 浩大 (京大・工) 鳥生 大祐 (京大・ACCMS) 牛島 省 (京大・ACCMS)  
Koudai NAGANO, Graduate School of Engineering, Kyoto University  
Daisuke TORIU, ACCMS, Kyoto University  
Satoru USHIJIMA, ACCMS, Kyoto University  
E-mail : ushijima.satoru.3c@kyoto-u.ac.jp

A computational method was proposed for the free-surface flows between multiple absorbent particles on the basis of the finite volume method with the collocated grid system. In the proposed method, the swelling of the particle due to the water absorption is considered with the velocity boundary conditions on the particle surfaces. The proposed method was applied to the dam-break flows in the porous media, which consists of multiple absorbent particles, to confirm its applicability. As a result, it is demonstrated that the free-surface flow patterns are largely affected by the swelling particles and that the flows between particles are possibly blocked by the swelling particles in case that the water absorption speed is sufficiently high.

### 1. はじめに

吸水性粒子とは、水を吸収し、それに伴い膨張する粒子である。代表的な吸水性粒子の例に SAP (superabsorbent polymer) 粒子があり、例えば紙おむつの吸水材や、土壌の保水力を高める土壌保水材として使用されている。本研究では、複数の吸水性粒子間に浸入する自由液面流れを、コロケート格子を用いる有限体積法により計算し、吸水性粒子の吸水速度が粒子間隙の流況に与える影響を考察する。

### 2. 気液相の基礎方程式と固相の扱い

本研究では、Fig. 1 に示されるように、流体計算を空間に固定されたオイラー格子で行うために、液相が各計算セルに占める体積割合  $C$  を用いて相平均された気液相に対する以下の基礎方程式<sup>1)</sup>を用いる。

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

ここで、 $t$  は時間、 $x_i$  は直交座標成分、 $u_i$  は気液相の質量平均速度であり、 $p$ 、 $\rho$ 、 $\mu$  はそれぞれ気液相の体積平均圧力、密度および粘性係数、 $f_i$  は外力の  $x_i$  成分である。上記の基

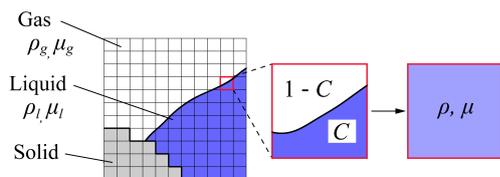


Fig. 1 Computational cells and multiphase field consisting of gas, liquid and solid phases

礎方程式をコロケート格子上で有限体積法に基づいて離散化し、MAC 系の非圧縮性流体解法<sup>1)</sup>で解く。

Fig. 1 に概略を示すように、固体は複数の計算セルにより表現される。この固体セルでは流体計算は行われず、固体セル境界に流速や圧力の境界条件が与えられる。本研究では、解法の基本的な特性に着目するため、計算領域は 2 次元とし、吸水性粒子の形状は円形とする。また、吸水性粒子の重心座標は空間に固定されているものとし、流れや互いの接触による粒子の移動は考慮しないと仮定する。

### 3. 吸水性粒子表面における境界条件

吸水性粒子を表す固体セルの境界条件の設定するため、単位時間あたりの吸水量を求める。Sunitha ら<sup>2)</sup>は、水中にある SAP 粒子に対して、次の吸水量の近似式を示した。

$$\frac{m}{m_e} = 1 - e^{-kt} \quad (4)$$

$$m = \frac{M_w}{M_p} = \frac{\rho_w V_w}{M_p} \quad (5)$$

ここで、 $\rho_w$  は水の密度、 $V_w$  は吸収された水の体積、 $M_w$  は吸収された水の質量、 $M_p$  は吸水前の粒子の質量を表し、 $m$  は  $M_w$  を  $M_p$  で正規化した値である。また、 $m_e$  と  $k$  はそれぞれ吸水量と吸水速度に関するパラメータである。式 (4) は粒子が完全に水に浸っている場合に成り立つ式であるため、本研究では粒子の表面積を  $S$ 、粒子表面のうち水に接する表面積を  $S_w$  とし、 $dm/dt$  と  $S_w/S$  に線形関係が成り立つと仮定して、次式により吸水量を推定する。

$$\frac{dm}{dt} = k(m_e - m) \frac{S_w}{S} \quad (6)$$

次に、粒子表面の膨張速度  $v_r$  を求める。ある時刻における吸水性粒子の体積とそれまでに吸収した水の体積の比を  $\alpha$  とし、次の関係式を考える。

$$\pi(r^{n+1})^2 - \pi(r^n)^2 = \alpha(V_w^{n+1} - V_w^n) \quad (7)$$

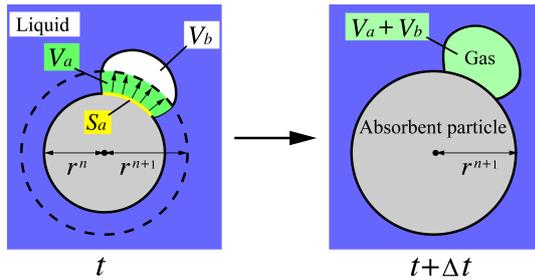


Fig. 2 Handling of gas around particle surface

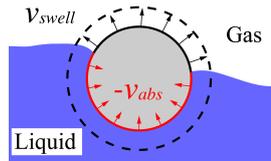


Fig. 3 Boundary conditions of velocity on particle surface

ここで、 $r$  は吸水性粒子の半径、上添字  $n$  は時間ステップを表す。本研究では  $\alpha = 1$  を仮定し、式 (7) より  $r^{n+1}$  を計算して  $v_r (= dr/dt)$  を求める。固体セルで表される粒子表面の形状を考慮し、得られた  $v_r$  に  $\pi/4$  を乗じて  $v_{swell}$  を計算する。この  $v_{swell}$  を空気に接する粒子表面における外向きを正とする法線方向の流速の境界条件として与えることで、Fig. 2 に示すように、 $r$  の更新によって粒子内部に取り込まれる空気を粒子外へ押し出す。

水に接する粒子表面で境界条件として与える流速  $v_{abs}$  を考える。流体計算段階では、粒子の膨張や吸水は流速の境界条件として Fig. 3 のように考慮する。本研究では  $\alpha = 1$  と仮定しているので、非圧縮条件より次の式が成り立つ。

$$v_{swell} S_a + v_{abs} S_w = 0 \tag{8}$$

ここで、空気に接する粒子表面の面積を  $S_a$  とした。式 (8) に基づき、 $v_{abs}$  は  $v_{swell}$ 、 $S_a$ 、 $S_w$  より計算される。

#### 4. 数値実験結果と考察

提案した手法を用いて、複数の吸水性粒子から構成される多孔質体に浸透する水柱崩壊流れを計算した。計算領域は Fig. 4 に示すように設定され、図中の  $l$ 、 $w$ 、 $r_0$  はそれぞれ、 $2.4 \times 10^{-3}$  [m]、 $2.0 \times 10^{-4}$  [m]、 $6.0 \times 10^{-5}$  [m] とした。また、粒子の吸水量及び吸水速度に関するパラメータは、 $m_e$  を 7.0 とし、 $k$  を 10.0, 20.0, 40.0, 80.0 [1/s] とした4ケースの数値実験を行った。

Fig. 5 に  $2l \leq x_1$ 、 $t = 0.2$  [s] における  $C$  の分布 (青色) と  $m/m_e$  の分布を示す。Fig. 5 より、 $k = 80.0$  の場合に比べて  $k = 10.0$  の場合の方が、同時刻において粒子間隙に浸入した水の量が多いことが確認できる。粒子の吸水速度が大きい場合、水柱崩壊流れが多孔質体に到達した直後に吸水によって流路が急激に狭まり、粒子間隙への水の浸入が阻害さ

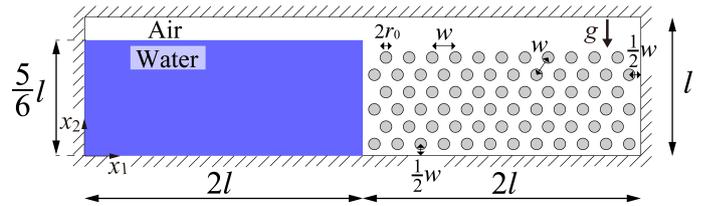


Fig. 4 Initial condition

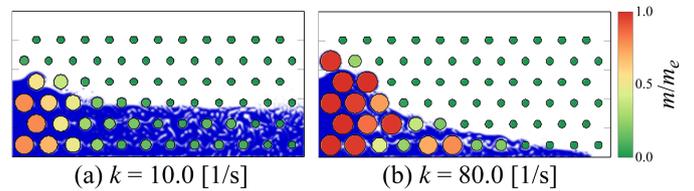


Fig. 5 Distributions of  $C$  and  $m/m_e$  ( $2l \leq x_1$ ,  $t = 0.2$  [s], blue color represents distributions of  $C$ )

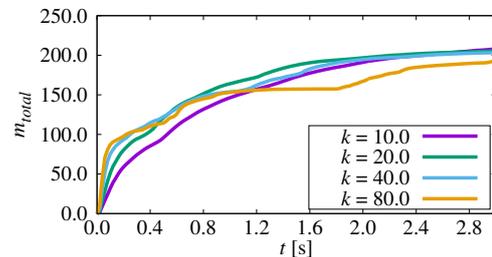


Fig. 6 Time histories of  $m_{total}$

れたことがこのような差異が生じた原因だと考えられる。

Fig. 6 に、多孔質体全体の吸水量として、各粒子の  $m$  を足し合わせた  $m_{total}$  の時間変化を示す。Fig. 6 に示されるように、 $t = 1.2$  [s] 以降では、 $k = 80.0$  における  $m_{total}$  の値が他のケースに比べて小さくなった。以上のように、吸水性粒子による吸水量は、粒子の吸水速度だけでなく、粒子の配置や流路の変化によるフローパターンなどの影響を受けることが本研究の数値計算で示された。

#### 5. おわりに

本研究では、コロケート格子を用いる有限体積法により、吸水性粒子から構成される多孔質体に浸入する自由液面流れの数値実験を行った。その結果、多孔質体全体での吸水量は、各粒子の吸水速度だけでなく、粒子の配置や流路の変化によるフローパターンなどの影響を受けることが示された。

#### 参考文献

- 1) 牛島省, 山田修三, 藤岡奨, 禰津家久: 3次元自由水面流れによる物体輸送の数値解法 (3D MICS) の提案と適用性の検討, 土木学会論文集 B, Vol. 62, No. 1, pp. 100–110, 2006.
- 2) Sunitha, K., Sadhana, R., Mathew, D. and Nair, C. P. R.: Novel superabsorbent copolymers of partially neutralized methacrylic acid and acrylonitrile: synthesis, characterization and swelling characteristics, *Designed Monomers and Polymers*, Vol. 18, No. 6, pp. 512–523, 2015.