バネ・ダッシュポット支持された捕捉粒子で分離される粒子群と自由表面流れの計算 Computation of Moving Particles and Free-Surface Flows around Trapping Particles Fixed with Spring and Dashpot Model

廣岡 信行 (京大・工) 牛島 省 (京大・ACCMS)

Nobuyuki HIROOKA, Graduate School of Engineering, Kyoto University

Satoru USHIJIMA, Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University

E-mail: hirooka.nobuyuki.85e@st.kyoto-u.ac.jp

This paper describes the applicability of the two-dimensional computational method to predict the sieving filtration, which is used to trap "moving particles" from the particle-laden liquid flows. A flexible porous structure for the sieving filtration is modeled with the "trapping particles", each of which connects to its initial position with a spring and dash-pot structure. The dam-break liquid flows including moving particles were calculated in the area where the trapping particles were placed. As a result, it was shown that the moving particles are retained by the trapping particles and that the sieving filtration is reasonably simulated.

1. はじめに

気体や液体中の異物を除去するろ過・精製技術は,日常生 活で空気や水を洗浄し,産業で製品製造に活用されるなど社 会に大きく貢献している.従来より,ろ過・精製プロセス中 の流体や粒子挙動の直接観測は難しく,粒子-流体-構造が相 互に影響を及ぼすこの複雑な過程のメカニズム解明に向けて は,計算技術の更なる発展が求められる.本研究では,(1) フィルタに相当する柔軟多孔質体を,バネ・ダッシュポット モデルにより初期位置に接続された「捕捉粒子」でモデル化 し,(2)フィルタにより捕捉される流体中の粒子を「移動粒 子」としてモデル化する,という計算手法を提案する.この 解法を用いて,流体力や移動粒子の衝突により位置が変化す る捕捉粒子により,移動粒子が捕捉されるシービングろ過の 過程の数値計算を試みる.

2. 計算方法

非圧縮性流体を対象として,互いに混じり合わない多相流 場の非圧縮条件と運動量保存則は,それぞれ以下の基礎式で 表される¹⁾.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$
$$\frac{\partial u_i}{\partial u_i} + \frac{\partial}{\partial u_i} (u_i u_j) =$$

$$\frac{\partial t}{\partial x_j} = \frac{\partial t}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$
(2)

式中の x_i は直交座標系の座標成分で, u_i と g_i は,それぞれ速度,重力加速度の x_i 方向成分である.また, ρ , t, p, μ は順に,密度,時間,圧力,粘性係数である.

気体-液体の界面は、以下のスカラー ϕ の移流方程式を解 くことにより追跡される²⁾.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (\phi u_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{3}$$

固体粒子に作用する流体力は,式(2)の圧力項と粘性項を 用いた次式から求められる¹⁾.

$$f_i = \alpha_k \Delta V \sigma_k \\ \left[-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \right]$$
(4)

ここで、 α_k , ΔV , σ_k は順に、流体計算セル内に含まれる 粒子の体積割合、流体計算セルの体積、粒子の密度である.

移動粒子同士の接触力は,個別要素法³⁾により計算される.上式で求められた流体力 f_i^p と粒子間の接触力 s_i^p を考慮した移動粒子の並進運動と,その回転運動はそれぞれ次式から計算される.

$$m^{p} \frac{\partial v_{i}^{p}}{\partial t} = f_{i}^{p} + s_{i}^{p} + g_{i}^{p}$$

$$(5)$$

$$I^{p}\frac{\partial w^{r}}{\partial t} = m^{p}_{c} \tag{6}$$

ここで、 $v_i^p \ge g_i^p$ は、それぞれ移動粒子の速度、重力加速度 の x_i 方向成分である。また、 m^p 、 I^p 、 w^p 、 m_c^p は、順に移 動粒子の質量、慣性モーメント、角速度、接触力 s_i^p により 生じるモーメントである。

柔軟多孔質体を構成する個々の捕捉粒子と移動粒子との接触力は,個別要素法³⁾により計算される.捕捉粒子の初期位置は,バネ定数 k のバネと減衰係数 c のダッシュポットそれぞれの一端に固定され,それらは 2 次元平面内で自由に回転する.一方,バネ・ダッシュポットの他端は捕捉粒子の重心位置に接続されている.

捕捉粒子の初期位置から重心位置を結ぶ方向において,捕 捉粒子の初期値 r_0 ,重心位置 r とすると,その方向の捕捉 粒子への作用力 h^s は,次式から求められる.

$$h^s = -c\frac{dr}{dt} - k(r - r_0) \tag{7}$$

上式で求められた作用力 h^s の x_i 方向成分 h^s_i と流体力 f^s_i および粒子間の接触力 s^s_i を考慮した捕捉粒子の並進運動と, その回転運動 はそれぞれ次式から計算される.

$$m^{s} \frac{\partial v_{i}^{s}}{\partial t} = f_{i}^{s} + s_{i}^{s} + g_{i}^{s} + h_{i}^{s}$$

$$\tag{8}$$

$$I^s \frac{\partial w^s}{\partial t} = m_c^s \tag{9}$$

ここで、 $v_i^s \ge g_i^s$ は、それぞれ捕捉粒子の速度、重力加速度の x_i 方向成分である。また、 m^s 、 I^s 、 w^s 、 m_c^s は、順に捕

捉粒子の質量,慣性モーメント,角速度,接触力 s^s_i により 生じるモーメントである.

3. 捕捉粒子の動作の検証

柔軟多孔体を構成する捕捉粒子の基本挙動を検証する. 粒 子径は 0.2 m で,密度は 1200 kg/m³ とした.粘弾性特性を 表すバネ定数は $k = 1.0 \times 10^4$ で,2つの減衰係数 $c = \sqrt{2km}$ と $c = \sqrt{2km}/4$ に対する運動を比較した.粒子に外力と初 速度は与えず.初期条件 r=0.1 [m], $r_0=0.0$ [m] として減衰 振動を計算した.その結果,数値シミュレーションの結果と 解析解はよく一致することが確認された.

4. 数値計算手法の適用性

Fig. 1 に示されるように,移動粒子および捕捉粒子を含 む気体と非粘性液体を対象とし,液柱崩壊を計算する.計算 領域の幅は W=1 [m],高さは H=1 [m],液柱の幅は W_f =0.3 [m],高さは H_f =0.6 [m] とした.移動粒子と捕捉粒 子は,各4 個とし,粒子径が 0.1 m で図のように初期配置し た.気体,液体,固体粒子の密度は,それぞれ 1.0 kg/m³, 1000 kg/m³, 1200 kg/m³ とした.



Fig. 1 Computational domain and trapping particles

最初に,移動粒子を含まない液柱崩壊時の自由表面流れと 捕捉粒子の挙動を計算した.その結果を Fig. 2 に示す.図 中,灰色で示した粒子は捕捉粒子,黒色で示した粒子は捕捉 粒子の初期位置である.図より,バネ定数は小さいほど,ま た減衰係数は小さいほど捕捉粒子の変位は大きくなり,妥当 な計算結果が得られていることが分かる.

次に,液柱崩壊時の自由表面流れと捕捉粒子および移動粒 子の挙動を計算した.その結果を Fig.3 に示す.図中,赤 色で示した粒子は移動粒子である.液体中の移動粒子は,捕 捉粒子にトラップされており,液体のみが多孔質体を通過し ていることが分かる.この結果から,本計算手法により,基 本的な固液分離プロセスであるシービングろ過を計算できる 可能性があることが確認された.



Fig. 2 Movements of trapping particles at t=0.35 [sec]



Fig. 3 Dam-break flows with moving and trapping particles at t=0.35 [sec]

5. おわりに

固液分離プロセスのひとつであるシービングろ過に対し, 構築した2次元計算モデルの適用性を検討した.柔軟多孔質 体をバネとダッシュポットで空間に固定された捕捉粒子でモ デル化し,その減衰振動の計算結果と解析解が一致すること を確認した.次に,移動粒子を含む液体の液柱崩壊現象を計 算し,移動粒子は,捕捉粒子にトラップされ,シービングろ 過の基本的な過程が計算されることを確認した.

参考文献

- 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.
- Akio Tomiyama, Iztok Zun, Akira Sou, and Tadashi Sakaguchi. Numerical analysis of bubble motion with the VOF method. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 141, No. 1-2, pp. 69–82, jun 1993.
- P. A. Cundall and O. D. L. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47–65, mar 1979.