

# 粒子法の産業応用に向けた研究（固液混相流解析）

Research of MPS method for Industrial Applications (Solid-Liquid Flows Simulation)

柳裕一朗 伊藤広貴 酒井幹夫 越塚 誠一

Yuichiro Yanagi, Hirotaka Ito, Mikio Sakai and Seiichi Koshizuka

東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

Department of Systems Innovation, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo  
(7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan)

**Abstract:** To calculate large-scale solid-liquid flow systems effectively, one problem to do so is the difference of spatial discretization scale. The spatial discretization scale of liquid is larger than that of solid. To simulate the large-scale systems, a new multi-scale Lagrangian model is developed by coupling Discrete Element Method (DEM) with Moving Particle Semi-implicit (MPS) method. By modeling drag force and the contact force, the multi-scale DEM-MPS enables the flow systems to treat the spatial discretization scale of the solid and the liquid equally. This is because the drag force acting on the solids and the energy dissipation due to collision depend on the solid size. Dam-break flow simulation was executed to look into the effectiveness of the multi-scale model. The solid phase volume fraction was 10% with the original size of 100 $\mu$ m. The simulations were carried out by using the calculated solid whose size was 100 times larger than the original one. The multi-scale Lagrangian model could simulate the original particle behavior from the viewpoints of the suspension by following the fluid streamlines.

## 序論

固液混相流の研究は、土石流、流砂、漂砂のような自然現象<sup>1)</sup>から機会・化学工学における攪拌槽<sup>2,3)</sup>、固液分離装置<sup>4)</sup>、ガラス溶鉱炉<sup>5)</sup>まで、多岐に渡る。固液混相流の内部機構解明に当たり、固相の濃度が高くなると、濃度や構成粒子の移動距離の計測が容易ではなく、実験によるアプローチが困難になることがあるため、数値シミュレーションによるアプローチが期待されている。

本研究では、Lagrange-Lagrange 的手法において、液相と固相の空間の離散化スケールが異なる体系に対して、計算上、同じスケールとして扱うモデルを提案する。液相には MPS 法を適用し、固相には DEM を適用する。固液混相流のダム崩壊シミュレーションを実行し、本モデルと既存モデルの結果を比較して、その有効性を確認する。

## 基礎式

Lagrange-Lagrange 的手法の固液混相流において、各粒子は液相もしくは固相のどちらかに属するものであり、Euler-Euler 的手法のように各格子に両者の

ベクトルやスカラーをもつものとは異なる。そのため Lagrange-Lagrange 的手法では、液相粒子と固相粒子に、それぞれ運動方程式を与えて、計算する必要がある。

## Multi-scale DEM-MPS 法

本研究では、固体粒子-流体粒子間に作用する流体力を流体抵抗係数に基づいて評価し、流体力と固体粒子間に DEM の粗視化モデルを用いる Multi-scale DEM-MPS 法を提案する。液相と固相の連続の式および運動方程式は、それぞれ、

$$\frac{D}{Dt} = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{Du_l}{Dt} = -\frac{\nabla p}{l} + \frac{1}{l}(\mu_l \nabla^2 u)u - \frac{K}{l} (u_l - u_s) + g \quad (2-2)$$

$$\frac{D}{Dt} \rho_s = 0 \quad (2-3)$$

$$\frac{Du_s}{Dt} = -\frac{\nabla p}{\rho_s} + \frac{K}{\rho_s} (u_l - u_s) + \frac{F_c}{m_s} + g \quad (2-4)$$

$$\rho_s + \rho_l = 1.0 \quad (2-5)$$

のように記述される。ここで  $u, p, \rho, \mu, g, F_c, K$  および  $\rho_s$  はそれぞれ流速ベクトル, 圧力, 密度, 粘性率, 重力加速度, 接触力, 流体抵抗係数および体積分率である。添え字について  $l, s$  はそれぞれ液相, 固相を意味する。

### アルゴリズム

計算アルゴリズムを Fig. 2-1 に示す。本アルゴリズムは, 既往の報告のもの<sup>6)</sup>とほとんど同じである。

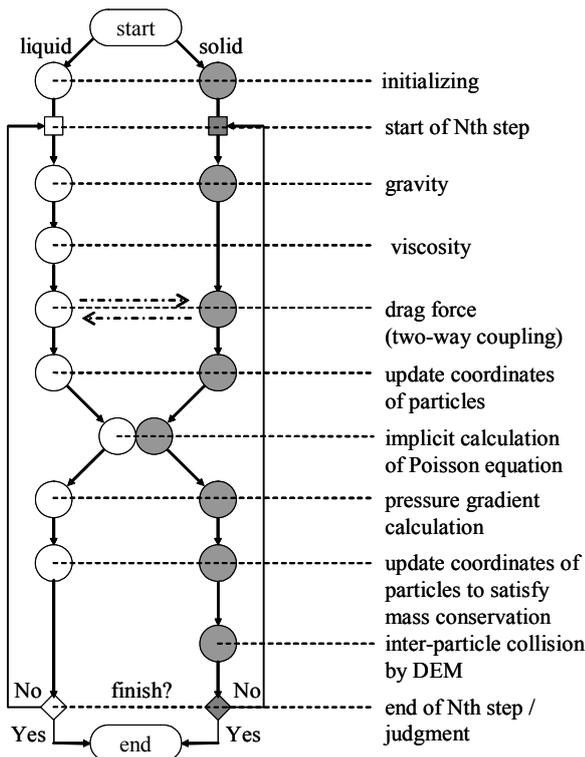


Fig. 2-1 Flows of solid-liquid simulation by DEM-MPS method

### 数値解析

固液混相流の2次元ダム崩壊シミュレーションを行い, Multi-scale DEM-MPS 法を既存の PMS-MPS モデルと比較して, その有効性を確認する。

### 解析条件

2次元ダム崩壊シミュレーションの体系を Fig. 2-2 に示す。MPS 法では, 壁面境界において, 2種類の壁粒子を用意する。内側では圧力を計算し, 外側では圧力を計算しない。液相の物性値について, 密度および粘性率を, それぞれ,  $1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$  および  $1.0 \times 10^{-3} \text{Ps}\cdot\text{s}$  で設定した。固相の物性値について, 密度, ばね定数, 反発係数および摩擦係数を, それぞれ,  $7.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3, 1.0 \times 10^3 \text{N/m}, 0.90$  および  $0.30$  で設定した。計算上の固体粒子径は,  $1.0 \times 10^{-2} \text{m}$  とし, 流体粒子の初期粒子間距離と同じとした。計算領域における固体粒子の体積分率は Case 1 から Case 3 において 10% になるように設定 (実際の固体粒子の体積分率は 10.05% となった) した。なお, 固体粒子の初期配置は, 乱数を用いて, ランダムに配置した。

Case 1 では, 粗視化率を 100 とし, オリジナル固体粒子の直径  $1.0 \times 10^{-4} \text{m}$  の体系において, Multi-scale DEM-MPS 法を適用した。すなわち, オリジナル粒子群をオリジナル粒子の 100 倍大きな粗視化粒子で

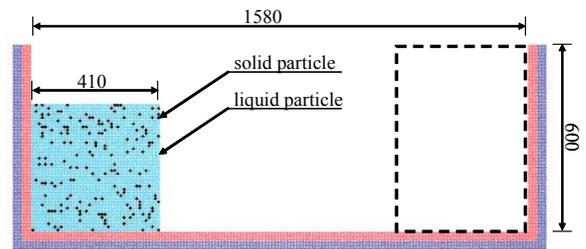


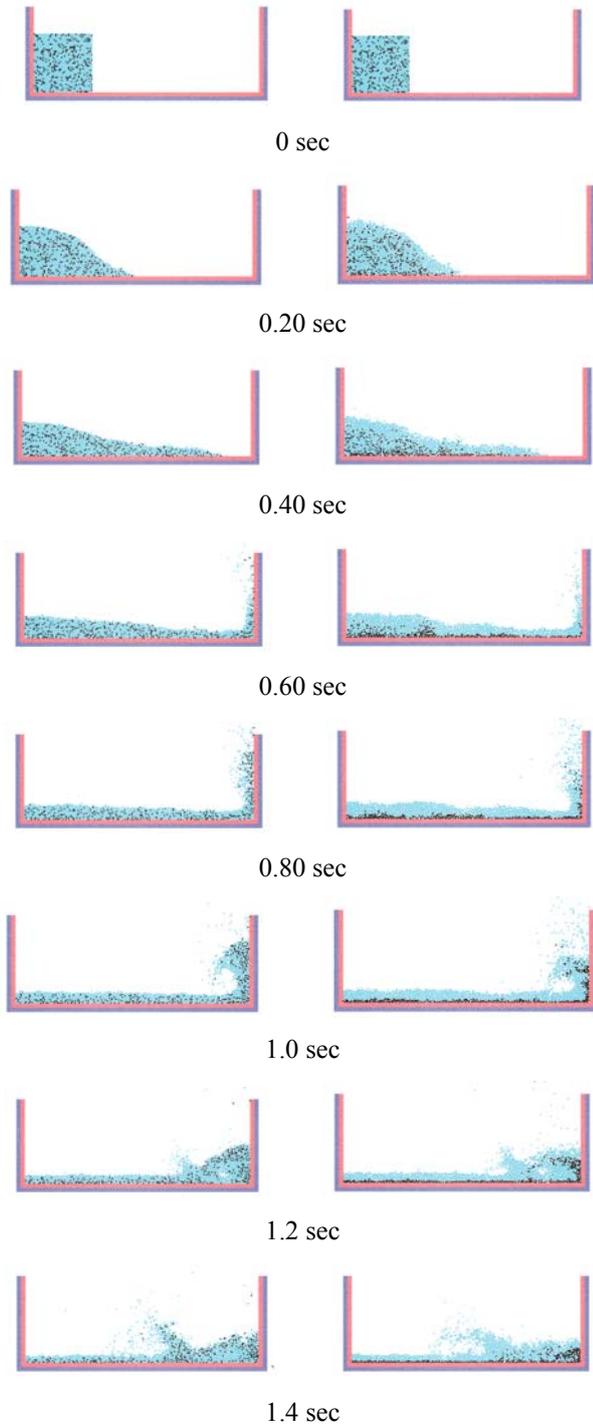
Fig. 2-2 Dam break configuration

模擬して, 流体粒子と固体粒子の計算上のスケールを同じとした。Case 2 では, 粗視化率を 1.0 とし, オリジナル固体粒子径  $1.0 \times 10^{-2} \text{m}$  の体系において, Multi-scale DEM-MPS 法を適用した。すなわち, 流体抵抗係数を用いて計算粒子径そのものの固相粒子の挙動を評価した。Case 3 では, オリジナル固体粒子径  $1.0 \times 10^{-2} \text{m}$  の体系で, PMS-MPS モデルを適用した。すなわち, 流体力の評価に流体抵抗係数を用いなかった。なお, PMS-MPS モデルでは, オリジナル固相粒子径は設定されない。時間刻みについては, 安定に計算ができるように設定し, すべてのケースにおいて, 1.5 秒のシミュレーションを行った。浮遊固体粒子数の時間変化および Fig. 3 の破線で囲まれた領域に存在する固体粒子数の時間変化を評価した。なお, 固体粒子が底部の壁粒子の最上面から固体粒子 1 個分よりも高い位置に存在するとき, そ

の粒子が浮遊したものとみなした。

解析結果・考察

Case 1 および Case 3 の解析結果の典型的なスナップショットを Fig. 2-3 に示す。固体粒子のオリジナ



(a) Case 1 (b) Case 3  
Fig. 2-3 Typical snapshots of the calculation results

ル粒子径が  $1.0 \times 10^{-4} \text{m}$  の Case 1 では、固体粒子の底部への堆積が少なく、大半の固体粒子が浮遊していた。固体粒子のオリジナル粒子径が  $1.0 \times 10^{-2} \text{m}$  の Case 3 では、水中の先端が右側の壁に到達する前に、多くの固体粒子が底部に堆積した。Case 2 の結果は載せていないが、Case 3 のものと同じ傾向を示した。

Fig. 2-4 に、浮遊固体粒子数の時間変化を示す。Case 2 および Case 3 に比べて、Case 1 の浮遊固体粒子数のほうが多かった。また、Case 2 と Case 3 の浮遊固体粒子数の時間変化は、ほとんど同じ傾向を示した。

Case 1 の浮遊固体粒子数が Case 2 および Case 3 よりも多かった理由として、Case 1 では、オリジナル固体粒子径が  $1.0 \times 10^{-4} \text{m}$  で、Case 2 および Case 3 で用いられた粒子径の 100 分の 1 になり、流体抵抗係数が大きくなるため、沈降しにくいことがあげられる。Case 2 と Case 3 の結果がほとんど同じ傾向を示した理由として、粒子径が  $1.0 \times 10^{-2} \text{m}$  と比較的大きいため、固体粒子と流体粒子間に作用する摩擦の影響が小さくなり、Multi-scale DEM-MPS 法と PMS-MPS モデルの間で有意な差が生じなかったことがあげられる。

水柱の先端が右側の壁に到達するまでの固体粒子数を観察することにより、固体粒子の流体への追従性を評価することができる。Fig. 2-2 の破線で囲んだ部分に存在する固体粒子数の時間変化を Fig. 2-5 に示す。水柱の先端が右側の壁に到達するまでの破線領域の固体粒子数は、Case 2 および Case 3 に比べて、Case 1 のほうが多く観察された。また、Case 2 と Case 3 の結果は、ほとんど同じ傾向を示した。

水柱の先端が右側の壁に到達するまでの破線領域の固体粒子数について、Case 1 のほうが Case 2 および Case 3 に比べて多く観察された理由として、Case 1

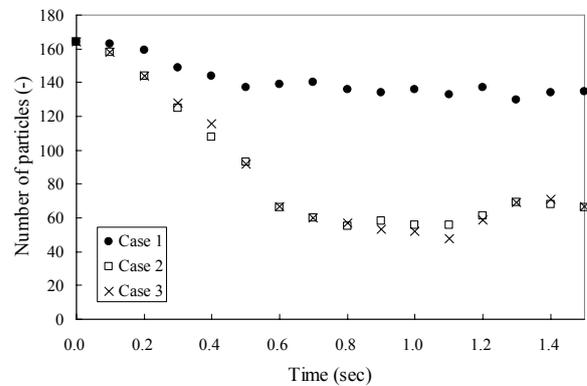


Fig. 2-4 Time vs. number of suspended particles

では、オリジナル固体粒子が  $1.0 \times 10^{-4} \text{m}$  で、Case 2 および Case 3 で用いられた粒子径の 100 分の 1 になり、流体抵抗係数が大きくなるため、固体粒子の流体への追従性がよくなったことがあげられる。また、Case 2 と Case 3 から得られた結果がほとんど同じ傾向を示した理由として、粒子径が  $1.0 \times 10^{-2} \text{m}$  と比較的大きいため、固体粒子と流体粒子間に作用する摩擦の影響が小さくなり、Multi-scale DEM-MPS 法と PMS-MPS モデルの間で有意な差が生じなかったことがあげられる。なお、Case 2 および Case 3 では、固体粒子と流体粒子間に作用する摩擦の影響が小さいため、固体粒子の流体への追従性が悪かった。

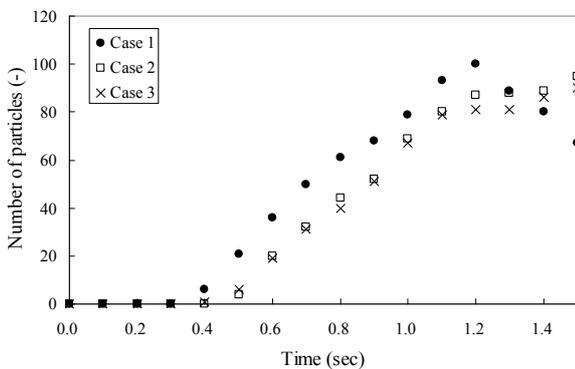


Fig. 2-5 Time vs. number of particles in the area surrounded by the broken line

以上のように、Multi-scale DEM-MPS 法を適用することにより、液相と固相の空間の離散化スケールが異なる体系に対して、計算上オリジナル固体粒子よりも大きなモデル粒子を使用して、両者と同じスケールで扱え、オリジナル固体粒子の挙動を定性的に模擬することができた。

### 今後について

今後は円形容器を用いて固液混相流の数値解析、実験を行っていく。具体的には容器の回転スピードを変えたときの様子の違いなどを調べていく。Fig. 2-6 に円形容器を回転させたときの様子を示す。容

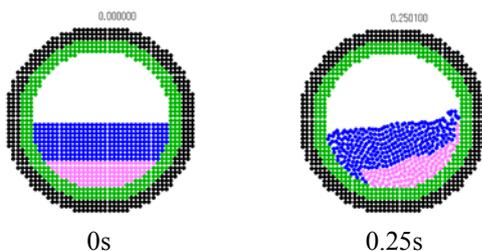


Fig. 2-6 Typical snapshots of the calculation results

器の直径は実験器具と同じ 12cm になるように設定した。本図では流体と固体を連成して計算した。下側に固体を配置し、上側に流体を配置した。

### 結論

固液混相流のダム崩壊シミュレーションを行い、Multi-scale DEM-MPS 法と既存モデルから得られた結果を比較して、その有効性を確認した。

計算上、液相粒子と固相粒子のスケールを同じにするために、オリジナル固体粒子よりも 100 倍大きなモデル粒子を使用したにもかかわらず、Multi-scale DEM-MPS 法は、オリジナル固体粒子の挙動を定性的に模擬することができた。すなわち、浮遊固体粒子数が多くなり、固体粒子の流体への追従性がよくなることが示された。他方、既存モデルでは同じ粒子径で計算しても浮遊固体粒子が少なく、固体粒子の流体への追従性は悪かった。これらの結果より Multi-scale DEM-MPS 法により、液相と固相の空間の離散化スケールが異なる体系に対して計算上、同じスケールで扱えることが定性的に示された。

今後は円形容器における固液混相流の研究を数値解析、実験の両方面からアプローチしていく。

### 参考文献

- 1) Gotoh, H. : "Suuchi Ryuusa Suiri Gaku", Morikawa Shuppan (2004)
- 2) Kagakukougakkai : "Mikishingu Gijutsu", Maki Shoten (2000)
- 3) Mousavi, S.M., P.Zamankhan and A.Jafari : "Computer simulations of sodium formate solution in a mixing tank", Comm. Nonlinear Sci. Numer. Simulat. , 13, 380-399 (2008)
- 4) Peker, S.M. and S.S. Helvaci : "Solid-Liquid Two phase flow", Elsevier (2008)
- 5) Chang, S.L. , C.Q.Zhou and B.Golchert : "Eulerian approach for multiphase flow simulation in a glass melter", Appl. Therm. Eng. , 25, 3083-3103 (2005)
- 6) Gotoh, H. , M.Hayashi, R.Andoh and T.sakai : "Lagrangian Coupling for Solid-Liquid Two Phase Flow by DEM-MPS method ", J.Hydroscience Hydraulic Eng. Ser. B, 72, 2109-2116 (2006)