

# マルチ GPU でスケールする粒子法コードによる大規模な水から土までの統合解析の高度化

課題責任者

浅井 光輝 九州大学大学院工学研究院

浅井光輝\*<sup>1</sup>, 大崎春輝\*<sup>1</sup>, 岡野翔大\*<sup>1</sup>, 森川ダニエル\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup>九州大学大学院, \*<sup>2</sup>海洋研究開発機構付加価値情報創生部門数理科学・先端技術研究開発センター

キーワード：GPU, 粒子法, 幾何マルチグリッド, 津波, 並列計算

## 1. 研究背景と目的

自然災害の被害予測を対象とするには、水(流体)と土(固体)といった物性の異なる物体の両者を扱うロバストな計算技術が必要である。

土と水の特徴を包含した統合化シミュレーション法として、代表者は粒子法ベースのマルチフェーズ解析技術を独自に開発することで、固体から流体、また両者の相変化が生じる難解な問題を解くツールを整備してきた。また斜面災害から津波災害までを解析対象として扱うため、解析領域が広範になり、これをできるだけ短時間で解析するために、ノードを跨ぐ多数の GPU 上でスケールする粒子法技術を構築してきた。

粒子法はこうした相変化を含むダイナミックな現象の数値解析において効果を発揮する解析手法である一方、解析精度についての議論は少ない。そこで、粒子法の中でも Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法に関して、計算精度を低下する要因解明に長年試み、前年度課題において、世界ではじめて 2 次収束の精度を有する粒子法の開発に成功した。

継続課題である本研究では、計算精度を担保するため陰解法の選択し、同時に計算速度の向上を図るため、粒子法に特化した幾何マルチグリッドソルバ（構造格子を使った前処理）の開発を目指した。

## 2. 粒子法用の幾何マルチグリッドソルバ

ISPH 法をはじめとする粒子法では、近傍粒子探索のためにバックグラウンドセルを用いる（図 1 参照）。このセルを幾何的マルチグリッド法の粗視化のための幾何的構造としても利活用することにした。マルチグリッド法の計算スキームは以下の通りである。まず、細かい格子上である程度解くスムージング (Pre-smoothing) を行い、減衰できなかった残差を細かい格子へ制限する (Restriction)。それを基に粗い格子上で解を修正し (Coarse grid correction)、細かい格子へ延長し (Prolongation)、最後にまた細かい格子上でスムージングを行う (Post-smoothing)。幾何学的マルチグリッド法は、空間離散化の幾何的構造を用い、階層的に粗い格子空間への粗視化を定義する。

粒子法向けのバックグラウンドセルベース幾何的マルチグリッド前処理付き共役勾配法のアルゴリズムを図 2 に示す。粒子からセルへの制限は、セルに含まれる粒子変数の和を計算する行列として、制限行列  $\mathbf{R}$  を作成することで定義した。逆にセルから粒子への延長操作は、粒子が

含まれるセルの変数を各粒子にコピーするものとし、制限行列  $\mathbf{R}$  の転置として延長行列  $\mathbf{P}$  を定義した。以降、セル間での制限および延長操作は、近傍セル 4 つ (3 次元では 8 つ) をまとめた粗視化セルを使用し、セルの値の和を粗視化セルの値として定義し、制限行列  $\mathbf{R}$  と延長行列  $\mathbf{P}$  を定義した。

以上の計算は、V サイクルと呼ばれる手法であり、また各グリッド階層でヤコビ法によるスムージングを数回ずつ行った。

なお共役勾配法などの反復ソルバーにおいて、メイン反復計算は倍精度で行い、前処理計算は単精度による計算でも収束性に変わりがないことが報告されている。また、GPU 計算機では倍精度演算よりも単精度演算の方が高い演算性能を発揮できたため、マルチグリッド法による前処理計算は全て単精度で計算を行った。

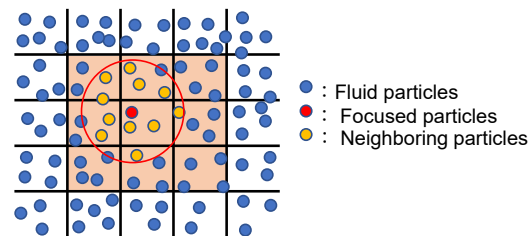


図 1 近傍粒子探索とバックグラウンドセル

Geometric multigrid preconditioning ( $\mathbf{M} = \mathbf{D}^{-1} + \mathbf{P}\mathbf{L}_1^{-1}\mathbf{R}$ )

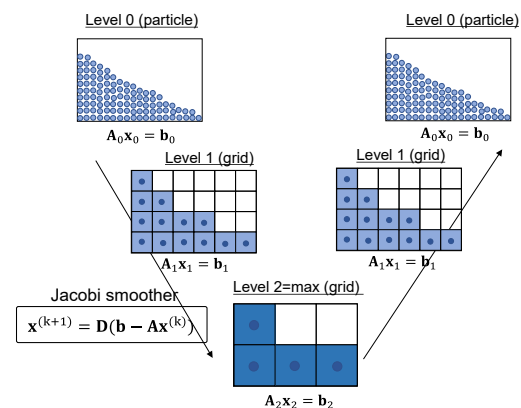


図 2 セルベースのマルチグリッド前処理

### 3. 計算効率の計測結果

提案手法の多解像度セル前処理の効果を確認するため、ダムブレイク問題と津波遡上問題に対して前処理無しCG法とマルチグリッド前処理付CG法(MGCG法)の反復回数および計算時間の比較を行った。この数値実験にはNVIDIA A100(80GB)のGPUを使用した。

はじめに、図3に示す3次元ダムブレイク計算により基礎的な検証を行った。モデルの幅を単調に広げること、同じ物理問題の規模を大きくし(粒子数を増大させ)、最大で流体粒子数は10213291とした。これは1GPU(メモリ80GB)で計算可能な粒子数である。計算条件として、初期粒子間隔1m、時間増分0.01sと設定し、総ステップ数400のテストを行った。

図4に前処理無しCG法およびMGCG法を用いた場合の、対岸の壁に衝突した直後である3.2s後の収束履歴を示す。前処理無しCG法に対してMGCG法では明らかに収束に至るまでの残差の減少傾向が改善され、反復回数を減らすことができた。また、グリッド数を増やすほど反復回数が減ることも確認した。図には同時刻でのソルバーの反復回数を示す。前処理無しCG法では粒子数の増加に伴い、収束解までの反復回数が増大するのに対し、MGCG法では反復回数がほぼ変化しない程度まで抑制できている。図5には同時刻の計算時間を示す。計算時間で比較しても多解像度セル前処理により大幅な高速化が達成できている、また大規模問題ほどその効果が大きくなることを確認した。そして、約1000万粒子の計算で前処理無しCG法に比べて全体の計算時間で約3.64倍の高速化を達成した。

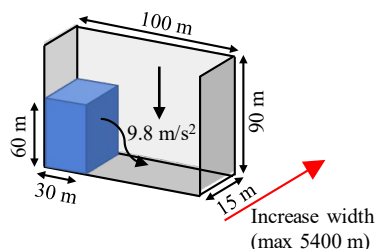


図3 計算効率計測用ダムブレイク問題

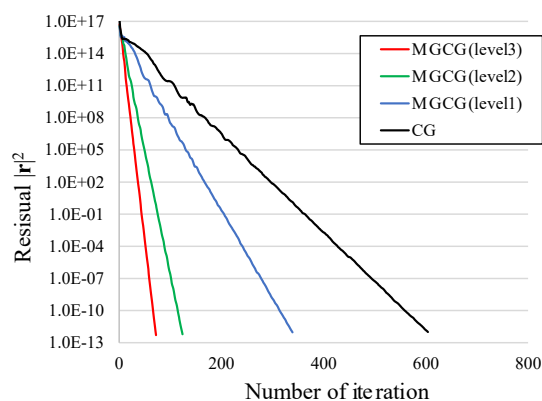


図4 ダムブレイク問題におけるMG法の効果

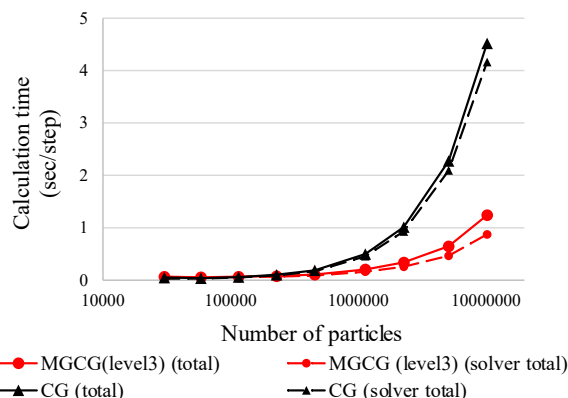


図5 MGCG法と前処理無しCG法の計算時間の比較

### 4. 福島原発の津波被害の再現解析

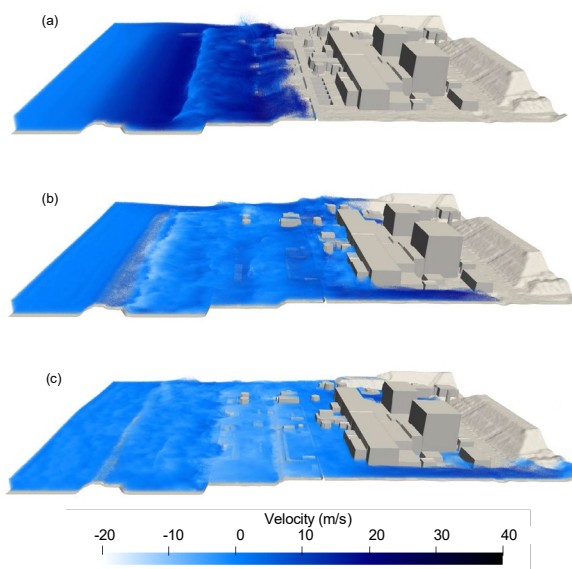


図6 福島原発周辺の津波遡上解析

続いて、実用的な問題を用いた検証として、福島第一原発付近の地形への津波遡上問題による検証を行った。計算条件は粒子間隔0.5m、流体粒子の総数は8,151,282、k実時間30s間の計算を、総ステップ数は30000で実施した。図6に遡上の様子と流速分布を示す。時間の進行とともに津波が内陸部に遡上し、波の大半は建物前面で反射し、一部の流体が建物背面まで浸水していく様子が計算できている。以上の計算を前処理無しCG法を用いた場合で45.1時間、MGCG法を用いた場合では23.1時間と、約2倍の高速化を実現できた。

### 謝辞

本プロジェクトを通して、地球シミュレータに搭載されている最新のGPU(NVIDIA製A100)を利用する環境を利用させていただくことで、円滑な開発を進めることができ、多数の計算成果をあげることができました。この場をもって感謝申し上げます。

## 文献

- 1) Haruki Osaki, Daniel Morikawa, Mitsuteru Asai, “ISPH with a Geometric Multigrid Preconditioning Solver using Background Cells in GPU environment”, Proceeding of Particle 2023, 2023.
- 2) Daniel Morikawa, Mitsuteru Asai, “Finite strain elastoplastic and solid-solid contact problems with the Smoothed Particle Hydrodynamics”, Proceeding of Particle 2023, 2023.
- 3) Shujiro Fujioka, Kumpei Tsuji, Naoto Mitsume, Mitsuteru Asai, “Bottom Boundary-Fitted Free Surface Flow Simulation with Coordinate Transformation Using SPH(2)”, Proceeding of Particle 2023, 2023.
- 4) Kumpei Tsuji, Mitsuteru Asai, Kiyonobu Kasama, Particle-based Semi-resolved Coupling Model for the Simulation of Internal Erosion in soil structures, Proceeding of Particle 2023, 2023.
- 5) 岡野翔大, 森川ダニエル, 大崎春輝, 浅井光輝, “ $\mu(I)$  レオロジーを用いた流動化地盤解析の陰的 SPH 法による効率化”, 土木学会論文集, 2024.