

MPM と FEM による未解明な大規模土砂災害の 数値シミュレーション

寺田賢二郎（東北大学）

概要

本研究の目的は、2021 年エビスサーキット（福島県）で発生した地震による大規模な土砂崩れと、2018 年スラウェシ島付近（インドネシア）で発生した海底地すべりおよびそれに起因する津波を高精細に再現することである。このような大規模土砂災害の数値シミュレーションには、大変形の表現が必要なため粒子法が適しているが、莫大な計算点が必要となるだけでなく、単純な領域分割では土砂の運動によって計算点が計算領域のごく狭い領域に集中し、計算領域内に粒子が一つも存在しない非効率な状況が生じる。そこで本研究では、プロセス間の負荷の不均衡さを減らすことを目的として動的負荷分散を適用し、スーパーコンピュータの効率的な利用による大規模 3 次元解析の実現を目指す。今年度には、主に固相解析コードの高度化・高速化の実現に取り組み、2 次元の砂柱崩壊の再現解析を通して計算速度の向上を確認した。次年度には、この固相解析コードに基づいて、固・液連成解析コードの高度化・高速化の実現を目指す。

1 共同研究に関する情報

1.1 共同研究を実施した拠点名

- 東京大学 情報基盤センター

1.2 課題分野

- 大規模計算科学課題分野

1.3 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)

- 超大規模数値計算系応用分野

1.4 参加研究者の役割分担

- 寺田：研究統括
- 中島：性能最適化
- 河合：性能最適化
- 三木：性能最適化
- 坂口：性能最適化
- 野村：3D-2D 連成手法の開発

- 潘：MPM-FEM hybrid の開発
- 飛弾野：Semi-implicit MPM の開発
- 菅井：Explicit MPM の開発
- 木村：Explicit MPM と DEM 連成手法の開発

2 研究の目的と意義

土砂崩れや地すべり等の斜面災害は、人命や財産を奪い、社会に甚大な被害をもたらす自然災害である。これに対し、数値シミュレーションは、その高度化によって定量的なリスク評価を可能とする強力なツールであり、今後も防災・減災の中で重要な役割を担うと期待されている。しかし、斜面災害のシミュレーションは、時間や空間のスケールが大規模なだけでなく、土構造の固体状態と流動挙動の遷移といっ

た複雑な挙動を精緻に表現する必要があるため非常に困難である。

例えば、2021年エビスサーキット（福島県）で発生した地震による大規模な土砂崩れは、時間・空間のスケールが大規模なだけでなく、流動・遷移といった複雑な現象を精緻に表現する必要があり、高精度かつ高速に計算することが極めて難しい。また、2018年インドネシアのスラウェシ島付近で発生した海底地すべりとそれに起因する津波は、一連のプロセスを広大な対象領域に対して解く必要があるため、時空間の解像度に偏りが生じる。したがって、適切な負荷分散を行わなければ極めて非効率な計算となり、目的とするシミュレーションの実現は叶わない。

このような現象を長時間・大規模・高解像度の精緻に解析できる計算ツールの開発には、計算力学の分野で蓄積された知見と最先端の計算科学技術の融合が必須である。本申請課題では、この融合により従来の計算手法におけるアルゴリズムの効率化とコーディングの最適化を実現し、大規模3次元解析を可能とすることで、災害発生時の状況をできる限り詳細に再現し、未解明部分が多い発生・伝搬メカニズムの解明を目的とする。上述したように、対象とする2つの災害はどちらも未解明な部分が多く、それらの精緻な再現結果は今後の防災・減災に資する知見の抽出に極めて貴重なデータとなる。これらの成果は、我が国だけでなく、国際的な防災・減災技術の発展に大きく寄与するものと期待される。

3 当拠点公募型研究として実施した意義

上述のように、数値解析の観点から見ると、土砂の流動挙動や海底地すべりに起因する津波に関する議論は全く不十分であり、本申請で目

指すような実際の地盤および津波災害を対象として高度な計算力学手法と計算科学を融合した報告例は国内外に見当たらない。その意味で、本研究は計算科学的にも挑戦的なものであり、数値解析がより現実に近い条件で行われるための基盤形成を目指した研究として位置付けられる。本申請課題で、大規模3次元解析によって実事例を細部まで再現し、実被害と解析結果との比較を通じて未解明部分を明らかにすることで、今後の防災に対する大規模計算の可能性について論じることは意義深い。また本研究では宇宙物理分野で実績のある動的負荷分散手法を計算災害力学に応用するため、大規模並列シミュレーションにおいて重要な動的負荷分散手法を様々なアプリケーションに適用していくという計算科学的意義も大きい。

4 前年度までに得られた研究成果の概要

新規の研究課題である。

5 今年度の研究成果の詳細

今年度は、主に固相解析コードの高度化・高速化の実現のために、動的負荷分散の実装に取り組んだ。また、次に説明する Material Point Method (MPM) のアルゴリズムでは、運動を表現する粒子のみでなく格子点上での情報が必要となるため、領域の再定義時にプロセス間の通信対象とする格子点のリストを迅速に獲得するためのアルゴリズムの実装にも取り組んだ。

5.1 MPM の概要

MPM は Sulsky らによって提案された固体連続体解析を目的とした粒子法である。その起源は1950年代に流体力学の分野で開発された PIC (Particle-in-Cell) にある。この PIC は過剰なエネルギー散逸が問題であったが、この問題を解消できる手法として1986年に Brackbill

らによって、FLIP (Fluid Implicit Particle) が開発されており、固体力学の問題に適用できるように改良・発展させた手法が MPM である。

MPM は、そのような枠組みのなかで開発されてきたため、図 1 に示すように、粒子だけでなく格子あるいは格子点も計算に用いる。具体的には、背面に Euler 格子を配置し、解析対象をすべての物理量（質量や体積、変形勾配等）の情報を有する Lagrange 粒子で離散化して表現する。図 2 は、その模式図と以下の計算アルゴリズムを合わせて示している。

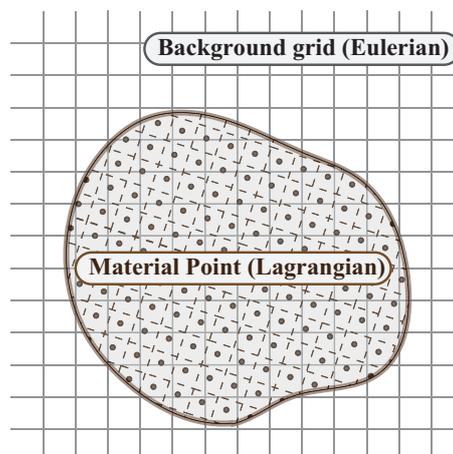


図 1 MPM の概念図

1. 各計算ステップの始めに Lagrange 粒子が持つ物理量を背面の Euler 格子上的の格子点 (node) にマッピングする。
2. 格子点で運動方程式を解いて運動量を求め、再度粒子に補間することで粒子の物理量を更新する。
3. 背面の格子を初期状態に戻して次ステップの計算 (1 番) へと進む。

MPM は、このように計算ステップごとに格子がリセットされることを除けば、斜面災害に関する研究でも多く用いられてきた有限要素法 (FEM) と類似の計算手法である。加えて、直接的な粒子間の相互作用を扱わないため、Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) や Moving Particle Simulation method (MPS) 等の他の粒子法と比較すると、粒子の近傍探索を必要としない特徴がある。したがって、以下の点が MPM の利点として挙げられる。

- (a) 粒子を積分点、格子を要素とみなせば、MPM の計算方法は FEM の計算のそれと非常に類似しており、FEM を用いた研究成果との置き換えが容易である点
- (b) 空間固定の Euler 格子を用いているため、大変形時であっても FEM のようにメッ

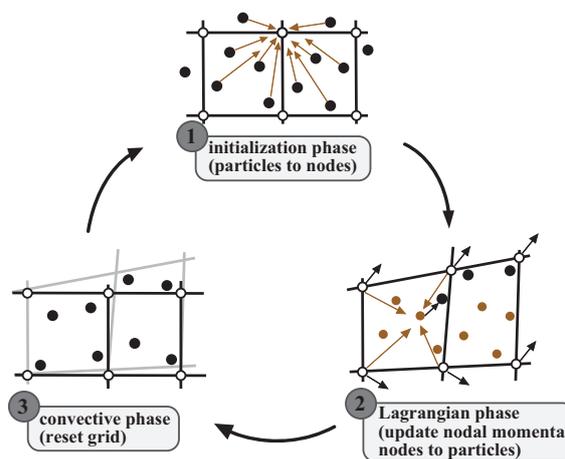


図 2 MPM の計算フロー

シュが破綻しない点

- (c) 粒子の近傍探索を必要としないため、他の粒子法と比べると計算コストを抑えやすい点
- (d) 格子基準であるため領域分割による並列化が比較的容易であり、計算効率を向上させやすい点

5.2 動的負荷分散の適用について

前述のように、MPM は粒子が持つ情報を格子上の点にマッピングして計算が進められる。そのため、図 3 のように MPI による格子基準

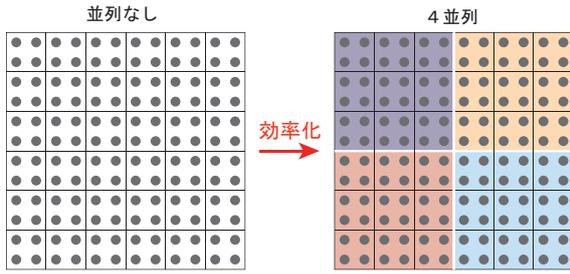


図3 MPMの領域分割

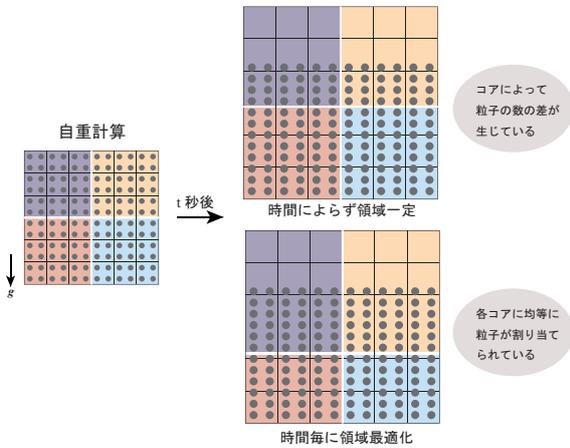


図4 時間依存の領域分割

の計算領域分割による並列化を行うことが容易であり、全体の計算を複数のノードやコアを用いて効率的に計算することが可能である。しかし、この分割された計算領域は時間によらず常に固定されているため、図4のような計算を行う際に、演算負荷や通信負荷にプロセス間で差が生じるため、並列化の利点を生かしきれない課題がある。そこで本研究では、各プロセスが所持する粒子数を均等にするによって計算量、通信量の偏りを解消するために、計算領域の分割の仕方を粒子分布に応じて領域を動的に変化させる動的負荷分散を適用することにする。

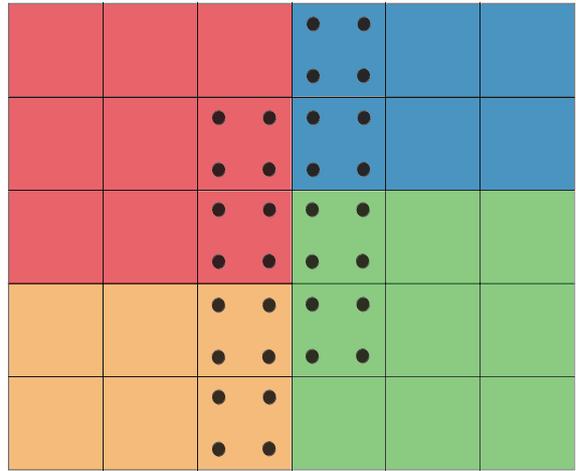


図5 領域の境界が互い違いケースの模式図

5.3 格子点の通信について

上述のように、MPMは粒子と格子点とを用いて計算が進められるため、運動方程式の求解には物理量を保持している粒子から格子点へのマッピングが必要となる。この際、各プロセスに割り当てられる計算領域の境界上の格子点については、その領域外にある粒子の物理量が必要となる。このため、領域外の粒子については境界上の格子点にマッピングした値を、該当するプロセスに渡すための通信が必要となる。この通信について、通信が必要な格子点の情報が把握しやすい利点から、これまで東北大チームが使用してきたコードでは、格子を基準として領域全体の端を除いて領域のサイズは均等に分割する方法を採用していた。この場合、四隅の格子点を除いて隣接する2領域間の通信となり、四隅の格子点のみ2領域だけでなく4領域間の通信になるケースが存在する。したがって、対象の格子点とその通信相手の把握が、i) 計算領域全体における位置（端に存在しないか）と、ii) その格子点が四隅にないかの2点から行えることがわかる。

しかし、プロセス間の粒子数を均等にする動的負荷分散を適用する場合、領域のサイズが均

等にならないケースが発生しうるため、図-5に示すような領域の境界が互い違いになる（領域間の角点が一致しない）ケースが生じる。この場合、通信対象となる格子点の通信相手の把握が複雑となり、先ほどの2点を考慮するだけでは通信相手の把握ができないことがわかる。そこで、各プロセスでの各方向の格子 ID の最小値と最大値を用いて、重なる格子を把握して、そこから通信の対象となる格子点とその通信相手を獲得できるように改良した。

5.4 B-spline を用いた場合の通信について

従来の MPM では、いくつかの数値不安定性が報告されているが、そのうちのひとつとして格子間を粒子がまたぐ際に発生する cell-crossing error がある。これは、従来の MPM では補間に C_0 連続な線形の基底関数を採用しているため、格子間で基底関数の勾配が不連続になることに起因している。この問題に対して、本研究では2次の B-spline 基底関数を用いることで対応する。

この B-spline 基底関数は、図6に示すように、ここまで考えてきた物理メッシュに、コントロールメッシュを加えた二種類のメッシュが必要となる。このコントロールメッシュ上にはコントロールポイントが存在し、格子点と類似の役割を果たす。例として、図7に2次元の物質メッシュを4つの領域に分割するケースを示す。図中の黒い点はコントロールポイントで、丸で囲まれている点は通信の対象となるコントロールポイントである。

また、5.3項で述べた互い違いの問題は、B-spline の場合にも生じる。特に、図8に示すオレンジ色の領域と青色の領域は、線形の基底関数の場合であれば物質領域が隣接していないとみなされ、通信対象に含まれないのに対して、2次の B-Spline 関数を基底を用いる場合にはこれらの領域間でも通信が必要となる。そこで、

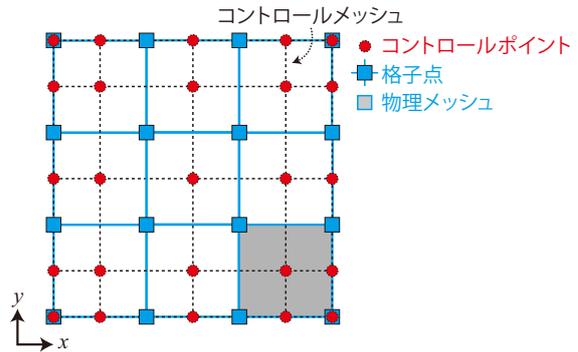


図6 物理メッシュとコントロールメッシュの模式図(2次 B-Spline 基底関数による場合)

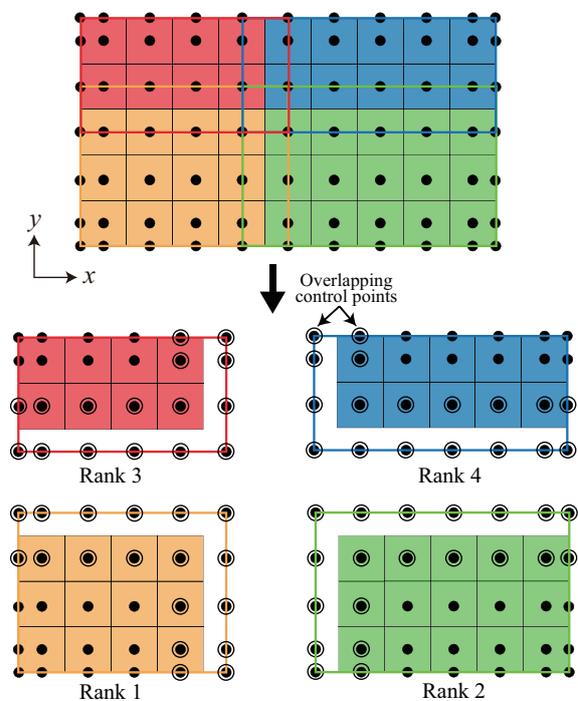


図7 MPM の並列計算における物質領域分割とそれに対応する計算領域分割の例(2次 B-Spline 基底関数による場合)

線形の基底関数と 2次の B-spline 基底関数とを使い分けられるように、他のプロセスとの格子の重なりを判定する際に、格子 ID ではなく、格子点 ID、もしくはコントロールポイント ID によって判定できるように改良した。

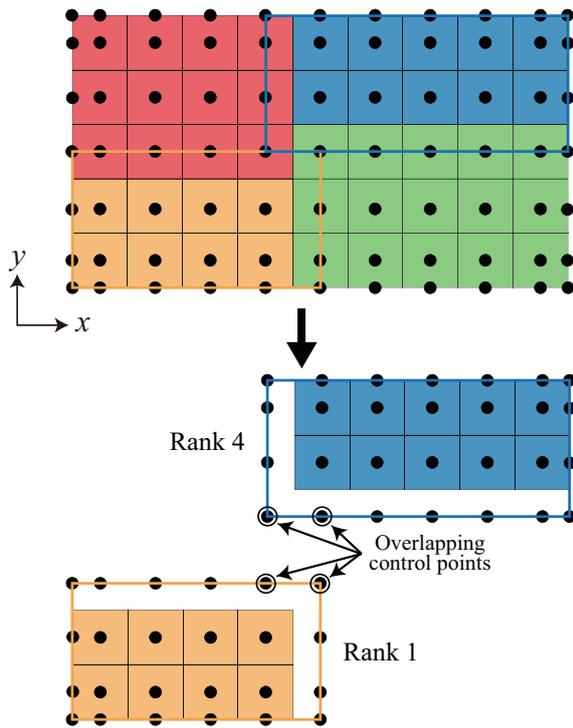


図 8 MPM の並列計算における物質領域の互い違いの分割とそれに対応する計算領域分割の例 (2次 B-Spline 基底関数による場合) .

5.5 動的負荷分散の有効性の検証

動的負荷分散の有効性の検証のため、2次元条件で砂柱崩壊解析を模擬したベンチマークの実験問題の検証を行った。解析モデルの形状を図9に示す。奥行方向の格子数を1とし、平面ひずみ状態を仮定した準3次元解析を行う。本解析では表1に示すパラメータを使用する。なお、材料モデルは Drucker-Prager モデルを用いた。計算領域は 6.0m × 3.0m とし、粒子は一辺 0.02m とし、格子中に $4 \times 4 = 16$ 個の粒子を配置した。したがって、格子数は 45000、粒子数は 80000 個の解析である。また、時間刻み幅 Δt は 1.0×10^{-4} 秒とした。重力は 10000 ステップ刻みで徐々に増加させ、初期状態を生成した。

計算機には、Wisteria/BDEC-01 Odyssey を利用した。また、動的負荷分散の効果を検証

するために、動的負荷分散を適用した場合としていない場合の2種類の計算時間を比較する。加えて、並列化効率の検証のために、1コア、6コア、12コア、24コア、48コアを用いた計算を行った。動的負荷分散を適用しないケースでは、縦横の領域分割数がある程度均等になるように、(x方向の分割数, y方向の分割数) = (1,1), (3,2), (4,3), (6,4), (8,6) とした。ただし、簡略化のために動的負荷分散を適用した場合を動的負荷分散あり、適用していない場合を動的負荷分散なしと以降呼称する。

まず、定性的な検討として、48コアを用いた場合の解析結果の粒子分布を図-10に示す。この図より、砂柱崩壊に伴う運動によって生じる粒子分布の偏りが動的負荷分散によって解消されていることが確認できる。

次に、定量的な検討として、各コア数での解析時間をプロットしたものが図-11である。この図より、領域分割の仕方が変更されない1コアのケースを除いて、動的負荷分散ありの方が計算時間が大きく削減されていることが確認できる。一方、動的負荷分散による高速化 (= (動的負荷分散ありの計算時間)/(動的負荷分散なしの計算時間)) を確認すると、12コア、24コア、48コアのケースで、動的負荷分散を適用することでコア数を増やすにつれて効果的に計算機を使用できていることが確認できる。加えて、6コアのケースでは動的負荷分散なしでの負荷の偏りが12コア、24コア、48コアと比較して大きいため、より高速化されていると考えられる。特に、今回検証した中で最大のコア数である48コアのケースでは、動的負荷分散ありでは2,212秒で完了し、なしでは、13,176秒で完了した。前者の計算時間は後者の約6倍に短縮され、演算性能の大幅な向上を確認した。

当該年度は、動的負荷分散の MPM アルゴリ

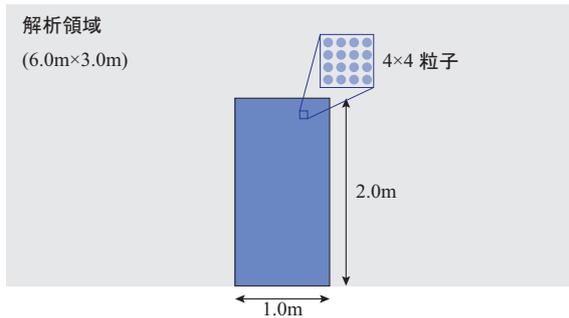


図9 検証モデル (砂柱崩壊解析)

表1 解析に用いた材料パラメータ

Parameters		value
粒子密度 (kg/m ³)	ρ_s	2500
ヤング係数 (Pa)	E	10.0×10^{12}
ポアソン比	ν	0.30
粘着力 (初期状態作成時) (N)	c	1.0×10^6
粘着力 (崩壊時) (N)	c	0.0
内部摩擦角 (°)	ϕ	0.0
ダイレイタンス角 (°)	ψ	0.0

ズムへの導入と、コードテストに時間を要したため、大規模解析については今後の課題としたい。次年度には、大規模な3次元土砂崩れ解析と流体解析を行うため、今年度と比較してトークン使用量が高くなる予定である。

6 今年度の進捗状況と今後の展望

当該年度は、(a) 動的負荷分散の実装、(b) 格子点の通信の改良の2点を中心に MPM の計算効率を向上させた。計画段階で対象に設定していた固相の3次元大規模解析の実施には至らなかったが、特に B-spline 基底関数を用いる場合の領域間通信の課題をおおむね解決でき、計算時間の削減も確認できたことから、当初の目標の7割程度は達成できたといえる。

今後の展望としては、高度化・高速化された MPM コードを用いて、2021年エビスサーキッ

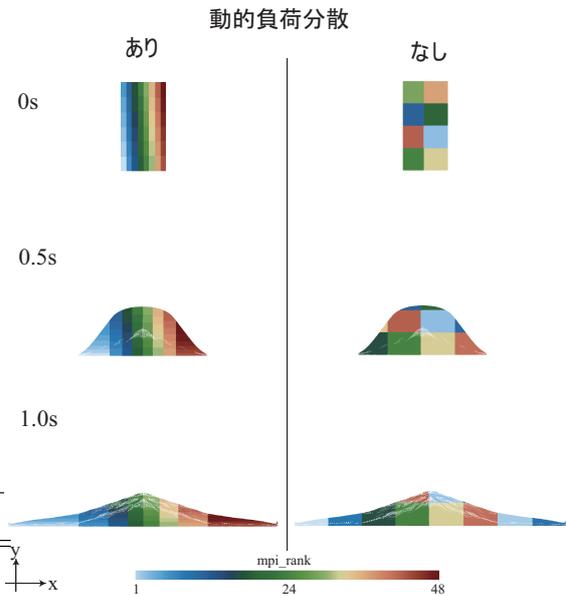


図10 砂柱崩壊解析の解析結果 (mpi 並列の rank の時刻歴変化)

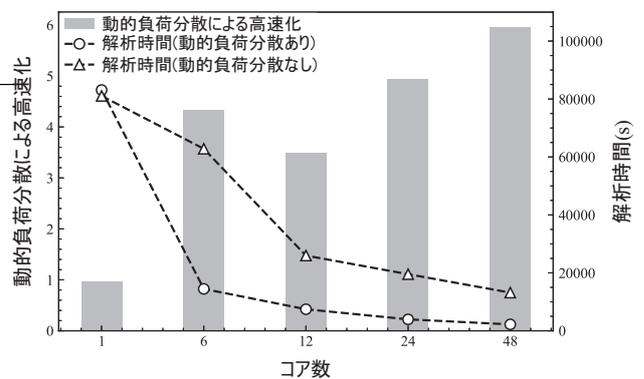


図11 コア数と計算コストの関係

トで発生した大規模な土砂崩れの3次元高精度解析を行う予定である。さらに、高速化された固相解析コードに基づいて、固・液連成解析コードの高度化・高速化の実現も目指す。具体的には、津波発生後の長時間におよぶ伝播の再現が必要になることから、固・液連成解析では陰解法を採用しているため、大規模連立一次方程式の求解の効率化の検討を行う予定である。

7 研究業績一覧（発表予定も含む）

(1) 学術論文（査読あり）

(2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）

(3) 国際会議発表（査読なし）

[1] Shaoyuan Pan, Reika Nomura, Shinsuke Takase, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada, “A 2D-3D Coupling Strategy for MPM-FEM Hybrid Analysis of Landslide-induced Tsunamis”, USACM Thematic Conference on Meshfree and Novel Finite Elements with Applications (MFEM), Berkeley, California, USA, 2022.09.

[2] Soma Hidano, Yuya Yamaguchi, Shinsuke Takase, Shuji Moriguchi, Kenji Kaneko, Kenjiro Terada, ”SEMI-IMPLICIT MPM FOR LARGE DEFORMATION IN UNSATURATED SOIL”, USACM Thematic Conference on Meshfree and Novel Finite Elements with Applications (MFEM), Berkeley, California, USA, 2022.

[3] Ryoichi Kimura, Kohei Yoshida, Soma Hidano, Riichi Sugai, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada, ”Simulations of Earthquake-induced Landslides by MPM”, 15th World Congress on Computational Mechanics and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, Yokohama, Japan, 2022

(4) 国内会議発表（査読なし）

[4] 潘紹元, 野村怜佳, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, ”多次元・多重物理ハイブリッドモデリングによる海底地すべり誘発津波の再現”, 第27回計算工学講演会, 2022

[5] 木村凌一, 飛弾野壮真, 菅井理一, 潘紹元, 森口周二, 寺田賢二郎, ”固体の変形と流動の遷移挙動を表現可能な構成則を用いた MPM によ

る土砂流動再現解析”, 令和4年度土木学会全国大会 第77回年次学術講演会, 2022

[6] 飛弾野壮真, 山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 金子賢治, 寺田賢二郎, ”不飽和土を対象とした半陰的 MPM による斜面崩壊解析”, 第66回理論応用力学講演会, 2022.

[7] 木村凌一, 野村怜佳, 森口周二, 寺田賢二郎, ”土砂災害における数値シミュレーション”, 第28回日本災害医学学会総会・学術集会, 2023

(5) 公開したライブラリ等

(6) その他（特許, プレス発表, 著書等）