

# 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

大規模な土砂崩れや海底地すべりに起因する津波などの大規模災害の数値シミュレーションには、大変形解析に適した粒子法が向いているが、莫大な計算点が必要となることに加え、土砂の運動に伴い計算点の分布に大きな偏りが生じる。本研究では、この計算負荷の偏りを抑制するために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。当該年度は、固相解析コードの高度化・高速化の実現による計算速度の向上を2次元の砂柱崩壊解析を通して確認した。また、実大規模の解析を行い、現実的な時間で解析が可能であることを確認した。また、固・液連成解析コードの高速化に向けた並列化用アルゴリズムの開発も行った。

## 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

- 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、社会に甚大な被害をもたらす自然災害である。これに対して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、広大な対象領域において一連のプロセスを解くため、時空間の解像度に偏りが生じる。したがって計算効率の観点からすると、適切な負荷分散なしには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アルゴリズムの効率化とコーディングの最適化を行い、時間空間的に実大規模の3次元解析を実現することで、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。実際、上述の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

上述したように、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不十分であり、本申請で目指す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。そのような観点かすると、本研究は計算科学的にも挑戦的であり、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な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は極めて大きい。

### 4 前年度までに得られた研究成果の概要

前年度までは、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、本研究で使用する解析手法である Material Point Method (以下、MPM) のアルゴリズムでは、粒子と格子点とを利用するため、領域の再定義時にプロセス間の通信対象とする格子点リストを迅速に獲得するアルゴリズムの実装にも取り組んだ。

#### 4.1 動的負荷分散の適用について

MPM は粒子がどの格子に属しているかを常に把握する必要があるため、MPI 並列における格子基準の計算領域分割による並列化が容易であり、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できる。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、演算負荷や通信負荷にプロセス間で差が生じ、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。

#### 4.2 格子点の通信について

MPM では粒子から格子点への物理量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も参照するため通信が必要となる。また、これまで使用してきたコードでは、要通信となる格子点を把握しやすいことから、格子数を均等に分割する領域分割を採用していた（格子数を割り切れない場合は端の領域に余りの格子を加えている）。しかし、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想定され、領域の境界が互い違いになり、要通信の格子点の把握が困難になる。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、プロセス間重なる格子を把握し、そこから要通信となる格子点と通信相手を獲得できるアルゴリズムに改良した。

従来の MPM では、いくつかの数値不安定性が報告されており、その一つが格子間を粒子がまたぐ際に発生する cell-crossing error である。これは、補間に  $C_0$  連続な線形の基底関数を採用する場合、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。この問題を解決するために、本研究では 2 次の B-spline 基底関数を用いる。この B-spline 基底関数は、図 1 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 2 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。

上述の互い違いの問題は、B-spline の場合にも生じる。特に、図 2 に示すオレンジ色と青色の領域は、線形の基底関数の場合は領域が非隣接とみなされるが、2 次の B-Spline 関数の基底関数の場合はこれらの領域間でも通信が必要となる。そこで、線形と 2 次の B-spline 基底関数とを使い分けられるように、プロセス間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。

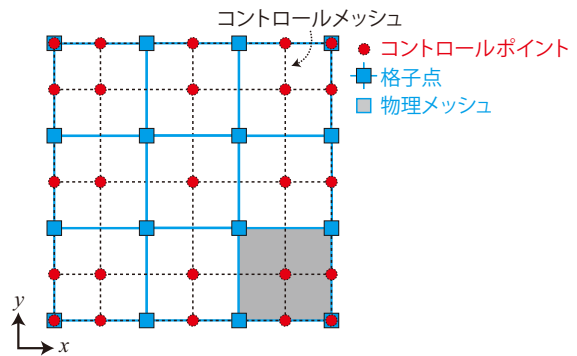


図 1 物理メッシュとコントロールメッシュの模式図(2次 B-Spline 基底関数による場合)

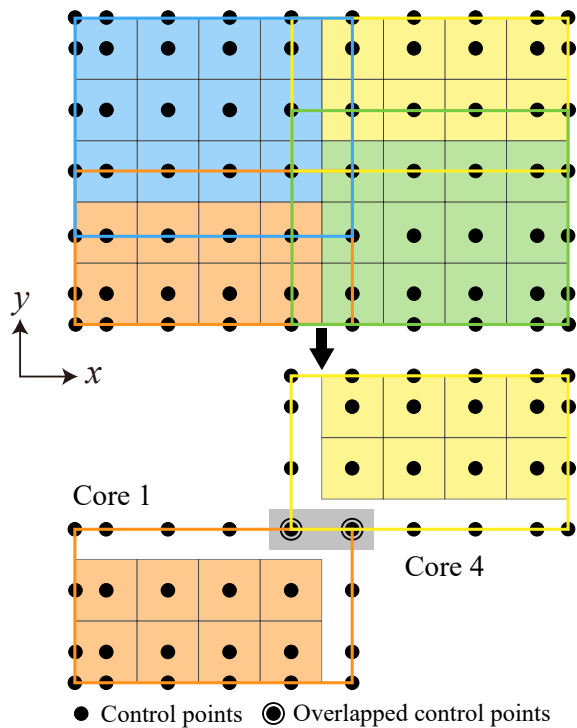


図 2 MPM の並列計算における物質領域の互い違いの分割とそれに対応する計算領域分割の例(2次 B-Spline 基底関数による場合)

## 5 今年度の研究成果の詳細

### 5.1 動的負荷分散の有効性の検証

動的負荷分散の有効性検証のため、2次元の砂柱崩壊解析を行った。また、動的負荷分散に対応した粒子交換ルーチンへと改良したため、動的負荷分散を任意の時間ステップを空けて解

析可能したことに加え、空間充填曲線に基づく粒子ソートによるメモリアクセスの効率化を実施した。解析モデルを図 3 に示し、パラメータを表 1 に示す。材料モデルは Hencky 超弾性および、Drucker-Prager モデルを用いた。格子数は 45,000、粒子数は 80,000 である。時間刻み幅は  $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$  秒とした。重力は 1 秒間で徐々に増加させ、初期状態を生成した。計算機は Wisteria/BDEC-01 Odyssey を利用した。また、動的負荷分散の効果検証のため、適用しない場合との計算時間の比較を行う。加えて、並列化効率検証のために、コア数の違う 14 ケースの計算を行った。ただし以降では、動的負荷分散を適用した場合を DLB、適用していない場合を Non-DLB と呼称する。

48 コアでの粒子分布を図 4 に示す。この図より、運動に伴う粒子分布の偏りが動的負荷分散により解消されていることが確認できる。次に、各コア数での解析時間を図 5 に示す。この図より、DLB によって計算時間が大きく削減されたことが確認できる。一方、並列化効率 (= ((シングルコアの計算時間/任意のコア数の計算時間) / 任意のコア数)) を確認すると、Non-DLB では、全体を通して 10 ~ 20 % の並列化効率であるのに対して、DLB では、60 ~ 95 % の高効率となっており、適切にコアが使用されていることが確認できる。また、昨年度に実施した 48 コアのケースでは、DLB で 2,212 秒要していたのに対し、今年度の解析では、1,054 秒まで削減できた。

## 5.2 実大規模シミュレーション

2021 年エビスサーキットで発生した地震による大規模な土砂崩れの再現解析に向けて、標高値を参照したモデルを用いた実大規模解析を行った。粒子は地表面から約 11 m 下まで配置し、斜面領域の地表面から 8 m 程下までを表層、その下と斜面以外の領域を基盤層として、

表 1 解析に用いた材料パラメータ

| Parameters                | value                |
|---------------------------|----------------------|
| 粒子密度 [kg/m <sup>3</sup> ] | 2500                 |
| Young 率 [MPa]             | 10.0                 |
| Poisson 比 [-]             | 0.40                 |
| 粘着力 (初期状態) [N]            | $1.0 \times 10^{12}$ |
| 粘着力 (崩壊) [N]              | 0.0                  |
| 内部摩擦角 [°]                 | 30.0                 |
| ダイレイタンシー角 [°]             | 0.0                  |

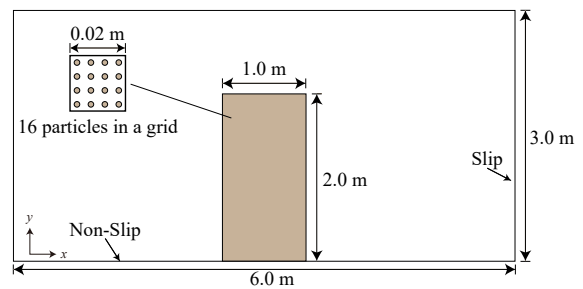


図 3 検証モデル (砂柱崩壊解析)

表 3 に示すパラメータを与えた。材料モデルは Hencky 超弾性および、Drucker-Prager モデルを用いた。計算領域は 450 m × 125 m × 320 m であり、格子は各辺 1 m であり、粒子は  $2 \times 2 \times 2 = 8$  設置した。総コントロールポイント数は 16,484,008 で、総粒子数は、19,150,323 である。時間刻み幅は、 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$  秒とし、重力は 10 秒間で徐々に増加させ初期状態を生成した。今回は予備解析であるため、実地震動ではなく、振幅 600 gal で 1 Hz の地震動を 80 秒間与え、合計で 100 秒間の解析を行った。計算機は Wisteria/BDEC-01 Odyssey を利用し、 $48 \times 4 \times 30$  プロセスで分割した。

図 6 に標高値の時刻歴を示す。茶色の領域は斜面外の領域である。この図から斜面全体が崩れる様子が確認できる。比較のために、Non-DLB で最初の 1 秒間の計算を行ったところ 1,255 秒を要したため、単純計算で 100 秒の解析には、34.8 時間要すると想定される。これに対し、DLB では、22,787 秒 (≈ 6.32 時

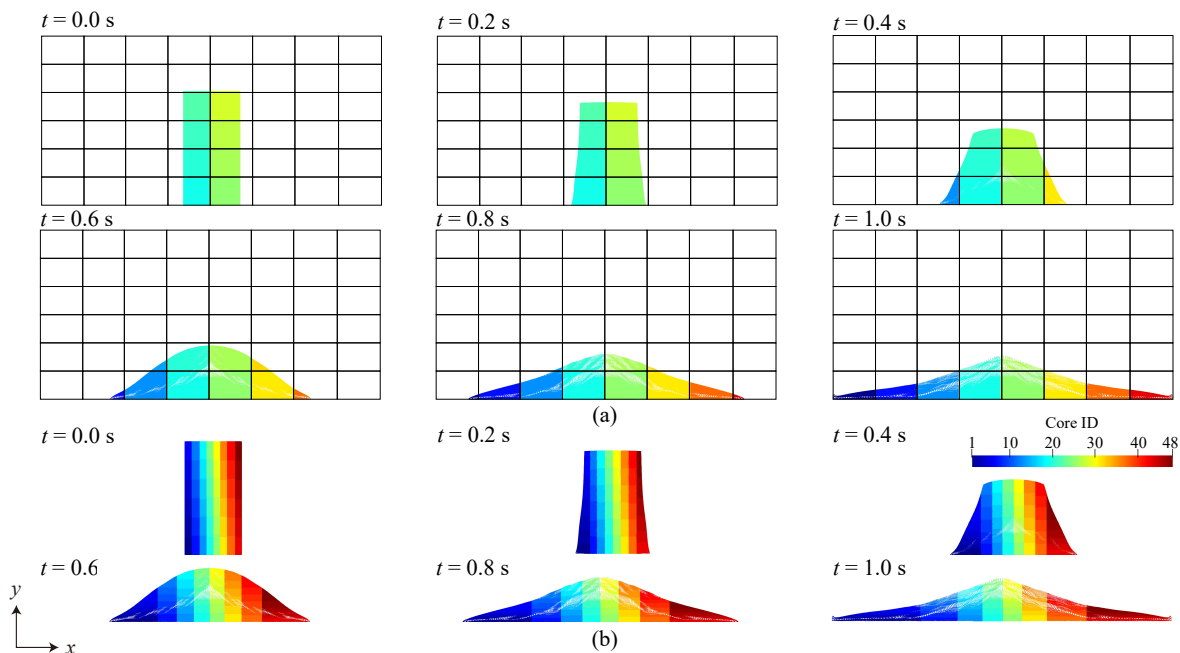


図4 砂柱崩壊解析の解析結果 (48 並列の 所属 Core ID の時刻歴変化)

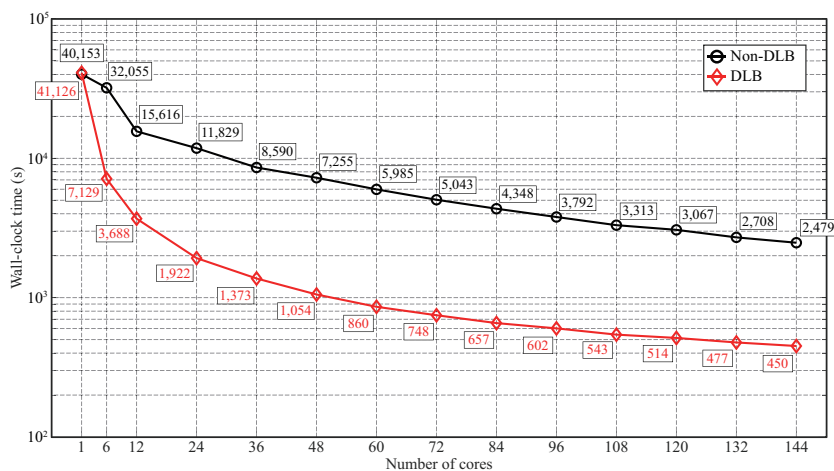


図5 DLB と Non-DLB でのコア数と計算時間の関係

間)を要したため、5.5 倍の計算効率を達成した。同内容は、Engineering with Computers の Special Issue “Recent Advances in Mesh-free and Particle Methods” に投稿中である。ただし、実現象の再現には、流動的な土砂の挙動の表現が必要なため、東北大チームが提案している  $\mu$ -I レオロジーに基づく構成則の導入

を予定している。

## 6 今年度の進捗状況と今後の展望

今後の目標は、実災害の再現のために材料モデルの改良を行いエビスサーキットの土砂災害を再現すること、固・液連成解析の高速度化・高度化を行い、実大規模の海底地すべり解析を

表 2 2次元の砂柱崩壊解析における並列化効率

| コア数     | 1      | 6      | 12     | 24     | 36     | 48     | 60     |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Non-DLB | 100 %  | 20.8 % | 21.4 % | 14.1 % | 12.9 % | 11.5 % | 11.1 % |
| DLB     | 100 %  | 96.1 % | 92.9 % | 89.1 % | 83.2 % | 81.2 % | 79.7 % |
| コア数     | 72     | 84     | 96     | 108    | 120    | 132    | 144    |
| Non-DLB | 11.0 % | 10.9 % | 11.0 % | 11.2 % | 10.9 % | 11.2 % | 11.2 % |
| DLB     | 76.3 % | 74.5 % | 71.1 % | 70.1 % | 66.6 % | 65.3 % | 63.4 % |

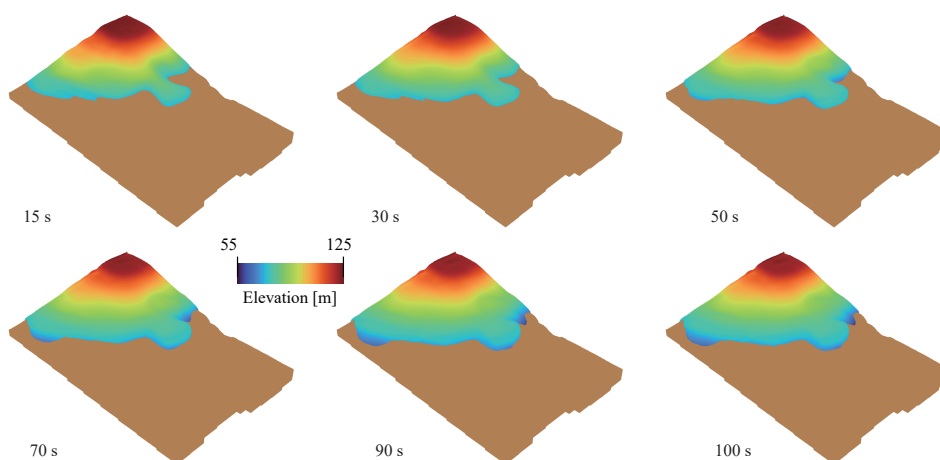


図 6 実大規模解析の標高値の時刻歴

表 3 実大規模解析のパラメータ

| Parameters                | 表層   | 基盤層   |
|---------------------------|------|-------|
| 固相密度 [kg/m <sup>3</sup> ] | 617  | 1,500 |
| Young 率 [MPa]             | 4.0  | 1,000 |
| Poisson 比 [-]             | 0.4  | 0.3   |
| 内部摩擦角 [°]                 | 30.0 | 55.0  |
| ダイレイタンシー角 [°]             | 0.0  | 55.0  |
| 粘着力 [kPa]                 | 5.0  | 300.0 |

実施することである。以下では、固・液連成解析に向けて前年度下期から取り組み始めたアルゴリズムの開発とコーディングについて、その達成状況を説明するとともに、幾つかの解決すべき課題を挙げておく。

固・液連成解析では、固相の MPM に DLB を実装している一方、Euler 型 FEM を適用する流体相では BLD は不要であり、時間によら

ず均等分割でよい。ただし、固体相には DLB を適用するため、図 7 (a) (b) に示すように、各相の同座標の点でも所属するプロセスが異なる場合があるため、相間でプロセスが異なる分割領域間での通信が必要となる。例えば、図 7 (c) に示すように、流体相のプロセス 3 の視点から、それに対応する固相のプロセス及び通信すべきコントロールポイントを識別する必要がある。

これに対応するためのコーディングを終え、海底地滑りを模擬した実験のシミュレーションにより検証を行った。解析モデルを図 8 に、パラメータを表 4 に示す。計算領域は 0.5 m × 0.0025 m × 0.2 m で、格子数は 16,000、粒子数は 12,288 である。また、時間刻み幅は  $\Delta t = 1.0 \times 10^{-5}$  秒とした。48 コアを用いた場合の各相の Core ID 分布を図 9 に示す。こ

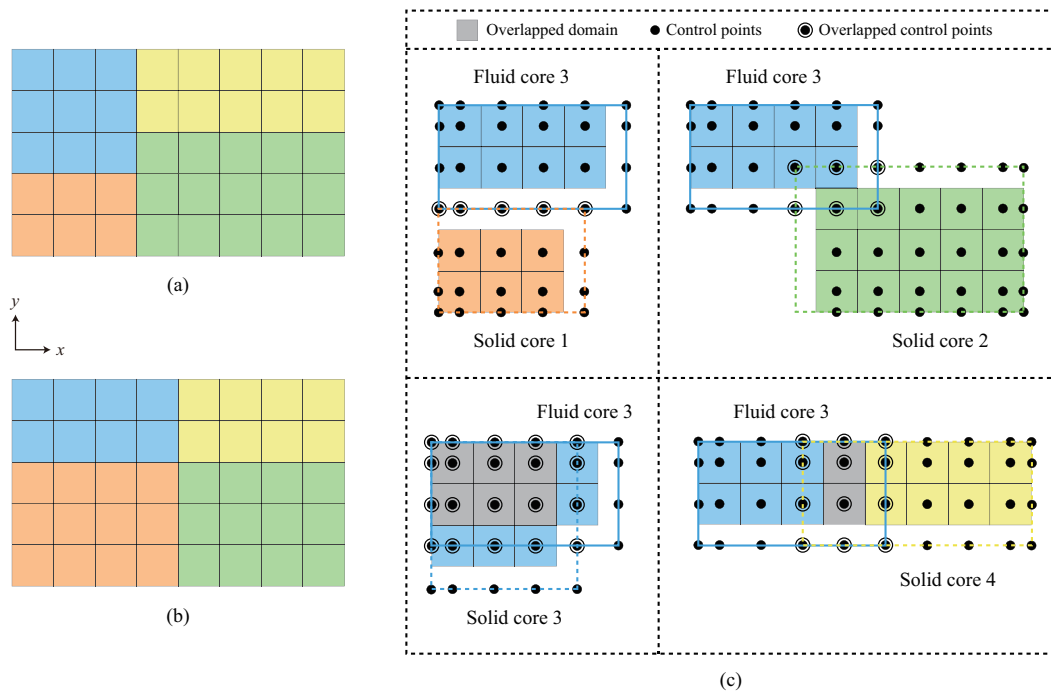


図7 領域分割の異なる固・液連成解析におけるコア分布: (a) 固相; (b) 流体相; (c) 流体相のコア3から見た固相の要通信コア

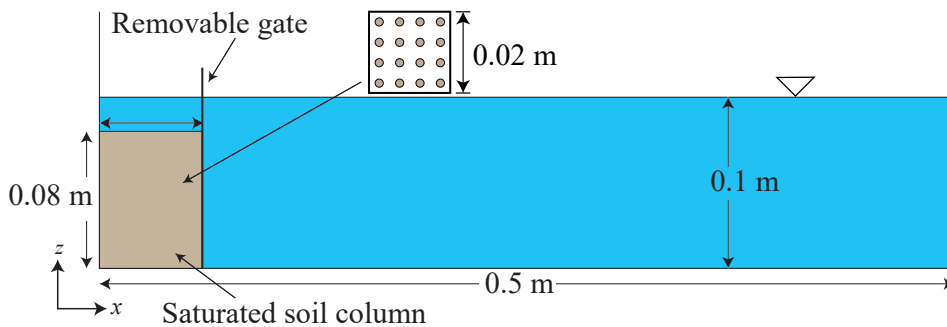


図8 海底地すべりを模擬した実験の解析

の図より、固相の Core ID が変化しているのに対し、流体相の計算領域が固定されていることが確認できる。

更に計算効率の向上を図るために、計算コストの高い工程を調査として 1,000 ステップの解析時間を測定した。合計時間 418 秒のうち固相が 0.05 秒、流体相が 417.95 秒を要し、流体相のソルバーで 417.63 秒を要していることが分かった。これは、固相が陽的 MPM なのに対して、流体相には圧力安定化を目的に陰的

FEM を採用しており、大規模連立一次方程式の求解を要することが原因である。これに対して、疎行列格納形式の改良や大規模問題に有効なブロック不完全コレスキー分解や幾何マルチグリッド前処理などの検討も行う。本改良により、求解部の計算時間を 1/2~1/3 に削減することが現在の最も大きな課題となっている。

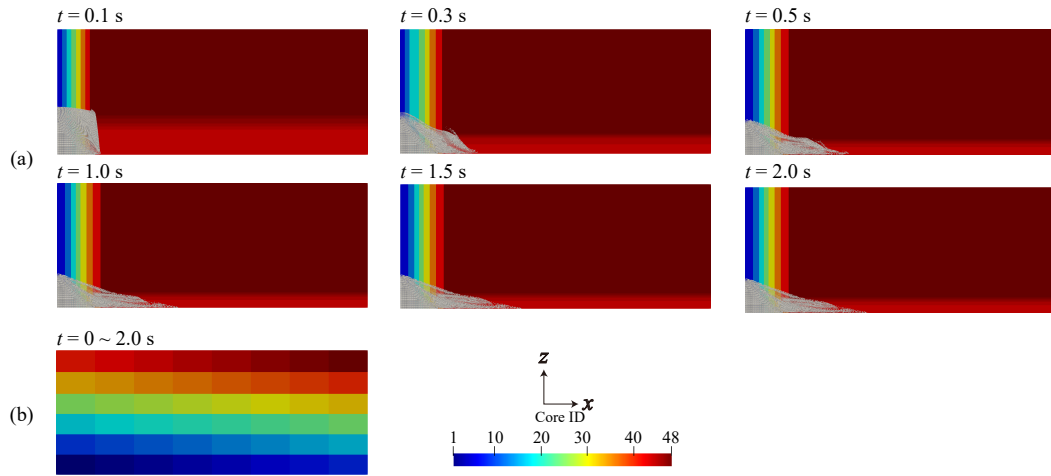


図9 海底地すべりを模擬した実験の再現解析における Core ID 分布：(a) 固相; (b) 流体相

表4 海底地滑りを模擬した実験の解析におけるパラメータ

| Parameter                     | Value                 |
|-------------------------------|-----------------------|
| 固相 土粒子密度 [kg/m <sup>3</sup> ] | 2500                  |
| Young 率 [MPa]                 | 150                   |
| Poisson 比 [-]                 | 0.3                   |
| 土粒子直径 [m]                     | $3.0 \times 10^{-4}$  |
| 初期間隙率 [-]                     | 0.45                  |
| 間隙率 [°]                       | 25                    |
| 粘着力 [kPa]                     | 0                     |
| 液相 密度 [kg/m <sup>3</sup> ]    | 1000                  |
| 動粘性係数 [Pa · s]                | $1.0 \times 10^{-3}$  |
| 気相 密度 [kg/m <sup>3</sup> ]    | 1.205                 |
| 動粘性係数 [Pa · s]                | $1.81 \times 10^{-5}$ |
| 重力加速度 [m/s <sup>2</sup> ]     | 9.81                  |

## 7 研究業績一覧（発表予定も含む）

### 学術論文（査読あり）

- [1] S. Pan, R. Nomura, G. Ling, S. Takase, S. Moriguchi, K. Terada, ‘Variable passing method for combining 3D MPM–FEM hybrid and 2D shallow water simulations of landslide-induced tsunamis’, *Internat. J. Numer. Meths. Fluids* (96), pp. 17-43, 2024.
- [2] S. Hidano, Y. Yamaguchi, S. Takase, S. Moriguchi, K. Kaneko, K. Terada, ‘Semi-

implicit material point method for simulating infiltration-induced failure of unsaturated soil structures’, *Internat. J. Numer. Anal. Meths. Geomech.* (In press).

**国際会議プロシーディングス（査読あり）**

**国際会議発表（査読なし）**

- [3] S. Pan, R. Nomura, S. Takase, S. Moriguchi, K. Terada, ‘A 2D-3D coupling strategy for MPM-FEM hybrid analysis of landslide-induced tsunamis’, 22nd Computational Fluids Conference, CANNES, France, 2023.04.

**国内会議発表（査読なし）**

- [4] 潘紹元, 野村怜佳, 凌国明, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, ‘Variable passing method for combining 3D MPM–FEM hybrid and 2D shallow water simulations of landslide-induced tsunamis’, 第 28 回計算工学講演会, 2023.05.

- [5] 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, ‘半陰的 MPM による不飽和土の浸透崩壊解析’, 第 28 回計算工学講演会, 2023.05.

**公開したライブラリ等**

**その他（特許, プレス発表, 著書等）**