

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

数値シミュレーションは、土砂崩れや、海底地すべりおよびそれに起因する津波をはじめとする大規模な災害リスクを評価する定量的・客観的な手段として期待されている。しかし、一般に災害の空間的規模は大きく、その数値シミュレーションには莫大な計算コストを要することから、計算手法の高速化が必須である。本研究で取り組む固相解析の計算負荷の平準化をはじめとする計算の効率化および高速化は、災害の状況を詳細に表現するような、スーパーコンピュータによる大規模 3 次元解析の実現に寄与する。2024 年度は、固相解析における異なる目的を有するコード群に対して類似のアルゴリズムを適切に統合し、計算プログラム全体の高速化を行った。また、前年度に引き続いて固相単体の解析における動的負荷分散の有効性を検証したことに加えて、この手法を固相・流体相連成解析手法における固相解析プログラムにも実装し、その有効性を確認した。

吉田 圭那：Implicit & explicit MPM の開発

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

- 東北大学 サイバーサイエンスセンター
- 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 参加研究者の役割分担

寺田 賢二郎：研究統括
中島 研吾：性能最適化
河合 直聡：性能最適化
三木 洋平：性能最適化
坂口 吉生：性能最適化
野村 怜佳：3D-2D 連成手法の開発
飛弾野 壮真：Semi-implicit MPM の開発
菅井 理一：Implicit MPM の開発

2 研究の目的と意義

防災・減災の観点から重要とされる情報が、どの程度予測可能であるかを定量的に把握することは、適切な災害リスク評価に直結する重要な課題である。数値シミュレーション技術は、その高度化および高速化によって災害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、土砂崩れ等の斜面災害を対象とする場合には、空間スケールが大規模になるだけでなく、固体および流体、またはそれに準ずる固体の流動挙動や固相・液相の遷移挙動を再現する必要があり、その数値シミュレーションは現象のモデル化、計算精度、計算コストなどあらゆる面で困難であると言われている。これ

らの課題を解決するためには、適切な解析手法の開発と計算の効率化が必要不可欠である。このような背景のもと、本研究では2021年に福島県の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（図1(a)）と、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を（図1(b)）対象として、さらなる高速化および固液混合連成解析の高度化に取り組み、災害発生時の状況をできる限り詳細に再現するとともに、解析時間の削減を目的とする。

加えて、数値解析の観点からみると、現状では、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た高度な計算力学手法と動的負荷分散などの宇宙物理分野で実績のある計算科学を融合した報告例は我々のグループの成果以外に見当たらない。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、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。

3 当拠点公募型研究として実施した意義

本研究グループは、これまでに JHPCN 共同研究課題として、固相単相の MPM (Material Point Method) の計算に際して、粒子が分散しても CPU 負荷を均等に保たれるような動的負荷分散技術などを導入して計算コードの高速化・高度化を行ってきた。しかしながら、固相-流体相混合問題である海底地すべり問題に対して MPM-FEM ハイブリッド法を適用する場合、流体相の解析に採用している安定化有限要素法 (FEM) の高速化が課題として残

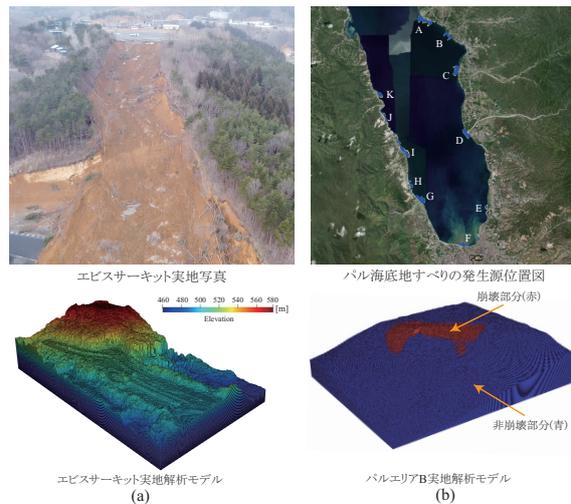


図1 二つの災害の実地写真と実地形の解析モデル

されていた。具体的には、MPM-FEM ハイブリッド法では、固体相には陽的時間積分を適用する MPM と、液体相には陰的時間積分を行う FEM を採用しているため、流体相の計算では陽的 MPM で表現する手法に比べて大きな時間刻み幅を採用できるという利点がある一方、陽的時間積分の制約を考慮した時間刻み幅も考慮する必要があるため、連立一次方程式の求解に非常に多くの時間を要することになる。特に、係数行列のサイズは自由度数の2乗に比例するため、問題の規模が大きくなれば同様のオーダーで計算コスト増大することになる。したがって、この求解過程の高速化を目指した、より効率的な前処理やソルバーの実装が重要となる。この課題には、計算力学におけるモデル化や従来のアルゴリズムの適用のみで解決することは不可能であり、計算科学に精通している東京大学の中島・三木、東北大学サイバーサイエンスセンターの河合や富士通の坂口の協力は不可欠である。

研究の目的と意義で示したパルでの海底地すべりとそれに起因する津波に関する解析では、実際の地形と現象の経過時間を考慮した高解像度の3次元解析を検討している。この災害は、

複数地点において海底土砂の崩壊とそれにより誘発される津波が発生しており、それぞれの関連性についての検討も重要である。そのうちの1地点であるエリア B の解析モデルを図 1 (b) に示しているが、このモデルの解像度は 5 m であり、 $400 \times 80 \times 350$ の要素と 3300 万程度の粒子となる。また、実施したい 1 m の解像度では、1 億要素と 1.5 億以上の粒子が必要となる。この計算を複数のエリアで地すべりとそれに伴う津波の解析を行い、その津波を領域全体で統合するためには、大規模計算を複数回実施するための豊富な計算資源が必要となる。

4 前年度までに得られた研究成果の概要

MPM による固体解析コードの高度化・高速化を実現するために、動的負荷分散（以下、DLB）の実装とそれに伴う MPM コードのアルゴリズムの改良を実施した。また、DLB を実装した MPM コードの性能評価および実大規模の災害シミュレーションを実施した。以下にそれぞれの概要を示す。

4.1 動的負荷分散の実装

MPM では物体の運動を解くための格子が空間に固定されている一方で、物体領域を表現するための粒子は格子をまたいで移動する。そのため土砂流動を対象とした解析を行う際には、格子に対する粒子の分布が初期配置から大きく変化する。これまでの MPM 固体解析コードでは、MPI 並列における計算領域分割は初期の格子基準で設定されており、時間に寄らず常に固定されていたため、粒子分布の偏ることでプロセス間で演算負荷や通信負荷に差が生じ、並列化の利点を生かしきれないことが問題であった。この問題を解消するために、粒子分布に応じて計算領域を動的に分割し直す DLB の実装を行った。

4.2 格子点の通信アルゴリズムの改良

これまで使用してきた MPM 固体解析コードでは、通信が必要な格子点の探索を容易にするために、MPI 並列における計算領域分割を格子数ができるだけ均等になるように実施していた。このとき、計算領域の境界が同一平面上に存在するように分割するようなアルゴリズムを採用してきた。しかし、粒子分布に応じて計算領域を再設定する DLB を実装したことにより、計算領域のサイズが均等にならないような領域分割が行われ、計算領域の境界が互い違いになる状況が発生した。従来コードに実装していた通信アルゴリズムでは通信が必要な格子点の把握が困難であったため、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境界の格子を把握し、通信が必要な格子点と通信相手となる格子点を獲得できるようにアルゴリズムを改良した。

4.3 砂柱崩壊解析による性能評価

DLB の有効性検証のために準 3 次元の砂柱崩壊解析を実施し、DLB の適用有無による並列化効率の検証を行った。格子数と粒子数、時間刻み幅をそれぞれ 45,000, 80,000, $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ 秒とし、コア数が異なる 14 ケースの計算を Wisteria/BDEC-01 Odyssey を利用して行った。

解析によって得られた並列化効率（=（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））を比較すると、DLB を適用していない解析では全体を通して 10 ~ 20 % の並列化効率であるのに対して、DLB を適用した解析では 60 ~ 95 % の並列化効率となり、負荷分散が適切に機能していることを確認した。また、2022 年度に 48 コアで実施した同様の砂柱崩壊解析では、DLB を適用した解析が 2,212 秒要したのに対して、上記の改良によって 2023 年度に実施した解析では 1,054 秒まで

解析時間を短縮することができた。

4.4 実大規模シミュレーション

2021年に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。解析領域は $450\text{ m} \times 125\text{ m} \times 320\text{ m}$ とし、格子一辺を 1 m 、粒子数は1格子あたり $2 \times 2 \times 2 = 8$ 個とした。したがって、MPM解析に使用したB-spline基底関数の総コントロールポイント数は16,484,008点、総粒子数は19,150,323個となる。時間刻み幅を $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$ 秒とする合計100秒間の解析を次の手順で実施した。はじめに重力を10秒間で徐々に増加させて初期状態を生成した後、振幅600 galで1 Hzの仮想的な地震動を80秒間与え、最後の10秒間は地震動を入力しない自重解析を実施した。計算機はWisteria/BDEC-01 Odysseyを利用し、 $48 \times 4 \times 30 = 5,760$ プロセスで分割して解析を実施した。

最初の1秒間の解析に要した計算時間は、DLBを適用しない解析では8,924秒、DLBを適用した解析では2,440秒であり、DLBの適用により約3.7倍のスピードアップを達成した。また、DLBを適用しない解析において、1秒間の解析の所要時間を基にすると単純計算で100秒の解析に248時間かかると想定される。一方で、DLBを適用した解析において100秒の解析に要した時間は6.3時間であったことから、実大規模解析におけるDLBによる効率化性能を確認した。

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

昨年度に引き続き、固相単体コードに実装した動的負荷分散(DLB)の有効性検証をいくつかの例題の解析を通して実施した。それに加えて今年度は、固相解析コードのさらなる高速化

に取り組んだ。その高速化に先立ち、改めて固相解析コードの各工程で要する解析時間を分析し、解析時間の割合が多く、その削減が容易である箇所の特定を行った。本分析から、MPMに特有な粒子から格子点へ物理量をマッピングする操作および、運動方程式を求解する操作が占める時間の割合が大きいのことが明らかになった。これらの操作は構造が似ており、格子のループの中で、その格子に所属する粒子IDを参照し、その粒子と関連する格子点との接続ティビティを形成したのち、形状関数を求め、行う処理である。その類似性を活かして、本来別々に行う処理であるところを、同一の工程として実施するようにコードを修正した。

その結果、48プロセスで分割し実施した準3次元の砂柱崩壊解析の解析時間が、DLBを適用したもので約529秒となり、一昨年と昨年度に実施した解析における計算時間と比較して、それぞれ約4.2倍と約2.0倍の高速化を達成した。このときの解析モデルを図2、解析結果を図3に示した。同様の問題の3次元解析も実施しており、DLBを採用しない場合の解析時間は、138,037秒(≈38.3時間)に対して、DLBを採用した場合の解析時間は6,886秒(≈1.91時間)という結果が得られており、計算コストを約1/20に抑えることができた。また、この高速化を施したのち、実大規模解析(図4)を実施しており、それらの結果をまとめ、Engineering with ComputersのSpecial Issue “Recent Advances in Meshfree and Particle Methods”に登載された(業績リスト: S. Hidano et al. “B-spline-based material point method with dynamic load balancing technique for large-scale simulation”, Engineering with Computers).

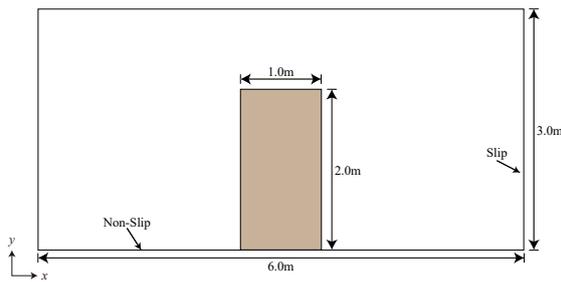


図2 準3次元砂柱崩壊解析のモデル

5.2 固相・流体相液連成解析の高速化

本プロジェクトチームでは、固相解析にMPMを採用し、流体相解析にEuler型FEMを採用する、MPM-FEMハイブリッド法を提案している。MPMでは、解析粒子はLagrange記述で表されるため、解析の進行に伴い、その空間分布に変化が生じる。その一方、Euler型FEMではその変化が生じない。流体相に対しては、Phase-field法を用いる手法となっており、水と空気の両相を統一的に表現する。より具体的には、0から1の間で定義されるPhase-field関数を用いて各領域内の水と空気の体積占有率を表現している。そのため、Euler型FEMでの計算点にあたる格子点（より正確には、B-spline形状関数を採用するためコントロールポイント）は常に同程度の計算負荷を有している。

そのような背景から、固相と流体相とで最適となるMPI並列に用いる領域分割は異なり、固相のMPMには動的負荷分散（DLB）が必要になる一方、流体相のEuler型FEMにはDLBが不要となる。そこで、固相と流体相とで異なる領域分割を適用し、その領域分割を考慮して矛盾なく通信を行うアルゴリズムを提案した（図5）。この手法の検証として、図6に示すような解析モデルを用いて水中での砂柱崩壊による波の伝播解析を行った。この解析モデルでは、12,288個の固相粒子と、流体相

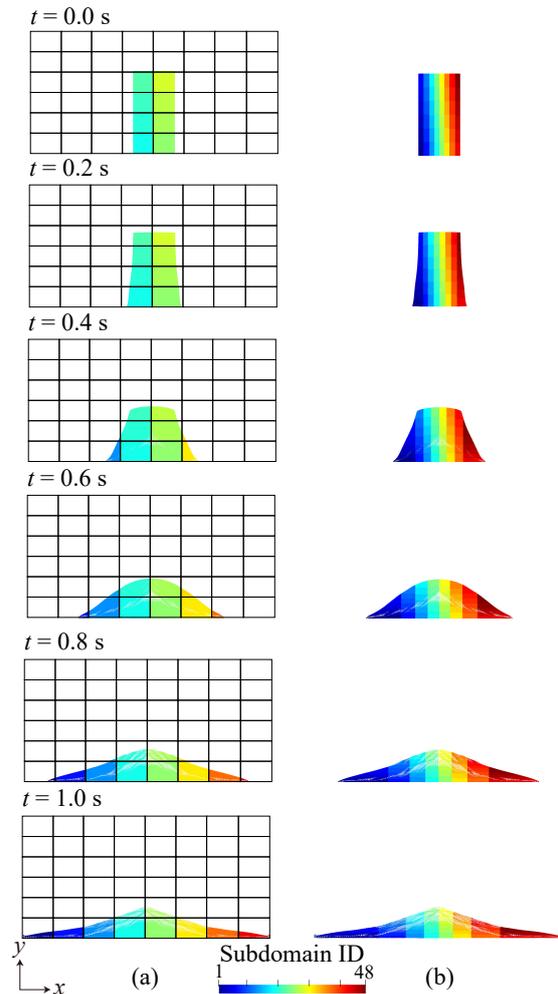


図3 準3次元砂柱崩壊解析の時刻 t における領域分割のスナップショット ($t = [0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0]$ s): (a) 動的負荷分散なし; (b) 動的負荷分散あり

を表す16,000格子点 ($200 \times 1 \times 80$) を用いており、各格子辺長は0.0025mであり、1格子あたり $4 \times 1 \times 4$ 個の粒子を配置したモデルである。境界条件として底面はNon-slip、側面はSlip条件とし、時間刻みはMPM、FEMともに 1.0×10^{-5} s、DLBの実行間隔は1,000ステップとした。この解析を通して、固相MPMと流体相FEMの領域分割パターンが不一致な状態でも、同一パターンの領域分割をした場合と同様の解析結果を示すことを確認している。

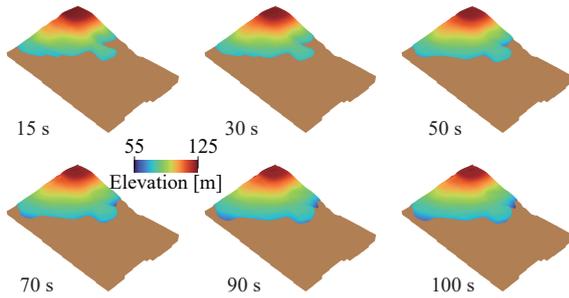


図 4 実大規模解析に各時刻における標高値のスナップショット

このときの、領域分割の様子は図 7 に示した。

図 8 に各並列化数での並列化効率を示すが、DLB の導入によって、より効率的な解析ができたことが確認できる。しかしながら、固相単体の場合と比べその効果は小さい。そこで、より詳細な計算時間を把握するため、固相と流体相で分けた計算時間を図 9 に示した。この図から、全体計算時間や固相計算時間は DLB の適用で高速化が確認できるのに対し、効率化を適用していない流体相については、計算時間の変化は見られず、その比率は全体の時間の大半を占めている。また、その中でも陰解法を採用している流体相での GPBi-CG 法による線形方程式の求解にかかる時間が、20 % 程度と多くの割合を占めている。これらの内容は、Computational Mechanics の Special Issue “Advancements in Computational Mechanics: A Tribute to E. Oñate” に掲載された（業績リスト: S. Pan, S. Hidano, et al., “Speeding up MPM calculations in MPM-FEM hybrid method incorporating inconsistent domain decomposition patterns for solid and fluid phases”, Computational Mechanics).

また、上記を踏まえると、流体相のアルゴリズムの効率化の実施だけでなく、線形ソルバーの高性能化が必要であり、Multigrid 前処理の導

入による高速化を検討している。Multigrid 前処理は構造格子に基づいた離散化では、MPM の特性を考慮した Coarse Grid Collection 生成と Smoother の選択ができれば、クリロフ部分空間法の収束性を大きく改善できる可能性がある。ただし、Multigrid 前処理の導入に向けて解くべき問題の解析を行った結果、固体と流体相の連成による条件数悪化の影響がソルバに与える影響が想定より大きいことが判明しており、反復計算中の疑似収束や、収束と判断した後の残差に対して近似解の誤差は大きい等の問題が発生している。現在はより堅牢な不完全コレスキー分解前処理の導入を先に行い、高精度、精度保証演算を導入して固体・流体相の計算で必要な精度の検証を実施している。

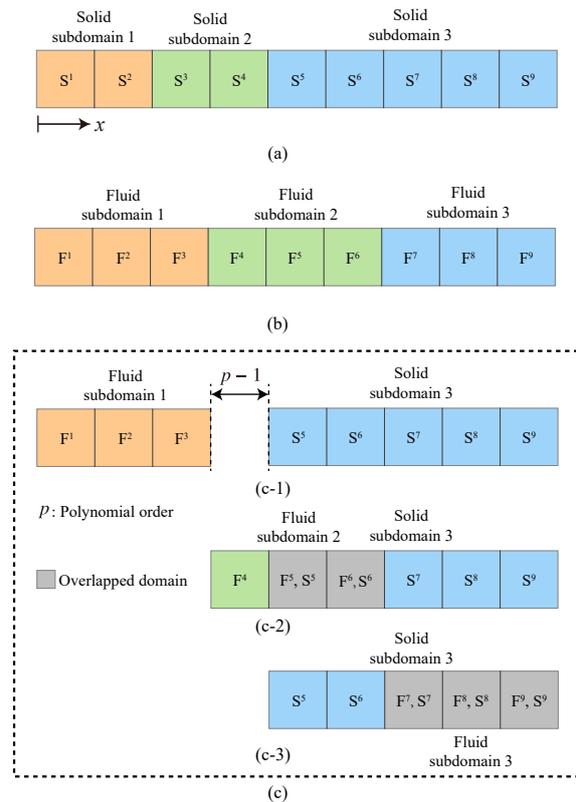


図 5 固相と流体相とで異なる領域分割の適用および、高次 B-spline 形状関数を考慮した通信対象の選定

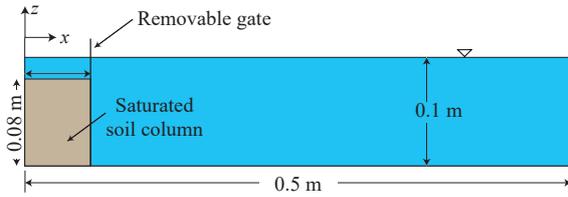


図 6 海底地すべりを模擬した水中の砂柱崩壊による波の伝搬解析のモデル

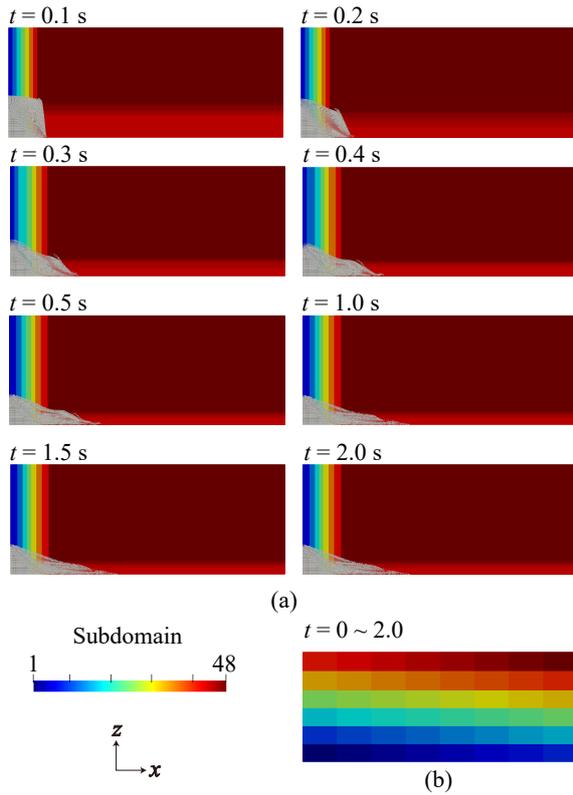


図 7 海底地すべりを模擬した水中の砂柱崩壊による波の伝搬解析における領域分割のスナップショット: (a) 固相; (b) 流体相

6 今年度の進捗状況と今後の展望

本研究は、実災害スケール大規模な土砂災害の解析の実現を目指しており、(a) 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、および、(b) 2018 年インドネシアのパルで発生した海底地すべりと津波の二つを対象とした。(a) に対しては、実大規

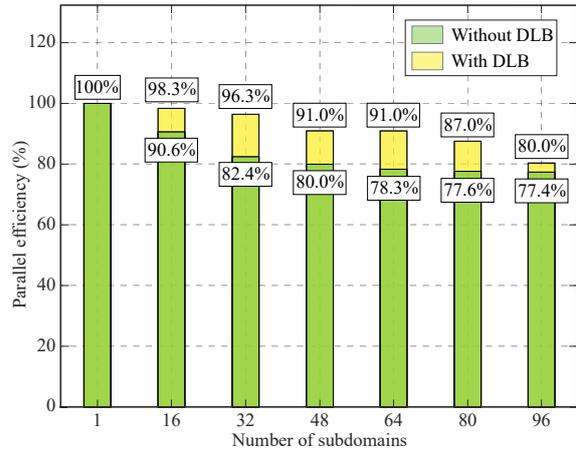


図 8 海底地すべりを模擬した水中の砂柱崩壊による波の伝搬解析における並列数の変化に応じた並列化効率の変化

模の固相単体解析を実現し、その成果を論文として公表した。構成則などのモデルに関する開発や、そのパラメータスタディが残されているが、アルゴリズムの高度化としては十分な進展が得られたと考えている。今後はそれらの残された課題について検討を深めていき、実災害のアルゴリズムの解明を行っていきたい。

また、より大規模な問題への応用も考えており、さらなる高速化を目指している。その観点から、改めてコードの解析時間の分析を行い、MPM 粒子と格子点間の物理量の内挿・マッピング操作に関する時間がそれぞれ、約 30%、16% となっていることを確認した。これらは、GPU 化による高速化が期待できると考えている。OpenACC による GPU 化を想定しており、これまでのフラット MPI によって並列化されたコードを OpenMP を併用したハイブリッド並列へと拡張し、その後 OpenMP の指示文を OpenACC の指示文へと置き換えて GPU 化という手順で進めていく予定である。2025 年度は、ハイブリッド並列 (MPI に加えて OpenMP もしくは OpenACC) のとして、

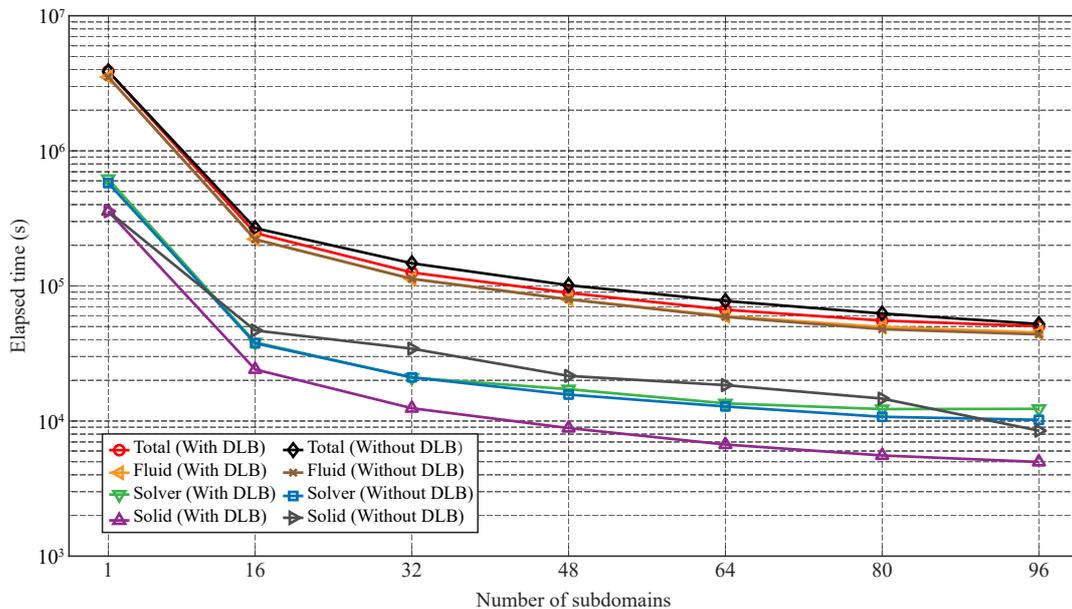


図9 海底地すべりを模擬した水中の砂柱崩壊による波の伝搬解析における並列数の変化に応じた工程ごとの解析時間の変化

比較的小規模な3次元砂柱崩壊解析を実施したいと考えている。 処理の開発に努める。

一方 (b) では、固相に加えて流体相の計算が必要となる。その流体計算に従来の陽解法MPMを採用すると、数値不安定性や時間刻み幅への強い制約などの問題点があることが知られている。これに対して本研究グループは、MPMとEuler型FEMを組み合わせたハイブリット法を提案している。この高速化を目指して、固相MPMへの動的負荷分散の適用を実施し、ある程度の高速化に成功した。しかしながら、流体相の計算が大半を占めており、その高度化が必要であることを、明確にした。この内容については、論文として公表している。

この内容を踏まえて今後は、線形ソルバーの高速化では、悪条件問題に対する堅牢性を向上させた不完全コレスキー分解前処理付きクリロフ部分空間法で要求される解の精度を満たせる収束条件、浮動小数演算精度を明確にし、線形ソルバーの高速化に寄与するマルチグリッド前