

jh210023-NAH

## 2021 年度課題 時空間領域境界積分方程式法の高速度解法の開発と巨大地震

### シミュレーションへの応用

安藤 亮輔（東京大学）

#### 概要

大規模並列計算環境を使用することで、現実的な 3 次元モデルを用いた地震発生シミュレーションを実現し、物理モデルに基づいたシミュレーションによる地震の繰り返しや動的破壊現象の再現性と予測可能性を向上させることを目的としている。研究課題は、既存の FDP 法を用いた動的破壊シミュレーション、H 行列を用いた準動的な地震シーケンス（サイクル）シミュレーション、動的シミュレーションの計算コストを  $O(N \log N)$  に低減させる FDP=H 行列法の 3 次元実装、の 3 つからなる。今年度の成果は以下の通りである。動的破壊シミュレーションでは、2016 年 Kaikoura（ニュージーランド）地震、2008 年 M7.9 Wenchuan 地震等について、破壊過程のパラメータ依存性と観測の再現性を検証した。また、地震シーケンス（サイクル）シミュレーションについては、格子 H-行列法を実装したアルゴリズムの大規模並列における性能を評価し、従来の H-行列法に見られた約 100 MPI での高速化の飽和が生じないことを示した。3 次元 FDP=H-行列法の開発については、変位波動計算の問題において、従来の H-行列ライブラリ（HACAPK）を拡張することで、FDP=H-行列のアルゴリズムに実装した。

#### 1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名  
東京大学

(2) 共同研究分野  
超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

安藤亮輔：研究課題の総括とモデルの構築

伊田明弘：H-matrix ライブラリの高度化

星野哲也：H-matrix ライブラリの高度化

大谷真紀子：FDP=H-matrix アルゴリズム開発

佐藤大祐：FDP=H-matrix アルゴリズム開発

小澤創：H-matrix ライブラリの高度化とモデルの構築

飯田達也：モデルの構築

村松和紀：モデルの構築

タン ロンジャン：モデルの構築

#### 2. 研究の目的と意義

地震発生に伴い生じる断層滑り量を物理的に予測することは、地震学における中心的課題である。その空間分布を決める大きな要素が断層の幾何形状であるとの示唆は、これまでも経験的に得られていたが、その実証には困難を伴っていた。しかしながら、最近の観測技術と数値計算技術の発達によって、実際の大地震の観測データと現実的な複雑形状を考慮した断層モデルを用いたシミュレーションの比較によって、物理モデルの検証が可能となってきている。現実的な系を対象としたモデルを用いた地震発生過程のシミュレーションを行うためには、大規模数値計算を実行することは必須の要求である。このような状況の下、本研究では、大規模なフォワードモデルを用いた実地震現象の物理モデルの高度化と、時空間境界積分方程式法（ST-

BIEM) に基づく新たな高速化手法の開発の、二つを目的とする。

本年度において、物理モデル高度化の課題として、これまで取り組んできた 2016 年 M7.9Kaikoura 地震の破壊過程について、観測ベースでこれまでの理解とは異なる仮説が提唱されたので、OFP を用いたパラメタスタディによってその力学的な妥当性を検証する。Kaikoura 地震は、史上最も詳細な観測データが得られた巨大地震の一つであり、多面的な検討が可能なイベントである。また、前年度から開始した一回の地震イベントの動的破壊のみでなく、地震の繰り返し過程や本震・余震系列のモデル化を扱う、地震サイクルシミュレーションを発展させる。数値計算手法の効率化としては、時空間境界積分方程式法 (ST-BIEM) に基づいた解析手法の開発を行う。高速領域分割境界積分方程式法 (FDP-BIEM) と H-行列法を組み合わせた、FDP=H-行列法の開発を進める。本年度は、簡単な物理系を用いて研究参加者の伊田が開発した既存の HACApK ライブラリを拡張し、これまでの FDP=H-行列法の開発では実現していなかった並列化に対応した、プロトタイプのアプローチを作成することを目指す。本課題は、手法の革新を実現することで、物理現象のより深い理解と予測可能性の向上を図る点に意義がある。

### 3. 当拠点公募型研究として実施した意義

本課題では、近年発生した国内外の地震を系統的に物理モデルによって再現する研究を行っている。本年度は 2018 年に発生した北海道胆振東部地震について、3 次元断層形状を考慮した物理モデルを構築し、大規模並列計算を用いて、モデル挙動を詳細に調べた。このことで、地震時の動的破壊過程が 3 次元断層形状に強く依存していることが示され

た。昨年度に実施した 2016 年カイクウラ (ニュージーランド) 地震のシミュレーションにおいても 3 次元断層形状の重要性は示されており、地震破壊過程を支配する重要な要素についての検証事例が着実に積み上げられてきている。この研究は、大規模モデルの挙動解析を多数回行うことを必要としたものであり、当拠点で OFP を用いること抜きにしては、その実現は難しかったと考えられる。

また、当拠点の研究として、地球物理学分野の応用的な計算力学者と計算機科学者が共同していることは、アルゴリズムの革新的な高度化にとって欠かせない。これまでに代表者の安藤と分担者の佐藤は、弾性波動論で用いられる波線座標の概念に注目し、特性曲線上の H-行列法と座標変換とを組み合わせることで高速解法を構築した。しかしながら、このアルゴリズムはその複雑な階層構造のため、まだ並列化されていない。一方で、副代表者の伊田が開発した HACApK ライブラリは、分散メモリ並列計算機を用いた H-行列法の大規模並列計算に耐える実装である。これまでの開発過程で、FDP=H-行列法の HACApK への実装を具体的に検討することができた。今後 HACApK を拡張することで、このような実装を実現させる計画である。このような学際的な研究は、当拠点公募型課題として実施したからこそ実現していると言える。

本課題では、地震学的に重要な課題である、超高精細な現実的 3 次元断層形状を考慮した動的な破壊シミュレーションを実現させることを大目標としている。それは、地震学を専門とする代表者が最近開発した FDP-BIEM、従来手法である H-行列法の拡張、さらに計算機科学を専門とする副代表者が開発した大規模並列演算に最適化されたライブラリである HACApK の拡張、および OFP のような大規模並列計算機上への実装を実現することで初めて解決できる問題である。これらすべてを用いて初めて実現する本課題は、地震学

での知見のみならずメニーコアへの対応など高度な計算機科学の知見が必要となるため、拠点公募型共同研究で実施していることの意義は大きい。

#### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

前年度から、それまで行っていた動的破壊伝播シミュレーションと高速高効率な DP=H 行列法アルゴリズムの開発に加えて、準動的地震シーケンスシミュレーションの手法開発と応用を実施することとした。

動的破壊伝播シミュレーションを用いた物理モデルの高度化として、2016 年 Kaikoura 地震について、破壊過程の複雑性を理解することを目的として、初期条件への鋭敏性を検討するためのパラメタスタディを行った。準動的地震シーケンスシミュレーションでは、HACApK ライブラリをシミュレーションコードに実装し高効率化した上で、断層形状の複雑性を考慮したモデルを用いて余震の発生過程をシミュレートすることに初めて成功し、国際誌で発表した (Ozawa and Ando, 2020, JGR)。FDP=H 行列のアルゴリズム開発では、3 次元動弾性問題に対するグリーン関数の近似精度と計算・資源効率化の関係を系統的に調べて、本手法がこれまで確認されていた 2 次元動弾性問題のみならず 3 次元動弾性問題にも有効であることを示す結果を得た (久河, 2020 年度, 修士論文, 東京大学大学院理学系研究科として取りまとめ)。また、この成果をベースとして、3 次元動弾性波動問題を計算するアルゴリズムと HACApK の拡張を設計し、実装に着手した。

##### ●動的破壊伝播シミュレーション

2016 年カイコウラ地震は、これまで観測された大地震の中で、最も詳細に破壊の伝播過程が観測で明らかとなった地震である。その破壊伝播過程は、合計で 10 数枚にもおよぶ断層が連動して破壊した、断層形状の複雑異性に代表される。本研究では、Orkforest-

PACS の 256 ノードを用いた大規模並列計算 (2 時間のラン) で可能となった断層形状の複雑性の再現モデルと、本地震について得られた貴重な観測データを用いて、両者を詳細に比較することで、地震破壊伝播を支配する物理過程を解明している。

これまでの研究によって、本震の破壊伝播過程の大局的な再現については成功しているが、10 数枚におよぶ断層の個々の破壊過程については、未解明の問題が残されている。その中でも大きな問題となっているのが、ホープ断層と呼ばれる比較的大きな断層の寄与である。ホープ断層では、地質学的調査によって、最近の大地震は約 150 年前に発生し、地震の平均的な発生間隔は 180-310 年だと考えられている。したがってホープ断層周辺には 2016 年に破壊を生じさせるだけの十分な応力が蓄えられていなかった可能性が考えられる。そのため、本研究では初期応力状態をパラメタとして変化させて観測と比較することで、この仮説の妥当性を定量的に評価した。その結果、臨界的な応力蓄積率が 70% 程度であると観測と調和的であることが分かった。

##### ●準動的地震サイクルシミュレーション

地震の顕著な特徴に、余震が発生した後に生じる余震現象の存在がある。余震は、本震で破壊した断層面状やその周囲の媒質内で発生する小規模な破壊の集団であり、時間のべき関数で減衰する性質を持つことが経験的に知られている。これまで余震現象の物理過程モデルでは、本震と余震との大きな時空間スケールの違いと余震の数の多さの数値的な取り扱いに困難さがあったが、本課題ではこれを乗り換えるための手法開発を完成させ、物理モデルの構築と解析に成功した。

まず超大規模並列に適用可能な、格子 H 行列版 HACApK のシミュレーションアルゴリズムへの実装を完成させた。そのことで、従来の準動的境界積分方程式法では  $O(N^2)$  である

計算コストを  $O(N \log N)$  にまで下げることにより成功した。これにより、本震断層より 2 桁程度まで小さな断層の解像を可能にして、本震と余震の系列をシームレスに数値計算に載せることに成功した。また本コードの計算結果は、南カリフォルニア地震センターの実施する国際的なコード評価プログラムに投稿し精度検証された(文献[1])。さらに 2 次元モデルによって、余震発生モデルには、本震の断層に地質学的観察により知られている波長が複数桁に及ぶフラクタル状の非平面形状を考慮した。また、本震断層の非平面の度合い変化させるパラメスタディを行うことによって、ラフネスの度合いが大きいほど断層の側方で断層を取り囲むように分布する余震の個数が増えることが分かった。これら特徴はどれも、遅れ破壊としての余震の再現とベキ的に減衰する余震発生個数の再現に観測される余震の一般的な特徴を再現するものであり、それが現実的な系を考慮した物理モデルで初めて再現された意義は大きい。

#### ● FDP=H 行列法の 3 次元動弾性問題への適用性の詳細検討

H 行列の動弾性問題への適用可能性は、我々のこれまでの研究により、2 次元問題については十分な性能を確認してきた。3 次元問題への拡張は、原理的には可能であると考えられていたものの、実問題での検証は未実施であった。今年度は、動的破壊シミュレーションの実問題に用いる、3 次元の応力グリーン関数による構成される積分核行列について、HACApK ライブラリを用いて低ランク近似における特性を明らかにするとともに効率化性能を詳細に評価した。

問題設定として、高速領域分割境界積分方程式法(FDP-BIEM)の積分核のテンソル成分に関して、平面や屈曲を考慮した複合面などいくつかの断層形状の場合を考慮して積分核行列を構成して、その密行列に対して H 行

列を適用した。

その結果、正方形に近い形状の 5000 要素程度の断層面に関して、積分核の静的な成分においては積分核と滑りベクトルの積で計算される応力の相対誤差が  $10^{-4}$  となる程度の精度であれば低ランク近似によるメモリの圧縮が可能であり、動的な成分に関しては  $10^{-3}$  となる程度まで低ランク近似によるメモリ圧縮が可能であることが判明した。3 次元問題では 2 次元問題と比して、方位依存性の効果で不利な側面を抱えるものの、要素数を大きくとることで理論的に期待される効率性能が得られることが確認された。

## 5. 今年度の研究成果の詳細

● 準動的地震サイクルシミュレーション  
格子 H 行列版 HACApK ライブラリを実装した地震サイクルシミュレーションアルゴリズムは、前年度においては比較的小さな並列規模での使用に留まっていた。今年度は、より大規模並列環境において、実際の地震の問題に近いモデル設定を用いて効率化性能を評価した。H-行列を用いた境界要素法の効率化手法は、良く使用される高速フーリエ変換を用いた手法とは異なり、非平面形状の断層面を扱うことができる点が重要なメリットである。そのため、本研究では、前年度扱った 2 次元モデルを 3 次元モデルに発展させて、図 1 に示す屈曲した断層形状モデルを用いた。性能評価は、数値計算速度と使用メモリ量を指標とし測定した。本測定には、OFP を用いて最大 2 万 MPI 並列程度で実施した。

図 2 と図 3 に、それぞれ境界要素数  $N$  に対するメモリ消費量および計算時間(100 タイムステップの計算に要した時間)の関係を示す。これらの結果から、双方の指標ともに、もとの実装が  $O(N^2)$  依存性を持つところが、H-行列に期待される  $O(N \log$

N) 依存性まで概ね縮減されていることが確認できる。

さらに重要なことは、並列計算を大規模化したときの効率化性能である。図4に、同じ要素数の問題を異なる MPI 並列数で計算したときの、MPI 並列数と計算時間の関係を示す。図には、通常の H-行列の実装と格子 H-行列の実装とを比較を示している。ここから分かるように、格子 H-行列は、低並列数では通常 H-行列より遅いものの、一定以上の並列数では、通常 H-行列で見られる計算速度の飽和現象は見られずに、より大規模な並列規模に至るまで同じスケールリングを示している。格子 H-行列は、MPI 並列の構造を意識したデータ構造を用いて積分核行列を分割しており、MPI に伴うオーバーヘッドが抑制されるという期待通りの性能が得られることが確認できた。本結果は Ozawa, Ida, Hoshino & Ando として投稿準備中であり、小澤（2022, 東京大学理学系研究科博士論文）の一部として取りまとめた。

また、本アルゴリズムを用いて、日本で最も活発な活断層である、中央構造線活断層帯のモデル化を開始した。その端緒として、測地学的な観測データに基づいて、システムに加える外力を設定して、地質学的に得られた観測データ等を用いて、断層の滑り速度の長時間平均など、基本的な物理量による観測との比較、検証を行った。結果の一部は、村松（2022, 東京大学理学系研究科修士論文）として取りまとめた。また本アルゴリズムを用いて、2次元問題において断層の屈曲が地震の大きさの統計に与える効果を調べ、天然断層の観測とよく一致する結果を得た（国際学会[1]）。

このように、大規模並列での高い実行性能が確認でき個別断層での大規模計算への応用ができたことにより、今後は例えば日本列島全域規模での現実的な地震サイ

クルシミュレーションの実現が視野に入ってきた。今後のさらなる応用研究への重要な基礎が築けたものと考えられる。

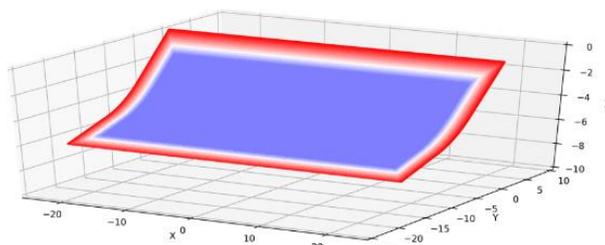


図1. 地震繰り返しシミュレーションに用いた断層モデルと摩擦パラメータ分布。

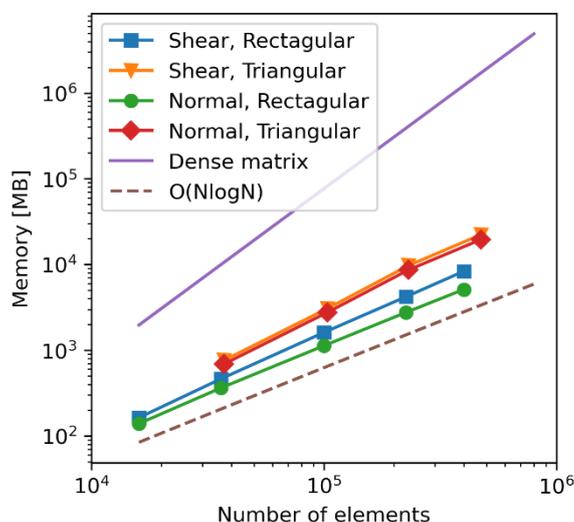


図2. 地震繰り返しシミュレーションにおけるメモリ消費量と要素数（計算規模）の関係。

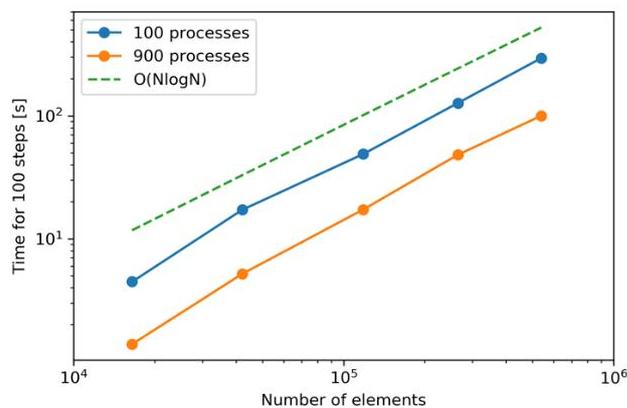


図3. 地震繰り返しシミュレーションにおける計算時間と要素数の関係。

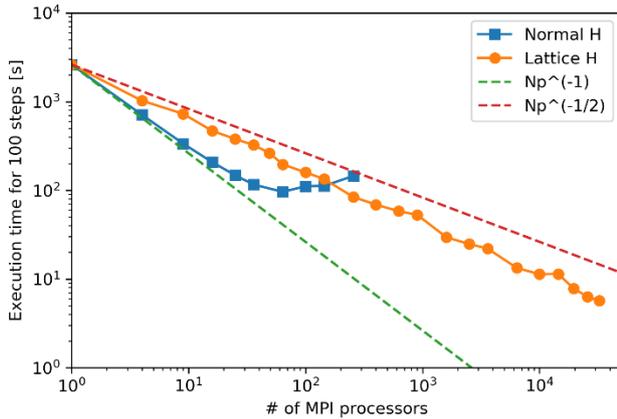


図 4. MPI プロセス数と計算時間の関係。

### ●動的破壊伝播シミュレーション

現実的な 3 次元断層形状を考慮した実地震現象のモデリングについては、まず 2016 年カイクウラ地震の事例研究を行った。本地震については最近の観測研究で、断層の南西部から北東部の領域への破壊の伝播経路が、これまで考えられてきた北側の経路ではなく、図 5（上）で赤丸を付けた断層を介した南側の経路であったのではないかと仮説が唱えられるようになった。そのため、本年度はパラメスタディによりそのような可能性が力学的に生じることがあるのかを調べた。本解析には、OFP の 128 ノードを用いて、約 1 時間の計算を 20 通り程度行った。

観測に基づいてモデルに考慮する初期条件で不確実性の高いのは、応力場であるため、観測で許容される範囲内で応力場を変化させ、その依存性を調べた。図 5 に、パラメスタディで考慮した断層に加わる応力分布の例を示す。動的破壊過程をすべてのパラメタセットについてシミュレーションにより解析したところ、応力場の違いは図中で赤丸を付した断層の滑り量の大きさに特に影響を与えることが分かった。図 6 の上と下はその両極端な結果を示す代表例であり、上の場合は当該断層での滑りが小さく、下の場合では大きいこと

が分かる。ところが、下の場合であっても当該断層を介した南側の経路で破壊が、南東領域から北東領域に伝播することは無かった。この結果に基づけば、力学的には、従来説である、北側の破壊伝播経路が尤もらしいことを示しているといえる。本結果は、国内学会[1]で発表した。

他の事例研究として、2011 年東北地方太平洋沖地震に誘発された茨城県北部の地震、および 2008 年 M7.9 Wenchuan 地震を対象としたシミュレーションを行った。結果は、前者は飯田達也（東京大学理学系研究科修士論文、2022）として取りまとめ、後者は Tang 他として投稿準備中である。

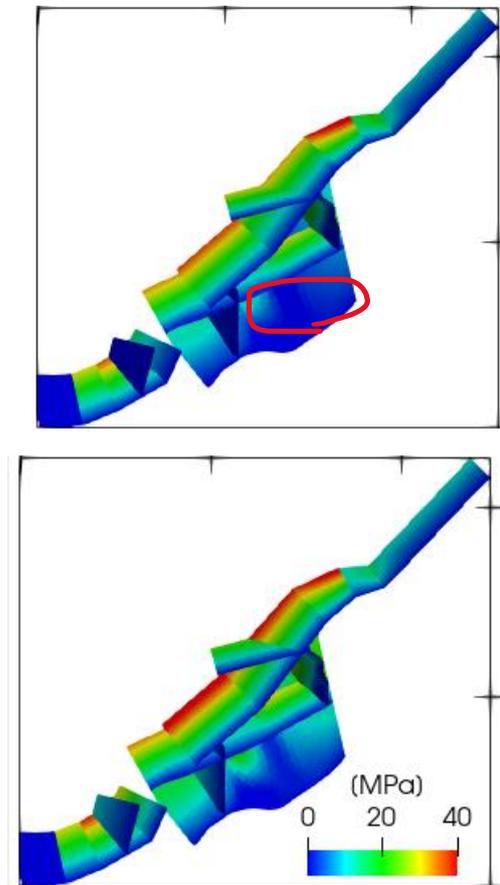


図 5. 3 次元動的破壊シミュレーションに用いた断層モデルと異なる応力モデル。特に赤丸を付けた断層の応力状態が異なり、上図で低応力、下図で高応力となることが分かる。

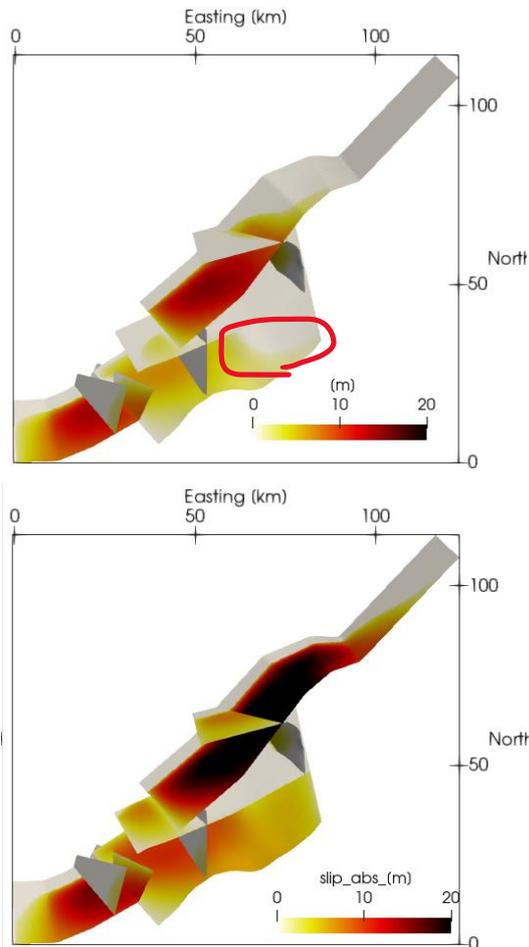


図 6. 異なる応力条件で得られた地震時断層滑りの空間分布.

● FDP=H 行列法の開発

FDP=H-行列法の 3 次元化および並列化に必要な HACApK ライブラリの拡張に着手した。まずは、動弾性問題の最も単純な場合をテストケースとして開発を進めることとし、変位波動場の計算問題を扱った。この後、破壊伝播計算に必要となる応力波動場の計算問題に拡張する予定である。

今年度は点震源を考慮した変位波動場計算の問題において、計算精度および演算効率を検証した。計算した変位波動場の一例を図 7 に示す。これを解析解と比較して、本手法の近似特性を明らかにし、より高精度の近似となる手法を開発することができた。さらに、PowerEdge R440 (CPU Xeon Gold:40 core . Memory DDR4-2933: 192GB/node) を用いて、効率化性能を計測し

た。得られたメモリ使用量と要素数の関係を図 8 に示す。この結果により、FDP=H-行列法を用いると通常の動的境界要素法 (FDP 法) が  $O(N^2)$  のコストであるものが、有意に縮約できることが確認された。一方で、H-行列法の  $O(N \log N)$  には到達していないことも分かる。これは、通常の H-行列法が扱う静弾性場ではなく波動場を近似するには、通常考慮される幾何減衰による近似の担保のみでなく、波面の到達時間および波面の曲率の減衰も担保する必要性から生じるものであることが明らかとなった。本結果は、国内学会発表 [3] で発表した。

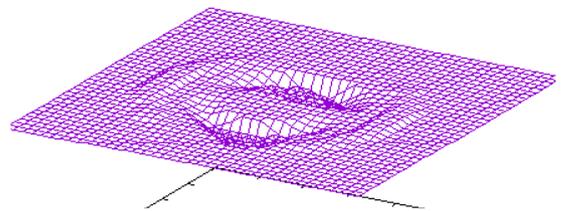


図 7. 3 次元 FDP=H-行列法を用いて計算した波動場の例.

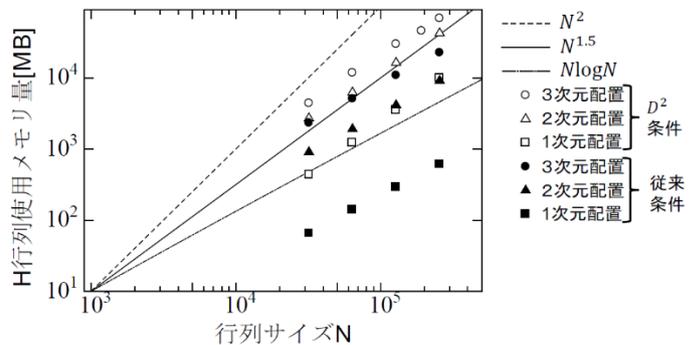


図 8. 実装した FDP=H-行列法による要素数とメモリ使用量の関係

6. 今年度の進捗状況と今後の展望
- 申請時に、1) 準動的シミュレーションの手法検証と実際の地震問題への応用, 2) 動的シミュレーションの応用, 3) FDP=H-行列法の開発, という 3 つの課題を設定した。1) については、国際学会 1 件, 国内学会 2 件, 投稿準備中論文 2 件, 修士論文 1 件, 博士論文

1 件という大きな成果をあげることができた。2)については、国内学会1件の成果であるが、国際共同研究の進化につながっている。3)については、これまでの予備的な解析から、新規のコード開発の段階に発展させることができ、一つのプロトタイプを完成させることができ、国内学会1件を行うこともできた。本課題は多項目に渡るが、おおむね順調な進展を見せていると評価している。

本年度の研究において、新規のコード開発ができたことと、従来コードの高度な性能が確認できたことが重要な成果であると考えている。これらの成果の下に、今後は高効率な動的破壊シミュレーションコード (FDP=H-行列法) の開発を進める。また、地震学および測地学による観測は列島全域規模でネットワーク化されたデータがあるものの、モデルの方は数値計算容量の制約によりその規模でのモデル化が実現していなかった。今後は、これまでに開発した手法を応用し超大規模問題を扱うことにより、日本列島全域規模での観測との比較によるモデル検証を実現することを展望している。

## 7. 研究業績一覧

(発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない)

### (1) 学術論文 (査読あり)

[1] J. Jiang, B. Erickson(+), V. Lambert, J-P Ampuero(+), R. Ando, S. Barbot(+), C. Cattania(+), L. D. Zilio(+), B. Duan(+), E. M. Dunham(+), AA Gabriel(+), N. Lapusta(+), D. Li(+), M. Li(+), D. Liu(+), Y. Liu(+), S. Ozawa, C. Pranger(+), Y. van, Dinther(+), Community-Driven Code Comparisons for Three-Dimensional Dynamic Modeling of Sequences of

Earthquakes and Aseismic Slip (SEAS), Journal of Geophysical Research, 10.1029/2021JB023519, 2022.

### (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] So Ozawa, Ryosuke Ando, Eric M. Dunham, Strength of Geometrical Barriers in Simulated Earthquake Sequences, Earthquakes (3rd edition), 2021.

#### (4) 国内会議発表 (査読なし)

安藤 亮輔, 金子 善宏, Andy Howell, [1] Andy Nicol, Robert Langridge, Ian Hamling, Why the Hope fault bypassed during the 2016 Kaikoura earthquake?, 日本地震学会秋季大会, 2021.

[2] 小澤 創, 安藤亮輔, Rupture segmentation caused by fault bends in simulated earthquake sequences, 日本地球惑星科学連合大会, 2021.

[3] 村松和紀, 小澤創, 安藤亮輔, 準動的地震シーケンスシミュレーションを用いた中央構造線断層の連動破壊過程の解明, 日本地震学会秋季大会, 2021.

[3] 伊田明弘, 安藤亮輔, 佐藤大祐, 小澤創, 星野哲也, 格子H行列とFDP法による3D弾性波動伝播の高速計算, SWoPP, 2021.

### (5) 公開したライブラリなど

### (6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)