

jh220013

時空間領域境界積分方程式法の高速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）

近年の地震観測の進展に伴って現実的な地震発生モデルの構築と検証が可能となってきた。本研究では、一回の地震についての地震波放射を考慮した完全動的破壊伝播シミュレーションと波動放射を無視する代わりに多数回の地震についての準動的な地震サイクルシミュレーションを行う。大規模並列環境を活用して、詳細な観測と比較可能な現実的なモデル化を実施する。本年度は、準動的シミュレーションとして、日本で最も活動的な断層である中央構造線、および沈み込み帯の巨大地震を対象としたシミュレーションと結果の検証を実施した。動的シミュレーションとして、2016年熊本地震の詳細構造を考慮したシミュレーションを行い合成開口レーダ観測と統合的な結果を得るとともに、2023年トルコ東部の地震のシミュレーションなどを実施した。さらに、 $O(N^2)$ 法である既存の動的シミュレーション手法を $O(N \log N)$ に高効率化する手法のアルゴリズム開発を行った。

1. 共同研究に関する情報

共同利用・共同研究を実施している拠点名（該当するものを残す）

北海道大学 情報基盤センター

東京大学 情報基盤センター

(1) 課題分野（該当するものを残す）

大規模計算科学課題分野

(2) 共同研究分野（HPCI 資源を利用している研究課題のみ、該当するものを残す）

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

埜敏博：アルゴリズム最適化

河合直聡：アルゴリズム最適化

村松和紀：モデルの構築

松嶋亮弥：モデルの構築

宮嶋拓光：数値計算コード開発

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。日本列島において地下の断層に加わる応力の力源はプレートの沈み込み運動とプレート境界の断層運動である。都市直下などに存在する内陸活断層と南海トラフ巨

大地震などのプレート境界地震とが相互作用するとの示唆が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、全国的な GPS ネットワークの観測データと現実的な断層モデルを用いたシミュレーションの比較によって、物理的な検討が現実のものとなってきている。このようなスケールの異なる断層とそこでの地震発生過程のシミュレーションを行うためには、マルチスケールのモデルを大規模数値計算で解析することは必須の要求である。本研究では、大規模なフォワードモデルを用いた天然の地震現象の物理モデルの高度化と、空間・時空間境界積分方程式法 (BIEM) に基づく新たな高速化・大規模化手法の開発の、二つを目的とする。前年度までの成果をベースとして、本年度からは物理モデルの高度化としては、個別の断層のモデルからプレート境界の大断層と内陸の多数の小断層群を統合したモデルを構築し、数十万年以上のスケールでの地震の繰り返し過程のシミュレーションを行う。数値計算のさらなる大規模化のための、形状メッシュの生成手法、可視化手法の開発も行う。数値計算手法の効率化としては、HACApK (格子 H 行列法ライブラリ) を実装した空間 BIEM コードを多コア計算機向けに最適化するとともに、時空間 BIEM に基づいた新たな準 $O(N \log N)$ 法 (FDP=H-行列と呼ぶ) の開発を行う。

3. 当拠点の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や活断層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 2016 年熊本地震や 2016 年 Kaikoura 地震、2023 年トルコ東部の地震、中央構造線活断層帯、中国の Wenchuan-Maoxien 断層などについて 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。これまでの研究でも 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 Wisteria 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などは、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。副代表者の伊田は、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最適化した HACApK ライブラリを開発している。これまで両者の共同研究で、これまで困難であった、3 次元での時間依存項を持つ積分核への H 行列の実装を着実に進めてきている。

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

●準動的地震サイクルシミュレーション

本テーマは、一昨年度より開始した。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、非平面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。

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）の関係を調べたところ、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。

●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、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、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。

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。

● FDP=H 行列法の 3 次元動弾性問題への適用性の詳細検討

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な応力波動場の計算問題に拡張する予定である。

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。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。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。

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

日本で最も長く活発な活断層である、中央構造線活断層帯のモデル化を完了させた。人工衛星を用いて観測された地表変位および応力インバージョンから求められた広域応力場によって系に与える外力を決定する、リアリスティックな 3 次元非平面断層モデルを構築した (図 1)。そして、系を拘束するインプットパラメータとは独立な古地震学的調査の値と比較 (図 2, 平均右横ずれ変位速度の東西軸に対する分布。) し、調和的な結果を得た。また、中央構造線の傾斜角において、高角であるか北傾斜であるかという未解決の問題が存在する。高角断層面および北傾斜断層面の両モデルについてシミュレーションを行ったところ、高角モデルでは観測値とファクターで一致したものの、北傾斜モデルの計算結果については観測値と桁で異なった。よって、本モデルから中央構造線の傾斜角が高角であることが支持された (図 3)。これらの結果を学会発表しており、国際誌に投稿準備中である。

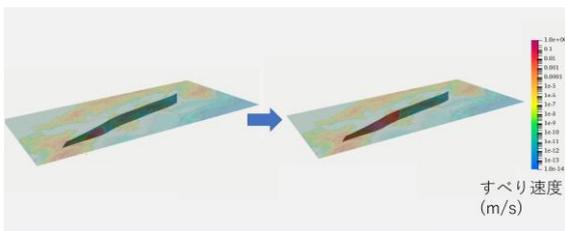


図 1. 中央構造線における準動的サイクルシミュレーションの様子。

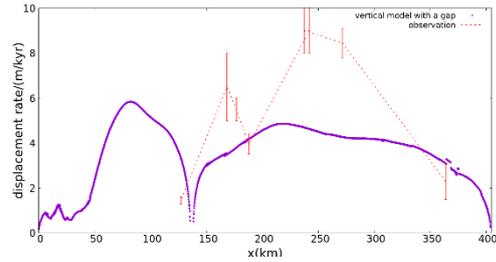


図 2. 平均右横ずれ変位速度分布の計算結果と観測値との比較。

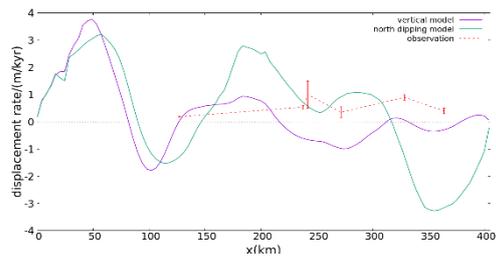


図 3. 平均鉛直変位速度分布の計算結果と観測値との比較。

また、これまで、境界積分方程式法による地震サイクルシミュレーションでは粘弾性の効果と 3 次元構造の効果と同時に取り入れることができなかった。そこで、弾性媒質中に震源断層を表す面とリソスフェア-アセノスフェア境界 (LAB) を表す面を置き、それぞれに境界条件として速度・状態に依存する摩擦則 (RSF 則) と粘性抵抗を与える手法を考案した。本手法について国内学会で発表した。

本手法について妥当性を検証するため、Savage & Prescott (1978) の解析解と比較した。図 4 に比較に用いた断層-LAB モデルを示す。x=0 に垂直な横ずれ断層を置き、深さ 60km に LAB を置いている。そして、断層に滑りを起こし、アセノスフェアの粘弾性緩和による地表面変位を計算した。

図 5 に x=10km における地表面変位の解析解と本手法による計算結果を示す。なお、横軸は断層に滑りを与えてからの時間を緩和時間 ($t_c = \eta/\mu$) で規格化したものである。この結果から、緩和時間程度以内の時間であれば

解析解と本手法はよく一致していることが確認できる。さらに、緩和時間より十分大きい時間では、計算結果は解析解に近づいていく傾向が見られる。

図 6 に $t=5$ 年 ($t = 0.85t_c$) における解析解と本手法による計算結果の比較を示す。この結果から、断層 ($x=0$) から断層サイズ (60km) 程度の距離では両者をよく一致していることがわかる。

このように、本手法と解析解との良い一致を確認できたことにより、今後は例えば沈み込み帯地震と粘弾性緩和の相互作用のシミュレーションの実現が視野に入ってきた。

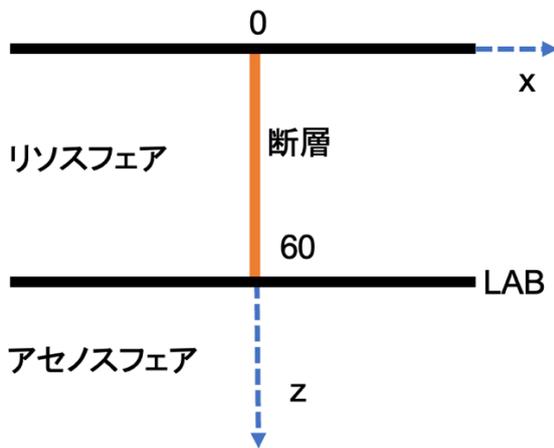


図 4. 解析解との比較に用いた断層-LAB モデル.

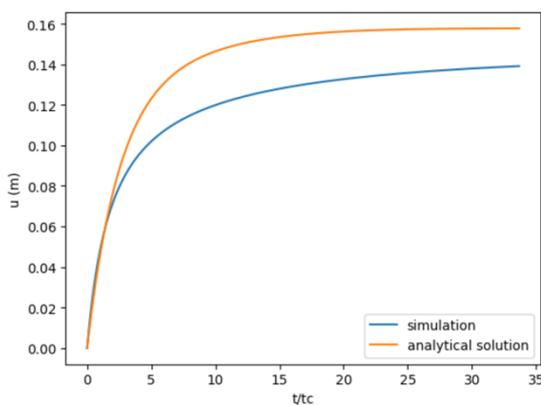


図 5. $x=10\text{km}$ における解析解と本手法の結果 (青:本手法, 橙:解析解)

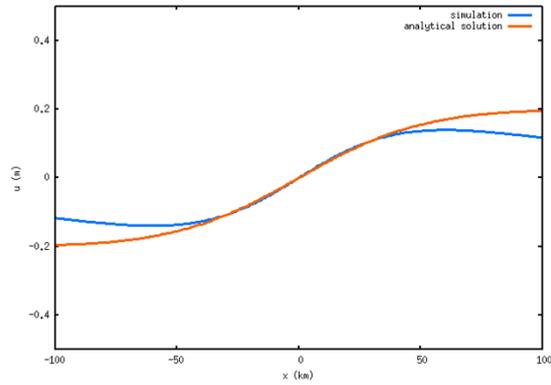


図 6. $t=5$ 年における解析解と本手法の結果 (青:本手法, 赤:解析解)

そこで、沈み込み帯を模した 3 次元モデルを作成し、シミュレーションを行った。図 7 に作成したモデルを示す。このモデルでは沈み込み帯地震の震源断層 (A)、内陸活断層 (B)、海洋プレート上面を表す LAB (C)、海洋プレート下面を表す LAB (D)、大陸プレート下面を表す LAB (E) を用意した。C と D に海洋プレートの沈み込みを表す変位境界条件を課した時の A, B の応力載荷速度を計算し、それをを用いてシミュレーションを行った。結果、沈み込み帯と内陸活断層では地震が発生した。また、各 LAB においては粘性緩和が発生した。結果の一部を図 8 に示す。

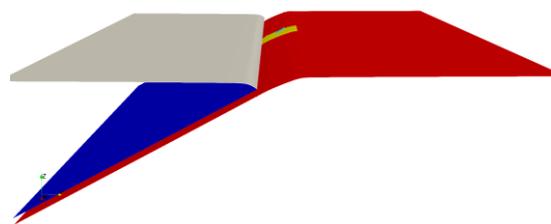


図 7. 作成したモデル (A:黄色, B:水色, C:青色, D:赤色, E:白茶色)

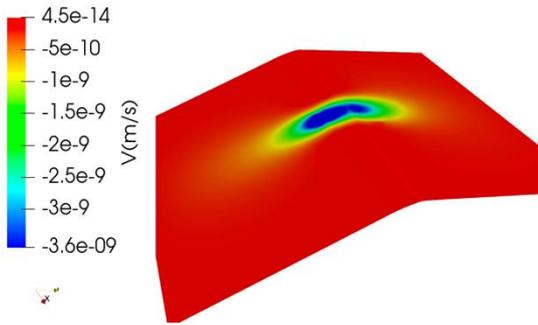


図 8. D で発生した粘性緩和の様子

● 動的破壊伝播シミュレーション

2016 年 Mw7.0 熊本地震（本震）の事例研究を行った。2016 年 Mw7.0 熊本地震（本震）での破壊は、日奈久断層に沿った断層面の深部から開始し、布田川断層に沿って北東へ伝播した後阿蘇カルデラ内で停止したことが知られており（Asano and Iwata 2016; Yagi et al. 2016），これは阿蘇カルデラ内の特徴的な地下構造が本震の破壊過程に影響していた可能性を示唆している。

本研究では、既往研究が得た非平面断層形状のうち布田川断層に対応する F6 と阿蘇カルデラ内の 5 つの分岐断層面 F1-F5 の計 6 つを考慮した動的破壊シミュレーションを実施し、阿蘇カルデラ内に見られる複数の分岐断層が本震発生時の動的破壊に与えた効果について調べた。シミュレーション手法としては FDP-BIEM (Ando et al., 2017) を使用した。シミュレーション時、64 ノードを使用した。タイムステップを 2005（およそ断層面上の滑りが完全に停止するまでの時間）としたところ、実行時間は約 30 分となった。

シミュレーションで得られた F1 上の最終滑り量分布を調べたところ、図 9 のように、滑り量は F1 西縁（布田川断層本体との接合部付近）の浅部で特に大きくなって

いた。また、共役関係にある F5 との交線に着目すると、交線よりも西側の方が大きく滑っていた。これは地表面変位の観測に基づくインバージョン解析結果 (Kobayashi et al., 2023) にも見られた空間パターンである。

シミュレーション中の剪断応力変化量を見ると、F5 での破壊伝播時、F1 上の剪断応力変化量の空間パターンが F5 との交線の東西で異なっていた（図 10, 図 11）。F5 上での破壊伝播が周囲に非対称性を持つ応力場を作った結果、交線の東西で F1 上の破壊伝播の様式に違いが生じたため、上述の滑り量分布の空間パターンがもたらされたと考えられる。これは、断層面上の滑りの空間分布が、周囲に存在する分岐断層との動的相互作用によって決定されていた可能性を示している。本結果は 2023 年 5 月に国内学会で発表する予定である。



図 9. F1 上の最終滑り量分布。赤楕円で囲まれた部分に F5 との交線が見える。

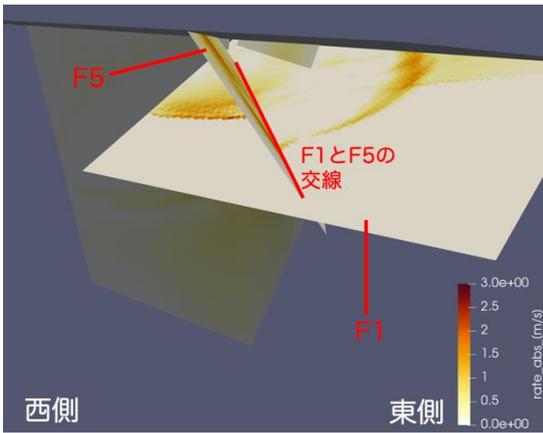


図 10. ある時刻における F1 上の滑り速度分布のスナップショット。

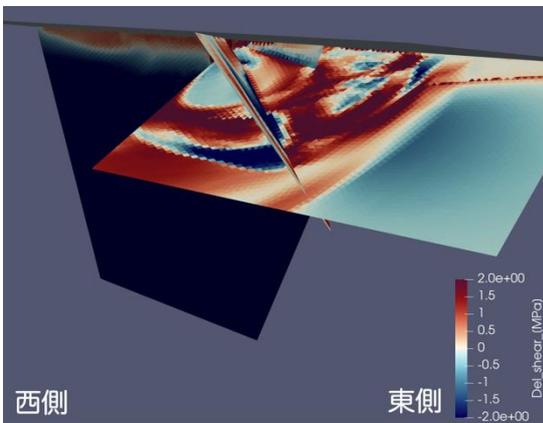


図 11. 図 2 と同時刻における初期からの剪断応力変化（赤：増加，青：減少）のスナップショット（図 2 と同角度で撮影）。

また、2023 年トルコ東部の地震のモデル化とシミュレーションに着手して、予備的な結果を得ることができた。図 12 に、予備的な解析で得た破壊伝播の様子のスナップショットを示す。

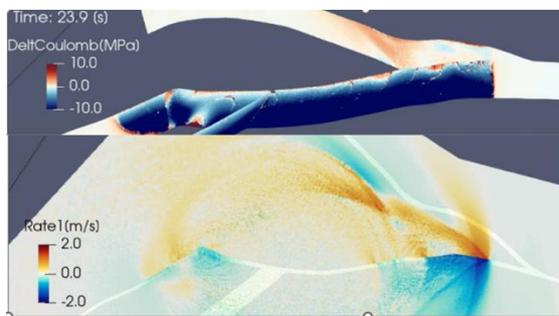


図 12. 2023 年トルコ東部の地震の予備的なシミュレーション結果。断層面上の応力変化（上）と地表面の変位（下）。

● FDP=H 行列法の開発

FDP=H-行列法の 3 次元化および効率的な並列計算を行うための格子 H 行列の利用を目指した動的破壊シミュレーションコードの作成に着手した。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ていたため、その変位波動場で近似精度の確認を行い、動的破壊シミュレーションへの拡張を目指している。

今年度は点震源を考慮した変位波動場計算の問題における走時誤差に関する検証、FDP=H 行列の Domain I のアルゴリズムの改良を行なった。

走時誤差は、動的破壊シミュレーションにおいても精度を左右する重要な要素であると考えており、3 次元波動伝播問題においてその検証を行なった。図 13 は、走時誤差に関するヒストグラムである。正しい走時との時間ステップのずれは、90%ほどのペアで ± 2 以内に収まっていることが確認できた。ただ、近似した走時は過小評価している傾向にあることも確認できた。これは、代表点の方向へ射影した長さを補正距離として用いていることに起因すると考えており、今後もこの系統的なずれが最終的な精度に与える影響を調べていく必要があると考えている。

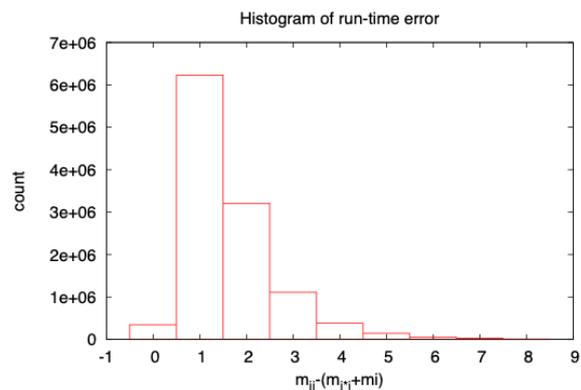


図 13. 3 次元 FDP=H-行列法を用いて計算した波動伝播計算における走時誤差のヒスト

グラム

また、FDP-BIEM 法におけるいわゆる Domain I の畳み込みについて、積分核が空間項と時間の冪乗に関する項に分離できることを用いた新たなアルゴリズムを開発した。これにより、時間方向の畳み込みについては近似なしに時間方向の計算量を全体で $O(M)$ で抑えて計算することが可能となった。

Domain I の積分核の性質(空間項と時間の冪乗項Tに分離可)を用いて、畳み込み計算を高速化する (s, j) ペアの畳み込みを考える

$$S_n = T_s D_{n-s} + T_{s+1} D_{n-s-1} + \dots + T_{e-1} D_{n-e+1} + T_e D_{n-e}$$

$$S_{n+1} = T_s D_{n-s+1} + T_{s+1} D_{n-s} + T_{s+2} D_{n-s-1} + \dots + T_e D_{n-e+1}$$

ex) 時間に関する2乗の項 $T = (0, D_s^2, 4D_s^2, \dots, M^2 D_s^2)^t$ * 簡単のため、以下では D_s^2 を省略(最後に D_s^2 をかけることにする)

$$S_n = s^2 D_{n-s} + (s+1)^2 D_{n-s-1} + \dots + (e-1)^2 D_{n-e+1} + e^2 D_{n-e}$$

$$S_{n+1} = s^2 D_{n-s+1} + (s+1)^2 D_{n-s} + (s+2)^2 D_{n-s-1} + \dots + e^2 D_{n-e+1}$$

$$S_{n+2} = s^2 D_{n-s+2} + (s+1)^2 D_{n-s+1} + (s+2)^2 D_{n-s} + \dots + e^2 D_{n-e+2}$$

1階差分

$$\text{diff1}_n = s^2 D_{n-s+1} + (2s+1) D_{n-s} + \dots + (2e-3) D_{n-e+2} + (2e-1) D_{n-e+1}$$

$$\text{diff1}_{n+1} = s^2 D_{n-s+2} + (2s+1) D_{n-s+1} + (2s+3) D_{n-s} + \dots + (2e-1) D_{n-e+2} - e^2 D_{n-e+1}$$

2階差分

$$\text{diff2}_n = s^2 D_{n-s+2} + (-s^2 + 2s + 1) D_{n-s+1} + 2 D_{n-s} + \dots + D_{n-e+2} + (-e^2 - 2e + 1) D_{n-e+1}$$

各 (s, j) について、 S_1 と diff1_1 を計算 →そこから先は、 S_n を $O(1)$ で更新可能 →全体で $O(M)$ で計

図 14. Domain I における時間方向の畳み込みを高速化するアルゴリズム

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

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、投稿中論文1件、国際学会3件、国内学会5件という成果をあげることができた。2)については、投稿中論文1件、国際学会1件、国際共同研究の進化につながっている。3)については、着実にコード開発を進めることができ、国内学会1件の発表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

(1) 学術論文 (査読あり)

R. Tang and R. Ando, A systematic method to develop dynamic earthquake rupture scenarios: A case study on the Wenchuan-Maoxian Fault in the Longmen Shan, China, thrust belt, Submitted to Earth Planets Space, 2023.

S. Ozawa, R. Ando and E. Dunhum, Quantifying the probability of rupture arrest at restraining and releasing bends using earthquake sequence simulations, submitted to Earth Planetary Sci. Lett., 2023.

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

Ryosuke Ando, So Ozawa, Akihiro Ida, Tetsuya Hoshino, Kazunori Muramatsu, Ryoya Matsushima, Masatoshi Kawai, Toshihiro Hanawa, High-resolution Simulation of Earthquake Recurrence Enabled by Optimization for Multi-core CPUs and Large-scale Parallelization, The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis (SC22), Poster, 2022/11/15.

(3) 国際会議発表 (査読なし)

So Ozawa, Ryosuke Ando, Mainshock and

aftershock sequence simulation in geometrically complex fault zones, SCEC 2022, Palm Springs, 2022/9/11

So Ozawa, Ryosuke Ando, Eric M. Dunham, Earthquake sequence simulations on nonplanar faults with restraining and releasing bends quantify the probability of rupture propagation through the bend, AGU, 2022, Chicago, USA, 2022/12/12.

R. Ando, Rupture Path of the 2016 Kaikoura, NZ, Earthquake Inferred from Dynamic Rupture, ACES, Blenheim, NZ, 2023/3/3.

(4) 国内会議発表 (査読なし)

So Ozawa, Akihiro Ida, Tetsuya Hoshino, Ryosuke Ando, 格子 H 行列を用いた超大規模地震サイクルシミュレーション, JpGU, 2022, 幕張, 2022/5/22

So Ozawa, Ryosuke Ando, Eric M. Dunham, 非平面断層における地震破壊停止確率, JpGU, 2022, 幕張, 2022/5/24

村松和紀, 小澤創, 内出崇彦, 安藤亮輔, 四国周辺の応力場を考慮した中央構造線断層帯の準動的地震シーケンスシミュレーション, 日本地球惑星科学連合大会, オンライン・幕張, 2022 年 5 月

村松和紀, 小澤創, 内出 崇彦, 安藤亮輔, 中央構造線活断層系 (MTLAFS) の傾斜角の準動的地震シーケンスシミュレーションによる推定, 日本地震学会秋季大会, 2022

松嶋 亮弥, 小澤 創, 安藤 亮輔, 粘性境界条件を用いて沈み込み帯の 3 次元構造を考慮した準動的地震シーケンスシミュレーション, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 札幌, 2022 年 10 月

宮嶋拓光, 安藤亮輔, FDP-H 行列の実装を見据えた時空間境界積分方程式の近似精度評価, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 札幌, 2022 年 10 月

(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)