

jh190046-NAH

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

本研究課題では、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、地震の動的破壊現象の予測可能性を、物理モデルに基づいたシミュレーションを用いることで、各段に向上させることを目的としている。今年度は、大きな被害を出した 2018 年北海道胆振東部地震を対象に、物理モデル化を行い、Oakforest-PACS に実装した FDP-BIEM アルゴリズムを用いてシミュレーションを実施し、観測データと比較することで現象の再現性とパラメタ依存性を検討した。その結果、観測データに基づいて断層の 3 次元幾何学的形状を適切に仮定することによって、地震時観測によって推定された断層の破壊過程の特徴が良く再現されることが明らかになった。また、シミュレーション手法の高度化として、これまで取り組んできた動的破壊伝播に加えて地震サイクルについても取り組みを開始した。地震サイクルシミュレーションについては、従来の H-行列法より分散性能の高い格子 H-行列法 (Lattice H-matrices) を導入した。また動的破壊伝播シミュレーションについては、3 次元 FDP=H-行列法 ($O(N \log N)$) の開発のために、格子 H-行列ライブラリを用いた場合の動弾性積分核 (グリーン関数) の低ランク近似の精度評価を行った。

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

佐藤大祐：FDP=H-matrix アルゴリズムの開発

大谷真紀子：FDP=H-matrix アルゴリズムの開発

小澤創：モデルの構築と FDP=H-matrix アルゴリズムの開発

久河竜也：FDP=H-matrix アルゴリズムの開発

2. 研究の目的と意義

地震発生の原因であ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、それを物理的に検証すること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、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と、実データとの比較による物理モデルの現象再現性の評価が可能となってきた。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および観測データとの比較によるモデル検証と、数値計算アルゴリズムの大規模演算環境下での高効率化を、二つの大きな研究目的として設定する。

物理モデルの高度化としては、これまでに取り組んできた近年発生した大地震を再現するシミュレーションを、OakForest-PACS (OFP) を用いて系統的に行って行くことに注力する。また、数値計算のさらなる大規模化のための、メッシング等の断層モデルの生成手法、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、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。本研究では、現状の ST-BIEM の $O(N^3)$ の数値コストを、低ランク近似手法の H-行列法と組み合わせることで $O(N)$ 程度に低減するアルゴリズム (FDP=H-行列と呼ぶ) の開発を進める。同時に既存の FDP-BIEM ($O(N^3)$) の OFP への最適化も進める。

現実的な物理モデルの挙動を、高効率な数値計算アルゴリズムを用いて解析できるようになれば、観測される地震破壊現象の複雑性の背後にある物理機構が、実証的に解明できるようになると考えられる。

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、副代表者の伊田の開発した 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

前年度は、実問題へのシミュレーション適用と、高効率なアルゴリズムの開発において成果が上がった。以下に述べるように、実問題への適用では、ニュージーランドで発生した巨大地震の再現計算を実行し、観測を概

ね再現する結果を得た。また、アルゴリズム開発では、FDP=H-行列のアルゴリズムの基本設計を行った。

●実地震のモデル化と再現:カイクウラ(ニュージーランド)地震

実地震現象のモデル化と既存手法である FDP-BIEM(O(N²))を用いたモデルの挙動解析を行った。この解析では、モデル挙動の詳細な解析が必要であったが、Oakforest-PACS を用いることで多数回のパラメタスタディーを行うことが可能となり、地震学的に重要な成果を上げることができた。結果は、地球数値計算は、OakForest-PACS を 256 ノード用いて実行した。その結果必要とした 1 回のランでの計算時間は概ね 60 分であった。このノード数によりメモリは合計 20TB 程度となるが、これは積分核を格納するために必要なメモリ容量である。

この研究課題のために、これまでに Oakforest-PACS を 30,730(H) 使用した(配分量の 59%)。1 回のランに典型的に使用する資源は、256 ノードを約 80 分間である。これは、概ね計画通りの消費量である。また、1 回のランあたりに使用する実際のメモリ容量は約 10TB である。コードは、Flat な MPI 並列を実装しており OpenMP とのハイブリッド化は行っていない。また 1 回のランで生成される出力ファイルの総容量は 1.2GB(ファイル総数は 13 個)である。

2016 年に発生したカイクウラ地震を対象に、断層の低解像度の 3 次元形状を考慮した物理モデルの構築を行い再現計算を行ったところ、代表的なパラメタセットを用いることで、実際に観測された現象、すなわち断層滑りの分布の大局的な特徴が再現されることが示された。さらに計算結果のパラメタ選択に対するロバストさの検討を、多数回のパラメタスタディーによって行った。このような検討は、シミュレーションの予測性能および不確かさの定量的評価のために重要である。

このモデル化では、現実的な 3 次元構造をモデル化するために、実際の断層形状についての詳細な観測データを考慮して、大小合わせて 14 枚の断層をモデル化した。従来の地震学的に標準的なモデル化では、これら全体をまとめて 1 枚の平面形状の断層面として近似することが多く、複雑さを考慮するにしても高々数枚の顕著な断層面での近似を考慮することに留まることが多い。それに対して、本研究では Oakforest-PACS の大容量メモリを生かすことで、複雑な断層モデルを考慮すること、さらには多数回のパラメタスタディーが実行できた。

前年度に行ったパラメタスタディーによって、カイクウラ地震の発生過程において、ある力学的な条件が重要な役割を果たしていることが明らかとなった。それは、この 14 枚の断層からなる断層群は、典型的には二つの規模の地震を発生させやすいということであり、その地震の規模の違いは、この地域に加わっている応力の大きさがある閾値を超えるかどうかで決まっている、という力学条件が存在しているということである。応力の値が比較的大きい場合は、実際に発生したようなモデル領域全体を破壊するマグニチュード 8 規模の地震となる。それに対して、応力の値がある閾値よりも小さい場合は、モデル領域の半分程度を破壊するようなマグニチュード 7 規模の地震に留まる。このように、破壊の広がる領域がこれら二つのパターンに典型的に二分されることが、この断層群が、二つの定性的に異なる地震規模を発生させることの背後にある力学であることが明らかとなった。さらに、多数回のパラメタスタディーにより、この閾値近傍での解の振る舞いが詳細に明らかとなった。実際に発生したのは、本領域全体が破壊された場合であったので、応力が比較的大きかったことが示唆される。

定性的に異なる解の存在は、地震発生の予測問題にとっても重要である。すなわち、

応力の値の詳細に依らず、それがある閾値より上にあるか、下にあるかのみで、地震の規模が予測できる可能性のあることを意味するからである。前年度の成果は、実データと比較した物理モデルの検証と改良が実際に可能であることを示しており、本研究課題において引き続き様々な地震について系統的な適用を行っていくことが重要であると考えている。

●FDP=H-行列法アルゴリズムの基本設計

これまで 2 次元問題に対して開発し精度検証を行ってきた FDP=H-行列法(佐藤 2018, 博士論文)の 3 次元並列実装の基本的な設計を行った。並列化には、アルゴリズムに一定の簡略化を施すことで、既存の HACApK ライブラリの比較的軽微な拡張で実装できることがわかった。これにより実装工程を大幅に短縮できることが期待される。アルゴリズムと 2 次元問題での検証結果は、Sato and Ando として Engineering Analysis with Boundary Elements 誌に投稿した。

5. 今年度の研究成果の詳細

物理モデルの高度化と検証として、2018 年北海道胆振東部地震と 2019 年 7 月の米国カリフォルニア州 Ridgecrest 地震(図 3)について、再現計算とパラメタスタディーを行った。

北海道胆振東部地震の結果は、Earth, Planets and Space 誌で発表した(Hisakawa et al., 2020)。Ridgecrest 地震については、日本地震学会(安藤他, 2019)と 12 月の American Geophysical Union Fall meeting (Ando et al., 2019) で発表した。

●自然地震の物理モデルの高度化

・2018 年胆振東部地震の動的破壊シミュレーション

北海道胆振東部地震はマグニチュード 6.7 の大地震で、札幌の大規模停電や震源地近傍での大規模な地滑りなど大きな被害を与え

た地震である。一方で、通常の内陸地震が発生する地下深さ領域より相当程度に深い地下 30km で発生した比較的珍しい部類に入る地震である。さらにこの地震は本震後の余震活動の観測データによって、本震で破壊した断層面の幾何形状が、3 次元的に複雑な構造を伴っていることが明らかとなっている。

これまでの我々の研究などで、断層の 3 次元形状が地震時の動的破壊過程に大きな影響を与えることが明らかになっている。この地震において、断層の 3 次元形状についての詳細なデータが得られていることは、本課題が目的とする実データによる物理モデルの検証を実施するのに重要である。本研究では、系統的なモデル検証の一環として、2018 年胆振東部地震のモデル化と観測データの再現性の検証、パラメタスタディーによる入力データの不確実性がシミュレーション結果に与える影響を評価した。

モデルに仮定する断層面および媒質に加わる応力場といった入力値は、観測データに基づいて仮定する。断層面の 3 次元形状は、図 1 の水平方向および鉛直方向の投影図を見て分かる通り、水平方向には S 字型をしており、鉛直方向には深さ 30km のところで屈曲しているという特徴がある。地下に加わる応力は、この領域で発生した過去 10 年程度の小規模地震のデータに基づいた推定値(Terakawa and Matsu'ura, 2010)を用いてモデル化した。なお、この応力の推定値には不確実さがあるため、パラメタスタディーによりシミュレーション結果への影響を評価する。

動的破壊過程をシミュレートするための数値計算手法には、すでに Orkforest-PACS 上に実装されている高速領域分割-境界積分方程式法(FDP-BIEM)によるコードを用いた。本手法は、断層面上の任意の位置時間での応力 T が積分核(グリーン関数) K と断層面の全ての離散境界要素上の滑り速度履歴 D の線形の畳み込み積分

$$T_p^{i,n} = T_p^{i,init} - \frac{\mu}{2\beta} D_p^{i,n} + \sum_j \sum_{m=0}^{n-1} \sum_{q=1}^3 K_{pq}^{i,j,n-m} D_q^{j,m}$$

で表されることを利用した手法である。また高速領域分割法とは、弾性体の動的応答を表す積分核の物理的性質を用いてその定義域を時空間分割することで、従来の BIEM が $O(N^3)$ の数値コストであるのに対して $O(N^2)$ までコスト削減した手法である。シミュレーションの規模は、空間要素が数 10,000 程度であり、200-500 ノードを使用して数 10 分の計算時間となった。

シミュレーションによって得られた地震時に断層面上を破壊が動的に伝播する様子を図 3 に示す。ここでは、断層面上を同心円状に近い形で破壊域が広がっている様子が再現された。破壊が開始した場所は、実際に観測された本震の破壊開始点位置に基づいて設定した。注目すべきは、破壊が仮定した断層面の全体に広がったのではなく、モデル領域の途中で破壊の停止が自発的に生じたことである。図 3 の t=8 や 10s を見ると、モデル領域の下方への伝播は、断層面が屈曲した部分の下部で停止していることが分かる。地震の規模の予測につながる地震破壊の停止条件の理解は地震学の中心的な問題の一つである。今回の計算結果に基づくと、破壊の停止は断層面の方位の変化のために生じることを示している。

図 4 は、シミュレーション結果と地震時の地震動観測データに基づいた解析結果を比較したものである。観測データ解析では、逆問題を解くことにより、断層面上の滑りの時空間発展を推定している。観測データ解析の結果では、破壊開始点から南北に広がる破壊パターンや断層面の浅部でのより大きな滑

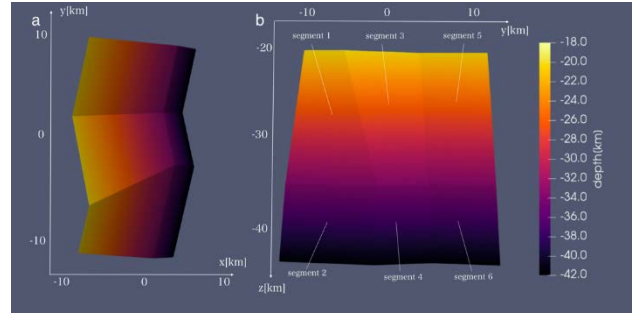


図 1. 2018 年北海道胆振東部地震の 3 次元断層モデル。(左) 上からおよび (右) 東から見た図。断層面は 6 つの面から構成されるものとしてモデル化した。Hisakawa et al. (2020) より引用。

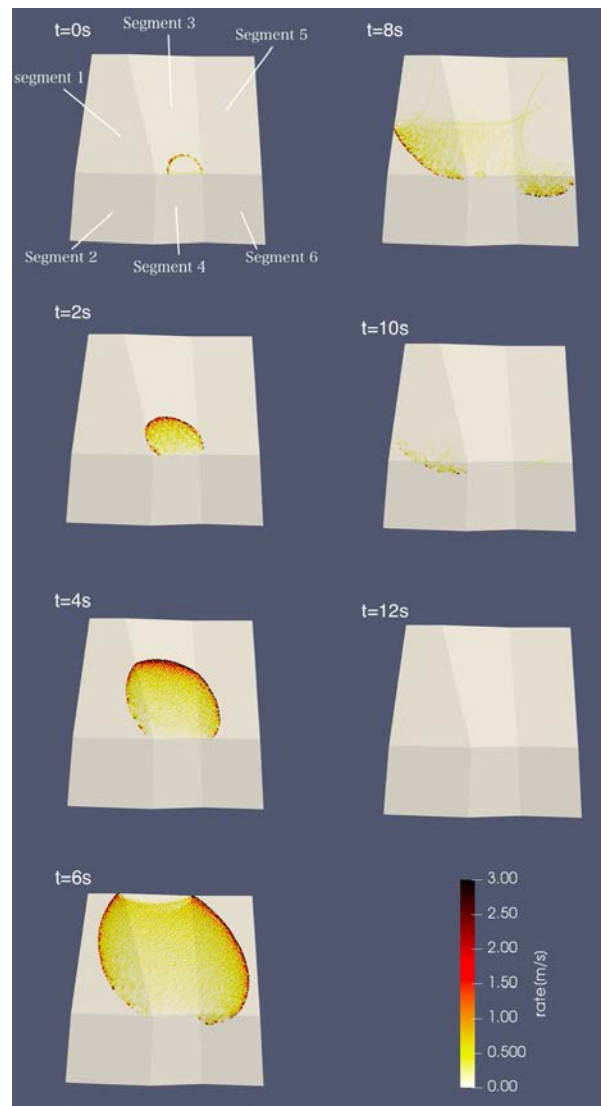


図 2. 断層の破壊が進展する様子。色は断層の滑り速度を示す。時刻 t=0 秒において断層領域の中央部から破壊開始して上下左右に伝播し、t=12 秒に停止した。Hisakawa et al. (2020) より引用。

りの発生といった特徴が見て取れる。そのよ

うな特徴的パターンが、シミュレーション結果において再現されていると言える。

図 5 は、モデルに考慮した媒質に加わる応力場についてのパラメタスタディーの結果を示す。応力場は、本震前の観測結果に基づいているものの、本地域では必ずしもデータ量が十分ではなく、推定結果の不確実性がある程度ある。ここでは、仮定する応力の大きさを基準モデルの周辺で変化させた 9 ケースを考慮して、最終的な滑り量分布における応力場の効果を検討した。その結果、基準モデルの場合で最も観測結果との一致がよく、そこから応力の大きさを変化させると滑り分布が大きく変化することが分かった。このことにより、実際の応力場は観測結果を参考にした基準モデルの場合に近いことが推定された。

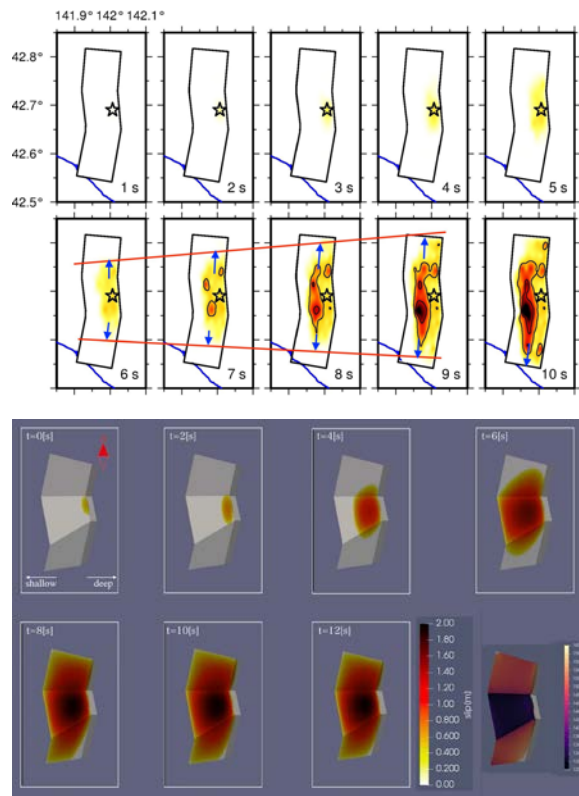


図 3. 観測データの逆解析（上）とシミュレーション（下）の結果の比較。色は断層の滑り量を示す。Asano and Iwata (2019) と Hisakawa et al. (2020) を改変。

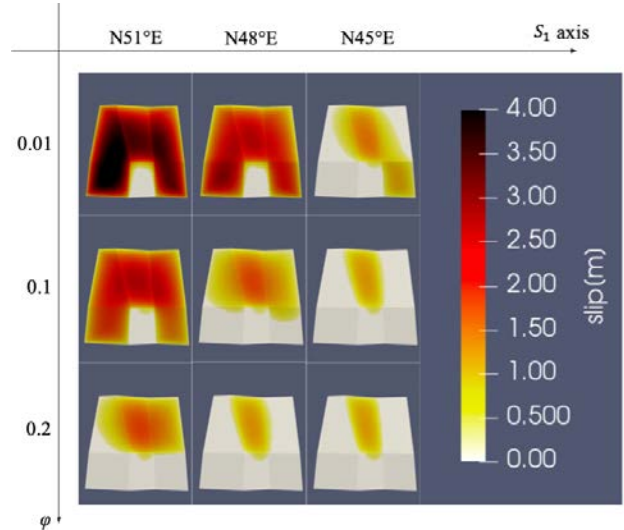


図 4. 断層面の最終的な滑り量の空間分布の、初期応力依存性についてのパラメタスタディー結果。横軸は最大主応力軸の方位、縦軸は応力比を示す。Hisakawa et al. (2020) より引用。

・2019年リッジレスト(カリフォルニア州)地震の動的破壊シミュレーション

リッジレスト地震は、プレート境界に位置する米国カリフォルニア州で、約 20 年ぶりに発生したマグニチュード7クラスの大地震である。この地震は、マグニチュード6クラスの明瞭な前震を伴った地震であり、前震が本震時に破壊した断層面に直交した断層面上で発生したという、際立った特徴を持った地震である。

本研究では、この前震と本震を含んだ過程の動的破壊シミュレーションを行った。研究にあたっては、地震の発生直後からデータ収集を開始して、速やかにモデル化を行い、2か月以内に予備的な結果を得た。

図 6 は、余震観測データに基づいて構築した断層の3次元形状モデルと、前震発生以前の観測データに基づいた仮定した断層面に加わる応力場の空間分布である。ここに示されるように、断層形状の第一義的な特徴は直交する二つの面を持つことである。

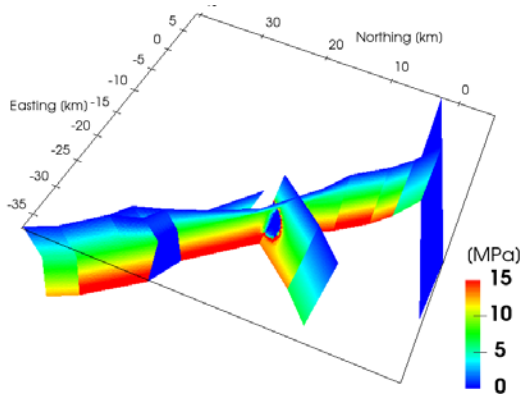


図 5. 2019 年リッジレスト（カリフォルニア州）地震の断層モデルと応力分布.

●地震サイクルシミュレーションの高度化

本年度から、本課題で取り組むシミュレーションに準静的な地震サイクルシミュレーションを加えた。格子 H-行列に対応した HACApK の開発が進んでおり、本研究ではこのような最新の成果を用いて、より大規模な並列化での高効率性を活かして、断層幾何形状の複雑性を考慮したシミュレーションを実施する。本年度は既存の物理シミュレーションコードに、HACApK を実装し格子 H-行列に対応させるコード開発を行った。

●数値計算手法の開発：3 次元 FDP=H-行列法アルゴリズムの開発

昨年度に引き続き、これまでに 2 次元問題で構築した FDP=H-行列法の 3 次元問題への拡張のために、HACApK を時間依存問題へ拡張するためのコード開発を進めた。今年度は、格子 H-行列に対応した HACApK の動弾性積分核への適用性を定量的に評価した。

具体的内容は次のとおりである。HACApK ライブラリを用いて、動弾性積分核（密行列）の低ランク近似を行い、さらに任意のベクトルに対して行列ベクトル積を実行した。この近似計算結果を、厳密計算の結果と比較することで精度評価を行った。ここで考慮した積分核は、約 3000 要素で表現した矩形断層上の波動先端による要素間動弾性相互作用を表現したものであり、FDP における領域 F_p に対応

する。

図 7 は、要素ごとの行列ベクトル積の値および近似解と厳密解との差を示したものである。ここでは低ランク近似において、行列の各成分の 2 乗和に関して相対誤差 0.1% 程度に抑えるよう近似精度を設定した。その結果、メモリ消費量をもとの密行列と比べて 20% 程度に抑えられることが分かった。このことにより、まだ考慮した要素数が小さいものの、HACApK を用いた低ランク近似が機能していることが定量的に明らかになったと言える。

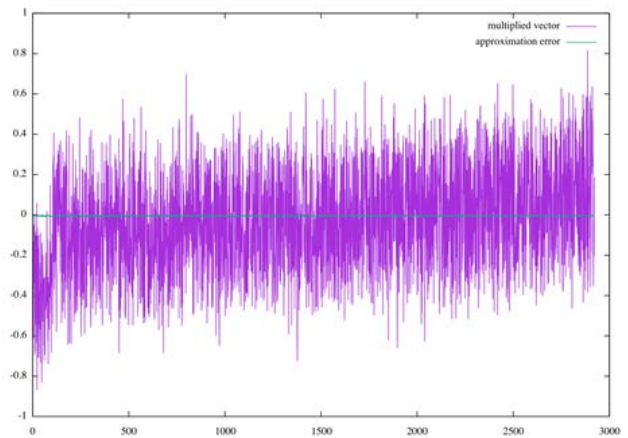


図 6. 図. 2922 要素の長方形断層モデルにおいて計算した積分核の行列に、2922 個の乱数からなるベクトルを掛け算した結果。紫線が積分核に近似を導入せずに掛け算した結果、緑線は積分核に低ランク近似を導入した場合としない場合の差（絶対誤差）。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度においては、社会的影響も大きかった 2018 年胆振東部地震を通じて本課題の目的である動的破壊過程の物理モデル化と実データを用いた検証を進めることができ、その成果を国際誌に発表することができた。また、国際的な注目の高かった 2019 年リッジレスト地震のモデル化をタイムリーに行うことが出来て国際学会で発表した。この研究において、概ね計画通りに配分資源を使用しているところである。今後、より詳細な断層形状モデルの構築を行い、初期条件の設定についてこれまで考慮していない観測量を用いて高度化を図

る予定である。

今後も引き続き、実際の地震現象の解析事例を増やすことで、地震発生を記述する物理モデルの検証を行う。このような検証事例を積み重ねることで、物理モデルを改善し重要な要素を抽出した一般モデルを構築していく。さらに、準静的な地震サイクルシミュレーションの高度化を進めて、余震の時間発展法則の経験則など、地震学の基本的な問題についても物理的な理解を進める。

現状の動的破壊シミュレーションに用いている FDP-BIEM ($O(N^3)$) のコードは、フラットな MPI 並列に留まっており、Orkforest-PACS への最適化を行うために OpenMP とのハイブリッド並列に対応するように拡張して改良を行う。

今年度、FDP=H-行列法の 3 次元化実装にむけて、HACApK ライブラリの動弾性問題への適用性を評価して、有望な結果を得ることができた。これに基づいて、今後は、H-matrices の階層矩形領域の重心情報と要素重心座標とに依存する走時分解関数、また時刻ずらしを含む滑り履歴の格納を実現するための、HACApK の拡張を行うこととなる。また、3 次元実装のために、HACAp K ライブラリと既存の FDPM の積分核表現を組み込んだコードの作成を実施する。

FDP=H-行列法は、今までにない手法であるので、既存のコードを活用できるものの、プログラムの一定の部分は、スクラッチから書き起こす必要がある。そのために、その完成までには、まだ多少の時間を必要とすると考えられるが、基本的なアルゴリズムについてはすでに完成しているので、作業の着実に実施しているところである。

7. 研究業績一覧（発表予定も含む）

(1) 学術論文（査読あり）

T. Hisakawa and R. Ando, Dynamic rupture simulation of 2018, Hokkaido Eastern Ibur

earthquake: Role of non-planar geometry, Earth Planet. Space, 72:36, doi.org/10.1186/s40623-020-01160-y, 2020.

(2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）

該当なし

(3) 国際会議発表（査読なし）

R. Ando, HOW 3-D FAULT GEOMETRY CONTROLS DYNAMIC EARTHQUAKE RUPTURES? VALIDATE PHYSICS-BASED MODELS WITH RECENT OBSERVATION, NMEM, Smolenice Castle, Slovakia, 2019 年 7 月

So Ozawa, Eric M. Dunham, Earthquake sequences on rough faults: effect of residual stress distribution on subsequent ruptures, NMEM, Smolenice Castle, Slovakia, 2019 年 7 月

R. Ando, Y. Aoki, M. Otsubo, H. Huang and L. Meng, Effects of 3-D fault geometry on rupture dynamics: Simulation of the 2019 Ridgecrest, CA, earthquakes, American Geophys. Union fall meeting, San Francisco, 2019 年 12 月

(4) 国内会議発表（査読なし）

R. Ando and Y. Kaneko, Dynamic rupture simulation reproduces spontaneous multifault rupture and arrest during the 2016 Mw 7.9 Kaikoura earthquake, JpGU, 千葉, 2019 年 5 月

So Ozawa, Takahiro Hatano, Unified description of slow and fast earthquakes using velocity-strengthening patches, JpGU Meeting, 千葉, 2019 年 5 月

T. Hisakawa and R. Ando, Dynamic rupture simulation of 2018, Hokkaido Eastern Ibur i earthquake: Role of non-planar fault geometry, annual meeting of Japan Geophys. Union, 千葉, 2019 年 5 月

(5) その他（特許、プレスリリース、著書等）

該当なし