

JHPCN jh180043-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）

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、マグニチュード 7.9 の巨大地震である 2016 年カイクウラ（ニュージーランド地震）を対象に、物理モデル化を行い、すでに Oakforest-PACS 上で実装が完了している FDP-BIEM ($O(N^3)$) 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実現し、モデルの現象再現性が示されるという、地震学的に重要な成果を上げることができた。またそれと並行して、FDP=H-行列法 ($O(N \log N)$) の、3 次元化と効率的な並列ライブラリ HACApK を用いた実装の設計を進め、既存アルゴリズムとの連結作業に着手した。

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

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

2. 研究の目的と意義

地震科学の目標の一つは、地震破壊現象の従う物理法則を定量的に理解して物理モデルを構築し、観測可能量であらかじめ定めた地下に加わる応力で記述される初期条件の下に支配方程式を解くことにより、その将来を予測することである。また予測を可能とするためには、モデルによる現象の再現性を実際のデータと比較することで検証しなければならない。

本研究課題では、地震の発生、すなわち動的破壊過程は、物理モデルを用いた超大規模シミュレーションでどこまで再現可能かとい

う問いに、正面から答えることを目指す。そのために、従来その重要性が認識されながらも数値シミュレーション手法の困難から無視されることの多かった 3 次元断層形状を、物理モデルに忠実に考慮するための手法開発を行う。手法開発と両輪の物として、物理モデルの検証を実際の観測データと比較することで進める。

3 次元断層上の動的破壊過程をシミュレーションで扱うために、我々が 2 次元問題について前年度までに開発した、FDP=H-行列法を 3 次元に拡張する。本手法は、 $O(\log N)$ という超高効率な数値計算を実現するものであり、3 次元断層形状を考慮した大規模な動的破壊シミュレーションを高精度な境界積分方程式法を用いて、 $O(\log N)$ の効率で実行するということは、世界初の試みである。

実問題への適用として、実際に発生し、高精度な観測データが得られている大地震（2016 年熊本地震や 2016 年カイクウラ（ニュージーランド）地震など）を対象に物理モデルの構築とシミュレーションによる再現性の検証を行う。このことは、地震現象の予測可能性を従来の経験則や統計則ではなく物理法則に基づいたシミュレーションによって向上さ

せるという、地震学的に大きな意義をもつ。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

代表者の安藤は、2016 年カイコウラ(ニュージーランド)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、モデル挙動の詳細を調べることで、この大地震発生の背後にある、地震規模を制御する力学条件を明らかにした。この研究は、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ったものであり、大規模計算を行うことができて初めてあげることのできた地震学的に重要な成果である。

前年度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、HACApK 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的としている。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 Oakforest-PACS 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、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予備的結果を得た。また、アルゴリズムの開発では、FDP=H-matrix の基本的なアルゴリズムの構築を行い、HACApK への実装手順について検討した。

●カイコウラ(ニュージーランド)地震のシミュレーション

本問題でのシミュレーションには、京コンピュータ上で実装していた 3 次元高速領域分割境界積分方程式法(FDP-BIEM) (Ando, 2016, Geophys. J. Intr.)を用いたコードを、本課題で用いている OakForest-PACS に移植して使用した。FDP-BIEM コードは、計算コストが、従来 BIEM の $O(N^{2.5})$ から $O(N^2)$ と効率化されており、このことにより初めて、必要とするメモリ容量を、京コンピュータで現実的に使用可能な容量以下に押さえることが可能となり実装が実現したものである。なお、FDP-BIEM の計算コストは、FDP=H-行列法の $O(N \log N)$ より高いものの、何らの近似操作を必要としないため、数値計算精度の劣化が無く、今後のベンチマークとしても使用するものでもあるし、3 次元 FDP=H-行列法の完成までは引き続き使用される。

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。

計算結果によって得られた滑り量の空間分布を、実際の地震の合成開口レーダー観測から直接的推定した値の分布 (Hamling et al., 2017, Science) と比較することで、モデルの検証を行った。その結果、断層上で大きな滑りの生じた場所の大局的な特徴が良く再現されていることが確認された。

●FDP=H-行列法の基本的なアルゴリズムの構築

動弾性問題を扱う従来の時空間境界積分方程式法 (ST-BIEM) では応力を評価するために、積分核と滑り速度の過去の履歴の畳み込み積分を実空間上で実行する。そのため、畳み込み積分が時空間の二重積分となる。それに対して、FDP-BIEM は、畳み込み積分を波線座標上で実行するために、たたみ込み積分が一重積分となる。すなわち、たたみ込み積分が、H-行列法が適用可能な行列ベクトル積の形となる。本研究では、FDP=H-行列法と呼ぶ、FDPM と H-行列法を組み合わせ、あらたな超高効率な数値計算手法の基本的なアルゴリズムを構築した。

なお H-行列法を FDPM と組み合わせる時には、本来、時空間座標に対して定義されていた畳み込み積分を、波線座標に対して実行する必要のある点に、アルゴリズム構築上の困難が生じる。本研究では、それを Averaged reduced time (ART) 近似という、あらたな近似手法を考案することで解決した。ART とは、弾性波の平面波近似に基づいた近似手法であり、波動伝播を記述する動弾性積分核 (グリーン関数) の時間依存項が、(応答計算に用いる) ソースとレシーバの双方に依存するところを、ソース依存性とレシーバ依存性の和として分離する形で高精度に近似することができる手法である。これにより、積分核を表す密行列を、レシーバ依存性を表す行ベクトルとレシーバ依存性を表す列ベクトルに分離するという H-行列法と、FDPM とを組み合わせることが可能となる。

昨年度は構築したアルゴリズムを、非並列プログラムとして実装した。まず積分核の近似精度を評価し、動的問題に適用した FDP=H-行列法が、基本的には従来の静的問題に適用した H-行列法と同様な精度を持つことが確認できた。また、本研究で特徴的な時間方向の近似精度を吟味すると、近似精度の制御に、従来のような、ある一定の閾値を用いる方法ではなく、閾値をソースとレシーバ間の距離の 1/2 に比例する形とする方が、よい近似を与えることが示された。

さらに、小規模な 2 次元問題に対して実際の地震破壊の問題に類似した破壊伝播問題に応用して、その適用可能性を検証した。その結果、本課題で目標としている、断層面が屈曲しているような場合でも、高精度で計算を行うことが可能であることが示された。

5. 今年度の研究成果の詳細

●カイコウラ (ニュージーランド) 地震のシミュレーション

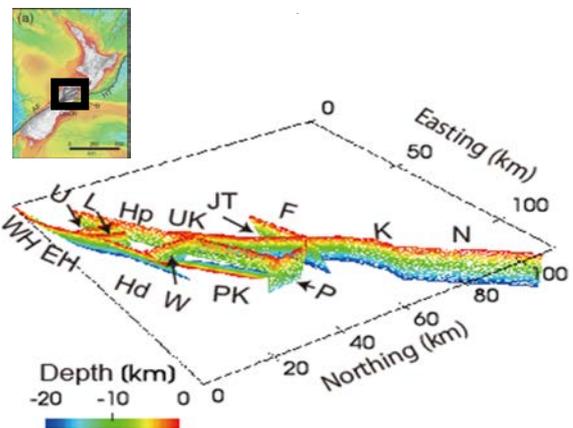


図 1. 断層形状の 3 次元モデル。2016 年カイコウラ地震 (M7.9) に伴い破壊した断層を再現した 3 次元モデルの俯瞰図。挿絵の囲み領域が震源域 (ニュージーランド南島北部)。アルファベットは、それぞれ別の断層面を示す。これら合計 14 枚の断層面が、地震時に連動して破壊した。色は断層面の深さ。

物理学分野の代表的国際誌である Geophysical Research Letters に受理された。

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。

昨年度までに、2016 年に発生したカイコウ

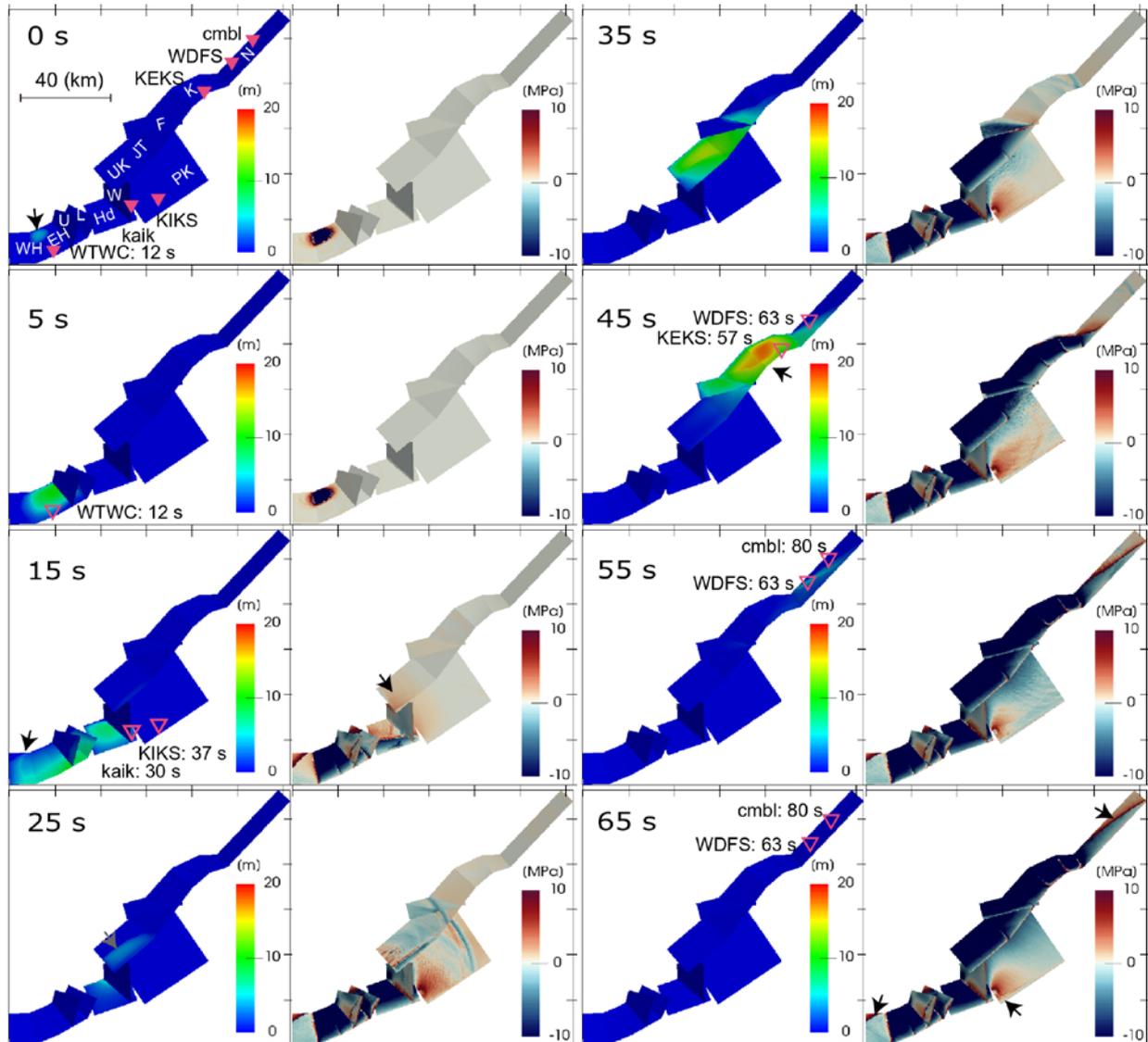


図 2. シミュレーションによって得られた断層面上を破壊が伝播する様子を上空から見下ろしたところ。破壊開始 0 秒から 65 秒後まで 10 秒ごとのスナップショットで、その間に生じた断層面上の滑り量(左パネル)とせん断応力の変化量(右パネル)を示す。破壊は左下の断層から右上の断層まで伝播している。パラメタスタディーの結果、破壊が上図のように 65 秒かけて右上の断層に達する場合と、15 秒間で左下の断層までで留まる場合という、二つの典型的な定性的に異なる結果が得られることが分かった。これは、考慮したパラメタに依存した非線形的な解の分岐現象の結果である。解がこのような特性を持つことは、多数回のパラメタスタディーを行わなければ明らかに出来なかった事項である。

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った。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。この予備的な結果に基づいて、本年度は、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。

まず、モデル化した 3 次元断層形状を図 1 に示す。ここでは、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 枚の断層がモデル化されている。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予想される。それに対して、本研究では Oakforest-PACS の大容量メモリと高速演算性能を生かすことで、このような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を実行することが可能となった。

本年度に行ったパラメタスタディーによって、カイコ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、図 2 に示すように、地震の破壊は南西(左下)に位置する断層から開始し、徐々に北東(右上)の断層に伝播して、約 65 秒後には自発的に停止する。それに対して、応力の値がある閾値

よりも小さい場合は、破壊は約 15 秒で停止し、右下に位置する複数の断層を破壊するのみである。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。さらに、多数回のパラメタスタディーにより、この閾値の上、もしくは下では、パラメタの詳細は、定量的には解に影響するものの定性的には影響しないことが分かった。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。今回行ったような実データと比較した物理モデルの検証を積み重ねることによって、シミュレーションによる地震の予測可能性がある側面においては各段に向上することが期待される。

なお、本年度は 2018 年大阪府北部の地震についてのモデリングも行っており、そのシミュレーション結果を日本地震学会で発表した。
●FDP=H-行列法の基本的なアルゴリズムの構築

FDP=H-行列法(佐藤 2018, 博士論文)の 3 次元並列実装を進めた。並列化には、アルゴリズムに一定の簡略化を施すことで比較的軽微な拡張で階層行列法(H-matrices) (Huckbush 並列ライブラリ(HACApK)(Ida et al., 2014)の延長で実装できるとわかった。これにより実装工程を大幅に短縮できた。またアルゴリズムと二次元問題での検証結果は、今年度 Sato and Ando として数値計算分野での代表的国際紙である Computational Mechanics 紙に投稿された。現在実装中の内容を以下にまとめる。

このコードは 1)積分核の格納と 2)応力評価(畳み込み)とで実装される。高速領域分割法(FDPM)により境界要素数 N の 2 乗へ軽量化された積分核のメモリ量と畳み込み計算量がさらに $N \log N$ へ低減される超効率アルゴリズムである(図 3)。積分核は以下のように縮約して格納される。つまり、まず FDPM により、時空間積分核(3 階テンソル)から時間依存性を表すベクトルを分離、次に空間依存性の行列構造を H-matrices により疎行列へ分解、さらに FDPM による積分核分割の時空間情報(走時)を平面波近似で疎行列へ分解される。応力評価では、断層滑りの時刻情報を走時に合わせて格納、積分核と時間・ソース・レシーバ依存性の順に畳み込む。

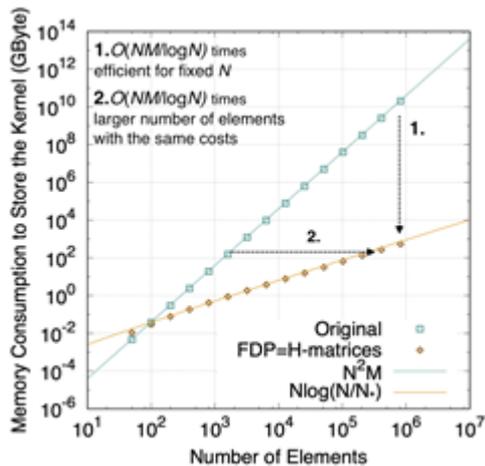


図 3. FDP=H-matrices の適用例。元の N^3 であった積分核格納コストが $N \log N$ へと低減され、劇的なコスト削減がなされている。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

本年度においては、実地震のモデリング研究が進捗し、大局的なモデル特性を解析した成果は国際誌にて発表できた。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。

また今後は、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。近年発生した多くの大地震が、高精度・高解像度な測定装置によって観測観測されており、検証の対象となるデータは多く存在する。このような検証事例を積み重ねることで、物理モデルの改善や一般的なモデルを構築していく。

本年度、FDP=H-行列法の 3 次元化実装を行うため、基本的なアルゴリズムの設計を行ったところである。動的積分核の場合に高精度な計算を担保するには HACApK に拡張が必要であることが明らかとなった。そのため、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、HACApK 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。また、並列計算機上での SIMD 化等で高速化も視野に入れる。

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. 研究成果リスト

(1) 学術論文

Ando, R. and Y. Kaneko, Dynamic Rupture Simulation Reproduces Spontaneous Multifault Rupture and Arrest During the 2016 Mw 7.9 Kaikoura Earthquake, Geoph. Res. Lett., 45, doi : 10.1029/2018GL080550, 2018.

Sato, D. and R. Ando, Quasilinear Algorithm for Elastodynamic Boundary Integral Equation Method, Computational Mechanics, 2019 (submitted)

(2) 国際会議プロシーディングス

該当無し

(3) 国際会議発表

R. Ando, Physical and geological entity of brittle-ductile heterogeneous fault zones at transition depth, Japan Geoscience Union meeting, May. 24, Chiba, 2018

R. Ando, Dynamic rupture simulations of the 2016 Mw 7.9 Kaikoura earthquake: Revealed importance of non-planar fault geometries and heterogeneous traction, ACES international meeting, Sep 26, Awaji, 2018

D. Sato, Quasi-linear Time Algorithm for Dynamical Boundary Integral Equation Methods, ACES international meeting, Sep 25-28, Awaji, 2018

D. Sato, Broadband slow-earthquake scaling and statistics reproduced by diffusive ruptures on critically, Am. Geophys. Union fall meeting, Dec. 10-14, Washington D. C., 2018

R. Ando, K. Imanishi and T. Uchide, Dynamic rupture transfer from reverse to strike-slip faults: FDP-BIEM simulation of the 2018, Mw5.5, northern Osaka earthquake, Am. Geophys. Union fall meeting, Dec. 10-14, Washington D. C., 2018

(4) 国内会議発表

佐藤大祐, 安藤亮輔, 動的境界積分方程式法への階層型行列法の適用と、現実の断層系の摩擦強度推定への展望, JpGU Meeting 2018, 2018 年 5 月 21 日, 千葉, 2018, 招待講演

安藤亮輔・今西和俊・内出崇彦・別所明彦・藤壺希子・金子りさ・井出哲, 2018 年 Mw5.5 大阪府北部の地震の動的破壊シミュレーション: 逆断層から横ずれ断層への破壊乗り移り, 日本地震学会秋季大会, 10 月 10 日, 郡山, 2018.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

該当無し