

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2018～2022

課題番号：18KK0095

研究課題名（和文）ニュージーランドにおける巨大地震発生シミュレーターの高度化と性能評価

研究課題名（英文）Development and validation of gigantic-earthquake simulator in New Zealand

研究代表者

安藤 亮輔（Ando, Ryosuke）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：10455256

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 6,100,000円

研究成果の概要（和文）：大地震の発生過程を理解して予測するには、断層形状と応力状態、断層レオロジーを考慮した現実的な物理モデルを構築し、観測データと比較して検証する必要がある。本研究では、そのため、全長約200kmにおよぶ多数の内陸活断層の連動破壊を伴った2016年M7.9カイクウラ（ニュージーランド）地震で得られた観測を用いた。2016年地震を再現するシミュレーションと、地震学・測地学的観測データ、2016年以前の古地震データと比較したところ、複雑な連動パターンをもたらした要因が地震履歴である可能性を示した。また、地震データを解析し、スロー地震（微動現象）の分布構造を見出し、深部レオロジー特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、地震発生シミュレーター構築の方法論を古地震発生履歴を含む形に拡張し、実観測データとの比較で詳細な検証を行うことができた。これは、より幅広い対象に対して、さらなるモデル構築と予測を行う方向性を切り開く成果といえる。また、共同研究相手で行っているニュージーランド全土を対象とした断層モデル構築のノウハウと具体的な手法を導入することができた。これより、今後日本国内でも3次元断層形状モデルを全土的に整備することも可能となり、本課題で構築した地震発生シミュレーションを実行することができるようになる。それは、強震動計算など、防災減災対策にも有用な応用研究の高度化を進めることにもなるであろう。

研究成果の概要（英文）：Developing realistic models is major keys to understand and forecast the generation processes of large earthquakes. It is important to validate the model ingredient such as fault geometries, states of stresses and rheological properties of faults by comparing with observations. This study tackled this problem by using the rich data associated with the 2016 M7.9 Kaikoura (NZ) earthquake, which ruptured multiple inland active fault segments over the distance of 200km. The simulation reproducing the 2016 event shows the possibility that the earthquake recurrence history played an important role causing the complex rupture pattern. Our observational analysis also clarifies the structure of the slow earthquake (tectonic tremor) distribution, which reflects the rheological fault property at the depth.

研究分野：地震発生物理学

キーワード：ニュージーランド 活断層 動的破壊シミュレーション 古地震 カイクウラ地震 応力場 UAV 大規模並列計算

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地震科学の目標の一つは、系の従う物理法則を定量的に理解して、観測可能量で定めた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。本研究では、個々の地震に伴う断層の破壊の、開始、進展、停止、について、地震発生前に得られる観測量と力学を用いて予測できる、地震発生シミュレーターの汎用的な手法の構築を目指した。

地震規模を含む地震の長期予測は、日本やニュージーランド、アメリカなどの地震多発地域ではすでに実施されている。過去に発生した地震の履歴は、古地震学により地形・地質痕跡を調査し求められるが、現行の長期予測は、その調査結果を特定の統計モデルに当てはめた経験論に基づいている。しかし、全ての断層について、理想的にこのような古地震学的データが得られるわけではない。さらに、この統計モデルは、活断層の適当な単位区間（セグメントと呼ぶ）では、同一規模の地震が等時間間隔で発生するという「固有地震モデル」を前提としているが、実際の地震はより多様であることが広く知られている。したがって、地殻に加わる応力場や断層の位置・形状、断層の摩擦特性など、それとは独立の、または相補的な、データや物理メカニズムも活用した、多様性を評価しうる、予測手法の開発が求められていた（例えば、地震調査研究推進本部、2013年）。

2. 研究の目的

2016年M7.8カイクウラ地震は、ニュージーランド南島の内陸部を約200kmの長さにわたって破壊した巨大地震であり、その動的な破壊過程が現代的観測と野外調査で詳細に確認される稀有な事象である。この事象は、事前に観測し得る情報と物理的シミュレーションを用いてどこまで予測可能だっただろうか？本研究では、現地研究者と共同で以下の研究を行い、地震発生シミュレーター構築の汎用的な手法の確立につなげる。

過去の地震発生履歴およびスロー地震（微動）の2つのカタログを整備し、それら事前情報に基づいてシミュレーターのカイクウラ地震を対象とした初期条件設定を高度化

カイクウラ地震観測データを用いシミュレーターの予測性能を定量評価。また衛星観測の解像度以下の地表変形・断層ずれ量の詳細データを、ドローンを用いた地形調査で新規取得

シミュレーターの性能向上のために、地震学と測地学を含む地震発生物理学と地形・地質学、古地震学、計算機科学を融合

3. 研究の方法

まず、従来の完全動的境界積分方程式法を用いた地震発生シミュレーターを、応力の空間変化を考慮できるように拡張整備する。シミュレーターは、スーパーコンピュータを用いた大規模並列環境で実行する。また、シミュレーターに入力する初期条件（応力と摩擦）およびモデル妥当性検証のための情報量を増やすため、最新の研究成果を反映させることで古地震発生履歴を整理し、また地震波解析により微動カタログを構築する。古地震カタログには、現地でGNSとCanturbery大等が遂行中の調査結果も随時反映させる。シミュレーション結果の定量評価のため、カイクウラ地震に伴い観測された地震波形、衛星観測および地質・地形観察で得られた断層変位の空間分布を詳細に比較する。さらに、より詳細な性能評価のため、衛星観測では明瞭に拘束できなかったが破壊を南部から中部に伝播させるのに重要な役割を果たした可能性のあるWhites断層等の南・中部の副次的断層を対象に、地表踏査と小型無人航空機（UAV；ドローン）を用いた測量により断層形状と変位分布のデータを取得する。

4. 研究成果

○断層形状モデルの更新

従来のシミュレーション研究（Ando and Kaneko, 2018）の断層形状モデルは、Humling et al. (2017)で用いられた2016年イベント後の初期に構築された平面断層を組み合わせた比較的単純なものであった。まず本課題では、最新の知見を考慮して構築された非平面の3次元断層形状モデル

(図1)を共同研究者から入手して、地震発生シミュレータに導入した。本断層モデルは地形・地質学や構造探査、地震活動の最近のデータを統合したものであり、従来の断層モデルは、概ね10kmスケールでの平面断層の組み合わせにより、全体の断層系を表現したものであったが、新モデルは約1kmスケールでの地表トレースと断層傾斜を考慮したモデルとなっている。

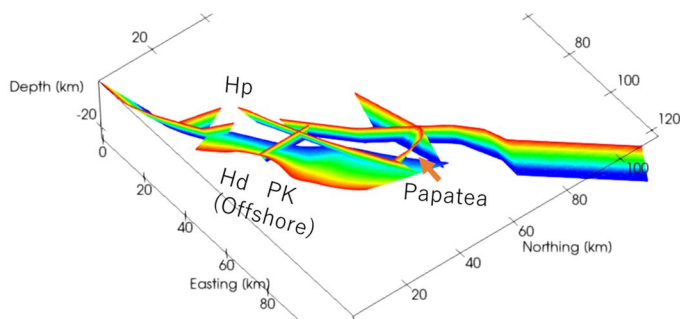


図1. 新たに構築した3次元断層形状モデル。Hp: ホープ断層。

○破壊伝播経路の複雑性の解明と再現性の検証

動的破壊シミュレーションの検証のため、2016年カイクウラ（ニュージーランド）地震の複雑な破壊伝播経路の再現性を詳細に調べた。顕著な複雑性は、本地域の主要活断層である Hope 断層が連動破壊しなかったことである。この要因について、まずシミュレーションにより考察した。

モデル検証にあたっては、不確実性のある広域応力場が破壊過程に与える効果をパラメスタディにより調べた。これは、Matsumoto et al. (2019)により推定された応力比が従来参照した Townend et al. (2012)の0.66より大きいという結果を踏まえてのものである。また、Hope断層が破壊しなかった要因が、過去の地震により解放された応力のテクトニックな載加による回復が十分でなかった可能性を考慮して、シミュレーターを拡張することで、Hope断層の応力値を変化させられるようにした。

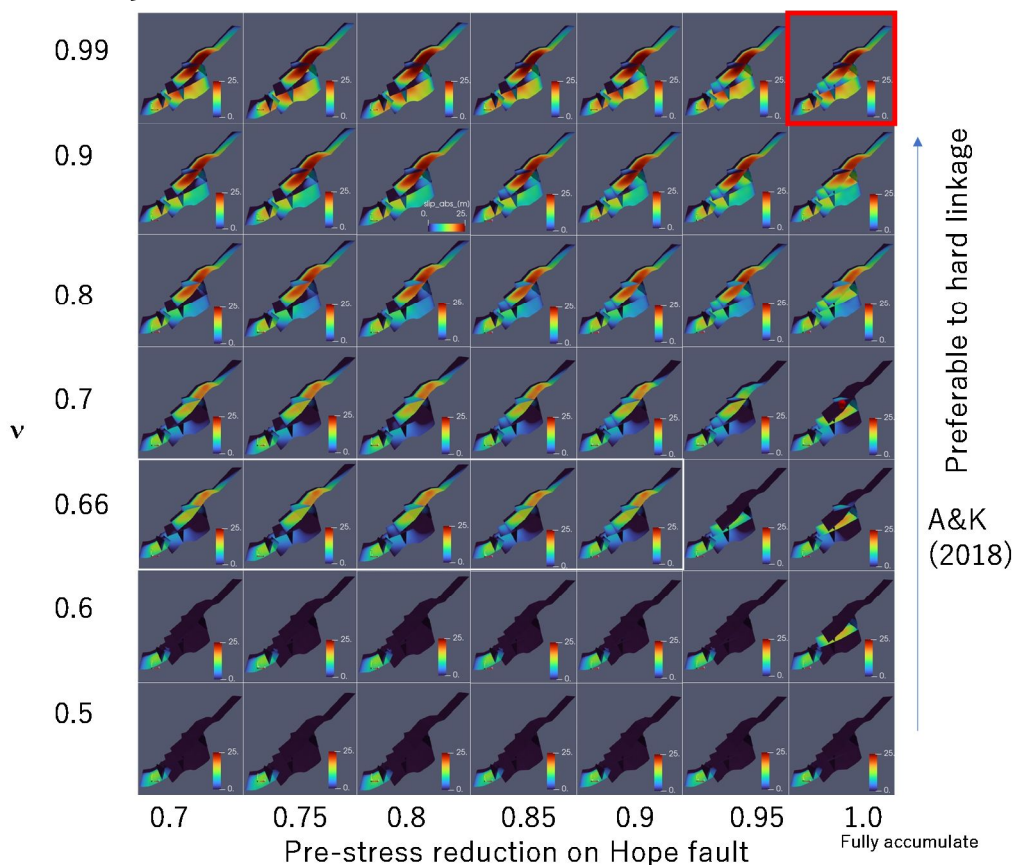


図2. パラメスタディによって得られた破壊停止後の断層面上の滑り量分布。縦軸は応力比，横軸は Hope 断層の応力蓄積率。

応力比と Hope 断層の応力蓄積率を変えて合計で 49 通りのパラメタセットで計算を行った。結果をまとめたところ、Hope 断層の割れやすさは応力比が大きくなるほどより高まる傾向にあるこ

とが分かった(図2)。一方で、Hope 断層が運動しなかった原因となった可能性が指摘されていたより深部に存在する低角逆断層は、応力比の増加によってより抑制される傾向となることが分かった(図4)。シミュレーションの結果、応力比の大小にかかわらず、応力蓄積率が約70%以下の場合には、Hope 断層が運動破壊しないことが分かった。また低角逆断層の効果で、Hope 断層の破壊が抑制されるシナリオは再現されないことが分かった。

○古地震調査結果の整理とシミュレーション結果との比較

カイコウラ地震以降の当地域での古地震学的調査の最新の成果(Hartem et al., 2019など)を踏まえて、地震発生履歴を力学的観点から整理した。その結果、当該地域のHope断層は、2016年時点で前回のイベントから誤差込みで176-285年経過しており、応力蓄積率に関する地震後時間経過率は57-160%と見積もられることが分かった。当該地域の古地震履歴研究による地震後経過率は誤差が大きい、応力蓄積率の低さがHope断層の運動しなかった要因となったシナリオも、その誤差範囲内に含まれると理解される。その意味において、今回のモデルは妥当性が示されたと考えられる。

○震源域中部のWhites断層の地表踏査・UAV調査

2016年カイコウラ地震で、破壊がHumps断層など南西領域から開始した断層破壊がKekerengu断層など北東領域に伝播したメカニズムは、よく分かっていなかった。その際、両者の中間に存在する既知の断層であるWhites断層が破壊したかどうか、すなわちWhites断層の破壊が伝播を仲介したのか、それとも破壊はWhites断層を飛び越えて、地震波動による応力擾乱が両者の破壊を仲介したのかが重要となる。Whites断層は、Litchfield et al. (2018)等の緊急調査によって、スポット的に断層変位の記載があったものの、全体像はあきらかでなかったために、現地調査を行うことでより詳細な把握を行った。UAV等も用いて(図3右)領域内を網羅的に踏査した結果、断層変位の生じた区間は既往研究よりやや延長されるものの、やはり連続した顕著な断層変位は確認できなかった(図3左)。



図3。(左)Whites断層にそって見つかったスポット的な断層変位。約30cmの縦ずれ成分を持つ。(右)UAV測量で作成した3次元地形モデル。DEMに光学画像を重ねる。

○マルボロ断層帯のスロー地震観測

多様なテクトニック環境下でのスロー地震発生メカニズムを理解するために、カイコウラ地震震源域を含むマルボロ断層系において、微動活動の検出と震源決定を行った。本年度は、Romanet and Ide (2019)で用いたGEONET定常観測点の波形記録に、これまで行ってきた臨時観測のデータを加えてより詳細な解析を行った。その結果、2013年から2019年の間で決定された微動震源は、定常観測網では369個だったのに対して、臨時点を加えた場合では4699個となり、大幅に増加させることができた(Romanet et al., 2021)。この高精度化された震源位置決定により、微動発生域が領域内の特定の位置にクラスタ状に存在している様子が明らかとなった。

○スロー地震の発生条件の拘束

カイクウラ地震を発生させたマルボロ断層帯およびそこに属するホープ断層は、横ずれ（トランスフォーム）断層である。そこでの温度圧力環境および断層岩の変成作用は、沈み込み帯で生じる継続的な脱水作用は生じないと考えられる。そのため、スロー地震の発生条件としてしばしば考慮される流体の効果は、少なくとも主たる要素としては排除される。そのため、前項で示した解析によってホープ断層の深部、すなわち脆性延性遷移領域、に沿った微動の発生が明らかとなったことは、温度上昇による塑性流動変形の卓越というより普遍的な要素の重要性を示すことになった。この観測事実に基づいて、スロー地震の滑り特性とレオロジー特性をコンパイルして、概念的深さ断面モデルとしてまとめた（図4）。また、深部スロー地震の深さ依存性を地震発生逆転層としてあらたに特徴づけた。

この結果は、今後の地震発生シミュレーター開発において重要なモデル拘束を与えた。すなわち、地震発生層下部の脆性延性遷移領域に、今回明らかとなった塑性流動変形を断層構成関係として考慮することが重要である。このことにより、スロー地震発生過程のモデル化さらにはスロー地震と大地震との相互作用のモデル化がより現実的なものとなり、大地震の発生過程の予測にとっても重要な示唆を与えるものとなる。

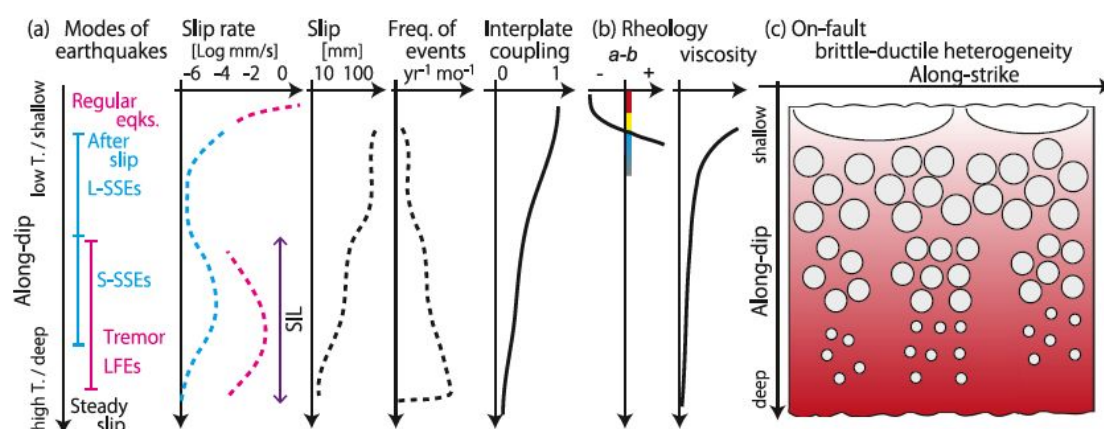


図4. スロー地震の滑り特性(a)と断層レオロジー特性(b-c)の概念的断面モデル。長期的スローリップイベント（L-SSE）の下部に位置する短期的スローリップイベント（S-SSE）・微動（Tremor）の深度が地震発生逆転層（Seismogenic Inversion Layer; SIL）。Ando et al. (2023).

○コミュニティ断層モデルの構築と地震発生シミュレーション：今後の展開と社会的意義

地震発生シミュレータの構築には、3次元断層形状モデルの構築が重要な要素となる。共同研究機関であるGNS Scienceとカンタベリー大学は、ニュージーランド全域を対象とした3次元断層形状モデルである、コミュニティ断層モデル (<https://www.gns.cri.nz/research-projects/new-zealand-community-fault-model/>) の構築を主導している。本課題では、先方の優れたモデル構築の方法論と使用するソフトウェアを含む計算機手法を導入することができた。このことにより、今後日本国内でも3次元断層形状モデルを全土的に整備することも可能となり、本課題で構築した地震発生シミュレーションを実行することができるようになる。それは、強震動計算など、防災減災対策にも有用な応用研究の高度化を進めることにもなるであろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Pierre Romanet, Daisuke, Sato, and Ryosuke Ando,	4. 巻 223
2. 論文標題 Curvature, a mechanical link between the geometrical complexities of a fault: application to bends, kinks and rough faults,	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 212, 232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggaa308	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ando Ryosuke, Kaneko Yoshihiro	4. 巻 45
2. 論文標題 Dynamic Rupture Simulation Reproduces Spontaneous Multifault Rupture and Arrest During the 2016 Mw 7.9 Kaikoura Earthquake	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 0
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GL080550	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ryosuke Ando, Kohtaro Ujiie, Naoki Nishiyama, and Yasushi Mori	4. 巻 50
2. 論文標題 Depth-Dependent Slow Earthquakes Controlled by Temperature Dependence of Brittle-Ductile Transitional Rheology	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2022GL101388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022GL101388	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Pierre Romanet, Florent Aden Antoniw, Ryosuke Ando, Stephen Bannister, Calum Chamberlain, Yoshihisa Iio, Satoshi Matsumoto, Tomomi Okada, Richard H. Sibson, Akiko Toh, Satoshi Ide
2. 発表標題 Tremor detections in New Zealand and their relationship with the 2016 Mw 7.8 Kaikoura earthquake
3. 学会等名 European Geoscience Union (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Pierre Romanet, Florent Aden Antoniw, Ryosuke Ando, Stephen Bannister, Calum Chamberlain, Yoshihisa Iio, Satoshi Matsumoto, Tomomi Okada, Richard H. Sibson, Akiko Toh, Satoshi Ide
2. 発表標題	Tremor detections in New Zealand and their relationship with the 2016 Mw 7.8 Kaikoura earthquake
3. 学会等名	日本地球惑星科学連合
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	安藤 亮輔, 金子 善宏, Andy Howell, Andy Nicol, Robert Langridge, Ian Hamling
2. 発表標題	Why the Hope fault bypassed during the 2016 Kaikoura earthquake?
3. 学会等名	日本地震学会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Pierre Romanet, Florent Aden-Antoniow, Ryosuke Ando, Stephen Bannister, Calum Chamberlain, Yoshihisa Iio, Satoshi Matsumoto, Tomomi Okada, Richard H. Sibson, Akiko Toh, and Satoshi Ide
2. 発表標題	Detection of tremors in the Marlborough region and its relationship with the 2016 Mw 7.9 Kaikoura (New Zealand) earthquake
3. 学会等名	European Geoscience Union (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	R. Ando
2. 発表標題	HOW 3-D FAULT GEOMETRY CONTROLS DYNAMIC EARTHQUAKE RUPTURES? VALIDATE PHYSICS-BASED MODELS WITH RECENT OBSERVATION
3. 学会等名	Workshop "Numerical Modeling of Earthquake Motions: Waves and Ruptures" (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 R. Ando and Y. Kaneko
2. 発表標題 Dynamic rupture simulation reproduces spontaneous multifault rupture and arrest during the 2016 Mw 7.9 Kaikoura earthquake
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 並木 亮、安藤 亮輔、穴倉 正展
2. 発表標題 ボーリングコア解析と物理的断層モデルに基づく富士川河口断層帯入山瀬断層の位置と活動性推定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小森 純希, 穴倉 正展, 安藤 亮輔
2. 発表標題 関東地震発生履歴解明のための房総半島離水低地の堆積構造調査
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Komori, J., Shishikura, M., Ando, R.,
2. 発表標題 History of Megathrust Earthquakes Along the Sagami Trough, Central Japan
3. 学会等名 AOGS 16th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小森 純希 , 安藤 亮輔 , 宍倉 正展 ,
2. 発表標題 隆起海岸段丘地形の DEMクラスタリングによる自動検出と分類
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Komori, J., Ando, R., Shishikura, M.,
2. 発表標題 Automatic Detection and Classification of the Uplifted Marine Terrace by Clustering DEM Dataset
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安藤亮輔, Yoshihiro Kaneko
2. 発表標題 動的破壊シミュレーションにより再現された2016年M7.9カイクウラ（ニュージーランド）地震の破壊の連鎖と停止
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryosuke Ando
2. 発表標題 Rupture Path of the 2016 Kaikoura, NZ, Earthquake Inferred from Dynamic Rupture
3. 学会等名 ACES (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryosuke Ando
2. 発表標題 Accelerating quasi-dynamic and dynamic boundary element simulations by hierarchy matrices
3. 学会等名 2022 Seismic Cycles Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

安藤研究室 www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~ando

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	Romanet Pierre (Romanet Pierre) (50829190)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波防災研究部門・特別研究員 (82102)	
研究分担者	井出 哲 (Ide Satoshi) (90292713)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------