

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13629

研究課題名（和文）地震現象の複雑性と断層破壊の不確定性

研究課題名（英文）Phenomenological Complexity of Earthquakes and Inherent Uncertainties in Fault Rupture

研究代表者

麻生 尚文（Aso, Naofumi）

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：70801223

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：物理法則がすべて与えられれば、断層すべりは決定論的に与えられるはずである。しかしながら、ミクロな不均質性までを決定論的に与えることは非現実的であり、断層すべりはあたかも確率論的なプロセスとして振る舞う。本課題では、不確定性を考慮した断層シミュレーションにより、スロー地震も含めた地震現象の複雑性を断層破壊の不確定性という観点から理解することを目指した。通常の決定論的なシミュレーションでは再現できない、パルス的と呼ばれる地震すべりを再現できたほか、近年着目されており、断層がゆっくりと滑る減少であるスロー地震も再現することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震の物理的側面には未解決の問題が多く、例えば、大きな地震と小さな地震との根本的な違いさえ、よく分かっていない。近年では、断層面がゆっくりと滑るスロー地震が巨大地震前に発生していることもわかっており、地震すべりの多様性を理解することは重要である。本研究の成果は、非常にシンプルなモデルながらも、断層破壊の多様性を再現する、世界で初めてのモデルである。

研究成果の概要（英文）：For a given physics on the fault, we can calculate slip evolution deterministically. However, precise determination of microscopic heterogeneity is unrealistic, and therefore slip evolution appears to be a stochastic process. In this study, I tried to understand the complexity of earthquake phenomena based on my unique concept of inherent uncertainties in fault rupture. As a result, a simple model could explain a variety of earthquakes, from crack-like to pulse-like features, as well as slow earthquakes.

研究分野：地震学

キーワード：地震

1. 研究開始当初の背景

地震の物理的側面には未解決の問題が多く、例えば、大きな地震と小さな地震との根本的な違いはよく分かっていない。断層でのすべり現象が次々と連鎖的に広がって大きな地震へ成長し、最終的にすべりが止まるまでの断層破壊プロセスを支配する物理メカニズムを解明することは、地震現象の物理メカニズムを理解する上で非常に重要である。

余震の地震数が時間に反比例して減少するという大森則は、地震同士の相互作用が複雑に絡み合った結果として見えてくる統計的特徴であり、その根本にある一つ一つの地震の相互作用は、ETAS モデルのように確率論的だと考えられる。さらにミクロなスケールである、一つの地震の断層破壊プロセスでの時々刻々のすべりが直後のすべりに及ぼす影響も確率論的なものと予想される（断層破壊の不確定性）。

もちろん、物理法則がすべて与えられれば、断層すべりは決定論的に与えられるはずである。しかしながら、ミクロな不均質性までを決定論的に与えることは非現実的であり、断層すべりはあたかも確率論的なプロセスとして振る舞うことが予想される（図 1）。例えば、ブラウン運動モデルのような機械的モデルでもスロー地震の特徴の一部が説明できることは知られており [Ide, 2008]。本課題では、不確定性を考慮した断層シミュレーションにより、スロー地震も含めた地震現象の複雑性を断層破壊の不確定性という観点から理解することを目指す。

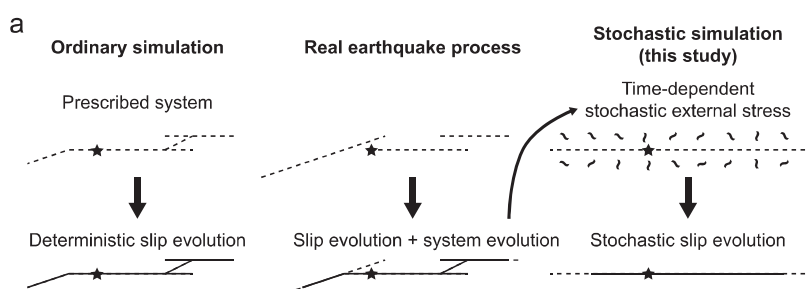


図 1 確率論的な断層すべりの概念図 (Aso et al. 2019)

2. 研究の目的

数値計算により、断層破壊の不確定性が地震現象の複雑性に及ぼす影響を調べる。通常は決定論的に与えられる時間発展の運動方程式に対して、本研究では確率的な揺動項を加え、結果がどのように分布するかを調べる。この揺動項は、従来は考慮されてこなかった、時空間の離散化スケールよりも細かいすべりの不均質性も説明しうる。

3. 研究の方法

通常は決定論的に与えられる時間発展の運動方程式に揺動項を加えた。本研究における境界積分法での応力の定式化を以下に与える。最後の項が確率論的な揺動項である。

$$T(x_i, t_n) = T(x_i, t_0) - \frac{\mu}{2\beta} \left(D(x_i, t_n) + \sum_{\substack{m < n \\ |i-j|\Delta x < \beta(n-m)\Delta t}} D(x_j, t_m) K((i-j)\Delta x, (n-m)\Delta t) \right) + q_{in}$$

本研究では、時空間的なガウシアンノイズを用いた。ただし、最小相関サイズを導入することで、空間離散化の影響を受けにくいような工夫をした。

4. 研究成果

通常の決定論的なシミュレーションでは、クラック的な破壊しか再現することができないが(図2のa・d・g)、確率的な応力擾乱を導入することで、クラック的なもの(図2のb・c)、中間的なもの(図2のe・f)、パルスのなもの(図2のh・i)まで、断層すべりの多様性を再現することができた。なお、計算条件において変更している点は、摩擦強度のレベルだけである。擾乱の影響が相対的に小さいものから大きいものへと変わること、このようなクラック的なものからパルスのなものへの遷移が見えていると解釈できる。

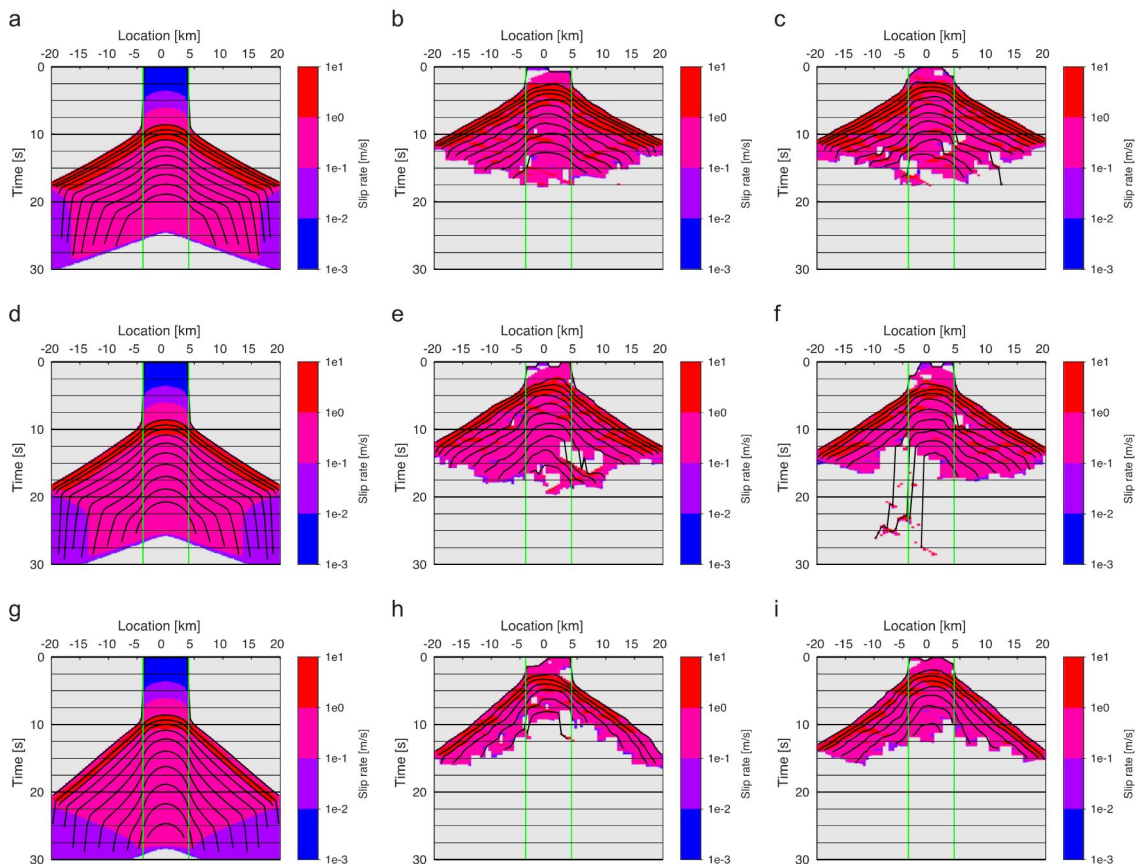


図2 シミュレーションにより再現された通常地震の時空間すべり分布

さらに、特定の条件において、スロー地震も再現することができた(図3)。具体的には、実際に微動で観測されているような拡散的な伝播、微動の解析やスロースリップの見えるパルスの滑り分布、東北地震前に見られたようなスロー地震から通常の地震への加速、といった様々な特徴が再現できた。非常にシンプルなモデルながらも、このような現実に近い滑りが再現できた、世界で初めてのモデルである。

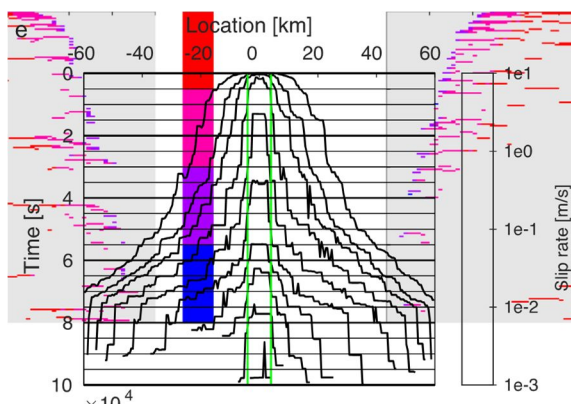


図3 シミュレーションにより再現されたスロー地震の時空間すべり分布

以上の研究成果は、Aso et al. (2019)にて報告された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Oikawa Genki, Aso Naofumi, Nakajima Junichi	4. 巻 46
2. 論文標題 Focal Mechanisms of Deep Low Frequency Earthquakes Beneath Zao Volcano, Northeast Japan, and Relationship to the 2011 Tohoku Earthquake	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 7361 ~ 7370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL082577	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 -

1. 著者名 Aso Naofumi, Ando Ryosuke, Ide Satoshi	4. 巻 46
2. 論文標題 Ordinary and Slow Earthquakes Reproduced in a Simple Continuum System With Stochastic Temporal Stress Fluctuations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 14347 ~ 14357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL085010	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 -

1. 著者名 Kano Masayuki, Aso Naofumi, et al.	4. 巻 89
2. 論文標題 Development of a Slow Earthquake Database	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Seismological Research Letters	6. 最初と最後の頁 1566 ~ 1575
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1785/0220180021	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 Tamune Hidetaka, Hamamoto Yu, Aso Naofumi, Yamamoto Naoki	4. 巻 73
2. 論文標題 Cefepime induced encephalopathy: Neural mass modeling of triphasic wave like generalized periodic discharges with a high negative component (Tri HNC)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Psychiatry and Clinical Neurosciences	6. 最初と最後の頁 34-42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/pcn.12795	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46件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 27件）

1. 発表者名 Aso, N.
2. 発表標題 島根東部で観測 & 検出した深部低周波地震の発生時間間隔分布
3. 学会等名 スロー地震学 C01班集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shibata, R., G. Oikawa, N. Aso, J. Nakajima, and S. Ide
2. 発表標題 Quantitative comparison between the radiation-corrected EGF and the conventional EGF
3. 学会等名 American Geophysical Union 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Oikawa, G., N. Aso, and J. Nakajima
2. 発表標題 Quantitative evaluation of relationship between stress change of large earthquakes and activity of low-frequency earthquakes in Northeast Japan
3. 学会等名 American Geophysical Union 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aso, N.
2. 発表標題 Campaign Observations of Deep Long-Period Earthquakes in Eastern Shimane
3. 学会等名 American Geophysical Union 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田 律也・及川 元己・麻生 尚文・中島 淳一・井出 哲
2. 発表標題 放射パターンを補正した経験的グリーン関数と従来の経験的グリーン関数を用いた波形インバージョン結果の定量比較
3. 学会等名 日本地震学会 2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 及川 元己・麻生 尚文・中島 淳一
2. 発表標題 巨大地震の静的応力変化が火山深部低周波地震の活動変化に与える影響の定量的評価
3. 学会等名 日本地震学会 2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 麻生 尚文・寺井 望
2. 発表標題 島根東部の深部低周波地震の臨時観測
3. 学会等名 日本地震学会 2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aso, N., R. Ando, and S. Ide
2. 発表標題 広島県北東部での火山型深部長周期地震観測
3. 学会等名 Slow Earthquakes WS 2020 Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aso, N.
2. 発表標題 島根東部の火山型深部長周期地震の初期プロセス解明へ向けた観測計画
3. 学会等名 スロー地震学 A01 A02 合同オンライン研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田 律也・及川 元己・麻生 尚文・中島 淳一・井出 哲
2. 発表標題 放射パターンを補正した経験的グリーン関数による震源過程解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2020年大会（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 及川 元己・麻生 尚文・中島 淳一
2. 発表標題 東北日本で発生する火山性深部低周波地震の震源メカニズム
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2020年大会（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 麻生 尚文
2. 発表標題 Deep Long-Period Earthquakes in Eastern Shimane
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2020年大会（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 麻生 尚文・柴田 律也・中島 淳一
2. 発表標題 Raspberry Piと加速度センサで学ぶ雑微動解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aso, N.
2. 発表標題 確率論的破壊伝播計算で考えるスロー地震の物理的実体
3. 学会等名 スロー地震学 C01班集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 麻生 未季・麻生 尚文・井出 哲
2. 発表標題 Variation of Focal Mechanisms of Low Frequency Earthquakes in Parkfield
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 麻生 未季・麻生 尚文・井出 哲
2. 発表標題 Evaluation of Magnitude and Characteristics of Seismicity of Low Frequency Earthquakes in Parkfield
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 及川 元己・麻生 尚文・中島 淳一・松澤 暢
2. 発表標題 Mechanisms transition of LFEs beneath Zao volcano due to the stress change induced by the 2011 Tohoku earthquake
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田 律也・麻生 尚文・中島 淳一・井出 哲
2. 発表標題 Source process of recent M6-class inland earthquakes in Japan
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 麻生 尚文・安藤 亮輔・井出 哲
2. 発表標題 Stochastic modeling of slow earthquakes comparable to observations
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Aso, N., R. Ando, and S. Ide
2. 発表標題 Stochastic Earthquake Modeling to Bridge the Gap between Deterministic Modeling and Earthquake Diversity
3. 学会等名 IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松澤 孝紀・加納 将行・田中 優作・麻生 尚文・井出 哲・小原 一成
2. 発表標題 「スロー地震データベース」の取り組み
3. 学会等名 日本地震学会 2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 及川 元己・麻生 尚文・中島 淳一
2. 発表標題 蔵王・岩手山・肘折で発生する深部低周波地震のメカニズム
3. 学会等名 日本地震学会 2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 麻生 尚文・安藤 亮輔・井出 哲
2. 発表標題 Rupture simulation in a temporally stochastic stress field
3. 学会等名 日本地震学会 2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田 律也・及川 元己・麻生 尚文・中島 淳一・井出 哲
2. 発表標題 放射パターンを考慮した経験的グリーン関数を用いた震源過程解析
3. 学会等名 日本地震学会 2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 麻生 未季・麻生 尚文・井出 哲
2. 発表標題 パークフィールドの低周波地震の震源メカニズム解 -理論波形振幅を用いた振幅インバージョン-
3. 学会等名 日本地震学会 2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Aso, N., R. Ando, and S. Ide
2. 発表標題 Temporally stochastic stress perturbations enable slow ruptures
3. 学会等名 Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Aso, N., R. Ando, and S. Ide
2. 発表標題 Rupture Evolution in a Temporally Stochastic Stress Field to be Slow
3. 学会等名 American Geophysical Union 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oikawa, G., N. Aso, and J. Nakajima
2. 発表標題 Focal Mechanisms of Volcanic Deep Low Frequency Earthquakes in Northeast Japan
3. 学会等名 American Geophysical Union 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Aso, M., N. Aso, S. Ide, and D. Shelly
2. 発表標題 Focal Mechanisms of LFEs in Parkfield by the amplitude inversion using synthetic waveforms
3. 学会等名 American Geophysical Union 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shibata, R., G. Oikawa, N. Aso, J. Nakajima, and S. Ide
2. 発表標題 Slip Inversion with Radiation-corrected Empirical Green's Functions
3. 学会等名 American Geophysical Union 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 麻生 未季・麻生 尚文・井出 哲
2. 発表標題 パークフィールドでの低周波地震のスタック波形の振幅評価：震源メカニズム推定のために
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2018年大会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 麻生 尚文・安藤 亮輔・井出 哲
2. 発表標題 New dynamic model of slow earthquakes considering stochasticity in rupture simulation
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2018年大会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加納 将行・麻生 尚文・松澤 孝紀・井出 哲・案浦 理・新井 隆太・馬場 慧・M. Bostock・K. Chao・日置 幸介・板場 智史・伊藤 喜宏・鎌谷 紀子・J. Maury・中村 衛・西村 卓也・尾鼻 浩一郎・太田 和晃・N. Poiata・B. Rousset・杉岡 裕子・高木 涼太・高橋 努・竹尾 明子・Y. Tu・内田 直希・山下 裕亮・小原 一成
2. 発表標題 Development of Slow Earthquake Database
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2018年大会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aso, N., R. Ando, and S. Ide
2. 発表標題 Stochastic Dynamic Modeling to Reproduce Variability of Earthquakes
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aso, M., N. Aso, and S. Ide
2. 発表標題 Focal mechanisms and seismicity of LFEs on Parkfield
3. 学会等名 Southern California Earthquake Center Annual Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aso, N., R. Ando, and S. Ide
2. 発表標題 Slow slip and tremors driven by stochastic stress perturbation
3. 学会等名 Joint Workshop on Slow Earthquakes 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aso, M., N. Aso, and S. Ide
2. 発表標題 Focal mechanisms and seismicity of LFEs on Parkfield
3. 学会等名 Joint Workshop on Slow Earthquakes 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tanaka, Y., M. Kano, N. Aso, T. Matsuzawa, S. Ide, and K. Obara
2. 発表標題 Recent Report on "Slow Earthquake Database"
3. 学会等名 Joint Workshop on Slow Earthquakes 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 及川 元己・麻生 尚文・中島 淳一・松澤 暢
2. 発表標題 SP振幅比を用いた火山深部低周波地震の発震機構解の推定
3. 学会等名 日本火山学会 2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井出 哲・麻生 尚文・矢部 優
2. 発表標題 地震発生プロセスと確率過程
3. 学会等名 日本地震学会 2018年度秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 麻生 尚文・安藤 亮輔・井出 哲
2. 発表標題 確率論的な応力擾乱で再現されるスロー地震
3. 学会等名 日本地震学会 2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 及川 元己・麻生 尚文・中島 淳一・松澤 暢
2. 発表標題 東北日本で発生する火山深部低周波地震のメカニズム解
3. 学会等名 日本地震学会 2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 優作・加納 将行・麻生 尚文・松澤 孝紀・井出 哲・小原 一成
2. 発表標題 「スロー地震データベース」の構築と運用
3. 学会等名 日本地震学会 2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tanaka, Y., M. Kano, N. Aso, T. Matsuzawa, S. Ide, and K. Obara
2. 発表標題 Recent Report on "Slow Earthquake Database"
3. 学会等名 American Geophysical Union 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aso, N., R. Ando, and S. Ide
2. 発表標題 Stochasticity representing heterogeneity and reproducing various earthquakes
3. 学会等名 American Geophysical Union 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 麻生 尚文
2. 発表標題 決定論的モデリングと地震の多様性とのギャップを埋める確率論的震源物理学
3. 学会等名 スロー地震学 C01班集会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------