

令和 6 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14588

研究課題名（和文）2011年東北沖地震に伴う断層すべりの時空間発展の高解像度推定

研究課題名（英文）High resolution estimation of the spatio-temporal evolution of fault slip associated with the 2011 Tohoku earthquake

研究代表者

富田 史章 (Fumiaki, Tomita)

東北大学・災害科学国際研究所・助教

研究者番号：20838916

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：沈み込み帯プレート境界での巨大地震に伴う断層すべりの時空間発展を高解像度で推定するため、Reversible-jump MCMC法による多時間窓すべり分布推定手法の開発した。開発した計算コードは従来手法と比べ、多くの利点を有することを確かめた。加えて、簡易な粘弾性グリーン関数・海陸測地観測データを用いた2011年東北沖地震に伴う断層すべり分布推定に本手法を適用した。その結果、地震時すべりは海溝近傍で南北に広く、余効すべりは宮城沖の沿岸域（10年以上）・福島沖の海溝近傍域（地震後6.5年以内に収束）に推定された。ただし、より精緻化した粘弾性グリーン関数による再検討が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沈み込み帯のプレート境界で進行する断層すべりの時空間発展を精密にモニタリングすることは、地震を起こす歪みの蓄積・解放状態を把握する上で重要である。この推定には、断層すべりの生じている近傍（海底）での測地観測が重要であり、2011年東北沖地震以降には海底測地観測点が増設されている。しかし、東北沖地震前・地震時の海底測地観測データを増やすことはできない。本研究では、地震後の測地観測データが粘弾性緩和という時定数の長い現象によって過去の断層すべりの情報を含んでいることに着目し、その情報を引き出す新しい断層すべり推定手法を開発した。この成果は、今後の断層すべりのモニタリングに貢献できると考える。

研究成果の概要（英文）：To estimate spatio-temporal evolution of fault slip associated with a large subduction earthquake, a new fault slip inversion technique based on a Reversible-jump MCMC method was developed. The developed inversion code shows several advantages superior to conventional methods. The developed method was applied to the geodetic observation data of the 2011 Tohoku earthquake including latest offshore GNSS-Acoustic observation data. The estimation results assuming a simple two-layered viscoelastic structure demonstrated that large coseismic slip was extended along the trench axis larger than the conventional studies and that afterslip was estimated along the coastline around Miyagi (over 10 years) and at the shallow portion near the trench axis off Fukushima (already decayed with 6.6 year after the mainshock). However, this application to the 2011 Tohoku earthquake needs to be re-evaluated by employing more accurate viscoelastic Green functions in the future.

研究分野：海底測地学

キーワード：インバージョン 海底測地観測 断層すべり推定 粘弾性緩和 巨大地震 沈み込み帯

## 1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯のプレート境界における巨大地震サイクルに伴う断層すべりの時空間発展を高い解像度で推定することは、プレート境界における力学的特性を把握する上で極めて重要である。従来の研究では、地震サイクルの各フェーズ（地震間・地震時・地震後）で得られた陸域測地観測データから観測時期に対応する断層すべり分布のみが推定されてきた。しかし、沈み込み帯のほとんどは電波を通さない海底下にあるため、陸域で行われている GNSS 観測を始めとした衛星測地観測からでは断層すべりを高解像度で推定することが難しい。加えて、地震後の測地観測データは、粘弾性緩和などの地震に伴う過渡的な現象によって、地震時すべりに関する情報を有しているにも関わらず、その情報を生かした解析はほとんど行われてこなかった。

## 2. 研究の目的

まず、本研究では沈み込み帯のプレート境界における巨大地震サイクルに伴う断層すべりの高解像度推定手法の確立を目指す。その上で、開発した手法を 2011 年東北沖地方太平洋沖地震（以降、2011 年東北沖地震）に適用することで、2011 年東北沖地震の震源域・津波発生域の広がりを見極め、東北沖沈み込み帯プレート境界における断層すべり特性の空間的な違いについて明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) 多時間窓の断層すべり分布を推定する解析手法の確立

本研究では、多数の時間窓を設け、それらの時間窓での断層すべり分布を同時推定することで、断層すべりの時空間発展を議論する。しかし、従来のすべり分布の平滑化等の拘束条件をおいた最小二乗法（以降、従来手法）では、時間窓数に応じて未知パラメータ数、拘束条件や観測データ間の重みを表現するハイパーパラメータが増大し、計算に非常に時間がかかってしまう。そのため、本研究では未知パラメータの数を最適化しつつパラメータを推定することが可能な Reversible-jump MCMC 法（e.g., Bodin & Sambridge, 2009）を用いた断層すべり推定手法を開発する。

### (2) 粘弾性応答を考慮したモデリング手法の実装

上記の時間窓間の断層すべり推定において、断層すべりに対する粘弾性応答を考慮した「粘弾性グリーン関数」を用いることで、観測データが時間窓を超えて断層すべりを拘束（特に、地震後の測地観測データによる地震時すべりの拘束）することが可能になる。本研究では、東北沖沈み込み帯を対象とした 3 次元非線形粘弾性体（Agata et al., 2019）を用い、その逐次線形化によって高精度な粘弾性グリーン関数を用いることで粘弾性応答を考慮したモデリングを実現することを当初計画していた。しかし、コロナ禍も含め、研究協力者等の研究環境の変化により、実現することができなかった。そこで、その代替として計算の容易な二層線形粘弾性構造（Fukahata & Matsu'ura, 2005; 2006）を用いた簡易な粘弾性グリーン関数によって、(1) で開発した手法の評価を行うこととした。

### (3) 海域測地観測データを含んだ 2011 年東北沖地震への適用

観測データには、陸域 GNSS 観測データ（国土地理院 F5 解：Takamatsu et al., 2023）と海域測地観測データ（e.g., Iinuma et al., 2012; Yokota et al., 2018; 富田・他, 2023）による 2011 年東北沖地震時変位と地震後変位時系列を用いた。これらの観測データを時間窓で分割した上で、(1)・(2)で開発した手法に適用した。

## 4. 研究成果

### (1) 多時間窓の断層すべり分布推定手法の開発

断層面をボロノイ分割し、その分割を Reversible-jump MCMC 法によって最適化することで、断層面におけるすべりの平滑化を仮定せずに断層すべり分布を推定する手法を開発した（Tomita et al., 2021）。加えて、この手法が、従来手法に比べて [1] 滑らかな分布も尖った分布も柔軟に再現可能、[2] 観測データ間の重み（時間窓間の観測データの重みや陸域・海域間の観測データの重みなど）を自動で最適化可能、[3] 複数時間窓の観測データに対しての計算が容易、[4] 実用的な誤差評価が可能、であることを確かめた。これらの利点は、多時間窓の断層すべり分布推定

において極めて有用である。図1に3つの時間窓（時間窓1：地震時変位，時間窓2-3：地震後変位）を用いた場合の合成データの解析例を示した。開発した手法は，想定したすべり分布をおおよそ再現し，従来手法を用いて推定した結果よりも確度の高い推定が可能であることを示した(図1)。開発した計算コードは，Zenodoにてマニュアルを付して公開している(Tomita, 2023)。この計算コードは時間窓によらず（単一時間窓を含める）断層すべり分布推定に汎用的に用いることが可能である。

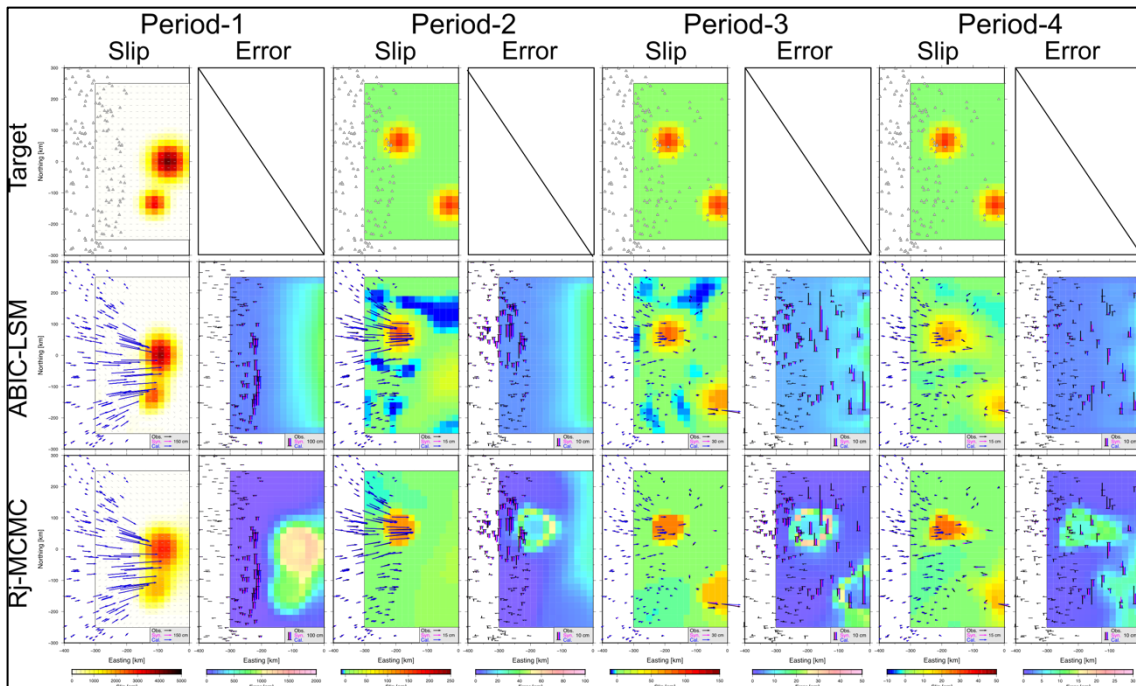


図1：4時間窓の合成データに対する断層すべり推定結果 (Tomita et al., 2021)。「Target」が想定したすべり分布，「ABIC-LSM」が従来手法による推定結果，「Rj-MCMC」が新開発した手法による推定結果

## (2) 2011年東北沖地震への適用

以下の観測データおよび粘弾性グリーン関数を用いて，2011年東北沖地震の地震時・地震後すべり分布の推定を行った(図2)。

- ・地震時測地データ：陸域GNSS観測&海域測地観測 (Iinuma et al., 2012)
- ・地震後測地データ：陸域GNSS観測&海域測地観測 (Yokota et al., 2018; 富田・他, 2023)
- ・粘弾性グリーン関数：二層粘弾性構造 (60 km 弾性層; Fukahata & Matsu'ura, 2005; 2006)

2011年東北沖地震後の陸域GNSS変位時系列は，2011年東北沖地震に伴う余効変動以外の成分を含むため，Trajectory model (Bevis & Brown, 2014)を応用した除去方法を考案し，観測データのクリーニングを行った(富田・他, 2022)。地震後の海域測地(GNSS音響)観測データについては，新たなGNSS音響測位手法を開発し(Tomita & Kido, 2022; 2024)，高精度なデータセットを準備した。上記の高精度なデータセットの作成は非常に手間のかかるものであり，2011年東北沖地震という世界でも数の少ない超巨大地震についてその整備を行ったことは，本研究による大きな成果の1つである。

観測データは5つの時間窓に分割し，地震時変位1窓と地震後変位4窓(0-1.5年，1.5-2.5年，2.5-6.5年，6.5-12.5年)とした。粘弾性グリーン関数は，地震直後の実効粘性係数の低下(e.g., Agata et al., 2019)を再現するため，時間窓ごとに異なる粘性係数を設定した。粘性係数は残差が小さくなるように設定した。推定された地震時すべり分布は，地震時変位のみを用いて推定した結果(e.g., Iinuma et al., 2012; Tomita et al., 2020)に比べ，海溝近傍で南北に広いすべり分布を示した。これは，地震後の海域での地殻変動を説明するためだと考えられる。三陸沖北部のGNSS-A観測点において顕著な西向きの変動が報告されており(Tomita et al., 2017)，それを粘弾性応答で説明するために北側に広い地震時すべりを必要としたと考えられる。一方，南側の地震時すべりは，福島沖のGNSS-A観測点で継続的な沈降傾向が報告されており(Watanabe et al., 2021)，その変動の説明に福島沖の海溝近傍での地震時すべりによる粘弾性応答を必要としたためと考えられる。地震後の余効すべりについては，全期間を通じた岩手～福島沖沿岸域での余効すべりと，観測期間前半での福島沖海溝近傍での余効すべりを示した。この2つの時間的な特徴の異なるすべり分布は，陸上GNSS観測および海域GNSS-A観測から示唆された傾向(Watanabe et al., 2021; 富田・他, 2023)を正しくモデル化できていると言える。ただし，福島沖浅部では顕著な

地震時すべりと余効すべりの空間分布が重なっており、これまで他の巨大地震によって観測されてきた地震時すべりと余効すべりの特徴と異なる。この点については、今回用いた粘弾性グリーン関数の粘性係数の設定の妥当性、および簡易な二層構造を用いたことによる系統的なモデル誤差によって大きく変わる問題である。この点以外にも、上記の粘弾性グリーン関数の不確定性によるモデル誤差の影響は大きいと考えられるため、より精緻に作成した粘弾性グリーン関数を用いて今後再検討する必要がある。

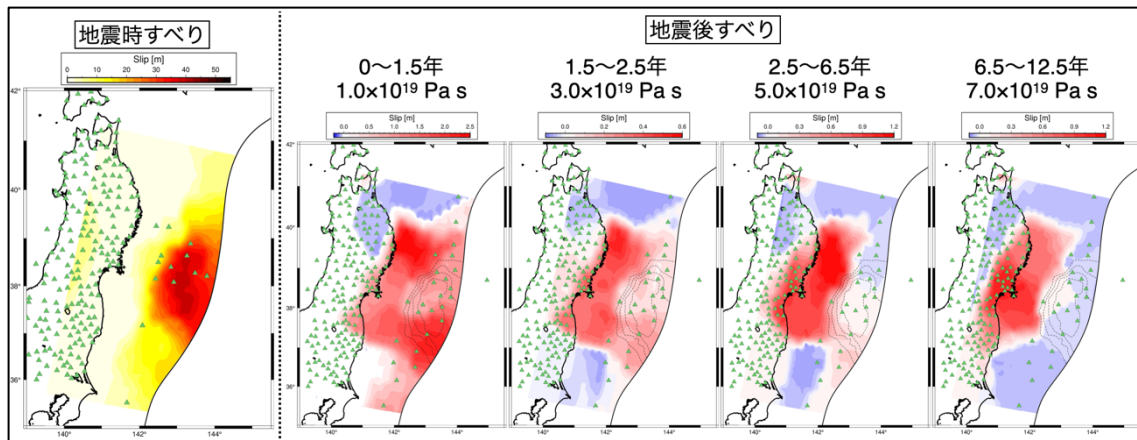


図 2：2011 年東北沖地震時・地震後の実測地観測データから推定した断層すべり分布。緑三角が各時間窓での観測点配置，地震後すべりにおける黒コンターは推定した地震時すべり (>20 m) を示し，地震後すべりの暖色が余効すべり，寒色が固着分布を示す。

#### 引用文献（本研究で得られた成果のみ記載）

- Tomita, F., Iinuma, T., Agata, R., & Hori, T. (2021). Development of a Trans-Dimensional Fault Slip Inversion for Geodetic Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(5), e2020JB020991. <https://doi.org/10.1029/2020jb020991>
- 富田史章（2022），測地データを用いた 2011 年東北沖地震後のプレート境界での非地震性すべりイベントの検出，日本地球惑星連合 2022 年大会，SGD01-P03，オンライン，6 月，2022 年。
- Tomita, F., Kido, M. (2022) An approximate travel time calculation and a robust GNSS-acoustic positioning method using an MCMC technique. *Earth Planets Space* 74, 176. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01740-0>
- 富田史章・木戸元之・飯沼卓史・太田雄策・日野亮太・大園真子・高橋浩晃・プラタ-マルティネス ライムンド・野徹雄・中東和夫・中村恭之（2023），日本海溝・千島海溝沿いにおける GNSS 音響海底測地観測とその成果，日本地震学会 2023 年度秋季大会，S03-05，横浜，10 月，2023 年。
- Tomita, F. (2023). Trans-dimensional inversion software for geodetic fault-slip estimation using a reversible-jump MCMC method (1.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8374908>
- Tomita, F., Kido, M. (2024) A new GNSS-acoustic positioning software implementing multiple positioning functions considering nadir total delays. *Earth Planets Space* 76, 48. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01987-9>

## 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 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tomita Fumiaki, Kido Motoyuki	4. 巻 76
2. 論文標題 A new GNSS-acoustic positioning software implementing multiple positioning functions considering nadir total delays	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 48
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-024-01987-9	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 -

1. 著者名 Tomita Fumiaki, Kido Motoyuki	4. 巻 74
2. 論文標題 An approximate travel time calculation and a robust GNSS-acoustic positioning method using an MCMC technique	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 176
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01740-0	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 -

1. 著者名 Tomita Fumiaki, Iinuma Takeshi, Agata Ryoichiro, Hori Takane	4. 巻 126
2. 論文標題 Development of a Trans Dimensional Fault Slip Inversion for Geodetic Data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2020JB020991
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JB020991	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 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 富田史章, 飯沼卓史, 木戸元之, 太田雄策, 福田達也, 日野亮太
2. 発表標題 東北沖におけるウェーブライダーを活用したGNSS音響海底地殻変動観測と成果
3. 学会等名 日本地球惑星連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富田史章
2. 発表標題 新しいGNSS音響測位解析ソフトウェア (SeaGap) の開発
3. 学会等名 日本地球惑星連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富田史章, 木戸元之, 飯沼 卓史, 太田雄策, 日野亮太, 大園真子, 高橋浩晃, プラタ-マルティネス ライムンド, 野徹雄, 中東和夫, 中村恭之
2. 発表標題 日本海溝・千島海溝沿いにおけるGNSS音響海底測地観測とその成果
3. 学会等名 日本地震学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富田史章
2. 発表標題 多様な事前分布に基づく音速水平勾配を仮定したGNSS音響測位解析手法の開発
3. 学会等名 日本測地学会第140回講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Iinuma, T., M. Kido, F. Tomita, T. Fukuda, R. Hino, T. Hori, K. Nakahigashi, H. Takahashi, T. No, Y. Nakamura, M. Ohzono, R. Plata-Martinez, D. Sato
2. 発表標題 GNSS-acoustic observations using manned and unmanned sea surface platforms along the Kurile-Japan Trench to grasp the interplate locking state and the postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake
3. 学会等名 2023 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomita, F., & M. Kido
2. 発表標題 Development of a new GNSS-acoustic positioning software “SeaGap” and its application
3. 学会等名 2023 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomita, F., M. Kido, C. Honsho, T. Iinuma, Y. Ohta, R. Hino, T. Sun, H. Luo, K. Wang
2. 発表標題 Near-Trench Postseismic Subsidence Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake Revealed by GNSS-Acoustic Observations
3. 学会等名 2022 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富田史章, 木戸元之, 飯沼卓史, 太田雄策, 本荘千枝, 日野亮太, 野徹雄, 中東和夫
2. 発表標題 東北沖における近年のGNSS音響海底測地観測とその成果
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富田史章, 飯沼卓史, 木戸元之, 太田雄策, 本荘千枝, 福田達也
2. 発表標題 東北沖におけるウェーブライダーを活用したGNSS音響海底地殻変動観測
3. 学会等名 日本地球惑星連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富田史章
2. 発表標題 測地データを用いた2011年東北沖地震後のプレート境界での非地震性すべりイベントの検出
3. 学会等名 日本地球惑星連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kido, M., C. Honsho, F. Tomita, Y. Ohta, R. Hino, T. Iinuma
2. 発表標題 Impact of employing a waveglider on GNSS-Acoustic survey along the Japan trench
3. 学会等名 EGU General Assembly 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯沼卓史, 木戸元之, 福田達也, 太田雄策, 富田史章, 有吉慶介, 永野憲, プラタ-マルティネス ライムンド, 日野亮太, 高橋浩晃, 堀高峰
2. 発表標題 ウェーブグライダーを用いたGNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測 (その3)
3. 学会等名 日本測地学会第138回講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富田史章, 飯沼卓史, 木戸元之, 太田雄策, 本荘千枝, 福田達也, 堀高峰
2. 発表標題 ウェーブグライダーを用いたGNSS音響結合方式の海底地殻変動観測とその成果
3. 学会等名 日本地球惑星連合2021年大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 富田史章, 飯沼卓史, 木戸元之, 日野亮太, 太田雄策, 縣亮一郎, 堀高峰, 内田直希
2. 発表標題 2011年東北沖地震に伴う地震時すべり分布の解像度向上と不確定性の評価
3. 学会等名 日本地球惑星連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富田史章, 飯沼卓史, 木戸元之, 本莊千枝, 太田雄策, 福田達也
2. 発表標題 ウェーブライダーを用いたGNSS-A海底地殻変動観測と近年の東北沖での海底地殻変動の傾向
3. 学会等名 日本地震学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Iinuma, T., M. Kido, T. Fukuda, F. Tomita, Y. Ohta, C. Honsho, R. Hino
2. 発表標題 GNSS-Acoustic observation using the Wave Glider to detect the seafloor crustal deformation off the Pacific coast of Northeastern Japan
3. 学会等名 2021 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Tomita, T. Iinuma, R. Agata, T. Hori
2. 発表標題 Imaging of fault-slip distributions using a trans-dimensional geodetic slip inversion approach
3. 学会等名 2020 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富田史章, 飯沼卓史, 縣亮一郎, 堀高峰
2. 発表標題 Trans-dimensionインバージョン手法による沈み込み帯における固着すべり分布推定
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 富田史章, 飯沼卓史, 縣亮一郎, 堀高峰
2. 発表標題 Reversible-jump MCMCによる平滑化条件を取り入れない断層すべり分布の推定
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020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
---------	---------