

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01992

研究課題名(和文)断層すべりの多様性は構造不均質により規定されるのか？

研究課題名(英文)Is the diversity of fault slip defined by structural heterogeneity?

研究代表者

吉村 令慧 (Yoshimura, Ryohei)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：50346061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、すべりの多様性がみられるプレート境界断層(トルコ：北アナトリア断層帯・Bolu-Geredeセグメント)と内陸活断層(日本：跡津川断層)を対象として、その多様性に対応して地下の電気比抵抗構造に不均質性が見られるか、見られたとして共通性があるか否かを明らかにすることを目的として観測研究を実施した。跡津川断層周辺において計44点、北アナトリア断層帯周辺において計36点で広帯域MTデータを取得した。跡津川断層沿いでは、地震活動や地表変位速度場の違いに対応する比抵抗構造の不均質性が見られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

過去に大地震が発生し、また、その周辺でクリープの地表変動が観測されている断層を対象に、そのようなすべりの多様性が地下構造の不均質性によって規定されているかを明らかにするために、3次元解析に資する面的なデータを取得したことは非常に意義深い。また、地下構造の不均質性に共通性が認められれば、固着域を地震発生前に評価できる可能性があり、社会的な意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, we conducted observational studies on a plate boundary fault (Bolu-Gerede segment, North Anatolian Fault Zone, Turkey) and an inland active fault (Atotsugawa Fault, Japan), where slip diversity is observed, to determine whether heterogeneity in the electrical resistivity structure is found in the subsurface corresponding to the diversity, and if so, whether it is common. The purpose of this observational study is to clarify whether heterogeneity in the subsurface electrical resistivity structure is observed in response to the diversity of the fault segments. We obtained broadband MT data at 44 sites around the Atotsugawa Fault and 36 sites around the North Anatolian Fault Zone. Along the Atotsugawa Fault, heterogeneity of resistivity structures corresponding to differences in seismic activity and surface displacement velocity fields was observed.

研究分野：地球内部電磁気学

キーワード：比抵抗構造 不均質 断層クリープ運動 固着域

1. 研究開始当初の背景

地震は「断層のすべり現象」であり、人的・物的被害を生じさせる地震性すべり(急激な破壊)と、人が感知できる震動を伴わない非地震性すべりに分類される。後者は、さらに定常すべりと準定常すべり(スロースリップ)に細分できる。このようなすべりの多様性は何が原因となって生じているのかを探ることは、地震の規模・ポテンシャル評価やモニタリングの対象を定める上で重要である。プレート境界では、「固着域 - 遷移域 - 安定すべり域」の詳細なマッピングや時間発展、領域間の時空間的連動性などの研究が精力的に進められているが、そのすべり様態の違いが何によって規定されるのか、特に構造的な相違があるか否かは明確になっていない。一方内陸地震では、地震発生後の余効すべりを除き、非地震性すべりが確認されることは稀であり、クリープ運動が認められるとされる断層がわずかに存在する程度である。しかしながら、一連の活断層帯において複数の領域で活動履歴やすべり量が異なるといったセグメント構造がみられることなどから、プレート境界と比較して規模が小さく非地震性すべり現象が明瞭でないだけかもしれない。内陸地震においては、「固着域 - すべりの端部 - セグメント境界部(もしくはクリープ領域)」に着目し、プレート境界との類似性の有無を把握することが、すべりの多様性が存在する理由を理解する上で重大な命題であると考えられる。

申請代表者はこれまで、大規模内陸地震の周辺域(1858年飛越地震、1984年長野県西部地震、2007年能登半島地震など)や準定常すべり現象であるスロースリップ域周辺(豊後水道)で、物理探査の一種である電磁探査による構造探査を行ってきた。電磁探査は、地下構造を電気物性の視点(電気比抵抗構造)でイメージする手法で、岩石中の数%以下の微量の流体の存在に敏感である。流体の分布は、断層のすべり・固着様態を規定している可能性が高いため、すべりの特徴付ける構造の有無を議論するのに最適である。内陸地震震源域周辺では、高比抵抗でイメージされる大すべり域(=固着域)とその周辺部を取り囲む低比抵抗領域の存在を明らかにしたが(例えば、Yoshimura et al, 2008; 2011; 2012, 吉村・他, 2006)これらの調査では、データのカバレッジが不足していたり、2次元解析を組み合わせた疑似的な3次元解釈であったりと、確証を得るには至っていない。豊後水道スロースリップ域では、陸域の面的観測データに対して推定した3次元構造により、準定常すべりの外縁部も、より低抵抗な領域で囲まれる様相が確認された。ただし、豊後水道スロースリップ域に近接する固着域は、大部分が海域に位置し観測の自由度が低いため、すべり様式の異なる領域に跨る構造不均質の解明には到達していない。

以上のように、垣間見えている“断層すべりの多様性に対応する比抵抗構造不均質”の存在が確実か否かは、固着域ならびにその端部を十分にカバーするデータを取得して、真に3次元の不均質構造を推定し議論する必要がある。加えて、地殻変動の状況が似通っていると想定されるプレート境界断層と内陸地震断層で、構造を比較し類似性の有無を明らかにすることが、特徴的構造をもたらず意味を理解するための足掛かりになると考える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、すべりの多様性が見られるプレート境界断層・内陸活断層において、面的な電磁場観測を実施し地下比抵抗構造を推定することで、多様性の特徴づける不均質構造の有無を明らかにすることである。さらに、両者の共通点・相違点から特徴的不均質構造の持つ意味に迫る。

本研究で対象とし比較するのは、日本国内の跡津川断層帯とトルコ・北アナトリア断層帯のBolu-Gerede セグメントである。跡津川断層は国内有数のテストフィールドであり、種々の地球科学的な調査が実施されているが、直近の大規模地震すべり(1858年飛越地震)の破壊過程は直接的に推測することは難しい。他方、Bolu-Gerede 地震も75年前の大地震であるが、地震に伴う地表変位は詳細な調査が存在する(たとえば、Kondo et al., 2010)。既報のInSAR解析(Kaneko et al., 2013)に直近の画像を加え、現在の地殻変動を精緻に描像する。

上記二つの断層での調査・解析により、すべりの違いを反映する類似構造が検出できれば、その類似性が普遍的であるか否かを検証するステップに繋がり、同種の比較研究を加速させることになると期待する。類似性が確認できなかった場合は、プレート境界地震と内陸活断層では、本質的にすべりのメカニズムが異なる可能性を示唆することになり、すべりの多様性を追究する研究の方向性を見直す契機となると考える。

3. 研究の方法

本研究において実施する地下比抵抗構造推定では、400Hz~0.0001Hzの広帯域の自然電磁場変動を地表面で測定する広帯域MT(magneto-telluric)観測を採用する。研究期間中の2つの

研究対象地域での観測には、申請時には所属機関の器材 10 セットを使用する予定であったが、7 セットの機器に関してメーカーから突如 GPS ロールオーバーに対応できず、2019 年から段階的に使用できなくなる旨の通告があった。この問題に対応すべく、申請者が開発に協力してきた新器材の実用試験を加速させる必要が生じた。

2019 年度

跡津川断層周辺で広帯域 MT 観測の実施と新器材の実用試験および性能評価

跡津川断層周辺で面的な広帯域 MT 観測を実施し、それと並行して新器材の性能評価を行い、順次本観測に投入する。

トルコ・北アナトリア断層帯 Bolu-Gerede セグメントでの観測準備

トルコ側研究協力者と現地にて打合せを実施し、観測消耗品の整備、ロジスティクスの検討など 2020 年度以降の観測準備を行う。

ALOS-2 撮像画像の予備的解析

トルコ・北アナトリア断層帯 Bolu-Gerede セグメントの ALOS-2 撮像画像を入手し、干渉性の確認などを行う

2020-2021 年度

申請時には予期しなかった新型コロナウイルス (Covid-19) の感染拡大に伴う行動制限により、予定していた海外渡航・観測は実施できず、また国内の補充観測についても十分に行えない事態となった。そのため、この 2 か年の研究費の大部分を繰越・再繰越し、2022 年度単年で遂行せざるを得ない状況となった。

トルコ・北アナトリア断層帯 Bolu-Gerede セグメントでの観測についての Covid-19 対応協議

トルコ側研究協力者とオンラインによる打合せを高頻度に行い、Covid-19 に対するトルコ国内規制の推移などの情報収集、実施についての協議を行う。

跡津川断層周辺での広帯域 MT 補充観測の実施および予備的解析

気象災害により実施できなかった観測候補地での補充観測を実施するとともに、2 次元逆解析により予備的解析を行う。

ALOS-2 撮像画像解析における電離層擾乱除去手法の高度化および面的速度場の推定

1944 年の Gerede 地震についての古い地震計記録の収集および解析

2022 年度

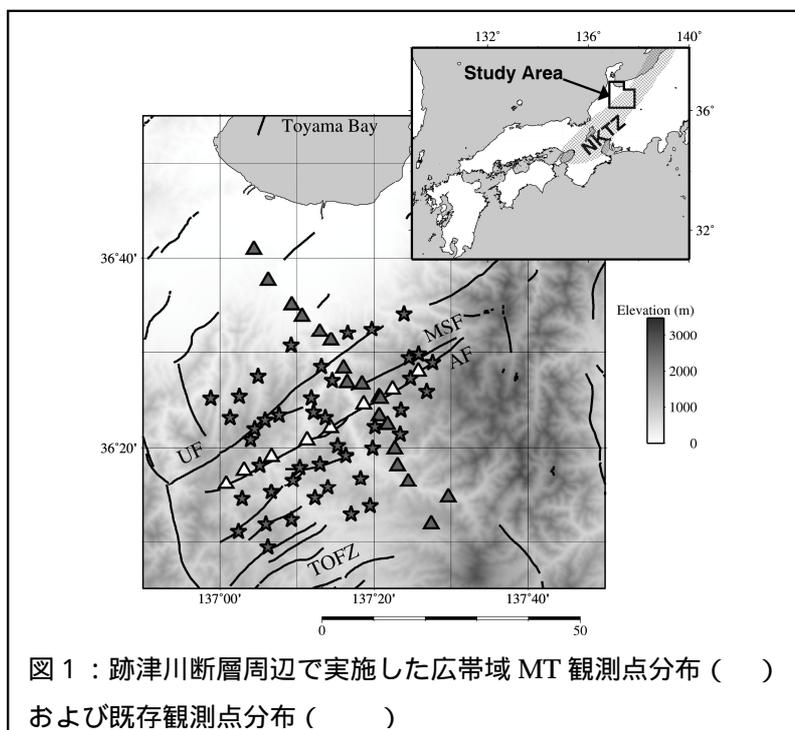
トルコ・北アナトリア断層帯 Bolu-Gerede セグメント周辺での広帯域 MT 観測の実施および解析

推定された面的速度場をもとに、トルコ・北アナトリア断層帯 Bolu-Gerede セグメント周辺での最適観測点配置を検討し、広帯域 MT 観測および補充観測を実施する。

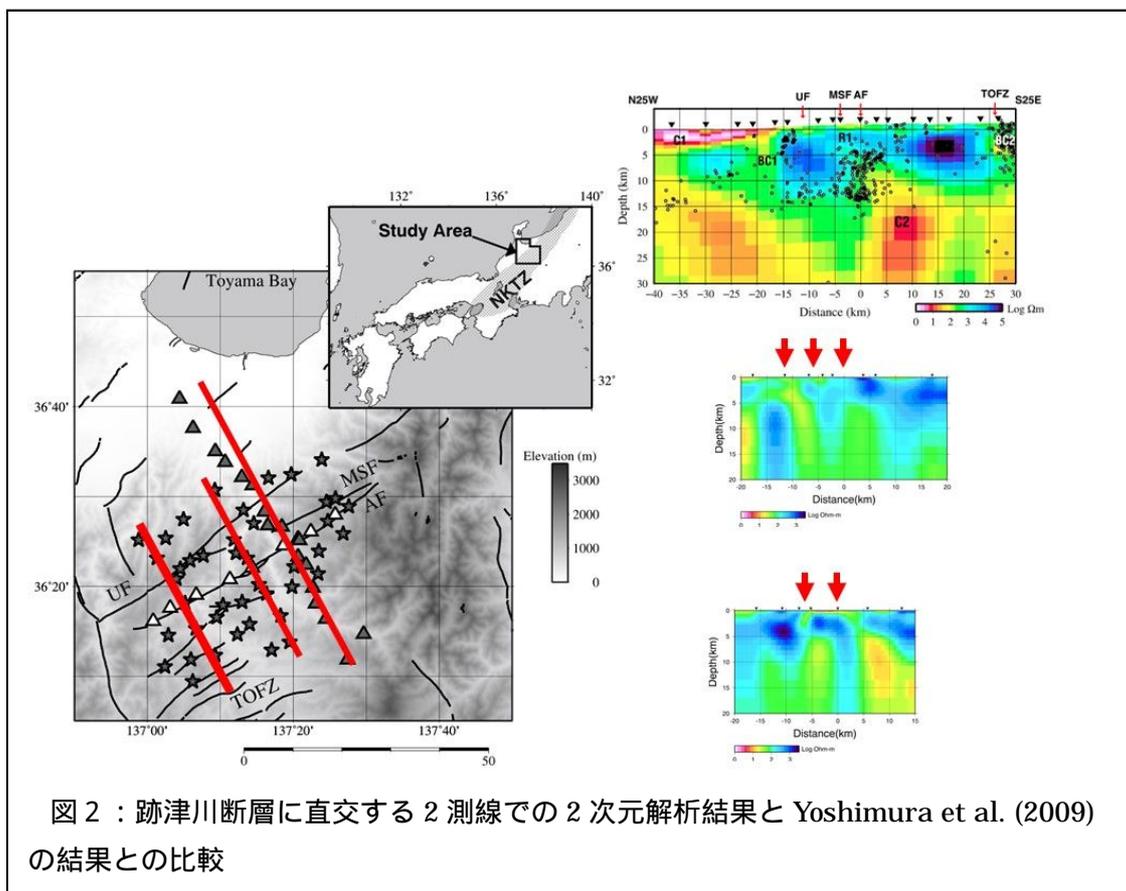
4. 研究成果

(1) 跡津川断層周辺での広帯域 MT 観測および構造解析

2019 年度には 43 地点において、2021 年度には 2 地点 (重複含む) において、それぞれ広帯域 MT 観測を実施し、計 44 地点において良質な電磁場データを取得した (図 1)。調査に際しては、観測効率を上げるために、電場磁場 5 成分を収録する観測点 (24 点) と電場 2 成分のみを収録する観測点 (20 点) に分けて実施した。取得した電磁場データについて、BIRRP (Chave and Thomson, 2003) を利用して時系列処理を行った結果、1 点を除き 43 点で良質な MT 応答を得た。断層に直交する複数測線において Ogawa and Uchida (1996) のコードを使用して 2 次元解析を行い、断層に沿った構造の違いを確認した (図 2)。跡津川断層沿いでは、地震活動について違い (東部で低調、西部で活発) がみられ、GNSS データの解析により西部でクリープ運動をしている可能性が指摘さ

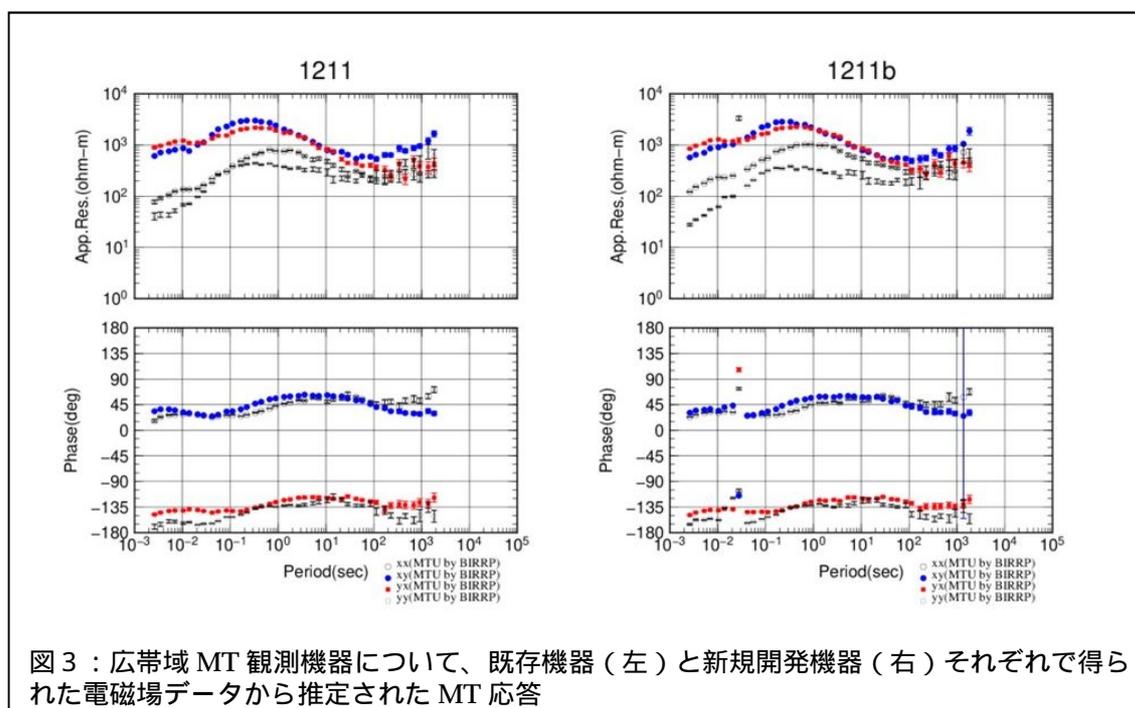


れている (Ohzono et al., 2011)。図2のそれぞれの比抵抗断面において、跡津川断層・茂住-祐延断層・牛首断層のそれぞれに対応する構造が見られることに加え、東西で徐々に構造が変化している様相が確認できる。現在、3次元解析を継続中であるが、このような予察の結果からも、断層沿いの地震活動の違いや変位速度場の違いを反映する構造の違いの存在を示唆している。



(2) 新規開発機器の性能評価

申請者が開発に協力した新規開発の広帯域 MT 観測機器 (低消費電力、軽量) について、既存の観測機器との並行観測による MT 応答推定性能を評価した。図3に同地点で、それぞれの機器で取得した電磁場データから推定した MT 応答を示す。商用周波数帯のノイズの除去については、さらなる高度化が必要であるが、それ以外の帯域については、ほぼ同等の MT 応答推定性能を有



することを確認した。

(3) トルコ・北アナトリア断層帯 Bolu-Gerede セグメント周辺の高解像度速度場の推定

2015 年から 2021 年に ALOS-2 が撮像した当該地域を含む広範囲の ScanSAR 画像に対し、電離層の分散特性を利用した Split Spectrum 法を適用し、電離層擾乱の影響を高精度に除去した速度場を推定した。北アナトリア断層沿いでは、断層直交方向について、Bolu-Gerede セグメントでは変位勾配が小さく、隣接する領域では変位勾配が大きいことが確認された。このことは、固着域の深さ・広がりを反映している可能性が高い。この速度場の情報をもとに、当該地域周辺の広帯域 MT 観測点の最適配置を検討した。

(4) トルコ・北アナトリア断層帯 Bolu-Gerede セグメント周辺での広帯域 MT 観測

2020 年から約 2 年におよぶ新型コロナウイルス感染拡大による行動制限により、2020-2021 年度のトルコでの観測・補充観測を延期し、2022 年度単年で実施せざるを得ない事態となった。加えてこの間、トルコ国内の経済状況の急変（物価の高騰）や急速な円安により、当初予定していた観測点数を大幅に減ずる必要が生じた。しかしながら、InSAR 画像解析による高精度な速度場により、ターゲットを絞った観測点配置の最適化により、当初目標を達成可能な観測を実施した。加えて、行動制限期間も高頻度にトルコ側研究協力者とのオンライン打合せ・協議を行い、可能な限り円滑に観測を遂行できるように準備した。

Bolu-Gerede セグメント周辺において 2022 年 8-9 月に、本観測・補充観測を含め計 36 点で広帯域 MT 観測を行い、電磁場データを取得した（図 4）。3 地点では獣害や器材トラブルで 1 日間の収録となったが、それ以外の地点では 2 日間以上の収録が行えた。トルコでの観測においても、観測効率を上げるために、電場磁場 5 成分を収録する観測点（10 点：内 1 点は磁場鉛直成分を除く 4 成分測定）と電場 2 成分のみを収録する観測点（26 点）に分けて実施した。時系列データを精査したところ、自動車等の通過に伴うノイズが昼間に目立つ観測点があるものの、ノイズ状況は概ね、日本における人工電磁ノイズよりも低いことが分かった。一方で、昼間は日本よりも高温となるため、一部の観測点においてロガー・センサーに悪影響が生じた。そのため、夕方から明け方にかけてのデータを使い MT 応答を推定したが、現在、日本国内では稀なこの昼間の高温影響について、夜間データに影響を与えていないかの検討を進めており、その後、構造解析に進む予定である。

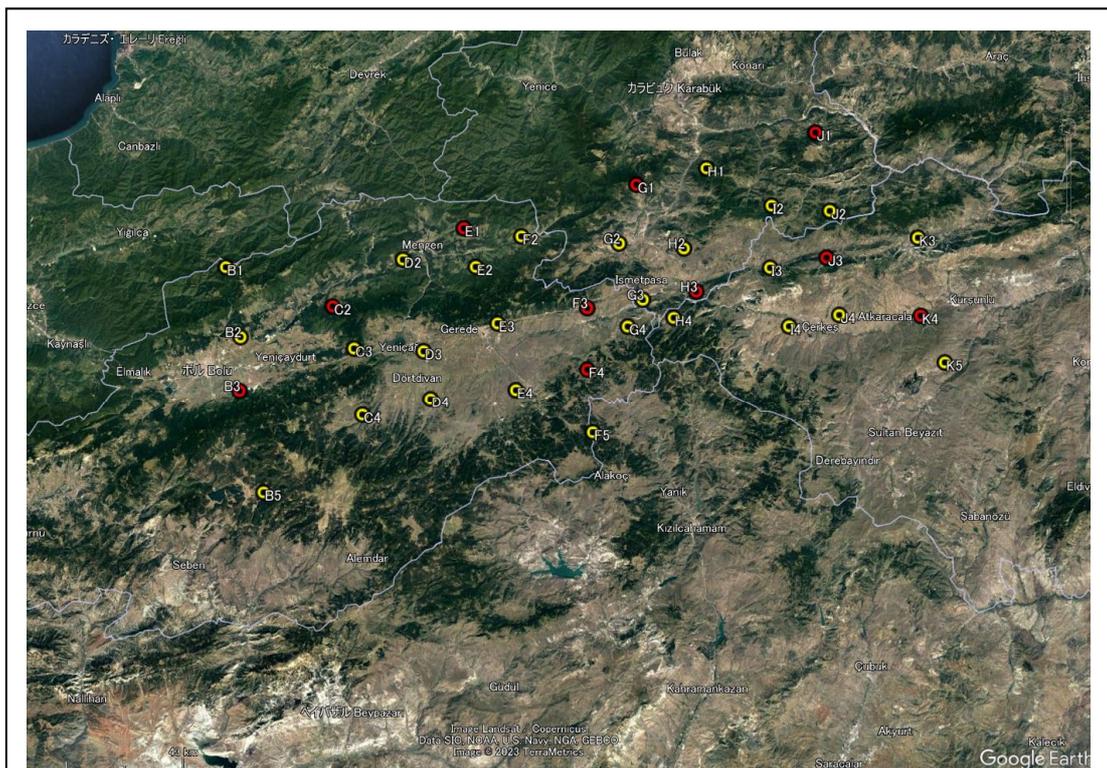


図 4：トルコ・北アナトリア断層帯 Bolu-Gerede セグメント周辺での広帯域 MT 観測点分布（赤：5 成分・4 成分観測点、黄：2 成分観測点）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名	吉村令慧・小川康雄・深井雅斗・中川潤・波岸彩子 相澤広記・山本有人・山崎友也・三浦勉・中本幹大 長岡愛理・高村直也・大志万直人
2. 発表標題	跡津川断層系周辺での面的広帯域MT観測
3. 学会等名	地球電磁気・地球惑星圏学会第148回総会及び講演会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	長岡頌悟, 高田陽一郎, 木下陽平
2. 発表標題	ALOS-2を用いた地震間地殻変動の検出: 悪条件下での電離層擾乱への対応
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	長岡頌悟, 高田陽一郎, 木下陽平
2. 発表標題	悪条件下においてSSMを適用する際のフィルターについて
3. 学会等名	東京大学地震研究所共同利用研究集会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	吉村令慧・小川康雄・深井雅斗・中川潤・波岸彩子 相澤広記・山本有人・山崎友也・三浦勉・中本幹大 長岡愛理・高村直也・大志万直人
2. 発表標題	跡津川断層沿いの不均質構造の解明に向けて
3. 学会等名	令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年	2021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
研究分担者	小川 康雄 (Ogawa Yasuo) (10334525)	東京工業大学・理学院・教授 (12608)	
研究分担者	MORI James Jiro (Mori James Jiro) (50314282)	京都大学・防災研究所・教授 (14301)	
研究分担者	高田 陽一郎 (Takada Youichiro) (80466458)	北海道大学・理学研究院・准教授 (10101)	

	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
研究協力者	大志万 直人 (Oshiman Naoto) (70185255)	京都大学・名誉教授 (14301)	
研究協力者	Baris Serif (Baris Serif)	コジャエリ大学・教授	
研究協力者	Tuncer Mustafa Kemal (Tuncer Mustafa Kemal)	イスタンブール大学ジェラバシャ・教授	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	Celik Cengiz (Celik Cengiz)	ボアジチ大学・准教授	

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			
	トルコ	コジャエリ大学	イスタンブール大学	ボアジチ大学