

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82116

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03810

研究課題名（和文）熊本地震はなぜ阿蘇カルデラ内で止まったのか？：測地観測と数値計算で探る破壊の終焉

研究課題名（英文）Why did the Kumamoto earthquake stop within the Aso Caldera?: Termination of fault rupture explored by geodetic observation and numerical simulation

研究代表者

小林 知勝 (Kobayashi, Tomokazu)

国土地理院（地理地殻活動研究センター）・その他部局等・研究室長

研究者番号：40447991

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：合成開口レーダー（SAR）衛星の画像データを用いた地殻変動解析から、2016年熊本地震の断層すべりが阿蘇カルデラ内に貫入した直後に停止したことを明らかにした。重力データの解析から地下の密度分布を推定すると、阿蘇カルデラ西端の深さ数kmの浅部に低密度体が存在しており、断層すべりはその低密度体に貫入/接触して停止していることが分かった。低密度体がある領域では、熱水環境が発達して高温の地殻構造となっていることが示唆され、脆性破壊が困難であることが推察された。動的破壊の数値シミュレーションから、阿蘇カルデラ内の低応力場の存在の有無が断層破壊の停止に深く関与していることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

内陸地震における断層末端のすべりの様子とその周囲の地殻構造を従来にない高い空間分解能で捉えたことにより、火山地域における高温の地熱地帯が断層破壊の停止に強く関与していたことを明らかにした。このことは、地震と火山の相互作用が断層破壊の停止の要因を考える上で重要な視点となり得ることを当該研究分野に示すものである。

研究成果の概要（英文）：Conducting crustal deformation analysis using synthetic aperture radar satellite data, we have successfully revealed that the fault slip for the 2016 Kumamoto earthquake progressively converged just after penetrating a few km into the Aso caldera. We inferred the density contrast structure using gravity data, and found that a low-density body exists in the shallow part of the western edge of the caldera at a depth of a few km. The fault slip penetrated the low-density region, and then dissipated. It is suggested that a hydrothermal environment has developed in the region, resulting in a high-temperature crustal structure which could prevent from further brittle rupture. Our numerical simulation of dynamic rupture indicates that the presence of low stress field in the caldera is closely related to the terminus of fault rupture.

研究分野：地震学

キーワード：断層破壊の停止 内陸地震 火山 地殻変動 SAR 重力 密度構造 3次元動的破壊数値シミュレーション

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

地震とは、地殻内の面上で食い違いすべりを起こす現象である。すべりの始まりについては、破壊核の形成に関する理論、実験、数値シミュレーション等が発達し、その理解が深められている。一方、断層面上のすべりがなぜ止まるのか、については限定的な理解にとどまっているのが現状である。すべりの終わりの要因としては幾つかの要因が指摘されているが、火山領域のように、地殻内の構造が強い不均質に支配された場では、柔らかい地殻媒質により解放する歪みがなくすべりが停止するという機構がその1つとして考えられる。

断層末端の動きやその周囲の構造の詳細な把握が、こうした機構の理解の促進に貢献するものと思われるが、従来の研究では、地下深部を進行する破壊を十分な空間分解能で捉えきれていないという側面があった。地殻変動は、断層の位置・幾何形状及びすべりのメカニズムを知る有効な手段であり、特に断層近傍では、断層すべりの停止位置や形状を詳細に知るうえで重要な情報となる。しかし、断層近傍の地殻変動を高い空間分解能で面的に捉えることは容易ではない。このような背景の下、近年、合成開口レーダー（SAR）衛星の利用環境や解析技術の飛躍的向上を受け、内陸活断層の断層運動が詳細に捉えられるようになってきた。特に近年の高空間分解能データにより、断層近傍の大規模変位や断層端部および延長上における微小な地表変位も詳細に検出できるようになってきており、内陸地震の複雑な断層運動が鮮明に把握できるようになりつつあった。

2016年に別府-島原地溝帯の構成断層の1つである布田川断層で生じた熊本地震は、活火山をもつ阿蘇カルデラのごく近傍で発生しており、上記の断層破壊の停止機構を観測研究から把握する絶好の機会であった。SARの予備的解析を通じて、断層運動に伴うと考えられる地殻変動が、布田川断層からさらに東進し、阿蘇カルデラ内にまで到達していることを見つけていた。火山内部では、地殻構造に不均質があり、断層面上のすべりの挙動に影響を与えていることが予想される中、SARによる高空間分解能な地殻変動データを出発点として、断層すべりを制御する物理的要因についての理解を進展させられるのではないかとという着想に至り、本研究の着手に至った。

2. 研究の目的

本研究では、地球物理観測データ解析と断層破壊の数値シミュレーションから火山体内部の構造不均質が断層すべりの挙動を制約し得るのかの解明を目指した。そのために、阿蘇カルデラ内部で断層すべりが停止した2016年熊本地震を対象として、地殻変動解析から断層すべりの空間分布を、重力データから地下構造の密度不均質を推定することで、本震時の断層運動と内部構造の関係を明らかにし、さらに、これら解析に基づき得られた断層形状と不均質構造の情報を組み込んだ動的破壊の数値シミュレーションにより、断層すべりの終焉がどのような物理条件に制御されたのか明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、地殻変動の取得に主にALOS-2衛星のSARデータを利用した。標準的に利用されるInSAR法では、本研究の遂行に必要な断層近傍の地殻変動の取得が困難なため、レンジ及びアジマス成分の周波数を帯域分割して干渉処理するSBI手法も適用した。アジマス成分に関する処理はMAI法として知られているが、本手法を適用することにより、標準的なInSARでは大きな変位勾配のために干渉性が低くなる断層近傍においても、空間的に詳細な変位を取得できる。標準的なInSARでは変位計測できなかった領域にSBI法で得られた変位を補間することで、震源領域全体における完全な変動場を獲得した。さらに、複数の軌道データから得られた変動データを用い、最小二乗法により上下、東西、南北3成分の地殻変動を得た。カルデラ内のすべりの終端を特定するために、得られた地殻変動データを基に断層面を設定し、断層面上のすべり分布を逆解析により推定した。推定ではまず初めに、矩形平面の1様すべりを仮定した断層運動から解探索により断層形状を大まかに決定した後、得られた断層形状を基にすべり分布を最小二乗により推定した。

続けて、阿蘇カルデラ内の地殻構造を明らかにするため、重力データ解析から密度コントラスト構造モデルを構築した。阿蘇カルデラ及びその周辺は、これまでの研究で多数の重力データが獲得されているが、本研究では、断層すべりの貫入域の構造を詳細に調べるために、計60点の重点的な観測（令和元年11月25日（月）から11月28日（木）に実施）を行って重力データの配点密度を高めた。観測には、CG-5 相対自動重力計を用いた。重力データには、「大気圧補正」「固体潮汐補正」「海洋潮汐補正」「ドリフト補正」「器械高補正」を施し、地球の質量構造に起因しない重力の影響を除去した。さらに、「フリーエア補正」「ブーゲ補正」「地形補正」を施すことで、地球の内部不均質構造を反映する完全ブーゲ重力異常を導出し、重力インバージョン解析によって地下密度不均質構造を重み付き最小二乗により推定した。

さらに本研究では、断層面上のすべりを制御する物理的要因を探るため、3次元動的破壊の数値シミュレーションを実施した。地殻変動解析から得られた断層面を基に数値計算を行うが、ここでは簡単のため、布田川断層 (F6)、カルデラ内の分岐断層である F1 断層、F4 と F5 断層 (後述) を連結した断層を用いることとし、分岐断層 F2 と F3 は省略した。後述するように、本研究においてカルデラ内の低密度体が断層すべりの停止に関与していることが示唆された。この効果を確かめるために、震源域全体に一樣な応力場を仮定した場合と、カルデラ内に低応力場を与えた場合で計算を行い、カルデラ内の地殻構造の不均質が断層すべりの停止に与える影響を調べた。

4. 研究成果

SAR 解析により地震に伴うカルデラ内の詳細な 3 次元地殻変動場を得た (図 1)。断層運動起因と推定される変位境界が、布田川断層の東部延長上に伸展して、阿蘇カルデラ西縁部で主に 2 方向に分岐していることが認められた。1 つは布田川断層の東部延長上に右横ずれを伴いながら南東側の地盤が沈降する変動を (F1)、もう 1 つはほぼ東西及び北西-南東方向に左横ずれを伴いながら北側の地盤が沈降する変動が示された (F4, F5)。さらに F1 と F4-F5 に挟まれた領域内に長さ 1km から 2km の局所的な変位不連続が明瞭に認められた (F2, F3)。ともに右横ずれを示し、F2 は南東側の地盤が沈降する変動を示した。これらの変位境界・急変帯は比較的広範囲に広がり、かつ直線的に分布することから断層運動起因であることが強く示唆された。

図 2 は、計算により得られた阿蘇カルデラ内の断層におけるすべり分布である。布田川断層の延長上に位置する F1 のすべりは、布田川断層と同様にやや正断層成分を持ちつつ右横すべり成分が卓越する断層運動となった。すべりは主に断層の西端 (カルデラ西縁側) の深さ数 km に集中しており、それより東側ではすべりが減衰している。F2 も同様のすべりの方向をもち、主なすべりは断層の西端 (カルデラ西縁側) の浅部に集中して、それより東部ではすべりは急速に減衰している。F3 も深さ数 km にすべりの中心が分布する。一方、カルデラ西縁部で東方向に分岐する F4, F5 では異なるすべり分布を示す。F4 では深さ数 km で正断層すべりが集中する。さらに東側の F5 では、正断層成分をやや含みながら左横すべりが卓越する特徴を持ち、東に進展するにつれ、すべりは深部から徐々に減衰していく。最適解を与える断層の傾斜角は、F1 が 30° 、F2 が 70° 、F3 が 90° 、F4 が 50° 、F5 が 50° となった。

図 3 は重力データから推定された密度不均質構造 (密度コントラスト) である。ここでは、地下 1km から 4km における密度コントラストの水平断面を示す。暖色が周囲よりも密度が高い領域を表し、寒色が周囲よりも密度が低い領域を表す。密度が高い領域には周囲よりも重く堅い物質、密度が低い領域には周囲よりも軽く柔らかい物質が存在することを示唆する。注目すべきは、深さ 1km から 3km において、カルデラ西縁部に低密度領域が分布していることである。さらに、断層 (白実線) は、その低密度体に重なっている。F4 においては、カルデラ西縁部に位置する長さ 2km の断層運動の東端部で低密度域と重なると、その断層運動は向きを変え南東方向に延び

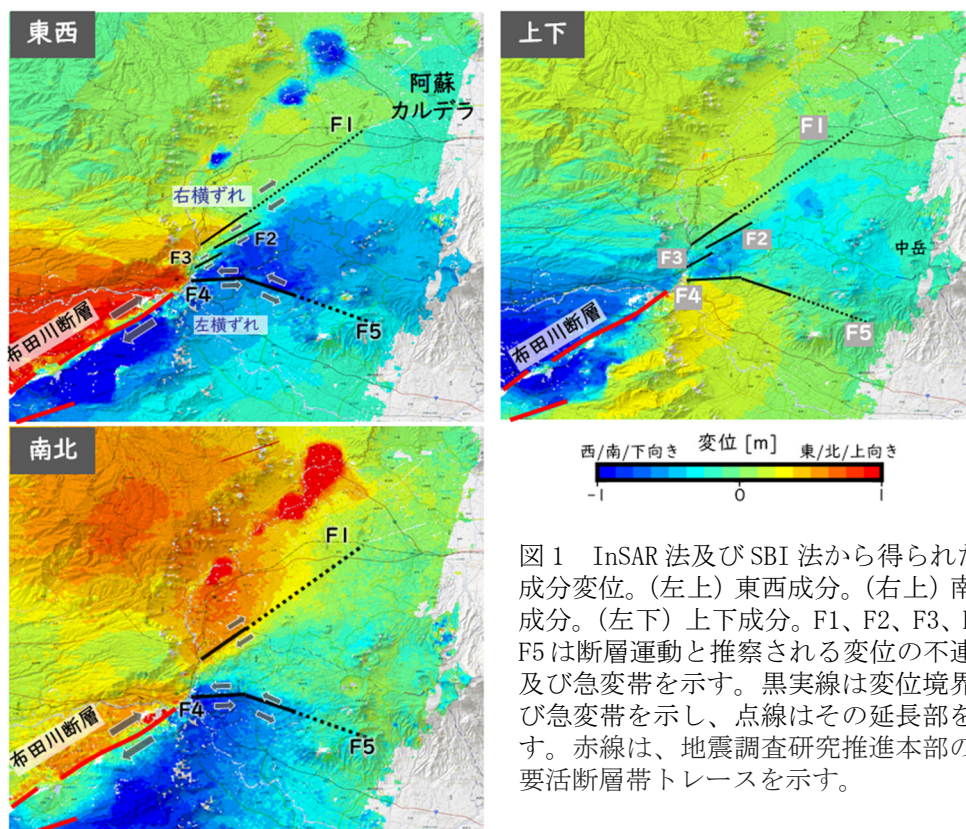


図 1 InSAR 法及び SBI 法から得られた 3 成分変位。(左上) 東西成分。(右上) 南北成分。(左下) 上下成分。F1、F2、F3、F4、F5 は断層運動と推察される変位の不連続及び急変帯を示す。黒実線は変位境界及び急変帯を示し、点線はその延長部を示す。赤線は、地震調査研究推進本部の主要活断層帯トレースを示す。

(F5)、その延長上で低密度域と重なる。なお、この空間的特徴は初期密度を変えた計算でも同じである。得られた阿蘇カルデラ内の断層すべりと低密度体の位置関係を精査したところ、F1の西縁の浅いすべりは低密度体に貫入していき、次第に減衰していることが分かった。F2、F3はいずれも低密度体に直接貫通し、すべりが終了している。F4は低密度体に接触した直後ですべり伝播が停止しており、さらに南東に位置するF5のすべりでは、低密度体を貫通した後、徐々にすべりが終了している。こうした位置関係を考慮すると、低密度体の影響によりすべりが収束した可能性が強く示唆される。

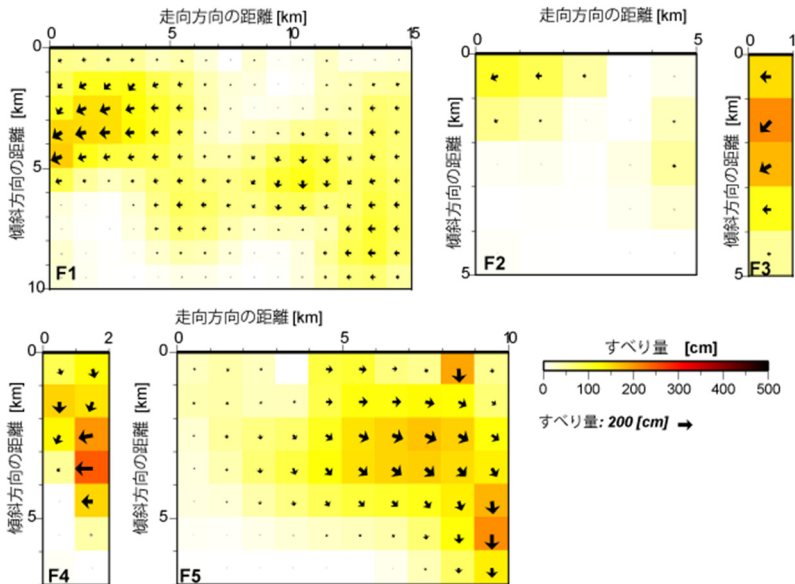


図2 阿蘇カルデラ内の断層面におけるすべり分布モデル。矢印は上盤側のすべりの方向と大きさを示す。

本研究で得られた低密度域は、S波速度構造と比較すると、S波速度が小さい(2km/s)領域と重なる。この領域では比抵抗も小さいことが先行研究で明らかにされている。火山性流体を含む熱水系が発達していることが示唆されており、温度が高い地殻内環境にあることが推察される。このことから、この領域では脆性破壊を起こしにくい可能性が考えられる。西から進展してきた断層破壊が、脆性破壊の能力を失うこの領域に到達したことで、東への進行が終了した可能性が示唆される。

地殻変動解析から、断層はカルデラ内で複数に分岐していることが分かった。このような様式は断層の末端で観察されることが多いが、この場合、破壊の停止の理由として、地殻構造の不均質というよりむしろ、主断層の弾性エネルギーが個々の分岐断層に分散されるため破壊の成長が抑制されるという機構の可能性も考えられる。このような背景の下、すべりの停止が局所的な構造の影響を受けてのものか断層分岐によるものなのかを検証するため、3次元動的破壊の数値シミュレーションを実施した。図4は、計算により得られた各断層面のすべり分布である。F1で

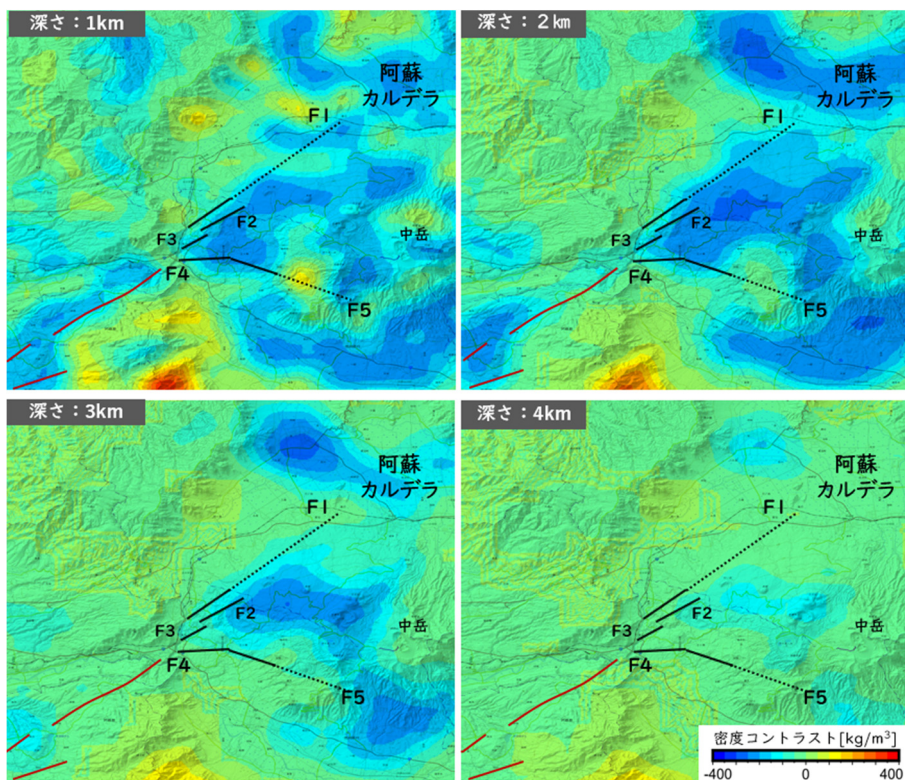


図3 重力インバージョンによって推定された阿蘇カルデラ西縁周辺の地下密度不均質構造。赤色が周囲よりも密度が高い領域を表し、青色が周囲よりも密度が低い領域を表す。赤線は、地震調査研究推進本部の主要活断層帯トレスを示す。

は、一様な応力場を仮定した場合も、カルデラ内に低応力場を仮定した場合も、地殻変動データから推定されたすべり分布に類似した分布を持った。F1 については、局所的な応力場の不均質がなくても、すべりの進展が抑制されることが分かった。一方、F5 では、均質な応力場を仮定した場合、断層破壊は停止することなく断層面の東端まで伝播しているが、低応力場がカルデラ内に広がる場合には、東に伝播するにつれ深部のすべりが徐々に減衰し、最終的に断層すべりが東端に達することなく終了することが分かった。そのすべり分布は、地殻変動データから推定されたすべり分布と類似している（図2）。これらの結果は、阿蘇カルデラに貫入した断層破壊が数 km の長さで収束する理由として、分岐断層におけるエネルギー散逸の考え方では十分に説明できず、むしろ、破壊の伝播を抑制するためには低応力領域が必要であることを示唆している。なお、本計算では、F1 では右横すべりが、F5 では左横すべりが再現された（図 4e, f）。阿蘇周辺の応力場（最大主応力軸がほぼ東西）においては、カルデラ内の分岐断層系で右横ずれと左横ずれが共存することは必然であることも示されたことになる。

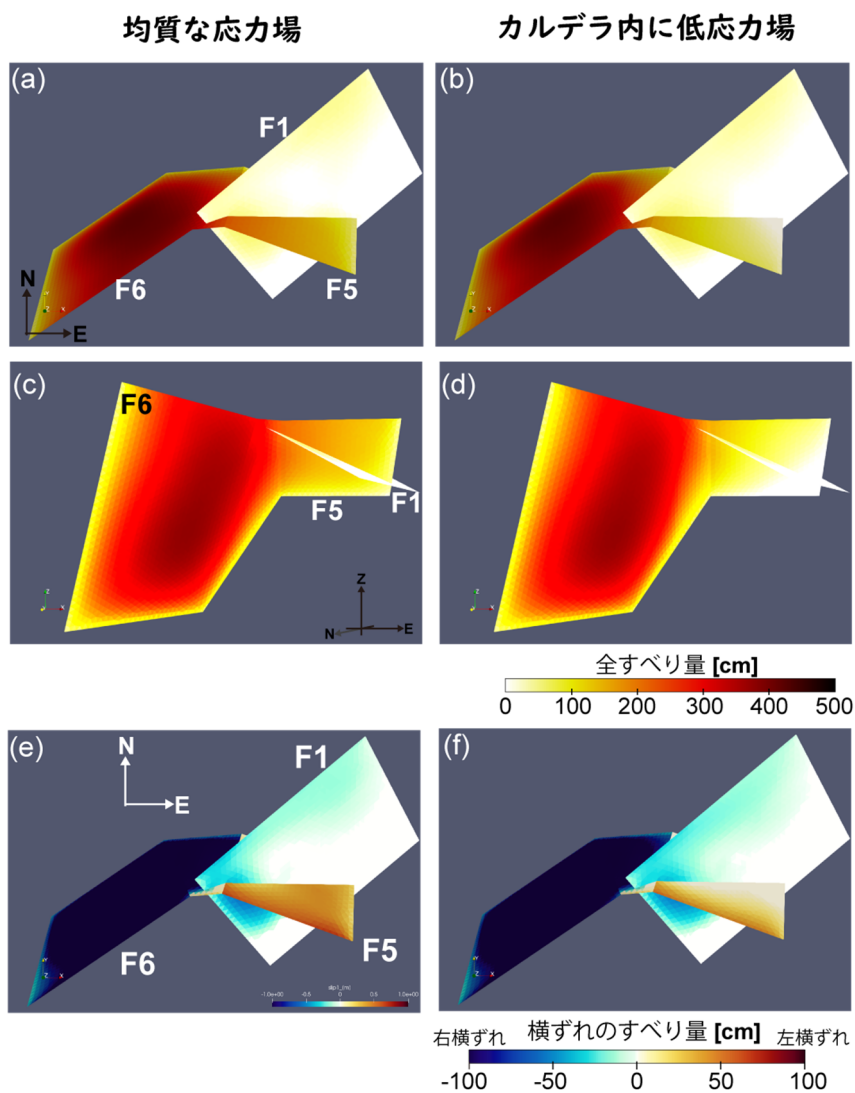


図4 3次元動的破壊の数値シミュレーション。(a)応力場一様下におけるF1、F5、F6断層面上のすべり量分布。真上からの視点。(b)低応力場を仮定した計算におけるF1、F5、F6断層面上のすべり量分布。真上からの視点。(c)(a)と同じ結果を南東側からの視点で描画した各断層面上のすべり分布。(d)(b)と同じ結果を南東側からの視点で描画した各断層面上のすべり分布。(e)応力場一様下におけるF1、F5、F6断層面上の横ずれ成分のすべり量分布。真上からの視点。暖色は左横ずれを、寒色は右横ずれをそれぞれ示す。(f)低応力場を仮定した計算におけるF1、F5、F6断層面上の横ずれ成分のすべり量分布。真上からの視点。暖色は左横ずれを、寒色は右横ずれをそれぞれ示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 小林知勝, 松尾功二, 中埜貴元	4. 巻 -
2. 論文標題 熊本地震はなぜ阿蘇カルデラ内で止まったのか? : 測地観測と数値計算で探る破壊の終焉 (第5年次)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 国土地理院調査研究年報 (令和4年度)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 小林知勝, 松尾功二, 中埜貴元	4. 巻 -
2. 論文標題 熊本地震はなぜ阿蘇カルデラ内で止まったのか? : 測地観測と数値計算で探る破壊の終焉 (第4年次)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 国土地理院調査研究年報 (令和3年度)	6. 最初と最後の頁 176-179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 松尾功二, 中埜貴元, 小林知勝	4. 巻 -
2. 論文標題 熊本地震はなぜ阿蘇カルデラ内で止まったのか? : 測地観測と数値計算で探る破壊の終焉 (第3年次)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 国土地理院調査研究年報 (令和2年度)	6. 最初と最後の頁 148-151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 小林知勝, 松尾功二, 中埜貴元	4. 巻 -
2. 論文標題 熊本地震はなぜ阿蘇カルデラ内で止まったのか? : 測地観測と数値計算で探る破壊の終焉 (第2年次)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 国土地理院調査研究年報 (令和元年度)	6. 最初と最後の頁 126-129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 小林知勝, 松尾功二	4. 巻 -
2. 論文標題 熊本地震はなぜ阿蘇カルデラ内で止まったのか? : 測地観測と数値計算で探る破壊の終焉 (第1年次)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 国土地理院調査研究年報 (平成30年度)	6. 最初と最後の頁 138-140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 小林知勝, 松尾功二, 安藤亮輔, 中埜貴元
2. 発表標題 2016年熊本地震の断層終端部における断層滑りと密度構造の3次元分布
3. 学会等名 地震学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomokazu Kobayashi, Koji Matsuo, Ryosuke Ando, and Takayuki Nakano
2. 発表標題 What controlled the fault ruptures in the final stage?: Relation between fault slips and density structures for the 2016 Kumamoto earthquake in Japan
3. 学会等名 The 13th UJNR meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林知勝, 松尾功二, 安藤亮輔, 中埜貴元
2. 発表標題 2016年熊本地震の断層終端部における断層運動と地下の密度構造の関係
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomokazu Kobayashi, Koji Matsuo, Ryosuke Ando, and Takayuki Nakano
2. 発表標題 What controlled the fault ruptures in the final stage?: A comparison of SAR-derived fault slips with gravity-inferred density structures for the 2016 Kumamoto earthquake in Japan
3. 学会等名 The American Geophysical Union Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koji Matsuo, Tomokazu Kobayashi, Ryosuke Ando, and Takayuki Nakano
2. 発表標題 Impact of topographic density variations on subsurface structure estimation by gravity inversion- a case study in Aso Caldera, Japan
3. 学会等名 The American Geophysical Union Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林知勝, 松尾功二, 安藤亮輔, 中埜貴元
2. 発表標題 2016年熊本地震の断層終端部における地殻変動と重力データから推定した地下の密度構造の詳細
3. 学会等名 地震学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomokazu Kobayashi, Koji Matsuo, Ryosuke Ando, and Takayuki Nakano
2. 発表標題 A Comparison of Fault Ruptures with Gravity-based Structures in Volcano Caldera: Analysis of the 2016 Kumamoto Earthquake, Japan
3. 学会等名 27th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly (国際学会)
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
研究分担者	安藤 亮輔 (Ando Ryosuke) (10455256)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	松尾 功二 (Matsuo Koji) (80722800)	国土地理院(地理地殻活動研究センター)・その他部局等・主任研究官 (82116)	
研究分担者	中埜 貴元 (Nakano Takayuki) (60511962)	国土地理院(地理地殻活動研究センター)・その他部局等・研究官 (82116)	

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