

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03803

研究課題名(和文) 2016年熊本地震は阿蘇カルデラ噴火をトリガーするか？

研究課題名(英文) Will 2016 Kumamoto Earthquake trigger caldera eruption of Aso volcano ?

研究代表者

大倉 敬宏 (Ohkura, Takahiro)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：40233077

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)：阿蘇のカルデラ噴火の準備過程における、地殻深部でのマグマの蓄積過程と地表へのマグマの移動過程を地球物理学的にとらえるため、地震波走時トモグラフィー、表面波トモグラフィーを行った。そして、2016年熊本地震の断層運動がマグマ溜まりに及ぼした影響を有限要素解析により評価した。その結果、熊本地震の断層運動により、阿蘇火山のマグマだまりの体積は0.06%増加するのみであった。このわずかな変化量では、中規模の噴火(VUI2以上)のトリガーとしても不十分だったと考えられる。またレシーバー関数解析による地震波速度構造解析では、地殻深部の低速度層の熊本地震前後での速度構造の変化は捉えられなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震の発生後に付近の火山活動が活発化することが知られている。2016年熊本地震の直後に、阿蘇火山でごく小規模な発生し、半年後には小規模なマグマ水蒸気噴火が発生した。そこで、熊本地震の断層運動が、阿蘇火山のマグマ供給系に及ぼした影響を評価したところ、本震の断層運動では、巨大なカルデラ噴火をトリガーするには不十分だったことが明らかになった。また、カルデラ噴火の準備過程に関連する地殻深部の地震波速度構造も変化していないことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Seismic travel-time tomography and surface wave tomography were performed to geophysically detect the magma accumulation process in the crust and the transfer of magma to the surface during the preparation process of a caldera eruption of the Aso volcano. Then, the effects of the fault movement of the 2016 Kumamoto earthquake on magma accumulation were evaluated by a finite element analysis. The results show that the fault movement of the Kumamoto earthquake caused only a 0.06% increase in the volume of the magma chamber of the Aso volcano. This small amount of change is considered insufficient to trigger a medium-sized eruption (VUI2 or higher). Seismic wave velocity structure analysis based on receiver function analysis did not detect changes in the velocity structure of the low-velocity layer in the lower crust before and after the Kumamoto earthquake.

研究分野：火山物理学

キーワード：阿蘇カルデラ 熊本地震 マグマ溜まり 地震波速度構造 地殻変動 トモグラフィー レシーバ関数 低速度領域

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

阿蘇火山では、約 27 万年前から約 9 万年前にかけて 4 回の大規模カルデラ噴火（1 度の噴火で 100 億  $m^3$  以上のマグマを放出する噴火）が発生した。約 9 万年前の 4 回目のカルデラ噴火では、約 6000 億  $m^3$  ( $600km^3$ ) のマグマが放出されたと推定されている。

一般的に、大規模カルデラ噴火時に噴出するマグマは、マントルから貫入する玄武岩質メルトが下部地殻を溶融することによって生成されると考えられている（たとえば、Petford et al., 2000, Nature）。そこで我々は、大規模カルデラ噴火の元となるようなマグマが現在の阿蘇カルデラの地下にも存在するかを明らかにするために、レーザ関数 (RF) の遺伝的アルゴリズム (GA) インバージョンを用いた解析をおこない、阿蘇カルデラの地下構造を精密に決定した。その結果、阿蘇カルデラの地殻内部に、 $V_s=2.0-2.5km/s$  程度の低速度領域が存在することが明らかになった。この低速度領域は、カルデラの大部分で 13km から 25km の深さに存在し、中央火口丘群東斜面の地下でのみ、8-15km と浅くなることが明らかになった (Abe et al. 2010, Abe et al., 2017)。この深さ 8-15km に分布する低速度領域 (LA) は、シル状地殻変動源（深さ約 15km）や低周波地震発生域（深さ 15-25km）の直上に位置する。これらのことから、LA には水あるいはマグマなどの流体が存在していると考えられ、仮にこの流体がすべてマグマだとすれば、LA には約  $45km^3$  のマグマが存在していることになる（S 波速度低下率に Takei (2002, JGR) の計算結果を適用して算出）。現時点では、この量は前回のカルデラ噴火で放出されたマグマ ( $600km^3$ ) の 10 分の 1 以下にすぎないが、次期カルデラ噴火にむけてこの低速度領域がどのように変化（成長）するのかを調べるのが非常に重要となる。

阿蘇火山近傍では 2016 年に熊本地震 ( $M_J=7.3$ ) が発生した。この地震による地殻応力の変化が阿蘇火山のマグマ溜まりの成長速度に影響を与えることも考えられる。最新の岩石学的研究には、大規模カルデラ噴火前に 10 年から月単位の時間スケールでのマグマ移動とマグマ溜まりの成長が進行した例が示されている（たとえば Druitt et al. 2012 Nature）。

これらのことから、最後の大規模カルデラ噴火から約 9 万年経過し、近傍で大地震の発生した阿蘇カルデラは、次の大規模カルデラ噴火に至るプロセスを明らかにするための研究フィールドとして最適であると考えられる。

## 2. 研究の目的

大規模カルデラ噴火の準備過程においては、マグマの量や組成などが変化することにより、マグマ溜まりの体積や地震波速度が大きく変化することが予想される。特に熊本地震後における速度構造変化の有無を検証し、2016 年熊本地震のカルデラ噴火への影響を評価する。

そのために、地震波走時トモグラフィ法やレーザ関数解析を用いて、阿蘇カルデラの速度構造や地殻内部の地震波速度不連続面での速度変化量の時間変化を検出する。

また、熊本地震によって引き起こされた地殻変動を検出し、この地殻変動を説明することのできる断層モデルを再検討する。そして、この断層運動が阿蘇火山のマグマ溜まりや低速度領域にあたえる影響を評価する。

### 3. 研究の方法

レシーバ関数解析は、遠地地震の後続波に含まれる PS 変換波を検出し、観測点直下の速度不連続面を決定する手法である。この手法により、従来の走時トモグラフィ法よりも精度良く（深さ 1–2km の誤差で）地殻深部の構造を決定できる。そこでまず、Abe et al.(2017)で使用された地震観測点での連続観測を継続するとともに、Abe et al.(2017)の解析対象期間の以降の期間、すなわち 2012 年 7 月から 2022 年 3 月までに、阿蘇火山から震央距離 30 度以上 90 度以内で発生したマグニチュード 5.5 以上の遠地地震の波形に、Shibutani(2008)の 時間拡張マルチテーパ法を用いてレシーバ関数を作成し、低速度領域の境界面での屈折波の振幅が時間変化しているかどうかを調べた。

また、阿蘇カルデラ内外の地震波形データに地震波干渉法を適用して、2 観測点間の波形の相互相関を求め、2 点間を伝播する表面波を検出した。そして、表面波トモグラフィを実施することで、阿蘇カルデラ内の浅部 S 波速度構造を求めた。

また、阿蘇火山の現在の火山活動と対応するマグマだまりの位置や構造についての理解を深めるために、走時トモグラフィによる 3 次元地震波速度構造の推定を行った。データには、九州大学・地震火山観測研究センターと京都大学・火山研究センターが 2009 年から共同で、別府島原地溝帯を横切るように設置した 35 点の臨時観測点 (Matsumoto et al.(2015))のデータと Hi-net、V-net、気象庁、九州大学、京都大学の定常観測点あわせて計 315 点での P 波および S 波初動の走時データ（2009 年 11 月から 2016 年 10 月まで）を使用した。

この解析には Double-Difference Tomography (Zhang and Thurber(2003))法を用いた。解析手順は以下の(1)~(4)である。

(1) 震源データの中から M2 以上で 20 以上の観測点で観測されたイベントを選び、震源分布の局所的な偏りを避けて、イベントペアを作成。

(2) 震源域のうち阿蘇山中岳山頂（東経 131.097 度、北緯 32.883 度）を中心とした 2 度四方（東経 130.097 度~132.097 度、北緯 31.8834 度~33.8834 度）の深さ 100km までの領域を 0.05 度×0.05 度×5km の立方体で区切り、それぞれ領域から検出数の多いイベント上位 25 個を選びイベントリストを作成。

(3) これらのイベントのうち、その 5km 以内に最低 8 個以上の地震が発生しているもののみを抽出。

(4) これらの地震イベント計 4379 から P 波 230,791、S 波 191,198 のピックされたデータと、P 波 263,166、S 波 237,610 の走時差データを用いてインバージョンを実施。

一方、2016 年熊本地震の断層運動による阿蘇火山への影響を評価するため、まず、ALOS-2 の InSAR 画像から求められた 2.5 次元変位場、GNSS 観測や水準測量結果などの種々の観測値を整理し、熊本地震の断層運動が阿蘇火山周辺に引き起こした変位場を明らかにした。次に熊本地震のいくつかの震源断層モデルについて、地形や地殻媒質の不均質を考慮した有限要素法モデルを用い、断層すべりが阿蘇火山周辺やマグマだまり（深さ約 6km）や低速度領域に与える変位を計算した。そして、計算結果と観測結果がおおむね一致する断層モデルを用いて、マグマ溜まりや低速度領域の変形

量を計算した。

#### 4. 研究成果

3. で述べた研究のうち、表面波トモグラフィーの結果として、阿蘇火山の中央火口丘群の地下 5~6km にマグマ溜まりに対応する低速度領域が、地下 1~2.5km には熱水だまりに対応する低速度領域がそれぞれ見出された。そして、それらを繋ぐような縦長の低速度構造も検出された。また、3~5km の深さには固結した貫入マグマに対応するような高速度領域が検出された。

また、走時トモグラフィーによる 3 次元地震波速度構造の推定の結果、阿蘇山の中岳山頂から西側 2km (草千里) の直下の 6~12km の深さに、P 波で最大 18%、S 波で最大 34% の速度低下をしめす領域が存在することが明らかになった。また S 波の低速度領域は P 波のそれより深部に続いていることも明らかになった。この結果と、Sudo and Kong(2001)で求められた低速度領域の位置と速度低下率はおおよそ一致している。このことは、この 20 年の間に地殻浅部のマグマだまりに大きな変化がなかったことを示している。

また、P 波速度で 10%以上の低下率を示す範囲をマグマだまりとし、その範囲の体積を計算したところ、おおよそ 100 立方 km であった。次に Takei (2002)にしたがい、P 波および S 波の速度低下率から低速度領域内のメルトの含有率を求めたところ、5~15%となった。これらのことから求まるメルト (マグマ) の体積は 5~15 立方 km である。

また解析の期間を、阿蘇山の活動期となる 2014 年 7 月から 2016 年 10 月までの期間とそれ以前に分割して速度構造の推定を行った結果、2014 年 7 月以降には S 波の低速度領域がより浅部に広がっているような時間変化が見られた。

一方、熊本地震前後のレシーバ関数解析では、2012 年 7 月から 2022 年 3 月までに、阿蘇火山から震央距離 30 度以上 90 度以内で発生したマグニチュード 5.5 以上の遠地震の波形に、Shibutani(2008)の 時間拡張マルチテーパ法を用いてレシーバ関数を作成した。その結果、低速度領域の境界で屈折した PS 波の振幅には、誤差を越える時間変化は検出されず、この期間には速度構造の変化が引き起こされていないと推定された。

最後に地殻変動解析の結果をのべる。この研究では、2016 年熊本地震による阿蘇火山への影響を評価するため、いくつかの震源断層モデルについて、地形や地殻媒質の不均質を考慮した有限要素法モデルを用い、断層すべりが阿蘇火山周辺やマグマだまり (深さ約 6km) や低速度領域に与える変位をシミュレーションした。InSAR 解析から得られた 2.5 次元変位場の準上下成分と GNSS 観測点の変位には、阿蘇火山周辺において最大 400mm の沈降がみられた。シミュレーションの結果、この沈降を説明するためには、カルデラ内西部に南東落ちの正断層成分をもつ断層モデルが必要であることが明らかになった。

前述の低速度領域では、熊本地震本震の断層運動により  $7 \times 10^8 \text{m}^3$  程度の収縮が引き起こされることが、有限要素法シミュレーションから明らかになった。しかし、この体積変化量は約 9 万年前の阿蘇 4 火砕流を引き起こした噴火時のマグマ噴出量 ( $6 \times 10^{11} \text{m}^3$ )

と比べると非常に小さい値である。したがって、熊本地震本震の断層運動だけでは、カルデラ噴火をトリガーするには不十分だったと考えられる。一方この断層運動により、マグマだまりの体積は 0.06% 増加するのみであることも明らかになった。このわずかな変化量では、中～大規模な噴火(VUI2 以上)のトリガーとしても不十分だったと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yu-Chih Huang, Takahiro Ohkura, Tsuneomi Kagiya, Shin Yoshikawa and Hiroyuki Inoue	4. 巻 70
2. 論文標題 Shallow volcanic reservoirs and pathways beneath Aso caldera revealed using ambient seismic noise tomography	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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） 10.1186/s40623-018-0941-2	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 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木村育磨、大倉敬宏、松本聡、志藤あずさ、清水洋
2. 発表標題 阿蘇火山周辺の3次元地震波速度構造
3. 学会等名 日本火山学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原嵩史、大倉敬宏、成田翔平
2. 発表標題 阿蘇火山のマグマだまりに対する2016年熊本地震の断層変位による影響
3. 学会等名 日本火山学会秋季大会
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
研究協力者	安部 祐希 (Abe Yuki) (80632538)		

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	黄 有志  (Huang Yu-Chih)		
研究協力者	吉川 慎  (Yoshikawa Shin)		
研究協力者	井上 寛之  (Inoue Hiroyuki)		
研究協力者	木村 育磨  (Kimura Ikuma)		
研究協力者	菅原 嵩史  (Sugawara Takafumi)		

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