

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）

実施期間 平成30年度～令和3年度
地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室 松尾 功二
地理情報解析研究室 中埜 貴元
測地部 宇宙測地課 小林 知勝

1. はじめに

地震の滑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、断層面上の滑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。このような背景の下、本研究は、内陸地震の断層破壊が火山体内部に進展した様子を捉えた平成28年（2016年）熊本地震（以下「2016年熊本地震」という。）の地殻変動データを足がかりに、地殻内構造の不均質が断層滑りの終焉にどのように関わっているのかを理解することを目的とする。なお、本研究は科学研究費補助金（研究課題番号：18K03810）により実施されるものである。

2. 研究内容

本研究では、SARによる地殻変動データ解析から断層滑りの空間分布を、重力データ解析から地下構造の不均質を推定し、本震時の断層運動と内部構造の関係を明らかにする。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、断層滑りの終焉がどのような物理条件に制御されたのかを検討する。令和2年度は、令和元年度に収集・解析を行った重力データを用いて、阿蘇カルデラ内の内部構造のインバージョン解析を行った。

3. 得られた成果

3.1 重力データ

本研究の対象とする領域は、2016年熊本地震の布田川断層沿いの破壊が阿蘇カルデラ西縁部で分岐した北東延長部と東延長部である。図-1に、その領域の地形図を示す。阿蘇カルデラ及びその周辺は、これまでの研究（他機関）で多数の重力データが獲得されている。本研究では、既存の重力データに加え、令和元年11月25日（月）から11月28日（木）にかけて上記領域で観測した60点の重力データも使用した（小林ほか, 2020）。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た。「ブーゲ補正」「地形補正」の計算には、国土地理院の10mメッシュ数値標高モデルを使用した。なお、地形の密度を 2670kg/m^3 の一定の値と仮定した。

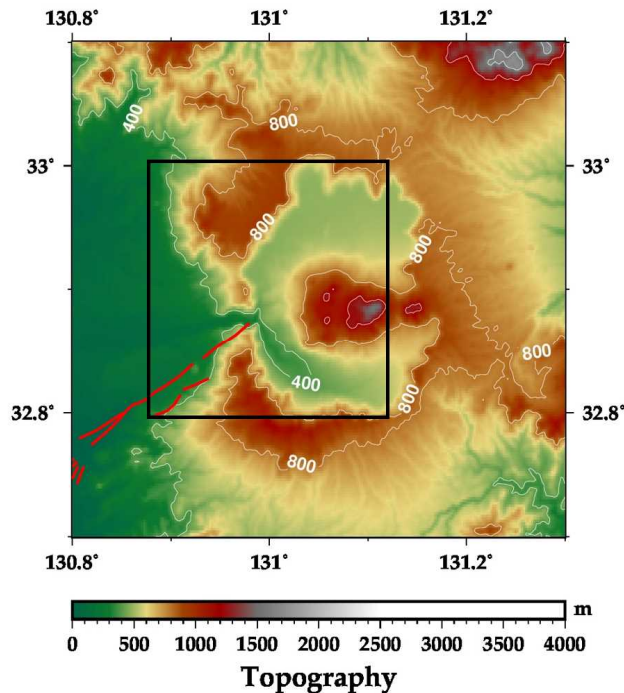


図-1 阿蘇カルデラ周辺の地形図. 黒枠の領域が、重力インバージョン解析を行った領域を示す. 赤い線は、2016年熊本地震の断層線を表す.

3.2 重力インバージョンによる阿蘇地区の地下密度不均質構造

阿蘇カルデラ西縁部（図-1の黒枠の領域）の完全ブーゲ重力異常分布から、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推定する。地下密度不均質構造の推定は、平行六面体の質量塊の引力（Pick et al., 1973）を応答関数とし、密度コントラストを推定パラメータとする重み付き最小二乗推定（Camacho et al., 2002）によった。最小二乗推定では、地下の密度コントラストが滑らかに変化するという制約条件を課した。この滑らかさを制御するダンピングパラメータは、観測値とモデル値の間の $L2$ ノルムが最小となる値 (*L-curve criterion*) を採用した。なお、重力データの観測誤差については、ガウス分布に従うものと仮定した。

図-2に、入力した完全ブーゲ重力異常（観測値）、重力インバージョンの推定結果（モデル値）、そして両者の差の空間分布を示す。観測値とモデル値の空間分布は良く整合しており、両者の重力差の標準偏差は 0.75mGal であった。

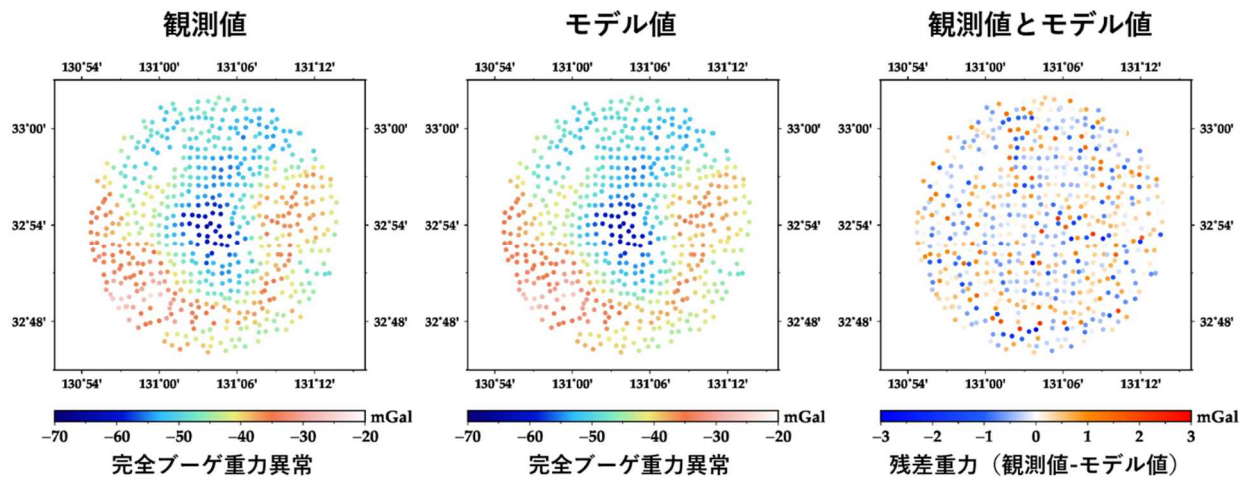


図-2 インバージョン解析に使用した重力の観測値(左図), インバージョン解析で計算されたモデル値(中央図), 観測値とモデル値の差分(右図)の空間分布図.

続いて, 地下密度不均質構造(密度コントラスト)の推定結果を図-3に示す. ここでは, 地下1000m~4500mにおける密度コントラストの水平プロファイルを示す. 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. 密度不均質は, $\pm 400\text{kg/m}^3$ の大きさである. 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. 密度が低い領域は, 杵島岳~高岳を含む阿蘇中央火口丘群の直下であることから, マグマ溜まりに由来した地下不均質構造を反映しているものと考えられる. これは, Komazawa (1995) や Miyakawa et al. (2016) などの先行研究の結果とも良く一致する. 密度が高い領域は, 阿蘇中央火口丘群直下の低密度域を取り囲む地下2000mまでの領域に存在しており, ここに何かしらの堅い岩盤構造が存在することが示唆される. この地域の地下密度不均質分布と2016年熊本地震の断層破壊の様相を詳細に調べると, 西から東へと破壊が進んだ断層はこの高密度領域に衝突した辺りで分岐していることが分かった. この2016年熊本地震の断層破壊と阿蘇カルデラ西縁の高密度領域との間の関係性については, 今後詳細に議論を進める予定である.

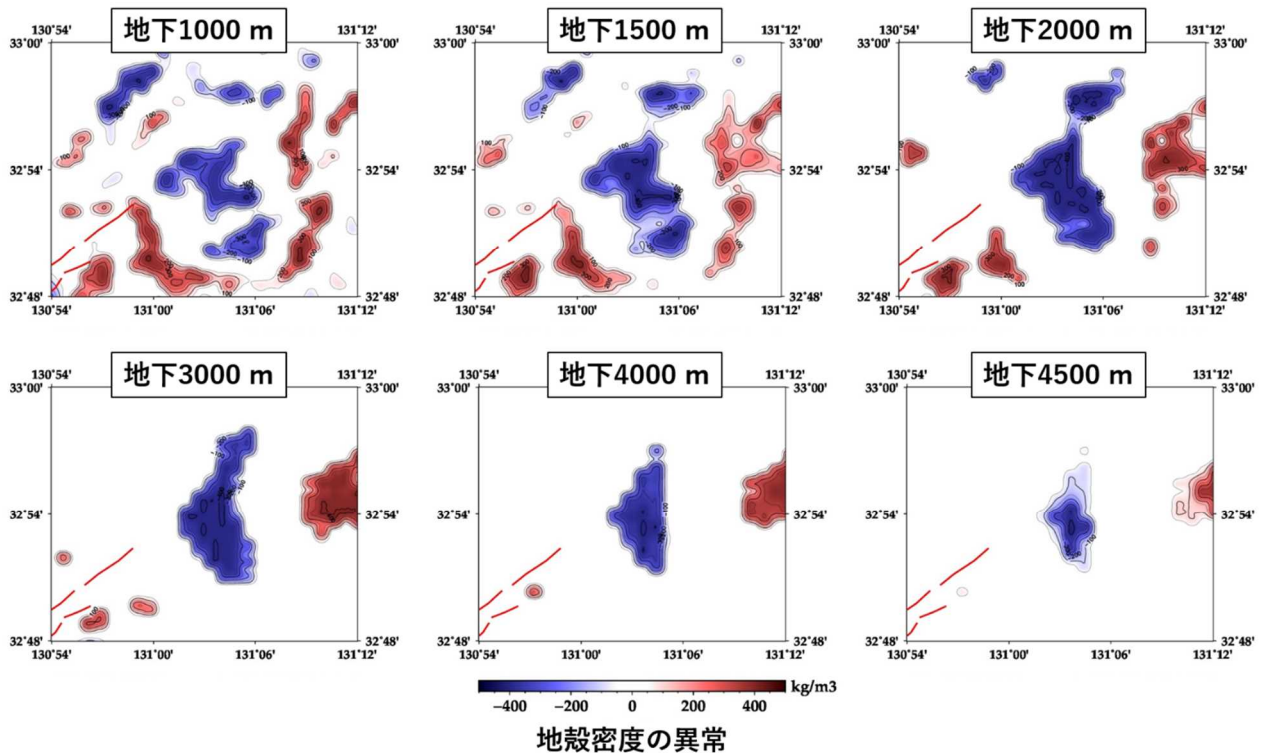


図-3 重力インバージョンによって推定された阿蘇カルデラ西縁周辺の地下密度不均質構造。赤色が周囲よりも密度が高い領域を表し、青色が周囲よりも密度が低い領域を表す。赤い線は、2016年熊本地震の断層線を表す。

4. 結論

令和2年度は、重力インバージョン解析に基づいて、阿蘇カルデラ西縁周辺の地下密度不均質構造を推定した。その結果、4500mまでの領域において阿蘇中央火口丘群直下に共通して低密度構造が存在し、その周囲の地下2000mまでの領域に高密度構造が存在することが分かった。この地下密度不均質構造と2016年熊本地震の断層破壊との間の関係性については、今後詳細に調査と議論を進める予定である。また、重力インバージョン解析については、地形密度の不均質構造や重力鉛直勾配の影響を考慮するなど、さらなる高度化を進める予定である。

参考文献

- Camacho, A.G., Montesinos, F.G., Vieira, R. (2002): A 3-D gravity inversion tool based on exploration of model possibilities. *Computers & Geosciences* 28, 191-204.
- 小林知勝, 松尾功二, 中埜貴元 (2020) : 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), 令和元年度国土地理院調査研究年報, 126-129.
- Komazawa, M. (1995): Gravimetric analysis of Aso volcano and its interpretation. *J. Geod. Soc. Jpn.* 41:17-45.
- Miyakawa, A., Sumita, T., Okubo, Y., Okuwaki, R., Otsubo, M., Uesawa, S., Yagi, Y. (2016): Volcanic magma reservoir imaged as a low-density body beneath Aso volcano that terminated the 2016 Kumamoto earthquake rupture. *Earth Planets Space* 68:208.
- Pick, M., Picha, J., Vyskocil, V. (1973): *Theory of the Earth's Gravity Field*. Elsevier, Amsterdam 538pp.