

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）

実施期間	平成30年度～令和4年度
地理地殻活動研究センター	
宇宙測地研究室	小林 知勝 松尾 功二
応用地理部 企画課	中埜 貴元

1. はじめに

地震の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。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すべ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すべりの空間分布を、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、断層すべ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4年度は、断層面上のすべり分布の推定と昨年度までの研究で発見した低密度体との3次元位置関係の精査を実施した。

3. 得られた成果

3.1 すべり分布モデルの推定

阿蘇カルデラ内の断層すべりの空間パターンを明らかにするために、以下の2つのステップを経て断層モデルを構築した。まず初めに、矩形平面の一樣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。

一樣すべりの矩形断層を仮定したモデル計算では、震源断層モデルパラメータを Simulated Annealing 法により推定した。観測値 (d_i^{obs}) と計算値 (d_i^{cal}) の間の重み付き二乗残差和 (WSSR) の最小値を与えるパラメータを最適解として採用した。

$$WSSR = \frac{1}{(N - M)} \sum_{i=1}^{i=N} (d_i^{obs} - d_i^{cal}) / \sigma_i^2$$

ここで、 N はデータ数、 M はモデルパラメータ数、 σ は各観測値の誤差である。推定されたパラメータの誤差はブートストラップ法で推定した。モデリングでは、SAR データを Quadtree 法により再サンプリングした。本モデル計算では、SAR による地殻変動結果に見られる変位境界に沿って、阿蘇カルデラ内に5つ (F1, F2, F3, F4, F5)、阿蘇カルデラ外の布田川断層帯、日奈久断層帯、出ノ口断層沿いに4つ (F6, F7, F8, F9)、計9つの断層面を設定した。

続けて、解探索によるモデル計算から得られた断層形状を基にすべり分布モデルを推定した。断層

面は基本的に解探索で得られたものに固定してすべり分布を計算したが、本研究の対象領域である阿蘇カルデラ内の断層（F1 から F5）については、さらに傾斜角を 10°間隔で探索し最適解を求めた。最終的に得られたすべり分布モデルの断層面は図-1 に示される。阿蘇カルデラ内の断層は 1×1 km の小断層で、阿蘇カルデラ外の断層は 2×2 km の小断層で分割し、各小断層のすべりの方向と大きさを最小二乗法で推定した。本研究では、モデルパラメータの増加による解の不安定性を抑制するため、ラプラシアン行列を用いてすべり分布に空間的な平滑性の制約を課した。結果的に以下の方程式を最小二乗的に解くことになる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \alpha \mathbf{L} \end{bmatrix} \mathbf{m}$$

ここで、 \mathbf{d} は観測値、 \mathbf{G} はグリーン関数、 \mathbf{m} はモデルパラメータを表す。 \mathbf{L} はラプラシアン行列、 α は平滑化を制御する超パラメータである。 α の最適値はABICにより決定した。

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つ。すべりは東に進展するにつれ、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°となる。断層系の外側が低角、内側で高角となっており、断層端部でしばしば見られるフラワー構造に類似した形態となっている。

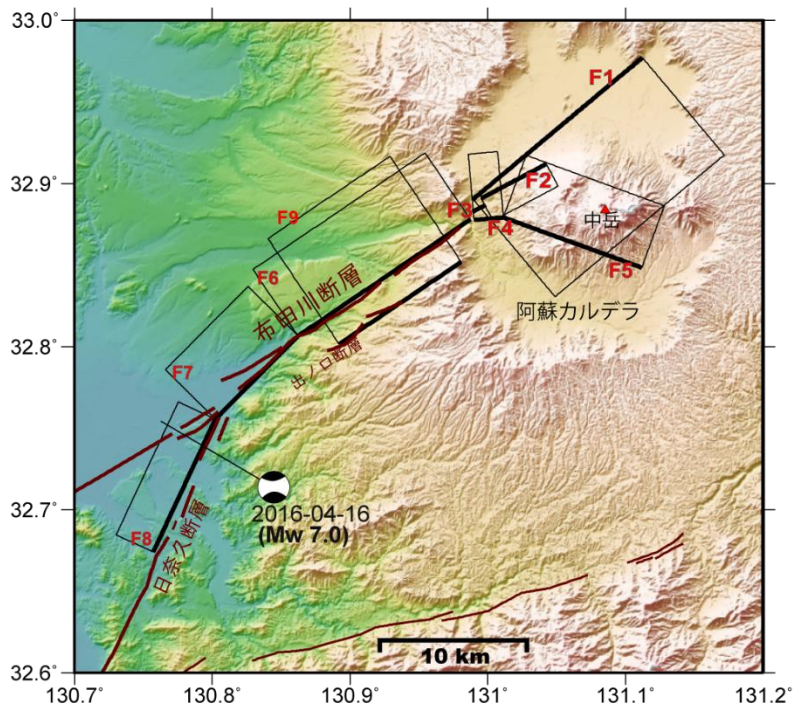


図-1 すべり分布モデルの断層面位置の地表投影。太線は断層上端を示す。茶色実線は、地震調査研究推進本部の主要活断層帯トレースを示す。

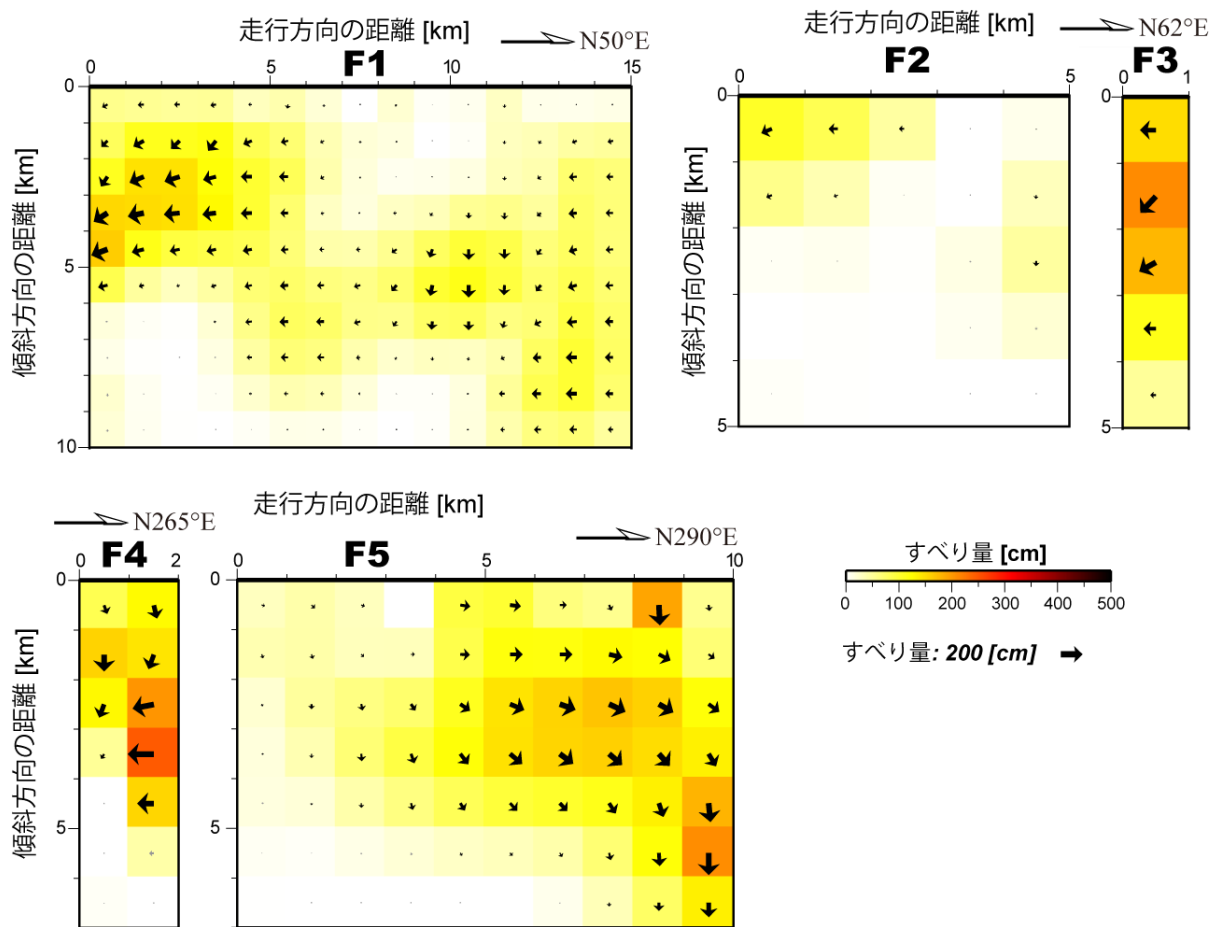


図-2 阿蘇カルデラ内の断層面におけるすべり分布モデル. 矢印は上盤側のすべりの方向と大きさを示す.

3.2 低密度体との位置関係

前節で得られた阿蘇カルデラ内の断層すべりと、前年度までの研究で得られた阿蘇カルデラ西端浅部にある低密度体の位置関係を精査した. 図-3 は、両者の空間関係を 3 次元的に示したものである. 図中の青い塊が低密度体を示す. 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. 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、徐々にすべり伝播が終了している様子がわかる. こうした位置関係を考慮すると、すべりの伝播が低密度体の影響により収束した可能性が強く示唆される.

4. 結論

令和4年度は、SARによる地殻変動解析から得られたデータを基に、阿蘇カルデラ内の断層運動のすべり分布モデルを構築した. 解析の結果、布田川断層の延長上に分布する断層においては、正断層成分をやや含みながら右横ずれが卓越する運動が推定された. すべりの中心は、カルデラ西縁側の深さ数kmに集中しており、それより東部においてはすべりが減衰している様子が捉えられた. 一方、布田川断層から分岐して東にのびる断層においては、正断層成分を含みながら左横ずれが卓越する運動が推定された. これら断層面上のすべりは、低密度体に接触/貫入しており、その後すべりの大きさは減衰することがわかった.

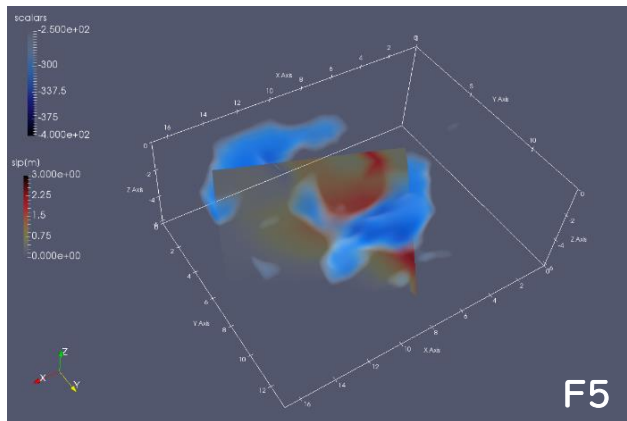
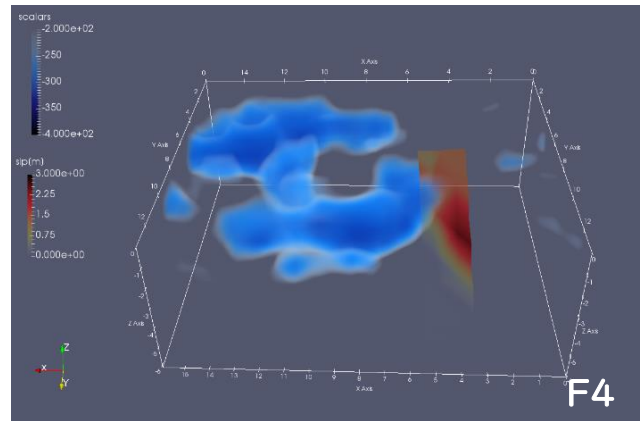
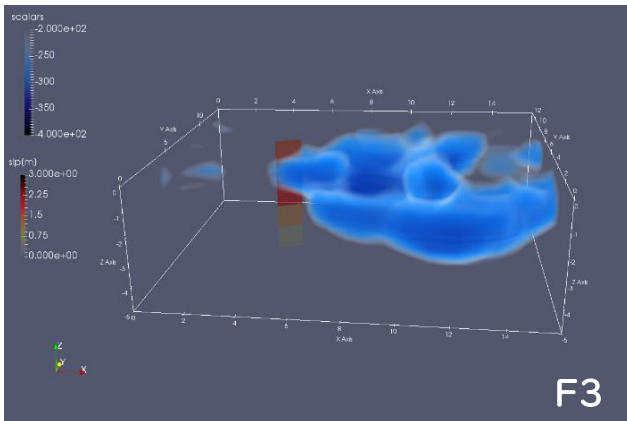
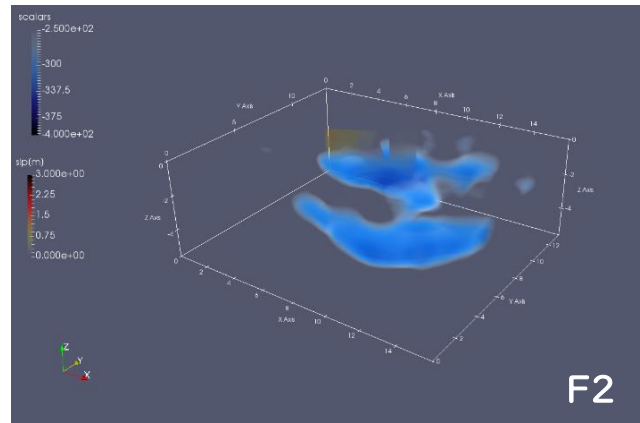
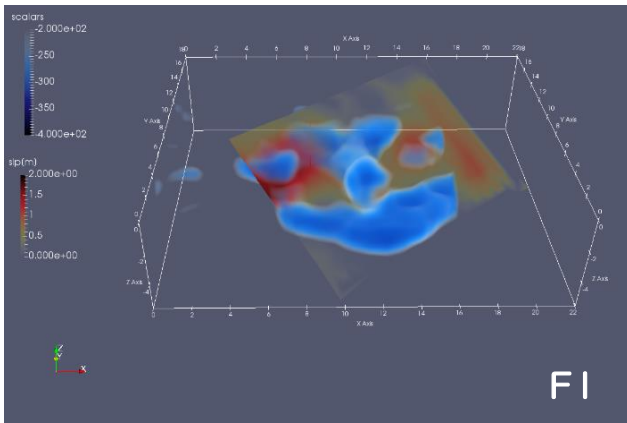


図-3 断層面上のすべり (F1から F5) と低密度領域の位置関係. 青色が低密度領域を示す.

謝辞

本研究で用いた ALOS-2 データは、地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループ (地震 WG) を通じて、(国研) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) から提供を受けました. 原初データの所有権は JAXA にあります.