

11 – 5 熊本地震に伴う断層すべりの阿蘇カルデラ内への貫入とその後の挙動 Intrusion of fault slip associated with the Kumamoto earthquake into the Aso caldera and its subsequent behavior

小林 知勝 (国土地理院)

Tomokazu Kobayashi (Geospatial Information Authority of Japan)

1. はじめに

熊本地震を引き起こした断層の 1 つである布田川断層の東端部には、活火山（阿蘇山）を抱える阿蘇カルデラがあり、断層破壊はそのカルデラ縁まで達したことが知られている。断層運動が活動的な火山体へ貫入し、その内部で破壊が終端する様子を地球物理学的な手法で観測した事例は世界的にも稀であり、火山が地震の断層破壊に与える影響を理解する上で重要なケーススタディとなる。一方で、布田川断層の断層破壊が端部においてどれくらい進展し、どのような挙動を示したのか、その詳細はあまりよくわかっていなかった。このような背景の下、合成開口レーダー（SAR）による高分解能な地殻変動データを用いることで、断層すべり終端部の詳細な変位分布とその地下構造との関係が明らかとなってきた¹⁾。さらに、地震後に阿蘇カルデラ内外で進行する変動を精査したところ、地震時にカルデラ内に貫入した断層群が、カルデラ内における地震後の地殻変動の推移に重要な役割を果たし、火山の活動評価にも大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった²⁾。本報告では、Kobayashi et al. (2025)¹⁾ 及び Munekane and Kobayashi (2025)²⁾ の成果を中心に、熊本地震に伴う断層すべりのカルデラ内への貫入から地震後の変動までを統合的に整理する。

2. 阿蘇カルデラに貫入した断層運動と断層すべり終端部の地殻構造

Kobayashi et al. (2025)¹⁾ は、だいち 2 号衛星や GNSS の地殻変動データを組み合わせることで、断層終端部における三次元変位分布を高い空間分解能で明らかにした。その結果、布田川断層のすべりは、阿蘇カルデラ内部に貫入し、大局的に 2 方向に分岐して進展したことが分かった。1 つは、布田川断層の東端部から北に数 km 位置をずらしつつも同じ走向で北東に進展するもので、南東に傾斜する低角の断層面上での正断層成分を含む右横ずれ運動を示す。もう 1 つは、布田川断層の東端部とほぼ連結しているものの、走向を東西に変え、さらに 2km 先で走向を北西 – 南東方向に変えて進展するものである。断層面は北及び北東傾斜で、正断層成分を含む左横ずれ運動を示す。これに加えて、北側の分岐断層の南側には、長さ数 km 程度の局所的な断層運動が確認できる。これらは高角の断層面における右横ずれ運動を示す。

重力データを用いてカルデラ内の密度コントラスト構造を推定したところ、カルデラ西端部の浅部（～3 km）に低密度域が存在していることが明らかとなった。注目すべきは、布田川断層から分岐して進展する断層運動の終端部が、この低密度域に貫入している点である。この低密度域には、低 V_s 域 (Huang et al., 2020)³⁾ 及び低比抵抗 (Matsushima et al., 2020)⁴⁾ 域も広がっており、地表では活発な噴気活動も確認できる。地下浅部に熱水系環境が発達し、多孔質な構造や間隙水を含む構造が低い密度として観測されたと考えられる。高温により脆性破壊の能力を失うことで、断層破壊の伝播に対して抑制的に働き得る構造が広がっていたのかもしれない。一方で、断層運動によって火山体内部の地殻構造に応力擾乱が与えられたことも意味しており、後述するように、その影響は地震後の地殻変動として現れた可能性がある。

3. 動的破壊シミュレーションから見る断層すべりの挙動

物性の違いによる力学的障壁が断層すべりの挙動（停止）に影響を与えた可能性が示唆される一方で、これとは異なる視点からも断層すべりの挙動を精査するため、阿蘇カルデラ内外の応力状態⁵⁾が断層すべりにどのように影響し得るかを検討することを目的として三次元動的破壊の数値シミュレーションが行われた。その結果、北側に分岐した断層においては、主応力軸の向きと南東に傾き下がる低角の断層面との関係で、破壊は抑制される特性を持っていたことが分かった。このことは、破壊の停止には、必ずしも破壊を抑制する物性不均質や低応力な場を必要としないことを意味する。一方、南側に分岐した断層においては、阿蘇カルデラ周辺の広域応力場と同じ条件下では破壊が進展し続けるものの、低応力場の存在により破壊の進展が抑制されることが示された。また、主応力軸の向きがほぼ東西であることは、北側に分岐した断層が右横ずれを、南側に分岐した断層が左横ずれを持つことの要因となっていることも示された。実際の断層破壊の停止では、低応力の状態や高温による脆性の喪失といった要因が複合的に絡み合っているものと推察されるが、こうした火山地域特有の環境が、断層破壊の進展のバリアとして機能した可能性がある。

4. 地震後の阿蘇カルデラ内の地殻変動とその原因

阿蘇カルデラ内では、地震後、長期にわたり沈降が継続した。先行研究の中には、こうした長期にわたる変動を火山性の活動として指摘しているものもあるが⁶⁾、先述のように、カルデラ内部に断層が貫入していることを考慮すると、その余効的挙動が与える影響の可能性もある。Munekane and Kobayashi (2025)²⁾は、広域の定常的なテクトニック変動、熊本地震の粘弾性緩和を除去した後、カルデラ内部の変動を、断層の余効すべり、火山性地殻変動（球状圧力源）、東北地震の余効変動に分離して同時推定を行い、これらの寄与を精査した。その結果、カルデラ内部に集中する沈降は、ほとんどが地震時に貫入した断層の余効すべりで説明が可能であることが明らかとなった。このことは、火山性地殻変動力源の寄与が小さいことも示唆する。さらに、長期的な変動傾向も示しておらず、熊本地震前後でも球状圧力源の体積変化の傾向に大きな変化がないことも分かった。余効すべりは時間とともに対数的に減衰しており、速度・状態依存摩擦則に整合した挙動を示す。さらに、南側に分岐した断層においては、減衰時間が他の断層より顕著に長い（約 1 年）ことも判明した。先述の通り、南側の分岐断層の終端部は熱水系に支配された弱い地殻構造であると考えられることから、すべりが継続しやすい特異な環境が、長い減衰時間に関係しているのかもしれない。

(小林 知勝)

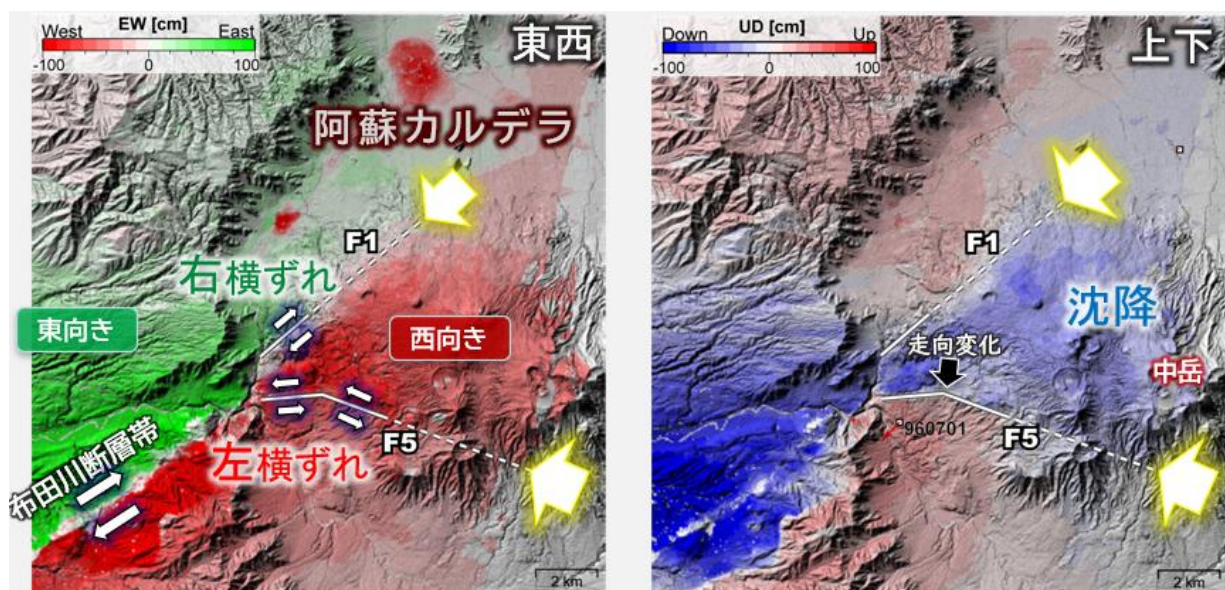
KOBAYASHI Tomokazu

謝辞

本研究で使⽤しただいち 2 号のデータは、地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループ（地震 WG）及びだいち 2 号に関する国土地理院と JAXA の間の協定に基づき提供されました。だいち 2 号の原初データの所有権は、JAXA にあります。

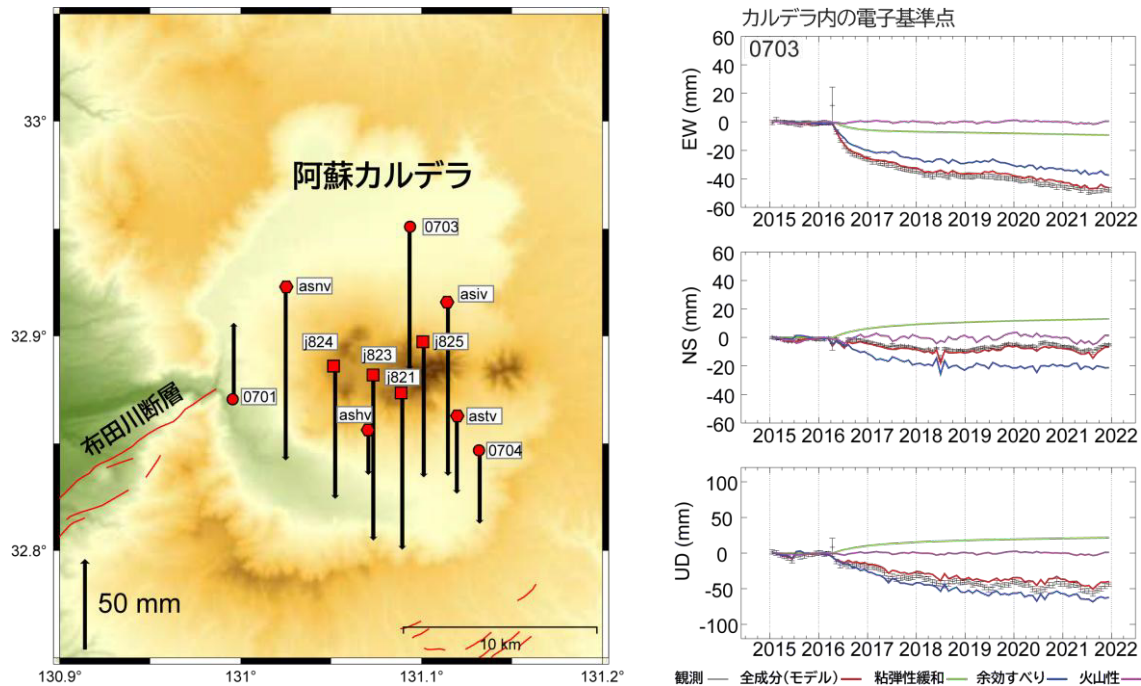
参考文献

- 1) Kobayashi et al. (2025), High-resolution image on terminus of fault rupture: relationship with volcanic hydrothermal structure, *Geophysical Journal International*, *Geophys. J. Int.*, **240**, 1196–1214.
- 2) Munekane, H., and T. Kobayashi (2025), Origin of subsidence within the Aso caldera after the 2016 Kumamoto earthquake: contributions of afterslip, viscoelastic deformation and volcanic deformation, *Geophys. J. Int.*, **240**, 1181–1195.
- 3) Huang et al. (2018) Shallow volcanic reservoirs and pathways beneath Aso caldera revealed using ambient seismic noise tomography, *Earth Planets Space*, **70**, 169.
- 4) Matsushima et al. (2020) Magmatic–hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, inferred from electrical resistivity structures, *Earth Planets Space*, **72**, 57.
- 5) Matsumoto et al. (2015) Spatial heterogeneities in tectonic stress in Kyushu, Japan and their relation to a major shear zone, *Earth Planets Space*, **67**, 172.
- 6) Yamada et al. (2019) Surface displacements of Aso volcano after the 2016 Kumamoto earthquake based on SAR interferometry: implications for dynamic triggering of earthquake–volcano interactions, *Geophys. J. Int.*, **218**, 755–761.



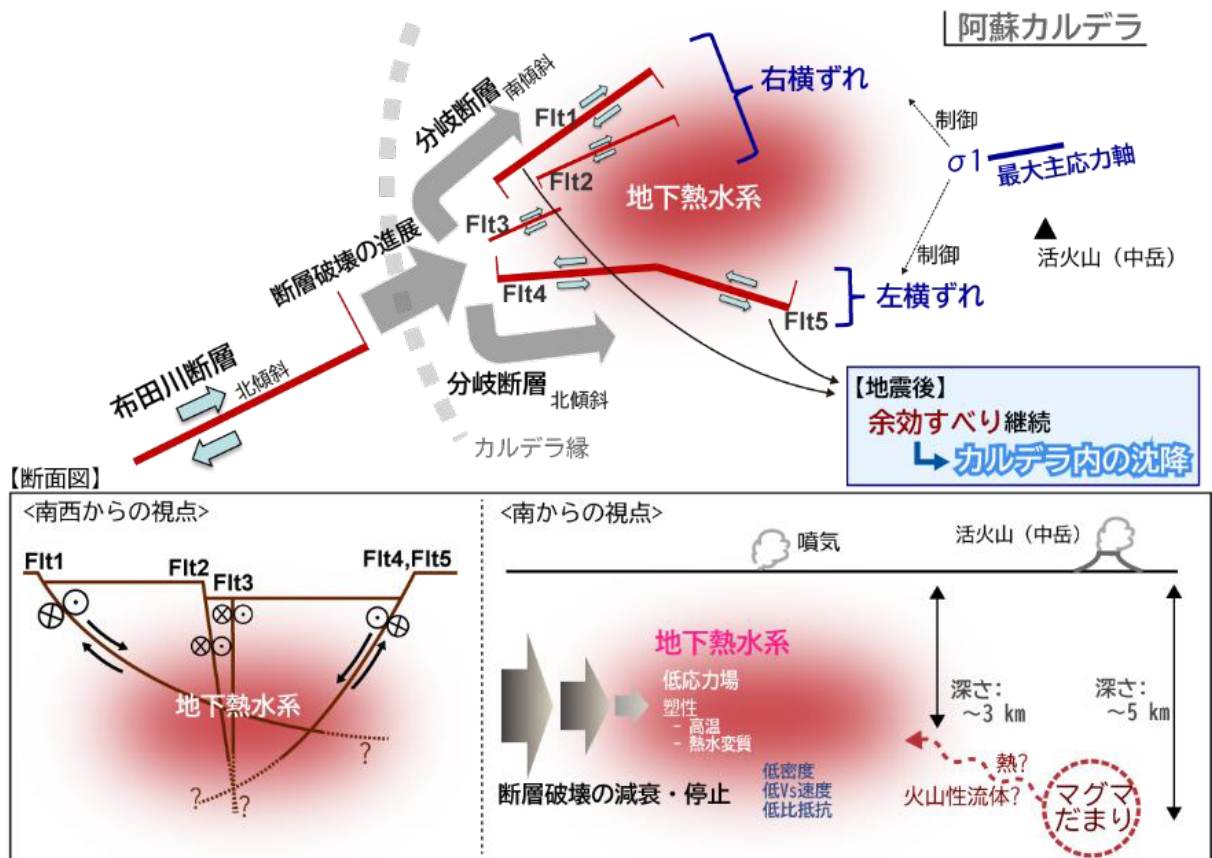
第 1 図 だいち 2 号衛星で捉えられた地震時の地殻変動。Kobayashi et al. (2025) の図を一部改変。

Fig. 1 Coseismic deformation detected by Daichi-2 SAR satellite. Partially modified from Kobayashi et al. (2025).



第 2 図 地震後の阿蘇カルデラ内の地殻変動。Munekane and Kobayashi (2025) の図を一部改変。

Fig. 2 Postseismic deformation within the Aso caldera. Partially modified from Munekane and Kobayashi (2025).



第 3 図 阿蘇カルデラに貫入した断層運動の模式図。Kobayashi et al. (2025) の図を一部改変。

Fig. 3 Schematic diagram showing fault motions that penetrated into the Aso caldera. Partially modified from Kobayashi et al. (2025).