

GNSS 観測による箱根火山 2019 年群発地震活動に伴う地殻変動

道家涼介^{*1}・原田昌武^{*1}・板寺一洋^{*1}・加藤照之^{*1}

Crustal deformation associated with the 2019 earthquake swarm activity of Hakone volcano observed by GNSS

by

Ryosuke DOKE^{*1}, Masatake HARADA^{*1}, Kazuhiro ITADERA^{*1} and Teruyuki KATO^{*1}

1. はじめに

神奈川県西部に位置する箱根火山では、2001 年以降、数年に一回の頻度で群発地震活動が発生し、その際、GNSS 観測では、山体膨張を示す地殻変動が観測されている。その変動源は、概ね深さ約 5 ~ 10 km 付近における茂木モデル (Mogi, 1958) で説明がなされている (原田ほか、2016)。また、一部のイベントでは茂木モデルに加えて、浅部クラックの開口により地殻変動の説明がなされている (代田ほか、2009; Kobayashi *et al.*, 2018; Harada *et al.*, 2018)。こうした活動は、箱根火山下のマグマ溜まり及び浅部熱水系の膨張を示唆しているものと考えられている。

箱根火山では、2019 年 3 月頃より地震活動の活発化が見られた。また、2019 年 5 月 18 日より、芦ノ湖周辺の地震活動に活発化が見られ、箱根火山では、翌 19 日までの 2 日間に 442 回の地震が観測された (温泉地学研究所による震源決定数、図 1)。同火山における顕著な群発地震活動は、2015 年の水蒸気噴火以降初めてのことであった。2019 年 3 月以降、GNSS 観測により、同火山を跨ぐ複数の基線で、山体膨張を示唆する基線長の伸びが観測されており、上記の地震活動以降も継続が認められた。本研究では、GNSS 観測結果から、箱根火山の 2019 年群発地震活動における地殻変動モデルの推定を試みた。このことは、同火山における 2015 年水蒸気噴火以降のマグマ-熱水系の状態や、群発地震活動との関係を理解する上で重要な情報であることから、ここに報告する。

2. 使用データと解析方法

図 2 に本研究で使用した GNSS 観測点を示す。国土地理院による GEONET 観測点に加え、温泉地学研究所が独自に設置している観測点 14 点と、気象庁よりデータ提供を受けた仙石原観測点 (J540) を使用した。な

お、温泉地学研究所が静岡県駿東郡小山町に設置している小山観測点については、周囲の観測点と比較して明らかに傾向が異なる変位を示したため、本研究では除外した。各観測点の日々の座標値は、Bernese ソフトウェア (Dach *et al.*, 2007) を用いて、道家ほか (2013) および Doke *et al.* (2018a) にて示した方法で求めた。なお、後述する地殻変動モデルの推定の際は、GEONET 観測点については、国土地理院が公開している日々の座標値 (F3 解) を使用した。

3. 時系列データ

図 3 に主な観測点間の基線長の時系列変化を示す。2019 年 3 月中旬より、各基線において山体の膨張を示唆する基線長の伸びが観測された。また、2019 年の活動の際の特筆すべき点としては、大涌谷観測点 (OWKD) の変位が顕著であったことが挙げられる。同観測点は 2015 年の活動後に増設された観測点で、平常時は南東方向へ年間約 2 cm で変位しているが、2019 年 3 月より変位方向が南西向きとなり、平常時の変位を取り除くと西向きに変化していることが伺える (図 4)。同観測点を含む基線 (例えば、図 3c) においては、2019 年 6 月以降、その変位速度が鈍化した。元の変位トレンドには戻っておらず、本稿執筆時において依然として変位が継続しているものと考えられる。

4. 地殻変動モデルの推定

各 GNSS 観測点で得られた地殻変動を説明するモデルの推定を試みた。2019 年 6 月以降、大涌谷観測点を含む基線 (例えば、図 3c) の変位に鈍化が認められることから、本稿では、同年 6 月 1 日までの GNSS 観測データを用いて、活動初期 (2019 年 2 月 19 日 ~ 28 日と 2019 年 5 月 23 日 ~ 6 月 1 日のそれぞれの平均値の差分) における地殻変動のモデル化を試みた。モデル

*1 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586
報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 51 巻, 1-9, 2019

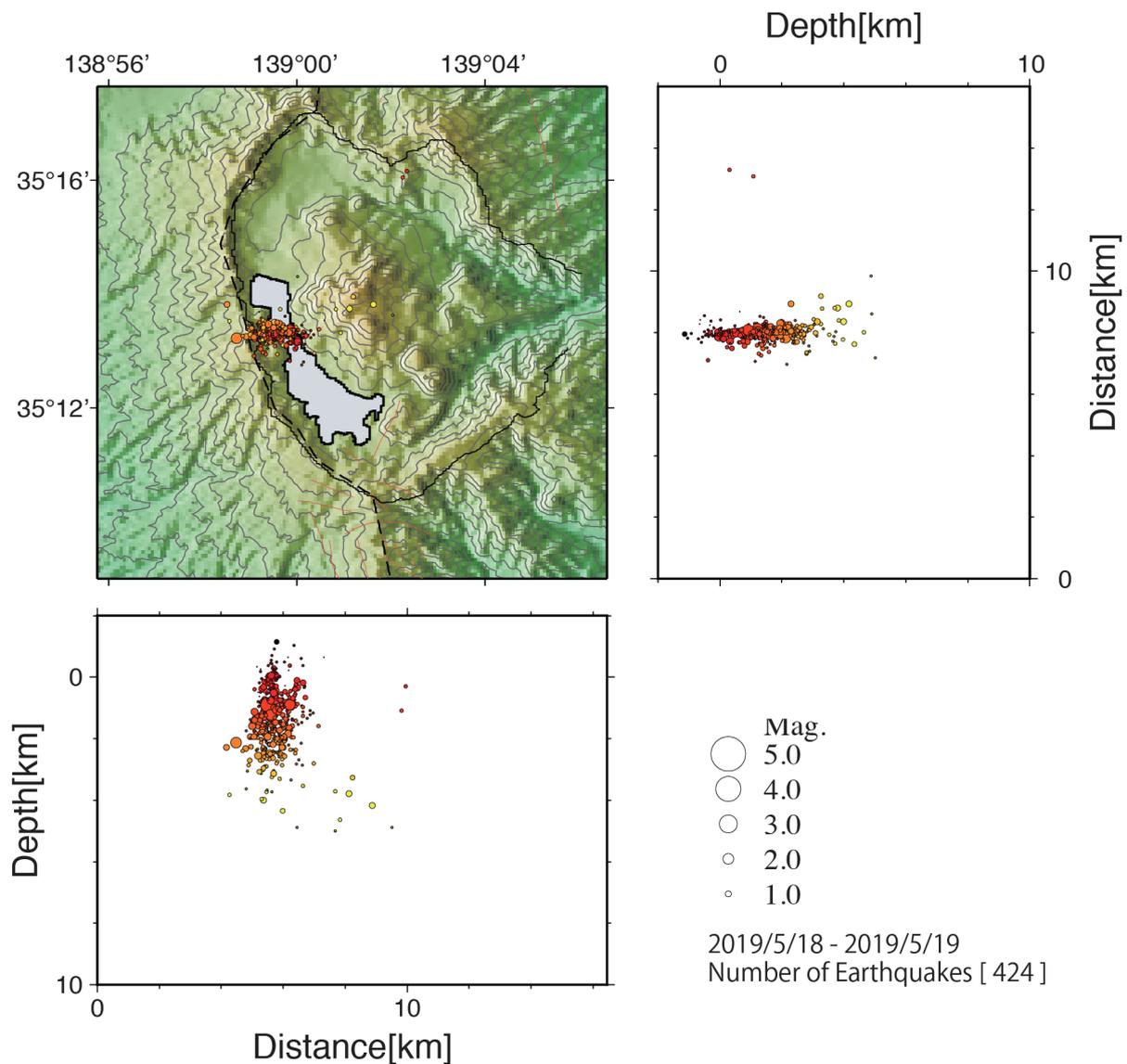


図1 箱根火山における2019年5月18～19日の震源分布図。

の計算には、気象研究所が開発した MaGCAP-V (Fukui *et al.*, 2013) を用いた。その際の固定点は、温泉地学研究所の曾我谷津観測点 (SOGA) とした。

解析結果の時系列グラフにおいて、箱根火山の山体を跨ぐ長基線の伸び (例えば、図 3a) に加え、上述の通り、大涌谷など中央火口丘付近の短基線の伸びの変位も顕著であった (例えば、図 3c)。このことは、地殻変動が単純な茂木モデルだけでは説明できないことを示唆しており、同火山の過去のイベント時にも推定された浅部の開口クラックの存在を示唆する。そこで、茂木モデルと開口クラック (Okada, 1985) の2つの変動源が混在するモデルを対象に、インバージョンによる推定を行った。解析の際、東西、南北、上下の3成分を使用し、重みは全て1とした。

得られたモデルのパラメーターを表1および表2に示す。各パラメーターは四捨五入による端数処理を行

い、緯度・経度は 10^{-4} 度 (約 10m)、標高および開口クラックの長さ・幅は 1m、走向・傾斜は 1度の精度で表中に示した。また、モデルによる地殻変動のシミュレーション結果を図5に示す。観測値とモデル値を比較すると、水平変位については、箱根火山の中央火口丘付近や外輪山周辺の観測点の変位をモデル値が良く説明する (図 5a)。一方で、足柄平野付近では、観測値の方の変位が大きく、モデル値では説明ができていない。その理由の一つとして、モデル化した期間が約3ヶ月と長く、長期的な地殻変動のトレンドが乗っている可能性が挙げられる。さらに長期間の地殻変動をモデル化する上では、このことは十分に考慮する必要がある、今後の課題である。また上下変位については、全体的に観測値の誤差が大きいものの、中央火口丘付近における隆起の傾向については、モデルにて説明ができていない (図 5b)。

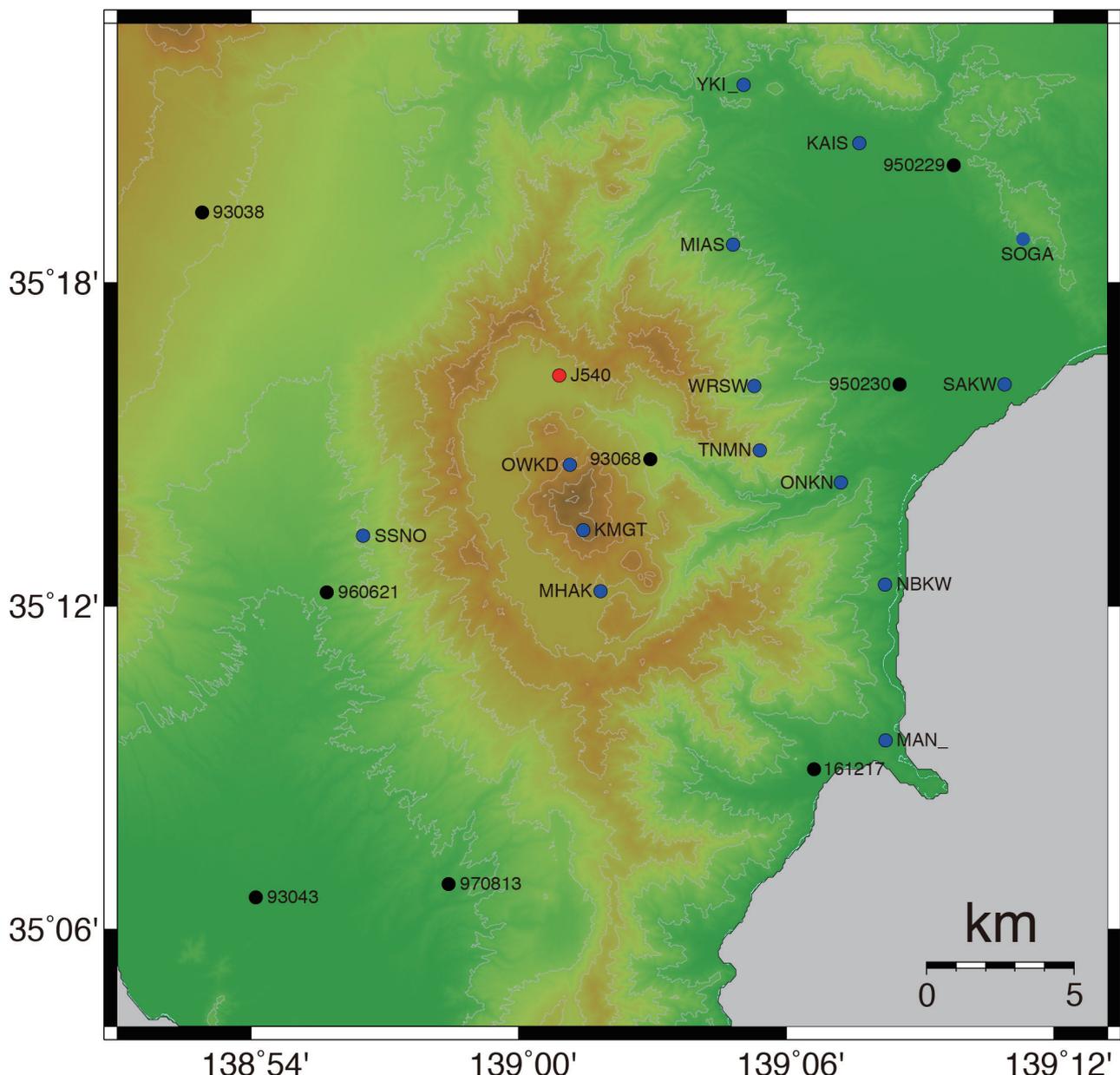


図2 観測点分布図。青丸が温泉地学研究所、赤丸が気象庁、黒丸が国土地理院による観測点を示す。

5. 考察

5.1. モデルと地下構造の比較

地殻変動から推定された茂木モデルの位置は、箱根火山中央火口丘の駒ヶ岳付近の直下深さ（海拔下）約 10 km 付近であった（表 1）。これは、過去の群発地震活動時に得られている茂木モデルの深さ（原田ほか、2016）と概ね調和的である。一方、2015 年の活動時に得られた茂木モデルは、深さ約 5 ~ 6.5 km と他の活動時に比べると浅い位置に推定されており（Kobayashi *et al.*, 2018 ; Harada *et al.*, 2018）、それに比べるとやや深い位置に推定された。

Yukutake *et al.* (2015) は、地震波トモグラフィー法により箱根火山下の地震波速度構造を推定した。それによれば、深さ 10 ~ 20 km 付近に深部のマグマ溜ま

りの存在が推定されている。本研究により推定された茂木モデルの位置は、このマグマ溜まりの上端付近に位置する。また、Yukutake *et al.* (2015) によれば、深さ 3 ~ 10 km には流体の存在が示唆されている。したがって、2019 年の活動に伴い観測された地殻変動は、箱根火山下のマグマ溜まりと流体（熱水もしくはガス）溜まりのいずれか、もしくはその両方における体積変化に起因しているものと考えられる。

また同様に、本研究により推定された開口クラックは、中央火口丘下の深さ（海拔下）約 0.4 ~ 3.3 km 付近に分布する（表 2）。これは、地震波速度構造（Yukutake *et al.*, 2015）に基づけば、流体が多く存在する深度から、より浅部への流体の貫入を示唆しているものと考えられる。

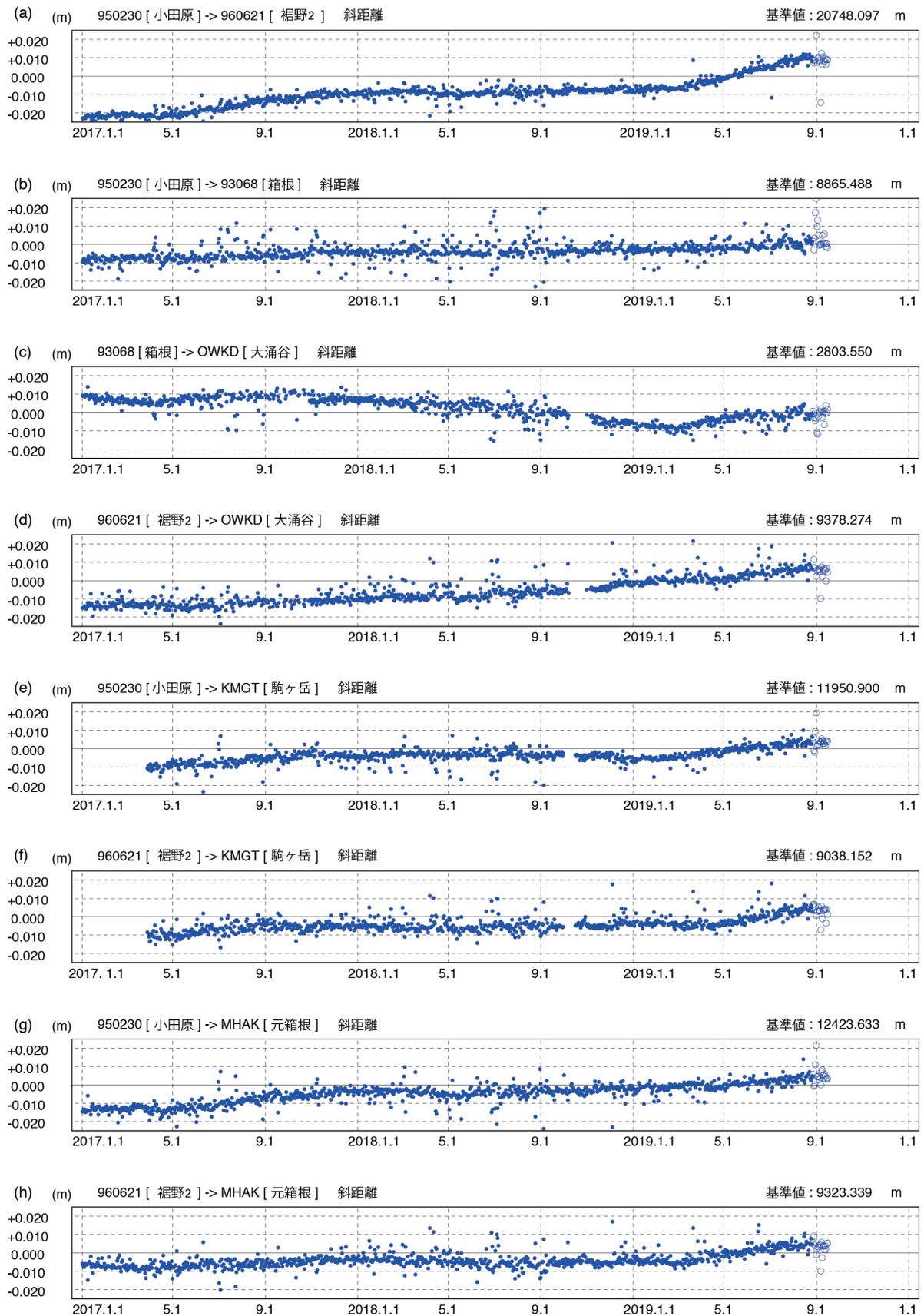


図3 主な観測点間の基線長(斜距離)変化グラフ。2017年1月1日～2019年9月15日間の変位を示す。基準値(グラフの縦軸の0の時の値)は、表示期間の平均値とした。各観測点の位置は、図2を参照。青丸は最終暦、白抜きの丸は超速報暦による解析結果を示す。

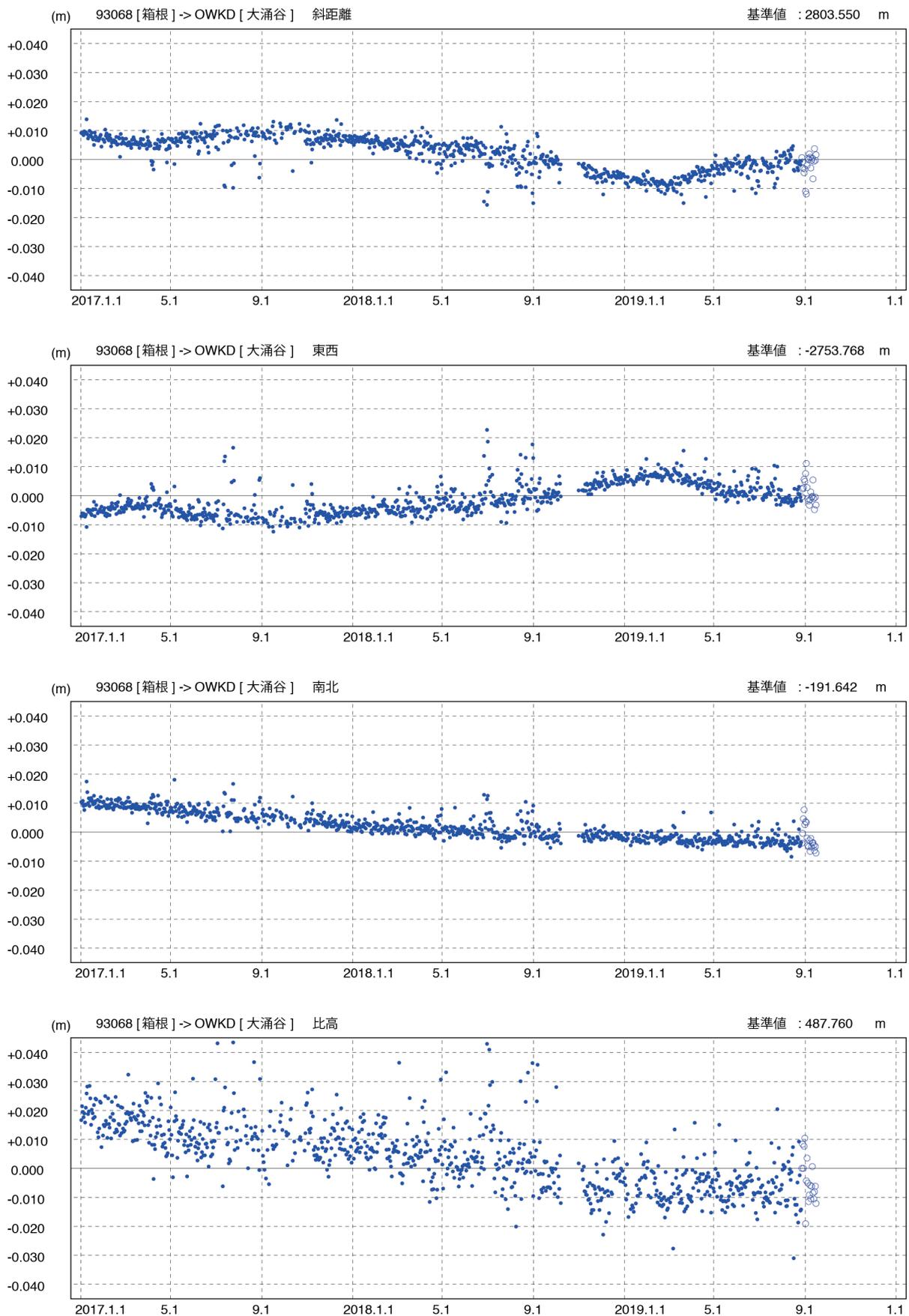


図4 GEONET 箱根観測点に対する大涌谷観測点の変位。上より順に、斜距離（正が伸張）、東西（正が東向き変位）、南北（正が北向き変位）、比高（正が上向き変位）を示す。基準値は表示期間の平均値。青丸は最終暦、白抜き丸は超速報暦による解析結果を示す。

表1 茂木モデルのパラメーター

経度[度]	緯度[度]	標高[m]	体積変化量[m ³]
139.0129	35.2180	-9596	2.4e+6

表2 開口クラックモデルのパラメーター

経度[度]	緯度[度]	標高[m]	走向[度]	長さ[m]	傾斜[度]	幅[m]	開口量[m]	開口体積[m ³]
139.0207	35.2421	-1866	165	3216	62	3292	0.054	5.8e+5

※開口クラックの座標値は、クラックの中央の位置の座標を示す。

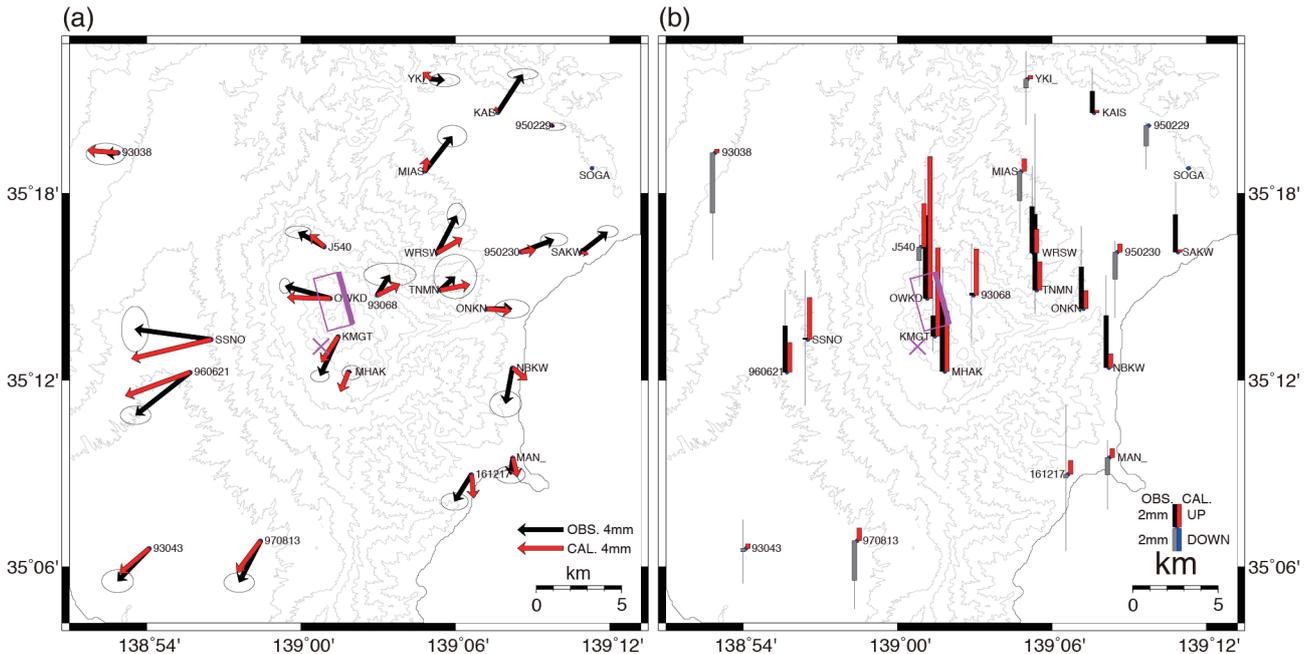


図5 活動初期における変位ベクトルおよびモデルによるシミュレーション結果。(a) 水平変位、(b) 上下変位。ベクトルは、2019年2月19日～28日と2019年5月23日～6月1日のそれぞれの平均値の差分で示している。ピンク色の×印が茂木モデル、矩形が開口クラックモデル（太線が上端）の位置を示す。各モデルのパラメーターについて表1及び表2を参照。

5.2. 干渉 SAR 解析において見られる変位との比較

箱根火山における2015年の活動時には、陸域観測技術衛星だいち2号（ALOS-2）によって取得されたSARデータの干渉解析により、大涌谷内の直径約200mの範囲において局所的な隆起が認められた（Kobayashi *et al.*, 2018; Doke *et al.*, 2018b）。この隆起は、同年5月7日に行われた緊急観測によって確認され、その後、継続的に観測された後、そのごく近傍で同年6月29日～7月1日に水蒸気噴火が発生した。2019年の活動の間においても、だいち2号による観測が実施され、筆者らはその観測データの解析を行なっているが、大涌谷や、今回地震活動が活発だった芦ノ湖周辺において、顕著な地表面変位は観測されなかった（図6a）。

また、2015年の活動時には、海拔より浅い位置でのクラックの開口に伴うと考えられる地表面変位が噴火前

後のペアでのSAR干渉解析で観測された（Doke *et al.*, 2018b）。2019年の活動においては、それよりも深い、深さ（海拔下）約0.4～3.3km付近の開口割れ目によってGNSSの変位を説明した（図5）。このGNSSの変位を説明する変動源モデルに対して、SAR干渉解析でどの程度の地表面変位が見積られるかをシミュレートした結果が図6bである。2019年の地殻変動により、SAR観測で期待される地表面変位はごく僅かであり、図6で示した観測条件においては、最も変位が大きいところでも、芦ノ湖の北岸付近での2cm弱である。これは、通常の差分干渉解析においては、変位とノイズを識別できる検出限界付近の値であり、干渉画像から有意な地表面変位を抽出することは困難である。このことから、GNSSの変位から推定された変動源モデルに対応する地表面変位が、SAR観測において捉えられていないこ

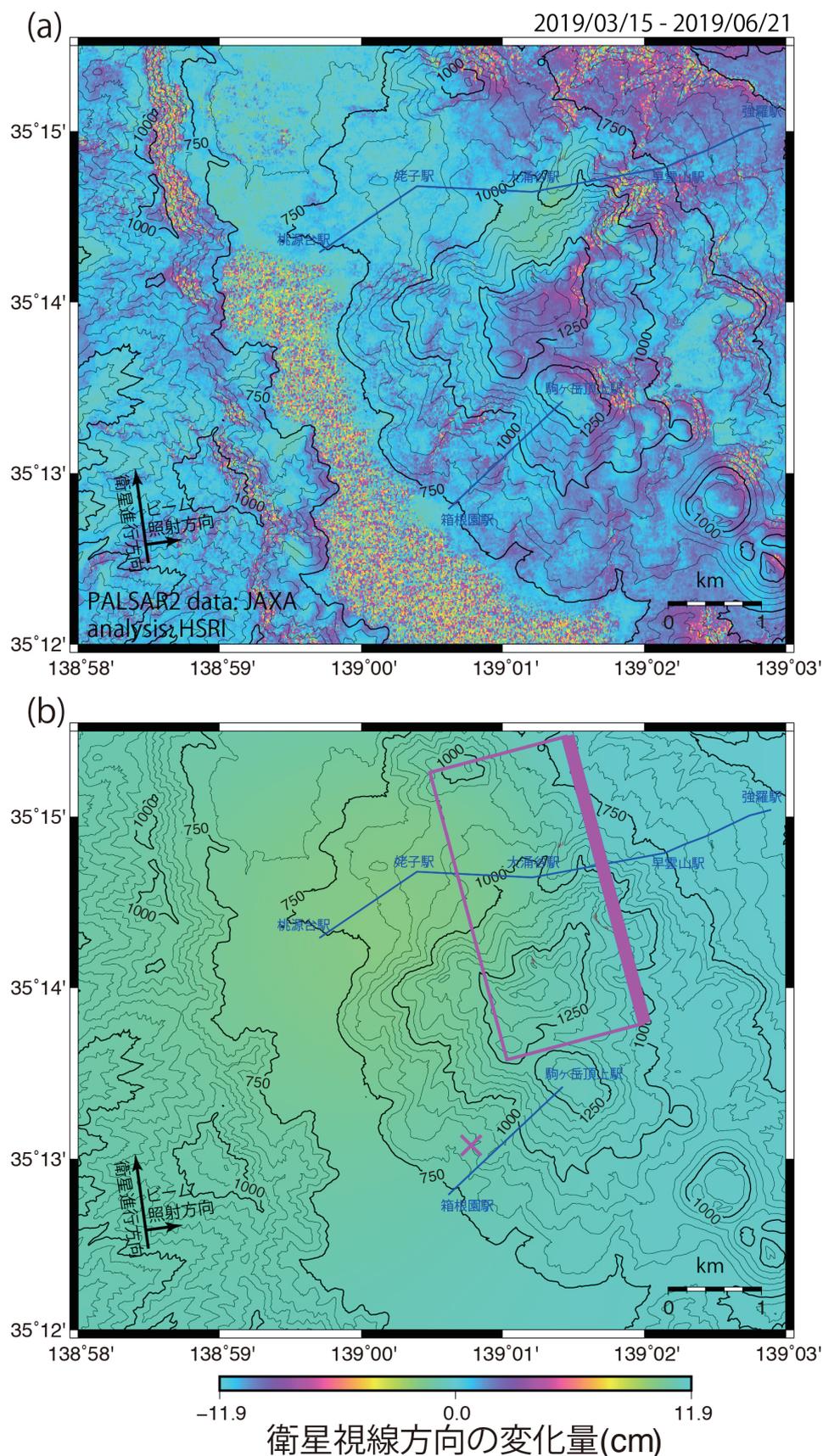


図6 ALOS-2/PALSAR-2 データの干渉解析結果。(a)2019年3月15日と6月21日の干渉ペア (Path126、オフナディア角 38.2°) による解析結果。(b) GNSS より得られた地殻変動源モデルによる SAR 干渉画像のシミュレーション結果。青線は箱根ロープウェイ、箱根ケーブルカー、駒ヶ岳ロープウェーを示す。ピンク色の×印が茂木モデル、矩形が開口クラックモデル (太線が上端) の位置を示す。各モデルのパラメーターについて表 1 及び表 2 を参照。

とに対しては、矛盾が生じることはない。したがって、2019年の活動では、2015年の活動で推定された海拔より浅い位置でのクラックの開口は生じておらず、地表付近の熱水系における活動は2015年時とは明らかに異なり、顕著な変動はないものと考えられる。

6. まとめ

箱根火山2019年群発地震活動に伴う地殻変動について、GNSS観測データよりモデル化を試みた。その結果、地殻変動は、深さ（海拔下）約10 kmの茂木モデルと、深さ（海拔下）約0.4～3.3 km付近の開口クラックにより説明できることが分かった。既存の地下構造に基づけば、茂木モデルは箱根火山下のマグマ溜まりや流体溜まりの膨張を、開口クラックは流体溜まりから浅部への流体の移動を見ているものと考えられる。また、SAR干渉解析においては顕著な変化が認められないことから、2015年の活動時に認められた海拔より浅い位置におけるクラックの開口はなく、地表付近における熱水系の活動については2015年時とは明らかに異なっており、顕著な変動はないものと考えられる。

謝辞

本研究では、国土地理院のGEONET観測点および気象庁の仙石原観測点のデータを使用しました。モデルの推定には、気象研究所が開発したMaGCAP-Vを使用しました。ALOS-2/PALSAR-2による観測データは火山噴火予知連絡会衛星解析グループを通してJAXAから提供されたものです。データの所有権はJAXAにあります。解析には、防災科学技術研究所の小澤拓氏が開発したSAR干渉解析ツール（RINC）および気象研究所の奥山哲氏が開発したrinc_guiを使用しました。2名の査読者のコメントにより本稿は改善されました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. (2007) Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Inst. Univ. Bern.
- 代田 寧・棚田俊收・丹保俊哉・伊東 博・原田昌武・萬年一剛 (2009) 2001年箱根群発地震活動に伴った傾斜変動と圧力源の時間変化に関する研究, 火山, 54, 223-234.
- 道家涼介・原田昌武・宮岡一樹・里村幹夫 (2013) 神奈川県を対象としたBerneseによるGPS統合解析表示システムの構築, 神奈川県温泉地学研究所報

告, 45, 63-70.

- Doke R., Harada M., Miyaoka K. (2018a) GNSS Observation and Monitoring of the Hakone Volcano and the 2015 Unrest. *Journal of Disaster Research*, 13:526-534. doi: 10.20965/jdr.2018.p0526
- Doke R., Harada M., Mannen K., Itadera K., Takenaka J. (2018b) InSAR analysis for detecting the route of hydrothermal fluid to the surface during the 2015 phreatic eruption of Hakone Volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, 70:63. doi: 10.1186/s40623-018-0834-4
- Fukui K., Ando S., Fujiwara K., Kitagawa S., Kokubo K., Onizawa S., Sakai T., Shimbori T., Takagi A., Yamamoto T., Yamasato H., Yamazaki A. (2013) MaGCAP-V: Windows-based software to analyze ground deformation and geomagnetic change in volcanic areas. IAVCEI 2013 Scientific Assembly July 20-24, Kagoshima, Japan, 2C-P8.
- 原田昌武・道家涼介・板寺一洋・里村幹夫 (2016) 箱根火山活動時のGNSS地殻変動とその圧力源モデルの推定. 日本地震学会講演予稿集2016年秋季大会, S03-P14.
- Harada M., Doke R., Mannen K., Itadera K., Satomura M. (2018) Temporal changes in inflation sources during the 2015 unrest and eruption of Hakone volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, 70:152. doi: 10.1186/s40623-018-0923-4
- Kobayashi T., Morishita Y., Munekane H. (2018) First detection of precursory ground inflation of a small phreatic eruption by InSAR. *Earth and Planetary Science Letters*, 491, 244-254. doi: 10.1016/J.EPSL.2018.03.041
- Mogi K. (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bulletin of Earthquake Research Institute*, 36, 99-134.
- Okada Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of Seismological Society of America*, 75, 1135-1154.
- Yukutake Y., Honda R., Harada M., Arai R., Matsubara M. (2015) A magma-hydrothermal system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 120, 3293-3308. doi:

