

# GNSS 観測データに基づく箱根火山周辺における 非定常地殻変動のパターン分類\*

田代惣一郎・道家涼介（弘前大学）・栗原亮（神奈川県温泉地学研究所）

## 1. はじめに

箱根火山はフィリピン海プレートの北端部に位置する活火山であり、しばしば群発地震が発生し、それに伴う非定常地殻変動が GNSS 観測によって捉えられている。従来の研究では、これらの非定常変動は、山体全体の変動成分は深部点圧力源で、局所的な成分は浅部開口割れ目を用いて説明されている<sup>1)</sup>。しかし、同一イベントでも推定されたパラメータにはばらつきがあり<sup>2)3)4)</sup>、モデルの不確実性まで含めて評価した研究は限られている（表 1）。さらに、近年の観測能力向上により、火山活動以外の要因が箱根周辺の地殻変動に寄与し得ることが示唆されている。例えば 2023 年イベントでは、火山中心部の変動に先行して足柄平野が東向きに変位したことが確認されており、この変動は平野地下の水平に近い逆断層のゆっくりとしたすべりである可能性が指摘されている<sup>5)</sup>。

本研究の目的は、近年得られた新たな知見に基づき過去の GNSS 観測データを見直し、箱根火山活動由来の変動とそれ以外に由来する変動を分類し、箱根火山周辺の非定常地殻変動メカニズムの理解に資することである。具体的には、箱根を東西に横断する 3 基線長時系列変化から非定常変動を抽出し、基線長変化の組合せに基づく変動パターン分類を実施した。さらに、得られた分類の妥当性を補強するため、変動パターンの代表例として 2015 年および 2019 年イベントを対象に、マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法により不確実性を考慮した変動源モデル推定を暫定的に実施した。

## 2. データ

### 2.1 基線長時系列（変動パターン分類）

パターン分類には国土地理院 GEONET の F5 解を用い、箱根火山を東西に横断する 3 観測点（950230：小田原，93068：箱根，960621：裾野<sup>2)</sup>）間の基線長を算出した。小田原-裾野 2 基線は山体全体の変動を、箱根-裾野 2 および箱根-小田原基線は中央火口丘周辺の局所的変動を捉える目的で設定した。

### 2.2 2015 年・2019 年イベント変動源モデル推定

2015 年および 2019 年イベントのモデル推定には、神奈川県温泉地学研究所（温地研）の定常解析によるデータセット<sup>6)</sup>を用いた。データは GEONET 観測点に加えて、気象庁および温地研の観測点を含む。解析には箱根周辺の観測点のみを用いた。モデル推定に用いた非定常変動期間は、温地研データセットにおける GEONET 小田原-裾野 2 基線に対して後述する 3 区間折

\* Pattern classification of transient crustal deformation around Hakone volcano based on GNSS observational data by Soichiro Tashiro, Ryosuke Doke, Ryo Kurihara

れ線モデル当てはめにより決定し、2015 年は 2015/4/5–2015/7/29、2019 年は 2019/2/24–2019/8/4 とした。

### 3. 手法

#### 3.1 基線長時系列（変動パターン分類）

各観測日ごとに二点間の距離を求め、その距離を基線長として扱った。本研究では、基線長そのものではなく、初めて観測された日の基線長から各観測日における基線長を引いた値を時系列データとして用いた。

#### 3.2 3 区間折れ線モデルによる非定常変動期間の推定

非定常変動の開始・終了日を客観的に決定するため、小田原–裾野 2 基線長時系列に対し「定常変動期間（変位速度 0）→非定常変動期間（速度≠0）→定常変動期間（速度 0）」の 3 区間折れ線モデルを当てはめた。時刻  $t$  に対するモデルは、開始日  $t_1$  と終了時刻  $t_2$  を用いて次式で与えられる。

$$y(t) = \begin{cases} c_1 + \varepsilon, & t \leq t_1 \\ c_1 + v(t - t_1) + \varepsilon, & t_1 < t \leq t_2 \\ c_1 + v(t_2 - t_1) + \varepsilon, & t > t_2 \end{cases}$$

ここで、 $c_1$  は変動前の基線長、 $v$  は非定常期間中の変位速度、 $\varepsilon$  は誤差である。 $t_1$ 、 $t_2$  の候補を総当たりで計算し、全候補の  $(c_1, v)$  を最小二乗法で求めて残差平方和を計算し、それが最小となる  $t_1$ 、 $t_2$  を非定常変動期間として採用した。

#### 3.3 2015 年・2019 年イベント変動源モデル推定

変動源モデル推定には、Python ベースのオープンソース解析フレームワーク VMOD<sup>7)</sup>を用いた。単一の深部点圧力源（茂木モデル）のみを仮定し、観測された変位速度ベクトルに対して MCMC 法で逆解析を行った。MCMC 法の設定は、ウォーカー数 10、総ステップ数 110 万、バーンイン 10 万とし、得られた事後総サンプル数は 100 万である。推定したモデルパラメータは位置  $(X_0, Y_0)$ 、深さ  $D$ 、体積変化量  $\Delta V$  である。

### 4. 結果

3 基線長時系列を図 1 に示す。基線は群発地震活動に伴って伸長する傾向が認められる。箱根–裾野 2 基線も群発地震活動に伴って伸長し、2001 年および 2015 年イベントで伸長量が顕著に大きく、小田原–裾野 2 基線の伸長量を超える。箱根–小田原基線は 2001 年および 2015 年イベントで短縮し、2006 年イベントでは伸長した。また、イベントごとに変位速度が異なり、2006 年・2008–2009 年・2017 年・2021 年・2023 年イベントは相対的に遅い傾向が示唆される。これらの特徴に基づき、以下の 3 つの変動パターンに分類した。

- ① 小田原–裾野 2（図 1 における赤の基線）と箱根–裾野 2（緑）が伸張し、箱根–小田原（青）が短縮するパターン（図 1 における青帯；2001 年、2015 年）
- ② 3 つすべての基線が伸張するパターン（緑帯；2006 年）
- ③ 小田原–裾野 2 と箱根–裾野 2 が伸張するパターン（赤帯；2008–2009 年、2013 年、2017 年、2019 年、2021 年、2023 年）

推定したそれぞれの非正常変動イベントの発生期間と変位速度は表 2 に示す。またモデル推定結果は表 3 および図 2・図 3 に示す。

表 1 主なイベントの変動源モデル

イベント年	文献	点圧力源		開口割れ目	
		深さ[km]	体積変化量[ $\times 10^6 \text{ m}^3$ ]	深さ[km]	開口量[m]
2001	原田ほか, 2024 <sup>2)</sup>	5.2	8.2	-	-
2015	Kobayashi et al. 2018 <sup>3)</sup>	4.8( $\pm 1.1$ )	3.5( $\pm 1.0$ )	0.6( $\pm 1.1$ )	0.10( $\pm 0.10$ )
	原田ほか, 2024 <sup>2)</sup>	5.4	5.5	-	-
2019	道家ほか, 2019 <sup>4)</sup>	-9.596	2.4	-1.866	0.054
	原田ほか, 2024 <sup>2)</sup>	10.2	8.5	-	-

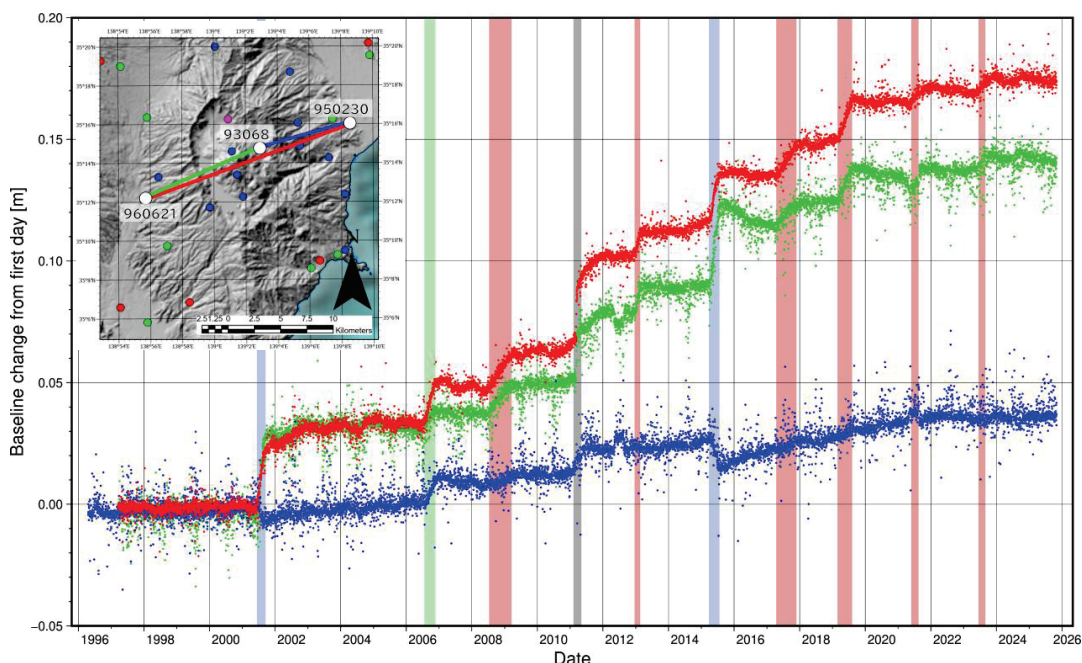


図 1 GEONET 箱根 (93068)・小田原 (950230)・裾野 2 (960621) 3 基線長の時系列変化  
灰色帯は 2011 年東北地方太平洋沖地震による変位

表 2 3 区間折れ線モデルによって推定した非正常変動期間と変位速度

開始	終了	変位速度 [mm/年]	変動 パターン	開始	終了	変位速度 [mm/年]	変動 パターン
2001/06/12	2001/09/17	96.1	①	2015/03/27	2015/07/22	63.3	①
2006/07/22	2006/11/22	51.5	②	2017/04/15	2017/11/26	20.7	③
2008/07/12	2009/03/09	20.4	③	2019/02/26	2019/08/08	36.8	③
2011/02/07	2011/05/05	140		2021/05/28	2021/08/17	24.5	③
2012/12/19	2013/02/13	59.3	③	2023/06/16	2023/08/30	23.9	③

表 3 2015 年・2019 年イベントのモデル推定結果の正規化誤差 (NRMSE)

イベント	NRMSE			
	東西	南北	上下	3 成分合計
2015	0.71	0.69	1.10	0.92
2019	0.81	0.73	1.07	0.99

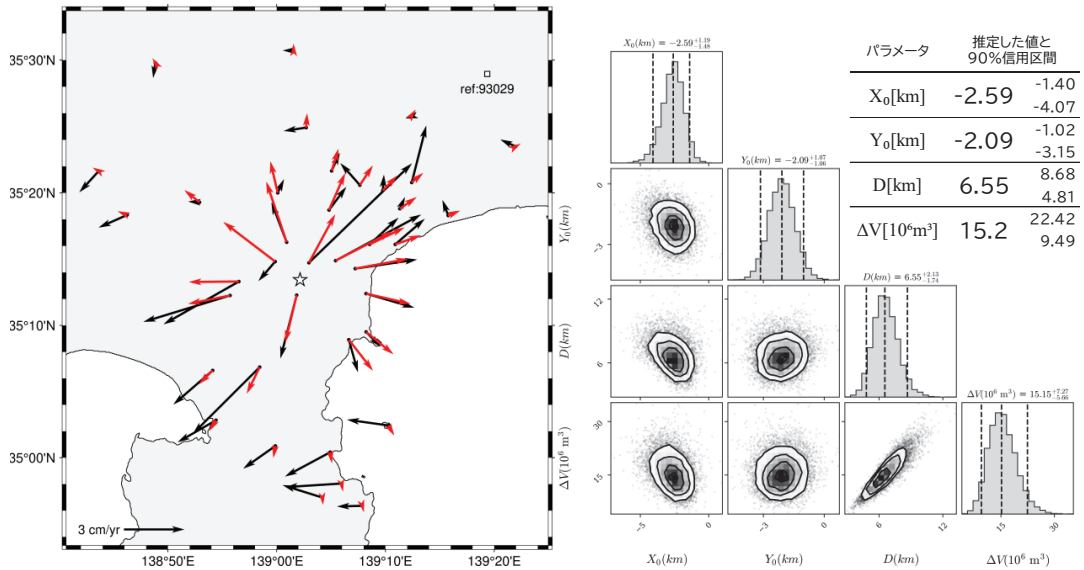


図2 2015年イベントのモデル推定結果

(左) 変位速度ベクトルおよびモデル計算結果 黒矢印は観測された変位速度ベクトル 赤矢印はモデルから計算した変位速度ベクトル 星は推定した点圧力源の位置  
 (右) モデルパラメータの事後確率分布 ヒストグラムの点線は中央値と 90%信用区間  
 (右上表) 推定されたモデルパラメータの中央値と 90%信用区間

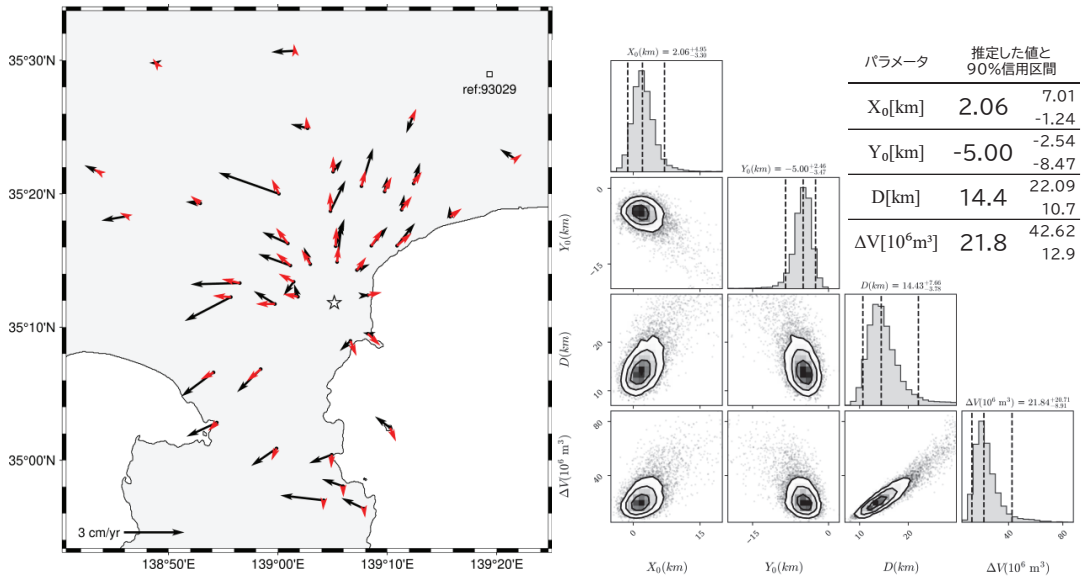


図3 2019年イベントのモデル推定結果

図の見方は図2と同様である

## 5. 議論

### 5.1 変動パターン分類

パターン①に関しては、顕著な群発地震活動など他の様々な観測項目でも非定常的な現象がみられた時期と一致しているため、火山活動に関連した変動である。小田原 - 裾野 2 基線が大きく伸張していることから、広域にはマグマ/流体だまりによる膨張する変動が見えていると考えられる。また小田原 - 箱根基線が短縮し、箱根 - 裾野 2 基線の伸長が小田原 - 裾野 2 より大きいことは、箱根観測点周辺の局所的な変動源によるものと考えられるため、パターン①は従来の研究通り、箱根火山活動による点圧力源と浅部開口割れ目により説明できると考えられる。パターン②に関しては、すべての基線長が伸張していることから、比較的広範に影響を与える箱根火山深部のマグマ/流体だまりの膨張を反映していると考え、これは点圧力源で説明できる可能性がある。

一方、パターン③は、小田原 - 裾野 2 と箱根 - 裾野 2 の伸張は山体全体が膨張していることを示唆するが、箱根 - 小田原に変化が見られないため、箱根火山東部が一体となって東に変位したものと考えた。このパターン③は、従来のモデルにおける点圧力源のような、箱根火山全体に変化をもたらす変動源によるものではなく、火山活動以外の変動源、例えば断層すべりのような、別の変動源が含まれるイベントである可能性がある。

### 5.2 2015 年・2019 年イベント変動源モデル推定とその残差

2015 年イベントの推定結果を図 2 に示す。点圧力源の位置は中央火口丘の海拔下 6.55 km 付近に推定された。2019 年イベントの推定結果は図 3 に示す。点圧力源の位置は中央火口丘のやや南東、海拔下 14.4 km に推定された。

推定された両イベントの点圧力源深さの事後確率分布が重ならないことが示された (図 4)。これは、2015 年と 2019 年で最も尤もらしい変動源深さが異なることを示唆し、基線長時系列変化に基づく変動パターン分類において両イベントを別パターンに分類したことと整合的であり、2019 年イベントを含むパターン③の変動については、断層すべり等の広域の変動源を候補に加え、モデル比較により妥当性を評価する必要がある。

一方で、本研究の推定深さは先行研究より相対的に深い傾向を示し、とくに浅部開口割れ目を同時に仮定した研究と比較した場合に差が大きい。本研究では暫定的に深部点圧力源のみでモデル化しているため、中央火口丘付近の局所の変位を十分に表現できず、その寄与が点圧力源のパラメータに吸収されることで、見かけ上、点圧力源が深めに推定され得る。残差の規格化指標 (NRMSE) でも、水平成分は両イベントで 1 未満に収まる一方、上下成分は両イベントで 1 を上回り (表 3)、点圧力源のみでは再現できない成分が残存していることを示す。これらは、両イベントにおいて浅部開口割れ目を含むモデル化が必要である可能性と整合的であり、特に 2015 年は噴火を伴う活動であったことから、浅部の熱水活動に起因する局所の変位の寄与が増大した可能性が考えられ、浅部開口割れ目を含むモデル化の必要性は両イベントで想定されるとともに、2015 年でより高い可能性がある。よって本研究のモデル推定は変動パターン分類を補強する位置づけにとどめ、深さの絶対的解釈には留意が必要である。

今後は、浅部開口割れ目を含むモデルとも比較して先行研究との深さの差の要因を検討し、パターン③では断層すべり等の広域源モデルも候補に加え、その妥当性を評価する必要がある。

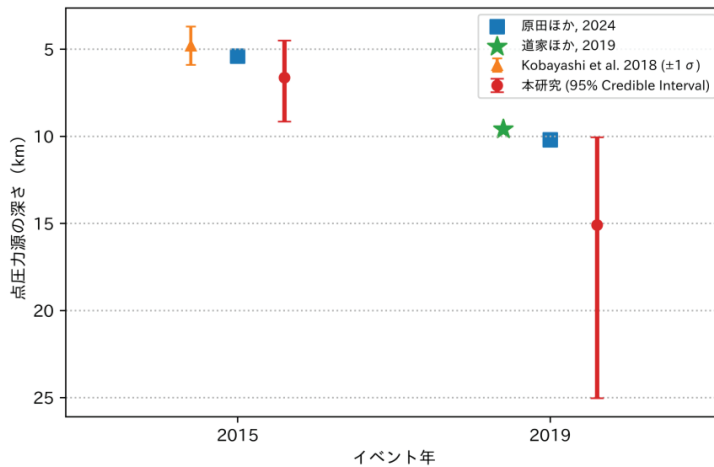


図4 先行研究と本研究で推定された15年・19年イベントの点圧力源の深さ

## 6. 結論

本研究は、箱根を東西に横断するGNSS基線長時系列変化から、箱根火山周辺の地殻変動には、少なくとも3つのパターンが存在することを明らかにした。うち1つは、変位のパターンから深部の点圧力源と異なる断層すべり等の広域的な変動源が必要である可能性が示唆される。またMCMC法による15年・19年モデル推定結果は、推定深さの事後確率分布が重ならず、不確実性を考慮しても両イベントで代表的な変動源が異なる可能性が示唆された。

## 7. 引用文献

- 1) 国土地理院 (2002) : 箱根山とその周辺地域の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, 第80号, p34-p40.
- 2) 原田昌武, 吉田明夫 (2024) : 箱根火山活動における膨張源の深さ —火山活動監視の視点から—, 地学雑誌, 第133巻, 第2号, p.91-100.
- 3) Tomokazu Kobayashi, Yu Morishita, Hiroshi Munekane (2018) : First detection of precursory ground inflation of a small phreatic eruption by InSAR, *Earth and Planetary Science Letters*, 491, p244-p254.
- 4) 道家涼介, 原田昌武, 板寺一洋, 加藤照之 (2019) : 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, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第51巻, p1-p9.
- 5) 道家涼介, 本多亮, 萬年一剛 (2024) : 稠密GNSS観測より推定される箱根火山周辺の非定常地殻変動と新たな活動像, 日本地球惑星科学連合2024年大会, MTT37-04.
- 6) 道家涼介, 原田昌武, 板寺一洋, 加藤照之, 中村康弘 (2020) : 温泉地学研究所における新たなGNSS解析戦略について, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第52巻, p.63-68.
- 7) Mario Angarita, Ronni Grapenthin, Scott Henderson, Michael Christoffersen, Kyle Anderson (2024) : Versatile modeling of deformation (VMOD) inversion framework: Application to 20 years of observations at Westdahl Volcano and Fisher Caldera, Alaska, US, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25(4), e2023GC011341.