# 箱根火山を対象とした歪時間変化グラフの作成

# 道家涼介\*1

# Drawing of strain time series graphs for the Hakone Volcano by

Ryosuke DOKE<sup>\*1</sup>

#### 1. はじめに

神奈川県西部に位置する箱根火山では、数年に一回の 頻度で群発地震活動が発生し、その際に、同火山の膨張 を示唆する地殻変動が GPS により捉えられている(例 えば、原田ほか、2013、2015)。これまでの複数回の 群発地震活動における観測の結果、山体膨張を示唆す る GPS 基線の伸びは、約半月~1ヶ月程度、群発地震 に先行して生じていることが分かっている。しかしなが ら、GPS 解析結果に生じるバラつきのため、基線の伸び が有意であるかどうかリアルタイムで判断するのは困難 であり、判断できるまでに半月~1ヶ月程度を要する。 それを解決する方法として、箱根火山を取り囲む複数基 線のデータをノイズレベルで規格化し、足し合わせるこ とによるスタッキング法が提案されている(宮岡ほか、 2014)。このスタッキング法では、単一の基線における 時系列データのみの場合に比べ、S/N 比が向上し、例え ば、山体膨張による基線の伸びの立ち上がりを早期に検 出できる利点がある。

一方、スタッキング法は、データの規格化を図っては いるものの、基本的にはデータを足し合わせただけなの で、異常の早期検出という面では有効な手法と言えるが、 その変化が持つ物理学的な意味については評価するのが 難しい。例えば、スタッキング波形において伸びが認め られた場合、それが全体の膨張を示すのか、特定の方向 への伸びを見ているのか、もしくは特定の観測点におけ る異常を見ているのかどうかを判断するためには、個々 の基線における時系列データに立ち返る必要がある。ま た、球状圧力源の膨張に起因する変化であれば、全ての 基線で伸びが観測されるが、ダイク貫入などに起因する 変化が生じた場合は、必ずしも全ての基線が伸びになる とは限らない。スタッキングでは、想定した変動源に対 する各基線の極性(値の正負)をそろえる必要があり、 想定していない変動源に対しては、変動を検出できない 可能性がある。

以上のような課題の一部を解決するため、歪の時間変 化を自動的に計算し図化する仕組みを構築した。平面内 における歪は、x 軸方向(東西方向)、y 軸方向(南北方向) に沿った変形を表すε<sub>xx</sub>、ε<sub>yy</sub>と、軸と垂直な方向の変形 を表す剪断歪ε<sub>xy</sub>で記載される。この歪の3成分を求め るためには、3基線における基線長変化が必要となる。 また、面積歪はε<sub>xx</sub>、ε<sub>yy</sub>を足し合わせることで記載する ことが可能である。これにより、ダイク貫入や断層変位 のような、異方性がある地殻変動が生じた場合でもその 変形を記載でき、なお且つ、スタッキング法では見出し づらかった、物理的に意味がある値を得ることができる。 本報告は、歪の時間変化の算出・グラフ作成の自動化に 関して、その概要を報告するものである。なお、歪の定 義などについては、関連する文献を参照されたい(例え ば、鶯谷, 2002)。

# 2. 使用データ

使用した観測点の位置を図1に示す。箱根火山にお ける歪変化を求めるために、必ずしも図1に示した全 ての観測点のデータを使用するわけではないが、余裕 をみてやや広域の観測点を抽出した。また、参照点と して対象地域からやや離れた GEONET 牧丘観測点(図 1の範囲外、北緯 35.747°東経 138.695°)も使用して いる。温泉地学研究所および気象庁の観測点について は、Bernese ソフトウェア(Dach *et al.*, 2007)により ルーチン的に日々の座標値を推定しており(道家ほか、 2013;Doke *et al.*, 2018a)、その解析結果を使用した。 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 解および R3 解)を使用した。な お、神奈川県及びその周辺の GEONET 観測点について

<sup>\*1</sup> 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 50 巻,45-52,2018



図1 使用した GPS 観測点。白丸は国土地理院の GEONET 観測点、青丸は温泉地学研究所、緑丸は気象庁による観測 点を示す。図中の赤線は活断層(中田・今泉編、2002)を示す。

は、温泉地学研究所の観測点のデータと合わせて、独自 に解析を行っているものの、静岡県や山梨県に位置する 一部の観測点については未実施であることから、全ての GEONET 観測点について、F3 解および R3 解を使用す ることとした。独自の解析結果と、F3 解・R3 解との間 のギャップについては、独自解析結果における GEONET 小田原観測点(950230)の座標値が F3 解・R3 解の座 標値と一致するように補正を行った。

その後、各観測点において GEONET 牧丘観測点 (950264)を基準とした南北、東西(および上下)の 各成分における距離を算出し、当該日と前後5日間を 含む計 11 日の移動平均を求め、基準日(後述)との差 を、日々の変位のデータとした。なお、移動平均をとる 際、直近の数日においては、当該日より後の観測日のデ ータがないことから、最大の 11 日間よりも少ない日数 で平均値が算出されることとなる。これについては、今 後検討し、改善していく必要があると思われるが、本稿 執筆時においては、データが追加され次第、日々再計算 することで値を更新することとしている。

#### 3. 歪の算出

歪の計算は、道家ほか(2014)にて報告した手法にて



図2 歪の値を抽出した地点(青丸)。背景は、2013年群発地震活動時に生じた歪変化を示す(道家ほか、2014を改変)。

行った。詳細な説明はそちらに譲るが、同手法では、各 GPS 観測点における変位を、Nearest Neighbor アルゴ リズムによって、緯度・経度方向に 0.05°× 0.05°のグ リッド点に補間し、グリッド点を結ぶ三角網を構築した 後、三角形ごとに歪を計算する。そして、計算された歪 は、三角形の重心の位置の値とする。

歪の算出に当たっては、プログラム上において、任意 の日付を基準日として選ぶことができるようにしてい る。ただし、各観測点の変位を反映するためには、基準 日と各日の双方において観測データが存在する必要があ る。そのため、古い日付を基準日として設定した場合、 近年増設した観測点のデータが反映されないという問題 がある。科学的な研究を目的とするのであれば、全期間 でデータがある観測点のみを選択し等品質のデータで歪 変化を見るのがよいが、火山における地殻変動をモニタ リングする目的においては、直近に増設された、より多 くの観測点のデータを使用するべきである。また、観測 網の強化により、今後、観測点が追加される可能性があ ることに加え、これまで継続して観測されたデータが、 今後も継続して観測される保証もない。したがって、こ こでは直近1年間に十分な観測データがある観測点を 対象とすることとし、基準日は1年前の日付を、その 都度抽出することとした。すなわち、現時点から1年 前を基準日として、各日の変位から歪を算出することと した。

# 4. 歪時系列の図化

歪の時間変化の図化に当たっては、算出される各地点 の歪のうち、箱根火山における 2013 年群発地震活動時 に正の面積歪変化が認められた地点(図 2 に示した青 ○の地点)の歪の平均値をとってグラフ化した(図 3)。 なお、個々の地点ごとに算出された歪の値についてはバ ラつきが大きく、観測点におけるデータの欠測や、観測 点増設の影響を受けるが(図 4)、複数地点の値を平均 化することにより、値のバラつきは相殺され、軽減さ れていることが分かる。また、2015 年末に追加された 観測点(大涌谷観測点:OWKD、図 1)の影響で、いく つかの地点の歪の時間変化にステップが認められる(図 4)。この様なステップは、隣接する地点間でトレード オフの関係にあるため、平均化した結果(図 3)におい



図3 歪の時間変化グラフの出力結果(5年間)。上から順に、東西方向の歪、南北方向の歪、剪断歪、面積歪の時間 変化を示す。表示期間は、2013年5月1日~2018年4月30日で、歪算出の際の基準日は、2017年5月1日。





図4 地点ごとの歪の時間変化グラフ。上から順に、東西方向の歪、南北方向の歪、剪断歪、面積歪の時間変化を示す。 表示期間および基準日は、図3と同様である。地点番号の1~8は、図2に示した各地点の番号と対応する。



を示す。歪算出の際の基準日は、2014年1月1日。

# 5. 長期間における歪の時間変化

以上により、定常的に箱根火山の歪を監視する仕組み を構築することができたが、本手法の妥当性を確認する ため、2001年まで遡り歪の時間変化の算出を行った(図 5)。その際、計算の基準日は、便宜的に 2014 年 1 月 1日とした。箱根火山では、2001年、2006年、2008-2009年、2011年、2013年および2015年に群発地 震活動が発生しているが、それぞれの活動時において、 山体の膨張を示唆する、東西、南北方向の伸長と、面積 の拡大が認められる。また、剪断歪については、定常時 は、概ね一定のレートで変化していることが分かる。こ れは定常的な地殻変動によるものと考えられる。また、 2011年に剪断歪が大きく変化しているのは、東北地方 太平洋沖地震による影響である。箱根火山の群発地震に 対応した剪断歪の変化はわずかながら認められ、特に 2001年、2015年の活動時には、面積歪の変化に対応 して、剪断歪のレートも上がっている様に見える(図5)。 両イベントでは、箱根火山の浅部でクラックの開口が推 定されていることから(代田ほか、2009; Honda et al., 2018; Doke et al., 2018b)、剪断歪の変化は、それら による地殻変動を捉えた可能性がある。また、図5中 で歪の値がステップ状に変化する箇所が認められるが、 これは、いくつかの観測点の増設や欠測の影響を受けた もので、平均化処理によっても取り除けていないものが あるためと考えられる。今後、原初データを精査するこ とにより補正を行う必要があるだろう。

# 6. まとめと今後の課題

GPS の変位から、歪の時間変化を計算し、時系列グラ フの図化までを自動で行う仕組みを構築した。これによ り、単一基線長やスタッキング波形では得られない、変 形の方向やその大きさの時間変化を、歪という物理学的 に意味のある値で記載し、地殻変動をモニターすること が可能となった。一方、異常の早期検出という観点に関 しては、現時点では十分な検討を行っていないため、依 然として課題が残る。例えば、歪の時間変化に対して、 閾値を設定するなどが今後の展開として考えられる。閾 値を検討する上では、過去に取得されたデータの精査が 必要である。加えて、変位を算出する際にとる移動平均 の期間、グラフの表示期間なども、異常をより検出しや すくするよう、今後検討を行う必要があるだろう。また、 気象庁が湯河原町鍛冶屋に設置している体積ひずみ計の 観測結果との比較なども今後の検討課題として挙げられ る。

#### 謝辞

解析には、国土地理院が提供する GEONET 観測点の 日々の座標値のデータを使用しました。また、仙石原観 測点(J540)のデータについては、気象庁とのデータ 交換協定に基づきご提供いただきました。本稿は2名 の査読者のコメントにより改善されました。ここに記し て感謝します。

### 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.
- 道家涼介・原田昌武・里村幹夫(2014)空間的に均質 な歪場の推定手法 - Nearest Neighbor 法による 試み - , 神奈川県温泉地学研究所報告, 46, 21-26.
- Doke R, Harada M, Miyaoka K (2018a) GNSS Observation and Monitoring of the Hakone Volcano and the 2015 Unrest. J Disaster Res 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
- 原田昌武・行竹洋平・宮岡一樹・本多 亮・板寺一洋・ 道家涼介・里村幹夫・吉田明夫(2013)箱根火山 における群発地震活動の分類,神奈川県温泉地学 研究所報告,45,1-8.
- 原田昌武・板寺一洋・本多 亮・行竹洋平・道家涼介 (2015)2015 年箱根火山活動に伴う地震活動と地 殻変動の特徴(速報),神奈川県温泉地学研究所報 告,47,1-10.

Honda R, Yukutake Y, Morita Y, Sakai S, Itadera K,

Kokubo K (2018) Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model. Earth, Planets Space, 70:117. doi: 10.1186/s40623-018-0887-4

- 宮岡一樹・原田昌武・道家涼介(2014)スタッキング 法を用いた GNSS 地殻変動監視,温地研報告,46, 1-8.
- 中田 高・今泉俊文編, 2002, 活断層詳細デジタル マップ, 東京大学出版会, 60p. 1Map, 2DVD-ROM.
- 鷺谷 威(2002)明治期以降の歪み集中帯,大竹政和・ 平 朝彦・太田陽子編『日本海東縁の活断層と地 震テクトニクス』,東京大学出版会,133-150.