

平成 30 年 4 月 10 日現在

機関番号：82116

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17797

研究課題名(和文) SAR衛星観測と数値計算による水蒸気爆発型噴火の前駆的地殻変動機構に関する研究

研究課題名(英文) Study on precursory ground deformation of a phreatic eruption by SAR observation and numerical simulation

研究代表者

小林 知勝 (Kobayashi, Tomokazu)

国土地理院(地理地殻活動研究センター)・その他部局等・主任研究官

研究者番号：40447991

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：衛星SARデータの解析により、2015年箱根山・大涌谷で発生した小規模な水蒸気噴火に先行する膨張性地殻変動を捉えた。地殻変動は、遅くとも噴火の約半年前から大涌谷内の直径200m程度の狭い範囲で進行し、噴火の約2ヶ月前から加速した。その後、変動域のごく近傍で噴火が開始した。こうした観測結果を基に、局所的地殻変動が発生する機構について、箱根山の深部マグマ供給システムを考慮して地熱環境の時空間発展を数値計算により調べたところ、大涌谷浅部における火道閉塞が、地下浅部に熱や圧力を蓄積し、局所的な前駆的地殻変動を生じる要因となり得ることを示した。

研究成果の概要(英文)： I have successfully detected precursory inflational ground deformation for the 2015 Hakone volcano eruption by conducting SAR data analysis. The ground inflation proceeded in the early stage; since the end of 2014 at the latest, and then, it accelerated two months before the eruption. Finally the eruption occurred nearby the most deformed part. To further discuss the mechanism of the local deformation, I computed the spatial distribution and the time evolution on pressure and temperature within the volcano body, with taking the magma supply system of the Hakone volcano into account. The numerical simulation showed that a mineralogical conduit sealing could accumulate heat and pressure under the geothermal area, resulting in the local ground deformation prior to the eruption.

研究分野：測地学

キーワード：前駆的地殻変動 水蒸気噴火 箱根・大涌谷 干渉SAR時系列解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 地下水にマグマが直接的もしくは間接的に関与することで発生すると考えられている水蒸気噴火は、多様な火山噴火現象がある中で、決して大規模なものではない。しかし、その発生頻度は他の噴火タイプと比べると高く、ひとたび発生すれば大きな人的・社会的被害をもたらす。近年、国内では御嶽山や箱根山・大涌谷で水蒸気噴火が発生しており、噴火災害軽減の観点からも、火山研究においてその理解を深化すべき重要なテーマであった。

(2) 水蒸気噴火の前には、地下浅部の熱水等の液相部が膨張し、過剰圧が周囲岩体の強度を超えると地殻が破壊され噴火に至ると考えられる。そのため、地下の圧力状態の変化に伴い、地殻変動が観測されることが期待される。地殻変動は地下の圧力状態を示す良い指標であり、膨張源の空間分布や圧力状態を定量的に把握できる。このようなパラメータが観測から得られれば、浅部熱水系の発達を制御する物理パラメータの議論が可能となり、噴火準備過程のメカニズムの理解を進展させることができると期待される。しかし、そのシグナルは空間的に局所的であり、規模も小さいと考えられることから、従来の観測手段では検出が困難であった。こうしたデータの乏しさから、水蒸気噴火の発生メカニズムの解明は限定的な段階にとどまっているのが現状であった。

(3) このような背景の下、近年、合成開口レーダー (SAR) 衛星の利用環境や解析技術の飛躍的向上を受け、従来困難であった水蒸気噴火に前駆する局所的な地殻変動が詳細に捉えられる場合が出てきた。2015年箱根山・大涌谷の火山活動では、水蒸気噴火発生前に地殻変動が進行したことが干渉 SAR 解析により検出された。さらに、数 mm/年の計測精度で微小な変動も捉えられる技術も近年高度化されてきており、このようなデータ解析の高度化に伴う地殻変動の検出力向上を受けて申請者は、SAR 衛星データから得られる地殻変動の規模や空間分布等に基づき、熱水環境下にある浅部地殻の膨張を制御するパラメータの定量的検証を行い、水蒸気噴火の準備過程のメカニズムに関する物理的理解を進展させられるのではないかとこの着想に至り、本研究計画を立案した。

2. 研究の目的

(1) SAR 衛星データの利用により、水蒸気噴火発生に先行する地殻変動を検出できる場合も出てきた昨今の観測技術・環境の高度化の中、その前駆的変動がどのような物理的要因によってコントロールされて進展していくかの詳細はよくわかっていない。重要な役割を果たしていると考えられる変動の機構は、地下深部から供給される火山性流体・熱の供給に伴う浅部地殻内の熱水等の膨張であろう。どれくらいの熱や流体が供給される

と観測で期待される変形が起こるのか、両者の膨張機構はどれくらいの寄与をもって働き地殻変動として現れるのかを定量的に議論できれば、水蒸気噴火の準備過程の理解を深化できると期待できる。

そこで本研究では、地下の熱水系の発達を数値シミュレーションにより計算し、その結果と SAR 衛星による観測データを統合的に分析することで、水蒸気噴火の前兆的地殻変動のメカニズムを理解する (図 1)。浅部の熱水環境下で熱や水の供給条件等を様々に変えて地殻変動を計算することで、地下での膨張を制御する物理パラメータや発生機構を定量的に検討し明らかにすることを目指した。本研究では、パラメータ等の推定をより具体的なものとするため、実際に小規模の水蒸気噴火が発生しそれに先んじて地殻変動が検出された 2015 年の箱根山・大涌谷の火山活動を研究対象とした。

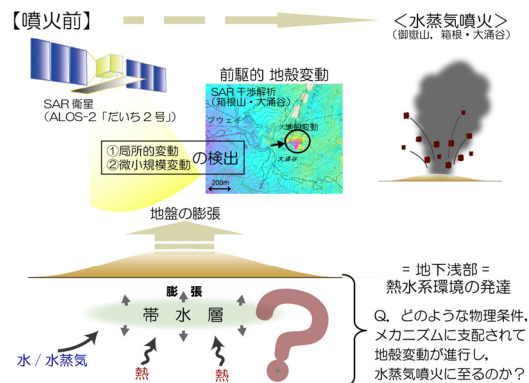


図 1: 本研究の概要。

3. 研究の方法

(1) SAR 衛星データを用いた地殻変動解析

2015年4月末以降、箱根山では地震活動の活発化や山体の膨張が観測された (図 2、図 3)。GNSS により検出された地殻変動データからは駒ヶ岳直下の球状圧力源の膨張と駒ヶ岳直下から大涌谷周辺に伸びるダイク開口が推定された (図 2)。しかし、大涌谷内の局所的な領域で小規模の地殻変動が進行した場合、GNSS のような測地観測ではその変動を捉えることは困難である。そこで、数 m から十数 m の高い空間分解能で地殻変動を捉えられる干渉 SAR 解析を適用した。解析には、ALOS-2 衛星及び RADARSAT-2 衛星を用いた。各衛星が箱根山を撮像した期間を考慮して (図 3)、4 月末の活動異常以降の地殻変動観測には ALOS-2 衛星を、2014 年 9 月から 2015 年 3 月までの期間には RADARSAT-2 衛星を用いた。ALOS-2 は L バンド帯のマイクロ波を用いることから、非都市域においても通常の干渉処理で地殻変動を捉えることが可能である。一方、RADARSAT-2 は、波長の短い C バンド帯のマイクロ波であり、通常の干渉処理では、非都市域において有意な地殻変動を検出するのが一般的に難しい。そこで本研究では、Phase Linking 法を適用した位相最適化処理

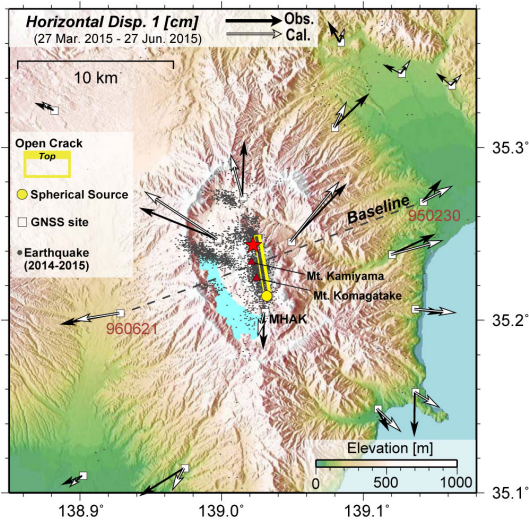


図2：箱根山・大涌谷の位置とGNSS観測により捉えられた2015年火山活動に伴う地殻変動。黄色の丸と四角は、推定された球状変動源と開口クラックを示す (Kobayashi et al., 2018)。

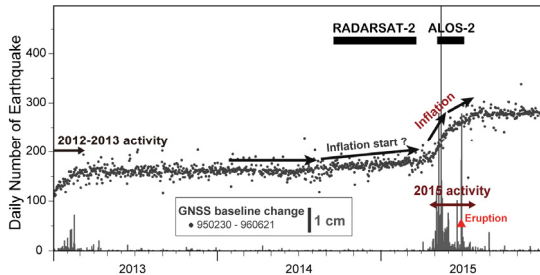


図3：GNSS観測点間距離変化と本研究で使用了る SAR データの観測期間 (Kobayashi et al., 2018)。

を行うことで、SAR 本来の空間分解能を維持したまま位相精度の高い変動観測を行えるように工夫を施した。

(2) 数値計算による熱水環境の時空間発展：

地下浅部の熱水系への熱/火山性流体の供給条件等を変えた数値シミュレーションにより、地下深部からの熱や水の貫入に伴う浅部熱水系環境における間隙流体圧分布や温度分布を得る。シミュレーションでは、地殻内の空隙率・浸透率等のパラメータを与えて地殻浅部の熱水系環境を設定する。計算にはアメリカ地質調査所が公開するソフトウェア「HYDROTHERM」を使用した。GNSSデータによる地殻変動データから推定した圧力源 (マグマ溜りとダイク) 位置 (図2) を考慮したモデルを構築した。南北に走るダイク及びダイク北端上部から大涌谷直下浅部につながる高浸透率の領域を設定し、その南端下部から深部マグマから上昇してきた流体 (ここではソフトウェアの制限からH<sub>2</sub>Oのみを扱う) を供給させた。本研究では、幾つかの先行研究において指摘されている火道閉塞の考え (硫黄等の鉱物の析出により火道内の浸透率が低下する

ことで閉塞する) を基に、火道閉塞が局所的な圧力増加に寄与した可能性を数値計算で調べた。そのために、大涌谷直下浅部につながる高浸透率の領域の上部に低浸透率のキャップ領域を設定した。

さらに、この数値計算から得られた浅部の熱/圧力状態を入力データとして、弾性変形と熱変形を取り扱う機能を備えた3次元有限要素解析ソフトウェア「3D-σ」を用いた地殻変動計算を実施した。

4. 研究成果

(1) SAR による地殻変動解析

2015年4月末から開始した活動異常から噴火に至るまでの期間における地殻変動を調べるために、ALOS-2 衛星データを用いた干渉 SAR 解析を実施した。その結果、2015年5月上旬以降、大涌谷で地盤が膨張する地表変位が進行していることが示された (図4)。6月中旬には、地盤変動は約 30cm に達した。変動域は直径約 200m のサイズで、噴火に至るまでそのサイズに大きな変化はない。しかし、最大変位の場所は、変動中心域から変動域の南端領域にシフトした。注目すべきは、噴火は最大変位が見られた変動域南端で発生し

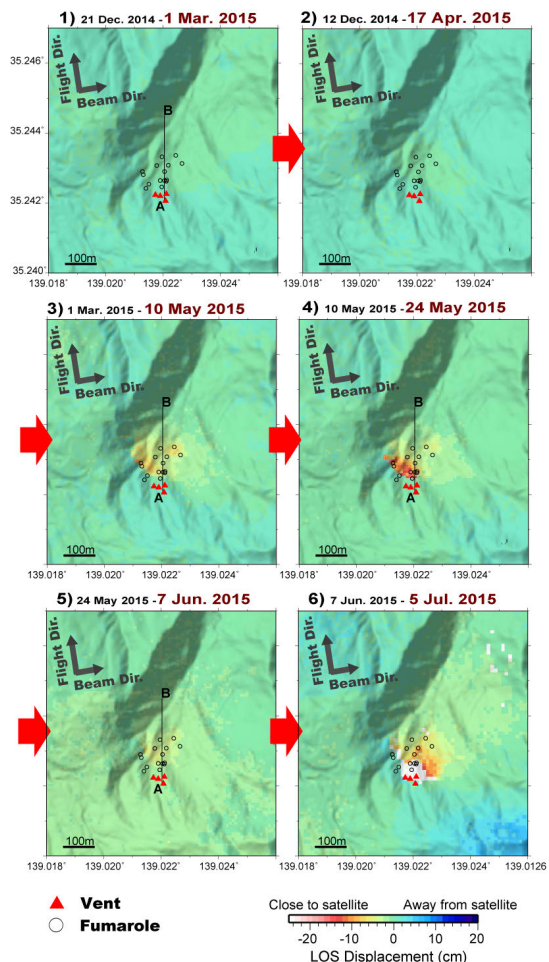


図4：ALOS-2 衛星データによる干渉 SAR 解析で得られた地殻変動の時間発展。暖色は衛星に近づく膨張性の変動を示す。三角印は噴火口を示す (Kobayashi et al., 2018)。

たことである。水蒸気噴火の準備過程においては、地下浅部の圧力増加に伴い地殻変動の進行が予想されてきたが、SAR 解析によりおそらく初めて前駆的地殻変動を捉えた事例である。

ALOS-2 衛星の解析では、4 月末の活動異常前には顕著な変動は見られなかったが、それ以前に大涌谷で地殻変動が進行していなかったかどうかを、RADARSAT-2 衛星による解析からさらに詳しく調べた。その結果、活動異常が認識される数ヶ月前から、既然大涌谷の地盤が膨張性的変動をしていることがわかった。2014 年 9 月から 2015 年 3 月までの地表変位速度を調べると、約 5mm/月の速度で膨張性的変動が進行していた (図 5)。驚くべきことは、その変動域の位置と空間サイズが、ALOS-2 衛星で捉えられた噴火前 2 ヶ月間に検出されたものとほぼ同じであることであった (図 6)。変動は時間とともに発展していくものの、その位置とサイズに大きな変化はない (図 6)。円盤状の変動源 (Fialko et al. (2001) の Penny-shaped crack モデル) を仮定してモデル計算をしたところ、変動域直下約 150m の深さでの約 0.7MPa の増圧 (1330m<sup>3</sup> の体積増加に相当) で観測量が説明できた。

RADARSAT-2 と ALOS-2 衛星データの解析から得られた変動域内の地点 (図 6: P、Q 点) の地表変位の時間発展を見ると、活動異常が顕著になる前は数 mm/月のほぼ一定速度で地表変位が進行していたが、4 月末の活動異常を境に、噴火に向けて変位が加速していることがわかった (図 7)。

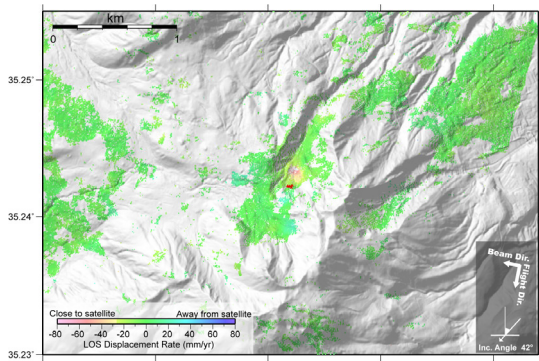


図 5 : RADARSAT-2 衛星データによる干渉 SAR 時系列解析で得られた 2014 年 9 月から 2015 年 3 月までの地表変位速度。暖色は衛星に近づく膨張性的変動を示す (Kobayashi et al., 2018)。

## (2) 数値計算による圧力・温度変化解析

大涌谷直下に火道閉塞に対応する低浸透率域を設定し、駒ヶ岳直下深部から流体・熱を供給する数値計算を実施した (図 8)。数値計算により、閉塞部周辺に局所的に圧力増加領域が生成されており、局所的な地殻変動が進行し得る条件が形成されることが示された (図 9)。熱と圧力の時間発展について調べたところ (図 10)、熱の蓄積が開始するに

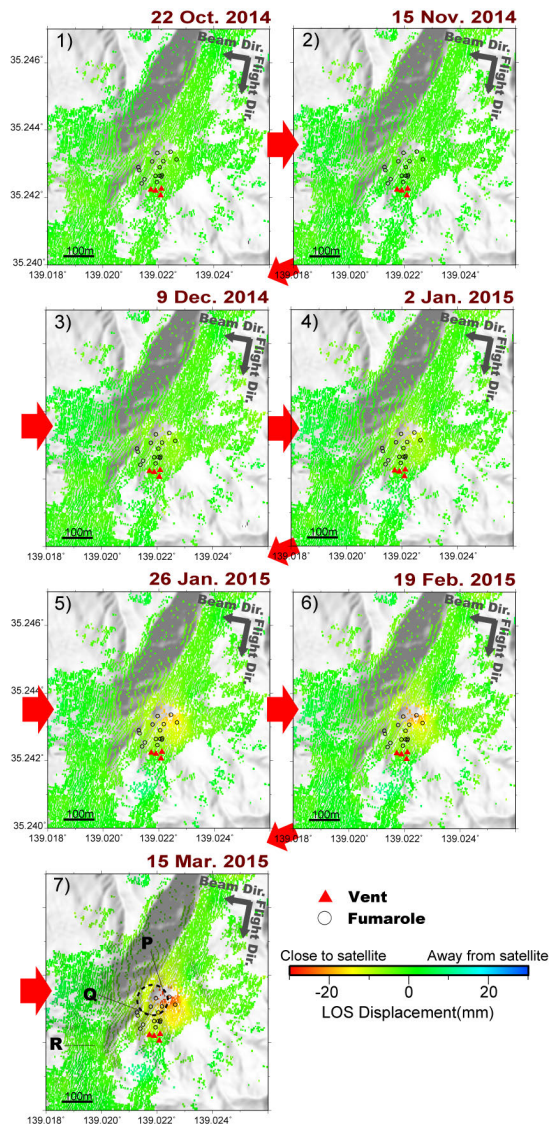


図 6 : RADARSAT-2 衛星データによる干渉 SAR 時系列解析で得られた 2014 年 9 月から 2015 年 3 月までの地表変位の時間発展 (Kobayashi et al., 2018)。

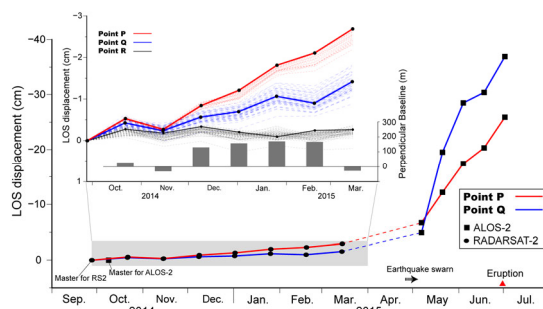


図 7 : SAR 解析から得られた噴火前に進行した地表変位の時間発展 (Kobayashi et al., 2018)。

は、深部の流体・熱供給が開始して約 2 年かかる一方で、圧力は深部からの供給が始まると大涌谷直下でも数日で圧力増加が見られる。2014 年後半から 2015 年 4 月までの期間では、深部からの流体供給量が小さく圧力増加はほとんど見られないが、温度上昇は顕著

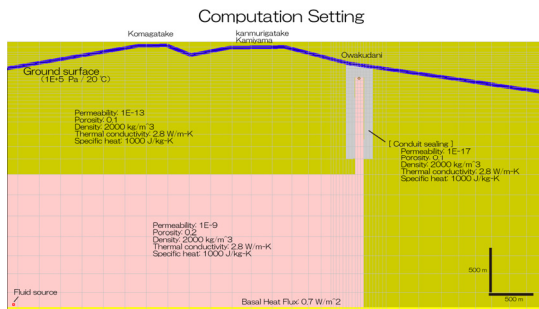


図 8：地下深部マグマからの流体注入による箱根山地下の地熱環境の数値計算の設定。大涌谷直下のごく浅部に低浸透率の火道閉塞を導入したモデル。

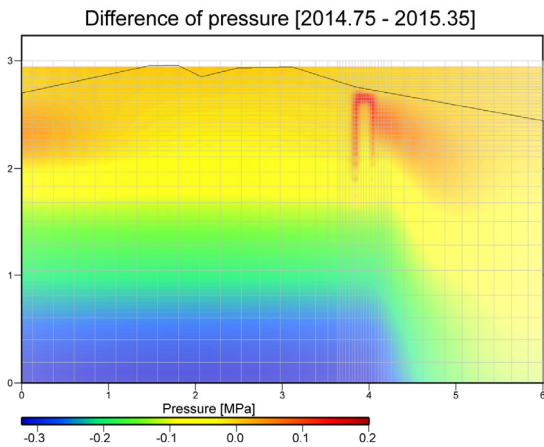


図 9：2014 年後半から 2015 年 4 月にかけての圧力増加分布。大涌谷直下の火道閉塞部に局所化した圧力増加が認められる。

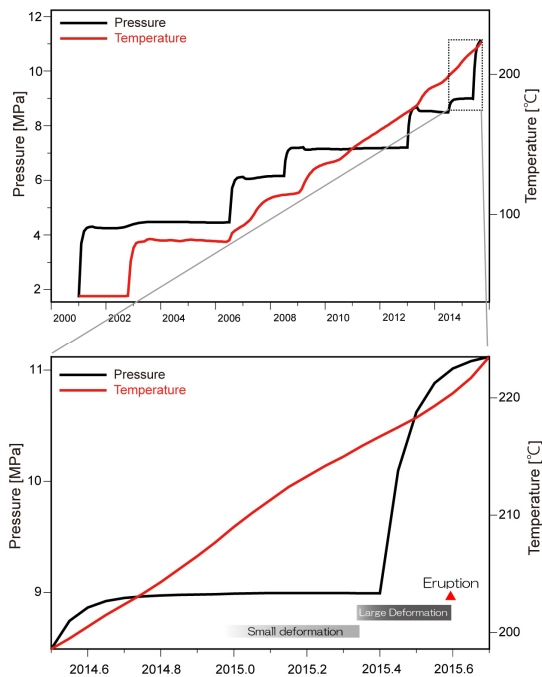


図 10：火道閉塞部における圧力（黒線）及び温度（赤線）の時間発展。（上段）2001 年以降。（下段）2014 年後半以降。

に確認できる。活動異常が顕在化するまでに見られた微小な変動は、熱変形の寄与が大きいことが示唆される。この数値計算から得られた浅部の温度変化を入力データとして、3次元有限要素解析により地表変位を計算した。泥に相当する媒質を浅部に組み入れて構造の不均質を考慮したモデルを作成した（図 11）。数値計算から得られた  $10^{\circ}\text{C}$  の温度上昇を、深さ 150m に位置する 100m 四方のセルに与えて熱変形による地殻の変形を計算すると最大約 3cm の変位が生じた（図 12）。このように、初期のゆっくりした変動は、熱変形により説明することが可能である。一方、4 月末以降は深部からの供給増に伴いほぼ時間遅れ無しで圧力が大きく増加していることから、圧力増加が地殻変動の要因として大きく寄与していると考えられる。

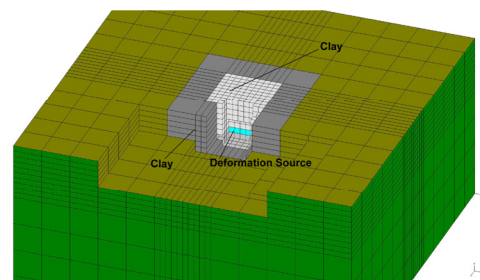


図 11：3次元有限要素モデル。

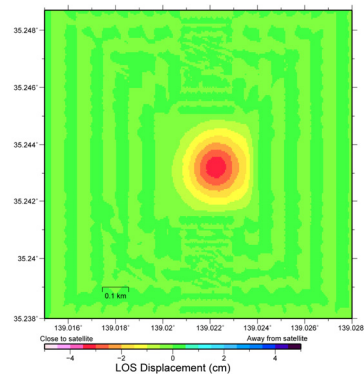


図 12：数値計算で得られた温度変化を用いて 3次元有限要素法により計算した地表変位。

以上のように、SAR データの解析により、水蒸気噴火に前駆する局所地殻変動の詳細な空間分布とその時間発展をとらえることができた。噴火の準備過程における地下の圧力変化の把握に SAR 観測が重要な役割を果たし得ることを示している。また、火道閉塞の状態を考慮することで、地下浅部に熱や圧力が蓄積し、局所的な地殻変動が生じ得ることを数値計算により示した。本研究で得られた知見の概念図を図 13 に示す。

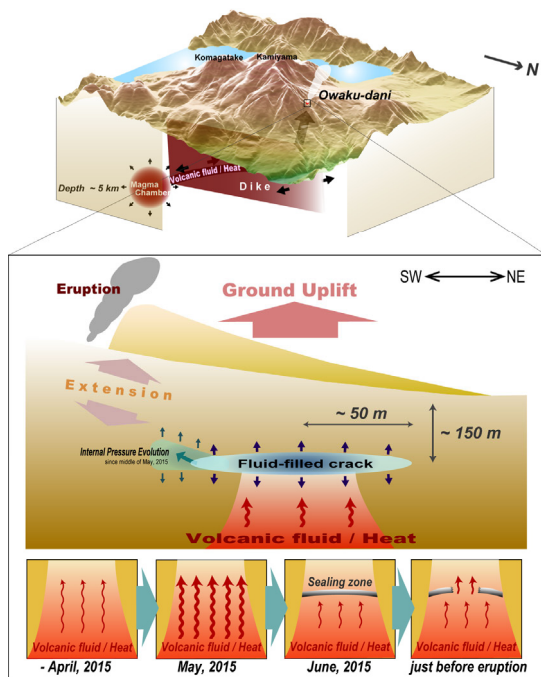


図 13 : SAR 解析及び数値計算から考察した 2015 年箱根山・大涌谷の水蒸気噴火に前駆した地殻変動の発生機構の概念図 (Kobayashi et al., 2018)。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① T. Kobayashi, Y. Morishita, and H. Munekane, First detection of precursory ground inflation of a small phreatic eruption by InSAR, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 491, 244-254, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.03.041> 査読有.
- ② 小林知勝, SAR 衛星観測と数値計算による水蒸気爆発型噴火の前駆的地殻変動機構に関する研究 (第 2 年次), 国土地理院調査研究年 (H29 年度), 2018 (印刷中) 査読無.
- ③ 小林知勝, SAR 衛星観測と数値計算による水蒸気爆発型噴火の前駆的地殻変動機構に関する研究 (第 1 年次), 国土地理院調査研究年 (H28 年度), 132-134, 2017 査読無.

[学会発表] (計 6 件)

- ① 小林知勝, SAR 観測により検出される局所的な火山性地殻変動と簡単な数値計算による考察, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張メッセ (千葉県・千葉市), 2018 年 5 月 23 日.
- ② T. Kobayashi and Y. Morishita, InSAR-detected Local Ground Inflation Prior to Small Phreatic Eruption, 2017 American Geophysical Union Fall Meeting, 2018, New Orleans (USA), 2018/12/13.
- ③ 小林知勝, 水蒸気噴火発生場における Phreatic

se Linking 法による微小地殻変動検出の有効性, 日本測地学会第 128 回講演会, 瑞浪市総合文化センター (岐阜県・瑞浪市), 2017 年 10 月 4 日.

- ④ 小林知勝, 森下遊, 干渉 SAR 時系列解析で捉えた 2015 年 4 月以前の箱根山・大涌谷における局所的膨張性地殻変動, 日本火山学会 2017 年度秋季大会, 熊本大学 (熊本県・熊本市), 2017 年 9 月 23 日.
- ⑤ 小林知勝, 干渉 SAR 解析によって検出される水蒸気噴火発生場の局所的地殻変動, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 幕張メッセ (千葉県・千葉市), 2017 年 5 月 22 日.
- ⑥ T. Kobayashi, Locally distributed crustal deformation in potential areas of phreatic eruptions, detected by InSAR analyses, European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna (Austria), 2017 年 4 月 26 日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 知勝 (KOBAYASHI TOMOKAZU)  
 国土地理院 (地理地殻活動研究センター)・主任研究官  
 研究者番号: 40447991