

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04005

研究課題名（和文）干渉SAR解析による活火山における噴気活動評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of a new evaluation method for fumarolic activities in active volcanoes with interferometric SAR analysis

研究代表者

道家 涼介（Doke, Ryosuke）

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00604109

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、箱根火山を対象とした干渉SAR解析の結果から、水蒸気噴火を発生させる場としての同火山浅部熱水系を特徴づける構造について明らかにした。干渉SAR解析などから明らかとなった地表面変位から推定される地下の圧力源のモデルから、箱根火山の浅部熱水系は、ポケット状の流体だまりと、それに流体を供給する経路としての北西-南東走向のクラックで特徴づけられることを明らかにした。また、同火山においては、2015年の水蒸気噴火以降、山体の収縮が認められているほか、地すべり性の変位が進展していることも明らかにした。これらはいずれも同火山の熱水系の活動に起因すると考えられるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水蒸気噴火はその活動の規模が小さく、観測事例が少ないため、その活動の予測などが困難な現象である。本研究では、2015年に水蒸気噴火が発生した箱根火山を対象に、干渉SAR解析を多数実施することにより、水蒸気噴火前や、噴火後の地表面変位の推移を明らかにした。これにより、水蒸気噴火を発生させる場としての箱根火山の浅部熱水系を特徴づける構造について明らかにすることができた。この特徴は、過去に同火山で発生した水蒸気噴火や周辺地域における地殻変動などとも関連があることが示され、本研究結果により、箱根火山を含む同地域の防災を考える上での基礎的なデータを得ることができたと言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, the structure that characterizes the shallow hydrothermal system of Hakone volcano as a field where phreatic eruptions are occurred is clarified from the results of interferometric SAR analysis. Based on a model of underground pressure sources estimated from surface displacement revealed by interferometric SAR analysis, the shallow hydrothermal system of Hakone volcano is characterized by pocket-shaped fluid reservoirs and northwest-southeast striking cracks as fluid supply paths to the reservoirs. We also found that the volcano has been contracting since the 2015 phreatic eruption, and that landslide displacement has been observed. All of these phenomena are considered to be caused by the hydrothermal activity of the volcano.

研究分野：固体地球科学

キーワード：干渉SAR解析 箱根火山 水蒸気噴火 熱水系 地すべり

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

活火山の活動状態を定量的に評価することは、火山活動の活発化やそれに起因する様々な災害への対策を立てる上で重要である。しかしながら、水蒸気噴火に関しては、その規模が小さく十分な観測事例が無く、その活動の予測を行うのが難しいのが現状であった。

人工衛星に搭載された合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar; 以下, SAR) の干渉解析は、近年、地震や火山活動に伴う地殻変動を観測する手法として一般的になっている。この干渉解析を用い、火山活動に伴う地表面の変位を高空間分解能でとらえることにより、火山体の浅部における熱水系の挙動をより高度にモデル化することが、水蒸気噴火の予測において重要であると考えられた。それに加えて、火山活動の活発化の指標の一つとして、地表における噴気活動の評価が挙げられる。噴気活動の評価においては、地上における様々な観測から定量化が試みられてきたが、火山活動の活発化などにより、現地に立ち入り困難になる場合も想定されることから、衛星リモートセンシングによる監視も含め重要な課題であった。

2015年に水蒸気噴火を発生させた箱根火山においては、水蒸気噴火前の干渉 SAR 解析により、同火山体の浅部における熱水の挙動が明らかとなっていた (Doke et al., 2018 *Earth Planets and Space*)。さらに、箱根火山における噴気地帯においては、噴気活動に起因する変化や、それに伴う地すべり性の地表面変位と見られる様々な変化が干渉 SAR 解析結果に認められていた。これらのことから、干渉 SAR 解析で認められた各現象を詳細に評価することにより、水蒸気噴火を発生させる場としての箱根火山浅部熱水系についての理解を深めることが可能であり、なおかつ、それらに基づき同火山における防災への貢献が可能であると考えられた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、干渉 SAR 解析により取得される高解像度の地表面変位から、水蒸気噴火を発生させる場としての箱根火山浅部熱水系の構造を明らかにすることである。研究の開始当初は、箱根火山の噴気地帯において噴気活動に伴うとみられる地表面変位が認められていたことから、これを定量的に評価することを検討したが、その原因が地表付近における土壌水分量の変化と地すべり性の変位が合わさったものであると解釈されたため、噴気活動を評価するアプローチから、地下の熱水系の活動に伴う地表面変位 (膨張, 収縮, 地すべり性変位など) を直接的に評価する方針に切り替えた。

### 3. 研究の方法

本研究では、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の SAR 衛星である ALOS-1 と ALOS-2 のデータを用い、箱根火山を対象に干渉 SAR 解析を行った。ALOS-1 は 2006 年～2011 年の間に観測が行われていた衛星であり、その間に箱根火山を対象として取得されたすべてのデータを解析した。また、ALOS-2 については、2014 年から現在までのデータがあり、これらについて順次解析を行った。解析方法については、解析対象となる地表面の変位の時間スケール・空間スケールに合わせて、適宜検討しながら行なったが、後述する研究成果に示す解析結果については、主に以下の解析を行った。

- 1) ALOS-1 データを対象とした干渉 SAR 時系列解析による 2015 年水蒸気噴火前の地表面変位速度の推定
- 2) ALOS-2 データを対象とした干渉 SAR 時系列解析による 2015 年水蒸気噴火後の地表面変位速度の推定
- 3) ALOS-2 のペアを用いた差分干渉 SAR 解析による地すべり性変位の抽出

なお、干渉 SAR 解析によって得られる地表面変位は、衛星視線方の 1 次元の変位となるが、これは直感的に変位方向が分かりにくいという欠点がある。1) や 2) の解析では、異なる 2 方向から得られた変位速度の結果を合成することにより、準東西成分と準上下成分を推定し、その評価を行った。また、3) の解析については、異なる 3 方向以上の変位データを合成し、3 次元変位量を推定し、直感的に分かりやすい変位方向の解析結果から現象の解釈を行った。

また、干渉 SAR 解析の結果を説明するためのモデルの推定も様々な現象を対象に実施し、地表面変位の原因となっている地下の変動源のパラメータを明らかにし、箱根火山の浅部熱水系の構造について検討を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 箱根火山大涌谷における局所的な沈降現象 (Doke et al. 2020 *Remote Sensing*)

ALOS-1 データの干渉 SAR 時系列解析により、2015 年水蒸気噴火以前の箱根火山大涌谷の西側において、直径約 500m の範囲で、沈降現象が観測された (図 1)。この沈降は、大涌谷の下の深さ約 300m (標高約 700m) 付近を中心とする収縮が原因であることがモデルの推定結果から明らかとなった。さらに、周囲における温泉井戸における温泉水の化学組成や、同箇所がかつては活発な噴気活動をしていたという観測事実に基づき、この収縮は、かつて活発であった噴

気活動を支えていた流体だまりが収縮している様子を見ているものと解釈された。

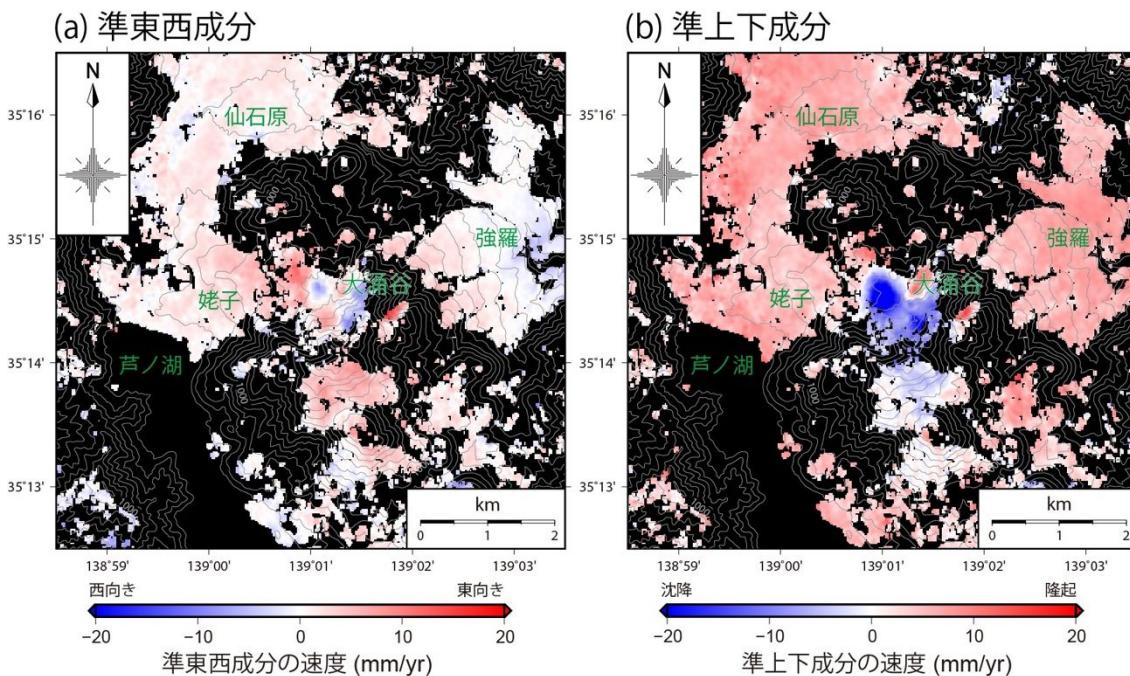


図1 2006~2011年の地表面変位速度 (a) 準東西成分, (b) 準上下成分

(2) 箱根火山 2015年水蒸気噴火後の山体収縮 (Doke et al. 2021 *Geophysical Research Letters*)

箱根火山で2015年に発生した水蒸気噴火以降に取得されたALOS-2データについて干渉SAR時系列解析を行った結果、同火山の中央火口丘が沈降していることが明らかとなった(図2)。さらに、この沈降の原因となる収縮源は、2015年水蒸気噴火時における収縮源の位置(標高100~200m付近)と概ね一致していることが明らかとなった。このことから、沈降の原因として、水蒸気噴火時に地下の流体だまりの圧力が抜けたことによる減圧と、その後の圧密の可能性を指摘した。なお、この圧密による沈下を仮定した場合に、この沈降は、噴火後100年経過したのちにおいても年間5mm程度で観測されることが予測された。しかしながら、箱根火山が次の噴火に向けて再び地下で圧力を溜め始めた際には、この沈降が早期に終了するか、もしくは隆起に転ずる可能性がある。したがって、本解析の結果は、箱根火山の活動を評価する上で、上下変位の継続的な観測の重要性を示唆しているものと言える。

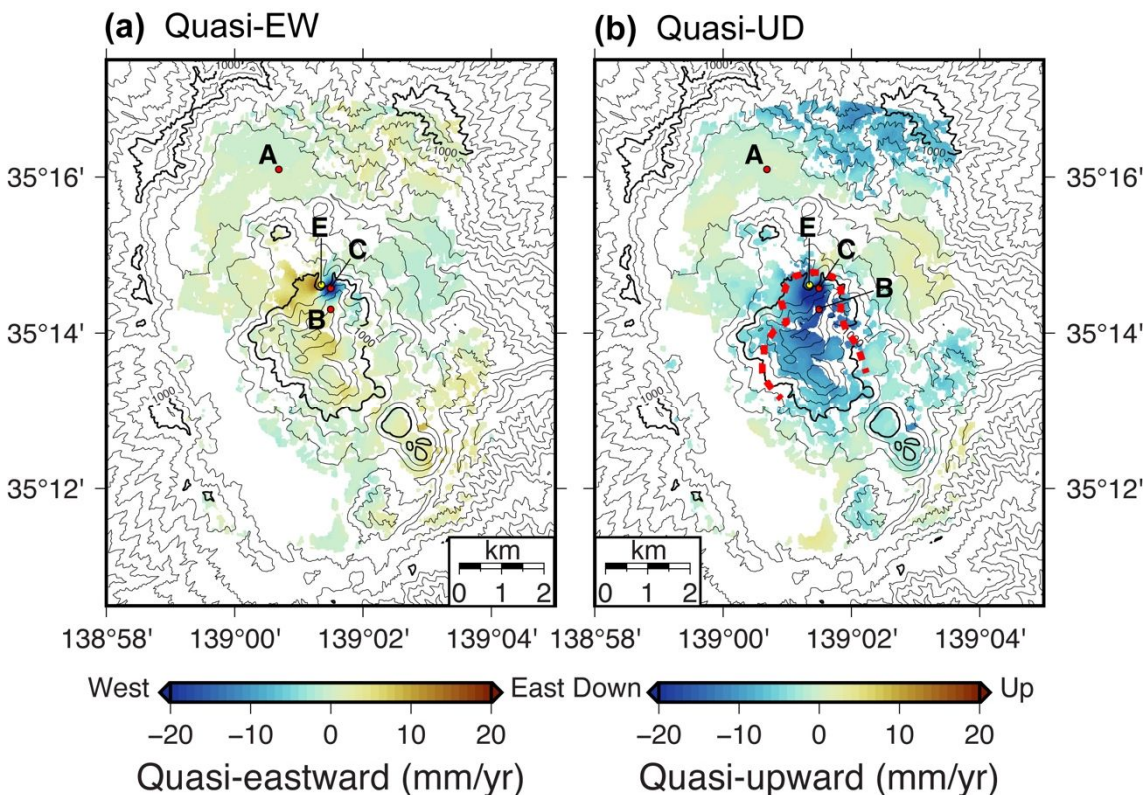


図2 箱根火山 2015年水蒸気噴火後の地表面変位 (a) 準東西成分, (b) 準上下成分



(3) 箱根火山浅部熱水系の構造 (道家ほか, 2021 地学雑誌)

上記の(1)および(2)の成果に加え, 2015年水蒸気噴火時の地表面変位を扱った自身の研究成果 (Doke et al., 2018 *Earth Planets and Space*) に基づき, 箱根火山の浅部熱水系の活動を特徴づける構造についての検討を行った。同火山の浅部熱水系の構造は, 地下におけるポケット状の流体だまりと, そこに流体を供給する通路としてのクラックで特徴づけられることを明らかにした。また, 箱根火山においては, 北西-南東走向のクラックが支配的であり, これらは箱根火山を含む伊豆衝突帯における GNSS の解析結果から推定される歪速度場 (Doke et al. 2020 *Geological Society of London, Special Publications*) とよく対応し, 箱根火山とその周辺地域におけるテクトニクス関係を示唆するものである。

(4) 箱根火山大涌谷周辺における地すべり性の変位 (Doke et al., 2024 *Landslides*)

ALOS-2 による差分干渉 SAR 解析の結果について, 同衛星による左観測のデータを含む異なる3方向の変位データから箱根火山大涌谷周辺における3次元変位の推定を行った。その結果, 大涌谷においては, 斜面の傾斜方向に向かう変位 (約3年間で15~20cm) が推定され, 地すべり性の変位が生じていることが明らかとなった (図3)。また, 有限要素法を用いたシミュレーション解析の結果, この地すべり性の変位が生じている箇所の地下において, 地すべり面と考えられる円弧上の滑り面の存在が示唆された (図4)。加えて, 干渉 SAR 時系列解析の結果からは, この地すべりが2015年の水蒸気噴火後に変位を開始しており, 地下からの流体の供給が増えたことにより間隙圧が高まり, それが地すべり変位の発生に寄与していることが示唆された。

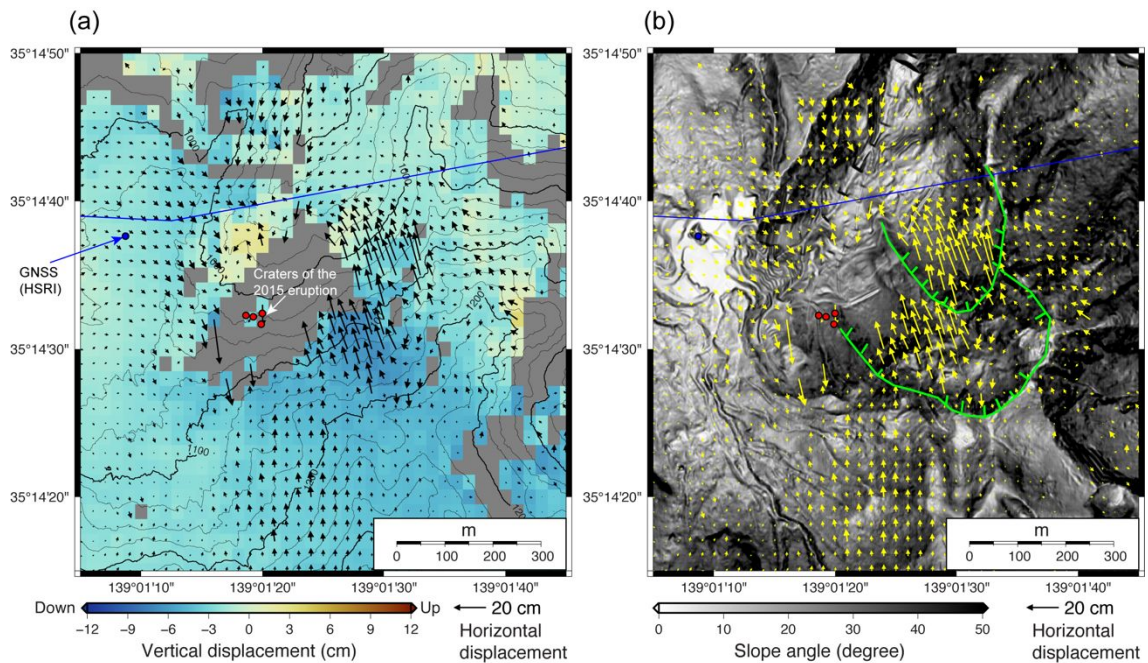


図3 (a) 干渉 SAR 解析結果から推定した箱根火山大涌谷周辺の3次元変位, (b) 大涌谷周辺の傾斜区分図に水平変位ベクトルを重ねた図。

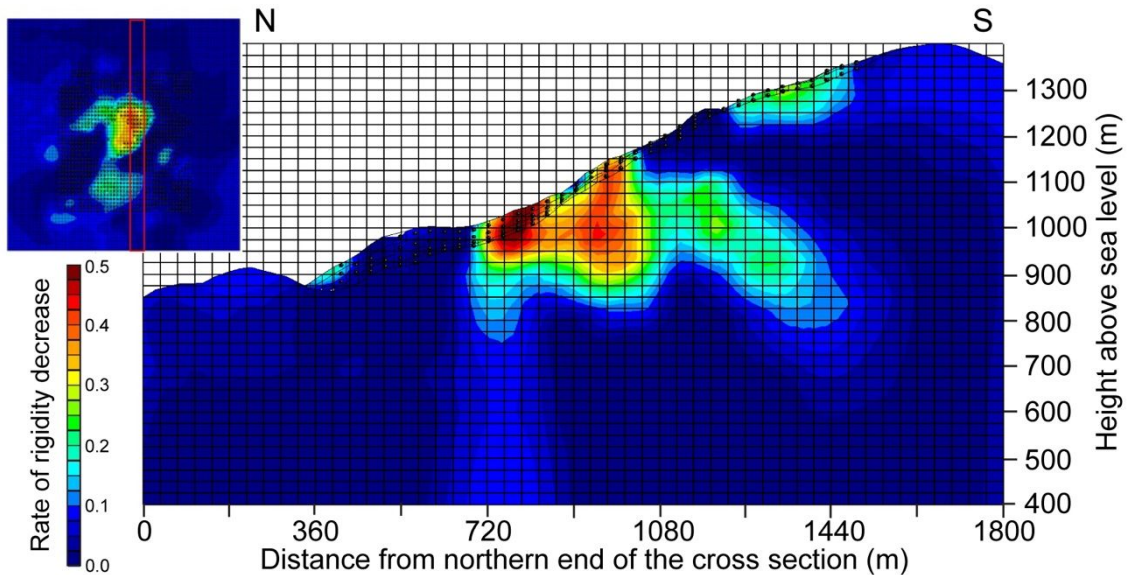


図4 有限要素法によるシミュレーション結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Doke Ryosuke, Sanoki Satoru, Iwanaga Shoji, Sato Masaru, Hosono Kenichi, Tominaga Eiji	4. 巻 21
2. 論文標題 Monitoring of landslide displacements in Owakudani, Hakone volcano, Japan, using SAR interferometry	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Landslides	6. 最初と最後の頁 1207 ~ 1219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10346-024-02224-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Doke Ryosuke, Mannen Kazutaka, Itadera Kazuhiro	4. 巻 48
2. 論文標題 Observing Post-eruptive Deflation of Hydrothermal System Using InSAR Time Series Analysis: An Application of ALOS 2/PALSAR 2 Data on the 2015 Phreatic Eruption of Hakone Volcano, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2021GL094880
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021gl094880	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 道家涼介・萬年一剛・板寺一洋	4. 巻 130
2. 論文標題 地表面変位から推定される箱根火山浅部熱水系の構造	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 811 ~ 830
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.130.811	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 道家涼介	4. 巻 53
2. 論文標題 3次元干渉SAR解析により明らかとなった箱根火山大涌谷における地すべり変位	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 神奈川県温泉地学研究所報告	6. 最初と最後の頁 47 ~ 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 MANNEN Kazutaka、YUKUTAKE Yohei、DOKE Ryosuke、HIRATA Daiji	4. 巻 130
2. 論文標題 Overview of the Special Issue “Mechanism of Phreatic Eruptions and Challenges for Eruption Forecasting: Latest Advances and Volcanic Disaster Prevention”	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 719 ~ 723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.130.719	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 萬年一剛・行竹洋平・道家涼介・平田大二	4. 巻 130
2. 論文標題 特集号「水蒸気噴火のメカニズムと噴火予知への課題 最新の知見と火山防災」巻頭言	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 725 ~ 729
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.130.725	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Doke Ryosuke、Kikugawa George、Itadera Kazuhiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Very Local Subsidence Near the Hot Spring Region in Hakone Volcano, Japan, Inferred from InSAR Time Series Analysis of ALOS/PALSAR Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 2842 ~ 2842
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs12172842	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 道家涼介・原田昌武・板寺一洋・加藤照之	4. 巻 51
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 神奈川県温泉地学研究所報告	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 道家涼介
2. 発表標題 箱根山の噴火
3. 学会等名 山噴火と防災および観光シンポジウム2023 草津白根山、御嶽山、箱根山（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 道家涼介
2. 発表標題 干渉SARによる箱根火山大涌谷における地すべり性変位のモニタリング
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 道家涼介・佐ノ木 哲・岩永昇二・里 優・細野賢一・富永英治
2. 発表標題 干渉SARによる箱根火山大涌谷における地すべり性変位のモニタリング
3. 学会等名 日本火山学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryosuke Doke, Satoru Sanoki, Shoji Iwanaga, Masaru Sato, Kenichi Hosono, Eiji Tominaga
2. 発表標題 Monitoring of landslide displacements in Owakudani, Hakone volcano, Japan using SAR interferometry
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryosuke Doke, Kazutaka Mannen, George Kikugawa, Kazuhiro Itadera
2. 発表標題 Structure of the shallow hydrothermal system in Hakone volcano, Japan, inferred from InSAR analysis
3. 学会等名 IAVCEI 2023 Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryosuke Doke, Satoru Sanoki, Shoji Iwanaga, Masaru Sato, Kenichi Hosono, Eiji Tominaga
2. 発表標題 Monitoring of landslide displacements in Owakudani, Hakone volcano, Japan using SAR interferometry
3. 学会等名 IAVCEI 2023 Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryosuke Doke, Kazutaka Mannen, Kazuhiro Itadera
2. 発表標題 Observing posteruptive deflation of hydrothermal system using InSAR time series analysis: An application of ALOS-2/PALSAR-2 data on the 2015 phreatic eruption of Hakone volcano, Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 道家涼介・萬年一剛・板寺一洋
2. 発表標題 干渉SAR解析結果から推定される箱根火山浅部熱水系の構造について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 道家涼介・萬年一剛・板寺一洋
2. 発表標題 箱根火山2015年水蒸気噴火後の収縮過程
3. 学会等名 日本火山学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryosuke Doke, George Kikugawa, Kazuhiro Itadera
2. 発表標題 Very Local Subsidence Near the Hot Spring Region in Hakone Volcano, Japan, Inferred from InSAR Time Series Analysis of ALOS/PALSAR Data
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 道家涼介
2. 発表標題 干渉SAR解析結果から推定される箱根火山浅部熱水系の構造について
3. 学会等名 令和2年度東京大学地震研究所共同利用(研究集会)「SARによる地表変動解析の新展開:先進レーダー衛星の活用を見据えて」(課題番号: 2020-W05)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳴海智博・山口範洋・白石理紗子・里村幹夫・伊藤広和・小林敬幸・末野幹雄・古田竜一・道家涼介
2. 発表標題 GNSS アンテナ付きコーナリフレクタを用いた地盤変動監視
3. 学会等名 日本測地学会第134回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 道家涼介・板寺一洋
2. 発表標題 活火山の噴気地帯の干渉SAR解析結果に認められる特異な変位:箱根火山上湯地区の例
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 道家涼介・原田昌武・板寺一洋・加藤照之
2. 発表標題 箱根火山2019年群発地震活動に伴う地殻変動
3. 学会等名 日本火山学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 道家涼介
2. 発表標題 干渉SAR解析による箱根火山2015年水蒸気噴火時の地表面変位
3. 学会等名 2019年度 特定共同研究(B) 研究集会 精密地球物理観測ネットワークによる地殻活動の総合的な理解
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryosuke Doke
2. 発表標題 Detection of local surface deformation using InSAR: a case study of the 2015 phreatic eruption of Hakone Volcano
3. 学会等名 International Workshop on the Mechanism of Phreatic Eruption (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 道家涼介	4. 発行年 2024年
2. 出版社 箱根町企画観光部観光課 箱根ジオミュージアム	5. 総ページ数 120
3. 書名 箱根ジオミュージアム展示解説書(担当範囲:箱根火山の観測)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

箱根火山大涌谷周辺における地すべり変位に関する研究 <a href="https://home.hirosaki-u.ac.jp/r-doke/52/">https://home.hirosaki-u.ac.jp/r-doke/52/</a> 箱根火山2015年水蒸気噴火後の地殻変動に関する研究 <a href="https://www.onken.odawara.kanagawa.jp/volcano-geology/20211109.html">https://www.onken.odawara.kanagawa.jp/volcano-geology/20211109.html</a> 箱根火山大涌谷周辺の局所的な沈降現象とその考察 <a href="https://www.onken.odawara.kanagawa.jp/volcano-geology/20200911-01.html">https://www.onken.odawara.kanagawa.jp/volcano-geology/20200911-01.html</a>
---

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------