

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04016

研究課題名(和文)地震波解析による水蒸気噴火発生場の解明：御嶽山・草津白根山におけるケーススタディ

研究課題名(英文) Understanding the preparation process of phreatic eruptions by seismic analyses at Ontake and Kusatsu-Shirane volcanoes

研究代表者

前田 裕太 (MAEDA, Yuta)

名古屋大学・環境学研究科・講師

研究者番号：00728206

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：水蒸気噴火は火山浅部の地下水の急激な気化によって起きると考えられる。気化する温度(沸点)まで地下水が加熱される具体的な機構・条件の解明のため、地震波解析に基づき流体移動が起きる場所を推定した。その結果を用いて地下水加熱の数値シミュレーションを行った。マグマから分離した高温水が低温の地下水層に注入されると流体圧が瞬時に増大して噴火の前兆となる地震活動が起きる一方、高温域はゆっくりと拡大するため地震活動以外の前兆現象は遅れて起きること、注入水が比較的低温の場合には御嶽山2014年噴火のように前兆現象に乏しい噴火となりうることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水蒸気噴火はマグマ噴火に比べ研究が少なく、地下のどこでどのような過程を経ていかなる条件で噴火が起きるのか、具体的なことがあまり分かっていない。本研究はその解明を試みたものであり、地震波解析に基づいて流体移動が起きる場所を推定したこと、その結果を用いて定量的な数値モデルを作成したことが特色である。御嶽山を対象とするモデルであるが他地域でも成り立ちうる物理的解釈を抽出しており、水蒸気噴火に関する火山学の発展に寄与し、将来的な火山活動推移予測にも寄与しうる。

研究成果の概要(英文)：Phreatic eruptions of volcanoes are attributed to the sudden vaporization of shallow underground water. To understand the mechanisms and conditions for underground water to be heated to the boiling temperature, this study estimated the locations of fluid migration using seismic analyses. A numerical model for the heating of underground water was then developed using the results of the seismic analyses as constraints. The model showed that the injection of high-temperature water exsolved from magma into cold underground water layer results in an immediate pressure increase and may cause precursory seismicity. In contrast, the high-temperature region expands slowly, resulting in delayed occurrences of other precursors, or almost no precursors other than seismicity (as in the case of the 2014 eruption of Mt. Ontake) if the temperature of the injected water was relatively low.

研究分野：火山学

キーワード：水蒸気噴火 御嶽山 地震波解析 数値シミュレーション 草津白根山

1. 研究開始当初の背景

火山ではマグマ噴火と水蒸気噴火が発生する。マグマ噴火についてはマグマだまりと火道という分かりやすい描像のもとで精緻なモデリングがなされてきた。一方、水蒸気噴火の物理過程については先行研究が少なく、マグマ噴火に比べ解明が大きく遅れていた。水蒸気噴火は浅部熱水系への流体と熱の供給が根本的な駆動力になると考えられるものの、その描像は漠然としており(図 1a)、特に「熱」がどのような媒体によっていかなる機構で運搬・蓄積されるのかを具体的に言及したモデルは極めて少数であった。

2. 研究の目的

水蒸気噴火に至る具体的な熱供給過程の解明を目的とした。御嶽山(2007, 2014年に水蒸気噴火)、草津白根山(2018年に水蒸気噴火)を対象地域とした。計画段階で念頭にあったのはマグマから析出した水蒸気が熱輸送を担うという作業仮説である(図 1b)。この仮説において水蒸気を主体とする火山性流体はマグマだまりからマグマの温度で析出し、上昇時の減圧に伴う膨張と周囲の岩体への熱拡散によって温度を下げながら最終的に浅部の地下水層に到達する。この流体移動の出発点であるマグマだまりの深さ、到達点である地下水層の深さ、流体の種類とフラックスを地震学的手法により制約する。得られた制約条件を用いて地下水加熱の数値シミュレーションを行い、水蒸気噴火が発生する(地下水が沸点まで加熱される)条件を探索する。

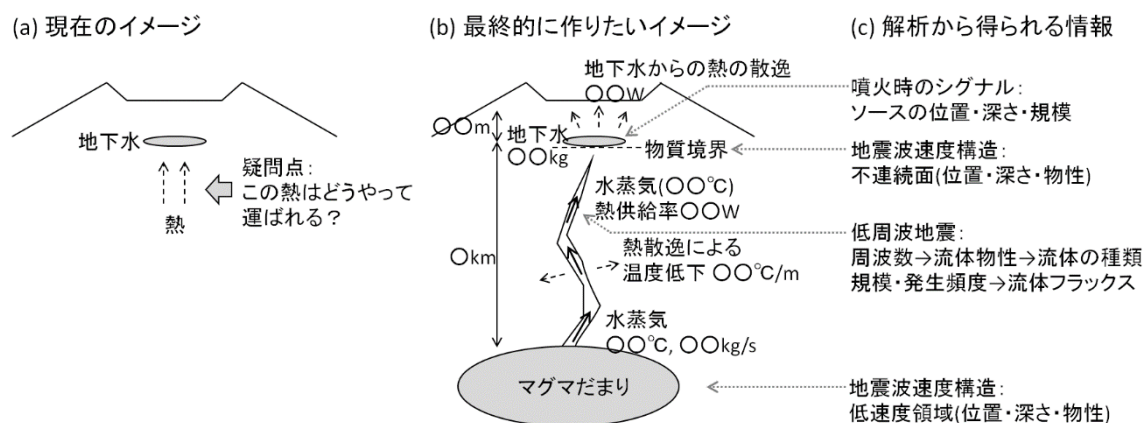


図 1. 研究計画時点での水蒸気噴火の描像(a)と本研究の到達目標(b)。研究計画調書より引用。

3. 研究の方法

(1) 熱輸送媒体の種類とフラックスの推定(御嶽山)

火山浅部の低周波地震は流体の移動や体積変化によって発生すると考えられ、流体の種類やフラックスを知る上で重要なシグナルである。御嶽山では低周波地震の発生頻度は低いながらも発生していることが研究開始前に連続波形の目視により確認されていた。但し微小であることや初動が不明瞭であることから従来のイベント検知手法では見逃される。そこで本研究では低周波地震を含む微小地震検知のための機械学習手法を開発し、御嶽山の連続波形に適用した。

計画段階では更に、検知した低周波地震のカatalogに基づいて発生頻度や規模を定量化し、波形のスタッキングによってシグナル/ノイズ比を向上させて周波数特性等を求め、これらの結果に基づいて流体の種類やフラックスを推定する計画であった。しかし予想外の困難(4-(1)に記載)により低周波地震カatalogを作成できなかったため、実際に(1)に関して実施した内容は機械学習手法の開発と適用のみとなった。

(2) マグマだまりと地下水層の深さの推定(御嶽山)

図 1b の作業仮説に基づけばマグマだまりは熱輸送の出発点、地下水層は到達点と考えられる。これらの位置を知ることは数値シミュレーションにおいて重要な制約条件となる。地震学的な地下構造推定手法によりこれらの位置を推定する。一般にマグマだまりは地震波速度異常としてイメージングされる。また御嶽山では新期御嶽(活動時期: 10 万年前以降)の噴出物層と古期御嶽(活動時期: 78-39 万年前)の噴出物層の境界に沿った地下水流動が提案されており(浅井他, 2006)、この媒質境界を地震学的手法でイメージングできれば地下水層の位置を制約できる。地下構造の推定手法は計画段階と実施段階でやや相違が生じたが大きくは変わらず①山頂域の地震の初動時刻を用いる方法、②波形相関を用いる方法、の併用である。

(3) 比較のための草津白根山の研究

御嶽山との比較のため草津白根山 2018 年噴火時に観測された長周期地震波のソース位置と規模を推定する。研究代表者の指導学生(2019-2020)の修士論文研究として実施する。広帯域地震計の傾斜応答を考慮する解析手法(Maeda et al., 2011)を用いる。

(4) 水蒸気噴火準備過程の数値シミュレーション(御嶽山)

マグマから析出・上昇する熱輸送媒体によって浅部の地下水が加熱され、沸点に到達すれば水蒸気噴火が発生すると考えられる。地震波解析で得られた制約条件を用いて地下水加熱の数値シミュレーションを行い、水蒸気噴火が発生する(地下水の温度が沸点に到達する)条件を探索する。2014 年噴火は前兆現象に乏しかったことから熱輸送媒体の上昇に伴い観測可能な大きさの地殻変動を生じないことを制約条件の一つとする。多様な物理法則の連成計算に適した商用の有限要素法ソフトウェア(COMSOL Multiphysics)を用いる。

4. 研究成果

(1) 機械学習による微小地震検知手法の開発と適用(御嶽山)

研究方法 3-(1)に対応する。連続地震波形からのイベント検知は①イベント候補の検知、②各候補の真偽判断、の 2 段階から成る。①に関しては手法が確立されており主たる困難は②である。機械学習を用いた地震検知の既往研究の多くは単一観測点の波形から様々な特徴量を抽出するアプローチで②が行われてきた。しかし単一観測点の波形に基づくイベントの真偽判断は特に火山地域の微小地震を対象とする場合、専門家による目視判断ですら極めて困難である。通常、専門家によるイベントの真偽判断においては振幅の空間分布が考慮される。例えば火山口近傍と遠方で同程度の振幅であれば遠方のイベントと判断され、多数観測点が密集するエリアにおいて 1 つの観測点でしか見られないような空間的に極度に局在したシグナルはローカルノイズであると見なされる。本研究ではこのような専門家の判断方法に近い、振幅の空間分布に注目する教師付き機械学習手法を開発した。

研究目的は低周波地震の検知であるが低周波地震のみを対象にすると発生頻度が低いため十分な数の教師データを用意できなかった。そこで低周波地震だけでなく山頂域の火山構造性地震や山麓域の地震も検知対象に加えることで教師データ数を確保した。山頂観測開始直後の 10 日間(2017 年 11 月 1-10 日)のデータを用いた。各観測点において振幅がノイズレベルを有意に上回る確率を定量化し、その空間分布をニューラルネットワークモデルにより補間し、その分布を表す特徴量を用いてサポートベクトル器でイベントの真偽を分類した。その結果、97%の正答率でイベントの真偽判断を行うことができた(Maeda et al., 2020)。

得られた学習済みモデルをそれ以降の連続波形データに適用し 2021 年末までのイベントカタログを作成した。このイベントカタログには山頂と山麓の地震が混在する。そこでカタログに含まれる震源位置が既知の地震に山頂/山麓のラベルを付け、これらを教師データとして再学習を行い山頂域と山麓域のイベントを分離した。このようにして山頂域の地震のみから成るイベントカタログを作成した。このカタログには火山構造性地震と低周波地震が混在する。

この次に山頂域のイベントカタログから低周波地震のみを抽出する解析を行う予定であったが中断せざるを得なかった。山頂域のイベントカタログにおいてイベント数の推移に原因不明の季節変動が見られ、真の季節変動の可能性もあるが Maeda et al. (2020)で 10 日間という短期間の教師データを用いたことが何らかの形で影響した見かけの変動である可能性も否定できないためである。そのため(1)の成果はイベント検知手法の開発と適用のみとなった。

(2) マグマだまりと地下水層の深さの推定(御嶽山)

本課題の要となる重要な成果(図 2; Maeda and Watanabe, 2023)が得られた研究である。計画段階とはやや異なるが以下の①~③のアプローチで地下構造推定を行った。

①御嶽山山頂域の代表的な P 波速度の推定(稍深発地震の初動部分の波形使用)

御嶽山では山頂域浅部を対象とする地震学的手法による地下構造の先行研究が無く、山頂域の地震波速度の概算値すらも不明であった。このような先験的情報が無い状態では次の②の解析で速度構造を制約できないことが予備的な解析から明らかとなった。そこで御嶽山直下の太平洋プレート付近(深さ約 250 km)で発生する稍深発地震の初動部分の波形を用いて山頂域の P 波速度の代表値を推定した。稍深発地震は御嶽山に真下から入射し、標高の低い観測点から高い観測点へと伝播する。その伝播速度をセンブランス法で推定した結果、標高 1500 m 以上の平均的な P 波速度 2.6 km/s という推定値を得た。

②水平成層構造の推定(火山構造性地震の到達時刻使用)

御嶽山浅部で発生する火山構造性地震の P 波・S 波の到着時刻を目視で読み取って使用し、①の結果を制約条件として浅部の地震波速度構造を推定した。未知パラメータ数を減らすため 1-3 層の水平成層を仮定した。その結果、P 波速度 2.4 km/s (標高>1900 m)、3.6 km/s (標高 900-1900 m)、5.6 km/s (標高<900 m)の 3 層構造が得られ、詳細な震源分布も求まった。

③反射面の推定(稍深発地震の自己相関関数使用)

観測点に真下から入射した地震波が地表と地下の媒質境界の間で反射を繰り返すことで一定の時間間隔において類似の波形が出現することが期待され、その自己相関関数を用いて地下の反射面の位置を推定できる(Claerbout, 1968)。②で推定する地震波速度不連続面と③で推定する反射面はともに媒質境界を表すと考えられる。すなわち同一の対象に対する半ば独立な2種類の推定であるので両方の結果の比較により相互に検証できる。

この手法を適用する上で、有意な反射面の抽出基準が不明確であるという問題があった。地震波を使用するので自己相関関数は振動し、反射面が存在しない場合でも正負のピークが現れる。そのため反射断面は通常は縞模様になり、その中から特に強度の強い反射面が真の反射面と解釈されるがその抽出基準は一般に曖昧である。そこで本研究では自己相関関数の誤差レベルの評価手法を開発した。自己相関関数に含まれる正負のピークの振幅が誤差レベル以下であれば偽の反射面と判断できる。地下構造が先行研究により既知で2層構造で近似可能な首都圏のデータを用いて手法の検証を行った(Maeda and Watanabe, 2022)。

開発手法を御嶽山に適用した。観測点毎に直下の反射面を推定後、反射振幅を標高を揃えてスタッキングした。その結果より②で求めた2つの速度不連続面に対応する反射面と、深部の別の反射面(海拔下0.3 km)を見出した。

以上3種類の解析結果の要約が図2である(Maeda and Watanabe, 2023)。②で得た地震波速度不連続面と③で得た反射面は整合的であり、これを新期御嶽-古期御嶽-基盤岩の境界と解釈した。浅井他(2006)によれば新期御嶽と古期御嶽の境界面は地下水面であると考えられる。2014年噴火直前の傾斜変動のモデル(Maeda et al., 2017)との比較から古期御嶽は流体移動に対してバリアの役目を果たす低浸透率層と考えられる。2つの境界の更に下部(海拔下0.3 km)に別の反射面がイメージされ、暫定的な解釈ではあるが半固結の低温マグマだまり上面と解釈した。震源分布が流体上昇経路を表すと仮定すれば、このマグマだまり上面から上昇した流体が準鉛直に古期御嶽を貫通し、新期-古期境界に沿って現在の火口直下へ水平移動し、再び上昇して火口に至るという描像になる。以上により研究目標であった熱輸送の出発点であるマグマだまりと到達点である地下水層の位置に加え、途中にあるバリア構造やそれを貫く流体供給路の位置を制約することができた。

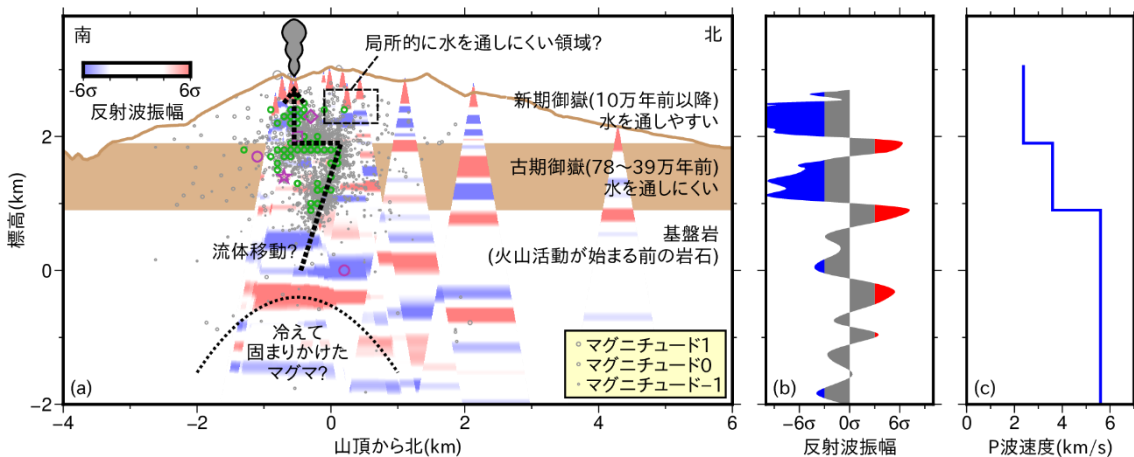


図2. 地下構造の推定結果の要約。Maeda and Watanabe (2023)を日本語化・簡単化。

(3) 比較のための草津白根山の研究

ほぼ計画通りである。観測点が3点しか利用できないため波形逆解析からは解の候補が多数並立する結果となったが、様々な状況証拠との比較により噴火口列の直下における火口列に平行な走向の準鉛直開口クラックが最も有力な解であるという結論が得られた。この力源は噴火開始の8-11秒前に膨張から収縮に転じ、この時間差と推定されたソース位置に基づいて噴火口直下における噴火直前の流体移動速度を49-100 m/sと推定した(Takahashi et al., 2022)。

草津白根山と御嶽山の研究結果の具体的な比較・検討は研究期間内に実施できなかったが、流体移動速度は浸透率に関係し、(4)のシミュレーションモデルにおいて重要なパラメータである。したがって将来的にはシミュレーションモデルを草津白根山に应用する中で(3)で得た知見を活用できると期待される。

(4) 水蒸気噴火準備過程の数値シミュレーション(御嶽山)

上記(2)で得られた地下構造モデル(図2; Maeda and Watanabe, 2023)を使用し、数値シミュ

レーションにより御嶽山 2007 年, 2014 年噴火の準備過程を検討した (Maeda, 2024)。図 2 に示す半固結のマグマだまり上面 (海拔下 0.3 km) から新期-古期境界 (海拔 1.9 km) までを流体計算の空間範囲とし、初期状態では低温の地下水で充填されているものとした。図 2 の準鉛直な震源分布に対応する幅 0.4 km の高浸透率領域 (流路) を設定した。また古期御嶽 (海拔 0.9-1.9 km) が流体移動に対してバリアの役目を果たすと考えられることからこの領域を低浸透率に設定した。モデル領域の下端がマグマだまり上面に相当し、ここからマグマ由来の高温水が注入されたときのモデル領域内の地下水の温度・圧力の時空間変化とそれにより生じる地表面での地殻変動を計算した。

シミュレーションで得られた重要な知見は圧力と温度の時間変化の特徴 (図 3) である。圧力は高温水の注入開始後すぐにモデル領域全体で増大する。これはモデル領域を充填する既存流体が注入流体から圧力を受けるため、注入流体が未到達の領域においても増圧が起きる。水蒸気噴火発生場でしばしば想定される低浸透率層が上部を覆う構造においては増圧量は低浸透率層の浸透率に強く依存する (図 3a)。一方、温度は高温域と低温域に分離し、その境界が低速で上昇する (図 3b)。この温度境界の到達までは浅部は低温状態が維持されるので温度上昇は圧力上昇よりも遅れる (図 3c)。これらの特徴は簡単な 1 次元モデルからの予想とも整合的である。

以上の特徴を踏まえて御嶽山を模した系でシミュレーションを行い、結果を次のように整理した (図 4)。地下から高温水の注入が開始されると全域の流体圧がすぐに増大し、噴火の前兆となる地震活動が起きる。一方、低温域と高温域の境界は低速で地下を上昇する。一般に浅部ほど低圧であるので沸点温度が低く、温度境界が沸騰曲線に接したときに地下水が気化して水蒸気噴火が起きる。注入水が水の臨界温度よりも低温の場合、温度境界が沸騰曲線に到達するまでは全域が液体であるので前兆現象に乏しく、気化は一度に起きるので噴火規模は大きくなると考えられる。この活動推移は 2014 年に類似する (図 4a)。注入水が臨界温度よりも高温の場合には深部で水が超臨界状態となることで多様な前兆現象が起きる一方、水は徐々に気化するので噴火規模は小さくなると考えられ、この活動推移は 2007 年に類似する (図 4b)。

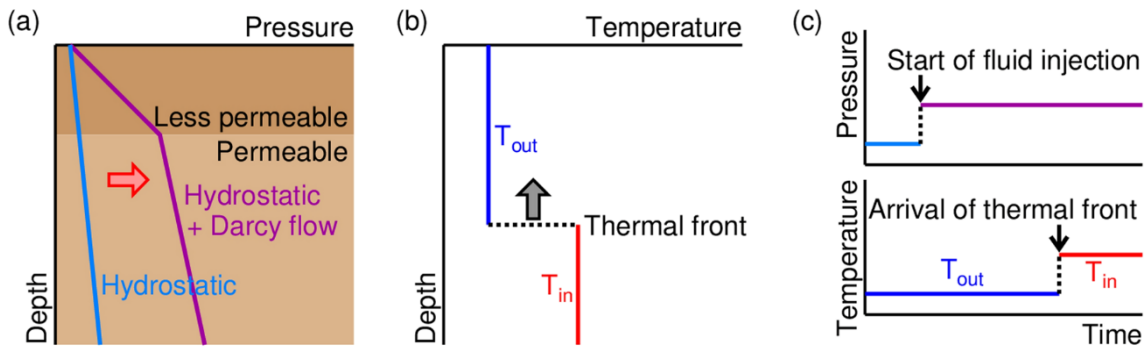


図 3. シミュレーション結果の特徴。Maeda (2024) より引用。

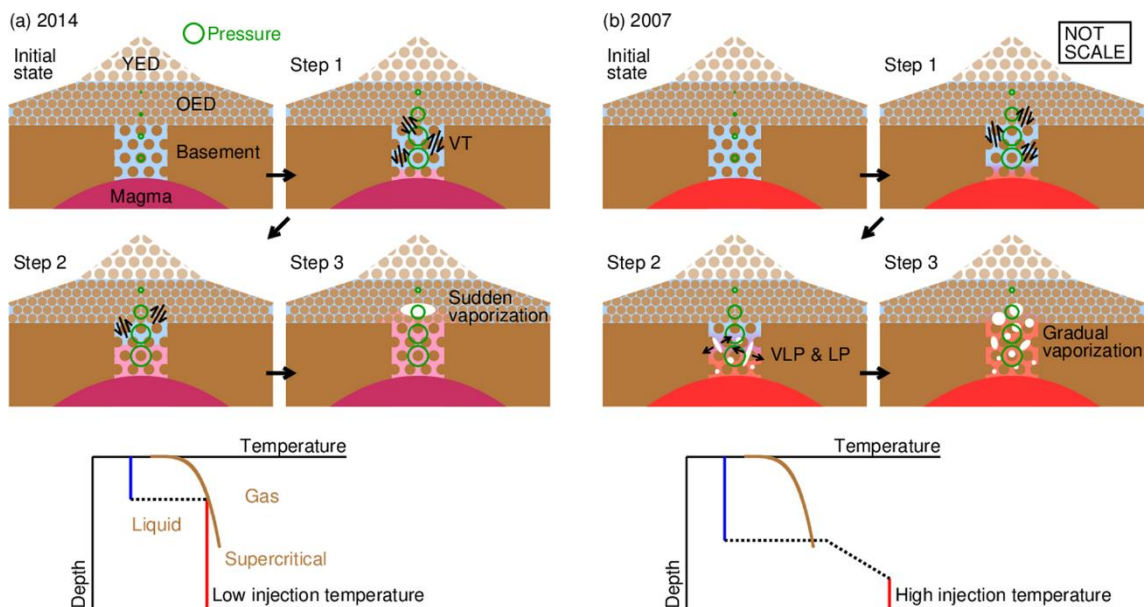


図 4. 御嶽山噴火準備過程のシミュレーションで得られた活動推移モデルの概念図。(a) 2014 年、(b) 2007 年。Maeda (2024) より引用。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Maeda Yuta	4. 巻 76
2. 論文標題 A numerical model for precursory time sequences of the phreatic eruptions of Mt. Ontake, central Japan	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 63
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-024-02013-8	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 Maeda Yuta, Watanabe Toshiki	4. 巻 75
2. 論文標題 Seismic structure and its implication on the hydrothermal system beneath Mt. Ontake, central Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 115
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-023-01870-z	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 Takahashi Ryohei, Maeda Yuta, Watanabe Toshiki	4. 巻 74
2. 論文標題 Waveform inversion of the ultra-long-period seismic event associated with ground tilt motion during an eruption of Mount Kusatsu-Shirane, Japan, on January 23, 2018	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 85
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01644-z	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 Maeda Yuta, Watanabe Toshiki	4. 巻 74
2. 論文標題 Estimating errors in autocorrelation functions for reliable investigations of reflection profiles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 48
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01606-5	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 Maeda Yuta, Yamanaka Yoshiko, Ito Takeo, Horikawa Shinichiro	4. 巻 225
2. 論文標題 Machine-learning-based detection of volcano seismicity using the spatial pattern of amplitudes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 416 ~ 444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggaa593	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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 前田裕太
2. 発表標題 御嶽山水蒸気噴火の準備過程：予備的な数値計算の試行
3. 学会等名 日本火山学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuta Maeda, Toshiki Watanabe, Toshiko Terakawa, Yoshiko Yamanaka, Shinichiro Horikawa
2. 発表標題 Subsurface structure and recent activity of Mt. Ontake, central Japan
3. 学会等名 IAVCEI Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田 裕太, 寺川 寿子, 山中 佳子, 堀川 信一郎
2. 発表標題 2022年2月～3月の御嶽山の地震活動活発化について
3. 学会等名 日本火山学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前田裕太, 渡辺俊樹
2. 発表標題 自己相関関数の誤差評価と御嶽山浅部構造への適用
3. 学会等名 日本火山学会2021 年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前田 裕太、渡辺 俊樹
2. 発表標題 自己相関関数の誤差評価 - 反射断面推定の信頼性向上に向けて
3. 学会等名 日本地震学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前田 裕太, 渡辺 俊樹
2. 発表標題 御嶽山浅部への流体供給構造の地震学的イメージング
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 高橋 龍平, 前田 裕太, 渡辺 俊樹
2. 発表標題 2018年1月23日草津白根山噴火時の傾斜を伴う極長周期地震の地震波逆解析
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 高橋龍平, 前田裕太, 渡辺俊樹
2. 発表標題 2018年本白根山噴火時の傾斜を伴う長周期地震の波形インバージョン
3. 学会等名 日本火山学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 龍平, 前田 裕太, 渡辺 俊樹
2. 発表標題 2018年1月23日の本白根山噴火時の傾斜を伴う地震波記録の順解析
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田裕太
2. 発表標題 振幅分布に注目した機械学習による火山性地震の検知(改良版)
3. 学会等名 日本火山学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究協力者	高橋 龍平 (TAKAHASHI Ryohei)	名古屋大学・大学院環境学研究科・修士課程学生(2019-2020)	

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
---------	---------