

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04613

研究課題名(和文) 多角的な監視による富士山の噴火予測精度高度化の研究

研究課題名(英文) Research into improving the accuracy of eruption predictions for Mt. Fuji through multifaceted monitoring

研究代表者

長尾 年恭 (Nagao, Toshiyasu)

東海大学・海洋研究所・研究員

研究者番号：20183890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数機関で実施されている微小地震観測やGNSS観測による山体膨張監視に加え、原理的にマグマの上昇を熱的に捉える事が可能な電磁気学的な観測体制の強化を目指した。さらに電磁気データに情報処理技術を適用して、富士山噴火監視の精度予測向上につながるシステムを構築した。当初計画では山頂近傍に新規観測点の設置を計画したが、コロナ禍と重なり、富士山登山そのものが不可能な年もあった。そのため徒歩によりサイトサーベイを含め、観測に適した地点の同定や、モデル計算を実施した。また御殿場側の富士山新五合目(太郎坊)観測点の改良およびデータのリアルタイム公開システムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

富士山は首都圏にも近く、年間3,000万人を超える観光客が訪れる日本有数の観光地となっている。富士山がなぜこのように美しい山体を維持しているのか、それは富士山が極めて若い火山であり、火山学者のコンセンサスとして将来の噴火が確実視されている。次の噴火の発生地点、その様式や規模を予測する事は科学的な観点だけでなく、首都圏の防災にとっても極めて大きな意義を持つ。万が一、300年前の宝永噴火と同等の噴火が発生すると、それはIT化された近代都市が初めて経験する大災害となる可能性も存在する。

研究成果の概要(英文)：In this study, in addition to micro-seismic observations and GNSS observations conducted by several institutions to monitor the expansion of the mountain body, we have enhanced the electromagnetism observation system that can, in principle, capture the magma rising thermally. Furthermore, by applying information processing technology to the electromagnetic data, a system was constructed to improve the accuracy of volcanic eruption monitoring at Mt. Fuji. The initial plan was to set up a new observation station near the summit, but it was impossible to climb the mountain in some years due to the COVID-19 problem. Therefore, we identified suitable observation sites and performed model calculations, including site surveys on foot. They also improved the observation point at the New Fifth Station of Mt. Fuji (Tarobo) on the Gotemba side and developed a real-time system for publishing data.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：富士山 噴火予測 電磁気観測 高度データ処理 マッチド・フィルタ 低周波地震

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 富士山頂には 2004 年まで有人の測候所が置かれていたが、気象衛星の発展により富士山レーダーはその役割を終え、測候所は廃止された。ただ富士山頂は CO₂ や PM_{2.5}、硫化水素といった環境モニタリングにも適している事から、2005 年に認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」が設立され、上記観測を継続し現在に至っている。ここ数年、バッテリーの能力向上等で、無人でも各種越冬観測が可能である事が判明し、今回の山頂近傍での地磁気通年観測を含めた計画を立案した。

(2) 富士山は首都圏にも近く、年間 3,000 万人を超える観光客が訪れる日本有数の観光地となっている。富士山がなぜこのように美しい山体を維持しているのか、それは富士山が極めて若い火山であり、火山学者のコンセンサスとして近い将来確実に噴火すると考えられている(人間で言えば 20 歳程度)。富士山の直近の噴火は 1707 年の宝永の爆発的噴火であり、その後 300 年以上に渡って沈黙している。したがって次の噴火がどこから発生し、その様式や規模を予測する事は科学的な観点だけでなく、日本の首都圏の防災にとっても極めて大きな意義を持つ。万が一、300 年前の宝永噴火と同等の噴火が発生すると、それは IT 化された近代都市が初めて経験する大災害となる可能性がある。

(3) このような事から、次の富士山噴火を精度良く予測するためにも、多角的な監視が必要であり、平常時のデータを蓄積しておく事が“異常”を判断するためにも肝要と考えた。そこで現在最も手薄と考えられる地磁気観測の増強およびマッチドフィルタ法(MF 法)と呼ばれる最新の微小地震検出手法を富士山に適用し、マグマだまりのモデルを構築し、常時監視を目指す事とした。さらに富士山頂ではすでに CO₂ や SO₂ などのガスもモニタリングされており、これらも活用できる状況である。換言すれば、山頂および山腹での多項目観測データを複数分野の専門家(地球電磁気学、地震学、地球化学、測地学、火山学等)が常時同じプラットフォームでデータを共有し、マグマの“今”を知る事が本科研費の最大の目的であり、さらに社会に情報発信するシステムを構築すべきであると考えた。

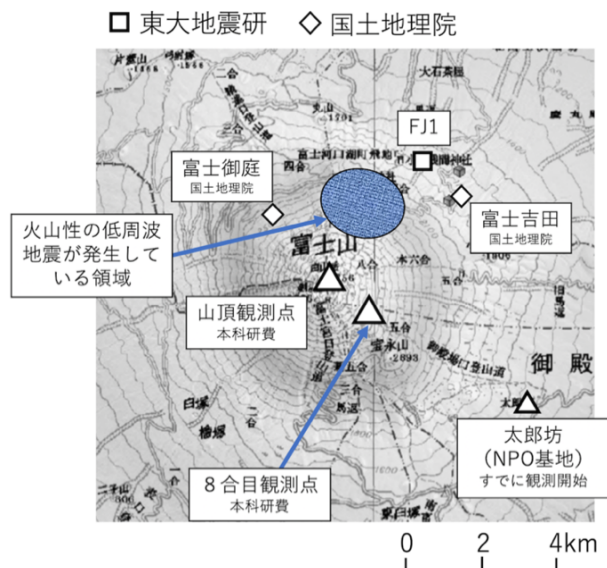
2. 研究の目的

(1) そこで現在最も手薄と考えられる地磁気観測の増強およびマッチドフィルタ法(MF 法)と呼ばれる最新の低周波微小地震検出手法を富士山に適用し、マグマだまりのモデルを構築し、常時監視を目指す事とした。さらに富士山頂ではすでに CO₂ や SO₂ などのガスもモニタリングされており、これらも活用できる状況である。換言すれば、山頂および山腹での多項目観測データを複数分野の専門家(地球電磁気学、地震学、地球化学、測地学、火山学等)が常時同じプラットフォームでデータを共有し、マグマの“今”を知る事が本科研費の最大の目的であり、さらに社会に情報発信するシステムを構築すべきであると考えた。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、地磁気観測で理論的に確立されているマグマの上昇による全磁力の変化(高温のマグマが山体内部を上昇する事による周囲の岩石の熱消磁)を捉えようというものである。さらに MF 法を用いて、火山性低周波微小地震の検知能力を現在、気象庁が発表している震源要素より圧倒的に多くの震源決定を目指す。また環境モニタリングとして山頂で実施されている CO₂ や SO₂、PM_{2.5} 等の観測結果や火口監視カメラ等のデータを NPO のポータルサイトに集約し、日本の火山監視のレベルの向上を目指すものである。

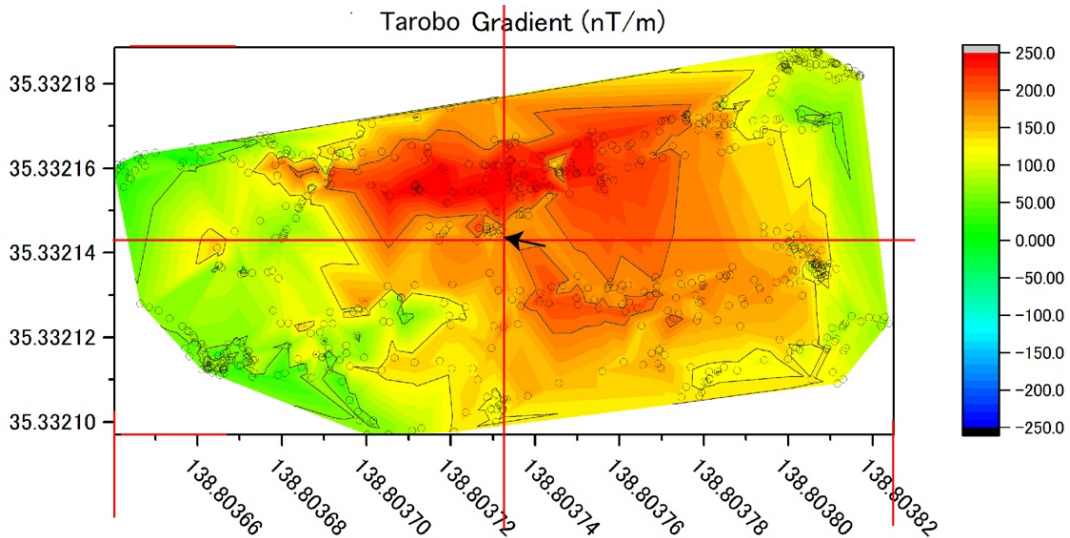
(2) 岩石磁化は温度上昇に伴い減少するため、地表に磁力計を設置してその時間変化を観測することで、地下の温度変化が間接的に推定できる。これまで阿蘇中岳火口近傍やニュージーランドの White Island など、多くの火山での全磁力観測により、地磁気が火山活動に伴い数か月～数年の単位で増減を繰り返すことが報告されている。右図は、2020 年 9 月時点の地磁気観測点の分布である。国土地理院が 2 点、東大地震研が 1 点を 5 合目より下で観測を行っており、それより上部には地磁気観測点は存在しない。



(3) 想定外であったのは、2021 年度はコロナの影響で、富士山頂への立ち入りそのものが完全に禁止され、山頂付近での観測や調査そのものができなかった事と、2022 年度で国土地理院が諸般の事情で、富士御庭と富士吉田での観測を中止してしまった事である。その結果、2022 年度末には東大地震研の FJ1 と太郎坊の 2 地点しか地磁気連続観測点が稼働していない状態となってしまった事である。

4. 研究成果

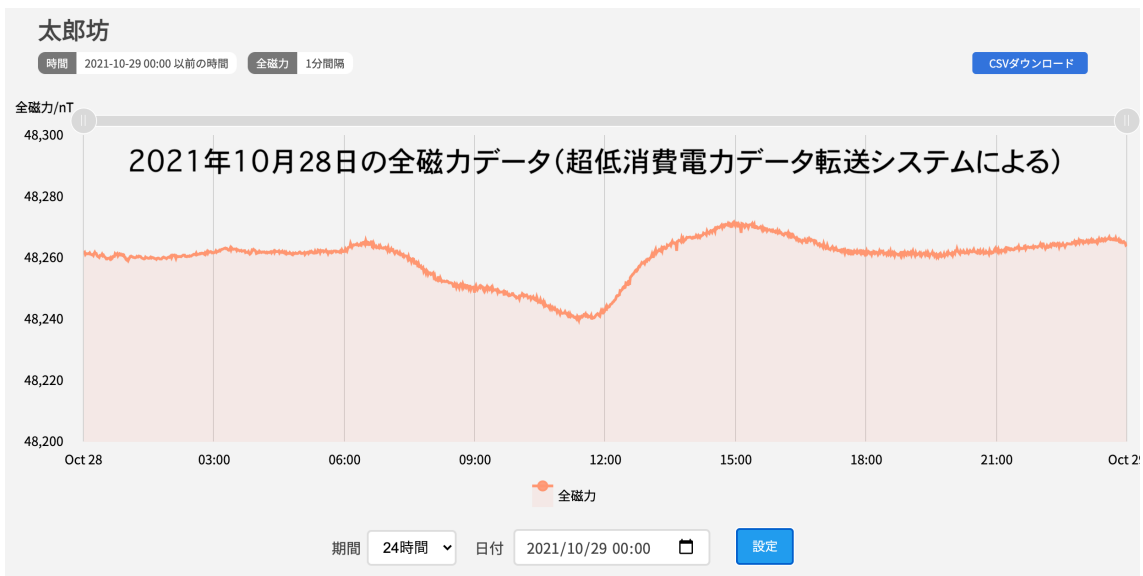
(1) 2021 年度の当初計画では、富士山頂観測点に磁力計の設置を考えていたが、コロナの状況が改善せず、山頂での作業が大幅に制限される状況が継続した。そのため、2020 年度に別途予算で設置した太郎坊地磁気観測点周辺の環境調査と、地磁気データ表示のためのポータルサイト開設や主成分解析(PCA)等を組み込んだ地磁気データ解析システムを構築した。次の図は太郎坊全磁力観測点周辺の地磁気環境調査の結果である。



これは微弱な地磁気変化を抽出するためには観測点周辺の磁気勾配を知っておく事が重要なためである。富士山は磁性体を多く含む玄武岩質溶岩から構成されており、この点では工夫を要する。そのため 2021 年度には太郎坊観測点周辺の磁気勾配測定を実施した。

(2) 将来の富士山に関する各種観測データのリアルタイム公開のため、LPWA(Low Power Wide Area)通信を用いた地磁気データ表示システムの試作版をまず動作させた。

次の図は 2021 年 10 月 28 日の太郎坊観測点における全磁力データの表示例である。

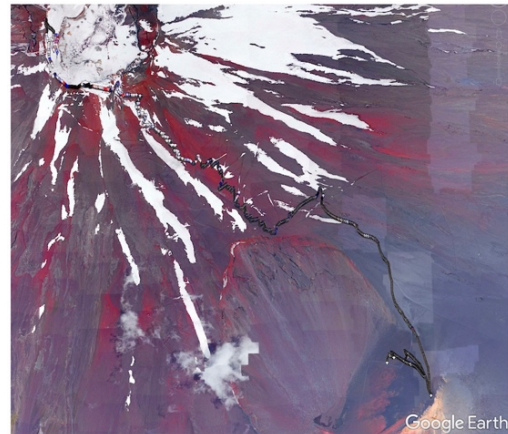


(3) 地磁気データ解析システムは、プラットフォームを Python として開発を実施した。組み込んだアルゴリズムは主成分解析(PCA)および独立成分解析(ICA)である。

(4)2022 年度もコロナ禍により、富士山頂での活動が完全に元通りになっていない状況であった。そのため将来の恒久的な観測点設営に適した地点の予備調査を重点的に実施した。次の写真は 2022 年 8 月に実施された地磁気環境調査の観測風景である。



右側の図は徒歩で実施された環境調査のルートマップである。7 合 8 尺近傍に観測点の候補地となりうる地点を発見する事ができた。ここには気象庁の地震計等も近くに設置されており、登山道にも近く、ブルドーザによる機材の輸送も容易であり、将来の観測点候補地となりうるものである。

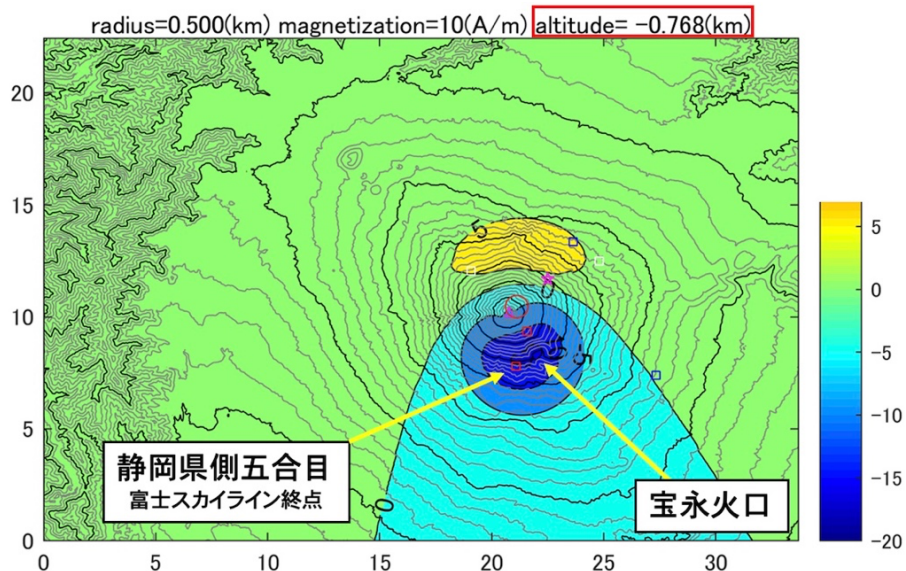


(5)現在の火山性の低周波地震の分布から、マグマ溜りは地下 15km から 18km 付近に 2 k m から 3 k m の空間的広がりを持っている可能性が推定されている。

ここでは半径 500m の球（マグマ溜り）が 50A/m の磁化を持っていると仮定し、それが完全消磁した時にどの程度の影響が地表で観測されるかを計算した。ちなみに主磁場は 2020 年国土地理院の磁気図を参照した。また磁化もその方向に一様に帯磁していると仮定した。

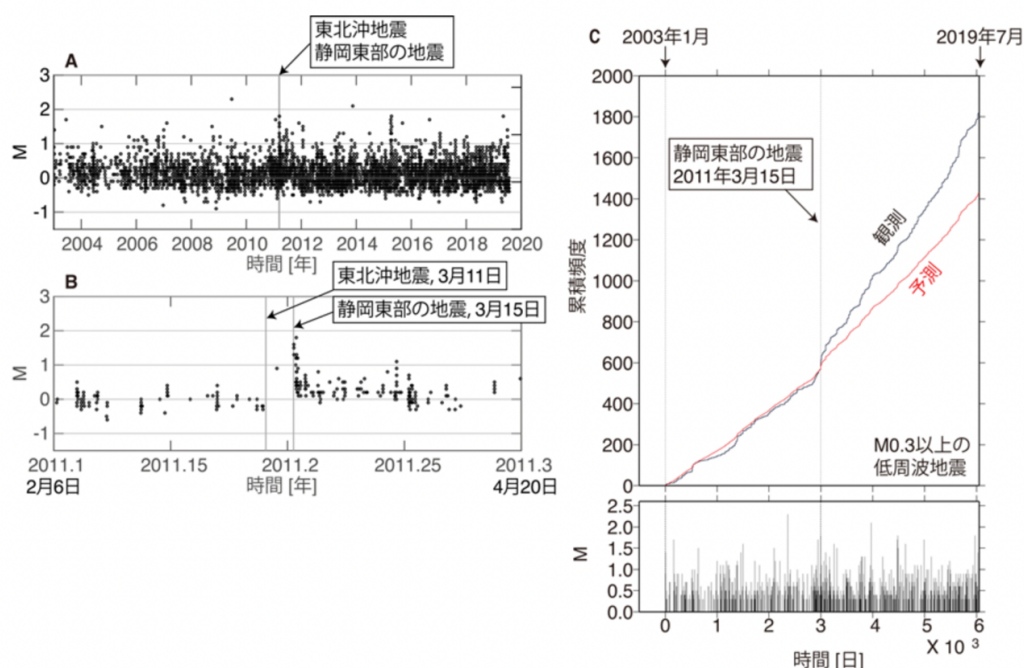
その結果、マグマが海拔高度ゼロ付近まで上昇してくると、静岡県側の富士山五合目周辺に観測点を設置すれば、明瞭な全磁力変化が捉えられる事が判明した。

次の図はマグマが海拔高度-768m まで上昇してきた時の全磁力変化である。



(6)地震観測については、富士山深部のマグマ活動と関係が指摘されている低周波地震を対象として研究を実施した。低周波地震は通常の地震に比べてゆっくりとした揺れを生じる地震である。また、富士山で起きる低周波地震の規模は非常に小さいため(マグニチュード $M=1\sim 2$)、観測された揺れのデータに含まれるノイズに埋没して地震と認識されない低周波地震が存在する。そのため、雑音の中から地震動を検知するマッチドフィルタ法(MF法)を導入した。2003年1月～2019年7月に富士山周辺の16観測点で記録した揺れのデータの中から、気象庁が観測した低周波地震の波形と調和する波形をデータ処理で抽出した。その結果、雑音に混じるなど気象庁が観測できていない低周波地震を検出する事に成功した。これまで低周波地震を約6,000回検知し、これは同一期間に気象庁が検出した地震回数の約3倍であった。

2011年3月11日東北沖地震(M9.0)の4日後に富士山麓で発生した静岡東部の地震(M6.4)の後、火山性微動は観測されず低周波地震活動は静岡と気象庁から報告され、すぐに富士山噴火につながる事は無いと当時判断された。我々は地震活動を予測・評価するETAS(Epidemic Type Aftershock Sequenceの略)モデルを用いて解析した結果、静岡東部の地震により活動が活発化していたことを見出した。さらに活動レベルは静岡東部の地震前のレベルに戻っておらず、富士山のマグマシステムが変化したことが示唆された。なおこの結果はすでにNanjo et al., 2023として、Scientific Reports誌に掲載された。



図の説明:富士山の低周波地震

- (A)低周波地震のマグニチュード(M)を時間の関数としてプロット。縦線は2011年に起きた東北沖地震(3月11日)と静岡東部の地震(3月15日)のタイミングを示す。
- (B)これらの地震の前後に注目した図。2月6日(2011.1年)～4月20日(2011.3年)の低周波地震を使用した。静岡東部の地震の直後に低周波地震が起きている。
- (C)上パネル:2003年1月～2019年7月の $M \geq 0.3$ の低周波地震の累積頻度を”観測”と呼ぶ(黒線)。ETASモデルの累積頻度を”予測”と呼ぶ(赤線)。予測は、静岡東部の地震(2,995日の縦線)までの観測にETASモデルをフィットさせ、その後外挿したもの。もし同地震前後で変化がなければ、観測(黒線)と予測(赤線)はほぼ重なるはずだが、同地震後に活動が活発化したため観測(黒線)は予測(赤線)より上方に逸れている。下パネル:Mの時間変化。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nanjo K. Z., Yukutake Y., Kumazawa T.	4. 巻 13
2. 論文標題 Activated volcanism of Mount Fuji by the 2011 Japanese large earthquakes.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-37735-4	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11件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 長尾年恭, 鴨川 仁, 楠城一嘉, 上嶋 誠, 佐柳敬造
2. 発表標題 富士山噴火予知実現のための多角的監視
3. 学会等名 日本地震予知学会2022年度学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長尾年恭, 鴨川 仁, 上嶋 誠, 佐柳敬造
2. 発表標題 富士山における全磁力観測 ー山頂近傍における電磁環境予備調査ー,
3. 学会等名 第16回富士山測候所を活用する会成果報告会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長尾年恭, 鴨川 仁
2. 発表標題 太郎坊における全磁力測定とそのデータ評価
3. 学会等名 認定NPO法人「富士山測候所を活用する会」第15回成果報告会講演予稿集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nagao, T, M. Kamogawa, M. Uyeshima and K. Sayanagi
2. 発表標題 Measurement of total magnetic intensity at Mt. Fuji for volcanic eruption prediction research
3. 学会等名 28th IUGG General Assembly, Berlin (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長尾年恭, 鴨川 仁, 上嶋 誠, 楠城一嘉
2. 発表標題 2023年度における富士山における全磁力・地震データ解析の進捗状況
3. 学会等名 認定NPO法人「富士山測候所を活用する会」第17回成果報告会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 楠城一嘉, 行竹洋平, 熊澤貴雄
2. 発表標題 富士山の低周波地震の検知と統計解析
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazu Z. Nanjo
2. 発表標題 Studies to evaluate seismicity using statistical methods
3. 学会等名 2022 Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes (EMSEV) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Z. Nanjo, Y. Yukutake
2. 発表標題 A study on detection of low-frequency earthquakes at Mt. Fuji and data quality evaluation
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年度大会 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Z. Nanjo, Y. Yukutake
2. 発表標題 Volcanism of Mount Fuji activated by the 2011 Japanese large earthquakes.
3. 学会等名 EGU23, Vienna (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 楠城一嘉, 行竹洋平, 野田洋一
2. 発表標題 Matched Filter 法を用いて富士山の低周波地震を検知する研究:序報
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 楠城一嘉, 行竹洋平
2. 発表標題 富士山直下で起きる低周波地震の研究の序報:Matched Filter 法を用いた地震カタログの作成とカタログの性能評価
3. 学会等名 日本地震学会 2021 年度秋季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 長尾年恭	4. 発行年 2022年
2. 出版社 ビジネス社	5. 総ページ数 168
3. 書名 巨大地震列島	

1. 著者名 楠城一嘉 編著	4. 発行年 2022年
2. 出版社 成山堂書店	5. 総ページ数 120
3. 書名 地震と火山と防災のはなし	

〔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
研究分担者	鴨川 仁 (Kamogawa Masashi) (00329111)	静岡県立大学・その他部局等・特任教授 (23803)	
研究分担者	楠城 一嘉 (Nanjo Kazuyoshi) (10549504)	静岡県立大学・その他部局等・特任教授 (23803)	
研究分担者	上嶋 誠 (Uyeshima Makoto) (70242154)	東京大学・地震研究所・教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	佐柳 敬造 (Sayanagi Keizo)		
研究協力者	藤井 敏嗣 (Fujii Toshitsugu)		
研究協力者	本多 亮 (Honda Ryo)		
研究協力者	加藤 俊吾 (Kato Shungo)		

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