

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02404

研究課題名(和文)火山噴火の標準モデル構築によるハザード予測手法の開発

研究課題名(英文) Hazard forecasting method by development of standard model of volcanic eruption

研究代表者

井口 正人 (IGUCHI, MASATO)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：60144391

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,600,000円

研究成果の概要(和文)：インドネシアの活動的火山噴火に前駆する火山性地震や地盤変動とその後に発生した噴火に伴うテフラ、火砕流、溶岩流の到達域を検討することにより、火山噴火の標準モデルを構築した。1. 噴火に先行して地盤変動が現れ、次に火山構造成地震、低周波地震が発生する。これは、マグマの貫入による弾性変形、応力の増加による破壊の開始、マグマの発泡の開始の過程進行を意味する。2. 噴出量は、火山性地震エネルギーや地盤変動に伴う圧力源の体積変化と相関があり、噴出物の上限が認められる。3. マグマのテフラ、火砕流、溶岩流への配分は揮発性成分の噴火直前の量に依存し、マグマの貫入速度が大きいほどテフラが卓越する爆発的噴火となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火山性地震、火山体の膨張などの異常現象の発現から噴火の発生を想定することができるが、噴火ハザードエリアの決定は、それぞれの火山における過去の異常現象の発現と噴出物の飛散・到達範囲との対応関係に基づいて、火山毎に個別に決定されている。個別の火山における対応関係よりも、どの火山にも適用可能な異常現象-噴出物到達範囲の対応関係の標準モデルを用いることにより、テフラ、火砕流、溶岩流の個別のハザード要因への噴出物が推定でき、噴火に先行する地震活動、地盤変動から噴火発生前のハザード予測ができる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：A standard model of volcanic eruptions is developed by examining the volcanic earthquakes and ground motions that precede active volcanic eruptions in Indonesia and the area of tephra, pyroclastic flows, and lava flows associated with the eruptions. 1) Ground deformation precede eruptions, followed by volcano-tectonic and low-frequency earthquakes. This means the process of elastic deformation due to magma intrusion, initiation of rupture due to increased stress, and initiation of magma foaming. 2) The volume of ejecta is correlated with the volumetric change of pressure source due to volcanic seismic energy and ground deformation, and an upper limit to the volume of ejecta is recognized. 3) The distribution ratio of magma volume to tephra, pyroclastic flow, and lava flow depends on the amount of volatile components immediately before the eruption, and the higher the magma intrusion rate, the more explosive the eruption with predominant tephra.

研究分野：火山防災

キーワード：火山噴火 火山性地震 地盤変動 テフラ 火砕流 溶岩流

1. 研究開始当初の背景

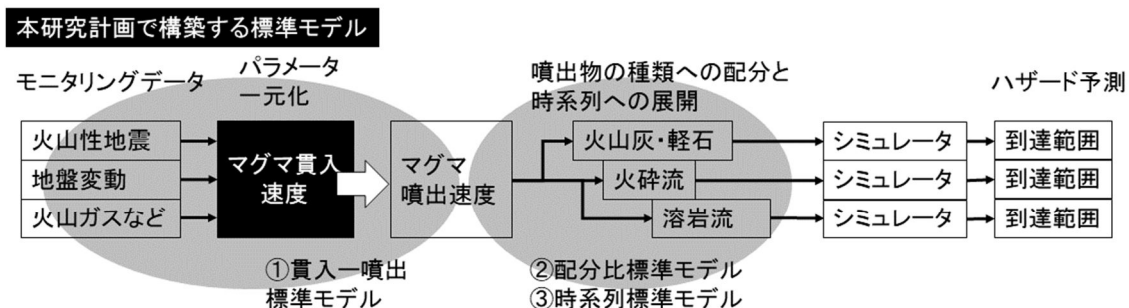
火山噴火の発生予測のために地震や地盤変動などの多種目の火山観測データが用いられ、火山性地震、火山体の膨張などの異常現象の発現から噴火の発生を想定することができるレベルになってきている。これを災害軽減のための警報としたのが、気象庁が発表する噴火警戒レベルであり、異常現象の発現データからハザードエリアを決め、立ち入り規制区域等を防災情報として提供するものである。一方、ハザードエリアの決定は、それぞれの火山における過去の異常現象の発現と噴出物の飛散・到達範囲との対応関係に基づいて、火山毎に個別に決定されている。噴火が頻繁に発生する火山においては、ある程度わかるが、近代観測が行われるようになって噴火の発生がない活火山では、異常現象 - 噴出物到達範囲の対応の経験的關係を導くことさえできず、噴火が頻繁に発生する火山でもこれまでの規模を超えるものが発生した場合、噴出物の到達範囲を予測することができない。個別の火山における対応関係よりもどの火山にも適用可能な異常現象 - 噴出物到達範囲の対応関係の標準モデルが必要である。そして、どの火山にも適用可能な異常現象 - 噴出物到達範囲の対応関係の標準モデルの構築は、噴火に前駆する様々な現象 - マグマの貫入速度 - マグマの噴出速度(様式)の対応関係の標準モデルを作成することに整理される。

前駆現象からマグマの貫入速度、あるいはマグマの噴出速度などが予測することが可能だとしても、火山灰、火砕流、溶岩流などの個々の噴出物の形態ごとに運動方程式が異なるので、それぞれ異なるシミュレーションを行うことになり、マグマの総量に加え、マグマが火山灰・軽石、火砕流、溶岩流などにどのような割合で配分されるかが次の問題となる。また、火山灰・軽石、火砕流、溶岩流は同時に噴出するのではない。火山灰・軽石の噴出から始まり、最終的には溶岩の流出をもって噴火活動の終息に向かうことが多いが、これらの時系列についても考慮する必要がある。

2. 研究の目的

本研究においては、個々の火山の噴火活動の多様性を踏まえつつ、その中から噴火活動の共通性を抽出することにより標準モデルを構築し、標準モデルを用いた火山噴火ハザードを予測する手法を開発することを目的とする。火山噴火の標準モデル(図1)とは、火山噴火に前駆する地震活動、地盤変動量等のデータから推定されるマグマの貫入速度からマグマの噴出速度を決定できるモデル、マグマの量を火山灰・軽石、火砕流、溶岩流に配分するモデル、さらに火山灰・軽石、火砕流、溶岩流の噴出の時系列を決めるモデルである。

火山噴火のモデリングについては、物理学的な方程式に基づいて多くのモデルが提示されており、例えば、長時間にわたって高噴出速度が継続するプリニー式噴火のような定常的な噴火であれば、モデル化が進んでいる。一方、火山のモニタリングデータの視点から見ると、火山現象は多様であるために、むしろ個々の火山の特殊性の抽出が強調され、共通の原理に基づくモニタリングデータの理解が遅れている。本研究は、マグマの貫入速度をキー・パラメータとしてモニタリングデータから火山噴火の標準モデルを構築するという新たな試みを行う。噴出速度がわかっても、火山の噴火物は火山灰・軽石、火砕流、溶岩流などに配分されるので、ハザード予測のためには、それぞれの要素への配分比をモデル化する必要がある。過去の噴火については配分量のデータはあるが、標準モデルは存在しない。本研究では、さらに、マグマの貫入速度から配分比を決める標準モデルを構築する。



これまでの考え方

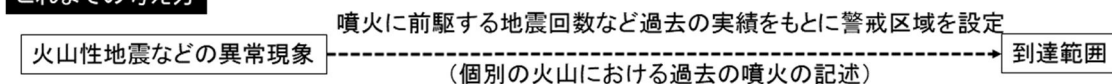


図1 火山噴火に先行するマグマの貫入 - 噴出、火山灰・軽石、火砕流、溶岩流への配分比、時系列の標準モデルの概念図

3. 研究の方法

我が国においては、最も適したフィールドとして桜島火山を上げることができるので、桜島において観測・調査を継続する。また、観測・調査が進んでいる日本あるいは海外のいくつかの活動的な火山においては、過去の噴火に関する文献調査等によって、モニタリングデータと噴出物の到達範囲の対応関係を調べる。

それでも事例は不足しているので、世界で最も頻繁に噴火が発生しているインドネシアの火山を対象として調査を行う。インドネシアではメラピなど一部の火山を除いて文献調査ができないが、約60の火山において、1990年以降、30年近くほぼ均質なデータが蓄積されており、現地調査によりモニタリングデータと噴出物の到達範囲の対応関係を調べる。

なお、新型コロナウイルスの感染拡大により、当初予定していたようなインドネシアにおける現地調査ができず、主として文献調査と過去データの分析によって研究を進めた。

火山噴火の標準モデルの構築

マグマ貫入速度の見積もりからマグマ噴出速度と総噴出量の推定

地震活動や地盤変動データを用いてマグマの貫入速度を見積もり、地震エネルギー - 貫入速度 - 噴出速度をつなぐデータベースを作成する。図1に示したものが標準モデルの考えの基礎になるものであり、他の火山噴火のデータベースを用い、標準モデルを構築する。

火山灰・軽石、火砕流、溶岩流への配分比の検討

過去の噴火活動について文献調査に基づいて、火山灰・軽石、火砕流、溶岩流の量と配分比のデータベースを作成する。その上で、配分比とマグマ貫入速度との関係を検討し、配分比に関する標準モデルを提示する。

火山灰・軽石、火砕流、溶岩流の噴出の時系列モデル

火山灰・軽石の噴出から始まり、最終的には溶岩の流出をもって噴火活動の終息に向かうことが多く、1914年桜島噴火は火山灰・軽石、火砕流、溶岩流の噴出の時系列を示した。過去の噴火活動について文献調査に基づいて、時系列のデータベースを作成する。その上で、時系列とマグマ貫入速度との関係を検討し、マグマ貫入速度ごとの時系列に関する標準モデルを提示する。

数値シミュレーションによる標準モデルの妥当性の検証

数値シミュレーションの実施

上記の火山噴火標準モデルから想定される火砕流、溶岩流への噴出物の配分と発生時系列の組み合わせに基づいて、個々の事象の連鎖的発生(イベントチェーン)としてとしてシミュレーションを実行する。プログラムは、山下・他(1990)、山田・他(1991)を用いた。イベントチェーンシミュレーションの結果を、過去の噴火による火砕流、溶岩流の到達氾濫/堆積実績と比較し、モデルの妥当性を評価する。また、シミュレーション結果のデータベースに格納されているシミュレーション結果と比較し、単一現象のシミュレーションと時系列的なイベントチェーンシミュレーションとの相違やデータベースの標準モデルとしての評価を行う。

4. 研究成果

マグマ貫入速度と噴火様式(マグマ噴出速度)・規模(総噴出量)の関係

メラピ火山のマグマの貫入速度と噴火様式(噴出率)と規模の関係は以下の様にまとめられた。

- 1) 地盤変動の検出限界以下(マグマ貫入速度 ~ 0)・・・水蒸気噴火
- 2) マグマ貫入速度 $\sim 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$ ・・・極小規模溶岩噴出(10^5 m^3 級)
- 3) マグマ貫入速度 $\sim 10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ ・・・ 10^6 m^3 級の溶岩ドーム形成(VEI2)と崩落による火砕流の発生
- 4) マグマ貫入速度 $\sim 10^6 \text{ m}^3/\text{日}$ ・・・大規模噴火(VEI4)、火山灰+火砕流が 10^8 m^3 級の噴火発生

このマグマ貫入速度による噴火様式・規模への分岐を桜島と比較する。桜島では2006年と2007年に水蒸気マグマ噴火が昭和火口で発生したが、この時にはマグマ貫入速度の見積もりを可能とする地盤変動が検知されていないので、メラピの1)のケースと同じである。マグマ性噴火であるブルカノ式噴火が頻発するときのマグマ貫入速度は $\sim 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$ であり、メラピの2)と3)の中間にある。メラピでも桜島のようなブルカノ式噴火が2019年後半から2020年の2月ごろにかけて発生した。メラピの2018年後半のマグマ貫入速度は $\sim 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$ であったが、2020年第4四半期のマグマ貫入速度は $\sim 10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ に増加していることから、その過渡期である2019年後半から2020年の2月ごろは一時的にマグマ貫入速度が $\sim 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$ となっていた可能性がある。桜島でも規模の大きいブルカノ式噴火や溶岩噴泉がみられるときは $\sim 10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ に達する。雲仙普賢岳噴火や西之島噴火でも溶岩ドームや溶岩流となる時は、噴出率が $\sim 10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ に達しており、この状態を保ったことからマグマ貫入速度も $\sim 10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ にあると推定される。

北スマトラにあるシナブン火山は2013年12月に山頂に溶岩ドームが出現し、2014年1月から6月ごろまでは溶岩が流出した。溶岩の噴出速度は20万 $\text{m}^3/\text{日}$ ~65万 $\text{m}^3/\text{日}$ と見積もられており、同様に $\sim 10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ のオーダーにある。溶岩が山頂に現れる直前2か月のGNSSによる地盤変動からはマグマ貫入速度は $\sim 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$ と見積もられているが、深さ2km以浅の圧力源の膨張によるものである。一方、溶岩が流出し始めてからの収縮圧力源の深さは8kmにあり、膨張期の地盤変動も深さ8kmの圧力源が関与していると考えれば、マグマの貫入速度は $\sim 10^5 \text{ m}^3/\text{日}$ となる。溶岩流となる下限の貫入速度であるのかもしれない。

火山灰・軽石、火砕流、溶岩流への配分比の検討

次に、噴出量の火山灰・軽石（テフラ）、火砕流、溶岩流への配分を過去の噴火に遡って文献等を調査した。マグマ換算体積（DRE）にしたものを表1に示す。

表1 過去噴火の火山灰・軽石、火砕流、溶岩流のマグマ換算体積（DRE）とその比

火山名	発生年	テフラ (m ³)	火砕流 (m ³)	溶岩流 (m ³)	合計 (m ³)
桜島	764	3.5 × 10 ⁷	量不明	8.7 × 10 ⁸	9.0 × 10 ⁸
		4%		96%	
	1471-1476	2.8 × 10 ⁸	量不明	4.7 × 10 ⁸	7.5 × 10 ⁸
		37%		63%	
	1779	1.0 × 10 ⁸	量不明	1.6 × 10 ⁹	1.7 × 10 ⁹
		6%		94%	
	1914	2.1 × 10 ⁸	量不明	1.3 × 10 ⁹	1.5 × 10 ⁹
		14%		86%	
	1946	5.7 × 10 ⁵	0	1.7 × 10 ⁸	1.7 × 10 ⁸
		1%未満		99%以上	
2018/6	1.4 × 10 ⁵	1.2 × 10 ⁴	0	1.5 × 10 ⁵	
	92%	8%			
新燃岳	2011	1.0 × 10 ⁷	7.0 × 10 ⁴	1.6 × 10 ⁷	2.6 × 10 ⁷
		38%	1%未満	61%	
口永良部島	2015	2.3 × 10 ⁵	9.2 × 10 ⁴	0	3.2 × 10 ⁵
		71%	29%		
アグン	1963/2	2.4 × 10 ⁷	1.9 × 10 ⁷	1.1 × 10 ⁸	1.5 × 10 ⁸
	第1フェーズ	16%	13%	71%	
	1963/5	1.0 × 10 ⁷	7.7 × 10 ⁶	0	4.8 × 10 ⁷
	第2フェーズ	57%	43%		
ケルート	2014	1.2 × 10 ⁸	7.7 × 10 ⁶		1.3 × 10 ⁸
		94%	6%		
スリエール	1979	1.4 × 10 ⁷	量不明	4.8 × 10 ⁷	6.2 × 10 ⁷
		22%		78%	

密度を 2600kg/m³ とした。

桜島の大規模山腹噴火については、溶岩流への配分が多い。1955 年以降の南岳の山頂噴火では、火砕流が発生することはまれであり、テフラへの配分の割合が大きい。

新燃岳 2011 年噴火、1963 年アグン火山噴火の初期フェーズ、1979 年スリエール火山噴火では、テフラと溶岩流に近い量となっている。この傾向は桜島の山頂噴火に近い。また、セントビンセント島・スリエール火山の 1979 年の噴火は火砕流の量が分からないが、溶岩流が多い。

2015 年口永良部島噴火、1963 年アグン火山噴火の第 2 フェーズ、2014 年ケルート火山噴火では、噴出物はテフラと火砕流で占められている。最も危険度の高い火砕流の配分比に注目してみると、概ね 30%以下である。プリニー式噴火及び準プリニー式噴火といった爆発的な噴火では火砕流が占める割合は小さくなる。ケルート火山の噴火活動では、20 世紀以降に発生した他の大規模噴火でもこの配分比は同様である。

火山灰・軽石、火砕流、溶岩流の噴出の時系列モデル

上記 では、貫入したマグマの火山灰・軽石、火砕流、溶岩流への配分比を検討したが、これらは同時に噴出するわけではないので、火山灰・軽石、火砕流、溶岩流の 3 つの要素が揃っている噴火についてその時系列について検討した。

桜島の大規模噴火では、初期段階において多量の軽石・火山灰が放出されるプリニー式噴火が発生した。また、火砕流も発生している。その後、溶岩流出が始まるとともに、火山灰の放出が続いた。同様の噴火活動の推移は 2011 年 1 月 26 日に始まった霧島新燃岳噴火でも見られる。26 日の午後以降、準プリニー式噴火が、3 回繰り返され、29 日には火口内に溶岩が噴出し、31 日まで続いた。1979 年のスフリエール火山の噴火も爆発的な噴火から溶岩流出の推移を示した。これらは標準的な推移と考えられる。

一方、これとは異なる推移を示す場合もある。スフリエール火山で 2020 年 12 月から始まる噴火活動では、初期段階において突然溶岩が火口内に噴出し、溶岩流出は翌年 3 月まで続いたが、4 月 9 日には多量の火山灰を噴出する大規模噴火が発生した。また、1963 年アグン火山噴火の第 1 フェーズは溶岩流出を主体としたものであったが、5 月 16 日の第 2 フェーズは火砕流噴火であった。

数値シミュレーションの実施

火砕流は最も危険なハザード要因であるので、火砕流の流下予測は避難による防災対策上重要である。溶岩ドーム崩落型の火砕流であれば、山頂に出現した溶岩ドームの全量が火砕流に変換されると仮定してハザード予測を行えばよい。噴煙柱崩壊型の火砕流の場合は、火砕流の体積は火道内に貫入してきたマグマの量に依存する。地盤変動観測等によってマグマの貫入量を見積もることは可能であるが、貫入したマグマの全量が火砕流に変換されるわけではなく、噴火様式によって、貫入マグマから火砕流への配分比は異なる。したがって、火砕流の配分比の評価が重要である。項において述べたように、脱ガスがある程度進行したマグマの噴出では配分比は 1/4 から 1/3 と大きい。火山ガスを多く含む爆発的な噴火では配分比は 1/10 以下と小さい。そこで、桜島の爆発を対象に配分比の妥当性をシミュレーションによって検証した。

桜島では 2018 年 6 月 16 日に火砕流を含む爆発が発生し、南岳南西山腹の野尻川を 1.3 km 流下した。まず、火砕流シミュレーションにより、火砕流体積と流下距離の関係を野尻川、持木川、古里川を対象に調べた。火砕流体積と流下範囲の関係を図 2 に示した。火砕流が 1.8 km の距離に到達するためには、野尻川で 5 万 m³、持木川で 8 万 m³ の火砕流が必要であることがわかる。先に述べた検討から桜島の爆発の場合、火砕流への配分比は多くても 10% と考えられる。したがって、火砕流が 1.8 km の距離に到達するためには、数十万 m³ のマグマが必要なことが推定される。2018 年 6 月 16 日に発生した爆発に伴う地盤変動から圧力源の体積変化量は、15.5 万 m³ と見積もられるので、火砕物の見かけ体積は約 40 万 m³ となる。そのうち 10% が火砕流になると仮定すると、約 4 万 m³ が火砕流として流下し、図 2 のダイアグラムでは流下距離は 1.5 km を下回り、目視観測から推定されている流下距離 1.3 km と整合的である。流下距離を 1.3 km とするには、火砕流への配分比を 8% とすればよい(表 1)。

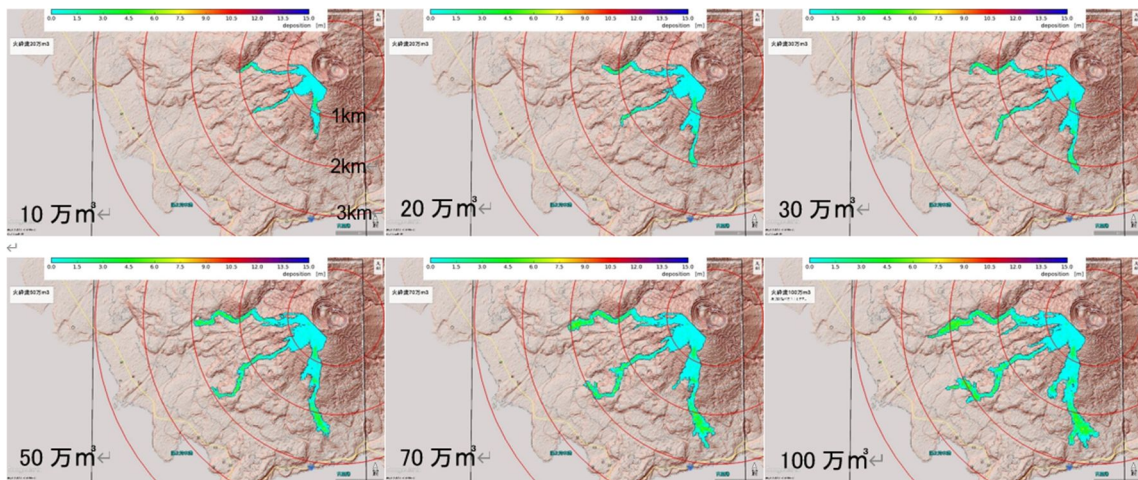


図 2 桜島南西山麓における火砕流の流下シミュレーションの結果。流出開始地点を野尻川、持木川、古里川の上流の火口縁とした。火砕流の体積はそれぞれの流溪ごとに与えた値である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 井口正人・為栗健・平林順一・中道治久	4. 巻 64
2. 論文標題 マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 火山	6. 最初と最後の頁 33-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18940/kazan.64.2_33	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 Iguchi, M., Nakamichi, H., Tameguri, T.	4. 巻 15
2. 論文標題 Integrated study on forecasting volcanic hazards of Sakurajima volcano	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Jour. Disast. Res.	6. 最初と最後の頁 174-186
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jdr.2020.p0174	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 井口正人	4. 巻 38
2. 論文標題 桜島大規模噴火の発生予測 - 非地震性地盤変動から地震活動を伴う地盤変動への推移	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 自然災害学会誌	6. 最初と最後の頁 306 - 317
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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Iguchi, M., Tamegiri, T., Hirabayashi, J., Nakamichi, H.
2. 発表標題 Forecasting Volcanic Eruption of Sakurajima Volcano Based on Magma Intrusion Rate in Recent 100 Years
3. 学会等名 International Union Geodesy and Geophysics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井口正人・為栗 健・平林順一・中道治久
2. 発表標題 マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2019
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	宮本 邦明 (Miyamoto Kuniaki) (00263492)	日本工営株式会社中央研究所・中央研究所・顧問 (92103)	

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