

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K01323

研究課題名（和文）瞬間的な火山爆発噴火の災害予測モデル提案

研究課題名（英文）Disaster prediction model for short-term volcanic explosions

研究代表者

鈴木 雄治郎（SUZUKI, YUJIRO）

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：30392939

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）：火山の爆発的噴火では、大気中に滞留する火山灰が航空機運航の障害となり、地表への降灰は大規模な災害を発生させる。そのため、火山灰の大気中での拡大速度と降灰のタイミングを高い精度で迅速に予測することが防災上求められている。火山噴煙の3次元モデルを構築し、数値シミュレーションを実施した。その結果、高頻度で起こる瞬間的爆発噴火の噴出条件と噴煙高度の関係を推定した。また、阿蘇中岳2021年噴火やトンガ2022年噴火の噴煙の上昇や拡大を再現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

活動的火山が多く存在する日本において、爆発的火山噴火の災害予測を高精度で行うことが求められる。そのため、より現実的な数値モデルを構築し、数値シミュレーションによって過去の噴火事例の再現や将来起こりうる噴煙災害の予測をすることは重要である。本成果は、火山災害予測の高精度化に向けての準備に大きな貢献をした。

研究成果の概要（英文）：In an explosive volcanic eruption, a large amount of volcanic ashes that stays in the atmosphere threaten aviation safety, and ash fall on the ground surface causes a large-scale disaster. Therefore, it is required for disaster prevention to quickly predict the expansion speed of volcanic ash in the atmosphere and the timing of ash fall with a high accuracy. We have developed a 3D numerical model of eruption cloud and carried out numerical simulations. As a result, the relationship between the eruption conditions and the plume height was estimated. In addition, we reproduced the ascending and horizontal expansion of the eruption clouds in Aso-Nakadake 2021 and Tonga 2022 eruptions.

研究分野：火山物理学

キーワード：火山噴火 数値モデル 降灰 サーマル 流体力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

火山の爆発的噴火では、大気中に滞留する火山灰が航空機運航の障害となり、地表への降灰は大規模な災害を発生させる。そのため、火山灰の大気中での拡大速度と降灰のタイミングを高い精度で迅速に予測することが防災上求められている。特に、2014年御嶽山噴火のような水蒸気噴火もしくはマグマ水蒸気噴火は小規模だが頻度が大きく、その災害予測は重要である。

噴火条件と噴煙高度の関係は徐々に解明されてきているが、防災上で利用できるほど定量化が進んでいなかった。火山灰の降灰分布については噴煙上昇を1次元的に近似し大気風も非常に単純化した1980年代のモデルが使用されている状況であった。一方で、噴煙の3次元モデルが発達してきていて、実際の観測事例に適用できる段階に達しつつあった。また、観測技術の発展で、実際の噴煙内部構造が見られるようになってきていた。そのため、実証的に火山噴煙研究を進め、噴火条件と噴煙挙動・降灰分布をむすびつける環境が揃いつつあった。

2. 研究の目的

爆発的火山噴火は、連続的に噴火を継続するプリニー式噴火と短時間で噴火を終了するブルカノ式噴火・マグマ水蒸気噴火の2種類に大きく分けられる。前者の連続的噴火に伴う噴煙は浮力で上昇するブルームとして近似し、その噴煙高度が噴出率の1/4乗に比例するというスケールリング則が求まっている。この関係は観測データを凡そ説明できている。ただし、近年数値計算によって、大気構造や風、噴煙の3次元構造がベキ乗則からのズレを生んでいることがわかってきている。一方、後者の瞬間的噴火は、噴火継続時間を無限小に近似したサーマルとして仮定し、噴出量の1/4乗に比例するというスケールリングが提案されている。サーマルの噴出量や噴煙高度を測定することは難しく、スケールリングの検証は十分にされていない。また、実際の噴煙は噴火継続時間が有限であり、サーマル的振る舞いからのズレが予想される。実際の噴煙はサーマルからブルーム的振る舞いまで連続的であると考えられる。そのため、様々な噴火条件と噴煙高度・降灰分布について理解することが求められる。

本研究では、連続的噴火から瞬間的噴火まで様々な噴煙形態について理解することを目的にする。特に、これまでに提案されていた連続・瞬間的噴火のスケールリング則の適用範囲やそれからのズレを調べる。

3. 研究の方法

噴火条件や噴煙高度・降灰分布の正確な観測が難しいため、数値シミュレーションによる研究を実施する。数値モデルの開発・高速化と数値シミュレーション実行に分けて研究を進める。

(1) 数値モデル開発

数値モデルは、課題代表者がこれまでに開発を進めてきた数値コードの改良を行う。特に、様々な噴出条件や大気条件のシミュレーション実行を出来るように、汎用性の高い数値コードへと改良する。また、数値コードの並列化効率を上げて計算の高速実行を可能にする。地球シミュレータをはじめ様々な大型計算機環境で実行可能にする。

(2) モデル検証

開発した数値モデルを用いて実際の噴火事例を数値シミュレーションする。日本国内で近年発生したマグマ水蒸気噴火もしくは水蒸気噴火を数値的に再現する。それにより、噴出条件を推定する。

(3) 噴火条件 噴煙高度のスケールリング導出

開発した数値モデルを用いて、噴出率・噴出量・速度・火口半径を変えたパラメータスタディを実施する。それにより、噴出条件と噴煙高度の関係を求める。無次元パラメータを模索することで数値計算結果を説明するスケールリング則を推定する。

(4) 降灰分布の推定

噴出条件と大気条件を変えたパラメータスタディを実施する。それにより、降灰分布の再現・予測を試みる。

4. 研究成果

(1) 数値モデル開発

数値モデルを改良し、標準的な中緯度・熱帯大気の大気温度・圧力・密度プロファイルを入力して計算できるようにした。また、気象再解析から得られた任意の物理量プロファイルを入力値にすることを可能にした。噴火条件用の入力ファイルを読み込むようにすることで、任意の噴出率・噴出量・噴火継続時間・速度・半径について計算できるように改良した。これまで最大1,000並列だった数値コードを10,000並列まで安定して計算できるようになった。作成した数値コードは、地球シミュレータや九州大学情報基盤研究開発センターIT0システム、東京大学情報基盤センターのOakleaf、Wisteriaにて実行可能な汎用性を達成した。

(2) モデル検証

実際の噴火事例の数値シミュレーションを実行した。御嶽山 2014 年噴火や口永良部島 2015 年噴火、阿蘇中岳 2021 年噴火、トンガ共和国フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ (HTHH)2022 年噴火を対象とした。

御嶽山 2014 年噴火事例を対象としたシミュレーションを実施した。この噴火は水蒸気爆発であり、噴出温度の推定が難しい。そこで、噴出温度を 100 °C から 800 °C まで変えたパラメータ・スタディを実行した。計算の結果、噴出物に含まれる水蒸気量を 10 質量%と仮定した場合には、噴出温度が 300 °C 程度の際に実際に観察された火砕流発生や噴煙高度を説明できることがわかった。

阿蘇中岳 2021 年噴火では、小規模な火砕流と火口上数 km に上昇した噴煙が特徴的だった。新しいマグマ物質をほとんど含まない水蒸気噴火と考えられ、比較的低温の噴火シミュレーションを実施した。噴出時の水蒸気量を多くした計算の結果、火口から 1~2km に到達する小規模な火砕流や風で流されつつ高度 3km 程度まで上昇した噴煙を再現することができた。

トンガ HTHH2022 年噴火は、日本でも大気振動や潮位変動を観測するほど強い噴火であった。浅い海底噴火であることから、マグマ物質とともに揮発した海水が混合して噴出したと仮定した。標準的な熱帯大気や中緯度大気を初期条件にして与え、風はないものと仮定した。予備的なシミュレーションではあったが、噴煙が上昇する様子や成層圏で水平に拡大する様子を再現することができた。さらなる検証は必要だが、マグマ物質と海水の質量比が 9:1 程度で噴出したことが推定できた。また、マグマ噴出率は、代表的な大規模噴火であるピナツポ火山 1991 年の数倍の大きさであったことも推定された。

その他、富士山宝永山 1707 年噴火やピナツポ火山 1991 年噴火事例のシミュレーションも実施した。さらに、カルデラを形成するような超大規模噴火を模したシミュレーションも行い、噴煙高度と噴出条件の関係がこれまでの単純モデルの予測とは異なり、火砕流が発生した場合でも噴煙高度が 60km 以上に達する場合があることが新たに分かった。

(3) 噴火条件 噴煙高度のスケーリング導出

噴出率・噴出量・噴火継続時間・速度・火口半径を変えたパラメータスタディを実施した。計算の結果、噴出条件と噴煙高度の関係はサーマル的、プルーム的、その中間的振る舞いをする場合があることがわかった。このレジームの違いは、噴煙が最高高度に達する時間スケールに対する噴出時間の比でおおよそ説明できることが分かった。その比が~0.1 より小さいとサーマル的に振る舞い、噴煙高度は同じ噴出率で得られるプルームの最高高度より著しく小さくなった。時間スケール比が~1.0 より大きいとプルーム的に振る舞う。時間スケール比が 0.1~1.0 では中間的振る舞いを示し、サーマル/プルームの 2 つのレジームにおける噴煙高度をつなぐ様子が観察された。

瞬間的噴火に関し、火口径で規格化した噴煙高度がリチャードソン数のみならず流体の循環に依存することを確認した。また、このスケーリング則が連続噴火の場合と異なる傾向を観察した。瞬間的噴火の噴煙高度は、これまで提案されていたプルームのスケーリング (図 1a) やサーマルのスケーリング (図 1b) とは異なる傾向を示すことが分かった。

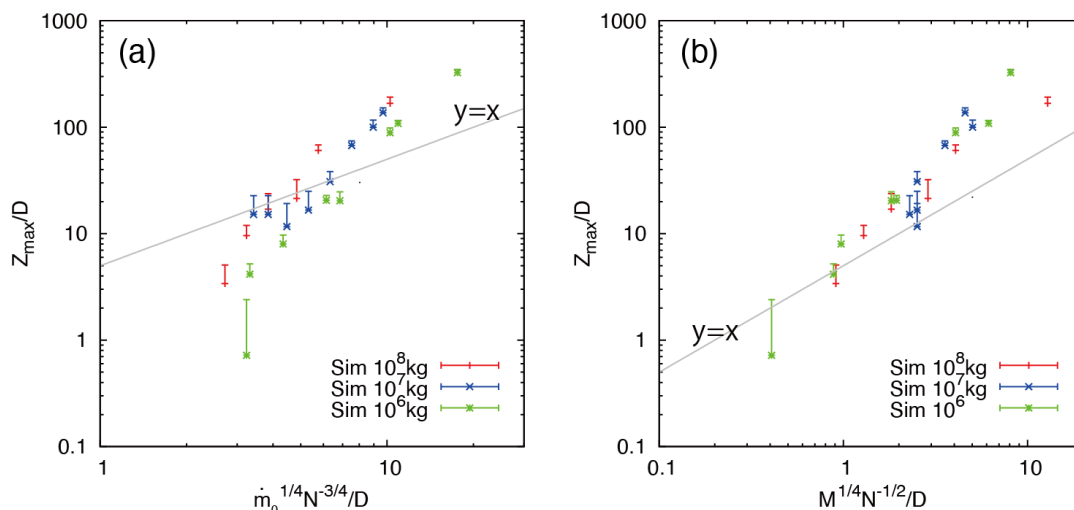


図 1 : 3次元噴煙シミュレーションから得られた噴出条件と噴煙高度の関係。横軸に(a) 噴出率を含む無次元パラメータ、(b) 噴出量を含む無次元パラメータを用いる。

(4) 降灰分布の推定

噴出条件と大気条件を変えた火山灰輸送と降灰のシミュレーションを実施した。火山灰の

粒子サイズによって、サーマル上昇中に噴煙から離脱し堆積する粒子、噴煙が最高高度に達してから離脱する粒子、その高度で漂ってから離脱し堆積する粒子、など様々ないくつかのパターンが存在することを明らかにした。このような堆積パターンの変化は近年行われているリアルタイム降灰観察や気象レーダーを用いた噴煙内部観察との比較材料になり、噴火過程の理解のために重要な基礎データとなる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Suzuki Y. J., Costa A., Koyaguchi T.	4. 巻 47
2. 論文標題 Control of Vent Geometry on the Fluid Dynamics of Volcanic Plumes: Insights From Numerical Simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 2020GL087038-NA
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020gl087038	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 Suzuki Y.J., Iguchi M.	4. 巻 382
2. 論文標題 Determination of the mass eruption rate for the 2014 Mount Kelud eruption using three-dimensional numerical simulations of volcanic plumes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 42 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2017.06.011	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 Shimizu Hiroyuki A., Koyaguchi Takehiro, Suzuki Yujiro J.	4. 巻 381
2. 論文標題 The run-out distance of large-scale pyroclastic density currents: A two-layer depth-averaged model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 168 ~ 184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2019.03.013	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 Koyaguchi Takehiro, Suzuki Yujiro J., Takeda Kai, Inagawa Satoshi	4. 巻 123
2. 論文標題 The Condition of Eruption Column Collapse: 2. Three-Dimensional Numerical Simulations of Eruption Column Dynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 7483 ~ 7508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2017JB015259	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 Koyaguchi Takehiro, Suzuki Yujiro J.	4. 巻 123
2. 論文標題 The Condition of Eruption Column Collapse: 1. A Reference Model Based on Analytical Solutions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 7461 ~ 7482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2017JB015308	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 Costa Antonio, J. Suzuki Yujiro, Koyaguchi Takehiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Understanding the plume dynamics of explosive super-eruptions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-02901-0	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 該当する

1. 著者名 Shimizu Hiroyuki A., Koyaguchi Takehiro, Suzuki Yujiro J.	4. 巻 4
2. 論文標題 A numerical shallow-water model for gravity currents for a wide range of density differences	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-017-0120-2	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 鈴木雄治郎	4. 巻 -
2. 論文標題 噴煙シミュレーションによるインドネシア・ケルト火山2014年噴火の噴煙放出条件の決定	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Annual Report of the Earth Simulator	6. 最初と最後の頁 91-96
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 鈴木雄治郎	4. 巻 -
2. 論文標題 火山の巨大噴火シミュレーション	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Annual Report of the Earth Simulator	6. 最初と最後の頁 91-96
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 鈴木雄治郎	4. 巻 -
2. 論文標題 火山噴煙ダイナミクスにおける火口形状の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Annual Report of the Earth Simulator	6. 最初と最後の頁 -
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 鈴木雄治郎	4. 巻 -
2. 論文標題 火山の瞬間的爆発噴火のシミュレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annual Report of the Earth Simulator	6. 最初と最後の頁 -
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 鈴木雄治郎	4. 巻 -
2. 論文標題 火山噴火に伴う火山灰輸送シミュレーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annual Report of the Earth Simulator	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Shimizu, H. A., T. Koyaguchi, Y. J. Suzuki, E. Brosch and G. Lube
2. 発表標題 Experimental validation of a two-layer model for pyroclastic density currents
3. 学会等名 JpGU-AGU joint meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中尾篤史・岩森光・中久喜伴益・鈴木雄治郎・中川貴司・中村仁美
2. 発表標題 Numerical simulation of water transportation along subducting slabs and implications for intraslab earthquakes
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西條祥・小屋口剛博・鈴木雄治郎
2. 発表標題 降下火砕物インバージョンに向けた火砕物供給源モデルの開発
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 Shimizu, H. A., T. Koyaguchi and Y. J. Suzuki
2. 発表標題 The run-out distance of a two-layer model for large-scale pyroclastic density currents
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新堀敏基・鈴木雄治郎・入山宙・石井憲介・佐藤英一・藤田英輔
2. 発表標題 移流拡散モデルによる大規模噴火を想定した降下火砕物予測の課題(その3)噴煙ダイナミクスモデルに基づく初期条件
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 Suzuki, Y. J., A. Costa and T. Koyaguchi
2. 発表標題 Simulating dynamics of explosive very large eruptions
3. 学会等名 27th IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志水宏行・小屋口剛博・鈴木雄治郎
2. 発表標題 大規模火砕流の到達距離に対する温度の影響: 二層重力流モデルによる数値シミュレーション
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 Suzuki, Y. J., A. Costa and T. Koyaguchi
2. 発表標題 The control of vent geometry on the dynamics of volcanic plumes
3. 学会等名 EGU General Assembly 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki, Y. J. and S. Jenkins
2. 発表標題 Numerical simulations of eruption clouds for assessing volcanic hazard to cities in Japan
3. 学会等名 Cities on Volcanoes 10 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 志水宏行・小屋口剛博・鈴木雄治郎
2. 発表標題 二層浅水波モデルに基づく火砕流ダイナミクスの数値的研究：流れの形態と堆積構造の変化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村仁美・鈴木雄治郎・入山宙・中尾篤史・岩森光
2. 発表標題 島弧における火成活動・火山噴火プロセスの統合的理解に向けて
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木雄治郎・小屋口剛博
2. 発表標題 火砕降下物と噴煙ダイナミクスのカップリング計算：ピナツボ1991年噴火シミュレーション
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Suzuki, Y. J. and M. Iguchi
2 . 発表標題 Numerical simulations of short-term eruption clouds
3 . 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Suzuki, Y. J., M. Iguchi
2 . 発表標題 Determination of the mass eruption rate for the 2014 Mount Kelud eruption using three-dimensional numerical simulations of volcanic plumes
3 . 学会等名 IAVCEI 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Kozono, T., H. Ueda, T. Ozawa, T. Shimbori, K. Fukui, T. Koyaguchi, E. Fujita, A. Tomiya and Y. J. Suzuki
2 . 発表標題 The dynamics of the 2011 Kirishima-Shinmoe-dake eruption, Japan, revealed by the tiltmeter, satellite, and weather radar observations
3 . 学会等名 IAVCEI 2017 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Matsumoto, K., M. Nakamura and Y. J. Suzuki
2 . 発表標題 Pyrrhotite oxidation as a tool for reconstructing thermal structure of eruption columns
3 . 学会等名 JpGU-AGU joint Meeting 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Shimizu, H. A., T. Koyaguchi and Y. J. Suzuki
2. 発表標題 Numerical simulations of a two-layer shallow-water model for pyroclastic density current
3. 学会等名 JpGU-AGU joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Suzuki, Y. J., A. Costa and T. Koyaguchi
2. 発表標題 Fluid dynamics of very large plumes generated by explosive super-eruptions
3. 学会等名 JpGU-AGU joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木雄治郎
2. 発表標題 阿蘇中岳の2021年10月20日噴火の3次元シミュレーション
3. 学会等名 日本火山学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木雄治郎
2. 発表標題 火砕物供給関数の推定に向けて：火砕物の到達高度
3. 学会等名 日本火山学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 志水宏行・小屋口剛博・鈴木雄治郎
2. 発表標題 二層重力流モデルに基づく火砕流堆積作用の解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 志水宏行・小屋口剛博・鈴木雄治郎
2. 発表標題 マグマ噴火・マグマ水蒸気噴火による大規模火砕流の到達距離：二層重力流モデルによる数値シミュレーション
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

〔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 分 担 者	小屋口 剛博 (KOYAGUCHI TAKEHIRO) (80178384)	東京大学・地震研究所・教授 (12601)	

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			
イタリア	INGV			
フランス	IPGP			