

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03992

研究課題名(和文)火山噴気ジェット音響特性にもとづいた新しい火山ガスSO₂放出率推定手法の開発

研究課題名(英文) A method for estimating volcanic gas emission based on acoustical features of volcanic fumaroles

研究代表者

横尾 亮彦 (Yokoo, Akihiko)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：70420403

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)：阿蘇山中岳第一火口の火山活動状況や、水蒸気爆発による観測点被害、新規調達した観測機材の不具合などの複合的な理由により、当初予定していた研究実施内容を変更せざるを得ない状況であった。しかし、無人航空機による火口地形変化や噴出物飛散分布の把握や、無人航空機を利用した火山ガス観測、熱データ解析方法の改善、また、水蒸気爆発発生前に頻発した空振パルスの波形解析を実施し、本研究の最終目的でもある火山活動度モニタリングの高精度化に資する重要な成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

噴火が発生すると立ち入り禁止区域が設定され、この外から火山活動状況を把握することが要請される。本研究では、噴火中の阿蘇山でドローンを使用したさまざまな観測を試行し、火口地形変化や噴出物の飛散範囲を把握することに成功した。また、火山ガスサンプリングや熱データ解析法の高精度化でも成果を上げた。また、空振データ波形解析を準リアルタイムで行えば水蒸気爆発発生を予測できるかもしれないことを見出した。

研究成果の概要(英文)：Due to several reasons, including the higher level of volcanic activity at the Nakadake first crater of Aso volcano, severe damage to infrasound stations caused by phreatic explosions in October 2020, and known mechanical problems on a thermal camera deployed on the unmanned aerial system that has newly purchased by this fund, we were forced to change the primary study plan of this research. However, we obtained fundamental results that will contribute to the improvement of volcanic monitoring, which is the goal of this study. They were the operations of an unoccupied aerial system leading to understanding detailed changes in crater topography, the spatial distribution of volcanic bombs due to the 2020 explosion, sampling of volcanic gases, improving the analytical methodology of the thermal data, and waveform inversions of infrasound pulses frequently observed before phreatic explosions.

研究分野：火山学

キーワード：阿蘇山 火山 空振 噴火 火山ガス 無人航空機

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、阿蘇中岳第一火口の噴気活動を対象にして、空振観測と可視・熱赤外線映像観測、および山麓での火山ガス放出率測定を繰り返し実施する。そして、これらのデータから噴気ジェットの影響特性の推定につなげる。最終的には、噴気ストローハル数の推定値を用いることで、噴気ジェットの周波数時間変化から火山ガス放出率を逐次推定することができるようにすることを目指したものである。

2. 研究の目的

しかし、阿蘇山では 2019 年 7 月ころから、中岳第一火口中央部に開口した噴出火孔において、間断なく火山灰噴煙の噴出が継続する状況になった。この噴火活動によって噴火警戒レベルが 2 に上がったため火口 1 km 範囲への立ち入りが制限された。また、降り積もる火山灰の影響などの影響もあり、十分なデータ取得がほとんどできない状況になった。一時的に噴火活動が小康状態になり噴火警戒レベルが 1 に引き下げられることもあったが、2021 年 10 月 14 日、10 月 20 日に水蒸気爆発が発生し、火砕流が 1.6 km 流下した。また、大量の火山岩塊が 900 m 地点まで飛散した。これをうけて噴火警戒レベルが 3 になり、火口から 2 km の範囲が立ち入り禁止となった。火山活動活発化のため 2022 年 1 月にもレベル 3 になるなど、研究期間のほとんどが噴火警戒レベル 2 の状態で推移した。

このように、当初目的を達成することが困難な状況になったことを受け、本研究では立入禁止区域外から火山活動状況を正確に把握するための方法を高精度化することを目指し、いくつかの項目の観測研究および解析作業を試行することにした。

3. 研究の方法

具体的には下記の 5 つの内容を実施した。

- (1) 火口内の状況変化把握のために、定期的に無人航空機で火口上空から可視(および熱赤外線)画像を取得し、既知座標値を使用してオルソ画像や地形モデルを作成した。
- (2) 水蒸気爆発発生直後には、噴出物の飛散状況把握のために、火口近傍域だけにとどまらず 5 km² ほどの範囲を他機関の研究者らの協力のもと撮影し、上記と同様に、オルソ画像、地形モデルの作成を行なった
- (3) 無人航空機に搭載したカメラは熱赤外線画像も取得するが、従来の解析方法では各画素に個別の大気補正や地形補正を施すことができなかった。この点を克服する手法を開発し、正確な三次元熱モデルを作成した。
- (4) 既往の空振記録の見直し作業を進め、水蒸気爆発や火山灰噴出の直前数日～数時間前に空振パルスが頻発することを発見し、これらのパルスイベントの波形インバージョンを実施した。
- (5) 名古屋大学の研究グループに協力し、無人航空機を利用した中央火孔および南壁熱異常域からの火山ガスサンプリングを実施した。サンプリングしたガスの同位体分析から火山活動状況の推移を明らかにした。

4. 研究成果

個別実施内容の成果を順に簡単に記す。

- (1) 2019 年に開口した中央火孔は直径 15 m ほどであったものの、2014-2015 年噴火でみられたモニタリング空振を発生させるほどではなく、深さ方向のスケールは非常に短い。2021 年 6 月から 11 月にかけての半年間は、火口内の状況が劇的に変化した。6 月に火口内北側に直径 50 m、深さ 50 m の陥没孔が形成され、徐々に熱水の充填が進んでいった。10 月 14 日の水蒸気爆発では南側に長径 65 m、短径 40 m、深さ 40 m の楕円柱状の陥没孔が形成された。10 月 20 日の水蒸気爆発では、火口中央部の長径 240 m、短径 140 m にわたる南北に伸びた領域が 40 m ほどえぐれ(堆積変化量 $-4 \times 10^5 \text{ m}^3$)、火口内に湯だまりが形成された。これらの地形変化領域は、Yamamoto et al. (1999) で推定されたクラックの走行と一致し、また、これよりさらに浅部の熱水系分布と深く関連していると考えられる。

- (2) 2020年10月20日の水蒸気爆発発生を受けて、11月末に4台の無人航空機を同時運用して5 km²範囲の撮影を実施した。撮影データから5 cm解像度のオルソ画像を作成して噴出物飛散状況の精査を行い、火山岩塊の飛散分布主軸が南～南東側と北西側の二方向であることがわかった。分布が二つあることは噴火発生時の噴煙噴出状況と整合している。火口直径1 mほどのインパクトクレーターが火口中心から南へ900 mほどの地点にあり、これが10月20日の最大飛散距離である。火口近傍では1.4 mのサイズの岩塊もあった。火口リムでの着弾数密度は40-50個/100 m²ほどで他火山の報告事例と同程度である。
- (3) 熱赤外線画像の個別画素に格納されている放射輝度データを抽出し、対象物との視線角度補正、対象物までのあいだの大気補正をおこなって、撮影対象の表面温度分布に変化するプログラムを作成した。最近10年間にわたって実施してきた火口リムからの撮影データに適用して、南壁熱異常域の放熱率の時間変化と噴火活動との対応性を明らかにした。また、可視画像による地形モデル作成の過程で計算されるカメラの位置・姿勢情報を用いて、熱赤外温度データを地形表面グリッドにそれぞれマッピングすることで地表熱活動の全体像を定量把握することができるようになった。2020年8月で1.5MWであった南壁熱異常域からの地表放熱率は、水蒸気爆発発生後の2022年3月に19.0MWであり、第一火口下の熱供給路が大きく変わったことが示唆された。
- (4) 2016年10月23日の水蒸気爆発発生前の一週間ほどから空振パルスが発生しはじめ、時間経過とともに振幅・頻度とも大きくなっていった。これに時を同じくして、高周波微動の振幅増大も認められた。同様の地震・空振活動は2019年の火山灰噴出開始直前にもみられた。気泡破裂によって空振パルス形成がおきたと考えて、MCMC法による空振波形解析を実施した。その結果、時間経過とともに気泡周囲流体の粘性、すなわち火口底物質の粘性が増大していったことが明らかになった。粘性増加は火山ガスの噴出活動を抑制し、火口底下での圧力蓄積が促進されたことを意味する。これが地盤の強度を超えたことが水蒸気爆発発生や火山灰噴出の開始をトリガーしたと考えられる。ただし、この期間で蓄積されたガス量の絶対値は、山麓で測定されたSO₂の量にくらべてやや少なく、今後も検討がもう少し必要ではあるものの、将来的に、噴火発生切迫度を評価する指標にできる可能性がある。
- (5) 名古屋大学の研究グループと協力し、無人航空機を利用した火山ガス採取手法の開発を進めた。また、継続的に阿蘇山での運用実績を積み重ね、火山ガス中の水素、酸素および炭素の同位体分析によって、噴出時におけるマグマ関与のレベルを検討した。2021年10月の水蒸気爆発発生直後の緊急観測でも貴重なガスサンプルの取得に成功し、このガスにマグマの寄与がほとんどみられないことを明らかにした。火山ガスの観点から噴火タイプが水蒸気爆発であったことを証明した。

5. 参考文献

- (1) 京都大学 (2021) 第149回火山噴火予知連絡会資料。
- (2) Yokoo et al. (2022) An aerial survey using unoccupied aerial vehicles in response to the phreatic explosion of Aso volcano in October 2021. Japan Geoscience Union Meeting 2022, SVC33-P12.
- (3) 横尾・石井 (2021) 熱赤外線カメラで撮影されたJPEG ファイルの解析方法. 火山, 66, 229-240.
Nashimoto & Yokoo (2022) Direct georeferencing approach to reconstructing 3D thermal photogrammetric models of active volcanoes. Japan Geoscience Union Meeting 2022, SVC33-P13.
- (4) 横尾 (2020) 阿蘇山において火山灰噴出直前にみられた地震空振活動. JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SVC45-P26.
小澤・横尾 (2020) 2015年10月23日のマグマ水蒸気爆発発生前にみられた空振パルスの波形解析. JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SVC45-P27.
- (5) Shingubara et al. (2021) Development of drone-borne volcanic plume sampler. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 412, 107197.
Tsunogai et al. (2022) Sampling volcanic plume using a drone-borne SeIPS for remotely determined stable isotopic compositions of fumarolic Carbon Dioxide. Frontiers in Earth Science, 10, 833733.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ishii Kyoka, Yokoo Akihiko, Iguchi Masato, Fujita Eisuke	4. 巻 402
2. 論文標題 Utilizing the solution of sound diffraction by a thin screen to evaluate infrasound waves attenuated around volcano topography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 106983 ~ 106983
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2020.106983	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 Shingubara Ryo, Tsunogai Urumu, Ito Masanori, Nakagawa Fumiko, Yoshikawa Shin, Utsugi Mitsuru, Yokoo Akihiko	4. 巻 412
2. 論文標題 Development of a drone-borne volcanic plume sampler	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 107197 ~ 107197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2021.107197	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 Tsunematsu Kae, Ishii Kyoka, Yokoo Akihiko	4. 巻 71
2. 論文標題 Transport of ballistic projectiles during the 2015 Aso Strombolian eruptions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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) 10.1186/s40623-019-1029-3	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 Maher Sean P., Matoza Robin S., Groot Hedlin Catherine D., Gee Kent L., Fee David, Yokoo Akihiko	4. 巻 125
2. 論文標題 Investigating Spectral Distortion of Local Volcano Infrasound by Nonlinear Propagation at Sakurajima Volcano, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	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) 10.1029/2019JB018284	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 該当する

1. 著者名 Shingubara Ryo, Tsunogai Urumu, Ito Masanori, Nakagawa Fumiko, Yoshikawa Shin, Utsugi Mitsuru, Yokoo Akihiko	4. 巻 412
2. 論文標題 Development of a drone-borne volcanic plume sampler	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 107197 ~ 107197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2021.107197	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 横尾 亮彦、石井 杏佳	4. 巻 66
2. 論文標題 熱赤外線カメラで撮影されたJPEGファイルの解析方法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 火山	6. 最初と最後の頁 229 ~ 240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18940/kazan.66.3_229	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 Ishii Kyoka, Yokoo Akihiko	4. 巻 73
2. 論文標題 Combined approach to estimate the depth of the magma surface in a shallow conduit at Aso volcano, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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) 10.1186/s40623-021-01523-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 Tsunogai Urumu, Shingubara Ryo, Morishita Yuhei, Ito Masanori, Nakagawa Fumiko, Yoshikawa Shin, Utsugi Mitsuru, Yokoo Akihiko	4. 巻 10
2. 論文標題 Sampling Volcanic Plume Using a Drone-Borne SeIPS for Remotely Determined Stable Isotopic Compositions of Fumarolic Carbon Dioxide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	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) 10.3389/feart.2022.833733	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 角皆 潤、新宮原 諒、伊藤 昌稚、中川 書子、吉川 慎、宇津木 充、横尾 亮彦
2. 発表標題 UAV搭載用火山ブルーム自動採取装置の開発と阿蘇中岳の噴気温度遠隔測定への応用
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横尾 亮彦
2. 発表標題 阿蘇山において火山灰噴出直前にみられた地震空振活動
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小澤 佑人、横尾 亮彦
2. 発表標題 2015年10月23日のマグマ水蒸気爆発発生前にみられた空振パルスの波形解析
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横尾亮彦、石井杏佳
2. 発表標題 熱赤外線カメラで撮影されたJPEGファイルの解析方法
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 森下雄平、角皆 潤、伊藤 昌稚、新宮原 諒、中川 書子、吉川 慎、宇津木 充、横尾 亮彦
2. 発表標題 噴煙中の水蒸気安定同位体比から探る阿蘇中岳から放出される水蒸気の起源
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 樋口和也、大倉敬宏、為栗健、横尾亮彦
2. 発表標題 2016年阿蘇火山爆発的噴火の準備および初期仮定
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 成田翔平、大倉敬宏、吉川慎、横尾亮彦、井上寛之
2. 発表標題 阿蘇中岳第一火口の放熱率(2020-2021年)
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 角皆 潤、新宮原 諒、伊藤 昌稚、中川 書子、森下雄平、吉川 慎、宇津木 充、横尾 亮彦
2. 発表標題 ドローン搭載用火山ブルーム自動採取装置SeIPSの開発および改良
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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