

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01290

研究課題名(和文) 気体水銀を用いた水蒸気噴火発生場の温度モニタリング

研究課題名(英文) Monitoring of temperature in hydrothermal reservoir using gaseous elemental mercury

研究代表者

寺田 暁彦 (TERADA, AKIHIKO)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：00374215

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,700,000円

研究成果の概要(和文)：予測が困難とされる水蒸気噴火について、その前兆活動を捉えるために火山表面から揮発している気体水銀に注目した。水銀放出率は、地下熱水の温度変化に反応して変化するが、地表面付近の環境要因の影響を強く受けるという欠点があった。草津白根火山における連続観測の結果、見かけ上の水銀放出変化の中から、火山活動に起因する変動を抽出することが可能となった。本知見を用いて草津白根山における多点観測を実施した結果、火山活動の影響がない領域よりも2-7倍に相当する水銀放出活動が存在することを見出した。本研究で構築した補正手法により、火山における僅かな水銀放出や、その時間変動を明瞭に捉えることが可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

活火山で発生する水蒸気噴火は、周辺 1-2 km 以内に大きな噴石を落下させ、そこに滞在している登山者や事業者に甚大な被害を与える。本研究では、水蒸気噴火に先行する地下温度上昇を、地表において気体水銀放出率を観測することで検出する新しい方法を構築した。本研究の主たる成果は、水銀放出率に影響する地表面付近の温度効果を定量的に明らかにしたことである。この知見に基づき、火山活動としての水銀放出を高い信頼性のもとでモニタリングが可能となる。今後は草津白根山などの火山において実際の観測に適用することで、本手法の有効性を実証的に検討する。

研究成果の概要(英文)：The relation between mercury emission rates () and temperature at the site RH was found to satisfy the Arrhenius equation, however, changes depending on the underground temperature (T_g), not the chamber temperature (T_c). Although $\ln(\)$ changes linearly against T_c (Arrhenius equation), we can clearly see that the intercepts of the Arrhenius plot is different for the data recorded on morning (temperature increased with time) and evening (temperature decreased with time). The mechanism for the difference in intercept is interpreted as a delayed response of the subsurface temperature (T_g) to the change in chamber temperature (T_c). On the basis of the consideration using the heat conduction equation, mercury emission rates () changes depending on the ground temperature at a depth of two centimeters. Using the empirical relation obtained in this study, we modified the spatial distribution and temporal changes in GEM emission rate from volcanoes.

研究分野：火山化学

キーワード：火山 水蒸気噴火 気体単体水銀 側噴火 草津白根山

1. 研究開始当初の背景

活火山で発生する水蒸気噴火は、周辺 1-2 km 以内に大きな噴石を落下させ、そこに滞在している登山者や事業者に甚大な被害を与える。戦後最悪と言われる 2014 年の御嶽火山噴火災害では、水蒸気噴火により 63 名の死者・不明者を出した。当時、山頂には 200 名程度が滞在していたので(長野県警しらべ)、その死亡率は 30%前後に達したことになる。

しばしば、水蒸気噴火は前兆現象に乏しいので、噴火予測が困難と言われる(気象庁・火山噴火予知連絡会会長コメント、御嶽山災害直後の 2014 年 9 月 28 日)。一方、世界中の水蒸気噴火の事例を収集した Barberi et al. (1992) は、水蒸気噴火の多くに前兆現象が存在すること、特に、噴気や温泉などの熱活動が特徴的に変化した事例を多数挙げている。

このことは、観測が可能か否かは別としても、水蒸気噴火に先行過程が存在することを示唆する。また、温泉や噴気に強く影響を与えるという観察事実は、地下浅部の熱水だまりにおいて、噴火前に温度等が上昇したことを暗示している。しかし、ここで問題となるのは、既存の手法で地下熱水だまりの温度変化検出が困難な点にある。

そこで、本研究では気体水銀放出量を温度変化の指標として用いることを考えた。水銀は火山ガスや温泉水などに普遍的に含まれているが、その溶解度は温度により大きく変化する(図 2)。

周辺に存在する水銀を含む二次鉱物からも、温度上昇とともに気体水銀が放出される。そのため、熱水やガス輸送経路の温度が上昇すれば、地表へと運ばれる水銀量が顕著に増えることが期待される。実際、水銀の空間分布は、地熱発電のポテンシャル評価に用いられた実績がある。

すなわち、単に熱水だまり直上の地表で水銀放出率を連続観測、テレメータすれば、地下温度変化をいち早く検出できるであろう。

そのテストフィールドとして草津白根火山を選択した(図 1)。同火山は水蒸気噴火を頻繁に繰り返してきた活動的火山であり、かつては、噴火前に火山ガス組成比が変化した先例がある(Ossaka et al., 1980)。また、火口周辺に多数の観光客が訪れる環境にあるため、噴火予測に対する社会的要請が、他の火山と比べても極めて高い。

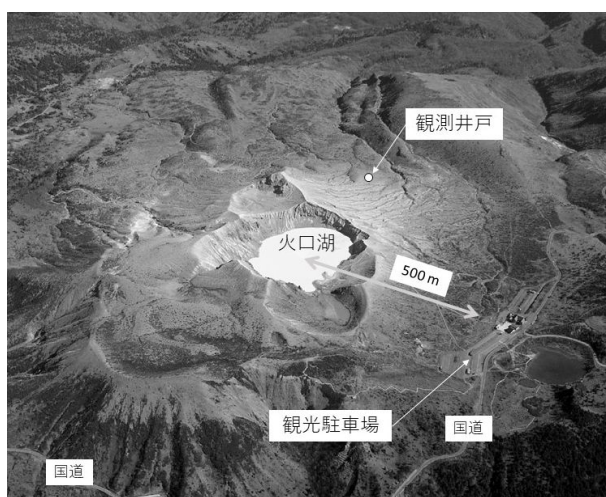


図 1. 草津白根山(テストフィールド)。

2. 研究の目的

最終的な目的は、水蒸気噴火に先行して起きる地下温度上昇を、火口周辺の土壌から放出される気体水銀放出率の変動から検出することにある。そのために、地下熱水から揮発してくる水銀放出率の時間変動を検出する技術を確立させる。そのための測定装置は存在するので、まずやるべきことは、質の高い観測の実施(周辺気体に起因するノイズ低減、測定系へ進入する水滴の除去など)である。そして、観測された水銀濃度に対する、火山活動以外の環境要因の定量的評価を行う。これにより、これまで前例のない活動火口周辺における水銀連続観測が実現する。長期観測を行えば、火山活動の変化を反映した水銀放出変動が検出できるかも知れない。

3. 研究の方法

地表付近で観測される水銀放出は、周辺環境、とくに気温に影響されることが知られているが、その具体的機構については諸説があり、気温を補正する手法は確立していない。そこで、草津白根山において高精度水銀連続測定装置を用いた定点連続観測を行い、得られた水銀放出率の温度依存性を検討した。あわせて、温度補正式を作成し、多点水銀放出率測定結果に適用することで、草津白根山火口周辺の水銀放出率分布を明らかにした。

水銀測定装置はロシア国 Lumex 社製 RA915AM を輸入した。本装置の検出下限は 0.5 ng/m³ と低く、これは我が国の標準的な大気水銀濃度の 1/4 に相当する。本装置を野外使用に耐えるよう改良し、独立電源により駆動する可搬装置とした。また、周辺大気に微量に含まれる水銀が測定に与える影響を低減させるため、循環 DFC 法に基づく測定機構を構築した。ここで循環 DFC 法と

は、測定地点に被せた容器（以下、チャンバー）から試料ガスを吸引し、その水銀濃度を測定した後、試料ガスから水銀を完全に取り除いたうえで再び試料ガスをチャンバーへ戻す手法である。この仕組みについて、標準水銀を用いた室内実験を行った結果、本手法における水銀収率は約 99 %と、信頼性の高い測定システムが完成した。測定装置は水滴の影響を受けやすいため、試料ガスの保温、加熱する機構を導入した。

本測定システムにより、人が通行可能な遊歩道さえあれば、任意の地表面において連続 15 時間程度の高精度水銀放出率測定が可能となった。

4. 研究成果

草津白根火山における定点連続観測の結果、チャンバー内部温度 T (K) の変動範囲 8-25 に対して、測定された水銀放出率 ($\text{ng}/\text{m}^2/\text{s}$) は 4-10 ($\text{ng}/\text{m}^2/\text{s}$) の範囲で時間変動していた。この値は、基準点における放出率 1.24 ($\text{ng}/\text{m}^2/\text{s}$) の 3-9 倍である。また、放出率の対数 \ln は、地温の逆数 T^{-1} に対して直線的に変化していた。すなわち、水銀放出率はアレニウスの式によく従っていることが分かる。

ただし、測定実施時刻により、アレニウスプロットにおける切片の値が明瞭に異なっていた。同一地点にも関わらず切片が異なる原因として、水銀放出率変化は気温そのものではなく、地中温度に依存して変化していることが考えられる。気温変動に対する地中温度応答を熱伝導方程式に基づいて計算した結果、水銀放出率へ影響しているには地表下 2 (cm) 前後の地中温度と考えられる。

本研究で得られた観測 Q と T の経験的關係を用いれば、温度変動が Q に与える影響を補正できる。例えば、草津白根山における多点観測で得られた Q について、参照温度 T_{ref} における補正放出 Q_{ref} を計算した。その結果、基準点の Q_{ref} (1.68 $\text{ng}/\text{m}^2/\text{s}$) の 1.6-6.9 倍に相当する水銀放出活動が湯釜火口湖外側の南斜面において認められた。現在、本領域で地熱活動は認められず植生が繁茂している一方、過去 100 年間で側噴火が繰り返されてきた。今回の温度補正により明らかとなった高い水銀放出活動は、本領域において僅かな火山ガスの上昇が継続していることを示唆する。温度補正により、僅かな水銀放出活動をより明瞭に捉えられると考えられる。

本研究を実施した草津白根火山は、群発地震や水蒸気噴火（2018 年 1 月）が発生するなど活発な火山活動が継続している。また、大学や気象庁による、地震、地殻変動、磁場、および火山ガス、温泉水などの定常観測が実施されている。本研究は、独自の視点から新たな火山観測項目を付加するものであり、浅部温度変化を捉えることが期待できる。今後も連続観測を継続し、本手法の有効性を検証、改良する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 17件）

1. 著者名 Yaguchi Muga, Terada Akihiko, Ogawa Yasuo, Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan, Volcanic Fluid Research Center, School of Science, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan	4. 巻 15
2. 論文標題 Air-Fall Ash from the Main Crater of Asama Volcano on August 7, 2019, and its Water-Soluble Components	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 53 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jdr.2020.p0053	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 James Mike, Carr Brett, D'Arcy Fiona, Diefenbach Angela, Dietterich Hannah, Fornaciai Allesandro, Lev Einat, Liu Emma, Pieri David, Rodgers Mel, Smets Benoit, Terada Akihiko, von Aulock Felix, Walter Thomas, Wood Kieran, Zorn Edgar	4. 巻 3
2. 論文標題 Volcanological applications of unoccupied aircraft systems (UAS): Developments, strategies, and future challenges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Volcanica	6. 最初と最後の頁 67 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.30909/vol.03.01.67114	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 寺田暁彦	4. 巻 124
2. 論文標題 水蒸気噴火発生場としての草津白根火山	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 地質学雑誌	6. 最初と最後の頁 251 ~ 270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2017.0060	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 橋本武志・宇津木充・大倉敬宏・神田 径・寺田暁彦・三浦 哲・井口正人	4. 巻 64
2. 論文標題 非マグマ性の火山活動に伴う消磁及び地盤変動のソースの特徴	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 火山	6. 最初と最後の頁 103-119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18940/kazan.64.2_103	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 Kametani Nobuko, Ishizaki Yasuo, Katsuoka Nanako, Yoshimoto Mitsuhiro, Terada Akihiko	4. 巻 126
2. 論文標題 Petrological characteristics of Shirane Pyroclastic Cone Group, Yumi-ike Maar and Ainomine Pyroclastic Cone at Kusatsu-Shirane Volcano, central Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of the Geological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 157 ~ 165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2019.0046	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 Ohba Takeshi, Yaguchi Muga, Nishino Kana, Numanami Nozomi, Tsunogai Urumu, Ito Masanori, Shingubara Ryo	4. 巻 7
2. 論文標題 Time Variation in the Chemical and Isotopic Composition of Fumarolic Gasses at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan	5. 発行年 2019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.2019.00249	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 Ishizaki Yasuo, Nigorikawa Aki, Kametani Nobuko, Yoshimoto Mitsuhiro, Terada Akihiko	4. 巻 126
2. 論文標題 Geology and eruption history of the Motoshirane Pyroclastic Cone Group, Kusatsu-Shirane Volcano, central Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of the Geological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 473 ~ 491
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2020.0022	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 Kametani Nobuko, Ishizaki Yasuo, Katsuoka Nanako, Yoshimoto Mitsuhiro, Terada Akihiko	4. 巻 126
2. 論文標題 Petrological characteristics of Shirane Pyroclastic Cone Group, Yumi-ike Maar and Ainomine Pyroclastic Cone at Kusatsu-Shirane Volcano, central Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of the Geological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 157 ~ 165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2019.0046	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 Terada Akihiko, Yaguchi Muga, Ohba Takeshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Quantitative Assessment of Temporal Changes in Subaqueous Hydrothermal Activity in Active Crater Lakes During Unrest Based on a Time-Series of Lake Water Chemistry	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.2021.740671	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 Yaguchi Muga, Ohba Takeshi, Terada Akihiko	4. 巻 9
2. 論文標題 Groundwater Interacting at Depth With Hot Plastic Magma Triggers Phreatic Eruptions at Yugama Crater Lake of Kusatsu-Shirane Volcano (Japan)	5. 発行年 2021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.2021.741742	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 Terada Akihiko, Kanda Wataru, Ogawa Yasuo, Yamada Taishi, Yamamoto Mare, Ohkura Takahiro, Aoyama Hiroshi, Tsutsui Tomoki, Onizawa Shin'ya	4. 巻 73
2. 論文標題 The 2018 phreatic eruption at Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane volcano, Japan: eruption and intrusion of hydrothermal fluid observed by a borehole tiltmeter network	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/s40623-021-01475-4	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 -

1. 著者名 Kametani Nobuko, Ishizaki Yasuo, Yoshimoto Mitsuhiro, Maeno Fukashi, Terada Akihiko, Furukawa Ryuta, Honda Ryo, Ishizuka Yoshihiro, Komori Jiro, Nagai Masashi, Takarada Shinji	4. 巻 73
2. 論文標題 Total mass estimate of the January 23, 2018, phreatic eruption of Kusatsu-Shirane Volcano, central 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/s40623-021-01468-3	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 亀谷 伸子、石崎 泰男、勝岡 菜々子、吉本 充宏、寺田 暁彦	4. 巻 66
2. 論文標題 草津白根火山, 白根火砕丘群南麓の白根南火口列と弓池マールの噴火様式と活動年代	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 火山	6. 最初と最後の頁 1~19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18940/kazan.66.1_1	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15件(うち招待講演 1件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 寺田暁彦・水谷紀章
2. 発表標題 草津白根火山・湯釜火口周辺における土壌水銀放出帯
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Terada, A.
2. 発表標題 Relationship between phreatic eruptions and the active hydrothermal system of Kusatsu-Shirane volcano, Japan
3. 学会等名 International Workshop on the mechanism of Phreatic Eruption (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺田暁彦・森 俊哉・大場 武・谷口無我・鬼澤真也・大野鷹士・森田裕一
2. 発表標題 伊豆大島三原山火口底の火山ガス組成測定
3. 学会等名 日本火山学会秋季大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水谷紀章・寺田暁彦
2. 発表標題 草津白根火山・白根火砕丘南側斜面における気体水銀放出域
3. 学会等名 日本火山学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 香取 慧・寺田暁彦・西野佳奈・沼波 望・大場 武
2. 発表標題 草津白根火山・白根火砕丘周辺の浅部熱水系
3. 学会等名 日本火山学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺田暁彦・神田 径・小川康雄・青山 裕・山本 希・筒井智樹・大倉敬宏・野口里奈
2. 発表標題 草津白根火山・本白根山で2018年1月23日に発生した噴火 - 地球物理学的観測からの示唆 - ,
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Terada, A., Kuwahara, T.
2. 発表標題 Active magmatic-hydrothermal system beneath Yugama crater lake at Kusatsu-Shirane volcano, Japan: Temporal variations in subaqueous fumarolic activities
3. 学会等名 IAVCEI Commission on Volcanic Lakes 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 若松 海・寺田暁彦・角野浩史・小長谷智哉・谷口無我・大場 武
2. 発表標題 草津白根火山・湯釜火口周辺における土壌ガス中のヘリウム同位体比分布 潜在破砕帯検出の試み-
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 角野浩史・滝口孝寛・小長谷智哉・外山浩太郎・寺田暁彦
2. 発表標題 ヘリウム・炭素同位体比からみた草津白根火山周辺における地下深部流体の供給系
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Obase T, Sumino H, Toyama K, Ohba T, Yaguchi M, Terada A.
2. 発表標題 Temporal variations in helium and argon isotopic compositions of fumarolic gases at Kusatsu-Shirane volcano, Japan
3. 学会等名 Goldschmidt2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋昌孝・寺田暁彦・角野浩史・外山浩太郎・大場 武・鈴木 レオナ
2. 発表標題 火口周辺から放出される土壌ガスの起源ーヘリウム同位体比からの示唆ー
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺田暁彦・香取 慧・谷口無我・山本 希・山田大志・鬼澤真也・西澤達治・神田 径・青山 裕・森田裕一・大場 武
2. 発表標題 草津白根山西方における温泉湧出と2018年群発地震
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yaguchi M., Ohba T. and Terada A.
2. 発表標題 The major chemical composition of lake water in Yugama crater at Kusatsu-Shirane volcano (Japan) and its changes in response to volcanic activity
3. 学会等名 IAVCEI Commission on Volcanic Lakes 2019 (国際学会)
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 分担者	大場 武 (Ohba Takeshi) (60203915)	東海大学・理学部・教授 (32644)	

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