

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01247

研究課題名(和文) 草津白根火山の熱水循環・マグマ供給システムの描像

研究課題名(英文) Picture of hydrothermal circulation, magma supply system of Kusatsu Shirane volcano

研究代表者

寺田 暁彦 (TERADA, AKIHIKO)

東京工業大学・理学院・講師

研究者番号：00374215

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：土壌気体水銀(GEM)放出率測定方法を構築して、箱根火山大涌谷噴気地において観測試験を行い、有効性を確認した。この結果に基づき、草津白根火山においてGEM観測を2017年に行った。その結果、将来噴火口になり得る破砕帯に相当すると思われる、高GEM放出域を白根火砕丘の南および南西斜面に見出した。また、地質調査に基づき、白根火砕丘南側から本白根山にかけて、過去に爆発的噴火が繰り返し発生してきたことが判明した。既存の物理観測網は湯釜火口湖を取り囲むように配置されている。現状よりも南側領域における観測点の整備が、今後の草津白根火山の監視上の課題である。

研究成果の概要(英文)：We have developed a simple method to quantify gaseous elemental mercury (GEM) discharge rates from grounds at volcanic fields. Applying the procedure, we have measured GEM flux distribution around the Shirane pyroclastic cones at Kusatsu-Shirane volcano. As a result, we have found two zones emitting relatively high flux of GEM at south and south-east flanks of the Shirane pyroclastic cones. We consider that the areas are fracture zones connecting between shallow hydrothermal reservoirs and ground surface that can form volcanic craters during future eruptions. In addition, our geologic surveys have revealed that explosive eruptions including phreatic and phreatomagmatic explosions have repeatedly occurred at southern part of the Shirane pyroclastic cones. To detect changes in volcanic activities, observation system such as seismometers should be installed at the southern part of Shirane pyroclastic cones, in addition to the area near Yugama crater lake.

研究分野：火山物理学

キーワード：草津白根火山 水蒸気噴火 熱水系 土壌気体水銀放出

1. 研究開始当初の背景

草津白根山は、予測困難とされる水蒸気噴火を代名詞とする活動的火山であり、近年では湯釜火口において1982年から83年にかけて5回わたり噴火したほか、2018年には本白根山が噴火した。同火山の浅部には熱水循環系が発達していることが地球物理観測や地球化学的研究から知られており(例えば Ohba et al., 2000; Nurhasan et al., 2006)、温泉が運ぶ熱エネルギーも含めて、草津白根山の放熱量は平均的な活火山の10倍にのぼる(上木・寺田, 2012)。これは、中規模噴火が毎年1回発生していることに相当する。

2014年までに進めてきた予察的調査の結果、以下の事由により、草津白根火山について新たな視点から組織的調査が必要と判断した:

東京工業大学草津白根火山観測所の地殻変動観測によれば、熱水が上昇してくる様子が見えつつある(寺田・他, 2011; 寺田・他, 2014)。その源の位置は、これまで考えられていた湯釜火口湖の直下ではなく、南側の逢ノ峰~本白根山周辺にある

地熱探査手法として土壌から揮発する気体水銀の観測がある。かつては測定に手間がかかり実用性に乏しかったが、近年の技術進展により、多点観測が容易となった(Bagnato et al., 2014; Tassi et al., 2016)。これにより、熱水移動経路や破碎帯の広がりを地上観測から知ることが可能になりつつある

予察的な地質調査によれば、これまで単成火山とみなされ、噴火の可能性は考慮されてこなかった本白根山で、1500年前まで爆発的噴火が繰り返し発生していたことが判明した。水蒸気噴火を起こす湯釜とは対照的に、本白根山はマグマを放出する極めて活動的な火砕丘であることが分かってきた

従来の大学や気象庁の地震等の観測点は、湯釜火口湖周辺の1 km以内に、ほぼ全てが設置されていた。すなわち、本白根山はもちろん、想定しているマグマだまりも観測網の外側に位置していた。これでは、噴火の前兆があったとしても、それが見逃される恐れがある。自治体が1995年に作成したハザードマップも、噴火は湯釜火口周辺だけで起こることを前提としている。

2. 研究の目的

草津白根火山の構造は複雑である。「想定」マグマだまりは近年噴火が頻発している湯釜火口湖直下にはない。南北3 kmにわたり配列している白根、逢ノ峰および本白根火砕

丘の関係も良く理解されていない。さらに、山体に広く分布する各強酸性温泉の流動経路は未解明である。その一方で、現在の火山監視用の観測点は、古い知見に基づいて湯釜付近だけに偏在して配置されていた。

本研究では、現在の火山監視システムをより現実的に適合したものへと改良するために、土壌気体水銀放出量分布測定および地質調査を実施する。これらの調査結果に基づいて、山体の各領域での噴火履歴を詳細に復元し、災害誘因の詳細を領域ごと把握するほか、将来、噴火口となりうる熱水流動経路もしくは破碎帯の広がりを明らかにする。

3. 研究の方法

水銀放出率観測

火山地表面から放出されている気体水銀(Gaseous Elemental Mercury, 以下 GEM と略す)は、古くから地熱探査手法の一つとして用いられてきた。近年、小型可搬で容易に GEM 濃度を測定できる装置が開発され、ここ数年、活火山の活動火口周辺においても GEM 濃度が盛んに測定され始めている。一般に、水銀は熱水系に特徴的に含まれていること、温度変化に対して揮発量が顕著に変化することから、地表における GEM 濃度分布は地下浅部温度や透水性の高い破碎帯の広がりを反映することが期待される。

測定の際、直径 20 cm のチャンバーを地表面に被せ、その内部のガスを装置へ吸引する。測定装置では、原子吸光法により GEM 濃度(ng/m^3)が定量化される。本研究では、まず GEM 濃度を水銀放出率に変換するために、チャンバーを出入りする水銀質量の時間変化を単純なモデルを用いて定式化した。また、過去に提案されていた測定方法(野田・他, 1993)の妥当性を評価した。さらに、より効率的な測定方法を検討し、短時間でより多くの個所で測定することを可能とした。本手法を箱根火山と草津白根火山に適用し、火口周辺での GEM 放出率分布を明らかにした。

地質調査

草津白根火山に存在する各火砕丘が内包する噴火リスクを評価するために、そこで発生した過去の噴火様式、規模および発生頻度を明らかにする必要がある。本研究では過去1万年程度を対象とした地質調査を実施し、別研究課題から得られたデータや知見も必要に応じて参照した。また、噴火堆積物中に認められる熱水変質鉱物の多様性に着目して、噴火発生場の物理化学的状態の時間変化を検討した。

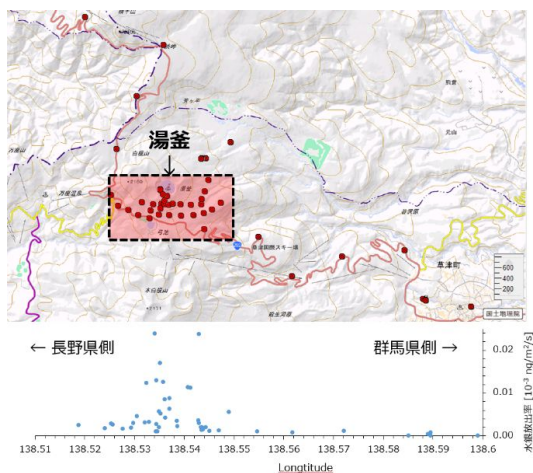
4. 研究成果

水銀放出率観測

観測される GEM 濃度とチャンバー形状との関係や、GEM 濃度から地表面 GEM 放出率 ($\text{ng}/\text{m}^2/\text{s}$, 以下 ϕ) を計算する方法が数値的に導かれた。当地において正しく ϕ を計測するためには、チャンバーからガスを吸引し始めて 10 分程度の時間が必要である。この結果は野田・他 (1993) の経験的手法と整合的である。正しく ϕ を得るために必要な計測時間は、当地の ϕ や地表面付近の GEM 濃度などに依存する。数値的検討から、計測時間はチャンバー形状を変更することで短縮化できることが示唆された。この方法によれば、バックグラウンド付近の低い水銀放出率を 1 日 20 点程度測定できる。

本装置を用いた試験観測として、熱水流動系がある程度判明している箱根火山・大涌谷周辺の約 40 箇所において 2016 年 9 月に多点 GEM 濃度観測を行い、上記方法に基づいて GEM 濃度から放出率 ϕ を計算した。その結果、大涌谷中心からの距離に従い ϕ が減少すること、大涌谷から 1.5 ~ 2 km 離れた領域で ϕ はほぼ一定値を取ることが示された。このような ϕ の分布は、地下熱水活動の空間な広がりを反映していると考えられる。

続いて、2018 年 9 月に草津白根火山・白根火砕丘周辺から山麓にかけて多点 GEM 濃度観測を実施した。この結果、湯釜火口の南側斜面において、GEM 放出率が特異的に高い領域が存在することが初めて明らかとなった。この領域から離れると、箱根火山の例と同様、GEM 放出率はほぼ一定値で推移する。



図．白根火砕丘周辺の GEM 放出率分布．地図中の赤丸は測定点を、グラフの青点は放出率 $\text{ng}/\text{m}^2/\text{s}$ を示す．地図は国土地理院地形図を引用して作成した。

湯釜南側斜面の高 GEM 放出率域は大別して東・西の 2 ヶ所認識できる。西側は昭和時代初期に繰り返し割れ目噴火が発生した領域に対応する。この領域内において、東京工業大学が深度 200 m まで掘削したポアホールの孔底内温度は 9 前後と低い。すなわち、この高 GEM 領域は破砕帯の広がりに対応し、気体水銀はより深部の熱水から揮発してきたものと考えられる。一方、東側の高 GEM 放出域には、西側のような火口跡は認められない。本領域の地表下は、過去に発生した大規模水蒸気噴火による堆積物が厚く堆積していることが本研究に基づく地質調査から判明している。おそらく、本領域も将来噴火が発生し得る破砕帯に対応すると思われるが、過去の噴火跡が埋積されて認識できないものと考えられる。

地質調査

火山体を構成する噴出物の層序から、白根火砕丘群は溶岩流・溶岩ドームの噴出と 5 回の火砕噴火及び少なくとも 2 回の水蒸気噴火によって形成されたと推測される。

また、テフラ層序と構成粒子・変質鉱物組成の変化から、噴火活動と熱水系の時間変化を検討した。湯釜南西部に厚く堆積する水蒸気噴火堆積物には珪化変質岩片が大量に含まれている。また、一般に高温・高圧下で生成する粘土鉱物であるパイロフィライトも豊富に見られることから、この水蒸気噴火は地下深部の変質帯中心部で生じたと考えられる。

この噴火に引き続いて、弓池マールを形成する爆発的噴火が発生した。さらに、2 回の火砕噴火が起きた。それ以降に堆積したテフラには未変質岩片をほとんど含まない。すなわち、ある時期からマグマ活動は不活発になり、水蒸気噴火が卓越するようになった。このステージでは、低温条件下で生成するスメクタイトが含まれることから、最近の水蒸気噴火の発生場は比較的浅部にあると考えられる。この結果は、湯釜周辺の表層付近に電気抵抗の低い領域の存在が示唆され、それがスメクタイトに富む粘土層と考えられていること (Nurhasan et al., 2006) と調和的である。

更に、山麓のテフラ層序を併せて、草津白根火山全体の活動史を概観できた。同火山では、約 1 万年前頃には火砕丘が相次いで形成されていた。約 5000 年前の本白根火砕丘群鏡池火砕丘の形成後、小規模な間欠的噴火が繰り返し発生し、それは 1500 年前頃まで継続していた。その後、約 1000 年前から各火砕丘群やその周辺で水蒸気噴火が頻発し始め、現在の状態に至ると考えられる。

以上の通り，同火山で水蒸気噴火が卓越する 1000 年前よりも以前は，爆発的なマグマ噴火が頻発していた．これら噴火の発生場所は本白根山から湯釜まで，山上領域の広い範囲に及ぶ．特に弓池など，白根火砕丘群と本白根火砕丘群との間の領域で強い噴火が発生した．その後，湯釜火口外の様々な場所に火口が形成され，約 1000 年間にわたり水蒸気噴火が繰り返し発生している．水銀放出率が特異的に高い領域を重視すれば，将来の水蒸気噴火の想定火口として，湯釜南側の数 100 m 程度の領域，および南西側の領域が挙げられる．本研究により，湯釜火口湖よりも南側で噴火活動が繰り返されていることが判明した一方で，既存の物理観測網は湯釜火口湖を取り囲むように配置されている．現状よりも南側領域における観測点の整備が，今後の草津白根火山の監視上の課題である．

おわりに

2018 年 1 月 23 日に，草津白根火山を構成する火砕丘群のひとつ，鏡池北火砕丘とその周辺において水蒸気噴火が発生した．主たる噴火口はスキーコースの至近距離に形成され，降下した噴石により 1 名が死亡したほか，スキー場の半分程度が廃止されることが決まるなど，同火山としては深刻な火山災害となった．鏡池北火砕丘は，東京工業大学が展開していた地震観測網の南外側に位置している．すなわち，本研究で目的としていた「中長期的な火山活動理解に基づく観測網の改良」という研究の方向性は妥当であり，この領域で得られつつあった調査結果は，研究期間を通じて学会発表として随時公表してきた．しかし，鏡池北火砕丘において噴火が切迫していることまでは認識できず，結果として，目標としていた物理観測の強化は噴火の後になった．

この噴火が発生した当日，本研究で蓄積されつつあった知見のうち，特に噴火履歴について簡潔にまとめた説明資料を作成し，全国の火山研究者や，防災関係者に周知したほか，報道を通じて積極的に広報した．また，噴火発生翌日から調査を行い，火山灰や噴石の採取・分析結果に基づき，本噴火が同火砕丘周辺で過去に発生してきた典型的な水蒸気噴火であることを指摘した．融雪後には，火口周辺において現地調査を行い，地質学的観点から噴火推移の復元に取り組んだ．これら本白根 2018 年噴火後の我々の研究成果については，別に発表する．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

草津白根山降灰合同調査班 (石崎泰男・他 15 名) (2018), 草津白根火山 2018 年 1 月 23 日噴火による降灰分布, 火山噴火予知連絡会会報, 129, 印刷中, 査

読なし

寺田暁彦 (2018) 水蒸気噴火発生場としての草津白根火山, 地質学雑誌, 124, 251-270, 10.5575/geosoc.2017.0060, 査読あり

Terada, A. and T. Hashimoto (2017) Variety and sustainability of volcanic lakes: Response to subaqueous thermal activity predicted by a numerical model, J. Geophys. Res., 122, doi:10.1002/2017JB014387, 査読あり

亀谷伸子 (2017) 草津白根火山の完新世噴火履歴, 富山大学・大学院理工学研究部 (理学) 修士論文 (指導教員: 石崎泰男), 90p

寺田暁彦 (2015) 平成 26 年御嶽山噴火と活火山登山, 山, 日本山岳会, 840, 2-4, 査読なし

〔学会発表〕(計 13 件)

寺田暁彦 (2017), 草津白根火山・白根火砕丘周辺の熱活動, 地球惑星科学連合 2017 年大会, 千葉市

水谷紀章・寺田暁彦・野田徹郎 (2017) 火口周辺の土壌から放出される気体水銀量の計測, 地球惑星科学連合 2017 年大会, 千葉市

水谷紀章・寺田暁彦・野田徹郎 (2017), 熱水系卓越火山における土壌気体水銀放出率の測定, 日本火山学会秋季大会, 熊本市

亀谷伸子・石崎泰男・吉本充宏・寺田暁彦 (2017), 草津白根火山の完新世噴火履歴, 日本火山学会秋季大会, 熊本市

水谷紀章・寺田暁彦・野田徹郎 (2017) EMP-2 を用いた活動火口周辺における土壌気体水銀放出率の測定, 日本地熱学会平成 29 年学術講演会, 函館市

亀谷伸子・石崎泰男・濁川 暁・吉本充宏・寺田暁彦・上木賢太 (2016) 草津白根火山の完新世噴火履歴, 日本火山学会秋季大会, 富士吉田市

寺田暁彦・坂本ゆり・神田 径・小川康雄 (2016) 地殻変動および熱観測から推定される草津白根山火口湖周辺の物質収支, 地球惑星科学連合 2016 年大会, 千葉市

濁川 暁・石崎泰男・亀谷伸子・吉本充宏・寺田暁彦・上木賢太・中村賢太郎 (2016) 草津白根火山本白根火砕丘群の完新世の噴火履歴, 地球惑星科学連合 2016 年大会, 千葉市

Terada, A. and Hashimoto, T. (2016) Evaluation of temporal changes in volcanic fluid emitted from the bottom of active hot crater lakes, the 26th Goldschmidt Conference, Yokohama

亀谷伸子・石崎泰男・濁川 暁・吉本充宏・寺田暁彦・上木賢太 (2015) テフラ層序からみた草津白根火山の最近 5000

年間の噴火活動，日本火山学会，富山市
寺田暁彦（2015）水蒸気噴火を起こす火
口地下浅部の熱構造，日本地質学会，長
野市

坂本ゆり・寺田暁彦（2015）夜間空中赤
外観測から推定される草津白根山の浅部
熱水活動，地球惑星科学連合大会，千葉
市

寺田暁彦・大倉敬宏・神田 径・小川康
雄（2015）草津白根火山における火口直
下浅部への流体蓄積，地球惑星科学連合
大会，千葉市

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺田暁彦（TERADA, Akihiko）

東京工業大学・理学院・講師

研究者番号：00374215

(2) 研究分担者

石崎泰男（ISHIZAKI, Yasuo）

富山大学・大学院理工学研究部（理学）・

准教授

研究者番号：20272891

吉本充宏（YOSHIMOTO, Mitsuhiro）

山梨県富士山科学研究所・研究員

研究者番号：20334287

(3) 連携研究者

上木賢太（UEKI, Kenta）

東京大学・地震研究所・研究員

研究者番号：40646353