

(1) 実施機関名：

東京工業大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

水蒸気噴火の準備過程を捉えるための火山熱水系構造モデルの精緻化

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では、浅部熱水系への流体供給源であるマグマだまりや、Brittle-Plastic境界（地表下2-3 km付近）以深に貯留されている高温・高圧の熱水の挙動を観測から伺い知るために、これまで判明している領域よりもやや深い場所の地下構造と、その周辺の熱水流動との関係を明らかにすることを目標とする。そのために、草津白根、御嶽および伊豆大島火山の3火山において電磁気学的な構造探査を基軸とした観測研究を実施する。本課題では、得られた地下比抵抗構造の特徴を、地球物理・地球化学的な観測成果と比較することで解釈する。すなわち、山体スケールで地震・地殻変動等の観測とデータ解析を進めるほか、火口周辺に加えて、やや広域を対象として噴気ガスや温泉等の試料採取する、あるいは既存データを収集する。このように得られた諸成果を整理することで、地下数～10 km程度までのやや深い領域までの構造と流体輸送との関係を研究する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1年目：草津白根、伊豆大島および御嶽火山（以下、対象3火山と呼ぶ）においてMT観測等の電磁気学的構造探査を実施。草津白根火山では地球物理観測（地震・地殻変動、全磁力および温度観測）、

および地球化学的調査（広域での温泉水採取、および火口周辺での繰り返しサンプリング）を実施
2年目：対象3火山において電磁気学的構造探査を実施。草津白根火山では地球物理観測および地球化学的調査を継続
3年目：対象3火山において比抵抗構造解析を進めるほか、必要に応じて補充観測を実施。草津白根火山では温泉および震源分布等の解析を行うほか、地球物理観測および地球化学的調査を継続
4年目：対象3火山において比抵抗構造を求める。伊豆大島ではCSEM連続観測を実施。草津白根火山では温泉および震源分布等の解析を行うほか、地球物理観測および地球化学的調査を継続
5年目：対象3火山において得られた比抵抗構造を、地球物理および地球化学的調査結果に基づき解釈する。伊豆大島ではCSEM連続観測を継続。草津白根火山では地球物理観測および地球化学的調査を継続

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

（草津白根山）

2018年に噴火した本白根火砕丘において実施した稠密MT観測の結果、同火山の浅部には白根火砕丘のような釣鐘状 cap rock が発達していないこと等が明らかとなった（Honda et al., 2023）。2014年から活発化していた白根火砕丘では、地震活動は低下し、拡大していた震源分布が2014年以前に戻ったこと、それまで観測されていた浅部増圧が2022年から減圧に転じたこと等を捉えた（東工大、第153回予知連資料、2024）。

2018年本白根山噴火発生時に観測されたVLPを再解析した結果、鉛直開口クラックよりも浅部にシル状の圧力変動源が見出された。これは、開口クラックを通じて上昇してきた流体が一時的に滞留したことを示唆する（Yamada et al., 2023）。噴火しなかった2011年の事象では、クラックの開口は観測されたもののVLPは発生していない。このVLPは、噴火発生の分岐条件を理解するために重要である。

地球化学的観測結果の解析高度化のために、湯釜火口湖の水・熱収支を再現する数値モデルを構築した。これにより、各溶存化学成分や同位体の時間変動を定量的に解析できる（Terada and Kuwahara, in press）。ドローンを用いた火口湖水の遠隔採水技術がウインチを用いるなど向上した。この手法を技術移転し、同様の観測がPoas火山（コスタリカ国）でも定常的に実施されるようになった（Sibaja et al., 2023）。

草津白根山湯釜火口周辺の固定MT観測点8点で広帯域電磁場の連続観測を行い、同時に山麓から高精度に制御された人工電流を送信した。解析については、昨年度のデータについて人工信号源に対する応答関数を求める重み付きスタッキング法を適用して応答関数を高精度で求めた。

（伊豆大島）

これまでに取得したデータ解析を実施し、A火口周辺とB火口列の地下浅部が他と比して、低比抵抗を示すことがわかった。このことは、両火口下に火山性流体が存在し、熱水変質が起きていることが示唆し、空中磁気測量解析の結果がB火口列に沿って弱磁化を示していることと整合的である。また、中央火口側からカルデラ縁に向かって浅部比抵抗値が高くなっており、ACTIVE観測から推定された構造とも一致する。以上のことは、中央火口直下に熱水上昇系が存在し、上昇が高止まったのちに周囲に拡散流下していることを示していると考えられる。

また、全磁力連続モニタリングを継続し、1986年噴火以降の帯磁傾向がほぼ収束し、現在は停滞傾向にあることが認められた。一方で、ACTIVE連続観測からは、帯水層上面の昇降による年周変化による変動は見られる程度で、火山下浅部に異状が認められなかった。

（御嶽山）

御嶽山の火山活動域付近の浅部(地表～数km程度)比抵抗構造を得るために、御嶽山山頂部の3地点にてAMT/広帯域MT観測を実施した。過年度の観測により御嶽山はノイズレベルが非常に高い地域であることが判明している。この問題に対して、2022年観測と同様、大容量の太陽光パネルおよびバッテリーを用いた数ヶ月間の長期間観測を行うことによって対応した。その結果、地磁気嵐期間を含む電磁場データを取得することに成功し、周波数10k～0.01Hzの良好なMTインピーダンスを推定することができた。得られたMTインピーダンスは2014年火口付近が低比抵抗の傾向を示し、熱水や変質粘土等が分布すると思われる。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

(草津白根山)

年度計画に従って実施した。すなわち、噴火発生場の特徴という静的な知見に加えて、流体流動という動的な情報を与えることで、水蒸気噴火と unrest の関係を具体的に描像した。例えば草津白根火山については比抵抗構造の全体像が判明し、白根火砕丘の地下浅部に釣鐘状に広がる cap rock のほか、その下の海拔 0 km から海拔 4 km 程度の広い範囲に流体貯留域、およびマグマだまりに対応すると思われる低比抵抗域が見つかった (Matsunaga et al., 2020; Tseng et al., 2020; Matsunaga et al., 2022)。2018 年本白根山に関しては、その直下に繰り返し開閉する鉛直開口クラックが見出されたほか、噴火前後の流体移動と構造との関係が議論された (Yamada et al., 2021; Terada et al., 2021; Yamada et al., 2023; Honda et al., 2023)。さらに、湖水や火山ガスの化学的特徴を解析する手法が新たに提案され、マグマガスや地下水循環の時間変動が示唆された (寺田, 2018; Yaguchi et al., 2021; Terada et al., 2022; Obase et al., 2022; Terada and Kuwahara, in press)。ドローン

(伊豆大島)

コロナ禍により現地観測の制約は受けたものの、5 年間で当初計画通りに実施した。成果としては、熱水変質と見られる低比抵抗域があり、熱水対流系がカルデラ周囲に流下する傾向が検出されたことにある。また、これらの傾向は、磁化構造解析や ACTIVE 観測データを支持する。連続観測からは、現時点では浅部に変化は認められないが、前回噴火以降の磁化強度変化に転換がみられ、今後の継続的なモニタリングの重要性が示唆された。

(御嶽山)

山中中腹部から山頂部の計 12 地点 (延べ 18 点) において、AMT/広帯域 MT 観測を実施した。初年度 (2019 年度) の観測により、御嶽山地域は MT データに対するノイズレベルが非常に高いことが判明した。そのため、2019 年度以降は大容量のソーラーパネルとバッテリーを用いた長期観測により、地磁気擾乱が大きい期間をとらえる計画に切り替えた。2020-2021 年はそのための試験観測などを御嶽山中腹域などで実施した。2022-2023 年度は山頂域で長期間観測を実施した。これにより火山活動域を含む御嶽山山頂行き南部から中部域の徒歩で到達可能な場所において、最低限の MT 観測データを得ることができた。現時点での解析によると、火口部付近の観測点で推定した MT インピーダンスから、地表よりおよそ 100 m より深部において 7 ohm-m 以下の低比抵抗層が存在することが見積もられている。この層は、火山活動による熱水が変質粘土層の存在を示唆している。今後は三次元比抵抗構造解析を行い、より詳細な比抵抗分布を解析する必要がある。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

草津白根山では、火口周辺で継続した高密度観測により活動評価の質的向上に資するデータを継続的に取得しながら、その火山学的理解を深めることができた。すなわち、草津白根山の浅部には熱水だまりが存在し、それは unrest を引き起こすばかりでなく、深部から供給された流体を緩衝する役割を担っている。一方で、より深い場所に self-sealed zone に覆われたもう一つの熱水貯留域が存在している。それが地表面と鉛直クラックで接続されることで、前兆に乏しい水蒸気噴火を駆動していると思われる。これらの結果は、他火山で取得されるモニタリングデータを解釈し、火山活動評価を行うために有益と思われる。

伊豆大島では、浅部熱水系についての知見を得ることに成功した。一方で、マグマ溜りの検出には至っておらず、その達成には周辺海域を含めたより広域の探査が今後必要であると考えられる。また、次の噴火の準備活動による浅部異常を捉えるためにも、連続観測モニタリングを継続していくことが重要である。

御嶽山では、徒歩での到達可能な観測点において、解析に耐えうる最低限の精度で AMT/WMT 観測データを得られたことから、ほぼ当初計画通りの成果を得たといえる。なお、御嶽山の MT 観測は本計画により初めて実施するため、過去の観測による蓄積がなかったことから、今後の MT 法観測の基盤となる重要なデータを得ることができたといえる。

(9) 令和 5 年度の成果に関連の深いもので、令和 5 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

・論文・報告書等

Honda A, Kanda W, Koyama T, Takakura S, Matsunaga Y, Nishizawa T, Ikezawa S, 2023, Shallow resistivity structure around the 2018 craters of Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by audio-frequency magnetotellurics, *Earth Planets Space*, 75, 43, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01799-3>, 査読有, 謝辞無

Yamada T, Terada A, Noguchi R, Kanda W, Ueda H, Aoyama H, Ohkura T, Ogawa Y, Tanada T, 2023, The Onset, middle, and climax of precursory hydrothermal intrusion of the 2018 phreatic eruption at Kusatsu-Shirane volcano, *J Geophys Res Solid Earth*, 128, e2023JB026781, <https://doi.org/10.1029/2023JB026781>, 査読有, 謝辞有

Sibaja BJ, Terada A, Alfaro-Solís R, Cambronero-Luna M, Umaña-Castro D, Porras-Ramírez D, Sánchez-Gutiérrez R, Godfrey I, Martínez-Cruz M, 2023, Unmanned Aerial Vehicle applications monitoring volcanic lake waters in Costa Rica, *Drone Systems and Applications*, 11, 1-14, <https://doi.org/10.1139/dsa-2022-0023>, 査読有, 謝辞有

Terada A, Kuwahara T, in press, A sensitive window into the magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane volcano, *Monograph Kusatsu-Shirane, Active Volcanoes of the World*, Springer, 査読有, 謝辞有

Matsunaga Y, Kanda W, in press, Magnetotelluric imaging of the magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, *Monograph Kusatsu-Shirane, Active Volcanoes of the World*, Springer, 査読有, 謝辞有

気象庁地磁気観測所・気象庁地震火山部・東京大学地震研究所, 2023, 伊豆大島における地磁気全磁力変化, 第152回火山噴火予知連絡会資料, 査読無, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Kanda W, Koyama T, Matsunaga Y, Tamura S, 2023, Geomagnetic variations associated with the unrest in 2014 and 2018 at the Kusatsu-Shirane Volcano, *IUGG2023, JS04p-071*

Matsunaga Y, Kanda W, 2023, Numerical simulation of hydrothermal circulation within active volcanoes: Constraints from resistivity structure models, *Numerical simulation of hydrothermal circulation within active volcanoes: Constraints from resistivity structure models, IUGG2023, JS04p-076*

Terada A, Wakamatsu K, Mizutani N, Sumino H, Obase T, Ohba T, Takahashi M, Yaguchi M, Takahashi Y, 2023, Assessment of lateral eruption hazards at Kusatsu-Shirane volcano: subsurface volcanic gas transport suggested by soil gas chemistry, *Volcanic Gas Workshop*, 10

Ishizu K, Ogawa Y, Tseng KH, Serita S, Kunitomo T, Minami T, Ichihara H, Caldwell TG, Heise W, Bertrand EA, 2023, Application of EM-ACROSS to investigate of underground structures of the Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, *JpGU2023, SEM14-10*

小川康雄, 2023, 電磁誘導を用いた地殻構造探査, 2023年度CA研究会

大石健登・小山崇夫・上嶋誠・馬場聖至・白井嘉哉・多田訓子・田中聡, 2023, 2021年度伊豆大島MT観測データ初期解析, 2023年度CA研究会

市原寛・桑谷立・多田訓子・永田賢二, 2023, グリッドサーチによるモデルパラメータの確率分布推定: 地磁気異常問題へ適用, 2023年度CA研究会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

項目: 火山: 地温測定 (現地・DTS)
概要: DTS試験観測 (側線長1.2km)
既存データベースとの関係:
調査・観測地域: 群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275
調査・観測期間: 昨年度より継続-2023/10/31
公開状況: 公開留保中 (公開時期・ポリシー未定)

項目: 火山: 地震: 短周期地震観測
概要: 定常・臨時観測 (14点)
既存データベースとの関係:
調査・観測地域: 群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地震：広帯域地震観測

概要：定常観測（3点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：空振観測

概要：定常観測（1点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地殻変動：傾斜計観測

概要：定常観測（ボアホール3点，地表付近3点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地殻変動：GNSS観測

概要：連続・繰り返し観測（14点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：その他

概要：定常観測（湖面水位1点・水温5点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地殻変動；地下水位観測

概要：定常観測（1点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：構造：MT・AMT観測

概要：電磁ACROSS

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：2023/7/-2023/10/

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：磁力観測（全磁力・3成分）

概要：定常観測（4点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地球化学：噴気ガス・土壌ガス

概要：噴気（定期採取5か所），土壌ガス（臨時採取，多点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地球化学：採水

概要：湯釜火口湖（定期採取，1か所）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：遠望観測（カメラ）

概要：湯釜火口内（1か所）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：

項目：火山：熱映像・噴気温度

概要：夜間空中観測（2-3年に1回），30m深地下水温度（定常1点），80m坑井内水晶温度計観測（定常1点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：構造：MT・AMT観測

概要：御嶽山山頂部の3地点にてAMT/広帯域MT観測を実施

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：水蒸気噴火を起こし得る火山活動不安定における観測データ理解の深化 35.893094 137.480644

調査・観測期間：2023/6/-2023/9/

公開状況：

(11) 次期計画における課題名：

水蒸気噴火を起こし得る火山活動不安定における観測データ理解の深化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

寺田暁彦（東京工業大学），神田 徑（東京工業大学），小川康雄（東京工業大学），野上健治（東京工業大学）

他機関との共同研究の有無：有

青山 裕（北海道大学），山本 希（東北大学），小山崇夫（東京大学地震研），市原 寛（名古屋大学），前田裕太（名古屋大学），渡辺俊樹（名古屋大学），大倉敬宏（京都大学），角野浩史※研究協力者（東京

大学先端科学技術研究センター), 鬼澤真也※研究協力者 (気象庁気象研究所), 山田大志※研究協力者 (防災科学技術研究所)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京工業大学科学技術創成研究院 多元レジリエンス研究センター

電話：

e-mail：

URL：<http://www.ksvo.titech.ac.jp/jpn/>

(14) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名：寺田暁彦

所属：東京工業大学科学技術創成研究院 多元レジリエンス研究センター