

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350494

研究課題名(和文) 精密地下構造調査と地盤変動検出による水蒸気爆発型噴火の可能性評価

研究課題名(英文) Evaluation of phreatic eruption potential by the precise imaging of subsurface structure and the detection of ground deformation

研究代表者

神田 径 (Kanda, Wataru)

東京工業大学・火山流体研究センター・准教授

研究者番号：00301755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：過去に水蒸気爆発を繰り返し、近年火山活動が活発化している立山火山地獄谷において、比抵抗構造調査、地盤変動解析、熱観測、温泉水分析を実施した。その結果、水蒸気爆発を繰り返してきた火山に特有のキャップ構造(地表付近のキャップロックと蒸気溜り)が認められ、その地下浅部は、高温の状態であることに加えて、圧力が高まった状態にあることが確認された。また、地獄谷で湧出している温泉水は、マグマ性流体と天水との混合で生成されており、地下浅所にて3種類の温泉水に分化していることが明らかになった。これらのことから、立山地獄谷は、水蒸気爆発の発生場としての要件を満たしていると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We conducted the resistivity surveys, the ground deformation analysis of InSAR images, the thermal observation, and the geochemical analysis of hot-spring waters in the Jigokudani valley of Tateyama volcano, where phreatic eruptions repeatedly occurred in the past and the volcanic activity has been increasing. These analyses revealed a typical cap structure consisting of near-surface cap rock overlying a gas reservoir, which has been detected in many volcanoes known to undergo repeated phreatic eruptions. We confirmed that the shallow subsurface of the Jigokudani Valley is in the pressurized and high-temperature state. In addition, we clarified that all hot springs are formed by the mixing of magmatic fluid and local meteoric water and have a common parent fluid that differentiates into three types in the shallow hydrothermal system. From these findings, we consider that the shallow ground of Jigokudani Valley is satisfying the requirements for causing a phreatic eruption.

研究分野：火山電磁気学

キーワード：火山災害 水蒸気爆発 比抵抗構造 地盤変動 熱水流体

1. 研究開始当初の背景

(1) わが国で発生する噴火の多くは水蒸気爆発型噴火であるが、その発生予測は、マグマが直接関与する噴火に比べて困難であるとされる。一般的に噴火規模が小さく、マグマの顕著な移動を伴わずに噴火が発生する事例も報告されているためである。しかしながら、1888年の磐梯山噴火のように、過去には大きな人的被害をもたらしたケースもあることから、水蒸気爆発型噴火の発生予測に繋がる爆発発生場の研究は、緊急に取り組まなければならない課題として位置づけられていた。

(2) 我々は、これまで草津白根山や口永良部島火山などにおいて、水蒸気爆発の発生場と考えられる活動火口周辺の浅部地下構造を明らかにしてきた (Nurhasan et al., 2009; Kanda et al., 2010)。これらの火山に共通して見られた地下構造の特徴は、極めて低い比抵抗帯として観測される熱水変質した難透水性の岩石層と、その直下のやや高い比抵抗値を示す蒸気が卓越した熱水流体溜りと考えられる領域の存在である。水蒸気爆発は、この熱水流体溜りへの過剰な火山流体の供給によって溜り内の温度・圧力が高まり、何らかのトリガーで発生するとの仮説を立てていた。

(3) 2011年3月の東北地方太平洋沖地震以降、立山(弥陀ヶ原)火山周辺では、最大マグニチュード5.4の地震が発生するなど、地震活動の活発化が報告されていた(気象庁, 2012)。山頂部に近い室堂平の地獄谷周辺では、以前から活発な熱・噴気活動が存在しており温泉も湧出していたが、2011年に入り従来の火山ガス組成に変化が生じ、高濃度のSO₂ガスやHClガスが検出されるようになった(環境省, 2012)。水溶性成分であるSO₂やHClの濃度上昇は、地獄谷浅部において、地下マグマから高温の火山ガスが供給されていることを意味しており、バッファとなるべき地下水層が局所的に消滅しつつある可能性も考えられた。

立山火山は、気象庁により活火山として認定されているものの、近代観測が開始されてからの明瞭な噴火記録はない。火山灰層序の研究により、過去1万年間に4回の水蒸気爆発の発生が確認されている(小林, 1980)ほか、古文書の記載の検討により、堆積物として痕跡のないより小規模な水蒸気爆発の発生が1836年に推定されている(中野・伊藤, 1998)。わずか180年前にも水蒸気爆発型噴火が発生しており、近い将来における噴火発生の可能性を排除することはできない。地獄谷地下浅部に高温の火山ガスが供給されている状況等から、我々は水蒸気爆発の発生場が形成されつつあるのではないかと、この作業仮説を立てていたが、浅部地下構造に関する情報は過去にも全く得られていなかった。観測例が少ない水蒸気爆発発生場の形成過程にある地下構造が得られる絶好の機会であった。

以上のことが背景にあり、本研究計画を立案した。

2. 研究の目的

本研究では、噴火規模が小さいため一般的に予測が難しいとされる水蒸気爆発型噴火について、その発生場が形成された可能性のある立山火山地獄谷の比抵抗構造調査、地盤変動解析、噴気温度観測などから水蒸気爆発発生要件を満たすかどうか検討することを目的とした。発生場として満たすべき要件は必ずしも明瞭ではなかったが、比抵抗構造調査からは、蒸気相と考えられる高比抵抗領域が発達しているかどうか、蓋となる熱水変質した層が存在するかどうか、を明らかにすることを要件と考えた。また、爆発の準備領域では、地下浅部が熱的に高温の状態にあり、膨張しているはずであることから、地獄谷周辺の局所的な膨張が発生しているかどうか、を明らかにすることも要件と考えた(図1)。

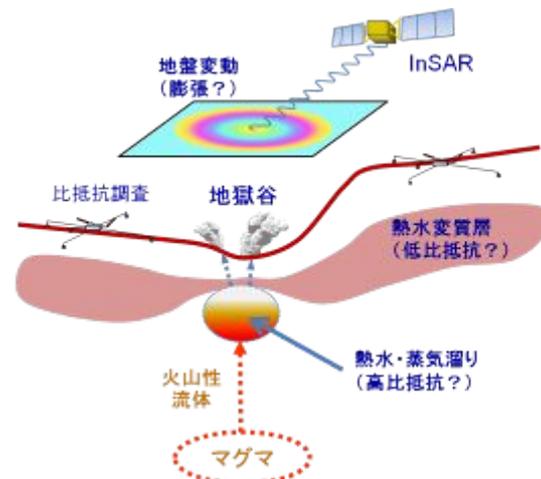


図1: 水蒸気爆発発生場の要件の概念図。

3. 研究の方法

(1) 過去に行った地下構造調査では、水蒸気爆発の発生場と想定している蒸気・熱水流体溜りは、活動火口直下の深さ数十m~数百mに検出されている。従って、地下構造を推定する方法として、深さ~10mから~1kmまでの比抵抗構造が推定できる可聴周波数帯域MT法(Audio-frequency Magnteo-Tellurics)による調査を実施した。AMT法は、地表における複数の周波数の電磁場観測から、地下の岩石の物性値の1つである比抵抗(電気伝導度)の分布を推定する方法である。測定は、2011年に噴気活動が活発化した地獄谷中央部を中心とし、東北東-西南西の方向に設定した測線に沿って2013年9月に8点、2014年9月には地獄谷中央部において約200m間隔で17点の稠密観測を行った(図2)。

(2) AMT法調査では分解能が低下する表層の低比抵抗層の微細な構造を明らかにするために、2015年10月に高密度電気探査を地獄谷内の2測線で実施した(図3)。地獄谷を南西-北東に横断する測線(JG_A)と北北西-南南東に横断する測線(JG_B)を設定し、それぞれの測線に沿って10m毎に電極を設置してウエナー電極配列およびエルトラ

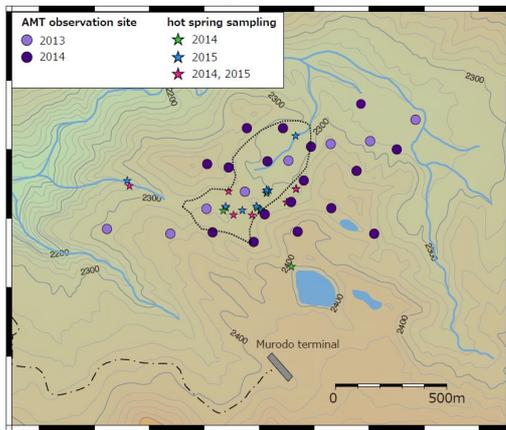


図 2: AMT 法比抵抗構造調査の観測点位置図 (紫の丸印)。点線で囲まれた領域が地獄谷の輪郭を表す。星印は温泉水のサンプリングを行った地点。



図 3: 多電極電気探査の測線位置図。緑の三角は噴気温度連続観測点。

ン電極配列の測定を行った。地形等の制約により、JG_A 測線の測線長は 500m (電極数 51)、JG_B 測線の測線長は 400m (電極数 41)であった。測定された電位差データ数は、JG_A 測線では 916 (ウエナー、エルトラン両電極配列で各 408) であり、JG_B 測線では 520 (両電極配置で各 260) であった。

(3) 室堂平周辺で行なわれた電子基準点間の GNSS 基線長解析からは、地盤変動は検出されていない(気象庁, 2012)。従って、変動があるとしても地獄谷周辺の局所的なものと考えられたため、地盤変動解析には、人工衛星に搭載された合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) 画像による SAR 干渉法 (InSAR: Interferometric SAR) を用いた。InSAR は、広範囲の 2 時期の画像から cm レベルの変動を面的に捉える技術であり、地上の観測装置を必要としないため、火山地域等での空間スケールの小さな変動を捉える目的に適している。解析には、山間部でも干渉性の高い、L バンド帯 (波長 15 ~ 30cm) のマイクロ波を用いる SAR データが必須であるが、L バンド SAR センサー搭載人工衛星である ALOS-1 の運用は 2011 年 5 月に終了したため、まずは 2007 年 ~ 2010 年の過去の画像の解析を行った。その後、2014 年 6 月から運用が始まった ALOS-2 による、より分解能の高い撮像画像を解析した。

(4) 噴気温度観測は、地獄谷の中心の鍛冶屋地獄および現在最も噴気活動が活発なエンマ地獄の 2 ケ所の噴気孔に白金抵抗体 (pt100) または K 熱電対を挿して行った (図 3)。噴気中に直接センサーを暴露させて温度を計測することとし、持続的な温度測定が行えるように噴気孔内部にセンサーを固定し、ケーブルを数 m 離れた位置まで敷設して、環境計測ロガーにて記録した。測定間隔は、記憶容量と電源の都合により、記録回収の容易な夏期については 1 分毎、回収が困難となる冬期中は 3 分毎とした。

(5) 当初計画にはなかったが、2014 年に地獄谷の 12 ケ所、2015 年に 15 ケ所で温泉水を採取し、化学分析を行った (図 2)。採取試料は持ち帰って、陰イオン濃度の測定を東京工業大学草津白根火山観測所で、水の同位体比の測定を東海大学大場研究室で行った。このほか、現地で温泉水の温度・pH・電気伝導度の測定を約 50 箇所で行った。

4. 研究成果

(1) AMT 法調査

まず、2013 年に取得した 8 観測点の電磁場データを解析し、Ogawa and Uchida (1996) のインバージョンコードを用いて 2 次元比抵抗構造モデルを推定した。その結果、地獄谷の直下には低比抵抗帯が広がり、その下 500m 以深では高比抵抗帯が存在することがわかった (図 4)。浅部の低比抵抗帯は、より低い値を示す上部と、相対的に高い値を示す下部に分かれており、上部は熱水を含んだ粘土混じりの堆積層、下部は熱水に高温の火山ガスが付加されたものであると解釈した。

次に、2014 年に取得した 17 点のデータを加えた合計 25 点のデータを用いて 3 次元比抵抗構造モデルを推定した (図 5)。これには Siripunvaraporn and Egbert (2009) のインバージョンコードを用いた。得られた比抵抗構造には、表層の 50m ほどの厚さを持つ低比抵抗層、その下のやや高比抵抗の領域、標高 1800 - 2200m に広がる低比抵抗層、東側深部に延びるやや低比抵抗の領域、表層から深部にかけて見られる高比抵抗領域、の 5 つの特徴が見られた。これらは、低浸透率のキャップロック、蒸気の卓越した領域、熱水変質した火砕流堆積物層、深部マグマからの流体の通路、この地域に広くみられる花崗岩の基盤岩、と解釈された。

の低比抵抗帯が下部に存在する火山ガスを留める蓋の役割を果たしており、これまでいくつかの火山で明らかにされてきた、典型的なキャップ構造が認められた。

(2) 高密度電気探査

測定された電位差データは、電極間隔の異なる見掛け比抵抗の分布に変換され、佐々木 (1981) に基づいた非線形最小二乗法による有限要素法 2 次元インバージョンプログラムを使用して 2 次元比抵抗構造モデルを推定した。

JG_A 測線では、 $10\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗帯が表層付近および測線の南西側に推定されている。また、数百 Ωm の高比抵抗領域が測線中央部から北東側の表層低比抵抗の下に見られる(図 6(a))。JG_B 測線においても、測線の中央部の表層付近に極めて低い低比抵抗

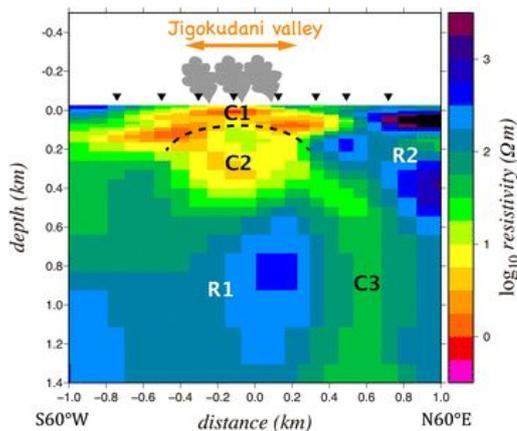


図 4: AMT 法から推定された地獄谷の 2 次元比抵抗構造モデル (Seki et al., 2015)

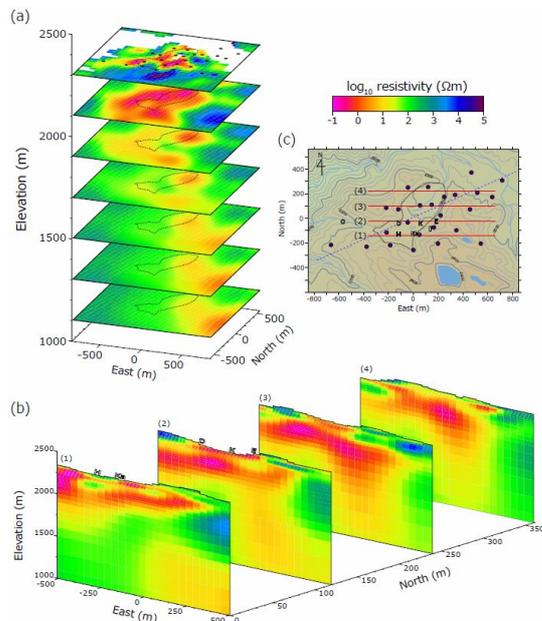


図 5: AMT 法から推定された地獄谷の 3 次元比抵抗構造モデル (Seki et al., 2016)

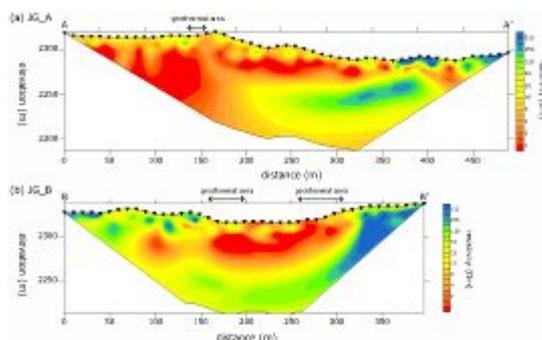


図 6: 高密度電気探査から得られた比抵抗構造。(a) JG_A 測線 (南東方向から見た断面図を示す)、(b) JG_B 測線 (西南西方向から見た断面図を示す)。各図の矢印は噴気地帯を表す。

帯が推定されており、測線の南側は高比抵抗を示している。両測線で見られた表層付近の低比抵抗帯は AMT 観測から推定された比抵抗構造のキャップロックにおよそ対応する。AMT による比抵抗構造モデルでは、キャップロックは一様な低比抵抗領域として推定されたが(図 4, 図 5)、高密度電気探査の結果は、キャップロックが不均質であることを表している。

(3) 地盤変動解析

まず、2007 年~2010 年の ALOS 衛星による撮像画像を用いて標準的な InSAR 解析を実施したが、ノイズレベルを超える有意な地盤変動は検出できなかった。そこで、複数の SAR 画像を用いた干渉 SAR 時系列解析 (PSI 法) を適用し、非積雪期に撮像された 12 枚の同軌道のデータを解析した。その結果、地獄谷内の局所的な領域で、最大約 4cm/yr の速度で衛星に近づく膨張性の地盤変動が検出された(図 7)。変動域は、活発な噴気・熱水活動が地表で見られる領域と空間的な対応が良い。また、ほぼ一定速度で膨張性の地盤変動が継続していたことがわかった。立山地獄谷の地盤変動はこれまで知られておらず、本研究で初めて検出されたものである。

地盤変動域の広がり局所的で数百 m 程度の範囲にとどまることから、変動をもたらす力源はごく浅部にあることが示唆された。そこで、 $50\times 50\text{m}$ サイズの 200 枚の開口シルを仮定し、その開口量分布をインバージョンにより求めた。計算の結果、主な開口は鍛冶屋地獄東側直下のごく浅部(深さ 50-100m)の局所的な領域に求まり、最大約 10cm/yr の開口速度が見積もられた。開口する領域は西側の百姓地獄付近にも分布し、その速度は約 5cm/yr であった。変動源の位置は、比抵抗構造から蒸気溜りと解釈しているやや高比抵抗の領域の上部付近に一致している。

最近の地殻変動の有無を調べるため、ALOS-2 衛星のデータを用いた解析も実施した。ALOS-2 衛星は、2014 年 6 月から運用が開始されたため、時系列解析を実行できず、標準的な InSAR 解析を実施した。2014 年 10 月 5 日と 2015 年 9 月 6 日に観測されたデータを用いて解析した結果には、有意

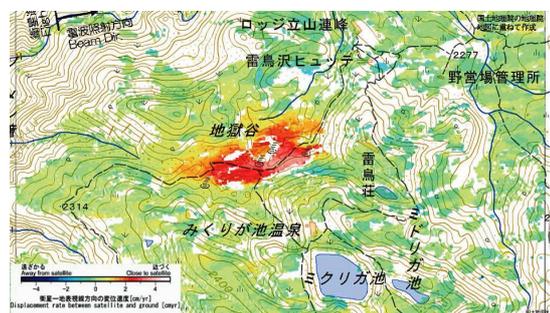


図 7: InSAR 時系列解析により検出された地獄谷周辺の 2007 年~2010 年の膨張性地殻変動速度。暖色領域が膨張領域に対応する (Kobayashi and Hanssen, 2015)。

な変動は認められなかった。もし ALOS-1 による 2007 年から 2010 年の解析と同じ速度で変動が継続していれば、年間 2-4cm 程度の変位のため、標準的な SAR 干渉の計測精度と同程度である。すなわち、少なくとも 2010 年以降、その変動速度が大きくなるような事態にはないことが示唆された。

(4) 噴気温度観測

噴気温度観測の結果を図 8 に示す。2ヶ所の噴気孔とも、当地の水のおよその沸点である 92 を超える温度を示しており、依然として地下浅部に高温高压の過熱蒸気が存在していることが推測される。両者に長期・短期とも同期した変化は見られないが、エンマ地獄の噴気孔では、2015 年から水の沸点近くの温度を示しており、鍛冶屋地獄でも低下傾向に見える。なお観測では、耐食性の強い素材を採用したが、感温部は常に火山ガスに曝され続けることから短期間で損壊するなど、度々欠測が生じた。その都度、材質を変更しセンサーを交換、破損を繰り返した。

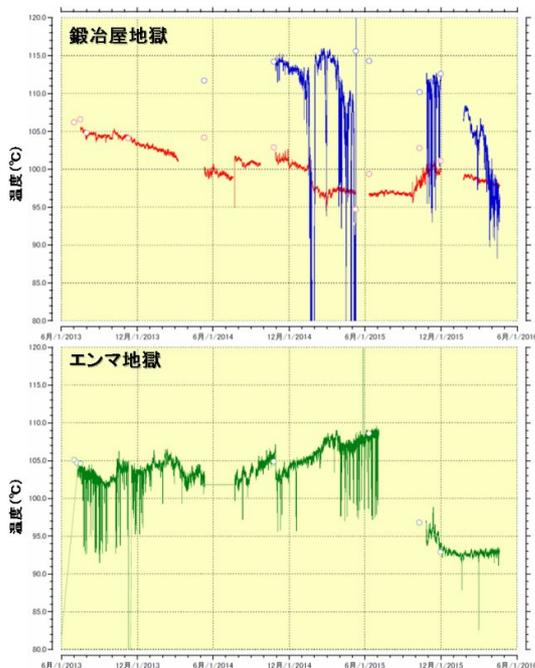


図 8：2ヶ所の噴気孔における噴気温度連続観測結果。白抜きの丸印は、同じ噴気孔における繰り返し観測の結果を表す。

(5) 温泉水分析

全ての温泉水の泉温は 60 を超え、水の沸点に近い 90 以上を示すものもあった。pH もほぼ全ての温泉水が 3 より低い強酸性を示した。電気伝導度は、最大で 10S/m を超える温泉水があった。

採取した温泉水の化学分析を行った結果、Cl と SO_4^{2-} の濃度比に基づいて Cl 型、 SO_4 型、Cl- SO_4 型の 3 種類に分類できることがわかった。さらに水の同位体比を測定したところ、地獄谷の温泉水はマグマ性ガス由来の流体と天水との混合で生成されていることがわかった(図 9)。Cl- SO_4 型の温泉水はマグ

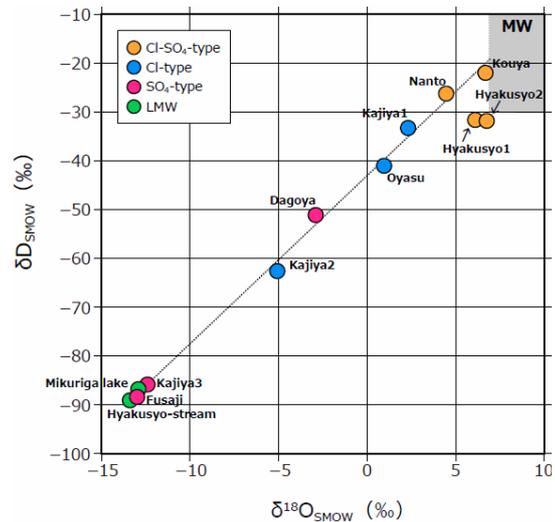


図 9：2014 年に採取した温泉水の酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)および水素同位体比($\delta^2\text{H}$)。陰イオン濃度から分類された 3 種類の温泉水と天水(LMW)で色分けされている。グレーの範囲(MW)は安山岩質火山のマグマ性ガスの同位体比の範囲 (Seki et al., 2016)

マ性ガスに近い同位体比組成を持つことから、マグマ性ガスの凝縮により生成されていると考えた。一方、Cl 型は、HCl の気相・液相への分配を考慮すると、気液二相に分離後の蒸気に由来していることが示唆された。2015 年に採取された温泉水から天水とマグマ水の混合が示されたが、2014 年ほど単純ではなく、熱水系の温度低下を示唆する結果を示しており、さらなる研究が必要である。

(6) まとめ

立山地獄谷で各種観測を行ったところ、典型的なキャップ構造が認められ、その地下浅部は、高温の状態であることに加えて、圧力が高まった状態にあることが確認された。すなわち、当初の研究目的である水蒸気爆発の発生場としての要件を満たしていることがわかった。また、地獄谷で湧出している温泉水は、地下浅所にて分化していることが明らかになった(図 10)

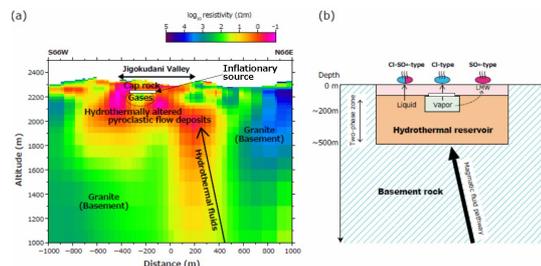


図 10：(a) 3次元比抵抗構造モデルとその解釈。(b)本研究から推定された立山地獄谷の熱水系 (Seki et al., 2016)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

関香織, 神田径, 小川康雄, 長谷英彰, 日野裕太, 小林知勝, 丹保俊哉, 立山地獄谷周辺の比抵抗構造, CA研究会論文集, 2014, 9-12, 2014, 査読無.

Seki, K., Kanda, W., Ogawa, Y., Tanbo, T., Kobayashi, T., Hino, Y., Hase, H., Imaging the hydrothermal system beneath the Jigokudani Valley, Tateyama volcano, Japan: Implications for structures controlling repeated phreatic eruptions from an audio-frequency magnetotelluric survey, Earth Planets and Space, 67:6, 1-9, 2015, doi:10.1186/s40623-014-0169-8, 査読有.

Seki, K., Kanda, W., Tanbo, T., Ohba, T., Ogawa, Y., Takakura, S., Nogami, K., Ushioda, M., Suzuki, A., Saito, Z., Matsunaga, Y., Resistivity structure and geochemistry of the Jigokudani Valley hydrothermal system, Mt. Tateyama, Japan, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2016 (掲載確定), 査読有.

[学会発表](計14件)

関香織, 神田径, 小川康雄, 長谷英彰, 日野裕太, 小林知勝, 丹保俊哉, 立山地獄谷周辺の比抵抗構造, 平成25年度CA研究会, 東京大学地震研究所(文京区), 2014年01月07日.

Seki, K., Kanda, W., Ogawa, Y., Hase, H., Hino, Y., Kobayashi, T., Tanbo, T., Resistivity structure around the Jigokudani Valley, Tateyama volcano, Japan, inferred from audio-frequency magnetotellurics, Geofluid-3 Symp., 東京工業大学(目黒区), 2014年02月28日.

関香織, 神田径, 小川康雄, 長谷英彰, 日野裕太, 小林知勝, 丹保俊哉, AMT法による立山地獄谷周辺の比抵抗構造, パシフィコ横浜(横浜市), 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年04月29日.

関香織, 神田径, 小川康雄, 丹保俊哉, 小林知勝, 日野裕太, 長谷英彰, 鈴木惇史, 比抵抗構造から推定される立山地獄谷の熱水系, 日本火山学会2014年秋季大会, 福岡大学(福岡市), 2014年11月02日.

関香織, 神田径, 丹保俊哉, 小川康雄, 高倉伸一, 潮田雅司, 鈴木惇史, 齋藤全史郎, 松永康生, 温泉水と比抵抗構造から推定される立山地獄谷の熱水系, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 幕張メッセ(千葉市), 2015年05月25日.

Kobayashi, T., Hanssen, R.F., Locally-distributed inflational deformation at Midagahara volcano, Japan, detected by InSAR time series analysis, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 幕張メッセ(千葉市), 2015年05月26日.

Seki, K., Kanda, W., Tanbo, T., Ogawa, Y., Takakura, S., Ushioda, M., Suzuki, A., Saito, Z., Matsunaga, Y., Hydrothermal system beneath the Jigokudani Valley, Tateyama

volcano, Japan, inferred from AMT surveys and hot spring water chemistry, 26th IUGG General Assembly, Prague Congress Centre (Czech Republic), 2015年06月28日.

小林知勝, ALOS/ALOS-2衛星を用いたSAR干渉解析による弥陀ヶ原火山・地獄谷の地殻変動について, 日本火山学会2015年秋季大会, 富山大学(富山市), 2015年09月27日.

関香織, 神田径, 丹保俊哉, 小川康雄, 高倉伸一, 潮田雅司, 鈴木惇史, 齋藤全史郎, 松永康生, 立山地獄谷の熱水系, 日本火山学会2015年秋季大会, 富山大学(富山市), 2015年09月29日.

小林知勝, Phase Linking を利用した山間部の地殻変動観測の効果 - 立山・弥陀ヶ原火山を例に -, 日本測地学会第124回講演会, 九州大学(福岡市), 2015年10月14日.

小林知勝, 干渉SAR時系列解析における計測点密度向上に関する幾つかの試み, 京都大学防災研究所一般研究集会「新世代SARがもたらす災害・環境モニタリングの進展」, 京都大学防災研究所(宇治市), 2015年12月03日.

関香織, 神田径, 丹保俊哉, 大場武, 小川康雄, 高倉伸一, 野上健治, 潮田雅司, 鈴木惇史, 齋藤全史郎, 松永康生, 立山地獄谷の熱水系, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 幕張メッセ(千葉市), 2016年05月23日.

丹保俊哉, 松田好弘, 立山地獄谷における熱観測について, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 幕張メッセ(千葉市), 2016年05月23日.

Seki, K., Kanda, W., Ohba, T., Tanbo, T., Nogami, K., Aoyama, S., Hydrothermal system beneath the Jigokudani Valley, Japan, Goldschmidt 2016, パシフィコ横浜(横浜市), 2016年07月01日(発表確定).

[その他]

ホームページ等

<http://www.ksvo.titech.ac.jp/~kanda/contents1.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 径 (KANDA WATARU)

東京工業大学・火山流体研究センター・准教授
研究者番号: 00301755

(2) 研究分担者

小川 康雄 (OGAWA YASUO)

東京工業大学・火山流体研究センター・教授
研究者番号: 10334525

丹保 俊哉 (TANBO TOSHIYA)

公益財団法人立山カルデラ砂防博物館・学芸課・主任学芸員

研究者番号: 10574311

小林 知勝 (KOBAYASHI TOMOKADU)

国土地理院(地理地殻活動研究センター)・地殻活動研究室・主任研究官

研究者番号: 40447991