

令和 4 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：2018～2021

課題番号：18K03777

研究課題名(和文)火山熱水系キャップ構造の実体と浸透率推定

研究課題名(英文) Real form of the cap structure of volcanic hydrothermal system and estimate of permeability

研究代表者

神田 径 (Kanda, Wataru)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：00301755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：強酸性環境下における火山熱水系の地下構造を解明するために、流動実験カラム装置を製作し比抵抗と透水係数の同時測定を試みたが、十分な測定結果を得ることができなかった。一方、詳細な比抵抗構造が推定されている立山地獄谷において、土壌からの火山ガス拡散放出量測定、土壌の透水係数および化学分析を行った。その結果、地獄谷中央部では、表層は粘土層ほど低浸透率ではないものの、シリカ鉱物や硫酸塩鉱物により透水性を下げていることが分かった。当初の目標であった比抵抗と浸透率との直接的な関係性は得られなかったが、表層の低比抵抗は、イオンを大量に含む酸性熱水の存在により作られていると結論づけることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水蒸気噴火の発生場と考えられている火山熱水系キャップ構造は、低浸透率かつ低比抵抗のキャップロックとその下部の流体溜りから形成されていると考えられているが、強酸性環境下にある火口や噴気地帯直下では、その実体は必ずしも明らかではなかった。本研究により、透水性を低下させている物質はシリカ鉱物や硫黄および硫酸塩鉱物であり、低比抵抗を担っている物質は強酸性の熱水であることが確認できた。従来の低比抵抗かつ低浸透率の粘土によるキャップが形成されているとする比抵抗構造の解釈を覆すものであり、水蒸気噴火発生場の理解が進展するものと期待できる。

研究成果の概要(英文)：To clarify the subsurface structure of the volcanic hydrothermal system in a highly acidic environment, we constructed a flow experiment column device and tried to measure the electrical resistivity and the hydraulic conductivity simultaneously, but we could not obtain sufficient measurement results.

In Tateyama Jigokudani, where the detailed resistivity structure was estimated, the distribution of soil diffuse CO<sub>2</sub> flux and the hydraulic conductivity of the soil were measured, and the chemical analysis of the soil was performed. As a result, although the surface layer in the central part of Jigokudani is not as low in permeability as the clay layer in the peripheral part, we found that the hydraulic conductivity is reduced by silica minerals and sulfate minerals. Although the direct relationship between resistivity and permeability was not obtained, it is concluded that the low resistivity of the surface layer is caused by highly acidic fluids containing a large amount of ions.

研究分野：火山電磁気学

キーワード：比抵抗構造 透水係数 浸透率 水蒸気噴火 変質鉱物

## 1. 研究開始当初の背景

水蒸気爆発型噴火は、国内外の多くの火山で発生しているにもかかわらず、その発生機構は未だ良くわかっていない。このタイプの噴火の噴出物には、火山体浅部に存在する熱水により変質を受けた岩石が多く含まれることから、発生機構を解明するためには、火山体浅部に発達する熱水系の理解が不可欠である。熱水変質岩石は、低浸透率の粘土鉱物などを多く含むため、地下深部からの流体の上昇通路を閉塞してしまい、その下部で温度・圧力を高める蓋（キャップロック）として機能することが期待される。従って、キャップロックが存在する環境は、その下部に温度・圧力の高まった蒸気・熱水を溜めるため、水蒸気爆発を誘発しやすいと考えられている（Browne & Lawless, 2001）。

火山体内において熱水やガスの流れを支配しているのは浸透率の構造であり、浸透率構造が明らかになれば、噴火や噴気活動等の火山現象の理解や発現機構の解明が進むと考えられるものの、観測から浸透率構造を直接知る方法はない。我々は、水蒸気爆発を繰り返してきた火山で電磁気学的手法による地下構造調査を実施し、火山体浅部（深さ 1 km 程度まで）の比抵抗構造を推定してきた（例えば、Kanda et al., 2010）。一般に比抵抗は、火山体を形成するマグマが固結した岩石や蒸気では高い値を示し、粘土質の岩石や熱水では低い値を示すため、熱水系の構造を理解する上で有効な物理量である。このような性質に基づき、火山体浅部で検出された低比抵抗帯がキャップロックではないかとの解釈がしばしば行われてきた（例えば、Nurhasan et al., 2006）。低比抵抗かつ低浸透率を示す鉱物として、粘土の一種であるスメクタイトが知られている。スメクタイトは、中性～アルカリ性の比較的低温環境（ $<100$ ）で生成され、火山地帯にも普遍的に存在する。しかし、活動火口周辺や噴気地帯などでは、多くの場合、強酸性の火山ガスや熱水が噴出しており、スメクタイトが安定的に存在できる環境にはなく、実際に検出されないケースも多い。

比抵抗と浸透率の関係は、未変質の多孔質岩石に対してはいくつか調べられている（例えば、Wright et al., 2009）。この種の岩石の比抵抗は、間隙流体の比抵抗値と空隙率のべき乗に比例する関係にある（Archie の法則）。一方で浸透率についても、空隙率に比例する関係式が知られている（Kozeny-Carman の式）ため、比抵抗から空隙率というパラメータを通じて浸透率を推定することが可能である。しかしながら、活動火口周辺や噴気地帯などでは、土壌は酸性変質帯を形成している。変質帯に産する粘土鉱物などの比抵抗は、表面伝導の効果が強くなり Archie の法則が成り立たないことに加え、イオウや石膏などの鉱物自体は低比抵抗を示さない。つまり、低比抵抗を担っている物質と低浸透率を担っている物質は異なる可能性がある。火山熱水系キャップ構造の実体の解明のためには、これらの酸性変質帯に産する鉱物に熱水が加わった場合の比抵抗と浸透率の関係を系統的に調べる研究が必要である。

## 2. 研究の目的

水蒸気噴火の発生場と考えられている火山熱水系キャップ構造は、低浸透率かつ低比抵抗のキャップロックとその下部の蒸気・熱水溜りから構成され、温度・圧力が高まりやすいと考えられているが、上述のように、強酸性環境下にある火山熱水系では、その実体は必ずしも明らかではない。本研究では、流動カラム装置を用いた様々な媒質に対する酸性熱水の浸透実験を行い、酸性環境下における透水係数と比抵抗の同時測定から、キャップロックとして機能する低透水性の岩石・鉱物を探索し、低比抵抗を示すかどうかを検証する。また、詳細な比抵抗構造が推定されている噴気地帯周辺において、火山ガスの上昇通路を推定できる土壌ガス拡散放出量測定と現場での土壌透水係数の測定データに基づいて土砂を採取し、カラム装置による同様の浸透実験を行う。実験結果から、透水係数（浸透率）・比抵抗・鉱物種の間関係を構築し、比抵抗から浸透率を推定する手法の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 透水係数および比抵抗の同時測定のための流動実験カラム装置を製作した。分担者の高倉の所属機関に現有するカラム装置のプロトタイプを参考に、内径 10cm、高さ 50cm のアクリルパイプを 2 本重ねた長さ 100cm のカラム装置を製作した（図 1）。10cm 毎に穴をあけてセンサーを挿入できるようにし、底にはバルブで開閉できる排水機構を取り付けた。比抵抗の計測には当初予定していた信号発生器とデジタルマルチメータの組み合わせではなく、送受信信号を一体的に測定できる HIOKI 社製の LCR メータを用いた。排水した流体量の測定には、島津製作所製の電子天秤を導入した。温度計測には、K 熱電対センサー 4 本を用いた同時測定が可能なデジタル温度計を使用している。これらの計測装置を組み上げて、固相としてガラスビーズを、液相として水道水を用いた流動実験を行い、装置と測定系の調整を試みた。

(2) Seki et al. (2016) により詳細な 3 次元比抵抗構造が推定されている立山地獄谷において、土壌の透水性を CO<sub>2</sub> ガス拡散放出量測定および現場における透水係数測定により調べた。CO<sub>2</sub> ガ

ス拡散放出量については、West Systems 社製のポータブルブラックスメータを用いて、2018 年 10 月に地獄谷内の 113 ヲ所で測定した。この測定において予想外に大きな放出量が測定されたため、地獄谷内の同じ領域において 2019 年 10 月に 120 ヲ所、2021 年 10 月にも 112 ヲ所で測定を実施し、その時間変化を調べた。これらの観測では、深さ 20~30 cm における地温測定も同時に行った。また、土壌ガス放出量に違いが見られた地獄谷内の 6 ヲ所において、透水係数のその場測定を、本科研費で購入した Soilmoisture Equipment 社製の Guelf Permeameter Kit を用いて実施した。また、そのうちの 4 ヲ所については土壌を採取し、その化学組成を蛍光 X 線分析 (リガク, Primus +) により推定し、土壌に含まれる主要鉱物を粉末 X 線回折分析 (リガク, MultiFlex) により特定した。その上で、土壌の透水係数およびガス放出量との関係性を調べた。

#### 4. 研究成果

(1) カラム装置を用いた流動実験では、ゼオライト (沸石) など低比抵抗を示すことが期待できる物質について測定を行った。天然の火山起源の沸石を用いた実験では、水道水の比抵抗値 (約 170  $\Omega\text{m}$ ) が沸石の導入後約 1 日かけて 1/5 程度 (約 30  $\Omega\text{m}$ ) まで低下し、期待していた結果が得られた。しかしながら、透水係数については、バルブを完全に開いてもカラム装置からの水の流下はほとんど見られず、計測ができなかった。実験装置は、比抵抗測定のための電極に用いている銅メッシュを通して水が落ちるように設計している。ここに土砂が溜まっていくとメッシュを塞いでしまい、液相の下方への流動が起きにくくなっており、土砂による透水係数の減少効果と区別ができない。ガラスビーズを用いた予備実験の場合は問題がなかったが、粒径の大きな試料では詰まってしまった可能性がある。また、内径を 10 cm としたことにより、現状では重量のある大きなサイズの排水機構を使用しているため、装置全体に負荷がかかっているほか、バルブの開閉がスムーズに行えず、排水量の測定のための空間を確保しにくい、などの難点があることがわかった。当初心配していた水圧による装置のたわみが見られず、水漏れがほとんど起きなかったことは収穫であったが、上記の問題は解決できなかった。



図 1: 製作したカラム実験装置。10cm 毎に電極および温度センサーを挿入できる。水位の低下速度はカメラにより測定する。バルブの開閉により電子天秤の上に排水し、その重量変化と水位の低下速度から透水係数を見積もる設計になっている。

(2) 図 2 に土壌からの 3 回の測定で得られた  $\text{CO}_2$  拡散放出量分布と地温分布を示す。2018 年以降その傾向に大きな変化は見られないが、2020 年および 2021 年は全体的に放出量の減少が見

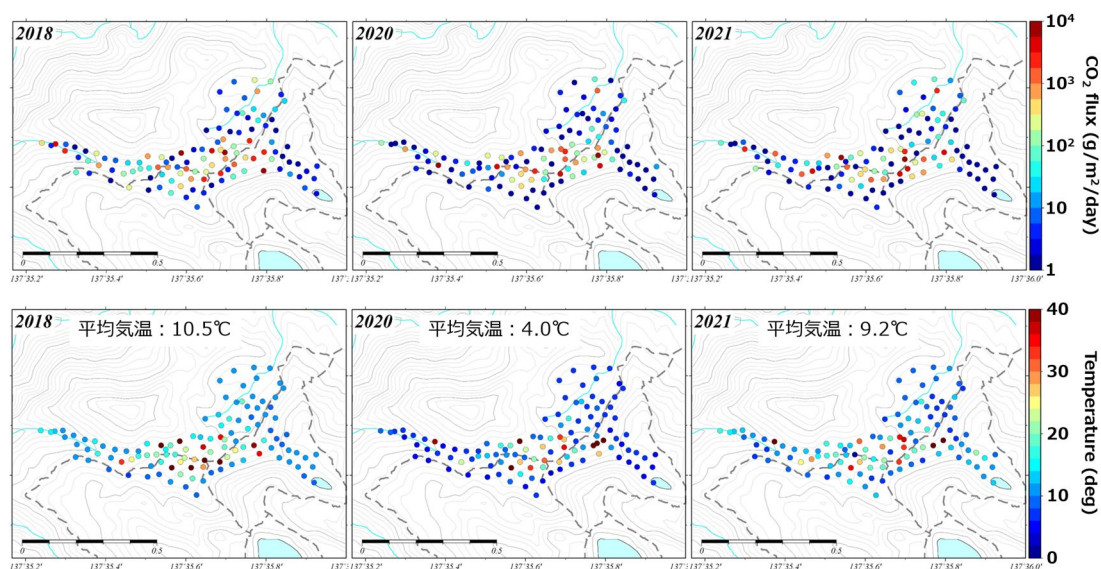


図 2: 立山地獄谷における土壌からの  $\text{CO}_2$  ガス拡散放出量分布 (上段) および同地点における地温分布 (下段)。左から 2018 年 10 月、2020 年 10 月、2021 年 10 月の測定結果。

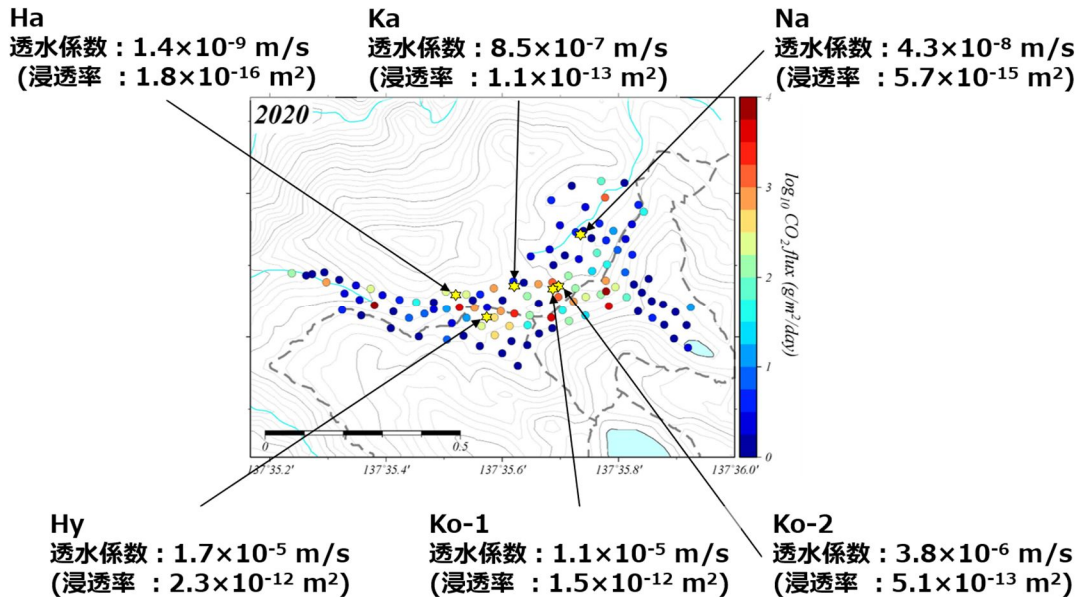


図 3: 立山地獄谷における土壌透水性係数のその場測定結果。浸透率は 15 の水の粘性率を仮定した場合の値。背景は 2020 年 10 月に測定した土壌からの CO<sub>2</sub> ガス拡散放出量。

られる。また、地獄谷では何ヶ所かで群をなして温泉・噴気活動が見られるが、10,000 g/m<sup>2</sup>/day を超えるような二酸化炭素放出量の大きな場所は、それらの地熱地帯周辺（比較的高温の地域）に一致していた。この値は、他火山における測定結果と比べても桁違いに大きく、水蒸気噴火火口跡が連結して地獄谷が形成されたことに起因しているものと思われる。

図 3 には、土壌透水性係数のその場測定の結果を示す。地質学的には、地獄谷の噴気地帯の中心に近い硫黄成分の多い土壌（Ka, Hy, Ko-1, Ko-2）と、粘土化した湖底堆積物の土壌（Ha, Na）であり、土壌ガスの分布に違いがあることから、透水性係数にも違いが出ることが期待された。測定の結果、地獄谷中央部では透水性係数が  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  m/s 程度であったが、周辺の湖成層における測定では  $10^{-8} \sim 10^{-9}$  m/s と 3 桁ほど小さい値が得られた。15（1 気圧）の水の動粘性係数を仮定すると、土壌浸透率は  $10^{-12} \sim 10^{-16}$  m<sup>2</sup> と計算された。これは、粘土交じりの土壌浸透率としては妥当な値だと考えられ、土壌ガス放出量分布ともある程度の相関が認められた。また、紺屋地獄周辺で測定した 2 点（Ko-1 および Ko-2）は、透水性係数が 1 桁異なる。この 2 点は距離的には数 m しか離れておらず、Ko-1 の方が地獄の中心（流体湧出地点）に近く透水性が高い。湧出流体の影響が小さくなると、一緒に放出されている土砂による透水性低下の効果が大きくなると考えられる。

地獄谷内 4ヶ所の土壌（地獄谷中心部(Hy, Ko-1)および周辺部(Ha, Na)）の化学分析を外注により実施した。その結果を図 4 に示す。蛍光 X 線分析による化学組成は、地獄谷中心部の 2 試料では、硫黄(S)の含有量が最も多く、Ko-1 で 82 wt%、Hy で 70 wt% を占めた（酸化物換算）。この値は、活動的な阿蘇火山中岳第 1 火口の湖底堆積物中の含有量（約 77 wt%；Miyabuchi and Terada, 2009）に近い値であり、地下深部からの硫黄を含む火山ガスの影響を強く受けていることを示す。周辺部の 2 試料では、いずれもケイ素(Si)の含有量が最も多く（30~40 wt%程度）、硫黄の含有量は 5~7 wt%であった。

図 5 に示す粉末 X 線回折分析の結果によれば、石英やクリストバライトなどのシリ

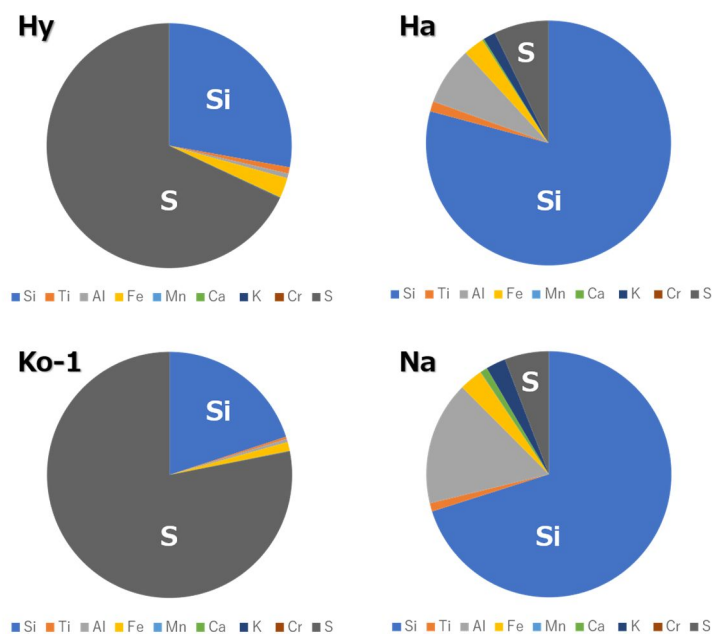


図 4: 立山地獄谷において採取した 4ヶ所の土壌の化学組成。分析はイピデンエンジニアリング。

試料名	検出鉱物														
	石英	クリストバライト	トリディマイイト	カリ長石	斜長石	氷長石	角閃石	パイロフィライト	カオリン鉱物	雲母鉱物	スメクタイト	明礬石	黄鉄鉱	硫黄	アナターズ
1. Ha	○	△	±		△	±		±	±	±	±	+	±	△	±
2. Hy	○	△	±						±			±		○	±
3. Ko-1	△	±	±						±			±	±	○	±
4. Na	○	+	±	±	△		±	±	±	±	±	+	+	±	

量比

◎: 多量(>5,000cps), ○: 中量(2,500~5,000cps), △: 少量(500~2,500cps), +: 微量(250~500cps), ±: きわめて微量(<250cps).

図 5: 立山地獄谷において採取した 4 ヶ所の土壌から検出された主要鉱物。分析はイビデンエンジニアリング。

カ鉱物と硫黄が卓越しており、酸性環境下で生成されるカオリン鉱物や明礬石などの硫酸塩鉱物が微量含まれている。スメクタイトなどの膨潤性粘土鉱物は、地獄谷中心部のHyおよびKo-1では検出されなかったが、湖成堆積層で採取したHaとNaからは、ごく少量のスメクタイトが検出された。

試料を分析した4ヶ所の透水係数を比較すると、HyおよびKo-1の透水係数が最も大きく、HaやNaでは3桁ほど小さな値を示した。以上のことから、地獄谷中央部では、表層はスメクタイトを含有する粘土層ほど低浸透率ではないものの、シリカ鉱物や硫酸塩鉱物が透水性を下げている。表層の低比抵抗は、イオンを大量に含む酸性熱水の存在により作られているものと考えられる。当初の目標であった比抵抗と浸透率との直接的な関係は得られなかったが、立山地獄谷における土壌透水係数、土壌分析、土壌ガスフラックス、の測定により、ある程度の相関関係を見出すことができた。これらの成果を取りまとめ、日本火山学会秋季大会において発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kanda Wataru, Utsugi Mitsuru, Takakura Shinichi, Inoue Hiroyuki	4. 巻 71
2. 論文標題 Hydrothermal system of the active crater of Aso volcano (Japan) inferred from a three-dimensional resistivity structure model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 37(1-10)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-019-1017-7	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2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 神田 径・丹保俊哉
2. 発表標題 立山地獄谷における土壌ガス・浸透率測定
3. 学会等名 日本火山学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kanda Wataru, Seki Kaori, Matsunaga Yasuo
2. 発表標題 Resistivity structure of preparation zone for phreatic eruptions in several volcanoes in Japan
3. 学会等名 Workshop on the mechanism of Phreatic Eruption（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020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	高倉 伸一  (Takakura Shinichi)  (50357349)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・上級主任研究員    (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	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	丹保 俊哉  (Tanbo Toshiya)  (10574311)	公益財団法人立山カルデラ砂防博物館・学芸課・学芸課長補佐     (83208)	

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