

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18784

研究課題名（和文）地盤表層域における熱水放出の状態変化に関する実験観測的研究

研究課題名（英文）Experimental observational study on high temperature groundwater release from shallow ground

研究代表者

青山 裕（Aoyama, Hiroshi）

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：30333595

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地下の極浅部から地表に向かう多様な熱水流動様式の物理的背景を理解するため、温泉井と蒸気井の中間的特徴を持つ減圧沸騰型間歇泉（しかべ間歇泉）に着目した観測調査と数値シミュレーションを中心に取り組んだ。その結果、間歇泉の噴出時には帯水層から噴出孔内への熱水の過剰供給が発生していることや、熱水中の炭酸ガスが噴出に寄与していることが明らかになった。また、熱水流動シミュレータのT2Well/ECO2Nを利用した数値実験で周期的噴出を再現すると共に、炭酸ガスの寄与の様子や噴出の開始/停止に関する噴出孔内の物理過程について新たな知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

間歇泉は全世界でも1000未満と希少で、国内ではその多くが観光資源として活用されているが、開発や気候変動などの環境の変化によって周期的噴出が止まってしまうなどの問題がしばしば発生している。本研究では、減圧沸騰型の間歇泉における噴出中の孔内映像撮影に初めて成功し噴出メカニズムの理解を深めるとともに、間歇泉として振る舞う場の水理パラメータの推定を行った。得られた知見は、希少な資源である間歇泉を保護するためには極めて重要で、本研究で観測調査対象としたしかべ間歇泉以外にも広く応用できるという点で、社会的な意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：The goal of this study is understanding the physical background of various hydrothermal flow patterns in the shallow subsurface. To achieve the goal, we mainly focused on field observation and numerical simulation of decompression-boiling Geyser (Shikabe Geyser), which has characteristics intermediate between those of hot spring wells and steaming wells. Our study revealed that an excess supply of hydrothermal fluid from the aquifer to the conduit occurs during the eruption phase of the geyser, and that carbon dioxide gas in the hydrothermal fluid contributes to the geyser eruption. Numerical experiments using the hydrothermal flow simulator T2Well/ECO2N reproduced the cyclic eruption and provided new insights into the contribution of carbon dioxide gas and the physical processes in the conduit related to the start/stop of eruption.

研究分野：火山物理学・地震学

キーワード：間歇泉 熱水流動 地下水 多項目同時観測 熱輸送効率 表面現象 噴気活動

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地盤のごく表層には「水」が多量に存在しており、雨水起源の水とマグマ起源の水が混じり合いながら地中を循環している。地中の水は温度・圧力条件に依存して「液体」「気体」「超臨界状態」と複雑に状態を変えながら流動し、水が存在しない場合に卓越する地盤中の固体伝導熱輸送に比べて、地中水の流動は効率的に熱を輸送する。火山地域など地下温度が高い地域では循環する水が熱せられて「熱水」となり、浅い部分の水の一部は温泉や間歇泉として地表へ噴出するほか、深い部分の水は蒸気井を通じて地表へ取り出されて地熱発電に利用されるなど、地下深部から地表へ向かう熱の輸送に大きく寄与している。一方、火山の火口や噴気地帯からもお湯や水蒸気として熱水は盛んに放出されており（火山から放出される噴気の大部分は水蒸気）、何らかの原因で地下での熱水圧力が地盤強度を急激に上回ると、御嶽山噴火災害のような激しい水蒸気噴火をもたらすこともある。

地中の熱水の流動や相変化が引き起こす現象の多様性には、地下での熱や水の供給率、熱を輸送する水の流動性、流路の形状特性が深く関わっている。温泉井や蒸気井のように水の上昇流路が安定して確保されている状況では、一般に定常的な流れの場（定常的な熱輸送の場）が形成されやすい。しかしながら、安定した流路が確保されていたとしても、熱供給率と水供給率が特定のバランスにある状況ではしばしば急激な気化が発生し、間歇泉的な振る舞いが見られる。また熱水の上昇流路が土壌のような多孔質媒質の場合は、水の物理的な状態（液体か気体か）によって流動性や熱輸送の効率が大きく変化するため、地表で観察される現象は複雑に変化すると考えられる。

地盤の浅い部分に存在する熱水（100℃以上）流動の変化は、温泉の泉温や湧出量の穏やかな変動から水蒸気噴火のような突発的な相変化を含む現象まで極めて幅広く、時として甚大な災害を引き起こす。水蒸気爆発や温泉井の暴噴といった突発的な災害の軽減には、定常的な噴気活動、間歇泉的な周期的噴出、水蒸気噴火の様な爆発的噴出といった、多様な熱水放出現象の背景にある物理的カラクリの統一的な理解が欠かせない。地下の熱水の挙動に関する研究は資源開発の分野を中心として進んできたが、地表への熱水放出現象は個別に議論されることが多く、多様性をもたらす物理的背景については統一的に理解されていない。

2. 研究の目的

本研究では特に地盤のごく浅い部分（地表から数 10m 程度）における熱水流動の変化とそれに伴う表面現象の変化に着目し、管のような安定流路を熱水が上昇する系（温泉井・間歇泉・蒸気井）と、砂礫などの空隙を熱水が上昇する系（噴気地帯）の双方について、流体の熱的状态や熱輸送効率の変化を支配するパラメータを特定するとともに、熱輸送効率と表面現象との関連を明らかにすることを最終的な目的とした。

3. 研究の方法

安定流路を熱水が上昇する系においては、液体噴出を主とする温泉井と気体噴出を主とする蒸気井の間に、熱供給率と水供給率が特定のバランスにある状況において気液混合状態での熱水噴出を周期的に起こす間歇泉が存在する。本研究では、北海道南部の鹿部町に湧出するしかべ間歇泉をテストフィールドとして連続観測や孔内観測を実施するとともに、地下水流動シミュレータも活用して、噴出を支配する物理過程の解明を中心的に行った。しかべ間歇泉は 1924 年に温泉掘削中に出現した間歇泉で、孔の上部にはケーシングが挿入されているため形状がシンプルで調査しやすいという利点がある。また、噴気地の事例として、有珠山の銀沼火口における地温観測と土壌調査を試験的に行った。

- (1) しかべ間歇泉の噴出孔近傍での観測は本課題の開始前から予備的に行っており、本課題の実施期間中も引き続き継続して取り組んだ。観測項目は、噴出孔の口元と孔口から 30cm 上部の 2 箇所を熱電対や白金抵抗体を設置しての温度観測、噴出孔から 3m 地点の低周波マイクロフォンによる音波観測、噴出孔から 6m 地点の傾斜計による地盤変動観測である。これらの連続データから、間歇泉噴出に先行する温泉水の湧出開始（口元温度計）、噴出の開始（30cm 温度計）、噴出の終了と水位回復（口元・30cm 温度計）が検出できるほか、地盤変動観測により噴出に同期する地下の圧力変動についての情報が得られる。観測機器の不調や間歇泉の状態変化のために噴出をとらえられない期間があったものの、データが得られた期間中は 8 分から 18 分の間で噴出が繰り返され、10 万回を超える噴出の記録に成功した。

連続観測とは別に、スポット的に孔内観測や遊離ガスの組成分析なども実施した。孔内の映像観測については、しかべ間歇泉の保守管理作業を受注している（株）アクアジオテクノに協力をいただいて 2021 年 6 月に実施した。孔内の温度・圧力観測については 2022 年 1 月に実施し、同時に噴出水量の計測も行った。また、遊離ガスの採取と分析は、東京工業大学火山流体研究センターの野上健治教授にご協力をいただき、2022 年 11

月に現地作業を行った。

- (2) 地下水流動シミュレーションでは、炭酸ガスを含む沸騰水の管内多層流れも考慮できる T2Well (Pan & Oldenburg, 2014) を利用して、しかべ間歇泉の形状を模した計算領域を設定し、周期的な噴出の再現と噴出素過程の検討を行った。
- (3) 噴気地の事例調査では、1977 年噴火の終息から噴気活動が続いている有珠山の銀沼火口において、面的な 0.25m, 0.5m, 0.75m, 1.0m の地温分布測定と噴気孔近傍での土壤調査を行った。土壤調査は連続的に噴気を出す噴気孔から数 m 離れた地点とし、通常状態では噴気の放出が見られないものの、鉄棒で 1.0m の孔を開けると噴気孔と同様に噴気を出し始めるという条件の場所を選択した。

4. 研究成果

- (1) しかべ間歇泉は、他の減圧沸騰駆動型とされる国内外の間歇泉と同様に、1) 水位回復過程 (recharge), 2) 口元からの湧出過程 (overflow & preplay), 3) 噴出過程 (explosion), 4) 緩和過程 (relaxation) の過程を繰り返す。しかべ間歇泉では、噴出孔内を上昇する熱水の沸騰が噴出を駆動することが先行研究で定性的に理解されていたが、孔の深さや深部の形状、熱水の流入状況など、孔内の様子については不明な部分が多かった。本研究で実施した孔内映像観測の結果、噴出孔の全長は 27m 程度で、上部 20m がケーシング、下部 7m が裸孔であり、約 113°C の熱水が裸孔部分の微細な亀裂から流入していることが確認された。現地の間歇泉公園の説明板には、孔の深部は袋状の湯だまりに接続されているイメージ図が描かれているが、実際の状況は全く異なっていた。噴出サイクル中に撮影した孔深部の動画からは、純粋な水-水蒸気系では沸騰が起こりえない温度圧力条件にも関わらず気泡が上昇の様子が確認され、水蒸気以外の気体成分の寄与が示唆された。湧出過程に孔口へ上昇してくる気泡を採取してガスの分析を行ったところ、水蒸気を除く成分の約 90% が炭酸ガスであることが明らかになった。また、噴出後に排水路へ集まる湯量を実測して噴出サイクル毎の噴出量を見積もったところ、1 サイクルあたり約 420L であった。一方で、噴出サイクル中の孔内圧力観測からは、噴出終了後の水位低下量は孔口から 8-9m 程度であることが確認され、孔内のお湯の減少量は 150L 程度となる。噴出量と減少量の差異は、噴出過程の間に周囲の帯水層から孔内へ熱水の過剰供給が起こっていることを意味する。以上の間歇泉観測に基づいて、しかべ間歇泉の新しい噴出概念モデルを提示し、Tsuge et al. (2023, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107851) にまとめた。

噴出周期変化の視点では、安定した周期性が見られる期間のほか、2 重周期や 3 重周期になる期間、安定した周期に時々乱れが入る期間、といった多様な変化が見られた。特に 2 重周期や 3 重周期となった期間は、噴出孔の内部に温泉成分が付着し、孔の上部で弱い狭窄が起こっていたことが確認されている。このような付着物による管径変化がない時期を選び、先行研究と同様に気温・気圧・潮汐・降雨・積雪量などの外的要因と噴出周期変化の相関関係を調べた。その結果、特に水位回復過程の継続時間と気圧変化に強い負の相関が確認できた。また、数ヶ月単位での長期的な噴出周期変化については、水位回復過程と湧出過程における熱水の供給をダルシー則に基づいて定式化し、間歇泉の静止水頭と帯水層の浸透率変化で観測データを説明できることを確認した。

- (2) しかべ間歇泉での周期的噴出および炭酸ガスを含む熱水の噴出素過程についての知見を得るため、熱水流動シミュレータ T2Well/ECO2N を利用した数値シミュレーションを実施した。このシミュレータには ECO2N と呼ばれる NaCl-H₂O-CO₂ 系の蒸気表が実装されており、上限温度は 110°C 程度までと制限があるものの、しかべ間歇泉と同じ 3 成分系での相変化を伴う流動を計算できる。しかべ間歇泉と似たような形状で、長さ 20m の鉛直管とその底部 4.5m が帯水層と接するような計算領域を設定し、帯水層の最遠部から適当な温度・圧力・二酸化炭素分率の熱水が流入する条件を与えたところ、観測事実と同様の水位回復過程、湧出過程、噴出過程のプロセスが繰り返される周期的振る舞いが再現できた。管内の気相分率や二酸化炭素分率を調べたところ、管の深部ではより高圧でも存在できる二酸化炭素の気泡が卓越し、浅くなるにつれて水蒸気分率が劇的に上昇することが確認された。これは孔内映像観測の結果とよく一致する。また、帯水層の浸透率、二酸化炭素分率、熱水温度、気圧などパラメータを様々に変化させた場合の振る舞いを調べた。特に気圧を変化させた場合は、気圧の上昇に伴って飽和温度が高くなり熱水の沸騰が抑制されることで一回の噴出量が少なくなり、結果として噴出周期が短くなることが分かった。これは観測事実である水位回復過程の継続時間と気圧変化の負の相関と対応する。また、供給される熱水温度を低下させたり供給率を下げたりした場合には、定常的な温泉湧出状態へ遷移することも確認できた。ただし、高温側の蒸気井への遷移については、ECO2N の温度制限のために調べられていない。
- (3) 通常状態では噴気の放出が見られないものの、鉄棒で 1.0m の孔を開けると噴気孔と

同様に噴気を放出し始めるという条件の場所で、深さ 70cm までの土壌を採取した。浸透率や粒度などの詳細な分析までは行えていないが、目視観察でも明らかにわかる粘土質層の存在が確認できた。地表から 10cm 深程度までは火口壁の崩落物が堆積した水分の少ない粗粒の火砕物であるが、その下には 15cm 程度の厚さの青灰色で水分に富んだごく細粒の粘土質層が発達し、それより深部は青灰色で粗粒の火砕物と粘土質層が互層になっているような構造となっていた。地温の深さ分布は、地表下 10cm では現地の沸点をやや下回るが、地表下 20cm 以深（粘土質層より下）では現地の沸点とほぼ同等であった。噴気孔との位置関係や深さを変えて開孔した場合の噴気出現の様子などから、粘土質層より下の青灰色の粗粒の層までは深部から水蒸気が噴気として上がってきているが、地表に近づいて温度が下がることで粘土層の深さで液化し、それより上部（地表）へは噴気として上がって来られなくなっているものと解釈できる。粘土質層の正体や生成プロセスに関する検討等は今後の課題である。

< 引用文献 >

Pan, L. and Oldenburg, C. M. (2014) T2Well an integrated wellbore-reservoir simulator. *Computers & Geosciences*, 65, 46-55, doi:10.1016/j.cageo.2013.06.005

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tsuge Ayuta, Aoyama Hiroshi, Nogami Kenji, Akita Fujio, Kato Kazuhiko	4. 巻 440
2. 論文標題 Eruption dynamics and plumbing system of Shikabe Geyser in southern Hokkaido, Japan, revealed by field observation inside and outside the conduit	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 107851 ~ 107851
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2023.107851	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Teshima Noriko, Nishimura Takeshi	4. 巻 450
2. 論文標題 Short-period flow oscillation during eruptions of Onikobe geyser, NE Japan: Insights from thermal infrared observation and acoustic measurements	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 108092 ~ 108092
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2024.108092	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 柘植 鮎太, 青山 裕, 秋田藤夫, 加藤和彦
2. 発表標題 しかべ間歇泉の熱水供給系と噴出における物理過程
3. 学会等名 日本火山学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ayuta TSUGE, Hiroshi AOYAMA, Fujio AKITA, Kazuhiko KATO
2. 発表標題 Eruption dynamics of Shikabe Geyser in southern Hokkaido Japan, inferred from physical observations inside and outside of the conduit
3. 学会等名 IAVCEI 2023 Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柘植 鮎太, 青山 裕, 秋田 藤夫, 加藤 和彦
2. 発表標題 ポアホールカメラを用いたしかべ間歇泉の井戸内観測
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 手島法子, 西村太志
2. 発表標題 間欠泉噴出過程の短周期振動 - 熱赤外映像および空振観測からの考察 -
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 柘植 鮎太, 青山 裕
2. 発表標題 しかべ間歇泉で観測された噴出周期の特徴と長期的な周期変化要因の推定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柘植 鮎太, 青山 裕
2. 発表標題 管路および帯水層内の気液二相流シミュレーションに基づく間歇泉の噴出 ダイナミクス
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2024年度大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ryo TANAKA, Shohei NARITA, Takeshi HASHIMOTO
2. 発表標題 Numerical Experiments of Volcanic Hydrothermal Systems and Their Implications to Multidisciplinary Geophysical Monitoring
3. 学会等名 TOUGH symposium 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柘植 鮎太, 田中 良, 橋本武志, 青山 裕
2. 発表標題 熱水流動数値計算に基づく登別地熱地域の熱水系構造と短期的活動推移の検討
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年度大会
4. 発表年 2023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	西村 太志 (Nishimura Takeshi) (40222187)	東北大学・理学研究科・教授 (11301)	
研究分担者	田中 良 (Tanaka Ryo) (30804926)	北海道大学・理学研究院・助教 (10101)	

	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
研究協力者	野上 健治 (Nogami Kenji)		

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
研究協力者	柘植 鮎太 (Tsuge Ayuta)		
研究協力者	手嶌 法子 (Teshima Noriko)		

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