



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	しかべ間歇泉の観測と数値実験から示唆される間歇泉の噴出と周期性のダイナミクス [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	柘植, 鮎太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第15747号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92285
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ayuta_Tsuge_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士 (理 学) 氏 名 柘 植 鮎 太

学 位 論 文 題 名

しかべ間歇泉の観測と数値実験から示唆される間歇泉の噴出と周期性のダイナミクス
(Dynamics of eruption and periodicity of Geysers, inferred from the observations and numerical experiments of Shikabe Geyser)

間歇泉は、水蒸気や非凝縮性ガスに駆動されて間欠的に地表に噴出する温泉であり、水や熱の供給条件、そして上昇経路のジオメトリの組み合わせが特殊な条件を満たした場合に発生する。間歇泉噴出を支配する物理過程を理解することは、火山噴火をはじめとする多相系の周期的な噴出現象について洞察を与える可能性があるとともに、希少な間歇泉を保全し、維持していくために重要である。これまで、間歇泉の噴出メカニズムについて様々な概念モデルが提案されており、それらは大まかにバブルトラップモデルと上昇駆動型減圧沸騰モデルの 2 種類に区別される。バブルトラップモデルは、上昇経路の側方に接続された空洞（バブルトラップ）が深部から上昇してきた水蒸気を蓄積し、上昇経路内に排出することで噴出を駆動する。一方で上昇駆動型減圧沸騰モデルは、上昇経路に供給される高温熱水が自身の熱で減圧沸騰することで噴出する。これらの概念モデルは観測される現象を部分的に説明するにとどまっており、間欠噴出を支配する詳細な物理過程は未解明な点が多い。また、間歇泉の噴出周期は多様に変化することが知られており、いくつかの間歇泉で気象条件や潮汐、地震との関係について研究されてきた。しかし、それらの研究は統計的な解析に基づいた議論が中心となっており、物理的な背景に基づいた定量的な評価はほとんど行われていない。本研究では、間歇泉の噴出ダイナミクスと噴出周期変化の物理メカニズムを理解するために、北海道南部の”しかべ間歇泉”で多項目の物理観測を実施した。

しかべ間歇泉では連続観測として熱水温度、空気振動、傾斜変動の観測を、キャンペーン観測として噴出孔内の映像、熱水温度、圧力観測、そして噴出量の直接測定を行った。しかべ間歇泉の噴出サイクルは、水位回復期間、湧出期間、そして噴出期間から構成される。ボアホールカメラを用いた孔内の映像観測によって、噴出開始直後に孔深部で急激に気泡が発生する様子を捉えることに成功した。間歇泉の上昇経路内における発泡の進展プロセスを直接的に観測した研究例は存在しておらず、本研究が世界初の観測事例である。一方で、孔内の温度および圧力データを解析したところ、孔深部における熱水温度は噴出サイクルを通して純水の沸点よりも低い値を示した。この結果から、映像観測で確認された気泡の形成過程には、非凝縮性ガスが寄与している可能性が強く疑われた。そこで、噴出孔から放出されるガスおよび熱水の採取と化学分析を行った結果、熱水中には CO_2 が多量に含まれることがわかった。すなわち、熱水に溶解している CO_2 は、その分圧によって飽和温度を低下させることで孔深部での発泡を促進すると考えられる。また、直接測定した噴出量と孔内の圧力データを用いた解析から、噴出期間における帯水層からの熱水供給率は水位回復期間のそれより約 4 倍大きいことがわかった。噴出時には孔深部だけでなく、周囲の帯水層における亀裂や空隙内でも気泡が形成し膨張することによって、孔内へ熱水の過剰供給が生じると考えられる。以上の結果に基づいて、しかべ間歇泉における噴出サイクルの概念モデルを新たに提案した。しかべ間歇泉は、噴出の駆動は熱水の上昇駆動型減圧沸騰

モデルで説明できるが、一方で噴出孔深部や周囲の帯水層内における気泡の形成や膨張が熱水の過剰供給を引き起こし噴出強度の維持に寄与する点で、バブルトラップモデルに類似した側面を持つと考えられる。

2019 年 11 月 26 日から開始した連続観測によって、2023 年 7 月 31 日までの約 4 年間の噴出周期データを取得した。そこで、観測期間における噴出周期の統計的な特徴や時間変化の傾向を整理し、幅広い時間スケールで噴出周期変化と気象条件や海洋潮位との関係を調査した。しかべ間歇泉の噴出周期は単純周期を示す期間もあれば、二重周期や三重周期を示す期間もあり、極めて多様に変化した。噴出周期の多重モードが発生した期間は、しかべ間歇泉でスケール析出防止のために施されているスケール抑制剤の注入が不十分であった期間と対応し、スケールによる孔内の部分的な閉塞が相変化や流動プロセスに影響を与えた可能性がある。また、数日程度の短期的な時間スケールで発生する噴出周期変化は気圧変化と強い負の相関を示した。噴出周期を水位回復期間、湧出期間、そして噴出期間に区別し、それぞれの変化と気圧変化を比較した結果から、気圧変化は熱水の飽和温度を変化させることで噴出プロセスに影響すると推測した。さらに、噴出周期は夏季に低下し冬季に上昇する傾向を示し、降水量および積雪量の変化と概ね対応した。すなわち、数ヶ月にわたる長期的な噴出周期の変化は、地下水の涵養量の変化に伴う静止水頭などの帯水層パラメータの変化に起因することが示唆される。噴出周期変化の物理メカニズムをより詳細に理解するために、噴出サイクルの概念モデルに基づいて、孔内の質量保存およびエネルギー保存の観点から噴出周期の数理モデルを新たに構築した。数理モデルを用いた解析から、長期的な噴出周期変化を説明する静止水頭や浸透率の時間変化量を定量的に推定した。本研究で提案した数理モデルは、上昇経路のジオメトリや熱水供給条件に関するパラメータを制約できれば、上昇駆動型減圧沸騰モデルが想定される他の間歇泉に対しても適用できると考えられる。

ここまでの結果は主に観測データに基づいており、しかべ間歇泉固有の性質であるのか、多くの間歇泉にも共通する普遍性な性質であるかどうかは定かではない。そこで、提案した概念モデルや噴出周期変化のメカニズムの妥当性や普遍性を検証するために、帯水層および管路内の気液二相流シミュレーターである T2Well/ECO2N を用いて数値実験を行った。シミュレーションの結果、特定の境界条件の組み合わせによって熱水と CO_2 の減圧発泡による間欠的な熱水噴出を再現した。さらに、再現された噴出サイクルの特徴は、しかべ間歇泉や他の間歇泉で典型的に見られる特徴とよく対応した。また、熱水に溶解している CO_2 は飽和温度を低下させるため発泡を促進する役割を持つが、一方で噴出の爆発性への寄与は小さいことがわかった。続いて、帯水層条件や管の形状、そして大気圧条件を変化させてシミュレーションを行い、噴出周期や噴出量などの応答の変化を調べた。特に、静止水頭や浸透率を上昇させると管内への供給率が上昇するため噴出周期は短縮し、また気圧を上昇させると飽和温度の上昇によって沸騰が抑制され、噴出量が減少するため噴出周期は短縮することがわかった。これらの結果は、しかべ間歇泉の観測事実から推定した周期変化のメカニズムの妥当性を支持している。さらに、シミュレーションで得られた各物理パラメータの時空間変化から、噴出プロセスは浅部の温度勾配が高い領域において発泡が促進される *self-enhancing process* と、深部の温度勾配が低い領域において発泡が抑制される *self-limiting process* に大別でき、それぞれが噴出の進展と停止を支配するという概念モデルを新たに提案した。本研究は、単純な上昇経路のジオメトリを仮定しており、かつ限られた温度圧力条件の範囲内での検証にとどまっているが、バブルトラップモデルおよび上昇駆動型減圧沸騰モデル両方の間歇泉における噴出ダイナミクスに重要な示唆を与えると考えられる。