

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03675

研究課題名(和文) 噴火の潜在性を秘めた静穏な火口湖の活動度評価の試み

研究課題名(英文) Attempts to evaluate activity level of dormant crater lake having eruption potential

研究代表者

後藤 章夫 (Goto, Akio)

東北大学・東北アジア研究センター・助教

研究者番号：80312685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：水を湛えた噴火口の活動度評価を、蔵王火山の火口湖・御釜をテストフィールドとして試みた。浅部地下熱水系とのつながりを明らかにする水・熱・化学物質収支の測定では、年間5mに及ぶ水位変動が、おもに夏期の降雨と冬期の地下水流出に支配されていることと、地下からの熱が伝導により湖底に及んでいることがわかった。水中ドローンによる湖底観察と音響による湖底地質探査からは、2018年に湖底中心部に発見された丘状の地形が熱水噴出などの火山活動によるものではなく、湖底地すべりの圧縮により盛り上がった地形であると明らかになった。これらにより、現在の御釜に表面的な活動は“ない”という結論を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火口湖は観光名所になっているところも多く、「噴火が起こらない安全な火山の美しい湖」という印象を持たれがちである。しかし噴火のリスクは常に存在する上に、ひとたび噴火が起これば、火山泥流や激しいマグマ水蒸気噴火といった、乾いた火口にはない危険な現象が起こり得る。火山の場に陸水学的手法及び映像・音響探査といった異分野の技術を持ち込んで実施した本研究は、観測体制の整っていない静穏な火口湖の活動度評価に有効で、火山活動の全容把握だけでなく、火山防災の面からも重要である。

研究成果の概要(英文)：We attempted to evaluate the volcanic activity of Crater Lake Okama at Zao volcano. The hydrological, chemical, and thermal budgets analyses revealed that annual lake level change (-5m) is controlled by rainfall mainly in summer and groundwater outflow in ice-covered winter, and geothermal heat input occurs at the lake bottom by conduction from depth. Lake bottom surveys by underwater drone and sonic prospecting indicated that a mound discovered on the center of the lake bottom in 2018 was not formed by volcanic activity such as geothermal water outflow but by compressional force from the front of underwater landslide. From these survey results, we concluded that there is no surface phenomenon by volcanic activity at present Okama.

研究分野：火山物理学

キーワード：火口湖 火山活動 蔵王 御釜 音響探査 水収支

1. 研究開始当初の背景

2014年9月の御嶽山と2018年1月の草津白根山(本白根山)の水蒸気噴火は、予期せぬ噴火の危険性を改めて私たちに教えた。そのような噴火の潜在能力を秘める環境の一つに、噴火口に水がたまった火口湖がある。日本には火口湖を有する活火山が多く、その美しさから観光名所になっているところも多い。表面活動がない場合や、あってもその活動レベルが低く、近傍までの立入が認められていると、そこでの噴火リスクは見過ごされがちだが、過去の活動域で再び噴火が起こる可能性は高い。火口湖で噴火が発生すると、火山泥流(ラハール)や、新たなマグマが供給されれば激しいマグマ水蒸気爆発など、乾いた火口にはない、より危険な現象が起こりうる。一見静穏な火口湖の活動度評価は、火山活動の全容把握だけでなく、火山防災の面からも重要である。

火山の活動度は、地震や地殻変動など、地球物理学的データで評価されることが多いが、それらは内部の力学的変動を捉えるもので、浅部に熱源が存在するかや、その影響が地表に及んでいるかの評価には向かない。これに対し、比抵抗構造探査は地下熱水系の検出に有効だが、変質帯のように、熱水と同じく低比抵抗を示すものもあり、解釈に任意性がある。そのため低比抵抗域の形状も考慮して解釈されるが、それには大がかりな多点観測が必要で、変化を見るためのくり返し観測は容易でない。また、熱水系と火口湖の間で熱や物質のやりとりがあるかは判断できない。火口湖の活動度を直接的に求められる手法の確立が望まれた。

2. 研究の目的

我々は地球物理学的手法では検出が困難な、噴火の潜在性を秘める静穏な火口湖の活動を、現地での直接的調査に基づき評価する方法の確立を目指し、2012年から現地調査を開始し、翌年から活発化が見られた蔵王山で、その火口湖である御釜をテストフィールドとして、静穏に見える御釜がただの水たまりか、それとも熱源からの影響を受けている火口湖なのかを明らかにするための調査を行った。御釜は最後の活動から80年を経た現在も湖水がpH3台の高い酸性度を示し、地下からの物質供給が続いていることが示唆される。また、2013年からの活発化以降、2014年と2019年に部分的白濁が起こり、2018年には平坦な御釜湖底中心部に小丘が発見されるなど、火山活動に起因する可能性がある現象が確認されている。

3. 研究の方法

御釜と浅部地下熱水系のつながりを明らかにするため、御釜の水・熱・化学物質収支を観測から定量的に決定した。具体的には、気象観測と河川流量を含めた現地調査から、表面での熱・水・化学物質の流入出量と、湖水の温度(蓄熱量)・水位(貯水量)・化学物質濃度の時間変化を求め、の差として、浅部地下熱水系から御釜への水・熱・化学物質の供給量を求めた(図1)。水温変化は最深点の深さ方向に配置した複数の温度計で通年の連続観測から求めた。

熱や物質の移動に関する調査に加え、音響による湖底の地形及び地質調査と、水中ドローンによる映像観察で、火山活動と関係する可能性のある水底地質構造の取得に挑戦した。音響地層探査では湖底地形だけでなく、医療のエコー診断のように、内部の地質構造が得られる。今回の新しい試みとして、火口湖の調査にも利用可能な、小型ボートに取り付けられる探査装置を開発した。層序、ガスの噴出に伴う空洞、地層の乱れなどを検出でき、火山活動の痕跡検出と、2018年

に御釜中心部の湖底で見つかった丘状地形の成因に迫った。

4. 研究成果

2012 年からの調査で、御釜では融雪期の春先に最も水位が下がり、夏から秋にかけて上昇することがわかっていった。水収支評価の結果、年間約 5m に及ぶ水位変動が、おもに夏季の降雨と、表面から

の流入がない結氷期の地下水流出に支配されていることがわかった。地下水流出量に着目すると、水位の低い春は少なく、水位が上がると増えた。このことは、流出河川のない御釜で、湖水が湖の浅い場所から地下水として漏出していることを意味する。

湖面からの熱流入がない結氷期には、表面から 2 m 以深で水温上昇が確認され、その程度は湖底に近いほど大きかった（図 2）。表面からの熱流入がない時期であることから、これは地下からの熱供給により起こっていることがわかり、さらに 2018 年から行っていた湖底水温連続観測でも同様の変化が毎年見られていたことから、一時的な火山活動の高まりではなく、定常的な熱供給によって起こっていることが判明した。水温上昇率と湖水体積から、最大 5 W/m^2 程度の地下からの熱供給があることがわかった。これはカルデラ湖である倶多楽湖と同程度、支笏湖の 10 倍、平均的な陸域の数十倍に当たる。しかし水温変化に対して、溶存イオン濃度に関する湖水の電気伝導度に変化がなかったことから、熱は温泉水ではなく熱伝導で供給されていると考えられる。湖水の高い酸性度については、湖底堆積物から黄鉄鉱が検出されていることもあり、周辺土壌中の黄鉄鉱が水や鉄と反応することで放出される水素イオンが原因と考えられる。実際、降雨後に火口壁からしみ出る水は、湖水より低い pH2.3~2.5 を示すことが、我々の調査で明らかになった。

2022 年 9 月に、200 kHz 音波を利用したソナーによる底質分析、サイドスキャンソナー（SSS）による水底地形のイメージング、サブボトムプロファイラ（SBP）による湖底下地質構造のイメージング、水中ドローンを用いた湖底表面の観察を実施した。その結果、幅が約 70 m、長さが約 60 m、最大厚さ約 2.5 m の明瞭な地すべり地形が湖の南西に発見され、湖底中央の小丘はその延長上にあった（図 3）。湖底は小丘を挟んで北側が南側より 0.3 m 程度低く、ここが異なる地形面の境界になっていた。小丘を南西から北東に横断する SBP イメージでは、小丘西側平坦部の直下 2.5 m からみかけ傾

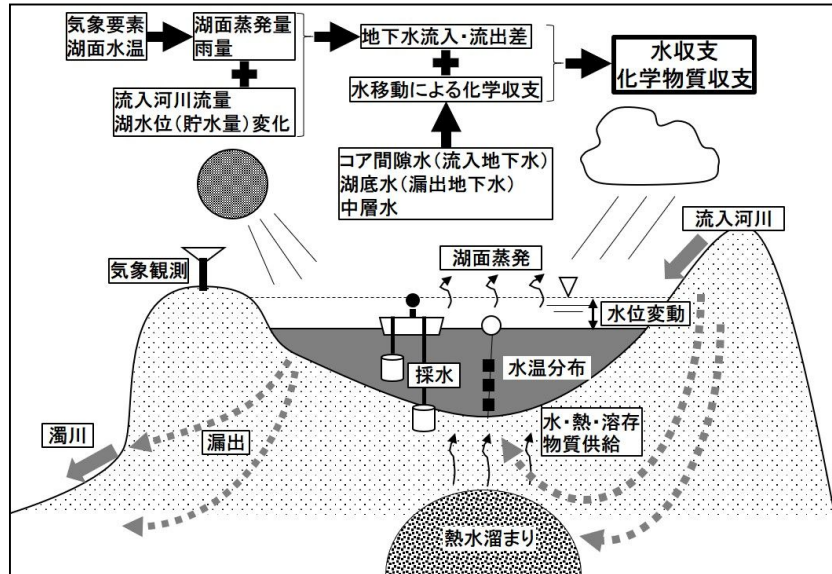


図 1 水・熱・化学物質収支の評価法。

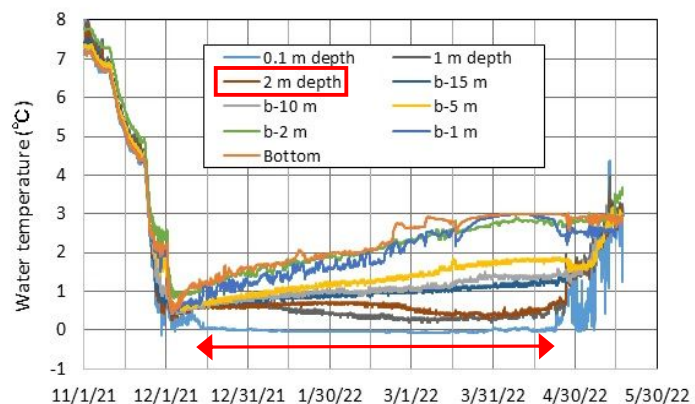


図 2 2021 年 12 月から 2022 年 3 月に見られた水温上昇。

斜 20 度で湖底面に伸びるスラストが認められ、これによる隆起域が小丘となっている。また、小丘東側の湖底下 1 m にある反射層は、水平短縮を受けるように鉛直方向に褶曲変形しており、所々に不連続やスラストが認められた。これらから、小丘を構成しているのは地質体同士が衝突して隆起・傾斜した湖底

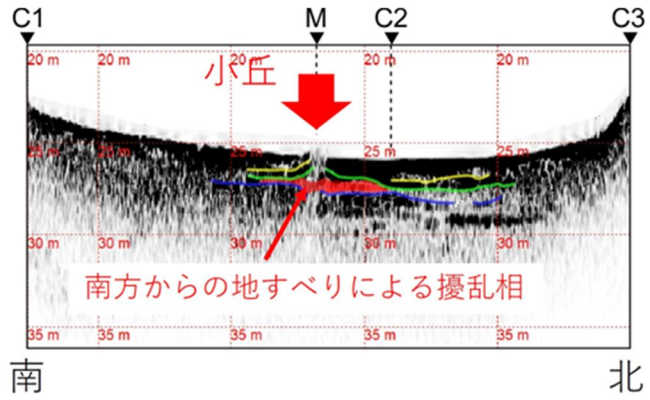


図3 サボトムプロファイラで得られた湖底地質断面。

堆積物で、火山活動に由来するものではないと考えられる。湖南西側の地すべりが変動して湖底の地質体とその圧力が伝搬し、さらにその前方の湖底が部分的に隆起した結果、小丘が形成されたと思われる。水中ドローンで観察できた小丘表面にはネットワーク状の亀裂が観察できたが、これは水平短縮に伴う曲隆によって表面が展張して形成された可能性がある。

御釜には最大 5 W/m^2 程度の地下からの熱が供給されているものの、高い酸性度は火山活動由来ではないことや、年間約 5m にも及ぶ水位変動が夏期の降雨と結氷期の地下水流出に支配されていること、さらに平坦な湖底中央に発見された丘状地形が水中地すべりによるものであることから、現在の御釜に表面的な活動は“ない”という結論を得た。

御釜の活動度評価という点では成果を挙げた一方で、予想に反して御釜があまりに静穏だったため、活動の“程度”を直接的に評価する手法の確立という、当初の目的は果たせていない。今後、静穏ながらも表面活動の見られるほかの火口湖で、我々の開発した手法でその活動がどのようなデータとして捉えられるかを検証する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Chikita Kazuhisa A., Goto Akio, Okada Jun, Yamaguchi Takashi, Oyagi Hideo	4. 巻 10
2. 論文標題 Water Cycles and Geothermal Processes in a Volcanic Crater Lake	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Hydrology	6. 最初と最後の頁 54 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/hydrology10030054	査読の有無 有
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 Chikita Kazuhisa A., Goto Akio, Okada Jun, Yamaguchi Takashi, Miura Satoshi, Yamamoto Mare	4. 巻 9
2. 論文標題 Hydrological and Chemical Budgets of Okama Crater Lake in Active Zao Volcano, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Hydrology	6. 最初と最後の頁 28 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/hydrology9020028	査読の有無 有
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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kazuhisa A. Chikita, Akio Goto, Jun Okada, Hideo Oyagi, Takashi Yamaguchi
2. 発表標題 A study on water cycles and geothermal processes in a crater lake: Okama in Zao Volcano
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山崎新太郎, 後藤章夫, 平野伸夫, 土屋範芳, 松中哲也
2. 発表標題 音響調査技術と水中ドローンが明らかにした蔵王火山・御釜火口湖の湖底地形と湖底下構造
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 後藤章夫, 知北和久, 山崎新太郎, 岡田純, 松中哲也, 土屋芳範, 平野伸夫, 大八木英夫, 山口高志
2. 発表標題 蔵王火山火口湖・御釜の現在の活動状況について
3. 学会等名 日本火山学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 知北和久, 後藤章夫, 岡田純, 大八木英夫, 齋藤圭, 岡崎友輔
2. 発表標題 活火山火口湖の環境構造に関する比較研究：鳴子火山・渦沼と蔵王火山・御釜
3. 学会等名 陸水学会北海道支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 後藤章夫, 山崎新太郎, 知北和久, 岡田純, 土屋範芳
2. 発表標題 蔵王火山火口湖・御釜の水中ドローン調査（速報）
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 知北和久, 後藤章夫, 岡田純, 三浦哲, 山本希, 山口高志
2. 発表標題 活火山火口湖における水・化学物質・熱収支評価による地下熱水系の推定：蔵王・御釜について
3. 学会等名 陸水物理学会2021年度名古屋大会
4. 発表年 2021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	知北 和久 (Chikita Kazuhisa) (70142685)	北海道大学・北極域研究センター・研究員 (10101)	
研究分担者	山崎 新太郎 (Yamasaki Shintaro) (40584602)	京都大学・防災研究所・准教授 (14301)	
研究分担者	松中 哲也 (Matsunaka Tetsuya) (60731966)	金沢大学・環日本海域環境研究センター・助教 (13301)	
研究分担者	平野 伸夫 (Hirano Nobuo) (80344688)	東北大学・環境科学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	土屋 範芳 (Tsuchiya Noriyoshi) (40207410)	東北大学・環境科学研究科・教授 (11301)	

	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	岡田 純 (Okada Jun) (50776747)	気象庁気象研究所・火山研究部第一研究室・主任研究官 (82109)	

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
---------	---------