

## 火山ガスと火口湖水の変動から推定する草津白根山の火山活動

Volcanic activity of Mt Kusatsu-Shirane suggested by the variations in fumarolic gas composition and crater lake water chemistry

\*大場 武<sup>1</sup>、谷口 無我<sup>1</sup>、糸原 宗一郎<sup>1</sup>、寺田 暁彦<sup>2</sup>

\*Takeshi Ohba<sup>1</sup>, Muga Yaguchi<sup>1</sup>, Soichiro Kumehara<sup>1</sup>, Akihiko Terada<sup>2</sup>

1.東海大学理学部化学科、2.東京工業大学火山流体研究センター

1.Department of chemistry, School of Science, Tokai University, 2.Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Inst. Tech.

## 序

気象庁の観測によると、草津白根山では2014年から火山性地震の回数が増加し、同年7月24日には発生頻度は一日当たり149回に達した[1]。その後、発生頻度は低下し、9月までに一日10回程度まで減少した。その後は2015年1、2月に突発的に頻度が増加したが、低い頻度が続いている。同じく気象庁の山頂付近における全磁力の観測によると、山頂付近では1994年ころから長期的にゆっくりとした浅部地殻の帯磁と解釈される変動が続いていたが、2014年4月頃から変動の傾向が逆転し、消磁と解釈される変化が始まり、2014年8月頃まで継続した[1]。筆者らはこれらの火山活動の原因を探るために、2014年から2015年にかけて地球化学的調査を行った。

## 試料の採取と分析

山頂火口湖の北側山麓に展開する東西方向に帯状に分布する地熱地帯の三か所（西からk1, k2, k3）で噴気を2014年7月23日、2015年5月15日、10月15日の三回にわたり採取した。k1はこの噴気地帯で長期間存在している勢いの強い噴気である。k2はそれに次いで勢いが強く、k3は音を立てずに静かに放出される噴気であった。山頂火口では南西の岸で湖面から湖水を、2014年7月から2015年10月にかけて5回採取した。これらの試料の化学組成とH<sub>2</sub>Oの安定同位体比を測定した。

## 結果

k1噴気のCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>Oは2014年7月23日に0.044と高い値を示したが、2015年5月、10月には、それぞれ、0.032、0.021と低下した。k2, k3噴気についても同様の低下傾向が見られた。噴気に含まれるH<sub>2</sub>Oの安定同位体比は変動が少なかった。地震発生頻度がピークを迎えた後の2014年8月から2015年10月にかけて、湯釜湖水に含まれる成分濃度が増加したが、化学種により増加率に差異が見られた。塩化物イオンと水素イオンは、それぞれ、81%、67%の増加を示した。Mg, Mn, Alは40%程度増加した。CaとFe濃度の増加はそれぞれ、11%と5%であった。湖水の安定同位体比は、dDが-56から-43‰に上昇し、d18Oが-5.3から-3.0‰に上昇した。

## 考察

1990年に地震活動が活発化した際に、湯釜湖水の塩化物と水素イオン濃度がほぼ平行して濃度が増加した。この点で、今回の変化は1990年の変化に類似している。湯釜の下で消磁と解釈される全磁力の変動が起きた点についても今回の活動と共通する。Ohba et alは1990年の活動で、固化しつつあるマグマに地下水が侵入しマグマからHClが抽出されそれが火口湖水に供給されたため、塩化物と水素イオン濃度の上昇があったと解釈した[2]。今回の活動でも、1990年の活動と同様に、マグマと地下水の接触の際に、熱量も運び出され火口湖水の水温を上昇させたと考えられる。湯釜の水温が上昇した結果、湖面からの蒸発が盛んになり、その影響で湖水の同位体比がdD, d18Oで、それぞれ、-43, -3.0‰まで上昇したと考えられる。1990年から始まった活動で同位体比の最高値は、それぞれ、-55, -4.4‰であり、今回の同位体比はそれを上回る。

噴気のCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比の変動は、マグマ溜まりそのものの変化か、あるいは、マグマ脱ガス圧力の変化が原因だろう。マグマ脱ガス圧力が増加すると、CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oのマグマへの溶解度の差から脱ガスするガスのCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比は上昇する。脱ガス圧力の上昇の原因としては、マグマを取り囲むシーリングゾーンの形成が候補として考えられる。2104年にシーリングゾーンが破壊し、高圧のマグマ性流体が浅部熱水系に注入され今回の活動を引き起こした可能性がある。

## 参考文献

- [1] 気象庁地震火山部火山監視・情報センター (2015) 草津白根山の火山活動解説資料 (平成27年12月)
- [2] T.Ohba, J.Hirabayashi, K.Nogami (2008) Temporal changes in the chemistry of lake water within Yugama Crater, Kusatsu-Shirane Volcano, Japan: Implications for the evolution of the magmatic hydrothermal system. *J.Volcanol.Geotherm.Res.*, 178 (2008) 131-144

キーワード：草津白根山、熱水系、火口湖

Keywords: Mt Kusatsu-Shirane, Hydrothermal system, Crater lake

## 立山地獄谷の熱水系

Hydrothermal system beneath the Jigokudani valley, Tateyama volcano

\*関 香織<sup>1</sup>、神田 径<sup>2</sup>、丹保 俊哉<sup>3</sup>、大場 武<sup>4</sup>、小川 康雄<sup>2</sup>、高倉 伸一<sup>5</sup>、野上 健治<sup>2</sup>、潮田 雅司<sup>5</sup>、鈴木 惇史<sup>1</sup>、齋藤 全史郎<sup>1</sup>、松永 康生<sup>1</sup>

\*Kaori Seki<sup>1</sup>, Wataru Kanda<sup>2</sup>, Toshiya Tanbo<sup>3</sup>, Takeshi Ohba<sup>4</sup>, Yasuo Ogawa<sup>2</sup>, Shinichi Takakura<sup>5</sup>, Kenji Nogami<sup>2</sup>, Masashi Ushioda<sup>5</sup>, Atsushi Suzuki<sup>1</sup>, Zenshiro Saito<sup>1</sup>, Yasuo Matsunaga<sup>1</sup>

1.東京工業大学 理学院 地球惑星科学系、2.東京工業大学 火山流体研究センター、3.富山県 立山カルデラ砂防博物館、4.東海大学 理学部 化学科、5.産業技術総合研究所

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, 3.Tateyama Caldera Sabo Museum, Toyama Prefecture, 4.Department of Chemistry, Tokai University, 5.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

The mechanism of phreatic eruption has not been well understood yet, although we observed phreatic eruptions many times. Phreatic eruption is known to occur in the hydrothermal system developed within a volcanic edifice because the ejecta of phreatic eruptions often contain the hydrothermally altered minerals originated from the hydrothermal system. Therefore, an understanding of the hydrothermal system is essential to clarify the mechanism of phreatic eruption.

The Jigokudani valley, Tateyama volcano located in the Hida Mountains, has an active solfatara field, and was formed by repeated phreatic eruptions some 40,000 years ago. Recently the Jigokudani valley showed the increased volcanic activity, for example, a sulfur outflow and temporal changes in the composition of fumarolic gases. These situations make us expect the presence of a well-developed hydrothermal system which is in preliminary stage of a phreatic eruption.

The objective of this study is to reveal the hydrothermal system beneath the Jigokudani valley by resistivity exploration and hot spring water analysis. In general, hydrothermal fluids or hydrothermally altered minerals are electrically conductive, whereas gases or rocks are resistive. Therefore, a resistivity imaging by using an audio-frequency magnetotelluric (AMT) method is suitable for structural investigation of the hydrothermal system. We estimated where the hydrothermal system developed by AMT survey. In addition, we discussed what has happened in the hydrothermal system by hot spring water analysis. We compared the inferred resistivity structure with the results of hot spring water analysis, which enabled us to estimate more realistic hydrothermal system.

The 3D resistivity structure showed that the Jigokudani valley has a cap structure that is composed of upper hydrothermally altered layer (called cap rock), which shows electrically conductive and rock) and hydrothermally low-permeable, and lower gas reservoir which shows relatively high resistivity. A highly conductive layer is found in a depth of around 500 m and it seems to extend eastward as the depth becomes large. These features were interpreted as the hydrothermally altered pyroclastic flow deposit and a fluid path from the deep magma, respectively.

We measured an electrical conductivity, temperature and pH of hot spring water on the spot. The ion concentration and isotope ratio of hot spring water samples were analyzed at 27 locations. The hot spring water in the Jigokudani valley was classified into three types based on  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  concentration ratio. Considering both the chemical composition and the isotope ratio, three types of hot spring water were derived from condensation of volcanic gases, a mixing of meteoric water and vapor phase separated at a shallow depth and the surface water supplied with volcanic gases consisting of mainly  $\text{H}_2\text{S}$ .

An integrated view of the resistivity structure and geochemical analysis suggests that the

hydrothermal system develops in the depth to 500 m and a common parental fluid of all hot springs is there. In addition, a gas reservoir estimated from the resistivity survey corresponds to the vapor phase inferred from the geochemical analysis. The concentration of  $\text{Cl}^-$  in the hot spring water derived from the vapor phase is a measure of the temperature condition beneath the cap rock, which implies that the monitoring of  $\text{Cl}^-$  could be useful to know the physical state of the cap structure.

キーワード：熱水系、水蒸気爆発、AMT、温泉水分析、キャップ構造

Keywords: hydrothermal system, phreatic eruption, AMT, hot spring water analysis, cap structure

地熱利用におけるスケール（析出物）に熱水系の変化が及ぼす影響について

The effect of the change of geothermal system for the scaling on surface facilities

\*柳澤 教雄<sup>1</sup>

\*Norio Yanagisawa<sup>1</sup>

1.産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

1.Institute for Geo-Resources and Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

火山の熱水活動の恩恵としての地熱発電や温泉、暖房などの地熱利用が世界各地で進められている。その利用に際し、熱水中の成分に起因する地上設備（配管、熱交換機など）へのスケール（析出物）の付着は、設備を維持するための大きな課題の一つである。そのため、熱水成分から利用温度領域で付着するスケールの種類やその付着速度を予測する必要がある。そして、長期の利用の間に、熱水性状の変化に伴い、スケールの付着状況が変化する事例もみられる。そこで、本発表では熱水系の性状変化に伴うスケールの変化の事例を示すことにする。

たとえば、岩手県の葛根田地熱発電所では、地下約3kmの葛根田花崗岩体と堆積岩体の境界付近に存在する地熱貯留層から熱水・蒸気を取り出して発電を行っている。その際、生産初期の熱水のpHは4付近であり、井戸には硫化銅鉱物やアンチモン、ヒ素鉱物が沈殿していた。しかし、数年後には熱水のpHは6付近となり、シリカ濃度低下に伴い、地化学温度も低下した。それに伴って、スケールの種類も四面銅鉱に変化するとともに、スケールの化学組成も硫黄が増加するなどの変化がみられた。

また、山形県肘折地域で実施されていた高温岩体試験では、地上から河川水を地下の人工貯留層にむけて注水し、加熱して高温の熱水・蒸気を取り出すものである。この場合、地下貯留層温度が高いときは、地上では少量のシリカが沈殿するのみであったが、冷却後は、炭酸カルシウムスケールが急速に沈殿するようになった。これは、地上から注水した水が、注入点付近の硬石膏を溶解することによりカルシウム濃度が上昇するが、貯留層温度が高いうちは、貯留層内で硬石膏が再沈殿することで地上には溶存カルシウム濃度は低くなる。しかし、貯留層温度の低下に伴い、地上に到達する熱水のカルシウム濃度が上昇し、地上で炭酸と反応して炭酸カルシウムを沈殿させるように変化する。

キーワード：地熱エネルギー、スケール、熱水性状

Keywords: Geothermal energy, scale, geochemistry of fluid

熱水流動を考慮した熱水系卓越火山における地磁気全磁力変化・地盤変動モデル（その1）-十勝岳  
2008-2009年の変化を例として-

Numerical model of temporal changes in magnetic total field and ground deformation due to  
hydrothermal system in volcanoes (1). - A case study on Tokachi-dake volcano, Japan -

\*田中 良<sup>1</sup>、橋本 武志<sup>1</sup>、石戸 経士<sup>2</sup>、松島 喜雄<sup>2</sup>

\*Ryo Tanaka<sup>1</sup>, Takeshi Hashimoto<sup>1</sup>, Tsuneo Ishido<sup>2</sup>, Nobuo Matsushima<sup>2</sup>

1.北海道大学、2.産業技術総合研究所

1.Hokkaido University, 2.AIIST

水蒸気爆発の発生場であると考えられる熱水系の発達した火山ではしばしば局所的な地盤変動や地磁気変化が観測される。橋本（2015）によれば、実際に水蒸気爆発が発生した口永良部島やその準備過程にあると考えられる幾つかの火山で、火口下数100 m程度の浅部における温度上昇を示唆する消磁やそれと同期する膨張性地盤変動がこれまで観測されてきた。北海道中央部に位置する十勝岳においても火口浅部における消磁と膨張性的地盤変動が同時期に観測されている。十勝岳は1926年、1962年、1988-89年にマグマ水蒸気噴火～マグマ噴火を経験しているが、それらの噴火間に水蒸気噴火を繰り返している（気象庁、2013）。2008年から開始された繰り返し地磁気全磁力測量により2009年までに62-2火口下での消磁を示す変化が観測された（橋

本・他、2010）。また、2007年以降GPS測量による基線長変化から62-2火口下の膨張を示唆する地殻変動が観測されている（気象庁、2015）。橋本・他（2010）では、この地磁気変化を熱消磁であると仮定し、深部から供給された水蒸気が消磁源深さで相変化し、潜熱放出後その液相が流下、蓄積するというメカニズムを提案した。そして同期間における噴気放熱率の低下量との比較から、熱消磁のためには深部からの供給量増加は必ずしも必要ではないことを指摘した。しかし、橋本・他（2010）は火道内における温度圧力条件を適当に仮定した半定量的な検討であり、熱水流動数値計算モデル等を用いてモデルの妥当性を検討する必要がある。

水蒸気爆発のためには火山浅部の相当量の水、圧力を閉じ込めるシール構造（キャップロック）、熱水を加熱する熱源が存在し、シール構造内の圧力が高まる必要があると考えられる。しかし、このような構造や物理過程が水蒸気爆発に先行してどのような全磁力変化、地盤変動を生じるかは明らかになっていない。本発表ではそのケーススタディとして、十勝岳の全磁力変化と地盤変動を説明する物理的に矛盾のないメカニズムを熱水流動数値計算によって提案することを目的とする。火口浅部にキャップロックが存在し、火口からの噴気放出はキャップロックの割れ目を浸透した蒸気によるもので、割れ目の浸透率が低下することで火口からの噴気放出量の減少、キャップロック周辺の温度圧力増加が引き起こされるとする作業仮説を立て、熱水流動数値計算によってこの仮説の妥当性を検討した。検討には数値計算プログラム“STAR”と状態方程式“HOTH20”（Pritchett, 1995）を用い、多孔質媒質中を流動する液相、気相、および気液二相の流れと、それらの流れに伴う岩石部への熱伝達を計算した。状態方程式“HOTH20”では、取り扱える流体は水一成分のみであるが、850℃までの高温領域を取り扱うことができる。

計算は以下の手順で行った。まず、地形の影響を考慮するために十勝岳山頂を始点とし、山体中腹の温泉と火口を横断する二次元断面を近似した地形を与えた。実際の計算領域は三次元であるが、断面に直行方向のグリッドを1つに設定することで擬似的に二次元とした。次に、適切な地下水位を与える山体の浸透率を推定した。この時、山体の浸透率は一様としている。境界条件として計算領域の上端および低標高側端には温度圧力条件を、下端および高標高側端には断熱不透水条件を与えた。また上端のグリッドには年間降水量相当の水の流入のソース、下端グリッドには地殻熱流量に相当する熱のソースを配置した。推定した浸透率を用いて火山活動開始前の準定常状態を計算した。次に、高浸透率領域を火口直下に伸びる鉛直火道と温泉標高に位置する水平チャンネルに、一部に割れ目を持つ低浸透率のキャップロック構造を火口浅部に配置し、火道下端から熱水を供給することで火口からの噴気放出、中腹からの温泉湧出を再現した。その後、キャップロック構造の割れ目の浸透率を変化させ、キャップロック付近の温度圧力状態の変化を観察した。その結果、割れ目の浸透率の低下が噴気量の減少、キャップロック付近の温度圧力増加を引き起こすことが確認された。これは作業仮説が少なくとも自己矛盾をはらむものではないことを示唆する。今後、ポストプロセッサにより、計算された地下の温度圧力変化と地表で実際に観測された地磁気全磁力変化や地盤変動との比較を行い、定量的な検討を

行う。

キーワード：数値計算、熱水系卓越火山、水蒸気爆発、地磁気全磁力、地盤変動

Keywords: numerical simulation, hydrothermal system, phreatic explosion, magnetic total field,  
ground deformation

## 地殻変動および熱観測から推定した草津白根山火口湖周辺の物質収支

Mass budgets of hydrothermal water beneath hot crater lakes at Kusatsu-Shirane volcano evaluated by ground deformation and changes in thermal activities

\*寺田 暁彦<sup>1</sup>、坂本 ゆり<sup>1</sup>、神田 径<sup>1</sup>、小川 康雄<sup>1</sup>

\*Akihiko Terada<sup>1</sup>, Yuri Sakamoto<sup>1</sup>, Wataru Kanda<sup>1</sup>, Yasuo Ogawa<sup>1</sup>

1.東京工業大学火山流体研究センター

1.Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

草津白根火山では、2014年3月に地殻変動を伴う微小地震の群発活動が始まった。同時期に、湯釜周辺地下での熱消磁に対応する地球磁場変動や、火口周辺において火山ガス組成の変化、そして湯釜火口湖の水温上昇などの変化が観測された。これらの事実は、火口直下における従来までの物質・熱収支に変化が生じたことを示唆する。本研究では、火口近傍に展開した傾斜計により得られた地下浅部の膨張体積と、湯釜火口湖および周辺における熱観測により明らかとなった流体放出量との量的関係を考察する。

東京工業大学は、湯釜火口湖から 1 km 内の3箇所はボアホール型傾斜計を設置している。このように火口にごく近接した観測網により、今回の活動を通じて S/N 比の良好なデータが取得された。火口付近の膨張を示す変動は2014年3月の群発地震開始とほぼ同時に始まり、変動率は同5月をピークとして、その後は単調に低下していった。群発地震活動は同8月頃から急激に衰えたが、膨張変動は2015年11月頃まで続いた。最も変動が大きかった湯釜北東観測点での傾斜変動は、合計で85  $\mu\text{rad}$  に達する。その後、2016年1月まで膨張変動は停滞したままであり、噴火も発生していない。

このように得られた傾斜ベクトルは、変動期間を通じて湯釜周辺を中心とする放射状の変動を示した。球状圧力源を仮定して計算すると、力源の位置は湯釜火口湖の北側、1976年に水蒸気爆発を起こした水釜火口周辺に求められた。力源の深さは地表下 500 m前後、2015年11月までの総膨張量は  $1.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ であった。

一方で、湯釜およびその周辺の熱活動にも変化が観測されている。湯釜火口湖の水温は、膨張変動の開始から2ヶ月遅れて2015年5月頃から、平年よりも高い状態が2016年1月も継続している。同火口湖には気泡式水位計が設置されていたが、おそらく硫黄の沈積を原因とする機器障害により、正しく測定できない状態のまま今回の活動を迎えた。そこで、2014年6月に測量ポールを湖畔付近の湖水中に設置して、これを東工大の湯釜火口湖監視カメラを用いて定期的に撮影することで、湯釜火口湖の水位を通年で数 cm 程度の信頼性で観測した。例えば融雪流入のない9月と比較すると、膨張変動が継続していた2014年および2015年の水位変化率は  $-5 \text{ mm/day}$ であった。これは、静穏期の同時期の水位変化率の、数倍に相当する。水温が高いこととあわせて考えると、湖底噴出流体の平均的エンタルピーが上昇したことを示唆する。

また、2012年10月、2014年10月および2015年11月に実施した空中赤外観測によれば、湯釜の北方に分布する噴気地の温度が、2015年は顕著に上昇したことが分かった。これは、2014年10月以降、2015年にかけて火山ガス放出量が増加したことを意味する。これは、北側噴気地からの噴気量が以前よりも増加したように見えることに矛盾しない。2015年10月に行なった現地踏査でも、既存の北側噴気地の西側に、地温の上昇による植生の枯死領域が認められている。

以上のことから、2015年11月以降、火口浅部の膨張変動が停止しているのは地下深部からの供給が途絶えたのではなく、深部供給量と地表面流体放出量の物質収支の均衡が実現したためと考えられる。湯釜火口湖直下では、難透水性の粘土層が釣鐘状に存在していることが電磁気学的研究から示唆されており、この内部で流体蓄積が進行しているのであろう。難透水層が熱水の圧力を支えつつ、釣鐘構造内部からの流体放出が緩やかに継続していると考えられる。発表では、これら流体放出量の時間変化を定量的に示し、浅部膨張量との比較を行なう。

キーワード：地殻変動、物質収支、傾斜計、火口湖、噴気、草津白根火山

Keywords: ground deformation, mass budget, tilt meter, hot crater lake, fumarole, Kusatsu-Shirane volcano





## 柱状節理に囲まれた花崗斑岩の物性構造

## Physical structure in pillars of granite porphyry surrounded by columnar joints

\*平田 康人<sup>1</sup>、千木良 雅弘<sup>2</sup>\*Yasuto Hirata<sup>1</sup>, Masahiro Chigira<sup>2</sup>

1.京都大学大学院理学研究科、2.京都大学防災研究所

1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

紀伊半島南東部の中新世の熊野酸性火成岩類の花崗斑岩には、高角の柱状節理が1-6 m間隔で発達し、緑泥石や黄鉄鉱などの変質鉱物が多く含まれる。花崗斑岩山地の高標高部では、緩斜面と厚い風化帯が広がっており、風化帯中に直径1 mを超える真球に近い岩塊が形成されている。これらの岩塊の表面には、殻状の層(皮殻)が付着している。この現象は球状風化と呼ばれる火成岩の代表的な風化現象であり、従来、節理の発達した均質な岩盤に生じると説明されてきた。しかしながら、球状風化する岩石の初生的な物性構造は調べられていなかった。我々は柱状節理軸に直交する面の反発硬さを調べ、柱状節理からの距離に応じて試料採取し、試料の密度、間隙率、P波速度とその異方性、X線CT値などの物性値を測定し、X線回折分析と薄片観察から鉱物組成を調べた。その結果、石柱の横断面には、石柱の中心から節理までに同心円状の構造があることが分かった。花崗斑岩は、石柱の中心から半径約10cm内は他の部分よりも間隙率が1%大きく、節理近傍はミリメートルスケールの大きな空孔が数多いという間隙の空間分布を持つ。節理軸方向の反発硬さとP波速度はそれと調和的に変化し、石柱の中心部分で小さく、その周囲で最も大きくなり、節理近傍で再び小さくなる。また、柱状節理軸方向のP波速度は石柱の直径・円周方向の速度よりも大きく、円周方向の速度は節理軸方向と似た変化であるが、直径方向の速度は中心ほど大きくなるという異方性を示す。これは直径方向(柱状節理に平行)の弱面が石柱の中心ほど少なく、軸方向と円周方向の弱面が中間部分で少ないことを示唆する。皮殻の形成は岩石の力学的強度とその異方性の影響を受けると考えられ、その間隙・弱面の分布が岩塊の球形化を促している可能性がある。XRD分析によれば、節理近傍は内部よりもスメクタイトと緑泥石との比が大きい。これは節理近傍が低温熱水による変質を強く受けたことを示唆する。しかしながら、石柱の中心部分とその周囲の間には、鉱物の明瞭な違いが認められない。花崗斑岩の石柱の物性構造は、柱状節理の形成が影響した脱ガスと変質の過程によるものと推測される。

キーワード：柱状節理、熱水変質、内部構造

Keywords: columnar joint, hydrothermal alteration, internal structure