

2018年草津白根火山噴火に関する総合調査 —草津白根山火山噴火から1年—

小川康雄¹・青山裕²・山本希³・筒井智樹^{4*}・寺田暁彦¹・大倉敬宏⁵・神田径¹・
小山崇夫⁶・金子隆之⁶・大湊隆雄⁶・石崎泰男⁷・吉本充宏⁸・石峯康浩⁹・野上健治¹・
森俊哉¹⁰・木川田喜一¹¹・片岡香子¹²・松元高峰¹²・上石勲¹³・山口悟¹³・伊藤陽一¹³・
常松佳恵^{8, 14}

- 1 東京工業大学理学院火山流体研究センター
 - 2 北海道大学理学研究院
 - 3 東北大学理学研究科
 - 4 秋田大学国際資源研究科
 - 5 京都大学理学研究科
 - 6 東京大学地震研究所
 - 7 富山大学大学院理工学研究部
 - 8 山梨県富士山科学研究所
 - 9 鹿児島大学地震火山地域防災センター
 - 10 東京大学理学系研究科
 - 11 上智大学理工学部
 - 12 新潟大学災害・復興科学研究所
 - 13 防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター
 - 14 山形大学理学部
- *現在 京都大学防災研究所

要 旨

草津白根山では、近年の火山活動が湯釜火口周辺に限定されていた。2014年からは、湯釜火口周辺で活動が高まり、山体の膨張を伴う地震活動、熱活動、火山ガス成分の変化が観測され、2年後には活動が終息した。一方で、1500年間活動のなかった本白根山鏡池北火口で、2018年1月23日に顕著な前駆的活動を伴わない水蒸気噴火が発生し、人的な被害が生じた。この噴火を受けて2018年度、2019年度に、地震学・測地学・地球電磁気学・地球化学・地質学に渡る科研費研究が実施された。噴火に先立って前兆的な現象の有無について、それぞれの分野で検討がなされた。また水蒸気噴火後にマグマ噴火への移行の可能性もありモニタリング研究を継続したが、現状では、本白根火山鏡池北火口の再活動の兆しは見当たらない。一方、草津白根山湯釜火口付近は、2018年4月、同9月、2019年5月に傾斜変動を伴う地震活動が発生し、再び活動的になってきている。

キーワード：草津白根山、水蒸気噴火、本白根山、白根山、前兆的現象、活動の推移

1. はじめに

群馬県北西部に位置する活火山である草津白根火山は、3山体（白根山・逢ノ峰・本白根山）で構成される。1805年以来、草津白根山の活動は、白根山山頂周辺（湯釜火口・水釜火口）を中心とする水蒸

気噴火活動が知られている(宇都ほか 1983, 寺田, 2018)。これまで地球化学的研究(Ohba et al., 1994, 2000; Ohwada et al., 2003)や地震学的研究(Nakano et al., 2003; 森ほか, 2006)・測地学的研究(寺田ほか, 2014), 地球電磁気学的研究(Takahashi and

Fujii, 2011; Nurhasan et al. 2006, Ogawa et al., 2016) が行われてきたが、これらの研究は、白根山の湯釜水釜火口周辺に集中していた。

2. 2014年の草津白根山(白根山(湯釜付近))の活動

2000年の東京工業大学火山流体研究センター発足とともに、草津白根山湯釜火口周辺に3箇所のボアホール型地震計および傾斜計からなる火口監視観測システムが整備された(森ほか, 2006)。ここではそれ以降の草津白根山の観測研究を簡単にレビューする。2001年以降の活動についてみると、2008年以前の火山活動は、静穏な状態が続いていた。2008年に湯釜火口北壁に赤外カメラおよび目視によって高温域が発見され、新たな噴気活動が確認された。

2014年3月には、湯釜・水釜火口周辺で地震活動が活発化し、8月まで日別の地震回数が100回に至るイベントが発生した。地震活動の活発化の開始と同時に、湯釜水釜火口を取り囲むボアホール傾斜計が山体の等方的な膨張を示し始め、その膨張は地震活動が低調化した8月以降も継続し、翌2015年8月まで継続した。この等方圧力源は湯釜水釜火口境界の海拔1500m(地表下500m)に推定された。また、この活動に伴い、湯釜北側噴気帯の硫化水素濃度が急激に低下していることが観測された。3月の地震活動と山体膨張に2ヶ月遅れて、湯釜湖水の水温が上昇を始め、膨張終了後も平年よりも放熱量で1.5倍高い状態が継続した。地磁気観測からも5月に急激な山体の消磁が観測された。このことは、3月の高温の火山ガス・熱水の貫入イベントの後、熱的な擾乱が地表付近で観測されるまでに2ヶ月を要したということになる。

この湯釜・水釜周辺の活動イベントについて、その位置を3次元比抵抗モデルと比較すると、地震の震源、地殻変動力源、消磁源が、低比抵抗かつ不透水性を示す粘土キャップの内部で発生していることが推定された。このように、2014年-2015年のイベントは、地震・地殻変動・火山ガス・地磁気によってモニタリングされ、かつ、3次元比抵抗構造モデルによってそのカラクリが示されることとなった。水蒸気噴火は未遂であったが、これまでの当センターで行ってきた稠密な他項目観測が、地下浅部の火山活動評価に大変有効であることを示した。

3. 2018年の草津白根山(本白根山)の活動

2014年の火山活動の活発化は、東京工業大学のボアホール型の地震・傾斜観測網でその推移がモニターされたのに対し、2018年1月23日に発生した本白根山鏡池北火口での噴火は、予見することが困難であった。顕著な前兆的観測データは、噴火のわずか2

分前の火山性微動のみであった。鏡池北火砕丘の再活動は1500年ぶりで、あらためて水蒸気噴火の予測の困難さを認識させられた。本白根山のスキー場では、噴石により人的な被害が発生した。

本稿では、科研費“2018年草津白根山噴火に関する総合調査”の成果を中心として以下に述べる。昨年までの成果については、小川ほか(2018)ですでに述べられているので、なるべく内容の重複は避ける。

3.1 草津白根山(本白根山)の地震観測

草津白根山の過去の噴火事例では、水蒸気噴火が繰り返されたことがあり、より大規模な活動への発展の可能性も指摘された。そのため、東工大・北大・秋田大・東北大のメンバーによって、本白根噴火後の数日間で、本白根火山周辺に地震観測点を緊急的に3箇所増設し、リアルタイムで地震波形データを伝送・集約することを実現した。3地点の臨時観測点を追加し統合処理することで、本白根火砕丘周辺の地震活動の把握が可能になった。データを気象庁にも転送し、2018年1月31日からは監視業務でも活用されることとなった。

噴火以前の3か月前までのデータを再解析し、震源の時空間変化・低周波地震の発生状況等の精査を行った。2018年1月23日噴火前後の火山性地震活動について、2018年1月23日噴火前は検出基準以上のものは月数イベント程度で、主にA型地震であることがわかった。噴火後・臨時観測開始以降は、多数のB型地震とハイブリッド型の地震が発生し、震央は、湯釜周辺と本白根山北側の2領域に集中している。2018年4月下旬には、湯釜周辺の地震活動が一時的に急増するイベントが発生し、本白根側の地震活動が静穏化している。

本白根噴火前の前兆的な微小地震活動については、Matched Filter法による微小地震の検出を行った。特に鏡池北火砕丘周辺の地震活動の様相を明らかにするために、当該領域で発生した地震をテンプレートとして、それらと波形相似性の高い微小地震を検出することによって、通常のルーチン処理に比べ数倍~10倍程度の地震(B型地震)を検出できたが、1月23日噴火直前の急激な地震発生数変化等の前兆的变化は明瞭には認められなかった。また、地震波干渉法による構造変化の推定を行った。噴火前後の火山体構造・熱水系の時間変化の抽出を狙い、草津白根山周辺の定常地震観測点の連続記録(雑微動記録)を用いた。しかしながら本白根山の噴火前後で有意な変化は認められなかった。

3.2 草津白根山(本白根山)の地盤変動観測

東京工業大学では、2017年から草津白根火山（白根山・逢ノ峰・本白根山）を取り囲む半径15kmのエリアを対象とした広域的なGNSS繰り返し観測ネットワークの構築を開始していた(Noguchi et al., 2019)。2018年1月の本白根山の水蒸気噴火はその中で発生した。

本白根山噴火前後の地盤変動については、白根山湯釜をとりまく3点のボアホール観測点と地上観測点2点の傾斜計で詳細が捉えられた。噴火前の9時59分58秒から10時02分10秒まで湯釜南方が隆起を示し、噴火後10時02分10秒から10時10分00秒まで湯釜南方が沈降する傾斜変動が捉えられた。これらを本白根山鏡池北火口の開口クラックで説明することができる。開口量1.7m、噴火前の膨脹体積42.5万 m^3 、噴火後の収縮体積30万 m^3 と推定された。

1月23日以降の本白根火山の活動推移を把握するためには、地盤変動観測を観測し、熱水やマグマの動きを監視することが不可欠であるが、噴火当時のGNSSおよび傾斜観測網は本白根山から2kmほど北の白根山湯釜火口周辺に集中していた。そのため、本白根山直下の圧力源や深部の圧力源に対しては検出が困難である。この問題を解決するために、2017年秋に整備してきた繰返し観測点を8箇所の中の5箇所について、連続観測が可能となるように機能強化を行なった。これにより本白根山直下のマグマの動きをリアルタイムに把握できるようになり、マグマ噴火への移行可能性を判断する材料を提供することができる。GPS記録からは、本白根火山噴火に伴う変動や、その噴火後のマグマの貫入に伴う変動などは捕らえられていない。

3.3 草津白根山（本白根山）の熱観測

2018年3月19日に本白根火砕丘外側の東～北側斜面の空中赤外線観測を、4月28日には夜間空中赤外線観測を行なったが、新火口で温度異常は認められていない。また、その後5月5日、5月11・12日に新火口における地表温度測定（接触式温度計）および赤外線カメラ撮影を行なったが、地熱異常は認められていない（草津白根山降灰合同調査班、2018）。

火山体を構成する岩石中の磁性鉱物がキュリー点以上の温度になると磁性を失うことを利用して、地球磁場を測定することによって火山体の温度構造の変動を捉えることができる。2018年3月6-7日および6月18日に無人ヘリコプターを用いた空中地磁気測定を行ない、2013年に国土交通省の実施した空中磁気測定データとの差を取ることで、温度構造の時間変化を推定した。その結果、本白根山火口周辺に顕著な変動は解明されなかったが、2013年以降、逢ノ峰の深部が高温化していると推定された。

3.4 草津白根山（本白根山）の噴出物調査

噴火直後から3月にかけて、草津白根山降灰合同調査班（2018）による調査、および4月から5月に追加調査がおこなわれた。当重量線図を作成し、Fierstein and Nathenson（1992）の手法により、総噴出物は3.6万トンと推定された。2014年の御嶽山の噴出物の1/10以下の規模である。

噴出物の産状から噴火推移を読み取ると、まず火口を開口させたフェーズ1では地表付近の岩石等を噴出し、それらは火口のごく近傍に堆積して下部層を形成した。その後のフェーズ2では噴煙が拡大し、遠方まで噴出物が輸送された。遠方相には火山灰凝集体が見られることから、湿潤な噴煙であったと考えられる。

本白根火砕丘群の熱水系の性質と噴火の推移に伴う変化を検討するために近傍の噴出物のユニットごとにXRD分析をおこなった。遠方の堆積物は、近傍の上部層と同様のピークとなった。同定された鉱物組合せから、高温酸性熱水による変質作用が生じていると考えられる。石英のピークが卓越し、粒子観察でもモザイク状石英が多数認められることから、本白根火砕丘群の地下には石英を主体とする珪化変質帯が形成されている可能性が高い。また、近傍の下部層と上部層を比較すると、上部層が熱水変質鉱物に富むことから、噴火の推移に伴い、より深部の熱水変質帯から噴出物がもたらされることで噴煙の規模が拡大したことが示唆される。

2018年1月23日噴火の噴石の最大長径分布および降下数密度を求めた。噴石は主火口の周囲500m圏内に分布し、北～北東にかけて集中的に分布することがわかった。ドローンによる空撮データからも同様に噴石の分布を求めた。噴石の長径と到達距離から初速度の下限が52-82(m/s)と推定された。

3.5 地球化学観測

火山灰に付着した水溶性成分について分析した。まず、水蒸気爆発に伴う噴出物にしては水溶性成分量が少いのが特徴である。これは、今回の噴火以前に新火口の地下浅所の熱水系の影響を受けていないことを意味している。そのため、噴火前に地下浅所での熱水活動はなかったと思われる。F、Cl、 SO_4 の分析の結果、草津白根山湯釜や本白根山山麓の万代鉱の温泉水とは異なり、Fが高いことがわかった。このことも、今回噴出した火山ガスが、地表付近の熱水系に影響されずに深部から直接、短時間に噴出していることを裏付ける。

CO_2 の拡散放出を新火口群で計測したが、 CO_2 放出が検出できたのは、鏡池北火口内のわずかに1箇所

のみであり、かつ、その放出率は $67.8\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ と、極めて小さかった。

さらに新火口に加えて、草津白根山火山周辺の主な噴気地である万座、北側噴気、殺生河原において土壌 CO_2 中の同位体を計測した。同位体を計測することによって、植物起源の CO_2 の影響を取り除くことができる。分析の結果、全ての噴気地域で $\delta^{13}\text{C}$ が、 -3.11 から -3.76 を示す。このことは、ほとんど同じ組成を示す高温の火山ガスが深部に広域的に存在していることを示唆する。

3.6 融雪泥流評価

積雪期に発生した噴火のため、融雪泥流評価を現地のパラメータに即して早急に行うことが防災上重要である。特に、噴火による融雪泥流および融雪期の激しい降雨と融雪にともなう(rain on snow型)泥流のリスク評価は重要である。

火山噴出物の物理特性(粒度、粘土含有量、粘土鉱物の種類)、泥流の粘性・浸透能、泥流の内部摩擦角や粘性の調査を行なった。噴出物については、砂粒子以下の粘土分が10wt%であり、粘性の低い流体が発生すると予想された。スノーサーベイを行い噴火前の積雪水量を計測し、噴火後の積雪量の観測を行なった。泥流が発生する可能性のある3地点において、準リアルタイムカメラと水位計を用いた河川モニターを実施した。

泥流のシミュレーションにはTITAN2Dソフトを用いて、噴火後に起こりうる3パターンの噴火推移シナリオ(噴火終息、水蒸気噴火発生、マグマ噴火発生)と3つの泥流発生モデル(融雪期のrain on snow型泥流、融雪期のシャーベット型泥流、噴火による融雪型泥流)を想定し複数の流下シミュレーションを行い、危険箇所を指摘した。

4. おわりに

1500年間活動がなかった本白根山鏡池北火口で、2018年1月23日に水蒸気噴火が発生し、人的被害が発生した。この噴火を受けて科研費“2018年草津白根山噴火に関する総合調査”が採択された。我々はこの課題の中で、噴火の推移の把握のために観測点を整備し、緊急観測を行い、リスクの軽減に努めた。この原稿の執筆段階では、噴火から1年半が経っているが、本白根山の活動は静穏化している。

一方で、2018年4月および9月に、白根山(湯釜付近)が再び活発化し、傾斜変動を伴う地震活動が高まっている。やや長期的な広域的な地殻変動のデータから、2011年以降草津白根山北西部(渋峠付近)に膨張源が推定されている。また2018年9月の地震活動と同調する地鳴りを伴う地震活動が草津白根山北

西の長野県高山村周辺で発生するようになり、草津白根山のマグマ供給系の深部が西側にある可能性も示唆されている。

草津白根山火山の防災のためには、より広域的な観点から、また地質学的な時間スケールの観点からも、火口近傍だけでなく火山全体のシステムの研究を推進する必要がある。また、本白根山噴火に際して、有事の観測網の電源の維持が重要であることが認識された。リスクに対して冗長度のある観測システムの構築が望まれる。

謝辞

文部科学省科学研究費補助金特別研究促進費「2018年草津白根山噴火に関する総合調査」(17K20141)による助成を受け、平成29年度および平成30年度に実施した研究の現時点までの成果をまとめたものである。また、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」および「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」の支援も受けた。

参考文献

- 宇都浩三・早川由紀夫・荒牧重雄・小坂丈予(1983): 草津白根山火山地質図, 火山地質図 No.3, 地質調査所, 10p
- 草津白根山降灰合同調査班(2018): 草津白根山2018年1月23日噴火による降灰分布, 火山噴火予知連絡会資料
- 寺田 暁彦・神田 径・大倉敬宏・小川康雄(2018): 草津白根山・湯釜火口湖地下浅部への流体供給: 2014年3月以降の群発地震に伴う地殻変動と湖底熱活動の変化, 日本火山学会講演予稿集, B1-33
- 寺田暁彦(2018)水蒸気噴火発生場としての草津白根山. 地質学雑誌, 124, 251-270,
- 濁川 暁・石崎泰男・亀谷伸子・吉本充宏・寺田暁彦・上木賢太・中村賢太郎, 草津白根山本白根火砕丘群の完新世の噴火履歴, 日本地球惑星連合2016年大会予稿集, SVC48-11
- 森健彦・平林順一・野上健治・鬼澤真也(2006): 草津白根山における新たな地震観測システムの構築, 火山, 第51巻, 第1号, 41-47.
- 吉本充宏・本多亮・小森次郎・石峯康浩・山田浩之(2018): 草津白根山, 本白根山2018年噴火の放出岩塊による被害調査の速報, 地球惑星科学連合大会, 幕張, 千葉
- Fierstein, J. and Nathenson, M. (1992): Another look at the calculation of fallout tephra volumes, Bull. Volcanol., 54, 2, 156-167.
- 小川康雄, 青山裕, 山本希, 筒井智樹, 寺田暁彦, 大倉敬宏, 神田径, 小山崇夫, 金子隆之,

- 大湊隆雄, 石崎泰男, 吉本充宏, 石峯康浩, 野上健治, 森俊哉, 木川田喜一, 片岡香子, 松元高峰, 上石勲, 山口悟, 伊藤陽一, 常松佳恵 (2018), 2018 年草津白根山噴火に関する総合調査, 京都大学防災研究所自然災害研究協議会, 55, 25-30.
- Ogawa, Y., Nurhasan, Tank, S. B., Terada, A., Kanda, W., Nogami, K. (2016): Three dimensional magnetotelluric modeling of Kusatsu-Shirane volcano and its implications for recent volcanic unrest, presented at AGU Fall meeting, San Francisco, USA.
- Ohba, T., Hirabayashi, J. and Nogami, K. (1994), Water, heat and chloride budgets of the crater lake, Yugama, at Kusatsu-Shirane volcano, *Geochem. J.*, 28, 217–231.
- Ohba, T., Hirabayashi, J., and Nogami, K. (2000), D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of water in the crater lake at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 97, 329–346.
- Ohwada, M., Ohba, T., Hirabayashi, J., Nogami, K., Nakamura, K. and Nagao, K. (2003): Interaction between magmatic fluid and meteoric water, inferred from $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{36}\text{Ar}/\text{H}_2\text{O}$ ratios of fumarolic gases at the Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *Earth Planets Space*, 55, 105–110, 2003.
- Nakano, M., Kumagai, H., and Chouet, B. A. (2003): Source mechanism of long-period events at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from waveform inversion of the effective excitation functions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 122, 149–164.
- Noguchi, R., T. Nishizawa, W. Kanda, T. Ohkura, A. Terada, Installation of new GNSS network around Kusatsu-Shirane Volcano, Japan: Its perspective and the first result, *J. Disast. Res.*, 14, 744-754, doi:10.20965/jdr.2019.p0744, 2019.
- Nurhasan, Ogawa, Y., Ujihara, N., Tank, S. B., Honkura, Y., Onizawa, S., and Mori, T. (2006): Two electrical conductors beneath Kusatsu-Shirane volcano, Japan, imaged by audiomagnetotellurics, and their implications for the hydrothermal system, *Earth Planets Space* 58, 1053-1059.
- Takahashi, K. and Fujii, I. (2014), Long-term thermal activity revealed by magnetic measurements at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 285, 180-194.