

## 2018 年の本白根山噴火後の自然電位観測

### Self-potential Observations at Mt. Motoshirane after Its 2018 Eruption

飯野英樹<sup>1</sup>, 山崎明<sup>2</sup>, 有田真<sup>3</sup>, 田中達朗<sup>4</sup>, 下川淳<sup>3</sup>

Hideki IINO<sup>1</sup>, Akira YAMAZAKI<sup>2</sup>, Shin ARITA<sup>3</sup>, Tatsuuro TANAKA<sup>4</sup> and Jun SHIMOKAWA<sup>3</sup>

(Received December 19, 2019 : Accepted January 4, 2021)

#### 1 はじめに

地表面で観測される自然電位から地下水の流動を推定する自然電位観測は、火山の熱水活動を推し量る手法の一つとしてこれまでも多くの火山で行われている。2000 年の噴火前に実施された三宅島の自然電位観測 (Nishida et al., 1996) では、山麓部での地形効果に加え山頂部において熱水対流によると推定される高電位が広く分布している結果が得られている。また、薩摩硫黄島でも熱水の上昇が原因と考えられる電位の正異常域が認められている (森・他, 2000) ほか、雲仙岳や安達太良山などでは自然電位の連続観測も試みられている (橋本・他, 1993 ; 山本・他, 2008)。

自然電位観測は過去に草津白根山でも行われている。地磁気観測所が湯釜周辺で 1994 年に実施した (山崎・他, 1997) ほか、2003 年の第 4 回草津白根山集中総合観測 (以下、2003 年集中観測と記す) では、湯釜周辺および芳が平から草津温泉街に至る登山道沿いでの観測 (小池・他, 2004) と、湯釜火口域から本白根山火砕丘の東縁、殺生河原噴気地帯を経由して草津温泉方面に至るルートで自然電位分布の調査が行われた (橋本・他, 2004)。湯釜周辺では、熱水系が発達した火山でしばしばみられる顕著な正の電位異常は認められていない。

一方、本白根山についての自然電位観測は 2003 年集中観測でルートに含まれた登山道の一部で実施されたのみで、中央火口、鏡池および鏡池北火砕丘

が並ぶ山頂周辺部の電位分布はこれまで得られていない。

こうした先行研究を背景に、2018 年の噴火をきっかけとして、2018 年と 2019 年に本白根山で自然電位観測を実施した (Fig. 1)。その主たる目的は、これまで測定されていない本白根山山頂周辺部での自然電位分布を明らかにし、地下の熱水活動に起因する可能性のある自然電位の空間分布や時間変化を把握することである。さらに、2018 年の噴火に関連した自然電位の分布およびその時間的変化を捉えて火山活動との関連性を推察し、今後の火山活動の推移を窺うことにある。

#### 2 草津白根山の過去の噴火活動

草津白根山は群馬県の北部と長野県との県境近くに位置し、南東側に低くなる第三紀火山岩からなる基盤岩の上部に非対称に成長した成層火山である。西端部の最高所付近に白根山・逢ノ峰・本白根山等の火砕丘群が南北に並ぶ (産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2019 ; 気象庁, 2013)。2018 年以前の草津白根山における噴火は、噴火記録のある 1805 年以降全て白根山山頂周辺で発生した水蒸気噴火である。最近では 1976 年, 1982 年, 1983 年に小規模な水蒸気噴火が発生した。また、約 3000 年前の噴火で本白根火砕丘が形成された本白根山では、最近の調査研究により最新のマグマ噴火は約 1500 年前であることが明らかになっている (濁川・他,

<sup>1</sup> 地磁気観測所観測課, Observation Division, Kakioka Magnetic Observatory

現所属 : 地震火山部火山監視課, Volcanic Observation Division, Seismology and Volcanology Department

<sup>2</sup> 地磁気観測所技術課, Technical Division, Kakioka Magnetic Observatory

<sup>3</sup> 地磁気観測所観測課, Observation Division, Kakioka Magnetic Observatory

<sup>4</sup> 鹿児島地方气象台, Kagoshima Local Meteorological Office



Fig. 1 Self-potential (SP) observation points at Mt. Motoshirane in 2018 are shown with yellow circles in a map from the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) (<https://maps.gsi.go.jp>). A brown dot and lines indicate craters formed by the phreatic eruption in 2018.

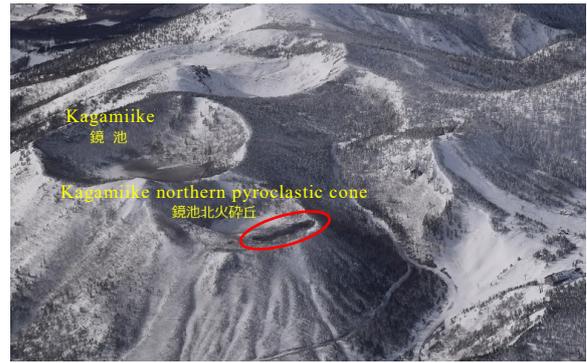


Photo. 1 Craters formed on the Kagamiike northern pyroclastic cone of Mt. Motoshirane are indicated with red ellipses. This photo was taken by the Japan Meteorological Agency (JMA) on January 28, 2018, in cooperation with the Kanto Regional Development Bureau of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism.

噴火後に草津白根山合同調査班が実施した降灰・噴出物調査(小川・他, 2018)によると、火山体内部で強酸性熱水による変質作用が生じていると推測されたほか、噴石は主火口の北西～東北東、特に北～北東にかけて集中的に分布し、噴火による噴出量は約 3.6 万トンと見積もられている。

2016).

### 3 2018 年 1 月 23 日の本白根山の噴火活動

有史以来噴火記録のなかった本白根山において、2018 年 1 月に前兆的な火山活動の高まりが観測されない状況で水蒸気噴火が発生し、鏡池北火砕丘、鏡池北火砕丘西側および鏡池に火口列を生じた (Fig. 1, Photo. 1)。

噴火時には火山性微動が発生し、湯釜周辺に設置されていた傾斜計によって湯釜南側が隆起し、その後反転する傾斜変動が観測された(気象庁, 2018a)。

噴火後は、鏡池北火砕丘北側付近のごく浅部を震源と推定される地震が活発化したほか、鏡池北火砕丘噴火口からの弱い白色噴気が時々観測された(気象庁, 2018a; 気象庁, 2018b)。その後、地震は増減を繰り返しながら減少し、2018 年 12 月以降は少ない状態で経過した(気象庁, 2019)。また、噴火後に認められた弱い白色噴気も 2018 年 2 月下旬以降は観測されず、2018 年 5 月に気象庁等が実施した現地調査においても噴火口周辺に地熱異常域は認められないなど、熱的な表面現象は短期間で終息した(気象庁, 2018b)。

## 4 自然電位観測

### 4.1 自然電位

地表に生じている電位には、誘導電流や電気設備からの漏洩電流などに起因するもののほか、自然電位と呼ばれる電位が存在する。自然電位が生じる主な原因は地下水の流れによる流動電位で、地下水が岩石の空隙を流れる際に、正電荷を運ぶことにより生じるものと考えられている。一般的に、自然電位を山地で測定すると、標高差による地下水の流れにより山頂部で電位が低く、山麓部で電位が高くなる傾向がみられる。加えて、火山においては、地下深部の熱源に起因した熱水対流により正電荷が上向きに運ばれる流れが生じることで、山頂部に高電位の領域が形成されるという考えがある。

自然電位は地下の比抵抗分布や地質、浸透率、ゼータ電位など多くの要素が影響し、解釈が難しいことも指摘されている(例えば、相澤, 2010)が、火山活動に関連する自然電位の時空間変化が多く火山で見出されていることは事実であり、熱水活動の寄与が大きいことも多くの事例に当てはまると考えられる。

#### 4.2 観測手法

自然電位観測の手法としては、リード線がつながっている2つの電極を交互に移動しながら電位差を測定するいわゆる尺取り法と、一方の電極を固定し、もう一方の電極を移動させる全電位法が知られている(西田, 2013)。今回の観測では測定誤差が少ないことが期待される全電位法を用いた。

固定電極と移動電極間のリード線は、2018年は約1km、2019年は約1.7kmのものを、観測者の歩数(70歩)をもとに約50m間隔で測定を行った(Fig. 2)。

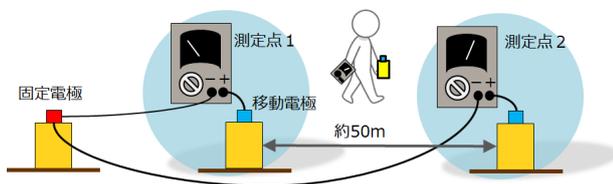


Fig. 2 A diagram of SP observation.

観測は、非分極性の銅・硫酸銅電極(Tinker & Rasor社 Copper-Sulfate Electrodes 3A (76 x 127mm))に飽和硫酸銅水溶液を満たして行った。電位測定にはデジタルマルチメータ(SANWA PM-3)を用いた。

底面が乾燥した状態で観測を始めると、電位が安定するまでに時間を要することから、各観測日も事前に電極底面を水に浸しておき、観測開始時点で安定した浸透性を持たせられるようにした。測点では表面の土を除去、あるいは5~10cm程度の穴を掘るなどして概ね直径1m円内に収まる範囲で3か所



Photo. 2 The average of SP data measured in a 1-meter circle (the three black areas in the photo) served as the representative SP data at the observation point. A yellow can is an electrode.

の測定場所を設け、容器の底面が土に密着するように小石などを除去して電極を設置して電位を測定した(Photo. 2)。土が乾燥し電位が安定しない場合には、携行した水で土を湿らせた後に測定を行った。3箇所での測定値が大きくばらつく場合は、さらに数箇所でも測定し、ばらつきの大きな値は異常値として除いた。

自然電位には年周変動のあることが知られており(例えば、産業技術総合研究所, 2014)、火山活動に起因する自然電位の時間的変化を議論するためには年周変動の影響は可能な限り避けたい。そこで、2018年の観測(6月30日~7月2日に実施)と2019年の観測(7月2日~7月4日に実施)を同時期とすることで、年周変動の影響を抑えた。

#### 4.3 観測ルート

Fig. 1に示した2018年の測点をFig. 3に再掲する。

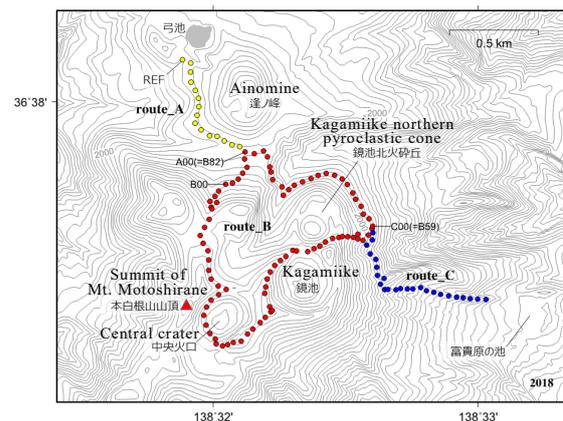


Fig. 3 Observation points for SPs at Mt. Motoshirane in 2018. Yellow circles : route\_A, Red circles : route\_B, and Blue circles : route\_C.

2019年も2018年と同じルートで観測しているが、測点間隔は観測者の歩数から決めているため測点の位置は厳密には同一ではない。便宜上、観測ルートを次のように区分する。

- ・ルート A [route\_A] : 逢ノ峰付近(弓池の南から逢ノ峰の南 : Fig. 3 黄色)
- ・ルート B [route\_B] : 山頂周辺部(中央火口、鏡池および鏡池北火砕丘周縁 : Fig. 3 赤色)
- ・ルート C [route\_C] : 東側山麓(鏡池北火砕丘の東から富貴原の池手前 : Fig. 3 青色)

ルート B は測点 B82 でルート A, 測点 B59 でルート C にそれぞれ接続している。なお, ルート B は一度で周回できないため, リード線を延ばしきった場合には, 到達した測点に設けた 3 か所の測定場所のうちの 1 つに固定電極を設置しなおし, 新たな固定電極点として測定を再開した。固定電極の移動は 2018 年には 3 回, 2019 年は 2 回行った。

## 5 観測結果

### 5.1 測定値の処理

各測点の電位は 3 か所の測定値の平均を用いた。また, 測定値の標準偏差の平均は 2018 年では 2.5mV, 2019 年では 3.0mV であった。

閉回路のルート B では, 周回時の電位は 0.0mV となることが期待されるが, 2018 年には -19.2mV, 2019 年には -14.7mV のループ併合誤差が生じた。

周回の途中で新たに固定電極点とする測点では, 3 か所の測定場所のうち 1 か所を選んで固定電極を設置するため, その点の電位と, 3 か所の平均値として求めた「測点の電位」との間に差が生じる。また, 固定電極の接地状態の変化により電位のドリフトも生じる。ループ閉合誤差はそれらに起因すると考えられるが, この誤差はルート B 内の測点に按分して補正した。

各測点の自然電位はルート A 北西端の測点 REF を電位の基準 (ゼロ) とした。なお, 固定電極と移動電極のオフセット電圧は 0.1mV 程度とわずかであったため, 観測後のデータ処理においてオフセット補正は実施していない。

### 5.2 自然電位の空間分布

得られた自然電位分布を Fig. 4 に, また各測点の標高と電位をプロットした図を Fig. 5 に示す。Fig. 5 の黄色はルート A, 赤色はルート B, 青色はルート C の測点を示す。Fig. 4 および Fig. 5 とも, 左が 2018 年, 右が 2019 年の結果である。これらの図では, 電位は北西端の測点 (Fig. 4 の REF) を基準 (ゼロ) とした相対電位で示している。

Fig. 5 をみると全体的には測点の標高と自然電位に明瞭な相関はみられないが, ルート C に着目すると 2018 年, 2019 年とも線形的な負相関が認められた。これは山頂部から山麓へ向かう地下水の流れによる「地形効果」によるものと考えられる。ルート

C から導出される, 標高に対する電位分布の勾配 (以下, 地形効果補正係数と記す) は, 2018 年は -1.34mV/m, 2019 年は -1.68mV/m であった。地形効果補正係数は草津白根山の湯釜周辺で -0.64mV/m という値が求められている (小池・他, 2004) ほか, 桜島で -1.0mV/m (橋本・他, 1999), 三宅島で -1.07mV/m (西田, 2013) などの値が求められている。ルート C から求めた地形効果補正係数は, それらと比べて大きく逸脱するものではなく, 以降の地形効果の補正にはこれらの値を適用した。

地形効果の補正は, ルート C の地形効果補正係数がルート C 以外の測点にも適用できると仮定し, 観測された電位から地形効果の影響を取り除く処理を行った (Fig. 6)。地形効果補正係数は, 2018 年と 2019 年に求められた係数の平均である -1.51mV/m を用いた。山頂周辺部は大きいところで基準点 (REF) と 130m 程度の標高差があるため, それぞれの年の地形効果補正係数を適用した場合と平均を用いた場合とでは, 補正処理で得られる電位に大きいところで 20mV 程度の違いが生じるが, 電位分布の傾向を把握する上では, その程度の違いは支障にならないと考える。

Fig. 6 を概観すると, ルート A (逢ノ峰付近) およびルート C (東側山麓) で黄色～緑色 (0～+200mV 程度), ルート B (山頂周辺部) では橙色～赤色 (+200～+500mV 程度) と全体的に正の電位分布を呈しており, 2 回の観測でその傾向は変わっていない。

本白根山およびその周辺の自然電位の空間分布の特徴は以下のようにまとめられる。

- 本白根山およびその周辺は, 測点 REF を基準とすると全体的に正 (+) の電位分布を呈する。
- 山頂周辺部は逢ノ峰付近や東側山麓より高電位で, +200mV～+500mV 程度の電位を示す (地形効果補正後)。
- 山頂周辺部の中でも, 特に鏡池南西側では相対的に +500mV 程度の高電位異常がみられる。

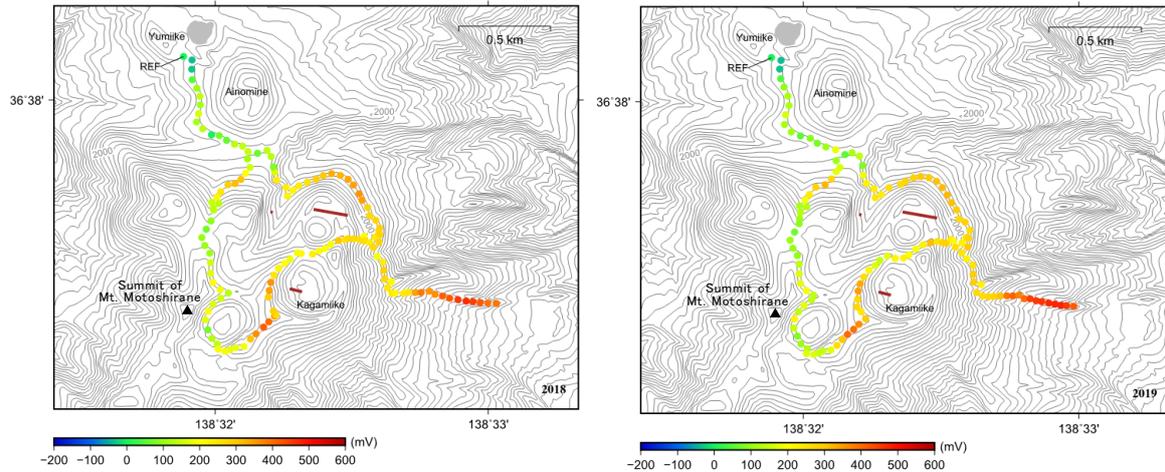


Fig. 4 Distribution of observed SPs. (Left: 2018 and Right: 2019)  
REF is the reference point. A brown dot and lines indicate craters formed by the phreatic eruption in 2018.

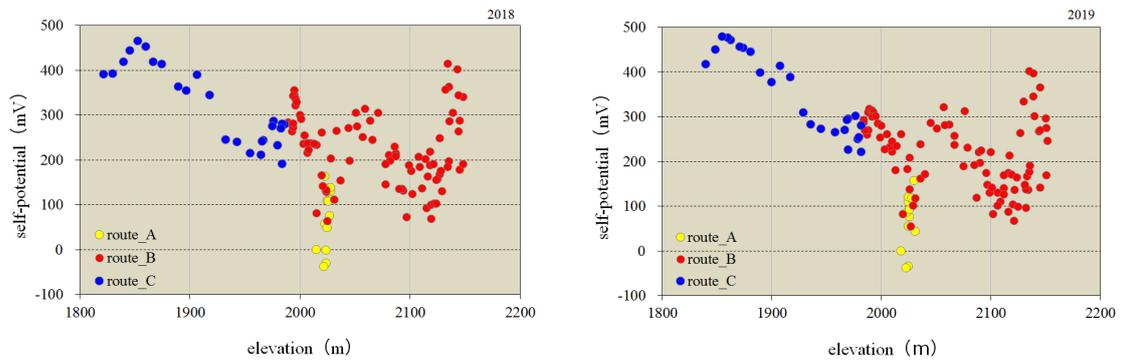


Fig. 5 Correlation between observed SP data and the elevation of the observation points. (L: 2018, R: 2019)

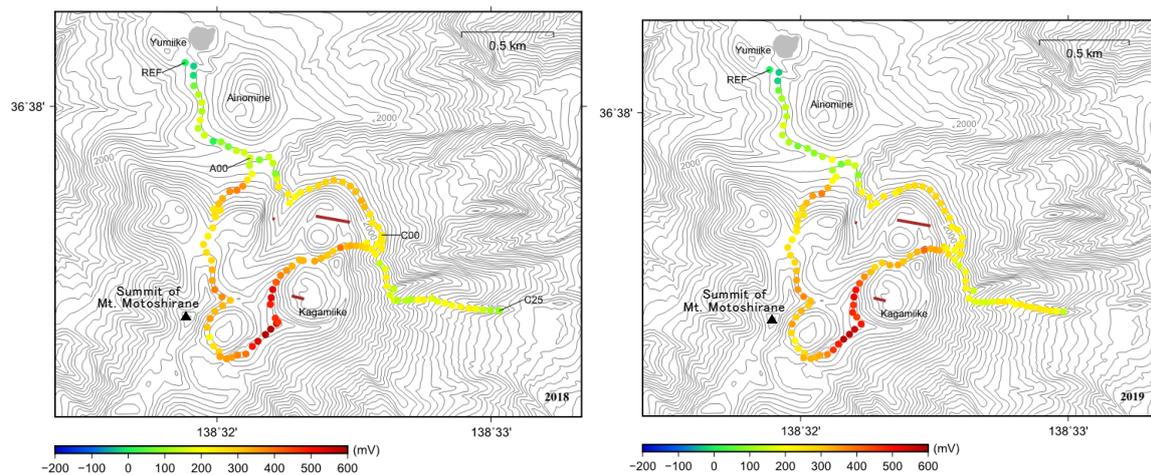


Fig. 6 Distribution of SP data after correcting for the effects of topography. (L: 2018, R: 2019)  
REF is the reference point. A brown dot and lines indicate craters formed by the phreatic eruption in 2018.

### 5.3 鏡池北火砕丘周縁部における自然電位の時間変化

橋本・他 (2004) は, 2003 年集中観測において Fig. 7 の a~j の区間で自然電位観測を実施している. 本稿の著者らが 2018 年および 2019 年に実施した自然電位観測では, そのうちの b~d 間 (逢ノ峰南東~富貴原の池) を踏襲している. そこで, 2003 年, 2018 年および 2019 年の b~d 間の自然電位のプロファイルと比較した. なお, Fig. 7 の点線の矩形領域は Fig. 8 の範囲に対応する.

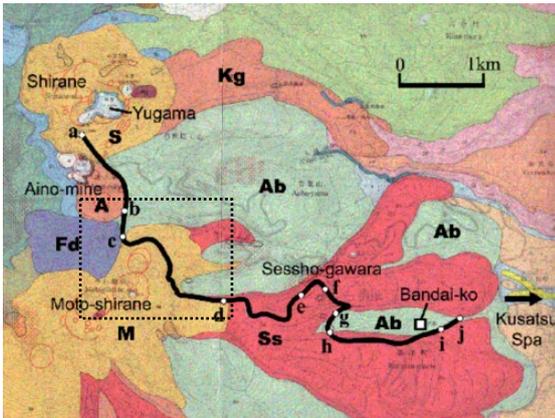


Fig. 7 Route for observation of SPs during the 4th Joint Observation of Mt. Kusatsu-shirane (added to Hashimoto et al., 2004). The square with dotted lines indicates the portion of the map in Fig. 8. In the background is a geological map of Mt. Kusatsu-Shirane from Uto et al. (1983).

各年の電位基準点としては, 山頂周辺部から離れている東側山麓における近接した測点を選択した (2003 年は KS139, 2018 年は C24, 2019 年は C25 (Fig. 8)). 電位プロファイルの比較区間を Fig. 8, 比較結果を Fig. 9 に示す. 2003 年は黒, 2018 年は赤, 2019 年は青でプロットした. Fig. 9 の横軸は, 電位基準点からの水平移動距離 (以下, 水平距離と記す. 電位基準点は右端にプロットしている), 上段縦軸は各測点の電位, 下段縦軸は各測点の標高である. なお, Fig. 8 と Fig. 9 を比較しやすいよう, 2018 年の主な測点を両図に併記した. また Fig. 8 の点線 I と II は Fig. 9 の区間 I, II に対応する. 水平距離は, 測点の位置情報を元に地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp>) の距離計測ツールを用いて概算した. なお, 2003 年集中観測のデータに合わせ, 地形効果補正を行っていないデータで比較している.

Fig. 9 より, 水平距離が概ね 1000m までの区間 I (ほぼルート C に対応) では, 500m 付近での電位の変曲や 800m 付近の局所的な低電位など, 3 つの結果ともほぼ同じトレンドが得られた. このことか

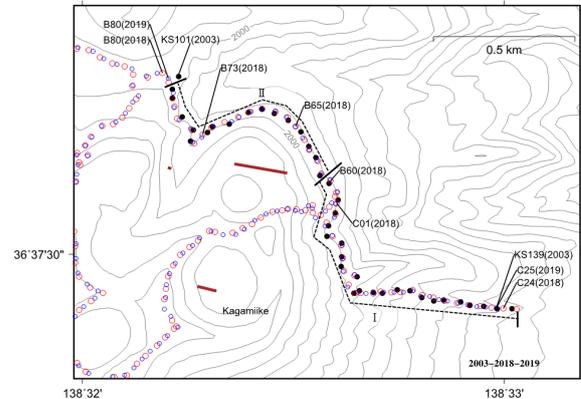


Fig. 8 Observation points at Mt. Motoshirane. A brown dot and lines indicate craters formed by the phreatic eruption in 2018. Black dotted lines I and II correspond to segments I and II shown in Fig. 9. Black circles: Observation points in 2003. Red circles: Observation points in 2018. Blue circles: Observation points in 2019.

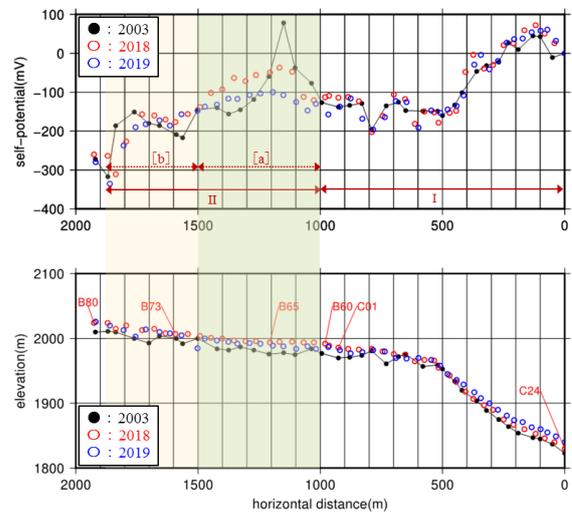


Fig. 9 A comparison of observed SPs and the results of the 4th Joint Observation of Mt. Kusatsu-Shirane in 2003 (upper graph). Pale green and pale yellow indicate areas [a] and [b] in segment II (see the main text). The lower graph shows the elevation of observation points. Black circles: SPs observed in 2003 (The reference point is KS139). Red circles: SPs observed in 2018 (The reference point is C24). Blue circles: SPs observed in 2019 (The reference point is C25).

ら、区間Ⅰにおける電位は安定しており、2003年以降ほとんど変化がなかったことが推定される。

一方、水平距離が1000m以上の区間Ⅱ（ルートBの北側部分に対応）では、区間Ⅰとは対照的にそれぞれの結果で異なるトレンドが得られた。

大きな特徴として、Fig. 9に薄緑色で示した、水平距離が1000~1500mの領域[a]（区間Ⅱのうち鏡池北火砕丘の噴火口の北側から東側にかけての領域

に対応）で、2018年の電位に対して2019年の電位が数十mV程度有意に低下し、さらにその一部では2018年の電位が2003年の電位と比べて上昇している。そのほか、Fig. 9に薄黄色で示した領域[b]（区間Ⅱのうち、鏡池北火砕丘の噴火口の北側から、鏡池北火砕丘の西側に生じた噴火口の北側にかけての領域に対応）では、2018年と2019年は概ね似たトレンドだが、一部で2003年と比べて電位が変化している。

なお、2003年のデータで電位基準点から約1150mの測点では、隣接する測点と比べて電位が突出して高い。その原因について橋本・他（2004）は特に言及していないが、2018および2019年の観測では同様の傾向は認められなかった。

区間Ⅱでみられた電位の時間変化を補足するため、区間Ⅱ内の2018年の測点と、各測点での時間経過による電位変化量をFig. 10に示した。上段は2018年の電位から2003年の電位を差し引いた変化量、下段は2019年の電位から2018年の電位を差し引いた変化量で、赤色は電位増加、青色は電位低下を示す。2018年の測点位置での2003年および2019年の電位は測点間を内挿して求めた。また、Fig. 10には本白根山周辺の地震活動域を示すため、東京工業大学が稠密観測を行って求めた震源（森・他、2006）の震央を緑丸で追記している（掲載期間：2001年11月~2003年3月）。自然電位の時間変化が認められた区間Ⅱ周辺は、本白根山周辺の地震活動域に近いことがわかる。

## 6 考察

### 6-1 自然電位の空間分布について

観測の結果、本白根山山頂周辺部では+200~+500mVの正の電位異常を示すことが明らかとなった（Fig. 6）。地下深部の熱源に起因した熱水対流により正電荷が上向きに運ばれる流れが生じることで、山頂部に高電位の領域が形成されるという考えに基づくと、本白根山山頂周辺部において熱水上昇が生じていると解釈することが可能である。Matsunaga et al. (2020)は、広帯域MT観測による比抵抗構造の探査により、本白根山の地表面下1~3kmにかけて低比抵抗体が広がっていることを明らかにした。また、その低比抵抗体が熱水貯留槽に対応し、熱水上昇が本白根山周辺の地震活動を引き起こしている

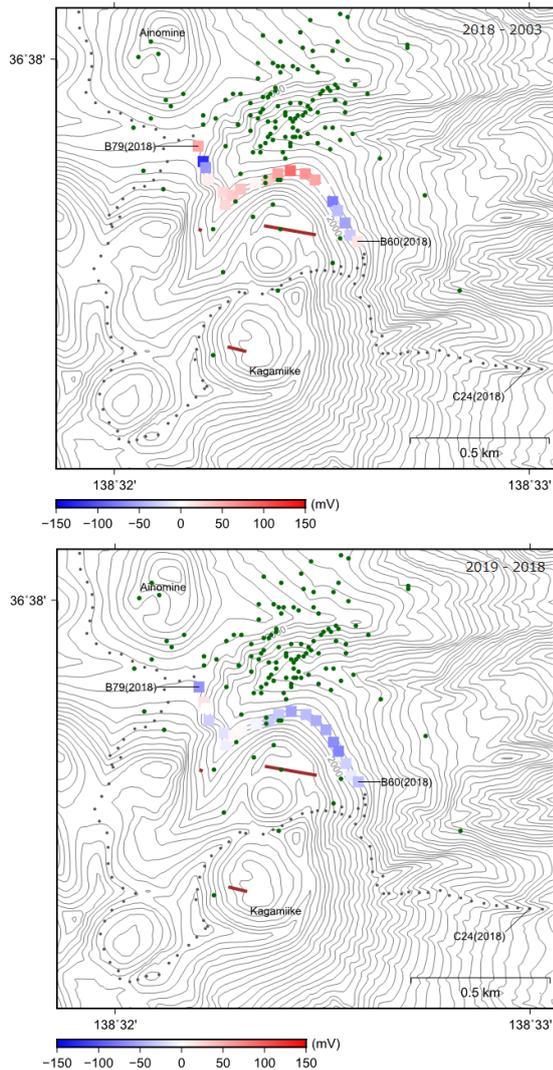


Fig. 10 Changes in SPs over time in segment II in Fig. 9. Small gray dots indicate observation points. Green dots indicate epicenters around Mt. Kusatsu-Shirane from November 2001 to March 2003 (Mori et al., 2006). A brown dot and lines indicate craters formed by the phreatic eruption in 2018. Upper: Difference obtained by subtracting 2003 data from 2018 data. Lower: Difference obtained by subtracting 2018 data from 2019 data.

の考えを示している。自然電位観測で得られた正の電位異常の解釈は、Matsunaga et al. (2020) が推察した熱水貯留槽からの熱水上昇と整合的である。

また、山頂周辺部の中でも、鏡池南西側で特に電位が高い特徴がみられた。この特徴は地形効果補正の有無によらない。2018 年の噴火により鏡池に噴火口列が形成されたことや、鏡池南西側には過去の推定小火口の存在が指摘されている(国土地理院, 2018) ことなどから、局所的な熱水の上昇流の存在が示唆される。

顕著な地熱域や活発な噴気活動が認められる湯釜周辺で明瞭な正の電位異常は見られていない(小池・他, 2004; 橋本・他, 2004) 一方で、2018 年の噴火直後を除いては地熱域や噴気活動が認められていない本白根山山頂周辺部で正の電位異常を示すことが確認された。このような違いはどのような要因で生じるのだろうか。例えば湯釜周辺部では、蒸気の卓越した気液二層の熱水貯留槽が存在すると考えられており、表層への正電荷の輸送が十分に行われていない可能性がある。その一方、本白根山地下浅部に存在すると考えられる熱水貯留槽では液相が卓越しているとすれば、表層への正電荷の輸送が効率的に行われている可能性がある。このような熱水貯留槽での気相もしくは液相の卓越具合が、湯釜周辺と本白根山山頂周辺部との正の電位異常の有無の違いを生じる一因となりうる。ただし、橋本・他(2004) では、湯釜周辺で明瞭な正の電位異常が認められないことに対して  $\zeta$  (ゼータ) 電位がほぼゼロかやや正になっている可能性に触れている。より詳細に比較するためには、こうした物性測定や、比抵抗構造も考慮した検討が必要であろう。

## 6-2 鏡池北火砕丘周縁部の自然電位の時間変化について

Fig. 9 で示したように、2003 年、2018 年および 2019 年に実施した自然電位観測結果は、区間 I (ほぼルート C に対応) ではほとんど電位の時間変化はみられず、区間 II (ルート B の北側部分に対応) で数十 mV~100mV 程度の有意な電位の変化が捉えられたというものであった。鏡池北火砕丘は 2018 年の噴火の主火口であり、領域 [a] での変化はおそらく噴火に関連したものと解釈できる。2018 年の電位が 2003 年より上昇し、2019 年の電位が 2018 年より低下す

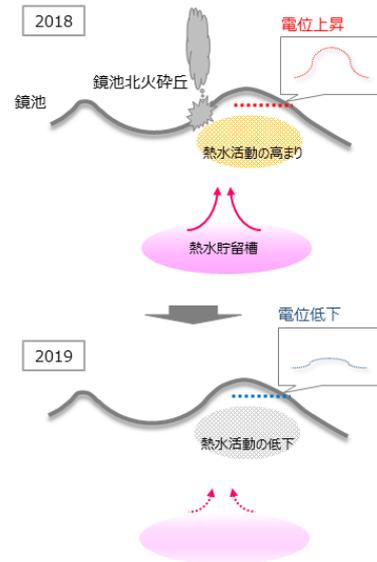


Fig. 11 Diagram indicating variations in SP data over time under the Kagamiike northern pyroclastic cone at Mt. Motoshirane.

るといった一連の電位変化は、2018 年の噴火で鏡池北火砕丘の地下の熱水活動が高まり、その後時間経過とともに低下を辿ったプロセスを反映しているものと推察される (Fig. 11)。噴火後に自然電位が上昇し、その後時間経過とともに低下した事例は、1974 年 7 月の噴火後キラウェア火山でもみられている (Zablocki, 1976)。領域 [b] の一部でみられた 2003 年からの電位上昇・低下の解釈は難しいが、噴火によって生じた局所的な地下水の流れの変化が、自然電位に変化をもたらしたと考えることは可能だろう。

## 7 まとめ

地磁気観測所では、2018 年 1 月の噴火後、2018 年と 2019 年の 2 度にわたり本白根山で自然電位観測を実施した。本白根山には全体的に正の電位分布が存在し、山頂周辺部は逢ノ峰付近や東側山麓より高電位を示すことや、中でも鏡池南西側で相対的な高電位異常を有することがわかった。

また、2003 年集中観測および 2018 年、2019 年に実施した観測結果を比較し自然電位の時間的変化を調べた。その結果、鏡池北火砕丘の北側の測線において、噴火活動に関連した変化と解釈できる電位変化が捉えられた。2018 年から 2019 年の一年間にみられた電位低下は噴火後の火山活動の鎮静化と調和的であり、地下の熱水活動の低下を反映していると

推察される。

## 謝辞

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター橋本武志教授より、2003年草津白根火山集中総合観測での自然電位観測データを提供頂いた。また、匿名査読者2名のご指摘により本稿の構成と内容が大きく改善された。ここに記して深く感謝の意を表す。

本稿の作成にあたっては、国土地理院発行の「数値地図50mメッシュ(標高)」、同院の地理院地図を使用した。

## 文献

- 相澤広記 (2010): 電磁気観測で推定する火山帯内部の地下水流動, 地質ニュース, **665**, 46-52.
- 宇都浩三・早川由紀夫・荒牧重雄・小坂丈予 (1983): 草津白根火山地質図, 地質調査所.
- 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, 自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, **55**, 25-30.
- 気象庁 (2013): 日本活火山総覧(第4版), **44** 草津白根山.
- 気象庁 (2018a): 草津白根山の火山活動 (2017年10月~2018年2月), 火山噴火予知連絡会会報, **129**, 58-77.
- 気象庁 (2018b): 草津白根山の火山活動 (2018年2月~2018年5月), 火山噴火予知連絡会会報, **130**, 43-78.
- 気象庁 (2019): 草津白根山, 第144回火山噴火予知連絡会資料(その1), 38-72.
- 小池哲司・菅沼一成・上杉忠孝・藤井郁子・高橋博・池田清・熊坂信之・大川隆志・大和田毅・徳本哲男 (2004): 草津白根山における地磁気全磁力・自然電位観測, 第4回草津白根火山集中観測報告書, 143-157.
- 国土地理院 (2018): 草津白根山周辺の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, **129**, 107-122.
- 産業技術総合研究所 (2014): 伊豆大島火山の自然電位観測, 火山噴火予知連絡会会報, **113**, 61-66.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2019): 草津白根火山地質図, 日本の活火山, [https://gbank.gsj.jp/volcano/Act\\_Vol/kusatsushirane/text/exp03-1.html](https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/kusatsushirane/text/exp03-1.html), (2019年7月1日閲覧)
- 濁川暁・石崎泰男・亀谷伸子・吉本充宏・寺田暁彦・上賢太・中村賢太郎 (2016): 草津白根火山本白根火砕丘群の完新世の噴火履歴, 日本地球惑星科学連合2016年大会予稿, SVC48-11.
- 西田泰典 (2013): 自然電位と地殻変動, 北海道大学地球物理学研究報告, **76**, 15-86.
- 橋本武志・田中良和・増田秀晴・歌田久司・鍵山恒臣・増谷文雄 (1993): 自然電位観測から推定される雲仙岳の地下熱水対流, 1993年CA研究会論文集, 178-186.
- 橋本武志・田中良和・西田泰典・茂木透・山本圭吾・神田径・平林順一・石原和弘 (1999): 桜島火山の自然電位と熱水系(第2報), 京都大学防災研究所年報, **42**, B-1, 19-25.
- 橋本武志・茂木透・西田泰典・小川康雄・平林順一・及川光弘・齊藤政城・水橋正英・氏原直人・ヌルハッサン・若林亨 (2004): 草津白根火山における高密度電気探査・自然電位調査, 第4回草津白根火山集中観測報告書, 133-142.
- 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 **51** (1), 41-47.
- 森真陽・神田径・井口正人 (2000): 薩摩硫黄島の自然電位分布, 京都大学防災研究所年報, **43**, B-1, 7-14.
- 山崎明・熊坂信之・上田義浩 (1997): 草津白根山における自然電位測定. 地磁気観測所技術報告, **36**, 22-32.
- 山本哲也, 高木朗充, 福井敬一, 大和田毅 (2008): 安達太良山の火山活動の総合的観測と推定される熱水活動, 気象研究所研究報告, **59**, 39-64.
- Nishida, Y., N. Matsushima, A. Goto, Y. Nakayama, A. Oyamada, M. Utsugi and H. Oshima (1996): Self-potential studies in volcanic areas (3) - Miyake-jima, Esan and Usu -, Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics, **10**(1), 63-77.
- Matsunaga, Y., W. Kanda, S. Takakura, T. Koyama, Z. Saito, K. Seki, A. Suzuki, T. Kishita, Y. Kinoshita, Y. Ogawa (2020): Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano, J. Volcanol. Geotherm. Res., **390**, 106742.
- Zablocki, C. J. (1976): Mapping thermal anomalies on an active volcano by the self-potential method, Kilauea, Hawaii, Proc. 2nd U. N. symp. on the Development and

Use of Geothermal Resources, San Francisco, 2,  
1299-1309.

(編集担当 山本哲也)