

草津白根山における全磁力観測の現状について

下川淳・山崎明・笹岡雅宏・増子徳道・弘田瑛士（気象庁地磁気観測所）

Current Progress of Geomagnetic Total Intensity Observation at Kusatsu-Shirane Volcano

Jun Shimokawa, Akira Yamazaki, Masahiro Sasaoka, Norimichi Mashiko, Eiji Hirota
(Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency)

Abstract

Since 1976, Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency has conducted observations of the total magnetic intensity at Kusatsu-Shirane Volcano for the purpose of researches for eruption prediction.

In this paper, we describe current progress of the observations, as well as our attempt to reduce the short-period noise due to the DI-effect in the continuous observation data. We show the correction is fairly well made by evaluating the noise alone from the horizontal component of the external field disturbances, for which Kakioka data are adopted as a reference. We also report results of our repeat surveys conducted in October 2020.

1 はじめに

草津白根山は安山岩質の岩石から構成される成層火山で、19世紀以降の噴火様式はすべて水蒸気噴火である（気象庁，2013）。気象庁地磁気観測所では1976年より草津白根山において火山噴火予知研究を目的とした全磁力観測を実施している。Takahashi and Fujii（2014）はそれまでに得られた全磁力観測結果から推定される湯釜および水釜地下浅部の長期的な熱活動の推移をまとめ、火山活動監視における全磁力観測の有効性を示した。最近では、白根山（湯釜付近）で火山活動の活発化に伴う全磁力変化が捉えられている（気象庁地磁気観測所，2014，2019）。このように、全磁力変化は火山体浅部熱水系の状態変化を反映していると考えられ、水蒸気噴火の発生予測への寄与が期待されている。

地磁気観測所による草津白根山の全磁力観測では、参照点を東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所（以降、八ヶ岳）とし、八ヶ岳との全磁力差をとることで火山性の磁場変化を抽出している。全磁力差をとることで太陽活動等による外部磁場擾乱や地球中心核に由来する地磁気永年変化を概ね除去可能だが、それでもなお各観測点における偏角と伏角の違いに起因する見かけの全磁力差（DI効果）や、表層岩石の温度変化による磁場変化（年周変化）などの様々な火山性以外の磁場変化（以降、ノイズ）が含まれている。全磁力観測による火山活動監視のためにはこれらのノイズを取り除くことが重要である。

地磁気三成分を用いてDI効果を軽減する手法（以降、DI補正）は、田中・他（1978）やDavis et al.,（1979）によって提唱された。秋元・他（2019）はDI補正を樽前山、吾妻山、御嶽山、九重山、霧島山に適用し、短周期現象である磁気嵐等によるDI効果を大幅に軽減した。一方、DI効果は地磁気永年変化などの長周期成分にも現れる（橋本，2006）。長周期成分のDI補正として浅利・他（2019）は伊豆

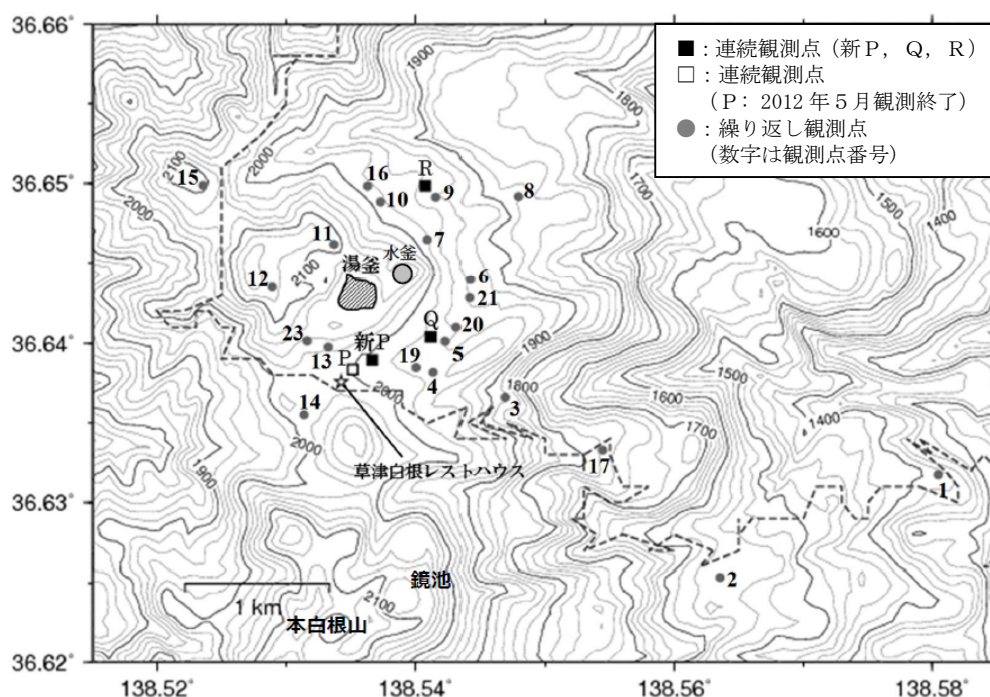
大島の地磁気データに、人工衛星主磁場モデル CHAOS-6 (Finlay et al., 2016) による地磁気三成分永年変化を用いた DI 補正を適用し、一定の効果が見られたことを報告した。

本稿では、地磁気観測所の近年の草津白根山における全磁力観測の現状について述べると共に、短周期成分に着目した DI 補正の結果を報告する。この補正手法は、雌阿寒岳の全磁力観測結果にも適用されている (気象庁地磁気観測所, 2020)。

また、今年度を実施した全磁力繰り返し観測結果について報告する。

2 観測点配置

地磁気観測所の白根山 (湯釜付近) における全磁力観測点配置図を以下に示す (第 1 図)。全磁力連続観測点が 3 点、繰り返し観測点が 21 点配置されている。



第 1 図 白根山 (湯釜付近) における全磁力観測点配置

Fig. 1 The location map of the continuous observation stations (P, Q, R and Shin-P) and the repeat stations (1-23) for the total intensity.

3 全磁力連続観測

地磁気観測所の草津白根山における全磁力連続観測点は 1990 年に湯釜付近に 3 点、プロトン磁力計 (国際電子工業株式会社製, PMP series, 分解能 0.1nT, 測定間隔 5 分) が設置された (高橋・他, 2009)。その後, 2012 年 11 月に 3 点とも観測機器がオーバーハウザー磁力計 (カナダ GEM Systems 社製の GSM-19F, 分解能 0.01nT, 測定間隔 1 分) に更新された。

なお, 連続観測点 P 点については, 草津白根レストハウス近くに停車する車両ノイズの影響を避けるため, 磁力計の更新と共に新 P 点に移設した。Q 点, R 点については, 同じ位置とセンサー高で更新した。

4 全磁力連続観測データの解析

解析期間は2018年1月1日から2020年11月30日までとし、解析には連続観測点（新P点、Q点、R点）および八ヶ岳の全磁力データを用いた。一般的に、短周期のDI効果を取り除くためには、田中・他（1978）やDavis et al., (1979)による手法が用いられる。しかし、磁気嵐等の外部起源の短周期変化では水平地磁気成分（以降、H成分）の変化が卓越し、長周期変化ではH成分と比較するとZ成分が卓越している。そのため、地磁気観測所による柿岡での地磁気連続観測データのH成分を用いた補正を行った。解析は以下の3段階の手順に沿った。

(1) 夜間日平均値差 ΔF の算出

連続観測点（新P点、Q点、R点）、および八ヶ岳の全磁力データの3時間（1500UTC-1759UTC）夜間日平均値差 ΔF を算出した。夜間日平均値を用いたのは、主に日中に生じる地磁気日変化の影響を除外するためである。

(2) 柿岡のH成分の永年変化の除去

柿岡のH成分に対して、人工衛星主磁場モデルCHAOS-7（Finlay et al., 2019）を用いて永年変化の除去を行った（第2図）。

$$\Delta H_{KAK} = H_{KAK} - H_{KAKCHAOS-7}$$

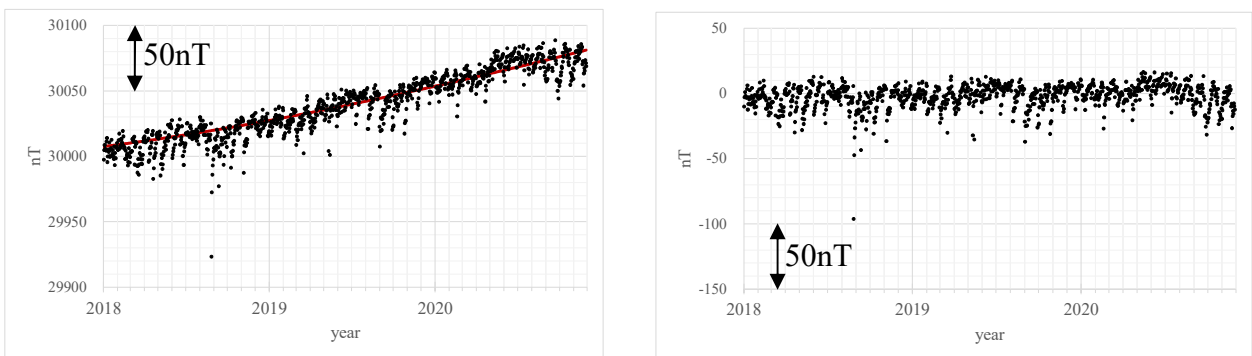
H_{KAK} は柿岡のH成分（日平均値）、 $H_{KAKCHAOS-7}$ は人工衛星主磁場モデルから求めた柿岡のH成分（日値）である。これらの差分 ΔH_{KAK} を求めることで永年変化を除去し、太陽活動による短周期成分を抽出した。

(3) 柿岡のH成分を用いたDI効果の補正

次の式で補正を行った。

$$\Delta F_C = \Delta F - \Delta H_{KAK} \times C$$

ここでCは補正係数である。 ΔF_C の5日ごとの標準偏差を解析期間全体について求め、その標準偏差の平均が最小となるように補正係数Cを決定した（第1表）。ただし、R点については落雷によるステップ状の変化があったため、2020年8月21日までのデータで補正係数を決定した。

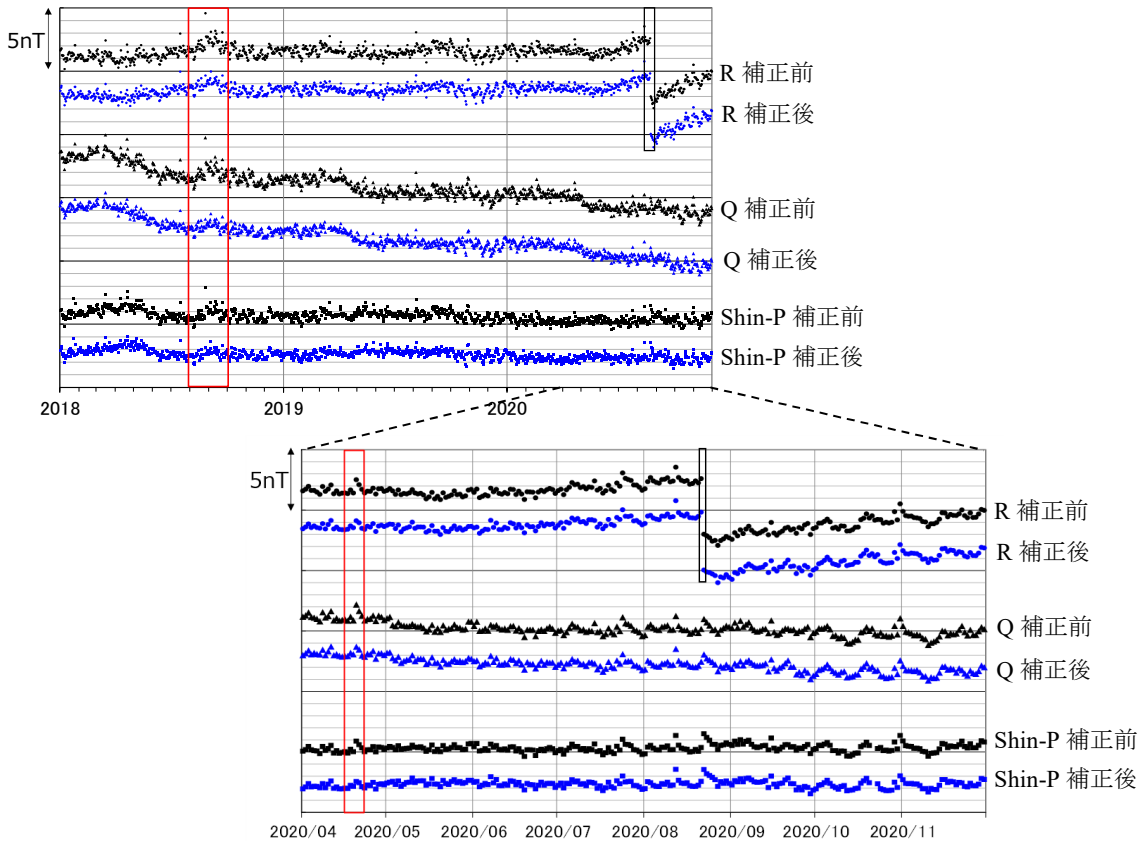


第2図 左図：柿岡のH成分の日平均値（黒丸）と衛星主磁場モデルの日値（赤線）
右図：左図の日平均値と衛星主磁場モデルの差分

Fig. 2 The H-components of observed daily mean values and CHAOS-7 model (Finlay et al., 2019) at Kakioka (left) and their differences (right).

5 解析結果

連続観測点（新P点，Q点，R点）および八ヶ岳の全磁力データにおける，補正前の夜間日平均値差 ΔF と補正後の夜間日平均値差 ΔF_c を第3図に示す．第1表に得られた補正係数と補正前後の標準偏差を観測点毎に示す．DI補正により2018年8月から9月，2020年4月に発生した磁気嵐によるDI効果がある程度軽減されていることが見てとれる（第3図の赤枠）．なお，R点における落雷によるステップ状の変化を第3図の黒枠で示した．



第3図 連続観測点におけるH成分補正前後の全磁力連続観測結果（2018年1月～2020年11月30日）とその拡大図（2020年4月～2020年11月30日）

Fig. 3 Nighttime mean values of the total intensity before and after the application of the H-component correction, for the stations Shin-P, Q and R (with respect to Yatsugatake) from January 2018 to November 30, 2020.

第1表 補正係数と補正前後の標準偏差

Table 1 Values of the coefficient C and their standard deviations before and after the H-component correction, for the stations Shin-P, Q and R (with respect to Yatsugatake) from January 2018 to November 30, 2020.

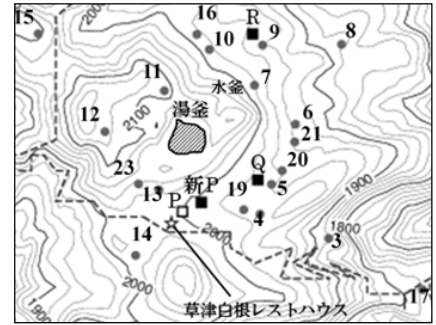
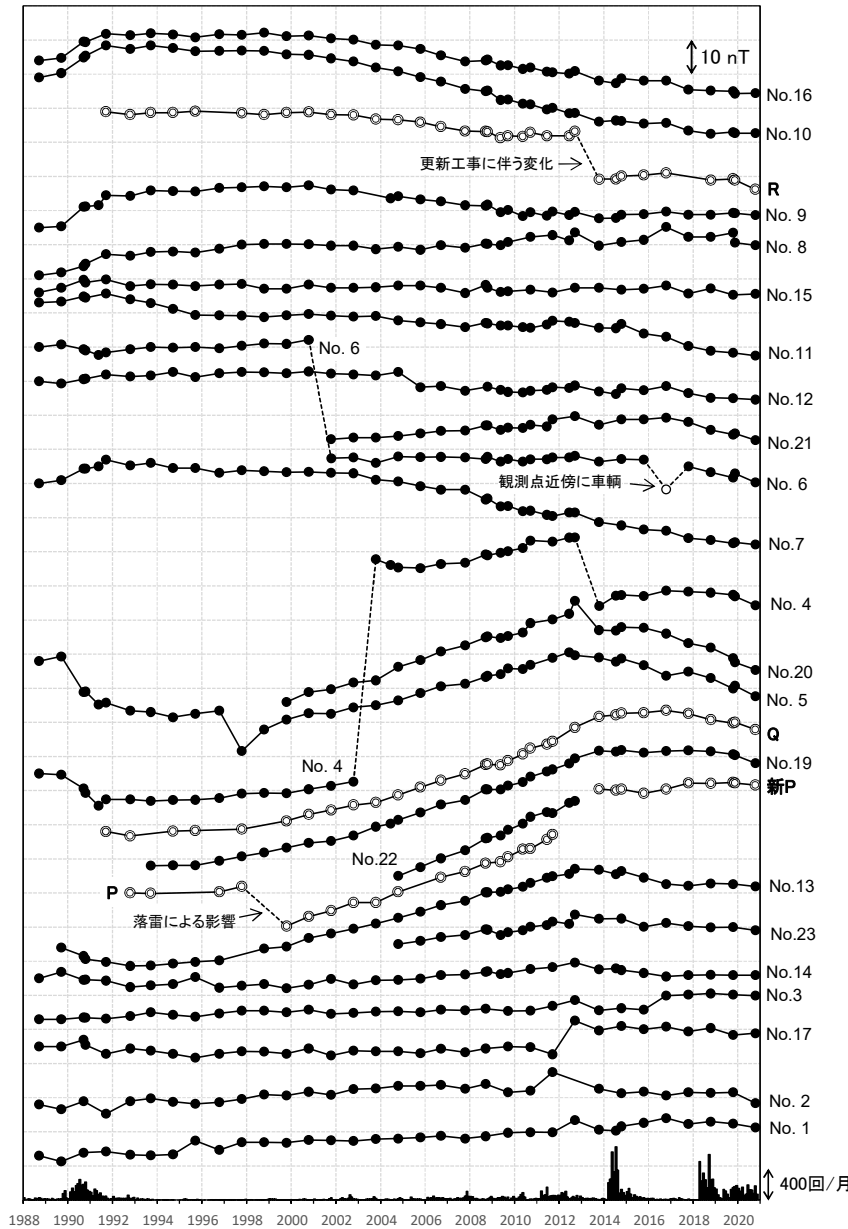
	Shin-P	Q	R
補正係数 C	0.0179	0.0255	0.0201
標準偏差(補正前)	0.21	0.24	0.23
標準偏差(補正後)	0.19	0.21	0.21

6 全磁力繰り返し観測結果

2020年10月14日から17日にかけて、白根山（湯釜付近）21地点と本白根山10地点で全磁力繰り返し観測を実施した。全磁力繰り返し観測には携帯型プロトン磁力計（G856、ジオメトリクス社製、分解能0.1nT）を使用した。センサー高は地表から2.0mである。観測結果を第4図および第5図に示す。

白根山（湯釜付近）の観測結果から、前回（2019年10月）の観測結果と比較して、湯釜の東から南東側の比較的狭い領域で2nT程度の全磁力値の減少が認められた（第4図）。

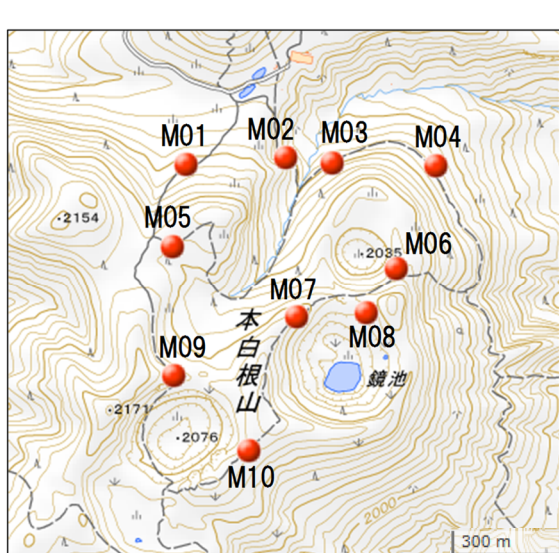
本白根山の観測結果からは熱磁気効果を示唆するような全磁力変化は認められなかった（第5図）。



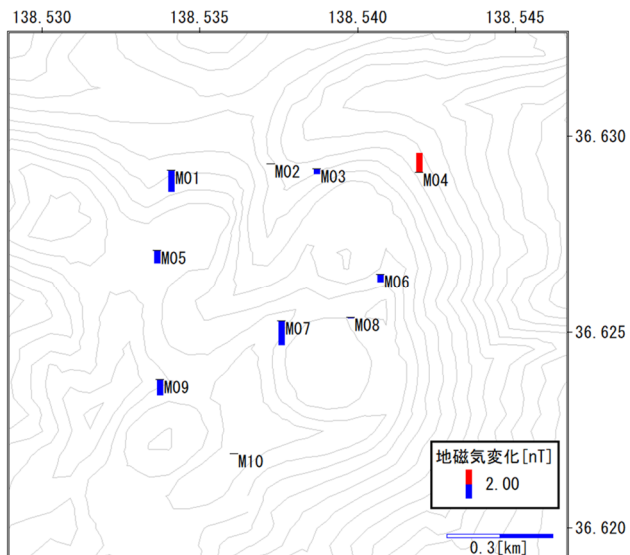
※No.1, No.2 は地図欄外

第4図 白根山（湯釜付近）における全磁力繰り返し観測結果（1988年9月～2020年10月）

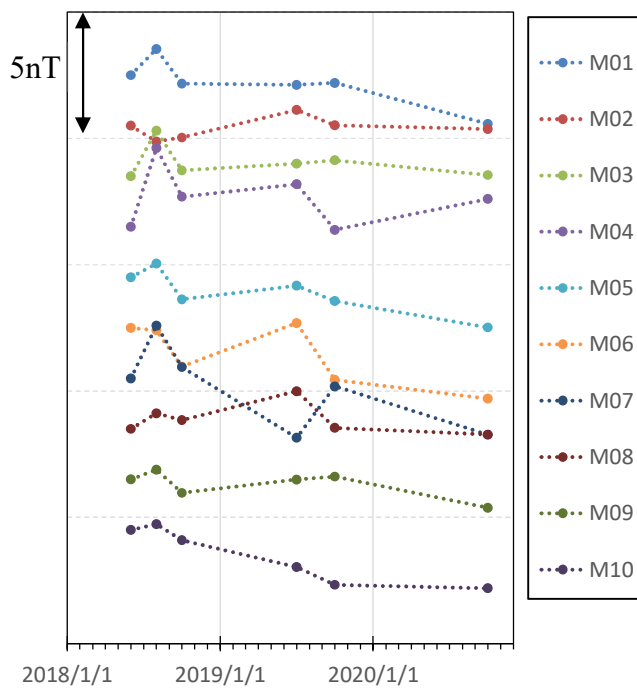
Fig. 4 Total intensities observed at the repeat stations (with respect to Yatsugatake) from September 1988 to October 2020.



地理院地図に繰り返し観測点を追記.



2020年と2019年の全磁力差を示す.



第5図 本白根山における全磁力繰り返し観測点の配置と観測結果 (2018年6月~2020年10月)

Fig. 5 The location map of the total intensity repeat stations at Motoshirane Volcano. Also plotted are the changes of the observed total intensities at these stations (with respect to Yatsugatake) from June 2018 to October 2020. Red and blue bars indicate increase and decrease in the total intensity, respectively.

7 まとめと今後の課題

本稿では地磁気観測所が草津白根山で実施している全磁力観測の現状として、連続観測へのDI補正の適応および繰り返し観測結果を中心に報告した。

全磁力連続観測については、連続観測点（新P点、Q点、R点）、および八ヶ岳の全磁力の夜間日平均値差に対して柿岡のH成分のみを用いたDI補正を試みた。その結果、磁気嵐等の短周期成分のDI効果はある程度軽減できることが明らかとなった。今後は、さらに補正効果を高めるため、八ヶ岳のX成分のみを用いた補正を試行する予定である。

また、安山岩質の草津白根山では、伊豆大島のような玄武岩質の火山と比べて、全磁力年周変化はかなり小さい。しかし、2018年4月頃から7月末頃にかけて観測された水釜付近地下の熱消磁を示唆する全磁力変化が1nT程度であったことを考慮すると、火山活動に関連した変化を検知する上で年周変化の影響も考慮する必要がある。今後は連続観測点の年周変化についても補正手法を検討する予定である。

なお、連続観測点Rでは2020年8月に落雷によると推定されるステップ状の変化が観測データに混入した。これはR点近傍の岩石で落雷により電流が流れて、磁化が獲得されたものと考えられる（山崎・他、2003）。その後、R点での全磁力値は増加がみられているが、落雷後の余効変動が含まれており、慎重に解釈する必要がある。

全磁力繰り返し観測では、白根山（湯釜付近）で連続観測点Q点近傍の観測点で、2018年以降減少傾向が続いている。一方、北側の観測点では変化が小さく、湯釜南側の連続観測点P点ではほとんど変化が認められないのに対して、周辺の繰り返し観測点で僅かながら減少が観測された。2019年の観測結果を基に、気象研究所地震火山研究部（2013）による解析ツール（MaGCAP-V）を用いて、水釜付近に点源を仮定し熱消磁源を推定したが、全磁力変化量が小さく局所的なことから、単純なモデルの仮定では信頼できる結果が得られなかった（気象庁地磁気観測所、2020）。今後は、観測データのノイズ軽減等により火山活動に起因する全磁力変化量を見直すなど、さらに精査を進める予定である。

謝辞

本調査では東京大学地震研究所共同利用（2020-D-15）により、八ヶ岳地球電磁気観測所速報データの提供を頂きました。データ提供にあたって、小河勉氏（東京大学地震研究所）に大変お世話になりました。図表の作成にあたって、国土地理院発行の「数値地図50mメッシュ（標高）」、同院の地理院地図および「国土数値情報（道路データ）国土交通省」を使用しました。

本稿の執筆にあたり、気象庁地磁気観測所の宮村淳一所長と浅利晴紀研究官に有益な助言を頂きました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 秋元良太郎, 山崎明, 山崎貴之, 浅利晴紀, 高橋幸祐 (2019) : 活火山での全磁力観測における DI 補正法の適用, *Conductivity Anomaly* 研究会 2019 年論文集, 25-32.
- 浅利晴紀, 長町信吾, 増子徳道, 高橋幸祐, 小山崇夫 (2019) : 地磁気火山監視における人工衛星主磁場モデルの有用性について. *地球電磁気・地球惑星圏学会第 146 回総会及び講演会予稿*, R003-03.
- Davis, P. M., Stacy, F. D., Zablocki, C. J., and Olson, J. V. (1979) : Improved signal discrimination in tectonomagnetism : discovery of a volcanomagnetic effect at Kilauea, Hawaii, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 19, pp. 331-336.
- Finlay, C. C., Olsen, N., Kotsiaros, S., Gillet, N., and Toffner-Clausen, L. (2016) : Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. *Earth Planets Space*, 68(1) : 1-18.
- Finlay, C.C., Kloss, C., Olsen, N., Hammer, M. and Toffner-Clausen, L., (2019) : DTU Candidate models for IGRF-13. Technical Note submitted to IGRF-13 task force, 1st October 2019.
- 橋本武志 (2006) : 永年変動によるみかけの全磁力変化—火山地磁気効果の評価—, *Conductivity Anomaly* 研究会 2006 年論文集, 51-58.
- 気象庁 (2013) : 草津白根山. *日本活火山総覧 (第 4 版) II*. 関東・中部・伊豆・小笠原編, 645-672.
- 気象庁地磁気観測所 (2014), 草津白根山 (湯釜付近) における地磁気全磁力変化. *火山噴火予知連絡会会報*. ;119, 32-35.
- 気象庁地磁気観測所 (2019), 草津白根山 (湯釜付近) における地磁気全磁力変化. *火山噴火予知連絡会会報*. ;132, 93-96.
- 気象庁地磁気観測所 (2019), 草津白根山における地磁気全磁力変化. 第 145 回火山噴火予知連絡会資料 (その 1) 草津白根山, 霧島山 ;145, 38-44.
- 気象庁地磁気観測所 (2020), 草津白根山 (湯釜付近) における地磁気全磁力変化. 第 146 回火山噴火予知連絡会資料 (その 1 の 1) 草津白根山 ;146, 43-47.
- 気象庁地磁気観測所 (2020), 雌阿寒岳における地磁気全磁力変化. 第 146 回火山噴火予知連絡会資料 (その 3 の 1) 北海道地方 ;146, 20-22.
- 気象研究所地震火山研究部 (2013) : 火山用地殻活動解析支援ソフトウェア MaGCAP-V の機能強化. *気象研究所技術報告*, 69, 168-179.
- 高橋幸祐, 大和田毅, 大川隆志, 熊坂信之, 源泰拓 (2009) : 草津白根山における地磁気全磁力観測, *月刊地球*, vol. 31, No. 12, 693-698.
- Takahashi K, Fujii I. (2014) : Long-term thermal activity revealed by magnetic measurements at Kusatsu-Shirane volcano, Japan. *J Volcanol Geotherm Res.* ; 285:180-194.
- 田中良和, 増田秀晴, 河村謙, 大地 洗, 加藤 誼司, 馬場広成, 吉野登志男 (1978) 阿蘇火山地域での全磁力測量 (1977) : 阿蘇火山集中総合観測 (第 1 回 1977) 報告 . 31-39.
- 山崎明, 白土正明, 大和田毅, 徳本哲男, 源泰拓 (2003) : 落雷に伴う磁場の異常変化に関する調査—草津白根山での観測例—, *Conductivity Anomaly* 研究会 2003 年論文集, 91-97.