

草津白根山湯釜南東で観測される季節変化に関する調査

笹岡雅宏・浅利晴紀・増子徳道・下川淳（気象庁地磁気観測所）

A Research on the Seasonal Variation of Geomagnetic Total Intensity Observed in South-East Flank of Yugama Crater Lake at Kusatsu-Shirane Volcano

Masahiro Sasaoka, Seiki Asari, Norimichi Mashiko, and Jun Shimokawa
(Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency)

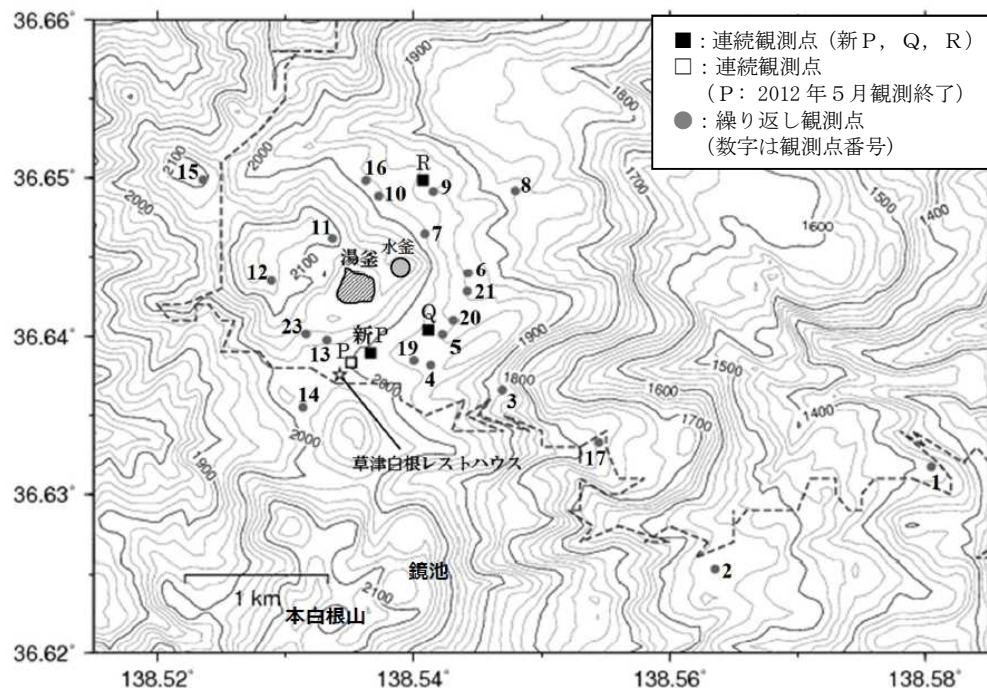
Abstract

A variation in geomagnetic total intensity suggestive of thermal demagnetization was observed in the subsurface near Yugama Crater Lake from April to July 2018, and a decrease of about 1.5 nT in total intensity was observed from March to May at the continuous station Q in south-east flank of Yugama Crater Lake from the following year onward. In order to distinguish this seasonal variation from variations due to thermal demagnetization or magnetic susceptibility, it is necessary to identify the cause of the seasonal variation. In this paper, we examine the surface temperature variation by focusing on the seasonal variation in net solar radiation during the snowmelt season among the causes due to seasonal variation of either solar activity or meteorology. Since no meteorological observations were made at the station Q, we used meteorological data published by the Japan Meteorological Agency to estimate the surface temperature. As a result, the temperature variation estimated from net solar radiation was small compared to the significant step-like variation in net solar radiation during the snowmelt season. The estimated surface temperatures were similar to those calculated from soil temperatures measured at the station Q. The seasonal variations in total intensity during the snowmelt season were not due to variations in surface temperature associated with the variation in net solar radiation, and may be due to other causes.

1 はじめに

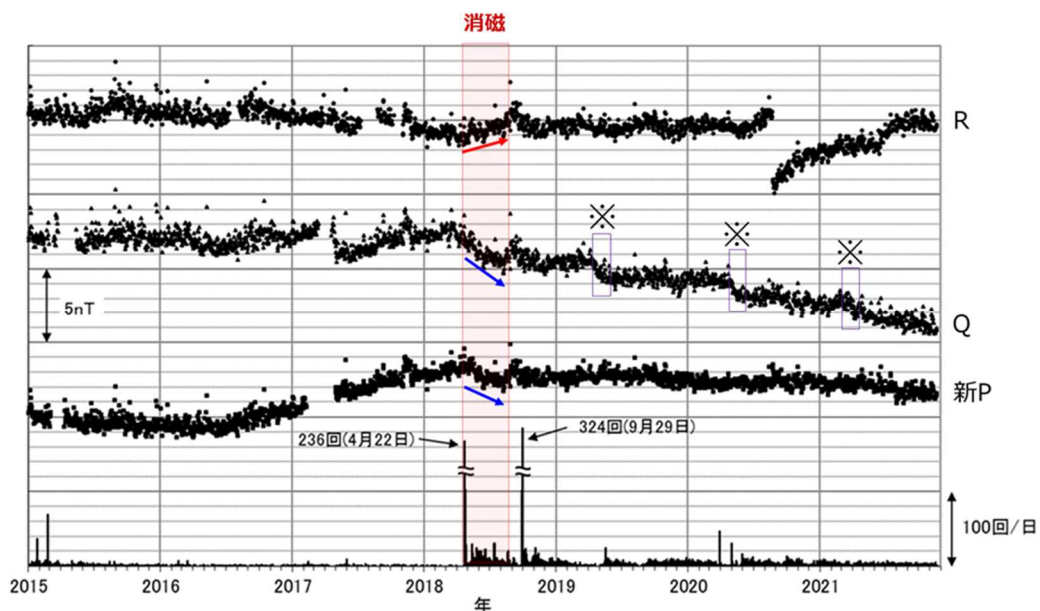
気象庁地磁気観測所は、1976 年以来草津白根山において水蒸気噴火を対象とする火山防災目的で地磁気全磁力観測を実施している。最近、全磁力連続観測や繰り返し観測のほか、観測点周辺の磁場環境を調査する目的で徒歩による磁気測量を実施した（笹岡ほか、2022）。全磁力連続観測点及び繰り返し観測点の配置について第 1 図に示す。2018 年 4 月頃から 7 月末頃にかけて、水釜付近地下の熱消磁を示唆する全磁力変化が観測されたが、その翌年以降にも湯釜南東の連続観測点 Q（標高:1,960m）では毎年 3 月頃から 5 月頃にかけて 1.5nT 程度の全磁力の減少が観測された（第 2 図）。この季節変化を熱消磁や帯磁による変化と区別するためにはその原因を特定する必要がある。このため、2020 年 10 月に Q 点において傾斜調査を実施した。センサーポールの傾斜角をクリノメータで東西南北方向に対して測定し、北 90 度、東 90.5 度、南 90 度、西 90 度の結果を得た。また、センサー高を測定し、設置時の仕様書通りの 2m と相違がないことを確認した。更に、センサー高にて Q 点の東西南北方向で 1m 間隔にて全磁力を測定し、連続観測点 Q を基準として水平磁場傾度を求めた（第 3 図）。その結果、水平磁場傾度は

東西方向では小さいが南北方向では約 $1.5\text{nT}/10\text{ cm}$ の大きさを確認した。仮にセンサーが南北方向に 10 cm 動けば融雪期に見られる季節変化程度の地磁気変化が見られる可能性はあるが、センサーポールが傾斜した痕跡は見つからなかった。



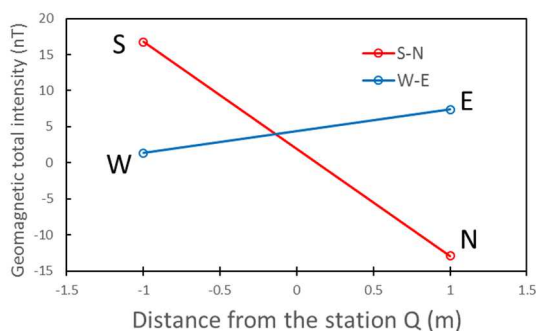
第1図 白根山（湯釜付近）における全磁力観測点配置

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



第2図 全磁力連続観測結果（2015年1月～2021年11月20日）

Fig. 2 Nighttime mean values of the geomagnetic total intensity for the stations Shin-P, Q and R (with respect to Yatsugatake) from January 2015 to November 20, 2021.

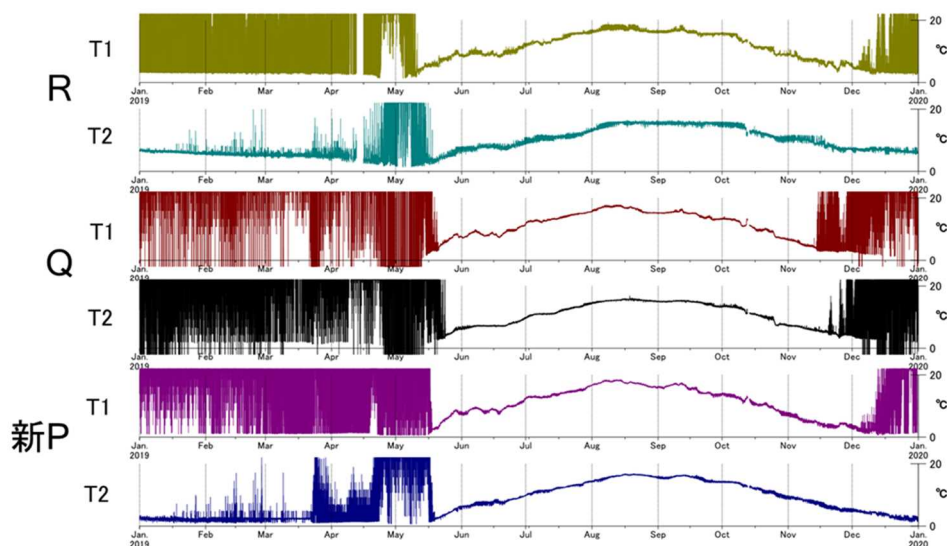


第3図 Q点における水平磁場傾度(2020年10月18日)

Fig. 3 Geomagnetic total intensity in east-west and north-south direction at the continuous station Q (with respect to the continuous station Q) on October 18, 2020.

季節的に3月頃から5月頃にかけては融雪期にあたる。融雪が地磁気観測に何らかの影響を及ぼすことがあるであろうか？ 湯釜南東の連続観測点の設置場所の土は粘土質であり柔らかく、風雨に晒されると地表面が削れやすく地面が変形しやすいように見える。しかし、現地を視認した限りでは崖崩れのような土地が変化した様子はなく、融雪が物理的に作用し観測環境が変化したといえるような状況証拠は見つかっていない。そこでQ点周辺の磁場環境を調査するために、2021年10月に徒歩による磁気測量を実施した(笹岡ほか, 2022)。徒歩磁気測量の結果、Q点の南側の地表面付近もしくは浅い地中で東西方向に強い磁気地帯が存在することが分かった。今後この磁気測量を定期的の実施することにより、もし観測環境が変化するのであれば、それに伴う磁場の変化が確認される可能性がある。

一方で、原因不明の地磁気の季節変化について、先ずは太陽活動や気象の季節変化の影響が疑われる。日射は、裸地と雪の地表面ではアルベド(日射の反射率)に大きな差があることが知られている。融雪期に日射量に差が生じ、地表面から浅い地中にかけてステップ様の温度変化が生じ、その結果、地磁気が変化するのはないかとの仮説を立てた。全磁力連続観測点における地中温度観測を見ると、冬季はデータが異常となっており融雪期の温度変化を確認することができない(第4図)。本稿ではこの仮説について、現地で気象観測を行っていないため、代わりに気象庁が公開しているアメダスや高層気象観測データを用いて地表面温度を推定することで検証する。



第4図 全磁力連続観測点における地中温度毎分観測(2019年1月1日~12月31日)

Fig. 4 Soil temperature measurements per minute for the continuous observation stations shin-P, Q and R from January 1 to December 31, 2019.

T1 and T2 are soil temperatures at depths of 50cm and 100cm underground at each station, respectively.

2 地表面温度の推定方法

地表面の積雪の有無を確認するために最深積雪を用いる．第5図にアメダス草津地点の最深積雪とQ点の全磁力観測を示す．Q点と草津地点の標高差は約740mあり，Q点における融雪期は草津より少し遅れるかもしれないが，概ね3月頃から5月頃の最深積雪の減少とQ点の全磁力減少は対応する．最深積雪が0cmのとき地表面は裸地と判断する．裸地と雪のアルベド α は，それぞれ0.1, 0.65とする（例えば，赤坂（2018））．全天日射量 S から地表面が受け取る正味の日射量は， $(1-\alpha)S$ と表せる．第6図に，前橋地方気象台における全天日射観測から日射量を示す．4月にステップ様の正味の日射量の増加，梅雨など悪天候に水蒸気量が増加する夏季に日射量の減少が示される．地表面熱収支の関係を第7図に示す．各パラメータの関係は以下の通り（例えば，菅原と近藤（1995），近藤（2000），吉本（2020））．

$$(1-\alpha)S_d + L_d = H + \ell E + L_u + G \quad (1)$$

データは日平均とし， G は昼夜で逆向きになり相殺されるので， $G \approx 0$ ．また水蒸気圧の鉛直勾配は殆どないとみなし， $\ell E \approx 0$ とし式2を得る．

$$(1-\alpha)S_d + L_d = H + L_u \quad (2)$$

次に顕熱の関係を式3に示す．

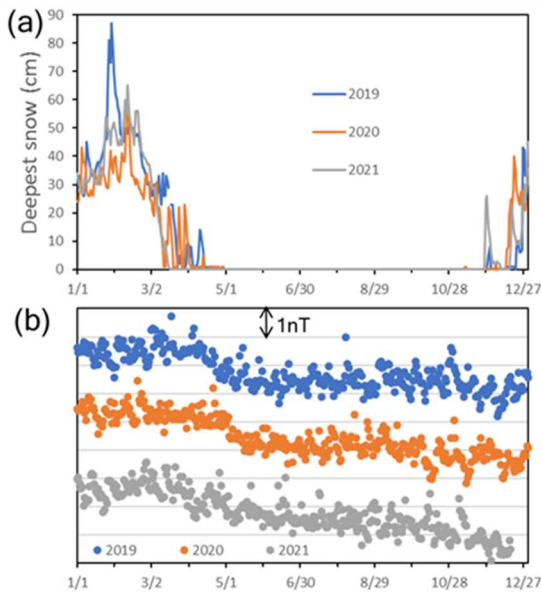
$$H = A_h U (T_s - T_a) \quad (3)$$

式2及び式3より，式4を得る．

$$T_s = T_a + \{(1-\alpha)S_d - (L_u - L_d)\} / A_h U \quad (4)$$

式4中の上向き長波放射は式5で与えられる．

$$L_u = \sigma T_s^4 \quad (5)$$



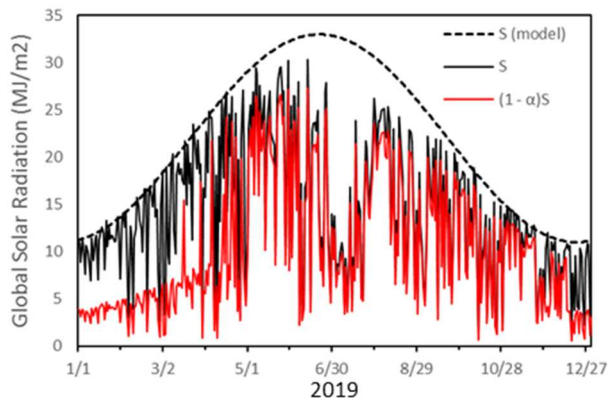
第5図 最深積雪と全磁力（2019～2021年）

Fig. 5 Deepest snow and geomagnetic total intensity from 2019 to 2021.

(a) deepest snow for Kusatsu of AMeDAS and (b) nighttime mean values of the total intensity for the station Q (with respect to Yatsugatake).

式4は，日射量が顕熱のみで消費される関係を示し，風速が大きい場合は日射の寄与が小さくなることを示す．ここに， T_s :地表面温度， T_a :気温， S_d :正味の日射量， L_u :上向き長波（赤外）放射， L_d :下向き長波（赤外）放射， U :風速， $A_h = C_p \rho C_H$ ， $C_p = 1,006$ (J/kgK)， $\rho = 1.166$ (kg/m³)， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴， $C_H = 0.07$ ．但し， C_H は観測比較により評価する必要があり，第3節に述べるように地中温度観測から算出した地表面温度を参考に決定した．大気の下向き赤外放射量 L_d は，天気依存し σT_a^4 と関連することが知られている（近藤, 2000）．館野における気温と下向き赤外放射観測から， $L_d / \sigma T_a^4 (= \beta)$ の2019, 2020, 2021年の年平均は，それぞれ0.87, 0.87, 0.85と求まる．関東甲信越地方では館野の β を用いて気温観測から， $\beta \cdot \sigma T_a^4$ を L_d とする．式4からQ点における地表面温度を求めるために，館野の高層気象観測（GPSゾンデ）の800hPa（高度2km付近）の9時及び21時の平均を求めた気温 T_a 及び風速 U を用いる．一般的に L_u は L_d より大きく， $(L_u - L_d)$ は夏季に大きく冬季に小さい季節変動を示

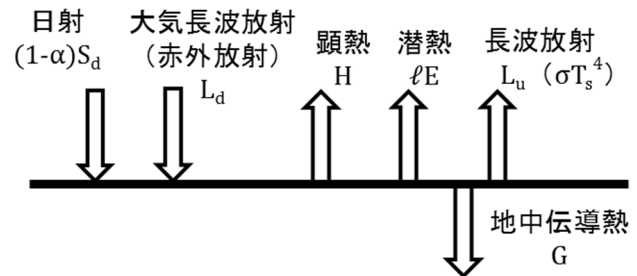
すが、本稿では年平均の $(L_u - L_d)$ を式 4 に用いる．式 4 による T_s の算出は数値的に行った．先ず L_u (初期値) を σT_a^4 とし、式 4 へ代入し求めた T_s から式 5 によりまた L_u を得る．これを 3 回繰り返す、式 4 中の $(L_u - L_d)$ の年平均を 0.01W/s の桁まで収束させることで、 T_s を決定した． $(L_u - L_d)$ の年平均は、2019、2020、2021 年について、それぞれ 46.0W/s、44.1W/s、49.3W/s と求まった．



第 6 図 全天日射量 (2019 年, 前橋)

Fig. 6 Global solar radiation in 2019 at Maebashi Meteorological Office, JMA.

S from model (dashed line), S (solid line) and $(1 - \alpha)S$ (red line). S: global solar radiation, α : albedo.



第 7 図 地表面熱収支の概念図

Fig. 7 Conceptual diagram showing the surface heat budget.

S_d : solar radiation, L_d : downward infrared radiation, H: sensible heat, ℓE : latent heat, L_u : upward infrared radiation, G: ground conduction heat, α : albedo, σ : Stefan-Boltzmann constant, T_s : surface temperature.

3 地表面温度と地中温度の比較結果

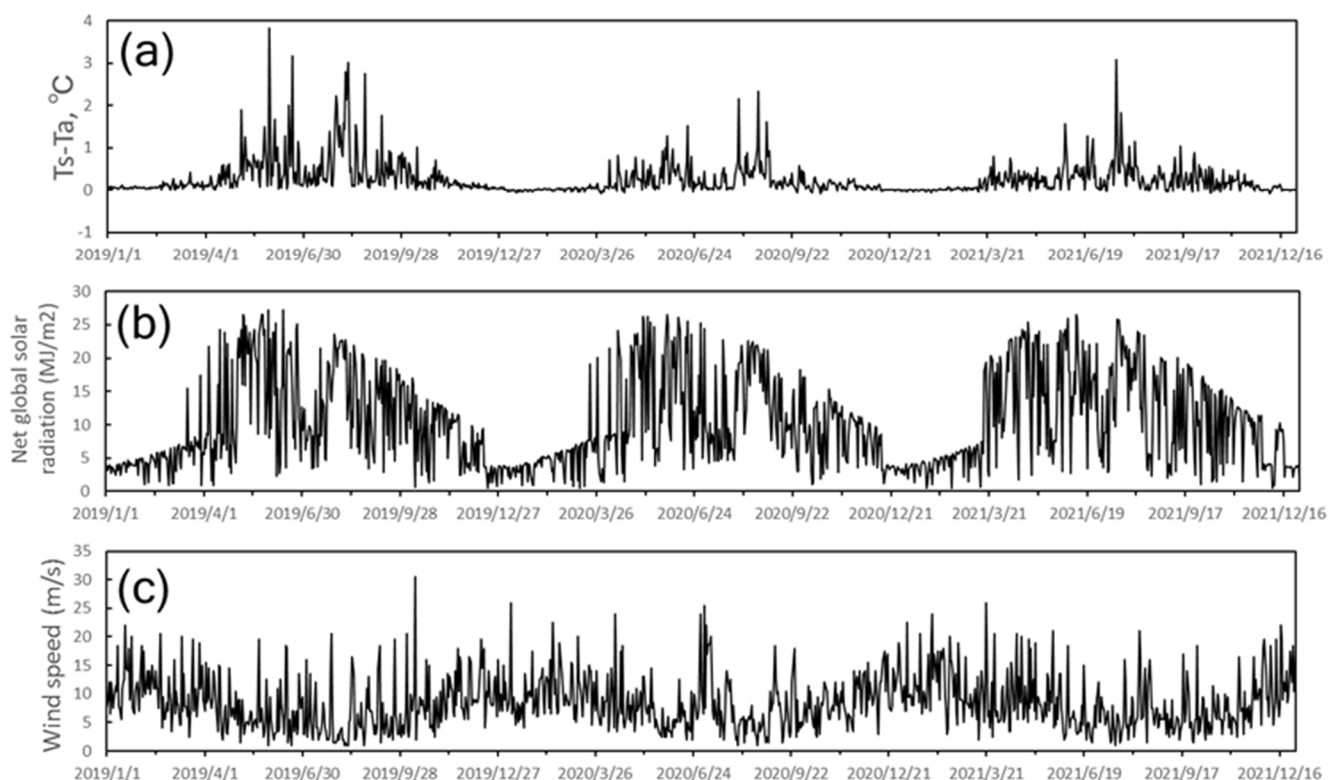
第 8 図に、2019 から 2021 年までの日射による温度変化、正味の日射量及び風速の比較を示す．融雪期に日射量が増加するタイミングでは、8 月上旬の日射の増加する時期と比べ日射による温度変化は小さい．地面の摩擦を殆ど受けない場所では冬季に強く夏季に弱い典型的な季節風が見られるが、融雪期はまだ風が強い季節であり日射による温度変化は小さく目立たないことが示された．風速が小さい夏季には日射による温度変化が大きい．Q 点で気象観測を実施していないため、草津（最深積雪）、前橋（全天日射量）、館野（気温、風速、下向き赤外放射量）の気象データを利用して地表面温度を推定したが、どの程度妥当な推定値を得られるのか検証したい．第 9a 図に気温と式 4 で求めた地表面温度を示すとともに、50 cm 及び 100 cm 地下の地中温度（第 9c 図及び第 9d 図中）から算出した地表面温度を第 9b 図に示す．この算出は、赤坂(2018)に基づき、地盤は粘土とし各層の厚さ 50cm、熱伝導率 1.5W/(mK)、容積比熱 3.0MJ/(m³K)を採用し、地中温度の日平均から求めた．地中温度データは冬季に異常値を示したため、夏季のみになるが両者の地表面温度の変化傾向はよく似ている結果を得た．

4 考察とまとめ

草津白根山は、玄武岩質に比べ磁化が小さい安山岩質の岩石から主に構成される火山として知られており、地中温度の変化の影響を受けにくく全磁力連続観測から年周変化を明瞭に確認できない．仮に日射による温度変化が有意にあった場合にも全磁力変化が現れにくいのではないかと予想された

が、本稿では太陽活動や気象による季節変化のうち、日射量の融雪期に見られる季節変化に着目して温度変化の全磁力変化への影響を検討した。第 6 図に示した地表面への正味の日射量は、第 5a 図に示した積雪が始まる冬季においては変化が小さい。これは第 2 図に示した全磁力の冬季の変化が小さいことと調和的であった。地表面温度の推定では、Q 点付近の地面が粘土質であり水はけがよく植生が殆どなくローカルな水循環が見られないことから潜熱については無視した。本稿では地表面温度の推定に現地観測が無く用いられなかったが、Q 点における地中温度との対応がよいことが示された（第 9 図）。このことは、地中温度が影響を受ける Q 点付近のローカルな気象が、関東甲信越地方における地域的な気象と大差ないことを示す。第 9a 図に示した地表面温度は夏季よりも冬季に変動が大きい、これは寒気移流により風が強く気温が大きく変動するためと考える。積雪時は雪の層が地上にできるため地中へ伝導する熱の変動は小さく、地中温度の変動は雪上の地表面温度のように大きくない。

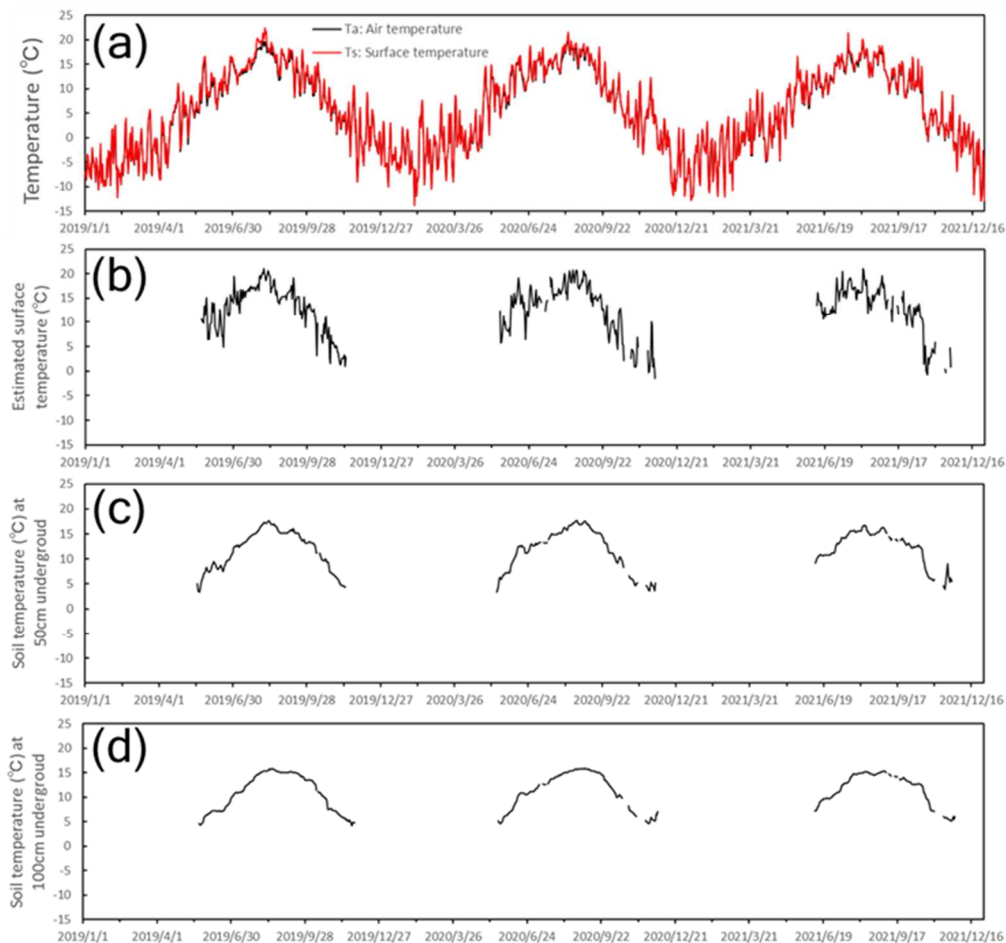
結果として、第 8a 図に示したように日射による温度変化は融雪期の日射のステップ様の著しい変化に対して小さかった。一方、気象データから推定した地表面温度は地中温度（T1 及び T2）から算出した地表面温度とよく似ていた。融雪期の全磁力の季節変化は、地表面への正味の日射量の変化に伴う温度変化が原因ではなかったことが分かったため、別の原因によるものと考えられる。



第 8 図 日射による地表面温度変化、正味の日射量及び風速の比較（2019～2021 年）

Fig. 8 A comparison of surface temperature variation caused by net global solar radiation with variations of both net global solar radiation and wind speed from 2019 to 2021.

(a) surface temperature variation caused by net global solar radiation ($T_s - T_a$), (b) net global solar radiation and (c) wind speed.



第9図 地表面温度と地中温度の比較（2019～2021年）

Fig. 9 A comparison of surface temperature with soil temperatures from 2019 to 2021.

(a) air temperature (T_a) and surface temperature (T_s), (b) surface temperature estimated from T1 and T2 soil temperatures, (c) soil temperature at 50cm underground (T1) and (d) soil temperature at 100cm underground (T2).

謝辞

東京大学地震研究所共同利用（2021-D-14）により、ハヶ岳地球電磁気観測所速報データの提供を頂きました。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。

参考文献

- 赤坂裕（2018）：地中温度の計算，株式会社 気象データシステム，pp.11.
- 近藤純正（2000）：地表面に近い大気の科学，東京大学出版会，pp.336.
- 笹岡雅宏，増子徳道，下川淳，浅利晴紀，藤原善明（2022）：草津白根山において実施した徒歩による磁気測量，2022 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集，5-12.
- 菅原広史，近藤純正（1995）：都市における各種地表面温度の敏感度解析，天気，42，813-818.
- 吉本真由美（2020）：連載講座「栽培環境における気温の観測技法と利用」(6)植物の体温はどのようにしてきまるのか，生物と気象，20，84-91.