

地磁気観測所構内の土壌磁化特性と地磁気観測値に対する影響
Magnetic property of soil in JMA magnetic observatories and
its relevance to observed geomagnetic values

三島稔明¹・大和田毅¹・森山多加志¹・石田憲久¹・吉武由紀¹・長町信吾¹・源泰拓¹・
山崎俊嗣²・小田啓邦²

¹気象庁地磁気観測所

²産業技術総合研究所

Toshiaki Mishima¹, Takeshi Oowada¹, Takashi Moriyama¹, Norihisa Ishida¹,
Yuki Yoshitake¹, Shingo Nagamachi¹, Yasuhiro Minamoto¹,
Toshitsugu Yamazaki², Hirokuni Oda²

¹Kakioka Geomagnetic Observatory, Japan Meteorological Agency

²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Abstract

Baseline values of fluxgate magnetometers installed at JMA magnetic observatories display annual variations with a maximum amplitude of 5 nT. A possible explanation for annual variations is change in magnetization of soil due to change in ground temperature change. In order to examine the effect of the temperature change in soil magnetization, we measured magnetic properties of soil samples collected from the observatories. Except for a strongly magnetized sample which was collected from a depth of 4 m, induced magnetization of soil samples in a magnetic field of 0.05 mT ranged within $0.05\text{-}1.7\times 10^{-3}$ Am²/kg and temperature dependence of magnetization ranged within $0.3\text{-}14\times 10^{-6}$ Am²/kg°C. Based on the measured magnetization and its temperature dependence of samples from Memambetsu, which shows the largest values among the samples from the three observatories, we estimated the distribution of geomagnetic field and its annual variation. Estimated maximum amplitude of annual variation in geomagnetic field is 7 nT, which is consistent with the observed annual variation in baseline value of magnetometers.

はじめに

地磁気観測所では地磁気変化観測値を絶対値化するために、週 1 回の絶対観測によって基線値を求めている。女満別・柿岡・鹿屋におけるフラックスゲート磁力計の基線値（第 1 図）には年周変化がみられる。年周変化の幅は鹿屋では各成分とも 1 nT 程度、柿岡では H（南北）成分・Z（鉛直）成分は 2 nT 程度だが D（東西）成分は年周変化がほとんど目立たず、女満別では Z 成分が 5 nT 程度、H 成分が 2 nT 程度、D 成分は年周変化がほとんど

見られない。この原因として従来は観測機器の温度変化や傾斜変化を考えていたが、傾斜変化を補正しても基線値の年周変化は残り、基線値の年周変化と観測機器の温度変化とは位相が合わないため、これらの原因では基線値の年周変化を説明することはできなかった。

このような年周変化は、女満別構内に設置したプロトン磁力計の全磁力地点差にも報告されており（西村ほか，2010），観測機器特有の問題ではなく実際の地磁気変化である可能性がある。火山での地磁気観測においても全磁力差年周変化が見られることがあるが、これは地表から深さ数 m までの岩石の温度変化に伴う磁化強度の変化が影響するものとして説明されており（Utada *et al.*, 2000），地磁気観測所内で観測された基線値

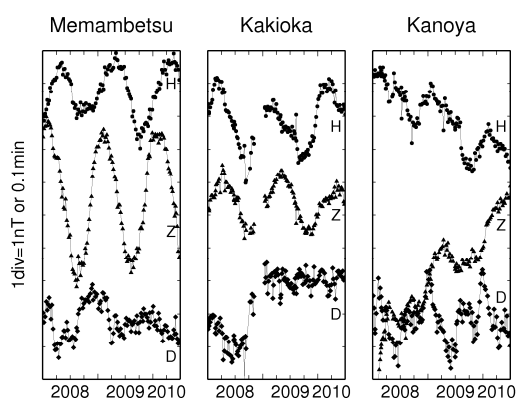
の年周変化も、これと同様に地表付近の土壌の温度変化に影響された地磁気変化に原因があるかもしれない。土壌の温度変化に伴う磁化強度の変化が地磁気観測値に影響を与える可能性はこれまでも指摘されていたが（例えば小河・小山，2009；山崎ほか，2011），具体的な影響量は検証されていない。

そこで、柿岡・女満別・鹿屋構内から土壌試料を採取し、その磁化の温度特性を測定することにより、土壌の温度変化による磁化強度の変化が地上での地磁気観測値にどの程度の影響を及ぼすかを試算した。

試料と分析

土壌試料の採取は柿岡・女満別・鹿屋の構内で、各 2 地点ずつから行った。それぞれの地点に穴を掘り、地表からの深さが異なる 1~3 個ずつの試料を採取した。試料採取深度の決定には土壌の色・粒度などの層相の変化や、地盤調査のために行われた掘削での層相記載を参考にした。また、女満別で連続観測施設を建設したときに地下約 4 m から粒度が粗く磁性の強い層（おそらく火山灰層）が見つかり、この試料も併せて分析に使用した。

岩石磁気分析は採取した各試料について 100 mg 程度を使用して行った。試料に 0.05 mT (50000 nT) の磁場を加えたまま、温度を 2 から 27 まで 1 /min の割合で上昇させ、1 分ごとに磁化を測定するルーチンを実行させた。測定には産業技術総合研究所の磁気特性測定装置 Magnetic Property Measurement System MPMS-XL を使用した。



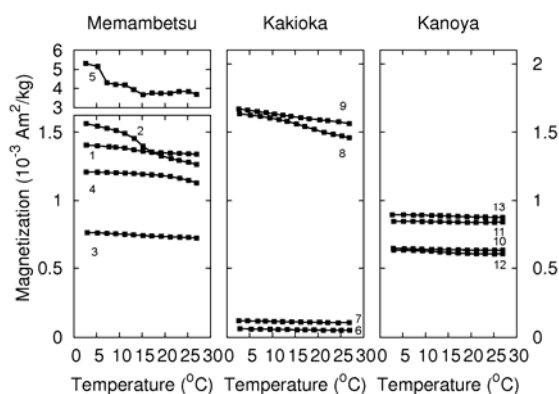
第 1 図 . 2008 年から 2010 年 6 月までの女満別・柿岡・鹿屋のフラックスゲート磁力計基線値の変化。H・Z は 1 目盛 1 nT, D は 1 目盛 0.1 分。

Fig. 1. Baseline values of fluxgate magnetometers installed at Memambetsu, Kakioka and Kanoya Observatories from 2008 to June 2010.

分析結果

第2図に磁化の温度変化を示す。大部分の試料は温度に対して線形的な磁化変化を示した。ただし、女満別の第二変化計室北深さ110 cm から採取した試料では11-19 で急激な磁化減少がみられた。また、女満別の連続観測施設深さ400 cm より採取した試料は温度に対する磁化変化のばらつきが大きかった。このような試料も含めて、温度に対する磁化変化を直線近似することによって12 °Cでの磁化の値と磁化の温度変化率を計算した(第1表)。

鹿屋から採取した試料は磁化強度が $0.6\text{-}0.9\times 10^{-3}\text{ Am}^2/\text{kg}$ 程度とやや大きいが、その温度変化率は $0.3\text{-}1.4\times 10^{-6}\text{ Am}^2/\text{kg}$ で、3箇所のうちもっとも小さい。柿岡は試料採取地点による磁化強度や温度変化率の違いが大きい。女満別は連続観測施設深さ400cmの



第2図. 各試料を0.05 mTの磁場中で2 °Cから27 °Cまで加熱したときの磁化変化。番号は第1表の試料番号に対応する。

Fig. 2. Variation in magnetization during heating each sample from 2°C to 27°C in a magnetic field of 0.05 mT. Numbers correspond to sample numbers shown in Table 1.

地点	深度 (cm)	磁化 (12 °C) ($10^{-3}\text{ Am}^2/\text{kg}$)	温度変化率 ($10^{-6}\text{ Am}^2/\text{kg}$)	番号
女満別 第二変化計室北	50	1.378	3.057	1
	110	1.455	13.965	2
女満別 全磁力(79F)北	50	0.747	1.737	3
	100	1.195	2.932	4
女満別 連続観測施設	400	4.294	56.646	5
柿岡 比較校正室南	50	0.057	0.476	6
	100	0.115	0.701	7
柿岡 地下変化計室東	50	1.579	7.807	8
	100	1.628	4.371	9
鹿屋 地下変化計室北	30	0.639	0.570	10
	120	0.840	0.329	11
	150	0.621	1.384	12
鹿屋 連続観測施設北	140	0.885	0.900	13

第1表. 各試料の12 °Cでの磁化と磁化温度変化率の計算値。

Table 1. Magnetization at 12°C and temperature dependence of magnetization calculated for each sample.

試料で磁化強度が $4.3 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$, 温度変化率が $57 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ と最も大きい値を取ったが , その他の試料でも磁化強度が $0.7-1.5 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$, 温度変化率が $1.7-14 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ と大きい値を示した . 測定した磁化の温度変化率が女満別で最も大きく , 鹿屋で最も小さかったことは , フラックスゲート磁力計の基線値にみられる年周変化の大小と整合的である .

年周変化量の試算

磁化強度やその温度変化率が最も大きかった女満別の測定値を用いて , 女満別でフラックスゲート磁力計が設置されている第二変化計室周辺の地磁気年周変化を推定した .

まず , 女満別の地中温度変化は 2004 年 5 月から 12 月までの実測値 (西村ほか , 2010) を元に , 一次元の熱拡散を仮定して深度 z に対して以下の式で与えられるとした .

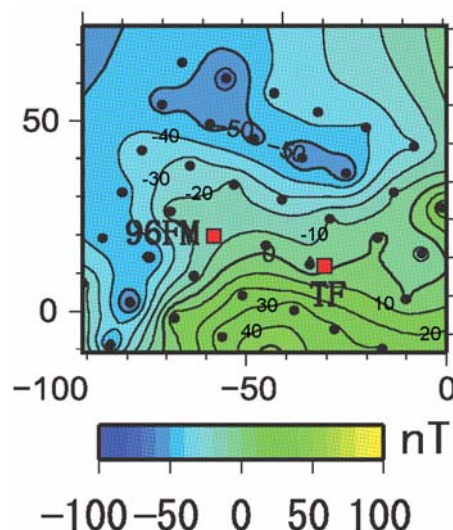
次に土壌の磁化が不均質に分布するモデルを仮定した . フラックスゲート磁力計基線値

$$\Delta T(z, t) = \Delta T_0 \exp(-nz) \cos(\omega t - nz)$$

$$\Delta T_0 = 13.3^\circ\text{C}, n = 0.585 \text{ m}^{-1}, \omega = 1 \text{ yr}^{-1}$$

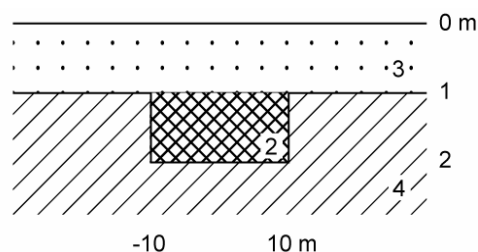
の年周変化の位相が深度 1-2 m の地中温度の位相に近いことから , 深度 1-2 m に磁化の不均質な分布があるとした . 第二変化計室周辺の磁場分布 (第 3 図) には , 全磁力が北で小さく南で大きい大局的な分布に加えて , 第二変化計室 (第 3 図の 96FM) 周辺 20 m 程度の全磁力がやや大きい領域とその領域を北側から東西にかけて囲む全磁力が小さい領域がみられ , これは地下が局所的に強く磁化した場合の特徴に一致する . 一方 , 第二変化計室付近で採取した土壌試料は , 全磁力観測点北 (第二変化計室より約 50 m 南) で採取した試料よりも磁化が強かった . 以上のことから , 磁化分布の不均質性として第二変化計室付近 20 m 四方の地中に局所的に強い磁化が分布するモデルを仮定した (第 4 図) . 局所的な強い磁化の磁化強度・温度変化率は , 第二変化計室北の深度 110 cm より採取した試料の値を用い , その他の部分は深さ 0~1 m , 1 m 以深についてそれぞれ全磁力観測点北の深度 50 cm・100 cm より採取した試料の値を用いた .

以上の条件をもとに , まず第二変化計室周辺の高度 2 m での地磁気全磁力分布を計算し (第 5 図 a) , 観測値 (第 3 図) との比較を行った . 次に H・



第 3 図 . 女満別での絶対観測室 (TF)・第二変化計室 (96FM) 周辺での高さ 2m における地磁気全磁力分布 . 絶対観測室プロトン磁力計観測値との差分を示す (西村ほか , 2010 を改変) .

Fig. 3. Geomagnetic total intensity at a height of 2 m around the absolute house (TF) and the second variation house (96FM) of Memambetsu Magnetic Observatory, with reference to the observed value in the absolute house (modified from Nishimura *et al.*, 2010).



第 4 図 . 計算に使用した土壌の磁化分布 . 試料番号 2, 3, 4 の磁化とその温度変化率 (第 1 表) を各ブロックの磁化と温度変化率として使用した .

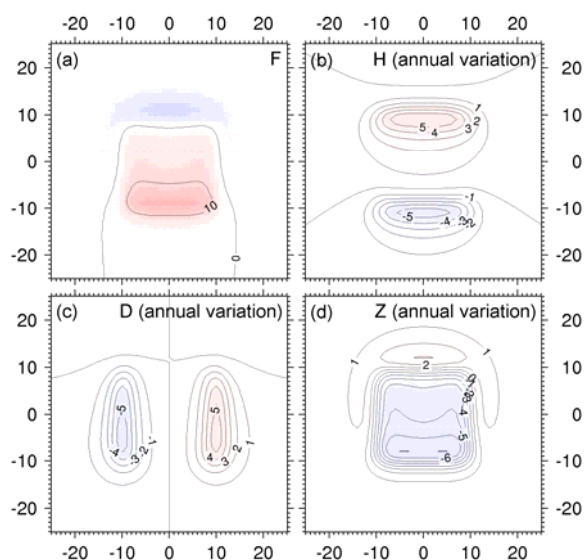
Fig. 4. A model of magnetization distribution in the soil. We adopted magnetization and its temperature dependence of the samples 2, 3 and 4 (Table 1) as those within each block.

D・Z 各成分について年周変化の振幅分布を計算し (第 5 図 b~d), フラックスゲート磁力計基線値の年周変化 (第 1 図) との比較を行った .

計算された地磁気全磁力分布では, 地中の磁化が局所的に強い領域で 10 nT 程度の正の全磁力差が見られる . これは, 磁場分布観測値にみられる第二変化計室周辺の局所的な特徴 (上述) と整合的である .

各成分の年周変化の最大振幅は H・Z 成分は地中磁化が局所的に強い領域の中心部にあるが, D 成分はその領域の東西両端にあると計算された . 最大振幅は H・D 成分は約 5 nT, Z 成分で約 7 nT であり, 地中磁化が局所的に強い領域では地中温度が高いときに H・Z 成分が小さくなる . 女満別のフラックスゲート磁力計基線値は, Z 成分に振幅約 5 nT, H 成分に振幅約 2 nT の年周変化が見られ, 地中温度の高い夏から秋にかけて両成分の基線値が大きくなる (すなわち, フラックスゲート磁力計による変化観測値を基準とした絶対観測値が大きくなる) が, この年周変化の符号や大きさの程度は, フラックスゲート磁力計が設置されている第二変化計室が局所的な強い地中磁化の影響を受けており, 絶対観測室はその影響を受けていないとして説明できる可能性がある .

今回の試算では年周変化の大きさを見積もることを目的としたため, 地中の磁化分布として単純なモデルを仮定したが, 構内磁場分布の観測結果を利用すればさらに現実に即した磁化分布を決めることができる . また, 女満別・鹿屋の観測を遠隔化することに伴い,



第 5 図 . 計算された磁場とその年周変化の分布 . (a) 全磁力地点差の分布 . (b-d) H 成分・D 成分・Z 成分の年周変化振幅の分布 . 正号 (赤色) と負号 (青色) は地中温度が高い時期にそれぞれ増加・減少することを示す .

Fig. 5. Calculated distribution of magnetic field and its annual variation. (a) Magnetic total intensity. (b-d) Annual variation of H, D and Z components, respectively. Positive and negative values (red and blue) indicate increase and decrease during high ground temperature period, respectively.

今後は観測環境監視のために構内の全磁力分布を毎月 1 回観測する予定なので，その結果を用いて構内での全磁力地点差の年周変化をより詳細に知ることができる．今後この 2 点を取り入れ，土壌の磁化が磁力計基線値に与える影響を正確に算出し，絶対観測結果の評価方法や地磁気観測値の信頼性を向上させたい．

文献

- 西村三治，有田真，森山多加志，橋本雅彦，菅原政志，石田憲久，長谷川浩（2010），全磁力観測における年周変動調査．地磁気観測所テクニカルレポート，7，9-13．
- 小河勉，小山茂（2009），八ヶ岳地球電磁気観測所絶対観測室内の磁気異常の時間変化．Conductivity Anomaly 研究会論文集 2009，74-77．
- Utada, H., M. Neki, and T. Kagiya (2000), A study of annual variations in the geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals. *Earth Planets Space*, **52**, 91-103.
- 山崎明，重野伸昭，山本輝明，熊谷佳子，伊藤信和（2011），土壌掘削による磁気異常とその経年的安定性—鹿屋の絶対観測室内の磁気異常調査から—．地磁気観測所テクニカルレポート，12，1-10．