

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—

橋本武志（北海道大学大学院理学研究院）

Apparent total field change due to secular variation —evaluation of volcanomagnetic effect—

Takeshi Hashimoto (Graduate School of Science, Hokkaido University)

Apparent temporal change in a total field difference between two stations can be produced due to local anomalies of declination and inclination. This well-known effect may take place not only in a case of short period events such as daily variation or geomagnetic storms but in a case of much longer ones such as secular changes of deep origin. The latter case, however, has not been systematically studied in the past, though this effect may be significant especially in volcanic areas where geomagnetic anomalies are normally strong. Some simple cases are investigated in the present study by applying spatially uniform secular changes on a magnetic anomaly due to a uniformly magnetized circular cone. Anomalies of a few degrees in the declination or inclination with a secular change of 100 nT can cause an apparent total field change of a few nT, being comparable to the typical volcanomagnetic effect. Thus, such apparent changes should be carefully taken into account in a discussion based on long-term variations. For this purpose it is important to distinguish local-scale volcanomagnetic effects of long period from regional-scale secular variations. Intensive deployment of total field stations is one of the solutions for this problem. Alternatively, or complementarily, monitoring of absolute three components is quite effective to evaluate whether an observed change is a genuine volcanomagnetic effect or not.

1. はじめに

火山活動に伴って周辺の地磁気が変化することはよく知られるところである。古い時代には、伏角・偏角の繰り返し測量が主流であった火山地磁気効果の観測は、近年では、多くの場合、その安定性と簡便さから、プロトン磁力計による全磁力の連続観測もしくは繰り返し測量によって行われている。火山地磁気効果の観測では、日変化や磁気嵐等の外部起源磁場変動を除去するために、参照点との差をとることが行われる。多くの場合、参照点との単純差をとることによって、日変化等の影響は数 10 分の 1 に抑えられるものの、差をとる 2 地点の偏角・伏角が異なっていると、完全にこれを除去することはできない (Osgood, 1970)。そこで、参照点の 3 成分磁場を用いて化成（いわゆる 3 成分補正）を施すと、さらに外部起源磁気場の影響を小さくできることが知られている（田中・他, 1978; Davis et al., 1979）。

偏角・伏角の違いによる見かけの全磁力変化は、永年変化のような長周期成分に対しても表れるはずであるが、この効果が実際にどの程度になり得るかについては、これまでさほど検討されていないように思われる。そこで、本稿では、火山地域で想定される磁気異常に対して、一様な永年変動が印加された場合にどのような見かけの全磁力変化が生じるかについて考察した。

2. 見かけの全磁力変化と 3 成分補正

まず、論点を明確にするために、本稿で問題とする見かけの全磁力変化が生じる原理について述

べる. ある地点の磁場3成分を (X_0, Y_0, Z_0) とする. ここに, 微小な外部起源磁場変動 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ が重畳したときの全磁力は次のように書くことができる.

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{(X_0 + \Delta X)^2 + (Y_0 + \Delta Y)^2 + (Z_0 + \Delta Z)^2} \quad (1)$$

ここで, Taylor 展開の2次以上の項を無視すると,

$$F \approx F_0 + \frac{X_0}{F_0} \Delta X + \frac{Y_0}{F_0} \Delta Y + \frac{Z_0}{F_0} \Delta Z \quad (2)$$

と近似される. ここで, $F_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}$ である. この地点の偏角と伏角をそれぞれ D_0, I_0 とすると,

$$F = F_0 + (\cos I_0 \cos D_0) \Delta X + (\cos I_0 \sin D_0) \Delta Y + \sin I_0 \Delta Z \quad (3)$$

である. ここで, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ の係数をそれぞれ a, b, c とおくと, この係数は観測点の偏角と伏角にのみ依存する. 今, 観測点 P および参照点 R に重畳する外部起源磁場変動が等しいとすると, この2地点間の全磁力差は次のように表されることになる.

$$\begin{aligned} F_P - F_R &= (a_P - a_R) \Delta X + (b_P - b_R) \Delta Y + (c_P - c_R) \Delta Z + (F_{P0} - F_{R0}) \\ &\equiv A \Delta X + B \Delta Y + C \Delta Z + D \end{aligned} \quad (4)$$

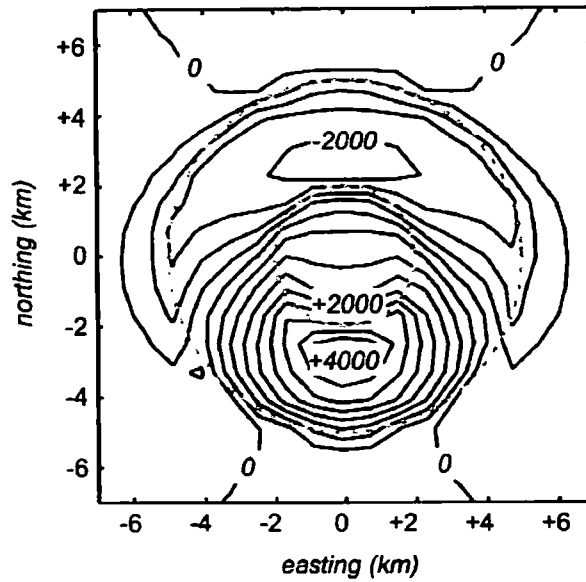
ここで, 添字の P は観測点, R は参照点, 0 は変動前の磁場を表す. (4) の第2式中の D は, 外部磁場変動が重畳する前の全磁力差である. 2地点の偏角と伏角が等しければ, A, B, C はすべて0となるが, 一般にはこれらは0でない値をとるため, 外部磁場変動 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ によって, 全磁力差に見かけ上の変化が生じることになる. ここまでの議論は, 田中・他 (1978) に述べられていることと基本的に同じである.

いわゆる3成分補正は, 参照点の $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ を用いて, (4) 式の係数 A, B, C を決定するものである. ところで, 今 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ は外部起源磁場変動と考えたが, これを地球深部起源あるいは地殻活動に伴うリージョナルな永年変動に置き換えても同じことが起こるはずである. この効果は, 磁気異常の強い火山地域では顕著に, しかもあるパターンを伴って表れるはずである. 以下では, 火山地域におけるこうした見かけの全磁力変化がどれほどの量に達し得るかについて, 簡単なモデル計算をもとに考察する.

3. 火山による磁気異常のモデル化

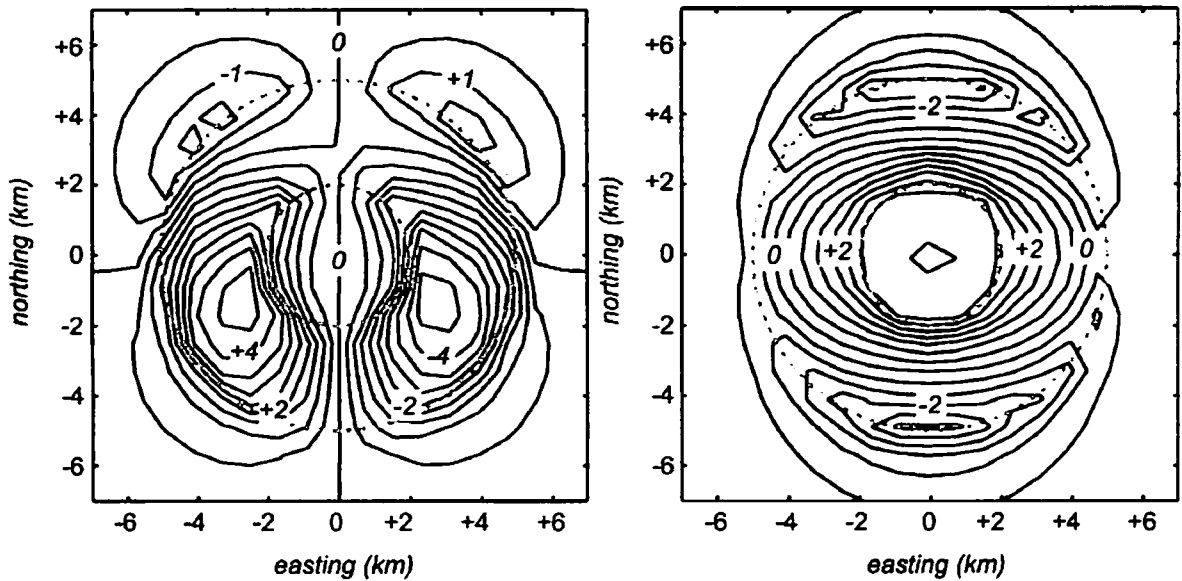
ここでは, 火山体を, 一様に帯磁した円錐台として近似する. 底面半径 5 km, 上面半径 2 km, 高さ 2 km の円錐台が, 伏角 45° , 偏角 0° で一様に 10 A/m の帯磁を有しているとする. 地表面から 0.3 km における全磁力異常は, 第1図の如くである. これは, 北半球中緯度の第四紀火山に典型的にみられる双極子型の磁気異常パターンであり, 比較的強い磁化を反映して -2000 ~ +4000 nT の全磁力異常を示している.

同様の円錐台による偏角異常と伏角異常を第2図に示す. 偏角異常は4象限型を示し, 伏角異常は山頂部で深く, 南北麓で浅くなる傾向を示す. いずれの異常も角度にして数度に及んでいる. こうした磁気異常の特徴は従来からよく知られるところであり, 基本的には山体の中心に単一の磁気双極子を置いた場合の磁気異常に類似のパターンである.



第 1 図：一様帯磁した円錐台による全磁力異常。コンターの単位は nT。
点線円は円錐台の下面と上面を示す。

Fig. 1: Total field anomaly due to a truncated circular cone. Uniform magnetization of 10 A/m is assumed with declination and inclination of 0 and 45 degree, respectively. Dashed circles indicate the bottom and top of the circular cone. Clearance between topography and measuring surface is 0.3 km. Contour values are in nT.



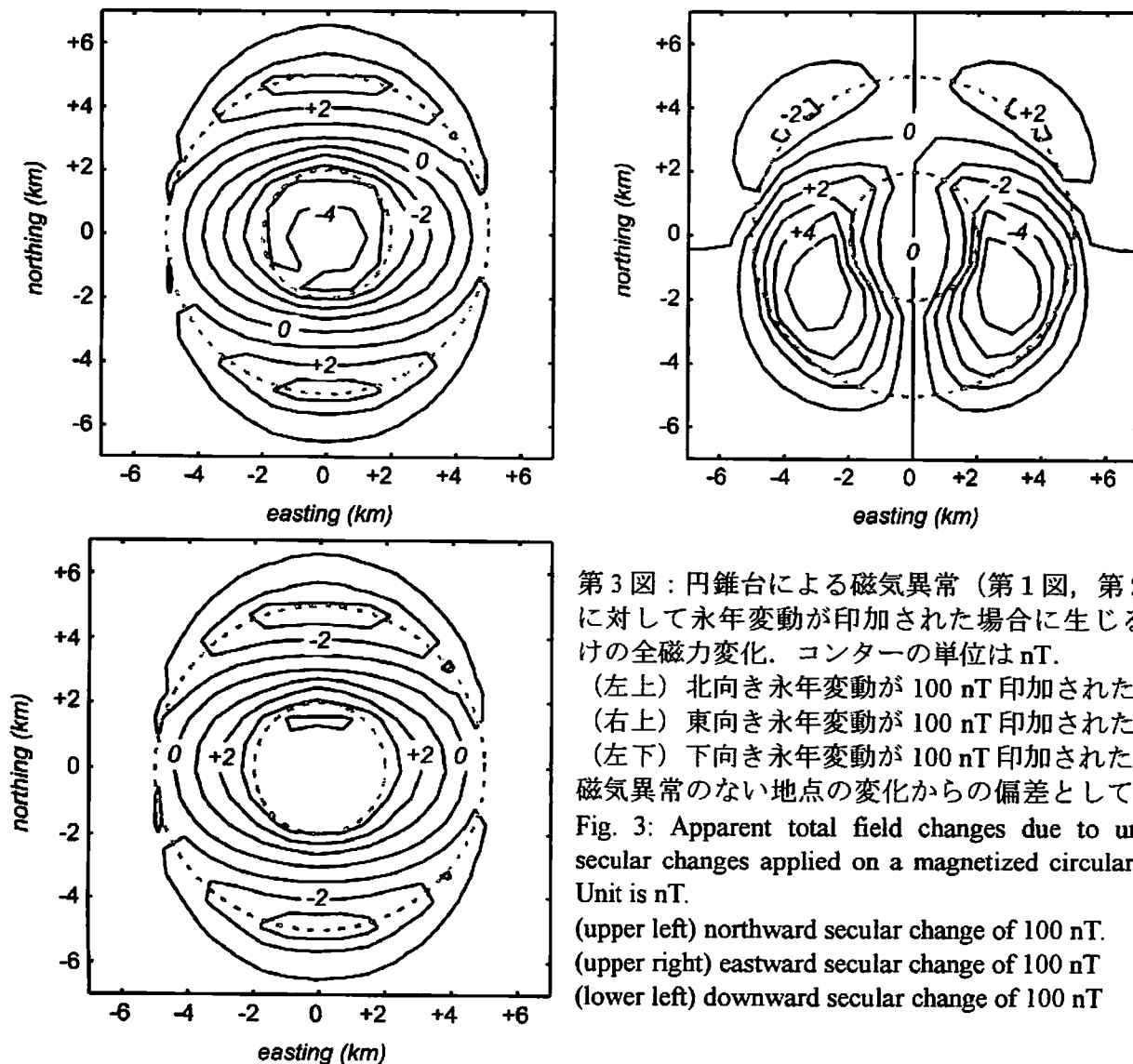
第 2 図：一様帯磁した円錐台による偏角異常（左）と伏角異常（右）。コンターの単位は°。

Fig. 2: Declination (left) and inclination (right) anomalies due to the same circular cone as Fig. 1. Contour values are in degree.

4. 永年変動と見かけの全磁力変化

偏角・伏角の異なる2地点に、等しい磁場変化が重畳した場合に見かけの全磁力異常が生じることは先に述べた。では、具体例として、前節で計算された磁気異常に対して、空間的に一様な永年変動が印加された場合にどのようなことが起こるかを考察する。3成分の寄与を個別に調べるために、北向き磁場、東向き磁場、鉛直下向き磁場がそれぞれ 100 nT 印加された場合に生じる見かけの全磁力変化のパターンを第3図に示す。

北向き磁場と下向き磁場は、見かけの全磁力変化に対してほぼ同じパターンを与えるが、寄与のセンスは逆になる。その変化パターンはもともとの伏角異常のそれと類似である。一方、東向き磁場は、もともとの偏角異常のパターンに類似した全磁力変化をもたらす。ここで計算したケースでは、見かけの全磁力変化はいずれも数 nT に及んでいる。現実には、これら3種（本質的には2種）の変化パターンが複合した形で見かけの全磁力変化が表れることになるのだが、これは永年変動（もしくは広域地殻活動に伴うリージョナルな磁場変化）がどのような成分をもっているかによって決まる。



第3図：円錐台による磁気異常（第1図，第2図）に対して永年変動が印加された場合に生じる見かけの全磁力変化。コンターの単位は nT。

（左上）北向き永年変動が 100 nT 印加された場合。
（右上）東向き永年変動が 100 nT 印加された場合。
（左下）下向き永年変動が 100 nT 印加された場合。
磁気異常のない地点の変化からの偏差として表現。

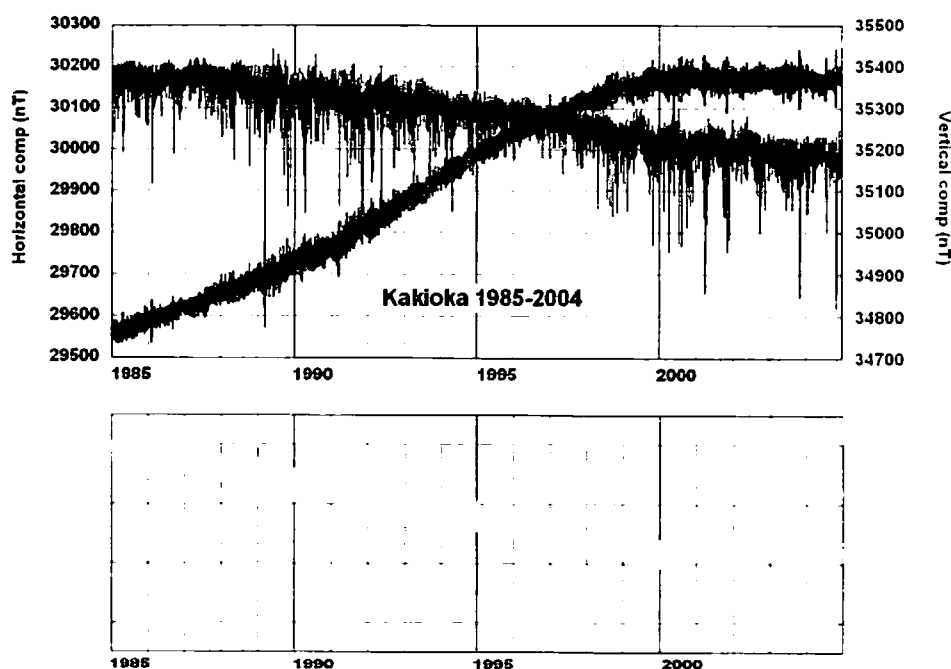
Fig. 3: Apparent total field changes due to uniform secular changes applied on a magnetized circular cone. Unit is nT.

(upper left) northward secular change of 100 nT.

(upper right) eastward secular change of 100 nT

(lower left) downward secular change of 100 nT

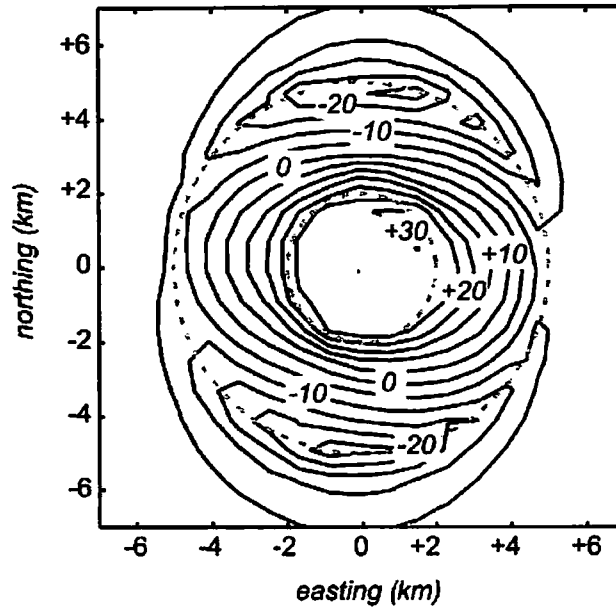
そこで、次のステップとして、ある程度現実的な永年変動についてこの効果を検討してみることにする。柿岡における 1985 年から 2004 年までの地磁気 3 成分の変化を第 4 図に示した。1990 年代の永年変動の大きさは、水平成分、偏角、鉛直成分でそれぞれおよそ -15 nT/yr , -0.025 deg/yr , $+45 \text{ nT/yr}$ であり、数年から 10 年という時間スケールでは、先の試算で仮定した 100 nT という値が現実的なものであることがわかる。ここでは、1990 年から 1999 年までの永年変動として、 X, Y, Z 成分にそれぞれ、 $-250, -100, +450 \text{ nT}$ という値を用いて、見かけの全磁力変化パターンを計算した（第 5 図）。この場合の全磁力変化は、水平成分と鉛直成分の寄与が大きいことを反映して、おおむね伏角異常に類似したパターンを示している。変化の振幅は、 $-20 \sim +30 \text{ nT}$ に及んでいる。この量は、火山活動に起因する熱磁気効果に匹敵するものである。しかも、こうした見かけの全磁力変化は、山体スケールの系統的なパターンを示すために、一見すると火山地磁気効果そのものであるかのように見えることに注意すべきである。補足するならば、こうした見かけの全磁力変化は、もっと局所的な偏角・伏角異常に対しても同様に起こるはずであるので、特に地上における連続観測にもとづく長期的な全磁力変化を議論する際には慎重に考慮すべきである。



第 4 図：柿岡地磁気観測所における 1985 年から 20 年間の地磁気変化。
(上) 水平成分と鉛直成分。(下) 偏角。

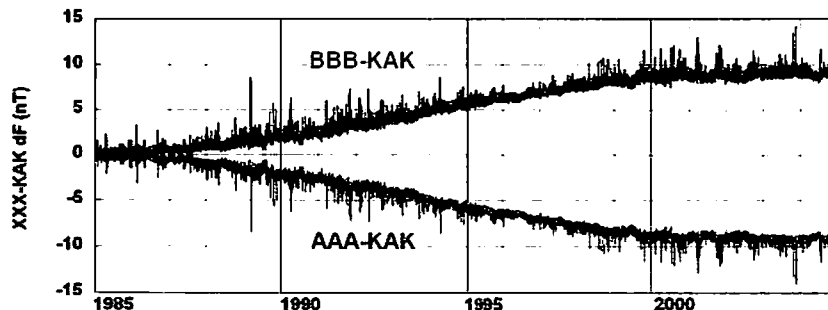
Fig. 4: Geomagnetic changes at Kakioka station from 1985 through 2004.
Horizontal and vertical components (upper panel). Declination (lower panel).

次に、ここまでに述べたことと本質的に同じではあるが、見かけの全磁力変化を時系列の表現で見てみる。今、柿岡と偏角が等しく伏角が 1° 浅い観測点を AAA、偏角が等しく伏角が 1° 深い観測点を BBB とする。第 4 図に示した実際の永年変動を用いて、これら 2 地点における見かけの全磁力変化（柿岡との単純差として表現）を求めると、第 6 図の如くである。20 年間に約 10 nT の見かけの全磁力変化が生じることがわかる。



第5図:円錐台による磁気異常に対して、北向き-250 nT, 東向き-100 nT, 下向き+450 nTの永年変動が印加された場合に生じる見かけの全磁力変化. コンターの単位は nT.

Fig. 5: Apparent total field change due to a uniform secular change applied on a magnetized circular cone. Unit is nT.



第6図: 仮想的な観測点と柿岡 (KAK) との全磁力単純差時系列プロット (1985-2004). AAA は KAK と偏角が等しく伏角が1度浅い地点, BBB は KAK と偏角が等しく伏角が1度深い地点を想定し、第4図に示した3成分磁場変動を印加して、見かけの全磁力変化を求めた。

Fig. 6: Simple differential total field between two virtual stations and Kakioka (KAK) from 1985 through 2004. The station AAA has smaller geomagnetic inclination by 1 degree compared to KAK. The station BBB does greater inclination by 1 degree to KAK.

第6図のグラフに見られる無数のスパイクは磁気嵐に起因するものであり、これもまた同様の原理で生じる見かけの変化である。ここまでの議論から考えると、参照点である柿岡とそれぞれの観測点における偏角・伏角の差異を正しく評価して3成分補正を施せば、こうした見かけの変動は、周期によらずすべて除去されるはずである。ところが、現実には地殻や海洋の電磁誘導の効果があるため、磁気嵐のような短周期成分の応答には、ここまでの静的な議論が適用できない。逆にいえ

ば、電磁誘導の影響を受けた短周期のスパイクを除去するように係数を決めて3成分補正を施すと、今度は長周期の変化をゆがめてしまうことになる。周期依存性を含めた補正法（例えば Davis, 1981）を用いればこのような問題は解消できるように思われるが、注意しなければならないのは、長周期成分には、我々が検出しようとしている地殻活動に伴う磁場変化そのものが含まれている可能性があるという点である。すなわち、本質的な問題は、ローカル・スケールの長周期火山地磁気効果とリージョナル・スケールの永年変動をどのように区別できるのかということに帰着される。

5. 地域標準磁場への期待

上記の問題を解決する方法として、以下の2つが考えられる。

ひとつは、火山地磁気効果が想定される地域に全磁力の多点群列観測を展開することである（直流成分までを確保した3成分の長期連続観測を火山地域で展開することは、今のところ現実的ではない）。この場合、群列観測によって、火山地磁気効果に加えて第5図に相当するような見かけの全磁力変化が重畳したパターンが観測されることになる。このうち、見かけの全磁力変化については、航空磁気測量や地上磁気サーベイによって山体の平均的磁化が推定されていれば、最寄りの地磁気観測所の3成分を用いて大まかなモデル化が可能である。こうした群列観測そのものは、1980年代の伊豆半島東部地域をはじめとして、現在多くの火山で行われているものであるが、著者の知る限り、実際に永年変動による見かけの全磁力変化の補正が試みられた事例はない。

もうひとつの方法は、たとえ少数点であっても、火山地磁気効果の期待される領域で3成分の絶対観測を行うことである。これは、時代の流れに逆行するようであるが、成分磁場には見かけの変化は生じないため、確実な方法でもある。連続観測が理想であるが、今問題になるのは数年以上の時間スケールの話であるので、注意深く行えば繰り返しの偏角・伏角測量によっても十分可能であろう。これにより、3成分標準場からのズレが、純粋な火山地磁気効果として抽出される。

地殻活動起源のローカルな磁場変化を検出する立場から言うと、現在作成されつつある地域標準磁場（通称 JGRF）に期待するのは、こうしたローカルな異常（見かけではなく本物の異常）が含まれない標準的・背景的な磁場変動の場が与えられることで、理想的には3成分の標準場が適切な空間分解能で与えられることが望ましい。地上で十分密な磁場観測網が展開されればこの目的は達成されるであろうが、限られた観測点データから標準磁場を作成しようとする場合には、極めてローカルな異常を排除するために、標準場モデルに航空磁気測量のデータを取り込むか、地上のデータから得られるモデルと航空磁気のデータを比較してなんらかの方法でチェックを行うことが有効ではないかと考える。

6. 結論

偏角・伏角の違いによる見かけの全磁力変化は、日変化や磁気嵐のような比較的短周期の成分だけでなく、永年変化に対しても表れる。この効果が火山地域の磁気異常について実際にどの程度になり得るかについて、簡単なモデルによって検討した。山体周辺で生じる数度の偏角・伏角異常の場では、100 nT の永年変動に対して数 nT の見かけの全磁力変化が生じることが分かった。これは典型的な火山地磁気効果による変化量に匹敵するため、数年スケール以上の長期変動については、こうした見かけの効果に留意すべきである。この効果を正しく見積もるためには、ローカル・スケ

ールの長周期火山地磁気効果とリージョナル・スケールの永年変動を区別する必要がある。このためのひとつの方法は、異常変化の場に全磁力の群列観測を展開することである。相補的な方法としては、少数点であっても3成分の絶対観測を行うことが有効であろう。

謝 辞

円錐台による磁気異常の計算には、笹井洋一博士の FORTRAN 計算コードを使用させて頂いた。本稿で使用した柿岡地磁気観測所の地磁気3成分データは、京都大学地磁気世界資料解析センターのデータサービスを利用して入手したものである。

引用文献

- Davis, P. M., Stacey, 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.*, 19, 331-336.
- Davis, P. M., Jackson, D. D., Searls, C. A. and McPherron, R. L. (1981) Detection of tectonomagnetic events using multichannel predictive filtering, *J. Geophys. Res.*, 86, 1731-1737.
- Osgood, C. (1970) Design and use of a gradiometer-connected rubidium magnetometer. *Rev. Phys. Appl.*, 5, 113-118.
- 田中良和・増田秀晴・河村まこと・大地 洸・加藤諄司・馬場広成・吉野登志男 (1978) 阿蘇火山地域での全磁力測量 (1977). 阿蘇火山の集中総合観測 (第1回 1977) 報告, 31-39.