

ピエゾ磁気効果への地形の影響について—茂木モデルの場合—

山崎 明・坂井孝行 (気象研究所)

On the topographic effects for piezomagnetic field
— A case study of the Mogi model —

Akira Yamazaki and Takayuki Sakai

Meteorological Research Institute

Abstract

The Mogi model is a fundamental crustal deformation model in volcanology. Although Sasai (1991) derived an analytic solution for the piezomagnetic field due to the Mogi model, it is necessary to evaluate topographic effects since volcanic topographies surround volcanic areas. The topographical effects have not been well studied, probably because a procedure of the 3-D numerical computing is somewhat complicated. In this study, we evaluate the topographical effects of a conical volcano, which is a typical volcanic topography, on the piezomagnetic field.

A finite-element method is applied to compute a stress field in the crust. Next, the stress field is converted to piezo-magnetization applying the linear piezomagnetic law. To obtain the piezomagnetic effects at the surface, numerical volume integration is then performed over the whole crust.

As a result, we found that the ratio of topographical effects on the piezomagnetic field at the volcano surface reaches almost 50%. We also found a piezomagnetic anomaly field at the foot area of the volcano caused by stress concentration.

1. はじめに

1980年代以降、地下の温度上昇に伴う熱消磁による磁場変化が国内のいくつかの火山で観測され、地磁気が火山活動の監視に有効であることが実証されている (例えば Yukutake, 1990; Tanaka, 1993)。一方熱消磁と並んで火山性の磁場変化をもたらす主要な原因のひとつであると考えられているピエゾ磁気効果については、検証例がまだ十分ではないように思われる。しかし、数時間以内の短時間の火山現象ではむしろピエゾ磁気効果の方が卓越すると考えられ、今後の研究に期待される。

火山性の磁場変化に地形がどのくらい影響を及ぼすのかについて考察してみる。熱消磁の場合、観測点に生じる磁場は観測点と熱消磁域との相対位置によって決まる。余程地下浅所でもないかぎり熱消磁域の拡がり地形の影響を受けることは考えにくいので、観測点の磁場変化に地形自体の影響はあまりないと考えてよい (Fig. 1(a))。厳密には地形によって地表に磁気異常が形成されているので全磁力変化には地形の影響が多少発生するが、この効果は成分磁場へ

の影響はなく見かけ上のものである。

他方、Fig. 1(b)に示すように地下に圧力源が存在しそれによって地殻全体の磁化が変化して観測点に生じる磁場、いわゆるピエゾ磁気効果の場合はどうであろうか。ピエゾ磁化の大きさは歪変化に比例するので、圧力ソースの近くでは大きなピエゾ磁化が生じる。観測点付近ではピエゾ磁化は小さいものの距離が近いので、それなりに影響があるはずである。また、浅部地殻に生じる歪分布は地表形状の影響を受けるので、ピエゾ磁気効果もある程度地形の影響を受けている可能性がある。

ピエゾ磁気効果のモデル計算を行う場合、通常地形は平坦とし地形の影響は小さいものと暗黙のうちに仮定されている。しかしこの仮定の妥当性については十分な検証はなされていない。地形の影響が小さければ無視して構わないであろうし、無視出来ないほど大きければそれなりに考慮する必要がでてくる。いずれにせよ地形の影響についてよく調べ評価しておくことは必要である。

本研究ではこのテーマについての最初のケーススタディーとして茂木モデル(Mogi, 1958)の場合を取り扱い、地表に円錐形の火山地形が存在する場合について、その影響の大きさの特徴を調べた。なお、本報告では概要のみを簡単に述べたが、計算方法などについては山崎・坂井(2006)に詳述してあるのでそちらを参照されたい(<http://www.mri-jma.go.jp>からdownloadできます)。

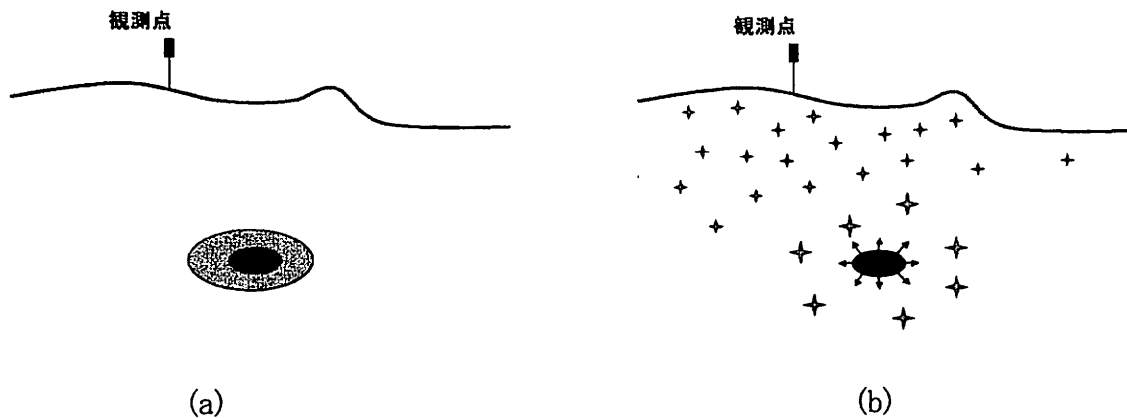


Fig. 1 Schematic view for thermal demagnetization and piezomagnetic model

(a) Thermal demagnetization model. The black zone indicates a thermal source, and the gray zone means thermal demagnetized area.

(b) Piezomagnetic model. The black zone indicates a pressure source, and the gray stars mean the piezo-magnetization in the crust.

2. 計算モデル

計算モデルとして、半無限弾性体中の深さ 10km に半径 1km の圧力源が存在する場合(モデル A)と、モデル A の圧力源の真上に高さ 2km 半径 5km の円錐形の火山地形が存在する場合(モデル B)を選んだ(Fig. 2)。地殻内の応力テンソルは有限要素法を用いて求めた。有限要素解の計

算ノード数はモデルA, Bとも約10万点とした。有限要素解析の範囲を半径150km、深さ150kmまでと大きくしたところ、かなり高い精度での計算が達成されていることが確認できた(坂井・他, 2007)。

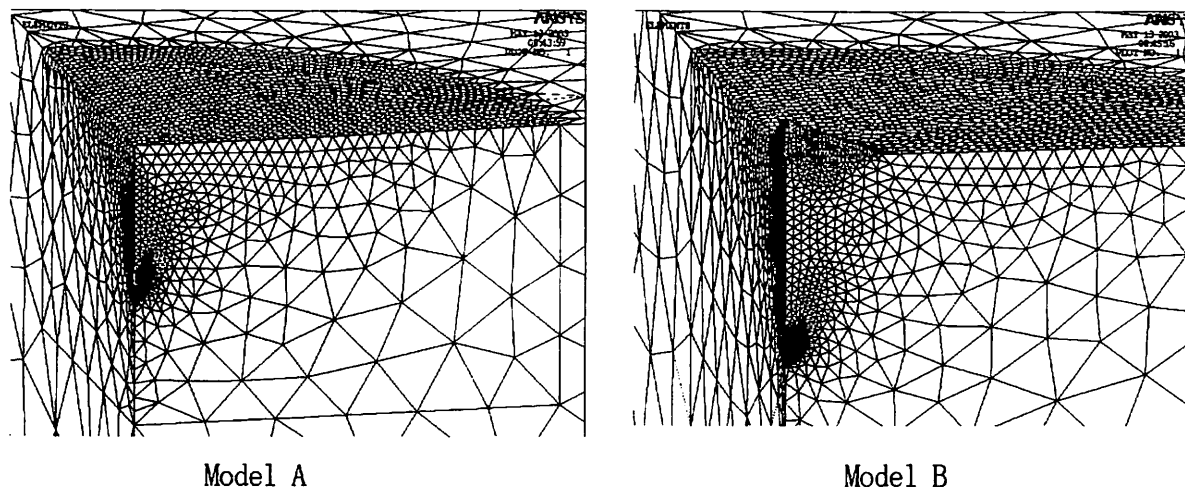


Fig. 2 Finite-element model for solving a stress field due to the pressure source in the crust. Table 1 lists the common parameters for models A and B.

- Model A: Model of a pressure source 10km deep with a radius of 1,000m in the semi-infinite elastic medium
- Model B: Model of an existing conical volcanic topography of which the radius is 5,000m and the height is 2,000m. The conical topography exists right above the pressure source as in model A.

Table 1.

Parameters used for computing the piezomagnetic field of models A and B.

Depth of the center of the pressure source sphere	: D	10km
Radius of the pressure source sphere	: a	1km
Internal hydrostatic pressure of the sphere	: ΔP	+101.325 MPa
Rigidity of the crust (Lame's constant)	: μ, λ	40 GPa
Depth of the Curie point isotherm	: H	20km
Stress sensitivity	: β	$2.0 \times 10^{-9}/\text{Pa}$
Geomagnetic declination	: D_0	0°
Geomagnetic inclination	: I_0	49°
Declination of the rock magnetization of the crust	: D_n	0°
Inclination of the rock magnetization of the crust	: I_n	49°
Intensity of the magnetization of the crust	: J	5A/m

次に求めた応力テンソルから線形ピエゾ磁気効果(Sasai, 1980)を適用しピエゾ磁化分布を求め、これを地殻全体で積分して磁場観測点でのピエゾ磁気効果を求めた。計算に用いたパラメータをTable 1に示す。モデルAについてはピエゾ磁気効果の解析解(Sasai, 1991)が与えられているので、計算精度のチェックのため数値解も別途求め解析解と比較した(Fig. 3)。

Fig. 3の実線はモデルAのピエゾ磁気効果の解析解である。黒丸は応力テンソルを解析解で求めピエゾ磁化を数値積分した解で、白丸は応力テンソルを有限要素法で求め数値積分した解である。解析解と数値解はよく一致し、有限要素法を用いて数値計算する手法によってもかなり高い精度でピエゾ磁気効果の計算が達成されていることが確認できた。白丸で示した数値解が数パーセント程度解析解とずれるが、これは有限要素解のノードの密度が十分でないことに起因していると思われる、さらに高密度で有限要素解が得られれば、解析解との差はさらに小さくなるものと推察される。

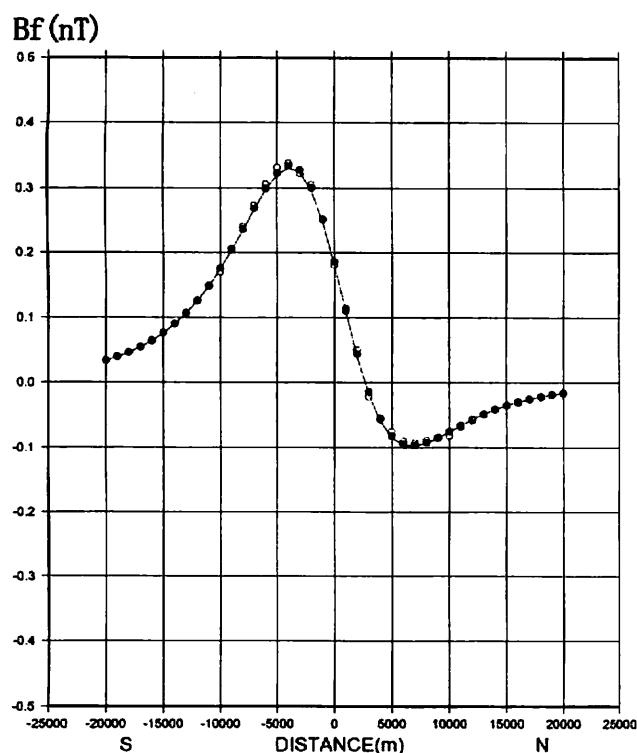


Fig. 3 Comparison of analytic and numerical solutions for f component on model A. The abscissa is oriented in a north-south direction, and the calculation range is -20km to $+20\text{km}$. The height of calculated points is 10m from ground level. A solid line denotes the analytic solution (Sasai, 1991 TYPE II). Black and white circles denote numerical solutions. Here, the stress tensor of black circles are derived from an analytic solution of the Mogi model, and that of the white circles are derived from the finite-element solution.

3. 計算結果

Fig. 4に黒の太線で示したのは、モデルBについて火山の中央を南北方向に縦断する -20km ~ $+20\text{km}$ の範囲で計算したピエゾ磁気効果である。計算高度は地表面からそれぞれ 10m 、 100m 、 500m としており、値は全磁力変化である。 100m 間隔で値を計算しているため、急変化している場所では一部破線になっている。

地表からの高さ 10m では値の小刻みな揺らぎが目立ち滑らかでないが、高さ 100m では目立たなくなり、高さ 500m では十分滑らかになっている。この小刻みな揺らぎは数値計算をするにあたって火山を一辺 10m の立方体に分割したためのエッジ効果の影響と思われる、地表から離れるにつれて消えてゆく様子が分かる。

Fig. 4 には、比較のためにモデルAから求められたピエゾ磁気効果の解析解も合わせて示している。灰色の太い実線で示したのはモデルBの地形が存在すると想定した場合の地表からの高さで計算した、いわば標高補正を施した結果であり、灰色の細い実線で示したのはモデルAの平面地表からの高さで計算した結果である。

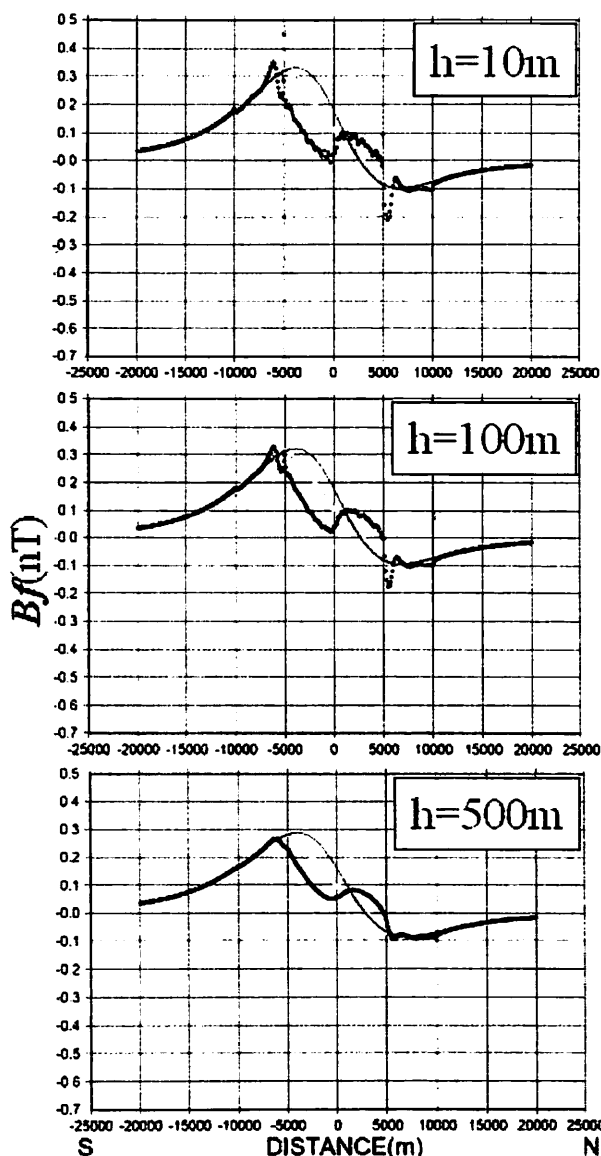


Fig. 4 f component of the calculated piezomagnetic field on the line that travels through the center of the model B volcano in the north-south direction is shown by thick black line. The heights of the calculating points from the ground surface are 10m, 100m, and 500m from top to bottom. The horizontal interval of the points is 100m. The thick gray line and thin gray line denote the analytic solution of the piezomagnetic field of model A. Here, the height of the thick gray line calculating point is the same as the black line. For the thin gray line, the height is 10m, 100m, and 500m from the flat surface of model A.

解析解と比べて際立って異なる値を示しているのは、火山中心から 5km 離れた地点にみられる異常値である。この異常値は高さ 10m で顕著であり、高さ 100m ではいくぶん小さくなり、高さ 500m ではかなり小さくなっていることから、火山のへりに存在する幅 1km 程度の局所的な磁気異常であることがわかる。Fig. 5 には地表高 100m でのピエゾ磁気効果による全磁力変化の分布を示した。図から火山のへりでピエゾ磁気効果が大きく乱れている様子がわかり、火山のへりに沿ってピエゾ磁気の大きな磁気異常が発生していることが確認できる。

また Fig. 4 をみると、モデルAにくらべ火山の山頂から南側斜面にかけて全磁力変化が半分

程度に小さくなっている傾向が認められる。全体的な全磁力変化は山頂を中心として南麓部に大きいピークがあり、北斜面に小さなピークがあるように見える。この傾向は観測高度を高くしても大きさはあまり変わらないことから火山全体にまたがる広範な傾向であることがわかる。これは先に述べた火山体のへりにみられる局所的磁気異常とは異なり、火山体全体が作る地形効果であろうと考えられる。

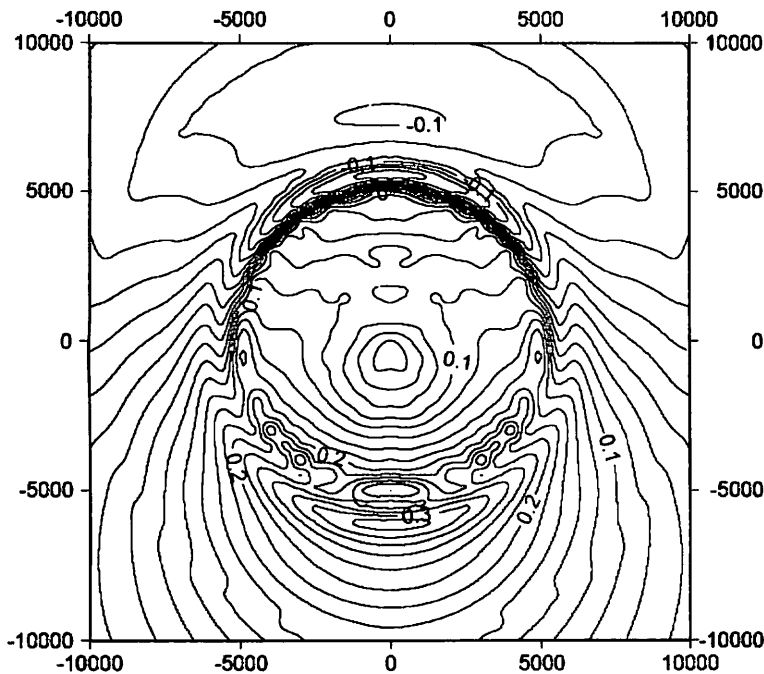


Fig. 5 f component distribution of the piezomagnetic field on model B. The height of computational surface is 100m from the ground surface. The range of the figure is 20km around, and the summit of the conical volcano of model B is located at the center of the figure. The contour interval is 0.02nT. The grid interval of calculation to make those figures is 500m.

4. まとめ

モデルBで示した円錐形の火山地形が存在する場合のピエゾ磁気効果について、地形の影響を調べた。その結果、円錐形火山のへりの部分に顕著な異常分布が生じることがわかった。これは地形が急変化する火山体のへりに応力の集中帯が存在し、ピエゾ磁化が強まることによるものと考えられる。また、火山の表面付近でのピエゾ磁気効果は解析解から大きくずれ、解析解との違いは大きいところで変動量の50%程度に達し、無視できる大きさではないことがわかった。

今回行ったモデル計算は幾何学的な円錐形の火山地形の場合であり、あまり現実的な例ではないかもしれない。また、現実の火山では縁辺部では裾野が緩やかに広がる構造をしているので、円錐形火山のへりの部分に見られた異常は実際にはそれほど大きくない可能性がある。とはいえ、今回の計算結果から地形の影響は意外と大きくあまり無視できないことが示唆されたことは重要である。また、地形が急変するような観測点では異常な変化を起こしている可能性があるため、解釈にあたり注意が必要となるであろうことが示唆される。

参考文献

- Mogi, K., 1958: Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 36, 99-134.
- 坂井孝行・山本哲也・福井敬一・藤原健治・高木朗充・中禮正明, 2007: 有限要素法による火山性地殻変動の計算精度の確立ー茂木-山川モデルの再現ー, 気象研究所研究報告, 58, 1-15.
- Sasai, Y., 1980: Application of the elasticity theory of dislocation to tectonomagnetic modeling, Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, 55, 387-447.
- Sasai, Y., 1991: Piezomagnetic field associated with the Mogi model revisited: Analytic solution for finite spherical source, J. Geomag. Geoelectr., 43, 21-64.
- Tanaka, Y., 1993: Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989-1990 activity of Aso Volcano, J. Volcanol. Geotherm. Res., 56, 319-338.
- 山崎 明・坂井孝行, 2006: 地形の影響を考慮した茂木モデルによるピエゾ磁気効果, 気象研究所研究報告, 57, 21-36.
- Yukutake, T., 1990: An overview of the eruptions of Oshima Volcano, Izu, 1986-1987 from the geomagnetic and geoelectric standpoints, J. Geomag. Geoelectr., 42, 141-150.