



Title	ドーム状隆起に伴う磁場変化 一有珠山2000 年噴火時の全磁力変化再検討一
Author(s)	橋本, 武志; HASHIMOTO, Takeshi; 茂木, 透 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 70, 123-135
Issue Date	2007-03-15
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.70.123">https://doi.org/10.14943/gbhu.70.123</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/20428">https://hdl.handle.net/2115/20428</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	70-14_P123-135.pdf



ドーム状隆起に伴う磁場変化  
—有珠山 2000 年噴火時の全磁力変化再検討—

橋本 武志・茂木 透・西田 泰典  
高田 真秀・鈴木 敦生・前川 徳光

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

佐藤 秀幸

産業技術総合研究所地質情報研究部門

(2007 年 1 月 12 日受理)

**Geomagnetic changes due to doming**  
— **The 2000 eruption of Usu volcano** —

Takeshi HASHIMOTO, Tohru MOGI, Yasunori NISHIDA  
Masamitsu TAKADA, Atsuo SUZUKI, Tokumitsu MAEKAWA

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

and

Hideyuki SATOH

Institute of Geology and Geoinformation

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

(Received January 12, 2007)

We investigated geomagnetic changes due to dome-like deformation by using a truncated circular cone model. In the case of the normal magnetization, magnetic total field decreases in the northern side of the uplift center, while it increases in the southern side. We found that the original topography prior to the mound formation does not affect the pattern of this magnetic change. We then apply this calculation to the mound-forming activity in the 2000 eruption of Usu Volcano to infer the magnetic change on the foot of the mound. The expected range of magnetic total field change at the station U01 is -80 to -800 nT which is in the opposite sense to the observed actual change (+70 nT). We examined some alternative mechanisms to compensate this decrease due to the deformation. None of them, however, can be a promising candidate. The most reasonable explanation so far for this contradiction is the reversed magnetization of the Tertiary lava that may comprise the mound.

## I. はじめに

大きな地殻変動を伴う噴火による地磁気変化を議論するには、熱磁気効果やピエゾ磁気効果の前に、まず地形変化そのものによってどのような磁気異常が生ずるかを把握しておく必要がある。このような場では、地表面に設置された観測点は、隆起に伴って時間変化する磁気異常の中を自ら移動することになる。

大きな地殻変動を伴う場での磁場観測としては、松代群発地震、有珠山の 1977 年噴火、雲仙普賢岳の平成噴火、2000 年の三宅島噴火があげられる。松代群発地震では、皆神山で約 1 m の隆起が生じたとされ、これに関連する全磁力変化がプロトン磁力計の群列観測によって捉えられている。Rikitake et al. (1967) は、この異常変化をピエゾ磁気によるものでないかと指摘した。有珠山 1977 年噴火では、森・他 (1978) の全磁力観測により、山頂噴火に伴う磁場変化が報告されている。彼らはこの変化について、数 10 m の地殻変動に伴って磁性体（山体の一部）が移動したことによるものと解釈した。雲仙普賢岳の例では、平成新山溶岩ドームの出現に伴って大きな地殻変動が起こっている。Tanaka (1995) は、仮に地殻変動による観測点の移動があっても、それは周辺の局所的磁気異常と同じ動きをするため影響は小さいとして、熱磁気効果が支配的であると主張した。三宅島の例では、Sasai et al. (2002) によって、山頂カルデラの陥没を円盤領域で近似したモデルによる磁場変化が議論された。ただし、この例では、観測点が地殻変動（陥没域）の範囲外にあり、実際に取り扱われているのは、地殻変動というよりも磁化欠損による磁場変化と称した方が正確ではある。

一方、理論的なアプローチとしては、Sasai (1991) が、茂木モデルによる地殻変動磁場について詳しく考察している。彼は、茂木モデルによる磁場変動を 4 つの過程（フリーエア効果、地形効果、ソース膨張効果、ピエゾ磁気効果）に分離し、常にピエゾ磁気効果が卓越することを見いだした。彼の得た結果は、弾性論の範囲内である限りあらゆる茂木モデルで成立する。しかし、噴火時に起こる大きな地殻変動はしばしば弾性限界を超えている。こうした状況に対しても地殻変動の力源位置を推定するために近似的に茂木モデルが用いられることがあるが、これに Sasai (1991) の理論をそのまま適用することはできない。

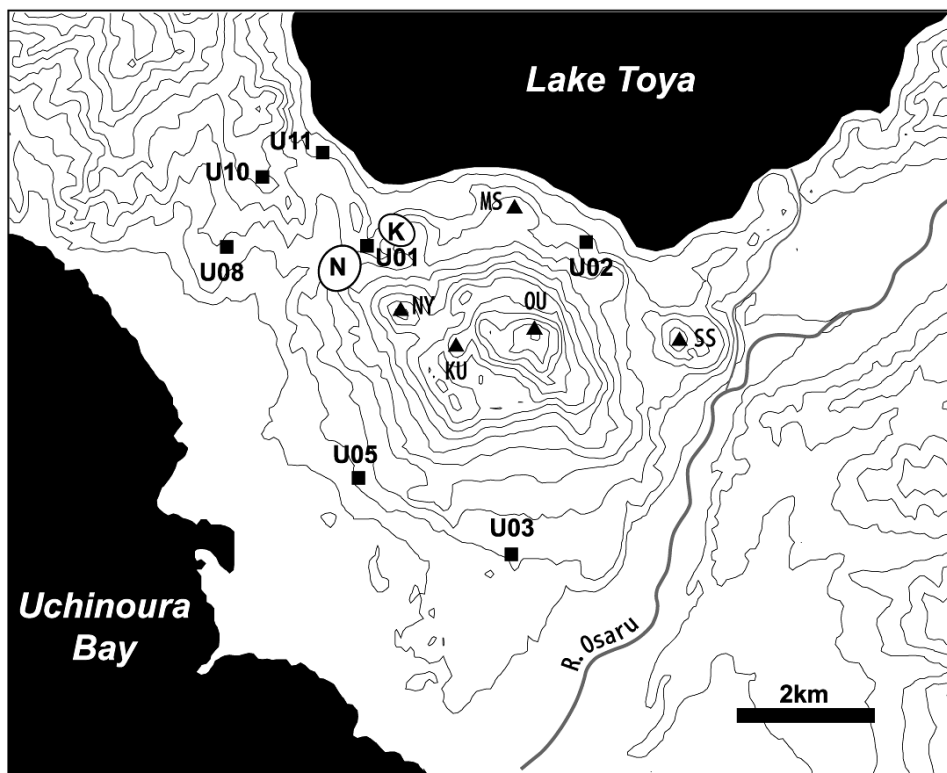
本稿では、有珠山の 2000 年噴火を対象として、ドーム状隆起による磁気異常とその発達について論じる。2000 年噴火の隆起活動では明らかに弾性限界を超えて破壊を伴った変位が起こっており、もしこの変位に茂木モデルのピエゾ磁気効果をそのまま適用すればとてつもなく大きな磁場変化が生じることになってしまう。このような状況では、隆起による地形効果をピエゾ磁気効果とは独立に取り扱う必要がある。

## II. 有珠山 2000 年噴火時の磁場変化

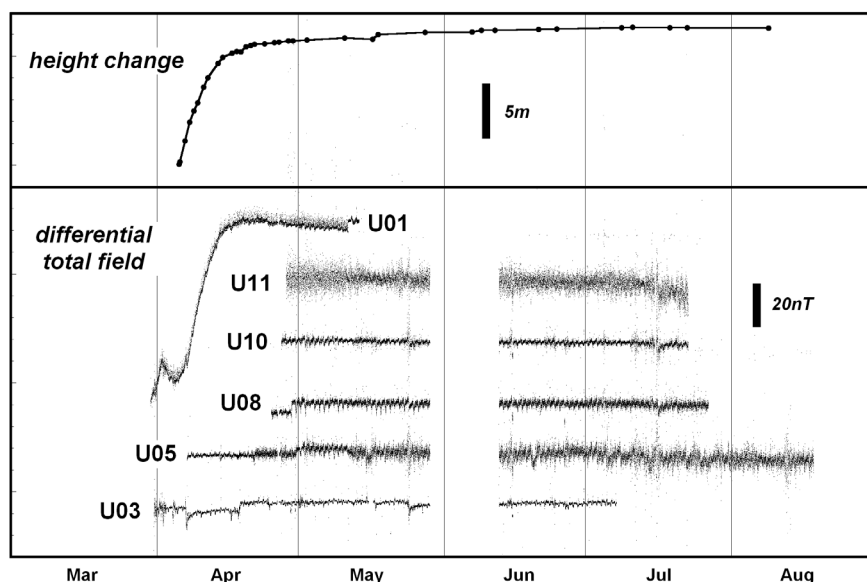
有珠山の 2000 年噴火では、山体の西麓から北西麓に新たな火口群（西山火口群および金毘羅

山火口群)が生じるとともに、地下浅所へのマグマ貫入に伴って最大約 70 m の地盤隆起、いわゆる新山の形成が起こった(三浦・新井田, 2002)。この噴火に関連して、北海道大学地震火山研究観測センターは、関係研究機関の協力の下で地磁気全磁力の連続観測を展開した。主要な観測点の配置を Fig. 1 に示す。このうち、U01, 02, 03 は噴火直前の前駆的地震活動の最中に設置されたもので、それ以外の磁気点は、噴火開始後に順次展開されたものである。

各地点における全磁力変化を Fig. 2 に示す。最初に設置された 3 点のうち、U01 観測点は、結果的に西山火口群と金毘羅山火口群の間、NB 火口(宇井・他, 2002)の約 400 m 北東(隆起中心からは約 450 m 北東)に位置することになった。この地点では、噴火の直前から最初期(2000 年 3 月末から 4 月中旬)にかけて約 70 nT の明瞭な全磁力増加を記録した。その後、全磁力は緩やかな減少に転じ、磁力計が停止する 5 月 10 日までに -5 nT の変化を得た。4 月中旬以降の磁



**Fig. 1.** Locations of geomagnetic stations and major landmarks around Usu volcano. Solid squares (U01, 02, 03, 05, 08, 10, 11) indicate the magnetometers. Circles with the letters **N** and **K** indicate active centers in the 2000 eruption. The former represents Nishi-yama crater group where numerous phreatic explosions took place to form a new mound with maximum uplift of about 70 m. The latter does Kompira-yama crater group which is characterized also by a number of phreatic explosions. Triangles with **MS**, **SS**, **NY**, **KU**, **OU** indicate major peaks of formed in the previous activities, Meiji-Shinzan, Showa-Shinzan, Nishiyama, Ko-Uso, and Oh-Uso, respectively.



**Fig. 2.** Differential magnetic total fields (U01~U11: See Fig. 1 for the location) during the 2000 eruption of Usu. Each magnetic trace is the simple difference from U02, the reference station. The uppermost trace indicates the height change at the point P (200m south of U01) due to dome-forming activity (Hitoshi Mori, private communication; unpublished data).

場減少傾向は、活動域中心から約 1.5 km 北西～北に離れた U10 および U11 観測点でもかろうじて捉えられていたが、それよりも遠い観測点では有意な磁場変化は観測されていない。なお、ここでは、外部起源磁場の除去のために、新山の隆起中心から東に約 1.8 km 離れた参照点 U02 との単純差を用いている。

佐藤・他 (2002) は、最初期の全磁力増加が西山火山群の活動に伴う地下の熱消磁によるものであり、4 月中旬にはそれに引き続く全磁力減少に対応して既に冷却が始まっていたのではないかとの予察的解釈を示している。しかし、彼らも指摘しているように、噴火に伴う地殻変動が激しく、U01 地点においても数 10 m の隆起が起こったことは間違いないので、地形変形そのものがもたらす磁場変化の議論は避けて通れない。実際、観測された磁場変化は、地盤の上下変動 (森濟, 私信: 未公表データ) と極めて相関が高く (Fig. 2), そのすべてを熱磁気効果に帰するのは早計であろう。

本稿では、ドーム状の隆起を、一様に帯磁した円錐台の成長で表現し、それによる磁気異常の時間発展について考察する。それをもとに、有珠山 2000 年噴火の新山形成時に捉えられた磁場変化を再検討した。

### Ⅲ. 地形効果磁気異常の計算

ここでは、新山形成による地形効果を以下の仮定と手順に基づいて評価する。

- (1) ドーム状の新山地形を円錐台で近似する。
- (2) 円錐台は現在の地球磁場の方向に一様磁化を有する。
- (3) 円錐台のつくる磁気異常を笹井 (1991) の方法で計算する。
- (4) 円錐台の高さを変化させ、磁気異常の時間発展を調べる。その際、円錐台の成長は上下変動のみによるものと考え、隆起した体積に見合う量の磁化物体が深部から付加されるものとする。

まず、この問題を考える前に、観測点が地球の主磁場の中を移動することによる「フリーエア効果」について検討しておく。地磁気を、地球中心に置かれた磁気双極子で表現すると、地球中心からの距離  $r$ 、余緯度  $\theta$  の地点における全磁力は次のように表される。

$$F(r, \theta) = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \sqrt{3 \cos^2 \theta + 1} \quad (1)$$

ここで、 $M$  は地球の磁気双極子モーメントである。これより、地表面のある地点 ( $r=R_e$ : 地球半径) における地磁気のフリーエア勾配は次のように求められる。

$$\frac{\partial F}{\partial r} = -\frac{3}{R_e} F_0 \quad (2)$$

ただし、 $F_0$  はその地点における全磁力値である。北海道南西部における全磁力として  $F_0 = 50,000$  nT を取るとフリーエア勾配は約  $-0.02$  nT/m である。従って、仮に  $100$  m の隆起があったとしても、それによる全磁力変化は約  $-2$  nT であり、今考えている変化量 ( $\sim 70$  nT) を議論する上では無視して差し支えない。

さて次に、本題であるところの、新山形成による磁気異常について考える。新山を突き上げたマグマそのものは、高温のため磁化をもたないはずであるが、ここでは、まず地形効果だけを評価するために、新山の磁化は一様であると仮定する。磁化の値には不確定な要素があるが、ひとまず有珠外輪山溶岩と同程度の  $10$  A/m を仮定して計算してみる。有珠外輪山溶岩は有珠山の本体を構成する玄武岩であり、この地域で想定される磁化としては最大と考えられる。有珠外輪山溶岩の磁化は、Nishida and Miyajima (1984) による地上磁気測量からの推定値を参考にした。円錐台の大きさは、2000 年新山のそれと同程度になるように、底面半径を  $500$  m、上面半径を  $50$  m とし、円錐台の高さを変えて磁気異常を計算する。隆起域の大きさは、土木研究所がレーザープロファイラを用いて行った標高計測にも基づく隆起量推定 (予知連有珠部会資料) を参考にしている。磁気異常計算に用いたパラメータを Table.1 にまとめる。磁気異常の計算には、Rikitake (1951) の円錐台公式を改良した笹井 (1991) の方法を用いている。この方法は、回転楕円体や円錐台のような軸対称物体の磁気異常を、円盤の磁気異常 (リプシッツ・ハンケル積分で表現される) の軸方向積分として計算するものである。Talwani 法などのように地形をブロックの集合体として計算する方法と比べて、磁化物体の表面付近でも滑らかな分布が計算できると

**Table 1.** Parameters used in the calculations of the magnetic anomaly due to a truncated circular cone. <sup>1)</sup> Geographical Survey Institute (2002 a,b)

bottom radius of the cone	500 m
top radius of the cone	50 m
height of the cone	variable
geomagnetic inclination	57° <sup>1)</sup>
geomagnetic declination	-9° <sup>1)</sup> (eastward positive)
magnetization of the cone	10 A/m
survey height	10 m above topography

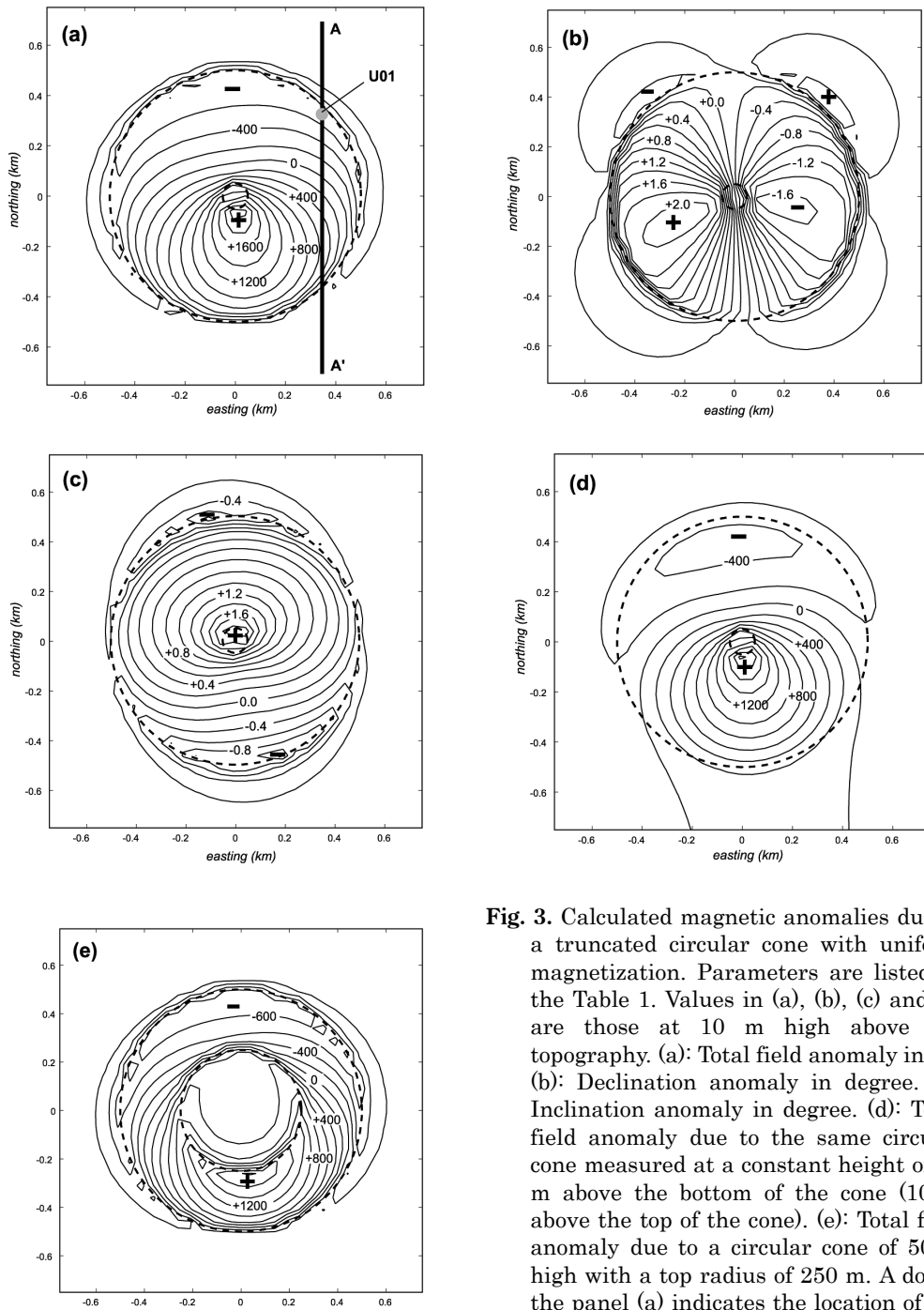
いう特長がある。すでに Rikitake (1951) において行われたことではあるが、本稿でも今一度、円錐台地形によってどのような磁気異常が生ずるのかを整理しておく。

磁気異常の全体像を把握するために、高さ 75 m の円錐台による計算例を Fig. 3 (a)-(d) に示した。当然のことながら、磁気異常の傾向は単一の磁気双極子によるものに類似である。まず、全磁力異常についてみると、円錐台の頂上より南側で正、北側で負の異常を示す。Fig. 3 (a)-(c)は、地上高 10 m で地形に沿った全磁力分布を示したものである。高度 85 m 一定面（円錐台の上面からみて 10 m 高い平面）における全磁力分布(d)と較べると、地形に沿った分布(a)は、負の異常が北麓側に移動し、かつ強くなっていることがわかる。次に、偏角(b)は北西・南東の象限で西寄り、北東・南西の象限で東寄りの 4 象限型異常を示す。ただし、伏角が 57° と深いため南側の異常対が相対的に卓越する。伏角異常(c)については、円錐台の頂上部を中心として広い範囲で伏角が深くなる一方、円錐台の南北縁では浅くなるという分布が見られる。円錐台の上面の効果を見るために、高さ 50 m 上面半径 250 m の場合の全磁力異常を(e)に示す。円錐台上部の平坦領域が広くなると、極大点が南側に押しやられるが、節点の位置はさほど変わらない。また北側の極小点の位置にはほとんど影響がないことがわかる。

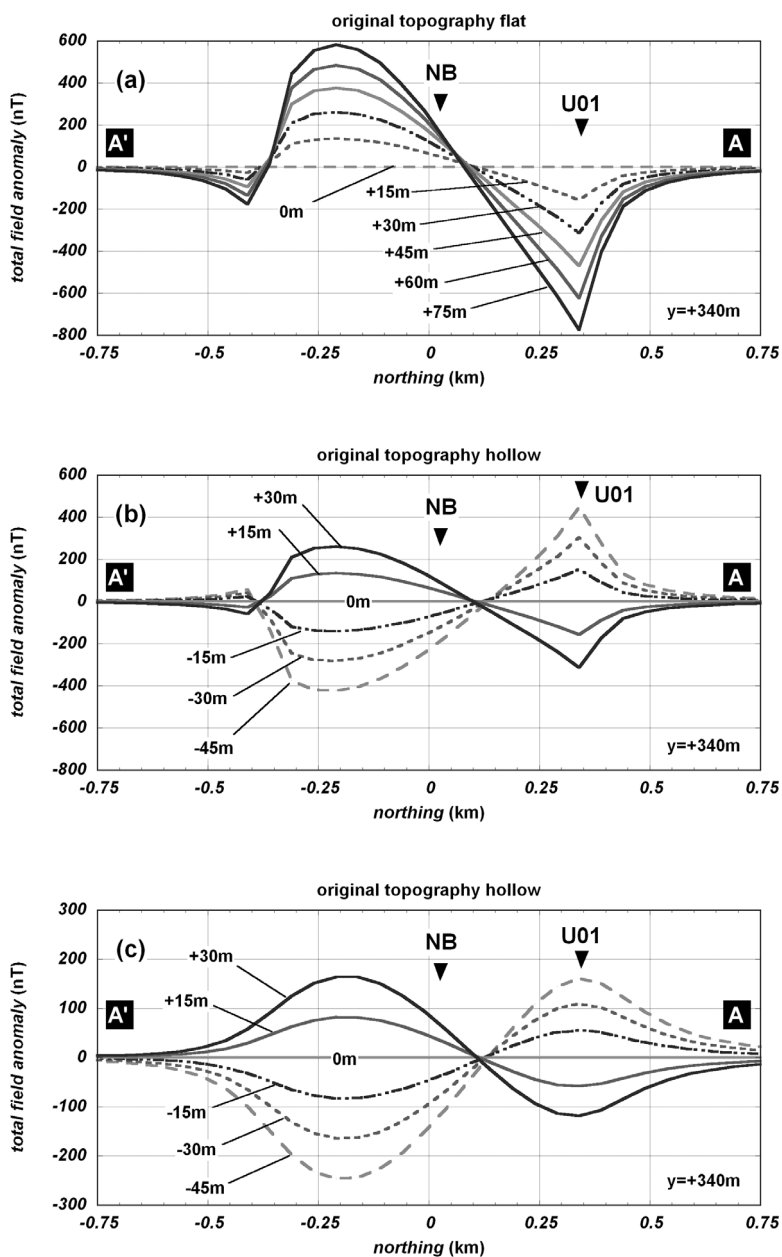
#### IV. 地形効果磁気異常の成長

次に、隆起に伴う磁気異常の時間発展について考える。実際に起こった地殻の隆起が最大 70 m 程度であったことは先に述べたが、その隆起の大半は噴火開始から 1 ヶ月の間に集中的に起こっている。顕著な隆起は、西山火口群地域を中心として北東-南西方向には±500 m 程度、北西-南東方向には±250 m 程度の広がりをもって生じている（土木研究所によるレーザープロファイラ測量を参考にした）。この地域は、噴火前には、洞爺カルデラ壁から内之浦湾に向かう南西下りの斜面の中程にあって、東西方向には西山と三豊丘陵、南北方向には洞爺カルデラ壁と西山南西麓丘陵部に挟まれた凹地形を成していたが、隆起の結果として谷が浅くなり、中央部はやや凸な地形へと変化した。

まずはじめに、元の地形が平面で、そこから円錐台が高さを増して成長する場合について考え



**Fig. 3.** Calculated magnetic anomalies due to a truncated circular cone with uniform magnetization. Parameters are listed in the Table 1. Values in (a), (b), (c) and (e) are those at 10 m high above the topography. (a): Total field anomaly in nT. (b): Declination anomaly in degree. (c): Inclination anomaly in degree. (d): Total field anomaly due to the same circular cone measured at a constant height of 85 m above the bottom of the cone (10 m above the top of the cone). (e): Total field anomaly due to a circular cone of 50 m high with a top radius of 250 m. A dot in the panel (a) indicates the location of the magnetometer U01. The center of the cone is adjusted to the point of maximum uplift.



**Fig. 4.** Profiles of magnetic total field anomaly along the A-A' line (340 m east of the cone center) in Fig. 3a. Projected positions of the NB crater and a magnetic site U01 are shown in the panels with inverted triangles. Traces in each panel correspond to different cone heights. Calculation parameters are listed in Table 1. (a): Profiles at 10 m above the topography (cone height: 0, +15, +30, +45, +60, +75m). (b): Profiles at 10 m above the topography (cone height: -45, -30, -15, 0, +15, +30m). (c): Profiles at a constant height of 100 m above the cone foot (cone height: -45, -30, -15, 0, +15, +30m).

てみる。この場合には、Fig. 3a の双極子型磁気異常が円錐台の成長とともに相似性を保って発達することになる。従って、中心より北側では全磁力が単調減少、南側では単調増加する（-0.4 km 付近にはもう一つの小さな極小点がある）。この様子を、円錐台の中心から 340 m 東の南北測線（Fig. 3a の A-A'）に沿った全磁力分布として Fig. 4a に示す。偶然であるが、この計算では観測点 U01 は極小点に位置しており、円錐台の高さ 75 m の場合の磁気異常はおよそ -800 nT に達する。

次に、噴火前の地形が凹状である場合について考察する。凹地形による磁気異常は、地磁気と逆向きの一様磁化をもつ倒立円錐台のつくる磁場として計算することができる。凹地形に沿った全磁力分布は、通常円錐台による分布（Fig. 4a）で磁場の符号を逆にした形にほぼ等しい（Fig. 4b）。円錐台の高さによらず磁場が変化しない節点の位置は先の場合と同じく中心から北に約 100 m の位置に現れる。凹地形が埋め立てられて円錐台が高くなるにつれ、磁気異常の符号は逆になるが、水平位置を固定して観測すると、磁場変化の様式は Fig. 4a の場合と同じで、U01 地点ではやはり約 800 nT の減少となる。これらのことから、ドーム状隆起による磁場変化は、噴火前の地形が平坦であるか凹地形であるかに拘わらず、隆起中心の北側で減少、南側で増加の傾向を示すことがわかる。

## V. 有珠山 2000 年噴火への適用

ここまで得た結果を有珠山 2000 年噴火の新山隆起に適用することを考え、媒介変数のとりうる範囲を検討しておく。まず、円錐台を構成する岩石の磁化は磁気異常に比例するので重要である。Nishida and Miyajima (1984) は、地上の磁気異常測定に基づき有珠山の磁気的構造は大まかに 3 つの要素からなるとし、第三紀の基盤岩、有珠外輪山溶岩、および山頂カルデラを埋積する溶岩類の磁化として、それぞれ 3 A/m, 10 A/m, および 3 A/m と推定している。そこで、これを参考にして新山の磁化を 3 ~ 10 A/m とすると、U01 における最大変化量は -240 ~ -800 nT の範囲をとる。次に、実際の隆起域は完全な円錐台ではなく、底面が楕円に近い形をしているので、変化の極大極小の位置は理想の場合からずれている可能性がある。そこで、隆起中心と U01 の相対位置に ±100 m のずれを許すと、U01 の変化量はピーク値のおよそ 1/3 倍から 1 倍の範囲になる。これらのことから、U01 で期待される最大変化量は、-80 ~ -800 nT の範囲にあると考えられる。

このように、媒介変数の誤差範囲を考慮しても、期待される変化の符号は負であり、実際に U01 で観測されたものとはまったく逆である。これはどのように理解すればよいのだろうか。以下では、2 つの立場からこの問題を議論する。第 1 の立場では、隆起に伴う地形効果が磁場を減少させようとするものの、それを相殺する別の機構が重畳した結果磁場が増加したと考える。第 2 の立場では、そもそも新山の磁化が逆帯磁であり、地形効果そのものが磁場増加をもたらしたと考える。

## VI. 議 論

### 1. 地形効果以外のメカニズム

観測された磁場変化が、単純なドーム状隆起によるものではないとすると、そのほかに考えられる原因として、以下の3つの可能性があげられる。

- (1) 地表断層など局所的な地形変化
- (2) ピエゾ磁気効果
- (3) 熱磁気効果

ただし、噴火初期の磁場データは事実上 U01 しかないため、モデルの正当性を確定的に論ずることは不可能である。

まず、局所的な地形変化であるが、新山の隆起に伴って、周辺には多数の正断層が形成されたことが知られている(三浦・新井田, 2002)。U01 の付近にもいくつかの地表断層が確認されている。従って、新山は全体としては西山火口群の中央部を中心として隆起したものの、局所的にはブロックに分かれて相対変位を生じていると考えられる。このような効果がいかにどの磁場変化を生ずるかを議論するのは困難であるが、U01 付近の磁気勾配が 10 nT/m 程度(実測による)と比較的小さいことや、磁場変化が上下変動と高い相関を保ったまま滑らかに推移していることを考えると、局所の変位の影響はそれほど大きくないのではないかと推測される。

次に、ピエゾ磁気効果について考察する。仮にピエゾ磁気効果があるとすれば、新山隆起をもたらしたマグマの貫入による地下の増圧を源として考えるべきであろう。Sasai (1991) によれば、増圧等方球状力源によるピエゾ磁気効果は、力源の北側で全磁力減少、南側で増加の双極子型になる。これもまた観測された変化とは逆向きである。力源の深さを 500 m、半径を 300 m とした場合、期待されるピエゾ磁場は、仮に過剰圧を 100 bar としても最大+8 nT、U01 の位置では-1 nT 程度であり、観測された変化量よりもはるかに小さい(応力感度  $1 \times 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$ 、初期磁化 10 A/m を仮定)。勿論、先に述べたように、新山の隆起量をすべて弾性変形によるものとするならば、これとは桁違いに大きなピエゾ磁場が生ずることになるが、それは現実的ではない。ただし、新山隆起による応力変化が、観測点近傍の小断層に蓄積されることによる「二次的」ピエゾ磁気効果の可能性までを否定することは難しい。

次に、マグマの貫入に伴う熱磁気効果を検討する。新山中央部の地下にマグマが貫入したことは疑いがない。マグマそのものは高温のため磁化をもたないので、貫入によって地下のしかるべき深さに無磁化領域が形成されたと考えられる。また、貫入したマグマの熱が拡散することで周辺の岩石が消磁される効果もあるだろう。熱消磁による効果は源の北側で全磁力増加、南側で減少をもたらすので、定性的には U01 の観測データを説明できそうに思われる。隆起がマグマの貫入によるものとするならば、隆起の時間スケールは無磁化領域が定置する時間スケールとほぼ同じと考えてよいので、Fig. 2 のように磁場変化が地殻変動と酷似していることは必ずしも不自然ではない。ただし、先に検討したように新山隆起の地形変化そのものの効果が-80~-800 nT 程度あるとするならば、これを相殺した上で 70 nT の磁場増加(すなわち、全体として 150~870 nT

の増加)を生じる必要がある。

噴火終息後の 2003 年以降に展開された繰り返し磁気測量によれば、西山火口域の地下では冷却帯磁を想起させるパターンで全磁力が変化している。単一の磁気双極子近似では、NB 火口の南西 100 m、海拔下 200 m 付近（西山火口域中央部の地表面下約 400 m 深）にこの帯磁源が推定される（北海道大学地震火山研究観測センター, 2005）。噴火初期の消磁がこれと同じ場所で起こっていたと仮定すると、U01 地点での全磁力増加の最大見積もりである +870 nT は、初期磁化 10 A/m、半径 400 m の球状領域が無磁化になることに相当する。最も小さな見積もりである +150 nT の変化では、初期磁化 3 A/m、半径 350 m の球状領域が無磁化になることに相当する。しかし、いずれの場合もこのように大きな領域が貫入マグマに置き換わったと考えるのは無理があるように思われる。もっと小規模なマグマの貫入が引き金となって周囲の岩石が熱消磁されたとしても、わずか 2 週間程度の短期間でこれだけの領域に熱拡散が起こったと考えるのはやや不自然である。

## 2. 逆帯磁の可能性

そこで、もう一つの立場として、新山を構成する岩石が逆帯磁である可能性について考察してみる。地質図（曾谷・他, 1981）によれば、新山が形成された場所は、東側の有珠外輪山溶岩と西側の新第三紀火山岩類の境界域にあっている。新山の表層は正帯磁の有珠外輪山溶岩が覆っているとしても、その下位には新第三紀の逆帯磁層が存在している可能性がある。大熊・他（2002）の空中磁気測量によれば、新山の北西側に分布するノットコ溶岩は逆帯磁で強磁性であると推定されており、これが南東側に延長しているとすれば、新山は全体として逆帯磁であっても不思議ではない。この場合、想定される磁気異常は Fig.3 および Fig.4 とは逆符号となり、磁化強度の範囲を考えれば U01 地点の全磁力増加（+70 nT）は無理なく説明できそうである。このように考えることで、地形効果とは逆向きの非現実的な熱消磁を想定する必要もなくなる。注意すべきなのは、逆帯磁の場合には熱消磁の符号も逆転することである。この場合、新山直下で熱消磁が起こると U01 では全磁力が減少する。このような目で再度 U01 の変化を見ると、4 月下旬に U01 の磁場が減少に転じたことは、マグマ貫入による熱消磁を捉えていたとも考えられる。この解釈が正しいとすれば、噴火終息後の現在、西山火口群地域中央部で観測されている帯磁様の磁場変化は、実は熱拡散による消磁（貫入マグマの冷却過程）を見ているということになる。勿論、現時点ではこれは仮説に過ぎないので、今後、地上あるいは空中磁気測量とそれによる構造解析によって検証されなければならない。なお、本稿では議論しなかったが、4 月初旬に観測されている磁場の一時的な反転は、西山火口群地域で地殻変動が顕著になる 4 月 3 日より前に起こっており、マグマの移動を直接反映している可能性がある。

蛇足であるが、どの機構を考察するにしても、1 地点の観測データしかないことがモデルの拘束を非常に困難にしている。かといって、噴火中に危険地帯に立ち入って多数の観測点を設置することは現実問題として不可能であったし、今後の噴火イベントにおいても同様に困難であろう。このような場合には、ヘリコプターや模型飛行機などによる空中磁気測量の利用価値が高い。例

えば, Fig. 4c は 100 m の一定高度 (円錐台の基底面を 0 m とした場合) で期待される全磁力分布の変化を示している. 空中からでも十分大きな磁場変化を捉えることができることがわかる. 空間的に密なデータを得ることで, 地形変化の効果と熱磁気効果を見分けることも可能であろう.

## VII. 結 論

- (1) ドーム状隆起による磁場変化を円錐台モデルで検討した. 円錐台の帯磁が現在の地球磁場と同じ方向と向きをもっている場合には, 隆起中心の北側で全磁力低下, 南側では増加が起る. この変化様式は隆起前の地形が凹状であっても同様である.
- (2) この結果をもとに, 有珠山 2000 年噴火の新山隆起に伴う磁場変化を推定した. U01 地点における全磁力の最大変化量は,  $-80 \sim -800$  nT 程度と推定され, 実際に観測された変化 (70 nT の増加) とは符号が逆である.
- (3) いくつかの可能性を検討した結果, 隆起域が逆帯磁であると考えれば観測事実をもっとも素直に解釈できることがわかった. 今後, 磁気構造解析等によってこの仮説を検証する必要がある.

**謝辞** 有珠山 2000 年噴火初期の磁場データの取得は, 谷元健剛氏, 佐波瑞恵博士, 山谷祐介氏 (北海道大学)・宇津木充博士 (京都大学) らの協力の下で行われた. また, 田中良和博士 (京都大学), 上嶋誠博士 (東京大学) には観測装置の支援を頂いた. 笹井洋一博士 (東京都) には, 軸対称物体の磁気異常計算コードを使用させて頂いた. 森濟博士 (北海道大学) には, 2000 年噴火初期の地殻変動に関する未公表データの使用を許可して頂いた. これらの方々に深く感謝申し上げる. なお, 噴火前後の地形変化を検討するにあたり, 噴火前については国土地理院発行の 50 m メッシュ標高データを, 噴火後については同じく国土地理院の 10 m メッシュ火山標高データ (試作版) を使用した.

## 文 献

- 北海道大学地震火山研究観測センター, 2005. 西山火口近傍の地磁気変化 (第5報), 第103回噴火予知連絡会資料.
- 国土地理院, 2002a. 2000.0年値磁気偏角一覧図, 国土地理院技術資料, B1-34.
- 国土地理院, 2002b. 磁気図2000.0年値, 国土地理院技術資料, B1-35.
- 三浦大助・新井田清信, 2002. 有珠火山2000年噴火における岩脈貫入過程と潜在ドームの形成メカニズム, 火山, **47**, 119-130.
- 森 俊雄・大地 洸・長谷川一美・笹井洋一・沢田宗久・西田泰典, 1978. 有珠山における地磁気・地電流観測, 1978年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 173-191.
- Nishida, Y. and E. Miyajima, 1984, Subsurface structure of Usu volcano, Japan as revealed by detailed magnetic survey, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **22**, 271-285.

- 大熊茂雄・中塚 正・高倉伸一・森尻理恵, 2002. 有珠火山地域における空中電磁・磁気探査—有珠 2000 年噴火に関連して—, 火山, **47**, 533-546.
- Rikitake, T., 1951. The distribution of magnetic dip in Ooshima (Oo-sima) Island and its change that accompanied the eruption of Volcano Mihara, 1950, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **29**, 161-181.
- Rikitake, T., Y. Yamazaki, M. Sawada, Y. Sasai, T. Yoshino, S. Uzawa and T. Shimomura, 1967. Geomagnetic and geoelectric studies of the Matsushiro earthquake swarm (5), *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **45**, 395-416.
- Sasai, Y., 1991. Tectonomagnetic modeling on the basis of the linear piezomagnetic effect. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **66**, 585-722.
- 笹井洋一, 1991. 軸対称なポテンシャル問題を解くためのリプシッツ・ハンケル積分, 1991 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 110-121.
- Sasai, Y., M. Uyeshima, J. Zlotnicki, H. Utada, T. Kagiya, T. Hashimoto and Y. Takahashi, 2002. Magnetic and electric field observations during the 2000 activity of Miyake-jima volcano, Central Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **203**, 769-777.
- 佐藤秀幸・茂木 透・高田真秀・西田泰典・谷元健剛・佐波瑞恵・田中良和・橋本武志・宇津木充・笹井洋一, 2002. 2000 年有珠山噴火に伴う地磁気の変化について, 平成 12 年度科学研究費補助金(特別研究促進費)研究成果報告書, 『有珠山 2000 年噴火と火山防災に関する総合的観測研究』, 124-132.
- 曾谷龍典・勝井義雄・新井田清信・堺幾久子, 1981. 有珠火山地質図, 地質調査所.
- Tanaka, Y., 1995. Volcanomagnetic effects on the Unzen volcano (1990-1992). *J. Geomag. Geoelectr.*, **47**, 325-336.
- 宇井忠英・中川光弘・稲葉千秋・吉本充宏・総合観測班地質グループ, 2002. 有珠山 2000 年噴火の推移, 火山, **47**, 105-117.