

西宮市甲山の磁気構造

牧野雅彦*・大熊茂雄*・森尻理恵*・中塚 正*

(1997年1月30日受付, 1997年6月19日受理)

Magnetic Structure of Kabutoyama Volcano in Nishinomiya City, Southwest Japan

Masahiko MAKINO, Shigeo OKUMA, Rie MORIJIRI and Tadashi NAKATSUKA

Kabutoyama volcano is supposed to be a part of a volcanic conduit which intruded at Miocene age into Rokko granite in Nishinomiya city, southwest Japan. The structure of a volcanic conduit is very important to understand how the magma is transported from its source to the terrain surface. We made a geomagnetic survey on the ground surface at intervals of 2.5 m or 5 m along profiles. Strong magnetic anomalies were observed on a circle with a radius of 150 m centered at the summit, and this strong anomaly zone has a width of a few tens meters. These results suggest that the Kabutoyama conduit has a tube-shaped magnetic structure.

A 3-D model calculation reveals that thin shell of the conduit is magnetized strongly (10 A/m) in comparison with inner content (0.5 A/m). This conduit shell seems to have obtained the high magnetization through a rapid cooling in contact with outer granitic rocks.

1. はじめに

兵庫県西宮市にお碗を伏せたようにそびえ立っている甲山(標高309 m)は比高が約100~150 mであり、その基底部の半径が約300 mの円頂丘型の地形である。ただし、完全に軸対称な地形ではなく、北側にやや張り出した地形をしている。

甲山は斜方輝石安山岩でできており、その岩石学的性質は瀬戸内火山と共通の特徴を持っている(藤田・笠間, 1982)。円頂丘型の地形であるためトロイデ(鐘状火山)と誤認されていたが、周辺の大阪層群下部に甲山安山岩礫を多量に含むことから、火山の火道にあたる岩頸部が突出して浸食から残されたものと推定されている(藤田・笠間, 1982)。また、甲山周辺の地質は六甲花崗岩で、東の甲陽断層と西の芦屋断層に挟まれており、六甲山地の東縁に位置する。

甲山の地表付近の安山岩は風化が進んでいるために、火道の構造を解明するのに必要な地質学的調査はあまり行われてこなかった。したがって、甲山の内部構造については、実質的にほとんどわかっていない。この火道がどのような物理学的構造を持っているのかを知るために、1996年2月、11月と1997年4月の3回に分けて地

上磁気探査を実施した。その結果、山体を取り巻くように分布する円環状の強い磁気異常が観測された。本論文では、磁気探査の概要と結果、ならびに火道の三次元磁気構造モデルによる磁気異常の解釈・検討を行う。

マグマ溜まりと地表を直接につなぐパイプである火道の物理的基礎構造を知ることは、溶岩・噴出物に厚く覆われた火山の深部構造ならびに火山噴火の活動様式の理解にとって、貴重な情報を与えることと思われる。

2. 磁気探査の方法

甲山における地上磁気探査は、Fig. 1に示すように山頂三角点を基点とした方位の異なる7本の測線で、プロトン磁力計(EG & G Geometrics製, G-856)を用いて実施した。測線上では5 m(O-C, O-D, O-F, O-G測線)ないし2.5 m(O-A, O-B, O-E測線)の間隔で地磁気測定を行った。プロトン磁力計のセンサーを長さ2.5 mのアルミ製ボールの先端に取り付け、ボールを鉛直に立てて全磁力を測定した。測定位置の確認、周辺環境のチェック等を行った後に、測定番号・測定時刻・読み取り値を磁力計の本体内部メモリに保存した。また、Fig. 1の7本の測線以外に、「神呪寺」と「甲山青年の家」からの階段が整備された2本の登山道でも探査を行ったが、鉄製の手すりによる磁気ノイズが大きすぎるため調査結果からはずした。

甲山の山頂付近の地形はなだらかで平坦であるが、山

* 〒305 茨城県つくば市東1-1-3

工業技術院地質調査所

Geological Survey of Japan, Higashi 1-1-3, Tsukuba 305, Japan.

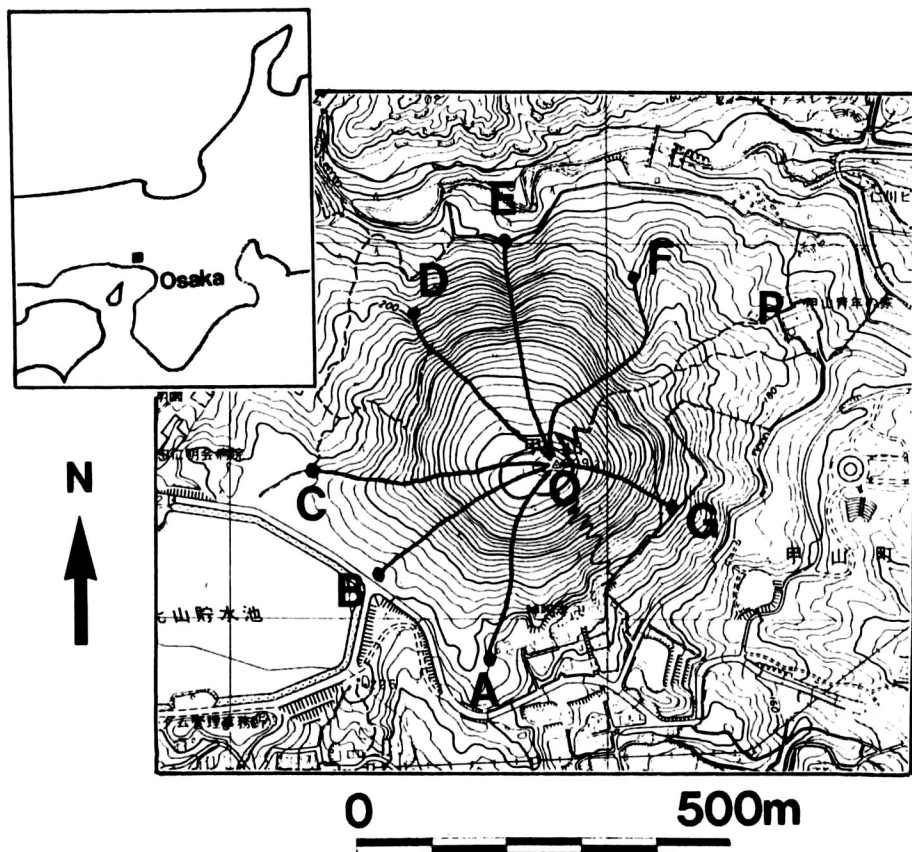


Fig. 1. Geomagnetic survey lines of Kabutoyama volcano. (based on 1:10,000 scale topographic map "Kabutoyama")

"O" means the triangulation point on the top of Kabutoyama. "P" indicates the base station observing the geomagnetic field.

腹斜面では傾斜が急峻であることに加えて、樹木等で見通しの悪い状況であった。このため、測線の位置決定が難しかった。測線は国土地理院発行の1:10,000の地形図「甲山」、ならびに空中写真(CKK-95-3 C7-46, 47)と磁気コンパスを併用しながら、100 mメジャーを用いてできるだけ直線状に引いたが、地形によってやむをえず多少曲折した。また、ディファレンシャルGPS(Fast Static Mode)を用いた位置決定を数カ所で試験的に実施したが、樹木等により受信環境が悪く、一つの位置での測定に20分以上の時間が必要であったため、地上磁気探査にGPSを利用することは難しかった。したがって、全般的に磁気探査における測定位置は $\pm 10\sim 20$ m程度の誤差を含むと考えられる。

甲山は市街地に近いため電車・工場等による人工磁気ノイズの影響を見るために、東山麓の「甲山青年の家」で定点観測を行い、Fig. 2に例示する地磁気時間変化を得ている。地磁気におけるスパイク状の短周期ノイズは

± 10 nT程度、Sqなどによる日変化のゆっくりとした長周期ノイズは、(6時間で) ± 20 nT程度であった(Fig. 2)。この両者を合わせた磁気ノイズは、探査実施の時間帯に対して、高々 ± 20 nT程度と見積ることができた。このノイズレベルに対して、予察的調査によってわかった甲山における磁気異常の大きさは、1,000 nTのオーダーでS/N比が50倍と良好であること、及び測定期間中に顕著な磁気嵐がなかったことから、測定磁場の時間補正は必要がないと判断した。

3. 甲山の磁気異常

Fig. 3に甲山の磁気探査結果を示す。各図の横軸は山頂三角点からの積算距離を示し、縦軸は測定された全磁力値を示す。

測線O-Aは甲山の南斜面の測定結果で、全磁力は距離100 mまでは47,300 nT前後ではほぼ一定の値であるが、斜面が急峻になるにつれて増大し、距離160 mの所

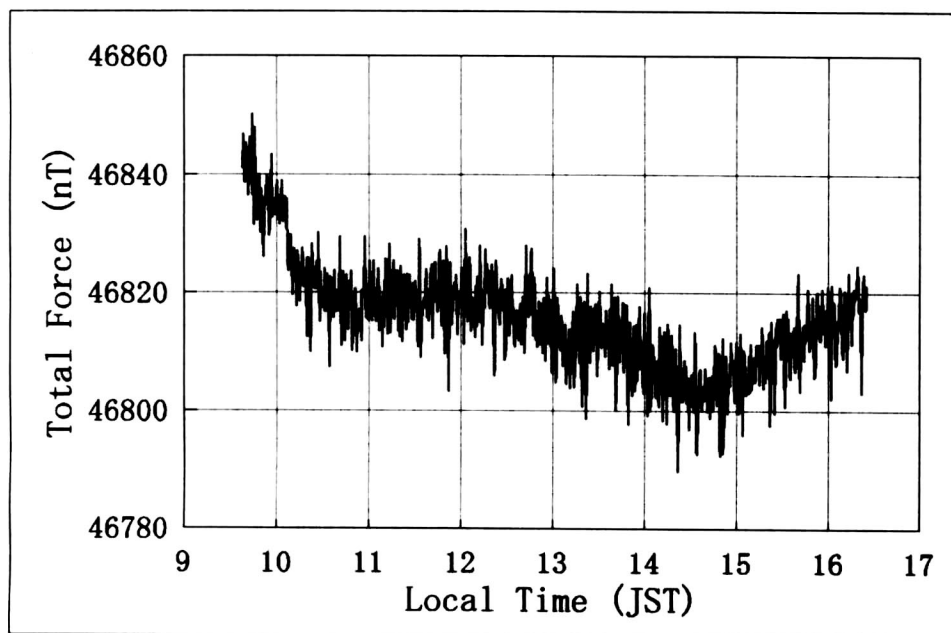


Fig. 2. Time variation of the geomagnetic fields at the base station.

で最大 50,000 nT に達した。そこから急激に全磁力は減少し、距離 200 m 付近で 47,000 nT まで小さくなった後、地形傾斜が緩やかになった所ではほとんど変化がなかった。測線 O-A の甲山南斜面での磁気異常の振幅は 3,000 nT にも達した。

測線 O-B は、南西斜面の結果で測線 O-A の磁気異常と同様のパターンを示した。ただし、磁気異常の振幅は 1,500 nT 程度とやや小さくなった。

測線 O-C は西斜面の結果で、三角点から距離 80 m 付近まで緩やかに 300 nT 程度増大し、それから 400 nT 程度減少した。距離 130 m 付近から急激に 400 nT ほど増大して幅 20 m の磁気異常のピークを形成した後、急激に 800 nT ほど減少した。この外側では磁気異常の変化はほとんど見られなかった。山頂付近では緩やかな磁気異常分布であり、三角点より西側で強いことがわかった。

このような特徴を持つ磁気異常分布は、測線 O-D の北西斜面にも見られるが、この測線では、距離 230 m 付近の磁気異常の急激な減少が、測線 O-C よりも振幅が大きく 1,300 nT に達した。

測線 O-E は北斜面の結果で、山頂基点から距離 200 m 付近まで約 47,300 nT と一定である。そして、距離 225 m 付近で約 300 nT 減少してから、距離 250 m 付近に 500 nT の小ピークを形成した。ここより北側斜面では 44,900 nT まで急激に減少した後、ゆるやかに全磁力は増大し、46,800 nT まで回復した。

測線 O-F は北東斜面で、磁気異常が 600 nT 程度増大した後、距離 270 m 付近で急激に 2,000 nT 減少した。この測線は、Fig. 1 に示すように深い谷地形に沿っているため、周囲の尾根・谷地形の影響を多少受けていることに注意する必要がある。

測線 O-G は東斜面の結果で、距離 150 m 前後で磁気異常は 500 nT のピーク値に達し、その外側で約 1,000 nT 減少した。

以上全ての結果に見られるように、山頂付近の磁気異常は緩やかで変化が小さいが、距離 150 m～250 m 付近で磁気異常は 500 nT～2,500 nT 増大し、幅数 10 m のピークを形成し、その外側で磁気異常は急激に減少している。南北測線 (A-O-E) ならびに東西測線 (C-O-G) の磁気異常と地表高度のプロファイルを Fig. 4 と Fig. 5 に示す。磁気異常の計算では、甲山の全磁力基準値を 46,800 nT と設定し、Fig. 3 の観測値から差し引いた。Fig. 4a のように磁気異常の正の最大ピークが南斜面に、負の最大ピークが北斜面に存在していることから、ほぼ現在の地磁気の方に正帯磁したものが、甲山を中心として円環状に取り巻いて存在していると推定される。さらに、甲山南麓の神呪寺東側の花崗岩の露頭で、携帯型帯磁率計 (Scintrex 製) で測定したところ、その帯磁率は 10^{-3} (SI) よりも小さく、器械の測定可能レンジよりも小さかった。今回の磁気探査ならびに帯磁率測定の結果から、このような円環状の磁気異常帯は安山岩と花崗岩の境界付近に対応しており、その外側に磁化強度がほとんど

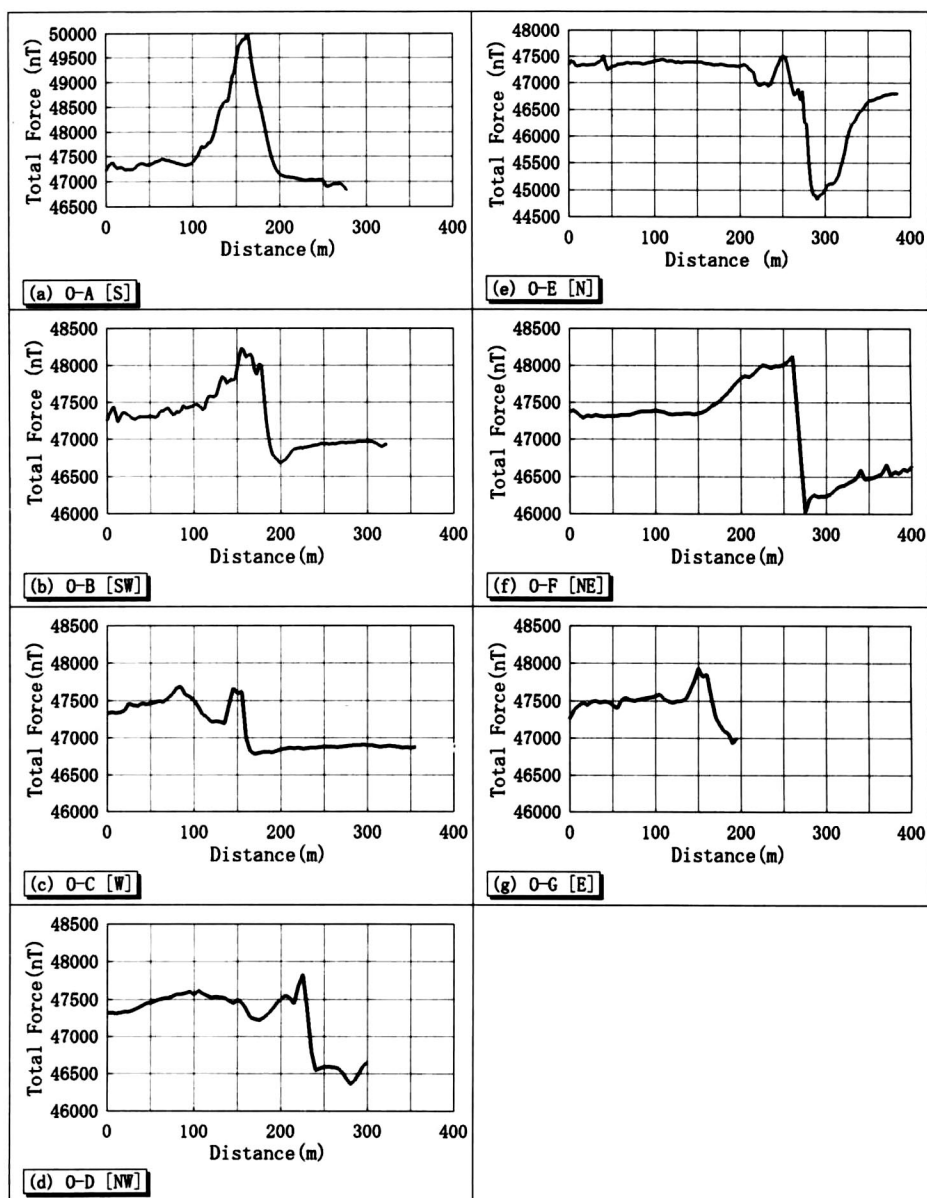


Fig. 3. Total forces along the profiles in Fig. 1.

Distance is measured along the survey route from the triangulation point on the top "O" of Kabutoyama.

ど無視できるほど小さい六甲花崗岩が分布していることと思われる。

さて、Fig. 3 に示したように磁気異常のピークの位置は距離 150 m 付近にあるもの（測線 O-A, O-B, O-C, O-G）と距離 200～250 m 付近にあるもの（測線 O-D, O-E, O-F）の 2 つに区分できる。Fig. 1 の地形図からわかるように、甲山は北側に向かってやや張り出した非対称な地形をしており、基点として用いた山頂三角点は円の中心ではなく、少し南側に偏った位置に存在する。また、

各測線も曲がっているために、Fig. 3 に示した距離は必ずしも甲山の中心軸からの半径距離に対応するわけではないことに注意する必要がある。しかしながら、全測線における磁気異常のピークの位置を地形図上にプロットしたところ、約 150 m の半径の円周上に並んだため、甲山の岩頭の平均半径は約 150 m と推定できる。

4. 甲山の 3 次元磁気構造モデル計算

Fig. 3～5 に示したように、甲山に円環状の磁気異常が

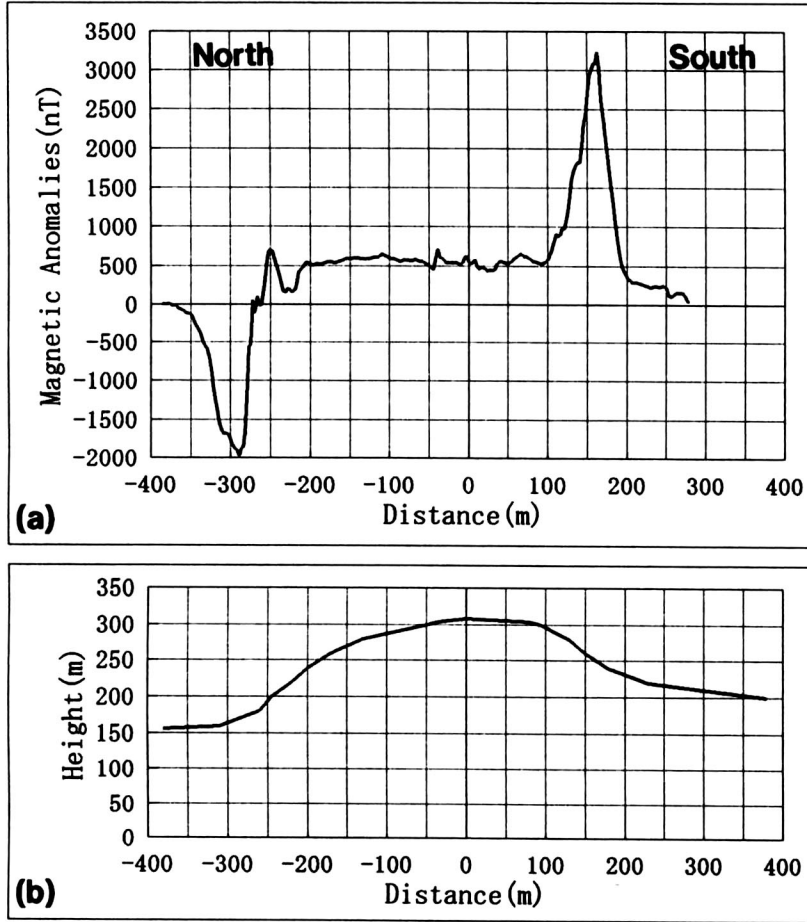


Fig. 4. Magnetic anomalies along the north-south (E-O-A) profile in Fig. 1.

(a) Observed magnetic anomalies. (b) Heights of the ground surface.

存在することがわかった。そこで、観測された磁気異常を解釈するために、簡単な3次元磁気構造モデルについて磁気異常の計算を行う。計算にあたっては、山体内部が非一様磁化である場合と、一様磁化である場合の2つについて考慮する。

3次元構造問題を取り扱うには、プリズムモデル、鉛直な線ダイポール、水平多角形板モデルや微小三角片モデルなどが考えられるが、本論文では計算が簡単である鉛直な線ダイポールモデルを採用する。つまり、甲山の磁気構造を近似するにあたって、Fig. 6(a)のような鉛直な線ダイポールの集合体を用いる。線ダイポールで近似するにあたっては、十分に小さな微小片に区分する必要がある。

さて、上端深度 z_1 、下端深度 z_2 の鉛直な線ダイポールモデルによる点Oにおける磁気異常 $T(0, 0, 0)$ は次式で与えられる(物理探査学会, 1989, p. 188)。

$$T(0, 0, 0) = kJ_L \{F(x, y, z_2) - F(x, y, z_1)\},$$

$$F(x, y, z) = \left[\frac{z}{d^4 R} \{ (2c_x - c_y - c_z)x^2 + (2c_y - c_x - c_z)y^2 + 6c_{xy}xy \} - \frac{z^3}{d^4 R^3} \{ (c_x - c_z)x^2 + (c_y - c_z)y^2 + 2c_{xy}xy \} - \frac{2}{R^3} (c_{zx}x + c_{yz}y) \right]. \quad (1)$$

ただし、 k は定数、 J_L は一様な磁化強度をもった線磁化であり、磁化強度をA/m単位、磁気異常をnT単位で表現するとき、 $k=100$ となる。ここで、

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad d^2 = x^2 + y^2,$$

$$c_i = e_i p_i \quad (i = x, y, z),$$

$$c_{ij} = (e_i p_j + e_j p_i) / 2 \quad ((i, j) = (x, y), (y, z), (z, x)),$$

(e_x, e_y, e_z) は外部磁場の方向余弦、 (p_x, p_y, p_z) は磁化の方向余弦である。

次に、Fig. 6(b)のように甲山を軸対称構造と近似し、動径方向(r 方向)に5m間隔で、方位角方向に360等分

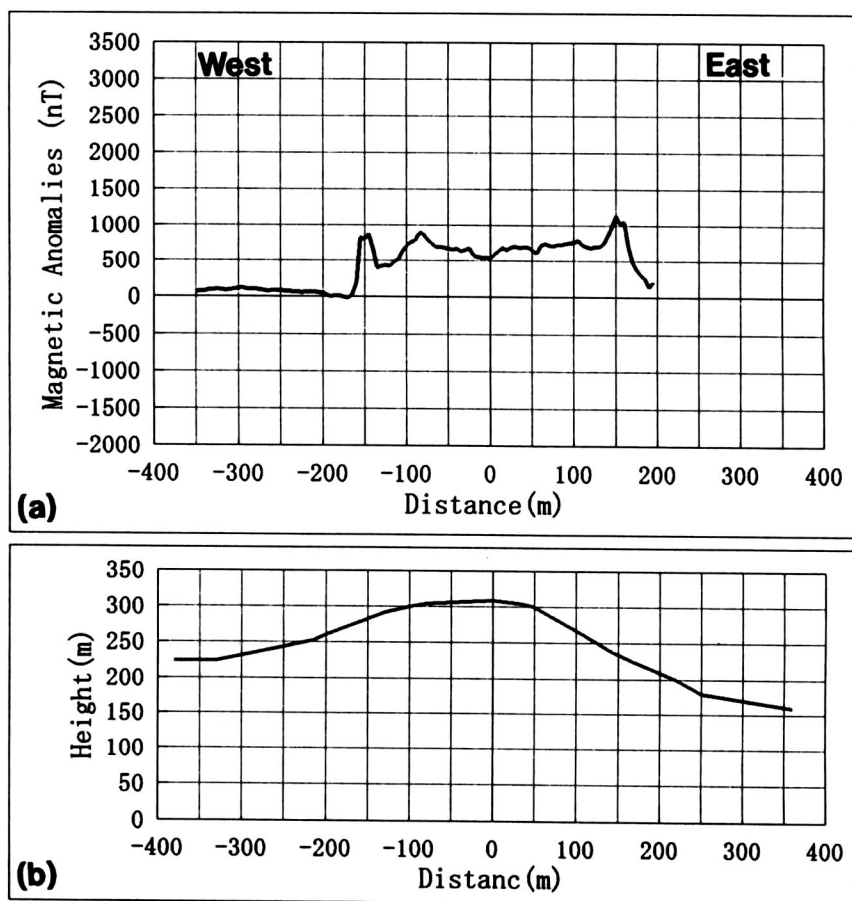


Fig. 5. Same as Fig. 4 along the west-east (C-O-G) profile.

の微小片に分割する。扇形の微小片の範囲を鉛直な線ダイポールモデルに置き換えて、その集合体で磁気構造モデルを構成する。微小片の断面積を ds として、線磁化 J_L は磁化強度 J を用いて

$$J_L = J \cdot ds, \quad (2)$$

と与えられる。

その磁気構造体の表面の高さ（比高）分布 $h(r)$ を次のように簡単な形状で近似する。

$$h(r) = h_0 \cdot \exp(-r^2/r_0^2). \quad (3)$$

ここで、 $h_0 = 100$ m, $r_0 = 200$ m と設定した。

また、磁気異常の計算高度は、磁気構造体の上面から 10 m の高さとする。測定時のセンサー高度は地上 2.5 m であったが、地表面付近は風化が進んでいて磁化強度はほとんど無視できるものと考えて、磁気構造体から 10 m 上方での計算を行ったものである。式 (1) における z_1 は計算高度 $\{h(r) + 10\}$ と磁気構造体上面の高度 $h(r')$ との相対高度である。すなわち、 $z_1 = \{h(r) + 10\} - h(r')$ とする。さらに、火道が地下深部から貫入してきた構造モ

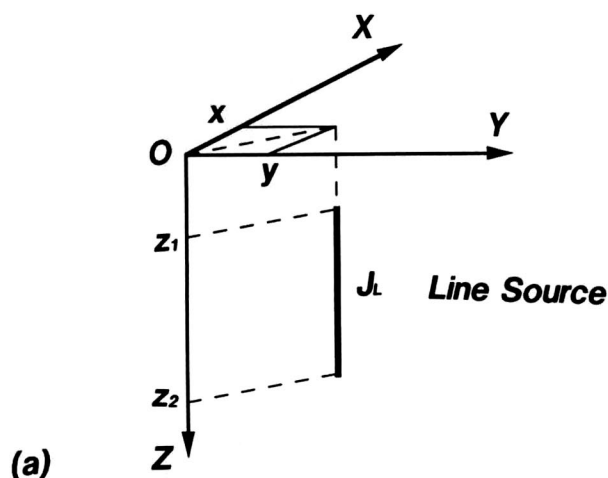
デルを想定し、磁気構造体の底面深度 z_2 を計算上 $+\infty$ と近似する。

さて、甲山の磁化については、未知数であるので、種々のパラメータを用いて計算を試行した。そのうち 2 つの典型例について述べることにする。

甲山の磁気構造体モデルを円環とその内外部の 3 個の部分に分けて、それぞれの磁化強度を Table 1 のように仮定する。現在の外部磁場の伏角を 48° と設定し、帯磁の伏角は観測値との適合性から 65° を選択した。帯磁の偏角は外部磁場と同じであると仮定した。Fig. 7 と Fig. 8 に 3 次元構造モデル計算された南北測線、および東西測線の磁気異常の結果を示す。なお、計算間隔は 5 m である。

磁気構造を中心から 160 m 以内が一様磁化 (2 A/m)、その外側を非磁性とした場合（溶岩ドーム構造）は、南斜面に正 (3,000 nT)、北斜面に負 (-1,500 nT) の磁気異常ができ、その磁気異常の波長は約 300 m と長いものである。東西では、磁気異常はドーム状の分布をしている。

3-D Model Calculation



Conduit Model

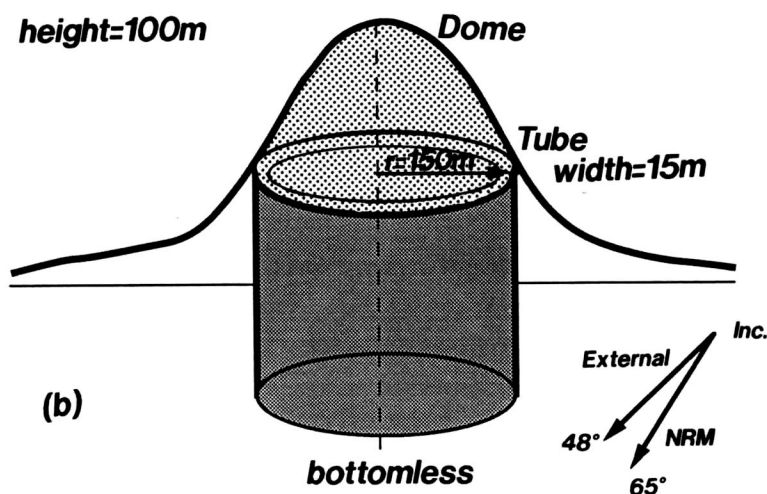


Fig. 6. Vertical line source model and conduit model for numerical calculation.

(a) Coordinate system and arrangement of magnetic line source. x , y and z are directed to the north, east and downward. J_L is a line intensity of magnetization calculated from a cross area of a fine element and its intensity. (b) 3-D magnetic model of a conduit with a tube structure for Kabutoyama. For calculation of magnetic anomalies on the ground surface, this structure is divided into elements with a width of 5 m in the radial direction and $\pi/180$ radians in the azimuth. Inclinations of NRM and external field are assumed to be 65° and 48° , respectively.

この一様帯磁モデルによる計算結果は磁気異常の観測結果と適合しないことから、甲山は単純な地形効果からでは説明できないと言える。

そこで、磁気構造の内部構造を非一様磁化とした場合

(円筒構造)を考える。Table 1 に示したように、岩頭の円筒殻状の部分を 10 A/m、その内部を 0.5 A/m とする。Fig. 7 の南北測線においての計算結果では、南斜面で 3,000 nT の正の磁気異常の鋭いピークが、北斜面では、

1000 nT ほどの小さな磁気異常のピークがあり、その外側で-1500 nT ほど急激に減少する。Fig. 4 の観測磁気異常と比較すると、距離の歪みの問題を除けば、異常分布の大きな特徴をよく再現している。今回の計算モデル

Table 1. Model parameters of magnetic intensity.

Radial distance	Tube-shaped structure	Lava dome structure
$r < 145$ m (Dome)	0.5 A/m	2.0 A/m
$145 \text{ m} \leq r \leq 160$ m (Ring)	10.0 A/m	2.0 A/m
$r > 160$ m	0.0 A/m	0.0 A/m

では、軸対称の簡単な地形モデルを採用したが、より精密な地形モデルを作れば計算結果を観測結果に近づけることができると思われる。

また、Fig. 8 の東西の計算結果は、内部では 500 nT の磁気異常で、距離 150 m 付近に 1,500 nT の磁気異常のピークが存在し、その外側で急激に減少する。Fig. 5 の観測結果と比較すると磁気異常のパターンをよく再現していることがわかる。ただし、計算されたピーク値は実測値の約 1.5~2 倍程度大きい。この差異は円環状磁気構造自体でも、その磁化強度あるいは幅などの形状に非一様な空間的分布をしている可能性を示している。

5. おわりに

甲山の磁気探査の結果、円環状の強い磁気構造が検出

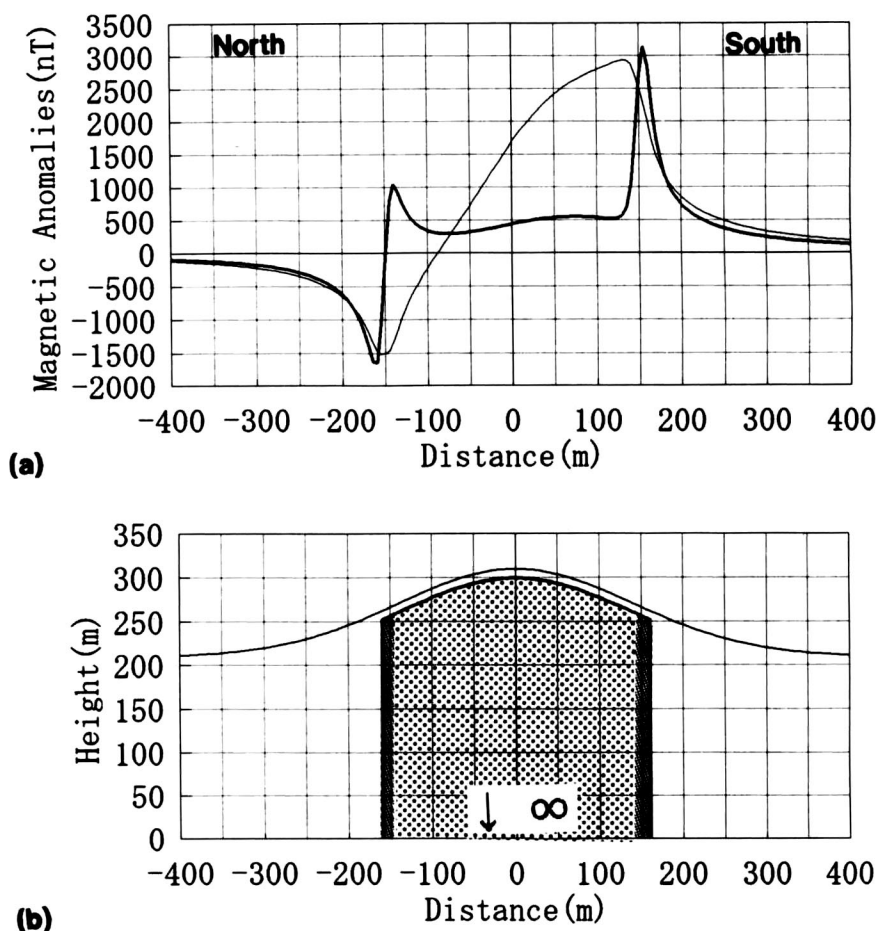


Fig. 7. (a) Calculated anomalies due to the 3-D magnetic model along the north-south profile. Thick line shows the anomalies by a strongly magnetized tube (10 A/m) with a weakly magnetized dome (0.5 A/m). On the other hand, a thin line shows the anomalies by an uniformly magnetized structure (2 A/m). (b) Cross-section of the magnetic structure model.

Thick and thin shaded areas show a tube-shaped structure and an inner content of a volcanic conduit, respectively.

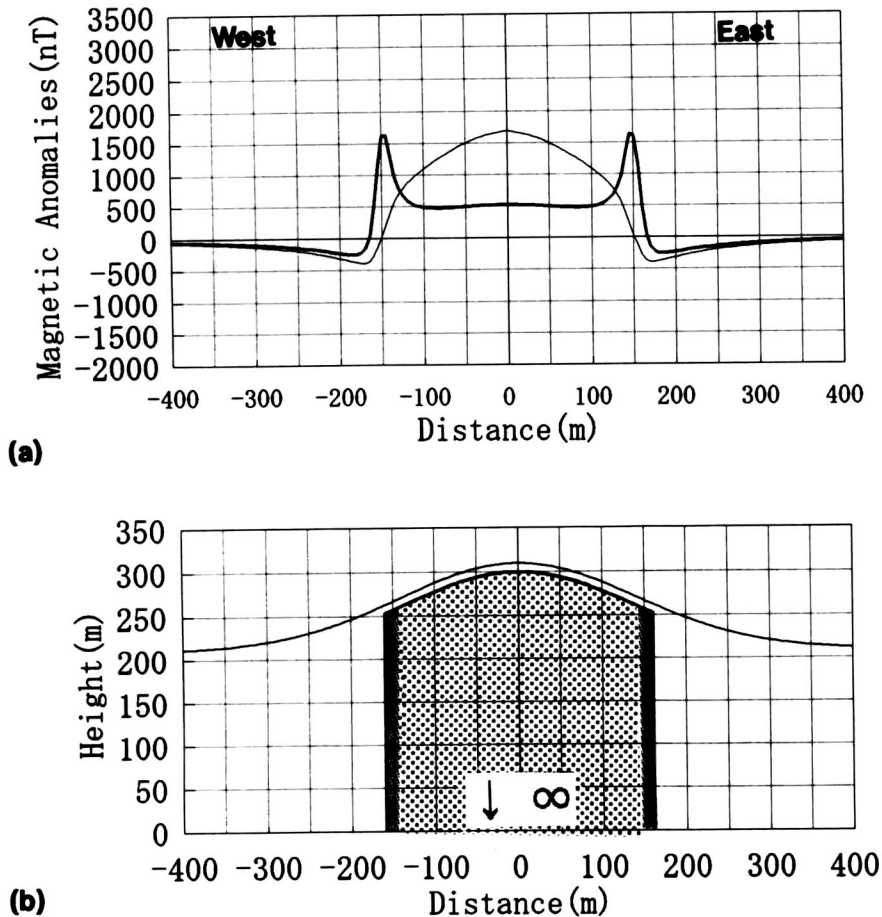


Fig. 8. Same as Fig. 7 along the west-east profile.

された。観測された磁気異常は、3次元モデル計算によると、幅15m、磁化強度10 A/mの薄い円筒殻状の構造と、その内部に0.5 A/mのものが満たされている構造で説明できた。甲山現地における帯磁率計(Scintrex製)で測定した安山岩の帯磁率は $4\sim 7 \times 10^{-3}$ (SI)であるから、地磁気全磁力を 5×10^4 nTとすると、その誘導磁化は0.2~0.4 A/m程度である。恐らく、甲山の火道岩頸の内部は、この誘導磁化成分で説明できる。岩頸の外殻の10 A/mは上記の誘導磁化成分では説明できないので残留磁化によると推定されるが、岩石磁気学的手法による調査はまだしていない。この強い磁化が火道と花崗岩の接触領域に存在することから、熔融したマグマが火道を通る際に外側の花崗岩に接触し、急冷したために強い残留磁気を獲得したのではないかと推定される。元木(1979)は六甲山地東南部の白亜紀火砕岩火道で石基の粒度分布から火道の中央部で粗粒、周辺部で細粒と報告している。さらに、熱残留磁化とマグネタイトの粒度には反比例に近い関係があること(Day, 1977)と考え合わせれ

ば、おそらく甲山の火道の境界域では残留磁化を担う磁性鉱物粒子が急冷却などによって強い磁化強度を獲得したのではないかと考える。

磁気探査結果による甲山の火道の推定半径は150m程度であると知ることができた。火山活動において、火道半径はマグマの噴出率を通して火山の噴火様式・メカニズムを左右する重要な鍵を持つことが、篠原・風早(1995)によって指摘されている。しかしながら、火山の火道の半径についての有効な情報は少ないのが現状である。さらに、甲山と同じ瀬戸内火山帯の一つである松山市北西部の80余の火山岩頸において、八島・浜口(1986)は火道の岩体と周辺岩との境界線の位置を地質学的に追跡、確認しているが、被覆層が堆積していて輪郭を推定せざるをえない問題や、火道なのか溶岩円頂丘なのか区別・判断できない問題があることを報告している。地上磁気探査を用いれば、このような火道の境界線の把握や内部構造についての理解を深める一助になると思う。

今回の磁気探査が有効であった要因としては、磁性の弱い基盤である六甲花崗岩に、火道の岩頸が孤立して取り残されていることが大きい。火山の深部の火道を調査するには、磁性の強い溶岩や火山噴出物自体が磁気異常の解釈を妨げる大きな要因となる。甲山には、浸食によって火山からの噴出物等が取り除かれていた。甲山と似た環境にある火山の岩頸では、磁気探査による構造調査がかなり有効であると言える。そして、今後、磁気探査のみならず岩石磁気学的手法や他の調査方法を利用して、火山の火道の内部構造の調査を進めていくことが益々重要なことであると思われる。

謝 辞

本研究を行うにあたっては、地質調査所の渡辺和明、宮崎純一両氏に GPS 測量、甲山周辺の地形図、空中写真などについて教えていただいた。地磁気定点観測については、「甲山青年の家」の関係者にお世話になった。

また、本論文の執筆にあたっては、匿名の査読者ならびに担当編集者に種々御指導いただいた。

以上の方々に厚く御礼申し上げる。

引用文献

- 物理探査学会 (1989) 図解物理探査. 物理探査学会, 239 p.
- Day, R. (1977) TRM and its variation with grain size. *J. Geomag. Geoelectr.*, **29**, 233-265.
- 藤田和夫・笠間太郎 (1982) 大阪西北部地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 112 p.
- 元木昭寿 (1979) 六甲山地東南部の白亜紀火砕岩火道. 火山, **24**, 55-72.
- 篠原宏志・風早康平 (1995) 噴火過程における揮発性物質の役割. 火山, **40**, S59-S77.
- 八島隆一・浜口浩一 (1986) 古火山の復元—松山市北西部の第三紀火山岩頸—. 福島大学理科報告, **37**, 29-43.

(編集担当 植木貞人)