

# 米塚スコリア丘の内部構造

北海道大学大学院理学研究院

橋本 武志

京都大学大学院理学研究科 宇津木 充・小森省吾

## 1. はじめに

スコリア丘あるいは噴石丘は、火山の形式としては地球上で最も数が多いとされており<sup>1)</sup> 噴火の目撃事例も多いため、古くから研究がなされてきた。噴石丘は、玄武岩質マグマの噴火によって形成されるが、その成長過程は、エトナ火山の北東火口における観察に基づいて McGetchin ら<sup>2)</sup> によりモデル化されている。また、噴石丘を形成する噴火は、現象が間欠的爆発の繰り返しや準定常的なマグマの噴出であることから、取り扱いが比較的容易であり、火道内でのマグマの発泡と破碎に関するモデル化の研究対象にもなってきた<sup>3), 4)</sup>。噴石丘の内部構造については、Houghton and Schmincke<sup>5)</sup> がドイツのアイフェル単成火山群で詳細な観察を行った事例が標準的なものとして受け入れられているようである。山本<sup>6)</sup> は、小値賀島単成火山群を対象として、特に溶岩流出の形態と内部構造の関係を論じた。噴石丘形成時の噴火様式には、ストロンボリ式からハワイ式までの多様性があるが、その様式を支配するメカニズムは、Head and Wilson<sup>7)</sup> によりマグマの噴出率と揮発性成分の多寡が本質的な要因であるという考えが提案されている。

米塚は、阿蘇中央火口丘の北西部に位置するスコリア丘で、その形成年代は地質層序から 1740±100 年前よりも若いとされている<sup>8)</sup> が、正確な年代測定は行われていない。基底直径約 350 m の円錐台形の山体はほぼ軸対称で、浸食をほとんど受けていない。山頂部には直径約 80 m、深さ約 10 m の火口がある。米塚はまた、その北西側の広い範囲に大量の溶岩流(米塚溶岩)を噴出している。西側と北東側の中腹には、溶岩の噴出口と思われる地形を確認することができるが、成長過程のどの段階でどのようにして溶岩が噴出したのかについてはよくわかっていない。米塚の表面はススキで覆われており、樹木はないので地表からの各種探査は比較的容易であるが、山体を含む景観は地域の観光資源でもあるため、トレンチ等によりその内部を直接観察することは許されていない。

著者らは、平成 20 年度集中総合観測の一部として米塚の磁気測量を実施した。本稿では、磁気測量の結果に加えて、過去に京都大学が実施した高密度電気探査の結果を用いる。本稿は、米塚スコリア丘の内部構造と噴火様式について、比抵抗と磁化という物性から検討することを目的とする。

## 2. 高密度電気探査による比抵抗構造

米塚では、京都大学により 2001 年および 2002 年に高密度電気探査が行われている。ここでは、測定の概要と解析結果について述べる。高密度電気探査の測線は、図 1 に示したように山頂火口の中央部を通るほぼ南北方向であり、溶岩流の噴出口を避けている。測定には千葉電子製の高密度電気探査装置を使用し、2001 年に山体の南側、2002 年に山体の北側を探索した。それぞれの探査での測線総延長は 400 m で、最小電極間隔は 10 m である。送信装置は PC で制御され、40 本の電極群から 4 本の電極を選択し、数 10 mA 程度の交代直流を流して見掛け比抵抗を得る。ウェンナー配列とエルトラン配列を併用することで、垂直方向と水平方向のいずれの構造に対しても分解能の偏りが生じにくい測定方法となっている。可探深度は、それぞれの測線の中央部で概ね 100 m である。

内部構造がほぼ軸対称であると予想され、かつ測線が中心軸を通っているので、2 次元構造を仮定した比抵抗構造解析を行った。ここでは、ABIC 最小化法による最適平滑化拘束の 2 次元比抵抗インバージョン<sup>9)</sup>を用い、それぞれの測線に対して比抵抗断面を得た。2 つの比抵抗断面は対称性が高く、山頂火口下の構造はほぼ同一とみなせるので、両者を合成して 1 枚の比抵抗断面図を作成した(図 2)。

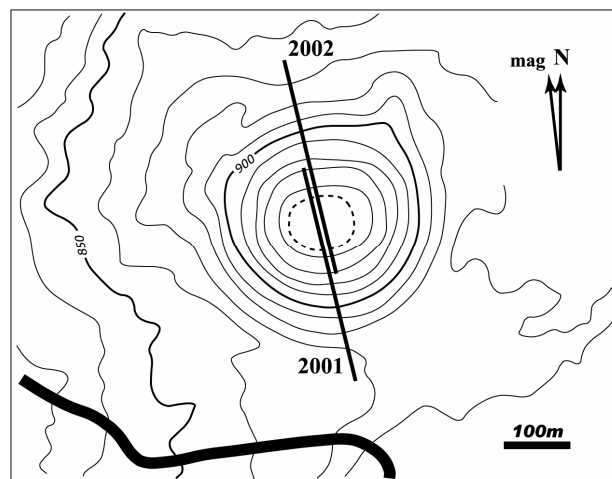


図 1. 米塚周辺の地形と高密度電気探査の測線位置。磁北は約 6.5° 西偏。地形標高のコンター間隔は 10 m (国土地理院の 2 万 5 千分の 1 地形図を参照した)。黒い太線は自動車道路を示す。点線は山頂火口の縁を示す。

得られた比抵抗断面は、南北に対称的な構造を示しており、当初の軸対称の仮定に矛盾しない。以下に比抵抗断面の特徴の概略を述べる。図 2 によれば、山頂火口の表層部は数 10～数 100  $\Omega\text{m}$  の低比抵抗層(C1)に覆われているが、その直下には逆円錐型の高比抵抗体(R1)が存在する。この部分は 10 k $\sim$ 100 k $\Omega\text{m}$  の高い比抵抗値を示し、周囲とは明瞭な違いが認め

られる。地表面から 20～50 m の深さには、この高比抵抗体の上部から連続する厚さ 30 m 程度で数  $k\Omega m$  のやや高比抵抗な層 (R2) があり、山麓まで分布している。R2 の下位で基底面より下には、数  $10 \Omega m$  の低比抵抗層 (C2) が楔形に分布している。それ以外の大部分は、 $0.1 k\sim 1 k\Omega m$  の中間的な比抵抗値で占められている。

米塚内部の比抵抗分布はこのように対称性が強く、かつ明瞭な不均質を示している。このことは、米塚を形成した噴火の噴出様式や堆積過程が、山体の内部構造 (溶結度や空隙率の違い) として保存されており、それが比抵抗分布から推定できる可能性を示唆している。とりわけ、山頂直下の高比抵抗体 (R1) の解釈については 2 つの可能性が考えられる。ひとつは、溶結したスコリア可能性、もうひとつは、空隙率が極めて高く水はけのよいスコリア堆積物、ないしは溶岩流出の結果として生じる空洞 (すなわち、山体内部に生じた「溶岩トンネル」) の可能性である。比抵抗値のみからでは、いずれが正しいのかを判断することはできないので、以下に述べるように稠密に全磁力サーベイを行い、磁気異常解析から推定される山体内部の磁化構造の情報を用いて考察を進めることにした。

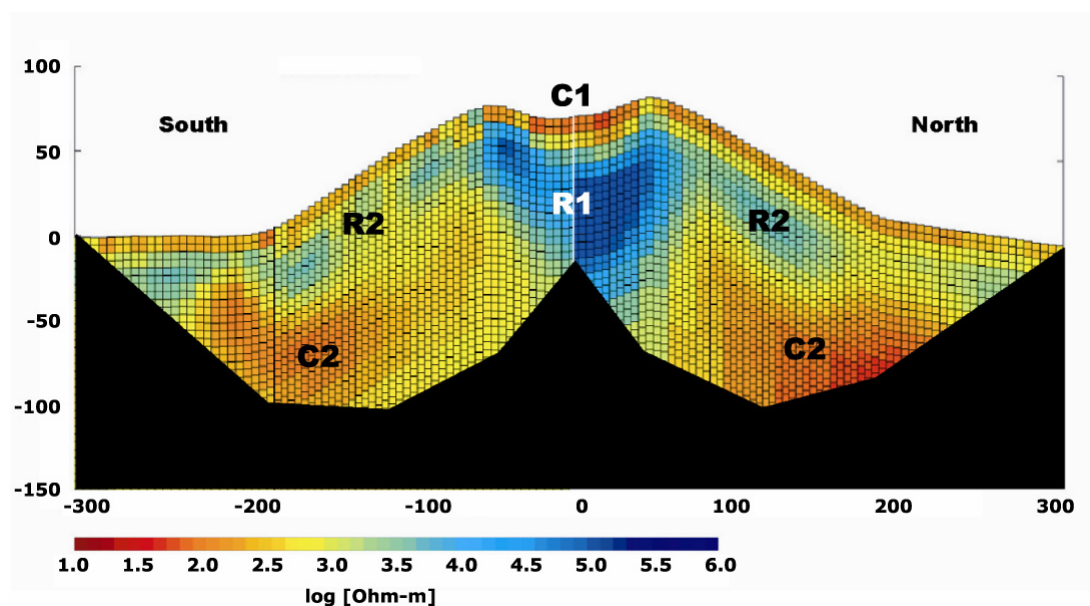


図 2. 高密度電気探査の 2 次元インバージョンで得られた米塚の比抵抗構造。カラーバーの数値は比抵抗 ( $\Omega m$ ) の対数値。本図は、2 つの比抵抗断面図を中央部で接続して作成している。黒塗りの部分は感度のない領域。

### 3. 磁気異常分布

集中総合観測の一部として 2008 年 11 月 18 日と 20 日に全磁力サーベイを実施した。また、2009 年 3 月 23 日と 25 日に追加測定を行った。用いた機材は GEM systems 社製のオーバーハウザー磁力計 (GSM-19) で、地上を歩きながら 3 秒毎に全磁力を自動測定した。位置の測定

には Garmin 社製の携帯型 GPS を用い、磁場測定をしながら 1 秒サンプリングで軌跡を記録した。位置精度は 5~10 m である。磁力計のセンサー高は地表から約 1.5 m であるが、移動しながらの測定であるため厳密ではない。測定は、図 3 に示したように山頂火口を中心とする放射状の測線に沿って行い、山頂火口縁部および山麓部には周回路線を追加した。これ以外にも、山頂域では補足的な測線を設けている。後に示す磁気異常図を作成するにあたり、内挿計算に不具合が生じないように、測線の交点付近のデータを除去する等の前処理を行った。有効測点数は 3,113 点である。

以下に磁気異常図(図 4)の特徴をまとめる。全磁力値の範囲はおおよそ 45,000~51,000 nT で、磁気異常の振幅は 6,000 nT に及んでいる。これにより、米塚が強い磁化をもつ媒質で構成されていることが伺える。北東側と西側の山腹から山麓にかけては明瞭な高磁気異常が認められる。位置関係から考えて、これらが溶岩流に対応していることは明白であり、米塚溶岩は山体の主要部を構成する堆積物(スコリア)の平均的磁化よりも強い磁化を有することがわかる。山体南斜面の中腹から山頂火口南縁にかけては、舌状の高磁気異常がある。これと対を成す低磁気異常が北斜面の中腹に見られる。山頂火口の周縁部では、49,000 nT 程度のやや強い磁場が環状に分布している。火口の内部では、南側が低磁気、北側が高磁気になっている。また、山体の大部分はこの地域の平均的磁場値(46,000~47,000 nT)で占められている。

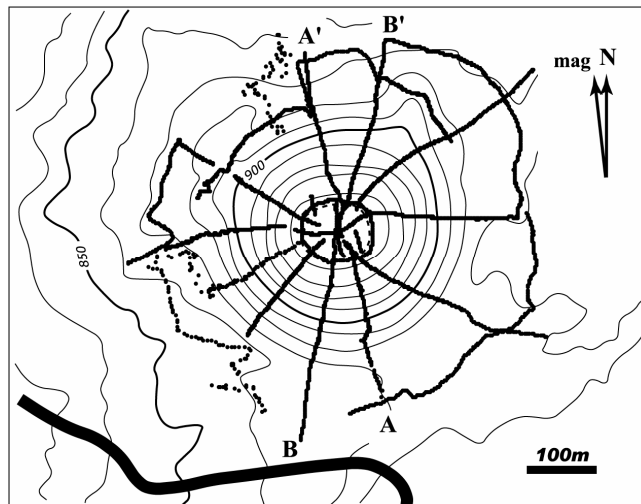


図 3. 全磁力の測点分布。

山体の磁気異常(南斜面で高磁気、北斜面で低磁気)は、米塚が現在の地磁気方向に磁化していると考えられることとおおよそ説明できそうである。磁気異常の特徴を詳しく見るために、溶岩流の影響が小さいと思われる 2 つの南北測線(A-A'および B-B')に注目する。図 3 の A-A'および B-B' 測線に沿った全磁力と地形標高の分布を図 5 に示す。山頂火口原の一部を除き、米塚

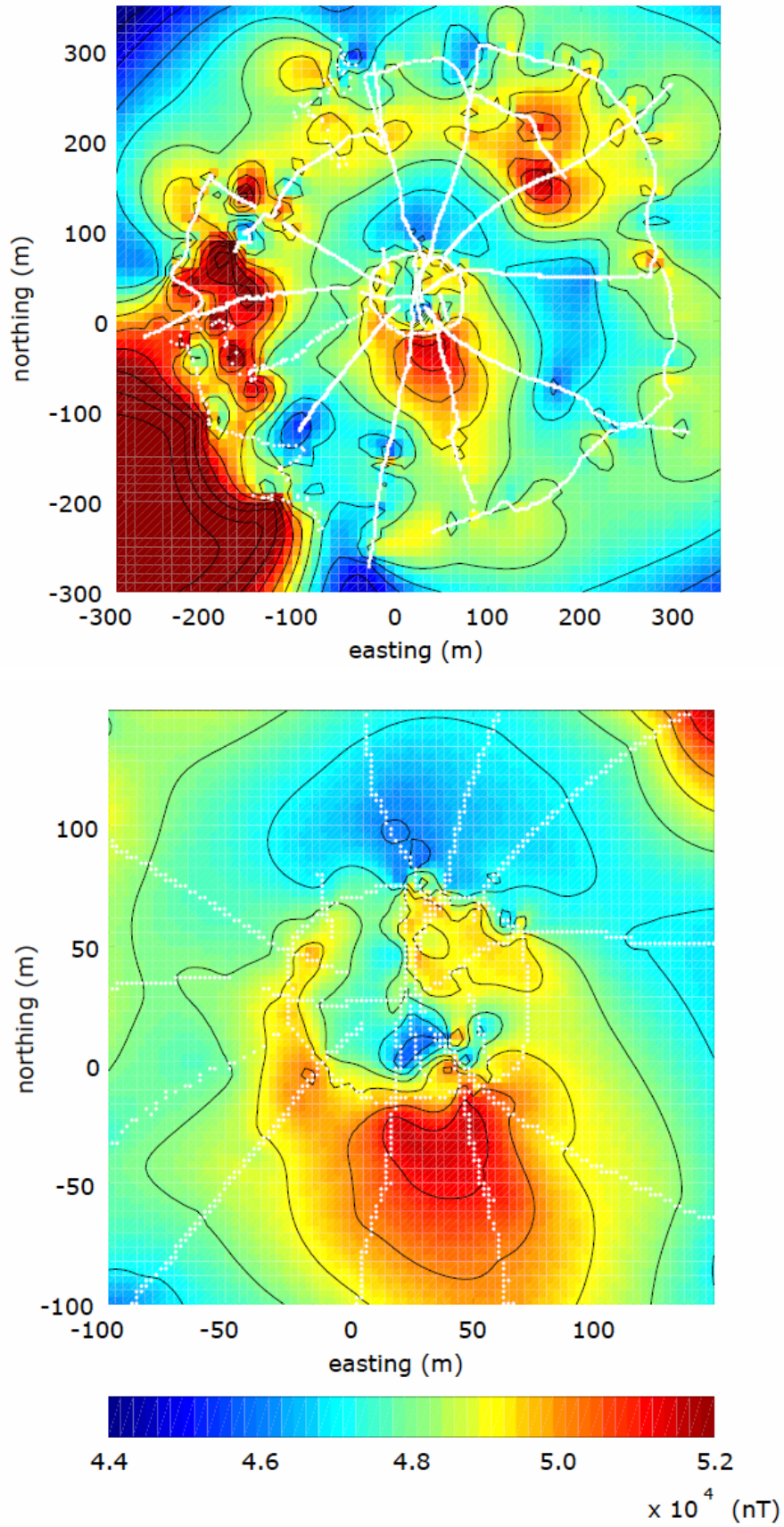


図4. 米塚の磁気異常図(全磁力)。縦横軸の数値は水平距離で単位はメートル。下図は山頂火口周辺の拡大図。

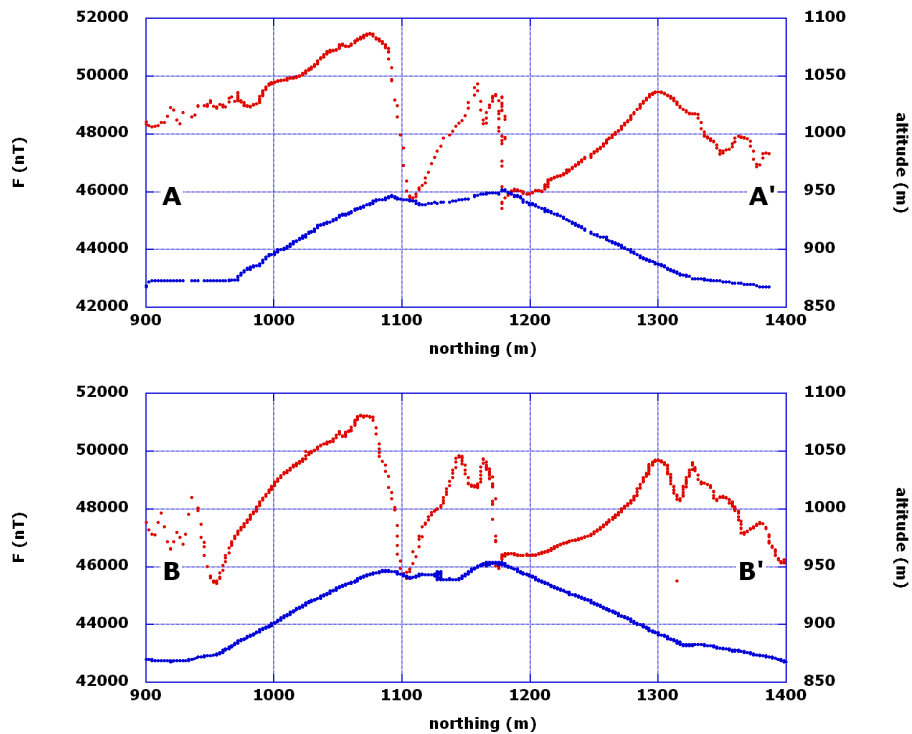


図 5. 南北方向の測線に沿った全磁力分布と地形標高。AA', BB' は図 3 を参照。

表面の磁場分布は滑らかであり、山体スケールの磁気異常が卓越している。これに対し、基底部から外側に出ると、短波長の磁気異常が目立つようになる。このことから、米塚が比較的単純な構造をしており、均質性の高い媒質で構成されていることが伺える。米塚は、杵島岳起源の溶岩流の上に形成されており、山麓部に見られる短波長の磁気異常はこの溶岩流によるものと推測される。米塚の上では、この基底面から離れるために短波長の磁気異常が見えなくなるのであろう。次節では、この 2 つの測線に沿った磁気異常についてモデル計算を行い、内部構造を推定する。

## 4. 磁化構造の推定

### 4.1 円錐台による近似

まず、山体を円錐台で近似した場合について述べる。一様に磁化した軸対称物体のつくる磁気異常計算には解析解が与えられている<sup>10)</sup>。ここでは、まず概略をつかむ目的で、基底直径 400 m、比高 80 m、上面直径 80 m、磁化 10 A/m の円錐台がつくる磁気異常を計算した。中心軸を南北に切る測線での全磁力異常を図 6 に示す。磁気異常は、山体の南斜面で高磁気、北斜面で低磁気となり、観測された磁気異常とほぼ振幅が合う。しかし、図 5 と比較すると、山頂火口内部の磁気異常が再現されていない。そこで、山頂火口の地下に無磁化の球状領域(半径 40 m)を置くと、磁気異常は図 6 の点線の如く実測に近い形となる。このモデルが正しければ、

米塚の山体内部には無磁化で高比抵抗の領域、すなわち空洞があることが示唆される。しかしながら、次節に述べるようにこのモデルは現実を正しく反映していない。

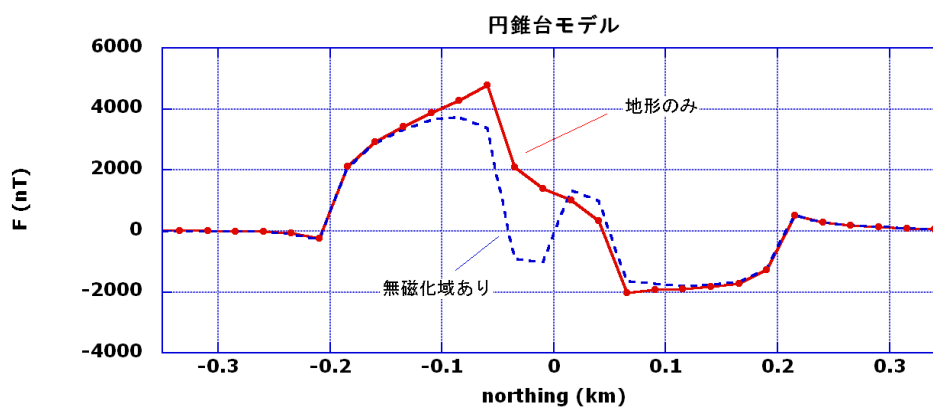


図 6. 一様に磁化した円錐台による磁気異常のモデル計算(実線)。磁化は 10 A/m を仮定。磁場は全磁力値で、地形に沿って中心軸を南北に切る測線での値。点線は円錐台の内部に無磁化の球を置いた場合の磁気異常。

#### 4. 2 火口地形と内部構造を考慮した軸対称モデル

前節では米塚の山体を円錐台で近似したが、火口地形を考慮していなかった。そこで、さらに近似を高めるために、山頂火口の窪みを入れた地形で磁気異常を計算してみる。ここで用いた計算コードは、軸対称物体のつくる磁気異常を表面積分の形で計算することができ、軸対称の内部構造も考慮することが可能である。高密度電気探査から得られた比抵抗断面を参考にして、図 7 のように地形と内部構造を与える。本稿では、できるだけ単純な構造で磁気異常の観測結果を表現するために、山体主要部の磁化(残留磁化と誘導磁化の和)を  $J_0$  とし、山頂火口直下に磁化  $J_1$  の円盤、中心部に磁化  $J_2$  の逆円錐台を与えた。なお、計算はすべて地形に沿って高さ 3 m における全磁力値を求めている。

まず、山体の磁化が一様( $J_0=J_1=J_2$ )の場合を考える。図 8 に、モデル磁気異常を観測値との比較を示す。北向きに 8.0 nT/m の直線トレンドを仮定すると、一様磁化 7.0 A/m で大まかな特徴を説明することができる。図 6 の実線で示したモデル(火口地形のない一様磁化円錐台)と比較すると、山頂域の不一致がかなり解消されている。つまり、前節で想定したような山体内部の無磁化領域は必要がなく、観測された磁気異常は、山頂火口の窪みの効果で大部分が説明可能であることがわかる。ただし、詳細に見ると、山頂火口の中央部が平坦になっているなどの食い違いがあり、内部構造は一様ではないことが想像される。そこで、次のステップとして、 $J_0$  は 7.0 A/m に固定したまま、 $J_1$  および  $J_2$  を様々に変化させて内部構造を推定する。以下の計算では、直線トレンドを 8.0 nT/m で固定し、磁気異常のばらつきが小さい  $\pm 170$  m の範囲を対象として観測値と計算値の比較を行う。図 3 の AA' および BB' 方向について、磁化  $J_1$ 、 $J_2$  および磁場のオ

フセット値をパラメータとして、観測値と計算値の残差自乗和が最小となるような値を探索した。ただし、磁化は地球磁場と同じ向きとし、その値は  $1.0 \text{ A/m}$  を下回らないという条件を課した。このようにして推定された磁化構造による磁気異常を図 9 に示す。

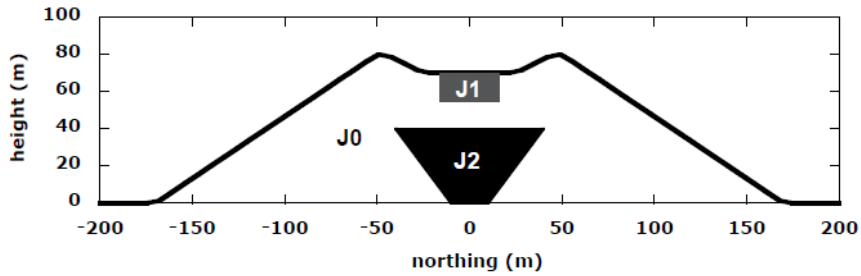


図 7. 火口地形と内部構造を考慮した軸対称磁化モデル。

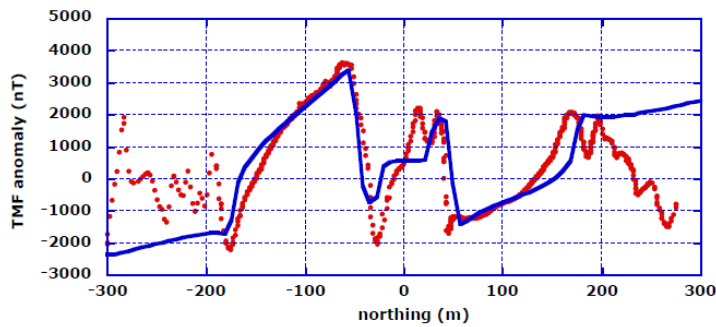


図 8. 一様磁化 ( $7.0 \text{ A/m}$ ) のモデル磁気異常 (実線) と観測値 (点) の比較。モデル計算には、南北方向に  $8.0 \text{ nT/m}$  のトレンドを加えている。

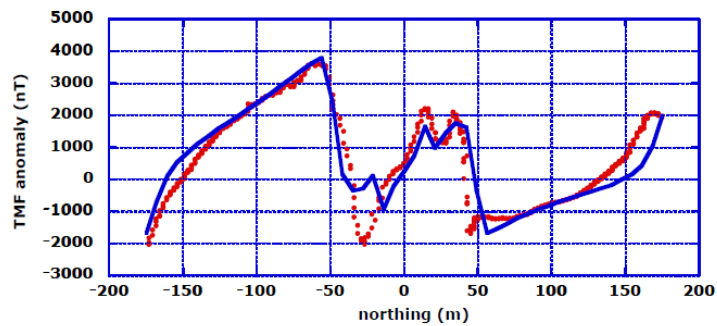
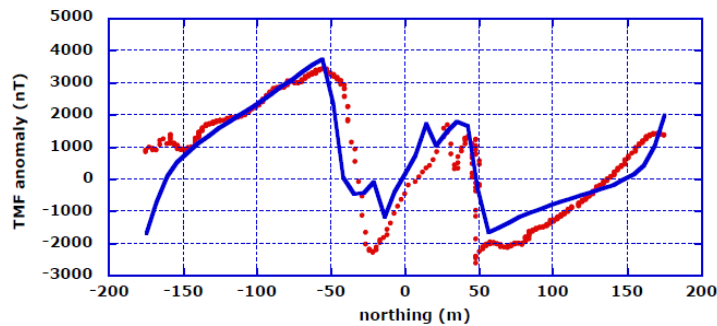


図 9. 内部構造を考慮したモデル磁気異常 (実線) と観測値 (点) の比較。上図は A-A' 測線、下図は B-B' 測線。モデル計算には、南北方向に  $8.0 \text{ nT/m}$  のトレンドを加えている。

図 9 を見ると、山頂火口中央部で磁場が平坦であった部分の一致が良くなっている。これには、山頂火口直下に置かれた低磁化が大きく寄与している。これによって、山頂火口北縁部に高磁場の突起が再現されている。一方、基底部の逆円錐台領域は、いずれのモデルでも平均より 2 倍程度大きな磁化が推定された。こちらはやや長波長の異常をつくることで一致度の向上に寄与しているが、上記の円盤状の低磁化よりも拘束力は低い。高磁化である方が観測値を再現する上で好ましい、という程度である。モデル計算と観測値の比較を表 1 にまとめる。ここで、モデルと観測値の一致度を数値で表現するために、残差と一致度を次のように定義する。

$$\text{残差} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{\sum (F_{obs} - F_{cal})^2}{N}}$$

$$\text{一致度} \quad \sigma = \left( 1 - \frac{\sum (F_{obs} - F_{cal})^2}{\sum (F_{obs} - \bar{F}_{obs})^2} \right) \times 100$$

ここで、 $F_{obs}$  は観測値、 $F_{cal}$  は計算値、 $\bar{F}_{obs}$  は観測値の区間平均、 $N$  はデータ点数である。 $\varepsilon$  は、各データ点毎の不一致の平均値を意味する。また、 $\sigma$  は一致度が高いほど大きな値をとり、観測値と計算値が完全に一致している場合は  $\sigma = 100\%$  となる。内部構造を考慮しない場合のモデルと比較すると、 $\varepsilon$  と  $\sigma$  の値はいずれも向上している。実際には、地形や磁化構造が厳密に軸対称ではないことを考慮すると、ここで検討したモデルは、観測された磁気異常を概ね説明できているものと考えられる。

一致度の高い B-B' 測線から推定された磁化構造のパラメータで計算した磁気異常を図 10 に示し、実測と比較する。山麓部の溶岩流による異常を除くと、低磁気が山体の中腹を取り巻いている様子や、山頂火口縁の環状高磁気と火口底の低磁気など、モデルは概ね実測値の特徴を反映していることが見てとれる。

表 1. 内部構造を与えた場合の最適磁化モデル。括弧内の値は一様磁化モデルの場合。

| 測線                 | A-A'        | B-B'      |
|--------------------|-------------|-----------|
| $J_1$ [A/m]        | 1.0         | 1.4       |
| $J_2$ [A/m]        | 14.6        | 16.4      |
| offset 値 [nT]      | 47,630      | 48,040    |
| $\varepsilon$ [nT] | 878 (1,002) | 585 (669) |
| $\sigma$ [%]       | 71 (62)     | 85 (81)   |

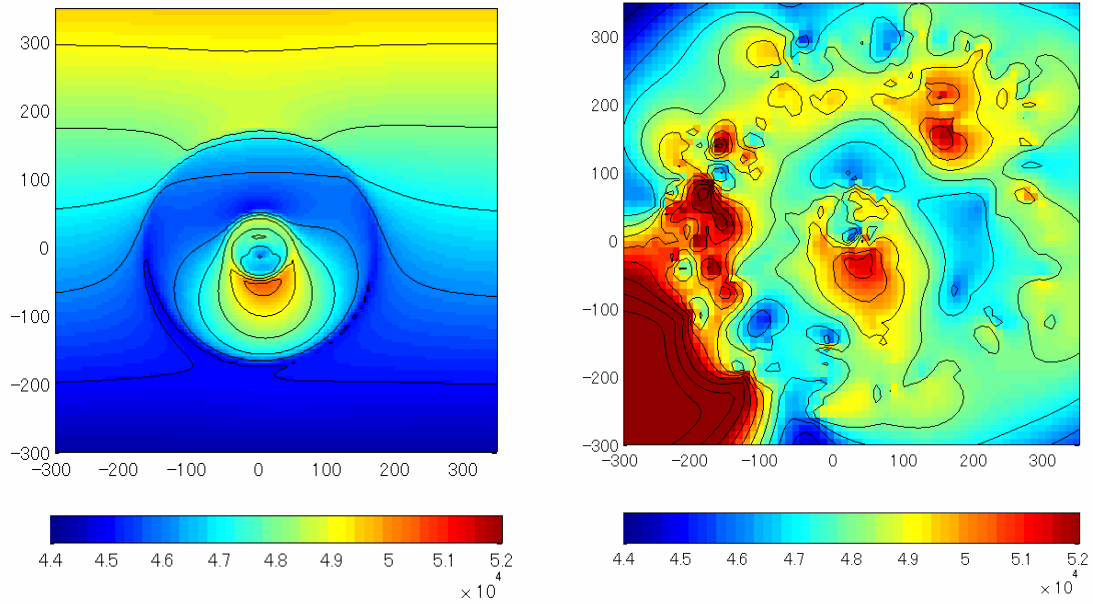


図 10. 内部構造を与えた場合の最適磁化モデル (左)と観測された磁気異常(右)。モデル計算では、北向きに 8.0 nT/m のトレンドを与えている。

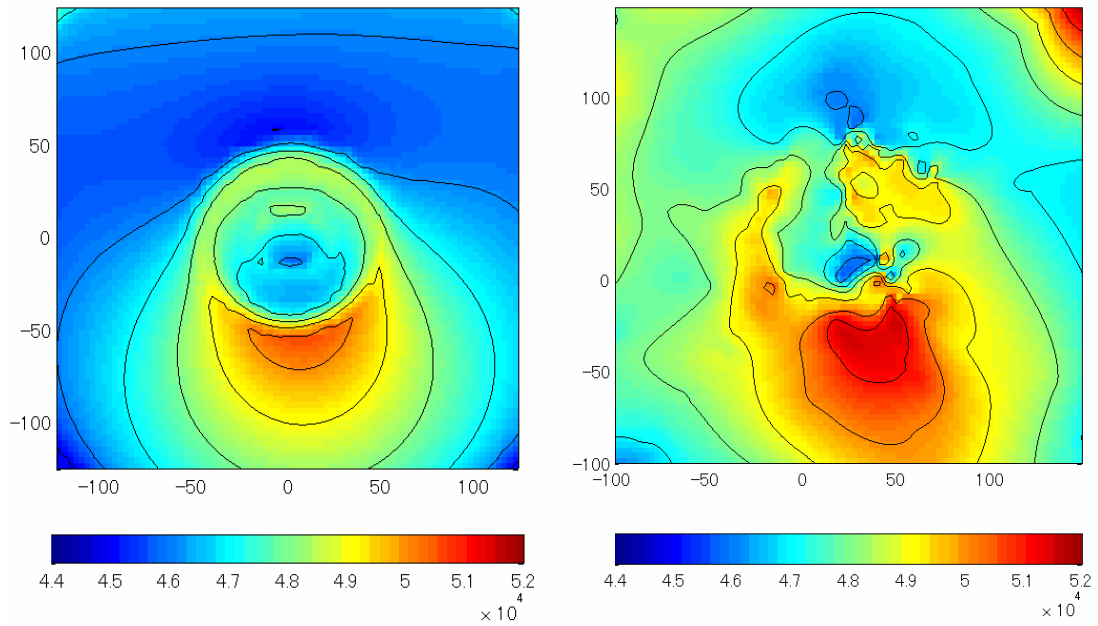


図 11. 図 10 の中央部を拡大したもの

ただし、本稿で推定した磁化構造が、発泡したスコリアやその溶結相として適切かどうかについては、現時点で十分な検討をしていない。溶岩流については米塚のサンプル、スコリアについては、近隣に位置する上米塚のサンプルを収集しているので、今後、残留磁化と誘導磁化の測定を行いたい。磁化構造モデルに制約条件を与えて、本稿の議論をより確実なものとする必要がある。

## 5. 考察

比抵抗構造と磁化構造のモデルを総合することにより、いくつかの考察を進めることが可能になった。まず、山頂火口の表層付近には、低比抵抗かつ低磁化の物質がある。このことは、山頂火口底およびその直下が、火口内壁の崖錐堆積物で覆われていることを示唆している。ごく表層については斜面でも低比抵抗を示していることから考えると、植生により土壌化された部分であると考えられる。次に、山体中央基底部は、先に述べたように高比抵抗の物質が占めている。磁気異常解析によれば、この部分は高磁化であることが好ましい。磁化の値は山体平均値の2倍程度であるから、磁性に大きな違いがないものと考え、密度も2倍程度であろう。上米塚（米塚の南東約800 mにある別のスコリア丘で、断面観察が可能）から採取したスコリアで密度を実測すると、 $1,100 \text{ kg/m}^3$ であった。もし、米塚の山体主要部を構成するスコリアがこれと同程度のものであるならば、高磁化域の密度は $2,200 \text{ kg/m}^3$ 程度と推定される。従って、その実体は若干の空隙を残し溶結した状態にある可能性が高い。山体の大部分は、磁化から見て均質性の高い媒質で構成されており、おそらく相対的に空隙率の高いスコリア堆積物である。この部分の比抵抗は深部に向かうに従って低くなっている。発泡度の高いスコリアであるならば、この比抵抗の遷移は、基底部に向かって空隙内の湿潤度（含水率）が増していることを示唆する。この部分の比抵抗値は数  $\text{k}\Omega\text{m}$  から数  $100 \Omega\text{m}$  を示しており、空隙内に水分を含む多孔質な岩石の比抵抗としてさほど奇異なものではない。

ここまで推定された内部構造から、米塚を形成した噴火の様式について以下に若干の考察を行う。山本<sup>6)</sup>は、小値賀島単成火山群に多数存在する噴石丘の内部構造を観察し、火砕物の溶結度および噴火様式との関係を論じている。それによれば、噴石丘の内部構造にはその溶結度によっていくつかのタイプが認められる（図12）。タイプIは溶結度が低いもので、ストロンボリ式噴火のような間欠的な噴火様式によって形成される。これは、Head and Wilson<sup>7)</sup>の考察によれば、マグマ噴出率が低く揮発性成分量が多い噴火に対応している。一方、タイプIVのように溶結度が高い噴石丘は、噴出率が高く揮発性成分量が低い溶岩噴泉のような噴火様式によるものとされる。米塚の場合、中央部の高比抵抗・高磁化部分を、スコリアの溶結部と考え、そのタイプは図12のIないしIIに該当すると思われる。このことから、米塚を形成した噴火は、ストロンボリ式の様式であった可能性が高い。

次に、磁化構造モデルで考慮しなかった溶岩流について考察する。溶岩流の影響は、その明瞭な流出部である山体西麓と北東麓に顕著に現れている。ただし、東麓から南麓にかけてもやや磁場の強い部分が環状に分布していることから、溶岩は基底部全体から流出しているようにも見える。ところで、山本<sup>6)</sup>は噴石丘の溶結度と溶岩流出形態の関係についても議論している。彼の分類を敷衍すると、米塚は、山体中腹から溶岩流出を起こすDpタイプにあたると思われ

れる。このタイプは、火道から支脈が分岐して山体中腹に伸びる形態で特徴付けられ、米塚と同程度の比較的小さな山体に多い。しかし、米塚の場合、西麓と北東麓の流出部に対応する高磁気異常は、山頂火口に向かって延長しているようには見えない。スコリア堆積物の山体斜面で覆われているため、基底部で中心火道に繋がるダイク状の溶岩が存在している可能性は否定できないが、米塚では、少なくとも浅い部分においては、中心火道からダイクの分岐は起こっていないと考えられる。

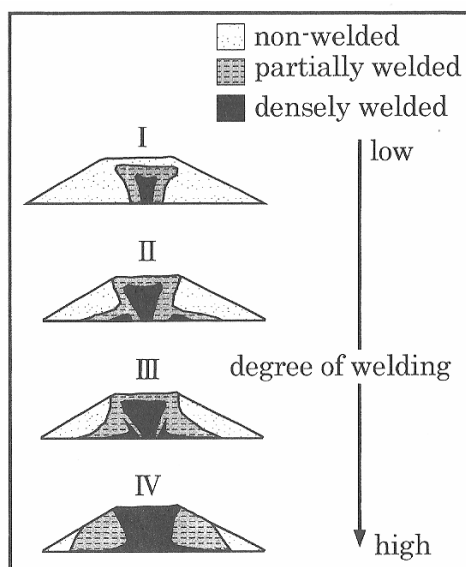


図 12. 噴石丘の内部構造(溶結度)による分類の概念図(山本, 2001)。

## 6. まとめ

阿蘇火山の集中総合観測の一環として、米塚スコリア丘の内部構造を考察する目的で地表磁気探査を行い、顕著な磁気異常を確認することができた。過去に行われた高密度電気探査による比抵抗構造と、今回実施した磁気探査に基づく磁化構造を総合することにより、以下のことが示された。

- (1) 山頂火口底の浅部には、低比抵抗かつ低磁化の領域がある。火口内壁の崖錐堆積物や植生による土壌を反映している可能性が高い。
- (2) 山体中央部には高比抵抗の領域があり、磁気異常解析によればこの部分は高磁化であることが示唆される。溶結したスコリアである可能性が高い。
- (3) 溶結部の分布から推測して、米塚を形成した噴火はストロンボリ式に近いものであったと思われる。
- (4) 磁気異常分布からみて、溶岩流出口は、少なくとも山体内部の浅い部分では中心火道とは連結していないと考えられる。

## 謝 辞

米塚への立ち入りは景観保全のため禁じられているが、今回の磁気測量に際し、特別に牧野組合の許可をいただいた。また、京都大学火山研究センターのスタッフ諸氏には、観測に際し便宜を図っていただいた。ここに記して感謝申し上げる。なお、本稿の議論に用いた比抵抗構造の元となった高密度電気探査は、著者の一人である橋本が京都大学在職中に、学部 3 年生の夏期野外実習の一部として実施したものである。

## 参 考 文 献

- 1) 横山 泉・荒牧重雄・中村一明 編 (1992) 火山, 岩波書店。
- 2) McGetchin, T. R., M. Settle, and B. A. Chouet (1974) Cinder cone growth modeled after Northeast Crater, Mount Etna, Sicily, *J. Geophys. Res.*, 79, 3257-3272.
- 3) Vergnolle, S. and C. Jaupart (1986) Separated two-phase flow and basaltic eruptions, *J. Geophys. Res.*, 91, 12842-12860.
- 4) Parfitt, E. A. (2004) A discussion of the mechanisms of explosive basaltic eruptions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 134, 77-107.
- 5) Houghton, B. F. and H-U Schmincke (1989) Rothenberg scoria cone, East Eifel: a complex Strombolian and phreatomagmatic volcano, *Bull. Volcanol.*, 52, 28-48.
- 6) 山本裕朗 (2001) 小値賀島単成火山群における噴石丘の溶岩流出形態, *火山*, 48, 1-10.
- 7) Head, J. W. and L. Wilson (1989) Basaltic pyroclastic eruptions: Influence of gas release patterns and volume fluxes on fountain structure, and the formation of cinder cones, spatter cones, rootless flows, lava ponds and lava flows, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 37, 261-271.
- 8) 小野晃司・渡辺一徳 (1985) 阿蘇火山地質図, 地質調査所, 1-8.
- 9) 内田利弘 (1993) ABIC 最小化法による最適平滑化拘束の比抵抗2次元インバージョン, *物理探査*, 46, 105-119.
- 10) 笹井洋一 (1991) 軸対称なポテンシャル問題を解くためのリップシッツ・ハンケル積分, 1991年 *Conductivity Anomaly* 研究会論文集, 110-121.