

## 草津白根山における空中磁気測量

宇津木 充<sup>1</sup>・田中 良和<sup>1</sup>・  
平林 順一<sup>2</sup>・小川 康雄<sup>2</sup>・  
浜野 洋三<sup>3</sup>

1: 京都大学大学院理学研究科  
2: 東京工業大学火山流体研究センター  
3: 東京大学大学院理学研究科

## Aeromagnetic survey on Kusatsu-Shirane Volcano

Mitsuru Utsugi<sup>1</sup>, Yoshikazu Tanaka<sup>1</sup>,  
Jyunichi Hirabayashi<sup>2</sup>, Yasuo Ogawa<sup>2</sup>,  
Youzou Hamano<sup>3</sup>

1: Graduate School of Science, Kyoto Univ.  
2: Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Inst. Tech.  
3: Graduate School of Science, Univ. Tokyo

### 1. 始めに

草津白根山ではこれまで、磁気測量や電気探査、電磁気探査などさまざまな電磁氣的観測が行われてきた。このうち、山崎ほか(1992)では1988年から90年にかけて全磁力の顕著な変化に対し、その変化を説明するため湯釜北東域の地下をソースとする熱消磁モデルが提出されている。本研究では、こうした草津火山で得られている電磁気学的な情報を統合し、山体浅部の磁気構造を把握することを目的として2003年11月に草津白根火山における空中磁気測量を行った。本報告では、得られた空中磁気測量データを元に、草津白根火山の大まかな磁気構造を推定し地質学的な情報との比較を行った。

### 2. 草津白根火山の概要

草津白根火山は群馬県の北西部、吾妻川を挟んで南の浅間火山と相対する位置にある火山である。この火山は基盤山地の肩付近を噴出源とするために、非対称で東方向に延びた形をしており、比較的なだらかな山頂部には、白根山や本白根山等の火砕丘群が南北に並び、水釜、湯釜、涸釜など多数の火口が分布している。草津白根火山の活動は、3つの活動期に区分されている。第1期の活動は、約60万年に形成された松尾沢火山の活動で、安山岩質溶岩と火山砕屑物を噴出して小型の成層火山を形成した。第2期の活動は、約55万年前～30万年前で、大規模な火砕流の噴出や厚い安山岩質溶岩を東・南方向に噴出した。その後20～30万年間の活動の休止期を挟んで、約16,000年前から第3期の活動が始まった。第3期の活動は主として山頂部での活動で、白根火砕丘や本白根火砕丘の単成

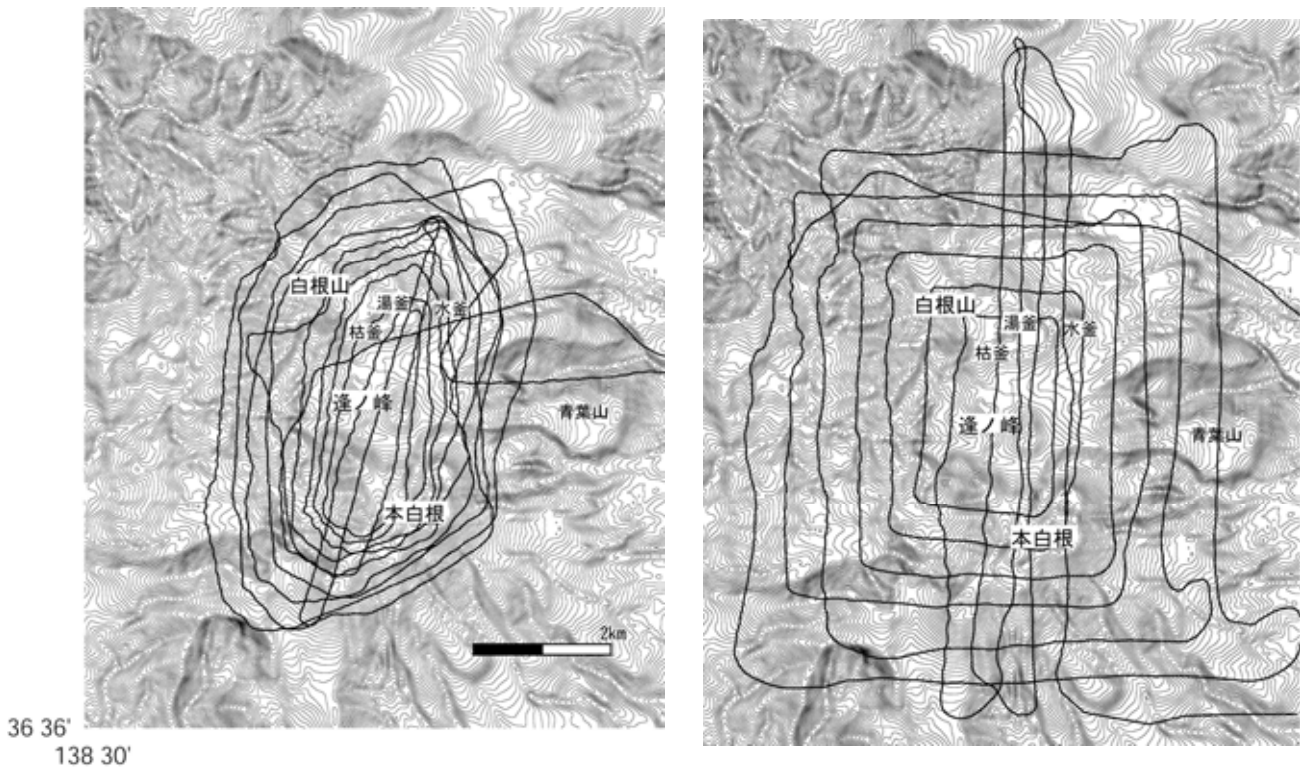


図1 フライト1(左)およびフライト2(右)の飛行航跡

火山を形成し、新期の溶岩流（殺生溶岩など）をやはり東・南方向に噴出し、また、水釜や湯釜などの火口も形成された。近年では硫化水素などによる人的災害などのほかに、山頂付近での水蒸気爆発などの活動が生じている。

### 3．空中磁気測量

近年、活動的火山に於いて地磁気観測が注目され盛んに行われるようになってきている。一般に、地中の温度が変わると、それに応じて地殻構成岩石の消磁、再帯磁が起こり、地表の磁場の値が変化する。こうした事を利用し、地上における磁場連続観測を通して地下の熱的状态変化をモニタリングし、噴火メカニズム解明や噴火予知に役立てようとする試みが多くの火山で行われている。草津白根火山に於いても、白根山山頂でこうした事を目的とした磁場観測が気象庁により行われている。しかし、磁場変化が検出された場合、それを地下の熱的状态の時間結変化に結びつけるためには、対象とする領域の磁化構造が詳細に分かっている事が望ましい。こうした事から、静穏期に於ける磁化構造を求める事は非常に重要である。このような目的の場合、空中磁気測量は非常に有効な手段となる。地上における地磁気観測から磁化構造を推定しようとした場合、地表付近の局所的な磁気異常、人工構造物や電磁気ノイズ源の影響などで詳細な地磁気分布を得ることが難しい。これに対し、航空機等を利用した磁気測量では、地表付近の局所的な磁気異常源から離れた場所で観測するので、比較的大きな構造により作られる磁場分布をより正確に測定することができる。しかし、飛行機を使用した磁気測量の場合、安定のためある程度の対地高度（1000～2000m）を保ちつつ高速で飛行しなければならず、火山のようなスケールの構造をターゲットにした場合には必ずしも適当ではない。そこで、我々

はヘリコプターによる高密度かつ低高度での磁気測量を行った。

磁気測量は、草津白根山、逢ノ峰、本白根山を含む東西約 8km、南北約 10km の領域について、2

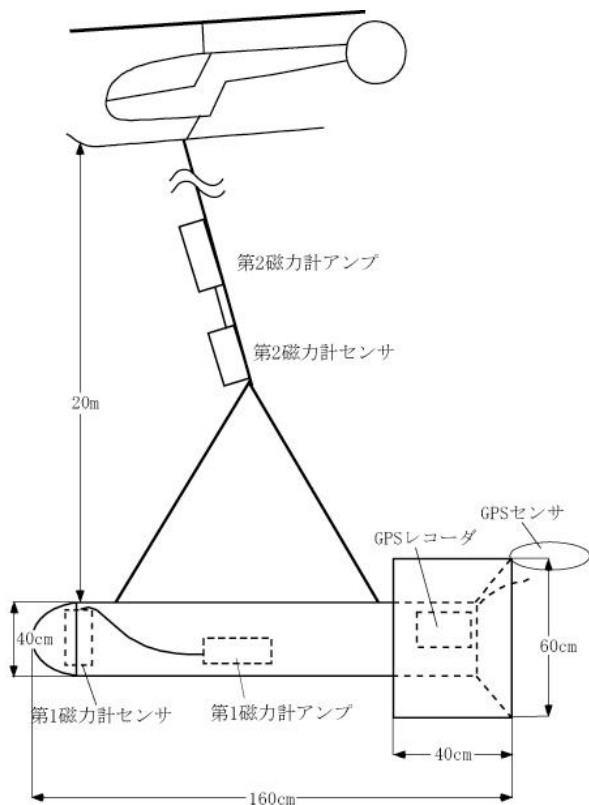


図2 バード概略図

種類のフライトを行った(図1)。第一フライトは対地 150m を目安とした等対地高度での測定、第2フライトは海拔 2500m の等海拔高度での測定であった。低高度の第一フライトでは地殻浅部に起因する短波長な磁気異常の測定、第2フライトではより大局的な磁化分布に起因する長波長な磁気異常の測定を目的としている。ここで、一般に空中磁気測量では、地殻磁化による磁気異常が南北に卓越することから、南北方向の直線的な測線で行われることが多い。しかし本観測領域は地形の起伏が激しいため、低高度のフライトでそうした測線をとることが難しい。このため、低高度でかつ測点密度をできるだけ密に取れるよう、低高度の第一フライトでは、図1(左)に示すスパイラル状の測線をとった。それぞれの測線長は、フライト1が約 100km、フライト2が約 120km で、フライトの所要時間は約 3 時間であった。磁場の測定に際しては、ヘリにバードを曳航させる方式をとった。使用したバードの概要を図2に示す。

バード本体は径 40cm、長さ 160cm の塩化ビニール製で、後部に径 60cm の円筒形の尾翼をつけている。また、飛行時の安定性のために鉛の錘(重量約 40kg)を乗せている。バード内には磁力計(Geometrix社製セシウム光ポンピング磁力計 G-858、測定精度 0.01nT、測定サンプリングング 1 秒)を搭載し、ヘリの機体磁気の影響を避けるためバードをヘリから 20m 吊り下げて測定を行った。また、もう一台のセシウム磁力計を、バードを吊るロープの途中(バードから約 10m 上方)に設置し、磁気グラジェントを測定する事を試みたが、気体磁気の影響が強く今回の解析には使用していない。観測された磁場の値には、地球外部に原因を持つ短周期の磁場変化が重なって観測されており、地下構造を反映した磁気異常分布を調べるためにはそれらの影響を除去する必要がある。地球外部起因の磁場変化は、ある程度広域で同様の変化が観測されると考えられることから、白根山東腹のヘリポートにリファレンスとなる磁場観測点を設け、空中磁気測量から得られた磁場値との単純差をとって補正した。バードの航跡は、やはりヘリポート付近に設置した GPS 基地局のデータを用いて、バードに搭載した GPS とのディファレンシャル解析により求めた。ここで、今回使用した磁力計では、時計の設定を行う仕様であった為、時刻に任意性が残る。このためフライトの前に GPS 時計を利用して磁力計の時刻校正を行った。磁力計のセンサーの周り(観測バードの先端部)にコイルを巻き、それに GPS 時計を用いて時刻同期させた PC から十秒毎に電流を流す。これにより、10 秒ごとのステップ状の磁場を発生させ

それを磁力計で測定する。これにより、ステップが現れたときの磁力計の時刻から、磁力計の時計のずれを同定した。その結果、時計ずれは0.95秒で有ることが分かり、フライトで得られたデータに

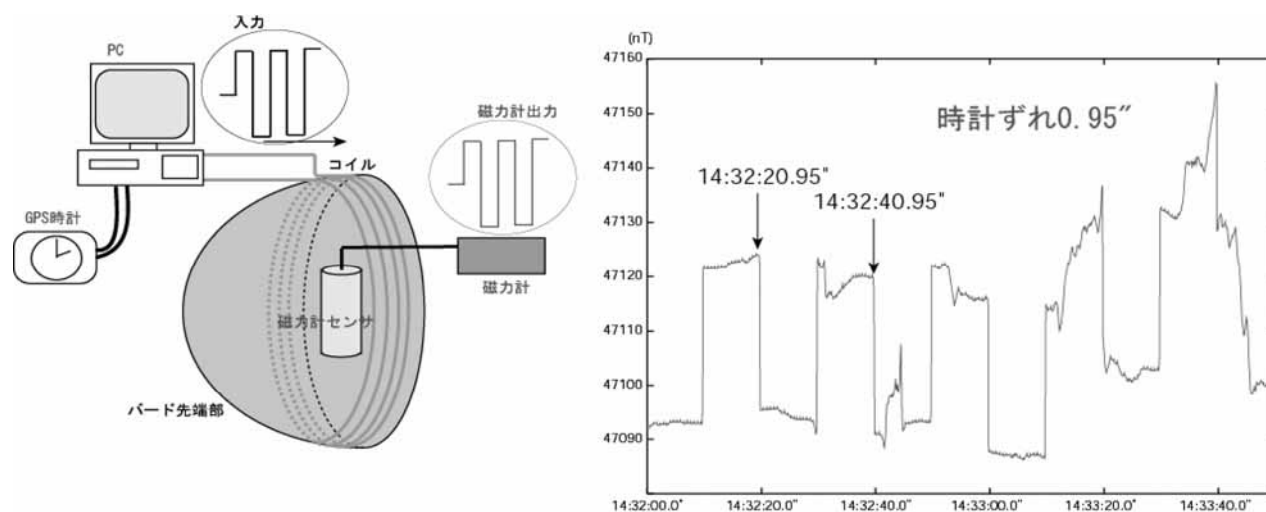


図3 磁力計の時刻校正の概念図(左)とそのデータ(右)

についてもその補正を施した。

#### 4. 磁化構造解析

こうして得られた磁場データから磁気異常の分布を求めた結果を図4に示す。この磁場データを基に、草津白根山の地殻磁化構造解析を行った。

まず、測定領域の大局的な地殻平均磁化を求めるために Grauch(1987)の方法を用いて観測領域における地殻の平均磁化を求めた。これは、山体全体が一様に帯磁していると仮定した場合の磁化強度で、山体を構成する主要な岩質等を表現するものであると考えられる。この計算の結果、平均磁化として 2.5A/m が得られた。草津白根火山は安山岩主体の火山であり、この値は平均磁化としては調和的な値であると考えられる。

次に、より詳細な地殻磁化分布を求めるためインバージョンによる解析を行った。解析方法は以下の通りである。地殻を、角柱状の小ブロックに分割し、各々のブロックは一定深度まで一様に帯磁していると仮定する。そうした上で、観測データを最もよく説明するように各々のブロックの磁化強度を決定した。各々の角柱が作る磁場に関しては Bhattacharyya (1964)のプリズム状の帯磁物体の作る磁場の計算式を用いた。今回の解析では、この角柱のディメンジョンを、NS100=m、EW=100m、角柱の下面の深さを地表から 250m とした。但し、各々のブロック上端面は、単なる水平面ではなく、地形に応じた凹凸を与え

ている。これは、今回のフライトのように比較的low高度で飛行を行っている場合、水平な上端面を持つ角柱を用いて磁気異常を計算した場合、角柱端点付近に磁気異常が集中してしまい、解の収束性に悪影響を及ぼすことが考えられるためである。標高データは、国土地理院の 50mメッシュ数値地図を用い、2次のスプライン補完で 10mごとの標高データを計算して用いた。また、各ブロックの磁化方

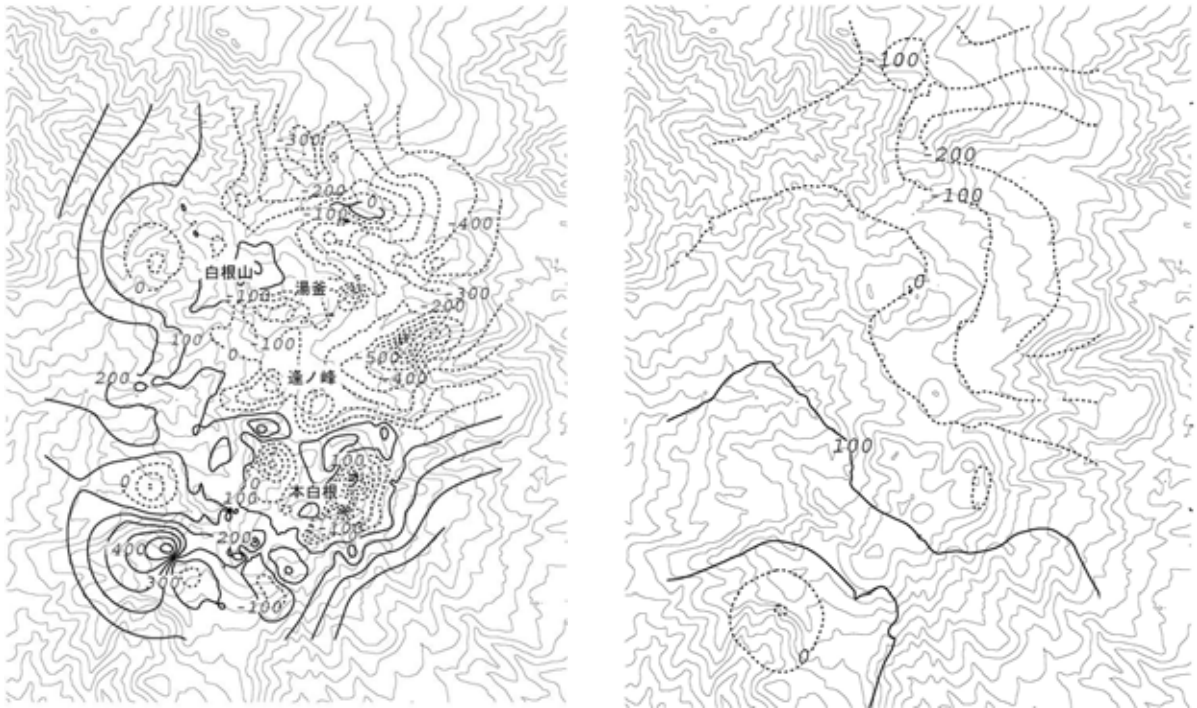


図4 フライト1(右)およびフライト2(左)により得られた磁気異常分布(単位は nT)

向は一様(伏角  $45^\circ$ 、偏角  $N7W^\circ$ )であると仮定し、磁化強度のみを未知変数とした。この場合、地殻を分割した  $i$  個目のブロックの磁化を  $J_i$ 、このブロックが単位に磁化している場合に観測点  $j$  につくる磁場を  $W_{ji}$  とすると、磁場観測値は

$$F_j = \sum_{i=1}^m W_{ji} J_i$$

( $j=1,2,\dots,n$ )

で与えられる。この行列  $W$  の逆行列を求めることで磁化分布  $J$  が求められるが、この計算に際しては、磁化空間分布の一階微分の平滑化を拘束条件とし、ABIC 情報量基準のインバージョンを行い最適解を求めた。こうして得られた磁化分布を図5に示す。図では磁化分布が平均磁化  $2.5A/m$  より大きな領域を実線、小さな領域を破線で表現している。この図から、本白根山南側、東側に磁化の強い領域が見られるが、図6に示したこの領域の地質図と比較すると、これらはそれぞれ本白根溶岩、殺生溶岩の分布域と一致しているように見られる。但し殺生岩溶岩の東部域は低磁化になっているが、これらは殺生河原の硫気変質地帯にあたり、変質により地殻岩石の磁化が失われて低磁化になっていると考えられる。このような低磁化域は、白根山湯釜北東、白根山西側の万座温泉周辺、青葉山北西側にも見られるが、これらいずれの領域も硫気変質地帯と一致していることが分かる。特に湯釜北側の低磁化域は、今回得られた磁化分布の中で最も磁化の低い領域であるが、この領域は現在白根山山頂で最も活発な噴気活動をしている領域のやや北東側に当たる。また山崎ほか(1992)が1988年から1990年にかけて観測された磁場変化を説明するために熱消磁モデルをおいた位置にも近く、山頂北側噴気の熱源を示している事も考えられる。

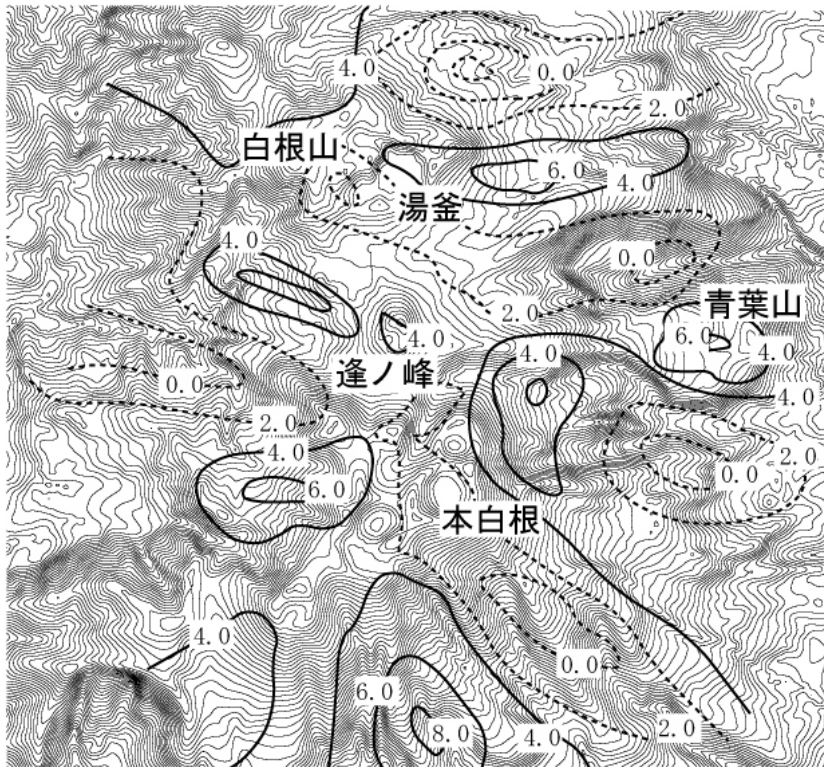


図5 インバージョンにより求められた磁化分布

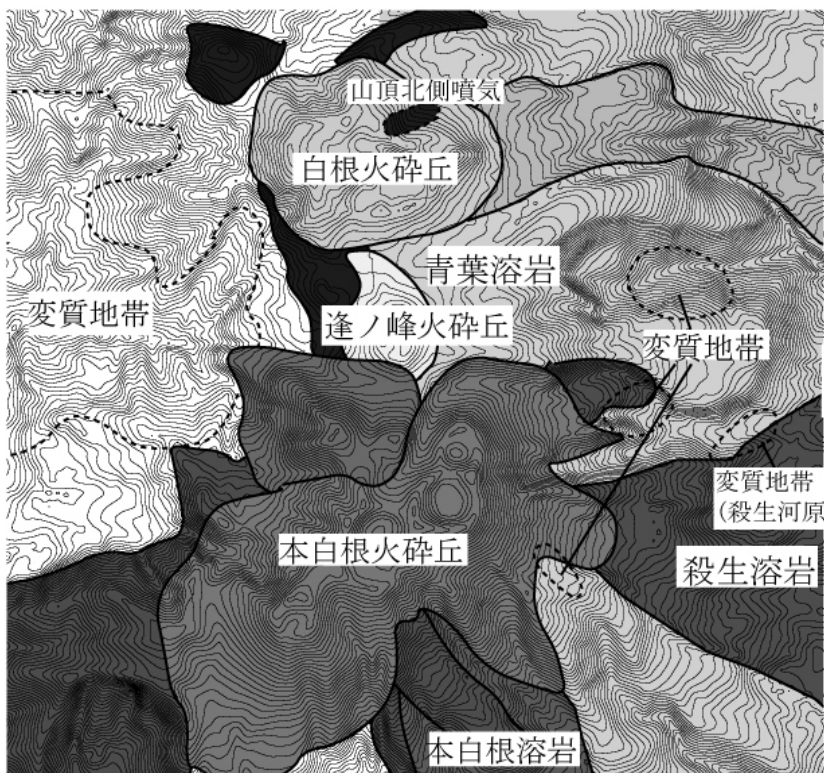


図6 草津白根山の地質概図

## 5. まとめ

今回の磁気測量・構造解析からもとめられた磁化分布は、地質学的な情報と非常に調和的であることが分かった。しかし、今回得られた磁化構造には深さ方向の磁化分布に関する情報は含まれて居ない。特に、現在活動的な白根山周辺部の3次元的な磁化構造を求める事は、地下の熱的状态の把握、熱水対流系の推定などにつながり、非常に重要な情報を提示する事が可能であると考えられる。特に、今回の観測では異なる2高度のフライトデータが得られており、こうしたデータを利用することで深さ方向の磁化分布も含めた構造解析が可能であると考えられる。こうした解析を目的とした計算手法は Li and Oldenburg (1996) や Pilkington(1997)などで提出されており、こうした手法を用いて今後白根山周辺部の3次元的な磁化構造解析を進める必要があると考えられる。また、得られた磁化構造をより定量的に解釈するためには、電磁気学的構造

探査や自然電位測定といった手法を併用し、電磁気学的な情報を総合して解釈にあたる必要があると考えられる。

### 参考文献

Bhattacharyya, B. K. (1964) Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization, *Geophysics*, 29, 517-531.

Grauch, V.J.S. (1987) A new variable-magnetization terrain correction method for aeromagnetic data, *Geophysics*, 52, 94-107.

Li, Y and Odenburg, D.W. (1996) 3-D inversion modeling of magnetic data, *Geophysics*, 61, 394-408.

Pilkington M. (1997) 3-D magnetic imaging using conjugate gradients, *Geophysics*, 62, 1132-1142.

山崎明、中禮正明、角村悟、中島新三郎(1992) 草津白根山における全磁力変化の解析：1999年の顕著な全磁力変化と熱消磁モデル, *Memoirs of Kakioka Magnetic Observatory*, 24, 53-66.