

# 岩手山航空磁気測量図の作成 Aeromagnetic Anomalies over Mount Iwate Volcano

測地部 錦 輝明・白井宏樹

Geodetic Department Teruaki NISHIKI and Hiroki SHIRAI

科学技術庁研究開発局 藤原 智\*

Science and Technology Agency, Research and Development Bureau Satoshi FUJIWARA

## 要 旨

1999年夏に岩手山周辺で航空磁気測量を実施し、空中の磁気分布を示す磁気図を作成し、国土地理院技術資料「岩手山航空磁気図 B.1-No.27」として刊行した。本稿では、その作成過程と結果について述べる。火山地域の航空磁気測量は今回初めて実施され、従来の全国航空磁気測量とは質・量ともに異なった種類のデータが得られた。また、火山地域での利用に即した成果が必要とされるために、新たな解析技術の開発を行った。今回の調査結果から、西岩手山に地表のごく近くまで地下の熱が達していることを示す負の磁気異常が認められた。一方、東岩手山は表層の火山岩の磁化が極めて強いことを示す正の磁気異常が見られ、表層まで熱が達していないことがわかるなど、岩手山の構造と熱の分布に関する多くの情報が得られた。

## 1. はじめに

岩手山は火山であり、過去に何回もの噴火を繰り返すことで現在の山体を形成してきた。広義の岩手山は25個以上の火山からなる火山群であり、形成時期が比較的新しい東側の最高点（標高2038m）周辺は東岩手山と呼び、形成時期が古い西側は西岩手山と呼んで区別している（土井，1999）。近年では1919年（大正8年）に西岩手山で水蒸気爆発が起きた後、昭和に入ってから東岩手山でも地温の上昇や噴気が数回見られた。1972年（昭和47年）以降は比較的静穏であったが、1998年（平成10年）に地震数の急増や山体が南北に開くような地殻変動（国土地理院，1999）が見られるようになり、1998年9月3日には、岩手山の南西部でマグニチュード6.1の地震が発生し、火山活動に関する警戒感が強まった。この地域の火山活動を監視するために、地震計、GPS受信機、光波測距儀などが数多く設置されたが、山体の大部分は山岳地帯であるため観測が困難であり、かつ火山活動のために立ち入り禁止にもなっているため、必ずしも詳細な観測網を成していない。

火山活動を監視し、災害防止・軽減を図るには、火山自身を知ることが重要である。このうち火山内部の構造・状態を知るためには、穴を開けて直接調べるのが最も確実である。しかし、実際には深さ数kmの穴を開けるのですら相当な労力を要するし、マグマで高温になった火

山の内部を直接のぞくことはほとんど不可能である。したがって、火山（地球）内部を知るには、地球の内部を通り抜ける道具を使用して間接的に調査を行うのが普通である。その道具として、現時点では、地球内部を通過する電気や磁気といった電磁波、地下の質量分布の大小を引力の大小で検出する重力、およびスィカをたたいて中身を判断するように地球の中を伝わる振動を利用して地球の内部の性質を知る地震波の3種類がある。地球の磁気を観測する地磁気観測は、磁気を介して地球を解剖するものであり、地球内部の理解のために必要不可欠な要素の一つであると言える。

地表で観測される地磁気の一部は、地球表面の地殻で発生している。その原因としては、地殻を構成している岩石の磁化（磁石としての性質）によるものが大きく、岩石の材質や成因によって磁化の大きさが異なる。磁化された岩石は、火山活動の活発化に伴いマグマや熱せられた地下水などの上昇により温度上昇がすると、磁気が弱められ、ある温度（キュリー点）を超えると磁気が消失する性質を持っている。逆に、いったん熱で磁気が消失しても、冷える過程で再び磁気を帯びる。航空磁気測量により、空中の地磁気の分布を測定することで、地下の岩石の磁化分布とマグマなどの熱による消磁域を推定し、地下の構造とその熱的状态を明らかにすることができる。

今回の航空磁気測量は、このような地磁気を対象とするリモートセンシングの手法を用いて、岩手山周辺の熱的分布を含む地下構造を明らかにすることを目的に行われた。得られた地磁気分布から、地下構造を分析するために行った解析処理の手法とその結果について報告する。

## 2. 航空磁気測量

地上における地磁気観測では、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を受けて周囲と異なった地磁気の値を示すことがあり、詳細な磁気分布を得ることが難しい。これに対して、航空磁気測量は、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ことから、ある範囲内の平均的な磁場を正確に測定できる。また、ほぼ自由な航路をまんべんなく飛ぶことにより、火山地域などの立ち入りが困難な場所でも、空間的に詳細な観測が可能である。国土地理院が行った磁

気測量の中で詳細な分布観測としては地上観測である二等磁気測量(全国約900点)があるが、局所的な磁気障害と多大な労力のために1970年代以降は行われていない。したがって、より詳細な地磁気分布を調べるためには、現状として航空磁気測量によって行うしかないであろう。

国土地理院の航空磁気測量は、航測機「くにかぜⅡ」により1962年から行われた日本全国の高度3000mにおける測量と、「くにかぜⅡ」により1982年から行われた高度5000mにおける測量の2種であり、1998年度に全国の観測が終了した。活火山およびその周辺地域における航空磁気測量は、測地学審議会の建議に基づき国土地理院が1999年度から取り組んでいる。これにより、地殻上層部の局地的磁気異常や火山地域の地形、地質構造を反映した磁気異常をとらえることができ、火山噴火予知の基礎的資料となることが期待される。

航空磁気測量において空間的な詳細さを追求する場合、低空を低速で飛行する必要がある、それにはヘリコプターや無人小型飛行船などがよく使われ、必ずしも「くにかぜⅡ」のような飛行機の得意とする分野ではない。また、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)などの観測によって詳細な航空磁気図がカバーされている地域も多いので、飛行機による一般的な観測では新たな知見を得られにくい。そこで「くにかぜⅡ」を使って火山地域に関する新たな知見を得るために、複数の異なる高度を飛行する測量を行った。これは、水平方向の磁気異常だけではなく鉛直方向の情報も得ることで、立体的な地磁気異常分布の調査を目的とするものである。

航空磁気測量による欠点の一つは、地磁気の方角の観測が難しいことである。これは、航空機の姿勢情報を正確に得ることが困難であるためである。航空磁気測量は、高速移動により行われるために位置制御が難しく、また、飛行機自体の磁気の影響を除去する補正計算が複雑なために、最終的な精度は地上観測に比べて低くなり、繰り返し観測による微小な地磁気の時間変化検出には必ずしも適していない。したがって、地磁気の場合、分布の測定には航空磁気測量が有効であるが、時間変化の検出には地上における連続観測が有効である(藤原・他、2000)。

### 3. 観測の概要

観測の諸条件は以下の通りである。

航空機:ビーチクラフトUC-90「くにかぜⅡ」

飛行場:海上自衛隊八戸航空基地

観測期間:1999年7月29日～8月5日

観測範囲:岩手山を中心とする東西方向21km、

南北方向27kmの地域

コース間隔:緯度・経度差30秒ごと

(南北方向約900m、東西方向約800m)

飛行高度:2700m, 3200m, 3700m(気圧測高による)

コース数:延べ186コース

(31コース×2方向×3高度)

飛行速度:135KT(約250km/h)

風によって対地速度は異なる

測定データ:6秒間隔の全磁力値

測位データ:電子基準点No.950161を既知点として基線解析を実施

使用機材:プロトン磁力計, GPS測量機

機体磁気検定地:水沢測地観測所

プロトン磁力計のセンサーは、機体後部に約1mつきだした形で装着する(写真-1)。観測範囲と個々の観測位置の例として図-1に高度2700mの観測位置および地形(標高)を示す。

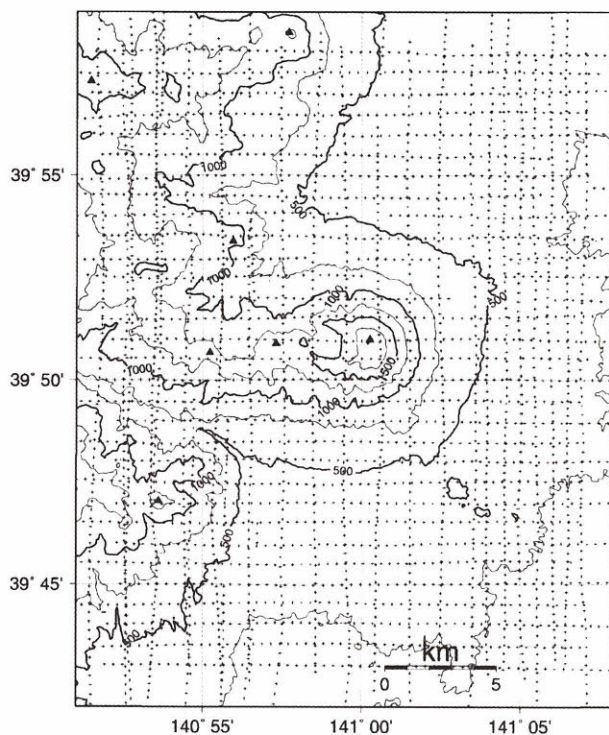


図-1 観測範囲と高度2700mの測定点(+)および地形(実線:標高250mごと)

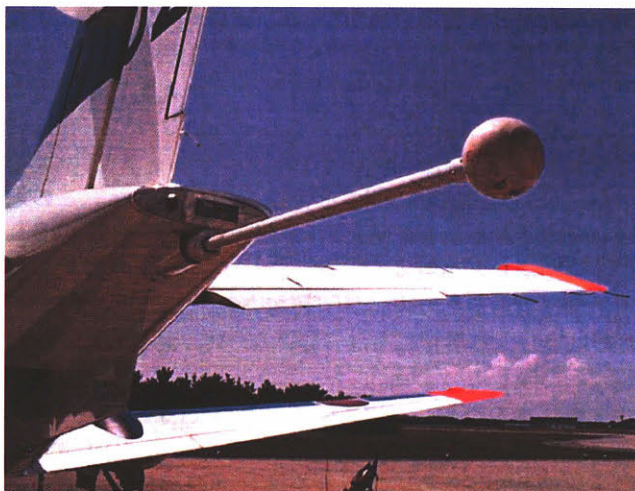


写真-1 「くにかぜⅡ」機体後部にとりつけられたプロトン磁力計センサー

#### 4. データの前処理

一般に、航空測量を行う機体には磁化（機体磁気）があり、これは機器の着脱や機体の分解修理などによって変化する。機体磁気は、自然磁場の観測に誤差を与えるので、測量年度ごとに機体磁気の量を計測して補正を行っている。磁気は向きと大きさを持ったベクトル量であり、飛行時の機首の方向によって、測定された量への補正量が異なる。また、飛行機は、飛行時に受ける機体の横方向からの気流（偏流）によって機体が流されるため機首の方向は、航跡方向とずれる。つまり、測線としての向きと機首の向きは異なることになるので、機首方向の測定も必要である。

今回の観測では、機首方向の測定が機器の故障のため行われなかったこと、東西方向の観測においてセンサーの不良と思われる $\pm 20\text{nT}$ 程度のランダムなノイズが含まれていたことなどの観測に起因する誤差が判明した。こうした、数多くの観測誤差によって、その補正方法は困難を極めることになった。幸いなことに、岩手山周辺の上空では磁気異常が明瞭に現れているために、磁気異常が測線の位置、方向、測定時刻などに対応して不自然な分布を示さないように調整することで、これらの誤差の影響を低減した。ランダムノイズが標準偏差で $10\text{nT}$ 以上存在するので、絶対的な精度も $20\text{nT}$ 程度のオーダーであると推測される。

観測された地磁気の値には、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地磁気の分布を調べるためには、それらを除去する必要がある。地球外部に起因する磁場変化は、ある程度の広域で同様な変化が観測される性質がある。そこで、異なる日時に観測された地磁気の値から同一の日時（基準日とよぶ）における地磁気の空間分布を求める処理を行った。今回は基準日を1999年8月1日0時（UT）とし、水沢測地観測所で取得されている全磁力の観測値において、基準日からの全磁力値の変化量を、航空磁気測量による各観測の時刻ごとに求めて、航空磁気測量の観測値からその量を差し引く方法を使った。

地磁気は地球内部・外部にわたる巨大なシステムの中で生じている部分が大きいため、局所的な異常分布を把握するためには、時間（長周期）と空間（長波長）における地磁気の概要を差し引いてその残差を表示することがよく行われる。ここでは、一般的に使われているIGRF（International Geomagnetic Reference Field: 国際地球標準磁場）を大局な地磁気分布として、これからの残差を求めた。IGRFの補正には緯度、経度、高度および時刻（1999年8月1日0時: モデルはIGRF1995使用）をパラメータとして使用した。

#### 5. 磁気異常図の作成

##### 5. 1 磁気異常図

4節の前処理を行った全磁力値をメッシュグリッド上

に補間し、2次元のローパスフィルターをかけて短波長のノイズを減らし、各高度ごとの磁気異常図を作成した。この過程で、明らかに計測上の異常値があることがわかった。これらは、図化して特定し元データから取り除いている。図-1の測定点は、最終的に使用されたデータ点のみを示している。岩手山の北側にデータ異常点が多く存在しており、送電線などの地上のノイズによる影響がある可能性がある。これらの結果を3高度まとめて一枚にした図が、岩手山航空磁気測量図(1/3)（国土地理院、2000）であり、いわゆる全磁力磁気異常分布図である。図-2に一例として高度2700mの図を示す。

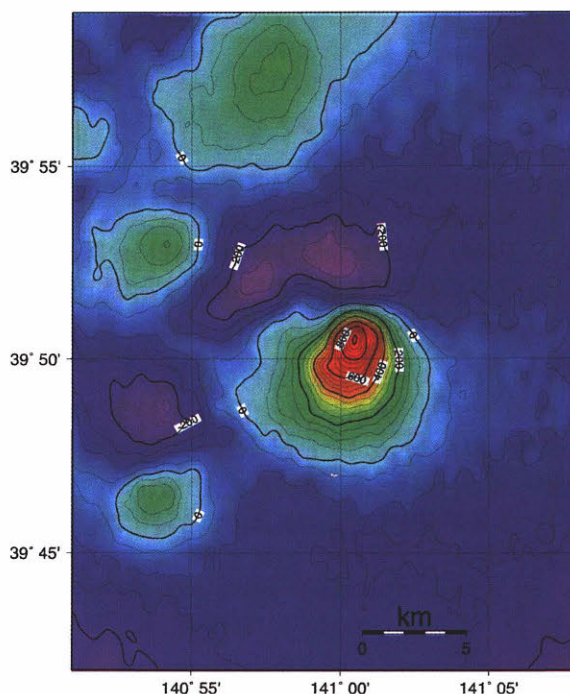
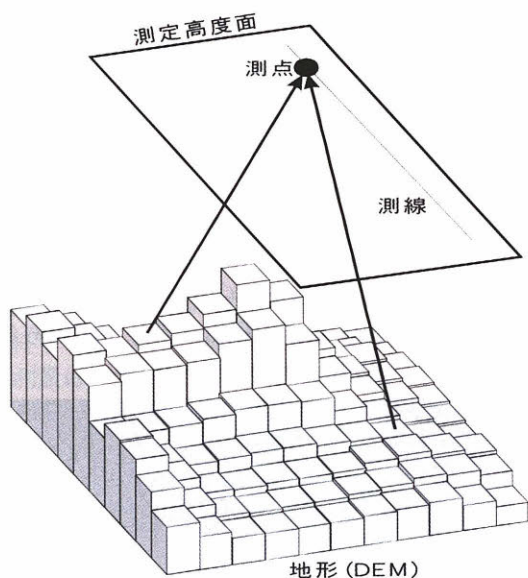


図-2 高度2700mにおける磁気異常分布図  
(黒線: 磁気異常50nTごとのコンター)

##### 5. 2 地形補正した磁気異常図

図-2は、重力異常図に例えればフリーエア重力異常図のようなものに対応し、基準面より上の地形の持つ磁化の影響を大きく受けており、標高の高い岩手山に対応した正の異常が見られる。そこで国土地理院の数値地図によって刊行されているデジタル標高モデル（DEM）を用いて、地形による磁気異常の除去（地形補正）を行う。

地形補正量はBhattacharyya (1964)の方法にしたがい、図-3で示すように地形を一定深度までの角柱に分けて、すべての角柱の磁気が測定点に作る磁場の和を測定点ごとに計算する（Okuma et al., 1994）。角柱の一边の長さを短くするにしたがって、また、地形補正を計算する範囲を広げるにしたがって、計算量が膨大になり時間がかかる。今回は、地形を30秒ごと（約900mごと）の角柱に分解し計算した。このとき、図-1で示される測点の範囲より広い範囲の地形を考慮した。これも重力

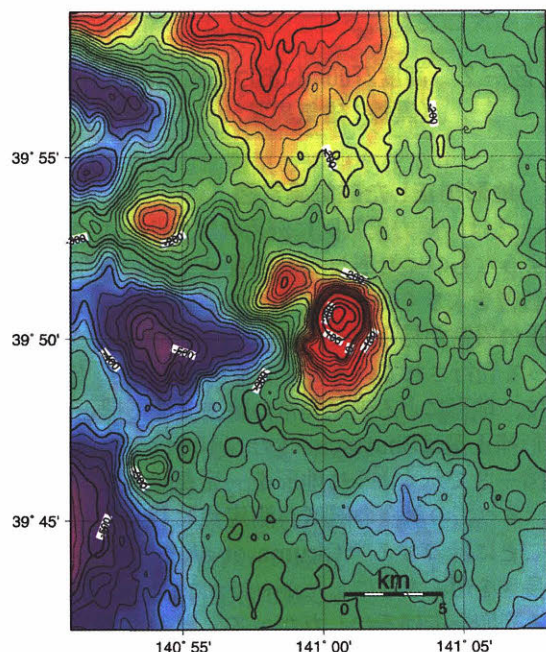


図－3 地形補正の概念図

DEMで表される地形は、各角柱に分解され、すべての角柱が測定点に作る磁場の和を測定点ごとに求める

の地形補正の場合と同様に、地形の磁化の影響は、距離が離れるにしたがって小さくなるが、図化する範囲外の地形の影響も取り除かなくてはならないからである。

地形補正の計算では、各角柱ごとの磁化の強さはすべて同じであると仮定した。それに用いる磁化の強さはかなり重要なパラメータであり、地域ごとに大きく異なる。そこで、図－2の磁気異常図と地形補正量の相関が最大になるように、この磁化率を求めた (Nakatsuka, 1994)。



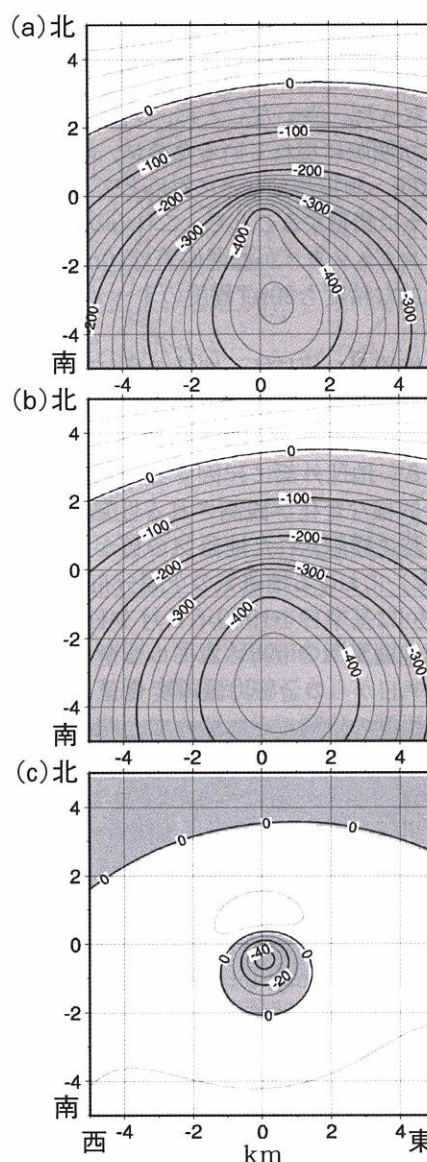
図－4 高度2700mの地形補正後の航空磁気異常分布図 (黒線：磁気異常20nTごと、100nT以上は100nTごとのコンター)

その結果、平均磁化率として  $4 \text{ A/m}$ 、磁化している場所の下限として地下  $5 \text{ km}$ を採用した (地下は高熱になっており、キュリー点温度に達している深度以深では岩石は磁化を持たない。しかし、この深さの違いは異常値の絶対値をずらすだけであり、磁気異常の相対的な空間分布には影響を与えない)。

こうして得られた結果を3高度まとめて一枚にした図が、岩手山航空磁気測量図 (2/3) (国土地理院, 2000) である。一例として、図－4に高度2700mの地形補正後の磁気異常図を示す。地形補正後なお岩手山において強い磁気異常が見られる。

### 5. 3 異なる高度の差の磁気異常図

今回の岩手山航空磁気測量の特徴は、複数の異なった



図－5 標高1200m地点と地下10km地点に負の磁気異常源が存在するときの磁気異常分布図 (数値の単位：nT)  
(a) 高度2700m, (b) 高度3200m, (c) (a), (b)の加重差

高度面からの観測が存在することである。それらの差を作成することで、深さに関する磁化分布の情報を抽出する。岩石磁化の影響は、定性的には、深いところに源を持つ磁気異常が、観測面の下層と上層ではほぼ同じ量であるのに対し、浅いところに源を持つ磁気異常では上層より下層でより大きな量となって現れる。したがって、高度面が異なる磁気異常の差では、深い磁気異常源によるものがほぼ消え去り、浅い磁気異常源によるものが現れると解釈することができる。この場合、単純にとった差では、下層の影響だけが強く現れてしまうので、上層を高度に応じて定数倍して加重差をとる方法を新たな解析手法として開発した。

図-5は、(a) 高度2700mと(b) 高度3200mの観測において、標高1200mの地表と深さ10kmの地下の2カ所に磁気異常源があったときに生じる磁気異常を数値計算した結果である(6.1節参照)。図の(a)と(b)で似通った分布を示しているのが、深い磁気異常源によるものであり、その加重差(c)をとることで、浅い磁気異常源による影響だけが明瞭に浮かび上がることがわかる。こうして得られる加重差をまとめて一枚にした図が、岩手山航空磁気測量図(3/3)(国土地理院, 2000)である。この図には岩手山の地形(標高)も併せて載せてある。また、岩手山航空磁気測量図(2/3)、岩手山航空磁気測量図(3/3)では、標高も同時に磁気異常図に書き入れ、場所の特定を容易にしてある。

## 6. 解釈

### 6.1 磁場分布について

磁気を帯びた岩は磁石としての性質を持っており、N極とS極が一組になって現れる。岩石の磁気は地球磁場の方向を向いていることが多く、地磁気の方向が鉛直方向から傾いている(伏角の存在)ために、日本付近では、正に磁化した岩の南側に大きなプラスの磁気異常、北側

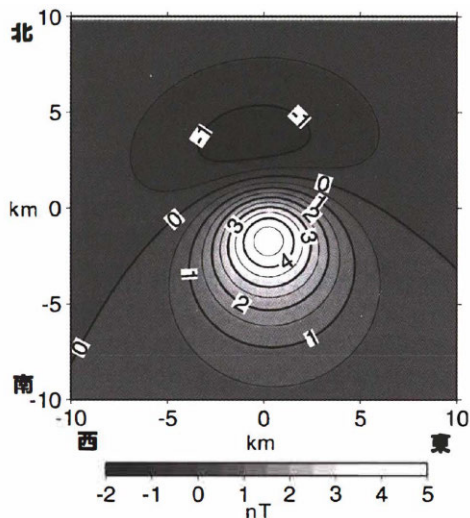


図-6 地下5kmに正の磁気異常源( $x=0$  km,  $y=0$  km)があるときに地表に生じる磁気異常分布図(数値の単位:nT)

に小さなマイナスの磁気異常が現れる傾向にある(図-6)。負に磁化した場合はプラス/マイナスが逆になる。したがって、測定値をそのまま図化したときに現れるプラス正や負のピークの真下に磁気異常源があるわけではないことに注意が必要である。このとき、地上に現れたプラスとマイナスのピーク間の距離と磁気異常源の深さがほぼ同じになる性質がある。例えば、図-2において東岩手山からわずかに南にずれた位置にみられる大きな磁気異常は、東岩手山の山体の磁化によるものだが、ピーク間の距離は小さく磁気異常源が地表に近いことを示している。

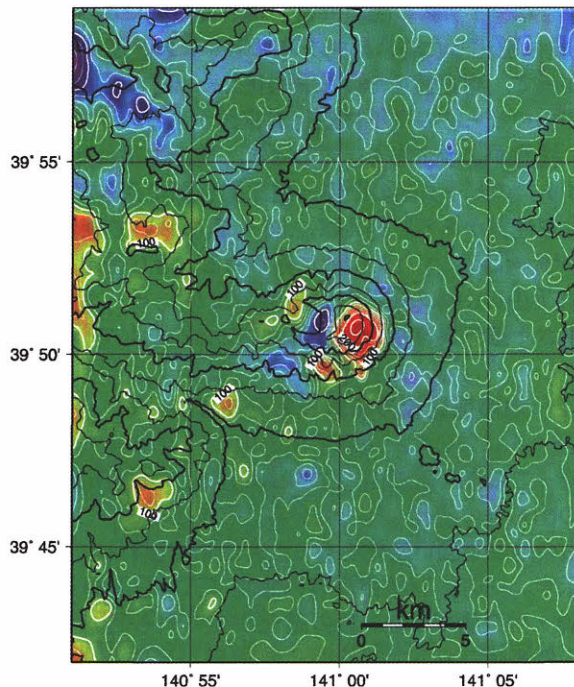
### 6.2 地形補正後の磁気異常分布について

図-4において、東岩手山の山頂付近が強く正の磁化を持っており、前森山、中倉山の西側、高倉山などの周辺の山も正の磁化を持っていることがわかる。これは、これらの地域が強い磁化をもった火山岩で覆われていることを示す。一方、葛根田溪谷の北側(三ツ石山周辺)や秋田駒ヶ岳東側では強い負の磁化が見られる。これは、これらの地域の地下で広範囲に熱消磁が発生していることを示唆している。葛根田川沿いは滝ノ上温泉や地熱発電所があり、日本有数の地熱地帯である。地殻変動観測によれば、(国土地理院, 1999), 1998年の4月~7月頃に三ツ石山の地下約8kmに等方的に膨らむ茂木モデルで近似できる膨張源の存在が推定されており、この膨張源と磁気異常分布から推測される熱源の位置がほぼ一致していることが興味深い。

### 6.3 異なる高度の差の磁気異常分布について

異なる高度で観測された地形補正済みの磁気異常の加重差をとった図-7では、東岩手山の正の異常が際立ち、表層の火山岩の磁化が極めて強いことを示している。これは過去の噴火による熱は冷めて地下の岩石が再磁化された結果であると考えられる。また、再磁化以後、東岩手山では表層まで新たに熱が達するような現象が起きていないことを表している。一方、西岩手山の御釜湖の東側および鬼ヶ城から犬倉山南部にかけて負の異常が広がり、これは地表ごく近くまで地下の熱が達しているためと推定される。この近くの大地獄谷~黒倉山~姥倉山などでは現在でも噴気活動が活発であり、東岩手山における活動と対照的である。噴気が発生している地帯では磁気異常はやや正であり、地下の温度はキュリー点温度に達していないようである。周囲の磁気異常分布から、この噴気地帯への熱の供給は、地下では東側もしくは南側から行われていると推定される。なお、これらとは別に、八幡平でも浅い熱源による熱消磁の効果と思われる強い負の異常が見られる。

図-4に現れているのに図-7に現れない磁気異常の分布は、磁気源が深部に存在することを示す。例えば、葛根田溪谷北側の地熱地帯や秋田駒ヶ岳東側がそのような場所にあたり熱消磁域は深いことがわかる。東岩手山



図－7 高度2700mと高度3200mの地形補正後の磁気異常の加重差分布（白線：磁気異常のコンター－20nTごと、200nT以上は100nTごとのコンター、黒線：250mごとの標高コンター）

は表面近くが強く正に磁化しているために、深部の熱についてはよくわからないが、三ツ石山などかなり西部に深部の熱源が存在していると考えられる。また、異なる高度における磁気異常の比較から、この熱消磁域は上部ほど東側に存在すること（国土地理院，2000）がわかった。これらを総合すると、西岩手山の噴気活動の元になっている熱は、深部では西岩手山のさらに西部の三ツ石山地下にあり、上昇するにしたがって東に位置を変えて、西岩手山直下まで達していると推定される。

以上の解釈は、定性的な解析に基づくものであり、より詳しく検討するためには定量的な解析が必要である。

定量的な解析として、例えば、地下のブロックごとの磁化率の推定が考えられる。この場合パラメータが多すぎるために、単純な最小二乗法で大地のブロックごとの磁化率の推定はできないが、解析手法を工夫し、一定条件のもとで行う推定（Okuma et al., 1994; Okuma, 1998; Nakatsuka, 1995）などが有効であろう。

ところで、地上の地磁気連続観測では大きな地磁気変化見つかっていない（藤原・他，2000，など）。したがって今回の磁気異常図に現れている磁気異常は、最近2年ほどの間では大きな変化はなかったものと推定され、本節で検討した熱源の解釈は地下に生じた急激な変化を意味するものではないことに留意したい。

## 7. まとめ

今回の航空磁気測量から判明した岩手山の火山活動に関連する地下構造の特徴をまとめると次のとおりである；

（1）三ツ石山地下の深いところに大きな熱源が存在する。この熱源は、上へ行くにしたがって東に位置を変えている。  
（2）西岩手山の地表近くに熱消磁域があり、上記熱源がこれにつながっていて、姥倉山近くの噴気活動域を形成しているようである。

（3）東岩手山では、極めて強い正の磁気異常が存在し、熱源が東岩手山には達していない。

国土地理院による火山地域の航空磁気測量は今回が初の試みであり、異なる高度面からの観測を行う方法も他に類を見ないことであった。火山地域は磁気異常のコントラストが非常に強い地域であることから、その方法により期待通りの成果を得ることができた。特に、この方法は熱消磁の存在から熱源の位置を推定するのは極めて効果的であることがわかった。

今後は、解析手法の高度化・自動化などの新たな開発がさらに必要であり、定量的な解析も必要である。また、データの公開によって、国土地理院外の研究者による各種の解析にも生かす予定である。

## 参考文献

- Bhattacharyya, B. K. (1964): Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization, *Geophysics*, 29, 517-531.
- 土井宣夫 (1999): 岩手山の縄文時代以降の噴火史, 月刊地球, 21, 257-263.
- 藤原智・濱崎英夫・門脇俊弘 (2000): 岩手山における全磁力連続観測, 国土地理院時報, 93, 12-18.
- 国土地理院 (1999): 東北地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 62, 16-34.
- 国土地理院 (2000): 岩手山航空磁気測量図, 国土地理院技術資料B1-No.27, 2000.
- Nakatsuka, T. (1994): Aeromagnetic anomalies over the area of Unzendake volcano, *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, 529-540.
- Nakatsuka, T. (1995): Minimum norm inversion of magnetic anomalies with application to aeromagnetic data in the Tanna area, central Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, 47, 295-311.
- Okuma, S., M. Makino, and T. Nakatsuka (1994): Magnetization intensity mapping in and around Izu-Oshima volcano, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, 541-556.
- Okuma, S. (1998): Magnetic constraints on the subsurface structure of Akita-Yakeyama volcano, northeast Japan, *Earth Planets Space*, 50, 153-163.