有珠山航空磁気測量図の作成
Aeromagnetic Anomalies over Mount Usu Volcano

測地部　錦　輝明・白井宏樹・黒石裕樹・阿部　博・豊田友夫
Geodetic Department Teruaki NISHIKI, Hiroki SHIRAI,
Yuki KUROISHI, Hiroshi ABE and Tomoo TOYODA

文部科学省研究開発局　藤原　智
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology Research
and Development Bureau Satoshi FUJIWARA

要　旨

2000年６月，「平成12年（2000年）有珠山噴火」に伴う航空磁気測量の緊急作業を実施した。得られた観測結果に基づき，この作業の最終的成果を，空中の磁気分布を表す航空磁気測量図（国土地理院技術資料）として刊行予定である。本稿では，現地作業，磁気異常図作成の処理と得られた結果について述べる。

国土地理院が行う火山地域の航空磁気測量は，1999年７～８月の岩手山に続いて二回目であり，その経験に基づいて観測手法に改良を加えて実施した。なお解析手法は，岩手山と同じ方法を用いた。

1. はじめに

有珠山は，内浦湾（噴火湾）の北側，洞爺湖の南側に位置する火山である。今から約10万年前，大量の火砕流噴出後に大きなカルデラができその中に水がたまって洞爺湖が生まれた。つづいて湖内に中島，湖の南岸に有珠山が形成された（中村ほか，1987）。有珠山頂部に直径約1.6kmの小カルデラ凹地があり，大有珠（標高732m），小有珠（標高552m），有珠新山（標高667m）の溶岩円頂丘がある。また東麓に昭和新山，北麓に明治新山が位置している（湯本ほか，1999）。有珠山は，過去にも周期的に噴火を繰り返している。最近では1977年8月に噴火があり，その前には周辺で群発地震が発生した。今回の噴火直前の2000年３月下旬にも群発地震が多発していた。2000年３月31日には，有珠山の西側山麓で噴火し，４月１日には，北側の金比羅山西側山麓で新たな噴火を起こした。

国土地理院では，有珠山における火山活動の活発化に対し，地殻変動の監視を強化するためGPS機動観測点を設置した。さらに，山体の変化を捉えるため，レーザー測距や測角などによる継続的な観測を実施した（毛塚ほか，2000）。

一方，火山内部を調べる手段のひとつとして，空中の地磁気の分布を効率的に測定することで地下の岩石の磁化分布とマグマの熱による消磁域を推定し，地下の構造を明らかにすることを目的として航空磁気測量を実施した。

2. 観　　測

2. 1　概　　要

航空磁気測量は，航空測量機「くにかぜⅡ」に搭載したプロトン磁力計により，異なる三つの高度での全磁力の空間分布を観測する方法で実施した。観測の諸条件は以下の通りである。

航空測量機：ビーチクラフトUC-90「くにかぜⅡ」
使用飛行場：航空自衛隊千歳航空基地
観測期間　：2000年６月13日～21日
観測範囲　：有珠山を中心とする東西方向15km，南北方向13kmの地域
コース間隔：南北コース経度差30秒（約750m）ごと
東西コース緯度差20秒（約650m）ごと
飛行高度　：3200m，3800m，4300m（気圧測高による）
飛行速度　：135KT（約250km／h）風によって対地速度は異なる
観測間隔　：全磁力（ 6秒または3秒ごと）
使用機材　：プロトン磁力計，GPS測量機，アスコット（GPSによる航法装置），磁気コンパス

2. 2　飛行コース

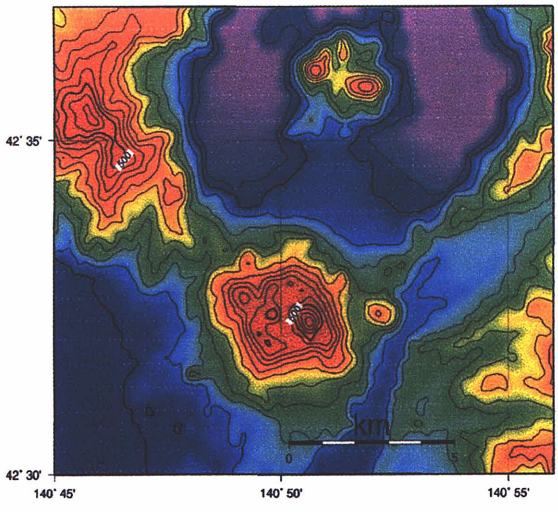
航測機で有珠山上空を碁盤の目のように等間隔で飛行するため，航測機に搭載されている航空写真測量用のGPSを用いたナビゲーションシステム（Leica社製ASCOT）による航法を行った。高密度のコース間隔で観測するためには，あらかじめ計画されたコース上を正しく飛行することが重要である。今作業では，計画したコースからおおむね150mの範囲で飛行された。気流，飛行速度などの厳しい条件を考慮すれば，精度は良好であった。

航測機には，精密な位置情報を求めるために，もう一

台のGPS測量機（Trimble社製4000SSi）を搭載している。

飛行高度は，詳細な磁気分布を得る上で重要な要因であり，なるべく低い高度で稠密にデータを取得する必要がある。そのため，当初，有珠山上空の高度5000feet（約1500m）を第一層（最も低い高度）として，それに1500feet（約500m）を加えた第二層，更に同じく同量を加えた第三層の3高度の飛行を検討した。しかし，有珠山噴火に伴う航空規制が高度10000feet以上であり，第一層を航空規制ぎりぎりの10500feet（約3200m）として実施した。

観測範囲を図－１に示す。



図－１　有珠山航空磁気測量の観測範囲（黒線：標高100mごとの等高線　白点：全磁力観測点の位置）

2. 3　観測の改善点

1999年の岩手山航空磁気測量に基づき，今回行った観測における主要な改善点は，次の４点である。

1）　磁気コンパスの導入

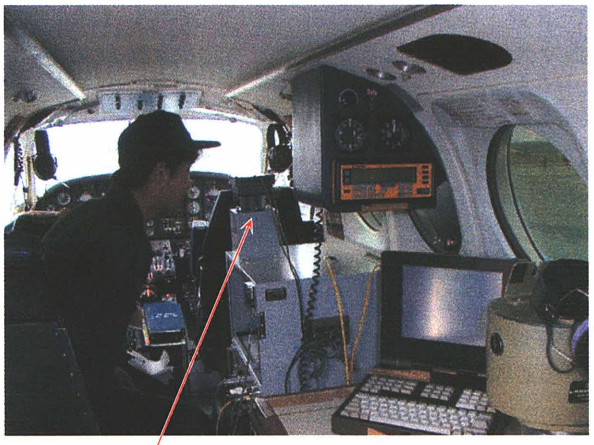
磁気コンパスを航測機内部に導入した（写真－１）。磁気コンパスは，航測機のヘディング（機首方向）情報を得ることを目的に開発されたものである。気流による航測機のヘディングの変化を求めることにより，機体磁気の影響について正確な補正をすることができる。

2）　デジタルデータの電子ファイル化

従来の制御部は，ロール紙に打ち出された観測値を手入力していたが，時刻，位置及び全磁力値等の時系列データの格納が制御器本体のメモリカードとアナログ表示装置（ノートパソコン）のハードディスクに行われるように変更され，データの整理及び解析が容易になった。

3）　全磁力観測の稠密化

航空磁気測量のプロトン磁力計は，これまで最小測定間隔が６秒であった。これは，センサー自体がコイルに電流を流して測定する構造であるため，これより高速で測定すると内部が高温となり，故障の原因となる恐れがあったからである。今回，より注目すべき領域での観測密度を高めるため，火山山頂部に限り３秒間隔での測定をしたところセンサーに問題なく，データを取得できた。



写真－１　磁力計本体の上部にとりつけられた磁気コンパスとアスコット表示部（手前のノートパソコン）

4）　GPS観測の改善

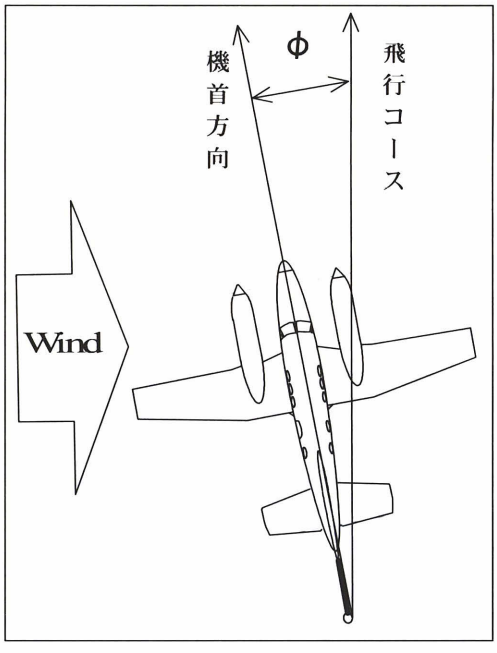
岩手山の観測ではキネマティック測量により３秒間隔でデータ取得を行い，GPSurveyソフトウェアによるキネマティック解析処理を行ったが，航測機が高速移動しているため，位置の解析精度が不十分であった。今回の観測では，１秒間隔での観測に変更した。

2. 4　機体磁気検定

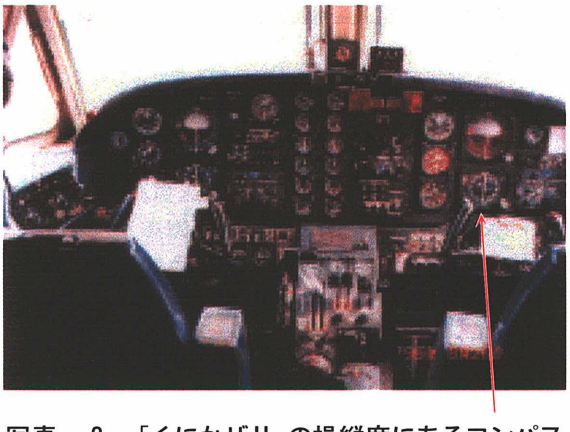
一般に，航空機には磁化（機体磁気）があり，機器の着脱や機体の分解修理などによってその大きさや向きは変化する。機体磁気は，自然磁場に重なって観測され，地磁気観測値にずれを生じるので，測定作業ごとに機体磁気を求めて補正を行う必要がある。磁気は向きと大きさを持ったベクトル量であり，飛行時のヘディングによって測定された全磁力値への補正量が異なる。

航測機は，飛行時に機体の横方向から気流（偏流）を受けると機体が流され，機首の方向へは飛ばない（図－２）。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，機首方位角（ϕ）の測定が必要である。今回，磁気コンパスによるヘディングの測定を実施したが，磁気コンパスの精度が不明確なため，適宜操縦席のコンパス（写真－２）とチェックしながら実施した。

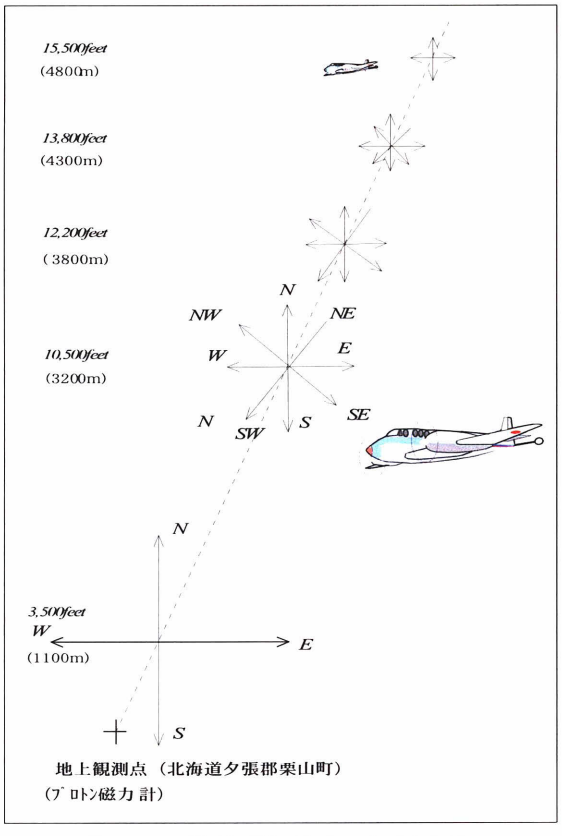
有珠山周辺の航空磁気測量において，機体磁気検定は千歳航空基地の北東約25kmに位置する栗山町の夕張川河川敷き上空で実施した。地上点では携帯型プロトン磁力計（Geometrics-856AX）のセンサー部を約2.5mのポールの先に取り付け，航測機の観測時間帯に，測定間隔６秒(同器械の最小間隔)で連続測定した。航測機での測定は，有珠山上空で測定した高度を含む５高度（図－



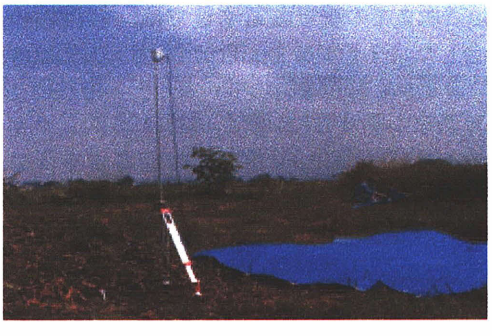
図－2　気流による航測機の機首方向と飛行コースの関係（磁気コンパスにより方位角（φ）を求める。）



写真－2　「くにかぜII」の操縦席にあるコンパス



図－3　機体磁気検定の観測方法



写真－3　機体磁気検定の地上点の測定風景（シートは地上点位置を示す目印）

3）で実施した。磁力計のセンサーには2種類あり，飛行方向が，北・南・北西・南西方向については，南北用，東・西・南東・南西方向については東西用のセンサーを用いた（図－3）。飛行方向は，観測時点において気流の影響が少ない方向に選んでいる。

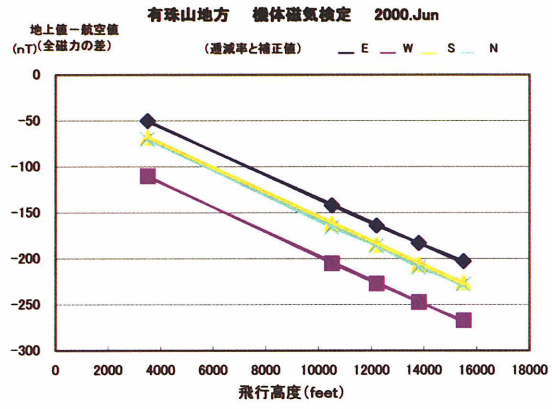
機体磁気検定では，各高度において地上点直上位置での全磁力値を求める必要がある。航測機を確実に地上点直上を通過させるため，アスコットによる航法に加えて，地上に目印用のシートを広げ（写真－3），ライフミラーによってパイロットに地上の位置を知らしている。

航測機における全磁力の測定は，一定間隔で行われるので，航測機が地上点直上を通過する時刻に，確実に地上点で全磁力の測定がおこなわれるとは限らない。そのため線形補間法により，通過時刻における地上点及び航測機位置での全磁力値を求める。

このようにして得られた地上点直上での全磁力値は，図－4のような違いを示す。全磁力値は，高度とともに線形に減少し，その減少率を磁場の逓減率と呼ぶ。機首方向が東・西・南・北向きのときの機体磁気の量をそれぞれE・W・S・N(nT)とすると，図－4のデータの場合，飛行高度 X(フィート)との間で以下の線形関係式が得られる。

$$E = -0.0128X - 6.1$$
$$W = -0.0132X - 65.0$$
$$S = -0.0133X - 24.2$$
$$N = -0.0133X - 21.8$$

このようにして各高度におけるヘディング別の関係式を



図－4　高度による全磁力のちがい

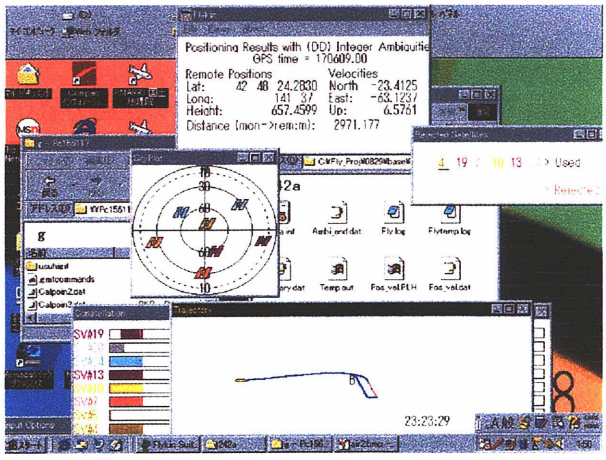
求め，それを用いて，実際の観測時におけるヘディングから機体磁気補正を行う。今回は，始めに各コース毎に磁気コンパスで測定されたヘディングの平均値を求め，それを用いて機体磁気補正を行った。その結果，北方向コースと南方向コースの全磁力値にバイアス誤差によると思われる異常パターンがみられたので，東西コースの全磁力値を参照しながら，南コース，北コースそれぞれの定バイアスを推定し，補正を行った。

3. データの前処理

3. 1　測位データの解析

データの前処理として，まず航測機の精密測位が必要である。これまでの航空磁気測量では，航測機の位置解析に適合したソフトがなく，Trimble社のGPSurveyによるキネマティック解析を行っていた。その方法では，位置精度の良否が不明なこと，解析時間が多大にかかる等の問題があったため，GPS受信機の設定変更を行い，新しい解析ソフトを導入した。

導入した位置解析ソフト(Leica社製Flykin Suite＋)は，GPSurveyでGPS受信機からダウンロードされた位相データをキネマティック処理できる，GPS後処理ソフトウェアであり，OTF（OnTheFly：オンザフライ)をサポートしている(図－5)。



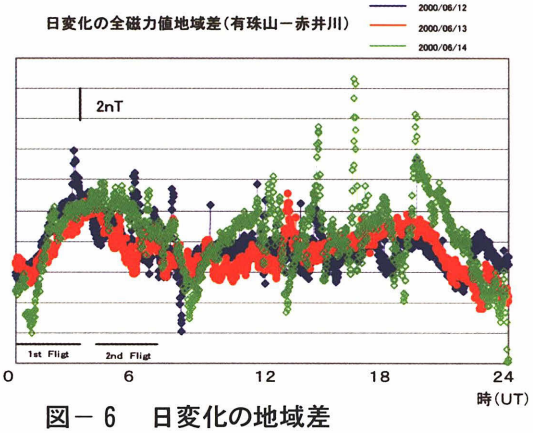
図－5　Flykinによる解析画面

解析結果は，GPS時刻とWGS84座標で出力されるため，UT時刻に変換するためにはUTとGPSの時刻の差（うるう秒の差13秒）の補正を行う。

3. 2　全磁力データの前処理

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おり，磁気異常の空間分布を知るためには，それを補正する必要がある。地球外部磁場は，主として比較的に広域において同様な変化である。そこで，北海道赤井川村（有珠山の北約60km）に設置されている地球電磁気連続観測装置の全磁力観測値を用いて時間変化量を補正し，同一の時刻（基準日とよぶ）における地磁気の空間分布を求めた。基準日として2000年6月16日0時を用いた。

全磁力値の日変化の地域差を調べるため，有珠山の北海道大学臨時観測点（USU010：洞爺温泉中学校）と赤井川の地球電磁気連続観測装置の全磁力日変化を比較した（図－6)。航空磁気の観測時間帯は，UTでおおむね0時～3時（午前の測量）と4時～7時（午後の測量）であり，図－6から，その時間帯に約6nTの地域差がみられる。この地域差は，時間変化成分の補正において誤差となるので，補正データの取得手法について注意する必要がある。



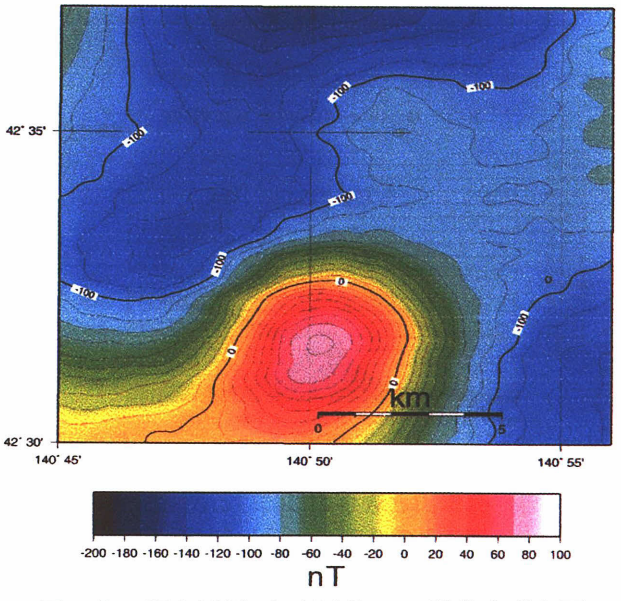
図－6　日変化の地域差
（縦の目盛り線：2nTごと）

地磁気は地球内部・外部にわたる巨大なシステムに原因をもつ部分が大きく，局所的な異常分布を把握するためには，日変化補正された全磁力値に対し，さらに時間（長周期）と空間（長波長）における地磁気の分布モデルを差し引いて，その残差を抽出する処理がよく用いられる。今回も，一般的に使われているIGRF（International Geomagnetic Reference Field：国際地球標準磁場)の補正を行った。補正にはIGRF1995モデルを用い，観測点の緯度，経度，高度を使い時刻を基準日に統一して処理を行った。

4. 磁気異常図の作成

4. 1　全磁力異常図

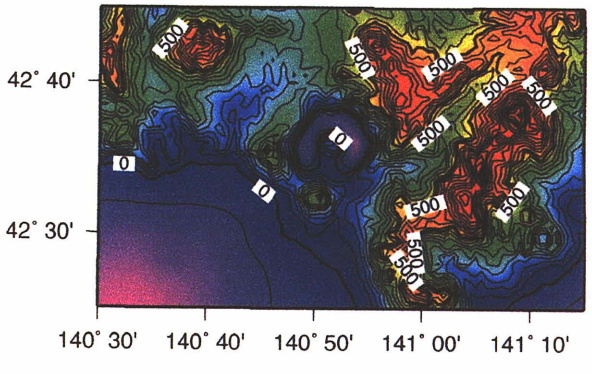
前節の処理終了後のIGRF残差全磁力値から，経・緯度差30秒間隔のメッシュグリッド上に補間し，２次元の余弦関数テーパー形のフィルターをかけて短周期のノイズを減らし，高度ごとの磁気異常図を作成した。これらの結果を３高度まとめて一枚にした図が，有珠山航空磁気測量図（１／３）（国土地理院，2001）であり，いわゆる磁気異常図である。一例として高度3200mの結果を図－７に示す。



図－７　高度3200mにおけるIGRF残差全磁力図
（黒線：磁気異常10nTごとのコンター
白点：全磁力観測点の位置）

4. 2　地形補正

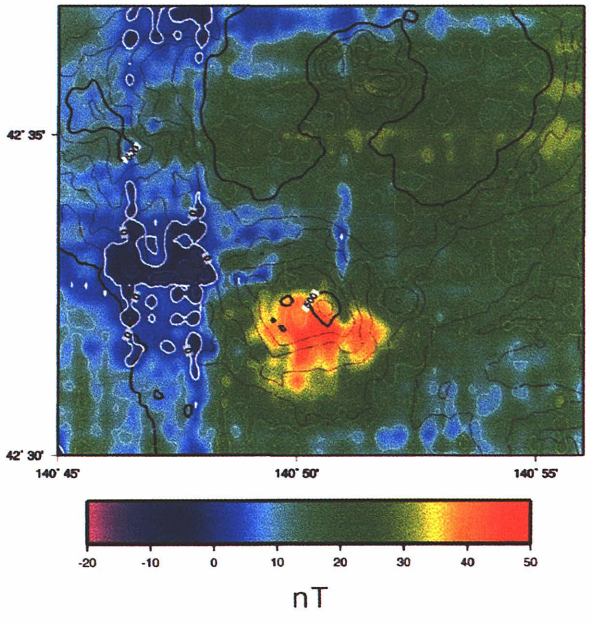
IGRF残差全磁力値は，地殻表層の岩石が持つ磁化の影響を大きく受けており，標高の高い有珠山に対応した正の異常が見られる。地形起伏の影響を低減するため，測地第一課重力係が保有している二次メッシュの標高データ（図－８）を用いて，補正（地形補正）を行った。



図－８　有珠山周辺の標高図
（黒線：標高50mごとのコンター）

補正には，湖底・海底の標高も考慮されている。

地形補正にはBhattacharyya（1964）を用い，磁気異常と地形補正量の相関が最大となるように，磁化率を求めた（Nakatsuka, 1994）。平均磁化率として2.2A／m，磁化層の下限として地下２kmを採用した。この結果を３高度まとめて一枚にした図が，有珠山航空磁気測量図（２／３）（国土地理院，2001）である。一例として図－９に高度3200mの地形補正後の磁気異常図を示す。

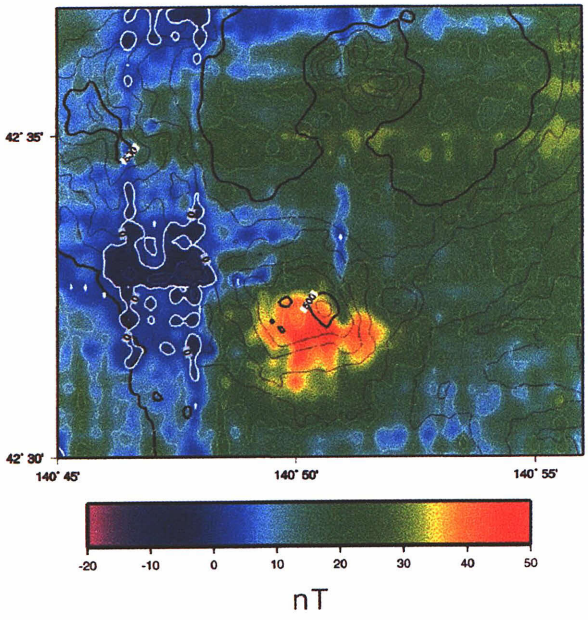


図－９　高度3200mの地形補正後の航空磁気異常図（白線：磁気異常10nTごとのコンター，黒線：標高100ｍごとのコンター）

4. 3　異なる高度の差

岩手山航空磁気測量と同様に，異なる３高度で観測した。定性的には，深いところに源を持つ磁気異常は，観測面の下層と上層でほぼ同じ量となって現れ，浅いところに源を持つ磁気異常は上層より下層に大きな量となって現れる。

したがって，高度面が異なる全磁力異常の差は，深い磁気異常源によるものが消え去り，浅い磁気異常源による影響がより強く現れると解釈することができる。単純な差をとった場合，深い源の影響だけが除かれることになるので，上層の全磁力異常を１より大きな定数倍して加重差をとり，比較的浅い異常源をより強く反映させた。結果の一例として，高度3200mと3800mの磁気異常の加重差図を図－10に示す。



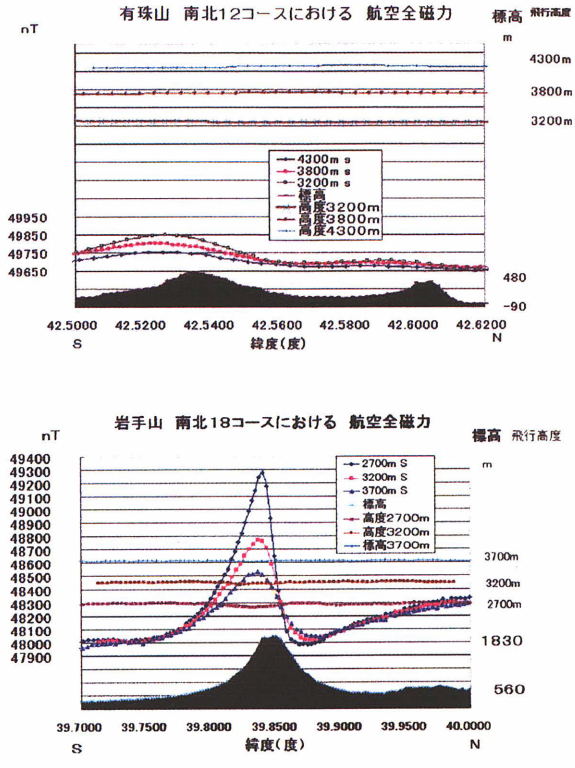
図－10　地形補正後の高度3200mと高度3800mの磁気異常図の加重差（白線：磁気異常10nTごとのコンター，黒線：標高100mごとのコンター）

5. 結　　果

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，北側に小さなマイナスの磁気異常が現れる。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，磁気異常図に見られるプラスやマイナス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距離と磁気異常源の深さがほぼ同じになる性質がある。図－10において，有珠山からわずかに南にずれた位置に大きなプラスの磁気異常がみられる。これは強い磁化をもった火山岩がこの周辺に分布していると考えられる。また有珠山北西部では，マイナスの磁気異常が広く分布しており，熱消磁によるものと解釈できる。

図－11は，1999年７月から８月にかけて実施した岩手山と有珠山の南北コースの観測について，高度ごとの全磁力値の変動を比較したものである。図－11には，地形と各コースでの観測点の位置関係をあわせて示してある。岩手山は最高点の標高2038ｍに対し2700ｍを飛行し，山体から近い高度を飛行することができたので，高度による全磁力値の差が大きくなっている。しかし，有珠山は最高点の標高732ｍに対し，3200ｍで飛行したため，浅いところに源を持つ磁気異常を分離する感度は低いと考えられる。

定量的に評価するためには，さらに詳細な分析が必要である。



図－11　有珠山と岩手山における南北コースの高度ごとの全磁力値の比較（縦の目盛り線：全磁力100nTごと，黒棒：断面の標高）

6. まとめ

国土地理院による火山地域の航空磁気測量は今回で二回目であり，1999年の岩手山観測からかなりの改善を施した。今回の結果から，地下構造を細かく推定するためには，できるだけ低高度での観測を実施することが重要であることが明らかとなった。また，機体のヘディング補正の高度化及び定量的な解析の検討が必要である。さらに，地磁気の日変化は，60km離れた２点間で約６nTの差がみられることが分かり，補正の精度を上げるためには，測量地域内において地上での全磁力連続観測を実施することが望ましい。

謝　　辞

有珠山の臨時観測点データ（USU010：洞爺温泉中学校）は，北海道大学大学院よりデータ提供を,海上自衛隊徳島教育航空群には，航測機の運航をして頂き感謝いたします。

参 考 文 献

Bhattacharyya, B. K. (1964) : Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization, Geophysics, 29, 517-531.
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.
毛塚三男・齋藤隆（2000）：「平成12年(2000年)有珠山噴火」に伴う国土地理院の取り組み（速報），国土地理院時報，94，1-14.
国土地理院（2001）：有珠山航空磁気測量図，国土地理院技術資料B1-No.29，2001.
中村一明・松田時彦・守屋以智雄（1987）：火山と地震の国，岩波書店，25-27.
Nakatsuka, T. (1994) : Aeromagnetic anomalies over the area of Unzendake volcano, J. Geomag. Geoelectr., 46, 529-540.
錦輝明・白井宏樹・藤原智（2000）：岩手山航空磁気測量図の作成，国土地理院時報，94，15-20.
湯本景一・明野純子・小原昇（1999）：火山土地条件図「有珠山」について，国土地理院時報，92，68-80.