

有珠火山 2000–2010 年空中磁気データ比較による磁気異常変化と 2000 年探査高度データ精度の検討

中塚 正・大熊 茂雄（産総研），有珠山空中磁気探査グループ*

Magnetic anomaly change of Usu Volcano 2000-2010 detected by repeated aeromagnetic surveys with a study on the accuracy of 2000 survey altitude data

T. Nakatsuka, S. Okuma (Geological Survey of Japan, AIST) and Joint Group for Usu Volcano Airborne Magnetic Survey*

Abstract: Aeromagnetic survey is expected to contribute to the elucidation of the volcanic structure and the change of its activity. However, the track lines of repeated surveys cannot be the same, and the inspection to the repeatability and the spatial alias effect of magnetic anomaly pattern is quite important to acquire valid information of the activity. To overcome this difficulty, we applied the generalized mis-tie control method (Nakatsuka and Okuma, 2006; Nakatsuka *et al.*, 2009).

We conducted an aeromagnetic survey of Usu Volcano in September 2010 (Hashimoto *et al.*, 2011). The existing reference data is the survey by the Geological Survey of Japan in June 2000 (Okuma *et al.*, 2003, 2010). Both data were processed together with the generalized mis-tie control method to yield total-force magnetic anomaly change between two epochs. The result revealed increases of magnetic force at Nishiyama-Kompira crater activity areas, the area of Gin-numa crater, and Showa-shinzan dome, and a possible decrease zone along northern somma. The comparison of the results with other studies observation and the interpretation is presented in another paper (Hashimoto *et al.*, 2011).

Although the track lines were fixed by the post-flight differential process of GPS system in both surveys, the altitude fix in 2000 survey might not be accurate enough because of insufficient accuracy signal from a few satellites among GPS satellites. As the 2000 survey flight were equipped with a radio-altimeter, the altitudes difference between GPS and radio-altimeter data was examined in detail, with the help of Volcanic DEM (10m mesh) by the Geographical Survey Institute. We could find that the data of radio-altimeter reflect artificial buildings and constructions, the slant radio-wave reflection from sideward objects, and the existence of thick surface vegetation. Then, the GPS altitude data is proven to be generally well determined, although the unreasonable difference (<10m) against radio-altimeter over the Lake Toya was revealed. If we consider this altitude accuracy, finer variations in the results above should be carefully interpreted, though the principal characteristics of the results above are still reliable.

1. はじめに

火山の山体構造及び活動状況とその推移の把握のため、精密空中磁気探査の活用が期待される。空中磁気異常の精密繰返し観測から磁気異常変化を検出するためには、探査測線位置が一致しないことによる空間エリアシングの効果を考慮に入れる必要がある。中塚・大熊(2006)は空間エリアス効果に影響されにくい磁気異常変化検出法について検討し、拡張交点コントロール手法を開発した(Nakatsuka and Okuma, 2006)。この手法は、2004年に活動が活発化した浅間火山で2005年10月に実施された空中磁気測量(橋本ほか, 2006; 宇津木ほか, 2006)と1992年に地質調査所が実施した探査(大熊ほか, 2005)とのデータ比較に適用され、有意な磁気異常変化成分が抽出された(中塚ほか, 2007, 2009; Nakatsuka *et al.*, 2009)。

* グループメンバー：橋本武志・鈴木敦生(北海道大学)、中塚正・大熊茂雄(産総研)、宇津木充(京都大学)、神田径(東京工業大学)、小山崇夫(東京大学)

* Group members: Takeshi Hashimoto, Atsuo Suzuki (Hokkaido Univ.), Tadashi Nakatsuka, Shigeo Okuma (Geol. Surv. Japan, AIST), Mitsuru Utsugi (Kyoto Univ.), Wataru Kanda (Tokyo Inst. Tech.), Takao Koyama (Univ. Tokyo).

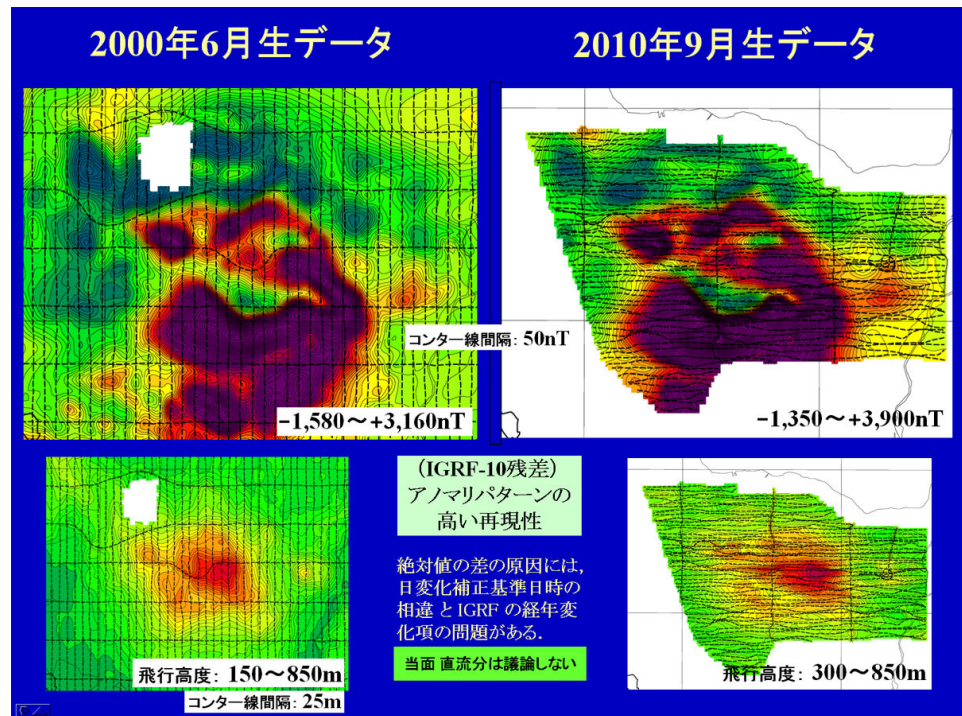
有珠火山では、2000年噴火以来種々の研究調査が進められてきている。2000年6月に地質調査所(現産総研)が高分解能空中磁気探査を実施し、大熊ほか(2003, 2010)は詳細な磁気異常分布図の作成とその解析を進めた。この度、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の一環として、そのデータとの対比を主眼の一つに据えた空中磁気探査が、北海道大学(代表:橋本)が中心となり2010年9月に実施された。2000年6月当時は盛んな噴火活動が続いていた金毘羅火口域の一部を除き、西山火口から有珠山本体(大有珠・小有珠・外輪山を含む)と昭和神山をカバーする地域で、2000年と2010年の両データが取得された(橋本ほか, 2011)。

2. 有珠火山 2000年および2010年の各空中磁気データ

上記の両探査に使用した機器材は、第1図のとおりであり、各データからIGRF残差全磁力異常分布として第2図が得られた。ここで基準IGRFとして、最新ではないIGRF-10を当面採用している。それはIGRF-11では、2005年以後の経年変化項(予測値の側面を含む)の傾向が2005年以前と大きく異なり適切な選択か否かの判断



第1図 空中磁気探査に使用した機器材
Fig.1 Equipment used for aeromagnetic surveys of Usu Volcano in 2000 and 2010.



第2図 2000年と2010年の空中磁気データ (IGRF残差全磁力異常と飛行高度)
Fig.2 Usu Volcano aeromagnetic (IGRF residual) anomalies in 2000 (top left) and in 2010 (top right) at the actual observation altitudes (bottom left and bottom right, respectively).

に迷ったための暫定措置である。

全磁力分布は p-p で 5000nT にのぼる異常を示し、高度の相違にもかかわらず類似の分布を示していることがわかる。

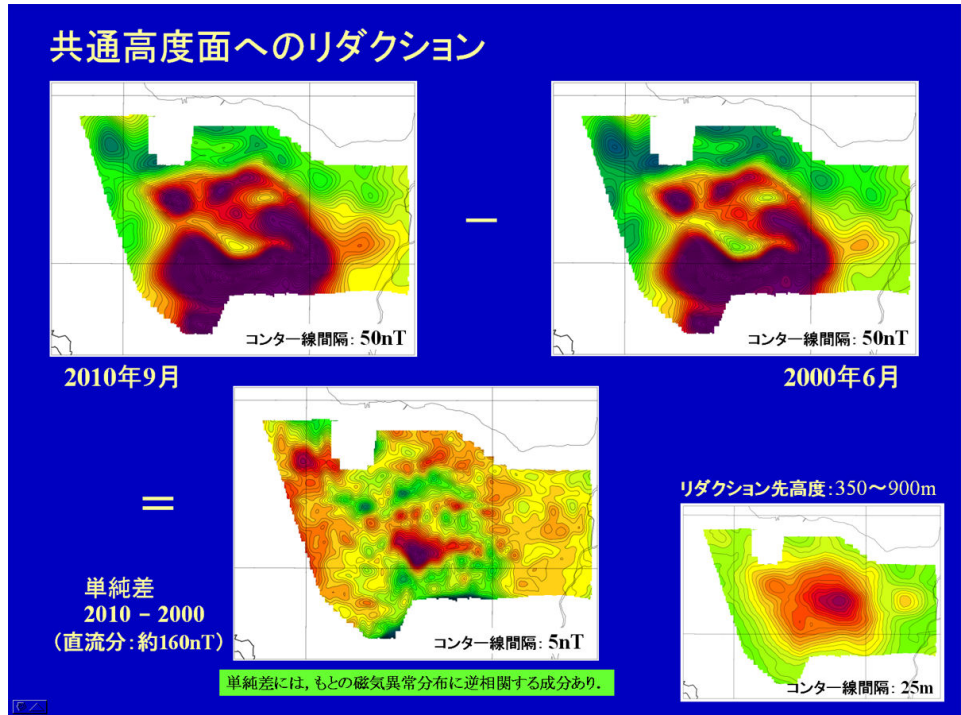
この両者のデータを、共通の高度面 (共通リダクション面) での分布に引き直す処理 (等価ソース法による) を行い、その両者の差をとると第3図の結果が得られた。ここに見られる特徴的なパターン

としては、(1) 西山火口域・(2) 銀沼周辺域での全磁力値の優勢な増加・(3) 昭和新山付近の緩やかな増加と(4) 北外輪付近の全磁力の減少が見られる。

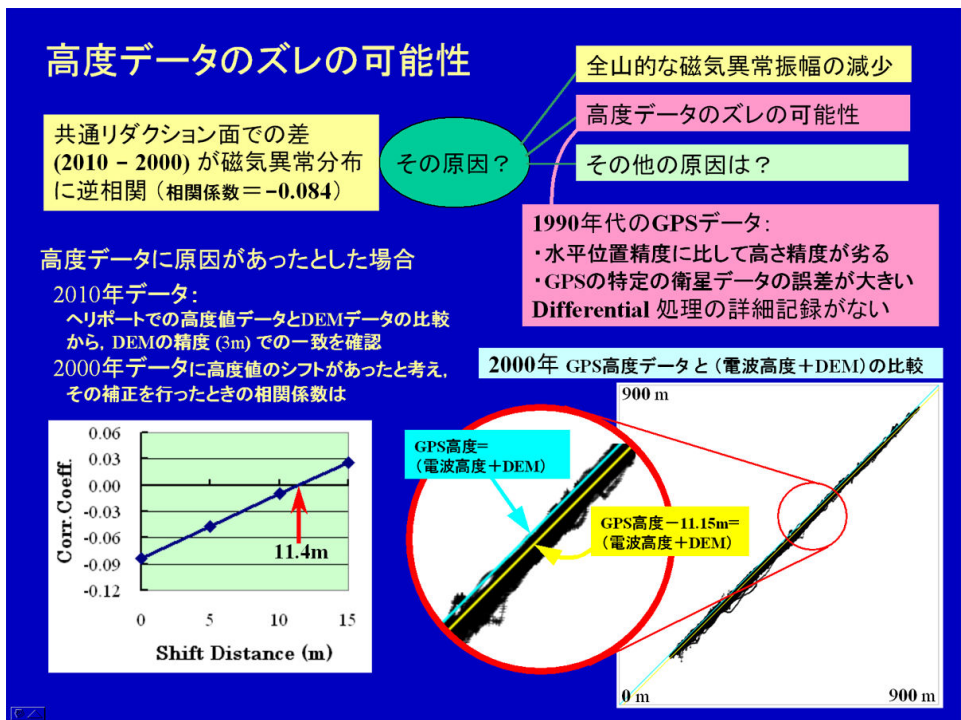
しかし第3図の単純差には、全磁力異常自体に逆相関する成分が認められ、慎重な検討を要する。例えば、2000年の飛行高度データに何がしかのレベルシフトが含まれているとそのような逆相関のパターンを生じる可能性がある。

3. 2000年高度データの検討と拡張交点コントロール法による磁気異常変化抽出

今回(2010年)調査の高度データについては、離着陸時のGPS高度データとヘリポートのDEMデータとの対比から少なくとも3m程度の精度限界を超えるデータのズレが存在しないことが確認できる。



第3図 共通高度面での2010年-2000年の単純差
Fig.3 Comparison of magnetic anomalies in 2010 (top left) and in 2000 (top right) both reduced to a common reduction surface (altitude: bottom right). The simple difference between them revealed a pattern (bottom left) reversely correlated with original anomalies.

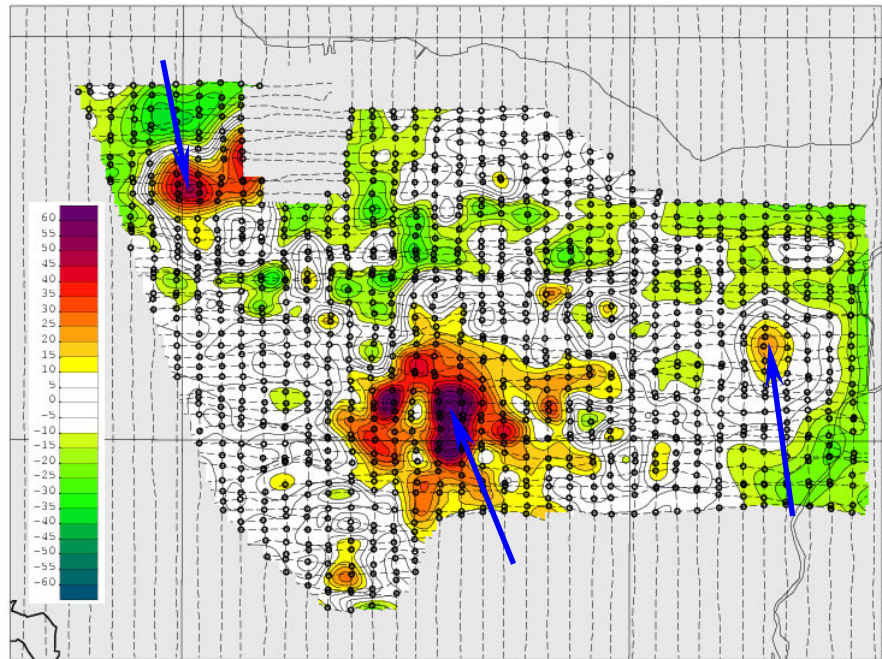


第4図 2000年調査高度データのズレの可能性検討
Fig.4 Discussion on the possible shift of altitude data in 2000 survey.

方 2000 年調査データは、外国の調査会社への間接発注作業のため全生測定データが残存する状況にない点と、当時の GPS では一部の GPS 衛星のデータにやや大きな誤差のあることが知られていた点に問題が残る。

2000 年測定では GPS 以外に電波高度計が搭載されており、そのデータと DEM を組み合わせて標高に引きなおしたものととの対比(第 4 図)を進めた結果、GPS 高度データが実際より約 10m 高く与えられていると考えると辻褄の合う形となった。

とりあえず、この 10m のズレを信用して、拡張交点コントロール法による磁気異常変化抽出の処理を行った結果が、第 5 図である。この結果では、前に述べた特徴的な 10 年間の変化パターンのうち、(4) がほぼ消失し (1)~(3) がより明瞭な形で示されている。



第 5 図 拡張交点コントロール法による磁気異常変化抽出結果。
(2010 年-2000 年, 2000 年高度を-10m 補正)

Fig.5 The result of deriving the magnetic anomaly variation between 2000 and 2010 by the method of generalized mis-tie control (Nakatsuka and Okuma, 2006), when 2000 survey altitude data were corrected by a constant value of -10m.

4. 2000 年調査高度データのより詳細な検討

第 4 図の左下は 2000 年調査高度データのレベルシフトを考慮に入れて第 3 図の単純差を計算し、それと実全磁力異常(第 3 図左上)との相関係数を計算したもので、-11.4m のレベルシフトで相関係数が 0 になることを示している。また、第 4 図の右下は電波高度計が DEM で与えられた(GPS による水平位置は正確であるとして)直下点からの高さを示すものとして GPS による高度との対比をプロットしたものであり、理想的には傾斜 45 度の線上に並ぶが、現実には平均的に-11.15m の差が認められる。前節では、両者の数値の類似性を根拠に、-10m のレベルシフトを想定して処理を行ったが、物理的な意味が十分とは言えないので、さらに 2000 年調査高度データの検討を行った。

まず第一に、電波高度計の計測電波はレーザのようにビームが細いとは考えられず、ある程度のひろがりを持つため、直下のある程度幅を持ったエリアのうちの再近接点までの距離を測っていると考えられること、第二に、樹木等の植生や人工物は DEM に反映さえれていない筈であり、直下点高度を DEM で求めると誤差を招くこと、さらに、DEM は地表を十分細かく再現しているとは言えないことが問題になる。

電波高度計ビームの広がりを考えて第 4 図の右下と同様な図を作成する処理から、ビームの広がりが対地高度 150m 程度で半径 20m としたときに GPS 高度データに対する標準偏差が最小を示すものの、その場合でもレベルシフト量は約-8m と大きく変わらなかった。植生との対比としては、最大樹高データがあるわけでもないの、航空写真や人工衛星リモートセンシングデータを参照し、GPS 高度値・電波高度データ・DEM 高度値などを測線に沿ってプロットしたものと対比する作業を行った。

使用した図は大量に上るので、ここでは二例を示すにとどめる。第6図は、2000年調査のA27, A39測線に沿った各高度データ・DEM等の挙動を示している。濃緑がDEM高度(水平位置はGPSによる), 黄緑が電波高度計データ(600mシフトして表示), 赤がGPSによる高度であり, 水色は電波高度とDEMの単純加算, 濃青は電波高度計のビームの広がり(20m)による斜め反射を考慮した加算結果, 黄色は全磁力異常である。また, 調査エリアのASTER画像(茶~こげ茶が濃い植生を示す)に黄線分で測線位置を示したものを合わせて示した。

ここに見られる特徴は次のようにまとめられる。

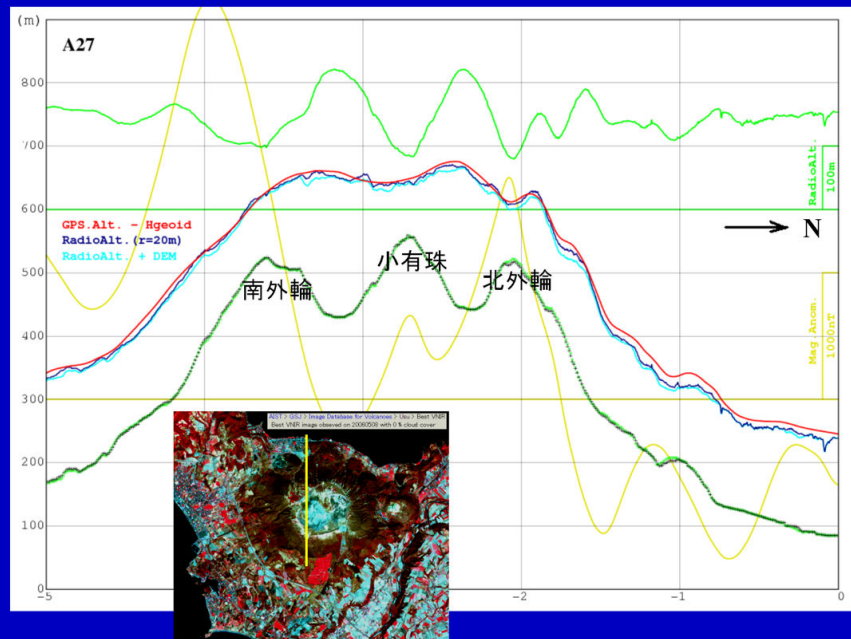
(1) 電波高度から求めた高度値(海拔)は, 半径20mからの斜め反射を考えると, GPSによる高度

値に近づくがスムーズなパターンにはならない。生の電波高度データよりも暴れがちな点から考えてDEMの分解能不足と斜め反射の効果が一樣ではないことなども予想される。

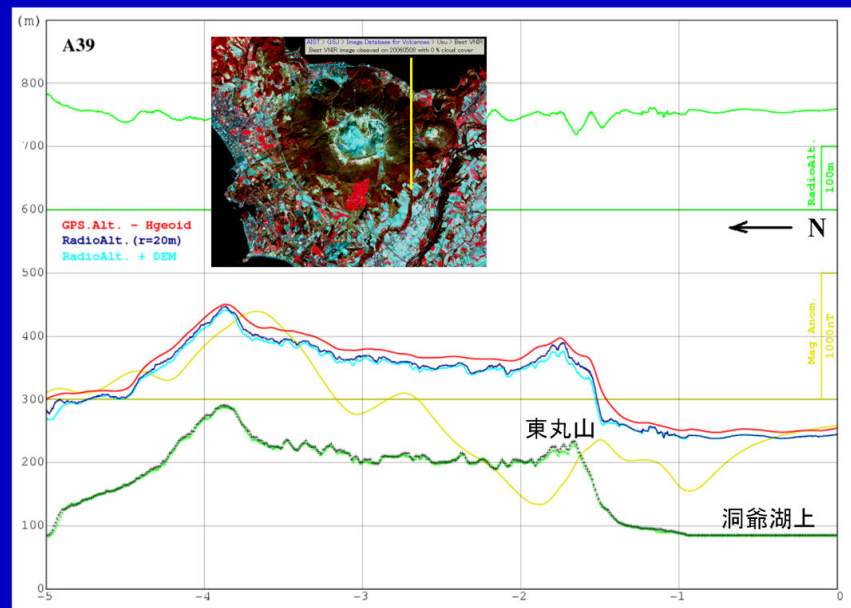
(2) 山頂域で電波高度計から求めた高度とGPSによる高度が近づくのに対し, 山腹域で差が残る点は, 明らかに植生の影響を示しているが, それに対する補正は難しい。

(3) 電波高度データにスパイク的な変化があるのはDEMに反映されていない人工構造物(建物[下向きスパイク]や整備された川谷[上向きスパイク])の影響と考えられる。

A27測線沿い各高度データ・DEM等の挙動



A39測線沿い各高度データ・DEM等の挙動



第6図 2000年調査A27, A39 測線上での各高度データの挙動

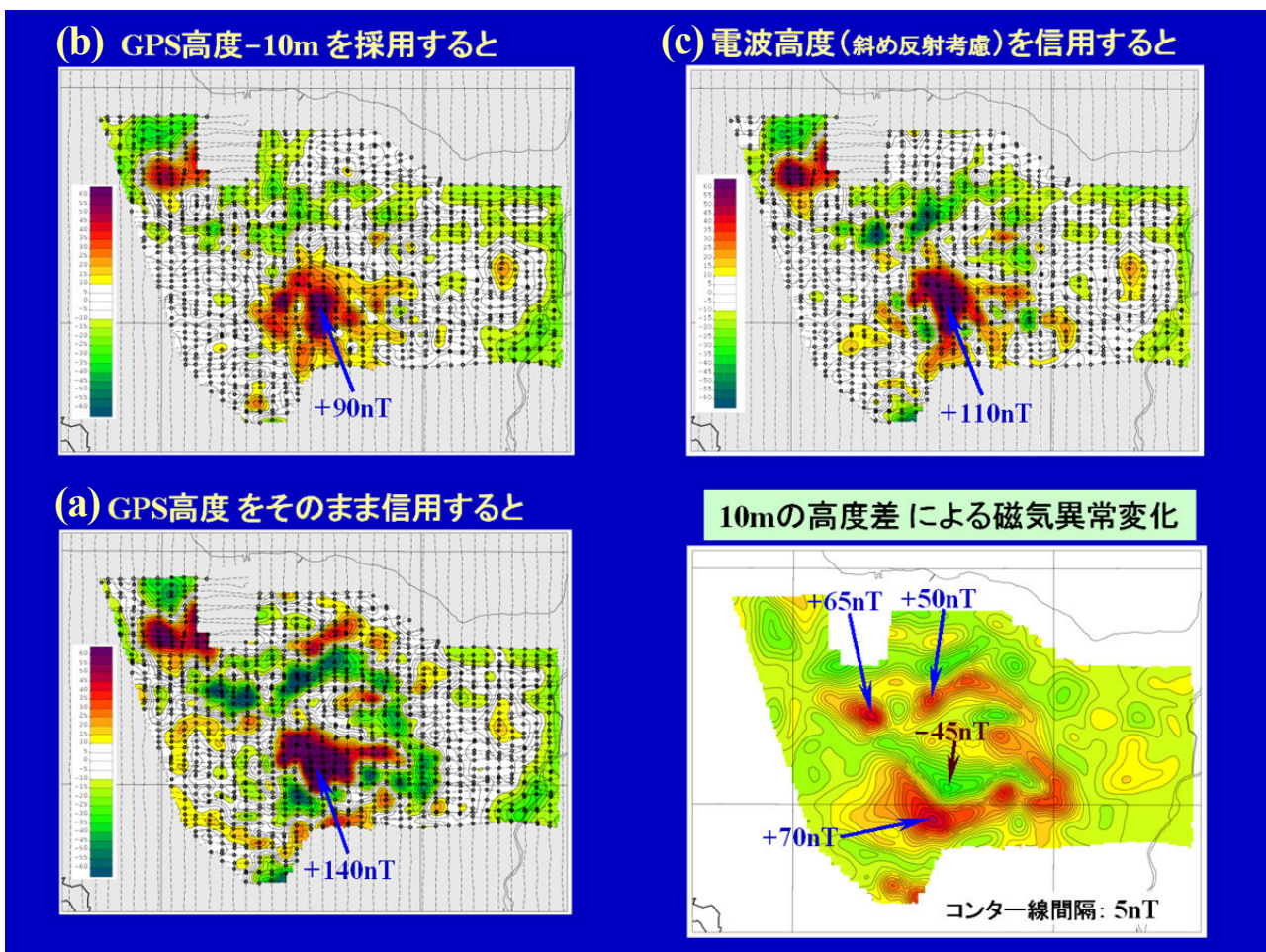
Fig.6 Altitude information data along 2000 survey lines A27 and A39 (for samples).

(4)では、植生と電波高度計電波の斜め反射を考慮すると、GPS高度データの方がより正当そうであるかという、そうとも限らない。A39測線の北側1kmほどは、洞爺湖上で植生も斜め反射も考えられないのに、GPS高度と電波高度は約8mの高度差をもってきれいに平行している(他の測線でも同様だが、高度差は測線によりばらつく)。

従って、断定的な結論は得られないものの、電波高度計データから1mの精度を議論できるデータを導くことは裸地以外では困難なこと、GPSの高度データには原因不明のデータのシフトが生じていた可能性が捨てきれないことが明らかになった。

5. 有珠火山 2000年～2010年の磁気異常変化

以上のことから結論的には、電波高度データを用いることは、現実にはありえないような高度値のゆらぎをデータに持ち込んでしまうので適当でなく、GPSの高度データを基本に用いつつも、10m以下のずれを生ずる原因不明の要因があった可能性があると考えざるを得ない。



第7図 2000年調査の高度データの各取扱い方法から求まる磁気異常変化の相違

Fig.7 Variety of the results from generalized mis-tie control analyses with different assumptions on the 2000 survey altitude correction, and the effect of 10m altitude difference on actual aeromagnetic anomaly data presentation (bottom right).

ちなみに、2000年調査の高度を、(a) GPS高度データを正しいと考えた場合、(b) GPS高度データが一樣にシフトしており10mだけ高度を下げたものが正しい高度だとした場合、(c) 電波高度データが(半径20m範囲の斜め反射を考慮して) DEMに対する正しい高度を与えていると考えた場合の各々について、拡張交点コントロール法で10年間の磁気異常変化を導くと、第7図の(a)左下、(b)左上(第5図と同じ)、(c)右上の各結果を得ることになり、(c)は(a)と(b)の中間的なものとなっている。

それらの中では、磁気異常変化として挙げた特徴的なパターンの(1)~(4)のうち(1)~(3)は、振幅の若干の相違を別にすれば、共通して現れており、そのような磁気異常変化パターンを生じるような地下の磁化のプロセスが進行したことは確実であろう。パターン(4)については、第3図で見たように全般的な磁気異常分布に相関したパターンに付随しており、有珠火山全体の磁化が一様に増減を生じるようなプロセスが考えにくい点からも、確実性が低いものと思われる。

6. 結論と課題

前記の2000年調査高度データの考察は、この10年間の磁気異常変化が、第7図の(a)から(b)の間のいずれかのレベルであったとしか言えない状況を示したが、そこには少な目に見積もっても、

- (1) 西山火口域で明瞭な全磁力値の増加があり、金毘羅火口方向への延長も認められた
- (2) 銀沼周辺域での全磁力値の優勢な増加があった
- (3) 昭和新山付近でも緩やかな全磁力値の増加があった

ことが確実と考えられる。

これまでの検討では、標準磁場の経年変化分に対応した磁気異常変化の直流分の検討と、地磁気の伏角・偏角成分の永年変化に伴う見かけの全磁力変化(橋本, 2006)の検討が不十分である。これらの点については、その影響の評価を進める予定である。

有珠での2000年・2010年空中磁気探査データの比較では、高度データの信頼性にまつわる問題がクローズアップされた。10mの高度差は第7図右下の磁気異常差(最大70nT)に相当し、磁気傾度の高い所の磁気異常変化の評価には、高精度の位置データがとくに重要であることが改めて明らかになった。

引用文献

- 橋本武志(2006) 永年変動によるみかけの全磁力変化—火山地磁気効果の評価—. *ConductivityAnomaly 研究会2006年論文集*, 51-58.
- 橋本武志・茂木透・鈴木敦生・山谷祐介・三品正明・中塚正・小山悦郎・小山崇夫・相澤広記・平林順一・松尾元広・野上健治・小川康雄・氏原直人・鍵山恒臣・神田徑・大久保綾子・田中良和・宇都智史・宇津木充(2006) 平成17年度浅間山電磁気構造探査の概要. *ConductivityAnomaly 研究会2006年論文集*, 79-80.
- 橋本武志・宇津木充・中塚正・大熊茂雄・小山崇夫・神田徑・鈴木敦生(2011) 繰り返し空中磁気測量で検出された有珠山の全磁力変化. *2010年度CA研究会*, (this issue).
- 中塚正・大熊茂雄(2006) 空中磁気データの交点コントロール手法の拡張を応用した磁気異常変化抽出法の検討. *ConductivityAnomaly 研究会2006年論文集*, 8-14.
- Nakatsuka, T., and S. Okuma (2006) Crossover analysis for the aeromagnetic survey at varying elevations, and its application to extracting temporal magnetic anomaly change. *Butsuri-Tansa (Geophys. Explor.)*, **59**, 449-458.
- 中塚正・宇津木充・大熊茂雄・田中良和・浅間山電磁気構造探査グループ(代表 橋本武志)(2007) 浅間火山2005年空中磁気異常の1992年データとの比較. *ConductivityAnomaly 研究会2007年論文集*, 120-125.
- 中塚正・宇津木充・大熊茂雄・田中良和・橋本武志(2009) 火山活動に関連した空中磁気異常変化の検出: 拡張交点コントロール法の適用. *ConductivityAnomaly 研究会2009年論文集*, 108-114.
- Nakatsuka, T., M. Utsugi, S. Okuma, Y. Tanaka, and T. Hashimoto (2009) Detection of aeromagnetic anomaly change associated with volcanic activity: an application of the generalized mis-tie control method. *Tectonophysics*, **478**, 3-18.
DOI: 10.1016/j.tecto.2009.02.018
- 大熊茂雄・中塚正・森尻理恵・牧野雅彦(2003) 有珠火山地域高分解能空中磁気異常図(1:25,000). *空中磁気図*, no.41, 産総研地質調査総合センター.
- 大熊茂雄・牧野雅彦・中塚正(2005) 浅間火山地域高分解能空中磁気異常図(1:25,000). *空中磁気図*, no.43, 産総研地質調査総合センター.
- 大熊茂雄・中塚正・駒澤正夫・松島喜雄・佐藤秀幸・高倉伸一・石塚吉浩・鬼沢真也・小川康雄・茂木透(2010) 有珠火山地域地球物理総合図. *数値地質図*, P-7, 産総研地質調査総合センター. (CD-ROM 1枚)
- 宇津木充・田中良和・中塚正・鍵山恒臣・橋本武志・神田徑(2006) 浅間火山における空中磁気観測. *日本地球惑星科学連合2006年大会*, E134-P005.