

## 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

橋本武志 (北大理)・宇津木充 (京大理)・中塚 正・大熊茂雄 (産総研)  
小山崇夫 (東大震研)・神田 径 (東工大火山流体)・鈴木敦生 (北大理)

### Magnetic changes on Usu Volcano detected by repeat airborne surveys

Takeshi Hashimoto (Fac. Sci. Hokkaido Univ.), Mitsuru Utsugi (Grad. School Sci., Kyoto Univ.)

Tadashi Nakatsuka, Shigeo Ohkuma (Geological Survey of Japan, AIST)

Wataru Kanda (Volcano Fluid Res. Center, Tokyo Inst. Tech.), Atsuo Suzuki (Fac. Sci., Hokkaido Univ.)

### Abstract

We conducted a helicopter-borne magnetic survey over Usu Volcano in September 2010. By comparing with the previous survey in 2000 with the aid of the generalized mis-tie control method (Nakatsuka and Okuma, 2006), temporal changes have been revealed over three eruptive fields in 2000, 1977-82, and 1943-45. These temporal changes have been confirmed with grounded repeat observations, all suggesting the magnetizing trends at shallow subsurface probably due to gradual cooling of intruded magmas in the past. For further quantitative investigations, evaluation of the geomagnetic secular variation is necessary.

#### 1. はじめに

有珠山では、2000年噴火の終息後、地上の繰り返し磁気測量によって顕著な磁場変化が捉えられている (Hashimoto et al., 2008; 橋本・他, 2010)。とりわけ、2000年噴火の隆起中心周辺 (本稿では2000年新山域と呼称する) では、2004年の測量開始以降の積算値で100 nTを超える全磁力の変化があり、噴火後10年経過した2010年時点においてもその変化は停止していない。

地上観測の強みは時間分解能の高さを確保できる点にあるが、空間的な一様性や密度の点では弱みを抱える。空中磁気測量がこの弱点を補い得ることは論を待たないが、ある時点における磁気異常の把握のみならず、時間変化成分の抽出をも可能にしたいというのが我々の目標とするところである。特に最近の10年間でGPS測位の精度が向上したことや、データ処理技術が改良されたことによって、繰り返し空中磁気測量の技術は、10 nT程度の時間変化まで抽出可能なレベルに到達してきた (中塚・大熊, 2006; Nakatsuka et al., 2009)。上述の有珠山における最近の磁場変化は、低高度であれば空中からも検知可能な量に達していると推測された。それに加えて、有珠山では2000年6月と10月に地質調査所 (現産総研) が、低高度稠密の空中磁気測量を実施していた。これらのことから、有珠山は、有意な変化が期待でき、比較対象となる過去の測量データが存在し、かつ地上観測に基づく検証が可能な実フィールドとして、好条件に恵まれた数少ない火山であるといえる。また、有珠山は歴史時代に多くの噴火を経験しており、しかも20世紀の4回のマグマ活動は、噴出/貫入地点がそれぞれ異なっている。空中磁気測量によれば、それらを一挙に網羅した観測が可能であり、過去の噴火を比較研究できる可能性もある。

本稿では、2000年6月と2010年9月の測量を比較することで得られた時間変化の特徴について述べるとともに、地上観測の結果との対比とその解釈についてまとめる。なお、中塚・他 (2011) にも述べられているように、ここで示している時間変化成分は、2011年2月までのデータ処理による暫定的な結

果である。今後、永年変化の影響等を考慮することで、結果が若干変わる可能性があることをお断りしておく。

## 2. 測定の概要

2000年6月、本稿で比較対象となる空中磁気測量を地質調査所が実施した。当時、噴火はまだ継続中であったため、金毘羅山火口群地域の一部が測量されなかったが、逆に、全体の測量範囲は、居住地や幹線道路の上空のほか、洞爺湖と内浦湾の一部も含んだ広域にわたっている。一方、2010年9月に飛行した領域はそれと比べると狭い範囲ではあるが、2000年新山域、山頂火口原、昭和新山、明治新山を含む、有珠山の主要な領域をほぼカバーしている。なお、地質調査所は2000年10月にも有珠山で空中磁気測量を実施しているが、技術的な問題から、今回の解析では時間変化検出の比較対象とはしなかった。

2000年6月の調査に用いられた機材や測定諸元は大熊・他(2001)に詳しく報告されているので、本稿では詳細は省略する。2010年9月の調査については第1表にまとめて示す。2000年6月の調査飛行では、主測線は南北方向、測線間隔は200mであった。一方、2010年9月の調査飛行では東西方向を主測線に設定し、測線間隔は100mとした(第1図)。主測線方向を、前回に対して直交させたのは、中塚・大熊(2006)の「拡張交点コントロール手法」の特長を最大限に活かすことを念頭に置いたものである。

## 3. 抽出された磁気異常時間変化成分の特徴

第2図は、拡張交点コントロール法によって抽出された10年間の時間変化成分を、2つの測量の共通リダクション面(対地高度約200mの滑らかな面)に投影したものである。高度データの誤差に起因するデータ処理上の問題については、中塚・他(2011)の議論を参照いただきたい。処理の方法によって、抽出される時間変化成分の強度が多少異なるが、本稿では、もっとも控えめな結果を与えている中塚・他(2011)の第5図を用いて以下の考察を行う。

大まかに見て、(A)2000年新山域(山西火口群地域)、(B)山頂火口原、(C)昭和新山、の3地域に顕著な時間変化が認められる。10年間の磁場変化のピークはそれぞれ、(A)+50 nT、(B)+70 nT、(C)+20 nTであり、想定される誤差範囲±10 nTを超えて有意である。これら3地域は、それぞれ2000年、1977-82年、1943-45年の噴火地点であり、地下浅所に残存するマグマが現在も冷却を続けていると考えられる場所であり、最近の地殻変動観測で沈降・収縮が検出されている場所でもある(Aoyama et al., 2009)。これに対して、1910年噴火の潜在溶岩ドームである明治新山周辺では、有意な磁場変化は検出されなかった。おそらく、明治新山の貫入マグマは100年間で相当に冷却されてしまい、磁場変化を起こすために必要となる熱残留磁化をもはや十分獲得できなくなっているものと推測される。以下では、有意な時間変化が捉えられた3地域について、地上観測との対比を行いながらさらに詳しく述べる。

## 4. 地上測量との対応

(A)2000年新山域：北海道大学では、2003年から地上での繰り返し全磁力観測(一部は連続観測)を行っている(磁気点は徐々に拡充され2010年現在で23箇所)。Hashimoto et al. (2008)は、全磁力変化のパターンを2個の磁気双極子で近似し、それぞれの位置を中心とした着磁が進行していることを示した。その一つは、NB火口付近の地下およそ500m深を中心とする冷却帯磁源で、Hashimoto et al. (2008)はそれを2000年噴火で貫入したマグマの上端に対応すると考えた。また、NB火口の北西側約500mの

ごく浅部には別の帯磁源が検出されている。Hashimoto et al. (2008) は、この着磁傾向について、噴火の進行とともにこの領域に地熱地帯が拡大したことで、逆帯磁岩体が熱粘性残留磁化を獲得しつつある過程を反映しているのではないかと主張している。本稿ではまず、2010年までの全磁力変化をもとに、上記2個の等価磁気双極子の位置と磁気モーメントを再決定した。その上で、時間変化率が2000年以降の10年間で一定であったと仮定して磁気モーメントを算出し、対地高度200 mの面（第2図の共通リダクション面にほぼ対応）に投影した（第3図）。

空中磁気測量の結果と比較すると、NB火口付近の全磁力増加域とその北側に見られる全磁力減少域で、パターンがよく一致していることがわかる。変化量についても大まかな一致が見られる。従って、空中磁気測量による時間変化検出はほぼ期待通りの性能を発揮したと考えてよさそうである。詳細を見ると変化量は一致していないが、これは空中磁気測量データの処理で永年変動の直流成分をどのように取り扱うかという問題とも関係してくるので、現時点でこれ以上の議論はしないことにする。

空中磁気測量の結果では、NB火口周辺の磁場変化域がKA火口方向にも延長しているように見える。ただし、2000年6月の測量にKA火口周辺が含まれていないため全貌は明らかではない。一方、地上磁気測量では、このような延長は見られない。これは、地上磁気測量の範囲が2000年新山域に限られており、金毘羅山火口群周辺には磁気点がないことによる。空中磁気測量を行ったことで、金毘羅山火口群周辺域にも帯磁傾向を示唆する磁場変化が生じていた可能性が示唆されたことは新たな知見である。

(B) 山頂火口原： 北海道大学では、2008年から山頂火口原内の約20箇所を繰り返し磁気測量を行っている。2010年までの3年間に観測された全磁力変化は、火口原の南部で増加、北部で減少の系統的傾向を示すことが明らかにされている。橋本・他(2010)は、銀沼火口の直下約500 m深とI火口付近の90 m深に磁気双極子を仮定すると、観測された全磁力変化は冷却帯磁でよく説明できるとしている。2008年以前についても同様の傾向が続いていたかどうかは不明であるが、仮にそうであったと仮定した場合の10年間の磁気モーメント変化から、空中における全磁力変化を計算すると第4図の如くである。地上・空中の双方とも、銀沼火口のすぐ南側に顕著な全磁力の増加域が認められ、変化量もほぼ同程度である。詳しく見ると、空中磁気の結果では、南外輪のリム付近まで磁場増加域が延長しており、南西外輪のリム付近にも独立したやや小型の磁場増加域がある。また、地上観測では、磁場増加域のカウンターパートとなる磁場減少域の中心は、小有珠(Ku)のすぐ北東側に位置するが、空中測量では、もっと北側の北屏風岩(Kb)付近にその中心があるように見える。これらの食い違いの原因は今後精査する必要があるが、空中で得られた大局的なパターンは、最近の地上観測と整合的であると考えてよいであろう。このことは、少なくとも2000年以降の10年間、山頂火口原の地下では冷却帯磁の傾向が続いていることを意味する。今回空中から捉えられた山頂火口原の冷却帯磁様の変化は、1977-82年噴火のマグマの継続的な冷却現象の一部を見たものではないかと考えられる。このような考えは、気象庁が継続的に測定しているI火口の温度がほぼ一貫して低下傾向を続けている(気象庁, 2011)こととも整合的である。

(C) 昭和新山： 北海道大学では、2008年から昭和新山および屋根山の14箇所を全磁力の繰り返し観測を開始した。1年に1回の頻度でこれまでに3回の測量を実施した。磁場変化の空間分布は、昭和新山溶岩ドームの基底部南西縁付近における冷却帯磁を示唆するもので、変化率は時間的にほぼ一定で

あった(第5図)。おそらく、これは昭和新山溶岩ドームそのものの冷却過程を反映したものであろう。等価磁気双極子の磁気モーメント変化を10年間相当量に換算した上で、対地高度200 m面に期待される全磁力変化を投影すると第6図のようになる。昭和新山山頂(Ss)のすぐ南側には16 nTの磁場増加が想定され、実際の空中磁気の結果ともほぼ一致している。カウンターパートとして想定される北側の磁場減少は-4 nTであるが、空中磁気では誤差の範囲内( $\pm 10$  nT)で検出できなかったものと思われる。

## 5. 現時点でのまとめと今後の課題

2010年9月に有珠山でヘリコプターを利用した低高度稠密空中磁気測量を実施した。拡張交点コントロール法(中塚・大熊, 2006)を適用し、2000年6月に行われた探査飛行データと比較を行ったところ、有意な時間変化成分が抽出された。顕著な変化は、2000年新山域のNB火口付近、山頂火口原内の銀沼火口付近、昭和新山の3地域に見られた。地上の繰り返し磁気測量からは、いずれの地域でも地下浅部での冷却帯磁傾向が推定されており、それぞれ過去の噴火に伴って地下浅部に貫入/残存したマグマの冷却過程を捉えたものと考えられている。地上観測から推定される等価双極子磁気モーメントの変化を10年間相当量に換算し、上空における全磁力変化を推定したところ、空中磁気測量で抽出された磁場変化と大局的な一致が見られた。このことから、低高度稠密空中磁気測量の繰り返しによる時間変化成分の抽出が実用レベルで可能であることが、従来よりもさらに確実なものとして示された。地上観測との対比による検証付きで、実データによる有意な時間変化を示した事例は、九重山(宇津木, 2011)に続いて世界で2例目となった。有珠山において、空中磁気測量によって面的な時間変化分布が得られたことの意義は大きい。地下に残存するマグマの冷却過程について今後定量的な考察を進めたい。そのためには、永年変化直流項や永年変化による orientation 効果の評価など、空中磁気データの処理そのものについてもさらなる検討が必要である。

謝辞：2010年の調査にあたり、北海道大学有珠火山観測所の大島弘光氏、前川徳光氏にはさまざまな助言と技術的支援をいただきました。また、ヘリポート用地の借用や調査飛行中の対応に関して、地元住民の皆様および自治体の関係部署の方々には大変お世話になりました。本研究は、文部科学省による「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の支援を受けました。

## 参考文献

Aoyama, H., S. Onizawa, T. Kobayashi, T. Tameguri, T. Hashimoto, H. Oshima, H. Y. Mori, Inter-eruptive volcanism at Usu volcano: Micro-earthquakes and dome subsidence, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 203-217, 2009.

橋本武志・鈴木敦生・松本征海, 有珠山頂域の全磁力変化, 日本火山学会 2010年度秋季大会予稿集, 49, 2010.

Hashimoto, T., T. Hurst, A. Suzuki, T. Mogi, Y. Yamaya, and M. Tamura, The role of Thermal Viscous Remanent Magnetisation (TVRM) in magnetic changes associated with volcanic eruptions: insights from the 2000 eruption of Mt Usu, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 176, 610-616, 2008.

気象庁, 第118回噴火予知連絡会資料, 2011.

Nakatsuka, T., M. Utsugi, S. Okuma, Y. Tanaka, and T. Hashimoto, 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, 2009.

中塚 正・大熊茂雄, 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, *Conductivity Anomaly* 研究会 2006 年論文集, 8-14, 2006.

中塚 正・大熊茂雄・有珠山空中磁気探査グループ, 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, *Conductivity Anomaly* 研究会論文集, 本号, 2011.

大熊茂雄・中塚 正・森尻理恵・牧野雅彦・内田利弘・小川康雄・高倉伸一・松島喜雄, 有珠火山地域における高分解能空中磁気探査 (序報), *地質調査研究報告*, 52, 149-154, 2001.

宇津木充, 京都大学における空中磁場観測への取り組み, *地質ニュース*, 677, 34-39, 2011.

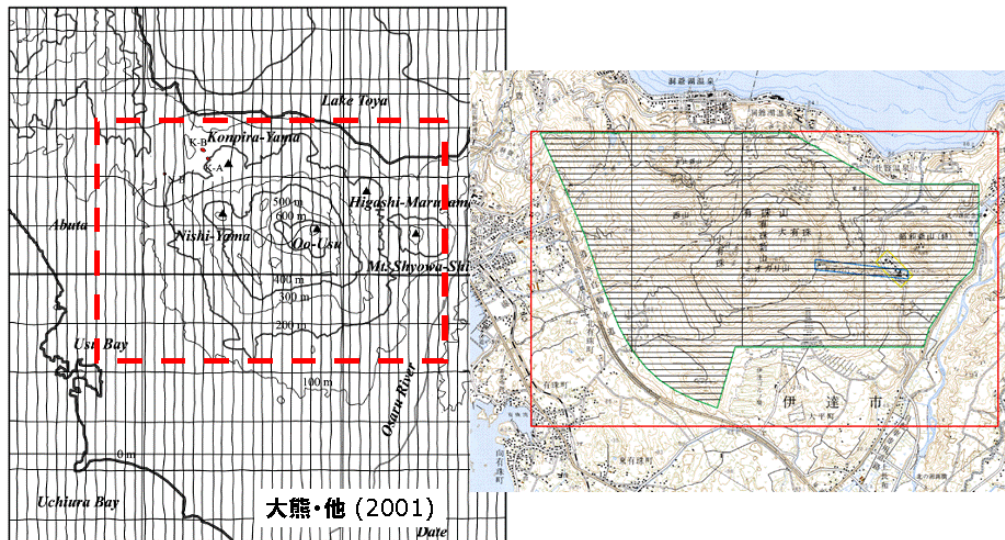
第 1 表 : 2010 年 9 月に実施した有珠山空中磁気測量の概要.

Table 1: Outline of the helicopter-borne magnetic survey over Usu Volcano in September 2010.

調査期間	2010 年 9 月 20 日～24 日
探査区域	Fig. 1 参照
使用航空機	AS350B 型ヘリコプター (中日本航空 (株))
作業飛行時間	約 8 時間
飛行高度	対地高度 150～250 m
測線延長	約 260 km
主測線方向	東西 (間隔 100 m)
交差測線方向	南北 (間隔 2000 m)
航法	Garmin GPS+ カシミール 3D モニタに援助された有視界飛行
測定方法	バード方式 (京都大学所有)
飛行基地	壮瞥町壮瞥温泉臨時ヘリポート
日変化補正	飛行基地近傍の地上固定点における全磁力連続観測データ
時刻校正	GPS 時計 (白山工業 LS10K) による測定時刻差を内挿補完
使用機材と 測定諸元	機上装置 空中磁力計 : Geometrics G-858 セシウム磁力計 10 Hz サンプリング 2 センサー GPS 受信機 : Leica SR530 10 Hz サンプリング SS 無線機 : Arrow7 製 ARN-60550 (2.4 GHz) 小型無線 RS232-C ユニット 地上装置 定点磁力計 : GEM Systems オーバーハウザー磁力計 GSM-19 定点 GPS : Leica SR530

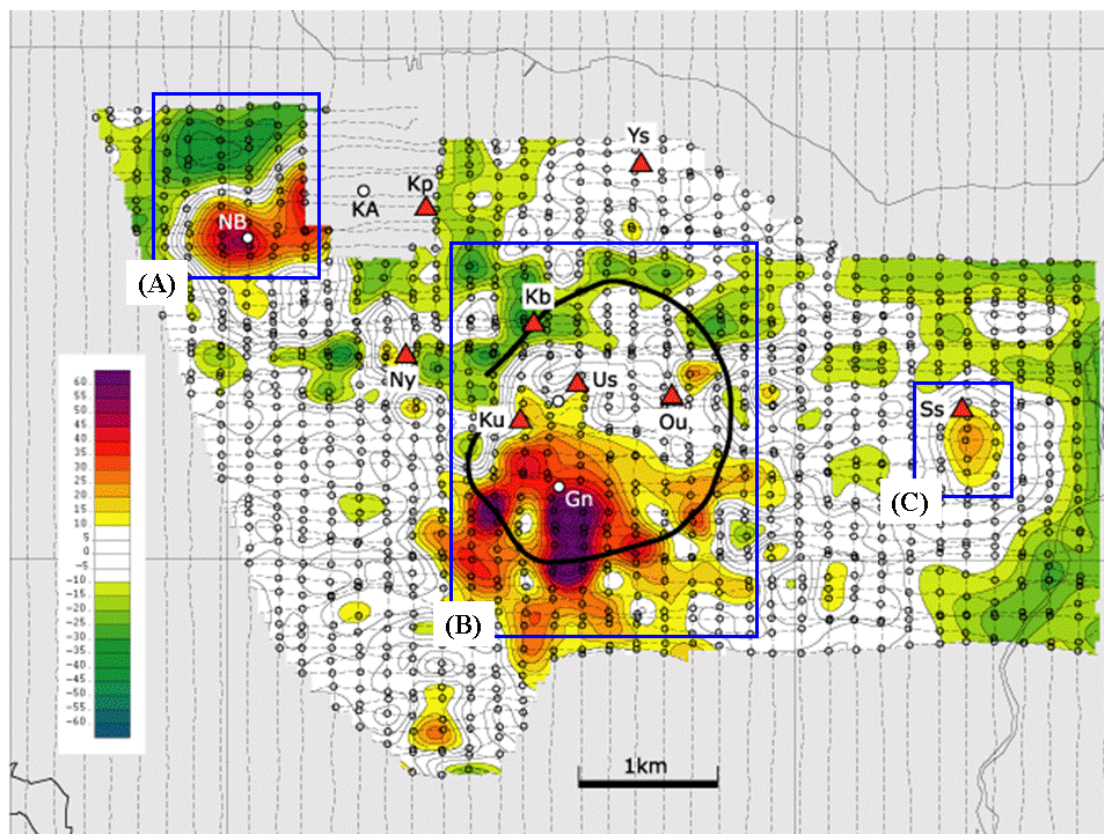
2000年6月調査(産総研)

2010年9月調査



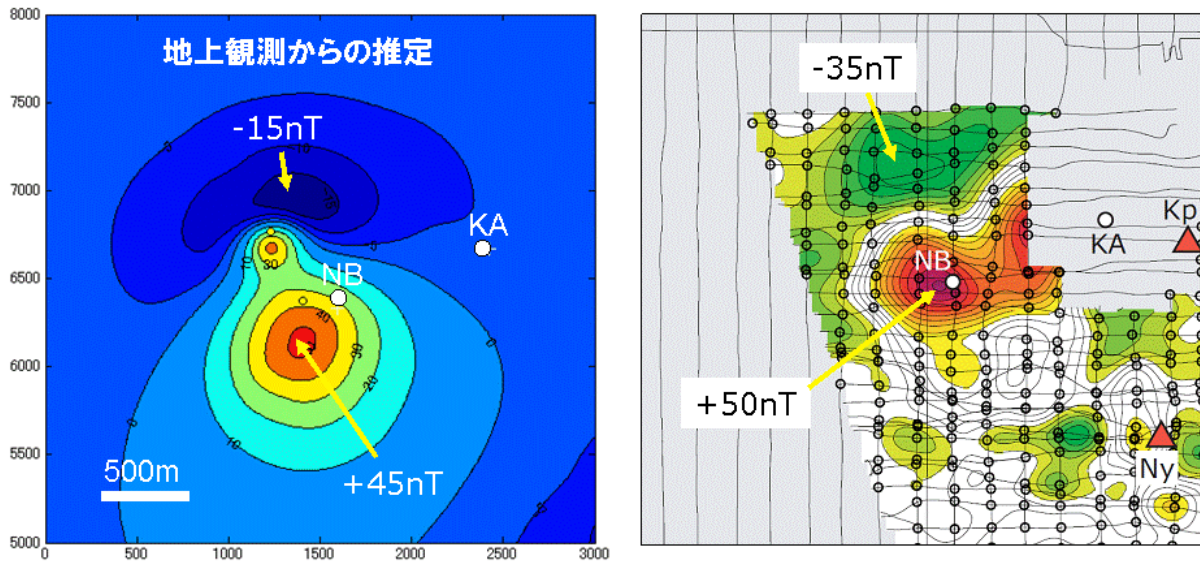
第1図：空中磁気測定の測線図（左：2000年6月の測量（大熊・他, 2001），右：2010年9月の測量）。

Fig.1: Flight line paths of the helicopter-borne magnetic surveys (left: June 2000 (Okuma et al., 2001); right: September 2010).

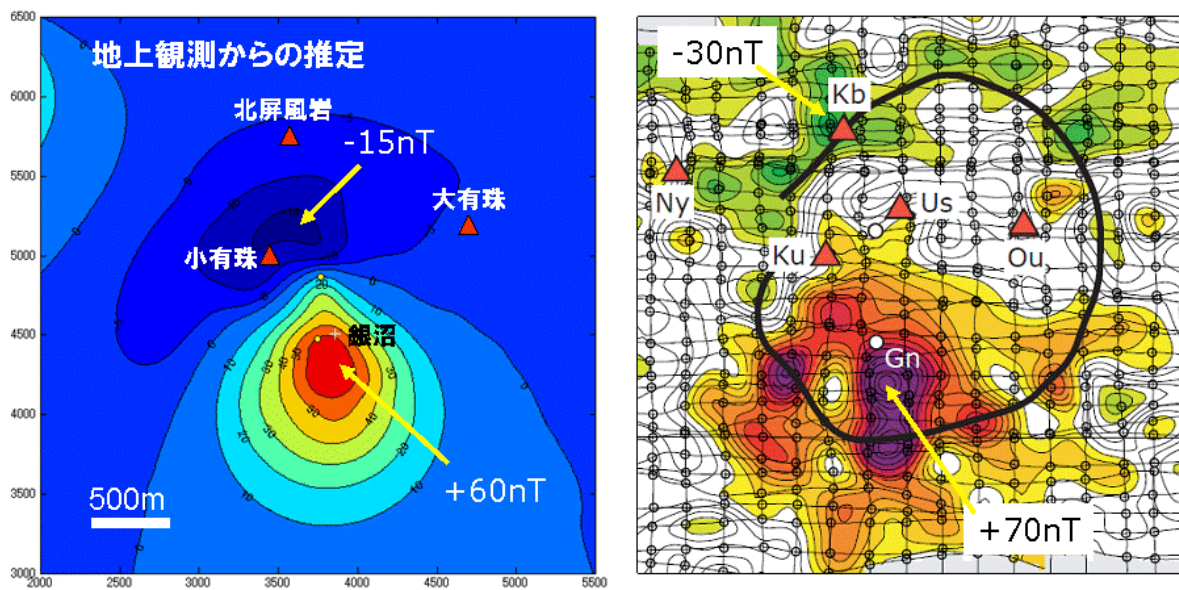


第2図：拡張交点コントロール法処理により抽出された2010-2000年の時間変化成分。コンターは5 nT 間隔で±10 nT 以上が有意として色付けされている。略号の意味は以下の通り。NB (NB 火口), KA (KA 火口), Kp (金毘羅山), Ys (明治新山), Ss (昭和新山), Kb (北屏風岩), Ny (西山), Us (有珠新山), Ku (小有珠), Ou (大有珠), Gn (銀沼火口)。

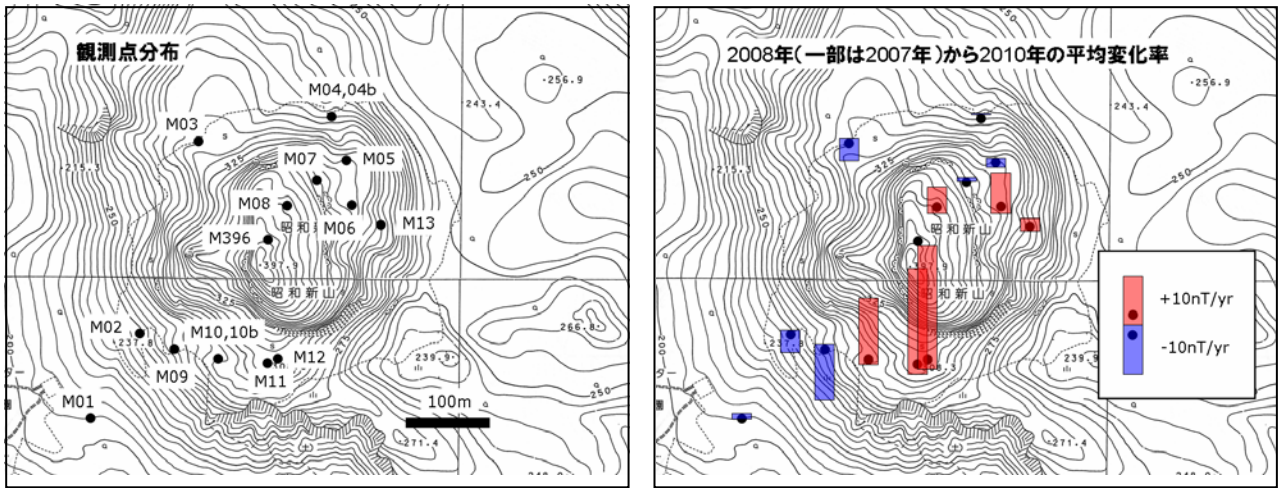
Fig.2: Temporal magnetic changes between 2010 and 2000 which is obtained by using the generalized mis-tie control method (Nakatsuka and Okuma, 2006). Contour interval is 5 nT. White portion indicates the error range of ±10 nT.



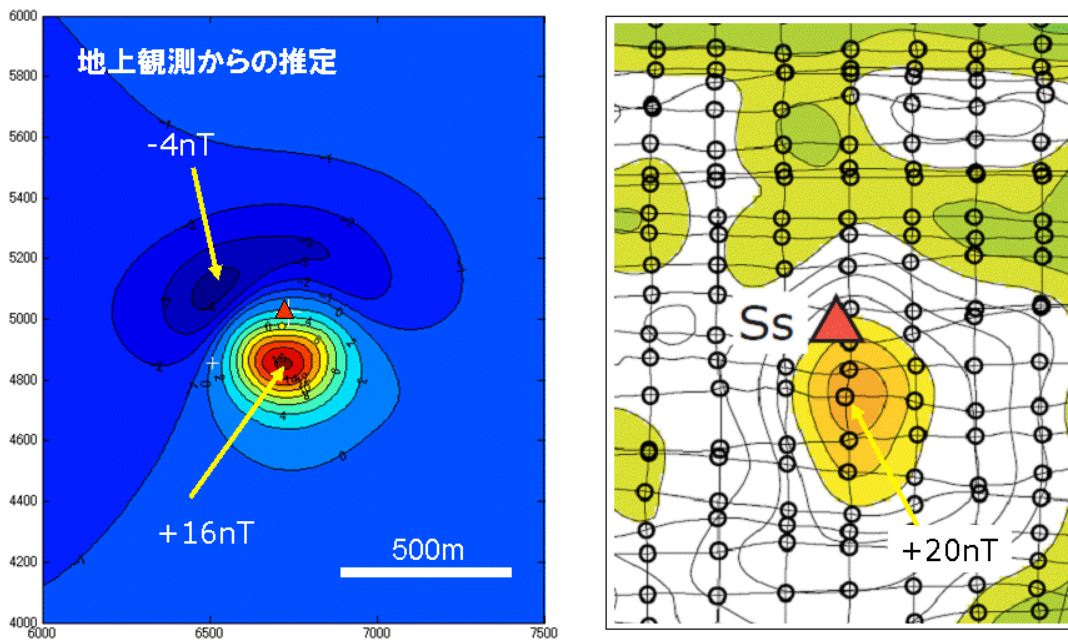
第3図：2000年新山域周辺の全磁力変化。左：地上観測から推定された10年間の磁場変化（対地高度200m面に投影）。右：空中磁気測量から得られた10年間の時間変化成分。第2図の該当部分の拡大。  
 Fig.3: Total field changes over the 2000 eruption field. Left: Magnetic changes in the 10 years, which is inferred from the ground observation (projected on the smoothed plane of 200 m high). Right: Magnetic changes in the 10 years, which is obtained from the repeated helicopter-borne surveys.



第4図：山頂火口原の全磁力変化。左：地上観測から推定された10年間の磁場変化（対地高度200m面に投影）。右：空中磁気測量から得られた10年間の時間変化成分。第2図の該当部分の拡大。  
 Fig.4: Total field changes over the summit caldera. Left: Magnetic changes in the 10 years, which is inferred from the ground observation (projected on the smoothed plane of 200 m high). Right: Magnetic changes in the 10 years, which is obtained from the repeated helicopter-borne surveys.



第5図：昭和新山地域の繰り返し磁気点分布 (左)。各磁気点における 2008 年から 2010 年の全磁力平均年変化率 (右)。  
 Fig.5: Location map of repeat magnetic sites on Showa-Shinzan (Left). Averaged annual rate of magnetic total field changes at the repeat sites (Right).



第6図：昭和新山周辺の全磁力変化。左：地上観測から推定された 10 年間の磁場変化 (対地高度 200m 面に投影)。右：空中磁気測量から得られた 10 年間の時間変化成分。第2図の該当部分の拡大。  
 Fig.6: Total field changes over Showa-Shinzan. Left: Magnetic changes in the 10 years, which is inferred from the ground observation (projected on the smoothed plane of 200 m high). Right: Magnetic changes in the 10 years, which is obtained from the repeated helicopter-borne surveys.