

桜島火山におけるくり返し空中磁気観測(2007-2011年)

京都大学大学院理学研究科	宇津木充、井上寛之
東京工業大学火山流体研究センター	神田 径
北海道大学大学院理学研究科	橋本武志
財団法人地域地盤環境研究所	井上直人
台湾中央研究院	小森省吾
京都大学防災研究所	井口正人、味喜大介

要旨

桜島火山の活動に起因する磁場時間変化を検出することを目的に 2011 年 10 月に桜島島内で空中磁気観測を行った。この観測では、ヘリコプターに磁力計及び GPS を搭載したバードを曳航させ、磁場全磁力及び計測位置を逐次計測し、桜島火山及びその周辺の磁気異常を求めた。この観測から得られた磁気異常分布からは、桜島火山・山体の南北に山体が正帯磁している場合の正・負の磁気異常が見られ、2007 年桜島集中観測の一環で行われた空中磁気観測の結果(宇津木ほか,2008)と調和的である。今回の結果について、2007 年の空中磁気観測結果をリファレンスとして、2007 年から 2011 年の間の 4 年間における磁場時間変化の検出を試みた。この結果得ら、昭和火口付近を中心とした北に負、南に正の時間変化が検出された。この変化の傾向は、昭和火口付近に新たな帯磁源が現れた場合のものとも一致する。

1. はじめに

桜島火山では近年、爆発的噴火は南岳火口を中心に発生していたが、2006 年 6 月 7 日に、昭和初期の噴火で形成された火口(昭和火口)跡付近で小規模な噴火が発生した後、噴火は昭和火口が中心となって発生するようになり、爆発の回数も増加へ転じた。2007 年中頃には一旦活動が沈静化した。その後 2008 年 2 月に昭和火口の活動が再開し、2009 年以降活動は活発化した。2009 年の爆発的噴火の回数は 548 回、2010 年 896 回、2011 年には 1 万回を超えるなど年々噴火回数が増え続けている。こうした昭和火口の活性化に伴う地下の熱的状态変化を捉える事を目的として我々は、2011 年 10 月に、「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」の一環として桜島火山周辺で繰り返し空中磁気観測を行った。桜島火山では、2007 年の、昭和火口の活動がいったん沈静化した時期(2007 年 11 月)に空中磁気観測を行っている。今回の観測では、このデータをリファレンスとして、2007 年から 2011 年までの 4 年間における、桜島火山周辺での磁場時間変化を検出する事を試みた。繰り返し空中磁気観測から磁場時間変化を検出する試みについては、宇津木ほか(2005)、Nakatsuka et al.(2006)、大久保ほか(2008)、橋本ほか (2011)などといった研究があり、九重火山、浅間火山、有珠火山で有意な磁場時間変化検出に成功している。

2. 繰り返し空中磁気観測

2.1 観測システム及び観測概要

本観測では、低高度かつ高密度の飛行を行い僅少な磁気異常を含め観測を行うため、ヘリコプターに観測バードを曳航させる方法を用いた。図

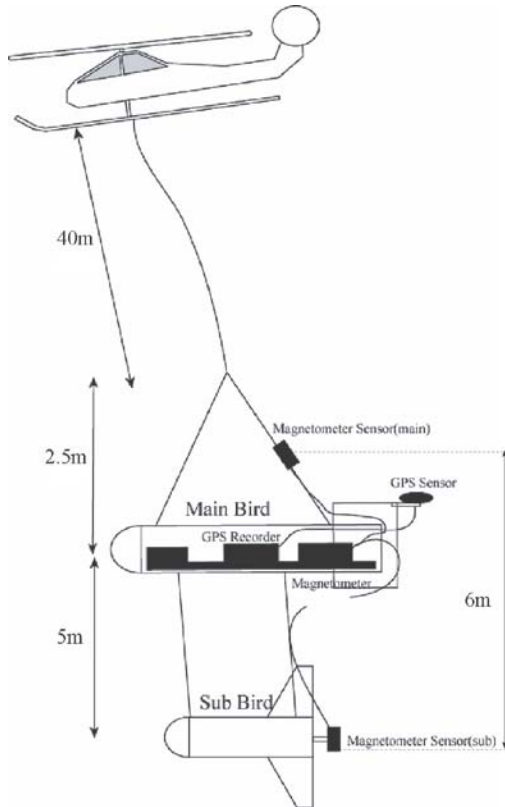


図1 観測システム概念図

1 に本観測で用いた観測システムの概念図を示す。機体磁気の影響を避けるため、観測バードをロープでヘリコプターから吊りし機体から40m離して曳航した。観測バード内には、磁力計(Geometrics社製・セシウム磁力計 G-858)アンプを搭載し、磁力計センサーをメインバード上部及びサブバードに設置した。これにより高度の異なる2点(高度差6m)での磁場全磁力値を測定し、全磁力及びその垂直勾配を同時計測した。また、ヘリポートに磁場リファレンス点を設置(GEM System社製・オーバーハウザー磁力計 GEM-11)し、観測期間中の磁場を同時計測した。メインバード尾部には、GPSセンサーを設置しバード内部のGPSアンプ(ライカ社製2周波GPS・SR520)で位置情報をカイネマティックモードで計測した。磁場及びGPSの測定サンプリングはそれぞれ0.1秒、1秒で、飛行速度(60~80km/h)を考慮すると磁場が1.7~2.2m、GPSが17~22mスペーシング程度の計測である。空中磁気観測は、

2011年10月24日~26日の3日間にかけて行われた。フライトは、各々の測線間隔(両隣の測線との間隔)250mを目安に南北22測線、東西15測線で行った。また対地高度は地表から150~200mを目安とした。

2.2 データ処理

本観測で使用した磁力計は時刻設定を手動で行っているため時刻に任意性が残る。また時刻は磁力計の内部時計のみによっているため計測中に時刻ずれが起こる可能性がある。こうした事から本観測ではGPS時計を用いた校正システムを用い時刻校正を行った。この校正システムでは磁力計センサー付近にコイルを設置し、GPS時計のクロックを元に10秒毎にコイルに電流を流した。これにより生じる矩形の磁場擾乱を測定し、その波形から磁力計の時刻ずれを求めた。時刻校正はフライト前後、または給油等でヘリコプターがヘリポートに着陸した際に行った。尚この時刻校正にはシモネックス社製高精度GPSクロックSC-GPSCLKを用いた。この時刻校正の結果求めた時刻ずれを線形補完し時刻校正情報を得た。その結果、各々のフライトでの時

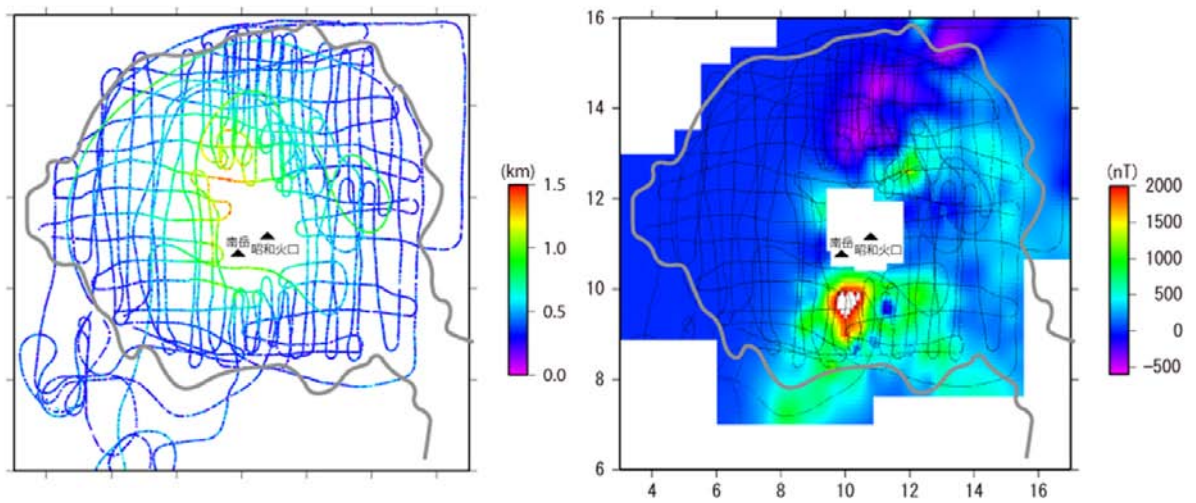


図2 2011年空中磁気観測の航跡・対地高度(左)及び飛行高度面上における磁気異常分布(右)

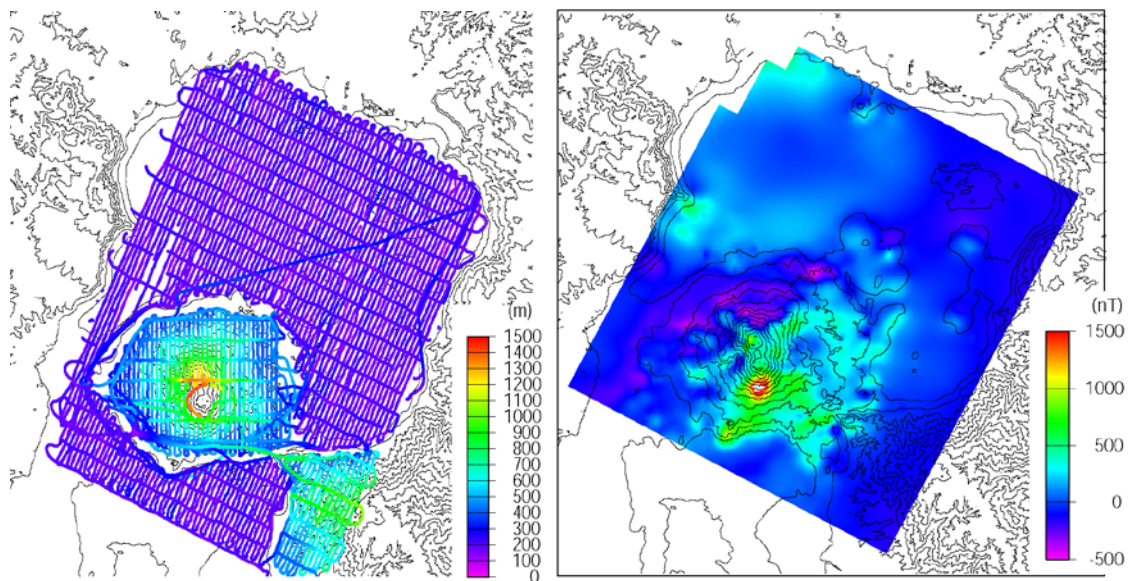


図3 2007年・桜島及び始良カルデラ空中磁気観測の航跡・対地高度(左)と磁気異常分布(右)

刻ずれは一時間あたりおよそ0.1~0.25秒程度と求まった。こうして得られた校正情報を元に時刻補正を施した観測データと、ヘリポートのリファレンスデータの単純差を取ることで地球外起因の磁場時間変化の影響を除去した。さらにIGRF地球磁場標準モデルとの差を取ることで地球深部起因の長波長の磁場傾動を除去した。GPSデータについては、バード内のGPSデータに、桜島火山活動研究センター(SVO)のGPS連続観測データを用いたディファレンシャル処理を施すことで高精度な飛行位置情報を得た。

GPSから得られた実際の飛行航跡・高度及び、飛行高度面上における磁気異常分布を図2に

示す。桜島火山のつくる磁気異常により、島の北側に低磁気、南側に高磁気異常域が見られる。さらにその北側に高磁気異常域が広がる。この傾向は 2007 年の桜島火山集中総合観測で行われた桜島・始良カルデラの空中磁気観測の結果(宇津木ほか,2008)とも調和的である(図 3)。島内では、南岳の南側斜面に 1600nT にも及ぶ極めて大きな正の磁気異常が見られる。また、新島及びその周辺の地形の高まり部分、始良カルデラ北縁の神造島周辺に 300~500nT の局所的な高磁気異常域が見られる。

3. 解析手法

3.1 Equivalent anomaly 法

磁場の時間変化を解析するに当たり、Nakatsuka and Okuma (2006) による equivalent anomaly 法を応用した。この方法は磁場の上方接続を求める為のもので、イレギュラーな面上で観測された磁場データを元に、観測面上空の 3 次元的な磁場分布を推定する。この方法を応用し、計測位置の異なるデータセットから磁場時間変化を推定した。

磁場の上方接続は、下記の積分方程式で与えられる。

$$f_u(r_u) = \iint_S f_0(r') \frac{\partial}{\partial n'} \frac{1}{|r_u - r'|} dS_{r'} \quad (1)$$

ここで f_0 は観測面 S で観測された磁場、 f_u は S よりも上面に位置する点 r_u に上方接続された磁場を表す。これを離散化すると

$$f_1(r_u) = \sum_{k=1}^N f_0(r'_k) G(r_u, r'_k) \quad (2)$$

と表される。ここに $G(r_u, r'_k)$ は上方接続の核関数 $(\partial/\partial n')(1/|r_u - r'_k|)$ 、 N は観測データ数である。ここで、ポテンシャルの場合、閉曲面上で境界条件が与えられれば、その閉曲面で囲まれた領域内のポテンシャルの値は一意に求められる。この事から観測面 S が十分に広いとみなせば、観測面 S と無限遠で囲まれた領域(つまり S より上空)では、 S 上の磁場観測値(及び無限遠で磁場=0)を境界条件として Laplace 方程式を解けば磁場分布が求められる事になる。この事から G を任意の調和関数 W に置き換え、 S より下方の r'_k について

$$f_0(r) = \sum_{k=1}^M f_e(r'_k) W(r, r'_k) \quad (3)$$

を満たす f_e に対し

$$f_u(r_u) = \sum_{k=1}^M f_e(r'_k) W(r_u, r'_k) \quad (4)$$

を計算する事でも上方接続が求められる。牧野ほか(1997)及び Nakatsuka and Okuma(2006)では W として

$$W(r, r'_k) = \frac{1}{2\pi} \frac{z - z'_k}{|r - r'_k|^3} \quad (5)$$

を用いている。式(3)を満たす f_e は、式(3)を

$$\mathbf{f}_0 = \mathbf{W} \cdot \mathbf{f}_e$$

と行列形式で書けば

$$\mathbf{f}_e = \mathbf{W}^{-1} \cdot \mathbf{f}_0 \quad (6)$$

で求められる。ここで \mathbf{r}'_k が平面上の点にある場合、式(5)の \mathbf{W} は上方接続核関数であり、従って式(6)は \mathbf{f}_0 の下方接続となる。一般に空中磁気観測から得られるデータ \mathbf{f}_0 は非一様グリッド上のデータとなる。この様なデータセットから式(1)で直接上方接続を求めても、データ分布の非一様性が上方接続の精度に影響を与えてしまう。こうしたデータ分布の非一様性の影響を除くため Nakatsuka and Okuma (2006) の方法では、観測面 S で得られた非一様グリッド上のデータを一旦下方接続し、正規化(グリッド化)した後上方接続を求めるものである。式(6)で求められる磁場分布を **equivalent anomaly** と呼び、これにより式(4)で再計算される磁場は、実際の磁場分布を高精度に表現できることが知られている。

3.2 磁場時間変化の検出方法

火山の磁場変化は、活動的の近傍に局所的に現われる。従って磁場変化が生じた後の磁場分布は、変化が起こる前の磁気異常に、時間変化項が重ねあわされたものとみなす事が出来る。即ち変化が現れる前の磁場分布を \mathbf{f}_0 、時間変化項を $\Delta \mathbf{f}$ として、時間変化が生じた後の磁場分布 \mathbf{f}_1 は

$$\mathbf{f}_1 = \mathbf{f}_0 + \Delta \mathbf{f}$$

で表わされる。ところで \mathbf{f}_0 も $\Delta \mathbf{f}$ も磁場分布であるから

$$\mathbf{f}_0(\mathbf{r}_0) = \mathbf{W}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{f}_{e0}(\mathbf{r}') \quad (7)$$

$$\Delta \mathbf{f}(\mathbf{r}_1) = \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{f}_{\Delta e}(\mathbf{r}') \quad (8)$$

なる **equivalent anomaly** \mathbf{f}_{e0} 、 $\mathbf{f}_{\Delta e}$ が存在するはずである。これらを用いれば磁場変化が生じた後の磁場分布は

$$\mathbf{f}_1(\mathbf{r}_1) = \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{f}_{e0}(\mathbf{r}') + \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{f}_{\Delta e}(\mathbf{r}') \quad (9)$$

で表現される。式(7)と式(9)から

$$\begin{pmatrix} \mathbf{f}_0(\mathbf{r}_0) \\ \mathbf{f}_1(\mathbf{r}_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}') & 0 \\ \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}') & \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}') \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{f}_{e0}(\mathbf{r}') \\ \mathbf{f}_{\Delta e}(\mathbf{r}') \end{pmatrix} \quad (10)$$

なる連立方程式が得られる。この式により、観測点位置の異なる 2 つのデータセット $\mathbf{f}_0(\mathbf{r}_0)$ と $\mathbf{f}_1(\mathbf{r}_1)$ の両方を用い **equivalent anomaly** \mathbf{f}_{e0} 、 $\mathbf{f}_{\Delta e}$ を同時に求め、式(4)の上方接続で観測面上空の3次元的な磁気異常、時間変化項の分布を推定する。各々のデータセットに式(6)、式(4)を適用すれば、各々の時期の磁場3次元分布が求められるので、同じ点における磁場変化を議論できるが、この場合観測点の分布の仕方の異差によりエイリアス効果で見かけの時間変化が表れてしまう事がある。これに対し 2 つのデータセットを同時に用いる事で、同じ観測点分布で時間変化を議論する事が可能となりエイリアス効果が軽減されると考えられる。式(10)に則り桜島の2007年の観測データと今回(2011年)のデータの両方を同時に使い、変化前の磁気異常及び時

間変化を表す equivalent anomaly f_{e0} 、 $f_{\Delta e}$ を求めた。但しこの際、 f_{e0} に対しては平滑化、 $f_{\Delta e}$ に対してはノルム最小のダンピング係数付き拘束条件を付加し、その係数を ABIC 最小化法により求めた。

4. 解析結果

2007 年及び 2011 年の空中磁気観測から得られたデータを元に、2007 年の磁気異常分布と、

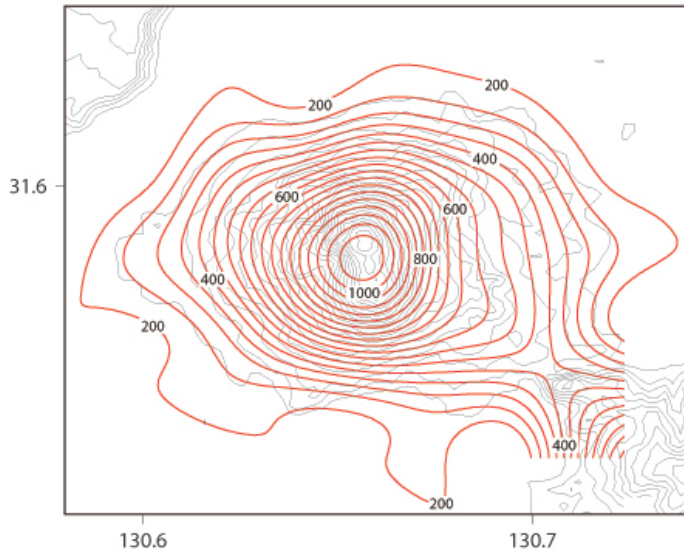


図 4. 解析に用いた共通リダクション面の海拔高度
2007 年及び 2011 年の空中磁気データを用い式(10)で equivalent source を求めた後、上方接続でこのリダクション面上での磁気異常及び時間変化項を計算した。

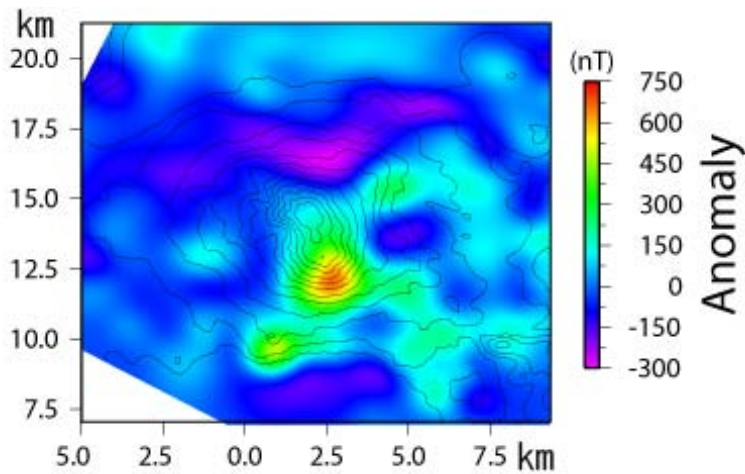


図 5. 解析から得られた変化前(2007 年)の磁気異常分布

2007年から2011年間の磁場時間変化とを求めた。この解析では、2007年及び2011年の空中磁気観測データを用い、式(10)に従って変化前(2007年)の磁気異常分布と時間変化(2007年~2011年)を表す equivalent anomaly を同時に求め、それを元に共通リダクション面上での磁気異常分布及び時間変化項を求めた。共通リダクション面として、対地 200m の高度面(地形を平滑化した局面を 200m 上空に上げた面)を用いた(図 4)。この解析の結果を図 5、図 6.に示す。図 5 は変化前の磁気異常分布(2007 年当時の磁気異常に相当)、図 6 が時間変化項を表す。図 6 から、南岳東側の昭和火口周辺で、北側で負、南側で正の時間変化が得られた。北側で磁場減少、南側で増加の傾向は、正負の領域の中心部で磁化が増加した場合に生じる変化のパターンと一致する。2007 年以降の噴火活動で、昭和火口周辺では降灰により地形が大きく変わって

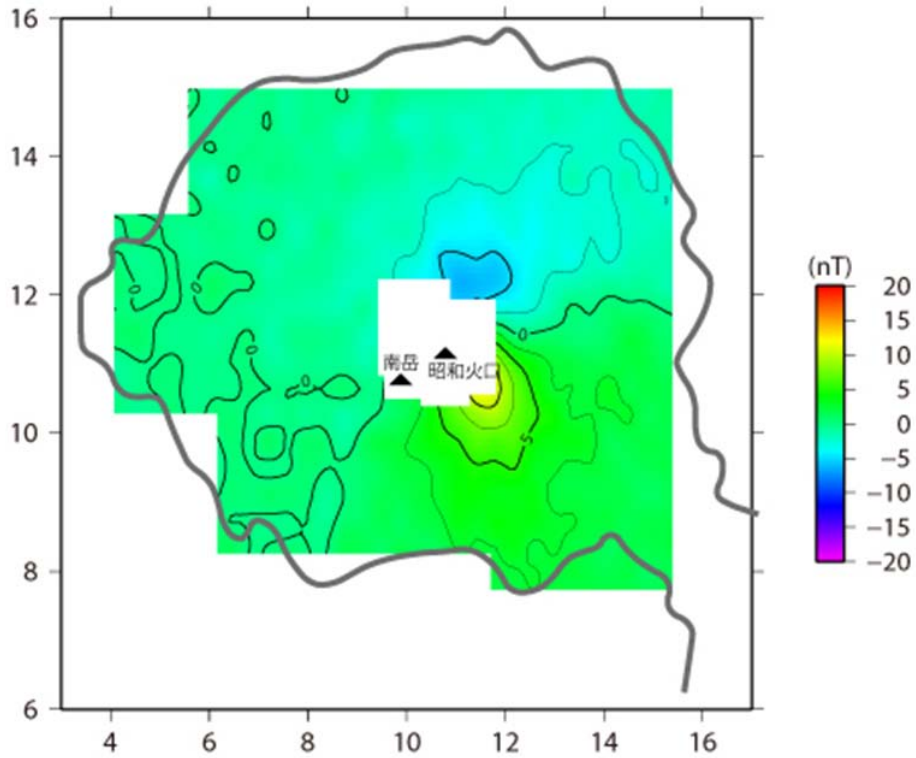


図 6. 解析から得られた 2007 年～2011 年の 4 年間の磁場時間変化

図 4 のリダクション面上で計算された磁場時間変化を表す。昭和火口周辺で、北側で負、南側で正の時間変化が見られる。

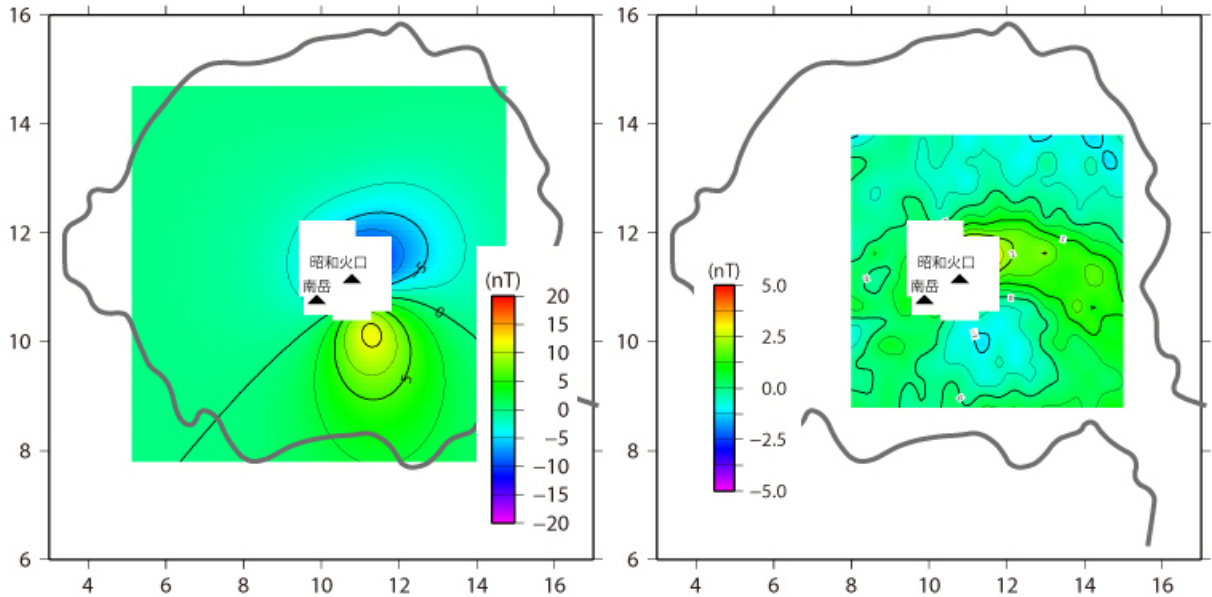


図 7. 図 6. 2001-2011 年の地形変動を補正した磁場時間変化

昭和火口東側斜面の地形変動を降灰の影響と仮定し、その誘導磁化を $0.4A/m$ と仮定した場合の磁気異常(左)及び図 6 から地形変動の影響を除いた時間変化項

いる。火口周辺の帯磁センスの時間変化はこの影響である可能性が考えられる。(株)国際航業(2001年)および国土地理院(2011年)による桜島島内のDEMデータを利用させていただき、両者の比較から2001-2011年の期間内の地形変動量を見積もった結果、昭和火口周辺で数m程度の地形の上昇が見られた。この地形変動を降灰の影響と仮定し、且つ堆積した灰が磁化(誘導磁化)を持つと仮定して最適な磁化強度を求めた。その結果磁化強度として0.4A/mが得られた。この時の磁気異常の理論値を図7左図に示す。図7右図は図6から図7左図の結果を補正した時間変化項を表す。この結果から火口周辺の磁場変化は北側で増加・南側で減少の(地下温度上昇を示す)パターンに反転する。こうした結果から、地下深部の温度上昇による磁場変化のシグナルが、表層の磁場環境の変化による擾乱に埋もれて見えなくなっている可能性が示唆される。但しこの結果は振幅が小さく空中磁気による検出精度と同等であり現時点では有意な変化とはいえず、今後より精密な補正を施す必要がある。

謝辞

本研究では(株)国際航業所有の桜島周辺の地形(DEM)データ及び国土地理院の桜島島内のDEMデータを使用させていただきました。また磁力計の時刻校正のため、シモレックス社製高精度GPSクロックGPS-CLKを使用させていただきました。

参考文献

- 1) 橋本武志、宇津木充、中塚 正、大熊茂雄、小山崇夫、神田 径、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、CA研究会論文集、29-36.
- 2) Nakatsuka and Okuma (2006): Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations, Exploration Geophysics (2006) 37, 121-128.
- 3) 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.
- 4) 大久保綾子、宇津木充、神田径、小山崇夫、中塚正、田中良和、井上寛之、A.W. Hurst、為栗健、石原和弘、高山鉄朗、桜島電磁気構造探査グループ (2008): 桜島火山2007年-2005年データから検出された空中磁気異常変化、CA研究会論文集、73-76.
- 5) 宇津木充、田中良和、鍵山恒臣、井上寛之(2005): 九重火山における高密度空中磁気観測、文部科学省科学研究費特定領域研究「火山爆発のダイナミクス」、平成16年度研究成果報告書、77-83.
- 6) 宇津木充、井上寛之、神田径、石原和弘、高山鉄朗、為栗健、大久保綾子、小山崇夫、田中良和(2008): 桜島火山及び始良カルデラにおける 空中磁気観測、第10回桜島火山の集中総合観測、75-82.