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

中塚 正¹・宇津木 充²・大熊 茂雄¹・田中 良和²・橋本 武志³ (¹産総研,²京都大学,³北海道大学)

Aeromagnetic anomaly change associated with volcanic activity: an application of the generalized mis-tie control method to Asama data

T. Nakatsuka¹, M. Utsugi², S. Okuma¹, Y. Tanaka², and T. Hashimoto³ (¹Geological Survey of Japan, AIST, ²Kyoto Univ., ³Hokkaido Univ.)

Abstract: Repeat aeromagnetic surveys may assist in mapping and monitoring long-term changes associated with volcanic activity. However, when dealing with repeat aeromagnetic survey data, the problem of how to extract the real change of magnetic anomalies from a limited set of observations arises, i.e. the problem of spatial aliasing. Recent development of the generalized mis-tie control method for aeromagnetic surveys flown at variable elevations enables us to statistically extract the errors from ambiguous noise sources. This technique can be applied to overcome the spatial alias effect when detecting magnetic anomaly changes between aeromagnetic surveys flown at different times. We successfully apply this technique to Asama Volcano, one of the active volcanoes in Japan, which erupted in 2004. Following the volcanic activity in 2005, we conducted a helicopter-borne aeromagnetic survey, which we compare here to the result from a previous survey flown in 1992. To discuss small changes in magnetic anomalies induced by volcanic activity, it is essential to estimate the accuracy of the reference and the repeat aeromagnetic measurements and the probable errors induced by data processing. In our case, the positioning inaccuracy of the 1992 reference survey was the most serious factor affecting the estimation of the magnetic anomaly change because GPS was still in an early stage at that time. However, our analysis revealed that the magnetic anomaly change over the Asama Volcano area from 1992 to 2005 exceeded the estimated error at three locations, one of which is interpreted as a loss of magnetization induced by volcanic activity. In this study, we suffered from the problem of positioning inaccuracy in the 1992 survey data, and it was important to evaluate its effect when deriving the magnetic anomaly change.

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いれる必要があり、拡張交点コントロール手法の応用による磁気異 常変化検出法について検討して 2005 年 12 月の CA 研究会で報告し (中塚・大熊, 2006)、「物理探査」誌 に発表した (Nakatsuka and Okuma, 2006).

浅間山電磁気構造探査グループは、火山噴火予知計画の火山体構造探査の一環として、2005 年 10 月 に浅間火山の空中磁気測量を実施した(橋本ほか、2006;宇津木ほか、2006). このうち山体全域にわたる 「高高度」測線は、1992 年に地質調査所(現 産総研)が高分解能空中磁気探査の実用化研究の一環と して実施した探査(大熊ほか、2005)と比較すると、飛行高度にかなりの差があるものの調査範囲が概ね 一致し、上記手法適用によるが成果が期待できる. 但し、1992 年の探査は GPS の利用が始まって間も なくの時期であり、位置決定精度を低下させる SA がかけられており、ディファレンシャル処理技術も 進展していなかったので、その位置精度は今日と比べると大きく劣る. そのため後に述べるように、 1992 探査データの位置誤差の効果を正しく見積る必要があり、解析結果の精度劣化の要因となった. このデータの検討については、2007 年 3 月の CA 研究会で中間的な結果を発表した (中塚ほか, 2007) が、さらに検討を進め、1992 探査データの位置誤差の効果を考慮した解析を行い、有意と考えられる 成分を抽出した (Nakatsuka et al., 2007). また、その結果を取りまとめて Tectonophysics 誌に投稿し、2009 年 2 月に受理 (Nakatsuka et al., 2009) された.

ここに記載する内容は、Tectonophysics 誌と内容的に重複する部分が多い点は、ご容赦いただきたい. なお、当該誌の査読過程で査読者との議論の素材として、実探査と同じ磁気異常場と探査測線配置の状 況下の合成磁気異常変化モデルに拡張交点コントロール手法を適用した結果図(論文内容には収容して いない)を作成した.この図は、手法の有効性を感覚的に見極めるうえで有用と思われるので、ここに 収録しておきたい.また、紙面の都合で2007年CA論文集と同内容の部分は図を掲出しない.

2005 年浅間山の空中磁気探査を含む電磁気構造探査は、気象庁軽井沢測候所と東大小諸火山化学研 究施設による安全監視支援のもと、浅間山電磁気構造探査グループ(北大:橋本・茂木・鈴木・山谷、 東北大:三品、産総研:中塚、東大:小山(悦)・小山(崇)、東工大:相澤・平林・松尾・野上・小川・氏原、 京大:鍵山・神田・大久保・田中・宇都・宇津木)によって実施されたものである.

2. 浅間火山空中磁気 2005-1992 年データへの拡張交点コントロール法の適用

使用したデータおよび処理手順は、2007CA 論文集 (中塚ほか、2007) に記したとおりであり、共通リ ダクション面ヘリダクションした結果の両データの差をとると、測線に沿って異様に伸びる見かけ上の 変動パターンが示され、空間エリアス効果と判定される.一方、拡張交点コントロール手法による磁気 異常変化の抽出結果は、図1のとおりである(2007CA 論文集に比しコントロール点数を約倍加した). 2005 年飛行測線(実飛行高度)に設定した 1090のコントロール点の上にのみ値が得られ、この図では、 高度を無視して単純図化してある.各点の実高度は変化に富むので、これを等価ソース法によって滑ら かな共通リダクション面へのリダクションを行うと、図2の結果を得る.このリダクション処理では、 少ないデータ点数に対する処理を強行しているためある程度の誤差の混入は免れない.なお、各図で青 太線の5角形範囲の外側では、データ処理に含まれる高度リダクションのエッジ効果により誤差が大き くなっていると考えられるので、議論の対象にはしない.



図1

拡張交点コントロール法による磁 気異常変化抽出.

○印がコントロール点の位置であ り、2005 年飛行の実飛行高度のそ の位置に与えられる値(大きく歪 んだ曲面での値)を、高度を無視 して図化してある. コンター間隔 は 5nT.

太青線の外では、高度リダクショ ンのエッジ効果が卓越するので、 議論の対象としない.



図2 図1の磁気異常変化を滑らかな 高度面の上へリダクションした 結果.

コンター間隔は5nT.

図 1,2 いずれも、共通リダクション面での単純差 に見られた空間エリアス効果が現れておらず、良好 な結果と思える.両図とも、磁気異常の減少域 *C* と増加域 *N*, *S* で特徴付けられるが、この結果が数 値的にどこまで有意であるかの検討が必要である.

3. 観測およびデータ処理の誤差の見積り

全磁力測定については、1992年・2005年ともへ リコプターから 40m 程度のロープで曳航されたバ ードによるもので、調査域内に設置した観測定点で の連続観測による日変化補正を行っており、その定 点観測データと柿岡の観測データとの対比から見て も, 誤差 lnT以下の相対精度が確信できる. 但し, 1992 年調査時は (長野新幹線開業前の) JR 信越線の 影響があり最大で 2~3nT の主に漏洩電流によると 考えられるノイズがある.一方,火山地域において 磁気異常変化を議論する上では、その期間内の標準 磁場方向変化を考慮することが必要である (橋本, 2006). その効果は,得られた磁気異常分布と IGRF 永年変化項による伏角・偏角の変動から、等価ソー ス解析をもとにした評価が可能である. ソース磁化 がすべて残留磁化による場合とすべて誘導磁化によ る場合とで約2倍の差を生じるが、1992-2005年の 変化(伏角+0.3 度・偏角-0.1 度)に対して、計算し た結果を図3に示す.火山岩では一般に残留磁化が 卓越することを考えると 2~3nT, 誘導磁化が卓越





地磁気伏角・偏角変動の効果の見積り. コンター間隔は lnT. (a) は残留磁化を仮定した場 合,(b)は誘導磁化を仮定した場合の結果. すると考えても最大 5~6nT の効果となり、そのパターンは図 1,2 とは明らかに異なることから、磁気 異常変化としてはマイナーである.以上の点から磁場計測における各種誤差要因の積算は、最大でも 5nT 程度と考えられる.

次に,位置計測の誤差が磁気異常変化の評価に及ぼす影響を考察する. GPS 技術の進んだ 2005 年の データでは 2~3m の誤差レベルが得られているのに比し, 1992 年当時は前記のように条件が熟してお らず,最大 60m 程度の水平位置誤差が想定される. (高度は,気圧高度計とレーザ高度計の組合せに より 5m 程度の誤差レベルである.) この大きな水平位置誤差が,磁気異常変化抽出に及ぼす影響を次 のように評価した.

位置誤差は、(1)相当な広さの範囲で平行移動に相当するような一様誤差ベクトル成分と、(2)誤差ベクトルがランダムに散乱された成分に分けられると考える.両者とも、大きな磁気異常のある部分では大きな誤差をもたらし、磁気異常不存在の部分では誤差をもたらさないことは自明である.前者(1)は、データリダクション処理においても磁気異常パターンの平行移動としてのみ影響するので、磁気異常値への影響は、(IGRF 残差をとる前の)磁気異常分布の磁気傾度に最大誤差距離(60m)を乗じたもので評価できる.一方、後者(2)は、探査測線の配置状況や実際の磁気異常の波長特性などに左右されると考えられ、その数値的評価が難しいので、ここでは、人為的に誤差を発生させた多数回のシミュレーションから誤差レベルを判定することとした.図4にこの両者をあわせたの最大誤差の分布を示す.ここで、1992 年探査の測線は対地高度約 200mに対し、磁気異常変化を評価する高度である 2005 年探査の測線は対地高度 250-1,300m であり、上方接続の操作が加わるので、位置誤差のランダム成分(2)の効果は平均化されるため、相対的に影響が緩和される結果となった.

図4は、60mの位置誤差が磁気異常変化抽出に及ぼす影響が、ピークで60nTに及ぶことを示し、図2 の値の変域が、-25~+35 nT 程度であることを考えると、図 1,2 にはその効果が大きく影響しているこ とが明らかである.ここでは、場所によって誤差レベルが異なることを踏まえつつ、そのレベルを超え る部分のみを抽出する目的で、図 1 の 1090 のコントロール点で誤差レベルを超える部分のみを残す処 理を行い、滑らかな共通リダクション面へのリダクションの処理を再度行った.その結果が図5であり、 磁場計測自体の誤差レベルである 5nT を超える範囲について色付けしてある.





図5

最大位置誤差の影響分を除去し たあとの 1992 年-2005 年の磁気 異常変化.

コンター間隔は 5nT.

磁場計測にかかわる総合最大誤 差レベルの 5nT を超える部分に 色付けしてある.

4. 議論と結論

図5では、3つの主要な磁気異常変化パターン C, N, S がなお明瞭な形で存在し、それらがこの13年間の磁気異常変化として現実に起こったらしいことを示している.

これらのうち*S*は、磁気異常の傾度が大きいため、図2と大きく異なる分布を示しており、ここに見 られた形そのものを議論するのは適切でない.また、青太線の5角形範囲の南東および北西寄りに負の 変化域が現れているが、その外側のエッジ効果卓越域に繋がっており、エッジ効果がたまたま強く現れ たものと解釈される.また 5nTの限界レベルをわずかに超える小さな異常域も散見されるが、それらは (不十分なデータ数による高度リダクション処理などの)別の誤差要因がたまたま競合して現れたもの であろう.

磁気異常の減少域 C は、2004 年噴火の活動域に合致し、釜山火口縁から 250m 下方に半径 150~200m の球体 (2A/m の磁化) に等価的な消磁域 (熱消磁 and/or 物質の置換)の生成で説明できる. その変動スケールは、国土地理院の可視/SAR による釜山クレータ内の変動観測や、植木ほか (2005)の重力変化 によるマグマ移動モデルと調和的である. 磁気異常の増加域 N, S は、それを裏付ける具体的なデータ はないが、とくに N は 1783 年活動の源頭域に対応し、非常にゆっくりした磁化獲得の経過の一部を見ている可能性があるかも知れない.

今回の浅間データの解析では、1992 年探査の位置誤差の問題が深刻であり、その影響を正しく見積 もることが重要であった.近年の GPS 位置計測技術は当時と比べて大きく進んでおり、人工擾乱が大 きくない限りは、繰返し空中磁気探査への拡張交点コントロール法適用により、数 nT の磁気異常変化 を抽出することが可能であろう.

付録. 実探査と同じ磁気異常場と探査測線配置の状況下の合成磁気異常変化モデルに

拡張交点コントロール手法を適用した結果

拡張交点コントロール法をモデルデータに適用した結果については、中塚・大熊 (2006), Nakatsuka and Okuma (2006) に示してあるが、実フィールドとかけ離れたモデルとの批判もあったので、浅間での 実データの環境に合わせて設定した仮想磁気異常変化に対して拡張交点コントロール法を適用した.その結果を図Aに示す.











⊠A

浅間での実データの環境に合わせて設定した仮想磁 気異常変化に対して拡張交点コントロール法を適用 した結果. コンター間隔は lnT.

1992年と2005年の実探査測線で期待される仮想観 測データを2005年探査データの等価ソースモデル を用いて生成し,それに拡張交点コントロール法の 処理を行った. (a),(c)は共通リダクション面での単 純差,(b),(d)が拡張交点コントロール法の結果.(c), (d)には(e)に示される磁気異常変化分が元データに 加算されている.

(a)-(d)とも実データと同じエッジ効果が見られ、(a),(c)に現れた空間エリアス効果が磁気異常変化分を 不明瞭にしている. 図 A は 5 つのパネルからなるが,2005 年探査の実データから求めた等価ソースモデルを用いて1992 年と2005 年の探査測線での期待される観測データを生成し、それを用いて拡張交点コントロール法の 処理を行った.(c),(d) はソースモデルに(e) に相当する磁気異常変化分が入っており,(a),(b) には入って いない.(a)-(d) とも測線配置が実データと全く同じなので、実データに見られたのと同じエッジ効果が 見えている.(a),(c) は拡張交点コントロール法によらずに、共通高度面へのリダクション結果の単純差 を示すが、実データの処理のときと酷似した空間エリアス効果が現れている.(c) には磁気異常変化(e) 相当分が確かに含まれるが、空間エリアス効果との分別は困難であろう.一方,(b),(d) は拡張交点コン トロール法によって抽出した磁気異常変化であり、磁気異常変化(e) 相当分が明瞭に示されている.

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 径・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. Conductivity Anomaly 研究会 2006 年論文集, 79-80.
- 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.
- Nakatsuka, T., M. Utsugi, S. Okuma, Y. Tanaka, and T. Hashimoto (2007) Detection of aeromagnetic anomaly change associated with volcanic activities — Application of generalized mis-tie control. 2007 IUGG General Assembly, JAS012.
- 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*, (in Press). DOI: 10.1016/j.tecto.2009.02.018
- 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.
- 植木貞人・大久保修平・大島弘光・前川徳光・孫 文科・松本滋夫・小山悦郎 (2005) 浅間火山 2004 年 9 月 1 日噴火前後の 重力変化.火山, 50, 377-386.
- 宇津木充・田中良和・中塚 正・鍵山恒臣・橋本武志・神田径 (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.