

ウェーブレット解析を用いた 火山性磁場の長期トレンド抽出と他手法との比較

笹岡雅宏¹, 清水淳平²

¹地磁気観測所技術課, ²精密地震観測室

2010年11月19日受付, 2011年9月28日改訂, 2011年11月4日受理

要 旨

地磁気観測所では、火山において実施している全磁力観測から火山性磁場変動を検出することを目的として、地球内外から及ぼされる様々な磁場変動を分離する手法の開発を行ってきた。これら手法を用いて、三宅島の観測点を例に火山性磁場の長期トレンドについて調査した。ウェーブレット解析は、地磁気擾乱などに起因する短周期変動を殆ど除去した長期トレンドを抽出し、年周変化や海流の影響を各地点で容易に比較可能にした。また、ウェーブレット解析、確率差分法及びカルマンフィルター法から得られた結果を比較すると、いずれの手法でも、程度の差はあるが短周期変動は分離され、ほぼ同様な火山性磁場の長期トレンドが抽出されたものの、1月間のオーダーで見ると、トレンドに食い違いが見られる場合があることが示された。この食い違いの原因としては、参照した地磁気観測データのトレンドが反映されたものと推察される。

1. はじめに

全磁力観測による火山監視では、通常、火山観測点と参照点（火山性磁場変動の影響を受けない地点）との単純差を求めることで火山性磁場を評価している。地磁気全磁力観測は、地球内部のダイナモ作用によって生じる地球磁場（地磁気永年変化）のほか、以下の影響が含まれると考えられている。

- ①主に太陽風に起因する磁気圏電流系の変動による磁気擾乱 (D)
- ②大気潮汐運動によって駆動される電離圏電流系による磁場変動
- ③観測地点付近の様々な磁気源（海流等含む）がつくる磁場

単純差で評価した火山性磁場には、一般的にこれら磁場要因の残差が含まれる。このため地磁気観測所では、火山性磁場に対する正確な推定のために、①の地磁気擾乱や②の地球電磁的に静穏な日の昼間によく確認される地磁気日変動 (Sq) の影響を除去するための手法の開発を行ってきたところである（藤井, 2004; Fujii and Kanda, 2008）。最近、著者らはデータを分解する方法論であるウェーブレット解析を用いて地磁気観測値の分解を試みた（笹岡と清水, 2009）。ウェーブレット解析の理論と

応用については、これまでに様々な文献により議論されている（例えば, Daubechies, 1992; Kautsky and Turcajova, 1994; 新井, 2006）。地球電磁気研究の分野では、ウェーブレット解析を利用して時系列中の局所的な短周期信号を抽出した成功例は少なくない（例えば, Nose et al., 1998; Trad and Travassos, 2000）。更に、本解析手法を火山観測データに適用して、磁気擾乱や地磁気日変動に関係する成分を除去して火山性の長期トレンドを抽出することが試みられた（笹岡と清水, 2009; 笹岡ほか, 2009）。また、他の要因に比べて小さな変化である火山性磁場変動の抽出については、現在は火山解説資料等の作成にあたり確率差分法（藤井, 2004）を試行しているが、運用上まだよく理解されていない点が多々あることから、複数の手法により得られた結果を比較することにより理解を深めることは重要である。本稿では、三宅島全磁力観測を例に取り、ウェーブレット解析で推定した火山性磁場の長期トレンドについて考察するとともに、単純差のほか先に開発された確率差分法（藤井, 2004）及びカルマンフィルター法（Fujii and Kanda, 2008）と比較検証した結果について報告する。

2. 方法

概ね火山で観測される磁場は、地磁気永年変化+ $Sq + D$ +火山性磁場+その他(上述③)で構成される。ウェーブレット解析の基本的な処理は、様々な形態の信号(観測値)から短周期信号(変化部分)を検出することであるが、その利点は局所的な短周期信号を分離する際に元の長周期的な信号の形態を崩さないことである。逆にフーリエ解析は、ある時間区間で周波数解析を行う必要があるため、短周期成分を除いた残りの長周期成分は元の長周期的な形態を変形させてしまうかもしれないことが指摘されてきた。ウェーブレット解析により、1日~数日の変化を示す現象である Sq と地磁気擾乱を高周波とみなして除去すると、残りの成分(地磁気永年変化と火山性磁場の長期トレンド等)を低周波として分離することができる。

解析に用いたデータは、観測毎分値を平均して0.1nT単位で求めた1時間値である。本稿のウェーブレット解析では、様々なデータ分解への用途に用いられるDaubechiesウェーブレット(Daubechies, 1992)を採用した。実際の計算は、地磁気永年変化も除く必要があることから、以下の手順で実行した。まず1年間分の火山観測点と参照点の差分を求めて、地磁気永年変化を分離する(単純差の計算)。次に、各データを時間と日付の2次元に配列し、各データ列にDaubechiesウェーブレットを適用した。このDaubechiesウェーブレットの時間及び日付方向のサポート長は、それぞれ12及び20を採用した。時間軸に対して1回、日付軸に対して4回の分解の後に抽出した低周波成分のみを逆変換することによりトレンド成分を得る。更に日平均を除いた各データ列についても同様の計算を行い、両者の差分から短周期成分(D並びに Sq の変化成分を含む)を分離し、火山性磁場成分を含む長期トレンドを得る。因みに、Daubechiesウェーブレットを地磁気H成分に適用した後の日変動成分は主として30日程度の周期を示したが、これは太陽活動の準27日周期を反映するものと思われる。本解析により地磁気からD成分の分離を達成することと、太陽活動が静穏な時期に支配的となる周期性が示されることは整合的である(笹岡と清水, 2009)。

上述のように求めた火山性磁場の長期トレンドと、確率差分法(藤井, 2004)とカルマンフィルター法(Fujii and Kanda, 2008)で求めた結果をそれぞれ比較する。

3. 結果

三宅島2000年噴火の際には地磁気、自然電位、比

抵抗など電磁気観測が現象解析に大いに貢献した(笹井, 2009)。これを受けて引き続き気象庁では大学関係機関と連携しつつ三宅島における全磁力観測を実施している。図1は、三宅島の連続観測点配置図である。観測点は、ほぼ島全域をカバーしているように見える。例えば、村営牧場付近は地下の熱変化をよく捉えられると考えられていることから集中しており、新濤池跡2は黒潮海流によるダイナモ作用の影響を見る目的で設置されている。図2は、図1の全磁力連続観測の日平均を示すが、2001~2003年にかけては太陽活動が相対的に活発であったので周期数日以下程度の変動幅は最近の観測と比較すると大きいことが分かる。ここでは、主に2001年のデータを例に解析する。図3aは、金曾、大路池北、手島牧場、新濤池跡の参照点(神津島)との単純差を示す。手島牧場の周期数日以下程度の全磁力変動幅は他の地点よりも小さいが、この変動幅の違いは局地的な磁気の影響による違いを表している。特に手島牧場と新濤池跡2で確認できるが、およそ15日周期で短周期変動の振幅が増減していて、それは海洋潮汐の影響である。図3bは、ウェーブレット解析により長周期変動を抽出した結果である。図3bは図3aと比較すると、短周期変動の振幅が小さくなり、長周期変動が相対的に目立つようになった。また図3bを見ると、三宅島東部および南部の金曾と大路池北に比べ、三宅島西部および南西海岸近辺の手島牧場と新濤池跡は変動の相関が強く、鍵山ほ

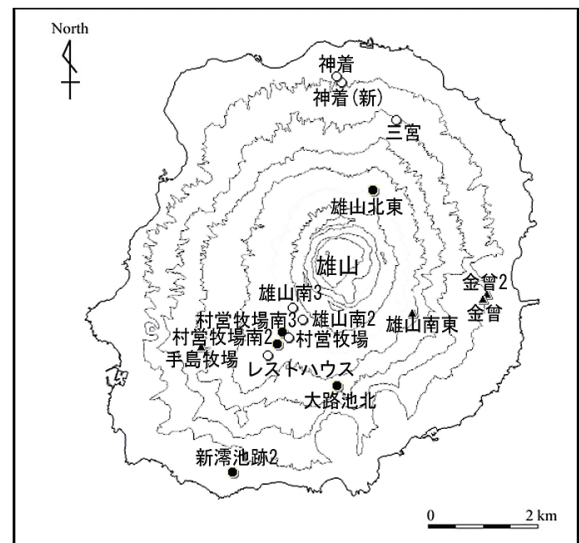


図1 全磁力連続観測点配置図(2010年10月現在)

●: 気象庁, ▲: 気象庁(観測終了), ○: 東京大学地震研究所(この図の作成にあたっては、国土地理院発行の『数値地図10mメッシュ(火山標高)』を使用した)。

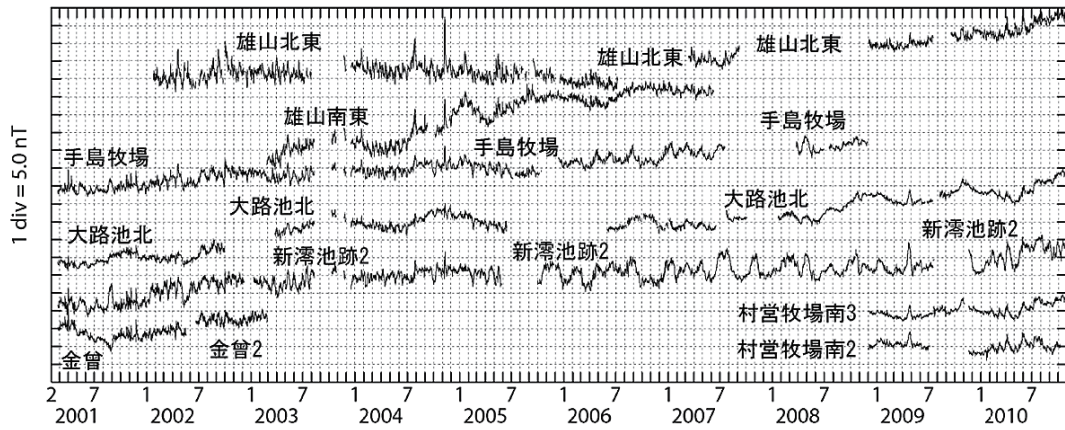


図2 全磁力連続観測の日平均値 (2001年2月~2010年10月)

か (2002) が検討した黒潮海流の影響について地点間の相違が明瞭になったと言える。長周期変化に注目すると、各観測点には 4 nT 程度の年周変化と思われる変動が見られる (図 3b)。この年周変化は、地中温度の年周変化に伴う全磁力年周変化として説明されるものである (Utada et al., 2000)。

確率差分法 (藤井, 2004) は、神津島の全磁力値のほか、柿岡の磁場 3 成分 (南北, 東西, 鉛直) を参照し S_q と D を除去する手法である。確率差分法では、三宅島で観測された全磁力に対し、神津島の全磁力と柿岡の磁場 3 成分をフィッティングした成分を分離することで、参照点の磁場変動に相関のないトレンド成分、即ち火山性を含む長期変動が得られるとしている。しかし実際には、火山観測点と参照点が示す広域の変動については必ずしも最適な相関が求められるわけではないことから、この長期変動には D を含む短周期成分の残差を含みうる。この残差は、所謂白色雑音ではないので必ずしも移動平均などの平滑化により除去できるものではなく、 D と有意な相関を示すことがある。カルマンフィルター法 (Fujii and Kanda, 2008) は、柿岡の磁場 3 成分 (南北, 東西, 鉛直) のみを参照することにより確率差分法による処理に加え、特にノイズ項の評価を持つことからランダムなノイズ除去の点で、確率差分法よりも優れた手法であり、確率差分法と異なり神津島を参照しなくても、適切なデータ品質管理が可能な柿岡のみを参照するだけで S_q と D が除去できる利点がある。ここでは金曾を例に取り、ウェーブレット解析、確率差分法並びにカルマンフィルター法を比較する。図 4a は、神津島の全磁力観測値である。ここでは擾乱のタイミングを確認したいだけなので、柿岡の 3 成分の代わりに神津島の全磁力を示す。図 4b は、金曾でのウェーブレット解析により分離した火山性トレンドと神津島との

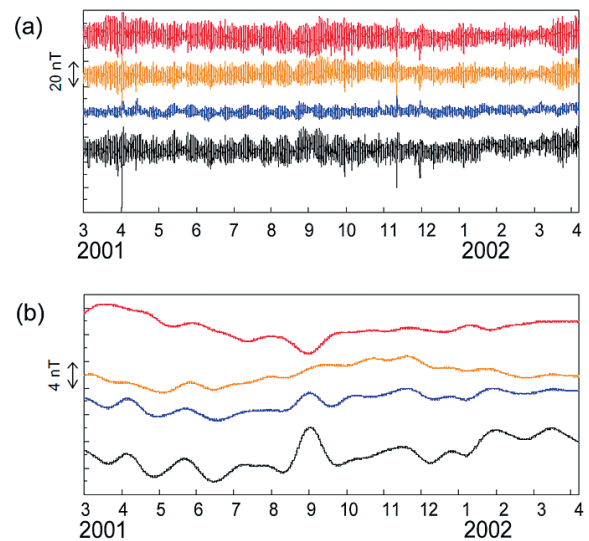


図3 上から金曾, 大路池北, 手島牧場, 新瀧池跡の毎時値 (2001年3月~2002年2月)
(a) 神津島との単純差, (b) ウェーブレット解析を用いた結果。

単純差である。図 4c と 4 d は、確率差分法とカルマンフィルター法の結果をそれぞれ示す。先ず短周期的変動に着目すると、図 4a の神津島の全磁力観測からは、3月中旬から4月上旬、及び9月下旬から11月上旬にかけて地磁気擾乱が頻度よく見られる。図 4b の単純差では擾乱日に限らず全期間にわたり残差が見られるが、ウェーブレット解析では地磁気擾乱との対応がない。図 4c の確率差分法では、これら地磁気擾乱のタイミングで変化が見られることから、火山性磁場の変化ではなく擾乱成分の残差ではないかと思われる (この場合、残差と D には負の相関が見られる)。一方、図 4d のカルマンフィルター法では、3月中旬から4月上旬にかけての地磁気擾乱のタイミングで変化が見られるが、10月から11月にかけては殆ど見られない。確率差分法よりカ

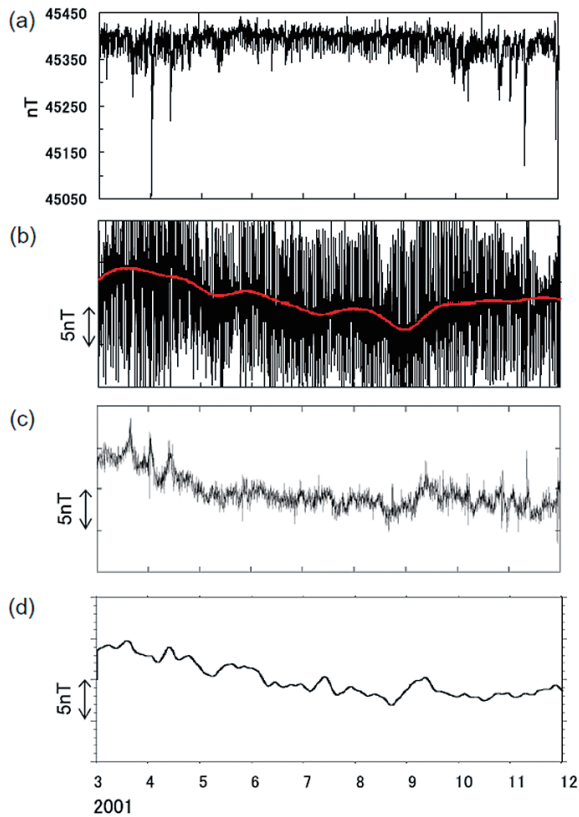


図4 全磁力毎時値プロット(2001年3月~2001年11月)
(a) 神津島の観測値, (b) 金曾の単純差(黒線)とウェーブレット解析の結果(赤線), (c) 金曾の確率差分法の結果, (d) 金曾のカルマンフィルターの結果.

ルマンフィルター法の方が擾乱日における影響を残さないことが分かる.

一方長期トレンドに着目すると, 図4bから4dまでの各手法について, 8月にかけて減少しその後増加に転じる長期トレンドは殆ど同じである. 次に1月間のオーダーでトレンドを見ていくと, 図4bのウェーブレット解析では, 8月までは緩やかに減少し, 9月にかけて増加したあとは, ほぼ横ばいになる傾向が見られる. しかし, 確率差分法では, 8月までの緩やかな減少と9月の増加のあと, 10月から11月中旬まではむしろ減少傾向に見える. カルマンフィルター法では, 8月下旬から9月上旬にかけて増加し, その後減少に転じ11月にかけて増加傾向を示す. ウェーブレット解析, 確率差分法及びカルマンフィルター法の結果のうち, 8月までの減少トレンドは共通しているものの, 9月以降のトレンドには食い違いが見られた. 上述した食い違いの主な原因は, SqとDを除くために参照しているデータにあると思われる. ウェーブレット解析は, 直接観測点と参照点の単純差から短期的変動成分を除いて

いるため, そもそも単純差の結果の傾向と矛盾が生じにくい. 一方で確率差分法とカルマンフィルター法は, 柿岡3成分を参照しているため, 地磁気観測の傾向が直接結果に反映されうる. 地磁気擾乱(Dst)が発達する頻度が高い期間では, 地磁気が回復する前に次のDstの発達により更に減少するため, 平均的に見ると地磁気が少し減少傾向を示すことがある. 各手法は, 参照データとの相関に基づき火山性磁場変動を評価するため, このようなDstの発達による減少傾向が結果に直に反映されることが懸念される. 図4aの神津島の観測から見ても, 9月下旬から11月上旬にかけて擾乱の頻度が高いので, この期間の全磁力のトレンドは少し減少傾向を示しており, 確率差分法とカルマンフィルター法の結果の減少を示す傾向とよく対応している(この場合, 擾乱成分の残差とDには正の相関が見られる).

4. まとめ

三宅島の観測を例に火山性磁場の長期トレンドについて調査した. 理想的には, 単純差を用いても火山性磁場成分のみが抽出されると思われるが, 実際の単純差では, 主にSqとDに起因すると思われる残差が目立つ. ウェーブレット解析から得られた結果は, 短周期変動を殆ど除去した長期トレンドを抽出したので, 年周変化や海流の影響が各地点で容易に比較可能になった. また, ウェーブレット解析, 確率差分法及びカルマンフィルター法から得られた結果を比較すると, いずれの手法においても, 程度の差はあるが短周期成分は除去され, 同様な火山性磁場の長期トレンドが抽出されたが, 1月間のオーダーで見た場合, トレンドに食い違いが見られる場合があることが示された. この食い違いの原因としては, 参照した地磁気観測データのトレンドが反映されたと推察される. 火山解説資料などでは, 1月毎に観測値の傾向が検討されることから, 特に太陽活動の活発な期間であれば, 1月間のオーダーでも火山性磁場のトレンドを見る際には, 参照した地磁気観測値の変動傾向にも注意を払う必要があるだろう.

参考文献

- 新井康平, 独習ウェーブレット解析, 近代科学社, 東京, 2006.
- Daubechies, I., *Ten lectures on wavelets*, SIAM, Philadelphia, 1992.
- 藤井郁子, 確率差分法を用いた火山性全磁力変動の抽出方法, 地磁気観測所テクニカルレポート, 2, 1-17, 2004.
- Fujii, I. and W. Kanda, New procedures to decompose

- geomagnetic field variations and application to volcanic activity, *Geophys. J. Int.*, **175**, 400-414, 2008.
- 鍵山恒臣, 小山悦郎, 杉岡 学, 笹井洋一, 小山 茂, 藤井郁子, 瀧沢倫明, 伊藤信和, 碓井勇二, 最近の三宅島の全磁力変化, 月刊地球号外, **39**, 115-120, 2002.
- Kautsky, J. and R. Turcayova, A matrix approach to discrete wavelets, in *Wavelets: Theory, Algorithms, and Applications Volume 5*, edited by C. K. Chui, L. Montefusco and L. Puccio, 117-135, Academic Press., Boston, 1994.
- Nose, M., T. Iyemori, M. Takeda, T. Kamei, D. K. Milling, D. Orr, H. J. Singer, E. W. Worthington and N. Sumitomo, Automated detection of Pi2 pulsations using wavelet analysis: 1. Method and an application for substorm monitoring, *Earth Planets Space*, **50**, 773-783, 1998.
- 笹井洋一, 三宅島2000年噴火の電磁気観測, 月刊地球, **31**, 665-674, 2009.
- 笹岡雅宏, 清水淳平, ウェーブレット多重解像分解法を用いた地磁気日変動の解析, 日本地球惑星科学連合2009年大会予稿集, E114-P018, 2009.
- 笹岡雅宏, 清水淳平, 小山崇夫, ウェーブレット多重解像を用いた火山性全磁力の長周期解析, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会予稿集, A003-09, 2009.
- Trad, D. O. and J. M. Travassos, Wavelet filtering of magnetotelluric data, *Geophysics*, **65**, 2, 482-491, 2000.
- Utada, H., M. Neki and T. Kagiya, A study of annual variations in the geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals, *Earth Planets Space*, **52**, 91-103, 2000.

Retrieval of the long-term trend of the volcanic geomagnetic field variations by using a wavelet analysis and its comparison with other methods

by

Masahiro SASAOKA¹ and Jumpei SHIMIZU²

¹Kakioka Magnetic Observatory

²Matsushiro Seismological Observatory

Received 19 November 2010; received in revised form 28 September 2011;
accepted 4 November 2011

Abstract

In order to retrieve the geomagnetic variations related to the volcanic activity, various methods for decomposing the geomagnetic field variations were developed at Kakioka Magnetic Observatory. The long-term trend of the volcanic geomagnetic field variations was investigated using these methods for the observation of the stations on Miyakejima Island. Using the wavelet analysis which extracts the long-term trend by removing the short-term variations attributed to the magnetic disturbances enables easy compare differences in annual variation and ocean dynamo effect at each station. While a comparison of the wavelet method, the stochastic difference method and the Kalman-filter method shows almost same variations in their long-term trends with the volcanic activity eliminating short-term variations. The differences between the trends of these methods are indicated in order of 1 month. It is inferred that 1-month trend of the reference data from the geomagnetic observatory affects to the estimated trends of the volcanic activity from the stochastic difference method and the Kalman-filter method.