

# 火山性磁場の長期トレンド抽出のためのウェーブレット解析

笹岡 雅宏, 山崎 明 (気象庁地磁気観測所), 小山 崇夫 (東京大学地震研究所)

## A wavelet analysis for retrieving the long-term trend of volcanic geomagnetic field variations

Masahiro Sasaoka, Akira Yamazaki (Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency),  
Takao Koyama (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

### Abstract

The long-term trend of the volcanic geomagnetic field variations was investigated by using a wavelet analysis for the observation of the stations on Miyakejima Island. Using the wavelet analysis retrieves the long-term trend by segregating the short-term variations attributed to such as the magnetic disturbances. A comparison of the wavelet method with the previous works shows similar variations in their long-term trends with the volcanic activity. Then there is likely to be little discrepancy between the trend retrieved by the wavelet analysis and those retrieved by each previous work during the periods with greater frequency of the disturbance. The difference between the methods is marked by a difference in the processing based on the reference data during those severe disturbance periods.

#### 1. はじめに

気象庁では、火山活動を把握するために、三宅島ほかの火山において地磁気全磁力観測を実施している。特に火山防災の観点からは、噴火に関連する火山性磁場の短期的な変化を捉えることが重要である。また、水蒸気爆発のような現象の監視には、地下浅部の温度変化を反映する地磁気観測は有効とみなされている。一方、三宅島のように周期的に大規模な噴火が発生することが見込まれる火山では、次の噴火までの過程を探る上で、地磁気の長期トレンドを把握することも有意義であると考えられている。三宅島は現在火山活動が沈静化しているため、火山性磁場の長期トレンドにも注目している。全磁力観測による火山監視では、通常、火山観測点と火山性磁場変動の影響を受けない地点（参照点）との単純差を求めることで火山性磁場を評価している。地磁気全磁力観測には、地磁気永年変化のほか、①磁気擾乱 (D)、②電離圏電流系による磁場変動、そして③観測地点付近の様々な磁気源（海流など）がつくる磁場の影響が含まれると考えられている。単純差で評価した火山性磁場には、これら磁場要因の残差が含まれる。地磁気観測所では、火山性の磁場変動を評価する目的で、①の磁気擾乱や②の地球電磁的に静穏な日の昼間に見られる地磁気日変動 (Sq) の影響を除去するための手法の開発が行われた（藤井, 2004; Fujii and Kanda, 2008）。

一方、地磁気データの成分構成を理解する目的で、Daubechies ウェーブレットを用いて1年間分にはわたる地磁気成分の分解が試みられた（笹岡, 2009）。地磁気 H 成分を5分解した結果、最初の2つの分解成分の和はDst指数との相関が高いため擾乱成分に、最後の分解成分はSqの季節変動に、それぞれ近似的に対応すると考えられた。ウェーブレット解析の理論と応用については、これまでに議論

された様々な文献を参照することができる（例えば，Kautsky and Turcajova, 1994）. Daubechies ウェーブレットについては，画像処理における特徴抽出への応用に評価が高い．地球電磁気研究の分野でも，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，Daubechies ウェーブレットを火山全磁力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（笹岡ほか，2009）. 本稿では，2001～2002年における三宅島の全磁力観測を例に取り，Daubechies ウェーブレットを用いた手法について，先行研究と比較することにより検証し，抽出した火山性磁場の長期トレンドの特徴について考察する．

## 2. 方法

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可能性が指摘されてきた．逆にウェーブレット解析は，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利点がある．火山全磁力は概ね，地磁気永年変化+ $Sq$ + $D$ +火山性磁場+その他（上述①～③）で構成される．Daubechies ウェーブレットにより， $Sq$ と磁気擾乱（ $D$ ）を主たる短周期信号とみなして分離し，火山性磁場の長周期トレンドを得る．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，火山地点と参照点の単純差を求めてから，Daubechies ウェーブレットを適用する．用いた Daubechies ウェーブレットによるデータ分解の概念図と長期トレンド抽出手順について，第 1 図と第 2 図にそれぞれ示す．用いた全磁力データは毎時値である．長期トレンドを抽出するために，5 分解後の最後の長周期成分（第 1 図中の L4）を用いて火山性の磁場変動を評価する．

## 3. 三宅島における火山全磁力観測

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貢献した（笹井，2009）. 第 3 図は，三宅島の連続観測点配置図である．例えば，村営牧場付近は地下の熱変化をよく捉えると考えられていることから集中しており，新瀨池跡付近には黒潮の流路変化に伴う磁場変動による影響を見る目的で観測点が設置された．第 4 図 a は参照点（神津島）を示し，第 4 図 b は金曾と参照点との単純差を示す．この単純差には，季節によらず地磁気擾乱や  $Sq$  の残差が現れている．次に，Daubechies ウェーブレットにより長期トレンドを抽出した結果を示す．第 5 図 a は，第 2 図中の①の処理後の成分を示し，第 5 図 b は，第 2 図中の②の処理後の成分を示す．第 5 図 a と b の差として長期トレンドを得る（第 5 図 c）. 第 5 図 c は第 4 図 b と比較すると，短周期変動より長周期変動が目立つようになった．長周期的変化に着目すると，4nT 程度の年周変化と思われる変動が見られる．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）.

## 4. ウェーブレット解析と先行研究との比較

先ず，鍵山ほか（2002）が参照点との単純差を用いて評価した村営牧場の全磁力変化と比較する．第 6 図 a と b は，それぞれ村営牧場と新瀨池跡 2 の Daubechies ウェーブレットによる全磁力の評価で

ある。第 6 図 b は、黒潮流による全磁力変化を示す。ここでは、鍵山ほか (2002) が検討した成果に基づき、黒潮流による全磁力変化と上述した全磁力年周変化を補正した。第 6 図 c は、村宮牧場の補正後の全磁力変化を示す。第 6 図 c の全磁力変化は、2001 年 4 月半ばにやや増加した後、8 月にかけて減少し、2002 年 6 月までは横ばいとなり、その後増加に転じる傾向を示す。鍵山ほか (2002) の結果と比較すると、横ばいの期間に現れる 2nT 程度の全磁力の増減も見られ、こうした全磁力変化はよく一致する。このような変化は、2001 年 8 月以降消磁が鈍り始めてから火山ガス放出量が減少し始めるなど、火山活動の変化とも整合的である。

次に、確率差分法 (藤井, 2004) 及びカルマンフィルター法 (Fujii and Kanda, 2008) と比較する。確率差分法は、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  $S_q$  と磁気擾乱を除去する手法である。カルマンフィルター法は、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、確率差分法による効果に加え、特に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、柿岡のみを参照するだけで  $S_q$  と磁気擾乱が除去できるという利点がある。ここでは、黒潮流の影響を比較的受けにくい金曾を例に取り上げる。第 7 図 a は、第 4 図 b の 24 時間移動平均と第 5 図 c との比較を示す。第 4 図 a に見られる擾乱日に対応して残差が大きいことが分かる。第 7 図 b は、藤井 (2004) からの引用である確率差分法による結果と第 5 図 c との比較を示す。この比較には同様な全磁力の長期トレンドが確認されるが、第 7 図 a 中の単純差の 24 時間移動平均に見られるような全磁力の短周期変動を示す。これにより、確率差分法による短周期変動には擾乱日に見られる変動の残差がわずかに混在することが分かる。第 7 図 c は、カルマンフィルター法による結果と第 5 図 c との比較を示す。8 月にかけて減少しその後増加に転じる全磁力の長期トレンドは同様である。これらの長期トレンドを見る限り、金曾では年周変化ばかりではなく火山性の全磁力変化がわずかにあったことが示唆される。一方で、第 7 図 b と c 中の比較には 10~11 月の期間でわずかに全磁力変化の食い違いが見られる。2001 年の擾乱指数の傾向によると、10~11 月には磁気擾乱が高い頻度で現れている。第 4 図 a の神津島の全磁力を見ても、9 月下旬から 11 月にかけて磁気擾乱による減少があり、この期間はわずかに全磁力の減少傾向を示しており、第 7 図 b と c の全磁力変化の食い違いが見られる期間と対応している。

## 5. 考察とまとめ

三宅島の 2001~2002 年の全磁力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。この期間は特に太陽活動が活発な年であるので、単純差の場合、主に  $S_q$  と磁気擾乱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を用いた手法について、先行研究と比較し検証した。各先行研究から得られた結果と比較すると、Daubechies ウェーブレットは同様な火山性磁場に関係する長期トレンドを抽出した。一方で、特に磁気擾乱が発達する頻度が高い期間では、確率差分法及びカルマンフィルター法との比較においてはわずかに食い違いが見られることが示された。この期間では、確率差分法やカルマンフィルター法はウェーブレット解析より、わずかに減少傾向を示した。磁気擾乱の多い期間では、地磁気が回復する前に次の擾乱により減少するため、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、参照データに基づき火山性磁場変動を評価するため、このような減少傾向が結果に直に反映することが懸念される。単純差を改良した Daubechies ウェーブレットを用

いた解析については参照点のみであるが、確率差分法は参照点と柿岡 3 成分、またカルマンフィルタ法は柿岡 3 成分をそれぞれ参照データとして用いている。今回の比較では、磁気擾乱の少ない期間については、手法の違いはあまり顕著には表れなかったが、磁気擾乱の頻度が高い期間では、各手法の参照データを用いる処理の違いが強調され、食い違いがわずかに目立ったのではないかと推察される。このような場合には、火山性磁場抽出の改善の余地がまだあるということだと思われる。

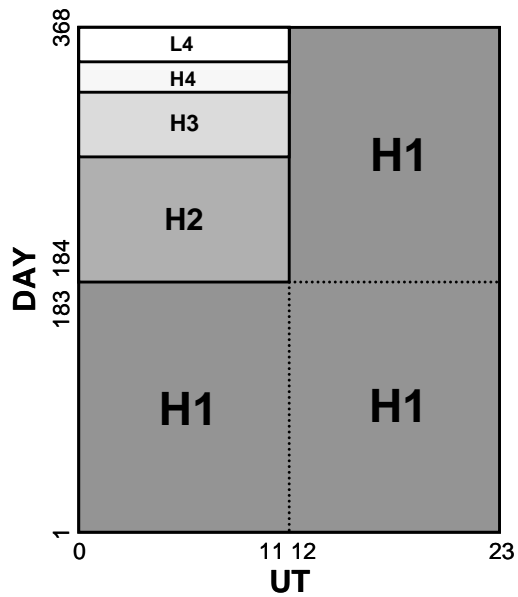
結論として、本稿における Daubechies ウェーブレットを用いた解析は、観測地点と参照点との単純差の長期トレンドを明瞭に示し、この長期トレンドは先行研究における結果と同様な変化を示した。

#### 謝辞

カルマンフィルタ法の計算結果については、気象庁地震火山部精密地震観測室清水淳平氏に提供して戴いた。

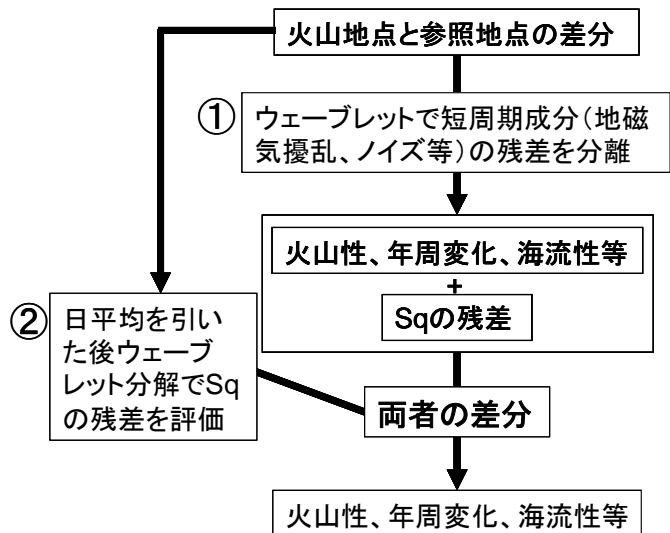
#### 参考文献

- 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.
- 鎌山恒臣, 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. Turcajova, 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 Planet. 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, 363, 665-674, 2009.
- 笹岡雅宏, 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.



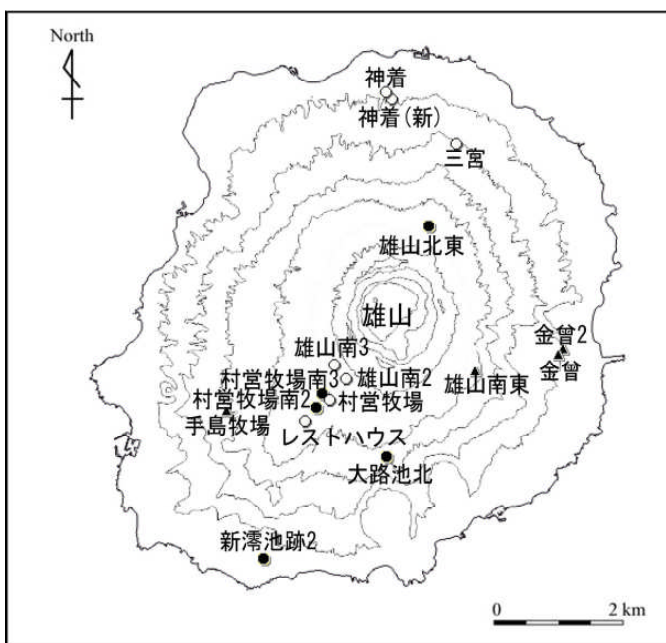
第1図 Daubechiesウェーブレット分解の概念図. 時間と日付の地磁気データ配列による5成分分解. H1からH4及びL4の順に高周波から低周波に分離. 採用された時間及び日付方向のサポート長は, それぞれ12及び20である.

Fig.1 A conceptual sketch of wavelet multiresolution for geomagnetic data arranged in a matrix of 24 (time-abscissa) x 368 (day-ordinate) to decompose into higher and lower frequencies: H1, H2, H3, H4, and L4. Used wavelet support lengths for Time and Day-axes are 12 and 20, respectively.



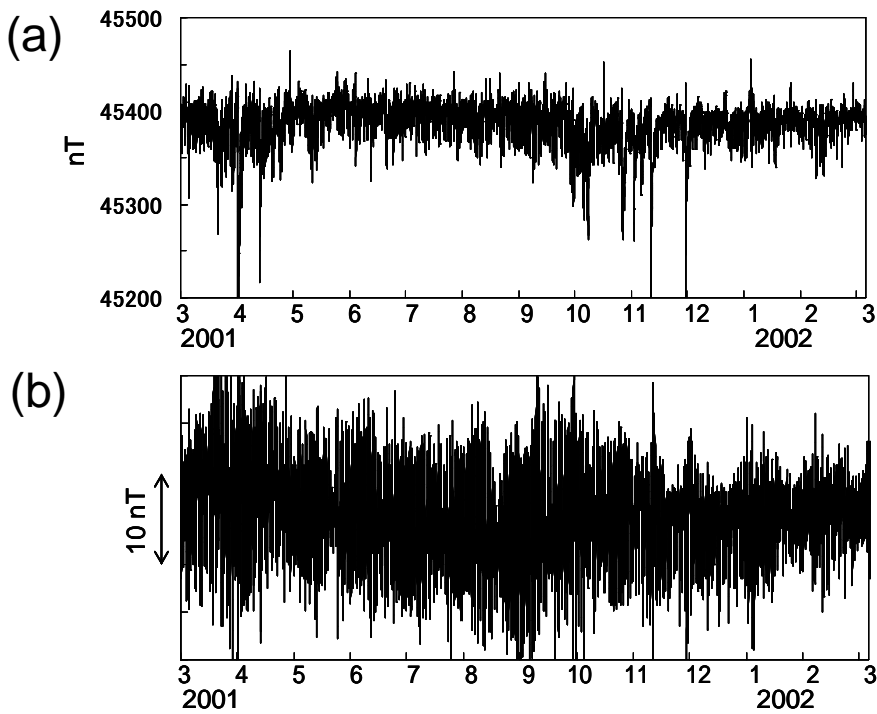
第2図 長期トレンド抽出手順. 火山地点と参照地点の差分について第1図の配列でウェーブレット分解の処理を実行. ①及び②の場合について算出した後, 差分を求め火山性等の磁場変動を得る.

Fig.2 A procedure of retrieving the long-term trend. Daubechies wavelet decomposition in Figure 1 is applied to the subtraction between the volcano site and the reference site. The subtraction between the results of the two processes ① and ② reads to the magnetic field variation with the volcano activity.



第3図 全磁力連続観測点配置図 (2011年2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).

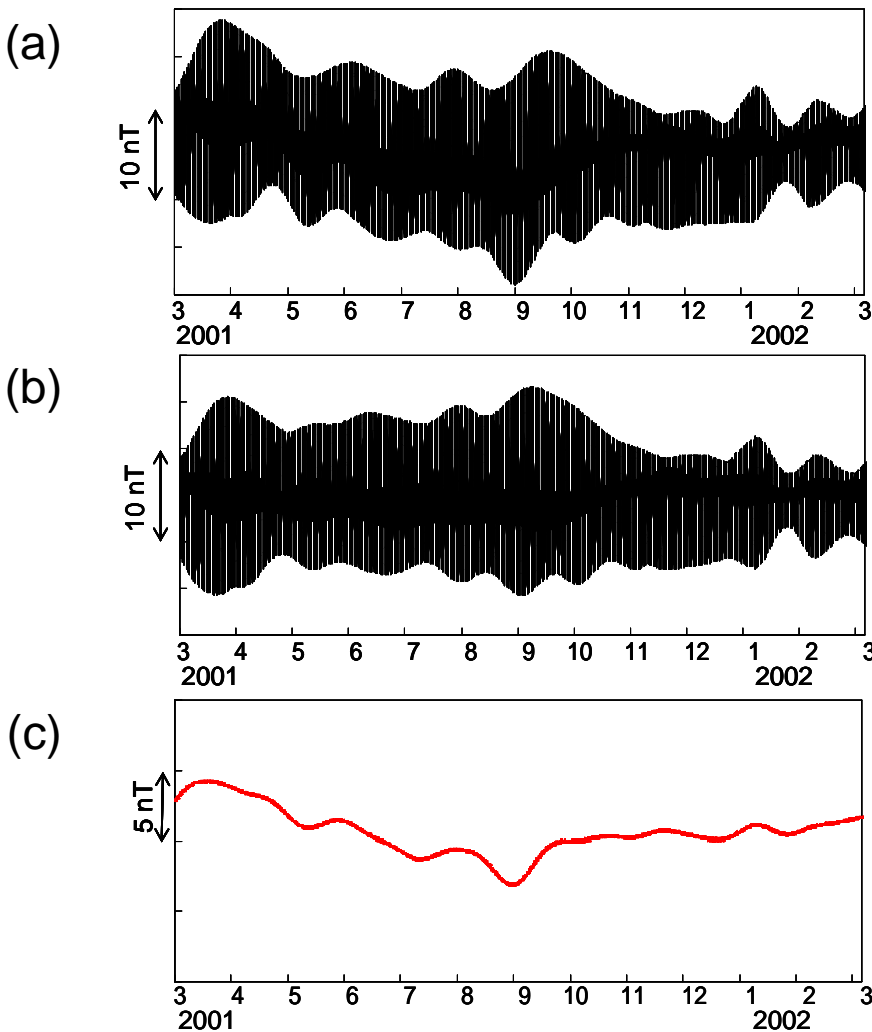
Fig.3 Observation sites of Miyakejima for February 2011 (●: Japan Meteorological Agency, ▲: Japan Meteorological Agency (closed station), ○: Earthquake Research Institute, The University of Tokyo).



第4図 気象庁の全磁力観測.

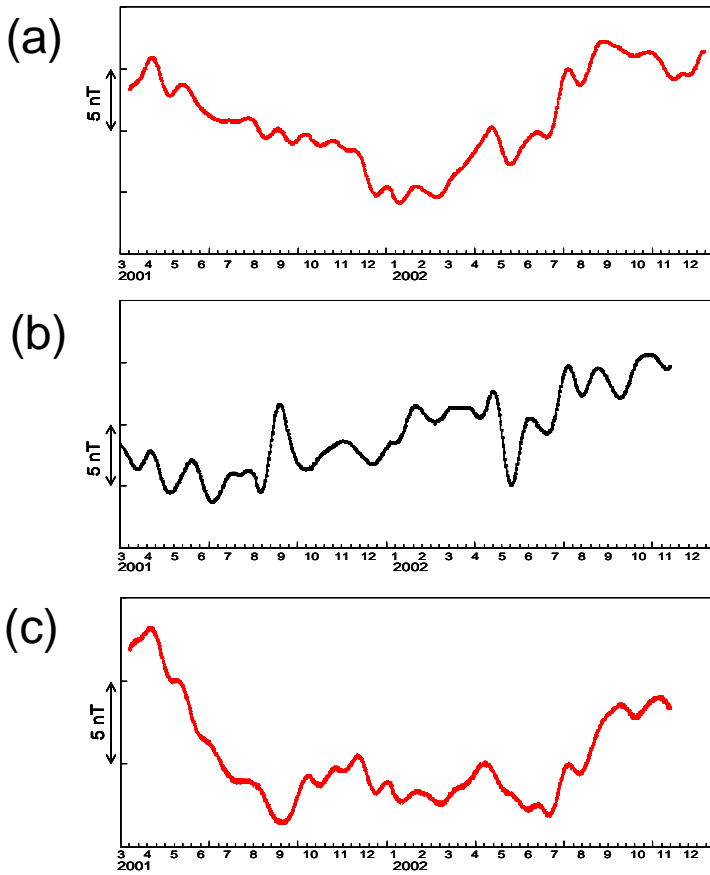
(a) 神津島 (参照点), (b) 三宅島における金曾観測点と参照点との単純差.

Fig.4 Variation of geomagnetic one hour value at (a) the reference site Kozushima and (b) the difference Kananso - Kozushima during March 2001 - February 2002.



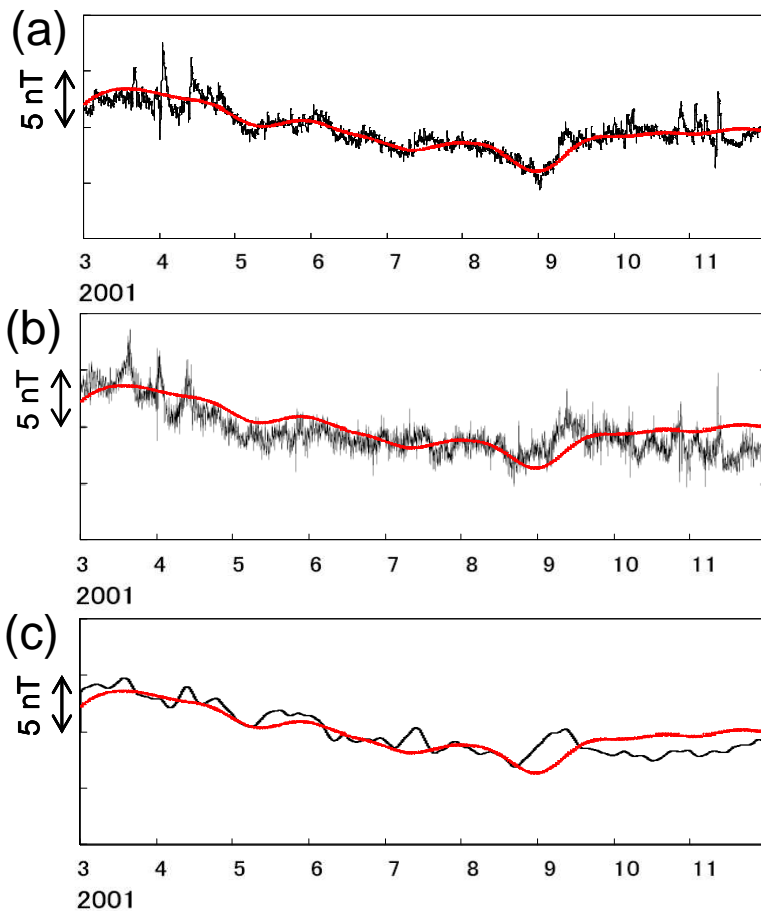
第5図 ウェーブレット解析による長期トレンド抽出. (a) 第2図中の①の処理後の成分, (b) 第2図中の②の処理後の成分, (c) aとbの差分による長期トレンド.

Fig.5 The wavelet decomposed Variation of geomagnetic one hour value at Kananso for (a) the process ① and (b) the process ② in Figure 2 during March 2001 - February 2002. (c) The difference between the variations a and b.



第6図 村宮牧場観測点の全磁力解析結果. (a) ウェーブレット解析による村宮牧場, (b) ウェーブレット解析による新濤池跡2, (c) 更に黒潮流による全磁力変化と全磁力年周変化を補正した村宮牧場の全磁力変化.

Fig.6 variation of geomagnetic one hour value at (a) Sonei-Bokujo and (b) Shinmio-Ike-Ato-2 after the wavelet analysis, and at (c) Sonei-Bokujo after additional adjustments for the annual variation and the path change of the Kuroshio.



第7図 金曾観測点の全磁力解析結果 (2001年3月1日~2001年11月25日). (a) 第4図bの24時間移動平均 (黒線) と第5図c (赤線) との比較, (b) 確率差分法による結果 (黒線) と第5図c (赤線) との比較, (c) カルマンフィルター法 (黒線) による結果と第5図c (赤線) との比較.

Fig.7 Variation on analysis of one hour value at Kananso during March 1 – December 25, 2001. Comparisons of (a) Figure 5c (red line) with 24-hour running average of Figure 4b, (b) Figure 5c (red line) with the stochastic difference method, and (c) Figure 5c (red line) with the Kalman-filter method.