

時間変化する地磁気成分の解析について

Short note for an analysis of geomagnetic field variations

藤井郁子 (気象庁地磁気観測所)

Ikuko Fujii (Kakioka Magnetic Observatory, JMA)

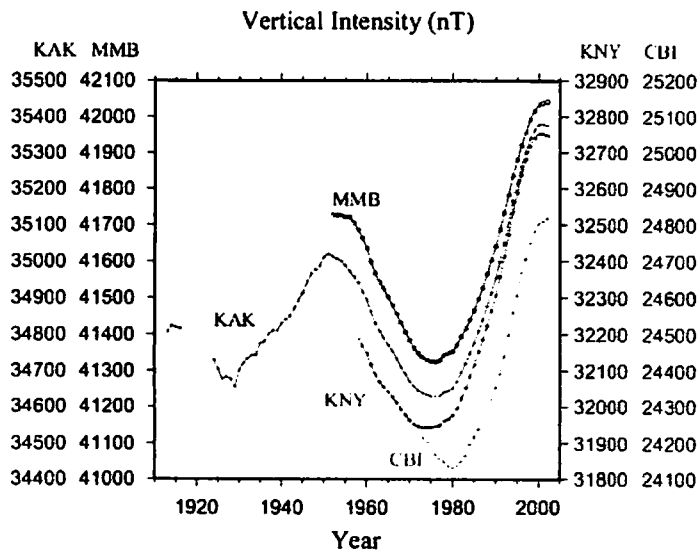
Abstract

Some examples to analyze geomagnetic field variations in order to investigate effects of the induction, volcanic activities and outliers are overviewed. Statistical methods such as the empirical orthogonal function, transfer functions in the frequency and time domains and the Kalman filter were used to directly or indirectly model target signals. Results of those statistical analyses suggest that global and regional variations are successfully detected and that local ones should be modeled with care.

1. はじめに

本稿では、時間変化する地磁気成分について、これまで筆者が行ってきた解析を通じて考察する。時間変化する地磁気成分とは、ある期間の地磁気データからその期間の平均値を除いたもののことである。

地磁気が時間変化する原因のうち振幅の大きいものは、主磁場の永年変化と、電離層や磁気圏などの超高層での電磁場変動の2つである。これらは大雑把には周期帯で区別することができ、長周期帯(2年以上)で顕著な永年変化と、短周期帯(2年以下)で顕著な超高層起源の変化と考えることができる。



第1図 柿岡 (KAK)、女満別 (MMB)、鹿屋 (KNY)、父島 (CBI) の地磁気鉛直成分の年平均値

Fig. 1 Yearly mean values of the geomagnetic vertical component at Kakioka (KAK), Memembetsu (MMB), Kanoya (KNY), and Chichijima (CBI).

例として、第1図に地磁気観測所で観測した約100年間の地磁気鉛直成分の年平均値、第2図に柿岡で観測した地磁気3成分毎分値について(a)静穏時と(b)擾乱時の場合を示す。どちらもグローバルな変化で振幅は数百nT程度であるが、第1図の数十年単位の変動は主磁場起源と考えられ、第2図(a)の日変化と(b)の磁気嵐は超高層起源である。

その他の地磁気変化の原因としては、地震や火山などの地殻活動、海水の運動、電車などの人工物によるノイズ等が挙げられる。これらのうち、人工ノイズ以外は、永年変化や超高層起源の変化に比べて振幅が小さい(〜10nT)。

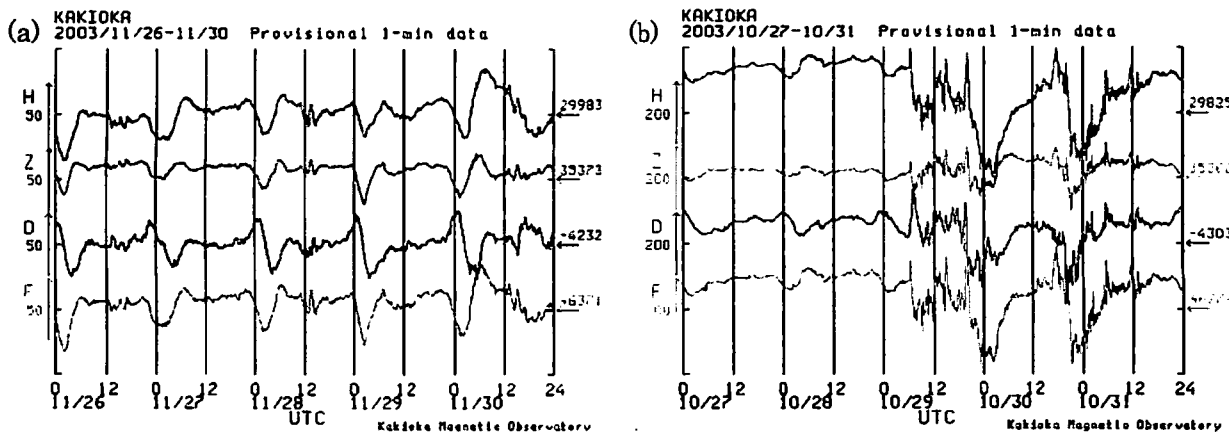
このような性質のため、どのような原因の地磁気変化を目的として解析するにせよ、永年変化と超高層起源変化を取り扱う必要

が生じてくる。

永年変化の解析では、IGRF などの全球モデル（例えば、Macmillan & Maus, 2005）、JGRF などの地域モデル（例えば、山崎他、2006；白井他、2006）のように、主磁場の時空間構造をモデル化する試みがある。最近の衛星観測や地上観測網の充実によって、長波長成分については信頼できる結果が得られていると思われる。しかし、ローカルな観測データから地殻活動起源の変化を取り出したい場合など、目的とするシグナルの振幅が小さく局所的なとき、モデルを利用するだけで永年変化を必要な精度で取り除けるかどうかは不明である。例えば、柿岡では磁場変化を観測するセンサーと計測本体部は厳しく温度管理されているが、それでも年間数度の温度変化があり、数 nT の磁場の年周変動につながる。これらの基線値変動は週一回の絶対観測により補正され、不規則な人工擾乱も随時補正されている。モデルに利用されるデータは年に二回未満の絶対観測しか行われていないものも含まれるので、長期的には少なくとも数 nT の誤差がある。それらを用いて導き出したモデルが、観測点のない場所で 1nT の精度を持つことは不可能とみるべきであろう。

超高層起源変化では、時間と場所とを入力すると変化を出力するような時空間モデルはまだ存在しないようである。このこともまた、ローカルな観測データから地殻活動起源の変化を取り出したい場合などでは支障になる。1 日値より早いサンプリングのデータを使いたければ、超高層起源変化を避けて通れないからである。そこで、JGRF は早いサンプリングのデータのモデル化を行うことによって、主磁場だけでなく超高層起源磁場も取り込んだ時空間モデルを目指していると考えられる。しかし、ローカルに十分な精度を持っているかどうかは不明である。

本稿では、永年変化や超高層起源磁場変化の時空間構造をモデル化する手法から視点を変え、より簡便な方法を目指して、観測点間・ベクトル成分間の相関を利用した相対的な解析を考察する。



第 2 図 柿岡での地磁気水平分力 (H)、鉛直成分 (Z)、偏角 (D)、全磁力 (F) の毎分値の様子。(a) 静穏時 (2003 年 11 月 26 日から 30 日)、(b) 擾乱時 (2003 年 10 月 27 日から 31 日)。

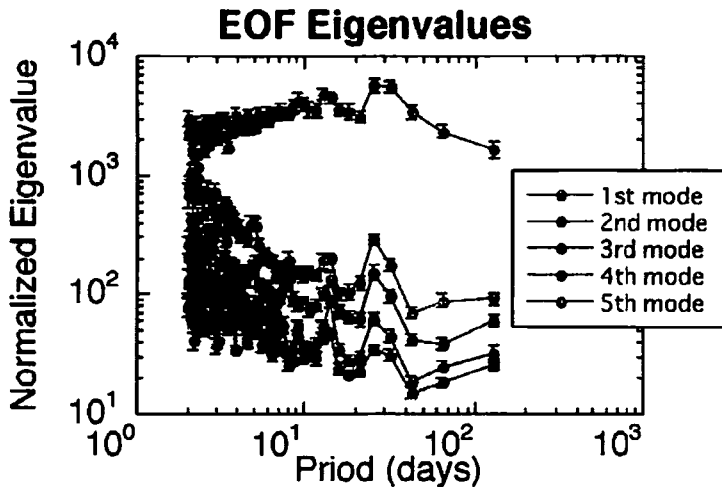
Fig.2 1-minute values of the geomagnetic horizontal force H, vertical component Z, declination D, and total force F at Kakioka in (a) a quiet time (November 26 to 30, 2003) and (b) a storm time (October 27 to 31, 2003).

2. 超高層起源磁場の解析

地殻・マントルの電気伝導度分布を知りたいとき、Magnetotellurics 法や Global Depth Sounding 法では超高層での磁場変化が引き起こす電磁誘導の平均的な周波数特性を利用する。永年変化はノイズになるが、周波数領域で短周期帯にしばって解析することで永年変化の締め出しが行われている。

ここでは、超高層起源磁場変動のフーリエスペクトルの平均的な空間分布について解析してみる。

世界中に分布する地磁気データの空間分布の解析には、Empirical Orthogonal Function 法 (EOF 法) を適用した。EOF 法は、JGRF の研究に用いられる直交法 (藤原他、1998; 山崎他、2006; 白井他、2006) と同種の主成分分析法である。グローバルな電磁誘導を調べるとき空間分布解析に多く用いられるのは球関数展開であるが、地磁気データの空間分布は一様ではなく、さらにデータには欠測や異常値が不規則に含まれるため、ダイポールのような単純な形の空間変動でも球関数展開の結果はデータの質の影響を受けてしまう (藤井&シュルツ、2000)。ここでは、元の時系列とフーリエスペクトルの両方にロバスト反復法を取り入れた、フーリエスペクトルに対する EOF を開発し、データの質の影響を抑えた (Fujii & Schultz, 2002)。



第3図 1967-82年の79観測点の磁場3成分1日値から得られたロバスト EOF 法による規格化された固有値。上位5モードを示す。

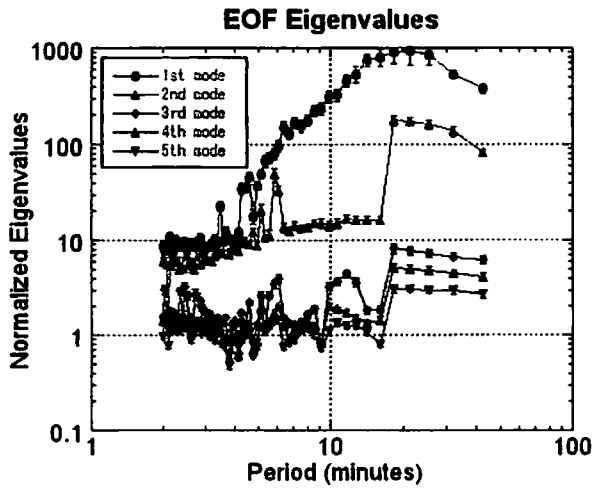
Fig.3 Normalized eigenvalues for first five EOF modes estimated by applying a robust EOF method to daily values of the geomagnetic field variations at 79 observatories for 1967-82.

第3図に示したのは、1967-82年の79点の磁場3成分の1日値にロバスト EOF 法を適用して得られた、規格化された固有値である。これらはパワースペクトルと同等のもので、最もパワーが強い第1モードから5番目に強い第5モードまでが示されている。解析に先立って、数10~100nT以上の振幅を持つ異常値は次章の手法を用いて取り除かれており、FFT 区間長の128日より長周期側はハイパスフィルターで取り除いてある。第3図から、5日より長周期側では、第1モードが他のモードより10倍以上強く、磁場変動はほとんど第1モードで表現される成分でできていることがわかる。ここには示さないが、第1モードの空間分布は、地球半径の数倍のところにある赤道環電流と、南北両半球のオーロラオーバル緯度の上空数百 km のところにある環

電流から作られる磁場によって説明できる。

磁場変動は、周期5日より長周期側では1つのモードに集約できるような単純な空間構造を持っていることが示唆されたが、短周期側ではどうだろうか？第4図に、1996年6月~8月にフィリピン海周辺の9観測点で観測された地磁気水平2成分の1分値に、ロバスト EOF 法を適用して得られた規格化された固有値を示す (藤井&歌田、1999)。固有値を見ると第1モードが卓越しているとは言えず、少なくとも第2モードまでは十分なパワーがあり、第3モード以下の寄与も完全には無視できない。この周期

帯では磁場変動を単純な空間構造に集約するのは難しく、どのモードまで考慮すべきか注意が必要になってくるであろうことが示唆される。第1モードと第2モードの空間構造はおおよそ北向きと東向きの変動であることが多く、第3モード以下はよくわからない。



第4図 1996年6～8月にフィリピン海周辺の9観測点で観測された地磁気水平2成分1分値から得られたロバスト EOF 法による規格化された固有値。上位5モードを示す。

Fig.4 Normalized eigenvalues for first five EOF modes estimated by applying a robust EOF method to 1 minute values of the geomagnetic field variations at 9 observatories in the Philippine Sea for June-August, 1996.

3. 周波数領域での応答関数を利用した時系列データのモデル化

ある周期帯のフーリエスペクトルの平均的な振る舞いではなく、時系列データとして変化を知りたい場合、永年変化と超高層起源磁場を同時に扱う必要が出てくる。1つの方法は、JGRFのように時系列に対して EOF 解析を行い主要なモードを選択することによって、永年変化と超高層起源磁場に代表される広域的变化と、地殻活動や観測ノイズなどの局所的变化を分離することである。しかし、前章で見たように超高層起源磁場を全体として単純な形に集約するのは難しく、周波数による違いもあることを考えると、時系列に対する EOF では考慮すべきモードの数に恣意性が出てくるであろうことが予想される。また、主磁場と超高層起源磁場が EOF として同様の振る舞いをすると限らない。

より単純な方法を目指して、応答関数を利用した時系列データのモデル化を考える。この章では、地磁気データベースの異常値処理用に開発したプログラム (Fujii & Schultz, 2002) の動作結果を紹介する。これは Zhang & Schultz (1990)による EXORCISE の改良版である。

前章までにみたように、永年変化や超高層起源変化に観測点間、観測成分間で定常的な相関があれば、応答関数を介してある観測データから別の観測データを推測することができる。ここでは、多くの観測があることを活かして相関を上げるため、データの多重相関を考える。観測網中に地磁気観測時系列 $x_i(t)$, $x_j(t)$, $x_k(t)$, $x_l(t)$, ... があるとき、 $dx_i(t) = x_i(t+1) - x_i(t)$, または、 $dx_i(t) = x_i(t) - x_i(t+1)$ で表される前後差 $dx_i(t)$ を用いて、

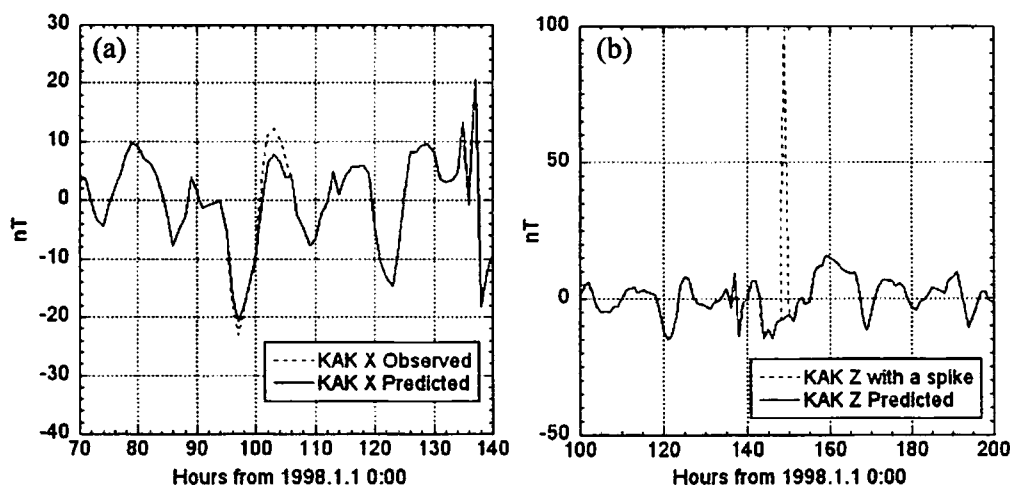
$$dx_i(\omega) = a(\omega) dx_j(\omega) + b(\omega) dx_k(\omega) + c(\omega) dx_l(\omega) + \dots \quad (1)$$

のようにモデル化する。 $dx_i(\omega)$ は、前後差 $dx_i(t)$ の角周波数 ω でのスペクトルである。 x_i , x_j , x_k , x_l はX、Y、Z、F成分のいずれかで、観測点が異なってもかまわない。 a , b , c は出力 $dx_i(\omega)$ に対する入力 $dx_j(\omega)$, $dx_k(\omega)$, $dx_l(\omega)$ の応答関数である。入力に使う観測値は、出力との相関が高いものを自動的に選び、多重相関を上げる方向に寄与する限り10個まで利用できる。応答関数の決定にはロバスト反復法を取り入れたアンサンブル平均を採用し、出力側スペクトルから応答関数を使って求めた入力側予想スペクトルを逆フーリエ変換して、入力の予想時系列を計算する。予想時系列が入力側観測値と大きく異なっている場合に異常値と判定するが、入力に異常値がある場合を考慮し、観測網中の観測値を交互に出力とし

て異常値の整合性をチェックする。これを2種類の前後差で繰り返し、異常がスパイク状であるか階段状であるかなどの判定をする。

式(1)の計算に x_t ではなく Δx_t を用いるのは、自然の変化の振幅を下げて異常変化を際立たせるためと、FFT区間長より十分長周期の変化を除くためである。FFT区間長より長周期の変化はFFTになじまないためFFT計算の前にprewhiteningが必要になるが、よく利用されるAR filterなどを導入すると、逆フーリエ変換時にフィルターの特性が上乘せられ時系列推定の精度が落ちてしまう。そこで、前後差を用いることでデータの長周期成分を小さくし、FFT計算前に区間の平均値と線形トレンドは除いておくことで良好な結果を得た。

第5図に、1998年1月に柿岡と女満別で観測された地磁気X、Y、Z成分1時間値に対して、異常値判定を行った例を示す。計6成分の観測値の中で柿岡のX成分とZ成分には、それぞれ欠測とスパイクを1箇所ずつ人工的に加えてある。異常値判定をした結果、6成分1か月分の観測値の中で異常と判定されたのは、人工的に与えた欠測とスパイクの2例であった。第5図(a)は欠測に対する予測値と実際に観測された値の比較、第5図(b)は人工的に加えられたスパイクと予測値の比較である。第5図(a)から、日変化を含めて数nTの範囲内で良好な予測ができていることがわかる。第5図(b)に示すように、プログラムは100nT程度の振幅を持つ異常を十分検出できる。



第5図 (a)柿岡X成分に人工的に与えられた欠測に対する予測値(実線)と観測値(点線)の比較、(b)人工的にスパイクを加えられた柿岡Z成分(点線)と予測値(実線)の比較

Fig.5 (a) Comparison between the observed and predicted values for an artificially given data gap in the X component at Kakioka. (b) Comparison between the observed Z component at Kakioka with an artificially given spike and predicted one.

4. 確立差分法による火山性磁場検出

時系列データの解析例として、地表で観測された磁場から、火山活動に伴う火山体内部の温度や圧力変動によって生じた磁場の長周期変動を抽出することを考える。この場合、永年変化と超高層起源磁場は不要な成分となり、なんらかの方法で除去しなければ微弱な火山性の変化を調べられない。これまで使用されてきた火山性変動の抽出法では、不要な成分が大きな波長を持っていることに着目して、火山

活動の影響がないところで同時に測定した参照データとの差を計算し、局所的な火山性変動を見積もることが多い。噴火時の大きな変化だけでなく噴火にいたるまでの長期間の変化をも検出できるような、より高精度の抽出が目標である。

前章の結果から、応答関数を利用して時系列データを予想する方法が利用できることが示唆されたので、その応用を模索した例を紹介する。全体を単純化するため、式(1)のような周波数領域での応答関数ではなく、コンボリューションを使って時間領域に戻した応答関数を採用した。具体的には、火山の全磁力補正で使われるDI補正(田中他、1978)を時間領域での応答関数を用いて一般化し、以下の確立差分法の式で表した(藤井、2004)。

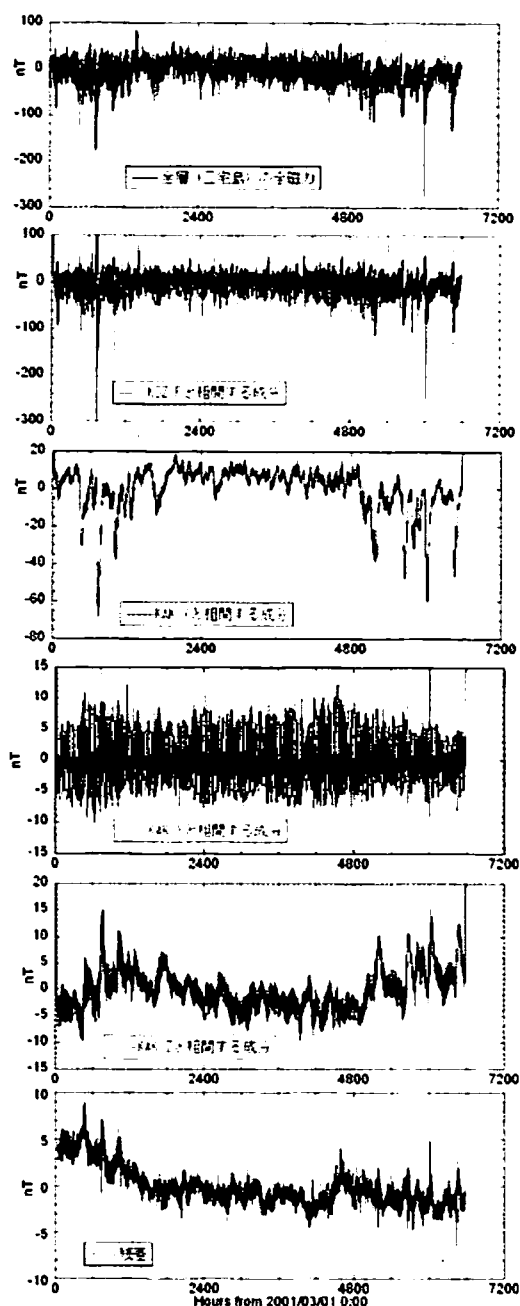
$$\Delta F(i) = F(i) - \sum_{j=-L}^K a(j) X_{ref}(i+j) - \sum_{j=-L}^K b(j) Y_{ref}(i+j) - \sum_{j=-L}^K c(j) Z_{ref}(i+j) - \sum_{j=-L}^K d(j) F_{ref}(i+j) \quad (2)$$

式(2)は、時刻*i*での全磁力観測値*F(i)*に含まれる超高層起源磁場や永年変化を、地磁気4成分の参照データ*X_{ref}(i)*、*Y_{ref}(i)*、*Z_{ref}(i)*、*F_{ref}(i)*から予想して除去し、得られた残差*ΔF(i)*が火山性変動の可能性のある成分とする。フィルター係数*a*、*b*、*c*、*d*は時間領域での応答関数で、*K*は未来の時間を参照する数、*L*は過去の時間を参照する数を表す。*K+L+1*がフィルター長となる。*K*、*L*の値をあらかじめ決めた範囲の中で変化させ、各々の*K*、*L*の値について残差*ΔF(i)*が最小となる解を計算し、それらの中でAIC(Akaike, 1973)が最小となる解を最適とする。参照できる観測成分の数は最大4成分で、最適な成分数や組み合わせもAICから判断できる。参照データが同一観測点のものである必要はないので、全磁力参照点は従来の近傍の点、XYZ成分参照点是最寄りの定常観測所を利用することも可能である。なお、式(2)は全磁力以外の地磁気成分にも適用できる。

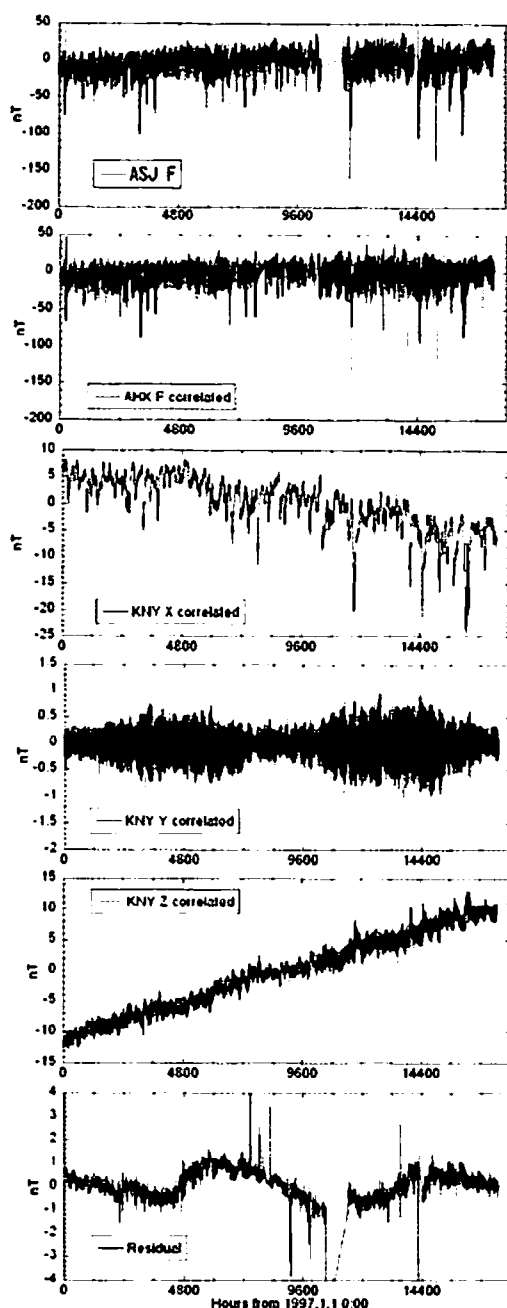
式(2)から、確率差分法は、前章の多点観測網用の異常値処理法と同様、他の観測データと線形関係で表現できるものはすべて取り除く方法であることがわかる。前章との違いは、スペクトル計算がないこと、参照する観測データに制限を設けていることである。一方、従来用いられてきた単純差は参照点と同一の変化のみを取り除き、DI補正(田中他、1978)は同一の変化が局所的な岩石磁化異常によってゆがめられた効果を考慮する。Davis *et al.* (1981)の確率差分法の場合は、前章の多点観測網用の異常値処理法の考え方に近く、観測網中のデータは効果がある限り何観測点でも参照する。

実際のデータに確率差分法を適用してみると、日変化は観測点間・観測成分間で相関がやや低く残差に残りやすいこと、海洋島の観測点に含まれる海洋潮汐は遠く離れた参照点には見られないので残差に残る場合があることなどがわかった。そこで、日変化と海洋潮汐を正弦波の集合とモデル化して、可能性のある周期のカタログを作り、残差中にそれらの周期の波が有意に含まれていれば除去するプログラムを追加した。地磁気観測所で利用する場合には、前処理として簡単な異常値処理や、リサンプリング処理など必要な機能を持つプログラムも合わせて、シェルスクリプトで一連の処理を制御して自動化している。

確立差分法による磁場分解の例を第6図、第7図に示す。ここでは、潮汐除去プログラムを適用する前の式(2)の分解のみを示している。第6図は、三宅島の金層観測点での2001年3月から2001年11月までの全磁力変動1時間値を、神津島での全磁力と180km離れた柿岡での磁場X、Y、Z成分を参照して分解し、参照データと相関のないローカルな長周期変動を抽出したものである。第7図では、阿蘇山上観測点での1997年1月から2年間の全磁力変動1時間値を、阿蘇山麓観測点での全磁力と160km離れた鹿屋の地磁気X、Y、Z成分を参照して、第6図と同様に処理した。



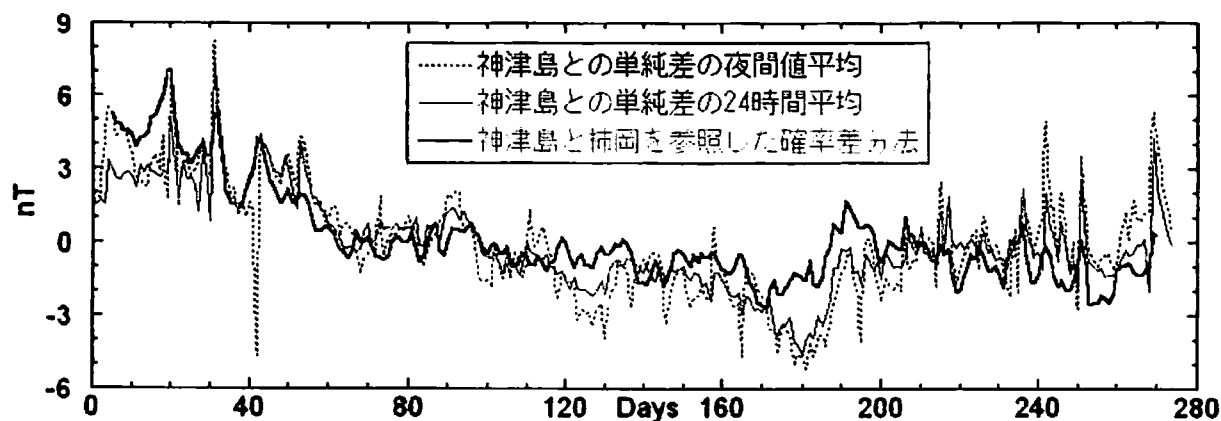
第6図 三宅島の金屑観測点での2001年3～11月までの全磁力変動1時間値を確立差分法で分解した例。上から、観測値、神津島(KOZ)での全磁力F、柿岡(KAK)での磁場X、Y、Z成分とそれぞれ相関する変動、残差。
Fig.6 Decomposition of the total force at Kanaso, Miyakejima by the stochastic difference method. From top to the bottom, the observed hourly values from March to November, 2001, coherent variations with the total force at Kozu-shima (KOZ), X, Y, and Z components of the geomagnetic field at Kakioka (KAK), respectively, and residual.



第7図 阿蘇山上点(ASJ)での1997年1月から2年間の全磁力変動1時間値を確立差分法で分解した例。上から、観測値、阿蘇山麓点(AHK)での全磁力F、鹿屋(KNY)の地磁気X、Y、Z成分とそれぞれ相関する変動、残差。
Fig.7 Decomposition of the total force at Aso-sanjyou (ASJ) by the stochastic difference method. From top to the bottom, the observed hourly values for 2 years from January, 1997, coherent variations with the total force at Aso-sanroku (AHK), X, Y, and Z components of the geomagnetic field at Kanoya (KNY), respectively, and residual.

金層での9ヶ月間の全磁力変動は約400nTの範囲にあるが、残差はおよそ15nTの変動であり、95%以上の変動が取り除かれた(第6図)。阿蘇山上では、観測された約250nTの変動のうち99%近くが取り除かれ、残差は約2nTの変動になっている(第7図)。残差振幅から見る限り、式(2)のモデルはうまく働いているように見える。取り除かれた中では、観測点近傍の参照点で得られた全磁力と相関する成分が最も大きな振幅を持ち、観測所のX、Y、Z成分との相関項は補完的なものである。しかし、観測点近傍の全磁力のみを参照するより、観測所のX、Y、Z成分を加えたほうが統計的には有意に良いと判断されるので、3成分を加える意義はある。

確立差分法の結果を従来手法の結果と比較してみる。三宅島の金層観測点では、従来は参照点との夜間値平均(現地時間で午前2~4時の単純差の平均)を用いていたので、1日値について比較を行った(第8図)。確立差分法の残差は、第6図に示した残差から潮汐成分を除去した後、ローパスフィルターで短周期成分を除去し1日値にリサンプリングして、神津島との単純差の夜間値平均、24時間平均と比較した。200日にわたる長周期のトレンドはどの手法でも似通っているが、確立差分法では短周期の変動が全般的に小さくなっており、夜間値平均に見られた海洋潮汐のエイリアジングによる変動や、夜間値と24時間平均に見られる磁気嵐時の短周期変動が取り除かれている。また、単純差の170日~200日に見られる緩やかな変化は黒潮の蛇行に伴うものであるが、確立差分法では振幅が小さくなっている。これは、金層と神津島では、非常に長周期の変動はほぼ同一であって手法を変えても1nT程度の差に収まるが、磁気嵐・潮汐・黒潮などに代表される短周期変動は相関していても同一ではなく、確立差分法のように振幅比や位相差を考慮できる手法のほうがうまく対処できた、と解釈できる。



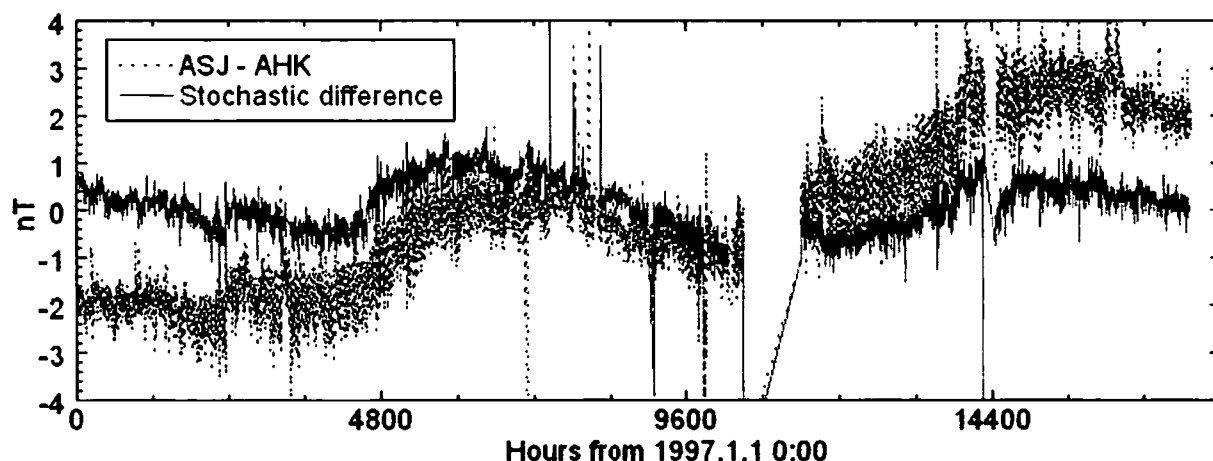
第8図 三宅島の金層観測点の全磁力について、神津島の全磁力との単純差の夜間(現地時間午前2~4時)平均値(点線)、24時間平均値(実線)、確立差分法によって神津島の全磁力と柿岡のXYZ成分に相関する変動を除去した残差の日平均値(太い実線)との比較。

Fig.8 Comparison of trend estimates of the total force at Kanaso, Miyake-jima. The nighttime (dotted line) and daily (thin solid line) means of the simple difference from the total force at Kozu-shima, and the daily mean of the residual with variations coherent with the total force at Kozu-shima and X, Y, and Z components at Kakioka removed by using the stochastic difference method (thick solid line) are shown.

確立差分法の問題点を知るために、阿蘇山上の例を検討してみる。第9図は、阿蘇山上の全磁力について、第7図に示した確立差分法の残差と阿蘇山麓との単純差を比較したものである。確立差分法の残差は、単純差に比べて、短周期変動が少なく期間中単調に増加していたトレンドもなくなっており、年周変化以外の長周期変動はないように思われる。ところが、確立差分法の係数 a 、 b 、 c 、 d を計算する期間を変えてみると、第10図に示すようにトレンドが有意に異なってくる。2年間すべてのデータを使って計算した係数を利用した場合は年周以外のトレンドはなく、データの後半1年間（1998年）から求めた係数を使うと2年間で約3nTの単調減少、データの最後の3ヶ月（1998年9～12月）から求めた係数を使うと2年間で約4nTの単調増加になった。

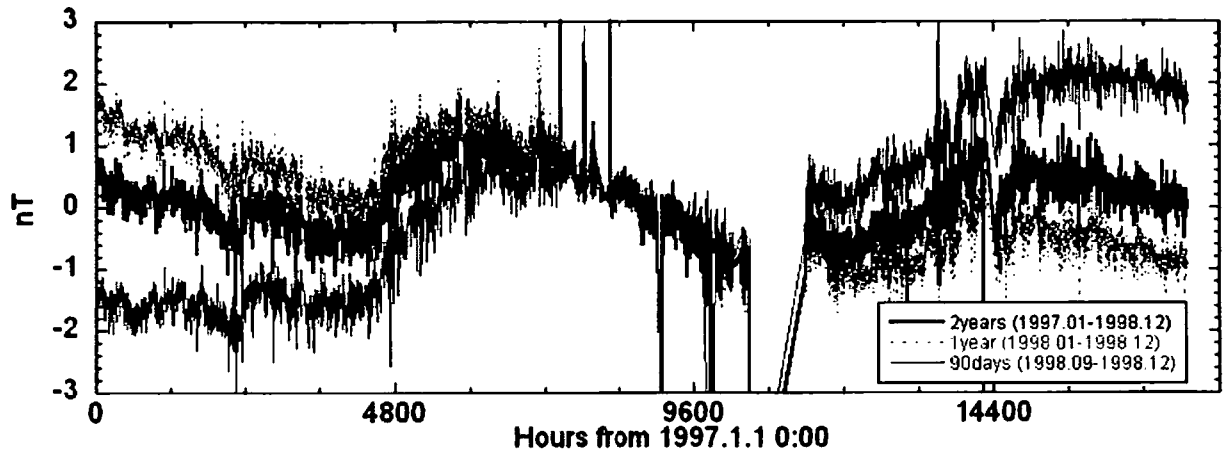
これは、阿蘇山上の全磁力が、参照した阿蘇山麓の全磁力と同一の長周期変動を持っていないことから端を発していると考えられる。第9図の単純差からわかるように、阿蘇山上は阿蘇山麓に比べて単調増加するトレンドを持ち、年周変化も異なっていた。確率差分法では式(2)の残差 $\Delta F(i)$ を最小にするのが良いとする基準を導入しているの、係数を決める期間内であるべく $\Delta F(i)$ の持つ長周期変動が小さくなるように参照データの阿蘇山麓の全磁力や鹿屋の3成分の係数が調整されるはずである。長周期変動が単調に変化する成分だけなら解析期間が変わっても合わせるべき長周期変動に差はないが、年周変化があると、どの期間を使うかで含まれる年周の正弦波の部分が変わり、期間内の観測値 $F(i)$ の持つ長周期変動が変わってしまう。そのため、係数は $\Delta F(i)$ の長周期変動が期間内で0に近くなるように決定され、異なる期間のデータに利用されると明らかな長周期変動を示す場合もあったと解釈できる。

見方を変えると、阿蘇山上の全磁力変化の中で確実に局所的なものは、解析条件を変えても変化しない年周変化であり、単調に増減するトレンドは他観測点との相関によって説明する余地があるということもできる。その意味では、確立差分法は局所的な変化を抽出するという本来の目的を達成しているとも言えるのだが、実用的に見た場合、第10図のような現象はまぎらわしく、間違った火山活動の解釈に結びつきかねない。地磁気観測所の火山観測データでは、草津白根山でも同様の事例があった。



第9図 阿蘇山上点の全磁力について、阿蘇山麓点の全磁力と鹿屋のXYZ成分を参照して確立差分法で分解した残差（実線）と、阿蘇山麓点の全磁力との単純差（点線）との比較

Fig.9 For the total force at Aso-sanjyou, comparison between the simple difference from the total force at Aso-sanroku (dotted line) and the residual of the stochastic difference decomposition with referring to the total force at Aso-sanroku and X, Y, and Z components at Kanoya (solid line).



第 10 図 3つの異なる係数計算期間を用いた場合の確立差分法の残差の比較。2 年分（太い実線）、1 年分（点線）、90 日分（細い実線）の阿蘇山上点の全磁力 1 時間値を用いて決定したフィルター係数を 2 年分の全磁力に適用した。

Fig.10 Comparison of the residuals of the total force at Aso-sanjyou that were obtained by applying either of 3 sets of the stochastic difference filter coefficients to a 2-year segment of hourly values. The data lengths to compute the coefficients for the 3 coefficient sets were 2 years (thick solid line), 1 year (dotted line) or 90 days (thin solid line), respectively.

第 10 図で提起された問題は、式(2)のモデル化の問題として捉えることができる。式(2)では、 $\Delta F(i)$ には火山性磁場を含む局所的な長周期変動があることを想定している一方、確立差分法の係数決定過程においては $\Delta F(i)$ を正規分布するランダムノイズとして扱い、 $\Delta F(i)$ の長周期成分の扱いが期間によって異なる原因となっている。 $\Delta F(i)$ に長周期変動があることを想定したフィッティング法が必要であることがわかる。

5. カルマンフィルターによる火山性磁場検出

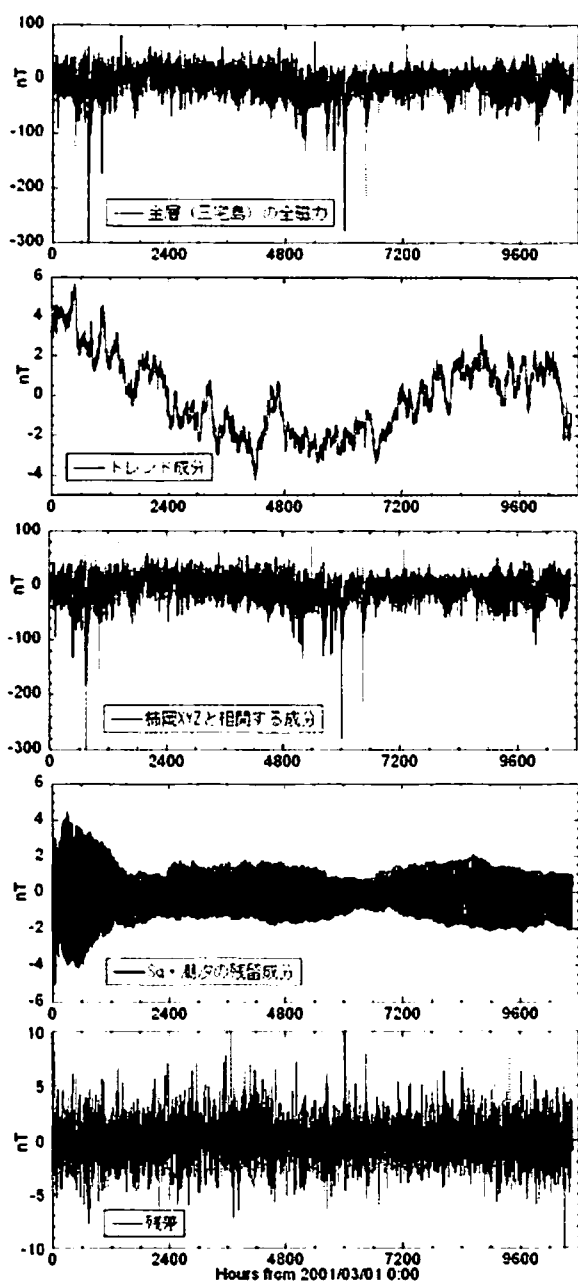
確立差分法の解析事例が蓄積されるにつれてわかってきた問題点を改善し、微弱な火山性磁場変動の抽出を手軽に精度良く行うために、カルマンフィルター（例えば、北川、1998）を取り入れた手法を考案した（Fujii & Kanda, submitted）。主な改善点は、まずモデルにおいて、

$$F(i) = t(i) + s(i) + r(i) + w(i) \quad (3)$$

のように、観測値 $F(i)$ を、長周期変動 $t(i)$ 、周期的変動 $s(i)$ 、参照点との相関成分 $r(i)$ 、観測ノイズ $w(i)$ の 4 つに分解したことである。 $w(i)$ は平均 0、分散 σ^2 のランダムノイズに従うと仮定し、カルマンフィルターで $w(i)$ を最少化するように解き、最適なパラメーターの組み合わせはAICで判断する。ただし、

$$r(i) = \sum_{k=1}^E \sum_{j=-L}^K A_k(j) X_k(i+j) \quad (4)$$

A_k は k 番目の参照データ X_k の係数である。 $t(i)$ と $s(i)$ は式(4)のように明確な形を持つのではなく、それぞれ、ゆっくりとした変動とおおよそ周期的な変動に対する緩やかな拘束条件、



第 11 図 金層の 2001 年 2 月 23 日～2002 年 5 月 19 日の全磁力 1 時間値をカルマンフィルターで分解した例。上から、観測値、長周期変動、楕円の X、Y、Z 成分と相関する変動、周期的変動、残差。
Fig.11 Decomposition of the total force at Kanaso, Miyakejima by the Kalman filter method. From top to the bottom, the observed hourly values from February 23, 2001 to May 19, 2002, trend component, coherent variation with X, Y, and Z components of the geomagnetic field at Kakioka (KAK), periodic component, and residual.

$$t(i) - 2t(i-1) + t(i-2) = u(i) \quad (5)$$

$$s(i) + s(i-1) + \dots + s(i+J-1) = v(i) \quad (6)$$

に従う。ただし、 $u(i)$ は平均 0、分散 y^2 のランダムノイズ、 $v(i)$ は平均 0、分散 z^2 のランダムノイズに従う変数である。これは、長周期変動はどのような関数に近いのかわからないため拘束を少なくし、周期項では周期が若干違う波が多数あり、同じ周期でも季節変動などの変動があることを考慮している。

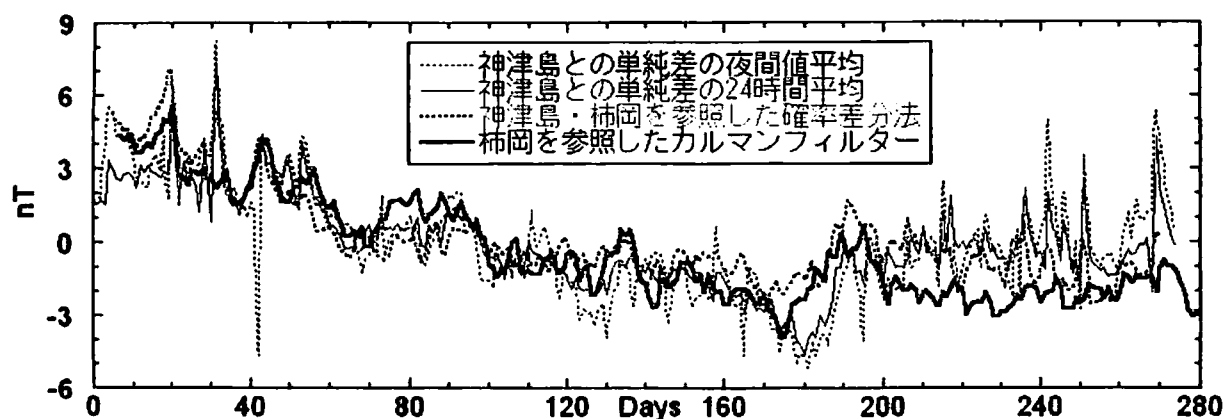
$r(i)$ は、式(2)の右辺第 2 項以下の係数を通じて参照観測値と結びつける 4 項の和と同等である。よって、式(2)の $\Delta F(i)$ が式(3)では $t(i)$ 、 $s(i)$ 、 $w(i)$ の 3 項に分けられたことがわかる。 $t(i)$ と $w(i)$ をあからさまに設けたことで前章で提起された問題に対処し、 $s(i)$ を他成分と同時に求めることで式(2)の分解後に潮汐除去を行っていた不具合を解消した。確立差分法では係数次数が大きくなりがちで(～60 時間)、係数次数が大きくなるほど AIC が小さくなる事例もあったが、カルマンフィルター法では係数次数は 10 数時間程度で AIC 最小に到達するようになった。

その他の改善点として、一時的な観測の参照点を利用せず、定常的に観測を行っている標準観測所のデータを参照するだけで、求める信号を抽出できるようにした。標準観測所が超高層起源磁場や主磁場の波長より近いところであれば、火山観測点と標準観測所の変動は相関しており、原理的に近傍の参照点の代わりになれるはずである。これは式(3)のように各変動成分を細分化することで $r(i)$ の見積もりが安定し、地磁気 3 成分の参照の場合が 4 成分の参照の場合より統計的に有意に良くなったことで達成できた。限られた観測点をすべて火山起源変動の観測のために使えば、より強力な観測ができる。また、従来の方法では参照点に割り当てられたデータに欠測やノイズがあると解析に影響が出るが、標準観測所のデータを使えばその点はかなり改善される。

カルマンフィルターの解析例を見てみよう。金層観測点の全磁力 1 時間値をカルマンフィルターで分解した結果を第 11 図に示す。使用したデータ期

間は 2001 年 2 月 23 日～2002 年 5 月 19 日で、参照データは柿岡の X、Y、Z 成分である。約 400nT の変動のうち観測ノイズは 20nT 程度であり、変動の 95%は説明できた。神津島を参照しなかったため短周期変動の相関が若干下がり、観測ノイズの振幅がやや大きい、長周期変動を抽出する目的には影響はない。

カルマンフィルターで抽出された局所的な長周期変動を、他の手法で得られた長周期変動と比較してみる。第 12 図は、第 8 図で示した 3 手法の長周期変動にカルマンフィルターの結果を加えたものである。カルマンフィルターの長周期変動は、第 11 図に示したものにローパスフィルターを作用して短周期変動を取り除き、リサンプリングして 1 日値にしたものである。200 日にわたる長周期のトレンドは 4 手法とも約 3nT 以内の違いに収まっており、カルマンフィルターの長周期変動は磁気嵐時の短周期変動が取り除かれている。神津島を参照しなくても柿岡だけで同等の結果が得られることが示唆された。



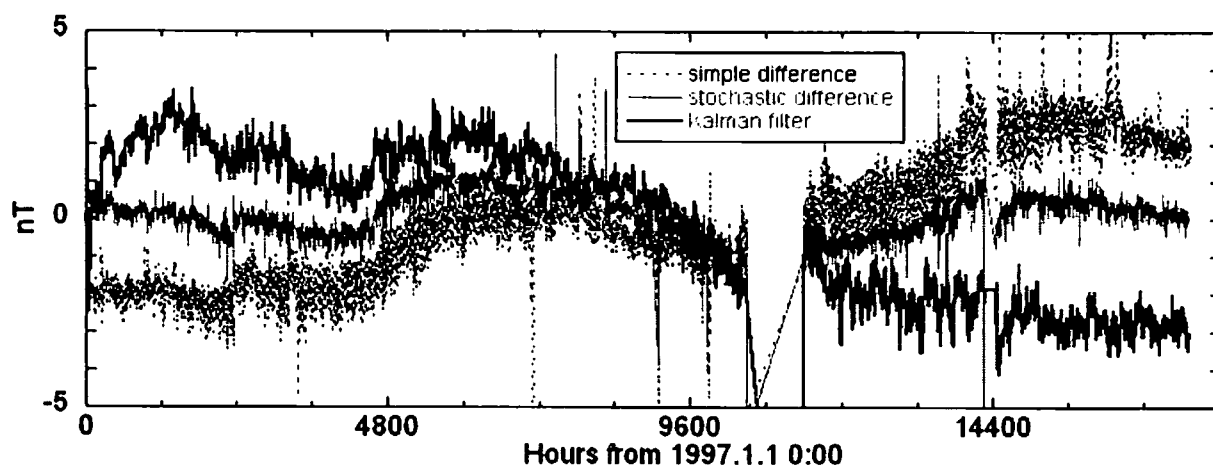
第 12 図 三宅島の金屑観測点の全磁力のトレンドの手法による違い。第 8 図の 3 手法にカルマンフィルターの結果を加えたもの。

Fig.12 Comparison of four trend estimates of the total force at Kanaso, Miyake-jima. The trend component estimated by the Kalman filter method with three vector components of the geomagnetic field at Kakioka as a reference (thick solid line) is added to three trend estimates shown in Fig.8.

次に、確立差分法では係数決定期間による結果の違いが問題になった阿蘇山上観測点の全磁力について、同様にカルマンフィルターの長周期変動と他手法の長周期変動を比較してみる。第 13 図は、カルマンフィルター、確立差分法、単純差によって得られた長周期変動の比較である。データ期間は第 7 図と同じで、参照データは、カルマンフィルターでは鹿屋の X、Y、Z 成分、確立差分法では鹿屋の X、Y、Z 成分と阿蘇山麓の全磁力、単純差では阿蘇山麓の全磁力である。確立差分法、単純差の変動は、第 9 図と同じである。もともとの阿蘇山上は阿蘇山麓や鹿屋に対して増加傾向を持っていたが、カルマンフィルターでは、初期値の影響で乱れている時系列の最初の日を無視すれば、小さな年周と期間中減少する方向のトレンドが得られている。

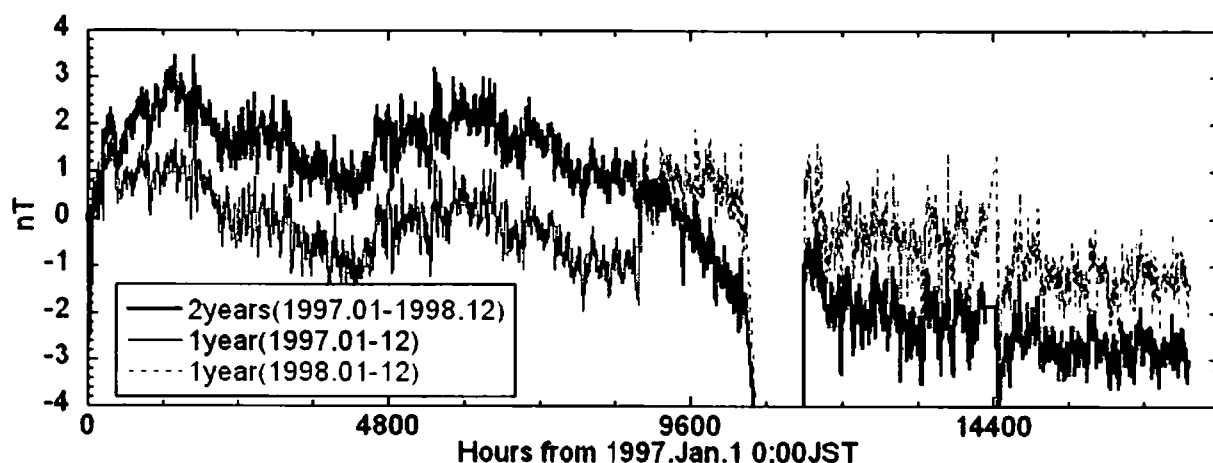
解析期間の影響をみるため、阿蘇山上の全磁力の 2 年分全部のデータを使った場合、前半の 1 年を使った場合、後半の 1 年を使った場合の 3 通りについて、カルマンフィルターで長周期変動を抽出し、比較を行った (第 14 図)。それぞれの時系列の最初の日分を無視すると、3 つの長周期変動はほぼ平行

しており、平均値以外の違いは小さい。参照点と観測点の主磁場や超高層磁場が同一でない場合、確立差分法よりカルマンフィルターのほうが安定した見積もりをすることが示唆される。



第 13 図 阿蘇山上観測点の全磁力のトレンドの手法による違い。第 9 図の 2 手法にカルマンフィルターの結果を加えたもの。

Fig.13 The trend component of the total force at Aso-sanjyou estimated by the Kalman filter method (thick solid line) in comparison to two trend estimates shown in Fig.9.



第 14 図 カルマンフィルターで抽出された阿蘇山上観測点の全磁力の長周期変動の解析期間による違い。2 年分（太い実線）、前半 1 年分（細い実線）、後半 1 年分（点線）のデータを使った場合を比較。

Fig.14 Three Kalman filter estimates of the trend component of the total force at Aso-sanjyou by using 2-year (thick solid line), first 1-year (thin solid line), and last 1-year (dotted line) segments of hourly values.

6. まとめ

地磁気スペクトルの EOF 法による空間分布解析、周波数領域の応答関数を使った異常値検出、時間領域の応答関数を使った長周期変動抽出、の 3 つの解析事例を通じて、主磁場の永年変化・超高層起源変化・火山性変化などを直接的あるいは間接的に解析する試みの例を紹介した。

これらの統計的手法を通じて、長波長の成分は比較的良好にモデル化できるが、短波長成分の扱いは注意が必要であることが示唆される。統計だけでなく物理を取り入れた解析をしたり、他のモデルと組み合わせた解析をすることなどは、将来的な課題であろう。

参考文献

- Akaike, H., Information theory and an extension of the maximum likelihood principle,
in: B. N. Petrov and F. Csaki, eds., 2nd Inter. Symp. on Information Theory,
Akademiai Kiado, Budapest, 267-281, 1973.
- Davis, P. M., D. D. Jackson, C. A. Searls, and R. L. McPherron, Detection of tectonomagnetic
events using multichannel predictive filtering, *J. Geophys. Res.*, **86**, 1731-1737, 1981
- 北川源四郎、カルマンフィルター、時系列解析の方法、尾崎統・北川源四郎編、朝倉書店、東京、93-106、
1998
- 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
- Ikuko Fujii and Adam Schultz, The three-dimensional electromagnetic response of the Earth to
ring current and auroral oval excitation, *Geophys. J. Inter.*, **151**, 689-709, 2002
- 藤井郁子、Adam Schultz、地球磁場観測ネットワークデータの解析手法について（その2）、
CA 研究会論文集、67-75、2000
- 藤井郁子、歌田久司、フィリピン海プレートの電気伝導度分布、地球電磁気・地球惑星圏学会予稿集、
仙台、1999
- Ikuko Fujii and Wataru Kanda, New Procedures to Extract Geomagnetic Field Variations Caused
by Volcanic Activities, submitted
- 藤原智、田辺正、西修二郎、松坂茂、V.P.Golovkov、S.V.Filippov、日本および極東地域における
全磁力変化モデルの作成、*CA 研究会論文集*、9-15、1998
- Macmillan, S., and S. Maus, International Geomagnetic Reference Field – the tenth generation,
Earth Planets Space, **57**, 1135-1140, 2005
- 白井宏樹、紀小麗、鈴木啓、何金蘭、宇津木充、日本の地磁気測量と地磁気モデル、*CA 研究会論文集*、
2006（本巻）
- 田中良和、増田秀晴、河村まこと、大地洸、加藤諄司、馬場広成、吉野登志男、阿蘇火山地域での
全磁力測量—(1977)、阿蘇火山の集中総合観測（第1回1977）報告、31-39、1978
- 山崎健一、地殻活動電磁気学と地域標準磁場モデル、*CA 研究会論文集*、2006（本巻）
- Zhang, T.S. and A. Schultz, Exercise-an algorithm for detection of spurious values and prediction
of missing data, *Computers in Geosciences*, **16**, 1027-1065, 1990