

地殻活動電磁気学と地域標準磁場モデル

山崎健一 (京都大学大学院理学研究科)

Regional geomagnetic field models for tectonomagnetism

Ken'ichi YAMAZAKI (Graduate School of Science, Kyoto University)

Abstract

We constructed two types of regional geomagnetic total force field models. One represents the daily mean values and the other represents the monthly mean values. The purpose of the models was extracting slight changes due to tectonomagnetic effect by subtracting them from the observed values. We used the NOC method to construct models with special attention to the data discontinuities and unevenly distributed sites. Both models successfully detected changes of a few nT. Generating mechanisms of detected changes are not clear, but they demonstrate the efficacy of these models.

1 はじめに

地磁気の一部は地殻を構成する岩石によってつくられているが、温度や応力などの変化に伴い、岩石の磁化も変化する。そのため、地殻内部で温度や応力などの物理状態が変化すると、地表で観測される地磁気にも変化が生じる。したがって、地表での地磁気観測は、地下で進行中のさまざまな活動を監視し、あるいはそのメカニズムを解明するための手段となりうる。

しかし、地上で観測される地磁気変化の大部分は、電離層などの超高層や地球深部の流体核に起因するものであり、地殻活動によってつくられる変化の割合は小さい。したがって、地磁気変化の観測を地殻活動監視に用いるには、さまざまな補正法を用いて、観測される地磁気変化のなかから地殻起源の変化のみを取り出すことが必要である。

このような補正では、地殻活動起源の地磁気変化がもつ空間スケールの特徴が利用される。すなわち、超高層や流体核起源の変動が広い地域で生じるに対して、地殻活動起源の変動は一般にごく狭い地域にのみ生じる、という性質を用いる。観測される地磁気変化 F^{obs} は、広い地域におよぶ変化 F^{global} と、狭い地域に限られて生じる変化 F^{local} の和として、

$$F^{\text{obs}} = F^{\text{global}} + F^{\text{local}} \quad (1)$$

と表現できるが、このうち F^{local} を地殻活動起源の変化と考えるのである。もし、研究対象とする観測点（主観測点）と、それ以外に設けた適当な参照点において、 F^{global} が等しいとみなせるならば、主観測点と参照点の間で差をとることにより、 F^{local} 、すなわち地殻活動起源の変化のみを取り出すことができる。

このように直接差をとる方法は、これまで有効に用いられてきたものではあるが、いくつかの欠点がある。まず、差をとった結果なんらかの変化が見られた場合、それが主観測点における変化なのか、参照点における変化なのかを区別することができない。また、広域変化はかならずしも一様ではないため、差をとっても完全には除去できない場合が多い。

ところで、 F^{global} を位置と時間の関数として表したものは、一般に標準磁場モデルと呼ばれる。標準磁場モデルを多数の観測値にもとづき構成しておけば、これを F^{global} とみなすことにより、観測値との差をとることによって、直ちに各観測点での局所変化が得られることになる。もちろん、こうしたモデルを構成する場合であつても、基準点での観測値に局所的な変化が含まれてしまう可能性はあるが、それはランダムであろうと期待できるから、多数の基準点を用いることで、影響は最小限に抑えることができるであろう。観測点が多数存在する地域を対象として求められた F^{global} の推定値を、地域標準磁場モデルと呼ぶ。特に、日本周辺の地磁気全磁力

変動から地殻活動起源の変化を抽出することを目的とするモデルは JGRF(Japan Geomagnetic Reference Field model) と呼ばれ、その構成法が検討されるとともに、データの整理が進められてきた。

本稿では、過去に単純差の解析から局所観測が示唆されるいくつかの事例を検証することを念頭に置き、日毎変化と月平均値の変化の二つについて、現在考えられている地域標準磁場モデル構成の手法や留意点を述べるとともに、構成されたモデルを適用して検出された局所的变化の例を紹介する。

2 標準場の構成例と補正結果

2.1 自然直交関数法

ほとんどの標準磁場モデルでは、 $F^{\text{global}}(x, t)$ を時間関数 $T_k(t)$ と空間関数 $X_k(x)$ の積の和に展開した形で表現する。

$$F^{\text{global}}(x, t) = \sum_{k=1}^K X_k(x) T_k(t) \quad (2)$$

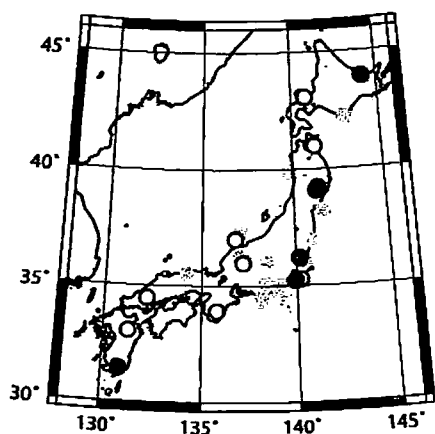
たとえば、全球を対象とした標準磁場モデル IGRF の場合、 X_k は球面調和関数であり、 T_k はガウス係数の時間変化を表すことになる。モデルの特徴は、この関数系にどのようなものを用いるかで決定される。

地殻活動にともなう地磁気変化の多くは $\ln T$ のオーダー、あるいはそれ以下であるから、標準磁場モデルにも同程度以上の精度が要求される。そのためには、時間変化を表現するために用いる基底関数は、複雑な変化を表現しうる数値関数でなければならない。観測時系列を完全に再現するには、一般に観測点の数と同じだけの基底関数が必要だが、実際には基底関数を適切に選ぶことにより、ほとんどの変化を少数の基底関数で再現することができる。こうした基底関数を選ぶ方法が自然直交関数法であり、得られる基底関数は NOC (Natural Orthogonal Component) と呼ばれる。NOC を求める具体的な手順については、Fainberg (1975) や Burdumaya *et al.* (1999) などを参照されたい。一般に、主要な NOC で表される変化は多数の観測点に共通するものであり、そうでない変化は一部の観測点に限定されていると期待できるので、NOC で表現される変化のみを標準磁場としてモデル化する方法は、地殻変動にともなう変化を検出するための基準値を決めるという目的にかなっている。こうして求めた時間関数それぞれの重みをあらかず空間関数 X_k は、空間的に比較的滑らかに変化することが期待できるので、通常は多項式などの解析関数が用いられる。本稿で示す標準磁場モデルでは、 X_k として、緯度経度の 2 次式を用いている。

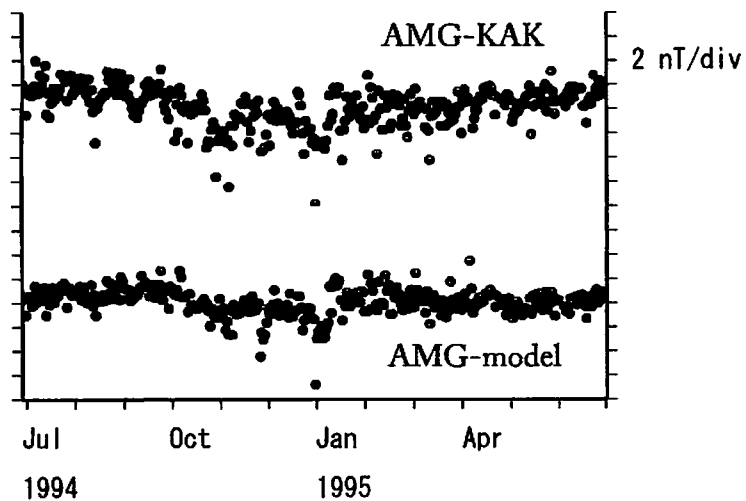
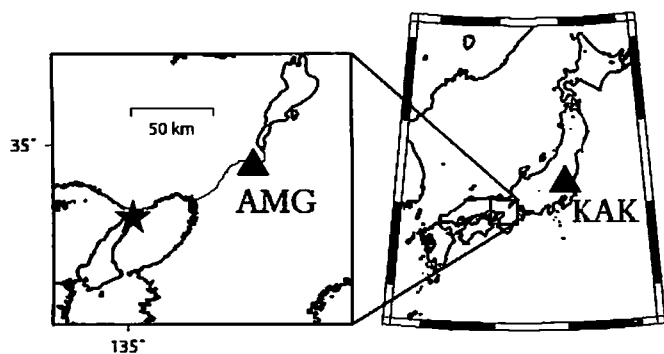
自然直交関数法を用いてモデルを構成する際、どの程度の時間スケールを表現しようとするのかをあらかじめ決めておくことは重要である。原理的には、全ての時間スケールの現象を含めた形でモデルを構成することは可能だが、幅広い時間スケールの現象を同時に扱うモデルを構成しようとすれば、それを表現するのに多数の基底関数が必要となる。そして、基礎とすることのできるデータ数に制約がある以上、多くの基底関数を求めようとすれば、個々の基準点を持つエラーが基底関数に伝播する可能性が高まってしまう。したがって、対象とする時間スケールに応じて別々のモデルを作成したほうが、必要となる基底関数の個数も少なくなり、結果として、精度の良いものが構成できるのである。本稿で紹介する 2 つの標準磁場モデルは、ともに 3 個の NOC を用いて構成されている。

2.2 日毎の変化について

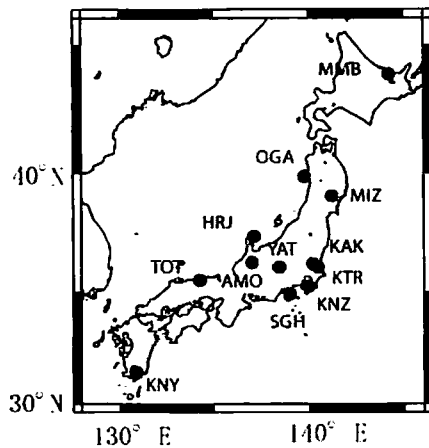
自然直交関数法を用いて日本周辺の日毎の全磁力変化を表現する標準磁場モデルを構築する試みは、Fujiwara *et al.* (2001) によってすでになされている。そこでは、1996 年以降国土地理院によって展開された地磁気連続観測点 (田辺, 1997) におけるデータが用いられており、 $\ln T$ 程度の変化の検出が可能なモデルの構築に成功している。しかし、これ以前の日本では、観測点の多くが東海地方など特定の地域に偏っていた (第 1 図)。観測点の配置が偏っている場合、得られる時間関数の直交性が影響を受けるため、同じ方法で適切なモ



第1図 Location of observatories and continuous stations in Japan. In this figure, sites indicated by open circles are installed since 1996, and they can't be used in analysis for 1994. Data obtained at sites indicated by grey solid circles since 1997 are not opened to publication, and they were not used in analysis for 2002.



第2図 Residual of daily mean total force after subtracting the model at the field station, AMG, about 70 km away from the epicenter of Kobe earthquake. In this figure, the locations of the stations and the epicenter are indicated by large triangles and a black star, respectively.



第3図 Location map of sites used to construct the monthly mean value model.

デルが構築できるかは明らかではない。

通常、自然直交関数法によるモデル化では、モデル化対象とする全期間について T_k をまず決定して、その後 N_k を決めるが、山崎・大志万 (2005) は、最初に観測点が均一に存在する最近のデータに基づき N_k を決定し、この N_k に合わせる形で T_k を求める手順を導入し、Fujiwara *et al.* (2001) によって得られたモデルと同程度の精度を持つモデルを構成することに成功した。

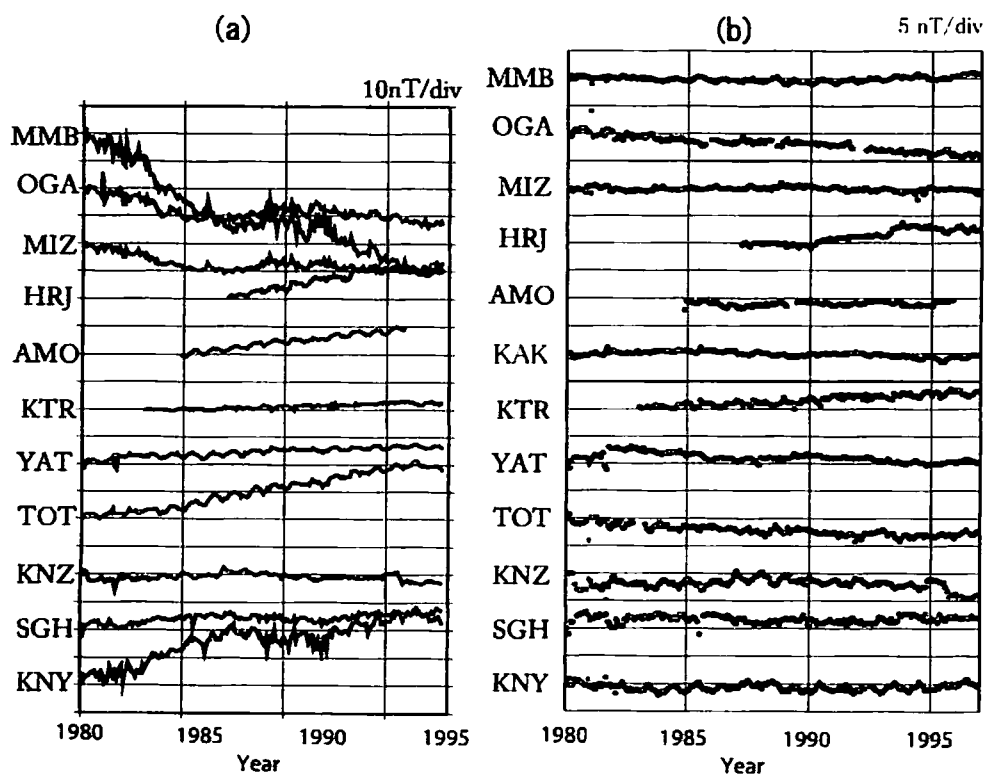
このモデルによる補正例として、1994 年から 1995 年にかけて、京都府宇治市の天ヶ瀬観測点 (AMG) で観測された変化を補正した例を紹介する。天ヶ瀬観測点は、兵庫県南部地震の震源からおよそ 70km 離れている (第2図)。この観測点の近傍では、伸縮計による測地観測も同時に実施されているが、そこでは地震発生の約半年前から顕著な歪変化があったことが報告されている (古澤, 1996)。また、柿岡の地磁気観測所における月平均値変化との単純差の解析からも、前年の経年変化が平年に比べて大きいとの報告がなされている (坂中ほか, 1996)。

第2図に、この観測点における全磁力夜間値の変動を示す。比較のため、柿岡 (KAK) に対する単純差と、標準磁場モデルとの差を合わせて表示している。標準磁場モデルを用いた場合には、残差にみられる変動量が全体的に小さくなり、詳細な変化が認識可能となっていることが確かめられる。標準磁場モデルとの差には、単純差からも認識できる前年10月ごろの減少以外にも、地震が発生した1月17日の約半月前に、ステップ上の変化が認められる。これらの変化が、どのような原因から生じたのかを明らかにすることは現在ではできないし、地震と直接関係するものか否かもわからないが、観測点近傍のみで局所的な全磁力の変化があったことは確かであろうと考えられる。

2.3 月平均値の変化

次に、月平均値の変化を表現するモデルを紹介する。比較的長期間のデータに対して自然直交関数法を適用して標準磁場を求めた例として、日本を含む極東地域における年平均値を表現した Burdman *et al.* (1999) や藤原ほか (1998) があるが、より精度を高めるためにも、観測点密度の高い日本のみのデータで地域標準磁場モデルを構成することは有意義であろうと考えられる。

ここで用いたデータは、第3図に示す12箇所の観測点で1980年以降にえられた全磁力夜間値を月毎に平均した値である。数年から数10年におよぶ変化をモデル化しようとする場合、観測点の中にデータが欠損する期間が含まれることは避けられない。データの欠損に対して NOC を求める際には、通常、欠損期間の長さに応じた重み付けをする方法などが用いられる (例えば門倉 (1990))。ところが、地磁気経年変化のように、な



第4図 (a) Changes in monthly mean values of the geomagnetic total force during the period from 1980 to 1997 relative to KAK. (b) Residuals after eliminating regional changes represented by major three NOCs.

だらかに大きく変化する成分を含む時系列に対しては、単純に重み付けをして NOC を求める方法ではかなりの誤差が生じる。また、短期間のデータから求めた空間関数 λ_k は、長期間の時間変化に対する空間関数とは必ずしも一致しないので、前節のようにまず λ_k を求めて固定してしまう方法でも、精度の高いモデルは構成できない。

この問題を回避するには、通常の重み付けによる補間をおこなったうえで、得られた標準磁場モデルから求められる予測値を、新たな補間値として再度 NOC を計算するという繰り返しの手法が有効であると考えられる。この方法を用いて構成された標準磁場モデルによる補正結果を第4図(b)に、また比較のため、柿岡(KAK)に対する単純差を第4図(a)に示す。単純差の場合に比べて、標準場による補正のほうが精度が高いことは明らかである。

検出された局所場には、いくつかの際立った変化が含まれている。たとえば、鹿野山(KNZ)における1995年頃の減少や、宝立(HRJ)における1990年以降のなだらかな増加と1993年の急激な変化などである。このうち、鹿野山での変化は、同じ時期に観測点近傍で建築工事が行われていたことがわかっており、その影響を捉えたものと考えられる。一方、宝立については、そのような事情は知られていない。実は、宝立観測点から約20km離れた能登半島沖では、1993年2月に能登沖地震(Mw.6.6)が発生している。つまり、1993年の変化が起こっている時期は、この地震と対応しているのである。

このことは、すでに単純差をとる方法による研究からも報告されており(坂中ほか, 1996), 新しいものではない。また、その発生原因を説明するメカニズムを考えることも、限られたデータからは困難である。しかし、標準磁場からの差をとる手法でも同じ変化が検出されたという事実は、この変化が、補正の不正確さに起因するみかけのものではなく、実際に局所的なものであることを強く示唆している。

3 おわりに

日平均値の変化、月平均値の変化の2つの時間スケールについて、標準磁場モデルの構成手法と、モデルを用いた補正結果の例を紹介した。標準磁場モデルを用いた補正の結果得られる値は、従来のような単純差や重価差によって得られる値と違って、特定の参照点の影響を受けないという意味で客観的な値である。すなわち、参照点の変化を主観測点の変化と誤認したものである可能性は低い。

しかし、本研究が扱ったデータは全磁力であるため、局所的な変動として検出された変化のなかに、観測点近傍の伏角・偏角の異常によるみかけのものが含まれている可能性があることには注意すべきである。なぜならば、観測される全磁力値は、静的な地磁気と変動する地磁気のベクトル和であるので、静的な地磁気の方が周囲と異なる地域、すなわち大きな磁気異常がある地域では、広域で一様な磁場変動がおこった場合でも、一様な大きさの全磁力変動が生じるとは限らないからである。そして、標準磁場構築の際に仮定した、各時間関数で表現される変化の振幅が空間的に滑らかに変化するという前提は、こういった磁気異常によるみかけの変化に対しては成り立たないものである。

磁気異常によるみかけの変化を防ぐ方法の一つは、全磁力のみでなく、磁場3成分の観測にもとづき局所的な変化を議論することである。今回紹介した自然直交関数法による標準磁場モデル構成は、空間関数 N_k として、ポテンシャル場を表現するための関数、たとえば球面調和関数などを用いることで、ただちにベクトル場に適用することが可能である。ただ、実際には磁場3成分の観測に基づき議論をおこなうことには、さまざまな困難が伴う。まず、労力などの上で、信頼できる磁場3成分の観測を多数の点で行うことは難しい。また、過去のデータを再解析する際には、標準磁場モデルの構築に必要な数の観測点を確保できない。

そこで、全磁力のみの解析から地殻起源の磁場変動を議論するには、観測点の周辺で磁気測量を行い、観測点における伏角・偏角を周辺地域と比べてみる必要があるであろう。観測点付近に大きな磁気異常がない場合、全磁力の標準磁場モデルを利用して検出される変化は、実際の現象を捉えたものである可能性が高い。一方、大きな磁気異常が存在する場合は、検出された変化の解釈には注意が必要である。

さまざまな原因によって生じる地磁気変化の理論値と観測値を比較することで、地殻活動のメカニズム解明に地磁気を用いることの有用性が評価できると期待されるが、応力磁気効果に起因する場合のように予測される変化量が小さい現象については、地磁気変化の中から地殻活動起源の変化のみを高い精度で抽出することが大前提となる。前述のように、標準磁場モデルを補正の基準として用いる方法は、決して万能の方法ではないが、地磁気データの有用性を高めるための手段の一つであると考えられる。

謝辞

本研究では、国土地理院、気象庁地磁気観測所、海上保安庁海洋情報部、および全国の大学の多年にわたる観測の結果得られた全磁力値のデータを使用させていただきました。また、各機関の保有するデータの取りまとめと再配布は、気象庁地磁気観測所によって行われました。これまでデータの収集・整理作業に関わってこられた全ての皆様に、深く感謝致します。

参考文献

- Burdernaya, I. A., S. V. Filippov, V. P. Golovkov, S. Fujiwara, T. Tanabe, S. Nishi, M. Kaizu, and S. Matsuzaka, Regional orthogonal models of the geomagnetic field changes over the Far East, *Earth Planets Space*, **51**, 287–296, 1999.
- Fainberg, E. B., Separation of the geomagnetic field into a normal and anomalous part, *Geomagnetism and Aeronomy*, **15**, 144–148, 1975.

- Fujiwara, S., T. Nishiki, H. Shirai, H. Hamazaki and V. P. Golovkov, Modeling the daily mean values of regional geomagnetic total force field changes in Japan, *Earth Planets Space*, **53**, 69–73, 2001.
- 藤原智・田辺正・西修二郎・松坂茂, 日本および極東地域における全磁力変化モデルの作成, *Conductivity Anomaly 研究会論文集*, 9–16, 1998.
- 古澤保, 地殻変動連続観測による兵庫県南部地震, 阪神・淡路大震災-防災研究への取り組み-, 京都大学防災研究所, 34–42, 1996.
- 門倉真二, 地磁気観測所永年変化観測データの新しい解析法, *Conductivity Anomaly 研究会論文集*, 151–158, 1990.
- 坂中伸也・住友則彦・大志万直人, 北陸・近畿・中国における全磁力永年変化について, 京都大学防災研究所年報, **39 B-1**, 273–285, 1996.
- 坂中伸也・住友則彦・大志万直人, 北陸・近畿・中国における全磁力永年変化(2), 京都大学防災研究所年報, **41 B-1**, 119–131, 1998.
- 田辺正, 全国に設置した地球電磁気連続観測装置, *国土地理院時報*, **87**, 4–12, 1997.
- 山崎健一・大志万直人, 地磁気全磁力標準変化モデルを利用した全磁力夜間値の補正法とその有効性, 第118回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会講演予稿集, D22-03, 2005