

主成分分析を用いた地磁気全磁力モデルの開発

阿部 聡・宮原 伐折羅 (国土地理院), 小山 崇夫・小河 勉 (東大・地震研)

Development of geomagnetic total force models by applying Natural Orthogonal Component (NOC) method

Satoshi Abe, Basara Miyahara (GSI of Japan, MLIT), Takao Koyama, Tsutomu Ogawa (ERI, the Univ. Tokyo)

Abstract

Geospatial Information Authority of Japan (GSI) has conducted nationwide continuous geomagnetic field vector observations since 1997. By utilizing these continuous data, we developed 2 types of geomagnetic total force models by applying Natural Orthogonal Component (NOC) method. One model is constructed from continuous total force observation data of proton and overhauser magnetometers. The other model is constructed from continuous 3-component geomagnetic vector observation data of fluxgate magnetometers. We call the models “scalar model” and “vector model” respectively. We developed the scalar model from total force observation data of 17 observatories operated by the GSI, Japan Meteorological Agency (JMA) and Earthquake Research Institute (ERI) and additional 2 observation stations operated by the ERI. We evaluated accuracy of the model by Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV), and the model reproduces total magnetic forces at the observatories and stations with the consistency of a standard deviation of 2.6nT. On the other hand, the vector model is developed from vector observation data of 17 observatories operated by the GSI, the JMA and the ERI. The model reproduces total magnetic forces at the observatories with the consistency of a standard deviation of 3.7nT. In order to remove a long wavelength trend of total geomagnetic force from total force observation data time series around a large volcano, we reproduced time series of total magnetic forces around Mt. Fuji and removed them from total force observation data at four observation stations around Mt. Fuji. The detrending revealed that detrended time series of one of the stations, Fujishi, contain clear seasonal variation with amplitude of 2nT. Time series of another station, Fuji-no-miya, also contain a clear step down probably caused by piezomagnetic effect with an earthquake in the eastern part of Shizuoka Prefecture on March 15, 2011.

1. はじめに

国土地理院は、日本全国の地磁気の地理的分布と永年変化を把握するため、1970年代から日本全国を網羅する地磁気測量を実施してきた。地磁気は時間的・空間的に変化するため、全国における磁場分布を把握するためには各地における連続観測が有用である。それを担う施設として、国土地理院は1990年代の後半からは、3つの観測所、全国11箇所の連続観測施設において地磁気ベクトルの連続観測を実施している。また、これらの連続観測データと一等磁気測量の成果から、日本全国の磁場分布を図に示した磁気図が作成・公表されている。

磁気図は「地磁気時空間モデル」という手法を用いて作成されている。このモデルは、日本全国の磁場の時間変化量を、複数の連続観測データと一等磁気測量のデータから推定する手法によって作成されるモデルで、入力には観測点の地磁気の年平均値を用いている。そのため、磁気図の時間分解能は年単位となっており、年毎の値は参照できるが短期の観測時期に対して参照値を与えることはできない。そこで今回、本手法を拡張することによって、より細かな時間分解能を持つモデルの作成を試みた。

2. モデリング手法について

モデル作成にあたっては、日本における標準的な磁場を表現するモデルの作成を目指すこととした。また、地磁気観測において、火山活動の監視で用いられるように、地下起源のシグナルを監視するツールとしての地磁気観測には全磁力観測を用いるケースがほとんどである。そこで、特に全磁力のモデル化にターゲットを絞ることとした。従来よりも時間分解能を向上させるため、使用するデータは日平均値とした。地磁気の時空間変化の支配的な成分を抽出するモデル化の手法については、磁気図作成の際に用いる主成分分析を応用した自然直交基底法（NOC 法）を用いることとした。NOC 法を用いた磁場のモデル化は、Fujiwara et al. (2001) や、Ji et al. (2006) により行われている手法である。NOC 法により、複数の観測点における時系列データを、少数の合成変数で説明することができる。

$$H_j(\phi_i, \lambda_i, t) = \sum_k X_j^k(\phi_i, \lambda_i) \cdot T_j^k(t) \quad (1)$$

H は i 点 (ϕ_i, λ_i) における磁場 j 成分の時系列データを表し、 X は磁場強度の空間依存を表す基本関数（空間関数）、 T は磁場の時間変化を表す基本関数（時間関数）であり、 k は次数を表す。(1)式により、複数の時系列データから共通の時間変化成分と、各点におけるその振幅に分解することができる。ここで、空間関数を全国的に展開することができれば、任意の地点における磁場の値を推定することが可能となる。Fujiwara et al. (2001) では空間関数の補間にルジャンドル多項式を用いており、Ji et al. (2006) では球面調和関数に準じた球キャップ関数を用いている。これらの関数は、各主成分の直交性を活かすために適した関数や物理法則に基づいた関数であるが、本研究においては、緯度経度の二次多項式を使用して、空間関数のフィッティングを行うこととする。これは、日本列島の形状が弧状であり、分布を再現する関数として二次関数が適当であるとの判断による。

$$X_j^k(\phi, \lambda) = M_j^k + A_j^k \Delta\phi + B_j^k \Delta\lambda + C_j^k (\Delta\phi)^2 + D_j^k \Delta\phi \Delta\lambda + E_j^k (\Delta\lambda)^2 \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\phi = \phi - 37^\circ$ 、 $\Delta\lambda = \lambda - 138^\circ$ である。 M および A から E は定数及び係数であり、求められた各点の空間関数を最もよく説明する値を最小二乗的に求めることで推定する。

以上のモデル化手法を用い、2通りのモデルを作成した。各観測点の全磁力データを入力値とする「スカラーモデル」と、三成分データを入力値とする「ベクトルモデル」である。以下に、その詳細を示す。

2.1. スカラーモデル

スカラーモデルの入力には、プロトン磁力計もしくはオーバーハウザー磁力計による連続観測で得られた全磁力の時系列データを用いた。スカラーモデルの作成において、入力値として絶対値をそのまま用いることはせず、あるエポックからの変化量を計算して入力値とすることとした。(1)の式により時間関数と空間関数に分離させた後、(2)の式で空間関数の補間を行う。その後、任意の地点における空間関数を計算し、時間関数と合成することで全磁力の変化量の時系列についてモデルが作成される。そのため、この手法によって任意の点において絶対値の時系列モデルを作成するには、モデル値の時系列を得たい地点においてモデル期間中のいずれかの時期に全磁力観測を行って全磁力の観測値を得ている必要がある。なお、モデルの作成において、複数の次数が存在する中で適当な次数を使用する必要性が生じることになるが、モデル値と入力に使用した観測データとの比較によって判断する。

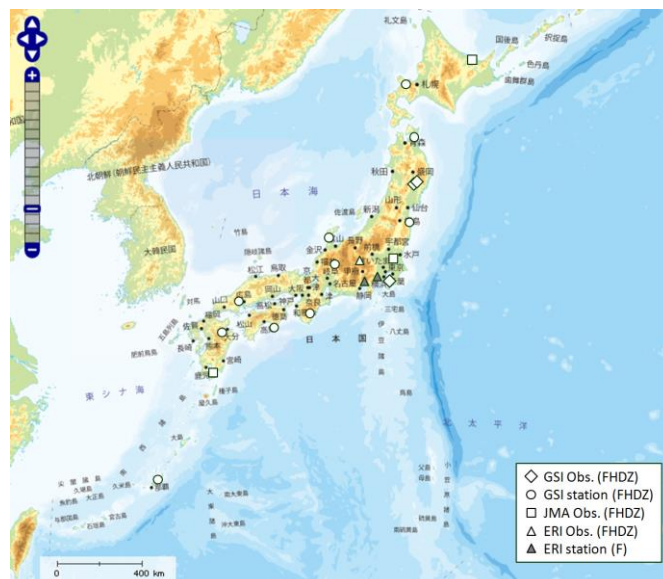
2.2. ベクトルモデル

ベクトルモデルの入力には、フラックスゲート型磁力計による連続観測で得られた地磁気三成分の変化量の時系列を絶対観測によって絶対値とした時系列データを用いた。ベクトルモデルの作成において、入力値は XYZ 直交三成分の絶対値を用いる。ベクトルモデルにおいては、扱う入力データ量とパラメータ数が3倍に増える。ただし、モデル化のプロセスはスカラーモデルと同様で、各成分に対して独立に主成分分析を行い時空間モデルを作成する。ベクトルモデルにおいて重要なのはベクトルの変化量であるため、空間関数と時間関数を合成したモデルから、変化量の時系列モデル $d\mathbf{B}/dt$ を計算する。3成分全てにおいて変化量モデルを計算した後、任意の時間（実際には絶対観測によって三成分の絶対値が得られているエポック）の三成分の絶対値を起点として時間方向にベクトルを合成することで、XYZそれぞれの絶対値の時系列モデルを計算した後、3成分のベクトルを合成することで全磁力の時系列モデルを得る。ベクトルモデルにおいても、どの次数の主成分まで採用するのが適切であるか判断が必要であり、モデル値と入力に使用した観測データとを比較して残差を評価することによって最適な次数を判断する。

3. モデルの作成と精度検証

3.1. スカラーモデル

スカラーモデルは、全磁力連続観測を行う19点のデータを用いて作成した（第1図）。観測点の内訳は、国土地理院が運用する3点の観測所および10点の連続観測施設、気象庁が運用する3点の観測所、東京大学地震研究所の運用する1点の観測所および2点の全磁力連続観測点である。使用したデータの期間は、2007年1月1日から2013年12月31日までの7年間のデータで、毎秒値もしくは毎分値から日平均値を計算して使用した。これらのデータは目視によるノイズ除去が行われたデータである。なお、NOC解析の制限により、共通のデータセットが必要になるため、1観測点でも欠測があるとその観測日のデータはモデル化できないこととなる。これにより、使用可能なデータは2219日分のデータとなった。

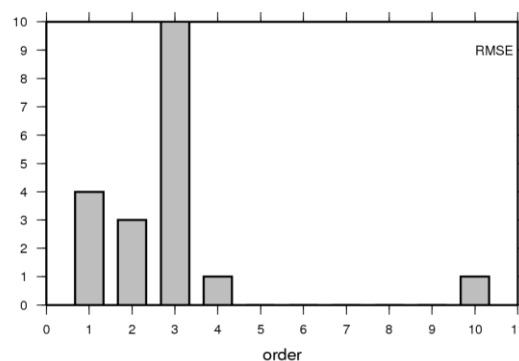


第1図 モデルに使用した観測点の配点図

Fig.1 Location map of observatories and observation stations.

作業のプロセスとしては、まずは(1)式によって全磁力変化量データを時間関数と空間関数に分解し、空間的に離散的な空間関数を(2)の式で最小二乗的に近似した。観測データを最もよく表現する次数を決定するため、次数毎のモデルの精度検証も兼ねて、一個抜き交差検定 (LOOCV, 例えば地球統計学研究会, 2003) を行った。これは、一点の観測データを除いてモデルを作成し、その作成したモデルから、除いた一点におけるモデル値を作成し、実際の観測データと比較する手法である。本モデルにおいては、2219 日分の全磁力モデル値と観測データ値を比較し、RMSE を計算した。採用する次数の判断として、小さい次数から順に加算していき、高次の次数を加えることで RMSE がどの程度改善するかを計算し、その変化量が 0.5nT 以下に収束した次数をカウントした (第 2 図)。その上で、半分以上の点において収束が確認された時の次数を採用することとした。結果として、第 3 次までの主成分を用いたときに半数以上の点で RMSE の収束が起こった。すなわちより高次の次数を追加しても観測データの再現性が大きく向上しないことが確認されたため、第 3 次までの次数を用いてモデルを作成するものとした。

また、モデルの精度についても、同様の LOOCV の結果を採用する。モデルに採用する次数は第 3 次までと決定したので、第 3 次までのモデルについて入力点全 19 点に対して LOOCV を行い、得られた 19 個の RMSE の平均を採ることによってモデルの精度とする。第 1 表に、次数毎の RMSE の平均値を示す。これによると第 4 次まで採用した場合が最も RMSE が小さいが、第 4 次の使用によって収束が起こった点は 1 点のみであり、第 4 次の時間関数および空間関数はその 1 点の変化を説明する成分である可能性が高い。そのため、今回は第 3 次まで成分を採用した。その場合の地磁気時空間モデルによる観測データの再現精度は、2.6nT となった。



第 2 図 RMSE が収束する次数のヒストグラム

Fig.2 Histogram of convergent order.

次数	Noc1	Noc2	Noc3	Noc4	Noc5	Noc6	Noc7	Noc8
RMSE	3.35	2.85	2.61	2.56	2.61	2.60	2.62	2.64

第 1 表 使用した次数毎の RMSE の 19 点平均値

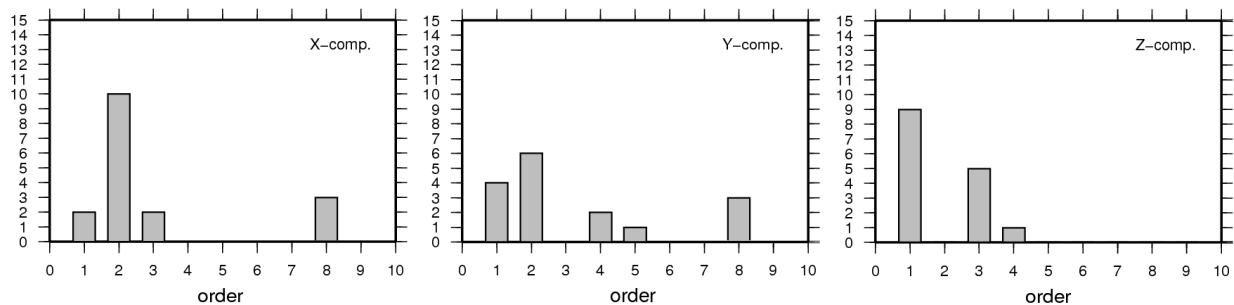
Table 1 Average RMSE at 19 stations for each order model.

3.2. ベクトルモデル

ベクトルモデルは、三成分の連続観測を行う 17 点のデータを用いて作成した。観測点の内訳は、スカラーモデルの作成にあたって使用した観測点 19 点から、2 点の全磁力連続観測点を除いたものである。使用したデータの期間は 2007 年 1 月 1 日から 2013 年 12 月 31 日までの 7 年間のデータで、毎秒

値もしくは毎分値から日平均値を計算して使用した。これらのデータも目視によるノイズ除去が施されたデータである。スカラー解析と同じく NOC 解析の制限により、欠測データがあった場合は全点で欠測として処理を行った結果、使用可能なデータは 2330 日分となった。ベクトルモデルでは XYZ 三成分をそれぞれ独立に扱うが、それぞれで行う処理はスカラーモデルと同様であるため、スカラーモデルで行った LOOCV による評価を XYZ 成分それぞれについて行い、モデルと観測データの RMSE が 0.5nT 以下に収束する次数のカウントを行った（第 3 図）。スカラーモデルの場合と同様に、使用点の半分以上が収束した次数を採用することとした。それにより、X 成分は第 2 次、Y 成分は第 2 次、Z 成分は第 1 次までを用いてモデル作成を行うものとした。

モデルの精度については、全磁力モデルが主たる作成対象であるため、XYZ を合成した後に得られる全磁力のモデル値と、観測データを比較することで行った。なお、ここで比較に用いた観測データは、全磁力計から得られた時系列データで、全磁力のモデル値はフラックスゲート型磁力計から得られた三成分の時系列データをモデル化したものであるため、異なる磁力計で観測されたデータから作成したモデルとの比較をすることになる。上記の次数を使用して作成した全磁力モデルと観測データの RMSE を、全 17 点にわたり平均した結果、3.65nT という結果が得られた。



第 3 図 RMSE が収束する次数のヒストグラム

Fig. 3 Histogram of convergent order at each component.

これらの結果は、LOOCV による評価の結果であるため、全ての観測点を用いて作成したモデルと比較して再現性が低いことは当然であるが、再現性がどの程度低下するかは、どの点を除外するかによって大きく異なる。観測点が密に配置された地域では 1 点除外したことによる低下は小さいが、領域の端のように観測点が疎な地域では、除外による低下は非常に大きくなる。今回のモデルには沖縄の連続観測施設のデータも使用しているが、沖縄を除外してモデルを作成した場合、沖縄のモデル値は再現性が大きく低下する。逆に、沖縄を入れることでモデルの再現性が飛躍的に向上することから沖縄地域の推定精度はかなり向上することが期待される。LOOCV の結果として得られた精度よりも、全点を使用して作成したモデルの精度は多少なりとも向上するであろうことが予想される。

4. モデルの適用

今回作成した 2 種類の全磁力モデルを用いて推定した広域の地磁気変動を用いて、国土地理院および東京大学地震研究所が行う富士山の火山監視用の全磁力連続観測点のデータに対して広域のトレンド除去を行った。富士山周辺の全磁力観測の結果は火山噴火予知連に提出しており、富士山監視の一握を担っている。従来は富士山南側に設置した国土地理院の富士市観測点 (FJI) を参照点とし、富士山北側の国土地理院の富士吉田観測点 (FUJ) と、東京大学地震研究所の富士吉田観測点 (FJ1) の全

磁力差の時系列変動を監視していたが、観測結果には強い年周変動が見られていた。富士山南側の観測点として東京大学地震研究所の富士宮観測点（FJM）も加えて、合計4点の全磁力データのトレンド除去を行った。配点図を第4図に示す。これらの点は全て目視による人工ノイズ除去を行ったものである。

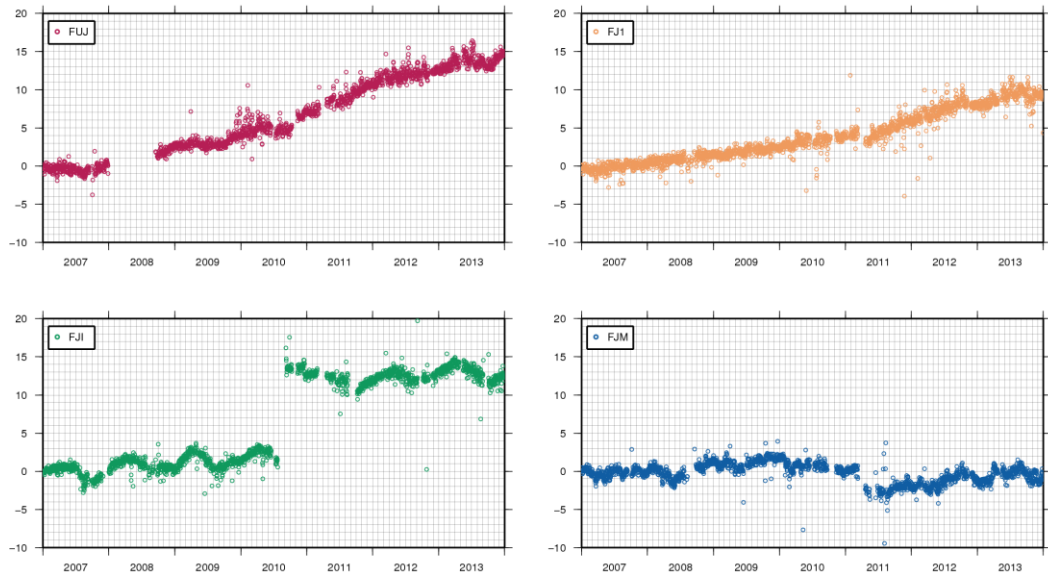


第4図 富士山周辺の全磁力観測点配点図

Fig. 4 Location map of total force continuous observation stations around Mt. Fuji.

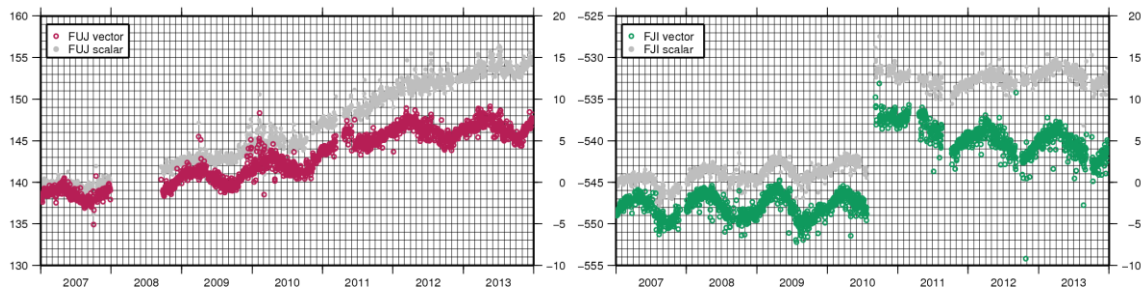
スカラーモデルによりトレンド除去を行った結果、富士山北側の2点については類似した傾向が確認された（第5図）。FUJには、若干の年周期的な変動が見られている。一方、南側の観測点では、FJIにおいて明瞭な年周変動が確認された。2010年のギャップは落雷による機器故障によるもので、その後2011年にかけての変動は、Shimizu et al. (2007)で報告された周囲の岩石の帯磁の粘性緩和と同様の現象であると考えられる。一方、FJMのデータでは、小河ほか(2011)で報告されている、2011年3月15日の静岡県東部地震により起こったピエゾ磁気効果を原因とするギャップが明瞭に判別できるようになった。なお、同様の原因によると思われるギャップが、FJ1にも現れている様子が確認できる。

一方、ベクトルモデルを用いたトレンド除去においては、ベクトルモデルの特性上、三成分を全磁力に合成するにあたっては、少なくとも1回は三成分の絶対値が得られている必要がある。FUJおよびFJIにおいては過去に絶対観測が行われ、三成分の絶対値が得られている。そこで、上述の2点において、ベクトルモデルによるトレンド除去を行った（第6図）。結果として、スカラーモデルの場合と比較して傾向が異なる結果が得られたほか、モデル値の時系列に明瞭な年周変化が含まれることが明らかになった。これはフラックスゲート磁力計に温度依存性があることによって、モデル作成に使用した観測データ自体に年周期的な変動が含まれることに起因すると考えられる。



第 5 図 スカラーモデルを用いた富士山周辺の観測点のトレンド除去

Fig. 5 Detrended total geomagnetic force data around Mt. Fuji using scalar model.



第 6 図 ベクトルモデルを用いた富士山周辺の観測点のトレンド除去

Fig. 6 Detrended total geomagnetic force data around Mt. Fuji using vector model(color dots) and scalar model(gray dots).

5. 考察

スカラーモデルとベクトルモデルについて、富士山周辺の全磁力観測点のトレンド除去を行った結果、両者に違いが生じることとなった。今回扱っている地磁気は本来ベクトル量であるが、スカラーモデルはその大きさのみを使用した全磁力モデルである。一方でベクトルモデルは地磁気の大きさと向きを考慮したモデルであり、大きさと向きを持つ物理量である地磁気を扱うという観点からは物理的に正しいモデルである。このことから、スカラーモデルはあくまでも近似的なモデルであり、傾向の違いは2つのモデルの特性の差によって生じたものではないかと考えられる。今後の課題として、両者の傾向の違いについて考察していきたい。また、今回は存在する全てのデータを採用しているが、地磁気活動度に応じた変動が複数の主成分の中に抽出されていることが確認できる。擾乱日のデータは点によって異なる変化を示すため、静穏日と擾乱日を切り分けて考えることも、検討課題の一つである。ただし、短周期の擾乱も再現できることが本モデルの利点であるため、擾乱日のウェイトを下げることはモデルの時間分解能の低下にもつながる可能性があり、慎重に検討を行うことが必要であ

ると考える.

6. まとめ

国土地理院の運用する地磁気三成分の連続観測点のデータを使用して, 日平均値を対象として広域の地磁気の時間変化傾向を表現する全磁力モデルの作成を試みた. 全磁力観測データから作成するスカラーモデルと, フラックスゲート磁力計データから作成するベクトルモデルの 2 種類を作成し, LOOCV により精度評価を行った. 結果として, スカラーモデルでは標準偏差で 2.6nT, ベクトルモデルでは標準偏差で 3.7nT の再現性が得られた. 作成したモデルを使用して, 富士山周辺の全磁力観測データのトレンド除去を行った結果, スカラーモデルと比較してベクトルモデルは永年変化傾向が異なり, 更に年周変動が確認された. 年周変化の原因はフラックスゲート磁力計の温度依存性によるものと考えられる. 永年変化傾向の違いについては, あくまでもベクトル量を扱うベクトルモデルのものが正しいと考えられるが, 今後更なる検討が必要である.

参考文献

- Fujiwara S., T. Nishiki, H. Shirai, H. Hamazaki, and V. P. Glovkov, Modeling the daily mean values of regional geomagnetic total field changes in Japan (2001), *Earth Planets Space*, **53**, 69-73.
- Ji X., M. Utsugi, H. Shirai, A. Suzuki, J. He, S. Fujiwara, and Y. Fukuzaki, Modeling of spatial-temporal changes of the geomagnetic field in Japan (2006), *Earth Planets Space*, **58**, 757-763.
- Shimizu H., T. Koyama, S. Koyama, and H. Utada, A geomagnetic total intensity anomaly originated from lightning-induced isothermal remanent magnetization: case of the Yatsugatake Magnetic Observatory, central Japan (2007), *Earth Planets Space*, **59**, 141-149.
- 小河勉, 小山茂, 小山崇夫, 白井宏樹(2011), 2011年3月15日静岡県東部地震に伴う全磁力変化について, 第130回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会予稿.
- 地球統計学研究委員会 訳編/青木謙治 監訳 (2003): 地球統計学, 森北出版株式会社