

主成分分析を用いた日本周辺の地磁気変化モデルの開発 Development of geomagnetic variation models around Japan by applying Natural Orthogonal Component (NOC) method

測地部 阿部聡・宮原伐折羅
Geodetic Department Satoshi ABE, Basara MIYAHARA

要 旨

方位を知る方法には、古くから方位磁石が使用されてきた。方位磁石を用いると、北の方角を知ることができるが、方位磁石の指す方向は、地球磁場の北極である「磁北」で、地球の幾何学的な北極である「真北」とはわずかに異なる。真北と方位磁石の指す磁北の差は偏角と呼ばれ、方位を測定した場所ごとに異なる。さらに、磁北は時間に伴いその位置を変えるため、偏角は時間的にも変化する。

国土地理院では、日本全国をカバーする地形図を作成し、各地形図にはその場所における偏角値を記載している。地形図は従来、図郭ごとに分かれた紙地図であったが、最近ではデジタル化されてシームレスとなり、GNSS 測位を用いることで地形図上の場所を容易に得ることが可能となった。方角も、カーナビやスマートフォンに搭載された磁気センサーを用いて容易に知ることができるが、磁気センサーの示す北「磁北」と地形図の北「真北」が異なることから、偏角の値を補正しなければ、地形図上で正しい方角を示すことはできない。様々な情報が電子化された社会においても、偏角値は依然として重要な地理空間情報の一つである。ただし、偏角値は、時間的・空間的に変化するため、必要な精度の偏角情報を社会に提供するには、地磁気観測を継続し、観測に基づいた正確な偏角値を更新し続ける必要がある。

国土地理院では、日本全国の磁場分布とその永年変化を把握するため、1950年頃から地磁気測量を実施してきた。その成果は、10年ごとに作成される磁気図として公開されている。最新の磁気図は2011年に公開した磁気図2010.0年値で、今後は5年ごとに更新する。磁気図2010.0年値の作成では、空間的に離散的な地磁気の時系列データに対して、数学的な解析手法を用いて全国を網羅する磁場変化モデルを作成する「地磁気時空間モデル」が開発された。今回はこのモデルの時間分解能をより細かくするよう拡張し、全国9点の地磁気連続観測データを同化したモデルを開発した。精度評価では、モデルは、全磁力5nT程度、磁場のX、Z成分で5nT、Y成分で10nTの精度を持つことが確認された。

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、1950年頃から日本全国を網羅する地磁気測量を実施してきた。地磁気は時間的にも空間的にも変化するため、全国の磁場変化分布を継続して把握するためには全国を網羅する連続観測が必須である。そのため、国土地理院では、全国3か所の測地観測所（以下、「観測所」という。）と、全国10か所の地球電磁気連続観測装置磁気変化観測部（以下、「連続観測施設」という。）において、地磁気ベクトルの連続観測を実施している。連続観測施設がない地域は、一等磁気測量と称する繰り返し観測によって複数年ごとに観測を実施しており、これらの成果から日本全国の磁場分布を示した「磁気図」を作成し、公表している。

現在、最新版である磁気図は、2011年9月に公表した「磁気図2010.0年値」であり、「地磁気時空間モデル」を用いて作成された（植田ほか、2013）。このモデルは、日本全国の磁場の1969年からの時間変化量を、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し、1970年1月1日に化成した全国の磁場分布と合成することによって任意の年の磁場の値を推定するもので、磁場の時間変化を推定するプロセスの入力には、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、年ごとの値は推定できるが、1年より短期の磁場値は推定ができない。そこで今回、「地磁気時空間モデル」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. 地磁気について

地球は、その物理的な構造、性質、ほかの天体との関係など、様々な環境を反映した固有の磁場を持っており、この地球固有の磁場は、地磁気と呼ばれている。地磁気は、地球内部を起源とする主磁場と、地球外部起源の変動磁場から構成される。地磁気の99パーセントは主磁場であり、その形状は、地球内部に棒磁石を置いた形で形容される双極子に似ている。変動磁場は、地球周辺を流れる様々な電流によって作られる磁場で、時間的に変化するため「変動磁場」と呼ばれる。磁場変化の時間スケールは、数秒間の短い変動から、月単位の長い変動まで様々な範囲に及ぶ。一方で、主磁場も長期的に変化しており、この変化は「永年変化」と呼ばれている。永年変化は数年から数百年という非

常に長い時間スケールで生じている。

地磁気はベクトル量であり、一般にベクトル \mathbf{B} で表現される。実際には、ベクトル \mathbf{B} を成分に分解したものがよく利用される。地磁気ベクトルの大きさを全磁力といい、 F で表される。全磁力 F を直交する三軸に分解したものをそれぞれ X 成分 (北向きを正とした南北成分)、 Y 成分 (東向きを正とした東西成分)、 Z 成分 (鉛直下向きを正とした鉛直分力) と呼ぶ。また、全磁力 F を水平面に投影したものを H 成分 (水平分力)、 X 軸と水平分力のなす角度を偏角 D (時計回りを正とする)、全磁力 F と水平分力 H のなす角度を伏角 I (水平面から下向きを正とする) という (図-1)。

地磁気ベクトルを表現する際には、これらの成分の中の独立した三成分によって表記することが多く、例えば (X, Y, Z) , (F, D, I) , (H, D, Z) などの組み合わせが用いられる。国土地理院では、後者の (H, D, Z) に F を加えた形式で全国の地磁気連続観測データの値を公表している。特に偏角情報は、磁気センサーや磁気コンパスで得られた磁北から真北を計算する際に用いられており、地磁気的成分の中でも特に人間の生活に重要な情報である。

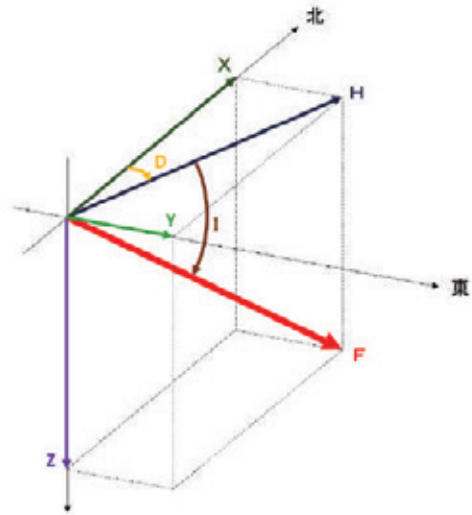


図-1 地磁気の各成分

3. 国土地理院の地磁気観測

国土地理院は、全国 13 か所で地磁気連続観測を行っている (図-2)。また、永年変化を把握するための一等磁気測量も実施している。以下に各観測について示す。

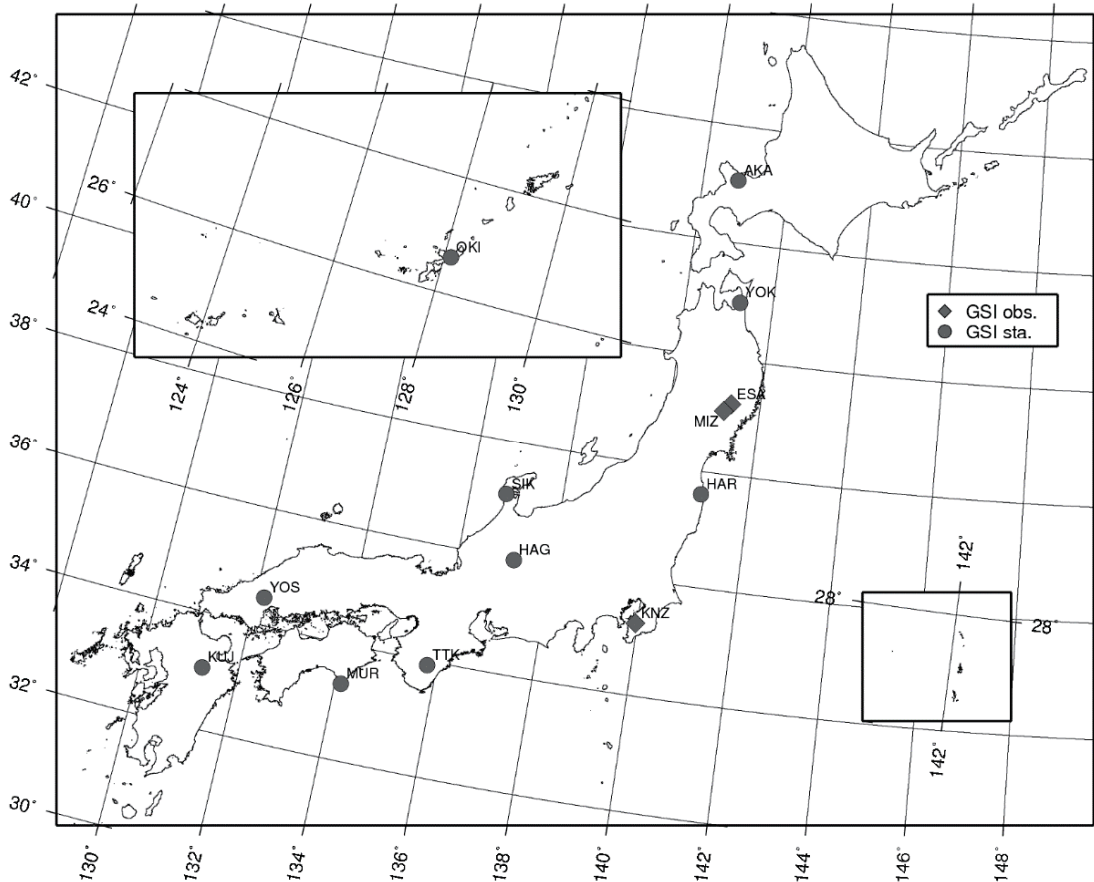


図-2 国土地理院が運用する地磁気連続観測施設の配点図

3.1 測地観測所

国土地理院は、1952年に千葉県君津市の鹿野山測地観測所において地磁気の連続観測を開始した。鹿野山では、それ以来現在に至るまで60年以上の連続観測を行っている。1965年頃、内房線の電化計画が明らかになり、地磁気連続観測に人工擾乱の影響が出る可能性が生じたため、磁氣的に静穏な岩手県水沢市（当時、現奥州市水沢区）に水沢測地観測所を設立し、1969年から地磁気連続観測を開始した。しかし、1971年には、東北新幹線が水沢測地観測所の近傍を通過することが明らかになり、新幹線が地磁気の短周期成分へ影響を及ぼすことが懸念されたため、1980年に、隣接する江刺市（当時、現奥州市江刺区）に江刺観測場を設立し、地磁気連続観測を開始した。現在は、これらの3観測所で地磁気の連続観測を継続している。

各観測所には、全磁力観測用にオーバーハウザー磁力計を設置しており、毎秒観測を実施している。また、オーバーハウザー磁力計のバックアップに、プロトン磁力計を設置しており、毎分観測を実施している。このほか、直交する地磁気三成分の変化観測用にフラックスゲート三軸磁力計を設置しており、毎秒観測を実施している。フラックスゲート三軸磁力計は、観測値に温度依存性があるため、温度変化を抑えるべく、断熱性の高い室内（変化計室と呼ぶ。）に設置している。変化計室内には花崗岩の台があり、フラックスゲート三軸磁力計をその台上に水平かつ直交三成分のY成分の磁場読み取り値が0になる方向に設置している。これは、センサーのX軸が水平分力H方向を、センサーのY軸が偏角D方向を向くことに相当する。

フラックスゲート三軸磁力計は、機器の読み取りレンジ内に値が収まるように一定の磁場を打ち消したうえで磁場の変化成分を記録しているため、厳密には磁場の絶対値を測定することはできず、測定ができるのは磁場の時間変化である。フラックスゲート三軸磁力計の測定から絶対値の時間変化を得るためには、磁気儀を用いて偏角D及び伏角Iの絶対値を測定する観測（絶対観測と呼ぶ。）を実施して、時間変化成分をこの角度の絶対値に整合する値に補正（絶対値化と呼ぶ）する必要がある。絶対観測は、自動的に行う観測機器がないため、観測者がその都度、磁気儀を用いて測量する必要がある。絶対観測の頻度は、国際共同観測では週1回程度が推奨されているが（INTERMAGNET, 2012）、国土地理院では、補正の頻度と測定の精度の費用対効果を考慮して、頻度を決めている。各観測所では、2006年までは毎週絶対観測を実施していたが、2006年以降は月2回、2010年からは月1回実施している。各磁力計で得られたデータは、月ごとに絶対観測の結果を用いて絶対値化している。なお、この絶対値は、絶対観測を実施する場所（絶対観測室と呼ぶ。）の観測基台上の値に化成した値である。全磁力の連続

観測は、観測基台とは異なる場所で行っているため、観測値が観測基台上の全磁力値とは異なる。そのため、観測基台上に全磁力計を設置して値を求め、同時刻の連続観測との全磁力の差分を計算して、これを連続観測に加味することで、観測基台上の全磁力値の時系列に補正している。三成分の時系列変化は、隣接した地点間では変化の程度が同一であると仮定のうえ、変化計で観測した時系列変化を観測基台上の値としている。国土地理院では、これらの絶対値を毎秒値、毎分値及び毎時間値にまとめ、地磁気測量ホームページ（http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_03/observatory_data.html）及び地磁気世界資料解析センター京都（WDC for Geomagnetism, Kyoto）から提供している。

3.2 地球電磁気連続観測装置磁気変化観測部

国土地理院は、全国の地磁気変化を把握するため、1996年から1997年にかけて、全国11か所に連続観測施設を設置した。観測所が安定した地磁気観測のために4万平方メートルを超える占有面積を持つ一方、連続観測施設は、全国を網羅した観測点の配置を優先したために、数十メートル四方程度の占有面積が狭い施設となっている。施設には、地磁気ベクトルを連続観測するため、プロトン磁力計とフラックスゲート三軸磁力計を設置している。設置状況の詳細は点ごとに異なるが、施設の概要は図-3に示すとおりである。

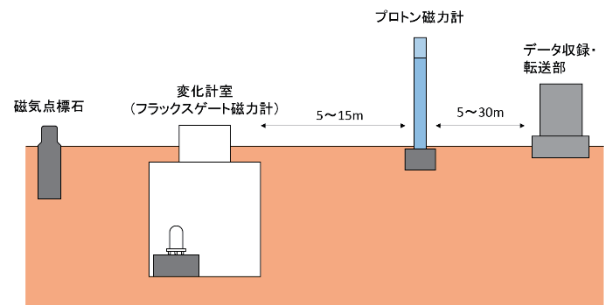


図-3 連続観測施設の概要図

プロトン磁力計は、地上2.5m程度の高さに、フラックスゲート三軸磁力計は、地下2m程度の深さに設置している。フラックスゲート三軸磁力計は、埋設した2m×2m×2mの非磁性のレジコンクリート製のマンホール（変化計室）に設置している。変化計室内のフラックスゲート三軸磁力計は、観測所と同様に、センサーのX軸を水平分力Hの方向に合わせる向きに設置している。また、サスペンション方式を用いることで、原理的にはZ軸が重力方向（鉛直下方向）を保つため、鉛直性が確保される。全ての磁力計で毎分観測を行っており、観測データは併設したデータ収録・転送部へ有線で送られ、一般電話回線や地上携帯電話回線を介して国土地理院へ転送されている。連続

観測施設は、占有面積が狭いため、観測所と比べて人工ノイズの影響を受けやすく、データに含まれるノイズが多い。磁気図作成及びデータ公開の際には、目視により人工ノイズを除去している。

連続観測施設には、繰り返し絶対観測を行うための磁気点標石を埋設している。磁気点標石上では、1年に1回の頻度で磁気儀を用いた偏角D及び伏角Iの絶対観測を実施し、その観測結果を用いて連続観測値を補正している。観測所と同様に、全磁力値及び三成分の変化値の時系列は、磁気点上の値に化成している。絶対値化した値は、月単位の毎分値及び毎時間値を作成して公開しているが、連続観測施設の場合は暫定値と確定値の2種類を公表している。暫定値は、ある年の絶対観測の後のデータに対して、直近の絶対観測の結果を用いて外挿して補正した絶対値であり、確定値は、絶対観測の実施後、前回と今回の2回の絶対観測結果を用いて、2回の観測間を月ごとに線形補間した値で補正した絶対値で、最終的な値となる。これらのデータは、国土地理院の地磁気測量ホームページ (http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_03/observato

[ry_data.html](#)) から公表している。

3.3 一等磁気点

観測所及び連続観測施設での連続観測に加えて、国土地理院では繰り返し観測のために測量標である「一等磁気点」を全国約100か所に設置している(図-4)。一等磁気点は、磁気点標石のみが埋設された観測点で、観測を行う際に、持参した全磁力計及びフラックスゲート三軸磁力計を一時的に設置し、それにあわせて磁気儀による絶対観測を実施する。一等磁気点は、地磁気の永年変化を把握するために設置したもので、1990年代までは数年間隔での繰り返し観測を行っていたが、連続観測施設の設置によって磁場変化を空間的に網羅できる範囲が広がったため、連続観測施設が空間的に網羅できない13点の一等磁気点に絞って繰り返し観測を実施している。

一等磁気点の繰り返し観測では、観測の成果として、観測日における地磁気の絶対値の日平均値が得られる。その結果は、国土地理院が作成する国土地理院技術資料B4「地球磁気観測報告」として公表している。

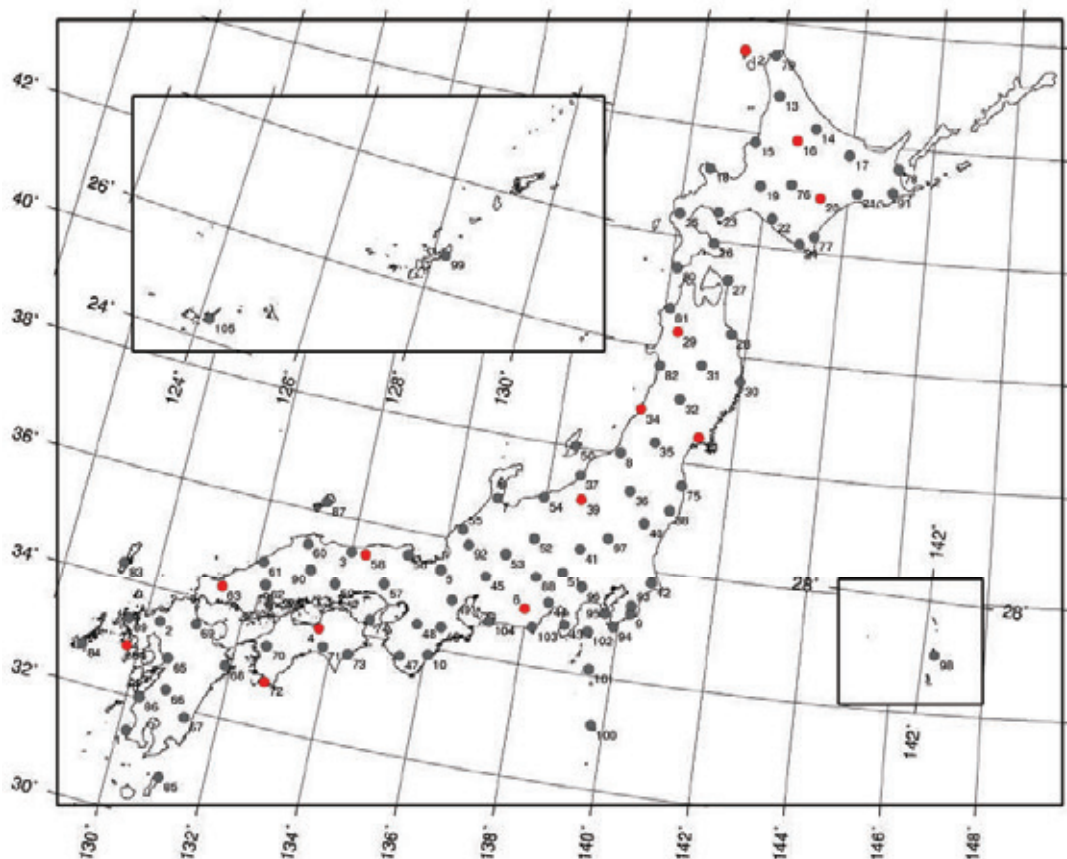


図-4 一等磁気点配点図。番号は磁気点番号を表す。モデル作成期間中に繰り返し観測が行われた観測点を赤色で示す。

4. モデル作成手法

国土地理院が公表している磁気図は、1970.0年値が全国統一基準で作成された初めての5枚一組の磁気図

(偏角D, 伏角I, 水平分力H, 鉛直分力Z, 全磁力F)であり、国土地理院が1949年から日本全国で実施してきた地磁気測量による全国約870点の地磁気測量成

果を、1970年時点の値に化成することで作成された (Geographical Survey Institute, 1973). 以降の磁気図は、この全国の詳細な磁場分布を基盤として、地磁気の繰り返し観測結果を用いてモデル化した、その後の磁場変化を加味することで作成してきた。磁気図 2010.0 年値の作成では、1970年時点の詳細な磁場分布を基盤とする点は変わらず、繰り返し観測に連続観測の結果を加えて磁場の変化量をモデル化している。磁場変化モデルからは任意の時期までの磁場変化量が得られるため、磁気図も任意の時期に対して作成することができる。本稿の開発の対象は、地磁気の連続観測データから磁場の時間変化をモデル化した、地磁気変化モデルである。

今回のモデル作成では、全国を網羅する連続観測を実施している利点を活かして、全国の磁場の変化を反映した、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。地磁気はベクトル量であるため、ベクトルの変化を再現できるよう、直交三成分の X, Y, Z 成分の絶対値の時系列データを用いて、各成分を独立にモデル化することとした。直交三成分の絶対値が得られれば、ベクトル成分を合成することで全磁力 F を得ることができる。特に、火山活動の監視など、磁場変化が地下を起源として生じる現象の監視に地磁気観測を用いる場合には、主として全磁力観測が用いられるため、全国の標準的な全磁力のモデルは、標準的な変化から逸脱した地下起源のシグナルを検出する際に有益である。従来の磁気図作成で用いた地磁気時空間モデルと比べて時間分解能を向上させるため、モデル作成には日平均値を用いた。モデルの入力に観測値をそのまま用いると、各成分の絶対値が観測点ごとに大きく異なるため、入力値が空間的に大きくばらつくこととなり、作成されるモデルもばらつきが大きくなる。そこで、求めたいモデルが日本の標準的な地磁気の時間変化であることから、モデル化したい地磁気の時間変化を、ある時期を基準とした変化値を計算することで求め、解析に用いることとした。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は、主成分分析を応用した自然直交基底法 (NOC 法) を用いて行うこととした。NOC 法を用いた磁場のモデル化は、Fujiwara et al. (2001) や、Ji et al. (2006) が用いている手法で、磁気図 2010.0 年値の作成 (植田ほか, 2013) で用いた手法である。NOC 法により、複数の観測点における時系列データを、(1) 式で示した少数の合成変数で説明することができる。

$$H_j(\varphi_i, \lambda_i, t) = \sum_k X_j^k(\varphi_i, \lambda_i) T^k(t) \quad (1)$$

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 (以

下、「空間関数」という.)、T は磁場の時間変化を表す基本関数 (以下、「時間関数」という.) である。k は主成分の次数を表し、寄与率の高いものから順に第一主成分、第二主成分、・・・と呼ぶ。(1) 式により、複数の磁場の時系列データを、全点で共通の時間変化成分 (時間関数) と、各点におけるその振幅 (空間関数) に分解する。ここで、離散的な空間関数を空間補間することで全国的に展開すれば、時間関数は全点で共通の関数であるため、式 (2) に示すように両者を合成することによって任意の地点における磁場の時間変化の値を推定することが可能となる。

$$H_j^{model}(\varphi_i, \lambda_i, t) = \sum_{k'} X_j^{k'}(\varphi_i, \lambda_i) T^{k'}(t) \quad (2)$$

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、補間に用いた 16 点の観測点では複雑な空間分布を表現できないこと、日本周辺の限られた範囲での標準的な磁場を表現することが目的であることから、式 (3) に示すような比較的単純な経緯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した。

$$X_j^k(\varphi, \lambda) = M_j^k + A_j^k \Delta\varphi + B_j^k \Delta\lambda + C_j^k (\Delta\varphi)^2 + D_j^k \Delta\varphi \Delta\lambda + E_j^k (\Delta\lambda)^2 \quad (3)$$

近似式の定数及び各係数は、最小二乗的に求める。また、入力する経緯度は、日本に適した形に変換し、 $\Delta\varphi = \varphi - 37^\circ$, $\Delta\lambda = \lambda - 138^\circ$ とする。空間関数は、各成分 j の k 次の主成分に対して計算する。

式 (3) により、空間関数を経緯度の二次多項式で近似することができるため、日本周辺のあらゆる場所において空間関数の値を推定することが可能となり、式

(2) によって磁場の時間変化のモデル値を計算することができる。NOC 法を用いた解析 (NOC 解析) により、各成分の主成分は寄与率の高いもの、すなわちより支配的な成分から順番に抽出される。すべての主成分を使用すれば、元の関数又は入力値を復元することは可能であるが、寄与率が低いものは、特定の観測点に固有なシグナルを表現する主成分となりやすいため、多くの点に共通した日本の標準的な磁場を表現する適当な主成分までについて合成を行うことで、今回目標とする標準的な磁場変化モデルを作成することができる。どの主成分までを採用することが適当かについては 5 章で検討する。

以上により、任意の場所における磁場各成分の時間

変化のモデル値が計算される。今回の主成分分析では、入力値に使用するデータは変化値であるため、得られるモデル値もあるエポックからの変化値となる。そのため、任意の点において、少なくとも一度地磁気三成分の日平均値の絶対値が得られていれば、時間変化の

モデルを加えることで、その日から時間方向に地磁気値を展開することが可能となり、モデルを作成した期間に対して日平均値モデルを作成することが可能となる。

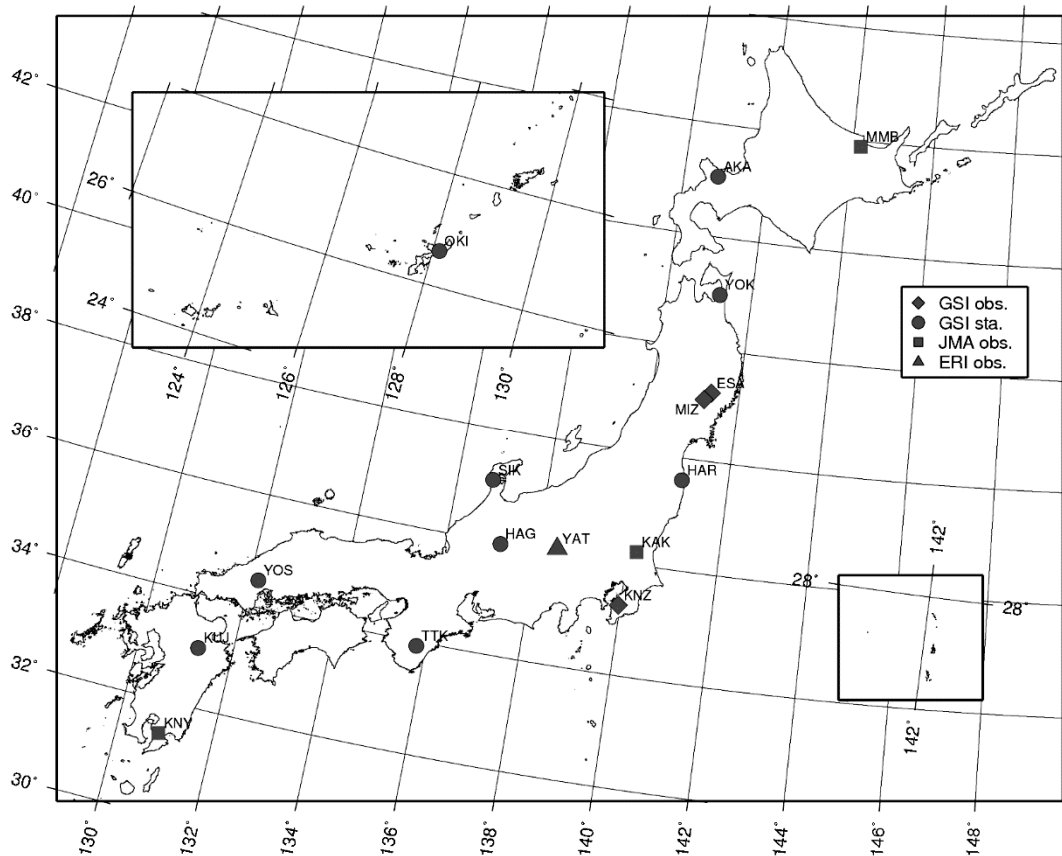


図-5 モデル作成に使用した観測点の配点図。国土地理院の観測所及び連続観測施設に加え、気象庁（JMA）の地磁気観測所、東京大学地震研究所（ERI）の地磁気観測所も用いた。

5. 地磁気変化モデルの作成

4章の手法によって、地磁気変化モデルを作成する。なお、地磁気ベクトルを X, Y, Z 成分の直交三軸に分解した三成分のモデル化を行うため、本モデルをベクトルモデルと呼ぶ。

5.1 モデル作成に用いるデータの諸元

ベクトルモデルは、三成分の連続観測を行う 16 点のデータを用いて作成した。使用した 16 点の配点図を図-5 に示す。観測点は、国土地理院が運用する 3 点の観測所及び 9 点の連続観測施設、並びに、気象庁が運用する 3 点の観測所、並びに、東京大学地震研究所が運用する 1 点の観測所である。使用したデータの期間は、2001 年 1 月 1 日から 2013 年 12 月 31 日までの 13 年間のデータで、毎秒値又は毎分値から、日平均値を計算している。これらのデータは目視によるノイズ処理によって人工ノイズが削除されたデータである。

なお、NOC 解析の制限により、共通のデータセットが必要となるため、1 観測点でも欠測があった場合、その観測日のデータはモデル化できない。NOC 解析は磁場の変化量に対して行うため、全てのデータにおいて、2001 年 1 月 1 日を基準エポックとし、そこからの変化量に換算している。

5.2 モデル作成と採用する主成分の検討

本モデルでは、各観測点の絶対値化したデータから直交する三成分 (X, Y, Z 成分) の日平均値の時系列を計算し、それぞれ独立に NOC 解析を行うこととした。三成分全て同時に NOC 解析を行う方法も考えられるが、NOC 解析は全ての入力データに共通のシグナルを抽出する手法であるため、全ての成分に現れるシグナルが優先して抽出され、ある一成分にのみ特徴的に現れているシグナルの抽出される順番が遅くなる（主成分の次数が高くなる）可能性が高い。各成分に

特徴的なシグナルを確実に抽出するため、三成分独立に NOC 解析を行った。

作業の手順は、1) 各成分のデータを (1) 式に適用し、それぞれ空間関数と時間関数を得る、2) 得られた空間関数と、入力点の経緯度の情報から、各主成分に対応する空間関数を、(3) 式によって近似する、の順に行った。なお、空間関数の定数及び各係数は、最小二乗的に決定した。これにより各主成分に対応した空間関数を計算できるようになり、時間関数と合成することで磁場のモデル値を得ることができるようになるが、モデルを確定するには、モデルに採用する主成分の選択を行う必要がある。前章で述べたとおり、主成分分析は、各点に共通のシグナルを抽出する手法であり、低次の主成分で大きなシグナルが抽出されることで高次の主成分では特定の点における固有のシグナルの比重が上がる。標準磁場を表現するためには、特定の点における固有のシグナルを表現する主成分を除外する必要がある。採用する主成分を決定するため、時間関数の時間変化の振幅と、空間関数の近似の整合性を指標として検討を行った。図-6 に時間関数の第四主成分までをプロットした図を示す。上段が X 成分、中段が Y 成分、下段が Z 成分に対応する。第五主成分以降は、寄与率が小さく、(2) 式にてモデル値に換算した場合に 1.5~2nT 以下となるため、検討から除くこととした。

図-6 では、全成分の縦軸はスケールが同じであるが、X 成分は主成分のばらつきが大きく、Z 成分は変化が大きいことがわかる。X 成分は、第三主成分までは顕著な時間変化を示すが、第四主成分では値が 0 付近に収束してほとんど時間変化を示さない。Y 成分は、第二主成分までは顕著な時間変化をしており、第三主成分で年周的な変化を示すが、0 付近に収束して大きな時間変化を示さない。Z 成分では、第二主成分まで顕著な時間変化を示しており、第三及び第四主成分は 0 付近に収束して大きな時間変化を示さない。

実際に (2) 式を用いて空間関数と合成し、主成分からモデル値を計算して各主成分の振幅を確認した結果を表-1 に示す。なお、空間関数は各点の主成分ごとの振幅を表現する関数であり、点及び主成分ごとに異なる値を持つため、この計算においては各点の空間関数の絶対値の平均値を使用して振幅を見積もった。

表-1 モデル値に換算した振幅の見積もり (単位: nT)

	X 成分	Y 成分	Z 成分
第一主成分	166.8	150.1	298.4
第二主成分	17.4	23.6	12.6
第三主成分	10.9	1.9	3.0
第四主成分	1.8	2.7	1.8

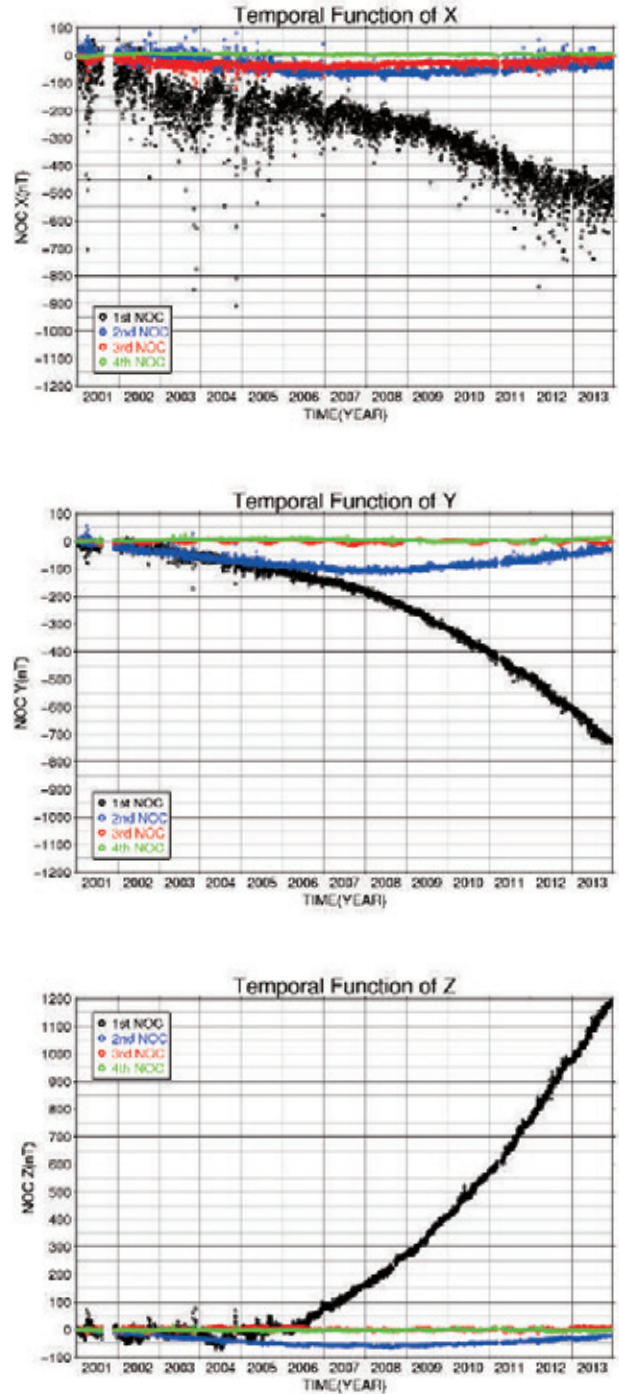


図-6 X (上段), Y (中段), Z 成分 (下段) の第四主成分までの時間関数

表-1 は、各主成分の寄与率とほぼ同義で、最大振幅が一桁になるのは、X 成分は第四主成分、Y、Z 成分は第三主成分である。時間関数の時間変化とモデル値への寄与を考慮して、X 成分は第三主成分まで、Y、Z 成分は第二主成分までを採用することが適当と判断した。ただし、X、Y 成分においては、採用する主成分と採用しない主成分の間で時間関数の時間変化の振幅がおおよそ 10 分の 1 程度になるのに対し、Z 成分

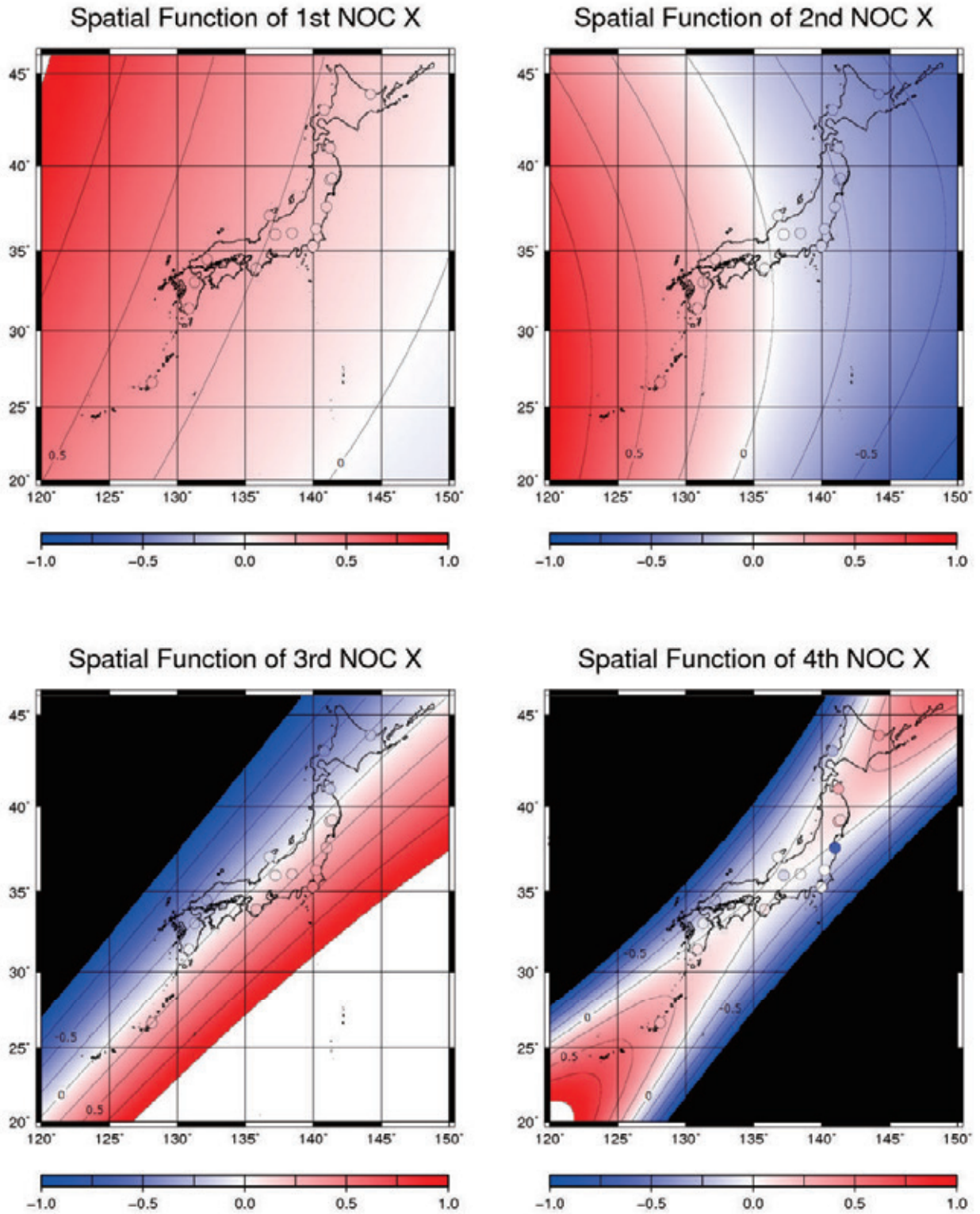


図-7 (a) X 成分の第四主成分までの空間関数の近似式（段彩図）と入力値の比較（無次元）。左上が第一主成分の空間関数、右上が第二主成分の空間関数、左下が第三主成分の空間関数、右下が第四主成分の空間関数を表し、-1 から +1 までの範囲を、赤青の二色の勾配でプロットした。+1 を超えるものは白色で、-1 を超えるものは黒色で表現される。段彩図が近似式を表し、入力値を同じスケールで描画した。第三主成分までは段彩図とプロットの整合がよく、第四主成分では大きな乖離が見られる。

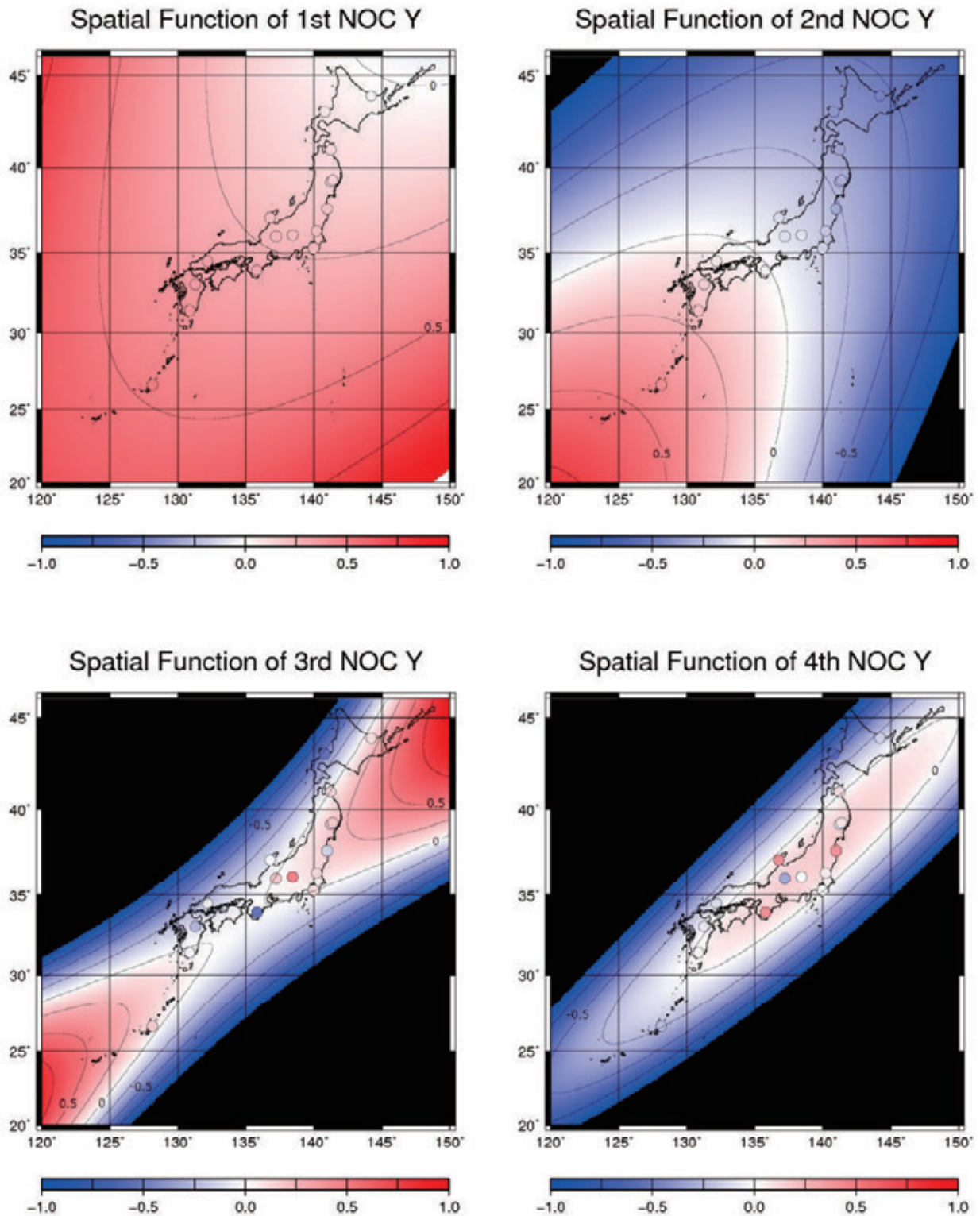


図-7 (b) Y 成分の第四主成分までの空間関数の近似式（段彩図）と入力値の比較（無次元）。左上が第一主成分の空間関数，右上が第二主成分の空間関数，左下が第三主成分の空間関数，右下が第四主成分の空間関数を表し，-1 から +1 までの範囲を，赤青の二色の勾配でプロットした。+1 を超えるものは白色で，-1 を超えるものは黒色で表現される。段彩図が近似式を表し，入力値を同じスケールで描画した。第二主成分までは段彩図とプロットの整合がよく，第三，第四主成分では大きな乖離が見られる。

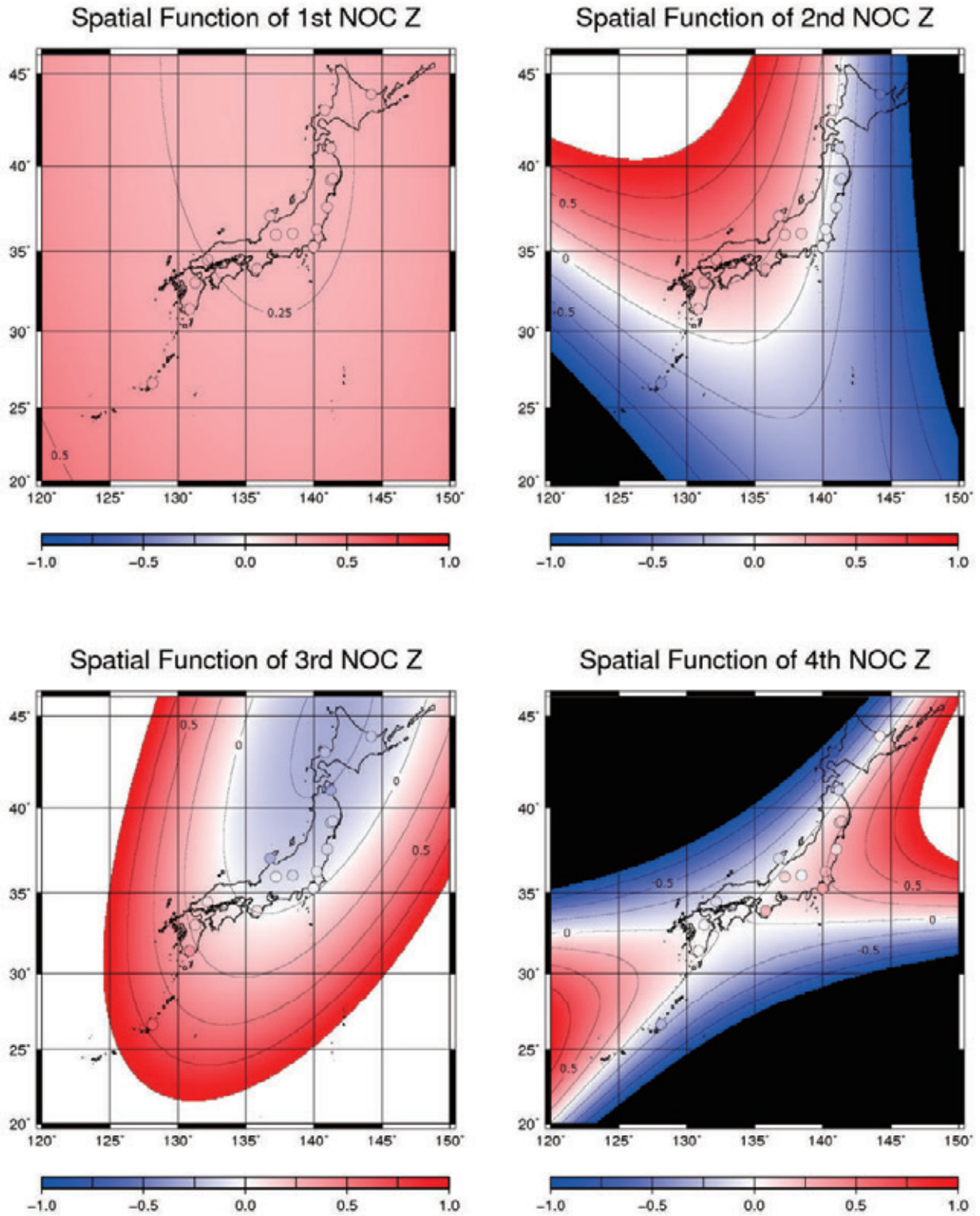


図-7 (c) Z成分の第四主成分までの空間関数の近似式(段彩図)と入力値の比較(無次元)。左上が第一主成分の空間関数, 右上が第二主成分の空間関数, 左下が第三主成分の空間関数, 右下が第四主成分の空間関数を表し, -1 から+1 までの範囲を, 赤青の二色の勾配でプロットした。+1 を超えるものは白色で, -1 を超えるものは黒色で表現される。段彩図が近似式を表し, 入力値を同じスケールで描画した。第二主成分までは段彩図とプロットの整合がよく, 第三主成分では若干の乖離が見られる。第四主成分は, 二次多項式ではうまく表現できていない。

は4分の1程度と小さいため、Z成分の第三及び第四主成分の採用の妥当性については、空間関数の近似の程度から判断することとした。

各成分ごとの空間関数を近似した二次多項式と入力値を、図-7 (a) ~ (c) に示す。背景の段彩図が近似式を、観測点の位置にプロットした色がついた円が入力値をあらわしている。段彩図と円は、値を同じスケールの赤と青の二色による勾配で描画しているため、背景の段彩図と円の色が同じ、もしくは違和感がなければ、近似式による空間関数の再現性が高く、色が異なって目立つようであれば近似式と入力値が整合していないために再現性が低い。図-7を見ると、X, Y成分は、各主成分の時間関数の振幅の変化から判断した主成分の採否と空間関数の近似の良否が整合しており、X成分は第三主成分まで、Y成分は第二主成分まで二次多項式が空間関数の振幅を違和感なく表現している。Z成分の第三及び第四主成分は、再現性は視覚的に相違ないが、第三主成分は南北に勾配を持つような分布となっているのに対して、第四主成分は東西及び南北に双曲線を描くような分布となっている。これは、第四主成分の空間関数の分布は、単純な関数で再現できないことを示唆していると考えられるため、Z成分の第四主成分は採用しないこととした。以上により、採用する主成分の次数は、X成分が第三主成分まで、Y成分が第二主成分まで、Z成分が第三主成分までとした。

6. モデルの精度検証

モデルの妥当性を評価するため、精度検証を行った。ここでは、2通りの内部評価と、モデルとは独立な観測結果と比較する外部評価の、合計3通りの検証を行った。以下にそれぞれの評価結果を示す。

6.1 モデルの内部評価

まずはモデルの内部評価として、モデル作成に用いた16点の観測点についてモデル値を作成し、13年分のモデル値と実測値の残差の時系列に対して(4)式に表すような二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error : RMSE) を計算した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (H_i^{OBS} - H_i^{Model})^2}{N}} \quad (4)$$

各点のRMSEとその全点平均値を表-2に示す。なお、八ヶ岳(YAT)については、全磁力計と変化計が別の地点に設置されているが、この二点間の全磁力値の違いが考慮されていないため、磁気値の三成分をベクトル合成した全磁力値と全磁力計から得た観測値に一定のオフセットが生じる。そのため、2001年1月

1日の時間平均値を用いて、磁気値三成分から計算した全磁力Fと、全磁力計の観測値との差を計算し、平均したものをオフセット量として全磁力に補正している。

表-2 実測値とモデル値の残差のRMSE

SITE	RMSE [nT]			
	X	Y	Z	F
MMB	2.14	2.23	3.42	2.00
AKA	2.30	4.46	3.53	2.89
YOK	2.93	2.03	2.88	2.16
ESA	3.09	2.25	1.11	1.84
MIZ	2.47	1.38	2.01	1.02
HAR	8.36	6.47	4.97	2.21
SIK	1.94	3.05	2.67	1.76
KAK	1.52	0.98	1.03	1.13
YAT	2.71	3.41	6.25	1.40
HAG	2.06	3.09	3.54	2.07
KNZ	0.92	1.80	1.79	1.39
YOS	2.00	2.40	2.05	2.07
TTK	4.62	5.40	2.21	2.14
KUJ	1.53	3.16	2.73	2.27
KNY	2.25	1.76	1.26	2.02
OKI	2.87	2.27	1.69	2.34
Ave.	2.73	2.88	2.70	1.92

内部評価の結果、全点平均値はX, Y, Z成分それぞれで3nT以下、全磁力Fで2nT以下という結果が得られた。各点ごとの値では、原町(HAR)のX, Y, Z成分のRMSEと、十津川(TTK)のX, Y成分のRMSEが大きい。残差の評価を行うため、図8-(a)~(d)に、X, Y, Z成分及び全磁力Fについて、観測値とモデル値の残差の時系列を赤線で、6.2節で行う一個抜き交差検証 (Leave-One-Out Cross Validation : LOOCV, 例えば地球統計学研究委員会, 2003) による内部評価の結果を黒線で示す。

観測環境のよい6つの観測所(MMB, ESA, MIZ, KAK, KNZ, KNY)では、Y成分で若干ばらつきがある又はZ成分で年周変動が残っている観測所があるものの、全体的に全成分において残差のばらつきは小さく、残差の時系列がほぼ一定値に見える。これは、モデル値が実測値をよく再現していると評価でき、逆に観測所の周辺ではローカルな磁気異常が見られないか、観測の系統的な誤差がないとも言える。

そのほかの観測点のいくつかでは、残差に顕著な年周変動が確認される。これは、フラックスゲート磁力計の設置環境が観測所より温度的に不安定であるために、実測値が周囲の温度変化の影響で変動していることに加え、絶対値化が年に一度しか行われていない

Difference data of X at each Observation station

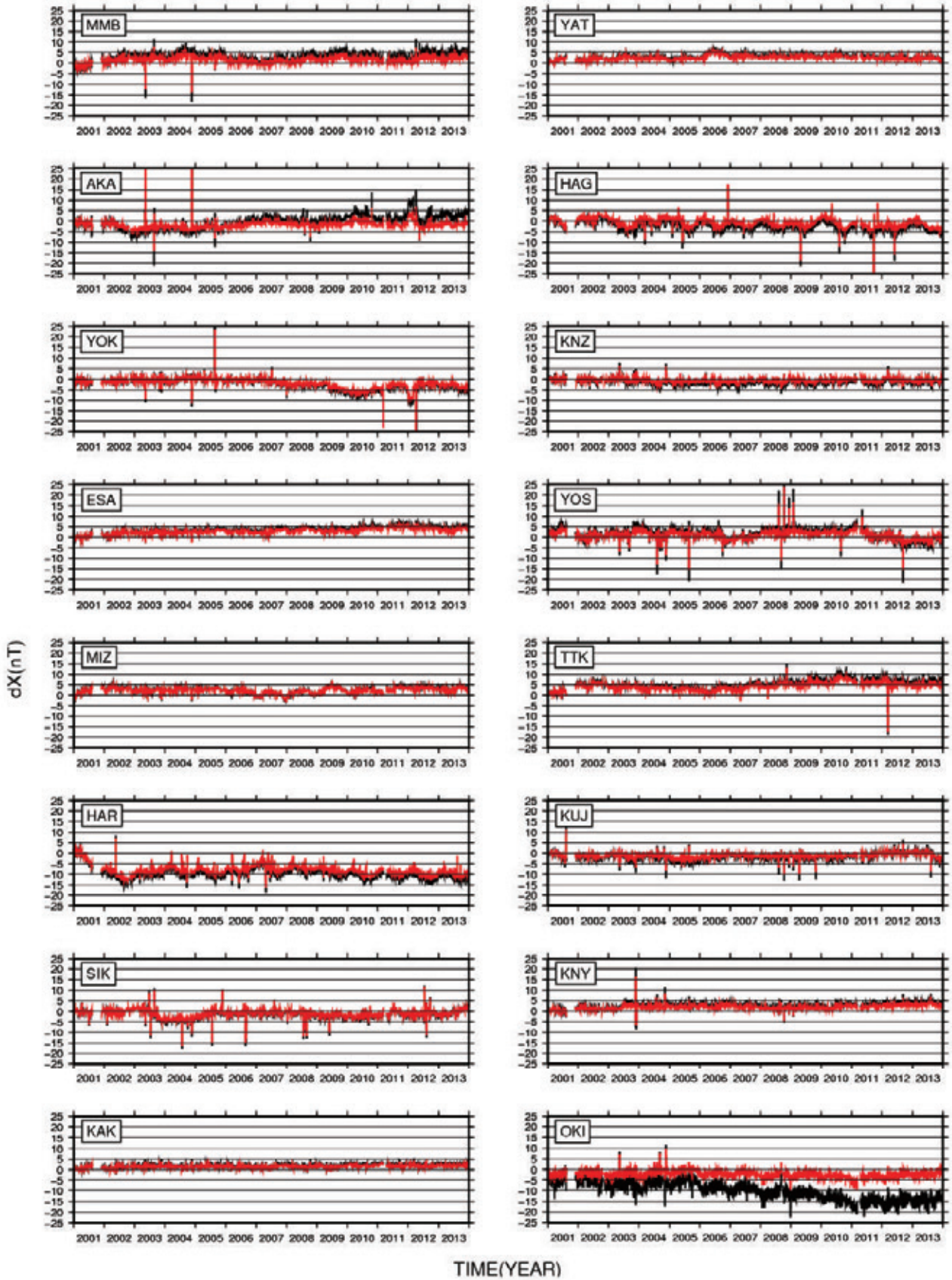


図-8 (a) 各観測点における X 成分の実測値からモデル値を差し引いた残差の時系列データ。赤線が内部評価の結果、黒線が 6.2 節の LOOCV の結果を示す。

Difference data of Y at each Observation station

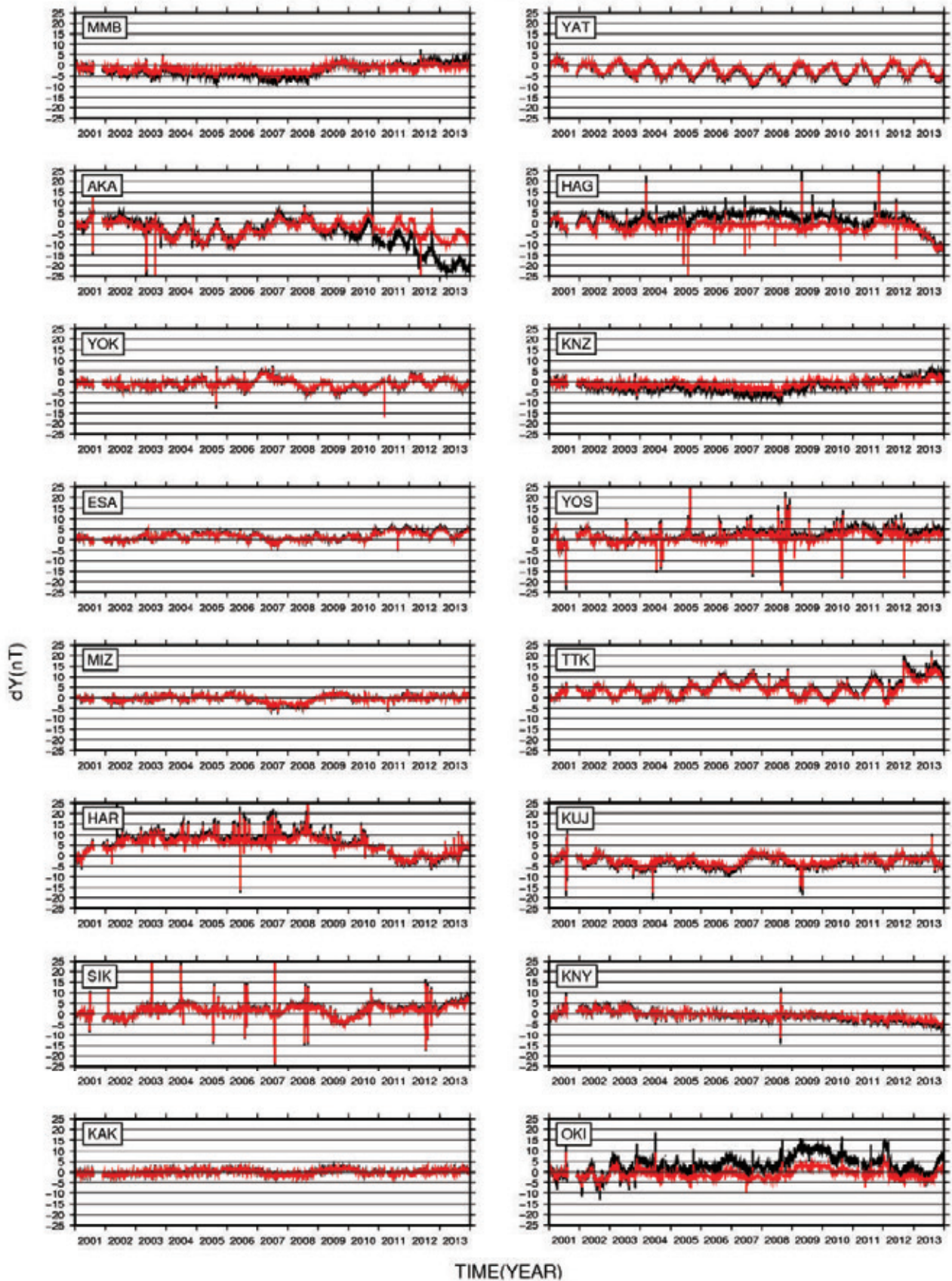


図-8 (b) 各観測点における Y 成分の実測値からモデル値を差し引いた残差の時系列データ。赤線が内部評価の結果、黒線が6.2節の LOOCV の結果を示す。

Difference data of Z at each Observation station

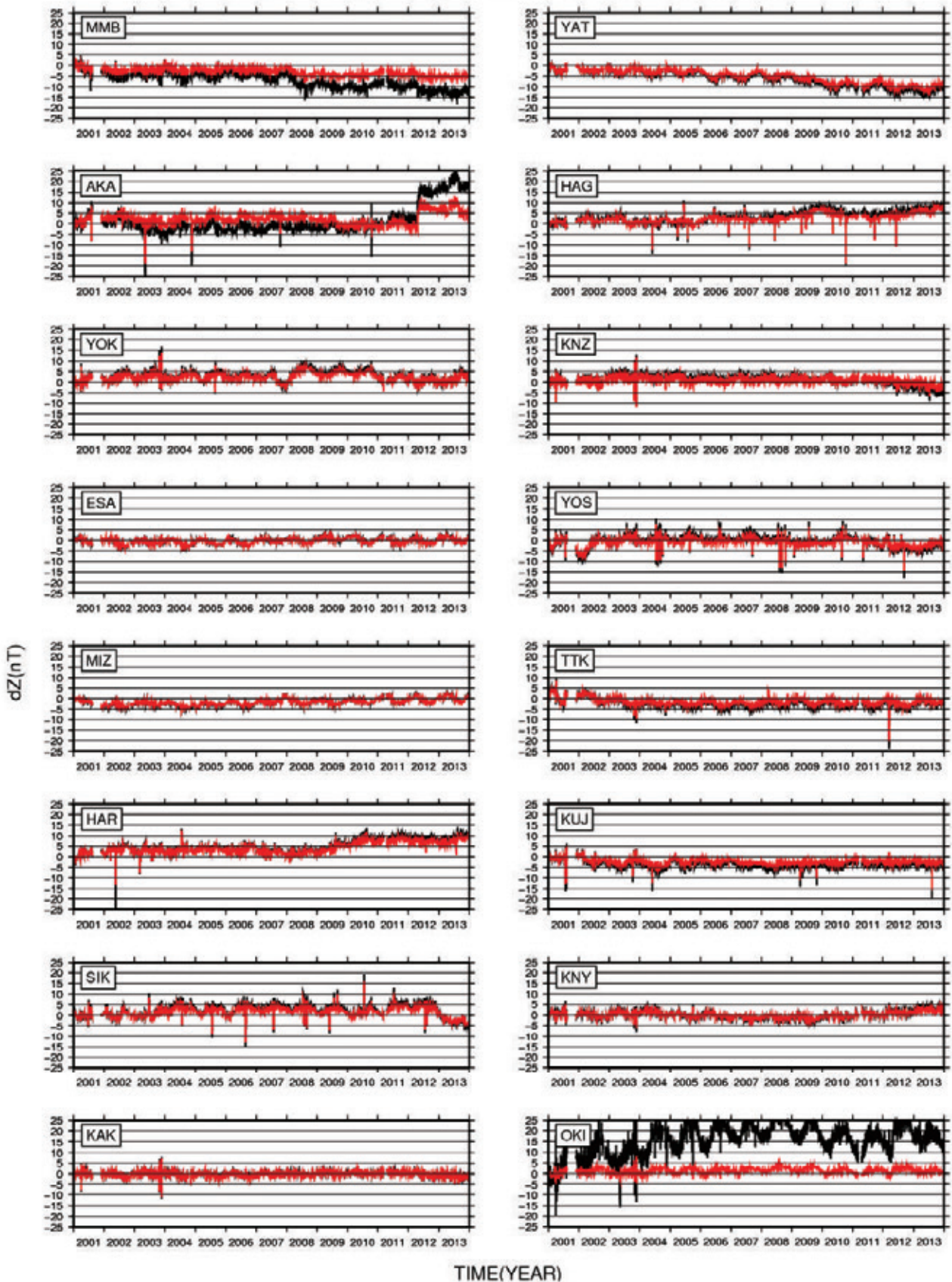


図-8 (c) 各観測点におけるZ成分の実測値からモデル値を差し引いた残差の時系列データ。赤線が内部評価の結果、黒線が6.2節のLOOCVの結果を示す。

Difference data of F at each Observation station

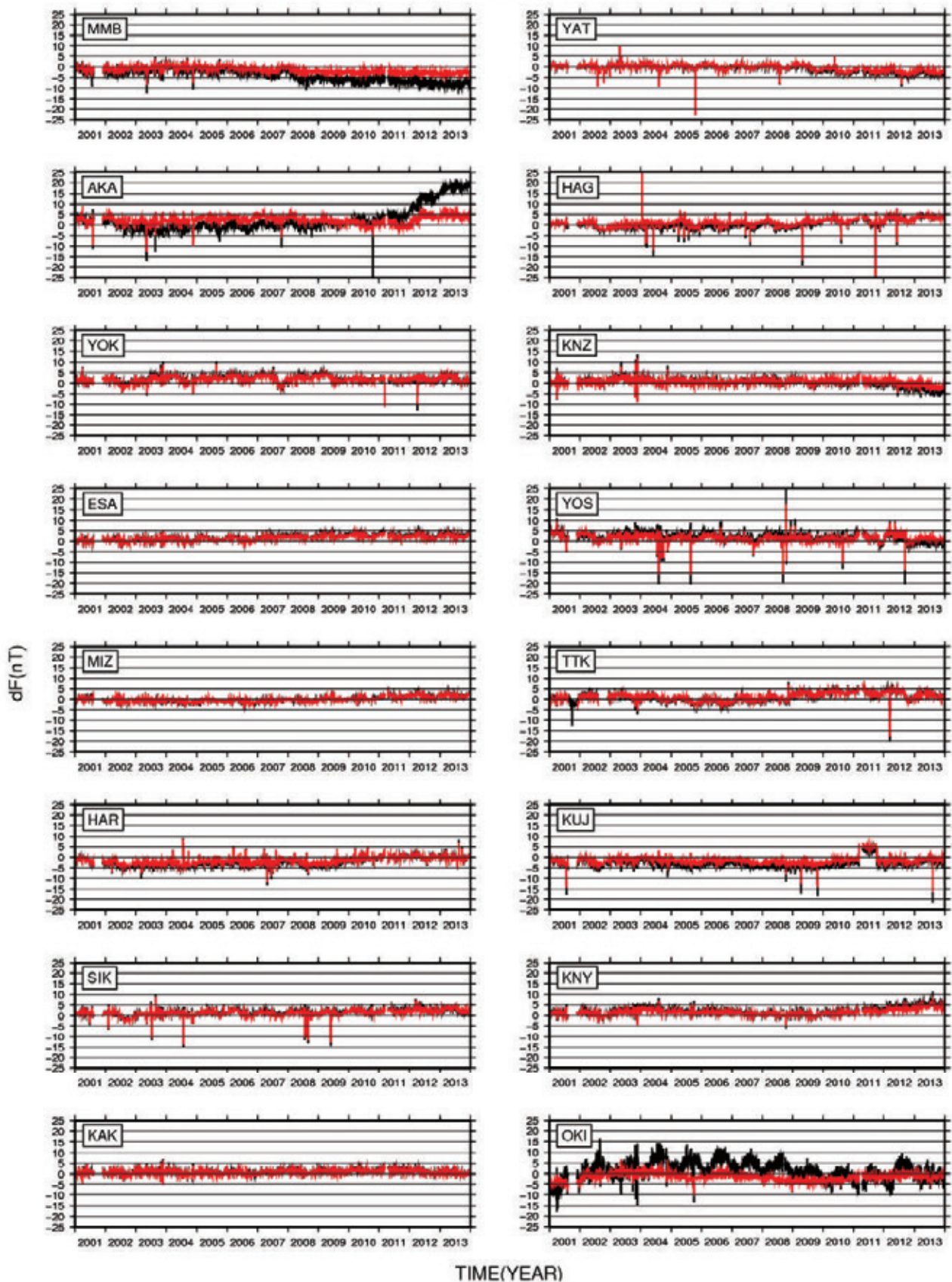


図-8 (d) 各観測点における全磁力Fの実測値からモデル値を差し引いた残差の時系列データ。赤線が内部評価の結果、黒線が6.2節のLOOCVの結果を示す。

ことによると考えられる。この年周変動は、観測点周囲の環境によって程度が異なり、観測点ごとに波の山の位置が異なるため、主成分分析の際に全国共通のシグナルとしては抽出されない。これらの温度依存のシグナルは、八ヶ岳の Y 成分が最も顕著であり、十津川の Y 成分、赤井川 (AKA) の Y 成分、萩原 (HAG) の X 成分、一部の観測点を除く全ての Z 成分に見られる。これらは観測機器の特性に依存して、実測値自体に含まれるシグナルであることから、取り除くことは難しい。なお、Y 成分の第三主成分は、年周変動を表現した成分となっているが、これは八ヶ岳と十津川の変動を表現しており、全国に共通する変動ではないため、全国の標準的な磁場変化を表現するという目的から、本モデルには使用していない。そのため、今回作成したモデルはこれらを表現する主成分を含まないモデルであり、モデルと実測値との残差には、観測機器に含まれる年周変動等の信号がより顕著に確認できるようになる。

この観点で、実測値からモデルの標準的な磁場変化を除去した図 8 を評価すると、一部の観測点データにギャップや除去しきれなかったノイズが含まれていることがわかる。スパイク状の変化は、修正後の実測値にノイズが残留している可能性を示唆している。また、例えば赤井川の Z 成分には、2012 年の前半に 10nT 程度のギャップが確認できる。また、十津川の Y 成分には、2012 年の中ごろに 10nT 程度のギャップが確認できる。これらは絶対値化の処理に原因があることが推測される。ほかにも、久住 (KUJ) の全磁力 F には、2011 年にステップ状の変化が確認できる。こちらについても同様の原因があることが推測される。

以上、16 点の連続観測点について実測値とモデル値の残差の時系列を確認した。この残差は、理想的には、実測値から標準的な磁場変化を除去した後の観測点に固有のシグナルを表した時系列である。モデルの作成には多くの点に明瞭に共通する傾向である、低次の主成分のみを採用したため、モデルが観測値を完全に再現して残差が 0 になることはないが、観測環境がよく、標準的な磁場変化を反映していることが想定される観測所については、今回作成した標準的な磁場モデルと実測値が整合的で、大きなギャップ及び年周変動、並びに、長期的なドリフトを含まない。これは、作成した磁場モデルが標準的な磁場変化を適切に表現していることを示している。一方、連続観測施設では、観測所よりも局所的な人工ノイズの影響を受けやすく、施設の構造上、温度の安定性も低い。そのため、観測所と比べて残差のばらつきが大きく、ギャップや年周変動、中長期的なドリフトが見られる。これは、連続観測施設では、標準的な磁場変化と乖離した局所的な磁場変化が観測データそのものに含まれていることと整合する。以上の結果は、今回作成したモデル

が、日本全国の標準的な磁場変動を表現した、国土地理院の磁気図に用いる目的に適したモデルであることを示している。

6.2 一個抜き交差検証

続いて、モデルの最も客観的な内部評価として、交差検証を実施した。交差検証には、一個抜き交差検証 (LOOCV) を採用した。LOOCV は、ある一つの観測点のデータを抜いてモデルを作成し、そのうえで抜いた観測点の場所におけるモデル値を計算し、観測データと比較してモデルの再現性を検証する手法である。主成分分析には、入力データセットが変わると抽出される主成分も変化する特徴があるため、厳密には採用する主成分の組合せを再検討する必要があるが、1 点を抜いたところで 15 組のデータセットが残ることから、寄与率が大きい主成分に影響は少ないと判断して、採用する主成分数は、先に決定したものと同様の数を使用した。LOOCV は、データセットの数だけ実施することができるため、このモデルでは 16 回行うことができる。1 回の検証につき、除外した点での磁場の X, Y, Z 成分それぞれの時間変化のモデルが作成され、さらにそれらをベクトル合成することで全磁力 F のモデルも作成される。以上により、全 4 成分に対し、13 年分の実測値とモデル値の差を得た。今回は数値的な指標として、13 年間に対して (4) 式に表す RMSE を計算した。計算された RMSE は、全磁力 F を含めた 4 成分に対し、観測点数分の 16 個が得られる。これらの RMSE と、その全点の平均値を表-3 に示す。

表-3 LOOCV の残差の RMSE

SITE	RMSE [nT]			
	X	Y	Z	F
MMB	3.66	3.50	7.83	4.93
AKA	3.21	10.43	6.85	6.72
YOK	3.50	2.26	3.47	2.32
ESA	3.73	2.60	1.25	2.25
MIZ	2.69	1.54	2.24	1.19
HAR	9.91	7.69	6.03	2.77
SIK	2.27	3.40	3.42	1.91
KAK	1.95	1.08	1.10	1.37
YAT	3.13	3.92	7.40	1.89
HAG	3.29	4.05	4.39	2.02
KNZ	1.66	3.41	2.42	1.80
YOS	2.88	3.37	2.61	2.65
TTK	5.58	6.25	3.08	2.25
KUJ	2.16	3.90	3.96	3.26
KNY	2.93	2.34	1.63	2.60
OKI	10.96	5.22	17.15	4.35
Ave.	4.52	4.06	4.68	2.96

表-3 と表-2 を比較すると、内部評価の結果よりも LOOCV の結果の方が全体的に RMSE の値が大きくなっていることが確認できる。RMSE の全点の平均値は、X, Y, Z 成分で 5nT 以下に、全磁力 F については、3nT 程度となった。一方、各観測点に注目すると、沖縄 (OKI) において極端に RMSE が大きい結果が得られたほか、女満別 (MMB) と赤井川でも RMSE が大きい結果が得られた。実測値とモデル値の残差の時系列の評価を行うため、図-8 (a) ~ (d) に、黒線で時系列データを示す。

図-8 を見ると、女満別、赤井川、沖縄の各成分の残差は、内部評価の結果である図中の赤線と比較して乖離する方向に傾向が大きく異なっていることがわかる。これは、配点図に見られるとおり、女満別、赤井川、沖縄をそれぞれ抜いてモデルを作成した場合、そのモデル値が外挿で作成されることによって妥当な値が推定されないことが原因と考えられる。これらの観測点をモデルに組み込むことで、観測値とモデル値の残差は図-8 の黒線から赤線へと改善されるため、これらの観測点は北海道から沖縄まで網羅した一定の精度のモデルを作成するためには不可欠な点であると言える。

表-3 及び図-8 からは、ほかにも RMSE が大きい点を確認される。モデル値の作成が外挿にならない原町の RMSE は、全磁力 F を除く三成分で大きい。原町は、設置場所が墓地の脇にあり、車輛の通過や停車が非常に多いため、連続観測施設の中では最も人工ノイズの影響を受ける点である。特に、フラックスゲート三軸磁力計の方がノイズ源と推測される駐車場に近く、X, Y, Z 成分の RMSE が大きい原因は実測値がノイズを多く含むことにあると推定される。図-8 (a) を確認すると、2001 年 1 月からおよそ半年の間、単調減少傾向が見られている。その後の残差は、大きく変化しないことから、2001 年前半に生じた観測データのドリフトによりオフセットが生じており、RMSE が過大に見積もられたのではないかと推察される。一方、Y 成分でも 2001 年前半のドリフトは起こっているが、それ以上に 2009 年から 2011 年にかけて単調減少が大きい。Z 成分でも 2001 年前半にわずかな増加が確認され、2009 年から 2010 年にかけて単調増加が見られる。この原因が、観測点周辺の環境変化によるものか、観測点付近の実際の磁場変化を示しているかは判断が難しいが、観測点固有の変化であることは明白である。なお、X 成分の時間関数の第四主成分は、ここで見られる原町の X 成分の傾向を抽出しており、図-7(a) の空間関数の入力値を見ても、原町の観測点のみ色の乖離が大きいことがわかる。このように、観測点固有の変動が主成分に抽出された場合、その主成分を採用して空間関数近似を行うことで、観測点固有のシグナルが全国に波及してしまう恐れがある。そのため、こ

の X 成分の第四主成分は、モデルに組み込まないことが望ましく、5.2 節において適切な主成分を選択したことが裏付けられた。

6.3 観測点固有ノイズの影響評価

LOOCV の結果を用いることで、6.1 節で述べた、赤井川や十津川の時系列に含まれるギャップが抽出された主成分に有意な影響を与えているかどうかを評価することができる。6.2 節では LOOCV によって除外した点のモデル値と観測値を比較することで、観測値の同化によるモデルの再現性の向上を評価したが、観測データが大きなノイズを含む場合には、データを同化することでモデルの再現性がかえって低下する可能性もある。例えば赤井川を抜いて作成したモデルで推定したほかの 16 点のモデル値を実測値と比較し、残差の RMSE を計算して、全点で作成したモデルのモデル値と実測値の残差の RMSE と比較することによって、赤井川を同化したことでモデルの再現性が向上したのか、それもと赤井川のデータに含まれるノイズがモデルの再現性を低下させたのか、検証することができる。そこで、2012 年 4 月 21 日に生じた 7nT 程度のギャップを時系列に含む赤井川の Z 成分に着目し、赤井川を除外したモデルのモデル値とほかの 16 点の実測値の比較を行った。残差の RMSE を表-4 に、残差のプロットを図-9 に示す。

表-4 赤井川、柿岡、沖縄の観測点を除外したモデルと観測値との残差の RMSE (Z 成分)

SITE	RMSE [nT]			
	AKA 除外	KAK 除外	OKI 除外	全点使 用
MMB	3.27	3.45	1.98	3.42
AKA	---	3.48	3.12	3.53
YOK	2.94	2.84	2.20	2.88
ESA	1.12	1.15	1.62	1.11
MIZ	1.58	2.04	2.89	2.01
HAR	5.07	4.96	4.38	4.97
SIK	2.63	2.65	1.97	2.67
KAK	0.92	---	0.82	1.03
YAT	6.05	6.26	6.41	6.25
HAG	3.72	3.53	3.20	3.54
KNZ	1.65	1.85	2.11	1.79
YOS	1.91	2.05	2.75	2.05
TTK	2.12	2.23	1.30	2.21
KUJ	2.62	2.73	2.27	2.73
KNY	1.06	1.26	3.97	1.26
OKI	1.42	1.68	---	1.69
Ave.	2.54	2.70	2.73	2.64

表-4には、比較のために赤井川を除外したモデルに加え、最もRMSEが小さい、即ちモデルの再現性が最もよい柿岡(KAK)を除外したモデル及び、南端に位置する沖縄を除外したモデルの結果も示した。なお、表-3で除外した点のRMSEは、データを同化しないことから再現性が悪くなることは必然で、ノイズの大きな観測データを同化した際に、そのデータが他の観測点の再現性にどのような影響を及ぼすかを検証するという趣旨にそぐわないため、除外した点のRMSEの値は表-4には示さず、平均値の計算にも用いていない。赤井川を除外したモデルでは、全点使用のモデルのRMSEと比較して、ほぼ全点でより小さいRMSEが得られており、その差は最大で0.5nT程度である。一方、柿岡を除外したモデルでは、除外によって生じたRMSEの差は0.1nT以下で、RMSEが減少するか増加するかは点によって異なる。また、沖縄を除外したモデルでは、点によってはRMSEに2.5nT以上の変化が見られる。沖縄に最も近い鹿屋(KNY)ではRMSEの増加(悪化)が最も大きく、最も遠方の女満別ではRMSEが減少(改善)している。また、平均値に着目すると、全点を使用したモデルのRMSEの平均値と比較して、赤井川を除去したモデルではRMSEが小さくなり、柿岡、沖縄を除去したモデルではRMSEが大きくなった。これは、赤井川をモデルに加えることでほかの点の再現性が低下したことを示している。この影響を確認するため、図-9に、赤井川を除外したモデルと実測値との残差を青色で、全点を使用したモデルと実測値との残差を赤色で示す。図-9から、赤井川の時系列で2012年前半に生じたギャップがほかの点の時系列に影響を及ぼしていることが確認できる。特に女満別や横浜(YOK)では、赤井川にギャップが生じた時期以降に実測値との乖離が大きくなっていく傾向が明らかである。そのほかにも志賀(SIK)、鹿野山(KNZ)、吉和(YOS)、鹿屋でも同様に残差の時系列で実測データとの乖離が大きくなる傾向が生じている。赤井川を除外したことで生じるモデル値の違いは、赤井川自身において最大となり、その値は3nT程度であるが、ほかの点においても赤井川を除外することでモデルに有意な影響があることは明確である。一方で、十津川のY成分に2012年9月に見られる12nT程度のギャップに関しては、図8(b)の十津川の残差の時系列で内部評価とLOOCVで結果が大きく変わらない。これは、ギャップを含んだ十津川がY成分の第三主成分またはそれよりも高次の主成分に支配的であるため、モデルに用いた第一、第二主成分には十津川のギャップの影響が含まれないことによる。図7(b)のY成分の第三主成分及び第四主成分の空間関数の図では、十津川の色の乖離が大きく、十津川のデータがこの成分に大きく寄与したことを示唆してい

る。このように、シグナルに対してギャップが大きいと低次の主成分においてギャップが抽出されることとなり、点固有のノイズである時系列のギャップがモデルに影響を及ぼす可能性が高くなる。採用した次数の主成分では十津川のノイズの影響は及んでいないと考えられるが、赤井川は影響を及ぼしていると考えられる。実際の磁場の時空間変化をより適切に表現したよいモデルを作成するためには、データのクリーニングによってこれらのギャップを取り除くことが重要である。

2012年4月に赤井川の時系列に見られるギャップは、明らかにモデル全体の再現性を低下させていることから、より精度のよいモデルを作成するためには何らかの処理を行う必要がある。赤井川のデータを除外してモデルを作成することも選択肢の一つではあるが、ギャップが生じた2012年以降の絶対観測の値が安定しており、2012年に観測点周辺に磁気値にギャップを生じたなんらかの環境変化が実際にあった可能性が非常に高いことから、ギャップの変化分を2012年4月21日以降の時系列に加え、スムーズな時系列データに補正してモデル作成に用いることで、赤井川のデータを活用することが適切と思われる。この処理によって2014年4月21以降の値は、実際の磁気値と異なる値をモデルに用いることとなるが、主成分分析で作成するのは磁気値の時空間変化であるため、この処理は目的に対して適切な処理であると考えられる。

また、南側の端点のデータを加えることによる影響を評価するため、沖縄を除外した場合についても同様に評価を行った。図-10に、沖縄を除外したモデルと実測値の残差を青色で、全点を使用したモデルと実測値の残差を赤色で示す。図-10は、表-4の結果と総合的で、女満別及び鹿屋において顕著な差が見られるが、そのほかの点では大きな違いが見られない。顕著な差が見られる2点では、赤井川を除外した際に見られた、ギャップと同期して生じる時系列の変化と異なり、モデル作成の全期間にわたって残差の時系列がシフトするような変化が生じていることが確認できる。沖縄を加えることで、特に女満別では1.5nT程度再現性が低下するが、鹿屋では2.7nT程度再現性が向上しており、全点の平均で評価すると0.1nT程度の低下でほぼ変わらない結果となる。一方で、表-3のLOOCVの結果では、沖縄を除外することで沖縄自身の再現性が15nTも悪化することから、沖縄を加えることによって生じるモデル全体の再現性の若干の低下と比べて、沖縄を追加することによる沖縄周辺の著しい再現性の向上の方がはるかにモデル改善の効果が大きいことがわかる。沖縄を加えることで沖縄地域までより再現性の高いモデルを作成することができることから、沖縄をモデルに加えることは適切であると評価できる。

Difference data of Z at each Observation station using Leave out AKA model

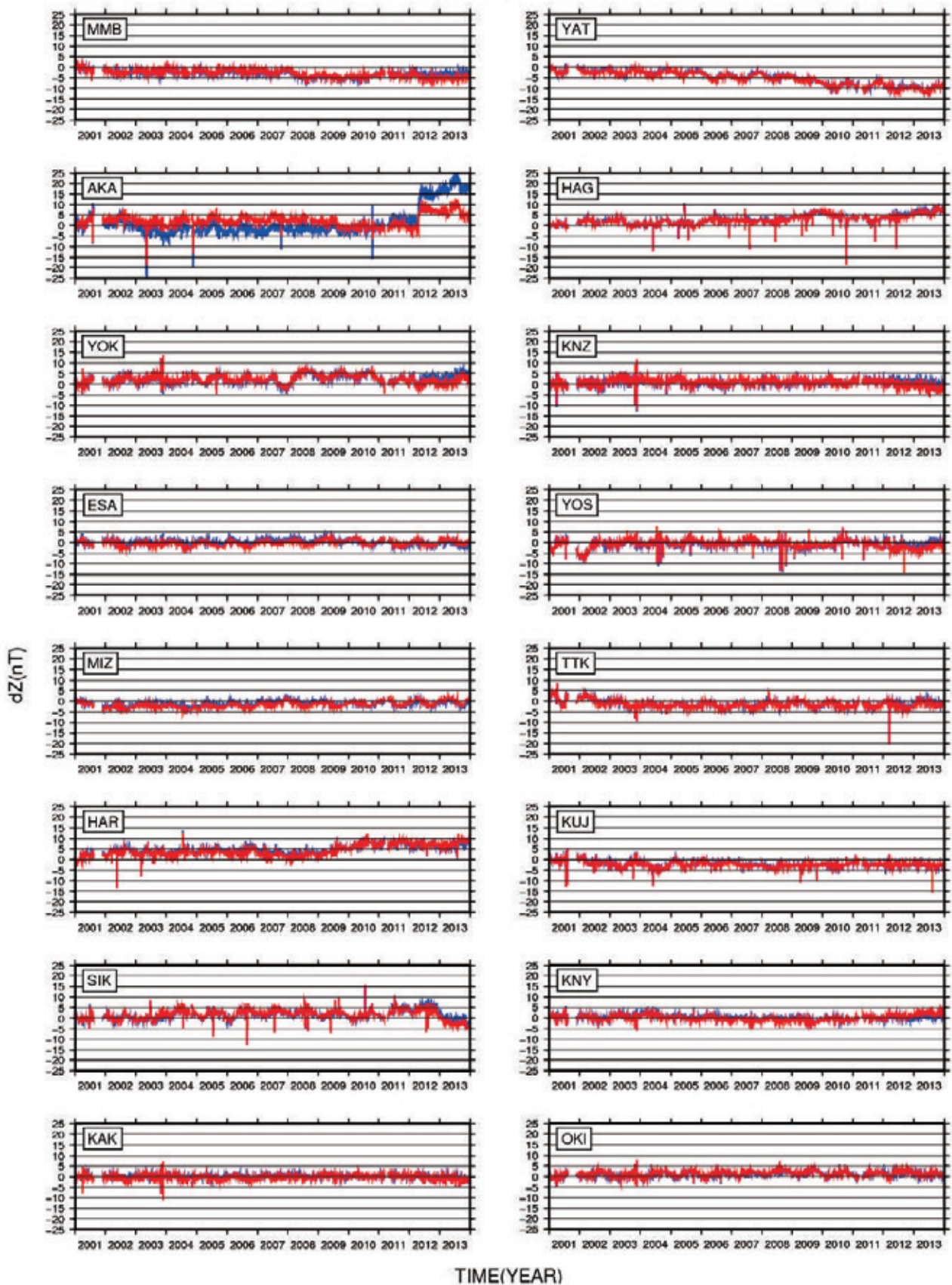


図9 各観測点における鉛直分力Zの実測値からモデル値を差し引いた残差の時系列データ。
赤線が内部評価（全点使用モデル）の結果、青線が赤井川（AKA）を除外したモデルの結果を示す。

Difference data of Z at each Observation station using Leave out OKI model

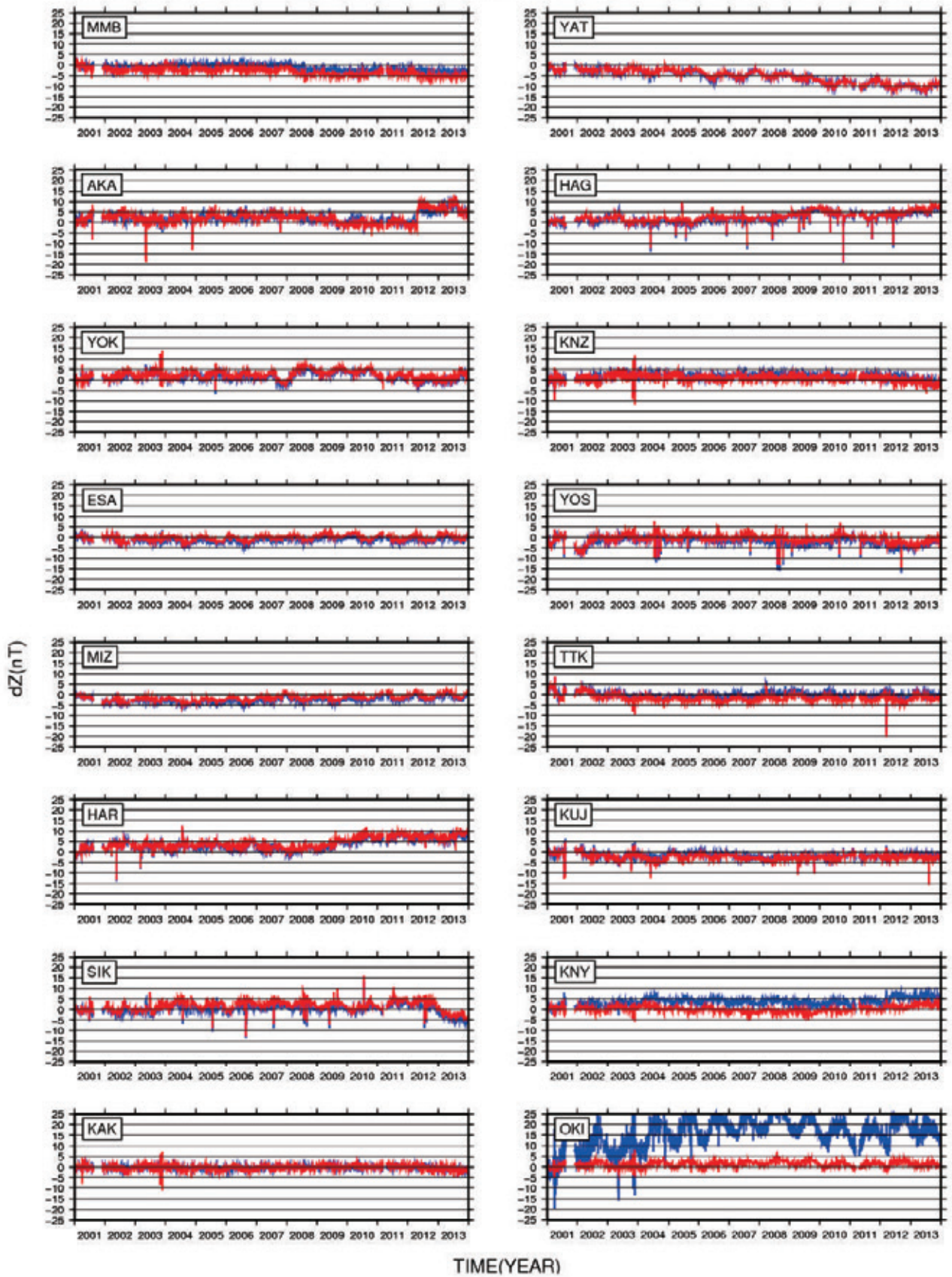


図-10 各観測点における鉛直分力Zの実測値からモデル値を差し引いた残差の時系列データ。
赤線が内部評価（全点使用モデル）の結果、青線が沖縄（OKI）を除外したモデルの結果を示す。

6.4 一等磁気測量成果を用いた精度検証

続いて、外部評価として、繰り返し観測が実施された一等磁気測量の成果を用いた精度検証を実施する。モデル作成期間中に、2回以上の観測が実施されていれば、1回目の観測日を基準エポックとしてベクトルモデルから日平均値モデルを作成し、2回目以降の観測

測に対して、観測値とモデル値を直接比較することが可能である。比較が可能な観測点は、全部で13点であった(図-4の赤丸の観測点)。その中から、例として図-11に一等磁気点(72)中村、図-12に一等磁気点(12)礼文島における日平均値モデルと一等磁気測量の実測値を同時にプロットした図を示す。

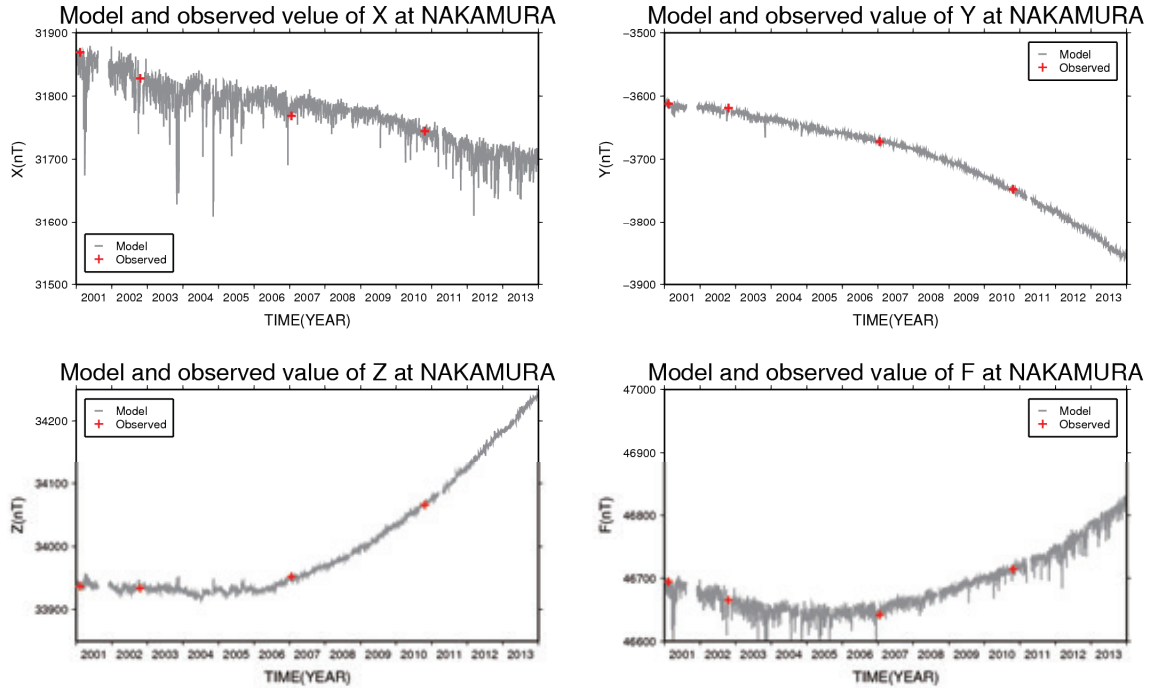


図-11 一等磁気点「中村」における日平均値モデル（灰色の線）と一等磁気測量成果値（十字）

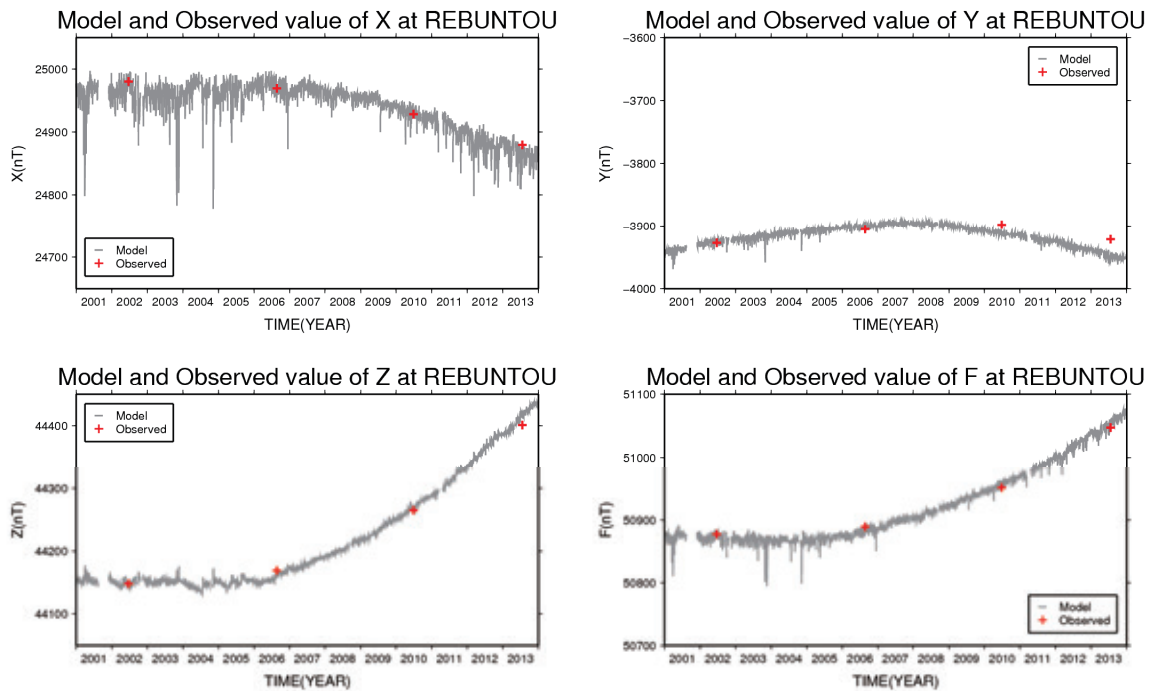


図-12 一等磁気点「礼文島」における日平均値モデル（灰色の線）と一等磁気測量成果値（十字）

図-11 の日平均値モデルは、2001年2月9日の一等磁気測量成果(図中、2001年の十字記号)を基準エポックとし、計算した変化モデルを加えて2001年1月1日から2013年12月31日の期間を作成したものである。X、Y、Z成分それぞれについて全期間のモデル値を計算し、全磁力Fは三成分のベクトル合成によって計算した。図-11では、基準エポック(2001年)の後に3回の繰り返し観測を実施したため、3回分の観測について、モデルと実測値の直接比較が可能である。

繰り返し観測の回数は観測点によって1~3回と異なるが、比較の対象となる2回目以降の観測数は、合計で25回であった。これらの25回のデータについて、モデルと成果との差を計算した結果を表-5に示す。全25組の単純差データのRMSEを計算したところ、X成分で5nT、Y成分で10nT、Z成分で4nT、全磁力Fで4.5nT程度という結果が得られた。6.2節のLOOCVで得られた結果と比較すると、X、Z成分、全磁力Fは

同程度の範囲で整合しているが、Y成分のみ倍以上の残差が見られ、特に(12)礼文島では、図-12に示すように、経年的にY成分の差が広がっている。

礼文島は日本の中で最北に位置する磁気点であり、礼文島のモデル値は外挿によって推定される。そのため、入力データに礼文島の地磁気変化の情報が含まれないことによって、変化傾向を再現できない可能性が高い。図-12では特にY成分の乖離が大きく、モデルでは2007年から2008年をピークとしてY成分が減少傾向に転じているが、実測値から判断される変化は、2010年頃までは増加傾向にあり、その後減少傾向に転じるという結果である。Y成分の日本全国の観測点の経年変化を比較するため、入力データである連続観測点16点全点におけるY成分の時系列データを、緯度の値の順に上から並べたものを図-13に示す。なお、この時系列データは絶対値ではなく相対値としてプロットしている。

表-5 一等磁気測量成果を用いたモデルと成果の差

SITE	EPOCH	DATE	dX [nT]	dY [nT]	dZ [nT]	dF [nT]
(4)川之江	2001/01/29	2003/10/03	-1.69	6.15	-0.17	-1.95
		2005/09/05	-4.41	-0.97	-0.96	-3.69
		2009/11/20	-6.44	-2.02	1.13	-2.84
(6)浜松	2004/07/24	2008/05/14	-0.53	0.16	-0.34	-0.18
(12)礼文島	2002/06/21	2006/08/24	-1.06	-4.78	3.76	4.79
		2010/06/26	3.06	16.68	-1.85	-1.28
		2013/07/18	4.60	26.68	-13.38	-11.83
(16)旭川	2001/06/21	2007/10/15	-0.07	1.11	3.93	2.89
(20)帯広	2002/06/13	2004/06/15	2.33	2.22	-1.16	0.28
		2011/07/22	4.28	22.14	-0.36	-0.29
(29)大館	2003/06/11	2007/08/23	1.61	-2.39	-0.34	0.59
(33)石巻	2001/06/03	2004/05/28	0.51	-0.71	-0.63	-0.39
		2009/06/16	-0.02	-3.77	2.72	2.43
(34)酒田	2001/06/11	2007/07/14	-0.99	-0.74	3.56	2.48
(39)十日町	2002/05/15	2006/05/24	-1.04	1.85	-2.40	-3.07
		2010/05/18	-4.22	13.84	-8.78	-10.63
		2012/06/21	-2.12	3.58	-9.06	-8.37
(58)鳥取	2002/09/28	2008/11/12	-0.68	13.64	2.86	0.29
(63)山口	2008/10/11	2011/10/26	11.12	11.74	-2.31	3.88
		2013/10/22	14.93	16.73	-0.23	7.67
(64)長崎	2005/10/26	2008/10/21	7.86	-4.37	-3.16	3.40
		2011/10/18	4.66	0.32	-2.81	0.42
(72)中村	2001/02/09	2002/10/21	-2.67	3.86	-0.32	-2.43
		2007/01/18	-4.69	-0.16	0.76	-2.44
		2010/10/22	-1.29	1.65	0.40	-1.31
RMSE			4.93	9.84	4.16	4.48

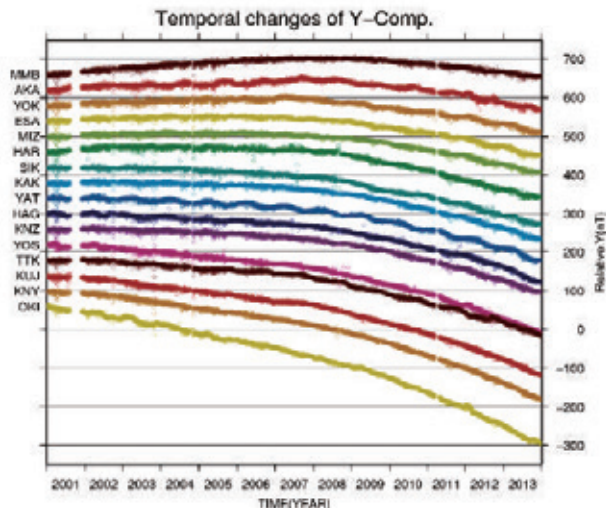


図-13 モデル作成に用いた観測点における、Y成分の時系列データ

図-13 では、北に位置する観測点ほど、近年の減少傾向の前に Y 成分が一度増加する傾向が強く見られ、南の観測点ほど単調減少する傾向が強く見られる。この Y 成分の変化の空間パターンは、磁極の移動に伴う変化を反映していると考えられており (British Geological Survey のホームページを参照)、磁極が北にあることから、北の観測点ほど影響を受けやすい。礼文島のモデルと観測値の乖離はこのような観測点配置により、再現できないことに起因する可能性が高いと考えられる。この外部評価の結果から、北海道の北端まで正確な磁場分布を反映した磁気図を作成するためには、礼文島での繰り返し観測とそのデータを同化したモデル作成が必須となることが示された。礼文島でのモデルと実測値の乖離は、11 年間で 27nT に達しており、礼文島の繰り返し観測のデータをモデル作成に用いない場合、北海道の北部では、磁気図に年間 2.4nT の誤差が累積する。

一方で、Y 成分は偏角成分に対応する成分であり、絶対観測の際に方位角観測を介して偏角が求められるため、観測の回数、すなわち誤差要因が一回多く、誤差の影響を受けやすい観測量である。そのため、Y 成分は、ほかの成分と比較して観測誤差が大きい可能性は否定できない。なお、礼文島におけるこの差を偏角 D の値に変換すると、10 年間でおよそ 3 分となる。観測時には秒単位で偏角値を算出するため、3 分の誤差はかなり大きいことがわかるが、全国を対象とした磁気図においては、コンター間隔を 10 分としているため、その半分以下の誤差でしかないことがわかる。磁気図を描画する際に大勢としては影響が出ないものと思われるが、誤差が累積することは望ましくないため、定期的に較正することが必要である。

このほか、一等磁気測量に含まれる誤差要因に、観測環境の変化がある。例えば、(39) 十日町の結果を見

ると、3 回の比較のうち、2 回目の 2010 年 5 月の Y 成分の差だけ、飛び抜けて大きな残差を示している。この原因は、観測時、観測点付近にノイズ源があったことが確認されている。

(63) 山口においては、X, Y 成分の残差が大きい。2 回にわたって残差が大きいので、基準とした観測時に何らかの観測誤差が含まれた可能性が否定できない。

以上から、モデルと成果との差の RMSE が大きく、6.2 節の LOOCV で得られた結果と整合しない場合の要因は、モデル領域の端で観測データがない場合と一等磁気測量の観測誤差による場合の 2 つに分類される。繰り返し観測のデータを同化したモデルを作成する際は、一等磁気測量の観測の記録を丁寧に確認する、検測を行うなど慎重に評価する必要がある。

6.5 精度検証のまとめ

今回行った内部評価によるデータの再現性は、X, Y, Z 各成分で 3nT 程度、全磁力 F で 2nT 程度となった。

LOOCV により評価したデータの再現性は、X, Y, Z 各成分で 5nT 程度、全磁力 F で 3nT 程度となった。

一等磁気測量成果を用いた外部評価において、外れ値と思われるものも含めて精度を評価した結果、Y 成分のみ 10nT, X, Z 成分及び全磁力 F では 5nT 程度となった。

内部評価の結果がほかの検証結果よりも優れていることは妥当であり、モデルが正しく機能していることを示している。一方で LOOCV と一等磁気測量成果を用いた外部評価の結果は整合的であり、これが直接今回作成したモデルの精度と呼んで差し支えない。X, Z 成分及び全磁力 F では 5nT 程度、Y 成分では 10nT 程度の精度を達成したと考えられる。

7. まとめ

国土地理院、気象庁及び東京大学地震研究所の地磁気ベクトル連続観測データから、主成分分析を用いて地磁気変化モデルの作成を試みた。13 年分の連続観測データから日平均値の変化モデルを作成し、任意の日の地磁気各成分が既知の場合に、変化モデルを加えることで 13 年分の絶対値モデルを作成することが可能となった。精度検証の結果として、X, Z 成分では 5nT 程度、Y 成分では 10nT 程度の精度を達成した。また、三成分のベクトル合成から計算した全磁力 F は、5nT 程度の精度を達成した。モデル領域の端では、観測データがないとモデルの再現性が大きく低下することから、縁辺まで精度のよいモデルを作成するためには、モデル領域の縁辺で観測を継続する必要がある。特に女満別 (MMB)、赤井川 (AKA)、沖縄 (OKI) における連続観測、一等磁気点「礼文島」の繰り返し観測の

成果については、モデルに同化する必要がある。使用データにはノイズが完全に除去できていない点があり、そのノイズがモデル全体の再現性の低下につながるため、それらの点については、補正量を与えて時系列のギャップを取り除く、データに絶対値を与えた絶対観測を見直すなど、個別に適切なノイズ修正を施す必要がある。ノイズが適切に修正されることにより、より信頼性の高いモデルの作成が可能となる。

本手法で開発したモデルを用いることで、より再現性の高い全国の地磁気の変化成分のモデル化が可能となり、精度の良い磁気図の作成に貢献することができる。さらに、全国を網羅する標準的な地磁気の時間変化を提供できることから、様々な地磁気観測の参照データとして利用できる。例えば、通常の火山帯における全磁力観測では、火山帯にある観測点と、参照点として火山の影響を受けない観測点との合計2か所での観測が必要となる。しかし、本モデルを使用すると、火山帯の観測点の全磁力のモデルを直接作成することが可能となるため、参照点の設置が不要となり、作業効率化にも貢献することができる。

謝辞

本開発にあたっては、気象庁地磁気観測所の観測データを使用させていただきました。また、東京大学地震研究所の八ヶ岳地磁気観測所の観測データを使用させていただきました。また、東京大学地震研究所小山崇夫助教、小河勉助教には、数々の技術的助言をいただきました。国土地理院地理地殻活動研究センターの宗包浩志宇宙測地研究室長、川元智司主任研究官には、解析手法についての助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。主成分分析や最小二乗法の解析には、R (Ihaka and Gentleman, 1996) を使用しました。図の作成には、The Generic Mapping Tools (GMT) ソフトウェア (Wessel and Smith, 1998) を使用しました。海岸線の情報は、国土地理院の基盤地図情報を使用しました。

(公開日：平成27年11月26日)

参考文献

- British Geological Survey : Magnetic Poles, <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/poles.html> (accessed 24 Jun. 2015).
- 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
- Fujiwara S., T. Nishiki, H. Shirai, H. Hamazaki, and V. P. Glovkov (2001) : Modeling the daily mean values of regional geomagnetic total field changes in Japan, *Earth Planets Space*, 53, 69-73.
- Geographical Survey Institute (1973) : Magnetic Charts for the Epoch 1970.0, *Bulletin GSI*, 19, 1, 131-137.
- Ihaka R., R. Gentleman (1996) : R: A Language for Data Analysis and Graphics, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Volume 5, Issue 3, 299-314.
- INTERMAGNET : Technical Reference Manual Version 4.6 (2012), http://www.intermagnet.org/publications/intermag_4-6.pdf (accessed 24 Jun. 2015).
- Ji X., M. Utsugi, H. Shirai, A. Suzuki, J. He, S. Fujiwara, and Y. Fukuzaki (2006) : Modeling of spatial-temporal changes of the geomagnetic field in Japan, *Earth Planets Space*, 58, 757-763.
- 植田勲, 阿部聡, 後藤勝弘, 海老名頼利, 石倉信広, 田上節雄 (2013) : 磁気図 2010.0 年値の作成, *国土地理院時報*, 123, 9-19.
- Wessel, P., W. H. F. Smith (1998) : New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 79, 579.
- World Data Center for Geomagnetism, Kyoto : 地磁気一分値プロット／データ出力, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/mdplt/index-j.html> (accessed 24 Jun. 2015).