

磁気図 2015.0 年値の作成 Geomagnetic Charts of Japan for the epoch 2015.0

測地部 高橋伸也・菅原安宏・松尾健一・矢萩智裕

Geodetic Department Shinya TAKAHASHI, Yasuhiro SUGAWARA, Kenichi MATSUO
and Toshihiro YAHAGI

測地観測センター 阿部聡

Geodetic Observation Center Satoshi ABE

要 旨

国土地理院では、日本全国を網羅する地形図を作成している。地形図はデジタル化が進んでシームレスとなり、GNSS 測位を用いることで地形図上における自分の場所を容易に知ることが可能となった。また、方角は方位磁針や磁気センサーを用いることで、磁石の指す北である「磁北」を基準とした自分の向きが分かる。ところが、これだけでは地形図上における自分の向きを正確に知ることができない。これは「磁北」と地形図の北である「真北」がずれていることが原因である。地形図上における自分の向きを正確に知るには、「磁北」と「真北」のずれ（偏角）を補正しなければならない。様々な情報が電子化された現代社会においても偏角は依然として重要な地理空間情報の一つであり、時間的及び空間的に変化する偏角情報を鮮度良く社会に提供するためには地磁気測量に基づいた正確な偏角を更新し続ける必要がある。

地磁気とは、地球が持つ固有の磁場のことであり、これは時間的にも空間的にも常に変化している。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。その成果として、日本全国の磁場分布を図に示した「磁気図」を定期的に更新している。2016年12月1日には、最新の磁気図として、2015年1月1日0時（協定世界時）における磁場の分布を表した「磁気図 2015.0 年値」を作成し、公表した。

本稿では、磁気図 2015.0 年値の作成手法や精度評価について報告する。

1. はじめに

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、全国の磁場分布の変化を継続して把握するには、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「連続観測点」という。）において、地磁気の連続観測を実施している。連続観測点の密度が低い地域では、一等磁気測量を複数年ごとに繰り返し実

施しており、これらの観測結果をまとめて、日本全国の磁場分布を地図に示した「磁気図」を定期的に作成し、公表している。1973年に磁場5成分（偏角、伏角、水平分力、鉛直分力、全磁力）の磁気図1970.0年値を作成して以来、これまで10年ごとに更新を行ってきたが、2015.0年値からは国際的な磁場モデルの一つである国際標準地球磁場（International Geomagnetic Reference Field, 以下「IGRF-12」という。）（Thébault et al., 2015）の更新間隔に合わせて、5年ごとに更新することとした。

地磁気は時間的に変化するため、磁気図はyyyy年1月1日0時（UTC）時点の地磁気の状態を表し、yyyy.0年値と呼んでいる。磁気図2015.0年値であれば、日本国内における2015年1月1日0時（UTC）時点の磁場5成分の分布を示した図を意味する。磁気図のほかにも、偏角一覧図や偏角一覧のテキストデータなどをホームページから一般に無償で公開しているが、これらはいずれも、2015年1月1日0時（UTC）時点における値である。

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.

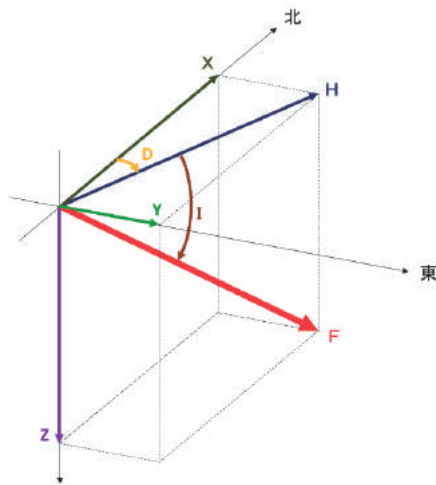


図-1 地磁気の各成分

3. 磁気図作成手法

3.1 磁気図作成に使用した観測点

磁気図 2015.0 年値の作成に使用した観測点の配点図を図-2 に, 図-2 の凡例を表-1 に示す.

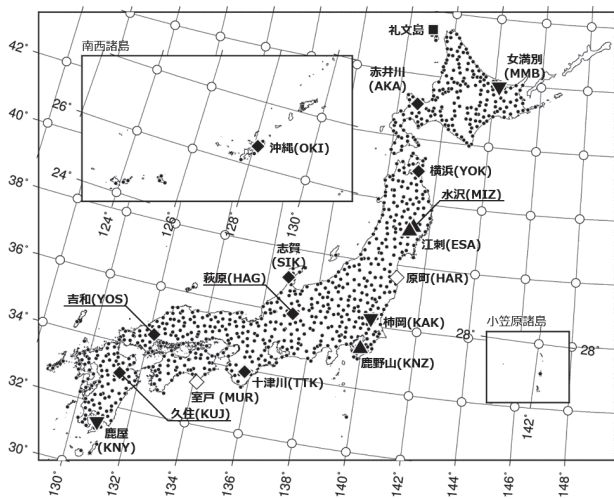


図-2 磁気図 2015.0 年値に使用した観測点の配点図

表-1 観測点の配点図 (図-2) の凡例

凡例	分類	種別	観測点の概要
▲ ▼ ◆	A	測地観測所 地磁気観測所 連続観測点	国土地理院 (3 点) 気象庁 (3 点) 国土地理院 (8 点)
◇	B	連続観測点	国土地理院 (2 点)
■	C	一等磁気点	礼文島 (1 点)
●	D	一等磁気点 二等磁気点	礼文島以外全点 (97 点) 全点 (772 点)
○	E	海上点	海上における経度緯度 2 度間隔の点 (230 点)

4 章で説明する地磁気時空間モデル (以下「モデル」という.) の作成には, 分類 A, C の観測データを使用した. 5 章で説明するグリッドデータの作成には, 分類 A, B の連続観測データ, 分類 C, D におけるモデルの値, 分類 E における IGRF-12 の値を使用した. このうち, 分類 E の海上点は, 沿岸部や島嶼地域における精度低下の軽減及び陸域と海域の磁場分布をシームレスに接続させるために使用した.

なお, 全国に 10 か所ある連続観測点のうち, 室戸 (MUR) と原町 (HAR) は 2004 年と 2015 年にそれぞれ移転しており, モデル作成に必要なデータ量が不足していることから, 分類 A には含まず, 分類 B としてグリッドデータの作成にのみ使用している.

3.2 磁気図作成フローチャート

磁気図作成のフローチャートを図-3 に示す. 磁気図作成は, モデル作成と磁気図描画の 2 つの工程に分けられる.

細部の工程は, 阿部・宮原 (2015a, b) で詳細に解説されている. 磁気図 2015.0 年値の作成では, モデル作成工程において, 一等磁気点の同化及びモデルを活用したデータクリーニングの 2 つの工程を新たに追加した. 一等磁気点の同化は 4.3 節, データクリーニングは 4.4 節で詳しく述べる.

4. 地磁気時空間モデル作成

4.1 地磁気時空間モデル作成手法

磁気図 2015.0 年値の作成では, 地磁気連続観測データから主成分分析を用いて磁場の時空間変化をモデル化した地磁気時空間モデルを使用した. この手法は Fujiwara et al. (2001) や Ji et al. (2006) が用いた手法であり, 磁気図 2010.0 年値の作成 (植田ほか, 2013) でも使われている. その後, 阿部・宮原 (2015a) によってより細かな時間分解能をもつモデルが開発されている.

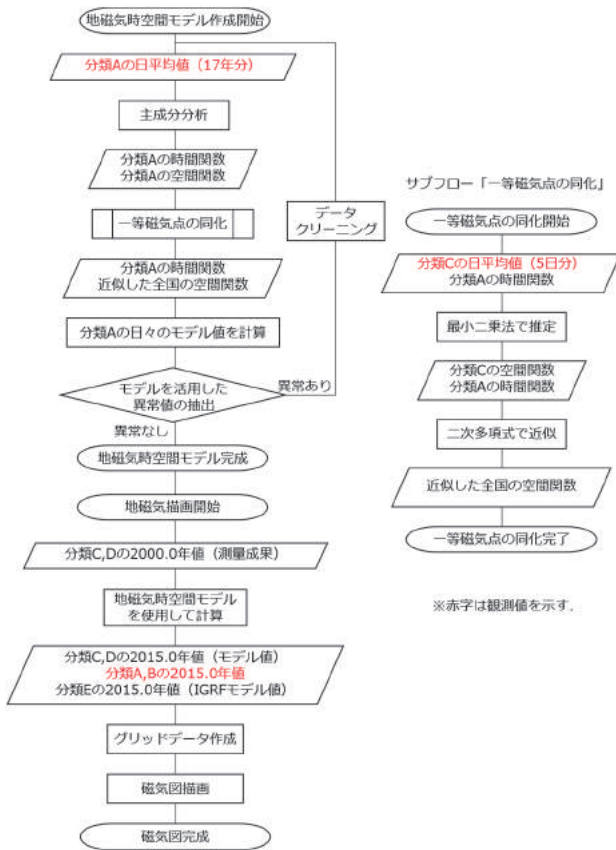


図-3 磁気図作成のフローチャート

阿部・宮原 (2015a) と異なる点は、扱うデータセットの違いと、一等磁気点の同化を行う点である。

このモデルは、地磁気の時間変化と空間変化を互いに独立した変化として扱うことで、(1) 式に示すとおり連続観測を行っている分類 A の観測点の時系列データから、全国の地磁気の時空間変化を、主成分分析によって場所に依存しない共通の時間変化成分（時間関数）に各点におけるその強度（空間関数）を乗じたものの和で表現する変化量モデルである。(1) 式において、 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す。また、 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、 k は主成分の次数、 t は時間（日単位）を表す。

$$H_j(\varphi_i, \lambda_i, t) - H_j(\varphi_i, \lambda_i, 2000.0) = \sum_k X_j^k(\varphi_i, \lambda_i) \cdot T_j^k(t) \quad (1)$$

モデルの精度評価では、国内では北に向かうほど偏角が磁極の移動に伴う磁場変化の影響を受けやすいことが指摘されている。特に、外挿によりモデル値が推定される北海道北部では、観測値との乖離が年々増加している（阿部・宮原, 2015a）。そのため、磁気図 2015.0 年値では、モデル作成には使用していないデータである最北の一等磁気点「礼文島」の一等磁気測量

の結果をモデルに組み込むことで、北海道北部における精度低下の軽減を図った。この工程を一等磁気点の同化と呼ぶ。

4.2 主成分分析

図-3 に示した主成分分析には、表-1 の分類 A のデータを使用した。使用したデータセットの詳細を表-2 に示す。

表-2 主成分分析に使用した地磁気データセット

データ期間	1999年1月1日～2015年12月31日
データ種別	日平均値（時間平均値から計算） 直交三成分（X, Y, Z 成分） 1999年1月1日からの変化量
観測点数	14点（表-1 の分類 A を参照）

表-2 のデータを用いて、X, Y, Z 成分についてそれぞれ独立に主成分分析を行った。主成分分析では、主成分は寄与率が高いものから順番に抽出される。寄与率が高いものは多くの観測点に共通なシグナルを表現する成分、寄与率が低いものは特定の観測点の固有なシグナル（観測誤差、ノイズ、局所的な磁気異常などを含む）を表現する成分とみなせる。

国土地理院の磁気図では、限られた 14 点の連続観測データから日本全国の磁場分布を表現する必要がある。これを実現するために、多くの点に共通したシグナルを表す成分を適当な次数まで合成し、モデルを作成する。阿部・宮原 (2015a) では、X, Z 成分は第三主成分、Y 成分は第二主成分までを合成してモデルを作成したが、磁気図 2015.0 年値では扱うデータセットの期間が異なるため、採用する主成分の次数を改めて検討した。検討に使用したデータセットは、4.4 節のデータクリーニングを行ったものである。

採用する主成分の次数は、時間関数の振幅及び主成分の寄与率から決定した。また、採用した次数の妥当性は、空間関数の近似の整合性から確認した。図-4 に X, Y, Z 成分の第四主成分までの時間関数を、表-3 に主成分分析で算出した各主成分の寄与率を示す。

表-3 主成分分析で算出した第四主成分までの寄与率 (%)

	X 成分	Y 成分	Z 成分
第一主成分	96.70	97.96	99.78
第二主成分	2.65	1.97	0.20
第三主成分	0.57	0.02	0.01
第四主成分	0.03	0.01	0.00

※X 成分は第三主成分、Y, Z 成分は第二主成分まで採用。

図-4 に示したとおり、X 成分は第三主成分まで、Y,

Z成分は第二主成分まで明瞭な時間変化を示すが、これ以降の主成分は絶対値が極めて小さくなり、ほとんど時間変化を示さない。寄与率を示す表-3では、X成分は第四主成分、Y、Z成分は第三主成分以降の寄与率が1万分の1程度になる。低い寄与率の主成分は、特定の観測点の固有なシグナルを表現する成分と考えられる。今回のデータセットを用いた主成分分析では、例えばX成分では第三主成分までの累積寄与率が99.9%となり、十分良い近似を示すと考えられる。このことから、X成分は第三主成分まで、Y、Z成分も同様の理由により第二主成分までを採用した。

採用した主成分の次数の妥当性を確認するため、X、Y、Z成分における空間関数の第一から第四主成分を図-5(a)～(c)に示す。観測点の場所にプロットした色付き円は、その点の磁場強度を表している。主成分の次数が高くなるほど、観測点固有のシグナルが表現される。コンター及び背景の段彩図は、14の観測点の磁場強度を(2)式に示す経緯度の二次多項式で近似し

た図である。近似式の数値及び各係数は最小二乗的に求めている。また、入力する経緯度は日本に適した形に変換して $\Delta\varphi = \varphi - 37^\circ$, $\Delta\lambda = \lambda - 138^\circ$ とし、各成分jのk次の主成分に対して計算している。

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

円と段彩図は、赤と青の二色を用いて同じスケールで描画している。14の観測点それぞれの固有シグナルを含んだ磁場強度を近似すれば、その近似式は複雑となり、二次多項式では表現しきれないため、色付き円と段彩図の色に差が生じる。図-5に示したとおり、X成分は第三主成分まで、Y、Z成分は第二主成分まで、色付き円と段彩図の色が整合しており、段彩図の形も比較的単純である。以上から、主成分の採用次数は妥当と判断した。

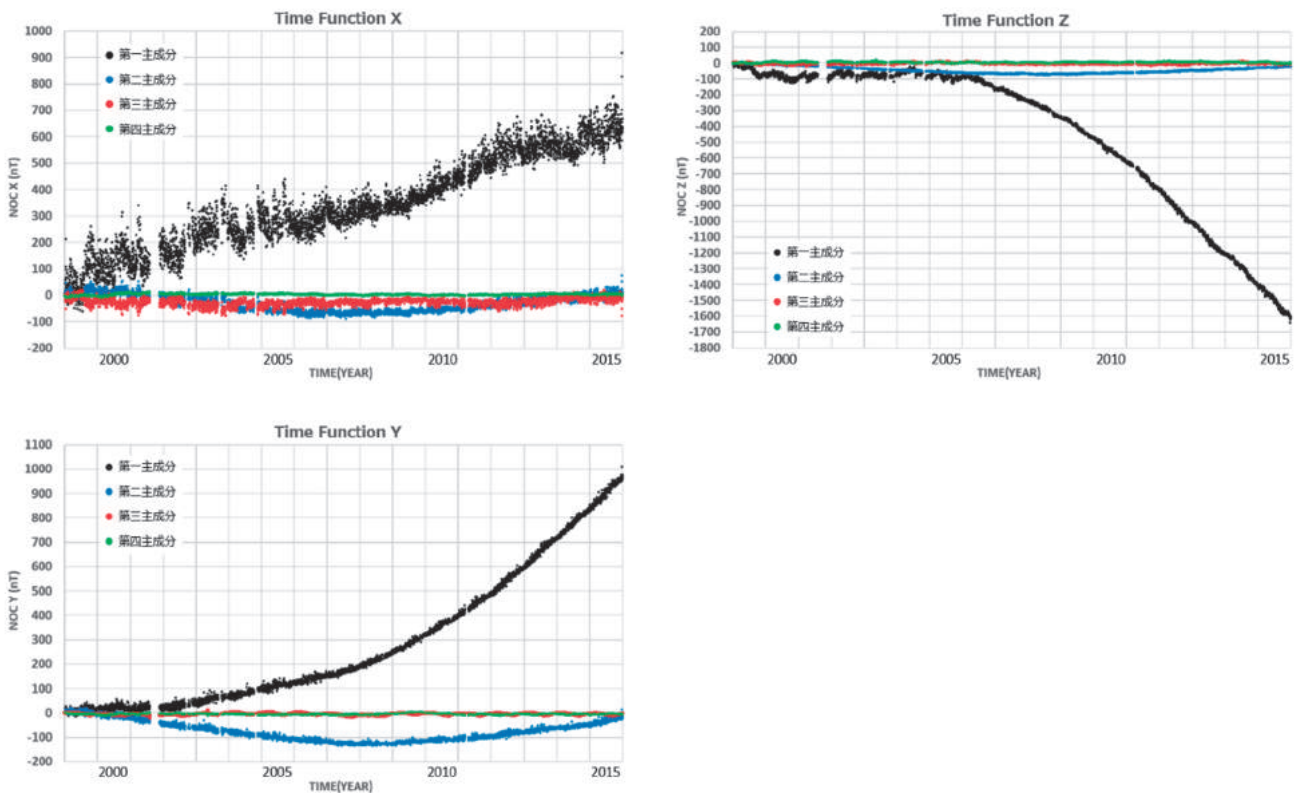


図-4 X, Y, Z成分の第四主成分までの時間関数

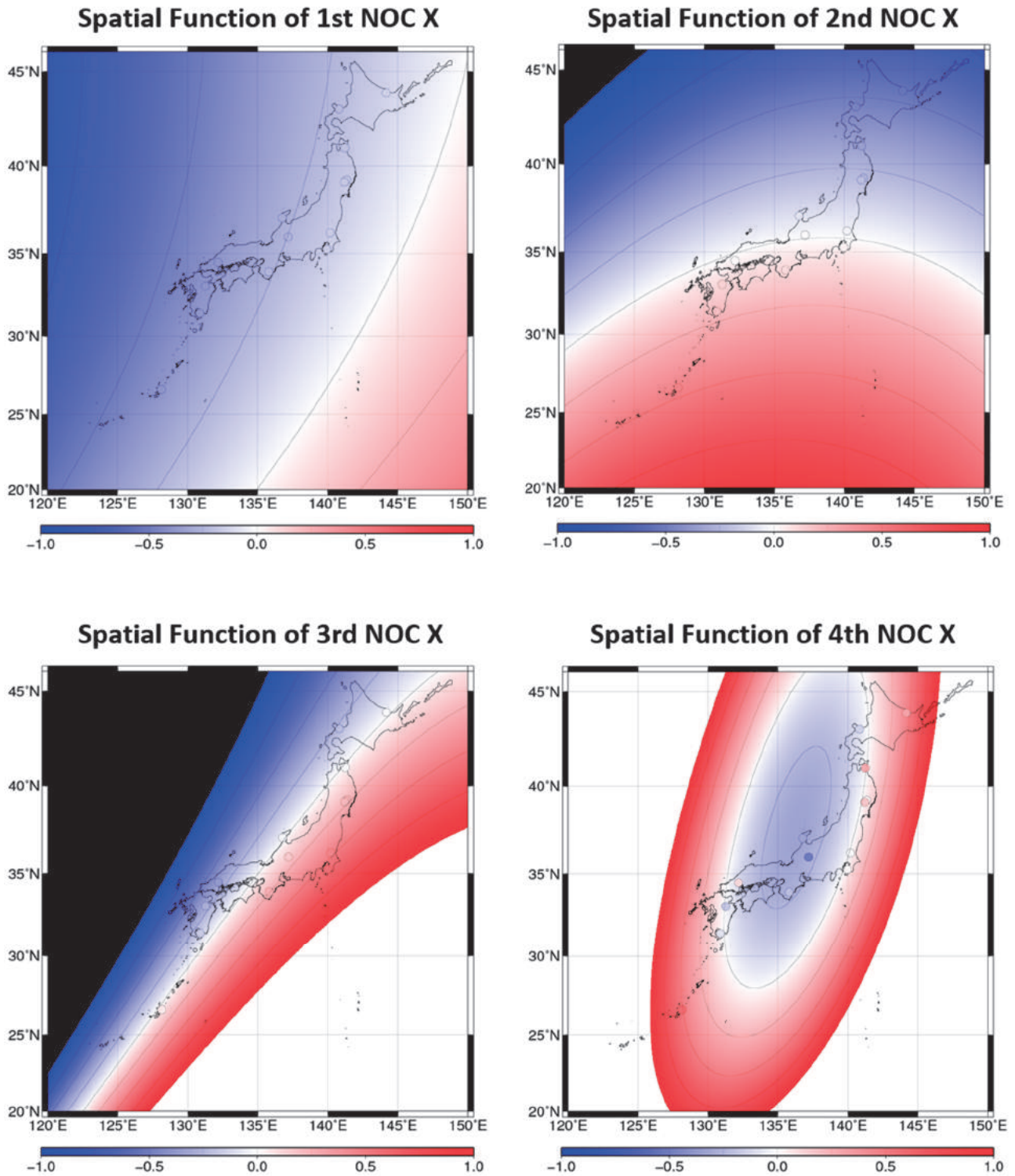


図-5 (a) X成分の第四主成分までの空間関数の近似式(段彩図)と観測点の磁場強度(色付き円)の比較(無次元)。左上が第一主成分、右上が第二主成分、左下が第三主成分、右下が第四主成分の空間関数を表す。-1から+1までの範囲を赤青の二色の勾配で描画し、コンター間隔を0.25とした。+1を超えるものは白色で、-1を超えるものは黒色で表現した。段彩図と色付き円を同じスケールで描画した。第三主成分までは段彩図と色付き円の色の整合が良いが、第四主成分では色が合わない点が多く、二次多項式ではうまく表現できていないことを示唆している。

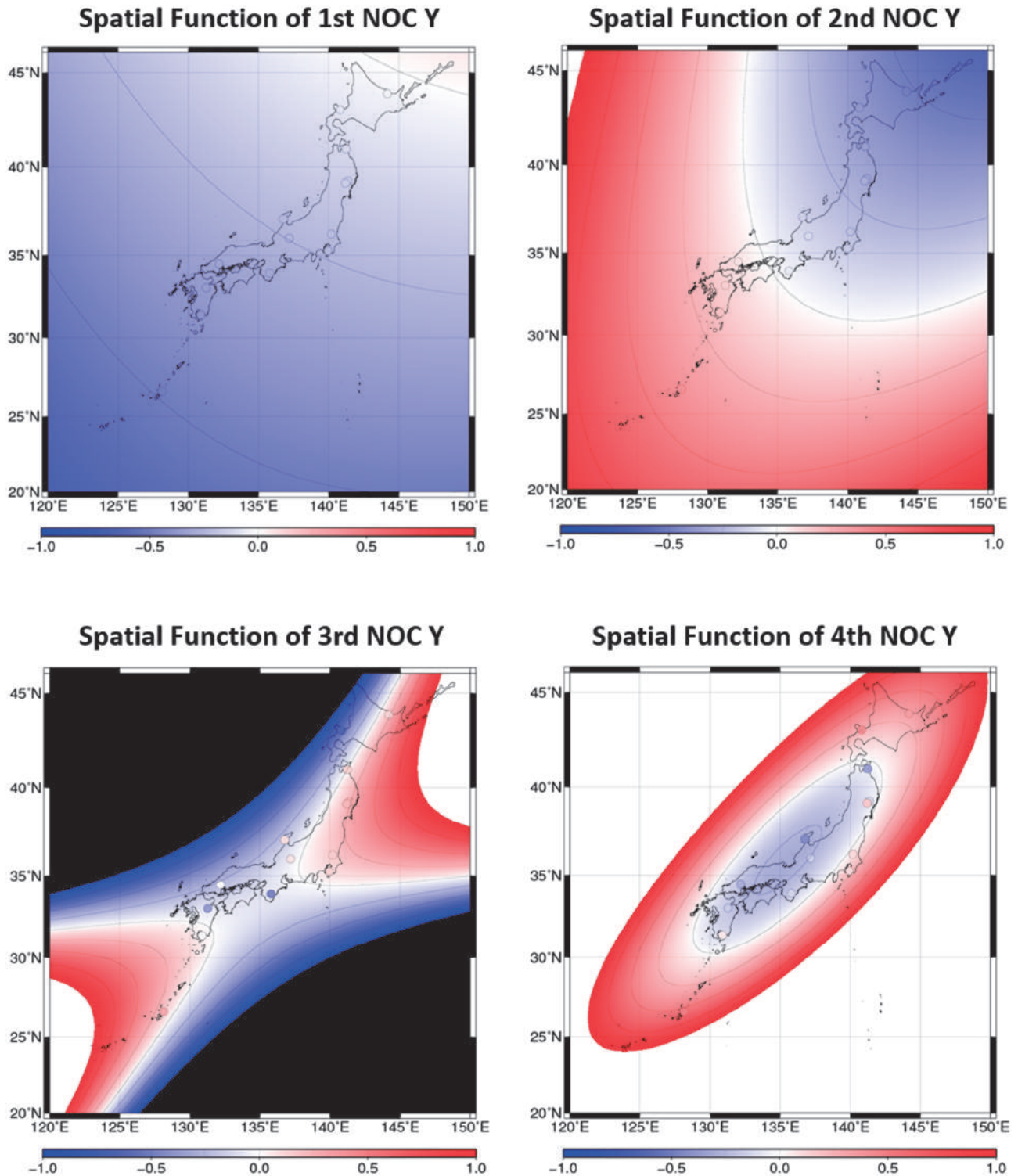


図-5 (b) Y 成分の第四主成分までの空間関数の近似式（段彩図）と観測点の磁場強度（色付き円）の比較（無次元）。左上が第一主成分，右上が第二主成分，左下が第三主成分，右下が第四主成分の空間関数を表す。-1 から+1 までの範囲を赤青の二色の勾配で描画し，コンター間隔を 0.25 とした。+1 を超えるものは白色で，-1 を超えるものは黒色で表現した。段彩図と色付き円を同じスケールで描画した。第二主成分までは段彩図と色付き円の色の整合が良いが，第三，第四主成分では色が合わない点が多く，二次多項式ではうまく表現できていないことを示唆している。

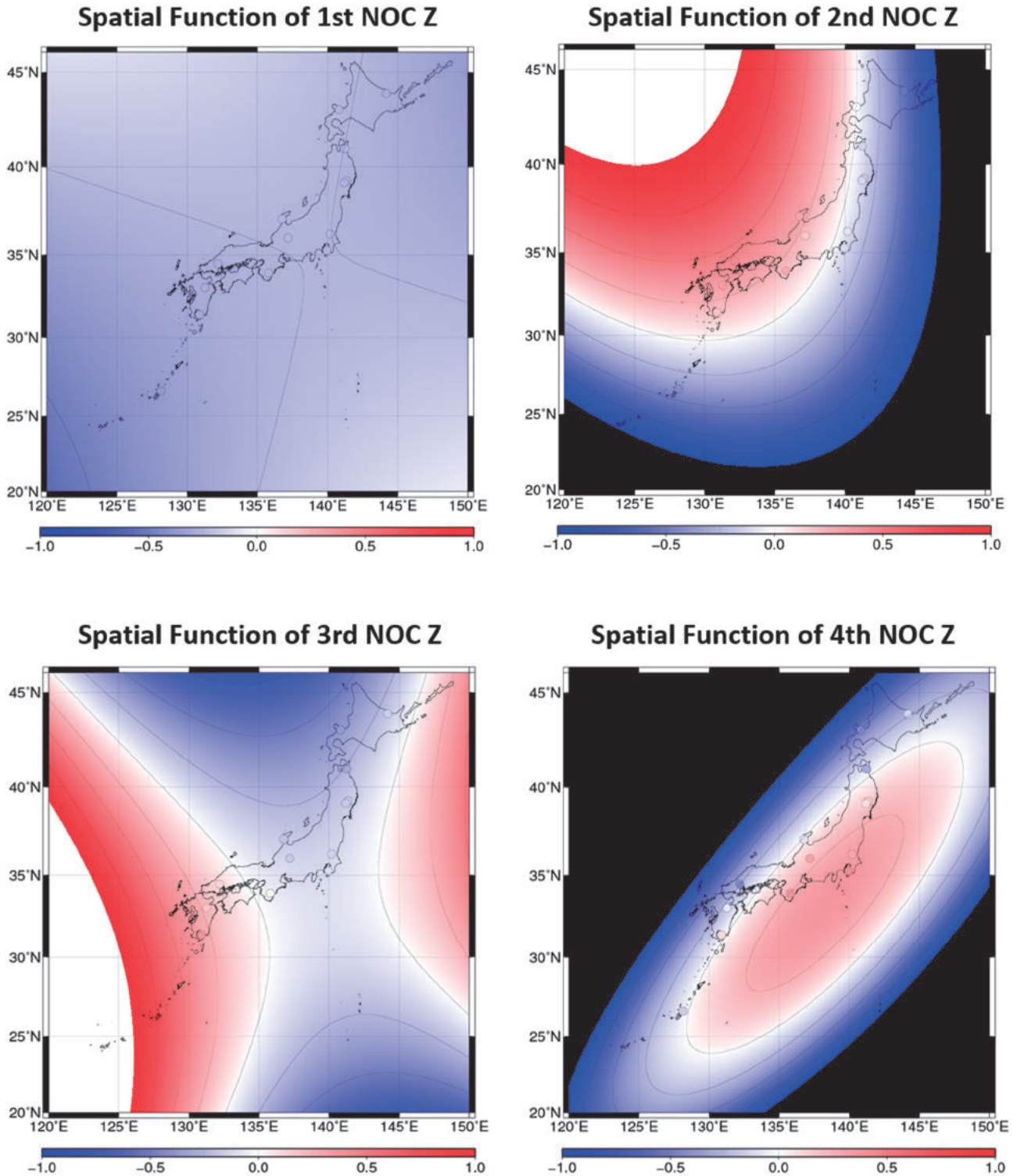


図-5 (c) Z成分の第四主成分までの空間関数の近似式(段彩図)と観測点の磁場強度(色付き円)の比較(無次元)。左上が第一主成分、右上が第二主成分、左下が第三主成分、右下が第四主成分の空間関数を表す。-1 から+1 までの範囲を赤青の二色の勾配で描画し、コンター間隔を0.25とした。+1 を超えるものは白色で、-1 を超えるものは黒色で表現した。段彩図と色付き円を同じスケールで描画した。第二主成分までは段彩図と色付き円の色の整合が良いが、第三主成分では若干の乖離が見られる。第四主成分では色が合わない点が多く、二次多項式ではうまく表現できていないことを示唆している。

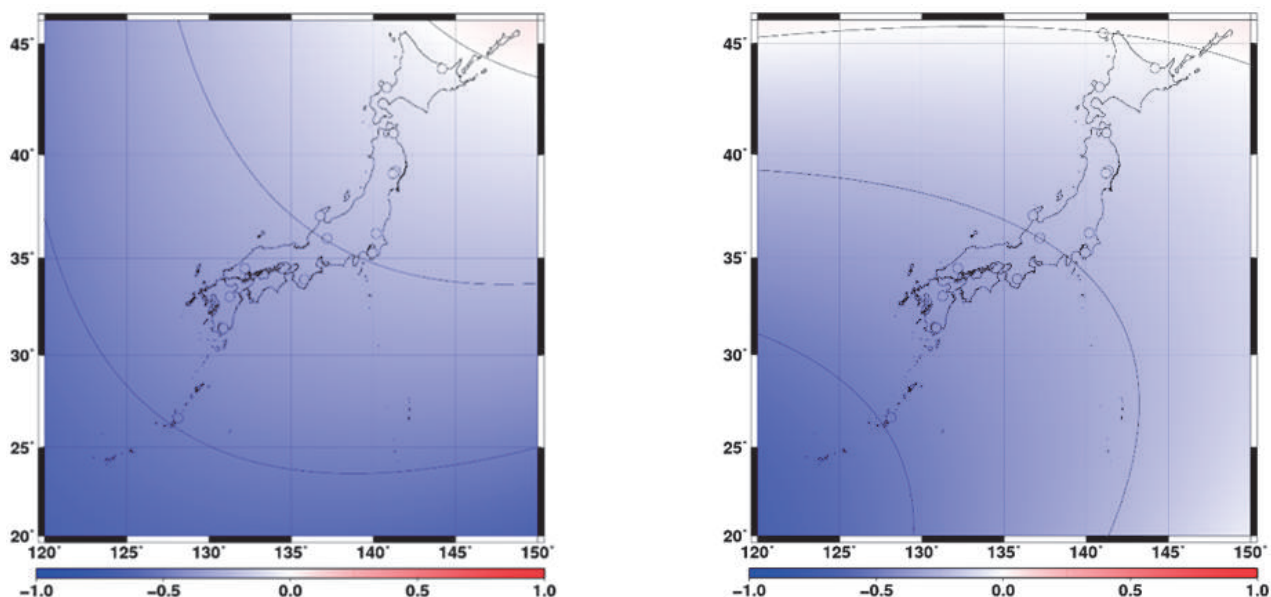


図-6 一等磁気点「礼文島」を同化する前(左)、後(右)の空間関数(Y成分第一主成分)。

モデルの適用範囲である陸域に着目すると、同化により北海道北部の空間関数が大きく変化している様子が分かる。

4.3 一等磁気点の同化手法

ここまでの工程で、分類 A の観測点の時系列データを使用したモデルができる。しかし、このモデルには北海道北部でモデル値と観測値との乖離が大きくなるという問題があった(阿部・宮原, 2015a)。この問題を緩和するため、最も北にある一等磁気点「礼文島」での一等磁気測定の結果をモデルに同化することで、北海道北部における精度低下の軽減を図った。一等磁気点には連続した時系列データがなく、4.2 節と同じ手法で主成分分析を行うことはできないため、次の手法により同化を行った。

まず、4.2 節の主成分分析で得られた全国で共通の時間関数は、場所に依存しない関数であるため、礼文島でも同じものと仮定した。その上で(1)式に1999年1月1日から2015年12月31日までに実施した5回分の一等磁気測定の結果を入力し、一等磁気点「礼文島」の空間関数を最小二乗法で推定した。使用した一等磁気測定の結果の諸元を表-4に示す。

表-4 同化に使用した一等磁気点「礼文島」のデータ

観測日	2000/5/30, 2002/6/21, 2006/8/24, 2010/6/26, 2013/7/18
データ数	5 個
データ種別	日平均値(絶対値) 直交三成分(X, Y, Z成分)

推定した一等磁気点「礼文島」の空間関数と分類 A の観測点の空間関数から全国の空間関数を二次多項式で近似することで、空間関数の補間を行った。その結果の例を図-6に示す。図-6は、同化前後のY成分の

空間関数第一主成分である。Y成分は阿部・宮原(2015a)の精度検証において特に乖離が大きい成分であり、偏角に対応する成分である。同化前には礼文島の北を通過していた等値線が同化後は礼文島上を通過しており、同化によって北海道北部の空間関数が修正されることが確認できる。同化手法の精度評価は、4.5.4項で詳しく述べる。

表-4に示したとおり、一等磁気点「礼文島」では一等磁気測量を概ね3年に1回行っている。最小二乗法で一等磁気点「礼文島」の空間関数を精度良く推定するには多数のデータが必要であるため、今後も定期的に観測を実施する必要がある。

4.4 データクリーニング

モデルの品質を確保するためには、主成分分析に使用するデータセットに含まれる異常値をあらかじめ取り除く必要がある。表-2に示したデータセットは目視によって毎分値から異常値を取り除いているが、そのデータ量は膨大であるため異常値が残っている可能性がある。本節では、残っている異常値の確認方法とそのクリーニング結果について述べる。

4.4.1 地磁気観測所の観測データとの比較

表-2に示したデータセットの品質を確認するため、X, Y, Z成分の時系列データと、観測環境が良好な気象庁の地磁気観測所である柿岡(KAK)のデータとの差分を評価した。その結果、十津川(TTK)、萩原(HAG)、吉和(YOS)の3点で無視できない異常なシグナルが含まれていることが明らかになった。異常が確認された観測点のデータを図-7に示す。

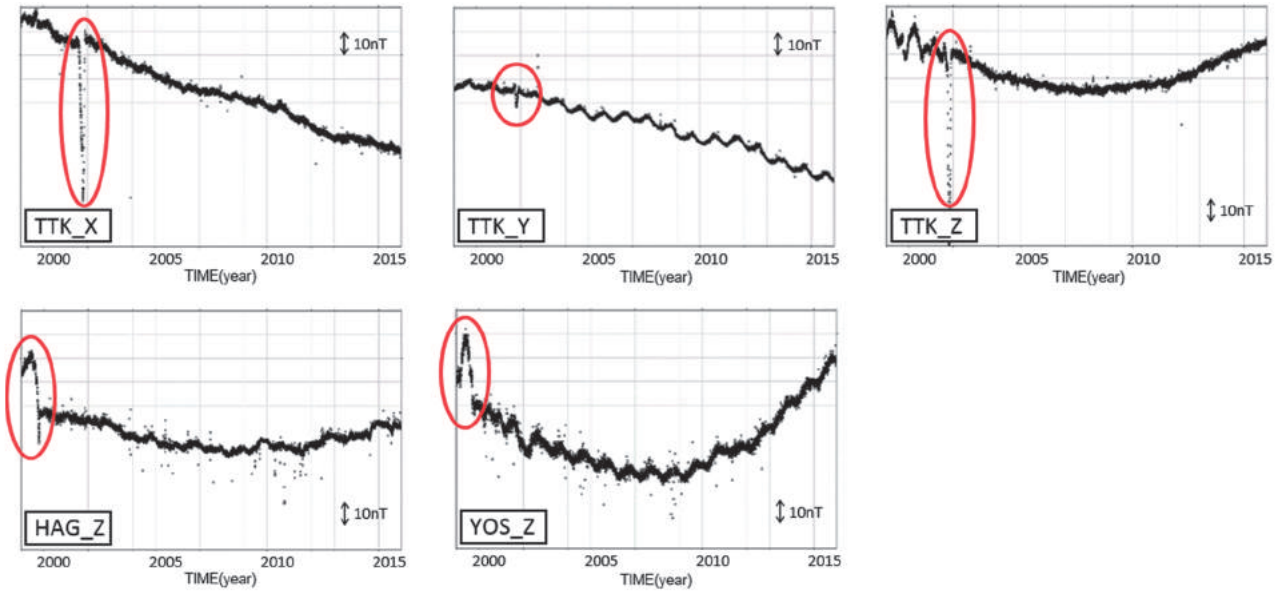


図-7 異常が確認された十津川 (TTK), 萩原 (HAG) 及び吉和 (YOS) と柿岡 (KAK) の差分の時系列データ

図-7 から, 十津川 (TTK) では, 2001 年後半に急激な値の減少を経て元の値に戻るような変化が三成分全てで確認された. 萩原 (HAG) と吉和 (YOS) では, Z 成分において, 1999 年に数箇月かけて増減するような変化が確認された. これらの特徴的で強度の強いシグナルは, 同時期にほかの観測点では検出されていないことから, 特定の観測点のみに生じた局所的な磁気変化又はノイズであると考えられる. これらは, 通常, 主成分分析では次数が高い (モデルに与える影響が小さい) 主成分として抽出される. しかし, 図-7 のような強度が強いシグナルや, 複数の点で同成分・同時期に同様の傾向を示しているシグナルは, 誤って上位の主成分として抽出されてしまうおそれがある. そのため, 以下のとおり処理した.

十津川 (TTK) の異常なシグナルは原因不明であったため, 該当する期間は欠測扱いとした. 萩原 (HAG) と吉和 (YOS) の異常なシグナルは Z 成分だけに見られ, X, Y 成分と全磁力 F 成分のデータには確認されない. そこで, 全磁力 F と X, Y 成分の値から, (3) 式により Z 成分の値を推定した. 推定した期間は, 萩原 (HAG) が 1999 年 1 月 1 日~10 月 31 日, 吉和 (YOS) が 1999 年 1 月 1 日~9 月 18 日である.

$$Z^{est} = \sqrt{F^2 - (X^2 + Y^2)} \quad (3)$$

4.4.2 モデルを活用した異常値の抽出

4.4.1 項では柿岡 (KAK) と比較を行ったが, ここでは 4.3 節で一等磁気点を同化したモデル値と観測値の比較を行った. 例として, クリーニング前後の変化が明瞭に見られた赤井川 (AKA) 及び萩原 (HAG) の Z 成分について, クリーニングを行う前の観測値とモデ

ル値との残差の時系列データを, 柿岡 (KAK) の結果とともに図-8 に示す.

観測環境の良い柿岡 (KAK) のような観測所では 0 を中心として ±5nT 程度の範囲内で収まっている. これは, モデル値が観測値をよく再現しており, モデルが正常に機能していることを示している. 一方, 連続観測点の赤井川 (AKA) 及び萩原 (HAG) ではスパイク状のノイズが頻繁に発生しており, 赤井川 (AKA) では 2012 年に明らかなギャップも生じている. モデルが正常に機能していることは確認できているため, これらは観測値に異常がある可能性が高い. そこで, X, Y, Z, F 成分それぞれについて, 観測値 (日平均値) に残っている異常値を以下の方法で判別した.

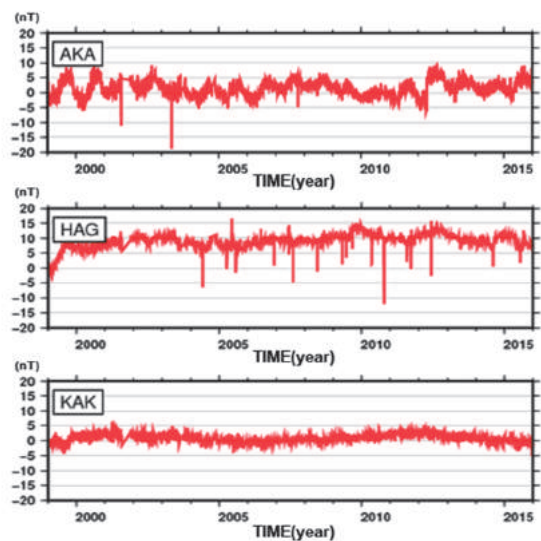


図-8 赤井川 (AKA), 萩原 (HAG) 及び柿岡 (KAK) における Z 成分の観測値からモデル値を差し引いた残差の時系列データ.

表-2 の期間の観測値とモデル値の残差を α として、30 日間の残差 α の移動中央値 M_α を求め、さらに残差 α と移動中央値 M_α の残差を β として、残差 β の中央値 M_β を求める。中央値を採用した理由は、異常値の影響を除外するためである。次に、1 日ごとの絶対偏差 $\beta - M_\beta$ 及び全期間の絶対偏差の中央値を計算し、中央絶対偏差 MAD (Median Absolute Deviation) を得る。最終的に、 $M_\beta \pm k \cdot MAD$ の範囲外にある残差 β を異常値と判別する。 k は、規格化した $|\beta / MAD|$ を計算し、99.7%信頼区間となる値とした。

図-9, 10 に赤井川 (AKA) の X 成分の異常値判定の例を示す。この例では、異常値と判別されたのは 16 日分のデータであったが、このほかに明らかなギャップが生じている箇所も確認できた。ギャップは異常値と判別されなかったが、個別に調査したところ、その原因は 1) 地点差の設定に起因するもの、2) 補正值の設定に起因するもの、3) 周辺環境の変化に起因するもの、に分類されることがわかった。それぞれのパターンに分類されたギャップの処理とスパイクノイズの除去について 4.4.3 項以降に示す。

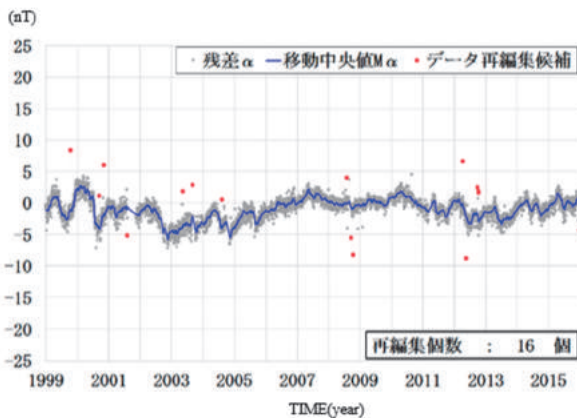


図-9 中央絶対偏差を指標とした異常値判定の例 (赤井川 X 成分)。残差 α の時系列を表している。青線は残差 α の移動中央値 M_α 、赤丸は異常値と判定された値。

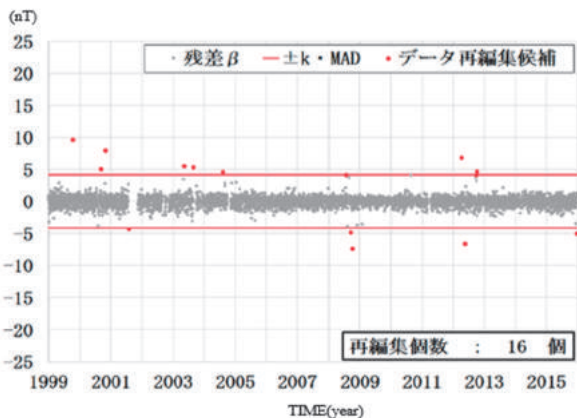


図-10 中央絶対偏差を指標とした異常値判定の例 (赤井川 X 成分)。残差 β の時系列を表している。赤線は閾値 $M_\beta \pm k \cdot MAD$ 、赤丸は異常値と判定された値。

4.4.3 地点差の設定に起因するギャップ処理

地点差とは連続観測点における基準磁気点とプロトン磁力計の設置場所の全磁力の差である (連続観測点の詳細は、阿部・宮原 (2015a) を参照)。連続観測点では年 1 回地点差観測を実施し、その結果を連続観測データの全磁力に加えている。地点差は毎年の観測日以降に反映させるため、例えばある年に観測された地点差が前年の結果と大きく異なる場合、その年の観測日以降のデータにギャップが生じる。実際には、そのギャップは前年の観測日から今回の観測日の間のある時点において生じていると考えられるため、本来であれば地点差を加える時点を適切な時期に変更することが望ましい。そのため、そのギャップが生じた時点が周囲の環境変化などから明確に分かる場合は、その時点から観測された地点差を採用することとした。一方、ギャップが生じた時点が不明な場合には、前年と今回の間を線形補間した。

4.4.4 補正值の設定に起因するギャップ処理

連続観測点で得られる変化量のデータを絶対値に変換するためには、年 1 回実施している絶対観測の結果を加味して補正する必要がある。4.4.3 項と同様に、前年の観測結果と大きく異なる場合にはギャップが生じる。この処理の方法は、4.4.3 項と同様である。

4.4.5 周辺環境に起因するギャップ処理

原因が特定可能で、環境変化があった時点に観測値に明確なギャップがある場合は補正を行い、不明な場合は補正又は修正を行わなかった。また、原因が特定できない場合も修正は行わなかった。ただし、図-11 に示す 2012 年 4 月 21 日に発生した赤井川 (AKA) の大きなギャップについては、モデル自体の再現性を低下させていることが阿部・宮原 (2015a) で指摘されているため、例外的に修正を行った。

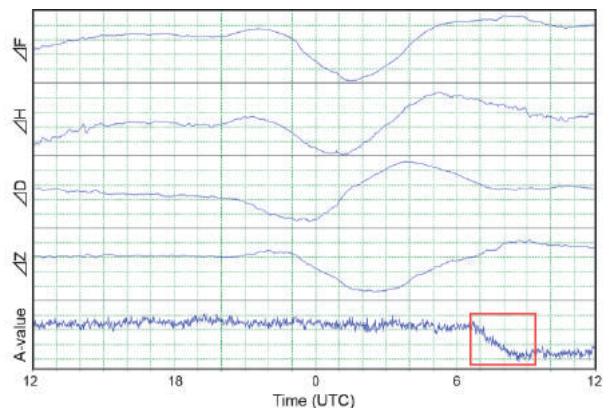


図-11 赤井川 (AKA) のギャップ (2012 年 4 月 21 日)

4.4.1 項と同様に赤井川 (AKA) と柿岡 (KAK) との差分を確認したところ、同じ時期に Z 成分にギャップが生じていたことから、Z 成分に変化が生じたと判断した。また、ギャップが生じた 2012 年 4 月 21 日前後の観測値が安定していることから、この日に連続観測点周辺に何らかの環境変化があった可能性が高い。そこで、ギャップの前後 10 日間の日平均値の差をオフセット量として、2012 年 4 月 21 日以降の Z 成分の観測値に加えた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_i^{obs} - H_i^{model})^2}{N}} \quad (4)$$

4.4.6 スパイクノイズの除去

異常値と判定した多くの点で、1 日の観測データの中に欠測があることがわかった。地磁気の日変化は非線形であるため、欠測の時間帯によっては、短時間であっても日平均値に与える影響が大きい場合がある。そのため、一部でも欠測がある場合、その日のデータは一切使用しないという選択肢もあるが、主成分分析ではデータセットを構成する観測点のうち 1 点でも欠測の日があると、その日のモデル値は得られない。そこで、今回は欠測時間が 3 時間以内であるものは、日平均値への影響は比較的軽微であるとして採用することとした。ただし、欠測時間が 3 時間以内であっても、地磁気活動が活発な日中の欠測と、静穏な夜間の欠測では日平均値に与える影響は大きく異なるため、欠測とどうかの判断基準は、今後検討する必要がある。

上記の編集方針に基づいてスパイクノイズを除去した結果を図-12 (a) ~ (d) の赤線で示す。これは X, Y, Z, F 成分の観測値とモデル値の残差の時系列を示している。残ったスパイクノイズは、3 時間以内の欠測がある日のほか、データ自体に異常がない日も含まれているが、原因の特定ができないためこれ以上の改善は難しい。

4.5 精度評価

これまでの手法で作成したモデルの妥当性を評価するため、内部評価、一個抜き交差検証 (Leave-One-Out Cross Validation, 以下「LOOCV」という。) (地球統計学研究委員会, 2003) 及び一等磁気測量結果を用いた外部評価を行った。以下にそれぞれの評価結果を示す。

4.5.1 内部評価

モデルの内部評価として、表-1 の分類 A のモデル値を計算し、そのモデル値と連続観測データとを比較した。モデルの時間分解能は日単位であるため、モデル値はモデル作成期間の日数分だけ存在する。そこで、(4) 式から各点の二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error, 以下「RMSE」という。) を計算した。(4) 式の N は時系列データの総数である。

表-5 観測値とモデル値の RMSE

観測点	RMSE (nT)			
	X	Y	Z	F
ESA	3.26	2.46	1.20	2.49
MIZ	2.61	2.11	1.44	1.37
KNZ	1.31	4.01	2.68	1.93
MMB	2.76	3.07	4.08	2.18
KAK	0.80	2.03	1.45	1.48
KNY	2.44	1.05	2.03	1.97
AKA	1.77	5.28	2.55	2.64
YOK	4.30	3.04	2.30	2.35
SIK	3.97	3.30	2.40	1.92
HAG	8.87	4.25	9.80	1.46
YOS	1.85	2.12	4.22	1.87
TTK	4.93	3.79	4.22	1.60
KUJ	1.16	3.10	3.60	2.61
OKI	2.06	4.56	3.57	3.23
平均値	3.01	3.16	3.25	2.08

各点の RMSE とその全点の平均値を表-5 に示す。内部評価の結果、全点の平均値は X, Y, Z 成分で 3nT 程度、F 成分で 2nT 程度であった。各点ごとの値では、赤井川 (AKA) の Y 成分、萩原 (HAG) の X, Z 成分、十津川 (TTK) の X 成分、沖縄 (OKI) の Y 成分の RMSE が大きく出ている。

残差の評価を行うため、X, Y, Z, F 成分について、図-12 に観測値とモデル値の残差の時系列を赤線で示す。萩原 (HAG) の X 成分は 1999 年から 2001 年にかけて、Z 成分は 1999 年前半に観測値とモデル値の差が徐々に大きくなり、ある時点から安定している。ある時点以降は常に始めの変化分を含んだ状態となったため、RMSE が大きくなった。柿岡 (KAK) などの観測所の結果からモデルは正しく機能していると思われるため、萩原 (HAG) の 1999 年から 2001 年までの観測値に問題があると推測されるが、原因は特定できなかった。赤井川 (AKA) 及び沖縄 (OKI) の Y 成分の RMSE が大きい原因は、一等磁気点「礼文島」をモデルに同化したことによると考えられる。同化による効果の詳細は 4.5.4 項で述べる。

Difference data of X at each Observation station

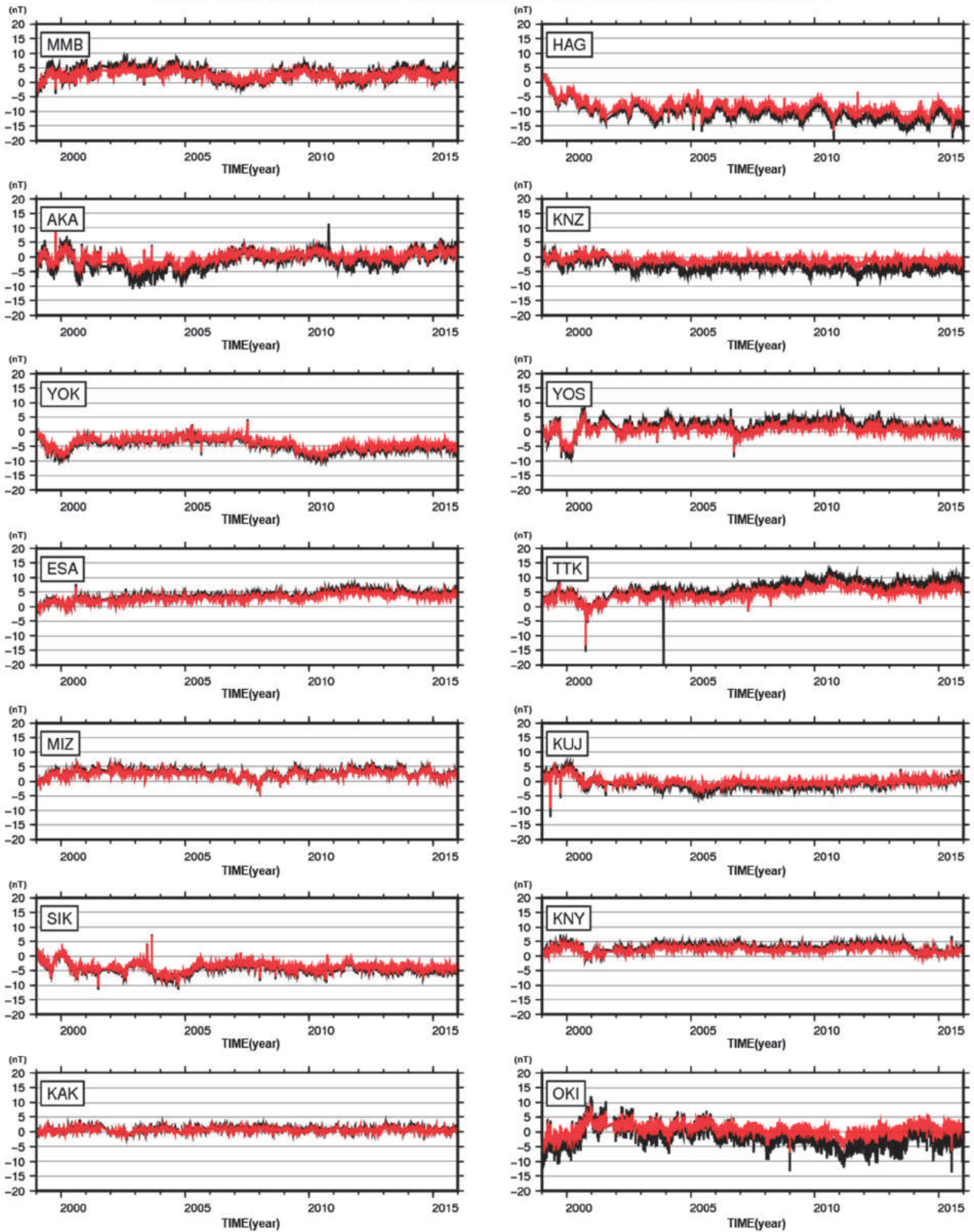


図-12 (a) 各観測点における X 成分の観測値からモデル値を差し引いた残差の時系列データ。(データクリーニング後)
赤線が 4.5.1 項の内部評価の結果, 黒線が 4.5.2 項の LOOCV の結果.

Difference data of Y at each Observation station

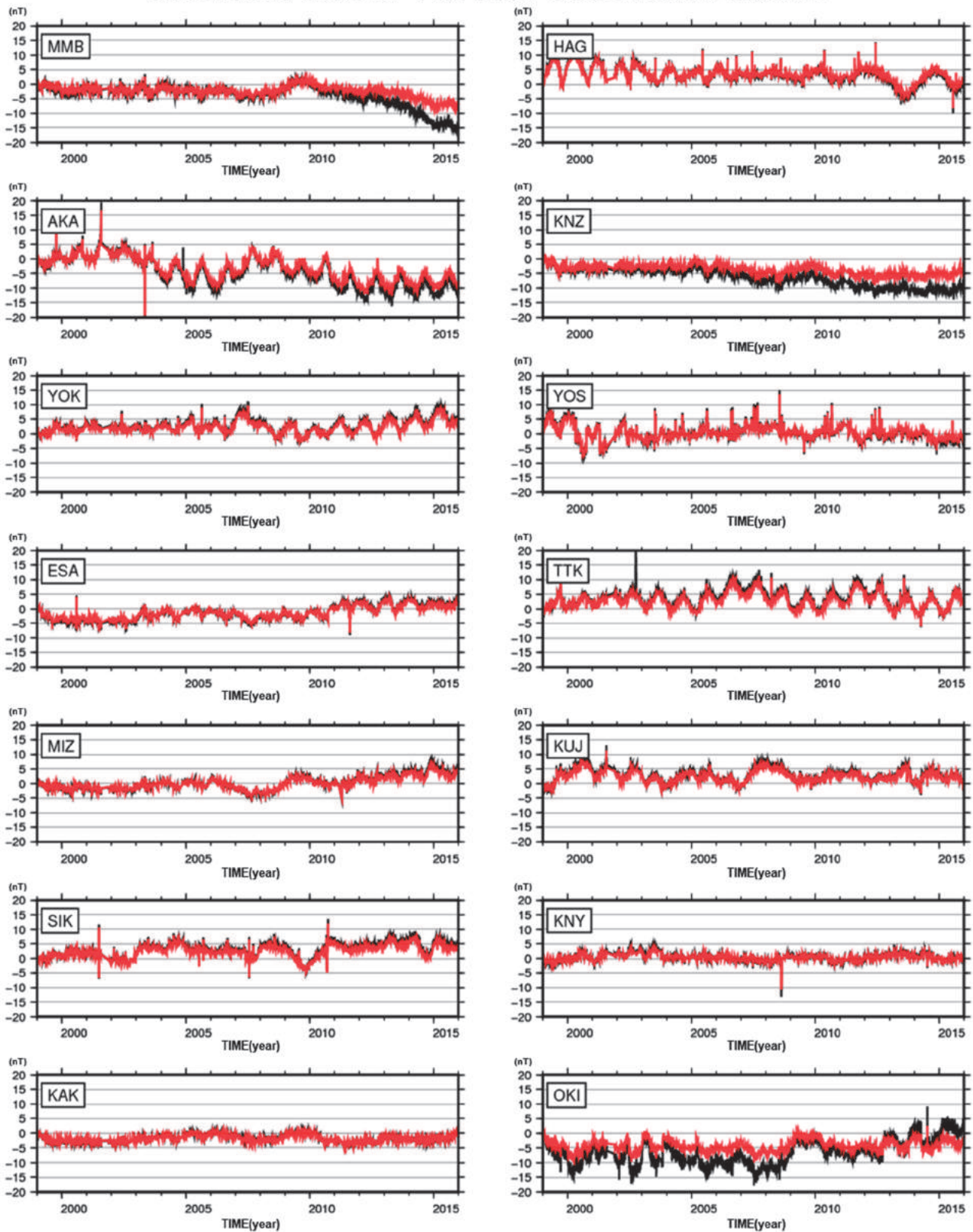


図-12 (b) 各観測点における Y 成分の観測値からモデル値を差し引いた残差の時系列データ。(データクリーニング後)
赤線が 4.5.1 項の内部評価の結果, 黒線が 4.5.2 項の LOOCV の結果.

Difference data of Z at each Observation station

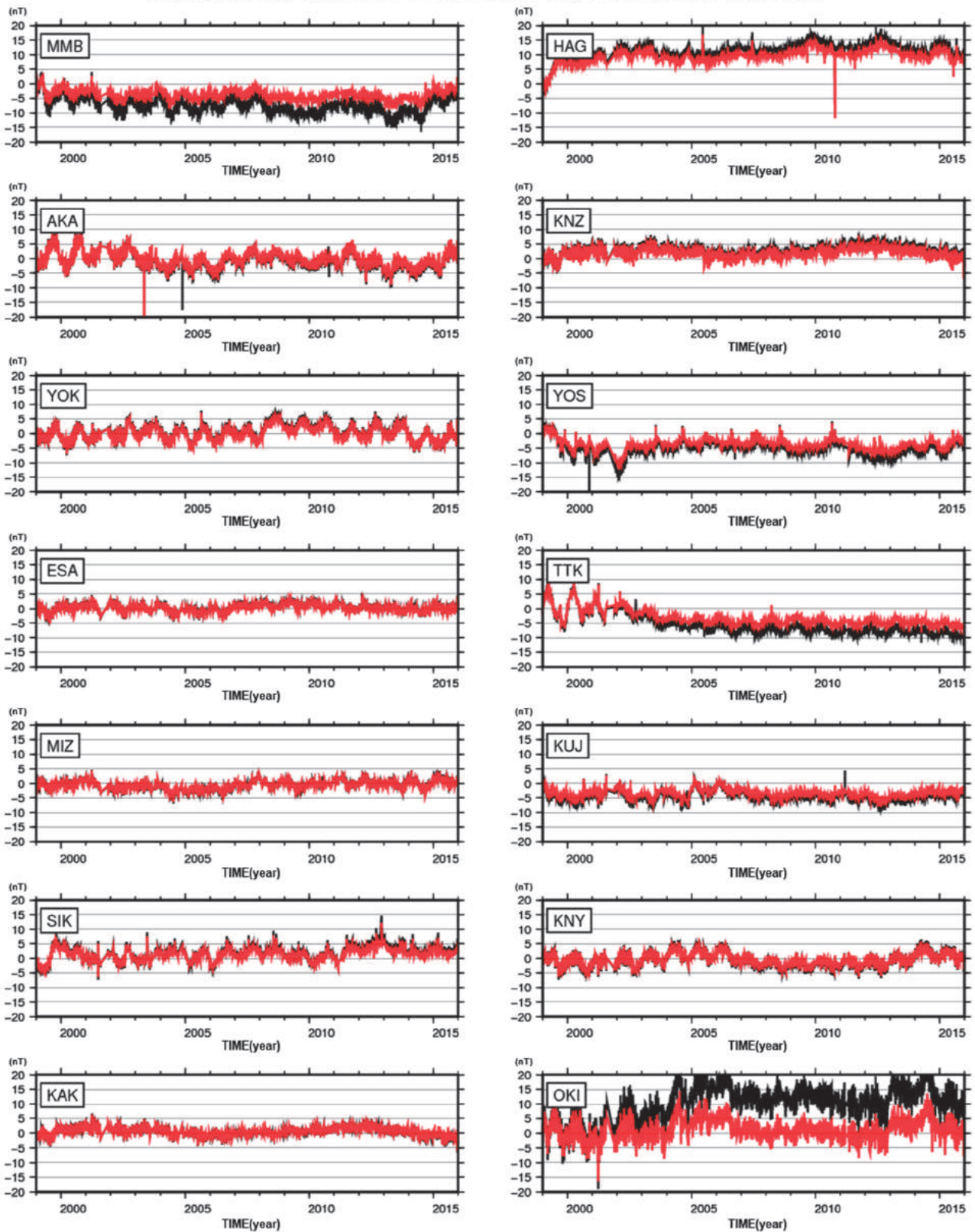


図-12 (c) 各観測点におけるZ成分の観測値からモデル値を差し引いた残差の時系列データ。(データクリーニング後)
赤線が4.5.1項の内部評価の結果, 黒線が4.5.2項のLOOCVの結果.

Difference data of F at each Observation station

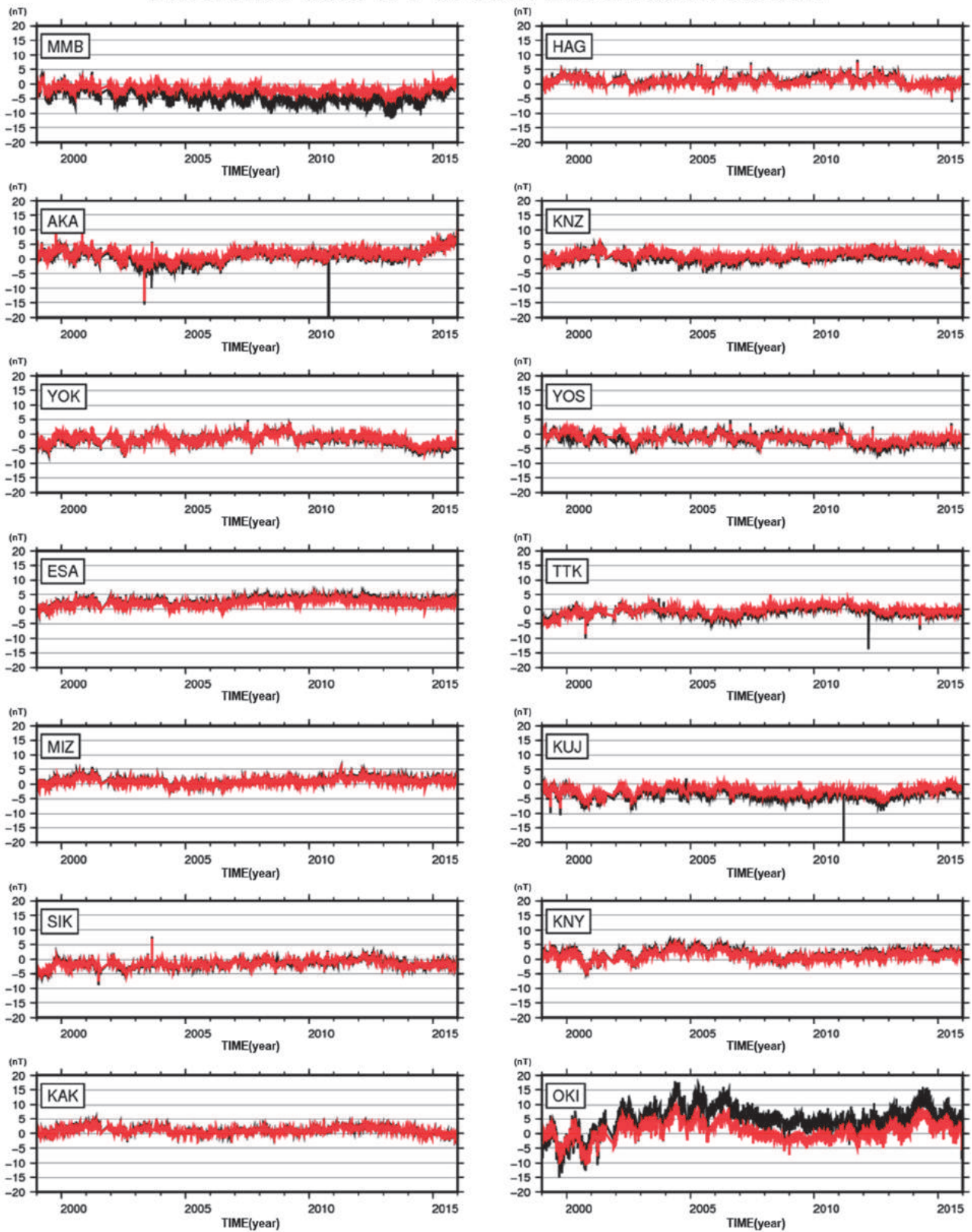


図-12 (d) 各観測点における F 成分の観測値からモデル値を差し引いた残差の時系列データ。(データクリーニング後)
赤線が 4.5.1 項の内部評価の結果, 黒線が 4.5.2 項の LOOCV の結果.

4.5.2 一個抜き交差検証

モデルの客観的な評価として、LOOCVを行った。表-1の分類Aのうち、ある一点を除外してモデルを構築する。その構築したモデルを使用して、除外した点のモデル値を計算し、モデル値と連続観測データとを比較した。LOOCVでも(4)式のRMSEを計算し、評価を行った。図-12に観測値とLOOCVで構築したモデル値の残差の時系列を黒線で示す。また、各点のRMSEとその平均値を表-6に示す。LOOCVの結果、全点の平均値はX, Y成分で4nT程度、Z成分で5nT程度、F成分で3nT程度であった。表-5, 6を比較すると、4.5.1項の内部評価の結果よりもLOOCVの結果の方が全体的にRMSEの値が大きくなった。LOOCVの結果は、観測点がない場所のモデルの再現性を示していることから、モデルは3~5nT程度の再現性を有することが示された。

各点ごとの値では、沖縄 (OKI) の Y, Z, F 成分において極端に RMSE が大きいほか、女満別 (MMB) の Y, Z 成分及び赤井川 (AKA) の Y 成分でも RMSE が大きい結果であった。図-12を見ると、女満別 (MMB)、赤井川 (AKA)、沖縄 (OKI) の該当する成分の残差は、内部評価の結果である図中の赤線との乖離が大きい傾向にある。これらの観測点は、モデル作成に使用している観測点の中で南北の端点に相当する。これらを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-12で黒線から赤線へと改善される。したがって、北海道から沖縄県までを網羅した一定の精度を有するモデルを作成するために、これらの点は不可欠であるといえる。

一方、観測値に大きなノイズを含む場合には、その観測点をモデルに組み込むことでモデルの再現性が低下する可能性もある。これを検証するため、LOOCVで構築したモデルでほかの13点のモデル値を計算し、それと観測値を比較した。これまでと同様に、モデル値と観測値のRMSEを計算し、評価を行った。例として、萩原 (HAG) を除外したモデルのモデル値と、ほかの13点の観測値の比較結果を示す。萩原 (HAG) は、1999年から2000年にかけて、X, Z成分に大きなギャップを含んでいる (図-12 (a), (c))。ここではZ成分に着目し比較する。

表-7に、萩原 (HAG) を使用した場合と除いた場合のそれぞれにおける各モデル値と観測値のRMSEを示す。水沢 (MIZ)、吉和 (YOS)、十津川 (TTK) 及び久住 (KUJ) において、萩原 (HAG) をモデルに組み込むことでモデルの再現性が低下した。これは、萩原 (HAG) のZ成分のギャップがモデルに影響を与えていると考えられる。この影響を除くためには、ギャ

ップを解消する又は変化が落ち着いた2001年以降のデータのみでモデルを作成するなどの対応が必要である。一方、ギャップが実際の現象を表している場合もあるため、これらの適切な扱いについては今後の課題である。

表-6 LOOCV モデル値と観測値の RMSE

観測点	RMSE (nT)			
	X	Y	Z	F
ESA	3.93	2.80	1.32	2.97
MIZ	3.02	2.49	1.56	1.58
KNZ	3.40	7.12	3.34	1.69
MMB	3.48	5.49	7.85	5.01
KAK	1.08	2.10	1.52	1.64
KNY	3.10	1.30	2.33	2.36
AKA	2.95	6.81	2.82	2.58
YOK	5.09	3.57	2.54	2.62
SIK	4.50	3.94	2.94	2.02
HAG	10.76	4.29	11.74	1.74
YOS	3.03	2.41	5.83	2.29
TTK	6.81	4.53	6.67	1.78
KUJ	1.82	3.63	4.53	3.70
OKI	3.67	7.58	11.70	6.56
平均値	4.05	4.15	4.76	2.75

表-7 萩原 (HAG) を除外したモデル値と観測値の RMSE (Z成分)

観測点	RMSE (nT)	
	HAG を除外した モデル	全点を使用した モデル
ESA	1.46	1.20
MIZ	1.40	1.44
KNZ	2.88	2.68
MMB	4.65	4.08
KAK	1.74	1.45
KNY	2.04	2.03
AKA	2.55	2.55
YOK	2.55	2.30
SIK	3.90	2.40
YOS	3.47	4.22
TTK	2.63	4.22
KUJ	2.98	3.60
OKI	3.64	3.57
平均値	2.76	2.75

※萩原 (HAG) をモデルに組み込むことで、RMSE が大きくなる点 (モデルの再現性が低下する点) を赤字で記載。

4.5.3 一等磁気測量の結果を用いた精度検証

外部評価として一等磁気測量の結果を用いた精度検証を行った。モデル作成期間中に2回以上の観測を実施している13点の一等磁気点において、1回目の観測結果を基準とし、その基準にモデル値を加味することで地磁気絶対値の時系列データを作成し、2回目以降の観測結果とモデル値との比較を行った。一等磁気測量の回数は概ね4~5回程度であるため、全ての観測値とモデル値のRMSEを計算した。

比較した一等磁気点全点のRMSEの平均値を表-8に示す。表-8は、モデルに使用していない点におけるモデル値の精度を表している。4.5.2項において、モデルが3~5nT程度の再現性を有することが示されたが、表-8はこれを支持する結果となった。

表-8 モデル値と一等磁気測量結果のRMSE

	RMSE (nT)			
	X	Y	Z	F
平均値	2.83	5.83	2.61	2.95

4.5.4 同化手法の評価

磁気図2015.0年値では、一等磁気点「礼文島」をモデルに同化した。本項では、同化の効果を評価する。同化モデルは、(1)式を満たしたモデルの空間関数に一等磁気点「礼文島」を後から組み込むため、厳密には(1)式を満たさない。そのため、礼文島周辺のモデルの再現性は向上するが、それ以外の場所ではモデルの再現性が低下することが想定される。なお、同化に使用した観測結果には観測誤差が含まれているが、一等磁気測量の作業規程で定めた制限を満たした結果であるため、観測誤差がモデルに与える影響は十分小さく、無視できるものとする。

まず、同化モデルによる礼文島周辺の再現性を確認する。4.5.3項と同様に、一等磁気点「礼文島」における同化前後のモデル値と一等磁気測量結果のRMSEを計算した(表-9)。表-9から分かるとおり、同化モデルでは一等磁気点「礼文島」の再現性が大幅に改善した。特に、乖離が大きかった礼文島のY成分では、約10nTの改善がみられた。この改善を視覚的にみるため、図-13に同化前後のモデル値の時間変化を示す。図-13から、同化前のモデル値(灰線)に比べ、同化後のモデル値(青線)は観測値(赤色の×印)に近付いており、モデルの再現性が向上していることが分かる。

次に、礼文島以外の場所におけるモデルの再現性を確認する。一等磁気点「礼文島」を同化する前のモデルについて、4.5.1項と同様に内部評価を実施した。同化前と同化後のモデルの内部評価の結果(RMSEの差)を表-10に示す。赤字は同化によって再現性が低下した箇所である。表-10から、全成分において再現性が

表-9 「礼文島」におけるモデル値と一等磁気測量結果のRMSE

	RMSE (nT)			
	X	Y	Z	F
同化前	5.01	16.42	3.02	2.39
同化後	1.11	5.96	1.33	1.66

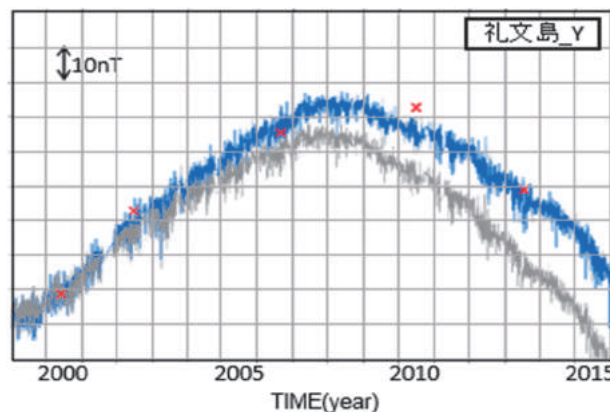


図-13 一等磁気点「礼文島」のY成分の時間変化(灰線:同化前のモデル値, 青線:同化後のモデル値, ×:一等磁気測量の結果)。

低下している観測点が5~10点あり、その影響は一部の点を除き0.3nT程度で、同化の影響が全国に波及していることが分かる。特に、赤井川(AKA)及び鹿野山(KNZ)では、1nTを越える再現性の低下がみられる。この2点の同化前後のモデル値と観測値の残差の時系列を図-14に示す。図-14の左図が同化前、右図が同化後である。両観測点において、同化後の残差(赤線)が年々0から乖離していく様子が見られる。

表-10 礼文島同化前と後のRMSEの差(同化前-同化後)

観測点	RMSE (nT)			
	X	Y	Z	F
ESA	-0.31	0.47	-0.03	-0.38
MIZ	-0.33	-0.30	0.11	-0.26
KNZ	-0.24	-1.29	0.30	0.35
MMB	0.00	0.00	-0.01	0.00
KAK	0.04	-0.11	0.01	0.04
KNY	-0.25	0.16	0.05	-0.15
AKA	-0.01	-2.43	0.05	1.04
YOK	0.03	-0.10	0.00	0.02
SIK	0.01	-0.04	-0.01	0.01
HAG	0.17	-0.32	-0.18	-0.15
YOS	0.11	0.21	-0.19	-0.17
TTK	-0.07	-0.19	0.08	0.01
KUJ	0.00	-0.11	0.04	0.05
OKI	0.04	-0.30	0.05	0.02
平均値	-0.06	-0.32	0.02	0.03

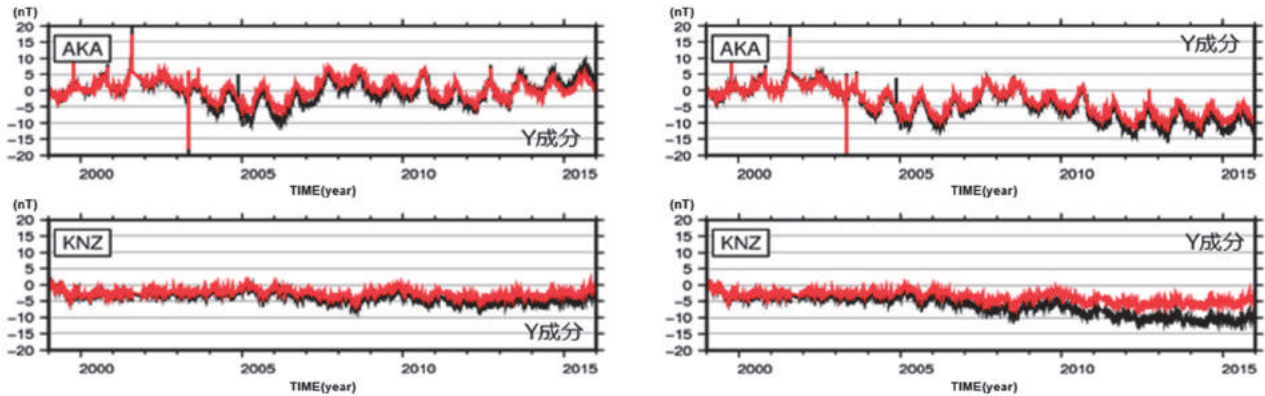


図-14 赤井川 (AKA) と鹿野山 (KNZ) における同化前後のモデル値と観測値の残差の時系列. 赤線が 3.5.1 項の内部評価の結果, 黒線が 3.5.2 項の LOOCV の結果 (同化前は左図, 同化後は右図.)

以上のように, 一等磁気点「礼文島」を同化することで一部の点の Y 成分で 1~2nT 程度再現性が低下したものの, 礼文島周辺のモデルの再現性は X 成分で約 4nT, Y 成分で約 10nT, Z 成分で約 2nT 向上したため, 磁気図 2015.0 年値では一等磁気点「礼文島」を同化したモデルを採用した. なお, 全体の再現性を低下させずに礼文島周辺のモデルの再現性を向上させるには, 礼文島又はその周辺の地域で連続観測を実施し, (1) 式を満たすモデルを作成する必要がある.

4.5.5 精度評価のまとめ

内部評価, LOOCV 及び外部評価の結果を表-11 に示す. いずれの評価結果も整合しており, 作成したモデルが正しく機能していることを示している. モデル値の再現性は LOOCV 及び外部評価の結果から, X 成分 4nT, Y 成分 6nT, Z 成分 5nT, F 成分 3nT 程度である.

表-11 精度評価のまとめ

	RMSE (nT)			
	X	Y	Z	F
内部評価	3.01	3.16	3.25	2.08
LOOCV	4.05	4.15	4.76	2.75
外部評価	2.83	5.83	2.61	2.95

5. 磁気図描画

磁気図は, 図-3 に示したとおり, グリッドデータ作成後に描画する. グリッドデータ作成及び描画には, 無償で利用可能なプログラム群 The Generic Mapping Tools (以下「GMT」という.) (Wessel et al., 2013) を用いた. 本章では, グリッドデータ作成手法及びその精度評価について述べる.

5.1 グリッドデータ作成 (空間補間) 手法

磁気図を描画するために, 表-1 のデータを使用して

規則的な格子点状に配列したグリッドデータを作成する. 表-1 の観測点のうち, 分類 A, B は連続観測データ, 分類 C, D はモデル値, 分類 E は IGRF-12 から計算した値をグリッドデータ作成の入力値 (以下「グリッド入力値」という.) として使用した. グリッド間隔は, 2万5千分1地形図の図郭の範囲に少なくとも4点以上のグリッドデータが含まれるように, 経度緯度共に3分間隔とした.

GMT には, 複数のグリッド化コマンドが実装されている. 従来の磁気図では, 局所的に凹凸のない滑らかな曲面となるように描画する方針だったため, surface スプライン法を用いていた. 磁気図 2015.0 年値では, 磁気図に観測点の情報をより忠実に反映させる方針としたため, Green 関数を用いたスプライン法を使用した. この手法の中にも, 最小曲率スプライン法 (オプション-Sc), 曲率保持スプライン法 (同-St), 正則化スプライン法 (同-Sr) の3種類がある. 後者の2つの手法は, 補間によって作成する曲面の空間的な滑らかさを定めるテンションを 0 から 1 の間で指定できる. テンション 0 で最も滑らかな曲面となり, テンション 1 で滑らかではない曲面となる. 5.2 節で精度評価した結果, Green 関数スプラインの正則化スプライン法を採用し, テンションの設定は 0.02 とした.

5.2 グリッドデータの精度評価

グリッドデータの精度評価として, surface スプライン法及び3種類の Green 関数スプライン法について, 4.5 節のモデルの精度評価と同じ手法で内部評価と LOOCV を行った.

内部評価では, 磁気点上のグリッド入力値と, グリッドデータから磁気点上の値を推定した値 (推定値) を直接比較した. 推定値は, 周囲4点のグリッドデータからバイリニア補間して求めた. 評価指標は, グリッド入力値と推定値の RMSE である.

内部評価の結果は阿部・宮原 (2015b) と同様で採用した手法の RMSE が最も小さくなった。ここでは、従来の手法と採用した手法の結果を表-12 に示す。今回採用した手法では従来よりも RMSE が 3 倍程度改善しており、磁気点上において推定値がグリッド入力値をよく再現していることが示された。

表-12 内部評価の結果(グリッド入力値と推定値の RMSE)

	偏角 D (min)	伏角 I (min)	水平分力 H (nT)	鉛直分力 Z (nT)	全磁力 F (nT)
採用	0.74	0.77	7.00	14.54	11.89
従来	2.13	1.90	21.58	34.35	30.52
差	1.39	1.13	14.58	19.81	18.63

※差は、従来手法の RMSE から採用手法の RMSE を減じた値。

表-13 LOOCV の結果(グリッド入力値と推定値の RMSE)

	偏角 D (min)	伏角 I (min)	水平分力 H (nT)	鉛直分力 Z (nT)	全磁力 F (nT)
採用	17.63	15.65	180.80	276.10	246.15
従来	16.92	14.50	172.33	259.31	234.16
差	-0.71	-1.15	-8.47	-16.79	-11.99

※差は、従来手法の RMSE から採用手法の RMSE を引いた値。従来手法より採用手法の RMSE が大きい場合、赤字で記載。

LOOCV では、グリッド入力値のある一点を除外してグリッドデータを作成し、除外した点の推定値をバイニア補間により求め、除外した点のグリッド入力値とその推定値を比較した。評価指標は、グリッド入力値と推定値の RMSE である。LOOCV の結果も阿部・宮原 (2015b) と同様の結果であったため、従来の手法と採用した手法の結果のみを表-13 に示す。LOOCV では、今回採用した手法の方が従来の手法よりも RMSE が大きい。その大きさは、表-13 に示した差であり、表-12 の差と同等である。この結果は、Green 関数スプライン法では観測点の情報をより忠実に反映させるが、観測点がない場所の再現性を低下させていることを示している。逆に、surface スプライン法では観測点の再現性を低下させるが、観測点がない場所の再現性を向上させる。今回の磁気図描画方針は、観測点の情報をより忠実に反映することであり、表-12 の結果を重視して空間補間手法を決定した。

表-12, 13 の結果を比べると、表-13 の結果は全ての成分で表-12 の 10 倍以上大きい値となった。この理由は、LOOCV で除外した点の地磁気値を周囲の点から推定する際に、除外した点と周囲の点で乖離があるた

め周囲の点から妥当な値を推定できなかったことが推測される。これは日本の磁場分布が、磁気点の平均点間距離 20~30km よりも短い空間波長の特徴を持つことを示唆している。入力に用いた磁気点の配点密度よりも細かな磁場分布の磁気図を作成するためには、さらに多くの磁気点を配置する必要がある。

5.3 磁気図 2010.0 年値との比較

磁気図 2015.0 年値と磁気図 2010.0 年値の差には、1) 5 年間の地磁気の変化、2) 空間補間手法の違い、3) 採用したモデルの違い、4) グリッドデータ作成に使用したデータ数の違い、が複合的に含まれている。このうち、1) は IGRF-12 の変化量と調和的で、3) 及び 4) には有意な差がなかった。つまり、二つの磁気図の違いは、主に 1) と 2) に起因する。5.2 節では RMSE を指標として評価したが、本節では、偏角について二つの磁気図の差分を図示し、視覚的に評価する。

図-15 (a) に二つの磁気図で使用したグリッドデータの差分を、図-15 (b) に 1) 5 年間の偏角の変化量を、図-15 (c) に 2) 空間補間手法の違いによる差分量を示す。

図-15 (a) には 1) から 4) の効果が含まれている。先に述べたとおり、3) 及び 4) には有意な差がなかったため、図-15 (a) から空間波長が長い図-15 (b) の 5 年間の変化分 (1) に相当) を引くと、図-15 (c) の空間補間手法の違いが現れる。図-15 (c) に空間補間手法の違いが特に大きい地域を拡大した磁気図を示した。この図のとおり、①旭川市周辺、②鳥取市周辺、③名古屋市周辺では、従来の surface スプライン法による図よりも、Green 関数スプライン法による図の方が等値線の間隔が密で、水平磁気勾配が大きいことが表現されている。これは、従来の surface スプライン法で滑らかに表現されていた磁場の起伏が、今回は Green 関数スプライン法によって磁気点の周囲が観測値の影響を受けて補間され、磁場のより細かい空間波長まで起伏が際立って表現されたことを示している。しかし、磁気点の観測値に誤差が含まれていた場合、その誤差を局所的な磁気異常として表現している可能性もあり得る。次に予定している磁気図 2020.0 年値の公表に向けて、空間補間手法の違いが大きい地域で、磁気図で表現されている磁場分布が妥当かどうかを、現地調査などで確認する必要がある。

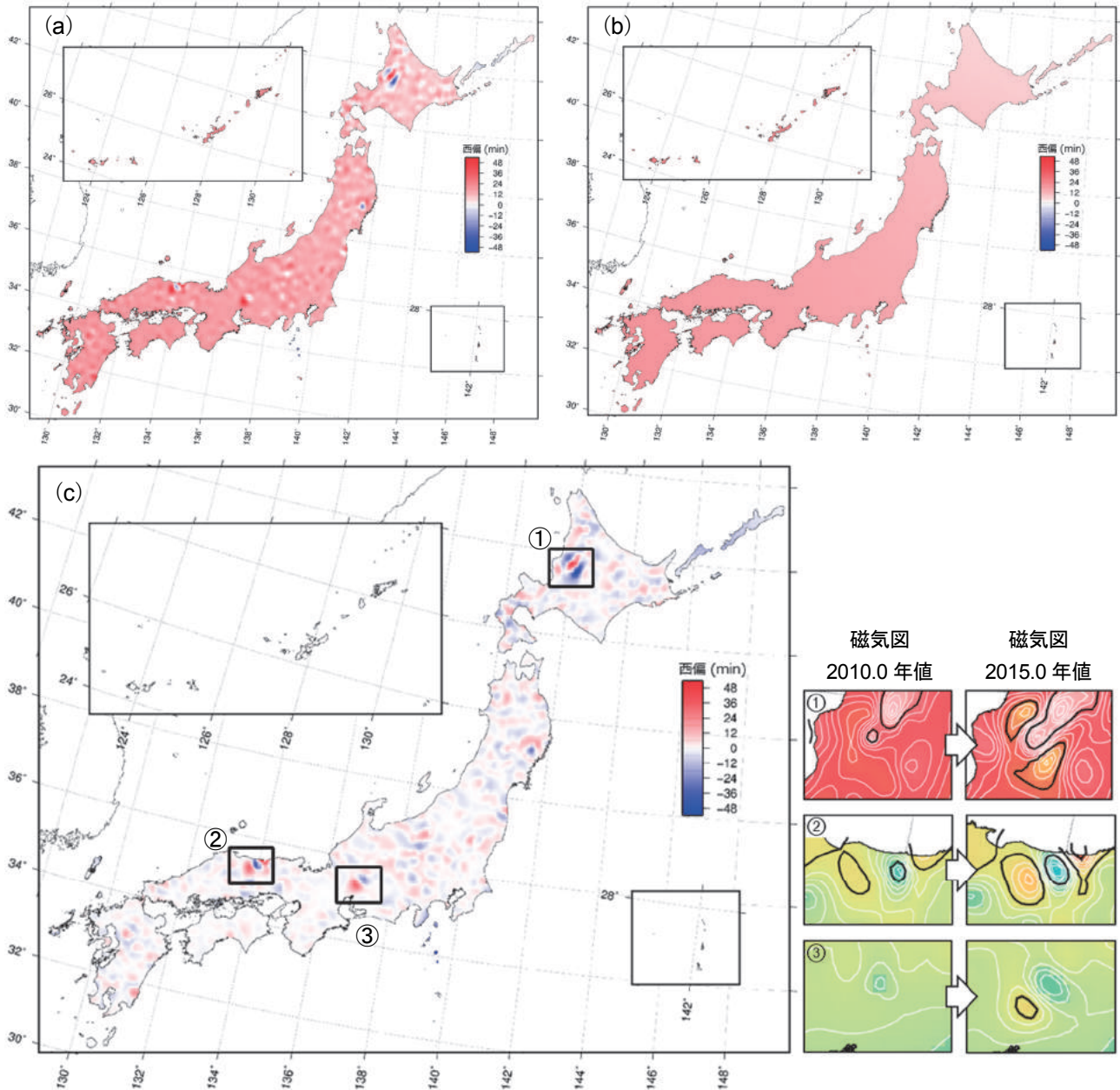


図-15 (a) 磁気図 2010.0 年値と磁気図 2015.0 年値のグリッドデータの偏角の差分. (b) 5 年間の偏角の変化量. (c) 偏角における空間補間手法の違いによる差分. (c) 図中の黒枠で示した地域の拡大図を右側に示した. 拡大図はそれぞれ磁気図 2010.0 年値と磁気図 2015.0 年値である.

5.4 国際標準地球磁場 (IGRF-12) との比較

図-3 の工程で作成された磁気図は日本全国の磁場分布を表した図である. 一方, 全球の磁場分布を表現する磁場モデルとして IGRF-12 がよく使われる. 本節ではこの二つについて比較する.

IGRF-12 は数式で表された磁場モデルである. 磁気図と比較するために, 磁気図と同じグリッド間隔で 2015.0 年時点におけるグリッドデータを IGRF-12 から

作成した. 図-16 に, 偏角における磁気図 2015.0 年値と IGRF-12 の 2015.0 年値との差を示す. IGRF-12 の空間波長は 1000~2000km であるため, 図-16 にみられる差は, IGRF-12 では表現できない日本国内の複雑な磁場分布を表しているといえる. 場所によっては, 1 度 (60 分) 以上の差が生じている地域もあるため, 利用者は用途によって両者を使い分ける必要がある.

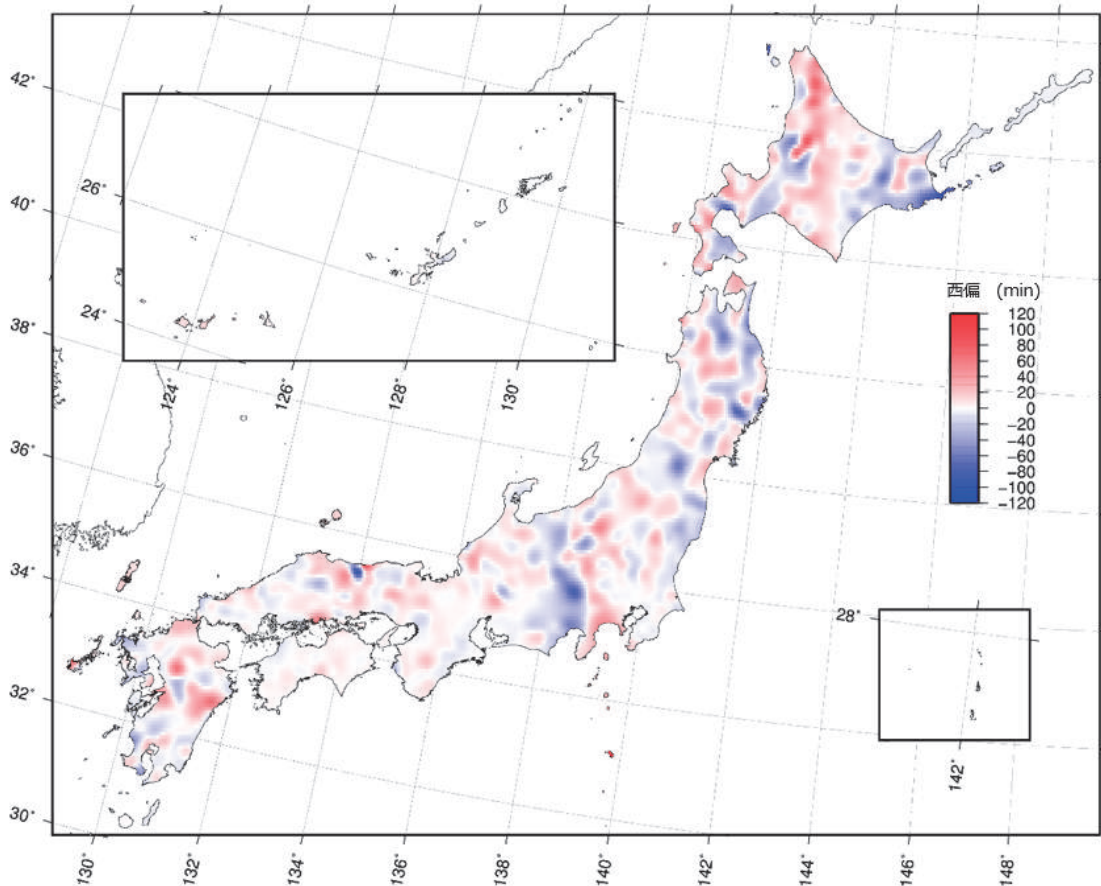


図-16 磁気図 2015.0 年値と国際標準地球磁場 (IGRF-12) の 2015.0 年値の差 (偏角)

6. データの公開

4 章で作成したモデルと 5 章で決定した最適な空間補間手法から作成した磁気図 2015.0 年値を 2016 年 12 月 1 日に公開した。公開したデータは表-14 のとおりで、地磁気測量ホームページ (以下「地磁気 HP」という。) (国土地理院, 2017a) から入手及び閲覧できる。

表-14 磁気図 2015.0 年値に関連する公開データ

公開データ	提供形態
磁気図 2015.0 年値	地磁気 HP 上で PDF 公開 地理院地図に表示
偏角一覧図	地理院地図に表示 (二次メッシュごとに表示)
偏角一覧	地磁気 HP 上で txt データ公開
地磁気計算サービス	地磁気 HP 上で計算

磁気図及び偏角一覧図について、これまでは印刷図も作成し、関係機関に提供していたが、2011 年に実施したニーズ調査の結果、紙媒体の成果物よりも電子データのニーズの方が高いことが判明した。そのため、今回からは表-14 のとおり、地磁気 HP 上での PDF 公開、又は地理院地図上での公開とした。

公開した磁気図 (偏角) を図-17 に示す。図-17 に示

した偏角のほか、伏角、全磁力、水平分力及び鉛直分力の磁場 5 成分の磁気図を公開している。磁気図の作成範囲は、2 万 5 千分 1 地形図の整備範囲である。図-17 に表示されていない地域は地理院地図 (国土地理院, 2017b) で確認できる。偏角及び伏角は 10' ごとに、そのほかの成分は 100nT ごとに等値線を描画した。また、角度及び磁力の大きさが大きいほど暖色系に、小さいほど寒色系になるように段彩をつけた。図中の赤線は、全ての一等磁気点のモデル値を経度緯度の二次多項式で近似した等値線で、1 度ごとに描画した。近似した二次多項式を (5) 式に、同式の各係数を表-15 に示す。この近似式は、日本周辺の磁場分布を大局的に表すもので、局所的な磁気異常は反映されていない。また、観測点から遠方になるほど精度が低下するので注意が必要である。

今回の公開では、各種ソフトウェア、登山アプリケーションなどでの利便性を考慮し、新たに偏角一覧のテキストデータ (txt データ) の提供を地磁気 HP 上で開始した。これにより、従来よりも幅広い分野でのデータの活用が期待される。

地磁気 HP 内の地磁気計算サービスでは、任意の座標を入力することで、任意の地点における 2015 年 1 月 1 日 0 時 (UTC) の地磁気値を求めることができる。

この計算では、モデルから作成したグリッドデータを使用しているため、(5) 式の計算よりも局所的な地磁気値が得られる。

7. まとめ

2016年12月1日に、最新版の磁気図となる磁気図2015.0年値を公表した。これまで10年ごとに更新していたが、今回から5年ごとの更新となる。図の作成には、国土地理院及び気象庁の地磁気連続観測データから主成分分析を用いて作成した地磁気時空間モデルを使用した。また、磁気図を描画するに当たり、最適なスプライン法としてGreen関数スプライン法(正則化, テンション0.02)を使用した。その結果、従来よりも、観測データを忠実に再現した図を作成できた。

磁気図2015.0年値におけるモデルの再現性は、外部評価の結果、偏角で18分程度、伏角で16分程度、水平分力で180nT程度、鉛直分力で280nT程度、全磁力で250nT程度となった。

謝 辞

磁気図作成に当たっては、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。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) (Wessel et al., 2013) ソフトウェアを使用しました。

(公開日：平成30年3月28日)

$$D_{2015.0} = M + A\Delta\varphi + B\Delta\lambda + C(\Delta\varphi)^2 + D\Delta\varphi\Delta\lambda + E(\Delta\lambda)^2 \quad (5)$$

$$\Delta\varphi = \varphi - 37^\circ, \quad \Delta\lambda = \lambda - 138^\circ$$

表-15 各成分における(5)式の各係数

	M	A	B	C	D	E
偏角D (西偏)	7°57.201'	18.750	-6.761	-0.059	-0.014	-0.579
伏角I	51°23.425'	72.639	-8.364	-0.951	-0.212	0.580
全磁力F	47700.818 nT	550.932	-259.776	-2.131	-2.992	4.879
水平分力H	29777.000 nT	-432.944	-79.882	-6.464	8.428	-5.109
鉛直分力Z	37273.244 nT	1058.758	-274.356	-10.608	-7.304	9.592

参 考 文 献

- 阿部聡, 宮原伐折羅 (2015a) : 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, 国土地理院時報, 127, 129-152.
- 阿部聡, 宮原伐折羅 (2015b) : 磁気図作図における地磁気値の空間補間手法の検証, 国土地理院時報, 127, 153-169.
- Erwan Thébault, Christopher C Finlay, Ciarán D Beggan, Patrick Alken, Julien Aubert, Olivier Barrois, Francois Bertrand, Tatiana Bondar, Axel Boness, Laura Brocco, Elisabeth Canet, Aude Chambodut, Arnaud Chulliat, Pierdavide Coisson, François Civet, Aimin Du, Alexandre Fournier, Isabelle Fratter, Nicolas Gillet, Brian Hamilton, Mohamed Hamoudi, Gauthier Hulot, Thomas Jager, Monika Korte, Weijia Kuang, Xavier Lalanne, Benoit Langlais, Jean-Michel Léger, Vincent Lesur, Frank J Lowes, Susan Macmillan, Mioara Manda, Chandrasekharan Manoj, Stefan Maus, Nils Olsen, Valeriy Petrov, Victoria Ridley, Martin Rother, Terence J Sabaka, Diana Saturnino, Reyko Schachtschneider, Olivier Sirol, Andrew Tangborn, Alan Thomson, Lars Tøffner-Clausen, Pierre Vigneron, Ingo Wardinski and Tatiana Zvereva (2015) : International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation, Earth, Planets and Space 2015, 67-79.
- 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.
- 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.
- 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.
- 国土地理院 (2017a) : 地磁気測量 HP, http://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/geomag_index.html (accessed 1 Oct.2017) .

国土地理院 (2017b) : 地理院地図, <https://maps.gsi.go.jp/> (accessed 1 Oct.2017) .

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.

Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. F. Luis, and F. Wobbe (2013) : Improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Am. Geophys. Union, 94, 409-410.

磁気図(偏角) 2015.0年値

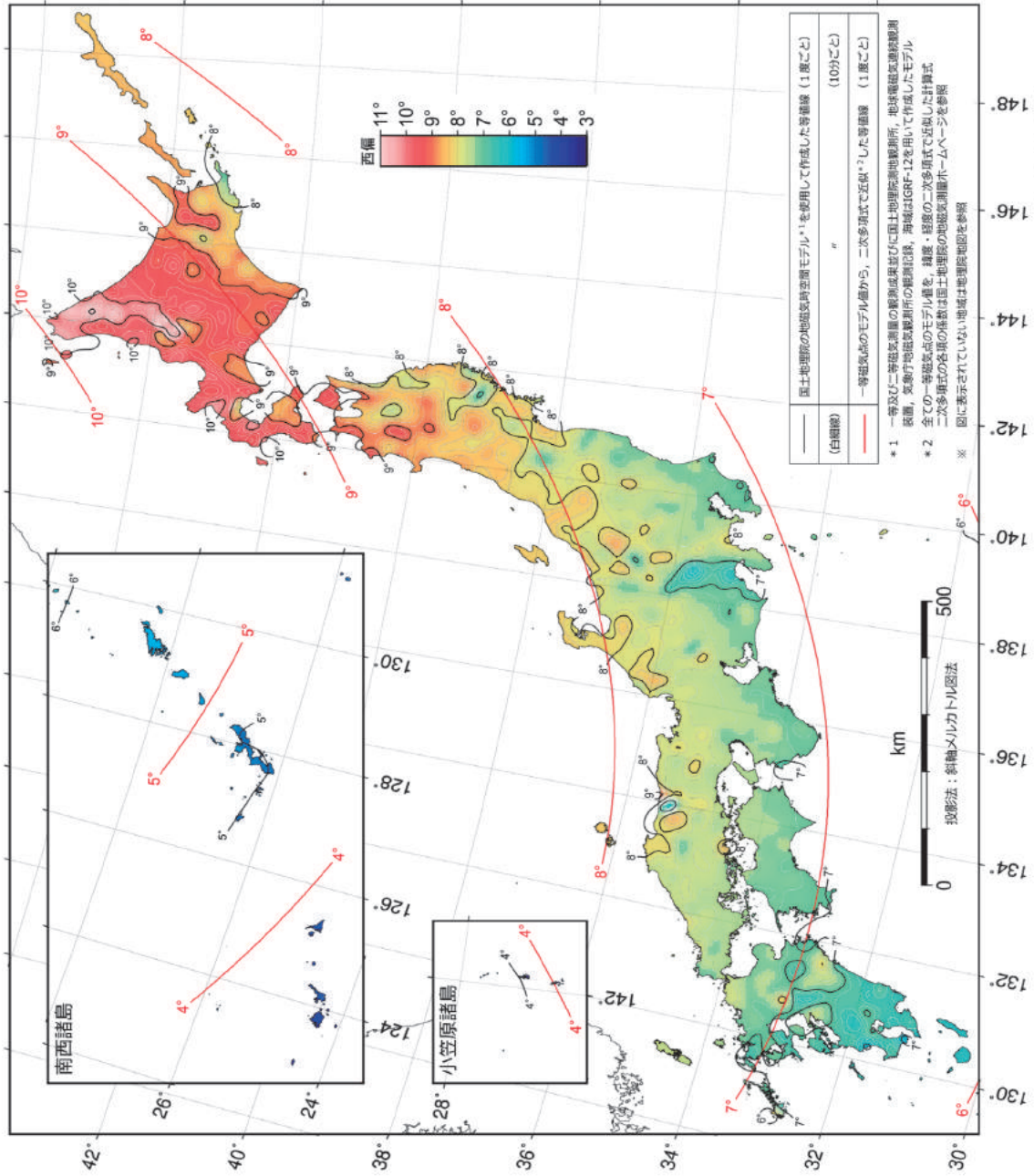


図-17 磁気図 2015.0年値(偏角) (2016年12月公開)