

## 磁気図 2015.0 年値の公表

高橋 伸也・菅原 安宏・矢萩 智裕・阿部 聡 (国土地理院)

### **Publishing Geomagnetic Charts of Japan for the epoch 2015.0**

Shinya Takahashi, Yasuhiro Sugawara, Toshihiro Yahagi, Satoshi Abe (GSI)

#### Abstract

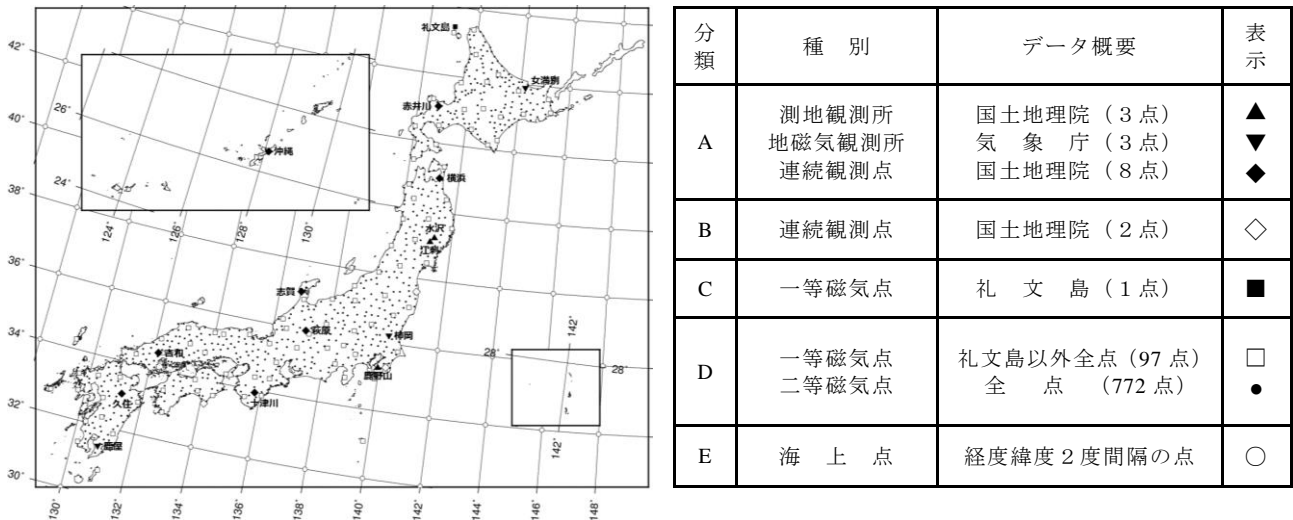
The Geospatial Information Authority of Japan (GSI) has conducted geomagnetic surveys all over Japan since around 1950. In addition, we established both 3 geomagnetic observatories in a sequential order from 1956 to 1980 and nationwide 11 observation sites in 1997 in order to collect continuous total force and vector components of geomagnetic field respectively. Those data have been not only opened in public but also used for making the “Geomagnetic Charts of Japan” which describe a normal state of a geomagnetic field over Japan. GSI had published the charts every 10 years since 1971 for the epoch 1970.0 and the newest one was done in 2011 for the epoch 2010.0. On the other hand, there were also some requests for shortening its period to every 5 years which is same interval as world geomagnetic models such as the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) and the World Magnetic Model (WMM). In order to live up to this demand, we developed a new method based on the principal component analysis to reproduce the fully reliable magnetic field model with less data. GSI released the new chart for the epoch 2015.0 in December 2016. We report here the detail of both our new method and the product.

#### 1. はじめに

国土地理院は、日本全国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。日本全国約100点の一等磁気点では永年変化を把握するための繰り返し観測（一等磁気測量）を実施し、約700点の二等磁気点では磁場分布を把握するための観測（二等磁気測量）を実施してきた。なお、二等磁気測量は1969年までに全国の測量を2回実施して終了している。このほかに3か所の観測所及び全国11か所の連続観測施設において地磁気ベクトルの連続観測も実施している。国土地理院はこれらの観測結果をまとめて日本全国の磁場分布を図に示した「磁気図」を公表している。1971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、2016年からは世界モデルの更新間隔に合わせて、5年ごとに更新することとした。2016年12月1日には、阿部ほか（2015a）で報告された手法を用いて、最新版の磁気図である「磁気図 2015.0 年値」を作成・公表した。本稿では磁気図 2015.0 年値の作成手法のほか、精度評価の結果やデータの公開方法についても報告する。

#### 2. 磁気図作成に使用したデータ

磁気図作成に使用した観測点等を第1図に示す。第3章で説明する地磁気時空間モデルの作成には、分類 A・C の観測データを使用した。第4章で説明するグリッド化においては、分類 A・B は連続観測データ、分類 C・D は地磁気時空間モデルの値、分類 E は IGRF12 から計算した値をそれぞれ使用して、経度緯度3分間隔のグリッドデータを作成した。なお、沿岸・島嶼地域における精度低下の軽減及び陸域と海域で磁場分布を世界モデルとシームレスに接続させるために、分類 E の海上点を使用した。



第1図 磁気図 2015.0年値の作成に使用した観測点等の配点図（左）と凡例（右）

FIG.1 Score map of the observation point used to Geomagnetic Charts of Japan for the epoch 2015.0

### 3. 地磁気時空間モデルの作成と精度評価

#### 3.1. 地磁気時空間モデル作成手法

地磁気時空間モデルは、①時系列データを主成分分析により時間関数と空間関数に分解、②一等磁気点における空間関数を推定、③空間関数を関数近似、④時間関数と空間関数の合成によるモデル値を計算、の4ステップに分けられる。以下、各手順について詳しく述べる。

①の手順では、主成分分析を応用した自然直交基底法（NOC法）を用いた（Fujiwara et al., 2001；Ji et al., 2006）。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。今回は、基準エポックからの差分を計算し、その差分の時系列データを入力データとした。NOC法の基本式を（1）式に示す。

$$H_j(\varphi_i, \lambda_i, t) - H_0(\varphi_i, \lambda_i, 0) = \sum_k X_j^k(\varphi_i, \lambda_i) \cdot T_j^k(t) \quad (1)$$

Hはi点（ $\varphi_i, \lambda_i$ ）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は主成分の次数を表す。本モデルでは、各成分に特徴的なシグナルを効率的に抽出するため、NOC法を磁場の直交三成分（X, Y, Z成分）にそれぞれ独立に適用することとした。（1）式により、複数の時系列データから場所に依らない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）を求めて分解することができる。

②の手順では、得られた時間関数Tと一等磁気測量成果から空間関数の推定を行う。一等磁気測量成果は、観測実施日の地磁気各成分の日平均値を記録したものである。一等磁気測量は繰り返し観測が実施されており、時間方向には離散的であるが、（1）式のHが複数得られていることになる。ただし、基準エポックの日平均値は得られていないため、空間関数Xと基準エポックの磁場の値である $H_0$ を未知数として最小二乗的に求めることで、一等磁気点の空間関数の値を得る。なお、本モデルでは、一等磁気点「礼文島」のデータのみ使用する。この理由は、一等磁気測量成果を本モデルに同化しない場合に、特に礼文島においてモデルと実測値との乖離が大きくなるためである。

以上により，連続観測点と一等磁気点の空間関数が得られるため，③の手順で空間関数を全国に展開することで，任意の地点における磁場の値が推定可能となる．本モデルでは，実測値の再現性を重要視し，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した．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．(2)式に空間関数分布を表現するための緯度経度の二次多項式を示す．

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

ここで， $\Delta\varphi_i = \varphi_i - 37^\circ$ ， $\Delta\lambda_i = \lambda_i - 138^\circ$ である．M 及び A から E は定数及び係数であり，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．

最後に④の手順として，(2)式の空間関数と(1)式から得られた時間関数を合成し，基準エポックからの変化量を得る．基準エポックとする2000年1月1日の磁場三成分の絶対値がわかっているならば，その値に変化量モデルを加算することで任意の時間の磁場のモデル値を得ることができる．このようにして，一等・二等磁気点における任意のエポック（2015.0年値の場合は2015年1月1日）の磁場のモデル値が得られる．

### 3.2. 地磁気時空間モデルの作成

磁気図2015.0年値では，3.1節の手法により地磁気時空間モデルを作成した．使用したデータは，1999年1月1日から2015年12月31日までの日平均値で，国土地理院の測地観測所3点，連続観測施設8点，気象庁の観測所3点の合計14点の連続観測データを使用した．地磁気活動度等を考慮せず，全てのデータに対して一律に0時から23時までの毎時間値を用いて日平均値を計算した．

主成分分析（NOC法）はX，Y，Z三成分独立に行い，得られた時間関数・空間関数の寄与率，空間関数のフィッティングの程度から，採用する主成分の次数を決定した．今回のモデルでは，X成分は第三主成分まで，Y成分は第二主成分まで，Z成分は第二主成分までを採用した．

### 3.3. 精度評価手法

地磁気時空間モデルの精度評価は，内部評価と外部評価の2種類を行う．内部評価は，連続観測データがある分類Aの点のモデル値を計算し，そのモデル値と連続観測データ（実測値）とを比較する．なお，本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，以下(3)式でRMSEを計算し，その値で評価を行う．

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_i^{obs} - H_i^{model})^2}{N}} \quad (3)$$

(3)式は点ごとに計算される．Nは時系列のデータ数である．

外部評価は，一個抜き交差検証（LOOCV，例えば地球統計学研究委員会，2003）を行う．まず，連続観測データがある点のうち，ある一点を除外してモデルを構築する．次に，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，最後にモデル値と実測値とを比較する．外部評価においても，(3)式のRMSEを計算し，その値で評価を行う．

### 3.4. 内部評価及び外部評価の結果

3.3 節の手法で、地磁気時空間モデルの精度評価を行った。精度評価の結果を第 1 表に示す。

精度評価の結果、内部評価の RMSE よりも外部評価の RMSE が大きい。これは、内部評価の方が実測値の再現性が高いことを示しており、モデルが正常に機能していることが確認できた。また、外部評価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、地磁気時空間モデルの精度を表していると考えられる。今回の評価では Z 成分が最も残差が大きく、作成したモデルは 5nT 程度の精度を有することが示された。

第 1 表 内部評価及び外部評価の結果として得られた成分ごとの RMSE

Table 1 self-evaluation and outside-evaluation of the model

RMSE 観測点	内部評価			外部評価(LOOCV)		
	X [nT]	Y [nT]	Z [nT]	X [nT]	Y [nT]	Z [nT]
江刺 (ESA)	3.26	2.46	1.20	3.93	2.80	1.32
水沢 (MIZ)	2.61	2.11	1.44	3.02	2.49	1.56
鹿野山 (KNZ)	1.31	4.01	2.68	3.40	7.12	3.34
女満別 (MMB)	2.76	3.07	4.08	3.48	5.49	7.85
柿岡 (KAK)	0.80	2.03	1.45	1.08	2.10	1.52
鹿屋 (KNY)	2.44	1.05	2.03	3.10	1.30	2.33
赤井川 (AKA)	1.77	5.28	2.55	2.95	6.81	2.82
横浜 (YOK)	4.30	3.04	2.30	5.09	3.57	2.54
志賀 (SIK)	3.97	3.30	2.40	4.50	3.94	2.94
萩原 (HAG)	8.87	4.25	9.80	10.76	4.29	11.74
吉和 (YOS)	1.85	2.12	4.22	3.03	2.41	5.83
十津川 (TTK)	4.93	3.79	4.22	6.81	4.53	6.67
久住 (KUJ)	1.16	3.10	3.60	1.82	3.63	4.53
沖縄 (OKI)	2.06	4.56	3.57	3.67	7.58	11.70
平均	3.01	3.16	3.25	4.05	4.15	4.76

## 4. グリッド化手法の検討と精度評価

### 4.1. グリッド化手法

地磁気時空間モデルから、空間的に不規則に分布した各磁気点上のモデル値が計算できるが、磁気図を作図するためには、規則的な格子点状に配列したグリッドデータが必要である。グリッド間隔は、2.5 万分 1 地形図に少なくとも 4 点以上のデータが作成されるよう、緯度経度共に 3 分間隔としている。また、このグリッドデータは、国土地理院の地磁気値計算ウェブサービスや 2 次メッシュごとの偏角一覧データの計算にも使用される。グリッドデータの作成には、無償で利用可能なプログラム群 The Generic Mapping Tools (GMT : Wessel et al., 2013) のグリッド化コマンドを用いた。グリッド化のコマンドはフィッティングと空間補間のやり方によって複数の選択肢が提供されているが、従来の磁気図では、周囲の 2 階微分までを使用して、作成される面の曲率が最も小さくなるようなスプライン

法である， surface スプライン法を用いていた．今回は， GMT のバージョン 4.4.0 以降で実装された， グリーン関数を用いたスプライン法の適用を検討する． グリーン関数スプライン法にも複数の選択肢があるため， 複数のスプライン法の中から， 磁場分布を再現するのに適当なスプライン法を， 精度評価に基づいて選択する．

#### 4.2. 精度評価手法

地磁気時空間モデルの評価と同様に， グリッド化手法についても内部評価と外部評価を行う． 内部評価として， グリッド化に使用した磁気点上の値（入力値）と， グリッド値から磁気点上の値を推定した値（推定値）とを直接比較する手法を採用する． 本来， グリッド値を作成したスプライン法を用いて， 周囲の格子点データからモデル値を推定すればほぼ正確な値が再現できるはずであるが， 今回は計算の簡便さから推定値の計算に周囲 4 点のデータを用いたバイリニア補間を行うこととする． その上で入力値と推定値を比較し， (3) 式の RMSE を計算する． ここで N は一等・二等磁気点の総数となる．

外部評価は， 一個抜き交差検証を行う． グリッド値を作成する際に， 一点を除外してグリッド値を作成し， 除外した点の推定値をバイリニア補間により計算し， 除外した点の入力値と推定値との比較を行う． この場合も (3) 式の RMSE を計算し， 評価する．

#### 4.3. 内部評価及び外部評価の結果

GMT が提供するグリーン関数スプライン法では， Minimum Curvature スプライン法 (-Sc)， Continuous Curvature スプライン法 (-St)， Regularized スプライン法 (-Sr) の 3 種類が磁気図のグリッドデータ作成に適用できる． 後者 2 つは， 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． 適切なスプライン法を評価するために， これらのグリーン関数スプライン法と従来使用してきた surface スプライン法について， 4.2 節の手法を用いて内部評価を実施した． 阿部ほか (2015b) による評価の結果， 最適なスプライン法は， Regularized スプライン法のテンション 0.02 であると示されているが， モデル作成及びグリッド化に使用する， データ数及び期間が異なることから， 改めて最適な手法の確認を行った． 阿部ほか (2015b) では， 4 つの手法からおおまかなテンションの比較により Minimum Curvature スプライン法と Regularized スプライン法の 2 つに絞り込んだ上で， 更に細かいテンションについて比較している． 今回も 2 つの手法に絞ったところから， テンションを細かく変化させて同様の比較を行う．

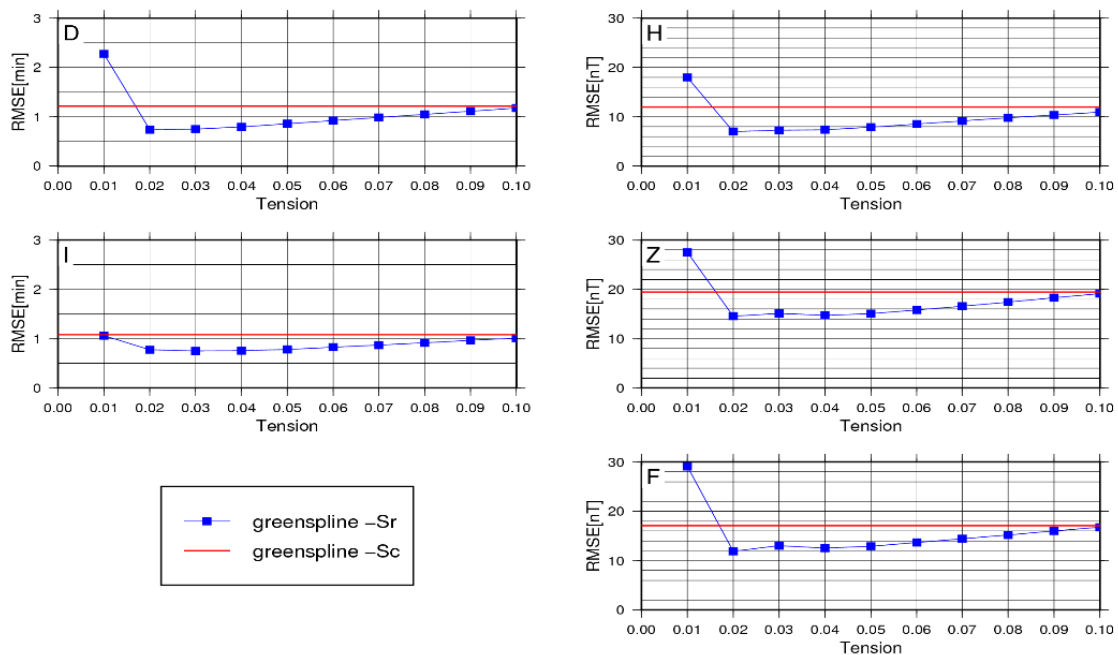
第 2 図に， Regularized スプライン法のテンションを 0.01 から 0.1 まで， 0.01 刻みで変化させて RMSE を計算し， 最小曲率スプライン法の RMSE と比較を行った結果を示す． ほぼ全ての成分において， Regularized スプライン法のテンション 0.02 の場合に RMSE が最小となり， かつ Minimum Curvature スプライン法の結果よりも小さな値をとることがわかる． 伏角成分 I のみ， テンションが 0.03 で RMSE が最小となるが， RMSE の違いは 0.02 分程度であるため， テンション 0.02 を採用してもほとんど差はないと思われる． 以上の残差評価から， 最適なスプライン法はグリーン関数スプラインの Regularized スプライン法のテンション 0.02 であると判断した．

この最適なスプライン法を用いて， 内部評価と外部評価を行った結果を第 2 表及び第 3 表に示す． なお， 比較のために， surface スプライン法の結果をあわせて示す． 第 2 表から， 磁気図 2010.0 年値で採用した surface スプライン法で作成したグリッド値の再現性と比較すると， 最適なスプライン法では RMSE が 3 倍程度改善されていることがわかる． この値は， 磁気図のコンター間隔（角度：10 分， 大

きさ：100nT）と比較するとかなり小さい値で再現されていることから、磁気図で表現することを目標とした精度を十分達成したといえる。

第3表の LOOCV によるグリッド化の残差の RMSE は、内部評価と比べて 10 倍以上大きな値を示す。例えば偏角成分ではコンター間隔の 1.7 倍の残差が生じており、磁気点のない、補間で値を求めている領域では、偏角値で 18 分程度の誤差が生じる可能性を示唆している。RMSE が大きくなった理由は、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の傾向に大きな乖離があるため、周囲の点から妥当な値を推定できなかったことが想定される。これは、観測を行っていない場所に局所的な磁気異常が存在した場合、周囲のデータからは妥当な値を推定することが不可能であることを示しており、入力に用いた一等及び二等磁気点の配点密度よりも細かな空間分布の磁気図を作成するためには、さらに多くの観測点を配置する必要があることを示している。日本の磁場分布は、平均点間距離 20~30km の観測点網で表現することができないほど複雑な特徴を持つことがわかる。一方で、外部評価では、内部評価のようにスプライン法の違いによる有意な差は見られない。これは、スプライン法を変更させたとしても、観測を行っていない場所の値の推定には大きな差が現れないということであり、少なくとも日本の陸域において周囲の磁場データから値を推定する上では、スプライン法の違いによって有意な差は生じないということである。

以上の結果から、磁気図 2015.0 年値のグリッド化手法は、内部評価の優位性から最適なスプライン法を決定した。



第2図 各スプライン法による RMSE の比較

Fig.2 Comparison of RMSE by each spline

第2表 内部評価の結果として得られた各スプライン法の RMSE

Table 3 self-evaluation of each method

	D [min]	I [min]	H [nT]	Z [nT]	F [nT]
Regularized スプライン (最適)	0.74	0.77	7.00	14.54	11.89
surface スプライン	2.13	1.90	21.58	34.35	30.52

第 3 表 外部評価 (LOOCV) の結果として得られた各スプライン法の RMSE

Table 4 outside-evaluation of each spline

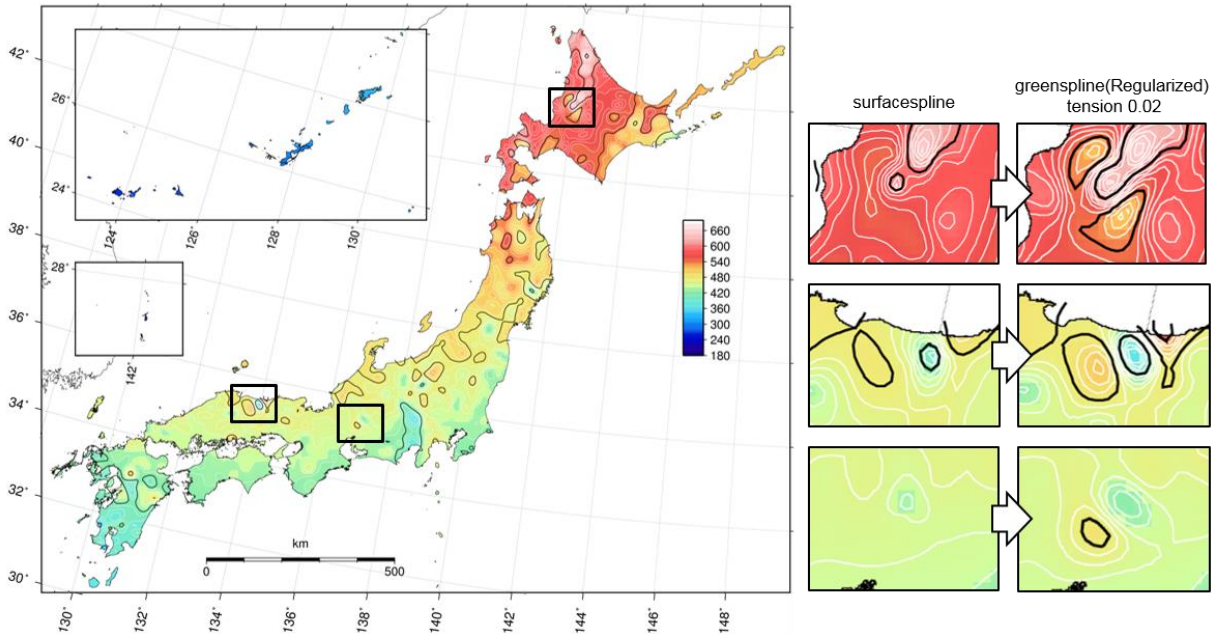
	D [min]	I [min]	H [nT]	Z [nT]	F [nT]
Regularized スプライン (最適)	17.63	15.65	180.80	276.10	246.15
surface スプライン	16.92	14.50	172.33	259.31	234.16

#### 4.4. 従来手法との比較

4.3 節で決定したグリッド化手法による磁気図と、従来の磁気図との比較を行った。磁気図 2015.0 年値の作成に用いた入力値を使用して、surface スプライン法とグリーン関数スプライン法でそれぞれ磁気図を作図した。偏角成分の磁気図について、第 3 図にスプライン法の違いによる差が大きい地域を示す。

各地域を比較すると、等値線の間隔がグリーン関数スプライン法の方が密になっている。これは、surface スプライン法では滑らかに表現されてしまった値が、より実測値に近い値で周囲が補間されることにより、詳細な磁気異常が適切に表現されていることを示している。surface スプライン法では表現できなかった、実際の磁場の分布に存在する水平磁気勾配の大きな凹凸が、グリーン関数スプライン法ではより現実に沿った磁場分布として表現されているものと考えられる。一方で、周辺のある一部の点に観測誤差が含まれていた場合、その観測誤差を局所的な磁気異常として表現してしまっている可能性もあり得るため、図に示すような差が大きい地域において、今後現地測量により実測値と磁気図の値を比較検証する予定である。

Geomagnetic Charts of D for the epoch 2015.0 using greenspline(Regularized) tension 0.02



第 3 図 スプライン法の違いによる磁気図の変化

Fig.3 Changes in Geomagnetic Charts of D due to differences in spline

#### 5. 磁気図等データの公開方法

磁気図 2015.0 年値の公表と合わせ、2016 年 12 月 1 日より、地磁気測量ホームページ上で、主に第

4 表に示すデータ等を提供している。このうち、磁気図及び偏角一覧図はこれまで印刷図も作成していたが、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での提供に対するニーズの方が高いことが判明したため、今回から PDF または地理院地図上のみの提供とした。また、各種ソフトウェア、登山アプリケーション等での利用を考慮し、新たに偏角一覧の txt 形式での提供を開始した。なお、今回更新した偏角は、2016年12月1日以降に刊行する2万5千分1地形図及び電子地形図にも反映されている。

第4表 磁気図 2015.0 年値に関連する主な公開データ

Table 4 Major public data related to Geomagnetic Charts of Japan for the epoch 2015.0

公開データ	提供方法	URL
磁気図 2015.0 年値	PDF／地理院地図	<a href="http://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/menu03_magnetic_chart.html#menu01">http://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/menu03_magnetic_chart.html#menu01</a>
偏角一覧図	地理院地図	<a href="http://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/menu03_magnetic_chart.html#menu03">http://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/menu03_magnetic_chart.html#menu03</a>
偏角一覧	txt 形式	<a href="http://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/menu03_magnetic_chart.html#menu02">http://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/menu03_magnetic_chart.html#menu02</a>
地磁気値計算サイト	web	<a href="http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_04/index.html#keisan">http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_04/index.html#keisan</a>

## 6. まとめ

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地磁気変化モデルを作成した。1999年1月1日から2015年12月31日までの16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、基準エポックとした2000.0年値に変化モデルを加えることで任意のエポックでの絶対値モデルを作成することが可能となった。モデルの精度は、外部評価の結果、X、Y、Z各成分で5nT程度となった。また、磁気図作成の際に入力データを補間する手法について、最適なグリッド化手法の検討及び精度検証を実施した。検証の結果、入力値を最もよく再現する補間手法は、GMTのグリーン関数スプラインのRegularizedスプライン法で、テンションが0.02の場合であると判断した。最適なスプライン法を使用した際のデータの再現性は、外部評価の結果、偏角で18分程度、伏角で15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。

上記のモデル及びグリッド化手法を用いて2015年1月1日時点の磁気図を作成し、2016年12月1日に、最新版の磁気図である「磁気図 2015.0 年値」を公表した。

## 参考文献

- 阿部聡, 宮原伐折羅, 小山 崇夫・小河 勉 (2015a) : 主成分分析を用いた地磁気全磁力モデルの開発, *Conductivity Anomaly 研究会論文集 2015*, **97**.
- 阿部聡, 宮原伐折羅 (2015b) : 日本の磁気図作成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**.
- 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, 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.
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. F. Luis, and F. Wobbe, Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Trans. AGU*, **94**, 409-410, 2013.