

磁気図 2015.0 年値の作成へ向けて

阿部 聡・菅原 安宏・上村 和彦・宮原 伐折羅 (国土地理院)

Draft Report on Development of Geomagnetic Charts of Japan for the epoch 2015.0

Satoshi Abe, Yasuhiro Sugawara, Kazuhiko Uemura, Basara Miyahara (GSI)

Abstract

Geospatial Information Authority of Japan (GSI) has conducted nationwide geomagnetic survey since 1949. GSI released the Geomagnetic Charts every 10 years since 1971 which represents spatial distribution of 5 geomagnetic components in Japan. In 2016, GSI will release the latest Geomagnetic Charts of Japan for the epoch 2015.0. Recently, GSI has developed the geomagnetic spatial-temporal model, and established a procedure for accuracy validation of the model. Moreover, GSI evaluated methods of spatial fitting and interpolation for gridding, and selected the most appropriate method for the dataset. Residuals of each model component are approximately 4nT in the standard deviation and those of the fitting is 6~15nT. In total, the accuracy of the charts is estimated around 10nT. In this paper, we report a result of the evaluation for an experimental model.

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、1949年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知るための繰り返し観測が実施され、約700点の二等磁気点では磁場分布を知るための観測が実施されてきた。なお、二等磁気測量は1969年までに全国2度の改測を実施して終了している。そのほかに全国各地における地磁気ベクトルの連続観測も実施しており、3つの観測所では1950年代から順番に地磁気ベクトルの連続観測を開始し、1990年代の後半には全国11か所の連続観測施設で観測を開始している。国土地理院はこれらの成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た5年ごとに更新を行う。

2016年に公開を予定する磁気図2015.0年値は、「地磁気時空間モデル」を用いて作成される。磁気図2015.0年値を作成するにあたりモデルの改修を行い、更に精度評価手法を確立した。今回は磁気図作成の手法を紹介するとともに、現時点で得られている2014年末までのデータを用いて磁気図の試作を行い、モデルの精度評価を実施したほか、磁気図作図の際に空間補間で行うグリッドデータ作成過程における精度評価も実施したので、ここに報告する。

2. 地磁気時空間モデル

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。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)を用いる(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、入力データに変化量を用いるため、基準エポックからの差分を算出した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 (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。これは、一等磁気点を同化しない場合に、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という事実に基づくものである。

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を推定可能とする。本モデルでは、あくまでも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。(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) 式で計算された空間関数と (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。こうして、磁気図作図のための、800 点を超える一等・二等磁気点におけるあるエポック（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. グリッド化

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得られるが、磁気図を作図するためには、グリッド化と呼ばれる規則的な格子点状に配列したデータの作成作業が必要である。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、2.5 万分 1 地形図ごとの偏角値の計算に使用される。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。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て行った。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，精度検証に基づいて選択する．

4. 精度検証手法

4.1. 地磁気時空間モデルに関する精度評価

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，①モデルの作成，②連続観測値のある入力点のモデル値を計算，③モデル値と連続観測値（実測値）とを比較，の順で行う．なお，日平均値モデルであるため，モデル値と連続観測値はそれぞれ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) 式は入力点ごとに計算される．N は時系列のデータ数となる．

外部評価としては，一個抜き交差検証（LOOCV，例えば地球統計学研究委員会，2003）を行うこととする．これは，①連続観測値のある入力点のうち，ある一点を除外してモデルを構築，②除外した点のモデル値を計算，③モデル値と実測値とを比較，の順で行う．LOOCV においても，(3) 式の RMSE を計算し，その値でもって評価を行うこととする．

また，もう一つの外部評価として，一等磁気測量成果と比較を行う．2 章で述べたように，一等磁気測量成果は繰り返し観測結果がまとめられたものである．モデル作成期間中に 2 回以上の観測を実施している点において，①1 回目の観測結果を基準エポックとし，変化量モデルを適用することで以降の時系列データを作成，②2 回目以降の観測結果とモデル値との直接比較を行う．繰り返し観測の回数はせいぜい 4～5 回程度であるため，全ての観測とモデル値との差に対して RMSE を計算する．

4.2. グリッド化に関する精度評価

グリッド化についても同様に，内部評価と外部評価を行う．内部評価としては，入力値（一等・二等磁気点上の値）と，グリッド値から入力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四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．ここでの N は一等・二等磁気点の総数となる．

外部評価としては，一個抜き交差検証を行うこととする．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．

5. モデルの試作と精度評価

現時点で得られている 2014 年末までのデータを用いて，上記の作成手法により磁気図の試作を行い，精度評価を実施した．扱うデータは，1999 年 1 月 1 日から 2014 年 12 月 31 日までの日平均値で，

国土地理院の観測所 3 点，連続観測施設 9 点，気象庁の観測所 3 点の，合計 15 点の連続観測データを使用した。毎日の変化を正確にトレースするという目的から，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。一部のデータに異常が含まれていたため，以下に示すように個別に対応した。十津川のデータでは 2001 年 8 月 4 日から 11 月 20 日まで全成分に極端な増減が見られたため，当該期間を欠測処理とした。また，萩原と吉和については，1999 年に Z 成分のみ 20nT 程度の増減が見られたため，F，X，Y 成分から Z 成分を推定して補うこととした。なお，計算期間は，萩原が 1999 年 1 月 1 日～10 月 31 日，吉和が 1999 年 1 月 1 日～9 月 18 日である。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，採用する主成分数を決定した。今回のデータセットにおいては，X 成分が第三主成分まで，Y 成分が第二主成分まで，Z 成分が第二主成分までとした。この主成分の時間関数の組と，礼文島の繰り返し観測データから，礼文島の空間関数を推定し，それを加えて空間関数を緯度経度の二次多項式でフィッティングした。

5.1. 内部評価及び外部評価

内部及び外部評価では，それぞれ作成したモデルを用いて，各連続観測点におけるモデル値を計算し，実測値と比較して（3）式の RMSE を計算した。それぞれの計算結果を表-1 に示す。

表-1 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（単位：nT）

観測点	内部評価			外部評価		
	X [nT]	Y [nT]	Z [nT]	X [nT]	Y [nT]	Z [nT]
江刺 (ESA)	4.67	2.61	1.32	5.49	2.93	1.44
水沢 (MIZ)	3.96	2.03	1.80	4.54	2.33	1.97
鹿野山 (KNZ)	1.79	4.29	2.13	2.60	6.99	2.18
女満別 (MMB)	3.56	2.07	4.37	5.78	3.06	8.91
柿岡 (KAK)	2.88	2.27	1.35	3.81	2.48	1.54
鹿屋 (KNY)	4.19	1.14	2.20	5.32	1.42	2.54
赤井川 (AKA)	2.51	7.30	4.22	5.14	9.42	5.04
横浜 (YOK)	4.20	2.85	2.47	4.93	3.27	2.69
原町 (HAR)	9.26	3.62	6.89	11.50	4.14	8.01
志賀 (SIK)	3.74	4.62	3.18	4.37	5.49	3.93
萩原 (HAG)	8.22	4.57	9.62	9.88	4.70	11.61
吉和 (YOS)	2.33	2.58	5.68	3.82	2.87	7.99
十津川 (TTK)	5.83	5.47	4.02	8.02	6.70	6.20
久住 (KUJ)	1.50	2.49	1.97	2.42	2.94	2.25
沖縄 (OKI)	2.29	4.59	3.64	10.45	8.29	9.45
平均	4.06	3.50	3.66	5.87	4.47	5.05

表-1 では，内部評価より LOOCV の方が RMSE の値が大きい。データの同化によって再現性が向上するのは妥当な結果であり，モデルが正常に機能していることが確認できる。またこの LOOCV の結

果は、観測点が無い場所のモデルの再現性を示していることから、今回の評価では、X成分が最も残差が大きく6nT程度で、試作モデルでは6nT程度の精度を有することが示された。

続いて、もう一つの外部評価である一等磁気測量成果を用いた検証結果を、表-2に示す。なお、このRMSEは、得られた全ての実測値とモデル値との差を用いて計算された値である。

表-2 外部評価（一等磁気測量成果との比較）による成分ごとのRMSE（単位：nT）

	X [nT]	Y [nT]	Z [nT]
RMSE	6.00	8.21	11.01

表-2では、表-1の外部評価の結果と比較して最大で2倍程度の値が得られている。離散的な繰り返し観測では、連続観測と比べて観測値自体の信頼度の評価が難しいため、この乖離には、観測の誤差も含まれると考えられる。一部の点では、最初のエポックから展開したモデルと以降の観測値に系統的なギャップが生じており、個別に評価する必要がある。

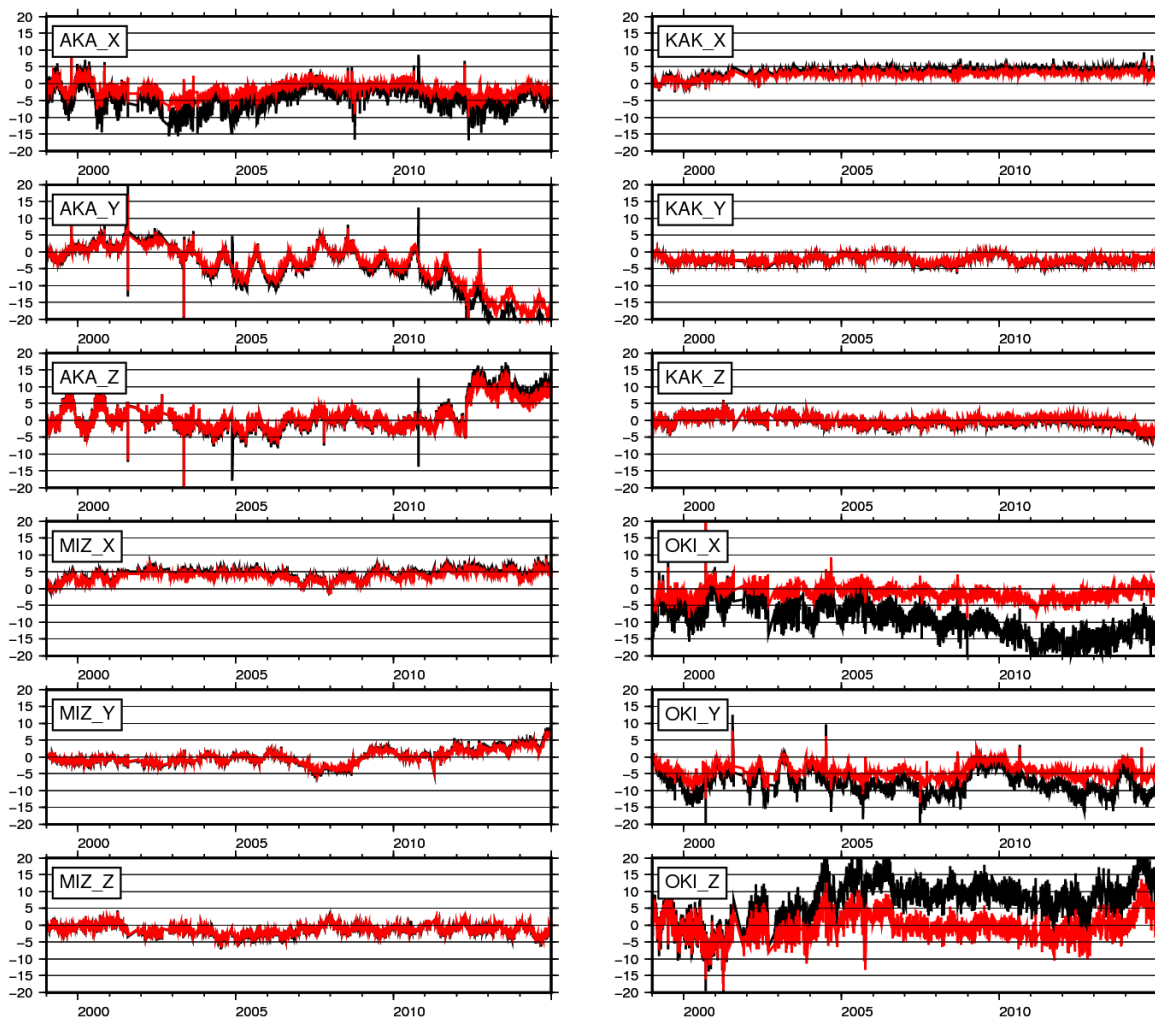


図-1 代表的な観測点の内部評価の結果の残差（黒線）と外部評価の結果の残差（赤線）。

5.2. モデルの精度評価のまとめ

モデルの確認も兼ねて、内部及び外部評価の結果として得られる各成分の残差の時系列について、代表的な点の残差を図-1 に示す。これらは全て、-20nT から 20nT までの範囲で描画している。

図-1 から、一部の点では内部評価と外部評価で残差が大きく異なることがわかる。これらの点は、モデルに組み込むことで、観測点周囲のモデル値をより実測値に近いものにしていくといえる。連続観測点と観測所の両方を図示したが、観測所である水沢 (MIZ)、柿岡 (KAK) は残差の変化が小さく、観測環境が良好で局所的なノイズを含まない地域の代表的な値が得られていることがうかがえる。

6. グリッド化の精度評価

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 種類が磁気図作成用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内部評価を実施した。内部評価では、4.2 節に記載したとおり、3 分間隔のグリッドデータからバイリニア補間によって磁気点上の推定値を計算し、入力値との比較を行った。評価の指標として、(3) 式の RMSE を計算する。阿部ほか (2015) 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。そこで、この最適なスプライン法を用いた際の、内部評価と外部評価を行った結果を表-3 及び表-4 に示す。なお、比較のために、surface スプライン法と、グリーン関数スプライン法の Minimum Curvature スプライン法の結果をあわせて示す。

表-3 内部評価によるグリッド化の残差

	D [min]	I [min]	H [nT]	Z [nT]	F [nT]
Regularized スプライン (最適)	0.74	0.77	6.79	14.48	11.77
surface スプライン	2.13	1.90	21.32	34.34	30.47
Minimum Curvature スプライン	1.20	1.06	11.67	19.40	17.05

表-4 外部評価 (LOOCV) によるグリッド化の残差

	D [min]	I [min]	H [nT]	Z [nT]	F [nT]
Regularized スプライン (最適)	17.67	15.76	181.63	276.52	246.52
surface スプライン	16.91	14.65	172.02	259.50	233.53
Minimum Curvature スプライン	17.56	15.06	176.33	262.88	236.09

表-3 からは、最適と判断したグリーン関数スプライン法の Regularized スプラインの RMSE が最も小さいことが確認できる。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。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。

一方、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。

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、補間で値を指定している領域では、偏角値で 20 分程度の誤差が生じる可能性がある。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。

7. 従来手法との比較

ここでは、選択した最適な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う。磁気図 2010.0 年値で用いた入力値を用いて、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。特に偏角成分について、図-2 に surface スプライン法による磁気図を、図-3 にグリーン関数スプライン法による磁気図を示す。

図-2 と図-3 を比較すると、特に磁気異常が大きい地域において、等値線の間隔が異なることが見て取れる。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、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。

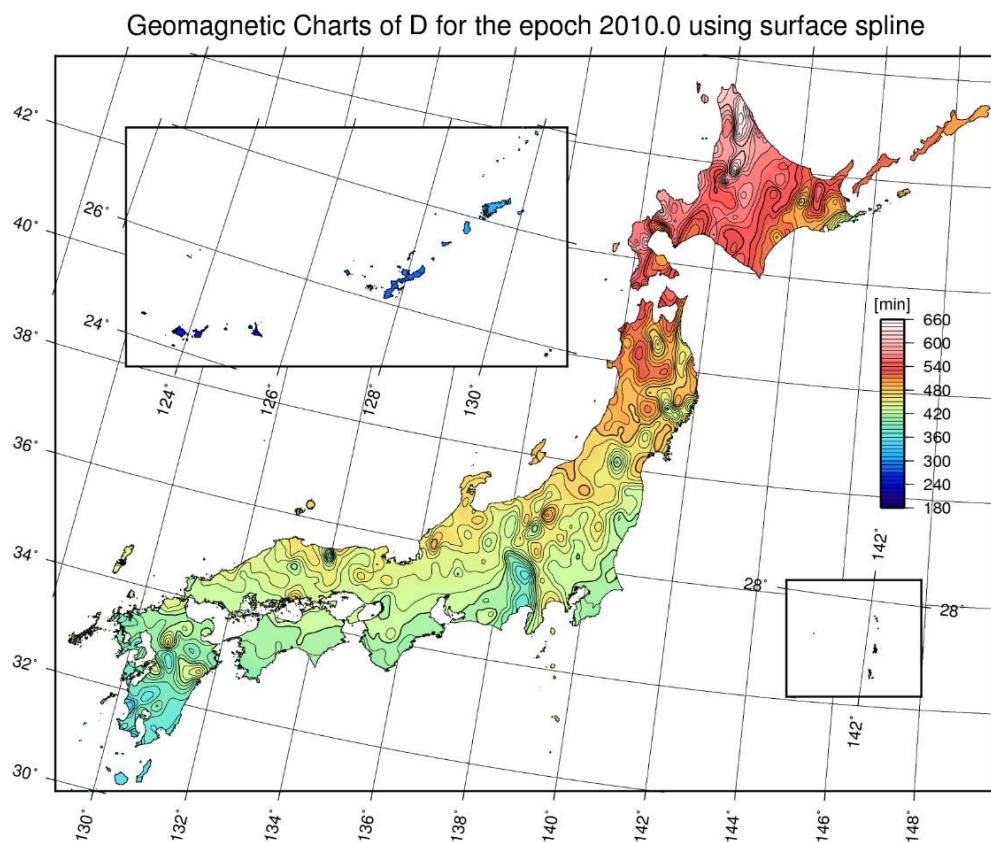


図-2 surface スプライン法（テンション 0）による磁気図 2010.0 年値（偏角図）

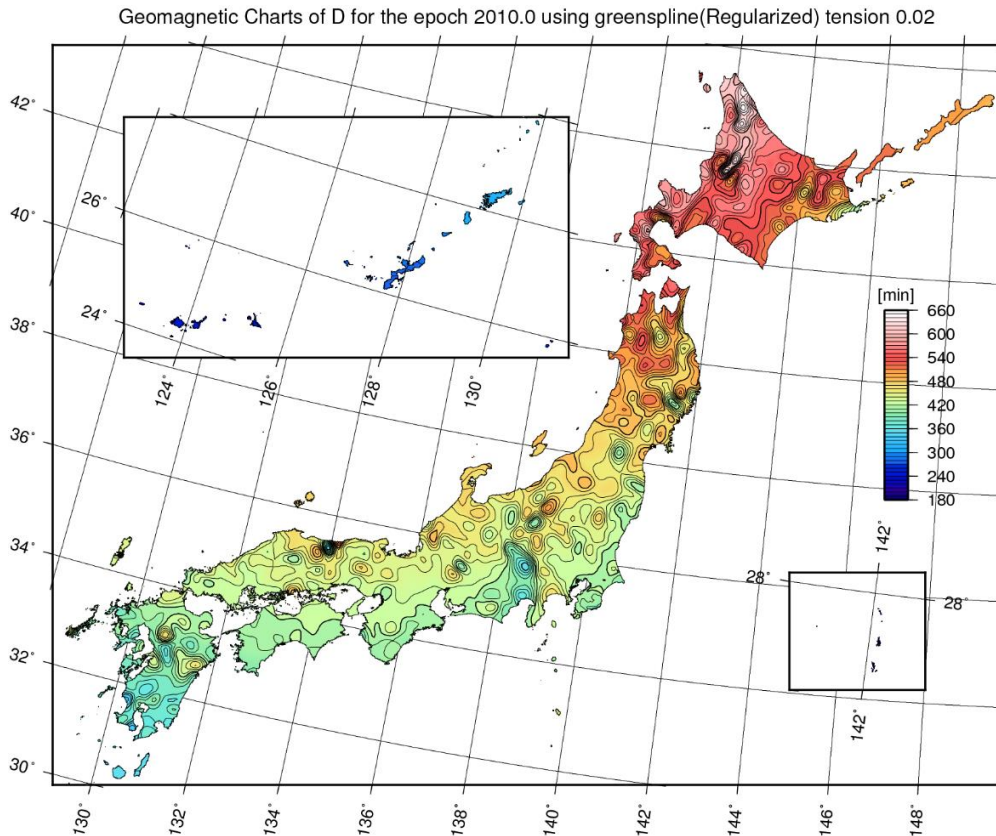


図-3 グリーン関数スプライン法 (Regularized, テンション 0.02) による磁気図 2010.0 年値 (偏角図)

8. まとめ

磁気図 2015.0 年値の作成に向けて、地磁気時空間モデルの改良を行った。モデルの精度評価手法を確立し、さらにグリッド化についても精度評価手法を確立した。今回、2014 年までのデータを用いてモデルの試作を行った結果、精度 10nT 程度のモデルが作成された。評価から、時空間モデル作成と比較してグリッドデータ作成における誤差のほうが大きいことが示された。2016 年には、今回報告した手法を用いて磁気図 2015.0 年値を作成する予定である。

参考文献

- 阿部聡, 宮原伐折羅 (2015) : 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**, 印刷中.
- 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.