

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
Evaluation of interpolation method for geomagnetic values applied for development of
geomagnetic charts of Japan

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

要 旨

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に地磁気測量を実施し、得られた磁場分布を磁気図として公開している。最新の磁気図は 2011 年に公表した磁気図 2010.0 年値で、磁場 5 成分（偏角 D、伏角 I、水平分力 H、鉛直分力 Z、全磁力 F）の 2010 年 1 月 1 日における空間分布を示す図である。最新の磁気図では、日本全国の地磁気のモデル値を計算する「地磁気時空間モデル」を新たに作成し、これを用いて磁気図を作成した。今後はこのモデルを使用して、5 年の更新間隔で磁気図を更新する。地磁気時空間モデルを用いると、任意の時期の任意の場所における磁場の変位を得ることができるため、これを加味することで、過去に地磁気測量を実施したことがある日本全国の一等及

び二等磁気点上において磁場のモデル値を得ることができる。得られたモデル値は磁気点のみに存在し、点以外の場所では値が得られないため、隙間なく全国を網羅する磁気図を作成するためには、各磁気点におけるモデル値を空間補間することで、地磁気値が等間隔に配列したデータを作成する必要がある。しかし、この手法では、周囲のデータと可能な限り整合するよう配列データを作成するため、作成したデータと元の入力モデル値は完全には一致せず、残差が生じる。補間にあたっては、できるだけ残差を小さく、地磁気の空間分布を適切に表現する最適な空間補間手法を選択する必要がある。そこで、より精度のよい磁気図の作成を目的として、複数の手法について再現性の評価と一個抜き交差検証による精度評価を行い、最適な空間補間手法の検証を行った。

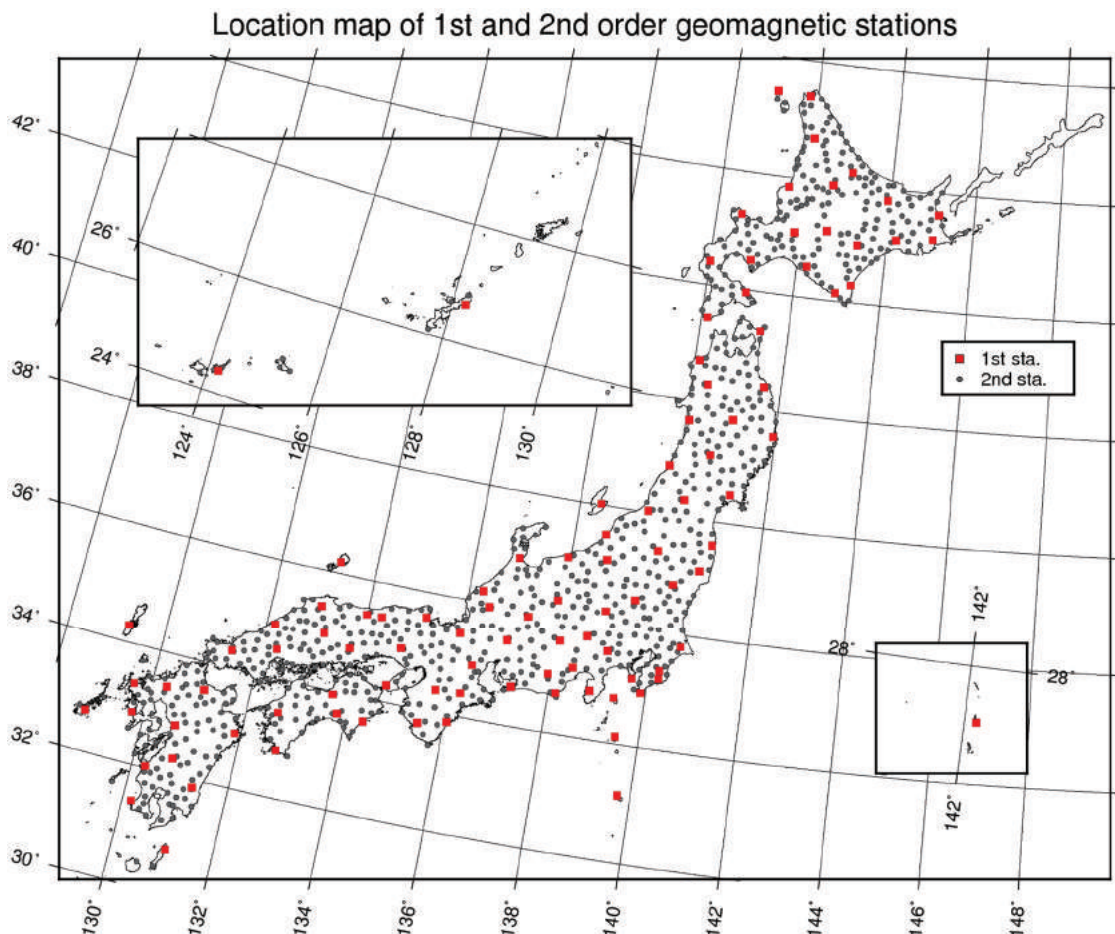


図-1 一等磁気点及び二等磁気点の配点図

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、1948年から現在まで日本全国を網羅する地磁気測量を実施している。国土地理院では、地磁気測量を目的に応じて一等磁気測量と二等磁気測量に分類している。一等磁気測量では、地磁気の永年変化を把握することを目的として、日本全国約100点の一等磁気点上で繰り返し観測を行い、二等磁気測量では、磁気異常の分布を把握する

ことを目的に、日本全国約840点の二等磁気点上で観測を行っている（図-1）。これらの観測の成果は、磁場分布を等値線図で示した「磁気図」にまとめられるが、地磁気の分布は時空間的に変化し続けているため、正確な磁場分布を表す磁気図を作成するには、観測を継続して磁場の時空間変化を把握し、磁気図を定期的に更新する必要がある。

国土地理院はこれまで、表-1に示すとおり磁気図の公開を13回行っている。

表-1 過去に作成された磁気図一覧

磁気図名（参考文献）	観測期間	対象地域	作成した地磁気成分
一等磁気測量成果			
磁気図1950.0年値 （Tsubokawa, 1952）	1948-51	全国	偏角D 伏角I 水平分力H
磁気図1960.0年値 （The Geographical Survey Institute, 1961）	1951-57		
二等磁気測量成果			
磁気図1952.5年値 （The Geographical Survey Institute, 1954）	1952-53	北海道	偏角D 伏角I 水平分力H
磁気図1955.0年値 （The Geographical Survey Institute, 1957）	1953-55	東日本	
磁気図1955.0年値 （The Geographical Survey Institute, 1960）	1956-57	西日本	
磁気図1960.0年値 （The Geographical Survey Institute, 1962）	1958-59	北海道	偏角D 伏角I 水平分力H 全磁力F
磁気図1960.0年値 （The Geographical Survey Institute, 1965）	1960-63	東日本	
磁気図1960.0年値 （The Geographical Survey Institute, 1971）	1964-69	西日本	
一等・二等磁気測量成果			
磁気図1970.0年値 （The Geographical Survey Institute, 1973）	1958-1971	全国	偏角D 伏角I 水平分力H 鉛直分力Z 全磁力F
磁気図1980.0年値 （First Geodetic Division, 1983）	1971-1980		
磁気図1990.0年値 （First Geodetic Division, 1993）	1981-1990		
磁気図2000.0年値 （白井ほか， 2002）	1980-2000		
磁気図2010.0年値 （植田ほか， 2013）	1969-2010		

一等磁気測量の成果のみを使用した磁気図は、最も古いもので全国51点の一等磁気点の観測結果を用いており、以降は磁気点を増設しながら作成を行ってきた。一等磁気点は全国100点程度で、空間密度の限界から、これらの磁気図では磁場の局所的な分布は表現できないが、広域の磁場分布を表現するには十分な空間解像度を持つため、一等磁気測量成果を

経緯度の二次多項式で近似し、近似曲線で日本全国の磁場分布を表現している。

一方、二等磁気測量成果のみを使用した磁気図では、全国約840点の二等磁気点の観測による密な観測点密度を活かして局所的な磁気異常の分布を把握できるため、地域ごとに二等磁気測量の成果を補間して作成した等値線で磁場分布を表現している。

磁気図1970.0年値以降は、一等磁気測量成果及び第2回の二等磁気測量成果を用いて、日本全国の詳細な磁気図の作成を開始した。磁気図1970.0年値から2000.0年値の期間では、全国およそ100点の一等磁気点に対して、全国を網羅するように点を選択して繰り返し観測を実施し、その成果に基づいて10年ごとにその期間の地磁気の変化量を求め、その変化量を磁気図1970.0年値に累積して加算することでその時点の磁気図を作成してきた。

しかし、磁気図2010.0年値の作成にあたっては、全国11か所に設置した「地球電磁気連続観測装置」による全磁力及び地磁気三成分の連続観測を1997年に開始したこと、連続観測の開始に伴って一等磁気測量の観測点数を減らしたことから、使用できる観測データが変わったため、同様の手法で磁気図を作成することが難しくなった。そこで、「地磁気時空間モデル」を使用した新しい磁気図作成手法を開発し、磁気図2010.0年値の作成に採用した（植田ほか，2013）。このモデルでは、複数の連続観測データから、数学的な解析手法を用いて全国を網羅する磁場変化量モデルを作成するため、全ての一等及び二等磁気点において磁場のモデル値を得ることができる。モデル値は、一等及び二等磁気点における空間的に離散的な地磁気値である。モデル値から空間を抜けなく網羅した等値線図を作成するにあたり、空間的に不規則で隙間のある分布を持つ一等及び二等磁気点の地磁気値から、空間補間によって等間隔に隙間なく配列した地磁気値のデータ（以下、「グリッドデータ」という。）を作成し、グリッドデータから磁気図を描画する処理が必要となる。グリッドデータの作成には、地球科学の計算処理を行うプログラム群であるThe Generic Mapping Tools（GMT）（Wessel and Smith, 1998）を用いた。グリッドデータを作成するための空間補間手法（以下、「グリッド化手法」という。）には、どのような関数を用いて平滑化したデータを表現するか、出力結果を入力値にどの程度拘束するか、周囲の観測データとの相関をどの程度考慮するかなど、複数の選択肢があるが、磁気図2010.0年値の作成では、離散的なデータを空間補間する際に標準的に用いられるsurfaceスプライン法（Smith and Wessel, 1990）を採用した。磁気図2015.0年値の作成に先立ち、今回、入力データの再現性の評価と一個抜き交差検証（Leave-One-Out Cross Validation：LOOCV，例えば地球統計学研究委員会，2003）による精度評価に基づいて、最適なグリッド化手法の検討を行った。

2. 磁気図作成手法について

モデル作成の過程における今回の検討の位置づけを明確にするため、磁気図 2010.0 年値の作成手法

（植田ほか，2013）を簡潔に述べる。磁気図 2010.0 年値の作成は、図-2 に示すように大きく 2 段階に分けられる。

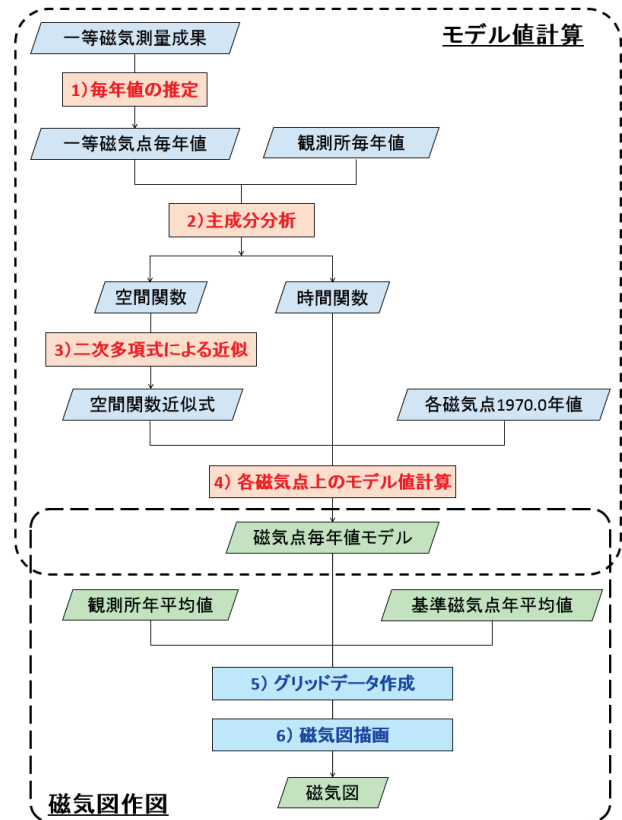


図-2 磁気図作成のフローチャート

第一の作成過程は磁場のモデル値計算で、図-2 の 1) から 4) の手順に相当する。ここでは、地磁気時空間モデルを使用して、任意の時間における一等及び二等磁気点における磁場のモデル値を推定する。地磁気時空間モデルでは、基準とする任意の時期における地磁気値からの変化量を推定することができる。ただし、変化量の推定は、連続したデータを用いて行う主成分分析によって可能となるため、基準とする任意の時期から推定したい時期までの連続データが必要である。磁気図 2010.0 年値の作成では、基準日を 1970 年 1 月 1 日（磁気図 1970.0 年値成果）としたため、モデルの特性上、1969 年からの連続観測データが必要となる。そのような連続観測データが存在するのは、国土地理院及び気象庁が運用する 5 点の観測所のみで、全国の磁場の変化を把握するためには空間分布が不十分である。そのため、5 点の観測所の連続データを用いて主成分分析を行い、その結果を用いて繰り返し観測を実施した一等磁気点のデータについて毎年の地磁気値を推定した上で、観測所のデータに推定した一等磁気点のデータを加えて再度主成分分析を行うという煩雑な手法を用いている。さらに、次回更新を予定する磁気図 2015.0

年値からは、1999 年以降については、全国 10 ヶ所の地球電磁気連続観測装置の連続観測データが利用可能であるため、これらのデータも加えてモデルを作成する予定である。なお、装置の近傍には花崗岩の基準磁気点が設置されており、装置で得られた観測データは基準磁気点における値に補正されている。モデル作成手法の詳細とモデルの精度評価は、阿部ほか（2016）で述べられており、5～10nT で磁場変化を再現するモデルが得られることが確認されている。

第二の作成過程は磁気図の作図で、図-2 の 5) から 6) の手順に相当する。最初の作成過程で一等及び二等磁気点における任意の時期の磁場のモデル値が得られ、そこに観測所と基準磁気点の任意の時期の年平均値（以下、「毎年値」という。）を加えてデータセットを作成し、GMT のグリッド化コマンドによって経度緯度 3 分間隔のグリッドデータを作成して等値線図を描画する。ここで作成したグリッドデータは、磁気図のほかに 2.5 万分 1 図葉ごとの偏角値及びそれらの偏角値一覧を図にした偏角一覧図、並びに国土地理院のホームページで提供している、任意の場所における地磁気値計算サービスサイト（http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_04/index.html#keisan）で活用されている。

以上のように、磁気図はモデル値計算と作図の 2 つの作成過程に分けられる。本稿では、2 つ目の作成過程である磁気図の作図における、グリッド化手法について検証を行う。

3. 検証対象とする空間補間（グリッド化）手法

磁気図を作成するために、空間的に離散的に分布した磁気点の毎年値のモデル値並びに観測所及び基準磁気点の毎年値から、GMT のプログラムを使用してグリッドデータを作成する。GMT はオープンソースソフトウェアで、空間的に離散的なデータから地図上に等値線図を描画するプログラムを提供している。データの空間的な分布パターンに何らかの物理的な特徴が明確にあるのであれば、その特徴を表現するために適したモデル化手法を選択する必要があるが、国土地理院で観測している地磁気の値は主磁場だけでなく地殻起源の残留磁場も含む、局所的な

磁気異常を強く反映したものであるため、空間分布に物理モデルを仮定して補間をすることが難しい。そこで、補間方法には物理的な意味は求めず、次の二つの条件を満たすグリッド化手法を求めることとした。

① 磁気点における磁場のモデル値（以下、「入力値」と呼ぶ。）とグリッドデータとの残差が小さい。

② LOOCV で評価した残差が小さい。

GMT に実装されているグリッド化手法は複数あるため、まずは各手法の特徴を概観し、検討対象の手法を整理する。

3.1 surface スプライン法

surface スプライン法は、すべての入力値を滑らかにつなぐ曲面でグリッドデータを作成する手法で、テンションを指定して平滑化を実行する。テンションは、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変数で、0 から 1 の間の値をとる。テンションが 0 の場合は最も滑らかな面となり、1 の場合は平面的になる。surface スプライン法は外挿で曲面を作成することが可能であり、磁気図 2010.0 年値作成の際にはテンション 0 として surface スプライン法を採用したため、本稿でも従来手法との比較として検討の対象とする。

3.2 グリーン関数スプライン法

グリーン関数は、情報の伝播を表す関数であり、ある場所の情報が周囲の点にどのように伝播するかを表現する。グリッド化では、作成したグリッドデータがその点で入力値と整合するだけでなく、できるだけ多くの周囲の点と整合することが重要であるため、周囲の点の情報がより多く反映されるグリーン関数を用いることを検討する。グリーン関数スプライン法は、GMT ver.4.4.0 以降で実装されており、コマンドのオプションで 5 種類のスプライン法を選択することが可能である（GMT ver.4.5.9 の場合）。今回取り扱う日本周辺の磁場データは、高さ方向の情報を含まないため、これらのうち、2 次元データに対して利用可能な 3 種類のスプライン法を検討した（表-2）。

表-2 2次元データに適用可能なグリーン関数スプラインの種別

名称	英語名称	オプション 表記	テンション	対象次元
最小曲率	Minimum Curvature	-Sc	不可	1-3 次元
曲率保持	Continuous Curvature	-St	可	1-3 次元
正則化	Regularized	-Sr	可	2-3 次元

最小曲率スプライン法 (Sandwell, 1987) は、データ点間をつなぐ曲面の曲率を最小にするスプライン法であるため、テンションは指定できず、解は1つに決まる。曲率保持スプライン法 (Wessel and Bercovici, 1998) は、データ点における微分値が滑らかに接続されるような曲面でデータを補間するスプライン法であり、曲面の滑らかさを表すテンションに0から1の値を指定する。最後の正則化スプライン法 (Mitasova and Mitas, 1993) は、平滑化関数を用いることで極端に歪んだ曲線を描かないように曲面を描くスプライン法で、0から1の間でテンションを指定する。なお、グリーン関数スプラインでは、テンションを0と1に指定することはできず、両者の間の値を指定することが推奨されている。

グリーン関数スプライン法では、表-2 に示した3つの手法を検討対象とする。ただし、曲率保持及び正則化スプライン法では、テンションを0から1の間で自由に設定可能なため、作成可能なグリッドデータは無数にある。これらの中から最適なものを選ぶにあたり、全パターンを試行することは非効率であるため、まずは簡易な検証によってテンションを絞り込み、その後テンションを細かく変化させて最適な値の検討を行うこととした。

4. 最適な再現性を実現する空間補間 (グリッド化) 手法の検証

最適なグリッド化手法の検討として、まずは入力値と作成したグリッドデータの値 (以下、「グリッド値」という.) を直接比較することで内部評価を実施した。この内部評価によって適当なスプライン法とテンション値の範囲を絞り込み、その後更に細かくテンション値を変更することで最適なグリッド化手法を選定した。また、LOOCV による最適なグリッド化手法の検討とその妥当性の評価も実施した。いずれの場合も空間的にランダムに位置した入力値とグリッド値を比較するが、グリッド値は緯度経度3分間隔で作成するため、入力値とグリッド値の位置が異なる場合、直接比較ができない。そこで、比較対象を、周囲のグリッド値からバイリニア補間によって推定した、磁気点における地磁気の推定値 (以下、「推定値」という.) とし、比較を行った。

4.1 内部評価による検証

まずは、4つの手法に対して、磁気図2010.0年値を用いて、入力値と推定値の比較を行った。磁気点の分布と入力値を図にしたものを図-3に示す。

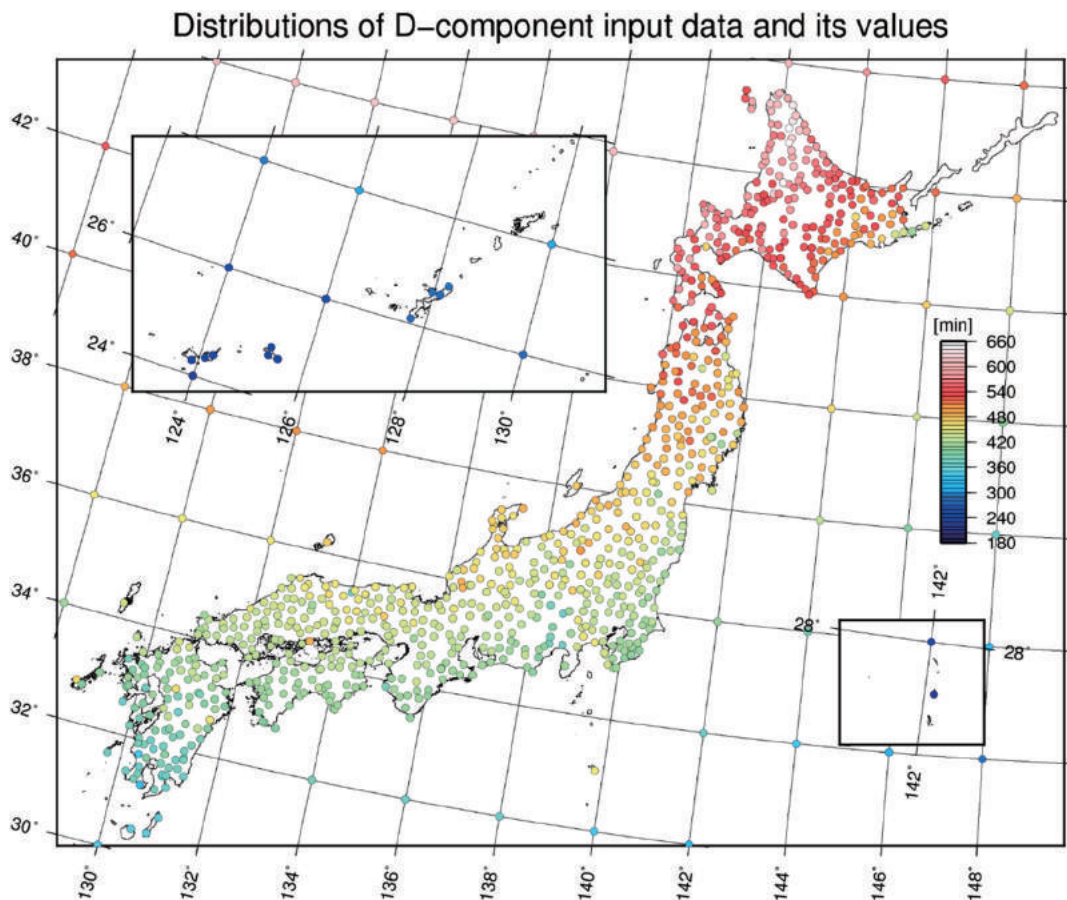


図-3 磁気点における入力値 (一等及び二等磁気点のモデル値, 観測所・基準磁気点の年平均値, 海上の IGRF-11 値). 偏角Dの例を示しており, カラーバーの単位は「分」である.

なお、入力値には、陸上の一等及び二等磁気点、観測所及び基準磁気点に加え、海上に地磁気世界モデル (IGRF-11) (Finlay et al., 2010) から推定した値を、緯度経度 2 度間隔で設定した。世界モデルのデータを同化することで、世界モデルが表現する長波長の標準的な磁場と日本の磁気図を滑らかに接続することを図っている。図-3 の入力データを空間補間することで、緯度経度それぞれ 3 分間隔のグリッドデータを作成する。磁気点の平均点間隔は 20~30km 程度であることから、より細かい 3 分間隔 (約 6km) のグリッドとしている。また、この間隔に設定することで、2.5 万分 1 図葉に少なくとも 2 点の格子点が存在することとなる。はじめに適当な手法とパラメータの範囲を絞り込むことを目的として、スプライン法ごとにテンションを段階的に変更して各々グリッドデータを作成し、式 (1) に示す入力値と推定値の残差の二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error : RMSE) で再現性を評価した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (H_i^{input} - H_i^{estimate})^2}{N}} \quad (1)$$

ここで、H は磁気図で作成する磁場成分 (偏角 D, 伏角 I, 水平分力 H, 鉛直分力 Z, 全磁力 F) のいずれ

かを表す。N は入力値の個数である。なお、グリッド化には海上の点を使用した。その後の残差評価では海上のデータとの整合性は評価せず、陸上のデータとの整合性の評価を行った。

一般に、スプライン法によって作成された曲面は磁気点上の入力値を全て通過する、すなわち磁気点では入力値と一致するため、残差は理論上 0 になるはずであるが、グリッドの格子間隔が有限であるため、残差は 0 にならない。つまり、この残差は、グリッドの間隔より細かい波長の凹凸が曲面にある場合に、グリッドデータをバイリニア補間してもその凹凸が表現されないために生じる。推定の手法によって異なる推定値が得られるが、今回の検証では、複数のスプライン法で得られた各々のグリッドデータからバイリニア補間で地磁気値を推定した際、入力値と推定値との残差が最も小さいグリッド化手法が、入力値を最もよく再現する手法とした。

まずは最適なパラメータの絞り込みを行うため、4 つのスプライン法に対して残差評価を行った。テンションの指定が可能な 2 つのグリーン関数スプライン法では、テンションを 0.1 から 0.9 まで 0.1 刻みで変化させて計算を実施した。なお、surface スプラインはテンションに 0 と 1 が指定できるため、surface スプライン法ではテンションを 0 から 1 まで 0.1 刻みで変化させた。その結果を図-4 に示す。

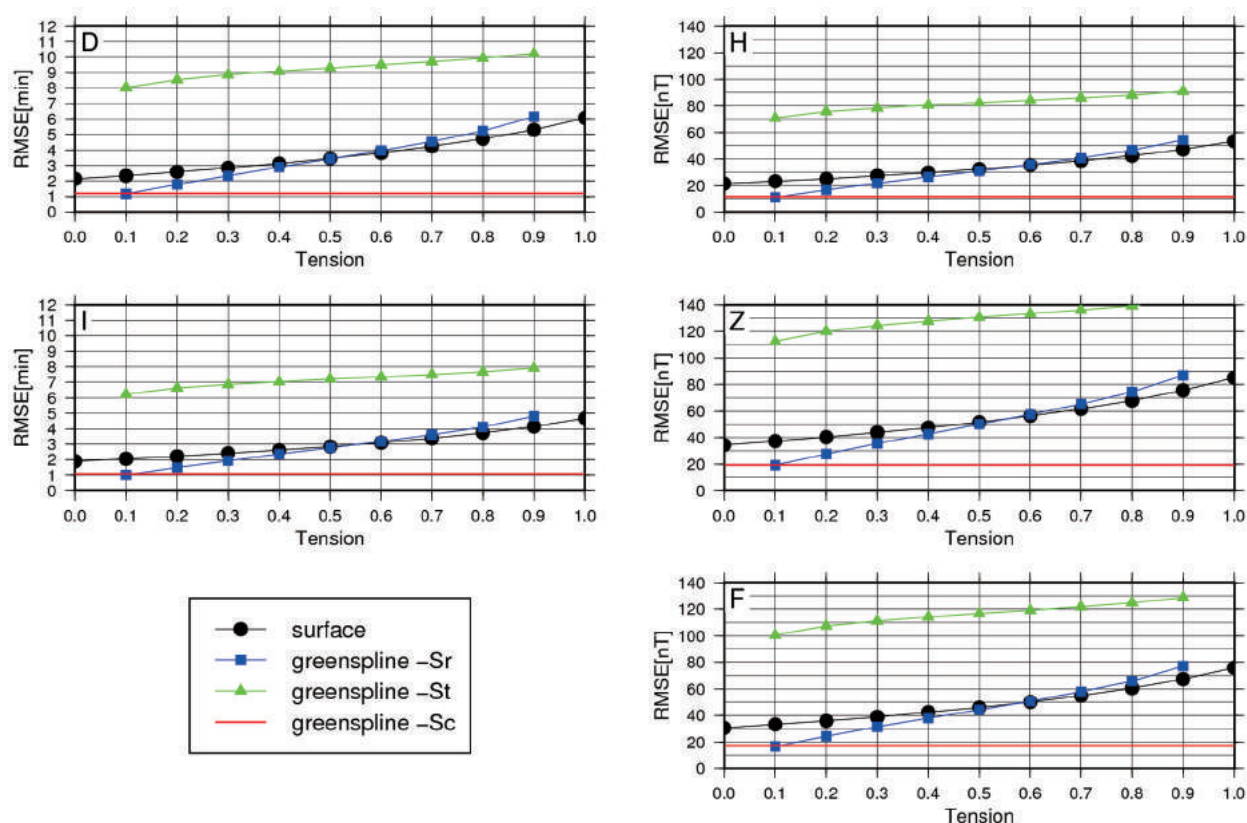


図-4 スプライン法及びテンションの違いによる RMSE の変化。左側の 2 つが角度成分を、右側の 3 つが大きさ成分の RMSE を示す。凡例を左下に示す。

図-4 では、折れ線グラフがそれぞれのスプライン法でテンションを変化させた場合の RMSE の値を示している。最小曲率スプライン法 (-Sc) では、テンションが指定できないため、テンションに関わらず定数であるとして図中に赤線で示している。図-4 では、各成分で RMSE の値は異なるものの、テンションが小さいほど RMSE が小さくなる。また、曲率保持スプライン法 (-St : 緑三角) では全ての成分で surface スプライン法 (黒丸) 及び正則化スプライン法 (-Sr : 青四角) よりも大きな値を示す。surface スプライン法と正則化スプライン法を比較すると、およそテンションが 0.5 から 0.6 の付近を境にして大小関係が逆転し、より小さなテンション値をとるときに、正則化スプライン法で RMSE が小さくなることわかる。また、最小曲率スプライン法との比較でも同様に、surface 法で RMSE の値が最も小さくなるテンション 0 の場合よりも RMSE の値が小さくなるため、以降は最適な値があると想定されるテンシ

ョン 0 から 0.1 の範囲で正則化スプライン法と最小曲率スプライン法の比較を行う。

図-5 に、正則化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。こちらも図-4 と同様に磁気図で用いる 5 成分に対して比較を実施した。図-5 からは、全ての成分において、正則化スプライン法 (青四角) のテンション 0.02 の場合に RMSE が最小となり、かつ最小曲率スプライン法 (赤線) の結果よりも小さな値をとることがわかる。伏角成分 I の場合では、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。

比較のため、surface スプライン法、最小曲率スプライン法及び正則化スプライン法の各磁気点での偏角 D の残差の分布図を、図-6 (a) から (c) に示す。

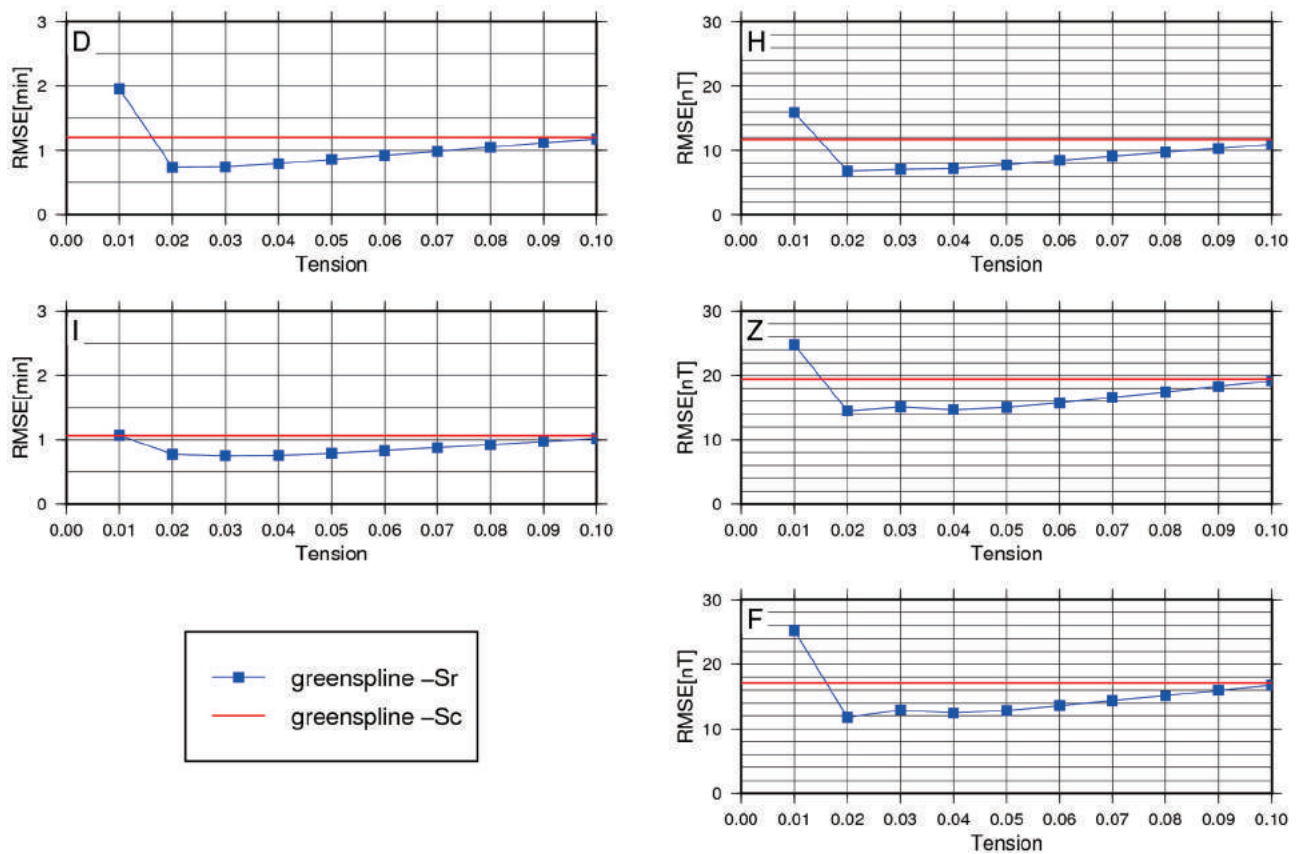


図-5 スプライン法及びテンションの違いによる RMSE の変化. 左の 2 つが角度成分, 右の 3 つが大きさ成分の RMSE を示す。

Residual distribution of D using surface spline

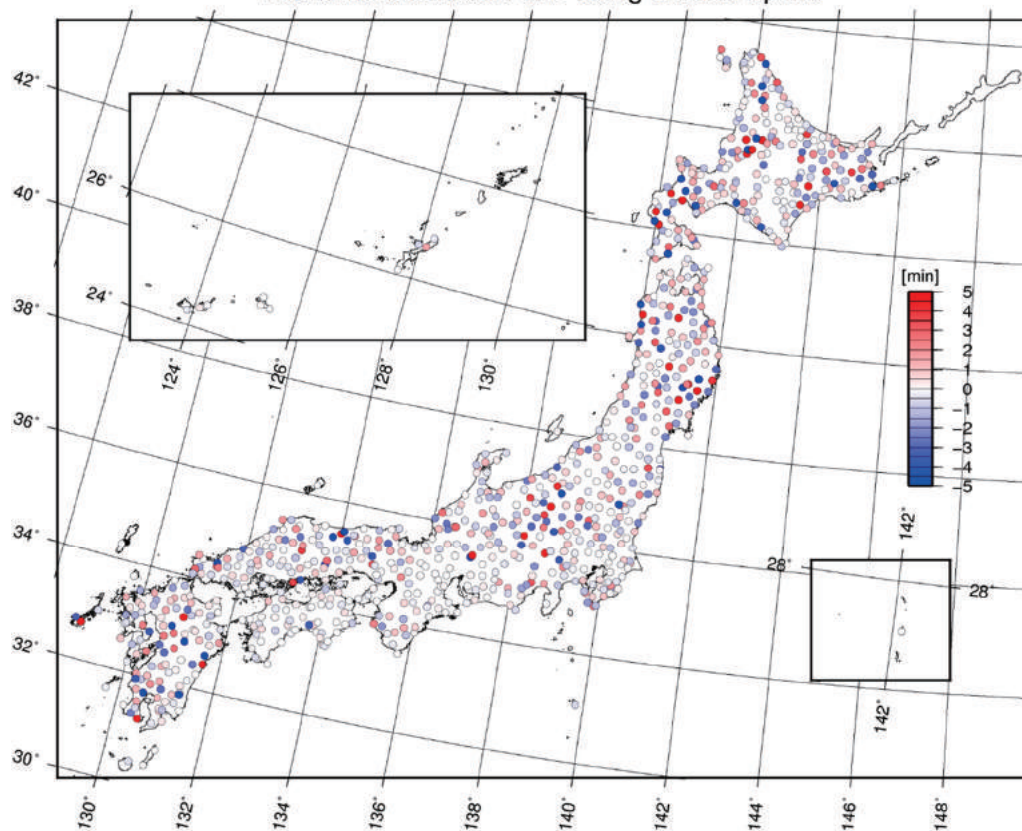


図-6 (a) surface スプライン法における偏角 D 成分残差分布.

Residual distribution of D using greenspline -Sc(Minimum curvature)

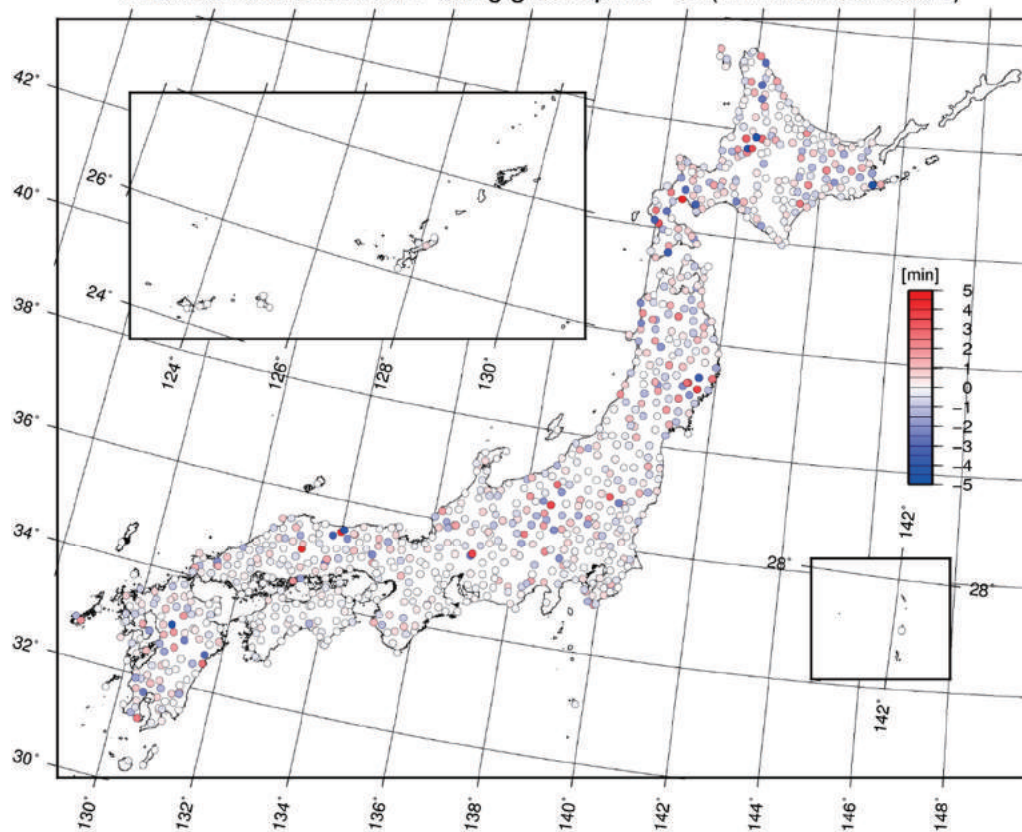


図-6 (b) グリーン関数スプラインの最小曲率スプライン法における偏角 D 成分残差分布.

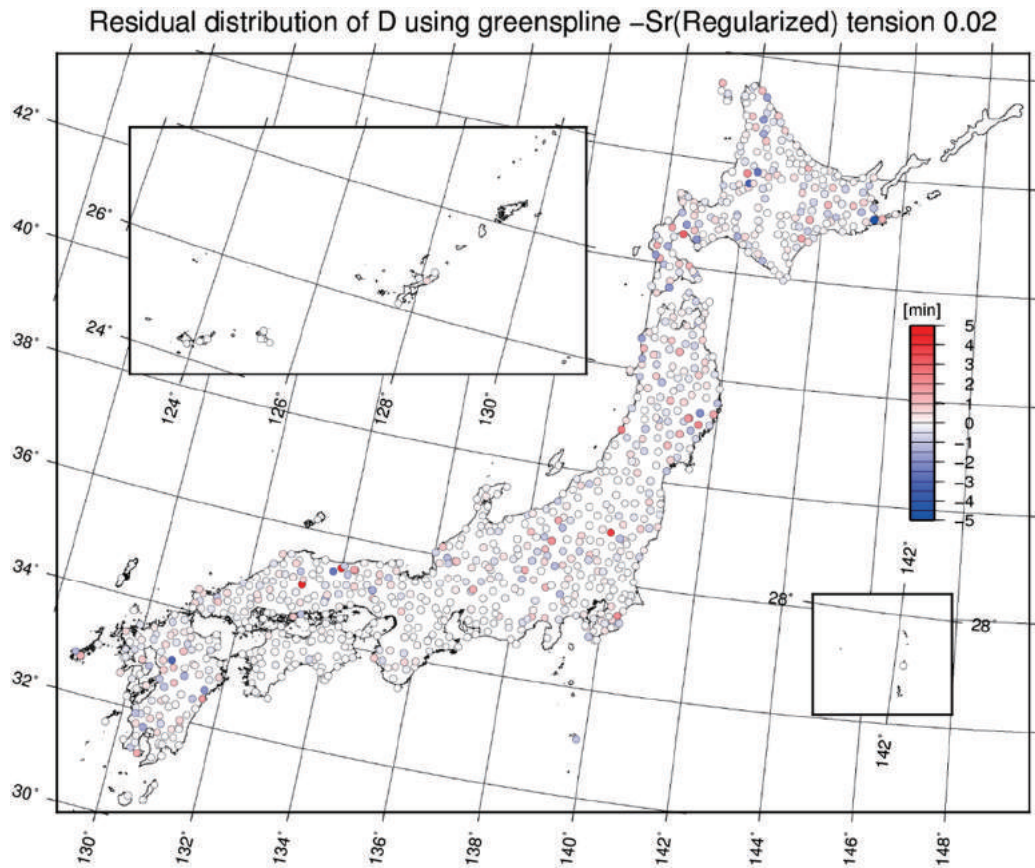


図-6 (c) グリーン関数スプラインの正則化スプライン法（テンション 0.02）における偏角 D 成分残差分布.

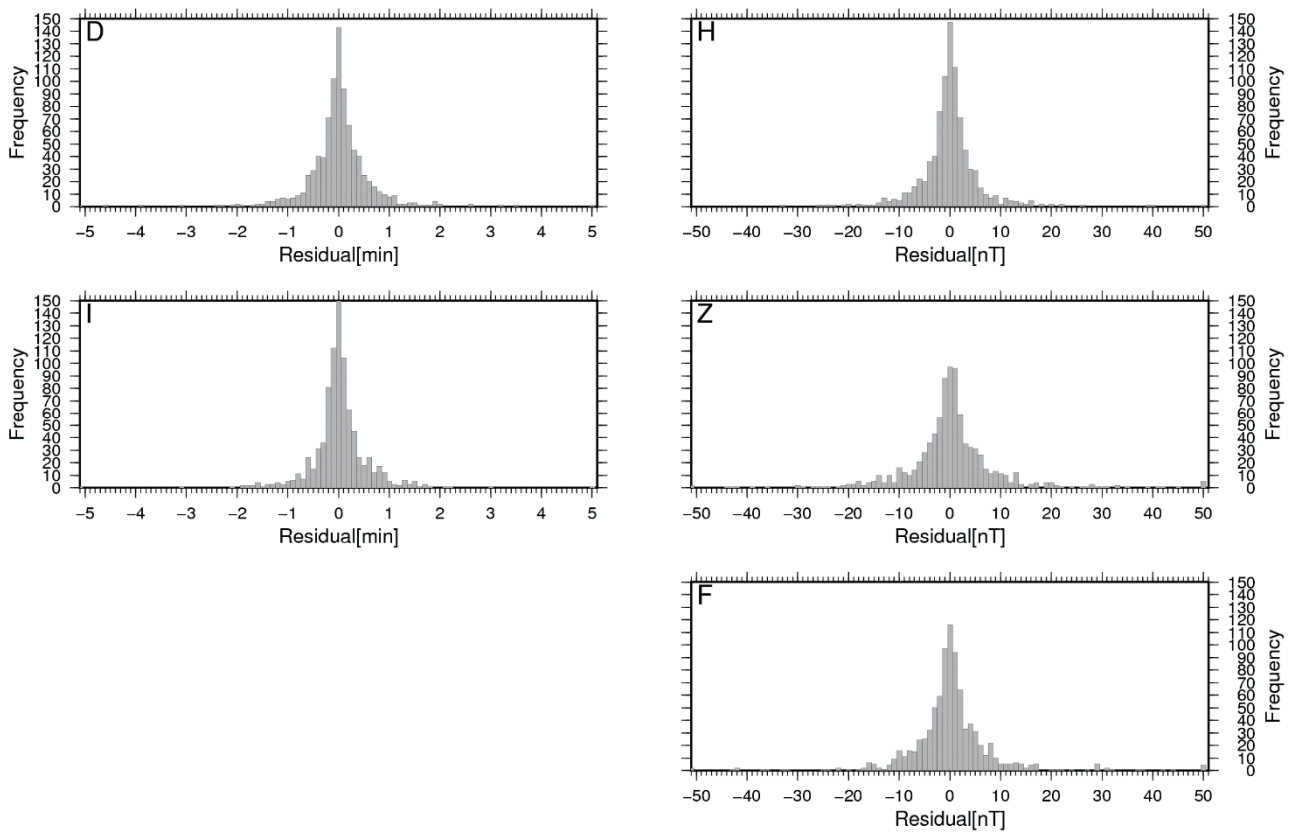


図-7 グリーン関数スプラインの正則化スプライン法（テンション 0.02）の場合の残差のヒストグラム.

図-6 は、偏角 D について、各手法の入力値と推定値との残差を示しており、-5 分から 5 分までの値を青と赤の二色の勾配を用いて示している。図-6 (a) の surface スプライン法では、濃い色（残差が数分の値）の点が全国に多く分布しているが、図-6 (b) の最小曲率スプライン法では、北海道東部や東北北部で残差が減少する傾向が見られ、図-6 (c) の最適と思われる正則化スプライン法では、特に北海道北部、北海道南部で残差が改善する方向が見られる。一部の点では大きな残差があるが、明らかに色の濃い（残差の大きい）点は減少している。

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正則化スプライン法のテンション 0.02 であると判断した。図-7 に最適なスプライン法で値を推定した場合の残差のヒストグラムを示す。偏角 D 及び伏角 I は、-5 分から +5 分の間を 0.1 分刻みで、水平分力 H 、鉛直分力 Z 及び全磁力 F は、-50nT から +50nT の間を 1nT 刻みでヒストグラムを作成した。図-7 からは、残差の分布に極端な偏りは見られず、全ての成分が正規分布に近い分布を示していることから補間が再現した値が大きな系統誤差を持つことなく入力値を表していることが判断できる。

4.2 一個抜き交差検証 (LOOCV) による検証

続いて、ある 1 点を除外してグリッドデータを作成し、除外した 1 点の推定値と入力値との比較を行うことで LOOCV による交差検証を行った。

4.1 節の残差評価から、グリーン関数スプラインの正則化スプライン法 (-Sr) をテンション 0.02 に設定した手法が最適であると結論を得たが、LOOCV による交差検証においてもその評価が妥当かどうか判断するため、テンションを 0.01 から 0.06 まで 0.01 単位で変化させて LOOCV を実施し、入力値と推定値の残差から RMSE を計算した。一例として、図-8 に偏角 D について LOOCV の結果として得られた RMSE の変化を示す。

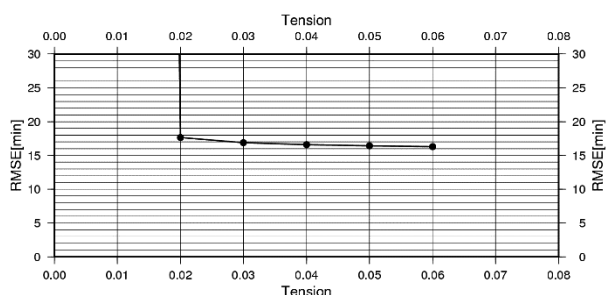


図-8 LOOCV の結果として得られた偏角 D の RMSE

LOOCV の結果では、テンション 0.01 の場合に極

端に大きな値を示すが、それ以外では 17nT 程度でほぼ同じ値となることが確認された。テンション 0.01 で RMSE が大きくなった理由は、残差が極端に大きい点があるためである。図-5 の偏角 D において、テンションが 0.01 の RMSE は 0.02 の約 2 倍となっており、磁気点全点のデータが揃っていても入力値の再現性は悪い。LOOCV では除いた 1 点を再現性の悪いグリッドデータから生成するため、入力値との残差が極端に大きくなる点が生じることはあり得る。

一方、LOOCV の結果は、4.1 節の内部評価の結果と比較して、10 倍以上大きな値となる。観測データを追加することで作成されるグリッド値の再現性が向上することは当然であることから、LOOCV の残差が内部評価より大きくなることは当然であるが、ある点のデータを除くとその点の値の再現性が大きく低下することは、入力データの空間密度が表現したいデータの空間波長に対して十分でないことを示唆している。すなわち、今回のデータセットである一等及び二等磁気点の空間的な分布と密度では、特に周囲のほかの点と整合しない磁場の異常分布を示す地域において、詳細な磁場分布を表現するためには入力データの配点密度が十分ではないと考えられる。LOOCV は、グリッド化に使用しないデータを用いたグリッド化手法の外部評価としてもみることができ、この結果から、磁気点が存在しない場所でグリッド値がどの程度の推定精度を持つかを評価することができる。テンション 0.02 では、LOOCV の RMSE の値は 18 分程度となり、この条件で作成したグリッドデータは、入力データが不在の場所において 18 分程度の誤差で偏角値を推定できる、ということが示された。

最適なスプライン法における、LOOCV により得られた残差分布を、図-9 に示す。残差の値は、-60 分から +60 分の間を赤青の二色の勾配で示している。図-9 は、カラスケールが図-6 の場合と比較して 12 倍異なるため、直接の比較はできないが、LOOCV の残差が大きな領域は、図-6 (a) から (c) の内部評価において残差が大きい領域とほぼ一致している。内部評価では全ての入力値を使用して作成したモデルに対して、入力値と推定値とを比較したが、全てのデータを用いても残差が大きい領域は、スプライン曲面によって再現が難しい、複雑な空間分布を持った領域と考えられる。LOOCV では一点を抜いて作成したグリッドデータによる推定値と、除外した点の入力値とを比較するため、複雑な空間分布の一点を抜くことで、より再現性が悪くなることが推測される。

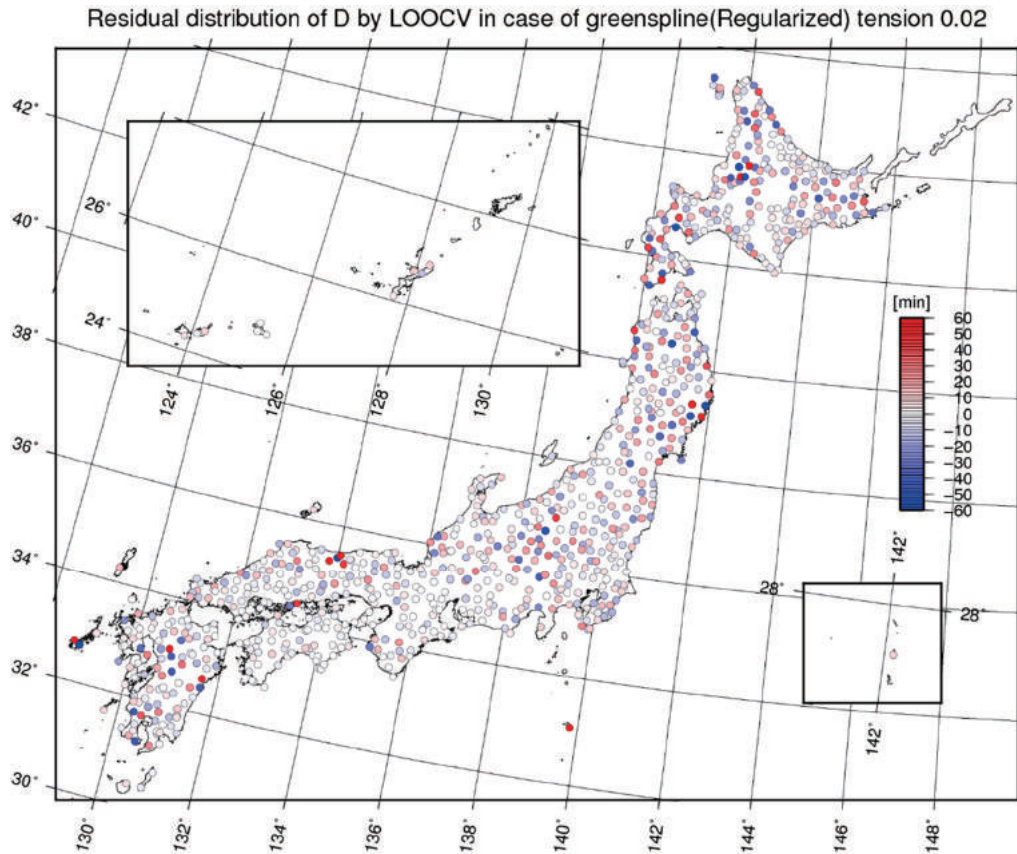


図-9 LOOCVにより得られた偏角Dの残差分布（グリーン関数スプライン（正則化，テンション0.02）の場合）

4.3 評価のまとめ

残差が最も小さくなるスプライン法を最適と判断して、内部評価からグリーン関数スプラインの正則化スプライン法（テンション0.02）を選択した。表-3に各々の手法で作成した磁気図の残差のRMSEを示す。このデータは、それぞれのスプライン法によって作成されたグリッド値の再現性を示しているといえる。最適な手法で作成したグリッド値の再現性は、角度成分で0.8分以下、大きさ成分で15nT以下となり、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指とした

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は、角度成分で2分程度、大きさ成分で35nT以下であり、最適な手法では、surface スプライン法より3倍程度改善された再現性を達成している。また、最小曲率スプライン法で作成したグリッド値の再現性は、角度成分で1分程度、大きさ成分で20nT以下となり、最適なスプライン法と比較すると再現性が若干低い。最適なスプライン法は、最小曲率スプライン法と比較しても最大で2倍程度、再現性が高い。

表-3 スプライン法の違いによるグリッド化の残差

	D [min]	I [min]	H [nT]	Z [nT]	F [nT]
正則化スプライン法（最適）	0.74	0.77	6.79	14.48	11.77
surface スプライン法	2.13	1.90	21.32	34.34	30.47
最小曲率スプライン法	1.20	1.06	11.67	19.40	17.05

表-4 LOOCVによる最適なスプライン法によるグリッド化の残差

	D [min]	I [min]	H [nT]	Z [nT]	F [nT]
正則化スプライン法（最適）	17.67	15.76	181.63	276.52	246.52
surface スプライン法	16.91	14.65	172.02	259.50	233.53
最小曲率スプライン法	17.56	15.06	176.33	262.88	236.09

一方、LOOCV によるグリッド化の残差の RMSE は、表-4 に示す値となった。なお、比較のため、ほかの手法による LOOCV の結果も示す。LOOCV では、残差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、補間で値を推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解能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、surface スプライン法や最小曲率スプライン法の LOOCV の結果と比較しても、表-3 に示したような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ないということである。そのため、残差評価においては内部評価の有意性をもって最適なスプライン法を決定して差し支えないといえる。

5. 従来手法との比較

本章では、精度検証に基づき選択した最適なグリッド化手法によって作成した磁気図と、従来の補間手法で作成した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磁気図を作成した。偏角成分について、図-10 に surface スプライン法による磁気図（磁気図 2010.0 年値で採用した手法）を、図-11 にグリーン関数スプライン法による磁気図を示す。

図-10 と図-11 を比較すると、グリーン関数スプライン法で作成した磁気図では、特に磁気異常が大きい地域において等値線の間隔が狭い（磁気値の勾配が大きい）。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って、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。

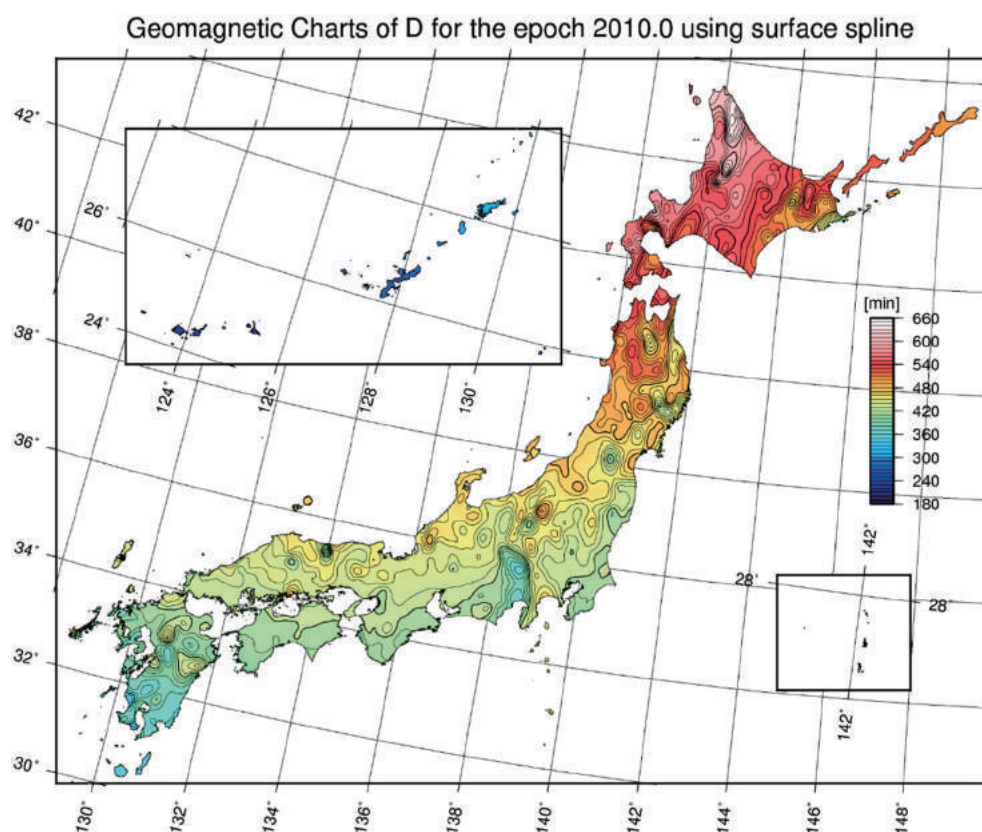


図-10 surface スプライン法（テンション 0）による磁気図 2010.0 年値（偏角図）

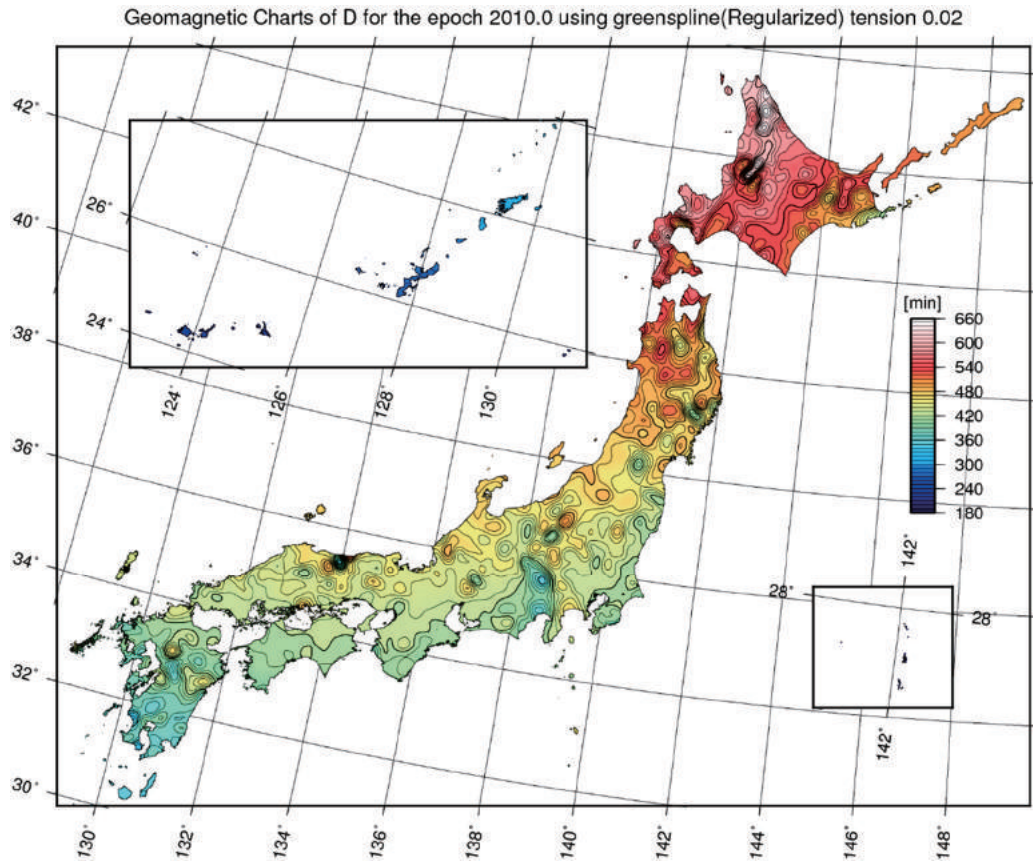


図-11 グリーン関数スプライン法（正則化，テンション0.02）による磁気図 2010.0 年値（偏角図）

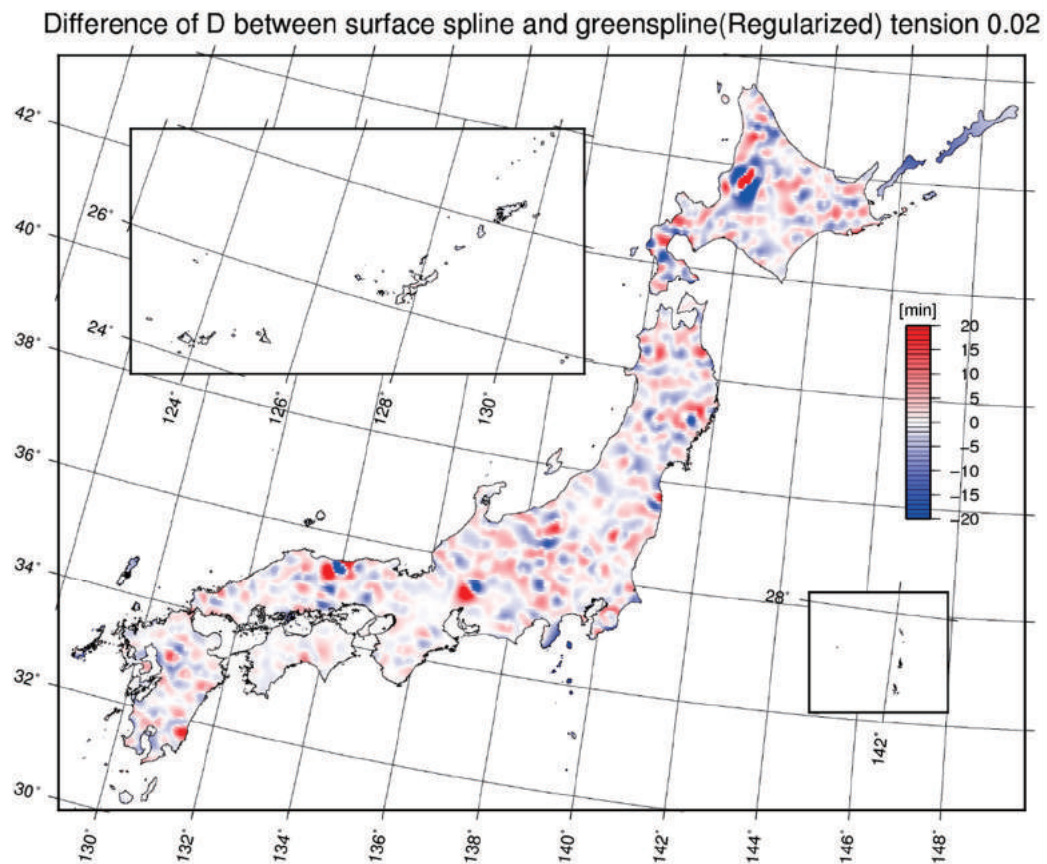
図-12 surface スプライン法とグリーン関数スプライン法（正則化，テンション0.02）の差（偏角図）
-20 分から 20 分を赤と青の二色の勾配で示している。それ以上の値は同色で示されている。

図-12 に図-10 と図-11 の磁気図の差を示す。図-12 には、surface スプライン法と最適なグリーン関数スプライン法のグリッドデータの差を赤青の二色の勾配のカラースケールで示している。図-12 では、全国に平均して±5～10 分程度の差が見られており、局所的には±20 分を上回る差が見られる。特に赤と青の値の大きな範囲が隣接する場所では、隣接する点間で入力値が大きく異なるため、その変化をグリッドデータで表現するには、本来はグリッド間隔をさらに細かくする必要がある。今回のグリッドデータで採用した 3 分という条件でグリッドの間をバイリニア補間した場合には、入力値と推定値にある程度の乖離が生じることは当然だが、surface スプライン法では点間を滑らかに補間するため、データの間に

生じる急激な勾配にグリッド間隔が見合う間隔ではなかったため、勾配が表現されず平滑化されたグリッド値となったと考えられる。一方、グリーン関数スプライン法では、入力値の影響が近傍のグリッド点に及んでいるため、入力値を反映したグリッド値となることで近接したグリッド値の間でも値が平滑化されず、surface スプライン法との乖離が大きくなったものと思われる。特に名古屋市周辺 (35.2N, 137.0E) に見られる残差が大きな領域では、図-11 で見られる対になった目玉状の等値線が図-10 ではほとんど確認できず、補間手法による差が大きく見られる。表-5 に、両者のグリッドデータの差についての数値情報を示す。

表-5 磁気図 2010.0 年値におけるスプライン法の違いによる残差の RMSE と最大値

	D [min]	I [min]	H [nT]	Z [nT]	F [nT]
RMSE	5.10	4.86	74.45	132.18	135.83
正の最大値	66.55 (鳥取市周辺)	55.22 (南相馬市周辺)	1358.63 (函館市周辺)	2861.60 (函館市周辺)	3140.05 (函館市周辺)
負の最大値	-57.76 (留萌市周辺)	-39.98 (名古屋市周辺)	-1174.48 (函館市周辺)	-2560.93 (函館市周辺)	-2774.73 (函館市周辺)

表-5 によると、スプライン法の違いにより、RMSE では角度成分で 5 分程度、大きさ成分で 140nT 以下の差が生じる。RMSE は残差のばらつきの平均値を見ているが、それに対して正負の最大値は 10 倍以上の大きな値を示す。最大値をとるのは、図-12 で見られる赤及び青の濃い一部の地点で、surface スプライン法では滑らかに表現される一方で、最適なグリーン関数スプライン法ではより入力値に即したスプラインとなるために、これだけの差が生じることになる。特に全磁力 F では正の最大値が 3000nT を超える。これは等値線 30 本分であり、磁気図において視覚的に大きな差である。局所的ではあるが、これらの領域では、補間に用いるスプライン法を変更することで磁気図の見た目が大きく異なる。これは、図-10 と図-11 を比較することで確認できるが、図-11 で示した最適な手法で作成した磁気図は、従来の磁気図と比べて等値線の分布が複雑である。図-12 における赤青の色が濃い場所において、図-11 ではそのほとんどで等値線間隔が密な目玉のような分布を示しており、従来の図と比べて視覚的に大きな変化がある。次回の磁気図公開にあたっては、観測された磁気値自体に空間分布の変化があったわけではなく、手法の最適化によって磁気図の精度が大きく向上したことによって空間分布の表現が変わったことを周知する必要がある。

6. 航空磁気測量との比較

図-11 の北海道北西部などに見られる等値線が密に入り組む原因は、周囲の点と傾向が大きく異なる値を持つ点が存在するためであると考えられるが、周囲と値が乖離している原因が観測値の誤差が大きいためであるのか、実際に局所的に存在する磁気異常を測定しているのか、個々に検討して判断する必要がある。磁気図作図で用いたデータの他に外部検証に用いることが出来るデータとしては、例えば、航空機を用いて上空の磁場の値を観測した航空磁気測量の測定値との比較が考えられる。航空磁気測量による測定値は、地上での観測データではないため、地上で測定した値と比べて磁気異常に対する感度が低く、今回の磁気図との直接的な比較はできない。しかし、磁気異常の分布の傾向は一致するはずであることから、磁気図との比較によって妥当性を検証することが可能である。そこで、航空磁気測量の成果から磁気異常が存在する領域を絞りこみ、今回の最適なスプライン法で作製した磁気図の磁気異常の領域を照合することを行った。国土地理院では、1984 年から航空磁気測量を実施しており、1999 年までの成果を高度 5000m における全国航空磁気異常図としてまとめている。その際に作製された航空磁気測量成果による全磁力 F をプロットしたものを図-13 に、同じ成分で比較を行うため、最適なスプライン法で作成した全磁力 F の磁気図を図-14 に示す。

Aeromagnetic Anomalies over Japan at the flight altitude of 5000m above sea level

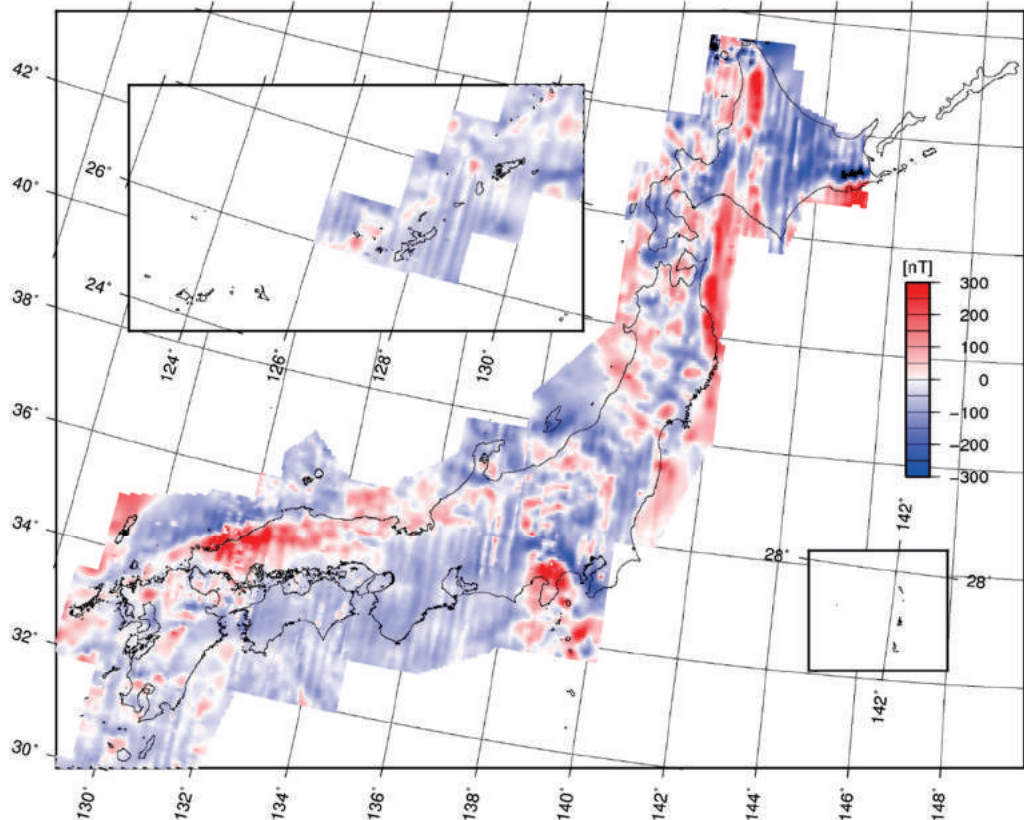
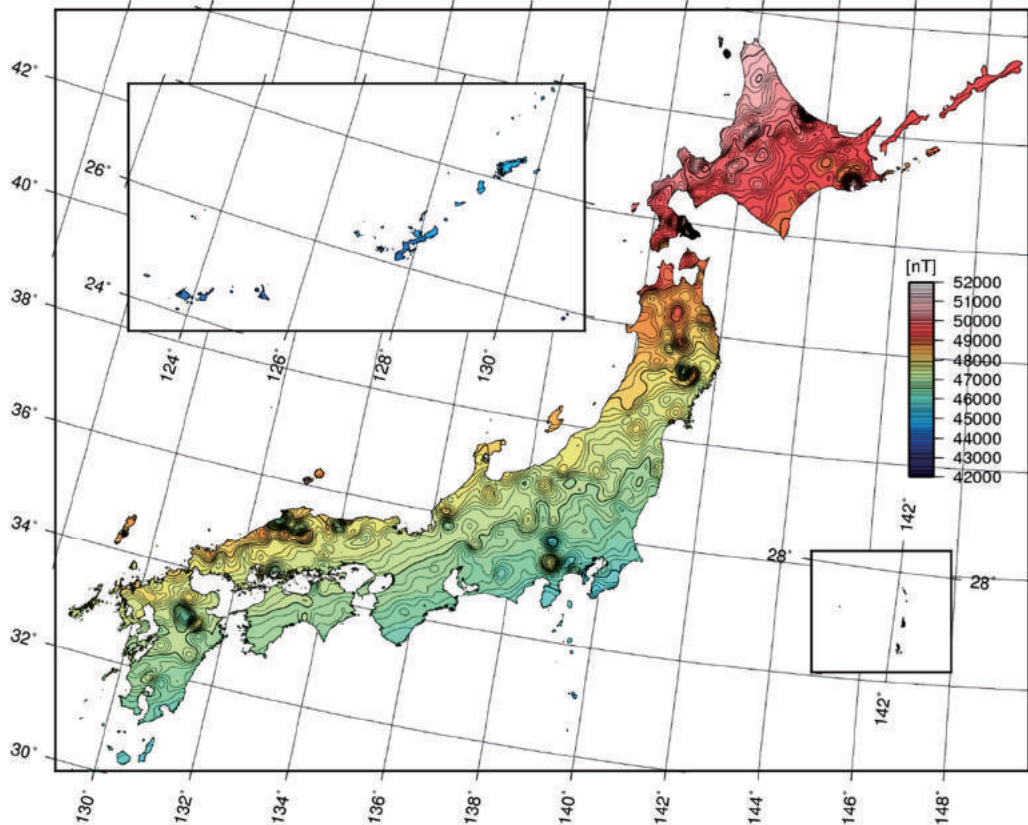
図-13 高度 5000m における全磁力 F の航空磁気異常図. -300nT から 300nT を赤と青の二色の勾配で示している.Geomagnetic Charts of F for the epoch 2010.0 using greenspline(Regularized) tension 0.02

図-14 グリーン関数スプライン法（正則化，テンション 0.02）による磁気図（全磁力図）

航空磁気測量の結果は、高度 5000m に化成した測定値であるため、地上観測で検出された磁気異常が捉えられていない可能性も考えられるが、少なくとも航空磁気異常図で確認された強い磁気異常の領域では地上観測でも大きな磁気異常が確認されるはずである。図-13 と図-14 を比較すると、図-14 で見られる大きな磁気異常のうち、ほとんどの領域が図-13 に見られる磁気異常地帯と概ね一致した傾向を示すことがわかる。このことから、磁気図に見られる大きな磁気異常は、観測値の誤差ではなく、局所的な磁気異常を捉えていると考えられる。ただし、図-13 において北海道北部の南北に広がる領域で認められる顕著な正の磁気異常は、南端で類似した傾向は認められるものの、図-14 の磁気図では明瞭には認められない。

一方、図-14 に見られる北海道北東部の顕著な磁気異常は、図-13 では確認できない。この原因が地上観測で検出された磁気異常が航空磁気測量で捉えられていないためか、この点の観測値に大きな誤差が含まれるためかは、これらのデータのみでは判断することができない。

航空磁気測量成果と磁気図の全磁力成分の比較から、両者の磁気異常の空間的なパターンが概ね一致することが示された。航空磁気測量で認められる北海道北部の大きな磁気異常が、地上観測で認められない点と、地上観測で確認された磁気異常が航空磁気測量で確認されていない点において、依然として齟齬が残るが、齟齬が生じた原因は、両者の比較からは判断できない。これらの点で観測値の妥当性を確認するには、過去の観測記録等を確認し、正常な観測が行えていたかどうかの判断を個別に行うとともに、磁気異常が確認された領域内において地磁気観測を改めて実施する必要がある。

7. まとめ

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正則化スプライン法で、テンションが 0.02 の場合であると判断した。また、最適なスプライン法を使用した際のデータの再現性は、内部評価では偏角及び伏角で 0.8 分程度、水平分力、鉛直分力及び全磁力で 15nT 程度、LOOCV による外部評価では偏角で 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。

最適な手法で作成した磁気図 2010.0 年値は、従来の手法で作成した磁気図 2010.0 年値と比べて、局所的ではあるが偏角で最大 60 分強の差がある。この差は磁気図の等値線の間隔が 10 分であることから視覚的には大きい。内部評価では最適な手法が入力データを適切に空間補間していることは明白で、最適な手法を採用することで、従来と比べて 3 倍程度も精度の良い磁気図を作成することができる。ただし、周囲と傾向が大きく異なり、磁気異常が目玉状に存在する領域においては、航空磁気測量などの外部データによる検証、確認のための追加観測など、妥当性の評価が個別に確認が必要である。次回の磁気図更新の際には、磁場の経年変化に加えて、手法の改善に伴う地磁気値の変化が磁気図に含まれることを周知する必要があるが、今回の検証により、実際の磁場分布と整合した、より精度の良い磁気図を作成する補間手法を提示することができた。

(公開日：平成 27 年 11 月 26 日)

参 考 文 献

- 阿部聡, 宮原伐折羅 (2016): 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.
- 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.
- David T. Sandwell (1987): Biharmonic spline interpolation of Geos-3 and Seasat altimeter data, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 139-142.
- Finlay C. C., S. Maus, C. D. Beggan, M. Hamoudi, F. J. Lowes, N. Olsen, and E. Thebault (2010): Evaluation of candidate geomagnetic field models for IGRF-11, *Earth, Planets and Space*, 62, 787-804.
- First Geodetic Division (1983): Magnetic charts for the epoch 1980.0, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, Vol. X X VIII, 106-108.
- First Geodetic Division (1993): Magnetic charts for the epoch 1990.0, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, Vol. X X X VIII, 1-4.
- Geographical Survey Institute (1957): The second order magnetic survey of Japan (2), *Bulletin of the Geographical*

- Survey Institute, Vol. V, parts 1-2, 13-30.
- Geographical Survey Institute (1954): Second order magnetic survey of Japan (1), Bulletin of the Geographical survey Institute, Vol. 4, part 1, 49-58.
- Geographical Survey Institute (1960): The second order magnetic survey of Japan [3], Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol. VI, part 1, 12-22.
- Geographical Survey Institute (1961): Magnetic survey of Japan, 1951-1957, Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol. VII, part 1.
- Geographical Survey Institute (1962): The second order magnetic survey of Japan (4), Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol. VIII, part 1, 41-51.
- Geographical Survey Institute (1965): The second order magnetic survey of Japan (5), Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol. XI, part 1-2, 1-16.
- Geographical Survey Institute (1971): The second order magnetic survey of Japan (6), Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol. X VII, part 1, 12-35.
- Geographical Survey Institute (1973): Magnetic charts for the epoch 1970.0, Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol X IX, part 1, 131-137.
- Helena Mitsova, and L. Mitso (1993): Interpolation by Regularized Spline with Tension: I. Theory and Implementation, *Mathematical Geology*, 25, 641-655.
- 植田勲, 阿部聡, 後藤勝広, 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.
- 白井宏樹, 錦輝明, 佐藤秀幸, 宇津木充, 仲井博之, 森田美好, 門脇俊弘, 湯通堂亨 (2002) : 磁気図 2000.0 年値の作成, 国土地理院時報, 99, 1-8.
- Smith W. H. F. and P. Wessel (1990): Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, Vol. 55, 293-305.
- Tsubokawa Ietsune (1952): Reduction of the results obtained by the magnetic survey of Japan (1948-51) to the epoch 1950.0 and deduction of the empirical formulae expressing the magnetic elements, Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol. III, part 1, 1-30.
- Wessel P., and D. Bercovici, (1998): Interpolation with splines in tension: a Green's Function Approach *Mathematical Geology*, Vol. 30, 77-93.
- Wessel P., W. H. F. Smith (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 79, 579.

