

自然直交基底法を用いた一等磁気点の化成 Reduction of Data Observed at the First-order Geomagnetic Stations with the Natural Orthogonal Components Method

測地部 紀 小麗・白井宏樹・鈴木 啓・何 金蘭・濱崎英夫
Geodetic Department Xiaoli JI, Hiroki SHIRAI, Akira SUZUKI,
Jinlan HE and Hideo HAMAZAKI

要 旨

日本標準磁場モデルは、全国の一等磁気点や二等磁気点などでの繰り返し観測結果を利用して構築してきた。モデルを構築するには、異なる時間で観測されたデータを化成し、ある基準年に統一する必要がある。従来、国土地理院は単純差法と二次式近似法によって磁気点の化成を行ってきた。しかし近年、磁気点での改測回数は低下し、基準年化成値を推定するには、十分な改測回数を得られなくなりつつある。そこで、二次式近似法より正確な化成値を求めるために、本稿は自然直交基底法 (NOC 法) を用いて、新たな補正方法を提案する。この方法を用いて、磁気点の 2000 年化成を行い、従来から使用している二次式近似法の結果と比較した。その結果、磁気点の最終観測年が基準年以後である場合、両方法の推定誤差は同じ程度であるが、最終観測年が基準年前の場合、NOC 法の推定誤差が二次式近似法より小さいことがわかった。

1. はじめに

日本標準磁場モデルは、日本域の地質構造を概観するのに有効であり、地殻変動の研究や資源探査等へ利用されている。日本標準磁場モデルを作成するために、国土地理院は 1940 年代から一等磁気点や二等磁気点での観測を行ってきた。一等磁気点は、全国約 100 点 (約 3600km² に 1 点) あり、2 年～5 年間隔で繰り返し観測を実施している。一方、二等磁気点は全国に約 850 点 (約 40km² に 1 点) あり、1952 年～1970 年にかけて繰り返し観測は行われているが、近年改測作業を実施していない (国土地理院技術資料, 1992)。このような異なる時間で観測された一等と二等磁気データを利用して日本標準磁場モデルを作成する際、観測値から基準年値への化成 (統一) をしなければならない。従来、国土地理院は単純差法と二次式近似法を用いて一等磁気点の化成を行ってきた。また二等磁気点は、現在繰り返し観測が行われていないため、基準年の化成値が付近の一等磁気点の化成結果を使用して求められている。このように一等磁気点と二等磁気点の観測データを基準年値に化成し、10 年に 1 回日本標準磁場モデルを作成してきた。最新版モデルは 2000 年版である。化成は、日本標準磁場モデル作成の出発点で、利

用する磁気点の改測回数と化成方法によって、化成精度が異なる。一等磁気観測は、1990 年頃まで約 100 点を 2 年～3 年間隔で実施し、化成の総合精度が約 5 nT である (国土地理院, 1992; Mizuno, 1984)。しかし、1995 年以後、一等磁気点の改測点数が低下し、2000 年前後改測を行った一等磁気点の点数は約 30 点となった (白井他, 2002)。また、これらの一等磁気点は、十分な繰り返し観測が行われていないため、従来の化成方法で求めた 2000 年化成値に大きな化成誤差が含まれる可能性がある。一等磁気点での改測回数を大幅に増やすことが解決法の一つであるが、人力や経費など条件の限界があるため困難である。現状の観測データから、より正確な化成値を求めるため、ここで自然直交基底法 (以下、「NOC 法」という。) を用いて、新たな化成方法を提案する。

本稿は単純差法と NOC 法を利用して、磁気点の全磁力値の 2000 年化成を行い、得られた 2000 年化成値と従来の二次式近似法の結果と比較した。本稿で使用された一等磁気点と地磁気観測所と地球電磁気連続観測装置の配置を図-1 に示す。

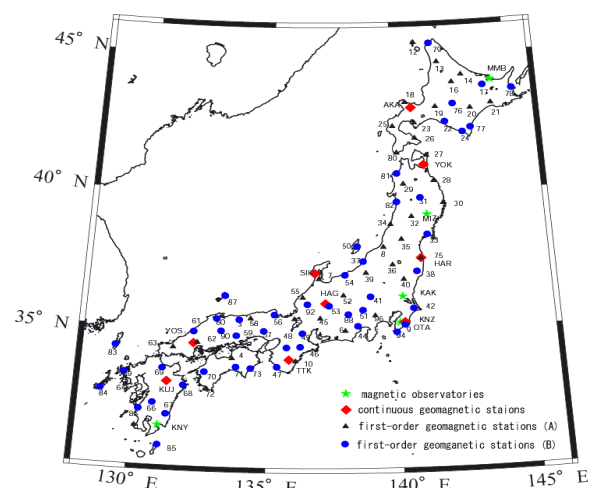


図-1 使用した磁気点の配置

2. 化成方法

2.1 単純差法と二次式近似法

標準磁場モデルは地球に固有な磁場分布を明らかにすることを目的とするため、化成する際、観測値から外部擾乱による磁場を除去する必要がある。そ

こで、柿岡地磁気観測所(KAK)を基準にした単純差法を用いる。単純差法は磁気点Pと柿岡は同じ大きさの外部擾乱があると仮定し、式1を使用して基準年化成値を求める。

$$M^P(t_0, t) = M^P(t) - (M^k(t) - M^k(t_0)) \quad (1)$$

こで、 t と t_0 は観測日と基準年で、 $M^P(t)$ と $M^P(t_0, t)$ は磁気点Pでの観測値と基準年値で、 $M^k(t)$ と $M^k(t_0)$ は柿岡での t と t_0 における観測値である。一方、磁気点Pと柿岡の経年変化量が異なるため、同じ観測点でも異なる観測時 t で推定された基準年値 $M^P(t_0, t)$ に1~2 nT/y程度のばらつきがある。そこで、式2のような多項式展開によって、 $M^P(t_0, t)$ から経年変化に起因する変化量を除去し、正確な基準年化成値 $M^P(t_0, t_0)$ を求める。式2の基本関数 T_k を t^k ($k=2$ まで)利用したため、この補正は二次式近似補正と呼ぶ。

$$M^P(t_0, t_0) = M^P(t_0, t) - (a_1 \cdot T_1 + a_2 \cdot T_2 \cdots) \quad (2)$$

一等磁気点の化成は、上記の単純差法と二次式近似法によって行う。単純差法の補正精度は2 nT~3 nTである(Mizuno, 1984)が、二次式近似法の精度は磁気点と参照点柿岡の距離や磁気点の改測周期などによって異なり、十数 nTの誤差を生じる場合もある。例として、女満別地磁気観測所(MMB)と釧路(KSR)一等磁気点の2000年化成結果を説明する。両点ともに北海道に位置し、柿岡から遠く離れている。図-2には、単純差法によって推定された全磁力の2000年化成値 $M^{mb}(t_0, t)$ と $M^{ksr}(t_0, t)$ を示した。二次式近似法で求めた女満別の2000年化成値 $M^{mb}(t_0, t_0)$ が49509.3 nTであるが、実際の2000年値(49517 nT)に比べて、7.7 nTの差がある。一方、求めた

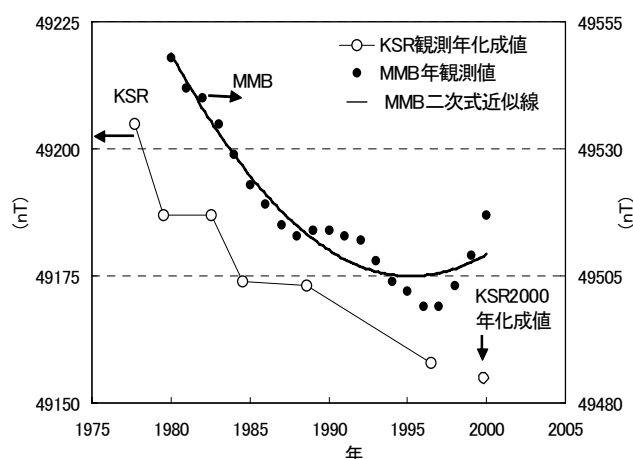


図-2 女満別(MMB)と釧路(KSR)の全磁力の2000年化成値。

釧路一等磁気点の2000年化成値が49155 nTである。釧路は、女満別の南約100 kmにあり、1990年~2000年の間に1回しか観測が行われていない。このような推定結果から、1995年以後化成値が時間的に減少するのが見られる。この傾向と近傍の女満別観測所での化成値の時間変化傾向と一致せず、求めた釧路の2000年化成値に大きな誤差を含むことがわかった。

2.2 自然直交基底法

二次式近似法より精度の高い経年変化量を補正するために、本稿は二次式近似法の基本関数 t^k の代わりに、日本域に共通にみられる変化パターン T_k を用いて化成を行う。このような T_k は、実際の磁場変化の様相を先見的に含めるため、式2の基本関数を用いれば、より正確な時間変化量を表現できると考えられる。次に、 T_k について簡単に説明する。

地球深部に原因を持つような長中波長の磁場時間変化を対象にした場合、日本列島のスケールでは、どの観測点でも似たような変化を示すはずである。全国に分布している地磁気観測所のデータを例として説明する。図-3は、地磁気観測所の女満別(MMB)、水沢(MIZ)、柿岡(KAK)、鹿屋(KNY)での1969年~2001年における全磁力の年平均値を示した。どの点でも似たような時間変化をしている。例えば、各観測所は1980年代から1990年代後半まで直線的に変化し、その後2000年付近で変化が鈍化するという傾向が共通に見られる。

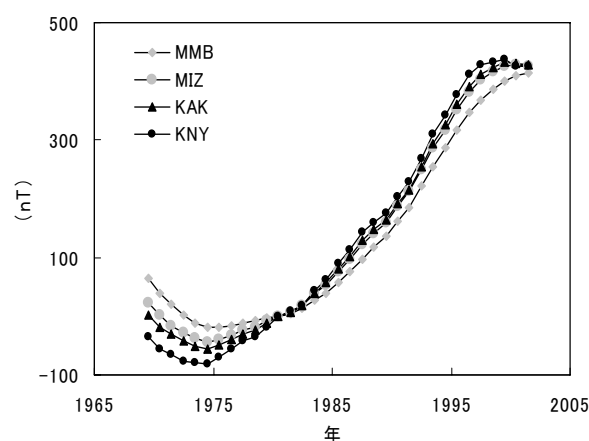


図-3 地磁気観測所(女満別(MMB)、水沢(MIZ)、柿岡(KAK)、鹿屋(KNY))での全磁力の時間変化。1980年値を基準にした。

日本域の共通的な時間変化パターン T_k を求めるために、NOC法を用いる(藤原他, 1998; 宇津木他, 2003; 紀他, 2004)。この方法は多変量統計解析の一つである主成分分析法の応用で、幾つかの観測値 $H_1, H_2, \dots, H_p$ に共通する特性を、互いに独立な少数

の数値関数の組 $T_1, T_2, \dots, T_k$ ($k < p$) で表すものである。成分 $T_1, T_2, \dots$ は、振幅が大きい順に並べそれぞれ第1主成分, 第2主成分, ... と呼ぶ。解析に使用したデータは全国に分布している地磁気観測所の年平均データである。地磁気観測所での観測データは、時間と共に滑らかに変化しており、人工擾乱などによるノイズの影響が少ないことから、より正確な T_k を推定できると考えられる。

一等磁気点の 2000 年化成値を推定するには以下の手順で行う。

- 1) 単純差法で観測日データから観測年値 $M(t)$ ($t: \text{xxxx.5}$) へ化成する。
- 2) 女満別, 水沢, 柿岡, 鹿屋地磁気観測所の地磁気四成分 (X, Y, Z, F) の年平均データを利用して, NOC 法で T_k を求める。
- 3) 式 3 で重回帰分析を行い, パラメータ $M_0, a_1, a_2, \dots$ を推定し, 2000 年化成値を予測する。

$$M(t) = M_0 + a_1 \cdot T_1 + a_2 \cdot T_2 \cdots \quad (3)$$

3. 化成結果と検討

図-4 は, NOC 法で推定された共通な時間変化パターン T_k ($k=1 \sim 4$) を示す。次数 k が大きくなるにつれて, 振幅が小さくなっていることが見られる。 k が 3 以上に対し, T_k のパワー (情報量) が 0 に近づいていることから, 今回は次数 1 から 3 までの T_k を式 3 に使用する。これで釧路一等磁気点の化成を行う。推定された式 3 のパラメータは表-1 のとおりで, これを用いて予測された釧路の 2000 年化成値は 49164.7nT である。女満別との化成結果 (図-2) と比較するために, 表-1 のパラメータを用いて, 釧路での各観測年の 2000 年化成値を計算し, 図-5 に示した。化成値は 1996 年以後時間とともに増加を示し, 近隣の女満別地磁気観測所から得られた結果とよく一致している。

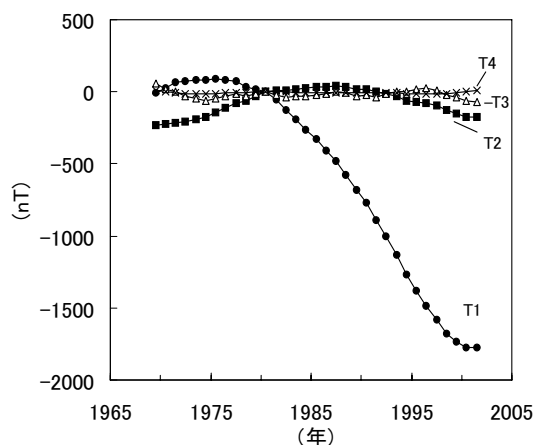


図-4 共通的な時間変化パターン T_k ($k=1 \sim 4$)

表-1 釧路 (KSR) での重回帰パラメータ

パラメータ	値
M_0	48750.742
a_1	-0.24228
a_2	-0.00865
a_3	0.26159
R^2	0.999

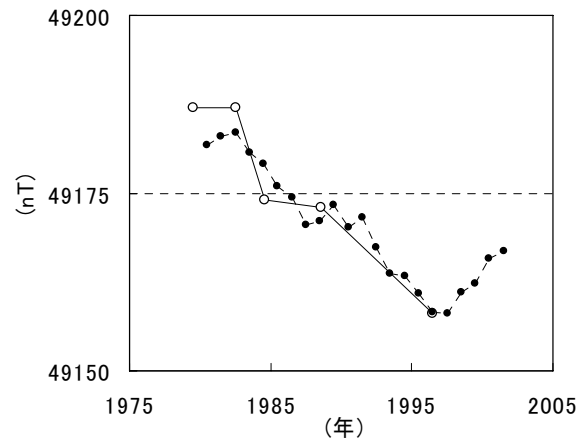


図-5 釧路 (KSR) での全磁力の 2000 年化成値。白丸は単純差法で求めた各観測年の 2000 年化成値, 黒丸は NOC 法で予測した 2000 年化成値。

次に, NOC 法の推定精度について検討した。一等磁気点の改測間隔は不規則であるため, 地磁気観測所のデータを使用した。まず鹿野山 (KNZ) の全磁力の年平均値を使用して化成を行う。改測周期と最終観測年は化成精度にどう影響するかを調べるために, 以下のような時系列データセットを作成し, NOC 法分析に使用する。

- 1) 改測周期が 3 年で, 最終観測年が 2001.5 年と 1998.5 年である。
- 2) 改測周期が 4 年で, 最終観測年が 2001.5 年と 1997.5 年である。
- 3) 改測周期が 5 年で, 最終観測年が 2001.5 年と 1996.5 年である。

このような 6 種類のデータセットを用いて, それぞれの 2000 年化成値を推定し, 推定誤差を計算した。ここで, 推定誤差は 2000 年化成値と 2000 年観測値 (1999 年~2000 年の 2 年間平均値) の差と定義する。表-2 に示すように, 最終観測年が 2001.5 年の場合は, 改測周期を変化しても推定誤差はあまり変わらず, 約 1 nT で実測データを表現している。一方, 最終観測年が基準年 2000 年以前の場合は, 基準年から離れるとともに, 推定誤差が拡大する。1996.5 年の場合は, 推定誤差は 7.2nT に達する。以上の結果から, 最終観測年は NOC 法の推定精度に大きな影響を与えることがわかった。

表－2 鹿野山 (KNZ) で求めた 2000 年全磁力化成値と推定誤差. 単位は nT である.

最終観測年	周期3年		周期4年		周期5年	
	化成値	誤差	化成値	誤差	化成値	誤差
2001.5	45888.0	-1.0	45888.8	-0.2	45888.4	-0.6
1998.5	45887.0	-2.0				
1997.5			45882.6	-6.4		
1996.5					45881.8	-7.2

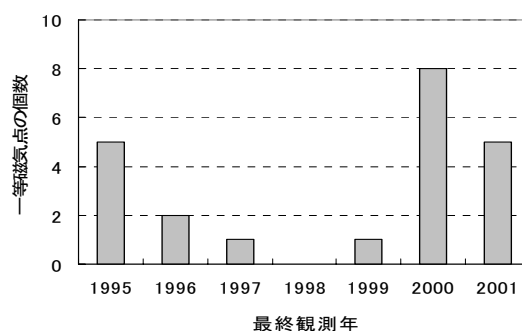
次に、同じ方法で日本の南北両端に位置する鹿屋 (KNY) と女満別 (MMB) の推定誤差を計算し、表－3 の第二と第六欄に示した. 最終観測年が 2001.5 年の場合は、女満別と鹿屋の推定誤差がそれぞれ 3 nT と 0 nT であるが、1998.5 年の場合は、女満別と鹿屋の推定誤差が 2001.5 年と比べて 1 nT 増加することが見られる.

NOC 法の推定誤差と従来から使用している二次式近似法の推定誤差とを比較した. 表－3 に示すように、最終観測年が 2001.5 年の場合は、両方法はともに 3 nT～4 nT の推定誤差で実測値を表現したが、1998.5 年の場合は、二次式近似法による女満別と鹿屋の推定誤差はそれぞれ 12 nT と 9 nT で、NOC 法の推定誤差と比べて 8 nT 増加している. これらの結果から、最終観測年が基準年前の場合は、二次式近似法の推定誤差が NOC 法のものより大きいことがわかった. 二次式近似法では、最終観測年は推定誤差に影響する以外に、磁気点と柿岡の距離も推定誤差に影響する. 表－3 から、柿岡から遠く離れる鹿屋と女満別の推定誤差は柿岡に近い鹿野山の方よりかなり大きいことがわかる. これは、磁気点が柿岡から遠くなると、単純差で求めた基準年化成値に含まれる経年変化が複雑になる. 二次式近似法はこのような複雑な経年変化量を正確に推定できず、推定値に大きな誤差を生じると考えられる.

一等磁気点の場合、規則正しく改測すれば、推定誤差は観測所と同じ程度と考えられる. ここで、2000 年版の磁気図を構築する際に使用した 26 点の中から、繰り返し観測回数が比較的が多い 22 点を選んで、NOC 法で化成を行った. この 22 点は全国に分布し、改測間隔は 2 年～5 年である. 図－6 に示すように、これらの点の最終観測年は 1995 年～2001 年に分布している. 最終観測が 1999 年～2001 年で実施された点は 14 点がある. それ以外の点数は計 8 点で、その中でも、1995 年の点数が最も多い. 表－4 は、NOC 法によって予測した各点の全磁力の 2000 年化成値を示した. 最終観測が 2000 年～2001 年にかけて実施した 13 点に対して、推定値と入力値の残差を計算した (図－7 に参考). 各点では概ね 3 nT 以下の RMS 誤差を示した. これらの点は、空間的に分布傾向を示していないため、観測ノイズや残留外部磁場などによるものと考えられる.

表－3 女満別 (MMB), 鹿野山 (KNZ), 鹿屋 (KNY) 3ヶ所での 2000 年全磁力の推定誤差. 単位は nT である.

最終観測年	MMB		KNZ		KNY	
	NOC法	二次式近似法	NOC法	二次式近似法	NOC法	二次式近似法
2001.5	3	-1	-1	0	0	4
1998.5	4	-12	-2	-1	1	9



図－6 一等磁気点数の分布

表－4 一等磁気点の化成結果

番号	点名	最終観測年	NOC 法による 2000 年化成値 (nT)	NOC 法と二次式近似法との推定値差 (nT)
34	酒田	2001	48108.9	0.1
63	山口	2000	48006.3	0.1
16	旭川	2001	49909.2	0.3
58	鳥取	2000	47828.5	0.4
72	中村	2001	46691.1	0.4
36	若松	2000	47033.2	0.5
64	長崎	2000	47466.3	0.7
7	氷見	2000	47742.1	0.9
4	川之江	2001	47033.7	1.1
26	茅部	2000	49238.3	1.3
20	帯広	2000	49177.3	1.4
6	浜松	2001	46358.4	1.9
39	十日町	1995	47609.0	2.0
14	滝の上	1999	49939.6	2.6
12	礼文島	2000	50867.9	2.7
28	八戸	1995	48484.9	4.9
75	原ノ町	1995	47178.9	5.0
29	大館	1996	48479.8	5.2
74	淡路	1995	46961.2	6.6
43	西伊豆	1997	45779.4	7.3
21	釧路	1996	49164.8	9.7
13	中川	1995	50875.4	27.3

一等磁気点での NOC 法と二次式近似法の 2000 年化成値の差を計算し、表－4 に示した. 最終観測年 (第三欄) と両方法の推定値の差 (第五欄) を対照してみると、最終観測が基準年 2000 年後に行う点に対して、両方法で得られた化成値の差が 2 nT 以内である. しかし、最終観測年が基準年前の場合、

両方法の推定値の差が大きく、十数 nT に達する場合もある。

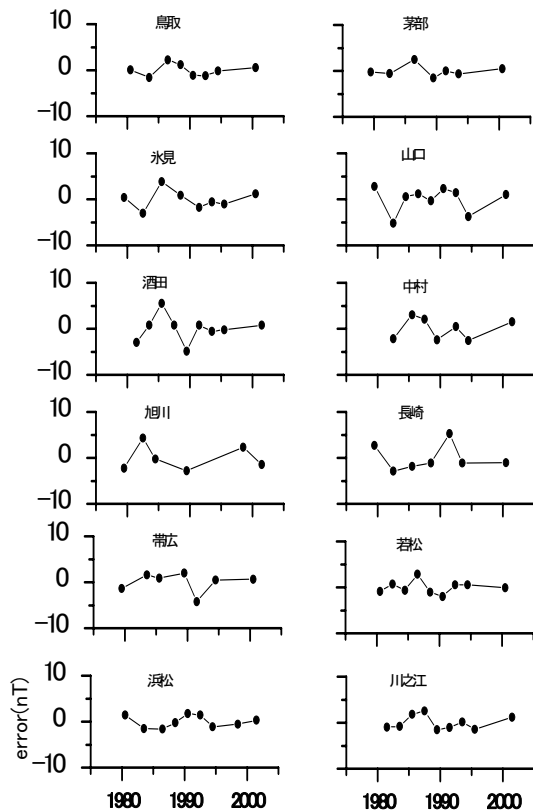


図-7 重回帰で求めた一等磁気点での残差

4. 今後の展望

今回単純差法と NOC 法を用いて、観測所と一等磁気点の化成を行った。NOC 法の推定誤差は一等磁気点の最終観測年に影響される。基準年から約 5 年離れる場合、NOC 法の推定誤差は 7 nT 以下である。単純差法の推定誤差 3 nT を加えると、化成の総合誤差は最大で 10 nT になる。こうした化成精度で日本標準磁場モデルを構築するのは可能である。

日本標準磁場モデルを構築する場合、基準年付近 (1995 年～2001 年) で観測が実施された一等磁気点 (A 類一等点) を使用するだけでは空間的に不十分である。そこで、1995 年以後観測を実施しなかった一等磁気点 (B 類一等点、図-1 に示す) にも化成を行った。それらの点の 2000 年化成値を求めるために、付近の A 類一等点の化成結果を用いる。具体的には、日本周辺域の磁場変化量は経緯度の二次式近似で表せると仮定し、A 類一等点と地球電磁気連続観測装置と観測所の化成結果を使用して、1990 年～2000 年の 10 年間の磁場変化量の空間分布を推定する。そこから得られた B 類一等磁気点の 10 年間の磁場変化量と 1990 年化成値を用いて、その点の 2000 年化成値を推定する。詳細な説明は (白井他, 2002) に報告がある。

観測所と地球電磁気連続観測装置と一等磁気点を合わせた 106 点の 2000 年化成値を利用して、国際標準地球磁場モデル (以下、「IGRF10」という。) を基準にした日本の磁気異常分布を求めた。図-8 はその全磁力異常分布を示した。IGRF10 はコア起源の磁場を表現しているため、この磁気異常は地殻の岩石の磁化による磁場分布と考えられる。今後この磁場異常から地殻構造に対応する広域の磁気異常を特定して、IGRF10 を補正し、日本地域の標準磁場モデルを構築することを考えている。

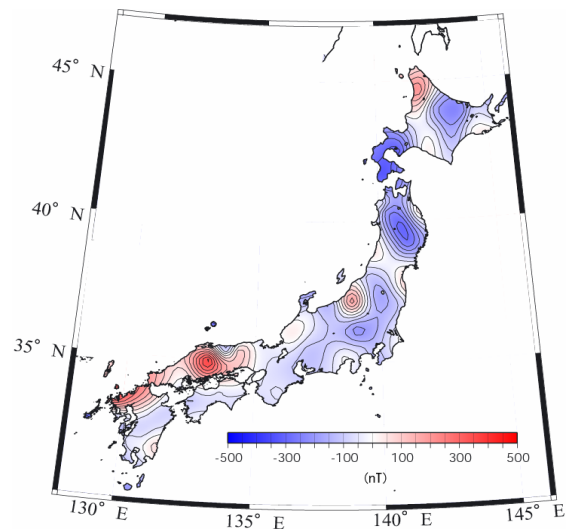


図-8 2000 年全磁力の異常分布

5. まとめ

本稿は単純差法と NOC 法を用いて一等磁気点の全磁力の 2000 年化成を行った。その結果、一等磁気点の最終観測年が基準年付近である場合、NOC 法の推定誤差は約 3 nT で、従来使用した二次式近似法と同じ程度であるが、最終観測年が基準年から離れる場合、NOC 法の推定誤差が小さく、推定精度が高いことがわかった。

日本標準磁場モデルを正確に作成するためには、一等磁気測量が不可欠である。しかし、1990 年以後、一等磁気点の改測点数が減少しつつあり、今後日本標準磁場モデルを作成するために最低限必要なデータ数が得られなくなる可能性が高い。一等磁気点の観測点数の不十分さを補完するための観測システムの改善が必要である。また、一等磁気測量は現在 2 年～5 年の周期で改測を行い、化成精度が 10 nT であるが、作成する日本標準磁場モデルはグローバルモデル IGRF10 より精度が高いことを目標とするために、磁気点の化成精度が 5 nT 以内であることが望ましい。今回の結果から、一等磁気点の最終観測年が基準年から 3 年以内であれば、このような化成精度を得られる。

参 考 文 献

- 藤原智, 田辺正, 西修二郎, 松阪茂, V. P. Golovko, Sergey V. Filippov (1998), 日本および極東地域における地磁気変化モデルの作成, 国土地理院時報, 89, 12-17.
- 紀小麗, 白井宏樹, 渡辺政幸, 何金蘭, 中川弘之, 宇津木充 (2004), 連続観測データによる日本周辺域の地磁気モデルの構築, 国土地理院時報, 103, 89-97.
- Mizuno, H. (1984) : Rapid and episodic variation of the geomagnetic secular variation field, Bulletin of the geographical survey institute, 29-1, 1-102.
- 国土地理院 (1992) : B. 5-No. 17 国土地理院技術資料 (測地技術に関する研究報告), 1-168.
- 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.
- 宇津木充, 白井宏樹, 渡辺政幸, 紀小麗, 何金蘭, 錦輝明, 濱崎英夫, 藤原智 (2003), 日本及びその周辺における磁場経年変化の Regional Model, 国土地理院時報, 102, 11-19.