

偏角（予測値）計算手法の構築

高橋 伸也・菅原 安宏・矢萩 智裕（国土地理院）

Construction of a method for calculating predicted value of magnetic declination

Shinya Takahashi, Yasuhiro Sugawara, Toshihiro Yahagi (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. Based on these observation data, we periodically published charts showing the distribution of the magnetic fields in Japan since 1971 and the latest one is the “geomagnetic charts of Japan for the epoch 2015.0” which was released on December 1, 2016. It represents the geomagnetic state as of January 1, 2015. In order to contribute in more fields, we have been developing a new method to estimate predicted values of magnetic declination based on the magnetic field model used for making the geomagnetic charts. We report here the details of our new method.

1. はじめに

国土地理院では、日本全国の地磁気の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。この測量には、永年変化（時間的変化）を把握するために全国約100点の一等磁気点で実施する繰り返し観測（一等磁気測量）と、磁場分布（空間的変化）を把握するために約700点の二等磁気点で実施する観測（二等磁気測量）がある。このほか全国に3か所の観測所及び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。これは、時間的に不連続な観測値しか得られない一等磁気点の代わりに、永年変化を連続的に捉えることを目的としている。

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」を定期的に公表している。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降、変動する磁場分布の最新情報を提供するため、これまでは10年ごとに更新を行ってきたが、磁気図2010.0年値以降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年には最新版となる磁気図2015.0年値を公表した。

これまで、国土地理院では2010.0年値（2010年1月1日0時（UTC））や2015.0年値（2015年1月1日0時（UTC））など、ある特定の時間における地磁気値のみを提供してきたが、地磁気成果の利用拡大を図るため、本研究では特に利用用途の多い偏角について予測値計算手法の検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 研究の背景

現在公表している最新の磁気図は、2016年12月1日に公表した磁気図2015.0年値である。地磁気は時間的に変化し続けているため、図に表すには時刻の基準を設ける必要があり、時点として表現している。ここで、yyyy.0年とはyyyy年1月1日0時（UTC）を意味する。したがって、磁気図2015.0年値とは、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である。なお、磁気図のほかにも、地理院地図で表示できる偏角一覧図やその一覧表をテキストデータと

して国土地理院のホームページから一般に無償で公表しているが、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。

地磁気成果の利用拡大を図るため、磁気図 2015.0 年値公表後に、国土交通省航空局に対してニーズ調査を行った。同局では、航空機の安全飛行のため空港ごとに整備される航空情報の作成及び更新のために偏角を用いている。しかし、その値は国土地理院が提供する値ではなく、主に国際標準磁場モデルである IGRF（International Magnetic Reference Field）や WMM（World Magnetic Model）を用いて計算される偏角の予測値であること、さらに予測値の提供がないために国土地理院の偏角が使用されないことが明らかとなった。そのほか、ニーズ調査で得られた結果の概要を以下に示す。

- ・ 航空情報の作成（更新）には、公示年度の10月1日における偏角値を使用している。
- ・ 航空情報は国際民間航空機関（ICAO）が規定した国際標準に準拠して作成している。
- ・ 航空情報の更新は、公示から5年以内又は偏角値が1度以上変化した場合に行う。そのほか、周辺関連施設に変更があった場合にも更新を行う。
- ・ 航空情報は、成田空港にある航空情報センター（AIS）の運行情報官が全空港分を管理、更新している。
- ・ 航空情報の作成から公示まで最低でも4、5か月、最大で1年程度かかる。
- ・ 偏角（予測値）の計算には米海洋情報機構（NOAA）の web 上の計算サービス（主に WMM）を使用している。
- ・ 航空情報に掲載している偏角は、1度又は0.1度単位。

現在、磁気図作成には地磁気時空間モデルを使用しているが、モデルの性質上、連続観測データが存在する期間の偏角（確定値）しか計算することができない。反面、磁気図は国内の詳細な地磁気測定の結果に基づき作成されているため、空間分解能の低い国際標準磁場モデルでは表現できない日本国内の複雑な磁場分布を表現できる利点がある。なお、地磁気時空間モデルについては、阿部（2015）や高橋（2017）を参照されたい。

地磁気時空間モデルをベースとした偏角（予測値）の提供は航空情報の確度向上につながり、利用者の安全・安心に直結するものであることから、本研究では偏角（予測値）の計算手法を構築し、精度評価により最適な手法について検討を行った。

3. 研究の目標

航空局へのニーズ調査の結果を踏まえると、航空情報の作成に利用可能な偏角情報を提供するにあたり取り組むべき課題として、以下が挙げられる。

- (a) 偏角の予測値計算手法の構築
- (b) 提供方法の検討（モデル更新頻度、提供期間、公開対象など）
- (c) 予測値計算に対応した計算プログラムや WEB フォームの開発

本研究では、このうち (a) の課題について、任意の場所と時間における偏角の予測値（以下、「予測値」という。）を計算する手法の構築を目標とする。また、構築した手法の精度評価を行い、最適な予測手法について検討を行った。精度評価の詳細は第 4.3 節で説明する。

4. 偏角（予測値）計算手法と精度評価手法

4.1. 直接予測

本手法は、地磁気時空間モデルで計算した直近1年間の偏角のモデル値を使用して、単純な線形予測を行う方法である。計算工程を以下に示す。

- ① 地磁気時空間モデルを使用して予測期間の直前1年間（2010年1月1日～2010年12月31日）の偏角のモデル値を求め、線形近似を行う。ただし、モデル値は日平均値であり、日々の値のばらつきを軽減するため、近似計算には月平均値に換算した値を使用する。
- ② ①で計算した近似式の傾きを2010年1月1日以降の偏角の変化係数(a)とみなし、 $D=D_{2010.0}+a \cdot t$ として2010年1月1日から2015年12月31日までの予測値を計算する。

4.2. 間接予測

本手法は、地磁気時空間モデルの時間関数を推定した後で空間関数と合成することにより、間接的に偏角の予測を行う方法であり、「時間関数の推定」と「時間関数と空間関数の合成」の2段階の工程で計算を行う。なお、地磁気時空間モデルの空間関数は時間に依存しないため、予測期間において不変であると仮定する。計算工程を以下に示す。

《時間関数の推定》

- ① 地磁気時空間モデルにおいて、偏角計算に寄与する時間関数のX成分とY成分のうち、寄与率の大きい主成分（X：第三主成分まで、Y：第二主成分まで）について、予測期間の直前5年間（2006年1月1日～2010年12月31日）の時間関数のモデル値を使用し、関数近似（1次～3次）を行う。ただし、直接予測と同様にモデル値の日々のばらつきを軽減するため、近似計算には月平均値に換算した値を使用する。
- ② 近似計算の結果から、主成分と近似式の採用次数をそれぞれ決定する。

《時間関数と空間関数の合成》

- ③ 時間関数に②で決定した主成分と近似式を使用し、空間関数と合成して2010年1月1日から2015年12月31日までの予測値を計算する。

4.3. 精度評価

精度評価のため、連続観測を行っている観測点のうち、観測条件が良好な一部の観測点において、2010年1月1日から2015年12月31日の期間の観測値と予測値を比較した。直接予測と間接予測の2種類の手法で計算した予測値について、(1)式より観測値と予測値の二乗平均平方根誤差RMSEを手法及び年度ごとに計算して評価を行った。なお、(1)式においてNは時系列データの総数である。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i^{obs} - D_i^{pv})^2}{N}} \quad (1)$$

精度評価は、連続観測を行っている観測点うち、観測環境が良好な国土地理院の測地観測所3か所（鹿野山、水沢、江刺）と、気象庁の地磁気観測所3か所（柿岡、鹿屋、女満別）の計6点で実施し

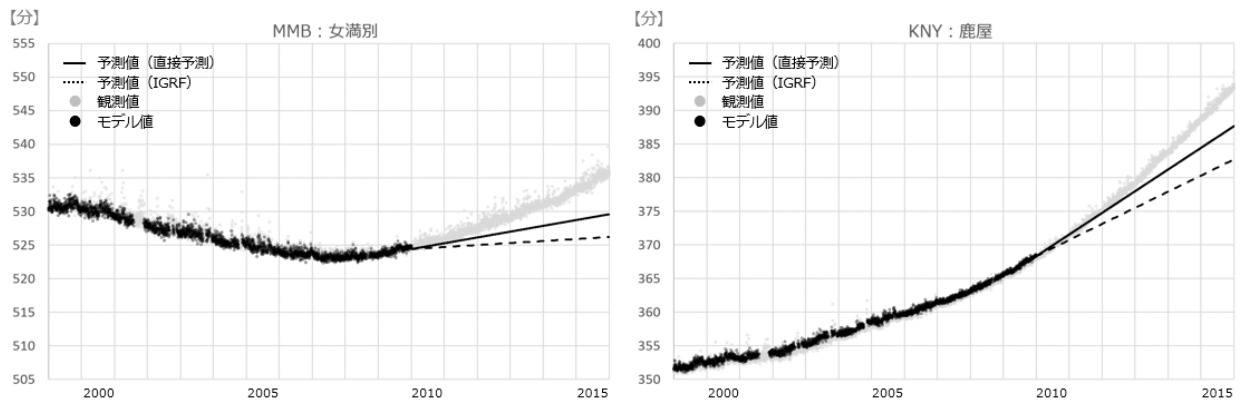
た。また、航空情報に記載される偏角値の桁数（有効数字）が 0.1 度単位であることから、その半量の 0.05 度（3 分）を予測の目標精度（RMSE の許容範囲）として設定した。

5. 結果と精度評価

5.1. 直接予測

直接予測による予測値と精度評価の結果を第 1 図と第 1 表に示す。なお、第 1 表の括弧書きの数値は、IGRF の予測値に対して同様の精度評価を行った場合の結果である。

第 1 図には、比較を行った 6 観測点のうち、最北にある女満別（北海道）と最南にある鹿屋（鹿児島）の結果を示す。いずれの点も、予測開始直後 2 年程度は比較的観測値と一致しているが、それ以降は観測値との差が徐々に増加していく様子がわかる。ただし、IGRF 予測値と比較すると乖離の程度は小さい。また、第 1 表は RMSE の全点平均値の 2010 年から 2015 年までの変化を示したものである。2014 年には RMSE が 4.3 節で設定した許容範囲（3 分）を超過するため、その前年度の 2013 年中にはモデルの更新が必要と考えられる。なお、IGRF の予測値は 2012 年度の時点で既に許容範囲を超過していることがわかる。



第 1 図 観測所における直接予測の結果比較（偏角）

FIG.1 Comparison of results of direct prediction at several observatories (magnetic declination)

第 1 表 実測値と予測値の RMSE（直接予測）

Table 1 RMSE of observation values and predicted values by direct prediction

(単位：分)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
6 観測点	0.510	0.775	1.632	2.559	3.490	5.136
全点平均	(0.646)	(1.853)	(3.208)	(4.853)	(6.473)	(8.792)

5.2. 間接予測

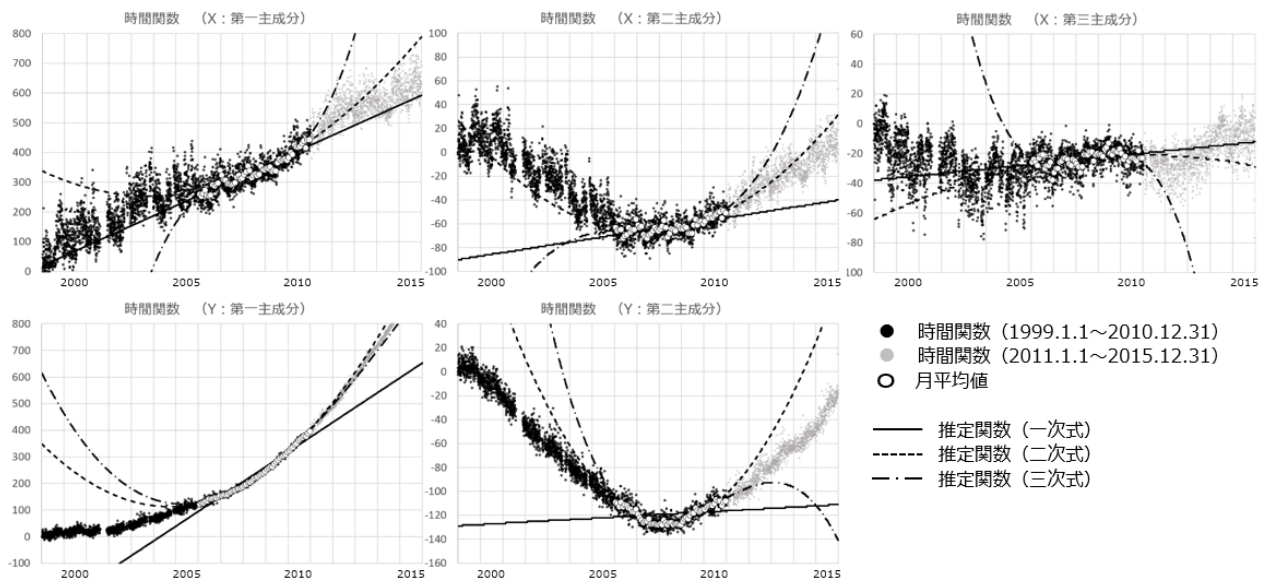
5.2.1. 時間関数の推定

時間関数の推定結果を第 2 図に、主成分の寄与率を第 2 表に示す。主成分のうち、X 成分は第三主成分まで（第 2 表より、累積寄与率 99.92%）、Y 成分は第二主成分まで（第 2 表より、累積寄与率 99.98%）を検討対象とした。

近似関数は、予測期間（2010 年 1 月 1 日～2015 年 12 月 31 日）の時間関数を精度よく推定できてい

ることが望ましい。本来、予測期間の時間関数は未知であることから、近似関数の妥当性は近似計算に使用した期間（2006年1月1日から2010年12月31日）における入力値との残差の大きさから評価するしかない。しかし、一般に近似式の次数が高いほど入力値との残差は小さくなるため、高次の関数（今回の場合は3次）が優位となってしまい、必ずしも適切とは言えない。今回は予測期間におけるモデル値との整合性も考慮して、各主成分の近似関数の次数を決定した。

結果として、X成分の第一主成分は1次式、第二主成分は2次式を採用した。なお、Xの第三主成分は、いずれの関数も予測期間の時間関数を精度よく推定しているとは言い難く、寄与率も1%以下と小さいことから予測値への影響は軽微と判断し、不採用とした。Y成分は第一、第二主成分とも二次式を採用することとした。



第2図 時間関数の推定結果

FIG.2 Comparison of approximations of time functions

第2表 主成分の寄与率

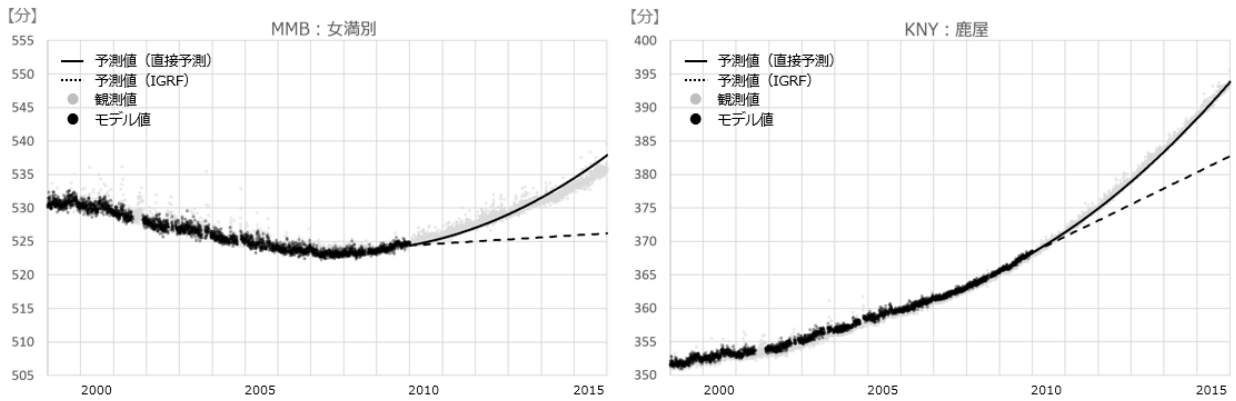
Table 2 Contribution rate by each principal component

	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
X成分	96.70%	2.65%	0.57%	0.03%
Y成分	97.96%	1.99%	0.02%	—

5.2.2. 時間関数と空間関数の合成

5.2.1節で決定した時間関数と空間関数を合成して計算した予測値の結果を第3図に、精度評価の結果を第3表に示す。なお、第3表の括弧書きの数値は、IGRFの予測値に対して同様の精度評価を行った結果である。

第2図には、比較を行った6観測点のうち、北端の女満別（北海道）と南端の鹿屋（鹿児島）の結果を示す。いずれの点も予測期間を通じて予測値と観測値の差が小さく、IGRFの予測値と比べても、予測結果が良好であることは明らかである。また、第3表に示すとおり、予測期間の最終年である2015年度時点においてもRMSEの全点平均は許容範囲（3分）内であることがわかる。



第 3 図 観測所等における間接予測の結果比較（偏角）

FIG.3 Comparison of results of indirect prediction at several observatories (magnetic declination)

第 3 表 実測値と予測値の RMSE（間接予測）

Table 3 RMSE of observation values and predicted values by indirect prediction

(単位：分)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
6 観測点	0.474	0.503	0.652	0.726	1.436	2.147
全点平均	(0.646)	(1.853)	(3.208)	(4.853)	(6.473)	(8.792)

6. 本研究における成果と今後の課題

6.1. 最適な予測偏角値計算手法

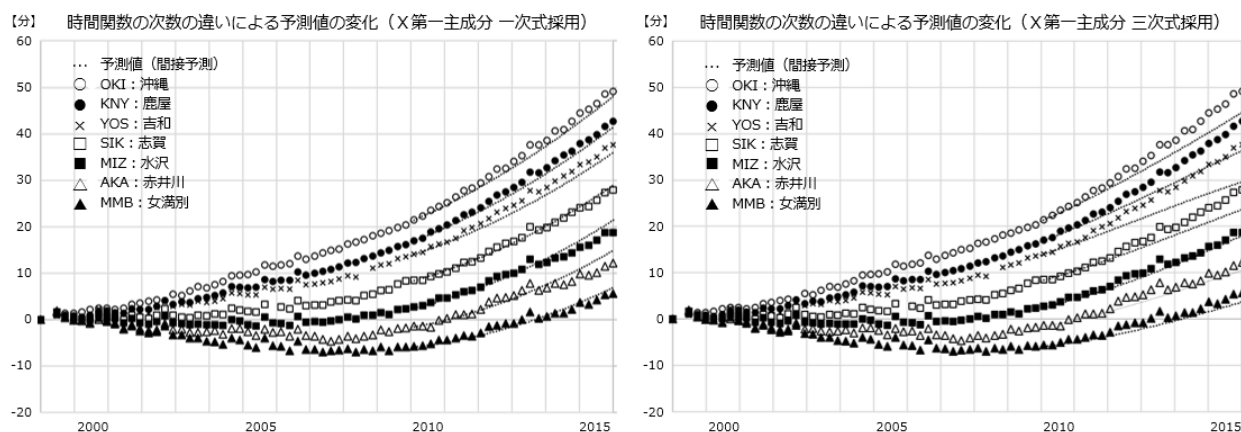
本研究では、偏角の予測値計算手法として直接手法と間接手法の 2 種類の手法について検討を行った。5 章の精度評価の結果から、直接予測、間接予測ともに予測期間において IGRF の予測値よりも良好な予測結果が得られた。また、今回の条件では、直接予測よりも間接予測の方が観測値との乖離が小さく、良好な予測結果が得られた。

しかし、間接予測は時間関数の近似関数の選択が困難であり、選択する関数を誤ると予測結果に大きな影響が生じる可能性がある。5.2.1 節でも述べたとおり、本来、予測期間の時間関数は未知であることから、近似関数の妥当性は近似計算に使用した期間（2006 年 1 月 1 日～2010 年 12 月 31 日）における入力値との残差の大きさから判断するしかない。一般に、近似式の次数が高いほど入力値との残差は小さくなるため、例として X 成分の第一主成分に 1 次式ではなく 3 次式を採用した場合の、全国の連続観測点における予測値の結果を第 4 図（右）に示す。また、各観測点における年ごとの観測値と予測値の RMSE を第 4 表に示す。なお、第 4（左）及び第 4 表の括弧書きは、X 成分の第一主成分に 1 次式を用いた場合の結果である。

第 4 図及び第 4 表より、X 成分の第一主成分に 1 次式を用いた場合は、いずれの観測点においても全予測期間を通して RMSE が許容範囲（3 分）内の良好な予測値が得られていることがわかる。一方、X 成分の第一主成分に 3 次式を用いた場合には、東日本に位置する観測点（女満別、赤井川、水沢）では観測値と予測値に大きな乖離は見られないが、西日本に位置する観測点（志賀、吉和、鹿屋、沖縄）では RMSE が年度の経過とともに徐々に大きくなり、さらに、観測値よりも予測値の方が小さく計算される傾向が見られる。

このように、間接予測では時間関数の主成分の採用次数や近似関数の選択が予測値に大きな影響を

及ぼすとともに、場所によってその影響の程度が異なることがわかる。



第 4 図 時間関数の近似関数の違いによる予測値への影響（偏角）

FIG.4 Effect of changing approximation of time function on predicted value (magnetic declination)

第 4 表 時間関数の近似関数の違いによる RMSE の比較（偏角）

Table 4 Change in RMSE by changing approximation of time function (magnetic declination)

（単位：分）

	2011	2012	2013	2014	2015
女満別（北海道）	1.024 (0.751)	1.451 (0.917)	1.461 (0.611)	1.282 (1.070)	1.906 (1.664)
赤井川（北海道）	0.773 (0.526)	1.541 (1.088)	1.520 (0.913)	1.079 (0.672)	1.403 (1.133)
水沢（岩手）	0.752 (0.546)	1.063 (0.646)	1.011 (0.701)	0.640 (1.809)	1.060 (2.625)
志賀（石川）	0.550 (0.654)	1.161 (0.641)	1.754 (0.805)	2.477 (1.297)	3.614 (1.985)
吉和（広島）	1.255 (0.755)	2.283 (1.114)	3.506 (1.225)	4.968 (1.076)	6.994 (0.986)
鹿屋（鹿児島）	1.088 (0.397)	1.795 (0.564)	2.811 (0.653)	3.938 (0.511)	3.467 (0.480)
沖縄（沖縄）	1.094 (0.313)	1.679 (0.482)	2.580 (0.733)	3.467 (0.754)	4.285 (0.460)

なお、時間関数の時系列データは、主成分分析の特性上共通のデータセットが存在する期間分（1999年1月1日～2015年12月31日）のデータしか存在しない。このため、現在のデータ数では時間関数の長期的な変化を再現する近似関数について、適切な判断を行うことは困難である。ただし、今後も連続観測データを蓄積して共通のデータセットが存在する期間を延長することで、時間関数の時系列データが増加し、近似関数の適切な推定が可能になる余地はあると思われる。

一方、直接予測では年度の経過により観測値と予測値の差が大きくなるため、RMSE が許容範囲を超える前にモデル更新が必要となる。しかし、線形予測の性質上、RMSE の変化量は事前に見積もることができるため、計画的なモデル更新が可能である。また、直接予測は計算方法が単純で、間接予測のような判断要素も少ないことから、誰が予測モデルを更新しても同じ結果が得られるという利点がある。

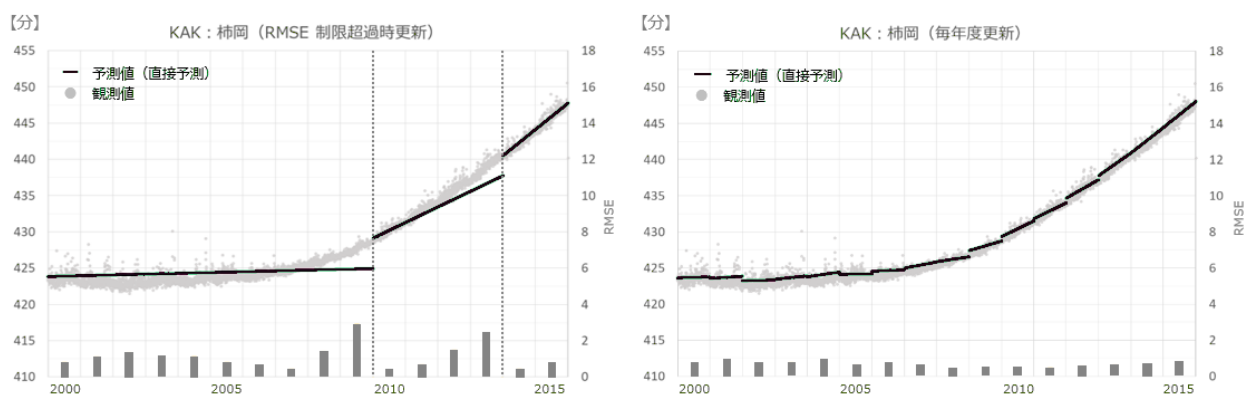
以上の結果を踏まえ、予測の安定性や作業の継続性、求められる予測値の精度等の観点から、直接予測の方が今回の目的については適していると判断される。

6.2. 今後の課題

予測値計算に直接予測の手法を採用した場合に、一番の課題となるのはモデルの更新間隔である。第5図に、柿岡地磁気観測所における2000年以降の予測値のモデル更新時期のシミュレーション結果を示す。第5図（左）は予測値と観測値のRMSEが許容範囲（3分）を超える前の年にモデル更新を行った場合のシミュレーション結果である。期間の前半は偏角の変化が緩やかであるため、予測値と観測値の乖離は小さくモデル更新の必要はないが、2010年以降は変化が大きくなるため、2010年と2014年にモデルの更新が必要となり、モデル更新時に予測値にギャップが生じてしまうことがわかる。

一方、第5図（右）はRMSEの大小に関わらず、毎年度モデル更新を行った場合のシミュレーション結果である。RMSEがほとんど一定となるため、予測精度が安定するとともに、モデル更新時のギャップも改善されていることがわかる。このことから、モデル更新は毎年度行うことが望ましいといえる。

現在は、測地観測所や連続観測点で得られた連続観測データに対して、手作業でノイズやオフセットなど異常値の処理を行っているため、モデル更新は5年に1回の頻度となっているが、データ編集にかかる作業時間を短縮できれば、毎年度のモデル更新も可能と考えられる。今後は、モデル作成に異常値が生じにくい夜間観測値のみを使用する方法や、異常値の影響を受けにくい中間値を使用する方法などを検証し、モデル更新の効率化に取り組んでいきたい。



第5図 モデル更新時期のシミュレーション（偏角）

FIG.5 Effects by changing the period of updating the model (magnetic declination)

参考文献

- 阿部聡, 宮原伐折羅 (2015): 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.
- 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.
- 高橋伸也, 菅原安宏, 矢萩智裕, 阿部聡 (2017): 磁気図 2015.0 年値の公表, Conductivity Anomaly 研究論文集, **2017**, 49-56.