

## 女満別・鹿屋における絶対観測頻度と精度のシミュレーション

藤井郁子<sup>1</sup>, 大和田毅<sup>2</sup>, 源 泰拓<sup>1</sup>

<sup>1</sup>地磁気観測所技術課, <sup>2</sup>地磁気観測所観測課

2011年6月20日受付, 2011年8月26日改訂, 2011年9月28日受理

### 要 旨

女満別および鹿屋における地磁気絶対観測について, その間隔を現用の毎週から延長した場合のシミュレーションを行った. 現用の単純外挿を用いて過去のデータから観測値の評価を行う場合, 隔週の観測では正常な観測値が異常値と判断される事例がある. 単純外挿に代えて連続観測を行う磁力計のセンサー温度・傾斜を加味した予測も試みたが, 著しい精度向上は認められない.

単純外挿のもとで絶対観測の間隔を延長する場合, 再観測の基準を緩和する必要がある. 再観測を行う確率が観測10回につき1回にとどまる基準を試算したところ, 隔週観測では, 1回の絶対観測の不確実さを長期的に必要な精度 (1 nT または0.1分) よりわずかに小さくすることができた. 4週間に1度の頻度になると, 再観測基準自体が必要精度を超える.

ただし, これらのシミュレーションは安定した基線値が得られた期間のデータについて行ったものである. また人為的要因によって生じた磁場擾乱があれば, 絶対観測間隔を延長した場合の精度の維持は困難となることが想定される.

### 1. はじめに

気象庁が行う地磁気観測の目的は, 磁気圏や地球内部などの自然環境の変化によって生じる地磁気を把握することである. しかし, 常時連続して測定される地磁気の変化には, 目的とする自然の地磁気変化に加えて, 磁力計を設置している地盤の傾斜変動, 磁力計の経年変化など設置環境の変化による見かけの変動が含まれている. これらの見かけの変動は, 1週間に平均的に0.2nT, 1ヶ月の間に1ないし2nTにおよぶ.

地磁気絶対観測は, この見かけの変動を補正するために必要とされるもので, 絶対観測で得られる基線値を連続観測値に付加することにより, 自然の地磁気変化を見出すことができる.

気象官署観測業務規程第55条において, 地球磁気絶対観測値の最小位数を1nTとすることが定められている. 気象庁地磁気観測所では長期的な必要精度を1nTまたは0.1分として定め, 運用する高感度フラックスゲート磁力計の精度及び安定性と絶対観測の精度を勘案して, 絶対観測を1週間毎に行い, 観測間は内挿することで, 安定した基線値を得ている.

1週間毎の絶対観測は, 国際的にも標準的な運用

である. Jankowski and Sucksdorff (1996) は2系統の独立した記録器がある場合であっても, 絶対観測を週に一度実施することが標準であるとしている. また国際リアルタイム地磁気観測ネットワーク (INTERMAGNET) の幹部会議および運営委員会も, 絶対観測を毎週実施するよう勧告している (Benoît, 2008).

しかしながら, 絶対観測の頻度と精度の関係は, 測器の安定性, 観測環境等個々の観測点で異なるものであり, この基準を満たすことが, あらゆる観測点において常に必要にして十分とはいえない. 2005年のINTERMAGNET指定観測所における年間絶対観測日数は40日ないし70日が最も多く, 約半数の42観測点が週1回程度の絶対観測を行っていた. 次いで, 2, 3日に1回の頻度の観測点が多く, さらに, ほぼ毎日絶対観測している観測点も7ヶ所ある. 一方で, 年間20回以下の観測点は3点あったが, いずれも運営上の問題が注記されている (INTERMAGNET 2007).

このように, 現状では, 世界中の地磁気観測所は, 基線値を把握するための絶対観測を標準的には週1回程度行っており, 磁力計の安定度によって

はさらに頻度を上げて対応している。現時点では絶対観測の自動化は実現されておらず、観測者が機器を手動で操作する必要がある。絶対観測の頻度を軽減することができれば省力化を図ることができるが、週1回を大きく下回る頻度での観測の成功例は未だ報告されていない。

気象庁地磁気観測所において地磁気変化観測測器として採用されている高感度フラックスゲート磁力計は、その温度依存性が $0.5\text{nT}/^\circ\text{C}$ と小さく、またセンサー周辺の温度変化は年間を通じて $3^\circ\text{C}$ 以下に保たれている (Minamoto, 2009)。このように安定した地磁気変化観測がなされていることから、過去にも絶対観測の頻度を下げる可能性が検討されてきた。小池 (1998) は柿岡における絶対観測の結果から観測頻度を約半分にした場合を試算し、H成分、Z成分、D成分で各々93%、97%、89%の観測が現行と同様の精度を維持しているとした。しかしこの検討は単純に観測値を間引いたもので、観測値の良否をそれ以前の結果から判断することは想定されていない。

我々は、女満別および鹿屋における絶対観測について、その間隔を延長した場合のシミュレーションを過去の観測データを用いて行った。本稿では、絶対観測の良否判定のための基準と、その基準で達成が期待される精度について報告する。

## 2. 現行基準を継続した場合の絶対観測の良否判定

### 2.1 現行の絶対観測手順

現行の絶対観測は、以下の手順で行われている。

- イ) 2人の観測者がそれぞれ4回計測を行い、計8個の基線値を得る。
- ロ) 8個の基線値の平均を計算し、観測基線値とする。平均する前に、8個の基線値の中に異常値があるかどうか検査し、異常値は平均から除外する。
- ハ) 前回と前々回の観測基線値の直線外挿から予測

値を求め、観測値が予測値より $0.3\text{nT}$  (H, Z成分) または $0.03$ 分 (D成分) 以上離れた場合、再観測を行う。

手順イ) とロ) は、観測者による偏りを抑え、観測基線値の精度を確保するために行うもので、絶対観測の頻度にはよらない。

手順ハ) は、観測全体に影響を与えるような観測器設定のミスや異常な観測環境変化の混入を防ぐために行うもので、再観測値が再観測基準以内になれば1回目の観測値にはなんらかの異常が含まれていたとして棄却する。再観測値が再度基準を超えた場合、環境等に異常がないか確認の上で観測値を採用し、真の基線値変化があった場合でも対応できるようになっている。

絶対観測の頻度を変更した場合、影響を受けるのは手順ハ) である。観測頻度変更により、再観測が増加すれば省力化が進まず、異常値を見落とせば基線値の精度を落とすことになる。次節以降では、手順ハ) における影響を検討する。

### 2.2 現行の絶対観測と同じ手順で観測間隔を延長した場合

絶対観測間隔を2週間にし、直近の2観測値の直線外挿から予測値を求め観測値と比較すると、正常な観測値でも再観測基準を超えるものが現れる。図1に示した例は、2006年3月から5月の女満別における観測基線値Z成分で、4月10日から1週間後を予想した場合 (図1a)、2週間後を予想した場合 (図1b) である。観測値には、再観測によって棄却された異常値は含まれていない。1週間後の場合は再観測基準内に実測値を含んでいるが、2週間後の場合は再観測と判定される。現行の手法は、観測間隔が週1回であるならば、4月10日以降の原因不明の急速な減少にも、再観測基準の範囲内に実測値を

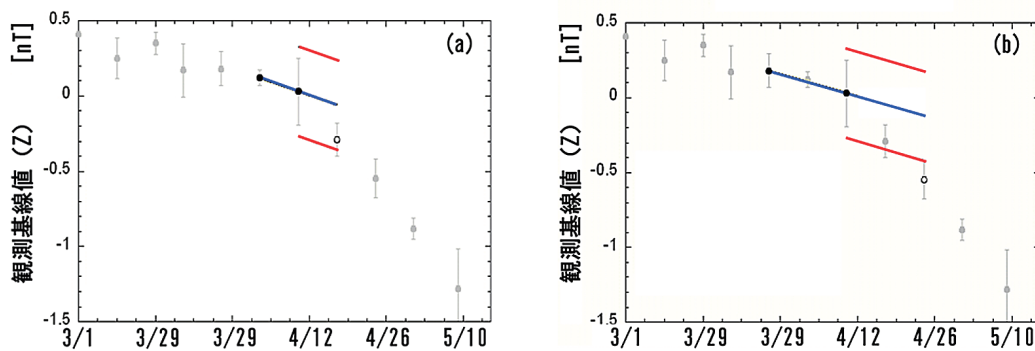


図1 2006年3月～5月の女満別の絶対観測値Z成分と、(a) 週1回の観測によって4月10日から1週間後を予想した場合、(b) 隔週の観測によって4月10日から2週間後を予想した場合  
●は予測に用いた観測値、○は予測すべき観測値、●はそのほかの観測値、中央の太線 (青) は直近2回の観測値の直線外挿、その上下の太線 (赤) は直線外挿  $\pm 3\text{nT}$  を示す。

含むことができるが、隔週の観測では再観測を要するとの判断となる。

2.3 予測手法を変えて観測間隔を延長した場合

次に直線外挿よりも高精度な予測を行い、観測間隔を延長することを考える。

新しい予測方法として、連続観測を行う磁力計のセンサー温度と傾斜から最小自乗法によって絶対観測予測値を算出し、観測値と比較した。

女満別において、連続観測値・絶対観測値・温度・傾斜のすべてが比較的安定していた2003年10月から2004年9月の1年分のデータを用いて、絶対観測の磁場3成分と同時刻の温度と傾斜に対する係数を計算した。図2に、図1と同じ期間のZ成分観測値と予測値を示す。図2に示した予測値は2種類ある。1つ目の予測値(▽)は、前述の係数を用いて算出した値に、観測が安定していた2006年3月の実測値に近づけるため定数を加えたものである。2つ目の予測値(▲)は、前章で基準とした絶対観測日(4月10日)に、絶対観測値と温度・傾斜からの予測値が一致するように、予測値にオフセットを加えたものである。

磁力計のセンサー温度・傾斜による予測(▽)は、4月10日以降についてはうまく再現できていない。また、温度・傾斜を用いて算出された予測値の変動と同時期の絶対観測値の変動は、必ずしも相関しな

いことがうかがえる。観測が行われない期間について、温度・傾斜からの予測値をそのまま絶対観測値の予測とすると、新たな誤差を導入することになる。

前節で基準とした観測日の予測値が実測値にように、予測値にオフセット分を加えた場合、7日ないし21日後では実測と予測の差が0.13ないし0.25nT、28日後では0.43nTになった。この期間では最も良い近似であった。

次に、温度・傾斜からの予測値を直近の観測値から求めたオフセットで補正する方法を用いて、絶対観測が2週間おき、4週間おきの場合にどのような予測精度になるかを検討した。

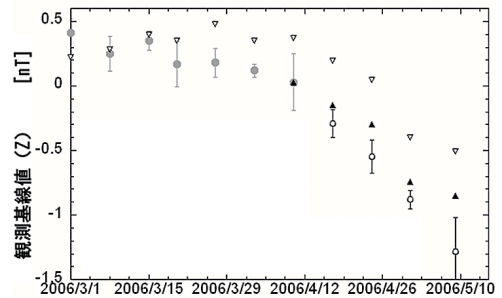


図2 2006年3月～5月の女満別の絶対観測値Z成分と温度・傾斜からの予測値  
○は予測すべき観測値, ●は過去の観測値, ▽は傾斜・温度から算出された予測値, ▲は絶対観測日(4月10日)を基準としてオフセットを与えた予測値。

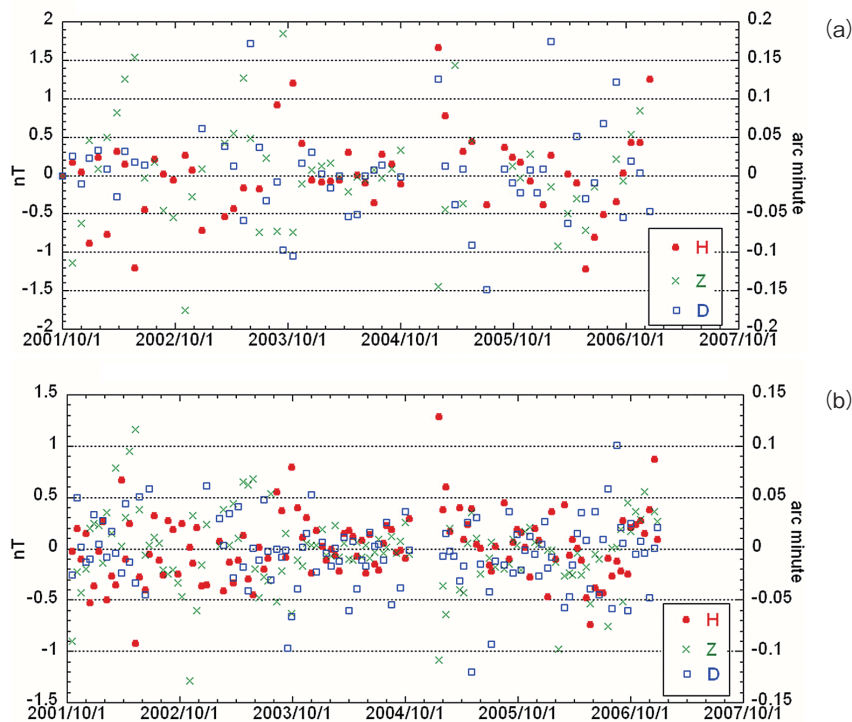


図3 女満別の絶対観測値と温度・傾斜からの予測値との差  
絶対観測間隔が4週間おき (a) と隔週 (b) の場合を示す。

2001年10月から2006年12月の女満別の絶対観測値から観測異常値を除去し、次に、2つおき及び4つおきに観測値を抜き出して新しいデータセットを作成した。新しいデータセットはほぼ2週間及び4週間おきであるが、なんらかの事情で頻繁に観測している期間には間隔が狭まっていることがある。新しいデータセットを用いて、次の絶対観測値を予測し、実測と比較した。

図3に女満別地磁気3成分の2週間おき、4週間おきの実測と予測の差を示す。

図3に示したのは、観測が順調に推移している期間の結果である。観測トラブルなど予期しない理由で傾斜計や磁力計に大きな変化が生じた場合は、予測と実測は大きく乖離し、約30nT程度の振幅を示す例も数個あった。そのような異常な場合を除いても、予測値と実測値の差はばらついており、現行の再観測基準（0.3nT以内）や必要精度（1nT以内）を超える事例が全期間を通じて不定期に現れる。

平均値、標準偏差、中央値、中央絶対偏差を表1に示す。平均値と標準偏差は、異常な値も含む全体の代表値とばらつきを示し、中央値と中央絶対偏差は図3に示されたような順調な期間の代表値とばらつきを示している。

表1、図3から、温度・傾斜からのオフセット付き予測値は、2週間あるいは4週間先予測において、必要精度、再観測基準を超える観測結果を頻発し、このままでは予測値には不向きであることがわかる。直近の観測に合わせるようにオフセットを変更するのは、過去のトレンド情報を無視する荒い近似であるため、長期予測には不適切と考えられる。

今後、温度計や傾斜計を利用した予測で精度を上げるのであれば、安定して欠測が少ない測器の調査に加えて、観測値と対応して変化する予測値を得る必要がある。しかしながら世界的に見ても未だ成功例はない。

表1 女満別の絶対観測値と温度・傾斜からの予測値との差の統計量  
(間隔が4週間の場合(上)と2週間の場合(下))

成分名 (単位)	絶対観測数	温度・傾斜 観測数	温度・傾斜 欠測率	平均値	標準偏差	中央値	中央絶対 偏差値
H(nT)	70	65	7.1%	1.2848	2.4786	-0.0517	0.3734
Z(nT)	70	65	7.1%	2.6626	7.2680	0.0669	0.4354
D(分)	71	61	14.1%	0.1099	0.2107	0.0082	0.0302
成分名 (単位)	絶対観測数	温度・傾斜 観測数	温度・傾斜 欠測率	平均値	標準偏差	中央値	中央絶対 偏差値
H(nT)	135	128	5.2%	0.5673	1.4434	0.0018	0.2193
Z(nT)	135	128	5.2%	0.9675	3.9905	0.0191	0.2146
D(分)	135	119	13.1%	0.0565	0.1413	-0.0018	0.0222

現時点では、観測現場ですぐに評価できるような簡便な方法では、1週間より先を精度良く予測するのは難しいと言える。

### 3. 再観測基準を緩和して観測間隔を延長した場合の精度

前項までに示したどの予測法を用いても、絶対観測頻度が週1回より低下すれば再観測が頻発する。一方で、対象が遠い先になると予測誤差は増大するので、絶対観測の間隔が1週間より延びるならば、再観測基準を緩和するのが妥当と考えられる。

2.3で求めた、4週間に1度の傾斜・温度からのオフセット付き予測値と実測値との差において、良好な観測時で再観測率が10%以下となるようにするには、再観測基準を1.0nT (H成分)、1.4nT (Z成分)、0.1分 (D成分) にする必要があるが、これでは長期的な必要精度 (1nT または 0.1分) を満たさない異常値があっても検出できない (表3)。

さらに絶対観測の誤差を考慮する必要がある。地磁気観測所の定常的な絶対観測においては、1回の観測について、1人の観測者が偏角と伏角を各々4回測定している。この4つの測定値の分散を観測の良否判断に用いているが、その大きさは概ね0.02分程度である。換言すれば、1回の絶対観測には0.2nT または 0.02分の誤差が含まれる。この誤差を考慮すれば、再観測基準を0.8nT または 0.08分以下にする必要があり、再観測率は13% (H成分)、22% (Z成分)、15% (D成分) になる。理想的な状況下でさえ4回ないし5回に1度の割合で再観測が必要な計画は、適切とはいえない。

次に観測間隔が2週間の場合を考える。再観測率が10%となる基準は、0.5nT (H成分)、0.6nT (Z成分)、0.05分 (D成分) となる。これは、観測誤差を考慮すると、長期的に必要な精度より小さい値である (表2)。

表2 良好な観測時で再観測率が10%以下とするための再観測基準 (女満別)

	H (nT)	Z (nT)	D (分)
隔週	0.5	0.6	0.05
4週毎	1.0	1.4	0.10
毎週(参考)*	0.3	0.3	0.03

\*毎週(参考)は現在採用している基準。2.3節を参照。

#### 4. 議論

女満別・鹿屋における観測データを用いて、絶対観測の間隔を延長した場合の観測精度について調査した。その結果、絶対観測の頻度を1週間に1回よりも下げた場合、現行の単純外挿に代えて温度、傾斜を考慮した予測法を用いたとしても、再観測が著しく増加するため、実務遂行上は基準の緩和が必要となる。絶対観測の間隔の延長に伴って観測間の基線値の誤差が増加するのに加え、再観測基準の緩和は各回の観測精度の低下を伴うことは避けられない。

具体的には、絶対観測頻度が2週間に1度の場合、再観測を行う頻度を観測10回につき1回にとどめるためには、再観測基準は0.5ないし0.6nTまたは0.05分とする必要がある。絶対観測に含まれる誤差（1回の観測で0.2nTまたは0.02分程度）と合わせると、1回の絶対観測の不確かさは、長期的に必要な精度（1nTまたは0.1分）よりわずかに小さい。4週間に1度の頻度になると、再観測基準自体が必要精度を超えてしまい、必要精度を超える異常があっても検出できない。

なお、これらのシミュレーションは安定した基線値が得られた期間のデータについて行ったものであることに留意されたい。2011年4月に女満別、鹿屋ともに観測が遠隔化され、職員が常駐していないため、シミュレーションに用いたデータの期間に比べて基線値の安定性はより脆弱になっていると考えられる。

絶対観測の間隔を延長するためには、絶対観測が正確に行われたか定量的に評価する方法を確立する必要があるが、1週間より先を精度良く予測することは現時点では困難である。評価手法の改善に向けては、たとえば温度変化による土壌の磁場変化を定量的に取り入れることが考えられる（三島ほか、2011）。

なお、以上の議論は再観測すれば検出できる一時的な異常についてのものである。とくに鉄材など人

為的要因によって生じた磁場擾乱は、恒久的に影響が続くものがある。前述の通り女満別および鹿屋では観測が遠隔化されたため、目視による人為的な擾乱源の発見は困難になった。擾乱源の検出のため、定期的な構内磁気測量の実施や、複数点に置いた磁力計とモニタリングカメラによる検知システム（Minamoto et.al. 2011）が導入されているが、たとえば空き缶など微小な鉄材が絶対観測点の近くに放置された場合は、絶対観測の間隔延長は深刻な影響を与える。女満別および鹿屋において、現在の精度を維持しつつ絶対観測の間隔を延長するためには、観測結果評価方法の確立とともに、人為的な擾乱源の監視についての経験を蓄積し、補正処理方法の改善を図ることが不可欠である。

#### 参考文献

- Benoît St-Louis, ed., *INTERMAGNET Technical Reference Manual version 4.4*, INTERMAGNET, Edinburgh, pp. 86, 2008.
- INTERMAGNET, *Magnetic Observatory Definitive Data 2005*, Chambon la Forêt, France, CD-ROM, 2007.
- Jankowski, J. and C. Sucksdorff, *Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice*, International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), Boulder USA, pp. 235, 1996.
- 小池捷春, 地磁気絶対観測頻度の検討, 地磁気観測所技術報告, **37** (3, 4), 1-9, 1998.
- Minamoto, Y., Ongoing geomagnetic field 1-second value measurement by JMA, *Proceedings of the XIIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing*, 190-193, 4, 2009.
- Minamoto, Y., Y. Ikoma, K. Morinaga and J. Shimizu, Advanced Systems to monitor geomagnetic environments by Japan Meteorological Agency, *Data Science Journal*, doi:10.2481/dsj.IAGA-09, 2011.
- 三島稔明, 大和田毅, 森山多加志, 石田憲久, 吉武由紀, 長町信吾, 源 泰拓, 山崎俊嗣, 小田啓邦, 地磁気観測所構内の土壌磁化特性と地磁気観測値に対する影響, CA 研究会論文集 2011, 61-66, 2011.

# **Simulation for frequency and precision of absolute measurements at Memambetsu and Kanoya**

by

**Ikuko FUJII, Takeshi OWADA and Yasuhiro MINAMOTO**

**Kakioka Magnetic Observatory**

Received 20 June 2011; received in revised form 26 August 2011;  
accepted 28 September 2011

## **Abstract**

With respect to the absolute geomagnetic observations at Memambetsu and Kanoya, we simulated the effect of extending the observation interval from the current weekly observations to a longer interval. When using past data to evaluate observation values, there are examples where the currently used simple extrapolation of bi-weekly observations causes normal values to be judged as outliers. An attempt at replacing simple extrapolation with prediction by adding the temperatures and gradients of the sensor of the magnetometer used for continuous observation produced no significant improvements in precision.

If the interval between absolute observations is extended and the simple extrapolation method used, then the standard for re-observation needs to be relaxed. We estimated the standard under which the probability of re-observation remained at one in ten observations, and found that bi-weekly observation could reduce uncertainty in a single absolute observation to slightly less than the precision required over the long term (1 nT or 0.1 minute). At an observation frequency of once every four weeks, the re-observation standard itself will exceed the required level of precision.

However, these simulations were carried out using data from a period during which stable baseline values were obtained. If there is a disturbance in magnetic fields due to artificial factors, then an extended interval between absolute observations will make maintenance of precision difficult.