

## 昭和基地における地磁気観測基線値とセンサーの傾斜の変動

有田 真<sup>1\*</sup>・井 智史<sup>2</sup>・仰木淳平<sup>1</sup>・高橋幸祐<sup>2</sup>・門倉 昭<sup>3</sup>・源 泰拓<sup>4</sup>

### Variations of Baseline Values of Geomagnetic Field Observations and tilt-change of the sensor at Syowa Station

Shin Arita<sup>1\*</sup>, Tomofumi I<sup>2</sup>, Junpei Oogi<sup>1</sup>, Kosuke Takahashi<sup>2</sup>, Akira Kadokura<sup>3</sup>, Yasuhiro Minamoto<sup>4</sup>

(2019年6月1日受付; 2019年8月27日受理)

**Abstract:** At Syowa Station, Antarctica, the baseline values, or the difference between the absolute and continuous measurements, vary relatively significantly in summer. They are possibly due to artificial disturbances from magnetized objects, and/or changes of the instrumental environment such as involving the tilt and temperature of the sensor for continuous observations. To evaluate the effect of the sensor tilt, we continuously monitored its behavior with electronic tiltmeters over two successive summer seasons (Jan.-Feb. 2013, Nov. 2013-Feb. 2014), while also intensifying the frequency of the absolute observation. The variability of the tilt was found such that, its angular changes in the East-West and North-South directions were 30 to 50 and 10 arcseconds, respectively. The observed variations of the baseline values can be attributed primarily to the sensor tilt changes, with its contribution estimated to be up to 60 to 100% for the D component and 30 to 40% for the H and Z components.

**Keywords:** Baseline value, Geomagnetic Field Observations, tilt-change, Syowa Station

**要旨:** 南極の昭和基地では、基線値（絶対観測値と連続観測値との差）が特に夏期間において顕著な変化を示す。この変化の要因としては、例えば重機のような磁性体によるノイズや磁力計センサーの傾斜変動や温度変化といった設置環境の変化が考えられる。磁力計センサーの傾斜変動が夏期間の基線値変化に及ぼす影響を調査するために、電子水管傾斜計を用いて傾斜変化を連続観測するとともに、絶対観測を通常より高頻度で実施した（2013年1月～2月、2013年11月～2014年2月）。調査の結果、東西方向で30秒角から50秒角程度、南北方向で10秒角程度の顕著な傾斜変化があることが判明した。基線値変化には傾斜変化が大

<sup>1</sup> 気象庁地磁気観測所。Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency, Kakioka 595, Ishioka, Ibaraki 315-0116.

<sup>2</sup> 気象庁地震火山部。Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency, 1-3-4 Ote-machi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122.

<sup>3</sup> 情報・システム研究機構国立極地研究所。National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

<sup>4</sup> 特定非営利活動法人富士山測候所を活用する会富士山環境研究センター第一研究部。1st Research Department, Laboratory for Environmental Research at Mount Fuji, NPO Mount Fuji Research Station, 1-6-9-901 Koji-machi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0083.

\* Corresponding author. E-mail: arita@met.kishou.go.jp

きく寄与していることが分かり、傾斜変化の基線値変化への寄与率は最大で、D成分で60%から100%、H成分とZ成分で30%から40%と推定された。

キーワード： 基線値, 地磁気観測, 傾斜変化, 昭和基地

## 1. はじめに

昭和基地 (69°00'19"S, 39°34'52"E) では1966年から継続して地磁気観測が行われている。地磁気観測はその目的の違いから2つに分けられる。一つは地磁気永年変化を監視するために行われている地磁気絶対観測 (以下, 絶対観測という) であり, もう一つは, 太陽風-磁気圏-電離圏現象に伴う地磁気変化をモニタリングするために行われている地磁気連続観測 (以下, 連続観測という) である Takahashi *et al.* (2013)。現在絶対観測は地磁気の向き (偏角及び伏角) を測定する角度測定器と, 地磁気の大きさ (全磁力) を測定する磁力計を組み合わせる概ね月1回の頻度で手動にて実施されており, 連続観測はフラックスゲート磁力計 (島津製作所製, MB162, 以下, 磁力計という) により地磁気3成分ベクトルの変化量を自動で連続的に観測している。これらのデータは, オーロラデータセンターの Web サイト (<http://polaris.nipr.ac.jp/~aurora/syowa.magne/magne.main.html>) で公開されている。

ところで世界の地磁気観測所では, この絶対観測と連続観測を組み合わせることで, 連続的な地磁気絶対値データを得ている。通常連続観測で得られる地磁気データには, 自然現象としての地磁気変化に加えて, 重機のような磁性体によるノイズや, 磁力計を設置している地盤の傾斜変動や主に温度に依存した磁力計出力値の変化が含まれている。絶対観測はこのような観測環境によるみかけの変動を補正し, 連続的な地磁気絶対値データを得るためにも必要とされる。この補正には, 磁力計で得られる連続観測値と, 絶対観測によって得られる絶対値との差である「基線値」が用いられる。観測環境によるみかけの変動が小さければ「基線値」は安定し, 絶対観測を頻繁に行う必要性は小さくなる。国際地球電磁気学・超高層大気物理学協会 (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) は, このような補正を行うために, 週に1度以上の絶対観測を実施するよう推奨している (Jankowski and Sucksdorff (1996))。例えば気象庁地磁気観測所 (柿岡) においては, 精密な地磁気永年変化を捉えるため長期的な必要精度を1nTまたは0.1分と定め, 週に1度絶対観測を実施し (藤井ほか (2012)), 得られた基線値を元に連続観測データを補正して, 連続的な地磁気絶対値データを提供している。

昭和基地では前述のとおり絶対観測の頻度は概ね月に1度であり, これまで連続的な地磁気絶対値データを求めていない。そこで我々は, 連続的な地磁気絶対値データを得ることで昭和基地の地磁気データの付加価値を高めることができなかと考え, そのために必要な基線値の安定性の調査を行った。その結果, 図1に示すとおり, 夏期間に基線値が地磁気水平成分 (以下, H成分という) で4nTから16nT, 鉛直成分 (以下, Z成分という) で5nTか

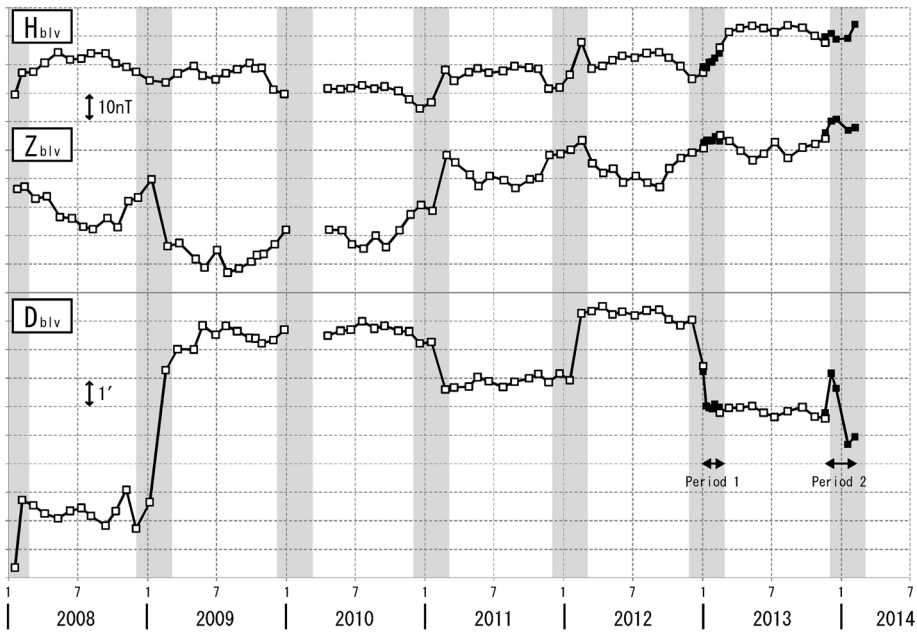


図 1 昭和基地における基線値の変動。灰色の網掛け部分は夏期間（12月から2月）を、黒色の四角（■）は本報告に関わる部分を示す。

Fig. 1. Variations of the baseline value at Syowa Station. Those involved in this report are plotted with black squares. Summer periods (December to February) are shaded.

ら 23 nT、偏角成分（以下、D 成分という）で 2 分から 6 分と大きく変動していることが分かった。気象庁地磁気観測所における平均的な基線値の変動量は 1 週間に 0.2 nT、1 ヶ月に 1 nT から 2 nT（藤井ほか（2012））であるが、昭和基地においては 1 ヶ月にこの 10 倍以上も変化をしている時があり、この基線値の安定性の問題から、連続的な地磁気絶対値データを得ることは困難であることが判明した。そこで、まずはこの基線値変動の主な要因を明らかにするために、2012 年の 1 月から 2 月にかけて磁力計センサーの傾斜変化を定期的に確認した。その結果、10 日の間に 10 秒角から 20 秒角の傾斜変化があることが分かった。さらなる調査を行うため、2013 年と 2014 年に電子水管傾斜計を使用して傾斜変化を連続的にモニターするとともに、絶対観測を通常より高頻度で実施し、磁力計センサーの傾斜変化が基線値へ与える影響評価を行った。

## 2. 観測期間・観測方法

2013 年 1 月 2 日から 2 月 13 日の 43 日（以下、第 1 期間という）及び 2013 年 11 月 19 日から 2014 年 2 月 6 日の 80 日（以下、第 2 期間という）の 2 回に分けて電子水管傾斜計を用いた調査を実施した。昭和基地でのその他の作業への影響を考慮し、第 1 期間と第 2 期間で

は、絶対観測の実施基準をそれぞれ次のように変更した。第1期間では昼夜を問わず週に1度実施したが、第2期間では傾斜データを毎週回収・確認し、1週間の傾斜変動が10秒角以上観測された際に実施することとした。それぞれの期間で実施した絶対観測日、及び傾斜変化観測の内容について、表1に示す。

傾斜変化観測には、Tierra Tecnica社製の電子水管傾斜計 RTC-203R (XYの2軸、観測精度0.1秒角。以下、傾斜計という)を用い、磁力計センサーに直接取り付けした(図2)。傾斜計取り付け時には、取り付けによる基線値の変化を把握するため、前後で絶対観測を実施した。

### 3. 基線値への影響評価方法

#### 3.1 基線値

ある時刻 t の絶対観測によって得られる基線値 (baseline value: blv) を次の式で定義する。

$$X_{blv(t)} = X_{abs(t)} - X_{FM(t)}. \tag{1}$$

ここで  $X_{abs(t)}$  は、絶対観測によって得られた X 成分の絶対値、 $X_{FM(t)}$  は同時刻の連続観測に

表 1 本調査における実施項目と期間。

Table 1. The timeline of the measurements for this investigation in Period 1 (top) and Period 2 (bottom).

時期	実施内容	実施期間												備考		
		2012年						2013年								
		11月		12月		1月		2月		1月		2月				
上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬		
第1期間	絶対観測															1週間に1度実施。
	傾斜観測															
	傾斜計 感度測定															
時期	実施内容	2013年						2014年						備考		
		11月		12月		1月		2月		1月		2月				
		上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬			
第2期間	絶対観測															1週間の傾斜変動が10秒以上観測された場合に実施
	傾斜観測															
	傾斜計 感度測定															

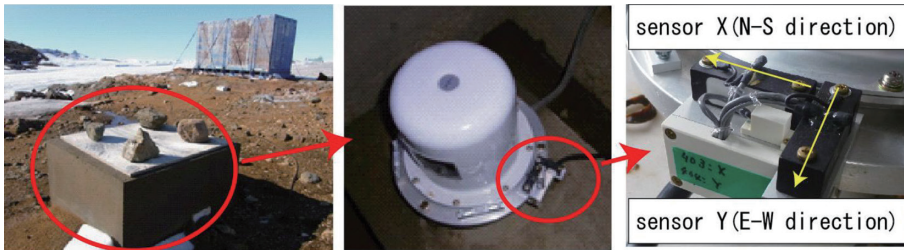


図 2 昭和基地のフラックスゲート磁力計と電子水管傾斜計。

Fig. 2. The fluxgate magnetometer and the electronic tiltmeters at Syowa Station.

使用している磁力計 (Fluxgate Magnetometer: FM) の出力値である。さらに次の絶対観測時刻  $t+1$  までに絶対観測点と連続観測点のそれぞれで変化する地球磁場の変動量を  $\Delta X_{\text{abs}}$ ,  $\Delta X_{\text{FM}}$  とすると、時刻  $t+1$  における基線値は

$$X_{\text{blv}(t+1)} = (X_{\text{abs}(t)} + \Delta X_{\text{abs}}) - (X_{\text{FM}(t)} + \Delta X_{\text{FM}}). \quad (2)$$

と表される。ここで絶対観測点と連続観測点は近接しており、両地点における同期間の地球磁場の変動量は同じ ( $\Delta X_{\text{abs}} = \Delta X_{\text{FM}}$ ) であるとし、それぞれの観測点でその変動量を正しく求めることができた場合、式(1)と式(2)から

$$X_{\text{blv}(t+1)} = X_{\text{blv}(t)}. \quad (3)$$

と、基線値は時間によらず一定と表される。しかし現実的には、 $X_{\text{blv}(t+1)} \neq X_{\text{blv}(t)}$  である。なぜなら第1章でも述べたように磁力計の出力値には、傾斜変動や、その他に温度に依存した磁力計出力値の変化、重機のような磁性体による人工的なノイズ（以下、人工擾乱という）などによる観測値の変動が含まれるからである。

そこで、絶対観測時刻  $t$  から次の絶対観測時刻  $t+1$  までの間に上述したような地球磁場の変動以外で磁力計の出力値に変化を及ぼすものを  $\Delta$  記号と添え字を用いて表示し式(2)を書き直すと

$$X_{\text{blv}(t+1)} = (X_{\text{abs}(t)} + \Delta X_{\text{abs}}) - (X_{\text{FM}(t)} + \Delta X_{\text{FM}} + \Delta X_{\text{FM}_\text{傾斜}} + \Delta X_{\text{FM}_\text{温度}} + \Delta X_{\text{FM}_\text{人工擾乱}}). \quad (4)$$

と表すことができる。ここで再度  $\Delta X_{\text{abs}} = \Delta X_{\text{FM}}$  として式(1)と式(4)の両辺で差をとると

$$X_{\text{blv}(t+1)} - X_{\text{blv}(t)} = -\Delta X_{\text{FM}_\text{傾斜}} - \Delta X_{\text{FM}_\text{温度}} - \Delta X_{\text{FM}_\text{人工擾乱}}. \quad (5)$$

となる。左辺  $\Delta X_{\text{blv}} (= X_{\text{blv}(t+1)} - X_{\text{blv}(t)})$  は、連続する2回の絶対観測から得られる値、右辺の  $\Delta X_{\text{FM}_\text{傾斜}}$  がその間の傾斜変化観測結果から見積もることができる値であり、本報告では  $\Delta X_{\text{FM}_\text{傾斜}}$  を見積もることで、 $\Delta X_{\text{blv}}$  に占める傾斜変化による影響量を評価する。

### 3.2 傾斜変化による磁力計出力値の変化量

連続観測に使用している磁力計は、内部に水平2成分、鉛直1成分の3軸直交型の磁気センサーが備え付けられている。通常磁力計自体はほぼ磁北方向（以後、東西南北の表記はそれぞれ磁方位を指す）に向けて設置し、磁力計の X 軸（南北方向、北向きが正）、Y 軸（東西方向、東向きが正）及び Z 軸（鉛直方向、下向きが正）の3成分で地磁気の変化を観測する。ここで全磁力値を  $F_{\text{abs}}$ 、水平分力を  $H_{\text{abs}}$ 、鉛直分力を  $Z_{\text{abs}}$ 、伏角を  $I_{\text{abs}}$ 、磁力計の X 軸と水平分力の角度差を  $D$  とすると、XYZD の各成分は、次のように表される（図3参照）。

$$X = H_{\text{abs}} \cos D.$$

$$Y = H_{\text{abs}} \sin D.$$

$$Z = Z_{\text{abs}}.$$

(6)

$$D = \tan^{-1} \left( \frac{Y}{X} \right).$$

本調査を実施した 2013 年の昭和基地における年間平均値は、 $F_{\text{abs}} = 42998.4 \text{ nT}$ 、 $H_{\text{abs}} = 19236.1 \text{ nT}$ 、 $Z_{\text{abs}} = -38455.9 \text{ nT}$ 、 $I_{\text{abs}} = -63^{\circ}25.5'$  である。磁力計の X 軸は、上述のとおり磁北に向けて設置するが、地球磁場の永年変化により次第に磁北から離れていく。このため昭和基地では数年に一度磁力計の X 軸を磁北に向けなおす調整をしており、第 1 期間と第 2 期間における D の最大値は  $0.5^{\circ}$  程度であった。これらの値を式 (6) に代入すると、 $X = 19235.4 \text{ nT}$ 、 $Y = 167.9 \text{ nT}$  となる。磁力計の分解能は  $0.1 \text{ nT}$  であり、X、Y を上述の値として Y 方向に  $0.1 \text{ nT}$  変化した場合の角度方向の分解能は  $0.018'$  である。

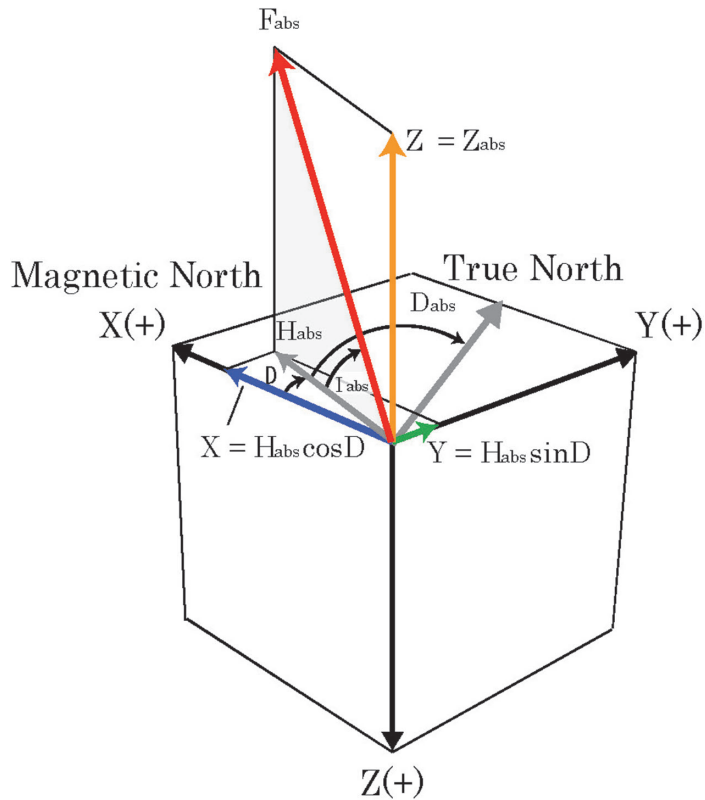


図 3 フラックスゲート磁力計の出力値と地球磁場ベクトルの関係性。

Fig. 3. Relation between the outputs of the fluxgate magnetometer and the geomagnetic field vector.

ここで磁力計の X(+) 側が下に角度  $\theta$  低くなるような Y 軸周りの回転をした場合 (図 4 参照), 回転後の座標系  $X'Y'Z'D'$  における各成分は, XYZ を用いて一般に次のように表すことができる.

$$\begin{aligned} X' &= X \cos \theta + Z \sin \theta. \\ Y' &= Y. \\ Z' &= -X \sin \theta + Z \cos \theta. \\ D' &= \tan^{-1} \left( \frac{Y}{X'} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

ここで示した  $X'Y'Z'D'$  が傾斜変化した状態における磁力計の出力値であり, 例えば  $\Delta X (= X' - X)$  が, 式(5)で示した傾斜変化による影響量  $\Delta X_{\text{FM\_傾斜}}$  である. 各成分の傾斜変化による影響量は, 式(7)に式(6)を代入して次のように書き表すことができる.

$$\begin{aligned} \Delta X_{\text{FM\_傾斜}} &= X (\cos \theta - 1) + Z \sin \theta \cong Z_{\text{abs}} \theta. \\ \Delta Y_{\text{FM\_傾斜}} &= 0 \\ \Delta Z_{\text{FM\_傾斜}} &= -X \sin \theta + Z (\cos \theta - 1) \cong -X \theta \\ &= -H_{\text{abs}} \cos D \times \theta \cong -H_{\text{abs}} \theta. \\ \Delta D_{\text{FM\_傾斜}} &= \tan^{-1} \left( \frac{Y}{X'} \right) - D \\ &= \tan^{-1} \left( \frac{Y}{X + \Delta X} \right) - D \\ &\cong \tan^{-1} \left( \frac{Y}{X} \right) + \frac{1}{1 + \left( \frac{Y}{X} \right)^2} (-Y) X^{-2} \Delta X - \tan^{-1} \left( \frac{Y}{X} \right) \\ &= \left( \frac{-Y}{X^2 + Y^2} \right) \Delta X \\ &\cong \frac{-H_{\text{abs}} \sin D}{H_{\text{abs}}^2} Z_{\text{abs}} \theta \\ &= \frac{-Z_{\text{abs}} \theta \times \sin D}{H_{\text{abs}}}. \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)の導出では, 角度  $\theta$  を微小量としてテイラー展開を行い, 磁力計の分解能未滿となる 2 次以降の項については無視した. 2 次以降を無視できる角度  $\theta$  の範囲はおおよそ  $\pm 470$  秒角以内である.  $\Delta Z_{\text{FM\_傾斜}}$  の導出においては, この角度  $\theta$  の範囲内で角度  $D$  が最大の 0.5 度程度であっても,  $H_{\text{abs}} \cos D \cong H_{\text{abs}}$  と近似して差しつかえない. また  $\Delta D_{\text{FM\_傾斜}}$  の導出では, X の変

化を微小量  $\Delta X = \Delta X_{\text{FM\_傾斜}} \cong Z_{\text{abs}} \theta$  としてテイラー展開の2次以降を無視した。導出された  $\Delta D_{\text{FM\_傾斜}}$  は、角度  $D$  が最大値の0.5度であっても角度  $\theta$  がおよそ  $\pm 60$  秒角の範囲内においては、磁力計の分解能未満として無視することができる。

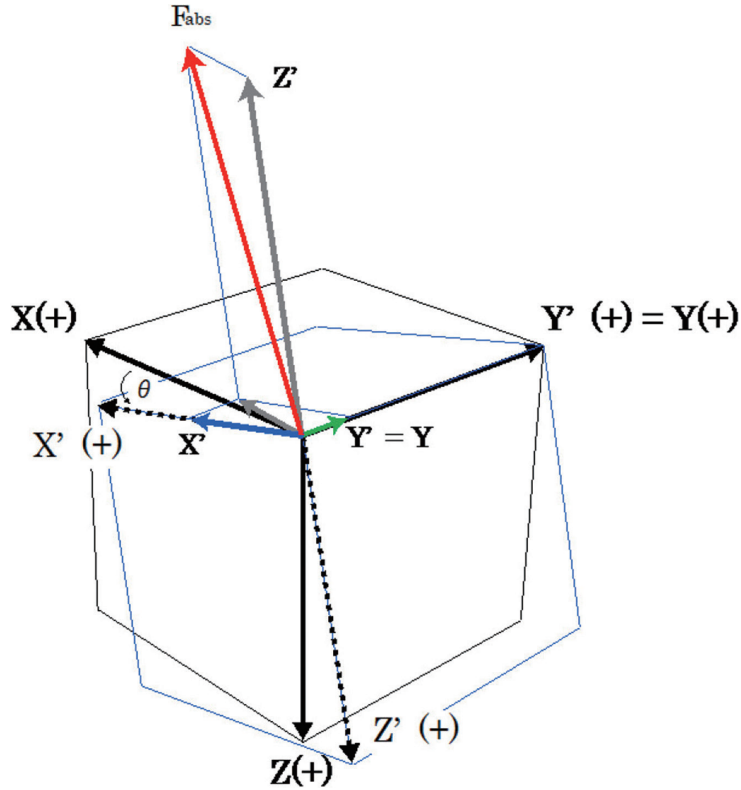


図4 磁力計のX軸が $\theta$ だけ変化した時にXとZがどの程度変化するかを示している。磁力計のX(+)  
側が下に傾いた時、 $\theta$ は増加する。

Fig. 4. The outputs,  $X'$  and  $Z'$ , of the magnetometer with its sensor frame rotated by  $\theta$  about the Y-axis.  
The tilt angle  $\theta$  is positive when the level on the magnetic north side sinks ("N down").

次に、再びXYZ座標系に戻りY(+)  
側が下に角度 $\phi$ 低くなるようなX軸周りの回転をした場合(図5参照)を考える。回転後の座標系 $X'Y'Z'D'$ における各成分は、XYZを用いて一般に次のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 X' &= X. \\
 Y' &= Y \cos \phi + Z \sin \phi. \\
 Z' &= -Y \sin \phi + Z \cos \phi. \\
 D' &= \tan^{-1} \left( \frac{Y'}{X'} \right).
 \end{aligned} \tag{9}$$



Y 軸周りの回転の説明と同様に, X 軸周りの回転における各成分の傾斜変化による影響量は, 式(9)に式(6)を代入して次のように書き表すことができる.

$$\begin{aligned}
 \Delta X_{\text{FM\_傾斜}} &= 0 \\
 \Delta Y_{\text{FM\_傾斜}} &= Y(\cos\varphi - 1) + Z\sin\varphi \cong Z_{\text{abs}}\varphi. \\
 \Delta Z_{\text{FM\_傾斜}} &= -Y\sin\varphi + Z(\cos\varphi - 1) \cong -Y\varphi. \\
 \Delta D_{\text{FM\_傾斜}} &= \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) - D \\
 &= \tan^{-1}\left(\frac{Y + \Delta Y}{X}\right) - D \\
 &\cong \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) + \frac{1}{1 + \left(\frac{Y}{X}\right)^2}(X^{-1})\Delta Y - \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) \\
 &= \left(\frac{X}{X^2 + Y^2}\right)\Delta Y \\
 &\cong \frac{H_{\text{abs}}\cos D}{H_{\text{abs}}^2} Z_{\text{abs}}\varphi \\
 &\cong \frac{Z_{\text{abs}}\varphi}{H_{\text{abs}}}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

式(10)の導出においても, 式(8)の導出と同様に角度  $\varphi$  を微小量としてテイラー展開を行い2次以降の項については無視した. 2次以降を無視できる角度  $\varphi$  の範囲はおよそ  $\pm 470$  秒角以内である. これにより導出された  $\Delta Z_{\text{FM\_傾斜}}$  は, 角度  $\varphi$  がおよそ  $\pm 120$  秒角以内においては磁力計の分解能未満として  $-Y\varphi$  を無視することができる.  $\Delta D_{\text{FM\_傾斜}}$  の導出では, Y の変化を微小量  $\Delta Y = \Delta Y_{\text{FM\_傾斜}} \cong Z_{\text{abs}}\varphi$  としてテイラー展開を行い, ここでも磁力計の分解能未満となる2次以降の項は無視した. この導出の過程において, 式(8)の導出と同様の理由で  $H_{\text{abs}}\cos D \cong H_{\text{abs}}$  の近似を使用した.

以上の条件の中で, 式(8)と式(10)に2013年の年間平均値を使用すると, 南北方向の X 軸の X(+) 側が下に1秒角低くなる変化では,

$$\begin{aligned}
 \Delta X_{\text{FM\_傾斜}} &= -0.19 \text{ [nT/1" (N down)]} \\
 \Delta Y_{\text{FM\_傾斜}} &= 0.00 \text{ [nT/1" (N down)]} \\
 \Delta Z_{\text{FM\_傾斜}} &= -0.09 \text{ [nT/1" (N down)]} \\
 \Delta D_{\text{FM\_傾斜}} &= 0.000 \text{ ["/1" (N down)]}
 \end{aligned} \tag{11}$$

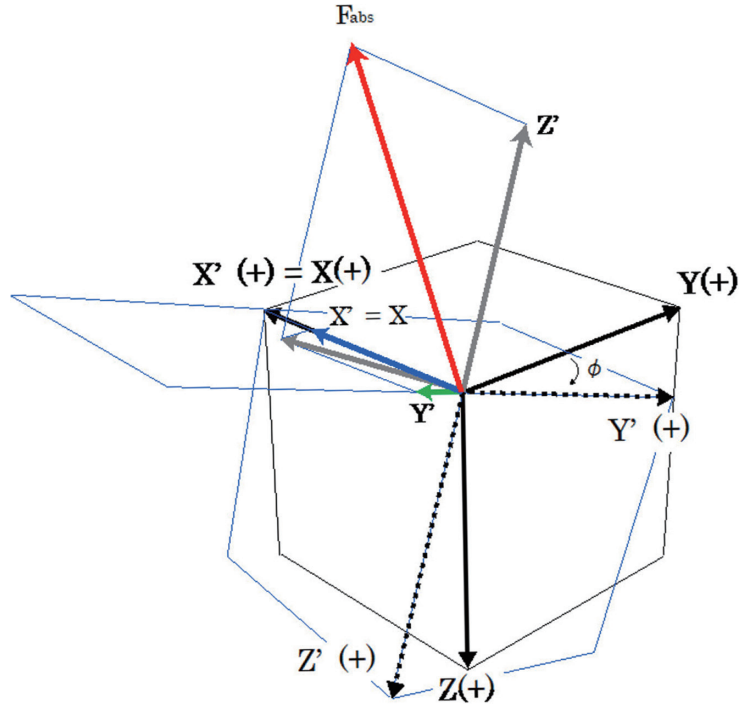


図 5 磁力計の Y 軸が  $\phi$  だけ変化した時に Y と Z がどの程度変化するかを示している。磁力計の Y (+) 側が下に傾いた時、 $\phi$  は増加する。

Fig. 5. The outputs,  $Y'$  and  $Z'$ , of the magnetometer with its sensor frame rotated by  $\phi$  about the X-axis. The tilt angle  $\phi$  is positive when the level on the magnetic east side sinks ("E down").

東西方向の Y 軸の Y (+) 側が下に 1 秒角低くなる変化では、

$$\begin{aligned}
 \Delta X_{\text{FM\_傾斜}} &= 0.00 \text{ [nT/1'' (E down)]} \\
 \Delta Y_{\text{FM\_傾斜}} &= -0.19 \text{ [nT/1'' (E down)]} \\
 \Delta Z_{\text{FM\_傾斜}} &= 0.00 \text{ [nT/1'' (E down)]} \\
 \Delta D_{\text{FM\_傾斜}} &= -0.033 \text{ ["/1'' (E down)]}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

の出力変化が生じることが予想できる。

ここで式(1)に関連して、絶対観測で得られる各成分の基線値は、暫定的に以下の式により得ている。  $H_{\text{blv}}$ ,  $Z_{\text{blv}}$ ,  $D_{\text{blv}}$  はそれぞれ水平成分、鉛直成分、偏角成分の基線値を表す。

$$\begin{aligned}
 H_{\text{blv}} &= H_{\text{abs}} - X. \\
 Z_{\text{blv}} &= Z_{\text{abs}} - Z. \\
 D_{\text{blv}} &= D_{\text{abs}} - D.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

$H_{blv}$  を求めるうえで、式(13)における  $X$  は厳密には  $\sqrt{X^2+Y^2}$  を用いるべきだが、磁力計の  $X$  軸は磁北に向けて設置しており、 $X \gg Y$  であるため、式(13)のように扱うことは本調査における議論に影響を与えない。

最後に式(5)の右辺において、傾斜変化のみによる磁力計出力値の変化を考えると、時刻  $t+1$  の基線値は式(11)、式(12)を代入して次のように書ける。

$$\begin{aligned} H_{blv(t+1)} &= H_{blv(t)} + 0.19 \times (\theta_{(t+1)} - \theta_{(t)}). \\ Z_{blv(t+1)} &= Z_{blv(t)} + 0.09 \times (\theta_{(t+1)} - \theta_{(t)}). \\ D_{blv(t+1)} &= D_{blv(t)} + 0.033 \times (\varphi_{(t+1)} - \varphi_{(t)}). \end{aligned} \quad (14)$$

この時、式(14)右辺第2項の係数は傾斜変動に対する磁力計の感度といえる。以降、この係数のことを傾斜感度と記載する。この傾斜感度を計算するために使用する  $H_{abs}$ 、 $Z_{abs}$  については、第1期間は時刻  $t+1$  の絶対観測で得た値を使用した。結果的には式(14)と同じ値であった。第2期間においても同様に計算で求まる傾斜感度に違いはなかったが、第2期間では傾斜計設置後に人工的に磁力計を短時間のうちに傾け、それに対応する出力値の変化から求めた傾斜感度を使用した。この値は  $H$  成分:  $+0.21$  [nT/1" (N down)],  $Z$  成分:  $+0.10$  [nT/1" (N down)],  $D$  成分:  $+0.032$  [1" (E down)] となり、式(14)の傾斜感度が実測感度と大きく違うことが確認できた。

以上により、絶対観測で得られた基線値（以下、観測基線値という）に対して、式(14)を使い傾斜変化量から推定できる基線値を推定基線値とよぶことにする。第1期間、第2期間において、それぞれ最初の観測基線値を基準にして、次の絶対観測時刻の推定基線値を求める。その後は、その推定基線値を元にさらに次の時刻の推定基線値を求める。このようにして求めた推定基線値と、観測基線値とを比較し、その変化量から傾斜変動が実際の観測基線値の変動にどの程度影響しているかを評価する。また、そこで明らかになる観測基線値と推定基線値の差については、式(5)で示した傾斜変化以外のその他の影響量（温度や人工擾乱を要因とするもの）として議論する。

## 4. 観測結果と考察

### 4.1. 傾斜観測

第1期間と第2期間のそれぞれで得られた傾斜及び磁力計センサー温度のデータについて、図6に示す。東西方向では、第1期間の大きい時に1日で約10秒角、期間全体の43日で約50秒角東側が高くなる変動が捉えられた。これは、気象庁地磁気観測所（柿岡）での傾斜変動量が1年で約5秒角である（Minamoto 2009）ことを考慮すると、かなり大きな変動である。また、第2期間では11月29日から12月1日にかけての1日半の間に約25秒角東側

が低くなる方向の傾斜変動が生じ、その後も12月下旬の約20秒角の変動を含みながら、観測終了の2月までに徐々に元の値に回復している。一方南北方向の第1期間では $\pm 3$ 秒角程度のおよそ1日周期の変動を繰り返しながら、期間全体では約10秒角北側が下がる方向の変動が観測された。第2期間では短期的には第1期間と同様に約 $\pm 3$ 秒角程度の変動を繰り返しながら、12月上旬から中旬にかけては約10秒角、12月下旬の3日間には約5秒角、それぞれ北側が一時的に下がる変動が観測された。南北方向の傾斜変動は、第1期間、第2期間ともに東西方向のそれに比べて終始緩やかであった。また、傾斜観測の結果から、今回の傾斜変化量は3章の式(8)と式(10)の導出の際に示した角度の範囲内であるため、第1期間の推定基線値の算出において式(14)を用いることに問題はないことが確認できた。

#### 4.2 傾斜変化の影響評価

絶対観測で得られた観測基線値と絶対観測時の傾斜値及び推定基線値を表2に、その時間変化を図7、図8及び図9に示す。ここで観測基線値とは、通常1回の絶対観測によって得られる4個の基線値の平均値をいう。観測基線値のエラーバーは、4個の基線値のばらつきを示す指標として最大値・最小値を用いた。また2種類の棒グラフは、傾斜変化による影響量(推定基線値の変化量)と、傾斜変化以外のその他の影響量を示すものであり、両者の和が観測基線値の変化量である。

まず、東西方向の傾斜変動に関係するD成分の推定基線値、観測基線値の変化について述べる(図7参照)。第1期間では、期間の初めの大きな傾斜変化が際立っていた。1月2日から1月10日の間に、東側が37.5秒角高くなる傾斜変化が見られ、対応するD成分の推定基線値の変化量は-1.24分だった。一方、同期間の観測基線値の変化量は-1.21分で、推定基線値の観測基線値の変化量に対する割合は102%と、両者の変化量は非常によく一致していた。その後1月18日以降は、東西方向の傾斜変動は、 $\pm 3$ 秒角以内であり、最初に比べて小さい変化量で推移したが、同期間の観測基線値と推定基線値の対応はよくない。例えば1月18日から1月25日の変化では、推定基線値、観測基線値の変化量がそれぞれ+0.02分、-0.03分となり、変化の向きが逆であった。そして第2期間では、期間の初めの11月19日から12月5日の間に最も大きく変化した。ただし、この変化には11月25日に行った傾斜感度測定のための人工的な傾斜変化も含まれている。この期間に東側が26.3秒角低くなる傾斜変化があり、対応するD成分の推定基線値と観測基線値はそれぞれ+0.84分、+1.38分変化した。推定基線値と観測基線値の変化の方向は一致しており、この間の観測基線値の変化量の61%は傾斜変化によるものといえるだろう。その後東西方向の傾斜は最初の変化と反対方向に回復していくが、12月5日から12月18日の間の変化でも推定基線値と観測基線値の変化の方向は一致しており、観測基線値の変化量の75%は傾斜変化によるものと考えられる。そしてその後は、傾斜変化の影響量は相対的に小さくなり、その他の影響が強く働い

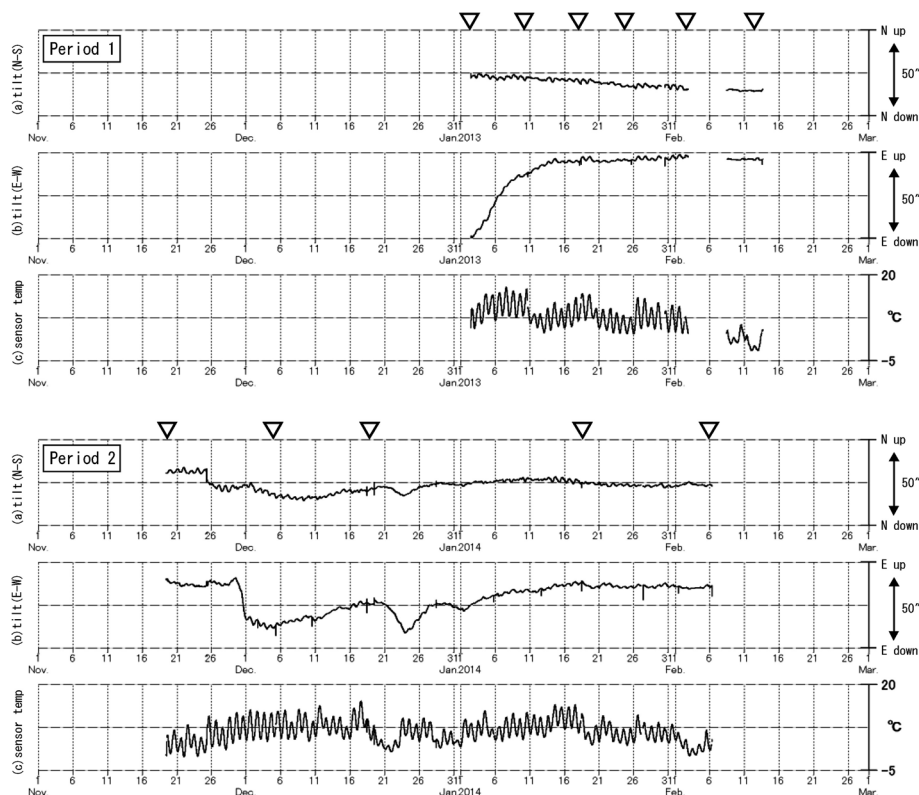


図 6 第 1 期間と第 2 期間で得られた傾斜データ。上から (a) 傾斜の南北 (N-S) 成分, (b) 傾斜の東西 (E-W) 成分, (c) 傾斜計センサーの温度を示す。▽は絶対観測日を示す。

Fig. 6. The observed data in Periods 1 and 2: (a) N-S tilt, (b) E-W tilt and (c) temperature of the sensor. The dates of the absolute observation are marked with ▽.

表 2 観測基線値, 絶対観測時の傾斜値及び推定基線値。

Table 2. Relative variations of the baseline values and tilt angles observed on the dates of the absolute observation. The baseline values predicted from the observed tilt angles are also shown.

観測日	観測基線値			傾斜値		推定基線値		
	水平成分 H (nT)	鉛直成分 Z (nT)	偏角成分 D ( ' )	南北成分 N-S ( " )	東西成分 E-W ( " )	水平成分 H (nT)	鉛直成分 Z (nT)	偏角成分 D ( ' )
第1期間								
2013/01/02	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
2013/01/10	-0.3	0.8	-1.21	0.9	-37.5	0.2	0.1	-1.24
2013/01/18	1.7	0.6	-1.26	3.9	-45.2	0.7	0.4	-1.49
2013/01/25	1.9	0.8	-1.29	6.3	-44.6	1.2	0.6	-1.47
2013/02/02	3.1	2.0	-1.14	8.2	-46.9	1.6	0.7	-1.55
2013/02/13	5.0	0.4	-1.23	8.7	-44.6	1.7	0.8	-1.47
第2期間								
2013/11/19	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
2013/12/05	1.2	4.1	1.38	14.3	26.3	3.0	1.4	0.84
2013/12/18	-0.8	4.8	0.85	10.4	13.7	2.2	1.0	0.44
2014/01/18	-0.5	0.9	-1.11	5.8	1.7	1.2	0.6	0.06
2014/02/06	4.4	1.8	-0.85	7.4	4.0	1.6	0.7	0.13

※：第1期間は2013年1月2日の値を, 第2期間は2013年11月19日の値を基準(0.00)としている。

※：傾斜値は, それぞれ北側, 東側が低くなる時に値が増加する。

ていた。

次に南北方向の傾斜変動に関係する H 成分, Z 成分の推定基線値, 観測基線値の変化について述べる (図 8, 9 参照)。第 1 期間では, 期間後半に向けて徐々に北側が 10 秒角程度低くなる一方向の変化であった。対応する H 成分の推定基線値と観測基線値の変化傾向はおおよそ一致していたが, 期間の後半に両者が大きく離れた。第 1 期間内で最も対応がよかったのは 1 月 25 日から 2 月 2 日の変化で, この間に北側が 1.9 秒角低くなる傾斜変化があり, 対応する推定基線値, 観測基線値の変化量はそれぞれ +0.4 nT, +1.2 nT だった。推定基線値の観測基線値の変化量に対する割合から, 傾斜変化を要因とする変化量は 33% と考えることができる。そして期間の最後の 2 月 2 日から 2 月 13 日では, 推定基線値, 観測基線値の変化量はそれぞれ +0.1 nT, +1.9 nT と, その差は非常に大きく傾斜変化以外のその他の影響が大きく働いていたことが分かった。Z 成分では, H 成分同様に期間全体では推定基線値と観測基線値の両者ともに増加する方向に変化しており, 変化傾向はおおよそ一致しているように見えるが, 傾斜変化による影響は小さかった。そして第 2 期間では, 期間の初めの 11 月 19 日から 12 月 5 日の間に最も大きく変化した。ただし, この変化には 11 月 25 日に行った傾斜感度測定のための人工的な傾斜変化も含まれている。この期間に, 北側が 14.3 秒角低くなる傾斜変化があり, 対応する H 成分の推定基線値と観測基線値はそれぞれ +3.0 nT, +1.2 nT 変化した。この時の推定基線値と観測基線値の変化の方向は一致しているものの, 推定基線値の方が観測基線値よりも 2 倍以上変化しており, 推定基線値の変化とは反対の負の方向にその他の影響があったと考えられる。その後は 12 月 5 日から 12 月 18 日の間で推定基線値と観測基線値の変化傾向は一致しており, この時の観測基線値の変化量の 40% は傾斜変化によるものといえるだろう。次に Z 成分では, 期間初めの最も傾斜が変化した時, 推定基線値と観測基線値はそれぞれ +1.4 nT, +4.1 nT 同じ方向に変化しており, この間の観測基線値の変化量の 34% は傾斜変化によるものと考えることができる。

第 1 期間, 第 2 期間の全体を通して各成分の変化傾向について見てみると, 第 2 期間では, どの成分も概ね推定基線値と観測基線値の変化傾向 (位相) は同じだったが, 傾斜変化以外のその他の影響量は第 1 期間に比べて大きかった。また, 第 2 期間の後半では, どの成分も傾斜変化の影響は相対的に小さくなり, その他の影響が強くと働いていた。そして第 1 期間, 第 2 期間を通じて特に H 成分, Z 成分において, 最も観測基線値が変化したタイミングを見てみると, その変化の要因は傾斜変化ではないことが分かる。傾斜が大きく変化した時に確かに観測基線値は大きく変化しているが, 観測基線値の変動に最も大きく関係しているのは, 傾斜変化以外のその他の影響であるといえる。

ここまで見てきた結果とともに, 図 1 の夏期間の顕著な基線値変動をあらためて見てみる。今回の調査により東西方向では, 冬の終わりから夏期間にかけての 11 月から 2 月までの間に 30 秒角から 50 秒角程度の傾斜変動があることが分かった。そこから得られる推定基線値

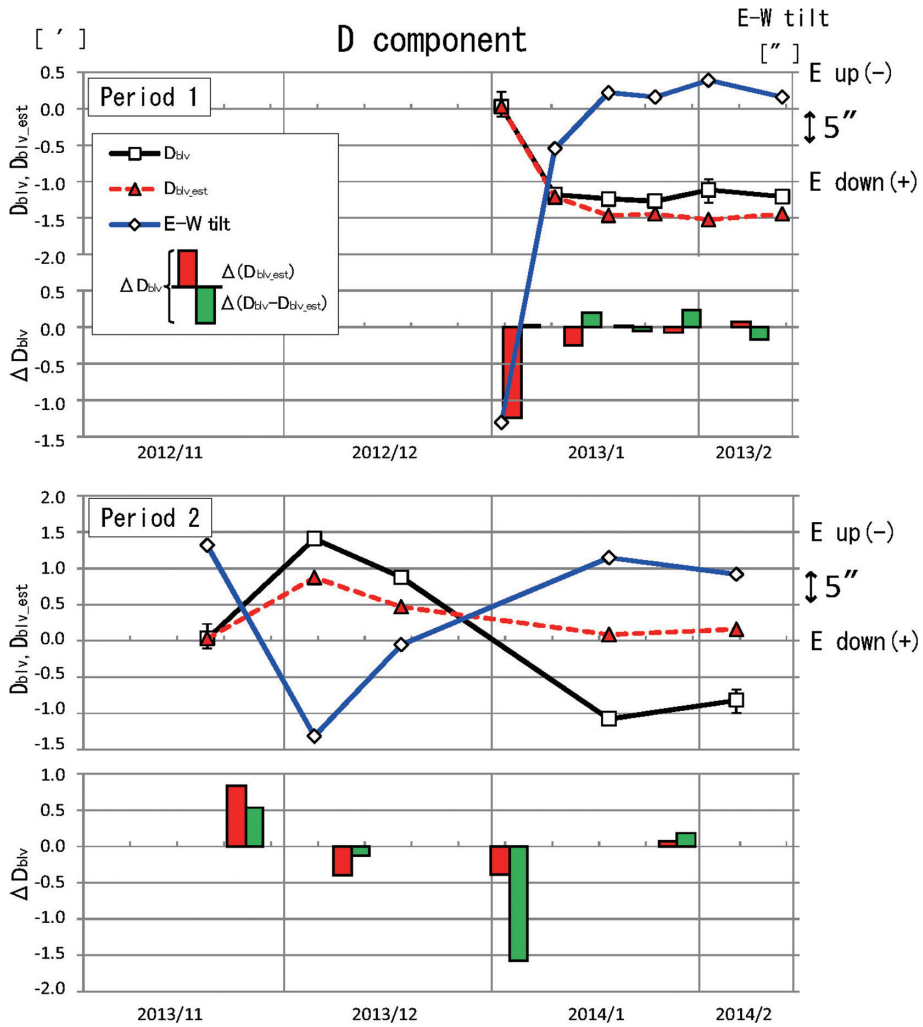


図 7 観測基線値、絶対観測時の傾斜値及び推定基線値の時系列変化 (D 成分)。

Fig. 7. The baseline values of the D component and tilt angles observed on the dates of the absolute observation. The baseline values predicted from the observed tilt angles are also plotted.

の変化量は 1 分から 1.7 分である。第 1 期間と第 2 期間の結果から、傾斜変化が D 成分の観測基線値へ及ぼす割合を最大で 60% から 100% と考えると、今回と同様の傾斜変化があった場合、およそ 1 分から 2.8 分程度の観測基線値の変化があることが予想できる。図 1 の 2008 年、2011 年及び 2012 年の夏期間の変化量は 1.6 分から 2.4 分程度であり、予想した値との対応がよい。ただし 2009 年の夏期間には 5.6 分もの変化があり、この時は今回の調査結果以上の傾斜変化があった可能性や、その他の影響が強く働いていたことが推測される。また図 1 の D 成分の観測基線値の変化量がおおよそ予想した量と一致したことから、昭和基地の

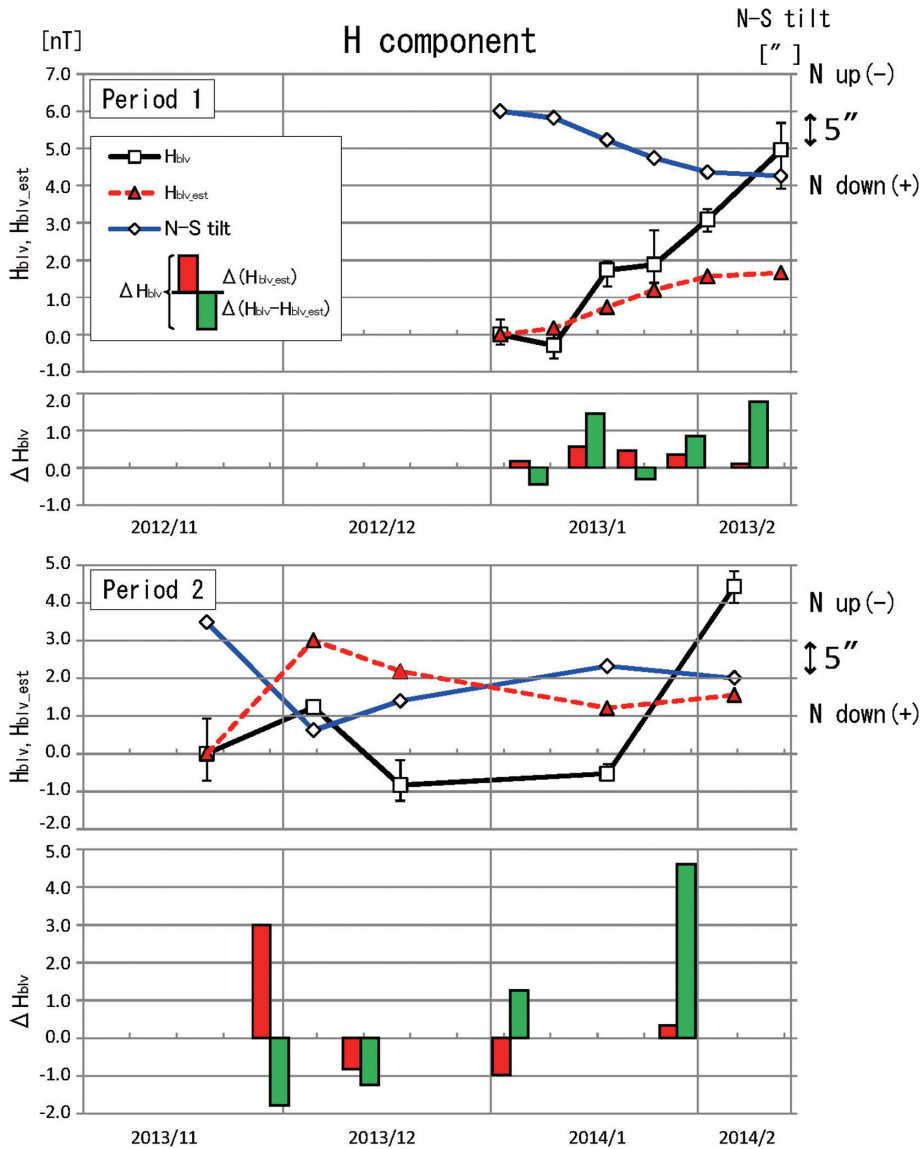


図 8 観測基線値，絶対観測時の傾斜値及び推定基線値の時系列変化 (H 成分).

Fig. 8. Same as Fig. 7, but for the H component.

磁力計付近では，夏になると東西の片側が高く（低く）なり，その翌年には反対に低く（高く）なるという変動を繰り返していると考えられる。

次に南北方向では，同様に冬の終わりから夏期間にかけて 10 秒角の傾斜変動があることが分かった，そこから得られる推定基線値の変化量は H 成分で 2 nT，Z 成分で 1 nT である。傾斜変化が H 成分，Z 成分の観測基線値へ及ぼす割合を最大でそれぞれ 30% から 40% と考



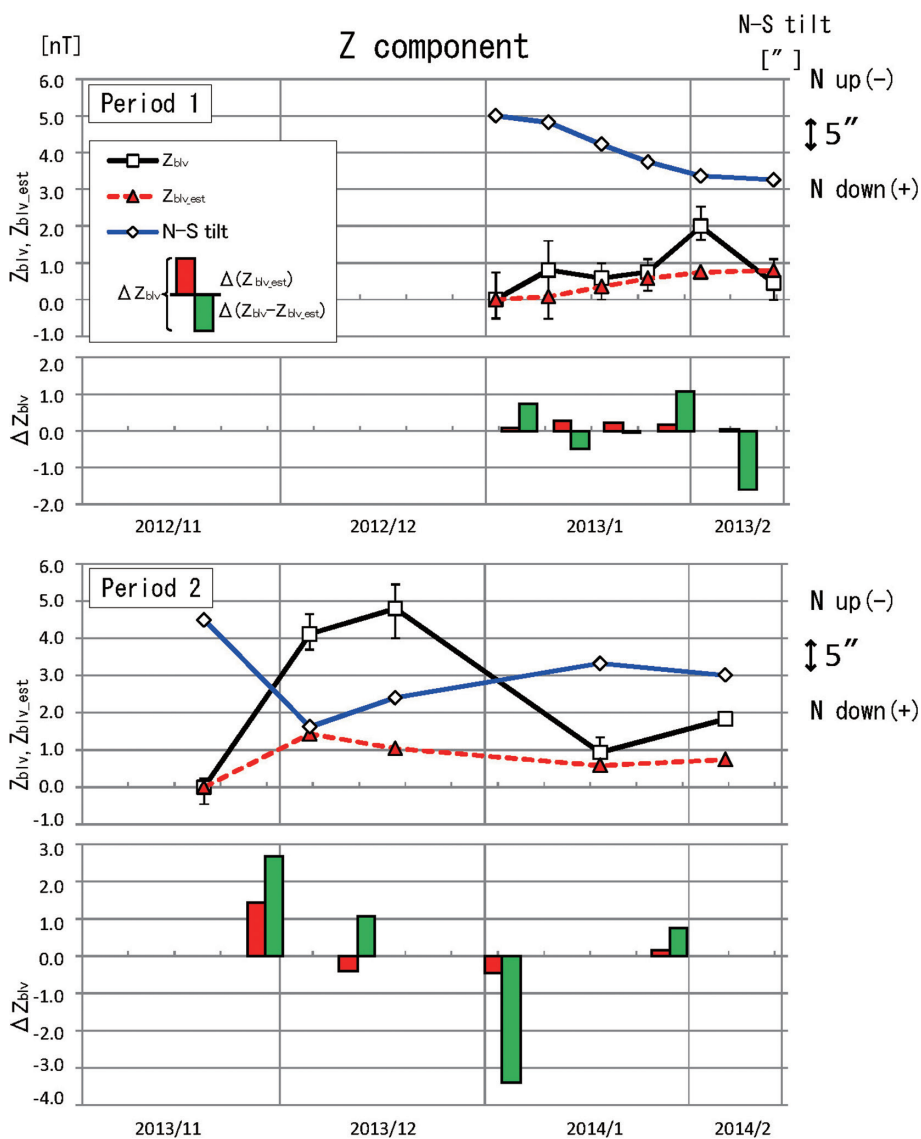


図 9 観測基線値，絶対観測時の傾斜値及び推定基線値の時系列変化（Z成分）.  
 Fig. 9. Same as Fig. 7, but for the Z component.

えると、およそH成分で5nTから7nT、Z成分で2nTから3nTの観測基線値の変化を予想できる。図1の夏期間の変化量は、平均するとH成分、Z成分ともに10nT程度あり、予想した値よりも大きい。H成分とZ成分の観測基線値は、傾斜の最大変化時の推定基線値から見積もれる量よりも大きく変化する観測結果が得られており、傾斜変化で予想した量よりも実際の観測基線値の変化量が大きかったことはむしろ納得のいく結果であるといえる。

### 4.3 傾斜変化以外の影響評価

観測基線値は3.1章の式(5)で示したように、傾斜変化以外では温度や人工擾乱によって変化することが考えられる。まず人工擾乱についてだが、昭和基地の場合を考えると、絶対観測点と連続観測点は10m程度しか離れていないため、大きな擾乱源が少なくともかなり近傍にないと両者の観測値に大きな差は生じない。例えば、Breiner (1973)によると、絶対観測点から50mの位置に約15tの鉄材が存在すれば、絶対観測点と連続観測点の両者への全磁力影響量の差が約3nTとなり、それが観測基線値の変化として現れることになる。しかし昭和基地では、絶対観測点である地磁気変化計室周囲50mを車両等立ち入り禁止区域としているため、それ程の人工擾乱が影響を及ぼしているとは考え難い。

次に温度に依存した磁力計出力値の変化について考える。これは具体的には主に磁力計センサー及び磁力計処理部電子回路（以下、処理部という）の温度依存性により生じるものである。そして、磁力計の測定方法に関連してH成分とZ成分においては高分解能で磁場変動を測定するために磁場の変動しない部分（直流部分）を人工磁場によって消去する方法をとっている。この人工磁場のことを補償磁場とよんでいるが、センサー及び処理部の温度変化は特に、補償磁場を与えているH成分とZ成分において、より大きく影響が出ると考えられる（大和田ほか（2013））。地球磁場は絶えず変化しているため、現地での観測を継続しながら磁力計のセンサー及び処理部の温度依存性を正確に調べるためには、近接した場所に磁力計をさらに1台設置し、片方のセンサーもしくは処理部の温度を意図的に変化させ、温度に依存した磁力計出力値の変化量を求めるという方法が考えられる。これを実行するためには、より詳細な議論と計画が必要であるが、ここでは本調査結果を元に磁力計センサーに取り付けた傾斜計で取得した温度（以下、磁力計センサー温度という）と、観測基線値と推定基線値の差を用いて観測基線値の温度依存性を確認した。両者の変化量について相関関係を調べた結果、相関係数は第1期間でH成分：0.02、Z成分：0.47、D成分：0.70、第2期間でH成分：-0.95、Z成分：0.12、D成分：-0.06だった。なぜこのような結果となったかは本調査結果では明らかにできないが、第1期間のD成分で比較的高い正の相関が、第2期間のH成分で非常に高い負の相関があることが分かった。相関係数の高かった第2期間のH成分について、観測基線値と推定基線値の差の変化量を目的変数、磁力計センサー温度の変化量を説明変数として一次の回帰式を求めた。この値（ $H_{blv\_temp}$ ）を推定基線値に加えたプロットを図10に示す。傾斜変化から求めた推定基線値だけでは説明できなかった観測基線値の変化を表現できており、観測基線値の温度依存性の一端については示すことができたと考えられる。今後、処理部温度の観測値も得られれば、他の成分についても本調査以上に観測基線値の変化を適切に説明できることが期待される。それは結果として絶対観測と連続観測の精度評価にも繋がるだろう。

ここまで、磁力計の観測環境の面から考察したが最後に、第1期間と第2期間の調査方法

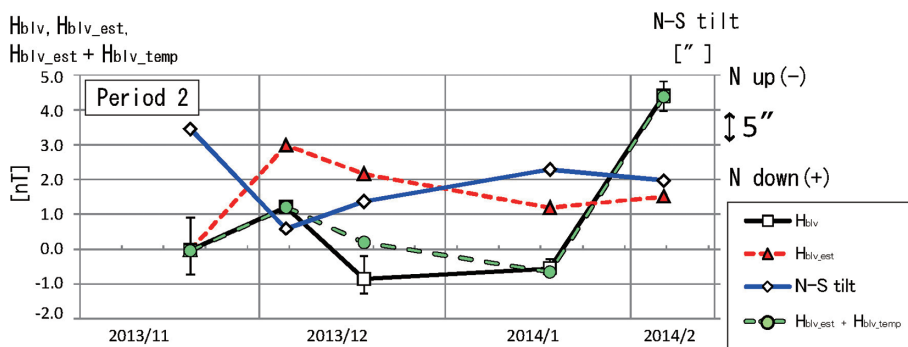


図 10 傾斜変化と磁力計センサー温度から推定した基線値の時系列変化。

Fig. 10. Baseline values predicted from both the sensor tilt and temperature, additionally plotted in the diagram for Period 2 in Fig. 8.

の違いが調査結果へ与えた可能性について検討したい。一つは使用した傾斜感度の違いである。3.2章で述べたように、第1期間と第2期間で異なる値を使用した。第2期間の値は、第1期間を基準にするとH成分とZ成分で+11%、D成分で-3%であった。この違いが第2期間の推定基線値に与える影響は傾斜最大変化時に最も大きく現れるが、その差はH成分: +0.3 nT, Z成分: +0.1 nT, D成分: -0.03'であった。この量は絶対観測の精度として示した図7から図9の観測基線値のエラーバーと比較しても小さく、傾斜感度の違いはここまで述べてきた結果の解釈に影響を与えない。もう一つは観測期間に対する絶対観測の頻度についてである。第1期間は43日の間に6回絶対観測を実施した。一方、第2期間は80日の間に実施した絶対観測は5回であり、その間隔は第1期間の2倍または3倍以上だった。推定基線値は、絶対観測と次の絶対観測の間の傾斜変化量から算出するため、推定基線値の精度は、絶対観測の間隔の長さ依存しない。一方で、絶対観測の間隔が長くなるほど、傾斜変化以外の観測環境が変化する可能性は高くなるだろう。このことは傾斜変化以外のその他の影響量が、第1期間より第2期間で多くなっていたという観測事実と一致する。本調査の目的は、夏期間の磁力計センサーの傾斜変化が観測基線値へ与える影響評価であり、その意味において両期間とも目的は達成できた。しかし第2期間のように相対的に傾斜変化による影響量が小さくなる場合では、精度の高い議論ができなくなるため今後の調査では、より適切な間隔で絶対観測を実施することが必要となるだろう。

## 5. ま と め

昭和基地において、絶対観測により得られた観測基線値の変動に対して、観測環境要因である傾斜変動がどの程度影響を及ぼしているかを評価するために、磁力計に電子水管傾斜計を設置し、絶対観測を通常より高頻度で実施した。調査の結果から、冬の終わりから夏期間

(11月から2月)に磁力計付近では東西方向で30秒角から50秒角程度、南北方向では10秒角程度の顕著な傾斜変動があることが判明し、傾斜変化が観測基線値へ及ぼす割合は最大で、D成分で60%から100%、H成分とZ成分で30%から40%程度と推定できた。しかし、その他の要因、特に温度変化による影響も考える必要がある。

現在気象庁が国内で実施している地磁気観測については、長期的な必要精度を1nTとしている。これは気象官署観測業務規定第55条において定められている地球磁気絶対観測値の最小位数1nTに依拠するものであるが(藤井ほか(2012))、気象庁地磁気観測所ではこの精度を担保するため、観測環境に細心の配慮を行っている。例えば、磁力計のセンサーは温度変化をなるべく少なくするため、地下5mに設置し、処理部も温度変化を無くすために恒温槽内に設置している。ただし、こうした環境下でも、温度による磁場環境の変動は基線値変動の要因となりうる。例えばMishima *et al.* (2013)は、土壌の温度変化による磁場環境の変動について論じ、気象庁地磁気観測所における基線値変動の要因の一つであると指摘している。

同様の観測環境を昭和基地において実現するのは簡単なことではないが、現在取得している連続観測データを絶対値化し、データ自体の持つ価値を高めるためには、あらためて観測環境について検討したうえで、適度な間隔で絶対観測を実施する必要があると考えられる。

## 謝 辞

本調査を実施するにあたり第54次観測隊の福田陽子隊員、富川喜弘隊員に多くの協力を頂いた。また、54次観測隊の全隊員に絶対観測時の交通規制等に関する理解と協力を頂いた。そして本報告の執筆にあたり、気象庁地磁気観測所の浅利晴紀氏、長町信吾氏に多くの助言を頂いた。この場を借りて感謝の意を表する。

## 文 献

- Breiner, S. (1973): Applications manual for portable magnetometers. Sunnyvale, California, GeoMetrics, 42-44.
- 藤井郁子・大和田毅・源 泰拓 (2012): 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。地磁気観測所テクニカルレポート。 **9** (1), (2), 1-6.
- Jankowski, J. and Sucksdorff, C. (1996): Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice. International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA). 232 p, ISBN 0-9650686-2-5
- Minamoto, Y. (2009): Ongoing Geomagnetic field 1-second value measurement by Japan Meteorological Agency. Proceedings of the XIIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing. 190-193.
- Mishima, T., Owada, T., Moriyama, T., Ishida, N., Takahashi, K., Nagamachi, S., Yoshitake, Y., Minamoto, Y., Muromatsu, F. and Toyodome, S. (2013): Relevance of magnetic properties of soil in the magnetic observatories to geomagnetic observation. Earth planets and space. Vol. **65** (4), 337-342.
- 大和田毅・森山多加志・森永健司 (2013): 基線値における環境要素の影響補正とその効果—複数磁力計基線値の比較—。地磁気観測所テクニカルレポート。 **10** (2), 21-35.
- Takahashi, K., Minamoto, Y., Arita, S., I, T. and Kadokura, A. (2013): Re-Evaluation of Geomagnetic Field Observation Data at Syowa Station, Antarctica. Data Science Journal. 12, WDS243-WDS246, doi:10.2481/dsj.WDS-044