

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 —

大和田毅, 森山多加志, 森永健司

地磁気観測所観測課

2013年1月18日受領, 2013年2月8日改訂, 2013年3月4日受理

要 旨

地磁気観測所には, 複数のフラックスゲート磁力計が設置されており, 地磁気絶対観測の結果から算出された各々の磁力計の観測基線値は, 磁力計によって変動が異なる. この変動の主な要因は, 磁力計の設置されている環境 (検出器器械台の傾斜, 検出器の温度, 磁力計制御器の温度等) である. 磁場データと共に環境要素として取得される検出器の傾斜と温度, 制御器の温度, 地中温度と観測基線値の相関を求め, 観測基線値に補正を施した. その結果, 適切な環境要素を選ぶことで観測基線値の変動をある程度補正することが可能で, 地磁気絶対観測の良否判定の一つの判断材料として有効であることが分かった.

1. はじめに

地磁気観測所では, 地磁気3成分 (水平 H, 鉛直 Z, 偏角 D) 連続観測にフラックスゲート磁力計を使用している. また, 主測器の予備, 人工擾乱の監視のために複数のフラックスゲート磁力計が設置されている. フラックスゲート磁力計の計測値には, 自然の磁場変動以外の変動も含まれている. 自然の磁場変動以外を除去し, 地磁気の絶対値とするための補正值が観測基線値である. 観測基線値はプロトン磁力計と角度測定器を用いて行う絶対観測によって測定した地磁気3成分の絶対値とフラックスゲート磁力計で計測された値とを比較することで求められる.

フラックスゲート磁力計は, 検出器方向の磁場の時間変動を測定するもので, 高分解能で磁場変動を測定する場合は, 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. 検出器コイルとそれに流す電流によって作られる補償磁場は, 磁力計周囲の温度変化によって変動すると考えられ (大和田ほか (1985)), 特に検出器の温度変化の影響が大きく, 測定値の誤差となる. 補償磁場を使用しない D 成分はこの影響が小さく (フラックスゲート磁力計で測定された東西成分 Y

を D 成分に換算する式は, $[D' = a \cdot \tan^{-1}(Y/H)]$ で, a は D を分 (') 単位にするための係数. 仮に H が補償磁場の不安定から 10nT 変動したとしても D への影響は 0.04% 以下である.) 観測基線値の変動は H, Z 成分に比べて小さい. 地磁気観測所では, 検出器の温度変化を小さくするため, 検出器を地下へ設置したり, 検出器庫の温度制御をしている. また計測値には, 磁力計検出器の設置された器械台の傾斜変動 (例えば地磁気観測所 (1987)) や, 三島ほか (2011) の言う土壤磁化の温度変化に伴う磁場変動も含まれる. これらの誤差等は, 地磁気絶対観測の結果から算出される観測基線値で補正する.

地磁気観測所の女満別観測施設 (以後, 女満別と呼ぶ) に設置されたフラックスゲート磁力計 96FM, FM10 および 02FM の観測基線値を図1に, 鹿屋観測施設 (以後, 鹿屋と呼ぶ) の 95FM および FM10 の観測基線値を図2に示す. 図は上から H, Z, D 成分である. 各々の磁力計検出器設置の深さ, 検出器および制御器の年間温度較差を表1に示す. 女満別の 02FM については, 温度データに欠測があるため記載していない. 女満別の Z 成分を例に見ると, 3台の観測基線値の変動の様子は異なっている. FM10 と 02FM (徳本ほか (2013) の MB162)

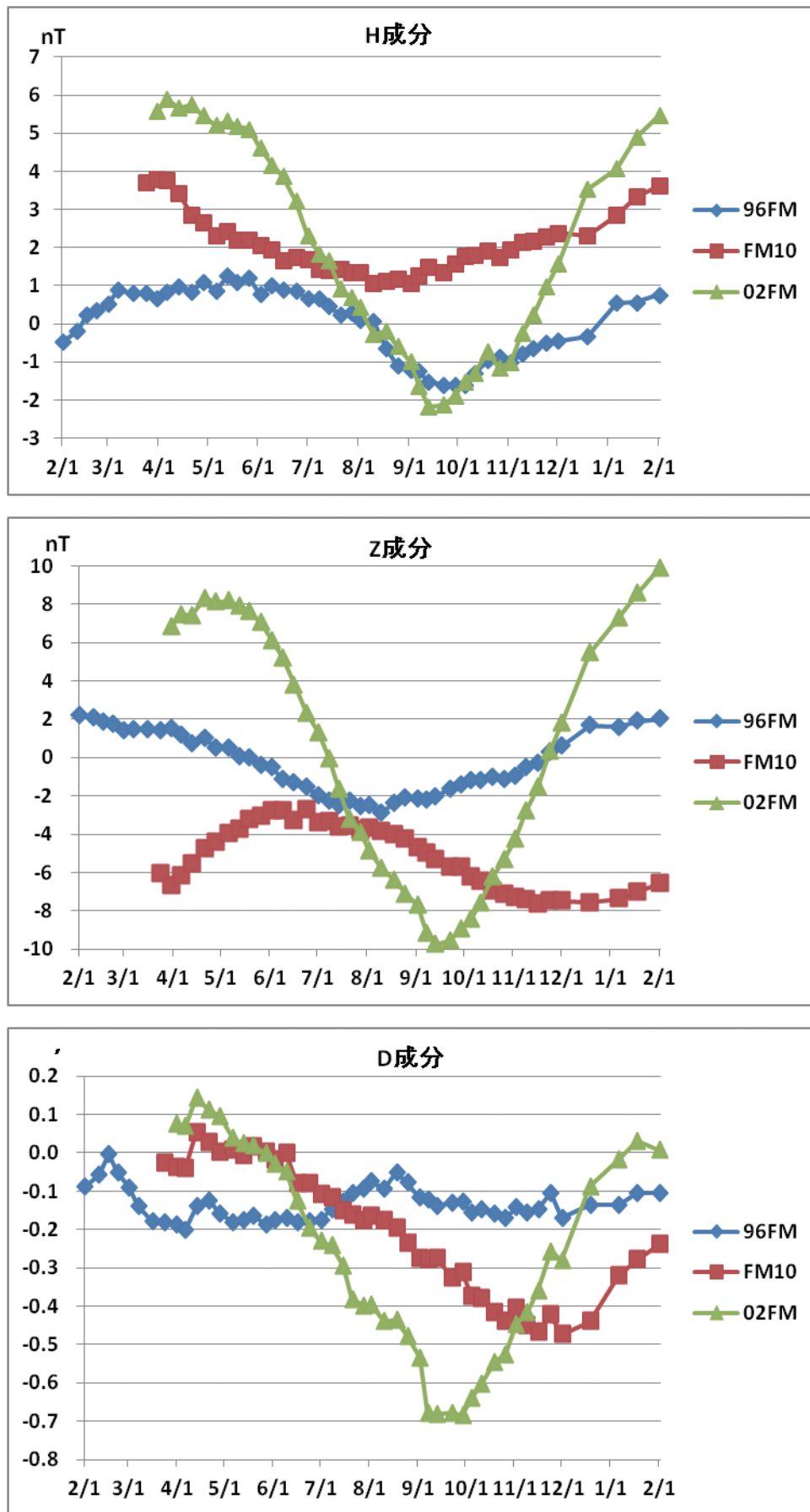


図1 女満別フラックスゲート磁力計 (96FM, FM10, 02FM) の観測基線値 (上から H, Z, D 成分. ◆; 96FM, ■; FM10, ▲; 02FM)

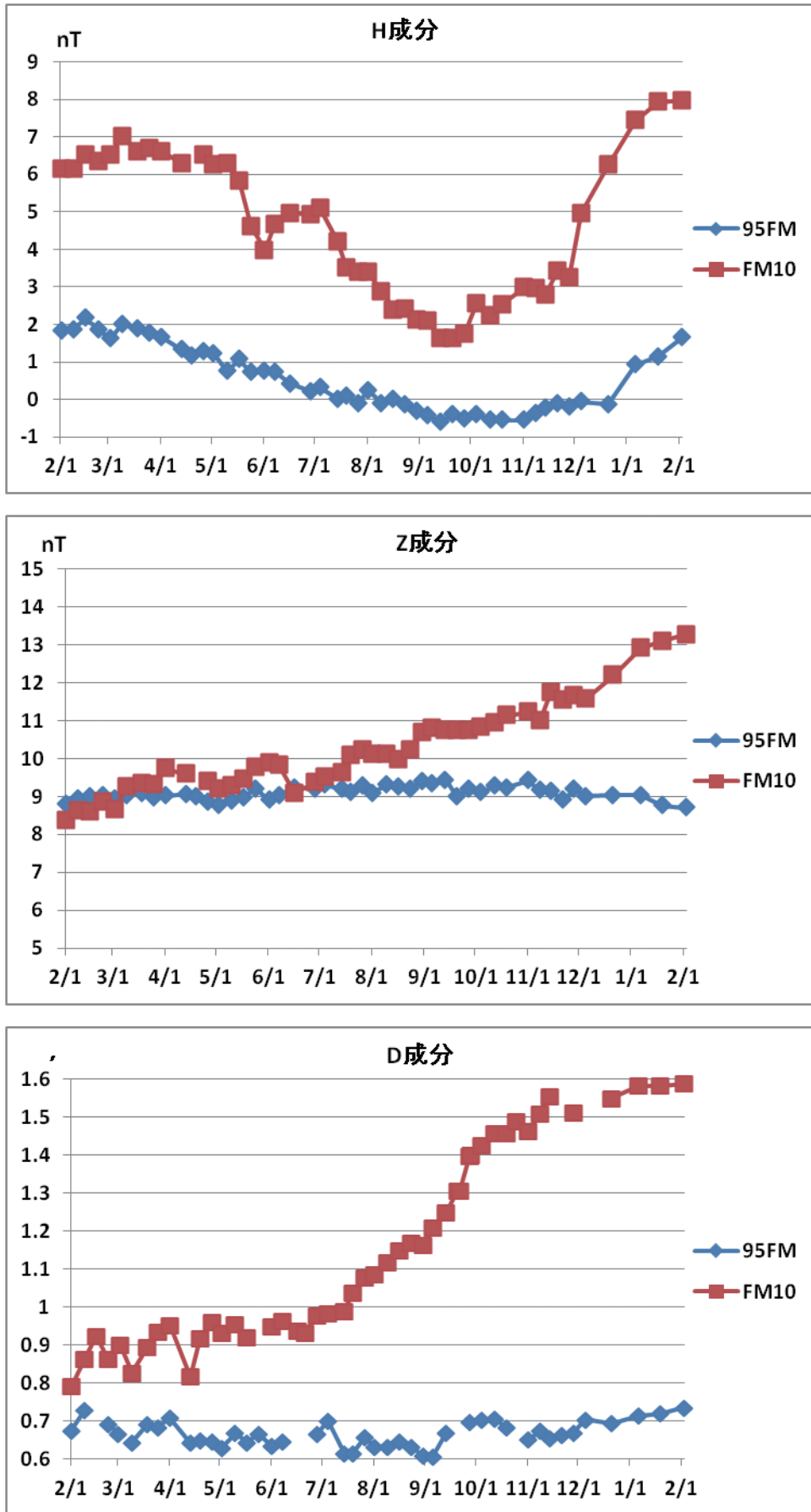


図2 鹿屋フラックスゲート磁力計 (95FM, FM10) の観測基線値 (上から H, Z, D 成分. ◆; 95M, ■; FM10)

表1 フラックスゲート磁力計の設置環境 (96FMの検出器庫, 女満別, 鹿屋のFM10制御器収納庫は温度制御されている)

	女満別			鹿屋	
	96FM	FM10	02FM	95FM	FM10
検出器設置の深さ(m)	0.0	5.0	1.5	6.5	5.0
検出器の年間温度較差(°C)	0.9	3.6	—	2.1	7.8
制御器の年間温度較差(°C)	8.5	1.8	—	6.0	0.4

の検出器は、検出器の温度変化を小さくするために地下に設置してあり、96FMは地上に設置してあるが検出器庫を温度制御している。02FMについては、検出器温度のデータが無いことからはっきりしたことは言えないが、同じ敷地内でも磁力計の設置された温度環境、検出器の場所と深さの違い等、環境によって観測基線値が異なることが分かる。

観測基線値は、前述したようにプロトン磁力計と角度測定器を用いて行う絶対観測によって求められる。絶対観測の良否判定は、求められた観測基線値が磁力計の傾斜変動や温度変化を考慮した予測値より、 $\pm 0.3\text{nT}$ (H, Z成分) または $\pm 0.03'$ 以内に有るかを基準として行っている。詳細は藤井ほか(2012)を参照されたい。

図1, 2に示した様に同じ絶対観測値から求められた観測基線値が、磁力計の設置された環境によって変動が異なることは、絶対観測の良否判定を行う上で難しいと言える。

そこで各々の磁力計の観測基線値と環境要素である検出器温度、制御器温度に、新たに取得可能となった地中温度との関係を明らかにし、観測基線値に対する補正効果を調査した。

2. 調査期間と使用したデータ

調査した期間は、2011年2月1日から2012年2月2日で、磁力計の初期ドリフトや人工擾乱の影響が補正できない期間は除外した。解析に使用した観測基線値の期間および環境要素は表2の通りで、異常とみなされた観測基線値は使用していない。使用した環境要素は表に○印を付けた傾斜、検出器温度、制御器温度および深さ1, 3, 5mの地中温度である。

図3に女満別の96FMの観測基線値、検出器に取り付けられた傾斜計のデータおよび各温度を例として示す。H, Z成分の観測基線値は年周変化を示しており、傾斜のNS成分と1m深地温とに相関が見られる。検出器の傾きがおよぼす磁場変化は、1秒あたり $0.1 \sim 0.2\text{nT}$, $0.02 \sim 0.03'$ (例えば地磁気観測所(1987))で、磁場の強さ、測定成分によって異なる。女満別、鹿屋における傾斜1秒あたりの影響量は表3の通りで、この係数を用いて観測基線値に含まれる傾斜変動分を補正した観測基線値(以後、傾斜補正基線値と呼ぶ)を基本として、各温度との関係を調査した。

なお、制御器温度については、観測基線値との相関が見られなかったため、3章での解析は行わなかった。

表2 解析に使用したデータ期間と環境要素

		データ期間	傾斜	検出器温度	制御器温度	地中温度(1m,3m,5m)
女満別	96FM	2011/02/01~2012/02/01	○	○	○	○
	FM10	2011/03/24~2012/02/01	○	○	○	○
	02FM	2011/03/31~2012/02/01				○
鹿屋	95FM	2011/02/01~2012/02/01	○	○	○	○
	FM10	2011/02/01~2012/02/01	○	○	○	○

表3 傾斜変動の補正係数

	H(nT/秒)	Z(nT/秒)	D(' /秒)
女満別	0.20	0.13	0.027
鹿屋	0.16	0.16	0.017

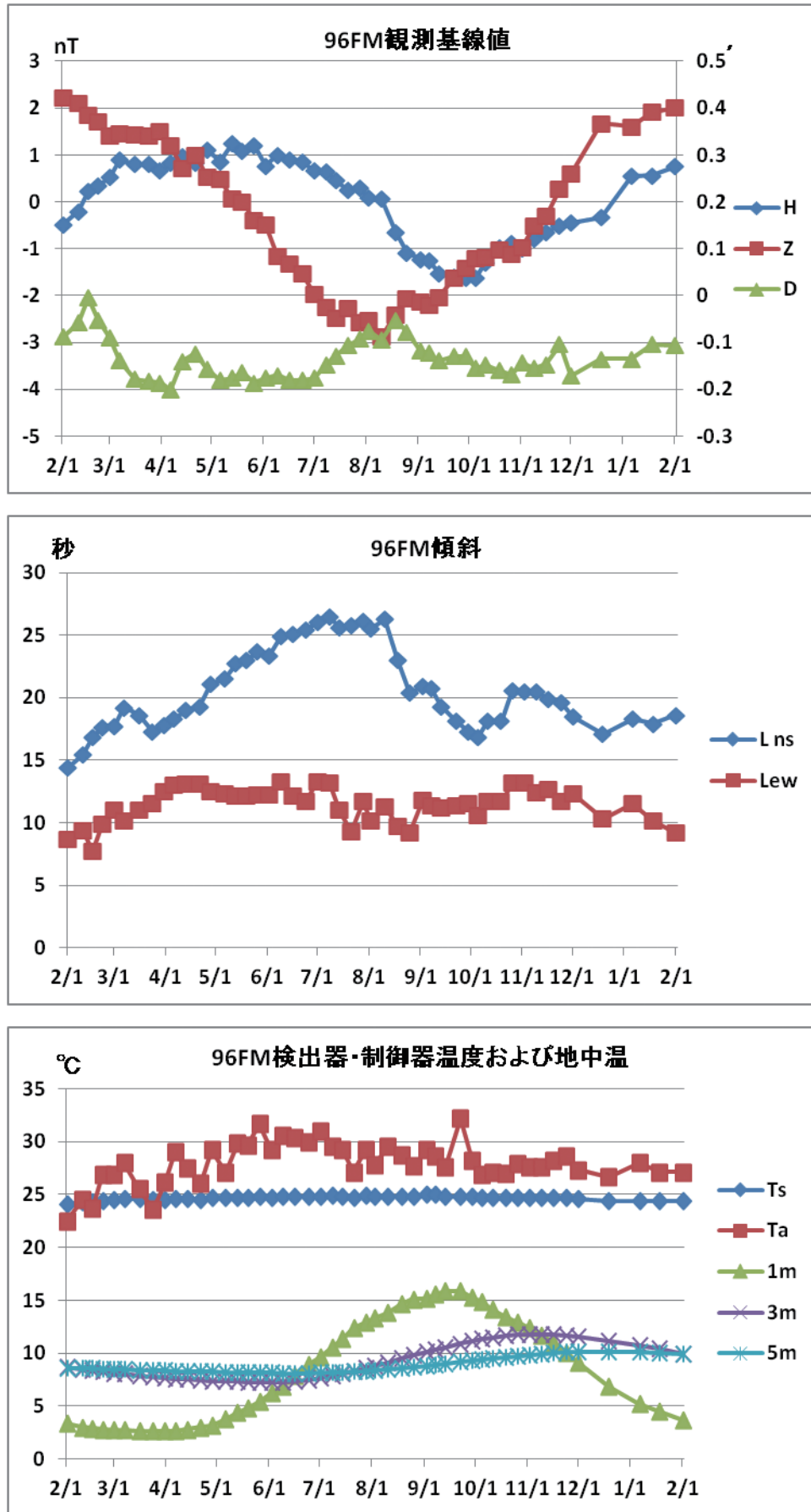


図3 女満別 96FM の観測基線値, 傾斜および各種温度 (上から 96FM 観測基線値 (◆:H, ■:Z, ▲:D), 傾斜 (◆:Lns は南北成分, ■:Lew は東西成分で, 北側または東側が高くなるとプラス), 温度 (◆:Ts は検出器, ■:Ta は制御器, ▲:1 m は 1 m 深地温, ×:3 m は 3 m 深地温, *:5 m は 5 m 深地温)

3. 各温度と観測基線値との関係

女満別の96FMについて述べる。96FMの温度環境は、表1および図3に示した通り。検出器は、地面と同じ高さに設置され、検出器庫が一定になるように温度制御されており、年間の温度較差は1℃程度である。制御器は空調機のある観測室に設置されており、年間の温度較差は9℃程度である。

傾斜補正基線値に対する、検出器温度、地中温

度の重相関解析 [傾斜補正基線値 = $a \times$ 検出器温度 + $b \times$ 地中温度 + c] を行った。表4に回帰係数とそれに対するt値 (回帰係数をその標準誤差で除算した値で、数値が大きいほど回帰係数の信頼性が高い)、重相関係数を示す。重相関係数が最も高いのは1m深地温を使用したときで、H成分で0.981、Z成分で0.968と非常に強い相関であった。使用する地中温度を深くすると重相関係数は小さくなった。

表4 女満別96FMの重相関解析結果 (傾斜補正基線値に対する検出器温度, 深地温)

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	-0.281	-1.4	-2.578	-7.0	0.0004	0.01
地中温度(1m)	-0.177	-23.6	-0.186	-13.2	0.0013	1.05
重相関係数	0.981		0.968		0.215	

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	-3.350	-9.4	-5.849	-11.3	0.0222	0.99
地中温度(3m)	-0.279	-6.9	-0.203	-3.5	0.0021	0.81
重相関係数	0.872		0.873		0.192	

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	-3.852	-8.7	-6.119	-10.5	0.0253	1.09
地中温度(5m)	-0.499	-4.2	-0.237	-1.5	0.0028	0.44
重相関係数	0.802		0.844		0.164	

表5 女満別FM10の重相関解析結果 (傾斜補正基線値に対する検出器温度, 深地温)

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	0.455	13.4	-2.048	-20.4	-0.1156	-13.65
地中温度(1m)	-0.226	-22.5	0.474	16.0	0.0111	4.35
重相関係数	0.969		0.957		0.946	

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	-1.240	-15.5	1.721	16.9	-0.0443	-2.95
地中温度(3m)	0.891	14.2	-2.049	-25.7	-0.0338	-2.88
重相関係数	0.929		0.982		0.933	

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	-0.642	-21.9	0.234	2.5	-0.0586	-8.83
地中温度(5m)	1.169	21.5	-2.405	-13.7	-0.0654	-5.33
重相関係数	0.967		0.944		0.954	

表6 鹿屋 95FM の重相関解析結果 (傾斜補正基線値に対する検出器温度, 深地温)

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	-1.420	-6.6	0.440	2.8	0.0420	2.15
地中温度(1m)	0.060	1.7	-0.065	-2.5	-0.0099	-3.12
重相関係数	0.902		0.396		0.488	

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	-0.623	-4.7	-0.358	-4.1	-0.0724	-5.42
地中温度(3m)	-0.256	-4.1	0.241	5.8	0.0312	5.18
重相関係数	0.926		0.679		0.658	

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	-0.210	-1.4	-0.626	-5.9	-0.0759	-4.12
地中温度(5m)	-0.721	-6.3	0.579	7.2	0.0502	3.74
重相関係数	0.947		0.751		0.546	

表7 鹿屋 FM10 の重相関解析結果 (傾斜補正基線値に対する検出器温度, 深地温)

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	0.589	1.4	0.561	3.1	0.0151	0.60
地中温度(1m)	-0.723	-2.8	-0.283	-2.6	-0.0234	-1.56
重相関係数	0.849		0.581		0.737	

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	-0.806	-8.5	0.024	0.6	-0.0172	-3.27
地中温度(3m)	0.455	2.8	0.159	2.3	-0.0142	-1.59
重相関係数	0.850		0.565		0.738	

	H		Z		D	
	係数	t 値	係数	t 値	係数	t 値
検出器温度	-1.005	-9.3	-0.047	-1.0	-0.0109	-1.69
地中温度(5m)	1.282	4.3	0.453	3.5	-0.0407	-2.31
重相関係数	0.879		0.636		0.755	

表8 女満別 02FM の単相関解析結果 (補正なし基線値に対する深地温)

	H		Z		D	
	係数	相関係数	係数	相関係数	係数	相関係数
地中温度(1m)	-0.597	0.976	-1.412	0.984	-0.0568	0.977
地中温度(3m)	-1.115	0.701	-2.145	0.575	-0.0990	0.654
地中温度(5m)	-1.376	0.368	-1.816	0.207	-0.1112	0.726

これは、検出器が地面と同じ高さに設置されていることから、浅い所の土壤磁化の変化を受けていると考える。D成分については、いずれの地中温度を使用しても、重相関係数は0.2程度と相関が無いと判断できる。

96FMと同じ解析方法で行った女満別のFM10(表5)、鹿屋の95FM(表6)、FM10(表7)の結果を表に示す。女満別の02FMについては、検出器に傾斜計が搭載されていないこと、検出器温度が欠測していたことから、傾斜補正なしの基線値に対して、地中温度の深さ別(1m, 3m, 5m)の単相関解析を行った。結果は表8である。

女満別のFM10の結果は、何れの深さの地中温度を使用しても、3成分の重相関係数は0.9以上と高く、96FMでは相関が無かったD成分も良い。また深い地中温度の方が地中温度の係数が大きくなっている。検出器の設置された地下5mの土壤磁化の影響補正は、3m、または5m深地温を使用するのが適切であると言える。

鹿屋の95FMの結果は、H成分が何れの深さの地中温度を使用しても、重相関係数は0.9以上と高いが、Z成分は1m深地温が0.4、3mが0.7、5mが0.8と、3m、5mでやや強い相関が見られる。D成分は

3mが0.7とやや強い相関が見られ、1m、5mでは0.5とやや弱い相関が見られる。

鹿屋のFM10の結果は、H成分が何れの深さの地中温度を使用しても、重相関係数は0.8以上、D成分が0.7程度とやや強い相関が見られ、Z成分は、0.6とやや弱い相関が見られる。なお、検出器の設置された深さは、表1に示したが95FMが6.5m、FM10が5.0mである。

女満別の02FMの傾斜補正なし基線値と各地中温度との単相関解析の結果は、1m深地温が3成分とも相関係数0.9以上と非常に強い相関を示し、地中温度を深くするにつれて相関係数は小さくなる傾向が見られる。

4. 検出器温度と地中温度の補正を施した基線値

3章で求めた係数で各々の磁力計の傾斜補正基線値を補正した。ただし、女満別の02FMは傾斜補正なしの基線値に、1m深地温のみの補正である。各々の磁力計の地中温度補正に用いた深さを選択した条件は、①3成分の相関係数が比較的高いこと、②検出器の設置されている深さを考慮する、である。

図4に女満別96FM、図5に女満別FM10、図6に女満別02FM、図7に鹿屋95FM、図8に鹿屋

表9 環境要素補正による観測基線値の年較差

補正内容	成分	女満別			鹿屋	
		96FM	FM10	02FM	95FM	FM10
補正なし	H(nT)	2.9	2.7	8.1	2.8	6.4
	Z(nT)	5.1	5.0	19.6	0.7	4.9
	D(′)	0.08	0.53	0.75	0.13	0.80
傾斜補正のみ	H(nT)	2.6	2.4	—	3.0	7.8
	Z(nT)	4.0	5.1	—	1.3	2.6
	D(′)	0.10	0.42	—	0.16	0.21
傾斜, 検出器温度, 1m深地温補正 (02FMは1m深地温補正のみ)	H(nT)	0.7	—	2.2	—	—
	Z(nT)	1.4	—	4.6	—	—
	D(′)	0.11	—	0.21	—	—
傾斜, 検出器温度, 3m深地温補正	H(nT)	—	1.1	—	—	—
	Z(nT)	—	1.3	—	—	—
	D(′)	—	0.21	—	—	—
傾斜, 検出器温度, 5m深地温補正	H(nT)	—	0.7	—	1.3	4.2
	Z(nT)	—	2.5	—	1.1	2.3
	D(′)	—	0.16	—	0.17	0.24

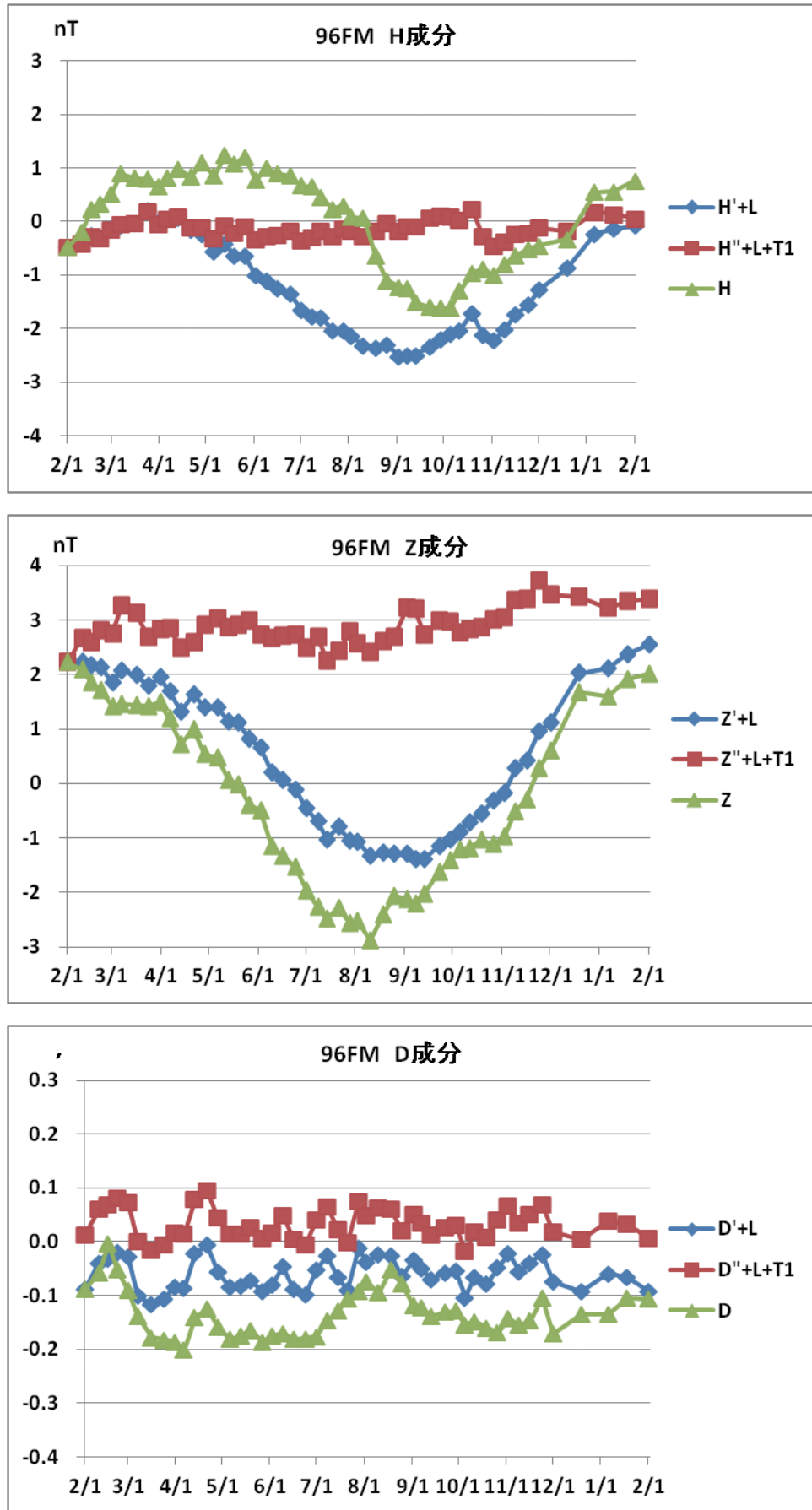


図4 女満別 96FM 観測基線値の補正結果 (上から H, Z, D 成分. ◆; 傾斜補正のみ, ■; 傾斜補正と検出器温度, 1 m 深地温補正, ▲; 補正なし)

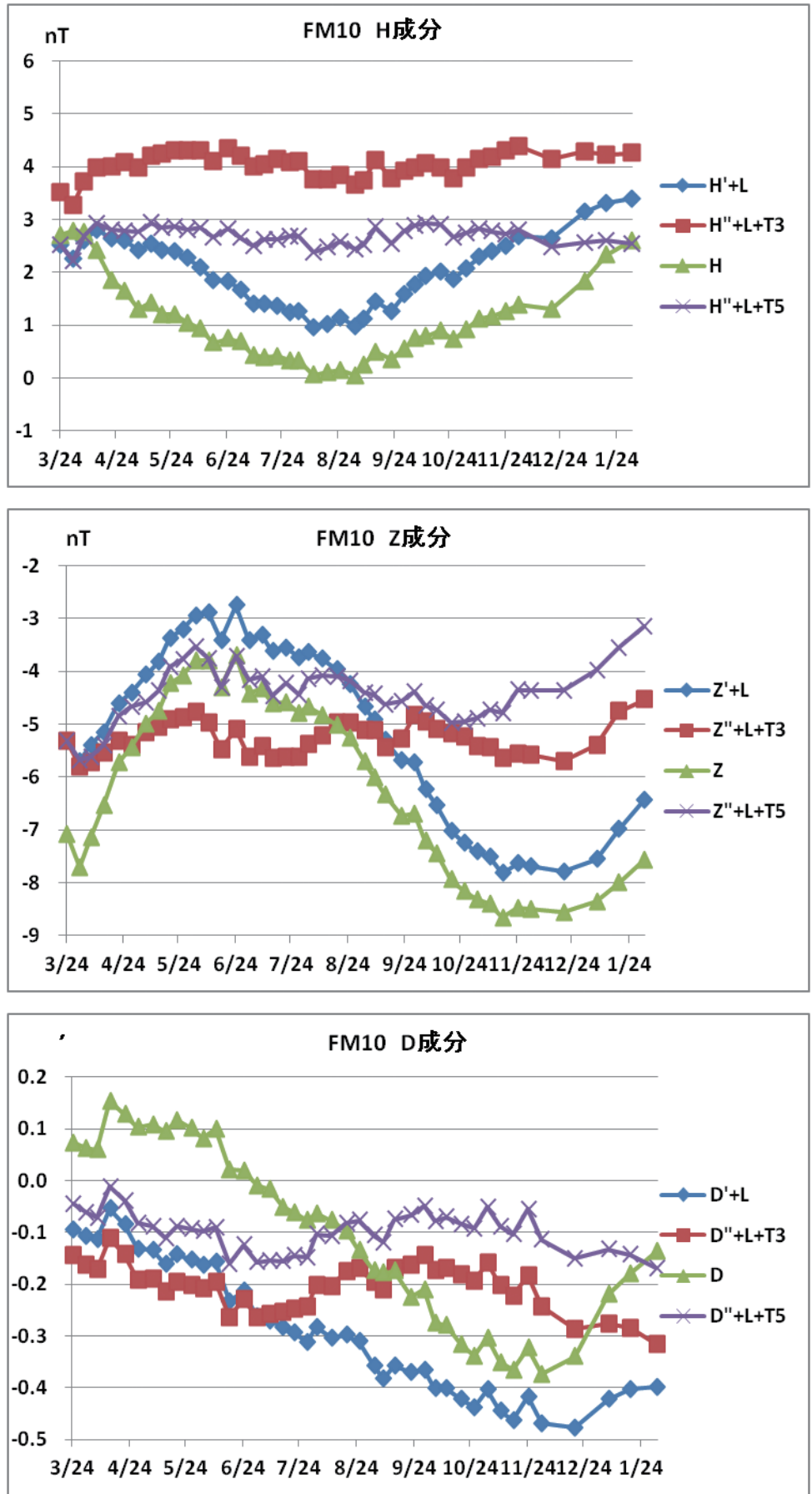


図5 女満別 FM10 観測基線値の補正結果 (上から H, Z, D 成分. ◆; 傾斜補正のみ, ■; 傾斜補正と検出器温度, 3 m 深地温補正, ×; 傾斜補正と検出器温度, 5 m 深地温補正, ▲; 補正なし)

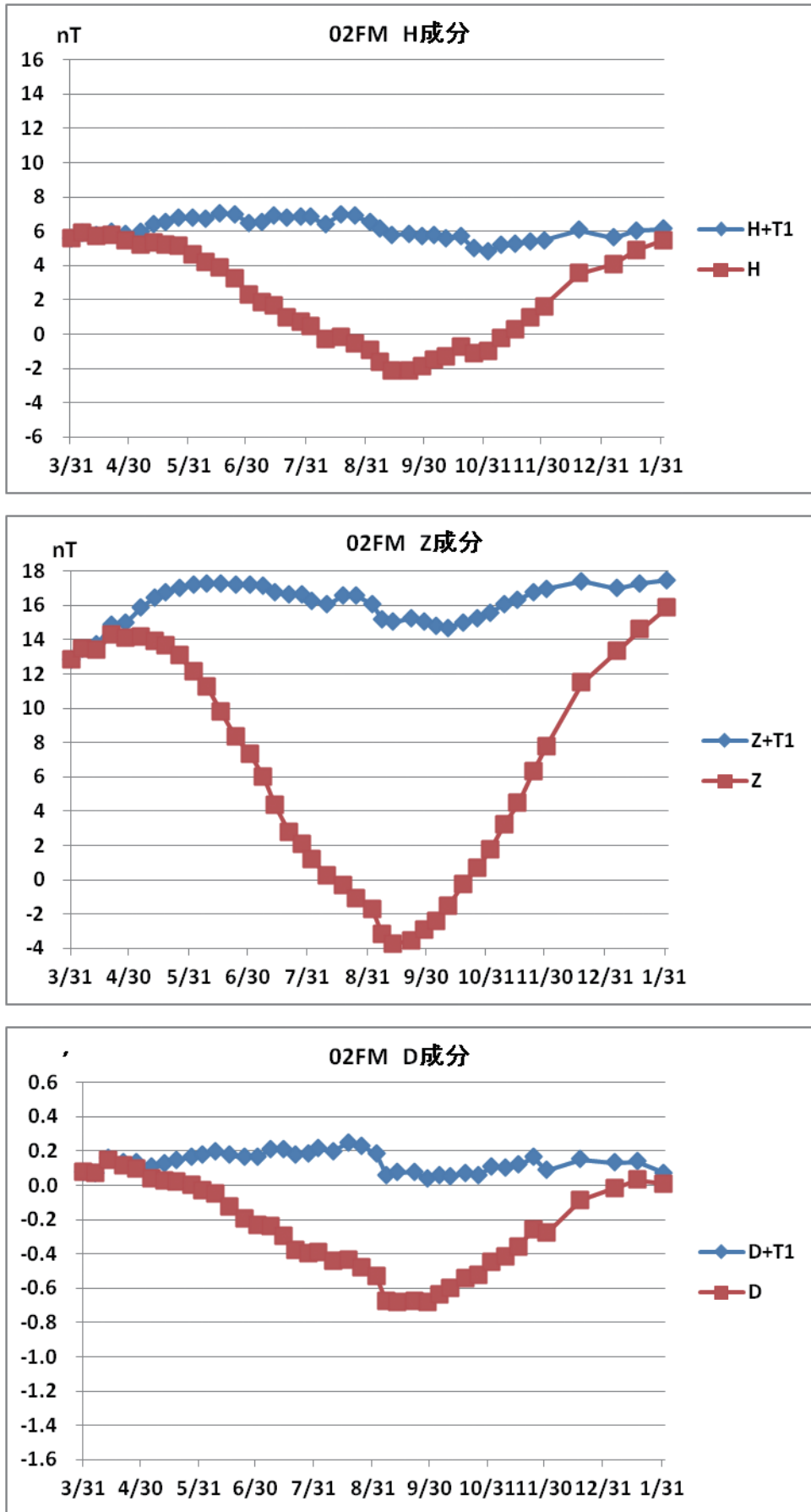


図6 女満別 02FM 観測基線値の補正結果 (上から H, Z, D 成分. ◆: 1 m 深地温補正のみ, ■: 補正なし)

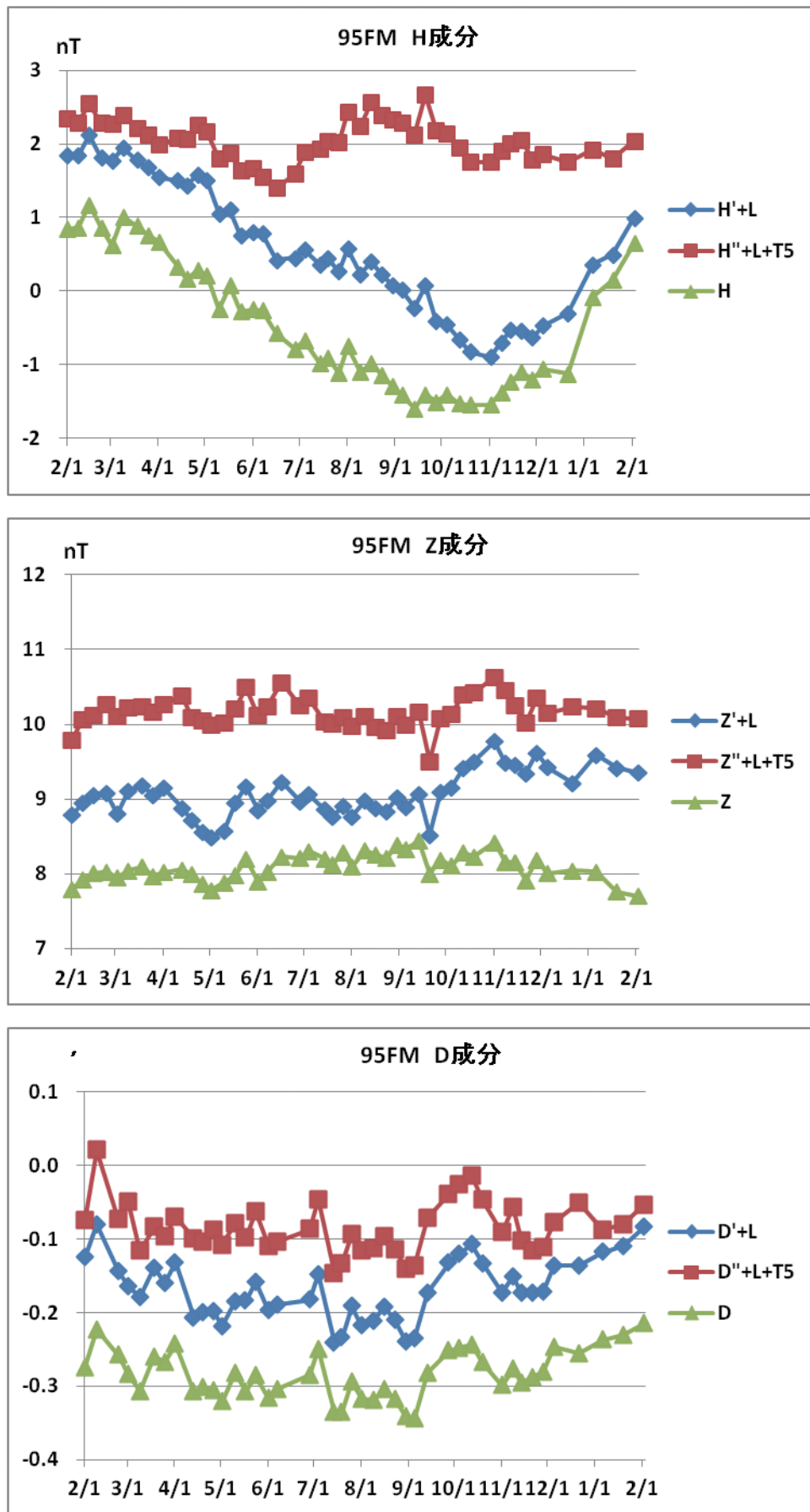


図7 鹿屋 95FM 観測基線値の補正結果 (上から H, Z, D 成分. ◆:傾斜補正のみ, ■:傾斜補正と検出器温度, 5 m 深地温補正, ▲:補正なし)

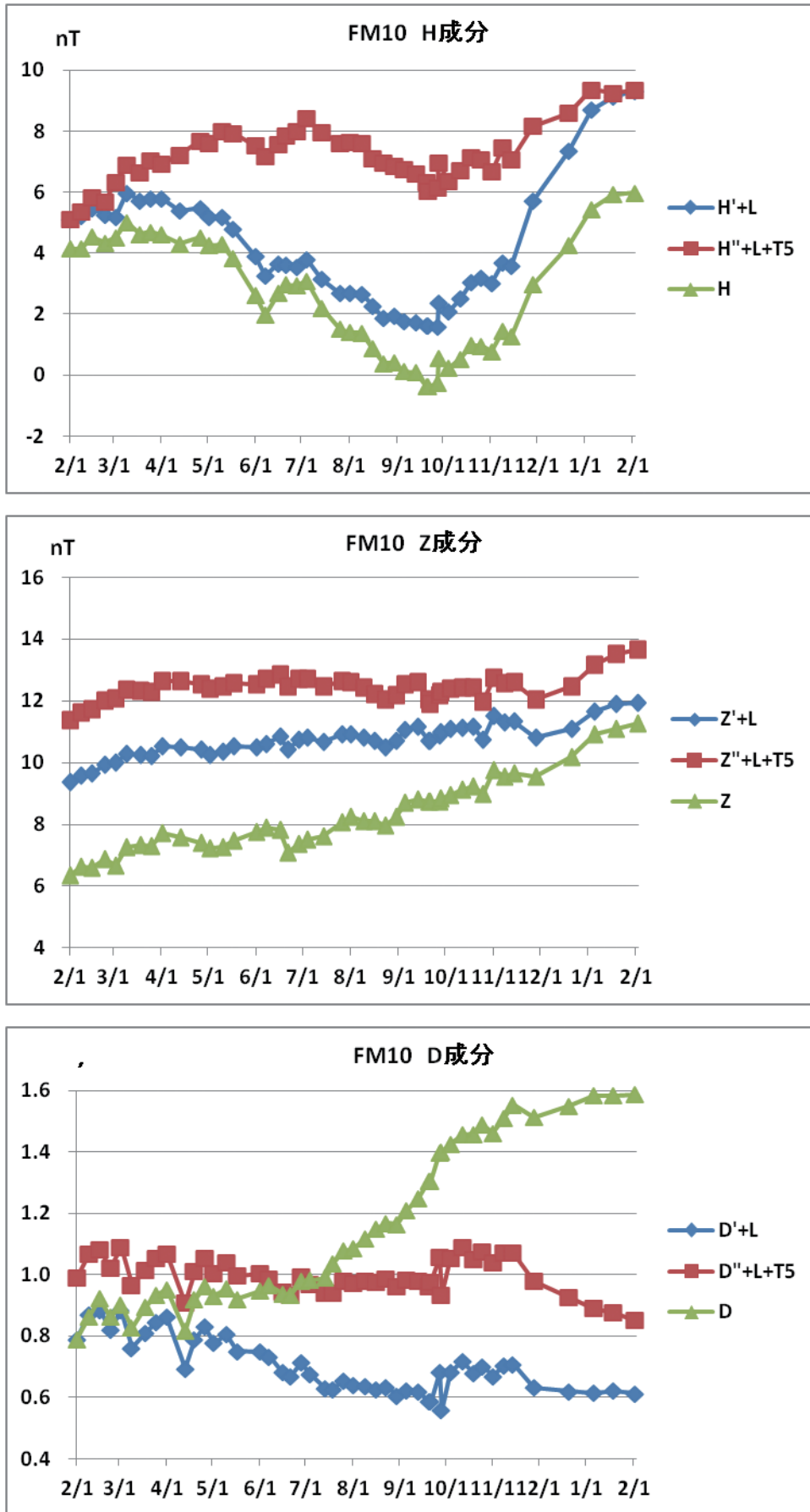


図8 鹿屋 FM10 観測基線値の補正結果 (上から H, Z, D 成分. ◆:傾斜補正のみ, ■:傾斜補正と検出器温度, 5 m 深地温補正, ▲:補正なし)

FM10の補正した基線値を示す。図中の $H' + L$ は傾斜補正基線値, $H'' + L + Tx$ 等は傾斜補正基線値に検出器と地中温度を補正した基線値(以後, 温度補正基線値と呼ぶ)で, x は使用した地中温度の深さを示す。 H 等は何の補正もしていない観測基線値である。女満別のFM10については, 3m深地温と5m深地温の相関が何れも高かったため, それぞれの係数を用いて補正した基線値を示した。表9に補正後の観測基線値の較差を示す。

5. 考察

女満別の温度補正効果について見てみる。96FM, FM10, 02FMの H, Z 成分, FM10, 02FMの D 成分は, 温度補正をしたことにより, 解析期間の基線値の較差は, $1 \sim 2nT$ (ただし02FMの Z 成分は $4.6nT$)または $0.1 \sim 0.2'$ と小さくなった。これにより, 例えば96FMや02FMの Z 成分観測基線値が, 1週間で絶対観測の良否判定基準としている $\pm 0.3nT$ 以上の変動を見せる5月~9月と10月~1月でも, 観測基線値から絶対観測の良否判定がし易くなっている。96FMの D 成分については, 傾斜補正基線値と温度補正基線値に差は殆ど無い。また, FM10の3m深地温と5m深地温の補正では, H, D 成分は5m深地温補正が, Z 成分は3m深地温補正が有効である。

鹿屋の温度補正効果について見る。95FM, FM10の H 成分は温度補正の効果が見られるが, Z, D 成分には見られない。FM10の, Z, D 成分は傾斜補正基線値と温度補正基線値に差は殆ど無く, 傾斜補正のみで十分と言える。また95FMの Z, D 成分の観測基線値は, 傾斜補正等をしなくとも年較差は $1nT$ または $0.1'$ と小さく, 傾斜補正, 温度補正の必要は無いと言える。

4章で求めた検出器温度係数と地中温度係数について述べる。地磁気観測所が使用しているフラックスゲート磁力計の仕様では, 検出器および制御器とも温度係数は $0.5nT/^\circ C$ 以下とされている(大和田ほか(1997))。これに対し, 重相関解析で求められた検出器温度係数は, 解析に使用した地中温度によっては, $1nT/^\circ C$ 以上となっている。女満別の96FMの Z 成分は, 相関の高かった1m深地温の場合 $-2.5/^\circ C$ とかなり大きく, この係数が正しいか疑問が残る。96FMは, 大和田ほか(1997)が納入時に柿岡で簡単な温度試験(検出器は地面から約1.5mの高さに設置)を行っている。それによると H および Z 成分の検出器温度係数は, 何れも $+0.3nT/^\circ C$ 程度であった。三島ほか(2011)によると, 女満別構内で採集した土壌の磁化温度変化率は, $1.7 \sim 56.6 \times$

$10^{-6}Am^2/kg^\circ C$ で, 柿岡の $0.5 \sim 7.8 \times 10^{-6}Am^2/kg^\circ C$, 鹿屋の $0.6 \sim 1.4 \times 10^{-6}Am^2/kg^\circ C$ よりかなり大きく, 更にモデル計算によれば, 96FMの設置された場所は, 局所的な強い地中磁化の影響を受けている結果となっている。これを参考とすれば, 1m深地温の係数は $-0.2nT/^\circ C$ よりも大きくなるのではないかと考えられ, 96FMの Z 成分については, 土壤磁化の温度依存分と検出器温度依存分係数が上手く分離されていない可能性がある。しかし, その原因については今回の調査では分からなかった。

6. まとめ

女満別, 鹿屋に設置してある複数のフラックスゲート磁力計の観測基線値を, 環境要素である検出器温度と地中温度の係数を用いて補正を行った。その結果, 適切な環境要素を使用することにより, 観測基線値の年較差が $1 \sim 2nT$ (ただし女満別02FMの Z 成分は $4.2nT$), または $0.1 \sim 0.2'$ 程度まで小さくなった。これは1週間で絶対観測の良否判定基準としている $\pm 0.3nT$ を大きく外れた観測基線値が出た場合でも, 温度補正等により, 絶対観測の良否判定の一つの判断材料として有効となる。

参考文献

- 地磁気観測所, 観測指針-絶対観測, 変化観測-, 地磁気観測所技術報告, 第26巻特別号, 163-168, 1987.
- 藤井郁子, 大和田毅, 源泰拓, 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, 第9巻, 第1, 2号, 1-6, 2012.
- 三島聡明, 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, 小田哲邦, 地磁気観測所構内の土壤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.
- 大和田毅, 加藤諄司, 来栖喜久男, 中島新三郎, 上井哲也, MO-PE78 FLUX GATE型磁力計性能調査について, 地磁気観測所技術報告, 第24巻, 第3, 4号, 3-13, 1985.
- 大和田毅, 山田雄二, 徳本哲男, 熊坂信之, 横山恵美, 菅原政志, 清水幸弘, 小池捷春, 小嶋美都子, 地磁気変化量観測装置について-高感度フラックスゲート磁力計-, 地磁気観測所技術報告, 第37巻, 第1, 2号, 1-20, 1997.
- 徳本哲男, 室松富二男, 生駒良友, 女満別・鹿屋における人工擾乱の検出能力, 地磁気観測所テクニカルレポート, 第10巻第2号, 37-50, 2013.

**Effect of environmental data on baseline values
-comparison between main and sub-
magnetometers**

by

Takeshi OWADA, Takashi MORIYAMA and Kenji MORINAGA

Kakioka Magnetic Observatory

Received 18 January 2013; received in revised form 8 February 2013;
accepted 4 March 2013