

柿岡、鹿屋、女満別の高感度フラックスゲート磁力計の周波数特性

山崎 明¹, 三島稔明²

¹ 気象庁地震火山部, ² 大阪市立大学

2012年8月3日受領, 2012年11月12日受理

要 旨

柿岡、女満別、鹿屋で実施している地磁気0.1秒値観測は2012年より高感度フラックスゲート磁力計の出力を直接A/D変換し収録する方式に切り替えられた。これまでは高感度フラックスゲート出力に周期150秒のアナログハイパスフィルタを通過させて収録していたので、この変更に伴い周波数特性が大きく変わることになる。また、高感度フラックスゲート磁力計3式も新たに整備されたことから、これらの磁力計の交流感度測定を実施し周波数特性の調査を行った。交流感度の測定は柿岡の比較校正室にある大型3軸コイルを用いて行った。測定結果、おおむね仕様に近い周波数特性が得られたものの、Z成分がH、D成分と比較してやや特性が異なるという結果が得られた。また、センサーに内蔵されているコイルを使用した交流感度測定も実施し、大型コイルの場合と比較した。その結果、内蔵コイルと大型コイルでは3成分とも周波数特性が少し異なることがわかった。これら特性が異なる原因を調査したところ、センサーの台座やカバー、センサー搭載台などのアルミ部材に誘導される電流が微妙に周波数特性に影響していることが明らかとなった。実際の地球磁場の観測ではセンサー周囲のアルミ部材に誘導される電流の効果も含んだ磁場が測定されるので、大型コイルによる交流感度測定値の方が内蔵コイルより正しい周波数特性を与えていると言える。

1. はじめに

島津製作所製の高感度フラックスゲート磁力計(以下、HFMと略)は高分解能で基線値の安定性にも優れており、地磁気観測所においては地磁気変化観測の主測器として使用されている(Tsunomura et al., 1994)。PcやPiなどの地磁気短周期現象を観測する地磁気脈動観測は、過去には誘導磁力計を用い、記録紙および磁気テープへのアナログ記録が行われてきた。その後、1995～1996年に柿岡、女満別、鹿屋ともHFMの出力を分岐し0.1秒サンプリングでデジタルデータを取得する方式に切り替えられた(大和田・他, 1998)。この方式ではHFMの出力信号に周期150秒のハイパスフィルタ回路を通過させ、ULF帯域の地磁気短周期変化を増幅してA/D変換している。周波数特性については定期的に交流感度測定が実施され、装置の点検を行うと共に、測定結果は記事表の一部として公表されてきた。

地磁気短周期変化を増幅させる方法として、アナログハイパスフィルタはオーソドックスな方法であるが、フィルタ特性によってオリジナルの信号を歪ませてしまうという欠点がある。さらに0.1

秒値の利用者にとっては必要に応じデジタルフィルタなどを適用してULF帯域の地磁気変化を抽出することもできるので、フィルタの入っていない周波数特性のフラットなデータの方がむしろ扱いやすいということもある。こうした事情と近年A/D変換器の分解能が向上したこともあり、2012年からは柿岡、女満別、鹿屋ともハイパスフィルタ回路を用いず、HFMの出力信号を直接A/D変換し0.1秒値データを収録することになった。これにより、2012年から提供される0.1秒値はほぼ平坦な周波数特性の地磁気変化データとなる。とは言え、HFMの出力部にはカットオフ周波数5Hzのローパスフィルタが入っているので、1Hz以上の帯域では依然として周波数特性を有している。

2009年度末に柿岡、女満別、鹿屋のHFMの更新のため3式の新しいHFMが配備され、柿岡の比較校正室にある大型3軸コイルを用いてこれらHFMの交流感度測定を実施した。測定結果、おおむね仕様どおりの周波数特性が得られたものの、Z成分がH、D成分と比較してやや特性が異なるという結果が得られた。この原因を調査したところ、センサー

の台座やカバー，センサー搭載台などに誘導される電流が周波数特性に影響していることがわかった。

本報告では山崎・三島(2011)で報告した内容を補足し，女満別・鹿屋のHFMの測定結果も加えて報告する。周波数特性の測定結果については地磁気0.1秒値データの利用者の便宜のため，数表で示した。また，周波数特性の測定におけるHFMセンサー周囲のアルミ製の器材に生じる誘導電流の影響についても考察する。

2. 測定方法

2009年度末に納入された3台のHFMの交流感度特性（周波数特性）の測定を2010年4月に実施した。測定には当所の比較較正室西台にある一辺約3mの大型3軸スクエアコイル（山本，1992）を使用した。測定のブロックダイアグラムを図1に示す。

測定では初めHFMのセンサーを大型3軸コイルの中心にセットする（図2の左上）。次にコイルに直流電流を通じ直流磁場を印加し，この印加磁場を利用して大型コイルのコイル軸とHFMのセンサー軸が一致するようにHFMセンサーの向きと水平レベルを調整する。次に大型コイル3軸を直列に結線し，PCで制御されたファンクションジェネレータ（OSC）を用い，約4V(p-p)の電圧で約8mA(p-p)の交流電流を流す。これにより約90nT(p-p)の3成分交流磁場がHFMセンサーに加わる。

測定周波数は100Hz～0.01Hz間の23周波数を

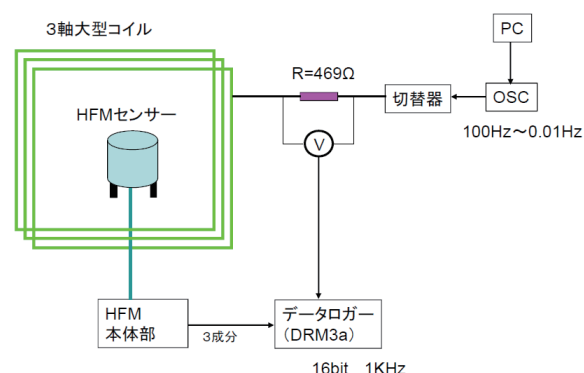


図1 交流感度測定のブロックダイアグラム

選定した（表1）。データの収録は16bit A/Dのデータロガー（DRM3a（ティアック（株）））で行い，サンプリング周波数は1KHzとした。測定時間は各周波数を合わせて計46分とした。大型コイルに流した電流を正確に求めるため，大型コイルと直列につながる469Ωの抵抗間電圧を測定し，同じデータロガーで収録した。こうして求めた電流に大型コイルのコイル定数を掛け，正確なキャリブレーション磁場を求めた。

3. 交流感度の計算

交流感度の計算は山本・小池(1996)と同様に，大型コイルによるキャリブレーション磁場とHFMの出力磁場は周波数が同じ正弦波で表されるので，サンプリングした波形に最適な正弦波を求める方法をとった。



図2 中心部にHFMセンサーをセットした大型3軸コイル（左上），HFMセンサーとアルミ製センサー搭載台（右上），アルミ製センサー搭載台（左下），塩ビ製センサー搭載台（右下）

表1 交流感度測定の測定周波数および測定時間

No.	周波数(Hz)	周期(s)	測定時間(分)
1	100	0.0100	1
2	60	0.0167	1
3	40	0.0250	1
4	30	0.0333	1
5	20	0.0500	1
6	15	0.0667	1
7	10	0.1000	1
8	8	0.1250	1
9	6	0.1667	1
10	5	0.2000	1
11	4	0.2500	1
12	3	0.3333	1
13	2	0.5000	1
14	1.5	0.6667	1
15	1	1.0000	1
16	0.5	2.0000	2
17	0.25	4.0000	2
18	0.1667	6.0000	2
19	0.1	10.0000	2
20	0.05	20.0000	2
21	0.025	40.0000	4
22	0.01667	60.0000	6
23	0.01	100.0000	11

H成分の例で説明すると、大型コイルによるキャリブレーション磁場は

$$B_{hin}(t) = K_h \times V_{in}(t) / R$$

$$= K_h \times (C_v \cos \omega t + S_v \sin \omega t + O_v) / R$$

と書ける。ここで、 $B_{hin}(t)$ は H 成分のキャリブレーション磁場 (nT), K_h は H 成分のコイル常数 (nT/A), $V_{in}(t)$ は R 両端の電圧 (V), R は固定抵抗 (469Ω) である。次に、サンプリングデータより 1 波形ごとに線形最小二乗法で C_v , S_v , O_v を求め、この値を 4 ~ 100 波形分求め、その平均値を最終値とした。 B_{hin} の振幅 (A_v) と位相 (Φ_v) は

$$A_v = K_h \times (C_v^2 + S_v^2)^{0.5} / R,$$

$$\Phi_v = -\arctan(S_v / C_v)$$

で与えられる。

同様に、HFM の H 成分出力磁場は

$$B_{hout}(t) = P_h \times V_{hout}(t)$$

$$= P_h \times (C_h \cos \omega t + S_h \sin \omega t + O_h)$$

と書ける。ここで $B_{hout}(t)$ は H 成分の HFM 出力磁場 (nT), P_h は H 成分の直流感度 (nT/V), $V_{hout}(t)$ は HFM の H 成分の出力電圧 (V) である。キャリブレーション磁場の場合と同様に C_h , S_h , O_h を線形最小二乗法で求め、 B_{hout} の振幅 (A_h) と位相 (Φ_h) を求めた。

$$A_h = P_h \times (C_h^2 + S_h^2)^{0.5},$$

$$\Phi_v = -\arctan(S_h / C_h)$$

最終的な H 成分のゲイン (G_h) と位相 (Φ_{hv}) は

$$G_h = A_h / A_v, \quad \Phi_{hv} = \Phi_h - \Phi_v$$

で与えられる。

4. 測定結果

HFM の更新後に柿岡で使用する 1 台の HFM の周波数特性の振幅 (gain) と位相 (phase) の測定結果を図 3 に示した。振幅特性では 1Hz 以上で振幅の減少、位相特性では 0.1Hz 以上で位相の遅れが始まっており、更新前の HFM の測定結果 (大和田・他, 1998) と概ね一致する結果が得られた。HFM にはカットオフ 5Hz のローパスフィルタが入っており、測定された周波数特性はローパスフィルタの特性であると言ってよく、回路設計の仕様とほぼ一致する結果が得られた。女満別および鹿屋用の HFM についてもほぼ同じような周波数特性の測定結果が得られた。なお、100Hz と 60Hz の測定値については HFM の出力信号がノイズレベル以下になり有意な測定値が得られなかったことから、図には示さなかった。

5. Z 成分の周波数特性が H,D 成分とやや異なる原因の調査

図 3 を見ると H,D 成分の特性はほとんど一致しているが、Z 成分が少し異なった特性を示していることがわかる。振幅特性でみると、H,D 成分にくらべ Z 成分では 5Hz で 2 割、10Hz で 3 割ほどゲインが小さくなっている。Z 成分のこうした特性は測定した 3 台の HFM すべてに認められた。原因としてローパスフィルタの特性が成分によって違うことも考えられたが、メーカー (島津製作所) によればローパスフィルタの特性は H,Z,D 成分とも同じとのことであった。よってローパスフィルタの特性ではなく別の原因によって Z 成分の周波数特性が水平成分と異なっていることになる。

初め、大型コイルによる大地の電磁応答が水平成分と Z 成分では異なることから、大地の影響の可能性を考えた。そこでループループ法で使われる式 (古川・他, 2004) を用いて大地の電磁応答を簡単に見積もってみた。大地の比抵抗を $100\Omega \cdot m$,

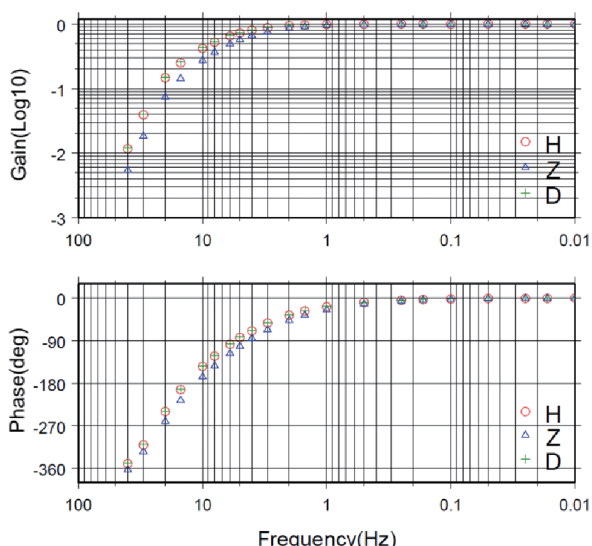


図3 高感度フラックスゲート（柿岡用）の周波数特性. 測定環境はアルミ製センサー搭載台を使用し、センサーカバーは取り付けられた状態での測定値. 上図が振幅特性で下図が位相特性.

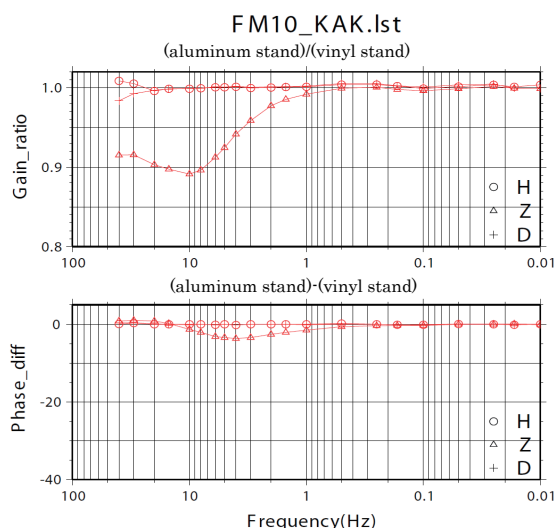


図4 アルミ製センサー搭載台と塩ビ製センサー搭載台を用いた場合の周波数特性の比較. 振幅比（アルミ製／塩ビ製）と位相差（アルミ製－塩ビ製）で示した.

周波数を 100Hz, 送信コイルと受信コイルの距離 (s) を 10m として計算した場合, 受信コイルにおける一次磁場 (H_p) と二次磁場 (H_s) の比 (H_s/H_p) は約 1/5000 となる. 今回の測定での大型コイル（送信コイル側）とフラックスゲート（受信コイル側）の配置では, ルーブループ法による試算より一次磁場がより大きくなるセンスであると考えられる. よって, 周波数が 100Hz 以下の帯域では大地の電磁応答はほとんど無視できるほど小さいことがわかった.

次にセンサーカバーなどセンサー周囲のアルミ製の部材が影響している可能性を考えた. センサーの搭載台（図2の右上, 左下）やセンサーカバー, センサーの台座は材質がいずれもアルミであり, そ

こに大型コイルの作る交流磁場で誘導される電流により生じる二次磁場が影響してくる可能性は考えられる. 特にセンサーの搭載台やセンサーの台座は水平な円盤状の形状であるため, そこに誘導される渦状の電流の作る磁場は鉛直成分となるであろうことは容易に推察できる.

最初にセンサーの搭載台の影響を調べるため, 絶縁体の塩ビ製の搭載台（図2の右下）を使用した場合との周波数特性の違いを検討した. アルミ台を使用した場合と塩ビ台を使用した場合のゲインの比および位相の差を図4に示す. 図に見るようにアルミ台と塩ビ台では水平成分ではほとんど違いが認められないが, Z成分ではゲインと位相に明瞭な相違が見られ, 10Hz ではアルミ台を用いた場合ゲインが1割ほど小さくなることがわかった. その理由

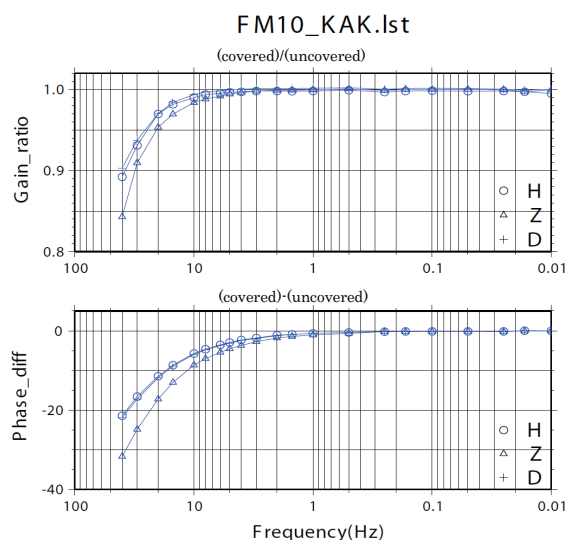


図6 センサーカバーをつけた場合と取り外した場合の周波数特性の比較. 振幅比（カバーあり／カバーなし）と位相差（カバーあり－カバーなし）で示した.

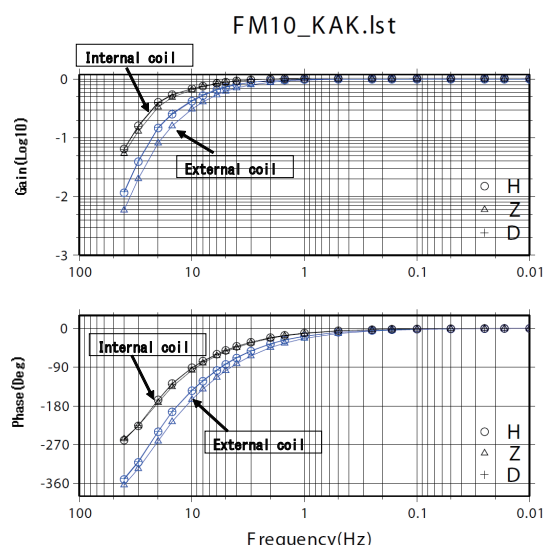


図7 内蔵感度コイルを用いた周波数特性結果（黒線）. 比較のため大型コイルを用いた測定結果も示してある（青線）.

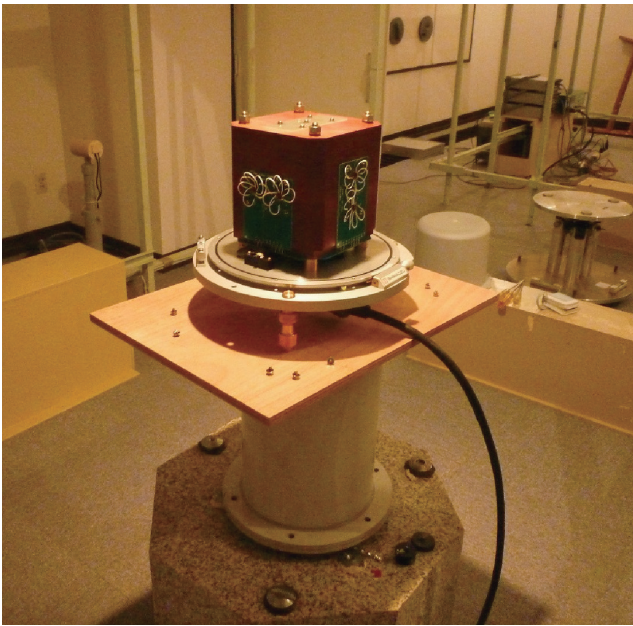


図5 センサーカバーを取り外した HFM センサーの外観 (左図) と取り外したセンサーカバー (右図)

として、アルミ台に誘導される電流の作る二次磁場が大型コイルの作る一次磁場を 1 割ほど打ち消しているためと考えられる。

次に HFM センサーカバーの影響を調べるため、センサーカバーを取り付けた状態とはずした状態 (図 5 の左図) で測定し比較した。測定にあたりセンサーの搭載台には塩ビ台を使用した。センサーカバーを取り付けた場合とはずした場合のゲインの比および位相の差を図 6 に示す。図に見るようにセンサーカバーの影響は H, Z, D の全成分に見られ、 H, D 成分はほぼ同じ特性を示すが、 Z 成分でやや減衰が早いことがわかった。ただしセンサーカバーは薄いためか影響量はあまり大きくなく 10Hz でも 1 ～ 2 パーセント程度の影響量である。

実験によりセンサーの搭載台とセンサーカバーが Z 成分の周波数特性に影響を及ぼすことは確かめられたが、その影響量は 10Hz の場合で 1 割程度であり、残り 2 割は説明できていない。図 5 に見るようにセンサーの底部にはアルミ製の円盤状の台座がある。この台座を取り外して影響を調べようとしたが、取り外しが困難であったので、実験はできなかった。しかし、台座は 1 cm ほどの厚みがあり、センサーの底部に円盤状に存在することから、 Z 成分に影響を及ぼすことは疑いがなく、残り 2 割の影響はセンサーの台座によってもたされているものと推測できる。

6. 内蔵感度コイルによる測定

HFM センサーの内部には H, Z, D 成分の感度測定用に 3 軸のコイルが巻いてある。通常は HFM の直

流感度の測定に使われているが、これに交流電圧をかければ交流感度測定が行える。ハイパスフィルタを通過させて 0.1 秒値を収録していた 2011 年までは、この内蔵感度コイルを用いて交流感度測定を実施していた。

図 7 に大型コイルと内蔵感度コイルの場合の交流感度特性を示した。内蔵コイルによる測定にあたっては、センサーの搭載台には塩ビ台を用い、センサーカバーは取り付けた状態で測定した。なお、図示した大型コイルの方の測定環境は内蔵コイルの測定の場合と同じである。図に見るように大型コイルの場合と内蔵コイルでは周波数特性に明瞭な違いがあり、内蔵コイルの場合では周波数の増加に伴うゲインの減衰が大型コイルの場合より全成分で小さい。また H, D 成分と Z 成分の周波数特性に大型コイルの場合ほど大きな違いのないこともわかった。

内蔵コイルでの交流感度測定の場合、センサーの台座やセンサーカバーに誘導される電流が大型コイルの場合よりずっと小さく、測定された周波数特性は HFM に組み込まれている 5Hz のローパスフィルタの特性にかなり近い値を示しているものと思われる。また全成分で大型コイルよりゲインの減衰が小さくなっていることは、センサー周囲のアルミ材の影響が、 Z 成分だけでなく実は H, D 成分にもかなり影響を与えているということになる。

7. 周波数特性の補正

HFM で地球磁場変動を観測する場合、センサーの台座やカバーは取り付けた状態で使用するの

表2 柿岡用 HFM の交流感度の測定結果. 測定環境は塩ビ製センサー搭載台を使用し, センサーカバーは取り付けた状態での測定値.

KAK No.	周波数(Hz)	H成分		Z成分		D成分	
		振幅	位相	振幅	位相	振幅	位相
3	40.00000	0.0116	-350.6	0.0059	-363.9	0.0121	-348.9
4	30.00000	0.0392	-311.1	0.0201	-325.9	0.0405	-309.6
5	20.00000	0.1473	-240.1	0.0815	-261.7	0.1503	-239.7
6	15.00000	0.2517	-193.9	0.1588	-216.8	0.2597	-193.5
7	10.00000	0.4210	-144.7	0.3077	-165.1	0.4348	-143.7
8	8.00000	0.5252	-122.6	0.4073	-141.2	0.5397	-121.4
9	6.00000	0.6566	-97.7	0.5412	-113.8	0.6691	-96.4
10	5.00000	0.7312	-83.8	0.6219	-98.4	0.7418	-82.6
11	4.00000	0.8077	-68.9	0.7086	-81.8	0.8153	-67.7
12	3.00000	0.8806	-53.0	0.7980	-63.8	0.8845	-52.0
13	2.00000	0.9428	-36.0	0.8857	-44.5	0.9430	-35.3
14	1.50000	0.9664	-27.2	0.9263	-34.2	0.9652	-26.6
15	1.00000	0.9845	-18.2	0.9631	-23.4	0.9820	-17.8
16	0.50000	0.9962	-9.2	0.9907	-12.0	0.9926	-9.0
17	0.25000	0.9981	-4.6	0.9979	-6.0	0.9945	-4.5
18	0.16670	0.9997	-3.1	1.0005	-4.1	0.9961	-3.0
19	0.10000	1.0003	-1.9	1.0011	-2.4	0.9961	-1.8
20	0.05000	0.9994	-1.0	1.0008	-1.3	0.9954	-1.0
21	0.02500	0.9989	-0.5	1.0000	-0.7	0.9954	-0.5
22	0.01667	1.0006	-0.3	1.0002	-0.5	0.9968	-0.4
23	0.01000	0.9992	-0.2	1.0019	-0.2	0.9976	-0.2

表4 鹿屋用 HFM の交流感度の測定結果. アルミ製センサー搭載台の影響は補正してある.

KNY No.	周波数(Hz)	H成分		Z成分		D成分	
		振幅	位相	振幅	位相	振幅	位相
3	40.00000	0.0113	-348.2	0.0063	-365.4	0.0102	-344.4
4	30.00000	0.0375	-309.8	0.0217	-327.2	0.0317	-308.4
5	20.00000	0.1412	-240.6	0.0889	-259.9	0.1210	-246.2
6	15.00000	0.2447	-195.1	0.1676	-213.9	0.2281	-202.0
7	10.00000	0.4158	-145.7	0.3146	-162.7	0.4135	-150.2
8	8.00000	0.5202	-123.6	0.4128	-139.4	0.5231	-126.8
9	6.00000	0.6532	-98.3	0.5459	-112.3	0.6585	-100.3
10	5.00000	0.7272	-84.5	0.6251	-97.3	0.7326	-86.0
11	4.00000	0.8034	-69.3	0.7102	-80.7	0.8075	-70.3
12	3.00000	0.8780	-53.4	0.8000	-63.0	0.8802	-54.1
13	2.00000	0.9419	-36.4	0.8879	-44.1	0.9417	-36.8
14	1.50000	0.9653	-27.4	0.9279	-33.8	0.9640	-27.7
15	1.00000	0.9843	-18.4	0.9653	-23.1	0.9819	-18.5
16	0.50000	0.9922	-9.5	0.9887	-12.0	0.9891	-9.4
17	0.25000	0.9934	-4.6	0.9950	-6.0	0.9904	-4.7
18	0.16670	0.9977	-3.1	1.0004	-4.0	0.9946	-3.0
19	0.10000	1.0005	-1.9	1.0028	-2.4	0.9967	-1.8
20	0.05000	0.9977	-1.1	1.0010	-1.2	0.9954	-0.9
21	0.02500	1.0002	-0.8	1.0014	-0.8	0.9934	-0.5
22	0.01667	0.9981	-0.2	0.9999	-0.4	0.9912	0.0
23	0.01000	1.0008	-0.2	1.0024	-0.2	0.9966	0.0

表3 女満別用 HFM の交流感度の測定結果. アルミ製センサー搭載台の影響は補正してある.

MMB No.	周波数(Hz)	H成分		Z成分		D成分	
		振幅	位相	振幅	位相	振幅	位相
3	40.00000	0.0097	-346.7	0.0064	-369.6	0.0114	-348.5
4	30.00000	0.0313	-310.7	0.0223	-330.5	0.0370	-310.2
5	20.00000	0.1226	-246.8	0.0936	-260.7	0.1395	-242.3
6	15.00000	0.2289	-201.8	0.1744	-213.3	0.2475	-196.4
7	10.00000	0.4082	-150.3	0.3189	-161.7	0.4217	-145.9
8	8.00000	0.5176	-127.0	0.4179	-138.4	0.5284	-123.5
9	6.00000	0.6528	-100.8	0.5497	-111.6	0.6595	-98.0
10	5.00000	0.7281	-86.5	0.6284	-96.7	0.7330	-84.1
11	4.00000	0.8057	-70.8	0.7135	-80.1	0.8082	-68.9
12	3.00000	0.8812	-54.5	0.8031	-62.7	0.8809	-53.1
13	2.00000	0.9430	-37.0	0.8886	-43.7	0.9406	-36.0
14	1.50000	0.9669	-28.0	0.9290	-33.7	0.9638	-27.2
15	1.00000	0.9850	-18.7	0.9655	-23.0	0.9812	-18.2
16	0.50000	0.9920	-9.8	0.9881	-12.1	0.9880	-9.4
17	0.25000	0.9947	-4.6	0.9959	-5.8	0.9907	-4.5
18	0.16670	0.9995	-3.1	1.0023	-4.0	0.9961	-3.0
19	0.10000	1.0027	-1.8	1.0040	-2.2	0.9973	-1.6
20	0.05000	1.0016	-1.1	1.0035	-1.3	0.9968	-1.0
21	0.02500	0.9978	-0.5	1.0007	-0.5	0.9944	-0.5
22	0.01667	1.0170	0.1	1.0156	-0.9	0.9840	0.0
23	0.01000	0.9781	0.5	0.9908	0.1	1.0015	0.0

これらに誘導される電流の作る磁場は観測値に影響する. 大型コイルを用いた交流感度測定はコイル内で地球磁場変動を模したものである. 大型コイルで与えた磁場変動でセンサーの台座やカバーに生じる電流系は地球磁場変動の場合と同じようにな

ると考えることができる. よって, 地球磁場変動を観測する上では大型コイルの方が内蔵コイルでの測定より正しい周波数応答を与えているものと考えてよい. ただし, HFM センサーは大理石などの絶縁体上に置かれることが多いので, 交流感度測定で使したアルミ製のセンサー搭載台の影響は除く必要がある.

柿岡用の HFM では塩ビ製のセンサー搭載台を用いた測定を実施したので, この測定結果を示せばよく, 0.1 秒値の利用者の便宜のため表で示した(表2). 女満別・鹿屋用の HFM ではアルミ製のセンサー搭載台を使用した測定後すぐに現地に送付したので, 塩ビ製のセンサー搭載台を用いた測定は実施していない. よって次善の策として, 3 台の HFM は全く同じ構造であるので, アルミ製のセンサー搭載台の影響はほとんど同一とみなし, 柿岡用の HFM の測定結果を用いて補正することにした. すなわち, ある周波数においてアルミ製のセンサー搭載台の影響により柿岡用 HFM の振幅が ΔG 倍, 位相差が $\Delta \phi$ 度変化したとすると, この ΔG と $\Delta \phi$ が不変として女満別・鹿屋用の HFM の振幅と位相を補正した. 補正した測定結果を表3, 表4に示す.

8. まとめ

2009 年度末に納入された 3 台の HFM について

大型コイルを用いた交流感度測定を実施した。測定の結果、Z成分の1Hz以上の周波数特性がH,D成分とやや異なるという結果が得られた。振幅特性でみると、H,D成分に比べZ成分では10Hzで3割ほどゲインが小さくなった。この原因について調査したところ、センサーの台座やカバー、センサー搭載台に誘導される電流がHFMの周波数特性に影響を与えていることがわかった。

アルミ製のセンサー搭載台については絶縁体の塩ビ台を使用した場合と比較することによりその影響量を調べた。アルミ製のセンサーカバーについてもこれを取り外して影響を調べた。その結果、センサー搭載台やセンサーカバーがHFMの周波数特性に影響を与えていることが確かめられた。しかし、両者を併せた影響量は測定された影響量の3分の1程度であった。残る3分の2の原因については直接確かめることはできなかったが、取り外し困難なセンサー底部にあるアルミ製の円盤状台座の影響であろうと推測された。

また、HFMセンサー内部にある内蔵コイルを用いた交流感度測定を実施し、大型コイルの場合と比較した。その結果、内蔵コイルの測定では周波数の増加に伴うゲインの減衰が大型コイルの場合より全成分で小さく、また水平成分とZ成分の周波数特性に大型コイルの場合ほど大きな違いのないことがわかった。内蔵コイルで測定された周波数特性はHFMに組み込まれている5Hzのローパスフィルタの特性にかなり近い値を示しているものと思われる。この実験により、センサー周囲のアルミ材がZ成分だけでなく実はH,D成分にも少なからぬ影響を与えていることがわかった。

実際の地球磁場の観測ではHFMのセンサーの台座およびセンサーカバーは取り付けられた状態で使用される。よって、センサーの台座やセンサーカバーにも地球磁場変動に伴う誘導電流が流れるため、この効果を含んだものが測定値となる。この測定環境に最も近い交流感度の測定方法はセンサーカバーを取り付け、絶縁体の塩ビ台に載せ大型コイルで測定した場合であり、この測定値を採用すべきである。内蔵感度コイルを用いれば大型コイル等の特別な較正用の装置を用いる必要もなく交流感度測定は比較的容易にできるが、HFMに限らずどのような型のフラックスゲートを使う場合でも一度は確認のため大型コイルを用いた交流感度測定を実施すべきであると言える。

参考文献

古川勇也・西谷忠師・坂中伸也, ループルー法による

浅部比抵抗構造, Conductivity Anomaly 研究会 2004 年論文集, 120-127, 2004.

大和田毅・徳本哲男・山田雄二・小嶋美都子・熊坂信之・横山恵美・菅原政志・小池捷春・清水幸 弘・新システム: 地磁気変化量観測装置の概要, 地磁気観測所要報, Vol.26, No.2, 1-14, 1998.

Tsunomura, S., A. Yamazaki, T. Tokumoto and Y. Yamada, The new system of Kakioka automatic standard magnetometer, Mem. Kakioka Mag. Obs. 25, 3-32, 1994.

山本哲也, 大型コイルによる3軸磁力計の感度測定, 地磁気観測所技術報告, Vol. 32, 特別号(CAシンポジウム講演論文集), 217-225, 1992.

山本哲也・小池捷春, フラックスゲート磁力計MB162の交流感度測定, 地磁気観測所技術報告, Vol. 35, No.3,4, 1996.

山崎 明・三島稔明, 高感度フラックスゲートの周波数特性について, Conductivity Anomaly 研究会 2011 年論文集, 53-60, 2011.

Frequency characteristics of high-sensitivity fluxgate magnetometers at Kakioka, Kanoya, and Memambetsu Magnetic Observatories

by

Akira YAMAZAKI¹ and Toshiaki MISHIMA²

¹Japan Meteorological Agency

²Osaka City University

Received 3 August 2012; accepted 12 November 2012

Abstract

Beginning in 2012, geomagnetic 0.1 s sampling interval values at the Kakioka Magnetic Observatory and its branches at Memambetsu and Kanoya have been produced by direct A/D conversion of the output signal from high-resolution fluxgate magnetometers. Before their use, an analog high-pass filter, which passed signals with periods shorter than 150 s, had been used for the output signal of the magnetometers; therefore the frequency characteristics of the 0.1 s values have changed markedly. Three new high-resolution fluxgate magnetometers were manufactured to replace the original magnetometers, and we have examined their frequency characteristics. A calibrating system of three axial large square coils in the absolute observation house at Kakioka was used. Although the result was close to the specification of the magnetometer, which is a 5-Hz low-pass filter, the characteristics of the Z component were somewhat different from those of the H and D components. We also examined the frequency characteristics measured by the calibration coil inside the fluxgate sensors. In a comparison of the results from the large coil system with those from the internal coil, the frequency characteristics of the three components were slightly different. We investigated the cause of the differences and found that induction currents inside the aluminum parts around the fluxgate sensor, such as the sensor bottom disk, sensor cover, and sensor-mounting stand, influenced the frequency characteristics. Since the observed geomagnetic field includes the effects of the induction currents in the interior of these aluminum parts, we should adopt the calibration data as measured by the large coil system.