

高感度フラックスゲートの周波数特性について

山崎 明・三島稔明 (気象庁地磁気観測所)

Frequency characteristics of high sensitivity fluxgate magnetometer

Akira Yamazaki, Toshiaki Mishima

Kakioka Magnetic Observatory

Abstract

We examined frequency characteristics of new purchased three high resolution fluxgate magnetometers by using a calibrating system of 3 axial large square coils. The measured frequency was 100Hz to 0.01Hz. First of all, we could confirm the frequency characteristics of the 5Hz low pass filter of the fluxgate magnetometers. And then, we noticed that the characteristic of Z component is somewhat different from H and D component. By investigation of the difference, it is found that an induced current into the sensor bottom stand and sensor cover of the fluxgate magnetometer, which are made of aluminum, influence to the frequency characteristics of fluxgate magnetometers.

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、地磁気観測所では地磁気変化観測の主測器として使用している (Tsunomura et al., 1994)。Pc や Pi などの現象を主な観測対象とする地磁気脈動観測においては、過去にはセンサーは誘導磁力計で、磁気テープへのアナログ記録が行われてきたが、1995～1996年にHFMの出力を分岐し10Hz 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)。HFMは長周期では平坦な周波数特性を有するが、振幅特性では概ね1Hz以上、位相特性では0.1Hz以上で周波数特性が生じることが報告されている (大和田・他, 1998)。

2009年度末に柿岡、女満別、鹿屋のHFMの更新のため3台の新しいHFMが納入され、これらの周波数特性の測定を実施した。測定結果、ほぼ仕様どおりの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、センサーをコイル中心部に載せる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。

本報告では今回行ったHFMの周波数特性の調査結果を紹介し、周波数特性の測定上の問題点などについて考察する。

2. 測定方法

2009年度末に納入されたHFM3台の交流感度特性 (周波数特性) を調べた。測定には当所の比較

較正室西台にある大型3軸コイル(山本, 1992)を使用した。測定では初めHFMのセンサーを大型コイルの中心にセットし、コイルに電流を通じ直流磁場を印加し、大型コイルとHFMの軸合わせを行う。次に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)の交流電流を大型コイル3軸を直列につなぎ流した。これにより約90nT(p-p)の交流磁場を被測定HFMに加えた。送信周波数は100Hz~0.01Hzとした。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。大型コイルに流す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、正確な印加磁場を求めた。測定のブロック図をFig. 1に示す。

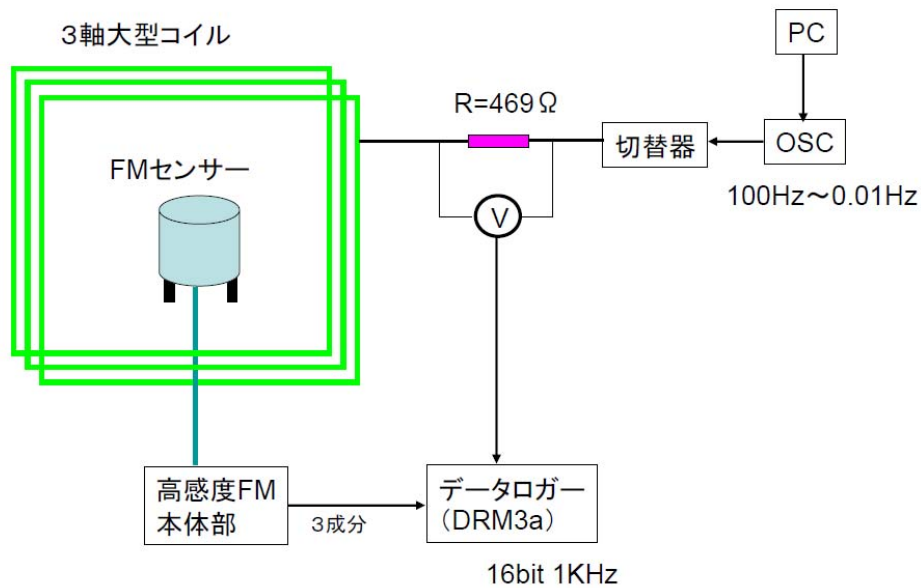


Fig. 1 Block diagram of the calibration system.

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、大型コイルへの印加磁場とHFMの出力磁場は周期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。

H成分の例で説明すると、大型コイルでHFMに印加した磁場は

$$B_{hin}(t) = K_h * V_{in}(t) / R = K_h * (C_v \cos \omega t + S_v \sin \omega t + O_v) / R$$

ここで、 $B_{hin}(t)$: H成分に印加した磁場(nT), K_h : H成分のコイル常数(nT/A),
R: 固定抵抗(469Ω)

で与えられる。また、HFMのH成分出力磁場は

$$B_{hout}(t) = S_h * V_{hout}(t) = S_h * (C_h \cos \omega t + S_h \sin \omega t + O_h)$$

ここで、 $B_{hout}(t)$: H成分のHFM出力磁場(nT), S_h : H成分の直流感度(nT/V)

で与えられる。

次に、サンプリングデータより1波形ごとに最小二乗法で C_v, S_v, O_v を求め、これを4~100波形分求め、平均値をとって最終測定値とした。 B_{hin} の振幅(A_v)と位相(Φ_v)は

$$A_v = K_h * (C_v^2 + S_v^2)^{0.5} / R, \quad \Phi_v = -\arctan(S_v / C_v)$$

で与えられる。

同様に C_h, S_h, O_h を最小二乗法で求め、 B_{hout} の振幅(A_h)と位相(Φ_h)を求めた。

$$A_h = S_h * (C_h^2 + S_h^2)^{0.5}, \quad \Phi_h = -\arctan(S_h / C_h)$$

最終的にH成分のゲイン(G_h)と位相差($\Delta \Phi_h$)は

$$G_h = A_h / A_v, \quad \Delta \Phi_h = \Phi_h - \Phi_v$$

で求められる。

4. 測定結果

柿岡で使用する予定の1台のHFMの周波数特性の振幅(gain)と位相(phase)の測定結果をFig. 2に示した。振幅では概ね1Hz以上、位相では0.1Hz以上で周波数特性が現れ、大和田・他(1998)の測定と概ね一致する結果が得られた。HFMには5Hzのローパスフィルタ(LPF)が入っており、得られた周波数特性は概ね5HzのLPF特性を示しているといつてよい。他の2台のHFMについてもほとんど同じような周波数特性の測定結果が得られた。

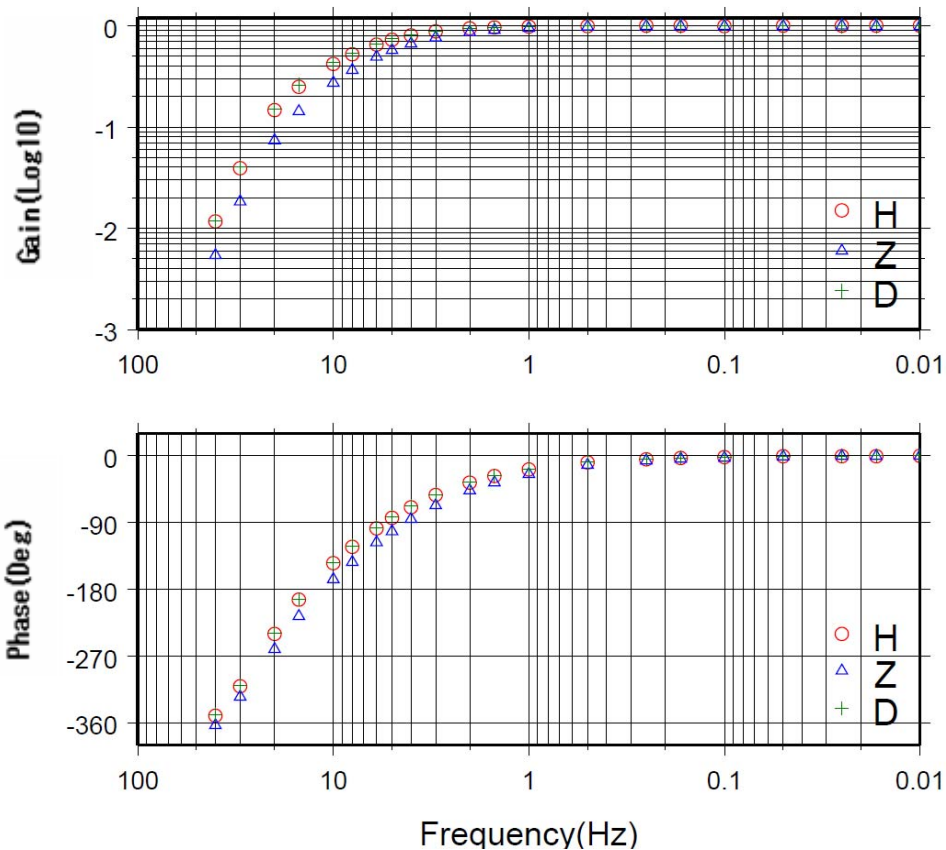


Fig.2 Measured gain and phase characteristics of high resolution fluxgate magnetometer.

5. Z成分の周波数特性がやや異なる原因の調査

Fig. 2 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。ゲイン特性でみると、H, D 成分にくらべ 5Hz で 2 割、10Hz で 3 割ほどゲインが小さくなっている。LPF の特性が異なっているようにも思えたが、メーカーによれば LPF は H, D と同じく 5Hz とのことであった。ではなぜ Z 成分の周波数特性が水平成分と異なってくるのであろうか？考えられる原因として次のような要因を想定した。

- 1) センサーのマウント台の影響
- 2) センサーカバーの影響
- 3) センサーの台座の影響
- 4) 大地の影響

センサーのマウント台 (Fig. 3 左図) 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製であり、そこに大型コイルの作る交流磁場で誘導される 2 次電流が影響してくる可能性は当然考えられる。特にセンサーのマウント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。なお、4) の大地の影響については大地の比抵抗から見積もった結果、数 10Hz 程度の帯域で誘導電流が周波数特性に影響するとは非常に考えにくいことがわかった。

まずセンサーのマウント台の影響を調べるため、絶縁体の塩ビ製のマウント台 (Fig. 3 右図) を使用した場合との周波数特性の違いを調査した。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 Fig. 4 に示す。図に見るようにアルミ台と塩ビ台では Z 成分の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。原因として、アルミ台に誘導される電流の作る 2 次磁場が大型コイルの作る 1 次磁場を 1 割ほど打ち消しているためと思われる。



Fig. 3 Fluxgate sensor mounting stands for setting the calibration coil.
Left: aluminum stand, Right: vinyl chloride stand.

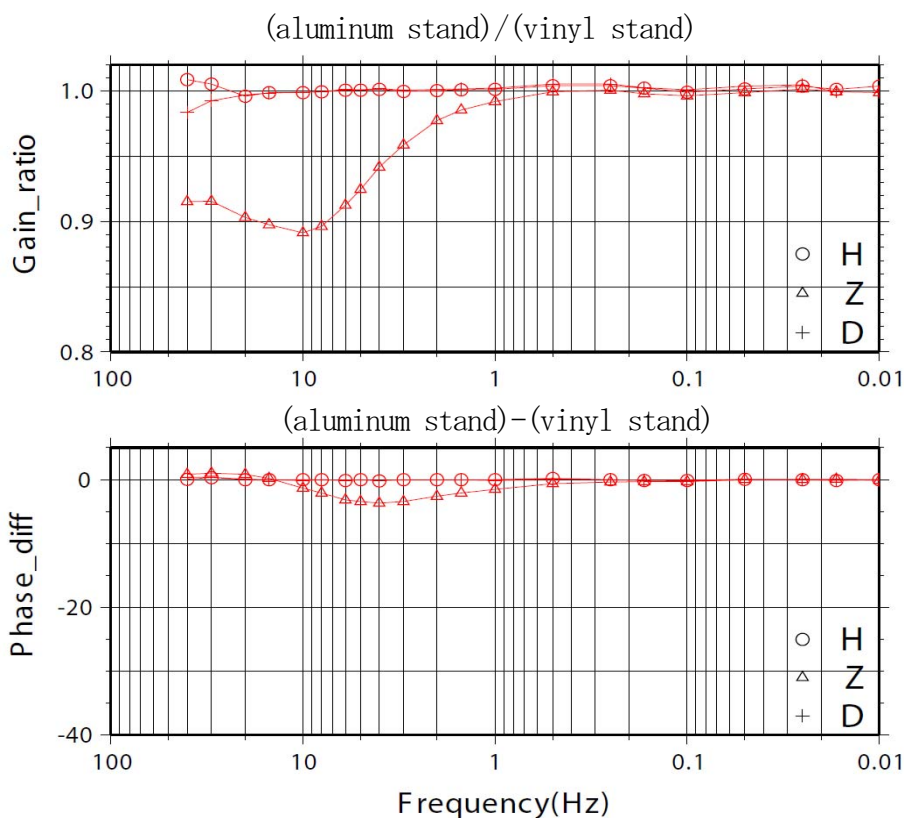


Fig.4 Comparison of frequency characteristics in case of aluminum stand with vinyl chloride stand.

次に HFM センサーカバーの影響を調べるため、センサーカバーをつけた状態とはずした状態 (Fig.5 左図) で測定し比較した。ここで、センサーのマウント台には塩ビ台を使用した。センサーカバーをつ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 Fig.6 に示す。図に見るようにセンサーカバーの影響は HZD の全成分に見られ、HD 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の影響量は 10Hz でも 1~2 パーセント程度で、量的に Fig.2 に示したような Z 成分の特性の相違を説明することはできない。



Fig.5 Uncovered fluxgate magnetometer sensor (left), and removed cover (right).

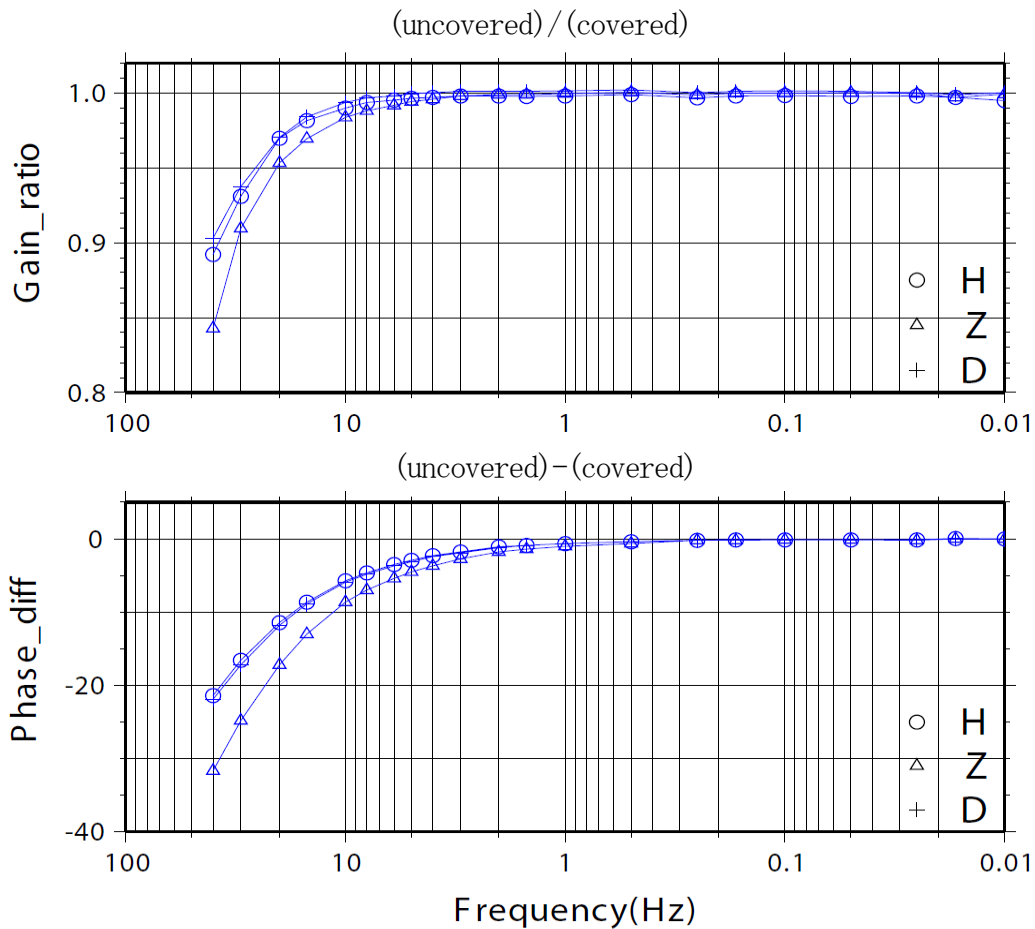


Fig.6 Comparison of frequency characteristics in case of covered fluxgate sensor with uncovered.

6. 内蔵感度コイルによる測定

HFM センサー内には感度測定用の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。Fig.7に大型コイルによる測定と内蔵感度コイルの場合の交流感度特性を示した。ここで測定にあたり、センサーのマウント台には塩ビ台を用い、センサーカバーはとりつけた状態で測定している。図にみ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はっきりとした違いがあり、大型コイルの場合では周波数の増加に伴う減衰が大きいことがわかった。また、内蔵コイルの場合ではH,D成分とZ成分の周波数特性に目立った違いのないこともわかった。内蔵コイルでの測定の場合、センサーの台座やセンサーカバーに誘導される2次電流が小さいと考えられ、このため各成分で同じような周波数特性を示しているものと考えられる。また、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LPFの回路特性に近い値を示しているのではないかと考えられる。

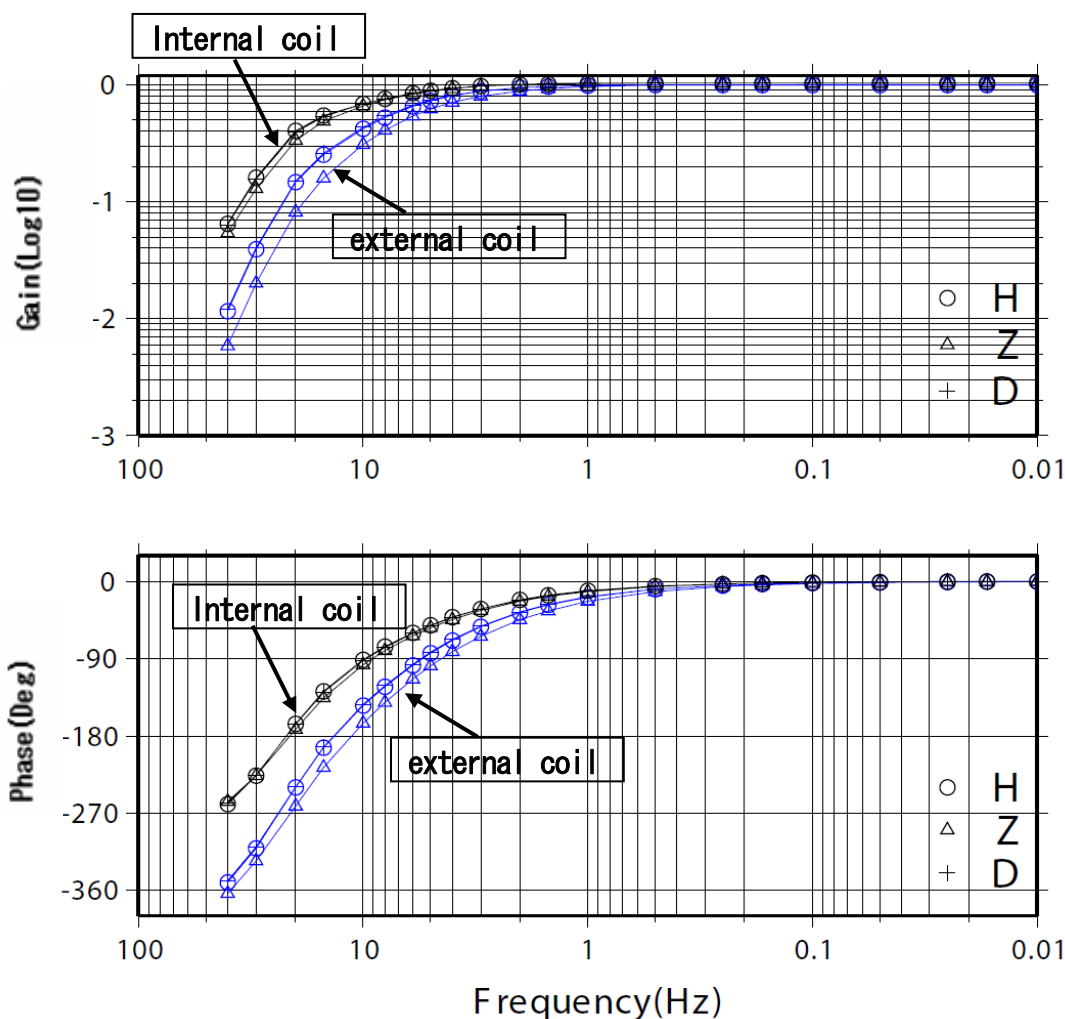


Fig.7 Comparison of frequency characteristics of internal calibration (upper black lines) with external calibration (lower blue lines).

7. まとめ

2009年度末に納入されたHFMの交流感度測定を行ったところ、Z成分の特性がH,D成分とやや異なるという結果が得られたのでその原因について調査した。その結果、センサー台やセンサーカバーに誘導される2次電流が1Hz以上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マウント台については絶縁体の塩ビ台の場合と比較することによりその影響量を調べた。また、アルミ製のセンサーカバーについてもこれを取りはずして影響を調べた。その結果、センサーマウント台やセンサーカバーもある程度周波数特性に影響を与えていることはわかったが、観測されたZ成分の特性をすべて説明することはできなかった。おそらくセンサーから取り外すことが困難なセンサーの台座部分が残りの影響を与えているものと推測される。また、HFMセンサーの内蔵コイルを使用した場合との比較では全成分とも大型コイルによる感度の方が減衰の大きいことがわかり、センサーの台座やセンサーカバーに誘導される2次電流が全成分に影響を与えていることがわかった。

実際の地球磁場の測定ではHFMのセンサーの台座およびセンサーカバーは当然とりつけた状態で

測定される。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る。また、内蔵感度コイルで測定される周波数特性は誘導電流の効果を含まないため大型コイルでの測定とはやや異なった特性を示すことがわかった。内蔵感度コイルを用いれば特別な校正用の装置を用いる必要もなく測定は比較的容易にできるが、HFM の場合では採用すべきではないことが結論できる。

参考文献

- 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.