

大型コイルによる3軸磁力計の感度測定

地磁気観測所 山本哲也

SENSITIVITY MEASUREMENT OF 3-AXIS MAGNETOMETER WITH LARGE COIL SYSTEM

Tetsuya YAMAMOTO

Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency

1. はじめに

地磁気観測所の役割としては、第1に地球電磁気現象の観測をあげることができるが、そのほかにも、これらの観測に用いられる測器の開発や、性能の調査を行うことも、地磁気観測所の欠かすことのできない役割である。その役割の一例として、ここでは、3軸大型コイルを用いた高感度フラックスゲート磁力計の交流感度測定を紹介する。

近年、記録装置の大容量化にともなって、野外での地磁気観測においても1 Hzまたはそれ以上のサンプリング間隔での測定が日常的なものとなりつつある。従来このような観測にはインダクション磁力計が用いられていたが、最近では、設置が容易なことなどから、高感度のフラックスゲート磁力計がしばしば用いられるようになってきている。本来、フラックスゲート磁力計は磁場のDC成分まで測定可能な磁力計であるが、このような磁力計では、出力にハイパスフィルターをかけて長周期成分を除去することで、より高いゲインの測定を可能にしている。それは同時に磁場変化の周期によって感度が変化するということを意味している。測定データの処理のために、従来のフラックスゲート磁力計ならば、DC成分の磁場に対する感度（直流感度）がわかれば充分であったが、このような種類のフラックスゲート磁力計では様々な周期の磁場変化に対する感度（交流感度）を知る必要がある。

交流感度の測定では、インダクション磁力計に適用されていた感度測定の手法を応用できる。ただし、検出器の形状がことなるため、棒状の1軸型のインダクション磁力計の場合はソレノイドコイルを用いて感度測定を行ってきたが、塊状の3軸型の高感度フラックスゲート磁力計では、大型のヘルムホルツコイルなどを用いる必要があるという点が異なっている。

2. 手法

ここで紹介する感度測定には、地磁気観測所の比較校正室に設置されている大型3軸コイル¹⁾²⁾を、感度測定に利用した。比較校正室は、絶対観測のための磁気儀が設置されている

第1表. 大型矩形3軸コイル(比較校正室西台)の概要.

	H	D	Z
辺長(mm)	2902	2802	3001.5
間隔(mm)	1578.5	1524.1	1631
巻数	20(主) 4(副)	20(主) 4(副)	20(主) 4(副)
コイル定数 (nT/mA)	11.222(主)	10.869(主)	11.628(主)
方位角	353° 27' 53"	83° 32' 48"	43° 30'
天底角	90° 00' 11"	90° 02' 12"	0° 01' 47"

建物であるが、磁力計の感度測定、器差測定にも、しばしば利用されている。大型コイルの3軸、すなわちH軸(北向き)、Z軸(下向き)、D軸(東向き)のそれぞれは、1対の正方形コイルによって構成されている。正方形は1辺が約3mの大きさで、コイルどうしの間隔は、約1.6mである(第1表)。このコイルのつくる磁場はコイルの中心近くでおおむね一様になる。特に中心付近の直径30cmほどの領域では、1万分の1よりも高い一様性がえられる。通常使用するフラックスゲート磁力計の検出部であれば、この領域に十分に納まるであろう。コイル定数についても理論値、実測値両面から高い精度で求められている³⁾。コイルの各軸間の角度はHとDが90° 04' 55"、DとZが90° 00' 50"、ZとHが89° 59' 02"⁴⁾である。直交度のずれは最大でも5'程度であり、これはある軸に10.0 nTの磁場を作るとき、他の軸の方向に0.15 nTほどのクロストークを生じるずれである。野外観測に用いる磁力計に要求される精度であれば、このずれに関する補正の必要はないと思われる。この大型コイルによるフラックスゲート磁力計の直流感度測定は、これまでに10年ほどの歴史があり、測定手法もほぼ確立している⁵⁾。それに対し、交流感度測定に利用されるようになったのは比較的最近のことである。

交流感度測定では、様々な周期の磁場を測定する必要がある。それぞれの周期の測定では、正弦波の磁場を最低でも数周期分与えている。そのため、交流感度の測定は、測定する周波数をどのように選択するかにもよるが、測定時間が数時間以上におよぶこともめずらしくない。単純に考えれば、3軸の感度を求めるためには、それぞれの軸について測定が必要であるから、さらに3倍の時間が必要となる。そこで、われわれは測定時間を短縮するために3軸のコイルの回路を直列につなぎ、3軸の磁場を同時に与えて測定を行っている。測定する周期は、サンプリング間隔が1秒のULF帯の電磁場測定装置の場合、4秒から1000秒程度までである。測定時間は約10時間である。測定周波数の切り替え等は、コイルに正弦波の電流を流すファンクションジェネレータを、パーソナルコンピュータで制御することで自動化を図っている。磁場の感度測定と同時に、電場の感度測定を行う場合は、コイルに直列に接続した小抵抗の両端の電圧を電場の入力として用いる。この電圧の変化は、コイルの磁場と同位相であると考えられるため、磁場と電場の位相特性の差も得ることができる。

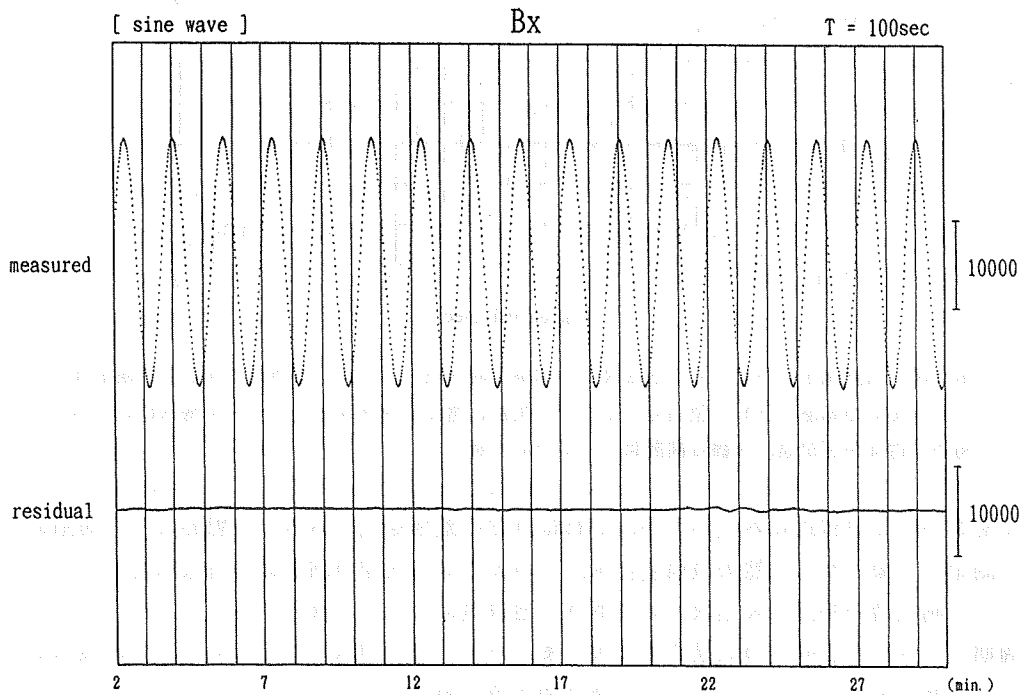
測定データの処理は測定周期ごとに行うが、次のような手順に従っている。測定値を測定周期の1周期ごとデータに区分する。区分したそれぞれについて、正弦波による最小2乗近

似を行い、振幅、位相（または正弦、余弦成分）を求める。測定に用いた磁場の周波数、振幅に変動がなければ、これらは一定の値となることが期待される。結果のうち、測定中の雑音による異常なものをのぞいて平均、標準偏差を求めることで、その測定周期についての振幅、位相と、それにとまらうばらつきを決定する。一方、コイルに流した電流から、測定に用いた磁場の大きさをもとめ、磁力計の感度が計算される。

3. 感度測定の実例

ULF帯電磁場測定装置U36（地震研究所所有のもの、以下U36ERIとする）について行った感度測定の結果についてのべる。U36ERIは、高感度フラックスゲート磁力計を使用し、ハイパスフィルターによって直流成分を取り除いた測定を行う（Hモード）ことができる。サンプリング間隔は、32Hzから4秒までの設定が可能であるが、ここでは1Hzで測定した。

第1図に、測定値の例としてBx（磁場の北向き成分）、周期100秒の測定結果を示した。入力した磁場は約14 nTである。上段に示したBxの測定値には入力の正弦波が明瞭にみとれる。また、下段には、データ処理で決定された振幅、位相の正弦波を測定値からさしひいた残差を示したが、測定値に比較するとかなり平坦であることがわかる。残差の多

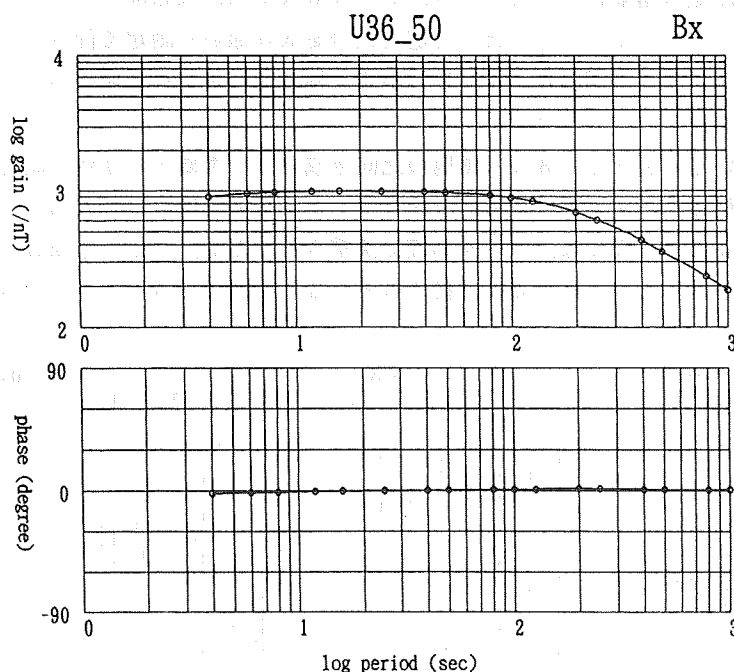


第1図 感度測定の実例。U36ERIの磁場北向き成分（Bx）、周期100秒の場合、測定値（上）と信号成分を取り除いた残差（下）。

第2表. 測定された感度と, その標準偏差.
(U36ERI, 周期100秒の例).

	感度 (/nT または /mV)	標準偏差 (/nT または /mV)
B x	884.4	3.9(0.4%)
B y	896.7	3.4(0.4%)
B z	897.1	3.2(0.4%)
E x	880.9	0.4(0.0%)
E y	878.3	0.4(0.0%)

標準偏差の括弧内の数字は感度に対する比率.



第2図 感度測定の結果. U36ERIの磁場北向き成分(Bx)の周期4秒から周期1000秒までの感度(上)と位相差(下). 位相差は電場東向き成分(Ey)を基準にした値. 図中の白丸が測定値, 実線は補間によって求めた値.

少の変動が22分付近にみられるが, これは自然の磁場変化であろうと思われる. 観測の場合は測定の対象となる自然の磁場変化も, このような高感度の測定の場合は雑音となる. ちなみに, 測定時の柿岡のK指数は4であり, 地磁気には多少の擾乱があった.

周期100秒の各成分の結果を第2表にまとめた. 先に図示したBxについては標準偏差は0.4%程度であり, 求められた感度は約3桁有効であることになる. By, Bz(磁場の東向き成分, 下向き成分)についても, ほぼ同様のことがあてはまる. Ex, Ey(電場の北向き成分, 東向き成分)は, 磁場の感度測定における自然磁場の変化に対応するような

雑音はほとんどないと考えられ、標準偏差も磁場の結果に比べるとかなり小さくなっている。

このような測定を4秒から1000秒までの17の周期について行いU36ERIの感度表を作った。第2図に B_x の結果を示す。位相は E_y を基準とした相対的な位相を用いている。最も感度の高いところで、約 $1000/nT$ であることがわかる。これは、最小測定単位がほぼ $0.001nT (=1pT)$ であることを意味している。この感度表を実際の観測データの処理に利用するときは、スプライン補間(図中の実線)等により使用する周期の感度を計算することになる。

4. 地磁気変化の影響

上述したのは測定が比較的うまくいった場合である。すでに述べたとおり測定中の自然磁場の変化は雑音となる。磁場変化がそれほど顕著でなければ平均操作によって充分実用になれる結果がえられるが、測定中に磁気嵐等大振幅の短周期現象を含む地磁気擾乱が発生すると、測定結果も大いに悪い影響をうける。そのような例を第3図に示す。これはEM109-No.1(以下EM109#1とする)というULF帯電磁場測定器の感度測定を実施したときの例である。図示したのは測定周期256秒の場合である。最上に表示したのが測定値である。測定値に正弦波の成分が含まれていることは一目してわかるが、第1図に示した測定値と比べると波形にかなりの乱れのあることがわかる。前述した手法で求めた正弦波成分を差し引いた残差を上から2番目に図示した。この残差から、かなりの振幅の磁場変化があったことが予想される。振幅にして、測定に用いた磁場の半分ほどの大きさがあったようである。この測定時には磁気嵐が発生しており、柿岡のK指数は7で、かなり大きな地磁気擾乱があったことがわかっている。処理の結果えられた磁場各成分の感度およびその標準偏差を第3表に示す(補正前の項)。 B_x 、 B_y 、 B_z とも $600/nT$ 程度の感度がえられているが、大振幅の地磁気変化の影響でそれぞれの標準偏差は11.0%、3.2%、7.0%とかなり大きい。 B_x の11.0%という標準偏差は求められた感度が1割以上の大きな誤差を含む可能性もかなりあることを意味しており、このような感度を観測値のデータ処理に用いることは問題があるだろう。

この例から、感度測定は地磁気擾乱のない静穏な期間に行うことが望ましいことがわかる。しかしながら、実用に耐えられないような測定値でも、測定中の雑音が自然の地磁気変化によるものであれば、その地磁気変化は地磁気観測所で観測されているわけで、地磁気の観測値を用いた補正を施すことで測定値を有効に活用する可能性が残されている。以下では、この可能性について議論する。

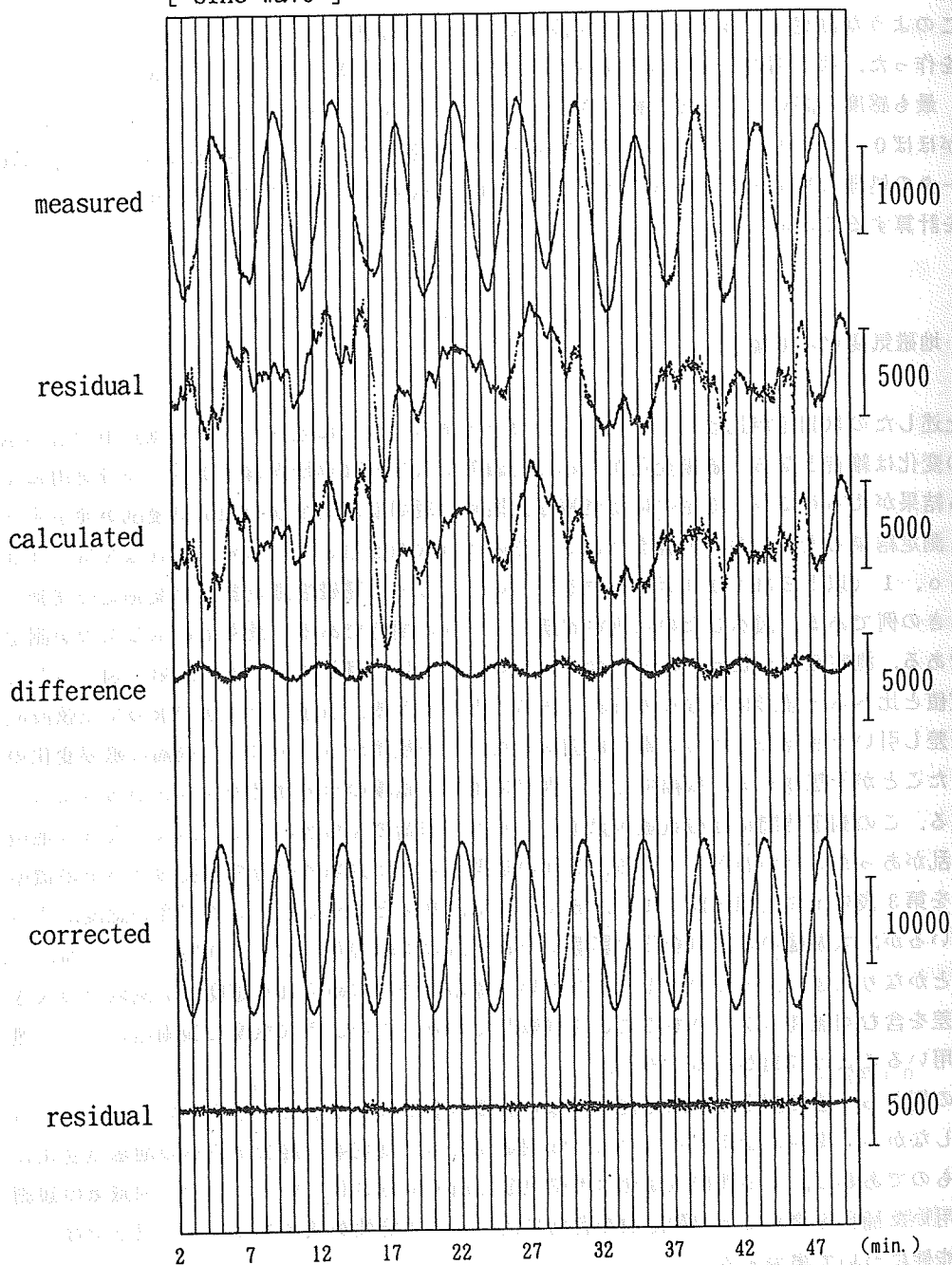
5. 補正の試み

地磁気観測所では、柿岡の地磁気の観測値として $0.1nT$ の分解能でH、D、Z、Fの

[sine wave]

Bx

T = 256sec



第3図 感度測定の場合。EM109#1の磁場北向き成分(Bx)，周期256秒の場合。
 上から、測定値、測定値から信号成分を取り除いた残差、柿岡の地磁気変化から近似式で求
 めた求めた残差の計算値、残差と計算値の差、測定値を残差の計算値で補正した補正值、補
 正值から信号成分を取り除いた残差。

第3表. 測定された感度と、その標準偏差。(EM109#1,
周期256秒についての地磁気擾乱補正前後の例)

	補正前		補正後	
	感度 (/nT)	標準偏差 (/nT)	感度 (/nT)	標準偏差 (/nT)
Bx	643.4	70.9(11.0%)	615.7	0.8(0.1%)
By	595.7	19.2(3.2%)	584.5	1.1(0.2%)
Bz	615.8	42.8(7.0%)	618.3	1.3(0.2%)

標準偏差の括弧内の数字は 感度 に対する比率.

1秒値がえられている。この観測値は0.01 n Tの単位で編集されたものが一般に提供されており、ここで述べる補正の試みにもこれを用いた。補正を行うためには柿岡の毎秒の観測値から、感度測定を行ったEM109#1によって測定される測定値を求める必要がある。測定値を近似的に求めるために次のような近似式を用いた。

$$y_k = \alpha y_{k-1} + \beta (x_k - x_{k-1})$$

ここで、

x_k : 第k秒における柿岡の観測値.

y_k : 第k秒におけるEM109#1の測定値の推定値.

α, β : 近似式の係数.

この式では、地磁気変化がないとき($x_k - x_{k-1} = 0$)には、測定値yが係数 α で減衰し、地磁気変化のあるときには、時間変化の β 倍だけ測定値yが変化するハイパスフィルタの特性が表わされている。係数 α, β は、実際の測定値がよく近似されるように決める。いくつかの係数について計算をしてみたところ、

$$\alpha = 0.97$$

$$\beta = 0.95$$

の場合、比較的よい結果がえられることがわかった。この係数を用いて柿岡の観測値からEM109#1の近似値を計算した。計算値を第3図の上から3番目に示した。残差と計算値はよく類似していることがわかる。残差と計算値の差が、第3図の上から4番目に示されている。差には、小振幅ながら正弦波のような波形がみられる。これは、測定値から測定周波数の正弦波の成分を求めるとき、地磁気変化が大きかったために誤差の大きい推定値しかえられず、誤差による正弦波成分が残差に含まれているためである。逆にいえば差にみられる正弦波の分だけ推定値は補正が必要であるということになる。地磁気変化の短周期の成分の振幅が大きい期間(たとえば45分前後)は、差でもある程度ばらつきが大きくなっている。

さて、ここでは第3図の上から3番目に示した計算値をもちいて、EM109#1の測定値を補正するという手法をとることとする。測定値から計算値を差し引くことでえられる補正された値を、第3図の下から2番目に示す。地磁気変化による雑音はほとんど取り除かれているため、測定周波数のきれいな正弦波がみられる。これについて正弦波の振幅から感度を求めた結果を、第3表(補正後)に示す。補正前の結果に比べると、Bxなどでは5%あまり求められた感度が異なっている。また、補正後の標準偏差は0.1-0.2%で、補正前の標準偏差の10分の1から100分の1となっており、著しい地磁気擾乱の期間に実施したことを考えあわせれば非常によい結果がえられたといえる。この標準偏差の値は、大きな擾乱のなかった期間に実施した感度測定の結果(第2表)と比較しても良好なものである。補正された値から正弦波成分を取り除いた残差を、第3図の最下下に示した。補正前の場合のような正弦波成分はみられず、求められた感度が妥当なものであることがうかがえる。残差のばらつきが大きくなる期間が数カ所にみられるが、いずれも地磁気変化の短周期成分(周期20秒以下)が大きかった期間に対応しているようにみえる。これは、補正に用いた近似式が長周期(周期60秒以上)についてはEM109#1の特性をよく表わしていたのに対し、短周期では近似が不十分なためであろう。近似式の係数を求める際には、相対的に地磁気変化の振幅が大きい長周期側の近似が重視されるため、簡単な近似式を用いる以上、短周期側の近似の精度が低下するのはいたしかたがない。

6. むすび

ここでは、大型3軸コイルを用いた高感度フラックスゲート磁力計の交流感度測定について紹介した。0.001nTの地磁気観測を行う磁力計の場合、感度測定中の自然の地磁気変化に大きな擾乱がないときには、おおむね3桁程度の精度で感度が求められた。磁気嵐などで地磁気変化が著しい期間に行った感度測定では、精度が大幅に低下した。このような場合でも地磁気観測値を用いた補正を行うことで、静穏時と同等の精度の感度が求められた。

ここで行った補正の試みは、磁力計の特性をよく表わす簡単な近似式がえられたために成功したが、感度測定の対象となる磁力計すべてについて、このような近似が行えるとは限らない。より本質的な補正は、測定の際にコイルでつくる磁場に、外部の自然の地磁気変化を打ち消すような磁場を重ね合わせることである。

ここで用いた大型コイルには、第1表にあるように、同一のコイル枠に主、副2種類のコイルが巻いてある。これまで行ってきた感度測定では主コイルのみを用いてきたが、副コイルを用いれば外部の自然の磁場変化を打ち消すことも比較的容易であろうと思われる。また、この大型コイルは外部磁場の変化を打ち消すことで、微少な磁場測定や精密な磁場測定をすることを目的に設計されており⁶⁾、そのような利用法が、本来の利用法でもある。地磁気観測所に与えられた、測器の性能の評価という役割を果たす意味でも、大型3軸コイルのこのような機能を十二分に活用していきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 佐野幸三, 河村謙, 大島汎海, 標準磁気儀 (KASMMER) について, 地磁気観測所技術報告, 12, No. 2, 38-70, 1972.
- 2) K. Yanagihara, M. Kawamura, Y. Sano and T. Kuboki, New standard magnetic observation system of Kakioka (KASMMER), Geophys. Mag., 36, 217-281, 1973.
- 3) 小池捷春, 中島新三郎, 清水幸弘, フラックスゲート磁力計の性能—感度及びその校正精度—, 地磁気観測所要報, 24, 1-13, 1990.
- 4) 上井哲也, 福島秀樹, 清水幸弘, 比較校正室西台大型ヘルムホルツコイルの方向調査, 地磁気観測所技術報告, 29, No. 3, 4, 24-29, 1990.
- 5) 菅原政志, 外谷健, 峯野秀美, 立川徹, 福島秀樹, 橋本雅彦, 上井哲也, 加藤誼司, フラックスゲート磁力計の常数測定について, 地磁気観測所技術報告, 31, No. 1, 2, 11-31, 1991.
- 6) 柳原一夫, 地磁気観測の精度—KASMMER以前の分析とKASMMERの目標—, 地磁気観測所技術報告, 12, No. 2, 1-17, 1972.

