

フラックスゲート磁力計の性能

—— 感度及びその較正精度 ——

小池捷春・中島新三郎・清水幸弘

(1990年10月11日受付, 1990年10月30日改訂)

概 要

地磁気観測所で地磁気変化観測用測器として使用している, 島津製作所製 MB-160及びMB-162型フラックスゲート磁力計の性能及び, 磁力計に内蔵されている感度測定器を較正するための方法と, その較正装置についての調査を行った結果, 以下のことがわかった.

- 1)地磁気観測所(柿岡)の大型3軸ヘルムホルツコイルを主とした較正装置を, フラックスゲート磁力計内蔵感度測定器の較正装置として用いた場合, 約0.1%の精度範囲で較正できる.
- 2)フラックスゲート磁力計で地磁気変化分を0.1nTの分解能で測定する場合, その測定範囲は±600nTまでであり, その間の感度の直線性は良い.
- 3)フラックスゲート磁力計に内蔵されている感度測定器の出力信号は, 安定しているので柿岡での感度較正を行っておけば, 観測中の感度較正は内蔵感度測定器でも可能である.

1. はじめに

地磁気変化の観測装置として, 古くは吊磁石式変化計がその主流測器であった. 吊磁石式変化計による観測値は, アナログ記録が主であり, 地磁気変化の分解能は読取り値の精度に依存し, 高々0.5nT程度であった. ところが, データー処理方式の進歩により, 読取りという人手を介する必要がある吊磁石式変化計による測定は敬遠され, アナログ出力をデジタル出力に変換する機構を持つフラックスゲート磁力計の採用が一般的になりつつある.

デジタル出力値をもつ地磁気変化観測装置は, フラックスゲート磁力計の他にも光ポンピング磁力計, オーバーハウザー磁力計, プロトン磁力計等があるが, 価格の面からはフラックスゲート磁力計が最も有利である. 地磁気観測所(柿岡)においては標準観測所という立場から性能面を重視して光ポンピング磁力計を採用しているが, 女満別・鹿屋両出張所に於いては経済性を重視してフラックスゲート磁力計を採用している.

フラックスゲート磁力計の性能は最近著しく向上し, 他のデジタル出力型磁力計の性能と同程度になってきた. フラックスゲート磁力計が絶対値を確保できない成分観測用磁力計であるのに対して, 他の磁力計は絶対値を確保した全磁力測定用の磁力計であるということが, 両者の大きな相違点である. 成分観測と言う観点からみれば, 他の磁力計も補償

磁場（成分観測をするため全磁力をベクトルの的に分離し一方を消去する）の安定性という問題があり、長期的精度としては大差ない。すべての磁力計値は絶対観測値によって較正されなければならないからである。

フラックスゲート磁力計が、他の磁力計に比べていま一つ信頼感がないのは、測定原理に起因する。つまり、フラックスゲート磁力計が磁場に比例した電圧を取り出すのに対して、他の磁力計は周波数を取り出し計測することによる。これらの信号は微小な大きさであるため、最終計測器（周波数カウンター、電圧計）に投入する前に種々の処理（ノイズ除去、周波数通倍、電圧増幅等）が必要であり、このうちフラックスゲート磁力計においては電圧の増幅率がそのまま測定値に影響を与える（他の磁力計は周波数を整数通倍するので測定値誤差にならない）。言い替えれば、フラックスゲート磁力計においては、電圧増幅率の設定によっては適当な測定値を作ることにも可能である。もちろん、正しい測定値にするために、メーカーは較正しながら磁力計を作るが、微小な測定値を問題にする場合は、この較正の精度に疑問が残る。

この理由により、フラックスゲート磁力計値の変動は、地球磁場の変動を忠実に表現していると言い切ることはできない。この忠実さを感度と言う言葉で表し、忠実でない測定値を忠実な測定値にするための換算常数を感度較正值と呼ぶことにする。

感度較正值は、次式で定義する。

$$S = H_0 \div F_0$$

$$H = F_0 \times S$$

但し、 S は感度較正值、 H_0 は基準磁場信号の変化分、 F_0 は磁力計による測定値の変化分、 H は地球磁場の変化分である。

ここでは、感度及びその変動の実状と、感度較正值の精度等について報告する。

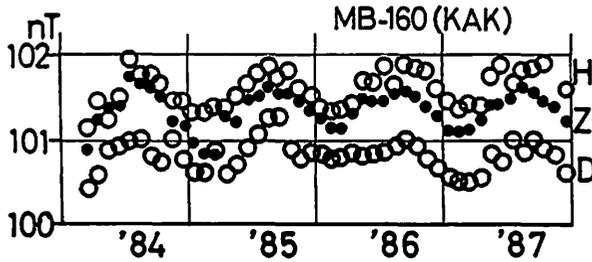
2. フラックスゲート磁力計感度の現状

一言でフラックスゲート磁力計といっても、メーカーによりかなりの差があり、同一に論じることはできない。ここでは、島津製作所によって作られている MB-160型および MB-162型磁力計について述べる。

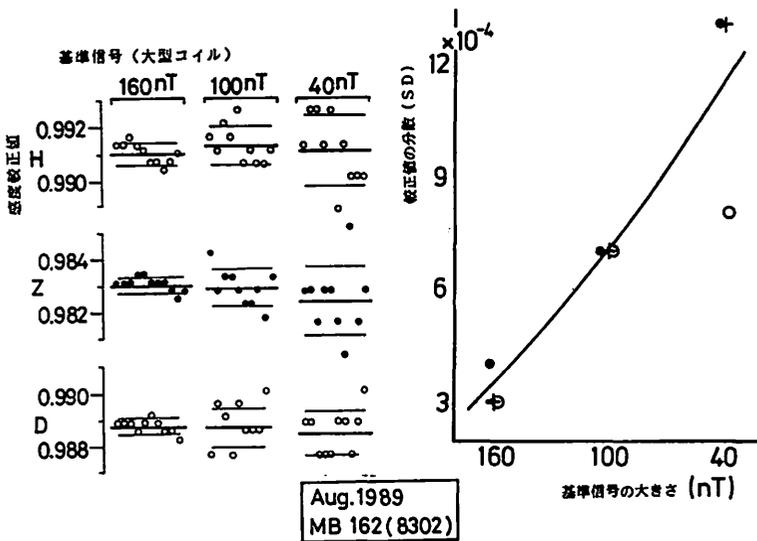
上記の器種では、基準磁場信号が内蔵され、測定値の確認を行えるようになっている。基準信号の大きさは20nTから100nTまで20nT刻みになっており、スイッチの操作により測定中の磁場に基準信号を重畳させることができる。つまり、基準磁場を加えた瞬間あるいは取り除いた瞬間に、測定値は基準磁場の大きさ分の変化をする訳である（厳密には、自然磁場の変動分も加わる）。メーカーによれば、基準信号も正しい値になるように較正されており、この操作により磁力計の感度較正が可能になることとなる。

ところが、この操作によって求められる感度較正值は1.000（測定器系、基準信号の双方とも正しく較正されている場合に期待される値）にならないことが多い。地磁気観測所で使用されている磁力計では、±1%程度の違いが現れることも希ではない。しかも、センサー温度に相関するとみられる年周変化があり、その格差が0.5%に達すると言う報告もある（第1図）。較正されている筈の基準信号、測定系の少なくともどちらか一方、場合によってはその両方に疑問が生じる。

この方法によって求められる感度較正值の精度は、繰り返し行う測定値の分散から、0.1~0.5%程度と推定される（第2図）。繰り返し測定回数（精度の面では測定回数が



第1図 フラックスゲート磁力計の感度変化
(内蔵基準信号100nTに対する出力変化)
-技術報告第85号から転写-



第2図 感度校正値の信頼性
(繰返し測定値の分散と基準信号の大きさ)

多いほど有利), 重畳する自然磁場変化の大きさ(静穏磁場変動の時に行うのが有利), 加える基準信号の大きさ(大きい基準信号の方が有利)等によって, 求められる精度は異なる. 測定回数を10~20回程度に増やし, 加える基準信号を100nT(内蔵基準信号では最大)にすることによって, おおよそ0.1%程度の精度が期待でき, 定常観測に於いてはその程度の扱いをしていることが多い.

この測定精度に照らして, 先の較正值の違い1%を考えると, 単に測定精度の誤差として見過ごしにすることはできない. 一方, 1%の違いが観測値に与える影響も少なくない. 例えば, D成分の日変化較差は, 100nT程度であるから, 1nT程度の測定誤差が含まれることになる. フラックスゲート磁力計のもつ他の要因による誤差(測定値の分解能, 温度やレベル変化による基線値の安定性, センサー3軸の非直交による相互干渉, D成分の場合は大きさを角度に換算する誤差, 等)は, これよりかなり小さい. この理由から, フラックスゲート磁力計の感度較正值は, 測定器に内蔵されている以外の基準信号を使って, 正しく求め直す必要に迫られる.

フラックスゲート磁力計の測定範囲はかなり広くすることも可能であり、地球磁場の大きさをそのまま計測することも可能である。この場合、現状で考えられる測定器の有効計測桁数に限りがあるため、本来の目的である地磁気変化を測定するための分解能が不足する。一般には、補償磁場を加えることによって直流分を消去し（この補償磁場の安定性がフラックスゲート磁力計の安定性となるが、最近かなり改善され、よい結果が得られている）、変化分のみを測定する。測定範囲は、器械パネル面のダイヤルの設定により決められ、通常 $\pm 500\text{nT}$ にすることが多い。この測定範囲では、磁場変化を 0.1nT の分解能で計測でき、普通の地磁気嵐程度の変化分を十分にカバーできる。

$\pm 500\text{nT}$ の範囲内での感度は一様であるとして、一つの感度較正值を使用することが多い。少なくとも $\pm 100\text{nT}$ の範囲内での一様性は、過去何度か内蔵基準信号を使って実験、確認された結果が報告されている。今回、 $\pm 100\text{nT}$ の範囲を広げての一様性の確認を行った。それは次の2つの方法による。

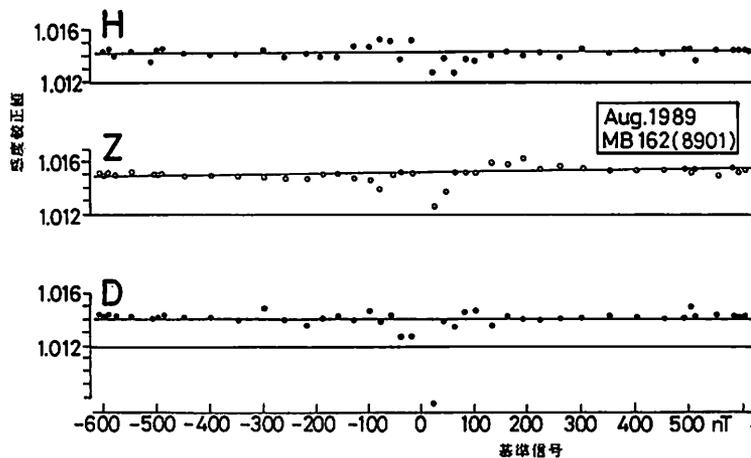
(1)設定位置を中心に $\pm 100\text{nT}$ の範囲の感度を内蔵基準信号によって求め、前述した補償磁場によって、設定位置を順次ずらした値を求めながら、全体的に接続する方法。

(2)通常測定位置は、磁力計の出力がゼロ付近になるように設定しておき、外部の基準信号（後述する大型ヘルムホルツコイル等による）によって測定範囲内の感度を測定する方法。

この実験結果は、第3図に示すように、概ね直線性があることが確認された。第3図では、特定の磁力計(MB-162 No.8901)での(2)の方法による実験結果のみを示しているが、(1)の方法による結果や別の磁力計(MB-162 No.8302)についても概ね同様であった。少なくとも、感度較正值を 0.1% の精度で求めるについては、広範囲での一様性があり、同一の感度較正值で代表できることを確認した。

この第3図では、デジタル出力値の感度較正值について示してあるが、アナログ出力についても同様であることを確認した。

第3図は、中心部分（加えた基準信号が 100nT 未満の部分）での分散が大きく、求められる感度較正值の精度が悪いことを示している。これは基準信号が小さいため、これに対する測定値の相対的分解能が十分でないことによる。小さい基準信号を利用して精密な感

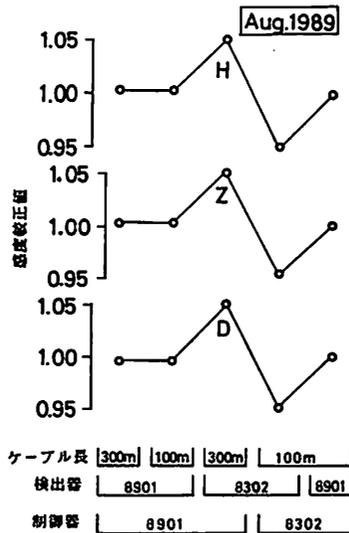


第3図 フラックスゲート磁力計感度の直線性

度較正值を得ようとする場合は、繰り返し測定が重要であることを意味している（過去の検討でも10~20回の繰り返しが必要とされている）。

更に、±500nTの範囲を超えた部分についても感度較正值が示され、範囲内からの延長と見なすことができる。つまり、この器種の磁力計では、±500nTの測定範囲に設定した場合でも、実は±600nTまでの範囲の測定が可能であることを意味している。

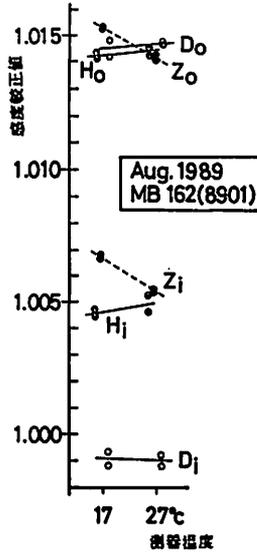
フラックスゲート磁力計は、センサー部・ケーブル・計測部の3つに分割される。この3つを1セットとして使用するのが普通であるが、互換性のある測器間で部分交換をしても測定値は得られる。この場合は出力される測定値は数%、大きい場合では10%程度の誤差を含むこともある。これは先に述べたように、フラックスゲート磁力計の測定値は較正を行った後、正しい測定値が供給されるものであり、メーカーによる較正は、センサー部に含まれるコイル常数と計測部に含まれる感度較正用の供給電流やセンサー出力電圧の増幅率等を、一つのセットとして較正しているからである。従って、他のセットの部分を組み合わせて使用する場合は、新たなセットとしての較正が必要であり、これを怠ると測定値は信頼できない。但し、ケーブルのみを交換する場合はこの限りでない。100mと300mのケーブルを入れ替えて実験したが、感度較正值に有意な差は見いだせなかった。これは、ケーブルの線抵抗等の変化が計測器側の抵抗に比べて無視できる程小さいためと推定される（第4図）。



第4図 磁力計の互換性と感度較正值の変化

長時間の観測を実施する上で、フラックスゲート磁力計の感度が変化するのかが、1つの問題となる。実験結果の1例を第5図に示す。この実験結果によると、求められた感度較正值は、検出器および計測器の温度が10度変化したことにより、最大0.1%の変化を示している（Z成分）。繰り返し測定回数を多くしたことによって得られた測定精度（0.05%程度）を上回る有意な変化である。D成分では殆ど変化が見られない。

第1図に示したMB-160の例も含めて考えると、求められた感度較正值の変動はある、として対処する方が無難である。そして、第1図の変化がセンサー温度に相関することや、



第5図 感度較正值の温度依存性

第5図の変化が基準信号の種類（直線の添え字*i*は内蔵基準信号を使い，同Oは外部基準信号を使っている）によらず同量であることから推定して，内蔵基準信号の変化はない，と仮定できる。

この仮定は，磁力計の感度較正值を求めるに当たって，ある時点で，ある方法で較正した内蔵基準信号を，後々まで基準として使用できることを示唆するものである。

2つの実験例（第1図，第5図）から推測すると，感度変化はセンサー温度の変化に関係し，おおよそ0.05%/°C未満と考えられる。従って，感度に関する測定値誤差を0.1%程度に抑えるためには，センサーの温度変化を2°C程度に抑え，これを超える場合は，別の感度較正值を与えることが望ましい。

3. 感度較正の方法とその精度

前節では，フラックスゲート磁力計感度の現状について述べた。そして，フラックスゲート磁力計によって磁場変化の精密測定をする場合は，なんらかの方法での感度較正が必要なることを示唆した。この節では，感度較正の方法とその精度のついて述べる。

まず，一般に使用されているのが，フラックスゲート磁力計に内蔵されている較正信号を基準とする方法である。この方法は最も簡単で，計測部に配置されている感度較正用押しボタンスイッチによって基準信号を加え，その時のフラックスゲート磁力計の測定値の変化を見ればよい。通常100nT程度の基準信号が内蔵されており，磁力計は0.1nTまでの分解能があるから，0.1%精度の較正が可能である。磁力計の測定値には，基準信号の他，磁場の自然変化分も重畳し，これが大きいときは求められる精度も落ちるが，静穏時に測定を行い，繰り返し測定による平均値を使用することによって，前記の精度は確保できる。この方法で，問題なのは内蔵基準信号の確かさである。つまり，100nTの基準信号と言っているながら，100.0nTである保証はない。前節で述べたように，±1%程度は怪しいと考えねばならない。

次に考えられるのが，地磁気変化観測の基準器との平行観測による方法である。この方

法による感度較正用の基準信号は、基準器によって値付けされた地球磁場の変化である。この方法は、長期間の測定によって感度の変化まで検査・検定できる利点はあるが、較正精度の面で必ずしも満足できない。その理由として、基準器の置かれている場所と検定器の置かれている場所の磁場変動が完全に一致すること、速い変化を対象にする場合は測定時間が完全に一致していること、ゆっくりした変動を対象にする場合は測定値に長時間の安定性が要求されること等の条件が満足されなければならない等が挙げられる。更に、測定される磁場変動の大きさは、一般には小さく、0.1%の較正に必要な磁場変動100nTは、常時出現するものではない。変化量が小さいために起きる相対的分解能の不足を補う方法として、同様現象（例えば、数10nTの日変化振幅）の重ね合わせを行い、見かけ上の分解能を0.1nTより高くする方法もあるが、必ずしも十分でない。

この方法の最大の欠点は、基準器による基準値が平行して供給されていることが条件であり、較正のために長時間の観測を要することである。

もう一つは、内蔵の較正用基準信号とは別に、人工磁場を作る装置を用意する方法である。地磁気観測所にあつては、このために大型のヘルムホルツコイルが用意されている。このコイルには、電源が常備されている。感度較正值を正しく求めるための人工磁場の精度は、コイル常数と電流の精度によって決定される。コイル常数、電流精度等は既知の値であるが、今回、これらの再確認を行い、人工磁場精度の再評価を実施したので報告に加える。

大型ヘルムホルツコイルを利用するこの方法によって磁力計の感度較正を行う場合は、磁力計による磁場測定方向（センサーの方向）とヘルムホルツコイルによって作る磁場方向を一致させる必要がある。一致させる精度は、高いほど良いことは勿論であるが、必要精度を超えれば無駄な手数が増えるだけである。ヘルムホルツコイルの作る磁場（A）の方向と、測定磁場方向（磁力計のセンサー方向）が θ° ずれていたとき、センサー方向に作られる磁場の大きさ（B）との関係は

$$B=A \times \cos \theta$$

で示される。

B/A が感度較正の精度に直接関与する。分散による感度較正の精度は、0.1%が限度であるから、 θ は 2° 程度で十分であるが、誤差要因はできるだけ小さい方が望ましいので、 0.2° 程度まで合わせて置くことを勧める。方向が一致したかどうかの確認は、ヘルムホルツコイルの電流をON、OFFして、磁力計によって測定される直交方向（Hを較正する場合は、ZまたはD）の磁場変動の大きさを確認すれば良い。 θ° のずれがある時、ヘルムホルツコイルによって作られる磁場の大きさ（A）と直交方向の方向の磁場の大きさ（C）との関係は

$$C=A \times \cos \theta$$

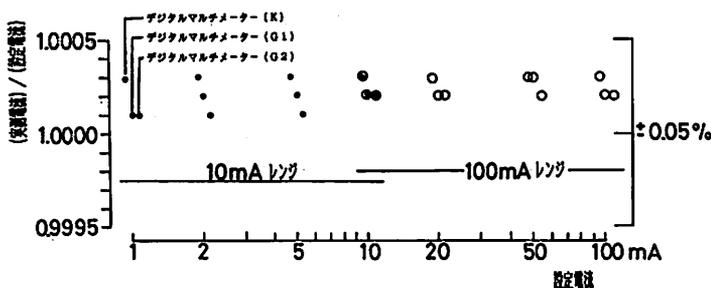
で示される。 θ を 0.2° 以内に設定するためには、Aを500nTとしたとき、Cを1.5nT以内にすれば十分である。 0.2° と言う値は、かなりの余裕をもった数値であり、この10倍の15nTでも大丈夫である。この確認方法は、磁力計センサーの直交性が正しいことを前提にしているが、過去の実験結果では数分（ 0.1° ）程度の精度で十分に満足されている（詳しくは、上井らの報告を参照されたい）。セットが終了したら、ヘルムホルツコイルの電流をON、OFFして磁力計の測定値の変化を見れば良い。ヘルムホルツコイルの電流は前述したように、大きい方が相対的な分解能を高められる利点がある。磁力計の測定範囲は、 ± 500 nTに設定することが多いから、 ± 50 nT程度から ± 500 nTまで順次人工磁場を大き

くして行き、磁力計の測定値を見ながら、感度の一様性も確認するのが良からう。当然ながら、人工磁場が小さい時は、相対的な分解能が低いので、繰り返し測定によって較正精度を高める必要がある。

ここで、地磁気観測所が持っている標準磁場作成装置の基準電流精度、コイル常数精度について報告しよう。

基準電流は、最近までは横河製作所製の安定化電源（TYPE2852）を使用していたが、電流不安定の兆候が見られたため、現在では同製作所製の安定化電源（TYPE2561）を使用している。両電源とも仕様上は $\pm 0.03\%$ の精度を確保できるが、これには定期的な検定・較正が条件になっている。しかし、使用条件や経費の絡みもあって検定有効期限は、既に経過している。

基準電流の検定・較正は、メーカーに依頼し、きちんとした検定証を取り寄せるのが望ましい方法であるが、今回は、手持ちの測器によって必要測定範囲のみの自主検定を試みた。使用した測器は、デジタルマルチメーター（アドバンテスト社、TR6851）3台である。3台のマルチメーターによる測定値の相互差は、最大較差で 0.02% であり、全測定値の平均は $\pm 0.01\%$ の精度で正しいと判断される。安定化電源（TYPE2561）の出力は、設定値より 0.02% 大きく出力されると言う結果を得た。しかし、電流を電圧に置き換えるために使用したダミー抵抗値の測定確度が $\pm 0.03\%$ であることを考慮すると、誤差範囲である。つまり、電源のダイヤルにより設定された電流値は、 $\pm 0.03\%$ の範囲で一致していると判断できる。これは今回の測定範囲である $1 \sim 100\text{mA}$ で一様であり、測定レンジによる違いも認められない（第6図）。少なくとも感度測定値の較正精度 0.1% を論ずるにおいては、電流の設定値は十分に信頼できる。



第6図 基準磁場用の電流精度(Type 2561)

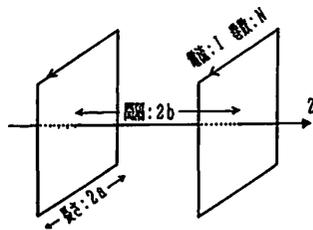
安定化電源（TYPE2852）は検定後約10年が経過しており、この出力値は残念ながら信頼できなかつた。 $1 \sim 100\text{mA}$ の間での分散も大きいし（最大較差 $\pm 1\%$ ）、設定レンジ間の違いも大きい。更に、前述のマルチメーターによる測定値間の較差も大きく、出力電流が不安定であることをうかがわせる。つい最近まで、この電源を信頼して使用し、感度の較正を行っていたことを考えると非常に残念である。

現在使用されているヘルムホルツコイルのコイル常数は、第1表（過去の採用値）に示す値であり、コイル枠の寸法やコイルの巻数から第7図の計算式によって求められらものである。

計算式から容易に推察できるように、求められたコイル常数精度は、コイル長及びその間隔の採寸精度に依存する。試験成績書に記入された採寸のばらつき具合から推定する

第1表 大型ヘルムホルツコイルのコイル常数

	南北用コイル (nT/mA)	東西用コイル (nT/mA)	鉛直用コイル (nT/mA)
過去の採用値	11.232	11.633	10.866
同上精度	0.010	0.010	0.010
今回の測定値	11.222	11.628	10.869
同上精度	0.001	0.004	0.002
差(過-今)	+0.010	+0.005	-0.003



$$C = (1.8 \times a^2 \times N) / ((a^2 + b^2) \times \sqrt{2a^2 + b^2})$$

C: コイル常数 [nT/mA]
 a: 螺旋コイルの一边の長さ [m]
 b: 一列の螺旋コイルの距離 [m]
 N: コイルの巻数

$$B_z = I \times C$$

B_z: z方向に与えられる磁場の大きさ [nT]
 I: コイルに流す電流 [mA]
 C: コイル常数 [nT/mA]

第7図 コイル常数の求め方

と、常数精度は0.1%が限度と思われ、0.2%程度と考える方が無難かも知れない。

今回は、コイルの採寸精度に左右されない、全く独立な方法によるコイル常数の決定を試みた。その方法とは、ヘルムホルツコイルと電源系によって作られる標準磁場の変化を、コイル中心にセットした磁力計で確認する方法である。

磁場変化の確認用磁力計としては、三菱電機の光ポンピング磁力計 (MQM-100) を使用した。光ポンピング磁力計は、変化分を測定するための、いわゆる感度に起因する誤差を含まない(前述)。更に、この磁力計は現用の光ポンピング磁力計(日本電気製、カスマーシステムの一部)との比較観測によって、測定値が正しいことを確認済みである。

光ポンピング磁力計は、磁場の大きさ(全磁力)のみを測定するものであり、ヘルムホルツコイルによって作られる特定方向の磁場変化のみの測定はできない。ヘルムホルツコイルによって作られる水平または鉛直方向の磁場は、計算によって(伏角の大きさは観測時点での値を使用した)全磁力方向に換算し、実測値と比較した。この場合、ヘルムホル

ツコイルの方向性が換算誤差を引き起こす原因になるが、水平・鉛直の各コイルとも 2° 以内の傾きであれば問題ない。後日行われた上井らによる実験結果でも、傾きの量は 10° 程度未満であり、全く問題にならない。求められたコイル常数は、第1表（今回の測定値）のようになる。

東西方向水平磁場作成用コイルについては、この方法でコイル常数を求めることはできない。東西方向に作った磁場を全磁力方向に換算するに当たっては、大きな誤差を含み易く、求められる常数精度が不足するからである。そのため、この場合には、フラックスゲート磁力計を使用してヘルムホルツコイルによる磁場変化分を測定した。フラックスゲート磁力計の感度は、南北方向水平磁場作成用コイルによって較正した。求められたコイル常数は、第1表（今回の測定値）のようになる。

過去採用値と今回の実測値の差は、 0.01 (0.1%) から -0.003 (0.03%) であり、過去採用値の精度から見れば、必ずしも有意な差ではない。しかし、今回の測定精度は 0.05% を満足するものであり、これに照らせば過去採用値は変更すべきものと判断される。基準電流の検定値に一抹の不安は残るが（type2561安定化電源は、その後のメーカーによる検定で、 0.01% 確保している）、今後今回決定のコイル常数を使用することを、筆者らは望む。

いずれにしても、フラックスゲート磁力計の感度較正を、 0.1% の精度で実施しようとするとき（一般に行われる感度較正值の測定精度は、 0.1% である）、ヘルムホルツコイルと基準電流による人工磁場は、標準値として十分にこれに対応できる。

感度較正值を求める手段として、基準信号別に分類すると、3つの方法があることを前述した。この3つについて、長所短所を整理すると第2表のようになる。

第2表 感度較正の方法による長所短所

基準値	長所	短所
大型ヘルムホルツコイル	基準値の信頼性が高い	変動経過を監視できない（セット後の測定不能）
内部較正信号	変動監視が容易	基準値の信頼性が低い 基準信号の変動監視が不能（信頼性が低い）
地磁気変化	変動監視が可能	平行観測の形態が必要 （信頼性の高い測器が要） データ処理に難 （多量のデータが要）

フラックスゲート磁力計を長期にわたって使用し、精度のよい測定値を得ようとするとき、感度較正に関して次の方法を勧めたい。(1)使用前に、大型ヘルムホルツコイルを基準にして、磁力計内蔵基準信号を較正する。

$$\alpha = S_0 / S_1$$

α : 内蔵基準信号の較正係数

S_0 : 大型コイルを基準として測定した、磁力計の感度較正值

S_1 : 内蔵基準信号を基準として測定した、磁力計の感度較正值

(2)使用中、定期的に内蔵基準信号による感度較正值を求め、採用する感度較正值を求めて使用する。

$$S = \alpha \times S_1$$

S： 採用される感度較正值

4. フラックスゲート磁力計の精度

フラックスゲート磁力計の測定精度は、その感度に起因するものが大部分であることを先に述べた。前節に述べた方法で較正し、測定値に対して補正を施した値を使用すれば、フラックスゲート磁力計値の精度は向上する。感度は、0.1%精度で較正できるから、測定値もそれだけの精度で得ることができる。つまり、100nT程度の変化（日周変化の大きさがこれに相当する）に関して、その0.1%である0.1nTの分解能を維持することができ、現在第一級である光ポンピング磁力計に匹敵する。しかし、100nTを超えるような変化（地磁気嵐のDstがこれに相当し、大きい場合は1000nT近くにもなる）に対しては、1nT程度の誤差を含む可能性も否定できず、光ポンピング磁力計に遅れを取る結果となる。

もう一つ心配な点は、感度較正值の安定性の問題である。確かに、フラックスゲート磁力計の置かれる特定の条件下（感度較正を実施する条件下）では、0.1%以上の精度で較正されるが、ある時間が経過した時点での較正值については、判らない。内蔵基準信号を利用した較正值が年周変化をすることは前にも述べた。これが、内蔵基準信号の変化でなく、感度（磁場変動の出力値）の変化であってくれば、方法はある。つまり、大型ヘルムホルツコイルによって内蔵基準信号を較正しておき（設定値100nTの真の値を決めておく）、計測中は内蔵信号を基準にして較正值を得ると言う筆者等が提唱する方法である。過去に得られた較正值の変化からは、基準信号の変化ではなく、感度の変化であるらしいと言う推定がなされる。その根拠は、次の理由による。

(1)内蔵信号を基準とした感度の変化が、センサーの温度変化と相関し、計測部（内蔵信号を形成する基準電源部は、この部分にある）に起因するとは考えにくい。

(2)基準電流の変化であれば、 V/I 変換回路は、背景磁場消去用のそれと共用のものであり、基線値の変動の中にも、感度変動のそれと同率の変化があるはずであるが、それは認められない。

(3)光ポンピング磁力計との比較観測によって、求められたフラックスゲート磁力計の感度も変動しており（精度不十分のため詳細不明）、内蔵信号の変動でない可能性が高い。

(4)センサーコイルのコイル常数の変化では説明できない。この磁力計ではキャリブレーション用コイルと背景磁場消去用コイルは1つのものを共用しているが、感度と基線値の変動は全く異なる変化をしているからである。感度の変化の原因については、今のところ判らない。内蔵基準信号が安定していると言う仮定が正しいかどうかについては、フラックスゲート磁力計値と光ポンピング磁力計値の比較によって、筆者の1人中島が現在調査中である。

5. おわりに

フラックスゲート磁力計の性能が向上してきた現在でも、感度に関連する事項については、完全な解決はみられず、光ポンピング磁力計に追いつくことができないのが実状である。この報告では、フラックスゲート磁力計（島津製作所MB-160およびMB-162）の感

度と較正方法について述べた。主な事項は、次の通り。

- (1) 感度較正值の測定精度は、現状では0.1%が限界である。
- (2) 磁力計値の一様性は、かなり広範囲におよび、 $\pm 500\text{nT}$ レンジでも $\pm 600\text{nT}$ までの測定が可能である。
- (3) 内蔵の基準信号に頼りきるには問題がある。
- (4) 柿岡で持っている標準磁場発生器（大型ヘルムホルツコイルと電源の組合せ）の使用によって、0.1%の絶対精度での較正が可能である。
- (5) 観測中の感度較正については、現在調査中であるが、大型ヘルムホルツコイルによって較正された内部基準信号を使用して、感度の較正ができる可能性が高い。

謝 辞

この報告を書くに当たって、ご助言頂いた桑島前技術課長（現気象庁地震火山部地震予知情報課補佐官）および実験に協力頂いた技術課員の方々にお礼を申し上げます。

〈参考文献〉

- 観測指針：地磁気観測所技術報告第26巻特別号
上井哲也，他：比較較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第89号
小池捷春，他：光ポンピング磁力計の動作試験，地磁気観測所技術報告第87号
小池捷春，他：光ポンピング磁力計と比べたフラックスゲート磁力計の性能，地磁気観測所技術報告第85号

ON THE ACCURACY OF FLUX-GATE MAGNETOMETERS
— Experiment of the Calibration —

Kazuharu KOIKE, Shinzaburo NAKAJIMA
and Yukihiro SHIMIZU

Abstract

We examined the efficiency of the flux-gate magnetometer, MB-160 and MB-162, Shimadzu, which we use for the variation observation at the Kakioka Magnetic Observatory. We also examined our method and the equipment for the calibration of the installed calibration apparatus in the flux-gate magnetometer.

On the basis of examinations, we obtained the following conclusions.

1. Using our equipment for the calibration at Kakioka, which is composed of mainly one set of 3-axial Helmholtz coil, we can calibrate the installed calibration apparatus in an accuracy of 0.1%.
2. In the case where we use the flux-gate magnetometer with the resolution of 0.1 nT, we can extend the range of the observation from $\pm 500\text{nT}$ to $\pm 600\text{nT}$ with a sufficient linearity.
3. The output signal for the calibration which is generated by the installed apparatus in the flux-gate magnetometer is stable. With the use of this installed apparatus, therefore, we are able to calibrate the scale value during the observation.