

オーバーハウザー磁力計 計測方法の改善

徳本哲男

地磁気観測所技術課

2010年11月11日受付, 2011年8月26日改訂, 2011年10月14日受理

要 旨

標準磁気儀 KASMMER の更新として, 光ポンピング磁力計 (OPM) に替わり1992年から1993年にかけてオーバーハウザー磁力計 (OHM) が整備された. OHM に更新されても OPM と同様に, 補償磁場コイルを用いて全磁力測定用の磁力計だけから地磁気の3成分を連続計測するという方式は継承している. しかし磁力計の計測範囲の違いなどの制限から, 計測, 処理方法には幾分の変更がなされており, 最終的な計測値の精度等は同じとはいえない. 特に D 成分 (偏角) のばらつきが大きくなったことは問題である. また4台の OHM のどれかが故障した際に成分値の欠測を避けるよう相互にカバーすることが難しく, とりわけ D 成分は欠測となりやすい. ここでは, この2点について改善方法を提案する.

1. はじめに

OHM は地磁気観測所の主測器である高感度フラックスゲート磁力計 (90FM) と並行して運用されており, これと相互比較することで地磁気観測値の確かさをチェックしている. 従って OHM による地磁気成分値の精度向上 (ばらつきを抑える) 等の改善は地磁気観測値の信頼性向上に資するものと考ええる.

現用の方式では4つの OHM のうち1台は全磁力値 (F) を計測し, 残りの3つはそれぞれ補償磁場の方向, 大きさを違えて, 補償磁場と自然の磁場 (地球磁場) を合成した磁場の大きさを計測している. 補償磁場を鉛直方向として Z 成分 (鉛直成分) をほぼ消去することで計測値が概ね H 成分 (水平成分) 値となるもの, 水平磁北方向として H 成分をほぼ消去することで計測値が概ね Z 成分値となるもの, および補償磁場を水平方向で磁北からおおよそ45度東向きとしてその方向の磁場成分を消去して残りの磁場の大きさを計測するものの3つである. それぞれの OHM を H 成分計測用 OHM, Z 成分計測用 OHM, D 成分計測用 OHM と呼び, その計測値を用いて次章に示す (1) ~ (4) 式により地磁気成分値を計算している.

2. 現用方式での計測値のばらつき

現用の OHM による地磁気成分観測は, 概ね OPM での方式 (Yanagihara *et al.*, (1972); 佐野 (1971)) を踏襲している. この方式では補償磁場のふらつきに対して計測値は安定しており, H, Z 成分では計測値がそのまま, ほぼ絶対値に近い値を示すという利点がある. 地磁気変化に応じて補償磁場の大きさを変動させる方式から, 現用方式では常に一定値に固定するなどの変更点があるが, 具体的な地磁気成分観測の方法については Yamazaki and Tokumoto (1998) に詳しく述べられている. これと重複するが, 現用 OHM の計測方法と併せて D 成分のばらつきの原因について説明する.

地磁気成分観測の方法は基本的にはベクトルプロトン方式による計測であり, 補償磁場コイルで地磁気の水平成分 (鉛直成分) を打ち消すことで, 残った鉛直成分 (水平成分) を計測できる. D 成分については少々工夫が必要で, 他の OHM 計測値も含めて算出される. 現用方式での地磁気成分値と高感度フラックスゲート磁力計 (90FM) の毎秒値前後差のプロットを図1に示す. 中央のプロットは算出された成分値ではなく OHM の計測値そのものを用いている. 90FM と比べると F 成分を除いて OHM 成分値のばらつきは大きい. しかし OHM 成分値と計測値を比べると3段目 (H 成分) と4段目 (Z 成分)

のばらつきは変わらないが、5段目 (D成分) は明らかに成分値で大きくなっている。従って OHM の H, Z 成分のばらつきは計測値のばらつきによるものだが、D 成分は成分値への変換処理によりばらつきが大きくなっていることが分かる。

OHM 成分値の計算式は, Yamazaki and Tokumoto (1998) で示されたものからやや変形しているが、以下のようになる。

$$H = \hat{H} - (Z - Z_0)^2 / (2\hat{H}) \quad (1)$$

$$Z = \hat{Z} - \{(H - H_0)^2 + d^2\} / (2\hat{Z}) \quad (2)$$

$$H_x = (\hat{F}^2 - \hat{H}_{YZ}^2 + H_{X0}^2) / (2H_{X0}) \quad (3)$$

$$\cos(D + D') = H_x / H \quad (4)$$

ここで \hat{H} , \hat{Z} , \hat{H}_{YZ} はそれぞれ H, Z, D 成分計測用 OHM の計測値, H_0 , Z_0 , H_{X0} は補償磁場の大きさ, H_x は D 成分計測用 OHM の補償磁場コイル軸 (磁北より45度東向きで, D' はこの角度) の水平成分, d は Z 成分計測の補償磁場コイルと直交する水平成分を表す ($d \sim H \sin(D)$)。実際の計算では地点差などの補正値も含まれるが簡単のため省略している。H, Z の式の右辺にはそれぞれ Z, H が含まれておりこのままでは H, Z は求まらない。 \hat{H} , \hat{Z} を H, Z の初期値として右辺第2項に代入を繰り返して H, Z を求めている。

さて、上の2式の右辺第2項をみると分子にある $Z \sim Z_0$, $H \sim H_0$ であり, d も数10nT 程度に設定されている。一方、分母にある \hat{H} , \hat{Z} は30,000~35,000nT と大きいいため、第2項は微小となる。従って H 成分, Z 成分のばらつきは主に右辺第1項の \hat{H} , \hat{Z} の計測値のばらつきと同じになる。D 成分

については, H_x を求めるときと角度変換のときの2つの段階でばらつきが大きくなる。 H_x の式の右辺を見ると \hat{F} , \hat{H}_{YZ} , \hat{H}_{X0} と大きな数値の2乗を足し引きしているが、これは一般的に数値計算としては好ましくない。例えば \hat{F} に誤差 δ があると H_x には $(\hat{F}/\hat{H}_{X0})\delta$ の誤差となる。 $\hat{F} \sim 46,000$, $H_{X0} \sim 21,000$ なのでこれは 2.2δ となり、誤差 δ は2.2倍に増幅されることになる。 H_{YZ} に誤差がある場合も同様に2倍程度増幅される。角度への換算では $\cos(D) \sim H_x/H$ より, H_x と H の微小変化に対して D の微小変化は、

$$dD \sim (dH_x/H - H_x dH/H^2) / \sin \theta \quad (5)$$

となる。ここで θ は D の平均的な値で補償磁場コイルの磁北から東向きの角度で、現用方式では $\theta \sim 45$ 度に設定されている。従って右辺には $1/\sin \theta (= \sqrt{2})$ がかかっており、右辺括弧内の H_x , H の誤差によるばらつきがさらに増幅される。

こうした計測値の誤差によって生じる暫定絶対値 (成分値) の誤差を表1に示す。H, Z 成分はそれぞれ計測値 \hat{H} , \hat{Z} からの影響しか受けず、その影響量は計測値誤差と同等であるのに対して、D 成分は計測値 \hat{F} , \hat{H} , \hat{H}_{YZ} のどれに誤差が含まれていても影響を受け、しかもその大きさは計測値 1 nT あたり 0.12分~0.35分と大きくなっている。計測値 \hat{F} , \hat{H} , \hat{H}_{YZ} の誤差が標準偏差 1 nT の場合、各計測値の誤差は独立なので、D 成分の誤差の標準偏差は $(0.352^2 + 0.115^2 + 0.313^2)^{1/2} \sim 0.49$ 分と非常に大きなものになってしまう。図1のデータに当てはめると計測値 \hat{F} , \hat{H} , \hat{H}_{YZ} の標準偏差はそれぞれ 0.017nT, 0.075nT, 0.031nT なので同様に D 成分の標準偏差は 0.0143分となる。実際に D 成分の標準偏差を計算してみると 0.0142分と非常に近い値を得る。このことから D 成分のばらつきは、計測値 \hat{F} , \hat{H} , \hat{H}_{YZ} のばらつきに表1の係数倍の影響に

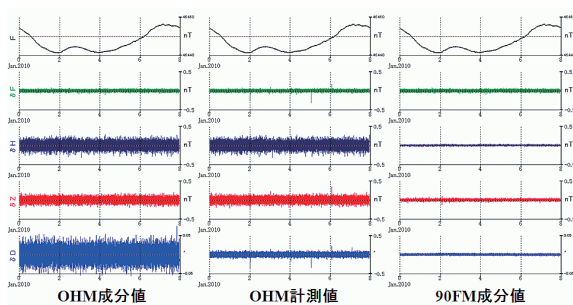


図1 オーバーハウザー磁力計と高感度フラックスゲート磁力計の毎秒値前後差

2010年1月1日0時0分から同7時59分のデータを示す。最上段は全磁力の生データで、以下 F 成分, H 成分, Z 成分, D 成分の前後差で、左はオーバーハウザー磁力計成分値, 中央はオーバーハウザー磁力計の計測値, 右は高感度フラックスゲート磁力計 (90FM) のデータを示す。プロットスケールは最上段の全磁力値は20nT, 他は 1nT, 0.1分である。

表1 各測器での 1 nT 当たりの異常量に対する影響量
各磁力計測器の異常量 1 nT 当たりの各成分値への影響量で、左端列の成分値が最上行の計測値誤差によって受ける影響量を示す。例えば、H 成分は、計測値 F, Z, H_{YZ} の影響は受けませんが (-の表示)、計測値 H と同じだけの誤差を生じる。これに対して D 成分は計測値 F, H, H_{YZ} がそれぞれ 1 nT の誤差があったときにそれぞれ -0.352分, +0.115分, +0.313分の誤差を生じる。徳本他 (1995) からの抜粋。

	\hat{F}	\hat{H}	\hat{Z}	\hat{H}_{YZ}
F	+1.00	-	-	-
H	-	+1.00	-	-
Z	-	-	+1.00	-
D(分)	-0.352	+0.115	-	+0.313

よって生じたものであると確認できる。

3. 計測値ばらつきの改善手法

F, H, Z成分のばらつきは、その磁気計計測値自体のばらつきと同等だが、D成分のばらつきは計測値 \hat{H}_{YZ} のばらつきに加えて、補償磁場コイルの設定とその計算処理方式による部分が多い。これを改善するための方法を示すが、その前にまず、ベクトルプロトン方式にまで立ち返って考えてみることにする。現用方式のZ成分計測では、補償磁場コイル軸を水平、磁北方向にセットし、水平成分(H成分)を打ち消すように補償磁場をかけることで、Z成分だけが残るので全磁気計でZ成分を計測することができる。つまり補償磁場コイル軸方向の地球磁場成分を消去することで、それと直交方向の地球磁場成分を計測する方式である(図2(a), 以下これを(a)方式と呼ぶこともある)。しかし補償磁場コイルの設置状態は同じでも、これとは異なる方式も考えられる。補償磁場の大きさを極端に大きくした状態、例えば地磁気全磁気値の3~4倍程度の大きさ、を想定すると、Z成分やD成分が100nT(10分)オーダーの変化をしたとしても計測値はほとんど影響を受けない。しかしH成分が変化すれば、計測値はその大きさだけ変化する。つまり、この方式では補償磁場コイル軸方向の成分を計測することになる(図2(b), (b)方式と呼ぶ)。なお、計測値はH成分の絶対値(~30,000nT)からは、かけ離れた値となるが、バイアスのかかった変化観測と見なすことはできる。また、大きな補償磁場をかけるといっても、OHMの計測範囲は20,000~80,000nT程度であるからその合成磁場はその範囲内に止めなければならぬし、補償電流の安定性も求められる点に注意

が必要である。従ってこの方式では補償磁場の向きにも依るが30,000~60,000nT程度の大きさまでに限られる。現用方式は(a)方式で行われているが、(b)方式を取り入れれば補償磁場コイルの向きや補償磁場の大きさは、もっと自由な設定が可能となる。

以上のことを念頭において現用方式のD成分の計測を見直してみる。前章で述べたように、まず H_x 算出での誤差は、例えばF計測値の誤差に因るものとしては $(\hat{F}/\hat{H}_{x0})\delta$ となる。(a)方式では H_{x0} は補償磁場コイルの方向である、磁北から45度東向き(東西方向)の水平成分の大きさに固定されるが、(b)方式の考えではこれに拘る必要はない。補償電流が安定していることが前提となるが、 \hat{F} は大きくは変わらないので H_{x0} を大きくすればそれだけ $(\hat{F}/\hat{H}_{x0})\delta$ は小さくできる。 \hat{H}_{YZ} についても同様である。しかし、そもそも補償磁場コイルを磁北から90度でなく45度東向きに設定したこと自体が(a)方式の考えによるものだったのかも知れない。つまり磁北より90度東向き(東西方向)の水平磁場はゼロなので(a)方式では補償磁場がかけられなくなるからである。補償磁場コイルの向きを磁北から90度水平に回転して東西方向とし、適当に大きな人工磁場(最大で60,000nT程度)をかけるとする。すると(5)式で $\sin\theta = 1$ となるので右辺括弧内の誤差の増幅はない。また括弧内第1項の dH_x は上で述べたようにこれまでより小さく抑えられ、さらに補償磁場コイル向きを東西方向にしたことから $H_x \ll H$ となるので括弧内の第2項は微小として無視できる。これらのことから (H_x, H) からD成分への変換に際しても誤差は小さく抑えられることが分かる。以上をまとめると、改善案は次のようになる。

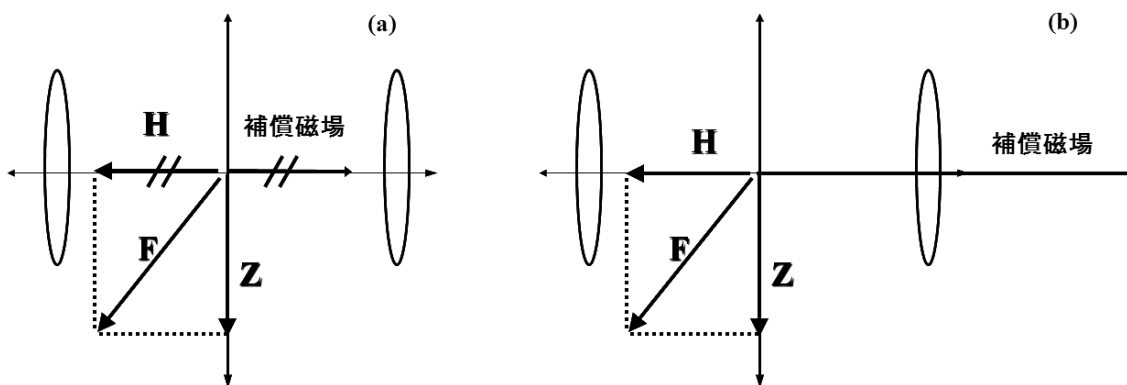


図2 ベクトルプロトン方式
(a)ではコイル軸方向の磁場を打ち消すように補償磁場をかける。(b)では非常に大きな補償磁場をかける。

- ・ H センサー, Z センサーはそのままで変更はしない.
- ・ H_x センサーは (1) 補償磁場コイルを磁北から90度の水平方向にとる.

(2) 補償磁場を大きくする.

これにはさらに, 計測値から暫定絶対値へ変換する計算式 (1) ~ (4) を変更する必要がないという利点がある. 補償磁場コイルの磁北からの角度と, 補償磁場の大きさを変えるだけであるから暫定絶対値化常数の2つのパラメータを変更するだけでよい.

上の改善案に従った場合に, どの程度ばらつきが押さえられるか, $H_{x0} = 60,000 \text{ nT}$ としたときの試算を示す. 簡単のため全ての OHM 計測値に 1 nT の誤差があるとすると, D 成分への影響量は Z の誤差の影響がない点と同じであるが F の誤差で -0.09 分, H ではほとんどなし (0.001分程度), H_{yz} の誤差で $+0.145$ 分といずれも現用方式より小さくなる. OHM 計測値のばらつきの標準偏差を 1 nT とすると, D 成分のばらつきの標準偏差は 0.17 分 (= $(0.09^2 + 0.00^2 + 0.145^2)^{1/2}$) となる. 前章で述べたように現用方式では 0.49 分なので, 約 $1/3$ 強ほどに小さくなると期待される. 2010年1月1日の計測値のばらつきの標準偏差を当てはめると同様に 0.0142 分から 0.0048 分にまで小さくなると予測される. ただしこれは補償電流が安定しているという前提での予測値であり, 実際にここまで改善できるかは使用する電源の精度や周辺環境等に依存することになる.

4. 現用方式での磁力計故障時のデータ処理方法

現用方式では, 4つの全磁力計測器の計測値を用いて地磁気3成分を計算して求めている. 地磁気水平成分 (鉛直成分) は補償磁場コイルではほぼ鉛直成分 (水平成分) を消去しているので, 計測値はそのまま概ね水平成分 (鉛直成分) に近い値となるが, 正確な成分値を得るために, 他成分の計測値を用いて相互に補正計算している. つまり第1章で述べたように, \hat{H} , \hat{Z} を H, Z 成分の初期値とし, 繰り返し (1) ~ (4) 式に繰り返し代入していくことで成分値を求めている. 従って厳密に言えば1つでも計測値に欠測や異常値があると, 地磁気3成分のいずれも求めることができず欠測となる. ただし, 上述したように地磁気水平成分, 鉛直成分は計測値が概ね正しい値に近いことを利用して, 一部に欠測や異常値があっても全成分を欠測とはしないようにしている. 例えば, Z 計測値が欠測しても, H 暫定絶対値は Z 成分による補正項を無視して近似的に計算している (つまり H の計測値 \hat{H} そのまま). しかし D 成

分については H_{yz} 計測値はもちろん, F 計測値, H 計測値のどれか1つでも欠測か異常値があれば, D 成分を求めることはできない. なお, 上に述べた意味で近似値ではあるが, F 計測値, H 計測値のどちらかが欠測したなら $A\text{-value} = 0$ から欠測の成分を求め, D 成分を計算することは可能と思われるが, その処理計算は行われていない. ここで $A\text{-value}$ とは, 全磁力値 - (水平成分² + 鉛直成分²)^{1/2} である.

このように現用方式では, 計測値に欠測がある場合はあくまで他成分の計測値を用いた補正処理をしていない近似値であること, また H_{yz} 計測値が欠測した場合は D 成分値を他の計測値からはカバーできず欠測とするしかないという問題がある.

5. 磁力計故障時のデータ処理の改善手法

5.1 磁力計の設定と計測値処理

これらの改善策として, 補償磁場コイルを水平で磁北45度東向き, 水平で磁北45度西向き, 鉛直方向の相互に直交する向きに設置する方式を提案する (図3参照). これに補償磁場を印加しない全磁力計測値を加えた4つの OHM から成る. 3軸の成分値をそれぞれ順に H_x , H_y , Z と表記する. 提案の方式は, 現用の方式から補償磁場コイルを水平磁北に向けたものを水平で磁北45度西向きにするだけの違いである.

各3軸の地磁気成分は, 既知である補償磁場の大きさと計測値を用いて, 例えば以下の式で求めることができる. ここでは簡単のため地点差等の補正項は省略している.

$$H_x = (\hat{F}^2 - \hat{H}_x^2 + H_{x0}^2) / (2H_{x0}) \quad (6)$$

$$H_y = (\hat{F}^2 - \hat{H}_y^2 + H_{y0}^2) / (2H_{y0}) \quad (7)$$

$$Z = (\hat{F}^2 - \hat{Z}^2 + Z_0^2) / (2Z_0) \quad (8)$$

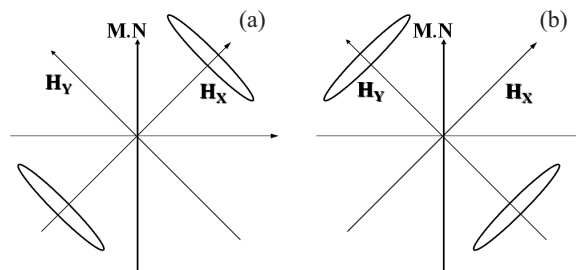


図3 H_x , H_y 成分と補償磁場コイル設定略図

(a) 磁北から東45度方向の水平成分を H_x 成分とし, 補償コイル軸は H_x 成分方向にセットする. (b) の H_y 成分は同様に磁北より西45度方向とする. 図中の M, N. は磁北を意味する.

これは (3) 式と同じ形であり、第 1 章で述べたように例えば H_x では \hat{F} や \hat{H}_x の計測誤差による H_x への影響を小さくするためには補償磁場 H_{x0} を大きくすればよい。Z 成分を例に、計測値の誤差による成分値の誤差を図 4 に示す。補償磁場に誤差がない場合は図 4 (a) に示すように、補償磁場が大きいほど成分値の誤差は小さくなるが、ある程度の大きさになるとそれ以上大きくしても誤差を減らす効果は小さい。図 4 (b) は補償磁場に大きさの一定割合で比例する誤差があるとした場合を示している。補償磁場が Z 成分をちょうどキャンセルする大きさ (約 35,000nT) で補償磁場誤差による影響はなくなる。さらに大きくしていくと次第に全体誤差は補償磁場による誤差が支配的となるが、その前に全体誤差が最小となる場所が存在している。そのポイントは OHM 計測値や補償電流のばらつき具合によって異なるため、実際に補償磁場 (補償電流) を幾らにするかは試験で確認しておくといふ。補償磁場の誤差による影響は後で述べるが、ここでは補償磁場は正確との前提で考察を続ける。ただし補償磁場の大きさは、計測値が OHM の計測範囲 (20,000~80,000nT 程度) になるように制限される。

(6) ~ (8) 式で \hat{H}_x や \hat{H}_y あるいは \hat{Z} が欠測しても $\hat{F}^2 = \hat{H}_x^2 + \hat{H}_y^2 + \hat{Z}^2$ の関係から、欠測した計測値を補充すれば地磁気 3 成分を近似値でなく正しく算出できる。ただし、 H_y を磁北方向、 H_x を東西方向に設定していると、 H_x 成分は H_y 、Z 成分に比べて極端に小さくなり、 $F^2 = H_x^2 + H_y^2 + Z^2$ から H_x を求めると他成分の誤差の影響が大きく実用的ではなくなることに注意されたい。しかし \hat{F} が欠測のときはこ

のままでは成分値は求められない。この場合には、いくつかの方法が考えられるが、まず未知数は 3 つで式も 3 つあるので煩雑ではあるが解析的に求めることも可能である (Appendix 1)。或いは、全磁力 \hat{F} の適当な初期値を決めて (6) ~ (8) 式で地磁気成分値を計算し、それらの比較から \hat{F} 初期値を補正して、と繰り返し、順次、漸近的に求めることもできる (Appendix 2)。こうして、4 つの OHM 計測値のうちどの 1 つが欠測しても (近似値ではない) 正しく地磁気成分値が得られることが分かる。

ここで提案した補償磁場コイルの設定で、計測値のばらつきによる地磁気成分値のばらつき誤差を見積もってみる。しかし地磁気成分値の計算方式は、上述の各成分毎に求める方法の他にも、各計測値と計算値との残差が最小となるように数値計算的に求める方法もあり、また補償磁場の大きさもある程度自由に設定できる。そこで、計算方法については各成分毎に求める方法と残差最小とする方法について、補償磁場の大きさは、ほぼ補償磁場コイル軸の地磁気成分の大きさとした場合と、より大きな補償磁場とした場合のそれぞれの組み合わせ (4 通り) についてばらつき誤差の見積もりを行い、比較してみることにする。残差最小とする数値計算にはエクセルのソルバー機能を使用した。計算結果の一覧を表 2 に示す。

第 1 章での説明から予想されるとおり、補償磁場が小さく (地磁気成分値と同程度) 各成分毎に計算する方式の場合 (2 行目) は標準偏差が大きい。単純に数値を比較してみて、補償磁場を大きくして残差最小となる計算で求めた場合 (5 行目) が最もば

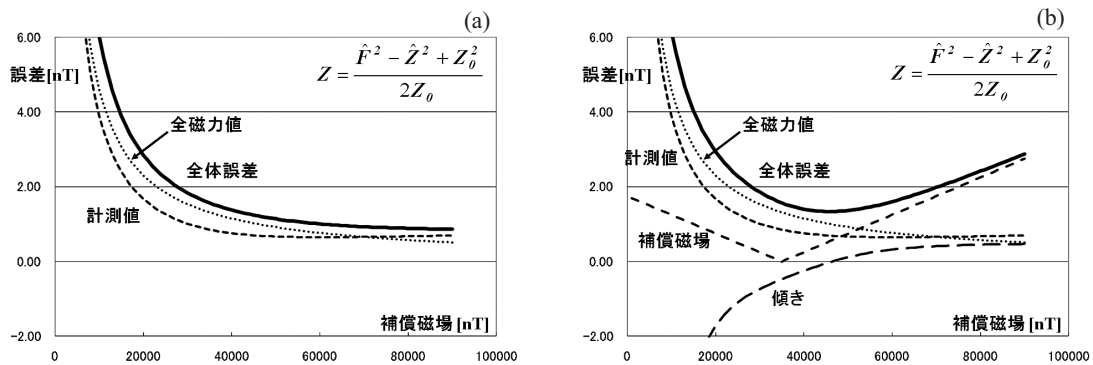


図 4 補償磁場の大きさと計測値誤差

Z 成分に補償磁場をかけたときの、補償磁場の大きさと Z 成分値の誤差の関係を示す。全磁力値 (\hat{F}) と計測値 (\hat{Z}) の計測誤差は 1 nT とする。(a) は補償磁場 (Z_0) には誤差はないとした場合、(b) は補償磁場にも誤差がある場合で、ここでは仮に補償磁場大きさの $5 \cdot 10^{-5}$ の割合で誤差を生じるとして計算した (補償磁場 10,000nT に対して誤差 0.5nT の割合で、これは補償電流の有効桁数が 5 桁に相当する)。図中、全磁力値とあるのは \hat{F} による誤差、計測値とあるのは \hat{Z} による誤差、全体誤差とあるのはそれらを合計したものである。補償磁場とあるのは Z_0 による誤差で、(b) での全体誤差はそれも加えた合計である。図中の傾きとあるのは全体誤差の微分値で、これがゼロとなる補償磁場 46,000nT あたりで全体誤差が最小となる。ただし、傾きの単位は無次元でプロットが見やすいように 10,000 倍している。

表2 各方式での地磁気成分値の影響量

各計測値のばらつきは全て標準偏差 1 nT とし、補償磁場の大きい場合小さい場合と、2つの計算方法での地磁気成分値のばらつきの標準偏差を示す。地磁気成分値は $H_x \sim 21,000\text{nT}$, $H_y \sim 21,500\text{nT}$, $Z \sim 35,000\text{nT}$ で、補償磁場小ではほぼこの大きさに、補償磁場大では $H_{x0} \sim 60,000\text{nT}$, $H_{y0} \sim 70,000\text{nT}$, $Z_0 \sim 80,000\text{nT}$ として求めた。

補償磁場 / 計算方式	H(nT)	Z(nT)	D(分)
補償磁場小, 成分毎計算	3.63	1.57	0.22
補償磁場小, 残差計算	1.00	0.88	0.22
補償磁場大, 成分毎計算	1.37	0.89	0.11
補償磁場大, 残差計算	1.10	0.74	0.11

らつきが小さくなるとの結果が得られた。現用方式と比べて、H は 1.1nT と若干大きくなるが Z, D ともに小さくなる。特に D については 0.11 分と 1/4 以下の大幅な改善が期待される。ただし、ここでは計測値のばらつき誤差だけについて計算したもので、補償磁場や他の原因によるばらつき誤差が追加されれば、それに応じてばらつきの標準偏差は表 2 よりもいくらか大きくなると思われる。また、どの場合も Z に比べて H, D が大きくなるのは H_x , H_y の 2 成分から求めるので、両方のばらつきが加わるためだと思われる。

5.2 地磁気成分値の誤差について

これまでは成分値のばらつきを確認するという観点から、OHM 計測値の誤差による成分値の誤差について述べた。ここでは、もっとゆっくりとした変動も考慮して計測値の誤差の他に補償磁場コイルの傾きや補償磁場大きさの変動も含めて、それらの誤差に因って生じる成分値の誤差を示す。H, Z, D 成分 (あるいは H_x , H_y , Z 成分) の誤差は計算方法によってやや異なる。ここでは、先に述べた成分毎に計算する方法と、残差最小とする方法について調べてみた。

まず成分毎に計算する方法の場合で、 H_x を例に説明するが H_y , Z でも同様である。 H_x は (6) 式で求められる。 \hat{F} , \hat{H}_x に計測値誤差があれば H_x に影響するが、これについては既に述べた。次に補償磁場 H_{x0} が設定値からずれていたり、補償磁場コイル軸が傾斜すると計測値 \hat{H}_x に見かけ上の誤差を生じる。補償磁場大きさの誤差を $\delta(H_{x0})$ 、補償磁場コイルの傾きを θ_x とすると計測値の自乗は

$$\{H_x - (H_{x0} + \delta(H_{x0})) \cos \theta_x\}^2 + H_y^2 + \{Z + (H_{x0} + \delta(H_{x0})) \sin \theta_x\}^2$$

となる。これと $\delta(H_{x0})$, θ_x がゼロの時の \hat{H}_x との差から見かけ上の誤差が得られる。それらを合わせ全

体として H_x の誤差分 (δH_x) は高次項を省略して次のようになる。

$$\delta H_x \sim (\hat{F}/H_{x0})\delta(\hat{F}) - (\hat{H}_x/H_{x0})\delta(\hat{H}_x) + \{(H_x - H_{x0})/H_{x0}\}\delta(H_{x0}) - Z\theta_x$$

θ_x は北東側上向きを正としている。同様にして

$$\delta H_y \sim (\hat{F}/H_{y0})\delta(\hat{F}) - (\hat{H}_y/H_{y0})\delta(\hat{H}_y) + \{(H_y - H_{y0})/H_{y0}\}\delta(H_{y0}) - Z\theta_y$$

$$\delta Z \sim (\hat{F}/Z_0)\delta(\hat{F}) - (\hat{Z}/Z_0)\delta(\hat{Z}) + \{(Z - Z_0)/Z_0\}\delta(Z_0) + H\theta_z$$

となる。右辺第 3 項にある H_x , H_y , Z は未知だが誤差を求めるには概数で十分である。なお、 H_{x0} 等を H_x 等とほぼ同じ大きさに設定すれば第 3 項は無視できるようになるが、第 1 項、第 2 項に対しては大きくした方が係数を小さくできることが分かる。第 4 項は補償磁場コイルの傾きによる誤差は補償磁場の大きさに依らないことを示している。(6) ~ (8) 式は補償磁場コイル軸方向の磁場成分を求めるものであるから、補償磁場コイル軸が地磁気全磁力の方向に近づくように傾斜すれば H_x は見かけ上は大きく、離れる方に傾斜すれば小さくなり、誤差の大きさは補償磁場の大きさとは無関係である。ここでは簡単のため OHM 間の地点差は含めなかったが、それら常数やその変動は結局のところ計測値に影響し、その計測値誤差が成分値誤差のもととなる。

H, D 成分の誤差については $H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$, $D \sim \tan^{-1}(H_y/H_x)$ の関係から

$$\delta H \sim (H_x/H) \delta H_x + (H_y/H) \delta H_y$$

$$\delta D \sim 1/\{1 + (H_y/H_x)^2\}$$

$$\{-(1/H_x) \delta H_y + (H_y/H_x^2) \delta H_x\}$$

であり、これに δH_x , δH_y を代入すると次のようになる。

$$\delta H \sim (\hat{F}/H)(H_x/H_{x0} + H_y/H_{y0})\delta(\hat{F})$$

$$- (H_x/H)(\hat{H}_x/H_{x0})\delta(\hat{H}_x)$$

$$- (H_y/H)(\hat{H}_y/H_{y0})\delta(\hat{H}_y)$$

$$+ (H_x/H)\{(H_x - H_{x0})/H_{x0}\}\delta(H_{x0})$$

$$+ (H_y/H)\{(H_y - H_{y0})/H_{y0}\}\delta(H_{y0})$$

$$- (H_x Z/H)\theta_x - (H_y Z/H)\theta_y$$

$$\delta D \sim 1/\{1 + (H_y/H_x)^2\} \times$$

$$[(\hat{F}/H_x^2)(H_y/H_{x0} - H_x/H_{y0})\delta(\hat{F})$$

$$- (H_y/H_x^2)(\hat{H}_x/H_{x0})\delta(\hat{H}_x)$$

$$+ \{\hat{H}_y/(H_x H_{y0})\}\delta(\hat{H}_y)$$

$$+ (H_y/\hat{H}_x^2)(H_x - H_{x0})/H_{x0}\delta(H_{x0})$$

$$- (1/H_x)(H_y - H_{y0})/H_{y0}\delta(H_{y0})$$

$$- (H_y/\hat{H}_x^2)Z\theta_x + (1/H_x)Z\theta_y]$$

実際の地磁気の値など数値を代入したものを表3に示す。同じく残差最小とする方法の場合を表4に示す。表4ではどの誤差でも必ず全成分に影響がでてしまうが、逆に誤差は分散されて、全体の標準偏差(各誤差の自乗和)は表3に比べてやや小さくなる。

5.3 データチェックでの注意点

一般にデータのチェックには、他の並行観測している磁力計との比較およびA-valueが有効であり実際によく行われている。フラックスゲート磁力計のように各成分がほとんど独立に計測されたものであれば各成分差をとれば異常値である成分がすぐに分かる。しかし、ここで提案した計測方式は各成分は独立でないため、並行観測測器と比較した場合に1つの計測値だけが異常であっても複数の成分値が異常値となるため、異常計測値の特定などでは煩雑になると思われる。また表4のA-valueを見ると、どの場合でもあまり変化がない。これは残差最小の計算式の中に、 $(\hat{F} - \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + Z^2})^2$ を最小にする、というA-valueを小さくするのと同等の条件が入っているためである。この場合、データチェックにはA-valueではなく残差値を用いるべきであろう。大雑把にいて計測値等の誤差が大きければ残差も大きくなる。これだけではどの計測値に異常があったかを特定することはできないが、このことはA-valueチェックでもF, H, Zのどれが異常値なのか

決められないのと同様である。また、成分毎に求める方法と残差最小とする方法とで、異常値がなければ同じ結果となるが(地点差などの設定値にも誤差がない場合)、どれか異常値があると両方式の計算結果に差を生じることから異常値のチェックを行うこともできる。

6. 補償磁場による器差測定の方法

前章では、4式あるOHM計測のうち、どの3つのOHM計測値でも地磁気成分値が求まることを述べた。もちろん計測値のばらつきによる地磁気成分計算値への影響や相互チェックができなくなるということを考慮すれば、通常は4つのOHM計測値を用いるべきである。それでも欠測を生じることなく、3つのOHMで計測し残り1つのOHMをフリーにできるならば、地磁気観測の運用にはばを持たせることができるだろう。例えばどれか1つのOHMについて定期的に短時間のメンテナンスを行うこともできるし、取り外して移動観測に使用することも考えられる。その間も欠測することなくOHMによる地磁気成分観測を続けることができる。ここでは一例としてOHMの器差測定を行う方法について述べる。

地磁気全磁力測定器の器差は、通常は基準器と比較観測を行うことで得られる。ただし計測中にも地磁気の自然変化が含まれるため基準器と比較測器を

表3 成分毎に計算する方法での誤差

縦列の先頭に示した各誤差要因に対する各成分値の誤差の大きさを示す。地磁気値をF~46,000nT, Hx~21,000nT, Hy~21,500nT, Z~35,000nT, 補償磁場をHx0~60,000nT, Hy0~70,000nT, Z0~80,000nTと設定した。

	$\delta(\hat{F})$	$\delta(\hat{H}_x)$	$\delta(\hat{H}_y)$	$\delta(\hat{Z})$	$\delta(H_{x0})$	$\delta(H_{y0})$	$\delta(Z_0)$	θ_x	θ_y	θ_z
	1nT	1nT	1nT	1nT	1nT	1nT	1nT	1秒	1秒	1秒
H[nT]	1.01	-0.66	-0.65	-	-0.45	-0.50	-	-0.119	-0.121	-
Z[nT]	0.58	-	-	-0.68	-	-	-0.56	-	-	0.146
D[分]	0.010	-0.077	0.072	-	-0.053	0.0554	-	-0.0139	0.0136	-
A-val.	-0.094	0.429	0.422	0.513	0.296	0.323	0.426	0.077	0.079	-0.111

表4 残差最小にする方法での誤差

縦列の先頭に示した各誤差要因に対する各成分値の誤差の大きさを示す。地磁気値をF~46,000nT, Hx~21,000nT, Hy~21,500nT, Z~35,000nT, 補償磁場をHx0~60,000nT, Hy0~70,000nT, Z0~80,000nTと設定した。

	$\delta(\hat{F})$	$\delta(\hat{H}_x)$	$\delta(\hat{H}_y)$	$\delta(\hat{Z})$	$\delta(H_{x0})$	$\delta(H_{y0})$	$\delta(Z_0)$	θ_x	θ_y	θ_z
	1nT	1nT	1nT	1nT	1nT	1nT	1nT	1秒	1秒	1秒
H[nT]	0.91	-0.22	-0.21	0.53	-0.15	-0.16	0.44	-0.04	-0.04	-0.11
Z[nT]	0.52	0.27	0.27	-0.35	0.19	0.20	-0.29	0.05	0.05	0.08
D[分]	0.010	-0.075	0.075	0.003	-0.051	0.057	0.002	-0.013	0.014	-0.001
A-val.	0.013	-0.064	-0.063	-0.076	-0.044	-0.048	-0.063	-0.012	-0.012	0.016
残差 ²	0.0138	0.2909	0.2804	0.4149	0.1380	0.1647	0.2870	0.0094	0.0099	0.0193

同時、或いはごく短時間毎に交互に計測し、さらに測定地点の間の地点差を補正するために基準器と比較測器の設置場所を交替して、再度同様に比較観測を行うのが一般的である。しかし、補償磁場コイルで任意の大きさの正確な人工磁場を作れるとすれば、この人工磁場値を基準値として器差を測定できる。この方法では OHM の取り外しや移動する操作は必要ない。簡単のため、補償磁場と自然磁場が直交している場合について考えるが、直交していない場合への適用は容易である。つまり補償磁場コイル軸方向の自然磁場を打ち消すように補償磁場を逆にかけた状態を基準とすれば、この時、残りの磁場方向と補償磁場コイル軸の方向は直交していることになる。第5章で示した3つの補償磁場が直交する設定であれば、例えば H_x 成分値のおよそ21,000nT をキャンセルして H_y 成分と Z 成分だけが残っている状態を基準とすれば、その合成分と H_x 方向（補償磁場コイル軸の方向）は直交している。

地磁気の方向成分を P 、それに直交する成分を q 、 q' とすると q 、 $q' \ll P$ である。補償磁場コイル軸の方向は q の方向になっているとする。ここで補償磁場を加えると

$$(M(\alpha) - \beta)^2 = (P + \alpha r)^2 + (q + \alpha R)^2 + q'^2$$

となる。ここで α は補償磁場にかかる係数で電流量の制御により可変であり既知である。 $M(\alpha)$ は計測値、 β は器差、 R と r は一定値で、 (αR) は q 方向にかかる補償磁場の大きさ、 (αr) は補償磁場コイルが傾いているために P 方向にかかる補償磁場の大きさを示す。 R は全磁力値と同じオーダー程度の大きさを想定しているので $r \ll R$ としてよい。 q' 方向にも補償磁場コイルの傾きのためいくらか磁場が加わるだろうが計測値への影響は少ないので省略している。特に $\alpha = 0$ のとき $M(0)$ は全磁力の計測値となる。上の式を展開して高次項を省略すると

$$M(\alpha) - \beta \sim G(\alpha) + (Pr + Rq) \alpha / G(\alpha)$$

となる。ここで、 $G(\alpha) = \sqrt{F^2 + (\alpha R)^2}$ 、 F は計測点での自然磁場である。上式で α をいろいろな値に変更して多数回計測し β を求めようという考えである。全磁力値 F は自然変化するが、他に並行観測している値があり変動分は補正できるとする（例えば、残り3つの OHM 計測から得られた地磁気成分値を用いることも可能である）。 $M(0)$ と繋がるように調整した並行観測値を \hat{F} として、 $G(\alpha)$ の式で F に $\hat{F} - \beta$ を代入し、 F を \hat{F} としたものを改めて $G(\alpha)$ とすれば、 $G(\alpha)$ は $G(\alpha) - (\hat{F} / G(\alpha)) \beta$ と置き換えられる。次に $(Pr + Rq)$ について、この中の個々のパラメータを分離できれば r から補償磁場コイルの傾きが分かることになるが、残念ながら α の

変更によっては括弧内の数値を分離することはできない。 $(Pr + Rq)$ も時間変化するが、 P 、 q の変化分を δP 、 δq とおくと、 $r \ll R$ より、 $\delta(Pr + Rq) \sim R \delta q$ と見なして良い。以上のことから

$$\begin{aligned} M(\alpha) - G(\alpha) - (R\alpha / G(\alpha)) \delta q \\ = (1 - \hat{F} / G(\alpha)) \beta + (\alpha / G(\alpha)) S \end{aligned}$$

と表せる。 S は $(Pr + Rq)$ の初期値で一定値である。 δq も並行観測値が得られるものとするれば、左辺は全て既知か計測値で、右辺の β と S は未知数である。 α を変えながら何度か計測し、式にもっとも合うように β と S を決めてやればよい。

上述の方法で数値シミュレーションとして試算してみた。一例として α を $-1.0 \sim +1.0$ まで 0.04 刻みで変化させた51パターンで、 $\beta = 0.5nT$ とし、 \hat{F} 、 $M(\alpha)$ 、 δq 、 R に適当なランダム誤差 $\pm 0.2nT$ を加えた場合に得られた β の範囲は $0.1 \sim 0.9nT$ 程度、ランダム誤差 $\pm 0.1nT$ では $0.3 \sim 0.7nT$ 程度で、どちらも平均すれば $0.5 \pm 0.1nT$ 程度で標準偏差はそれぞれ $0.16nT$ 、 $0.07nT$ となった。得られた β の中央値から外れたものを除外する等の工夫をすれば信頼性は若干あがるものと思われる。

7. まとめ

本報告では2つの改善案を示した。第3章で示したものを改善案1、第5章で示したものを改善案2として装置の設定を以下に再掲する。装置の構成は現用のものと全く変わらず、補償磁場の向きと大きさ、及び計算方法を変更する（改善案2のみ）もの

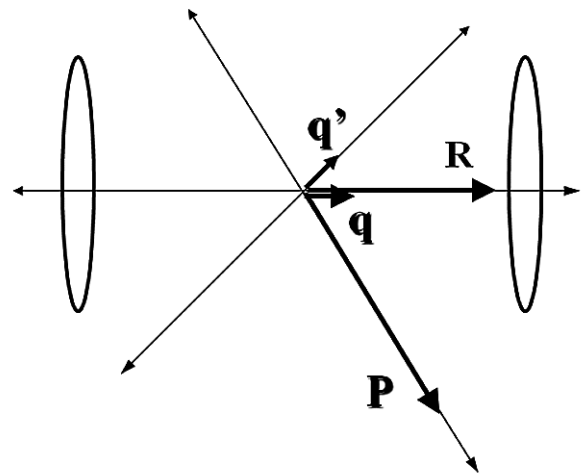


図5 補償磁場を用いた器差測定概念図

P 、 q 、 q' は互いに直交しており全磁力は概ね P 方向と一致している。 q 方向にかける補償磁場 (R) の大きさを変えていき、その時の磁場値 (計測値) から器差を求める。

である。

改善案 1 ・ H_x センサーの補償磁場コイル軸を磁北より45度東向きから90度東向きとし、補償磁場を大きく (21,000nT 程度から、例えば60,000nT 程度へ) する。

・H センサー (補償磁場コイル軸は鉛直方向)、Z センサー (補償磁場コイル軸は磁北方向) での補償磁場コイルの方向、補償磁場の大きさはそのまま変更はない。

改善案 2 ・現用 Z センサーの磁北向きの補償磁場コイルを磁北より45度西向きとする (これで3つの補償磁場コイルは相互に直交方向となる)。他の現用 H センサー、 H_{yz} センサーの補償磁場コイルの方向はそのまま変更はない。

・補償磁場の大きさを3つとも大きく (例えば60,000~80,000nT 程度) する。

はじめの改善案 1 は、変更を最小限に止め、H、Z 成分の安定した計測はそのまま残し、D 成分のばらつきを下げるができる。計算式の変更も不要で一部パラメータの数値を変えるだけでよい。改善案 2 では、D 成分のばらつきをさらに抑えるとともに4つの OHM 計測のうち1つが欠測してもカバーして地磁気 3 成分を求めることができる。計算式は、計測値のばらつきに対する成分値のばらつきが小さいことから残差最小として求める方法を提案したが、成分毎に計算する方法もあり、両者を比較することで異常値のチェックにもなる。

今回は補償磁場は既知として扱ったが、それには正確なコイル常数 (単位補償電流から作られる補償

磁場の係数) が前提となる。単純に考えて直径が数十 cm の補償磁場コイルが0.1mm まで正確に作られていたとしても有効桁数は4桁であり、10,000nT オーダーの補償磁場をかけた時、10nT オーダーの精度しか期待できないことになる。何らかの方法 (例えば山田 他 (1989)) で十分な有効桁数でコイル常数を求めておく必要がある。これは第6章で示したものと表裏の関係にあたり、磁場計測値を元に補償磁場を求めるか、補償磁場を信頼して計測値を補正するかの違いであると考えられる。

補償電流も安定しているという前提としたが、補償電流をモニターして正確な電流値が分かっていたら、それを含めて計算あるいは補正することも容易である。いずれにせよ実際の観測運用では補償電流も常時モニターに追加しておくことが望ましい。

参考文献

- 佐野幸三, 光ポンピング磁力計による成分磁場測定法ならびに補償磁場に関する誤差および安定度, 地磁気観測所要報, 14, 1, 19-38, 1971.
- 徳本哲男, 大川隆志, 手島聡, 瀧沢倫明, 長谷川一美, オーバーハウザー磁力計による観測値の精度, 技術報告, 99, 1-10, 1995.
- 山田雄二, 大和田毅, 福井史雄, 長谷川浩, 横山恵美, 比較校正室西台の大型ヘルムホルツコイルの常数測定, 技術報告, 106, 48-62, 1989.
- Yamazaki, A. and T. Tokumoto, Geomagnetic three components measurement with Overhauser magnetometer, *Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory*, 26(2), 15-24, 1998.
- Yanagihara, K., M. Kawamura, Y. Sano and T. Kuboki, New Standard Magnetic Observation System of Kakioka (KASMMER), *Memoirs of Kakioka Magnetic Observatory*, Supplementary, 4, 217-281, 1972.

Appendix. 1

\hat{H}_X , \hat{H}_Y , \hat{Z} は異なる場所で計測したものであるから、実際には相互に地点差があるのが普通である。最終的に求める地磁気成分値 H_X , H_Y , Z は、それぞれ \hat{H}_X , \hat{H}_Y , \hat{Z} 計測地点での値とする。また地点差 T_{ij} ($i, j = X, Y, Z$, T_{ZX} は H_X 計測点から Z 計測点への地点差を表す。他も同様) は既知とする。すると計測値と地磁気成分値の関係は以下の式で表される。

$$\begin{aligned}\hat{Z}^2 &= (H_X + T_{ZX})^2 + (H_Y + T_{ZY})^2 + (Z - Z_0)^2 \\ \hat{H}_Y^2 &= (H_X + T_{YX})^2 + (H_Y - H_{Y0})^2 + (Z + T_{YZ})^2 \\ \hat{H}_X^2 &= (H_X - H_{X0})^2 + (H_Y + T_{XY})^2 + (Z + T_{XZ})^2\end{aligned}$$

これを解くと以下の式となる。この2次式の解が求める地磁気成分値である。どちらの解であるかは概算値 ($H_X, H_Y \sim 21,000\text{nT}$, $Z \sim 35,000\text{nT}$) から容易に判別できる。

$$\begin{aligned}(\hat{p}_X^2 + \hat{p}_Y^2 + 1)Z^2 + 2\{p_X(q_X + T_{ZX}) \\ + p_Y(q_Y + T_{ZY}) - Z_0\}Z + (q_X + T_{ZX})^2 \\ + (q_Y + T_{ZY})^2 + Z_0^2 - \hat{Z}^2 = 0 \\ (\hat{p}_X^2 + 1 + \hat{p}_Z^2)H_Y^2 + 2\{p_X(q_X + T_{YX}) - H_{Y0} \\ + p_Z(q_Z + T_{YZ})\}H_Y + (q_X + T_{YX})^2 + H_{Y0}^2 \\ + (q_Z + T_{YZ})^2 - \hat{H}_Y^2 = 0 \\ (1 + \hat{p}_Y^2 + \hat{p}_Z^2)H_X^2 + 2\{-H_{X0} + p_Y(q_Y + T_{XY}) \\ + p_Z(q_Z + T_{XZ})\}H_X + H_{X0}^2 + (q_Y + T_{XY})^2 \\ + (q_Z + T_{XZ})^2 - \hat{H}_X^2 = 0\end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned}\alpha_{11} &= 2(T_{ZX} - T_{YX}), \quad \alpha_{12} = 2(T_{ZY} + H_{Y0}), \\ \alpha_{13} &= -2(Z_0 + T_{YZ}) \\ \alpha_{21} &= 2(T_{YX} + H_{X0}), \quad \alpha_{22} = -2(H_{Y0} + T_{XY}), \\ \alpha_{23} &= 2(T_{YZ} - T_{XZ}) \\ \alpha_{31} &= -2(H_{X0} + T_{ZX}), \quad \alpha_{32} = 2(T_{XY} - T_{ZY}), \\ \alpha_{33} &= 2(T_{XZ} + Z_0)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\beta_1 &= T_{ZX}^2 + T_{ZY}^2 + Z_0^2 - T_{YX}^2 - H_{Y0}^2 - T_{YZ}^2 + \hat{H}_Y^2 - \hat{Z}^2 \\ \beta_2 &= T_{YX}^2 + H_{Y0}^2 + T_{YZ}^2 - H_{X0}^2 - T_{XY}^2 - T_{XZ}^2 + \hat{H}_X^2 - \hat{H}_Y^2 \\ \beta_3 &= H_{X0}^2 + T_{XY}^2 + T_{XZ}^2 - T_{ZX}^2 - T_{ZY}^2 - Z_0^2 + \hat{Z}^2 - \hat{H}_X^2\end{aligned}$$

とし、 α_{ij} を要素とする行列式を A , その i 行 j 列の

余因子を A_{ij} , A の第 i 列を β に置き換えたものを Δ (i), その j 行 k 列の余因子を $\Delta(i)_{jk}$ とおく。上の第1式から第3式について順に

$$\begin{aligned}p_X &= A_{21}/A_{23}, \quad p_Y = A_{22}/A_{23}, \quad q_X = \Delta(3)_{21}/A_{23}, \\ q_Y &= \Delta(3)_{22}/A_{23} \\ p_X &= A_{31}/A_{32}, \quad p_Z = A_{33}/A_{32}, \quad q_X = \Delta(2)_{31}/A_{32}, \\ q_Z &= \Delta(2)_{33}/A_{32} \\ p_Y &= A_{12}/A_{11}, \quad p_Z = A_{13}/A_{11}, \quad q_Y = \Delta(1)_{12}/A_{11}, \\ q_Z &= \Delta(1)_{13}/A_{11}\end{aligned}$$

である。

Appendix. 2

適当な F の初期値 $F(0)$ を設定して各成分値 $H_X(0)$, $H_Y(0)$, $Z(0)$ を求める。これらの値が正しければ

$$F^2(0) = H_X^2(0) + H_Y^2(0) + Z^2(0) \quad (\text{判定条件})$$

が成り立つはずである。仮に $F(0)$ の誤差を Δ とすると、正しい全磁力値は $F = F(0) - \Delta$ となる。そのときの地磁気成分値の誤差は $\delta H_X(0) \sim F\Delta/H_{X0}$ 等となる。これを上の判定条件式に代入し Δ について解けばよい。そして改めて $F(1) = F(0) - \Delta$ として以下同様に繰り返していけばよい。実際の計算では Δ^2 以上の項は省略してもかまわない。初期値も $\pm 3,000\text{nT}$ 程度の誤差があっても安定して収束するようである。ちなみに $F(1)$ を単純に $F(1) = \sqrt{H_X^2(0) + H_Y^2(0) + Z^2(0)}$ で求めると地磁気成分値や補償磁場の大きさにも依るが、例えば表2の設定では誤差 Δ は拡大し収束しない。

なお、補償磁場を地磁気の補償磁場コイル軸方向の成分値に近い値としている場合には若干、異なる手順をとることもできる。初期値の段階では $(H_X - H_{X0})$ 等をゼロとおき、 $\hat{H}_X^2 + \hat{H}_Y^2 + \hat{Z}^2 \sim 2\hat{F}^2$ から $F(0)$ を求め、これから $H_X(0)$, $H_Y(0)$, $Z(0)$ を計算して、その値で $(H_X - H_{X0})$ 等の項を補正し再代入して、

$$\begin{aligned}\hat{H}_X^2 - (H_X(0) - H_{X0})^2 + \hat{H}_Y^2 - (H_Y(0) - H_{Y0})^2 \\ + \hat{Z}^2 - (Z(0) - Z_0)^2 = 2F^2(1)\end{aligned}$$

から $F(1)$ を求め、以下繰り返す、という方法もある。

Proposition for improving measurements and data processing for the Overhauser magnetometers in KASMMER

by

Tetsuo TOKUMOTO

Kakioka Magnetic Observatory

Received 11 November 2010; received in revised form 26 August 2011;

accepted 14 October 2011

Abstract

Renewal of the Kakioka Automatic Standard MagnetoMetER (KASMMER) from 1992 to 1993 involved installing Overhauser magnetometers (OHM) to replace the optical pumping magnetometers (OPM). Although the OPMs were updated with OHMs, the method for continuous measurement of the three geomagnetic components remains unchanged, with the three components derived from total magnetic intensity measured by a magnetometer fitted with a compensating coil. However, because of restrictions such as differences in the magnetometers' measurement ranges, measurement and processing methods have been slightly changed, and it cannot be said that the magnetic component values are the same as before in terms of precision. In particular, it is problematic that the scattering of D-component (magnetic declination) values has increased. In addition, it is difficult to make up for a missing component if one or of the four OHMs malfunctions, and the D-component is particularly likely to be missing. In this paper, we propose methods to address these two shortcomings.