

地磁気絶対観測の自動計測手法の調査 —ベクトルプロトン方式を応用した方法—

徳本哲男¹, 大和田毅²

¹地磁気観測所調査課, ²地磁気観測所観測課

2013年11月7日受領, 2014年2月28日改訂, 2014年3月3日受理

要 旨

相互に直交する3組の補償磁場コイルとその中心に全磁力計を設置した装置および方位標, 傾斜計を組み合わせて地磁気絶対値を測定する方法について調査した. 方位標を用いて補償磁場コイルの作る人工磁場の正確な方向を求めることで偏角を測定することができる. 偏角のみを測定する方法と, 3成分をまとめて測定する方法とに分けて説明する.

1. はじめに

ベクトルプロトン方式でH(水平)成分, Z(鉛直)成分の絶対値を測定することは既に実績があり, 良好な結果を得ている(Mizuno et al. (1987)). 従ってD成分の絶対観測が可能となれば, 地磁気3成分を絶対観測できることになるが, D(偏角)成分の絶対値観測はいまだ実現していない. 本報告では, まずD成分単独の測定方法を示し, 続いて地磁気3成分を測定する方法と手順について述べる.

本報告で示す測定方法で地磁気絶対観測を自動で測定するためには, まず非磁性で装置が製作でき, 補償磁場コイルに流す電流(以下, 補償電流)を制御でき, 補償磁場コイルを反転できること, およびそれらの操作手順を自動で行えることなどが条件となる. しかしこれらは技術的にさほど困難なレベルではないと思われる. 実際, 非磁性装置であることや電流の制御はKASMMER(Kakioka automatic standard magnetometer)のオーバーハウザー磁力計を用いた変化観測で行われている. 電流制御, 反転動作, 全磁力計測のタイミングをコントロールするには専用の制御装置が必要となるが新たな技術開発というほどのものではない. 補償磁場コイルの反転操作の自動化については未経験であるが, 超音波モーターなど非磁性の駆動装置を用いれば実現可能であろう. また後で述べるように現状のDI測定方式(Yanagihara et al. (1973))と比較して, 回転動作は決まった角度(180度)だけでよく, 分オー

ダーの精度であればよいという利点がある. これらのことから, ベクトルプロトン方式を応用した自動絶対観測の装置は現在の技術で製作は可能と思われる. ここでは測定の原理, 手順について述べる.

2. 偏角の測定

従来のベクトルプロトン方式では, H, Z成分を水平及び鉛直方向の2軸の補償磁場コイルで, それぞれ地磁気H成分, Z成分を打ち消すことで, Z成分, H成分を測定している(Mizuno et al. (1987)). 補償磁場コイルの傾きによる誤差を補正するために鉛直軸で反転し, その前後で同様な測定を行う. このとき, 装置に傾斜計を取り付けておき, 回転軸の鉛直からの傾きによる誤差分を補正する方法がとられている.

さらに加えて, これと独立してD成分を測定できれば, あわせて地磁気3成分が得られることになる. D成分測定は, 原理的にはASMO(automatic standard magnetic observatory)方式の考え方をを用いる(Alldredge and Saldukas (1964)). これは例えばKASMMERで用いられているオーバーハウザー磁力計用の補償磁場コイルを初期設置で方向を調整する手順と似ている. すなわち補償磁場コイル軸をほぼ水平東西向きにして同じ大きさの補償磁場を東向きおよび西向きにかけて, 全磁力計で地球磁場と補償磁場の合成磁場の大きさを計測する(計測値をそれぞれ $f_a(+)$, $f_a(-)$ とおく). 補償磁場が正しく

磁北に直交していればどちらの合成磁場も同じ大きさになるが、例えば図1 (a) に示すように磁北がやや西向きだと、 $f_a(-) > f_a(+)$ となる。この違いから補償磁場と磁北とのなす角度がわかる。磁北の地理的な方向（真北からの偏向）を知るためには補償磁場の地理的な方位が分かっているなければならない。また図1 (b) に示すように、補償磁場方向の水平面からの傾きを求めてこれによる誤差分を補正する必要がある。そのために補償磁場コイルを東西方向軸に反転し、方位標を用いてその回転軸方向を求める。それについては後述するが、ここでは回転軸方向が求められたとして話を進める。

反転前に補償磁場を東向きにかけたときの全磁力値を $f_a(+)$ 、西向きにかけたときを $f_a(-)$ 、同様に反転後での計測値をそれぞれ $f_b(+)$ 、 $f_b(-)$ とし、回転軸と磁北との東側からの角度を $\theta + \pi/2$ とおく。F は補償磁場をかけないときの全磁力値である。また η は回転軸の水平面からの角度（図1 (b)）、H は水平成分、Z は鉛直成分、 X_0 は補償磁場の大きさとする。簡単のため測定中は磁場の変動はないものとし、図1 に示す ε 、 η 、 ξ は微小として2次項を省略して整理すると計測値は以下のように表せる。

$$f_a^2(+)=F^2+X_0^2+2\{-HX_0\sin(\theta)+\varepsilon HX_0+(\eta+\xi)ZX_0\} \quad (1)$$

$$f_a^2(-)=F^2+X_0^2+2\{+HX_0\sin(\theta)-\varepsilon HX_0-(\eta+\xi)ZX_0\} \quad (2)$$

$$f_b^2(+)=F^2+X_0^2+2\{-HX_0\sin(\theta)-\varepsilon HX_0+(\eta-\xi)ZX_0\} \quad (3)$$

$$f_b^2(-)=F^2+X_0^2+2\{+HX_0\sin(\theta)+\varepsilon HX_0-(\eta-\xi)ZX_0\} \quad (4)$$

左辺は計測値で既知となる。右辺第1項と第2項 ($F^2+X_0^2$) はどれも同じ符号であり (1) ~ (4) 式だけでは分離できない。同様に右辺第3項の括弧内の $\sin(\theta)$ と η のかかる項は4式とも符号が逆のパターンであり両者は分離できず、 θ を求める式中に η は残ってしまうことになる。さらに ε と ξ も全て同符号なので、つまり (1) ~ (4) 式は実質的に、($F^2+X_0^2$)、($\sin(\theta)$ 、 η)、(ε 、 ξ) の3組の未知数についての式であり、($\sin(\theta)$ 、 η) 組の η は別に求めて与えることで θ を解こうというわけである。補償磁場 X_0 は補償電流とコイル定数（単位電流で作られる補償磁場の大きさ）から求めることもできるが、補償磁場コイルの歪みや相対するコイルの距離、軸のずれ等の可能性を考慮すると、直径など形状の寸法からコイル定数を精度良く求めるのは困難であり、実測値から求める方が望ましい。 X_0 は例えば F は既知（計測値）として (1) + (2) + (3) + (4) から得られる。 η は次章で述べるように方位標の測定から求まる。そうすると θ は - (1) + (2) - (3) + (4) から次のように表せる。

$$\sin(\theta)=\{-f_a^2(+)+f_a^2(-)-f_b^2(+)+f_b^2(-)\}/(8HX_0)+\eta(Z/H) \quad (5)$$

(5) 式には Z、H が含まれているが、これには上述の H、Z の絶対値測定で得られた値を用いるものとする。ただし仮に θ を10分くらいに想定していれば、H、Z は10nT 程度の違いがあっても θ への誤差は0.1秒オーダーでありあまり影響しないのでそれほど正確な値でなくても構わない。一方、右辺中括弧 $\{\}$ 内の $f_a(+)$ 等の計測値に1 nT の誤差がある

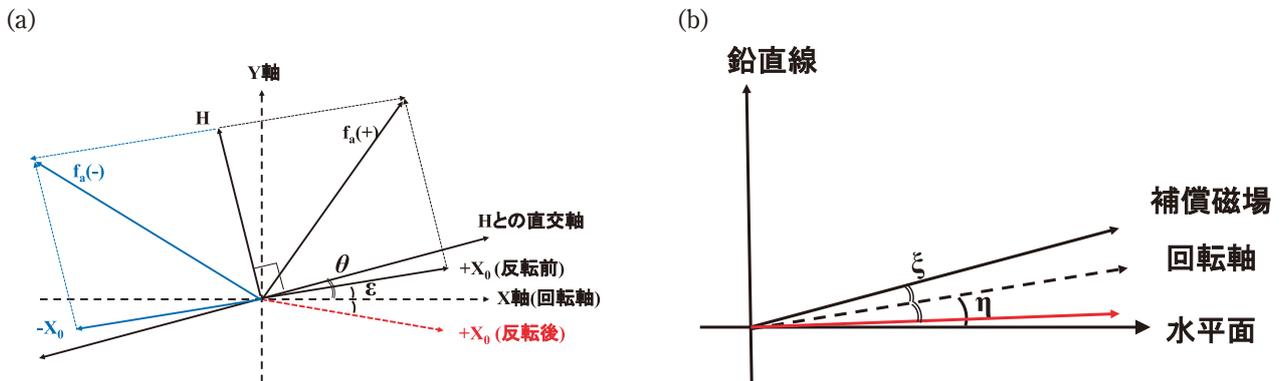


図1 D成分測定概念図

(a) 上から見たところでX軸は補償磁場コイルの回転軸、それと直交してY軸をとる。 $\pm X_0$ は補償磁場を表す。補償磁場方向は水平面内では回転軸と微小角 ε ずれている。H は地磁気の水平成分で、回転軸と磁北との角度を $\theta + \pi/2$ とおく。計測値は $\pm X_0$ と自然磁場のベクトルの和の大きさ $f_a(+)$ 、 $f_a(-)$ になる。補償磁場コイルを反転すると、補償磁場方向 ($+X_0$ (反転後)) とある点線矢印は回転軸に対して対称の向きになる。

(b) 横（水平面）からみたところで、回転軸は水平面から微小角 η だけ傾いている。補償磁場方向は回転軸からさらに微小角 ξ ずれている。補償磁場方向の水平面からのずれは、補償磁場コイルの反転前後でそれぞれ $\eta + \xi$ 、 $\eta - \xi$ となる。

と、 X_0 の大きさにもよるが、最大0.1~0.5分もの誤差を生じえる。ただしこれは $f_a(+)$ 等4つの計測値誤差の符号が揃った場合であるし、計測誤差1 nTはやや過大な見積もりと思える。 $f_a(+)$ 等の計測の誤差がそれぞれ独立にランダムなノイズならば、自動化により繰り返し測定は容易となることで十分な回数を測定し平均することで誤差は小さく抑えられるものと期待できる。

3. 方位標を用いた補償磁場コイルの回転軸方向の測定

補償磁場コイルの回転軸方向は方位標を用いて求める。補償磁場コイルと方位標の緯度、経度、高さの座標はあらかじめ分かっているものとする。方位標には方眼紙状の目盛板を取り付ける。目盛板は50~60cm四方程度の大きさを想定するが、補償磁場コイルの回転軸と補償磁場方向とのずれ具合によっては必要な大きさは変わりうる。観測装置に望遠鏡が付いていればこの目盛板の目盛をそのまま読めば良く、望遠鏡で覗きながら方向を微調整して方位標の一点に合わせこむ作業は必要としない。次いで補償磁場コイルを反転して同様に望遠鏡から目盛板の目盛を読む。反転前後の望遠鏡方位の中心(平均)が補償磁場コイルの回転軸方位である。回転軸の方向は前章の偏角測定と同じく東西方向で、実際の観測では偏角測定と方位標測定は同じく補償磁場コイル反転の前後で行うことになる。

方位標測定を手動観測ではなく自動観測とするためには、上述のように望遠鏡から方位標を目視する代わりに例えばレーザーと受光器を使っても可能(Rasson and Gonsette (2011))と考えられるが、ここでは方位標目盛板のデジタル画像を用いる方法を提案したい。磁性を考慮してCCD(charge coupled device)イメージセンサを用いた装置(以下、CCDとする。デジタルカメラ等を想定している。)は方位標側に設置し、補償磁場コイル側には鏡だけを取り付ける。鏡は固定ではなく幾分は可動とし、CCDから見て鏡に方位標目盛板が写るように鏡の傾きを調整できるようにしておく。鏡を用いると、望遠鏡で観測点から方位標を見るのと比べて、距離はその倍に相当するので、例えば距離100mのとき目盛1mmがおおよそ角度1秒にあたる。この程度の距離を想定すると近似的に角度と方位標目盛板の座標が比例すると見なして良い。図2に方位標読み取りの概念図を示す。これは上方あるいは横方向から見たもので、それぞれで補償磁場コイルに設置した鏡面の傾きのために反転前後で方位標の見える場所が変わることを示している。図中で視点とあるのがCCD

の位置で、鏡面の垂直軸を中心にした反対側にあるところの方位標目盛が見える。反転すると鏡面の垂直軸は回転軸に対称の方向に変わり、それに対応して方位標目盛の見える位置も変わる。視点、鏡、方位標の座標から回転軸の方位を知ることができる。つまり図中の視点と方位標目盛(A)から反転前の鏡面の垂直軸方向が、同様に視点と方位標目盛(B)から反転後の鏡面の垂直軸方向が分かる。そして回転軸の方位は両者の中心(平均)として求まる。

このときのCCDの画像の見え方を模式的に示したものが図3である。角の丸い四角が画像で、その中にある角の1つが欠けた四角が鏡部分を表す。ABCDとあるのが反転前の、A'B'C'D'が反転後の鏡部分で、補償磁場コイルの反転操作により○印を中心に180度回転移動したことを表示している。○印は回転軸と鏡との交点であるから、そこに見える方位標目盛を読み取る。鏡の位置を原点として反転前後での読み取り値を p_a 、 p_b 、また視点の座標値を p_0 とし、方位標の目盛板は回転軸に対して垂直で補償磁場コイルと方位標間の距離が方位標読み取り値の変化分に比べて十分大きいとすると、回転軸の方位標での座標は $(p_a + p_b + 2p_0)/4$ になる。こうして回転軸の方位が求められれば、そのうちの鉛直方向の傾きはすなわち前章の η である。 p_a 、 p_b を求めるのに実際には○印位置に写る目盛だけを読み取るのではなく、鏡部分に写っている他の方位標目盛も読み取り平均処理等を行うことで、仮に画像の分解能が不足していても、ある程度それを補えることも期待

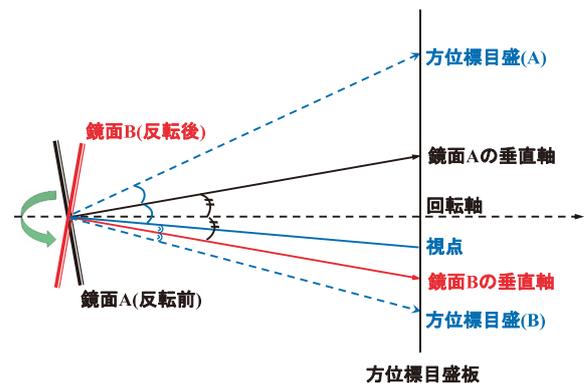


図2 方位標読み取り概念図

鏡を左に、方位標を右にして横あるいは上から見たところの概念図を示している。鏡面の垂直方向と回転軸方向は少しずれており、回転軸での反転の前後で鏡面の向きは僅かながら異なる。鏡面A、Bは補償磁場コイルの回転軸に固定された鏡の反転前後での向きで、鏡面A、Bの垂直軸は回転軸に対称になる。反転前後で鏡面A、Bを視点から覗いたときに方位標目盛(A)、(B)が見えることになる。視点と方位標目盛(A)、(B)はそれぞれ鏡面A、Bの垂直軸に対して対称の位置にある。

できる。また、CCDの設置台が傾いても画像（面）が得られていれば、画像の中で鏡の位置がずれるだけであって回転軸方位の算出に誤差は与えない。

補償磁場コイルの反転動作と連携して、上述のCCD画像からの方位標目盛の読み取りをソフトウェア制御することは十分可能であろう。またCCDは絶対観測装置から離して設置するのでCCD装置に磁性があっても絶対観測にまで影響することはない。

4. 3成分の測定

ベクトルプロトン方式を用いた地磁気絶対観測には、前述のH、Z成分とD成分を別に測定する方法の他にも3成分をまとめて測定する方法もある（徳本（2008））。これは相互に直交する3組の補償磁場コイルにより、いくつかの合成した補償磁場を加えて計測するものである。基本的な考え方はベクトルプロトン方式であり、地磁気3成分値に加えて補償磁場コイルの傾きや直交度のずれをすべて未知数として扱い、これらをまとめて解いてしまおうというものである。徳本（2008）と重複するが、以下にこの3成分測定の概要を述べる。図4に示すように全磁力計を中心にして3組の補償磁場コイルを相互に直交させ、それぞれ概ね鉛直方向（上向きz軸とする）、磁北方向（北向きy軸とする）、それと水平面上で直交する方向（東向きx軸とする）になるように配置する。補償磁場の大きさを例えば概ね $X_0=40,000\text{nT}$ 、 $Y_0=30,000\text{nT}$ 、 $Z_0=35,000\text{nT}$ 等として（ Y_0 、 Z_0 は概ね水平成分、鉛直成分の大きさ）、x軸では $0, \pm X_0$ 、y軸では $0, -Y_0, -2Y_0$ 、z軸では $0, +Z_0, +2Z_0$ の補償磁場をかける。各軸で3通り

なので全部で $3^3=27$ 通りの補償磁場パターンがあるが、そのうち合成磁場がほぼゼロになる（ $x:0, y:-Y_0, z:+Z_0$ ）のケースを除いて26通りの補償磁場をかけてその時の全磁力値を計測する。これを1セットとする。この中には補償磁場のない自然の全磁力値の計測も含まれている（ $x:0, y:0, z:0$ ）。合成磁場は各成分で

$$\begin{aligned} X \text{ 成分: } & x + \delta x_i + C_x(i)X_0 + C_y(i)Y_x + C_z(i)Z_x \\ Y \text{ 成分: } & y + \delta y_i + C_x(i)X_y + C_y(i)Y_0 + C_z(i)Z_y \\ Z \text{ 成分: } & z + \delta z_i + C_x(i)X_z + C_y(i)Y_z + C_z(i)Z_0 \end{aligned}$$

となる。ここで x, y, z はある時刻（ $i=0$ とする）での地磁気成分、 δx_i 等は時刻 i での $i=0$ からの変化分（既知とする）で、 $C_x(i)$ はx軸補償磁場にかかる係数（ x では上述の通り、 $0, \pm 1$ になる）で C_y, C_z も同様、 X_y はx軸補償磁場コイルが傾いているためにy成分に生じる磁場の大きさで他も同様である。この各成分を合成した磁場の大きさを計測することになる。それを11個のパラメータ（地磁気と各補償磁場の3成分で12個だが、そのうちy軸補償磁場の水平方向を基準とするので1つは除く、つまり $Y_x=0$ とおく）で計測値に最もフィットするように数値計算で求めるのだが、1セットの測定値だけでは安定した解は得られない。z軸補償磁場コイルを反転させてさらに1セットの測定を行い、この反転前後の測定値をあわせて計算すれば地磁気3成分をふくめて各補償磁場コイルの傾きもすべて求められる。

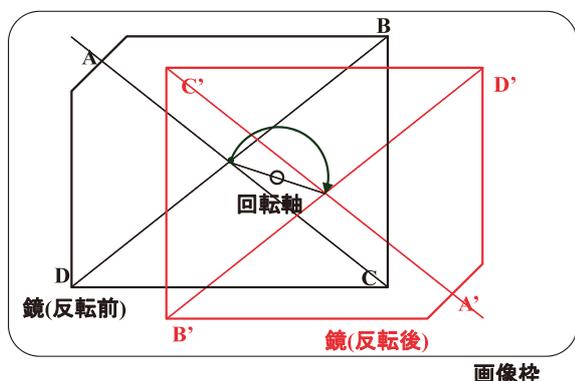


図3 方位標画像の模式図
 ABCDとA' B' C' D'は反転前後の鏡枠で、○印は回転の中心を示す。回転軸はほぼ水平方向で、鏡面は回転軸と概ね直交している（回転軸は紙面に垂直の方向）。半円矢印は鏡の中心の回転移動の軌跡を表示したもの。

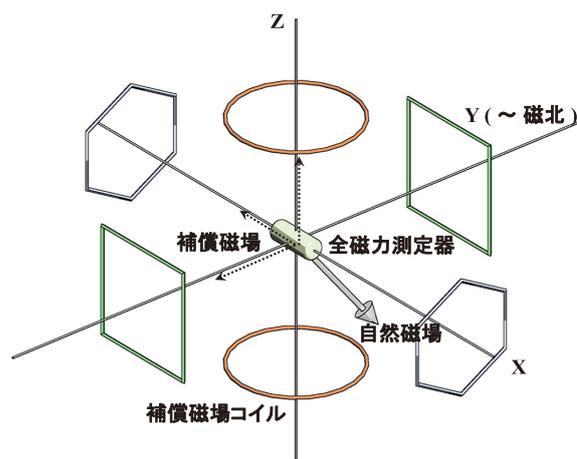


図4 計測の概念図
 互いに直交する3組の補償磁場コイルとその中心に全磁力計を設置する。図中の破線矢印は全磁力計が置かれた中心に作られる補償磁場を表している。自然磁場とそれぞれの補償磁場コイルで適当な大きさの補償磁場を加えたときの合成磁場の大きさを計測する。

このことは徳本（2008）では回転軸が正しく鉛直軸に一致する場合に限って示されていたが、回転軸と鉛直軸のずれを考慮しなければ現実的ではない。実際には補償磁場コイルには直交する2方向に傾斜計を取り付けて反転前後での傾斜角から回転軸方向を求めておく必要がある。これは3章で述べた水平遠方にある方位標の測定から回転軸方向を求めたことを、鉛直回転軸に対して行うことに相当する。z軸補償磁場コイルの方位と回転軸の鉛直軸からのずれが微小であれば、補償磁場ベクトル (Z_x, Z_y, Z_0) が回転軸の方位 (Z_{xp}, Z_{yp}, Z_0) に傾いたと考えて、補償磁場は近似的に $(Z_{xp} + Z_x, Z_{yp} + Z_y, Z_0)$ と表せる。ここで $Z_{xp}, Z_{yp}, Z_x, Z_y \ll Z_0$ である。これが反転すると $(Z_{xp} - Z_x, Z_{yp} - Z_y, Z_0)$ となる。 Z_{xp}, Z_{yp} を反転前後の傾斜計の値から与えてやれば Z_x, Z_y を含め全てのパラメータが正しく求められるようになる。

地磁気3成分の値など適当に設定し、全磁力計測値に一樣なランダム誤差を加えてシミュレーション計算して求められた値の標準偏差を表1に示す。これによると例えば全磁力計測値に $\pm 1.0\text{nT}$ のランダム誤差があるようなら x, y, z には $0.1\sim 0.3\text{nT}$ 程度の標準偏差が見込まれる。標準偏差の大きさは全磁力計測値のばらつき大きさに概ね比例していることが分かる。傾斜計の誤差等で、既知として与える回転軸の傾き (Z_{xp}, Z_{yp}) が正しくないと、それだけ鉛直軸がずれた方向にあるとみなして計算してしまうことになる。つまり x, y, z は回転軸の誤差だけずれた座標系に変換された値になると考えられる。回転軸の誤差を $\delta Z_{xp}, \delta Z_{yp}$ とすると各成分は近似的に次のようになる。

$$\begin{aligned} x \text{ 成分: } & x + (\delta Z_{xp}/Z_0)z \\ y \text{ 成分: } & y + (\delta Z_{yp}/Z_0)z \end{aligned}$$

$$z \text{ 成分: } z - (\delta Z_{xp}/Z_0)x - (\delta Z_{yp}/Z_0)y$$

表1の設定では Z_0 と z は同じ程度の大きさで符号は異なる。また x は Z_0 に比べ2桁以上小さいので z 成分の第2項は省略できるだろう。これから x, y, z にはそれぞれ、 $-\delta Z_{xp}, -\delta Z_{yp}, -(y/Z_0)\delta Z_{yp}$ 程度の偏りを生じる。実際に $\delta Z_{xp}, \delta Z_{yp}$ に適当な値を与えて計算し、標準偏差は変わらないが x, y, z には上述の式と同程度の誤差を生じることを確認した。上記の式を一見すると Z_0 を大きくすると誤差を小さくできるように思えるかもしれないが、 $\delta Z_{xp}, \delta Z_{yp}$ は傾斜角と Z_0 から求めたものなのでその比率は Z_0 の大きさでは変わらないことに注意されたい。傾斜角の誤差1秒に対して x, y, z の誤差は $0.17\sim 0.15\text{nT}$ 程度に相当する。

これで得られた地磁気3成分値は y 軸（あるいは x 軸）方向を基準にしたもので、それが地理的どの方向であるかは先に述べた方位標測定により決められる。これをあわせて地磁気3成分の絶対値が得られる。

補償磁場コイルの反転操作は、 H, Z 成分と D 成分を別に測定する方法でも、3成分まとめて測定する方法でも、補償磁場コイルの鉛直軸および水平軸（方位標測定のため）での2つの反転操作が必要であることは同じである。これまでの経験では器械台も含めて、補償磁場コイル機器の傾斜変動は避けられないものと思われるが、水平面で振れる動きは構造上、考えにくい。仮にそうであれば、補償磁場の鉛直面での方位は変動するが水平面での方位はほとんど変動しない、と言える。 D 成分単独の測定方法では方位標を用いて補償磁場コイル軸の水平方向だけでなく鉛直方向の傾きを求める必要がある。(5)式に当てはめると θ を求めるのに絶対観測ごとに η

表1 全磁力の計測値誤差による地磁気成分値等への影響

全磁力計測値に「誤差」欄にある範囲の一樣なランダム誤差を加えたときに求められる地磁気成分値等の標準偏差を示す。地磁気成分と各補償磁場は次のように設定した。

$(x, y, z) = (-120, 30100, -35200)$, $(X_0, X_y, X_z) = (40000, 100, -70)$, $(Y_x, Y_0, Y_z) = (0, 30000, 80)$, $(Z_x, Z_y, Z_0) = (-100, 90, 35000)$, および $Z_{xp} = 50, Z_{yp} = 80$ で、単位は全て nT である。 Y_x の標準偏差が全てゼロとなっているのは Y 軸補償磁場の水平磁場の方向を基準として $Y_x = 0$ で固定しているためである。

誤差	x	y	z	X ₀	X _y	X _z	Y _x	Y ₀	Y _z	Z _x	Z _y	Z ₀
±0.2	0.025	0.049	0.058	0.032	0.044	0.039	0.000	0.039	0.037	0.021	0.025	0.036
±0.4	0.052	0.102	0.119	0.065	0.088	0.081	0.000	0.081	0.075	0.040	0.050	0.071
±0.6	0.078	0.144	0.168	0.095	0.137	0.114	0.000	0.112	0.110	0.063	0.079	0.106
±0.8	0.101	0.197	0.230	0.128	0.176	0.151	0.000	0.157	0.144	0.082	0.098	0.141
±1.0	0.126	0.249	0.290	0.162	0.223	0.190	0.000	0.193	0.182	0.103	0.124	0.174

を得るために補償磁場コイルの反転操作を行う必要がある。一方、3成分まとめて測定する方法では補償磁場コイルの傾斜も含めて得られるので初回以降の方位標測定は不要となる。実際には例えば地震などの振動で補償磁場コイル軸の水平面での方位が変わる可能性もあるが、方位標測定のための補償磁場コイルの反転操作の頻度はかなり減らせることが期待できる。補償磁場コイルの傾斜角が別に求められるので方位標測定でも鉛直方向の読み取りは不要で、それに伴い視点、鏡、方位標の高さ座標の情報も必須ではない。また、D成分単独の測定方法では、その測定原理から補償磁場コイル軸は東西方向にとる必要があるが、従って方位標の位置は東方（西方）でなければならないが、3成分まとめて測定する方法ではそういった制限はなく東方（西方）あるいは北方（南方）のどちらにおいても良い。

5. 測定手順

5.1 D成分とH, Z成分を別に測定する方法

H, Z成分の測定はMizuno et al. (1987)の方法で、D成分は2章で述べた方法で行う。2章の(1)～(4)式は簡単のため地磁気の自然変化がないとした場合であるが、実際には時間とともに地磁気の値も変化しており、(5)式も若干の修正が必要である。時刻*i*での値には θ_i 等と添字で示すことにする。ただし X_0 は時刻とは関係がない。 ε , η , ξ も一回の絶対観測の実施時間内では一定値とみなせる。時刻0を基準としてそれから時間*i*後の値を $\theta_i = \theta_0 + \delta\theta_i$ などと表すことがある。ここで、絶対観測時には並行して観測している変化計があり、 $\delta\theta_i$ などはその値が使えるものとする。通常、絶対観測時にも変化計は稼働しているのであるから、この条件は当然満たされよう。(1)～(4)の計測をそれぞれ時刻1～4で行ったとすると、偏角 θ_0 は高次項を省略して、少し長くなるが以下で示される。

$$\begin{aligned} \sin(\theta_0) = & \{-f_{a1}^2(+)+f_{a2}^2(-)-f_{b3}^2(+)+f_{b4}^2(-)\}/(2X_0H_{\text{sum}}) \\ & + \{+Z_1+Z_2+Z_3+Z_4\}\eta/H_{\text{sum}} \\ & + \{-H_1\sin(\delta\theta_1)-H_2\sin(\delta\theta_2)-H_3\sin(\delta\theta_3)-H_4\sin(\delta\theta_4)\}/H_{\text{sum}} \\ & + \{+F_1^2-F_2^2+F_3^2-F_4^2\}/(2X_0H_{\text{sum}}) \\ & + \{+H_1+H_2-H_3-H_4\}\varepsilon/H_{\text{sum}} \\ & + \{+Z_1+Z_2-Z_3-Z_4\}\xi/H_{\text{sum}} \end{aligned} \quad (5')$$

ここで $H_{\text{sum}} = H_1 + H_2 + H_3 + H_4$ である。地磁気の自然変化がなければ右辺の第3項以降はゼロであり

(5)式と一致する。 F_1 等は既知の扱いではあるが、計測回数を増やすときは右辺第4項以降の分子が相殺するように、4つの状態、つまり反転前後での補償磁場の東向き西向きが一組となるように数のバランスを保つようにすべきである。 ε , ξ は方位標測定でも得られず、変数として計算しても係数が小さいため十分な精度では求められないが、 ε , ξ の大きさが数分程度以下であれば(5')式の θ_0 にはほとんど影響はない。また2章で述べたように X_0 は(5')式においてもさほど正確でなくて良い。 F を除いて時間変化はないとして

$$X_0 = \frac{\sqrt{(f_{a1}^2(+)+f_{a2}^2(-)+f_{b3}^2(+)+f_{b4}^2(-))}}{\sqrt{-(F_1^2+F_2^2+F_3^2+F_4^2)}/2}$$

としても良い。(5')式に適当な数値を当てはめ、全磁力値では $\pm 0.3\text{nT}$ 、成分値では $\pm 0.2\text{nT}$ あるいは ± 0.02 分のランダム誤差を加えて偏角 θ_0 のばらつきを調べたところ、標準偏差は0.03分程度であった。誤差に大きく効くのは(5')式右辺第1項の $f_{a1}(+)$ 等の計測値である。誤差の軽減には全磁力計等の計測値のバラツキを抑える、 X_0 を大きく設定する、計測回数を増やすなどが考えられる。

H, Z成分の測定についてもここで簡単に述べておく。鉛直方向と磁北方向に補償磁場を加えてそれぞれZ成分, H成分を打ち消すことでH成分, Z成分を測定する。補償磁場コイルの傾きによる誤差は反転前後の計測値を足しあわせることでキャンセルし、さらに傾斜計を用いて回転軸と鉛直軸とのずれによる影響を補正する。従って装置としては全磁力計と2軸の補償磁場コイル、傾斜計（南北方向だけでよい）を備えたものになる。(5')式の表記にあわせると高次項は省略して次のようになる。

$$H = \{H_{a1}(+) + H_{b2}(+)\}/2 - (\delta H_1 + \delta H_2)/2 - Z_0 \sin(\alpha) \quad (6-1)$$

$$Z = \{Z_{a1}(+) + Z_{b2}(+)\}/2 - (\delta Z_1 + \delta Z_2)/2 + Y_0 \sin(\alpha) \quad (6-2)$$

から求められる。ここで、 $H_{a1}(+)$, $H_{b2}(+)$ 等は計測値、 Z_0 , Y_0 は補償磁場、 α は磁北方向を含んだ鉛直面での鉛直軸と反転軸のなす角度（磁北側にある時にプラスとする）である。(6-1)式, (6-2)式の右辺第1項は計測値、第2, 3項は既知である。(6-2)式はD成分の変化や補償磁場の東西方向の成分を省略したものなので、例えば柿岡では $H \sim 30,000\text{nT}$, $Z \sim 35,000\text{nT}$ として補償磁場方向が磁北から7～8分ほどずれているとZの計算値に

0.1nT 程度の誤差を生じるようになるので、このことは注意しておかなければならない。(6-2)式のZに $-(H_0 \sin(\theta))^2 / (2Z_1)$ などの補正項を加えてもよいが、反転の角度が180度からずれた場合はその補正も必要になるため、可能であれば補償磁場コイルと磁北の方位を上記数値以内に収まるように合わせておくのが良い。

この方法ではH、Z成分とD成分は独立して測定できるが、もしもそれぞれ装置を別にすると同一場所で測定できず地点差を生ずるなど不都合である。1つの装置により同じ場所でH、Z成分とD成分のどちらも測定できることが望ましい。そのための装置で最も単純な構造は水平軸と鉛直軸の2軸の補償磁場コイルが相互に固定されているものだろう。装置のイメージを図5に示す。このタイプの構造では、水平軸の補償磁場コイルはH、Z成分測定、D成分測定で共用するので、両方の測定を完全に分けて一方の測定が終わってからもう一方を測定するという手順となる。D成分測定ではH、Zの値を用いるのでH、Z成分測定、D成分測定の順に行う方が良くかもしれない。

大まかな測定手順は以下のようになろう。

- (i) 装置の初期セット 装置を概ね水平にセットする。
- (ii) H、Z成分の測定① 水平磁場コイルを磁北に向ける。
- (iii) H、Z成分の測定② H成分、Z成分の磁場を打ち消すように補償磁場をかけて計測

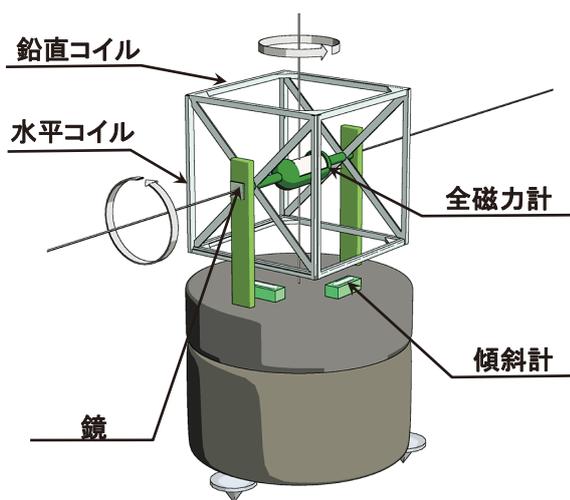


図5 装置のイメージ1

水平方向、鉛直方向の2組の補償磁場コイルは一体化した構造となっている。図中の座標軸と矢印で、補償磁場コイルの設置台の上部で鉛直軸に、支持棒で支えられた水平軸に補償磁場コイルが回転することを示す。

- (iv) H、Z成分の測定③ 補償磁場コイルを鉛直軸に反転し、(iii)と同様の作業を行う。
- (v) D成分の測定① 水平補償磁場コイルを方位標(東西方向)に向ける。
- (vi) D成分の測定② 東向き、西向きに補償磁場をかけての計測、および方位標の読み取り。
- (vii) D成分の測定③ 補償磁場コイルを東西軸に反転し、(vi)と同様の作業を行う。

以下、(ii)～(vii)を繰り返す。

(i)～(vii)で3成分が得られる。(ii)～(iv)と(v)～(vii)は互いに独立しているので順序は替えても構わないし、別々に繰り返しても良いだろう。各成分の測定には全磁力値を直接は用いないが、補償磁場の大きさの確認や値のチェック等のため適宜全磁力値の計測を含めると良い。

5.2 3成分まとめて測定する方法

3成分まとめて測定する方法では4章の最後に述べたように方位標は東(西)側あるいは北(南)側に設置しても構わない。現実的にも、柿岡や鹿屋観測施設などでは敷地や既存建物の制約から東(西)側に方位標をおくことが難しいかもしれない。ここでは方位標は北側にあるものとしておく。装置のイメージの例を図6(a)に示す。これは北向き方向(y軸)の補償磁場コイルはy軸に回転し、上向き(z軸)の補償磁場コイルは鉛直軸に回転するが、両者は別々に動作できる機構のものである。

測定手順の概略を以下に示す。5.1節と同様に絶対観測中の地磁気各成分の変化分は分かっているものとする。

- (i) 装置の初期セット 装置を概ね水平にとり、y軸補償磁場を磁北にセットする。
- (ii) 1セット分測定
- (iii) z軸補償磁場コイルを鉛直軸に反転して1セット分測定
- (iv) 方位標読み取り、y軸補償磁場コイルをy軸に反転して方位標の読み取り
- (v) 1セット分測定
- (vi) z軸補償磁場コイルを鉛直軸に反転して1セット分測定

以下、(ii)～(vi)を繰り返す。

1セット分の測定とは4章で述べた26の補償磁場パターンで全磁力値を計測することである。(iii)の段階でy軸の補償磁場コイル方位を基準($Y_x = 0$)としての地磁気成分や補償磁場コイルの傾斜角などが求まる。y軸の補償磁場コイルの地理的な方位はまだ分からないのでD成分は決まらないがH、Z成分は得られている。(iv)の段階でy軸補償磁場

コイル回転軸の地理的方位が得られ、(v) (vi) の段階で地磁気3成分が求められる。(iv) の方位標測定で求まるのは正確には補償磁場コイルの回転軸の方位であり、この段階では回転軸と補償磁場との角度がまだ分かっておらず地磁気3成分も決められない。(ii) (iii) と (v) (vi) でそれぞれのy軸補償磁場コイルの方位を基準として地磁気3成分が得られるから、両者の座標の違いによる見かけ上の水平成分での角度の差も求められ、それは(iv) の反転で生じたものである。これから(iv) の回転軸と(ii) (iii) および(v) (vi) のy軸補償磁場コイルの方位との差を出すことができる。なお、連続して絶対観測を続けるなら(ii) (iii) と(v) (vi) は同じ操作なので、始めに(i) ~ (vi) を行った後は(iv) ~ (vi) を繰り返すのでよい。さらに4章で述べたように水平面での振れがないとすれば、つまりy軸補償磁場コイルの水平面での方位は変動しないと見なせるならば、以後は(vi) を繰り返すだけで他の操作は省略できる。

図6 (a) のような3組の補償磁場コイルがほぼ独立に動作できるなら反転操作する補償磁場コイルが1組だけ(z軸補償磁場コイル) で計算が分かりやすいものの、装置の構造には制約が多くなり製作が難しくなることも考えられる。3組が全て独立に

動作できなくても測定は可能で、例えば図6 (b) ではx軸とz軸の補償磁場コイルは相互に固定されており、それとy軸補償磁場コイルとは別に動作できる構造のイメージ図である。このときは(iv) ではy軸補償磁場コイルだけが反転し、(ii) (iii) あるいは(v) (vi) ではz軸とx軸の補償磁場コイルは同時に反転することになる。x軸補償磁場コイルを鉛直軸に回転させる場合、回転角度の誤差(ω とする。従って回転角度は $\pi + \omega$)があると特にy方向への補償磁場の影響が大きくなる。 $\omega \sim 3$ 分程度以下なら2次項は省略できて補償磁場(X_0, X_y, X_z)は反転後は($X_0, \omega X_0 + X_y, -X_z$)と見積もれる(符号は反転後の補償電流を逆に流していることに注意)。計算には ω による影響を考慮する必要があるが、逆にこれから ω を求めることも可能である。これは反転の角度制御が数分程度の精度でも良いことを意味している。

6. まとめ

ベクトルプロトン方式による地磁気絶対観測について2つの方法を示した。偏角だけを別に測定する方法は装置は比較してよりシンプルにできるが、事前にH, Z成分を求めておかなくてはならず、また方位標の設置場所は東西方向に制限される。それに

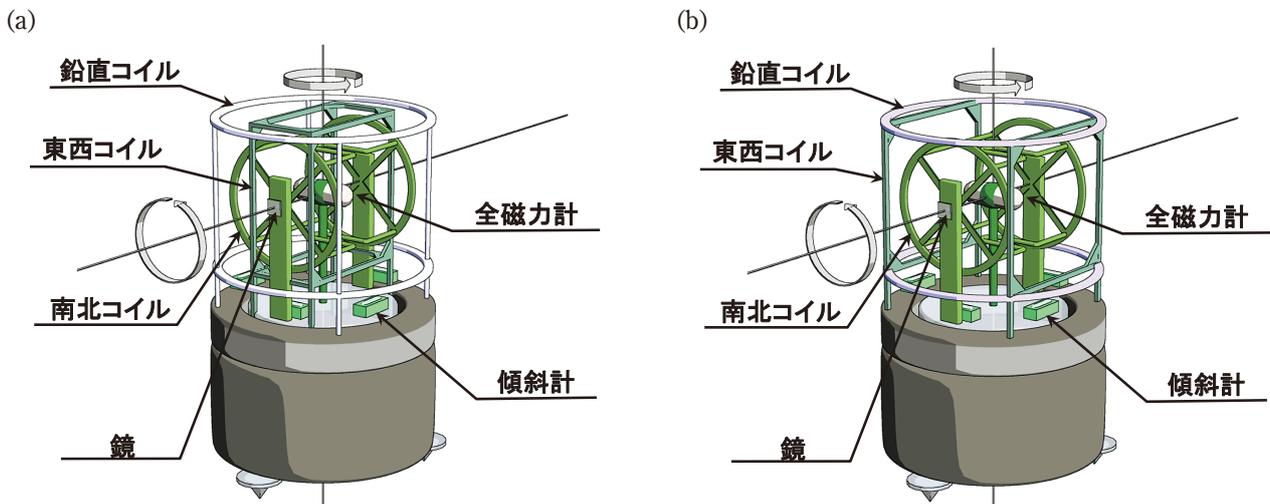


図6 装置のイメージ2

(a) 3組の補償磁場コイルは一体化構造とはなっていない。鉛直方向の補償磁場コイルは単独で鉛直軸に回転でき、南北方向の補償磁場コイルは水平軸に回転できる機構を持つものとする。

(b) (a) との違いは、鉛直方向と東西方向の補償磁場コイルは一体化されていることだけである。東西方向補償磁場コイル枠が鉛直方向補償磁場コイルの支柱を兼ねている。

図中の座標軸と矢印は図5と同じである。(a), (b) どちらも鉛直軸、南北軸には回転するが東西軸には回転しない。それぞれの回転軸でどの補償磁場コイルが回転するのかは

(a) 南北軸：南北コイル、鉛直軸：鉛直コイル

(b) 南北軸：南北コイル、鉛直軸：鉛直コイルと東西コイル

となる。なお、台座上部の内側部分は(a)では東西コイルと南北コイルが、(b)では南北コイルだけが設置されている。必ずしも必要ではないが、この台座上部の内側部分も鉛直軸に回転できる機構となっていれば、偏角の経年変化や地震等で装置がずれた際に、補償磁場コイルの方位の再調整に有用である。

対して3成分まとめて測定する方法では方位標は南北方向に設置してもよく、方位標目盛の読み取りも水平方向だけでも観測は可能である。おのおの長短がありどちらを採用するかは観測所での事情もあろうが、図6(b)に示した装置、つまりx軸、z軸補償磁場コイルは一体構造で、それとy軸補償磁場コイルが別に操作できるタイプであればどちらの方法にも対応できる。y軸補償磁場コイルを東(西)方向に設定することでD成分単独の測定も行える。今回の測定方法で自動計測が行えるなら、現用の手動での観測に比べて個人的な技量等によるばらつきがなく、絶対観測の観測頻度を上げることで変化計基線値の安定性、信頼性向上の可能性も期待できる。なお、留意点としては補償磁場の大きさにもよるが全磁力計の計測値は30,000nT~70,000nTの広範囲に及び、全磁力計に対して磁場の方向も一定していない、ということがあり、実用化に際してはさらなる検討と十分な試験が求められる。全磁力計に方向差や計測値の大きさによる感度あるいは器差に違いがある場合は補正が必要となる可能性もあるが、それらの特性が分かっているならば補正は容易であろう。

謝辞

外谷元観測課長および中島元調査課長からは重要な示唆および資料を提供していただきました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- Allredge, L. R. and I.Saldukas, An automatic standard magnetic observatory, *J. Geophys. Res.* **69**, 1963-1970, 1964.
- Rasson, J. and A.Gonsette, The MARK II automatic Dflux, *Data Science Journal*, vol10, 2011.
- Mizuno, Y., F. Fukui, M. Hashimoto and M. Takada, Stability of Vector Proton Magnetometer at Memambetsu Magnetic Observatory. *Mem. Kakioka Mag. Obs.*, vol22, No.1, 11-20, 1987.
- 徳本哲男, ベクトルプロトン方式を応用した地磁気絶対観測, 地磁気観測所テクニカルレポート, 第5巻第1号, 1-9, 2008.
- Yanagihara, K., M. Kawamura, Y. Sano and T. Kuboki, New Standard Magnetic Observation System of KAKIOKA (KASMMER), *Mem. Kakioka Mag. Obs.*, vol36, No.4, 217-281, 1973.

**Research of an Automatic, Absolute Geomagnetic
Measurement Device
- Application of the Vector Proton Method -**

by

Tetsuo TOKUMOTO and Takeshi OWADA

Kakioka Magnetic Observatory

Received 7 November 2013; Received in revised form 28 February 2014;
accepted 3 March 2014

Abstract

We investigated a new method of making absolute geomagnetic measurements with a device composed of (1) three orthogonal coils to produce an artificial compensating magnetic field, (2) a geomagnetic total force magnetometer installed in the center, (3) a set of tilt meters, and (4) an azimuth mark. Magnetic declination can be measured by using the azimuth mark to determine the precise direction of the artificial magnetic field generated by the compensating coils. We show two measurement methods of (1) magnetic declination only and (2) all three vector components of the geomagnetic field.