

# ベクトルプロトン方式を応用した地磁気絶対観測

徳本哲男（技術課）

2007年8月27日受付, 2007年11月2日改訂, 2007年11月8日受理

## 要 旨

地磁気3成分の絶対観測として、全磁力測定器に直交3軸の磁場補償コイルを組み合わせた装置による測定方法について検討した。ベクトルプロトン方式は優れた成分測定方法だが、補償コイルの傾きや、それが時間的に変動することの誤差のため絶対観測にはなり得ていない。ここではベクトルプロトン方式をもとにして、直交する3軸磁場補償コイルを用いて自然磁場に幾通りかのパターンで人工磁場を加えたときの全磁力値を計測し、地磁気成分値および磁場補償コイルの傾きを変数として取り込んで計算する方法について調査した。

全磁力測定器や補償電流の分解能および安定性などが十分に精度を満たしていることを前提とすれば、現在の磁気儀による絶対観測に相当する精度で地磁気3成分値の絶対値を計測できる可能性がある。

### 1. はじめに

地磁気3成分の絶対観測は柿岡では試験期間も含めれば1972年以来、プロトン磁力計による全磁力値と磁気儀 (DI-72) による偏角 (D)、伏角 (I) を測定する方式が採られている。変化観測装置は高分解能、高サンプリング、かつ自動測定が進んでいる一方で、絶対観測では経緯儀により、その時の地磁気の角度（あるいはそれと直交する方向）を手動操作で測定する方法が続けられている。

これまで絶対観測の自動化を目指して、ベクトルプロトン、ASMO (Allredge and Saldukas, 1964), dIdD (国際電子工業 (株), 2001; Hegymegi et al., 2005) などが試みられてきたが、変化観測としてはともかく絶対観測としては成功していない。ベクトルプロトンは例えば磁場の鉛直成分 (Z 成分) を補償磁場で打ち消すことにより水平成分 (H 成分) を計測することができる (櫻岡, 1966)。地磁気の大きさは柿岡ではおおよそ鉛直成分は35,000nT、水平成分は30,000nT だが、そこで35,000nT の補償磁場を鉛直上向きに加えると地球磁場の鉛直成分が打ち消され、水平成分だけが残る。この時、鉛直成分の補償磁場の大きさが35,000±80nT 程度の範囲にあれば、水平成分は±0.1nT の精度で得られる。補償磁場を作る補償電流の精度が良くなくても安定した成分値が得られる利点はあるものの、補償コイルの傾きに対しては1秒で約0.17nT の誤差を生じて

しまうという問題がある。この方式による絶対観測が実用されない理由の1つは、この補償コイルの傾斜量の把握あるいは制御ができていないことによる。

ASMO では初期設定での地磁気全磁力の向き（その時の伏角を I、偏角を D' とおく）を定めておき、それに対して直交する2方向にそれぞれ補償磁場を加えることで I および D' からのずれ分を計測する。補償コイルの傾きにはある程度対応できるものの、設置台の傾きなどで装置全体の傾きがあると I、D' も変動してしまうという弱点がある。dIdD も測定原理は同様であり同じ問題を抱えている。

### 2. 装置の構成

ベクトルプロトン方式では、水平成分を計測する場合は鉛直成分に、鉛直成分を計測する場合は水平成分に補償磁場をかけて直交する成分を非常に小さくすることで、本来は成分測定ができない全磁力測定器を用いて成分計測できるようになる。全磁力ベクトルの方向に直交する2軸に対して補償磁場を加えた値と、補償磁場のない値（全磁力値）を組み合わせることでそれぞれ偏角、伏角を求める ASMO や dIdD のような方法もある。ベクトルプロトン方式の場合は計測値がそのまま成分値であって分かり易いが、ASMO では若干の計算が必要となる。

これらに対して、ここでは直交3軸コイルで補償

磁場を追加して全磁力値を計測するシステムを考える。システム構成の概略を図1に示す。全磁力測定器センサーとそれを中心として、直交する3軸の磁場補償コイルを付加する。3軸はおおむね水平面上で磁北に直交、および平行する方向と鉛直方向に設置する。それぞれをx軸コイル（東プラス）、y軸コイル（北プラス）、z軸コイル（上プラス）と呼ぶことにする。各軸コイルには電流量を制御して、その軸方向に任意の補償磁場をかけることができる。また補償コイルは水平回転できる機構を持つものとする。その他に重要な条件として、別に変化観測装置があり短時間（次章で述べるように、毎秒計測するならば1分間程度）では基線値変動のない地磁気成分の変化量が得られるものとする。

従って全体の構成としては、全磁力測定器センサーと計測部、3軸磁場補償コイル、電流制御装置、変化観測装置、時計、および収録装置から成る。

### 3. 計測手順および計算方法

座標は3軸直交座標で、y軸は水平面上で概ね磁北方向、x軸は水平面上でy軸に直交する東向き、z軸は鉛直上向きとする。ただし、y軸はy軸コイルの水平方向に一致するものとする。x,z軸コイルは必ずしもx,z方向とは一致せず工作精度や設置誤差等により微小なずれが含まれている。y方向が地理的な北（真北）からどれだけ偏っているかは別の方法で得る必要がある。例えば磁場補償コイル台に方位を計測できる機能を付けて北極星などを観測するような方法が考えられるが、これについては4章でも述べる。磁場補償コイルは温度変化や降雨の影響

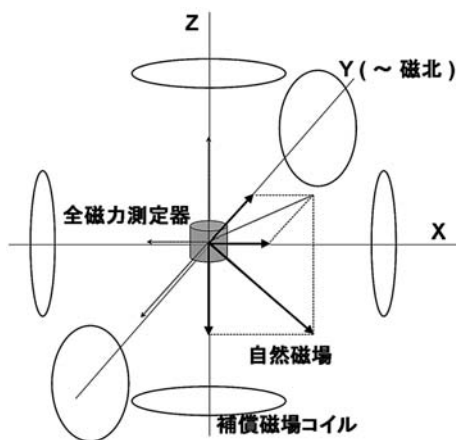


図1 装置の概略

全磁力測定器を中心に、直交する3軸に磁場補償コイルを設置する。それぞれのコイルで適当な大きさの補償磁場を加えたときの全磁力値を計測する。

を受けて傾きは変動するが、“ねじれ”はないとすれば、いちどy方向と真北との角度 ( $D_0$ とする) を決定できれば、地震等による変動がない限りは  $D_0$  は一定としてよいだろう。実際の運用ではチェックの意味も含めて定期的に測定し直すことが望ましいが、その頻度は装置や設置場所の条件で違ってくると思われる。

各軸コイルは概ね座標軸に平行になるように設置するが、実際には微小なずれが残る。そのずれを角度で表すこともできるが、ここではずれは微小としてベクトル成分として表示する。例えばx軸コイルがある一定の電流量で作る補償磁場のベクトルを  $(X_0, X_y, X_z)$  と表す (図2)。ここで  $X_0 \gg X_y, X_z$  である。補償磁場の大きさ  $X_0$  を30,000~40,000nT、x軸からの傾きを仮に10分程度とすれば、 $X_y, X_z$  は100nT程度となる。同様にy軸、z軸コイルの作る補償磁場ベクトルは  $(Y_x, Y_0, Y_z)$ 、 $(Z_x, Z_y, Z_0)$  で表す。上で述べたことから  $Y_x = 0$  である。

地磁気成分を  $(x, y, z)$  と表すと柿岡近辺では  $x \sim 0$ nT (初期設定ではこの方向に設置する)、 $y \sim 30,000$ nT、 $z \sim -35,000$ nT となる。補償磁場を加えることでその成分をほぼゼロにすると他の成分だけが残るので計算上は都合がよい。x成分の計算精度を考慮すると、y,z成分がゼロのときに全磁力値が計測できるよう  $X_0$  はy,z成分と同等程度の大きさにしておくことが望ましい。そこで、 $X_0 \sim 40,000$ nT、 $Y_0 \sim 30,000$ nT、 $Z_0 \sim 35,000$ nT として、x軸コイルには  $0, \pm X_0$ 、y軸コイルには  $0, -Y_0, -2Y_0$ 、z軸コイルには  $0, +Z_0, +2Z_0$  とそれぞれ補償磁場ゼロも含めて3パターンの補償磁場をかけてその時の全磁力値を計測する。各軸コイルの補償磁場ベクトルが座標軸に平行でない場合は、 $X_y$  等の他成分への影響量も電流の大きさに応じて増減することになる。これまでのベクトルプロトン方式では通常、複数の補償磁場を同時に加えることはなかったが、その制約をはずして表1に示すパターンの補償磁場をかける。同表には

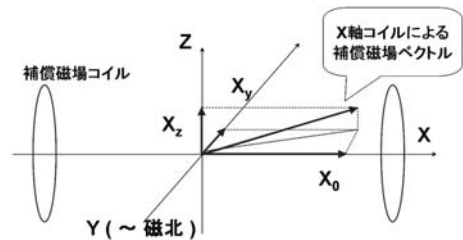


図2 補償磁場ベクトル

x軸コイルの方向がx座標軸から微小角ずれているときに、x軸コイルが作る補償磁場の成分を  $(X_0, X_y, X_z)$  で表す。他の軸コイルの補償磁場成分も同様。

適当な数値を当てはめて、予測される大まかな全磁力計測値も示している。C<sub>x</sub>, C<sub>y</sub>, C<sub>z</sub>は各軸の補償磁場の大きさにかかる係数であり、例えば0番目はC<sub>x</sub>=C<sub>y</sub>=C<sub>z</sub>=0で補償磁場がないときの地磁気全磁力値であり、1番目はz成分上向きにC<sub>z</sub>×Z<sub>0</sub>(1×35,000nT)を加えて、その時の全磁力計測値(ほぼ水平成分)が30,191.5nTとなることを意味している。1番目ではz軸コイルが傾いているためz成分の他にx成分に-100nT(=C<sub>x</sub>×Z<sub>x</sub>), y成分に+

90nT(=C<sub>z</sub>×Z<sub>y</sub>)が加わることになる。

補償磁場は各軸コイルで3パターンなので3<sup>3</sup>=27通りとなるが、組合せによっては全磁力値が小さすぎて計測できない場合があるので、それ((C<sub>x</sub>, C<sub>y</sub>, C<sub>z</sub>)=(0, -1, +1)の場合)を除いた26パターンを用いることにする。表1の全磁力値では、最小値はx, z成分が非常に小さくなりy成分のみとなる(1番目, 6番目)の~30,000nT程度、最大値はx, y, z成分共に磁場成分が大きい(8, 10, 14, 16, 17, 19, 23, 25番目)の~61,000nT程度となり、オーバーハウザー型磁力計などで計測できる範囲内にある。ただしASMOとは違って全磁力値の最大値と最小値には倍近い違いがあるため、計測ごとにチューニングの必要があるかも知れない。

表1 補償磁場追加パターンと全磁力値  
地磁気磁場成分と各補償磁場ベクトルは以下のよう  
においた。  
(x, y, z) = (-120, 30100, -35200)  
(X<sub>0</sub>, X<sub>y</sub>, X<sub>z</sub>) = (40000, 100, -70)  
(Y<sub>x</sub>, Y<sub>0</sub>, Y<sub>z</sub>) = (90, 30000, 80)  
(Z<sub>x</sub>, Z<sub>y</sub>, Z<sub>0</sub>) = (-100, 90, 35000)  
単位はnT。これにC<sub>x</sub>, C<sub>y</sub>, C<sub>z</sub>をかけた値をそれぞれ  
地磁気磁場の各成分に加えたときの全磁力値を示  
す。

番号	C <sub>x</sub>	C <sub>y</sub>	C <sub>z</sub>	全磁力値[nT]
0	0	0	0	46314.8
1	0	0	1	30191.5
2	0	0	2	46130.5
3	0	-1	0	35280.3
4	0	-1	2	34722.6
5	0	-2	0	46307.2
6	0	-2	1	29813.0
7	0	-2	2	45643.3
8	1	0	0	61208.1
9	1	0	1	50000.1
10	1	0	2	60857.4
11	1	-1	0	53292.4
12	1	-1	1	39782.6
13	1	-1	2	52680.8
14	1	-2	0	61104.3
15	1	-2	1	49652.0
16	1	-2	2	60389.8
17	-1	0	0	61186.0
18	-1	0	1	50230.2
19	-1	0	2	61257.3
20	-1	-1	0	53379.4
21	-1	-1	1	40220.6
22	-1	-1	2	53254.8
23	-1	-2	0	61278.0
24	-1	-2	1	50123.3
25	-1	-2	2	60989.5

全磁力値は自然磁場と補償磁場をベクトル加算したスカラー値で(1)式で示される。ここでFは全磁力計測値で、括弧内の*i*は表1の番号に相当し、0 ≤ *i* ≤ 25である。x, y, zは、表1での0番目の時の地磁気成分値とする。δ<sub>x</sub>, δ<sub>y</sub>, δ<sub>z</sub>は地磁気成分値の変化分で既知である。表1に合わせた補償磁場を与えれば26個の全磁力の計測値が得られる。未知数は地磁気成分x, y, zの3個と各補償磁場ベクトル9個(3×3)だが、Y<sub>x</sub>=0と設定しているので、合計3+3×3-1=11個となる。計測した全磁力値に最もフィットするように未知数を数値計算によって求める。今回は修正マルカート法を用いて計算した(中川・小柳, 1982)。

$$F(i) = \sqrt{X_c^2(i) + Y_c^2(i) + Z_c^2(i)}$$

$$\begin{aligned} X_c(i) &= x + \delta_x(i) + C_x(i)X_0 + C_y(i)Y_x + C_z(i)Z_x \\ Y_c(i) &= y + \delta_y(i) + C_x(i)X_y + C_y(i)Y_0 + C_z(i)Z_y \\ Z_c(i) &= z + \delta_z(i) + C_x(i)X_z + C_y(i)Y_z + C_z(i)Z_0 \end{aligned} \quad (1)$$

計算においては、電流の大きさ、従って補償磁場の大きさは正確であるとしている。全磁力の計測値に誤差を加えない場合では未知数は正確に求まるが、全磁力値に±コンマ数nT程度のランダム誤差を加えると正しい値は得られなくなる。計算結果の一例を表2に示す。表の数値は計算値と正しい解との差で、各行は異なる初期値で計算した結果である。それぞれ残差は十分に小さくなるが、初期値によって異なる値に収束してしまい、解が不定の状態となる。これを見てみると以下のような性質があることが分かる。

- (1) 補償磁場の大きさX<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>は概ね正確に求まっている。
- (2) X<sub>y</sub>も比較的正しい値に近い。
- (3) x+Z<sub>x</sub>, y+Z<sub>y</sub>, z-Y<sub>z</sub>はほぼ一定となる。

表2 補償磁場パターン(表1)での計算例

表には計算値と正しい値との差を nT 単位で示す。下の2段には平均値(Ave.)と標準偏差(s.d.)を表示した。

	x	y	z	X <sub>0</sub>	X <sub>y</sub>	X <sub>z</sub>	Y <sub>x</sub>	Y <sub>0</sub>	Y <sub>z</sub>	Z <sub>x</sub>	Z <sub>y</sub>	Z <sub>0</sub>	x+Z <sub>x</sub>	y+Z <sub>y</sub>	z-Y <sub>z</sub>
	-164.2	52.1	45.9	-0.6	1.1	-186.4	0.0	-0.3	44.6	163.0	-51.9	0.1	-1.2	0.1	1.3
	-43.1	104.1	89.8	0.0	0.7	-48.9	0.0	-0.5	89.1	42.9	-103.8	0.1	-0.3	0.3	0.8
	-37.0	-42.7	-36.0	0.0	0.2	-42.4	0.0	0.0	-36.2	36.8	42.3	-0.1	-0.2	-0.4	0.2
	45.8	150.6	129.6	0.2	0.2	52.0	0.0	-0.7	128.8	-45.3	-150.2	-0.2	0.4	0.5	0.8
	-146.8	33.6	29.9	-0.5	0.9	-166.6	0.0	-0.2	28.9	145.7	-33.6	0.1	-1.1	0.1	1.1
	-196.1	-96.6	-80.8	-0.9	0.0	-222.9	0.0	0.0	-82.0	194.6	95.8	-0.4	-1.5	-0.8	1.2
	-167.6	-20.7	-16.4	-0.6	0.6	-190.4	0.0	-0.1	-17.5	166.4	20.5	0.0	-1.2	-0.2	1.1
	-117.3	-81.3	-68.4	-0.3	0.1	-133.5	0.0	0.0	-69.0	116.4	80.6	-0.2	-0.9	-0.7	0.6
	-165.2	14.1	13.4	-0.6	0.9	-187.6	0.0	-0.2	12.2	164.0	-14.2	0.1	-1.2	0.0	1.1
	-59.3	91.1	78.7	0.0	0.8	-67.2	0.0	-0.4	77.9	58.9	-90.8	0.2	-0.4	0.3	0.8
	126.3	-35.2	-29.9	0.1	-0.1	142.8	0.0	-0.1	-29.8	-125.2	34.9	-0.7	1.1	-0.3	-0.1
Ave.	-84.0	15.4	14.2	-0.3	0.5	-95.6	0.0	-0.2	13.4	83.5	-15.5	-0.1	-0.6	-0.1	0.8
s.d.	101.6	79.2	67.6	0.4	0.4	115.2	0.0	0.2	67.5	100.8	78.8	0.3	0.8	0.4	0.4

ここで言う、正確等とは1 nT以下程度の正しさである。(3)は表2の右3列に示したが、地磁気成分と補償コイルの傾きによる影響を分離できず、その分だけ自由度が残っている。なお、(2)と $Y_x=0$ とから、x軸コイルとy軸コイルの水平面での相対的な角度はこれで知ることができる。

さて、(3)からz軸コイルの傾き( $Z_x, Z_y$ )が分かれば、x, yが得られ、続けて全磁力値Fからzを求められる。(3)の自由度をなくすために、さらに何らかの制約条件を加えるか、別の計測結果を付加するかの必要がある。

(a) z軸コイルに傾きはないとする( $Z_x=Z_y=0$ )

(b) z軸コイルをz軸について180度回転させて同様の補償磁場追加パターンで計測する

上の2つについて計算したところ、どちらも正しい値が得られた。(a)のように設置することは現実的には難しく、また完全に水平に設置されたとしてもそれを確認する方法を持ちあわせていない。(b)については傾きが微小であるとの前提から、鉛直軸に対して180度回転(以下、反転と呼ぶ)によってz軸コイルによる補償磁場ベクトル( $Z_x, Z_y, Z_0$ )が( $-Z_x, -Z_y, Z_0$ )になるとした。ただしこれは、回転軸が正しくz方向と一致している場合に限られる、ということに注意しなければならない。例えばz軸コイルを載せている台座に傾きがあれば $Z_x \rightarrow Z_{xp}+Z_x$ 等( $Z_{xp}$ は台座の傾きによるx成分への影響量とする。 $Z_{xp}$ も未知数である)と台座の傾きとコイル自体

の傾きを加えたものになるので、反転により( $Z_{xp}+Z_x, Z_{yp}+Z_y, Z_0$ )から( $Z_{xp}-Z_x, Z_{yp}-Z_y, Z_0$ )になるとすべきである。これを考慮した場合には反転によっても符号が変わらない $Z_{xp}, Z_{yp}$ は最初の結果と同様にx, yと分離できず正しい値は求まらない。回転軸を鉛直とするためには例えば、z軸コイルを吊り下げ式とする方法が考えられる。あるいは補償コイルを液面(水平面)に浮かべる方式等によって $Z_{xp}=Z_{yp}=0$ とできるなら正しく地磁気成分値を計算することができる。(b)の計算結果の一例を表3に示す。この場合は初期値に関わらず同じ値に収束することを確認した。表の各行では、全磁力の計測値に加えるランダム誤差を変えている。この表では、計算値はおおよそ0.3nT以下の精度で求まっている。計測値に加えるランダム誤差の大小に応じて計算値の精度も変化する。これは、得られる計算値の精度は全磁力値の観測精度に影響されることを意味している。

計測サンプリングについて補足しておく。例えばASMOでは補償電流をゼロ、プラス、マイナスに流したときの計測で3回、あるいはさらに補償コイルを180度回転して再び補償電流プラス、マイナスでの計測を加えたものを、それぞれ偏角、伏角合わせて10回程程度の全磁力値計測を1セットとして地磁気絶対値が得られる。今回の方法ではz軸コイルの反転前後で同様に計測するので $26 \times 2 = 52$ 回の測定を行う。ただし、26という数字は各軸コイルで補償磁場を3パターンとしたことから出した回数であり、

表3 z軸コイル反転を含めた場合の計算例

表には計算値と正しい値との差を nT 単位で示す。下の2段には平均値 (Ave.) と標準偏差 (s.d.) を表示した。

	x	y	z	X <sub>0</sub>	X <sub>y</sub>	X <sub>z</sub>	Y <sub>x</sub>	Y <sub>0</sub>	Y <sub>z</sub>	Z <sub>x</sub>	Z <sub>y</sub>	Z <sub>0</sub>
	-0.03	0.05	-0.06	-0.08	-0.03	-0.01	0.00	-0.06	0.08	0.01	0.01	0.06
	0.15	0.13	0.10	0.00	0.11	0.18	0.00	0.06	0.02	0.02	-0.03	-0.06
	-0.02	0.00	0.06	0.05	0.02	0.14	0.00	0.00	0.09	-0.09	-0.03	0.04
	0.07	-0.03	-0.12	-0.08	-0.13	0.11	0.00	0.01	-0.13	0.00	-0.04	0.03
	0.02	-0.19	0.14	0.13	-0.14	0.02	0.00	-0.20	0.19	-0.06	0.00	0.07
	0.05	-0.07	-0.07	-0.03	-0.01	-0.04	0.00	0.03	-0.09	-0.04	-0.02	0.05
	0.00	0.04	-0.02	-0.13	-0.03	-0.01	0.00	0.09	-0.11	0.04	0.02	-0.06
	-0.09	0.04	-0.15	-0.06	-0.10	0.04	0.00	0.05	-0.21	0.00	-0.05	-0.05
	0.00	0.22	0.20	0.01	0.18	0.07	0.00	0.14	0.26	0.08	-0.07	0.03
	-0.08	-0.22	-0.04	0.14	-0.01	-0.08	0.00	-0.19	-0.07	-0.08	-0.02	0.02
	-0.04	-0.28	-0.13	0.11	0.12	0.23	0.00	-0.21	-0.12	0.01	-0.04	-0.04
Ave.	0.00	-0.03	-0.01	0.01	0.00	0.06	0.00	-0.03	-0.01	-0.01	-0.02	0.01
s.d.	0.07	0.15	0.12	0.09	0.10	0.10	0.00	0.12	0.15	0.05	0.03	0.05

必ずしもこれだけの回数が必要というわけではない。それでも ASMO に比べて多くの計測回数を要することに違いはない。ASMO では偏角、伏角を別々に計測するが、今回の方法は1セットの計測でまとめて地磁気3成分の絶対値を計算する。そのため表1の補償磁場パターンを延々と繰り返して連続して計測する場合には、現時点から前の52回分の計測値を用いて計算できるので、各計測ごとに地磁気絶対値を求めることができる。従って連続して計測する場合には、1セットに要する計測回数が多くても地磁気絶対値のサンプリングが長くなるわけではない。

#### 4. 偏角の計測

3章では、y軸コイルの水平成分方向をy軸と設定し、それが地理的な北方向からどれだけずれているかは別に決めるとした。通常は、補償コイルと経緯儀を組み合わせることで北極星や方位の分かっている地上のマークを観測する方法が採られるだろう。この方法は直接的で分かり易いが、経緯儀としての問題点、目盛板の歪みや誤差、望遠鏡と補償コイルとの平行性の工作精度、読み取り誤差などが含まれる。また、現状では手動操作が必要となる。ここでは別の方法を提案し、その調査結果を述べる。

これまで述べた絶対観測装置をAとし、これと同様な装置をもう一台用意しBとする。座標軸は水平面上で東をx方向、北をy方向とし、A, Bの地理的

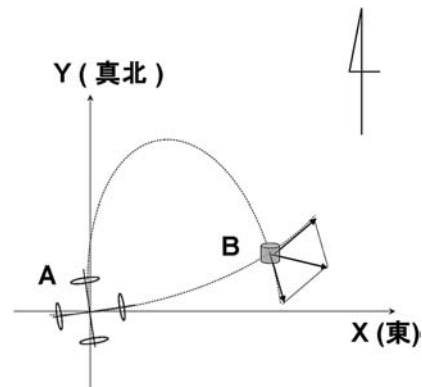


図3 偏角測定概念図

Aのx, y軸コイルの補償磁場によりBの全磁力値が変化する。A, Bの座標とBでの全磁力値からx, y軸コイルの水平面での方向を求める。

な座標は正確に分かっているものとする。Aのx, y軸コイルで補償磁場を発生させ、Bで全磁力値を計測する。この計測値とA, Bの相対位置から、地理的座標でのAのy軸コイルの向きを求めようとする方法である。y軸コイルの地理的な方位が分かれば、3章で求めた地磁気3成分値を座標回転することで地磁気偏角が求まることになる。X<sub>y</sub>等の記号は同じものを使うが、この章では上述の地理座標での値であることに注意されたい。従って一般にY<sub>x</sub> ≠ 0である。今回はx, y軸コイルを磁気ダイポールと見なしてBでの磁場を計算した。AB間の距離が短く、磁気ダイポールとして近似できない場合には、コイル

の大きさや枠の形状からBへの影響量を直接計算する必要がある。BはAと同じ水平面上にセットし、補償磁場をかけてz成分をほぼゼロにしておく。そうすることでBに作られるz成分磁場は小さくなり、Bの全磁力値からz成分の影響は除かれてx,y軸コイルの水平面での方向算出の精度を上げることができる。3章の(1),(2)からx軸コイルとy軸コイルの水平面内での相対角度は分かっているので、x,y軸コイルの相対角度も束縛条件に入れて計算した。

計算結果の一例を表4に示す。意図的にz成分を小さくしたため $X_z, Y_z$ およびBでのz成分値のばらつきは大きくなっているが、 $X_0, X_y, Y_x, Y_0$ は2~3 nT以内に収まっている。ここでの計算では、初期値により収束しない場合も多いが、多数計算して残差がある程度小さくなるものだけを平均すれば1 nT以下程度の精度になることが期待できる(表4の下から2行目)。これは補償コイルの水平面での

角度にすると数秒程度となる。

設置台や補償コイルなど、一旦、方位が決まれば傾きは変化しても鉛直軸での回転はごく小さいと思われるので、計測頻度は少なくとも良いと考えている。なお、B点に対して数万nT程度の磁場を与えるためには極めて大きな電流が必要となること、それだけの磁場が作れたとしたらその影響は非常に遠くにまで及んでしまうことなど、実用に際しては留意しておかなければならない。

## 5. 結論

これまで述べてきたように、全磁力測定器と直交3軸の磁場補償コイルを組み合わせることで地磁気絶対値を得ることができる。x軸コイルとy軸コイルは相互に固定していても構わない。y軸の真北からの方位は4章で述べた方法で求められる可能性がある。その場合、通常の観測ではx,y軸コイルを鉛直軸に回転する必要はないが、初期設置にあたって

表4 偏角測定の計算例

表には計算値と正しい値との差を示す。x,y,zはBでの磁場である。下の2段には平均値(Ave.)と標準偏差(s.d.)を表示した。D<sub>x</sub>,D<sub>y</sub>はy軸コイルの北からの偏りで、それぞれx軸コイル,y軸コイルを基準にして求めたもの。計算ではx軸コイルとy軸コイルの相対角度が一定であることを条件にしているので概ね近い値となっている。単位はD<sub>x</sub>,D<sub>y</sub>は秒、それ以外はnTである。計算では、補償コイルに流す適当な電流量を1単位として、x軸コイルに0,±1,y軸には0,±1,±2の15(=3×5)パターンのうち全磁力値が30,000~80,000nTに収まるものを選んで13パターンで計測した値を用い、AB間は5~6m,水平面高さは数センチ(5cm)違っている等の条件で計算した。各行は初期値を最初の値から±100nTの範囲でランダムに変えて計算した結果を示す。

	X <sub>0</sub>	X <sub>y</sub>	X <sub>z</sub>	Y <sub>x</sub>	Y <sub>0</sub>	Y <sub>z</sub>	x	y	z	D <sub>x</sub>	D <sub>y</sub>
	-1.3	0.6	-30.0	0.0	-2.8	20.0	0.0	5.6	-120.0	4.0	2.4
	-0.6	0.4	45.0	-0.3	0.6	17.5	4.1	-2.5	-118.0	2.3	1.6
	-1.0	-2.2	170.0	1.6	0.1	-180.0	-1.1	1.9	-120.0	-10.8	-11.0
	-1.5	-0.6	170.0	0.6	-0.9	-61.7	-3.5	3.4	69.1	-2.3	-3.0
	0.0	0.4	-30.0	-0.3	0.7	16.0	2.7	-1.6	-90.8	2.0	1.2
	-0.4	0.6	14.7	-0.3	0.1	20.0	2.8	-0.6	-120.0	3.2	2.0
	-0.1	0.3	-29.9	-0.2	0.5	17.6	2.4	-0.7	-111.0	1.8	1.2
	-0.7	-2.1	170.0	1.5	0.9	-180.0	2.1	-2.2	-120.0	-10.3	-10.8
	-0.8	1.0	17.3	-0.2	-2.1	20.0	4.6	-0.3	-120.0	5.6	2.9
	0.1	-0.6	-30.0	0.5	0.1	-60.2	-2.6	1.0	80.0	-3.3	-3.5
	0.0	0.0	-30.0	0.1	-0.4	-4.4	-3.6	2.5	79.9	0.2	-0.3
	-0.4	0.7	12.0	-0.3	-0.1	20.0	3.3	-0.9	-120.0	3.6	2.2
	-2.0	0.3	130.2	0.0	-2.5	20.0	1.2	3.5	-120.0	2.9	2.1
	1.2	-1.0	-30.0	0.4	3.8	-118.6	0.7	-6.0	80.0	-6.0	-6.1
Ave.	-0.5	-0.2	39.2	0.2	-0.1	-32.4	0.9	0.2	-60.8	-0.5	-1.4
s.d.	0.8	1.0	80.3	0.6	1.6	72.9	2.6	2.9	87.6	5.1	4.7

y 軸コイルをほぼ磁北の方向に合わせるために回転機構を備えていることが望ましい。また  $X_z, Y_z$  は極端に大きくならないよう、コイルの傾きを調整することも求められる。z 軸コイルは x, y 軸コイルとは独立に回転できる機構を持つ必要がある。重要なことは懸垂式等構造を工夫し、z 軸コイルの反転の前後でコイルの傾きが水平面に対して対称になるようにすることである。 $Z_x, Z_y$  の大きさにもよるが、反転の角度が正確に180度でない場合、1度あたり2%程度以下の誤差が見込まれる。概ね3分以内であれば、反転前後での  $Z_x, Z_y$  の違いは0.1nT に収まることになる。

実際の運用では、異常値の判定など幾つかのチェックを併用することが重要である。磁場補償コイルの電流値や傾斜計の値も同時に収録して比較することで計算値の信頼性を高めることができる。コイルに流す電流の制御や全磁力値を自動計測することに技術的な問題はなく十分に可能であろう。手動操作を要するのはz 軸コイルの反転のみとなる。こ

の方式により、絶対観測の個人誤差の排除、観測時間の短縮、観測労力の軽減、測定結果の自動計算が期待される。さらに、z 軸コイルの反転操作も手動によらずモーター等を用いて自動で行えるなら、連続的に地磁気絶対値を計測することも可能となる。

#### 参考文献

- Allredge, L.R. and I.Saldukas, An automatic standard magnetic observatory, *J. Geophys. Res.* **69**, 1963–1970, 1964.
- Hegymegi, L., B.Heilig and A.Csontos, New suspended dIdD magnetometer for observatory use, *Proceedings: XI<sup>th</sup> IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing*, 28–33, 2005.
- 国際電子工業(株), GSM-19 取扱説明書, 2001.
- 中川 徹, 小柳義夫, 最小二乗法による実験データ解析 – プログラム SALS –, 東京大学出版会, 1982.
- 櫻岡 勉, MO-P 型核磁気儀による水平, 垂直成分観測とその補償磁場, 地磁気観測所要報, **12(2)**, 85–97, 1966.

# Geomagnetic Absolute Observation by applied Vector Proton Method

by

**Tetsuo TOKUMOTO**

**Kakioka Magnetic Observatory**

(Received 27 August 2007; received in revised form 2 November 2007; accepted 8 November 2007)

## Abstract

A new method of absolute observation of three geomagnetic field components by a device composed of a geomagnetic total force magnetometer combined with three orthogonal coils to produce a compensating magnetic field was investigated. A vector proton method is an excellent method to measure vector components of geomagnetic fields, however it cannot serve as a magnetic absolute observation because of the inclination of the compensating coil and its fluctuation with time. In this study, a new method based on the vector proton method was considered. Absolute magnetic fields and orientation of compensating coils are calculated from measured values of magnetic total forces for some patterns of artificial magnetic fields added by the three orthogonal compensating coils to each component.

Three components of geomagnetic absolute fields could be measured by the new method with high precision comparable to the current magnetometer in use assuming that resolution and stability of the geomagnetic total force magnetometer and electric current through the coils are adequate.