

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係する誤差および安定度

佐 野 幸 三

概 要

光ポンピング磁力計を用いた成分磁場測定法ならびに測定誤差および安定度、特に偏角観測の場合について詳細に考察した結果について議論する。光ポンピング磁力計による直接の高精度偏角測定法は現在の技術では不可能で、実用上採用しうる同測定法は水平成分 H と水平面内適当な方向の H の分力を同時測定し、合成するという複雑な方法でなければならない。なお、地球磁場の3成分として、水平成分、鉛直成分および偏角を取るという立場に立って考察を進めた。

観測精度、誤差の考察の結果によれば、観測精度を 0.1γ または $0.01' \sim 0.02'$ にするためには補償磁場の $0.5'$ 以内という非常に高い方向の安定度が要求される。補償磁場の方向の変化（特に被測定磁場方向への）に起因する誤差は最も大きく安定度に影響するが、この誤差をうへの精度以内にすることは不可能に近いことである。一方、補償磁場の大きさの補償精度は各磁力計で少々差があるが、最もシビアな偏角磁力計の場合 $20\gamma \sim 30\gamma$ の精度が必要である。これは技術的にそれほど困難なものではない。偏角の観測精度は測定系が複雑になることもあって、他の水平成分、鉛直成分の観測精度よりも劣る。なお、本論文で議論する観測精度、誤差には光ポンピング磁力計そのものの精度、誤差は含まれていない。この問題については別の機会に述べる。

§1 は し が き

地球磁場各成分の連続観測のための測器としてはマグネットを用いた変化計が現在もおお代表的なもので、多くの観測所で用いられている。変化計は最も簡単にして、比較的精度、安定度も高いものであるが、最近各方面から要求がある地球磁場の精密観測という観点からすれば充分なものでない。最も大きな欠点は温度に対して弱いことである。近年になってまったく別種の方法による磁力計が開発されてきている。これらのうち光ポンピング磁力計が代表的なもので、現在のところ最も安定度の高い磁場測定器とされている。しかし、光ポンピング磁力計にも問題がない訳ではない。光ポンピング磁力計は本質的に全磁力測定器であって、各成分をダイレクトに測定することが不可能である。これはプロトン磁力計の場合とまったく同様である。各成分を測定する場合には全磁力に人工的な補償磁場を附加し、各成分担当の磁場にしてやらなければならない。したがって各成分測定の場合にはこの補償磁場の安定度が直接観測精度、安定度に影響してくる。更に決定的な欠点はゼロ磁場近辺での磁場測定が技術的に現在のところ不可能であることである。このことは変化計のように単純に偏角 (D) を測定することができないことを意味する。なお本論文の内容とは直接の関係はないが、光ポンピング磁力計はプロトン磁力計のような絶対値に対する確度がないこと

も大きな欠点である。現在のところ光ポンピング磁力計は直接絶対観測測器とはなり得ないものである。

柿岡地磁気観測所においても光ポンピング磁力計が導入されることになり、現在製作中である。前述したごとく、光ポンピング磁力計による各成分磁場観測の場合補償磁場の安定度が問題になる。本論文ではこの点について議論をし、光ポンピング磁力計による成分観測の安定度および精度について考察してみることにする。地球磁場の3成分として最も一般的な成分は水平成分 (H)、鉛直成分 (Z) および偏角 (D) である。本所の場合もこの3成分を光ポンピング磁力計により観測する計画である。 H -成分および Z -成分についてはプロトン磁力計の場合とまったく同様の方法で観測することができる。したがってプロトン磁力計の観測精度の研究論文^{1) 2) 3) 4) 5)}を参照すればほぼ充分であるので、これらについては簡単に議論するに留める。ここでは最も問題の多い偏角磁力計について、その観測法ならびに観測精度および安定度について詳細に議論することにする。

§2 光ポンピング磁力計による偏角 (D) の測定法

地球磁場の偏角 (D) は説明するまでもなく、水平成分 (H) の方位と地理学上の真北とのなす角度である。一般に我々は D -成分を連続的に観測する場合、ある基準偏角 (一般に観測点の平均的偏角とする) とそれからの変位角として、すなわち、

$$D = D_0 + \Delta D, \quad \tan \Delta D \cong \Delta D = \Delta H_{\perp} / H_0 \quad (\because \Delta H_{\perp} \ll H_0 \rightarrow \Delta D \ll 1)$$

として求める。但し、ここで D_0 は基準偏角値、 ΔD はそれからの変位角であり、 ΔH_{\perp} は D_0 と直角 (水平面において) 方向の地球磁場の変化量および H_0 はその観測点の平均的水平成分値である。なおより正確には $\Delta D = \Delta H_{\perp} / H$ ($H = H_0 + \Delta H$) であるが、これも柿岡においては $\Delta H \ll H_0$ であり、 $\Delta D = \Delta H_{\perp} / H_0$ としてもほとんどの場合に問題がない。ともかく光ポンピング磁力計による D の観測は上述の ΔH_{\perp} を測定すれば良いことになる。(直接に角度を測定することは不可能である。) 一方、 D_0 は他の準器によって較正し、常数として求められる。しかしながら ΔH_{\perp} は当然ゼロ磁場を中心とする磁場変動、しかも最高の変化の場合でも高々数 100 ガンマの磁場であり、それを測定することは光ポンピング磁力計では不可能である。これを解決する方法として次の方法がある。

その方法は Fig. 2. (a) に示すように ΔH_{\perp} の方向つまり基準偏角と直角の方向の東西いずれかに、光ポンピング磁力計で磁場測定が安定に行なえる程度の一定補償磁場 (H_{\perp})、(一般には $5,000\gamma \sim 10,000\gamma$) を附加して、 ΔH_{\perp} を $\Delta H_{\perp} + H_{\perp}$ として測定することである。この場合地球磁場の水平成分、鉛直成分、つまり全磁力を別の補償磁場で消去してやらなければならないことはいうまでもない。この方法は原理的には簡単であるが、一定補償磁場 H_{\perp} の安定度が直接磁場 (ΔH_{\perp}) の測定誤差となるので、現在の一定磁場を作る技術から考えてこの方法を採用することは不可能に近いことである。このように光ポンピング磁力計により ΔH_{\perp} を直接的にしる間接的にしる測定することは不可能である。となると光ポンピング磁力計による D -成分観測は別の方法を考えなければならない。

別の方法として Fig. 1. に示すように H -成分の任意分力、即ち水平成分の水平面内にお

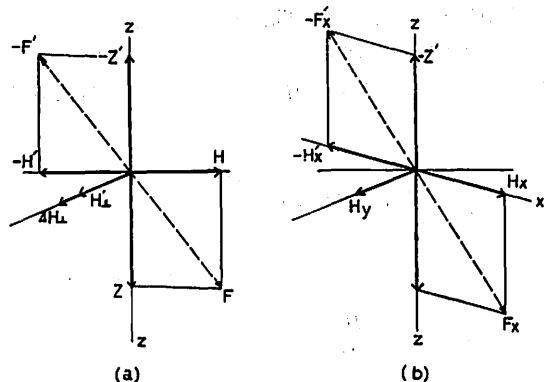


Fig. 2. Vector diagram of the compensating fields and geomagnetic field component in a few cases of D or H_y component observation.

値は、 H_y および H —成分の値から計算によって求めることは簡単に出来るが、 D —成分のアナログ化については H_y —成分と H —成分とをなんらかの方法でアナログ的に合成してやる必要がある。すなわち、前述したように偏角のある基準点からの変化 (ΔD) は

$$\cos(\theta_0 + \Delta D) = \frac{H_y}{H} = \frac{(H_y + \Delta H_y)}{H_0 + \Delta H} \quad (4)$$

なる関係がある。ただしここで $\cos \theta_0 = H_{y0}/H_0$ 、 H_{y0} および H_0 は夫々基準値、 ΔH_y および ΔH はそれぞれ基準値からの変化量である。この形では簡単な ΔD の合成はむずかしい。そこで (4) 式は $\Delta H_y \ll H_{y0}$ 、 $\Delta H \ll H_0$ および $\Delta D \ll 1$ という条件を充分通常満足しているので、次のように変形近似し、 ΔH_y と ΔH を差動の形にして合成する。すなわち、(4) 式の両辺を展開等整理をし、第 1 次項のみ考慮すれば、偏角の変化量 ΔD は

$$\Delta D = \frac{1}{-\sin \theta_0 \cdot H_0} (\Delta H_y - \Delta H \cos \theta_0) \quad (5)$$

と第 1 次近似される。(5) 式の関係で光ポンピング磁力計の各周波数変動 $\Delta H(f)$ および $\Delta H(f)$ を電圧に変換して合成するか、又はあの特典条件 ($\cos \theta_0 = 1/2$) のもとでは周波数の差動を取り合成しそれを周波数電圧変換すれば、 ΔD —成分のアナログ変換は可能である。しかしながら、(5) 式においては 2 次項を無視しているのでその誤差が当然考えられる。なお、詳細な ΔD —成分のアナログ変換の技術的なことについては別の機会に述べることにする。

§3 H_y —成分磁場観測における誤差 (安定度) 及び精度

H_y —成分の測定は前述したように地球磁場の Z および H_x —成分を独立に消去するか、両成分の合力 F_x を消去しなければならない。今、前者による方法を 2 成分補償磁場法、後

者による方法を1成分補償磁場法による H_y -成分測定と呼ぶことにする。次に両補償磁場法における、 H_y -成分の測定誤差（安定度）について考えることにする。

H_y -成分の測定誤差は H_y -成分を測定しようとして附加する補償磁場と地球磁場との合力が、真の H_y -成分とどの程度に一致しているかによって定義される。すなわちある時刻における地球磁場の真の H_y -成分を H_y 、補償磁場と地球磁場との合力を H_y' とし、測定誤差（絶対誤差）を ϵ と表わせば、 ϵ は

$$\epsilon = |H_y'| - |H_y| \quad (6)$$

として求められる。 \vec{H}_y および \vec{H}_y' を図示すれば Fig. 3 の通りである。ここで ΔH_{yx} , ΔH_{yz} および ΔH_{yy} は後に定義する座標系における H_y -成分の測定誤差磁場成分である。以上の

通りで H_y -成分測定法誤差を論ずることは、 ΔH_{yz} , ΔH_{yx} , ΔH_{yy} を計算し H_y' を求めることである。

ここで注意すべきことは光ポンピング磁力計は前述したごとく、一般に磁場測定の絶対値に関しては我々が望むほどの精度を持っていない。それで絶対値についてはプロトン磁力計等によって校正してやらなければならない点が欠点であった。したがって光ポンピング磁力計を変化観測的な用途に使用する場合

(本所における用途の場合)、前述の $\epsilon = |H_y'| - |H_y|$ の絶対誤差がすべて問題になるという訳ではない。なぜならば今 $\epsilon = \text{一定}$ (時間的に) とすれば、これは光ポンピング磁力計における絶対値の不確実性と等価であり、プロトン磁力計等の一回の校正により除去することができるからである。ここで問題になるのは誤差 ϵ の時間的な変動量である。しかし本論文においては先ず絶対誤差について述べ、最後にその時間的な変動について議論する。

(1) 2成分補償磁場法における H_y -成分の測定誤差および安定度

(a) H_y -成分の絶対誤差について

2成分補償磁場法における地球磁場の各成分および補償磁場各成分の関係を Fig. 4. に示した。Fig. 4 に示した xyz および XYZ 座標は次のように定義する。 xyz 座標系は地球に固定した直交座標系で、 z 軸は鉛直方向、 xy 面は水平面で Fig. 4. (b) に示すようにその方向は地球磁気平均又は基準子午線より東方に θ_0 の角度を持つ方向とする。この座標系における地球磁場の各成分は Fig. 4. に示すごとく、また前にも定義したように、 H_x , H_y および Z である。 $(\vec{H}_x + \vec{Z} \equiv \vec{F}_x)$ も同様)。一方、 XYZ 座標は補償磁場を作るヘルムホルツコイル系に固定した直交座標系で、その Z 軸はコイル系の鉛直廻転軸と一致させてとり、 XY 軸はそれぞれ x , y 方向に取るが、コイル系の鉛直廻転軸の鉛直度に関係して微小角だけ x , y 方向(軸)より変位している。即ち、Fig. 4. に示す如く、 Z 軸(コイル系の鉛直軸)

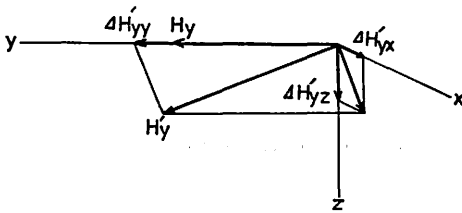


Fig. 3. Vector diagram of H_y' -field measured and true H_y -field.

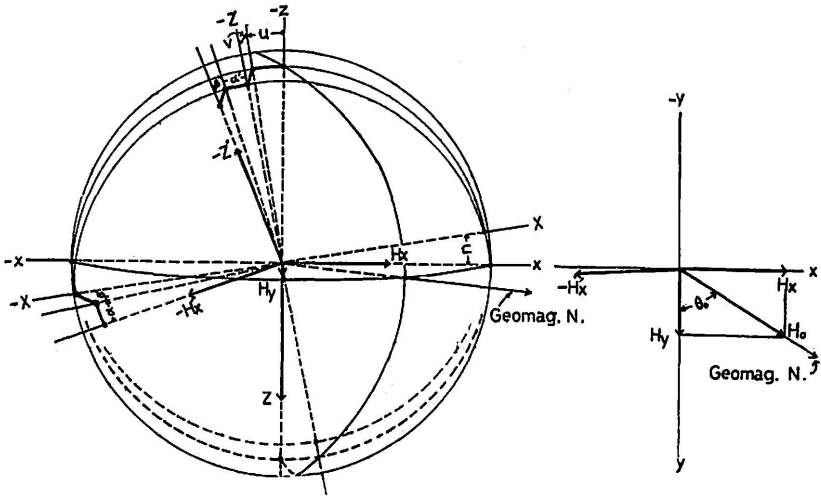


Fig. 4. Determination of error in the case of H_y -component measurement with two compensating fields.

は $-x$ 方向に微小角 u , $+y$ 方向に v だけ斜むいと仮定し、これに対応して X 軸は Y 軸を中心にして反時計廻りに u だけ変位し、 Y 軸は x 軸を中心にして v だけ $+$ 方向が下方に変位している座標系である。この u, v という微小角は我々が一般に呼んでいるレベルの誤差角に相当するものであり、コイル系の設置誤差にもとづくものである。この誤差角はコイル系のレベルを測定することによって求められるものである。

補償磁場は云うまでもなく補償コイルによって作られるので、補償磁場は XYZ 座標系に一般に固定したものである。 H_x' 用補償磁場は X 方向に、 Z' 用補償磁場は Z 方向に設置されるものであるが、実さいにはその設置精度に基づく微小誤差角をもって Fig. 4 に示すような方向に向いているものとする。これら微小誤差角を H_x' 補償磁場に関するものを α, β , Z' 補償磁場に関するものを α', β' と Fig. 4 に示すように定義する。一般に $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ は補償コイルの工作精度およびコイル系の設置精度に起因するものである。

以上のように補償磁場および地球磁場を考えれば、 H_y -成分の測定誤差は補償磁場と地球磁場の合力 H_y' を求め測定せんとする H_y -成分との差 $|H_y'| - |H_y|$ を計算することであるので、まず H_x' および Z' の XYZ 座標成分を計算し、更にこれを xyz 座標成分に変換して、地球磁場の xyz 座標成分、 H_x, H_y, Z と合成をして H_y' -成分を求めることにする。

H_x' および Z' の XYZ 成分を夫々 $H_{x'x}, H_{x'y}, H_{x'z}$ および $Z_{x'}, Z_{y'}, Z_{z'}$ とすれば、Fig. 4 より明きらかにこれらの成分は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} H_{x'x} &= -H_x' \cos \alpha \cos \beta & Z_{x'} &= Z' \sin \alpha' \\ H_{x'y} &= H_x' \cos \alpha \sin \beta & Z_{y'} &= -Z' \cos \alpha' \sin \beta' \\ H_{x'z} &= H_x' \sin \alpha & Z_{z'} &= -Z' \cos \alpha' \cos \beta' \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

但し、 H_x' , $Z' > 0$ として表示した。又 $\alpha, \beta, \text{etc.}$ も Fig. 4 に示す方向を正とした。

次にこれらを xyz 座標成分に変換するのであるが、 XYZ 座標を xyz 座標に変換する方向余弦は次の通りである。

	x	y	z
X	$\cos u$	0	$-\sin u$
Y	$\sin u \sin v$	$\cos v$	$\cos u \sin v$
Z	$\sin u \cos v$	$-\sin v$	$\cos u \sin v$

更に H_x' と Z' をまとめて示すために $\vec{H}_x' + \vec{Z}' \equiv \vec{R}$ と定義し (\vec{R} は \vec{F}_x であるが F_x なるノータンションを使用すると1成分補償磁場法の F_x と混同するので R というノータンションを用いた), \vec{R} の xyz -成分を夫々 R_x, R_y, R_z とすれど, R_x, R_y, R_z は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} R_x &= H_x'(\sin \alpha \sin u \cos v - \cos \alpha \cos \beta \cos u) \\ &\quad + Z'(\sin \alpha' \cos u - \cos \alpha' \cos \beta' \cos v \sin u) \\ R_y &= H_x'(\cos \alpha \sin \beta \cos v - \sin v \sin \alpha) \\ &\quad + Z'(\cos \alpha' \cos \beta' \sin v - \cos \alpha' \sin \beta' \cos v) \\ R_z &= H_x'(\cos \alpha \cos \beta \sin u + \cos \alpha \sin \beta \cos u \sin v \\ &\quad + \sin \alpha \cos u \cos v) - Z'(\sin \alpha' \sin u \\ &\quad + \cos \alpha' \sin \beta' \cos u \sin v + \cos \alpha' \cos \beta' \cos u \cos v) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで (8) 式の三角函数の項を展開し, $\alpha, \beta, \text{etc.}$ は微小角であるので2次項まで考慮すると (8) 式は ($\alpha, \beta \dots$ はラジアンを単位とするもの)

$$\left. \begin{aligned} R_x &= Z'(\alpha' - u) - H_x' \left(1 - \frac{\alpha^2 + \beta^2 + u^2}{2} - \alpha u \right) \\ R_y &= Z'(v - \beta') + H_x'(\beta - v \cdot \alpha) \\ R_z &= H_x'(\beta \cdot v + \alpha + u) - Z' \left(1 - \frac{\alpha'^2 + \beta'^2 + u^2 + v^2}{2} + \alpha' u + v \cdot \beta' \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

と表わされる。(9) 式は補償磁場の成分の非常に精度の高い近似式である。

\vec{R} の xyz の成分が求められたので, 次に補償磁場と地球磁場との合成磁場すなわち H_v' を求める。 H_v' の xyz 成分を $\Delta H'_{vx}, H_v + \Delta H'_{vy}, \Delta H'_{vz}$ とすれば, これらは示すまでもなく,

$$\left. \begin{aligned} \Delta H'_{vx} &= H_x + R_x' = H_x - H_x' \\ &\quad + H_x' \left(\frac{\alpha^2 + \beta^2 + u^2}{2} + \alpha \cdot u \right) + Z'(\alpha' - u) \\ H_v + \Delta H'_{vy} &= H_v + R_y = H_v + H_x'(\beta - \alpha \cdot v) + Z'(v - \beta') \\ \Delta H'_{vz} &= Z + R_z' = Z - Z' + H_x'(u + \alpha + \beta \cdot v) \\ &\quad + Z \left(\frac{\alpha^2 + \beta'^2 + u^2 + v^2}{2} - \alpha' \cdot u - v \cdot \beta' \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

となる。上式で $\Delta H'_{yz}$, $\Delta H'_{yy}$ および $\Delta H'_{yx}$ は測定せんとする磁場 H_y に比して小さな量であり、これらが Fig. 3 に示した測定誤差成分磁場となる。

H_y' の絶対値は

$$|H_y'| = \sqrt{(H_y + \Delta H'_{yy})^2 + \Delta H'_{yz}{}^2 + \Delta H'_{yx}{}^2} \quad (11)$$

であるが、 $\Delta H'_{yz}$, $\Delta H'_{yy}$, $\Delta H'_{yx} \ll H_y$ の条件をこの場合充分に満足しているのので (11) 式は次のように近似できる。

$$|H_y'| = H_y + \Delta H'_{yy} + \frac{(\Delta H'_{yz}{}^2 + \Delta H'_{yx}{}^2)}{2H_y} \quad (12)$$

したがって求めたい H_y 成分の測定絶対誤差は

$$\varepsilon = |H_y'| - |H_y| = \Delta H'_{yy} + \frac{(\Delta H'_{yz}{}^2 + \Delta H'_{yx}{}^2)}{2H_y} \quad (13)$$

より求められる。(13)式に (10)式からの $\Delta H'_{yy}$, $\Delta H'_{yz}$, $\Delta H'_{yx}$ を代入し計算し、微小角 α, β, \dots 等の 2 次項までを考慮すれば ε は

$$\begin{aligned} \varepsilon = & H_x'(\beta - \alpha \cdot v) + Z'(v - \beta') + \frac{(H_x - H_x')^2 + (Z - Z')^2}{2H_y} \\ & + \frac{(H_x - H_x')Z'(\alpha' - u) + (Z - Z')H_x'(\alpha + u)}{H_y} \\ & + \frac{Z'^2(\alpha'^2 - 2\alpha'u + u^2) + H_x'^2(u^2 + 2u\alpha + \alpha^2)}{2H_y} \end{aligned} \quad (14)$$

として求められる。ここで更に後述する ε の各項の数値的検討より明らかなように、また $|(H_y - H_x')|$, $|(Z - Z')|$ は一般に 1 よりも大と考えるべきであり、 $\alpha \cdot \beta \dots$ 微小誤差角は 1 よりもはるかに小さいという条件を持っているので、 $\alpha \cdot \beta \dots$ 等の 2 次項は無視して良い。したがって ε は

$$\varepsilon \cong H_x'\beta + Z'(v + \beta') + \frac{\Delta H_x^2 + \Delta Z^2}{2H_y} + \frac{\Delta H \cdot Z'(\alpha' - u) + \Delta Z \cdot H_x'(\alpha + u)}{H_y} \quad (15)$$

として充分である。ここで $\Delta H_x = H_x - H_x'$, $\Delta Z = Z - Z'$ である。ここで無視した項については (15) 式より ε の許容限界を定めて、諸量の大きさの限界を計算し、それ等の値を用いて α, β, \dots 等の 2 次項を含む項の大きさについて後で簡単にチェックしてみることにする。

(b) 測定誤差 ε の数値的検討

前述の (15) 式の各項がまず 0.1γ 以内 (我々は地磁気観測を 0.1γ の精度で常時観測したいという目標を持っている) にするための諸誤差の条件について、以下に検討してみることにする。

i) $H_x'\beta$ の項

この項を 0.1γ 以内におさえるためには、 β として Table 1 に与えるような角度以内でな

Table 1. $\Delta\beta$ or $\Delta\beta'$ values for error due to $H_x'\Delta\beta$ or $Z'\Delta\beta'$ is 0.1γ .

θ_0	30°	40°	50°	60°	70°	80°
$\Delta\beta$	1.4''	1.1''	0.9''	0.8''	0.7''	0.7''
$\Delta\beta'$	0.6''					

なければならない。この β は H_x' の大きさ、つまり H と H_y とのなす角度 θ_0 にデペンドして変り、云うまでもなく H_x' が小さくなれば β の許容される大きさは大きくなる。しかし反面後述するように H_x' を小さく、すなわち θ_0 を小さく取れば別の意味の D -成分測定誤差が悪くなる。そこで光ポンピング磁力計自身の安定度なども加味して総合的に考えると、 θ_0 としては $50^\circ \sim 70^\circ$ 程度が適当と思われる。例えば $\theta = 60^\circ$ とすればこの項を 0.1γ 以内におさえるためには β を $0.8''$ 以内としなければならない。 β を $0.8''$ 以内におさえることは現在の我々の技術では、非常に困難なことと云うよりは不可能な事である。したがってこの項は誤差として最も重要なものの一つである。なおこの項はレベル誤差 (u, v) には無関係である。ただレベル誤差によるものは (13) 式よりわかるように 2 次項として問題になるだけであり、これはほとんどの場合無視して良い。

ii) $Z'(v - \beta')$ の項

この項も同様に 0.1γ 以内におさえるためには、柿岡においては $Z \sim 35,000\gamma$ であるので、 $(v - \beta')$ は $0.29 \times 10^{-3} \cong 0.6''$ 以内におさえなければならない。ここで v は補償コイルのレベルに関係する誤差角、 β' は補償磁場とコイル鉛直廻転軸とのなす角度に関するものであるが、これらは全く同格の影響となる。 $v - \beta'$ の差の形で表現されているが、 v, β' の符号によって影響は加わり合うので、一般に誤差の場合は $|v| + |\beta'|$ として考えなければならない。補償コイルを固定した状態で測定する光ポンピング磁力計の場合、 v と β' に分離して考えること自身あまり意味がない。

ともかくにも前項の β と同様 $(v - \beta')$ を $0.6''$ 以内におさえることは技術的に無理である。 β よりも一層シビアであり、 $H_x'\beta$ の項よりもより重要な誤差項である。更にレベル誤差が直接に関係してくることも重要な点である。

iii) $\frac{\Delta H^2}{2H_y}$ および $\frac{\Delta Z^2}{2H_y}$, 又は $\frac{\Delta H^2 + \Delta Z^2}{2H_y}$ としての項

$\Delta H, \Delta Z$ は補償磁場の消去精度に関係するもので、この項を 0.1γ におさえるためには、両項とも同一条件である。又、 $(\Delta H^2 + \Delta Z^2)/2H_y$ にして 1 項とみなした場合は充分条件として $\Delta H \cong \Delta Z$ とみなし $\Delta H^2/H_y$ であれば良い。これらの場合についての $\Delta H, \Delta Z$ の許容限界を Table 2 に、 θ_0 をパラメーターにして与えた。 $\theta_0 = 60^\circ$ の例について見れば $\Delta H, \Delta Z$ は単独として考えた場合 55γ 以内の精度で、 $\Delta H, \Delta Z$ を合成さして考えた場合には $\Delta H, \Delta Z$ は夫々 36γ 以内の精度で地球磁場成分 H_x, Z 又は F_x が消去されていけば良いことになる。当然この精度で消去するためには、自然磁場変化に応じて補償磁場を自動的に調整してやらなければならない。このことは別の機会に議論することにするが、それほどこのことは技術的に困難性はない。磁場の自然変化は最大級で $\pm 300\gamma$ 、日変化程度で $40\gamma \sim 50\gamma$ もある

ので当然補償磁場は自動調整できるような測定系にしなければ 0.1γ の安定度は望めない。ともかくも、この項の誤差は前2項よりも問題の少ない項である。じがしながら ΔH 、 ΔZ の2乗に比例することは充分留意しておく必要がある。

Table 2. ΔH or ΔZ and ΔF_x values for error due to $\frac{\Delta H^2 + \Delta Z^2}{2H_y}$ is 0.1γ . ($\Delta F = \sqrt{\Delta H^2 + \Delta Z^2}$)

θ_0	30°	40°	50°	60°	70°	80°
ΔH or ΔZ	51 γ	48 γ	43 γ	39 γ	32 γ	23 γ
ΔF_x	72 γ	68 γ	60 γ	55 γ	45 γ	32 γ
H_y	2.6	2.3	1.9	1.5	1.0	$0.5 \times 10^4 \gamma$

iv) $\frac{\Delta H Z'(\alpha' - u)}{H_y}$ の項

この項は ΔH および $(\alpha' - u)$ の2つの誤差変数が関係している項で、 ΔH は iii) 項で示した条件を満足しているものと仮定すれば、すなわち $\Delta H = 35\gamma \sim 55\gamma$ とすれば $(\alpha' - u)$ は $2.8' \sim 3.9'$ 程度以内であれば良いことになる(但しこれは $\theta_0 = 60^\circ$ の場合)。 $(\alpha' - u)$ がうえのような数値まで許容されるので、レベルに起因する u の項は無視して良い。ゆえにこの条件は α' の条件とみなして支障はない。 α' をこの程度の精度で補償磁場を設置することは充分に可能である。したがって本項の誤差はほとんど無視して良いものである。

v) $\frac{\Delta Z H_x'(\alpha + u)}{H_y}$ の項

本項も前項と同様に考えられるが、 $(\alpha + u)$ の条件は α' の場合よりもゆるく、前項と同じ条件で $(\alpha + u)$ は $3.9' \sim 5.5'$ 以内であれば本項を 0.1γ 以内におさえることができる。この場合も u は無視して良く α の条件と考えて良い。この条件は充分に満すことができ、前項よりも更に小さな誤差項である。

vi) 無視した2次項の検討

i)~v) 項までに示したように H_y 成分の測定誤差をほぼ総合的に 0.1γ 以内にするためには、少なくとも次の条件を満していなければならない。

$$\beta, \beta', v < 0.5'' \sim 0.7'', \quad \alpha, \alpha' < 2' \sim 3', \quad \Delta H, \Delta Z < 35\gamma \sim 55\gamma$$

うえの条件とすれば前述の(14)式で問題になる2次項は

$$\frac{Z'^2 \cdot \alpha'^2}{2H_y} \quad \text{および} \quad \frac{H_x'^2 \cdot \alpha^2}{2H_y}$$

の2項である。ここで $\alpha' \sim \alpha$ であるからうえの2項のうち前者の方が大きい。今 $\alpha' = 2'$ とすれば、 $Z'^2 \cdot \alpha'^2 / 2H_y$ の大きさは 0.01γ にしかならず問題にならない。 $(\alpha' = 3'$ としても本項は 0.04γ)。説明するまでもなく他の2項は、これよりもはるかに小さく無視して良い。

以上のように H_y 成分の絶対測定誤差は(15式)を次の様に書き改ためて、

$$\epsilon = H_x' \beta + Z' \beta' + \frac{(\Delta H)^2 + (\Delta Z)^2}{2H_y} + \frac{\Delta H \cdot Z' \alpha' + \Delta Z \cdot H_x' \alpha}{H_y} \quad (16)$$

とし、上式の各項について吟味すれば充分であると結論できる。但し微小誤差角 $\alpha \cdot \beta \cdots$ 等は iv) 項で示した条件を満たしているものと仮定する。(16) 式で最も重要な項は、 $H_x' \beta$ および $Z' \beta'$ の 2 項で、これらの項を 0.1γ におさえることは不可能であり、又検出の方法がない。他の 2 項は簡単に（技術的にであって経費的にはではない）無視しうる程度に調整することができる。

(c) 絶対誤差の時間的変動について

前項までは H_y —成分測定における絶対的な誤差について詳細に議論してきたが、前述したごとく光ポンピング磁力計は磁場測定の絶対値に対してはある程度の不確実性が伴うもので、一定な絶対誤差は問題にならない。問題になるのは光ポンピング磁力計の安定度に関係する絶対測定誤差の時間的変化量である。したがって本項では絶対誤差 ε の時間的変化量について考えてみる。

ε は (16) 式で与えられたが、(16) 式において $H_x' + Z' \beta'$ の項を除いた他の項は、 ΔH 、 ΔZ を含んでいるので、これらの項はそのまま時間的に変化する項と考えなければならない。但し α 、 α' についても当然変化があるものとしなければならないが、一般的に考えて α 、 α' を $2'$ 程度とすれば、その変化量は絶対値に比べて小さいであろうから α 、 α' は一定として取扱っても問題はない。 $H_x' \beta + Z' \beta'$ の時間的変化量は

$$\Delta H' \beta + \Delta Z' \beta' + H_x' \Delta \beta + Z' \Delta \beta' \quad (17)$$

で与えられる。ここで $\Delta H'$ 、 $\Delta Z'$ は補償磁場の変化量で、 $\Delta H' = H_x' - H_{x0}$ 、 $\Delta Z' = Z' - Z_0'$ である。(前述の ΔH 、 ΔZ と混同しないこと。) 従って絶対誤差の変化量 $\Delta \varepsilon$ は

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon = & \Delta H' \beta + \Delta Z' \beta' + H_x' \Delta \beta + Z' \Delta \beta' \\ & + \frac{\Delta H^2 + \Delta Z^2}{2H_y} + \frac{\Delta H Z' \alpha + \Delta Z H_x' \alpha}{H_y} \end{aligned} \quad (18)$$

と表わせる。但し、 β および β' が絶対誤差として問題にした $0.5'' \sim 0.7''$ 程度の場合には (18) 式の第 1、第 2 項は無視して良い。この場合には ε の (16) 式を $\beta \rightarrow \Delta \beta$ 、 $\beta' \rightarrow \Delta \beta'$ と書き変えただけで全く同一の式である。絶対誤差で β 、 β' をその変化量とみなせば前とまったく同様の結論が得られる。 $\Delta \beta$ および $\Delta \beta'$ を $0.5'' \sim 0.7''$ 以内に長期間保持することは非常に困難と思われる。

$\Delta H' \beta + \Delta Z' \beta'$ の項について考えると、絶対誤差の変化だけを考える場合には β 、 β' の許容値が相当に大きくなることを示している。即ち、 $\Delta H'$ 、 $\Delta Z'$ を、前述したように補償磁場を地球磁場変動に応じて変化させてやらなければならないことから考えて、夫々 300γ および 200γ とすれば、 β および β' は夫々 $1.1'$ および $1.7'$ 程度まで許容される。この β 、 β' を $1'$ 以内に設置することはそれほど技術的にむづかしいことではない。

以上の結果から H_y —成分観測の安定度を 0.1γ 程度におさえるための諸条件をまとめること次の通りである。

(1) レベル誤差角が数秒以内になるように補償コイル系を設置し、 α 、 $\beta \cdots$ 等の誤差角を $1'$ 以内におさまるように調整設置しなければならないこと。なお被測定磁場方向に直角方向

の誤差角は $2' \sim 3'$ あっても場合によっては支障がない。この条件を満たすことは技術的にそれほど容易ではないが不可能でもない。

(2) 補償磁場の H_y 方向の誤差角 β, β' の許容時間変化量は非常にシビアで、 $0.5'' \sim 0.7''$ 以内でなければならないこと。この条件を満足させることは不可能と思われる。このような条件があるために光ポンピング磁力計による H_y 成分測定の安定度は 0.1γ にすることは不可能である。これは H_y 成分に限らず、他の水平成分、鉛直成分についても同様である。

(3) 各補償磁場による消去精度は $20\gamma \sim 30\gamma$ 程度でなければならないこと。これは技術的に充分可能である。

(2) 1成分補償磁場法における H_y 成分測定 (安定度)

1成分補償磁場による H_y 成分測定の場合の各磁場成分を Fig. 5 に示した。Fig. 5 に示した xyz および XYZ 座標の定義は、Fig. 4 の2成分補償磁場の場合と全く同様である。

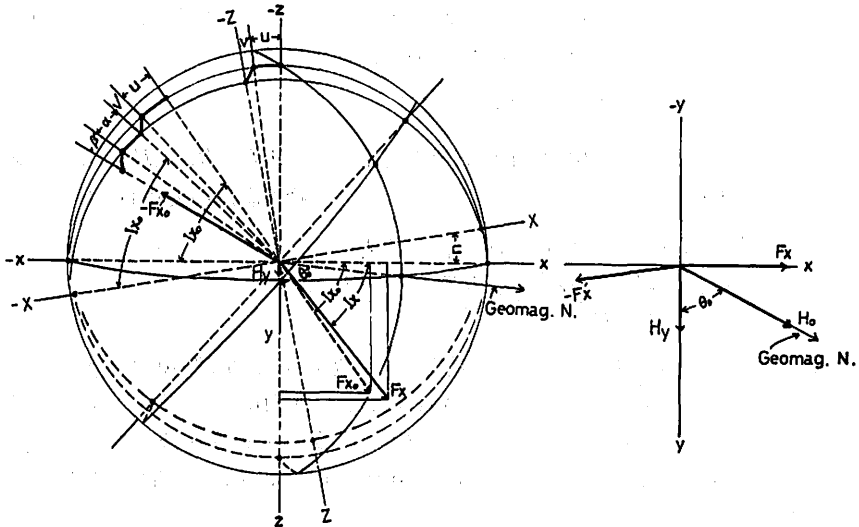


Fig. 5. Determination of error in the case of H_y -component measurement with one compensating field.

この場合の測定誤差も前の場合と同様の手順で求めることができるので、ここでは簡単に述べることにする。

全合成磁場 H_y の誤差の xyz 各成分, $\Delta H'_{yx}, \Delta H'_{yy}, \Delta H'_{yz}$ は

$$\left. \begin{aligned} \Delta H'_{yx} &= H_x - F_x' \cos I_{x0} - F_x' \sin I_{x0}(\alpha + u) \\ \Delta H'_{yy} &= F_x'(\beta + \sin I_{x0} \cdot v) \\ \Delta H'_{yz} &= Z - F_x' \sin I_{x0} + F_x' \cos I_{x0}(\alpha + u) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

(但し2次項無視)

となる。ここで I_{x_0} は Fig. 5 に示すように、ある基準の F_{x_0} の伏角である。(19) 式は $H_x = F_x \cos(I_{x_0} + \Delta I_x)$, $Z = F_x \sin(I_{x_0} + \Delta I_x)$ であるのでこれを代用して次のように書き直せる。(但し ΔI_x は F_x —成分の伏角の変化量とする。)

$$\left. \begin{aligned} \Delta H'_{yx} &= (F_x - F_x') \cos I_{x_0} - F_x' \sin I_{x_0} (\Delta I_x + \alpha + u) \\ \Delta H'_{yy} &= F_x' (\beta + \sin I_{x_0} \cdot v) \\ \Delta H'_{yz} &= (F_x - F_x') \sin I_{x_0} + F_x' \cos I_{x_0} (\Delta I_x + \alpha + u) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

故に 2 成分補償磁場法における (15) 式に対応する 1 成分補償磁場法の測定誤差 ϵ は

$$\epsilon = F_x' \beta + \frac{(F_x - F_x')^2 + F_x'^2 (\Delta I_x + \alpha)^2}{2H_y} \quad (21)$$

と表わされる。(21) 式の α , β は実さいには夫々 $(\beta + \sin I_{x_0} \cdot v)$, $(\alpha + u)$ であるが、いずれも補償磁場の方向変位 (真の方向からの) であるので同格であり、補償コイル系も固定した状態での議論の場合は分離して議論することに意味がないこと、また実質上一般にレベル誤差は小さく無視しても良いこと等の理由でこれ等の項は α , β で代表させた。同様に (21) 式の時間的変化量 $\Delta \epsilon$ は、 ΔI_x の変化量が一般に β の変化量よりも相当大きいので、

$$\Delta \epsilon = \Delta F_x' \beta + F_x' \Delta \beta + \frac{(F_x - F_x')^2 + F_x'^2 \cdot \Delta I_x^2}{2H_y} \quad (22)$$

と表わされる ($\Delta F_x' = F_x' - F_{x_0}$ で補償磁場の変化量)。この (22) 式が 1 成分補償磁場法における誤差の時間的変化量を与える重要項を示したものである。

これと 2 成分補償磁場法におけるものと比較すると、最も大きな違いは ΔI_x という F_x —成分の伏角の変化量が入ってくることである。これは至極当然のことで、方向と大きさの変る磁場を方向を固定した補償磁場で除去できないために生ずる誤差である。これは鉛直成分測定の場合の偏角 D の変化による誤差と全く同様の関係にある。したがって ΔI_x に基づく誤差は補償コイルの向を ΔI_x に応じて変えてやらなければ解決しないもので、それは実用上不可能なことである。その他の項については 2 成分補償磁場法の場合と同様である。最後に (22) 式の各項を 0.1γ 以内にする誤条件を Table 3 にまとめて示した。

Table 3. A few conditions to maintain error of each term 0.1γ in the case of Formular (21).

(a) $F_x' \Delta \beta$

θ_0	30°	40°	50°	60°	70°	80°
F_x'	43.0	4.34	4.39	4.43	4.49	$4.53 \times 10^4 \gamma$
$\Delta \beta$	0.48"	0.47"	0.47"	0.47"	0.46"	0.46"

(b) $\Delta F_x \beta$

ΔF_x	50 γ	100 γ	150 γ	200 γ	250 γ	300 γ
β	6.9'	3.4'	2.3'	1.7'	1.4'	1.2'

(c) $F_z^2 \Delta I_z^2 / 2H_z$

θ_0	30°	40°	50°	60°	70°	80°
ΔI_z	5.8'	5.3'	4.8'	4.3'	3.6'	2.5'

(3) H, Z -成分の測定誤差の変化量(安定度)について

H, Z -成分の測定誤差については種々報告されているので、ここではその時間的な変化量についての重要項についてのみ以下に示しておく。

 H -成分の場合

$$\Delta \epsilon = \Delta Z' \beta + Z_0' \Delta \beta + \frac{(Z - Z')^2}{2H} \quad (23)$$

 Z -成分の場合

$$\Delta \epsilon = \Delta H' \beta + H' \Delta \beta + \frac{(H - H')}{2Z} + \frac{H'^2 \Delta D^2}{2Z} \quad (24)$$

(4) 各成分観測における総合的な誤差

成分磁場の観測誤差は2・3条件はあるが、本質的に問題になるものは補償磁場の被測定磁場方向への変位と補償精度である。前者については非常にデリケートなもので、どの程度の補償磁場の方向の変位が実際にあるのか見当がつかない。また $0.5''$, $1.0''$ といった角度の検出そのものも不可能に近い。したがってこれに関する資料はあまりなく、正確な検討はできないが、大体のオーダーとして $\Delta \beta$ は数秒/月程度には、通常の場合おさえられるのではないかと思われる。この程度とすれば $\Delta \beta$ による誤差は各成分とも大体 0.5γ /月におさえることができる。補償精度に関しては自動制御方式を採用すれば、必要な精度を達成すること

各種自然磁場状態における誤差の程度

	補償磁場の状態	5 静穏日平均	5 擾乱日平均	中磁気嵐 ¹⁾	大磁気嵐 ²⁾
H -成分	半固定 自動制御	問題なし "	$\sim 0.1\gamma$ 問題なし	$\sim 0.2\gamma$ 問題なし	$\sim 0.6\gamma$ 問題なし
Z -成分	半固定 自動制御	" "	$\sim 0.1\gamma \sim 0.3\gamma$ $\sim 0.1\gamma$	$\sim 0.7\gamma \sim 1.5\gamma$ $\sim 0.4\gamma$	$\sim 5\gamma$ $\sim 1.6\gamma$
D -成分(1) ³⁾	半固定 自動制御	$\sim 0.1\gamma$ 問題なし	$\sim 0.2\gamma \sim 0.6\gamma$ $\sim 0.1\gamma \sim 0.3\gamma$	$\sim 3\gamma \sim 4\gamma$ $\sim 0.5\gamma$	$\sim 10\gamma \sim 15\gamma$ $\sim 2\gamma$
D -成分(2) ⁴⁾	半固定 自動制御 H_z のみ自動制御	$\sim 0.1\gamma$ 問題なし "	$\sim 0.2\gamma \sim 0.4\gamma$ 問題なし $\sim 0.1\gamma$	$\sim 1\gamma \sim 2\gamma$ 問題なし $\sim 0.3\gamma \sim 0.4\gamma$	$\sim 6\gamma \sim 8\gamma$ $\sim 0.1\gamma \sim 0.2\gamma$ $\sim 1.6\gamma$

- (註) 1) 中磁気嵐 = $\Delta H: 200\gamma, \Delta Z = 100\gamma, \Delta D = 15', \Delta F_z = 200\gamma, \Delta I_z = 10'$ 程度とした。
 2) 大磁気嵐 = $\Delta H: 400\gamma, \Delta Z = 200\gamma, \Delta D = 30', \Delta F_z = 400\gamma, \Delta I_z = 20'$ 程度とした。
 3) D -成分(1) = 1成分補償磁場法によるもの。
 4) D -成分(2) = 2成分補償磁場法によるもの。

はできる。このことは前述した通りである。なお補償精度には補償磁場を作る電源の安定度、コイル常数の温度変化が関係してくる。コイル常数の温度変化は $\sim 4 \times 10^{-4} / 20^\circ\text{C}$ 程度で、補償磁場の変動として $12\gamma \sim 18\gamma$ となる。これはそれほど問題にならないが、簡単にこれを補償できないので注意を要する。電源の安定度に関しては前述のコイル常数の変化等より考えて $5 \sim 1 \times 10^{-4}$ / 月程度の安定度が要求される。この点については技術的に可能であるが、場合によっては月一回程度の手動調整をしなければならないであろう。

以上の通りであるので各成分観測の精度、誤差を補償磁場固定の場合および数%の精度で地球磁場変動に応じて自動調整した場合におけるものを上表にまとめて示した。この中には 4β による誤差は含ませてない。

§4 H_y —成分の D —成分変換精度 (安定度) について

前節までに議論したことは H_y —成分磁場の磁場測定誤差および安定度についてであった。次に H_y —成分と H —成分から D —成分に変換する場合の角度誤差について考えてみる。偏角 D のある基準点からの変化量 D は第1近似として前述したように (5) 式、即ち

$$\Delta D = \frac{1}{\sin \theta_0} \left(\frac{\Delta H_y}{H_0} - \frac{\Delta H}{H_0} \cos \theta_0 \right) = \frac{1}{H_{x0}} (\Delta H_y - \Delta H \cos \theta_0)$$

として求められる。従って ΔD —成分の我々が問題にする誤差 ($\Delta \varepsilon_D$) は、 H_y —成分の誤差を $\Delta \varepsilon_{Hy}$ 、 H —成分の誤差を $\Delta \varepsilon_H$ と表わせば、

$$\Delta \varepsilon_D = \frac{\Delta \varepsilon_{Hy}}{H_{x0}} - \frac{\Delta \varepsilon_H}{H_{x0}} \cos \theta_0 \quad (25)$$

となることは云うまでもない。これが D —成分の角度誤差または精度を示すものである。今、 H_y —成分および H —成分の総合誤差が理想的になって 0.1γ とすれば、(25) 式の角度誤差は Table 4 に示す通りである。これよりも知れるように総合角度誤差 $\Delta \varepsilon_D$ は θ_0 の大きさによって相違しており、 θ_0 が大きくなるほど誤差は小さくなり精度が良くなる。当然のことながら $\theta_0 = 90^\circ$ 、つまりダイレクトに D —成分を測定した場合が、この意味における誤差は最も小さくなり、精度が良いことになる。ともかく、我々が今回計画している磁力計のシステムとしては $\theta_0 = 60^\circ$ にすることになっているが、この場合の変換誤差はうへの条件の場合 $\Delta \varepsilon_D \cong 0.02'$ となり、 D —成分直接測定の場合の2倍程度大きくなる。しかしこれは

Table 4. Accuracy of D -component in angle when each of observational errors of ΔH_y and ΔH is 0.1γ .

θ_0	30°	40°	50°	60°	70°	80°
ΔH_y	1.4"	1.1"	0.9"	0.8"	0.8"	0.7"
ΔH	0.6"	0.5"	0.4"	0.4"	0.2"	0.1"
Max. Total	2.0" 0.033'	1.6" 0.027'	1.3" 0.022'	1.2" 0.020'	1.0" 0.015'	0.8" 0.013'

$\Delta\epsilon_{H_V}$, $\Delta\epsilon_H$ を 0.1γ とした場合であって、実際上は $\Delta\epsilon_{H_V}$, $\Delta\epsilon_H$ も θ_0 の函数であり、次に示すように $\theta_0 \sim 60^\circ$ 附近が最も精度良く D -成分を観測することができる。

まず H_V -成分に起因する D -成分の角度誤差について考えてみよう。この誤差を $\Delta\epsilon_D(H_V)$ と表わせば、 $\Delta\epsilon_D(H_V)$ は (25) 式の第 6 項に (18) 式を代入して θ_0 の函数として示せば、

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_D(H_V) = & \frac{\Delta H' \cdot \beta + \Delta Z' \cdot \beta'}{H_0 \sin \theta_0} + 4\beta + \frac{Z_0}{H_0 \sin \theta_0} \cdot 4\beta' \\ & + \frac{\Delta H^2 + \Delta Z^2}{H_0^2 \sin 2\theta_0} + \frac{\Delta H Z_0 \alpha' + \Delta Z H_0 \cdot \alpha \cdot \sin \theta_0}{H_0^2 \sin 2\theta_0} \end{aligned} \quad (26)$$

となる。但し、 $H_x' \cong H_{x_0}$, $Z' \cong Z_0$ とみなした。(26) 式は θ_0 に関して次の 3 つの項に分類される。(1) θ_0 に無関係な項 (4β)、(2) $1/\sin \theta_0$ に比例する項および (3) $1/\sin 2\theta_0$ に比例する項の 3 種である。 α , β , ΔH , $\Delta Z \dots$ 等が一定であるとすれば (2) に関する項は $\theta_0 = 90^\circ$ で最小となり、(3) に関するものは $\theta_0 = 45^\circ$ で最少となる。従って $\theta = 90^\circ$ の場合が必ずしも最良であるとも云えない。

一方、 H -成分に起因するものを $\Delta\epsilon_D(H)$ とすれば、これも同様に処理して

$$\Delta\epsilon_D(H) = \left(\frac{\Delta Z' \beta + Z_0 \cdot 4\beta}{H_0} + \frac{(Z - Z')^2}{2H_0^2} \right) \cot \theta_0 \quad (27)$$

と示される。当然のことながら $\theta_0 \rightarrow 90^\circ$ にしたがってこの角度誤差は小さくなる。

以上総合的に考え、又光ポンピング磁力計自身の磁場測定誤差、安定度等から考えて、 θ としてはあまり数値的な理由はないけれども大体 $50^\circ \sim 60^\circ$ の範囲が最適であると考えられる。この範囲であればそれほど大きな差はない。 $\theta_0 = 60^\circ$ という角度は $H_{V0}/H_0 = 1/2$ という特殊角であることから、我々は $\theta_0 = 60^\circ$ に決定した。なお $\theta_0 = 60^\circ$ とすれば $\Delta\epsilon_D(H)$ の効果は $\Delta\epsilon_D(H_V)$ の効果の $1/2$ になる。

最後に誤差項として最も重要な項である 4β および $4\beta'$ の項は、前者が角度誤差としてそのまま、後者が $1.3 \sim 1.4$ ($\theta_0 = 60^\circ$) 倍の角度誤差として現われてくることは留意すべきである。つまり H_x -補償磁場の水平廻轉變位角はそのままの大ききで D -成分の角度誤差になり、 Z -補償磁場の H_V -方向への傾きの変位角はその $1.3 \sim 1.4$ 倍が D -成分の角度誤差となることである。特に後者については効果が大きく且つ傾きの変位する可能性も大であるので注意しなければならない。以上は 2 成分補償法 (我々はこれを採用した。) についてのみ議論したが、1 成分補償磁場法においても本質的には同じ結果が導かれる。

θ_0 の角度としては前述の如く 60° 程度にした場合が好ましいという結果を得た。次に θ_0 の方向を東方に取るか西方に取るかということがある程度問題になる。勿論、原理的には全く同等である。しかし地球磁場の自然変化を考えて、補償磁場方向の変化成分が小さく (H_x -方向)、測定磁場方向 (H_V -方向) の変化成分が大きき方が誤差の点からして好ましい。地球磁場の水平変化成分が全く等方的に変化すれば、 θ_0 の方向をどちらに取らうが関係ないが、実察の自然変化磁場の形態は Fig. 6, Fig. 7 および Fig. 8 に示すように異方性を持っている。Fig. 6 および Fig. 7 は 1958 年 (太陽活動極大期) における静穏日および擾

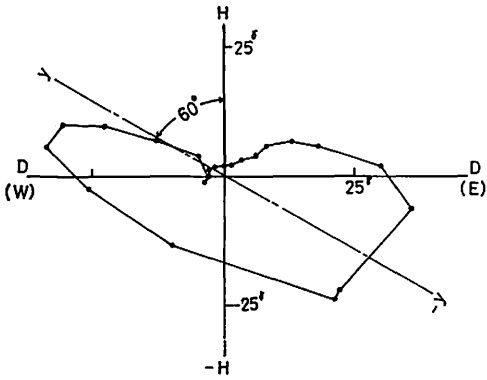


Fig. 6. Mean daily variation of hourly horizontal disturbance vector on calm days in 1958.

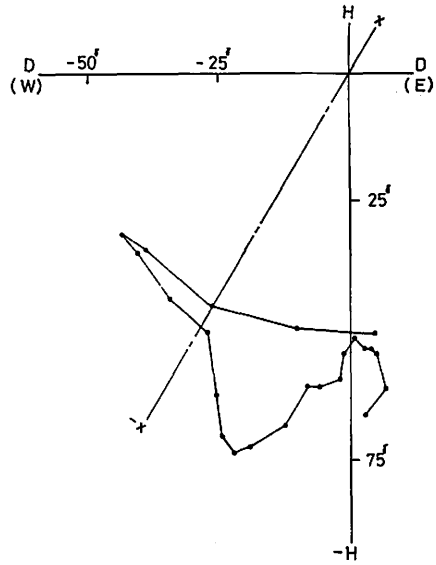


Fig. 7. Mean daily variation of hourly horizontal disturbance vector on disturbed days in 1957.

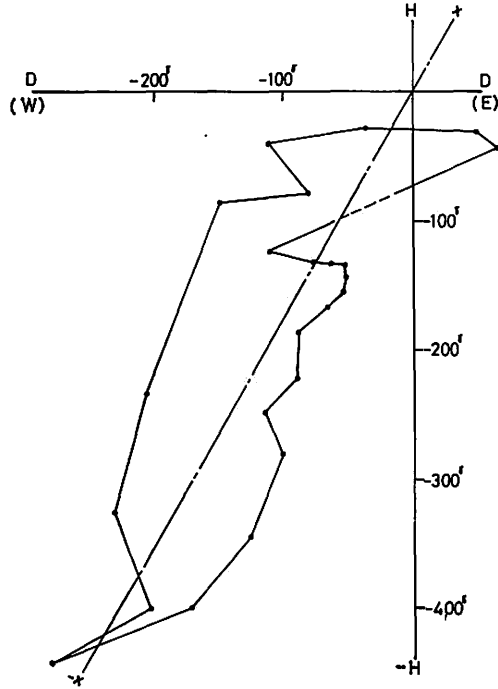


Fig. 8. Variation of hourly horizontal disturbance vector for the great storm on 13, Sep. 1957.

乱日の静穏日日平均値を基準とする地磁気水平変化成分の日変化を示したものである。一方、Fig. 8 は1057年9月13日の有名な大地磁気嵐の時の水平変化成分を示したものである。なお、 θ_0 を西方に取った場合の x 軸または y 軸を示した。

静穏日については Fig. 6 より見うけられるように日変化の特性は明りょうな異方性を示している。すなわち、変化の方向は大略 H 方向から 70° の方向になっている。したがって静穏日においては、 θ_0 の方向として西方の方が好ましいことになる。 θ_0 を西方に取った場合、 H_y の変化量は全振幅として約 70γ であるのに比べて H_x の変化量に前者のほぼ半分の 35γ 程度と小さい。他方 θ_0 を東方に取った場合両変化量は大体同じ大きさになり、ほぼ 55γ となる。しかしこれは決定的な大きな差ではない。

擾乱日については少々様相が変わってくる。Fig. 7 に示すように当然のことながら水平成分の擾乱が卓越し、水平変化成分の方向変化が小さくなる。この方向は日変化の主方向より大略 90° 方向が違う。この点から考えると静穏日とは反対に θ_0 の方向は東方に取った方がよいことになる。しかし Fig. 7 の水平変化成分のそのまた変化を見ると（ループで示した変化）静穏日特性に似ている。ここだけに着目すれば結論は反対になり、 θ_0 は西方の方が好ましいことになる。いずれにしても擾乱日の平均的な様相は次に述べる大地磁気嵐と静穏日との中間的な様相を示している。

Fig. 8 に示すように大地磁気嵐の場合には完全に静穏日変化と様相を異にし、水平変化成分の主軸は 90° 以上静穏日のものからずれている。すなわち、 θ_0 を東方 60° に取れば、その方向はほぼ主変化の方向に一致している。したがってこの場合は θ_0 は東方に取ることがよいことになる。

以上のようにすべての擾乱に対して適合した θ_0 方向はない。結局、測定精度としてどちらがより重要かということで θ_0 の方位は決定される。ここでは結論として、静穏日の場合にはどちらを取ろうが決定的な差はないが、大擾乱になると大きな差を生じるので、観測精度だけの観点からすれば、 θ_0 を東方 60° に取った方が好ましいと考える。しかし反面現象の興味からすれば西方にとれば、地球磁場の主変化方向成分がほぼ直接観測できる利点がある。（ H_y —磁力計として）理想的なことを云えば東方、西方2方向の H_y —磁力計を設置すれば良いことになる。更に地球磁場変化に対する相対的誤差として誤差を問題にすれば、擾乱日にはある程度誤差が大きくなってしまってもかまわないという考え方もある。現在のところ確定的な結論は出していないが、ほぼ 60° 東方成分を観測する方針である。

§5 結 論

本論文では光ポンピング磁力計による地球磁場成分の連続観測、特に偏角の測定法ならびにその測定誤差、安定度（精度）を主題にして議論してきた。その結果次のような結論を得た。

(1) 光ポンピング磁力計による直接的な D —成分連続観測、つまり地球磁場変化の東西成分を直接に観測する方法は、精度上不可能で、任意方向の水平成分分力を測定し、それと水平成分測定結果を用いて合成し D —成分を求めるという間接的な方法を取らざるを得ないこ

と。したがって単独の D -成分連続観測用光ポンピング磁力計は現在の技術では無理である。

(2) うえの任意方向水平成分分力として、基準偏角（通常観測点の平均的偏角とする）より東方または西方 60° 程度の方向の分力を取ることが好ましいこと。

(3) D -成分の観測精度として期待される $0.01' \sim 0.02'$ を達成するためには、補償磁場の安定度について、方向の変化が $0.5''$ 以内、大きさについては $20\gamma \sim 30\gamma$ の精度、絶対的な方向の誤差角が $1'$ 以内になっていなければならないこと。

(4) 前項の第1番目の条件を作り出すことは、残念ながら現在の技術では不可能であると考えられる。他の条件については期間を月程度のことを考えれば、なんとか作り出せる条件である。

(5) 光ポンピング磁力計による D -成分観測精度、安定度は全く不確実な資料による推定であるが、 $\pm 0.05'$ /月程度となると考えられる。なおこれには光ポンピング磁力計自身の磁場測定の安定度は含まれていない。

結論としてまだまだ種々の問題が残されているが、これらについては別の機会に述べることにする。最後に本論文を書くにあたり色々と助言ならびに指導をいただいた柳原所長に深く感謝いたします。また河村技術課長をはじめとする関係者の方々にも同様感謝いたします。

文 献

- (1) L. Hurwitz & H. Nelson (1960): Porton Vector Magnetometer. J. G. R. 65, 6, 1759-1764.
- (2) 坪川家恒(1958): 核誘導型磁力型による地球磁場の測定, 科学, 28, 2, 73-38.
- (3) 柳原一夫(1961): 核磁力計について(1), 地磁気観測所技術報告, 1, 1, 47-54.
- (4) 柳原一夫(1961): 技術ノート。
- (5) 桜岡 勉(1966): 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.

A Measuring Method of Magnetic Field Component with Optical Pumping Magnetometer and Its Error and Stability Related to the Compensating Field.

Yukizo SANO

Abstract

In this paper are discussed observations of magnetic field components with optical pumping magnetometers concerning their methods of measurement and observational error and accuracy, especially in the case of declination measurement. A device of D-component observation should be such a complicated one as combination of H-component and H_y -component observations which are made with independent optical pumping magnetometers, where H_y is a component of H in a suitable direction fixed in the horizontal plane. According to the present result of detailed study on the observational error, such a very high stability in direction of the compensating magnetic field as about $0.5''$ is necessary for the accuracy of $\pm 0.1\gamma$ or $0.01'$ in the measurement of each component. On the other hand, the accuracy of compensation of the perpendicular magnetic field should be $20\gamma \sim 30\gamma$ in the most severe case, i.e. in D-component, to obtain the same accuracy of measurements.