

KASMMER システムによる地磁気 観測精度について

佐野 幸三

概 要

1973年9月～1975年4月の期間の KASMMER システムによる地磁気標準観測結果について、光ポンピング磁力計の安定度および絶対観測精度を主体として報告する。

補償磁場を必要としない全磁力用光ポンピング磁力計の安定度は、約 $0.5 \gamma/\text{year}$ で非常に高く満足のいく結果を示している。補償磁場を持つ他の成分光ポンピング磁力計についても、平均的に評価して $1.5 \gamma \sim 2.0 \gamma/\text{year}$ の高い安定度を示している。

個々の絶対観測値のバラッキを分析した結果、それらの標準偏差は D-成分で $0.0328'$ 、I-成分では $0.0200'$ という結果をえた。このことより評価して各成分光ポンピング磁力計の絶対値較正精度は 0.1γ または $0.01'$ よりも良いと考えられる。

は し が き

KASMMER システムによる地球磁場の精密連続観測は、製作以降 1973年8月までの比較試験観測期間をへて、1973年9月より正式なルーチン観測システムとして軌道に乗って現在に至っている。この間すべてが順調であったとは必ずしもいえず、光ポンピング磁力計の 1, 2 の改良調整、データ集録部の調整等を行なってきた。

KASMMER の比較試験観測期間の総合観測結果については、柳原所長らによって報告¹⁾されているとおりである。ここでは 1973年9月より 1975年4月までの結果について、光ポンピング磁力計の安定度および絶対値較正装置（絶対観測）の観測精度（誤差）を主眼として報告する。

KASMMER の光ポンピング磁力計は設計段階で $0.1 \gamma/\text{month}$ または $1 \gamma/\text{year}$ （長期ドリフトに関して）の安定度を持たせることを目標とした。絶対値観測精度に関しても 0.1γ の相対精度が要求された。これらの観点から KASMMER 観測データを解析した結果、ほぼ目標に達している観測精度が得られているという結果をえた。但し補償磁場（Bias field）を必要とする成分用光ポンピング磁力計の安定度を目標精度に維持するためには、2, 3 の障害（一部はさけられない要因もある。）があり困難性がある。しかし、これらについても $1.5 \gamma \sim 2.0 \gamma/\text{year}$ の安定度は期待される。

§1. 光ポンピング磁力計の安定度 (絶対値シフト)

1. 光ポンピング磁力計の絶対値較正について

光ポンピング磁力計 (Optical pumping magnetometer, 以下“ O_P -磁力計”と呼ぶことにする。) は地球磁場の絶対値を直接測定する磁力計ではあるが, その絶対値確度は我々が望む 0.1γ の精度はないものであることは良く知られているとおりである。しかし, 各回の計測のバラツキは非常に小さく, また $0.1\gamma/\text{month}$ 程度の高い安定度と高い時間分解能を持つもので, 適当なインターバルでその絶対値を較正してやれば, 高い精度で地球磁場の絶対値を連続に測定しうる磁力計である。

KASMMER システムでは O_P -磁力計の絶対値を較正するために, DI-72 と呼ばれる磁気儀 (D および I の測定器)^{注)}と F を測定する MO-PK と呼ばれるプロトン磁力計がある。この DI-72 と MO-PK の組合せにより地磁気成分 F, D, I を測定し, 他の H, Z 等の成分の絶対値はこれら F, D, I より計算により求められる。この絶対観測と同時刻に各 O_P -磁力計の計測を行ない, その計測値とさきの絶対値とを比較することより O_P -磁力計の較正を行なう。(詳細は別報告¹⁾参照) 即ち, O_P -磁力計の各較正值は同時測定の O_P -磁力計計測値と DI-72 および MO-PK による絶対観測値との差として求められる。 O_P -磁力計各センサーの設置地点と DI-72, MO-PK の設置地点は異なっているので, これらの較正值には地磁気地点差を含んでいることはいうまでもない。

以下各成分の O_P -磁力計の較正值を次のように表わす。なお, KASMMER には F 測定用 F(A)-磁力計, H 測定用 H-磁力計, Z 測定用 Z-磁力計および D 測定用 Hy-磁力計の 4 台の O_P -磁力計がある。

$$F(A)\text{-磁力計の較正值} \equiv CF = F(O_P) - F(\text{MO-PK})$$

$$H\text{-磁力計の較正值} \equiv CH = H(O_P) - F(\text{MO-PK}) \cdot \cos I$$

$$Z\text{-磁力計の較正值} \equiv CZ = Z(O_P) - F(\text{MO-PK}) \cdot \sin I$$

$$\text{Hy-磁力計の較正值} \equiv \text{CHy} = \text{Hy}(O_P) - H \cdot \cos(D + D_0),$$

および O_P -磁力計の組合せにより計算より求められる D, I, X, Y-成分の較正值は各々 CD, CI, CX, CY と表わす (C は correction value または calibration value の略)。

KASMMER の O_P -磁力計の絶対値較正は現在まで原則として 1 週間に 1 回行なっている。1 回の較正内容については後節でその精度等と合せて詳細に述べるが, 1 回の較正值は 8 個の較正值の平均である。なお, F(A)-磁力計の較正はこの他, MO-PK の自動毎正分連続計測による較正が可能で, 多くの日にこのような較正を実施してきた。H, Z 等他の成分の較正には DI-72 の手動操作をどうしても必要とするので, F(A)-磁力計のような長期連続自動較正は不可能である。

注) 地磁気各成分名は通常使用されている記号を用いるので以下説明なしで使用する。

2. KASMMER 光ポンピング磁力計の長期安定度

Fig. 1~Fig. 4 に Sept. 1973 より Apr. 1975 までの約 2 年間の KASMMER O_P -磁力計により直接、間接 (計算合成) に求められる F, H, Z, H_y , D および I-成分の較正值および

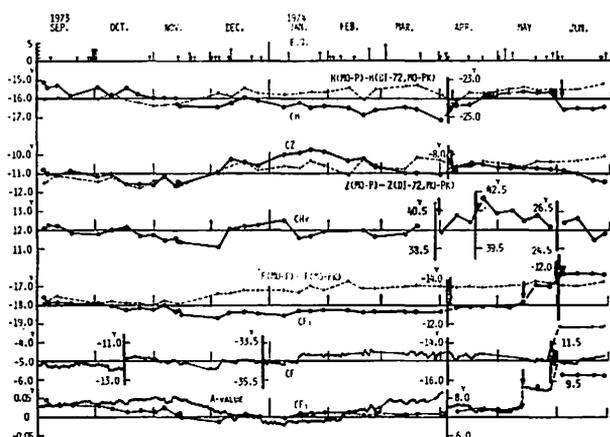


Fig. 1. Stability of KASMMER's F, H, Z and H_y optical pumping magnetometers and comparison of KASMMER's calibration system and MO-P vector proton magnetometer during the period of Sept. 1973-June 1974. Arrows in the figure mean some adjustments of optical pumping magnetometers like exchange of lamp.

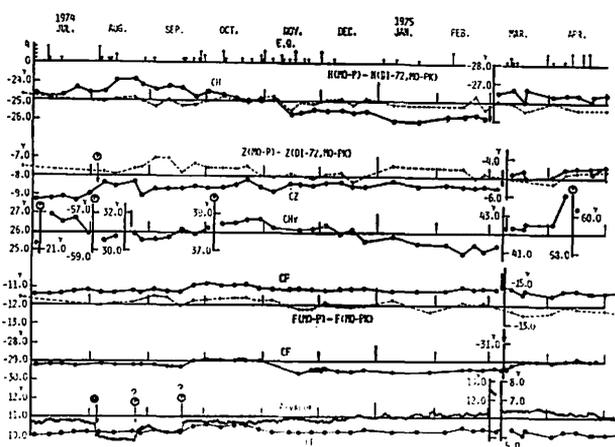


Fig. 2. Stability of KASMMER's F, H, Z and H_y optical pumping magnetometers and comparison of KASMMER's calibration system and MO-P vector proton magnetometer during the period of July 1974-Apr. 1975. Arrows in the figure mean some adjustments of optical pumping magnetometers like exchange of lamp.

び関連する他要素の観測結果を示した。これらの図の結果より O_P -磁力計の長期安定度を議論する。

Fig. 1 および Fig. 2 は O_P -磁力計で直接測定される F, H, Z および Hy-成分に関するものである。実線で結んだ大きい黒丸はほぼ1週間インターバルで求められた較正值, CH, CZ, CHy および CF (図では CF_1 と表示) をプロットしたものである。 CF_2 および A-Value と表示したものは、各々毎正分値による連続の F(A)-磁力計較正值の日平均値 (完全に1日に満たないものも含む。) および O_P -磁力計 F, H, Z-成分より計算される全磁力値の差、

$$A = F - \sqrt{H^2 + Z^2}$$

なる値 (毎正分値) の日平均値をプロットしたものである。A-Value は O_P -磁力計の安定度の一つの目安となるもので、通常一定値となるべき値である。

更に CH, CZ および CF_1 の較正值と重なるようにプロットされている点線で結んだ小さい黒丸は、同日ほぼ同時刻 (数時間の差はある。) に観測された KASMMER システムの絶対観測値と KASMMER システム外の絶対観測磁力計 MO-P (ベクトルプロトン磁力計) の絶対観測値との差 (両磁力計間の地磁気地点差および器差を含む総合差と呼ぶもの。) を示したものである。いうまでもなく両絶対観測時刻の違いによる地磁気自然変化分は、 O_P -磁力計を仲介して補正されている。また各図の最上段に E. Q. と表示したものは、柿岡で観測した有感地震を示す。縦線の長さは震度を表わす。

その他矢印は O_P -磁力計のランプ交換, 位相調整等何んらかの大きな調整を実施した時点を示しており、各較正值に大きな Gap がある。Fig. 2 で⊙で示したところの大きな Gap は地震によって生じたものである。なお、Fig. 1 の Oct. 1973 および Dec. 1973 の CF_2 の大きな Gap は、MO-PK (較正器) のセンサー設置地点の変更に伴うもので、 O_P -磁力計の絶対値 Gap ではない。

a) 各成分較正值の変動特性 (光ポンピング磁力計の安定度)

Fig. 1 および Fig. 2 に示した各磁力計の較正值の変動を見ると、調整等による不連続性はあるが、 CF_1 を除き他の較正值は年間約 $1\gamma \sim 2\gamma$ の規則的な年变化的変動を示している。CH は1973年、1974年とも夏に大きく冬に小さくなるような特性を示している。両年とも $0.2\gamma \sim 0.3\gamma/\text{month}$ の変動率を示している。CZ および CHy 較正值については、両年において CH ほど変動に類似性はないが、振幅 $1\gamma \sim 2\gamma$ のほぼ1年周期の正弦波的な変動が見られる。特に Sept. 1973~Mar. 1974 の期間の CZ の変動はそのような様相が顕著であった。

設計段階でその安定度に最も問題ありと考えられた Hy-磁力計の較正值変動についても、地震および補償電源のトラブルによる比較的多くの Gap のあった点を除けば、H または Z-磁力計の較正值変動と同等程度で決して心配されたほどには悪くはない結果を示している。これは特筆すべきことである。ただ較正值の短周期的変動が CHy に最も目立っている。

一方、F(A)-磁力計の較正值 CF_1 は補償磁場 (Bias field) を必要とする他の成分磁力計に比べて、当然のことながら数段と安定しており変動量が小さい。高々 $1\gamma/\text{year}$ 程度の変動を示すのみであり、較正值の短周期変動も他の成分に比らべ非常に小さい。特に June

1974~Apr. 1975の間では 0.5γ 程度の CF 変動しか起していない。(この安定度は July 1975 までも維持されつつある。)

各較正值の変動の特性は以上のとおりで、F(A)-磁力計の長期安定度は、後述する地磁気地点差が変動する可能性もあるということを考え合せて目標どおりの良好な精度が得られていると評価される。なお、CF₂ 較正值の変動を見ると CF₁ 較正值以上の短周期的変動が見られるが、これは MO-PK の観測値にも問題があると考えられる。なぜならば、これらの多くの較正值は比較較正室内の地面より非常に高い地点に設置されている MO-PK センサー (CF₁ 較正時に使用) によるものではなく、地上約 1.5 m と比較的地面に近い簡易小屋内に設置されているセンサーによるものであるからである。このことは多くの CF₂ の短周期変動と A-Value の変動とが対応していないことから推定される。またデータは示さないが、MO-PK 上記 2 地点間の地磁気地点差の変動の事実も観測している。

補償磁場を必要とする H, Z, Hy-磁力計の長期安定度は、F(A)-磁力計よりも少々悪い。これらの O_P-磁力計自身は構造的にも回路的性能等についても同等のものであることと F(A)-磁力計が安定であることを考え合わせると H, Z, Hy-磁力計の不安定さの主たる原因は補償磁場の不安定さにあると考えられる。一つには補償電源の長期安定度に問題があり、他の一つは Bias Coil (補償コイル) の機械的安定度が問題となる。前者については電源の完全な故障等も数回発生したので十分に原因として考えられる。後者については詳細なデータはないが、Apr. 1975 より実施している Bias Coil の較正観測日毎のレベル読取結果によれば、少なくとも年間に 4''~5'' 程度の補償磁場方向の変位がある可能性が十分にある。現在のところ観測データが十分でなくこれ以上の議論はできないが、このことについては地盤等の変動とも考え合せて今後追求していく必要がある。なお、O_P-磁力計の絶対値シフトの原因として磁力計各部の温度変化によるものが当然考えられる。これについては別に報告⁹⁾したとおり、各部の温度シフト特性および年間の温度変化量とから考えてこれによる絶対値シフトはほぼ無視しうる量である。

他に注目すべきことは A-Value の day to day の変動は比較的長時間に対してスムーズであるのに、CH および CZ には観測日毎の変動が大きいことである (CH, CZ の変動のスムーズ曲線からのズレとみても良い。) これは O_P-磁力計の H および Z-成分の絶対値は変動しているにもかかわらず、両者の変動が $\sqrt{H^2+Z^2}$ としてはキャンセルし合っていることを示している。このような現象の起る可能性として H および Z-磁力計センサー室周辺の地盤に一樣な傾斜の変動があれば起りうる。他方、前述した KASMMER の絶対値較正法によれば、DI-72 の I-成分に観測誤差があると同じような現象が起りうることも考慮しなければならない。現実には両者が混在しているだろうが、その実態は今後の調査に待ちたい。

b) 光ポンピング磁力計の安定度と地震との関係

Sept. 1973~Apr. 1975 の期間に震度 1 から震度 4 までの有感地震が約 100 回柿岡で観測されている。当然地震により補償コイルの機械的位置が変位し、O_P-磁力計の絶対値が変わることが予想された。ところが予想に反して地震のショックにより補償コイルの機械的安定度はそれほど大きな影響を受けないものであるという結果がえられた。即ち、地震に関係する各成分の較正值の顕著な急変化は、Fig. 2 に示した震度 4 クラスのこの期間内の最上級の地

震時4回のみである。この急変動(数 γ ~数 10γ)は特にHy-磁力計に集中した。HおよびZ-磁力計の場合はGap量も小さく回数も少ない。1 γ 以上の地震によるGapは今までのところ起きていない。他に0.2 γ ~0.3 γ 程度のもは有りそうであるが、確しかなことは不明である。ともかく補償磁場を持つ O_P -磁力計でも比較的地震に対して安定であることは重要な結果で特筆すべきことである。

c) 地磁気地点差の変動と光ポンピング磁力計の安定度

Fig. 1 および Fig. 2 に示した二つの絶対観測装置各成分値の差(総合差)の変動にも、 O_P -磁力計の較正值の変動とコンパライナ変動が見られる。特に Fig. 1 に示したZ-成分およびF-成分に関するものは、明らかに年間1 γ ~1.5 γ の変動を示している。F-成分のそれは CF_1 の変動よりも大きい。

少なくともこのような総合差の変動は両センサー地点間の地磁気地点差の変動と考えなければならぬ。このような地磁気地点差の変動の事実は、他にも多くの報告があり間違いのないことである。これらのことより推定して O_P -磁力計センサー地点の地磁気地点差も変動している可能性がある。したがって前述した各成分較正值の変動の中にも地磁気地点差の変動による部分が含まれていないとはいえない。ともかく O_P -磁力計のような精度(安定度)の高い磁力計の長期安定度を問題にする場合には、地磁気地点差の変動にも十分の考慮が必要である。なお地磁気地点差の変動を示すデータは後でも示し議論する。

d) CI および CD 較正值の変動

Fig. 3 および Fig. 4 は KASMMER 各成分 O_P -磁力計の組合せにより求められるIおよびD-成分の較正值(大きい黒丸)およびDI-72と従来の方式のDI測定器であるA-56磁気儀との各成分の総合差(小さい黒丸)の変動を示したものである。なお O_P -磁力計の I_1 , I_2 と表示したI-成分値は、 $I_1 = \tan^{-1} Z/H$, $I_2 = \cos^{-1} H/F$ より求められたものである。(その他地震、調整等の表示は Fig. 1, Fig. 2 と同じであるので説明省略。)

CI (CI_1 および CI_2) および CD の変動は先の CF, CH, CZ および CHy の変動の組合

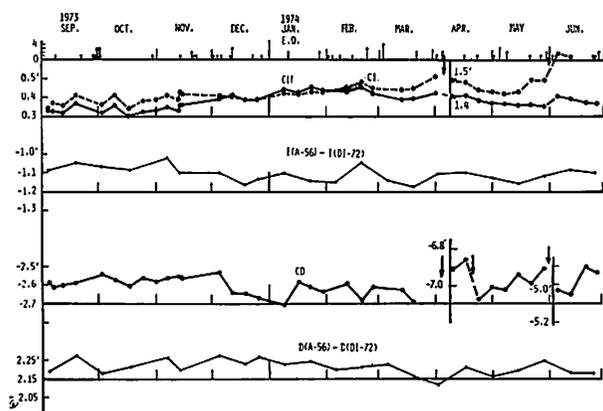


Fig. 3. Stability of D and I components synthesized from optical pumping magnetometers and comparison of DI-72 and A-56 magnetic theodolites during the period of Sept. 1973-June 1974.

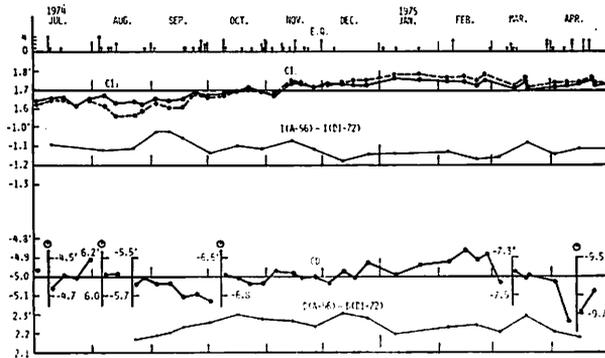


Fig. 4. Stability of D and I components synthesized from optical pumping magnetometers and comparison of DI-72 and A-56 magnetic theodolites during the period of July 1973–Apr. 1975.

せであり説明するまでもないが、調整等による Gap を除いて考えて $0.1' \sim 0.2' / \text{year}$ の規則的な変動を示している。CI の変動は概して夏から秋口に最低値を、冬から春先にかけて最高値を示す特性が見られる。CD の変動は Hy-成分の異常 Gap による不連続点が多く、年間を通した様相はつかみにくい。また CI に比べて不規則な短期変動も目立つ。この原因については今後の調査を待たなければ確かなことはいえない。ただ、補償電源の安定度の劣化が大なり小なり影響していたことは間違いない。May 1974, Apr. 1975 頃の比較的急激な CD の変動時点で、いずれも Hy-磁力計の補償電源が故障しており、同電源のドリフト的不安定さがさきの CD 急変化に関係していたと考えられる。更に D-成分絶対観測には方位標 (Telescope mark) の読取り誤差も加味されるので、絶対値較正精度にも他の成分より問題がある。このことも CD のバラツキが比較的大きいことに関係があるかも知れない (今後の問題点の一つ)。

e) CI, CD の変動と DI-72 と A-56 の総合差の変動との関連

Fig. 3 および Fig. 4 に示した CI, CD の変動と DI-72 と A-56 との総合差の変動を比較すると両者には何んらかの相関がありそうである。即ち、I-成分 (特に I_1 -成分) に関しては概して逆相関、D-成分については概して正相関の関係が見られる。このことは少なくとも両者の変動の中には、地磁気地点差の変動部分が含まれていることを暗示するものであろう。他にも種々と推定し議論することが可能であるが、ここでは I-成分の総合差 $[I(A-56) - I(DI-72)]$ の変動は、地磁気地点差の変動であると証明できそうな一つの事実を最後に示しておく。

柿岡における DI-72, A-56 および MO-P (H, Z 観測より I-成分を計算) による I-成分観測値の相互の差を分析してみると、3 者の観測値の差には系統的な関係が見られる。Fig. 5 にその結果を示した。図は $4I(A-56) \equiv [I(A-56) - I(DI-72)]$ と $4I(MO-P) \equiv [I(MO-P) - I(DI-72)]$ の相関を示したもので、明きらかに両者には正相関関係がある。両者の相関係数は 0.761 と高く、回帰直線の回帰係数 (a) は 0.458 である。これらの磁気儀、磁力計は全く独立に観測したもので、このような相関関係があることは単なる偶然の観測誤差とは考え

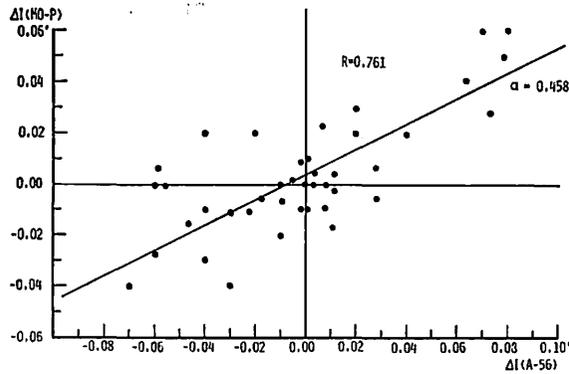


Fig. 5. Correlation between $\Delta I(A-56) = I(A-56) - I(DI-72)$ and $\Delta I(MO-P) = \tan^{-1}[Z_p/H_p](MO-P) - I(DI-72)$.

にくい。つまり偶発的な観測誤差がこのように系統的に起るとは考えられない。したがってこれは直接的に地磁気地点差の変動特性を示すものであろう。

ではこの地点の地磁気地点差の変動であろうか？ $\Delta I(A-56)$ および $\Delta I(MO-P)$ とともに $DI-72$ を基準として算出したもので、 $DI-72$ の観測値に変動があれば、 $\Delta I(A-56)$ と $\Delta I(MO-P)$ とはまさに正相関関係が生じる。しかしこの場合の相関関係の回帰係数は 1 に近い値とならなければならない。Fig. 5 に示した回帰係数は 0.458 と小さく、1 よりも明らかに有意な差を示している。したがって $DI-72$ 地点の地磁気地点差とは考えられず、同一建物内にある $A-56$ および $MO-P$ 点の地磁気地点差の変動が起っていると考えた方が最も自然である。即ち、 $A-56$ 点と $MO-P$ 点の地磁気地点差はその原因が同じであり、 $MO-P$ 点は $A-56$ 点の約 $1/2$ の振幅で変動していると考えられる ($DI-72$ 地点は一定)。

このことからして O_P -磁力計センサー地点の地磁気地点差が、 $A-56$, $MO-P$ 地点と同様のオーダーで変動する可能性があるかと推定して議論してきたことは誠に自然である。なぜならばこれら地磁気地点差の変動が起っているらしい地点のセンサーの高さは、共通して $DI-72$, $MO-PK$ のセンサーの高さよりも低く地面（地磁気地点差の変動源と考えられる）に近いからである。 $A-56$ 地点は特に低くこの条件からしても最も地磁気地点差の変動を受けやすいと考えられる。これは Fig. 5 に示した結果について $DI-72$ 地点の地磁気地点差を不変とした場合に、 $MO-P$ 地点よりも $A-56$ 地点の地磁気地点差の変動が大きいと考えたことと矛盾しない。

f) 光ポンピング磁力計の安定度の総合評価

以上のとおり $KASMMER$ の O_P -磁力計の安定度は、ほぼ週 1 回の較正值の変動から評価して $1r \sim 2r/year$ 以内であると考えられる。この中には地磁気地点差の変動分も少なからず含まれていると考えられるので、 O_P -磁力計自身の本来の安定度は、ほぼ我々が目標とした精度に達していると評価する。しかし、 D -成分 (Hy -成分) についてはもう少しの深い観測データの解析が必要である。

3. 光ポンピング磁力計の短期安定度について

次に O_P -磁力計の day to day または日安定度といった短期安定度はどうであるかが問題となる。即ち、週1回の較正観測間の振舞はどうなっているかということである。現時点では O_P -磁力計の絶対値シフト特性は、吊り磁石式変化計のような統一の実験式により求められる可能性はない。 O_P -磁力計の絶対値シフトの多くの原因は偶発的に起る要素がより大きく関係しているからである。ともかく以下に O_P -磁力計の短期安定度に関する分析結果を述べる。

O_P -磁力計の短期安定度は次のようなことにより解析する。F(A)-磁力計については毎正分値による連続の較正が可能であるので詳細な解析ができる。H および Z-磁力計については A-Value の変動 ($\sqrt{H^2+Z^2}$ 部分の変動) より解析する。Hy-磁力計に関しては DI-72 による較正値によるしか解析の方法はなく、ここでは短期安定度は議論できない。むろん変化計データと比較することによってもある程度の解析は可能で、H および Z-成分についてはその比較結果についても簡単に議論する。

a) F(A)-磁力計の短期安定度

F(A)-磁力計の day to day のドリフトについては、すでに Fig. 1 および Fig. 2 に示したとおりで、大きな異常がない限り一般に週1回の較正値を直線（またはスムーズ曲線）で結んだ値より大きくずれることは少ない。また各較正日間のノンリニア部分は A-Value の変動を参照すれば大体の推定が可能である。一般に A-Value の変動以上に F(A)-磁力計の絶対値変動は起りにくい。A-Value の変動以上の CF の変動は O_P -磁力計に原因があるというよりも、MO-PK (較正器) の測定条件等の問題がある場合が多い。

一方、F(A)-磁力計の日安定度はどうであろうか？ Fig. 6. に Sept. 1973, Oct.~Nov. 1973, Apr.~June 1974, Mar.~July 1975 の4期間の平均 CF₂ 較正値の日変化特性を示し

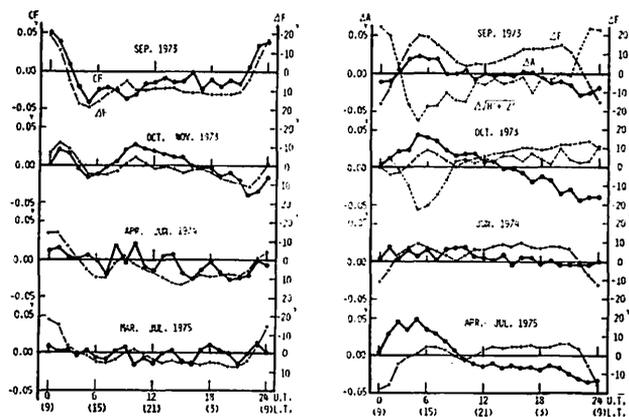


Fig. 6. Mean diurnal variations of CF which is the difference of total force F between optical pumping magnetometer and MO-PK proton magnetometer (left) and A-Value which is $[F - \sqrt{H^2+Z^2}]$ of optical pumping magnetometers (right).

た(左側の図で大きい黒丸)。各期間とも10日間の平均値をプロットしたものである。小さい黒丸はFの平均日変化を示す。但し、下方を $4F$ 増加のセンスでプロットしてある。

Sept. 1973 および Oct.~Nov. 1973 の期間の CF_2 の平均日変化は特徴的で $4F$ の日変化曲線と図の上で全く平行な変動特性を示している。つまり $4F$ の日変化特性と高い負相関関係がある。これらの事実については既に報告³⁾してあるので詳細はそれを参照されたい。ところが Apr.~June 1974 および Mar.~July 1975 の期間のものは CF の変動振幅も小さく、前期間のような特徴的な特性は見られない。

このように $F(A)$ -磁力計の較正值 CF の日変化特性に顕著な相違があるのは、Apr. 1974 の初めに O_P -磁力計の次のような改良を行なったためである。以前は帰還増幅器内に Band-pass filter が組込まれていたが、このフィルターの特性として磁場変化に対応する O_P -磁力計の周波数変化をわずかではあるがおさえるような効果があった。このため O_P -磁力計の周波数磁場変換定数が見かけ上大きくなり、理論的に求められている定数を採用していたため見かけ上の計測誤差があった。したがってこの Band-pass filter を除去し、正常な理論どおりの特性で動作するように O_P -磁力計を調整した。しかしながら以前の状態においてもその誤差は高々 0.2~0.3% であった。改良により少なくともこの誤差は 0.1% 以下になっており、実用上は無視される程度である。

以上のとおりで改良後の $F(A)$ -磁力計は問題となるほどの日変化的な不安定さは少なくとも平均的にはないと結論される。また時として 0.1γ ~ 0.2γ 程度の日変化的な不安定さを示すとしても、それは $F(A)$ -磁力計の不安定さなのか地磁気地点差の変動なのか確実なことはわからない。

b) H および Z-光ポンピング磁力計の短期安定度

H および Z- O_P -磁力計の絶対的な短周期較正值変動を示すデータはない。前述したように A-Value の変動からある程度の推定により議論する。Fig. 6. の右側に CF を分析したと同期間内の A-Value の平均日変化特性を示した(大きい黒丸)。これらは各期間10日~20日の平均を示す。小さい黒丸(破線で結んだもの)は同期間の F の平均日変化を示す。Apr. 1974以前の A-Value の変動の中には当然 CF の変動部分を顕著に含んでいる。そこで点線で結んだ小さな黒丸はこの CF 変動分を補正した $\sqrt{H^2+Z^2}$ の変動を示したものである。Apr. 1974以降のものについては CF がほぼ一定値であるので、A-Value の変動はほぼ $\sqrt{H^2+Z^2}$ の変動とみなせる(但し A-Value の変動と $\sqrt{H^2+Z^2}$ の変動は逆センス)。

Sept. 1973 および Oct. 1973 の A-Value の日変化は比較的規則的な様相を示している。しかし A-Value と $4F$ との日変化特性の相関性は、 CF と $4F$ との間に見られたほどには高くはない。位相関係にも相違がある。一方、 CF を補正した $\sqrt{H^2+Z^2}$ 分の日変化特性は、 CF の場合と同様 $4F$ の日変化と高い逆相関性が明きらかに見られる。これは H, Z-磁力計でも $F(A)$ -磁力計と同様 Band-pass filter の効果(影響)を受けていたためである。

H, Z-磁力計(Hy-磁力計も)についても Apr. 1974 に Band-pass filter を除去する改良を行なった。この改良後の June 1974 の A-Value の日変化は極めて小さく全くないといってもよい。改良による成果があったと考えられる。ところが Mar.~July 1975 の A-Value はフィルター除去前の Oct. 1973 と同じような日変化特性を示している。これは H, Z-磁

力計の日変化的不安定さを示すものである。この程度不安定さは補償磁場の方向の安定度から考えても当然起りうるものである。即ち、補償磁場の方向が N-S 方向に $0.5'' \sim 1''$ 程度の日変化を起すとすれば、A-Value の変動 (H または Z-磁力計の絶対値変動) は十分に説明できる。この程度の補償磁場の方向変化は機械台のレベル変化の実測もありしばしば起りうると考えられる。したがって A-Value の変動は多くの場合 (補償電源の安定度には問題のない場合) 磁力計自身の不安定さ (温度ソフトなどによる。) によるよりも、補償磁場の方向変化による場合が多いと考えられる。なぜならば June 1974 (ここでは示してないが May 1974 も同様) の A-Value のように信じがたいほど変動しない時もあるからである。

このように考えてくると一つの疑問が起る。それは H および Z-磁力計センサー室一帯の地盤が、N-S 方向に一樣に傾斜するような現象が起きた場合には、H, Z-成分の絶対値は変動しても A-Value は不変であるので、そのような現象はないかということである。この疑問に完全に答えるためには、絶対値較正観測を多くの日に終日連続実施してみる他にないが、ここでは O_P -磁力計 H および Z-成分値と変化計の読取値を比較してみた。(この比較は本来は変化計の安定度を調査する目的のもので、詳細な比較結果については別の機会に報告する。)

June 1975 の第 2 変化計室 (新室) の H および Z-変化計とも室温の温度変化も小さく比較的安定であった。 O_P -磁力計と比較して 1 か月間に $1\gamma \sim 2\gamma$ 程度の周期 (周期約 10 日) 的な基線値変動を示しているに過ぎない。Fig. 7. に H および Z-成分の O_P -磁力計毎時平均値と変化計のそれ (一定基線値採用) との差の月平均値 (29 日間採用), その差より求められる $\sqrt{H^2 + Z^2}$ の毎時変化量および同期間の A-Value の毎時月平均値を示した。A-Value のプロットはセンスを逆にして、 $\sqrt{H^2 + Z^2}$ の変化センスと一致させてプロットしてある。変化計データには比較的大きい読取誤差を伴うので、 O_P -磁力計と変化計データの差の平均値の 95% 信頼区間は $\pm 0.1\gamma$ 程度と大きいのが、H-成分について約 0.3γ , Z-成分について約 0.2γ の系統の日変化が顕著に見られる。F-成分に合成した変化量 ($4F$) は約 0.2γ の日変化レンジを示している。一方、A-Value の変化レンジは 0.08γ と非常に小さく、位相特性も $4F$ と関連性がない。

もし O_P -磁力計と変化計との差の変動の原因が、 O_P -磁力計側にあるとすれば、当然 A-Value の変動は $4F$ と同じになるはずである。少なくとも両者の変動には同相関係が見られるはずである。しかし、事実は前述のとおりでそのような様相は見られない。したがってこの原因は主として変化計側にあると考えざるをえない。

以上のことより思考して、H および Z-磁力計個々の日安定度は、A-Value の安定度と少なくとも平均的には同等と評価される。つまり比較的大きな H および Z-成分の絶対値変動が、A-Value の変動を起さないように互にキャンセルするような形態で起るケースは少ないことを示している。いずれにしても A-Value の平均的な日変化量はまずどの期間を取っても 0.1γ もしくはそれ以下であるので、H および Z- O_P -磁力計の日安定度もその程度と評価される。

一方、 O_P -磁力計の day to day の安定度に関しては、A-Value がどの程度の目安となるかももう少しデータを深く解析しないとなんともいえない。前にも述べたように CH および CZ

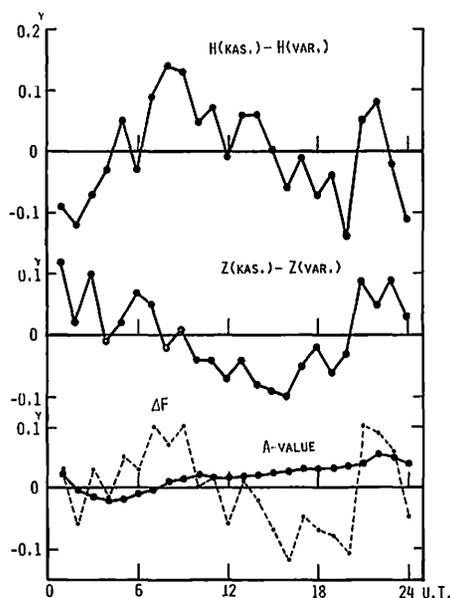


Fig. 7. Mean diurnal variation of the difference in H and Z components between optical pumping magnetometers of KASMMER and bar-magnet variometers (top and middle), and those of synthesized difference in total force, ΔF , and A-Value = $(F - \sqrt{H^2 + Z^2})$ of optical pumping magnetometers (bottom).

較正值が、A-Value がほぼ一定値を示している場合でも、比較的大きく変動していることが時々見られたことから考えて、A-Value が安定しているからといって H, Z-成分磁力計も安定であると安心はできない。

§2. DI-72 の観測精度について

前節で議論した光ポンピング磁力計の安定度はすべて DI-72 および MO-PK の組合せによる絶対観測誤差を無視し、その較正值を真値として議論してきた。果たしてこれには大きな誤りはなかったかどうかを本節で考えてみる。MO-PK の観測誤差については別の報告¹⁾³⁾もあるので詳細は省略するが、計測値のパラツキは標準偏差にして $\pm 0.150 \gamma \sim \pm 0.200 \gamma$ 程度である。従って通常 1 回の CF 較正值の誤差はサンプリング数 = 80 個であるので $\pm 0.05 \gamma$ (95%信頼区間) 以内と推定され問題はない。本節では DI-72 の観測精度を主体にして議論する。

1. DI-72 の各観測状態における系統誤差および偶然誤差

a) DI-72 の観測状態の種類と観測量

DI-72 の観測法についてはすでに報告¹⁾²⁾ されているとおりで、従来のサーチコイル軸に

よって地磁気の方角を決定するかわりに、軸精度（安定度）の高い補償コイル（Helmholtz Bias Coil）軸によって測定する方式のものである。この方式は柿岡で新たに開発されたものである。

DI-72 の観測状態はサーチコイル（Sh. Coil）、補償コイル（Bias Coil）、磁気儀の向き（Vertical circle の位置 E, W）およびサーチコイルの回転の向き（R, L）の各 2 通りの状態の組合せとして、Table 1. に示す通り 16 の観測状態がある。通常 1 回の較正観測は表に示した順序で 2 回繰返し行なう。これにより通常の磁気儀と同様の計算法により 8 個の D, I 観測値（4 時刻の平均値）がえられる。

Table 1. 16 states for combination of axis directions and search coil rotation sense of DI-72 magnetometer. The marked side of the search coil axis can be pointed either towards direction of the marked side of the Helmholtz coil axis (0°) or towards the reversed direction (180°), for each state of the Helmholtz coil axis which is denoted by (up) for the marked side upward and by (down) for downward. The horizontal axis of the magnetometer, which supports the search coil and Helmholtz coil, directs one of two directions which are expressed by vertical circle eastward (E) and vertical circle westward (W), respectively. At each state of the axis, the search coil rotates in one of two ways, right-handed (R) and left-handed (L).

Sh. Coil	0°								180°							
	Up				Down				Down				Up			
Vertical circle	E		W		W		E		E		W		W		E	
Sh. C. Rotation	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
State No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

方位標およびレベルの読取りは Apr. 1975 以前は、DI-72 全観測の前後に、それ以降は前、中、後の 3 回実施している。方位標読取値およびレベル補正値はこれらの平均値を採用している。

O_P -磁力計の較正は DI-72 の 16 通りの各観測に 3 秒以内の同時性を持って対応する O_P -磁力計測定値との 1 対 1 の比較により処理されている。したがって、較正器と被較正器の測定値に最高 3 秒の非同時性にもなう地磁気自然変化による誤差が原理的に混入する以外は、較正值算出法上の誤差要素はない。

b) DI-72 の観測誤差の定義および算出法

DI-72 の観測誤差は測定対象物理量に変質するので通常の物理量の測定誤差のようには簡単にいかない。測定対象たる地磁気 D および I-成分の時間変化分を補正し、測定値を一定値に引き直してやる必要がある。この時間変化分の補正には、DI-72 観測時間（1 時間程度）の範囲内では完全に安定していると仮定して O_P -磁力計を利用する。そこで DI-72 の各観測状態（16 通り）での個々の観測誤差を次のように定義する。

D-成分については各観測状態での DI-72 の観測値を D_i 、それと同時刻の O_P -磁力計の

D-成分観測値を $D_i(O_P)$, $D_i(O_P)$ を本較正観測によってえられた較正值 CD で補正したものを $D_i'(O_P)$ とし, $DI-72$ の観測誤差 (測定値の系統的, 偶発的偏差) を $\varepsilon_i(D)$ とすれば, $\varepsilon_i(D)$ は

$$\varepsilon_i(D) \equiv [D_i - D_i(O_P)] - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{16} (D_i - D_i(O_P))}{N(16)} \right\} = [D_i - D_i'(O_P)]$$

と定義する。なお, i は $DI-72$ の観測状態を表わす。

同様に I-成分についても D-成分の場合の各量の記号 D を I に置き替へ, I-成分に対応させると I-成分の観測誤差 $\varepsilon_i(I)$ は

$$\varepsilon_i(I) \equiv [I_i - I_i(O_P)] - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{16} (I_i - I_i(O_P))}{N(16)} \right\} = [I_i - I_i'(O_P)]$$

と定義する。($I_i'(O_P)$ は $I_i(O_P)$ を CI 較正值で補正した値。) ところで $DI-72$ の各観測状態の I-成分測定値 I_i は, 一般の磁気儀がそうであるように Vertical circle の水平方向の角度読取 ($I=0^\circ$ における) を直接的に行なっていないので, D-成分のように方位標の読取値と D-成分測定の読取値との差として求められるようには求められない。そこで $\varepsilon_i(I)$ は Vertical circle の読取値の式に変換して次のように求める。いま E-state および W-state の Vertical circle の読取値を $R(E)$ および $R(W)$ とすると $\varepsilon_i(I)$ は, $\varepsilon_i(I)_E$ (E-state) および $\varepsilon_j(I)_W$ (W-state) に分けて,

$$\varepsilon_i(I)_E = 180^\circ - (R_i(E) - R_0) - I_i'(O_P) = 180^\circ + R_0 - (R_i(E) + I_i'(O_P))$$

$$\varepsilon_j(I)_W = R_j(W) - R_0 - I_j'(O_P) = (R_j(W) - I_j'(O_P)) - R_0$$

として求められる。 R_0 は定数で Vertical circle の水平方向の仮想的角度読取値 (水平方向の目盛基点) である。 R_0 は 1 回の観測の全平均値として

$$R_0 = \frac{1}{16} \left[\sum_{i=1}^8 (R_i'(E) + I_i'(O_P)) + \sum_{j=1}^8 (R_j(W) - I_j'(O_P)) \right]$$

$$(\text{但し, } R_i'(E) = R_i(E) - 180^\circ)$$

として求められる。実際の角度読取値は互に 180° 対向位置 (通常 I および II の読取位置と呼ばれている。) の読取値の平均値を採用すべきであるので, 上記の $R_i'(E) = R_i(E) - 180^\circ$ には意味がなく, “度” の読取値を I, II どちらにするかだけの問題である。なお, 上記各式の i は E-state における 8 通りの観測状態および j は W-state における同様 8 通りの観測状態を表わす。いうまでもなく, $\varepsilon_i(I)_E$ は $DI-72$ の角度読取値 $-(R_i(E))$ と O_P -磁力計の I-成分値 $(I_i'(O_P))$ との和, $\varepsilon_j(I)_W$ は 同様の $R_j(W)$ と $I_j'(O_P)$ との差が変数となっている。

これらの D, I-成分観測誤差の算出に用いる $DI-72$ のデータはすべてレベル補正をした値を用いる。

以上のように定義した $\varepsilon_i(D)$, $\varepsilon_i(I)_E$, $\varepsilon_j(I)_W$ には, $DI-72$ 磁気儀が一般の経緯儀として受けられない系統誤差 (Systematic deviation または error) と偶発的に起る偶然誤差 (Accidental error) を含んでいる。この系統誤差は一般に全観測状態での全平均を取ることにより消去すべきもので, 常識外に大きな値を示さないかぎり問題とはならない。系統誤差を除去した偶然誤差が観測精度として問題になる誤差である。そこで偶然誤差を $4\varepsilon(D)$ および $4\varepsilon(I)$ と表わし次のように定義する。即ち, 解析する全期間のデータについて先に定義した

$\epsilon_i(D)$, $\epsilon(I)_E$ および $\epsilon_j(I)_W$ の同一観測状態での全平均値を系統誤差とみなし, その全平均値からの個々の誤差の偏差を偶然誤差と定義する。

c) DI-72 各観測状態の系統誤差および偶然誤差 (観測値のバラツキ)

Fig. 8 に前項の定義にしたがって求めた DI-72 の各観測状態における系統誤差および偶然誤差のバラツキ (標準偏差) を示した。解析した資料は 1974 年に観測した 96 回 (16 状態での観測を単位とする。) 分についてのものである。96 回の観測データを観測月日順に 3 期, 前, 中, 後期に分けて解析した。これら前, 中, 後期の期間を A, B, C と呼ぶことにする。A, B, C 各期間の観測回数は各々 30 回, 30 回および 36 回となっている。

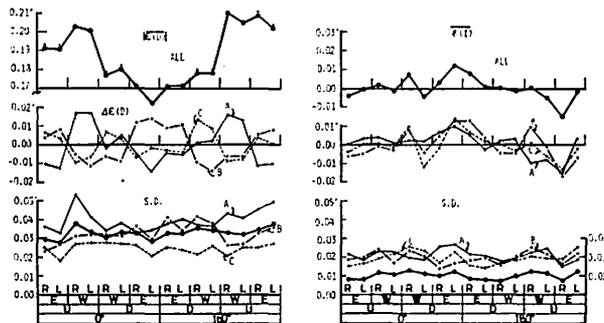


Fig. 8. Systematic deviations of DI-72 measured value in each state of axis direction indicated in the bottom abscissa (top), their changes for three sub-periods A, B and C from the mean of the whole period (middle) and standard deviations in each sub-period (bottom). For D-component (left) absolute value of the deviation is shown in order to use the same scale as the others and those of negative value are indicated by dot given aside.

Fig. 8 の左側に示したものは D-成分に関するものである。図の最上段に大きい黒丸で示したものは, 各 16 通りの観測状態における全期間の系統誤差の平均値の“絶対値”を示したものである。なお, 大きい黒丸にドットを付けたものは系統誤差が負値を示すものである。2 段目のものは各状態における A, B, C の期間の系統誤差の全期間平均値からの偏差を示したものである。D-成分の各観測状態での詳細な系統誤差は Table 2. (a) に示したとおりである。表中 4 ~ 7 行に示した $[0^\circ]$, $[Up]$ etc の表示は各 [] 内に示した観測状態に属する全観測の系統誤差の全平均値を意味する。従って $[0^\circ]$ - $[180^\circ]$ 等はサーチコイル軸 0° での観測と 180° での観測での系統誤差の差を意味する。また * 印を付けた () 内の数値は, 該当行の最初に示した系統誤差の差の () 内に Up, E, 0° , Up 等で示した観測状態での差を示す。その他の () 内の数値は 1975 年の 38 回の観測資料についての同様の結果である。なお, 数値はすべて $0.001'$ 単位で表示されている。

D-成分の各観測状態での系統誤差は“絶対値”で $0.16' \sim 0.21'$ の値を示しており, その平均値は $0.185'$ である。この数値は通常の常識程度の大きさで, 補償コイルの鉛直回転面と補償磁場軸が平均的に $0.185'$ ずれているを示している。その他系統誤差の特性として注目すべ

Table 2. Systematic deviation ϵ (D) and ϵ (I) of measured value in each state of DI-72 magnetometer and their standard deviation obtained from 96 measurements in 1974 for D-component (upper) and for I-component (lower) in 0.001' unit. Values in bracket () are those from 36 measurements in 1975.
 *1: Bracket [] means the mean value of systematic deviation or standard deviation at the state given in the bracket averaged for the other states.
 *2: Four values in bracket () of 8th-11th rows represent the difference values which correspond to those at the head of the row for each state designated by = sign.

Sh. Coil	0°												180°											
	Up						Down						Down						Up					
	E	L	R	L	R	W	E	L	R	L	R	W	E	L	R	L	R	W	E	L	R	L	R	W
System. devl. ϵ (D) & their standard deviations	(a) Declination																							
	ϵ (D) -191 -191 203 202 -177 -180 171 162 171 171 -178 -178 210 205 -209 -202 -191(-202) 202(213) -179(-177) 167(161) 171(166) -178(-171) 208(210) -206(-204) 5.5(5.5) -5.5(-3.0) -3.5(-2.5) 1.0(3.0)																							
	*1 [0°]-[180°]=1.3 (Up, E=15, Up, W=-8, Down, W=0, Down, E=-0)*2 (1.0) [Up]-[Down]=7.8 (0°, E=-358, 0°, W=380, 180°, W=386, 180°, E=-377) (9.6) [E]-[W]=-28.3 (0°, Up=-393, 0°, Down=345, 180°, Down=349, 180°, Up=-414) (-39.5) [R]-[L]=1.4 (0°, Up=1, 0°, Down=3, 180°, Down=0, 180°, Up=2)																							
	ϵ (I) 29.3 27.4 37.5 33.1 30.6 32.8 32.5 28.4 32.5 33.1 35.9 34.2 32.5 31.7 33.9 38.1 28.4(33.8) 35.4(31.2) 31.7(40.2) 30.5(35.8) 32.8(33.9) 35.1(39.9) 32.1(52.9) 36.1(39.7)																							
	*1 [0°]=31.6, [180°]=34.1, [E]=32.1, [W]=33.6, [Up]=33.1, [Down]=32.6, [R]=33.2, [L]=32.5																							
	(b) Inclination																							
	ϵ (I) -3.3 -0.2 1.7 -0.7 7.4 -4.2 3.2 12.3 8.1 0.9 0.4 -1.2 0.3 -4.3 -14.7 -1.9 -1.8(-5.9) 0.5(-0.1) 1.6(-3.8) 7.8(8.6) 8.5(-1.9) -0.4(4.5) -2.0(0.5) -8.3(-2.5)																							
	-0.7(-3.0) 4.7(2.4) 4.1(1.3) -5.2(-1.0)																							
	*1 [0°]-[180°]=3.5 (Up, E=6.6, Up, W=1.8, Down, W=2.0, Down, E=3.3)*2 (-0.5). [Up]-[Down]=-6.3 (0°, E=-9.5, 0°, W=-1.1, 180°, W=-0.9, 180°, E=-12.8) (-3.9) [E]-[W]=0.7 (0°, Up=-2.2, 0°, Down=6.2, 180°, Down=4.9, 180°, Up=-7.0) (-0.7) [R]-[L]=0.3 (0°, Up=-0.4, 0°, Down=1.2, 180°, Down=4.7, 180°, Up=4.1)																							
	ϵ (D) 17.8 17.7 21.5 20.4 23.0 20.8 19.3 22.3 18.2 18.0 16.5 19.4 22.7 21.6 17.2 22.3 17.8(22.9) 21.0(23.5) 21.9(34.2) 20.9(29.3) 18.1(34.6) 18.0(23.8) 22.2(20.9) 19.9(25.3)																							
	*1 [0°]=20.4, [180°]=19.6, [E]=19.2, [W]=20.8, [Up]=20.3, [Down]=19.8, [R]=19.7, [L]=20.4																							

きことは、サーチコイル軸の向き (0° , 180°) の違いおよびサーチコイルの回転の向きの違いによる系統誤差がないことである。つまり Table 2. (a) で $[0^\circ]-[180^\circ]$ および $[R]-[L]$ が共に $0.0014'$ の数値でこれは誤差範囲内でゼロとみなせる。これらは DI-72 の測定原理からして当然の結果である。他方, A, B, C 各期間の系統誤差値は, $0.03'$ ($1.8''$) 程度のややシステムテックな差を示す。これについては Apr. 1974 (A 期間に属す。) に DI-72 の総合調整を実施しており, そのための DI-72 の状態変化による差と考えられる。これは後述の偶然誤差の標準偏差の期間別の差からも考えられることである。

次に DI-72 の観測精度に直接関係する偶然誤差特性について見てみよう。Fig. 8 の最下段 (左側) に D-成分の偶然誤差の各観測状態別および期間別の標準偏差値を示した。大きい黒丸は全期間全平均値を示す。詳細は Table 2. に示してある。全平均的な標準偏差値は $0.0328'$ である。

全体的に見て観測状態の違いによる標準偏差値には大きな差はないが, A, B, C 期間により明らかな差がある。C 期間の標準偏差は最も小さく, A 期間のものは最も大きい。これは前述の A 期の終りに実施した DI-72 の総合調整による効果と考えられる。

I-成分に関する系統誤差および偶然誤差については, Fig. 8 の右側および Table 2 (b) に示したとおりである。これらはさきの D-成分の場合と同様の形式により示されているので説明は省略する。ただ系統誤差は“絶対値”でなく値そのものをプロットしてある。DI-72 の I-成分の系統誤差は当然のことながら D-成分よりもはるかに小さい。較差にして $0.03'$ 以下の系統誤差を示しているに過ぎない。また, サーチコイルの観測状態の違いによる系統誤差の差についても, D-成分の場合と同様有意な差は認められない。ただ, D-成分の場合に比らべてサーチコイルの回転の向きの違いによる系統誤差の違いがある傾向が見られる。しかし, これについても問題とするほどの大きさではなく, 実際上は無視して良からう。他方, I-成分の偶然誤差の標準偏差は全期間安定しており, 平均的な標準偏差値は $0.0200'$ ($1.2''$) であり非常に小さい。なお, D-成分および I-成分の偶然誤差の標準偏差値は各々 $0.0328'$ および $0.0200'$ であるが, これらの比は大体 $F/H \doteq 1.52 \doteq 0.0328'/0.0200' = 1.64$ となっており, ほぼ当然の結果を示している。両者の比でやや標準偏差の比の方が大きいのは, A 期間の D-成分観測がやや異常であったためではなかろうかと考えられる。

これらの D, I-成分の各種誤差と対比して 1975 年前半の資料の解析結果が示してあるが, 各特性について 1974 年の結果と大差ないことを附記しておく。

2. DI-72 観測偶然誤差の度数分布および各成分光ポンピング磁力計較正值偏差の度数分布

a) DI-72 観測偶然誤差の度数分布

観測精度を分析する場合先に述べたような計算より求められた標準偏差値の他に, 偶然誤差の度数分布特性が重要な要素となる。即ち, 偶然誤差が正規分布をしているかどうか重要である。Fig. 9 に先に定義した DI-72 の偶然誤差 (4ϵ) の度数分布を示した。図の左側は D-成分, 右側は I-成分に対するもので, 各成分の上段は A, B, C の期間 (A=実線, B=破線, C=点線) の度数分布を, 下段は全期間の度数分布を示している。資料数 (偶然

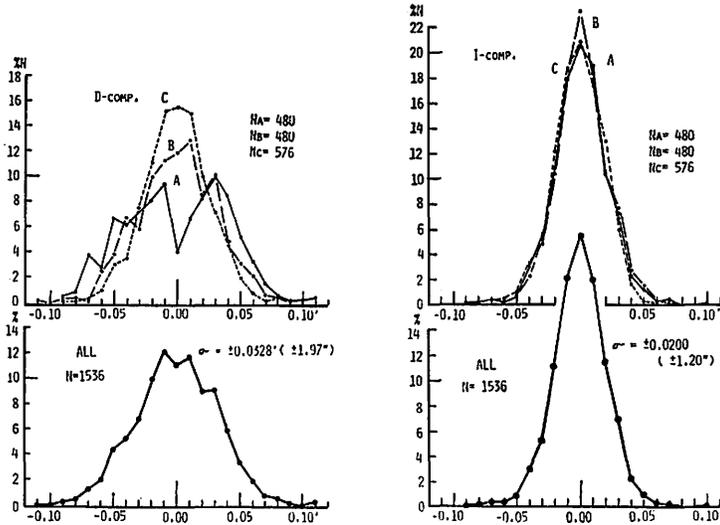


Fig. 9. Frequency distribution of errors in single measured value of D and I components by DI-72 for the data during 1974.

誤差値)は図に表示してあるとおりで全体では1536個となる。なお度数(縦軸)はパーセンテージで表示してある。

D-成分について見ると、まず特徴的なことは各期間 A, B, C により度数分布特性が違うことである。特に A 期間のものは正規分布とはいえず、度数分布に2つの山がある。ここでは示さないが各観測状態においてはほぼ同様の傾向が見られる。この期間は Apr. 1974 の DI-72 の前述した調整前のデータであり、調整前の DI-72 には何んらかの異常な系統誤差的部分が含まれていたと考えられる。これは Nov. 1973 に行なった DI-72 の標準磁気儀室への移動(DI-72の器差比較観測のため)したことによって生じた不安定性によるものと考えられる。本題より議論がはずれたが、他の期間および全期間に対する度数分布特性は正規分布であるとして大きな誤りはない。

I-成分に関しては各期間において度数分布特性にほとんど差はなく、いずれも良い正規分布を示している。当然のことながら D-成分に比べて度数分布曲線の山は高く、シャープである。

以上のとおり DI-72 の観測誤差は正規分布をしており、正規分布に従う推計学により観測精度(誤差)は評価される。DI-72 の観測値のパラツキ(偶然誤差の標準偏差)は D-成分について $\sigma(D) = \pm 0.0328'$ 、I-成分について $\sigma(I) = \pm 0.0200'$ と考えれば、通常現在実施している較正観測の精度は、標準誤差 $\sigma_m = \sigma / \sqrt{N}$ ($N=32$) であるので較正值の95%信頼区間は

$$1.96 \sigma_m(D) = \pm 0.0114' (= \pm 0.684'')$$

$$1.96 \sigma_m(I) = \pm 0.0069' (= \pm 0.416'')$$

となり、従来の磁気儀に比べ精度は高い。これは新しい設計にもとづく DI-72 が磁気儀として優れたものであることを示している。なお、D-成分の標準偏差値(0.0328')は前述の

とおり A 期間の理由のある異常時のデータも含んだものでそれを除いた B, C 期間について見ると, $\sigma(D) = \pm 0.0289'$, $1.96 \sigma_m(D) = \pm 0.0100' (= \pm 0.600'')$ となりもう少し精度は一般に良いと考えられる。

b) 光ポンピング磁力計較正值の度数分布

DI-72 の 16 通りの観測から各 E, W-state におけるサーチャコイル R, L 回転による 4 個の観測に対して 1 個の O_P -磁力計各成分の較正值が求められる。従って現在の 1 回の較正観測から 8 個の較正值が得られることはすでに述べた。ここではこの個々の較正值の全平均値 (1 回の較正観測の平均値で 8 個の平均) からの偏差の度数分布を分析する。DI-72 の観測状態の違いによる系統偏差は補正 (除去) してある。これは $4\epsilon_i(D)$, $4\epsilon_i(I)$ の場合と同じである。この分析は DI-72 の 16 通りの観測値の各 4 個の平均値の精度を分析することに対応する。なお、分析した資料は分析の都合で Sept. 1973~June 1974 期間のデータで、個々の較正值数は 336 個 (42 較正観測回数分) である。

Fig. 10. にこのようにして求められた O_P -磁力計 H, Z, I および D-成分の較正值偏差の度数分布を示した。計算から求めた較正值偏差の標準偏差も表示してある。各度数分布特性を見ると H および I-成分に関するものは良い正規分布特性を示している。Z および D-成分のものは正規分布からのズレが比較的目立つが、いずれにしても正規分布として大きな誤りはない。

各度数分布の標準偏差値を見ると、I および D-成分の標準偏差値は先に述べた個々の DI-72 の偶然誤差の分析結果から考えてほぼ当然の値を示している。I-成分および D-成分の較正值の標準偏差は $0.0132'$ および $0.0164'$ となっている。これらの値は前項の個々の観測値 4 個の平均値に対するものであるから、個々の観測値の偶然誤差の標準偏差値の $1/\sqrt{4} = 1/2$ の値を示すことが期待される。D-成分の標準偏差値 $0.0164' (= 0.0328'/2)$ は正にそのよう

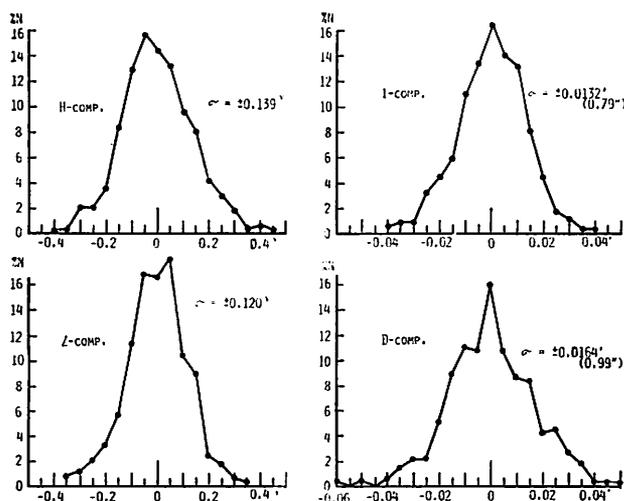


Fig. 10. Frequency distribution of the individual deviation of calibration values, CH, CZ, CI and CD.

参 考 文 献

- 1) 柳原一夫他, (1973), 栢岡の新標準磁気儀 カスマー, 地磁気観測所要報別冊, 第4号, 1973 (英文)
- 2) 佐野幸三他, (1972), 標準磁気儀 (KASMMER) について, 技術報告, 第12巻, 第2号 (第47号), 1972.
- 3) 佐野幸三, (1973), KASMMER の光ポンピング磁力計による全磁力観測の安定度について, 技術報告, 第13巻, 第4号 (第53号), 1973.
- 4) 佐野幸三, (1975), KASMMER 光ポンピング磁力計について (I), 技術報告, 第15巻, 第2号 (第58号), 1975.

Stability and Accuracy of Standard Magnetic Observation by KASMMER System

Yukizo SANO

Abstract

Instrumental studies of the standard magnetic observation by KASMMER system during the period from Sept. 1973 to Apr. 1975 are described mainly discussing stability of optical pumping magnetometers of the system and accuracy of absolute calibration measurement.

The total force optical pumping magnetometer which has no bias field shows the most excellent stability of about $0.5\gamma/\text{year}$. For the other three component magnetometers which have proper bias field, in average is found a good stability of $1.5\gamma\text{--}2.0\gamma/\text{year}$.

Examining fluctuations of individual measured values of calibration magnetometer DI-72, the standard deviation of single value error is estimated at $0.0328'$ for D-component and $0.0200'$ for I-component. This leads to the accurate calibration better than 0.1γ or $0.01'$ for one time calibration measurement of 32 values.