

# リングコア型フラックスゲート回転磁力計 および電流制御式3軸交番磁場消磁装置について

小山 真人<sup>\*†</sup>・新妻 信明<sup>\*</sup>

Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer  
and Current-regulated Three Axial  
Alternating Field Demagnetizer

Masato KOYAMA<sup>\*†</sup> and Nobuaki NIITSUMA<sup>\*</sup>

High sensitive Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer and Current-regulated Three Axial Alternating Field Demagnetizer for the studies on rock magnetism and paleomagnetism, are described.

The spinner magnetometer with a ring-core-type flux-gate was built in Institute of Geosciences, Shizuoka University. The magnetometer system is computerized. The noise level of the magnetometer is  $1 \times 10^{-5}$  to  $3 \times 10^{-5}$  A/m in a measurement of stacking number of 37. The duration to complete a measurement of stacking number of 37 is about three minutes, including the time of numerical analysis and printing out of the results. Anisotropy of magnetic susceptibility and initial magnetic susceptibility can be measured with the magnetometer by means of an applied magnetic field on a sample. A comparison between results measured with Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer and Automatic Digital Astatic Magnetometer (NIITSUMA & KOYAMA, 1981) revealed magnetic interactions between samples and an astatic magnetometer.

Three Axial AF demagnetizer (NIITSUMA & KOYAMA, 1981) was modified to Current-regulated Three Axial AF demagnetizer with higher output of alternating field. The demagnetizer can generate up to 35mT of alternating field for the magnetic cleaning of paleomagnetic samples.

## 1. はじめに

岩石の残留磁気測定に用いられる高感度磁力計には、無定位磁力計、超伝導磁力計、回転磁力計、フラックスゲート回転磁力計がある。これらの磁力計

は、測定の原理、構造、性能を異にしており、それぞれ一長一短がある(新妻・小山, 1981)。フラックスゲート回転磁力計は、測定時に試料に磁氣的擾乱を与えず、常温において短時間に測定できるという利点を備えているが、微弱な残留磁気測定のために

---

1983年1月24日受理

\* 静岡大学理学部地球科学教室 Institute of Geosciences, School of Science, Shizuoka University, Shizuoka 422, Japan.

† 現所属: 東京大学地震研究所 Present address: Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Bunkyo-ku Yayoi, Tokyo 113, Japan.

は感度が不十分であり、出力の温度依存性も問題となっていた (NIITSUMA, 1982)。しかし、近年の電子技術の進歩によりフラックスゲートを駆動するための安定な電子回路を組むことが容易になると共に、フラックスゲート自身にも改良が加えられ、最近では宇宙空間の磁場測定にもフラックスゲートが用いられてきている。フラックスゲートには従来用いられてきた棒状のコア（磁芯）を環状にすることにより感度や温度特性を向上させたものがあり、リングコア型フラックスゲートと呼ばれている。今回、筆者らはこのリングコア型フラックスゲートを用いた回転磁力計を岩石磁気測定用に製作したので、その構造や性能について報告する。この回転磁力計は、微弱な残留磁気を測定できると共に帯磁率異方性および初期帯磁率の測定も可能である。

岩石の保持している残留磁気から不安定な成分を除去するために用いる 3 軸交番磁場消磁装置については既に報告したが (新妻・小山, 1981)、今回この装置に改良を加え、安定性と出力の向上を図ったので報告する。

無定位磁力計は、その構造上強力な磁石を測定試料に近づけなければならないので、測定中にこの磁石が試料の残留磁気に擾乱を与え、残留磁気測定結果に影響を与えることが十分考えられる。筆者らは、以前使用していた高感度自動無定位磁力計 (新妻・

小山, 1981) と今回製作したリングコア型フラックスゲート回転磁力計で同一試料を測定して比較し、この影響について検討したので合わせて報告する。

## 2. リングコア型フラックスゲート回転磁力計

### (1) 回路および構成

高透磁率のコアに 1 次および 2 次コイルを巻き、1 次コイルに交流を流して磁芯を励磁させた場合、2 次コイルには高調波を含んだ交流電圧が発生する。その偶数次の高調波成分の振幅は 2 次コイルを通過する磁束密度に比例するので、この高調波成分を取り出し、その振幅を測定することにより 2 次コイルを通過する磁束密度を測定するのがフラックスゲートである。今回製作した回転磁力計に用いたフラックスゲートは、環状のコアを用いたリングコア型である。

リングコア型のセンサーは東北金属製であり、コアは幅 3 mm、厚さ 0.01 mm の  $\mu$  メタルの薄膜リボンを内径 24 mm、外径 27 mm の環状ボビンに巻いたものである (Fig. 1)。このコアに径 0.2 mm のホルマル線を 120 回巻きつけ励磁用コイルとしている。検出用コイルとしては、励磁用コイルの巻きつけたコアの外側のボビンに 0.1 mm のホルマル線が 200 回巻かれたコイルが用いられる。このリングコア型センサーを 2 個、検出コイルの方向が一致し、逆直列に

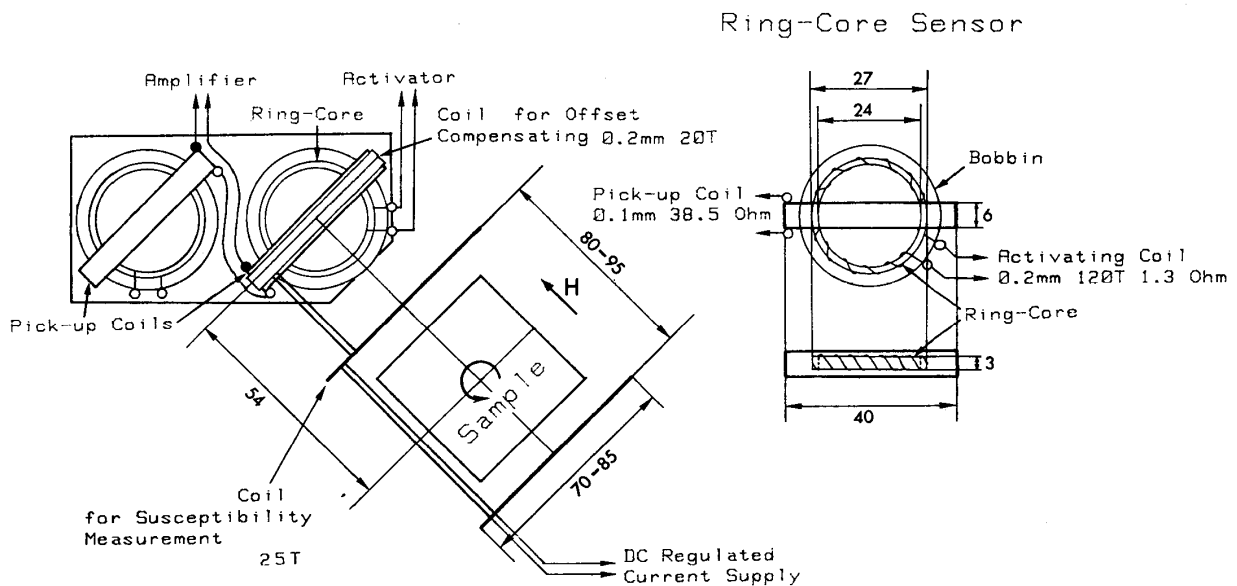


Fig. 1. Ring-core sensor and the ring-core sensor system of Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer.

なるよう接続し、試料に近い側のコアのみを励磁して検出部とした (Fig. 1)。この接続・励磁法は2個のリングコア型センサーを組み合わせる方法としては最も高いS/N比を与える。

励磁用交流は、水晶発振器から発せられる 600 kHz の方形波を分周して得られた 15 kHz の方形波を電力増幅して得ている。水晶発振器駆動用素子として今回、TC5082Pを用いたが、600 kHzはこのICの動作周波数の下限にあたるため通常の動作電圧では発振を開始せず、素子変更の必要がある。検出コイルの出力は、まずFET入力の低雑音OPアンプにより2段増幅される (Fig. 2, 3)。増幅された信号は、掛算器および整流器によって 30 kHz の方形波の同期信号と合成・整流され、励磁周波数の

2倍高調波成分のみが位相検波され脈電圧として取り出される。この信号は積分器によって平滑化され直流出力となり、デジタル電圧計に入力される (Fig. 4)。

位相検波に用いられる同期信号は、励磁用の水晶発振器から分周によって得られており、同期信号の位相は出力が最大となるよう選択できるようになっている (Fig. 3の※)。測定用試料は試料ケースに入れ、回転台の上に置いて水平回転させて測定する。試料回転軸と検出用コイルとの距離は 54 mm である。試料ケースには最大直径 35 mm、高さ 35 mm の円柱状の試料を入れることができる (Fig. 5)。この回転台は、コンピュータによって自動制御でき、試料ケースを水平回転させるとともに、重心から外れた位置

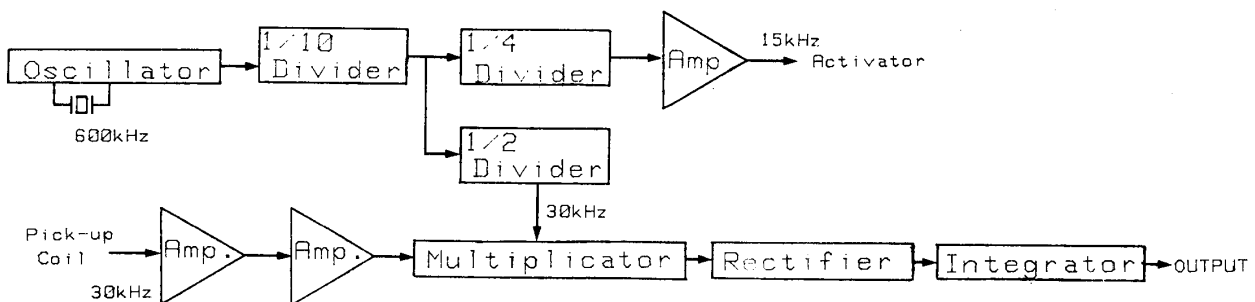


Fig. 2. Block diagram of the activator and amplifier of Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer.

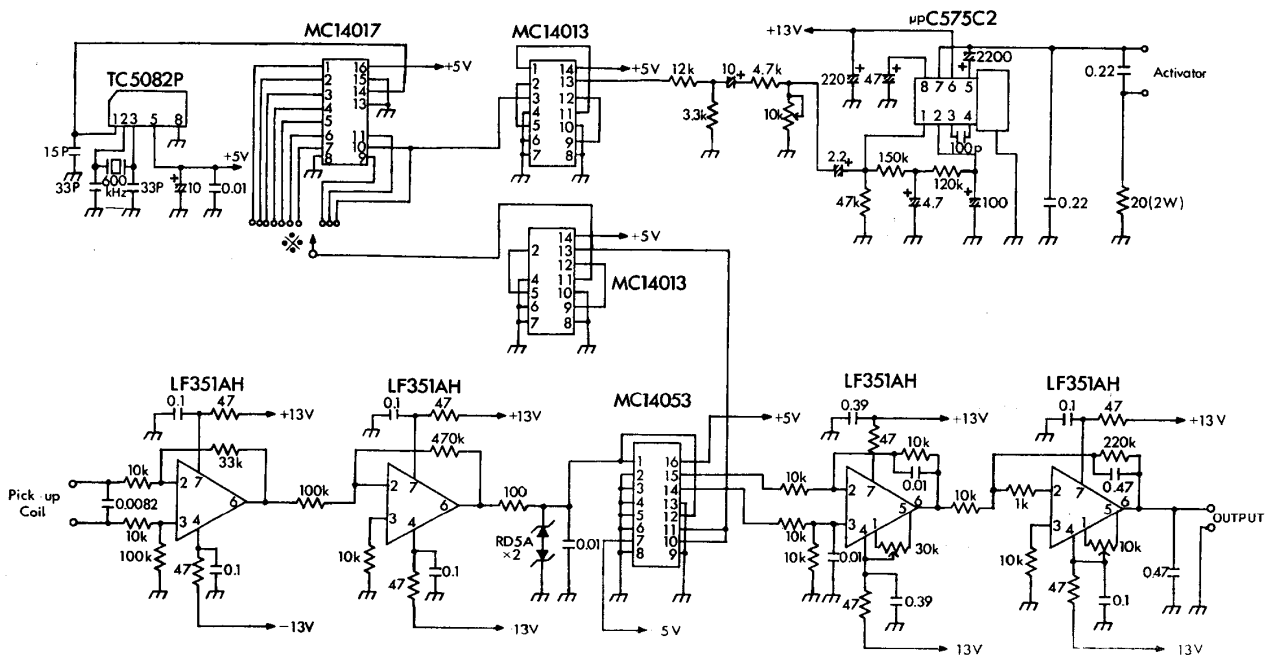


Fig. 3. Circuit diagram of the activator and amplifier of Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer, all values of resistors and capacitors are in  $\Omega$  and  $\mu F$ .

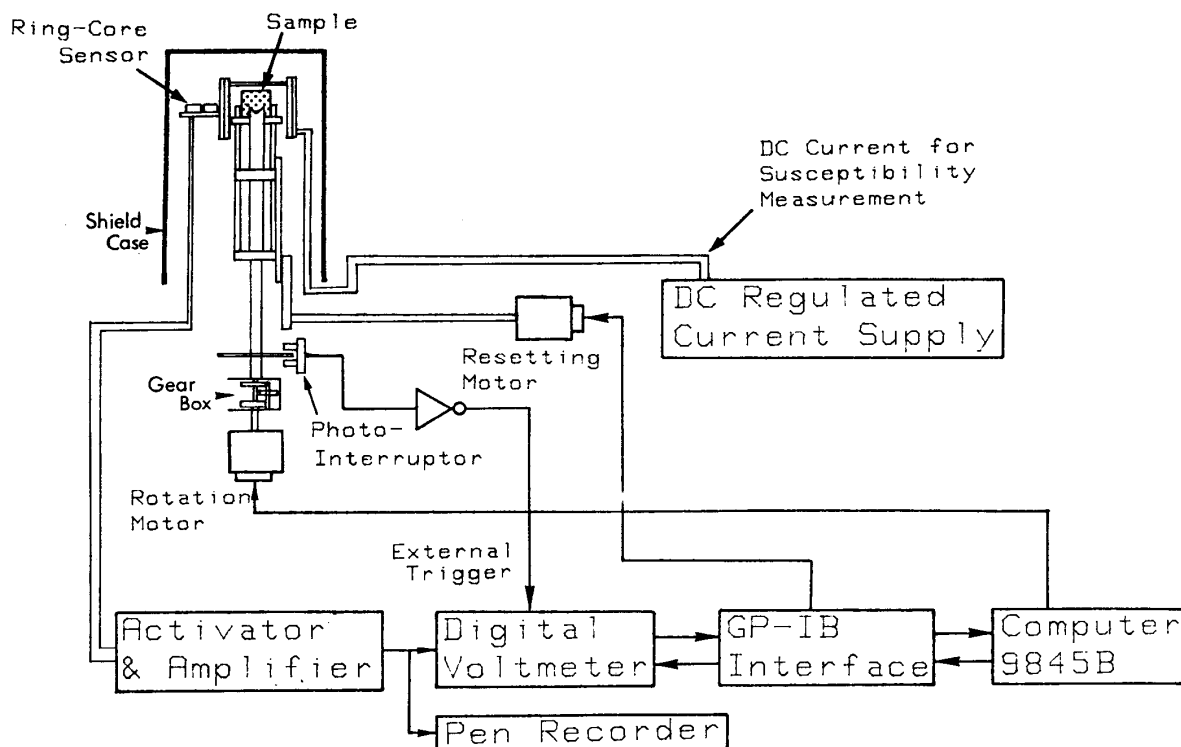


Fig. 4. Block diagram of Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer system.

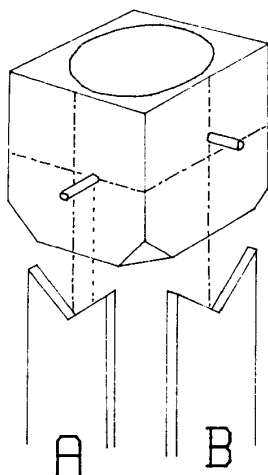


Fig. 5. Sample case of Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer. A and B are supporting plates for sample case rotations on a vertical plane around each axis rod which is located on the sample case. This figure shows a condition after the vertical rotation on the supporting plate B and before on the supporting plate A.

に付された支軸のまわりに垂直回転させることによって回転軸を2回置換することができる。従って、試料ケースを一度回転台に置くことにより、直交する3軸のまわりに水平回転させることができる。実際の測定においては、試料ケースを回転台上に置き、直交する3軸のまわりについて測定を行なった後、試料ケースを最初に置いた方向と逆向きに置くことにより、再び直交する3軸について測定を行ない、計6スピンの(①~③, ④~⑥, Fig. 6)を測定している。

残留磁気の測定のためには試料を水平回転させて磁束密度の変化を測定するのであるが、測定値の検出間隔は $45^\circ$ である。これは回転軸と同心の円盤上に取り付けたマスクを発光ダイオードとフォトトランジスタを組み合わせたフォトインタラプタによって検出し、パルス信号に変換してデジタル電圧計の外部トリガー端子に入力することによって行なっている(Fig. 4)。デジタル電圧計(Hewlett Packard 3456 A)は $6\frac{1}{2}$ 桁で、最大サンプリング速度は毎秒330回であり、これをIEEE-488標準インターフェースGP-IB (HP-IB)を介してコンピュータ(Hewlett Packard 9845 T)に接続し、自動計測を行なってい

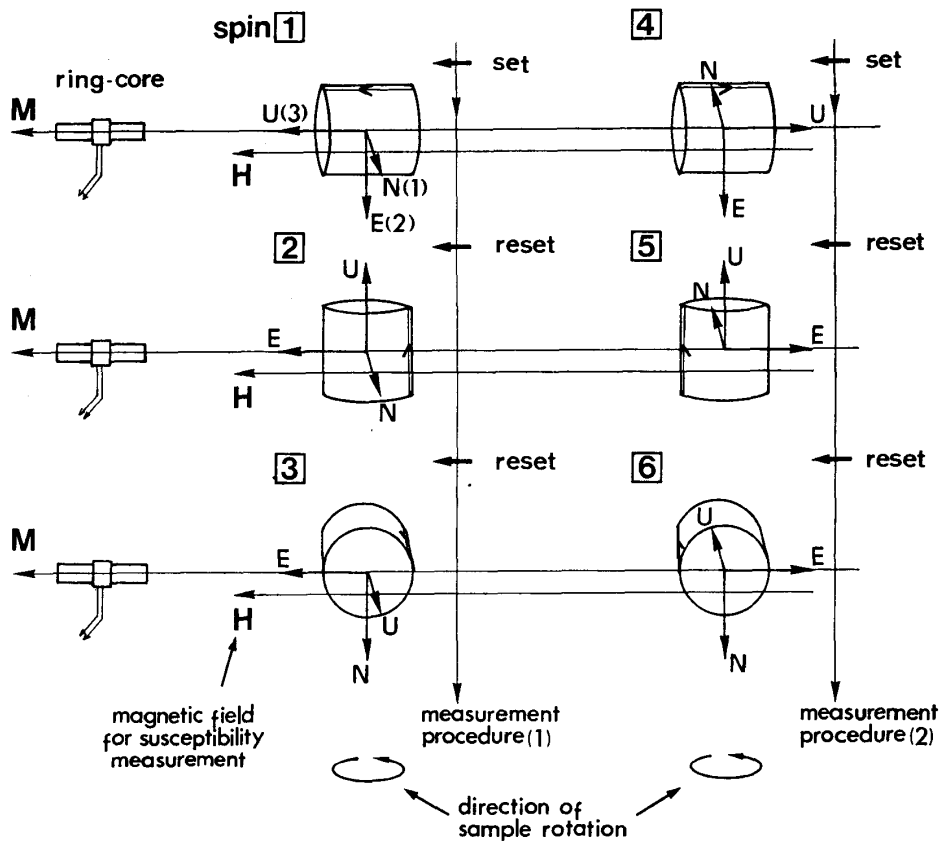


Fig. 6. Schematic diagram of measurement sequence (spin 1 to 6) of Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer. N, E, U: axes of a coordinate system of sample, H: direction of the magnetic field for susceptibility measurements, M: direction of the magnetic field measured by the ring-core sensor. Each figure of sample shows a condition after sample setting or resetting, before sample rotation.

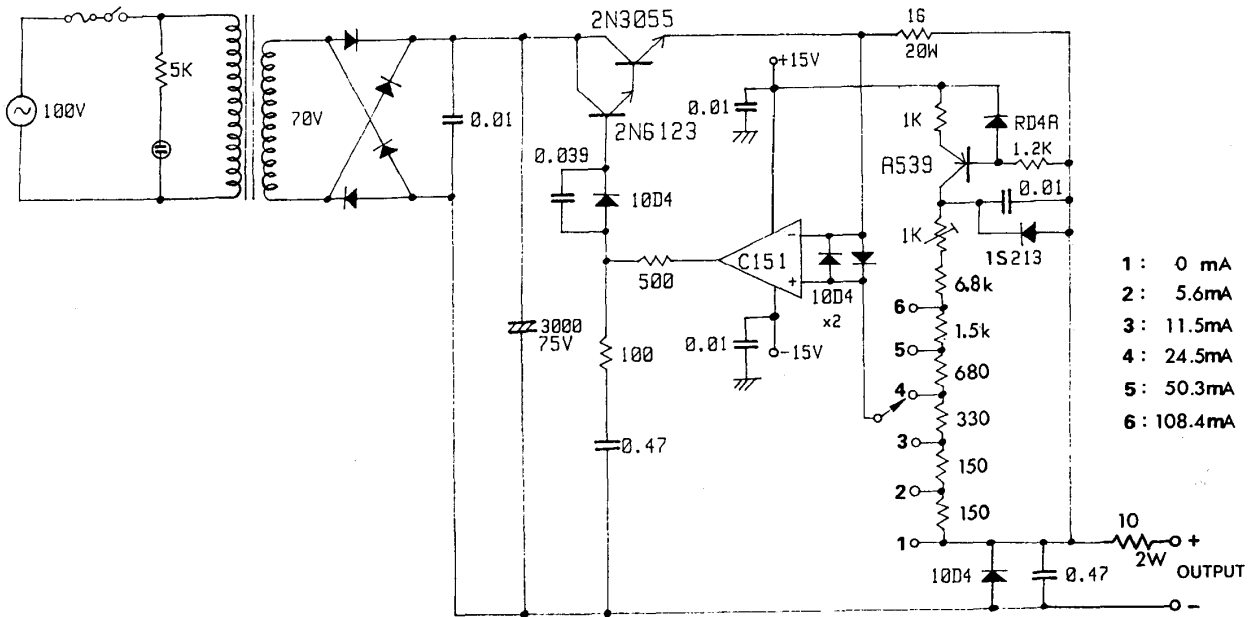


Fig. 7. Circuit diagram of the regulated power supply for susceptibility measurement of Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer. All values of resistors and capacitors are in  $\Omega$  and  $\mu F$ .

る。

試料の初期帯磁率および帯磁率異方性の測定は、直流磁場H内に試料を置いて行なうが、本磁力計ではコイルにより直流磁場を発生させている (Fig. 1)。通常用いる印加磁場強度は  $25 \mu\text{T}$  であり、この時コイルに流す電流は  $108.4 \text{ mA}$  である。印加磁場発生用電流は定電流装置 (Fig. 7) から得ている。試料に磁場を印加すると、フラックスゲート検出部の磁束密度も変化するため磁力計の出力が変動するが、この変動は測定に好ましくない。本磁力計ではこの変動を除くためにリングコアの検出コイル部に逆向きに巻いた補償コイルを付し、磁場印加用コイルに流す電流を流している (Fig. 1)。

## (2) 感度およびノイズレベル

本磁力計の感度測定および直線性の検討は、試料ケースの中心に直径  $7 \text{ mm}$  の円形コイルを固定し、このコイルに発生する磁場と磁力計の出力との関係を測定することにより行なった。円形コイルの直径を  $a \text{ (m)}$ 、巻き数を  $n$ 、コイル電流を  $i \text{ (A)}$ 、円形コイルからリングコア中心までの距離を  $z \text{ (m)}$ 、真空中の透磁率を  $\mu_0 (=1.257 \times 10^{-6} \text{ Wb/A}\cdot\text{m})$  とすれば、リングコア中心の磁束密度  $B \text{ (T)}$  は次式で求められる。

$$B = \frac{\mu_0 n i}{2} \cdot \frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \quad (1)$$

円形コイルに  $10 \text{ mA}$  の電流を流した場合には(1)式により、リングコア中心部に発生する磁束密度の変化は  $2.9 \text{ nT}$  となる。この磁束密度変化に対し、 $43 \text{ mV}$  の出力変化が実測された。この測定結果から、出力  $1 \text{ mV}$  あたりの磁束密度変化は  $6.8 \times 10^{-2} \text{ nT}$  となる。測定試料からリングコア中心までの距離を  $r \text{ (m)}$  とし、リングコア中心の磁束密度を  $B \text{ (T)}$  とすれば、試料の磁気モーメント  $M \text{ (Am}^2\text{)}$  は次式で表わされる。

$$M = \frac{2\pi}{\mu_0} \cdot Br^3 \quad (2)$$

この関係式から、 $6.8 \times 10^{-2} \text{ nT}$  の磁束密度は  $5.4 \times 10^{-8} \text{ Am}^2$  の磁気モーメントに相当する。すなわち、試料ケースの中心に  $5.4 \times 10^{-8} \text{ Am}^2$  の磁気モーメントを置き回転させた場合、 $1 \text{ mV}$  の出力変化

を生じることになる。ここで、試料の体積を  $V_s \text{ (cc)}$ 、出力を  $V_{\text{out}} \text{ (mV)}$  とすれば、試料の単位体積あたりの磁気強度  $J_n \text{ (A/m)}$  は次式を用いて求めることができる。

$$J_n = V_{\text{out}} \times 5.4 \times 10^{-2} / V_s \quad (3)$$

円形コイルに流す電流を  $0.2 \text{ mA}$  から  $1 \text{ A}$  の範囲 (リングコア中心の磁束密度  $0.059 \sim 290 \text{ nT}$ ) で連続的に変化させて磁力計の出力を測定した所、電流と出力の比は一定であり、磁束密度変化に対する本磁力計の出力変化の直線性が確かめられた (Fig. 8)。この直線性が確かめられた範囲は、試料体積を  $30 \text{ cc}$  とすれば残留磁気強度に換算して  $1.5 \times 10^{-2} \sim 7.7 \times 10^1 \text{ A/m}$  の範囲に相当するので、残留磁気強度の非常に大きな試料でも正確に測定できることを示している。

このリングコア型フラックスゲートを2重の  $\mu$  メタルシールドケース内に納め、外部磁気ノイズを除いた状態でのノイズレベルは約  $0.3 \text{ mV}$  であり、 $30 \text{ cc}$  の試料の磁気強度に換算して  $7 \times 10^{-4} \text{ A/m}$  に相当する。試料を回転し、同一方向の磁気強度を繰り返し測定するスタッキングを行なうと、測定回数の平方根に反比例してノイズレベルは低下する。本磁

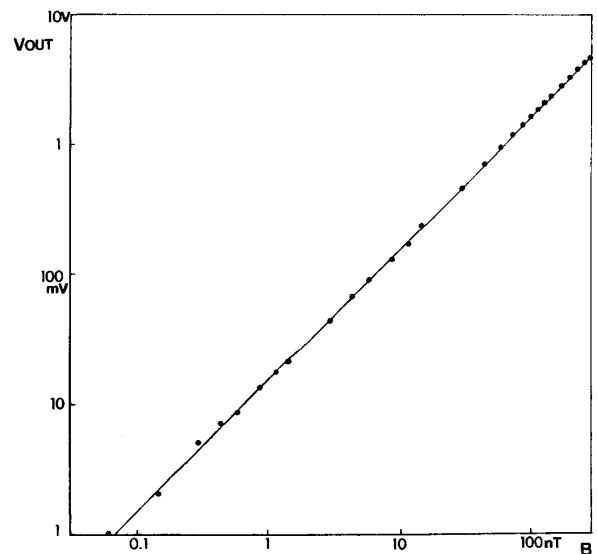


Fig. 8. Relationship between the applied magnetic field and the output voltage (in mV) of Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer. B: magnetic flux density of the applied magnetic field,  $V_{\text{out}}$ : output voltage of Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer.

力計は、微弱な試料も測定できるようにスタッキングを行なう回転磁力計として使用することにより、ノイズの影響を小さくしている。試料の回転速度は約70 rpmである。連続回転を行なうことによって試料静止時と比べ出力の振幅は10%程度減少し、約40°の位相の遅れが生じる。この位相の遅れは、試料の位置をあらかじめ位相の遅れる分だけ回転方向に進めておくことによって補正することができる。この補正は、円柱状のアクリル材の中心に針金を埋め込んだ標準試料 (Orientation Needle) を測定することによって行なっている。スタッキング回数は10回~100回を選べるようにプログラムを設定しており、通常使用している37回のスタッキング測定における残留磁気ベクトルに対するノイズレベルは、30 ccの試料について  $1 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-5}$  A/m である。試料の挿入から測定結果の算出までに要する時間は、スタッキング回数を37回として約3分である。微弱な試料の測定を行なう場合は、試料ケース自身が  $3 \times 10^{-5}$  A/m 程度の残留磁気をもっているため、まず試料ケースの磁気を測定し、次に試料を入れて測定を行ない、両者の差から試料の残留磁気を求めている。この方法を用いて極性を判別できる最小の残留磁気強度は、 $5 \times 10^{-5}$  A/m である。

### (3) 帯磁率の測定および数値処理

試料の帯磁率異方性および初期帯磁率の測定は、まず試料の残留磁気の180°周期の成分を測定する。次に定電流装置によってコイルに直流電流を流し、試料に直流磁場を印加した状態で180°周期の成分を測定する。この2つの180°周期の成分の差から、直流磁場により励磁された180°周期の成分のみを算出する。こうして求められた2方向の180°周期成分を Sus 1, Sus 2, 直流磁場強度を  $H$  とし、測定する方向を  $i$ , 直流磁場の方向を  $j$  とした帯磁率テンソル  $K$  の各成分を  $K_{ij}$  とすれば、本磁力計の各スピン (Fig. 6) において Sus 1, Sus 2 は、 $K_{ij}$ ,  $H$  を用いて次の式で表わされる (なお、 $i, j = 1, 2, 3$  はそれぞれ Fig. 6 のサンプル座標 N, E, U の方向に対応する。).

$$\text{スピン} \boxed{1} \ \& \ \boxed{4} \quad \begin{cases} \text{Sus 1 (1)} = -\frac{1}{2} H \cdot (K_{11} - K_{33}) \\ \text{Sus 2 (1)} = -H \cdot K_{13} \end{cases}$$

$$\text{スピン} \boxed{2} \ \& \ \boxed{5} \quad \begin{cases} \text{Sus 1 (2)} = \frac{1}{2} H \cdot (K_{22} - K_{11}) \\ \text{Sus 2 (2)} = -H \cdot K_{12} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{スピン} \boxed{3} \ \& \ \boxed{6} \quad \begin{cases} \text{Sus 1 (3)} = -\frac{1}{2} H \cdot (K_{33} - K_{22}) \\ \text{Sus 2 (3)} = -H \cdot K_{23} \end{cases}$$

一方、 $K$  は  $K_{ij}$  を用いて次の行列で表わされる。

$$K = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$K$  は、幾何学的には3つの主軸をもつ楕円体で表現され、その主軸の長さおよび方位は  $K$  の固有値および固有ベクトルの方向によって表わされる。よって、(4) で得られた  $K$  の各成分の値を用いて、 $K$  の固有方程式

$$\begin{vmatrix} K_{11} - \lambda & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} - \lambda & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

を  $\lambda$  について解き、固有値  $\lambda$  および固有ベクトルを求める。実際には(4)で得られた  $K$  の各成分のうち、 $(K_{11} - K_{33})$ ,  $(K_{22} - K_{11})$ ,  $(K_{33} - K_{22})$  の3つは独立ではないので、これから  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$  を求めることはできない。よって、 $K_{33}$  をパラメータとして  $K$  を次の形に分解した。

$$K = K_0 + K_{33} E$$

$$= \begin{pmatrix} K_{11} - K_{33} & K_{12} & K_{13} \\ K_{12} & -(K_{33} - K_{22}) & K_{23} \\ K_{13} & K_{23} & 0 \end{pmatrix} + K_{33} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$K$  は実エルミート行列であり、適当な実ユニタリ行列  $U$  を用いて  $\tilde{K} = U^{-1} K U$  と対角化できる。よって、(7) は

$$\begin{aligned} \tilde{K} &= U^{-1} K U \\ K &= U^{-1} (K_0 + K_{33} E) U \\ K &= U^{-1} K_0 U + K_{33} E \\ K &= \tilde{K}_0 + K_{33} E \end{aligned} \quad (8)$$

となり、 $K$  の固有空間は  $K_0$  の固有空間と等しく、 $K$  の固有値は  $K_0$  の固有値に  $K_{33}$  を加えたものである。そこで  $K_0$  の固有方程式を解いて固有値と固有ベクトルを求め、固有ベクトルの方向から帯磁率楕円体の主軸の方位を決定した。

ここで、 $K_{33}$  を別に求めれば、 $K$  の固有値すなわち

帯磁率楕円体の主軸方向の初期帯磁率の値を求めることができる。本磁力計では、試料を測定位置に置いた状態と試料を除いた状態との出力の差を測定することによって、 $K_{33}$ の値の決定を行なっている。

具体的には、Fig. 6においてスピンの①および④中の測定値の平均を  $Md_{\text{mean}}(1)$ 、スピンの②および⑤中の測定値の平均を  $Md_{\text{mean}}(2)$ 、スピンの③および⑥中の測定値の平均を  $Md_{\text{mean}}(3)$ 、試料を除いた状態の出力値を  $Md_{\text{blank}}$ 、試料に掛ける磁場の強さを  $H$  とすれば、 $Md_{\text{mean}}(1)$ 、 $Md_{\text{mean}}(2)$ 、 $Md_{\text{mean}}(3)$ は、 $K_{11}$ 、 $K_{22}$ 、 $K_{33}$ を用いて次のように表わされる。

$$\begin{aligned} Md_{\text{mean}}(1) - M_{\text{blank}} &= \frac{K_{11} + K_{33}}{2} \cdot H \\ Md_{\text{mean}}(2) - M_{\text{blank}} &= \frac{K_{11} + K_{22}}{2} \cdot H \\ Md_{\text{mean}}(3) - M_{\text{blank}} &= \frac{K_{22} + K_{33}}{2} \cdot H \end{aligned} \quad (9)$$

これらから、 $K_{33}$ は次の式で求められる。

$$K_{33} = \frac{Md_{\text{mean}}(1) - Md_{\text{mean}}(2) + Md_{\text{mean}}(3) - M_{\text{blank}}}{H} \quad (10)$$

$M_{\text{blank}}$  値の測定は、測定開始、スピンの①～③の後、スピンの④～⑥の後の計3回行なっているため、この間に磁力計の出力にドリフトがある場合には、ドリフトが時間に直線的であるとして補正を行なった。こうして求められた  $K_{33}$ の値の妥当性を標準試料 (Orientation Needle) の帯磁率を測定して検討した。標準試料は円柱状のアクリル材の中心に鉄針金を試料座標系の U 軸 (Fig. 6) に向けて埋め込んである。この場合、標準試料の帯磁率楕円体の長軸は U 軸に一致し、 $K_{33}$ は帯磁率の最大値となり、 $K_{11}$ および  $K_{22}$ は最小値となる。そこで、標準試料については、(9)および(10)式を用いて  $K_{11}$ 、 $K_{22}$ 、 $K_{33}$ を測定して求めれば、それらの値から帯磁率異方性が独立に求められる。一方、(10)式で計算された  $K_{33}$ を(7)式の  $K_0$ の固有値に加えることによって帯磁率の最大値、最小値が求められる。この2つの方法で求められた帯磁率異方性の値を比較した場合、標準試料においては(9)、(10)式を用いて求めた帯磁率の最大値と最小値の差は、 $K_0$ の固有値から求められる帯磁率の最大値と最小値の差の1.6倍となるが、異方性から

求めた値に一致するように  $K_{33}$ の値に補正を加えている。

こうして求められた帯磁率異方性の程度を表現する方法として、筆者らは次のパラメータを用いている。

$$qn = -\log_2 \left( \frac{K_{\text{max}} - K_{\text{int}}}{K_{\text{int}} - K_{\text{min}}} \right) \quad (11)$$

ここで、 $K_{\text{max}}$ 、 $K_{\text{int}}$ 、 $K_{\text{min}}$ は(7)式の  $K$ の固有値、すなわち帯磁率楕円体の最大軸、中間軸、最小軸の初期帯磁率の値である。値同士の比較を容易にするために2を底とする対数を取り、負号をつけた。帯磁率楕円体の最小軸が他の2軸に比して短くなり、楕円体が円盤形状に近くなれば、 $qn$ の値は1より大きくなる。逆に最大軸が他の2軸に比して長くなり、楕円体が紡錘形状に近くなれば、 $qn$ の値は-1より小さくなる。また、帯磁率楕円体の形状がそれらの中間であれば、 $-1 < qn < 1$ となる。

### 3. リングコア型フラックスゲート回転磁力計と無定位磁力計の比較

以上述べてきたリングコア型フラックスゲート回転磁力計を用いた残留磁気の測定結果と、以前使用していた高感度自動無定位磁力計(新妻・小山, 1981)の測定結果の比較を行なうことにする。残留磁気の1回の測定において、直交する3成分それぞれについて求まる2つの測定値の差を残留磁気方向の角度の差に換算した error angle EI (NITSUMA, 1971)を、本磁力計および無定位磁力計で測定した同一試料の測定結果について求めた (Fig. 9, 10)。本磁力計の測定は6スピンを行なっているが (Fig. 6)、ここでは無定位磁力計との比較のために3スピンで行なった測定の結果を用いている。それぞれの図に描かれた曲線は、18 ccの試料について等方的な  $1.1 \times 10^{-3}$  A/mのノイズレベルを仮定して、様々な強度の試料を測定した場合に得られる EIの最大値を計算して結んだものである。この曲線の形と本磁力計による実際の試料の測定から得られた EIの分布はほぼ一致している (Fig. 9)。すなわち、本磁力計における測定誤差は無作為な磁気雑音に起因していると言える。しかし、この曲線は無定位磁力計による実際の試料の測定結果から得られた EIの分布とは一



致せず、実際の測定結果から得られたEIには計算で求めたEIより有意に大きな一群が含まれている (Fig. 10). すなわち、無定位磁力計による残留磁気測定中には無作為な磁気雑音以外の作用が働き、測定誤差を増していると考えられる。同様な結果はこれまでも指摘されており、新妻 (1976) は残留磁気強度の大きな試料を無定位磁力計の通常の測定位置から遠ざけていきながらその残留磁気を測定し、通常の測定位置で残留磁気強度の小さい試料を測定した場合と比較した。その結果、通常的位置で残留磁気強度の小さい試料を測定した場合の方がEIが有意に大きくなることを見出し、その原因として測定中に試料の残留磁気が外部磁場の影響を受けて変化するためと考えた。

同一試料を本磁力計および無定位磁力計を用いて測定を行なった結果を比較すると、両者の残留磁気方向に有意な差のみとめられる試料がある (Fig. 11). ここに示した試料は、伊豆半島北東部に分布す

る上部新生界の各種火山岩、凝灰岩およびシルト岩の試料 (KOYAMA, 1981, 小山, 1982), および駿河湾西岸牧ノ原丘陵に分布する上部更新統古谷層のシルト岩試料 (北里ほか, 1981) である。古谷層の4層準の試料のうち中部の2層準の試料は特に残留磁気方向の差が著しく  $136^{\circ} \sim 162^{\circ}$  にも達している。この試料は無定位磁力計の測定では逆帯磁を示したものである (北里ほか, 1981) が、本磁力計を用いた再測定では正帯磁となっている (小山・新妻, 1983). この原因を本磁力計を用いた帯磁率異方性の測定結果を考慮して考察した結果、古谷層の試料は大きな帯磁率異方性 (NRM強度の  $1/20 \sim 1/8$  程度) を有しており、無定位磁力計に用いた磁石の磁場が試料に影響を与えた結果、帯磁率異方性の大きさに比例した残留磁気ベクトルの変化を生じていることが判明した (小山・新妻, 1983). Fig. 10において両磁力計の残留磁気方向の測定結果に有意な差のみとめられる他の試料についても、試料に印加さ

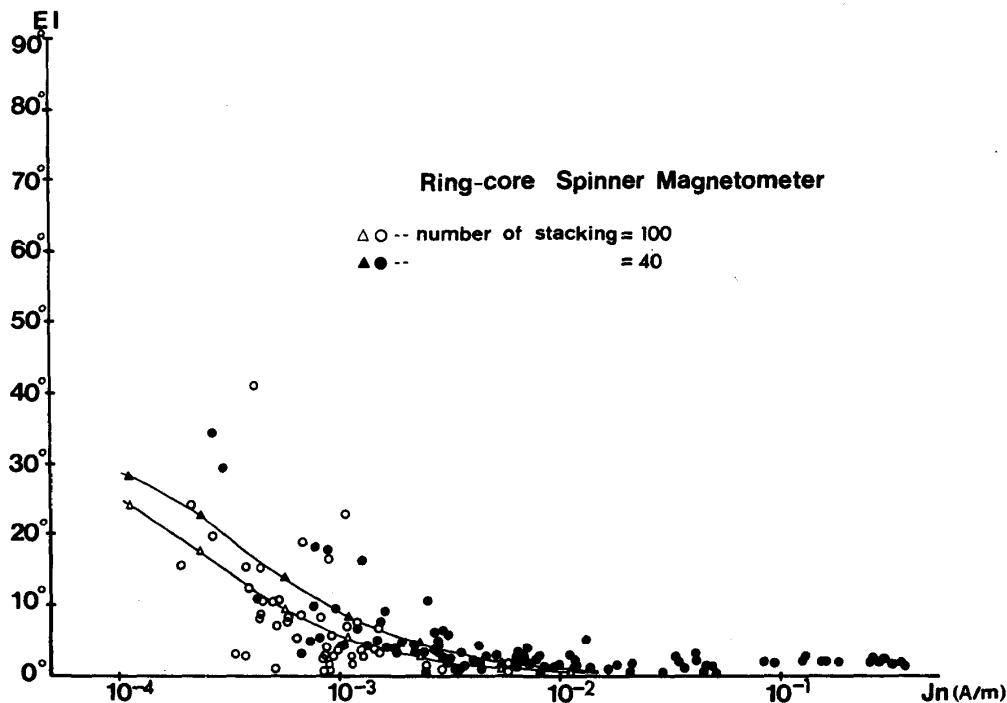


Fig. 9. Relationship between intensities of remanent magnetization and error angle EI (NITSUMA, 1971) for 3-spin measurements by Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer. The curves show the maximums of EI for measurements of different stacking number ( $\blacktriangle$ : stacking number of 40,  $\triangle$ : stacking number of 100), calculated for 18cc samples on the assumption that the intensity of noiselevel is  $1.1 \times 10^{-3}$  A/m in every direction. The number shows the sample number of the Furuya Formation samples.

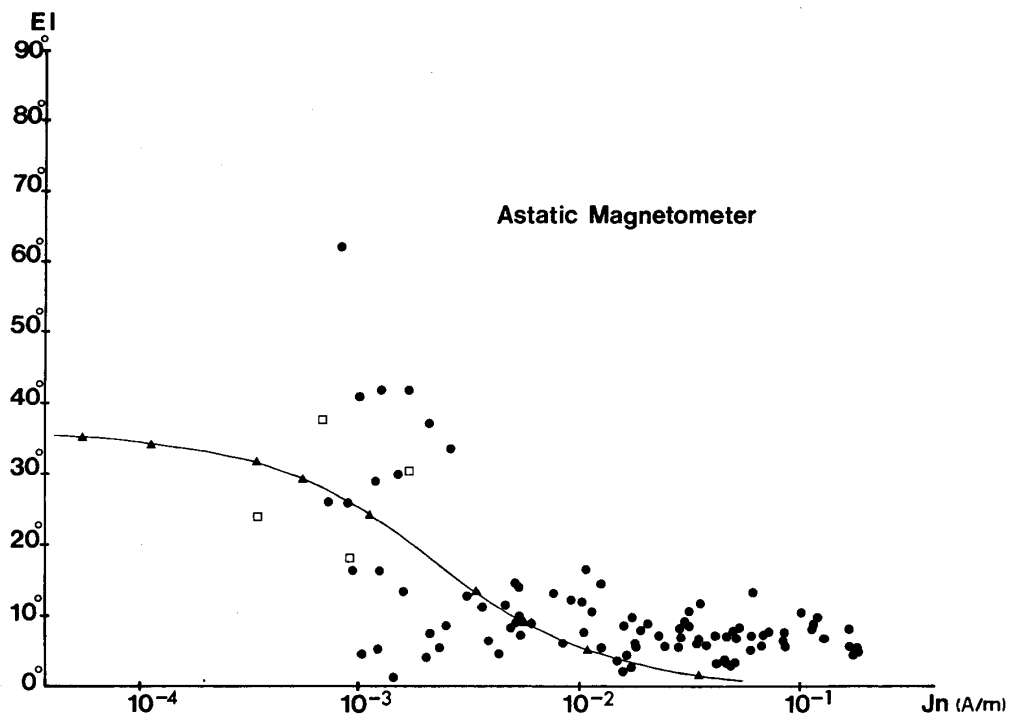


Fig. 10. Relationship between intensities of remanent magnetization and error angle EI (NIITSUMA, 1971) for measurements by Automatic Digital Astatic Magnetometer. The curve show the maximum of EI calculated for 18cc samples on the assumption that the intensity of noise-level is  $1.1 \times 10^{-3}$  A/m in every direction. The number shows the sample number of the Furuya Formation samples. □: results measured without sample (blank test).

れた磁場による同様な影響が生じているものと考えられる。また、交番磁場消磁によって残留磁気強度を減ずる不安定な試料ほど、両磁力計による残留磁気方向の測定結果の差が大きくなる傾向が認められる。これは、交番磁場消磁によって残留磁気強度は大きく強度を減じるが、帯磁率は交番磁場消磁には影響されないため、印加された外部磁場の残留磁気への影響が相対的に大きくなることによると考えられる。よって、残留磁気強度に比して帯磁率異方性の大きい試料、および交番磁場消磁によって残留磁気強度が大きく減ずる試料を無定位磁力計で測定する場合には十分な注意が必要である。

#### 4. 電流制御式 3 軸交番磁場消磁装置

筆者らは以前、試料を回転させずに 3 軸方向について同時に消磁を行なう 3 軸交番磁場消磁装置 (新妻・小山, 1981) を製作し、岩石磁気・古地磁気の研究に使用してきた。この装置において最も重要なことは、交番磁場の出力波形に歪がないことである。

もし、出力波形に歪があれば、消磁操作を行なうことによって試料に非履歴残留磁気 (ARM: Anhyseris Remanent Magnetization) が獲得され、消磁装置としての機能をはたさない。これまでは交番磁場発生用増幅器に電圧制御方式を用いていたため、消磁用コイルとの共振状態がずれると出力波形に歪が生じ ARM を獲得するので、これを防ぐために ARM の獲得しやすい試料について増幅器と消磁コイルの接続の極性を逆にして消磁を行ない、正逆両接続の消磁後の残留磁気方向および強度が一致するまで共振周波数の微調整を行なっていた。また、最大交番磁場出力が 25 mT であったので、火成岩等の残留磁気の研究には出力が不十分となる場合があった。

今回、増幅器の帰還方式を、出力電流に比例した負帰還電圧を増幅器入力に与えて出力電流の波形の安定を図る電流制御方式に変更した。また、負荷コンデンサの耐圧を確認した上で、装置の高出力化を図った。これら 2 点の改良方法および改良結果につ

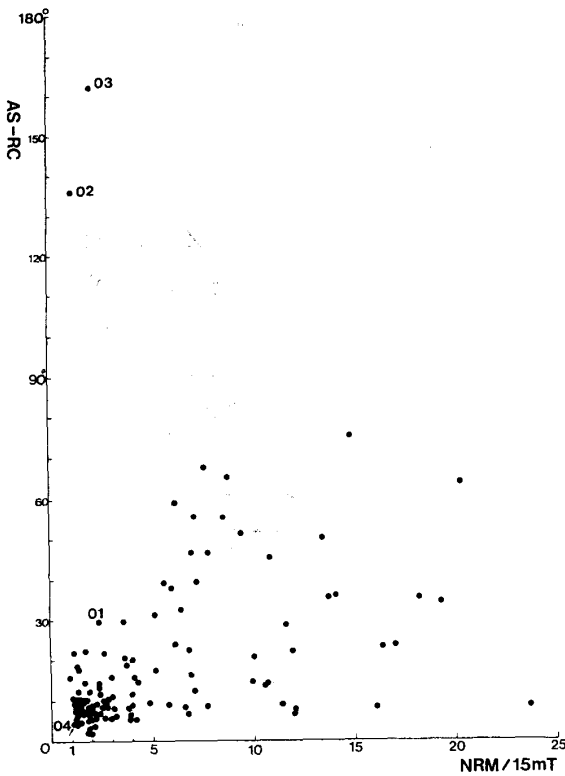


Fig. 11. Relationship between the ratio of the intensity of NRM to the intensity of remanent magnetization after 15mT AF demagnetization, and the angle between two vectors of remanent magnetization, which were measured with Automatic Digital Astatic Magnetometer and Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer. NRM/15mT: the ratio of the intensity of NRM to the intensity of remanent magnetization after 15mT AF demagnetization, AS-RC: the angle between two vectors of remanent magnetization measured with Automatic Digital Astatic Magnetometer and Ring-core-type Flux-gate Spinner Magnetometer. Numbered points correspond to samples of the Furuya Formation.

いて述べる。

消磁コイルのアース側に極性切り換えスイッチを介して接続されている  $0.5 \Omega$  の抵抗 (Fig. 12) の両端に発生する電圧を帰還電圧として取り出し、最終段の高出力増幅器の前段に置かれた増幅器の入力端子に抵抗を介して接続し、負帰還をかけた (Fig. 13)。

増幅器の増幅率の設定の前に共振用コンデンサの耐圧を検討した。X, Y, Z 各出力の共振用コンデンサの容量, 連続使用耐圧, および 20 mT の交番磁場出力時に両端に加わる交流尖頭値電圧は次表のようであった。

出力	容量	連続使用耐圧	両端尖頭値電圧 (20 mT)
X	$2 \mu\text{F}$	DC1000V	480V
Y	$4 \mu\text{F}$	DC1000V	175V
Z	$8 \mu\text{F}$	DC1500V	95V

よって、50 mT の出力を想定した場合にコンデンサ両端にかかる交流尖頭値電圧は、X, Y, Z それぞれ 1200V, 437.5V, 237.5V が期待される。X には 1200V の交流尖頭値電圧が発生することになるが、コンデンサの瞬間耐圧は JIS 規格によれば連続使用耐圧の約 2 倍であるため、定格の範囲内と言える。よって、これらのコンデンサを用いて最大 50 mT の交番磁場出力を得ることが可能である。

電流制御方式を採用したことにより、共振周波数を変化させても出力電流波形は変化せず、発振器の波形がそのまま交番磁場の波形となる。したがって、発振器から出力される波形はできる限り歪のないものでなければならない。今回行なった発振器の出力波形の調整法としては、発振器内で波形リミットを行なっている正逆 2 対のダイオード (IS 1588  $\times$  4, Fig. 14) の順方向抵抗値を完全に一致させる方法を

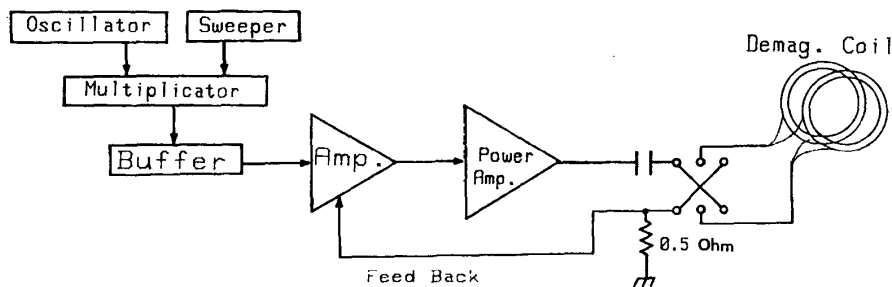


Fig. 12. Block diagram of Current-regulated Three Axial Alternating Field Demagnetizer.

とった。ダイオードの波形リミット効果が正逆とも完全に等しければ、この発振波形で消磁しても ARM は獲得されないはずである。実際には、数十本の同種のダイオードの中から順方向抵抗値が一致する組み合わせを見出して接続し、ARM を獲得しやすい試料を正逆両極性に於て消磁を行ない、消磁後の残留磁気方向および強度が一致するかどうかを確認、一致しない場合にはダイオードを交換することによって調節した。

以上の改造を行なった結果、無調整化された最大

交番磁場出力 50 mT の 3 軸交番磁場消磁装置が完成した。なお、掃引電圧発生器は以前のまま変更を加えていない (Fig. 15)。

最終段の高出力増幅器の入力および出力電流波形を交番磁場出力を高めていきながら観察した所、40 mT 以上の出力時に Y および Z の入出力波形に差が生じ始めている。同様な現象は、40 mT 以下の出力においても、高出力増幅器の利得を下げていった場合にみられることから、この現象は最終段の高出力増幅器の利得が不十分であるために起こるものと

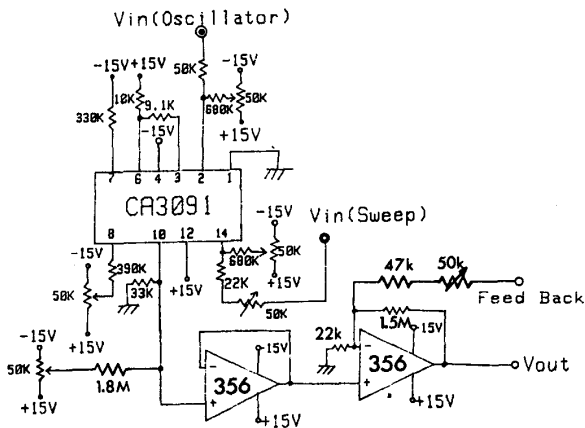


Fig. 13. Circuit diagram of the one set of multiplier, buffer, and amplifier of Current-regulated Three Axial AF Demagnetizer. All values of resistors and capacitors are in  $\Omega$  and  $\mu F$ .

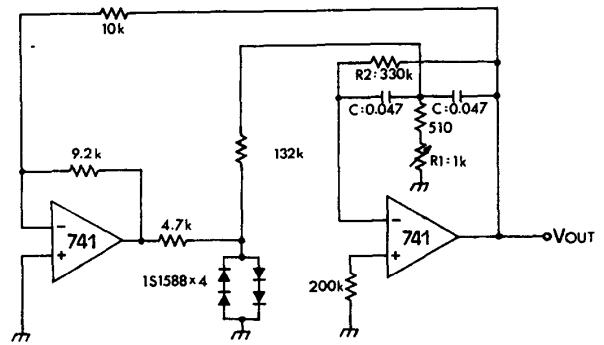


Fig. 14. Circuit diagram of the one set of oscillator of Current-regulated Three Axial AF Demagnetizer. All values of resistors and capacitors are in  $\Omega$  and  $\mu F$ . The frequency of oscillation  $f_0$  can be calculated with the next formula.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_1 R_2}}$$

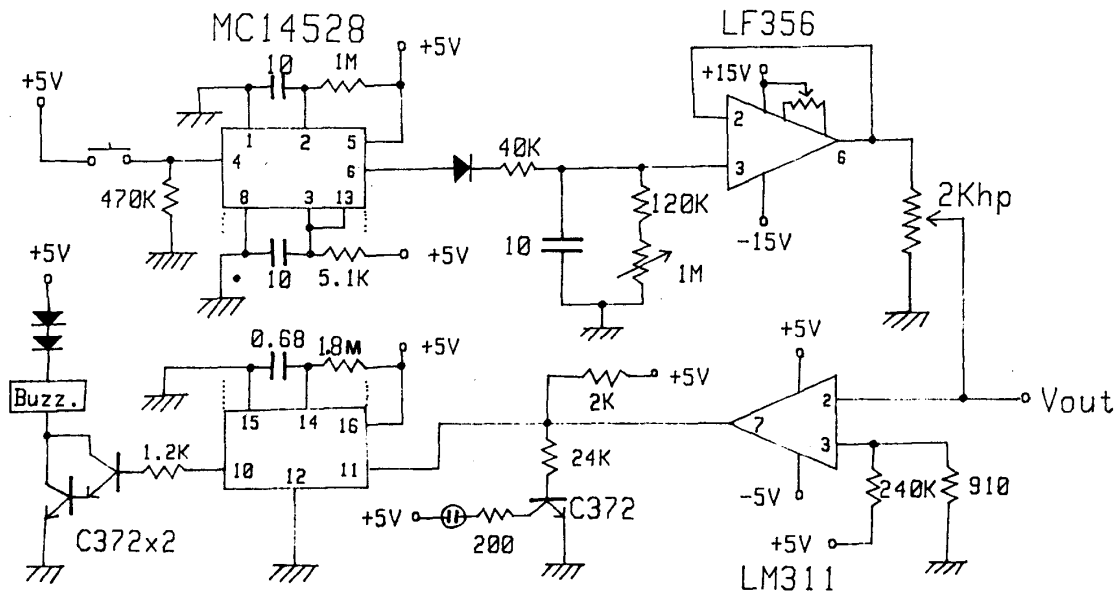


Fig. 15. Circuit diagram of the sweeper of Current-regulated Three Axial AF Demagnetizer. All values of resistors and capacitors are in  $\Omega$  and  $\mu F$ .

考えられる。このように入出力波形が不一致の状態  
で消磁を行なうと、試料には ARM が獲得されるの  
で、消磁装置としては使用できない。この現象は、  
ステレオ高出力増幅器をさらに出力に余裕のあるも  
のに変更することによって解決されると考えられ、  
今後の課題と言える。現在の状態では 35 mT の出力  
まで安定な交番磁場消磁が可能となっている。

### 謝 辞

東北大学地球物理学教室の斎藤尚生，湯元清文，  
東北工業大学電子通信学教室の瀬戸正弘の各氏には，  
リングコア磁力計に関する基本資料を提供して頂き，  
リングコア入手の便宜を図って頂いた。また，本磁  
力計製作，調整上の問題点を指摘して頂いた。東京  
大学地球物理学教室の浜野洋三，高知大学地質学教  
室の小玉一人の両氏には，帯磁率異方性および初期  
帯磁率の計算法を教示して頂いた。本教室の田村淳  
一氏には，交番磁場消磁装置の改良時に協力して頂  
いた。本教室の檀原 毅，北里 洋の両氏には草稿  
を査読して頂いた。記して感謝の意を表す。

### 文 献

- 北里 洋・新妻信明・小山真人・近藤康生・神谷隆宏  
(1981)，駿河湾周辺後期更新世根古屋層，草薙層，国吉  
田層，古谷層の地磁気層序。静大地球科学研報，6，45-  
59.
- KOYAMA, M. (1981), Paleomagnetism of the Cenozoic  
deposits in the north-eastern part of the Izu Penin-  
sula, Central Japan. *Rock Magnetism and Paleo-  
geophysics*, 8, 1-8.
- 小山真人(1982)，伊豆半島北東部中伊豆町～伊東市地域  
の層序。静大地球科学研報，7，61-85.
- 小山真人・新妻信明(1983)，駿河湾西岸後期更新世古谷層  
の古地磁気。静大地球科学研報，8，39-47.
- NIITSUMA, N. (1971), Detailed study of the sediments  
recording the Matuyama-Brunhes Geomagnetic  
Reversal. *Sci. Rept. Tohoku Univ.* [2], 43, 1-39.
- 新妻信明(1976)，房総半島における古地磁気層位学。地質  
雑，82，no. 3，163-181.
- NIITSUMA, N. (1982), Paleomagnetic results, Middle  
America Trench off Mexico Deep Sea Drilling  
Project Leg 66. *Initial Rept. Deep Sea Drilling  
Project*, 66, 737-770.
- 新妻信明・小山真人(1981)，高感度自動無定位磁力計およ  
び3軸交番磁場消磁装置について。静大地球科学研報，  
6，35-43.