

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

新妻信明*・小山真人*

High Sensitive Automatic Astatic Magnetometer and
Three Axial Alternating Field Demagnetizer

Nobuaki NIITSUMA* and Masato KOYAMA*

High sensitive magnetometer (ADAM: Automatic Digital Astatic Magnetometer) and Three Axial Alternating Field Demagnetizer for the studies on rock magnetism and paleomagnetism, are described.

ADAM has a parastatic type of a magnet system in a μ metal shield case. The sensitivity of this magnetometer can be controlled by the magnetic field produced by the Helmholtz coil at the upper magnet of the magnet system, ranging from 1.6×10^{-8} emu/(cc dig.) to 1.3×10^{-5} emu/(cc dig.) with $1 \sim 2 \times 10^{-7}$ emu/cc of noise level. Rotation angles of the magnet system are measured with the position of light spot using light lever. The light spot position is converted into electric voltage with paired solar cells. The output voltage is recorded on a chart recorder and digitized with a digital voltmeter. The digital output is sent into the Desktop Computer. The computer does not only analyse the measured voltage, but also controls the rotations of sample on horizontal and vertical planes. The duration to complete a measurement of one sample is about three minutes, including the time of numerical analysis and printing out of the results.

Three Axial AF Demagnetizer consists of an alternating current generator and three pairs of the Helmholtz coils with three orthogonal axes and with different radii, located in the μ metal shield case. The generator supplies sweeping alternating currents. It consists of a sine wave oscillator, a sweep voltage supply, a multiplier and a 240 watt high power amplifier. This demagnetizer can generate up to 35 mT (350 Oe) of alternating field. The demagnetization for three orthogonal directions can be completed by only putting a sample at the center of the coil system without any rotation for fifteen seconds. The results of stepwise demagnetizations show that the demagnetizer can remove a secondary unstable component of remanent magnetization.

1981年1月22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.

1. はじめに

岩石磁気学および古地磁気学の研究には高感度の磁力計を必要とする。その磁力計が高感度で、微弱な残留磁気まで短時間に測定できれば研究対象は大きく広がるので、これらの研究にたずさわっている各研究室では磁力計の感度の向上およびノイズの減少と測定時間の短縮に種々工夫をこらしている。また、古地磁気学の研究においては2次的に付加された残留磁気成分を除いて本来の残留磁気を測定する必要がある。この目的のためには種々の消磁法が用いられているが、その1つとして交番磁場 (AF: Alternating field) 消磁法がある。これは2次的に付加された粘性残留磁気 (VRM: viscous remanent magnetization) や等温残留磁気 (IRM: isothermal remanent magnetization) を除去するために有効な消磁法である。VRM や IRM はどのような試料にも多かれ少なかれ存在するため AF 消磁装置は古地磁気学の研究にはなくてはならない装置である。

静岡大学地球科学教室においても岩石磁気学および古地磁気学研究のために高感度自動無定位磁力計 (ADAM: Automatic Digital Astatic Magnetometer) と3軸 AF 消磁装置を作製したので、それらの構造と性能について述べる。

2. 高感度自動無定位磁力計

岩石の残留磁気の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等がある。超伝導磁力計はごく微小な残留磁気を磁気的影響をおよぼさずに測定できる理想的な磁力計であるが、超伝導状態を保つために液体ヘリウムで冷却する必要があり、装置の維持が容易ではない。また、強度の大きな試料を測定のため挿入あるいは回転させるとその際起こる大きな磁場変化に磁力計がついてゆけず測定できない場合があり、残留磁気強度の大きな火山岩等の測定には適さない。

回転磁力計は試料を高速で回転させるため軟弱な試料の測定を行なうことはできない。

フラックスゲート回転磁力計に用いられているフラッ

クスゲートは温度により感度や出力が変動するため、小さな残留磁気強度の試料を測定すると残留磁気の方向を求めることはできるが正確な強度を求めることは困難である (NIITSUMA, 1981 in press)。

無定位磁力計は測定時に測定器に用いている強力な磁石を試料に近づけなければならないため、この磁石の磁場に起因する2次的な残留磁気を獲得する可能性があるという弱点を有するが、測定可能な残留磁気強度範囲が広く、しかも感度を常に更正できるので、正確な強度測定ができる利点を有している。また、構造が簡単のため容易に製作できることから広く用いられ

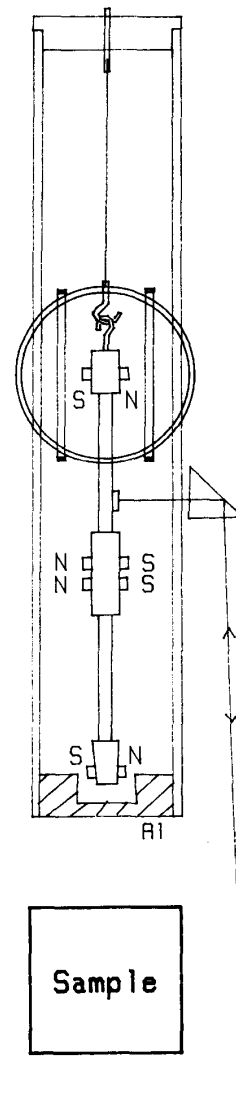


Fig. 1. Parastatic magnet system of high sensitive automatic magnetometer (ADAM: Automatic Digital Astatic Magnetometer).

ている。無定位磁力計には2本の磁石を使用する2磁石系のものや3磁石系のものがあるが、3磁石系のは2磁石系のものに比較してノイズレベルが約1桁低い(新妻, 1976)。今回製作した磁力計は3磁石系の無定位磁力計であり、これをμメタルの円筒状ケースで磁気シールドしたものである。

本磁力計の磁石系は直径3mm、長さ10mmのアルニコ磁石4本を反平行にセットし3磁石系を構成させたものである(Fig.1)。この磁石系をリン青銅リボンでつり下げて、磁場変化にともなって回転するようにした。リン青銅リボンの長さを長くすると感度を上げることができるが、磁石系の固有振動周期が長くなり、測定に要する時間が長くなるので、50mmにした。磁石系の下にはアルミニウムのダンパーを付し、磁場変化にともなう回転が急激に起こり長時間振動することを防止するために使用した。この磁石系全体を直径200mm、高さ400mmの天井のあるμメタルの円筒でおおひ磁気シールドを行なった。シールドケースの外側は温度変化の影響を小さくするために発泡スチロールの箱でさらにおおった。磁石系の中上部には光テコ用の鏡

を付し、磁石系の回転を光の移動量に変換し、その光を2枚の鏡を用いてシールドケース外に導いた。シールドケース外に導かれた光の移動は太陽電池を用いて電気信号に変換し、自記記録計(ナショナルVP6541A型)に記録させるとともに記録計のペン位置制御用ポテンショメーターの端子電圧をデジタルパネルメーター(ナショナルVP2322A型)でデジタル化し、そのBCD信号をディスクトップコンピューター(Hewlett Packard System 45T)へ入力した。磁石系の最上部の磁石のまわりには直径40mmの直交する2組のヘルムホルツコイルを付した。磁石の軸と直交する軸を有するコイルは既知の電流を流して磁力計の感度測定を行なうための感度測定用コイルとし、軸が一致しているコイルは電流を流すことにより磁力計の感度を落とすための感度変換用コイルとした。磁力計の感度は感度変換用コイルに流す電流と自記記録計のレンジを変えることにより調節できる。感度変換用コイルには、2.5、5.7、10.3、25、113mAの電流を流すことのできる定電流装置(Fig.2)を接続し、160分の1まで感度を落とすことができるようにした。記録計のレンジは2、

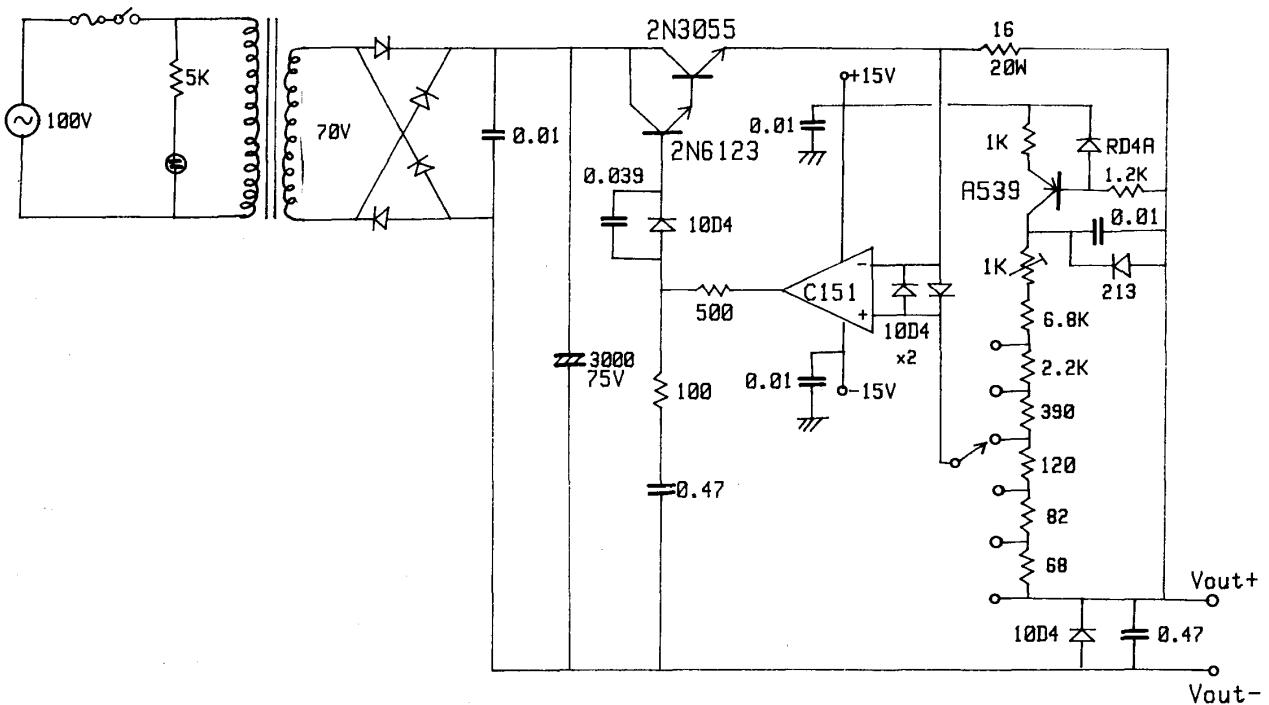


Fig. 2. Circuit diagram of current supply for sensitivity control of ADAM. All values of resistor and capacitor are in Ω and μF.

5, 10mVの3つが使用できるので, 感度は 1.6×10^{-8} emu/(cc·dig.)から 1.3×10^{-5} emu/(cc·dig.)の範囲を18段階に設定することが可能である.

測定用試料は磁石系の真下50mmの位置に置き垂直な軸のまわりに水平回転させて残留磁気を測定する. 試料は試料ケースに入れ回転台の上に置いて回転させ, 試料ケースには最大直径36mm, 長さ36mmの円柱状試料を入れることができる (Fig. 3). 回転台は試料ケースを45°おきに水平面で回転させるとともに, 試料ケースの重心から外れた位置に付された支軸のまわりにケースを垂直面内に回転させることによって, 水平回転軸を2回変換することができる. 水平回転および垂直回転による置換はすべてコンピューターで自動的に行なえるようになっていいる. 測定は試料を水平に90°ずつ回転して, 磁石系のふれをコンピューターに読みこみ, 1周したら置き換えて異なった軸のまわりに水平回転させ同様に測定値を読みこむ. 直交する3軸についての測定値をすべて読みこむとコンピューターは残留磁気ベクトル方向と強度, 現地における残留磁気ベクトルの方向, 地層の傾斜補正後のベクトル方向, みかけの磁極 (virtual geomagnetic pole)の位置, 試料内の磁気の均一度をただちに算出する. 試料の挿入から測定結果の算出までの時間は約3分である.

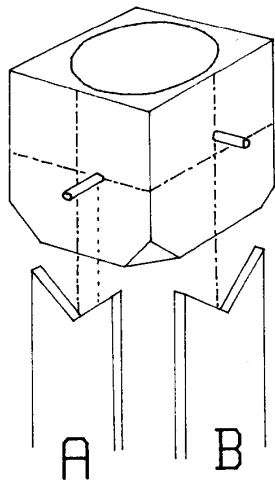


Fig. 3. Sample case of ADAM. A and B are supporting plates for sample case rotation on vertical plane around each axis rod which is located on sample case. This figure shows a condition after vertical rotation on supporting plate B and before vertical rotation on supporting plate A.

本磁力計のノイズレベルは周囲の状況によって変化するが30ccの試料について $1 \sim 2 \times 10^{-7}$ emu/cc程度である.

3. 3軸交番磁場消磁装置

残留磁気を測定して古地磁気学的な検討を行なうためには, 試料が現地において現在の地球磁場のもとに獲得した2次的な残留磁気や試料を採取・整形する際に付加された2次的な残留磁気成分を除去しなければならない. この2次的な成分を除く方法として広く使用されているのがAF消磁法である. 一般的に従来行なわれてきた方法としては, 1組のヘルムホルツコイルに商用電源を用いて交番磁場を発生させ, その交番磁場の中で試料を3軸方向に回転させることによりすべての方向の2次的成分を除くものである. 消磁に際して交番磁場強度をなめらかに0まで減少させなければならないが, その方法としては試料の入っている回転タンブラーから交番磁場発生用コイルを遠ざける引抜き法や, コイルに流れる電流を電解溶液を通じて流し, 電解溶液の量を徐々に減少させる方法などが用いられている. 複雑に回転するタンブラーに試料を収納し, タンブラーを回転させ, 交番磁場の最大値をセットして, なめらかに減少させてから取り出すという1回の消磁操作に従来は3~4分を要していた. 近年の磁力計の高性能化により残留磁気の測定は2~3分間で行なえるようになったが, 3~4分もかかる従来のAF消磁法を用いていたのでは測定能率は上がらないので, 消磁装置の改良が必要になってきていた. また, 試料を複雑に回転させながら消磁するため, 消磁中にどのような変化が残留磁気に起こったかを定量的に検討することも困難であった.

このような従来の方法を改良するためには試料を回転させずに消磁を行なうことと, 交番磁場のなめらかな減少はすべて電子回路を使用して行なうことの2点が考えられるであろう. 試料を回転させずに試料の全方向について消磁することは直交する3軸を有する3組のヘルムホルツコイルにそれぞれ異なった周波数の交流を与えることによって実現できる. なめらかな交番磁場の減少については, コンデンサーに蓄えられた電圧

を放電することによって得られるなめらかに減少する電圧と発振器の出力を乗算器に入れて増幅することによって実現できよう。今回製作した装置はこの2つの点について改良を加えたものである。

直交する3軸を有する3組のヘルムホルツコイルの直径が等しい場合にはぶつかり合って巻くことができないので、コイルの直径は軸ごとに異なった値を使用する必要がある。コイルの直径に関しては外側のコイルに内接する球の半径が内側のコイルに外接する球の半径よりも大きければ、コイルの軸方向は任意に設定することができる。このような条件の他にそれぞれのコイルによって生じる磁場の強さは同一電流、電圧で等しいという条件も加えることにする。

ヘルムホルツコイルの中心付近の磁場 H は

$$H=0.0899ni/r \quad (\text{mT})$$

で与えられる。ここで n はコイルの巻数、 i は電流(A)、 r はコイルの半径(cm)で、これはコイル間の距離に等しい。コイル半径 r の異なるヘルムホルツコイル2組に同一電流で等しい磁場が生じるためには

$$\frac{n_1}{r_1} = \frac{n_2}{r_2} \quad (1)$$

なる関係が必要である。また同一電流が同一電圧下で流れるためにはコイルの抵抗が等しくなければならない。巻線の単位長さ当りの抵抗を ρ とすれば、コイルの全抵抗は $2\pi rn\rho$ であるので

$$2\pi r_1 n_1 \rho_1 = 2\pi r_2 n_2 \rho_2$$

すなわち

$$r_1 n_1 \rho_1 = r_2 n_2 \rho_2$$

である。(1)式から

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{r_2 n_2}{r_1 n_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \quad (2)$$

の関係が得られる。巻線の直径を ϕ とすると

$$\rho \propto \frac{1}{\phi^2}$$

であるから

$$\left(\frac{\phi_2}{\phi_1}\right)^2 = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

すなわち

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{r_2}{r_1}$$

の関係が得られる。以上のことから、半径の異なるヘルムホルツコイル内に同一電圧、電流で同一磁場を生じさせるには巻数および巻線の直径がコイルの半径と比例関係にある必要がある。すなわち、

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\phi_1}{\phi_2} \quad (3)$$

ただし、このコイルには交流を流すためコイルのインダクタンスによって見かけの抵抗は大きくなるが、コイルにコンデンサーを直列に接続して共振させることによりそれを無視できるとして設計を進めることにする。

コイルの断面を1辺 a (cm) の正方形に巻いた場合、コイルに内接する球の半径 R は

$$R = \sqrt{\frac{1}{4}(r-a)^2 + \left(r - \frac{a}{2}\right)^2}$$

コイルに外接する球の半径 R' は

$$R' = \sqrt{\frac{1}{4}(r+a)^2 + \left(r + \frac{a}{2}\right)^2}$$

である。コイル1の内接球の半径 R_1 がコイル2の外接球の半径 R'_2 より大きいためには

$$R_1 - R'_2 \geq 0 \quad \text{または} \quad R_1^2 - R'^2_2 \geq 0$$

でなければならない。したがって

$$R_1^2 - R'^2_2 = \frac{5}{4} \left[\left(r_1 - \frac{3}{5}a_1\right)^2 - \left(r_2 + \frac{3}{5}a_2\right)^2 \right] + \frac{1}{20}(a_1^2 - a_2^2) \geq 0$$

であり、(3)から $a_1^2 - a_2^2 > 0$ であるから

$$r_1 - \frac{3}{5}a_1 = r_2 + \frac{3}{5}a_2$$

の関係が満たされれば $\frac{1}{20}(a_1^2 - a_2^2)$ の余裕をもって両コイルは組み合わせることになる。試料の半径が最大1.7 cmであることを考慮して、最小のコイルの半径を2.5 cm以上、中間のコイルが $\frac{r}{a} = 3$ 、コイルの巻線率を0.8として3組のコイルの r と a を求めると次表のようになる。

コイル	r cm	a cm	ϕ cm	n	H mT
1	4.12	1.14	0.5	366	4
2	6.00	2.00	0.7	534	4
3	9.65	4.08	1.1	859	4

H はコイルに1 A流した時に生じる磁場強度である。

以上の結果にもとづいてコイルを巻き、並列に接続したヘルムホルツコイルの直流抵抗とインダクタンスは下表のようであった。

コイル	直流抵抗 Ω	インダク タンス mH	共振用コ ンデンサ ー μF	共振周波 数 Hz
1	4.10	8.81	8.0	600
2	4.41	26.4	3.9	496
3	5.23	94.8	1.7	397

測定された直流抵抗値は一定になるはずであるが、太いものほど大きくなっている。表に示した共振用コンデンサを直列に接続した場合に表に示した共振周波数が得られる。消磁を行なうためには周波数が大きいほど消磁に要する時間を短くすることができるが、余り大きいとノイズや回路内の発振等の問題が起こるので400~600Hzの周波数を選んだ。

このようなヘルムホルツコイル系において、それぞれのコイル組に1Aの電流を流した場合には4mTの磁場が生じることになるが、直交する3軸の磁場を合成すると7mTの磁場が得られることになる。すなわち、このようなコイル系では最大振幅7mTの磁場が周波数の組み合わせによる複雑な経路を通して回転、振動することになる。

交流発生用の発振器としては正弦波発振器(Fig.4)

を作製した。3組のコイルに異なった周波数の交流を与えなければならないので発振器は3組作成した。また共振周波数を微調整できるように10回転ヘリポットを付した。

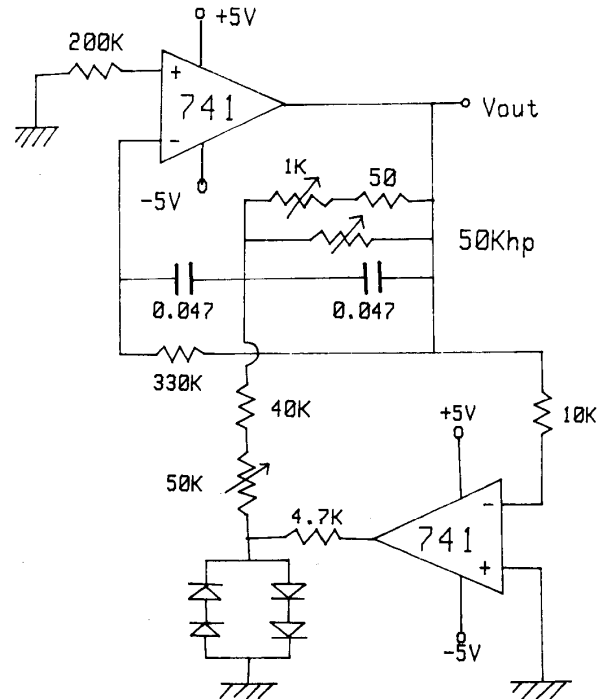


Fig. 4. Circuit diagram of one set of Oscillator of Three Axial AF Demagnetizer. All values of resistor and capacitor are in Ω and μF .

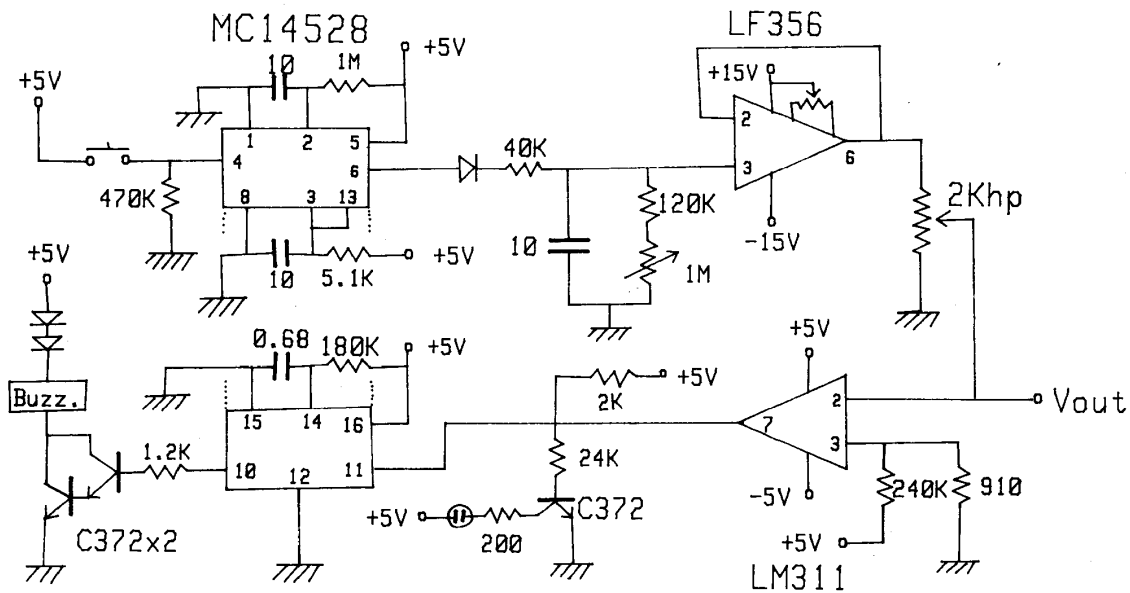


Fig. 5. Circuit diagram of Sweeper of Three Axial AF Demagnetizer. All values of resistor and capacitor are in Ω and μF .

交流出力をなめらかに減衰させるための減衰電圧はワンショットIC (MC 14528) を用いて、ボタンを押すと2秒間で10 μ Fのコンデンサーに充電し、その後可変抵抗器を通して放電する方式を採用した。減衰時間は可変抵抗器の抵抗値を変えることにより7~60秒の範囲で調整することができる。減衰電圧が規定電圧 (19 mV) より小さくなったらブザーが鳴るようワンショットICとブザーを接続した (Fig. 5)。

減衰電圧と3組の正弦波はそれぞれ3組の乗算IC (CA3091) に入力し、2秒間で最大値まで増大し、7~60秒かかって減衰する正弦波出力を得る (Fig. 6)。この3組の出力をステレオ高出力増幅器 (ヤマハP-2200) 2台にそれぞれ入力し交流を得、コンデンサーと直列に接続したヘルムホルツコイルに供給し、交番磁場を得る (Fig. 7)。

交番磁場発生用コイル系は外部磁場をシールドするため μ メタルケース (厚さ1mm, 直径300mm, 高さ600mmの底つき円筒状) 内に置き消磁を行なう (Fig. 8)。

発振器の周波数をコイル系の共振周波数に一致させるにはオシロスコプのXY入力に高出力増幅器の入力と出力を入れ、位相が合いしかも増幅器の出力が最大

になるよう周波数調整用ヘリポットで調整する。3組のコイルの交番磁場出力のバランスはピックアップコイルをコイル系の中央に置いて測定し、乗算器の出力調整用可変抵抗器あるいは高出力増幅器の利得を変換して調整を行なう。

この装置で得られる最大交番磁場出力は35mTである。

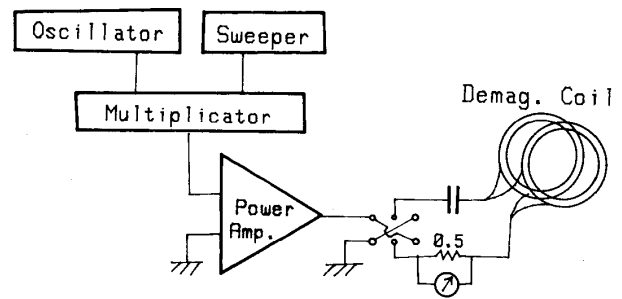


Fig. 7. Schematic circuit diagram of one axial component of Three Axial AF Demagnetizer.

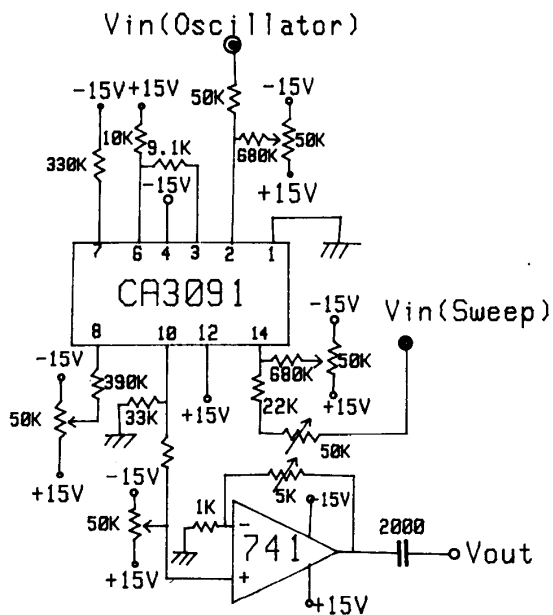


Fig. 6. Circuit diagram of one set of Multiplicator of Three Axial AF Demagnetizer. All values of resistor and capacitor are in Ω and μ F.

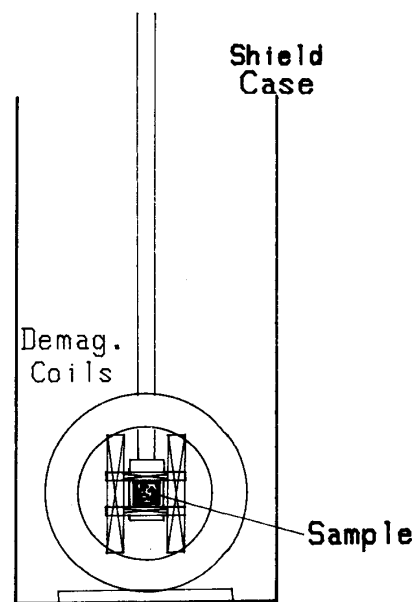


Fig. 8. Three axis demagnetize coil system of Three Axial AF Demagnetizer.

4. 消磁結果

前述の高感度自動無定位磁力計と3軸AF消磁装置を用いて行なった消磁装置の微調整と消磁結果について述べることにする。

消磁の際に試料にかかる交番磁場の波形が完全な正弦波でない場合には、消磁操作によって非履歴残留磁

気(ARM:Anhysterisis remanent magnetization)が獲得されてしまう。したがって、交番磁場波形は厳密に正負対称の正弦波である必要がある。しかし、このように小さな波形の歪はオシロスコープ等の測定器類では検出できないので、ARMを獲得しやすい岩石試料にAF消磁を試み、ARMを獲得するかどうかを検討する必要がある。試料の残留磁気がこの種のAR

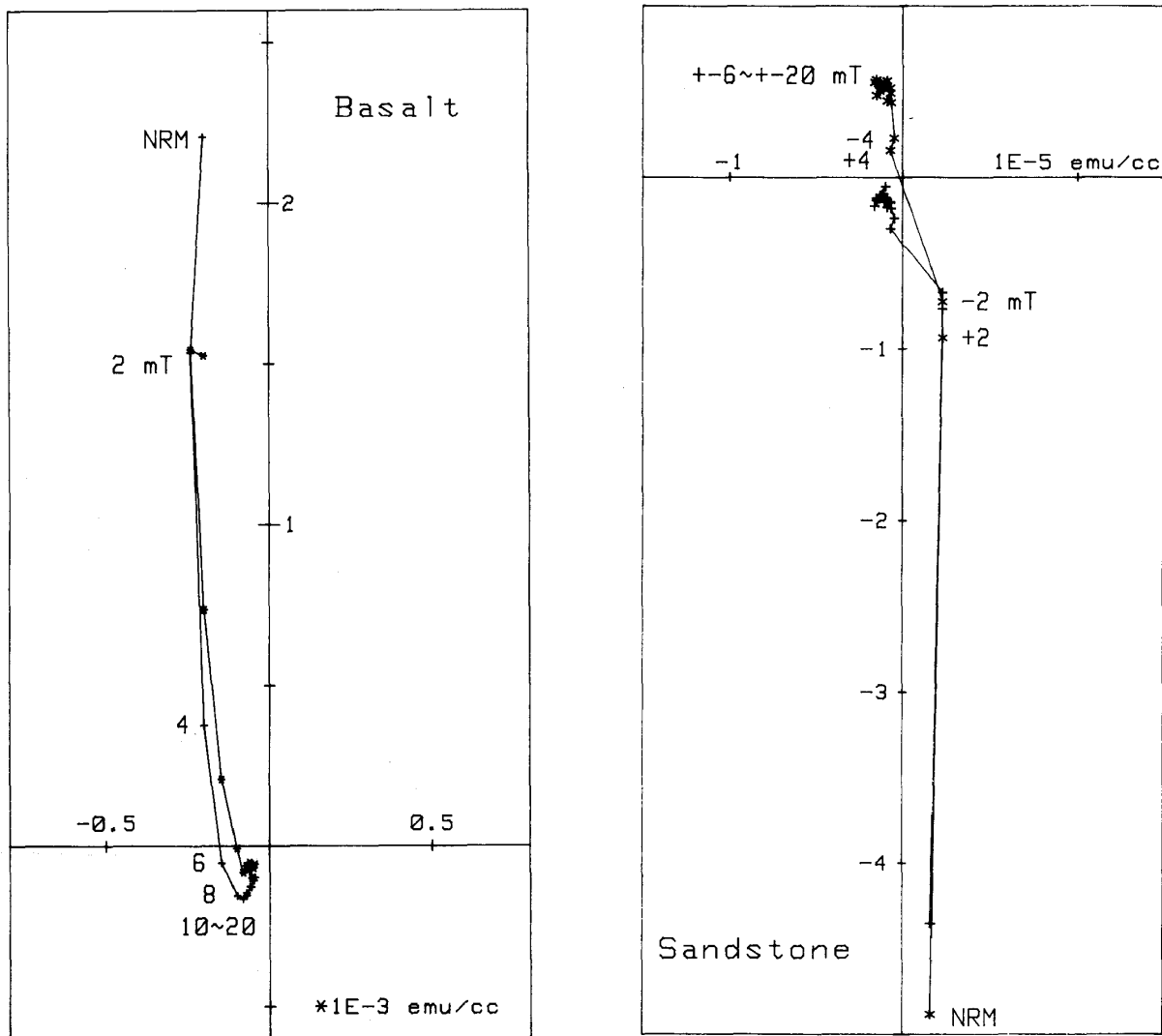


Fig. 9. These figures show changes in vectors of remanent magnetization of basalt and sandstone after stepwise AF demagnetization. The number shows intensity of demagnetize alternating field. NRM corresponds to original remanent magnetization before AF demagnetization. Point (+) corresponds to a vector of remanent magnetization, projected on vertical plane with axes of vertical component and one horizontal component. Point (*) corresponds to a vector of remanent magnetization, projected on horizontal plane with axes of one horizontal component and the other horizontal component crossed at right angle.

Mであるかどうかは増幅器とコイルの接続の極性を逆にしてみて消磁を行えば知ることができる。すなわち、測定された残留磁気がこの種のARMであれば、コイルの接続を逆にした場合、残留磁気の方向は180°逆方向に変化するはずである。波形の歪は共振状態からの小さなずれによっても起こるので、共振周波数の微調整はARMを獲得しやすい試料を正と逆の接続をして消磁を行ない、両者の残留磁気の方向および強度が一致するまで行なう必要がある。また、消磁した試料の残留磁気にこの種のARMの付加が予想された場合には、逆に接続して消磁し、再測定することにより確かめることができる。

Fig. 9 は本装置を使用して得られた段階消磁の結果を示したものである。この2つの測定試料は測定前に磁石を近づけてIRMを付加したものである。試料には玄武岩(a)と砂岩(b)を使用した。図中NRMとあるのはIRMを付加した状態で測定された方向である。両試料とも、段階消磁にともなって強度（原点からの距離）が急激に減少し、6~8 mTより大きな消磁を行なっても方向をほとんど変化しない。(b)の場合には各段階ごとにコイルの接続を正逆と変えて消磁を行なったものであるが、正逆による方向の変化はほとんど見られないことから、本装置の交番磁場波形には歪がないことが結論される。また、IRMは6~8 mTのAF消磁で除けることがわかる。

消磁中のARMの獲得は上記の波形の歪の他に外部磁場（地球磁場など）の存在下で消磁を行なった場合にも起る。この種のARMは試料を置く方向を変えて消磁を行ない残留磁気の方向と強度を検討することによって知ることができる。実際に試料を置き換えて消磁してみたが、両者の間に差を見出すことができなかった。本装置では外部磁場に起因するARMも生じないことが結論できる。

交番磁場を消磁の際に減衰させるが、その減衰時間を7秒から60秒まで変化させて消磁を行ない消磁効果を比較したが差は見い出されなかった。このことは7秒でも充分消磁が行なわれていることを示しているが、減衰時間を短くすると到達最大交番磁場強度が小さくなるので、減衰時間としては15秒程度が適当である。

以上のテストを行なった結果、高感度自動無定位磁力計および3軸AF消磁装置は充分満足できる性能を有していることがわかった。測定および消磁時間が従来のものに比較し格段と短縮されるとともに、操作も自動化され非常に単純化したのでこれらの装置は、今後の古地磁気学・岩石磁気学の研究に威力を発揮するであろう。

謝 辞

本装置製作にあたり宮坂 晃、塚本泰夫、田村 努、新妻弘明、鈴木国雄、館山 茂の各氏に御協力いただいた。また、中川久夫、檀原 毅、岡田博有、北里 洋の各氏には本稿作成に御協力いただいた。本装置製作費の一部は特定研究「駿河湾の形成と地殻変動」による。

文 献

- 新妻信明(1976)、房総半島における古地磁気層位学。地質雑、82, 163-181。
NIITSUMA, N. (1981 in press), Paleomagnetic results of the Middle America Trench off Mexico, drilled in IPOD Leg 66. *Initial Rep. Deep Sea Drilling Project*, 66.