

交流電橋型帯磁率計について

(第1報)

陶山淳治*

Résumé

A. C-Bridge Type Susceptibility-Meter (Preliminary Note)

by

Junji Suyama

The writer made a device an apparatus for the measuring the magnetic susceptibility of rocks at places. The principle is to find the change caused by the inductance of a coil, carrying a current, when a magnetic substance comes into its magnetic field. The winding of the coil forms a part of one arm of an alternating current inductance bridge, so that the change in inductance caused by the rocks on which it lies, can be measured.

The sensibility of this bridge is in the order of microhenries.

1. 緒言

岩石の帯磁率を測ることは、物理探鉱を行う場合に必要となることが多く、その測定法も種々考えられているが、多くの方法では試料を粉末にして測定している。

ところで、この場合の帯磁率と固形の場合のその差異は、ほとんど無視され、かつ多くの場合、そのことは眞実であるが、両者がかなりの差に達する場合もある。

次に同一の岩石を種々の部分から取出した試料について測定してみると、その値はかならずしも一致せず、ある場合には磁鉄鉱分布の不均一性のため、個々の試料間に相当量の帯磁率の差異が現われる。例えば、Wilson¹⁾が花崗岩について行つた測定では、各試料間で75%程度の差異が認められている。

したがつて、帯磁率を測定する場合、数個の試料を at random に取出して、その測定値の平均を取るのがよい。

さて粉末にした場合の帯磁率が、固形の場合のそれと大差ないものと見做しても、数多くの試料について測る場合、試料を粉末にすることは仲々大へんな仕事であるので、固形のままで帯磁率を測ることが望ましい。

そこで次に述べる器械を試作し、その場で帯磁率を測ることを試みた。

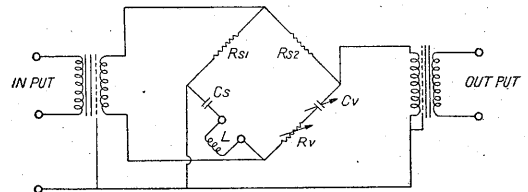
2. 方法

磁性物質が線輪の近傍にある場合に起る線輪の自己感應係数の変化を測り、それから磁性物質の帯磁率を決めようとする方法であり、自己感應係数の変化は交流電橋により測定する方式を採つた。

この方法は、Paterson²⁾が Owen bridge を使用して成功しているが、ここでは沼倉氏の方法を採つた bridge 回路で行つた。

3. 器械について

第1図に示した回路で製作した。



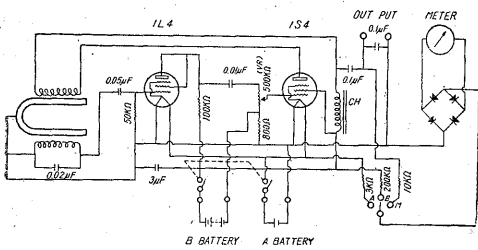
第1図 電橋回路図

ここに L; Test coil で平均半径 9.8 cm
BS 31 番線を 1,000 回、線輪断面 1 cm × 0.5 cm
自己感應係数 0.108004 mH
純抵抗 323.6 Ω
R_{S1}; 標準抵抗 5,000 Ω
R_{S2}; " 5,000 Ω
R_V; 標準可変抵抗 200 Ω ~ 292 Ω
C_S; 標準容量 0.105668 μF
C_V; 0.424554 ~ 0.431011 μF 標準可変容量

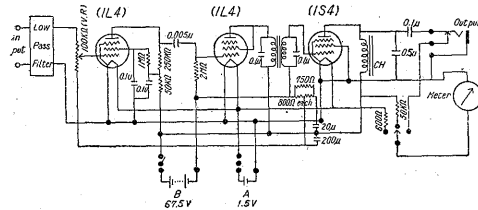
* 物理探査部

1) E. Wilson: Measurement of Magnetic Susceptibility of Lone order. Proc. Roy. Soc., (1877), 29-A, 429.

2) R. G. Paterson: Determination of Magnetic Susceptibilities of Rocks, in Situ (T. P. 1298 with discussion) AIME., Vol. 164, pp 247-255, (1945)



第2図 發振器回路圖



第3図 増幅器回路圖

交流電源としては、周波数が安定で、かつ波形の良いものが望ましいので、第2図に示したような真空管2個を1組として用いた1,000 ∞ の音叉發振器を用いた。

この場合周波数の変動は電源電圧の $\pm 10\%$ の変化に対して $\pm 10^{-3}$ 以下であり、かつ音叉の温度係数は 10^{-4} 以下であるので、發振周波数は 10^{-4} 程度以下で安定に保たれた。

波形は利得を、ある程度以下に抑えれば、満足すべきものが得られる。

次に平衡点を求めるには head phone を用いたが、その前に増幅器を附した。この場合増幅器は、1,000 ∞ のみを能率よく増幅するものが望ましいので、1,000 ∞ 複同調結合を含む第3図のような増幅回路を用いた。

head-phone としては、一層明瞭な平衡点をうるために、1,000 ∞ で著しく能率のよくなる、Magnetic resonance type の受話器を用いた。

このようにして、電橋は R_v, C_v を変えると、容易に平衡点が見出し得られる。その時の自己感應係数は

$$L = \frac{C_v - C_s}{\omega^2 C_v C_s} \text{ で求められる。}$$

そこで空気中での自己感應係数 L_0 を測り、次に岩石上にのせてその際の自己感應係数 L を測ると、自己感應係数の変化から岩石の帯磁率がわかる。

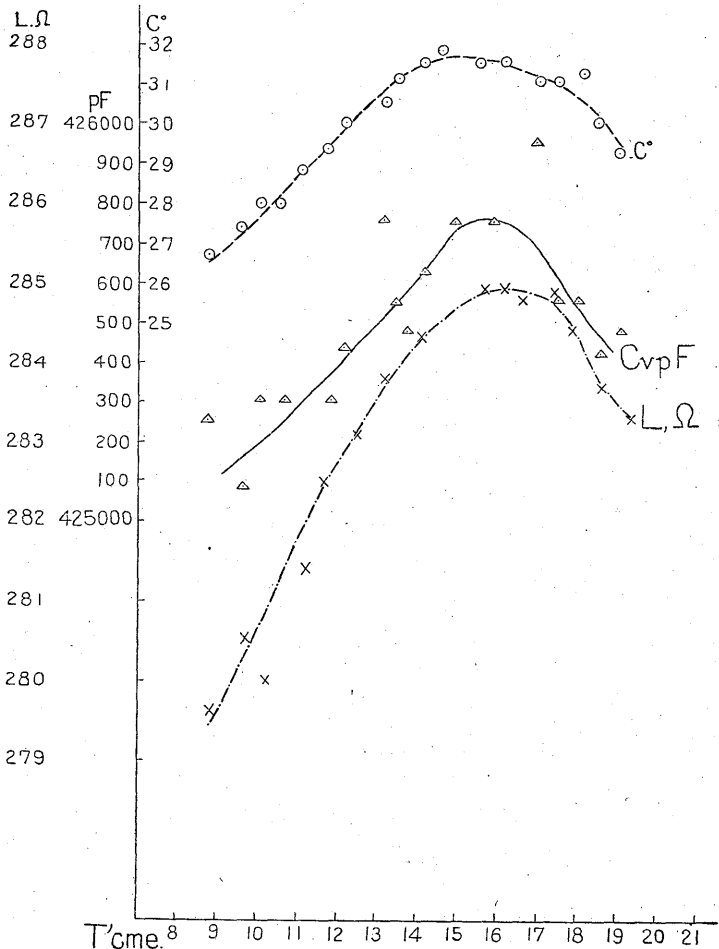
すなわち $L = \mu a L_0$ とおくと、 μa は岩石の帯磁率の函数である。したがってこれを“見掛けの透磁率”と名付ける。

次に $\mu a = 1 + 4\pi K a$ とおき、 $K a$ を“見掛けの帯磁率”と呼び、空気中での C_v を C_{v0} 岩石上での C_v を C_{vi} , $dC_{vi} = C_{vi} - C_{v0}$ とすると

$$\mu a L = \frac{C_{vi} - C_s}{\omega^2 C_{vi} C_s}, \quad L_0 = \frac{C_{v0} - C_s}{\omega^2 C_{v0} C_s}$$

$$\therefore \mu a = \frac{1 - \frac{C_s}{C_{vi}}}{1 - \frac{C_s}{C_{v0}}}$$

したがって見掛けの帯磁率



第4図 容量および抵抗の温度變化

$$K_a = \frac{C_s(C_{vi}-C_{v0})}{4\pi C_{vi}(C_{v0}-C_s)} = \frac{C_s d C_{vi}}{4\pi C_{vi}(C_{v0}-C_s)}$$

で表わされる。

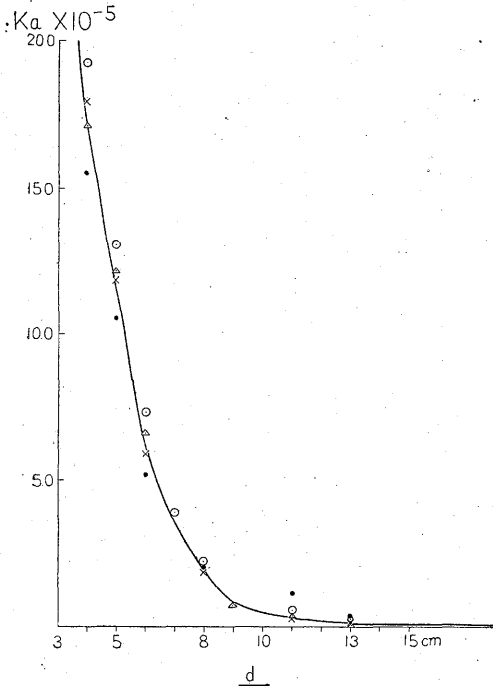
もちろんここで ω , C_{v0} , C_s はおのの一定と考える。

さて周波数 ω は $10^{-4}/C$ 以下の温度係数で変動することはあるが、これは後に述べる C_v , C_s の温度変化に比べて小さいので、反復測定により周波数変動に伴う誤差は相当程度避けうるので無視し、 ω は一定であると考えてさしつかえない。

線輪の Frame および巻線の膨張係数によつて生ずる自己感應係数の変化も、 $10^{-5}/C$ 以下の温度係数であるので、周波数の場合と同様無視しうる。

最も問題のあるのは、回路中のコンデンサー C_s および C_v の容量への影響である(第4図参照)。これは現段階では $3 \times 10^{-4}/C$ 以下にすることは技術的に困難であるので、 C_v は $130 \text{ pF}/C$; C_s は $30 \text{ pF}/C$ 程度の変化は避け得られない。従つて比較的溫度変化の著しくない場所では、反復測定によりこの変化に伴う誤差を無視できる程度としうるが、野外その他で溫度変化の著しく、かつ急激な場合には、 C_v , C_s の溫度変化に伴う測定誤差に注意する必要がある。

本器は $\pm 20 \text{ pF}$ 程度以下の誤差で平衡点が求められるが、以上の溫度の影響に伴う誤差を含めて、通常の場合



第5圖 試料と線輪との距離が見掛けの帯磁率におよぼす影響

所での反復測定の結果からは、 K_a は 2×10^{-3} 以下の誤差で測定しうるものと考えられる。

次に同一試料を、時日を変えて測定した結果第5図に示したように実際には上に述べたような溫度の影響に伴う測定値の変動よりも、線輪と磁性体との相対位置の変化に伴う見掛けの透磁率 μ_a の変化によつて起る、測定値の変動の問題の方が重要であると考えられる。

第5図をみると、試料との距離が近づくにつれて、測定値の変動が大きくなるので、前記のようなことが考えられるのであるが、このことについては後に述べる。

4. 理論

線輪の誘導または磁束の変化と媒質の透磁率、または帯磁率との関係は複雑で、解析的にとり扱うことは一般にはほとんど不可能である。

ここでは最も単純な半無限性体について考えてみる。

半無限磁性体(透磁率 μ)の前面 d の距離に、内径 R 導線半径 ρ_0 の線輪(総巻数 $M \times N$ の M 層の密巻)を磁性体表面に平行においたとすると

測られる自己感應係数 $L\mu$ は、

$$L\mu = L_0 + \frac{\mu-1}{\mu+1} M(d) \quad \text{で表わされる。}$$

ここに L_0 は磁性体ない場合(空气中)での自己感應係数であり、

$$L_0 = 4\pi \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{(R+2m\rho_0)(R+2m'\rho_0)}$$

$$\left[-\frac{2}{k_1} E + \left(-\frac{2}{k_1} - k_1 \right) K \right]$$

で表わされるもの

$M(d)$ は線輪の磁性体表面に関する鏡像の位置に、等しい線輪をおいたときの相互感應係数で

$$M(d) = 4\pi \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{(R+2m\rho_0)(R+2m'\rho_0)}$$

$$\left[-\frac{2}{k_2} E + \left(\frac{2}{k_2} - k_2 \right) K \right]$$

で表わされるものである。

ただし

$$k_1 = \frac{\sqrt{4(R+2m\rho_0)(R+2m'\rho_0)}}{\sqrt{4(n-n_0)^2\rho_0^2 + (2R+2m\rho_0+2m'\rho_0)^2}}$$

$$k_2 = \frac{\sqrt{4(R+2m\rho_0)(R+2m'\rho_0)}}{\sqrt{4(d+1n-n_0\rho_0)^2 + (2R+2m\rho_0+2m'\rho_0)^2}}$$

K , E はおのの k_1 , k_2 に関する第1種および第2種完全楕円積分である。

ところで $L\mu = \mu_a \mu_0$ である故

$$\mu_a = 1 + \frac{\mu-1}{\mu+1} M(d)/L_0$$

$$K_a = \frac{K}{2 + 4\pi K} M(d)/L_0$$

いま $2(M-1)\rho_0 \ll 2(N-1)\rho_0 \ll R$ で R に比べて無視しうるほど小さい場合の $M(d)$ を $M_A(d)$ 、しからざる場合を $M_B(d)$ とすると

$$[M_A(d)] > [M_B(d)] \text{ であり,}$$

$(M-1)\rho_0 \ll (N-1)\rho_0$ が d に比べて小さく無視しうる範囲では

$$M_A \doteq 4\pi R_m M^2 N^2 \left[-\frac{2}{kd} E + \left(\frac{2}{kd} - kd \right) K \right]$$

で表わされる。

$$\text{ただし } kd = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{d}{R_m}\right)^2 + 1}} R_m; \text{ 平均半径}$$

次に、 $2(M-1)\rho_0 \ll 2(N-1)\rho_0$ および d が R_m に比し無視しうる」とすると

$$(M_A)_{d=0} \doteq 4\pi R_m M^2 N^2 \left(\log \frac{8R}{\rho_0} - 1.508^* \right) = L$$

$$\therefore \frac{M_A(d)}{L} =$$

$$\frac{4\pi R_m M^2 N^2 \left[-\frac{2}{kd} E + \left(\frac{2}{kd} - kd \right) K \right]}{4\pi R_m M^2 N^2 \left(\log \frac{8R}{\rho_0} - 1.508 \right)} \\ = \frac{\left[-\frac{2}{kd} E + \left(\frac{2}{kd} - kd \right) K \right]}{\left(\log \frac{8R}{\rho_0} - 1.508 \right)}$$

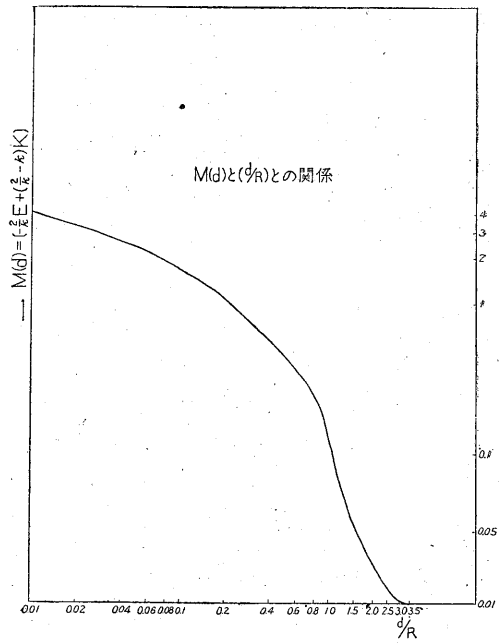
かつ $M_B(d) < M_A(d) \leq L$

すなわち、(i) 線輪断面が平均半径に比べて小さく無視しうるほどである場合、 K_a は量値 $\frac{K}{2+4\pi K}$ とほとんど等しくなる。

(ii) 第6図に $M_A(d)$ と d/R との関係を示したが $d \times 2R$ 附近で0.3%程度となり、 $d=0$ に近づくと d の僅かの違いで、測定値に当然大きな差異を生ずる。また線輪と磁性体面のなす角度によっても同様な差異を生ずる。

以上記したように、線輪断面が小さくかつ半径の大きい程能率が良く、また試料(特に岩石・鉱石)の表面の風化を考えると、野外用測定器としては、できるだけ径の大きなものが望ましい。実際の測定に当つては、各測定線輪について半径の2倍程度の厚さで、既知の帯磁率をもつ試料について、予め μ_a と μ (ないし dL と μ) との関係を実験的に決めておけば、種々の試料について、その帯磁率を直ちに決められる。

* ここに 1.508 は Kirchoff が用いた常数を採用した。



第6図 $M(d)$ と (d/R) の関係

5. 測定について

次に試料の性質が測定値におよぼす影響について述べると

まず 5.1 周波数変化による影響。5.2 試料と線輪の間の容量による影響。5.3 試料の電気伝導度による影響が考えられるが、

5.1 Paterson⁴⁾ および Brown⁵⁾ の実験によれば、 $500\infty \sim 1,000\infty$ 迄は透磁率は一定に止るとみてさしつかえないと思われる。

5.2 試料の容量の影響を調べるため、空气中における場合と蒸溜水面上に吊した場合とについて自己感應係数を測定したが、なんら著しい変化はみられず、無視して差支えないものと考えられる。

5.3 高い伝導度をもつ NaCl の飽和溶液について、5.2 と同様な測定を行つたが、著しい変化はなく、誤差の範囲に入る程度である。飽和溶液の伝導度は普通の岩石・鉱石のそれより大であるので、一應試料の伝導の影響は無視しうるものと考えられる。

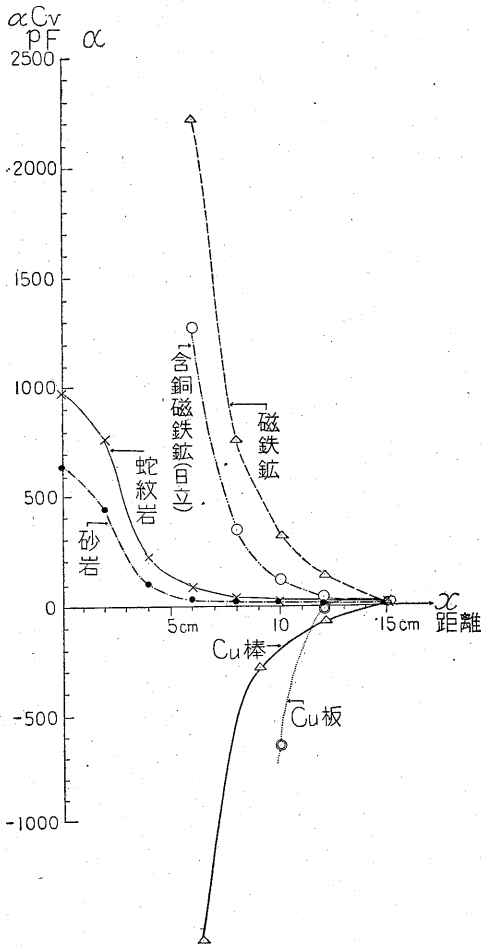
ただし第7図に示したように金属導体の場合伝導度の影響は存在する。このことについては別の機会に詳細を検討する予定である。

以上のように、この種の方式で測られる自己感應係数の変化は、岩石・鉱石においてはその透磁率の影響によるものとしてさしつかえないと考えられる。

第7図には種々の試料について測定した結果のうち、
2, 3 のものを示した。 (昭和27年2月稿)

文 献

- 1) E. Wilson: Measurement of Magnetic Susceptibility of Lone Order. Proc. Roy. Soc., (1877) 29-A, 429.
- 2) R. G. Paterson: Determination of Magnetic Susceptibilities of Rocks in Situ. (T. P 1298 with discussion) AIME Vol. 164, pp 247-255 (1945).
- 3) 沼倉秀穂: 保護環を設けた試料の誘電体力率及び誘電率の可聴周波数乃至ラジオ周波数に亘り測定し得るブリッジの研究, 電気学会誌, Vol. 57, No. 592, pp 1063-1073, 昭12, 11月.
- 4) 前出 (2)
- 5) R. Brown: Characteristics of Iron in High Frequency Magnetic Field. Jour Franklin Inst., 183, p 41-59, (1917)



第7圖 2, 3 の試料についての測定結果