

## (6) 磁化特性の測定

2020 年度版

### 1) 実験の目的

磁束計を用いて強磁性材料の B-H 特性を求め、磁気測定の基本法を修得すると共に、磁化機構について理解を深める。

### 2) 磁束計による磁化特性の測定 (直流磁化特性)

一様に励磁コイルを巻いた環状試料を用い反転法によって、その正規磁化曲線とヒステリシスループを測定する。磁化状態の変化の検出には、磁束計を用いる。試料は、珪素鋼板 T-135 打抜き鉄心、方向性珪素鋼板 SPS の巻鉄心、感温磁性材の 3 つであり、いずれも一部に、サーチコイルが巻いてある。試料中の印加磁界の強さ  $H$  (A/m) は、励磁コイルの巻数  $N$ 、その電流  $I$  (A) と平均磁路長  $\ell$  (m) から算出され

$$H = \frac{NI}{\ell} \quad (\text{A/m}) \quad (1)$$

で与えられる。 $H$  を変化させたときの試料中の磁束変化  $\Delta \phi$  は、サーチコイル (巻数  $n$ ) につないだ磁束計によって、サーチコイルの鎖交磁束数変化  $\Delta \phi (= n \Delta \phi)$  として検出され、これから磁束密度変化  $\Delta B$  が後述の (5) 式によって与えられる。

#### 2-1) 磁束計 (Flux meter) の動作

磁束計は一種の可動コイル型ガルバノメーターであるが、その構造上、普通の衝撃検流計 (Ballistic galvanometer) と異なる点は懸垂線の弾性による制御力が著しく小さく、かつ可動コイルの運動が線輪中に誘発される電流によって制動されるようになっている。このためにその周期は極めて長く、従って計器の振れは電流の通過する時間の長短に影響されることが少なく、また振れの終端において可動線輪は比較的長く止まるので、振れの読み取りが容易である。

磁束計の構造は図 1 に示すように可動線輪 B は N、S なる永久磁石の磁極と A なる鉄心との間の空隙に装置され、枠 E、E によって支えられ 1 本の絹糸でつられているのでほとんど制御力は働かない。可動線輪はその回路の場合約 10~20 秒の大きな周期を有している。

磁束計につながれたサーチコイルの巻数を  $n$ 、それを貫く磁束を  $\phi$  として、時間  $dt$  中に  $d\phi$  だけの磁束変化があったとすると、サーチコイル中に発生する起電力  $e$  は

$$e = n \frac{d\phi}{dt}$$

で表わされる。このとき、全回路の抵抗を  $R$ 、インダタンスを  $L$ 、磁束計の可動コイルを流れる電流を  $i$ 、可動コイル

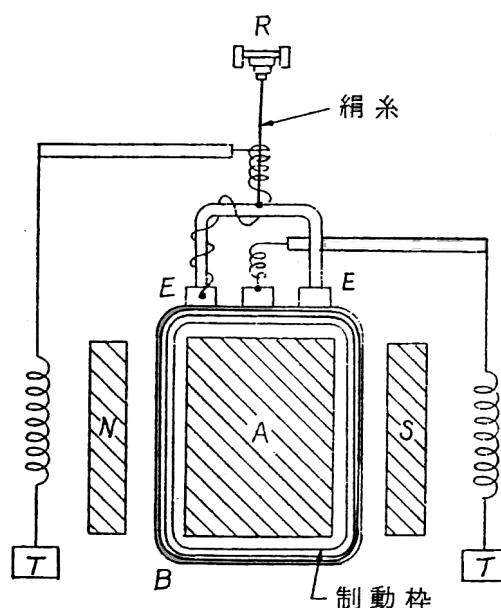


Fig. 1 磁束計の原理図

の回転角を  $\theta$ 、単位角速度によって可動コイルに生ずる起電力を  $G$  とすれば、上記起電力  $e$  は次のようになる。

$$e = n \frac{d\phi}{dt} = G \frac{d\theta}{dt} + L \frac{di}{dt} + Ri \quad (2)$$

また可動コイルの運動は、その慣性定数を  $J$ 、制御係数を  $r$ 、制御バネ定数を  $\tau$  とするとき、次で与えられる。

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + r \frac{d\theta}{dt} + \tau\theta = Gi \quad (3)$$

ただし、磁束計では前述の如く、 $r$  が小さいので、 $r\theta$  の項は無視することができる。

いま、時間  $t$  中における磁束の全変化量を  $\Delta\phi$ 、可動コイルを通過した全電荷量を  $Q$  とし、磁束変化の前後で、電流  $i$  と角速度  $d\theta/dt$  がゼロであることを考えれば(2)、(3)式を積分することにより

$$\begin{aligned} d\Delta\phi &= G\Delta\theta + RQ \\ r\Delta\theta &= GQ \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta\theta$  は磁束変化の前後の指示角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  の差  $\theta_2 - \theta_1$  である。  
したがって、

$$\begin{aligned} n\Delta\phi &= \left( G + \frac{rR}{G} \right) \Delta\theta \\ r &\ll \frac{G^2}{R} \text{ であれば} \\ n\Delta\phi &= G\Delta\theta \end{aligned} \quad (4)$$

となって、サーチコイルの抵抗が小さい場合（普通  $20\Omega$  以下）では、指示値は抵抗に無関係になる。使用する磁束計は、磁束の単位（Maxwell-turns）で目盛りされており、サーチコイルの鎖交磁束数の変化  $\Delta\phi (=n\Delta\phi)$  が直読できる。

（定数  $G$  は、可動コイル部分に永久磁石が作る磁束の密度  $B'$ 、可動コイルの各辺の長さ  $a$ 、 $b$ 、その巻数  $n'$  の積  $B' abn'$  で与えられる。）

## 2-2) 磁束密度の計算法

磁束計は、(4) に示したように、サーチコイル（巻数  $n$ ）の鎖交磁束数の変化量  $\Delta\phi (=n\Delta\phi)$  を指示し、従って、磁束密度  $B$  の変化量  $\Delta B$  が求められる。サーチコイルが試料に固定され、試料中の磁束が印加磁界の変化によって変わる場合、 $\Delta\phi$  (Wb) と試料の断面積  $S$  ( $\text{m}^2$ ) と  $n$  から、 $\Delta B$  (T) は

$$\Delta B = \frac{\Delta\phi}{nS} \quad (5)$$

となり、

$$B_2 = B_1 + \Delta B \quad (1, 2 \text{ は変化の前後の値を示す})$$

として、 $B$ の絶対値を求めることができる。

### 3) 直流磁化特性の測定法

#### 〔実験 I-1〕 磁束計の校正

磁化特性の測定に先立って、使用する磁束計の校正を行なう。1次巻線と2次巻線間の相互インダクタンスが10mHの標準相互誘導器（1次巻線抵抗約20Ω）を用いる。Fig. 2のように結線し、1次巻線に電流  $I$ (A)を流しておいて、スイッチ  $S_1$ を反対側に切り替えれば、2次巻線の鎖交磁束数は

$$\phi = MI \quad (\text{Wb})$$

で、 $2\phi$ 変化したことになる。1次電流  $I$ を測定すれば $\phi$ を計算できるから、これを基準にして磁束計の指示値を校正する。

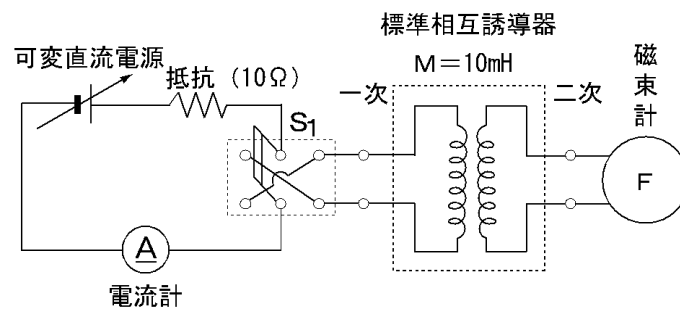


Fig. 2 磁束計の校正結線図

#### 〔実験 I-2〕 実験の準備 (消磁の方法)

実験にさきだち試料をFig. 3のように結線して交流電源に接続する。スライダックを最低位置において、スイッチを入れ2アンペアを限度に徐々に励磁コイルに電流を流した後、直ちに2次側電圧を下げて電流を零にする。この実験の目的は磁性材料の測定においては、試料の残留磁束を消すためであって、測定のやり直しの際も同様に消磁する。

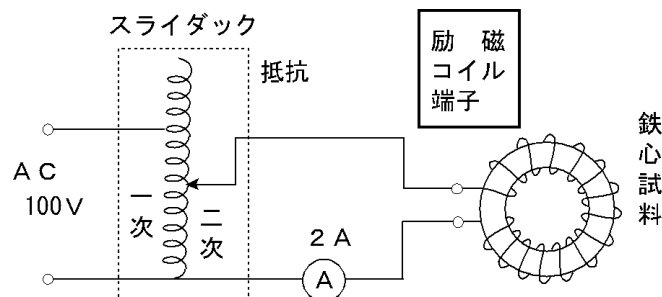


Fig. 3 消磁の方法

## 【実験 II】 正規磁化曲線の測定

測定回路は Fig. 4 に示すように結線する。試料の励磁コイルはスイッチと抵抗を通して直流電源に、サーチコイルは磁束計につなぐ。 $S_2$  のスイッチは  $\alpha$  側に入れておく。電源のダイヤルを回すことによって電流を加減できる。 $S_1$  を切り替えれば励磁コイルの電流が逆に流れ、試料中の磁界も逆になる。

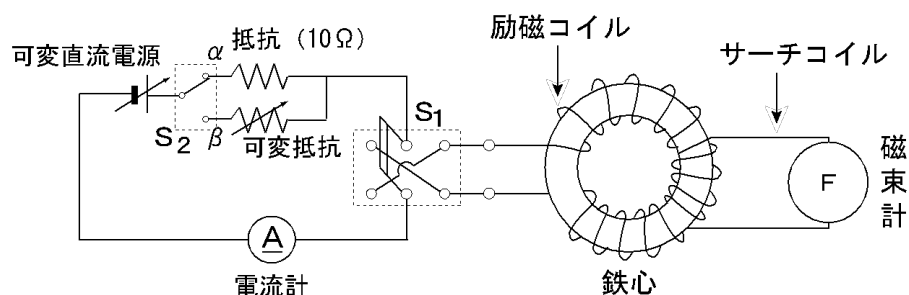


Fig. 4 磁化特性測定回路

Fig. 5 に示すように、正規磁化曲線は、種々の対称なヒステリシスループの先端を結んで得られるものであり、 $S_1$  のスイッチを切り替えて、磁界を  $H_1$  から  $-H_1$  にしたときの磁束計の振れ  $\Delta\Phi = 2 \times \Delta\phi$  を読み取り、(5) 式を用いて磁束密度  $B_1$  を求める。 $H_1$  は電流  $I$  から (1) 式で計算される。Fig. 5 のように、 $H_1 < H_2 < H_3 \cdots$  と順次磁界を増加して測定するために、電源の電流つまみを回転させ、電流量を順次増加させる。その際、同一  $H$  に対して循環磁化状態にするため  $S_1$  を数回反転してから測定することが必要である。得られる正規磁化曲線は、Fig. 5 の実線部分のようになる。

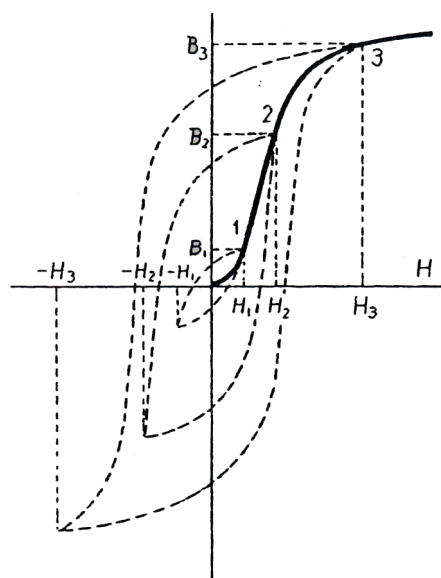


Fig. 5 正規磁化曲線の測定

### 【実験 III】ヒステリシスループの測定

反転法では Fig. 6 に示すように常にループの先端である点 a、点 g を測定の基点とする。点 a における  $H_m$ 、 $B_m$  は、〔実験 II〕の実験で得られた飽和値  $B_m$  とそのときの電流値  $I_m$  を用いる。グラフを描く際は、 $I_m$  を  $H_m$  に変換する。

#### 実験方法

可変抵抗の値は初期値として  $20\Omega$  を選び、Fig. 4 のように接続する。このとき、 $S_2$  は  $\alpha$  側にし、 $S_1$  は電源を調整して  $H_m$  に相当する電流が流れるように左右いずれかへ入れておく。測定前の準備として方眼紙に、縦軸に磁束密度相当、横軸に電流値 ( $H_m$ 、 $-H_m$ ) 相当をとり対称的なループになっているか確認しながら実験を行う。

#### (1) 点 a から点 g への経路

点 a - c 間の 1 点を求めるため、 $S_2$  を  $\beta$  側へ入れる。そのときの磁束計の振れ幅を  $\Delta B_b$  とすると、点 b の磁束  $B_b$  は、

$$B_b = B_m - \Delta B_b$$

で求まる。次に  $S_1$  を中立にしたときの磁束計の振れ幅を  $\Delta B_c$  とすると、点 c における  $B_c$  は、

$$B_c = B_b - \Delta B_c$$

で求めることができる。更に  $S_1$  を  $-H_m$  側に入れたときの磁束計の振れ幅  $\Delta B_d$  とすると、点 c - e 間の点 d における  $B_d$  は

$$B_d = B_c - \Delta B_d$$

として求められる。最後に  $S_2$  を  $\alpha$  側に入れて抵抗の値を元の  $10\Omega$  に戻すと、 $-H_m$  に相当する電流が流れ、そのときの磁束計の振れ幅を  $\Delta B_e$  とすると、

$$B_e = B_d - \Delta B_e$$

として、 $B_e$  を求めることができる。 $B_e$  の値は実験的誤差を含むため  $-B_m$  の近似値になる。しかしながら、点 a、点 e は、ヒステリシスループの基準点とするため、点 e における  $B_e$  は常に  $-B_m$  とする。

#### (2) 点 e から点 a への経路

点 e から点 a へ戻る際の手順も、点 a から点 e への手順と同様に行い、点 e - g 間、点 g、点 g - a 間の値を求める。点 a に戻ったときの  $B_m$  の値は初期に設定した  $B_m$  とする。

(1)、(2) に示す手順を、ヒステリシスループが描けるまで、可変抵抗の値を変えて繰り返す行う。

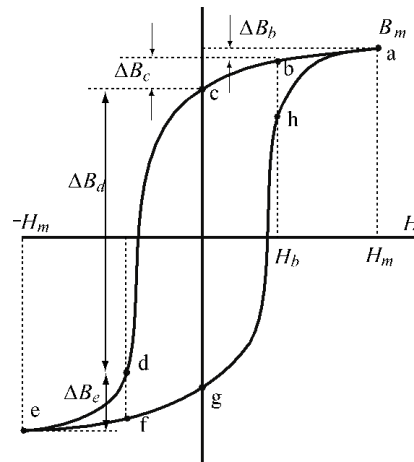


Fig. 6 ヒステリシスループの測定

#### コイルの諸条件

	コイル(大)	コイル(小)	コイル(実験 IV)
1 次側/2 次側巻数 (巻)	75/45	160/100	75/75
内半径/外半径 (mm)	29/59	26/38	25/40
コイル高さ (mm)	20	28	1.2

#### 4) 検討

下記の検討項目を必ず記載すること。グラフの横軸、縦軸は MKS 単位系を使うこと。

- (1) 磁性材料については CGS 電磁単位系 (oersted、Maxwell、gauss 等) が主に用いられている。MKS 単位系 (weber/m<sup>2</sup>、AT/m、weber 等) との換算を調べよ。
- (2) 磁束計の較正について、横軸を実験値  $\phi$ 、縦軸を計算値  $\phi$  としてグラフで示せ。また、磁束計の較正のために必要な数値をグラフから読み取って示せ。
- (3) 実験値を較正した正規化磁化曲線、ヒステリシスループをグラフで示せ。なお、縦軸は磁束密度で単位は [T]、横軸は、正規化磁化曲線、ヒステリシスループでは磁界の強さで単位は [A/m] とする。  
なお、ヒステリシスループの図は、測定した結果を一枚のグラフ上に全てプロットし、その全てを使って一つのヒステリシスループを描くこと。
- (4) 正規化磁化曲線から実験で用いたコイルの飽和磁束密度、最大比透磁率を求めよ。
- (5) コイルによって飽和磁束密度、最大比透磁率が異なる理由を考えよ。
- (6) ヒステリシスループから、残留磁束密度  $B_r$ 、保持力  $H_c$ 、ヒステリシス損を求めよ。

#### 5) レポート

上記の検討項目 (1) ~ (6) について回答せよ。 (提出期限: 1 週間後 17:00、CLE)

場所 : E6-617 (遠隔授業の場合は CLE)

レポート提出 : 1 週間後 17:00、CLE

担当 : H. T. Lee [heunlee@eei.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:heunlee@eei.eng.osaka-u.ac.jp)

TA : 鈴木 雅也 [suzuki-m@st.eie.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:suzuki-m@st.eie.eng.osaka-u.ac.jp)