

磁性体の実験

1 目的

磁性材料は、電子機器の中で重要な役割をこなす電子材料の一つである。トランスや電動機のコア(磁心)、永久磁石、磁気記録媒体、磁歪振動子など幅広く用いられている。本実験では、種々の磁性材料の磁化特性とヒステリシス曲線の測定を行い、磁性材料の基礎的性質の理解を深めることを目的とする。

2 解説

2.1 磁性の起源

真空中に磁界 H (A/m) が存在すると、磁束密度 B は $\mu_0 H$ (T, テスラ) となる。 μ_0 は真空の透磁率で、 $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) で与えられる。一方、磁界 H 中におかれた物質中の磁束密度は、

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0\mu_r H \quad (1)$$

となる。 M は磁化(magnetization) とよばれ、磁気モーメントの密度(単位体積あたりの磁気モーメントの和)に等しい。 μ_r を物質の比透磁率という。

磁気モーメントは、主として物質を構成する原子中の電子の軌道運動や電子の自転(スピン)運動により発生するが、固体の場合は、電子スピンによる磁気モーメントが支配的であると考える。磁化により増大した磁束密度が工学的に利用されるのである。

2.2 磁性体の分類

常磁性(paramagnetism) 一般的に、物質中の原子が磁気モーメントをもち、原子間の磁気モーメントに相互作用のないときに生じる磁氣的性質である。磁界中におかれると、磁気モーメントは磁界方向に向こうとするが、熱エネルギーによりランダム化される効果のため、磁化率 $\chi = M/H$ はきわめて小さな値となる。従って、磁性材料としての工学的応用はない。

強磁性(ferronagnetism) 物質中の原子が磁気モーメントをもち、かつ量子力学的な交換力が、磁気モーメントを同一方向にそろえるようにはたらくとき強磁性となる。強磁性体では、交換力により磁気モーメントのそろった領域(磁区、magnetic domain)が存在している。このように、外部磁場がなくとも存在する磁化を自発磁化という。磁界を加えない初期状態では、各磁区はさまざまな向きに磁化されているため、試料全体としては打ち消しあって磁性をあらわさない。外部磁界を加えると、磁区間の境界である磁壁が移動し、磁界方向の磁気モーメントをもつ磁区が広がる。磁壁の移動に要するエネルギーは、磁気モーメントの回転に要するエネルギーより少なくすむから、小さな外部磁界で高い磁化率が得られる。遷移金属の Fe, Ni, Co や希土類金属の Gd および GdO_2 , ErO のような酸化物がこれに相当し、工学的に重要な磁性材料である。ただし、強磁性体のこのよ

うな性質は、ある温度(キュリー温度)以上になると失われる。熱エネルギーが交換力を上回り、自発磁化が消失し、常磁性に転移するからである。

反強磁性(antiferromagnetism) およびフェリ磁性(ferri magnetism) 量子力学的な交換力により、隣接原子の電子スピンの向きが反対平行に配列されることがある。磁気モーメントは打ち消し合い、磁化率は小さい。これが反強磁性であり、 MnF_2 , MnO , FeO , CoO などがある。工学的用途はない。

一方、フェリ磁性は反対平行の磁気モーメントが完全に打ち消しあわず、正味の自発磁化が残る場合である。主としてフェライトと呼ばれる酸化鉄(Fe_2O_3)を含む磁性体がこれに相当し、工学的に強磁性体とともに重要である。フェリ磁性体も、キュリー温度(ネール温度ともいう)以上では常磁性となる。

以上の各磁性体において、原子の磁気モーメントがどのように配列しているかを模式的に示したのが図1である。

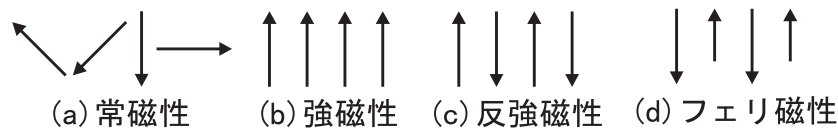


図1:各磁性体中の磁気モーメントの様子

2.3 磁化特性

工学的に重要な磁性材料である、強磁性体およびフェリ磁性体の磁化特性を説明する。

消磁した磁性材料の磁区は図2(a)のようにになっている。磁界 H を印加すると、磁界の小さいうちは磁壁が移動し、磁界方向の磁区の体積が増加する(図2(b))さらに外部磁界を強くすると、磁区の回転が起こり、磁気モーメントはすべて磁界方向を向くから、磁束密度は飽和する(図2(c))

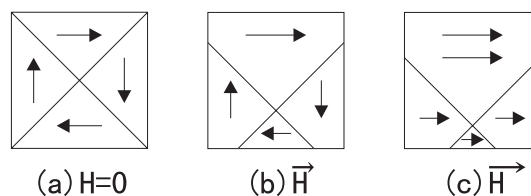


図2:外部磁界と磁区の様子

以上の結果、外部磁界 H と、試料内部の磁束密度 B の関係(磁化曲線)は図3(a)のOAのようになる。磁界が小さいうちは、磁化曲線は可逆的であり(OA')、 H を0に戻せば B も0となる。しかし、磁界が大きくと、 H を0に戻しても B は B_r の値をとり、0にはならない。 B_r を残留磁束密度という。これは、 $H=0$ にしても磁区が完全に元の状態に戻らないためである。 $-H_c$ の

逆方向磁界を加えて磁束密度は0になる。 H_c の値を保磁力という。このようにして、 $B-H$ 曲線はヒステリシスループを描く。 H_c の小さい磁性材料を軟磁性体と呼び、磁心等の応用に適し、一方 H_c の大きい硬磁性体は永久磁石や磁気記録媒体等へ利用される。

磁性材料の性能を表す比透磁率 μ_r は $B = \mu_0\mu_r H$ で与えられるが、磁化曲線が曲っているため、初透磁率 μ_i 、最大透磁率 μ_m を次のように定義して用いる。図3(b)参照。

初透磁率 原点における磁化曲線の接線。 $\mu_0\mu_i = \left. \frac{dB}{dH} \right|_{H=0}$

最大透磁率 原点を通る磁化曲線の接線の中で勾配が最大のもの。 $\mu_0\mu_m = \frac{B_2}{H_2}$

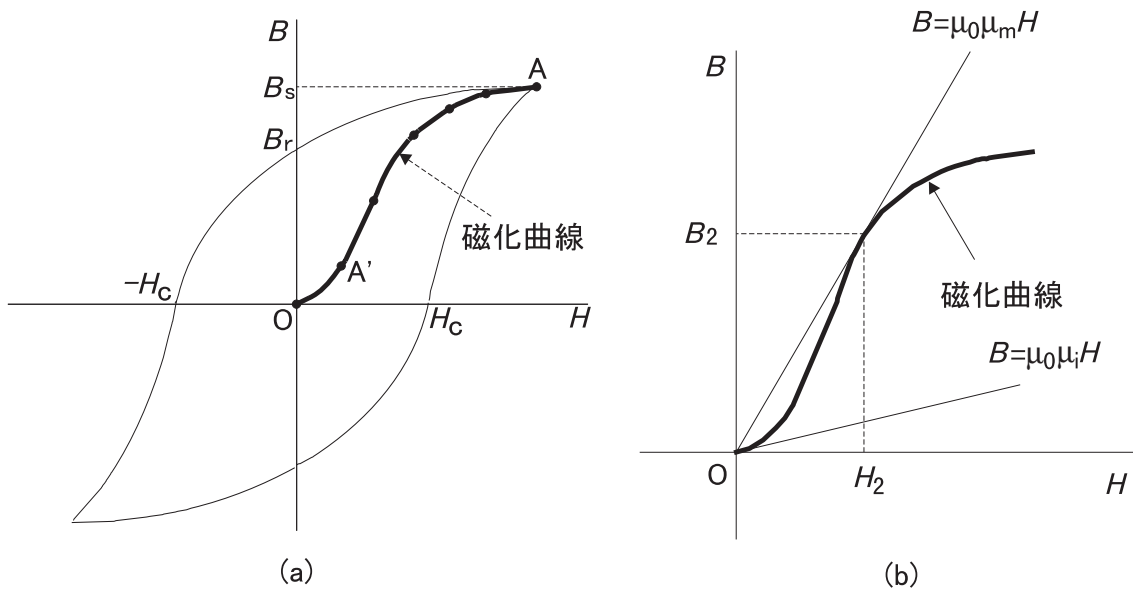


図3:(a)磁化曲線とヒステリシス曲線, (b)透磁率の定義

3 実験操作

3.1 測定回路

交流 $B-H$ 曲線の直視装置の回路図を図4に示す。励磁用電源により、環状試料に巻いた巻線数 N_1 (回)の一次コイルに I_1 (A)の電流を流すと、この電流により発生する磁界の強さ H (A/m)は、

$$H = \frac{N_1 I_1}{\ell} = \frac{N_1}{\ell} \cdot \frac{V_1}{R_1} \quad (2)$$

ℓ : 磁路長 (m)

巻線数 N_2 (回)の二次コイルに誘起される電圧 V_2 (V)は、

$$V_2 = N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

S : 試料断面積 (m²)

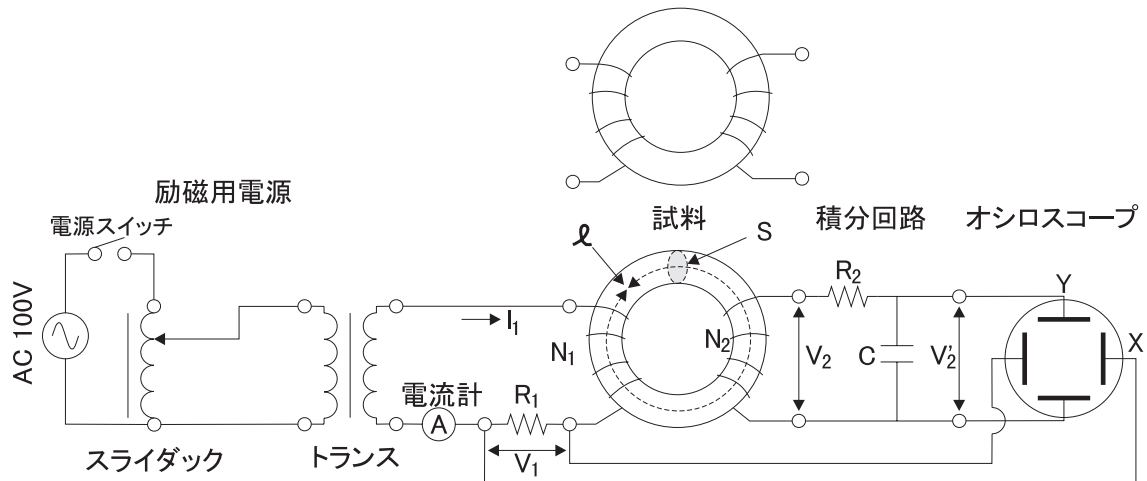


図 4: 測定回路

この電圧を C, R 積分回路に入力すると、その出力電圧 $V_2'(V)$ は、

$$V_2' = \frac{1}{R_2 C} \int V_2 dt = \frac{N_2 S}{R_2 C} \cdot B \quad (4)$$

となり、 V_2' は磁束密度に比例した量となる。したがって、(2)(4)式より、 V_1 をオシロスコープの X 軸に、 V_2' を Y 軸に入力させれば、ブラウン管上にヒステリシスループを描かせることができる。

表 1 に回路定数と試料の寸法、巻線数を記す。

表 1 : 諸定数

回路定数	$R_1 = 10\Omega (10W) R_2 = 100k\Omega C = 2\mu F$			
材料	l (m)	S (m ²)	N_1 (回)	N_2 (回)
ケイ素鋼板	0.13	2.5×10^{-4}	100	100
Mn-Zn フェライト	0.12	1.5×10^{-4}	100	100
パーマロイ	0.17	1.0×10^{-4}	100	100
電磁軟鉄	0.13	1.5×10^{-4}	100	100

3.2 ヒステリシスループの測定

1. 電源スイッチが OFF になっていること、およびスライダックの出力が 0 V になっていることを確認する。
2. けい素鋼板、フェライト、パーマロイ、電磁軟鉄の順序で測定するので、最初にけい素鋼板の測定ができるようにジャックを切り替える。
3. オシロスコープの電源、測定装置の電源を ON にする。

4. リサージュが観察できるようにオシロスコープをセットし、ヒステリシスループが観察できるように、オシロスコープの電圧レンジを X 軸: $0.05V/cm-2V/cm$ Y 軸: $0.02V/cm$ に設定する。試料により最適なレンジを選ばなければならない。オシロスコープの電圧レンジを切り替えると原点が移動する場合があるので、適宜調整すること。
5. スライダックの電圧を徐々に上げて試料一次コイルの電流を増加し、オシロスコープにより磁束密度が飽和することを確認する。このとき一次コイルに流す電流は 1A 以下とする(電磁軟鉄はこの電流範囲で飽和しないが、コイルが焼損するおそれがあるので 1A 以上の電流を流してはいけない)。
6. 測定の前に試料を消磁しておかなければならない。そのためには、いったん $B-H$ 曲線が飽和するまで一次コイルに電流を流したあと、スライダックの電圧を徐々に減少させてゼロにする。これにより磁性材料を残留磁束密度ゼロの初期状態にすることができる。これを消磁という。
7. ヒステリシスループをオシロスコープに描かせグラフ用紙に記録する ($B-H$ への変換は後で計算するので、単位は V でよい)。このときの電流計の指示値も忘れずに記録する。なおループを描いていない部分 (H が非常に大きな部分) は記録しなくてもよい。
8. スライダックの電圧を 0V にし、測定装置の電源を OFF にする。
9. 次の試料が測定できるようにジャックを切り替え、上記の手順により 4 つの試料すべてを測定する。

3.3 磁化曲線の測定

1. 各試料について、消磁したあと、一次電流 I_1 の値を変えて、ヒステリシスループを描かせ、第一象限における頂点の値を図 5 のようにグラフ用紙上にプロットせよ。これにより磁化曲線が求められる。オシロスコープの感度を切り替えて、原点近くの変化を詳しく観察すること(感度を切り替えることにより 0 点が移動する場合があるので適宜調整する)。縦軸、横軸の単位は V である。

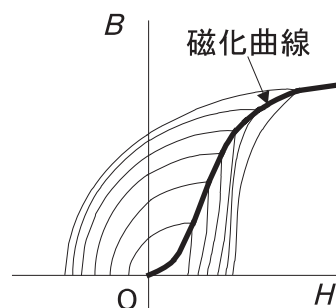


図 5 磁化曲線の求めかた

4 報告に含まれるべき内容

報告書には、以下の内容が含まれていなければならない。

1. 実験で求めた各磁性材料のヒステリシス曲線を、(2), (4) 式により横軸を A/m、縦軸を T の単位でグラフ用紙上にプロットせよ。4%ケイ素鋼の測定例を図 6(a) に示してある。
2. 各試料の飽和磁束密度 B_s 、保磁力 H_c を求め表にして示せ。
3. 各試料の磁化曲線を横軸を A/m、縦軸を T の単位でプロットしたグラフを示せ。なお、4%ケイ素鋼板の測定例を図 6(b) に示した。
4. 各材料の初透磁率 μ_i 、最大透磁率 μ_m を、図 3(b) を参考にして求め、表にして示せ。
5. 実験結果に関する考察（次項参照）

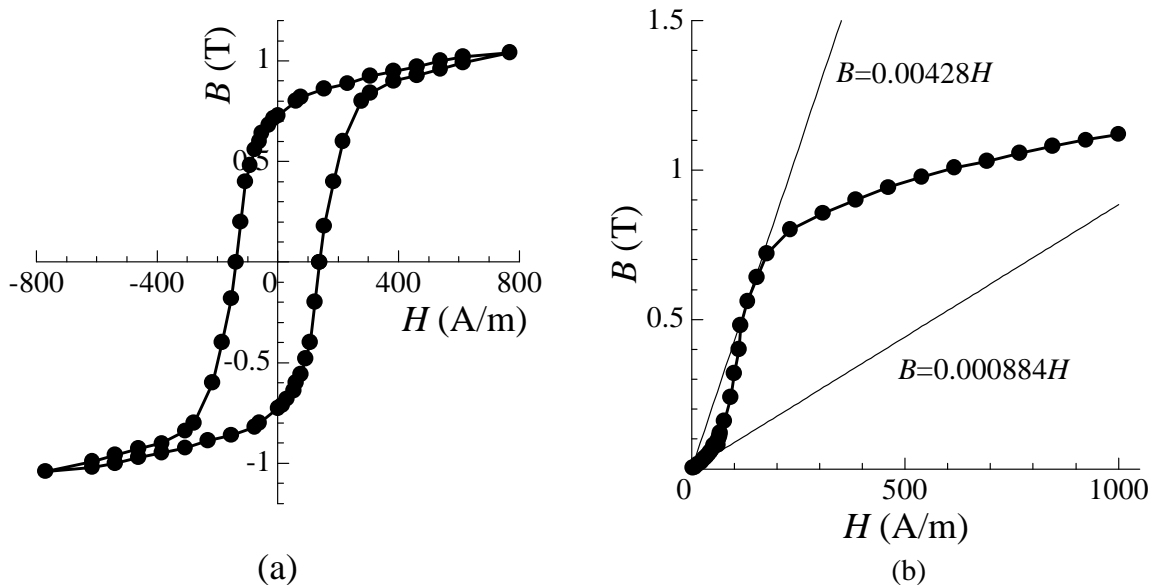


図 6: (a) ヒステリシスループの測定例 (けい素鋼板), (b) 磁化曲線の測定例

5 考察すべき事柄

1. ヒステリシスループを測定する際、一次側コイルに流れる電流値は、電流計で読み取った値と、オシロスコープで読み取った抵抗 R_1 両端の電圧を R_1 で割って求めた電流値とは値が異なる。この理由を述べよ。
2. 実験で求めた各磁性材料の最大磁束密度 B_s 、保磁力 H_c 、初透磁率 μ_i 、最大透磁率 μ_m を、参考文献に記載された値と比較せよ。
3. 磁性材料の鉄損とは何か。簡潔に記せ。

4. 実験で用いた各磁性材料の電気抵抗率を参考文献により調べ、これと実験で求めた各材料の B_s , H_c , μ_i , μ_m の値とから、各磁性材料に適する用途を述べよ。
5. 実験で使用した C , R 積分回路において時定数 $\tau = R_2 C$ の値は、入力信号電流の繰り返し周期より十分大きくなければならない。その理由を述べよ。

6 参考文献

1. 磁性材料に関しては、例えば、鈴木正義、高橋晴雄、松田忠重共著「電気材料」、コロナ社、(1990), p128-156 。
2. 磁性体のわかりやすい解説として、佐藤勝昭、越田信義共著「応用電子物性工学」、テレビジョン学会編、コロナ社、(1989), p1-60 。
3. 磁気計測に関しては、電気学会大学講座「電気計測基礎」、オーム社、(1987), p127-138 。
4. 積分回路に関しては、小郷 寛、佐藤達男共著「電子回路」、電気学会、(1990), p191-193 。