

1 実験条件

実験日時 2010（平成 22）年 12 月 16 日木曜日 午後 1 時～午後 4 時

天気 晴

気圧・気温・湿度 省略

2 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。

3 実験の原理

3.1 磁束計による磁化特性の測定の原理

一様に励磁コイルを巻いた環状試料を使って、反転法により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 つを用い、それぞれのコイルの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 $l[m]$ から算出でき、

$$H = \frac{NI}{l} \quad (1)$$

と表される。 H を変化させたときの試料中の磁束変化 $\Delta\phi$ は、磁束計の指すサーチコイル（巻数： n ）の鎖交磁束数変化 $n\Delta\phi$ として検出でき、これより磁束密度変化 ΔB が後述の式 9 によって与えられる。

3.1.1 磁束計（Flux meter）の動作

磁束計は可動コイル型ガルバノメーターの一種である。その構造上、普通の衝撃検流計（Ballistic galvanometer）と異なるのは、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点である。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。磁束計の構造を図 1 に示す。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 によって支えられているが、1 本の絹糸でつらわれているのでほとんど制御力は働かない。可動線輪はこの回路の場合約 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 ϕ 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

$$e = n \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

で与えられる。

このとき、全回路の抵抗を R 、インダクタンスを L 、磁束計の可動コイルを流れる電流を i 、可動コイル（図 1）の回転角を θ 、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

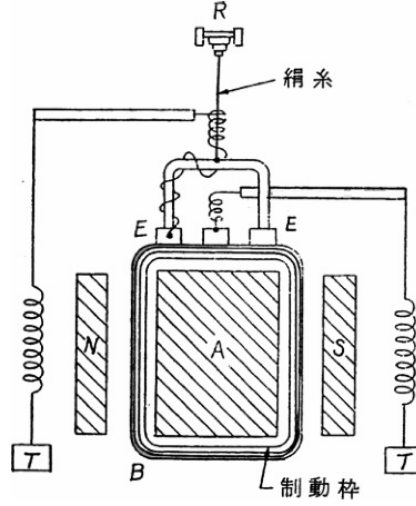


図1 磁束計の原理図

表される。

$$e = n \frac{d\Phi}{dt} = G \frac{d\theta}{dt} + L \frac{di}{dt} + Ri \quad (3)$$

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 τ とするとき、次式で与えられる。

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + r \frac{d\theta}{dt} + \tau\theta = Gi \quad (4)$$

ただし、磁束計では前述のとおり r が小さいので、 $r\theta$ の項は無視することができる。ここで、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 $\frac{d\theta}{dt}$ 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次式を得る。

$$d\Delta\theta = G\Delta\theta + RQ \quad (5)$$

$$r\Delta\theta = GQ \quad (6)$$

ただし $\Delta\theta$ は磁束変化の前後の指示角の差である。

したがって、

$$n\Delta\phi = \left(G + \frac{rR}{G} \right) \Delta\theta \quad (7)$$

さらに $r \ll \frac{G^2}{R}$ であれば

$$n\Delta\phi = G\Delta\theta \quad (8)$$

となり、サーチコイルの抵抗が小さい場合（普通 20Ω 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）で目盛られており、サーチコイルの鎖交磁束数の変化 $\Delta\theta (= n\Delta\phi)$ を読み取ることができる。

なお、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。

3.1.2 磁束密度の計算法

磁束計は、式 8 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 $\Delta\theta (= n\Delta\theta)$ を指示し、従って、磁束密度 B の変化量 ΔB 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、 $\Delta\phi[\text{Wb}]$ と試料の断面積 $A[\text{m}^2]$ と n から $\Delta B[\text{T}]$ を求めることができ、

$$\Delta B = \frac{\Delta\phi}{nA} \quad (9)$$

となり、

$$B_2 = B_1 + \Delta B \quad (10)$$

のように、変化の前後の値、すなわち B の絶対値を求めることができる。

4 使用器具及び装置

- 磁束計
- 可変直流電源
- 抵抗・スイッチ付きボード
- 標準相互誘導器
- スライダック
- 交流電流計
- 配線
- ホットプレート
- コイル 3 種（大・小・シンクバット入り。諸条件は表 1 の通り）

表 1 コイルの諸条件

	コイル大	コイル小	コイル（シンクバット入り）
1 次側巻き数	75	160	75
2 次側巻き数	45	100	75
内半径 [m]	0.029	0.026	0.025
外半径 [m]	0.059	0.038	0.040
コイル高さ [m]	0.02	0.028	0.0012

5 実験結果

実験 I-1：磁束計の較正 磁化特性の測定に先立ち、磁束計の較正を行なった。較正には 1 次巻線と 2 次巻線間の相互インダクタンスが $M=10[\text{mH}]$ の標準相互誘導器（1 次巻線抵抗：約 20Ω ）を用いた。図 2 の通り結線し、1 次巻線に電流 $I[\text{A}]$ を流し、スイッチ S1 を反対側に切り替えて、その時の磁束計の触れ幅 $2\Delta\phi$ を求めた（実験値）。さらに、一次電流に対して計算で得られる 2 次巻線の鎖交磁束数 ϕ （理論

表 2 磁束計の校正結果

一次電流 I[A]	磁束 $2 \Delta \phi$ [Wb](実験値)	$\Delta \phi$ [Wb](実験値)	ϕ [Wb](理論値)
0.10	0.00210	0.00105	0.0010
0.20	0.0040	0.0020	0.0020
0.30	0.0060	0.0030	0.0030
0.40	0.0082	0.0041	0.0040

値) を式 11 で求めた。これらをまとめて表 13 に示す。以後の実験ではこのデータを元に磁束を校正した。

$$\phi = MI \quad (11)$$

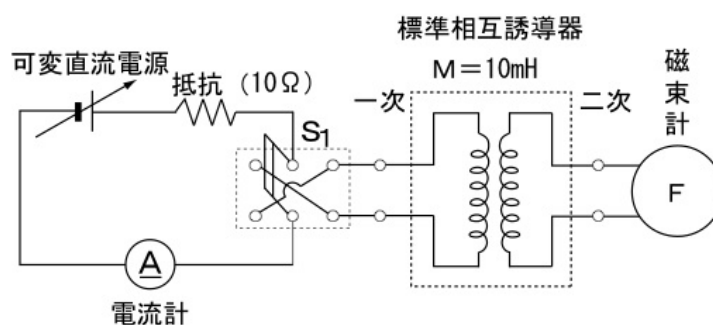


図 2 磁束計の校正結線図

実験 I-2：コイルの消磁 実験に用いるコイルはあらかじめ消磁を行った。まず図 3 のように結線して交流電源に接続した。次にスライダックを最低位置にしたのを確認してからスイッチを入れ、2[A] 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 0 にした。この目的は磁性材料の測定において試料の残留磁束を消すためである。

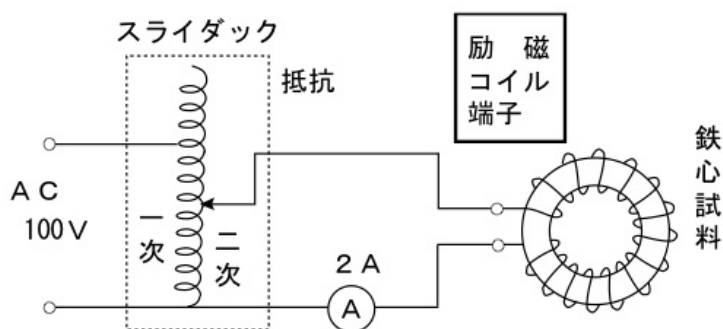


図 3 消磁の方法

実験 II：正規磁化曲線の測定 はじめに測定回路を図 4 に示すように結線した。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いだ。S2 のスイッチは α 側に入れた。次に電源のダイヤルを回して 1 次電流を増加させ、各電流において循環磁化状態にするため S1 を素早く 2・3 回切り替えて極性を変化させ、さらに S1 を 1 往復切り替えたときの磁束計の振れ幅 $2\Delta\phi$ を記録した。この過程を大小 2 種類のコイルについて行った。実験結果を表 3・4 に示す。実験中はデータが図 5 に示す正規磁化曲線を描くことを確認しながら計測を行った。

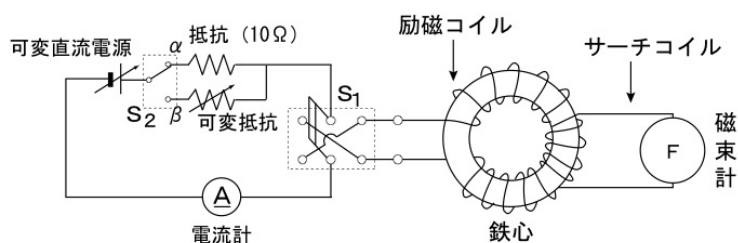


図 4 磁化特性測定回路

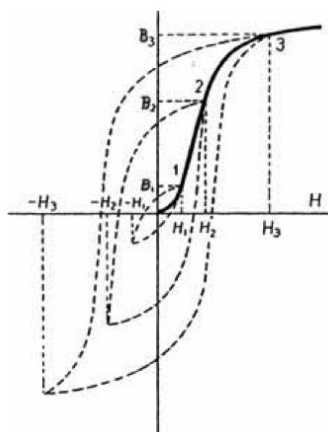


図 5 正規磁化曲線の測定

実験 III：ヒステリシスループの測定 回路は実験 II のままにし、コイルは小さい方を取り付けた。当実験で用いる反転法では、図 6 に示すヒステリシスループの先端である点 a、点 g を測定の基点として、回路につなぐ抵抗を変化させることで 1 次電流を増減させ、その前後の磁束計の振れ幅を計測した。これを磁束に変換し、式 10 を用いて基点からどれだけ磁束が変化したかを求めた。図 6 の右上から左下にかけての曲線を描くには次の手順を行った。まず S2 を α から β 側に切り替えて、その時の磁束計の触れを測った (b 点)。次に S1 を中立にして 1 次電流を 0 にしたときの磁束計の振れ幅を測った (c 点)。そして S1 を切り替えて極性を判定させたときの磁束計の振れ幅を測った (d～f 点)。最後に S2 を β から α に戻したときの振れ幅を測った (g 点)。同様の手順で下側のループも求めた。結果を表 5～11 に示す。

実験 IV：磁束密度の温度特性 磁束密度の温度測定では、図 7 の様に配線した。鉄心部分はシンクバットに入れられた鉄心と入れ替え、ホットプレート上に置いて接続した。実験手順は、室温において鉄心コイ

表 3 1 次電流と磁束変化の関係 (大コイル)

一次電流 I[A]	磁束 $\Delta \phi$ [Wb]	磁束 $\Delta \phi$ [Wb](補正済み)	印加磁界 [A/m]	磁束密度 [T]
0	0	0.0	0.00	1.03×10^{-4}
0.02	0.00062	0.000308	5.43	0.0114
0.04	0.00120	0.000593	10.9	0.0220
0.06	0.00235	0.00116	16.3	0.0429
0.08	0.0044	0.00217	21.7	0.0803
0.10	0.0076	0.00374	27.1	0.139
0.12	0.0115	0.00566	32.6	0.210
0.14	0.0160	0.00788	38.0	0.292
0.16	0.0195	0.00960	43.4	0.355
0.18	0.0240	0.0118	48.8	0.437
0.20	0.027	0.0133	54.3	0.492
0.22	0.03	0.0148	59.7	0.547
0.24	0.033	0.0162	65.1	0.601
0.26	0.035	0.0172	70.5	0.638
0.28	0.038	0.0187	76.0	0.693
0.30	0.040	0.0197	81.4	0.729
0.32	0.041	0.0202	86.8	0.747
0.34	0.0415	0.0204	92.2	0.756
0.36	0.042	0.0207	97.7	0.766
0.38	0.043	0.0212	103	0.784
0.42	0.048	0.0236	114	0.875
0.46	0.050	0.0246	125	0.911
0.50	0.051	0.0251	136	0.930
0.54	0.052	0.0256	146	0.948
0.58	0.054	0.0266	157	0.984
0.62	0.055	0.0271	168	1.00
0.66	0.056	0.0276	179	1.02
0.70	0.057	0.0280	190	1.04
0.78	0.058	0.0285	212	1.06
0.86	0.059	0.0290	233	1.08
0.94	0.061	0.0300	255	1.11
1.02	0.062	0.0305	277	1.13
1.10	0.062	0.0305	298	1.13
1.18	0.063	0.0310	320	1.15
1.26	0.064	0.0315	342	1.17
1.42	0.064	0.0315	385	1.17
1.54	0.065	0.0320	418	1.18

表 4 1 次電流と磁束変化の関係 (小コイル)

一次電流 I[A]	磁束 $\Delta \phi$ [Wb]	磁束 $\Delta \phi$ [Wb](補正済み)	印加磁界 [A/m]	磁束密度 [T]
0	0	0.0	0.00	8.30×10^{-5}
0.01	0.0048	0.00236	7.96	0.0704
0.02	0.040	0.0197	15.9	0.586
0.03	0.054	0.0266	23.9	0.791
0.04	0.064	0.0315	31.8	0.937
0.05	0.070	0.0344	39.8	1.03
0.06	0.074	0.0364	47.7	1.08
0.07	0.077	0.0379	55.7	1.13
0.08	0.080	0.0394	63.7	1.17
0.09	0.082	0.0404	71.6	1.20
0.10	0.084	0.0413	79.6	1.23
0.12	0.086	0.0423	95.5	1.26
0.14	0.088	0.0433	111	1.29
0.16	0.089	0.0438	127	1.30
0.20	0.092	0.0453	159	1.35
0.24	0.094	0.0463	191	1.38
0.28	0.095	0.0467	223	1.39
0.32	0.096	0.0472	255	1.41
0.40	0.097	0.0477	318	1.42
0.50	0.099	0.0487	398	1.45
0.60	0.102	0.0502	477	1.49
0.80	0.102	0.0502	637	1.49

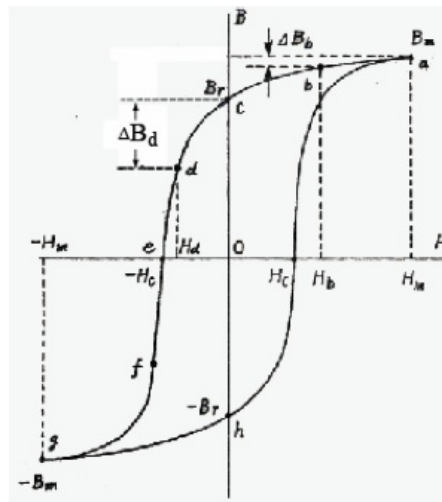


図 6 ヒステリシスループの測定

表 5 磁束変化 (抵抗 20Ω)

抵抗 20 Ω	電流 I[A]	振れ幅 $\Delta \phi$ [Wb]	$\Delta \phi$ [Wb] (補正済)	磁界 H[A/m]	振れ幅 ΔB [T]	磁束密度 B[T]
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	0.46	0.0036	0.00355	366.1	0.106	1.39
S1 中立	0	0.0064	0.00630	0.0	0.188	1.20
S1 極性反転	-0.46	0.095	0.09349	-366.1	2.783	-1.58
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	-0.80	0.0075	0.00738	-636.6	0.220	-1.80
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	-0.46	0.0055	0.00542	-366.1	0.161	-1.33
S1 中立	0	0.0015	0.00148	0.0	0.044	-1.29
S1 極性反転	0.46	0.090	0.08857	366.1	2.636	1.35
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	0.80	0.0013	0.00128	636.6	0.038	1.39

表 6 磁束変化 (抵抗 30Ω)

抵抗 30 Ω	電流 I[A]	振れ幅 $\Delta \phi$ [Wb]	$\Delta \phi$ [Wb] (補正済)	磁界 H[A/m]	振れ幅 ΔB [T]	磁束密度 B[T]
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	0.31	0.0045	0.00443	246.7	0.132	1.36
S1 中立	0	0.0055	0.00542	0.0	0.161	1.20
S1 極性反転	-0.31	0.090	0.08857	-246.7	2.636	-1.44
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	-0.80	0.0075	0.00738	-636.6	0.220	-1.66
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	-0.31	0.0040	0.00394	-246.7	0.117	-1.38
S1 中立	0	0.0015	0.00148	0.0	0.044	-1.33
S1 極性反転	0.31	0.090	0.08857	246.7	2.636	1.30
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	0.80	0.005	0.00492	636.6	0.147	1.45

表 7 磁束変化 (抵抗 40Ω)

抵抗 40 Ω	電流 I[A]	振れ幅 $\Delta \phi$ [Wb]	$\Delta \phi$ [Wb] (補正済)	磁界 H[A/m]	振れ幅 ΔB [T]	磁束密度 B[T]
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	0.23	0.0050	0.00492	183.0	0.147	1.35
S1 中立	0	0.0047	0.00463	0.0	0.138	1.21
S1 極性反転	-0.23	0.090	0.08857	-183.0	2.636	-1.43
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	-0.80	0.0085	0.00837	-636.6	0.249	-1.68
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	-0.23	0.0037	0.00364	-183.0	0.108	-1.39
S1 中立	0	0.0013	0.00128	0.0	0.038	-1.35
S1 極性反転	0.23	0.088	0.08660	183.0	2.577	1.23
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	0.80	0.0040	0.00394	636.6	0.117	1.35

表 8 磁束変化 (抵抗 50Ω)

抵抗 50 Ω	電流 I[A]	振れ幅 $\Delta \phi$ [Wb]	$\Delta \phi$ [Wb] (補正済)	磁界 H[A/m]	振れ幅 ΔB [T]	磁束密度 B[T]
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	0.18	0.0048	0.00473	143.2	0.141	1.35
S1 中立	0	0.0040	0.00394	0.0	0.117	1.24
S1 極性反転	-0.18	0.088	0.08660	-143.2	2.577	-1.34
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	-0.80	0.0090	0.00886	-636.6	0.264	-1.61
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	-0.18	0.0025	0.00246	-143.2	0.073	-1.42
S1 中立	0	0.0015	0.00148	0.0	0.044	-1.38
S1 極性反転	0.18	0.090	0.08857	143.2	2.636	1.26
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	0.80	0.0015	0.00148	636.6	0.044	1.30

表 9 磁束変化 (抵抗 60Ω)

抵抗 60 Ω	電流 I[A]	振れ幅 $\Delta \phi$ [Wb]	$\Delta \phi$ [Wb] (補正済)	磁界 H[A/m]	振れ幅 ΔB [T]	磁束密度 B[T]
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	0.15	0.0055	0.00542	119.4	0.161	1.33
S1 中立	0	0.0036	0.00355	0.0	0.106	1.23
S1 極性反転	-0.15	0.087	0.08562	-119.4	2.548	-1.32
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	-0.80	0.0105	0.01034	-636.6	0.308	-1.63
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	-0.15	0.002	0.00197	-119.4	0.059	-1.44
S1 中立	0	0.001	0.00099	0.0	0.029	-1.41
S1 極性反転	0.15	0.085	0.08365	119.4	2.490	1.08
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	0.80	0.0025	0.00246	636.6	0.073	1.16

表 10 磁束変化 (抵抗 70Ω)

抵抗 70 Ω	電流 I[A]	振れ幅 $\Delta \phi$ [Wb]	$\Delta \phi$ [Wb] (補正済)	磁界 H[A/m]	振れ幅 ΔB [T]	磁束密度 B[T]
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	0.13	0.0057	0.00561	103.5	0.167	1.33
S1 中立	0	0.0032	0.00315	0.0	0.094	1.23
S1 極性反転	-0.13	0.087	0.08562	-103.5	2.548	-1.32
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	-0.80	0.0104	0.01024	-636.6	0.305	-1.62
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	-0.13	0.015	0.01476	-103.5	0.439	-1.05
S1 中立	0	0.0014	0.00138	0.0	0.041	-1.01
S1 極性反転	0.13	0.085	0.08365	103.5	2.490	1.48
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	0.80	0.001	0.00099	636.6	0.029	1.51

表 11 磁束変化 (抵抗 80Ω)

抵抗 80 Ω	電流 I[A]	振れ幅 $\Delta \phi$ [Wb]	$\Delta \phi$ [Wb] (補正済)	磁界 H[A/m]	振れ幅 ΔB [T]	磁束密度 B[T]
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	0.11	0.0062	0.00610	87.5	0.182	1.31
S1 中立	0	0.0028	0.00276	0.0	0.082	1.23
S1 極性反転	-0.11	0.08	0.07873	-87.5	2.343	-1.11
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	-0.80	0.00115	0.00113	-636.6	0.034	-1.15
S2 $\alpha \rightarrow \beta$	-0.11	0.009	0.00886	-87.5	0.264	-1.23
S1 中立	0	0.001	0.00099	0.0	0.029	-1.20
S1 極性反転	0.11	0.085	0.08365	87.5	2.490	1.29
S2 $\beta \rightarrow \alpha$	0.80	0.0015	0.00148	636.6	0.044	1.33

ルに電流が流れるように S1 を操作し、 $I = 0.5[\text{A}]$ が流れるよう電源を調整しておいて S1 を数回反転した。鉄心コイルに流れる電流が逆になるようにスイッチを切り替えたときの磁束計の振れ幅 $2\Delta\phi$ を読み取った。次にホットプレートの温度を上げ、同様にして磁束計の振れ幅 $2\Delta\phi$ を計測した。鉄心の温度 T は室温から 80℃までの 5℃刻みで記録した。結果を表 12 に示す。

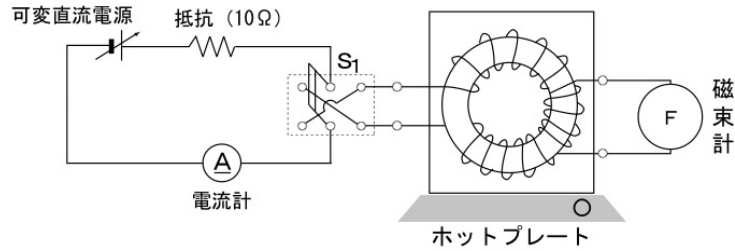


図 7 温度特性測定回路

6 検討

1. CGS 電磁単位系と MKS 単位系の換算は表 13 のとおりである。
2. 磁束計の較正について、表 2 をグラフにしたものを図 8 に示す。線形近似により、理論値と実験値の間に

$$\phi_{\text{理論値}} = 0.984 \times \phi_{\text{実験値}} + 2.7875 \times 10^{-6} \quad (12)$$

の関係が得られた。よって、以後の検討では、実験で得られた値を $\phi_{\text{実験値}}$ に代入し、 $\phi_{\text{理論値}}$ に修正してからグラフを作成した。

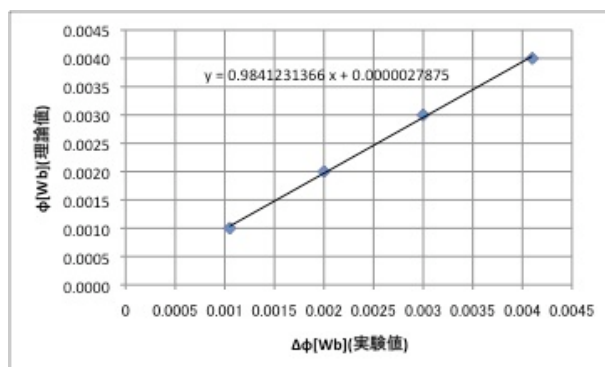
3. まず正規磁化曲線のグラフを表 3 と表 4 の結果から求める。計測した 1 次電流 $I[\text{A}]$ を用いて式 1 より印加磁界を求めた。また磁束計の振れ幅を補正し、式 9 を使って磁束密度を求めた。そして磁束密度を縦軸、印加磁界を横軸にとってプロットしたものが図 9・10 である。どちらのコイルも印加磁界が増加するに連れて磁束密度が増加している。その増加の仕方は印加磁界が小さい時のほうが顕著で、指数関

表 12 磁束密度の温度特性

温度 T[°C]	磁束 $\Delta \phi$ [Wb]	磁束 $\Delta \phi$ [Wb](補正済み)	磁束密度 B[T]
20	0.018	0.00886	6.56
25	0.018	0.00886	6.56
30	0.017	0.00837	6.20
35	0.016	0.00788	5.83
40	0.016	0.00788	5.83
45	0.016	0.00788	5.83
50	0.015	0.00738	5.47
55	0.014	0.00689	5.10
60	0.0125	0.00615	4.56
65	0.0105	0.00517	3.83
70	0.007	0.00345	2.55
75	0.005	0.00246	1.82
80	0.003	0.00148	1.10

表 13 単位の換算

物理量	CGS 電磁単位系	MKS 単位系
磁界 H	1[Oersted]	$\frac{10^3}{4\pi}$ [A/m]
磁束 ϕ	1[Maxwel]	10^{-8} [Wb]
磁束密度 B	1[Gauss]	10^{-4} [Wb/m ²]= 10^{-4} [T]
起磁力 V _m	1[Gilbert]	$\frac{10}{4\pi}$ [AT]

図 8 $\Delta \phi$ の理論値—実験値グラフ

数的な増加を見せた後、徐々に緩やかになり、最終的に飽和している。

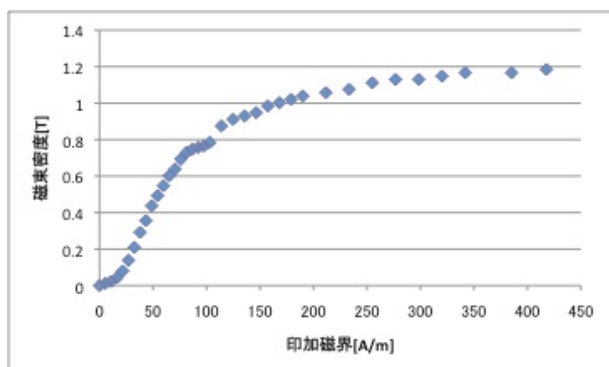


図 9 正規磁化曲線（大コイル）

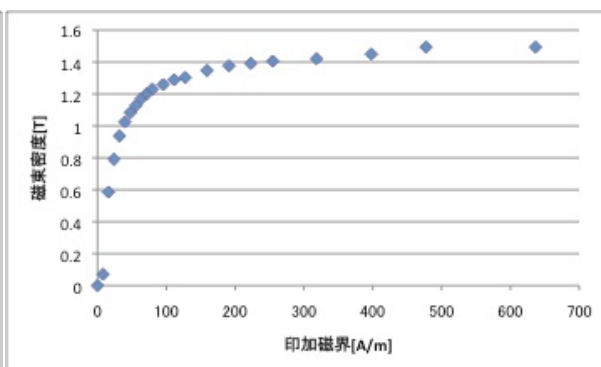


図 10 正規磁化曲線（小コイル）

次にヒステリシスループを作成した。表 5～11 から式 1・9 を用いて印加磁界と磁束密度を求め、すべての抵抗の値を集計し、各印加磁界に対する磁束密度をプロットした（ただし $H=0$ の点のみ各抵抗値の値の平均値をとった）。結果を図 11 に示す。プロットできる点がない箇所は結果を予想してループを描いた。理論上ループは対称だが、実験で得られたカーブは非対称の図形となった。

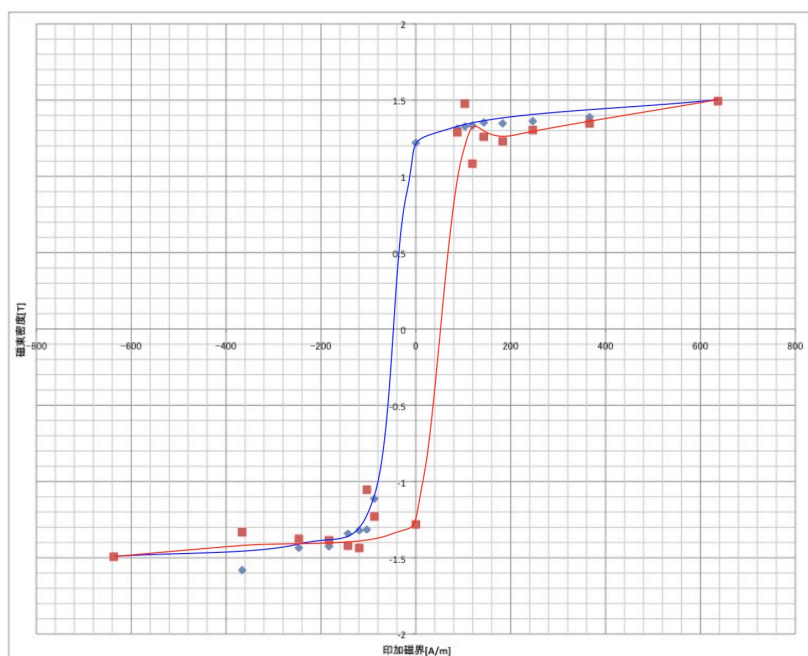


図 11 小コイルのヒステリシスループ

最後に磁束密度の温度特性を図 12 に示す。表 12 の磁束を補正し、 $A = (0.040 - 0.025) \times 0.0012 = 1.8 \times 10^{-5} [m^2]$ を使い、式 9 で磁束密度に換算しプロットした。この結果より、温度が上昇するとコイルの磁束密度が低下することが分かった。減少の仕方は最初は緩やかで、温度が高くなるに連れて急激に低下し、 $80^\circ C$ では磁束密度が $20^\circ C$ のほぼ $1/7$ になった。磁束密度の値は他の班で得られたデータ

よりもオーダーが1つ大きくなっており、記録ミスか磁束計のスケールの読み違いの可能性が考えられる。

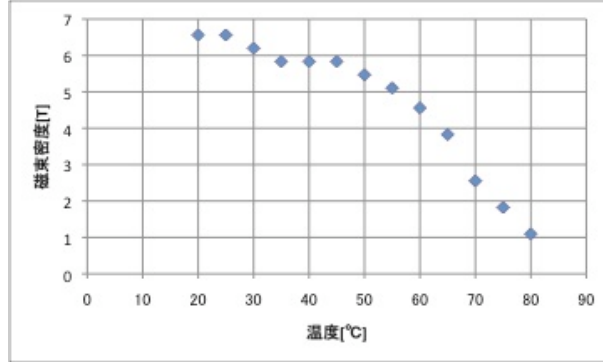


図 12 磁束密度の温度特性（誤り）

4. 正規磁化曲線の飽和磁束密度は、表 3・4 より大コイルでは 1.2[H] ($I=1.54[A]$)、小コイルでは 1.5[H] ($I=0.60[A]$) であった。最大比透磁率 μ_r は

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (13)$$

式で表される。ただし $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$ ：真空の透磁率。つまり図 9・10 の正規磁化曲線の傾きの最大値が μ_r になる。これを計算すると、大コイル・小コイルでそれぞれ 12027、51548 となった。すなわち、小コイルのほうが飽和磁束密度と最大比透磁率が大きくなることが分かった。

5. コイルによって飽和磁束密度と最大比透磁率が異なる理由にはコイルの大きさが関係すると考えられる。大小のコイルは表 1 のような寸法で作られており、小コイルは内径・外径が小さい。すると、大小のコイルを突き抜ける磁束が同じ時、磁束の密度は突き抜ける面積が小さい小コイルのほうが大きくなると考えられる。よって B と H の間の比例係数である μ_r も小コイルのほうが大きくなり、飽和磁束密度も増加すると推測される。
6. 残留磁束密度 B_r は $H=0$ の時の磁束密度の値、保持力 H_c は $B=0$ の時の印加磁界の値を読めばよいので、図 11 より、 $B_r=1.25[T]$ （上下点の平均をとった）、 $H_c=50[A/m]$ （左右点の平均をとった）となった。

ヒステリシス損 P_h はヒステリシスループに囲まれる面積 S にコイルの体積 V をかけて求められる。 S は図 11 のループに囲まれるます目の数を数えることで求めることができ、

$$S = 73.5 \text{ マス} \times 4 [Wb \cdot A/m^3] \text{ (1 マスあたり)} = 294 [J/m^3] \quad (14)$$

となる。小コイルの体積 V は

$$V = (0.038^2 - 0.026^2) \times 0.028 \times \pi = 6.76 \times 10^{-5} [m^3] \quad (15)$$

したがって、求めるヒステリシス損 P_h は

$$P_h = S \times V = 1.99 \times 10^{-2} [J] \quad (16)$$

となった。

7 結論

1. 磁束計を用いて磁束変化を測ることができ、これを元にして磁束密度を計算し、ヒステリシスループを求めることができる。
2. 正規磁化曲線は一般的に磁界が大きくなるに連れて磁束密度も増加するが、ある程度まで上昇すると飽和する。
3. 磁界を一定にしたとき、磁束密度は温度が高くなるに連れて減少する。
4. コイルの大きさが飽和磁束密度と最大比透磁率などの諸特性を決める。

8 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の6人と、丁寧に指導して下さいった先生方・TAの方々に感謝申し上げたい。

9 参考文献

- 実験テキスト「A6. 磁化特性の測定」
- 「大阪大学物理学実験 2008」大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第2版第1刷 第2編
- 「電子物性入門」浜口智尋著 丸善株式会社 第18刷
- 「強磁性体の物理」近角聡信著 裳華房 第6版
- 「 $\text{\LaTeX 2}_{\epsilon}$ 美文書作成入門 改訂第4版」奥村晴彦著 技術評論社 第4版第6刷

以上