

第3学年 電気電子工学実験実習報告書

4

強磁性体のヒステリシス現象

実験日 令和4年5月12日(木)
令和4年5月17日(木)

班	学生番号	氏名
4	3333	宮崎 永

共同実験者名

野島 奏一朗 吉野 曹生 谷下 文紀

提出日			備考	評価
予定日 /				
提出日				

1 目的

本実験では

- トランス鉄心に使用される強磁性体の B-H 特性測定を通し磁気回路と磁性材料について理解する。
- 変圧器鉄心の交流化特性を測定し、測定原理と鉄心のヒステリシス損算出法を理解する。
- 変圧器における励磁電流、電力、位相差の変化を観測する。

ことを目的とする。

2 原理

2.1 磁気回路

図 1 に示すように断面積 $S [\text{m}^2]$ 、平均磁路長 $L [\text{m}]$ の鉄心に巻数 $N_1 [\text{Turn}]$ のコイルを巻き、これに $I [\text{A}]$ の電流を流すと、起磁力 $N_1 \cdot I [\text{A} \cdot \text{Turn}]$ を生じる。この起磁力により

$$\phi = \frac{N_1 \cdot I}{R_m} \quad (1)$$

の磁束 $\phi [\text{Wb}]$ を生じる。ここで R_m は以下に示す磁気抵抗である。

$$R_m = \frac{L}{\mu_0 \mu_s S} \quad (2)$$

ただし、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ F/m}$ は真空の透磁率であり、 μ_s は鉄心の比透磁率である。ここで、磁路 1 m あたりの起磁力を磁化力 $H [\text{A/m}]$ という。磁化力 H は

$$H = \frac{N_1 \cdot I}{L} \quad (3)$$

である。また磁路断面積 1 m^2 あたりの磁束を、磁束密度 $B [\text{Wb/m}^2]$ という。

$$B = \frac{\phi}{S} \quad (4)$$

ここで、 $S [\text{m}^2]$ は磁路断面積を示す。

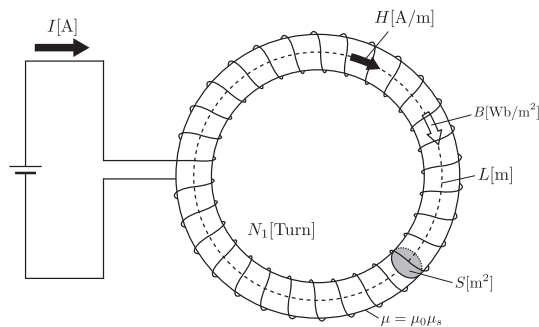


図 1: 磁気回路

鉄心の磁化力 H と磁束密度 B との関係を示す曲線を B-H 曲線といい、一般に図 2(a) のような飽和特性になる。また磁化力 H を正負の方向に増減すると、図 2(b) の様なヒステリシス曲線になる。

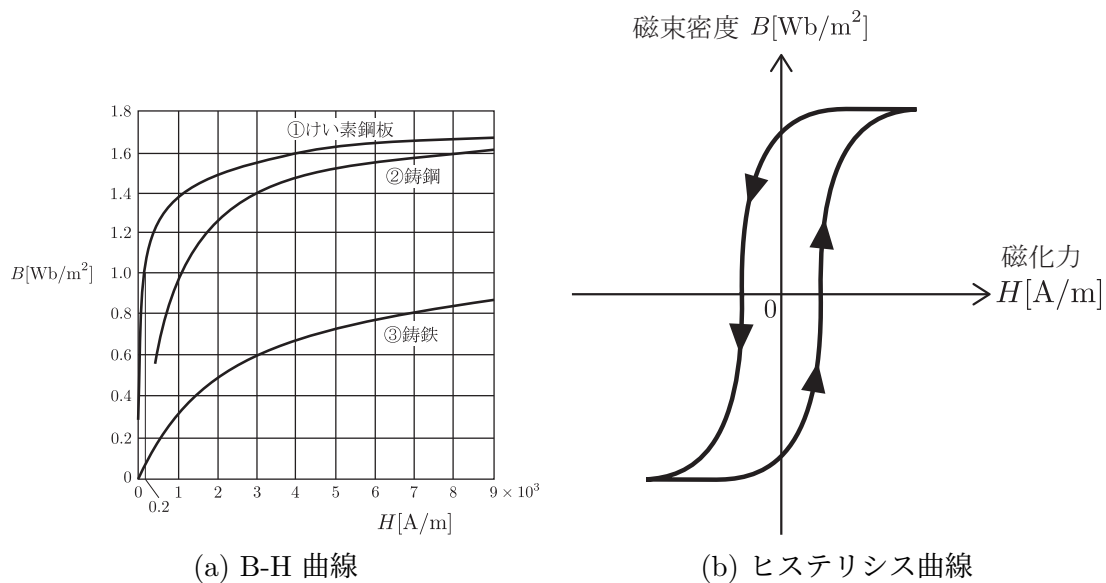


図 2: B-H 曲線とヒステリシス曲線

2.2 交流磁化特性

図 3 の変圧器のように、鉄心に巻かれた巻数 N_1 のコイルに交流電圧 V_1 を加えると、鉄心中に交番磁束 ϕ を作るための電流（励磁電流） i_0 が流れる。このとき磁束密度 B と磁化力 H との間にはヒステリシス特性があるため、励磁電流は図 4 のようにひずみを生ずる。この現象を逆に利用して、励磁電流 i_0 と交番磁束 ϕ の波形をなんらかの方法で取り出し、オシロスコープの X 軸に励磁電流 i_0 の波形、Y 軸に交番磁束 ϕ の波形を入力すれば、オシロスコープの画面に鉄心のヒステリシス特性（B-H 曲線）が描かれる。

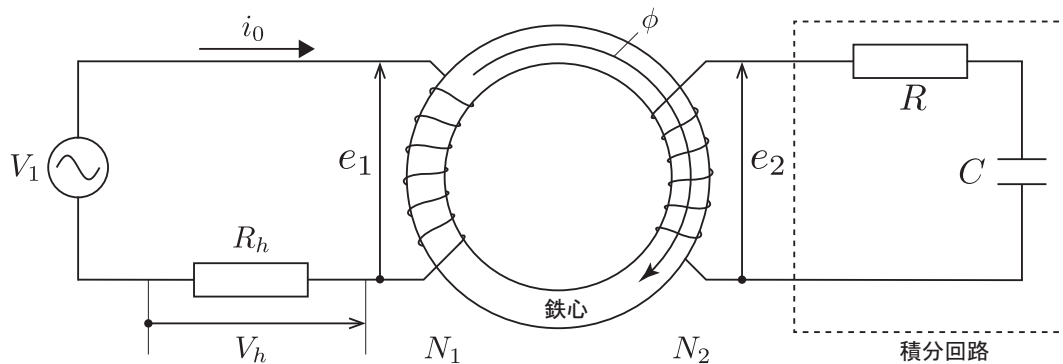


図 3: 変圧器の交流磁化特性測定回路

励磁電流 i_0 の波形を直接取り出すのは難しいので、図 3 において励磁電流 i_0 が抵抗 R_h を流れるときの電圧変化、すなわち

$$V_h = i_0 R_h \quad (5)$$

として取り出す。また、交番磁束 ϕ は次の様にして取り出す。

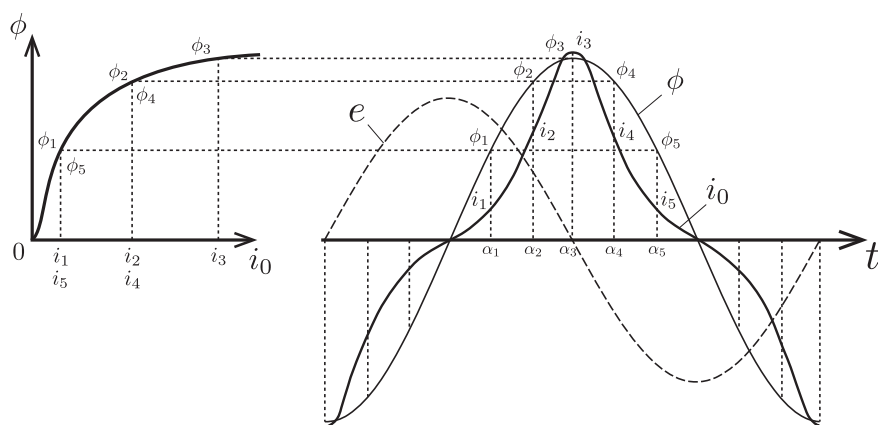
図 3 において二次巻線 N_2 と鎖交する磁束の時間に対する変化が二次誘起電圧 e_2 として現れるから

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

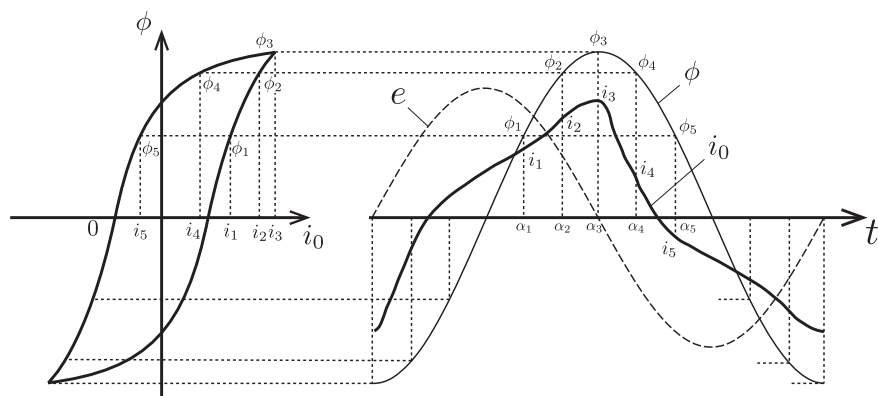
となり、式 (6) を変形すると

$$d\phi = \frac{1}{N_2} \times e_2 \times dt \quad (7)$$

となるから、交番磁束 ϕ は式 (7) を積分すれば求まることとなる。すなわち、二次巻線に発生する電圧 e_2 を時間で積分すればよい。そこで二次側に CR 積分回路を接続しコンデンサ C の両端から e_2 を積分した、交番磁束に比例した電圧をとりだす。



(a) ヒステリシス現象のない場合



(b) ヒステリシス現象のある場合

図 4: ヒステリシス現象

3 方法

3.1 使用器具

今回の実験で使用した器具を表 1 に示す。また、これらの器具を用いてのように配線を行った回路を図 5 と図 6 に示す。

表 1: 使用器具

使用器具	製造元	型番
電圧計	YEW	TYPE2013
電流計	YOKOGAWA	TYPE2013
低力率用力率計	YOKOGAWA	MODEL 2041
スライダートランス	東京理工舎	RSA-2
オシロスコープ	KEYSIGHT	MSO-X 2004A
ヒステリシス曲線直視回路セット	不明	不明

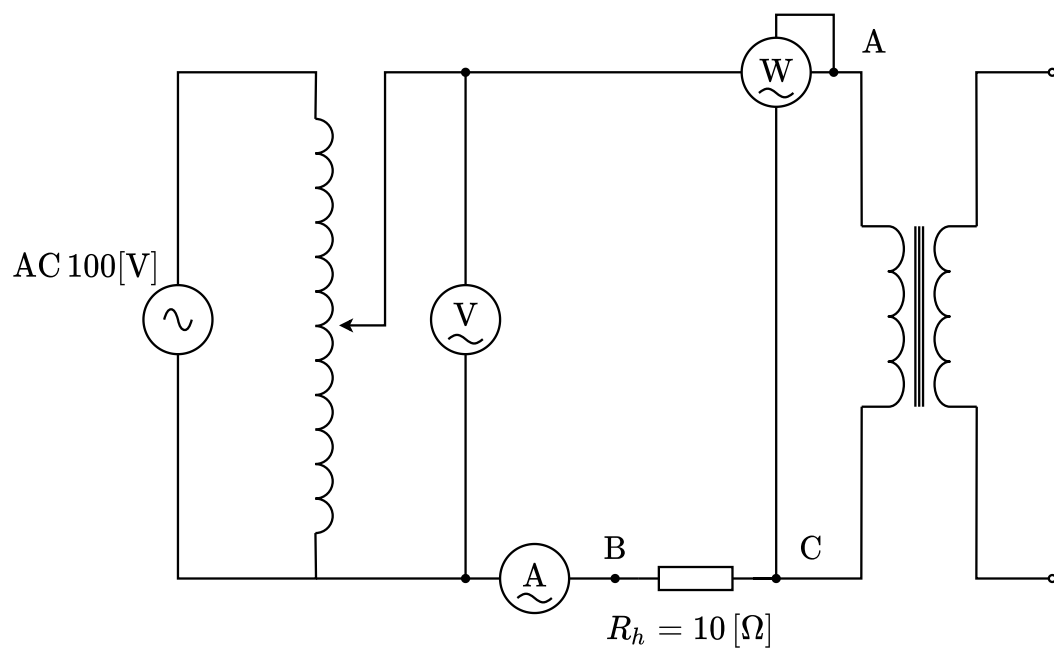


図 5: 実験回路 (積分回路なし)

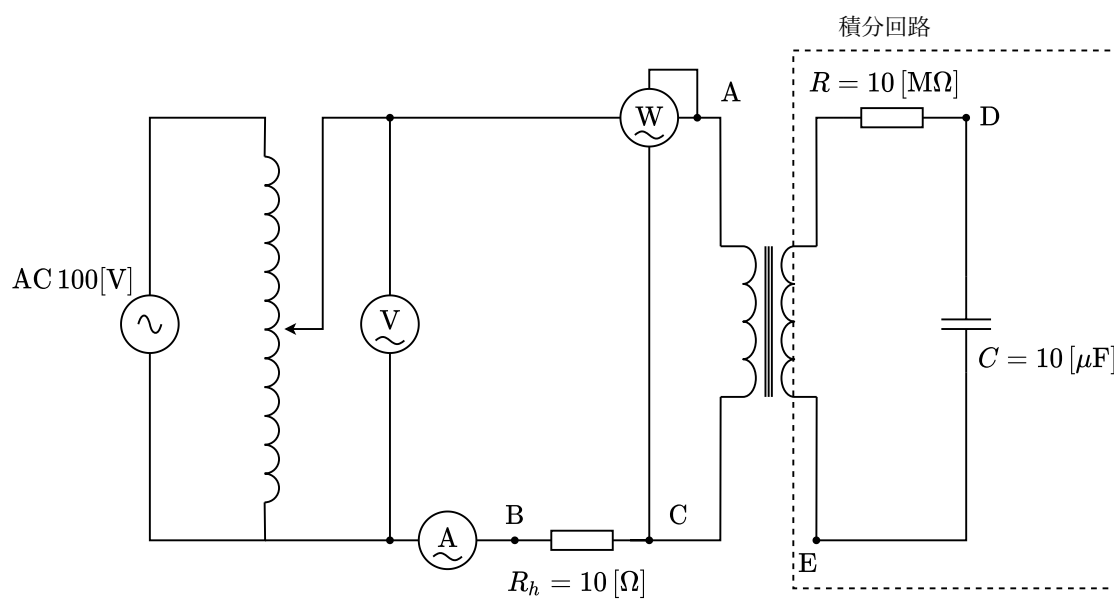


図 6: 実験回路 (積分回路あり)

3.2 実験手順

本実験では、励磁電流及び電力、位相差の測及び交流磁化特性の測定を行った。次にそれぞれの実験手順を示す。

3.2.1 励磁電流及び電力、位相差の測定

- 1) 図5に示した回路のように、各種計器とスライダック、ヒステリシス曲線直視回路セット及びトランスを接続した。
- 2) スライダックの電圧を 0V に設定し、オシロスコープのプローブを次のように接続した。
 - CH1 の GND を図5の C 点
 - CH1 のプローブを図5の A 点
 - CH2 の GND を図5の C 点
 - CH2 のプローブを図5の B 点
- 3) 入力電圧を 75V から 100V まで 5V 刻みで変化させ、それぞれ電流と有効電力を測定した。
- 4) 入力電圧が 80V と 100V の時はオシロスコープで波形を観測し、USB に保存した。なお、オシロスコープは反転モードに設定する。

3.2.2 交流磁化特性の測定

- 1) 図6に示した回路のように、各種計器とスライダック、ヒステリシス曲線直視回路セット及びトランスを接続した。
- 2) スライダックの電圧を 0V に設定し、オシロスコープのプローブをそれぞれ次のように接続した。
 - ch1 の GND を図6の C 点
 - ch1 のプローブを図6B 点
 - ch2 を GND を図6E 点
 - ch2 のプローブを図6の D 点
- 3) 入力電圧を 80V と 100V の時はオシロスコープで波形を観測し、USB に保存した。

4 結果

4.1 励磁電流及び電力、位相差の測定結果

表 2: 励磁電流及び電力の測定結果

電圧 v [V]	電流 i_0 [A]	電力 P_0 [W]	位相差 θ [deg]
75	41	0.9	72.9813526
80	45	1	73.87237979
85	49.5	1.1	74.84460034
90	54.5	1.3	74.63092721
95	60	1.4	75.78187581
100	66	1.6	75.9703346

表 3 は、励磁電流及び電力の測定結果である。それぞれの位相差 θ [deg] は次の式を用いて導出した。

$$\cos \theta = \frac{P_0}{v \cdot i_0} \quad (8)$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{P_0}{v \cdot i_0} \right) \quad (9)$$

5 考察

5.1 課題

5.1.1 励磁電流の作図

5.1.2 ヒステリシス曲線の面積の算出

5.1.3 ヒステリシス損の算出

5.2 考察

5.2.1 励磁電流の役割

変圧器の二次側に起電力を誘起

5.2.2 励磁電流がひずむ理由

5.2.3 電圧が変化したときのヒステリシス損失

5.2.4 電圧が変化したときの渦電流損

5.2.5 周波数が変化したときのヒステリシス損失

5.2.6 周波数が変化したときの渦電流損

5.2.7 電力系の測定損失とヒステリシス損失の比較

5.2.8 変圧器の鉄心用珪素鋼板について

6 結論

参考文献

[1] 著者名, 書名, 出版社, 発行年.