

# 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6月23日(木)  
令和4年6月30日(木)

班	学生番号	氏名
2班	3314	城戸 貴博

共同実験者名

3302 新川 史人 3310 岡村 放

3318 鈴木 春香 3327 猶崎稜真

提出日			備考	評価
予定日	6/30	7/7		
提出日				

## 1 目的

今回の実験では以下の3点を目的とする。

- 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。

## 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、 $\mu_s$  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  $1 \text{ m}^2$  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。

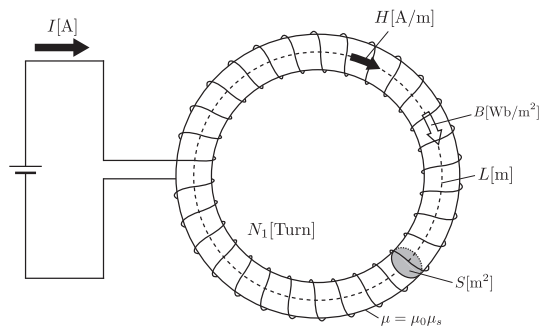


図 1: 磁気回路

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。

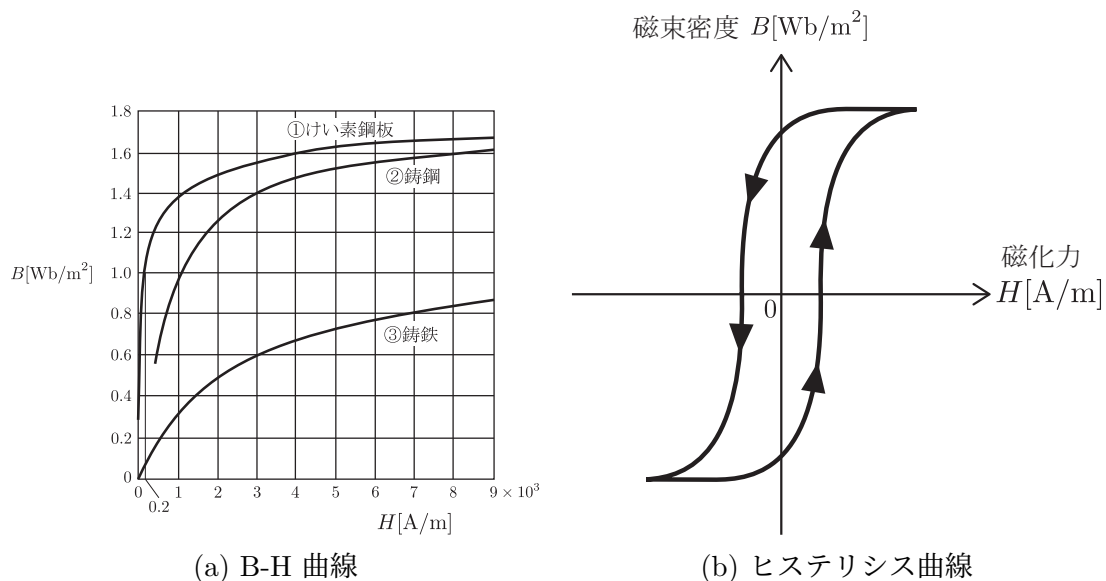


図 2: B-H 曲線とヒステリシス曲線

## 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  $\phi$  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  $\phi$  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  $\phi$  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。

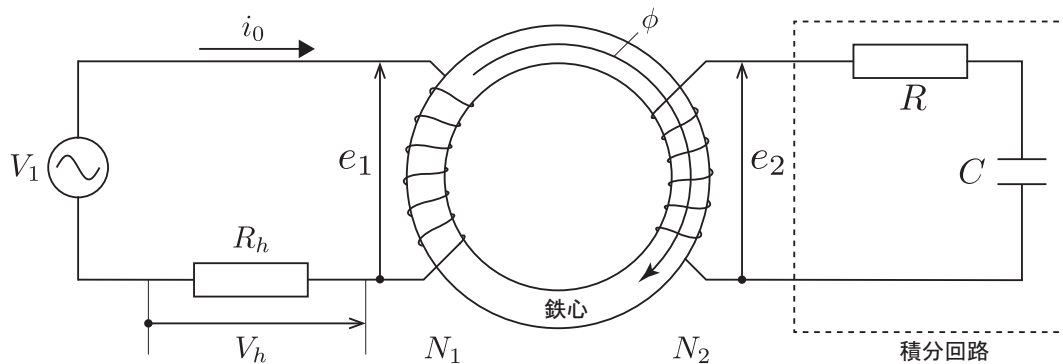


図 3: 変圧器の交流磁化特性測定回路

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  $\phi$  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  $\phi$  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。

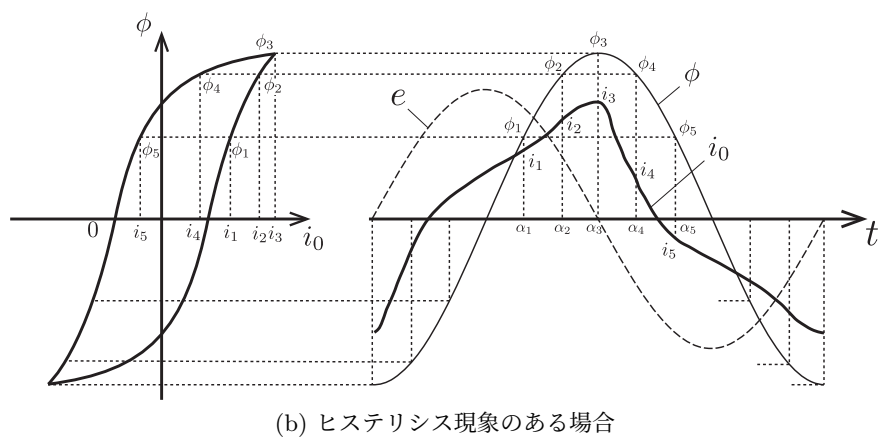
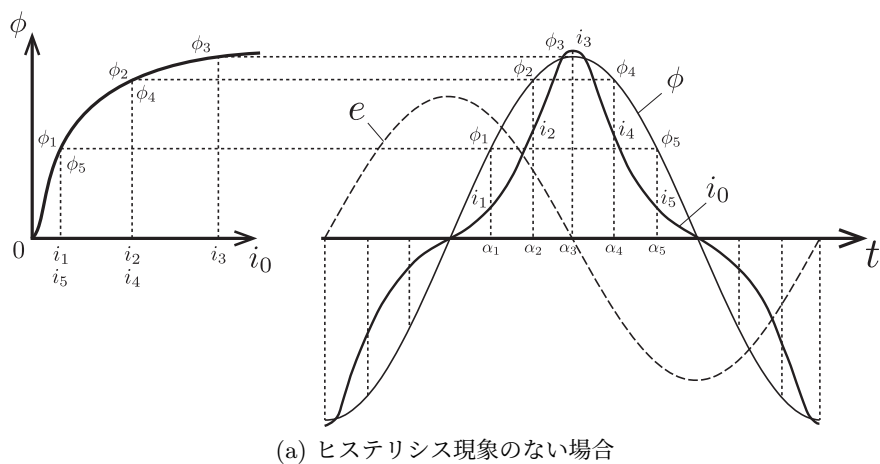


図 4: ヒステリシス現象

### 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。

表 1: 使用器具

使用器具名	製造元	型番	定格	製造番号 (管理番号)
電力計	横河電機	2041	1/5 A 120/240 V	4-23-62
電圧計	横河電機	2013	75/150 V	4-5-(1/5)
電流計	横河電機	2013	0.1/0.2/0.5/1 A	L94-004859
オシロスコープ	Keysight	DSOX2004A	200 MHz	SH-Q1701017
トランス (変圧器)	菅野電機研究所	SP-121	100 V	HYS(A)
トランス (変圧器)	菅野電機研究所	SP-121	100 V	HYS(B)
スライダック	東京理工舎	RSA-2	0-130 V	BH2

#### 3.2 実験手順

この実験を行った際、一度目の実験ではオシロスコープの設定が間違っており不正確な波形を計測してしまった。そのため、オシロスコープの設定を修正した上で、波形の測定のみ二度目の計測を行った。一度目は HTS(A) のトランスを使用し、二度目は HTS(B) のトランスを使用した。

##### 3.2.1 励磁電流、電力、位相差の測定

この実験では図 5 の回路を用いて励磁電流、電力、位相差を測定した。入力電圧が表 2 になるように調整し、それぞれ電流、電力を測定し記録した。また、目標入力電圧が 80 V , 100 V の場合の入力電圧と励磁電流の波形をオシロスコープで計測し記録した。オシロスコープには以下の操作をした。ch1 と ch2 の GND 端子を P2 に接続し、グランド共通化した。各波形がうまく収まるように垂直感度を調整した。今回は ch1 の垂直感度を 50.0 V/DIV , ch2 を 0.5 V/DIV に設定した。INV スイッチを押し、オシロスコープの ch2 の信号を反転させた。

表 2: 目標入力電圧

目標電圧	75	80	85	90	95	100
------	----	----	----	----	----	-----

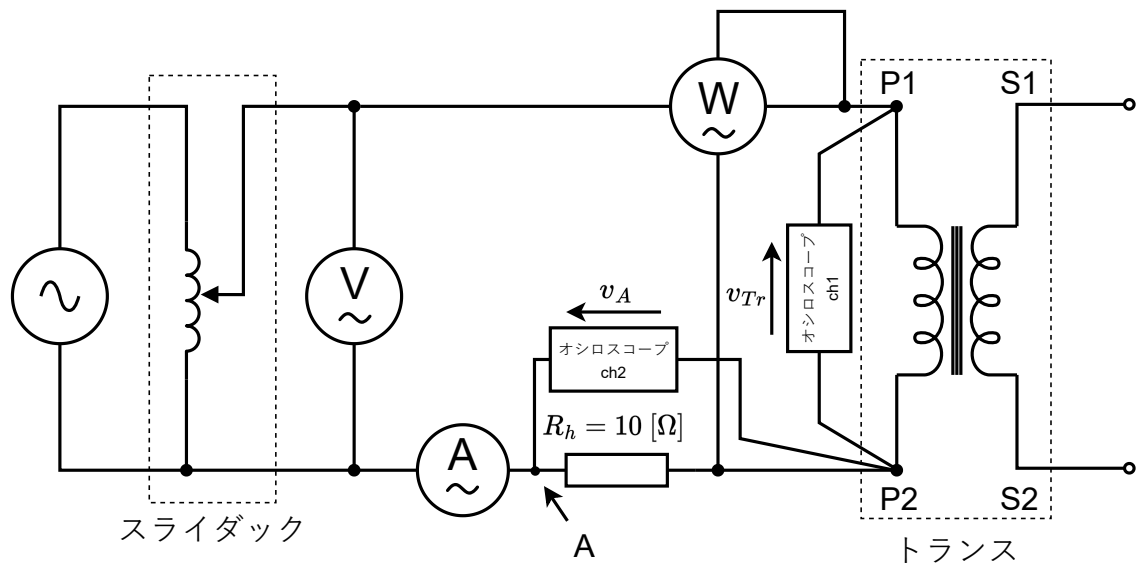


図 5: 励磁電流，電力，位相差の測定で用いた回路

### 3.2.2 ヒステリシス曲線の測定

この実験では図 6 の回路を用いてヒステリシス曲線を測定した。入力電圧は 80 V , 100 V の場合について測定した。オシロスコープには以下の操作をした。

ch1 の GND 端子を P2 に, ch2 の GND 端子を S2 に接続した。波形がうまく収まるように垂直感度を調整した。今回は ch1 の垂直感度を 500 mV/DIV , ch2 を 20 mV/DIV に設定した。また, ch2 の反転を解除した。水平感度の表示を X-Y 表示にした。

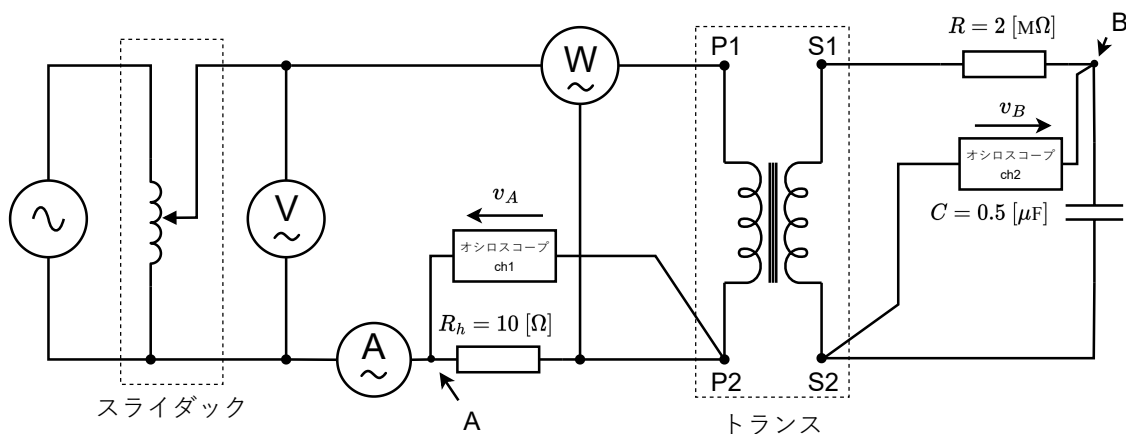


図 6: ヒステリシス曲線の測定で用いた回路

## 4 結果

### 4.1 励磁電流, 電力, 位相差の測定

励磁電流, 電力, 位相差の測定で記録した入力電圧, 励磁電流, 電力を表 3 に示す。また, 下式を用いて計算した位相差  $\theta$  についても表 3 に示す。

$$\begin{aligned} (\text{力率}) &= \frac{(\text{有効電力})}{(\text{皮相電力})} \\ \cos \theta &= \frac{\text{電力計値}}{\text{電圧} \times \text{電流}} \\ \theta &= \arccos \frac{\text{電力計値}}{\text{電圧} \times \text{電流}} \end{aligned}$$

表 3: 励磁電流及び電力, 位相差の測定結果

入力電圧 $V$ [V]	電流 $I_0$ [mA]	電力 $P_0$ [W]	位相差 $\theta$ [deg]
75.2	30.2	1.6	45
80.0	34.2	1.9	47
85.0	39.0	2.2	49
90.2	44.4	2.4	52
95.0	52.0	2.8	56
100.0	57.8	3.1	57

入力電圧 80 V , 100 V の時の励磁電流を図 A-1 , 図 A-2 に示す。

x 軸と水平な区間の励磁電流の大きさは 80 V , 100 V とともに約 20 mA でほぼ同じであった。励磁電流の最大値は 80 V では約 55 mA , 100 V では約 110 mA であった。

入力電圧は正弦波だが、計測した波形はなまっている。時間ごとのトランスと抵抗  $R_h$  の分圧の比が変化したことで、なまっていると考えられる。

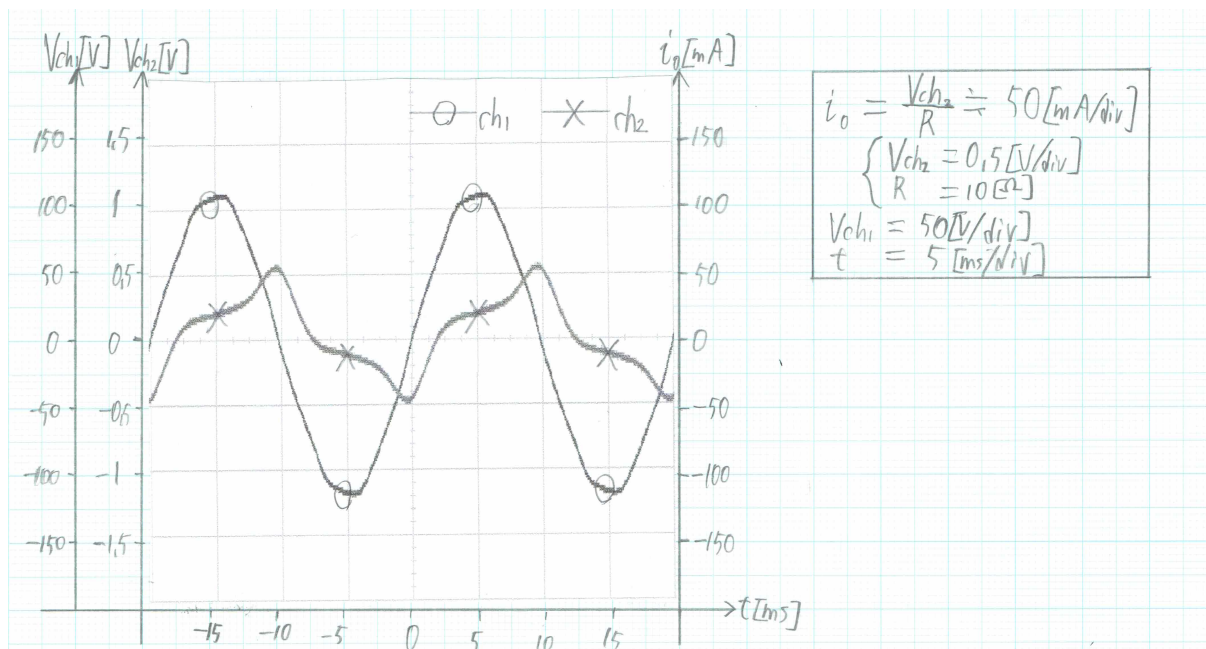


図 A-1: 80V の励磁電流

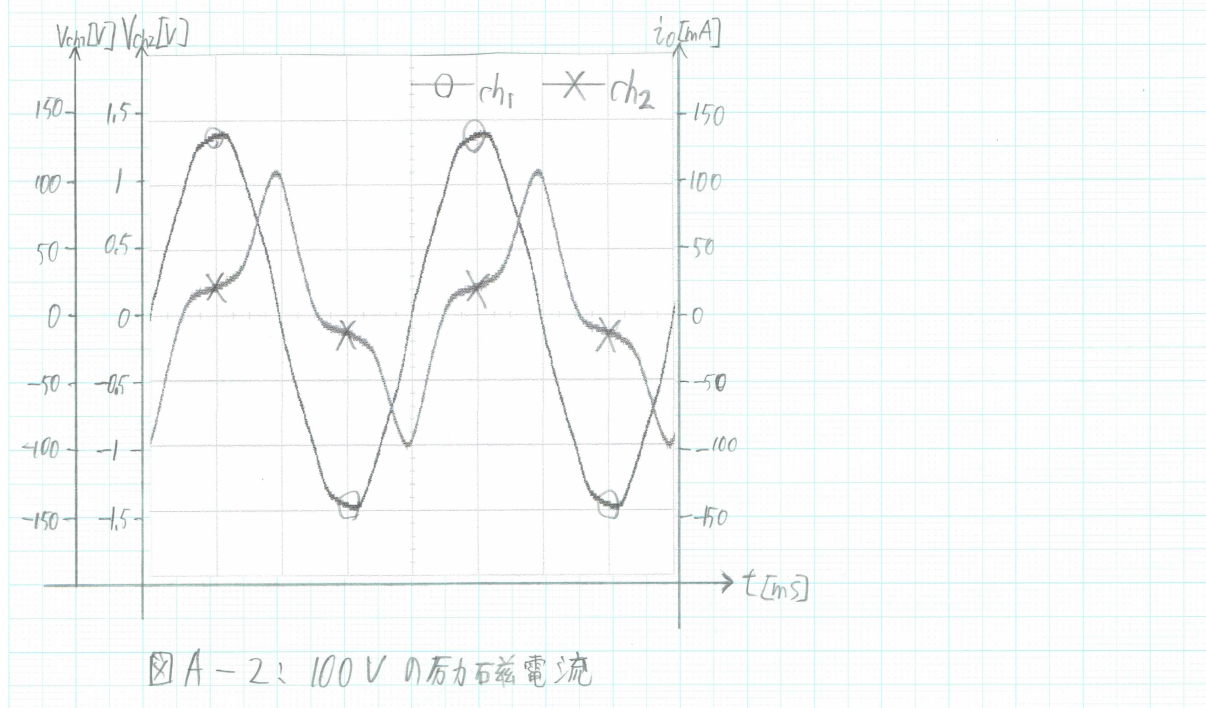
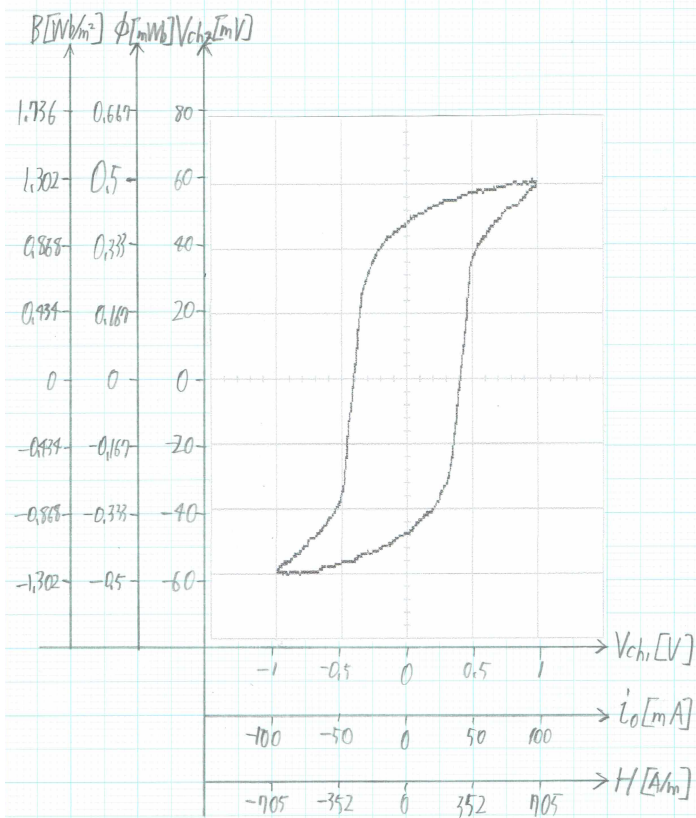
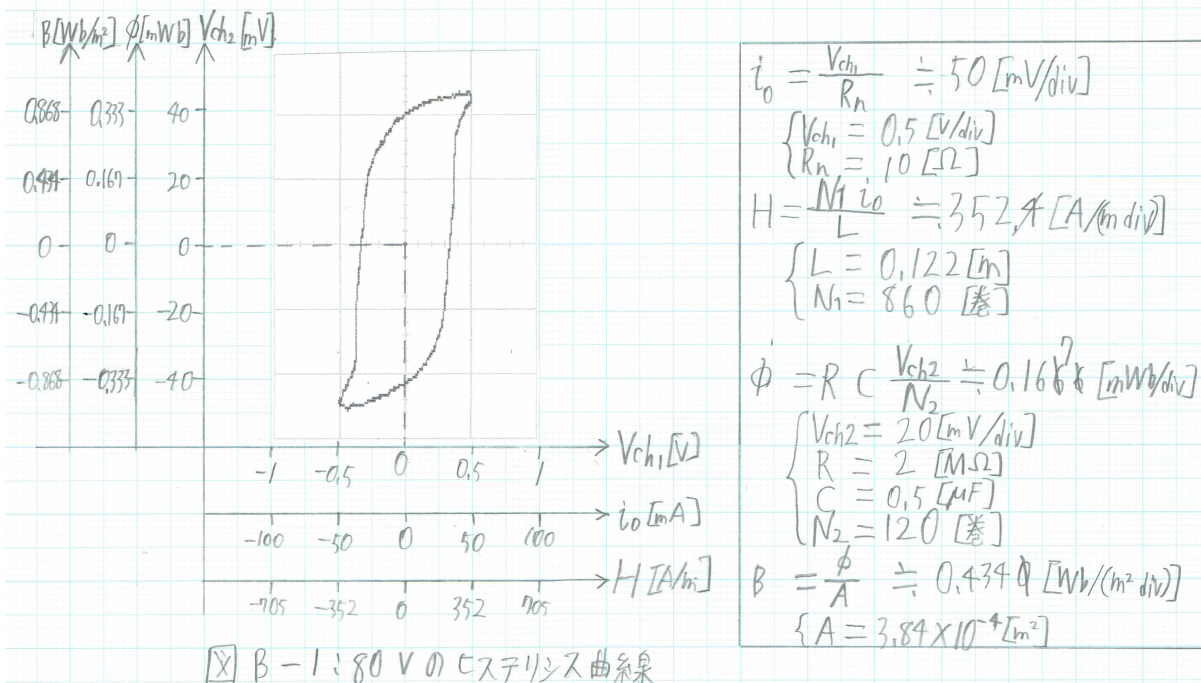


図 A-2: 100V の励磁電流



#### 4.1.1 ヒステリシス曲線の測定

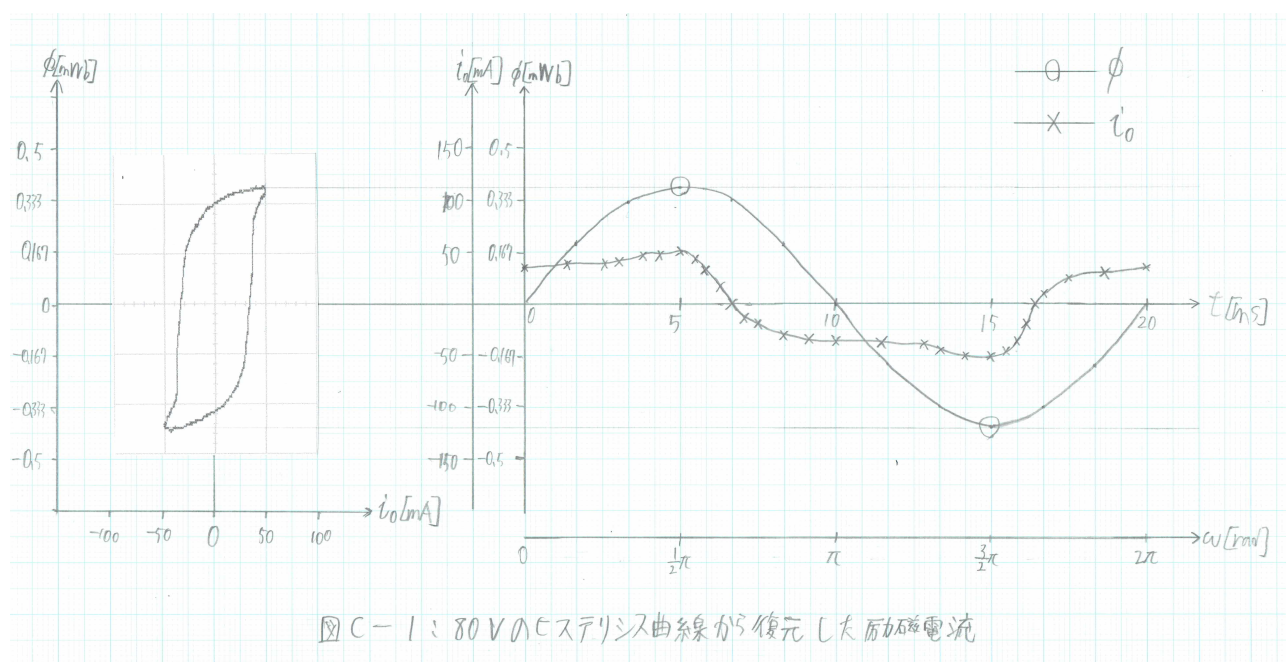
入力電圧 80 V , 100 V の時のヒステリシス曲線を図 B-1 , 図 B-2 に示す。80 V より 100 V のほうが飽和に近い状態にことが分かる。



入力電圧 80 V , 100 V の時のヒステリシス曲線から復元した励磁電流を図 C-1 , 図 C-2 に示す。

80 V の励磁電流の最大値は約 50 mA であり, 100 V の励磁電流の最大値は約 100 mA であった。計測した励磁電流 (図 A-1 , 図 A-2 ) の最大値とおおよそ同じであるため, 正しく復元できたことが分かる。

x 軸と水平な区間の励磁電流の大きさは 80 V で約 40 mA, 100 V で約 45 mA であった。計測した励磁電流 (図 A-1 , 図 A-2 ) の励磁電流の大きさの 2 倍ほどである。復元した励磁電流は電圧・磁束がなまっていない正弦波であるとしていた。しかし, 計測した励磁電流では電圧がなまっていることを確認できたことから, 磁束もなまっていた可能性がある。原因としては, コイルの自己誘導起電力やトランスが電力計と並列に接続されていることが考えられる。計測した励磁電流の x 軸と水平な区間の励磁電流の大きさが小さかったのは以上のことが原因だと考えられる。



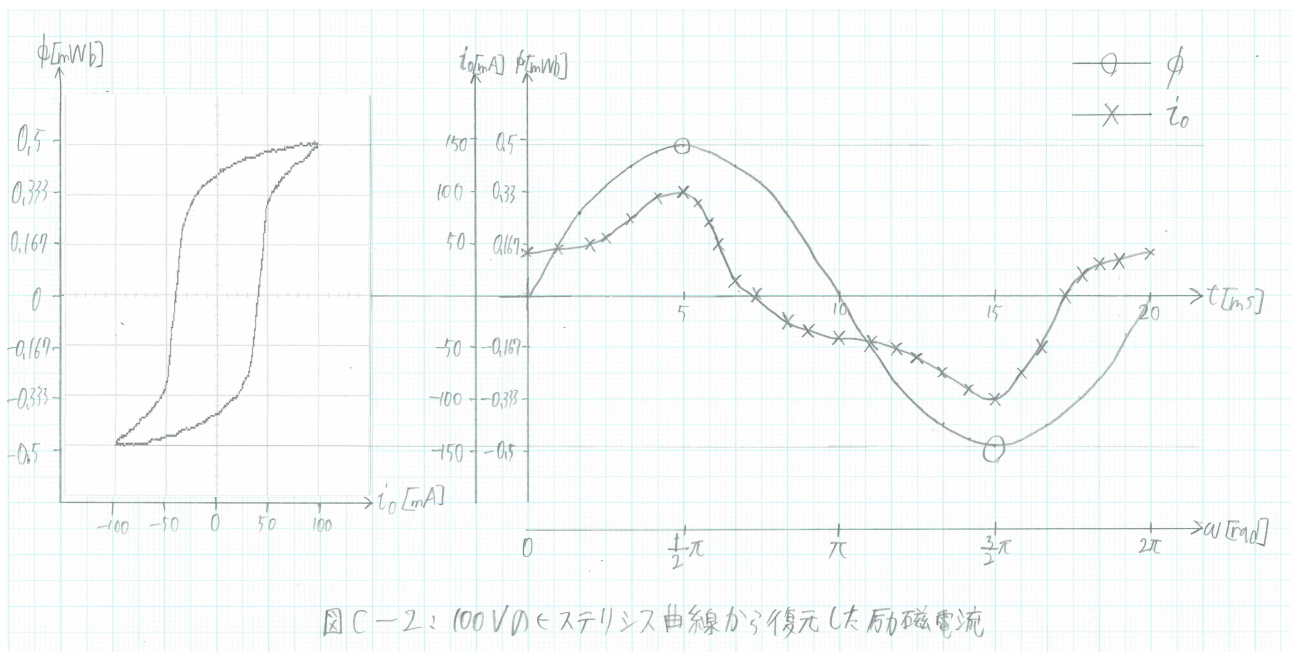


図 C-2: 100 V のステリシス曲線から復元した励磁電流

## 5 考察

- 1 変圧器の励磁電流について調べ、なぜ流れ、どのような役割をしているのかを考察せよ。  
一次巻線に電圧を加え、二次巻線を開放（無負荷）すると、一次巻線に電流が流れ磁束を生じる。この電流を励磁電流（無負荷電流）という [3]。

負荷をかけず（無負荷状態）に定格電圧を加えたときに流れる電流であり、鉄心に磁束を作るための電流である [8]。

- 2 励磁電流がひずみ波形になる理由を説明せよ。  
鉄心の飽和とヒステリシス現象により、励磁電流はひずみ波となる [3]。

印加電圧が変化すると

$$\begin{aligned}V &= d\phi/dt \\ \int V dt &= \phi \\ \phi/S &= B \\ B &= S \times \int V dt\end{aligned}$$

となり、磁束密度  $B$  が変化する。

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (8)$$

より、 $I$  が変化することも分かる。ここに鉄心の飽和とヒステリシス現象の影響が加わることで、励磁電流はひずみ波形になる。

- 3 磁性材料のヒステリシス損失について調査せよ。特に使用電圧が変化したとき及び使用電圧の周波数が変化したときについてそれぞれ説明せよ。

鉄心の磁区が交番磁界（時間とともに大きさと方向が変化を繰り返す磁界）によって磁界の向きを変えるときに発生する摩擦による損失のこと [1] [4]。磁区とは、強磁性体内部の磁気モーメントのそろった領域である [7]。強磁性体内部には方向の異なる磁区があり、磁気的なエネルギーを下げる働きをする。

ヒステリシス損  $P_h[\text{W/m}^3]$  は、電圧  $V$  [V]、周波数  $f$  [Hz]、比例定数  $K_h$  [-]、 $K'$  [-]、最大磁束密度  $B_m$  [T] から、

$$P_h = K_h f B_m^2$$

で示される [5]。また、 $B_m \propto \frac{V}{f}$  の関係式より

$$P_h = K_h f B_m^2 = K' \frac{V^2}{f} \quad (9)$$

を導出できる。式 (9) のうち、 $K_h B_m^2$  は一周分のヒステリシスループの面積（ヒステリシス損）であり、 $f$  周くり返すということである。式 (9) から、ヒステリシス損は電圧の二乗に比例し、周波数に反比例することが分かる。

- 4 磁性材料のうず流損について調査せよ。特に使用電圧が変化したとき及び使用電圧の周波数が変化したときについてそれぞれ説明せよ。

磁場の向きを変えたときに、磁化の変化を妨げるように銅板内に発生する渦電流による損失（渦電流損）のこと [1]。

渦電流損  $P_e$  [W] は鉄板厚み  $d$  [m] , 周波数  $f$  [Hz] , 起電力の波形率  $k_f$  [-] , 最大磁束密度  $B_m$  [T] , 定数  $K_e$  [-] ,  $K'$  [-] から,

$$P_e = K_e(d f k_f B_m)^2$$

で示される [6] 。また,  $B_m \propto \frac{V}{f}$  の関係式より

$$P_e = K_e(d f k_f B_m)^2 = K' d^2 k_f^2 V^2 \quad (10)$$

を導出できる。式 (10) から, 渦電流損は電圧の二乗に比例することが分かる。また周波数が変化しても渦電流損が変化しないことも分かる。

- 5 電力計を使用して測定するときの損失とヒステリシス曲線から求めた損失について比較検討し考察せよ。

計測したヒステリシス曲線を 1 div を 1 cm として, ImageJ を用いて面積を計測した。各電圧について 2 回ずつ計測し, その平均を面積とした。入力電圧  $V$  とヒステリシス曲線の面積  $S$  を表 4 に示す。

表 4: ヒステリシス曲線の面積

入力電圧 $V$ [V]	面積 $S$ [div <sup>2</sup> ]
80	5.722
100	8.900

ヒステリシス損  $W_h$  [W] は, 周波数  $f$  [Hz] , 鉄心断面積  $A$  [m<sup>2</sup>] , 磁路の長さ  $L$  [m] , ヒステリシス曲線の磁化率  $H$  [A/m/div] , ヒステリシス曲線の磁束密度  $B$  [Wb/m<sup>2</sup>/div] , ヒステリシス曲線の面積  $S$  [div<sup>2</sup>] を用いて以下のように計算できる。

$$W_h = (\text{周波数}) \times (\text{体積}) \times (\text{単位体積当たりの損失})$$

$$\begin{cases} (\text{周波数}) & = f[\text{Hz}] \\ (\text{体積}) & = A \times L[\text{m}^3] \\ (\text{単位体積当たりの損失}) & = H \times B \times S[\text{J/m}^3] \end{cases}$$

$$= f \times A \times L \times H \times B \times S[\text{W}]$$

80 V のヒステリシス損は,  $f = 50[\text{Hz}]$ ,  $A = 3.84 \times 10^{-4}[\text{m}^2]$ ,  $L = 0.122[\text{m}]$ ,  $H = 352.4[\text{A/m/div}]$ ,  $B = 0.434[\text{Wb/m}^2/\text{div}]$  と表 4 の  $S = 5.722[\text{div}^2]$  より

$$\begin{aligned} W_h &= f \times A \times L \times H \times B \times S \\ &\approx 2.05 [\text{W}] \end{aligned}$$

2.05 [W] であると計算できた。

100 V のヒステリシス損は,  $f = 50[\text{Hz}]$ ,  $A = 3.84 \times 10^{-4}[\text{m}^2]$ ,  $L = 0.122[\text{m}]$ ,  $H = 352.4[\text{A/m/div}]$ ,  $B = 0.434[\text{Wb/m}^2/\text{div}]$  と表 4 の  $S = 8.900[\text{div}^2]$  より

$$\begin{aligned} W_h &= f \times A \times L \times H \times B \times S \\ &\approx 3.19 [\text{W}] \end{aligned}$$

3.19 [W] であると計算できた。

表 5: エネルギー損失

電圧 [V]	測定値 [W]	算出したヒステリシス損 [W]
80	1.9	2.05
100	3.1	3.19

表 3 の各電圧の電力と比べると，計算値のほうが大きくなっている。通常，ヒステリシス損の他に渦電流損もあるため，ヒステリシス損が測定値より大きくなることはない。今回ヒステリシス損が測定値より大きくなってしまったのは，二度目の計測で波形のみ測定したのにも関わらず，一度目の測定値と比較したことが原因だと考えられる。よって今回の実験結果では，電力計を使用して測定するときの損失とヒステリシス曲線から求めた損失について正しく比較できない。

#### 6 変圧器の鉄心用珪素鋼板について調べよ。

珪素鋼板は電気鉄板，電磁鋼板とも呼ばれる。珪素鋼板は印加磁場の向きを反転すると容易に磁化も反転する軟磁性材料である。軟鋼（炭素をおよそ 0.18～0.30 質量%含む炭素鋼）にケイ素を添加することで，巻線の鉄心の鉄損（磁化した時に鉄心が消費するエネルギー）を低減した磁性材料である [2]。ケイ素により，結晶磁気異方性および磁気ひずみが小さくなり電気抵抗が大きくなるため，鉄損を低減させることができる [1]。

#### 7 電力計の有無によるヒステリシス曲線の変化

二度目の計測の際，オシロスコープの設定を修正できたことを確認するために，図 6 から電力計と電流計を省いた簡易回路を作成した。その際計測したヒステリシス曲線を図 7，図 8 に示す。

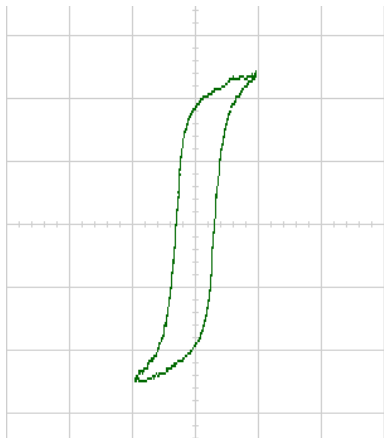


図 7: 80 V の簡易回路でのヒステリシス曲線

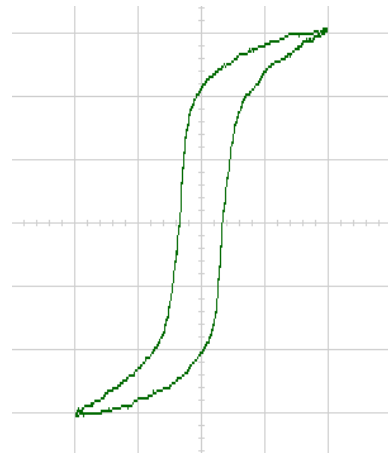


図 8: 100 V の簡易回路でのヒステリシス曲線

図 B-1，図 B-2 と比較すると，図 7 図 8 のほうが  $V_{ch2} = 0$  の  $V_{ch1}$  の大きさが小さいことがわかる。 $V_{ch2} = 0$  の  $V_{ch1}$  の大きさが小さいことから， $V_{ch2} = 0$  の励磁電流  $i_0$  の大きさも小さいことが分かる。

抵抗  $R_h$  に流れる励磁電流  $i_0$  は電力計の漏れ電流とトランスからくる電流の和である。よって， $V_{ch2} = 0$  の  $V_{ch1}$  の大きさの違いは，電力計の漏れ電流の有無による違いだと考えられる。

## 6 結論

実験を通して 1. 2. を達成できた。しかし，一部のみを再実験したことでデータに相違が発生し，一部のデータが理想と異なってしまった。



- a 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。
- b 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。
- c 変圧器における励磁電流、電力、位相差の変化を観測する。

## 参考文献

- [1] “3分でわかる技術の超キホン 電磁鋼板とは?鉄損の低減方法,製法と用途(電動機/発電機/変圧器)の要点解説”, 日本アイアール株式会社, <https://engineer-education.com/electrical-steel/>, 2022/06/28
- [2] “軟鋼”, 一般社団法人 日本機械学会, <https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/08:1009421>, 2022/06/28
- [3] “用語辞典 ㇿ 励磁電流”, E&M JOBS, <https://em.ten-navi.com/dictionary/2743/>, 2022/06/28
- [4] “用語辞典 ㇿ 交番磁界”, E&M JOBS, <https://em.ten-navi.com/dictionary/2580/>, 2022/06/28
- [5] “用語辞典 ㇿ ヒステリシス損”, E&M JOBS, <https://em.ten-navi.com/dictionary/2758/>, 2022/06/28
- [6] “用語辞典 ㇿ 渦電流損”, E&M JOBS, <https://em.ten-navi.com/dictionary/2759/>, 2022/06/29
- [7] “磁石と磁区のはなし その 1”, 東邦大学, [https://www.toho-u.ac.jp/sci/ph/column/Galileo\\_6.html](https://www.toho-u.ac.jp/sci/ph/column/Galileo_6.html), 2022/06/28
- [8] “無負荷電流とはどのようなものですか”, 日立産機産機システム, <https://hitachi-ies.force.com/web/s/article/trans5239>, 2022/06/29
- [9] “パワエレコラム”, Myway プラス株式会社, <https://www.myway.co.jp/column/detail.php?id=3055>, 2022/06/29