

# 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 19日 (木)

班	学生番号	氏名
4	3308	大竹一輝

共同実験者名

3304 石島健太郎,3312 角張達哉

3316 重松寛門, 3320 鈴木康仁

提出日			備考	評価
予定日	5/19	5/26		
提出日				

東京都立産業技術高等専門学校  
電気電子工学コース

## 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、 $\mu_s$  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。

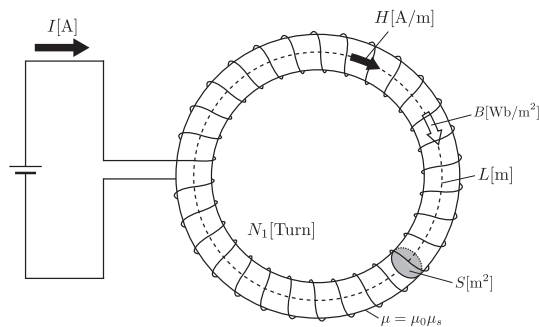


図 1: 磁気回路

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。

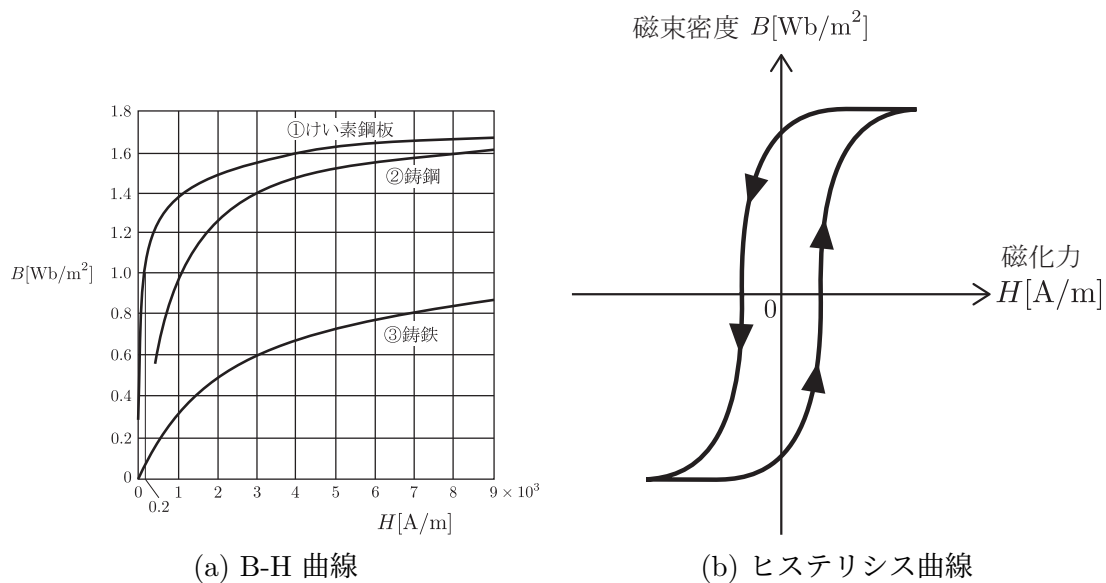


図 2: B-H 曲線とヒステリシス曲線

## 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。

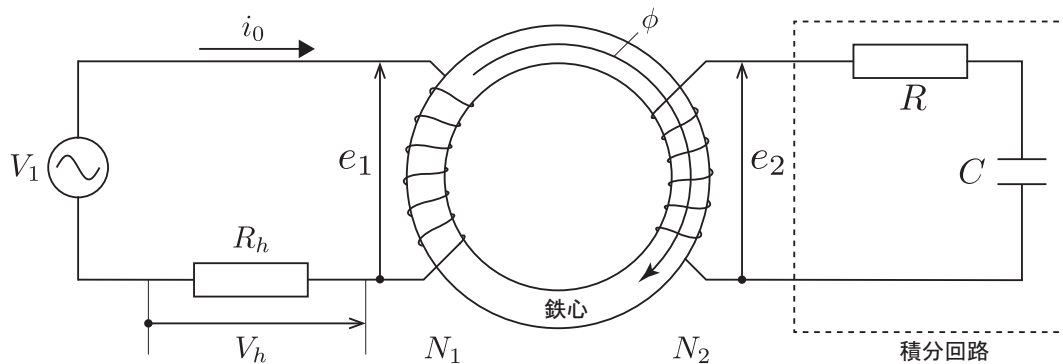


図 3: 変圧器の交流磁化特性測定回路

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。

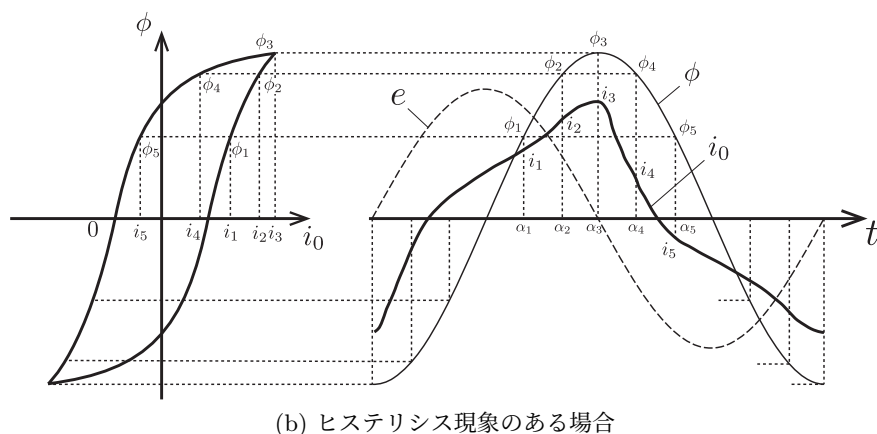
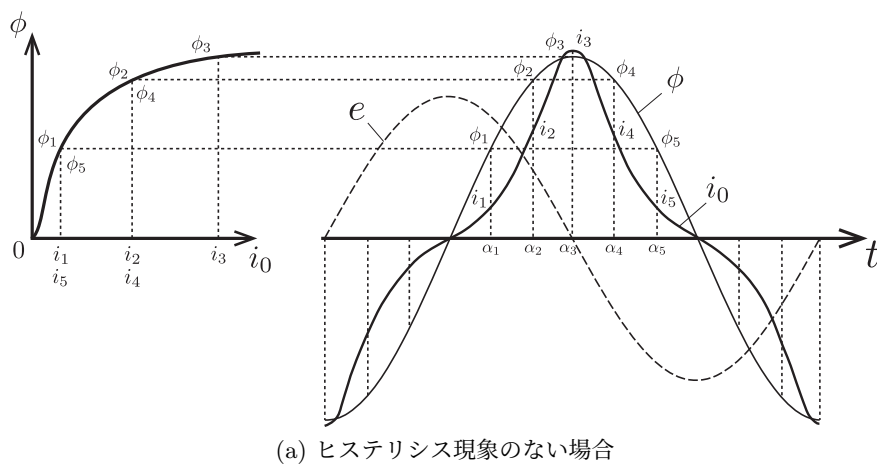


図 4: ヒステリシス現象

### 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
オシロスコープ	Agilent Technologies	DSO1022A
交流電流計	YOKOGAWA	Type 2013
交流電圧計	YEW	Type 2013
交流電力計	YEW	Type 2041
スライドトランス	東京理工舎	A3-01062
Transformer	菅野電機研究所	SP-121

### 3.2 実験手順

ヒステリシス特性直視回路実験セットがボード上に組んであるため、図6の回路図の通りに、スライドトランス、交流電圧計、交流電流計、交流電力計、Transformer とボードを接続する。

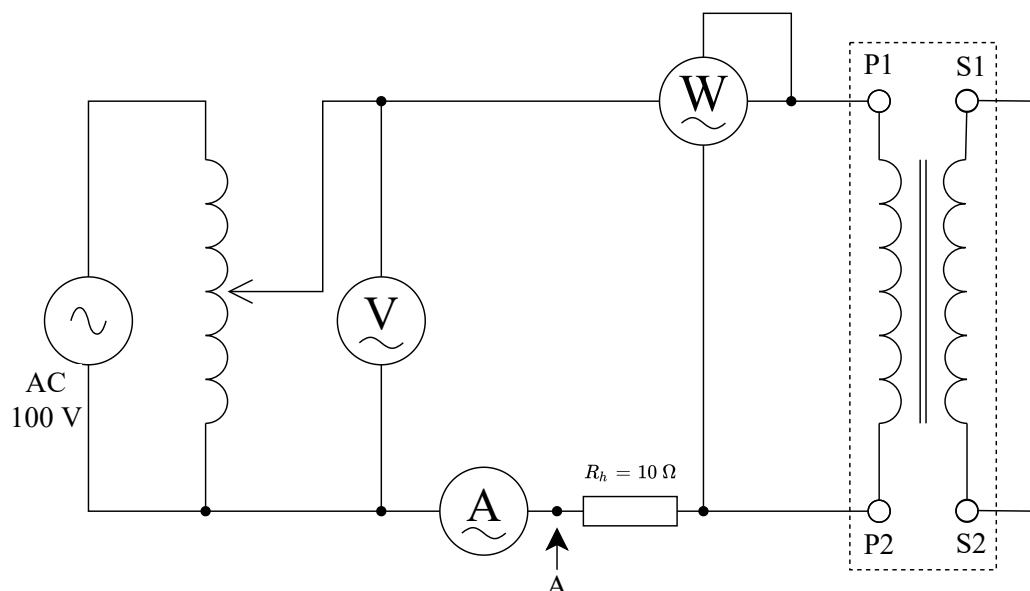


図 5: 励磁電流及び電力、位相差測定用接続図

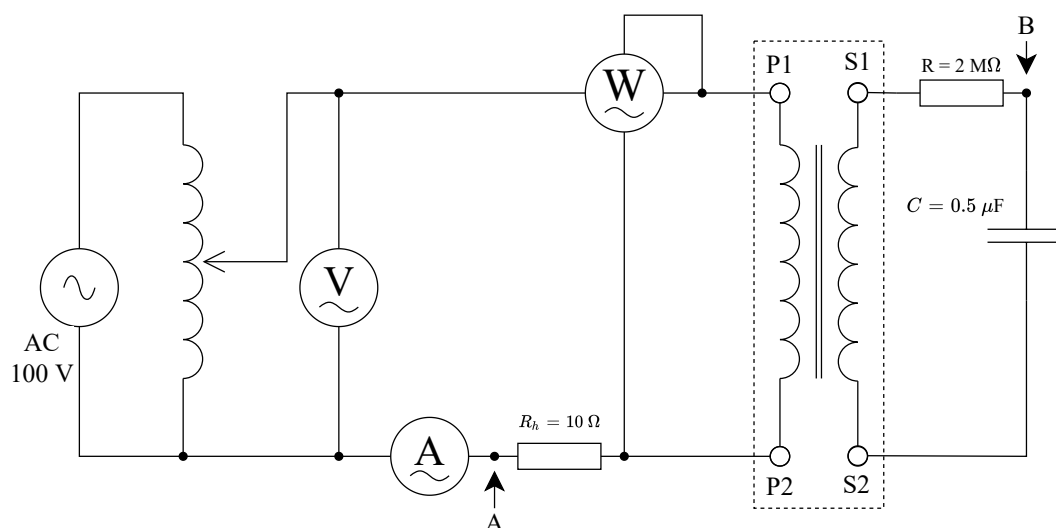


図 6: 交流磁化特性測定用接続図

#### (1) 励磁電流、電力、位相差の測定

入力電圧波形と励磁電流の波形を同時に観測し、入力電圧が 75,80,85,90,95,100V の時、それぞれの入力電力、入力電流、位相差を測定し表にまとめる。ただし、位相差は読み取ることが出来ないため計算で求めることとする。また、入力電圧が 80V と 100V の時のみ、オシロスコープで入力電圧波形と励磁電流の波形を観測し、グラフ用紙にまとめる。

#### 観測方法

- 図5の通りに配線する。

- オシロスコープの水平感度を 5 ms/DIV にする。
- ch1 のプローブの GND を図 5 の P2 へ、プローブの先は P1 に接続する。
- ch2 のプローブの GND を図 5 の P2 へ、プローブの先は A 点に接続する。
- オシロスコープの ch2 の信号を反転する。(INV スイッチを押す)
- ch1 の垂直感度を 50 V/DIV に、ch2 の垂直感度を 0.5 V/DIV に設定する。
- 入力電圧をセットし、波形を観測する。
- ch1 は入力電圧、ch2 は励磁電流を示す。

## (2) 交流磁化特性 (ヒステリシス曲線) の測定

Transformer のヒステリシス曲線を観測する。

### 観測方法

- 図 6 の通りに配線する。
- 磁化力  $H$  が入力される ch1 は垂直感度を 0.5 V/DIV に、磁束  $\phi$  が入力される ch2 は垂直感度を 20 mV/DIV に設定する。
- ch1 のプローブの GND を図 6 の P2 へ、プローブの先は A 点に接続する。
- ch2 のプローブの GND を図 6 の S2 へ、ch2 のプローブの先は B 点に接続する。
- ch2 の信号の反転を解除する。
- 水平感度の表示を X-Y 表示に切り替える。
- 入力電圧が 80V と 100V の時のみオシロスコープのヒステリシス曲線をグラフにまとめる。

## 4 結果

### 4.1 励磁電流及び電力、位相差

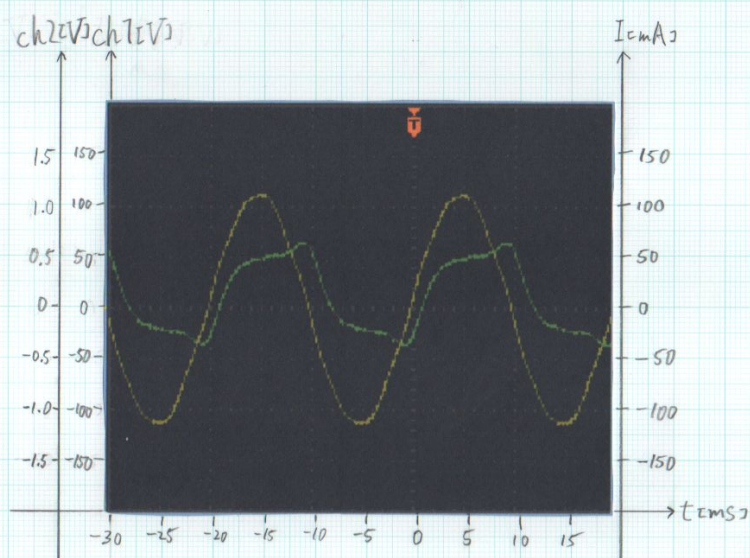
- a 励磁電流、電力、位相差を測定した結果を表 2 に示す。

表 2: 励磁電流及び電力の測定結果と位相差の計算結果

入力電圧 $V$ [V]	電流 $i_0$ [A]	電力 $P_0$ [W]	位相差 $\theta$ [rad]
75	0.030	1.4	0.90
80	0.034	2.0	0.74
85	0.038	2.2	0.82
90	0.044	2.4	0.92
95	0.050	2.7	0.97
100	0.056	3.0	1.01

表 2 より、電流と実効値電圧の積が電力であることが確認できる。また、コイルにかかる電圧が増えることから、位相差が大きくなることも確認できる。

- b 80V と 100V の時の励磁電流波形軸を換算し図 7(P.6), 図 8(P.7) に示す。



$$I = \frac{V_{div}}{R_h} = \frac{0.5[V/DIV]}{10[\Omega]} = 50[mA/DIV]$$

(a) 入力電圧 = 80[V]

図 7: 80V 入力電圧、励磁電流の観測波形



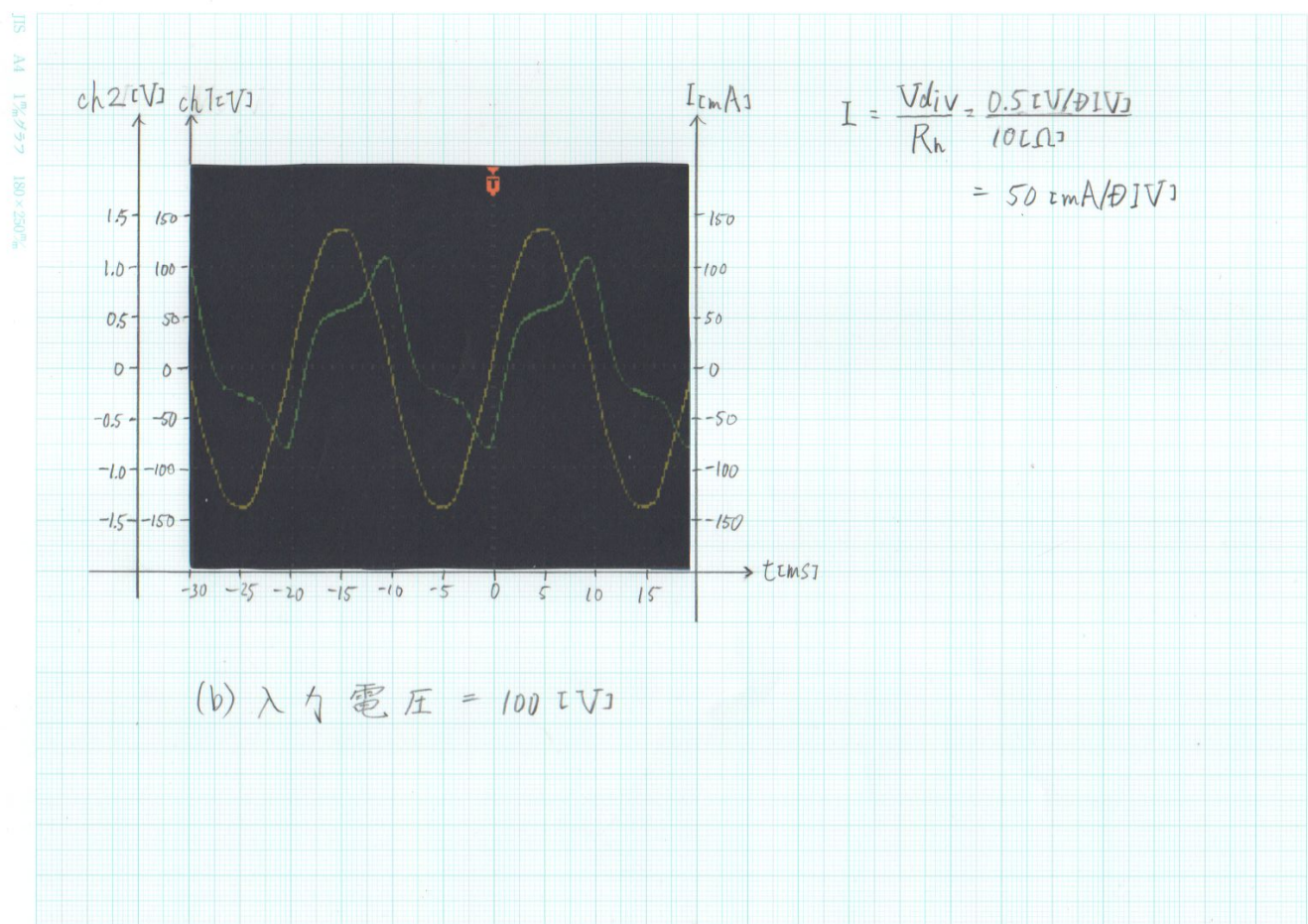


図 8: 100V 入力電圧、励磁電流の観測波形

図 7 と図 8 より、入力電圧が 80 V と 100 V の時の励磁電流では 100 V の時の励磁電流波形の方が、振幅が大きいことが読み取れる。これはオームの法則からも確認できる。また、それに伴い波形の歪みが大きくなっていることが読み取れる。



## 4.2 交流磁化特性 (ヒステリシス曲線)

- a 80V と 100V の時のヒステリシス曲線を図 9(P.9), 図 10(P.10) に示す。
- b 80V と 100V の時のヒステリシス曲線から励磁電流波形を作図した結果を図 11(P.11), 図 12(P.12) に示す。

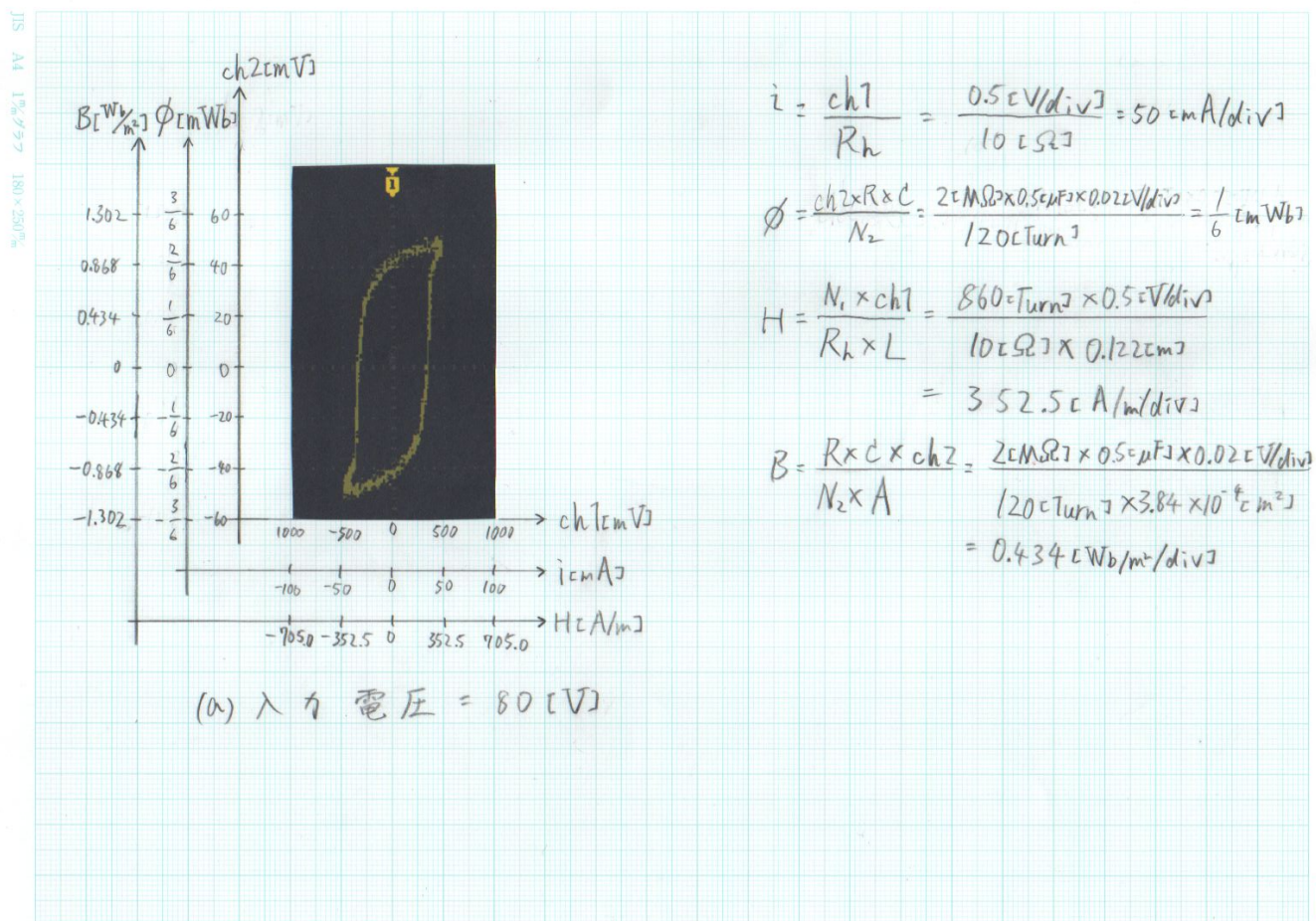
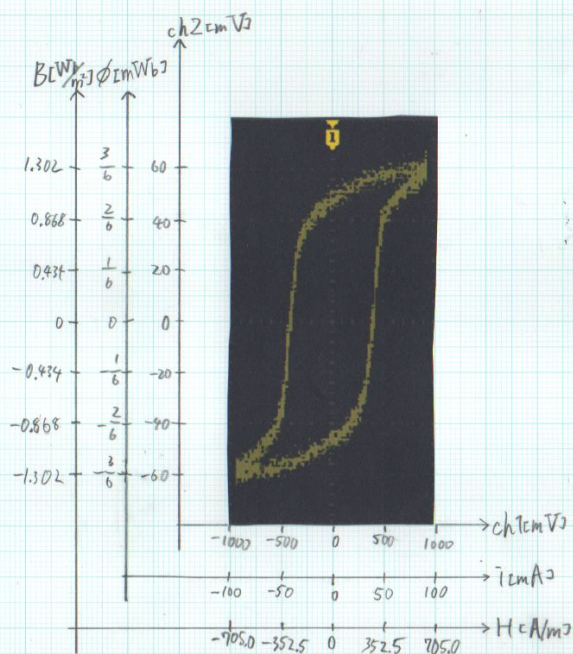


図 9: 80V 入力電圧の時のヒステリシス曲線



(b) 入力電圧 = 100V

$$\bar{i} = \frac{ch1}{R_h} = \frac{0.5 \text{ V/div}}{10 \text{ } \Omega} = 50 \text{ mA/div}$$

$$\phi = \frac{ch2 \times R \times C}{N_2} = \frac{2 \text{ mS} \times 0.5 \text{ } \mu\text{F} \times 0.02 \text{ V/div}}{120 \text{ Turn}} = \frac{1}{6} \text{ mWb}$$

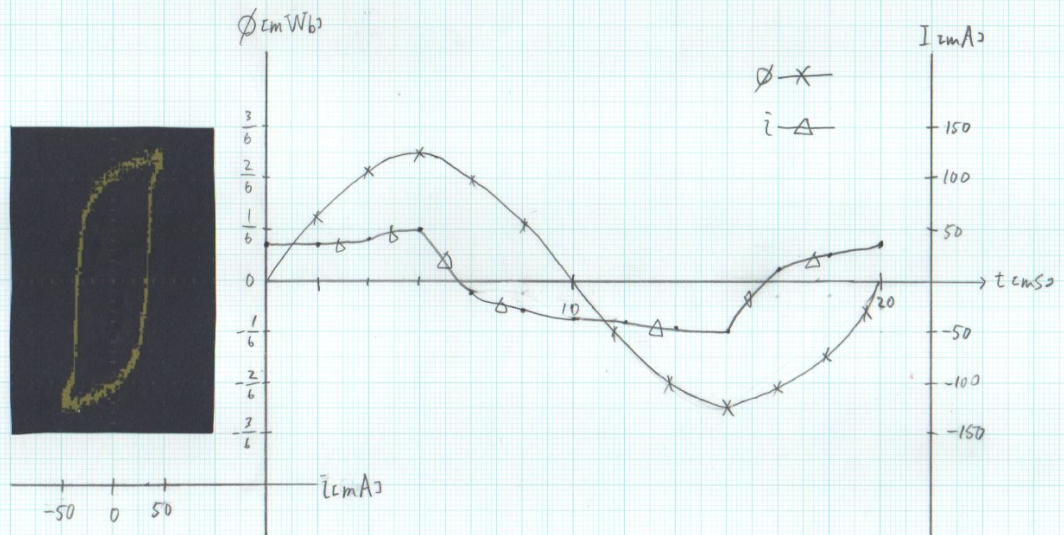
$$H = \frac{N_1 \times ch1}{R_h \times L} = \frac{860 \text{ Turn} \times 0.5 \text{ V/div}}{10 \text{ } \Omega \times 0.122 \text{ m}} = 352.5 \text{ A/m/div}$$

$$B = \frac{R \times C \times ch2}{N_2 \times A} = \frac{2 \text{ mS} \times 0.5 \text{ } \mu\text{F} \times 0.02 \text{ V/div}}{120 \text{ Turn} \times 3.84 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 0.434 \text{ Wb/m}^2/\text{div}$$

図 10: 100V 入力電圧の時のヒステリシス曲線

図 9 と図 10 を比較すると、ヒステリシス曲線に囲まれた面積が入力電圧が 100 V の方が大きいことが分かる。





(a) 入力電圧 = 80 V

図 11: 80V 入力電圧、励磁電流の作図波形

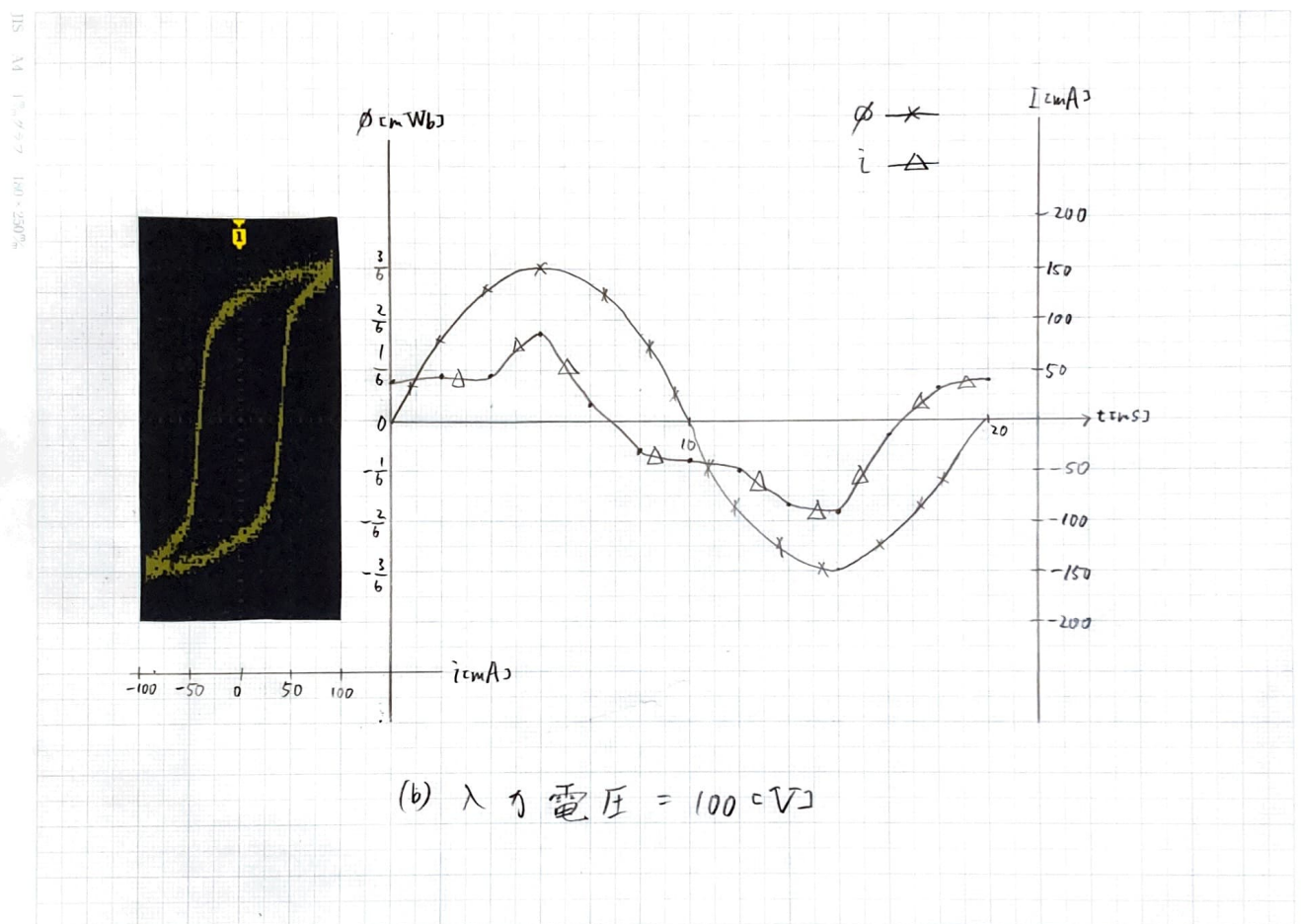


図 12: 100V 入力電圧、励磁電流の作図波形

図 7 と図 11 より、測定した波形と作図した波形が近似していることが読み取れる。また、図 8 と図 12 より、電圧を変更しても測定した波形と作図した波形が近似していることが読み取れる。

## 5 考察

### 5.1 変圧器の励磁電流は何故流れるのか。また、どのような役割をしているのか考察せよ。

一次巻線に電圧を加え、二次巻線を開放すると、一次巻線に励磁電流が生じ、流れる。また、磁束を生じる。

### 5.2 励磁電流がひずみ波形になる理由を説明せよ。

磁束密度と磁化力は比例しないため、印加電圧は正弦波なのでそれと平衡（バランス）する誘導起電力は正弦波でなければならない。そのためには電流が歪むしかないから。

### 5.3 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。

ヒステリシス損失とは鉄心を磁化させるときに発生する損失のことである [1]。

$$P_h = W_h f = K_h f B_m^{1.6} \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (8)$$

- $P_h$ : ヒステリシス損失 [W/m<sup>3</sup>]
- $W_h$ : ヒステリシスループ 1 周による鉄心のエネルギー損失 [J/m<sup>3</sup>]
- $f$ : 交番磁界の周波数 [Hz]
- $K_h$ : 鉄心材料のヒステリシス係数 [-]
- $B_m$ : 最大磁束密度 [T]

また、式 (8) のスタインメッツの実験式より、ヒステリシス損失は電圧の周波数に比例する [2]。

$$P_h = K_h f B_m^2 = K' \frac{V^2}{f} \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (9)$$

- $K'$ : 比例定数

そして、式 (9) の式より、ヒステリシス損失は実用上電圧の 2 乗に比例し周波数に反比例する [3]。

### 5.4 磁性材料のうず流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。

変圧器の 1 次巻線に交流電圧をかけると、電圧とともに流れる電流の大きさや、向きも変化する。よって、鉄心中の磁束の大きさと向きも同様に変化する。この時、鉄心に磁束の変化を妨げる方向に起電力が生じる。そして、鉄心中に起電力の向きと同じ方向に電流が流れる。この電流がうず電流であり、鉄心に流れるうず電流により、鉄心に生じる熱損失をうず電流損失という [1]。

$$P_e = K_e B_m^2 t^2 f^2 V \text{ [W]} \quad (10)$$

- $P_e$ : 渦電流損 [W]
- $K_e$ : 比例定数

- $f$  : 周波数 [Hz]
- $B_m$  : 最大磁束密度 [T]
- $V$  : 面積 [m<sup>3</sup>]

$$P_e = K_e \frac{(tE)^2}{\rho} \quad [\text{W}] \quad (11)$$

- $\rho$  : 磁性体の抵抗率
- $t$  : 鉄心の厚さ [m]
- $E$  : 電圧 [V]

式 (10) より、うず電流損失は電圧の周波数の 2 乗に比例する。また、式 (11) より、電圧の 2 乗に比例する [4]。

## 5.5 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。

ヒステリシス曲線から式 (12) で求める。この時、単位が [W] になることを確認する。

$$W_h = f \text{ [Hz]} \times A \text{ [m}^2\text{]} \times S \text{ [cm}^2\text{]} \times L \text{ [m]} \times H \text{ [A/m} \cdot \text{1/DIV]} \times B \text{ [Wb/m}^2 \cdot \text{1/DIV]} \quad (12)$$

- $f = 50 \text{ Hz}$  電圧の周波数
- $A = 3.84 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  鉄心断面積
- $L = 0.122 \text{ [m]}$  平均磁路長  
以下は図 9、図 10 を参照
- $S \text{ [cm}^2\text{]}$  測定したヒステリシス曲線の面積
- $H \text{ [A/m} \cdot \text{1/DIV]}$  換算 X 軸測定条件
- $B \text{ [Wb/m}^2 \cdot \text{1/DIV]}$  換算 Y 軸測定条件

この時、磁化力と磁束密度の積の単位は  $[\text{A/m} \cdot \text{Wb/m}^2 = \text{J/m}^3]$  である。そして、面積の算出時に使用した単位換算より、 $[\text{cm}^2 = \text{DIV}^2]$  とする。そして  $[\text{Hz}]$  は  $[1/\text{s}]$  であるため、式 (12) の単位は  $[\text{J/s}]$  となる。つまり、 $[\text{W}]$  である。

表 3: 測定した損失とヒステリシス曲線から求めた損失の比較

入力電圧 $V$ [V]	曲線面積 $S$ [cm <sup>2</sup> ]	測定損失 $P_0$ [W]	算出損失 $P_1$ [W]
80	5.5	2.0	2.0
100	8.3	3.0	3.0

表 3 に、測定した損失と算出した損失を示した。表 3 より、測定した損失と算出した損失が一致したことが確認できる。さらに、単位も一致していることから、式 (12) は適当な計算法であると考えられる。また、図 6 より、電力計の接続位置から、コイルにかかる実効値電圧と流れる電流の積がヒステリシス損失であると考えられる。そのため、ヒステリシス損失とは鉄心で消費される電力であると考えられる。

## 5.6 変圧器の鉄心用珪素鋼板について調べよ。

鉄心用珪素鋼板は電磁鋼板とも呼ばれる [5]。軟鋼に珪素を添加することで、コイルの鉄心の鉄損、つまりヒステリシス損失とうず電流損失を軽減した磁性材料のこと [6]。

## 6 結論

今回、磁気回路と磁性材料について理解することができた。そして、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失の算出法を理解できた。また、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が出来た。よって、本実験の目的は全て達成することができた。

## 参考文献

- [1] あさみあさひこ, “電験 Tips”, 電験の解説と情報サイト, 2021, <https://denki-plantengineer.com/tetsuson#toc3>, 最終アクセス日, 2022/05/23
- [2] , “Electrocal Infomation”, <https://detail-infomation.com/hysteresis-loss/>, 最終アクセス日, 2022/05/23
- [3] “E & M JOBS”, <https://em.ten-navi.com/dictionary/2758/>, 最終アクセス日, 2022/05/23
- [4] “wikipedia”, <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%89%84%E6%90%8D>, 最終アクセス日, 2022/05/23
- [5] “コトバンク”, <https://kotobank.jp/word/%E3%82%B1%E3%82%A4%E7%B4%A0%E9%8B%BC%E6%9D%BF-59019>, 最終アクセス日, 2022/05/23
- [6] “アイアール技術者教育研究所”, <https://engineer-education.com/electrical-steel/>, 最終アクセス日, 2022/05/23