

第3学年 電気電子工学実験実習報告書

4 変圧器を用いた磁性体の磁気特性観測

(Observation of magnetic material using transformer)

実験日 令和 04 年 07 月 14 日 (木)
令和 04 年 07 月 21 日 (木)

班	学生番号	氏名
1	3309	大山 主朗

共同実験者名

3301 青木 柊人 3305 市川 潤

3313 亀田 知典

提出日			備考	評価
予定日	07/21	07/28		
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 磁束 (magnetic flux)[1]

磁気量 q_m の磁極からは q_m 本の磁束が発生し、磁束は途切れたり枝分かれすることはない。磁束に垂直な単位面積の面を貫く磁束を磁束密度 (magnetic flux density) といい、磁束密度 \mathbf{B} と磁界 \mathbf{H} には

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} [\text{Wb/m}^2] \text{ or } [\text{T}] \quad (1)$$

という関係がある。

2.2 磁気双極子 (magnetic dipole)[2]

正負の磁極の対。本質的には微小円電流で以下のように表される。

$$\mathbf{m} = \mu_0 I S \mathbf{n} \quad (2)$$

ここで、 S ：ループ面の面積、 \mathbf{n} ：ループ面の単位法線ベクトルである。

2.3 磁気モーメント (magnetic moment)[2][3]

磁気モーメントは以下のように表すことができる。

$$\boldsymbol{\mu} = I S \mathbf{n} \quad (3)$$

2.4 磁化 (magnetization)[4]

磁界に対して応答を示す物質を磁性体 (magnetic material) という。通常の磁性体には多数の磁気双極子が含まれている。単位体積に含まれる磁気モーメントの和を磁化と呼ぶ。ここで薄い板状の磁性体を考える。板に垂直方向に一樣な磁界がかかっており、外部における磁場を H_0 とすると、磁性体の外部での磁束密度 B は

$$B = \mu_0 H_0 [\text{T}] \quad (4)$$

という関係を満たす。一方、この場合には磁性体は板の厚み方向に磁化されており、その値を M とすると、磁性体の両面には単位面積あたり $\pm \mu_0 M$ の磁極が発生する。このとき磁極は磁性体内部に $-M$ という磁界を発生させる。これらより磁性体内部の磁束密度以下ようになる。

$$\begin{aligned} H &= H_0 - M \\ \mu_0 H &= \mu_0 H_0 - \mu_0 M \\ \mu_0 H &= B - \mu_0 M \\ B &= \mu_0 (H + M) [\text{T}] \end{aligned} \quad (5)$$

となる。向きも含めて考えると上式は式 (6) のようになる。

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) [\text{T}] \quad (6)$$

また、磁界と磁化の関係を式 (7) のように表現する場合

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} [\text{T}] \quad (7)$$

χ を磁化率 (単位は無次元) などと呼び, 式 (6) に代入し, 式 (8) の関係を用いると

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} [\text{T}] \quad (8)$$

式 (9) のような関係があることがわかる.

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \\ \mu \mathbf{H} &= \mu_0 (\mathbf{H} + \chi \mathbf{H}) \\ \mu &= \mu_0 (1 + \chi) [\text{F/m}] \end{aligned} \quad (9)$$

2.5 キュリーの法則 (Curie's law) [5]

常磁性物質において, 磁化率と温度の関係 (反比例) を示す法則で以下のように表すことができる.

$$\chi = \frac{C}{T} [-] \quad (10)$$

ここで, C : キュリー定数 [K], T : 絶対温度 [K]

2.6 磁気回路 (magnetic circuit)

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

$$\phi = \frac{N_1 \cdot I}{R_m} \quad (11)$$

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.

$$R_m = \frac{L}{\mu_0 \mu_s S} \quad (12)$$

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

$$H = \frac{N_1 \cdot I}{L} \quad (13)$$

である.

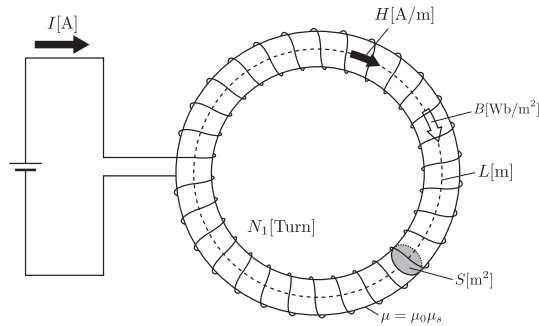


図 1: 磁気回路

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 (Hysteresis curve) になる.

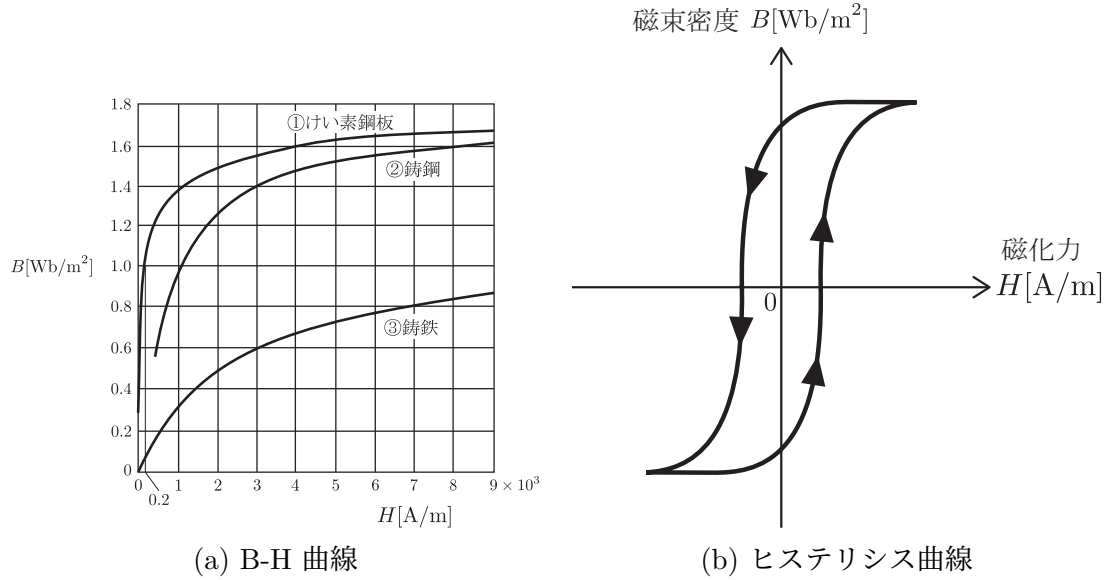
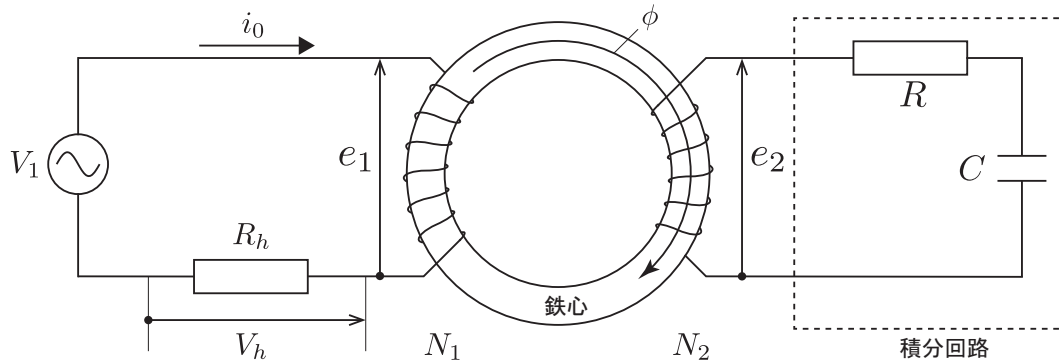


図 2: B-H 曲線とヒステリシス曲線

2.7 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 $\dot{\phi}$ 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 6 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 $\dot{\phi}$ 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 $\dot{\phi}$ 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．



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

$$V_h = i_0 R_h \quad (14)$$

として取り出す．また、交番磁束 $\dot{\phi}$ 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 として現れるため

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (15)$$

となり、式 (15) を変形すると

$$d\phi = \frac{1}{N_2} \times e_2 \times dt \quad (16)$$

となるから，交番磁束 ϕ は式 (16) 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．

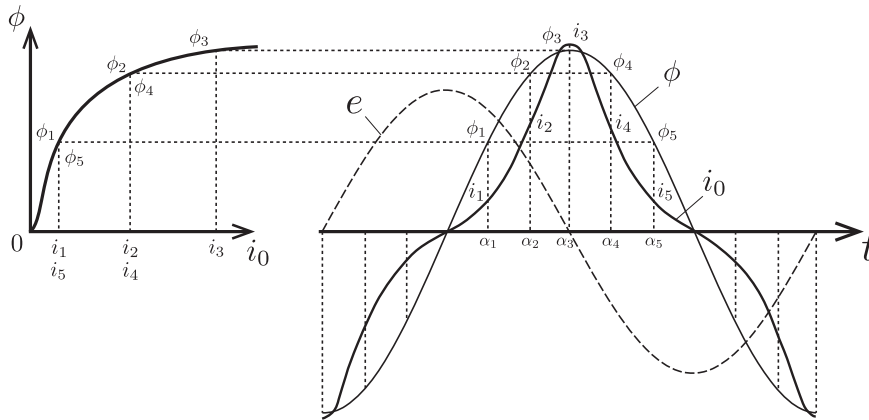


図 4: ヒステリシス現象のない場合

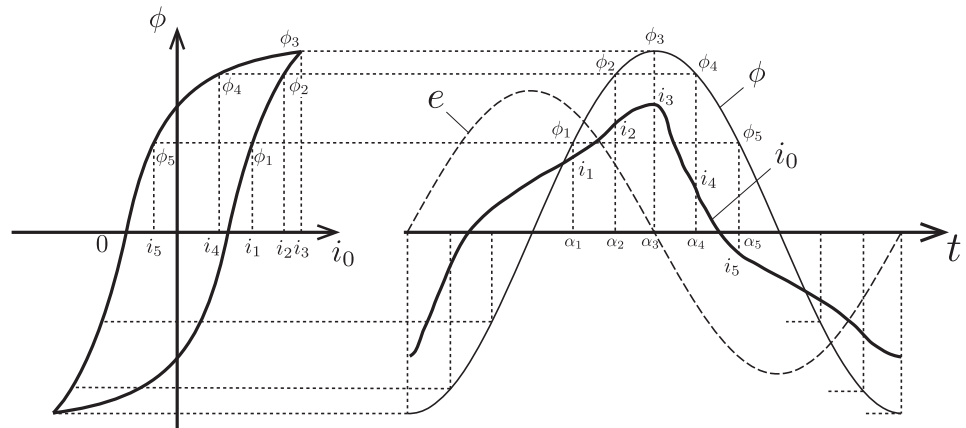


図 5: ヒステリシス現象のある場合

図 6: ヒステリシス現象

2.8 磁区 (magnetic domain)[6]

図 7 にヒステリシスループと磁区の関係を示す．ヒステリシスループにおいてループと縦軸が交わる場所での磁化値を残留磁化といい，ループと横軸が交わる場所での磁界の値を保磁力という．強磁性体は外部磁界がなくても自発磁化を持っているが，全体が一樣に磁化されていると外部の空間に磁界を発生し，その磁界によるエネルギーが余分に余ってしまう．そのため，強磁性体は自らを磁化の向きが異なる区間を磁区といい，磁区どうしの境界面を磁壁という．強磁性は磁気モーメントどうしに互いに同じ向きを向うとする相互作用がはたらくことで出現する．磁壁の両側では異なる向きの磁気モーメントが対峙することになるので，磁壁では余分なエネルギーが発生する．このエネルギーの増加と，外部に磁場を発生させることによるエネルギーの増加の合計を最も小さくするように磁区構造が決まる．

2.9 磁気飽和現象 [8]

界磁電流が大きくなると，エアギャップ磁束が界磁電流に比例せず，頭打ちになる現象．同期機の磁気回路 (磁束の通路) は磁極，エアギャップ，電機子歯，電機子鉄心，界磁継鉄 (円筒界磁機では回転子

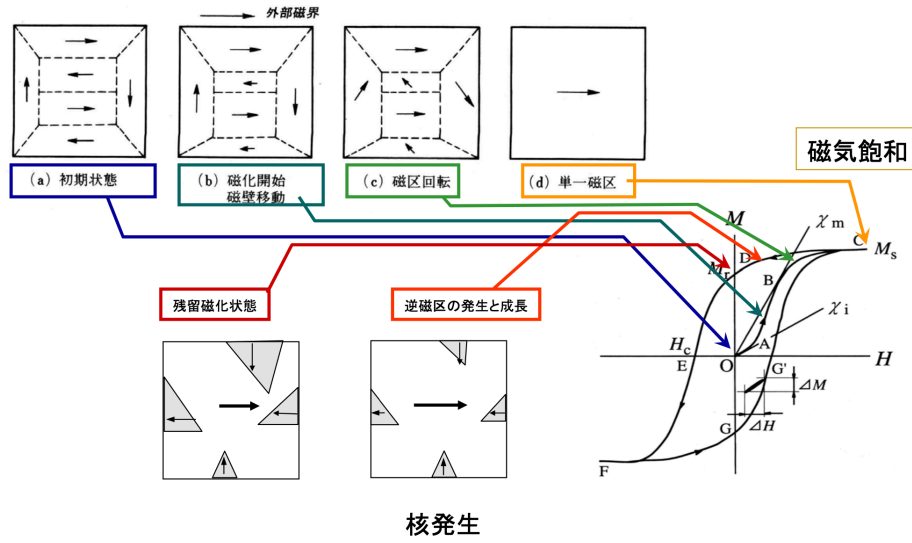


図 7: ヒステリシスループと磁区 [7]

鉄心) からなっており，このうち，エアギャップ以外はケイ素鋼板や鋼材などの強磁性体である．強磁性体の磁気分極は磁界の強さに比例せず，ある値に漸近する磁気飽和現象を有する．

それゆえ，同期機の磁気回路では界磁電流の増加に伴い，エアギャップの磁気抵抗は一定であるが強磁性材料部の磁気抵抗が増大するため，磁束は飽和現象を呈する．磁気飽和の程度を表すのに飽和係数を用い，無負荷飽和曲線上の定格電圧に対して，次式で表される．

$$\text{飽和係数} = \frac{\text{鋼材部分に必要な界磁電流}}{\text{エアギャップに必要な界磁電流}} \quad (17)$$

2.10 ビオ-サバルの法則 (Biot-Savart's law) [9]

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times R}{R^3} \quad (18)$$

2.11 アンペールの法則 (Ampère's circuital law) [10]

積分形のアンペールの法則は以下で与えられる．

$$\oint_C \mathbf{r} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (19)$$

2.12 抵抗損と漂遊負荷損 [11]

ブリッジ法などで測定した巻線の抵抗 (直線抵抗) を r_d とし，巻線に流れる交流電流を I とすると，抵抗損は $I^2 r_d$ である．しかし，実際の損失はこの値より大きくなる．その理由は次の 2 つである．

(1) 導体内のうず電流損

電流による漏れ磁束が導体自身の断面に鎖交するため，導体内にうず電流が発生し，電流密度が不均一になり，導体断面積が減少したのと同じ結果となり抵抗が増加する．またその増加分は 5 ～ 20 % である．また，うず電流は抵抗に反比例するため，巻線の断面積が大きい場合はうず電流を低減することができる [12][13]．

(2) 構造材料内の損失

漏れ磁束の一部は，タンクの側板，締め付けボルトなどを通るため，それらの部分にうず電流損失やヒステリシス損失が生じる．以上の2つを合わせて漂遊負荷損といい，抵抗損の5～20％になる．抵抗損と漂遊負荷損の和が負荷損であるが，その値はほとんど電流の2乗に比例する．すなわち，二次負荷電流を I_2 とすれば負荷損 W_l は

$$W_l = I_2^2 r \quad (20)$$

で表される．

2.13 積分回路

図9に示すようなCR回路を積分回路という．この回路で入力信号を積分した信号を取り出すことができる．同図で $S_1 - S_2$ に電源 $e = E \sin \omega t$ なる電圧が印加されている場合を考える．この時回路を流れる電流 I は $R \gg 1/\omega C$ ならば¹キャパシタにかかる電圧を E_C とすると

$$I = \frac{E_C}{R} \sin \omega t \quad (21)$$

となる．このとき E_C は，コンデンサの電荷を q とすれば

$$E_C = \frac{q}{C} \quad (22)$$

と表せる．また，電荷 q は電流を積分したものであることと，式(21)より

$$\begin{aligned} q &= \int I dt \\ &= \int \frac{E}{R} \sin \omega t dt \end{aligned} \quad (23)$$

式(22)と式(23)より

$$E_C = \int \frac{E}{RC} \sin \omega t dt \quad (24)$$

式(24)より，コンデンサ C の両端電圧 E_C は入力信号 e を積分した信号に比例した信号が得られる．

¹この回路の合成インピーダンスが抵抗のみであると近似できる条件

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

器具名	製造会社	型番	シリアルナンバー
電力計	横河計測	MODEL 2041	L98-000218
電流計	横河計測	TYPE 2013	L94-004860
電圧計	横河計測	TYPE 2052	B-5033.62.14/14
スライダック	東京理工舎	RIKO-SLIDETRANS RSA-2	S57-5.1/15
オシロスコープ	Agilent Technologies	DSO1022A	CN53504828
トランス	菅野電機研究所 (株)	MODEL SP-121	No.2

3.2 実験手順

(a) 励磁電流の観測

i) 図 8 のように回路を構築した.

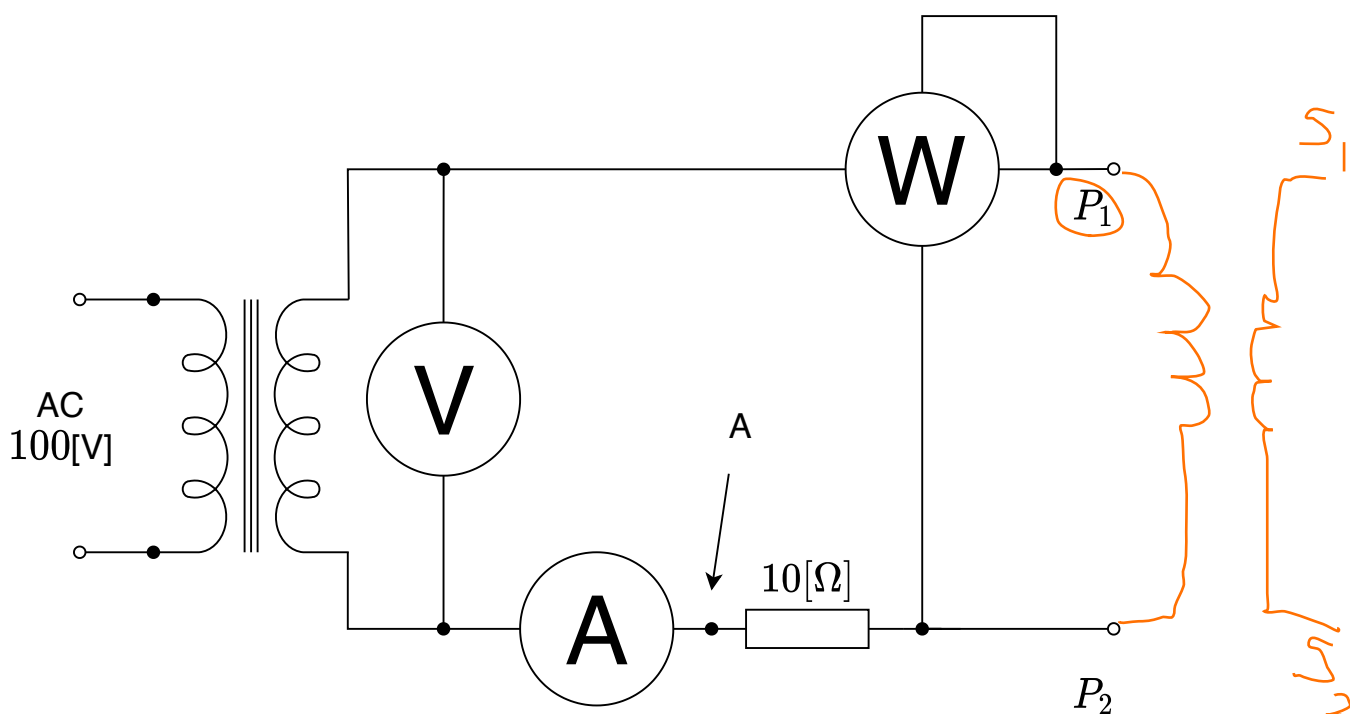


図 8: 測定回路

- ii) オシロスコープの水平感度は 5 ms/DIV に設定.
- iii) オシロスコープの ch1 プローブの GND を同図の P_2 へ, プローブの先を A 点に接続し, ch2 のプローブの GND を P_2 へ, プローブの先を P_1 に接続.

- iv) ch2 の信号を反転させるように設定を変更.²
- v) ch1 の垂直感度を 0.5 V/DIV に, ch2 垂直感度を 50 V/DIV に設定.
- vi) 入力電圧を 75 V ~ 100 V まで 5 V 刻みで変化させ, それぞれの場合における電流と電力を計測した.
- vii) 位相差 θ は Excel で式 (25) を算出して求めた.

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_0}{Vi_0} \quad (25)$$

- viii) 80 V と 100 V の場合においては入力電圧波形及び励磁電流の波形を保存した.

(b) ヒステリシス曲線の測定

- i) 図 8 の P_1 に図 9 の S_1 を図 8 の P_2 に図 9 の S_2 を接続.

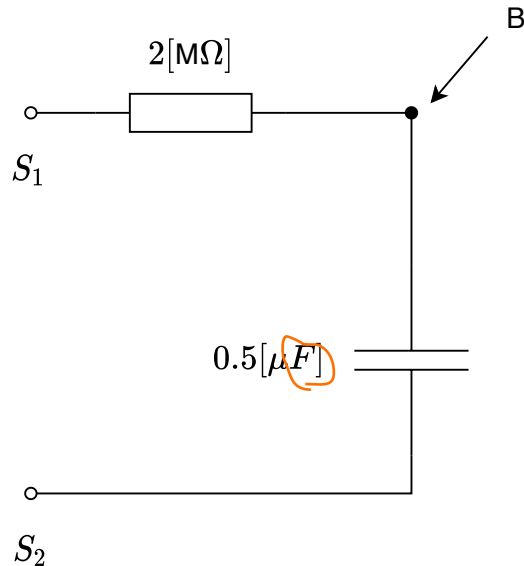


図 9: 積分回路

- ii) ch1 の垂直感度を 0.5 V/DIV とし, ch2 の垂直感度は 20 mV/DIV に設定.
- iii) ch1 プローブの GND を図 8 の P_2 へ, プローブの先を A 点に接続し, ch2 のプローブの GND を図 9 の B 点へ, プローブの先を S_2 に接続.
- iv) ch2 の信号の反転をしたままの状態にした.
- v) 表示を X-Y 表示に変更.
- vi) 入力電圧が 80 V, 100 V のそれぞれの場合における波形を記録した.

²INV スイッチを押す

4 結果

- 入力電圧-励磁電流-電力-電力の関係は表2のようになった。入力電圧上昇とともに電流，電力，位相の増加が確認できる。

表 2: 励磁電流特性

入力電圧 V [V]	電流 i_0 [A]	電力 P_0 [W]	位相 [deg]
75	0.307	1.84	85.41643
80	0.337	2.10	85.53252
85	0.378	2.36	85.78774
90	0.429	2.64	86.07928
95	0.483	2.96	86.30133
100	0.552	3.34	86.53107

5 考察

5.1 課題考察

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。[14]

実際の変圧器では、一次・二次巻線には抵抗があるため、負荷電流が流れると銅損が生じる。また、鉄心の透磁率は無限大ではないため、磁束 ϕ をつくるために電流が必要となる。この電流を励磁電流 (exciting current) という。これによって、鉄心中には鉄損が生じる。

2. 励磁電流がひずみ波形になる理由を説明せよ。

実際の変圧器では、一次巻線に交流電圧を加えると、鉄心の磁気飽和現象 (参考：2.9) やヒステリシス現象 (参考：2.7) が生じるため、励磁電流は非正弦波交流 (ひずみ波形) となる [14]。

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するとき及び使用電圧の周波数が変化するときについてそれぞれ説明せよ。[15]

ヒステリシス損は、鉄心内の磁束が方向及び大きさを変化することにより鉄心を構成する磁気分子が方向・配列を変え、分子相互間に摩擦損が生じることに起因するもの。また、ヒステリシスループの囲む面積に比例する。従って、周波数 f に比例し、さらに、最大磁束 Φ_m のとき磁束密度 B_m がほぼ 1 T 以下では $B_m^{1.6}$ に比例し、1 T 以上では B_m^2 に比例する。普通、 $B_m = 1 \sim 1.8$ T で使用されるため、鉄心の単位質量当たりのヒステリシス損 ω_h は以下で与えられる。

$$\omega_h = \sigma_h f B_m^2 = k_1 \frac{E^2}{f} [\text{W/kg}] \quad (26)$$

ここで、 σ_h ：ヒステリシス損係数、 f ：周波数 [Hz]、 B_m ：最大磁束 Φ_m のときの鉄心磁束密度 [T]、 k_1 ：比例定数、 E ：誘導起電力 [V]

式 (26) より使用電圧及び使用電圧の周波数が増加すると損失も増加することがわかる。

4. 磁性材料のうず電流損について調査せよ。特に使用電圧が変化するとき及び使用電圧の周波数が変化するときについてそれぞれ説明せよ。[15]

うず電流損は、磁束の変化によって鉄心内に起電力を生じ、電流が流れる結果、抵抗損失が生じるもので、鋼板の厚さ、周波数及び磁束密度のそれぞれ 2 乗に比例する。これらより、単位重量当たりのうず電流損 ω_e は次式で与えられる。

$$\omega_e = \sigma_e t^2 f^2 B_m^2 = k_2 t^2 E^2 [\text{W/kg}] \quad (27)$$

ここで、 σ_e ：うず電流損係数、 t ：積層鋼板 1 枚の厚さ [mm]、 k_2 ：比例定数である。

この式 (27) より使用電圧及び使用電圧の周波数が増加すると損失も増加することがわかる。

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。
6. 変圧器の鉄心用珪素鋼板について調べよ。[16]

変圧器の鉄心には、飽和磁束密度と透磁率が大きく、鉄損の少ない電磁鋼板が用いられる。電磁鋼板は、ヒステリシス損を減少させるためケイ素を 4.5 % 程度含有させている。電磁鋼板には一方だけ磁束を通しやすい性質の材料もある。また、1 枚 1 枚の電磁鋼板の表面に施してある絶縁皮膜が、温度上昇の一因となるうず電流が流れるのを防ぐ働きをしている。

5.2 独自考察

1. 理想変圧器とは以下の条件を満たす変圧器のことをいう [17].
 - 巻線の抵抗が 0 である.
 - 鉄心の透磁率が無限大であり、したがって磁気回路における磁気抵抗が 0 である.
 - 鉄心の鉄損が 0 である.
 - 鉄心の磁気飽和は無視できる.
2. 一方、実際の変圧器は理想変圧器と異なり、以下のことを考慮しなければならない [18].
 - 一次及び二次巻線の抵抗や漏れリアクタンスが存在する.
 - 主磁束を作るために起磁力、すなわち励磁電流が必要である.
 - 鉄心中に鉄損が存在する.
 - 鉄心の磁気飽和を無視することは実際上できないが、ここでは特に考慮しない.

6 結論

本実験を通して以下のことを達成することができた.

- 磁気回路と磁性材料についての理解
- 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の理解
- 変圧器における励磁電流，電力，位相差の変化の観測方法の理解

参考文献

- [1] 博. 佐藤, 工学基礎電磁気学 (新・工科系の物理学). 数理工学社 and サイエンス社 (発売), 2019, p. 44. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270467697152>.
- [2] 博. 佐藤, 工学基礎電磁気学 (新・工科系の物理学). 数理工学社 and サイエンス社 (発売), 2019, p. 74. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270467697152>.
- [3] 亨. 宇野 and 宏. 白井, 電磁気学. コロナ社, 2010, p. 200. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282271626280192>.
- [4] 博. 佐藤, 工学基礎電磁気学 (新・工科系の物理学). 数理工学社 and サイエンス社 (発売), 2019, pp. 47–48. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270467697152>.
- [5] 博. 佐藤, 工学基礎電磁気学 (新・工科系の物理学). 数理工学社 and サイエンス社 (発売), 2019, p. 49. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270467697152>.
- [6] 博. 佐藤, 工学基礎電磁気学 (新・工科系の物理学). 数理工学社 and サイエンス社 (発売), 2019, p. 51. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270467697152>.
- [7] 佐藤勝昭, 磁気ヒステリシス その物理的起源, Jul. 2022. [Online]. Available: <https://home.sato-gallery.com/education/denjiki/denjiki2004/D0501280HP.pdf>.
- [8] E. JOBS, 磁気飽和, Jul. 2022. [Online]. Available: <https://em.ten-navi.com/dictionary/2678/>.
- [9] 亨. 宇野 and 宏. 白井, 電磁気学. コロナ社, 2010, p. 230. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282271626280192>.
- [10] 亨. 宇野 and 宏. 白井, 電磁気学. コロナ社, 2010, p. 246. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282271626280192>.
- [11] 茂. 坪島 and 正. 羽田, 図解変圧器：基礎から応用まで. 東京電機大学出版局, 1981, p. 71. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282271832577152>.
- [12] 茂. 坪島 and 正. 羽田, 図解変圧器：基礎から応用まで. 東京電機大学出版局, 1981, p. 73. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282271832577152>.
- [13] 博. 佐藤, 工学基礎電磁気学 (新・工科系の物理学). 数理工学社 and サイエンス社 (発売), 2019, p. 58. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270467697152>.
- [14] 文. 熊谷 and 正. 深尾, 電気機器概論 (First stage シリーズ). 実教出版, 2015, p. 71. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270091029760>.
- [15] 茂. 坪島 and 正. 羽田, 図解変圧器：基礎から応用まで. 東京電機大学出版局, 1981, p. 70. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282271832577152>.
- [16] 文. 熊谷 and 正. 深尾, 電気機器概論 (First stage シリーズ). 実教出版, 2015, p. 66. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270091029760>.
- [17] 一. 三木 and 昭. 下村, 電気機器学 (電気・電子工学ライブラリ). 数理工学社 and サイエンス社 (発売), 2017, p. 61. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000795154912128>.
- [18] 一. 三木 and 昭. 下村, 電気機器学 (電気・電子工学ライブラリ). 数理工学社 and サイエンス社 (発売), 2017, p. 65. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000795154912128>.