

実 験 報 告 書

題 目 B6. 絶縁体の誘電物性

実 験 実 施 日 (西暦) 2024 年 11 月 15 日

提 出 日 (西暦) 2024 年 11 月 28 日

(再 提 出 日 (西暦) 年 月 日)

報告書作成者

学籍番号 8223036 氏名 栗山 淳

共同実験者

学籍番号 8223014 氏名 遠藤 碧海

学籍番号 8223069 氏名 陳 毅 雷

学籍番号 8223040 氏名 小杉 温子

東京理科大学先進工学部マテリアル創成工学科

実験指導者記入欄	
提 出 日 /	署名
再提出指定日 /	
再 提 出 日 /	署名

チェックリスト

- ☒ 「結論」が的確にまとめられているか。
- ☒ 「結論」の長さは適切か。日本語に誤りがないか(論旨，文法，単語)。
- ☒ 「結論」と「実験結果」の整合性がとれているか。
- ☒ 「結論」を導くために必要十分かつ適切な「実験結果」の表現が過不足なくされているか。
- ☒ 「実験結果」はわかりやすく，見やすく，正確に表現されているか。
- ☒ グラフの軸，表の項目，グラフや表のタイトルに漏れはないか，適切か。
- ☒ 有効数字は適切か。単位が漏れていないか。
- ☒ (写真を用いる場合) 写真の明るさやコントラストは適切か。
- ☒ 「実験結果」を得るために必要な「方法」が過不足なく表現されているか。
- ☒ 「目的」が明記されているか。「目的」と「結論」の整合性がとれているか。
日本語が適切か。
- ☒ 「なぜこの目的で実験をしたか」が「背景」に的確に表現されているか。日本語が適切か。
- ☒ 必要に応じて適切に参考文献の引用情報が記述されているか。
参考文献：議論の裏付けを与えるものであるから，実験題目に関係がある文献を偏りがないようにできる限り引用する。文献の表記方法を参考として下記に記述しておく。
 - 1) 著者名，書籍名，発行所，ページ，発行年
 - 2) 著者名，雑誌名，巻，号，ページ，発行年
- ☒ 全体としてわかりやすいか。
- ☒ 「背景」が1ページを超えていないか。
- ☒ 「実験方法」が1ページを超えていないか。
- ☒ 「結論」が100字程度で記されているか。

1. 背景

強誘電体は、外部から電場を加えると自発的な分極を持ち、その分極の方向を電場で切り替えられるという特性を持つ材料である。この特性により、強誘電体はメモリ素子やセンサ、アクチュエータ、コンデンサーといったさまざまな電子デバイスに利用されている¹。代表的な強誘電体には、チタン酸バリウム (BaTiO_3) やジルコン酸鉛チタン (PZT) があり、これらの材料は高い誘電率と大きな自発分極を持つことから、電子工学やエネルギー技術分野で特に重要な役割を果たしている。強誘電体は、電子デバイスの高性能化と小型化に向けた材料として、現代の技術基盤を支える中核的な存在である²。

強誘電体の特性の中で特に注目されるのが、ヒステリシス特性である。ヒステリシス特性は、外部電場に対して分極がどのように応答するかを示すものであり、電場を印加した際の分極の遅れや残留分極の挙動を観察することができる³。この特性は、特にメモリ素子や高誘電率コンデンサーの設計において重要である。ヒステリシス特性を解析することで、強誘電体がどのようにエネルギーを蓄積し、分極を制御できるかを理解することができる。また、強誘電体は高誘電率を持つため、エネルギー貯蔵デバイスとしても利用されている。コンデンサー用途では、高い誘電率によって小型化が可能となり、これにより現代の電子機器の効率性と省スペース化が実現されている。

一方、交流電圧を直流電圧に変換する整流技術も、電力供給や電子機器の動作において欠かせない要素である。交流電源は電力システムの主流であるが、多くの電子機器やデバイスは直流電力を必要とする。そのため、整流回路を用いて電力を変換する必要がある。整流技術では、ダイオードやトランジスタなどの半導体素子を用いて交流波形の正の部分または負の部分を取り出し、直流に変換する。この技術は、家庭用電化製品から産業用設備に至るまで広範囲に使用されており、安定した電力供給を実現している。

近年では、強誘電体を活用した整流技術が注目されている。強誘電体の分極特性を利用することで、効率的なエネルギー変換やノイズの低減が期待されている。この技術は、従来の整流回路とは異なる動作原理を持ち、より効率的で低損失な電力変換を可能にする。また、強誘電体は特定の周波数領域で優れた応答性を持つため、高精度な電力制御が可能となり、次世代のエネルギーデバイス設計において重要な役割を果たすと考えられている。これにより、エネルギー効率の向上や電力供給の安定化が期待されている。

本実験では、強誘電体の特性を明らかにし、その誘電物性を評価することを目的とする。特に、強誘電体のヒステリシス特性を測定し、電場による分極の挙動を解析する。また、交流電圧を直流電圧に近似して変換するプロセスを検討する。

2. 方法

2.1 誘電物性

2.1.1 常誘電体の特性

まず、図 1 のような Sawyer-Tower の回路を作成した。試料として空セルの平行平板コンデンサー C_{x1} を接続し、Y-T モードでの波形を観測した。また、 V_T を X 軸、 V_0 を Y 軸に設定し、X-Y モードでのリサージュ図形を観測した。この時、 V_T の周波数を100,1k,5k,10k,50k,100k,200kHzに変化させ、それぞれのリサージュ図形の変化を調べた。この実験を行うときは、 V_T を三角波、振幅を10Vとした。

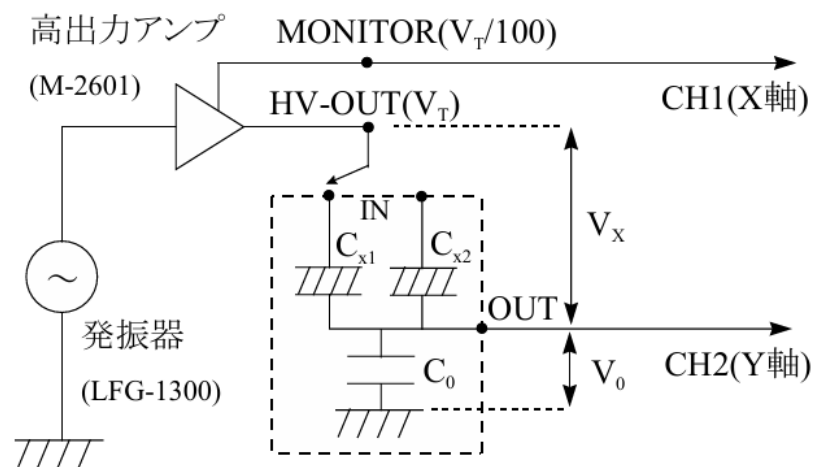


図 1 Sawyer-Tower 回路

2.1.2 強誘電体の特性

測定座量を空セルから強誘電性液晶セルコンデンサー C_{x2} (電極面積 $A = 0.16\text{cm}^2$,電極間距離 $d = 3\mu\text{m}$)に付け替えて、リサージュ図形(X-Y モード)を観測した。この時、 V_T は振幅10V,周波数100Hzの三角波で行った。

2.2 電気回路

2.2.1 過渡現象

抵抗値が $10 \times 10^3 \Omega$ である抵抗と電気容量が $0.1\mu\text{F}$ のコンデンサーそして図 2 の過渡現象測定用回路を用いて図 3 のような RC 直列回路を完成させる。オシロスコープで低周波発信機から短径は上の電圧である $V_i(t)$,とコンデンサー両端の電圧 $V_c(t)$ を観測した。この実験を行う際には、発信機出力端子に T 字型の分岐コネクタをつけ、 V_i をオシロスコープの CH1 に、測定回路を経由した V_c を CH2 につないで観測した。かと状態と定常状態が十分に観測される波形になるように周波数を設定し、その後、観測波系より時定数を求めた。

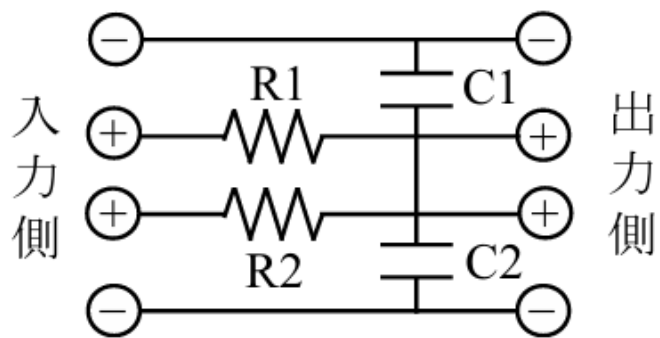


図 2 過渡現象測定用回路

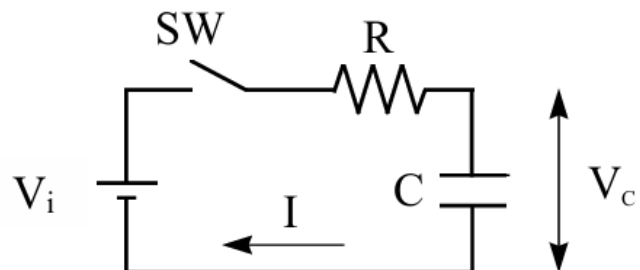


図 3 RC 直列回路

2.2.2 整流作用

まず，図 4 のような半波整流回路を作成した。その後，オシロスコープで波形を観測した。電圧波形から振幅 V_m を求め，その値から直流成分における定数項 $V_m/2\pi$ を求めた。

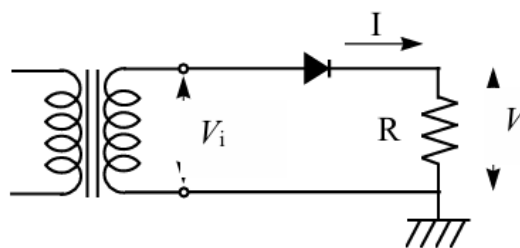


図 4 半波整流回路

次に，図 5 のように全波整流回路をそれぞれ作成した。その後，それぞれの回路におけるオシロスコープで波形を観測し，電圧波形からそれぞれ振幅 V_m を求め，その値から直流成分に

おける定数項 $V_m/2\pi$ を求めた。

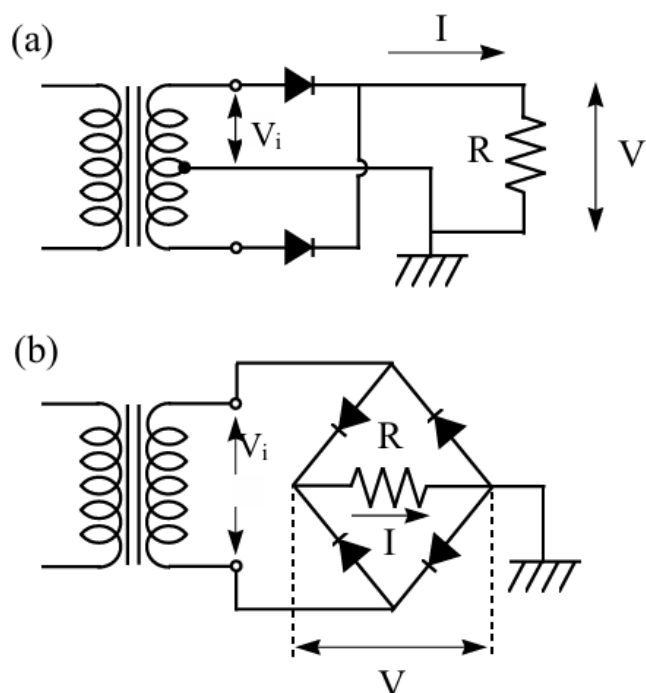


図 5 全波整流回路

2.2.3 平滑回路(コンデンサー入力型)

まず，図 4 および図 5 の回路に $100\mu F$ のコンデンサーを付け加えることによって，図 6 のような半波及び全波整流の平滑回路を作成した。オシロスコープを用いて観測した電圧波形より出力電圧変動率 $\Delta V/V_m$ を算出した。続いてコンデンサーの電気容量を $470\mu F$ に変更し，同様の実験を行った。

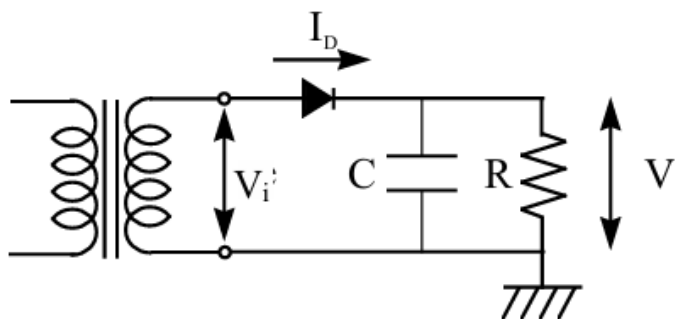


図 6 半波整流の平滑回路

3. 結果及び考察

3.1 誘電物性

3.1.1 常誘電体の物性

V_T の周波数を 100、1k、5k、10k、50k、100k、200k Hz に設定したときの、Y-T モードで観測した電圧の波形をそれぞれ図 6～12 の(1)に示した。また、横軸 CH1,縦軸 CH2 の X-Y モードで観測したリサージュ図形を図 6～12 の(2)に示した。

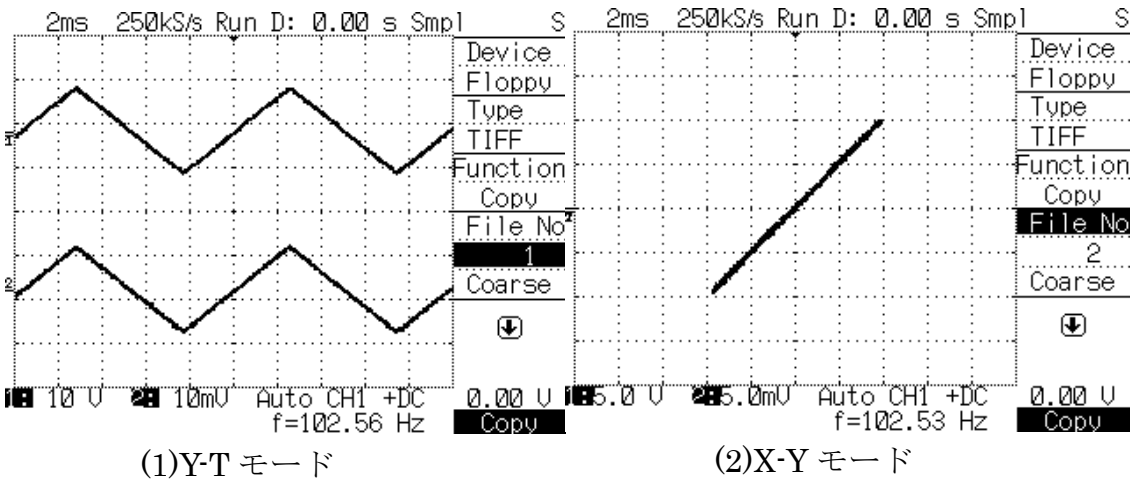


図 6 100Hz における電圧の波形及びリサージュ図形

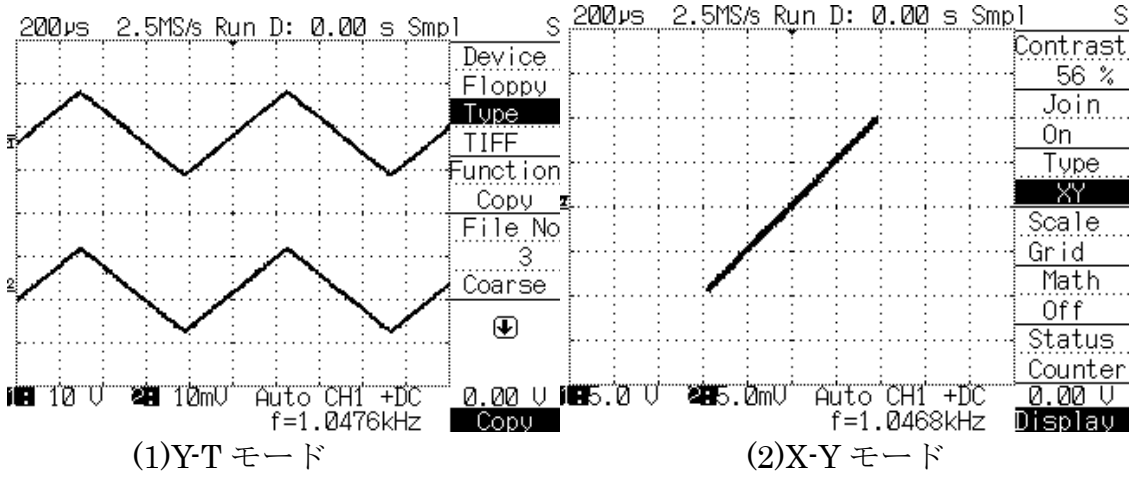


図 7 1kHz における電圧の波形及びリサージュ図形

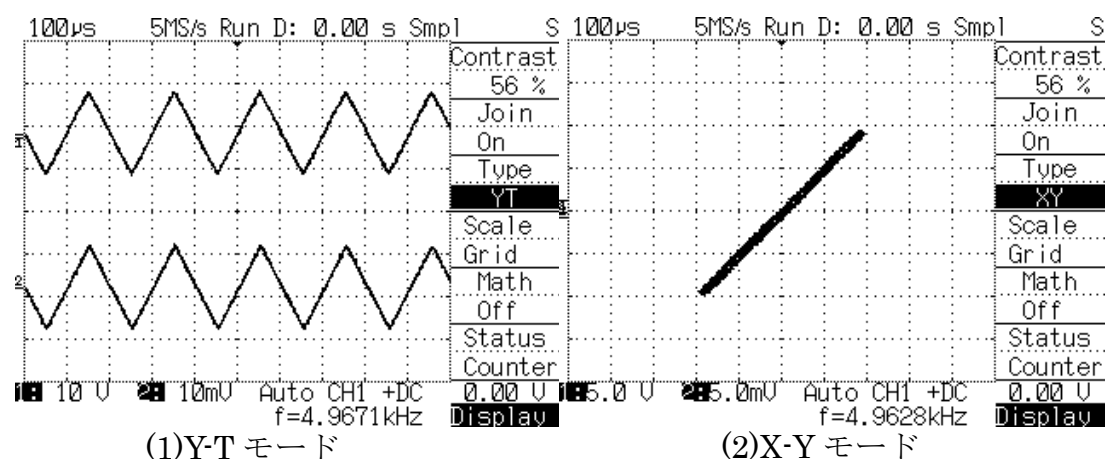


図 8 5kHz における電圧の波形及びリサージュ図形

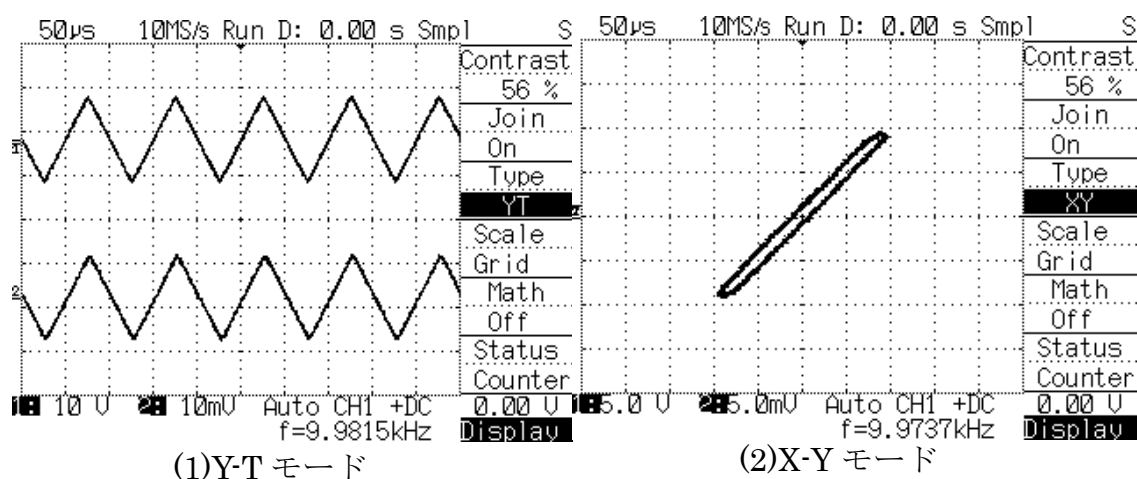


図 9 10kHz における電圧の波形及びリサージュ図形

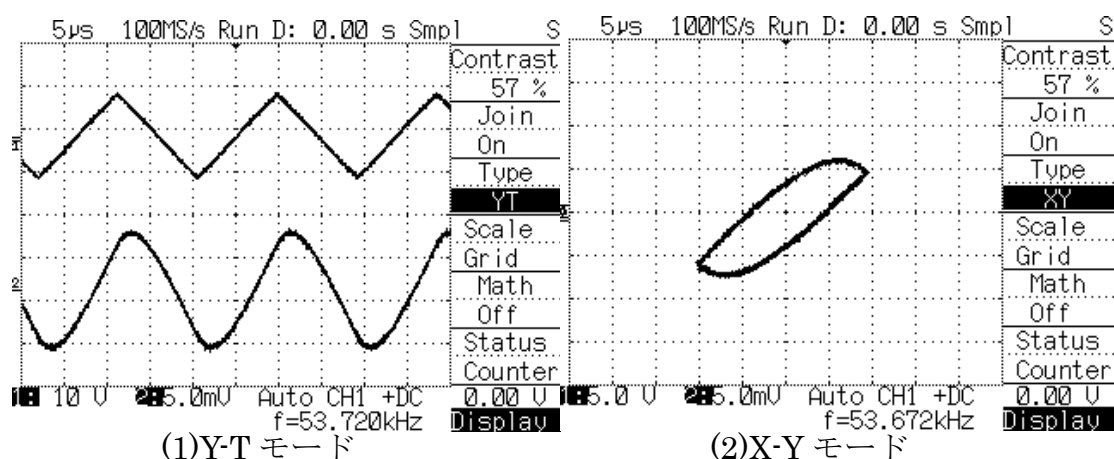


図 10 50kHz における電圧の波形及びリサージュ図形

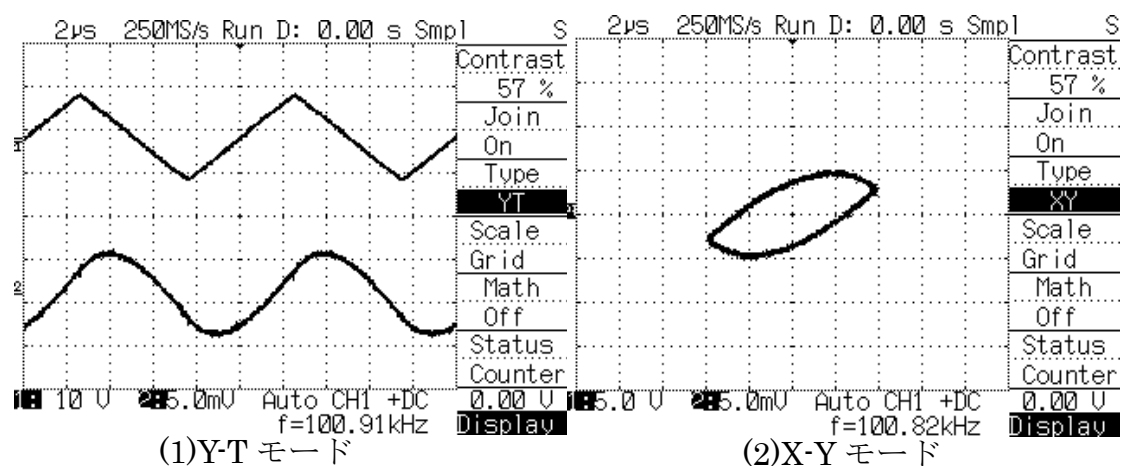


図 11 100kHz における電圧の波形及びリサージュ図形

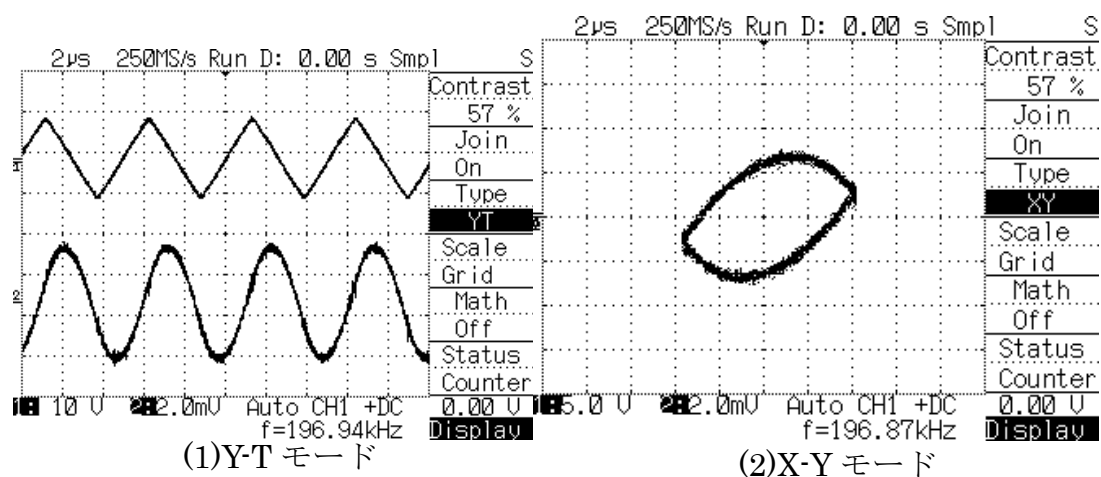


図 12 200kHz における電圧の波形及びリサージュ図形

Y-T モードより出力電圧は、10kHz までは、位相のずれもなく、入力電圧と同様の三角波形であった。しかし、50kHz 以上の周波数では、周波数が高くなるにつれて、入力電圧の位相よりも出力電圧の位相が遅れていった。また、出力電圧の波形は丸みを帯びていた。X-Y モードより周波数が高くなるにつれて、直線形から、楕円に近い形状の図形に近づくことが分かった。

[課題 1]

常誘電体に外部電場を加えると、誘電体内部の電子やイオンが電場に応じて動き、分極が生じる。この分極の応答は、電場の変化速度（周波数）に依存する。

低周波では電場がゆっくりと変化するため、誘電体の分極は電場の変化にほぼ完全に追従し、外部電場と分極の間に位相差は生じない。一方、高周波では電場の変化が急速になるため、誘電体内部の分極が電場の変化に追従しきれず、外部電場と分極の間に位相差が生じる。

この現象は波形とリサージュ図形に反映される。低周波では分極が電場の変化と同期して動くため、波形は入力信号の形を保ちなめらかである。リサージュ図形も、外部電場と誘電体の応答がほぼ同期しているため、細長い楕円や直線に近い形状になる。一方、高周波では分極の遅れが顕著になり、外部電場と分極の間の位相差が大きくなる。その結果、波形に歪みが生じ、リサージュ図形は楕円状や円に近い形に変化する。

分極には電子分極、イオン分極、配向分極の3種類があるが、今回の実験では常誘電体として空気を用いている。空気は窒素や酸素といった非極性分子で構成されており、空気中にはほとんどイオンが存在しない。このため、空気中で発生する分極の主なメカニズムは電子分極である。電子分極は応答速度が非常に速く、高周波まで外部電場に追従できる。そのため、今回の実験における波形やリサージュ図形の変化は電子分極によるものと考えられる。

3.1.2 強誘電体の特性

以下の図 13 に強誘電体に振幅 10V、周波数 100Hz の三角波の電圧をかけた時の X-Y モードにおけるオシロスコープの波形である。

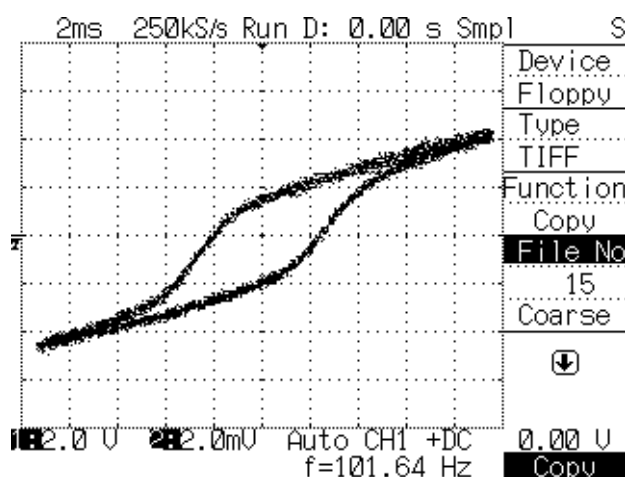


図 13 強誘電体での 100kHz におけるリサージュ図形

図 13 より、この時のリサージュ図形はヒステリシスループと呼ばれる特殊な概形であることが分かった。

[課題 2]

試料を電極面積 A 、電極間距離 d の平行平板コンデンサーとし、電束密度 D を用いると

$$V_0 = \frac{Q}{C_0} = \frac{AD}{C_0} \quad 1$$

真空の誘電率を ϵ_0 、分極を P とすると

$$D = \epsilon_0 E + P \quad 2$$

$E = 0$ のとき, $D = P_s$ となり, P_s は自発分極である

1 式より, $D = \frac{C_0 V_0}{A}$

$A = 1.0 \text{ cm}^2, C_0 = 0.68 \mu\text{F}, V_0 = 1.75 \text{ mV}$ より

$$P_s = \frac{1.75 \times 0.68}{1.0} = 1.19 \times 10^{-3} \approx 1.2 \times \frac{10^{-3} \mu\text{C}}{\text{cm}^2} \quad 3$$

E_c を抗電場とすると次の式が成り立つ。

$$V_x = Ed \quad 4$$

$$E_c = \frac{V_x}{d} \quad 5$$

$d = 3 \mu\text{m}, V_x = 2.1 \text{ V}$ より

$$E_c = \frac{2.1}{3 \times 10^{-6}} = 0.7 \times 10^6 = 7.0 \times \frac{10^3 \text{ V}}{\text{cm}} \quad 6$$

[課題 3]

図 13 より入力電圧について 2V おきに出力電圧 V_0 を読み取り、入力電圧に対応する経過時間 t を 1 周期(0.01s)分併記すると、表 1 のようになった。

表 1 入力電圧と出力電圧の時間変化

時間(s)	入力(V)	出力(mV)
0	0	-2
0.0005	2	-0.5
0.001	4	2
0.0015	6	3
0.002	8	3.5
0.0025	10	4.2
0.003	8	3.9
0.0035	6	3.5
0.004	4	2.8
0.0045	2	2.2
0.005	0	1.6
0.0055	-2	0
0.006	-4	-2.3
0.0065	-6	-3.6
0.007	-8	-4.1
0.0075	-10	-5
0.008	-8	-4.3
0.0085	-6	-3.8
0.009	-4	-3.5
0.0095	-2	-2.8
0.01	0	-2

この表から入力電圧、出力電圧の時間変化をそれぞれグラフにすると図 14、15 のようになった。

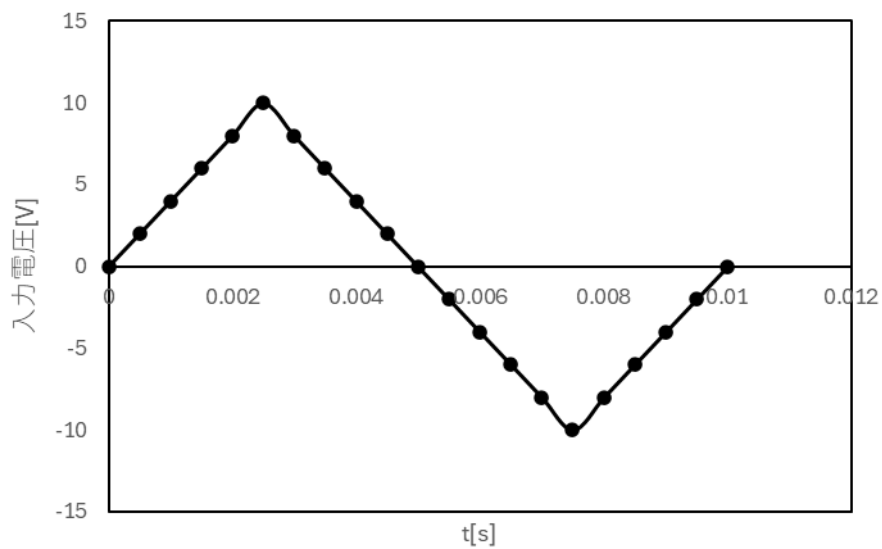


図 14 入力電圧の時間変化

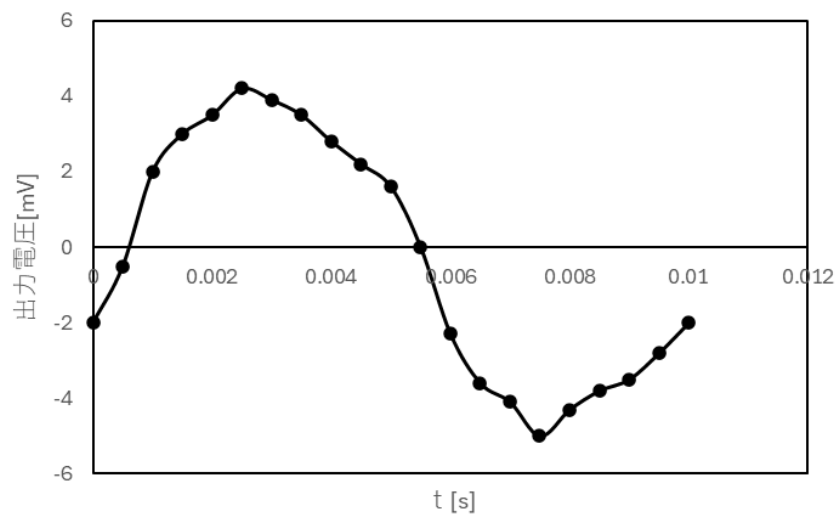


図 15 出力電圧の時間変化

このグラフから入力電圧の波形は三角波となり、出力電圧の波形は入力電圧の波形に比べて丸みを帯びた形状となっていることがわかる。また、2つのグラフで位相差は見られなかった。

[課題 4]

理想的なヒステリシスループは以下のような形状となっている。

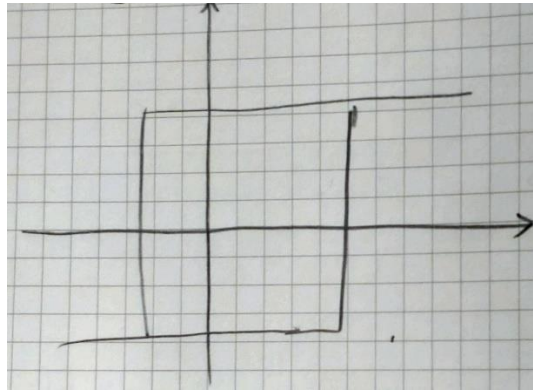


図 16 理想的なヒステリシスループ

実験で観測された強誘電体のヒステリシスループは、理想的なヒステリシスループとは異なっている。このような違いが出てしまった原因としては分極が抗電場に達したときに、強誘電体内部の分極が完全に行われるまでに時間がかかってしまっていることが原因ではないかと考えた。

[課題 5]

3.2 電気回路

3.2.1 過渡現象

図 14 に過渡現象測定用回路を用いて作成した RC 直列回路に電圧を加えた時の電圧 V_i とコンデンサーにかかる電圧 V_c の波形を示した。

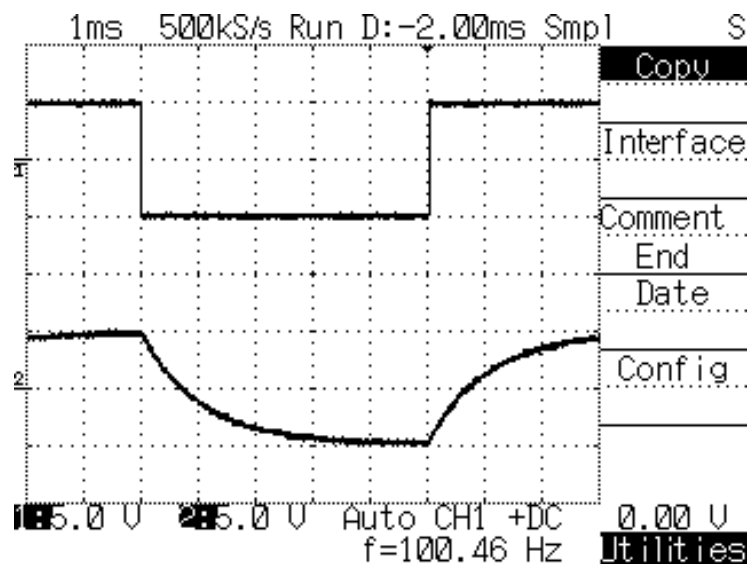


図 17 RC 直列回路による電圧波形

この図よりコンデンサーは充電と放電を繰り返していることがわかる。

[課題 6]

時定数 τ の理論値は、RC 回路における抵抗値 R とコンデンサーの容量 C を用いて次のように表すことができる。

$$\tau = RC \quad 7$$

この式に $R = 10 \times 10^3 \Omega$ 、 $C = 0.1 \mu F$ を代入すると今回の実験における時定数 τ の理論値は次のようになる。

$$\tau = 10 \times 10^3 \times 0.1 = 1.0 \times 10^3 s = 1.0 ms \quad 8$$

続いて時定数 τ の実験値を導出する。充電においてコンデンサー両端の電圧 V_c は定常状態における電圧 V_i を用いて次のように表すことができる。

$$V_{c(t)} = V_i \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad 9$$

$t = \tau$ の時を考えると、入力電圧 V_i は 10V であることから、 $V_c(t)$ は以下のようにあらわされる。

$$V_c(t) = V_i \exp(-1) = \frac{V_i}{e} \approx 0.37V \quad 10$$

図 14 より、 $V_c(t) = 0.37V$ における時定数 $\tau = 12ms$ であることが読み取れる。

ここで時定数の理論値と実験値を比べると実験値の時定数のほうが理論値の時定数よりもはるかに大きいことがわかる。時定数が大きくなるのは式 7 より、抵抗値が大きいか、コンデンサーの容量が大きいかのいずれかが原因であると考えられる。今回の実験では抵抗値が大きいの原因ではないかと考えた。抵抗は回路中の銅線や端子にもあるのでその抵抗が原因となって時定数が理論値よりも大幅に大きくなっていると考えた。

3.2.2 整流作用

半波・全波整流回路を加えた際の出力電圧の波形を図 15 に示した。

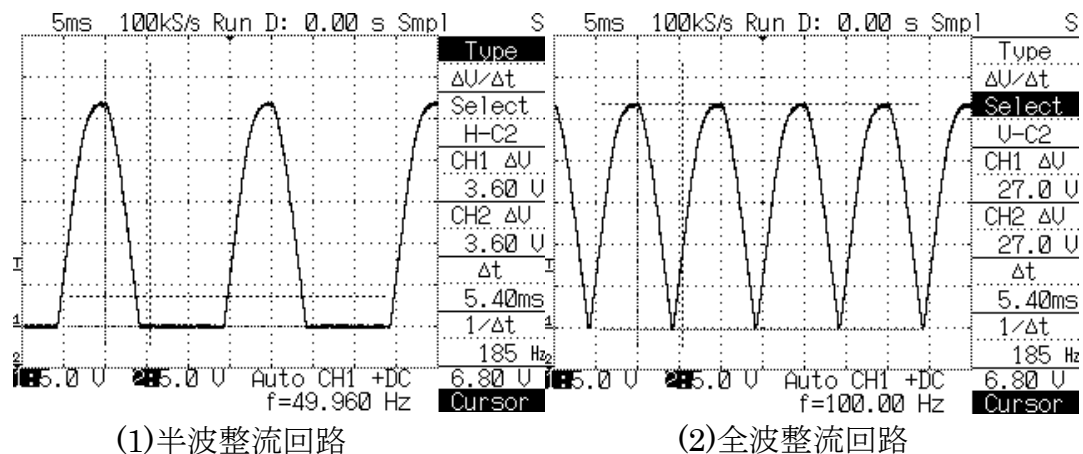


図 18 半波・全波整流回路における出力電圧の波形

この図より、全波整流回路の出力電圧の波形は半波整流回路の出力波形に比べて周期が短いことがわかる。

また、出力電圧の最大値 V_m 及び電圧の直流成分のテスターの測定値をまとめたものを下の表 2 に示した。

表 2 出力電圧の最大値 V_m 及び電圧の直流成分のテスターの測定値

	$V_m [V]$	$V_m/\pi [V]$	$2V_m/\pi [V]$	テスター $[V]$
半波整流回路	27	8.59		8.43
全波整流回路	27		17.2	17.1

[課題 7]

入力電圧が振幅 V_m ,角振動数 ω であり、 $V_i(t) = V_m \sin \omega t$ で表されるとき、半波整流回路の出力電圧 $V_{\text{半波}}(t)$ は次式で表される。

$$V_{\text{半波}}(t) = V_m \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{1}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1 + (-1)^n}{(n^2 - 1)} \cos n \omega t \right) \quad 11$$

全波整流回路の出力電圧 $V_{\text{全波}}(t)$ も同様に次のような式で表すことができる。

$$V_{\text{全波}}(t) = V_m \left(\frac{2}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1 + (-1)^n}{(n^2 - 1)} \cos n \omega t \right) \quad 12$$

11, 12 式の定数項とテスターでは買った電圧の測定値を比較するとテスターでの測定値のほうが低いことがわかる。この原因はテスターの内部には電圧を図るために非常に大きい内部抵抗があり、その抵抗によって電圧降下が起こっているためだと考えられる。

3.2.3 平滑回路

図 16、17 に半波整流回路及び全波整流回路に $100\mu F, 470\mu F$ のコンデンサーをつないだ時の出力波形を示した。

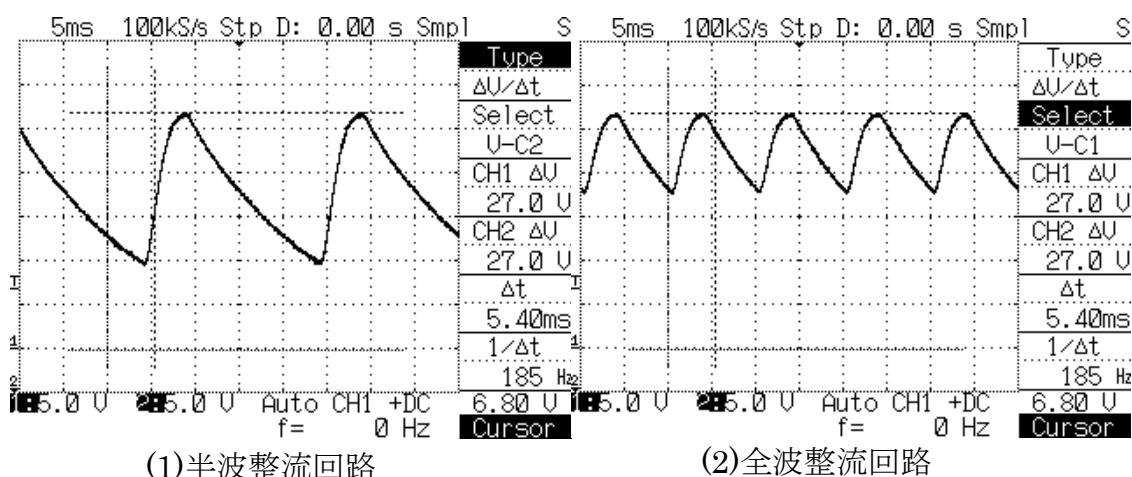


図 19 100 μ Fのコンデンサーを接続した半波・全波整流回路の出力電圧の波形

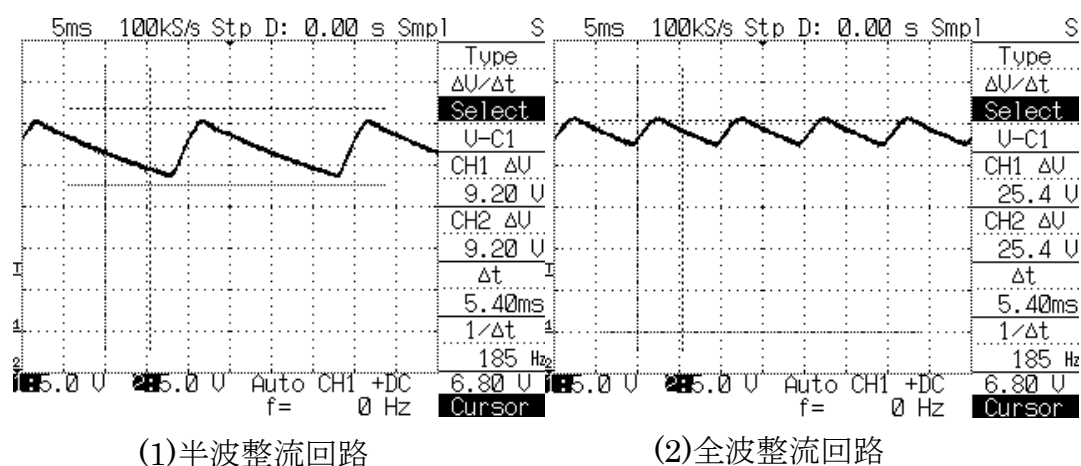


図 20 470 μ Fのコンデンサーを接続した半波・全波整流回路の出力電圧の波形

この図より全波整流回路の出力電圧の波形は半波整流回路の出力波形に比べて周期が短いことがわかる。また、100 μ Fの回路は 470 μ Fの回路に比べて振幅が小さいことがわかる。

[課題 8]

平滑回路におけるグラフから読み取れる波の最大値 V_m と、最大値及び最小値の差 ΔV と、出力電圧変動率 $\Delta V/V_m$ を読み取り、テスターの計測値と合わせてまとめた表は以下のようになった。

表 3 出力電圧変動率とテスター計測値

コンデンサーの容量[μ F]		V_m [V]	ΔV [V]	$\Delta V/V_m$	テスター
100	半波整流回路	27.0	17.5	0.65	18.9
100	全波整流回路	27.0	10.0	0.37	23.0
470	半波整流回路	26.0	8.00	0.31	22.3
470	全波整流回路	26.0	3.00	0.12	24.5

この表から半波整流回路と全波整流回路の出力電圧変動率について比較するとコンデンサーの容量に関係なく半波整流回路のほうが全波整流回路に比べて出力電圧変動率は小さくなっていることがわかる。また、コンデンサーの容量による出力電圧変動率についてみるとコンデンサーの容量が小さいほど出力電圧変動率の値が大きくなることがわかる。次にテスターで測定した電圧と出力電圧変動率についての関係について見てみると、テスターの値は全波整流回路の時と半波整流回路の時を比べると全波整流回路の時が値が大きくなっており、コンデンサーの容量の観点からみるとコンデンサーの容量が大きいほうがテスターの測定した値も大きいことがわかる。

出力電圧変動率は値が小さければ小さいほど直流性が高いことを示しているのでコンデンサーの容量が大きければ、回路の直流性は高まると考えられる。

4. 結論

本実験により、強誘電体のヒステリシス特性が明確化され、電場による分極挙動が解析された。また、交流電圧を直流電圧に近似変換するとき、コンデンサーの容量が大きい必要があることが明らかになった。

5. 参考文献

1. 鈴置保雄編、新インターユニバーシティ 電気電子材料、オーム社、P71~78、2023
2. 図解入門よくわかる最新有機 EL &液晶パネルの基本と仕組み 2020 年 1 月 20 日 第 1 版第刷 斎藤勝裕 p110~125
3. 西久保靖彦,最新 半導体のしくみ,ナツメ社,P.46, 2010