

1 目的

本実験は、抵抗 R とコンデンサ C の2つの素子で構成されるフィルタ回路の周波数応答を調べ、フィルタ回路についての理解を深めることを目的とする。

2 概要

2.1 フィルタ回路とは

インダクタのインピーダンスは周波数に比例し、コンデンサのインピーダンスは周波数に反比例する。これらの特性を利用することで、入力信号の特定の周波数に対して「通過」もしくは「遮断」することができる。これらの現象は「フィルタ」と呼ばれ、これらの動作を行う回路をフィルタ回路 [1] [2] と呼ぶ。

2.2 フィルタの種類

以下の図 1 にフィルタの種類とその特徴を示す。

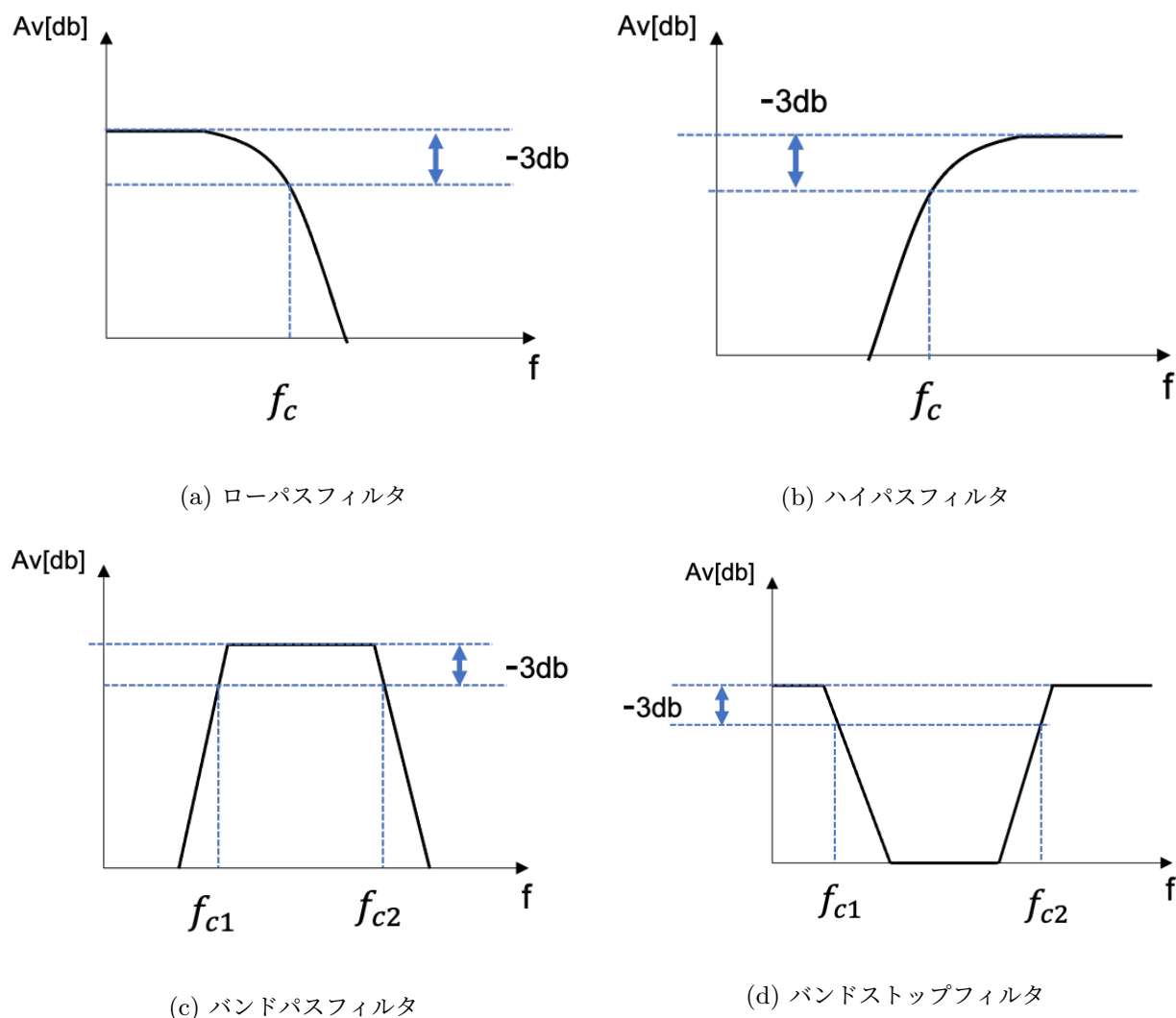


図 1: フィルタの種類

1. ローパスフィルタ (低域通過型フィルタ, LPF)(図 1a) ある周波数 f_c より低い周波数帯域の信号のみを通すフィルタ。

2. ハイパスフィルタ (高域通過型フィルタ, HPF)(図 1b) ある周波数 f_c より高い周波数帯域の信号のみを通すフィルタ.
3. バンドパスフィルタ (帯域通過型フィルタ, BPF)(図 1c) カットオフ周波数 f_{c1} , f_{c2} を持ち, それらの間の周波数帯域の信号のみを通すフィルタ. 中心周波数 f_0 付近の周波数を取り出すための目的にも利用されることもある.
4. バンドストップフィルタ (帯域阻止型フィルタ, BSP)(図 d) バンドパスフィルタとは反対に, カットオフ周波数 f_{c1} , f_{c2} に挟まれた周波数帯域の信号を阻止し, それ以外の信号を通すフィルタ. バンドリジェクションフィルタとも呼ばれる.

2.3 RC ローパスフィルタ

以下の図 2 に RC 型ローパスフィルタの回路を示す.

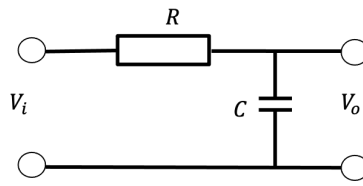


図 2: RC 型ローパスフィルタ

この回路における V_i と V_o の関係を分圧則を用いて考えると, 以下の式 1 のように表すことができる.

$$V_o = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} V_i = \frac{1}{1 + j\omega RC} V_i \quad (1)$$

また, このときの V_i と V_o の比の絶対値 (ゲイン) は以下の式 2 のようになる.

$$G = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad (2)$$

ゲイン G を用いると, 電圧利得を以下の式 3 で表すことができる.

$$A = 20 \log G [\text{dB}] \quad (3)$$

式 3 において, $A = -3\text{dB}$ となる周波数はカットオフ周波数と言われ, f_c で表される. RC 型ローパスフィルタのカットオフ周波数は以下の式 4 となる.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

2.4 RC ハイパスフィルタ

以下の図 3 に RC 型ハイパスフィルタの回路を示す.

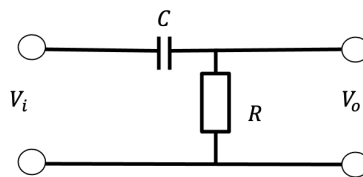


図 3: RC 型ハイパスフィルタ

この回路における V_i と V_o の関係を分圧則を用いて考えると、以下の式 5 のように表すことができる。

$$V_o = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} V_i = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} V_i \quad (5)$$

また、このときの V_i と V_o の比の絶対値 (ゲイン) は以下の式 6 のようになる。

$$G = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad (6)$$

ゲイン G を用いると、電圧利得を以下の式 7 で表すことができる。

$$A = 20 \log G [\text{dB}] \quad (7)$$

式 7 において、 $A = -3\text{dB}$ となる周波数はカットオフ周波数と言われ、 f_c で表される。RC 型ローパスフィルタのカットオフ周波数は以下の式 8 となる。

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (8)$$

3 実験環境

以下の表 1 に使用した実験器具を示す。

表 1: 使用した実験器具

ファンクションジェネレータ	RIGOL DG1022 No.23
オシロスコープ	Agilent Technologies DSO1024A No.2
定抵抗	996.8Ω
コンデンサ	0.476μF
ブレッドボード	
配線ケーブル	

4 実験方法

本実験は実験資料 [1] に準じて行う。以下にローパスフィルタとハイパスフィルタそれぞれの実験手順について示す。

4.1 ローパスフィルタの周波数特性測定

1. 定抵抗とコンデンサを使用し、図 2 の回路を作成する。
2. ファンクションジェネレータで振幅を 5V に調節し、フィルタ回路の入力に接続する。
3. オシロスコープの CH1 で入力信号を測定し、CH2 で出力信号を測定する。
4. 入力信号の周波数を任意の値に変更しながら、CH1 と CH2 の信号を同時に観測し、振幅を計算する。
5. 実行結果をもとに、電圧利得 (dB) を計算しグラフ化する。

4.2 ハイパスフィルタの周波数特性測定

1. 定抵抗とコンデンサを使用し、図 3 の回路を作成する。

2. ファンクションジェネレータで振幅を 5V に調節し、フィルタ回路の入力に接続する。
3. オシロスコープの CH1 で入力信号を測定し、CH2 で出力信号を測定する。
4. 入力信号の周波数を任意の値に変更しながら、CH1 と CH2 の信号を同時に観測し、振幅を計算する。
5. 実行結果をもとに、電圧利得 (dB) を計算しグラフ化する。

5 実験結果

5.1 ローパスフィルタの周波数特性測定

以下の表 2 と図 5 にローパスフィルタ回路における測定結果を示す。

表 2: ローパスフィルタ回路の測定結果

Freq[Hz]	V_{out}	V_{in}	G(測定値)	db	G(理論値)	db(理論値)
10	9	10.6	0.849056604	-1.421267117	0.971715923	-0.249213616
15	9.3	10.4	0.894230769	-0.971007815	0.958445116	-0.368655026
20	10	10.2	0.980392157	-0.172003435	0.94570359	-0.484899244
30	9.7	10.2	0.950980392	-0.43656875	0.921674322	-0.708450242
50	10.4	10.4	1	0	0.878644489	-1.123736209
60	9.8	10.4	0.942307692	-0.516145272	0.859272816	-1.317378549
70	10.6	10.4	1.019230769	0.165450519	0.841128397	-1.50275409
80	10.4	10.4	1	0	0.824086893	-1.680539866
90	10.4	10.4	1	0	0.808040912	-1.851332998
100	10.6	10.2	1.039215686	0.33411387	0.792897156	-2.015662802
150	9.8	10.2	0.960784314	-0.347481921	0.728177601	-2.755253683
200	9	10.2	0.882352941	-1.087153246	0.677093102	-3.387032219
250	8.2	10.2	0.803921569	-1.895726388	0.635442967	-3.938468458
300	7.8	10.2	0.764705882	-2.330111381	0.600640332	-4.427710182
350	7.4	10.2	0.725490196	-2.787369041	0.570993573	-4.867375597
400	6.8	10.2	0.666666667	-3.521825181	0.545343693	-5.266594096
450	6.4	10.2	0.62745098	-4.048403956	0.522866444	-5.632184578
500	6	10.2	0.588235294	-4.608978428	0.502957466	-5.969374814
550	5.4	10.2	0.529411765	-5.524128239	0.485162195	-6.282260957
600	5.2	10.2	0.509803922	-5.851936563	0.469131275	-6.574112275
650	4.8	10	0.48	-6.375175252	0.454591187	-6.847579756
700	4.6	10	0.46	-6.744843366	0.441324319	-7.104842805
750	4.6	10	0.46	-6.744843366	0.429155079	-7.347714869
800	4.2	10	0.42	-7.535014192	0.417940009	-7.57772104
850	4	10	0.4	-7.958800173	0.407560601	-7.796156128
900	4	10	0.4	-7.958800173	0.397917976	-8.004128811
1000	3.6	10	0.36	-8.873949985	0.380522733	-8.392387857
2000	2.2	10	0.22	-13.15154638	0.279373335	-11.07630095
3000	1	10	0.1	-20	0.231133832	-12.72272959

表 2: ローパスフィルタ回路の測定結果

4000	0.82	10	0.082	-21.72372295	0.201518002	-13.91372302
5000	0.66	10.2	0.064705882	-23.78112472	0.180979628	-14.84740616
6000	0.56	10.2	0.054901961	-25.2082429	0.165663835	-15.61544581
7000	0.48	10.2	0.047058824	-26.54717869	0.153676459	-16.2678531
8000	0.42	10.2	0.041176471	-27.70701763	0.143963816	-16.83493299
9000	0.38	10.2	0.037254902	-28.5763315	0.135886941	-17.33644556

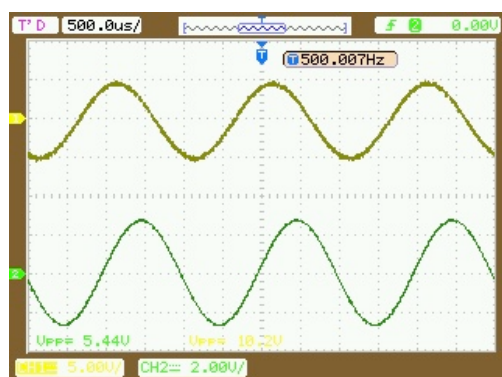
また、以下の図 4 に実験中に取得したオシロスコープの波形を示す。



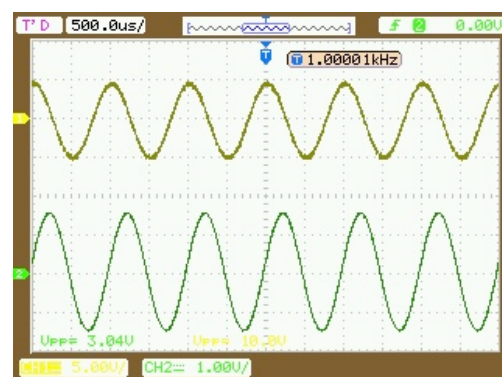
(a) 10Hz のとき



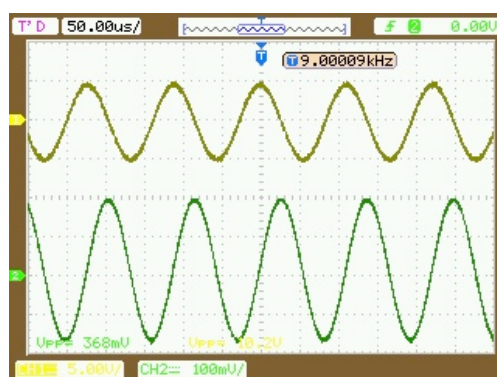
(b) 100Hz のとき



(c) 500Hz のとき



(d) 1000Hz のとき



(e) 9000Hz のとき

図 4: LPF 回路におけるオシロスコープの出力

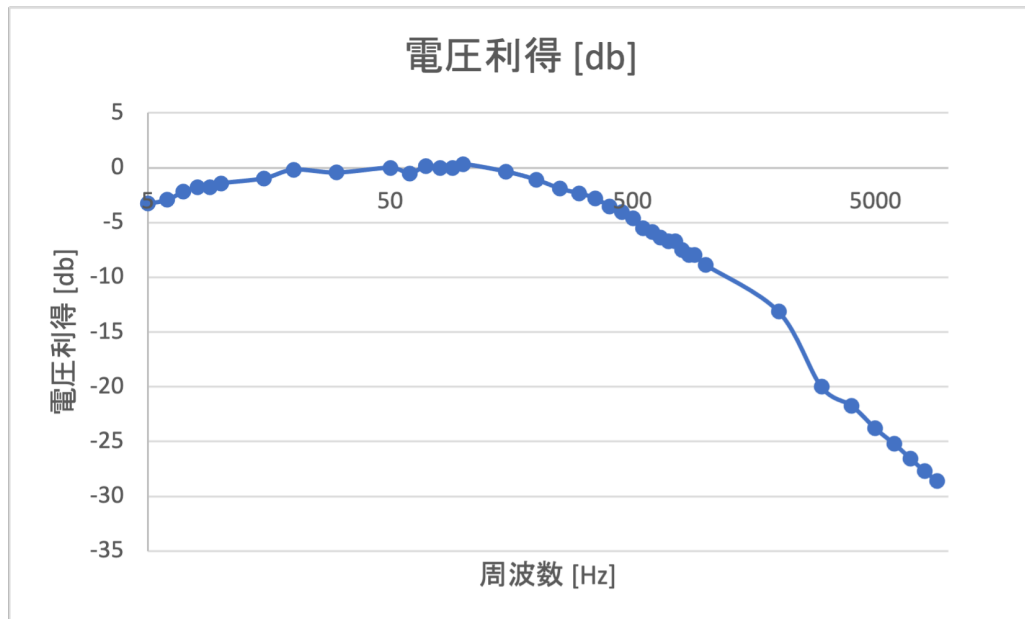


図 5: ローパスフィルタ回路の測定結果

以上のデータからもわかるように、周波数が低い領域では V_{in} と V_{out} はほとんど変わりがなく、信号が通過していて、周波数が高い領域では V_{out} がとても低くなり、ほとんどの信号を阻止していることがわかる。図 4a を見ると、入力信号 (黄) と出力信号 (緑) は振幅は変化がないが、図 4e では振幅に大きな違いが見られ、RC 型ローパスフィルタが正常に動作したことがわかる。

5.2 ハイパスフィルタの周波数特性測定

表 3: ハイパスフィルタ回路の測定結果

Freq[Hz]	V_{out}	V_{in}	G(測定値)	db(測定値)	G(理論値)	db(理論値)
10	0.288	10.4	0.027692308	-31.15281703	0.029104358	-30.72083963
20	0.6	10.6	0.056603774	-24.9430923	0.057391429	-24.82305918
30	0.88	10.4	0.084615385	-21.45101334	0.084911445	-21.42067541
40	1.17	10.4	0.1125	-18.97694955	0.111710181	-19.03814489
50	1.47	10.6	0.138679245	-17.15977061	0.137829469	-17.21315837
60	1.84	10.4	0.176923077	-15.04431033	0.163307626	-15.73987071
70	2.16	10.6	0.203773585	-13.81704228	0.188179837	-14.50853825
80	2.4	10.4	0.230769231	-12.73644195	0.212478481	-13.45370094
90	2.72	10.6	0.256603774	-11.81473922	0.23623342	-12.53317325
100	2.96	10.4	0.284615385	-10.91483256	0.259472249	-11.71818168
150	4.3	10.6	0.405660377	-7.836748194	0.368757747	-8.665176953
200	5.2	10.2	0.509803922	-5.851936563	0.468300457	-6.589508363
250	6	10.2	0.588235294	-4.608978428	0.559962036	-5.036828327
300	6.6	10.2	0.647058824	-3.781124724	0.645113747	-3.807274062
350	7.1	10.2	0.696078431	-3.146836461	0.724794208	-2.795705713
400	7.5	10	0.75	-2.498774732	0.799808668	-1.940277866
450	7.8	10.2	0.764705882	-2.330111381	0.870793959	-1.201691845
500	8	10.2	0.784313725	-2.110203695	0.938262389	-0.553513845

表 3: ハイパスフィルタ回路の測定結果

550	8.3	10.2	0.81372549	-1.790441588	1.002632248	0.022833374
600	8.4	10.2	0.823529412	-1.686417714	1.064249531	0.540869352
650	8.5	10	0.85	-1.411621486	1.123403747	1.010717359
700	8.7	10	0.87	-1.209614948	1.180339623	1.440139729
750	8.8	10	0.88	-1.110346557	1.235265945	1.835209368
800	8.8	10	0.88	-1.110346557	1.288362301	2.20076017
850	8.8	10.2	0.862745098	-1.282349992	1.339784333	2.540697898
900	8.9	10	0.89	-1.012199867	1.389667839	2.858220137
950	9	10.2	0.882352941	-1.087153246	1.438132048	3.155975287
1000	9	10	0.9	-0.915149811	1.485282231	3.436179711
1500	9.3	10.2	0.911764706	-0.802344464	1.901004925	5.579664838
2000	9.4	10.2	0.921568627	-0.709446363	2.247441154	7.033766582
2500	9.4	10	0.94	-0.537442928	2.549908907	8.130493319
3000	9.4	10.2	0.921568627	-0.709446363	2.821474517	9.009522644
3500	9.4	10.2	0.921568627	-0.709446363	3.069862475	9.742378404
4000	9.4	10	0.94	-0.537442928	3.300066338	10.3704534

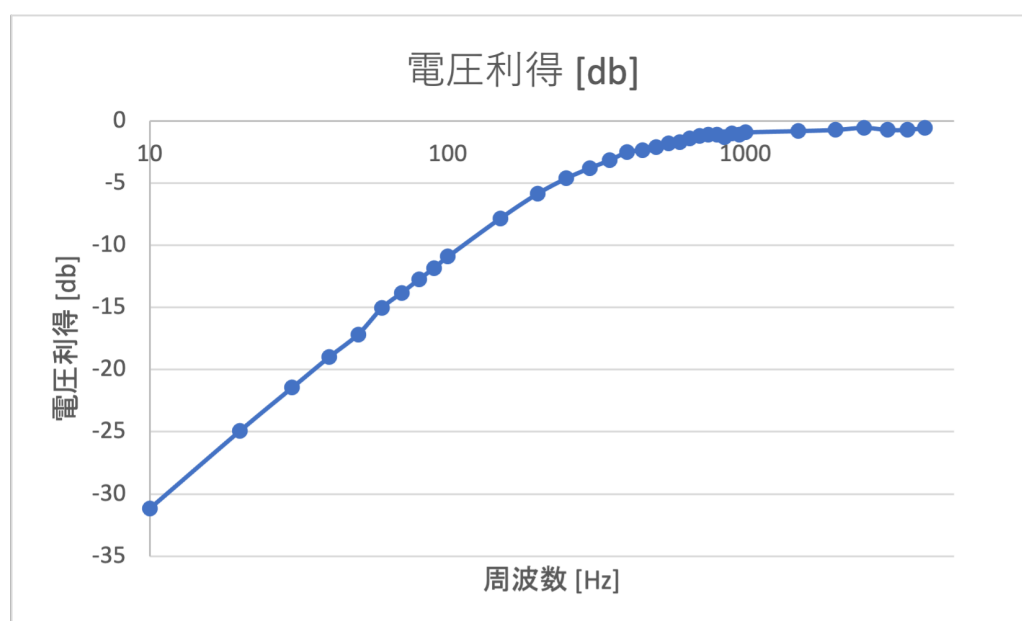
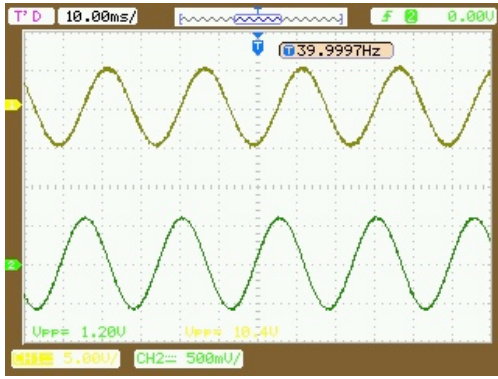


図 6: ハイパスフィルタ回路の測定結果

また，以下の図 7 に実験中に取得したオシロスコープの波形を示す．



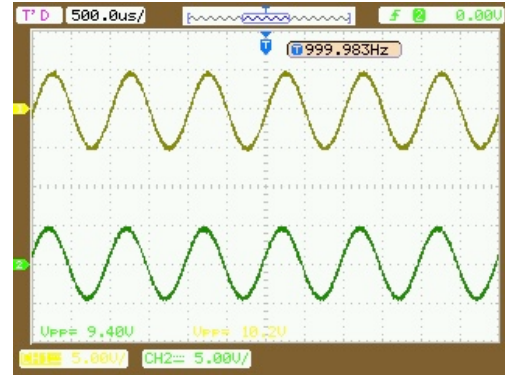
(a) 40Hz のとき



(b) 100Hz のとき



(c) 500Hz のとき



(d) 1000Hz のとき

図 7: HPF 回路におけるオシロスコプの出力

以上のデータからもわかるように、周波数が高い領域では V_{in} と V_{out} はほとんど変わりがなく、信号が通過していて、周波数が低い領域では V_{out} がとても低くなり、ほとんどの信号を阻止していることがわかる。図 7d を見ると、入力信号 (黄) と出力信号 (緑) は振幅は変化がないが、図 7a では振幅に大きな違いが見られ、RC 型ハイパスフィルタが正常に動作したことがわかる。

6 考察

6.1 カットオフ周波数

本実験でのカットオフ周波数を式 4.8 を用いて計算する。本実験で使用した抵抗 R とコンデンサ C はそれぞれ表 1 に示した値であり多少の誤差が含まれる。以下の式 9 に測定値から求めたカットオフ周波数を示し、式 10 に理論値から求めたカットオフ周波数を示す。

$$\begin{aligned}
 f_c &= \frac{1}{2\pi RC} \\
 &= \frac{1}{2\pi \times 996.8 \times 0.496 \times 10^{-6}} \\
 &= 321.907 \text{ Hz}
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 f_c &= \frac{1}{2\pi RC} \\
 &= \frac{1}{2\pi \times 1000 \times 0.47 \times 10^{-6}} \\
 &= 338.628 \text{ Hz}
 \end{aligned} \tag{10}$$

上式や，実験結果からわかるようにカットオフ周波数に理論値と異なるズレが生じた．これらは回路に用いた素子の誤差が原因だと考えられる．

6.2 バンドパスフィルタ回路

バンドパスフィルタ [3] は図 1c に示したような特徴をもつフィルタであり，LPF と HPF 2つを用いることで作成することができる．以下の図 8 に回路例を示す．

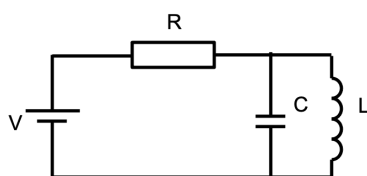


図 8: バンドパスフィルタの回路例

この回路における共振周波数が，バンドパスフィルタの信号を一番多く通す周波数帯であり，共振周波数は以下の式 11 で示される．

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (11)$$

6.3 バンドストップフィルタ回路

バンドストップフィルタ [4] とは，ある範囲の信号のみを減衰させ，それ以外の信号を通すフィルタのことであり，減衰させる周波数の範囲が狭くなったものはノッチフィルタと言われている．以下の図 9 にノッチフィルタ回路の例を示す．

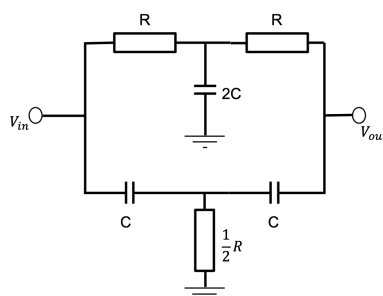


図 9: ノッチフィルタの回路例

減衰させる周波数は以下の式 12 で示すことができる．

$$f_N = \frac{1}{2\pi CR} \quad (12)$$

参考文献

- [1] 制御情報システム工学科 4 年実験指導書: ” フィルタ回路”, 2020 (最終閲覧日 2021 年 7 月 1 日)
- [2] APS: ” ローパスフィルタとハイパスフィルタを学ぶ” (最終閲覧日 2021 年 7 月 1 日)
<https://www.aps-web.jp/academy/ec/539/>
- [3] APS: ” バンドパスフィルタで特定の周波数範囲を扱う” (最終閲覧日 2021 年 7 月 5 日)
<https://www.aps-web.jp/academy/ec/541/>

[4] Electrical information: ”【ノッチフィルタとは】設計方法や用途について” (最終閲覧日 2021 年 7 月 5 日)

<https://detail-infomation.com/notch-filter/>