

1 目的

我々が学んでいる電気回路について，抵抗・コイル・コンデンサからなる直列共振回路の周波数特性・方形波応答の測定を通じて理解する．同時に，電気回路を測定する，オシロスコープ，ファンクションジェネレータなどの測定器の扱いを学ぶ．

2 原理

原理です．

3 実験方法

本章では，今回行った実験について，その手順を示す．

3.1 直列共振回路の測定

抵抗，コンデンサ，コイルを用いた直列共振回路について，その周波数特性と，方形波応答を測定した．

3.1.1 アドミタンスの周波数特性の測定

直列共振回路のアドミタンスについて，各周波数の入力信号に対する，出力電圧を測定することで，周波数特性を測定した．

本実験に用いた測定系を図 1，回路を図 2 に示す．

本実験の実験手順を次に示す．

1. ユニバーサル基板上に，図 2 に示す回路を構成した．
2. 図 1 に示す測定系を構成した．
3. オシロスコープのプロープの校正を行った．
4. ファンクションジェネレータの出力をおよそ 1[MHz] に調整し，前後に変化させて，バンドパスフィルタとして機能していることを確認した．
5. ファンクションジェネレータの周波数を 500[kHz] から，4[MHz] まで変化させ，オシロスコープの Peak to Peak 電圧測定機能を用いて，出力電圧 V_o [Vp-p] を測定した．この時，入力電圧 V_i は 6[Vp-p] 一定となるようにした．また，アドミタンスを $Y = (V_o/R)/V_i$ [S] により計算した．但し， $R = 4.7[\Omega]$ である．
6. 同時に，入力信号を基準とした出力電圧の位相ずれを，オシロスコープのカーソル機能を用いて，2 つの信号の時間差 Δt を測定することにより行った．時間差は，波形のピークの時間差をとることにより測定した．また，位相差は， $\theta = 360f\Delta t$ を用いて計算した．

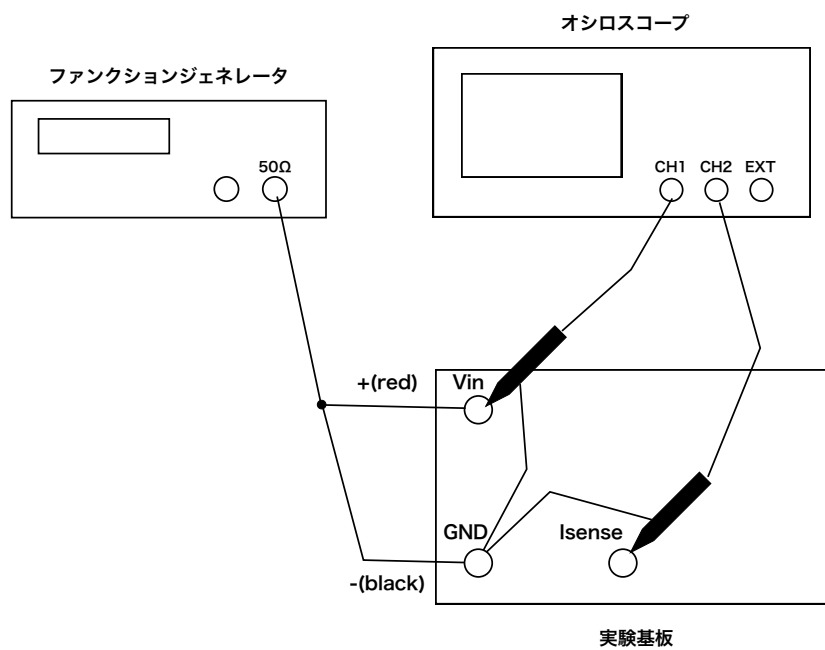


図1 アドミタンスの周波数特性測定系

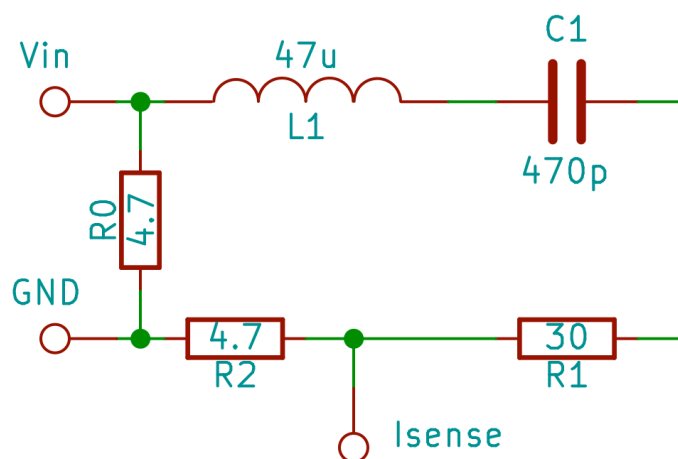


図2 アドミタンスの周波数特性測定回路

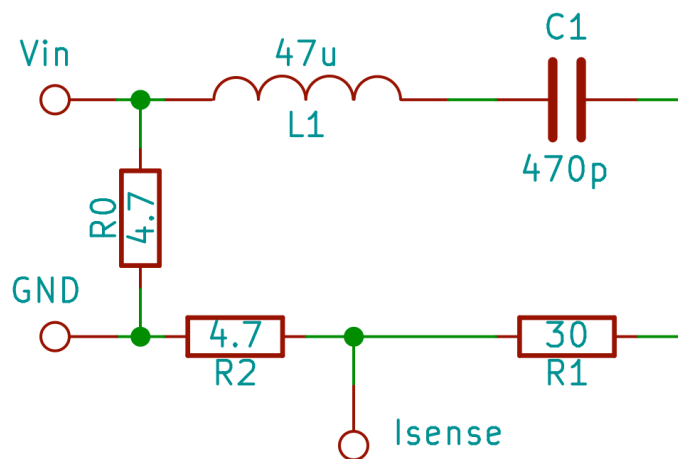


図 3 RLC 回路の方形波応答測定回路（振動的）

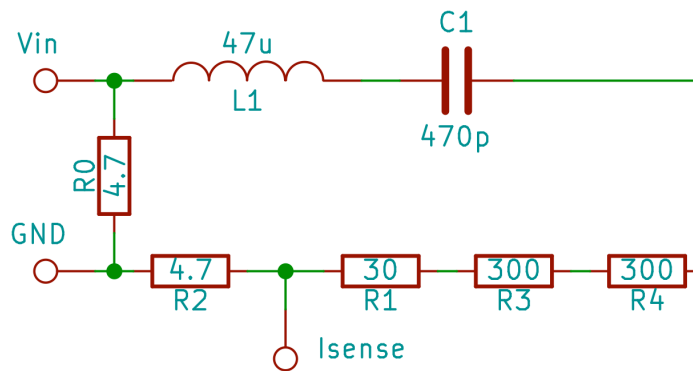


図 4 RLC 回路の方形波応答測定回路（臨界的）

7. 電圧増幅度，位相差をグラフにプロットした。

3.1.2 方形波応答の測定

直列共振回路に方形波を入力し，その出力電圧を観測することで，方形波応答を測定した。

本実験に用いた測定系は，図??と同じである．測定回路を図 3（振動的），図 4（臨界的），図 5（減衰的）に示す。

本実験の実験手順を次に示す。

1. まず，測定回路のうち一つを選び，ユニバーサル基板上に構成した。
2. 測定系は，前実験のものをそのまま持ちいた。

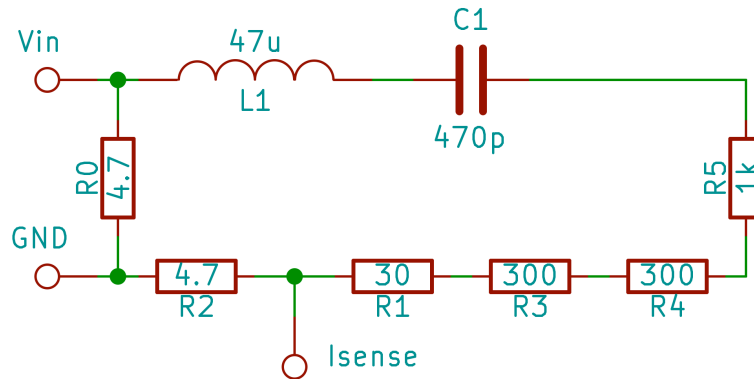


図5 RLC回路の方形波応答測定回路（減衰的）

3. ファンクションジェネレータの出力をおよそ 1[kHz]、方形波、10[Vp-p] に設定し、オシロスコープを用いて、立ち上がりの波形を測定した。波形の保存には、オシロスコープの画像保存機能を用いた。
4. 他の測定回路について、ユニバーサル基板上に再び構成し、同じような処理を繰り返した。

3.2 RC 四端子網回路の測定

抵抗とコンデンサを用いた四端子回路網について、その周波数特性と方形波応答を観測した。

本実験に用いた測定系を図 6 (LPF), 図 7 (HPF), 図 8 (APF) に示し, 測定回路を図 9 に示す. 回路中のジャンパー JP1 と JP2 は, 回路の機能を LPF, HPF, APF と変化させるためのジャンパーであり, 実際にははんだでショートさせるかどうかを意味する.

実験手順を次に示す.

1. まず、図 9 に示す回路をユニバーサル基板上に構成した。
2. はじめに、LPF について測定した。そのために、図 9 に示す回路において、JP1 をオープン、JP2 をショートにした。図 6 に示す測定系を構成した。
3. ファンクションジェネレータの出力周波数を 1[kHz]、方形波、入力電圧 $V_i = 10[\text{Vp-p}]$ に設定し、その出力波形をオシロスコープの画像保存機能を用いて保存した。
4. ファンクションジェネレータの出力周波数を、10[Hz] から 100[kHz] まで可変させ、その時の出力電圧 V_o を測定した。また、電圧増幅度 G を、 $G = 20\log(V_o/V_i)$ を用いて計算した。
5. 同時に、入力電圧と出力電圧の時間差 Δt を測定した。時間差は、波形のピークの時間差をオシロスコープのカーソル機能を用いて測定した。また、入力電圧を基準とした出力電圧の位相差 θ を $\theta = 360f\Delta t[\text{deg}]$ を用いて計算した。
6. 計算した電圧増幅度 G 、位相差 θ をグラフにプロットした。
7. 次に、HPF について測定した。図 9 に示す回路において、JP1 をショート、JP2 をオープン

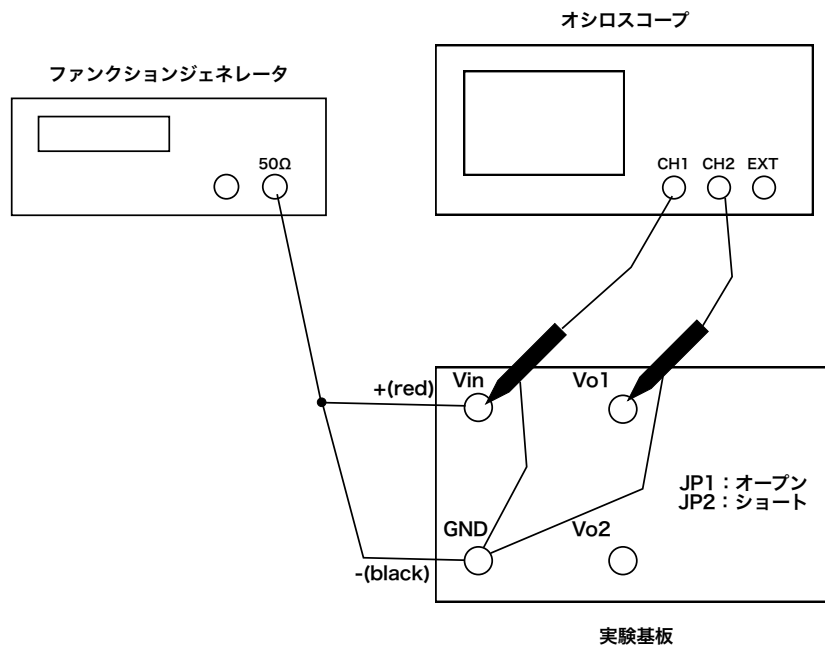


図 6 RC 四端子回路網の測定 (LPF)

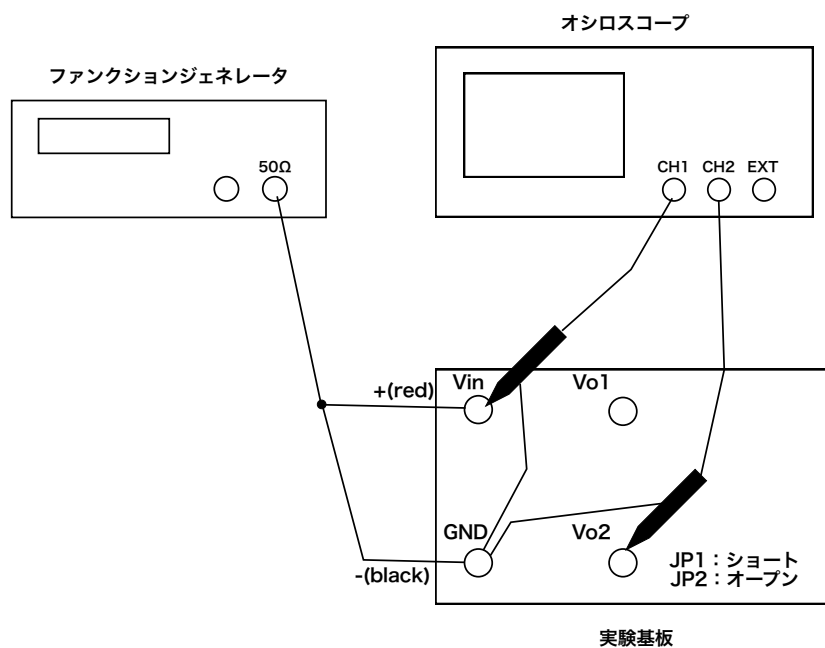


図 7 RC 四端子回路網の測定 (HPF)

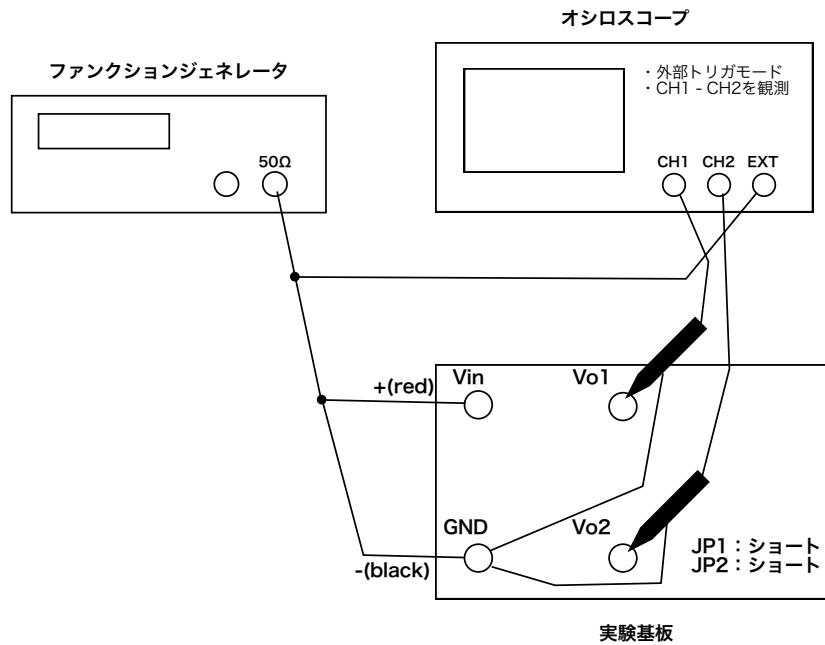


図 8 RC 四端子回路網の測定 (APF)

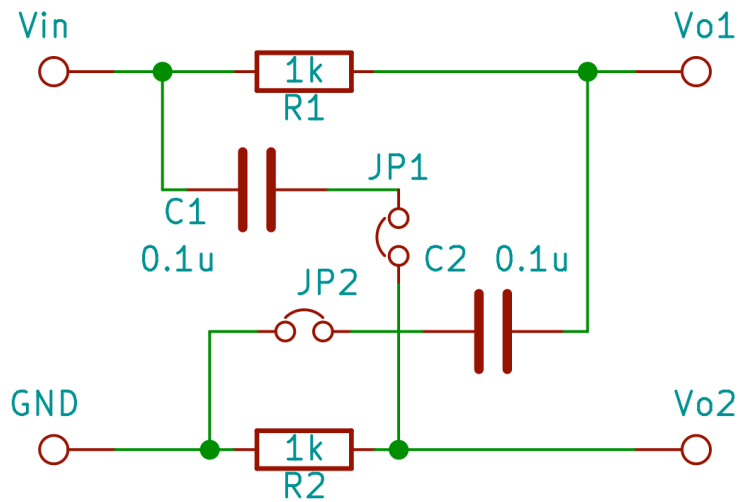


図 9 RC 四端子回路網の測定回路

- ンにした。図 7 に示す測定系を構成し、LPF と同じ測定を行った。
8. 最後に、APF について測定した。図 9 に示す回路において、JP1, JP2 とともにショートした。図 8 に示す測定系を構成した。
 9. APF については、振幅は一定であるため、位相差のみを測定する。オシロスコープの外部トリガ機能を用いて、ファンクションジェネレータの出力を分岐させ、外部トリガ入力につなぐ。ファンクションジェネレータの出力を、入力電圧 $V_i = 10[V_{p-p}]$ の状態で、周波数を

可変させ、トリガされた時点からの、出力電圧の時間差 Δt を測定した。また、出力電圧の位相差 θ を、 $\theta = 360f\Delta t$ を用いて計算した。

10. 計算した位相差 θ をグラフにプロットした。

11. 最後に、ファンクションジェネレータの出力を 1[kHz]、方形波に設定し、APF の方形波応答を測定した。出力波形は、オシロスコープの画像保存機能を用いて保存した。

4 使用器具

本実験で使用した器具の一覧を表 1 に示す。

5 実験結果

本章では、今回行った実験について、その結果を示す。

表 1 P1 実験 使用器具

器具名	定格・型番	メーカー	備品番号	個数
オシロスコープ		岩通	28	1
ファンクションジェネレータ		TEXIO	28	1
ユニバーサル基板		サンハヤト		1
BNC ケーブル				1
分配器				1
BNC-ワニ口ケーブル				1
プローブ				2
はんだこて	15 / 90[W]	goot	28	1
はんだ				1
金属皮膜抵抗	4.7[Ω] , 1/2[W], 1[%]			2
金属皮膜抵抗	30[Ω] , 1/2[W], 1[%]			1
金属皮膜抵抗	300[Ω] , 1/2[W], 1[%]			2
金属皮膜抵抗	1[kΩ] , 1/2[W], 1[%]			2
セラミックコンデンサ	470[pF], 10[%]			1
積層セラミックコンデンサ	0.1[μF], 10[%]			2
マイクロインダクタ	47[mH]			1

5.1 直列共振回路の測定

5.1.1 アドミタンスの周波数特性の測定

測定したアドミタンスの周波数特性のグラフを図??, 図??に示す.

各グラフには, 原理の章で計算した理論曲線を重ねて描いた.

まず, アドミタンス絶対値の周波数特性について, 測定結果から Q を求めた. 最大の値から $1/\sqrt{2}$ を示す線を引き, それと交差する周波数 f_1, f_2 , (但し $f_1 < f_2$) を求めた. すると, 共振周波数を f_o とすると,

$$\begin{aligned}f_o &= 1.06[\text{MHz}] \\f_1 &= 975[\text{kHz}] \\f_2 &= 1145[\text{kHz}] \\Q &= \frac{f_o}{f_2 - f_1} = 6.24\end{aligned}$$

という結果が得られた.

アドミタンス位相の周波数特性については, およそ $-45[\text{deg}]$ を迎えるあたりまでは理論値とかなり一致している. しかし, それを超える範囲については, 大きくずれてしまっている. 一つの原因としては, 測定誤差があげられる. なぜなら, $-45[\text{deg}]$ 付近以外の範囲では出力信号の振幅が非常に小さく, 波形のピークを正しく見極めることが難しかったからである.

詳しくは, 考察の章で述べる.

5.1.2 方形波応答の測定

直列共振回路に方形波を入力し, その出力電圧を観測することで, 方形波応答を測定した.

振動的, 臨界的, 減衰的それぞれの場合に測定した方形波応答について, 図??, 図??, 図??に示す.

図??, 方形波が立ち上がった際に大きく振動が起きている. したがって, 振動的な状態であると考えられる.

図??では, 方形波が立ち上がった際に上昇し, 速やかに下降している. したがって, 臨界的な状態であると考えられる. 詳しくは, 考察の章で議論する.

図??では, 方形波が立ち上がった際に, 上昇した後, 緩やかに下降している. したがって, 減衰的な状態であると考えられる.

5.2 RC 四端子網回路の測定

抵抗とコンデンサを用いた四端子回路網について, その周波数特性と方形波応答を観測した.

まず, LPF と HPF について, 測定した電圧増幅度, 位相の周波数特性と方形波応答をそれぞれ

図??, 図??, 図??, 図??に示す.

周波数特性については, その理論曲線も示した.

LPF について, -3[dB] 下がる周波数を見ると, およそ 1.46[kHz] となることをグラフから読み取った. 理論値は, $f_c = 1/(2\pi RC) = 1.59[\text{kHz}]$ であるから, 誤差率は

$$\epsilon = \frac{1.46 - 1.59}{1.59} \times 100 = -8.2[\%]$$

となることが分かった.

HPF について, -3[dB] 下がる周波数を見ると, 1.69[kHz] となることをグラフから読み取った. 理論値は, LPF 同様 $f_c = 1.59[\text{kHz}]$ であるから, 誤差率は

$$\epsilon = \frac{1.69 - 1.59}{1.59} \times 100 = 6.3[\%]$$

となることが分かった.

最後に, APF について, 測定した位相の周波数特性と方形波応答をそれぞれ図??, 図??に示す.

位相が 90[deg] ずれる周波数をグラフから読み取ると, 1.58[kHz] となることがグラフから読み取れた. 理論値は LPF, HPF 同様, 1.59[kHz] であるから, 誤差率は

$$\epsilon = \frac{1.58 - 1.59}{1.59} \times 100 = -0.63[\%]$$

となることが分かった.

6 考察

本章では, 実験結果を踏まえ, その考察を示す.

6.1 直列共振回路の測定

6.1.1 アドミタンスの周波数特性の測定

アドミタンス絶対値の周波数特性について, その考察を示す.

- 周波数特性の理由を, 伝達関数の極・ゼロ点を用いて説明せよ (誤差についても)

この回路の極・零点は図??に示す. 伝達関数の絶対値は, $s = j\omega$ が虚軸上を動く際に, 各極, 零点までの距離をそれぞれ d_{pi}, d_{oi} , 実軸方向となす角を θ_{pi}, θ_{oi} とすると,

$$\begin{aligned} \log |H(\omega)| &= \log |H| + \sum_i \log d_{oi} - \sum_i \log d_{pi} \\ \arg H(\omega) &= \sum_i \theta_{oi} - \sum_i \theta_{pi} \end{aligned}$$

したがって, 虚軸上を s が動くに連れて, 原点ではゼロ, 極と同じ周波数近くで最大, さらに上に行くにつれ小さくなっていく. 伝達関数が最大の値をとるのは, 伝達関数の分母が最

小，すなわち共振であり，その周波数は $\omega = 1/\sqrt{LC}$ である．結果，共振周波数でピークを持ち，両側に行くに連れ小さくなる，BPF の周波数特性が現れる．

位相についても， $s = 0$ ，すなわち原点では，ゼロ点との角度が $-90[\text{deg}]$ ，2 つとの極との角度の和はゼロなので， $-90[\text{deg}]$ である．虚軸上を上がっていくに連れ，ゼロ点との角度は変わらず，極との角度だけが大きくなっていくので，遅れはどんどん強くなっていく．無限遠では，2 つの極のなす角の和は， $+540[\text{deg}]$ であるから，アドミタンスの位相は $-270[\text{deg}]$ に収束する．測定した位相は，電圧を基準としているため，電流を基準とすれば，この理論値と一致する．

アドミタンス絶対値の中心周波数の誤差を議論する．

$$\begin{aligned} L &= 45.8[\mu\text{H}] \\ \text{コイルの直列抵抗} &= 5.5[\Omega] \quad C = 510[\text{pF}] \end{aligned} \quad (1)$$

ここから中心周波数の理論値を求めると，

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 1.056[\text{kHz}]$$

という結果が得られた．理論値と比較すると，

$$\epsilon = 0.379[\%]$$

というように誤差率が求められた．この誤差は小さく，実測値は理論値と一致したと考えられる．

次に， Q の比較を行う．実測値の Q については，結果の章で既に述べた．回路全体の抵抗値は，次のように見積もることができる．

$$\begin{aligned} R_o &= \text{抵抗器の総和} + \text{信号源抵抗の影響} + \text{オシロスコープの内部抵抗} + \text{コイルの抵抗成分} \\ &= 30 + (4.7//50) + (4.7//10M) + 5.5 \\ &= 43.6[\Omega] \end{aligned} \quad (2)$$

これを用いて Q を求めると，次のようになる．また，誤差率も共に示す．

$$\begin{aligned} Q &= 6.94[-] \\ \epsilon &= -10.2[\%] \end{aligned}$$

これは大きな誤差であるが，主に接触抵抗が原因であると考えられる．逆算して，実際の回路の全抵抗成分を求めると，

$$R_o = 48.7[\Omega]$$

$$\Delta R = 5.1[\Omega]$$

と、理論値との差は $5.1[\Omega]$ となった。これは十分に接触抵抗で起きうる値である。ゆえに、この誤差の原因は主に配線や半田付けの接触抵抗であると考えられる。

最後に、アドミタンス位相の周波数特性について考察する。

$1.5[\text{MHz}]$ を超えたところで、理論値と異なりグラフは上昇している。これは、コイルの自己共振の影響であると考えられる。位相差が再びゼロに戻る周波数は、データからおおよそ $2.5[\text{MHz}]$ と読み取れる。もしこれがコイルの自己共振の影響であるとする、コイルの並列キャパシタンス成分は次のようになる。

$$C_p = \frac{1}{L\omega^2} = 89.0[\text{pF}]$$

事前にコイルの並列キャパシタンスを計測した結果、 $C_p = 550[\text{pF}]$ であったことを考慮すると、その値より小さくなっているものの、回路に搭載したコイルがこれだけの並列キャパシタンスを持つこととは十分考えられる。したがって、コイルの自己共振により、急激に位相が変化したのだと考えられる。

- 周波数特性の理由を、インパルス応答波形を用いて説明せよ。(誤差についても)
- ステップ応答を計算し、結果と比較。一致する点、乖離する点について説明し、誤差についても説明せよ。

6.2 RC 四端子網回路の測定

抵抗とコンデンサを用いた四端子回路網について、その周波数特性と方形波応答を観測した。

- 周波数特性の理由を、伝達関数の極・ゼロ点を用いて説明せよ(誤差についても)

RC 回路を利用した、LPF、HPF、APF の極・零点を図??から図??に示す。

- カットオフ周波数の誤差

結果の章で述べたように、カットオフ周波数について、LPF では $-8.2[\%]$ 、HPF では $6.3[\%]$ の誤差があることが確認された。これらは、信号源抵抗による誤差であると考えられる。ファンクションジェネレータの出力抵抗は $50[\Omega]$ であるから、それを用いてフィルタを計算し直すと、次のようになる。

$$\begin{aligned}\text{LPF} : f_c &= \frac{1}{2\pi(R+50)C} = 1516[\text{Hz}] \\ \epsilon &= \frac{1460 - 1519}{1590} \times 100 = -3.9[\%] \\ \text{HPF} : f_c &= \frac{1}{2\pi\sqrt{R^2R_0^2 - 2RR_0}} = 1680[\text{Hz}] \\ \epsilon &= \frac{1690 - 1680}{1680} \times 100 = -0.6[\%]\end{aligned}$$

HPF については、誤差率が大きく減少したので、誤差の要因は信号源抵抗ということだと考えられる。LPF については、まだ誤差が残っているが、これについては部品の誤差で説明可能である。例えば、C に誤差があると仮定して、実際の回路の C を求めると、 $C = 0.095[\mu\text{F}]$ となった。これは C の誤差である 10[%] に収まっているので、この誤差の原因は C の値のズレにあると考えられる。

- LPF, HPF についての考察課題
- APF についての考察課題

位相が 90[deg] ずれる周波数をグラフから読み取ると、1.58[kHz] となることがグラフから読み取れた。理論値は LPF, HPF 同様、1.59[kHz] であるから、誤差率は

$$\epsilon = \frac{1.58 - 1.59}{1.59} \times 100 = -0.63[\%]$$

となることが分かった。

参考文献

- [1] 広島大学 脳神経外科 HP <http://home.hiroshima-u.ac.jp/nouge/right/MRI.htm>

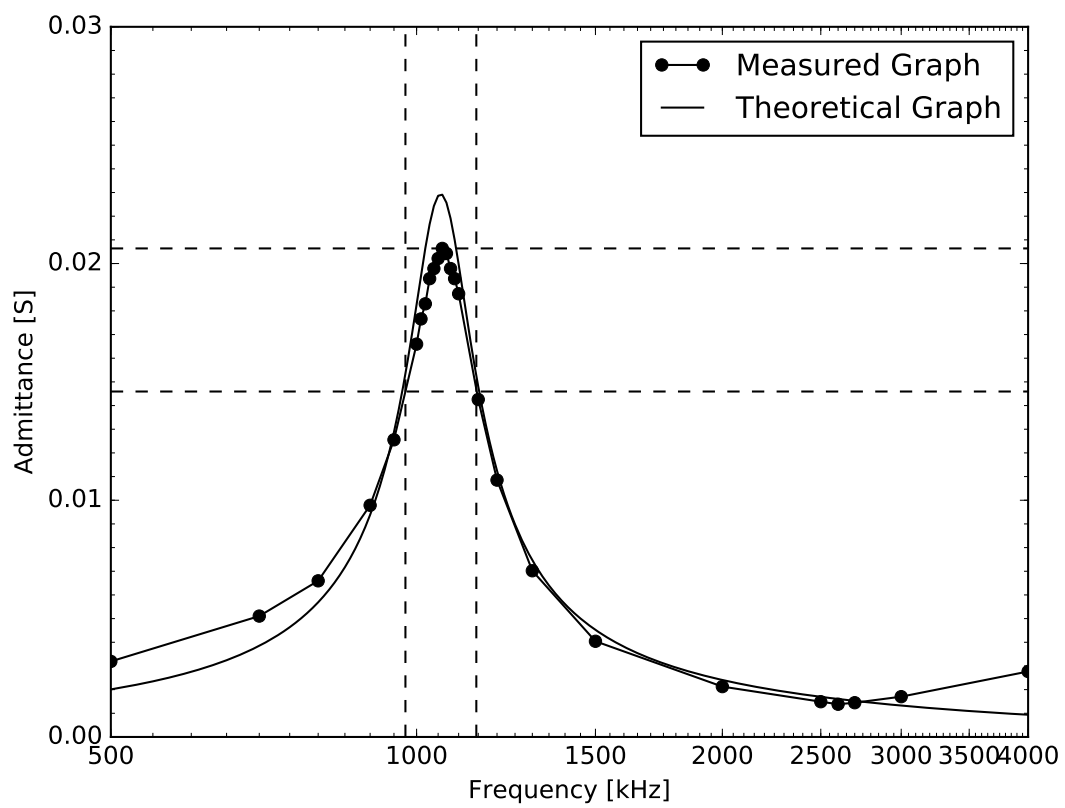


図 10 アドミタンス絶対値の周波数特性

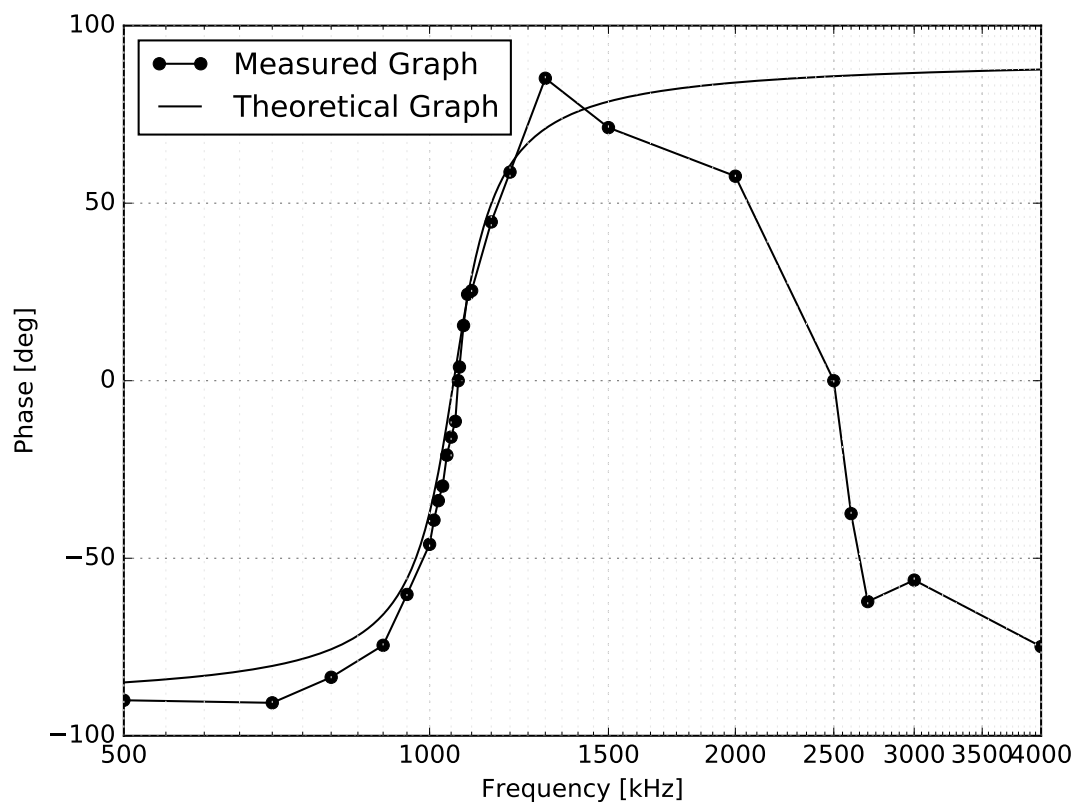


図 11 アドミタンス位相の周波数特性

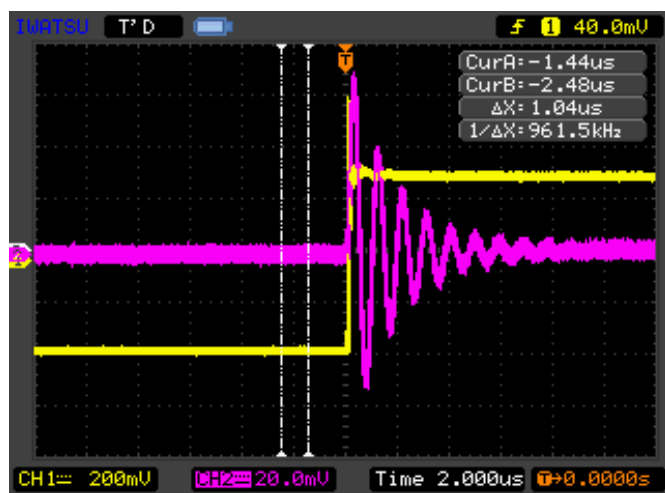


図 12 直列共振回路の方形波応答（振動的）

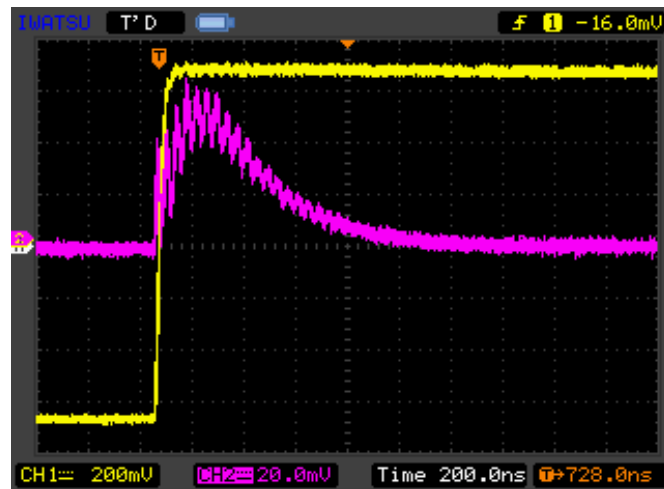


図 13 直列共振回路の方形波応答（臨界的）

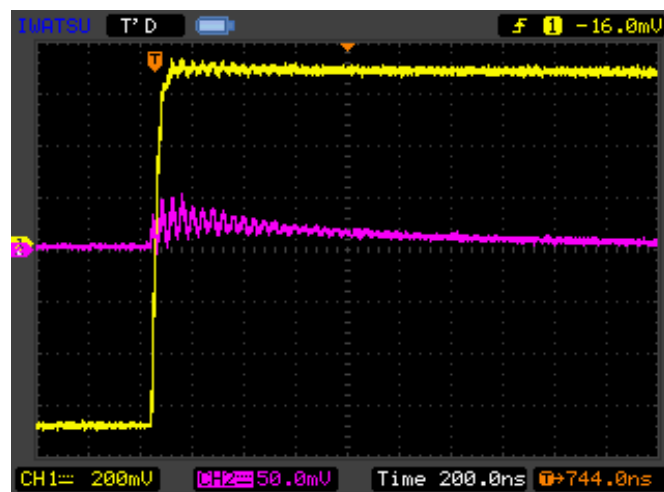


図 14 直列共振回路の方形波応答（減衰的）

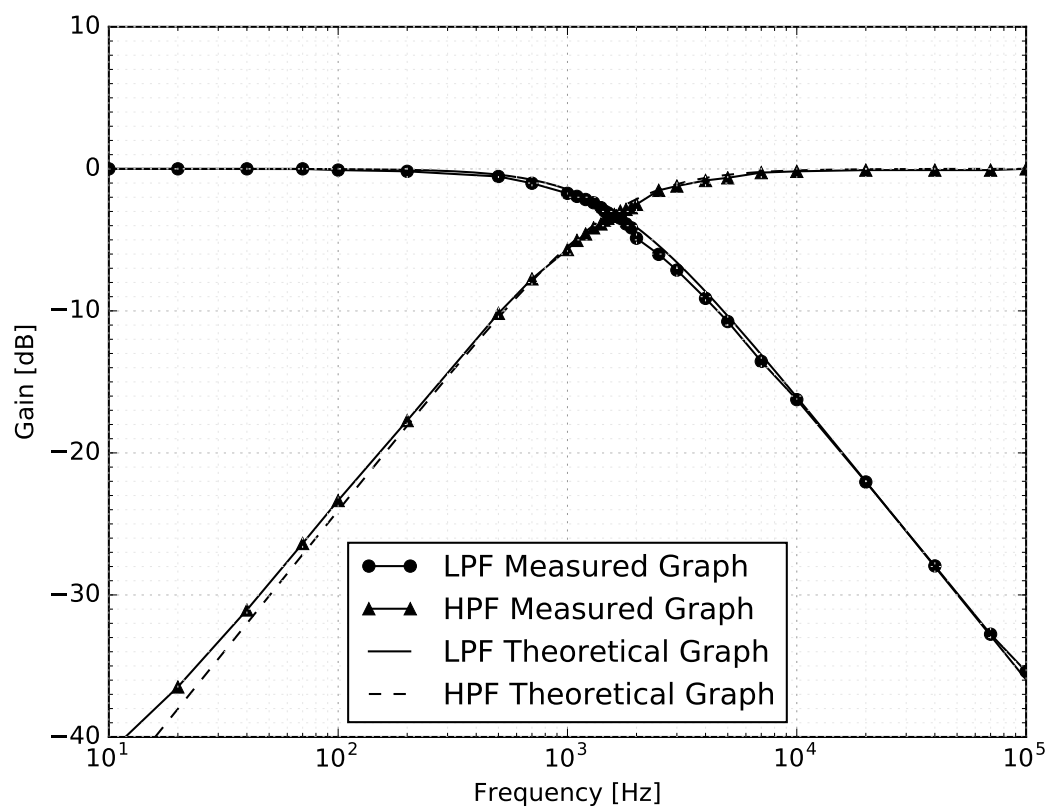


図 15 LPF, HPF の電圧増幅度周波数特性

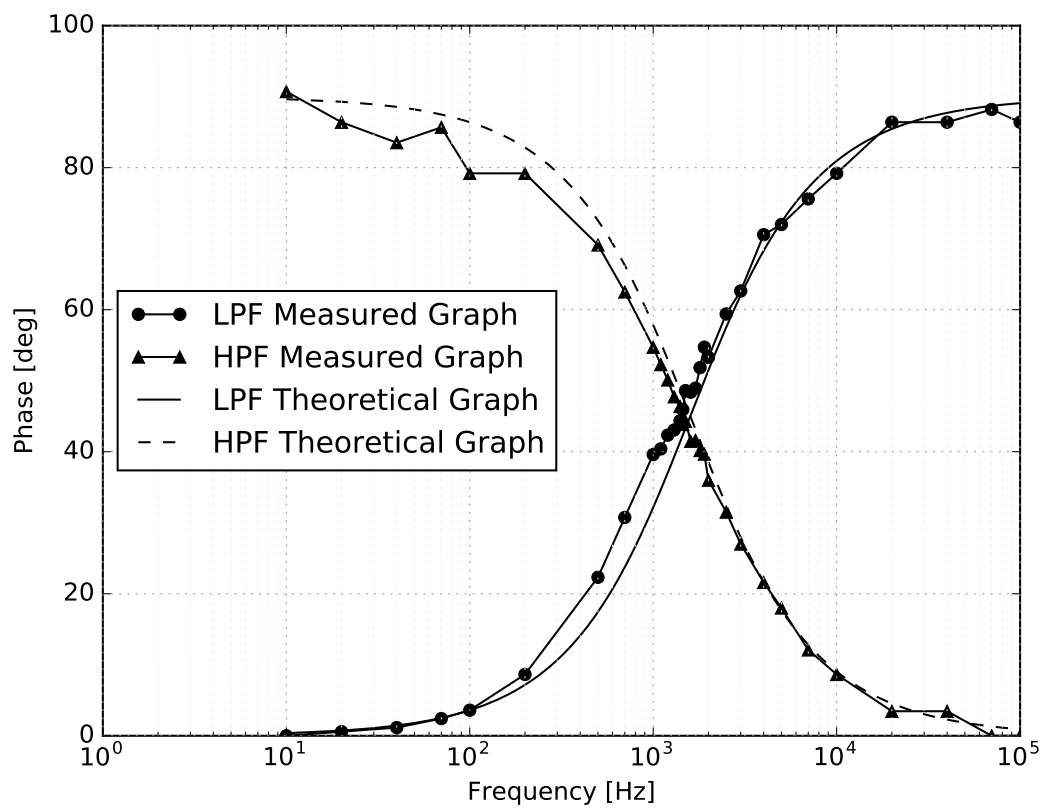


図 16 LPF, HPF の位相周波数特性

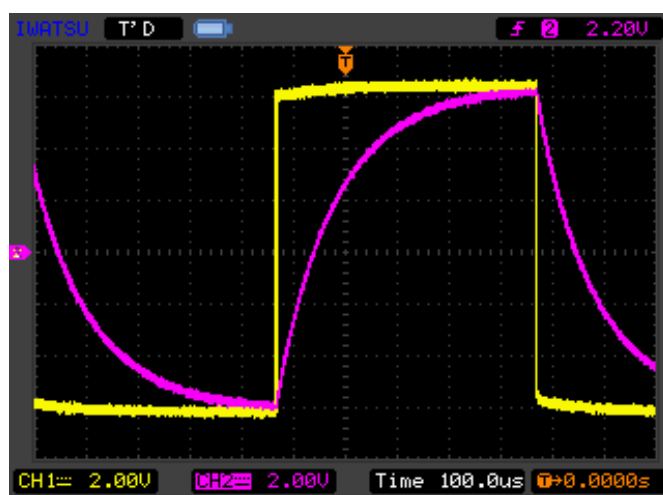


図 17 LPF の方形波応答

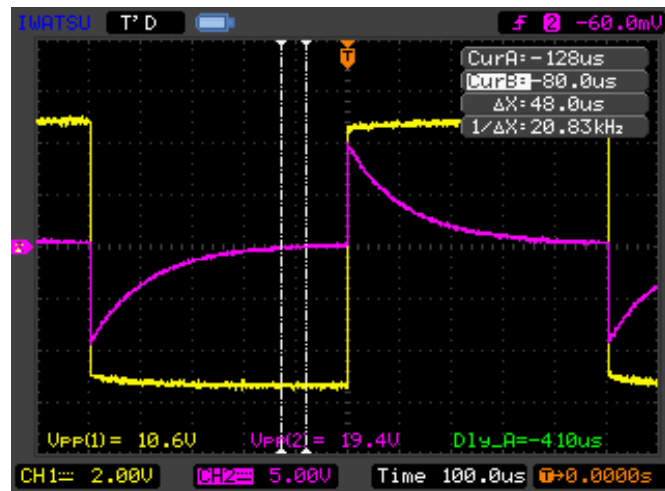


図 18 HPF の方形波応答

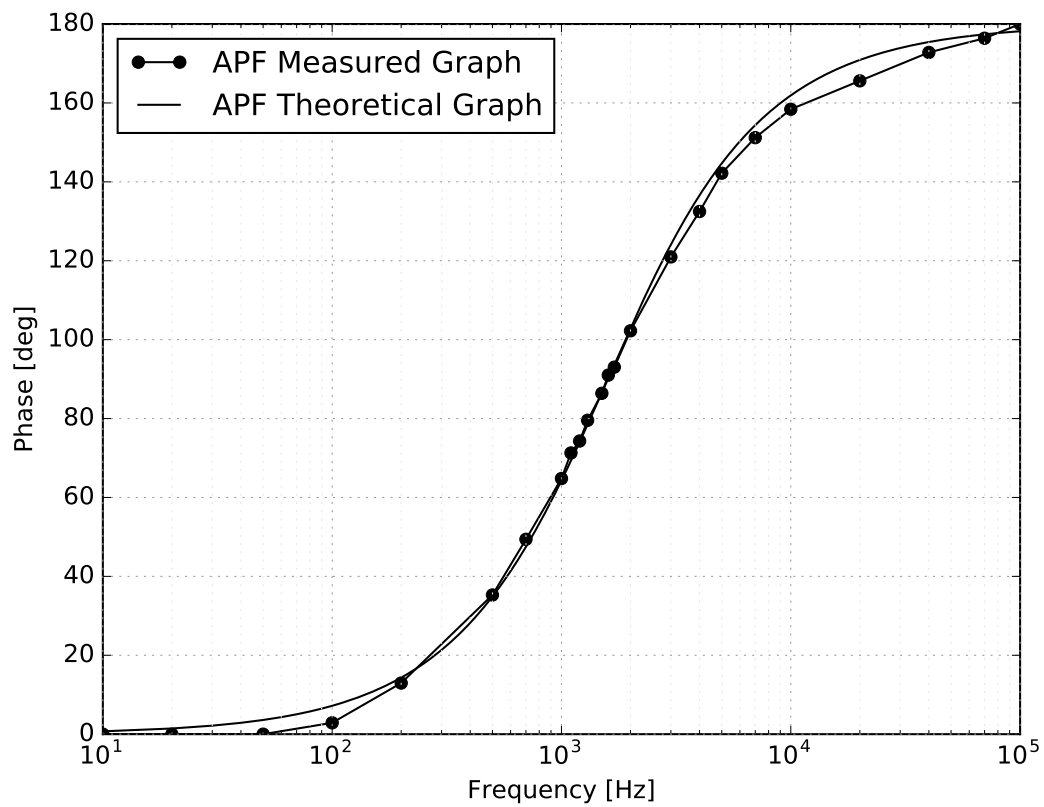


図 19 APF の位相周波数特性

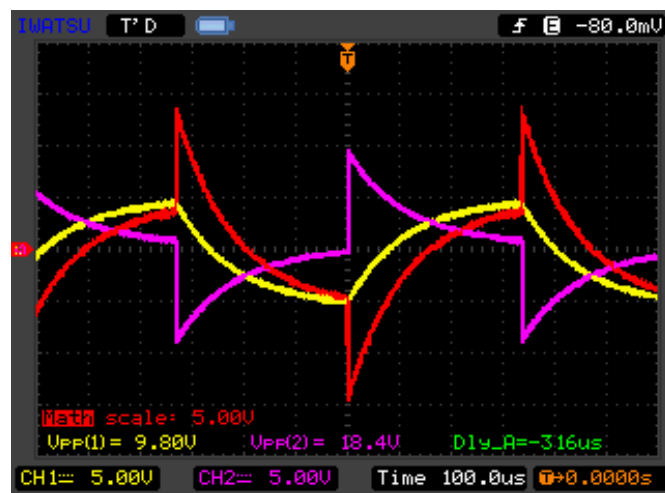


図 20 APF の方形波応答