

1 目的

回路シミュレータ SPICE の原理を理解し、シミュレーション結果と測定結果の比較を行うことで回路に対する知識を広げ、SPICE の扱いに慣れる。また、プログラムで回路方程式を解くことと、実際に数値積分公式を利用することで回路方程式に対する数値解法の役割を理解し、回路シミュレータの中身について理解する。

さらに、自分自身で回路シミュレーションを行う過程を通じて、理論と実験の違いや、シミュレーションの限界・有用性についても考察し、今後の回路設計や解析に活かせる実践的な知識と技術を身につける。

2 原理

2.1 SPICE の概要等

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) は、電子回路のアナログ動作をシミュレーションするためのソフトウェアである。1970 年代にカリフォルニア大学バークレー校で開発され、現在では多くの派生版や商用版が存在する。SPICE は、回路図をテキスト形式 (ネットリスト) で記述し、回路素子や解析条件を指定することで、回路の動作を数値的に解析できる。主な解析機能として、直流解析 (DC 解析)、交流解析 (AC 解析)、過渡解析 (Transient 解析) などがあり、トランジスタやダイオードなどの非線形素子も扱うことができる。SPICE は回路設計や検証、教育など幅広い分野で利用されている。(1)

2.2 回路記述方法 (ネットリストの書き方)

SPICE のネットリストは、以下の順序で記述される。

1. タイトル行記述する回路の名前等を入れて、わかるようにしておく。
2. 回路素子の定義

```
V 0 1 5V
```

```
R 1 0 10
```

のように素子名、ノード、値を空白区切りで記述することで回路を与えられる。この場

合、ノード 0 と 1 の間に直流電圧源 5V、ノード 1 と 0 の間に抵抗 10 Ω が接続されていることになる。

3. 解析コマンド

回路解析の種類を指定するコマンドである。例えば、直流動作点解析では.OP コマンドを記述する。

4. END

もうこれ以上コマンドがないことを示すもので、必須である。

2.3 メリットとデメリット

メリットは、SPICE（回路シミュレーター）を使うことで、実際に部品を用意して回路を組み立てる手間やコストをかけずに、パソコン上で簡単かつ短時間で回路の動作を確認できる点である。また、開発の初期段階で設計ミスや不具合を早期に発見できるため、製品開発の時間やコストを大幅に削減できることも大きな利点である。

デメリットは、標準の SPICE モデルは実際の部品と動作が異なる場合が多く、精度の高いシミュレーションには高品質なモデルを入手したり自作したりする必要があり、これには手間やコストがかかる点である。さらに、SPICE はあくまで計算ツールなので、正しい回路知識がないと誤った結果を信じてしまう危険がある点も注意が必要である。(2)

2.4 使用されている数値解析方法について（ニュートン法等）

ニュートン法（Newton's Method） 非線形方程式 $f(x) = 0$ の解を数値的に求めるための反復法である。関数の接線を用いて次の近似解を求める方法で、以下のような更新式で表される。

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

この方法は収束が速いという利点があるが、導関数 $f'(x)$ の計算が必要であり、また初期値によっては発散してしまい収束しないこともある。

前進オイラー法（Explicit Euler Method） 常微分方程式の初期値問題

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0$$

を数値的に解く最も基本的な方法である。以下のように、現在の傾きを使って次の値を計算する。

$$y_{n+1} = y_n + hf(t_n, y_n)$$

計算は簡単で実装も容易であるが、精度は1次であり、刻み幅 h が大きいと不安定になる場合がある。

後退オイラー法 (Implicit Euler Method) 前進オイラー法に対し、次の時刻の傾きを用いて計算する陰的手法である。

$$y_{n+1} = y_n + hf(t_{n+1}, y_{n+1})$$

右辺に y_{n+1} が含まれるため、各ステップで非線形方程式を解く必要がある。その分計算コストはかかるが、剛性を持つ問題に対して非常に安定である。

台形法 (Trapezoidal Method) 前進オイラー法と後退オイラー法の平均を取った方法で、以下のように表される。

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [f(t_n, y_n) + f(t_{n+1}, y_{n+1})]$$

傾きを線形補間し、積分を台形則で近似するため精度が高く (2次精度)、安定性も高い。ただし陰的手法のため、やはり非線形方程式の解法が必要になる。(3)

3 実験結果

3.1 予備実験回路解析

図 3.1 に示した回路を構築し、付録に記載したネットリストを用いて SPICE でシミュレーションを実行した結果を基に、表 3.1 を作成した。

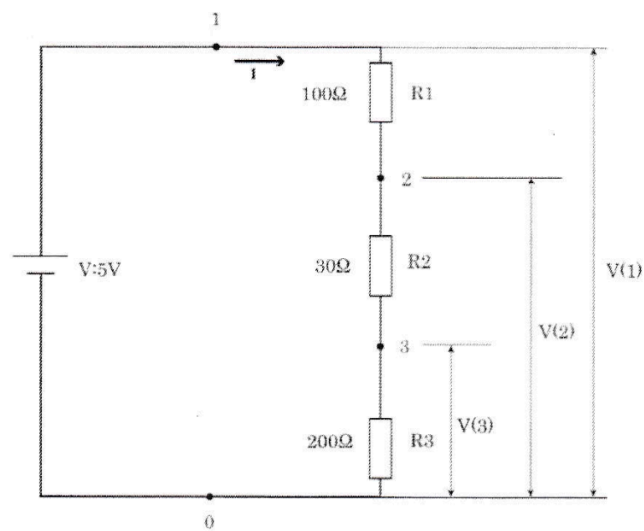


図 3.1: 予備実験回路

表 3.1: 実験結果の比較

確認項目	$V(1)$ [V]	$V(2)$ [V]	$V(3)$ [V]	I [mA]	V_{12}	V_{23}
実測値	5.00	3.48	3.05	14.17	1.52	0.43
シミュレーション結果	5.00	3.48	3.03	15.15	1.52	0.45
理論値 (計算値)	5.00	3.48	3.03	15.15	1.52	0.45
誤差率 (%)	0.00	0.00	0.6	0.0	0.0	4.4

3.2 線形抵抗回路解析

図 3.2 に示した回路を構築し、付録に記載したネットリストを用いて SPICE でシミュレーションを実行した結果を基に、表 3.2 を作成した。

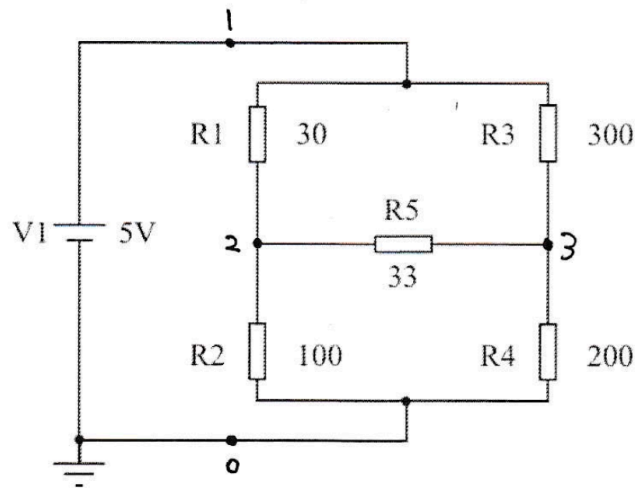


図 3.2: 線形抵抗回路

表 3.2: 実験結果の比較

確認項目	V(1) [V]	V(2) [V]	V(3) [V]	I [mA]
実測値	5.00	3.53	3.23	45.4
シミュレーション結果	5.00	3.60	3.26	52.3
誤差率 (%)	0.0	1.9	0.9	13.2

3.3 非線形抵抗回路解析

図 3.3 に示した回路を構築し、付録に記載したネットリストを用いて SPICE でシミュレーションを実行した結果を基に、表 3.3 を作成した。

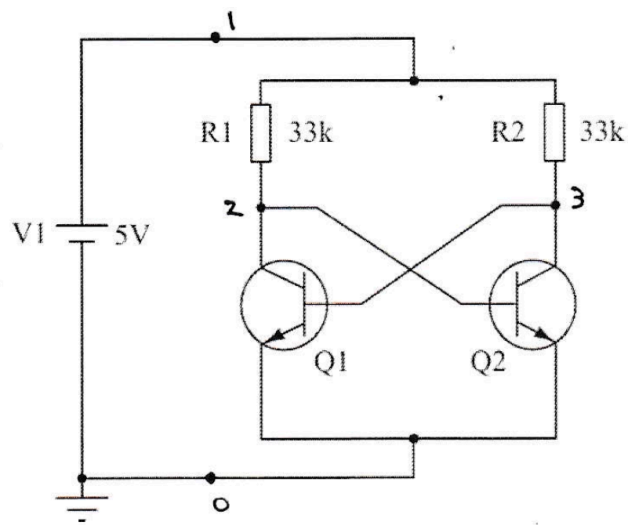


図 3.3: 非線形抵抗回路

表 3.3: 実験結果の比較

確認項目	$V(1)$ [V]	$V(2)$ [V]	$V(3)$ [V]	I [mA]
実測値	5.00	0.645	0.017	0.27
シミュレーション結果	5.00	0.603	0.603	0.267
誤差率 (%)	0.0	6.97	97.2	1.1

3.4 DC 解析

図 3.4 に示した回路を作成し、 V_2 の電圧を 0.1V から 5.0V まで変化させたときの電流 I を測定することで表 3.4 を作成した。また、付録に記載したネットリストを用いて SPICE でシミュレーションを実行し作成したグラフを図 3.5 に示す。

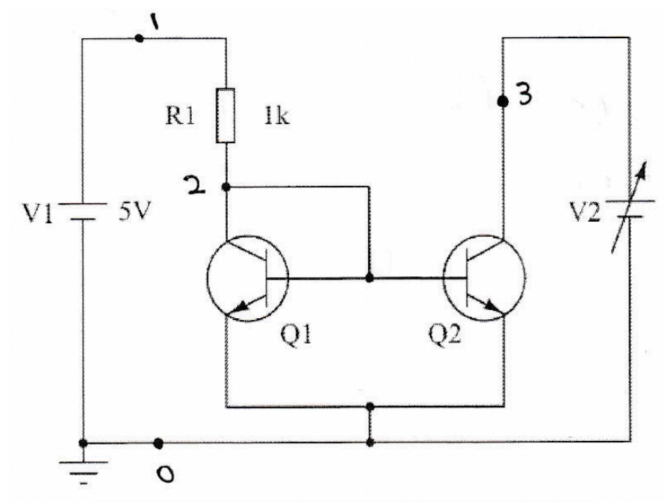


図 3.4: DC 解析回路

表 3.4: 実験結果

V_2 [V]	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
I [mA]	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.09	4.09	4.10	4.10

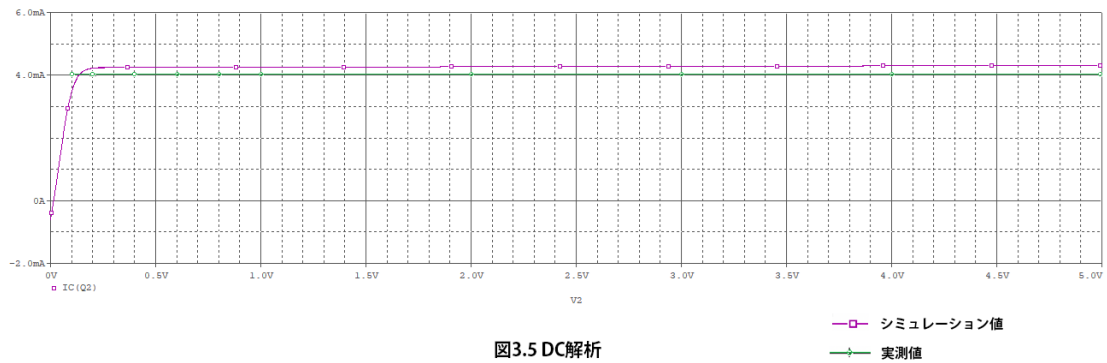


図3.5 DC解析

図 3.5: DC 解析

3.5 AC 解析

図 3.6 に示した回路を作成し、V1 の周波数を 20Hz から 100kHz まで変化させたときのノード 4 (Vout) の電圧を測定した結果をもとに表 3.5 を作成した。また、付録に記載したネットリストを用いて SPICE でシミュレーションを実行し、さらに実測値をプロットし作成したグラフを図 3.7 に示す。

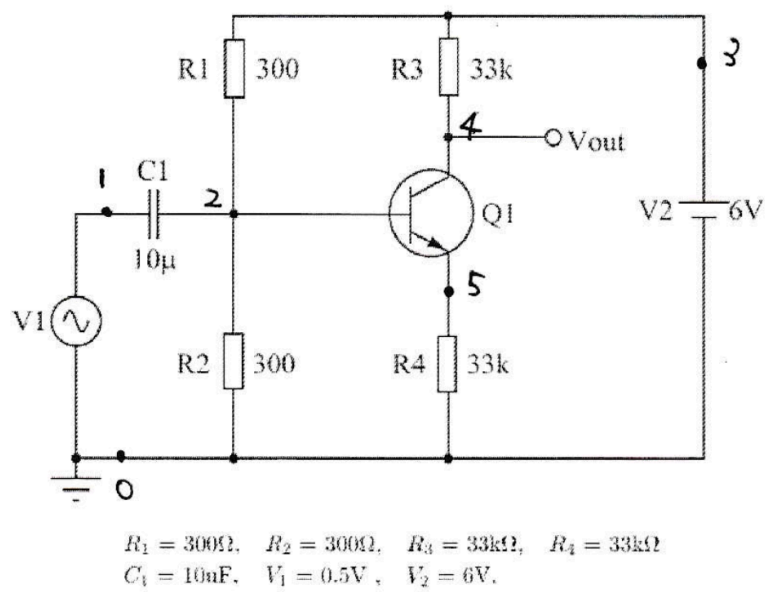


図 3.6: AC 解析回路

表 3.5: AC 解析結果

周波数 [Hz]	20Hz	30Hz	100Hz	300Hz	1kHz	3kHz	10kHz	30kHz	100kHz
電圧 [mV]	400	400	600	600	600	1000	1000	1000	860

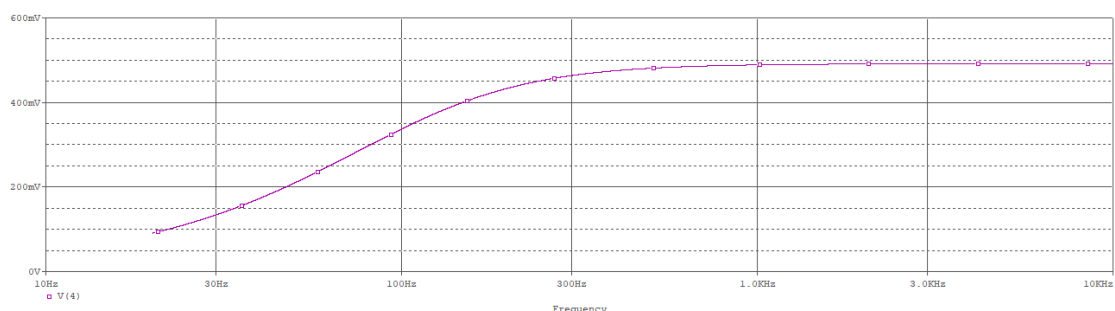


図 3.7: AC 解析

3.6 過渡解析

図 3.8 に示した回路を作成し、ノード 2 (V) の電圧を測定した結果をもとに表 3.6 を作成した。オシロスコープでの観測波形を図 3.9 に示す。なお、周期のはじまりの電位を 0V 基準かつ時刻 $t=0$ とし、そこからの ΔV の値を記録した。また、付録に記載したネットリストを用いて SPICE でシミュレーションを実行し、さらに実測値をプロットし作成したグラフを図 3.10 に示す。

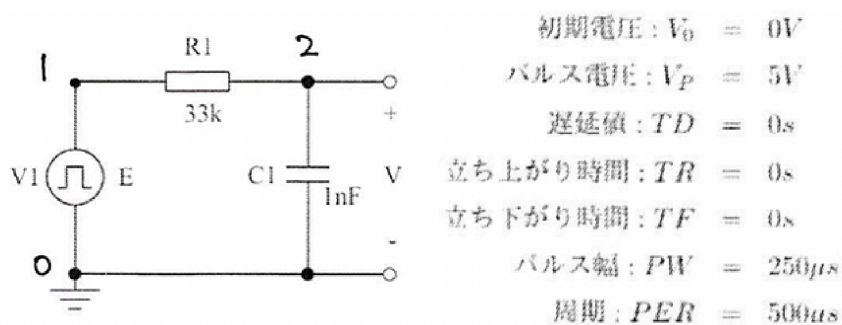


図 3.8: 過渡解析回路

表 3.6: 過渡解析結果

$t [\mu s]$	0	50	100	150	200	250	300	360	400
$V [V]$	0	3.84	4.64	4.72	5.04	5.12	1.12	0.32	0.08

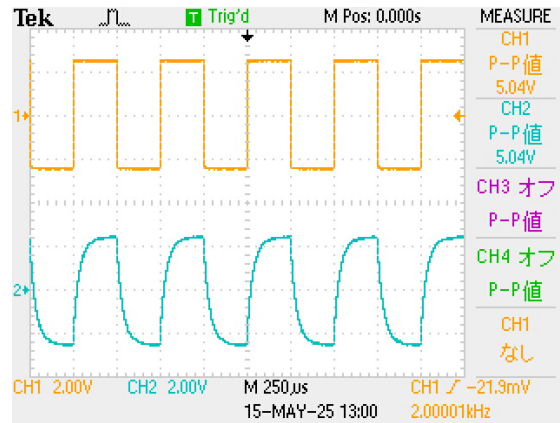


図 3.9: オシロスコープでの観測波形

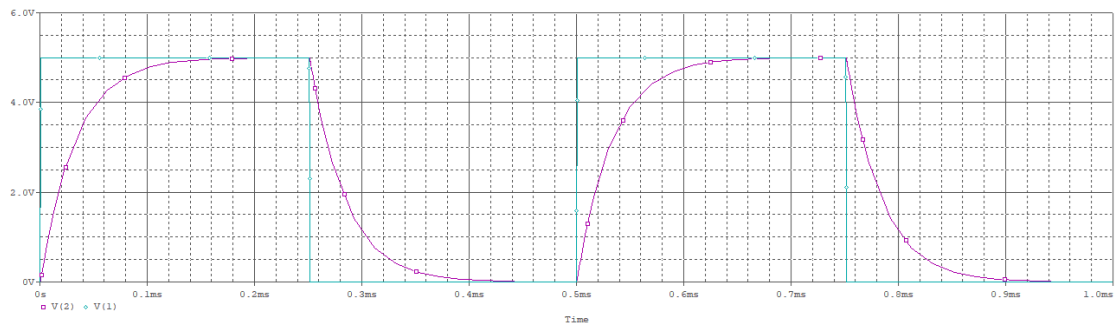


図 3.10: 過渡解析

4 考察

4.1 線形抵抗回路解析

V1, V2, V3 に関しては、シミュレーション値と実測値に大きな誤差は現れなかった。軽度の誤差は電圧計の測定精度等によるものだと考えられる。

電流値に関しては 13 % 程度の誤差が確認され、電流計の内部抵抗によるものであると考えられる。電流計の内部抵抗を R_m とすると、測定される電流 I_m は以下のように表される。

$$I_m = \frac{V}{R + R_m}$$

ここで、 R は回路の抵抗、 V は電源電圧である。内部抵抗 R_m が無視できない場合、実際の電流 I よりも小さい値が測定されるため、誤差が生じる。この理論と実際の計測結果は一致する。今回、5.0V の電圧を加えてシミュレーションでは $I = 52.3\text{mA}$ より、抵抗値 R は以下のように計算される。

$$R \approx \frac{V}{I} = \frac{5.0}{0.0523} \approx 95.6\Omega$$

一方、実測値では $I = 45.4\text{mA}$ より、回路全体の抵抗値 $R + R_m$ は以下のように計算される。

$$R + R_m \approx \frac{V}{I} = \frac{5.0}{0.0454} \approx 110.1\Omega$$

これらの結果から、電流計の内部抵抗 R_m は以下のように求められる。

$$R_m \approx 110.1 - 95.6 \approx 15\Omega$$

したがって、電流計の内部抵抗 R_m は約 15Ω であると考えられる。

4.2 非線形抵抗回路解析

4.2.1 コレクタ電圧の初期値を設定した場合のシミュレーション

図 3.3 の回路において、Q1 のコレクタ電圧の初期値を設定した場合のシミュレーション結果を表 4.1 に示す。

表 4.1: 非線形抵抗回路解析シミュレーション結果

初期値 [V]	V(1) [V]	V(2) [V]	V(3) [V]	I [mA]
0.2	5.00	0.238	0.644	0.283
0.6	5.00	0.603	0.603	0.267
0.8	5.00	0.644	0.238	0.283

4.3 DC 解析

4.4 AC 解析

実験値はシミュレーション値と異なり、100kHz 付近で電圧が減少している。この原因として、プローブの影響が考えられる。プローブには寄生容量 C と抵抗 R が存在し、これらが回路に並列に接続されることで、回路全体の周波数特性に影響を与える。

プローブの影響を考慮すると、回路の高周波特性は以下のようなローパスフィルタとして振る舞う。

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

ここで、 f_c はカットオフ周波数であり、 R はプローブの入力抵抗、 C はプローブの入力容量である。カットオフ周波数を超えると、信号の振幅が減少し始める。

今回の実験では、プローブの入力容量が比較的大きかったため、100kHz 付近で信号の減衰が顕著になったと考えられる。一方、シミュレーションでは理想的な条件が仮定されているため、プローブの影響が考慮されず、減衰が見られなかった。(4)

4.5 過渡解析

5 追加課題

5.1 過渡解析の各種数値計算法比較

5.2 フィルタ回路の作成

5.2.1 53Hz 以上の周波数を通過させる回路（ハイパスフィルタ）

抵抗とコンデンサを用いてカットオフ周波数を計算し、設計した回路を図 5.1 に示す。また、V1 を 1.0V (p-p 値) にして周波数を 5Hz から 10kHz まで変化させたときの V2 の実測値を表 5.1 にまとめ、シミュレーション結果と実測値をプロットしたグラフを図 5.2 に示す。

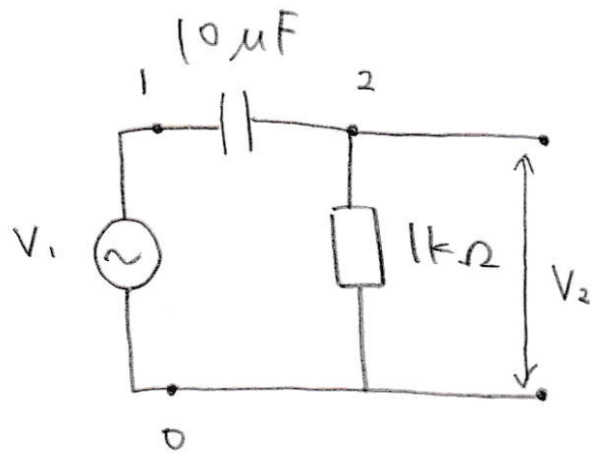


図 5.1: ハイパスフィルタ回路

表 5.1: ハイパスフィルタ実測値

周波数 [Hz]	5	10	20	50	100	200	500	1k	2k	5k	10k
電圧 [mV]	100	240	720	960	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

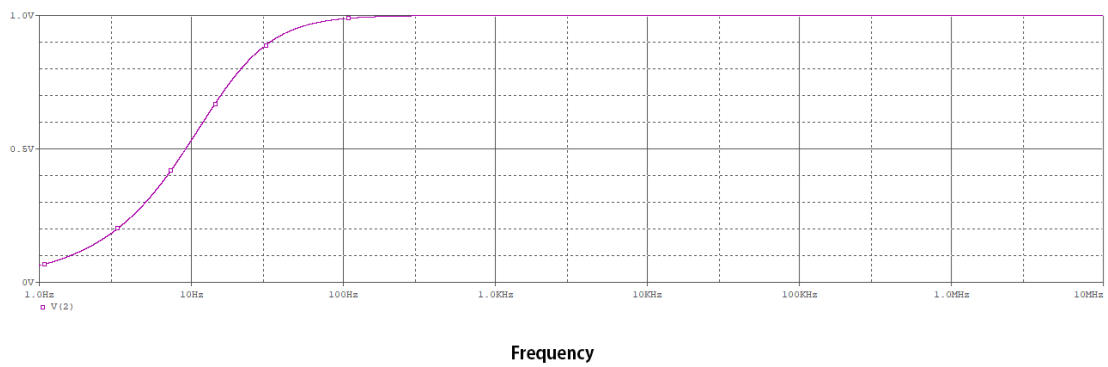


図 5.2: シミュレーション結果

5.2.2 160kHz 以下の周波数を通過させる回路（ローパスフィルタ）

抵抗とコンデンサを用いてカットオフ周波数を計算し、設計した回路を図 5.3 に示す。また、 V_1 を 1.0V（p-p 値）にして周波数を 5kHz から 1MHz まで変化させたときの V_2 の実測値を表 5.2 にまとめ、シミュレーション結果と実測値をプロットしたグラフを図 5.4 に示す。

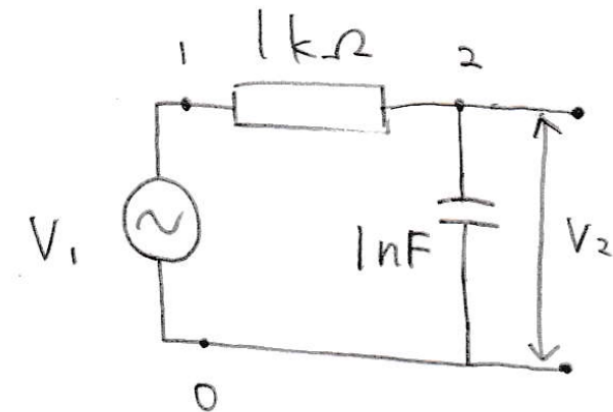


図 5.3: ローパスフィルタ回路

表 5.2: ローパスフィルタ実測値

周波数 [kHz]	5	10	50	100	200	500	1000
電圧 [mV]	1000	1000	1000	900	680	380	240

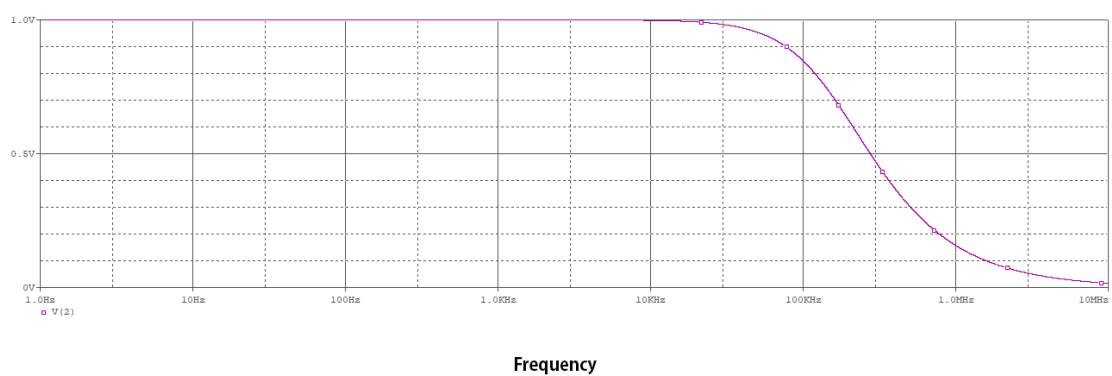


図 5.4: シミュレーション結果

5.2.3 53Hz 以上かつ 160kHz 以下の周波数を通過させる回路（バンドパスフィルタ）

抵抗とコンデンサを用いてカットオフ周波数を計算し、設計した回路を図 5.3 に示す。また、 V_1 を 1.0V（p-p 値）にして周波数を 5Hz から 1MHz まで変化させたときの V_2 の実測値を表 5.3 にまとめ、シミュレーション結果と実測値をプロットしたグラフを図 5.3 に示す。

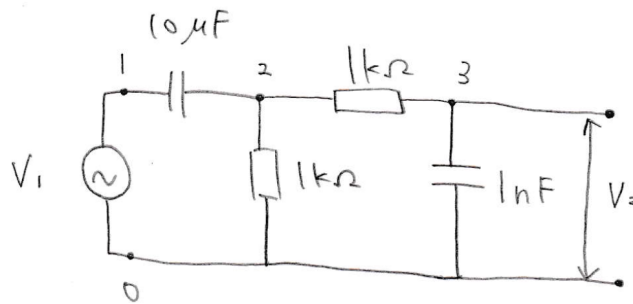


図 5.5: バンドパスフィルタ回路

表 5.3: バンドパスフィルタ実測値

周波数 [Hz]	5	10	20	50	100	200	500	1k	2k
電圧 [mV]	184	528	744	896	920	936	980	980	1000
周波数 [Hz]	5k	10k	20k	50k	100k	200k	500k	1M	-
電圧 [mV]	1000	1000	1000	960	820	640	380	220	-

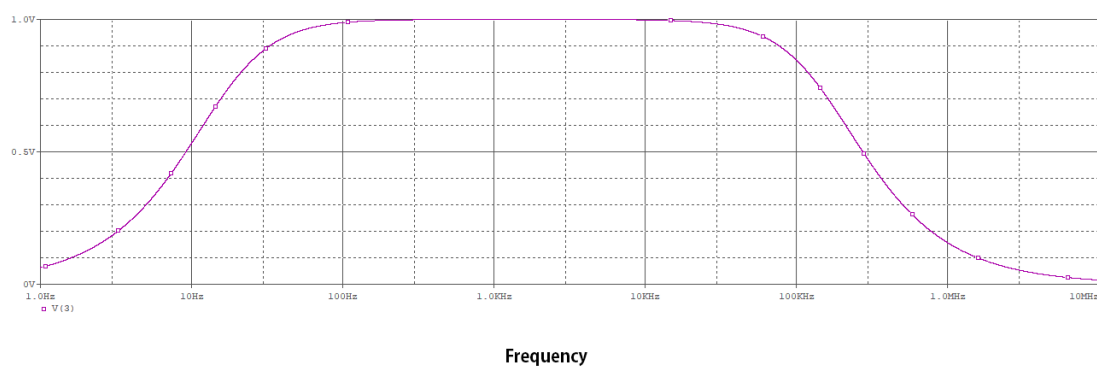


図 5.6: シミュレーション結果

6 使用機材

7 参考文献

1. SPICE とは, 電子回路シミュレーションの基礎
<https://techweb.rohm.co.jp/product/simulation/7688/>
閲覧日：2025 年 5 月 17 日
2. アナログ電子回路シミュレータのメリット・デメリット
<https://spiceman.jp/circuit-simulator-merit-demerit/>
閲覧日：2025 年 5 月 17 日
3. 長尾佑紀, 『数値計算の常識を変える！ 安定性で選ぶ常微分方程式の数値解法』, 共立出版, 2022 年.
4. プローブの基礎, YOKOGAWA
https://tmi.yokogawa.com/jp/library/resources/measurement-tips/probe_basics/
閲覧日：2025 年 5 月 19 日

8 付録

本実験のシミュレーションで使用した SPICE のネットリストを以下に示す。

8.1 線形抵抗回路解析

8.2 非線形抵抗回路解析

8.3 DC 解析

8.4 AC 解析

8.5 過渡解析