

第7週レポート

10 班 山村優太

2024 年 11 月 26 日

1 目的

オペアンプを用いた増幅回路における電圧利得の周波数特性や入力インピーダンスを測定し、オペアンプの非理想的な特性について理解を深める。

2 原理

オペアンプの周波数特性

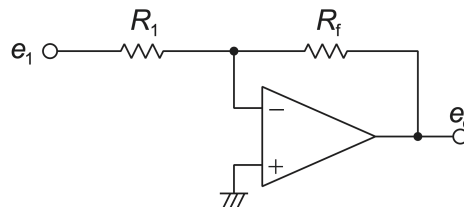


図 1 反転増幅回路

図 1 に示した反転増幅回路において、電圧利得 G_{inv} は以下の式で表される：

$$G_{\text{inv}} = 20 \log_{10} \left| \frac{e_o}{e_1} \right| = 20 \log_{10} \frac{R_f}{R_1} \quad (1)$$

上式より、理想オペアンプの電圧利得は入力信号の周波数によらないことがわかる。

しかし、実際のオペアンプは周波数特性を持ち、高周波領域ではその特性が増幅回路の電圧利得にも現れる。オペアンプと帰還回路からなる増幅回路を図 2 に示す。

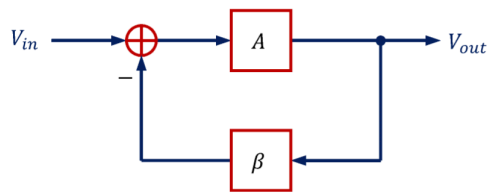


図 2 増幅回路の概要図

負帰還回路を構成したときの利得である閉ループゲイン G_v は以下の式で表される：

$$G_v = \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \left| \frac{A}{1 + A\beta} \right| \quad (2)$$

ここで、 A は帰還回路を構成せずにオペアンプを動作させる際の利得である開ループゲイン、 β は帰還率である。帰還量 $|A\beta|$ の大小により、式 (2) で表される閉ループゲインは

$$|A\beta| \gg 1 : G_v \simeq \frac{1}{|\beta|} \quad (3)$$

$$|A\beta| \ll 1 : G_v \simeq |A| \quad (4)$$

と近似される。開ループゲインの周波数特性はオペアンプ内部のコンデンサに起因するものであり、1 次の RC ローパスフィルタ (LPF) と同じ周波数特性を持つ。LM741C の開ループゲインは以下の式で近似される：

$$A(\omega) = \frac{G_0}{1 + j\omega T}, \quad G_0 = 10^5, \quad T = 16\text{ms} \quad (5)$$

すなわち、開ループゲインが大きい範囲 (低周波領域) では帰還回路の特性が、開ループゲインが小さい範囲 (高周波領域) ではオペアンプそのものの開ループ特性が出力に現れる。

カットオフ周波数 f_c を求める。式 (5) を式 (2) に代入すると

$$G_v = \left| \frac{1}{1/A + \beta} \right| = \left| \frac{1}{-1 + 1/A} \right| \left(\because \frac{1}{\beta} = -\frac{R_1}{R_f} = -1 \right) \quad (6)$$

$$\simeq \left| \frac{G_0}{-G_0 + j\omega T} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f T)^2 / G_0^2}} \quad (7)$$

を得る。 $G_v = 1/\sqrt{2}$ となるときのカットオフ周波数 f_c は

$$f_c = \frac{G_0}{2\pi T} \simeq 1\text{MHz} \quad (8)$$

と計算される。

増幅回路の入カインピーダンス

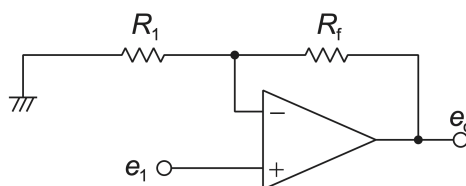


図 3 非反転増幅回路

図 1 に示した反転増幅回路の入力インピーダンス Z_{inv} は, 仮想短絡の考え方から

$$Z_{inv} = R_1 \quad (9)$$

である. また, 図 3 に示した非反転増幅回路の入力インピーダンス Z_{ninv} はオペアンプの入力インピーダンスに等しく, 理想的には無限大となるが, 実際は LM741C のデータシートより

$$Z_{ninv} \simeq 20 \text{ M}\Omega \quad (10)$$

となる.

3 方法

以下の実験では, オペアンプの電源電圧を $\pm 15 \text{ V}$ とし, 発振防止のため正負の電源と接地との間に $10 \mu\text{F}$ のアルミ電解コンデンサを挿入する.

実験 7.3

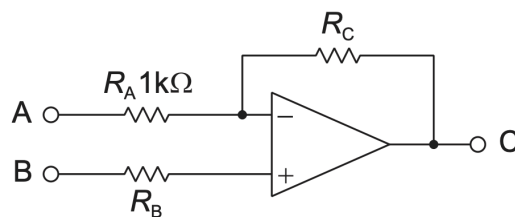


図 4 反転増幅回路

1. 図 4 に示した反転増幅回路をブレッドボード上に作成する. 抵抗値は $R_A = R_C = 1 \text{ k}\Omega$, $R_B = 510 \Omega$ とする.
2. 点 A に振幅 0.1 V および 4.0 V の正弦波を入力信号として印加し, 電圧利得 G_{inv} の周波数特性 $G_{inv}(\omega)$ を測定する. 測定周波数は 1 kHz ~ とする.
3. 周波数の変化に対する入力および出力波形とその位相関係についても記録する.

実験 7.4

1. 図 5 に示した反転増幅回路をブレッドボード上に作成する. R_{in} は入力電流を測定するために挿入する抵抗である. 抵抗値は $R_{in} = R_1 = R_f = 1 \text{ k}\Omega$ とする.
2. 適当な振幅の正弦波 V_{in} を入力信号として印加し, V_{in} と点 A の電位 E_i から入力電流 I_i を求める. 入力信号の振幅は 4 V とした.

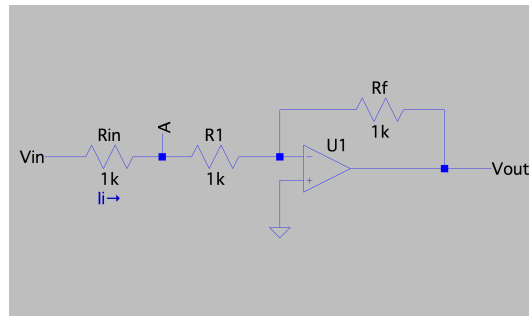


図 5 反転増幅回路

3. 以下の式に基づいて回路の入力インピーダンスを計算する：

$$Z_{in} = \frac{E_i}{I_i} \quad (11)$$

実験 7.5

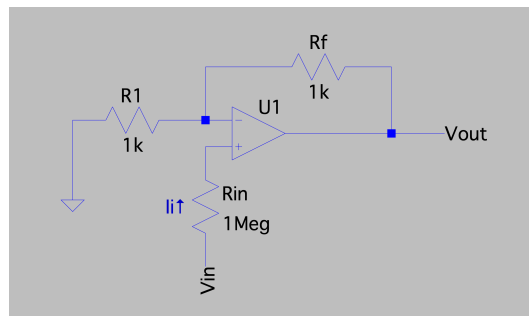


図 6 非反転増幅回路

1. 図 6 に示した非反転増幅回路をブレッドボード上に作成する． R_{in} は入力電流を測定するために挿入する抵抗である．抵抗値は $R_1 = R_f = 1\text{ k}\Omega$, $R_{in} = 1\text{ M}\Omega$ とする．
2. 適当な振幅の正弦波 V_{in} を入力信号として印加し, V_{in} と+端子の電位 E_i から入力電流 I_i を求める．入力信号の振幅は 8 V とした．
3. 式 (11) に基づいて回路の入力インピーダンスを計算する．

4 使用器具

- ファンクションジェネレータ 33210A
- オシロスコープ DSOX2002A
- テスター DE-200A
- 直流電源 PA18-1.2B ×2

- 抵抗 510Ω , $1k\Omega \times 3$, $1M\Omega$
- コンデンサ $10\mu F \times 2$
- オペアンプ LM741C
- ブレッドボード
- ジャンパーワイヤー, コード, アダプター各種

5 結果

実験 7.3

入力信号の振幅を $0.1V$ および $4V$ としたときの電圧利得の周波数特性を, それぞれ図 7 および図 8 に示す. 横軸は周波数 [kHz], 縦軸は電圧利得 [dB] である. プロットには MATLAB を用いた.

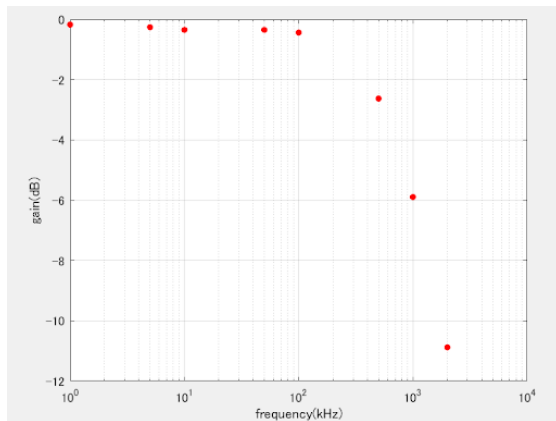


図 7 電圧利得の周波数特性 (0.1V)

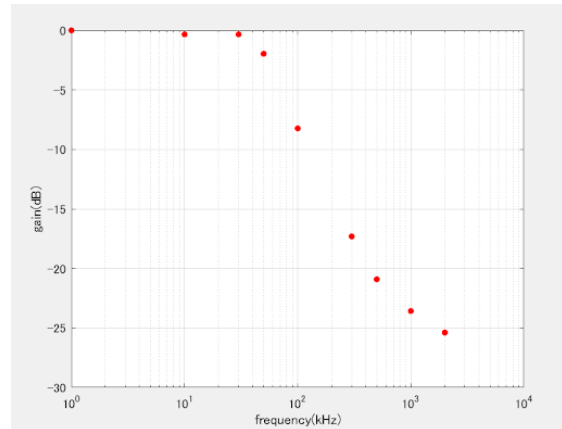


図 8 電圧利得の周波数特性 (4V)

振幅が $0.1V$ および $4.0V$ のいずれの場合においても, 低周波数領域では電圧利得はほぼ 0 dB であり, 高周波領域では電圧利得が減少している. カットオフ周波数 f_c は $0.1V$ の場合でおよそ 600 kHz , $4.0V$ の場合でおよそ 60 kHz である. $0.1V$ の場合は電圧利得は直線的に減少したが, $4V$ の場合は直線的に減少したのち, およそ 1 MHz では減少が緩やかになった. また, $0.1V$ の場合には出力波形は全て正弦波であったが, $4.0V$ の場合には 50 kHz より高い周波数領域では三角波が観測された.

実験 7.4

$E_i = 3.94V$, $I_i = 3.99\text{ mA}$ となった. これより, 回路の入力インピーダンスは $Z_{in} = 987\Omega$ と計算される.

実験 7.5

$E_i = 7.29 \text{ V}$, $I_i = 0.70 \mu\text{A}$ となった. これより, 回路の入力インピーダンスは $Z_{\text{in}} = 10.4 \text{ M}\Omega$ と計算される.

6 考察

実験 7.3

$R_A = R_C = 1 \text{ k}\Omega$ より, 回路の理想的な電圧利得は

$$G_{\text{inv}} = 20 \log_{10} \frac{R_C}{R_A} = 0 \text{ dB} \quad (12)$$

となる. 開ループゲインが LPF の周波数特性を持つことを考慮すると, 結果は式 (3), (4) の理論と一致している. 式 (8) より, f_c の理論値は 1 MHz であり, 0.1 V の場合の実験値は理論値より小さい. 誤差の要因としては, ユニティゲイン周波数よりも高い周波数領域で, 開ループゲインの減衰率が増加することが挙げられる. 4 V の場合の実験値は理論値と大きく離れている. 誤差の原因としては, 入力信号の振幅が大きい場合, 高周波領域においてスルーレートが不足し, 出力波形が高周波成分を多く含む三角波に歪むことで, 信号が正しく増幅されないことが挙げられる.

実験 7.4

式 (9) より, 反転増幅回路の入力インピーダンス Z_{inv} の理論値は $1 \text{ k}\Omega$ であり, 実験値の 987Ω は理論値とほぼ一致している.

実験 7.5

式 (10) より, 非反転増幅回路の入力インピーダンス Z_{ninv} の理論値は $20 \text{ M}\Omega$ であり, 実験値の $10.4 \text{ M}\Omega$ は理論値よりも小さい. 誤差の要因としては, テスターのインピーダンスが R_{in} と並列に接続され, 抵抗値が R_{in} よりも小さくなったことが考えられる.

7 問題

問題 7.2

第 2 節 オペアンプの周波数特性, 第 6 節 実験 7.3 を参照.

問題 7.3

実験 7.3 の結果を以下に示す. 緑色の波形は入力波形, 黄色の波形は出力波形である.

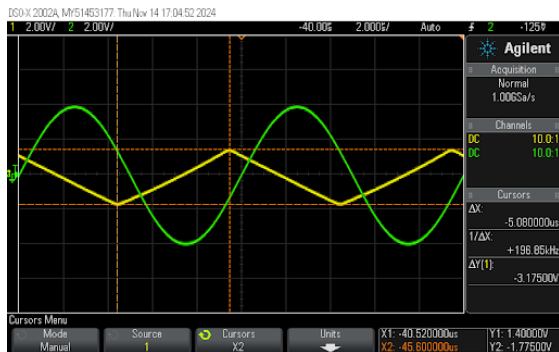


図 9 入力および出力波形 (立ち上がり)

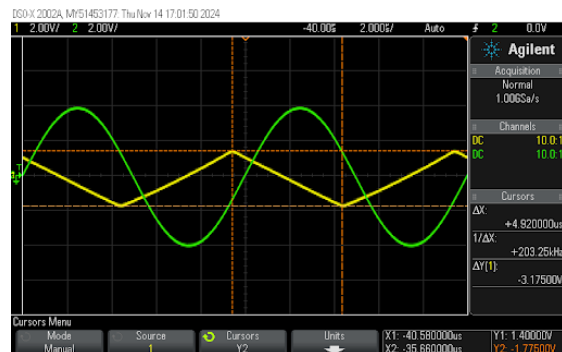


図 10 入力および出力波形

図 9 および図 10 から、立ち上がり、立ち下りのスルーレート SR は、それぞれ以下のように計算される：

$$\text{立ち上がり} : SR = 3.175 \text{ V} / 5.08 \mu\text{s} = 0.625 \text{ V} / \mu\text{s} \quad (13)$$

$$\text{立ち下り} : SR = 3.175 \text{ V} / 4.92 \mu\text{s} = 0.645 \text{ V} / \mu\text{s} \quad (14)$$

問題 7.4

第 2 節 増幅回路の入力インピーダンス, 第 6 節 実験 7.4, 7.5 を参照.

問題 7.5

理想的なオペアンプを用いた反転増幅回路は、入力インピーダンスが無限大、入力オフセット電流がゼロとなる。しかし、実際のオペアンプではこれらの条件を満たさない。微小な入力オフセット電流によって+端子および-端子に発生するオフセット電圧が等しくなるようにするためには、両端子から見たインピーダンスを等しくする必要がある。このため、+端子と GND 間に抵抗を挿入する。-端子から見たインピーダンスは $R_A // R_C$ である。したがって、実験 7.3 の場合、+端子と GND 間に挿入する抵抗は $R_A // R_C \simeq 510 \Omega$ である。

8 感想

本実験を通して、オペアンプの非理想的な特性についての理解を深めることができた。これまでには増幅回路の特性に注目する機会が多かったため、オペアンプそのものの特性に焦点を当てて調べることは新鮮であった。特に、高周波領域ではオペアンプの周波数特性が増幅回路の性能に影響を与えると知り驚いた。