

実験 A2: オペアンプによるアナログ回路設計

1 目的

演算増幅器 (Operational Amplifier; オペアンプ, OP アンプ, OP-AMP などと略す) は非常に大きな直流電圧利得を持った差動増幅器で, アナログ回路設計における基本素子として広く用いられている. 本実験では, オペアンプを用いた基本的な回路の特性を測定し, オペアンプ回路についての基礎知識を身に付ける.

2 原理

オペアンプはその動作のために電源 (通常 $v_{cc} = \pm 15V$) が必要であるがその応用範囲は広く, 増幅回路にとどまらずアナログ信号の加減算回路, 微積分回路, フィルタ回路, 信号処理回路 (リミッタ回路, 絶対値回路, 実効値変換回路, コンパレータ回路など) や波形発生回路などを構成できる. オペアンプ回路記号は図 1 のように表す. 三角形の左側の 2 本の線が入力端子で, $-$ の符号がある方を反転入力端子, $+$ の符号がある方を非反転入力端子と呼ぶ. 右側の 1 本の線が出力端子である. ここで, 図 1 のように各端子の電圧を定義すれば,

$$v_o = \mu(v_2 - v_1) \quad (1)$$

という関係がある. v_1 および v_2 は直流信号でも交流信号でも構わない. このようにオペアンプは 2 つの入力端子に加わった電圧の差分のみを増幅する働きをもつ. ここで, μ は正の数で, オペアンプの作動利得あるいは電圧利得と呼ばれており, 直流信号あるいは周波数が 10Hz 程度までの交流信号に対しては $10^5 \sim 10^6$ 程度の非常に大きな数値である. 交流信号の周波数が 10Hz 程度以上になると, 電圧利得は周波数に比例して減少していき, ある周波数 (1MHz \sim 10MHz 程度) で 1 となる.

理想的なオペアンプでは, 入力端子に電流は流れ込まず, 出力電圧は負荷に影響されない. つまり, 入力インピーダンスは ∞ であり, 出力インピーダンスは 0 である. 実際のオペアンプでは, 入力端子に電流は流れ込み, 出力端子に沢山の電流を流すような負荷を接続することはできない. また, 両入力端子の電圧を 0 とすれば理想的なオペアンプでは出力に何も現れないが, 実際のオペアンプでは入力オフセット電圧や入力オフセット電流などの影響で出力端子に直流電圧が現われる. これ以外にも, 実際のオペアンプでは理想オペアンプと比べて特性上いろいろな制限があり, 応用する場合に注意する必要がある. 理想的なオペアンプの機能をまとめると以下ようになる.

1. 電圧の入出力関係は $v_o = \mu(v_2 - v_1)$, $\mu \gg 1$ である.
2. 入力端子に電流は流れない.
3. 出力電圧 v_o は負荷に影響されない.

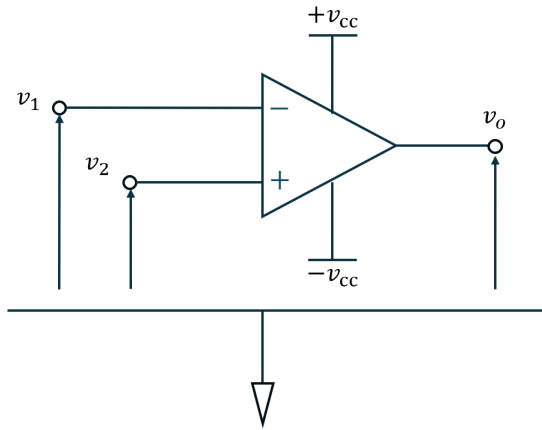


図1 オペアンプの回路記号と端子電圧の定義。 v_{cc} は電源をあらわす。

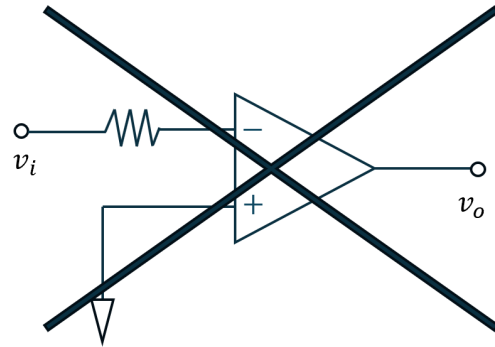


図2 オペアンプを開ループ接続した例。電圧利得が大きすぎ、出力信号が飽和してしまうため、ほとんど使われない。

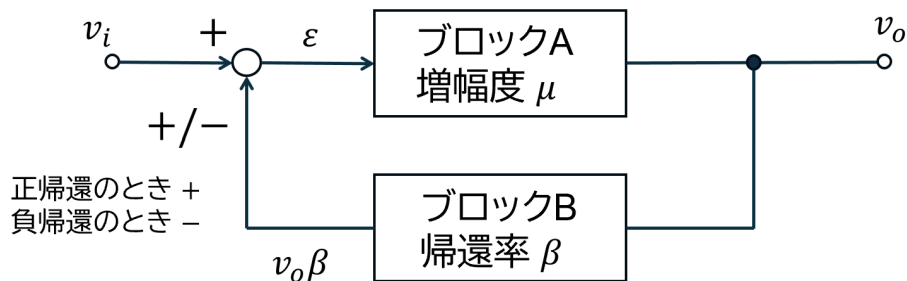


図3 帰還回路（フィードバック回路）の原理

ここで、 $\mu = 10^6$ 、 $v_o = 10\text{V}$ とすると、 $v_2 - v_1 = 10\mu\text{V}$ となり、 v_o の 10V に比較してほぼ 0 に近く、 $v_2 \approx v_1$ である。電圧利得 ∞ の理想的なオペアンプでは、 $v_2 = v_1$ である。

オペアンプは、図2のように出力から入力に信号を戻さない開ループの状態で使用することはほとんどない。オペアンプを開ループで使用すると、電圧利得が非常に大きいので、たとえオペアンプが理想的な動作をしている場合でも、わずかの入力信号に対して大きな出力電圧が現われ、出力が飽和する。実際のオペアンプでは内部のオフセット電圧のために、開ループのままでは入力に信号を加えないときにも出力に大きな直流電圧が現われ、増幅器として使用できない。従って、オペアンプでは、必ず出力信号の一部を入力に戻す回路（帰還回路、フィードバック回路）を付加して使用しなければならない。

帰還回路には入力信号と反対の極性の信号を戻す負帰還（negative feedback）と、入力信号と同じ極性の信号を戻す正帰還（positive feedback）とがある。図3に帰還回路の原理をブロック図で示す。ここで v_i は入力信号、 v_o は出力信号である。ブロックAの部分は利得 μ の増幅器で、 $v_o = \epsilon\mu$ の特性を持ち、ブロックBの部分が出力信号の一部を入力に戻す帰還回路で、 $v_o\beta$ という成分が帰還され、合成点の符号は、正帰還の場合 $+$ 、負帰還の場合 $-$ となる。 β を帰還率と呼ぶ。オペアンプ回路では負帰還回路が多く用いられる。

図4に非反転増幅回路を示すが、この回路で、反転入力端子の電圧は $R_1 v_o / (R_1 + R_2)$ であり、非

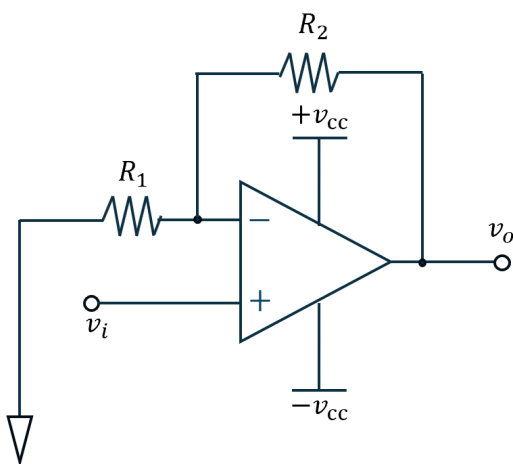


図4 非反転増幅回路.

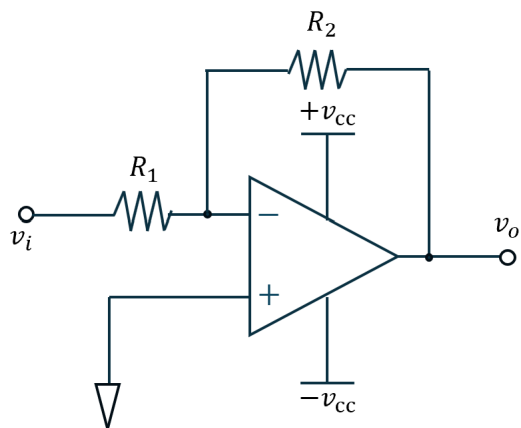


図5 反転増幅回路.

反転入力端子の電圧は v_i であるから,

$$v_o = \mu \left(v_i - R_1 \frac{v_o}{R_1 + R_2} \right) \quad (2)$$

となる. ここで, $R_1/(R_1 + R_2) = \beta$ とおいて式を整理すると,

$$v_o = \mu \frac{v_i}{1 + \mu\beta} \quad (3)$$

となり, 図3の帰還回路の原理と直接に対応していることがわかる. ここで, $\mu \gg 1$ とすると,

$$v_o \doteq \frac{v_i}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} v_i \quad (4)$$

となり, 図4の回路は電圧利得が $(R_1 + R_2)/R_1$ の増幅器になっていることがわかる.

図4の非反転増幅回路の入出力の関係を求めるもう一つの方法として, 電圧利得 ∞ の理想的なオペアンプの考え方をを用いる方法を以下に示す. 理想的なオペアンプでは入力端子には電流は流れ込まないので, オームの法則により, 反転入力端子の電圧は $R_1 v_o / (R_1 + R_2)$ となる. 一方, 電圧利得 ∞ の理想的なオペアンプでは反転入力端子の電圧と非反転入力端子の電圧は等しいので,

$$v_i = R_1 \frac{v_o}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

となり,

$$v_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} v_i \quad (6)$$

となって, 式(4)と一致する.

図5に示す反転増幅回路についても同様の考え方で入出力の関係が得られる. すなわち, 反転増幅回路では, 図5に示すように非反転入力端子は接地されているので電位は $0V$ である. また, 反転入力端子の電位は非反転入力端子の電位に等しいはずであるから, やはり $0V$ である. 入力端子には電流は流れ込まないので, R_1 を流れる電流と R_2 を流れる電流の大きさは等しくなる. 電流の向きを考えると, $v_i/R_1 = -v_o/R_2$ となり,

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_i \quad (7)$$

が得られる．このように反転増幅回路では入力と出力の電圧の極性が反対になり，抵抗値の比 R_2/R_1 が電圧利得に等しくなる．

選択課題 1: オペアンプの役割として「増幅」と「フィルタリング」を用いる身近な例を挙げ，その仕組みと長所と短所を説明せよ．文献調査等を行った場合，レポートの末尾に参考文献として出典を明記すること．

3 実験

実験の項目と内容を以下に示す．交流電圧に関する実験については，発振器やオシロスコープを使用するが，これらについては実験当日に説明する．

3.1 準備

3.1.1 実験装置について

本実験では，図 6 のようなオペアンプ実験装置を用いて実験をおこなう．実験装置にある各スイッチについて以下で説明する．

- スイッチ S1 は実験装置の主電源である．
- スイッチ S2 はオペアンプ IC1～IC4 に加える電源電圧切り替え用スイッチであり，INT に設定すると内部電源から供給され，EXT にすると POWER SUPPLY の各端子に接続されている外部電源から供給されるようになる．OFF に設定すると，オペアンプの動作電源はオフになる．本実験では，INT に設定して実験をおこなう．
- スイッチ S3 は INPUT 端子からの入力回路に電解コンデンサを挿入するか，直接入力するかを切り替える．
- スイッチ S4 は入力回路切り替え用スイッチで，INPUT 端子からの入力もしくは，可変抵抗器 RV からの入力を切り替える．可変抵抗 RV を調整することで $-15\sim 15\text{V}$ の試験用可変直流電圧を得ることができる．
- スイッチ S5 は DC デジタル電圧計への入力回路を切り替える．
- スイッチ S6 は DC デジタル電圧計の電圧レンジを切り替える．各レンジは V にした場合， $-19.9\sim 19.9\text{V}$ ，mV にした場合， $-199.9\sim 199.9\text{mV}$ になる．これらのレンジを超えた場合，“1” や “-1” が表示される．

また，図 6 の実験装置において，白い線の箇所は配線されており，白い線が途切れているところは配線されていない．

3.1.2 DC デジタル電圧計の接続

DC デジタル電圧計の配線方法について説明する．例えば，オペアンプ IC1 を使って入出力特性を計測する場合，図 7 のように配線する．デジタル電圧計のマイナス端子 T22 は接地 T20 に配線し，プラス端子 T23 は T24 と配線したのち，IC1 の入力電圧計測箇所 T1 と T25，出力電圧計測箇所 T4 と T26 を配線する．後述する実験 3 では出力電圧の計測箇所が異なるので注意する．

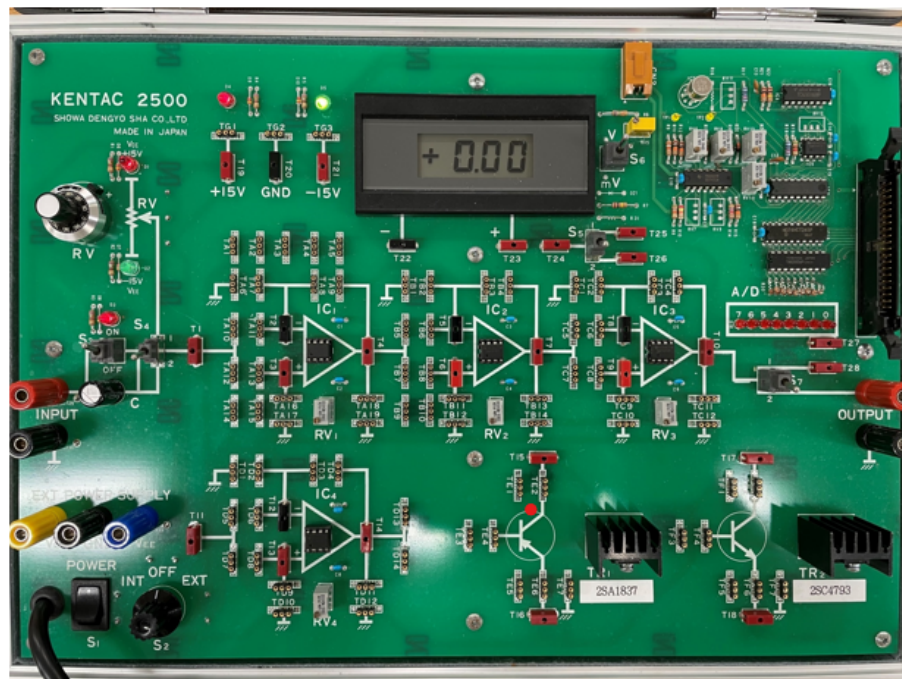


図6 オペアンプ実験装置.

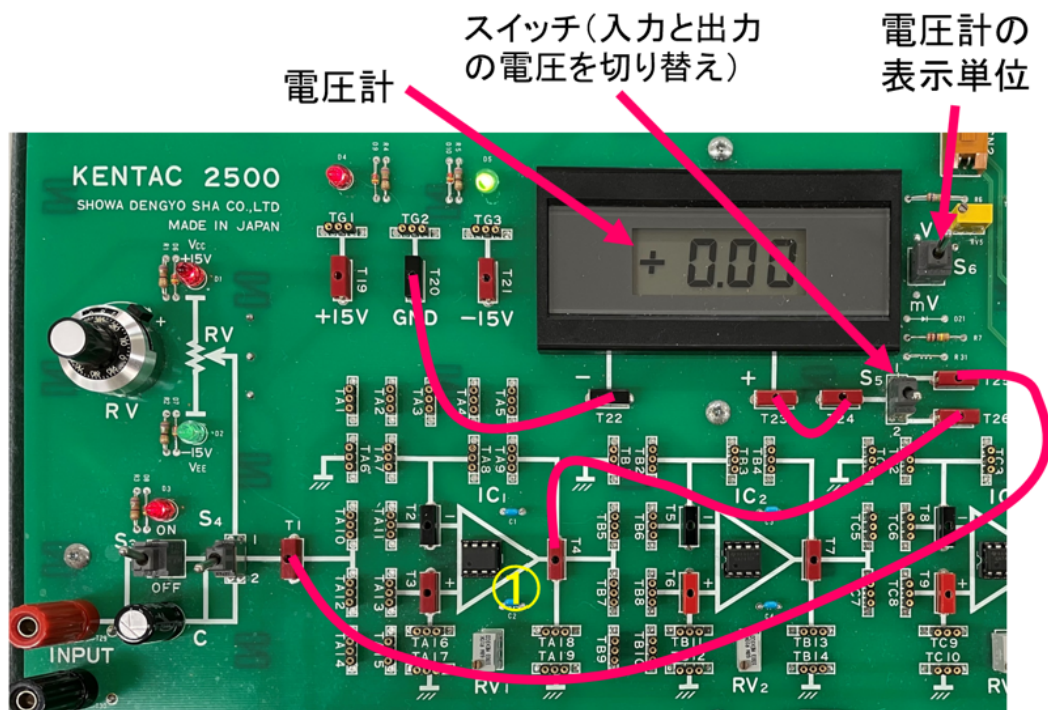


図7 IC1 のオペアンプを利用する際のデジタル電圧計の接続方法. S5 を切り替えることで入力電圧と出力電圧の測定を切り替えることができる.

3.1.3 オフセット調整

図8のように、各実験で回路を配線して動作確認をした後、回路の入力端子を接地し、入力電圧を0Vの状態にした上で、オフセット調整用抵抗器RV1を出力電圧が0Vになるよう付属のマイナスインスドライバーで調整する。可変抵抗の軸を回して行き、”カチッ”という音がしたら、可変抵抗のストッパを破損する恐れがあるため、それ以上回さないこと。

必須課題1: オフセット電圧が生じる原因についてまとめよ。また、オペアンプの実験において、オフセット調整ができないと、どのような支障をきたすか、まとめよ。文献調査等を行った場合、レポートの末尾に参考文献として出典を明記すること。

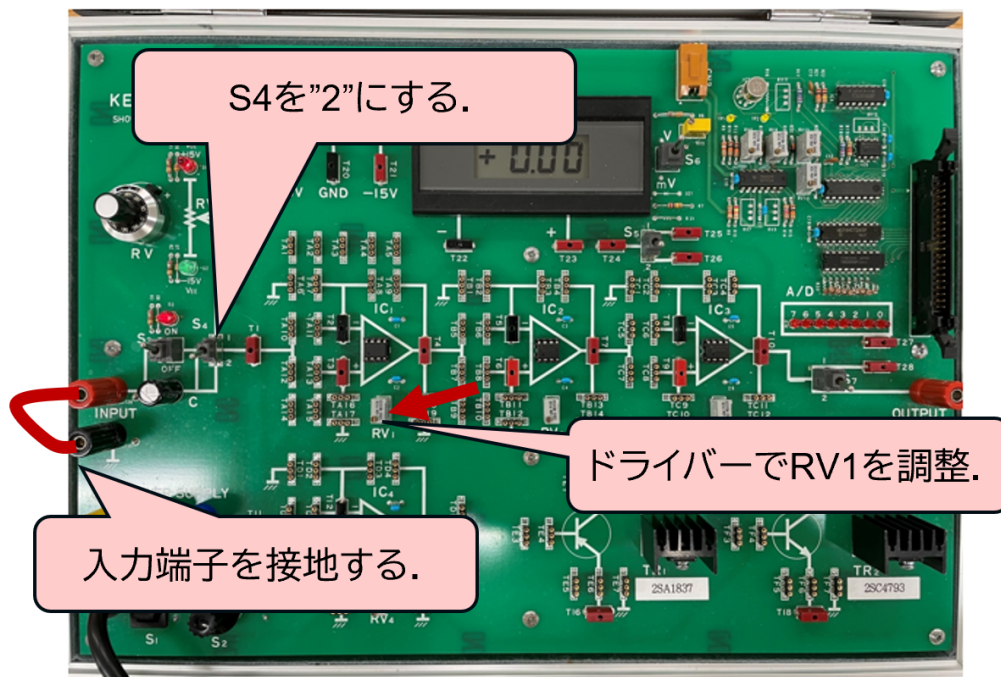


図8 オフセット調整の流れ.

3.2 実験1：直流増幅回路の入出力特性

図9および10にそれぞれ示す、増幅度10および100の反転増幅回路において、入力電圧を変化させ、それぞれの入力電圧における出力電圧の値を測定し記録せよ。レポート作成時は、結果の表とグラフを作成し、その結果の考察を含めること。使用する素子は以下のとおりである。

《増幅度10》

- 抵抗 $10\text{k}\Omega$ (茶-黒-オレンジ) 2個
- 抵抗 $100\text{k}\Omega$ (茶-黒-黄) 1個
- 抵抗 $2\text{k}\Omega$ (赤-黒-赤) 1個

《増幅度100》

- 抵抗 $10\text{k}\Omega$ (茶-黒-オレンジ) 2個
- 抵抗 $1\text{M}\Omega$ (茶-黒-緑) 1個
- 抵抗 $2\text{k}\Omega$ (赤-黒-赤) 1個

選択課題2：反転増幅回路（図5）の増幅度を可変にする場合、入力抵抗 R_1 と帰還抵抗 R_2 のどちらを変化させるのが良いか説明せよ。

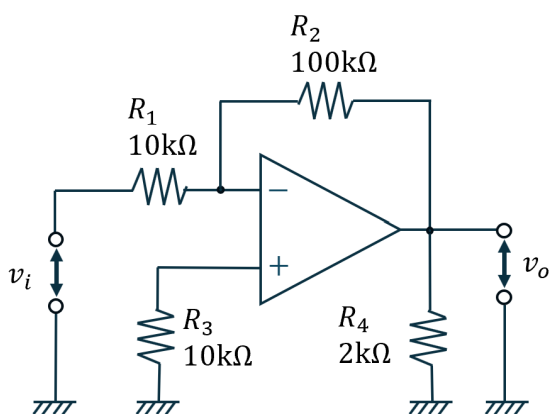


図9 反転増幅回路（増幅度10）

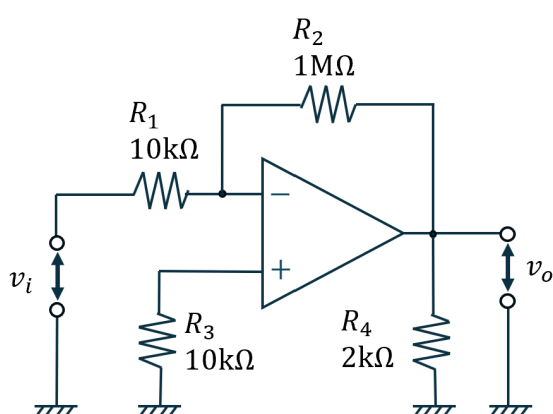


図10 反転増幅回路（増幅度100）

3.3 実験2：交流増幅回路の周波数特性

図11に示す増幅度10の交流反転増幅回路において、発振器を用いて正弦波信号を回路に入力し、正弦波の振幅を一定に保ちつつ周波数を変化させ、それぞれの周波数における出力電圧の振幅をオシロスコープを用いて測定し記録せよ。なお、入力電圧の振幅は 0.1V, 0.2V, 0.4V, 0.8V, 1.0V の5つのパターンを実験すること。出力波形が正弦波であることを確認しつつ実験を行い、出力電圧の波形がひずみ始める周波数についても記録しておく。レポート作成時は、結果の表とグラフを作成し、その結果の考察を含めること。使用する素子は以下のとおりである。

- 抵抗 $10\text{k}\Omega$ (茶-黒-オレンジ) 2個

- 抵抗 $100\text{k}\Omega$ (茶-黒-黄) 1 個
- 抵抗 $2\text{k}\Omega$ (赤-黒-赤) 1 個

必須課題 2：交流増幅回路について，オペアンプのスルーレートと回路の周波数特性との間にはどのような関係があるかを数式によって説明せよ．また，この関係式と実験 2 の結果を比較し，考察に含めよ．

選択課題 3：図 11 において，入力端子からの入力回路に挿入されている電解コンデンサ C の効能を説明せよ．

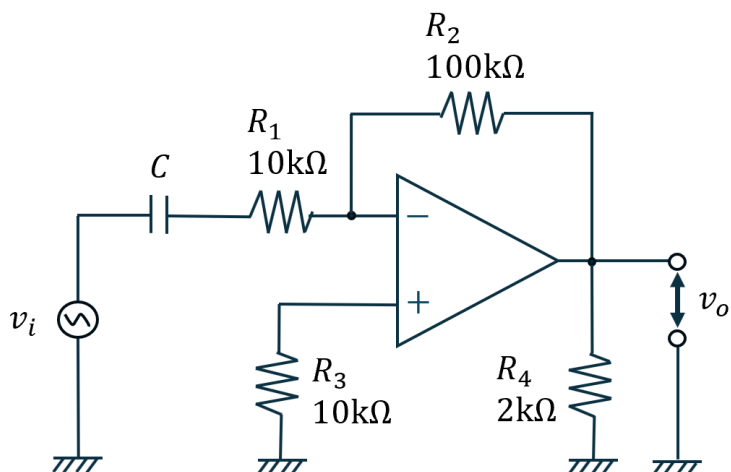


図 11 交流増幅回路（増幅度 10）

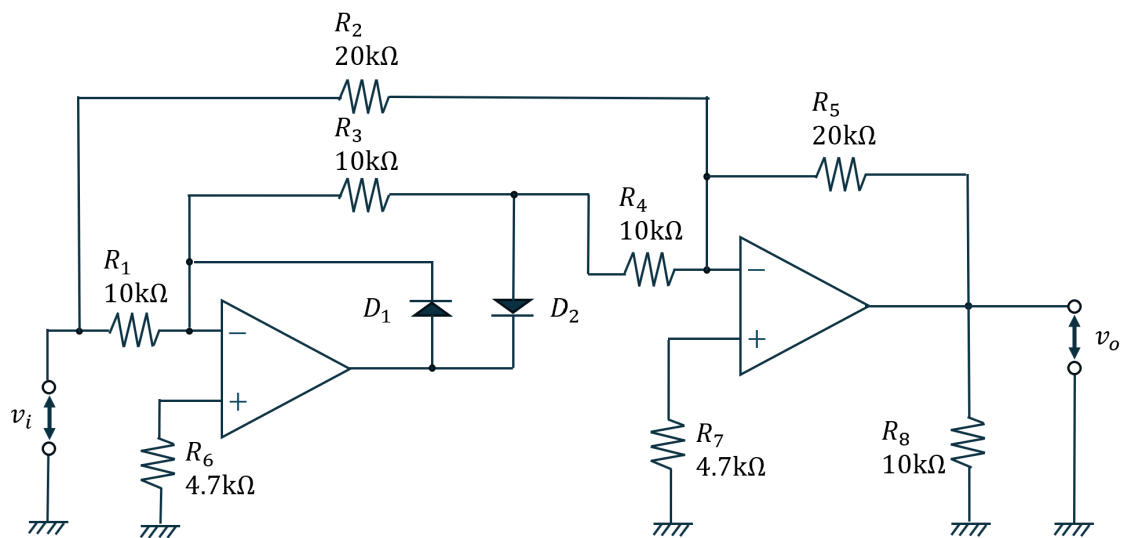


図 12 絶対値増幅回路

3.4 実験 3：絶対値増幅回路の入出力特性

図 12 に示すようなオペアンプとダイオードを組み合わせた絶対値増幅回路において，直流入力電圧を変化させ，それぞれの入力電圧における出力電圧の値を測定し記録せよ．レポート作成時

は、結果の表とグラフを作成し、その結果の考察を含めること。使用する素子は以下のとおりである。

- 抵抗 $10\text{k}\Omega$ (茶-黒-オレンジ) 4 個
- 抵抗 $20\text{k}\Omega$ (赤-黒-オレンジ) 2 個
- 抵抗 $4.7\text{k}\Omega$ (黄-紫-赤) 2 個
- ダイオード 2 個 (アノード, カソードの向きに注意)

選択課題 4：絶対値増幅回路において、回路中の 2 つのダイオードの極性を逆にすると出力電圧の極性はどのようなになるかを説明せよ。

3.5 実験 4：ローパスフィルタの周波数特性

図 13 および 14 にそれぞれ示すような、遮断周波数約 1kHz の 2 次形ローパスフィルタおよび 4 次形ローパスフィルタの周波数特性を測定し記録せよ。レポート作成時は、結果の表とグラフを作成し、その結果の考察を含めること。使用する素子は、それぞれ以下のとおりである。

《2 次形ローパスフィルタ》

- 抵抗 $22\text{k}\Omega$ (赤-赤-オレンジ) 2 個
- 抵抗 $2\text{k}\Omega$ (赤-黒-赤) 1 個
- コンデンサ 4700pF (472) 1 個
- コンデンサ $0.01\mu\text{F}$ (103) 1 個

《4 次形ローパスフィルタ》

- 抵抗 $22\text{k}\Omega$ (赤-赤-オレンジ) 4 個
- 抵抗 $2\text{k}\Omega$ (赤-黒-赤) 1 個
- コンデンサ 4700pF (472) 2 個
- コンデンサ $0.01\mu\text{F}$ (103) 2 個

必須課題 3：電圧利得 ∞ の理想的なオペアンプの考え方をを用いて 2 次形ローパスフィルタの入出力特性（伝達関数）を導出せよ。それに従って回路の減衰特性の理論値を計算し、実験値と比較せよ。

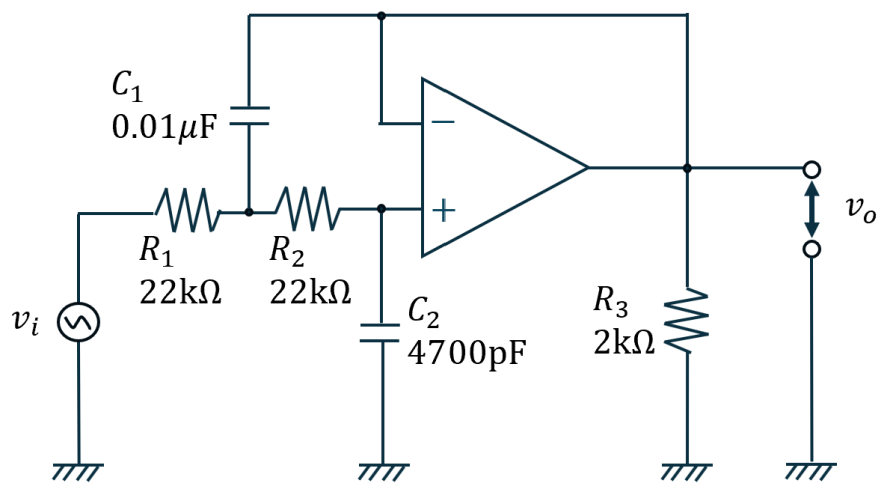


図 13 2次形ローパスフィルタ

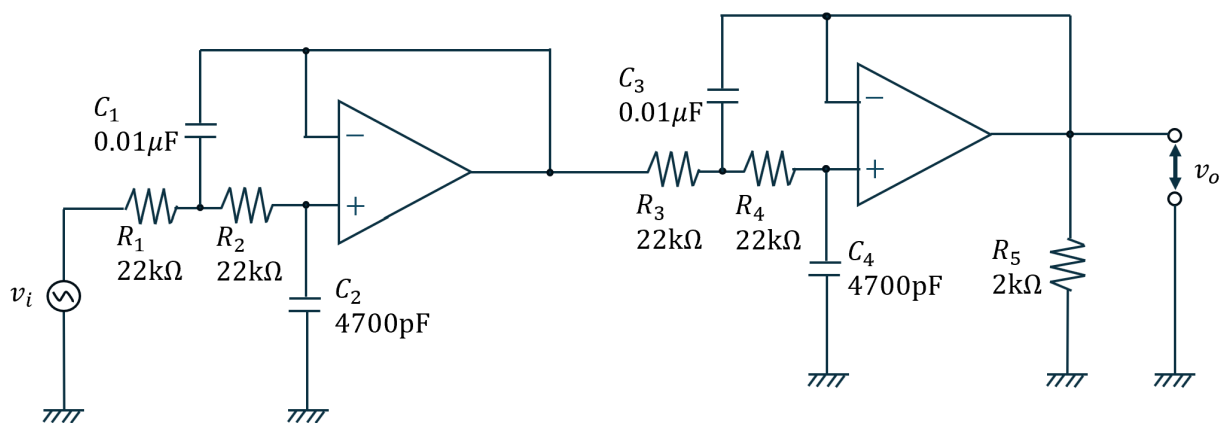


図 14 4次形ローパスフィルタ

3.6 実験5：ハイパスフィルタの周波数特性

図 15 に示す遮断周波数約 1kHz の 2 次形ハイパスフィルタの周波数特性を測定し記録せよ。レポート作成時は、結果の表とグラフを作成し、その結果の考察を含めること。

使用する素子は以下のとおりである。

- 抵抗 $11\text{k}\Omega$ (茶-茶-オレンジ) 1 個
- 抵抗 $22\text{k}\Omega$ (赤-赤-オレンジ) 1 個
- 抵抗 $2\text{k}\Omega$ (赤-黒-赤) 1 個
- コンデンサ $0.01\mu\text{F}$ (103) 2 個

必須課題 4：電圧利得 ∞ の理想的なオペアンプの考え方をを用いて 2 次形ハイパスフィルタの入出力特性（伝達関数）を導出せよ。それによって回路の減衰特性の理論値を計算し、実験値と比較せよ。

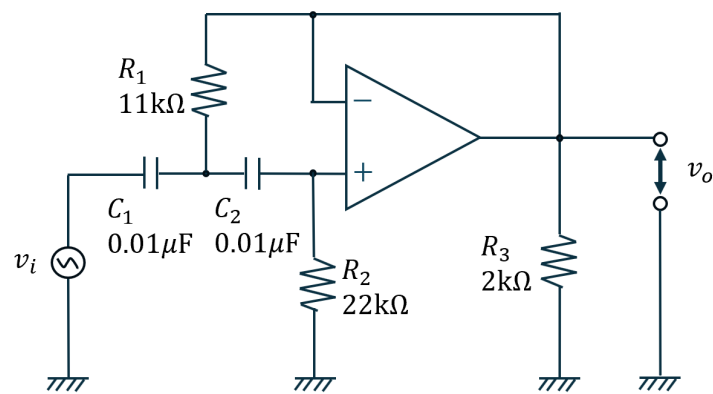


図 15 2 次形ハイパスフィルタ

4 発展課題

※本問題は選択課題2つ分として、取り組んだ場合はレポート点に加点する。

図16において大きい三角形は、オペアンプの入力オフセット電圧 V_{OS} 、入力オフセット電流 I_{OS} 、入力インピーダンス Z_g 、出力インピーダンス Z_o 、および増幅度 μ を考慮したオペアンプの等価回路である。このオペアンプに入力抵抗 R_1 と帰還抵抗 R_2 とを付加して図16に示すように構成した反転増幅回路の出力電圧 v_o を与える式を導出せよ。なお、図16の小さいほうの三角形は増幅度 μ の理想的なオペアンプ、 Z_L は付加のインピーダンスである。

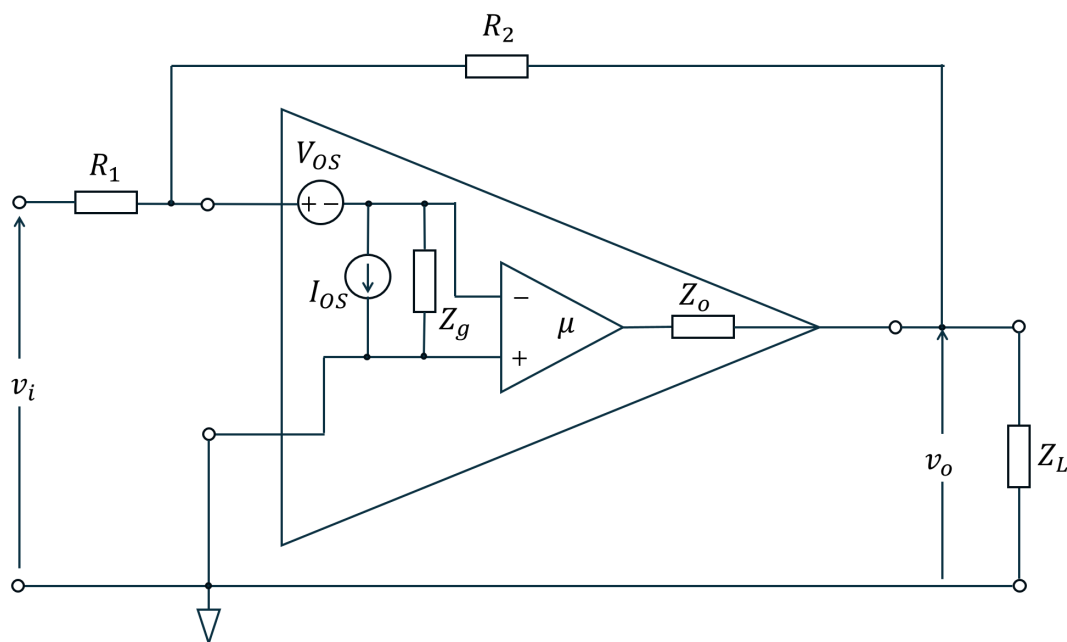


図16 諸特性を考慮したオペアンプの等価回路と反転増幅回路

5 レポート作成

実験終了後、実験結果をできるだけ早く整理し、レポートとしてまとめることが大切である。提出するレポートは下記の事項を含めること。

1. 表紙

実験番号、実験題目、班番号、共同実験者氏名、報告者、報告者学籍番号、報告者氏名、学科名、メールアドレス（学内メールを用いること）を記入する。

2. 目的

今回の実験の目的を**自分の言葉**でまとめる。手順書を丸写ししたものは減点対象とする。

3. オペアンプの原理

手順書の2節の内容を**自分の言葉**でまとめる。手順書を丸写ししたものは減点対象とする。

4. 各実験の説明

実験1～5の実験内容を説明し、回路図を示す。回路図の各素子のパラメータは明記する

こと。

5. 各実験の結果

実験1～5の実験結果の表とグラフの両方を作成し、それらについて文章にて説明する。節として、次の「各実験結果の考察」と一緒にまとめてもよい。表内の数値は、使用した計器の測定限界や部品の精度、要求される量の正確な度合等をもとに、有効数字の桁数を考えて記載すること。また、表やグラフにおける各項目の単位は正確に記述する。表は“表1”のようにカウントし、キャプションを上、グラフは図と同じく“図1”のようにカウントし、キャプションは下に書く。

6. 各実験結果の考察

実験1～5それぞれの結果を考察しまとめる。一目でわかるグラフの特徴を記述するだけでは不十分である。理想的な場合（理論式）との比較などを考察すること。理論値とのギャップが存在する場合は、その原因について考える。考察時に使用した参考文献がある場合は明記する。

7. 課題への解答

必須課題1～4すべてに対して解答すること。**選択課題1～4**や発展課題（選択問題2問分として換算）を解答している場合は加点対象とする。

8. 結論

全体的な実験のまとめを行い、助言者や共同実験者への謝辞を述べる。

9. 参考文献

課題への解答や考察に利用した文献をまとめる。文献には“[1]”のように番号を振り、文章中の該当箇所で引用すること。レポートをまとめる上で、各種チャットAIの回答を参考にすることは止めないが、**必ず文献で信憑性を確かめ、その際に用いた文献を明記**すること。

上記に加えて、レポートには**ページ数を記載**し、**章立てをする**こと。目次を追加していることが望ましい。レポートの提出方法については、実験2日目に別途指示する。

参考文献

[1] 谷本 茂著 「オペアンプ実戦技術」 誠文堂新光社

[2] トランジスタ技術増刊 「アナログIC活用ハンドブック」 CQ出版社