

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 $\pm 15\text{V}$) 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。

オペアンプの回路記号は図1のように表す。三角形の左側の2本の線が入力端子で、一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、

$$e_o = \mu(e_2 - e_1) \quad (1)$$

という関係がある。 e_1 および e_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、オペアンプの差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 ($1\text{MHz} \sim 10\text{MHz}$ 程度) で1となる。

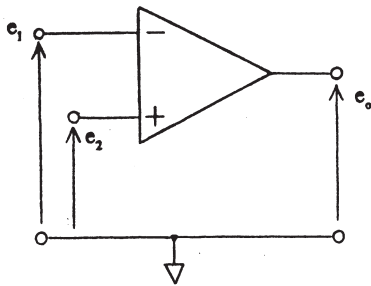


図1 オペアンプの回路記号と端子電圧の定義

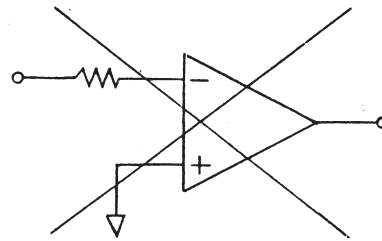


図2 開ループのままでは不可

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。換言すれば、入力インピーダンスは ∞ であり、出力インピーダンスはゼロである。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ゼロとすれば理想的なオペアンプでは出力には何も現われないが、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。理想的オペアンプの機能をまとめると以下ようになる。

- 1) $e_o = \mu(e_2 - e_1)$ $\mu \gg 1$
- 2) 入力端子に電流は流れない。
- 3) 出力 e_o は負荷に影響されない。

ここで、 $\mu = 10^6$ 、 $e_o = 10\text{V}$ とすると、 $e_2 - e_1 = 10\mu\text{V}$ となり、 e_o の 10V に比較してほぼゼロに近く、 $e_2 \doteq e_1$ である。電圧利得 ∞ の理想オペアンプでは、 $e_2 = e_1$ 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へ戻す回路（帰還回路）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、 e_i は入力信号、 e_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、 $e_o = \epsilon \mu$ 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へ戻す帰還回路で、 $e_o \beta$ 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。

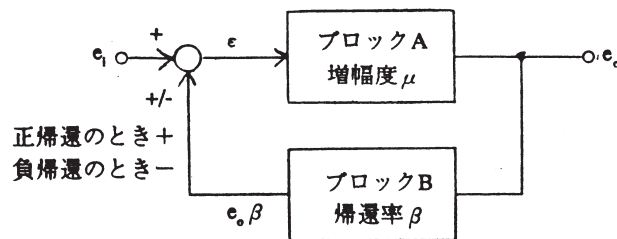


図3 帰還回路の原理

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 $R_1 e_o / (R_1 + R_2)$ であり、非反転入力端子の電圧は e_i であるから、

$$e_o = \mu (e_i - R_1 e_o / (R_1 + R_2)) \quad (2)$$

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

$$e_o = \mu e_i / (1 + \mu \beta) \quad (3)$$

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、

$$e_o \doteq e_i / \beta = (R_1 + R_2) e_i / R_1 \quad (4)$$

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 ∞ の理想オペアンプの考え方をを用いる方法を以下に示す。理想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 $R_1 e_o / (R_1 + R_2)$ となる。一方、電圧利得 ∞ の理想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、

$$e_i = R_1 e_o / (R_1 + R_2) \quad (5)$$

となり、

$$e_o = (R_1 + R_2) e_i / R_1 \quad (6)$$

となって、(4)式と一致する。

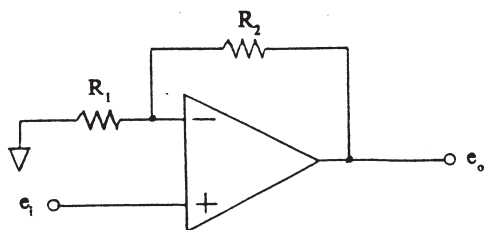


図4 非反転増幅回路

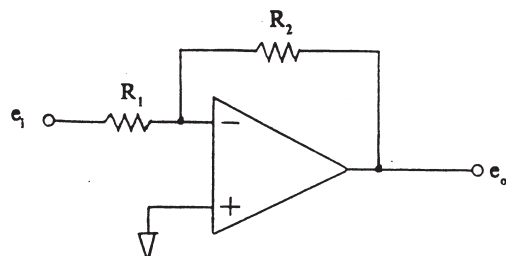


図5 反転増幅回路

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、 $e_i/R_1 = -e_o/R_2$ となり、

$$e_o = -R_2 e_i / R_1 \quad (7)$$

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。

3. 実験

実験の項目と内容を以下に示す。なお、手順の詳細は別冊の「オペアンプ実験装置実験指導書」に示されている。実験に先立ち、装置の「取扱説明書」を熟読すること。

<実験1> オフセット調整回路の特性

図6(a)および(b)にそれぞれ示すように、増幅度10および100の反転増幅回路において、増幅回路の入力端子を接地して入力電圧を0Vの状態にしてオフセット調整用抵抗器を1回転づつ回し、それぞれの位置における出力電圧の値を測定する。

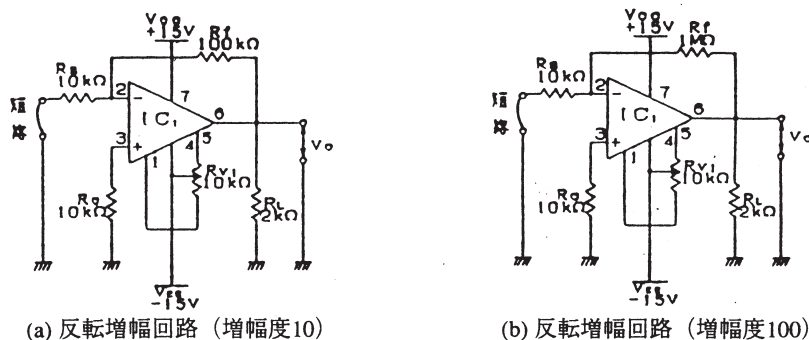


図6 オフセット調整回路の特性測定

<実験2> 直流増幅回路の入出力特性

図7(a)および(b)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、オフセット調整を行った後、入力電圧を変化させてそれぞれの入力電圧における出力電圧の値を測定する。

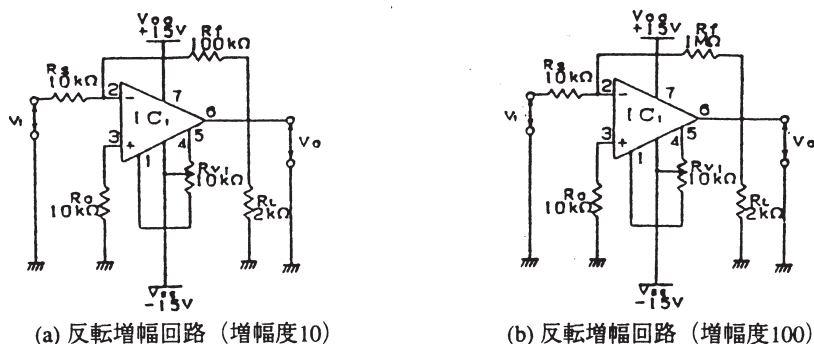


図7 直流増幅回路の入出力特性測定

＜実験3＞交流増幅回路の周波数特性

図8に示す増幅度10の交流反転増幅回路において、オフセット調整を行った後、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てそれぞれの周波数における出力電圧の振幅を測定する。このときオシロスコープによって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まで測定を行う。

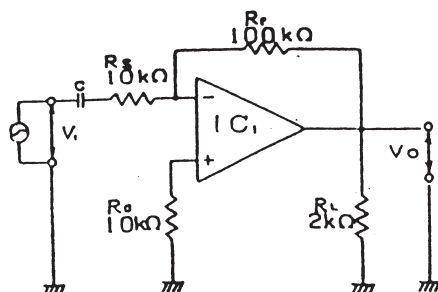


図8 交流増幅回路（増幅度10）

＜実験4＞絶対値増幅回路の入出力特性

図9に示すようなオペアンプとダイオードとを組み合わせた絶対値増幅回路において、オフセット調整を行った後、直流入力電圧を種々変化させてそれぞれの入力電圧における出力電圧の値を測定する。

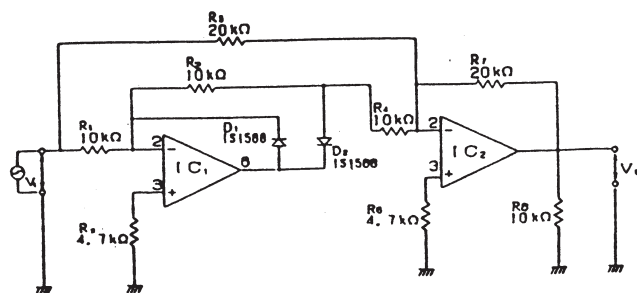
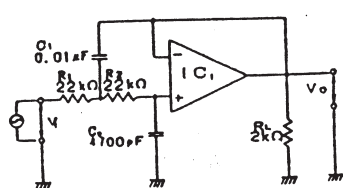


図9 絶対値増幅回路

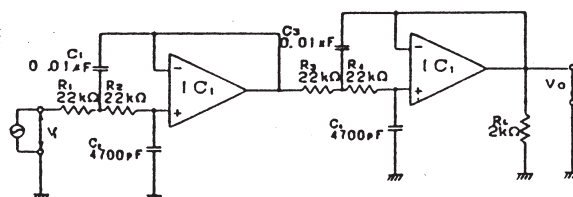
＜実験5＞低域ろ波回路（ローパスフィルタ）の周波数特性

図10(a)および(b)にそれぞれ示すような、遮断周波数約1kHzの2次形低域ろ波回路および4次形低域ろ波回路の周波数特性を測定する。



(a) 2次形低域ろ波回路

(遮断周波数約1kHz)



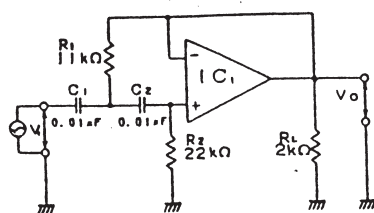
(b) 4次形低域ろ波回路

(遮断周波数約1kHz)

図10 低域ろ波回路（ローパスフィルタ）の周波数特性測定

<実験6>高域ろ波回路（ハイパスフィルタ）の周波数特性

図11に示す遮断周波数約1kHzの2次形高域ろ波回路の周波数特性を測定する。



2次形高域ろ波回路

(遮断周波数約1kHz)

図11 高域ろ波回路（ハイパスフィルタ）の周波数特性測定

4. 考察

(1) 図12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 E_{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12に示すように構成した反転増幅回路の出力電圧 e_o を与える式を導出せよ。なお、図12の小さい方の三角形は増幅度 μ の理想オペアンプ、 Z_L は負荷のインピーダンスである。

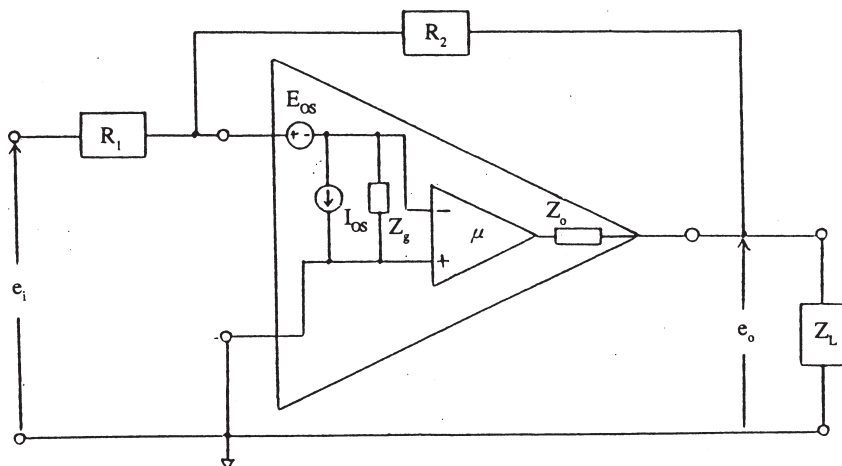


図12 諸特性を考慮したオペアンプの等価回路と反転増幅回路

(2) 反転増幅回路の増幅度を可変にする場合、入力抵抗（図5の R_1 ）と帰還抵抗（図5の R_2 ）とどちらを変化させるのが良いか。

(3) 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。

(4) 図9の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になるか。

(5) 電圧利得 ∞ の理想オペアンプの考え方をを用いて、図10(a)の2次形低域ろ波回路の入出力特性(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。

(6) 電圧利得 ∞ の理想オペアンプの考え方をを用いて、図11の2次形高域ろ波回路の入出力特性(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。

【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