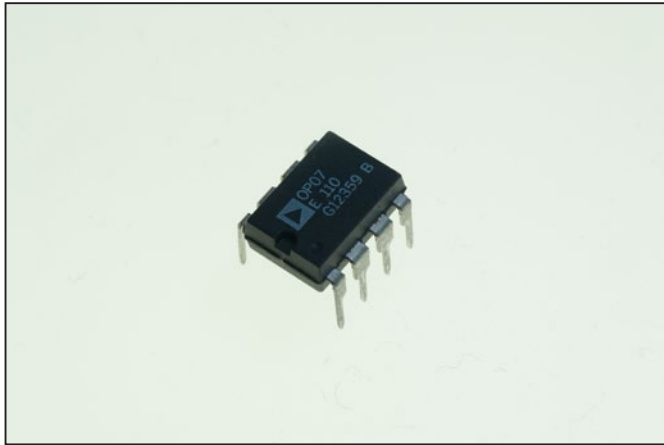


Operational Amplifier



第1回 オペアンプの使い方

●まえがき

初めましての方、初めまして！ お久しぶりの方、お久しぶりです。今回は電子工作でよく出てくるオペアンプの使い方の方の導入を記事として書いてみました。オペアンプって何それ？おいしいの？という疑問を持った方々に出来るだけ分かりやすく説明していければいいと思います。さてさて、余りまえがきが長くなってしまってもカッコイイこと書けないので本題にいってしましましょう。

◆オペアンプとは何者か？

オペアンプとは Operational Amplifier という英語を略した言葉で日本語では演算増幅器と訳します。ですが、オペアンプと言ったほうが慣れ親しみがあるので通常はオペアンプと呼びます。

このオペアンプは Amplifier という英語が付いてるだけあって、信号を増幅することが出来ます。増幅ということなんだか難しい気がしますが入力された信号を目的の大きさまで大きくしちゃうことを増幅と呼んでいます。例えば 1[V] の入力信号を 100 倍に増幅すると 100[V] になるわけです。

オペアンプの特徴を利用すれば増幅だけではなく比較もできるのですが厳密に言うと比較も増幅みたいなものになります。これに関しては後々ゆっくりと解説していくつもりです。

今回の第1回目は取り敢えずオペアンプを動かしてみるところに焦点を当てて解説していきます。

◆オペアンプを動かすのに最低限必要なもの

一般的にオペアンプで増幅をさせようとするのなら最低限、次の4つのものが必要になります。

- 1：オペアンプ
- 2：抵抗器（2本）
- 3：電源

取り敢えず動かしてみる、というだけならばこれで事足ります。各 부품の選び方などは後々細かく説明します。

◆信号を増幅する基本的な2つの回路

オペアンプで信号を増幅させるのには2種類の回路があります。

I：反転増幅回路

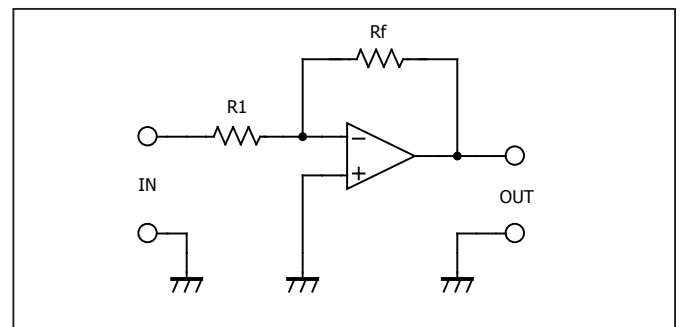


図 1.1 反転増幅回路

反転増幅回路は入力された信号を $-R_f/R_1$ 倍に増幅します。倍率の前に負の記号が付くのは入力された振幅に対して 180 度位相が変わるからです。簡単に言うと入力に対して出力が反転します。なので反転増幅回路と呼ばれています。

II：非反転増幅回路

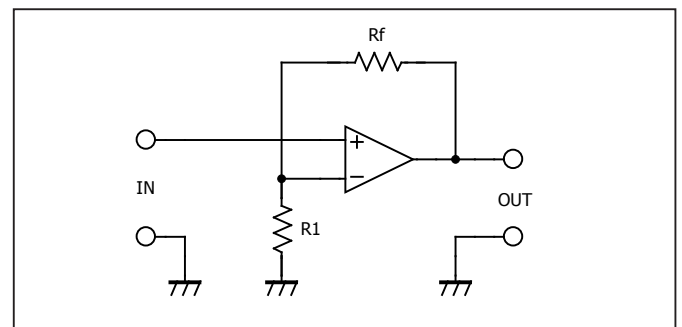


図 1.2 反転増幅回路

非反転増幅回路は入力された信号を $1 + R_f/R_1$ 倍に増幅し

ます。反転増幅回路とは異なり出力の信号は反転しません。しかしながら、増幅度に1が足されることにより多少使いにくいかもしれません。この非反転増幅回路は入力された信号に対して出力信号が反転しないことから非反転増幅回路と呼ばれています。

◆実際に動かしてみる

では、実際に動かしてみましょう！

各回路をブレッドボードに組んで入出力信号をオシロスコープで見えます。オシロスコープなんて持ってねーよと仰る方は僕が代わりにオシロスコープを使ってやってみますので・・・

まずはこの反転増幅回路を組んでみましょう。

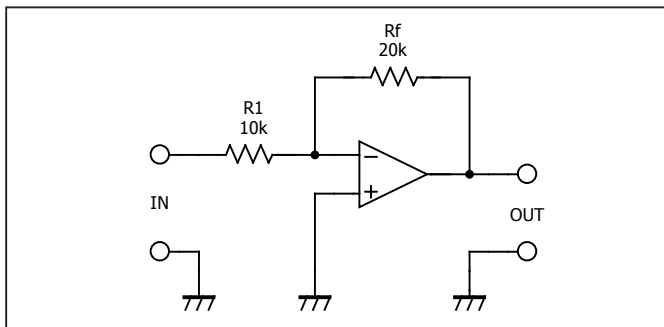


図 1.3 反転増幅回路の実験回路

理論的には入力された信号は-2倍に増幅されて出力されるはずですが・・・

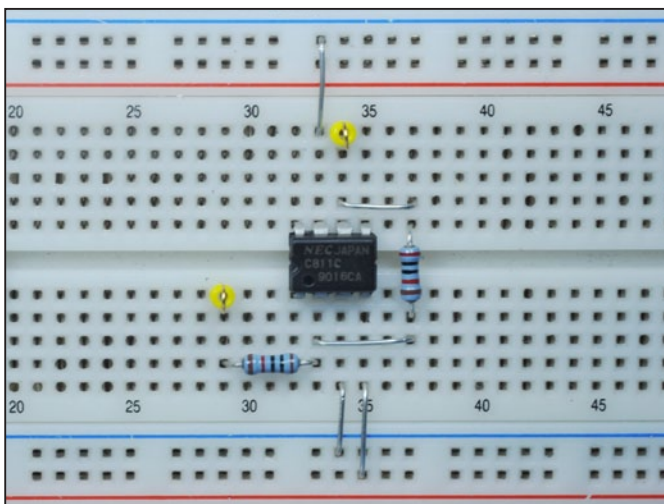


写真 1.1 ブレッドボード上に組んだ非反転増幅回路

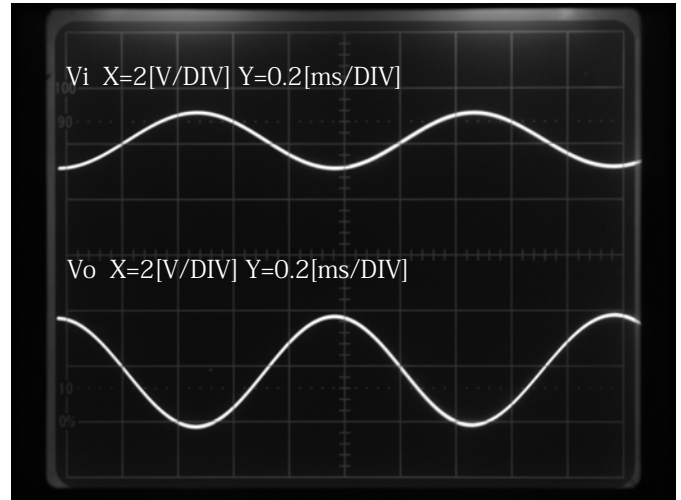


写真 1.2 反転増幅回路の入出力信号

Viが入力信号でVoが出力信号になります。

入力のピーク値は1[V]で出力波形を見ると大体2[V]になっているのが分かります。そして波形は反転しています。これが反転増幅回路を使った結果です。

次は反転増幅回路を組んでみましょう。

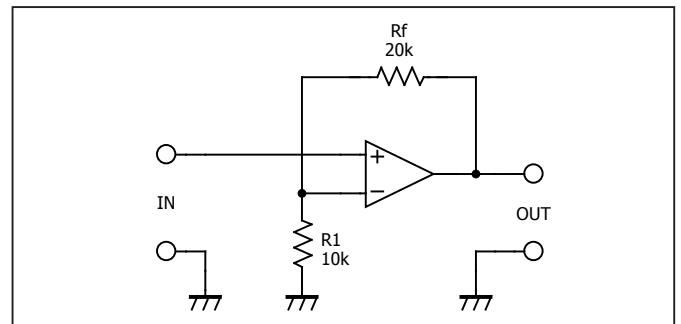


図 1.4 非反転増幅回路の実験回路

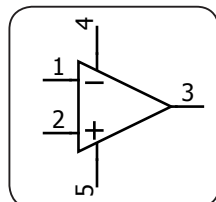
理論的には入力された信号は3倍に増幅されて出力されるはずですが・・・

コラム

オペアンプの端子の名前

- 1：反転入力端子
- 2：非反転入力端子
- 3：出力端子
- 4：正電源端子
- 5：負電源端子

基本的には上記の5種類の端子があります。オペアンプによっては位相補償端子やオフセット調節端子などもありますのでデータシートを必ず確認して下さい。



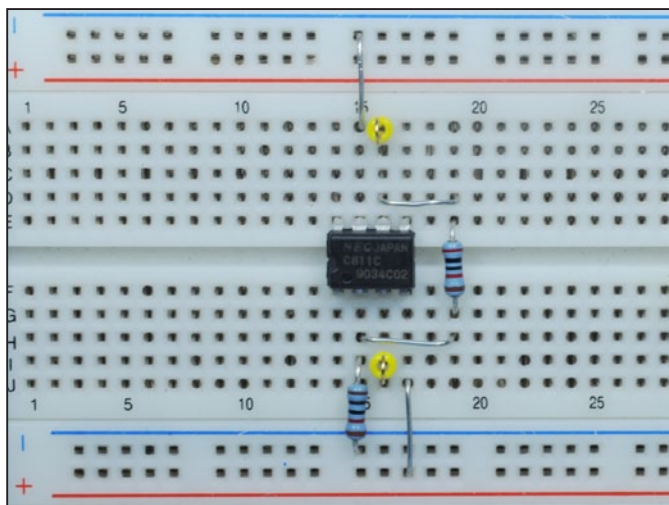


写真 1.3 ブレッドボード上に組んだ非反転増幅回路

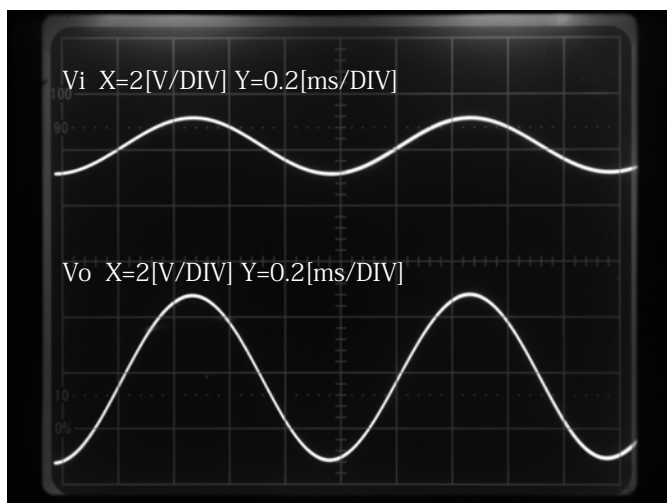


写真 1.4 非反転増幅回路の入出力信号

V_i が入力信号で V_o が出力信号になります。

入力のピーク値は 1[V] で出力波形を見ると大体 3 [V] になっているのが分かると思います。これが非反転増幅回路を使った結果です。

ほらね？簡単でしょ？

と言いたいところなのですが実はこのオシロスコープの写真はズルをしています。

オシロスコープで観測しているのは交流信号だけにしてあるため直流信号は先程の写真に現れません。どうしてそんなことをしたかという・・・

◆残留偏差電圧 (off-set)

先程の図 1.3 の回路の入出力波形を直流も観測できるようにしてオシロスコープで見てください。

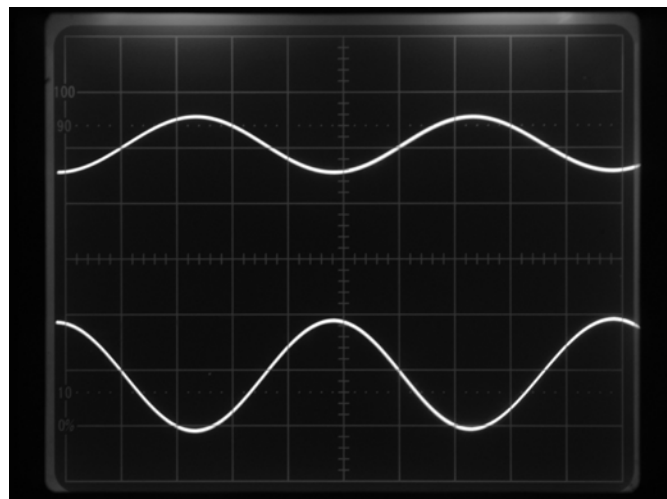


写真 1.5 残留偏差電圧①

出力の振幅が 0[V] からずれているのがわかりますか？
わかりませんので・・・分かりやすくするために入力信号を 0[V] にした時の入出力信号の波形を載せます。

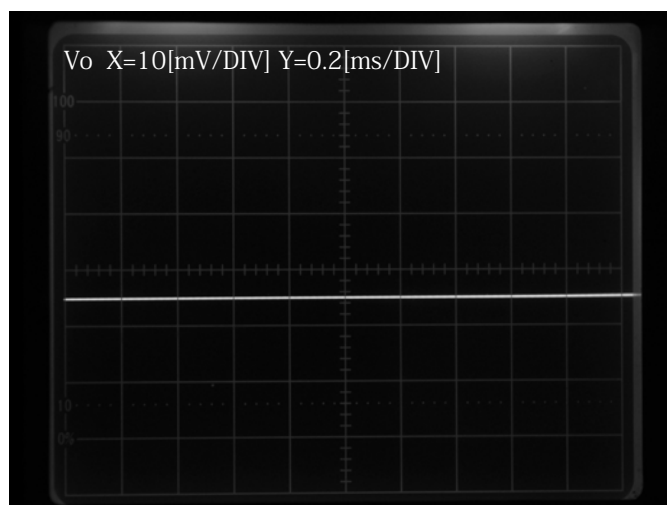


写真 1.6 残留偏差電圧②

入力信号が 0[V] なので出力信号は 0[V] でないといけないのに - 6[mV] 程度ずれています！ このずれた電圧を残留偏差電圧 (off-set) と言います。親しみやすい言い方で言うとオフセットです。このオフセットは計測やオーディオでは非常に厄介な存在です。計測用途では零点、いわゆる基準点がずれてしまい正確な計測ができなくなってしまいます。オーディオのスピーカーでは直流を入力すると簡単に定格を超え破損させてしまう危険性さえ持っているものなのです・・・

◆残留偏差電圧を減らす使い方 1

計測に限らず色々な場面で厄介な存在となってくる残留偏差電圧（以下オフセット）がちょっとした工夫で減らすことができます。まずは反転増幅回路のオフセットを軽減する方法を考えてみましょう。

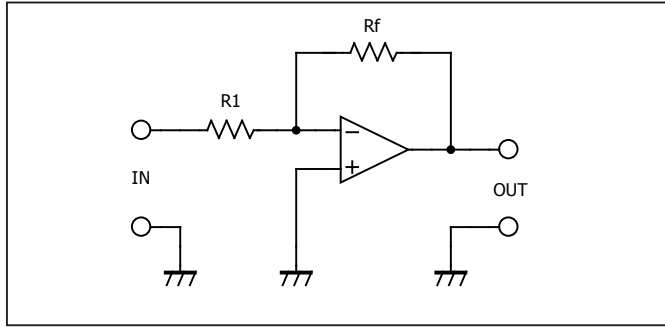


図 1.5 反転増幅回路

図 1.5 は先程の実験回路と同じものになります。この回路の反転入力端子（負の記号が書いてある端子）から見た等価回路を考えてみます。

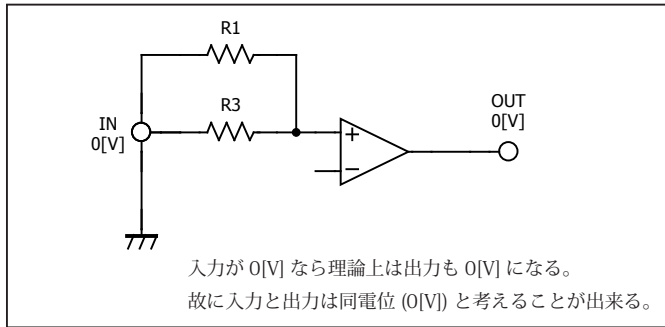


図 1.6 反転増幅回路の反転入力端子から見た等価回路

図 1.6 を見ると反転入力端子には Rf と R1 が並列に接続されているように見えます。この Rf と R1 が成す並列の抵抗値を R3 として求めます。

$$R3 = \frac{R1 \times Rf}{R1 + Rf}$$

ここで求めた R3 を図 1.7 のように新たに加えることでオフセットを軽減することができます。

※軽減することが出来るだけで無くすことは出来ません。

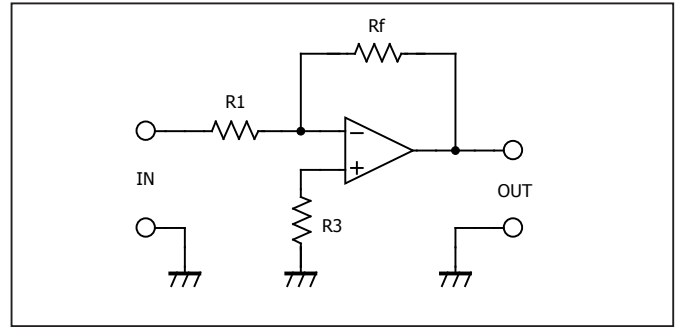


図 1.7 R3 が加わった反転増幅回路

次に非反転増幅回路のオフセットを軽減する方法を考えてみましょう。

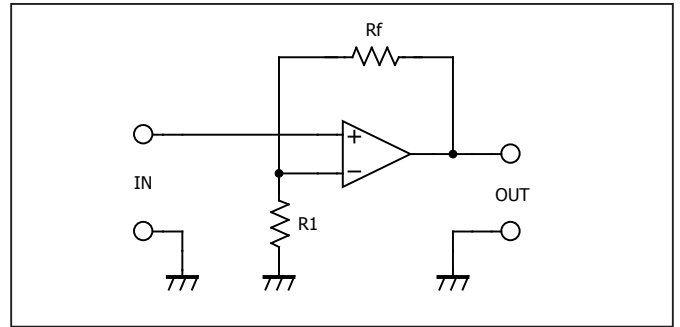


図 1.8 非反転増幅回路

図 1.8 は先程の実験回路と同じものになります。この回路の反転入力端子（負の記号が書いてある端子）から見た等価回路を考えてみます。

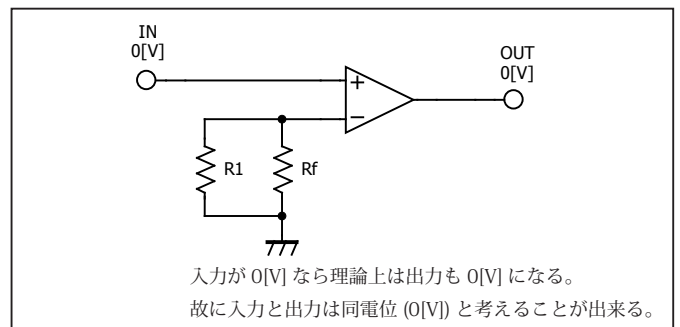


図 1.9 非反転増幅回路の反転入力端子から見た等価回路

図 1.9 を見ると反転入力端子には Rf と R1 が並列に接続されているように見えます。この Rf と R1 が成す並列の抵抗値を R3 として求めます。

$$R3 = \frac{R1 \times R2}{R1 + R2}$$

ここで求めた R3 を図 1.10 のように新たに加えることでオフセットを軽減することが出来ます。※軽減することが出来るだけで無くすことは出来ません。

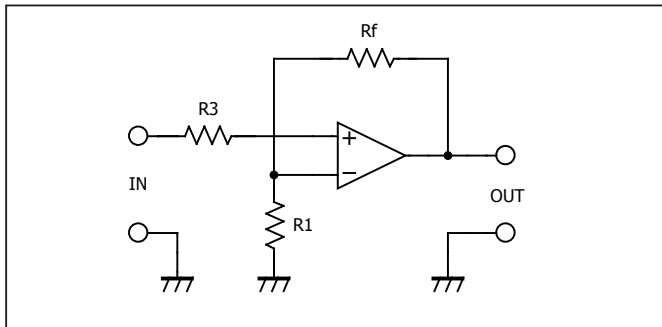


図 1.10 R3 が加わった非反転増幅回路

◆残留偏差電圧を減らす使い方 2

ここで紹介する方法はコンデンサの性質を利用したのになります。コンデンサを利用することで信号に重畳している直流成分を無くすことが出来ます。つまり、オフセットを無くすことが出来ます。しかし、この方法を用いるとオペアンプのメリットである直流信号の増幅が出来なくなってしまうため直流信号の増幅が必要ない、もしくは直流信号が邪魔なときにこの方法を使うとよいでしょう。

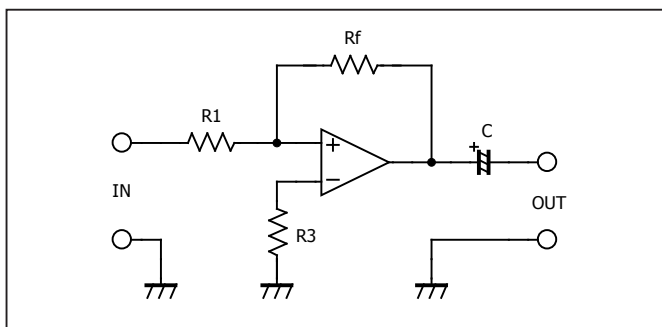
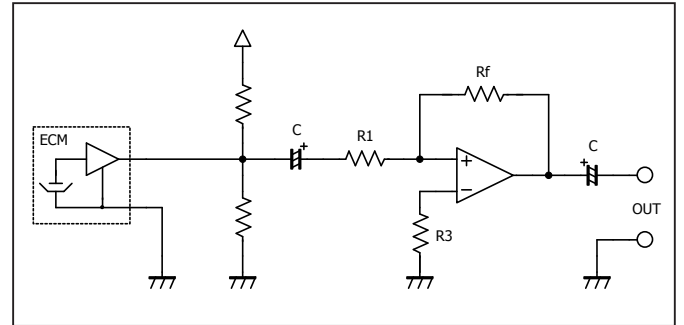


図 1.11 コンデンサで直流を遮断した回路

使い方は至って単純で出力端子にコンデンサを直列に入れるだけになります。注意点としては直流を遮断するコンデンサに有極性の物を使用する場合には直流電位の高い方に正極を合わせなければなりません。負荷が単純な抵抗などの場合はオペアンプの出力端子側が正極になりますが、それ以外の場合は回路構成によって変化していきます。が、これは慣れて

覚えるしか無いのではないかと思います。ちなみに、逆に接続すると回路を運用を始めて、時間が経ってからコンデンサから液漏れが起きたり、最悪爆発することがあります。



先に紹介した方法はオペアンプ自体から出力されるオフセットを軽減する方法でした。今度は入力信号に直流信号が重畳している場合を考えてみましょう。図 1.12 はエレクトレット・コンデンサ・マイクロフォン（以下 ECM）の信号を増幅する回路です。ECM は電源と信号線が共通なため ECM に入った音声信号（とどのつまり交流信号）だけを取り出すためには直流信号を遮断しなければいけません。そのためにコンデンサを利用します。注意点としては、先ほどと同じでコンデンサの極性に注意する必要があることです。

いや、正直良く分かんね。という場合にはバイポーラコンデンサを使うことをおすすめします。バイポーラコンデンサには極性がないので頭を悩ます必要がありません。フィルムコンデンサでもかまいませんがバイポーラコンデンサと比べて外形が大きく、価格も高くなるので好みで選んでください。

コンデンサを使用したときの遮断周波数

コンデンサと抵抗が組み合わさるとフィルターと言われる周波数特性が変わる回路構成になります。図 1.8 や図 1.9 で紹介した回路ではハイパスフィルターと言われる構成になるため低い周波数が通らなくなります。結果として低い周波数が増幅されなくなります。実際にどの程度の周波数から信号が通ることが出来るかを求める式を以下に示します。

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

教科書には書かれないコンデンサを使うときの注意点

先ほど、入力にコンデンサを入れることで直流信号を遮断することが出切ると書きましたが非反転増幅回路では注意しなければならないことがあります。具体例を図 1.13 に示します。

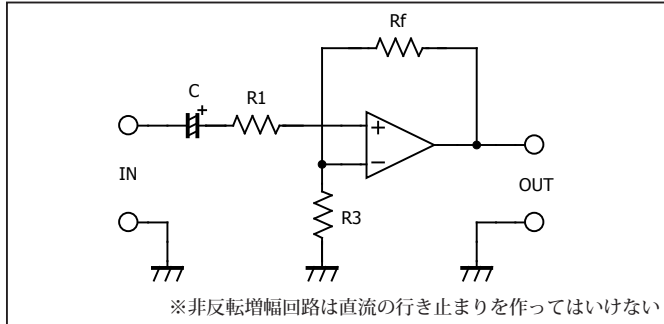


図 1.13 やってはいけない！非反転増幅回路

え？大丈夫でしょ？とまあ思いますが・・・
オペアンプの入力端子は理想的には電流の流れがありませんがそんなの幻想ですから！
とか言うときっと半導体作ってる人に怒られちゃうので・・・
実際には極めて微小な入力バイアス電流というものが潜んでいます。この入力バイアス電流のせいで直流を遮断するコンデンサが充電され入力電圧の絶対値が予想せずに大きくなるのです。結果として何も信号を入力していないのに出力が正、又は負の電源電圧付近に振りきれしてしまうことがあります。しかも！何処が不具合なのか探ろうとオシロスコープのプローブをあちこち当てているうちに治るなんて事もあります。これは、幾ら入力インピーダンスの値が高いオシロスコープでもコンデンサの放電に十分な導通性を持っているためです。こう言った爆発しちまえよ的な不具合を出さないようにするためには回路を設計する段階でこまめに確認するようにしましょう。

◆電源

電源・・・それは素晴らしい響き・・・いやなんでもありません。電源ですね、はい。電源は電子回路を動かす以上絶対に必要と言っても過言ではないものになります。そのため、次のことだけは絶対に忘れないようにしてください。

『電子回路は電源の束縛を逃れることは出来ない。』

これは、DC-DC コンバーターやスイッチング回路、BTL 回路を除いて通常にアンプを組む場合は必ず適用されます。具体的に言うと 10[V] の電源を使った回路で 11[V] の出力を得ることは出来ないということです。

電源の電流に関しては、それ以上に出力することが出来ない電流を定格出力電流といい保護回路などが内蔵されている場合はそれ以上の電流が流れると電圧が下がるなどの工夫がされています。

オペアンプを使う際には単電源と正負電源という 2 種類の電源があることを覚えておいてください。

単電源とは 12[V] 出力ならばプラス (12[V]) とマイナス (0 [V]) の電源の端子 2 つを持っている電源になります。

正負電源とは ± 12[V] 出力ならばプラス (12[V]) とグランド (0[V]) とマイナス (- 12[V]) の電源の端子 3 つを持っている電源になります。簡単に回路図として図 1.14 に記載します。

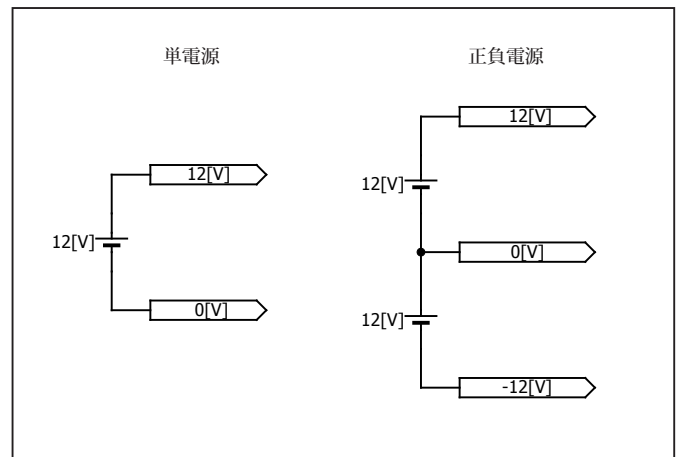


図 1.14 2 種類の電源

電源に付随することで必ず確認してほしいことが 1 つあります。それは使用するオペアンプの動作電源電圧を確認することです。例えば NJM5532D というオペアンプの電源電圧を確認する場合はインターネットの Google 等で型番を検索すると PDF ファイルのデータシートというものを見つけることができますので、必ず参照してください。

電源電圧に関しては 10[V] のような表記ではなく $\pm 3 \sim \pm 22$ [V] のように範囲で記載されており、この範囲内であれば正常に動作するというを表しています。

この $\pm 3 \sim \pm 22$ [V] という範囲は単電源では $6 \sim 44$ [V] ということになります。また、この電源電圧範囲を超えるとオペアンプが永久的に破壊される可能性があるので注意してください。

◆安定に動作させるためのワンポイント

最近のオペアンプはよく出来ているためアバウトな使い方をしても案外うまく動いてくれることがあります。しかし、いつも必ずそううまく行くとは限らないので安定に動作させるためのワンポイントを紹介します。

I：電源を補助するデカップリング・コンデンサ

オペアンプを使用すると電力を消費します。電力を消費するということは電流が流れることになります。

オペアンプに電源を供給するためには線を繋げるようになります。

オペアンプが出力電圧等の変化で瞬間的に電流を必要としたときに電源線（パターン）－オペアンプの間で電流の供給が行われるわけですが、この経路が長ければ長いほど供給する速度が間に合わなくなってくる場合があります。この対策としてオペアンプの電源端子付近にデカップリング・コンデンサ（バイパス・コンデンサ）を入れることで電源を補助することができます。

言い換えればオペアンプの電源端子の付近にそのオペアンプ専用の電源があるように見なすことが出来るのです。

デカップリング・コンデンサの挿入方法を図 1.15 に示しま

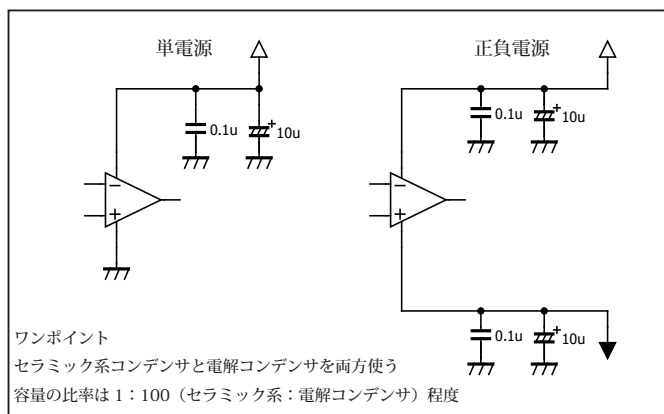


図 1.15 デカップリング・コンデンサの挿入方法

II：発振を防ぐための位相補償

オペアンプを使っていくうちに必ずと言ってもぶち当たる壁があります。それは、信号を入力していなくても、もしくは入力したとしても、出力から電源電圧付近の謎の波形が出てくることがあります。これは、発振という状態でオペアンプを正常な増幅器として使うことができなくなります。

対策として、直流信号を遮断する回路と似たようなローパスフィルターという回路を加えることで増幅できる周波数の幅を狭めることで発振を防ぐことが期待できます。このローパスフィルターは下記の式で求めた値以下の周波数しか通過することが出来ないものになります。

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

式中の f_c は遮断周波数を示し、これ以下の周波数を通ることを表しています。C はコンデンサの容量になり、R はコンデンサに繋がっている抵抗器の抵抗値になります。出力であれば負荷に当たる部分になります。さっき出てきた式と全く同じです。コンデンサと抵抗の接続が直列ならばハイパスフィルターになり、並列ならばローパスフィルターになります。

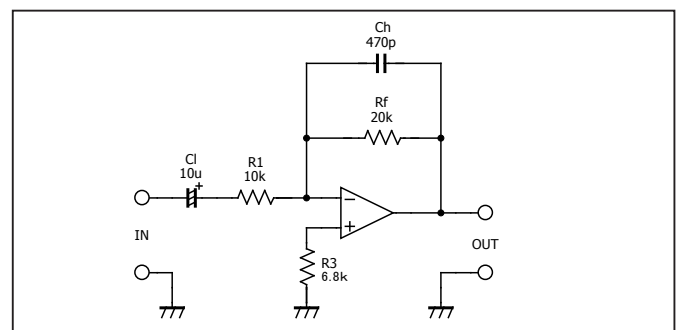


図 1.16 位相補償を付けた回路

図 1.16 にローパスフィルターを入れて発振を防ぐような回路を記載しました。この発振を防ぐためのローパスフィルターのことを一般的に位相補償と呼びます。図 1.13 の回路では入力に直流信号を遮断するコンデンサがあるため周波数の端は 1.6 [Hz] で位相補償が 1.7 [kHz] に設定されているため増幅することのできる信号の周波数は 1.6 [Hz] \sim 1.7 [kHz] となります。この下限と上限の周波数は回路の目的に合わせて選びます。しかし、極端に高い周波数を扱う場合はオペアンプの種類を吟味する必要もあるかもしれません。

◆色々なオペアンプ

一口にオペアンプと言っても様々な回路手法やパッケージの種類があります。

I：1つのパッケージに何個のオペアンプが入っているか

オペアンプには1回路入り、2回路入り、4回路入りなどオペアンプが対称のICとに何個入っているかというのが型番によって違ってきます。使用する個数が多い場合などには4回路入りを。2つで十分な場合は2回路入りを等、コストや実装面積に合わせて選んでいきます。

II：ICのパッケージ

一口にオペアンプと言っても基板に取り付けるための形が異なります。ユニバーサル基板などに取り付けられるDIPや基板に直接載せるようなSOPやQFN等もあります。

III：とても似てるコンパレータ

オペアンプと回路記号が全く同じコンパレータというICが存在します。しかし、このICはオペアンプとは異なり電圧を比較することに特化しています。全く使えない訳ではないのですがオペアンプとコンパレータを取り間違いないようデータシートを入念に確認して下さい。

◆何が違う反転増幅回路と非反転増幅回路

ここでは、それぞれの特徴を箇条書きに上げていきます。

●反転増幅回路

- I：増幅度の設定が簡単
- II：入力された信号が反転する

●非反転増幅回路

- I：入力された信号が反転しない
- II：入力インピーダンスが非常に高い

非反転増幅回路の特徴として入力インピーダンスが非常に高いという特徴があります。この入力インピーダンスが非常に高いと何が良いのか・・・

それは、計測や増幅したい信号に対して影響を極力与えないことが出来るということになります。仮に入力インピーダンスが非常に低かった場合、そのオペアンプを用いた回路を信号

源に繋げることで信号源から出力される電圧が変化してしまうことがあります。これでは、本末転倒なわけです・・・なので、信号源に影響を極力与えたくない場合には入力インピーダンスが高い回路が使われるのです。

●あとがき

さて、途中からいい加減に書いていたような気がします・・・まずは、オペアンプを使ってみるということを念頭に今回は記事を書いてみました。でも、最初にイメージしていたよりもオペアンプなんて簡単に使えるじゃないと思いませんか？オペアンプは回路構成の名前ですが現在ではICを指すことのほうが多いと思います。やはり、オペアンプを組むよりもICとして使ったほうが設計の時間の短縮化やコスト削減、高性能化など様々なメリットが生まれてきます。

と・・・まあ今回はこのへんで・・・

次回はもう少しオペアンプの中に突っ込んだ内容にしていきたいと思います。

2011年3月 黒羽音響技研

