

増幅器 オペアンプ

●オペアンプの概要

▶増幅器

増幅器(amplifier)は信号の振幅を大きくして増幅させるものです。古くは真空管を例にあげることができます。今日では、トランジスタ、オペアンプ、電界効果トランジスタ(FET)などをあげることができます。ここでは「オペアンプ」を解説します。

▶オペアンプ

オペアンプ(OP アンプと表記されることもあります。)とは、「オペレーショナル・アンプリファイヤ(operational amplifier)」を略したもので、IC(integrated circuit)の形態で提供されています。正式名称の「オペレーショナル・アンプリファイヤ」で呼ばれることはあまりなく、略称の「オペアンプ」で呼ばれることがほとんどです。様々な会社から様々な種類のオペアンプが販売されています。安いものは百円以下ですし、高いものは数千円します。

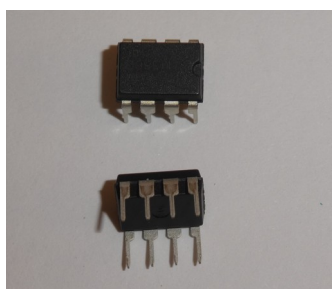


図 1: オペアンプ

図 1 に実物のオペアンプを示します。金属製の脚は外部との接続端子です。黒いプラスチック部は、回路を収納している本体です。1つの IC に 1つのオペアンプだけが

含まれる場合もありますが、複数のオペアンプが含まれる場合もあります。2つや4つ含まれる場合が多いです。下の図 2 は 2つ含む場合の内部概略図です。

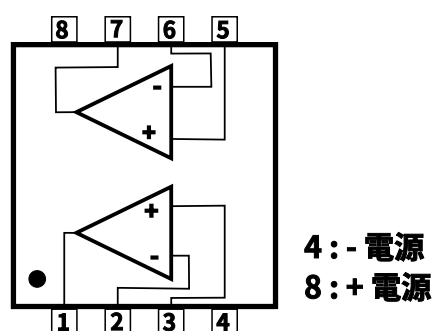


図 2: 内部概略図

本書ではオペアンプの内部構造をブラックボックスとして取り扱い、使用方法のみ解説していきます。

オペアンプは電子回路図で図 3 のように書き表されます。

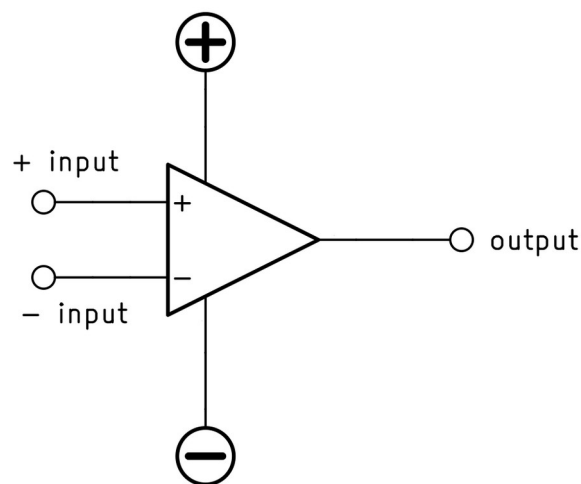


図 3: 電子回路図

信号入力用の端子が2つあります。一つは「+ input」でもう一つは「- input」です。

「+ input」に入力された信号電圧から「- input」に入力された信号電圧が引き算され、次にその引き算された電圧が増幅されて「output」から出力電圧が出力されます。

「+ input」に入力された電圧を V_+ 、「- input」に入力された電圧を V_- 、出力電圧を V_{out} 、オペアンプの増幅率を A とすれば次の式が成り立ちます。

$$V_{out} = A \times (V_+ - V_-)$$

電力供給用の端子も二つあり、一つは⊕でもう一つは⊖です。

回路図では電力供給用の端子を省略することも多いです。なお、電力供給については後述の「中間電位」を参照してください。

●4つの特徴

オペアンプは次の4つの特徴を持っています。

- 入力抵抗が極めて大きい
- 出力抵抗が極めて小さい
- 増幅率が極めて大きい
- 出力端子でキルヒホッフの第1法則は成り立たない(電源電流なども加味すると成り立っているが…)

以下にこれらの特徴を説明します。

▶入力抵抗

オペアンプの入力抵抗は、種類ごとにいろいろですが、どれほど低くても数十 $k\Omega$ オーダー、普通で $10^6 \sim 10^8 \Omega$ オーダーです。大きいものでは $10^{12} \Omega$ オーダーにもなります。オペアンプのまわりで使用される抵抗は数 $k\Omega$ から数百 $k\Omega$ のオーダーなので、オペアンプはそれら抵抗に比べて十分すぎるほど高い抵抗値を持っています。

▶出力抵抗

オペアンプの出力抵抗は、通常で数百 Ω オーダーなので、まわりで使用される抵抗に比べ、十分に低いといえます。

▶増幅率

オペアンプの増幅率は十数倍から数千倍の値をります。これはとても大きな値です。

▶キルヒホッフの第一法則

キルヒホッフの第一法則は「回路上のある一点に流れ込む電流の総和と、そこから流れ出る電流の総和は等しい」というものでした。しかし、オペアンプの出力端子ではキルヒホッフの第一法則は成り立たません。方程式を立てる際、出力端子での電流の入出総和がゼロになるような式は作らないようにしましょう。ただし、この「出力端子ではキルヒホッフの第一法則が成り立たない」は、あくまでも信号経路上での話です。電源電流などの条件も加味すると出力端子でもキルヒホッフの第一法則は成り立っています。

●オペアンプの使用法

▶理想的な増幅器

ネガティブ・フィードバックを前提とする理想的な増幅器というのは、入力抵抗が $\infty \Omega$ で、出力抵抗がゼロ Ω で増幅率は ∞ のものです。オペアンプは理想的な増幅器の条件を完全に満たしているとはいえませんが、高いレベルで満たしているとはいえません。回路設計の際などは、オペアンプを理想的な増幅器とみなして計算することがよくあります。本書でも、使用するオペアンプを理想的な増幅器として取り扱います。

では、実際にオペアンプがどのように使用されるか示してみましょう。

▶反転増幅アンプ

反転増幅アンプとは図4にあるようなもので、オペアンプの最も基本的な使い方の一つです(電力供給用の端子は省略してあります。)。

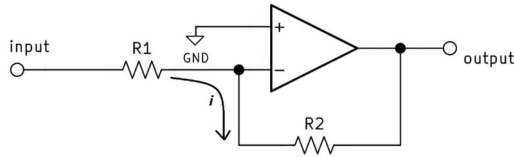


図 4: 反転増幅アンプ

+のインプットはグラウンドに接続されており、入力電圧は0です。-のインプットは抵抗 R_1 を介して入力と接続されています。-のインプットの入力抵抗が $\infty\Omega$ なので-のインプットに電流は流れこめず電圧のみ伝えます。-のインプットに流れ込めなかった電流 i は出力 output までそのまま流れます。ここで方程式を作ってみましょう。入力信号電圧を V_{in} 、出力信号電圧を V_{out} 、増幅率を A とすると次の2つの式が成り立ちます。

$$\begin{cases} V_{in} - iR_1 - iR_2 = V_{out} \cdots (1) \\ V_{out} = A \times \{0 - (V_{in} - iR_1)\} \cdots (2) \end{cases}$$

式(2)の両辺を A で割ります。

$$\frac{V_{out}}{A} = 0 - (V_{in} - iR_1) \cdots (2')$$

A は ∞ なので式(2')の両辺で A を無限大にします。

$$\lim_{A \rightarrow \infty} \frac{V_{out}}{A} = \lim_{A \rightarrow \infty} \{0 - (V_{in} - iR_1)\}$$

左辺は0に収束するので

$$0 = 0 - (V_{in} - iR_1)$$

ゆえに

$$i = \frac{V_{in}}{R_1} \cdots (3)$$

式(1)に式(3)を代入して整理すると

$$V_{out} = \frac{-R_2}{R_1} V_{in}$$

出力信号電圧 V_{out} は入力信号電圧を反転して R_2/R_1 倍したものとなります。オペアン

プと抵抗2つで好みの増幅率の反転増幅を行い得ることが分かりました。

なお、出力信号を-の入力側に戻すことをネガティブ・フィードバック(negative feedback)と呼びます。

ネガティブ・フィードバックを使うと、増幅度を自在に設定できるだけでなく、周波数特性も改善できます。 オペアンプで増幅する場合、ほぼ100%の確率でネガティブ・フィードバック仕様です。

▶ 正転増幅アンプ

正転増幅アンプとは図5に示すもので、オペアンプの最も基本的な使い方の一つです。

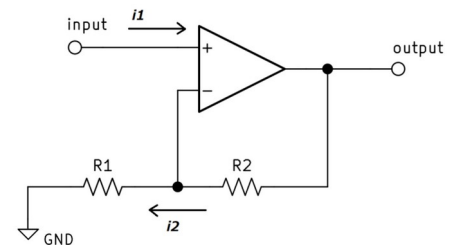


図 5: 正転増幅アンプ

+のインプットは入力と接続されています。+のインプットの入力抵抗が $\infty\Omega$ なので+のインプットに電流は流れず電圧のみ入力されます。つまり $i_1=0$ です。-のインプットの入力抵抗も $\infty\Omega$ なので-のインプットに電流は流れこめず電圧のみ入力されます。すると出力からグラウンドまで電流 i_2 が流れます。ここで方程式を作ってみましょう。入力信号電圧を V_{in} 、出力信号電圧を V_{out} 、増幅率を A とすると次の2つの式が成り立ちます。

$$V_{out} - i_2 R_2 - i_2 R_1 = 0 \cdots (1)$$

$$A \times \{V_{in} - (V_{out} - i_2 R_2)\} = V_{out} \cdots (2)$$

(1)より

$$i_2 = \frac{V_{out}}{R_1 + R_2} \cdots (1')$$

式(2)の両辺を A で割り、 A を無限大にすると

$$\lim_{A \rightarrow \infty} \left\{ V_{in} - (V_{out} - i_2 R_2) \right\} = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{V_{out}}{A}$$

$$\left\{ V_{in} - (V_{out} - i_2 R_2) \right\} = 0 \cdots (2')$$

式(2')に式(3')を代入して整理すると

$$V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{in}$$

$$= 1 + \frac{R_2}{R_1} V_{in}$$

出力信号電圧は入力信号電圧を $(1 + R_2/R_1)$ 倍したものとなります。オペアンプと抵抗2つで好みの増幅率(ただし、1以上)の増幅を行い得ることが分かりました。

▶反転加算アンプ

反転加算アンプとは図6にあるようなもので、オペアンプの最も基本的な使い方の一つです。前出の反転増幅アンプの応用です。

＋のインプットはグラウンドに接続されており、入力電圧は0です。－のインプットは抵抗 $R_1 \sim R_3$ を介して入力と接続されています。－のインプットの入力抵抗が $\infty \Omega$ なので－のインプットに電流は流れこまず電圧

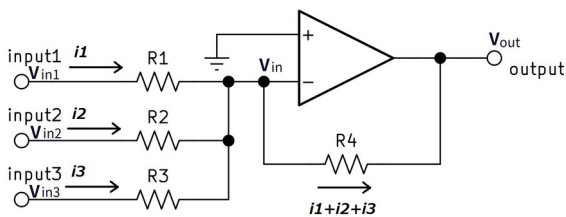


図6: 反転加算アンプ

のみ入力されます。ここで方程式を作ってみましょう。入力信号電圧をそれぞれ V_{in1} 、 V_{in2} 、 V_{in3} とし、出力信号電圧を V_{out} とし、増幅率を A とすると次の7つの式が成り立ちます。

$$\begin{cases} V_{in1} - i_1 R_1 - (i_1 + i_2 + i_3) R_4 = V_{out} \cdots (1) \\ V_{in2} - i_2 R_2 - (i_1 + i_2 + i_3) R_4 = V_{out} \cdots (2) \\ V_{in3} - i_3 R_3 - (i_1 + i_2 + i_3) R_4 = V_{out} \cdots (3) \\ V_{in1} - i_1 R_1 = V_{in} \cdots (4) \\ V_{in2} - i_2 R_2 = V_{in} \cdots (5) \\ V_{in3} - i_3 R_3 = V_{in} \cdots (6) \\ A \times V_{in} = V_{out} \cdots (7) \end{cases}$$

式(7)の両辺を A で割り、 $A \rightarrow \infty$ すると $V_{in} = 0 \cdots (7')$

となります。

式(4)～(6)に(7')を代入して整理すると

$$\begin{cases} i_1 = \frac{V_{in1}}{R_1} \cdots (4') \\ i_2 = \frac{V_{in2}}{R_2} \cdots (5') \\ i_3 = \frac{V_{in3}}{R_3} \cdots (6') \end{cases}$$

(4')、(5')、(6')を(1)、(2)、(3)のいずれに代入しても次の結果が得られます。

$$V_{out} = - \left(\frac{R_4}{R_1} V_{in1} + \frac{R_4}{R_2} V_{in2} + \frac{R_4}{R_3} V_{in3} \right)$$

出力信号電圧は、それぞれの入力信号電圧を反転してそれぞれ R_4/R_1 倍、 R_4/R_2 倍、 R_4/R_3 倍したものの合計となります。オペアンプと抵抗4つで3つの入力信号電圧を好みの割合で合成して反転増幅を行い得ることが分かりました。この回路の優れている点は、それぞれの入力信号電圧が、他の入力信号電圧の回り込みの影響を受けずに済むことです。

▶インピーダンス変換アンプ

インピーダンス変換アンプとは図7にあるようなもので、オペアンプの最も基本的な使い方の一つです。

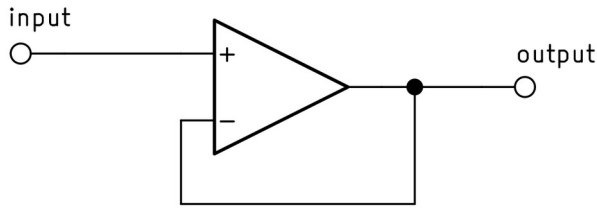


図 7: インピーダンス変換アンプ

+のインプットは入力と接続されています
+のインプットの入力抵抗が $\infty\Omega$ なので+のインプットに電流は流れず電圧のみ入力されます。-のインプットの入力抵抗も $\infty\Omega$ なので-のインプットに電流は流れこまず電圧のみ入力されます。入力信号電圧を V_{in} 、出力信号電圧を V_{out} 、増幅率を A とすると次の式が成り立ちます。

$$(V_{in} - V_{out}) \times A = V_{out}$$

両辺を A で割り、 $A \rightarrow \infty$ とすると

$$V_{in} - V_{out} = 0$$

ゆえに

$$V_{out} = V_{in}$$

出力信号電圧に入力信号電圧がそのまま出てきます。意味のない回路と思うでしょうが、実はとても便利な機能を持っています。このインピーダンス変換は出力抵抗を下げる事ができるのです。出力抵抗の大きな回路があった場合、その出力にこのインピーダンス変換アンプを取り付けます。すると、入力の信号電圧はそのまま出力されるのですが、出力抵抗は極めて小さくなります。

▶ ハイパス・フィルタ・アンプ

オペアンプは抵抗とキャパシタとを組み合わせ、フィルターとしても機能します。次に、代表的なハイパス・フィルタ・アンプを紹介します。

ハイパス・フィルタ・アンプとは図 8 にあるようなものです。

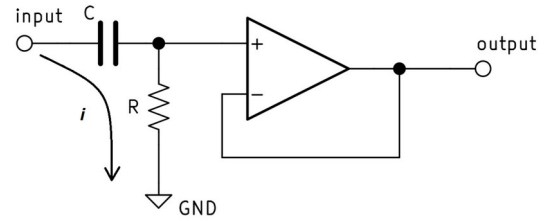


図 8: ハイパス・フィルタ・アンプ

回路の右側は、前述のインピーダンス変換アンプです。キャパシタと抵抗の間の電圧がそのまま出力されます。入力信号電圧を V_{in} 、出力信号電圧を V_{out} とすると次の式が成り立ちます。ただし、前出の「交流回路の計算」で示した手法を使用する必要があります。なお、 $j = \sqrt{-1}$ です。

$$V_{out} = \frac{R}{R + \frac{1}{2\pi f C}} \times V_{in}$$

$$= \frac{2\pi f C R (2\pi f C R + j)}{(2\pi f C R)^2 + 1} \times V_{in}$$

このゲイン G は

$$G = \sqrt{\text{実部}^2 + \text{虚部}^2}$$

なので

$$G = \frac{2\pi f C R \sqrt{(2\pi f C R)^2 + 1}}{(2\pi f C R)^2 + 1}$$

となります。C=0.1 μ F、R=500k Ω の場合のゲイン曲線を図 9 に示します。

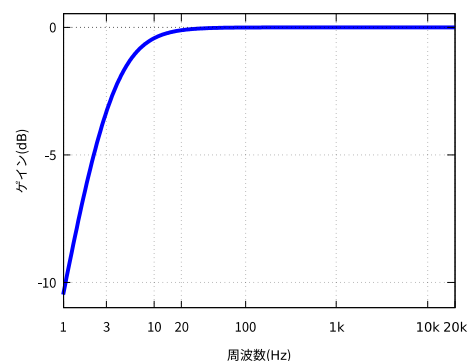


図 9: ゲイン曲線

3~10Hz 付近に変曲点があります。3Hz よりも低ければ低いほどゲインが低くなります。10Hz 以上は周波数にかかわらず、ほぼ 0dB です。0dB というのは入力の振幅と

出力の振幅が同じという意味です。低い周波数の通過が阻害されて、高い周波数(ハイ)の通過は、阻害されないので、ハイ・パス・フィルタ・アンプといいます。

エフェクターの入力部に使われることが多いので紹介しました。

▶ オペアンプの発振

オペアンプのフィードバック抵抗が大きい場合、高音で発振してしまうことがあります。

対策は二つあります。

一つ目はフィードバック抵抗の値を小さくすることです。二つ目はフィードバック抵抗と並列にキャパシタを挿入することです。

By 荻窪のおっちゃん

公開日:2023年10月29日

最新更新日:2023年10月29日

[「エフェクターの設計要点」に行く](#)

[「ホーム」に行く](#)