

1群(信号・システム) - 7編(電子回路)

3章 演算増幅器

(執筆者: 茨木栄武)[2008年12月受領]

概要

演算増幅器は、「Operational amplifier」と英訳され、OPamp, opamp, オペアンブ, OPアンブのように書かれることもある。Operational amplifier という言葉は、コロンビア大学のジョン・ラガツィーニ(John Ragazzini)教授により1947年に公表された論文で初めて使用された。この論文中で、複数の入力電圧に対して、数学的な演算(Operational)が可能である増幅器(Amplifier)をOperational amplifierと定義している。

演算増幅器は、能動素子と受動素子の組み合わせからなる電子回路である。能動素子とは、信号成分に対して増幅機能のある素子であり、現在では、半導体でできたトランジスタが主に利用されている。トランジスタの性能が向上する以前(1945~1960年頃)は、真空管の一種である電子管が能動素子として使用されていた。

演算増幅器を応用する際には、単体で使用することは稀であり、ほかの素子と組み合わせることで所望の機能を実現する。その応用例を素子の接続方式で分類をすると、負帰還(Negative feedback, (2章2-4節)), 正帰還(Positive feedback), 無帰還(Open loop)の3種類に分類できる。帰還とは、演算増幅器の出力から入力に信号を戻すことである。負帰還の応用例として、増幅器、レギュレータ(5章5-2節)、正帰還の応用例として、発振回路(4章4-2節)、ヒステリシスコンパレータがあげられる。無帰還の場合は、コンパレータとしてのみ利用が可能である。

演算増幅器の応用のほとんどは、負帰還を利用したものである。その理由は、演算増幅器と負帰還を組み合わせた負帰還増幅器は、増幅器の性能を大幅に向上させるためである。負帰還増幅器は、1927年にベル研究所のハロルド・ブラック(Harold S. Black)氏により、発明された。負帰還増幅器の不適切な設計は、発振のような不安定な動作を引き起こすが、当時は、適切な設計法については理論的には説明されていなかった。そこで、実用的な負帰還増幅器を設計するため、有名なナイキストの安定判別法(Nyquist criterion)やボーデ線図(Bode plots)が、考案されたことを知ると、この発明の偉大さを感じとれる。

【本章の構成】

本章では、演算増幅器をブラックボックスとして取り扱い、その回路構成については触れないこととする。負帰還増幅器の一つである非反転増幅器を応用例として、演算増幅器の説明を進めている。まず、演算増幅器の機能(3-1節)について述べた後、演算増幅器の性能(3-2節)について説明がなされている。更なる応用例に関しては、他章あるいは参考文献を参考にして頂きたい。また、演算増幅器の設計・使用の上で、不可欠な知識である安定性・周波数特性・過渡特性などに関しても、本章では取り扱わないので、参考文献を参照されたい。

1群-7編-3章

3-1 演算増幅器の機能

(執筆者：茨木栄武)[2008年12月受領]

様々な種類の演算増幅器が存在するが、本章では、次の三つの条件を満たす基本的な演算増幅器を取り扱うことにする。一つ目の条件は、電圧入力—電圧出力である。二つ目の条件は、差動入力—単出力である。そして、最後の条件は、正負の二つの電源を必要とする両電源である。そのため、本章で取り扱う演算増幅器は、二つの入力端子、一つの出力端子、二つの電源端子の合計5端子を持つ回路である。

3-1-1 演算増幅器の定義

演算増幅器の記号を図3・1(a)に示す。二つの入力端子は、極性に応じて、非反転入力端子、反転入力端子と呼ばれている。電源端子も記号に示されているが、簡略化のため、しばしば記号から省略されることがある。記号上で電源端子が省略された場合でも、実際の回路では電源端子が必ず電源に接続されている。

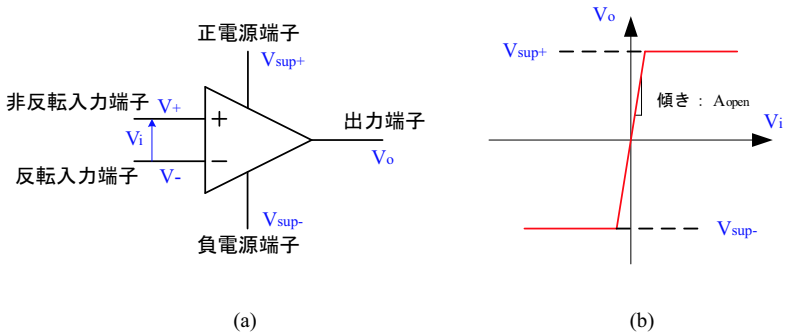


図3・1 演算増幅器の記号と入出力電圧特性

演算増幅器の入出力電圧特性は、式(3・1)のように表せる。

$$V_o = A_{open}(V_+ - V_-) = A_{open}V_i \quad (3\cdot1)$$

ここで、 V_+ 、 V_- 、 V_o は、それぞれ、非反転入力端子、反転入力端子、出力端子の電圧である。 V_i は、差動入力電圧 $V_+ - V_-$ である。また、 A_{open} は、演算増幅器の開ループ利得である。理想的な演算増幅器では、開ループ利得は無限大となる。この場合、微小な差動入力電圧に対しても、出力電圧が無限大となり、出力電圧が両電源電圧範囲を超えてしまう。出力電圧の範囲は、正電源電圧と負電源電圧の間に制限されるため、出力電圧は次の不等式を満たすものとする。

$$V_{sup-} < V_o < V_{sup+} \quad (3\cdot2)$$

ここで、 V_{sup+} と V_{sup-} は、それぞれ、正電源電圧と負電源電圧である。式 (3・1) と式 (3・2) で表された入出力電圧特性のグラフを図 3・1(b) に示す。

3-1-2 演算増幅器と帰還回路の組み合わせ

3-1-1 項の演算増幅器の定義の説明だけでは、その長所を理解することは難しい。その入出力電圧特性からは、コンパレータの応用しかすぐに思い当たらない。演算増幅器がその長所を発揮するのは、帰還回路と組み合わせで使用したときである。帰還回路とは、演算増幅器の出力端子と入力端子との間に接続される回路であり、出力電圧の要素を含む電圧を入力端子へ戻すことが目的である。帰還回路の接続方法により、正帰還回路と負帰還回路に分類ができる。演算増幅器と負帰還の組み合わせは、増幅器の性能を大幅に向上させる。そのため、ほとんどの演算増幅器の応用例は、負帰還を利用したものである。この項では、演算増幅器に負帰還を施すことで得られる利点を説明する。

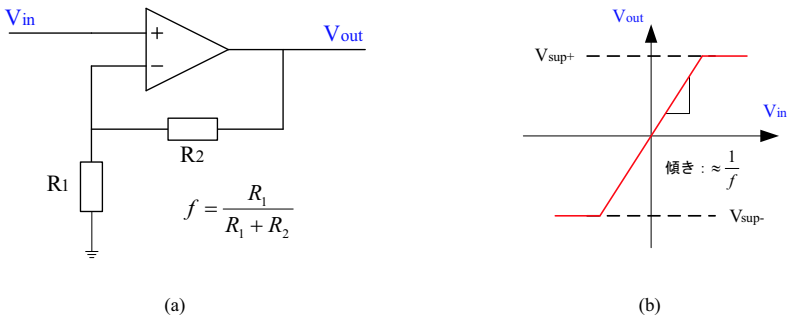


図 3・2 非反転増幅回路の回路図と入出力電圧特性

負帰還を利用した演算増幅器の一例として、図 3・2(a) に非反転増幅器の回路図を示す。ここでは、 R_1 と R_2 が、帰還回路を構成しており、出力端子と反転入力端子の間に接続されているため、負帰還回路となる。図 3・2 と式 (3・1) より、次の 2 式を導出できる。

$$V_{out} = A_{open}(V_{in} - V_-) \tag{3・3}$$

$$V_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out} = f V_{out} \tag{3・4}$$

ここで、 V_{in} と V_{out} は、それぞれ、非反転増幅器の入力電圧と出力電圧である。また、 f は、帰還回路の利得であり、図 3・2 の例では、 $R_1/(R_1 + R_2)$ となる。式 (3・3)、式 (3・4) より、 V_- を消去し、整理すると非反転増幅器の利得を導出できる。

$$A_{close} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{f} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{open}f}} = \frac{1}{f} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{|A_{loop}|}} \tag{3・5}$$

演算増幅器に負帰還を施した後の利得 A_{close} は、閉ループ利得と呼ばれる。また、 A_{loop} は、

ループ利得と呼ばれ、演算増幅器と帰還回路で構成されたループを一巡する利得である。図 3・2(b) に、非反転増幅器の入出力電圧特性を示す。

今後の説明において誤解を最小限にするために、3種類の利得について、ここで定義を再確認することにする。一つ目の利得は、開ループ利得 A_{open} であり、式 (3・1) で示されたように演算増幅器の単体の利得である。二つ目の利得は、閉ループ利得 A_{close} であり、式 (3・5) に示されたように、演算増幅器に負帰還回路が施されたときの利得である。三つ目の利得は、ループ利得 A_{loop} であり、演算増幅器と帰還回路により構成されたループを一巡する利得である。ループ利得は、負帰還回路の場合には、 $-A_{open} \times f$ 、正帰還回路の場合には、 $A_{open} \times f$ となる。

式 (3・5) で示された非反転増幅器の閉ループ利得について考察をする。ループ利得 A_{loop} が、1 より十分に大きい場合、閉ループ利得は次式のように近似できる。

$$A_{close} \approx \frac{1}{f} \quad (3\cdot6)$$

この特性が、演算増幅器のすばらしい長所を表現している。つまり、演算増幅器と負帰還回路を組み合わせたときに得られる閉ループ利得は、演算増幅器の開ループ利得に依存せず、帰還回路のみで決まるということである。

信号を増幅するには、増幅機能のある能動素子を使用する。演算増幅器も、能動素子から構成される能動回路である。現在、能動素子には、半導体でできたトランジスタが利用されている。トランジスタの特徴として、温度依存性が高く、非線形な入出力特性（バイポーラトランジスタ: 指数関数, MOSFET: 2乗関数）があげられる。

能動素子をそのまま無帰還の状態では増幅に利用すると、温度依存性が高く、また、非線形特性のため歪みの大きな増幅回路となる。演算増幅器もトランジスタを含んでいるが、式 (3・6) は、演算増幅器の特性を含まず、帰還回路の特性のみを含んでいる。帰還回路が受動素子で構成されれば、温度依存性の低い、線形性のよい増幅回路を作ることが可能である。

受動素子は能動素子に比べ、温度依存性も低く、線形性もよいためである。非反転増幅器の例では、閉ループ利得は抵抗の比で決まる。二つの抵抗の温度依存性が整合していれば、抵抗値は変わっても、抵抗比は変わらないため、閉ループ利得の温度依存性は無いことになる。「演算増幅器と負帰還回路の組み合わせ」は、能動素子の短所である温度依存性大、非線形性を克服し、能動素子の長所である増幅という部分をうまく引き出す手法である。

1群-7編-3章

3-2 演算増幅器の性能

(執筆者: 茨木栄武)[2008年12月受領]

理想的な演算増幅器を使用して負帰還増幅器を構成した場合、閉ループ利得は帰還回路の特性のみに依存する。しかし、実際には演算増幅器は理想的ではないため、非理想成分が、閉ループ利得に影響を与える。そのため、演算増幅器がどの程度、理想に近いかを数値化した性能指標がある。この性能指標より、演算増幅器を用いて構成した負帰還増幅器が、理想特性から、どの程度、誤差を生じるかを見積もることが可能である。

3-2-1 開ループ利得

理想的な演算増幅器は、無限大の開ループ利得を有するが、実際の演算増幅器の開ループ利得は有限である。有限の開ループ利得は、負帰還を用いて増幅器を構成した場合に、閉ループ利得の誤差の要因となる。式(3・5)において、 $1 \gg 1/(A_{open} \times f)$ の条件が成り立つとき、マクローリン展開より、次式を導出できる。

$$A_{close} \approx \frac{1}{f} \times \left(1 - \frac{1}{A_{open} \times f}\right) = \frac{1}{f} \times \left(1 - \frac{1}{|A_{loop}|}\right) \quad (3\cdot7)$$

開ループ利得 A_{close} は開ループ利得が無限大の場合、 $1/f$ となる。しかし、開ループ利得が有限の場合、開ループ利得は誤差を生じ、 $1/f$ より小さな値となる。最終的には、有限のループ利得が、閉ループ利得の誤差の要因となる。同じ演算増幅器を使用する場合、閉ループ利得の大きな増幅器のほうが、小さな f を持つ帰還回路を使用するため、ループ利得も小さくなり、利得誤差は大きくなる。例えば、開ループ利得が 200 倍、帰還回路の利得が 0.5 倍の場合は、閉ループゲインが約 2 倍となり、利得誤差は約 1% となる。これに対して、開ループ利得が 200 倍、帰還回路の利得が 0.1 倍の場合は、閉ループ利得が約 10 倍となり、利得誤差は約 5% となる。このように、開ループ利得より、利得誤差を見積もることが可能である。通常、開ループ利得は、用途に応じて数十から数百万倍となる。一般的に、開ループ利得の単位は、デシベルで表示することが多く、広帯域演算増幅器で 60~70 dB、高精度演算増幅器で 100~130 dB となる。

ここまでは、開ループ利得を定数として扱ってきた。開ループ利得が入力依存性を持つ場合は、式(3・7)より、閉ループ利得も入力依存性を持つ。つまり、入力電圧により、入出力電圧特性の傾きが変わるため、非線形性を生じる。単一周波数の正弦波を非線形な増幅器に入力すると出力には高調波成分も出力される。そのため、非線形性は、ひずみの原因となる。図 3・3 に非反転増幅回路の入出力電圧特性を示す。図 3・3(a) は、開ループゲインが無限大の場合の特性である。また、図 3・3(b) は、開ループゲインが有限の場合の特性であり、図 3・3(a) より利得が小さくなり、利得誤差を生じている。図 3・3(c) は、開ループゲインが入力依存性を持つ場合の特性の一例であり、利得誤差と非線形を生じている。

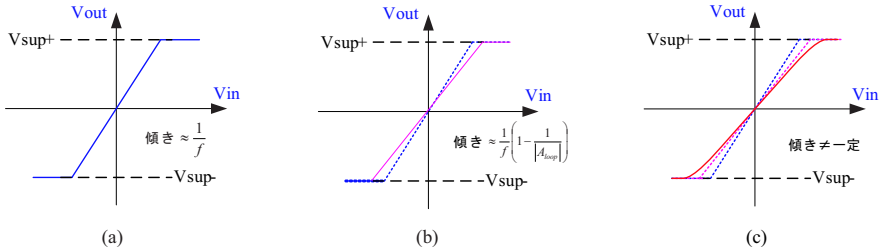


図 3-3 非反転増幅回路の入出力電圧特性

3-2-2 オフセット電圧

理想的な演算増幅器は、式 (3-1) の特性を持ち、差動入力電圧 V_i がゼロの場合、出力電圧は、ゼロとなる。しかし、実際には、差動入力電圧がゼロの場合でも、出力電圧はゼロにはならない。この非理想成分をオフセット電圧と呼び、次式のようにモデル化することができる。

$$V_o = A_{open} V_i + V_{OS_opamp_out} = A_{open} (V_i - V_{OS_opamp_in}) \quad (3-8)$$

差動入力電圧がゼロのときの出力電圧を出力換算オフセット電圧と呼ぶ。式 (3-8) では、 $V_{OS_opamp_out}$ に相当する。通常、演算増幅器の開ループ利得が非常に高いため、差動入力電圧をゼロにしたとしても、出力は、電源電圧まで振り切れてしまい、測定することは非常に難しい。そのため、演算増幅器のオフセット電圧を出力換算オフセット電圧で表すことはほとんどなく、次に説明する入力換算オフセット電圧で表すのが通常である。

出力電圧がゼロになるような差動入力電圧を、入力換算オフセットと呼ぶ。式 (3-8) では、 $V_{OS_opamp_in}$ に相当する。出力換算オフセットを開ループ利得で除算した値となる。通常は、正負は区別せず、絶対値で表示する。演算増幅器の種類にもよるが、数 μV ~ 数十 mV の範囲である。

次に、非反転増幅器のオフセット電圧について説明をする。演算増幅器の場合と同様に、入力電圧がゼロのときの出力電圧を出力換算オフセット電圧、出力電圧がゼロになるような入力電圧を入力換算オフセットと呼ぶ。このように、オフセット電圧はすべての増幅器に対して定義できるため、オフセット電圧について説明するときは、対象となる増幅器を明白にすることが重要である。演算増幅器が式 (3-8) の特性を持つ場合、図 3-4(a) に示す非反転増幅器の出力電圧は、次式のように表すことができる。

$$V_{out} \approx \frac{1}{f} \left(1 - \frac{1}{A_{open} f}\right) (V_{in} - V_{OS_opamp_in}) \quad (3-9)$$

式 (3-9) で表された入出力電圧特性を図 3-4(b) に示す。また、式 (3-9) より、非反転増幅器の入力換算オフセット電圧および出力換算オフセット電圧は、次式のように表せる。ここでは、有限な開ループ利得による誤差は、無視している。

$$V_{OS_niamp_in} = V_{OS_opamp_in}$$

$$V_{OS_niamp_out} \approx -\frac{1}{f} \times V_{OS_opamp_in}$$

演算増幅器の入力換算オフセット電圧より，非反転増幅器のオフセット電圧を見積もることが可能である．

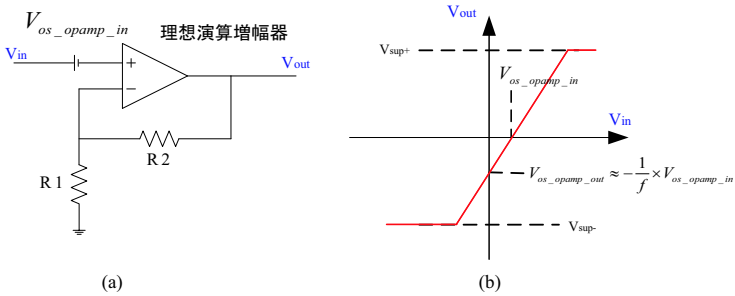


図 3・4 オフセット電圧を含めた非反転増幅回路の入出力電圧特性

参考文献

- 1) “アナログ・デバイゼズ,” OP アンプ大全 第 1 巻～第 5 巻, CQ 出版社, 2003.
- 2) 藤井信生, “アナログ電子回路—集積回路化時代の—,” 第 7 章, 昭晃堂, 1984.
- 3) P.R. グレイ, P.J. フルスト, S.H. レビス, R.G. メイヤー 共著, 浅田邦博, 永田穰 監訳, “アナログ集積回路設計技術上・下 第 4 版,” 第 6 章, 第 9 章, 第 12 章, 培風館, 2003.
- 4) B. Razavi 著, 黒田忠広 監訳, “アナログ CMOS 集積回路の設計 応用編,” 第 9 章, 第 10 章, 丸善, 2003.