

理想的な電圧帰還（VFB）オペアンプ

はじめに

オペアンプは、リニア回路設計における基本的なビルディング・ブロックの一つです。その古典的形態は、2つの入力端子と1つの出力端子から構成され、入力端子の一方は信号の位相を反転させて出力し、他方は位相を反転させないで出力します。オペアンプの標準的な記号を図1に示します。この図では、電源供給端子が省略されていますが、動作するうえで必要なことは明らかです。

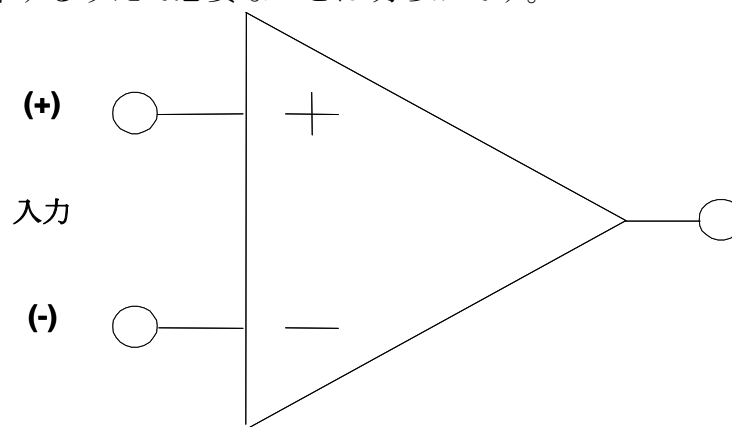


図1. オペアンプの標準記号

「オペアンプ」という名称は、演算増幅器（operational amplifier）の一般的な略称です。この名前は初期の増幅器設計に由来しており、当時はアナログ・コンピュータに使用されていました（最初のコンピュータは、本質的にデジタルというよりアナログでした）。基本増幅器を、いくつかの外付け部品と共に使用すると、加算、積分など様々な数学的演算（operation）を行うことができました。アナログ・コンピュータが使用されたのは第二次世界大戦中で、その主な目的の一つは、ミサイル等の弾道軌道を計算することでした。オペアンプの歴史については、参考文献2をご覧ください。

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいはその利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標はそれぞれの所有者の財産です。日本語資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。
©2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0, 10/08, WK

アナログ・デバイセズ株式会社

本社／〒105-6891 東京都港区海岸 1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル
電話 03 (5402) 8200
大阪営業所／〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36 新大阪トラストタワー
電話 06 (6350) 6868

理想的な電圧帰還（VFB）モデル

理想的な電圧帰還（VFB）オペアンプの古典的モデルには、次の性質があります。

1. 入力インピーダンス無限大
2. 周波数帯域幅無限大
3. 電圧ゲイン無限大
4. 出力インピーダンスゼロ
5. 消費電力ゼロ

もちろん、実際にはいずれの項目も実現不可能です。これらをどれだけ理想的な値に近づけて実装するかで、オペアンプの質が決まります。

これを電圧帰還（VFB）モデルと呼びます。このタイプのモデルを適応可能なオペアンプには、帯域幅 10MHz 以下のオペアンプのほぼ全てと、より高い帯域幅のオペアンプの約 90%が含まれます。電流帰還（CFB）は異なるオペアンプ・アーキテクチャであり、別のチュートリアルで取り上げます。理想的な VFB オペアンプの属性を図 2 にまとめます。

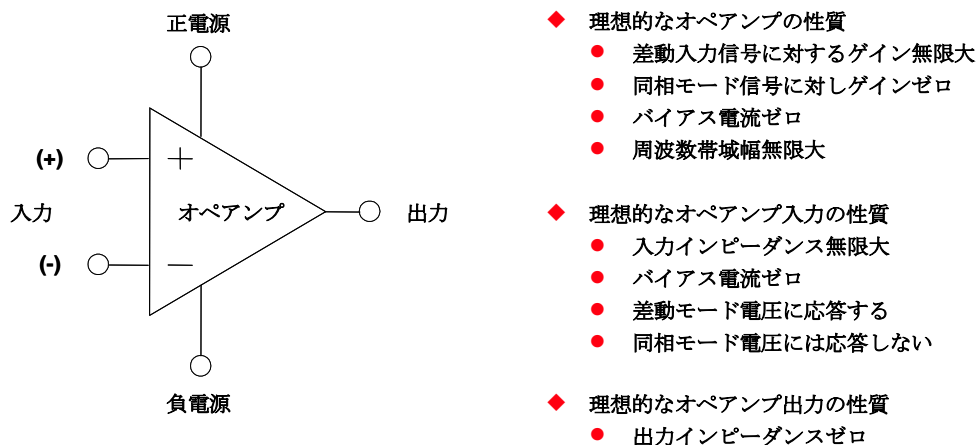


図 2. 電圧帰還オペアンプの属性

基本動作

理想的なオペアンプの基本動作は、簡単にまとめることができます。まずアンプで、ある決まった量のゲインを形成するために、出力信号の一部を反転入力端子に戻します。これを負帰還と呼びます。オペアンプの入力端子間に与えられる差電圧は、オペアンプの「オープンループ・ゲイン」で増幅されます。オープンループ・ゲインは、理想的なオペアンプでは無限大です。もし差電圧の大きさとして、反転（-）端子の電圧が、非反転（+）端子の電圧より「高」ければ、出力は「負」に振れます。一方、非反転（+）端子の電圧が、反転（-）端子の電圧より「高」ければ、出力は「正」に振れます。アンプの無限大のオープンループ・ゲインは、入力差電圧を強制的にゼロにしようとします。入力と出力がアンプの動作範囲内に納まっているかぎり、アンプは入力差電圧をゼロに維持し、出力電圧は、入力電圧に帰

還回路で決められたゲイン倍した値になります。出力は差動モード入力電圧にのみ応答し、同相モード入力電圧には応答しないことに注意してください。

反転構成と非反転構成

理想的な電圧帰還オペアンプをアンプとして構成するには、基本的に 2 つの手法があります。これらを図 3 と図 4 に示します。

図 3 は反転構成として知られています。この回路を用いると、出力は入力に対して位相が反転します。この回路の信号ゲインは、使用される抵抗の比により決まり、次式で与えられます。

$$G = -\frac{R_F}{R_G} \quad (\text{式 1})$$

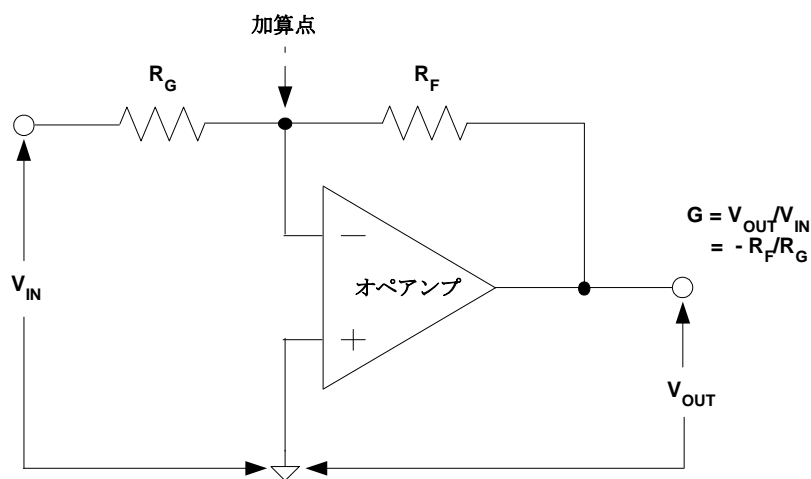


図 3. 反転オペアンプ段

図 4 は非反転構成として知られています。この回路を用いると、出力は入力に対して同じ位相になります。この回路の信号ゲインも、使用される抵抗の比により決まり、次式で与えられます。

$$G = 1 + \frac{R_F}{R_G} \quad (\text{式 2})$$

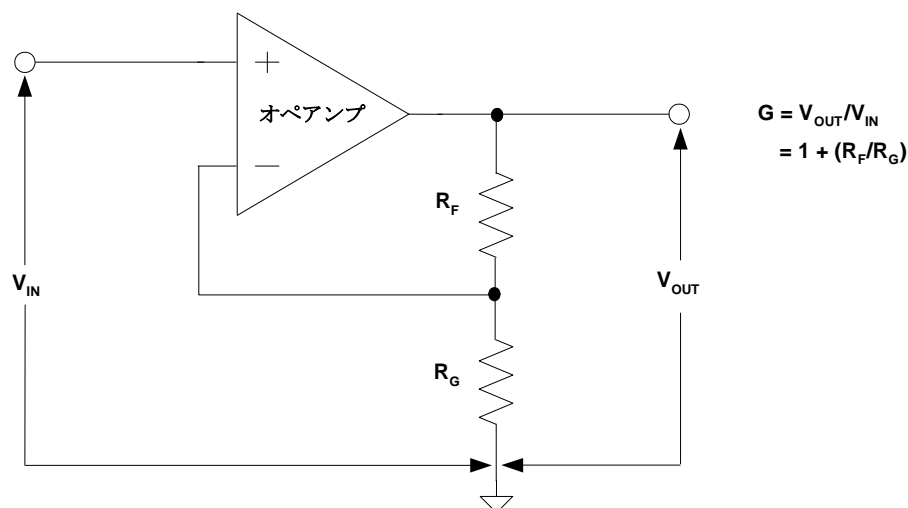


図 4. 非反転オペアンプ段

実現可能な最小ゲイン「1」として、この回路が構成されている場合（すなわち $R_G = \infty$ ）、出力が電圧分圧回路（ゲイン設定回路）を駆動しますが、反転入力端子へ帰還される最大電圧は、出力端子が出力可能な最大電圧になることに注意して下さい。

さらに、反転、非反転の両方の構成において、帰還信号は出力から反転端子に帰還されていることに注意してください。これが負帰還であり、設計者にとって多くの利点があります。これらの点について以降でさらに詳細な考察をしていきます。

ゲインは抵抗の「比」に基づいており、実際の抵抗値に基づいていないことにも注意してください。これは、設計者が現実的な範囲内で、多様な抵抗値を選択できることを意味しています。

しかし抵抗値が低すぎる場合、適切な動作を行うにはオペアンプ出力から大電流を流せることが必要になります。これは、オペアンプ自体に過度の電力損失を引き起こし、多くの害を及ぼします。電力損失の増加はチップの自己発熱を引き起こし、オペアンプ自体の DC 特性に変化をもたらします。さらに、発生した熱により、ほとんどの半導体にとって接合部温度として許容できる 150°C を超えることは明らかです。この接合部温度は、シリコンチップ自体が許容できる最大温度そのものです。一方、抵抗値が高すぎる場合、ノイズが増加したり寄生容量に対して影響を受けやすくなったりします。寄生容量に対する影響としては、帯域幅の制限、回路の動作不安定、発振などが生じる可能性が挙げられます。

実際には、 10Ω 以下の抵抗や $1M\Omega$ を超える抵抗は調達が困難であり、特に高精度の抵抗が要求される場合に顕著です。

反転オペアンプのゲインの導出

反転アンプのケースをもう少し詳しく見てみましょう。図 5 を見ると、非反転端子はグラウンドに接続されています。ここではバイポーラ（正と負）電源を使用すると仮定しています。オペアンプは、入力端子間の差電圧を強制的にゼロにしようとするので、反転入力も接地されているように見えます。実際、端子のこの状態はしばしば「仮想接地」と呼ばれています。

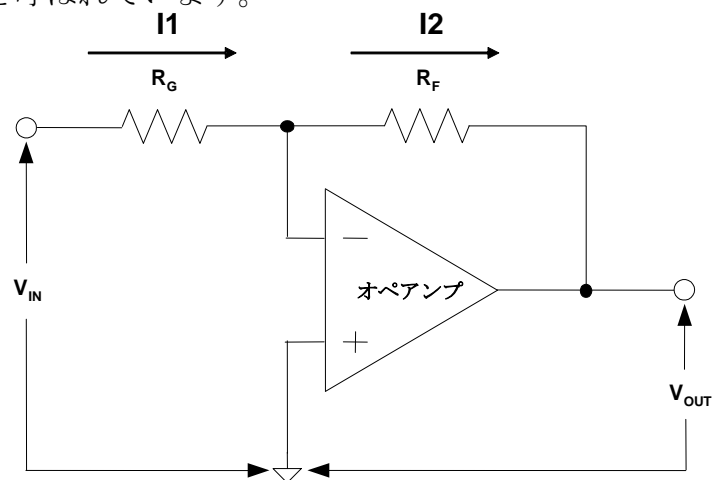


図 5. 反転アンプのゲイン

ここで、入力抵抗に電圧 (V_{IN}) が印加されると、それにより抵抗 (R_G) には次式で与えられる電流 ($I1$) が流れます。

$$I1 = \frac{V_{IN}}{R_G} \quad (\text{式 3})$$

理想的なオペアンプの入力インピーダンスは無限大なので、反転入力端子には電流が流れません。したがって、同じ電流 ($I1$) が帰還抵抗 (R_F) を経由して流れなければなりません。アンプは反転入力端子が強制的にグラウンド電位と等しくなるように動作するので、出力は次式で与えられる電圧 (V_{OUT}) となります。

$$V_{OUT} = I1 \times R_F \quad (\text{式 4})$$

簡単な計算をいくつかすると、次式 (式 5) と同じ結論 (式 1) に至ることができます。

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = G = -\frac{R_F}{R_G} \quad (\text{式 5})$$

非反転オペアンプのゲインの導出

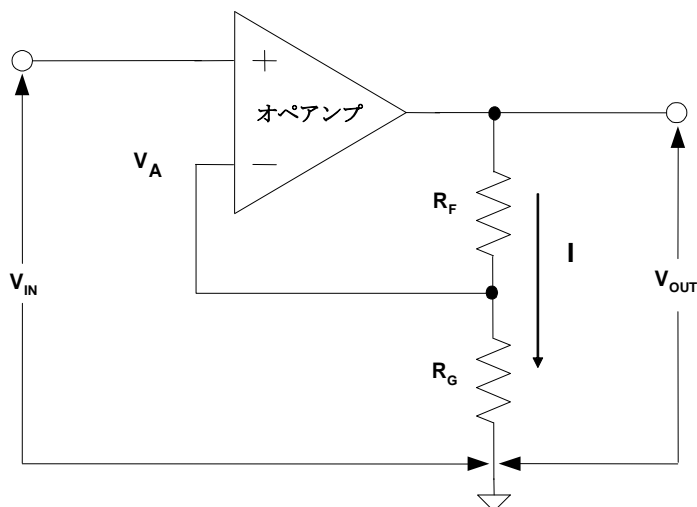


図 6. 非反転アンプのゲイン

続いて、非反転アンプの場合をより詳細に見てみましょう。図 6 に示すように、入力電圧が非反転端子に直接印加されています。出力電圧は、 R_F と R_G から構成される分圧回路を駆動します。2 つの抵抗で分圧された電位は反転端子へ帰還される電圧 (V_A) となり、その値は次式に示すとおりです。

$$V_A = \frac{R_G}{R_G + R_F} V_{OUT} \quad (\text{式 6})$$

オペアンプの負帰還作用は、差電圧を強制的に 0 にしようとします。したがって、次式を得ることができます。

$$V_A = V_{IN} \quad (\text{式 7})$$

単純な計算を行うことで次式を得ます。

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = G = \frac{R_G + R_F}{R_G} = 1 + \frac{R_F}{R_G} \quad (\text{式 8})$$

これは、式 2 として明記した式と同じものです。

上記の解説の全体において、ゲイン設定部品を「抵抗」としてきました。実際には、これらの部品は「インピーダンス」であり、単なる抵抗ではありません。このことは、周波数依存があるアンプを設計可能な事を示唆しますが、このことについては、後のチュートリアルで詳しく述べることにします。

参考資料

1. Hank Zumbahlen, *Basic Linear Design*, Analog Devices, 2006, ISBN: 0-915550-28-1. Also available as [Linear Circuit Design Handbook](#), Elsevier-Newnes, 2008, ISBN-10: 0750687037, ISBN-13: 978-0750687034. Chapter 1
2. Walter G. Jung, [Op Amp Applications](#), Analog Devices, 2002, ISBN 0-916550-26-5, Also available as [Op Amp Applications Handbook](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7844-5. Chapter 1.