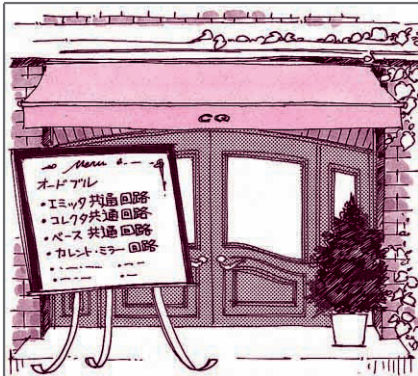


トランジスタCooking!

〈第6回〉

理想OPアンプができるまで

柴田 肇
Hajime Shibata



今回は負帰還を掛けたときのOPアンプのふるまいを説明しました。OPアンプの基本的な機能はトランジスタ1個でもなんとか実現できますが、特性が不十分であるため使いやすいものではありません。市販のOPアンプは、簡単に使えるように、また、十分な性能をもつように、これまで紹介してきた差動増幅回路、カレント・ミラー、電流源といったミニ回路を組み合わせ、理想に近い特性を実現しています。

最初にトランジスタ1個で作るOPアンプの弱点を整理して、その問題点をひとつひとつ解決していきます。これまでの連載に登場したテクニックを組み合わせることで性能を改善していくことができるのです。紹介するOPアンプの順番は、

- ① トランジスタ1個
- ② 差動対+抵抗負荷
- ③ 差動対+カレント・ミラー
- ④ 差動対+カレント・ミラー+エミッタ共通
- ⑤ 差動対+カレント・ミラー+エミッタ共通+電圧バッファ

です。⑤の段階で古典的なOPアンプが実現できます。さらに、出力の振幅をできるだけ多く取り出すという観点から、

- ⑥ 差動対+フォールデッド・カスコード+カレント・ミラー
- ⑦ 差動対+カレント・ミラー+カレント・ミラー

で構成したOPアンプを紹介します。

最後に電流帰還型OPアンプとして、

- ⑧ バッファ+カレント・ミラー

を紹介します。

OPアンプは入力段、増幅段、電圧バッファなどの回路ブロックに分けて考えることができます。それぞれのミニ回路はここではシンプルなものしか扱いませんが、もっと高性能な回路ブロックに置き換えることにより、性能の向上が図れます。読後のもっといろいろな組み合わせに挑戦してみてください。

① トランジスタ1個のOPアンプ

● メリット

図6-1に示すのは、トランジスタ1個で作ったOPアンプによる2倍の非反転増幅回路です。

連載第1回(2003年10月)で取り上げたトランジスタを使った基本的な増幅回路では、トランジスタのベース-エミッタ間に入力電圧を与え、出力電圧はコレクタ電流の変化を負荷抵抗を使って変換することで取り出しました。入力電圧は、ベース電圧からエミッタ電圧を差し引いた値、つまり $V_B - V_E = V_{BE}$ で、出力電圧はコレクタ電圧 V_C でした。

入出力の位相関係を見ると、入力電圧のベース-エミッタ間電圧が上がると出力電圧のコレクタ電圧は下がりましたから、ベース-エミッタ間電圧に対して反転した電圧が出力されていることになり、増幅率は負の値になります。そのため、増幅率 A を $A > 0$ とおくと、

$$V_C = -A(V_B - V_E) = A(V_E - V_B) \dots\dots\dots(6-1)$$

の関係がありました。

これに対してOPアンプは、非反転端子の電圧を V_+ 、反転端子の電圧を V_- 、出力端子の電圧を V_{out} 、増幅率を A とすると、

$$V_{out} = A(V_+ - V_-) \dots\dots\dots(6-2)$$

の関係もっています。

式(6-1)と式(6-2)を見比べてみると、エミッタと非反転端子、ベースと反転端子、コレクタと出力端子を対応させることで、トランジスタ1個でOPアンプもどき(図6-1)ができることがわかります。

図6-1に示す回路は帰還抵抗の設定でゲインを決めることができます。2倍の非反転増幅回路になっており、入力信号 v_{in} に対する出力信号 v_{out} のゲイン G_{close} は、

$$G_{close} \doteq 1/\beta = \frac{R_{10} + R_{11}}{R_{11}} = 2 \dots\dots\dots(6-3)$$

ただし、 $1/\beta$ ：設定ゲイン(β は帰還率)

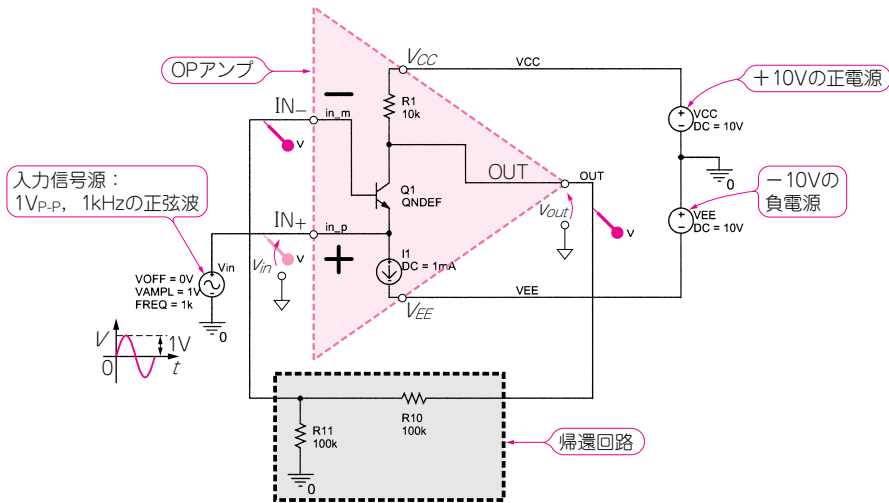


図6-1 トランジスタ1個で作るOPアンプで構成した負帰還増幅回路

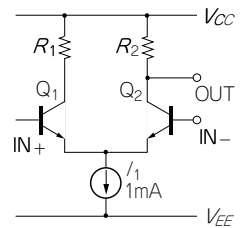


図6-3 差動対十抵抗負荷で作るOPアンプ

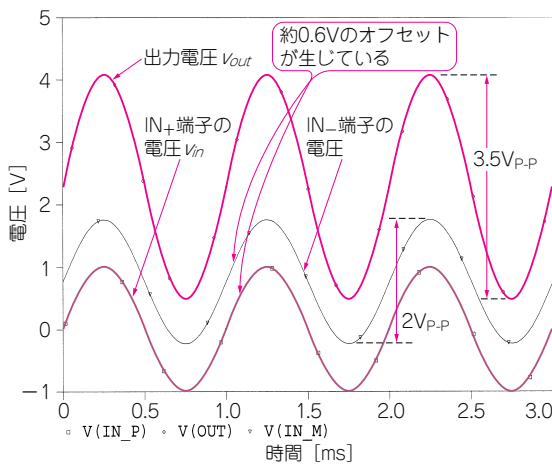


図6-2 図6-1のシミュレーション結果
ゲインは1.75倍で2倍に少し足りないものの反転増幅回路として動作している

になります。

図6-2に示すのは、図6-1の入出力波形をシミュレーションした結果です。入力電圧は振幅 $\pm 1\text{V}$ ($2\text{V}_{\text{P-P}}$)で、出力電圧は約 $4\text{V} \sim 0.5\text{V}$ ($3.5\text{V}_{\text{P-P}}$)まで振れています。シミュレーション結果からの入出力間のゲインは1.75倍で、2倍に少し足りませんが、ちゃんと反転増幅回路として動作しています。ゲインが設定どおりにならないのは、トランジスタ1個のOPアンプのゲイン A が十分大きくないからです。

● デメリット

トランジスタ1個のOPアンプ回路には、次のようなたくさんの弱点があり、残念ながらあまり使いやすとはいえません。

- ゲイン A が小さいためループ・ゲインが小さくなり、誤差が大きい
- 非反転端子と反転端子間に約 0.7V ($= V_{\text{BE}}$)のオフセットをもつ
- 出力インピーダンスが大きい
- 非反転端子の入力インピーダンスが小さい
- 出力電圧範囲が狭い。出力を取り出すコレクタの電圧が、信号を入力するエミッタの電圧以下に下げられない

例えば、電源電圧を $\pm 15\text{V}$ として、NPN型で構成したOPアンプの非反転端子(エミッタ)が 13V 、反転端子(ベース)が 13.7V と、ともに正電源近くにあるとき、出力電圧(コレクタ)の最低電位はエミッタ電圧 $+0.2\text{V}$ 程度の 13.2V 付近になります。最高電位は電源電圧の 15V ですから、出力電圧範囲は $15 \sim 13.2\text{V}$ と、電源電圧の $\pm 15\text{V}$ と比べて非常に狭くなります。逆に非反転端子が -13.7V 、反転端子が -13.0V 付近など、負電源近くにあるとき、出力電圧範囲は $+15 \sim -13.5\text{V}$ 程度と広がります。このため、1倍の電圧バッファ回路などの特別な場合を除いて、大きな出力振幅が必要とされる回路には利用できません。

▶ 図6-1に示した回路は弱点が目立たなくふうをしていた

図6-1の応用例ではこれらの弱点があまり見えなくなるように、

- 負荷抵抗 $R_{10} + R_{11}$ ($200\text{k}\Omega$)を出力インピーダンス R_1 ($10\text{k}\Omega$)よりも大きく選ぶ
- 入力インピーダンスの低い非反転端子を電圧源で強力に駆動する

など、いろいろと小細工をしています。しかし、これでは用途が限定されてしまいます。

