

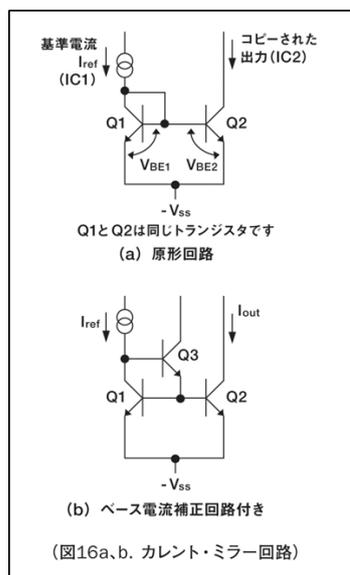
電流信号を作り出す回路 (後半)

著者：藤森 弘巳

技術記事 MSJ-004 記事では、「電流信号を作り出す回路(前編)」と題して、OP アンプとトランジスタを利用した定電流回路、トランジスタのダーリントン接続。そして応用回路として可変電流出力回路について紹介しました。本稿では、その後編として、電流信号のコピー回路(カレント・ミラー)の紹介をします。最後に本稿に関連する記事としてアナログ・デバイゼズの技術誌アナログ・ダイアログから、「アナログ信号処理の幅を広げる電流出力回路の技術」James Bryant (Analog Devices Inc.)という記事をご紹介します。

§ 4 電流信号のコピー回路(カレント・ミラー)

回路設計をしていると、信号をコピーしてほかの回路に伝送してやりたいことがしばしばあります。電圧信号では、バッファ・アンプなどを挟んで伝送してやればよいのですが、電流信号では少し厄介です。電流コピーは、トランジスタ回路の電流バイアスや、励起信号の分配などに使われます。高い電圧からのシンク電流出力をこの回路でコピーして、グラウンドに対するソース電流源とすることも可能です。ここではカレント・ミラーと呼ばれる回路を用いて電流をコピーする方法について解説します。



カレント・ミラー回路は、特性がそろった複数のトランジスタを使用して、基準になるトランジスタに流れる電流をほかのトランジスタにコピーする回路です。図16を見て下さい。ここでは二つのトランジスタを使用した、原型の回路を示しています。二つのNPNトランジスタのベース同士が接続され、片側のコレクタ/エミッタに基準電流 I_{ref} が流れ、もう一つのトランジスタのコレクタに出力電流が流れています。トランジスタQ1の

コレクタとベースはショートされ(接続され)、この間に電位差はありません。Q1、Q2ベース/エミッタ間の電圧をあらわしたものが、次の式です。ここで V_{BE1} はQ1のベース/エミッタ間電圧、 V_{BE2} はQ2のベース/エミッタ間電圧です。 V_{BE1} と V_{BE2} は同電圧で、それぞれのコレクタ電流 I_{C1} と I_{C2} を用いて表されます。式1と2から、Q1とQ2が全く同じトランジスタであれば $I_{C1} = I_{C2}$ となり、右側の電流を左側にコピーしたことになります。

$$V_{BE1} = V_T \times \log_e (I_{C1} / I_{SAT1}) =$$

$$V_{BE2} = V_T \times \log_e (I_{C2} / I_{SAT2}) \quad \text{---(1)}$$

V_T は、絶対温度(°K)に比例した電圧、 I_{SAT} は飽和電流です。

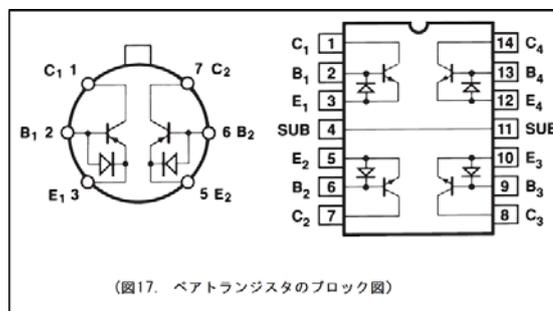
$$V_T = kT / q$$

(k = ボルツマン定数、 T = ケルビン温度、 q = 電荷量)

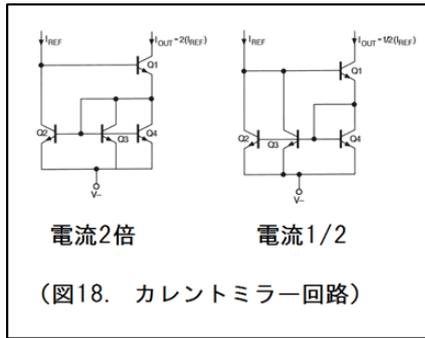
$$I_{C1} = I_{C2} (I_{SAT2} / I_{SAT1}) \quad \text{---(2)}$$

ここでなぜ $V_{BE1} = V_{BE2}$ なのかということですが、ふたつのトランジスタが全く同じ外形と特性を持ち、流れている電流やジャンクション温度も同じであるとき、ベース/エミッタ間の電圧は等しくなります。従って(a)のふたつのトランジスタには全く同じコレクタ電流が流れるということになります。左のトランジスタ I_{ref} が基準電流であれば、まったく同じ電流が右側のトランジスタの出力電流、 I_{out} となります。ただしこのままだと、(a)のQ1の基準電流は、Q2を動作させるベース電流も供給しなければならないので、これが誤差となります。そこで(b)のようにベース電流を供給するトランジスタQ3を追加して、Q2のベース電流の $1/h_{fe}$ (Q3の h_{fe}) で動作するように改良したものが良く使われます。

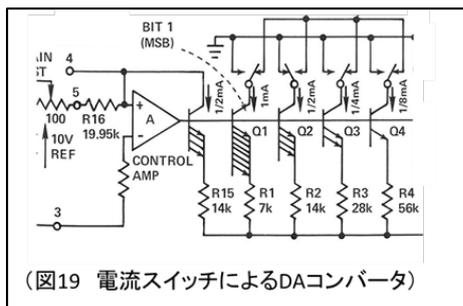
カレント・ミラー回路の条件は特性が同じトランジスタを、2個以上そろえなければならないということです。よく用いられるのがウエハー上で隣り合った複数のトランジスタを、一つパッケージ収めたデュアル・ペアトランジスタや4個入りのクワッド・トランジスタです。アナログ・デバイゼズ社でもこの形のトランジスタを供給しています。(図17参照)。



例えば4個入りのトランジスタの一つリファレンス電流に使用し、残りの3個をこのトランジスタに従属させると、一つの電流源から、同じ値の電流信号を3個作り出すことができます。3個をひとつのトランジスタとして並列接続すると、その出力電流は3倍になります。図18のようにいくつかの回路バリエーションが考えられます。



カレント・ミラー回路は、実はリニア IC の中で数多く使われています。むしろ使われていないアナログ IC のほうが稀だともいえます。カレント・ミラーは、トランジスタ回路の中でも高速で動作する回路です。この特性を生かして、電流帰還形 OP アンプの内部で入力電流信号を出力段に伝送する部分に使用されています。またここでは紹介しておりませんが、OP アンプ入力差動ペアの負荷としても多用されています。アンプ以外では、電流型の DA コンバータの 1-2-4-8-... という比率の電流ソースの供給源としても多く使用されています。(図 19)

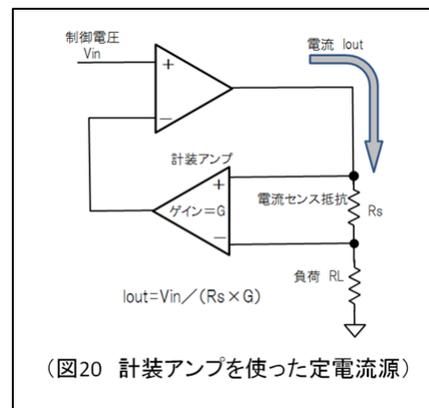


一つのリファレンス電流 (DA コンバータの基準電圧から作る) から、2進の重み付けをした電流源を作ります。エミッタの大きさは、電流の比率に合わせて、1-2-4-8 の大きさになっています。それぞれの VBE が温度変化に追従して一緒に変化するので、大変安定です。図 19 の左端にあるリファレンス・トランジスタに基準電流を流し、それを各ビットのスイッチにコピーして分配しています。リファレンス・トランジスタが温度により動作が変化 (例えば VBE) しても、従属するトランジスタも一緒に同じ分だけ変化して動作を補正します。この回路方式は、James Pastoriza という人が 40 年以上前に開発して特許となっています

した。回路そのものは、最初ディスクリートで構成されていましたが、今ではよりマッチングの良いモノリシック IC として実現されています。

§ 4 補足 プログラマブル電流源ワンチップ IC

可変電流源という回路の動作を考えた場合、抵抗に電流を流してその電圧でフィードバックをかけるという回路トポロジーが思い浮かびます。これを素直にそのまま実現した回路が図 20 です。出力の電流は電流センス抵抗でモニターされ、その両端の電圧を差動アンプ (計装アンプ) が増幅して、制御アンプのフィードバック信号としています。この回路の利点の一つは、同じ回路でソース (吐き出し)、シンク (吸い込み) のどちらの方向の電流でも作ることができることです。使われているアンプが両電源 (+ のバイポーラ電源) であれば、制御電圧 Vin をマイナスにすることで電流の方向をシンクにすることができます。



もちろん OP アンプや抵抗を集めてこの回路を、構成することは可能ですが、実際には集積された IC として市販されています。§ 1~3 で紹介した回路はどちらかというと単機能の電流源ですが、このタイプの IC は様々なフレキシビリティを持っています。AD5522 という可変電流源 (可変電圧源にもなる) のブロック図を図 21 に示します。

