

## 電流信号を作り出す回路 (前編)

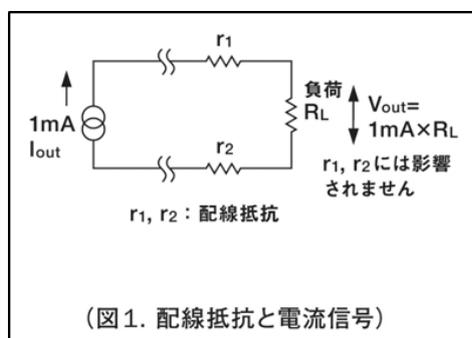
著者：藤森 弘巳

電子回路システムでは、アナログ、デジタル問わず「電圧」で信号を表現するケースが多いでしょう。しかし信号を表すには、「電流」を用いても全く同じことができるはずですが、電流信号は電圧信号に比べて配線抵抗の影響を受けにくいという特長があります。本稿では「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てゆきます。

### § 1 電流源信号の目的

電子回路システムの中で信号(振幅や周波数)を表現する方法は、多くの場合電圧信号です。アナログ信号処理はもとより、デジタル信号も多くの場合電圧により1, 0を表現します。しかし信号を表すには、電流を用いても全く同じことができるはずですが。

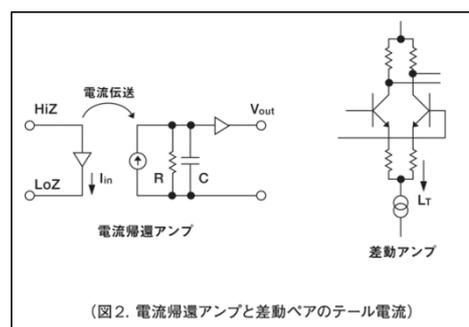
電流信号の良いところは、伝送中の配線抵抗の影響を受けにくいという特徴があることです。例えば図1のように長い距離(配線)を通して信号伝送する場合、電圧信号であると、途中の配線抵抗により負荷抵抗と分圧器を構成し、送り側と受け側で異なった電圧信号となりますが、電流信号であればこのようなことはなく、途中でリークしない限り1mAの出力は受け手側でも1mAと変わりません。4~20mAのプロセス制御電流信号は、この原理を使用したもので、プラント内を長距離伝送しても送信側と受信側が同じ大きさの信号を受信できるという利点と、配線が途中で断線した時に電流信号が途絶え、すぐに検出できるという特徴があります。また抵抗値の変化により測定を行うストレインゲージ・ブリッジや測温抵抗体に印可する励起信号(Excitation)を、定電圧ではなく定電流で励起すると、やはり途中経過の配線抵抗の影響を受けにくくなります。



プロセス制御やセンサー信号処理だけでなく、ICの中や基板上の回路でも電流信号は使われています。例えば、高速OPアンプのトポロジーとしてポピュラーな電流帰還形アンプの内部では、入力の信号が電流に変換され、出力に電流信号として伝送されます。その伝送には、電流信号回路であるカレント・ミラー回路が応用されています。もう少し身近なところでは、差動トランジ

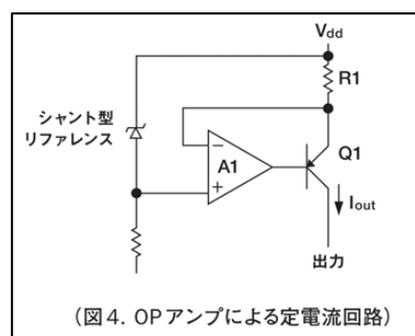
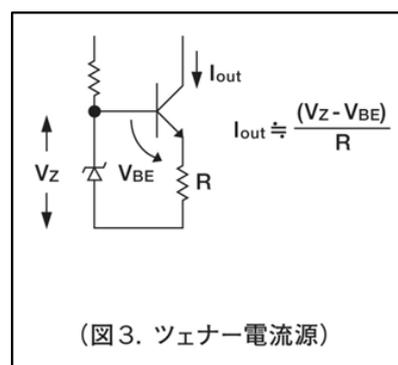
スタ・ペアのバイアス電流供給源として定電流源などがあげられます。

定電流あるいは制御された電流を発生させるには、基準となる定電圧源(リファレンス)と高精度の抵抗が必要になります。その中でもOPアンプを利用した回路は、高精度で汎用性の高い電流源を実現することができます。ここでは、OPアンプを利用した定電流回路、その応用である可変電流出力回路、電流信号をコピーするカレント・ミラー回路について紹介してゆきます。

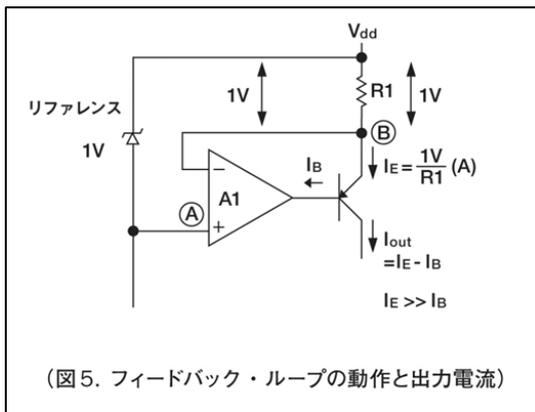


### § 2 OPアンプとトランジスタによる定電流発生回路

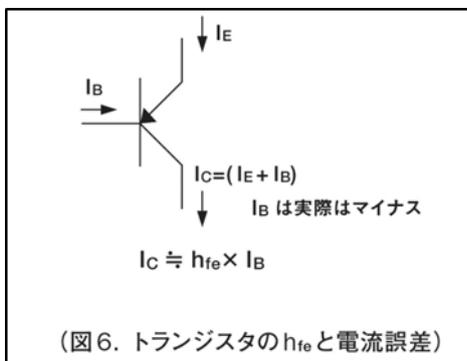
シャント型のリファレンス電源(ツェナーダイオードでも可)とトランジスタ+抵抗を使用すると、図3のような簡単な定電流回路を構成することができます。OPアンプを利用すると、これより1桁~2桁精度の高い電流源を作ることができます。基本的な考え方は、高精度の抵抗に定電圧を変え、流れる既知の電流を信号として取り出すというものです。これを実用化する回路が図4の回路です。



この回路では、OPアンプの出力がトランジスタのベースに接続され、このトランジスタQ1の出力を制御しています。このアンプA1の+側入力にはシャント型のリファレンス電圧源(ADR510:1V、AD589:1.2V等)が接続され、正側電源電圧からこのリファレンス電圧の値だけ低い電圧が加わります。-側入力にはフィードバックが接続されていますが、この信号はOPアンプの出力についているPNPトランジスタのエミッタ電圧をセンスしています。OPアンプは、フィードバック・ループが正常に作動していれば、二つの入力電圧が同じになるように動作します。実際にはオフセット電圧やバイアス電流による誤差源がありますが、ここでは無視することにします。

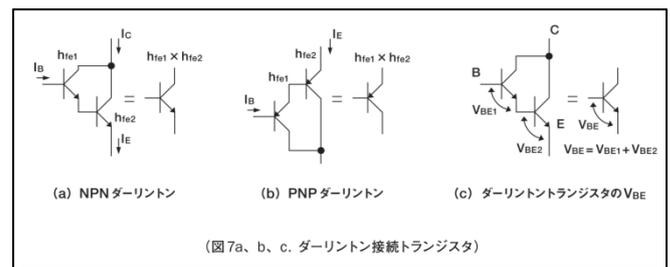


さてOPアンプは図5のA点とB点が同じ電圧になるように、トランジスタQ1を制御します。B点に接続される抵抗R1に流れる電流により、この電圧がリファレンス電圧に等しくなるようにトランジスタのエミッタ電流をコントロールします。ADR510を使い、このR1が仮に100Ωであると、ここに1Vの電圧がかかるので、コレクタ電流は、 $1V \div 100\Omega = 10\text{mA}$ ということになります。既知の電圧を既知の抵抗にかけることにより、定電流を発生させることができます。この定電流は、エミッタからコレクタを通して出力されますが、この時ベース電流がエミッタ電流より減算されてコレクタに出力されるので、このベース電流分が出力誤差となります。(図6) ベース電流はコレクタ電流のほぼhfe分の一なので、出力電流の誤差は使用するトランジスタの電流増幅率に依存します。仮にhfeが250であれば、出力電流の誤差は $1/250 = 0.4\%$ となります。



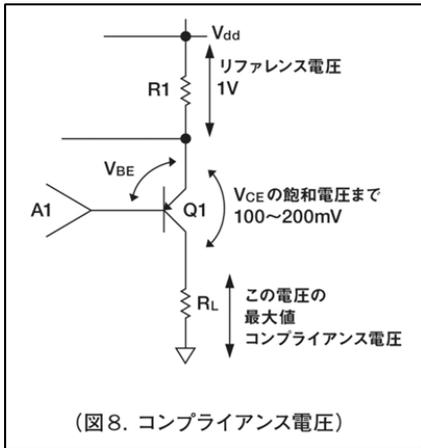
より精度の高い出力電流値を必要とする場合は、トランジスタの電流増幅率を大きくしなければなりません。単体でのhfeは限られています。hfeが1,000以上あるスーパーベータ・トランジスタということも考えられますが、耐圧が低い等の問題もあります。耐圧に関しては、この後に解説するコンプライアンス電圧

という重要な特性に大きく影響するスペックです。一般的なトランジスタを組み合わせ、非常に大きなhfeを得ることができる回路がダーリントン接続トランジスタ(略してダーリントン・トランジスタ)です。図7にその接続法を示します。二つのトランジスタにより、3端子で一つのNPNあるいはPNPトランジスタと酷似した動作をします。この時ダーリントン・トランジスタのhfeは、接続した二つのトランジスタのそれぞれのhfeを乗算したものになります。例えば先にあげたhfe=250のトランジスタを二つ使えば $250 \times 250 = 62,500$ 倍のhfeを持ったトランジスタとなります。これならば、ベース電流による誤差(16ppm)も無視できるでしょう。



先にダーリントン・トランジスタは、単体トランジスタとよく似た動作をすると説明していますが、確かに異なるところもあります。トランジスタが動作するためには、ベース/エミッタ間にVBE電圧が必要です。一般的にはVBEは0.6V~0.7Vぐらいですが、エミッタの電流密度やジャンクション温度により変化します。ダーリントン・トランジスタの場合、図7のように、二つのトランジスタを動作させるため、二つ分のVBEを確保してあげなくてはなりません。従ってトータルでのVBEは、ダーリントン・トランジスタの場合およそ1.4V~1.6Vぐらいになります。この電圧は、この後解説するコンプライアンス電圧に影響を与えます。

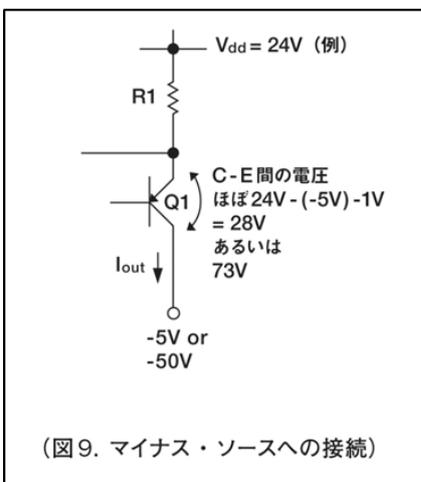
図4に戻りますが、この回路で出力電流をR1とリファレンス電圧で設定できるソース型(電流吐き出し型)定電流源を作ることができますが、その出力電流がつながる先の負荷について少し考えてみます。例えばこの電流源を図8のように抵抗負荷に接続すると、この抵抗の両端には信号電流による電圧が発生します。この電圧は単純に $I_{out} \times R_L = V_{out}$ で表すことができます。Ioutが10mAで、抵抗が250Ωであれば、電圧に変換した値は $250\Omega \times 10\text{mA} = 2.5\text{V}$ になります。ではこの抵抗が100kΩであればどうでしょう。計算であれば電圧は1,000Vになりますが、もちろん電源以上の電圧は出力することはできないので、これでは正常に動作しません。電流信号を抵抗負荷に加えて得ることができる電圧の最大値を、コンプライアンス電圧と呼びます。この電圧が高いほど、使い勝手は良いということになります。図4の回路で、このコンプライアンス電圧はどれぐらい期待できるのでしょうか。図8をご覧ください。



(図8. コンプライアンス電圧)

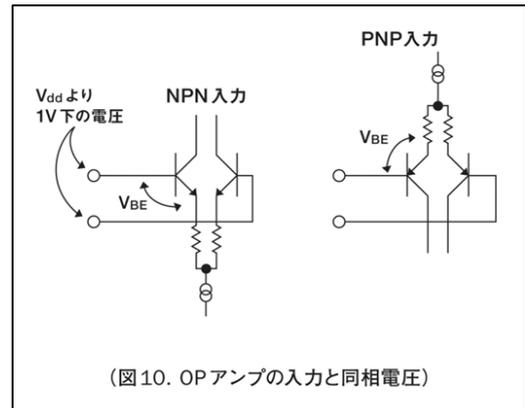
ここで解説した回路では、電源電圧  $V_{dd}$  より少なくともリファレンス電圧分 ( $R_1$  の両端電圧) は低い電圧が、トランジスタのエミッタにかかっています。従ってこの点以上の電圧 ( $V_{dd} - V_{ref}$ ) は、出ないはずですが、次にトランジスタを見ると、アンプの出力は少なくともトランジスタの  $V_{BE}$  分低い電圧を出さなくては行けませんので、トランジスタ一つなら約  $0.7V$ 、ダァリントンなら  $1.5V$  ぐらいエミッタ電圧より低い電圧となります。OPアンプがレール to レール出力であれば、この電圧を無理なく出せるでしょう。実際にはコレクタ/エミッタ間にも電圧が多少残りますので、コンプライアンスは、ここで  $100mV \sim 200mV$  引き算されます。使用するシャント・リファレンスの電圧が大きいと、コンプライアンス分の電圧をここで使ってしまう、出力の電圧範囲が小さくなります。

もう一つ考えなくてはならないのは、出力が接続される回路の電圧です。先の例では抵抗負荷がグラウンドに対して接続されていますが、電流信号であれば電圧源に直接接続しても動作するはずですが、例えば  $10mA$  の出力を  $-5V$  に接続したらどうでしょう。(図9)  $Q_1$  のエミッタには  $-5V$  がかかり、コレクタとの電圧差は、 $(V_{dd} - 1V) + 5V$  になります。電圧源は  $-5V$  なのでこの回路は無理がかからないでしょうが、これが仮に  $-50V$  であるとどうでしょう。 $V_{dd}$  が  $+24V$  であるとこの差は  $74V$  になり、小さなトランジスタであると  $Q_1$  のコレクタ/エミッタ間の電圧、およびベース/エミッタ間の電圧の限界を超えてしまう危険性があります。またOPアンプの出力も、 $V_{BE}$  電圧があるとはいえ、ここまで低くすることは困難です。コンプライアンスのマイナス側は、これにより制限されます。



(図9. マイナス・ソースへの接続)

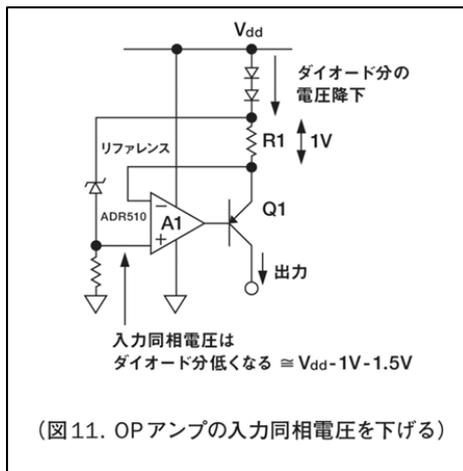
気が付かれた方もいると思いますが、定電流回路なので  $Q_1$  の電流は一定ですが、コレクタ/エミッタ間の電圧は、負荷の電圧により変わります。そのため  $Q_1$  の消費電力は、負荷の電圧により大きく変わります。このトランジスタの許容損失がこれに耐えられないと、やはり回路の破壊というリスクがあります。もし  $V_{dd} = 24V$  で  $10mA$  出力がマイナス  $5V$  に接続される時、最大  $28V \times 10mA = 0.28W$  の電力をここで吸収してあげなければなりません。使用するコンプライアンス電圧の仕様により、このトランジスタを選択してください。



(図10. OPアンプの入力と同相電圧)

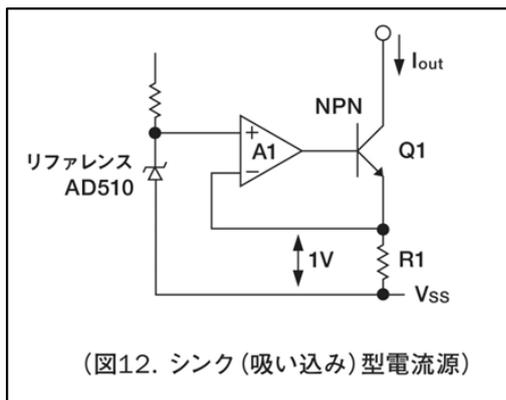
次にこの回路で使用するOPアンプについて考察します。OPアンプは、定電流回路のフィードバックをつかさどるキアデバイスですが、どんなアンプでも良いということはありません。まず入力ですが、ここには普通のアプリケーションではあまり使わない、高い同相電圧がかかります。具体的には電源  $V_{dd}$  - リファレンス電圧という電圧です。ここに使われるOPアンプにはこの条件でも動作する特性が求められます。PNP差動入力OPアンプではまず動作しません。リファレンス電圧が  $2.5V$  のように大きければ、NPN差動入力OPアンプでも動作するものがあります。リスクが低いのはレール to レール入力のアンプです。入力のバイアス電流は、そのまま  $R_1$  に流れる電流の誤差となるので小さいほうが良いのですが、出力とする電流との比率の問題ですから、一概に  $nA$  のオーダーでは使えないということではありません。アンプの出力はトランジスタのベースを駆動しますが、前に述べたように  $V_{BE}$  分を駆動しなければならないので、電源近くまで出力できるものが便利です。レール to レール出力型のOPアンプが便利ですが、この型のアンプは出力インピーダンスが一般のものより高く、不安定、発振器になるリスクはやや高くなります。場合によっては位相補正などが必要になります。

どうしてもレール to レール入力ではないアンプを使いたいという時は、図11のように工夫した回路が使えます。OPアンプの電源電圧を制御する電圧より上げて、見かけでの入力同相電圧を下げています。この回路の場合、通常のアンプを使用することができますが、電圧を下げただけコンプライアンス電圧が下がります。



(図11. OPアンプの入力同相電圧を下げる)

今までの回路ではソース電流源（吐き出し型電流源）の解説をしてきましたが、シンク電流源（吸い込み型電流源）は、トランジスタの形をPNPからNPNに変更するだけで作ることができます。ただし今度はOPアンプの入力同相電圧が、マイナス電源電圧近くになります。（図12）



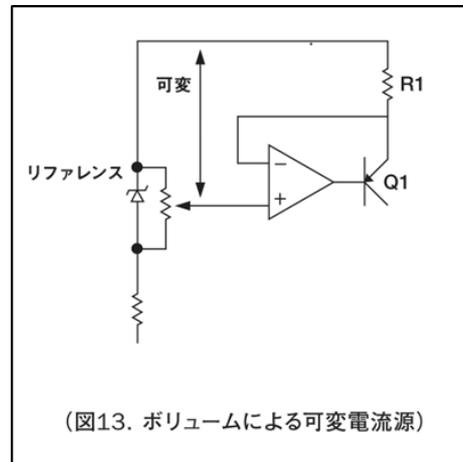
(図12. シンク(吸い込み)型電流源)

最後にこの回路の精度を決める重要な部品である抵抗値について、言及しなければなりません。電流発生回路の精度は、リファレンス電圧の精度と抵抗値の精度により決まります。ここで紹介した回路もR1の精度に大きく影響されます。ただし絶対精度というより、高安定度が重要な要素です。ある程度の電流が流れるので、この抵抗は時に発熱します。温度が上がっても値が動かなければ、高精度の電流発生が可能です。逆に許容損失の小さい抵抗を使うと、大電流時に問題を起こします。使用する電流値に合わせて最適な抵抗を選んでください。

§ 3 可変電圧源を使用したプログラマブル可変電流源

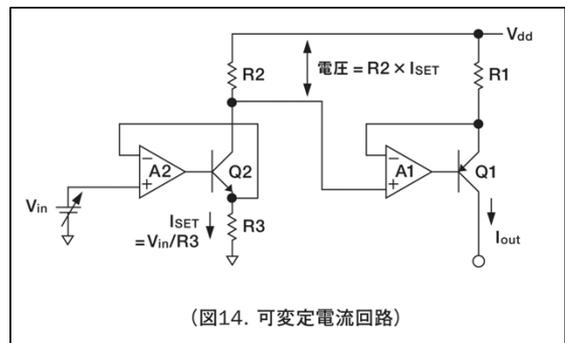
先のセクションでは、回路定数（R1の抵抗値やリファレンスの電圧値）で決めた一定電流を、負荷に関わらず発生する回路を解説しました。このセクションでは、この電流値をプログラマブルとし、可変電圧信号、例えばDAコンバータの出力などにより設定できる回路を紹介します。§2の回路では、電流値を変化させるには、リファレンス電圧を可変にするか、抵抗値を変更することで可能になります。例えば図13のようにリファレンス電圧を可変抵抗器（ボリューム）で変化させると、出力の電流を可変にすることができます。あまりスマートではありませんし、電子

ボリュームを使おうとするとVddに合わせて高電圧用のものが必要になります。



(図13. ボリュームによる可変電流源)

電流出力を可変電圧の入力で制御できれば、制御信号源としてDAコンバータなどが使えるので大変便利です。§2の回路のやや不便なところは、出力電流を決めるリファレンス電圧が、正側電源電圧から何Vという指定になっているところです。DAコンバータの出力は、一般的にグランド（0V）から何Vという形式ですので、Vddから何Vという形式に変換してやらなければなりません。図14に示す回路が、これを具体化したものです。先の回路はOPアンプ、抵抗、トランジスタは各一つでしたが、今回はこれに新たにOPアンプ（A2）、トランジスタ（Q2）と抵抗を数本追加して構成しています。

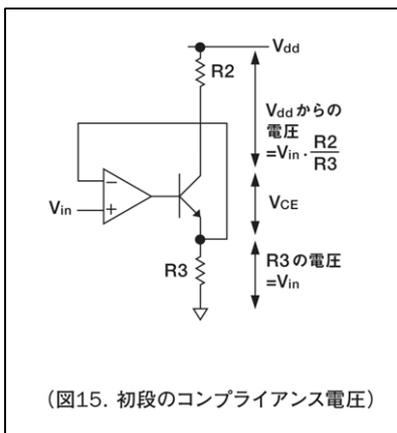


(図14. 可変定電流回路)

ではこの回路の動作について見てゆきましょう。A2はその出力点、すなわちQ2のエミッタの電圧がその入力電圧Vinと同じになるように帰還回路により制御します。その電圧はR3に加えられ、Vin/R3というエミッタ電流を生じさせます。このQ2のコレクタ電流はエミッタ電流とほぼ等しく（誤差はベース電流分）なります。Q2にダーリントン・トランジスタを用いれば、この誤差は無視できるほど小さくなります。従ってIC≒IEとなり、この電流は入力電圧Vinに比例することになります。ここでR2を見ると、流れる電流はQ2のコレクタ電流とA1のバイアス電流の合計になります。ここでも比率の問題になりますが、バイアス電流がコレクタ電流にくらべて十分小さければ、R2に流れる電流はほぼQ2のコレクタ電流で、そこで発生するR2両端の電圧は、この電流に比例することになります。R2は正電源に接続されているので、抵抗の下端の電圧は、電源電圧から何V（コレクタ電流×R2の電圧）という値になります。

ここまで見ると入力電圧  $V_{in}$  を、電源電圧から何  $V$  へという変換の過程がわかると思います。 $V_{in} \rightarrow R_3$  に流れる電流  $\rightarrow Q_2$  コレクタ電流  $\rightarrow R_2$  に流れる電流  $\rightarrow$  電源  $V_{dd}$  からの電圧、というルートで信号変換がされます。これで可変入力電圧  $V_{in}$  により  $A_1$  の入力の電圧を  $V_{dd}$  から何  $V$  と設定できるようになりました。ここまでくればあとは簡単です。§ 2 で使用した回路を用いて、 $R_2$  に発生する電圧で  $R_1$  に流れる電流を制御し、 $Q_1$  のコレクタ電流を出力とします。違いは  $R_2$  に発生する電圧が可変で、 $V_{in}$  に比例することです。 $V_{in}$  の信号に DA コンバータの出力を使用すれば、デジタル・コードで電流をプログラムできる、電流信号源とすることができます。

この回路は電流出力回路を 2 ブロック使用しているので、動作条件の理解はやや複雑です。 $A_1$  出力のコンプライアンス電圧は、§ 2 の回路の場合と同じですが、入力電圧が可変なので、この電圧 ( $R_2$  の電圧) が大きくなると電源からの電位が下がり、コンプライアンス電圧は低くなります。上のほうは  $Q_1$  のコレクタ/エミッタ電圧や  $A_1$  の入力同相電圧の限界、 $A_1$  の出力電圧の限界などに制限されることは同じです。 $A_2$  では  $V_{in} \div R_3$  が信号電流となりますが、この電圧値  $V_{in}$  の最大値が、 $R_2$  の下端の電圧を越えないように選ばなければなりません。(図 15 参照) マイナスソースへの接続は § 2 の場合と同じです。



この回路の出力電流精度を決める要素は、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  という 3 個の抵抗の精度です。 $R_3$  と  $R_2$  は、 $A_1$  への入力電圧の精度を決め、 $R_1$  は出力電流そのものの精度を決めます。また何度か出てきていますが、アンプの入力バイアス電流やトランジスタのベース電流は、流れる電流信号に加算されて誤差となります。バイアス電流が  $100 \text{ nA}$  でも、作ろうとしている電流が  $100 \mu\text{A}$  であれば、その誤差は、 $0.1\%$  になります。これが許容できるかどうかは、システムの要求仕様によります。例えば消費電流を下げようと  $A_2$  の段の出力電流を小さく抑えすぎると、バイアス電流による誤差の比率が大きくなります。低バイアス電流の OP アンプでも、同相電圧が電源近くになると、バイアス電流が変わるものがありますので、注意してください。

部品を選ぶ際にもう一つ重要な特性があります。OP アンプの中には、入力同相電圧が電源電圧近くになると出力の位相が反転して、逆方向の電圧を出力するものがあります。レール to レール入出力アンプではこのようなことはありませんが、一般的なアンプではこの動作がみられるものがあります。この位相反転が起らないアンプを選んでください。

後編では電流信号コピーを作り出す回路や専用のプログラマブル電流源 IC について紹介します。

【後編へ続く】