

# アナログ信号処理の幅を 広げる 電流出力回路の技術

著者：James Bryant (Analog Devices Inc.)

アナログ技術の習得コースの中でカレント・ミラーや Howland 電流ソース回路などを習うにも関わらず、驚くほど多くのエンジニアが高精度アナログ回路の出力を電圧で取り扱うことに執着しています。これはちょっと残念なことです。電流出力は、多くの場面でアドバンテージを持っています。例えば、ノイズの多い工業制御の環境で使われる電流ループ信号 (0mA~20mA、4mA~20mA) や、大きな電圧差のある信号伝送で、光や磁気による絶縁回路を使用しないでレベル・シフトをする場合です。ここではこうした回路の例と、その使い方について述べています。

可変ではない定電流信号を得ることは、非常に容易です。もっとも簡単な方法は、二つの等価なトランジスタを用いたカレント・ミラー回路です。この回路は、同一ウエハ上に同じプロセス、同じ外形 (ジオメトリ) で構成されたペアのトランジスタで、電気特性や温度特性が全く同じとみなせるものを図 1 のように接続したものです。ベース・エミッタ間の電圧 (VBE) は、両方のデバイスで同じになり、T2 のコレクタに流れる出力電流 ( $I_{OUT}$ ) は T1 のコレクタに流れる入力電流 ( $I_{IN}$ ) に等しくなります。

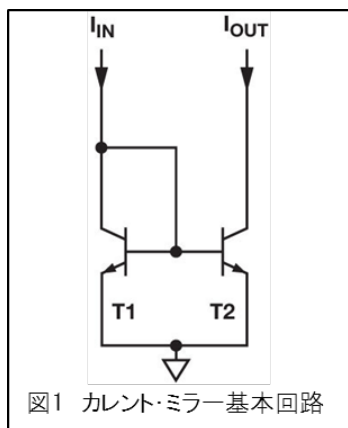


図1 カレント・ミラー基本回路

ここでは T1、T2 は全く等価で、熱結合しているとみなしています。また電流増幅率は非常に大きいと仮定し、ベース電流による誤差 (エミッタ電流とコレクタ電流の差) は無視しています。またコレクタ電圧の違いによるコレクタ電流の変化に影響を与える、アーリー電圧の効果も無視しています。

このカレント・ミラー回路は、PNP あるいは NPN どちらの素子でも作ることができます。T2 の部分を図 2 a のように同じトランジスタ  $n$  個を並列に増やしてやると、出力電流は入力  $n$  倍となります。もし図 2 b のように入力 T1 が  $m$  個、出力 T2 に

$n$  個のトランジスタを接続すると、その電流比は  $n/m$  となり、出力は入力電流  $\times (n/m)$  になります。

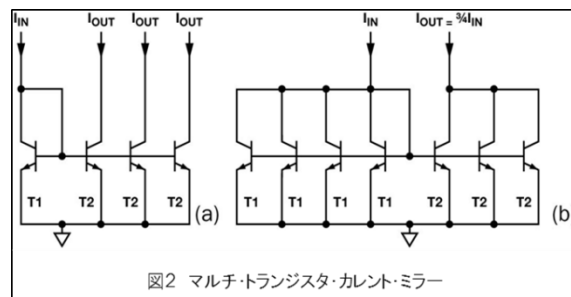


図2 マルチ・トランジスタ・カレント・ミラー

アーリー電圧による影響が深刻であれば、多少回路が複雑になりますが Wilson カレント・ミラー回路により改善することができます。これは図 3 に示すように、トランジスタ 3 個あるいは 4 個を用いた回路が考えられます。4 個を用いた回路のほうが高精度で、広いダイナミック・レンジを持ちます。

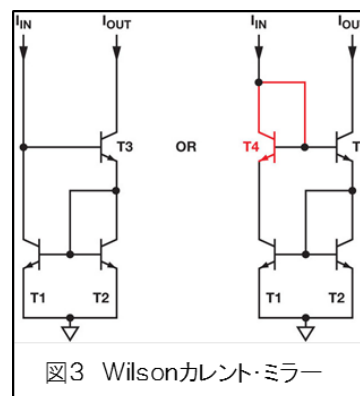


図3 Wilsonカレント・ミラー

トランス・コンダクタンス・アンプ (電圧入力/電流出力回路) が必要な場合は、単電源動作の OP アンプとバイポーラ・トランジスタ、あるいは FET (一般的にはベース電流にあたるゲート電流がほぼゼロなので MOSFET が使われる)、そしてトランス・インピーダンスを規定する高精度抵抗を組み合わせで構成します。図 4 をご覧ください。

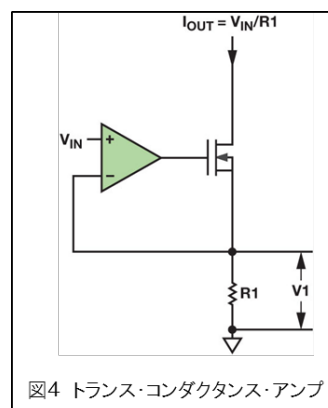


図4 トランス・コンダクタンス・アンプ

この回路はシンプルで低コストです。MOSFET のゲート電圧によりこのトランジスタの電流を設定しますが、 $R1$  にかかる電圧  $V1$  とアンプ入力  $VIN$  が等しくなるように回路は制御されます。

もしカレント・ミラーがモノリシック IC の中に必要な時、トランジスタによる回路構成が最適です。しかしながら個別部品による設計の場合は、高価なマッチング・トランジスタを使うより、図 5 のように OP アンプを使用した回路を用いるほうが安価です。マッチングのとれたトランジスタ素子は、作成が困難というより需要が少ないので高価になるからです。OP アンプによるカレント・ミラーは、トランス・コンダクタンス・アンプと抵抗により構成されています。

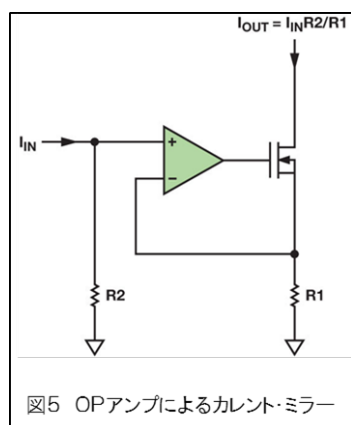


図5 OPアンプによるカレント・ミラー

カレント・ミラーは、相対的に高いインピーダンス（時に非線形な値）を持つため、電流の供給源にも高いインピーダンスが求められます。入力電流信号が低インピーダンスのシンク（吸い込み）機能を求められる場合、図 6 のように OP アンプが必要です。これらは低  $Z_{IN}$  のカレント・ミラーです。

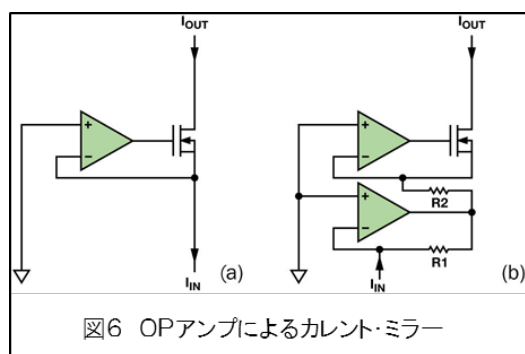


図6 OPアンプによるカレント・ミラー

基本的なカレント・ミラーや電流ソース回路では、入力と出力の電流の向き（極性）は同じです。一般的に出力素子のエミッタ／ソースは、グラウンドに直接あるいはセンス抵抗を通して接地され、出力電流はコレクタ／ドレインから負荷に接続され、そのもう一方は DC 電源に接続されます。この動作形態は、特に負荷がグラウンド接地になっている場合などに不便です。図 7 のように回路が、DC 電源側にエミッタ／ソースを持つ電流源から電流を作る場合は、問題ではありません。

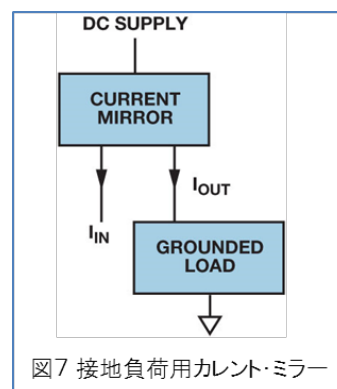


図7 接地負荷用カレント・ミラー

もし電流／電圧の入力がグラウンド基準であれば、レベル・シフトを使わなければなりません。多種の回路が考えられますが、図 8 の回路が多くの場合で適合します。このシンプルな回路は、グラウンド・レベルに対するカレント・ソースが、負荷に電流を供給する DC 電源側に付いたカレント・ミラーを駆動します。カレント・ミラー側に電流ゲインを持たせることができるので、駆動用の電流は負荷電流と同じ大きさである必要はありません。

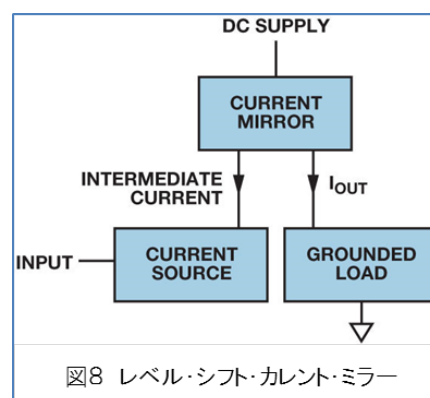


図8 レベル・シフト・カレント・ミラー

回路の出力は、単極性（ユニポーラ）すなわち一方ですが、双方向（バイポーラ）にすることも可能です。設計が容易で、よく知られているものとして、図 9 にあげる **Hawland Current Pump** があげられます。しかしこのシンプルな回路には、いくつかの問題点があります。高出力インピーダンスのためには高精度のマッチング抵抗が必要なこと、入力に  $R1$  という抵抗が必要でマッチング誤差を小さく抑えるためにインピーダンスをなるべく小さくしなければならないこと、電源電圧を出力電圧よりかなり高くしなければならない、OP アンプの CMRR にある程度の高性能が求められること等です。

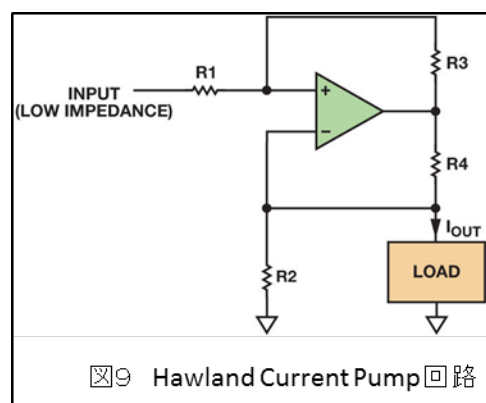


図9 Hawland Current Pump 回路

最近では高性能計装アンプ（I n - A m p）が安価で供給されているので、図10で示されているような双方向出力の電流源を、OPアンプ、計装アンプと電流センス抵抗を用いて構成することが容易です。この回路は、Hawland Pump に比べてよりシンプルで、計装アンプ内部の抵抗ネットワーク以外では、性能が抵抗ネットワークのマッチングに依存しなくなります。なおモノリシック構成の計装アンプ I C では、内部の抵抗ネットワークのマッチングは温度特性も含めて、もともと非常に高精度に保たれています。また出力電圧のレンジも電源から500mV ぐらいまで可能です。

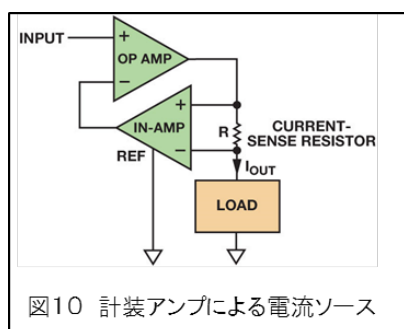


図10 計装アンプによる電流ソース

ここまで解説した回路は、高精度電流出力を持つアンプ回路です。これらはもちろん高精度の固定出力電流ソースですが、より簡易な2端子電流ソースを作ることにも可能です。例えばADR291という基準電圧源（リファレンス電源）は、約10μAの自己消費電流と20nA/°C typという温度特性を持っています。図11に示すように負荷抵抗を接続すると、3V～15Vの電源電圧範囲で消費電流は、 $(2.5/R + 0.01)$  mA となります。（Rの単位はkΩ）

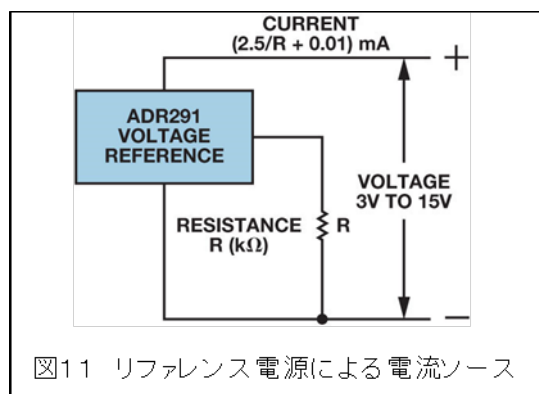


図11 リファレンス電源による電流ソース

高精度が要求ではなく、頑丈なユニポーラ電流源が欲しいということであれば、デプレッション・モードJFETと抵抗を組み合わせて電流源を作ることができます。図12に示す回路は、温度に対する安定性があまり良くなく、またデバイス毎にばらつきがあるので複数の性能をそろえるためには調整が必要ですが、簡単で安価という特徴があります。

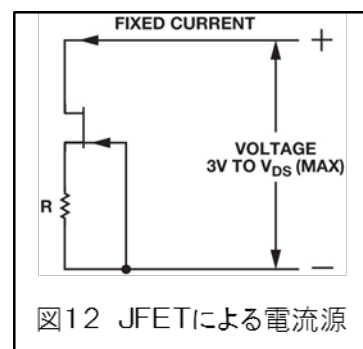


図12 JFETによる電流源

次にしめす例は、私（James Bryant）が手掛けたLEDのためのパワー回路です。友人のエンジニアたちは、照明を暗くするための可変電流源回路を見てトラブル多発になるだろう考えました。実際には、ジャンクで売っていたラップトップPC用の電源パック（Black-Blick）を安価に購入して実験をしました。図13が、LEDを定電流駆動するための改造点です。出力電流が小さい時は、固定出力電圧の電源として動作します。

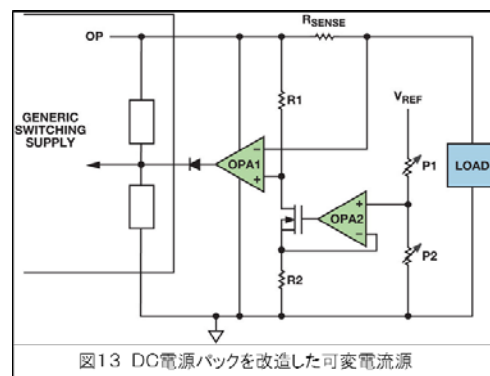


図13 DC電源パックを改造した可変電流源

可変電流を作るため、まずリファレンス電圧（電源パックからでも外からでもいい）をP1/P2でしめされるポテンショ・メータ（可変抵抗）に入力して可変電圧を作ります。アンプOPA2とMOSFETはR1を通して小さな電流を流し、これによる電圧降下を生じさせます。負荷電流は、センス抵抗にも流れます。もしセンス抵抗に流れる負荷電流による電圧降下がR1の電圧を超えると、アンプOPA1の出力は上昇し電源パックの制御電圧入力駆動します。そして電源パックの出力電流がリミットを越えないように、出力電圧に制限をかけます。

電流ソースの基本に関するこの資料は、詳細なアプリケーション・ノートではありません。いくつかの回路は、発熱に対する放熱処理や帰還アンプ回路の安定性、動作中の絶対最大定格、性能の計算などの様々な考察が必要です。より詳細については、電子回路の書籍、Analog Devices社のWebsiteあるいはWikipediaをご覧ください。

#### Reference

AN-1208 アプリケーション・ノート：Programmable Bidirectional Current Source Using the AD5292 Digital Potentiometer and the ADA4091-4 OP Amp. Analog Devices inc., 2013

CN-0099 Circuit Note：High-Precision, Low-Cost Current Source Using the AD8276 Difference Amplifier and the AD8603 OPamp.

CN-0151 Circuit note : Versatile High-Precision Programmable Current  
Source Using DACs, OP Amps, and MOSFET Transistors.

Murnane, Martin. AN-968 アプリケーション・ノート : Current  
Sources: Options and Circuits. Analog Devices Inc., 2008

著者

J a m e s   B r y a n t

1982年よりアナログ・デバイセズ社のアプリケーション・エンジニアリング、ヨーロッパ担当マネージャ。Leeds大学より物理学および哲学の学位。C.Eng., Eur.Eng., MIEEE,およびFBISメンバー。趣味、アマチュア無線 (HAM) コールサイン : G4CLE