

## データ・コンバータのドリフトに関する設計者の必須知識： 最悪劣化度の構成要素を理解して仕様の条件を減らす

アナログ-デジタル/デジタル-アナログ・コンバータの確度は温度変化によって劣化しますが、厳密にはどの程度まで劣化するのでしょうか。設計者にはよく分かっていることですが、12ビットのデバイスの場合、動作温度の上限近くでは確度が9ビット、または8ビットにまで大幅に低下します。しかしそれ以上正確な知識がないために、設計者の多くは安全策（つまりコストのかかる方法）に走り、仕様の条件を必要以上に多くしてしまいます。

けれども、コンバータの様々なドリフトの仕様から、コンバータの絶対的な最悪劣化度を判断するのはそれほど難しいことではありません。これらの仕様を個別に考慮して基本を調べることで、コンバータ・ドリフトという名の迷宮を解明し、ドリフト誤差の実際の最悪値を計算する方法を示すことが、多くのデバイスで容易になります。

D/Aコンバータ、または逐次比較型A/Dコンバータの確度ドリフトには、ゲイン、オフセット、非直線性(ノンリニアリティ)温度係数という3つの主要な成分があります。メーカーによってはゲイン・ドリフトとオフセット・ドリフトを区別せずに、両方を考慮に入れたフルスケール・ドリフトを仕様で定めています。多くのアプリケーションで重要になるもうひとつの仕様は、微分非直線性(DNL)です。これは、隣接したデジタル・コード間のアナログ・ステップが等しいこと(というよりは、等しくないこと)を反映しています。しかし、実際にはこのパラメータでは直線性(リニアリティ)誤差の分布のみを記述するため、その温度係数はコンバータの確度ドリフトの最悪値には寄与していません。

### ドリフトの構成要素の分析

D/Aコンバータの伝達関数を見ると、確度を劣化させるドリフトには様々な種類があることが分かります。

バイポーラD/Aコンバータ(正負両方向のアナログ電圧を生成する)では、オフセット・ドリフトが出力電圧すべてを同じ量だけ変化させ、伝達関数全体を理想値と平行に、理想値よりも上か下に移動させます(図1a)。コンバータのリファレンス電圧のドリフトが、この誤差の主な原因です — これは、負のフルスケール・ドリフトと呼ぶこともできます。すべての入力ビットが論理0つまりオフの場合にも発生するためです。ユニポーラ型ユニットでは、通常ではオフセット・

ドリフトが大幅に小さくなります。その第一の原因は出力オペアンプのオフセット電圧のドリフトであり、第二の原因は電流スイッチでの漏れ電流(leakage)です。

オフセット・ドリフトとは異なり、ゲイン・ドリフトは伝達関数を回転させます(図1b)。バイポーラ型ユニットでは負のフルスケール(全ビットがオフ)を中心に回転させ、ユニポーラ型ユニットではゼロ(これも全ビットオフ)を中心に回転させます。ゲイン・ドリフトは、ある角度に伝達関数を傾けて理想値に近づけることにより、各出力電圧に(同じ量ではなく)同じ比率で影響を与えます。全体として、このドリフトの約70%はコンバータのリファレンス電圧のドリフトによって発生します。

このことから、ゲインとオフセット・ドリフトが原因で発生する全体的な確度劣化の大きな原因のひとつがリファレンス・ドリフトであると明確に判断できます。図1cに示すように、バイポーラ型コンバータでは、リファレンスの正の温度係数により伝達関数がゼロを中心に回転します。リファレンスが原因のゲイン・ドリフトとバイポーラ型オフセット・ドリフトは常に方向が正反対であるため、確度ドリフトの最悪値は個別のドリフト仕様値の和の2分の1よりも低い可能性があります。ユニポーラ型コンバータではゲイン・ドリフトとオフセット・ドリフトを足し合わせる事が可能ですが、ユニポーラ型オフセット・ドリフトは通常ゲイン・ドリフトの大きさ(magnitude)よりも小さいため、それほど重要な要因にはなりません。

フルスケール・ドリフトは、全ビットがオンの場合の出力電圧の変化を記述します。ユニポーラ型コンバータの場合、これは単なるオフセット・ドリフトとゲイン・ドリフトの和にすぎません。これに対して、バイポーラ型コンバータでは、フルスケール・ドリフトはリファレンス・ドリフトの2分の1、リファレンスの関係しないゲイン・ドリフト、リファレンスの関係しないオフセット・ドリフトの和になります。

この資料は、Texas Instruments Incorporated (TI) が英文で記述した資料を、皆様のご理解の一助として頂くために日本テキサス・インスツルメンツ(日本TI)が英文から和文へ翻訳して作成したものです。資料によっては正規英語版資料の更新に対応していないものがあります。日本TIによる和文資料は、あくまでもTI正規英語版をご理解頂くための補助的参考資料としてご使用下さい。製品のご検討およびご採用にあたりましては必ず正規英語版の最新資料をご確認下さい。TIおよび日本TIは、正規英語版にて更新の情報を提供しているにもかかわらず、更新以前の情報に基づいて発生した問題や障害等につきましては如何なる責任も負いません。

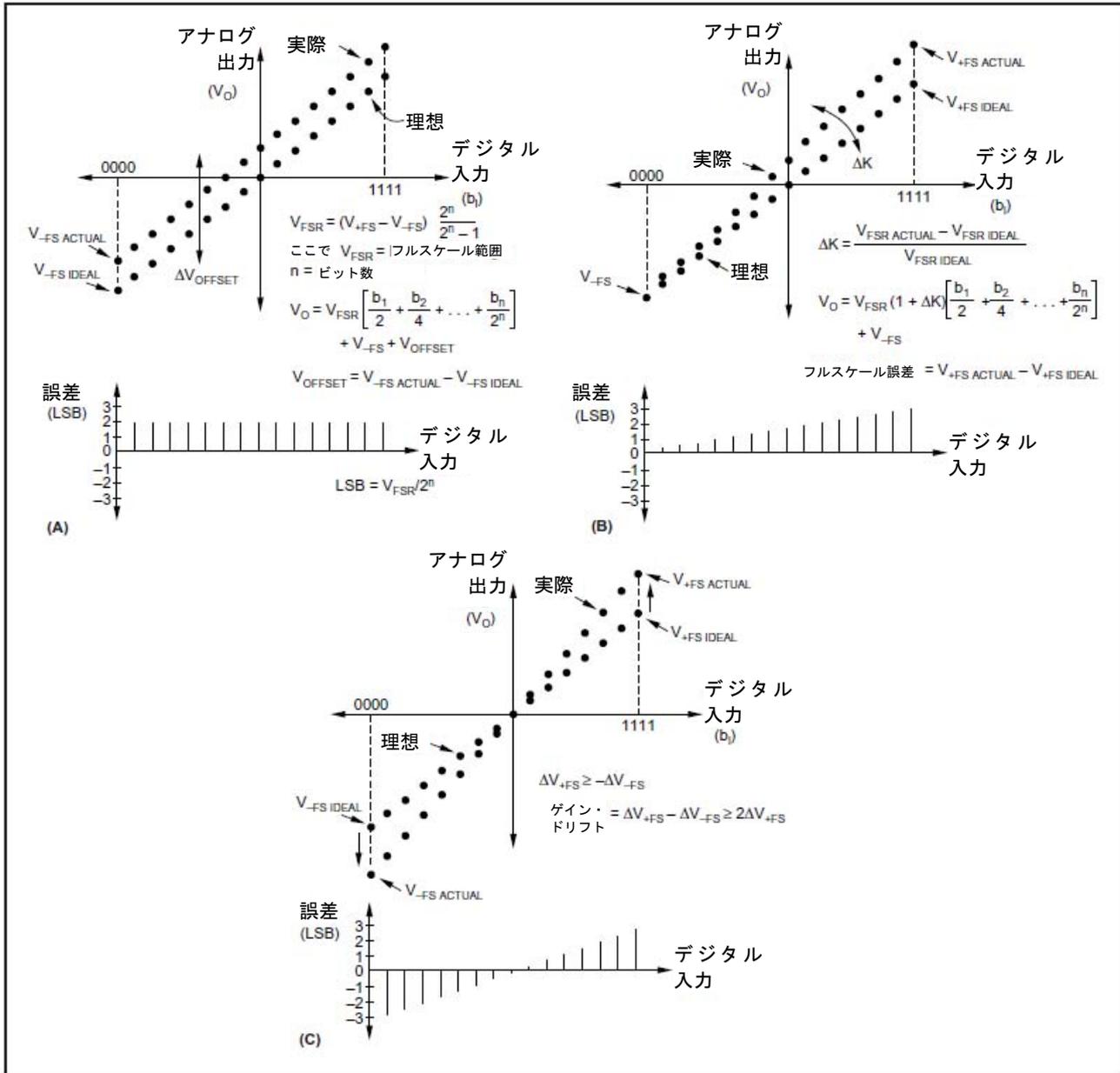


図 1 ドリフトの影響。バイポーラ型D/Aコンバータの場合、オフセット・ドリフトは (a) ユニットの伝達関数を上または下に移動させる。これに対してゲイン・ドリフトは (b) デジタル・ゼロの周囲を回転する。これら両方の誤差の主な原因はリファレンス・ドリフトであり、(c) これによりアナログ・ゼロ周囲での回転が発生する。

### トラッキング不足でリニアリティ・ドリフトが発生

最後に紹介するリニアリティ・ドリフトは、全ビットがオフ(負のフルスケール)の時の出力値と、全ビットがオン(正のフルスケール)の時の出力値の間に引かれた直線からの、アナログ出力電圧のずれを反映しています。この誤差は、コンバータの電流重み付け(スケール)抵抗の抵抗比の温度係数の変動や、ベース・エミッタ間電圧とそのトランジスタ電流スイッチのベータの比率ドリフトによって生じます。

温度によるリニアリティの変動は、各種パラメータの絶対的な値ではなく、各種パラメータが互いにどの程度密接にトラッキングしているかということに依存するため、現在のハイブリッド技術とモノリシック技術を使用して制御することはそれほど難しくありません。その結果、リニアリティ・ドリフトは通常、ゲイン・ドリフトまたはオフセット・ドリフトのどちらかよりも大幅に小さくなります。加えて、通常は、コンバータの完全動作温度範囲についての上限值内に収まることも保証されています。

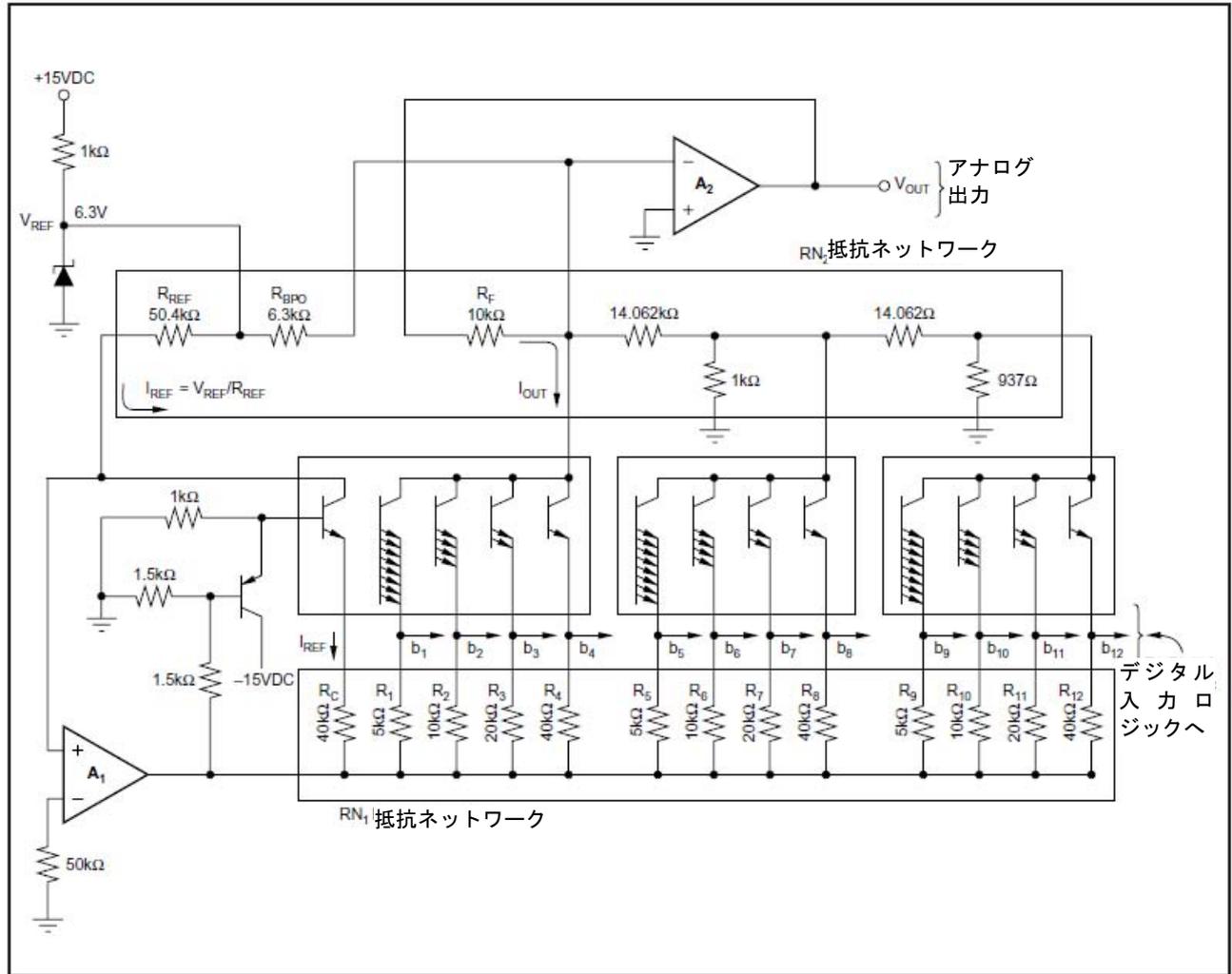


図2. 標準的なD/A回路。一般的に、D/Aコンバータの回路設計は抵抗ネットワークとトランジスタ電流スイッチでのトラッキング誤差を主として補償する。ほとんどの場合、主要な誤差原因はリファレンスを補償するツェナー・ダイオードのドリフトである。

アプリケーションによっては重要となるもうひとつの仕様は、バイポーラ・ゼロ・ドリフトです。これは、MSB(most significant bit)のみがオンであり、その他ビットがすべてオフである場合に、ミッドスケールでのバイポーラ型コンバータの出力電圧の変化を反映します。このゼロでのドリフト誤差は、リファレンス・ドリフトには少しも影響されませんが、コンバータのスケール抵抗と電流スイッチでのトラッキングが不足していることを主な原因として発生します。したがって、このドリフト誤差はゼロの周囲でのランダムな変動のように見え、その最悪値の大きさは、リファレンスの関係しないオフセット・ドリフト + リファレンスの関係しないゲイン・ドリフトの2分の1に等しくなります。

このドリフト誤差がどのように生成されるかをさらに深く理解するために、標準的な12ビットのバイポーラ型D/Aコンバータの簡略回路図(図2)を考えてみます。回路動作はそれほど複雑ではありません。リファレンス電流はリファレンス・トランジスタ $Q_C$ を通して流れ、抵抗 $R_C$ で電圧低下を発生させます。 $Q_C$ のベースは、他のすべてのトランジスタ電流スイッチのベースに接続されているため、同じ電位が抵抗 $R_1$ ~

$R_{12}$ でも生成されます。トランジスタの複数のエミッタにより、これらのバイナリ重み付けされた各電流ソースについて電流密度が均一になり、トランジスタの $V_{BE}$ と $\beta$ のマッチングとトラッキングが向上します。

## 打ち消される傾向にあるトラッキング誤差

ここで、温度変化または経年劣化により、ネットワーク $R_{N1}$ の各抵抗の値が1%ずつ増加すると仮定します。リファレンス電流が一定のため、これらの抵抗での電圧も1%ずつ増加し、出力電流と出力電圧は変わりません。もしそうでなく、ネットワーク $R_{N2}$ の全抵抗の値が1%ずつ増加したとすると、リファレンス電流は1%減少し、それによって $R_C$ での電圧も1%減り、出力電流も1%落ちます。ただし、帰還抵抗 $R_F$ の値が1%上がっているため、出力電圧( $I_{OUT}R_F$ に等しい)は変化しません。

コンバータでは、トランジスタの $V_{BE}$ と $\beta$ の変動を同じ方法で補償します。 $R_{N1}$ と $R_{N2}$ での個別の抵抗の温度係数は、 $\pm 50$  ppm/ $^{\circ}C$ にまで高くなることもあります。これらの

抵抗のトラッキングと、リニアリティとゲインでのドリフトに対するこれらの抵抗の寄与は、通常では1~2 ppm/°Cと小さくなっています。実際には、回路が補償できない誤差源は、ツェナー・リファレンス・ダイオードのドリフト以外では、アンプA1およびA2のオフセット電圧でのドリフトとオフセット電流のドリフトのみです。圧倒的に主要な誤差源はこのツェナーのドリフトですが、A1のオフセットはリファレンスの関係しないゲイン・ドリフトに寄与し、また、A2のオフセットはリファレンスの関係しないオフセット・ドリフトに寄与します。

## リファレンス・ドリフトの影響

コンバータ全体の確度に対するリファレンス電圧での変動の影響を概算するには、周囲温度の変化に対応する出力電圧の変動を判定する必要があります。一次近似として有効な方法が、他のすべてのドリフト誤差 - トラッキング誤差と不規則な変動が原因で発生するもの - がゼロであると仮定することです。

アンプA2の反転入力での加算ノードの式を書くと、次のようになります。

$$\frac{V_{OUT}}{R_F} + \frac{V_{REF}}{R_{BPO}} - \frac{V_{REF}}{R_{REF}} K \left[ \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{4} + \dots + \frac{b_n}{2^n} \right] = 0$$

ここで、Kはゲイン定数であり、 $b_1 \sim b_n$ はあるビットがオンかオフかに従って二種類のデジタル・ビット(1か0)を表します。この式は、任意のデジタル入力の出力電圧を判定するのに使用できます。

負のフルスケールで、 $B_1 = b_2 = \dots = b_n = 0$  とすると、出力電圧は次のようになります。

$$V_{OUT} = V_{-FS} = - \left[ \frac{R_F}{R_{BPO}} \right] V_{REF}$$

バイポーラ・ゼロ( $b_1 = 1, b_2 = b_3 = \dots = b_n = 0$ )では、理想的なコンバータの出力電圧は次のようにゼロに等しくなります。

$$V_{OUT} = V_{BPZ} = 0 = \left[ \frac{R_F}{2R_{REF}} K - \frac{R_F}{R_{BPO}} \right] V_{REF}$$

正のフルスケールで、 $b_1 = b_2 = \dots = b_n = 1$  とすると、出力電圧は次のようになります。

$$V_{OUT} = V_{+FS} = \left[ \frac{R_F}{R_{REF}} K - \frac{R_F}{R_{BPO}} \right] V_{REF}$$

$V_{BPZ}$  の式をゲイン定数Kについて解くと、次のようになります。

$$K = \frac{R_F}{R_{BPO}} \frac{2R_{REF}}{R_F} = \frac{2R_{REF}}{R_{BPO}}$$

Kに対するこの式を該当する式に置き換えると、温度によるリファレンスの変化に伴う出力電圧の変動が計算できます。負のフルスケールでは、このドリフトは次のようになります。

$$\frac{\Delta V_{-FS}}{\Delta T} = - \frac{R_F}{R_{BPO}} \frac{\Delta V_{REF}}{\Delta T}$$

ここで、 $\Delta T$  は周囲温度の変化を表します。前述のように、ミッドスケールでのドリフト誤差はリファレンスの変動ではなく、トラッキング誤差によって発生するため、次のようになります。

$$\frac{\Delta V_{BPZ}}{\Delta T} = 0$$

正のフルスケールでは、出力の変化は次のようになります。

$$\frac{\Delta V_{+FS}}{\Delta T} = \frac{R_F}{R_{BPO}} \frac{\Delta V_{REF}}{\Delta T}$$

したがって、負のフルスケール(またはバイポーラ・オフセットのドリフト)のリファレンスの変動による出力電圧のドリフトは、正のフルスケールの場合と振幅(magnitude)は等しくなりますが、向きは反対になります。これらの各ドリフト誤差の量は、リファレンス・ドリフトの半分に等しくなります。リファレンスの変動が原因のゲイン・ドリフトは次のように記述できます。

$$(\Delta V_{+FS} - \Delta V_{-FS}) / \Delta T$$

これは、リファレンス・ドリフトと等しくなります。注意する必要があるのは、ゲイン・ドリフトとリファレンス・ドリフトはppm/°C単位で指定されますが、フルスケール・ドリフトとオフセット・ドリフトは1°Cあたりのフルスケール範囲(FSR)のppmで表されることです。

## 最悪時の誤差値を計算する

これから上記の結果を使用して、図2に示す標準的なコンバータの、最悪時の総確度ドリフト誤差を求めてみます。デバイスの内部リファレンスの最大温度係数が $\pm 20 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ であると仮定すると、ゲイン・ドリフト $\pm 20 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ 、正のフルスケール・ドリフト $\pm 10 \text{ ppm FSR/}^\circ\text{C}$  と、バイポーラ・オフセット・ドリフト $\pm 10 \text{ ppm FSR/}^\circ\text{C}$  という結果になります。リファレンスの関係しない最大ゲイン・ドリフトは $\pm$

10ppm/°C、リファレンスの関係しないオフセット・ドリフトは±5ppm FSR/°Cになります。

最悪時の誤差は、正のフルスケールで発生します。これを計算するには、リファレンスに起因する誤差も、リファレンスには関係なく不規則な変動が原因の誤差も両方考慮に入れる必要があります。したがって、最悪時のフルスケール確度ドリフトに対して寄与する要素は、リファレンスに起因する正のフルスケールのドリフト、オフセット・ドリフトのランダム誤差、そしてリファレンスの関係しないゲイン・ドリフトのみです。これらを合計すると、最悪時のフルスケール確度ドリフト±25ppm FSR/°C、つまり±0.0025% FSR/°Cが得られます。

ここで例に挙げるコンバータは、±1/2のLSBつまり±0.01%のリアリティ誤差を持つ12ビットのデバイスです。また、動作温度範囲が0~70°Cであるため、室温(25°C)からの最大逸脱値は45°Cになります。ゲイン誤差とオフセット誤差が室温ではゼロに調整されることを前提にすると、総確度

誤差はリアリティ誤差とフルスケール確度誤差の和として次のように計算できます。

$$\begin{aligned} \text{総確度誤差の最悪値} &= (\text{リアリティ誤差}) \\ &+ (\text{フルスケール確度誤差}) \\ &= (\pm 0.01\%) + (\pm 0.0025\%/^{\circ}\text{C})(45^{\circ}\text{C}) \\ &= \pm 0.12\% \end{aligned}$$

つまり、精度は約9ビットになります。多くの12ビットD/Aコンバータの確度は通常この倍になりますが、ほとんどのデバイスの提供する確度は10ビットです。

このアプリケーション・ノートで分析しているドリフトの関係と原因すべては、逐次比較(SAR)型A/Dコンバータにも当てはまります。図3に示すように、SAR型A/Dコンバータでは、D/Aコンバータを回路ブロックのひとつとして使用します。前述の等式の $V_{OUT}$ を $V_{IN}$ に、 $R_F$ を $R_{IN}$ に置き換えるだけでSAR型A/Dコンバータ用になります。またA/Dコンバータでは、オペアンプのドリフトではなくコンパレータのドリフトが、デバイスのユニポーラ・オフセット・ドリフトに寄与します。

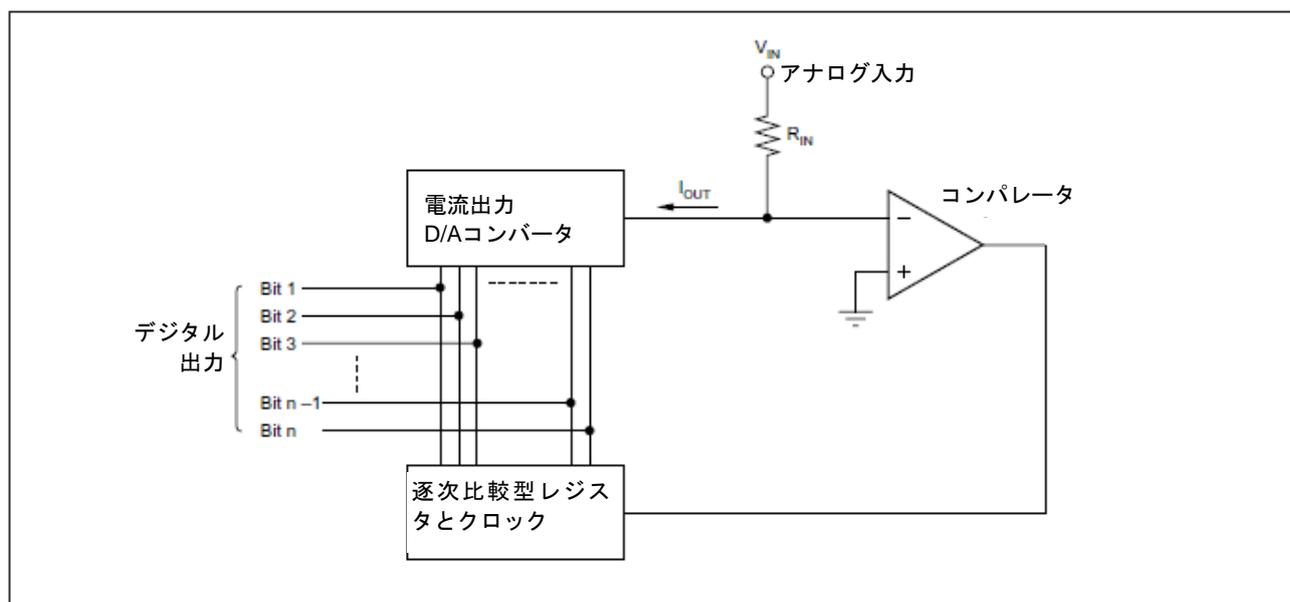


図3 A/Dコンバータ。D/Aコンバータのドリフト誤差に当てはまる関係すべては、逐次比較(SAR)型コンバータにも適用できる。図に示すように、このコンポーネントには、電流出力D/Aコンバータが回路ブロックのひとつとして組み込まれているためである。

# ご注意

日本テキサス・インスツルメンツ株式会社(以下TIJといたします)及びTexas Instruments Incorporated(TIJの親会社、以下TIJないしTexas Instruments Incorporatedを総称してTIJといたします)は、その製品及びサービスを任意に修正し、改善、改良、その他の変更をし、もしくは製品の製造中止またはサービスの提供を中止する権利を留保します。従いまして、お客様は、発注される前に、関連する最新の情報を取得して頂き、その情報が現在有効かつ完全なものであるかどうかをご確認下さい。全ての製品は、お客様とTIJとの間に取引契約が締結されている場合は、当該契約条件に基づき、また当該取引契約が締結されていない場合は、ご注文の受諾の際に提示されるTIJの標準販売契約約款に従って販売されます。

TIJは、そのハードウェア製品が、TIの標準保証条件に従い販売時の仕様に対応した性能を有していること、またはお客様とTIJとの間で合意された保証条件に従い合意された仕様に対応した性能を有していることを保証します。検査およびその他の品質管理技法は、TIが当該保証を支援するのに必要とみなす範囲で行なわれております。各デバイスの全てのパラメータに関する固有の検査は、政府がそれ等の実行を義務づけている場合を除き、必ずしも行なわれておりません。

TIJは、製品のアプリケーションに関する支援もしくはお客様の製品の設計について責任を負うことはありません。TI製部品を使用しているお客様の製品及びそのアプリケーションについての責任はお客様にあります。TI製部品を使用したお客様の製品及びアプリケーションについて想定される危険を最小のものとするため、適切な設計上および操作上の安全対策は、必ずお客様にてお取り下さい。

TIJは、TIの製品もしくはサービスが使用されている組み合わせ、機械装置、もしくは方法に関連しているTIの特許権、著作権、回路配置利用権、その他のTIの知的財産権に基づいて何らかのライセンスを許諾するということは明示的にも黙示的にも保証も表明もしていません。TIが第三者の製品もしくはサービスについて情報を提供することは、TIが当該製品もしくはサービスを使用することについてライセンスを与えるとか、保証もしくは承認をすることを意味しません。そのような情報を使用するには第三者の特許その他の知的財産権に基づき当該第三者からライセンスを得なければならない場合もあり、またTIの特許その他の知的財産権に基づきTIからライセンスを得て頂かなければならない場合もあります。

TIのデータ・ブックもしくはデータ・シートの中にある情報を複製することは、その情報に一切の変更を加えること無く、かつその情報と結び付けられた全ての保証、条件、制限及び通知と共に複製がなされる限りにおいて許されるものとします。当該情報に変更を加えて複製することは不正で誤認を生じさせる行為です。TIは、そのような変更された情報や複製については何の義務も責任も負いません。

TIの製品もしくはサービスについてTIJにより示された数値、特性、条件その他のパラメータと異なる、あるいは、それを超えてなされた説明で当該TI製品もしくはサービスを再販売することは、当該TI製品もしくはサービスに対する全ての明示的保証、及び何らかの黙示的保証を無効にし、かつ不正で誤認を生じさせる行為です。TIJは、そのような説明については何の義務も責任もありません。

TIJは、TIの製品が、安全でないことが致命的となる用途ないしアプリケーション(例えば、生命維持装置のように、TI製品に不良があった場合に、その不良により相当な確率で死傷等の重篤な事故が発生するようなもの)に使用されることを認めておりません。但し、お客様とTIの双方の権限有る役員が書面でそのような使用について明確に合意した場合は除きます。たとえTIJがアプリケーションに関連した情報やサポートを提供したとしても、お客様は、そのようなアプリケーションの安全面及び規制面から見た諸問題を解決するために必要とされる専門的知識及び技術を持ち、かつ、お客様の製品について、またTI製品をそのような安全でないことが致命的となる用途に使用することについて、お客様が全ての法的責任、規制を遵守する責任、及び安全に関する要求事項を満足させる責任を負っていることを認め、かつそのことに同意します。さらに、もし万一、TIの製品がそのような安全でないことが致命的となる用途に使用されたことによって損害が発生し、TIないしその代表者がその損害を賠償した場合は、お客様がTIないしその代表者にその全額の補償をするものとします。

TI製品は、軍事的用途もしくは宇宙航空アプリケーションないし軍事的環境、航空宇宙環境にて使用されるようには設計もされていませんし、使用されることを意図されていません。但し、当該TI製品が、軍需対応グレード品、若しくは「強化プラスチック」製品としてTIが特別に指定した製品である場合は除きます。TIが軍需対応グレード品として指定した製品のみが軍需品の仕様書に合致いたします。お客様は、TIが軍需対応グレード品として指定していない製品を、軍事的用途もしくは軍事的環境下で使用することは、もっぱらお客様の危険負担においてなされるということ、及び、お客様がもっぱら責任をもって、そのような使用に関して必要とされる全ての法的要求事項及び規制上の要求事項を満足させなければならないことを認め、かつ同意します。

TI製品は、自動車用アプリケーションないし自動車の環境において使用されるようには設計されていませんし、また使用されることを意図されていません。但し、TIがISO/TS 16949の要求事項を満たしていると特別に指定したTI製品は除きます。お客様は、お客様が当該TI指定品以外のTI製品を自動車用アプリケーションに使用しても、TIは当該要求事項を満たしていなかったことについて、いかなる責任も負わないことを認め、かつ同意します。

Copyright © 2009, Texas Instruments Incorporated  
日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

## 弊社半導体製品の取り扱い・保管について

半導体製品は、取り扱い、保管・輸送環境、基板実装条件によっては、お客様での実装前後に破壊/劣化、または故障を起こすことがあります。

弊社半導体製品のお取り扱い、ご使用にあたっては下記の点を遵守して下さい。

### 1. 静電気

素手で半導体製品単体を触らないこと。どうしても触る必要がある場合は、リストストラップ等で人体からアースをとり、導電性手袋等をして取り扱うこと。

弊社出荷梱包単位(外装から取り出された内装及び個装)又は製品単品で取り扱いを行う場合は、接地された導電性のテーブル上で(導電性マットにアースをとったもの等)、アースをした作業者が行うこと。また、コンテナ等も、導電性のものを使うこと。

マウンタやはんだ付け設備等、半導体の実装に関わる全ての装置類は、静電気の帯電を防止する措置を施すこと。前記のリストストラップ・導電性手袋・テーブル表面及び実装装置類の接地等の静電気帯電防止措置は、常に管理されその機能が確認されていること。

### 2. 温・湿度環境

温度: 0~40、相対湿度: 40~85%で保管・輸送及び取り扱いを行うこと。(但し、結露しないこと。)

直射日光があたる状態で保管・輸送しないこと。

### 3. 防湿梱包

防湿梱包品は、開封後は個別推奨保管環境及び期間に従い基板実装すること。

### 4. 機械的衝撃

梱包品(外装、内装、個装)及び製品単品を落下させたり、衝撃を与えないこと。

### 5. 熱衝撃

はんだ付け時は、最低限260以上の高温状態に、10秒以上さらさないこと。(個別推奨条件がある時はそれに従うこと。)

### 6. 汚染

はんだ付け性を損なう、又はアルミ配線腐食の原因となるような汚染物質(硫黄、塩素等ハロゲン)のある環境で保管・輸送しないこと。はんだ付け後は十分にフラックスの洗浄を行うこと。(不純物含有率が一定以下に保証された無洗浄タイプのフラックスは除く。)

以上