

**Circuits
from the Lab™**
Reference Circuits
実用回路集

Circuits from the Lab™ 実用回路は今日のアナログ・ミックスド・シグナル、RF 回路の設計上の課題の解決に役立つ迅速で容易なシステム統合を行うために作製、テストされました。詳しい情報と支援については <http://www.analog.com/jp/CN0214> をご覧ください。

接続/参考にしたデバイス

ADuC7060/ ADuC7061	ARM7 ベースのマイクロコントローラ、デュアル 24 ビット ΣΔ ADC 付き
ADP3333	2.5 V、低ドロップアウトのリニア・レギュレータ
ADP120	2.5 V、低ドロップアウトのリニア・レギュレータ
OP193	高精度、低消費電力のオペアンプ

**高精度アナログ・マイクロコントローラ ADuC7060/ADuC7061 を使用した、
冷接点補償機能を搭載した USB ベースの熱電対温度モニタ**

評価と設計支援

回路評価用ボード

ADuC7061 MiniKit (EVAL-ADuC7061MKZ)

設計と統合ファイル

[回路](#)、[レイアウト・ファイル](#)、[BOM](#)

回路機能とその利点

これは、高精度の熱電対温度監視アプリケーションにおいて高精度アナログ・マイクロコントローラ ADuC7060/ADuC7061 を使用した回路です。ADuC7060/ADuC7061 は、ARM7 コア、32 kB フラッシュ、4 kB SRAM、さまざまなデジタル・ペリフェラル

(UART、タイマ、SPI、I²C インターフェースなど)に加えて、デュアル 24 ビット ΣΔ ADC、デュアル・プログラマブル電流源、14 ビット DAC、1.2 V 内部リファレンスを集積しています。

この回路では、ADuC7060/ADuC7061 を熱電対と 100 Ω の Pt RTD (Pt Resistance Temperature Detector: 白金測温抵抗体) に接続します。RTD によって冷接点補償を行います。

ソースコードでは、4 Hz の ADC サンプリング・レートを選択しています。ADC の入力プログラマブル・ゲイン・アンプ (PGA) のゲインを 32 に設定すると、ADuC7060/ADuC7061 のノイズフリー・コード分解能は 18 ビットを上回ります。

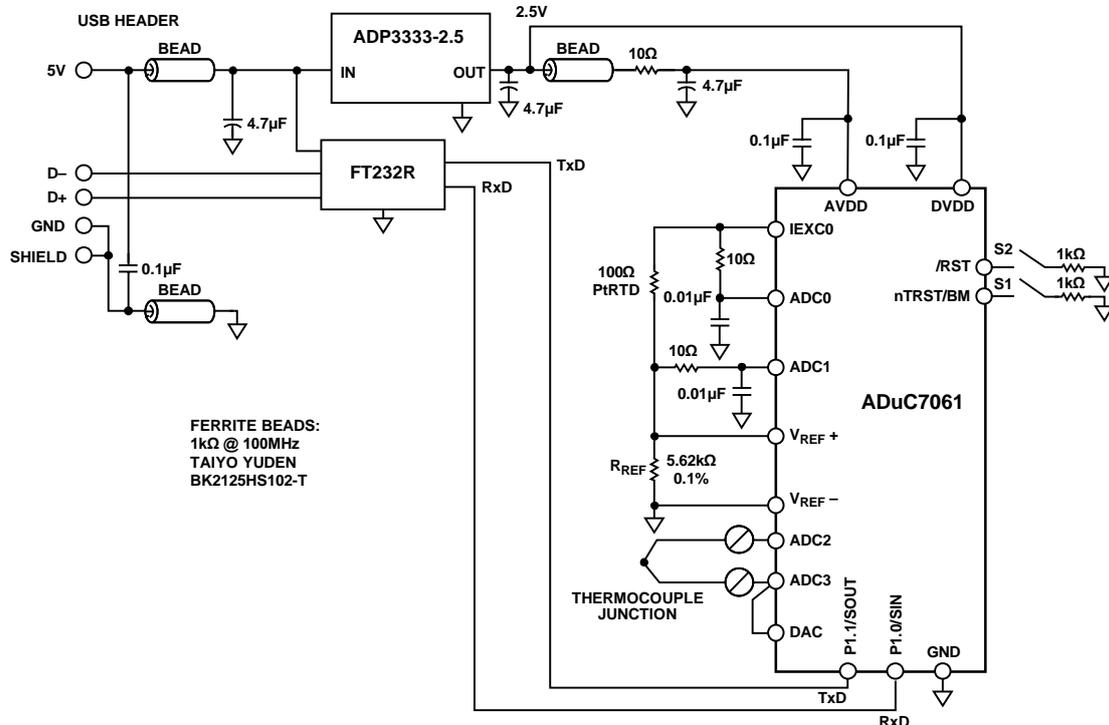


図 1. 熱電対インターフェースを備えた温度モニタ・コントローラとしての ADuC7060/ADuC7061 (簡略回路図: すべての接続が図示されているわけではありません)

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。※日本語資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。
©2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. B

このアプリケーションでは、ADuC7060/ADuC7061 の以下の特長を利用します。

- プログラマブル・ゲイン・アンプ (PGA) を搭載したプライマリ 24 ビット $\Sigma\Delta$ ADC : このアプリケーション用のソフトウェアで PGA のゲインを 32 に設定します。プライマリ ADC は、熱電対電圧と RTD 電圧を切り替えながら連続的にサンプリングしました。
- RTD の制御電流を設定するためのプログラマブルな励起電流源 : デュアル電流源は、0 μA から 2 mA の範囲で 200 μA のステップにより設定できます。この例では、RTD の自己発熱による誤差を最小限に抑えるために 200 μA の設定値を使用しました。
- ADuC7060/ADuC7061 に含まれる ADC 用の 1.2 V 内蔵リファレンス : 熱電対電圧を測定するため、高精度の内蔵電圧リファレンスを使用しました。
- ADuC7060/ADuC7061 に含まれる ADC 用の外付け電圧リファレンス : RTD 抵抗を測定するため、外部 $V_{\text{REF+}}$ ピンと $V_{\text{REF-}}$ ピンの間に外付けリファレンス抵抗 (R_{REF}) を接続するレシオメトリック・セットアップを使用しました。
- 14 ビット DAC : この DAC を使用し、熱電対の同相電圧をグラウンドより 850 mV 高く設定しました。
- ARM7TDMI[®] コア : 32 kB フラッシュと SRAM メモリを内蔵した強力な 16/32 ビット ARM7 コアでユーザ・コードを実行し、ADC の設定および制御、RTD からの ADC 変換処理、UART/USB インターフェースによる通信を制御します。
- UART : UART をホスト PC への通信インターフェースとして使用しました。
- デバイスをフラッシュ・ブート・モードに設定する 2 つの外部スイッチ : S1 をロー・レベルに保持し、S2 をトグルすることによって、ADuC7060/ADuC7061 は、通常のユーザ・モードではなくブート・モードに入ります。ブート・モードでは、UART インターフェースを介して内部フラッシュを再プログラムすることができます。

熱電対と RTD は、いずれも非常に小さな信号を生成します。したがって、信号を増幅するために PGA が必要です。ADuC7060/ADuC7061 上の補助 ADC には PGA がないため、どちらもプライマリ ADC に接続し、ソフトウェアで熱電対と RTD 間の切替えを行いました。

このアプリケーションで使用した熱電対は、 $-200\sim+350^{\circ}\text{C}$ の温度範囲を持つタイプ T (銅コンスタンタン) です。その感度は約 $40\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ であるため、ゲイン 32 の PGA を備えたバイポーラ・モードの ADC は、熱電対の全温度範囲をカバーできます。

RTD は冷接点補償に使用しました。この回路で使用した RTD は、0805 サイズの表面実装パッケージを採用した 100 Ω のプラチナ RTD (モデル番号 : Enercorp PCS 1.1503.1) です。この RTD の温度変動は $0.385\text{ }^{\circ}\text{C}$ です。

なお、基準抵抗 (R_{REF}) は高精度な 5.62 k Ω ($\pm 0.1\%$) にしてください。

ADuC7060/ADuC7061 への USB インターフェースは、USB 信号を UART に直接変換する UART/USB トランシーバ FT232R によって実装します。

図 1 に示すデカップリングに加えて、USB ケーブル自体にも EMI/RFI 保護を強化するフェライト・ビーズが必要です。回路で使用したフェライト・ビーズは、100 MHz で 1000 Ω のインピーダンスを持つ太陽誘電製の #BK2125HS102-T でした。

この回路は、広い面積のグラウンド・プレーンを持つ多層 PC 基板を使用する必要があります。適正な性能を実現するには正しいレイアウト、グラウンディング、デカップリング技術が必要です (MT-031 チュートリアル「[Grounding Data Converters and Solving the Mystery of "AGND" and "DGND"](#)」と MT-101 チュートリアル「[Decoupling Techniques](#)」、ADuC7060/ADuC7061 評価用ボードのレイアウトを参照)。

図 2 に EVAL-ADUC7061MKZ PC ボードを示します。



図 2. この回路に使用した EVAL-ADUC7061MKZ ボード

コードの説明

回路のテストに用いたソースコードは、www.analog.com/CN0214-SourceCode から zip ファイルでダウンロードできます。

UART の設定は、ボーレート=9600、データビット=8、パリティ無し、フロー制御無しです。回路を PC に直接接続した場合、図 3 に示すように、HyperTerminal などの通信ポート表示アプリケーションを使用して、プログラムから UART に送信された結果を表示することができます。

温度を読み取るには、熱電対と RTD の温度を測定する必要があります。RTD 温度は、ルックアップ・テーブルを介して等価な熱電対電圧に変換されます。これら 2 つの電圧を加算することによって、熱電対の絶対値が得られます。

まず、熱電対 (V_1) の 2 本のワイヤ間で電圧を測定しました。RTD 電圧を測定し、それをルックアップ・テーブルによって温度に変換します。その後、この温度を等価な熱電対電圧 (V_2) に変換します。さらに、 V_1 と V_2 を加算して全体の熱電対電圧を計算し、最終的な温度計測値に変換します。

最初、熱電対での電圧を $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ とする直線的な簡単な仮定に基づいて変換を行いました。図 4 から、 0°C を中心とする狭い範囲で許容可能な誤差しか生じないことがわかります。熱電対温度

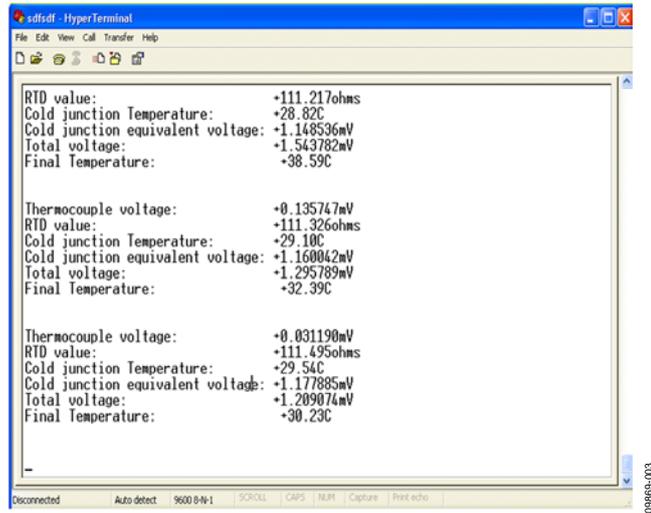


図 3. 通信ポート表示アプリケーション HyperTerminal の出力

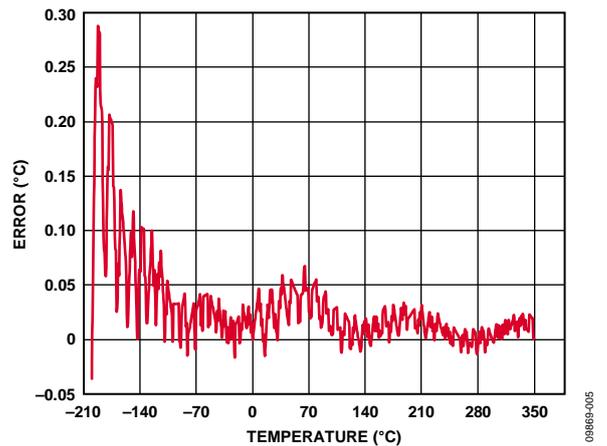


図 5. 52 個のキャリブレーション・ポイントと理想的な測定による区分的線形近似を使用したときの誤差

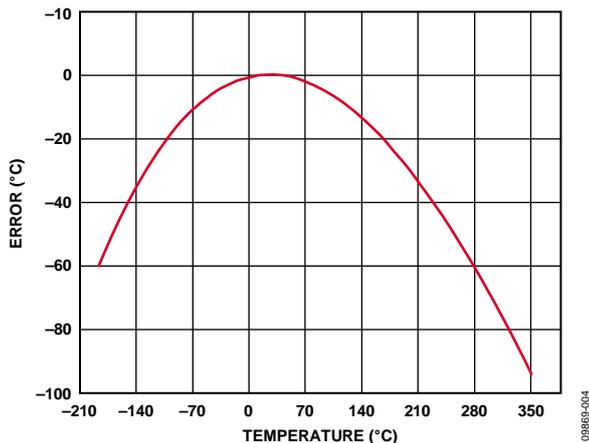


図 4. 簡単な線形近似を使用したときの誤差

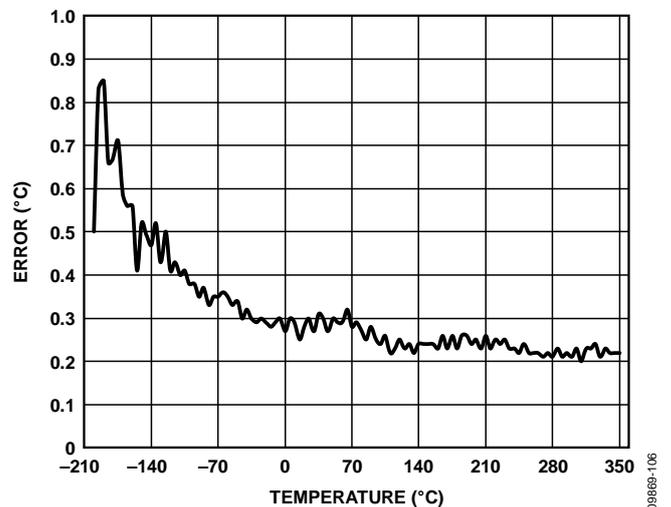


図 6. ADuC7060/ADuC7061 の ADC0 によって測定した 52 個のキャリブレーション・ポイントによる区分線形近似を使用したときの誤差

を計算するもっとよい方法としては、正の温度に 6 次の多項式を使用し、負の温度に 7 次の多項式を使用します。これには数値演算が必要になり、計算時間とコードサイズが増大します。納得のいく妥協策として、一定数の電圧について、それぞれの温度を計算します。これらの温度値を配列に格納し、隣接するポイント間の線形補間によって中間の値を計算します。図 5 から、この方法を使用すれば誤差が大幅に減少することがわかります。図 5 は、理想的な熱電対電圧を使用した場合のアルゴリズム誤差を示しています。図 6 は、ADuC7060 上の ADC0 を使用して熱電対の全動作範囲にわたって 52 個の熱電対電圧を測定したときの誤差を示しています。全体としてワーストケースでの誤差は $<1^\circ\text{C}$ です。

RTD 温度は、ルックアップ・テーブルを使用して計算し、熱電対の場合と同じ方法で RTD 用に実装します。なお、RTD には、その温度を抵抗の関数として記述する別の多項式があります。

RTD の性能を直線化および最大化する方法の詳細については、アプリケーション・ノート AN-0970「[RTD Interfacing and Linearization Using an ADuC706x Microcontroller](#)」を参照してください。

バリエーション回路

ADP3333-2.5 レギュレータの代わりに ADP120-2.5 を使用することができます。後者は、広い動作温度範囲（ $-40\sim+125^{\circ}\text{C}$ ）を持ち、消費電力が少ない（Typ. $20\ \mu\text{A}$ に対して $70\ \mu\text{A}$ ）ですが、最大の入力電圧範囲が低下（ $5.5\ \text{V}$ に対して $12\ \text{V}$ ）します。また、マイクロコントローラに、より多くの汎用 I/O ピンが必要な場合、48 ピン LFCSP または 48 ピン LQFP パッケージの ADuC7060 を使用することもできます。なお、ADuC7060/ADuC7061 は、標準の JTAG インターフェースを介してプログラム/デバッグすることができます。

RTD 測定のリファレンス源として外付け基準抵抗を使用するとき、ユニティ・ゲイン・モードのオペアンプを使用して、入力を $V_{\text{REF+}}$ ピンにバッファすることを推奨します。これによって、 $V_{\text{REF+}}$ ピンへの入力リーク電流が測定精度に悪影響を与えることを防ぎます。図 8 では、この目的でユニティ・ゲインのオペアンプ OPI93 を使用しました。図 1 の概略図ではこの入力はバッファされていませんが、最高の結果を得るには、バッファが必要です。

標準的な UART から RS-232 インターフェースする場合、FT232R トランシーバの代わりに $3\ \text{V}$ 電源で動作する ADM3202 などのデバイスを使用することができます。さらに広い温度範囲の場合、タイプ J など、別の熱電対を使用することができます。冷接点補償誤差を最小限に抑えるには、サーミスタを、PC ボードではなく、実際の冷接点に接触させて配置します。

冷接点温度の測定に RTD と外付け基準抵抗を使用する代わりに、外付けデジタル温度センサーを使用することもできます。たとえば、 $I^2\text{C}$ インターフェースを介して ADT7410 を ADuC7060/ADuC7061 に接続することができます。

冷接点補償の詳細については、[Sensor Signal Conditioning, Analog Devices, Chapter 7, "Temperature Sensors"](#) をご覧ください。

この回路と USB コネクタとの間にアイソレーションが必要な場合、ADuM3160/ADuM4160 アイソレーション・デバイスを追加してください。

回路評価とテスト

回路のテストと評価を行うため、熱電対測定と RTD 測定の評価をそれぞれ行いました。

熱電対測定テスト

図 6 に基本的なテスト・セットアップを示します。なお、熱電対は J2-8 と J2-9 に接続し、J2-5 は J2-8 に接続する必要があります。EVAL-ADUC7061MKZ ボードの電力は PC の USB 接続から供給します。

回路の性能を評価するために、2つの方法を用いました。1つ目は、回路のテストに使用した熱電対をボードに接続し、氷の温度を測定し、次に沸騰水の温度を測定しました。

図 4 と図 6 に示したような、誤差を完全に評価するために Wavetek 4808 多機能校正器を用いました。この方法では、図 7 に示すように、熱電対の代わりに電圧源として校正器を置きました。この校正器を用いて、T タイプ熱電対の負と正の範囲に対応する $-200\sim+350^{\circ}\text{C}$ の範囲内の 52 個のポイントに等価な熱電対電圧を設定し、T タイプ熱電対の全範囲を評価しました。（参照：[ITS-90 Table for type T thermocouple](#)）。

ルックアップ・テーブル計算の正確性を評価するため、 1°C 間隔で $-200\sim+350^{\circ}\text{C}$ の範囲の温度に相当する、551 個の電圧値を温度計算関数に代入しました。図 4 と図 5 に示したように、線形法と区分線形近似法について誤差を計算しました。

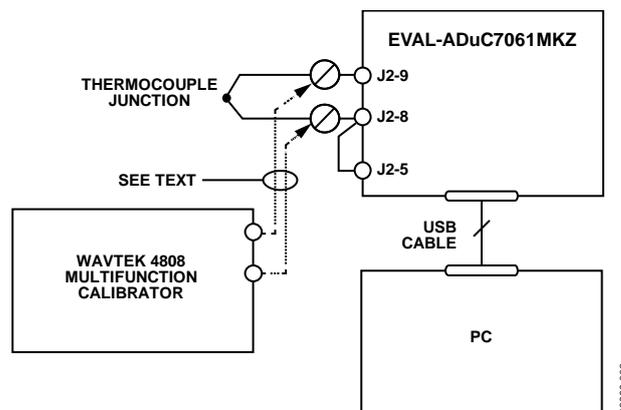


図 7. 熱電対の全出力電圧範囲での回路の校正とテストに使用した構成

RTD 測定テスト

RTD 回路と直線化処理のプログラムを評価するため、ボード上の RTD の代わりに正確で調整可能な抵抗源を配置しました。使用した機器は 1433-Z ディケード抵抗です。RTD 値は $90\sim140\ \Omega$ であり、これは $-25\sim114^{\circ}\text{C}$ の RTD 温度範囲を表しています。

図 8 にこの評価のための回路構成を示します。

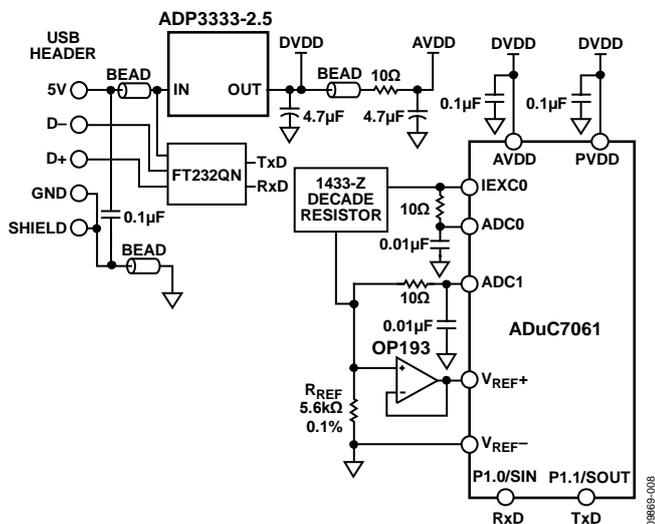


図 8. -25~114°C の RTD 出力電圧範囲の校正とテストに使用したテスト・セットアップ

図 9 に RTD テストの誤差の結果を示します。

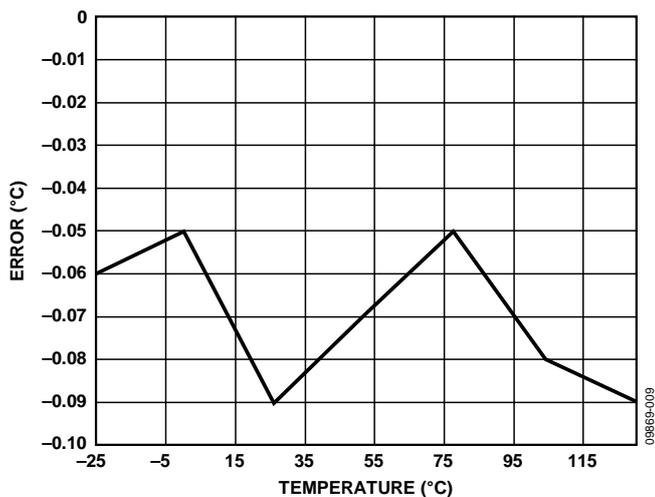


図 9. 区分的直線化コードと ADC0 測定を使用した RTD 測定の誤差 (°C)

さらに詳しくは

CN0214 Design Support Package:

www.analog.com/CN0214-DesignSupport

ADIsimPower™オンライン設計ツール

Kester, Walt. 1999. *Sensor Signal Conditioning*. Analog Devices. Chapter 7, "Temperature Sensors."

Kester, Walt. 1999. *Sensor Signal Conditioning*. Analog Devices. Chapter 8, "ADCs for Signal Conditioning."

AN-0970 Application Note : RTD Interfacing and Linearization Using an ADuC706x Microcontroller

MT-022 Tutorial : ADC Architectures III: Sigma-Delta ADC Basics

MT-023 Tutorial : ADC Architectures IV: Sigma-Delta ADC Advanced Concepts and Applications

MT-031 Tutorial : Grounding Data Converters and Solving the Mystery of "AGND" and "DGND"

MT-101 Tutorial : Decoupling Techniques

ITS-90 Table for Type T Thermocouple.

データシートと評価用ボード

ADuC7060/ADuC7061 データシート/評価用キット

ADM3202 UART/RS-232 トランシーバのデータシート

ADP120 データシート

ADP3333 データシート

改訂履歴**11/11—Rev. A to Rev. B**

Change to Devices Connected/Referenced.....	1
Changes to Circuit Description.....	1
Changes to Code Description.....	2
Changes to Common Variations.....	4
Changes to Circuit Evaluation and Test	4

6/11—Rev. 0 to Rev. A

Changes to Circuit Description.....	2
Changes to Circuit Evaluation and Test	4

4/11—Revision 0: 初版

「Circuits from the Lab/実用回路集」はアナログ・デバイセズ社製品専用で作られており、アナログ・デバイセズ社またはそのライセンスの供与者の知的所有物です。お客さまは製品設計で「Circuits from the Lab/実用回路集」を使用することはできますが、その回路例を利用もしくは適用したことにより、特許権またはその他の知的所有権のもとでの暗示的許可、またはその他の方法でのライセンスを許諾するものではありません。アナログ・デバイセズ社の提供する情報は正確でかつ信頼できるものであることを期しています。しかし、「Circuits from the Lab/実用回路集」は現状のまま、かつ商品性、非侵害性、特定目的との適合性の暗示的保証を含むがこれに限定されないいかなる種類の明示的、暗示的、法的な保証なしで供給されるものであり、アナログ・デバイセズ社はその利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許権もしくはその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。アナログ・デバイセズ社はいつでも予告なく「Circuits from the Lab/実用回路集」を変更する権利を留保しますが、それを行う義務はありません。商標および登録商標は各社の所有に属します。