



# 回路ノート

## CN-0281



テスト済み回路設計集“Circuits from the Lab™”は共通の設計課題を対象とし、迅速で容易なシステム統合のために製作されました。さらに詳しい情報又は支援は [www.analog.com/jp/CN0281](http://www.analog.com/jp/CN0281) をご覧ください。

### 使用したリファレンス・デバイス

ADuC7060/ ADuC7061	デュアル 24 ビット $\Sigma$ - $\Delta$ ADC 内蔵 ARM7 ベースマイクロコントローラ
ADT7311	$\pm 0.5^\circ\text{C}$ 精度、16 ビット・デジタル、SPI、温度センサ
AD8628	高精度、低電力、ゼロ・ドリフト、オペアンプ
ADP7102	ロー・ドロップアウト(LDO)リニア・レギュレータ

## 高精度アナログ・マイクロコントローラ ADuC7060/ADuC7061 を使用し、冷接点補償機能を搭載する SENT インターフェース・ベースの車載用熱電対温度センサー

### 評価および設計サポート環境

#### 設計と統合ファイル

[回路図](#)、[レイアウト・ファイル](#)、[部品表](#)

### 回路の機能とその利点

これは、高精度の熱電対温度モニタリング・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、32kB フラッシュ、4kB SRAM、さまざまなデジタル・ペリフェラル (UART、タイマー、シリアル・ペリフェラル・インターフェース (SPI)、I<sup>2</sup>C インターフェースなど) に加えて、デュアル 24 ビット・シグマ・デルタ ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) A/D コンバータ (ADC)、デュアル・プログラマブル電流源、14 ビット D/A コンバータ (DAC)、1.2V 内部リファレンスを内蔵しています。

この回路では、熱電対と 100 $\Omega$  の白金測温抵抗体 (RTD) を ADuC7060/ADuC7061 に接続します。この RTD は冷接点補償に使用します。予備のオプションとして、デジタル温度センサー ADT7311 を使って RTD の代わりに冷接点温度を測定することもできます。

ソース・コードでは、4Hz の ADC サンプルング・レートを選択しました。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。

タイマーを使ってデジタル出力ピンを制御することにより、ホストとのシングル・エッジ・ニブル伝送 (SENT) インターフェースを行います。次に、このデジタル出力ピンを外付け NPN トランジスタを使って外部で 5V にレベル・シフトしま

す。SENT プロトコル (SAE 規格 J2716) のセクション 6.3.1 で推奨されているように、SENT 出力回路には EMC フィルタを備えています。データは立下がりエッジと立下がりエッジの間の時間として測定され、各パルスの持続時間はシステム・クロック・チック数で決まります。システム・クロック・レートは SYNC パルスを計測することによって求められます。SYNC パルスは各パケットの開始時に送信されます。詳細は「SENT インターフェース」のセクションで説明します。

### 回路説明

このアプリケーションでは、ADuC7060/ADuC7061 の以下の機能を使用しています。

- プライマリ  $\Sigma$   $\Delta$  ADC は PGA を搭載しています。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 を連続的に切り替えながら熱電対電圧と RTD 電圧をサンプリングしました。

アナログ・デバイス社は、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・デバイス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。本誌記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。※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。

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. A

アナログ・デバイス株式会社

本社 / 〒105-6891 東京都港区海岸 1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル  
電話 03 (5402) 8200  
大阪営業所 / 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36 新大阪トラストタワー  
電話 06 (6350) 6868

- 冷接点温度の測定に RTD を使用する場合、プログラマブル励起電流源が RTD に制御電流を強制的に流します。このデュアル電流源は、0 $\mu$ A から 2mA まで 200 $\mu$ A ステップで設定可能です。この例では、RTD の自己発熱によって生じる誤差を最小限に抑えるため、200 $\mu$ A に設定しました。
- 冷接点温度の測定に ADT7311 を使用する場合、SPI インターフェースをマスタ・モードで使い ADT7311 をスレーブ・デバイスとして接続します。
- ADuC7060/ADuC7061 の ADC 用に 1.2V リファレンスが  $s_s$  内蔵されています。熱電対電圧の測定には、高精度なことから内部電圧リファレンスを使用しました。
- ADuC7060/ADuC7061 内蔵 ADC 用に電圧リファレンスが外付けされています。RTD 抵抗の測定には、外部の  $V_{ref+}$  ピンと  $V_{ref-}$  ピンの間に外付けリファレンス抵抗 ( $R_{REF}$ ) を接続したレシオメトリック構成を使用しました。
- 単電源オペアンプ AD8628 を使って、 $R_{REF}$  と ADC の間の高インピーダンス・リファレンス電圧をバッファしました。
- AD8628 の代わりに OP193 を選択することもできます。
- DAC を使って熱電対の同相電圧をグラウンドより 850mV 高い値に設定しました。
- ARM7TDMI@ コアは、32kB フラッシュと SRAM メモリを内蔵した強力な 16/32 ビット ARM7 コアを用いて ADC の設定と制御するユーザー・コードを実行し、RTD からの ADC 変換処理、SPI インターフェースによる通信制御を行います。
- タイマー1 とデジタル出力ピンを使って SENT 出力信号を生成します。

- オプションの PESD1LIN 保護ダイオードが ESD、電気的高速トランジェント (EFT)、最大 23kV までのサージ・トランジェントを抑制します。
- SENT 出力の EMC フィルタが、SAE 規格 J2716 (SENT プロトコル) のセクション 6.3.1 で推奨されています。
- デバイスを強制的にフラッシュ・ブート・モードにするため、2個の外部スイッチを使用します。S1 をローに固定して S2 を切り替えることにより、ADuC7060/ADuC7061 は通常のユーザー・モードからブート・モードになります。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プログラムし直すことができます。

熱電対と RTD はどちらも出力信号が非常に小さいため、これらの信号を増幅する PGA を必要とします。

ADuC7060/ADuC7061 の補助 ADC は PGA を備えていないため、両方の信号ともプライマリ ADC に接続し、ソフトウェアで2つの信号を切り替えました。

このアプリケーションで使用した熱電対は、温度範囲が  $-200^{\circ}\text{C} \sim +350^{\circ}\text{C}$  の T タイプ (銅-コンスタンタン) です。その感度は約  $40\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$  なので、バイポーラ・モードでは、ゲイン 32 の PGA を備えた ADC により熱電対の全温度範囲をカバーすることができます。

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、 $100\Omega$  の白金 RTD (Enercorp の PCS 1.1503.1) です。この製品は、0805 表面実装パッケージで利用可能です。RTD の温度変動は  $0.385\Omega/^{\circ}\text{C}$  です。

リファレンス抵抗  $R_{REF}$  は高精度の  $5.6\text{k}\Omega$  ( $\pm 0.1\%$ ) にする必要があります。

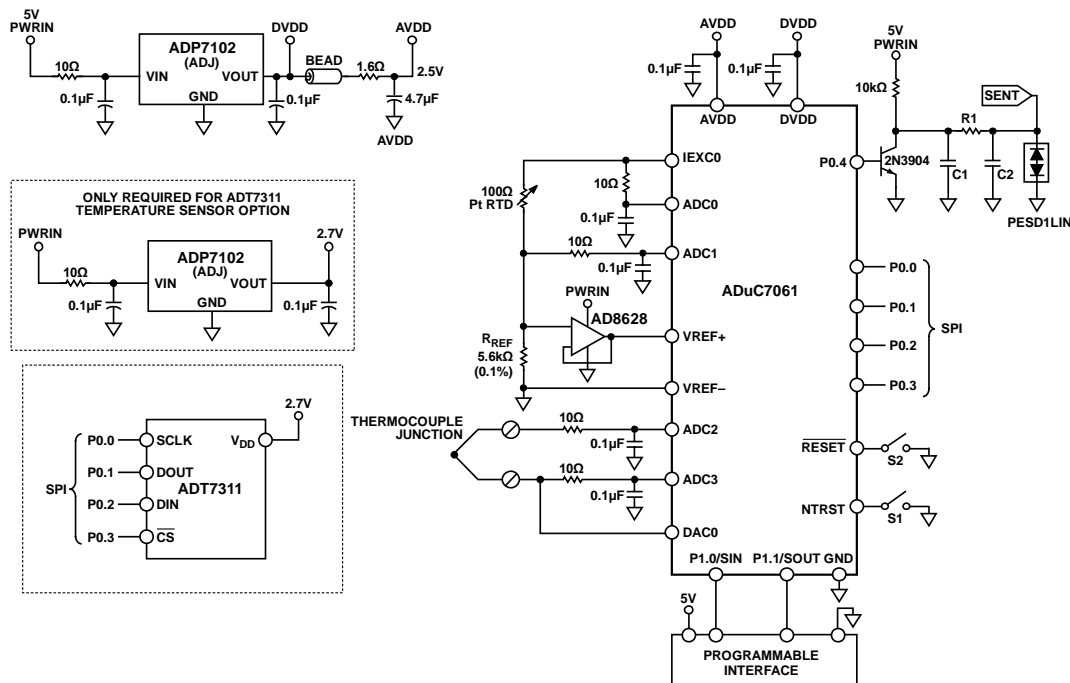


図 1. 熱電対インターフェースを備えた温度モニタ・コントローラとしての ADuC7060/ADuC7061 (簡略回路図：全接続の一部は省略されています。)

## SENT インターフェース

SENTは、1ピン、単一方向（センサーからホスト）、時間変動信号のインターフェースで、主に車載システムであちこちに配置されているセンサーからホスト CPU へのインターフェースに使用されます。

SENTの主な必要条件には以下のものがあります。

- EMC フィルタを備え、0V から 5V への信号振幅が必要。
- SENT 信号に使用するクロックには $\pm 20\%$ の精度が必要。
- SENT 出力回路にはグラウンドへの短絡と電源電圧への短絡に十分耐える堅牢性が必要。

関連するソース・コードは ADuC7061 の P0.4 デジタル・ピンを SENT 出力ピンとして使用します。使用するパケット・フォーマットはシングル・センサー・パケット・フォーマットで、このフォーマットについては SAE 規格 J2716 (SENT プロトコル) の A.4 セクションに詳細が記載されています。ソース・コード、特に、SENT.h ファイルと Sent.c ファイルを修正することにより、その他のパケット・フォーマットにも対応することができます。全ての温度測定値はデータ・ニブル 1 からデータ・ニブル 3 に $^{\circ}\text{C}$ のフォーマットで返信されます。返信される出力パケットを要約すると以下のとおりです。

- 同期パルスに 56 クロック・チック
- ステータス・パルス (7 チック $\sim$ 15 チック)
- データ・ニブル 1 (温度測定値のビット 11 $\sim$ ビット 8)
- データ・ニブル 2 (温度測定値のビット 7 $\sim$ ビット 4)
- データ・ニブル 3 (温度測定値のビット 3 $\sim$ ビット 0)
- データ・ニブル 4 (カウンタのビット 7 $\sim$ ビット 4)
- データ・ニブル 5 (カウンタのビット 3 $\sim$ ビット 0)
- データ・ニブル 6 (ニブル 1 の反転)

パケットの例を図 2 に示します。

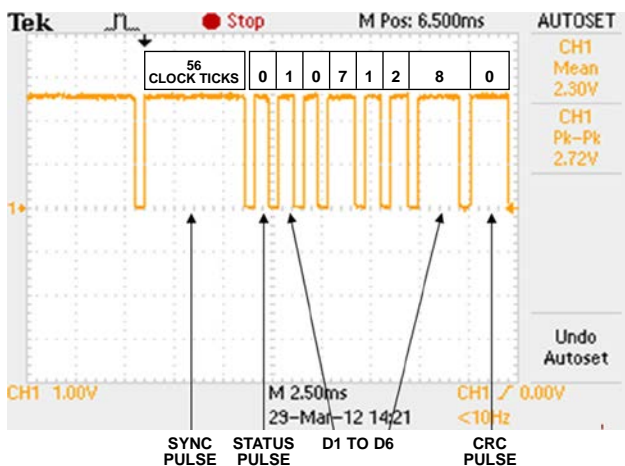


図 2. P0.4 ピンで測定された SENT パケットの例

この回路は、大きな面積のグラウンド・プレーンを持つ多層プリント回路ボード (PCB) 上に構築する必要があります。最適な性能を実現するためには正しいレイアウト、グランディング、デカップリング技術が必要です (チュートリアル MT-031 「データコンバータのグランディングと AGND/DGND の不可解さの解決」 (英語)、チュートリアル MT-101 「デカップリング技術」 (英語) と、ADuC7060/ADuC7061 評価ボード・レイアウトを参照してください)。

## コードの説明

タイマー1を使って SENT 出力ピン P0.4 を制御します。ADC 結果により熱電対と冷接点温度の温度測定値が求められると、SENT パケット構成 SENT\_PACKET が更新されてタイマー1 が始動します。図 2 に示されているように、このパケット構成のフィールドは P0.4 ピンにクロック出力されます。パケットの最初の部分は同期シーケンスです。ホストはこのパルスからクロック周期を求め、これにより後続のニブル値を特定します。

温度測定値を得るため、熱電対と RTD の温度を測定します。RTD 温度はルックアップ・テーブルを使って等価な熱電対電圧に変換します。これら 2 つの電圧を加算することにより、熱電対における電圧の絶対値を求めます。

まず、熱電対にある 2 本のワイヤ間の電圧 (V1) を測定します。次に、RTD 電圧を測定し、ルックアップ・テーブルを使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 (V2) に変換します。さらに、V1 と V2 を加算して全体の熱電対電圧を求め、この値を最終的な温度測定値に変換します。

区分的リニアライゼーション手法を使って最終的な温度の値を計算します。一定値の電圧に対するそれぞれの温度をアレイに格納し、隣接するポイント間の線形インターポレーションによって中間値を計算します。理想的な熱電対電圧を使ったアルゴリズム誤差を図 3 に示します。ADuC7060/ADuC7061 の ADC0 ピンを使用し、熱電対の全動作範囲に及ぶ 52 ポイントで熱電対電圧を測定したときに得られた誤差を図 4 に示します。ワーストケースでも全誤差は  $1^{\circ}\text{C}$  未満です。

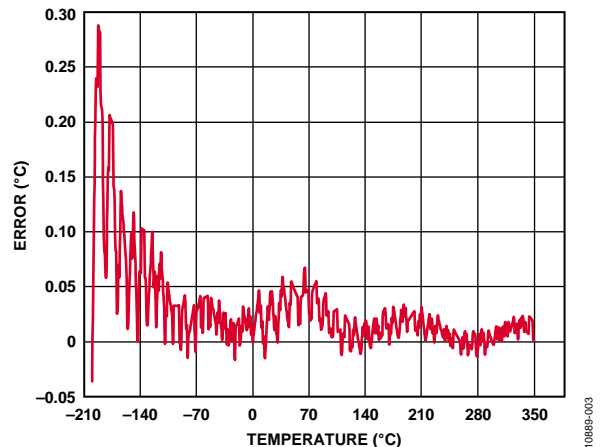


図 3. 52 個のキャリブレーション・ポイントと理想的な測定による区分的線形近似を使用したときの誤差

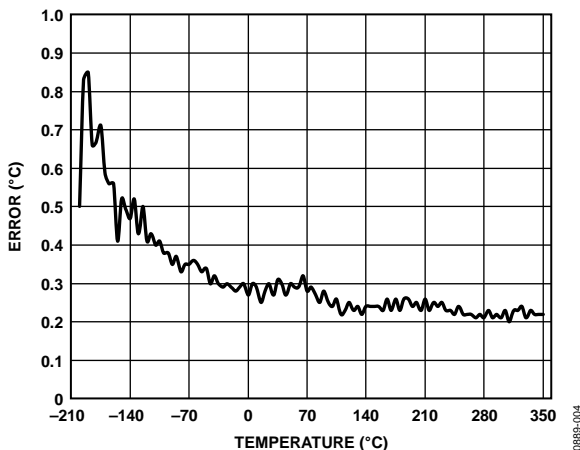


図 4. ADuC7060/ADuC7061 の ADC0 ピンで測定した 52 個のキャリブレーション・ポイントを使用して区分的線形近似を行ったときの誤差

ルックアップ・テーブルを使って RTD 温度を計算し、熱電対に対する方法と同じ方法を RTD に対して実行します。RTD では、その温度を抵抗の関数として表す多項式が異なることに注意してください。

設計サポート・パッケージのソース・コードは KEIL  $\mu$ Vision V3.90 を使って生成されたものです。

RTD のリアライゼーションと性能最適化については、[アプリケーショントラブルシューティングノート 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

外付け RTD を使用する代わりに、温度センサー ADT7311 を使って冷接点温度を測定することもできます。

ADT7311 を使ったソース・コードは設計サポート・パッケージのソフトウェア・パッケージとともに提供されます ([www.analog.com/CN0281-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0281-DesignSupport))。

ADT7311 を駆動するのに外部レギュレータを追加する必要があります。

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 パッケージまたは 48 ピン LQFP パッケージで供給される ADuC7060 を使用することもできます。ADuC7060/ADuC7061 は、標準 JTAG インターフェースを介してプログラムやデバッグを行うことが可能です。

RTD 測定のリファレンス・ソースとして外付けリファレンス抵抗を使用する場合、ユニティ・ゲイン・モードのオペアンプを使って VREF+ ピンの入力をバッファすることを推奨します。これにより、VREF+ ピンへの入力リーク電流によって測定精度が低下するのを防ぎます。図 9 では、OP193 がこの目的のために使われています。図 1 では、動作温度範囲が  $-40^{\circ}\text{C}$  ~  $+150^{\circ}\text{C}$  の AD8628 が使われています。

より広い温度範囲の測定には、タイプ J のような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ため、サーミスタを PCB 上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 と外付けリファレンス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、PC インターフェースを介して ADT7311 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."](#)」を参照してください。

## 回路の評価とテスト

### SENT インターフェースのテスト

SENT インターフェースの出力はデジタル・オシロスコープとロジック・アナライザを使って評価しました。SENT インターフェースは、SENT 規格の最大許容値である  $100\mu\text{s}$  の SENT クロック周期でのみテストを行いました。このテストの制限要因には以下のものが含まれます。

- タイマーの FIQ 割り込み遅延の変動。ARM7 の可能な割り込み遅延は最大 45CPU クロックです。10.24MHz の CPU クロックでは、最大  $4.4\mu\text{s}$  になります。最小割り込み遅延は 5CPU クロック ( $0.5\mu\text{s}$ ) です。ワーストケースの遅延は、ARM7 コアが LDMIA または STMIA (複数の値をメモリからロードまたはメモリへ格納) を実行しているときに生じます。この遅延を最小限に抑えるには **Split Load and Store Multiple** コンパイラ・オプションを選択します。この使用方法については図 5 を参照してください。
- ADuC7060/ADuC7061 の 10.24MHz 発振器の  $-40^{\circ}\text{C}$  ~  $+125^{\circ}\text{C}$  の動作温度範囲におけるワーストケースの精度は  $\pm 3\%$  です。

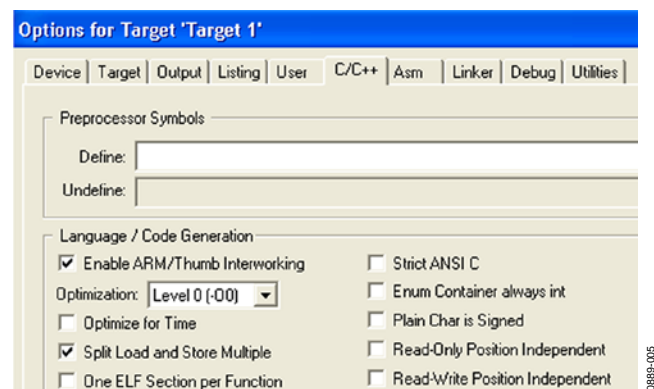


図 5. Split Load and Store Multiple オプションの選択

これらの制限要因があるにもかかわらず、 $100\mu\text{s}$  の SENT クロック周期を選択したときのこのテストの結果は、SENT 規格で要求される  $\pm 20\%$  のタイミング精度に対し、十分に範囲内です。

図1の SENT 出力には EMC フィルタが付いています。SENT 出力による EMC 放射を減らすため、図6に示すようなトランスミッタ出力波形になるように、このフィルタ (R1、C1、C2) の値を選択します。

このフィルタについては、限られたテストしか行っていないため、図1のように、出力フィルタの抵抗とコンデンサの値は記載していません (R1、C1、C2)。

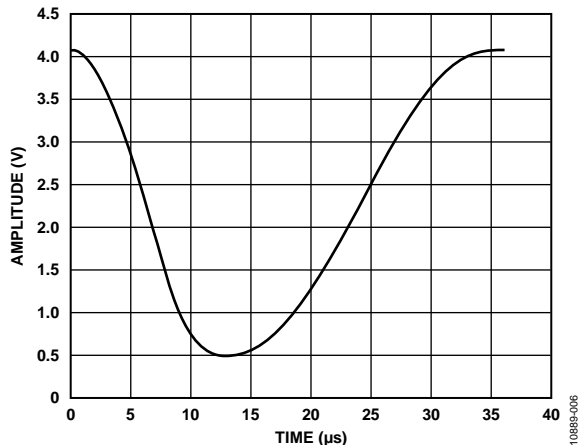


図6. SENT 波形のトランスミッタ出力の例

さらに回路のテストと評価を行うため、熱電対測定と RTD 測定を個別に評価しました。

### 熱電対測定のテスト

基本的なテスト・セットアップを図7に示します。2つの方法を使って回路の性能を評価しました。最初に、回路をボードに接続された熱電対でテストし、氷水の温度を測定し、次に沸騰したお湯の温度を測定しました。

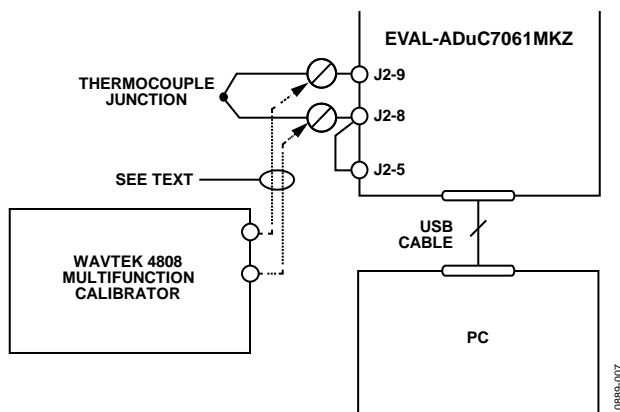


図7. 熱電対の全出力電圧範囲での回路の補正とテストに使用したテスト・セットアップ

図3と図4に示されているような誤差を十分に評価するために Wavetek の 4808 多機能校正器を使用しました。この方法では、図7に示されているように、熱電対の代わりに電圧源として校正器を設置しました。Tタイプ熱電対の全範囲を評価するため、この校正器を使って、Tタイプ熱電対の負と正の範囲に対応する $-200^{\circ}\text{C}$ ~ $+350^{\circ}\text{C}$ の52個のポイントで熱電対等価電圧を設定しました (ITS-90のTタイプ熱電対の表を参照してください)。

ルックアップ・アルゴリズムの精度を評価するため、 $+1^{\circ}\text{C}$ 間隔で $-200^{\circ}\text{C}$ ~ $+350^{\circ}\text{C}$ 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3と図4に示したように、線形法と区分的線形近似法で誤差を計算しました。

### RTD 測定のテスト

RTD 回路とリニアライゼーション・ソース・コードを評価するため、ボードの RTD を調整可能な高精度抵抗源に置き換えました。使用した計器は10進の可変抵抗器 1433-Z です。テストした RTD の値の範囲は $90\Omega$ ~ $140\Omega$ ですが、これは RTD の温度範囲 $-25^{\circ}\text{C}$ ~ $+114^{\circ}\text{C}$ を表します。

RTD テストの誤差の結果を図8に、テスト・セットアップ回路を図9に示します。

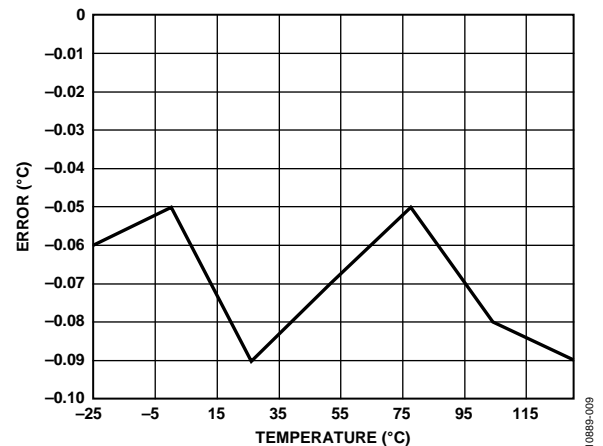
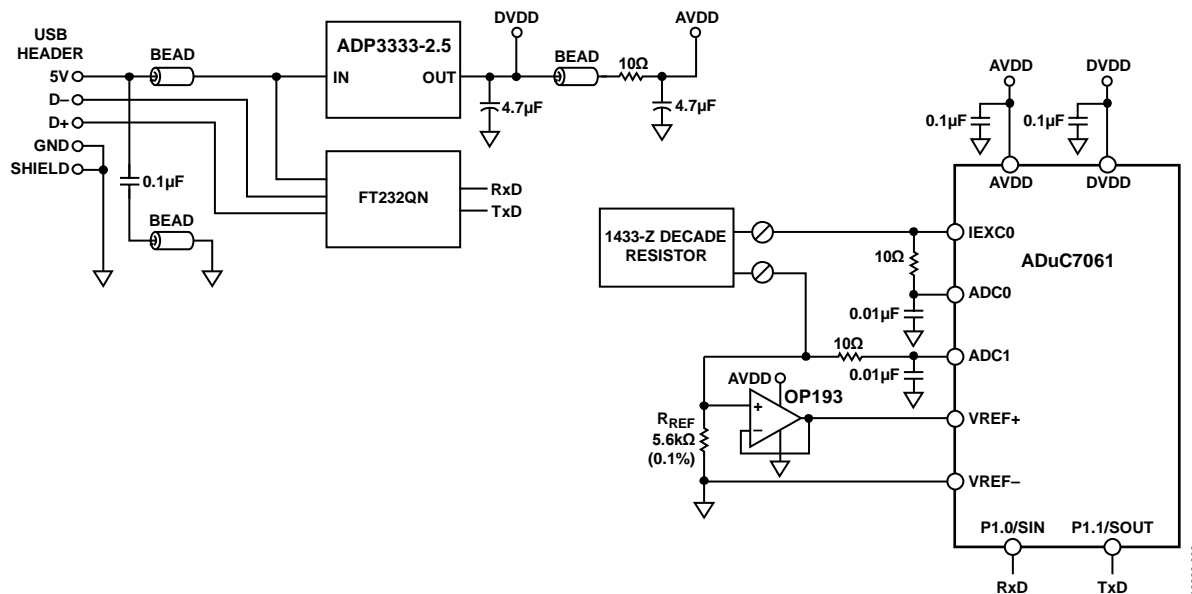


図8. 区分的リニアライゼーション・コードと ADC0 の測定値を使用した RTD 測定の誤差 ( $^{\circ}\text{C}$ )



図 9.  $-25^{\circ}\text{C}\sim+114^{\circ}\text{C}$  の RTD 出力電圧範囲の補正とテストに使用したテスト・セットアップ

## さらに詳しい資料

CN0281 Design Support Package :

<http://www.analog.com/CN0281-DesignSupport>.

ADIsimPower Design Tool.

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. Analog Devices.

MT-022 Tutorial : ADC Architectures III: Sigma-Delta ADC Basics. Analog Devices.

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

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

MT-101 Tutorial : Decoupling Techniques. Analog Devices.

ITS-90 Table for Type T Thermocouple.

SAE J2716 Standard (SENT Protocol).

## データシートと評価ボード

[ADuC7060/ADuC7061](#) データシート

[ADuC7060/ADuC7061](#) 評価キット

[ADM3202](#) データシート

[ADT7311](#) データシート

[AD8628](#) データシート

[ADP7102](#) データシート

## 改訂履歴

7/13—Rev. 0 to Rev. A

Change to Figure 1 ..... 2  
Changes to Common Variations Section ..... 4

7/12—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。お客様は製品設計で「Circuits from the Lab/実用回路集」を使用することはできませんが、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。

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。  
CN10889-0-7/13(A)