



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 <http://www.analog.com/jp/CN0300> をご覧ください。

### 使用したリファレンス・デバイス

ADuCM360	24 ビット $\Sigma$ - $\Delta$ ADC 内蔵 Cortex-M3 ベースのマイクロコントローラ
ADP1720-3.3	低ドロップアウト・リニアレギュレータ

## ARM Cortex-M3 を使用した 12-Bit、4-20mA、ループ駆動熱電対測定システム

### 評価および設計サポート環境

#### 回路評価ボード

CN-0300 評価用ボード(EVAL-CN0300-EB1Z)にはアナログ・デバイセズ社の J-Link OB エミュレータ (USB-SWD/UART-EMUZ)が含まれています

#### 設計および統合ファイル

回路、レイアウト・ファイル、部品表、ADuCM360 用ソース・コード

#### 回路の機能とその利点

高精度熱電対温度監視アプリケーション向けのこの回路は、高精度アナログ・マイクロコントローラ ADuCM360 を使用して、4 mA to 20 mA 出力電流を制御します。ADuCM360 は ARM Cortex-M3 コア、126 kB フラッシュ、8 kB SRAM、各

種デジタル・ペリフェラル (UART、タイマー、SPI/I<sup>2</sup>C インターフェースなど) と共に、デュアル・24 ビット・シグマ・デルタ ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) A/D コンバータ (ADCs)、デュアル・プログラムブル電流源、12 ビット・D/A コンバータ (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、ADuCM360 に T タイプ熱電対と 100 $\Omega$  白金測温抵抗体 (RTD) を接続します。冷接点補償に RTD を使用します。低消費電力 Cortex-M3 コアは ADC の読み出し値を実際の温度測定値に変換します。T タイプの使用温度範囲である -200°C ~ +350°C が、4 mA ~ 20 mA の出力電流範囲に変換されます。

この回路は熱電対測定を最小の外付け部品点数で実現できる完全なソリューションです。ループ電圧で駆動され、ループ電圧は最大 28V まで対応しています。

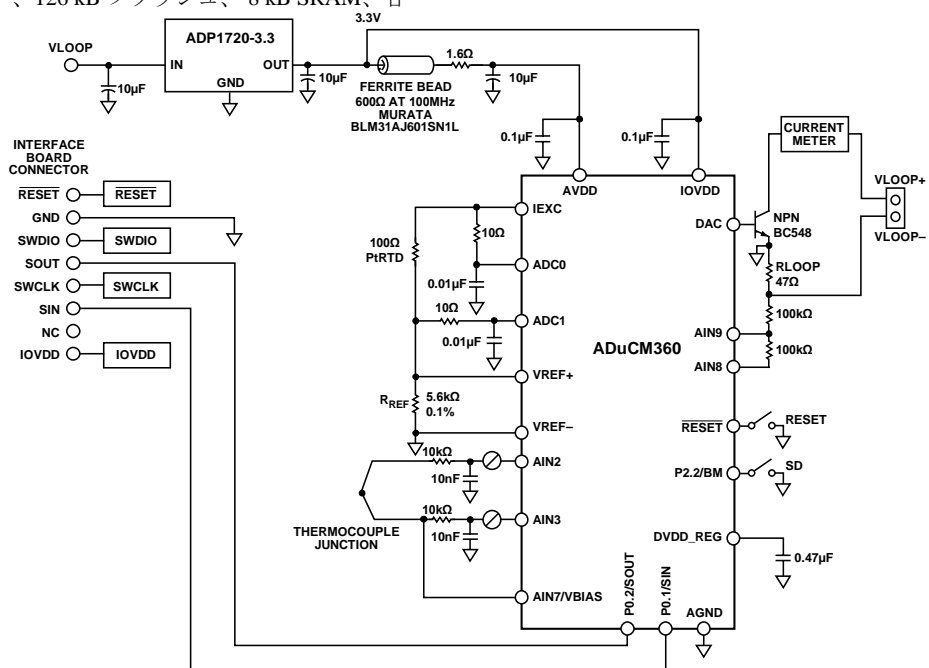


図 1. 熱電対インターフェース付き温度モニターコントローラーとして構成した ADuCM360 (簡略回路図、接続の一部は省略されています)

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。

## 回路の説明

このアプリケーションには ADuCM360 の次の特徴が利用されています。

- 柔軟性のあるオンチップの出力バッファ付き 12 ビット DAC 出力を使用して外部 NPN トランジスタ (BC548) を制御します。このトランジスタの  $V_{BE}$  を制御する事により、負荷抵抗  $47\ \Omega$  を流れる電流を希望値に設定することができます。NPN モードを選択した時、AIN8 ピンにはバッファ付き内蔵  $1.2\text{V}$  基準電圧が表れます。
- DAC は 12 ビットの単調増加性があります；しかし DAC 出力の精度は標準で約  $3\text{LSB}$  です。さらに、バイポーラ・トランジスタには直線性誤差があります。DAC 出力の精度を向上し、オフセットとゲインのエンドポイント誤差を低減するために、ADC0 は負荷抵抗 ( $R_{LOAD}$ ) 両端電圧を反映するフィードバック電圧を (AIN9 ピン) 測定します。この ADC0 の読み取り値を基本に、ソース・コード内で DAC 出力を修正します。この方法より  $4\text{ mA to }20\text{ mA}$  出力は  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  の精度になります。
- 熱電対/RTD 用にソフトウェアでゲインを 32 に設定された PGA 付きの 24 ビット  $\Sigma\text{-}\Delta$  ADC。ADC1 は熱電対電圧と RTD 電圧を連続的に切り替えてサンプリングを行います。
- プログラマブルな励起電流源は制御電流を RTD に強制的に流します。このデュアルの電流源は  $0\ \mu\text{A}$  から  $2\text{ mA}$  まで段階的に設定可能です。この例では、RTD の自己発熱によって生ずる誤差を最小限にするために  $200\ \mu\text{A}$  に設定されます。
- ADuCM360 の ADC 用に  $1.2\text{ V}$  電圧リファレンスが内蔵されています。熱電対電圧を測定する時は、この高精度の内部電圧リファレンスを使用します。
- ADuCM360 内蔵 ADC 用外付け電圧リファレンス。RTD 抵抗を測定する時にはレシオメトリック構成を採用し、VREF+ ピンと VREF- ピン間に外付けリファレンス抵抗 ( $R_{REF}$ ) を接続しました。この回路のリファレンス源は高インピーダンスなので、内部リファレンス入力バッファはイネーブルになります。リファレンス・バッファを内蔵しているため、外付けバッファが必要なく入力リークの影響を最小限にできます。
- バイアス電圧発生器 (VBIAS)。熱電対の同相電圧を AVDD\_Reg/2 ( $900\text{ mV}$ ) に設定するために VBIAS 機能を利用します。この VBIAS 機能を内蔵しているため熱電対の同相電圧を設定するための外付け抵抗は必要ありません。
- ARM Cortex-M3 コア。126 kB フラッシュと 8 kB SRAM を集積した強力な 32 ビット ARM コアはユーザ・コードを実行し、ADC の設定、制御を行い、熱電対と RTD の入力からの ADC 変換結果を最終的な温度値に変換します。その ARM コアは又、AIN9 の電圧レベルからの閉ループ・フィードバックを利用して、DAC 出力を制御し、この DAC 出力を連続的にモニターします。この ARM コアは、デバッグ用の UART/USB インターフェースを介した通信も制御します。

- ホスト PC との通信インターフェースとして UART が使用されます。UART は ADuCM360 の内部フラッシュをプログラムするために使用されます。UART はデバック・ポートとしても使用され、DAC と ADC のキャリブレーションにも使用されます。
- ADuCM360 をフラッシュ・ブート・モードにするために 2 個の外部スイッチを使用します。SD を "ロー" にしながらリセットボタンをトグルする事により、ADuCM360 はノーマル・ユーザ・モードの代わりにブート・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通して内蔵フラッシュを再設定する事が出来ます。
- J1 コネクタ (8 ピン、デュアル・ライン・コネクタ) は CN-0300 ハードウェアとともに提供されるアナログ・デバイズ社の J-link OB エミュレータに接続します。これによりこのアプリケーション・ボードのプログラミングとデバックが可能になります。図 3 を参照してください。

熱電対と RTD が発生する信号は極めて小さいので、それらの信号を増幅するためにプログラマブル・ゲイン・アンプ (PGA) が必要となります。

このアプリケーションで使用する熱電対は温度範囲が  $-200^\circ\text{C}$  ~  $+350^\circ\text{C}$  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、PGA のゲインを 32 に設定する事により、バイポーラモードでの ADC は熱電対の全温度範囲をカバーできる事になります。

RTD は冷接点補償に使用されます。この回路で実際に使用した RTD は、白金  $100\ \Omega$  RTD (Enercorp 社 PCS 1.1503.1) です。それは 0805 (表面実装パッケージ) で供給可能です。この RTD の温度変化は  $0.385\ \Omega/^\circ\text{C}$  です。

リファレンス抵抗 ( $R_{REF}$ ) は高精度の  $5.6\ \text{k}\Omega$  ( $\pm 0.1\%$ ) を使用する必要がある事に注意してください。

回路基板は、大面積のグランドプレーンを含む多層 PC ボード (PCB) で構成してください。適正な性能を得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 (Tutorial MT-031 「データ・コンバータのグラウンディングと、「AGND」および「DGND」に関する疑問の解消」 Tutorial MT-101, *Decoupling Techniques*, and the ADuCM360TCZ Evaluation Board layout をご覧ください)。

この回路の評価に使用される PCB を図 2 に示します。

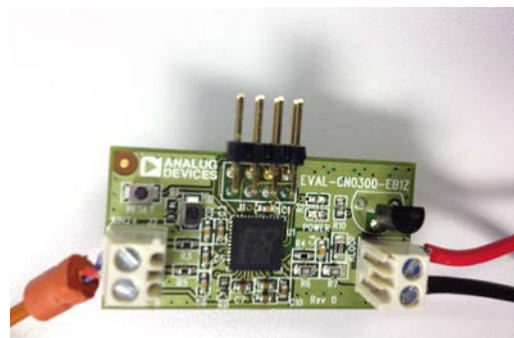


図 2. この回路に使用される EVAL-CN0300-EB1Z ボード

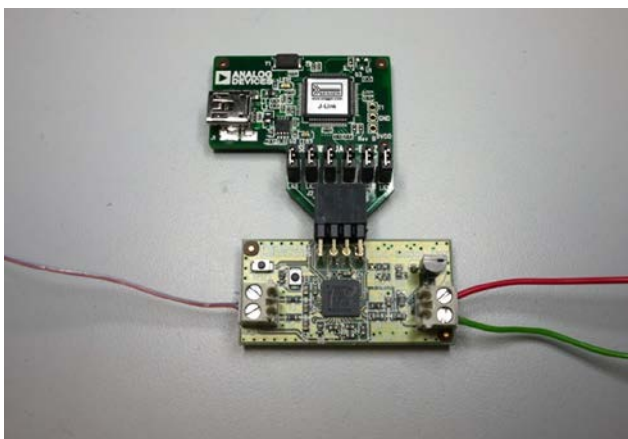


図 3.アナログ・デバイゼズ社 J-link OB エミュレータに接続した EVAL-CN0300-EB1Z

アナログ・デバイゼズ社の J-Link OB エミュレータ(USB-SWD/UART-EMUZ) は下記の内容をサポートします：

- PC の USB ポートに接続すると、PC の COM ポート (仮想シリアルポート) に接続する事もできます。これはキャリブレーション・ルーチンの実行に必要です。
- ADuCM360 に対して、SW (Serial Wire) デバッグとプログラミングが可能です。
- この USB ポートを使用する事により UART を介したダウンローダを使用してデバイスのプログラムができます。
- 図 4 はエミュレータ・ボードの上面図を示します。コネクタ J2 を EVAL-CN0300-EB1Z ボードに差込みます。コネクタ J2 のピン接続を図 5 に示します。

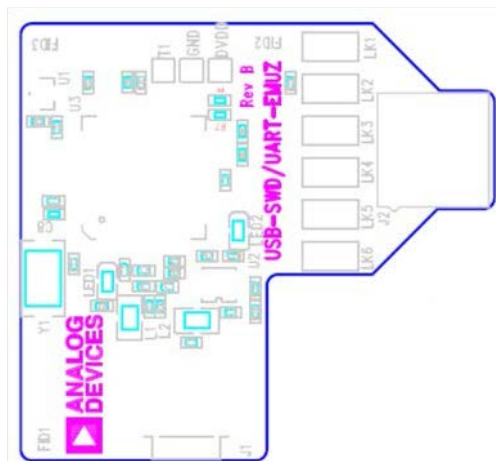


図 1.アナログ・デバイゼズ社 j-Link OB エミュレータ 上面図

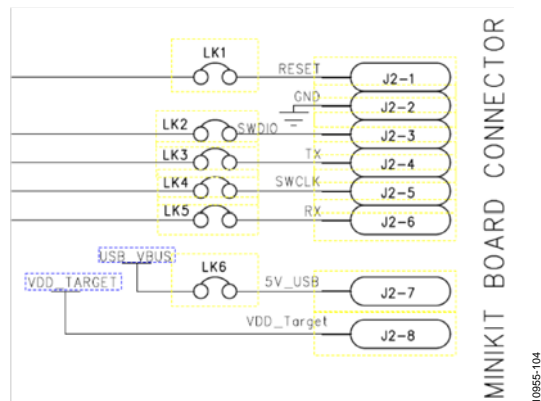


図 5.コネクタ J2

ダウンロードとデバッグを行うには、LK1、LK2、LK4、LK6 のジャンパーを挿入する必要があります。UART 経由で通信するには LK3 と LK5 のジャンパーが必要です。J-Link OB に必要なソフトウェアはソフトウェアのインストール・ファイルに含まれています。

従来の ADuCM360 開発システムに同梱されていた J-Link Lite とインターフェース・ボードは、J-Link OB エミュレータに置き換わっていますので注意してください。

詳細については [UG-457, ADuCM360 Development Systems Getting Started Tutorial](#) を参照してください。

回路をテストするために使用されるソース・コードへのリンクは CN-0300 Design Support Package at <http://www.analog.com/CN0300-DesignSupport> に載っています。

ソース・コードはサンプルコードと共に提供される機能ライブラリを使用します。図 6 は Keil μVision4 ツールで表示した時のプロジェクトに使用されるソース・ファイルのリスト・ビューです。



図 6.μVision4 で表示したソース・ファイル

### コードのキャリブレーション・セクション

ADC と DAC のキャリブレーション・ルーチンをイネーブル又はディスエーブルするために (ADC1 や DAC のキャリブレーション) コード内の #define 値で設定/調整する事ができます。

ADC 又は DAC をキャリブレーションするには、アナログ・デバイゼズ社の J-Link OB エミュレータ(USB-SWD/UART-EMUZ)を J1 と PC の USB ポートに接続する必要があります。

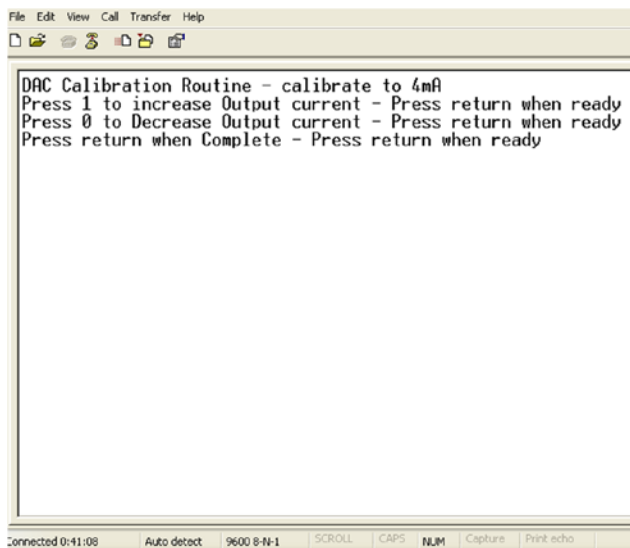
(Windows のハイパー・ターミナルのような) COM ポートと通信可能なプログラムを使って、キャリブレーション・ルーチンのキャリブレーションのメニューとステップを見る事ができます。

ADC をキャリブレーションする時、ソース・コードはユーザにゼロスケール電圧とフルスケール電圧を AIN2 と AIN3 に接続する事を要求します。AIN2 は正入力である事に注意してください。キャリブレーション・ルーチンの完了時に、ADC1INTGN レジスタと ADC1OF レジスタの新しいキャリブレーション値が内蔵フラッシュに保存されます。

DAC をキャリブレーションする時、高精度電流計を通して VLOOP+出力を接続してください。DAC キャリブレーション・ルーチンの最初の部分は 4 mA 出力を設定するために DAC をキャリブレーションし、DAC キャリブレーション・ルーチンの 2 番目の部分は 20 mA 出力を設定するために DAC をキャリブレーションします。4 mA ~ 20 mA 出力の設定に使用される DAC コードはフラッシュに保存されます。4 mA と 20 mA の最終設定時の AIN9 の測定電圧も記録されフラッシュに保存されます。AIN9 の電圧は RLOOP を通して流れる電流と直線的な関係にあるので、これらの値は DAC の調整ファクタを計算するために使用されます。このクローズド・ループ回路は DAC に多少の直線性誤差がある事を意味しますが、トランジスタを使用した回路と内蔵 24 ビット  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC を使って微調整されます。

UART はボーレート 9600bps、8 データ・ビット、パリティ無し、フローコントロール無しに設定します。回路基板が PC に接続されているならば、図 7 に示すように、プログラムによって UART に送信された結果を (Windows のハイパー・ターミナルのような) 通信ポート表示アプリケーションを使って見る事ができます。

表示ターミナル上で必要な文字などを入力することで、ADuCM360 はキャリブレーション・ルーチンに必要な指示などを UART ポートを介して受信します。



```
DAC Calibration Routine - calibrate to 4mA
Press 1 to increase Output current - Press return when ready
Press 0 to Decrease Output current - Press return when ready
Press return when Complete - Press return when ready
```

図 7. DAC をキャリブレーションする時のハイパー・ターミナルの出力

## コードの温度測定セクション

温度の測定値を得るためには、熱電対と RTD の温度を測定します。RTD 温度はルックアップ・テーブルを用いてその等価熱電対電圧に変換されます (ISE 社、表 ITS-90 の T タイプ熱電対を参照してください)。この 2 つの電圧は加算され、熱電対での絶対値が得られます。

最初に熱電対の 2 線間電圧 (V1) が測定されます。RTD 電圧が測定され、ルックアップ・テーブルを使ってそれが温度に変換され、次にこの温度はその等価熱電対電圧 (V2) に変換されます。次に V1 と V2 は加算され全体の熱電対電圧を得て、最後にその値は温度測定値に変換されます。

一定数の熱電対電圧は配列に保存されます。温度の中間値は隣接する 2 点間で線形補間を行う事により計算します。

図 8 は ADuCM360 の ADC1 を使用して、熱電対の動作範囲全体にわたり 52 の熱電対電圧を測定した時に得られた誤差を示します。全体のワーストケース誤差は <math>1^{\circ}\text{C}</math> です。

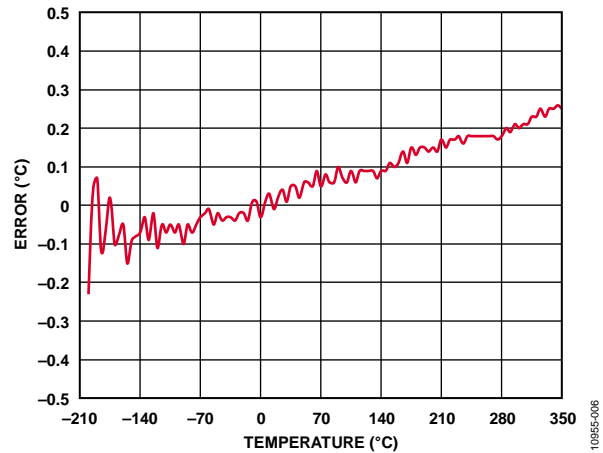


図 8. ADuCM360/ADuCM361 で測定した 52 のキャリブレーション点を使用して区分的線形近似を行った時の誤差

RTD の温度はルックアップ・テーブルを使って計算され、RTD についても熱電対に対する方法と同じ方法で処理されます。ただし RTD はその温度を抵抗の関数として表す多項式が異なる事に注意してください。

[RTD のリニアライゼーションと性能の最適化に関する詳細は、Application Note AN-0970, RTD Interfacing and Linearization Using an ADuC706x Microcontroller](#) を参照してください。

## コードの温度 to 電流出力セクション

一度最終温度が測定されたら、RLOOP を通して必要な電流が流れるように DAC の出力電圧を適切な値に設定します。入力温度範囲は  $-200^{\circ}\text{C}$  ~  $+350^{\circ}\text{C}$  と予想されます。コードは  $-200^{\circ}\text{C}$  を 4mA に、 $+350^{\circ}\text{C}$  を 20 mA に設定します。コードは図 9 に示すようなクローズド・ループ回路を実行し、AIN9 のフィードバック電圧が ADC0 によって測定されますが、その値が DAC 出力の設定を補正するために使用されます。

**FineTuneDAC(void)** 関数がこの補正を行います。

最高の結果を得るために、この回路の性能テストを始める前に DAC をキャリブレーションしてください。



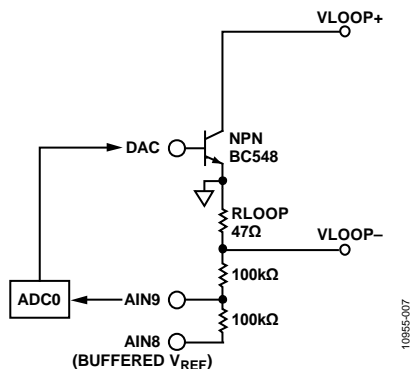


図9 クローズド・ループ制御の 4 mA to 20 mADAC 出力

デバッグの目的で、通常動作の間、下記の文字列は UART で PC に送信されます (図 10 を参照)。

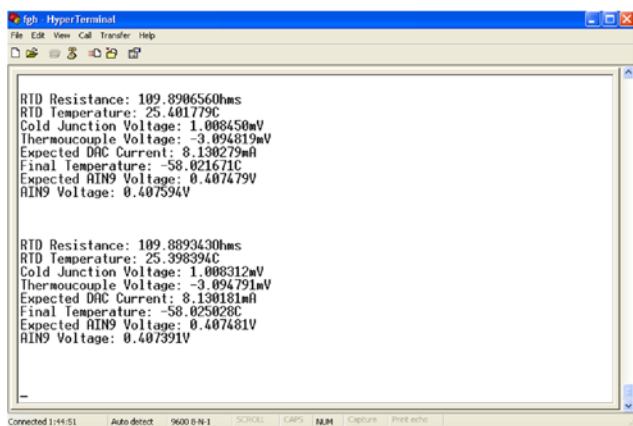


図 10 デバッグに使用される UART の文字列

## バリエーション回路

標準的な UART to RS-232 インターフェースには、FT232R トランシーバがありますが、これを [ADM3202](#) (3V 電源を必要とする) のようなデバイスと置き換える事ができます。また、より広い温度範囲の測定にはタイプ J のような異なる熱電対が使用できます。冷接点補償誤差を最小限にするために、サーミスタを PCB 上に配置する代わりに実際の冷接点に接触して配置する事ができます。

冷接点温度の測定に RTD と外付けリファレンスを使用する代わりに、外部デジタル温度センサを使用する事ができます。たとえば、[ADT7410](#) を I<sup>2</sup>C インターフェースを介して [ADuCM360](#) に接続する事ができます。

冷接点補償についての詳細は [Sensor Signal Conditioning, Analog Devices, Chapter 7, "Temperature Sensors."](#) を参照してください。

もし USB コネクタとこの回路の間にアイソレーションが必要な場合にはアイソレーション製品 [ADuM3160/ADuM4160](#) を追加する必要があります。

## 回路の評価とテスト

### 電流出力の測定

DAC と外付け電圧/電流変換回路は、同時に性能テストを実施しました。

図 1 に示すように、電流計は VLOOP+ に直列に接続しました。使用したメータは HP 34401A です。

初期キャリブレーションが行われる時と VDAC 出力のクロズド・ループ制御が使われた時の回路の性能は 0.5°C の温度値になりますが、それは DAC 出力回路によって明らかになります。DAC と外付けトランジスタ回路による非直線性誤差は 24 ビット ADC により調整されます。温度はゆっくり変化する入力パラメータなので、このクロズド回路はこのアプリケーションに理想的です。図 11 は理想的な DAC 出力を青で示し、クロズド・ループ制御無しの実際の DAC 出力 (DAC 出力を補正するために ADC0 を使用しない) を赤で示します。誤差はクロズド・ループ制御無しで >10°C になります。

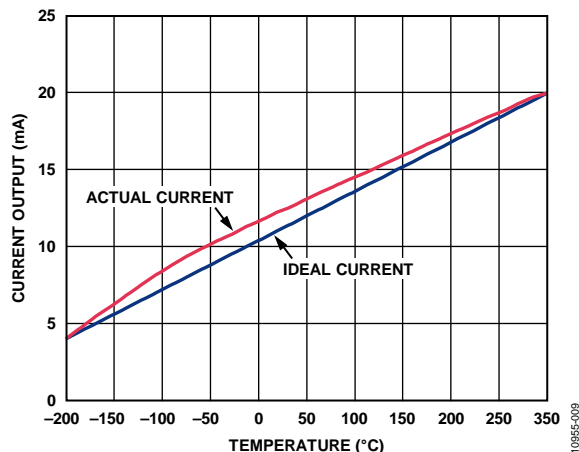


図 11. 温度 (°C) 対電流出力 (mA) (青=理想値、赤=オープン・ループ動作：補正無しの DAC 出力)

図 12 は推奨されるクロズド・ループ制御を使用した場合のグラフです。誤差は小さく、理想値から 0.5°C 以下です。

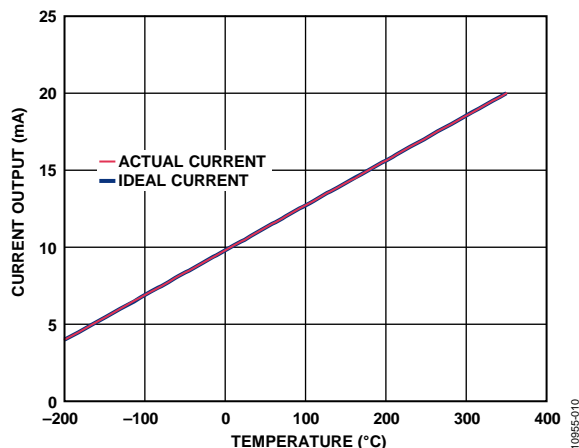


図 2. 温度 (°C) 対電流出力 (mA) (青=理想値、赤=クロズド・ループ動作：ADC 測定による補正有りの DAC 出力)

## 熱電対測定テスト

基本的なテストの構成を図 13 に示します。熱電対を J2 に接続します。

回路の性能を評価するために 2 つの方法を使用しました。最初は、ボードに接続した熱電対を使って回路をテストしました。具体的にはその熱電対を使いアイスボックスの温度を測定し、次にその熱電対を使い沸騰水の温度を測定しました。

図 13 に示すように、誤差を十分に評価するために Wavetek 社の多機能校正器 4808 を使用しました。このテストでは熱電対をこの校正器に置き換え、校正器を電圧源として使用しました。T タイプ熱電対の全範囲を評価するために、校正器を使用して、T タイプ熱電対の負と正の範囲に対応する  $-200^{\circ}\text{C} \sim +350^{\circ}\text{C}$  の範囲の 52 ポイントに等価の熱電対電圧を設定しました (ISE 社の表 ITS-90 の T タイプ熱電対を参照)。図 8 にテスト結果を示します。

性能チェックを行う時や CN-0300 回路を通常動作に使う時には J-Link OB エミュレータが EVAL-CN0300-EB1Z ボードとは接続されていないことを確認してください。J-Link OB は EVAL-CN0300-EB1Z ボードをプログラム、キャリブレーション、デバッグする時のみに使用します。

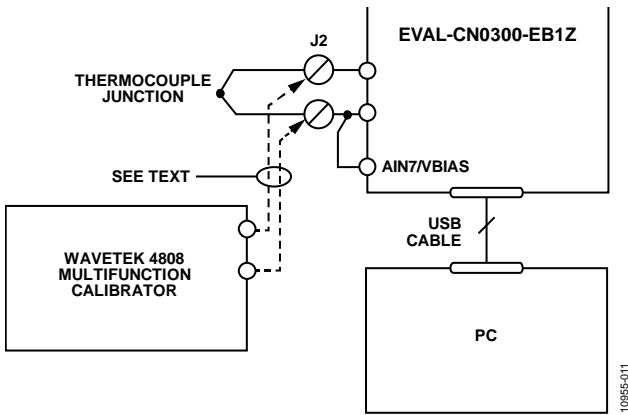


図 13. 全熱電対出力電圧範囲にわたって回路を調整、テストするために使用したテスト構成

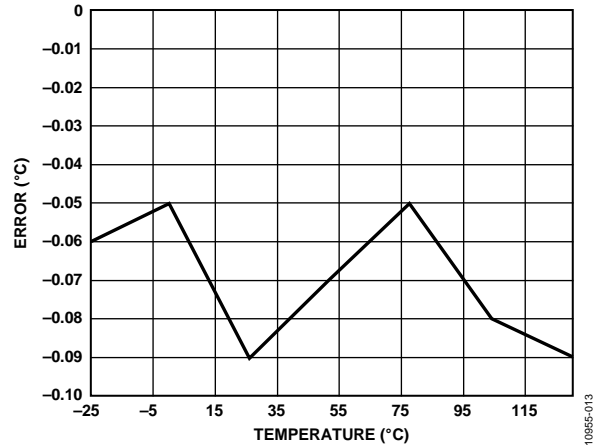


図 15. 区分的線形近似コードと ADC0 測定値を用いた RTD 測定を  $^{\circ}\text{C}$  で表した誤差

### 電流測定テスト

全回路は通常動作時に 2.25 mAtyp 消費します。リセット状態の時では全回路の消費電流は 600  $\mu\text{A}$  以下です。

CN-0300 回路の性能チェックを行う時や通常動作に使う時には J-Link OB エミュレータが EVAL-CN0300-EB1Z ボードとは接続されていないことを確認してください。J-Link OB は EVAL-CN0300-EB1Z ボードをプログラム、キャリブレーション、デバッグする時のみに使用します。

ADuCM360 の電流消費量についての詳細は、[Application Note AN-1111](#) を参照してください。

### RTD 測定テスト

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に、ボードの RTD を高精度に調整可能な抵抗源と置き換えました。使用した計器は十進抵抗器 1433-Z です。RTD 値は  $90\ \Omega \sim 140\ \Omega$  ですが、これは RTD の温度範囲  $-25^{\circ}\text{C} \sim +114^{\circ}\text{C}$  に相当します。

RTD を測定するテスト構成回路を図 14 に示します。そして RTD テストの誤差結果を図 15 に示します。

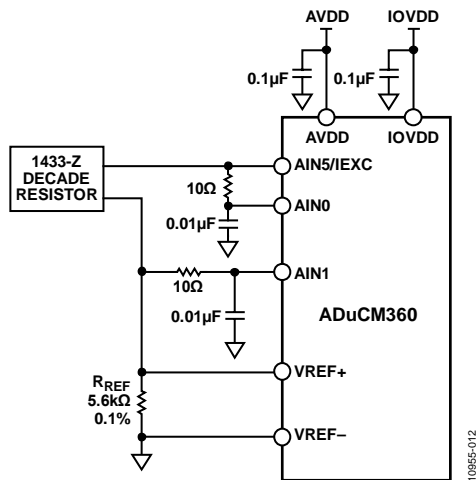


図 14. RTD 誤差測定のためのテスト・セットアップ

## さらに詳しい資料

CN-0300 Design Support package: <http://www.analog.com/CN0268-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.

## データシートと評価ボード

ADuCM360/ADuCM361 データシート

ADuCM360/ADuCM361 評価用キット

ADM3202 UART to RS232 トランシーバ・データシート

ADP1720 データシート

## 改訂履歴

### 12/13—Rev. B to Rev. C

回路の説明のセクションを変更..... 3

### 8/13—Rev. A to Rev. B

タイトルを変更..... 1

### 5/13—Rev. 0 to Rev. A

USB-SWD/UART and SEGGER J-Link Lite Board を J-Link OB Emulator に変更..... Universal

回路の説明セクションを変更..... 2

図 3 とコード・セクションのキャリブレーション・セクションを変更 ; 図 4 と 図 5 を追加、数字を順番に付け直す..... 3

図 9 を変更..... 4

熱電対測定テストのセクションと電流測定テストのセクションを変更..... 6

データシートと評価用ボードのセクションを変更..... 7

### 10/12—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に作られており、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黙的許可、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黙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、暗黙的、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。

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 商標および登録商標は各社の所有に属します。