



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/CN0391 をご覧ください。

接続／参照デバイス

AD7124-8	8チャンネル、低ノイズ、低消費電力、24ビット、シグマ・デルタ (Σ - Δ) ADC、PGA およびリファレンス内蔵
ADP7118	20 V、200 mA、低ノイズ、CMOS LDO リニア・レギュレータ

フレキシブル、低消費電力、4チャンネル熱電対システムと Arduino 互換のデジタル・インターフェース

評価および設計サポート

回路評価用ボード

[CN-0391 回路評価用ボード \(EVAL-CN0391-ARDZ\)](#)

[ADICUP360 評価用ボード \(EVAL-ADICUP360\)](#)

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

図 1 に示す回路は、AD7124-8 低消費電力、低ノイズ、高精度 24 ビット、 Σ - Δ A/D コンバータ (ADC) に基づく、柔軟で統合された 4 チャンネルの熱電対測定システムです。

この回路は、最大で 4 つの独立した熱電対チャンネルを処理でき、ソフトウェアの直線化アルゴリズムは、8 タイプの熱電対 (B、E、J、K、N、R、S、T) に対応します。4 つの熱電対を自由に組み合わせることで接続できます。各熱電対チャンネルの測温抵抗体 (RTD) は、冷接点補償の機能を備えています。別の補償は不要です。このシステムを使用する熱電対計測は、多様なタイプの熱電対の全動作範囲に対応できます。

プロトタイプを迅速に作成するため、この回路には Arduino 互換プラットフォーム・ボードへの標準シリアル・ペリフェラル・インターフェース (SPI) 接続機能があります。EVAL-CN0391-ARDZ は、USB - UART インターフェースとオープンソース・ファームウェアを搭載しているため、多様な熱電対アプリケーションに簡単に適用できます。

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、それぞれの所有者の財産です。※日本語版資料は 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。

Rev. 0

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

アナログ・デバイセズ株式会社

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

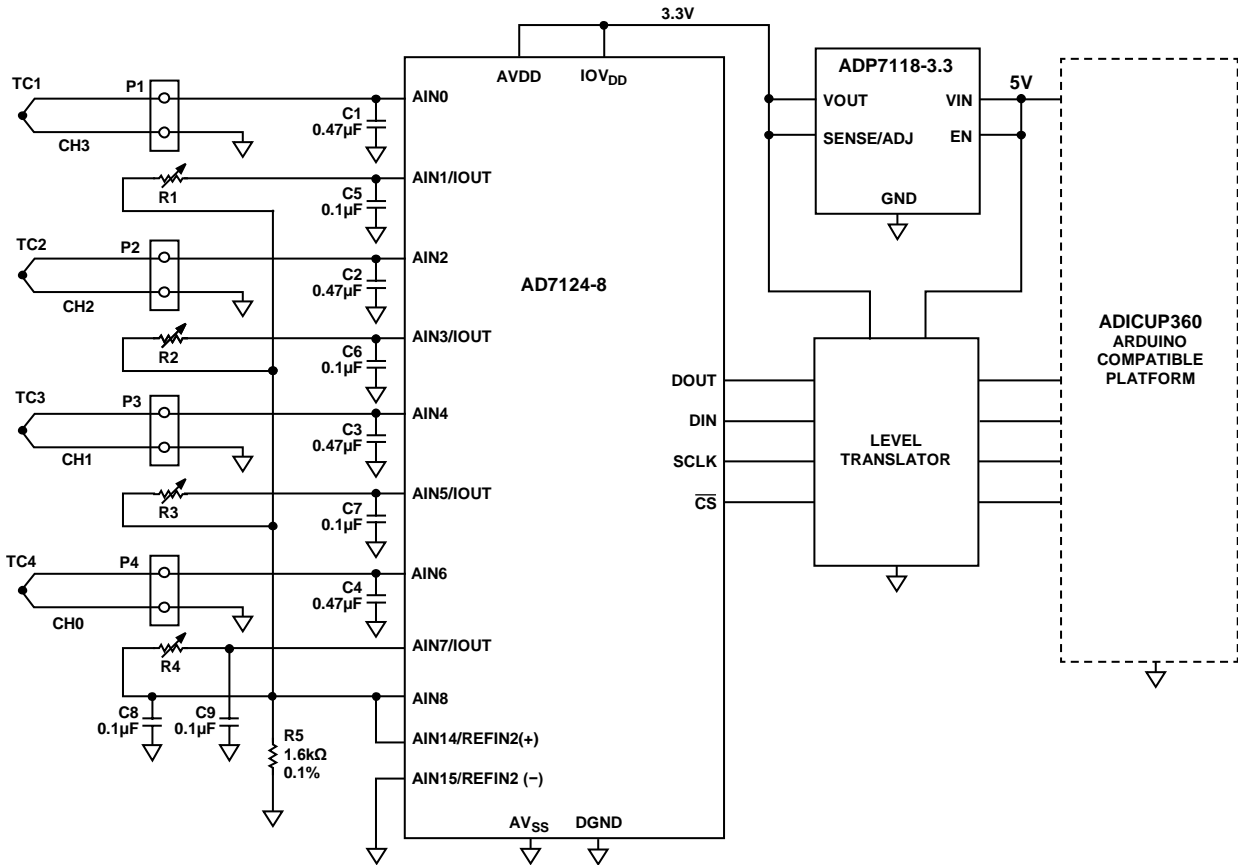


図 1. 熱電対測定システム（簡略化した回路図：一部の接続およびデカップリングは省略されています）

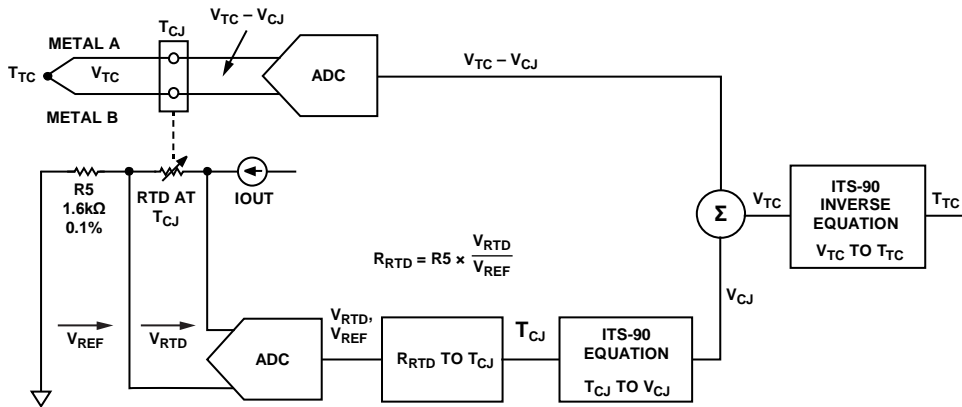


図 2. 1つのチャンネルで測定値とリファレンス接合を示す熱電対接続

回路の説明

温度計測について

熱電対は、低コスト、耐久性、再現性だけでなく、幅広い動作温度範囲と迅速な反応という利点を備えているため、工業用アプリケーションにおける温度計測で頻繁に使用されるセンサーの1つです。熱電対は、高温で計測する場合に非常に便利です（タイプC熱電対では最大2300℃）。

図2に示すように、熱電対は異なるタイプの金属ワイヤ2本を接合して構成されます。

温度を計測する位置となる T_{TC} は、計測接点と呼ばれます。熱電対の反対側の終端は、高精度の電圧計測システムに接続されます。この接続はリファレンス接合または冷接点（CJ）と呼ばれます。計測接点 T_{TC} と冷接点 T_{CJ} 間の温度差から、熱電圧 $V_{TC} - V_{CJ}$ が生成されます。この値は2つの接点の間の温度差に比例します。通常生成される電圧は、数ミリボルトから数十ミリボルトで、温度差と熱電対のタイプに依存します。

冷接点補償

熱電対によって生成される電圧を温度に変換する必要があります。熱電対の電圧は小さく、温度と電圧の関係は非直線性で、冷接点温度を正確に測定する必要があります。このため、測定した電圧を正確な温度に変換するのは困難な場合があります。

熱電対の出力電圧は、熱電対と冷接点の間の温度差を表します。図2に、温度に敏感な他のデバイス（一般にサーミスタ、ダイオード、RTD、半導体温度センサー）で測定された冷接点温度を示します。この回路で使用される温度測定デバイスはPt1000 RTDです。正確に計測するため、4チャンネルごとに1つのRTDを搭載しています。

図2では、熱電対の合計電圧 $V_{TC} - V_{CJ}$ を高精度ADCで計測し、次の式を使用してデジタル形式に変換します。

$$V_{TC} - V_{CJ} = V_{REF} \times \frac{(CODE - 2^{N-1})}{2^{N-1} \times G}$$

ここで

$V_{TC} - V_{CJ}$ は計測された熱電対の電圧。

CODE はADCコード。

N はADCの分解能、 $N = 24$ 。

V_{REF} は計測に使用されるリファレンス。この回路では、熱電対の計測に2.5Vの内部リファレンスが使用されます。

G はTCモードで選択されるゲイン、 $G = 32$ 。

ADCは、バイポーラ差動モードで動作します。

定電流源 IOUT (AD7124-8 ADC から取得) は、直列接続したRTDと1.6kΩの高精度リファレンス抵抗R5を駆動します。CN-0391回路のIOUTは750μAに設定されています。この結果、 $1.6\text{k}\Omega \times 750\mu\text{A} = 1.2\text{V}$ の公称電圧 V_{REF} が生成され、RTD両端間で $1\text{k}\Omega \times 750\mu\text{A} = 0.75\text{V}$ の電圧降下が発生します。R5両端間の電圧は、ACDへのリファレンスとして使用されます。バイポーラ差動入力モードにおいて、RTD抵抗 R_{RTD} は、次の式を使用して計算されます。

$$R_{RTD} = R5 \times \frac{(CODE - 2^{N-1})}{G \times 2^{N-1}}$$

ここで

CODE はADCコード。

N はADCの分解能、 $N = 24$ 。

R5 はリファレンス抵抗、 $R5 = 1.6\text{k}\Omega$ 。

G はRTDモードで選択されるゲイン、 $G = 1$ 。

CN-0391回路では、熱電対電圧とRTD電圧はどちらもAD7124-8マルチチャンネル24ビットADCによって変換されます。計測はレシオメトリックで、リファレンス電圧やIOUT励起電流の精度に依存しません。

次に、RTD抵抗 R_{RTD} は、ルックアップ・テーブルまたは多項式を使用して、冷接点 T_{CJ} に変換されます。カレンダーバンドワーセンの方程式として知られるRTDの伝達関数は、2つの異なる多項式で構成され、正確な結果を提供します。CN-0391ソフトウェアではこの方程式が使用されます。これらのRTD式の詳細な説明については、回路ノートCN-0381を参照してください。

次に、冷接点 T_{CJ} はITS-90熱電対データベースに記載された公式を使用して、対応する熱電対の電圧 V_{CJ} に変換されます。CN-0391ソフトウェアでは、ルックアップ・テーブルではなくITS-90多項式を使用してこの変換を実行します。

その後、ソフトウェアは熱電対の電圧 ($V_{TC} - V_{CJ}$) を冷接点 V_{CJ} に加算して熱電対EMF V_{TC} を算出します。

次に、ITS-90の反転公式を使用して熱電対EMF V_{TC} を等価の熱電対温度 T_{TC} に変換します。

熱電対の理論、線形化テーブル、公式、冷接点については、NIST ITS-90熱電対データベース、NIST標準リファレンス・データベース60、バージョン2.0 (NIST Webサイトで入手可能) を参照してください。熱電対と温度計測の一般的な理論については、Sensor Signal Conditioningの第7章を参照してください。

A/D変換

CN-0391回路は、AD7124-8マルチチャンネル、24ビットΣ-ΔADCを使用します。AD7124-8には、入力マルチプレクサと1~128のゲイン・オプションを備えたプログラマブル・ゲイン・アンプ(PGA)が搭載されています。AD7124-8では、8つの差動入力または15の擬似差動入力を設定できます。

3つの内蔵消費電力モードから選択できることが、AD7124-8の主な利点の1つです。消費電流、出力データ・レートの範囲、およびRMSノイズは、選択した消費電力モードでカスタマイズできます。また、このデバイスは、複数のフィルタ・オプションを備えているので、優れた柔軟性を発揮します。

内部PGAを使用すると、熱電対の小さな電圧を内部Σ-ΔADCにとって最適なレベルに増幅できます。適切なゲイン設定は、熱電対信号の振幅とリファレンス電圧の値によって決定されます。

CN-0391ソフトウェアは、次の8タイプの熱電対をサポートします。B、E、J、K、N、R、S、T。

図3に示すように、熱電対ごとに範囲と感度は異なります。例えば、鉄とコンスタンタンを接合したタイプJ熱電対は、 $-210\text{°C} \sim +1200\text{°C}$ の計測範囲と $50\mu\text{V}/\text{°C}$ (0°C)の感度を備えています。この感度はゼーベック係数とも呼ばれ、熱電対温度の関数になっています。8タイプの熱電対の計測範囲とゼーベック係数を表1に示します。

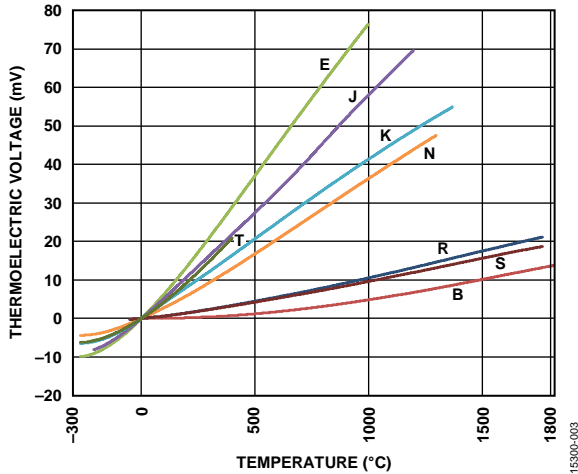


図 3. 熱電対の出力電圧と温度の関係

表 1. 各種熱電対の計測範囲とゼーベック係数、ITS-90 公式の範囲

Type	ITS-90 Equation Range (°C)	Seebeck Coefficient at 0°C (µV/°C)	Seebeck Coefficient at 400°C (µV/°C)
E	-200 to +1000	59	80
J	-210 to +1200	50	55
K	-200 to +1372	39	42
N	-200 to +1300	26	37
T	-50 to +400	39	62
R	-50 to +1768	5	10
S	-50 to +1768	5	10
B	250 to 1820	3 (at 250°C)	4

AD7124-8 の内蔵 PGA を使用すれば、熱電対の低い電圧レベルを検出し、正確なデジタル値に変換できます。

冷接点温度の範囲は 0 °C ~ 50 °C で、最大および最小の出力電圧範囲は、各タイプの電圧振幅を検証し、熱電対の電圧から減算される冷接点電圧を含めることで決定されます。表 2 に示すように、タイプ E 熱電対では最も広い範囲が必要になります。

表 2. 熱電対電圧の最大振幅 (タイプ E)

Output	Hot Junction	Cold Junction	Voltage
Maximum	1000°C	0°C	76.4 mV
Minimum	-270°C	50°C	-12.88 mV

2.5 V の内部リファレンスを使用する AD7124-8 ADC バイポーラの入力範囲は $-50 \text{ mV} \sim V_{\text{REF}}/G$ です。 $V_{\text{REF}} = 2.5 \text{ V}$ で PGA ゲインを $G = 32$ に設定した場合、バイポーラの ADC 入力範囲は $-50 \text{ mV} \sim 78.125 \text{ mV}$ になります。この範囲は、8 タイプすべての出力電圧範囲に対応します。そのため、外付けのシグナル・コンディショニング回路は不要になり、すべての熱電対タイプで PGA を 32 の固定ゲインで操作できます。24 ビットの分解能を備えているので、信号範囲が小さい熱電対 (タイプ B など) でもゲインを調整せずに温度を計測できます。熱電対は、シングルエンド・モードで ADC に接続されます。ここで、負の入力は、センサーからのノイズを削減するため、GND に接続されます。

EVAL-CN0391-ARDZ ボードには、熱電対のオス・コネクタに接続する 4 つの小型タイプ U 熱電対メス・コネクタ (Omega PCC-SMP-U-100) があります。冷接点は、コネクタの接点で形成され、CJC RTD は、コネクタの近くに配置されます。

CN-0391 回路ではシンプルな 2 線式 RTD 接続を使用していますが、AD7124-8 では、2 線式、3 線式、4 線式 RTD で整合されたプログラマブル励起電流を使用できます。3 線式および 4 線式アプリケーションの詳細については、それぞれ回路ノート CN-0381 と回路ノート CN-0383 を参照してください。

システム・ノイズの計測と結果

熱電対の低い電圧を正確に測定できるように、システム・ノイズを抑えることが重要です。図 4 に、1 つのチャンネルに短絡された熱電対のコネクタで収集された、256 サンプルのヒストグラムを示します。AD7124-8 sinc3 フィルタがオンの場合、データ・レートは 50 Hz でした。

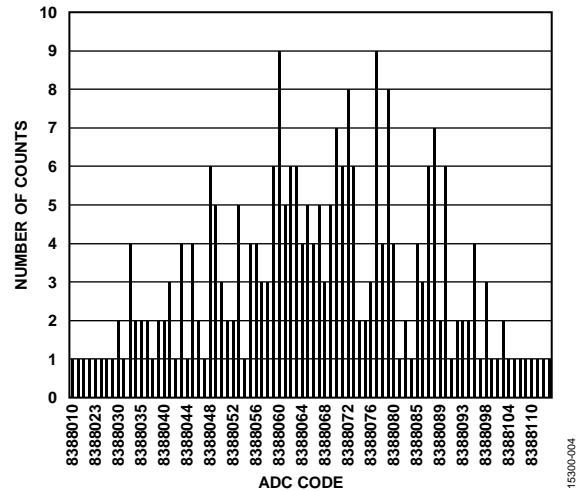


図 4. 1 つのチャンネルの短絡入力ヒストグラム、256 サンプル、ADC Sinc3 フィルタはオン、50 Hz データ・レート

ヒストグラムによると、入力を基準にしたピーク to ピーク・ノイズは 978 nV です。78 mV のフルスケール入力では、ノイズ・フリー・コードの分解能を計算できます。

$$\text{Noise Free Code Resolution} = \log_2 \frac{78 \text{ mV}}{978 \text{ nV}} = 16.3 \text{ bits}$$

システム熱電対の計測と結果

熱電対システムの計測テストでは、広い温度範囲にわたる熱電対温度の正確な知識が必要です。オイル浴槽は正確ですが、温度範囲が制限され、安定するまで時間がかかります。

Time Electronics 1090 温度キャリブレーションなどの正確な熱電対シミュレータは、オイル浴槽の代替品として最適です。図 5 に、シミュレータのテスト概念を説明するブロック図を示します。

精度を高めるため、特に B、R、S タイプの熱電対では、高精度の外付け電圧源を使用してシステム・レベルのゼロ・スケール補正とフルスケール補正を実施する必要があります。

ADR4525 (初期精度 0.02%) のように、精度の高い外付けリファレンスを使用して、ゲイン誤差を最低限に抑えることもできます。

タイプ J の熱電対をチャンネルに接続して熱電対を周囲温度に保ち、ThermoStream または Thermonics 温度コントローラで EVAL-CN0391-ARDZ ボードをサイクルさせることで、冷接点補償をテストしています。温度の変動に対して比較的感度の高い (25°C で 52 μ V/°C) ことが、タイプ J 熱電対を選択した理由です。

0°C、25°C、105°C の冷接点温度で計測を実施しました。結果は図 8 に示します。

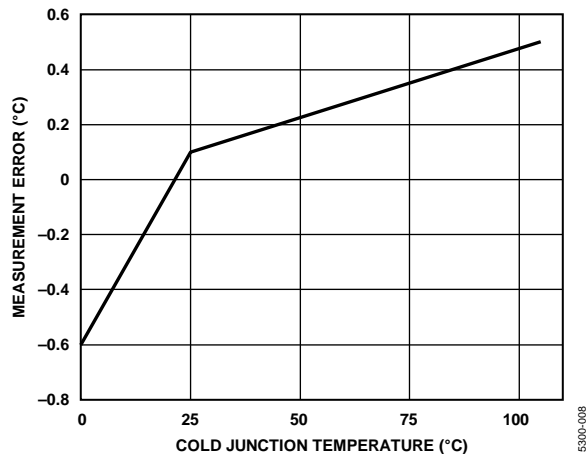


図 8. EVAL-CN0391-ARDZ タイプ J 熱電対の温度計測の誤差
室温、冷接点温度 0°C、25°C、105°C

回路図、レイアウト・ファイル、ガーバーファイル、部品表を含む EVAL-CN0391-ARDZ ハードウェアのすべての技術文書については、CN-0391 設計サポート・パッケージを参照してください。

システム設計のトレードオフ

EVAL-CN0391-ARDZ ボードは、4つの独立した熱電対入力チャンネルのあらゆる組み合わせで柔軟性を最大限に発揮するように設計されています。また、回路設計で使用される追加の部品は最低限に抑えられています。

計測前にシステム・レベルでゼロ・スケール補正とフルスケール補正が実施されている場合、AD7124-8 ADC は高い精度を実現できます。

差動入力のアンチエイリアス・フィルタが各チャンネルに追加されている場合、AD7124-8 のノイズ性能も向上します。典型的なフィルタ配列を図 9 に示します。ここで、R1+R2 および C3 は、差動モード・フィルタ (帯域幅約 800 Hz) を形成し、R1/C1 および R2/C2 は、コモンモード・フィルタ (帯域幅約 16 kHz) を形成します。

AD7124-8 ADC で最適な性能を発揮するための設計については、回路ノート CN-0381、回路ノート CN-0383、回路ノート [CN-0384](#) を参照してください。

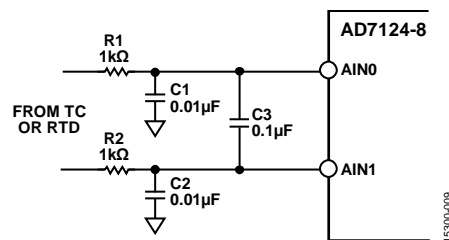


図 9. AD7124-8 の最適な差動モードおよびコモンモード入力フィルタ

AD7124-8 のもう 1 つの利点は、3つの消費電力モードから選択できることです。消費電流、出力データ・レートの範囲、および RMS ノイズは、選択した消費電力モードでカスタマイズできます。また、このデバイスは、複数のフィルタ・オプションを備えているので、優れた柔軟性を発揮します。

コモン変動

AD7124-8 には、15 個の疑似差動入力または 8 個の差動 ADC 入力があります。チャンネル数を減らしてコストを抑えるには、7つの疑似差動入力と 4つの差動入力を備えた [AD71244](#) をご利用ください。

AD7124-8 の 2.5 V の内部リファレンスの初期精度は $\pm 0.2\%$ です。精度を高くし、フルスケール・ゲイン誤差を削減するには、初期精度 $\pm 0.02\%$ の ADR4525 2.5 V リファレンスを使用してください。

回路の評価とテスト

この回路は、EVAL-CN0391-ARDZ Arduino シールド・ボードと EVAL-ADICUP360 Arduino 互換プラットフォーム・ボードを使用します。これらのボードは、EVAL-CN0391-ARDZ を上に、EVAL-ADICUP360 を下にして簡単に積み重ねることができます。EVAL-CN0391-ARDZ ボードの P1 ~ P4 に熱電対を差し込みます。

このシステムは、EVAL-ADICUP360 ボードの USB インターフェース経由で PC に接続します。両方のボードには、USB 5 V 電源から電力が供給されます。RTD センサーは、EVAL-CN0391-ARDZ ボードにすでに取り付けられています。

必要な装置

以下の装置が必要になります。

- USB 2.0 ポートおよび Windows® 7 (64 ビット) 以降の PC
- EVAL-CN0391-ARDZ Arduino シールド互換の回路評価用ボード
- EVAL-ADICUP360 開発ボードまたは Arduino 互換プラットフォーム・ボード
- B、E、J、K、N、R、S、T タイプの熱電対のいずれかの組み合わせ (合計 4) または Time Electronics 1090 温度キャリブレータあるいは同等の製品
- ADICUP360 ソフトウェア (IDE)、CN-0391 ユーザー・ガイドを参照してください。
- PuTTY や Tera Term などのシリアル端末ソフトウェア
- USB A - USB マイクロ・ケーブル
- EVAL-CN0391-ARDZ デモ・コード (CN-0391 ユーザー・ガイド)

評価の開始にあたって

EVAL-CN0391-ARDZ ボードと EVAL-ADICUP360 ボードの両方で、正しいジャンパ設定を選択してください。ジャンパ設定の詳細については、CN-0391 ユーザー・ガイドを参照してください。

EVAL-CN0391-ARDZ Arduino シールド・ボードと EVAL-ADICUP360 Arduino 互換プラットフォーム・ボードに差し込みます。EVAL-CN0391-ARDZ ボードに熱電対センサーを接続します。ユーザー USB ポートを PC に接続します。4つのチャンネルは、それぞれ Omega タイプのコネクタを熱電対に使用します。これにより、別の熱電対タイプへのプラグの抜き差しが簡単になります。ボード (P1 ~ P4) のすべてのチャンネルはユニバーサルで互換性があるため、タイプ U コネクタを使用しました。

Tool Chain Setup User Guide に従い、プロジェクト・デモ・コードを [ADuCM360 IDE](#) にロードします。

CN-0391 ユーザー・ガイドに記載されているとおり、熱電対のタイプに合わせて P1、P2、P3、P4 でソフトウェアを構成する必要があります。

このプログラムを実行すると、出力データが計算され、温度ウィンドウに表示されます。

Arduino フォーム・ファクタ互換の ARM Cortex™-M3 開発プラットフォーム (EVAL-ADICUP360) は、EVAL-ADICUP360 ユーザー・ガイドから入手できます。

機能ブロック図

テスト・セットアップのブロック図を図 10 に示します。

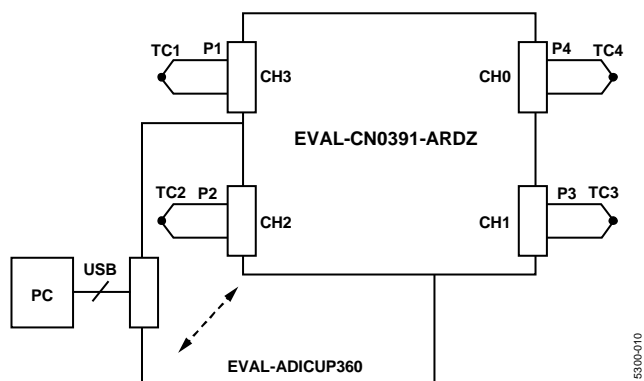


図 10. テスト・セットアップの機能ブロック図
(どちらのボードも PC USB 5 V 電源から電力を供給)

テスト

サンプル・コードがビルドされ、EVAL-ADICUP360 にロードされ、EVAL-CN0391-ARDZ が上部に取り付けられると、デバイスは PC と通信して連続的に値を更新し、各チャンネルに次の内容が表示されます。

- チャンネル番号と熱電対のタイプ
- RTD 抵抗
- 線形化 RTD 温度 (冷接点温度) 」
- 線形化された熱電対温度

選択した熱電対の最後に線形化された値が ITS-90 公式によって定義された範囲外である場合、警告メッセージが表示されます。その他のプログラミング・オプションの詳細は、CN-0391 ユーザー・ガイドに記載されています。

図 11 に、EVAL-CN0391-ARDZ ボードの写真を示します。



図 11. EVAL-CN0391-ARDZ ボードの写真

さらに詳しくは

CN-0391 Design Support Package:

www.analog.com/jp/CN0391-DesignSupport

EVAL-AD7124-4 ユーザー・ガイド (UG-855)

EVAL-AD7124-8 ユーザー・ガイド (UG-856)

EVAL-ADICUP360 ユーザー・ガイド

Kester, Walt

Sensor Signal Conditioning Chapter 7 “Temperature Sensors”

アナログ・デバイセズ、1999年

McCarthy, Mary

AN-615 アプリケーション・ノート

ピーク to ピーク分解能 対 有効分解能

アナログ・デバイセズ

McNamara, Donal

AN-892 アプリケーション・ノート

温度計測の理論と実践上のテクニック

アナログ・デバイセズ

MT-031 チュートリアル

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

アナログ・デバイセズ

MT-101 チュートリアル

Decoupling Techniques

アナログ・デバイセズ

回路ノート CN-0376

Channel-to-Channel Isolated Temperature Input

(Thermocouple/RTD) for PLC/DCS Applications

アナログ・デバイセズ

回路ノート CN-0381

Completely Integrated 4-Wire RTD Measurement System Using a

Low Power, Precision, 24-Bit, Sigma-Delta ADC

アナログ・デバイセズ

回路ノート CN-0383

Completely Integrated 3-Wire RTD Measurement System Using a

Low Power, Precision, 24-Bit, Sigma-Delta ADC

アナログ・デバイセズ

回路ノート CN-0384

Completely Integrated Thermocouple Measurement System Using a

Low Power, Precision, 24-Bit, Sigma-Delta ADC

アナログ・デバイセズ

Duff, Matthew, Joseph Towey

Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples Feature

Simplicity, Accuracy, and Flexibility

アナログ・ダイアログ、44-10、2010年10月

アナログ・デバイセズ

NIST ITS-90 熱電対データベース

NIST 標準参照データベース 60、バージョン 2.0

Time Electronics 1090 温度キャリブレーション

データシートと評価用ボード

EVAL-ADICUP360 評価用ボード

AD7124-8 データシート

ADP7118 データシート

改訂履歴

11/2016—Revision 0: Initial Version

「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。

©2017 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。