



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/CN0354> をご覧ください。

使用したリファレンス・デバイス	
AD8495	熱電対用アンプ、全機能内蔵、Kタイプ用 0°C~50°C、冷接点補償機能付
AD7787	A/D コンバータ、24 ビット、2 チャンネル、 $\Sigma\Delta$ 型、低消費電力
REF194	電圧リファレンス、4.5V、高精度、マイクロパワー、低ドロップアウト
ADG1609	マルチプレクサ、4 チャンネル、オン抵抗 4.5 $\Omega$ 、 $\pm 5V/\pm 12V/\pm 5V/\pm 3.3V$
ADR3412	電圧リファレンス、1.2V、高精度、マイクロパワー
ADM8829	電圧インバータ、スイッチド・キャパシタ式

## 冷接点補償機能付きの低消費電力マルチチャンネル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-0354 評価用ボード (EVAL-CN0354-PMDZ)

システム・デモンストレーション・プラットフォーム (EVAL-SDP-CB1Z)

SDP-I-PMOD インターポーザ・ボード (PMD-SDP-IB1Z)

#### 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、柔軟性を備えた 4 チャンネル低消費電力熱電対測定回路で、総消費電力は 8mW 未満です。この回路は多重化フロントエンドを内蔵しており、その後段には冷接

点補償 (0°C~50°C) を行う計装アンプが接続されていて、5mV/C という高精度のスケール・ファクタで熱電対出力を電圧に変換します。-25°C~+400°C の測定範囲における誤差は 2°C 未満で、これは主に熱電対の非直線性によるものです。非直線性補正アルゴリズムが、900°C 以上の測定範囲における誤差を 0.5°C 未満に減らします。ノイズ・フリー分解能は 0.1°C 未満です。

信号は 24 ビット  $\Sigma\Delta$  ADC によってデジタル化され、SPI シリアル・インターフェースにデジタル値が出力されます。ラビッド・プロトタイピング用の PMOD フォーム・ファクタを用いたこの設計は最小限の PC ボード面積しか必要とせず、熱電対温度を高精度で測定することが求められるアプリケーションに最適です。

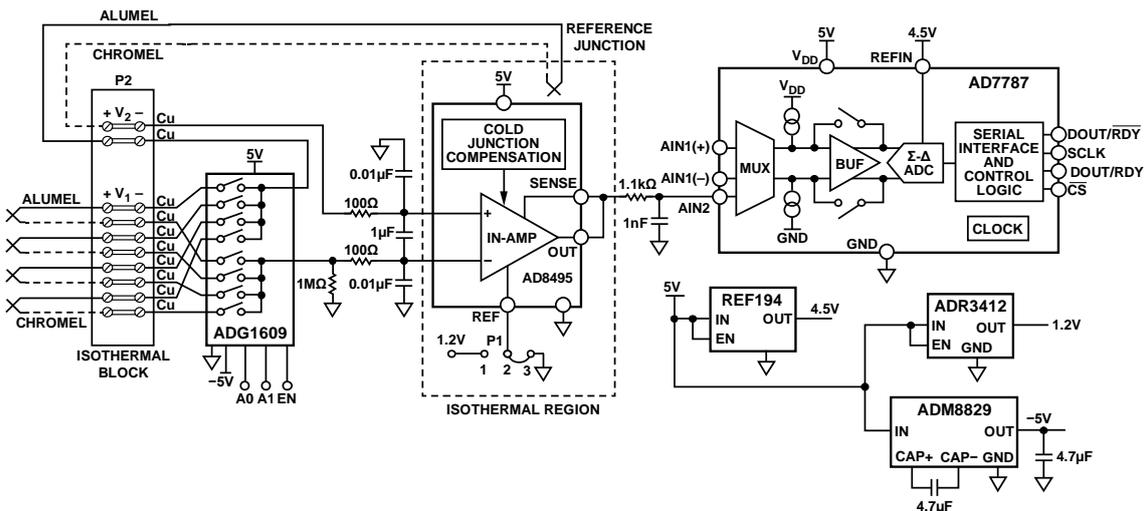


図 1. マルチチャンネル K タイプ熱電対測定システム (簡略回路図: 全接続の一部およびデカップリングは省略されています。)

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。

## 回路説明

回路への4つの熱電対入力は、等温ブロック P2 で終端されています。ADG1609 相補型金属酸化膜半導体 (CMOS) アナログ・マルチプレクサは、4つの熱電対チャンネルを1つのシグナル・コンディショニング・ブロックに切り替えることで、4つの熱電対入力を処理します。各スイッチはブレーク・ピフォア・メーク型のスイッチング動作を行い、チャンネル切替え時のトランジェントを最小限に抑えるために、チャージ・インジェクションが本質的に低く抑えられています。

等温ブロックの出力に生成される熱電対電圧は、測定熱電対の温度と等温ブロック (冷接点) の温度の差に比例します。

信号は、K タイプ熱電対用に高精度の 5mV/°C 出力を提供できるようにレーザ・トリミングされた高精度計装アンプ AD8495 によって増幅されます。AD8495 は、0°C~50°C 範囲の冷接点補償も行います。

図1に示す5番目の熱電対は、等温ブロックと AD8495 の冷接点補償回路の間に存在する温度差によって生じる電圧を相殺するために追加されたものです。マルチプレクサが有効な状態では、等温ブロックの熱電対接続によって形成されるコンスタンタン (アルメル) 銅接点は、リファレンス熱電対接続によって形成される銅コンスタンタン (アルメル) 接点と直列です。ブロックが等温なので、この直列の組み合わせは、値が等しい逆方向の電圧を発生させます。IC のリファレンス接点は 0°C~50°C の範囲になければならず、AD8495 の内部冷接点補償回路はこの状態でリファレンス接点を補正します。したがって、通常は等温ブロックへ AD8495 を直接取り付ける必要がありますが、5番目の熱電対接続によってその必要もなくなります。

AD8495 の出力は、145kHz の-3dB カットオフ周波数を持つ 1.1kΩ/1nF の単極フィルタによってフィルタされます。このフィルタは、AD7787 ADC 入力の広帯域ノイズを最小限に抑えます。

AD7787 は、熱電対測定システムなどの低周波数測定アプリケーション用の 24 ビット低ノイズ低消費電力  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC です。クロックを内蔵しているため外部クロックは不要で、ユーザーが出力データレートを設定できます。また、低い内部クロック周波数で動作するので、消費電力を減らすことができます。このデバイスには、差動入力とシングルエンド入力を1つずつ持つ  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC が含まれており、これらの入力はいずれもマルチプレクサ通過後にバッファすることもバッファしないことも可能です。

AD7787 は内部クロックで動作します。そのため、デバイスに対するクロック・ソース供給は不要です。このデバイスの出力データレートは 9.5Hz~120Hz の範囲でソフトウェア設定可能であり、低更新レートでの RMS ノイズは 1.1 $\mu$ V です。この回路の AD7787 は 9.5kHz の更新レートで動作します。内部クロック周波数は 2、4、8 分周できるため、消費電流を節約することができます。更新レート、カットオフ周波数、セトリング時間は、すべてクロック周波数によって決まります。

AD7787 は 2.5~5.25V の電源で動作します。3V 電源で動作する場合の消費電力は最大 225 $\mu$ W です。このデバイスは 10 ピン MSOP パッケージで供給されます。

## 熱電対のシグナル・コンディショニング

熱電対は、広い温度範囲を必要とする温度測定に使われます。熱電対が測温抵抗体 (RTD) よりも好まれるのは、この点と、コストが安いことによります。しかし、熱電対は非直線性です。つまり、熱電対によって生成される電圧は、異なる温度では異なる率で変化します。たとえば、J タイプの熱電対の 25°C における変化率は 52 $\mu$ V/°C で、150°C では 55 $\mu$ V/°C です。K タイプの熱電対はこれより直線性が良好な傾向があり、0°C 以上での変化率は約 41 $\mu$ V/°C です。温度勾配に対する熱電対の電圧応答は、一般に 6 次以上の多項式で記述されます。

タイプの異なる熱電対の動作温度範囲に対するゼーベック係数を図2に示します。図2は、K タイプの熱電対の温度範囲が最も広く、最大 1250°C までの温度を測定できることを示しています。

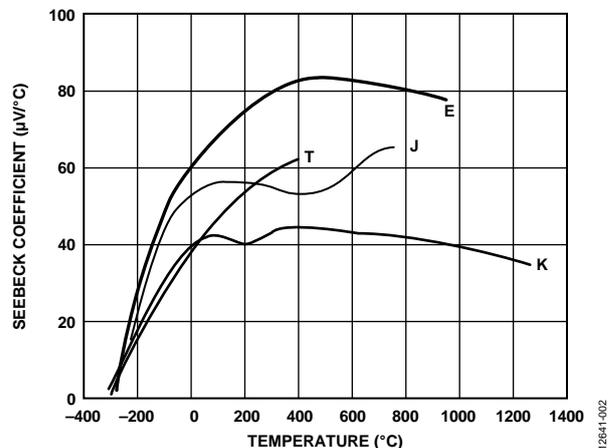


図2. 熱電対のゼーベック係数の温度特性

熱電対は非直線性なので、正確な温度指示値を得るには、複雑なシグナル・プロセッシングとシグナル・コンディショニングが必要ですが、AD8495 はこのような用途に最適です。

AD8495 は、0°C~50°C のリファレンス接点範囲で冷接点補償を行えるようにトリミングされており、5mV/°C の直線的な伝達関数を備えています。-25°C~+400°C の測定範囲における最大出力誤差は $\pm 2$ °C で、出力電圧の計算には次の式を使用します。

$$T_{MJ} = \frac{V_{OUT} - V_{REF}}{5 \text{ mV/}^\circ\text{C}}$$

AD8495 は、回路内の 5V 単電源で動作します。PNP トランジスタの入力構造からして入力電圧は -200mV まで下げることができるので、負の温度も測定可能です。しかし、負の温度を処理するには出力電圧をオフセットさせる必要があり、これはリファレンス電圧入力ピン (REF) を使用して行います。

P1 ジャンパを使って REF ピンを接地している場合、システムが測定できる最低温度は 5°C です。P1 ジャンパは、REF ピンのバイアス電圧を 1.2V の ADR3412 リファレンスに接続することもでき、その場合は -235°C までの測定が可能です。それぞれの条件に対応する温度範囲を表 1 に示します。どちらの場合も温度範囲は 875°C です。REF ピンは、誤差を防ぐために、電圧リファレンスやバッファ・アンプなどの低インピーダンス・ソースでドライブすることが重要です。

表 1. REF = 0V と 1.2V の場合の測定範囲、5V 単電源使用時

REF Pin Voltage	Temperature Range
0 V or Grounded	5°C to 880°C
1.2 V	-235°C to +640°C

### 断線した熱電対の検出

AD8495 は、断線または故障した熱電対を検出することができます。AD8495 の入力 は PNP トランジスタのベースです。したがって、入力からは常にバイアス電流が流れ出しています。どちらかの入力に断線がある場合、出力はどちらかの電源レールに等しくなります。負の入力を 1MΩ の抵抗経由でグラウンドに接続すると、熱電対が断線状態になった場合、AD8495 の出力は上側のレール値となります。4 つのチャンネルのうちのいずれかが使われていない場合は、そのチャンネルが接続された場合に AD8495 の出力が正電源と同じ値にならないように、入力を短絡してください。1MΩ の抵抗は、バイアス電流のグラウンドへのリターン・パスも提供します。

AD8495 は高い同相ノイズ除去性能を備えており、長い熱電対配線による同相ノイズのピックアップを最小限に抑えます。このアンプは高インピーダンス入力なので、電磁干渉/無線周波数干渉 (EMI/RMI) 保護を強化するためのフィルタリング機能を容易に追加できます。

### 電力に関する考慮事項

図 1 の回路は 5V 単電源を使用し、ADG1609、AD8495、AD7787 の VDD ピン、REF194、ADR3412、および ADM8829 に電力を供給します。

REF194 は AD7787 用の 4.5V リファレンスを供給します。また、ADR3412 は、AD8495 の REF 入力用にオプションの 1.2V オフセット電圧を供給します。ジャンパ P1 により、REF ピンを 1.2V またはグラウンドに接続します。

ADM8829 スイッチド・キャパシタ電圧インバータは、負の温度に対応するために、ADG1609 マルチプレクサが必要とする -5V を供給します。

回路内の各デバイスが消費する電流を表 2 に示します。これはデータシートの仕様に基づく値です。この設計では最大 1.56mA の電流を消費します。電流を最も多く消費するのは、ADM8829 スイッチド・キャパシタ電圧インバータです。ADG1609 の VSS ピンをドライブするための負の電流を他から供給できる場合はこのインバータを省略でき、合計電流は約 556μA に減少します。

表 2. 回路の電流消費

Part Number	Maximum Current Consumption
AD8495	250 μA
AD7787	160 μA
ADG1609	1 μA
REF194	45 μA
ADR3412	100 μA
ADM8829	1000 μA

合計電流は 1556μA です。

### テスト結果

AD8495 には熱電対の非直線性による温度誤差があり、その値は、リファレンス接点温度が 0°C ~ 50°C の時に、-25°C ~ +400°C の範囲で最大 ±2°C です。温度範囲を広げたり精度を高めたりするには直線性補正アルゴリズムが必要で、これはソフトウェアで実装できます。非直線性補正については [アプリケーション・ノート AN-1087 「AD8494/AD8495/AD8496/AD8497 を使用する際の熱電対の直線化」](#) に説明があります。この補正アルゴリズムを実装した場合と実装していない場合の回路の直線性誤差を図 3 に示します。

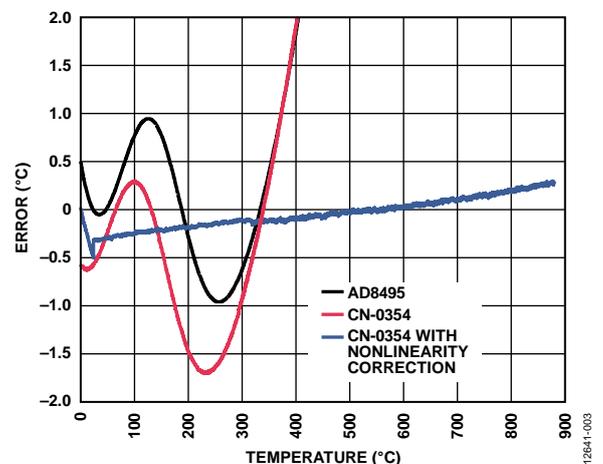


図 3. 補正アルゴリズムを実装した場合と実装していない場合の回路の直線性誤差

システムのノイズは、システムのノイズ・フリー・コード分解能を確認するために、温度が管理された環境でテストしました。図4はノイズ分布で、その幅は約1098コードです。24ビット分解能で幅が900°Cの場合、分解能は1LSB = 900°C/224 = 0.07°Cです。

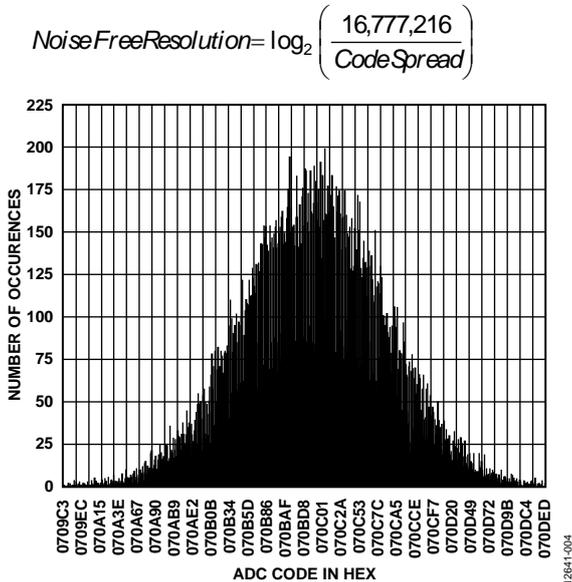


図4. AD7787の入力バッファを無効にした場合の回路のノイズ分布ヒストグラム（出力データレート = 9.5 Hz）

ノイズ・フリー・コード分解能は次式で計算します。

$$\text{NoiseFreeResolution} = \log_2 \left( \frac{16,777,216}{1098} \right) = 13.9 \text{ Bits}$$

## バリエーション回路

CN-0354の回路は、この設計用に選択された部品の値を使って、優れた安定性と高い精度で動作することが実証されました。

この設計はAD594/AD595を使用して実装することもできます。AD594/AD595も、10mV/°C出力の熱電対用シングル・チップ・シグナル・コンディショニング・アンプです。

AD8495にはAD8494、AD8496、AD8497といった他のバリエーションもあり、これらは表3に示すように、熱電対タイプ、周囲温度範囲、測定温度範囲などが異なります。

表3. AD849xの精度±2°Cの温度範囲

Device	Thermocouple Type	Maximum Error	Ambient Temperature Range	Measurement Temperature Range
AD8494	J	±2°C	0°C to 50°C	-35°C to +95°C
AD8495	K	±2°C	0°C to 50°C	-25°C to +400°C
AD8496	J	±2°C	25°C to 100°C	55°C to 565°C
AD8497	K	±2°C	25°C to 100°C	-25°C to +295°C

## 回路の評価とテスト

### 必要な装置

以下の装置類が必要です。

- EVAL-CN0354-PMDZ 評価用ボード
- EVAL-SDP-CB1Z システム・デモンストレーション・プラットフォーム
- PMD-SDP-IB1Z、SDP-I-PMOD、インターポーザ・ボード
- CN0354 評価用ソフトウェア
- 6V 電源アダプタ
- PC (Windows 32 ビットまたは 64 ビット OS)

### ソフトウェアのインストール

CN-0354 評価用キットの CD には自動インストール型のソフトウェアが含まれています。このソフトウェアは、Windows® XP (SP2)、Windows Vista (32 ビットおよび 64 ビット)、Windows 7 (32 ビットおよび 64 ビット) で使用できます。セットアップ・ファイルが自動的に起動しない場合は、CD から **setup.exe** ファイルを実行してください。PC に接続したときに評価システムが正しく認識されるように、評価用ソフトウェアは、評価用ボードと SDP ボードを PC の USB ポートに接続する前にインストールしてください。このソフトウェアを使用すれば、シリアル・インターフェースの構成設定をすべて行うことができます。マスターとスレーブの構成は、システムが適切に動作するように行うことが重要です。

ソフトウェアの動作については、[CN-0354 ソフトウェア・ユーザー・ガイド](#)に説明があります。

### 電源要件

EVAL-CN0354-PMDZ 評価用ボードには、必ず 5V 電源を使用してください。少なくとも 2mA を供給できる電源を推奨します。PMD-SDP-IB1Z インターポーザ・ボードから直接電源を取る場合は、十分にフィルタをかけてデジタル・ノイズを除去してください。

## テスト・セットアップの機能図

セットアップの機能図を図 5 に、EVAL-CN0354-PMDZ の写真を図 6 に示します。

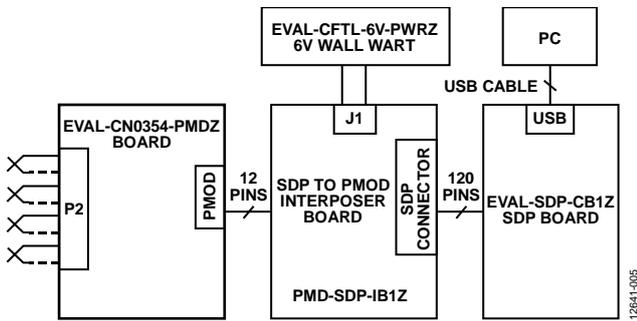


図 5. テスト・セットアップの機能図

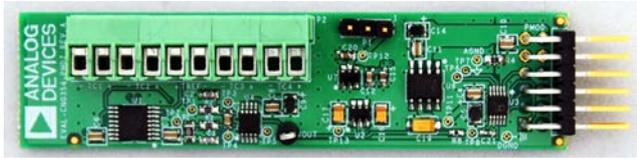


図 6. EVAL-CN0354-PMDZ 評価用ボード

## さらに詳しい資料

CN0354 Design Support Package :  
<http://www.analog.com/CN0354-DesignSupport>

AN-1024 : How to Calculate Settling Time and Sampling Rate of a Multiplexer. Analog Devices.

Analog Dialogue, 44-10 : 熱電対の簡便性、精度、フレキシビリティを利用して温度を測定

測定する 2 つの方法

Kester, Walt, et. al. "Temperature Sensors", Chapter 7 in Sensor Signal Conditioning. Analog Devices, 1999.

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.

AN-1087 : AD8494/AD8495/AD8496/AD8497 を使用する際の熱電対の直線化.

AN-369 : Thermocouple Signal Conditioning Using the AD594/AD595. Analog Devices.

MT-035 Tutorial : Op Amp Inputs, Outputs, Single-Supply, and Rail-to-Rail Issues. 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.

NIST (National Institute of Standards and Technology) Table for Type K Thermocouple.

## データシートと評価ボード

[AD8495 データシート](#)

[AD7787 データシート](#)

[ADG1609 データシート](#)

[REF194 データシート](#)

[ADR3412 データシート](#)

[ADM8829 データシート](#)

## 改訂履歴

2/15—Rev. 0 to Rev. A

Change to Circuit Function and Benefits Section.....1

Change to Table 1.....3

9/14—Revision 0: 初版

「Circuits from the Lab/実用回路集」はアナログ・デバイゼス社製品専用で作られており、アナログ・デバイゼス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・デバイゼス社の提供する情報は正確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・デバイゼス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・デバイゼス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各社の所有に属します。