

**Circuits
from the Lab®**
Reference Designs

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。更に詳しい情報又は支援は www.analog.com/jp/CN0383 をご覧ください。

接続または参考にしたデバイス

AD7124-4	4 チャンネル、低ノイズ、低消費電力、24 ビット、シグマ・デルタ ($\Sigma\Delta$) ADC、PGA およびリファレンス内蔵
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 ($\Sigma\Delta$) ADC、PGA およびリファレンス内蔵
ADP150	超低ノイズ、150mA CMOS リニア・レギュレータ

低消費電力、高精度、24 ビット・シグマ・デルタ ($\Sigma\Delta$) ADC を使用した 完全統合型 2 線式、3 線式、または 4 線式 RTD 測定システム

評価と設計支援

- ▶ 回路評価用ボード
 - ▶ AD7124-4 回路評価用ボード (EVAL-AD7124-4SDZ) または AD7124-8 回路評価用ボード (EVAL-AD7124-8SDZ)
 - ▶ システム・デモンストレーション・プラットフォーム (EVAL-SDP-CK1Z または EVALSDP-CB1Z)
- ▶ 設計および統合ファイル
 - ▶ 回路図、PCB レイアウト・データ、部品表

回路の機能とその利点

図 1 に示す回路は、高精度計測アプリケーション用に最適化された、低消費電力、低ノイズ、24 ビット $\Sigma\Delta$ A/D コンバータ (ADC) である AD7124-4/AD7124-8 をベースとした、2 線式、3 線式、または 4 線式の測温抵抗体 (RTD) システムです。

この回路ノートでは、0°C で $\pm 0.3^\circ\text{C}$ の精度を持ったクラス B の Pt100 RTD センサーを使用していますが、より高精度の RTD であるクラス A、クラス AA、1/3 DIN、または 1/10 DIN などの他のクラスにも応用できます。この回路は、低消費電力アプリケーションで有用な Pt1000 RTD にも対応しています。

AD7124-4/AD7124-8 は、高分解能、低非線形性、低ノイズ性能、それに高い 50Hz/60Hz 除去を実現可能で、産業用 RTD システムに適しています。システムの代表的なピーク to ピーク分解能は、通常消費電力モード、sinc4 フィルタを選択の場合、出力データ・レートが 50SPS で 0.0043°C (17.9 ビット) です。また、低消費電力モード、ポスト・フィルタを選択の場合、出力データ・レートが 25SPS で 0.0092°C (16.8 ビット) です。これらの設定の値は、システム精度がセンサーの精度よりもかなり優れていることを示しています。

AD7124-4/AD7124-8 は、RTD 測定をサポートするために必要ないくつかの重要なシステム・ビルディング・ブロックを統合しています。プログラマブル励起電流源は RTD を励起し、プログラマブル・ゲイン・アンプ (PGA) は RTD を増幅します。これらの機能により、センサーとの直接インターフェースが可能になり、コストと消費電力を削減しながら設計を簡素化できます。

複数のオンチップ・デジタル・フィルタ処理オプションと、消費電流、出力データ・レートの範囲、セトリング時間、および実効値ノイズが最適化された 3 種類の統合電源モードにより、アプリケーションの柔軟性が高まります。低消費電力モードでの消費電流はわずか $255\mu\text{A}$ で、通常消費電力モードでは $930\mu\text{A}$ です。パワーダウン・モードでは、ADC 全体とその補助機能がパワーダウンされるので、AD7124-4/AD7124-8 の消費電流は $1\mu\text{A}$ (代表値) に抑えられます。このパワー・オプションにより、AD7124-4/AD7124-8 は、入力モジュールのような無電力であることが重要なアプリケーションや、トランスミッタ全体の消費電流が 4mA 未満でなければならないループ電源型スマート・トランスミッタのような低消費電力アプリケーションに適しています。

AD7124-4/AD7124-8 は、その包括的な機能セットの一部として、広範な診断機能も内蔵しています。この機能を用いて、アナログ・ピンの電圧レベルが指定の動作範囲内にあるかどうかを確認できます。これらのデバイスには、シリアル・ペリフェラル・インターフェース (SPI) バスの巡回冗長検査 (CRC) とシグナル・チェーンのチェックも含まれており、より堅牢なソリューションを実現できます。これらの診断機能により、診断機能を実装するための外部部品を削減できるため、ソリューションの小型化、設計サイクル・タイムの短縮、コスト削減が可能になります。

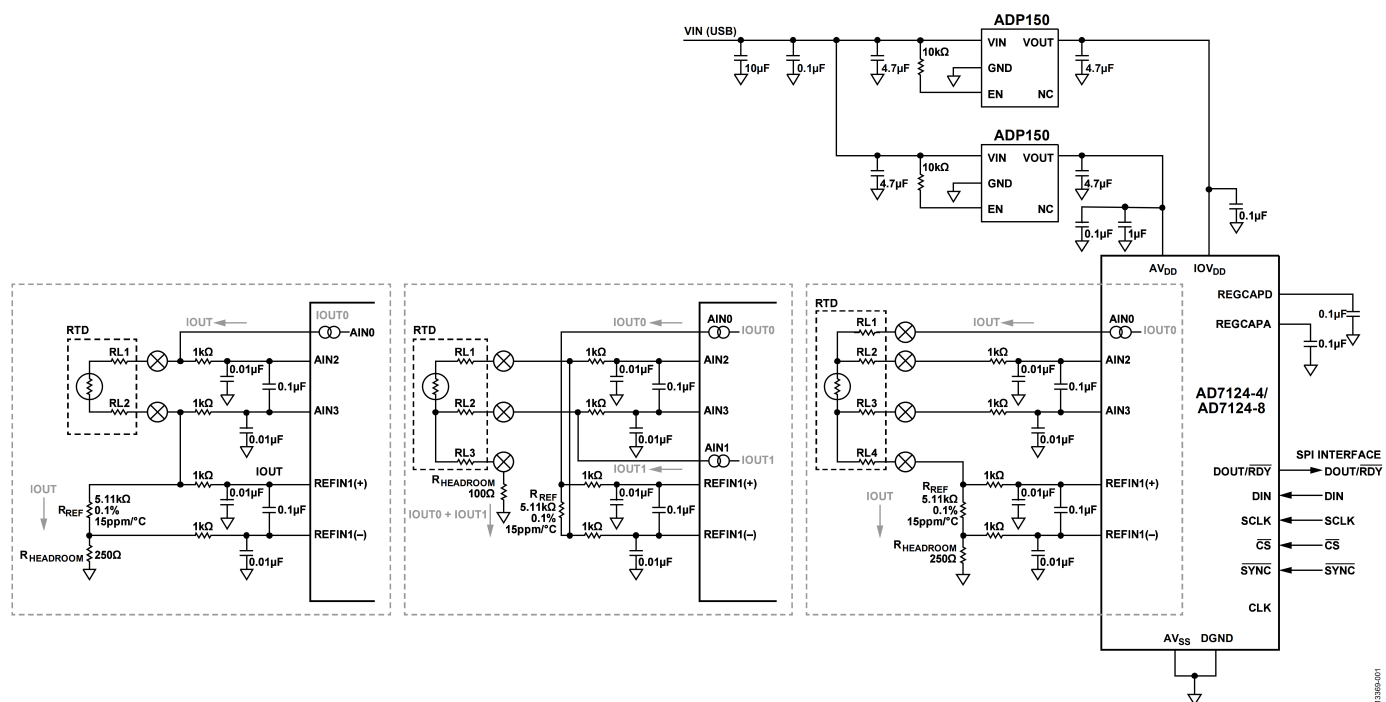


図 1.2 線式、3 線式、または 4 線式 RTD 測定構成

回路の説明

RTD の概要

RTD は、温度測定によく使用されるセンサーです。RTD は純金属（白金、ニッケル、銅など）から作られており、温度変化に伴う抵抗値の変化が予測可能で、一般には+850°C まで測定できます。RTD は、サーミスタ、熱電対、半導体（IC）温度センサーなど、他種の温度センサーと比較すると、高精度で安定性が高いセンサーです。最も広く使用されている RTD は、白金の Pt100 と Pt1000 です。これらのセンサーは、0°C における公称抵抗値によって分類されます。プラチナ RTD センサーの許容差と精度の限界値を定義する業界標準がいくつかあります。

図 1 の回路では、-200°C ~ +600°C の範囲を測定できるクラス B の Pt100 RTD センサーを使用しています。クラス B の Pt100 RTD の抵抗値は 0°C で 100Ω（代表値）であり、温度係数は約 0.385Ω/°C（代表値）（図 2 参照）、0°C での許容差は±0.3°C です。RTD のキャリブレーション温度（0°C）を逸脱した温度では、許容差の範囲が広がり、精度が低下します。Pt1000 RTD も同様の範囲と許容差のものが入手可能です。ただし、Pt1000 RTD の抵抗値は、Pt100 センサーの抵抗値に比べて 10 倍高くなります。

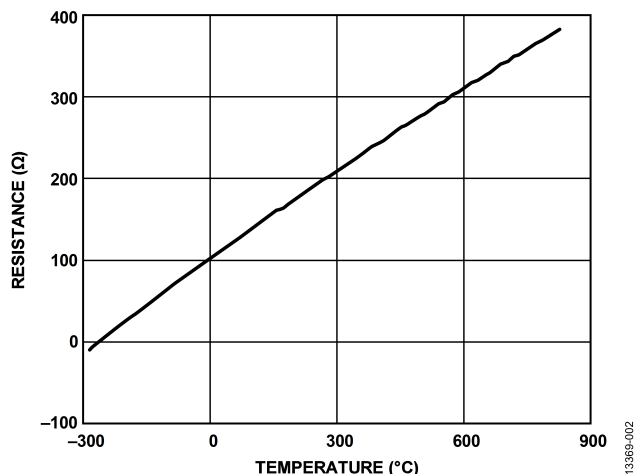


図 2. Pt100 RTD の抵抗と温度の関係

RTD 測定アプリケーションで一般的に使用される RTD 構成には、2 線式、3 線式、4 線式の 3 種類があります。2 線式は最もシンプルな構成です。しかし、この構成では、リード抵抗が RTD と直列となって補正できないため、誤差が生じます。したがって、2 線式 RTD は、リード線が短く、精度へのリード抵抗の影響が最小化される場合に使用されます。長いリード線の抵抗は、2 つの励起電流を使用する 3 線式接続で補正できますが、長いリード線の抵抗による誤差は、4 線式接続を使用することでほぼなくなります。したがって、4 線式の構成が最良の性能となります。

ただし、3 線式 RTD では、RTD への接続が 3 つしか必要ないため、コネクタ・サイズを最小限に抑える設計に有効です（必要な接続端子は 3 つで、4 線式 RTD では 4 端子必要です）。

RTD の伝達関数

Pt100 RTD の仕様によれば、抵抗値は約 0.385Ω/°C で変化します。この関係は、RTD のおよその温度を素早く求める方法として使用できます。この方法は、RTD の温度係数が温度範囲にわたってわずかに変化するため、不正確です。しかし、温度を素早く確認する方法としては有効です。

およその温度を計算するには、式 1 を使用します。ここで、RTD の抵抗値は、0°C で 100Ω です。

$$Temperature(^{\circ}C) = (R_{RTD} - 100) / 0.385 \quad (1)$$

RTD の伝達関数は Callender-Van Dusen 方程式として知られ、より正確な結果が得られます。これは、2 つの異なる多項式で構成されています。0°C 未満の温度には式 2 を使用し、0°C を超える温度には式 3 を使用します。

温度 (T) ≤ 0°C の式は次のとおりです。

$$R_{RTD}(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3) \quad (2)$$

T ≥ 0°C の式は次のとおりです。

$$R_{RTD}(T) = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (3)$$

ここで、

$R_{RTD}(T)$ は温度 (T) における RTD の抵抗値

R_0 は 0°C での RTD の抵抗値（この場合、 $R_0 = 100\Omega$ ）

T は RTD の温度 (°C)

$$A = 3.9083 \times 10^{-3}$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7}$$

$$C = -4.183 \times 10^{-12}$$

式 2 および式 3 の伝達関数が与えられている場合、温度を RTD 抵抗値の関数として決定するには多くの異なる方法があります。この回路ノートでは、正確さの点から直接的な数学による方法を選択しています。式 4 を使用すると、温度は次のように計算できます。

$$T_{RTD}(^{\circ}C) = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{r}{R_0})}}{2B} \quad (4)$$

ここで、 r は RTD の抵抗値で、他の変数は前に定義したとおりです。

回路の説明

この方法は、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ の温度でうまく機能します。 0°C 未満の温度における RTD の温度を計算するには、最適な多項式が必要です。この回路ノートで使用している多項式は、式 5 に示すように 5 次の多項式です。

$$T_{RTD}(^{\circ}\text{C}) = -242.02 + (2.2228 \times r) + (2.5859 \times 10^{-3})r^2 - (4.826 \times 10^{-6})r^3 - (2.8183 \times 10^{-8})r^4 + (1.5243 \times 10^{-10})r^5 \quad (5)$$

RTD の測定

RTD の抵抗値を正確に測定するには、一定の励起電流源によって R_{RTD} 端子間に低レベルの電圧を生成させます。この低レベルの電圧は、次に ADC のオンボード PGA によって増幅され、さらに 24 ビットの $\Sigma\text{-}\Delta$ ADC を用いて高精度デジタル表現に変換されます。電流源の誤差は、測定値を、同じ電流源で駆動される高精度のリファレンス抵抗 (R_{REF}) 端子間の電圧と比較することで容易に相殺が可能で、それによってレシオメトリック測定結果が得られます。

ADC がユニポーラ・モードで動作している場合、RTD の抵抗値 (R) を計算する一般式は次式で与えられます。

$$R_{RTD}(\Omega) = \frac{(CODE \times R_{REF})}{G \times 2^N} \quad (6)$$

ADC がバイポーラ・モードで動作している場合、RTD の抵抗値 (R) を計算する一般式は次式で与えられます。

$$R_{RTD}(\Omega) = \frac{(CODE - 2^{N-1}) \times R_{REF}}{G \times 2^{N-1}} \quad (7)$$

ここで、

$CODE$ は ADC のコード。

R_{REF} はリファレンス抵抗値。

N は ADC の分解能 (この場合は 24)。

G は選択したゲイン。

例として、AD7124-4/AD7124-8 をバイポーラ・モードに設定し、温度を 25°C に設定した場合、AD7124-4/AD7124-8 から読み出されるコードは 11270065 になります。このコードを式 7 を用いて抵抗値に変換すると次のようになります。

$$R_{RTD} = \frac{(11270065 - 2^{23}) \times R_{REF}}{G \times 2^{23}} = 109.704 \quad \Omega$$

式 4 を用いて線形化すると、温度は 24.921°C となります。

2 番目の例として、AD7124-4/AD7124-8 をバイポーラ・モードに設定し、温度を -25°C に設定した場合、AD7124-4/AD7124-8 から読み出されるコードは 10757779 になります。

このコードを抵抗値に変換すると次のようになります。

$$R_{RTD} = \frac{(10757779 - 2^{23}) \times R_{REF}}{G \times 2^{23}} = 90.200 \quad \Omega$$

式 5 を用いて線形化すると、温度は -24.982°C となります。

RTD 設計の考慮事項

以下のセクションでは、回路部品を設計し、図 1 に示す RTD 測定回路に必要な動作を設定する際の一般的なガイドラインについて説明します。

RTD 配線構成のセクションでは、各配線構成で使用される様々な回路技術と接続について説明しています。ここに示したそれぞれの回路構成で使用される全ての考慮事項と計算については、**RTD 配線構成**のセクションを参照してください。

ADC

システムの精度は、RTD センサーの仕様と ADC の性能に依存します。AD7124-4/AD7124-8 は、RTD 測定のための統合ソリューションを提供します。これらのデバイスは、高分解能、低い非直線性、低ノイズ性能、そして優れた 50Hz/60Hz 除去性能を実現できます。AD7124-4/AD7124-8 は、オンチップ・プログラマブル励起電流源、リファレンス・バッファ、RTD からの小信号を増幅する低ノイズ PGA で構成されています。これらにより、センサーとの直接インターフェースが可能になり、必要な外付け回路を最小限に抑えることができます。

電源

AD7124-4/AD7124-8 では、アナログとデジタルの電源を分離しています。デジタル電源 IOV_{DD} はアナログ電源から独立しており、DGND を基準として $1.65\text{V} \sim 3.6\text{V}$ の範囲で使用できます。アナログ電源 AV_{DD} は AV_{SS} を基準とし、低消費電力および中消費電力モードでは $2.7\text{V} \sim 3.6\text{V}$ の範囲、通常消費電力モードでは $2.9\text{V} \sim 3.6\text{V}$ の範囲となります。図 1 に示す回路は単電源で動作します。そのため、 AV_{SS} と DGND は互いに接続し、グラウンド・プレーンは 1 つしか使用しません。 AV_{DD} 電圧と IOV_{DD} 電圧は ADP150 電圧レギュレータを用いて個別に生成されます。ADP150 レギュレータを使用して、 AV_{DD} 電圧は 3.3V 、 IOV_{DD} 電圧は 1.8V に設定されます。別々のレギュレータを使用すると、ノイズを最低限に抑えることができます。

電源モードの選択は、目的のアプリケーションにおける電流バジェット割り当てに依存します。アプリケーションが、より高い出力データ・レートと優れたノイズ性能を必要とする場合は、デバイスを通常消費電力モードに設定できます。ポータブル・アプリケーションでは、低消費電力の部品を使用する必要があります。また、一部の工業用アプリケーションでは、最大 4mA の電流バジェットが可能のように、システム全体の電源を $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$ ループから供給します。この種のアプリケーションでは、デバイスを中消費電力モードまたは低消費電力モードに設定できます。

励起電流と出力コンプライアンス

AD7124-4/AD7124-8 は、レジスタにより $50\mu\text{A} \sim 1\text{mA}$ の範囲で設定可能な 2 つの励起電流源を備えています。励起電流の選択は、RTD の入力電圧範囲、ゲイン選択、リファレンス抵抗とリファレンス・バッファ・ヘッドルーム抵抗に影響します。性能を向上させるためには、励起電流をできる限り最大にします。ただし、RTD 測定の際には、励起電流源の出力コンプライアンスも考慮する必要があります。

回路の説明

この回路では、500 μ A を選択し、出力コンプライアンス電圧は $AV_{DD} - 0.37V$ となります。この回路の AV_{DD} 電源電圧は 3.3V です。したがって、励起電流源の出力コンプライアンス・レベルは 2.93V 未満でなければなりません。

Callender-Van Dusen 方程式を用いると、RTD の温度範囲を $-200^{\circ}C \sim +600^{\circ}C$ とした場合、500 μ A の励起電流で RTD 端子間に発生する電圧は約 9.26mV $\sim$ 156.85mV となります。

アナログ入力とゲイン選択

センサーからの信号は非常に小さいため、低ノイズのゲイン・ステージで増幅する必要があります。これは、選択する RTD に応じて、数 10 ミリボルト $\sim$ 数 100 ミリボルトの幅があります。PGA を内蔵する ADC を使用すれば、外付けのアンプ・コンポーネントは不要になります。AD7124-4/AD7124-8 は、RTD からの小信号を 1 $\sim$ 128 のプログラマブルなゲイン範囲で増幅するオンチップの低ノイズ PGA で構成されているため、センサーとのダイレクト・インターフェースが可能です。ゲイン・ステージの入力インピーダンスは高いため、入力リーク電流を通常消費電力モードで 3.3nA (typ)、低消費電力モードで 1nA (typ) に制限します。オンチップ励起電流を 500 μ A に設定した場合、最高温度が 600 $^{\circ}C$ で、RTD 端子間に発生する電圧は約 156.85mV となります。

AD7124-4/AD7124-8 の最大レンジを確保するために、PGA のゲインは 16 に設定します。PGA は、RTD センサーの最大出力電圧を 2.5096V に増幅します。

リファレンスとリファレンス・バッファのヘッドルーム

図 1 の回路では、REFIN+ と REFIN- をリファレンス入力としています。RTD を流れる電流は、リファレンス電圧を生成する高精度リファレンス抵抗にも流れます。高精度リファレンス抵抗の端子間に発生する電圧は、RTD 端子間の電圧にレシオメトリックとなります。したがって、励起電流で生じる変動は除去されます。

リファレンスは、スイッチド・キャパシタによって連続的にサンプリングされます。この回路では、リファレンス入力は外付けのリファレンス抵抗によって駆動されます。RC 値が大きいと、測定にゲイン誤差が生じることがあるので注意してください。内部リファレンス・バッファをイネーブルすると、誤差を増やすことなく、広範囲の抵抗値または EMC フィルタ処理が可能です。リファレンス・バッファをイネーブルした場合、正しい動作に必要なヘッドルームを十分にとる必要があります。

リファレンス電圧は、最小リファレンス電圧 $\sim$ 最大リファレンス電圧の範囲内になければなりません。AD7124-4/AD7124-8 は 0.5V $\sim$ ($AV_{DD} - AV_{SS}$) の範囲のリファレンスで動作できます。リファレンス・バッファは電源レールの上下に少なくとも 0.1V のヘッドルームを必要とします。

励起電流 (I_{EXC}) を 500 μ A とし、ADC の増幅電圧 ($V_{RTD_{MAX}}$) を考慮すると、リファレンス抵抗値は次のようになります。

$$\frac{V_{RTD_{MAX}}}{I_{EXC}} = \frac{2.51 \text{ V}}{500 \text{ } \mu\text{A}} = 5020 \text{ } \Omega$$

したがって、5.11k Ω の抵抗を選択し、次式によりリファレンス電圧 (V_{REF}) が求められます。

$$V_{REF} = R_{REF} \times I_{REF} = 5.11k\Omega \times 500\mu A = 2.555V$$

0.125V (500 μ A $\times$ 250 Ω) のヘッドルームは、図 1 (2 線式と 4 線式のセクションを参照) に示すように、250 Ω の抵抗をグラウンドに接続することで得られます。このヘッドルーム抵抗は、リファレンス抵抗を回路のロー・サイドに配置している場合に必要です。図 1 (3 線式のセクションを参照) に示すように、リファレンス抵抗がハイ・サイドにある場合、リファレンス・バッファのヘッドルーム条件は、より高い RTD 温度測定 (300 $^{\circ}C$ 以上) の場合に満たされます。したがって、この測定構成では追加のヘッドルーム抵抗は必要ありません。しかし、より低い RTD 温度測定 (300 $^{\circ}C$ 未満) では、図 1 (3 線式のセクションを参照) に示すように、100 Ω の抵抗をグラウンドへ接続することによって、0.1V (500 μ A $\times$ 100 Ω) のヘッドルームが得られます。

これまで述べたとおり、この回路の AV_{DD} 電源電圧は 3.3V です。したがって、励起電流源の出力コンプライアンス・レベルは 2.93V 未満でなければならず、リファレンス電圧は 0V $\sim$ 3.3V の範囲内でなければなりません。

AIN0 (IOUT0) ピンの最大電圧は、高精度リファレンス抵抗の端子間電圧に RTD の端子間電圧を加え、さらにヘッドルーム抵抗の端子間電圧を加えたものであるため、この仕様は満たされています。

$$V_{REF} + V_{RTD} = 2.555V + 156.85mV = 2.71185V$$

デジタル・フィルタ処理とアナログ・フィルタ処理

差動フィルタ (約 800Hz カットオフ) およびコモンモード・フィルタ (約 16kHz カットオフ) が、アナログ入力とリファレンス入力に実装されています。このフィルタ処理は、変調器周波数およびその倍数の周波数での妨害を除去するために必要です。

センサーで高精度の測定を行うためには、センサーのノイズと精度がシステム全体の誤差を支配することも重要です。ノイズは、ADC が認識できるセンサー信号レベルのごく小さな変化を制限して、システムの分解能に直接影響するため、システムの精度に影響を与える可能性があります。また、キャリブレーションを行って、正確で再現性のある測定結果が必要とされる場合にも影響を与える可能性があります。したがって、ADC の分解能とノイズ性能がセンサーのノイズと分解能よりも優れていることが重要です。

AD7124-4/AD7124-8 は、オンチップ・デジタル・フィルタ処理の柔軟性に優れています。いくつかのフィルタ・オプションを使用できます。選択するフィルタ・オプションは、出力データ・レート、セトリング時間、50Hz/60Hz 除去に影響します。この回路ノートでは、sinc4 フィルタとポスト・フィルタを実装しています。sinc4 フィルタを使用しているのは、出力データ・レートの全範囲にわたって優れたノイズ性能と 50Hz/60Hz 除去性能を備えているからです。ポスト・フィルタは、セトリング時間が 40ms で、50Hz と 60Hz の除去を同時に行うために使用します。

回路の説明

同一のフィルタ、ゲイン、出力データ・レート設定において、各システムの入力に RTD を接続した場合と ADC アナログ入力を短絡した場合のノイズ実効値とノイズ性能を表 1 と表 2 に示

します。RTD にはノイズがいくらかあるため、RTD を接続すると測定ノイズが大きくなります。

表 1. 代表的なノイズ性能、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、50SPS

RTD Configuration	Input Condition	RMS Noise (nV)	Noise Free Resolution
2-wire	RTD connected	169.33	0.0029°C (18.09 bits)
	Shorted	102	0.0017°C (18.83 bits)
3-wire	RTD connected	199.37	0.0032°C (17.9 bits)
	Shorted	100	0.0018°C (18.7 bits)
4-wire	RTD connected	199.37	0.0032°C (17.9 bits)
	Shorted	100	0.0018°C (18.7 bits)

表 2. 代表的なノイズ性能、ポスト・フィルタ、低消費電力モード、25SPS

RTD Configuration	Input Condition	RMS Noise (nV)	Noise Free Resolution
2-wire	RTD connected	347	0.0059°C (17.05 bits)
	Shorted	335	0.0057°C (17.1 bits)
3-wire	RTD connected	774	0.0070°C (16.8bits)
	Shorted	360	0.0050°C (17.3 bits)
4-wire	RTD connected	774	0.0070°C (16.8 bits)
	Shorted	360	0.005°C (17.3 bits)

キャリブレーション

AD7124-4/AD7124-8 は、オフセット誤差とゲイン誤差を除去できる異なるキャリブレーション・モードを備えています。この回路ノートでは、内部ゼロスケール・キャリブレーションと内部フルスケール・キャリブレーションを使用しています。これらのキャリブレーションは ADC のゲイン誤差とオフセット誤差のみを除去し、外部回路によって生じるゲイン誤差とオフセット誤差は除去しないことに注意してください。

診断機能

AD7124-4/AD7124-8 は、アナログ・ピンの電圧レベルが指定の動作範囲内にあるかどうかを確認できるオンチップ診断機能を備えています。全てのアナログ入力ピン (AINx) は、過電圧と低電圧、それに ADC の飽和を個別に確認できます。アナログ入力の電圧が AV_{DD} を超えると過電圧のフラグが立ち、アナログ入力の電圧が AV_{SS} を下回ると低電圧のフラグが立ちます。システムの広範な診断機能には、SPI バスの CRC とシグナル・チェー

ンのチェックも含まれ、より堅牢なソリューションが得られます。これらの診断機能により、診断機能を実装するための外部部品点数を削減できるため、ソリューションの小型化、設計サイクル・タイムの短縮、コスト削減が実現します。IEC 61508 規格に従って実施した、代表的なアプリケーションの故障モードの影響と診断解析 (FMEDA) において、安全側故障割合 (SFF) は 90%を超える値を示しました。

RTD 配線構成

AD7124-4 は 4 差動または 7 疑似差動の入力チャンネルに、AD7124-8 は 8 差動または 15 疑似差動のチャンネルに構成できます。これらはフレキシブルなマルチプレクサを用いているので、センサーの接続が容易で、同じ基板上に複数の 2 線式、3 線式、4 線式の RTD を接続できます (表 3 を参照)。

表 3. 接続可能な RTD の最大数

Product	Wiring Configuration		
	2 Wire	3 Wire	4 Wire
AD7124-4	2	2	2
AD7124-8	5	4	5

以下のセクションでは、図 1 に示す 3 種類の RTD 配線における回路と ADC 構成について説明します。これらのセクションでは、RTD 設計の考慮事項のセクションで既に述べたように、ADC の構成、センサー接続、出力コンプライアンス、リファレンスとゲインの選択などの ADC 側からの条件とともに、RTD を ADC にインターフェースするために必要な様々な技術を考察し、RTD の各構成設計について焦点を当て、理解を深めます。また、各セクションでは、単一 RTD センサーで各構成を使用した際の結果や、それから学ぶこと、得られることについて議論します。

2 線式 RTD 構成

2 線式 RTD 構成は最も単純な構成です。AD7124-4/AD7124-8 の 3 つのアナログ・ピン (AIN0、AIN2、AIN3) が 2 線式構成を実装するのに使用されます。AIN2 と AIN3 は完全差動入力チャンネルとして構成され、RTD 端子間電圧の検出に使用されます。使用されるリファレンス入力、REFIN+ と REFIN- です。ロー・サイドにリファレンス抵抗を使用するため、リファレンス・ヘッドルーム抵抗が必要です。

2 線式構成の場合、励起電流源が 1 つ必要です。RTD、リファレンス抵抗、ヘッドルーム抵抗を励起するのに使用される励起電流源は、AV_{DD} から生成され、AIN0 (IOUT0) に送られます。同じ電流が、リファレンス電圧を生成する RTD と高精度リファレンス抵抗を流れるため、レシオメトリック測定が確保されます。

回路の説明

2 線式の場合、AIN0 ピンと AIN2 ピンはコネクタで短絡する必要があります。AIN3 と REFIN1(+) もコネクタで短絡する必要があります。アナログ・ピンとその構成の詳細を図 3 に示します。リファレンス抵抗とヘッドルーム抵抗の選択は、励起、ゲイン、デジタル・フィルタ処理も含めて、RTD 設計の考慮事項のセクションに基づきます。

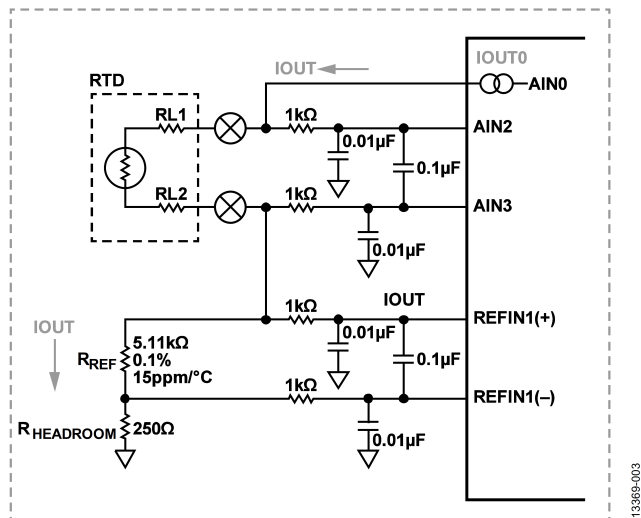


図 3. 2 線式 RTD アナログ入力構成での測定

AD7124-4/AD7124-8 の 2 線式 RTD 測定の構成は次のとおりです。

- ▶ 差動入力：正のアナログ入力(AIN+) = AIN2、負のアナログ入力(AIN-) = AIN3
- ▶ 励起電流：IOUT0 = AIN0 = 500μA
- ▶ ゲイン = 16
- ▶ 5.11kΩ の高精度リファレンス抵抗
- ▶ 250Ω のヘッドルーム抵抗
- ▶ デジタル・フィルタ処理 (sinc4、50SPS、およびポスト・フィルタ、25SPS)

図 3 に示す RTD 回路を使用し、異なるデジタル・フィルタ構成および消費電力モード構成の AD7124-4/AD7124-8 を用いて、データを収集しました。具体的には、[デジタル・フィルタ処理](#)と[アナログ・フィルタ処理](#)のセクションで述べたように、通常消費電力モードでは sinc4 フィルタを使用し、低消費電力モードではポスト・フィルタを使用しています。

この 2 線式システムの代表的なノイズ・フリー・コード分解能は、通常消費電力モードおよび sinc4 フィルタ選択時で 18.09 ビット、低消費電力モードおよびポスト・フィルタ選択時で 17.05 ビットです。これらは、それぞれの温度測定において、約 0.0029°C と 0.0059°C の誤差変動に相当します。2 線式 RTD を接続した場合のノイズ分布を図 4 と図 5 に示します。

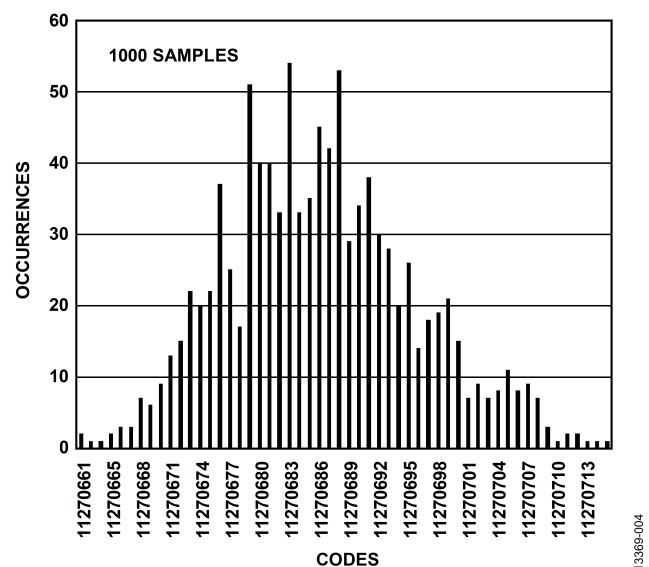


図 4. 室温、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、50SPS における 2 線式 RTD のコードのヒストグラム

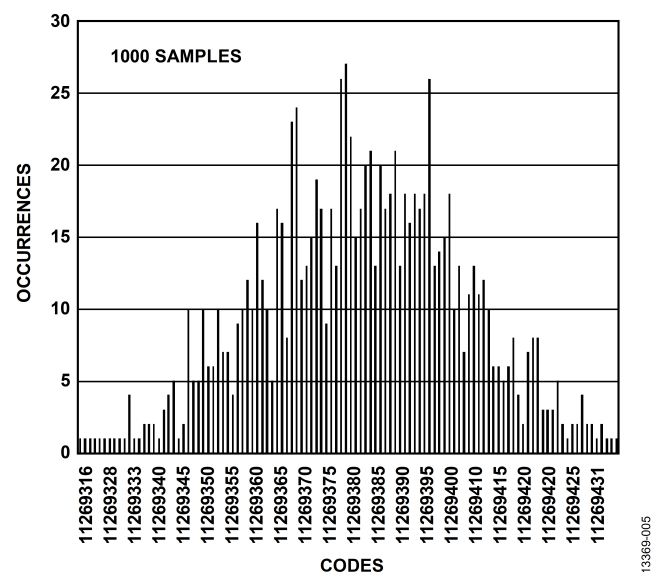


図 5. 室温、ポスト・フィルタ、低消費電力モード、25SPS における 2 線式 RTD のコードのヒストグラム

2 点キャリブレーションと線形化により、2 線式システムの全体的な精度は、-50°C ~ +165°C の温度範囲において ±1°C より優れています。各温度について、AD7124-4/AD7124-8 を使って、RTD の端子間電圧を前述の要領で測定しました。[RTD の伝達関数](#)のセクションで説明したように、この電圧は抵抗に変換され、線形化されて、温度に変換されます。

回路の説明

以上のデータから得られた誤差（設定温度から測定温度を差し引いた値）を図 6 と図 7 に示します。各 RTD 温度設定に対して、AD7124-4/AD7124-8 は 25°C に保たれています。ここに示されているように、誤差は 0°C での RTD エンベロープに近く、リード抵抗によって誤差が付加されます。0°C 以上でも以下でも、測定値は RTD の仕様内に収まっています。図 6 と図 7 には、AD7124-4/AD7124-8 を異なる温度に設定した場合の RTD 誤差の偏差も示されています。AD7124-4/AD7124-8 のそれぞれの温度設定において、内部ゼロスケール・キャリブレーションとフルスケール・キャリブレーションが行われています。図 6 と図 7 に示すように、2 線式測定の場合、全体的な誤差も 0°C での RTD のエンベロープに近くなっています。他の全ての温度では、RTD の誤差は、AD7124-4/AD7124-8 の全ての温度設定について、クラス B RTD に期待される誤差の範囲内に十分収まっています。

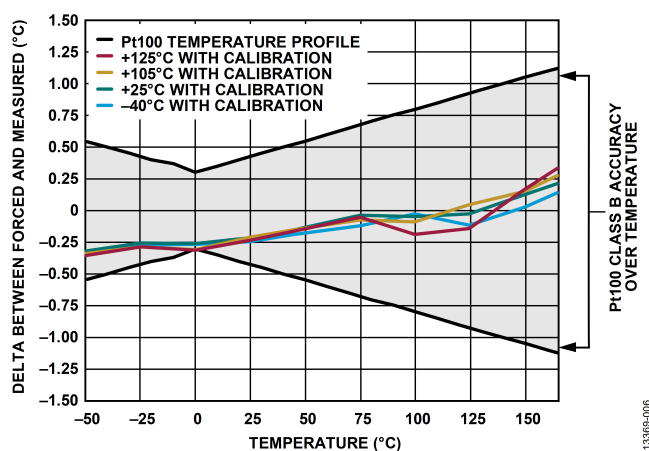


図 6. 2 線式 RTD の温度精度測定、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、50SPS

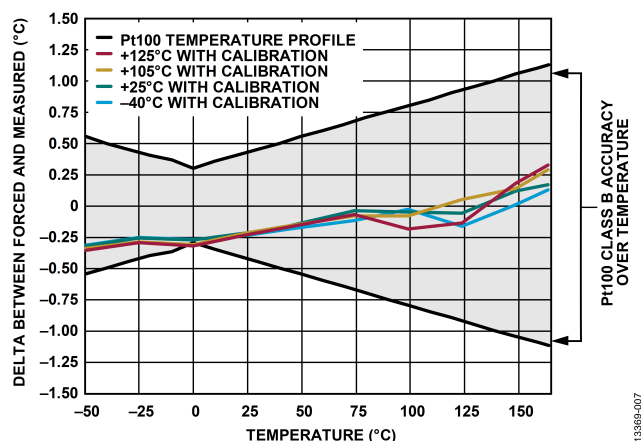


図 7. 2 線式 RTD の温度精度測定、ポスト・フィルタ、低消費電力モード、25SPS

図 8 と図 9 は、25°C で内部ゼロ・スケール・キャリブレーションとフル・スケールキャリブレーションを 1 回実施した場合の RTD 温度測定値の誤差を示しています。図 8 と図 9 は、25°C での 1 回のキャリブレーション、または AD7124-4/AD7124-8 の各個別温度でのキャリブレーションでは、AD7124-4/AD7124-8 が高温になるとリード抵抗誤差のために性能が劣化することを示しています。

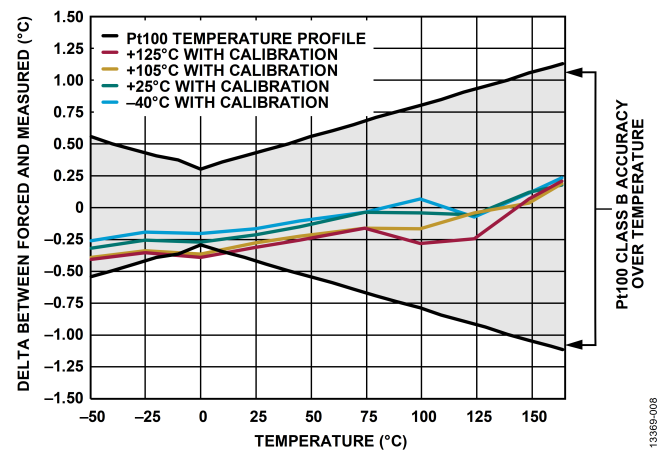


図 8. 2 線式 RTD の温度精度測定、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、50SPS、25°C で 1 回のみのキャリブレーション

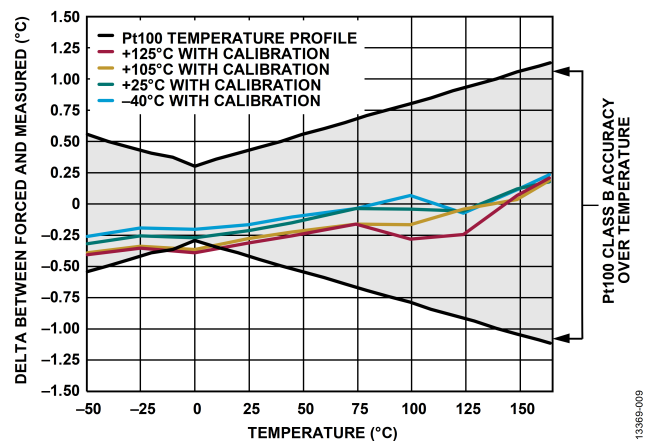


図 9. 2 線式 RTD の温度精度測定、ポスト・フィルタ、低消費電力モード、25SPS、25°C で 1 回のみのキャリブレーション

2 線式 RTD におけるリード抵抗の考慮事項

2 線式 RTD の実装では、誤差境界の下限にかなり近い誤差が見られます。この背景には、2 線式 RTD の測定値が、そのリード抵抗のために実際の測定値よりも常に高くなる場合があります。2 線式 RTD 構成の場合、図 3 のリード抵抗、RL1 と RL2 は、RTD 素子と直列に抵抗を追加するため、ADC 入力端子間の電圧測定値を増加させ、その結果、印加温度よりも測定温度が高くなります。

回路の説明

例えば、24AWG 銅線の公称抵抗は、 $0.026\Omega/\text{foot}$ ($0.08\Omega/\text{meter}$) です。RTD のリード線の長さが 25 フィートの場合、リード線の合計抵抗 (RL1 および RL2) は 1.3Ω に相当します。RTD の温度係数は約 $0.385\Omega/^\circ\text{C}$ です。したがって、 1.3Ω のリード抵抗は、リード抵抗により $(1.3/0.385) = 3.38^\circ\text{C}$ の誤差を生じることになります。

この誤差を補正する唯一の方法は、手動でオフセットをキャリブレーションすることであり、これはリード線の抵抗が一定である限り可能です。しかし、リード線抵抗は温度によって変化します。したがって、周囲温度が変化すると、リード線抵抗も変化し、温度測定にある程度の誤差が生じることになります。リード線が長い場合、この誤差原因は大きくなります。

したがって、2 線式 RTD 構成は、リード線が短いアプリケーションや高抵抗センサー（例えば、PT1000）を使用して、リード抵抗の精度への影響を最小限に抑えることができる場合に主に使用されます。

3 線式 RTD 構成

3 線式 RTD 構成は、ピン数が 3 つで他の構成よりも精度に優れるため、最も一般的に使用される構成です。

図 10 に示す回路では、AD7124-4/AD7124-8 の AIN0、AIN1、AIN2、AIN3 の 4 つのアナログ・ピンが 3 線式測定の実装に使用されています。AIN2 と AIN3 は完全差動入力チャンネルとして構成され、Pt100 RTD センサーの電圧を検知するのに使用されます。RTD を励起するための励起電流源は AV_{DD} から生成され、AIN0 に送られます。これと同じ電流が AIN1 に送られ、RL2 リード抵抗に流れ、RL1 リード抵抗端子間で降下した電圧を相殺する電圧を生成します。使用されるリファレンス入力は、REFIN+とREFIN1-です。ここでもレシオメトリック構成が採用され、励起電流の変動による誤差が除去されます。

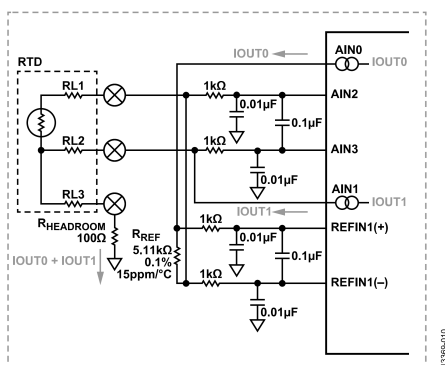


図 10.3 線式 RTD アナログ入力構成での測定

AD7124-4/AD7124-8 の 3 線式 RTD 測定の構成は次のとおりです。

- ▶ 差動入力： $A_{IN+} = A_{IN2}$ および $A_{IN-} = A_{IN3}$

- ▶ 励起電流：IOUT0 = AIN0 = 500μA
- ▶ 励起電流：IOUT1 = AIN1 = 500μA
- ▶ ゲイン = 16
- ▶ 5.11kΩ の高精度リファレンス抵抗
- ▶ 100Ω のヘッドルーム抵抗
- ▶ デジタル・フィルタ処理 (sinc4、50SPS、およびポスト・フィルタ、25SPS)

リファレンス、励起電流、ゲイン、およびデジタル・フィルタ処理の選択は、[RTD 設計の考慮事項](#)のセクションに基づいています。

PGA をイネーブルすると、アナログ入力バッファも自動的にイネーブルになります。PGA を使用すると、入力ピンの電圧を AV_{SS} と同程度にまで下げることができます。そのため、アナログ入力ピンにヘッドルーム抵抗は必要ありません。リファレンス・バッファもイネーブルになります。リファレンス抵抗がハイ・サイドにあるため、リファレンス・バッファのヘッドルーム条件は、より高い RTD 温度測定 (300°C 超) の場合に満たされます。したがって、この測定構成では追加のヘッドルーム抵抗は必要ありません。しかし、より低い RTD 温度測定 (300°C 未満) では、リファレンス・ヘッドルーム抵抗が必要です。

3線式RTD測定の場合は、2つの高精度励起電流源が必要になります。これらにより、RL1とRL2によって生成されるリード抵抗誤差を簡単に相殺できます。RL3のリード抵抗は、測定精度に影響を与えないことに注意してください。図10に示す3線式RTD構成では、リファレンス抵抗はRTDのハイ・サイドに配置されています。このセットアップでは、1つの励起電流がリファレンス抵抗とRTDの両方を流れ、2番目の励起電流がRL2リード抵抗を流れて、RL1リード抵抗の端子間で降下した電圧を相殺する電圧を生成します。1つの励起電流だけがREFIN1+とREFIN-へのリファレンス電圧を生成し、またRTD端子間電圧を生成するので、電流源の精度、ミスマッチ、ミスマッチ・ドリフトはADCの伝達関数に最小限の影響しか与えません。

3 線式 RTD の結果

図 10 に示す RTD 回路を使用し、異なるデジタル・フィルタ構成と消費電力モード構成の AD7124-4/AD7124-8 を用いて、データを収集しました。具体的には、**デジタル・フィルタ処理とアナログ・フィルタ処理**のセクションで述べたように、通常消費電力モードでは **sinc4** フィルタを使用し、低消費電力モードでは **ポスト・フィルタ**を使用しています。

この 3 線システムの代表的なノイズ・フリー・コード分解能は、通常消費電力モードおよび sinc4 フィルタ選択時で 17.9 ビット、低消費電力モードおよびポスト・フィルタ選択時で 16.8 ビットです。これらは、それぞれの温度測定において、約 0.0033°C と 0.0070°C の誤差動に相当します。3 線式 RTD を接続した場合のノイズ分布を [図 11](#) と [図 12](#) に示します。

回路の説明

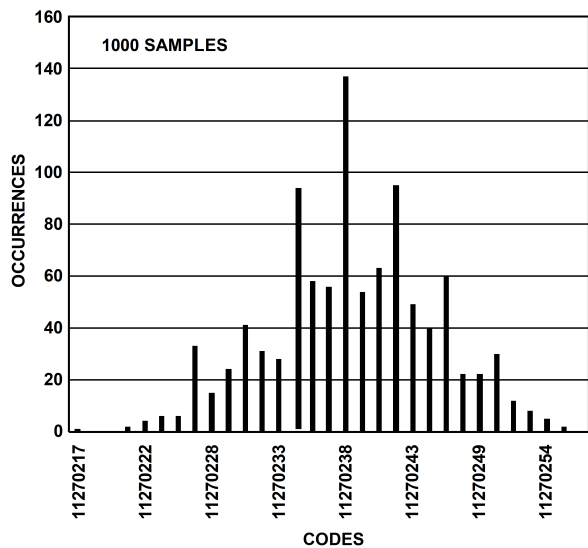


図 11. 室温、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、50SPS における 3 線式 RTD のコードのヒストグラム

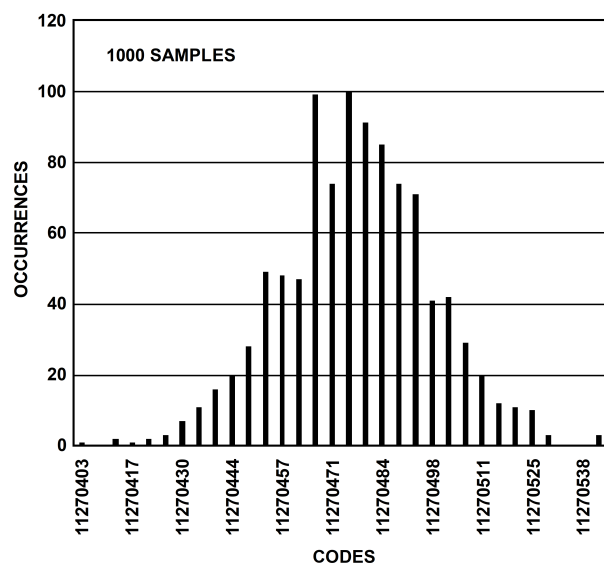


図 12. 室温、ポスト・フィルタ、低消費電力モード、25SPS における 3 線式 RTD のコードのヒストグラム

2 点キャリブレーションと線形化により、3 線式システムの全体的な精度は、 -50°C ~ $+200^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において $\pm 1^{\circ}\text{C}$ より優れています。各温度について、AD7124-4/AD7124-8 を使って、RTD の端子間電圧を前述の要領で測定しました。RTD の伝達関数のセクションで説明したように、この電圧は抵抗に変換され、線形化されて、温度に変換されます。

以上のデータから得られた誤差（設定温度から測定温度を差し引いた値）を図 13 と図 14 に示します。それぞれの RTD 温度設定において、AD7124-4/AD7124-8 は 25°C に保たれ、誤差は Pt100 Class B の誤差ウィンドウ内に十分収まっています。図 13 と図 14 は、異なる AD7124-4/AD7124-8 の温度設定間の RTD 誤差の偏差も示しています。AD7124-4/AD7124-8 の各温度設定において、内部ゼロスケール・キャリブレーションとフルスケール・キャリブレーションが実施されます。図 13 と図 14 に示すように、全体の誤差は許容誤差バジェット内に十分収まっています。

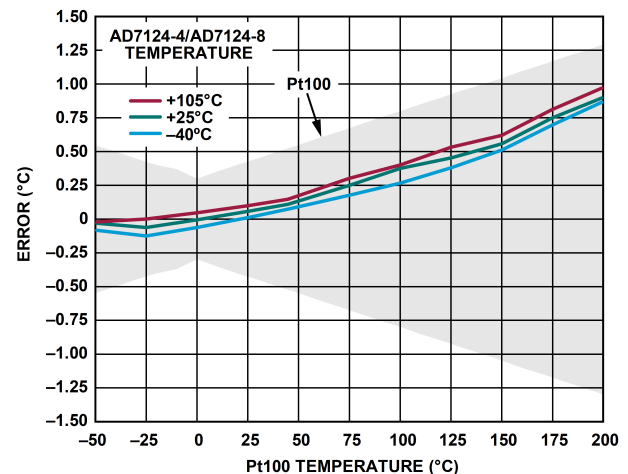


図 13. 3 線式 RTD の温度精度測定、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、50SPS

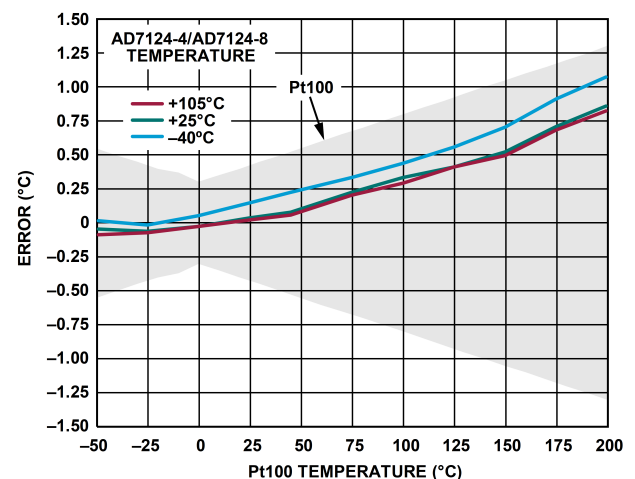


図 14. 3 線式 RTD の温度精度測定、ポスト・フィルタ、低消費電力モード、25SPS

図 15 と図 16 は、 25°C で内部ゼロ・スケール・キャリブレーションとフル・スケールキャリブレーションを 1 回実施した場合の RTD 温度測定値の誤差を示しています。図 15 と図 16 は、 25°C での 1 回のキャリブレーションと、AD7124-4/AD7124-8 の各個別温度でのキャリブレーションが同様の性能になることを示しています。

回路の説明

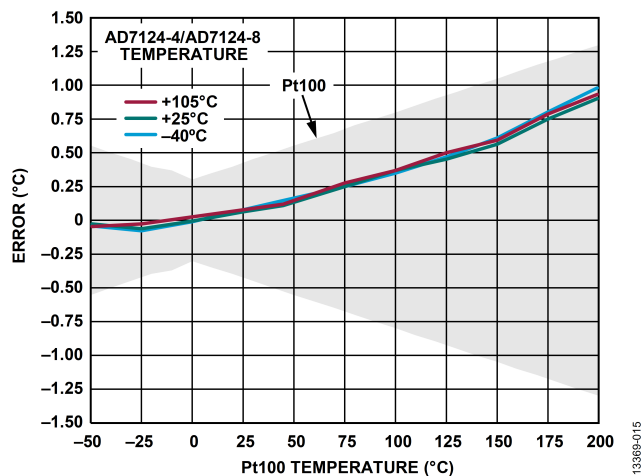


図 15. 3 線式 RTD の温度精度測定、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、50SPS、25°C で 1 回のみのキャリブレーション

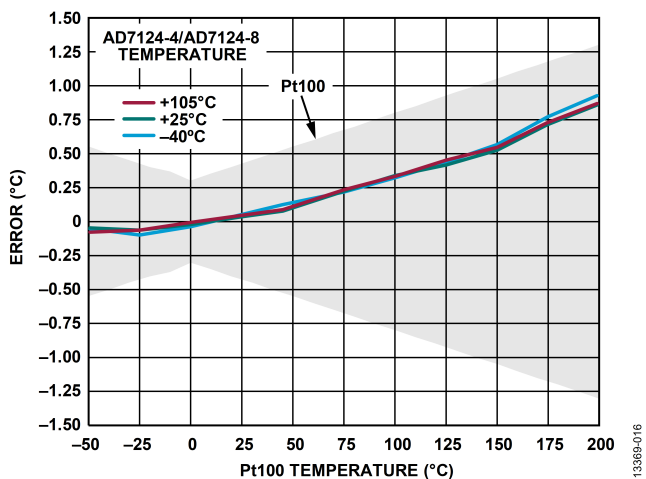


図 16. 3 線式 RTD の温度精度測定、ポスト・フィルタ、低消費電力モード、25SPS、25°C で 1 回のみのキャリブレーション

3 線式 RTD におけるリード抵抗の考慮事項

3 線式測定では、2 番目の励起電流がリード抵抗をアクティブに補正します。したがって、温度に伴うリード抵抗値の変化も測定に影響しなくなります。

ただし、リード抵抗補償の精度は、各リード線の抵抗値が等しいこと（具体的には、 $RL1 = RL2$ ）に依存します。 $RL3$ の端子間での降下電圧は、RTD 素子の端子間で測定された電圧に影響を与えません。したがって、 $RL3$ は、この回路ノートで示す回路の測定に誤差を生じさせることはありません。

繰り返しになりますが、50 フィートの長さの 24 AWG 銅線では、抵抗値は 1.3Ω です。補償電流と励起電流が完全にマッチングしていると仮定した場合、マッチングに 10% の誤差が生じると、RTD 測定に 0.13Ω の誤差が生じます。RTD の温度係数は約 $0.385\Omega/^\circ\text{C}$ です。したがって、リード抵抗のミスマッチによる 0.13Ω の測定誤差は、リード抵抗のミスマッチにより約 $(0.13/0.385) = 0.337^\circ\text{C}$ の誤差に変換されます。したがって、3 線式測定を正確に行うためには、接続ケーブルのマッチング特性を正確に知る必要があります。

リード抵抗が完全にマッチングしている仮定すると、励起電流（ I_{OUT0} と I_{OUT1} ）のミスマッチは、合計リード抵抗に比例する誤差を生成します。例えば、励起電流に 0.5% のミスマッチ（AD7124-4/AD7124-8 仕様の代表値）があるとすると、RTD 抵抗測定に 0.5% の誤差を生じます。Pt100 RTD 抵抗の公称温度係数は $0.385\Omega/^\circ\text{C}$ で、これは $2.6^\circ\text{C}/\Omega$ の温度変化に相当します。抵抗測定に 0.5% の誤差があると、RTD 測定誤差は $(0.005 \times 2.6) = 0.013^\circ\text{C}/\Omega$ となります。 10Ω のリード抵抗（約 400 フィートの 24AWG 銅線）の場合、電流のミスマッチによる誤差は 0.13°C に過ぎません。

これまでの議論から、ほとんどの実用的なアプリケーションでは、励起電流の 0.5% のミスマッチよりも、リード抵抗のミスマッチの方がはるかに大きな誤差を生じることがわかります。

図 10 の回路では、高精度リファレンス抵抗はハイ・サイドに配置されています。ハイ・サイドの構成は、単一の RTD を使用するシステムで正常に機能します。複数の 3 線式 RTD を使用する場合は、リファレンス抵抗を 1 つで済ますため、高精度抵抗をロー・サイドに配置するのが良いでしょう。

電流源のミスマッチとミスマッチ・ドリフト

リファレンス抵抗をロー・サイドに配置した場合、励起電流のマッチングを良好にする必要があります（3 線式 RTD）。以下の 2 つの異なる方法により、電流のミスマッチによる誤差を最小限に抑えることができます。

- ▶ 励起電流のチョッピング
- ▶ 励起電流の測定によるキャリブレーション

励起電流のチョッピング

AD7124-4/AD7124-8 のクロス・ポイント・マルチプレクサにより、チョッピング構成を簡単に実装できます。図 17 は、高精度 $5.11\text{k}\Omega$ のリファレンス抵抗を Pt100 RTD のロー・サイドに接続した 3 線式 RTD 構成を示しています。この構成では、使用する電流源とゲインを再検討する必要があります。 I_{OUT0} と I_{OUT1} はともに $250\mu\text{A}$ に設定されています。この電流を選択することで、回路が電流源の出力コンプライアンスに準拠し、高精度抵抗の端子間に生成されるリファレンス電圧にも適合します。ADC のフル・レンジを利用するために、PGA のゲインを 32 に設定しています。リファレンス・バッファがイネーブルでヘッドルーム（ 100mV ）を必要とするため、リファレンス抵抗のロー・サイドに抵抗が必要です。

回路の説明

電流をチョップするために、図 17 に示すように、IOUT0 を AIN0 に接続し、IOUT1 を AIN1 に接続している時の RTD 電圧を測定します。次に、電流が入れ替わった時、つまり IOUT1 を AIN0 に接続し、IOUT0 を AIN1 に接続した時に、RTD の端子間電圧について 2 回目の測定を行います。これら 2 つの電圧測定値の平均を、RTD 抵抗値の計算全体に使用し、その後、式 2～式 7 を用いて温度を計算します。チョッピング法は、励起電流のミスマッチやミスマッチ・ドリフトの影響を大幅に低減します。ただし、2 回の測定が必要なため、スループット・レートに影響します。

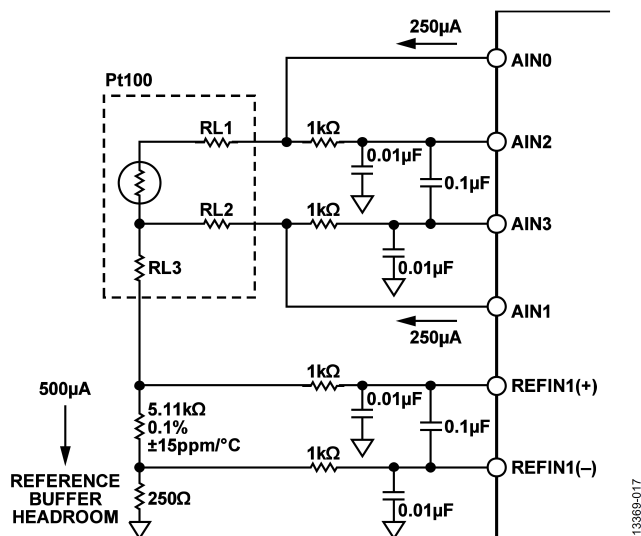


図 17. 電流チョッピング測定技術を使用した 3 線式 RTD 測定用の AD7124-4/AD7124-8 の構成

励起電流チョッピング法を使用した測定データを収集し、それに対応する Pt100 温度誤差を記録しました (図 18 参照)。測定した全ての RTD 温度について、AD7124-4/AD7124-8 の異なる周囲温度に対して、温度誤差は Pt100 RTD の誤差範囲内にあります。これらの結果は、励起電流をチョッピングした場合でも、ハイ・サイド高精度リファレンス抵抗構成で収集したデータと同等の結果が得られることを示しています。

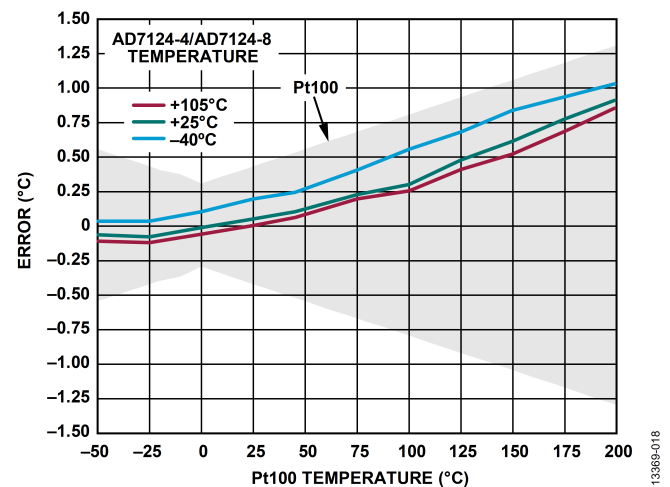


図 18. チョッピング構成、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、各温度でのキャリブレーションによる温度精度測定

励起電流測定によるキャリブレーション

励起電流を測定して 3 線式システムのキャリブレーションを行う構成を図 19 に示します。この構成では、高精度リファレンス抵抗を RTD のロー・サイドに接続します。この構成は電流をチョッピングする構成と似ており、電流は両方とも 250μA に設定し、PGA ゲインは 32 に設定します。しかし、主な違いは、追加の差動入力チャンネルが必要なことです。追加入力チャンネルにより、2 つの励起電流の測定が可能になります。この測定は、各励起電流を個別にイネーブルした時の、内部リファレンスに対する高精度リファレンス抵抗端子間の電圧降下を測定することによって行います。測定された電圧は、高精度リファレンス抵抗の値に基づいて電流に変換され、その後、電流比率の計算に使用された後、ミスマッチの補正に使用されます。

回路の説明

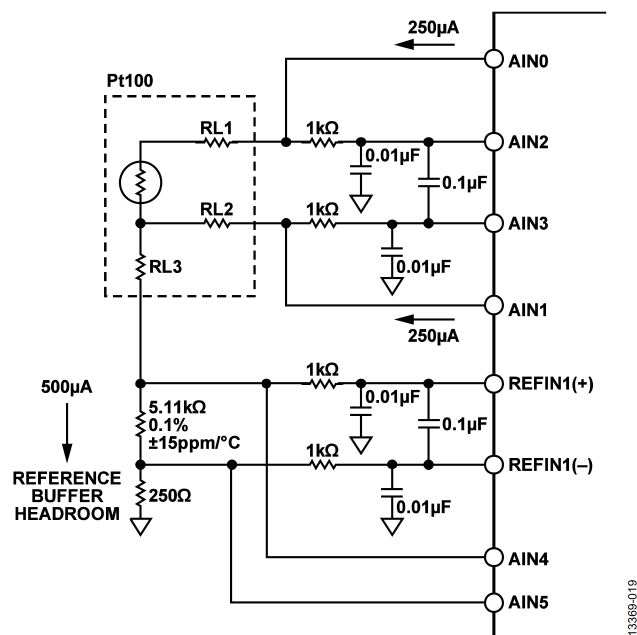


図 19. 励磁電流測定による 3 線式 RTD 測定キャリブレーション用 AD7124-4/AD7124-8 の構成

図 20 は、RTD 測定におけるキャリブレーション後の温度誤差を示しています。この結果は、RTD 誤差が RTD の期待誤差範囲内にあり、測定誤差が RTD 自体の誤差プロファイルに近いことを示しています。正確な結果を得るためには、電流のキャリブレーションを定期的に行う必要があります。

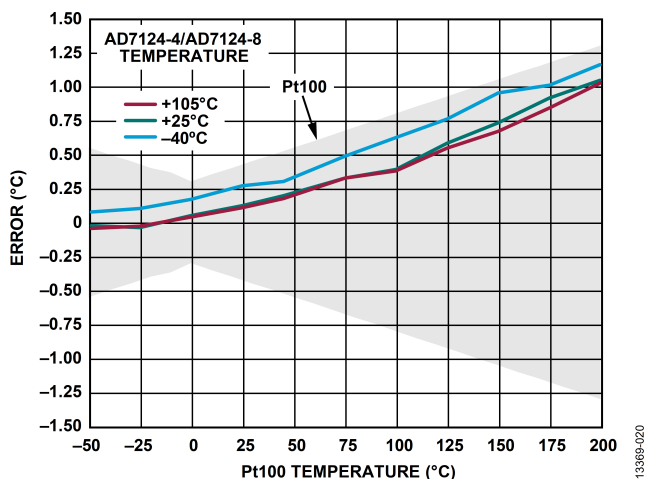


図 20. 励磁電流キャリブレーション、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、各温度でのキャリブレーションによる温度精度測定

複数の 3 線式 RTD 構成

AD7124-4/AD7124-8 は、複数の 3 線式 RTD 用の測定システムとして使用できます。ADC をマルチチャンネルに設定している場合、ADC はチャンネルごとに 1 回の変換を実行しながら、自動

的に有効なチャンネルを順次切り替えます。チャンネルが変わる際、変換を生成するためにフィルタの完全なセトリング時間が必要となるため、全体のスループット・レートに影響を与えます。したがって、複数のセンサー間でマルチプレクスを行う場合、デジタル・フィルタの遅延を考慮することも重要です。励起電流はシーケンサの外部にあるため、励起電流のオン/オフやこれらの電流を特定のチャンネルに与えるには、ユーザがデバイスに書き込む必要があります。ただし、ターンオン時間は ADC に接続された外付けの RC 値に依存します。したがって、実際のターンオンまたはターンオフ時間はアナログ・デバイセズの管理外となるため、測定を行う際にはこの点にも考慮する必要があります。

単一の 3 線式 RTD を構成するには、[3 線式 RTD 構成](#)のセクションを参照してください。

AD7124-4 は 2 個の 3 線 RTD を接続可能で、AD7124-8 は最大 4 個の 3 線 RTD を接続可能です。

複数の 3 線式 RTD を使用する場合は、リファレンス抵抗が 1 つで済むため、高精度抵抗をロー・サイドに配置するのが良いでしょう。それぞれの 3 線式 RTD は、最低でも AD7124-4/AD7124-8 の 4 つのピン、つまり、2 つの励起電流用ピンと 2 つのアナログ入力用ピンを必要とします。したがって、RTD 電圧を測定するために必要な手順は次のとおりです。

1. 外部リファレンスを REF1N1+ と REF1N1- にセットします。
2. 入力に RTD が接続されているアナログ入力チャンネルをイネーブルします。

例として、4 つの 3 線式 RTD を AD7124-8 に接続した場合を図 21 に示します。1 つの 3 線式 RTD を AIN2 および AIN3 アナログ入力ピンに接続し（チャンネル 0 構成）、励起電流を AIN0 および AIN1 から供給します。同様に、2 つめの 3 線式 RTD を AIN4 および AIN5 アナログ入力ピンに接続し（チャンネル 1 構成）、励起電流を AIN6 と AIN7 から供給します。他の 3 線式 RTD も同様に接続します。全ての RTD 構成の詳細を表 4 に示します。

表 4. 複数 3 線式 RTD のチャンネル構成

Sensor	Channel	IOUT0	IOUT1	AIN+	AIN-
RTD1	0	AIN0	AIN1	AIN2	AIN3
RTD2	1	AIN6	AIN7	AIN4	AIN5
RTD3	2	AIN10	AIN11	AIN8	AIN9
RTD4	3	AIN14	AIN15	AIN12	AIN13

温度測定は、以下の手順で各 RTD に対して順に行うことができます。

1. 測定する RTD への IOUT0 と IOUT1 の電流をイネーブルします。
2. IOUT0 を AIN0 に、IOUT1 を AIN1 に導通します。電圧をチャンネル 0（AIN2 と AIN3）で測定します。したがって、チャンネル 0 をイネーブルする必要があります。他の全てのチャンネルは、この測定ではディセーブルします。

回路の説明

3. チャンネル0をディセーブルに、チャンネル1をイネーブルにして、IOUT0とIOUT1の電流をAIN6とAIN7に導通します。電圧をチャンネル1 (AIN4とAIN5) で測定します。EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ には、AIN4とAIN5にオンボードのサーミスタが接続されているので注意してください。AIN4とAIN5を使用する場合は、このサーミスタ (R28) を取り外します。
4. 全てのRTDを測定するまで、この手順を繰り返します。

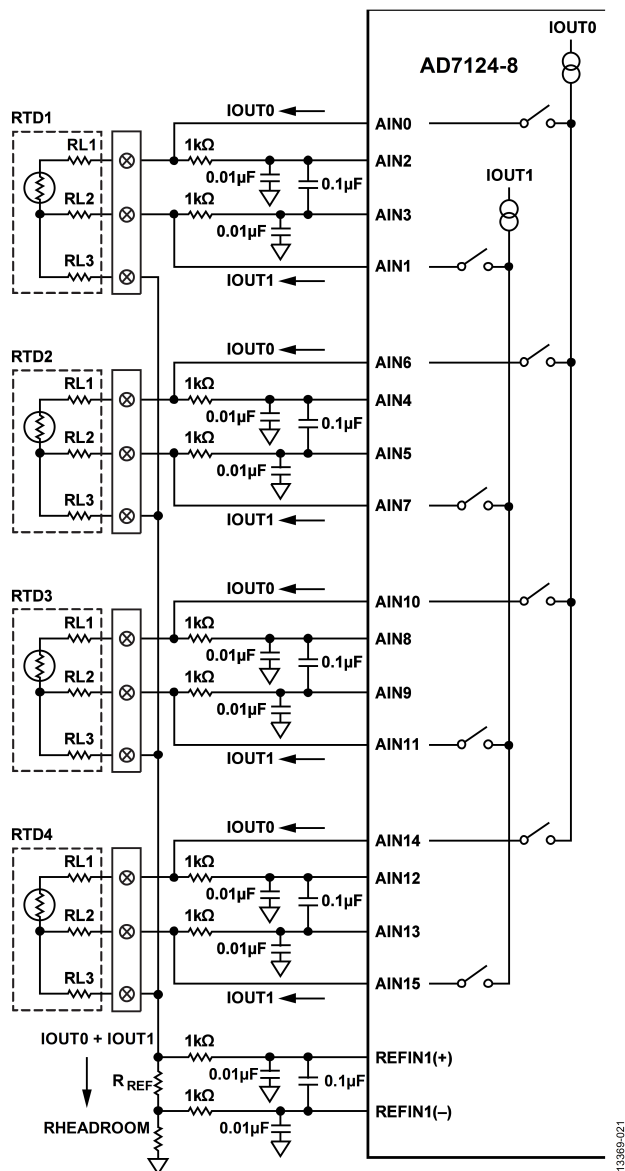


図 21. AD7124-8 の複数 3 線式 RTD 構成

4 線式 RTD 構成

4 線式 RTD 構成は、最も簡単で最も正確な構成です。この構成における唯一の複雑さは、他の 2 つの構成と比較して、PCB 面積の大部分を占める 4 ピン・コネクタのサイズです。4 線式 RTD 構成を実装するために、AD7124-4/AD7124-8 の 3 つのアナログ・ピン、AIN0、AIN2、AIN3 を使用します。AIN2 と AIN3 は完全差動入力チャンネルとして構成し、RTD 端子間電圧の検出に使用されます。使用されるリファレンス入力、REFIN+ と REFIN- です。ロー・サイドにリファレンス抵抗を使用するため、リファレンス・ヘッドルーム抵抗が必要です。

4 線式 RTD 構成の場合、励磁電流源が 1 つ必要です。RTD、リファレンス抵抗、ヘッドルーム抵抗を励起するのに使用される励起電流源は、AV_{DD} から生成され、AIN0 (IOUT0) に送られます。同じ電流が、リファレンス電圧を生成する RTD と高精度リファレンス抵抗を流れるため、レシオメトリック測定が確保されます。

アナログ・ピンとその構成の詳細を図 22 に示します。リファレンス抵抗とヘッドルーム抵抗の選択は、励磁、ゲイン、デジタル・フィルタ処理も含めて、RTD 設計の考慮事項のセクションに基づきます。

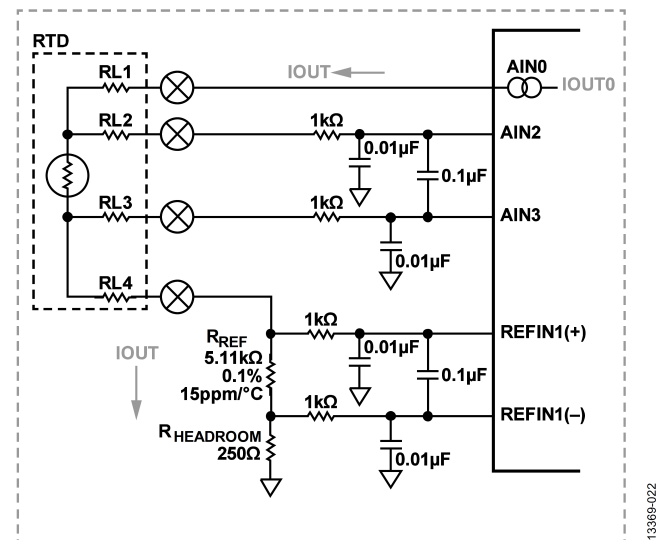


図 22.4 線式 RTD アナログ入力構成での測定

AD7124-4/AD7124-8 の 4 線式 RTD 測定の構成は次のとおりです。

- ▶ 差動入力: $\text{AIN}+ = \text{AIN}2$ および $\text{AIN}- = \text{AIN}3$
- ▶ 励起電流: $\text{IOUT}0 = \text{AIN}0 = 500\mu\text{A}$
- ▶ ゲイン= 16
- ▶ $5.11\text{k}\Omega$ の高精度リファレンス抵抗
- ▶ 250Ω のヘッドルーム抵抗
- ▶ デジタル・フィルタ処理 (sinc4、50SPS、およびポスト・フィルタ、25SPS)

回路の説明

図 22 に示す RTD 回路を使用し、異なるデジタル・フィルタ構成と消費電力モード構成の AD7124-4/AD7124-8 を用いて、データを収集しました。具体的には、[デジタル・フィルタ処理](#)と[アナログ・フィルタ処理](#)のセクションで述べたように、通常消費電力モードでは sinc4 フィルタを使用し、低消費電力モードではポスト・フィルタを使用しています。

この 4 線式システムの代表的なノイズ・フリー・コード分解能は、通常消費電力モードおよび sinc4 フィルタ選択時で 17.9 ビット、低消費電力モードおよびポスト・フィルタ選択時で 16.8 ビットです。これらは、それぞれの温度測定において、約 0.0033°C と 0.0070°C の誤差変動に相当します。4 線式 RTD を接続した場合のノイズ分布を図 23 と図 24 に示します。

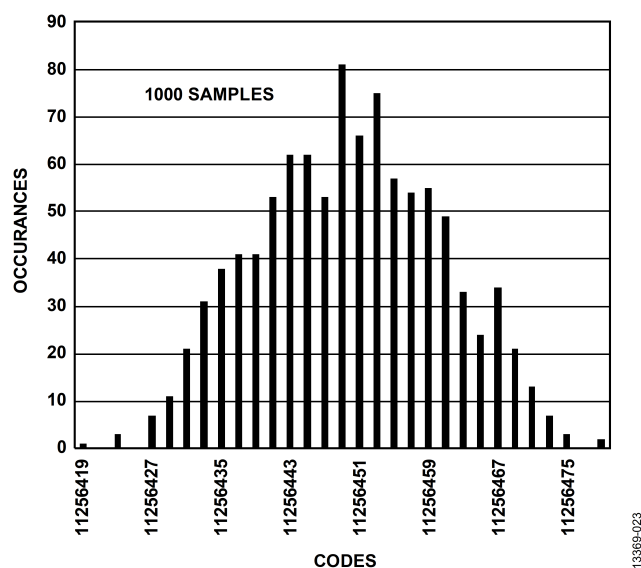


図 23. 室温、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、50SPS における 4 線式 RTD のコードのヒストグラム

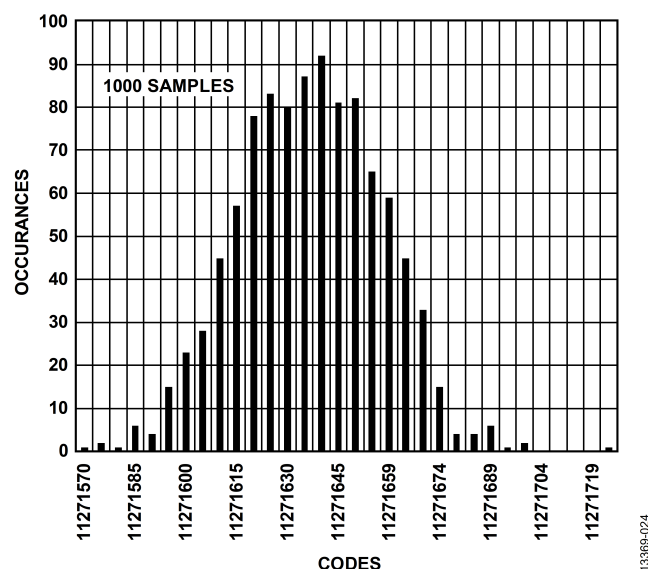


図 24. 室温、ポスト・フィルタ、低消費電力モード、25SPS における 4 線式 RTD のコードのヒストグラム

2 点キャリブレーションと線形化により、4 線式システムの全体的な精度は、 -50°C ~ $+200^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において $\pm 1^{\circ}\text{C}$ より優れています。各温度について、AD7124-4/AD7124-8 を使って、RTD の端子間電圧を前述の要領で測定しました。[RTD の伝達関数](#)のセクションで説明したように、この電圧は抵抗に変換され、線形化されて、温度に変換されます。

以上のデータから得られた誤差（設定温度から測定温度を差し引いた値）を図 25 と図 26 に示します。それぞれの RTD 温度設定において、AD7124-4/AD7124-8 は 25°C に保たれ、誤差は Pt100 Class B の誤差ウィンドウ内に十分収まっています。図 25 と図 26 は、異なる AD7124-4/AD7124-8 の温度設定間の RTD 誤差の偏差も示しています。AD7124-4/AD7124-8 のそれぞれの温度設定において、内部ゼロスケール・キャリブレーションとフルスケール・キャリブレーションが行われています。図 25 と図 26 に示すように、全体の誤差は許容誤差バジェット内に十分収まっています。

回路の説明

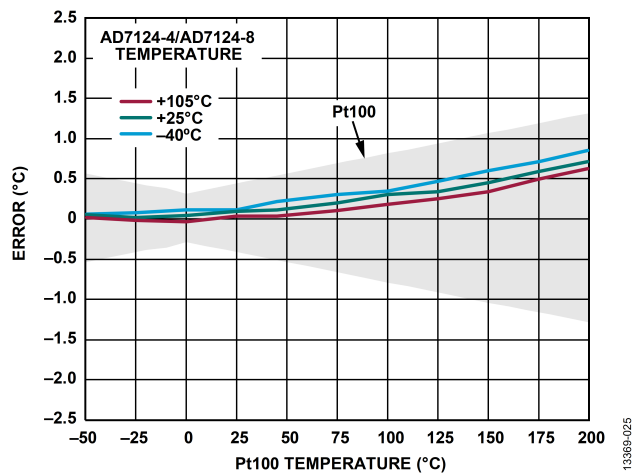


図 25. 4 線式 RTD の温度精度測定、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、50SPS

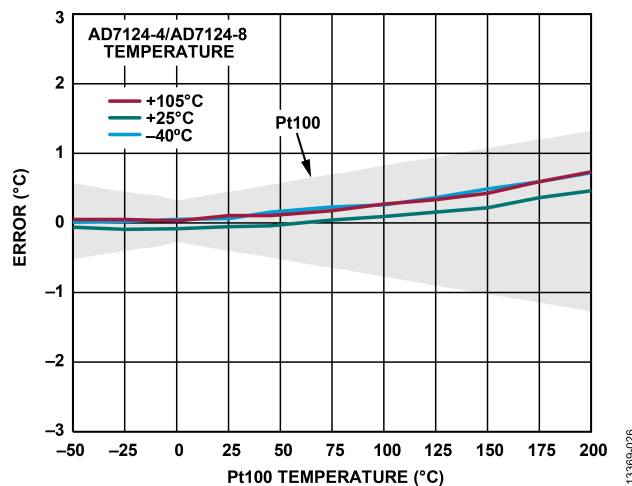


図 26. 4 線式 RTD の温度精度測定、ポスト・フィルタ、低消費電力モード、25SPS

図 27 と図 28 は、25°C で内部ゼロ・スケール・キャリブレーションとフル・スケールキャリブレーションを 1 回実施した場合の RTD 温度測定値の誤差を示しています。図 27 と図 28 は、25°C での 1 回のキャリブレーションと、AD7124-4/AD7124-8 の各個別温度でのキャリブレーションが同様の性能になることを示しています。

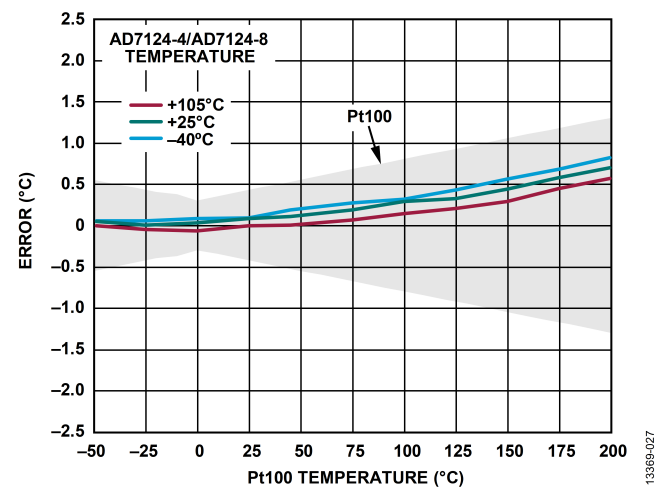


図 27. 4 線式の温度精度測定、Sinc4 フィルタ、通常消費電力モード、50SPS、25°C で 1 回のみキャリブレーション

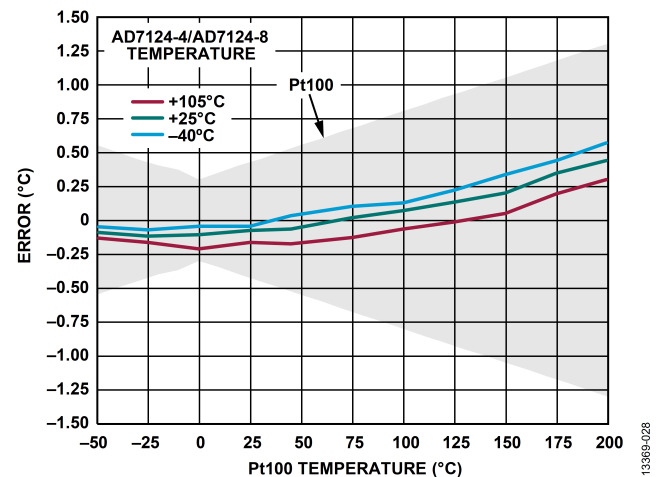


図 28. 4 線式 RTD の温度精度測定、ポスト・フィルタ、低消費電力モード、25SPS、25°C で 1 回のみキャリブレーション

4 線式 RTD におけるリード抵抗の考慮事項

リード線の抵抗誤差を完全に補正するには、4 線式 RTD の構成を推奨します。ここでは、2 本の追加ワイヤを RTD の両端に接続し、1つのペアが電流を供給し、もう 1つのペアが電圧測定を実行するため、リード線の抵抗は測定に影響を与えません。したがって、4 線式 RTD での測定が最も正確です。

複数の 2 線式/4 線式 RTD 構成

AD7124-4/AD7124-8 は、複数の 2 線式/4 線式 RTD の測定システムとして使用できます。ADC をマルチチャンネルに設定している場合、ADC はチャンネルごとに 1 回の変換を実行しながら、自動的に有効なチャンネルを順次切り替えます。チャンネルが変わる際、変換を生成するためにフィルタの完全なセトリング時間が必要となるため、全体のスループット・レートに影響を与えます。したがって、複数のセンサー間でマルチプレクスを

回路の説明

行う場合、デジタル・フィルタの遅延を考慮することも重要です。励起電流はシーケンサの外部にあるため、励起電流のオン／オフやこれらの電流を特定のチャンネルに与えるには、ユーザがデバイスに書き込む必要があります。ただし、ターンオン時間はADCに接続された外付けのRC値に依存します。したがって、実際のターンオンまたはターンオフ時間はアナログ・デバイセズの管理外となるため、測定を行う際にはこの点にも考慮する必要があります。

単一の2線式または4線式を構成するには、[2線式RTD構成](#)のセクションまたは[4線式RTD構成](#)のセクションを参照してください。

AD7124-4は2つの2線式／4線式RTDを接続できるのに対して、AD7124-8は最大5つの2線式／4線式RTDを接続できます。同じリファレンス入力を全てのRTDに使用することができ、1つの電流源で全てのRTDを励起できます。RTDの温度測定が必要になった時に、電流を各RTDのトップ・サイドに順に導通していきます。AD7124-4/AD7124-8のクロス・マルチプレクサにより、複数のチャンネルを個別に設定でき、各チャンネルを異なるセットアップ用に設定できます。

RTD電圧を測定するために必要な手順は次のとおりです。

1. 外部リファレンスをREFIN1+とREFIN1-にセットします。
2. 測定するRTDへのIOUT0電流をイネーブルします。
3. 入力にRTDが接続されているアナログ入力チャンネルをイネーブルします。

例として、5つの2線式／4線式RTDをAD7124-8に接続した場合を[図29](#)と[図30](#)に示します。1つの2線式／4線式RTDをAIN2およびAIN3アナログ入力ピンに接続し（チャンネル0構成）、励起電流をAIN0から供給します。同様に、2つめの2線式／4線式RTDをAIN4およびAIN5アナログ入力ピンに接続し（チャンネル1構成）、励起電流をAIN1から供給します。他のRTDも同様に接続します。全てのRTD構成の詳細を[図1](#)に示します。

表 5. 複数の2線式／4線式RTDのチャンネル構成

Sensor	Channel	IOUT0	AIN+	AIN-
RTD1	0	AIN0	AIN2	AIN3
RTD2	1	AIN1	AIN4	AIN5
RTD3	2	AIN8	AIN6	AIN7
RTD4	3	AIN11	AIN9	AIN10
RTD5	4	AIN14	AIN12	AIN13

温度測定は、以下の手順で各RTDに対して順に行います。

1. IOUT0をAIN0に導通します。電圧をチャンネル0（AIN2、AIN3）で測定します。したがって、チャンネル0をイネーブルする必要があります。他の全てのチャンネルは、この測定ではディセーブルします。

2. チャンネル0をディセーブルに、チャンネル1をイネーブルにして、IOUT0電流をAIN1に導通します。電圧をチャンネル1（AIN4とAIN5）で測定します。EVAL-AD7124-4SDZまたはEVAL-AD7124-8SDZには、AIN4とAIN5の間にオンボードのサーミスタが搭載されています。AIN4とAIN5を使用する場合は、このサーミスタ（R28）を取り外します。
3. 全てのRTDを測定するまで、この手順を繰り返します。

バリエーション回路

複数の RTD を使用する場合は、リファレンス抵抗が 1 つで済むため、高精度抵抗をロー・サイドに配置するのが良いでしょう。0°C で $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 未満という高い精度を持つ高グレードの RTD クラスを使用することで、回路の性能を向上させることができます。PT1000 センサーの場合、励起電流が低くなるため、このデバイスは低消費電力アプリケーションに適しています。

単一の 2 線式または 4 線式 RTD を使用する場合は、高精度抵抗をハイ・サイドに配置することもできます。性能は、リファレンス抵抗をロー・サイドに配置した場合と同じです。

回路の評価とテスト

必要な装置

2 線式、3 線式、または 4 線式の RTD 測定システムには、以下の機器が必要です。

- ▶ EVAL-AD7124-4SDZ または EVAL-AD7124-8SDZ 評価用ボード
- ▶ EVAL-SDP-CK1Z または 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 (SDP)
- ▶ AD7124 Eval+ Software
- ▶ USB 給電の電源
- ▶ クラス B、Pt100、2 線式、3 線式、または 4 線式の RTD
- ▶ USB2.0 ポートを備えた Windows® 搭載 PC

ソフトウェアのインストール

AD7124-4/AD7124-8 および EVAL-SDP-CK1Z または EVAL-SDP-CB1Z の完全なソフトウェアユーザ・ガイドは、EVAL-AD7124-4SDZ または EVAL-AD7124-8SDZ ユーザ・ガイドおよび SDP ユーザ・ガイドに記載されています。

ソフトウェアは、ハードウェアとのインターフェースに必要です。このソフトウェアは、<ftp://ftp.analog.com/pub/evalcd/AD7124> からダウンロードしてください。セットアップ・ファイルが自動的に実行しない場合は、**setup.exe** ファイルをダブルクリックします。EVAL-AD7124-4SDZ または EVAL-AD7124-8SDZ と EVAL-SDP-CK1Z または EVAL-SDP-CB1Z を PC の USB ポートに接続する前に評価用ソフトウェアをインストールして、PC に接続した時に評価用システムが正しく認識されるようにします。

評価用ソフトウェアのインストールが完了したら、EVAL-SDP-CK1Z または EVAL-SDP-CB1Z を EVAL-AD7124-4SDZ または EVAL-AD7124-8SDZ に接続し、EVAL-SDP-CK1Z または EVAL-SDP-CB1Z を付属のケーブルで PC の USB ポートに接続します。評価用システムが検出されたら、表示されるダイアログボックスに従ってインストールを完了させます。

セットアップとテスト

EVAL-AD7124-4SDZ または EVAL-AD7124-8SDZ と EVAL-SDP-CK1Z または EVAL-SDP-CB1Z の両方を接続するまで、ハードウェアに電源を接続しないでください。2 線式、3 線式、または 4 線式 RTD 構成のためのテスト・セットアップの機能ブロック図を図 31 に示します。

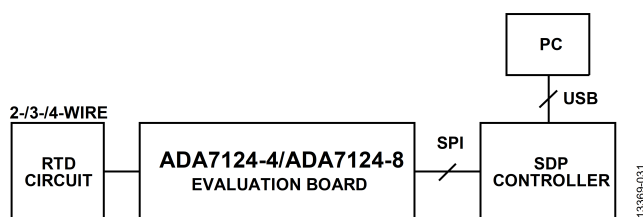


図 31. テスト・セットアップ機能図

回路のテストには EVAL-AD7124-4SDZ または EVAL-AD7124-8SDZ が必要です。また、正しく動作させるために以下のセンサーと抵抗が必要です。

- ▶ 2 線式、3 線式、または 4 線式の Pt100 RTD、クラス B
- ▶ 5.11kΩ の高精度リファレンス抵抗
- ▶ 250Ω または 100Ω のバッファ・ヘッドルーム用抵抗

ハードウェアを設定するには、以下の手順を実行します。

1. EVAL-AD7124-4SDZ または EVAL-AD7124-8SDZ の全てのリンクを、EVAL-AD7124-4SDZ または EVAL-AD7124-8SDZ のユーザ・ガイドに記載されているデフォルトのボード位置に設定します。
2. 40 ピン・コネクタを介して、EVAL-SDP-CK1Z または EVAL-SDP-CB1Z を、EVAL-AD7124-4SDZ または EVAL-AD7124-8SDZ 評価用ボードに接続します。
3. 使用する RTD 構成 (2 線式、3 線式、4 線式) に応じて、RTD、高精度リファレンス抵抗、バッファ・ヘッドルーム抵抗を接続します。CN-0383 Hardware and Software User Guide の Wiki ページを参照してください。
4. EVAL-SDP-CK1Z または EVAL-SDP-CB1Z を USB ケーブルで PC に接続します。
5. 7V または 9V の電源を J5 に接続して、EVAL-AD7124-4SDZ または EVAL-AD7124-8SDZ に電源を供給します。
6. AD7124_Eval+ Software を実行します。この評価用ソフトウェアは AD7124-4 と AD7124-8 の両方に使用できます。
7. ソフトウェアを実行する際、PC に接続されている評価用ボードを選択します。AD7124-8 の場合、ドロップダウン・メニューから EVAL-AD7124-8SDZ を選択します (図 32 参照)。

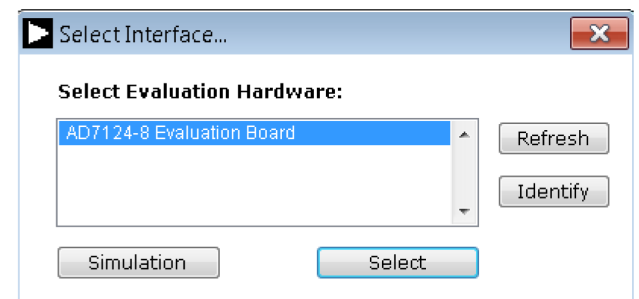


図 32. AD7124-4/AD7124-8 の評価用ボードの選択

8. 評価用ボードを選択すると、図 33 のウィンドウが表示されます。AD7124-4/AD7124-8 を 2 線式、3 線式、または 4 線式の RTD 測定用に設定するには、**2-WIRE RTD**、**3-WIRE RTD**、または **4-WIRE RTD Demo Modes** ボタンをクリックします (図 33 参照)。

回路の評価とテスト

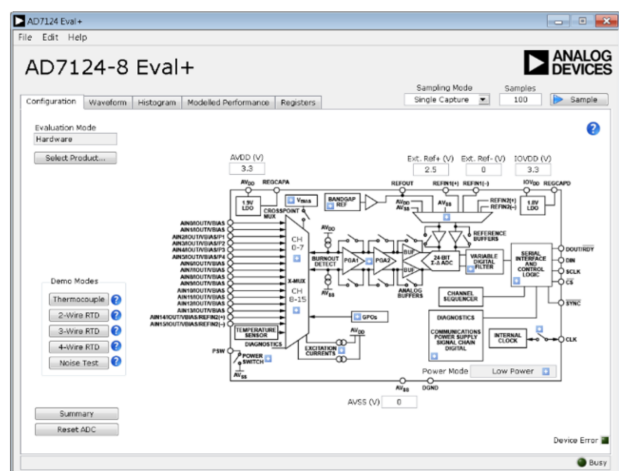


図 33. AD7124_Eval+ソフトウェアのウィンドウ

9. **Demo Modes** ボタンをクリックすると、それぞれの RTD 構成用に ADC ソフトウェアが設定されます。
10. AD7124-4/AD7124-8 をそれぞれの RTD 測定用に設定する前に、もう 1 つのステップが必要です (AD7124-4/AD7124-8 の内部フルスケール・キャリブレーションとゼロスケール・キャリブレーション)。このキャリブレーションは **Registers** タブで行うことができます (図 34 参照)。

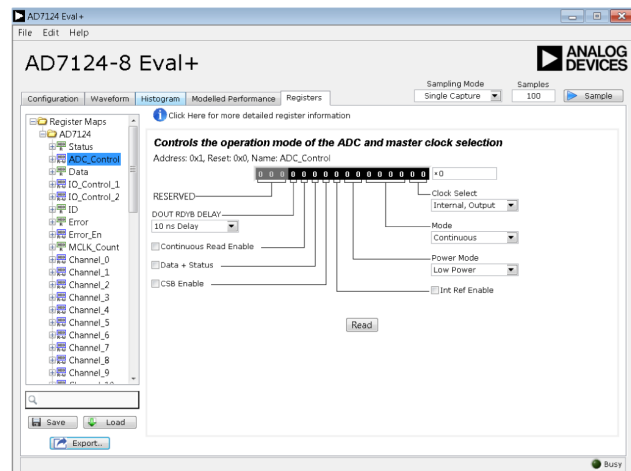


図 34. Registers タブ

11. ADC レジスタ・マップの設定、キャリブレーション、測定手順の詳細については、CN-0383 Hardware and Software User Guide の Wiki ページを参照してください。

更に詳しい資料

CN-0383 設計サポートパッケージ: www.analog.com/CN0383-DesignSupport

SDP ユーザ・ガイド

EVAL-AD7124-4 user guide (UG-855)

EVAL-AD7124-8 user guide (UG-856)

アプリケーション・ノート AN-892: 「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

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

McCarthy, Mary, アプリケーション・ノート AN-615: 「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

チュートリアル 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」 アナログ・デバイセズ

MT-101 Tutorial. Decoupling Techniques. Analog Devices.

Circuit Note CN-0376. Channel-to-Channel Isolated Temperature Input (Thermocouple/RTD) for PLC/DCS Applications. Analog Devices.

回路ノート CN-0382: 「低消費電力の高精度 24 ビット・シグマ・デルタ A/D コンバータを使用した 絶縁型 4mA～20mA/HART 工業用温度および圧力トランスミッタ」 アナログ・デバイセズ

Circuit Note CN-0384. Completely Integrated Thermocouple Measurement System Using a Low Power, Precision, 24-Bit, Sigma-Delta ADC. Analog Devices.

データシートと評価用ボード

EVAL-AD7124-4SDZ

EVAL-AD7124-8SDZ

EVAL-SDP-CK1Z または EVAL-SDP-CB1Z

AD7124-4 データシート

AD7124-8 データシート

ADP150 データシート

改訂履歴

10/2021—Rev. C to Rev. D

Changes to Equation.....	4
Changes to Figure.....	9

10/2020—Rev. B to Rev. C

Changes to Figure.....	2
Changes to RTD Introduction Section.....	3
Added RTD Transfer Function Section.....	3
Added RTD Measurements Section.....	4
Added RTD Design Considerations Section.....	4
Added Table.....	6
Added Table.....	6
Added RTD Wiring Configuration Section.....	6
Deleted Figure.....	7
Added Figure.....	7
Added Figure.....	8
Changes to 3-Wire RTD Configuration Section.....	9
Changes to Figure.....	9
Deleted Figure.....	11
Deleted Figure.....	12
Added Figure.....	14
Added Figure.....	10
Added Figure.....	10
Added Figure.....	10
Changes to Common Variations Section.....	19
Changes to Figure.....	21
Added Figure.....	21

10/2019—Rev. A to Rev. B

Change to 3-Wire RTD Configuration Section.....	9
Change to Equipment Needed Section.....	20

9/2017—Rev. 0 to Rev. A

Changes to 3-Wire RTD Configuration Section.....	9
--	---

7/2015—Revision 0: Initial Version



ESD に関する注意

ESD（静電放電）の影響を受けやすいデバイスです。電荷を帯びたデバイスや回路ボードは、検知されないまま放電することがあります。本製品は当社独自の特許技術である ESD 保護回路を内蔵してはいますが、デバイスが高エネルギーの静電放電を被った場合、損傷を生じる可能性があります。したがって、性能劣化や機能低下を防止するため、ESD に対する適切な予防措置を講じることをお勧めします。

（最初のページから続く）「Circuits from the Lab／実用回路集」はアナログ・デバイセズ製品専用に作られており、アナログ・デバイセズ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・デバイセズ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。



©2015-2021 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。

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 10F
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 10F
電話 06 (6350) 6868
名古屋営業所／〒451-6038 愛知県名古屋市中区牛島町 6-1 名古屋ルーセントタワー 38F
電話 052 (569) 6300

Rev. D | 22 of 22