

### AD594/AD595を使用した熱電対信号のコンデショニング

著者: Joe Marcin

#### はじめに

温度計測に最も広範囲に採用されているデバイスの 1 つは熱電対です。熱電対は、工業用、商用、科学技術用アプリケーションを問わず、多くの環境で広い温度範囲を計測するコスト/パフォーマンスの優れたソリューションを提供します。残念なことに基本原理がしばしば誤解されて、大きな測定誤差が発生しています。このアプリケーション・ノートでは、熱電対の基礎をレビューして、熱電対シグナル・コンデショニング回路のデザインについて AD594/AD595 モノリシック IC を使用して説明します。

#### 基本に戻る

熱電対の基本原理は、1821 年に Thomas Seebeck により発明されました。2 つの異種メタルを両端で接合して、一端を加熱すると電流が流れます。このループを中央で切断すると解放電圧(ジーベック電圧)が発生し、この電圧は 2 つの接点の温度差に比例します。このため、測定接点の温度を求めるためには、リファレンス接点の温度を知る必要があります。

図 1a.熱電対ループ

アイス・バスを使うとリファレンス接点の温度を 0°C に設定することができます。これが、種々のメタル組み合わせに対する熱電対出力電圧の温度特性表で標準リファレンス・ポイントになりました。

図 1b.氷点リファレンス

これらの組み合わせは、National Institute of Standards and Technology (以前の National Bureau of Standards)によりキャラクタライズされて分類されました。次の表に、広く採用されている熱電対のタイプ、構成、特性を示します。

表 1.熱電対の特性

ANSI Code	Alloy Combination	Maximum Temperature Range	mV Output
B	Platinum/Rhodium	0°C to +1700°C	0 to +12.426
E	Chromel/Constantan	-200°C to +900°C	-8.824 to +68.783
J	Iron/Constantan	0°C to +750°C	0 to +42.283
K	Chromel/Alumel	-200°C to +1250°C	-5.973 to +50.633
N	Nicrosil/Nisil	-270°C to +1300°C	-4.345 to +47.502
R	Platinum/Rhodium Platinum	0°C to +1450°C	0 to +16.741
S	Platinum/Rhodium Platinum	0°C to +1450°C	0 to +14.973
T	Copper/Constantan	-200°C to +350°C	-5.602 to +17.816

電圧計はジーベック電圧を測定するときに広く使用されていますが、電圧計を熱電対に接続するときに細心の注意が必要です。図 1c に示すように、2 つの追加接点 J2 と J3 が熱電対と測定器との間の接続で形成されます。これら 2 つの接点は、熱電対ループ内で逆電圧を発生します。接続ポイントに等温ブロックを使用すると、これらの接点は熱平衡状態に維持され、逆極性の等しい起電力を発生します。被測定電圧は、測定接点と等温ブロック(リファレンス接点)との間の電位差になります。

図 1c.電圧計による熱電対電圧の測定

## 実用的な熱電対測定

大部分のアプリケーションでは、リファレンス接点にアイス・バスを使用することが実用的です。リファレンス接点で発生する電圧を補償することにより、氷点リファレンスをなくすることができます。これは、リファレンス接点電圧と等しい逆の電圧を熱電対ループに加えることにより行われます。AD594/AD595 ファミリーの熱電対シグナル・コンディショニング IC には、冷接点補償回路、増幅機能、熱電対断線検出機能が内蔵されています。

図 1d. 冷接点補償

## AD594/AD595 回路の説明

図 2 に、AD594/AD595 熱電対シグナル・コンディショナ IC のブロック図を示します。タイプ J (AD594 用) またはタイプ K (AD595 用) の熱電対が、ピン 1 とピン 14 の計装アンプ差動ステージ入力に接続されます。この入力アンプは、ローカル温度を基準とするループ内に接続されます。IC もローカル温度に設定して、ローカル温度基準の熱電対ループ内で欠損電圧に等しい電圧を氷点補償回路により発生します。この電圧は 2 つ目のプリアンプに入力され、このプリアンプ出力は入力アンプ出力と加算されます。こうして得られた出力は次にメイン出力アンプに入力されます。このメイン出力アンプは合成信号のゲインを設定する帰還を持っています。この氷点補償電圧は、IC 温度を測定するアイス・バス基準の熱電対により発生されるはずの電圧に等しくなるようにスケールされます。この電圧は次にローカル温度基準のループ電圧と加算されて、氷点基準のループ電圧になります。

図 2. AD594/AD595 の機能ブロック図

帰還パスを使って、メイン・アンプは入力での平衡を維持します。熱電対の故障またはデバイス入力での断線の際には、これらの入力は不平衡になるため、故障が検出されます。過負荷検出回路は電流制限 NPN トランジスタを駆動し、このトランジスタはアラームとしてインターフェースすることができます。

これらの IC はタイプ J またはタイプ K の熱電対に対して特別にキャリブレーションされていますが、再キャリブレーションすると、他の熱電対タイプにも使用することができます。温度により制御される電圧と帰還の内部ノードに対するピン接続が、再キャリブレーション用に設けてあります。

## AD594/AD595 出力電圧の解釈

10 mV/°C の温度比例出力を発生し、回路の定格動作範囲でリファレンス接点を正確に補償するために、AD594/AD595 のゲインは +25°C で J タイプと K タイプの熱電対の伝達特性に一致するように出荷時にトリムされています。このキャリブレーション温度でのジーバック係数(与えられた温度でのサーマル電圧の温度変化率)は、タイプ J 熱電対に対しては 51.70  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  に、タイプ K に対しては 40.44  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  に、それぞれなっています。これは、AD594 と AD595 に対して、10 mV/°C 出力を得るためのそれぞれゲイン=193.4 とゲイン=247.3 に対応します。+25°C で 250 mV の出力を得るようにデバイスはトリムされていますが、出力アンプに入力オフセット誤差が発生して、AD594/AD595 ではそれぞれ 16  $\mu\text{V}$  と 11  $\mu\text{V}$  のオフセットになります。AD594/AD595 の実際の出力電圧を求めるときは、次式を使う必要があります。

$$\text{AD594 出力} = (\text{タイプ J 電圧} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$\text{AD595 出力} = (\text{タイプ K 電圧} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3$$

ここで、タイプ J 電圧とタイプ K 電圧は 0°C 基準の熱電対電圧表から取得。

熱電対出力は狭い温度範囲で直線であることに注意することは重要です。広い温度範囲では、ジーバック係数が非線形になります。AD594/AD595 では直線化を行っていませんが、外部で任意の直線化技術を使用することができます。これにより、高次多項式を使って熱電対温度を計算することができます。National Institute of Standards and Technology は、与えられた熱電対タイプに対する多項式係数表を提供しています。この表はこの処理で使うことができます。

表 II.さまざまな周囲温度での計算誤差

Ambient Temp. °C	AD594C Temp. Rej. Error °C	AD594C Total Error °C	AD594A Temp. Rej. Error °C	AD594A Total Error °C	AD595C Temp. Rej. Error °C	AD595C Total Error °C	AD595A Temp. Rej. Error °C	AD595A Total Error °C
-55	4.83	5.83	6.83	9.83	5.28	6.28	7.28	10.28
-25	1.98	2.98	3.23	6.23	2.04	3.04	3.29	6.29
0	0.62	1.62	1.25	4.25	0.62	1.62	1.25	4.25
+25	0.00	1.00	0.00	3.00	0.00	1.00	0.00	3.00
+50	0.62	1.62	1.25	4.25	0.62	1.62	1.25	4.25
+70	1.46	2.46	2.59	5.59	1.38	2.38	2.50	5.50
+85	2.25	3.25	3.75	6.75	1.99	2.99	3.49	6.49
+125	4.90	5.90	7.40	10.40	3.38	4.38	5.88	8.88

注

Temp. Rej. Errorには、(a)実際のリファレンス接点と氷点補償電圧×ゲインとの間の差、および(b) 0°C~+50°Cの規定値から外挿したオフセットTCおよびゲインTCの2つの成分があります。Total errorは、temp. rej.と初期キャリブレーション誤差の和です。

## 性能の最適化

### 冷接点誤差

AD594/AD595 の最適性能は、熱電対の冷接点とデバイスが熱平衡しているときに得られます。AD594/ AD595 の周囲に発熱デバイスまたは発熱部品を配置すると冷接点に関する誤差が発生するため、避けてください。AD594/AD595 の周囲温度範囲は 0°C~+50°C に規定されているため、冷接点補償電圧はこの範囲での熱電対出力の最適近似直線に一致します。この範囲外での動作では、誤差が大きくなります。表 II に、種々の周囲温度での最大計算誤差を示します。

### 回路基板のレイアウト

図 3 に示す回路ボード・レイアウト(キャリブレーション抵抗付き)では、冷接点と AD594/AD595 との間で熱平衡が得られます。パッケージ温度と回路ボードは、ピン 1 とピン 14 の下でプリント回路ボードの銅パターンと熱的に接触しています。リファレンス接点は、IC と熱平衡している銅—コンスタンタン(または銅—アルメル)接続と銅—鉄(または銅—クロム)接続から構成されるようになります。

図 3. PC ボードのレイアウト

### ハンダ処理

熱電対と PC パターンの接続には、正しいハンダ技術と表面処理が必要です。熱電対の配線を清掃して、ハンダ処理の前に酸化物を除去してください。非腐食性ロジン融剤は、錫 95%アンチモン 5%、錫 95%銀 5%または錫 90%鉛 10%のハンダに対して有効です。

### バイアス電流のリターン

AD594/AD595 の入力計装アンプは入力バイアス電流のリターン・パスを必要とするため、“フローティング”のままにしておくことはできません。熱電対の測定接点が電気的に絶縁されている場合、IC のピン 1 を電源コモン(ピン 4)へ接続する必要があります。アプリケーションによっては、熱電対を直接コモンに接続できないことがあります。ピン 1 とコモン(ピン 4)の間に抵抗を接続すると、バイアス電流のリターン・パスが構成されますが、それを流れる 100 nA のバイアス電流により入力オフセット電圧が発生してしまいます。熱電対を測定接点でグラウンドへ接続する必要がある場合または小さい同相モード電位が存在する場合には、ピン 1 とピン 4 を接続しないでください。

### ノイズの除去

熱電対から低レベルの出力電圧を検出する際、ノイズの除去が重要な問題です。ノイズは内部発生か、または発生源から放射によるかを問わず、ダイナミック・レンジと分解能を制限する要因になります。ノイズ問題の解決には、発生源の除去および/またはシールドが含まれます。後者は、発生源を制御または特定できない場合に有効です。

ノイズは、長い熱電対を使うときに AD594/AD595 の入力アンプへ混入します。このノイズ・パスが犯人かどうかを識別するときは、AD594/AD595 から熱電対を切り離して、ピン 1 とピン 14 をピン 4 に接続します。AD594/ AD595 のピン 9 の出力電圧が周囲温度(+25°C で 250 mV)を表示するようになります。出力(ピン 9)のノイズがなくなる場合は、入力のシールドが必要です。シールドされた熱電対をシールド線で IC のピン 4 に接続すると、ノイズ除去が効果的になります。出力にまだノイズがある場合には、電源経路の混入と見られます。適切な電源バイパスとデカップリングによりこの状態が改善されます。

熱電対入力をフィルタすると、増幅前のノイズが減衰します。図4に、ピン1に直列な抵抗とこのピンとグラウンドとの間に接続したコンデンサから構成される効果的な入力フィルタを示します。抵抗を流れる入力バイアス電流によりオフセット電圧が発生します。反転入力(ピン14)の入力バイアス電流が入力電圧の変化により変化するため、この入力に直列に任意の抵抗を接続すると、入力に依存するオフセット電圧が発生してしまいます。このため、このピンを直接コモンに接続することが推奨されます。さらに、入力ピンのコンデンサにより、熱電対故障の際にアラーム回路の応答時間が大きくなります。

容量を周波数補償ピン(ピン10)に接続すると、AD594/AD595 出力アンプの帯域幅がロールオフされるため、ノイズが抑えられます。補償がない場合の3 dB 帯域幅は約10 kHzです。ピン10とピン11との間に0.1  $\mu$ Fのコンデンサを接続すると、3 dB ポイントが120 Hzに低下しますが、この方法はノイズにより入力ステージが飽和しない場合のみ有効です。

図4.入力のフィルタリング

### キャリブレーション誤差の調整

AD594/AD595 では2種類の性能グレードが提供されており、グレードに応じて1°Cまたは3°Cの最大キャリブレーション誤差を実現するように出荷時に調整されています。大部分のアプリケーションでは、この範囲の誤差を許容できますが、図5に示すオプションのトリム回路を接続するとこの誤差をなくすことができます。約3°Cの負のオフセットがピン5に加えられます。トリム用ポテンショメータにより、平衡電流がピン3に加えられるため、キャリブレーション誤差が相殺されます。

図5.オプションのキャリブレーション

### オフセットとゲインの変更

AD594/AD595は公称ゲイン10 mV/°Cにより0°Cで0 V出力を発生するようにデザインされていますが、他の範囲も容易に可能です。ゼロ出力温度はオフセット電圧をピン8に加えることにより変更することができます。この電圧の大きさは、与えられた熱電対温度に対してAD594/AD595出力電圧の式を使って計算されます。ゲインの変更は、ゲイン増には抵抗の直列接続により、ゲイン減には公称47 k $\Omega$ の帰還抵抗の並列接続により、容易に行うことができます。次の方法でこの原理を説明します。

1. 温度範囲T1~T2を選択します。
2. この範囲に基づいて、最大出力範囲を両電源動作では(-V<sub>S</sub> + 2.5)~(+V<sub>S</sub> - 2)に、単電源動作では0~(+V<sub>S</sub> - 2)に、それぞれ制限する出力感度(mV/°C)を決めます。
3. 選択した温度範囲での平均熱電対感度(VT1-VT2)/(T1-T2)を計算します。
4. 所望の出力感度(mV/°C)を平均熱電対感度(mV/°C)で除算します。これにより、AD594/AD595の新しいゲイン(G)が得られます。
5. ピン8とピン5の間の実際の帰還抵抗R<sub>FB</sub>を測定します。
6. R<sub>IN</sub> = R<sub>FB</sub>/193.4 - 1、ここでR<sub>FB</sub>は帰還抵抗の測定値。注意: AD595には193.4ではなく247.3を使用してください。
7. 新しい帰還抵抗はR<sub>EXT</sub> = (G × 1)(R<sub>IN</sub>)になります。

図 6. オフセットとゲインの変更

### 電流モード伝送

多くのアプリケーションで、AD594/AD595はノイズの多い離れた場所に配置され、出力は長いケーブルを駆動します。これらの厳しい条件では、電流伝送が優れたノイズ耐性を提供するため、ケーブル抵抗による誤差が解消されます。図7に示す回路はAD594/AD595出力を電流に変換した後、制御ポイントで電圧に戻します。ピン9の帰還電圧は、 $R_{SENSE}$ の両端の電圧を熱電対電圧に一致させます。 $R_{SENSE}$ に示す値を使うと、これは電流出力スケール・ファクタ $10 \mu\text{A}/^\circ\text{C}$ になります。このため、検出抵抗を流れるAD594/AD595の静止電流が最小測定温度を $16^\circ\text{C}$ に制限することに注意してください。AD711のオペアンプは制御ポイントでこの電流を公称 $10 \text{mV}/^\circ\text{C}$ に戻します。総合誤差は、AD594/AD595キャリブレーション誤差および検出抵抗と制御ポイントでの $1 \text{k}\Omega$ の電流/電圧変換抵抗との間の一致に依存します。

図 7. 電流モード伝送

### 温度/周波数変換

デジタル出力フォーマットは、AD594/AD595の電圧出力を周波数へ変換することにより発生することもできます。このフォーマットは長い伝送パスでノイズ耐性を強化するだけでなく、コンピュータへ直接インターフェースできる情報も提供します。低価格の電圧/周波数コンバータであるAD654は、 $10 \text{mV}/^\circ\text{C}$ の電圧出力をTTL互換の方形波出力へ変換します。図8に示すように、システム全体は $5 \text{V}$ の単電源を使い、 $0^\circ\text{C} \sim +300^\circ\text{C}$ の温度測定が可能です。熱電対温度が高いほど、電源より $2.5 \text{V}$ 低いAD594/AD595の最大出力振幅を維持するために高い電源電圧が必要になります。AD594/AD595の出力電圧は、直列抵抗を介してAD654入力に接続されて、 $0 \text{mA} \sim 1 \text{mA}$ のフルスケール電流を発生します。コンデンサ $C_T$ はフルスケール出力周波数を決定し、最大有効周波数 $500 \text{kHz}$ で $0.4\%$ の非直線性が得られます。その他の温度範囲と出力周波数も実現可能です。詳細については、AD654のデータ・シートを参照してください。

図 8. 温度/周波数変換

### 華氏温度出力

AD594/AD595 は、華氏温度スケールの温度に比例した電圧を発生するように設定することができます。摂氏温度から華氏温度スケールへの温度変換では、摂氏温度に 9/5 を乗算して 32° のオフセットを加算する必要があります。このオフセットは 200 nA/°C の電流をピン 3 に入力して発生し、ゲイン 9/5 を実現するため帰還抵抗を大きくします。出力キャリブレーションは次のように行います。

1. 熱電対を切り離して、ピン1とピン14に10 mVp-pの100 Hz AC 信号を入力します。
2. ピン9のp-p出力が3.481 V (AD594)または4.451 V (AD595)になるようにR<sub>GAIN</sub>を調整します。
3. 熱電対を接続して、0°Cを測定しながら、ピン9の出力が320 mV になるまでR<sub>OFFSET</sub>を調整します。

華氏温度出力の理論伝達関数は次のようになります。

$$\text{AD594 出力} = (\text{タイプ J 電圧} + 919 \mu\text{V}) \times 348.12$$

$$\text{AD595 出力} = (\text{タイプ K 電圧} + 719 \mu\text{V}) \times 445.14$$

この場合、熱電対の有効範囲で得られる出力電圧振幅が大きくなるため、電源より 2.5 V 低い最大出力電圧を維持するためには電源電圧を高くする必要があります。

図 9. 華氏温度出力

### 平均温度

AD594/AD595 入力に多数の熱電対を並列接続すると、平均接点温度を測定することができます。図 10 に示すように、300 Ω の抵抗を各熱電対の一端に直列接続して、各熱電対の枝の間を還流する電流を制限します。平均値より高いまたは低い熱電対温度に基づいて、正または負の電圧降下が発生します。

図 10. 平均温度の測定

### 熱電対のマルチプレクス

複数の熱電対を ADG507A のような外付け CMOS アナログ・マルチプレクサを使って 1 個の AD595/AD595 に接続することができます。正しい動作のためには、複数の熱電対間のすべての接続、マルチプレクサ、AD594/AD595 入力には銅を使い、等温ブロックにより熱平衡状態に維持します。図 11 に示すように、IC 温度を測定するため、さらに等温ブロックのリファレンス接点電圧を相殺させるために熱電対を実装します。マルチプレクサをイネーブルすると、等温ブロックで熱電対接続により形成されるコンスタンタン(アルメル)—銅接点とリファレンス熱電対接続により形成される銅—コンスタンタン(アルメル)接点は直列になります。

ブロックは等温であるため、この直列組み合わせにより電圧は等しく極性は逆になります。この状態で、AD594/AD595 の内部冷接点補償機能が IC のリファレンス接点を補償するようになり、0°C ~ +50°C の間に維持されます。ただし、等温ブロックは任意の便利な温度または場所に置くことができることに注意してください。未使用のマルチプレクサ入力はコモンに接続して、漂遊信号が混入しないようにする必要があります。AD594/AD595 の入力が“フローティング”になり出力が飽和してしまうのを防止するため、イネーブル入力を +5 V にして、マルチプレクサを常時イネーブルする必要があります。

### 参考文献

1. Sheingold, Dan, ed. Transducer Interface Handbook, Analog Devices, 1980.
2. 1992 Amplifier Applications Guide, Analog Devices, Pub. No. G1646-10-4/92.
3. American Society for Testing and Materials, Manual On The Use Of Thermocouples In Temperature Measurement, ASTM PCN 04-470020-40.

図 11. 入力のマルチプレクス