

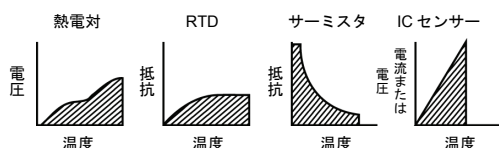
### 熱電対温度計測に関する不明瞭な部分の理解 (AD594/AD595 を使用)

著者 : Bob LeFort、Bob Ries

温度は、物理パラメータとして最も頻りに測定されています。しかし、温度計測技術はかなり誤解されているため、大きな誤差が生じたり、データが無意味なものになることがあります。このアプリケーション・ノートでは、これらのよくある誤解を解明するほか、興味深く、役に立つ回路上の解決法をご紹介します。

#### 温度トランスデューサの技術

現在市販されている電子温度計測デバイスの中で最もよく使われているものに、熱電対、抵抗温度検出器 (RTD)、サーミスタ、IC 温度トランスデューサなどがあります。表 I に示すように、いずれのデバイスにもアプリケーション上の利点と制限があります。



	熱電対	RTD	サーミスタ	IC センサー
直線性		*		**
感度			*	**
頑丈度	*			
コスト	**		*	*
安定性		*		
精度		**		*
応答時間	*			
ノイズ耐性				*
消費電力	**			*
最大温度範囲 <sup>1</sup> (°C)	-270~+2980	-180~+630	-80~+150	-55~+150

\* 良い

\*\*優れている

<sup>1</sup> ここに示す温度範囲は、必ずしもトランスデューサ・タイプのシングル・バージョンに対するものではありません。

表 I. センサーの比較

#### 熱電対の特性

熱電対は、測定用に最も広く使われている温度センサーです。このため、米規格基準局 (NBS) はタイプ J (鉄-コンスタンタン)、

タイプ K (クロメル-アルメル)、タイプ E (クロメル-コンスタンタン)、タイプ T (銅-コンスタンタン) などさまざまな金属の組み合わせについて広範囲に特性を規定しました。熱電対の特性としては、本来の高精度、広い温度範囲、速い熱応答、頑丈、低価格、再現性がよい、汎用性などが挙げられます。熱電対は幅広く使用されていますが、同時に最も誤解の多い温度センサーです。冷接点補償、ゼーベック係数、等温接続や等温ブロックなどの用語が、多くのユーザに混乱や不安を招いています。このアプリケーション・ノートはこれらの用語について説明し、正確かつ簡単に温度を測定するために必要な情報を提供します。

#### 熱電対回路

異なる材料の 2 本の金属線を両端で接合することで、基本的な熱電対回路ができます (図 1a を参照)。この回路は、2 つの接点での温度差に比例する電圧を発生します。熱電対は基本的に温度差測定デバイスであるので、ある点での温度を測定するには、もう一方の接点 (基準接点) は既知の温度である必要があります。熱電対のユーザは、さまざまな方法を用いて基準接点 (つまり「冷接点」) の温度を決め、補償してきました。

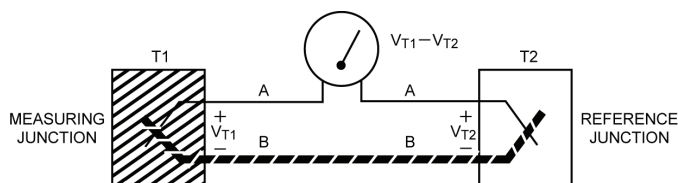


図 1a. 熱電対回路

#### 氷点基準

すべての熱電対 (NBS の表にあるもの) の電圧出力は、0°C を基準とします。つまり、熱電対の両端の電圧は、基準接点が 0°C に保持されていれば、測定接点の温度に一致します。基準接点を 0°C に保持することは図 1b に示すように、氷点槽 (「アイス・バス」といわれるもの) を用いて実現できます。しかし、残念ながらこのような方法は手間がかかり、コストもかかるため、実験室でしか使用できません。製造工場の環境では、基準接点を 0°C に維持することは現実的ではありません。

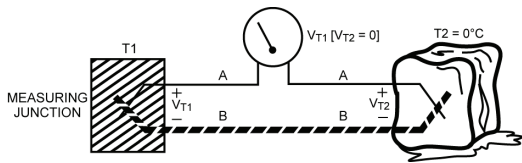


図 1b. 氷点基準

### 中間金属の法則

実際には、明白な基準接点 (図 1a のようなもの) を設けなくても済むように、基本的な熱電対回路に相当する直接の接続を行います (図 1c を参照)。中間金属の法則によると、熱電対の 2 つの異種金属に第 3 の金属 (通常は銅) を接続しても、同じ温度で接続されている限り、出力電圧に影響を与えません。

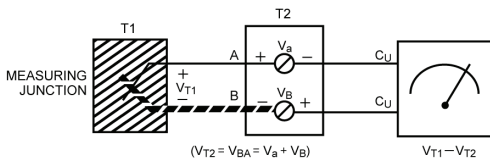


図 1c. 「間接的な」基準接点

### 実質的な熱電対による測定

実際の環境では、基準接点で発生する電圧を補償することで、氷点基準を不要にしています。そのために、基準接点の電圧と等しいが向きが反対の電圧を熱電対回路に加算します (図 1d を参照)。

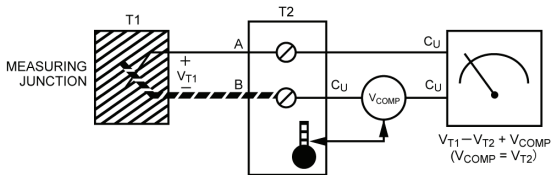


図 1d. 冷接点補償

この補償を実現するデバイスが AD594/AD595 です。ブロック図と基本的な接続を 図 2 に示します。内蔵の氷点補償回路が、基準接点の温度を監視し、内部の加算点で熱電対回路に適切な電圧を加算します。次に、この正味電圧を公称出力 10mV/°C に増幅します。

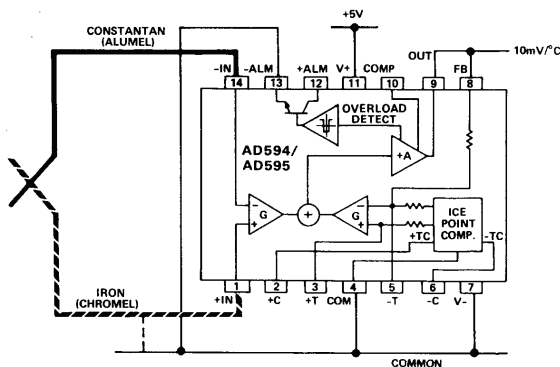


図 2. AD594/AD595 のブロック図

AD594 は工場出荷時にタイプ J 熱電対用に調整されており、AD595 はタイプ K 熱電対用に調整されています。

### ゼーベック係数

熱電対のゼーベック係数は、任意の温度での熱起電力の温度変化率と定義されており、通常、 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  の単位で表されます。熱電対の非直線性は、この係数の温度変化によって表されます。図 3 は、さまざまな熱電対のゼーベック係数のグラフです。

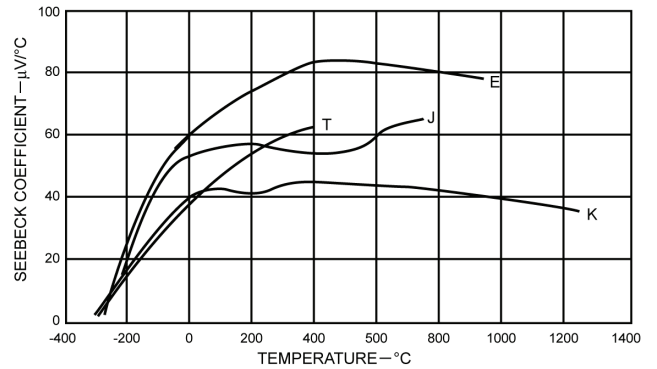


図 3. ゼーベック係数対温度

### いろいろなタイプの熱電対

熱電対の種類を区別するために、一般に感度と動作温度範囲の 2 つの特性を使用します。図 4 のグラフは、一般によく使われる金属の組み合わせについてこれらの特性を示したものです。

AD594 はタイプ J 熱電対用として工場出荷時調整されていますが、AD594/AD595 のデータシートに示すように、簡単な外部調整でタイプ E に設定できます。タイプ K 熱電対用に工場出荷時に調整されている AD595 も、 $0.2^\circ\text{C}$  以内の誤差が伴うだけでタイプ T 熱電対に直接接続することができます。

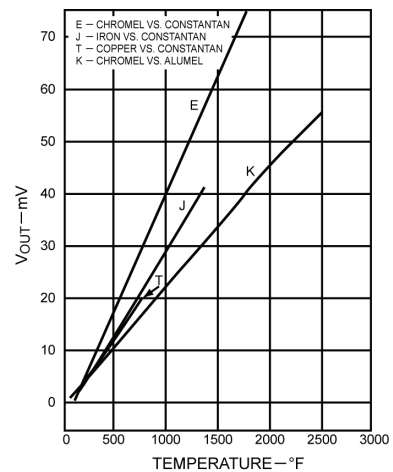


図 4. 熱電対出力対温度

## AD594/AD595の性能の最適化

AD594 または AD595 で規定された精度を十分得るには、以下の設計ガイドラインを守る必要があります。

### 1. 冷接点誤差

AD594/AD595 には冷接点補償機能が内蔵されています。この機能が正しく働くには、IC を熱電対の冷接点と同じ温度に保持する必要があります。放熱によって冷接点補償に関わる誤差が生じないように、AD594/AD595 にほかの部品や熱源が直接触れないようにしてください。(AD594/AD595 の無負荷時電源電流はわずか  $160\mu\text{A}$  なので、自己発熱に伴う誤差はごくわずかです。)

### 2. 回路基板のレイアウト

図5に示すプリント回路基板の接続レイアウト(オプションの調整用抵抗含む)によって、冷接点とAD594/AD595 との間の熱平衡が得られます。ここでは、1番ピンと14番ピンの下のプリント回路基板の銅パターンにおいてICと回路基板が熱的に接触しています。基準接点は銅-コンスタンタン(または銅-アルメル)接続と銅-鉄(または銅-クロメル)接続で構成されており、いずれもAD594/AD595 と同じ温度に保持されています。

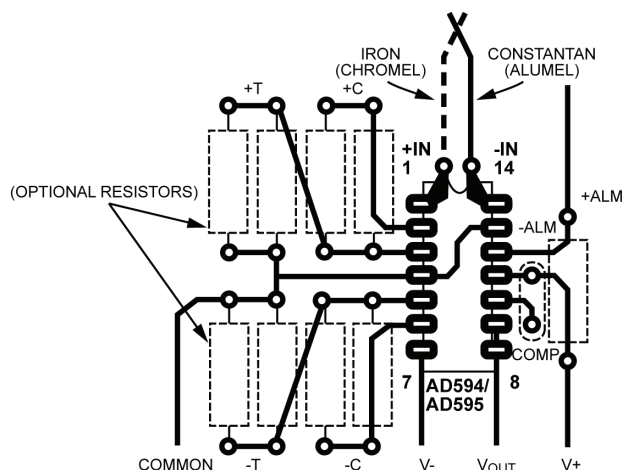


図5. PCボードの接続

### 3. ハンダ処理

接合を確実にし、 $I \times R$  電圧降下を最小限に抑えるため、熱電対金属線の酸化部分をきれいに除去してからハンダ付けを行う必要があります。鉄、コンスタンタン、クロメル、アルメル、および錫95%/アンチモン5%、錫95%/銀5%、または錫90%/鉛10%のハンダに対しては、非腐食性ロジンフラックスが効果的です。

### 4. 接地の方法

AD594/AD595 の入力段にはトランジスタがあり、熱電対入力からグラウンドにバイアス電流を流す必要があります。この経路がないと、電流によって入力段がカットオフ状態になり、出力が誤った値を示すことになります。帰還経路ができるようにグラウンドへ直接接続します。

### 5. ノイズの最小化

熱電対が拾った高周波ノイズの増幅を最小に抑えるために、9番と10番、10番と11番の各ピンの間に補償コンデンサを接続します。図6に示す値は、60Hzでゼロになりますが、応答時間が遅くなります。

グラウンド・ラインでの  $I \times R$  電圧降下を避けるために、すべてのグラウンド点を中心点に直接接続します。100Ω 抵抗と  $0.1\mu\text{F}$  コンデンサにより、電源ラインの過渡スパイクとリップルを取り除きます。

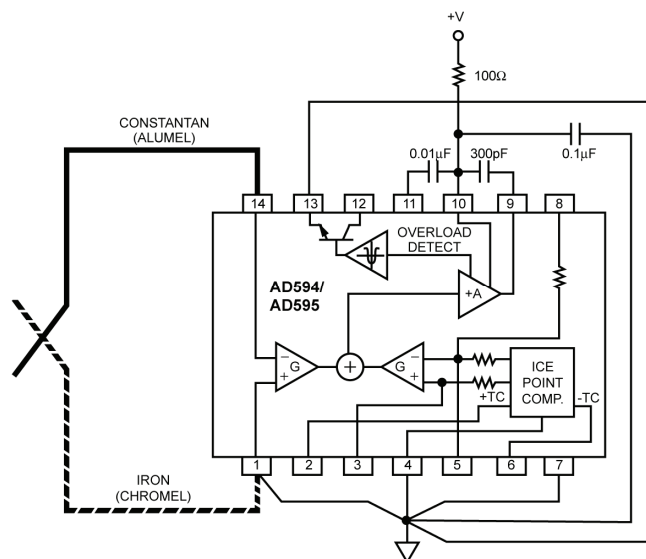


図6. フィルタリング、補償、接地による誤差の低減

## 拡張周囲温度

### 誤差の計算

熱電対の非直線性(ゼーベック係数の変化)に関連する誤差を最小限に抑え、精度を  $25^\circ\text{C}$  の周囲温度で最適化するために、AD594/AD595 の仕様は動作温度範囲  $0 \sim 50^\circ\text{C}$  で規定されています。AD594/AD595 の氷点補償電圧は直線的であり、 $0 \sim 50^\circ\text{C}$  での熱電対の出力の最良適合直線に一致します。この範囲を外れると、熱電対と補償電圧との偏差が顕著になります。つまり、AD594/AD595 は仕様を保障している温度範囲外でも正しく動作しますが、規定されている温度安定性誤差内に収まらない可能性があります。

表IIは、民生周囲温度範囲、工業周囲温度範囲、拡張周囲温度範囲について最大誤差を計算した値の一覧です。周囲温度はICと基準接点の温度です。測定接点は、熱電対の定格限度内であれば任意の温度にすることができます。

周囲温度 °C	AD594C 最適範囲外 での誤差°C	AD594C 合計誤差 °C	AD594A 最適範囲外 での誤差°C	AD594A 合計誤差 °C	AD595C 最適範囲外 での誤差°C	AD595C 合計誤差 °C	AD595A 最適範囲外 での誤差°C	AD595A 合計誤差 °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：  
“最適範囲外での誤差”には、(a)実際の基準接点と氷点補償電圧の差×ゲイン、および(b)0~50°Cの規定値から推定したオフセット温度係数とゲイン温度係数の2つの成分があります。合計誤差は、温度不合格誤差と初期調整誤差の和です。

表 II. さまざまな周囲温度における最大誤差の計算値

## 回路のアイデア

### オプションの調整方式

図7の回路は、AD594/AD595の残留する調整誤差をゼロにします。15MΩ抵抗によって、-T (5番ピン) に電流が注入され、オフセットが負になります (約-3°Cのオフセットに対応)。調整用ポテンショメータ (R<sub>CAL</sub>) を使用し、+T (3番ピン) に平衡電流を注入することで、強制的に作った負のオフセットをゼロにすることができます。この回路は、1個の単方向トリムによって任意の調整誤差をゼロにすることができます。

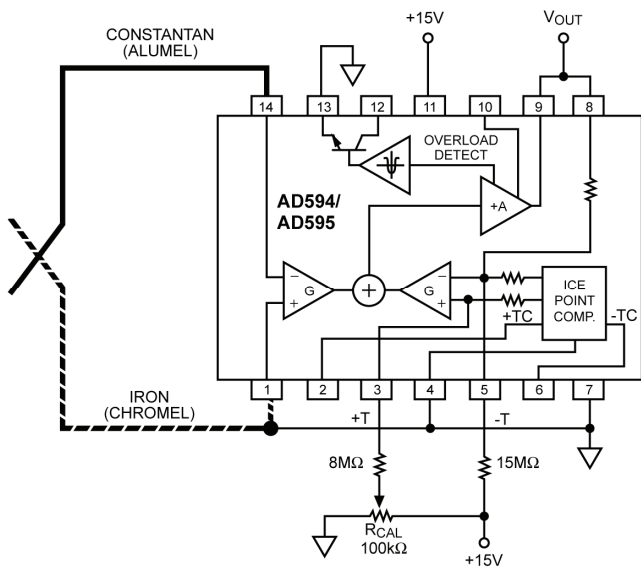


図7. 調整誤差の微調整

### 華氏温度の出力

図8は、10mV/°Fの電圧出力を直接に読み取ることができる回路です。次に示す温度スケール変換式が、回路にそのまま組み込まれています。

$$\text{華氏温度} = (9/5) (\text{摂氏温度}) + 32$$

3番ピンに注入された 200nA/°C の電流によって 32°F のオフセットが発生し、出力の抵抗網によりゲインが 9/5 に増加します。

出力の調整：

1. 熱電対を切り離し、1番ピンと14番ピンに10mVp-pの100Hz AC信号を入力します。(AC励起を使用することで、ゲインの調整とオフセットの調整を分離できます。)
2. p-p出力が3.481V (AD594) または4.451V (AD595) になるように R<sub>GAIN</sub> を調整します。
3. 0°Cのアイス・バスまたは氷点槽にある熱電対を1番ピンと14番ピンにもう一度接続します。
4. 出力が320mVになるまで、R<sub>OFFSET</sub> を調整します。

華氏温度を出力する AD594/AD595 の、0°C で熱電対を調整した場合の、理想的な伝達関数は次のようになります。

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

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

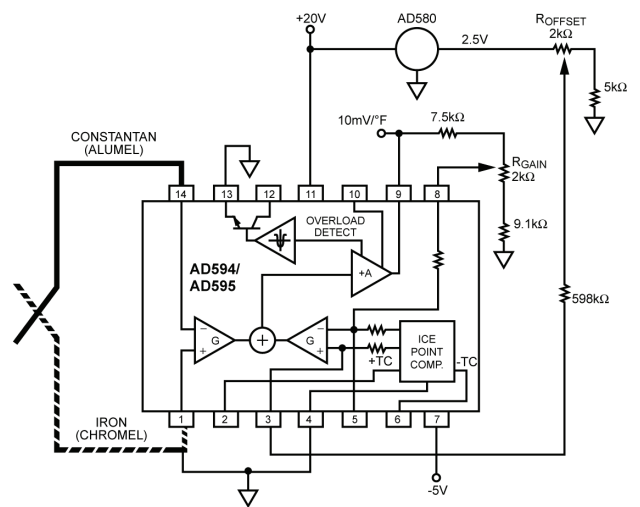


図8. 摂氏温度から華氏温度への変換

## 平均温度の直接測定

平均温度は、1つのAD594/AD595を使い、図9の構成にすることにより直接測定できます。この回路の出力は、 $(T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_N) / N$  (単位:  $^{\circ}\text{C}$ )  $\times 10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  (公称値) に等しくなります。熱電対/抵抗ペアをいくつ並列に接続しても、AD594/AD595は正しい冷接点

補償を行います。300 $\Omega$ の直列抵抗が、各熱電対の間を流れる電流を最小限に抑えます。この直列抵抗には、各熱電対の温度が平均値より高いか低いかにより、その電圧差をバランスするための正または負の電圧降下が発生します。大きい温度勾配がある対象について正確な平均値を出す場合にも、この回路を利用できます。

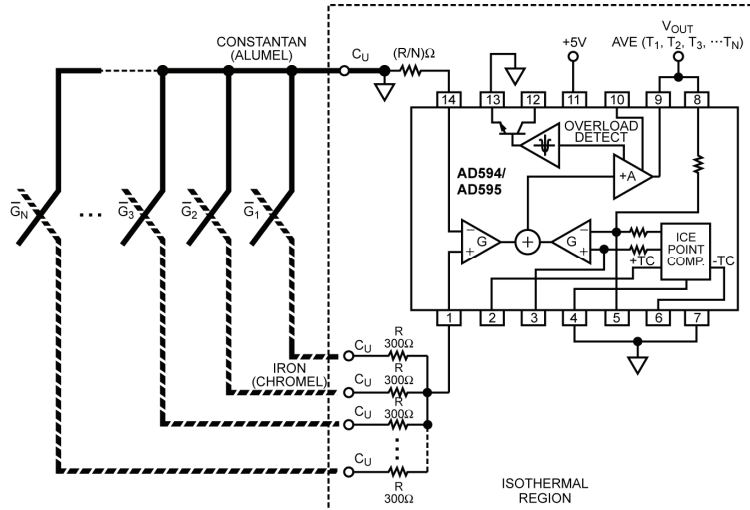


図9. 平均温度の測定

## マルチプレックスを使った複数温度の測定

大型の温度測定データ収録装置では、熱電対信号をマルチプレクサで切り替えて入力することによって必要なAD594/AD595の数を最小にすることができます(図10を参照)。この回路のもうひとつ重要な機能は、複数の基準接点接続を端子台の集合からAD594/AD595の単一接点に変換することです。

AD594/AD595の下に熱電対を置き(熱的接触)、その出力信号を等温コネクタに戻すことによって、等温ブロックで発生した基準接点電圧を効果的にキャンセルすることができます。あるマルチプレクサがONの位置にあるとき、コンスタンタン(アルメル)–銅接点と銅–コンスタンタン(アルメル)接点を直列に配置すると、大きさは等しく極性は逆の電圧が得られます。つまり、ブロック

が等温であることから、 $V_1 = V_2$ になります。鉄(クロメル)–銅接点にも同じことが当てはまります。

このようなキャンセル機能によって、AD594/AD595の内蔵冷接点補償回路はICの直下にある熱電対を補償します。このようにすれば、端子台を任意の離れた位置に置くことができます。ただし、AD594/AD595と付属の熱電対の温度は0~50 $^{\circ}\text{C}$ の範囲を維持してください。

AD7502を使用すれば、1個のAD594/AD595で4種類の温度を監視できます(AD7507では8つの温度を監視可能)。シングルエンドのマルチプレクサを用いれば、熱電対の配線のおよそ半分を除去することができますが、その場合システムはコモンモード・ノイズを拾いやすくなります。

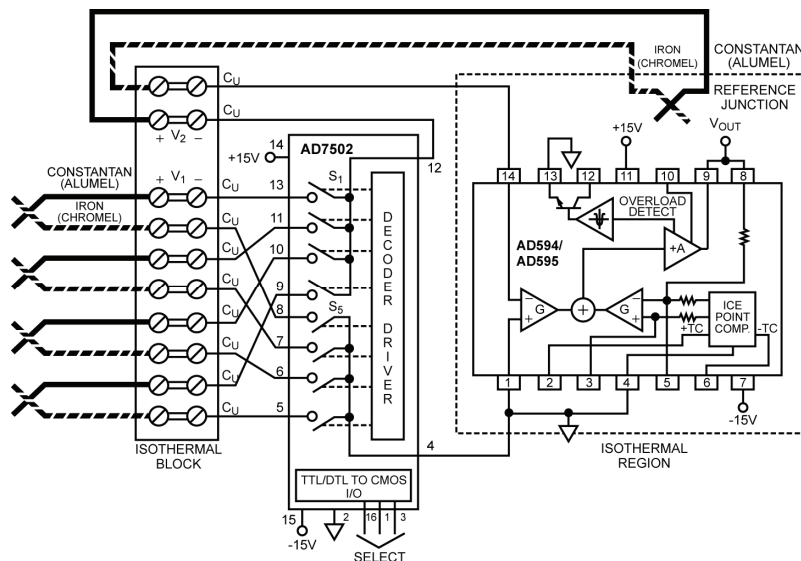


図10. 複数熱電対をマルチプレックスで切り替える方法

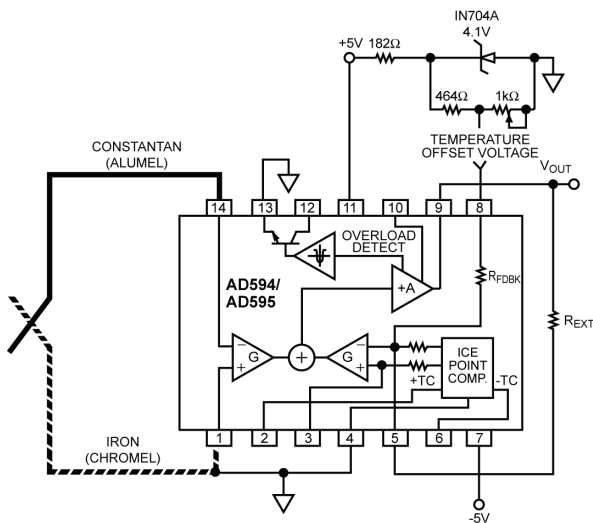


図 11. ゼロ点のシフトと感度（ゲイン）変更

### オフセットとゲインの変更

図 11 に示す回路には 2 つの機能ががあります。1) AD594/AD595 にオフセット電圧を加えることにより、任意の温度で出力を 0V にする。（ゼロ点のシフト）2) AD594/AD595 のゲインを変更することにより、出力感度（熱電対の 1 度当たりの変化に対する出力電圧の変化）の変更を可能にする。

0°C 以外の温度で出力が 0V になるように出力をシフトするには、帰還抵抗（8 番ピン）つまり、加算点に接続された右側のアンプの反転入力にオフセット電圧を加えます。

### 電流モード伝送

ノイズの多い環境で信号を送信する場合は、電圧よりも電流を使用するほうがよいと考えられます。図 12 は、AD594/AD595 の出力信号を電流として伝送してから、信号処理側で電圧に変換する方法を示しています。

この回路では、9 番ピンの帰還電圧によって R\_SENSE 両端の電圧が熱電対の電圧に等しくします。R\_SENSE を正しく選択すると（AD594 では 5.11Ω、AD595 では 4.02Ω）、10μA/°C の電流が発生します。

オフセット電圧（AD594/AD595 のデータシートの表 1 の出力の列に記載されている値）は、ゼロ出力温度をその加えたオフセット電圧に相当する分シフトします。感度は内蔵帰還抵抗の代わりに大きい外部抵抗を使用するか、小さな外部抵抗を使用するかにより、大きくも小さくもできます。新しい帰還抵抗の値を計算するひとつの方法を示します。

1. 所望の出力感度を決めます。（mV/°C 単位）
2. 温度範囲 T1~T2 を決めます。
3. その温度範囲に対する平均熱電対感度を計算します。  

$$(V_{a1} - V_{a2}) / (T1 - T2)$$
4. 所望の感度を平均熱電対感度で割ります。  
 (1)の結果 ÷ (3)の計算値。この値が AD594/AD595 の新しいゲイン (G\_NEW) になります。計算が正しければ、結果は単位がありません。
5. 実際の帰還抵抗（8 番ピンから 5 番ピン）R\_FDBK を測定します。
6. 
$$R_{INTERNAL} = \frac{R_{FDBK}}{193.4 - 1} = \frac{(5)の結果}{193.4 - 1}$$
 注：AD595 では、193.4 ではなく 247.3 を使用します。
7. 新しい帰還抵抗の値を計算します。

$$(G_{NEW} - 1)(R_{INTERNAL}) = ((4)の結果 - 1) / ((6)の結果)$$

この方法によって、5V 電源で温度範囲 300~330°C、とし、300°C で 0V 出力に設定して 300°C から始まる 100mV/°C の出力にすることができます。4.1V のツェナー・ダイオードと抵抗分圧器を使用して、ゼロ出力温度点を変更することができます。

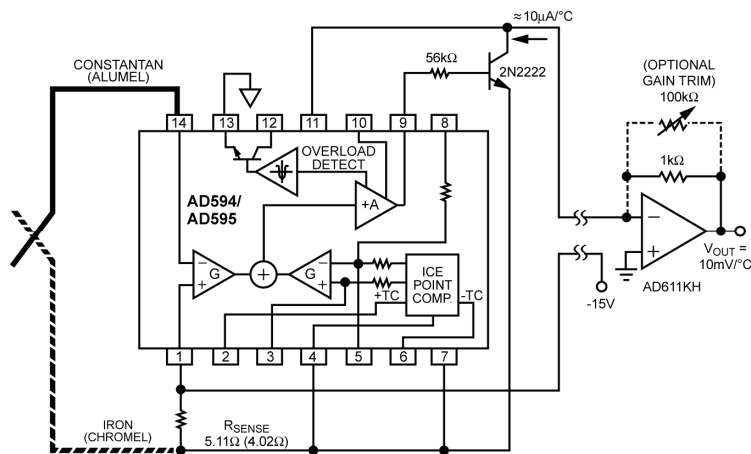


図 12. リモート温度計測