

実用的な温度測定

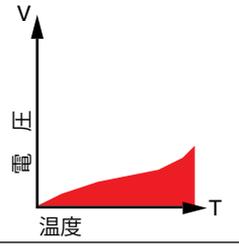
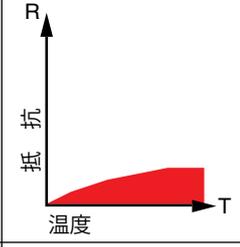
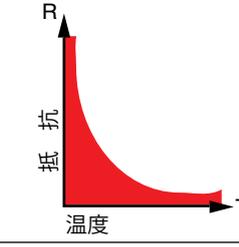
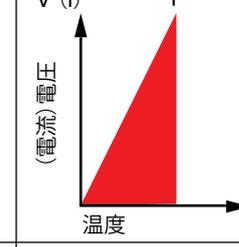
	熱電対 	RTD 	サーミスタ 	IC センサ 
				
利点	<input type="checkbox"/> 自己出力形 <input type="checkbox"/> 簡単 <input type="checkbox"/> 頑丈 <input type="checkbox"/> 安価 <input type="checkbox"/> 豊富な種類 <input type="checkbox"/> 測定範囲が広い	<input type="checkbox"/> 安定性が最高 <input type="checkbox"/> 精度が最高 <input type="checkbox"/> 熱電対より線形	<input type="checkbox"/> 高出力 <input type="checkbox"/> 応答が速い <input type="checkbox"/> 2線式の抵抗測定	<input type="checkbox"/> 最も線形 <input type="checkbox"/> 最も高出力 <input type="checkbox"/> 安価
欠点	<input type="checkbox"/> 非線形 <input type="checkbox"/> 低電圧 <input type="checkbox"/> 基準接点が必要 <input type="checkbox"/> 安定性が最も低い <input type="checkbox"/> 感度が最も低い	<input type="checkbox"/> 高価 <input type="checkbox"/> 絶対抵抗値が低い <input type="checkbox"/> 小さい ΔR <input type="checkbox"/> 電流源が必要 <input type="checkbox"/> 自己発熱	<input type="checkbox"/> 非線形 <input type="checkbox"/> 温度範囲が狭い <input type="checkbox"/> 壊れやすい <input type="checkbox"/> 電流源が必要 <input type="checkbox"/> 自己発熱	<input type="checkbox"/> $T < 200^{\circ}\text{C}$ <input type="checkbox"/> 応答が遅い <input type="checkbox"/> 限られた構成 <input type="checkbox"/> 電源が必要 <input type="checkbox"/> 自己発熱

図1

目次 アプリケーションノートと実用的な温度測定

	温度ページ
一般的な温度変換器	18
はじめに	19
基準温度	20
熱電対	20
基準接点	21
基準接点回路	22
ハードウェア補償	23
電圧から温度への変換	24
実用的な熱電対測定	26
ノイズ除去	26
接合点の不良	28
校正のズレ	28
並列インピーダンス	28
電蝕作用	29
熱の転換	29
配線ケーブルの校正	29
故障診断	30
概要	31
RTD	32
歴史	32
金属膜 RTD	32
抵抗測定	33
3線式ブリッジの測定誤差	34
抵抗値の温度変換	34
使用上の注意点	35

*Copyright©1997,2000はAgilent Technologies Inc.の許可を得て引用

目次 アプリケーションノートと実用的な温度測定(続き)

サーミスタ.....	35
線形サーミスタ.....	36
測定.....	36
モノシック線形温度センサ.....	36
付録A 熱電対の経験的法則.....	36
付録B.....	37
熱電対の特性.....	37
卑金属熱電対.....	37
標準配線誤差.....	38
図書目録.....	39

はじめに

合成燃料研究、太陽エネルギーの利用、新型エンジン開発などにより、天然資源の枯渇に対応すべくさまざまな努力が払われています。あらゆる産業がエネルギー効率を強調しているため、基本的な温度測定が新しい重要性を帯びています。このアプリケーションノートの目的は、比較的一般的な温度管理技術を解説して測定精度を改良するための手順を紹介することです。

4種類の最も一般的な温度センサ：熱電対、RTD、サーミスタと集積回路(IC)センサについて説明します。熱電対は非常に普及していますが、誤用されることが多いので、ここでは主に熱電対測定技術について解説します。

付録Aは、ここで使用される理論の基礎である熱電対の経験則が記述されています。熱電対理論の詳細は、図書目録の17をご覧ください。

特定の熱電対アプリケーションに関しては、付録Bが熱電対の最良型を選ぶガイドになっています。このアプリケーションノートでは、変換器の配置、信号処理、および計装関連の実用的な問題について述べています。

初期の測定機器 - ガリレオは1592年頃に温度計を発明しました^{1, 2, 3}

有色のアルコールで満たしたフタのない容器の中に、上側に中空のガラス球を付けた細長いガラス管を吊しました。加熱されると球の空気が膨張して液体を通して抜けていきます。球が冷やされると液体はチューブを上っていきます。¹ これにより球の温度変動が、ガラス管の中の液レベルとして観測できます。この「逆さ」の温度計は、気圧に影響される上、ガラス管に目盛りが無かったので測定器としては初歩的な物でした。しかしフィレンツェでの温度計の開発で温度測定精度に大きな改良が加えられました。

(その温度計は密封された構造と目盛りを刻んだスケールを取り入れました)。その後数十年間で、多くの寒暖計が考案されましたが、すべて2つ以上の定点に基づいていました。しかしながら、オランダの機器製作者のガブリエル・ダニエル・ファーレンハイトが、1700年初頭に、初めて正確な再現性をもつ水銀温度計を生産に成功するまでは、一般に認識されませんでした。温度スケールの下側の定点用に、ファーレンハイトは氷水と塩(または、塩化アンモニウム)の混合物を使用しました。これは当時、再現できる最低温度でした。彼はそれを「0度」と名付けました。スケールの上限には、人の血液温度を選んで96度と呼びました。100度ではなく96度になったのは、当時のスケールは12分割されていたからです。ファーレンハイトは、分解能をもとめてスケールは24から48になり最終的に96の目盛りに分割されました。ファーレンハイト温度計は主として再現性の良さと、彼の作る温度計が高品質だったため普及しました。

1742年頃にアンダース・セルシウスは、氷の融点と水の沸点を2つの定点として使用するよう提案しました。最初に沸点を0度、融点を100度に選定しましたが、後に融点を0度、沸点を100度にして、その間を100分割した百分目盛が生まれました。1948年に、名前は公式に摂氏目盛に変わりました。

1800年代前半にウィリアム・トムソン(Kelvin公)が、理想気体の膨張係数に基づく汎用性のある熱力学的スケールを開発しました。絶対零度の概念を確立したケルビンのスケールは現代の温度測定学の標準となっています。

現在使用されている4つの温度スケールに関する変換式は以下の通りです：

$$\begin{aligned} ^\circ\text{C} &= 5/9(^{\circ}\text{F} - 32) & ^{\circ}\text{F} &= 9/5^{\circ}\text{C} + 32 \\ \text{K} &= ^{\circ}\text{F} + 273.15 & ^{\circ}\text{R} &= ^{\circ}\text{F} + 459.67 \end{aligned}$$

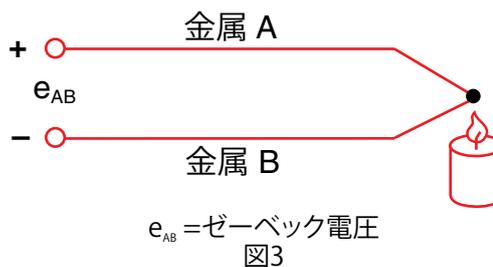
ランキンスケール(R)は、単にケルビンスケールを華氏に当てはめたもので、熱力学の初期のパイオニアであるW.J.M.Rankineにちなんで名付けられました。

^{1, 2, 3} 図書目録1、2、3を参照して下さい。

基準温度

電圧デバイダーのように、温度デバイダーを作ることはできません。あるいは、距離を測定する、長さを加えるように、温度を加える事もできません。温度は、簡単に観測される一貫した物理的な現象によって確立されたものを使用しなければなりません。国際実用温度目盛 (IPTS) は、このような理論に基づいています。1968年に改訂されて、11の温度基準を確立しています。

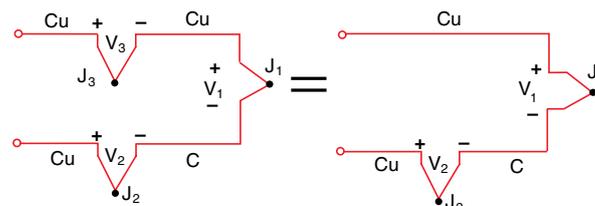
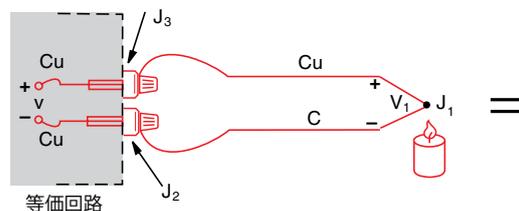
参照として使用する固定の温度は他に無いので、その間を補間する器具を使用しなければなりません。しかし、正確に温度を補間するには、特殊な変換器を必要とします。その多くが実用的な状況で使用できないくらい複雑であるか、または高価です。ここでは議論を4種類の最も一般的な温度変換器に制限します：熱電対、抵抗温度計 (RTD)、サーミスタ、および集積回路 (IC) センサです。



すべての異種金属間には、この効果があります。2種金属の最も一般的な組み合わせは、それぞれの重要な特性と共に、このアプリケーションノートの付録 B に記載されています。小さな温度変化の範囲では、ゼーベック電圧は温度に直線的に比例しています：

$$\Delta e^{AB} = \alpha \Delta T$$

ここで、 α (ゼーベック係数) は比例定数です。熱電対電圧の測定 - 電圧計 (DVM) を熱電対に接続すると、その接続自体が新しい熱電回路を形成するので、直接ゼーベック電圧を測定できません。銅コンスタンタン (タイプ T) 熱電対に電圧計を接続して、電圧出力を見ます：



DVMで接合点の電圧測定
図4

IPTS-68基準温度

均衡点	K	°C
水素の三重点	13.81	-259.34
水素の液相/気相の平衡点 (25/76標準雰囲気中で)	17.042	-256.108
水素の沸点	20.28	-252.87
ネオンの沸点	27.102	-246.048
酸素の三重点	54.361	-218.789
酸素の沸点	90.188	-182.962
水の三重点	273.16	0.01
水の沸点	373.15	100
亜鉛の凝固点	692.73	419.58
銀の凝固点	1235.08	961.93
金の凝固点	1337.58	1064.43

表1

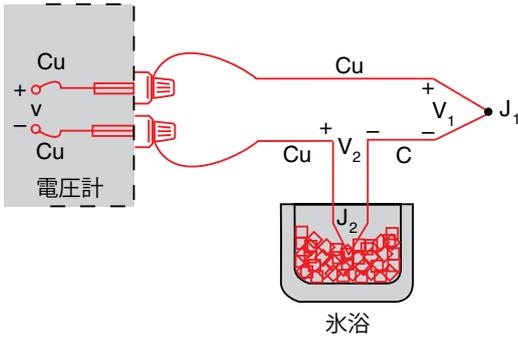
熱電対

異なった金属でできた2本の導線が、両端で接合された状態で、接合点の片方が加熱されているときこの熱電回路に連続して電流が流れます。トーマス・ゼーベックが1821年に、この原理を発見をしました。

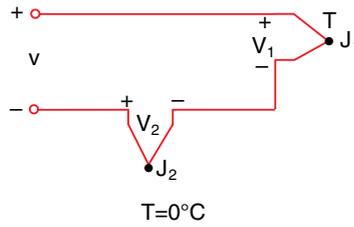


この回路を途中で開いたときの、電圧 (ゼーベック電圧) は、接合点温度と2つの金属の組成の関数になっています。

基準接点



外部参照接点
図5



J₂の温度を決定する一つの方法は、接合点を物理的に氷浴に入れ0°Cにします。これにより、J₂が基準接点になります。ここでは両方の電圧計ターミナルの接合点が銅/銅であるため熱起電力を全く発生しません。電圧計(DVM)の測定値VはJ₁とJ₂の温度差に比例しています。電圧計測定値は(図5参照):

$$V = (V_1 - V_2) \approx \alpha(t_{J1} - t_{J2})$$

摂氏度でT_{J1}を指定すると:

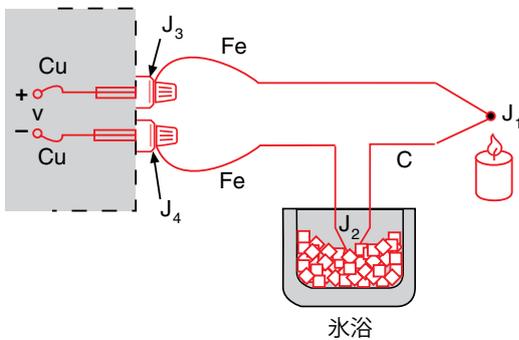
$$T_{J1} (^{\circ}\text{C}) + 273.15 = t_{J1}$$

次に、Vは:

$$V = V_1 - V_2 = \alpha [(T_{J1} + 273.15) - (T_{J2} + 273.15)] \\ = \alpha (T_{J1} - T_{J2}) = \alpha (T_{J1} - 0)$$

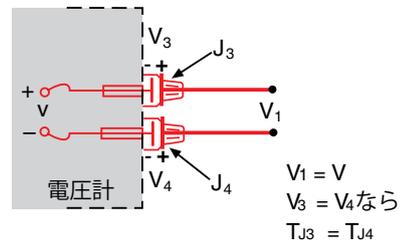
$$V = \alpha T_{J1}$$

氷浴の接合点出力(V₂)が0ボルトでないことを強調しておきます。それは絶対温度の関数です。氷点を使用した基準接点の電圧を加えることによって、測定値Vを0°Cに参照させることになります。氷点温度は正確に制御できるので、この方法は非常に正確です。米国標準局(NBS)によって、氷点が基本的な基準点として熱電対テーブルに使用されるので、NBSテーブルを参照して電圧Vから温度T_{J1}を直接変換できます。



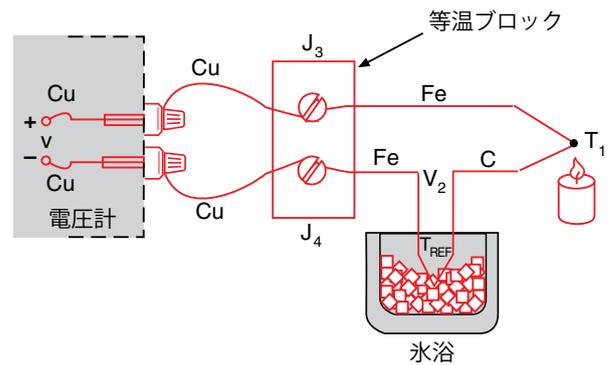
鉄-コンスタンタン熱電対
図6

銅線が電圧計端子と同じ金属であるので、図5に示した銅-コンスタンタン熱電対はユニークな例です。次に、銅-コンスタンタンの代わりに鉄-コンスタンタン(タイプJ)熱電対の例を説明します。両方の電圧計の端子がCu-Fe熱電対接合点になるので、鉄線(図6)は、回路中の、異種金属の接合点の数を増加させます。



接合点電圧の相殺
図7

両方の電圧計の端子が同じ温度でないと、誤差が生じます。正確な測定をするためには、電圧計の銅配線を延長して、銅から鉄への接合点を等温ブロック上に作ります:



DVM端子から接合点を取り除きます
図8

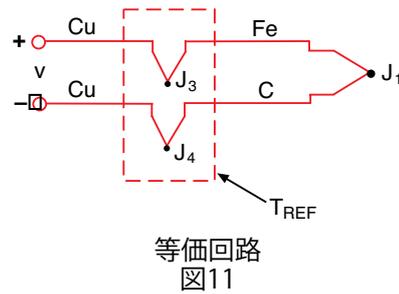
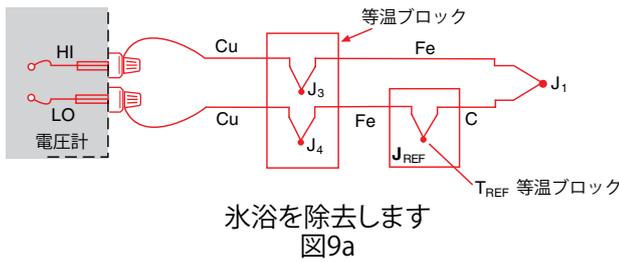
等温ブロックは、熱伝導性が高い電気絶縁体なので、J₃とJ₄を同じ温度に保ちます。2つのCu-Fe接合点が反対に作用するので、ブロック温度の絶対値は重要ではありません。ここでも、

$$V = \alpha (T_1 - T_{REF})$$

基準接点回路

次に、氷浴も、別の等温ブロックに取り替えてみます。
 T_{REF} 等温ブロックが基準温度となります。そして、J3

結論は、LO リード側で鉄 (Fe) の配線が完全に排除できます：

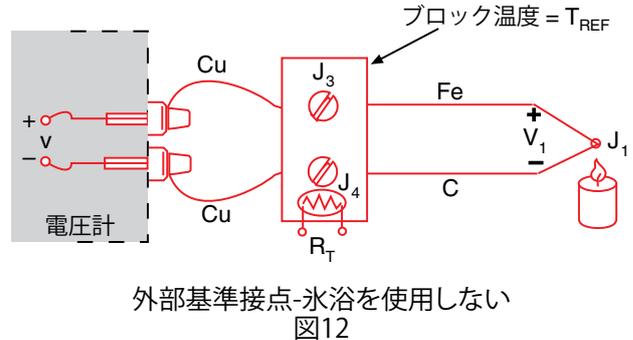
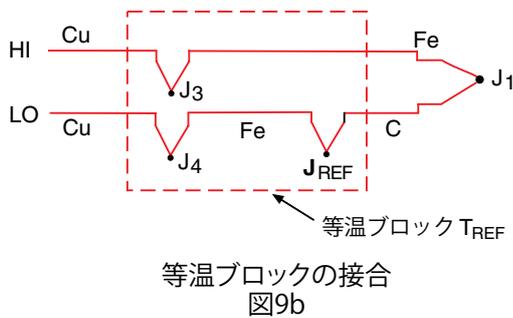


と J4 が同じ温度にあるので：

$$V = \alpha (T_1 - T_{REF})$$

それでも、2 個の熱電対を接続しなければならないので、これはかなり不便な構成です。マイナス (LO) リード側の Cu-Fe 接合点 (J4) と Fe-C 接合点 (JREF) を結合することによって、余分な Fe 配線を排除しましょう。まず、2 つの等温のブロック (図 9b) を接合します。

$V = \alpha (T_{J1} - T_{REF})$ となり、 α が Fe-C 熱電対のゼーベック係数です。接合点の J3 と J4 に氷浴の役割を持たせます。これらの 2 つの接合点が基準接点になります。これで、次の論理的なステップに進むことができます。直接、等温ブロック (基準接点) の温度を測定して、未知の温度 (T_{J1}) を計算します。



出力電圧 V は変わらないので、以下が成立：

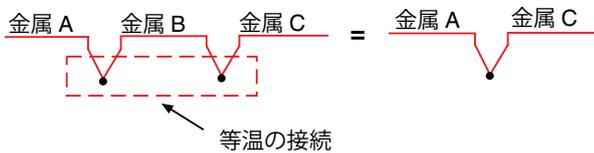
$$V = \alpha (T_{J1} - T_{REF})$$

ここで、中間金属 (付録 A 参照) の法則を利用して余分な接合点を排除します。この「経験則」によると、2 つの熱電対接合点の間に 3 番目の金属 (この場合鉄) を挿入しても、追加金属によって形成された 2 つの接合点と同じ温度である限り、出力電圧に影響がありません：

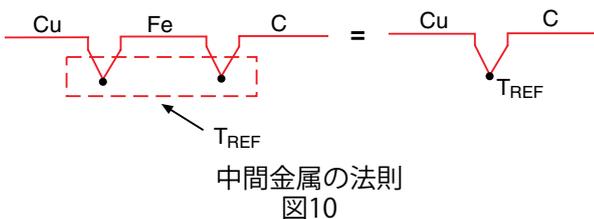
サーミスタ (その抵抗値 R_T は温度の関数) により、基準接点の絶対温度を測定する方法があります。等温ブロックの設計により、接合点 J_3, J_4 およびサーミスタが同じ温度にあると考えられます。コンピュータ制御のデジタルマルチメータを使用すると：

- 1) T_{REF} を決定するために R_T を測定して、 T_{REF} を基準接点の電圧 V_{REF} に変換します 同等な基準接点に電圧、 V_{REF}
- 2) V を測定します、そして、 V_{REF} を加えて、 V_1 とします、そして、 V_1 を温度 T_{J1} に変換します。

この手順は、ソフトウェア補償として知られている基準接点の機能を補うためにコンピュータのソフトウェアを使用するので、等温ブロック温度センサは、絶対温度に比例する特性があれば、RTD、サーミスタ、IC センサなども使用できます。ここで当然、次の疑問が浮かびます：既に絶対温度が測定できるセンサがあるなら、基準接点を必要とするような熱電対をなぜ使用するのでしょ



その結果、図 9b の LO リードは、右下のようになります：

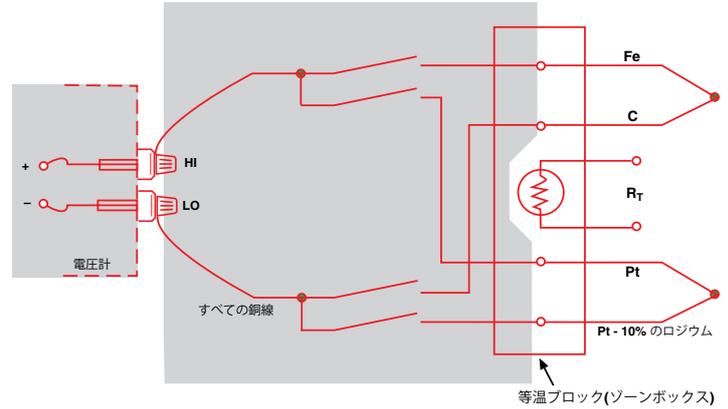


この質問に対する明確な答えは、サーミスタ、RTD、IC センサは、使用できる温度範囲が限定されているということです。熱電対は、幅広い温度レンジで使用できる上、さまざまな環境に対して最適化できます。またサーミスタよりはるかに頑丈です。熱電対は金属部品に溶接したり、ねじで押しつけて固定するなどの使用方法が可能です。熱電対は、即座に、はんだ付けか溶接で加工できます。つまり、熱電対は最も汎用性の高い温度変換器です。測定システムが基準温度補償とソフトウェアによる温度 / 電圧変換の全タスクを実行するので、熱電対を使用するのは 1 対のリード線を温度変換器に接続するだけです。

多点のデータポイントをモニタしなければならないとき、熱電対測定は特に便利になります。これは、複数の熱電対で等温基準接点を共用できるからです (図 13 を参照して下さい)。

リードリレイスキャナは、順番にさまざまな熱電対に電圧計を接続します。電圧計とスキャナの配線のすべてが、熱電対のタイプの如何に関わらず銅です。各熱電対タイプが何であるかを知っている限り、同じ等温接点ブロック (しばしばゾーンボックスと呼ばれる) 上に、タイプが異なる熱電対を混ぜて使用できます。これはソフトウェアによる適切なサポートを前提とします。接点ブロックの温度センサ RT は、温度分布による誤りを最小にするためにブロックの中心に配置しています。

ソフトウェア補償は、熱電対測定向けとしては最も汎用性の高い技術です。多くの熱電対が同じブロックに接続され、銅配線がスキャナ全体で使用されます。この技術は熱電対のタイプの如何にかかわらず適用可能です。さらに、内蔵のゾーンボックスがあるデータ収集システムを使用すれば、熱電対を接続するだけです。変換作業ののすべてがコンピュータによって実行されます。しかし、コンピュータが基準接点温度について計算するので、少し時間がかかります。最高度の処理速度が必要な場合は、ハードウェア補償を使用できます。

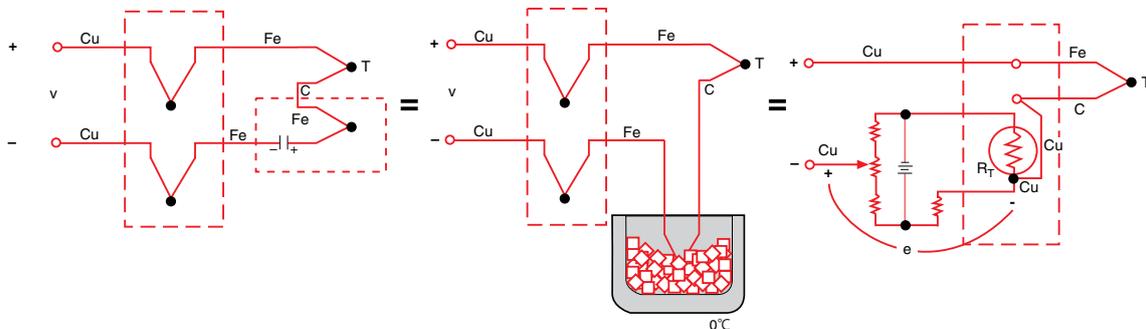


ゾーンボックスの切り換え
図13

ハードウェア補償

基準接点の温度を測定して、それに相当する電圧を計算するソフトウェア補償の代わりに、基準接点のオフセット電圧を取り消すバッテリーを設置することができます。このハードウェア補償電圧と基準接点電圧の組み合わせは、 0°C の接点電圧と等しくなります。補償電圧 (e) は抵抗式温度センサ (R_T) の関数です。電圧 V は 0°C を基準温度としているので、NBS テーブルを使用して、直接 V を温度に変換することができます。

この回路の別名は電子氷点基準 (アイスポイントレファレンス)⁶ です。この回路は一般的に販売されており、あらゆる電圧計と熱電対の組み合わせに対しても利用可能です。短所は、特定の電子氷点が熱電対タイプ別に必要となることです。図 15 は、リードリレイスキャナとともに使用して、熱電対入力ブロック全体を補償する実用的な氷点基準回路を示しています。同一ブロック内のすべての熱電対は同じタイプである必要がありますが、単にゲイン抵抗を変えることによって、各ブロックは異なった熱電対タイプに対応できます。



ハードウェア補償回路
図14

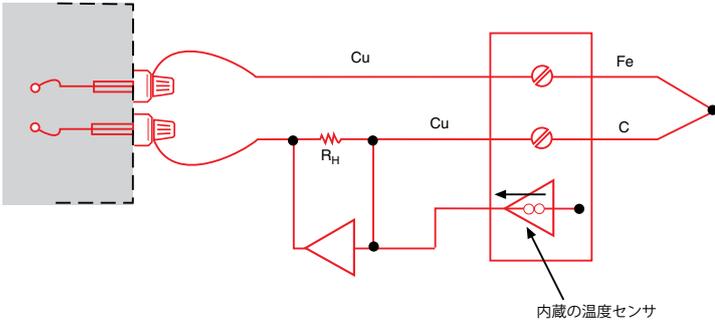
⁶ 図書目録6を参照して下さい。



オメガ電子氷点。(Ice point) 熱電対コネクタに内蔵-"MCJ"



OMEGA ice pointTM(オメガ氷点)
基準チャンバー電子冷凍により氷浴が不要になります。



実用的なハードウェア補償
図 15

ハードウェア補償回路(電子氷点参照)の利点は、基準温度を計算する必要がなくなることです。このため、2段階の計算ステップが無くなり、ハードウェア補償の温度測定はソフトウェア補償の測定よりいくらか速くなります。

ハードウェア補償	ソフトウェア補償
速い タイプ別に回路カードが必要	より多くのコンピュータ実行時間を必要とします。汎用性大-どんな熱電対も受け入れます。

表2

電圧から温度への変換

氷点基準(アイスポイントレファレンス)の機能を代替えるのに、ハードウェア補償とソフトウェア補償を使用しました。次のステップは、デジタル電圧計で測定した電圧値を温度に変換することです。残念ながら、電圧と温度の関係は線形ではありません。一般的な熱電対の出力電圧は図16に示すように、温度の関数としてプロットされます。ゼーベック係数を温度に対して図17のようにプロットすると、残念ながら、熱電対における電圧形のデバイスであることが明白になります。

図17における水平な線は一定の a 、言い換えれば線形デバイスを示します。タイプK熱電対のスロープが0~1000°Cの温度範囲で定数に近いのが分かります。このため、タイプKは、計算機能のある電圧計と外部の氷点基準を使用すると、適度に正確な温度測定が可能になります。すなわち、温度表示はスケールファクターのみに影響を受けるので、この測定法は、一般の電圧計で可能です。

このゼーベック係数の変化を調べると、1つのスケー

ルファクターでは、使用できる温度範囲と測定精度が制限されることが簡単に分かります。電圧計の測定値を、このハンドブックのTEMP-202ページにある米国標準局(NBS)の熱電対テーブル⁴に当てはめると、より良い変換精度が得られます(テーブル3参照)。

$$T = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + \dots + a_n X^n$$

ここで

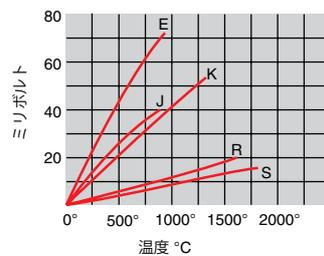
T = 温度

x = 熱電対起電力 (volts)

a = 各熱電対に特有の多項式係数

n = 多項式の最大時数

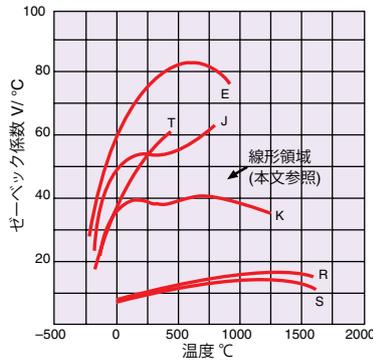
nが増加するのに従って多項式の精度は向上します。代表的な例は、n=9のとき精度±1°Cです。システム処理速度を速くするためには、低い次数の多項式を狭い温度範囲に対して使用します。表3は、電圧を温度に変換するのに使用される多項式の例です。このデータは温度データ収集システムに使用されます。指数計算は直接行うのではなく、コンピュータの実行時間を節約するために、ネストされた多項式フォームを使用するようにプログラムされています。多項式の適合度は、表3に示される温度範囲外では急速に悪化するので、範囲外で使用するべきではありません。



タイプ	金属	
	+	-
E	クロメル	コンスタンタン
J	鉄	コンスタンタン
K	クロメル	アルメル
R	白金	白金
S	白金	13%ロジウム
T	銅	10%ロジウム
	銅	コンスタンタン

熱電対温度 vs 電圧グラフ
図 16

⁴図書目録4を参照して下さい。



ゼーベック係数対温度
図 17

タイプ E	タイプ J	タイプ K	タイプ R	タイプ S	タイプ T
ニッケル-10%クロム(+) 対 コンスタンタン(-)	鉄(+) 対 コンスタンタン(-)	ニッケル-10%クロム(+) 対 ニッケル-5%(-) (アルミニウムシリコン)	白金-13%ロジウム(+) 対 白金(-)	白金-10%ロジウム(+) 対 白金(-)	銅(+) 対 コンスタンタン(-)
-100°C to 1000°C ±0.5°C	0°C to 760°C ±0.1°C	0°C to 1370°C ±0.7°C	0°C to 1000°C ±0.5°C	0°C to 1750°C ±1°C	-160°C to 400°C ±0.5°C
9次式	5次式	8次式	8次式	9次式	7次式
a ₀ 0.104967248	-0.048868252	0.226584602	0.263632917	0.927763167	0.100860910
a ₁ 17189.45282	19873.14503	24152.10900	179075.491	169526.5150	25727.94369
a ₂ -282639.0850	-218614.5353	67233.4248	-48840341.37	-31568363.94	-767345.8295
a ₃ 12695339.5	11569199.78	2210340.682	1.90002E +10	8990730663	78025595.81
a ₄ -448703084.6	-264917531.4	-860963914.9	-4.82704E +12	-1.63565E +12	-9247486589
a ₅ 1.10866E +10	2018441314	4.83506E +10	7.62091E +14	1.88027E +14	6.97688E +11
a ₆ -1.76807E +11		-1.18452E +12	-7.20026E +16	-1.37241E +16	-2.66192E +13
a ₇ 1.71842E +12		1.38690E +13	3.71496E +18	6.17501E +17	3.94078E +14
a ₈ -9.19278E +12		-6.33708E +13	-8.03104E +19	-1.56105E +19	
a ₉ 2.06132E +13				1.69535E +20	

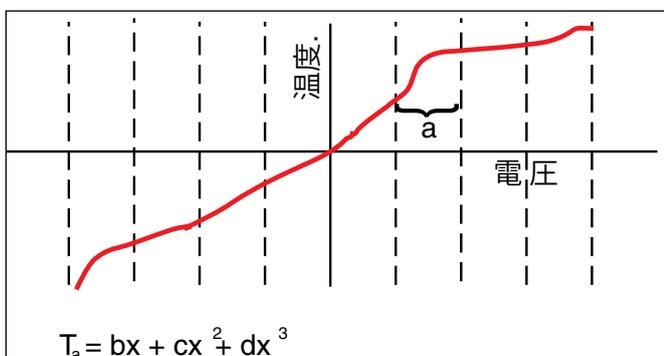
温度変換式: $T = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$

ネスティッド多項式フォーム: $T = a_0 + x(a_1 + x(a_2 + x(a_3 + x(a_4 + a_5x))))$ (5th order) ここで: xは電圧、Tは°C

表3 NBS多項式係数

高次多項式の計算は、コンピュータにとっては演算時間のかかるタスクです。以前に述べたように、小さい温度範囲に低次多項式を使用することによって、時間を短縮できます。温度データ集計システムのソフトウェアは、熱電対特性曲線を8つのセクターに分割し、3次多項式を使用して各セクター別に温度を計算しています。*

以上の手順は、正確かつ簡単に熱電対電圧を測定できると仮定しています。しかしながら、NIST 熱電対テーブルから分かる通り、熱電対からの出力電圧は極端に小さいことが分かります。このため、システムの電圧測定能力が重要になってきます。



セクターに分割されたカーブ
図 18

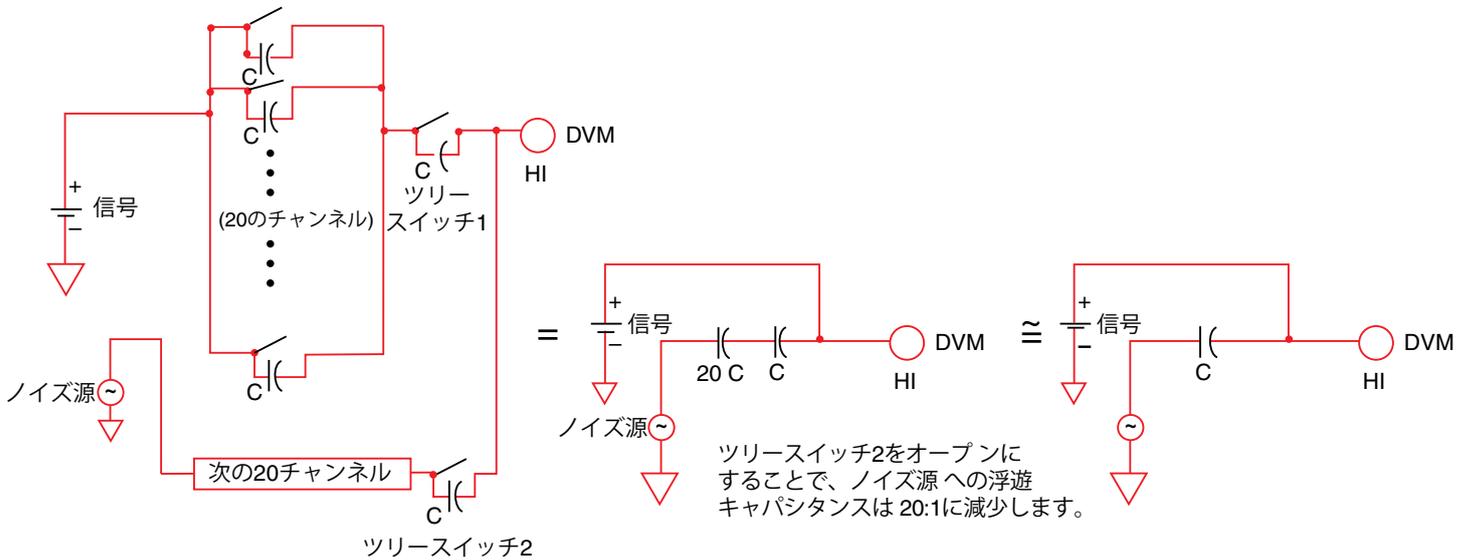
熱電対タイプ	ゼーベック係数 ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)@20°C	DVM感度 0.1°Cあたり (μV)
E	62	6.2
J	51	5.1
K	40	4.0
R	7	0.7
S	7	0.7
T	40	4.0

必要なDVM感度
表4

普通のタイプK熱電対でも、電圧計は0.1°Cの変化を検出するために、4 μV を測定できる解像度が必要です。このレベルの信号の大きさはどんなシステムにとっても、ノイズが非常に入りやすい状態なので、ツリースイッチング、正規モードフィルタ、積分、ガーディングなどを含む、基本的なノイズ除去技術を利用します。

*ヒューレットパッカード3054A

実用的な熱電対測定 ノイズ除去



ツリースイッチング
図 19

ツリースイッチング - ツリースイッチング (Tree Switching) はスキャナのチャンネルをグループ単位に分割する方式です。各グループはそれ自身のメインスイッチを持ちます。

ツリースイッチングが無ければ、チャンネル全体の浮遊キャパシタンスがノイズの原因になる可能性があります。ツリースイッチングでは、チャンネルキャパシタンスを持つ各グループが並列にならんでおり、スイッチが入った時だけそのグループがシステムに接続されます。その結果、チャンネル間のキャパシタンス減少により、大規模データ収集システムにおけるクロストークが大きく減少します。

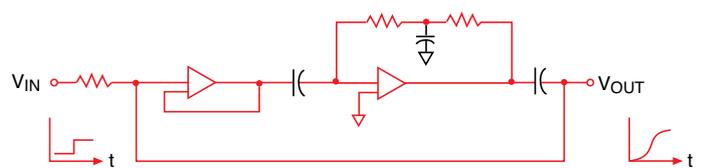
アナログフィルタ - フィルタは、電圧計の入力に対して直接、ノイズを減少させるのに使用されます。干渉を劇的に抑えますが、電圧計はステップ入力に対して応答が遅くなります。

インテグレーション - インテグレーションは、フルラインサイクル上のノイズを平均化する A/D テクニックです。したがって、電源ライン関係のノイズや倍音は、事実上排除されます。インテグレーションの期間がラインサイクルの 1 整数未満になるように選択した場合、ノイズ防止の特性は本質的に打ち消されます。

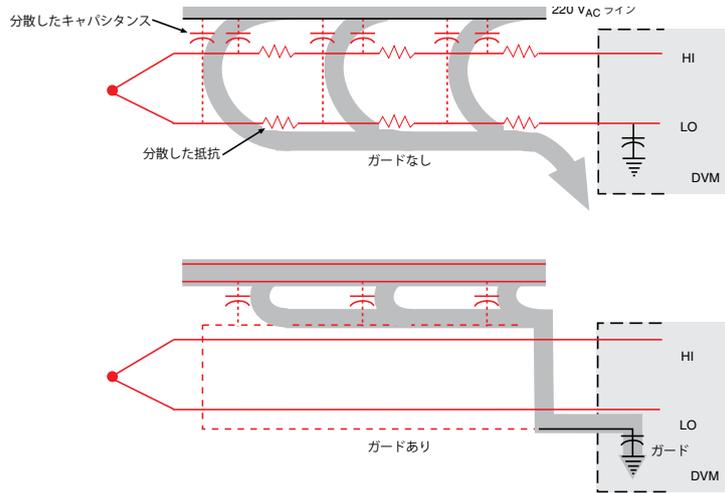
長距離をカバーする熱電対回路は、電源関連のノイズに特に影響されやすいので、熱電対電圧を測定する際には AD 変換器の使用をお勧めします。この機能は 1 秒あたり 48 回のサンプルレートを可能にする A/D 技術です。

ガーディング - ガーディングは測定ラインの HIGH と LOW 両方の配線に対して共通な、あらゆるノイズ源 (例: コモンモードノイズ源) からの干渉を抑えるために使用されるテクニックです。

熱電対配線が 220Vac 電源ラインと同じ配線管に通されたと仮定しましょう。送電線と熱電対線の間のカパシタンスは、ほとんど等しい大きさの交流信号を両方の熱電対配線に発生させます。このコモンモード信号は理想回路では問題になりませんが、電圧計は理想回路ではありません。LOW 側の端子とセーフティグランド (筐体) の間に何らかのカパシタンスを持っています。電流がこのカパシタンスを通して流れ、熱電対のリード抵抗にも通して流れて、正規モードノイズ信号を発生させます。このガードは物理的には、全体の電圧計サーキットを囲むフローティング状態の金属箱です。ガードは熱電対配線を覆うシールドに接続されていて、干渉電流を排除します。



アナログフィルタ
図 20



電流で干渉を起こすガードシャント
図 21

スキャナがそれぞれの熱電対チャンネル別にガード端子を切り換える構成になっているので、各シールド付熱電対の接点は、悪影響なしで干渉ノイズ源に直接接続できます。ノイズガードをシールドに接続するこの方法は、シールドが接地に接続される時、しばしば作成されるグラウンドループを防ぐのに役立ちます。DVM ガードは熱電対接点がコモンモードノイズソースと直接接触するとき作成されるノイズ電圧を除去する際に特に役に立ちます。

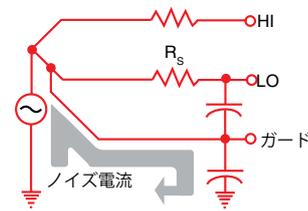


図 24

また、 R_s を最小にすることによってノイズを最小にすることができます。具体的には小さい配線抵抗を持つ太い熱電対導線を使用することです。磁力により誘発されるノイズの可能性を減少させるために、熱電対は均一にツイストされたツイスト線を使用すべきです。熱電対補償導線はツイストペアの構成で販売されています。

実用的な注意事項 - 基準接点の概念、絶対温度データを得る多項式利用法、温度データ集計システムのノイズ防止法について述べてきました。次に、熱電対の配線自身に注目しましょう。多項式曲線の適合性は、熱電対導線が完全な状態であることを前提としています。すなわち、温度測定を行う際に、校正がずれてはいけません。そこで、熱電対に起こり得る温度測定学上の落とし穴について議論します。

データ集計システムとゾーンボックスの規格精度は別として、ほとんどの測定誤差は、以下に述べる一次的原因に起因する可能性があります：

1. 接点の接触不良
2. 熱電対補償導線の校正ズレ
3. シャントインピーダンスと電蝕作用
4. 熱転移
5. ノイズとリーク電流
6. 熱電対仕様
7. ドキュメンテーション

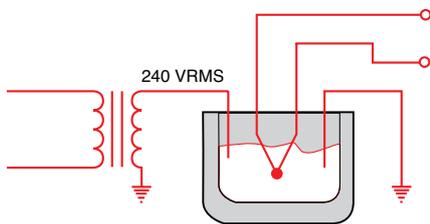


図 22

図 22 では、電流によって加熱されている溶融金属溶液の中心で温度を測定しているところです。槽の中心の電位は 120V RMS です。等価回路は以下の通りです。

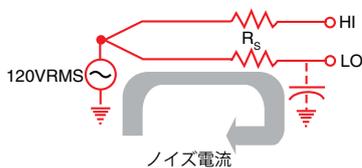


図 23

DVM の LO 端子から筐体までの浮遊キャパシタンスにより、電流が LO リードへ流れます。(これは、熱電対の配線抵抗 (R_s) によりノイズ電圧を下げることに繋がります)。この電圧は、DVM の HI から LO 端子に表れて、測定信号にノイズを引き起こします。直接、熱電対に接続されたガードリードを使用すると、LO リードに流れる電流が劇的に減少します。ノイズ電流はガードリードに流れるので測定値に影響ができません。

温接点の不良

2つの熱電対線を接続する方法がいくつかあります。はんだ付け、銀ろう付、溶接などです。

熱電対線と一緒にはんだ付けされるとき、3番目の金属を熱電対回路に取り入れることとなりますが、熱電対の両側の温度が同じである限り、はんだが誤差要因になることはありません。

はんだは温接点にかけられる最高温度を制限します。より高い測定温度用には温接点を溶接しなければなりません。しかし溶接は簡単に使用できる方法ではありません。⁵加熱は導線の品質を劣化させる可能性があります。また、溶接時に接触する溶接ガスと雰囲気とともに熱電対金属の中に拡散して特性を変える可能性があります。接合される2つの金属が非常に異なった性質を持つので、困難の度が悪化します。販売されている熱電対は、一様性を保障するのに容量放電技術を使用した高価な機械で溶接されます。



Junction: Fe - Pb, Sn - C \cong Fe - C

熱電対のはんだ付け
図 25

溶接不良により温接点がオープンなる可能性があります。(測定時にオープン熱電対チェックを実行することによって検出できます)。これはデータロガーでは一般的な検出機能です。接触不良の熱電対は最も簡単に検出できる故障ですが、一般的な不良ではありません。

校正のズレ

正しいように見える温度測定値が出るので、校正のズレは熱電対のオープン状態よりはるかに重大な不良です。校正のズレとは、熱電対導線の物理的な構成が予期せずに変更されたため、NBSの多項式の演算結果が許容誤差内に収まらない状態のことです。校正のズレは、極端な温度により金属に大気粒子が拡散した結果生じる場合があります。それは金属を高温アニーリングか冷間加工(補償導線をコンジットの中に配線するときや、荒い取り扱いや振動のひずみにより起こる可能性があります)することによって引き起こされる場合があります。アニーリングはバラツキのある温度変動を受ける補償導線の中に部分的に起こることがあります。

⁵図書目録5を参照

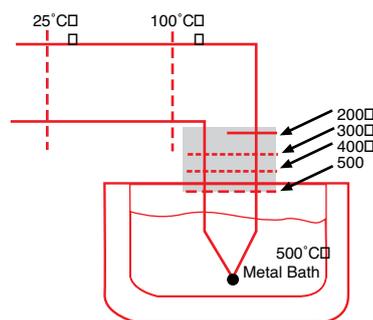
⁹図書目録9を参照

⁷図書目録7を参照

Robert Moffat氏は、著書"Gradient Approach to Thermocouple Thermometry"で、熱電対電圧が必ずしも温接点だけではなく、温度勾配のある補償導線のセクションからも発生すると説明しています。⁹

例えば、私たちが溶融金属槽にサーマルプローブを設置すると、実際には等温の領域と大きい温度勾配を持つ2つの部分が生じることがあります。

図26では、熱電対接合点は全く出力電圧を発生しません。陰影をつけたセクションが、実際には全体の熱電対出力電圧を生産することとなります。経年変化かアニーリングにより、この熱電対の出力がずれてきた場合は、熱電対接点だけを置き換えても問題は解決しません。熱電対電圧の源になっている



温度勾配で電圧が発生
図 26

陰影をつけたセクション全体を交換しなければなりません。

完全な熱電対補償導線は製造できません。なぜなら、出力電圧誤差を引き起こすいくつかの欠陥を完全に排除できないからです。急な温度勾配の領域にこれらの不均一性が重なると、特に破壊的な悪影響が出る可能性があります。不良が補償導線中のどこに起こるかかわからないので、大きな温度勾配が配線途中で起こるのを回避することが重要です。温度勾配は金属スリーブを使用するか、熱電対補償導線を慎重に配線する事で減少できます。

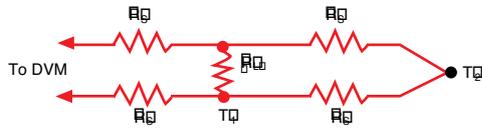
シャントインピーダンス

また、高温は熱電対補償導線の絶縁体を損傷する可能性があります。温度上昇に従って、絶縁抵抗は指数関数的に減少します。最悪の場合は、接合点を形成⁷してしまう可能性があります。例えば、完全にオープン状態の熱電対を高温で動作させる場合です。

リーク抵抗(R_L)が、十分に低い状態で、回路ができる場合は、不適当な電圧測定値を与える可能性があります。ここで、熱電対はオープン状態ではないが、非常に長い距離に対して小さい直径の補償導線を使用していると仮定します。



リーク抵抗
図 27



仮定の接合点
図 28

熱電対補償導線の直径が小さいと、配線抵抗 (R_S) は非常に高くなり、極限の状態では $R_L \ll R_S$ となります。これは、熱電対接点が R_L に見えることを意味します。そして出力は T_2 ではなく、 T_1 に比例します。高温は熱電対補償導線に有害な影響をもたらします。断熱材中の不純物質や化学物質が熱電対金属の中に拡散していき、温度 / 電圧の関係が公称値から外れる可能性があります。高温で熱電対を使用するときは、絶縁方式を慎重に選択すべきです。大気からの影響も適切な保護金属やセラミックのシースを選ぶことにより、小さくすることができます。

電蝕作用

熱電対断熱材に使用される染料の中には、水と接触して電解質を形成する場合があります。この場合、ゼーベック効果より何百倍も大きい出力が電蝕作用により生じます。過酷な環境や液体との接触から熱電対補償導線を保護するように注意して下さい。

熱の転換

質量 0 の熱電対を作ることはできません。どんな大きさの質量でも加熱するのにエネルギーを要するので、熱電対は、測定対象物の温度をわずかに変更します。測定されるべき質量がわずかであるなら、熱電対はそれに従い小さくしなければなりません。しかし、小径の補償導線で作られた熱電対は、汚染、アニーリング、ひずみ、シャントインピーダンスの影響を受けやすくなります。これらの影響を最小にするために、熱電対補償導線を使用します。補償導線は熱電対と電圧計の間の長距離をカバーする配線ケーブルのことです。

補償導線は接続する熱電対タイプに非常に近いゼーベック係数を持っている金属で作られています。ケーブルの直径は一般に大きく長距離の配線でも、ケーブルの配線抵抗が問題になりません。また、ケーブルを配管に通す場合でも、非常に細い熱電対やケーブルより、はるかに簡単に行えます。

一般に、補償導線はプレミアムグレードの熱電対線より低い温度範囲で使用されます。実用的なサイズによる利点に加えて、補償導線は標準の熱電対線ほど高価ではありません。これは白金ベースの熱電対の場合に特に当てはまります。

補償導線はより狭い温度範囲向けである上、機械的ストレスを受やすいので、補償導線全体にわたってわたって温度勾配は最小限に保たれるべきです。勾配理論によると、実際に出力信号のいずれも延長線による影響を受けないことが保証されています。

ノイズ - 温度データ集計システムに関連して、既に配線関連のノイズについて議論しました。インテグレーション、ツリースイッチングおよびガーディングのテクニックは、配線関連の干渉を相殺するのに役立ちます。アナログのフィルタでブロードバンドのノイズを遮断できます。集計システムが遮断できないノイズのタイプは、システム内の dc リーク電流によって引き起こされる dc オフセットです。感知され得る誤差を引き起こすほどの大きさの dc リーク電流はそれほど一般的ではありませんが、特に熱電対補償導線が非常に小径で、関連するシリーズインピーダンスが高い場合は誤差の可能性に注意を払い対策を施すべきです。

熱電対素線の校正

NBS テーブルに対する適合性を考慮した仕様で熱電対素線は製造されています。素線を校正 (既知の温度でテスト) することによって、時には仕様を高めることができます。一般に、連続したスプールから連続して作った素線は、お互いの特性が近似していてバラツキが規定値より小さい傾向があります。しかし、その出力電圧の絶対値は仕様の中心値からわずかにずれている場合があります。

基本的な仕様を改良するように、素線を校正する場合は前述の条件のすべてに関して「校正のズレ」を避ける対策を取る事が必須になります。

ドキュメンテーション-ドキュメンテーションを電圧測定誤差の源であるとするのは不適当に思えるかもしれませんが。しかし実際には使いやすいこともあり、熱電対システムは大量のデータを収集します。データの全体規模は大きくて全く扱いにくくなる可能性があります。大量のデータを収集するときには間違った NBS カーブを使用したり、配線に間違ったレッテルを貼ったりなどのために、誤りの確率が増加します。

そして、チャンネル番号は変化するので、データはチャンネル番号だけでなく、測定によって分類されるべきです。⁶ この測定と変換器タイプ、出力電圧、標準値、測定位置などの情報も、データファイルに記録できます。コンピュータ制御で行うか、または印刷された定型フォームに書き込むことによって実施することもできます。どのようにデータを管理するにしても、簡潔なシステムの重要性を過小評価するべきではありません。特に複雑なデータ収集プロジェクトを開始するときなどです。

故障診断

以上に述べた誤差の源の大部分は、限界温度近くで、熱電対を使用することによって悪化します。この状態は、実際のアプリケーションではあまり発生しません。しかし、高温で過酷な環境の中で細い熱電対を使用している状況はどうでしょうか？熱電対が、いつ誤った結果を生みつつあるか予測できる診断方法を開発する必要があります。ダイアグノスティック技術の使用で、R.P. Reed 氏は不完全な熱電対とデータチャンネルを検出する素晴らしいシステムを開発しました。¹⁰ このシステムの3つの構成要素は、イベント記録、ゾーンボックス試験と、熱電対抵抗値の履歴です。

イベント記録-最初のダイアグノスティックはテストではなく、少しでも測定に影響する可能性のある関連するイベント全ての記録です。一例を以下に示します：

3月18日のイベント記録

- 10:43 停電
- 10:47 システム電源復帰
- 11:05 M821 を熱電対タイプ K に変更
- 13:51 新しいデータ集計プログラム
- 16:07 M821 は、不良測定値のように見えます

図 29

記録されたリストを見て、測定対象 #M821 がタイプ J 熱電対を使用したこと、そして、新しいデータ集計プログラムはタイプ J と認識していることを確認できます。しかし、イベント記録から熱電対 M821 は、タイプ K に変更されているが、変更はプログラムに入力されていないことが分かります。ほとんどの異常がこれほど簡単に発見されませんが、イベント記録は、システム測定において、変更が説明されなかった理由に関して貴重な観察を提供できます。これは何百ものデータポイントを測定するために構成されたシステムにおいては、特に当てはまります。

¹⁰ 図書目録 10 参照

ゾーンボックス試験 - ゾーンボックスは、氷点基準の代わりに使用される、既知の温度を使用した等温ターミナルブロックです。直接ゾーンボックスで熱電対を一時的に短絡させると、システムはゾーンボックスの温度に非常に近い値を読み取ります。その値は、室温に近い温度です。熱電対リード抵抗が短絡抵抗よりはるかに大きいなら、銅線による短絡は $V=0$ となります。短絡をしていない正常な場合では、 T_J を測定するので、システムは以下を読み取ります：

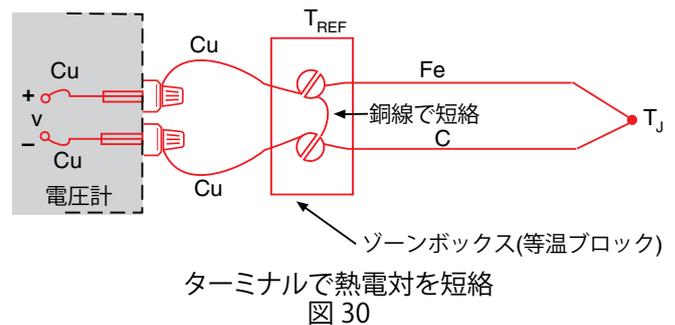
$$V \cong \alpha (T_J - T_{REF})$$

しかし、機能テストのため、端子をショートしたので、 $V=0$ となります。表示される温度 T_J は以下のようになります：

$$0 = \alpha (T_J - T_{REF})$$

$$T_J = T_{REF}$$

したがって、DVM 測定値が $V=0$ であるので、システムはゾーンボックス温度を示します。まず最初に、温度 T_J (T_{REF} と異なるよう強制した) を観測して次に、銅線で熱電対をショートして、システムが T_J の代わりにゾーンボックス温度を示すのを確認します。



この単純なテストで、コントローラ、スキャナ、電圧計、およびゾーンボックス補償がすべて正しく動作していることを確かめます。この簡単な手順で、熱電対素線以外のすべてをテストできます。

熱電対抵抗 - 熱電対回路における抵抗値の急変は、警報インジケータとして利用できます。それぞれの熱電対セットに関して、抵抗対時間のトレンドを記録しておくこと、突然の抵抗変化をただちに見つけることができます(それは、断線、絶縁不良による短絡、振動疲労による変化など、多くの故障メカニズムの1つの可能性があります)。例として、図 31 に示された熱電対測定をする場合について説明します。

発火した石炭の地下継ぎ目層に関する温度プロフィールを測定する場合です。補償導線は高温領域から低温領域に通り抜けます。突然、測定温度が 300°C から 1200°C に上昇します。炭層の燃えているセクションが移動したのか、または熱電対の絶縁が破壊されて、ホットスポットで2つの補償導線の間の短絡を引き起こしたのか、などの疑問が生じます。

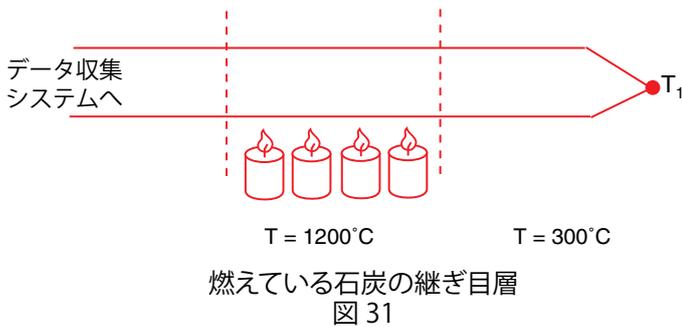


図 31

熱電対補償導線の抵抗値の連続した記録があれば、実際に何が起こったかを推論できます。

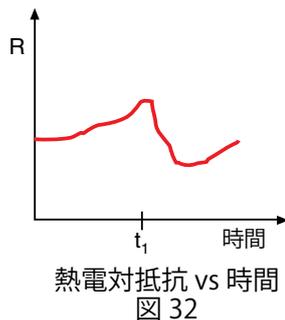


図 32

補償導線の抵抗値が温度変動のために変化するように、熱電対の抵抗値も自然に時間の経過とともに変化します。しかし、抵抗値が急変する場合は、何かがおかしいという警告です。この例は、抵抗値がは突然に低下した場合です。絶縁が損傷して、事実上、熱電対ループに短絡が起きています。

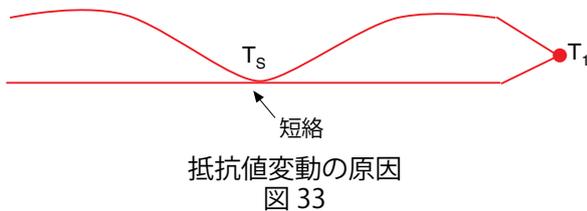


図 33

新しい接点は T1 ではなく、温度 Ts を表示します。抵抗値測定は、標準のオープン熱電対チェックで検出された物理現象を使用して、問題点の解析ができます。

抵抗値測定 - 熱電対補償導線の抵抗値測定について言及してきますが、単純ではありません。熱電対が電圧を発生している場合、この電圧が大きい測定誤差を引き起こすからです。熱電対の抵抗を測定するのはバッテリーの内部抵抗を測定するのに似ています。オフセット電圧補正機能として知られているテクニックを使用して、この問題を処理します。

名前が示すように電圧計は、最初にテスト電流源なしで熱電対オフセット電圧を測定します。そして、テスト電流源を ON にして、抵抗に対する電圧を再び測定します。

電圧計ソフトウェアは、熱電対のオフセット電圧を補って、実際の熱電対のソース抵抗を計算します。

特別な熱電対 - 極限的な状況下では、熱電対に故障診断用回路を追加します。頂点分岐タイプと足型分岐タイプの熱電対は、補償導線の故障診断をするために、4線式熱電対回路を構成して温度、ノイズ、電圧および抵抗値の測定をします。それぞれの長所についての詳細説明は参照 8 をご覧ください。

高レベルのアプリケーションで、このような徹底した故障診断を必要としますが、重要な熱電対測定に対して保守管理が必要な場合にも、この方法が使用できます。

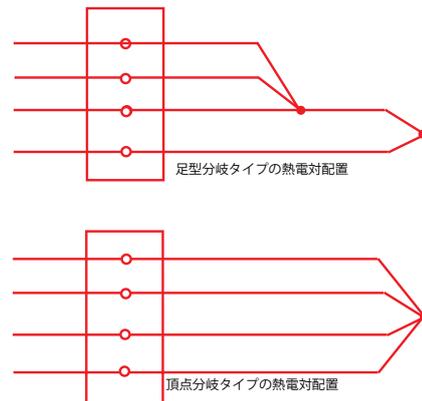


図 34

まとめ

以下の注意点に従うことにより、熱電対システムの性能を高いレベルに維持できます：

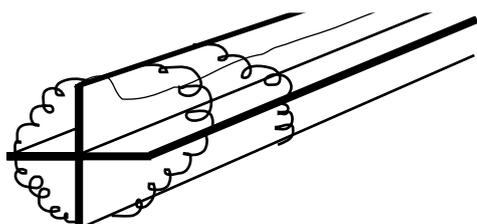
- 可能な限り太い素線を使用して下さい。しかし、測定エリアから熱を吸収しすぎない範囲に限ります。
- 細い素線が必要な場合は、測定スポット周辺だけにし、その後は補償導線を使用して下さい。補償導線を使用するエリアでは温度勾配が起きないように注意して下さい。
- 機械的ストレスと振動を避けて下さい。補償導線にひずみが生じます。
- 長い熱電対補償導線を使用するときには、補償導線のシールドを DVM ガード端子へ接続して下さい。補償導線にはツイストタイプを使用して下さい。
- 急な温度勾配を避けて下さい。
- 熱電対線は、十分に余裕を持って温度定格内に入る範囲で使用して下さい。
- ノイズガードが使用できる A/D コンバータを採用して下さい。
- 過酷な環境では、適切なシース材料を使用して下さい。熱電対線を保護する必要があります。
- 補償導線は低温領域のみで使用して下さい。温度勾配が小さい領域に限定して下さい。
- イベントログと連続的な熱電対抵抗値の記録を保管して下さい。

測温抵抗体 (RTD)

歴史

ゼーベックが熱電気に関する発見をしたのと同じ年に、ハンフリー・デービーは、金属の抵抗率が著しい温度依存を示したと発表しました。50年後に、ウィリアム・シーメンスは、抵抗温度計の素子として白金を使用しました。そして今日でも、白金は主要素子として、高精度の抵抗温度計に使用されています。

実際に、白金測温抵抗体 (PRTD)¹⁵として、今日使用されています。酸素ポイント (-182.96℃) からアンチモンポイント (630.74℃) の間の補間法の基準として素晴らしい安定性がある上に、高温に耐えることができます。貴金属として白金は、汚染に強い特性を持っています。白金を使用する古典的な測温抵抗体 (RTD) は、1932年に C.H. メイヤーズによって提案¹²されました。彼は交差している雲母板上に白金の螺旋コイルを巻き上げて、ガラスチューブの中に取り付けました。この構造で、抵抗を最大にしながら導線のひずみを最小にできました。



メイヤーズ RTD の構造
図 35

しかし、この構造は非常に安定した素子を作り出しますが、白金と測定ポイントとの熱的接触はかなり弱く、熱に対する応答速度が遅くなります。構造的に脆弱なので、今日では、主として実験室レベルでの使用に限定されています。

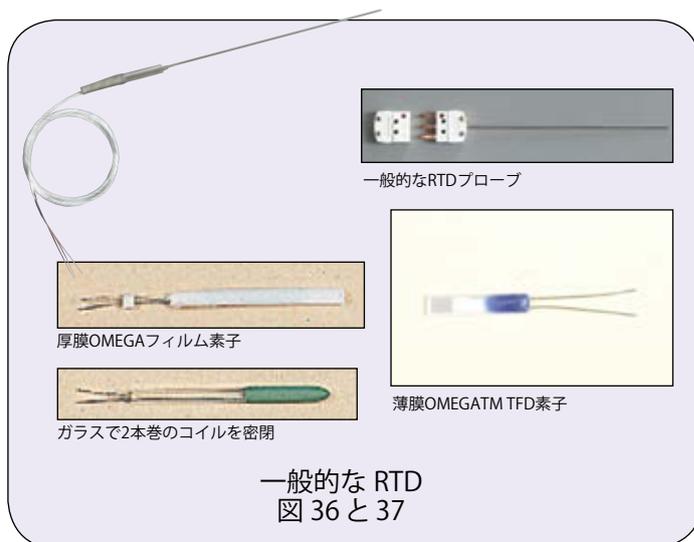
別の実験室向け方式として、メイヤーズのデザインの代わりに、エヴァンスとバーンズによって提案されたバードゲージ型の素子があります。¹⁶白金の素子は、大部分が固定されないで浮いています (温度差によって膨張・収縮しても自由に動きます)。

時間経過や温度変化によるひずみで誘発される抵抗変化が最小になり、バードゲージ型は究極の実験室基準になります。しかし、素子を固定しない構造で振動に敏感なため、製造環境には脆弱すぎる点があります。

より頑丈な製作方法を図 37 に示します。白金線とガラスまたはセラミックのボビンを使用してバイファイラ巻コイルを作ります。バイファイラ巻は、マグネティックピックアップとその関連するノイズを最小にするためにコイルの有効面積を減少させています。

コイルアセンブリは、溶融ガラスで封入されます。封入により RTD は極端な振動の下でも機能しますが、高温で白金の膨張を制限します。白金とボビンの膨張係数が完全にマッチしない限り、温度変化に応じてワイヤにストレスが生じ、ひずみによる抵抗の変化が起こります。これは白金線の抵抗値を恒久的に変化させる可能性があります。

バードゲージ型と密封したコイルタイプの中間の形式で、部分的に白金線を支持する RTD バージョンがあります。その 1 つはセラミック円筒内に白金のつる巻き線を通して、部分的に粉末ガラスで固定したものです。このデバイスは適度に頑丈で振動のあるアプリケーションでも高い安定性を維持します。



一般的な RTD
図 36 と 37

金属薄膜 RTD

最も新しい製作方法では、白金か金属 / ガラス混合のスラリーを小さく平坦なセラミック基板上に蒸着かスクリーン印刷で形成して、その後レーザトリムシステムで抵抗値を調整して密封します。フィルム RTD は製作時間の短縮だけでなく、単位面積当たりの抵抗値を大きくできる特徴があります。この生産技術を利用するとデバイスサイズを小さくできるので、熱容量が小さくなり温度のステップ変化にすばやく応答できます。フィルム RTD は、現在使用されている手作り製品ほど安定していませんが、小型化と大量生産の可能性があるので注目されています。この利点が、機動力となって、安定性を改良する研究が前進すると期待されています。

¹²図書目録12参照

¹⁵図書目録15参照

¹⁶図書目録16参照

金属 - すべての金属は温度が正方向に変化すると、抵抗値も正方向に変化します。これが RTD の主な機能です。以下に示すように、RTD 抵抗の公称値が大きいと、システムエラーは相対的に小さくなります。これは高抵抗の金属ワイヤが好ましいことを意味しています。金属の抵抗率が低ければ低いほど、使用しなければならない材料が増えてしまいます。表 5 は一般的な RTD の材料の抵抗率を記載しています。

金属		抵抗率 Ω /CMF (cmf = circular mil foot)
金	Au	13.00
銀	Ag	8.8
銅	Cu	9.26
白金	Pt	59.00
タンガステン	w	30.00
ニッケル	Ni	36.00

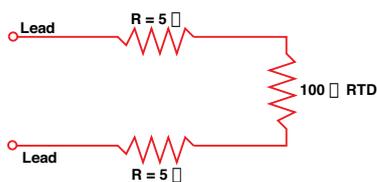
表5

抵抗率が低いため、金と銀は RTD 素子として滅多に使用されません。タンガステンは、比較的高い抵抗率を持っていますが、極端にもろくて加工が難しいので、高温アプリケーション向けに限定して使用されます。銅は RTD 素子として使用される場合があります。銅の素子は低抵抗率なので、白金の素子より長くなりますが、線形性が高いうえ非常にローコストなので、経済的な代替品となります。その温度上限は、約 120°C にすぎません。最も一般的な RTD は、白金、ニッケル、またはニッケル合金で作られています。経済的なニッケルベースのワイヤは限られた温度範囲内で使用されます。それらは、かなり非線形であるうえ、時間と共に変化する傾向があります。高精度な測定のためには、白金が当然の選択となります。

抵抗測定

白金 RTD の一般的な抵抗値の範囲は、バードゲージ型の 10 Ω からフィルム RTD 用の数 1000 Ω まであります。最も一般的な値は 0°C のとき 100 Ω です。白金線の DIN43760 における標準温度係数は $\alpha = 0.00385$ です。100 Ω のワイヤに関しては、0°C で +0.385 Ω /°C に相当しています。この α 値は、0°C から 100°C までのスロープの平均値です。白金の抵抗標準に使用される化学的により純粋な白金線は、+0.00392 Ω / Ω /°C の α 値を持っています。

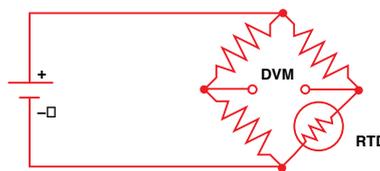
特にセンサに通じるリード線の抵抗が、数 Ω から数十 Ω もある場合があるので、相対的にセンサのスロープ (ゲイン) と絶対値の両方が小さな数になっています。



リード抵抗の影響
図 38

配線インピーダンスは温度測定にとって、大きな誤差要因になります。

10 Ω の配線インピーダンスは測定においては、 $10/0.385 \approx 26^\circ\text{C}$ の誤差要因になります。配線の温度係数さえ測定誤差の原因になります。この問題を避ける古典的方法是ブリッジ回路の使用です。



ホイートストンブリッジ
図 39

細い導線の RTD の抵抗値を算出するためにブリッジ出力電圧が使用されます。ブリッジは 4 本の導線、外部電源、および 3 つの抵抗体 (温度係数が 0 の物) を必要とします。3 つのブリッジ構成用抵抗体を RTD と同じ温度にさらすのを避けるために、RTD を 1 組のリード線によってブリッジから切り離します：

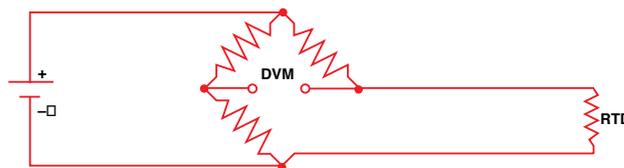
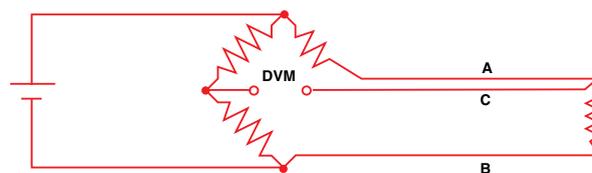


図 40

これらのリード線は初めに持っていた問題を再現します：リード線のインピーダンスが温度測定値に影響します。3 線式ブリッジの構成を使用することによって、この影響も最小にすることができます：

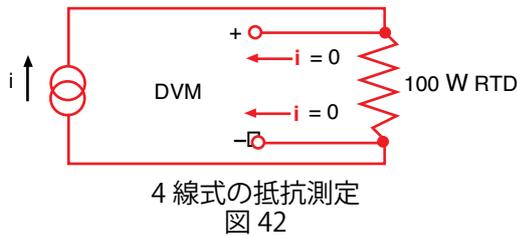


3 線式ブリッジ
図 41

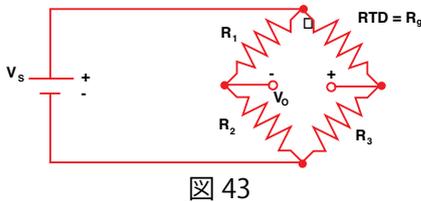
リード線 A と B の長さが完全に一致している場合は、それぞれがブリッジの反対の脚に接続されているので、リード線 A と B のインピーダンスによる影響は打ち消し合います。3 番目のリード線 C はセンスリードとして機能して電流は全く流れません。

図 41 で示すホイートストンブリッジは、抵抗変化とブリッジの出力電圧変化との間に非線形の関係を持っています。この方式は RTD の非線形の温度対抵抗の特性に加えて、ブリッジ出力電圧を同等な RTD インピーダンスに変換する方程式を追加することによって、一層複雑になります。

4線式抵抗測定 - デジタル電圧計 (DVM) で、離れた箇所
の電圧を測定する際に電流源を使用する方式で、ブリッ
ジに関連する多くの問題を軽減します。



DVM が測定する出力電圧は RTD 抵抗に正比例している
ので、1つの変換式で計算できます。ブリッジを構成
する3個の抵抗を1個の標準抵抗で置き換えます。
DVM はリード線の長さに影響を受けずに、RTD だけで起
きる電圧降下を測定します。4線式抵抗測定を使用する
欠点は、リード線がもう1本、3線式ブリッジより必要で
すが、温度測定の精度が重要な場合はお勧めできる方式
です。



3線式ブリッジの測定誤差

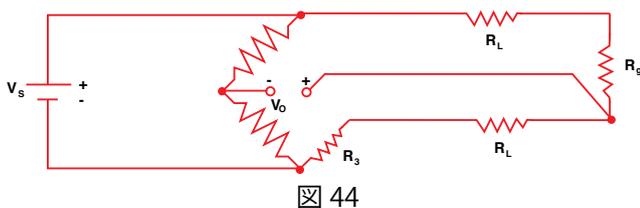
V_s と V_0 がわかっているとき、 R_g を決定して温度を求め
ることができます。 $R_1=R_2$ なので、ブリッジの不均衡電
圧 V_0 は以下の通りです：

$$V_0 = V_s \left(\frac{R_3}{R_3 + R_g} \right) - V_s \left(\frac{1}{2} \right)$$

もし $R_g=R_3$ なら $V_0=0$ となり、ブリッジはバランスが取れ
た状態です。手動でのブリッジバランスが可能ですが、
手動でない場合は V_0 から R_g を以下のように決定できます：

$$R_g = R_3 \left(\frac{V_s - 2V_0}{V_s + 2V_0} \right)$$

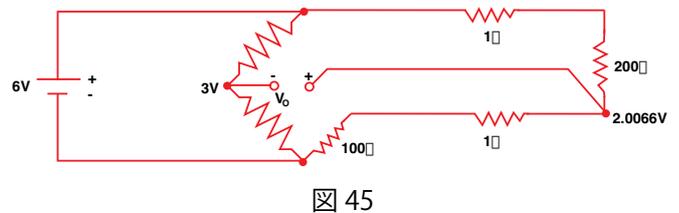
この計算は配線抵抗がゼロであると仮定しています。 R_g
が3線構成のブリッジから離れた場所に位置している場
合は、配線抵抗 R_L は R_g と R_3 の両方に直列に追加され
ます：



このとき R_g は以下の式で決定されます：

$$R_g = R_3 \left(\frac{V_s - 2V_0}{V_s + 2V_0} \right) - R_L \left(\frac{4V_0}{V_s + 2V_0} \right)$$

V_0 が小さいなら誤差は小さくなります。すなわち、ブリッ
ジがバランスに近い場合です。この回路は抵抗値をほん
の数パーセント変える、ひずみゲージのようなデバイスで
は機能しますが、RTD は温度変化により抵抗値を劇的に
変えます。RTD 抵抗が 200Ω であり、ブリッジが 100
 Ω で設計されていると仮定して下さい：



R_L の値が不明なので、以下の方程式 (a) を使用します：

$$R_g = 100 \left(\frac{6 - 1.9868}{6 + 1.9868} \right) = 199.01 \text{ ohms}$$

正解はもちろん 200Ω です。これは約 2.5°C の温度誤差
となります。 R_L の抵抗を実際に測定する、もしくは、ブリッ
ジのバランスが取れない場合は、3線式は RTD の絶対
温度を測定する正確な方法ではありません。より良いア
プローチは、4線式です。

抵抗値の温度変換

RTD は熱電対より直線的なデバイスですが、曲線回帰
(カーブフィッティング) を必要としています。カレンダー・
ヴァン・デューセン方程式は、RTD カーブを近似する
のに使用されています。^{11,13}

$$R_T = R_0 + R_0 \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) \right]$$

ここで：

R_T = 温度 T における抵抗

R_0 = 温度 0°C における抵抗

α = 温度 0°C における温度係数 (通常 $+0.00392 \Omega / \Omega / ^\circ\text{C}$)

δ = $1.49 \cdot (0.00392)$ 白金の標準値)

$\beta = 0 (T > 0 \text{ のとき})$ 、 $\beta = 0.11$ (代表値、 $T < 0$ のとき)

係数 α 、 β 、および δ の厳密な値は、4つの温度で
RTD をテストして、方程式を解くことによって決定します。
この有名な方程式は 1968 年に、より正確なカーブ適合
を提供するために、20 次多項式に取り替えられました。
この方程式をプロットすると、RTD が熱電対より線形性
デバイスであることが分かります。

^{11,13} 図書目録 11 と 13 を参照