

# 接触式温度センサの基礎

2010年6月1日

株式会社岡崎製作所

東京技術部 風岡

## 1. はじめに

一般に温度計測に使用される接触式センサというと、熱電対、測温抵抗体、サーミスタ測温体、パイメタル式温度計、液体充満式温度計および水銀温度計等が対象となる。ここでは、温度が電圧や抵抗という電気信号で直接出力できるために、工業用として最も多く使用されている、熱電対と測温抵抗体について解説する。放射温度計等非接触式の温度計は除外する。本稿では、最初に基本的な測定原理、種類および特徴について触れ、さらに実際に工業用として使用されるシース形熱電対とシース測温抵抗体の構造および製法に関して触れる。最後に、熱電対と測温抵抗体を用いた温度計測における問題点を述べる。

## 2. 温度センサ測定原理

### 2-1. 熱電対の測定原理

熱電対の測定原理に関する記述で、ASTM STP470<sup>1)</sup>には次のような記載がある。1800年頃、ガルバニは2種類の異なる金属の接触によりカエルの脚がけいれんすることを見だし、動物電気が生じていることを報告した。ところがその論文を読んだVoltaはより深い考察から、2種類の金属が間に水溶液を介して接触することにより電位が発生すると結論付け、電池の発見に結びつけた。このVoltaが熱電対原理の先駆者であろうとしている。その他、熱電対の理論の確立に貢献した研究者として、Thomas Johann Seebeck (1821)、Jean Charles Althanase Peltier (1843)、William Thomson -後の Lord Kelvin (1848-1854) らの名前を掲げている。この中で最も有名になっているのが以下の理論である。

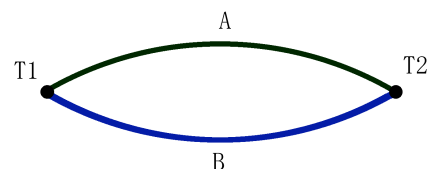


図 1 熱電対原理

種類の異なる2本の均質な導体の両端を電氣的に接続して図-1の様な閉回路を作り、この両端に温度差を与えると回路中に電流が流れる。

この現象は一般にゼーベック効果と呼ばれ、1821年にT. J. Seebeck がビスマス-銅とビスマス-アンチモンの組み合わせで発見したものとされている。実際には、セーベック効果とはペルティエ効果とトムソン効果の組合わさった結果となることが後日の研究の結果判明している。

これらの詳細に関してはここでは触れないが、別途多くの文献が 発行されているのでそちらを参照されたい。

この回路に電流を起こさせる電力を熱起電力 (Thermoelectromotive force) と呼び、その極性と大きさは2種類の導体の材質 (AとB) と両端の接合点の温度 (T1とT2) のみによって定まることが確認されている。従って、導体の太さや長さ、両端部分以外の温度には無関係である。通常は温度を測定する側とは反対側になる端部を一定温度 (0°C) に保ち、熱起電力を測定するこ

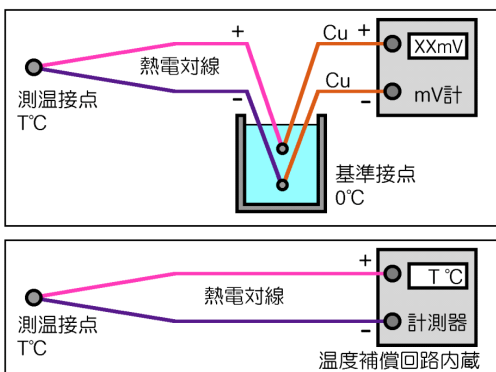


図 2 熱電対と基準接点

とであらかじめ分かっている熱起電力と温度の関係から測定対象の温度を知る。この測定する側の接点を測温接点 (Measuring junction) または熱接点 (Hot junction) と呼び、反対側の一定温度に保つ接点を基準接点 (Reference junction) または冷接点 (Cold junction) と呼ぶ。実際に熱電対を温度センサとして使用する場合は、測温接点側を計測する箇所に設置し、反対側を電圧計に接続することになる。但し、そのままでは基準接点温度が一定にならないため、基準接点となる部分を氷水の中に入れて0°Cとするか、温度補償回路の内蔵された計測器を使用する。図2を参照されたい。

2-2. 熱電対回路の基本法則

熱電対の熱起電力特性に関し、以下に示す3つの法則が実験的に確かめられている。

(1) 均質回路の法則

「均質の導体で構成される回路では、回路の途中に温度変化があっても両端の温度が変わらなければ熱起電力は変化しない」というもので、熱電対の回路でA, Bの素線が均質な材料で構成されているならば、回路の途中にt2, t3の様な局部的な加熱部があっても、熱起電力は両接点の温度t1およびt0によってのみ決まる。

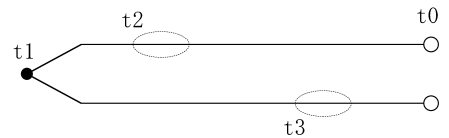


図3 均質回路の法則

したがって、高温で熱電対を使用していて、部分的に劣化し成分が不均質になったり、後ほど述べるショートレンジオーダーリングにより結晶構造が変化したりすると、この法則が成り立たず、均質でなくなった部分に対して局部的な加熱や温度分布の変化により大きな誤差が生ずることがある。

(2) 中間金属の法則

「熱起電力回路の途中に第3の導体を挿入しても、その導体の両端の温度が等しければこの影響は生じない」というもので、熱電対の回路でA, Bの素線が均質な材料で構成されているならば、回路の途中に第3の金属Cが挿入されても両端t2, t3の温度が等しければ、熱起電力はt1およびt0によってのみ決まる。

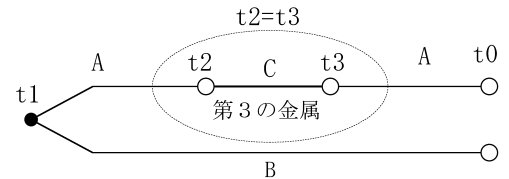


図4 中間金属の法則

従って、実際の使用環境において、熱電対と補償導線を接続するような場合、接続箱内で通常の銅合金の端子台を介して結線することが多い。この時、銅合金の端子が短く、かつ周囲の温度が均一であるという前提で使用できることになる。あるいは、着脱可能なコネクタ等を用いる場合も、長手方向に温度勾配が生じない条件で使用することで、誤差を無視できるが、測定箇所から近い場所でこのようなコネクタを使用すると大きな誤差を生じることがある。その様な場合には、熱電対材料と同一材料の端子金具を用いることで、誤差を最小とすることがある。

(3) 中間温度の法則

「熱電対回路の中間温度が既知である場合、熱接点と中間温度、中間温度と基準接点それぞれの温度差から得た熱起電力の総和は全体の熱起電力に等しい。」というもので、図5において、V1, V2が同じ熱電対であり、両接点の温度がt1, t2の時の熱起電力がV1で、t2, t0の時の熱起電力がV2あるならば、温度がt1, t0の時の熱起電力はVABである。

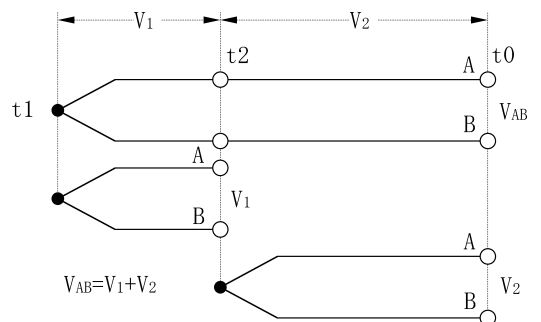


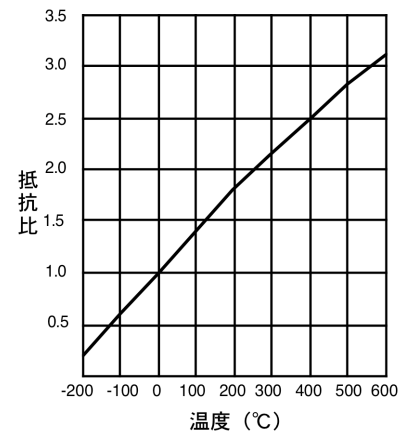
図5 中間温度の法則

一般的な計装システムで、配管等に取り付ける熱電対部分と、そこから延長する補償導線は別の購入ルートで調達し、端子箱部分で接続して使用するが、同じ特性のもの

であれば別々に調達して、接続が可能であるということがいえる。また、熱起電力の計算を行う際の法則でもある。

### 2-3. 測温抵抗体の測定原理

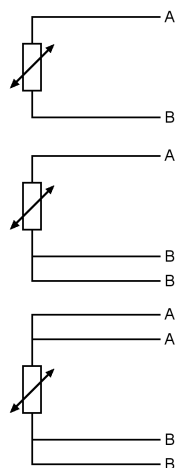
一般に金属材料は周囲温度の変化に比例して、電気抵抗が変化する。通常は温度の上昇とともに抵抗値が増加する。この特性を利用して、抵抗値を測定することで温度を知るものが測温抵抗体である。工業用に最も多く使用される金属材料が白金でついで銅、ニッケルが使用される。その他に、半導体の温度に対する抵抗変化を利用したサーミスタ測温体がある。このセンサは種類により温度に対して負の抵抗変化を示す NTC (Negative Temperature Coefficient) と正の抵抗変化を示す PTC (Positive Temperature Coefficient)、さらに一定の温度領域で抵抗値が急減する CRT (Critical Temperature Coefficient) の 3 種類がある。



通常は工業用に比較し、民生用（電子ジャー・エアコン・石油ファンヒーター等の温度コントロール）に多く使用される。使用可能な温度範囲は狭いが、温度に対する抵抗変化が大きいため分解能が大きく取れる。

図 6 白金測温抵抗体の抵抗特性

抵抗値の変化はブリッジまたは定電流源を用いた電位差法が使用され、導線の結線には次の 3 通りがある。



2 導線式：導線抵抗が抵抗値に加算されるため、導線抵抗を小さくするか、導線抵抗をあらかじめ知っておく必要がある。高抵抗の場合に使用される。

3 導線式：導線 3 本のばらつきが精度に影響を悪影響を与えるため長距離を伝送する場合注意が必要。最も多く使用される。

4 導線式：導線抵抗には影響されずに抵抗値の計測ができるため、標準温度センサ等高精度の計測時に使用される。通常、定電流を流し電位差により抵抗値を計測する。

## 3. 温度センサの種類と特徴

### 3-1. 熱電対の種類と特徴

一般に熱電対の構成材料には金属線が用いられるが、希に非金属材料であるセラミックスが使用されることがある。通常、工業用として使用されるものは日本国内では日本工業規格 (JIS C 1602) にて定められており、これらの熱電対であれば多くの計測器メーカーがそれに対応した受信計器を製作している。世界的には国際規格である IEC 60584 に規定されたものが使用されている。表 1 に IEC にて規格化された熱電対の種類と特徴を示す。N 熱電対は今までの JIS には無かったが、1995 年改訂の JIS C1602 に採用された。なお、構成材料と特徴に関しては主に ASTM STP 470B<sup>1)</sup> によった。

表1 規格化された熱電対の種類と特徴

種類	構成材料		特徴
B	+	Pt-30Rh	870°C~1700°Cまでの酸化性または不活性雰囲気に適する。真空中では短時間。還元性雰囲気や金属蒸気を含む雰囲気は不適。常温での熱起電力が小さいので、補償導線は不要。
	-	Pt-6Rh	
R	+	Pt-13Rh	0~1480°Cまでの酸化性または不活性雰囲気に適する。還元性雰囲気や金属蒸気を含む雰囲気は不適。白金系の熱電対は直接金属保護管の中に挿入して使用してはならない。従って、シース形として使用することは推奨しない。製品としてNCF600シースタイプは存在するが、1000°C以上では寿命がきわめて短い。
	-	Pt	
S	+	Pt-10Rh	
	-	Pt	
N	+	Ni-14.2Cr-1.4Si	K熱電対の欠点を取り除くために開発された。Siを+/-両側の線で増加させ、さらに+側のCr量を増加し、高温での耐酸化性を改善し、かつショートレンジオーダーリング特性を減少させた。
	-	Ni-4.4Si-0.15Mg	
K	+	Ni-10Cr	1260°Cまでの酸化性または不活性雰囲気に適する。高温還元性の雰囲気には適さず、条件によってはグリーンロット腐食を生じ、極めて短時間でEMFの大幅な低下を引き起こす。Niを主成分とするため、硫黄を含む雰囲気には適さない。250°C~600°Cの温度域でショートレンジオーダーリングという、可逆的なEMFの増加を起こすため、挿入深さを変えたり、使用後に校正を行う際は十分な注意が必要である。
	-	Ni-2Al-2Mn-1Si	
E	+	Ni-10Cr	-200°C~900°Cまでの酸化性または不活性雰囲気に適する。還元性の雰囲気には適さない。0°C以下の低温域での計測に適する。
	-	Cu-45Ni	
J	+	99.5Fe	0~760°Cまでの酸化性、還元性、不活性雰囲気に適する。540°C以上では+側のFeの酸化が早まるため、太い線を使用する必要がある。0°C以下での使用は不適。
	-	Cu-45Ni	
T	+	Cu	-200°C~370°Cまでの酸化性、還元性および不活性雰囲気に適する、0°C以下の低温域の計測に適する。上限温度はCuの酸化温度に依存する。
	-	Cu-45Ni	

表1に示した熱電対の他に、最近IEC規格で制定された新しい熱電対がある。標準用に開発されたもので、純金属熱電対と呼ばれ、IEC 62460 Temperature - Electromotive force (EMF) tables for pure-element thermocouple combinations という規格名である。金-白金 (Gold versus Platinum : 0~1000°C) と白金-パラジウム (Platinum versus Palladium : 0~1500°C) 熱電対という2種類の熱起電力が定められ、許容差の規定はない。これらのほかに、規格化されていない特殊な熱電対がある。それらは規格化された熱電対にはない特徴を持ったもので、高温用のものから極低温用まで各種のものがある。表2に示すものは規格化されていないが、工業用にも一部使用されている熱電対の代表的なものである。

表2 規格化されていない熱電対の種類と特徴

種類	構成材料		特徴
白金系	+	Pt-40Rh	Land-Jewellと呼ばれる熱電対。連続して1800°Cで使用でき、短時間では1850°Cまで使用できる。但し、EMF特性が低いため、高精度測定には適さない。
	-	Pt-20Rh	
	+	Pt-5Mo	Pt-Rh合金は中性子が照射される用途には適さない。RhがPdにゆっくり変化するためである。1400°Cまでのガス冷却原子炉のHeガス中での使用に適する。
	-	Pt-0.1Co	
イリジウム-ロジウム系	+	Ir-40Rh	2190°Cまでの不活性または真空雰囲気に適する。酸化性または還元性雰囲気では寿命が短い。ジェットエンジンの排気温度計として使用された。
	-	Ir	
プラチネル系	+	Pd-14Pt-3Au	プラチネル I と呼ばれ、K熱電対とほぼ同一のEMF特性を持つ。1260°Cまでの不活性または酸化性雰囲気に適する。乾燥した水素ガス中でも使用可能。
	-	Au-35Pd	
	+	Pd-31Pt-14Au	プラチネル II と呼ばれ、K熱電対とほぼ同一のEMF特性を持つ。1260°Cまでの不活性または酸化性雰囲気に適する。乾燥した水素ガス中でも使用可能。
	-	Au-35Pd	
タンガステル-レニウム系	+	W-5Re	最高2760°Cまでの不活性または真空中で使用可能。乾燥した水素ガス雰囲気でも使用可能。使用に際しては雰囲気・温度に適した絶縁材や保護管材料の選定が重要である。
	-	W-26Re	
金系	+	Ni-10Cr	1.341K~300Kまでの極低温環境で使用可能。40K以下でも高い熱電能を持つ。
	-	Au-0.07Fe	
ニッケル-モリブデン系	+	Ni-18Mo	20Alloy/19Alloyの組み合わせで呼ばれる。1260°Cまでの水素および他の還元性雰囲気での使用に適する。Kと類似のEMF特性を持つ。イプセン炉で使用されている。
	-	Ni-0.8Co	

規格化された熱電対はその種類に応じ、規準熱起電力が定められている。実際の製品の熱起電力を規準熱起電力と一致させて製造することは不可能なため、ある幅の誤差を許容している。これを許容差と言い、国

際的にはIEC 60584で制定されている。JIS C1602 -1995は今回の改正でIECとの大幅な整合が計られ、許容差はもとより、規準熱起電力表もIECにあわせITS-90によるものとなった。表3に許容差を示す。

表3 熱電対の許容差

種類	許容差の分類		
	クラス1	クラス2	クラス3
B	温度範囲	-	600°C以上 800°C未満
	許容差	-	±4°C
	温度範囲	-	600°C以上 1700°C未満
	許容差	-	±0.0025・ t  °C
R, S	温度範囲	0°C以上 1100°C未満	0°C以上 600°C未満
	許容差	±1°C	±1.5°C
	温度範囲	-	600°C以上 1600°C未満
	許容差	-	±0.003・ t
N	温度範囲	-40°C以上+375°C未満	-40°C以上+333°C未満
	許容差	±1.5°C	±2.5°C
	温度範囲	375°C以上 1000°C未満	333°C以上 1200°C未満
	許容差	±0.004・ t	±0.0075・ t
K	温度範囲	-40°C以上+375°C未満	-40°C以上+333°C未満
	許容差	±1.5°C	±2.5°C
	温度範囲	375°C以上 1000°C未満	333°C以上 1200°C未満
	許容差	±0.004・ t	±0.0075・ t
E	温度範囲	-40°C以上+375°C未満	-40°C以上+333°C未満
	許容差	±1.5°C	±2.5°C
	温度範囲	375°C以上 800°C未満	333°C以上 900°C未満
	許容差	±0.004・ t	±0.0075・ t
J	温度範囲	-40°C以上+375°C未満	-40°C以上+333°C未満
	許容差	±1.5°C	±2.5°C
	温度範囲	375°C以上 750°C未満	333°C以上 750°C未満
	許容差	±0.004・ t	±0.0075・ t
T	温度範囲	-40°C以上+125°C未満	-40°C以上+133°C未満
	許容差	±0.5°C	±1°C
	温度範囲	125°C以上 350°C未満	133°C以上 350°C未満
	許容差	±0.004・ t	±0.0075・ t

以上のように、様々な種類と特徴を持った熱電対の共通した長所<sup>2)</sup>をあげると次のようになる。

- (a) 温度を電氣量に換算して検出できるため、その後の処理（変換・増幅・通信・制御等）が容易である。
- (b) 比較的安価に入手可能で、測定方法が簡単な割に測定精度が高い。
- (c) 簡単な計測であれば、熱電対素線の外径を変えることで、要求される応答特性や寿命を満たせる。
- (d) 測定可能な温度範囲が広い。例えばK熱電対の場合、0°Cから1200°Cまでの計測が行える。

その反面として、以下のような短所<sup>2)</sup>もあるため注意して使用する必要がある。

- (a) 測定雰囲気により、使用可能な熱電対の種類が制限される。
  - (b) 測定温度の0.25%以上の精度を得ることが困難である。
  - (c) 測定に際し、必ず基準接点を必要とするため、その箇所を0°Cに保つか電氣的に補償する必要がある。
- 以上のような特徴がある。しかしながら、使用に際していくつかの注すべき点がある。

- (a) 熱電対は均質であるという前提で使用される。従って、表-1のK熱電対の特徴や4項で示すように、ショートレンジオーダリングによる熱起電力の上昇や、高温雰囲気での使用による劣化等で不均質な部分が生じた際は、挿入長さを変えることで思わぬ誤差を観測することがある。特に長期にわたって使用した熱電対を温度槽で校正する際は、挿入深さが実条件と異なるため、取り付いた状態での誤差以上に大きな誤差を示すことがある。

### 3-2. 測温抵抗体の種類と特徴

工業用に最も多く使用されている測温抵抗体には次の種類がある。表4に各種測温抵抗体の種類を示す。現在最も多く使用されているのは、IEC 60751 (AM.2) -1995 や JIS C1604-1997 に規定されている白金測温抵抗体で、抵抗比 (0Ωと100℃での抵抗値の比 R100/R0) が 1.3851 のものである。IEC 60751-2008 が既に発行されているが、JIS への取込は審議中であらうしばらく時間が掛かる。

表4 測温抵抗体の種類

	抵抗比 (R100/R0)	規格	備考
白金測温抵抗体	1.3916	JIS C 1604	日本独自の旧規格で JPt100 と呼ぶ
	1.3851	IEC 60751/JIS C 1604	国際規格に整合された規格 Pt100 と呼ぶ
銅測温抵抗体	1.4250	JEM 1252	Cu25Ω at 0Ω / Cu10Ω at 25℃ (旧規格)
ニッケル測温抵抗体	1.618	DIN 43760	独国旧規格

通常は 0Ωでの抵抗値が 100Ωのものが使用される。なお、JIS には日本独自の規格として JPt100 と呼ばれる白金測温抵抗体がある。これは抵抗比が 1.3916 のものであり、1981 年以前の JIS はこの規定のみであったが、国際規格に整合させるために従来の Pt100 が JPt100 に変更された。現行の Pt100 と JPt100 の間には互換性がないため使用には注意が必要である。

表4に示したほかに、近年の超伝導研究にロジウム-鉄 (Rh-0.07%Fe) 抵抗体や白金コバルト (Pt-0.5%Co) 抵抗体さらに 1000Ωを越える白金測温抵抗体が極低温測定用に使用されている。その他に、温度の標準器として使用される、標準用白金測温抵抗体がある。これは国際温度目盛に定義された定点温度で校正し目盛り付けされたもので、JIS 等工業規格で規定されたものとは特性も若干異なり、通常は純白金線を使用し、抵抗比が 1.3925 程度以上のものが使用される。

測温抵抗体の特性を定めているのは、前述のように抵抗比と 0℃における抵抗値である。しかし、実際に温度センサとして使用するために、各温度における規準抵抗値が各国の規格で定められている。これら規準値に対し、工業用として測温抵抗体を製造するために許容される誤差が示されている。表5に現行の JIS/IEC/ASTM に規定されている許容差を示す。

表-5 測温抵抗体の各国規格許容差

公称抵抗値	クラス (階級)	許容差 (℃)	JIS C 1604	IEC 60751		ASTM E 1137
				巻線抵抗素子	薄膜抵抗素子	
温度範囲 (℃)						
Pt100Ωat0℃ (R100/R0=1.3851)	AA	± (0.1+0.0017 t )	-	-50~250	0~150	-
	A	± (0.15+0.002 t )	-200~500	-100~450	-30~300	-
		± (0.13+0.0017 t )	-	-	-	-200~650
	B	± (0.3+0.005 t )	-200~500	-196~600	-50~500	-
		± (0.25+0.0042 t )	-	-	-	-200~650
C	± (0.63+0.01 t )	-	-196~600	-50~600	-	

熱電対と比較した場合の白金測温抵抗体の長所を以下に示す。

- (a) 感度が熱電対に比べ大きく、熱電対のような基準接点が必要なため、常温付近の測定に有利。
- (c) 安定度が高く、低振動の良好な環境であれば、長期にわたって 0.1℃より良い安定度が期待できる。
- (d) 規格上も許容差は熱電対より小さく、精度良い計測が期待できる。

その反面、欠点として以下の事項があるため使用には注意が必要である。

- (a) 抵抗素子は複雑で大きくなりやすいため、応答速度が遅く、小さい箇所の温度計測に不適當。但し、近年は薄膜抵抗素子や、細径素子が供給され、外径φ0.5の製品も現れている。
- (b) 工業用の測温抵抗体は（JISの場合）最高温度が600°Cと低い。
- (c) 抵抗素子内部の抵抗線には細い線が使用されるため、機械的振動や衝撃に弱い。但し、薄膜抵抗素子はアルミナ基板に白金の膜が形成されるため、振動・衝撃に強い。

**4. 温度センサの構造**

熱電対および測温抵抗体が工業用として使用される場合、近年最も多く採用されるのがシース形熱電対とシース測温抵抗体である。安価なものはシース形を採用せず、金属パイプの中に絶縁管を介して熱電対素線を組み入れたものや、絶縁電線の先端にマイカ板等に抵抗線を巻き付けた抵抗素子を取りつけたものがある。

**4-1. シース形温度センサの構造と特徴**

シースとは一般的にMI (Mineral Insulated) ケーブルあるいは、無機絶縁ケーブルと呼ばれ、金属のチューブの中に熱電対素線や測温抵抗体用の導線を入れ、酸化マグネシウム (MgO) で固く充填し絶縁したものである。その製法から外径はφ0.08からφ12.7のものまで製造可能である。これらの先端部に熱接点を設けたものがシース形熱電対で、シース材質の選択により保護管を使用せずに悪環境下での使用を可能にした。

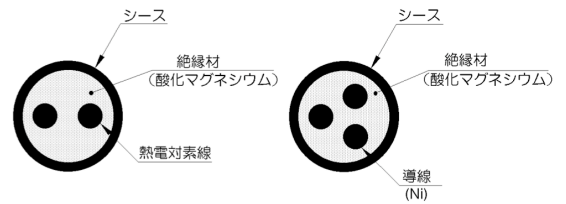


図7 シース断面図

図7にシースの断面例を、図8にシース形熱電対の最も多く使用されている形式の構造図を示す。

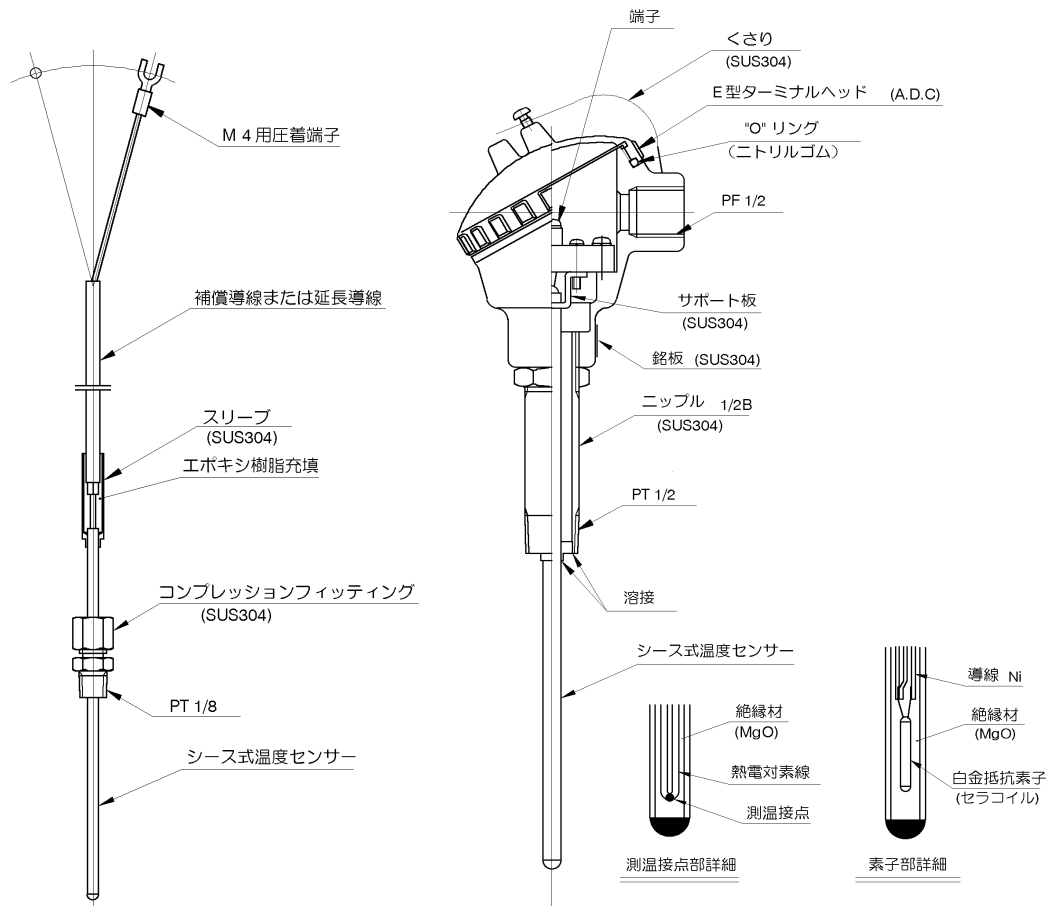


図8 シース形温度センサ構造例

図8の左図は、シース部分と補償導線が直接接続された構造例で、右図は端子箱を介して補償導線を接続する例である。シース形熱電対の場合、外観的には熱電対と測温抵抗体に大きな差は無い。シース外径の最小外径に最も大きな差があり、これはシース形温度センサの製法に起因する。図9にシース形熱電対の熱接点加工方法とシース測温抵抗体の加工方法を示す。シース熱電対はシース先端部の絶縁物の除去と熱接点の溶接および末端の加工が外径の制約となる。現在、シース外径0.08mmのものがシース熱電対での製作可能な最小外径である。これらのシース形熱電対の特徴は以下の通りである。

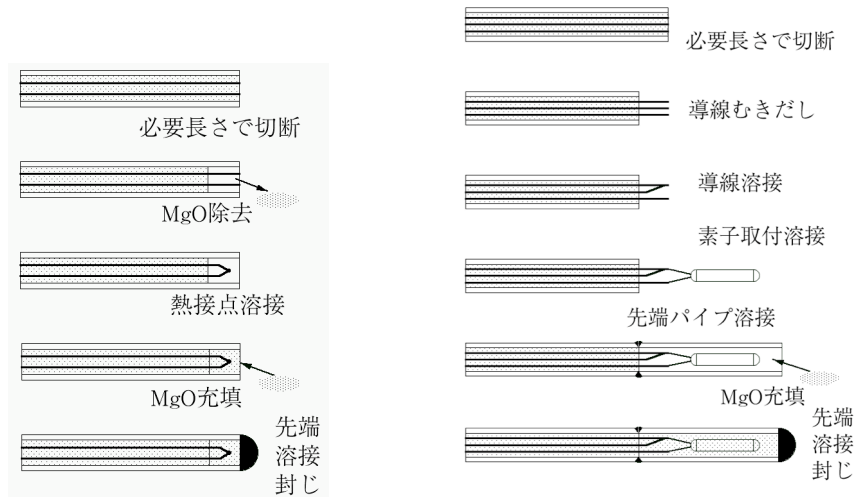


図9 シース形温度センサ加工方法

- (a) 熱電対素線が外気から遮断されているため、シース材質の適切な選定により、酸化及び腐食性の雰囲気での使用に耐え高温域まで使用できる。
- (b) MIケーブル部分は小さな半径でも曲げ加工ができるため、取り付けや配線が容易である。最小曲げ半径=2d
- (c) MIケーブルはシース外径により長尺のものが製造可能なため、ボイラー内部やタンク内部等大きな構築物内の温度測定に適する。φ4.8のもので140mのシース形熱電対が製作可能である。
- (d) 外径の細い温度センサが製造可能であるため、狭い場所への設置や、早い応答速度を求められる場合に有利である。
- (e) 絶縁材が固く充填されているため、接地形のシース熱電対は耐圧強度が高く、約3500kg/cm<sup>2</sup>の圧力に耐える。

以上のような、優れた特徴を持っているため最近では化学プラントや石油精製プラント、LNG基地や火力・原子力発電所等様々な製造に関わる設備で多くの使用実績をあげている。特にシース熱電対は熱接点部の構造によりさらに固有の特徴を持つ。図10に熱接点部の構造を示す。これらの特徴は下記の通りである。

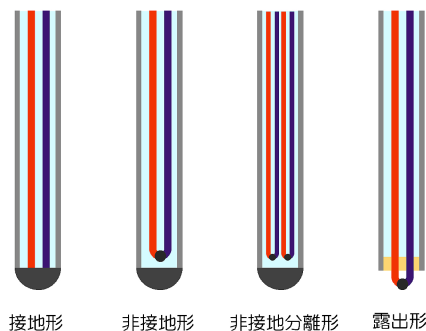


図10 熱接点部の構造

- (a) 接地形：応答速度が早く、耐圧強度は約3500kg/cm<sup>2</sup> と高いが電気障害に弱い。
- (b) 非接地形：接地形に比べ応答速度は遅いが、測定対象への制限が少なく最も多く使用される。
- (c) 露出形：最も応答速度が早く、ガス体の温度測定に適する。他の熱接点に比べ最も弱い。

このシース形熱電対はその構造から、耐熱性や耐食性はシース材質によって大きな影響を受ける。また、高温領域では絶縁材の特性で絶縁抵抗の低下も生じるが、これは絶縁材の種類によって大きく異なる。さらに製法からくる制約で、組み合わせ可能なシース材質と素線材質が決まる。以下の内容は主にASTM STP 470<sup>1)</sup> によった。表6にシース熱電対に使用されるシース材質とそれらの特性を記す。一般的に使用されるオーステナイト系ステンレス鋼であるSUS316が標準材質として使用されることが多く、シース熱電対やシース測温抵抗体に採用されている。高温用のシース熱電対の場合はSUS310S やINCONEL600 (JIS NCF600) が一般的に使用され、用途により446SSが使用される。さらに高温の場合はハステロイXが選択され、短時間であれば1300°C近くまで使用できる。

表6 シース材質の種類・特徴

材質	融点 (°C)	最高温度 空气中 (°C)	使用可能雰 囲気	連続最高 温度 (°C)	特徴
304	1404	1049	ORNV	899	一般的なステンレス鋼
310	1404	1093	ORNV	1147	耐熱ステンレス鋼
316	1371	899	ORNV	927	標準的に使用
321	1399	899	ORNV	871	安定化ステンレス鋼
347	1427	915	ORNV	871	
446	1482	1093	ORNV	1093	耐硫化物に優れる
Inconel	1399	1093	ONV	1149	耐熱鋼
Inconel X	1438	1371	ONV	1204	
Incolloy	1371	893	--	--	
Hastelloy X	1288	1260	--	--	
Monel	1349	893	--	--	耐海水
Pt-10Rh	1848	1704	ON	1703	白金シース
Molybdenum	2610	204	VNR	--	超高温用、曲げ不可
Tantalum	2996	315	V	2778	超高温用、曲げ可能

O：酸化性雰囲気 R：還元性雰囲気 N：不活性雰囲気 V：真空

表7には一般に使用される絶縁材の種類と、使用可能上限温度を示した。これらの内、最も多く使用されるマグネシア (MgO) は吸湿性が極めて高いため、製造時は高度の注意を払って取り扱われている。

タングステンレニウム系熱電対の様な2000°Cを越える超高温領域では、絶縁材の選定が難しくなる。その為、表7にも記載してあるベリリヤの様な極めて毒性の高いものを使わざるを得ないことがある。

表7 絶縁材の種類

絶縁材	融点 (°C)	使用可能温度 (°C)
マグネシア (MgO)	2800	1650
アルミナ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2030	1650
ジルコニア (ZrO <sub>2</sub> )	2420	650
ベリリヤ (BeO)	2570	2315
トリヤ (ThO <sub>2</sub> )	3050	2500
ハフニア (HfO <sub>2</sub> )	2900	2000
イットリア (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2410	2000

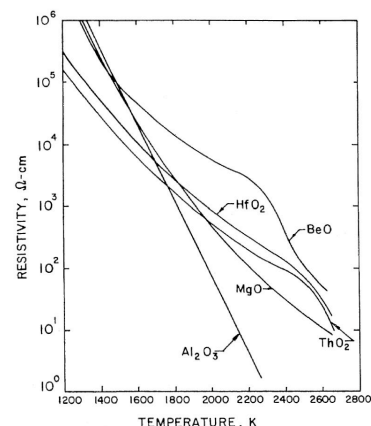


図11 絶縁材の温度特性

表8にはシース材質と組み合わせ可能な素線の種類を示す。一般に使用されている組み合わせは、表8の“1”か“3”の組み合わせである。

国内では多くのメーカーのシース熱電対の標準材質はSUS316であり、高温用にInconel 600を準備している。また、シース測温抵抗体の標準シース材質はSUS316で、内部導線はNiである。希に導線がCuのものがあるが、これはT熱電対の場合の+脚側の材質であるから、シース材質SUS316のT熱電対との組み合わせはやや難しいものといえる。

表8 シース材質と素線の組み合わせ

シース材質 素線	316	310S	321/347	446	Pt Alloys	HastelloyX	Inconel 600	Cu	Ta
K, N	1	1	1	1	1	3	1	4	3
J	1	1	1	1	2	4	3	4	4
T	1	1	1	1	2	4	2	1	3
E	1	1	1	1	1	1	1	4	3
B, R & S	1*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	4	4
W/Re	3	3	3	3	3	3	3	4	3
Cu	3	4	3	4	4	4	3	1	2
Ni	1	1	1	1	1	1	1	4	3

1：製造が容易で使用上も良い組み合わせ 2：製造が容易であるが使用上良くない組み合わせ

3：製造が困難であるが使用上良い組み合わせ 4：製造が難しく使用上良くない組み合わせ

\*：文献では“1”となっているが、1000℃以上では金属蒸気の影響でEMFが低下する。

組み合わせの良否は、それぞれの材質の冷間加工後の熱処理温度と互いの材質の線膨張係数の違いにある。当然ながら、同様な熱処理温度を持ち、かつ類似の線膨張係数を持った材料がMIケーブルの組み合わせでは望ましい。さらに制約として、シース材料と素線材料の組み合わせの相性がある。例えば、Inconel 600のシースとR熱電対素線は製造上は良い組み合わせだが、1000℃以上の高温で使用するとInconel 600から発生する金属蒸気がR熱電対の白金に悪影響を与え、短時間で熱起電力劣化を生ずる。

### (2) MIケーブルの製造方法

前章で述べたような様々な特徴を持つシース形熱電対の基本はMI (Mineral Insulated : 無機絶縁) ケーブルである。このMIケーブルの大きな特徴は外側を耐食・耐熱性のある合金製のパイプ (オーステナイト系ステンレス鋼または耐熱合金) で覆い、内部の導線が無機物 (MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等) で絶縁した構造にあり、絶縁物の充填密度が高いため、曲げ加工が可能で、耐圧強度に優れた点である。さらに金太郎飴と一緒に、どこで切っても同じ断面形状を持ち、同様な特性を有することである。

一般的に、温度センサメーカーは各種外径のMIケーブルを1ロット数十mから100m単位で在庫し、製造に必要な長さごとに切り出してシース式温度センサとして加工する。

MIケーブルの製造方法は金太郎飴と同様に、最初は太く短い完成品と相似断面形状のものを、段階を経て細く長いMIケーブルに仕上げる。製造方法はノウハウの塊であるが、一般的なシースの製造行程を簡単に記すと図12の様になる。

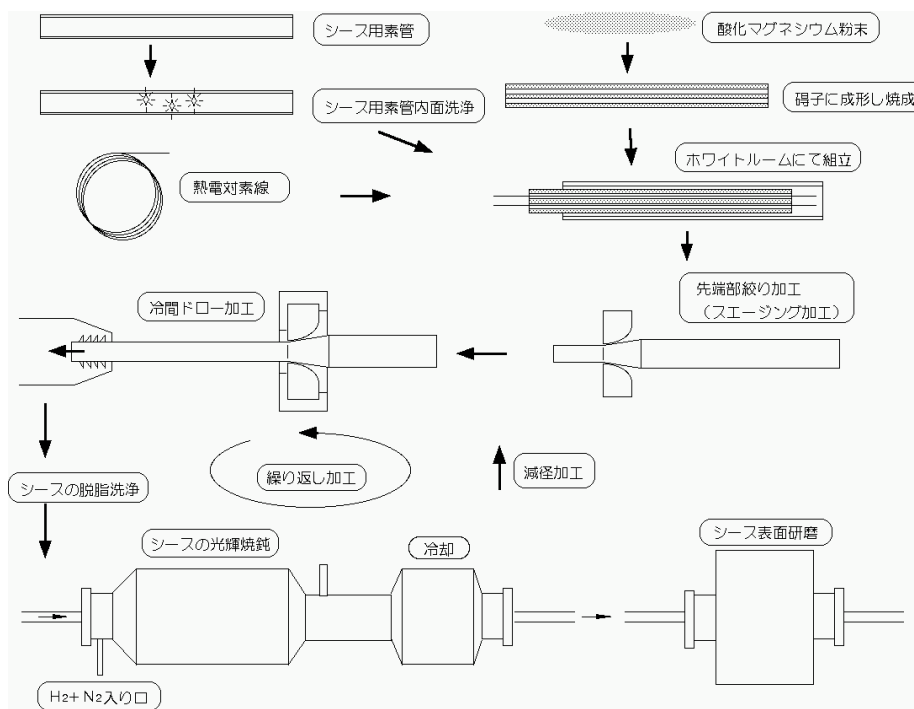


図12 MIケーブルの製造方法

5. 測定上の注意

接触式温度センサによる温度計測では、測定対象と温度センサを熱的に十分接触させ両者の温度を一致させることが最も重要である。そのために熱電対による温度計測時には以下のような注意が必要となる。

(1) 熱的に接触させ、外部の熱影響をさけるために測定対象に対し、十分な長さを接触させる。流速条件によっても異なるが、気体の場合は温度センサの外径の10倍程度以上挿入することが望ましく、液体の場合は5倍程度以上の挿入が望ましい。測定対象が個体の場合は、感温部のみを接触させるのではなく、外熱の影響を避けるために途中の部分も表面に十分に接触させることが望ましい。

(2) 測定対象の温度が変化する場合、温度センサもその変化にすばやく追随する必要がある。従って、応答遅れの小さい温度センサを選定することが望ましい。応答遅れは温度センサの熱容量と表面積によってほぼ決まるため、強度的あるいは耐食的に許容できる最小の外径の温度センサが望ましい。一般に時定数  $\tau$  と呼ばれる63.2%応答は次式で簡易的に表現される。

$$\tau = \frac{C}{\alpha \cdot A} \quad \text{----- (1)}$$

ここで

C：物体の単位長さあたりの熱容量 kcal/m・°C

$\alpha$ ：平均熱伝達率 kcal/m<sup>2</sup>・°C

A：物体の単位長さあたりの表面積 m<sup>2</sup>

表9と表10にシース形熱電対及びシース測温抵抗体の時定数の実測例を示す。条件は室温から沸騰水中である。

表9 シース熱電対の応答速度 ( $\tau=63.2\%$ )

シース外径	$\phi 0.1$	$\phi 0.15$	$\phi 0.25$	$\phi 0.5$	$\phi 1.0$	$\phi 1.6$	$\phi 3.2$	$\phi 4.8$	$\phi 6.4$	$\phi 8.0$
接地形	-	-	3.8ms	14.7ms	46.5ms	0.15s	0.4s	0.7s	1.2s	2.1s
非接地形	1ms	2ms	5.7ms	16.4ms	84.9ms	0.2s	0.5s	1.2s	2.4s	3.9s

表10 シース測温抵抗体の応答速度 ( $\tau=63.2\%$ )

シース外径	$\phi 1.0$	$\phi 1.8$	$\phi 3.2$	$\phi 4.8$	$\phi 6.4$	$\phi 8.0$
応答時間	0.7s	1.7s	2.5s	6.9s	12.7s	16.9s

(3) 気体の温度計測の場合、周囲からの放射熱が誤差の原因となる場合がある。その場合は温度センサの周囲に熱遮蔽を設ける必要がある。

(4) 測定対象が小さい場合、温度センサの接触により温度変化を生じる場合がある。その様な場合は極力熱容量の小さな温度センサを選定する必要がある。

## 6. 温度センサ設置時の注意

温度センサを設置する場合、設置する箇所・用途により各種制約があるため注意が必要である。

(1) 屋外設置の場合、防水形の端子箱を設ける必要がある。日本国内（JIS C 0920）及び国際規格（IEC 60529）でIPコードとして人体及び固形異物に対する保護、水に対する保護を等級別に分類・規定されている。米国ではNEMA規格に類似のものがある。

(2) 石油化学プラント等、雰囲気引火性の物質が生ずる可能性のある箇所では、防爆形の温度センサが必要である。耐圧防爆形と本質安全防爆形の2種類ある。日本国内では労働省産業安全研究所の検定代行機関である産業安全協会の検定合格が必要である。世界的にはIEC規格で制定されているものが認められ、検定は各国の機関が実施している。欧州連合では英国のBASEEFA、独国のPTBが有名である。日本の法律もIEC規格に整合されつつあるが、検定方法を含め100%同一ではない。米国ではNECに防爆の規格があり危険場所の分類等を規定している。構造や試験方法はULまたはFMに規定され、検定も行っている。当社では、積極的に世界各国の防爆規定を満足する製品を供給しており、IEC規格はもちろん、欧州、米国、中国、韓国等主要各国の検定合格品を有している。

(3) 設置される雰囲気が腐食性である場合、端子箱の塗装を耐食性の高いものに変えるか、ステンレス製またはプラスチック製の端子箱を採用する。NEMA4Xは防水のほか、耐食性も求めている。また、扱う流体が硫化水素系のものである場合は、NACE MR0175/ISO 15156-1に規定された、耐応力腐食割れの材料を用いなければならない。

(4) 高圧ガス保安法の対象となる場合、耐圧部の強度計算書、材料証明書、溶接部カラーチェック及び耐圧試験成績書が必要となる。基本的に、温度センサは特定設備検査規則の対象外であるが、温度センサの設置される装置が対象である場合、これらの要求がある。

(5) NADCAP/AMS2750Dの要求がある、航空機部品の熱処理用温度センサでは、該当文書の要求を満足する仕様で、製品の製作、使用を行わなければならない。

NADCAPとは米SAEの外郭団体で、米Boeing社や欧州Airbus社に代表される航空機メーカーと、英Rolls-Royce社や米GE社などの航空機エンジンメーカーが参加するPRI（Performance Review Institute）が開発した、特殊工程管理に関する認証制度で、熱処理業者はこの認証を受けないと購入してもらえない。

熱処理に関しては米国AMS2750D規格があり、熱電対の校正に関し、細かく規定されている。この規格では、KおよびE熱電対の再校正は禁じられ、再使用時の挿入深さに関し短くすることを禁じている。従って、タイプN熱電対の使用が多い。当社文書番号TD-1405「NADCAP/AMS2750D対応熱電対について」を参照のこと。

(6) 食品・医薬品業界向けの温度センサは、清浄度の要求が厳しく、製品の接液部を含め「サニタリー設計」が求められる。フェルール等の主要部品はSUS316L材を要求される事が多く、シース測温抵抗体のシース材質もSUS316Lで対応することがある。また、バリデーションの規定で校正温度が細かく指定されるため、要求にあった温度校正を行わなければならない。

## 7. 温度センサ使用上の問題点

### 7-1. 熱電対の問題点

#### (1) 雰囲気ガスの影響

すでに表1に示したように熱電対の種類により、雰囲気ガスによる影響は異なる。特に問題になるのは高温での水素ガスである。その他、高温で保護管内部に発生する金属蒸気の影響もある。

##### (a) 水素ガスによるK熱電対への影響<sup>3)</sup>

高温水素ガスによる影響で最も顕著な現象は、グリーンロットあるいはNi-Cr合金の選択酸化と呼ばれる現象で、極めて短時間でK熱電対の熱起電力を大きく減少させ、断線に至らせることがある。通常800から900°C以上の還元性雰囲気で発生する。一般的に高温用に用いられる熱電対は金属保護管またはシースに覆われて用いられるため、雰囲気ガスによる影響は少ない。しかしながら、H<sub>2</sub>ガスは高温において、金属を透過し内部に悪影響を与える。この現象は以下のように説明される。

素線表面に生成されている酸化皮膜は保護皮膜も兼ねているが、還元性雰囲気下で還元され、金属光沢を有する合金表面が露出する。次の段階で、雰囲気中に微量存在するO<sub>2</sub>と反応してNiOが生成され、さらにCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>と反応し、NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>が生成される。これらNiOやNiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>はCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>と比較し、ポーラスであり、合金との密着性が悪いので急激に成長し内部に進行していく。その結果、熱起電力の急激な低下が生じ使用に耐えなくなる。対策として、水素透過の少ないシース材を用いる。あるいは積極的にシース内部の酸素を減少させるために酸素のgetter材として、シース内にTa やTi を組み込むことがある。別の方法は酸素を十分に供給することであるが、実際の現場では困難なことが多い。

##### (b) 金属蒸気による白金熱電対への影響

白金系熱電対 (B, R, S) を使用する場合、極めて高い温度を測定するため、ほとんどは非金属保護管を用いる。しかし、1000°C程度の場合、金属保護管や金属シースを用いた計測を行う場合がある。一般に白金は高温では活性化し、他の金属と容易に合金を作りやすくなる。その様な条件下で、直接金属に触れたり、あるいは金属から発生する金属蒸気に接すると、合金化し熱起電力に異常をきたす。ひどい場合には本来の融点以下で溶けだし、断線することがある。従って、白金系熱電対を金属保護管と組み合わせて使用する場合、必ず内部に気密質非金属 (高純度アルミナ: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 保護管を用いて、保護する必要がある。以上の理由から、シース形の場合で、インコネル等の金属シースを用いる場合は1000°C以上では極めて短時間で熱起電力が低下する事を認識する必要がある。

#### (2) 温度履歴による影響

熱電対の構成材料は一般的に金属が使用される。金属材料は熱処理によりその特性が決定されることが多いため、使用温度により特性に影響が出ることがある。また、用いる絶縁材料により温度の影響が現れることがある。以下にその例を示す。

##### (a) K熱電対の不可避誤差 (短範囲規則格子変態: Short range ordering) <sup>4)5)</sup>

K熱電対は250°Cから600°Cの温度領域で使用すると、比較的短時間で熱起電力の変化 (上昇) を生ずるという欠点がある。この原因はクロメル合金の結晶構造の変化によるもので、650°C以上に加熱することで元の熱起電力特性に戻る。この現象は一定の温度で使用している場合は顕著に現れないが、現場の測定個所から熱電

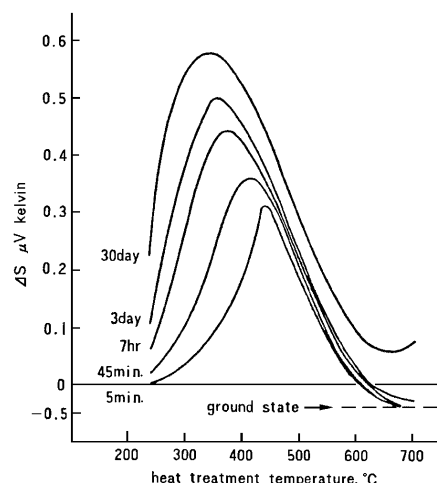


図 13 ゼーベック係数の変化

対を抜き取り、校正装置で実際より短い挿入長さで温度校正を行う場合や、測定時に挿入長さを変化させ、熱履歴を受けた箇所に温度勾配が加わった場合に誤差が現れ問題視される。原因は熱電対素線が不均質になったことによるもので、特に300℃から450℃ではゼーベック係数(温度変化に対する熱起電力発生の度合い)の増加が大きくまた比較的短時間で平衡する(図12参照)。このゼーベック係数が変化した部分に温度勾配を与えると顕著な誤差として現れる。従って、

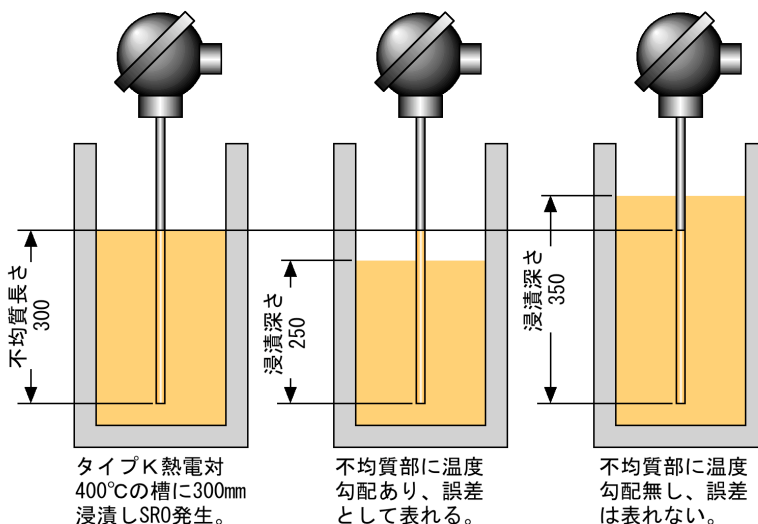


図 14 SR0による不均質誤差の例

もし400℃近傍で使用する場合はその温度近傍(例えば400℃)で熱処理を行い、

あらかじめゼーベック係数を増加させ、平衡状態にしておくことで400℃で使用した際の熱起電力の増加はかなり防げる。但し、熱起電力の増加量が大きいため予め熱起電力の低い特性の素線を選定するか、プラス側へシフトした値を考慮して使用する必要がある。

(b) シャントエラー<sup>6)</sup>

シース熱電対を炉内で長い距離をはわせる場合、途中で900℃を超えるような高温の個所があるとその部分の温度の影響で絶縁材料の固有の絶縁抵抗が低下し、誤差の原因となる。測定箇所より高い温度が途中にあり、そこの線間抵抗が低下するとあたかもその部分に熱接点が出来たような状況になり、高めの温度誤差となる。この現象は絶縁材料の物理的特性によるものであるため、熱電対の不良と言うべきものではなく、使用状況に合わせた熱電対の設置を心がけることで避けるべき事柄である。細いシース外径ではより低い温度で影響が出ることがある。従って、高温部にシースをはわせる場合は、極力外径の太いシース熱電対を選定し、絶縁距離を確保する事が対策となる。図15 シャントエラーの例を参照。表11には、シース熱電対を高温に曝した場合の実際の絶縁抵抗測定結果を示す。<sup>9)</sup>

表11 シースの温度と絶縁抵抗

シース外径	φ 8.0	φ 8.0	φ 6.4	φ 6.4	φ 4.8	φ 4.8
温度	φ 8.0	φ 8.0	φ 6.4	φ 6.4	φ 4.8	φ 4.8
常温	1.1×10 <sup>11</sup> Ω	6.5×10 <sup>11</sup> Ω	1.0×10 <sup>11</sup> Ω	3.8×10 <sup>11</sup> Ω	4.5×10 <sup>11</sup> Ω	3.4×10 <sup>11</sup> Ω
500℃	4.7×10 <sup>9</sup> Ω	2.2×10 <sup>8</sup> Ω	2.1×10 <sup>9</sup> Ω	1.3×10 <sup>8</sup> Ω	2.2×10 <sup>8</sup> Ω	2.1×10 <sup>8</sup> Ω
600℃	2.1×10 <sup>8</sup> Ω	8.5×10 <sup>7</sup> Ω	4.4×10 <sup>8</sup> Ω	5.2×10 <sup>7</sup> Ω	3.6×10 <sup>7</sup> Ω	7.5×10 <sup>7</sup> Ω
700℃	1.6×10 <sup>7</sup> Ω	3.6×10 <sup>6</sup> Ω	3.8×10 <sup>7</sup> Ω	1.6×10 <sup>7</sup> Ω	4.7×10 <sup>6</sup> Ω	2.4×10 <sup>6</sup> Ω
800℃	3.0×10 <sup>6</sup> Ω	8.6×10 <sup>5</sup> Ω	8.0×10 <sup>6</sup> Ω	4.5×10 <sup>6</sup> Ω	1.6×10 <sup>6</sup> Ω	8.9×10 <sup>5</sup> Ω
900℃	2.2×10 <sup>5</sup> Ω	1.4×10 <sup>5</sup> Ω	5.3×10 <sup>5</sup> Ω	7.0×10 <sup>5</sup> Ω	1.6×10 <sup>5</sup> Ω	3.0×10 <sup>5</sup> Ω
1000℃	4.0×10 <sup>4</sup> Ω	1.5×10 <sup>4</sup> Ω	8.0×10 <sup>4</sup> Ω	8.1×10 <sup>4</sup> Ω	5.5×10 <sup>4</sup> Ω	2.5×10 <sup>4</sup> Ω
常温	4.0×10 <sup>11</sup> Ω	8.5×10 <sup>11</sup> Ω	3.0×10 <sup>11</sup> Ω	1.2×10 <sup>11</sup> Ω	5.5×10 <sup>11</sup> Ω	2.0×10 <sup>11</sup> Ω

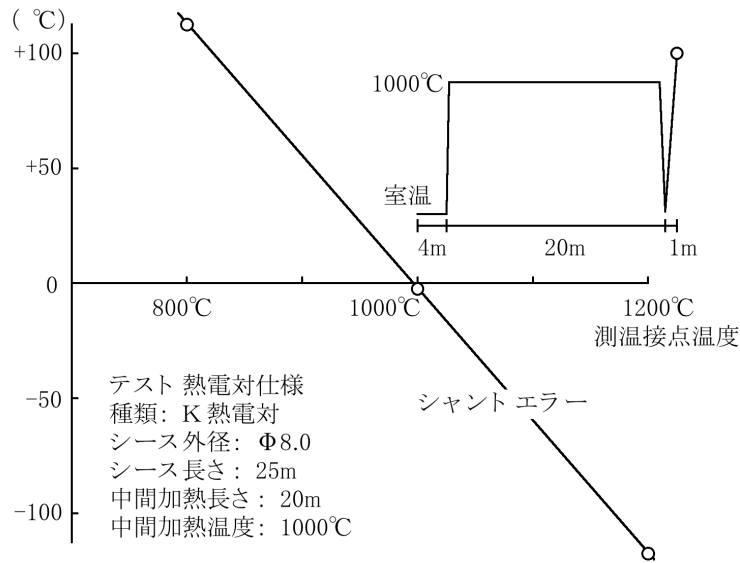


図 15 シャントエラーの例

(c) 正常劣化による寿命<sup>7)</sup>

熱電対材料は金属材料であり、高温酸化雰囲気中で長時間使用することで酸化が進行し、熱起電力の劣化が生じる。従って、JISでは素線の種類と外径により、清浄な酸化雰囲気における常用限度の温度と、連続使用時間における熱起電力変化の限界を規定している。これらはある程度の目安となるが、一般にこの温度より20°C程度上下するとその時間は半減または倍増すると言われている（アレニウスの法則）。さらに、温度サイクルが加わると酸化皮膜の薄利が促進されるためいっそう寿命は短くなる。K熱電対の通常の劣化状況を見ると、初期の短時間に熱起電力の若干の増加（ショートレンジオーダリングの影響もあると思われる）が見られ、時間の経過とともに低下する傾向がある。これはK熱電対の表面に生成されている酸化皮膜が僅かずつではあるがさらに酸化し、次第に合金表面部分のCr濃度が低下しクロメル線の熱起電力は+側に増加していく。

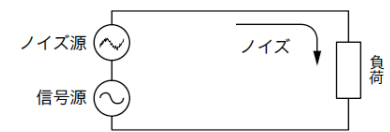
これらに関してはより高級な材料を使用する以外対策はないので、実際の測定の経験から適切な寿命予測をたて、定期的な交換を行う方法が良い。

(3) 外部からの電气的影響（ノイズ）

(3-1) 電気ノイズの種類

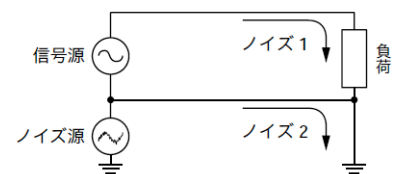
(a) ノーマルモードノイズ

入力端子間に現れるノイズで、直接測温に影響を与える。



(b) コモンモードノイズ

入力端子と大地間に現れるノイズで、測定に直接の影響はないが、何らかの要因で位相がずれるとノーマルモードノイズとなる。



(3-2) 電気ノイズの原因と対策

(a) 電磁誘導ノイズ

原因：電力線等により発生する磁界中を信号線が通ると電圧が誘起されノイズとなる。

対策：

- i) 対になっている信号線を撚り合わせる。

- ii) 信号線を高誘磁率材料（鉄・アルミ）で磁気シールドする。
- iii) 磁界の強度は距離に二乗に反比例するので、信号線を電力線から離す。

#### (b) 静電誘導ノイズ

原因：電力線と信号線が静電容量で結合していると、信号線に電圧が発生しノイズとなる。

対策：

- i) 銅シールドのある信号線を用いる。
- ii) 電力線から離す。
- iii) 信号線インピーダンスと負荷インピーダンスを小さくする。

#### (c) 抵抗結合ノイズ

原因：大地での漏れ電流が、信号回路と対地間絶縁抵抗の低下により信号線に流入する。コモンモードノイズと同様に働くため、各信号線の抵抗が異なることからノーマルモードノイズとなる。

対策：

- i) 高温で使用する熱電対は、絶縁抵抗の良好な材料を選定する。
- ii) 3線式熱電対を用い、一線を接地する。
- iii) 導電性の良い保護管を使用して回路をシールドし、一端を接地する。

#### (d) パルス性ノイズ

原因：サイリスタや電磁開閉器等では動作中にインパルス性の電圧が発生する。100V以上の電圧で数100kHz～数10MHzの高周波になり、信号回路に乗ると受信計器の誤動作の原因となる。

対策：

- i) 計器側の電源トランスに静電シールドを設ける。
- ii) 高周波防止に入力端子間にコンデンサを挿入する。

#### (3-3) 接地方式

温度センサを設置し外部と導線を接続する際、導線部へのノイズの影響を避けるためにシールドされた導線を用いてシールド線を接地させることがある。一般的には1点接地が推奨され、熱電対側で接地されていない場合は、計器側で接地する。

弊社の製品で標準的に導線にシールドの付いているものが付属している場合は、シース部が取付けの関係で接地することになるため、以下の2形式がある。現地にて温度センサとシールド付の外部導線を接続する際も同様な方法で施工することを推奨する。

A) 導線端末にアース線が引き出されていない場合、シースとシールドを導通させ、シース側で接地

B) 導線端末にアース線としてリード線が引き出されている場合は、通常計器側にて接地するため、2点接地とならないようシースとシールドは絶縁。

また、接地形の熱電対の場合には先端が接地されるので、補償導線側のシールドを計器側で接地させると2点接地となる。図17に示したように、シールドは熱電対の接地と同一箇所を接地させる方法を推奨する。

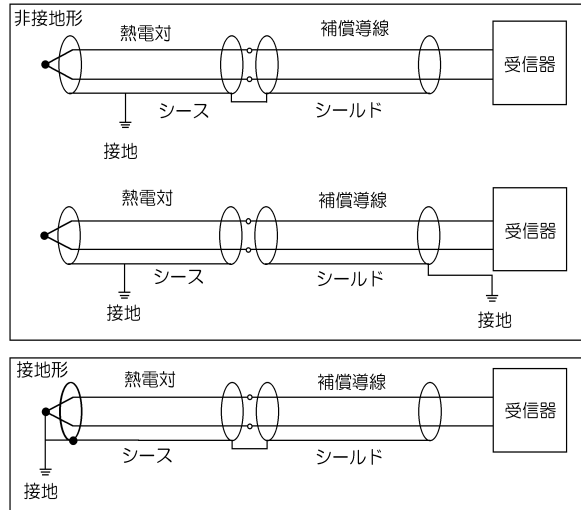


図17 接地方式

(4) 絶縁抵抗低下による影響

熱電対の健全性を簡便に評価する際に、一般的に導通があることと絶縁抵抗が高いことを目安とする場合が多い。製品出荷の場合も受け渡し検査として、JIS C1602/1605 に規定があるのは熱起電力特性と絶縁抵抗である。現在のJISはIEC規格に整合されたため、出荷時の絶縁抵抗値はかなり高く規定され、100MΩ/500VDCとなっている。それ以前の日本独自の規格であった頃は、5MΩ/500VDCであった。この変更には性能的には根拠はなく、IEC規格にならって値を合わせただけであり、絶縁抵抗がここまで高くなければならない理由は全く明示されていないが、ほとんどの場合、この数値のみで性能の良否を判断している。

ところが、実際の運用面をみると長期間の使用で絶縁抵抗が低下したにもかかわらず、正常に温度計測ができていた例が多い。そこで、実験と計算により影響を調査した。

(a) 実験結果

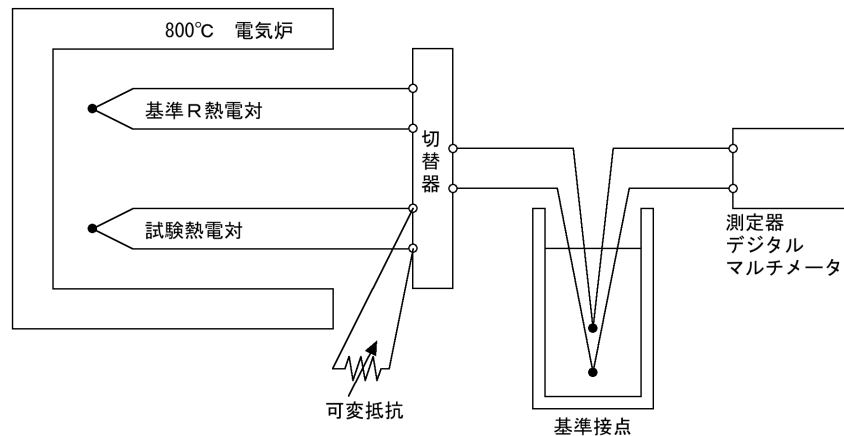


図18 熱電対の絶縁抵抗低下による影響

表12 熱電対の絶縁抵抗低下と誤差

絶縁抵抗	実測誤差 (°C)	相対誤差 (°C)
200MΩ	1.84	0
100kΩ	0.9	-0.94
50 kΩ	0.05	-1.79
1 kΩ	-1.58	-3.42
500 Ω	-1.25	-3.09
50 Ω	-24	-25.84
5 Ω	-179	-180.84

備考：上記のデータのうち、200MΩと100kΩのものは実製品を吸湿させて、600℃で試験したものであるが、そのまま引用した。

(b) 計算結果

表13 熱電対の絶縁抵抗と誤差（近似計算）

計器の内部抵抗 r3	絶縁抵抗 r2	合成抵抗 R	r1 (Ω)	800℃でのEA (mV)	E0 (mV)	誤差 (mV)	誤差 (℃)
100MΩ	200MΩ	66.67MΩ	4	33.28	33.27	0.00	0.00
100MΩ	100kΩ	99.9kΩ	4	33.28	33.27	0.00	0.03
100MΩ	50kΩ	49.98kΩ	4	33.28	33.27	0.00	0.06
100MΩ	1kΩ	999.99Ω	4	33.28	33.14	0.13	3.19
100MΩ	500Ω	499.998Ω	4	33.28	33.01	0.26	6.35
100MΩ	50Ω	49.99998Ω	4	33.28	30.81	2.46	59.26
100MΩ	5Ω	4.9999998Ω	4	33.28	18.49	14.79	355.56

(c) 結論

実験結果と理論の計算結果は、数値としてはかなり異なるが、傾向としてどちらもほぼ同様な結果が得られた。すなわち、絶縁抵抗は50kΩ程度あれば性能に悪影響は与えない。また、1kΩ程度の場合で、JISクラス1と同等の誤差である。従って、実際に使用する現場での経験則はほぼ正しいものといえ、JIS規定の抵抗値以下に絶縁抵抗が低下しても、正確な温度計測は可能であるといえる。

但し、温度計測上、問題のない程度の絶縁抵抗低下でも、時間の経過とともにさらに低下する恐れはある。従って、絶縁抵抗が1MΩを下回るような場合は、早めの交換を推奨する。

7-2. 測温抵抗体の問題点

(1) 雰囲気ガスの影響

測温抵抗体は素線が白金系の合金であるため、高温においては雰囲気ガスの影響を受けやすくなる。特にシース形測温抵抗体を使用する場合、高温においてはシース等から発生する金属蒸気の影響で、白金線の特性が変化し、抵抗値に影響があることが明らかになっている。そのため、JISではシース形測温抵抗体の使用上限温度を500℃に押さえている。そのため、高温で測温抵抗体を用いる場合は、金属保護管ではなくアルミナや石英ガラスのような非金属保護管を採用することが望ましい。

(2) 温度による影響

前項にも記したように、白金測温抵抗体は素線の金属学的な特性から、高温においては他の原子の影響で特性が変化する。ほとんどが化学的変化によるものといえる。ところが、極低温領域においては、その物理的特性から抵抗値変化が生じなくなり、温度計としては機能しにくくなる。そのため、-200℃以下の領域を白金測温抵抗体で計測する場合は、基準抵抗値を高いものにして、抵抗の変化値を大きくすることで計測できるようにしている。当社で、H2ロケット用に開発した温度センサは液体水素の温度まで計測できるようにしている。当社で、H2ロケット用に開発した温度センサは液体水素の温度まで計測できるようにしている。当社で、H2ロケット用に開発した温度センサは液体水素の温度まで計測できるようにしている。当社で、H2ロケット用に開発した温度センサは液体水素の温度まで計測できるようにしている。

(3) 機械的強度

測温抵抗体は白金の細い線を抵抗素子の内部に巻き、抵抗変化を温度としてとらえている。そのため、構造は基本的に脆弱であり、機械的な強度は熱電対と比較して格段に落ちる。以前はマイカ板のような絶縁体

に白金線を手で巻いて素子を作り、両側にステンレスの薄い板でバネ取り付けて保護したものを、金属のパイプの中に入れて使用していた。これは、近年になって改良され現在一般的に多く使用されているシース形測温抵抗体が主流となっている。このシース形測温抵抗体は元々は当社が開発したものであったが、同様な形式の製品が世界に広まっている。

当初の構造はシースの先端に素子を取り付け、保護パイプを被せた形状であったが、機械的強度が弱いという欠点を克服するため、最近では別の形状のものを製造しはじめている。この構造は図9に示したものと異なり、図17に示すように、シースの中心部にキリ穴を開け、その部分に抵抗素子を埋め込み、先端側で導線と抵抗線を溶接で接続する構造である。この構造の採用によりシース内部での可動部分がほとんど無くなり、素子先端部に極端な衝撃や曲げを与えない限り、容易には断線等の事故には至らなくなる。

但し、この構造を採用できるものはシース外径φ4.8以上でシングルエレメントのみである。それ以外のもは従来通りの構造となる。

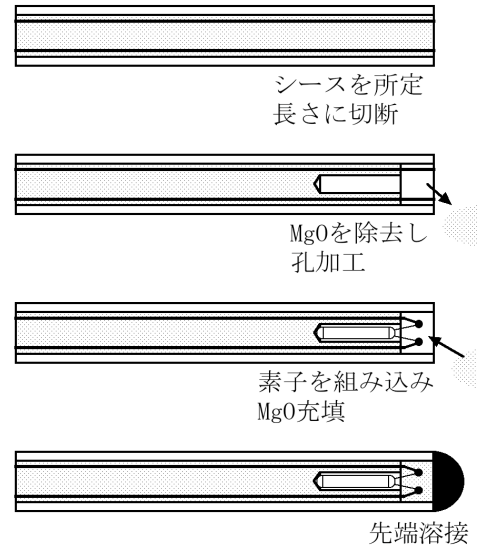


図 19 逆挿入方式

(4) 絶縁抵抗低下時の誤差

絶縁劣化は諸種の原因により生じる。次に事例を挙げてみる。高温に於いては、一般に測温抵抗体の電気的絶縁材として使われている無機物は物性上、温度上昇とともに絶縁特性が著しい低下を示す。シース測温抵抗体での絶縁抵抗の低下による誤差は次の簡便な式で計算出来る。

$$\Delta T = R^2 / \{ (R_s + R) \cdot (\Delta R / \Delta t) \} \text{ ----- (1)}$$

ここで

- $\Delta T$  : 測定誤差 (°C)
- R : 抵抗素子の抵抗値 (Ω)
- $R_s$  : 抵抗素子とシース間絶縁抵抗値 (Ω)
- $\Delta R / \Delta t$  : 抵抗素子の 1°Cあたりの抵抗変化 (Ω/°C)

計算結果の例

$R_s$ (MΩ)	$R_s$ (Ω)	R (Ω)	誤差 (°C)
1	1,000,000	138.5	0.048
0.5	500,000	138.5	0.096
0.1	100,000	138.5	0.479
0.05	50,000	138.5	0.956
0.025	25,000	138.5	1.908
0.01	10,000	138.5	4.730

絶縁抵抗が500kΩの時、約0.1°C程度の誤差となるため、数百kΩ程度有れば大きな誤差にはならない。

**参考文献**

- 1) MANUAL ON THE USE OF THERMOCOUPLES IN TEMPERATURE MEASUREMENT ASTM STP 470B (1981)
- 2) (社)計測自動制御学会 温度計測部会編：新編温度計測 2.1.2 (1992)
- 3) 河野 充：日本金属学会会報 第14巻 第12号 熱電対材料とその金属学的諸問題(1975)
- 4) 吉田 武知代：化学工学 第41巻 第8号 クロメル-アルメル熱電対の不可避誤差と対策(1977)
- 5) N.A.Burley：Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry vol.5, part2, Instrument Society of America (1982)
- 6) (社)計測自動制御学会 温度計測部会編：新編温度計測 2.8.2 (1992)
- 7) 河野 充：計装 5月号 熱電対の劣化とその対策(1977)
- 8) 川口千代二、荒 克之 (株)幸書房発行 原子炉の計測 (1978)
- 9) 日本工業出版 温度計測の実務編纂委員会編 温度計測の実務 (1976)
- 10) A.W.Fenton：The travelling gradient approach to thermocouple research, Temperature Vol.4 -1972