

高精度温度計測と 要求される温度センサ

田澤R&D技術士事務所

ATN会員

田澤勇夫



温度計測における高精度とは

1 mKでも高精度とは言わない分野もある
(温度目盛・標準定点等の研究をしている技術者)

1 μmKでも高精度と言う分野もある

今回は対象となる分野を考慮して
数十mK(0.01 ~ 0.05)を高精度とする



目次

1. 高精度温度計測に要求される温度センサ
2. 高精度温度計測のためのアルゴリズム設計
3. 高精度温度計測のための計測理論=アナログ



1 - 1 温度センサ・温度計の分類

主な温度センサ、温度計

熱膨張式センサ

(アルコール、水銀、バイメタル)

熱電対

(ゼーベック効果利用)

サーミスタ

(PTC,NTC)

金属測温抵抗体

(白金、ニッケル、銅)

IC温度センサ

赤外線温度センサ

(サーモパイル、焦電型)

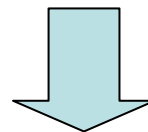
水晶温度計

超音波温度計

NQR温度計

熱雑音温度計

- ・腐食性が優れ、経時変化が非常に小さい
- ・ヒステリシス効果がない。
- ・温度以外の他の条件(圧力、湿度など)で変化しない。
- ・温度変化率が大きいこと。
- ・国際温度目盛(ITS-90)で-259.3467 から961.78 の範囲で標準温度計として採用されている。

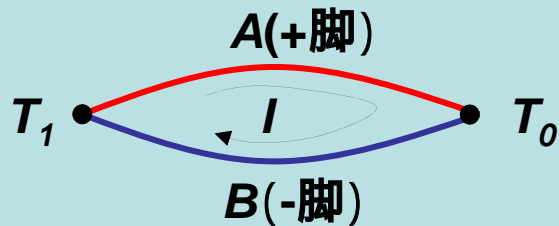


**高精度温度計測には
白金測温抵抗体が適している**



1 - 2 熱電対温度センサ

熱電対温度センサはゼーベック(T.J.Seebeck)効果による熱起電力を利用している



T_1 : 測温接点 T_0 : 基準接点

2種の異なる金属の両端を接合し、2接点を異なる温度にたもつとき、回路に起電力を熱起電力 V_E (Thermoelectromotive force) という。

相対ゼーベック係数

$$\alpha_{AB} = dV_{E(AB)}/dT = a + bT + \dots$$

であるので、熱起電力 $V_{E(AB)}$ は

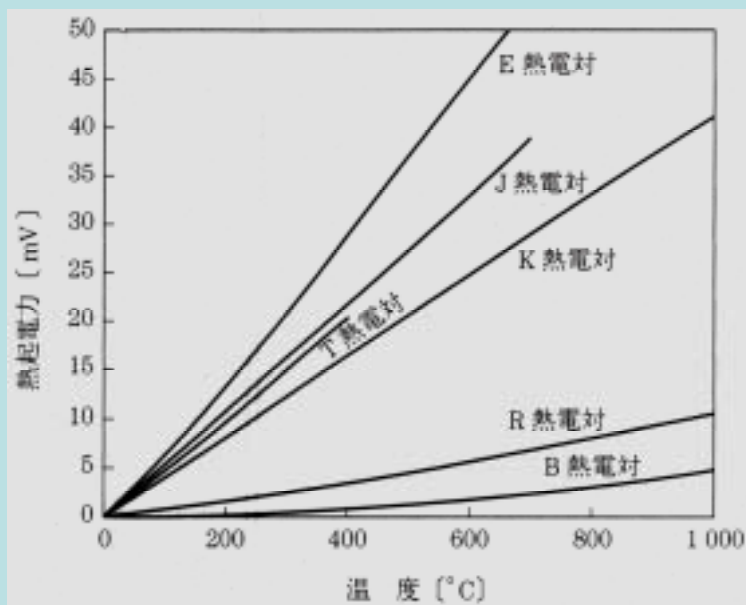
$$V_{E(AB)} = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_{AB} = a'(T_0 - T_1) + b'(T_0 - T_1)^2 + \dots$$



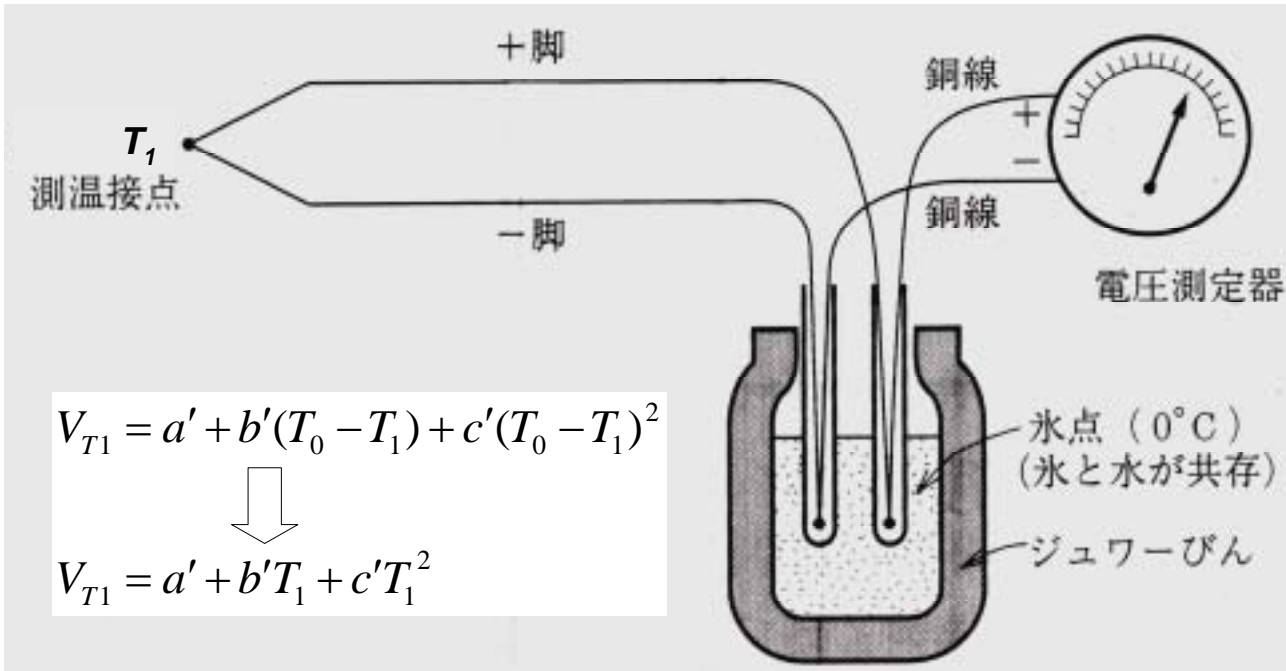
分類	種類の記号	熱電対の構成材料		使用温度範囲 ($^{\circ}\text{C}$) *2	許容差 [%]
		+ 昇	- 昇		
貴金属熱電対	B	Pt 30% Rh 合金	Pt 6% Rh 合金	600 ~ 1700	$\pm 0.25, 0.5$
	R	Pt 13% Rh 合金	白金	0 ~ 1600	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
	S	Pt 10% Rh 合金	白金		± 0.25
卑金属熱電対	N	Ni, Cr, Si を主とした合金	Ni, Si を主とした合金	-200 ~ 1200	$\pm 0.4, 0.75, 1.5$
	K	クロメル *1	アルメル *1		
	E	クロメル	コンスタンタン *1	-200 ~ 900	
	J	鉄	コンスタンタン	-40 ~ 750	$\pm 0.4, 0.75$
	T	銅	コンスタンタン	-200 ~ 350	$\pm 0.4, 0.75, 1.5$

*1: いずれの合金も商品名であるが、一般に広く使われている。クロメルは Ni, Cr を主とした合金、アルメルは Ni を主とした合金、コンスタンタンは Cu, Ni を主とした合金である。

*2: 使用温度範囲は熱電対の線径によっても異なる。



熱電対による温度測定の基本構成



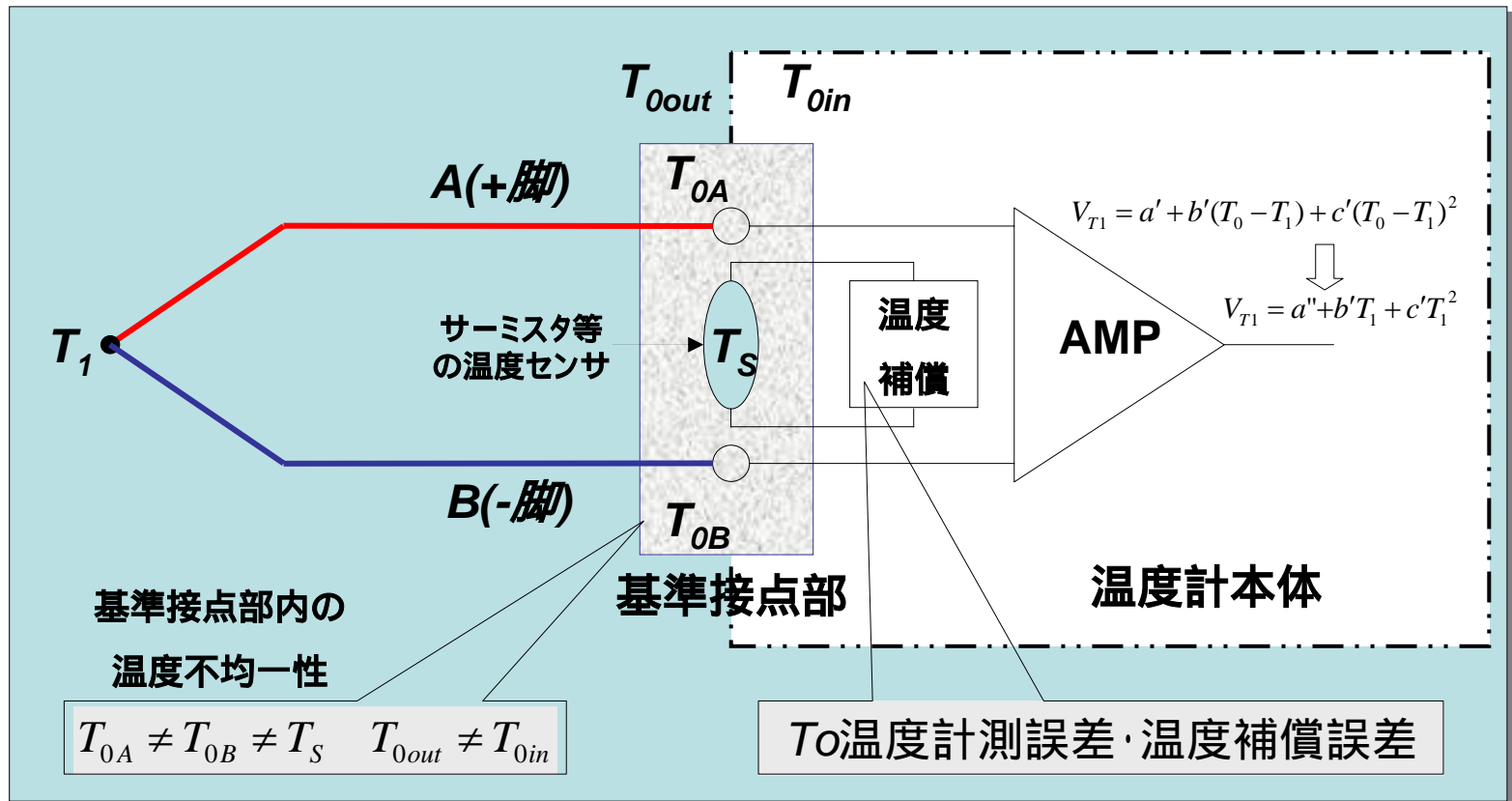
$$V_{T_1} = a' + b'(T_0 - T_1) + c'(T_0 - T_1)^2$$



$$V_{T_1} = a' + b'T_1 + c'T_1^2$$

基準接点 T_0 冷接点

実用的な温度計測システム



最も理想的条件が成立したとしても、 T_0 温度計測精度以上にはならない

高精度温度計測における熱電対の欠点

- 出力電圧が小さいため(0.4 μ V/0.01 :K熱電対)ノイズの影響が大きい
- 基準接点の温度計測誤差・補正誤差
- 熱履歴による不均質性の増大
- 経年変化



高精度計測のための最大の問題点は基準接点の
温度測定誤差・補正誤差

利点

- 熱容量小
- 自己加熱の問題がない
- 安価



1 - 3 サーミスタ温度センサ

サーミスタは半導体感温抵抗体でMn, Co, Ni, Fe等の2種類以上の遷移金属酸化物の複合焼結体

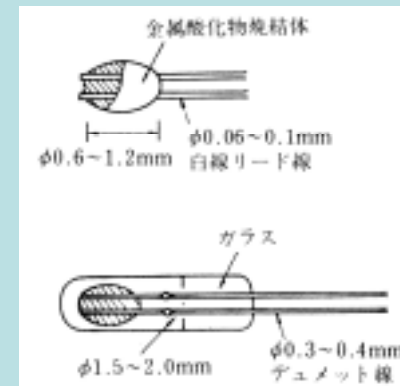
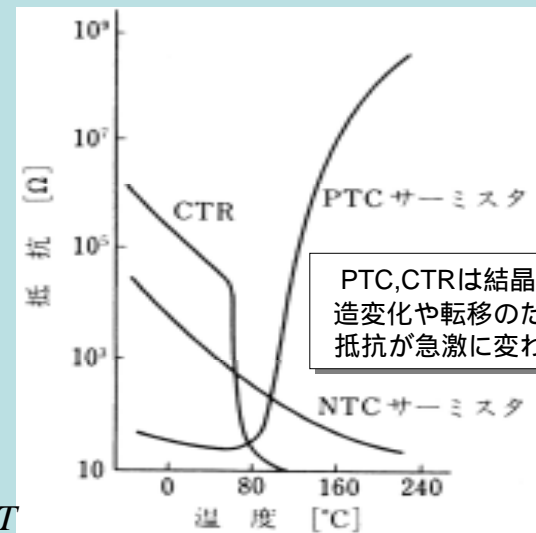
サーミスタにはNTC, PTC, CTRがあるが、通常、温度センサにはNTCが用いられる。

半導体抵抗率は $\rho = \frac{1}{en\mu}$

抵抗率の温度係数は $\alpha = (d\rho/\rho)/dT = -(dn/n)/dT - (d\mu/\mu)/dT$

であるので、キャリア密度 n や移動度 μ が温度により大きく変化し、抵抗値は $R = R_0 \exp(B/T)$

サーミスタ温度センサは2本の白金線上にNTCをビート状に焼結したもので、そのままでは機械的、熱的に不安定でありガラスで被覆することもある



高精度温度計測におけるサーミスタの欠点

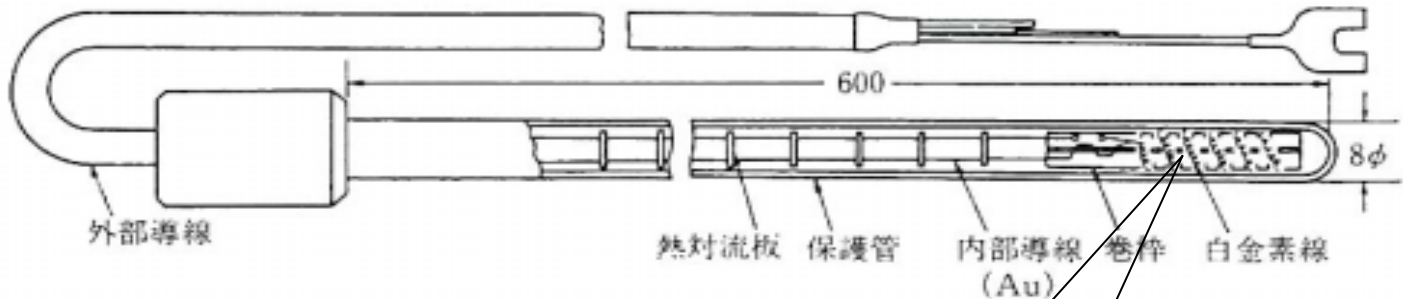
- 自己加熱 $R I^2$
- 非線形特性
- 経年変化

ある程度の広い温度範囲において所要の精度で抵抗-温度の関係を確立するのは困難

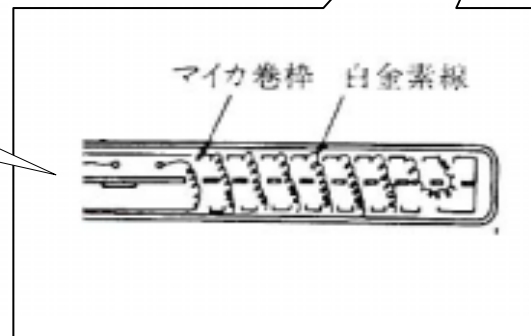
利点

- 安価
- 抵抗変化率大
- 小型

1 - 4 白金測温抵抗体温度センサ



一種の巻き線抵抗



白金測温度抵抗体の物性理論

各金属には固有の抵抗、その温度係数を持ち、基本的には物性論(固体電子論)により説明できる

オームの法則により金属の抵抗率 は

$$\rho = \frac{m}{ne^2 \tau}$$

m : 電子質量、 n : 自由電子数
 e : 電子の電荷値、 τ : 平均自由時間

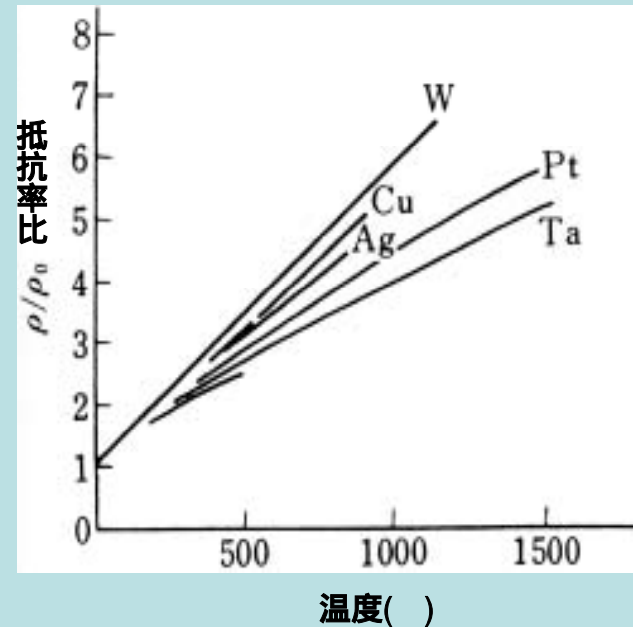
金属中の格子は熱振動しており、非調和振動であるとすると、その変位 x の平均の2乗は

また、 $\frac{1}{\tau} \propto \bar{x}^2$ であるので

よって、

$$R = R_0 + A \cdot t + B \cdot t^2$$

R_0 : 0 における抵抗値、 A : 温度係数
 $t = T - 273.15$: ケルビン温度



金属抵抗の温度特性



白金測温抵抗体の種類 (JIS規定に基づく)

記号	R100/R0	階級	規定電流	使用温度区分	結線方式
Pt100	1.3850	A級	0.5mA	L -200 ~ 100	2線式
		B級	1mA	M 0 ~ 350	3線式
			2mA	H 0 ~ 650	4線式
JPt100	1.3916	A級	0.5mA	L -200 ~ 100	2線式
		B級	1mA	M 0 ~ 350	3線式
			2mA	H 0 ~ 500	4線式



高精度計測のためには

校正済 1mA以下

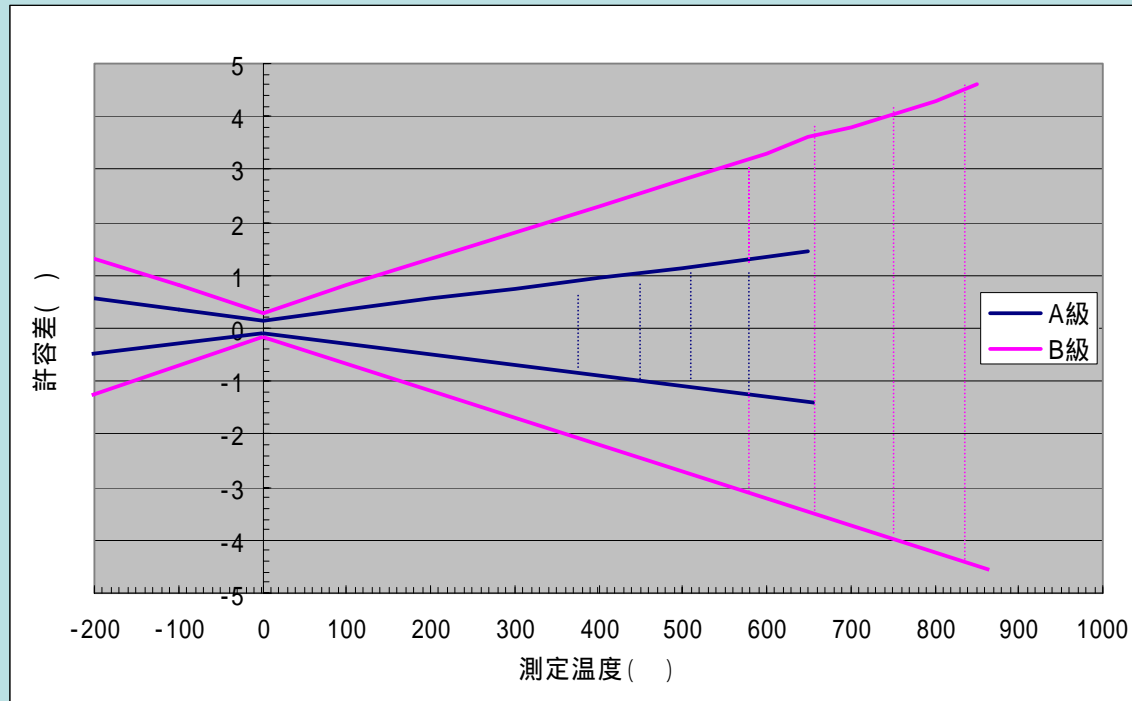
4線式



階級 - 白金測温抵抗体の許容差 (JIS規定)

測定温度 ()	許容差			
	A級		B級	
-200	± 0.55	± 0.24	± 1.3	± 0.56
-100	± 0.35	± 0.14	± 0.8	± 0.32
0	± 0.15	± 0.06	± 0.3	± 0.12
100	± 0.35	± 0.13	± 0.8	± 0.30
200	± 0.55	± 0.20	± 1.3	± 0.48
300	± 0.75	± 0.27	± 1.8	± 0.64
400	± 0.95	± 0.33	± 2.3	± 0.79
500	± 1.15	± 0.38	± 2.8	± 0.93
600	± 1.35	± 0.43	± 3.3	± 1.06
650	± 1.45	± 0.46	± 3.6	± 1.13
700			± 3.8	± 1.17
800			± 4.3	± 1.28
850			± 4.6	± 1.34

許容差: 標準特性に対するばらつき (誤差ではない)
 標準特性しか入力されていない機器では (許容差) = (誤差)



白金測温抵抗体特性のばらつきに対する校正

$$R = R_0 + at + bt^2$$

$$R = \underline{R_0} \left\{ 1 + \underline{\alpha} \left[t + \underline{\delta} \left(\frac{t}{100} \right) \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \right] \right\} \quad \text{C} \cdot \text{V} \cdot \text{D} \text{ 式}$$

個々のセンサ特性は R_{01} 、 R_{02} で示される

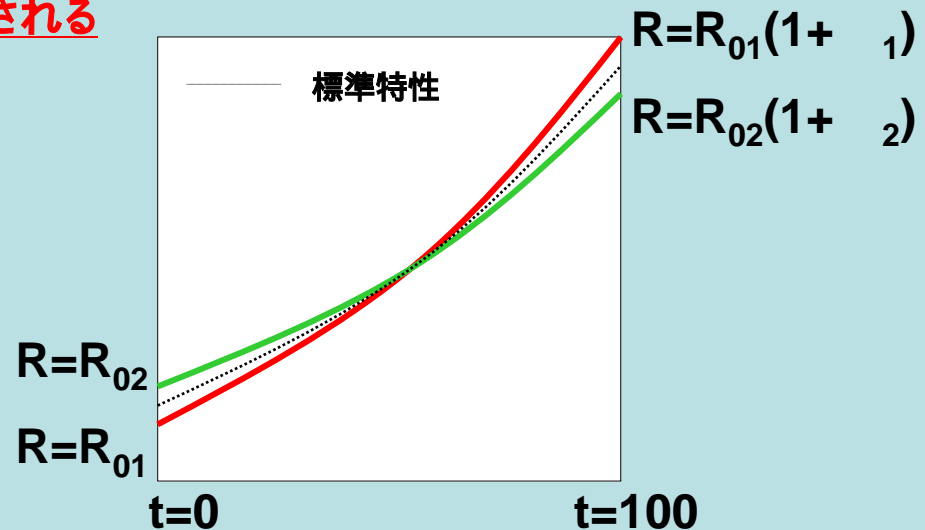
$t=0$ の場合

$$R = R_0 (\text{標準値 } 100)$$

$t=100$ の場合

$$R = R_0 (1 + \alpha) (\text{標準値 } 138.5)$$

$$\alpha = 0.385$$



各センサに対応した定数 R_{01} 、 R_{02} で校正可能な計測システムにより高精度計測が実現可能となる



白金測温抵抗体の特徴

- 高精度 (標準温度計に用いられる)
- 安定性が高い
- 高価
- 強磁場の影響を受け易い
- 自己加熱がある (熱電対有利)
- 一般に形状が大きく熱容量が大きい
(応答速度が遅い:
熱電対・サーミスタが有利)



1 - 5 トランジスタ温度センサ

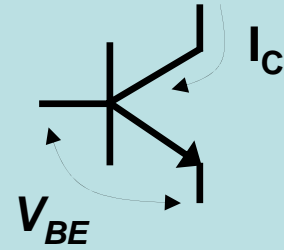
トランジスタの特性(電圧 V_{BE} -電流 I_C)の関係は

$$I_C = (\alpha T^\gamma) \exp(-qV_{go}/kT) \{ \exp(qV_{BE}/kT) - 1 \}$$

温度 T が低く $V_{BE}/kT \gg 1$ である場合

$$I_C / \alpha T^\lambda \approx \exp\left(q \frac{V_{BE} - V_{go}}{kT}\right)$$

$$V_{BE} \approx V_{go} + (kT/q) \ln\left(I_C / \alpha T^\gamma\right)$$



IC温度センサ

$$I_C / \alpha T^\lambda \approx \exp\left(q \frac{V_{BE} - V_{go}}{kT}\right)$$

$$V_{BE} \approx V_{go} + (kT/q) \ln\left(I_C / \alpha T^\lambda\right)$$

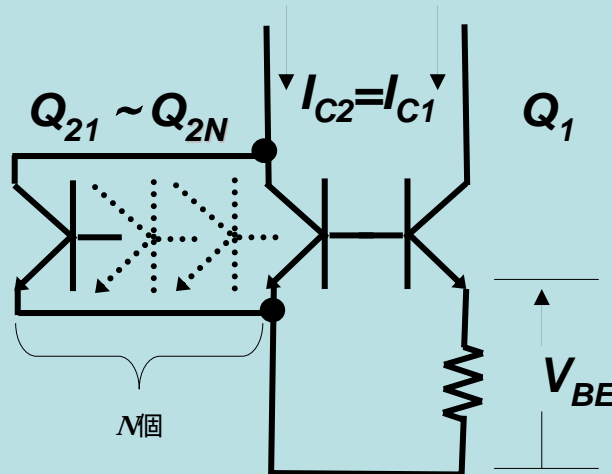
$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2}$$

$$\approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}}\right)$$

$$\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}/N}\right)$$

$$\therefore I_{C1} = I_{C2}$$

$$\Delta V_{BE} = \frac{k \ln N}{q} T$$



温度範囲 $0 \sim 60$ で精度 $0.5 \sim 2$

非直線性誤差 ± 0.03

各社のIC温度センサの主要スペック

型 式	温度範囲	精度	出 力	パッケージ
LM20B	-55 ~ +130	± 2.5	-11.7mV/	SC-70
LM20C	-55 ~ +130	± 5.0	-11.7mV/	SC-70
LM35A	-55 ~ +150	± 1.0	+10mV/	TO-46
LM35CA	-40 ~ +110	± 0.5	+10mV/	TO-92
LM135	-55 ~ +150	± 2.0	+10mV/	TO-46
LM235	-40 ~ +125	± 2.0	+10mV/	TO-46
AD590	-55 ~ +150	± 5.0	+1 μ A/	TO-52
AD592AN	-25 ~ +105	± 2.5	+1 μ A/	TO-92
AD592CN	-25 ~ +105	± 0.5	+1 μ A/	TO-92
S-8110C	-40 ~ +100	± 5.0	-8.2mv/	SC-82
S-8120C	-40 ~ +100	± 2.5	-8.2mv/	SC-82
SM6610	-40 ~ +100	± 5.0	-10.7mV/	SC-82
SM6610	-40 ~ +100	± 2.5	-10.7mV/	SC-82



高精度温度計測におけるIC温度センサの欠点

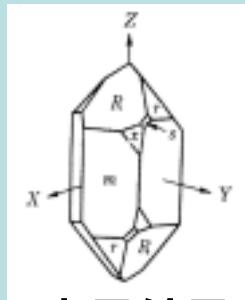
- ・ 既存のIC温度センサの最高精度は0.5 程度
- ・ ICのパッケージは熱容量大
- ・ 比較的高価

利点

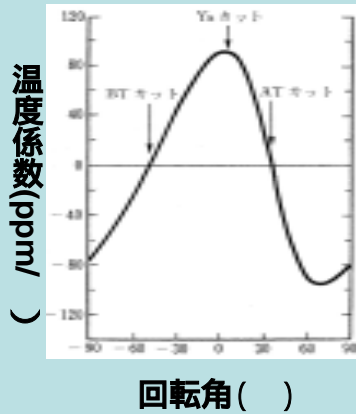
- ・ 比較的直線性が良い
- ・ 直線性の良いアナログ信号が直接出力



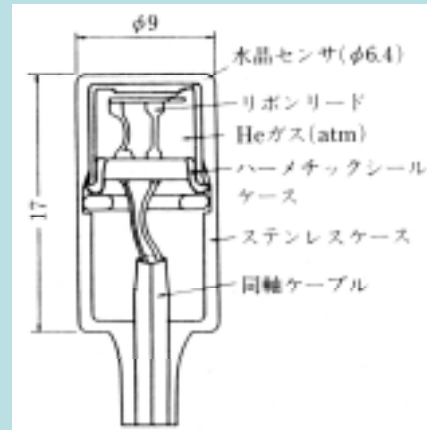
1 - 6 水晶温度計



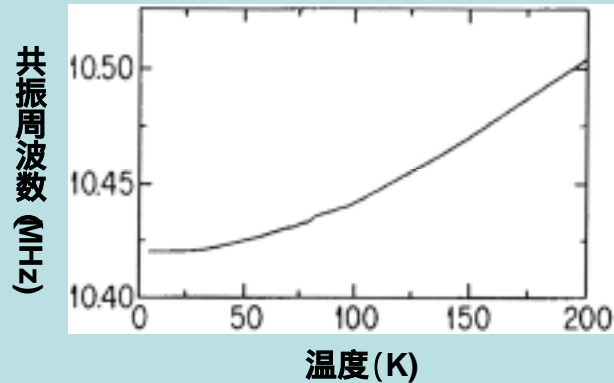
水晶結晶



結晶の切り出し角 により
温度係数が大きく変わる



水晶温度センサの構造



水晶温度センサの特性



高精度温度計測における水晶温度センサの欠点

- 共振周波数が水晶自身の特性以外に水晶を支持する構造にも影響を受けるため、経時ドリフトが大きい、歩留まりが悪い。
- 高分解能の特性を生かせない
- 熱容量が大きい

利点

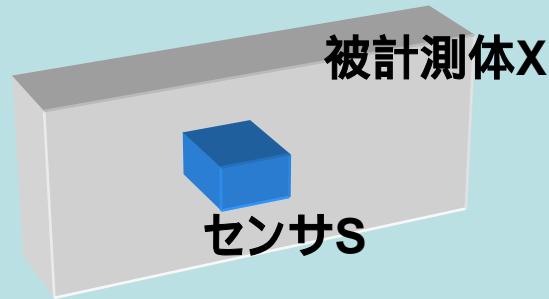
- 磁場の影響を受けない
- コードレスシステムに適している



1-7. 温度計測での重要な物理的ファクタ

- 熱容量
- 熱接触
- 熱伝導
- 熱平衡
- 熱抵抗
- 自己加熱
- 熱放散

温度計測の基本：熱接触



熱平衡にある被計測体XにセンサSを熱接触させ、
物体XとSが等温度になるようにする。

ポイント

十分に熱接触させ、XとSからなる系が熱平衡の状態
にあること。

Xの熱容量に比べ、Sのそれが著しく小さいこと。

比熱・熱容量

	比熱(J/K・Kg)
金	0.1257×10^3
アルミ	0.883×10^3
ガラス	$0.6 \sim 0.9 \times 10^3$
水	4.1816×10^3
空気	1.006×10^3

比熱：1 kgの物質の温度を1 上げる
ために必要な熱量

熱容量：或る物質の温度を1 上げる
ために必要な熱量

$$(\text{熱容量}) = (\text{比熱}) * (\text{質量})$$

単位体積当りの熱容量

比熱*比重

金	2.43×10^3
アルミ	2.38×10^3
ガラス	$1.3 \sim 5.7 \times 10^3$
水	4.18×10^3
空気	0.001×10^3

比重(水1 ~ 1kg/1L)

金	19.3
アルミ	2.7
ガラス	2.2 ~ 6.3
水	1
空気	0.001

気体の温度を正確に測るには熱容量の小さいセンサが好ましい

熱容量の大きいセンサでは温度変化する空気の温度を正確に捉えられない



熱伝導率・熱抵抗

熱伝導率(J/m・S・K)

金

$2.97 \cdot 10^{-2}$

アルミ

$1.13 \cdot 10^{-2}$

ガラス

$6.3 \sim 10.5 \cdot 10^{-5}$

水

$5.82 \cdot 10^{-5}$

空気

$0.24 \cdot 10^{-5}$

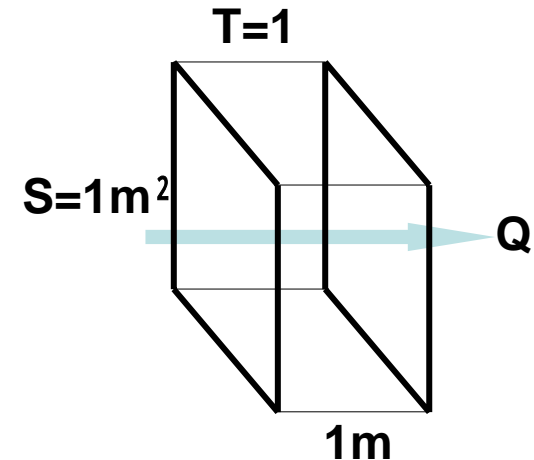


均一な液体・気体環境を得るには十分に
攪拌する必要あり。

熱伝導率：

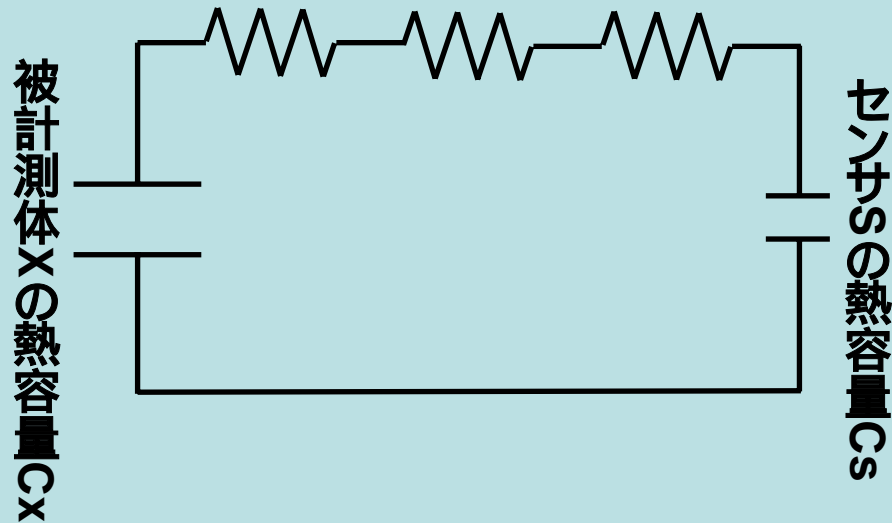
1mの間隔に1 の温度差がある
場合、 1 m^2 の面積を通じて流れ込
む熱量

$$(\text{熱抵抗率}) = 1/(\text{熱伝導率})$$

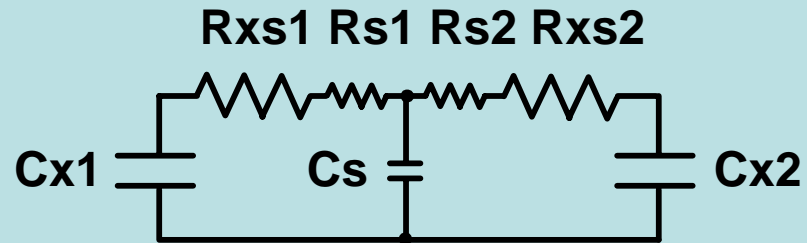
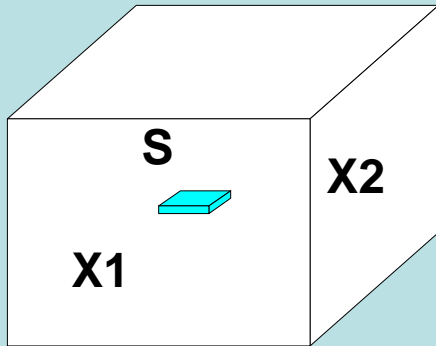


熱現象の電気的モデル

Xの熱抵抗 R_x 熱接触抵抗 R_{xs} Sの熱抵抗 R_s



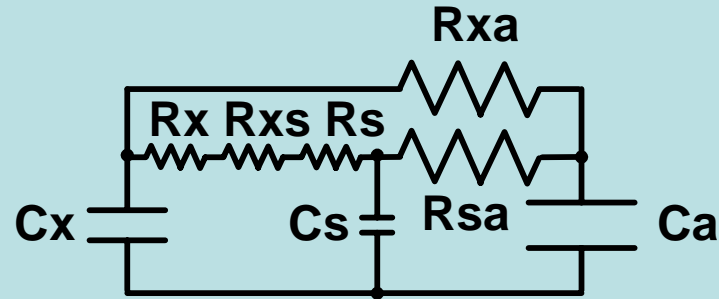
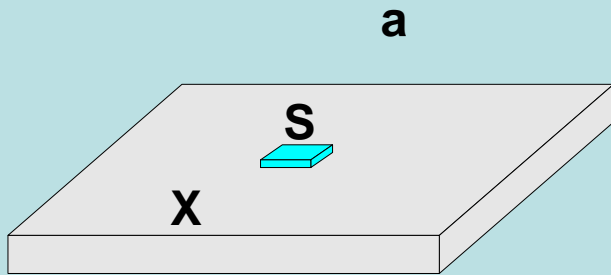
空気中の温度計測



- ・風速を大きく熱交換を十分に
- ・センサの応答性を高く

R_{xs} を小さく
 C_s を小さく

表面温度計測



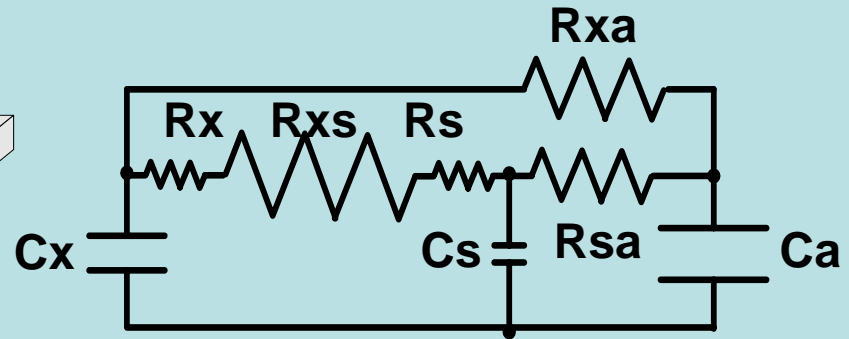
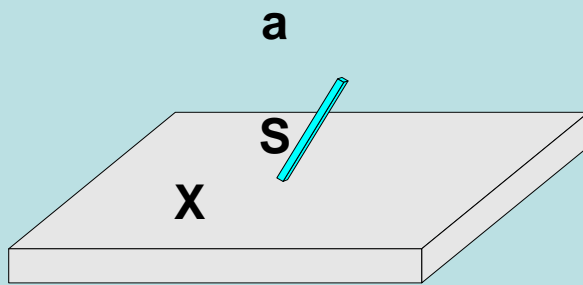
- ・被計測体XとセンサSの熱接触を十分に
- ・Xを大きくSを小さく
- ・空気の流れが小さいほうが良い
- ・ T_x と T_a の差が大きいほど誤差が大きい

R_{xs} を小さく

$C_x \gg C_s$

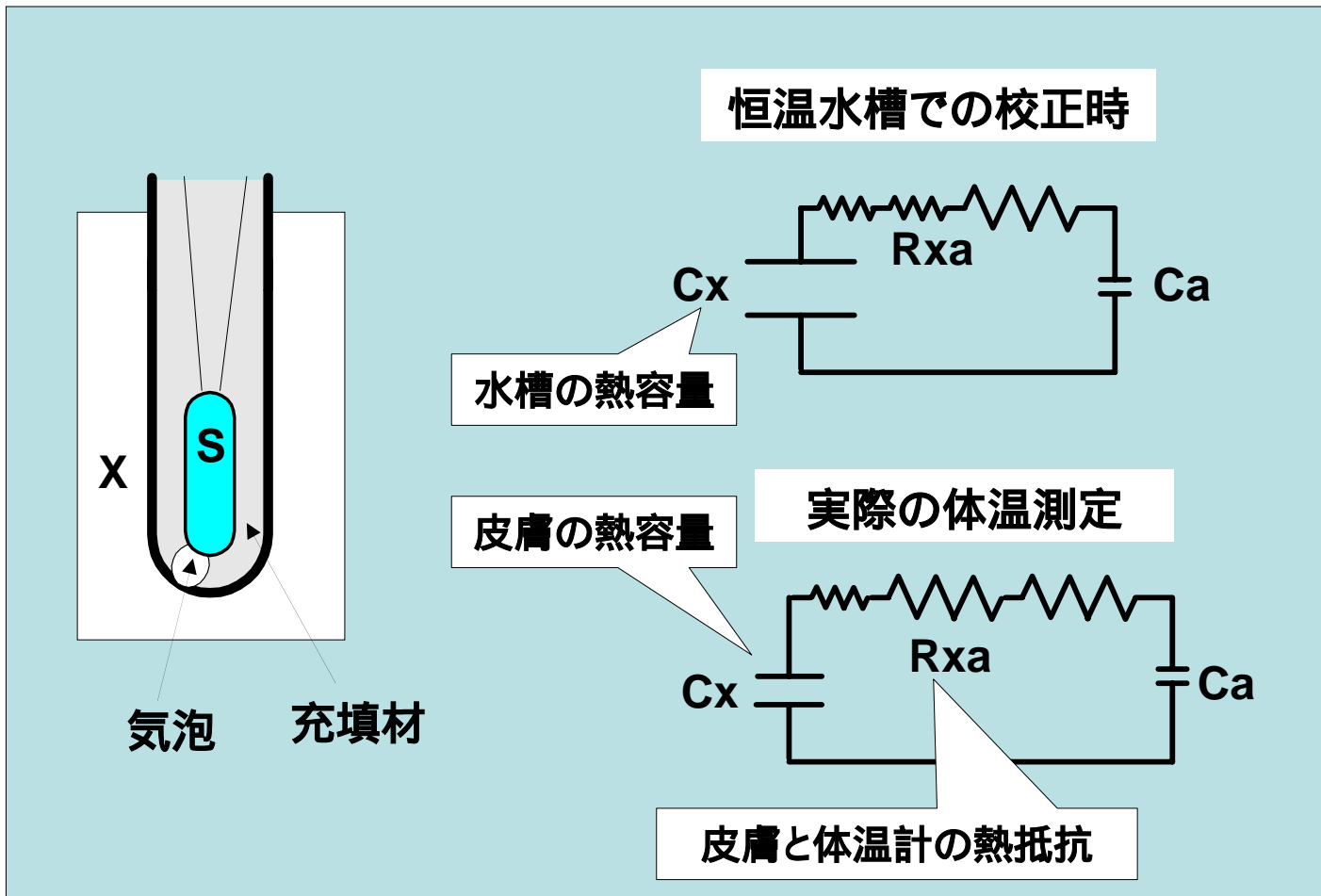
R_{xa}, R_{sa} を大きく

誤った表面温度計測

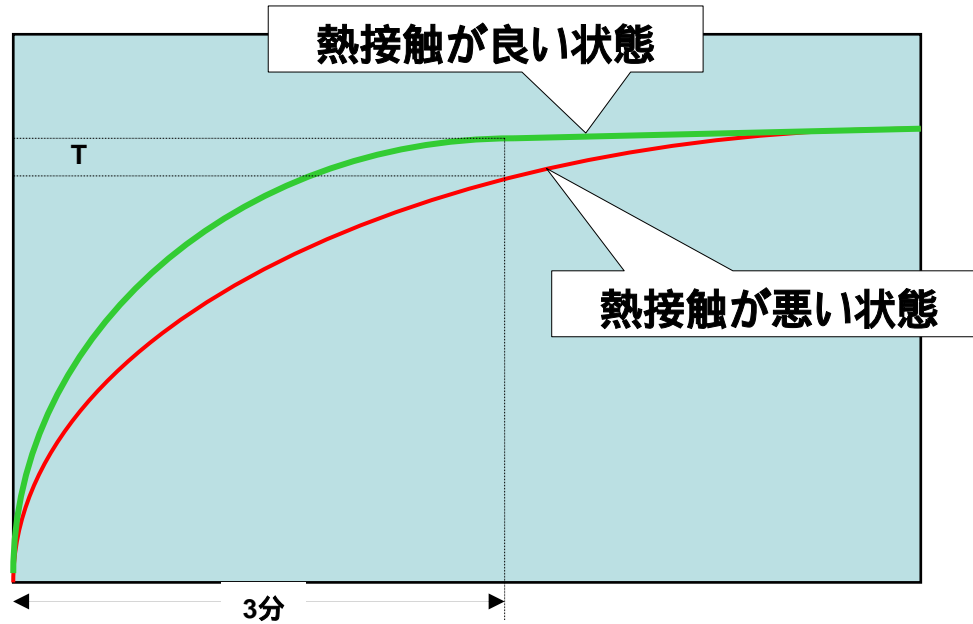


- ・被計測体XとセンサSの熱接触が不十分 R_{xs} が大きく
- ・周辺空気の温度の影響大 $R_{xs} > R_{sa}$

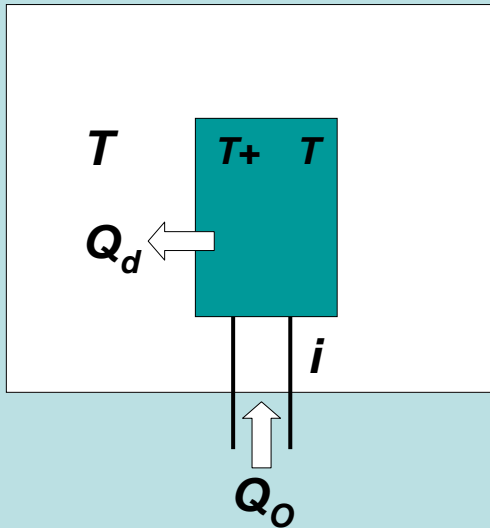
体温計開発での思わぬ落とし穴



熱抵抗増大による熱応答の遅れ



温度センサの自己加熱



温度センサの電流によりジュール熱が生じ、センサ温度が周辺温度より上昇する。

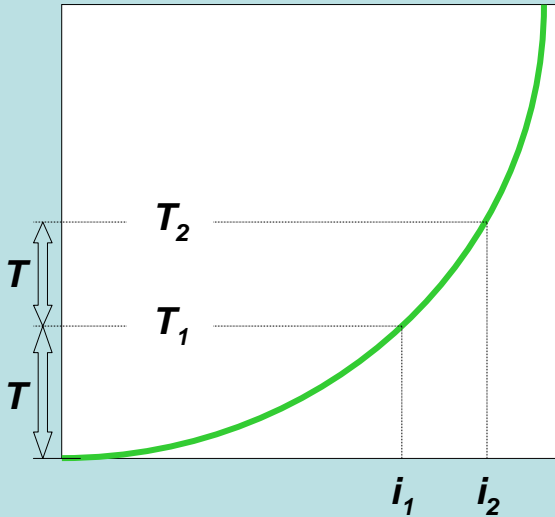
センサ温度が1 上昇するに必要な電力を熱放散定数と言う。

$$K = Q_o / T$$

熱放散定数例

サーミスタA	サーミスタB	白金薄膜
3mW/	2mW/	2.4mW/

自己加熱に対する補正



$$\delta T = \Delta T \frac{i_1^2}{i_2^2 - i_1^2}$$

δT : 電流 i_1 時の自己加熱による温度上昇
 ΔT : 2点の電流 i_1, i_2 での温度指示値の差

$i_1 = 1\text{mA}$ $i_2 = \sqrt{2}\text{mA}$ とすると

$$\delta T = \Delta T$$

温度センサの選定・設置方法でのポイント

- 校正された白金測温抵抗体を用いる
- **熱容量の小さいセンサを選定する**
- 熱接触は十分に考慮する
- 応答速度－熱平衡の関係を考慮する
- 自己加熱による影響を考慮する

2. 高精度温度計測のためのアルゴリズム設計

アナログ回路での演算処理ではなくソフトウェア
で処理を行った方が良い機能

- リニアライズ
- 抵抗-温度変換(温度目盛)
- センサ特性のばらつきに対する校正



リニアライズ(線形化)

増幅

アナログ
リニアライズ

アナログ・リニアライズ

折線近似によるリニアライズ
半導体特性によるリニアライズ
帰還回路によるリニアライズ
IC乗算器によるリニアライズ
抵抗補間によるリニアライズ

増幅

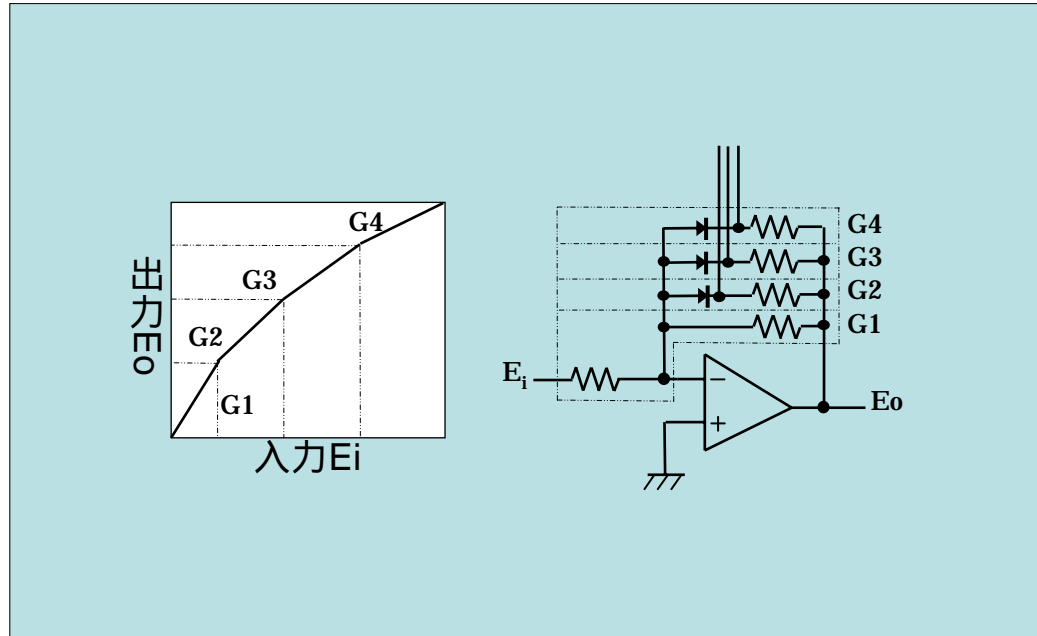
AD変換

デジタル
リニアライズ

デジタル・リニアライズ

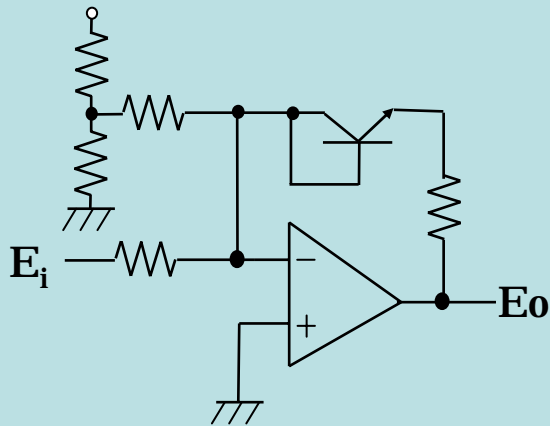
ROMテーブルによるリニアライズ
μコンピュータによるリニアライズ

アナログ・リニアライズ(1) - 折線近似

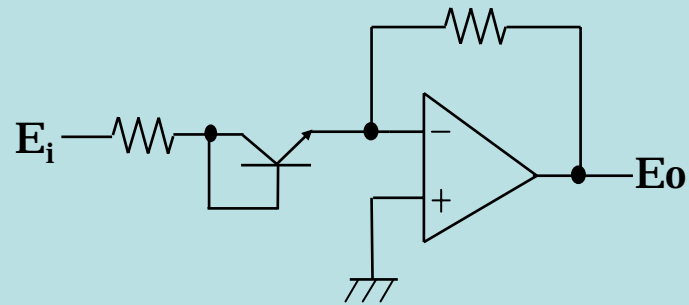


アナログ・リニアライズ(2) - 半導体特性利用

トランジスタ特性 $V_{EB} = -E_0 \log \frac{I_C}{I_0}$ を利用

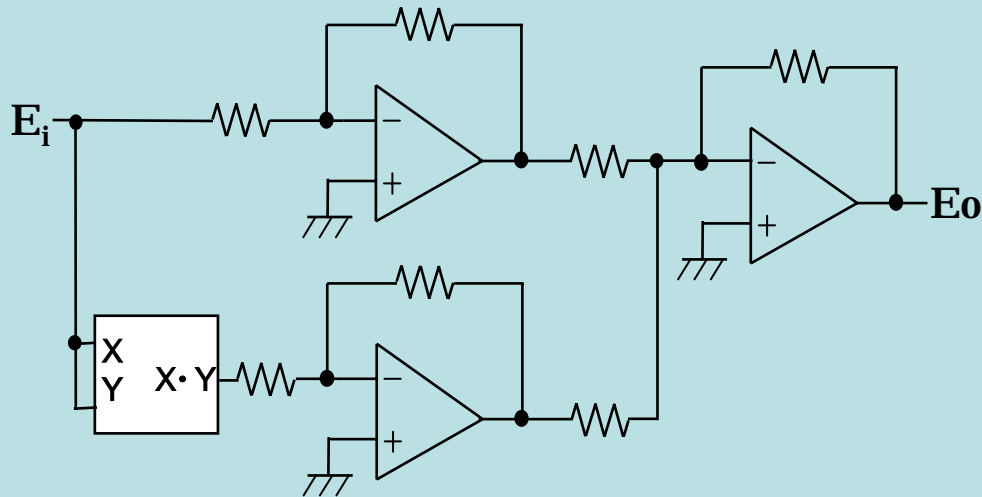


$$E_0 \propto \log E_i$$



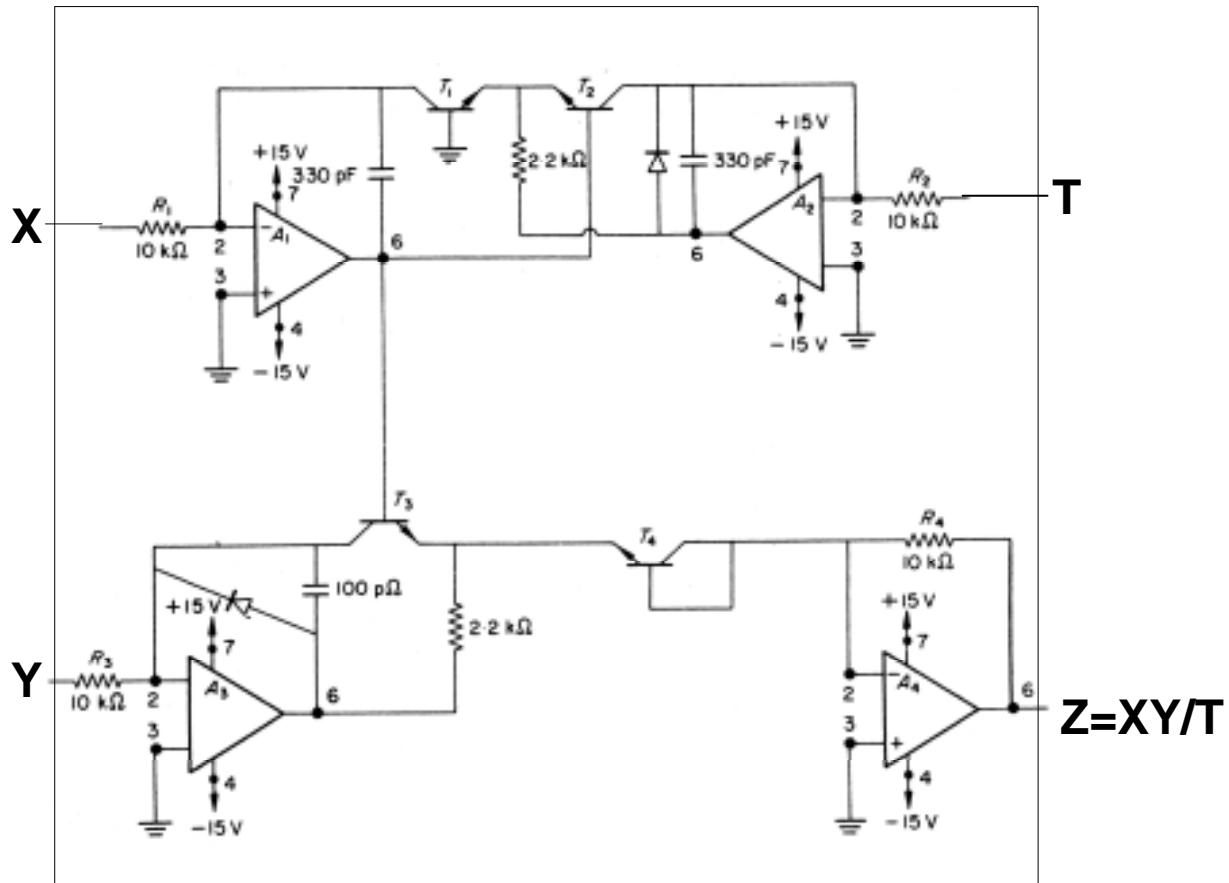
$$E_0 \propto 10^{E_i}$$

アナログ・リニアライズ(3) - IC乗算器

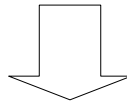


$$E_0 = AE_i + BE_i^2$$

IC乗算・除算器の内部回路



- ・ 温度変化に対する影響が大
- ・ リニアライズ誤差が大きい
- ・ 校正誤差が大きい



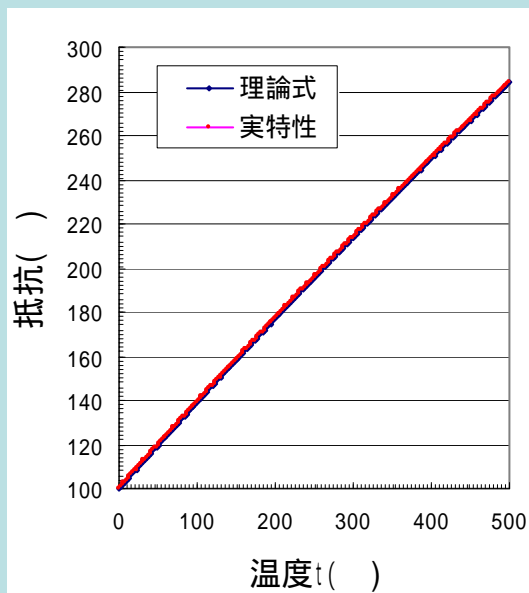
アナログ・リニアライズを高精度温度計測に用いると、精度・安定性上問題が生じる

理論2次式 $R=R_0+A\cdot t+B\cdot t^2$ の誤差

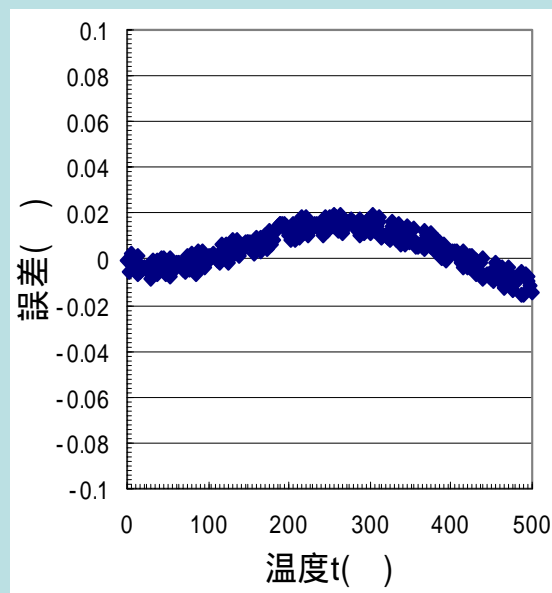
理論2次式においても最大0.016 (温度換算0.04)の誤差がある



2次をこえる高次項を省略したこともあるが、これ以上の温度の精度を論じるには温度目盛の概念を取入れる必要がある



実特性と2次式特性の比較



実特性に対する2次式特性の誤差

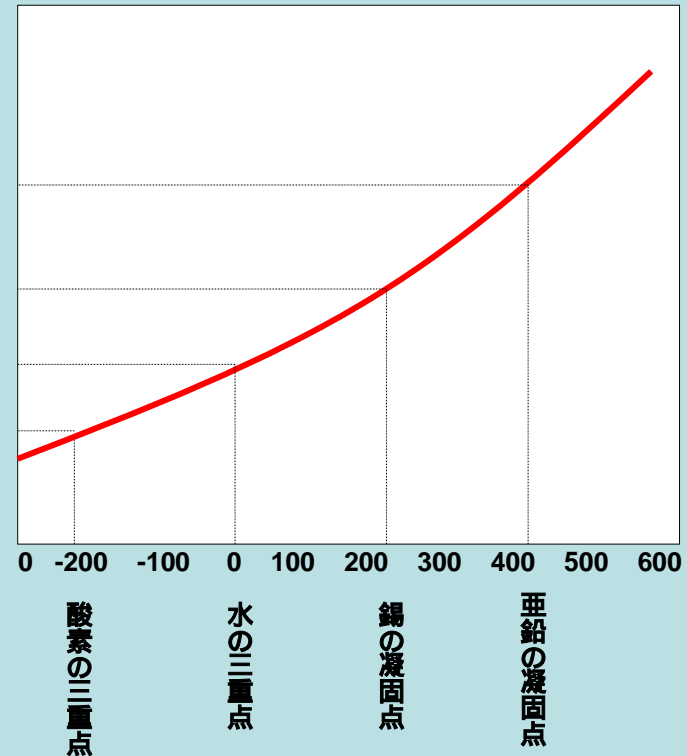
国際実用温度目盛

幾つかの再現可能な物質の平衡状態(定義定点)に与えられる温度値に基づいて目盛られる白金測温抵抗体に基づいている

定義定点

定義定点	与えられた値	不確かさの推定値
平衡水素の三重点	13.81 K	0.01 K
平衡水素の17.042 K点	17.042 K	0.01 K
平衡水素の沸点	20.28 K	0.01 K
ネオソンの沸点	27.102 K	0.01 K
酸素の三重点	54.361 K	0.01 K
酸素の沸点	90.188 K	0.01 K
水の三重点	273.16 K	定義として正確に
水の沸点	100 °C	0.005K
水銀の凝固点	231.968 °C	0.015K
亜鉛の凝固点	419.58 °C	0.03 K
銀の凝固点	961.93 °C	0.2 K
金の凝固点	1064.43 °C	0.2 K

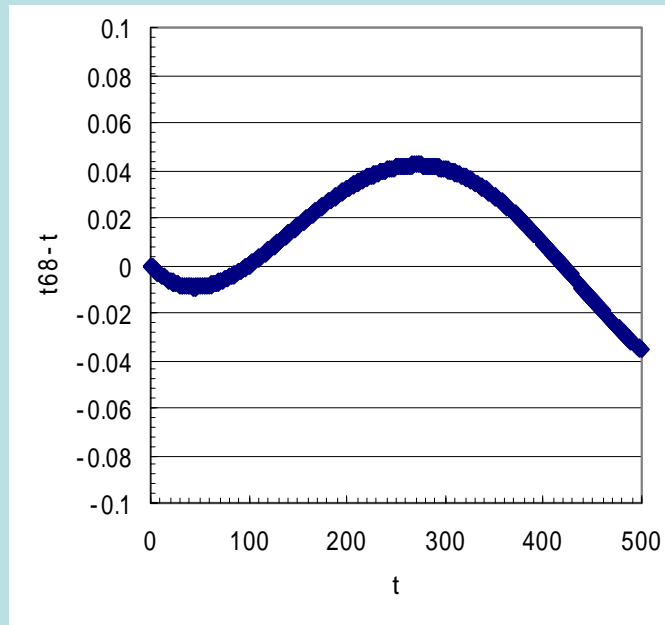
白金測温抵抗体の抵抗値



国際温度目盛 IPTS-68 t_{68}

$$R = R_0 + A \cdot t + B \cdot t^2$$

$$t_{68} = t + 0.045 \left(\frac{t}{100} \right) \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{419.58} - 1 \right) \left(\frac{t}{630.74} - 1 \right)$$



国際温度目盛ITS-90

1990年国際温度目盛として、次式を採用

$$R = R_{0.01} \left(W_r(T_{90}) + a(W_r(T_{90}) - 1) + b(W_r(T_{90}) - 1)^2 + e(W_r(T_{90}) - 1)^3 + f \left(W_r(T_{90}) - \frac{R_{660.323}}{R_{0.01}} \right)^2 \right)$$

$$W_r(T_{90}) = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left(\frac{T_{90}/K - 754.15}{481} \right)^i$$

逆関数は

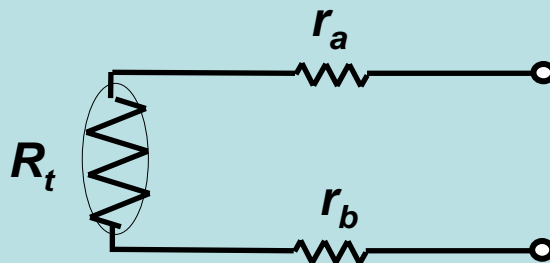
$$T_{90}/K - 273.15 = F_0 + \sum_{i=1}^9 F_i \left(\frac{W_r(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right)^i$$



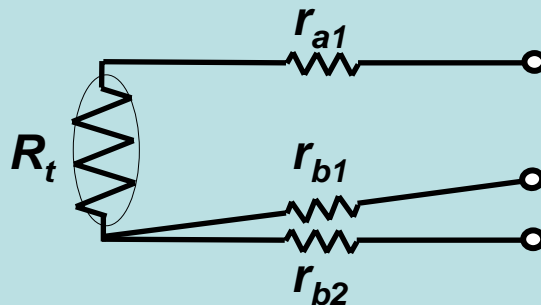
3. 高精度温度計測のための計測理論=アナログ

白金測温抵抗体の結線方法

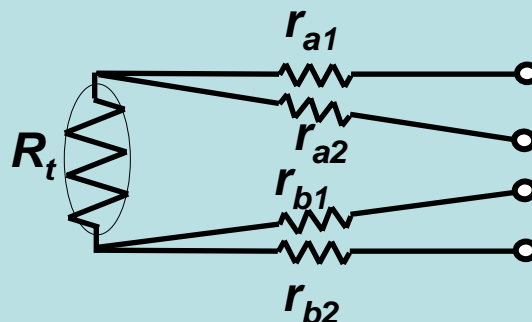
2線式



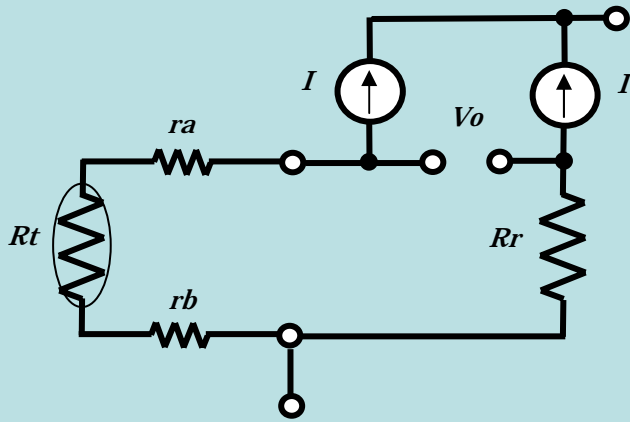
3線式



4線式



2線式の計測原理

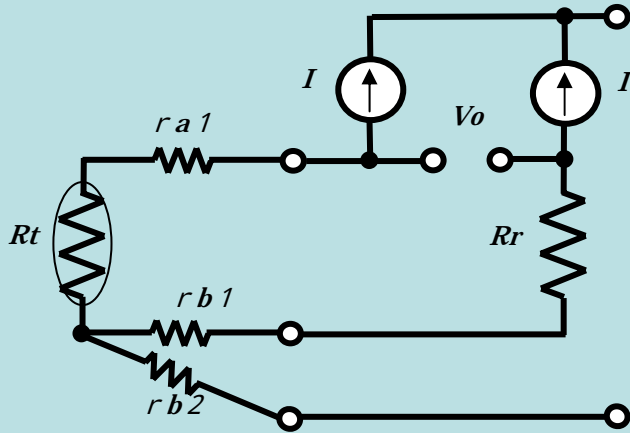


$$V_o = \{ (R_t - R_r) + \underbrace{(r_a + r_b)}_{\text{誤差要因}} \} I$$

誤差要因

配線コードの抵抗による誤差が生じる

3線式の計測原理



$$V_o = \{(R_t - R_r) + (r_{a1} - r_{b1})\}I$$

$$V_o = \{(R_t - R_r) + \Delta r\}I$$

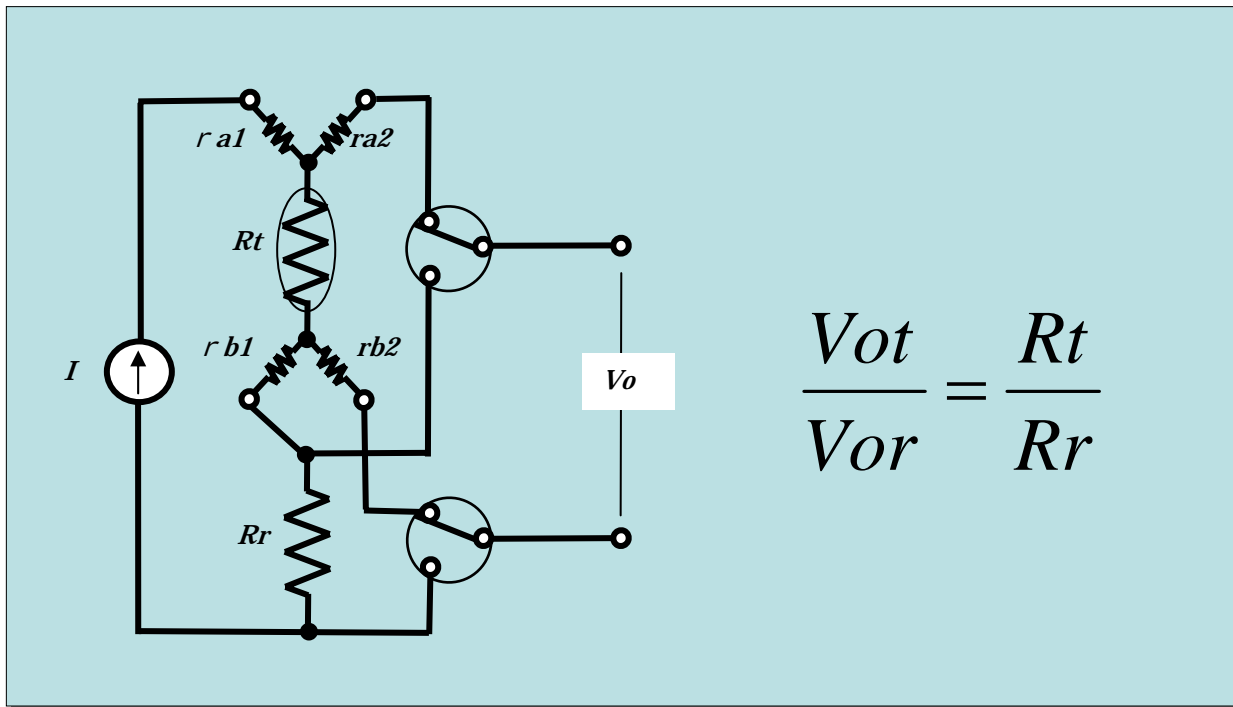
$\Delta r = 0$ の場合

$$V_o = (R_t - R_r)I$$

↑
誤差要因

配線コードの抵抗差による誤差が生じる

4線式の計測原理



配線コードの抵抗による誤差が全く生じない

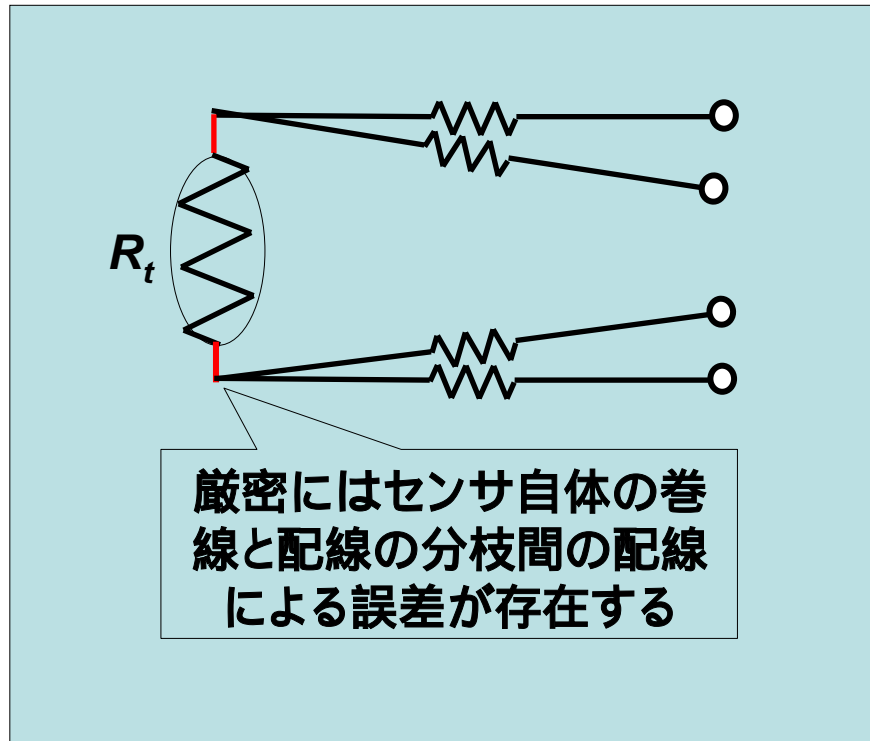
電流Iの変動による誤差も生じない



高精度計測には4線式が適している



4線式結線方法での注意点



直流抵抗の精密計測

ブリッジ法

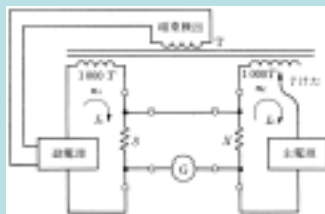
電流・電圧平衡法

電位差法

- ・各国で標準機として採用されるほど高精度
- ・非常に高価(数百万～1千万円)
- ・大きい・遅い・操作性悪い

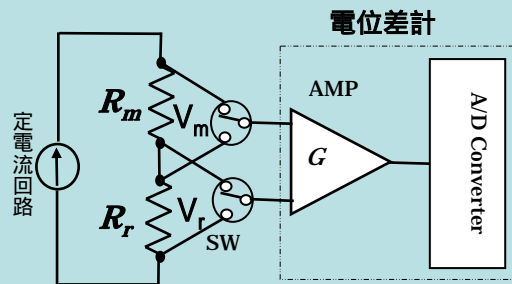


電流比較ブリッジ
(Guildline社)



電流比較ブリッジ
の原理図

- ・ブリッジ法レベルの高精度は非常に難しい
- ・比較的安価(数万～数百万円)
- ・比較的小さい・高速計測・操作の簡便性



R_m : 被測定抵抗 R_r : 標準抵抗

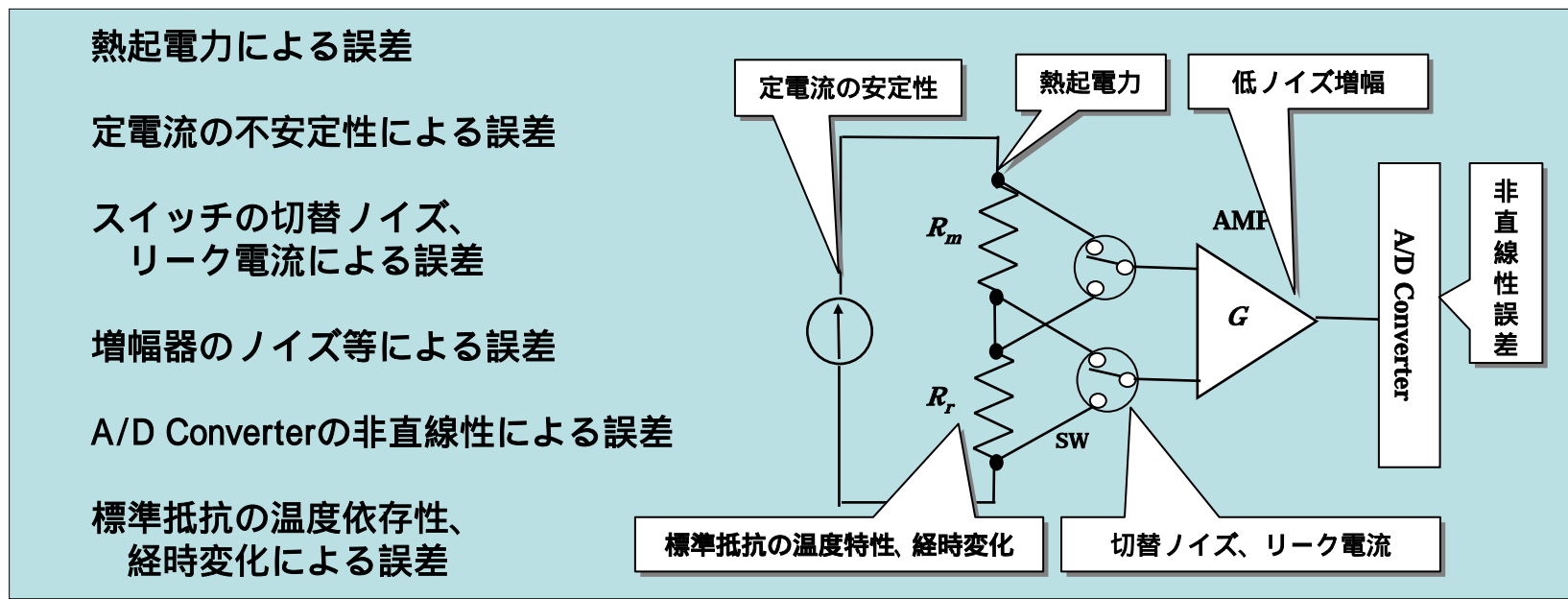
電位差計法による四端子抵抗計測

$$R_m = R_r \cdot \frac{V_m}{V_r}$$

計測理論式



電位差計法における高精度計測のための課題

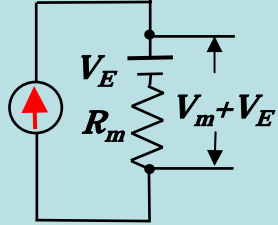


計測原理 $R_m = R_r \cdot \frac{V_m}{V_r}$ **はどこまで成立するか？**



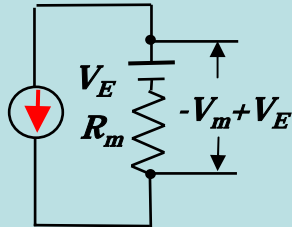
熱起電力による誤差

異種金属の接触や同一金属上でも温度差がある場合、熱起電力が発生

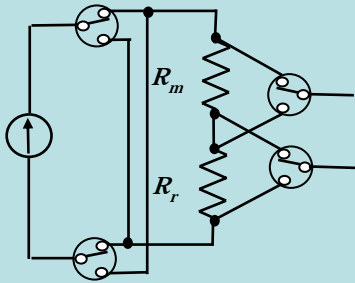


$$R_m' = R_r \cdot \frac{V_m + V_{E1}}{V_r + V_{E2}} \neq R_m$$

電流の極性反転により、熱起電力による誤差を防止



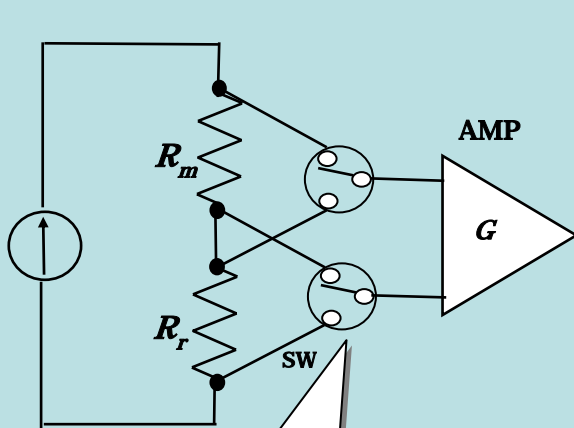
$$R_m' = R_r \cdot \frac{(V_m + V_{E1}) - (-V_m + V_{E1})}{(V_r + V_{E2}) - (-V_r + V_{E2})} = R_r \cdot \frac{V_m}{V_r} = R_m$$



電流反転のためスイッチを設けると、新たな誤差要因(計測原理からのずれ)が発生する可能性がある

・切替ノイズ ・リーク電流 ・定電流不安定さ増大

定電流の不安定性による誤差



切替えている間の不安定さ I

$$R_m' = R_r \cdot \frac{V_m}{V_r} \left(1 + \frac{\Delta I}{I} \right) \neq R_m$$

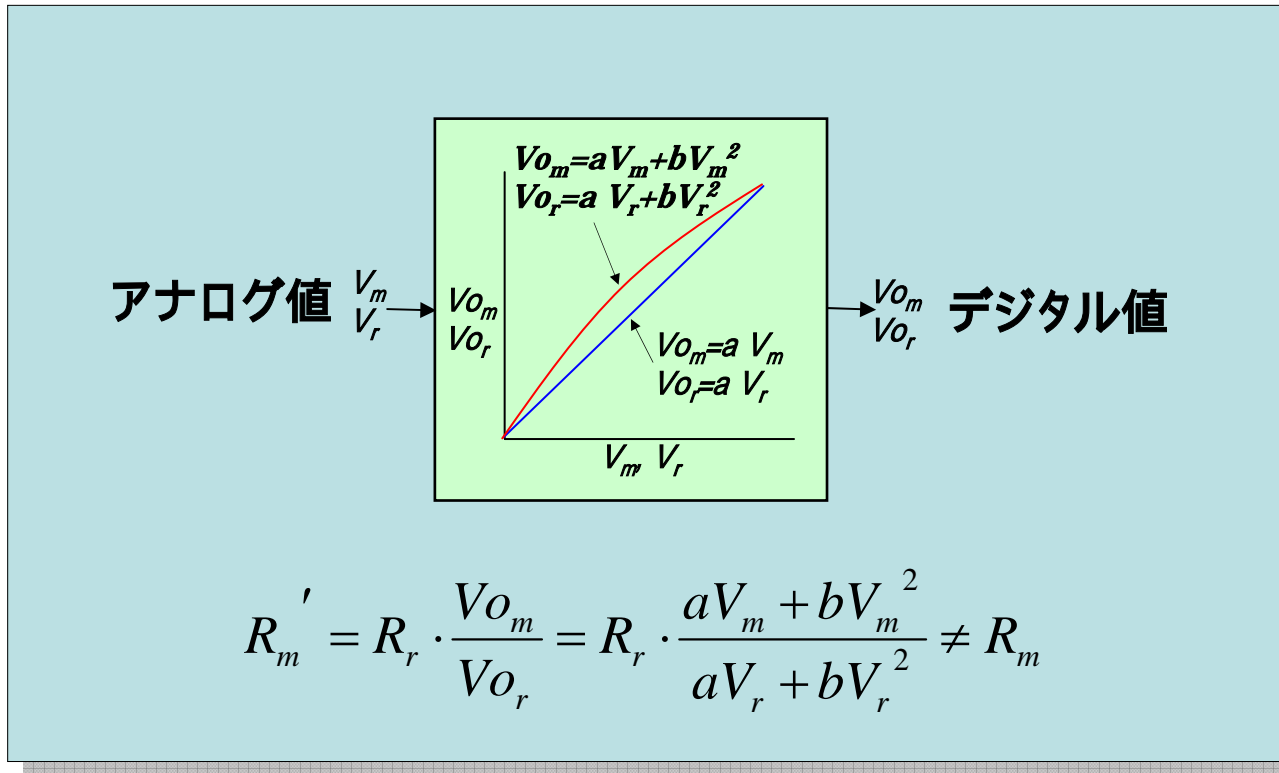
$R_m=100$ 、 $I=1\text{mA}$ で数mの精度で計測するには V_m 計測からSWを切替えて V_r 計測の間の電流の変動は

$$I < \text{数}10\text{nA}$$

でなくてはならない。



A/D Converterの非直線性による誤差



標準抵抗の温度依存性、経時変化による誤差

$$R_m' = (R_r + \Delta R_r) \cdot \frac{V_m}{V_r} \neq R_m \quad \Delta R_r = \frac{\partial R_r}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial R_r}{\partial t} \Delta t$$

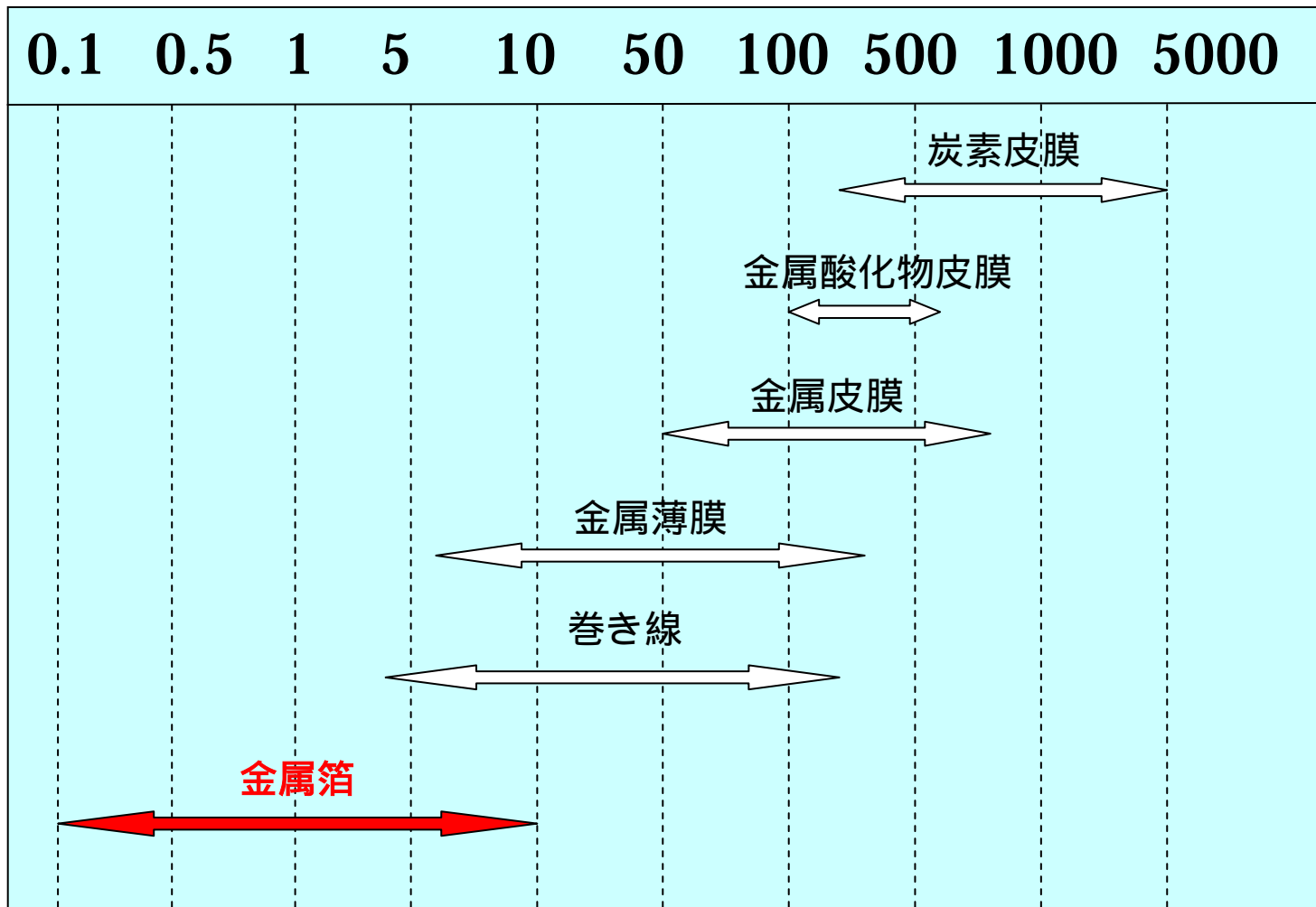
温度変化や経時的に高い安定性が要求されるので、
温度係数が小さく安定性が高い抵抗を選定する必要がある

抵抗の性能比較

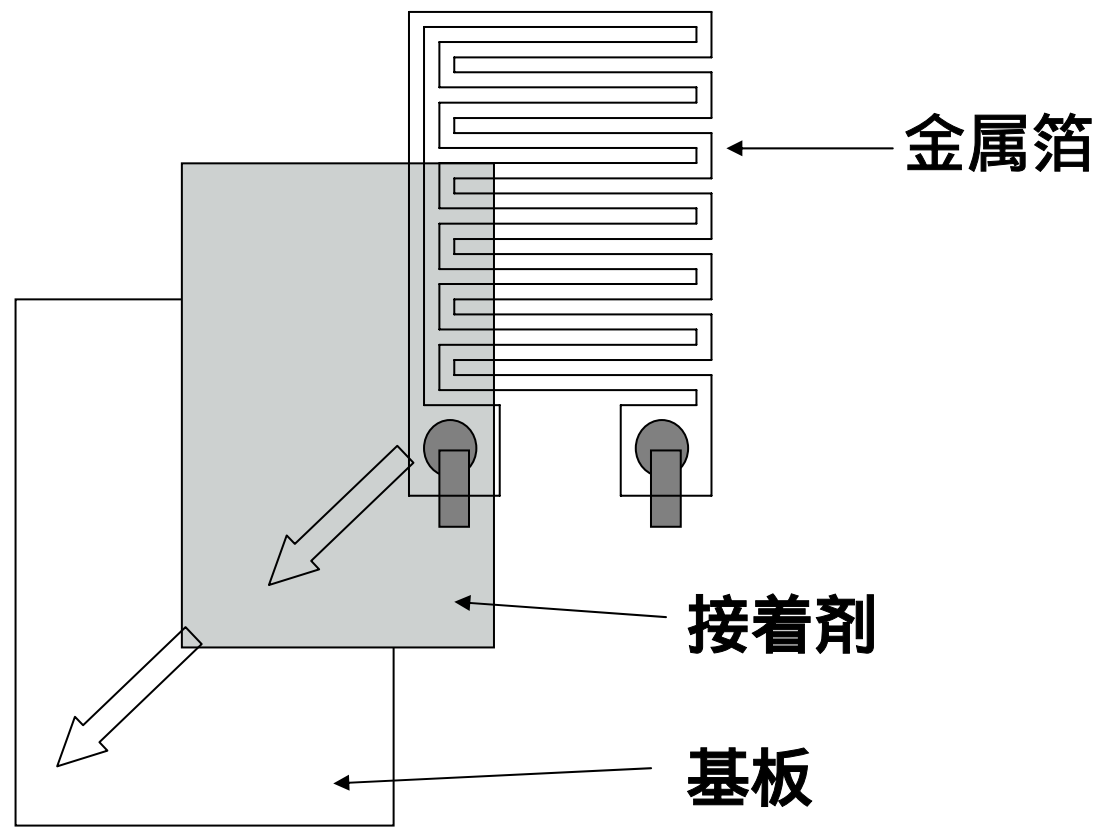
抵抗の種類	抵抗値	温度係数	ノイズ	安定性	用途
炭素皮膜	低～高	×	×	×	一般電子回路
炭素ソリッド	低～高	×	×	○	高信頼性回路
金属皮膜	低～高		○	○	一般アナログ回路
金属薄膜	低～高	○		○	高精度アナログ回路
金属箔	低～中				超高精度アナログ回路
金属酸化物皮膜	低～高				中電力回路
巻き線	低～中	○			高精度電力回路
セメント	低				一般電力回路
ハウロウ	低～中				大電力回路
金属板	超低～低		○	○	電流検出・制限回路



抵抗の温度係数の比較



金属箔抵抗の基本構造



結 論

- 高精度計測には白金測温抵抗体が最適
- 校正された特性 (R_0 ,) のセンサを用いる
- センサ特性 (R_0 ,) に基づき校正出来る機器を選定
- 十分な熱接触と熱平衡状態は高精度計測には重要
- 熱容量が小さく、熱抵抗が大きい空気等には小さいセンサを選定
- 熱抵抗が大きい水や空気を均一温度にするには十分に攪拌する
- リニアライズ、抵抗-温度変換、校正機能はソフトウェアで行う
- 白金測温抵抗体の結線方式には4線式を用いる
- 自己発熱による影響を考慮し、センサへの電流は1mA以下とする
- 抵抗比較電位差法の計測原理を所要誤差内で成立させるには幾つかの技術的課題が有る

