

高精度・高速温度計測技術

田澤R&D技術士事務所

ATN会員

群馬大学大学院非常勤講師

田澤 勇夫



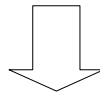
温度計測における高精度とは

1mK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°Cでも高精度と言う分野もある

しかし、多くの分野で高精度化の要求が高まっている

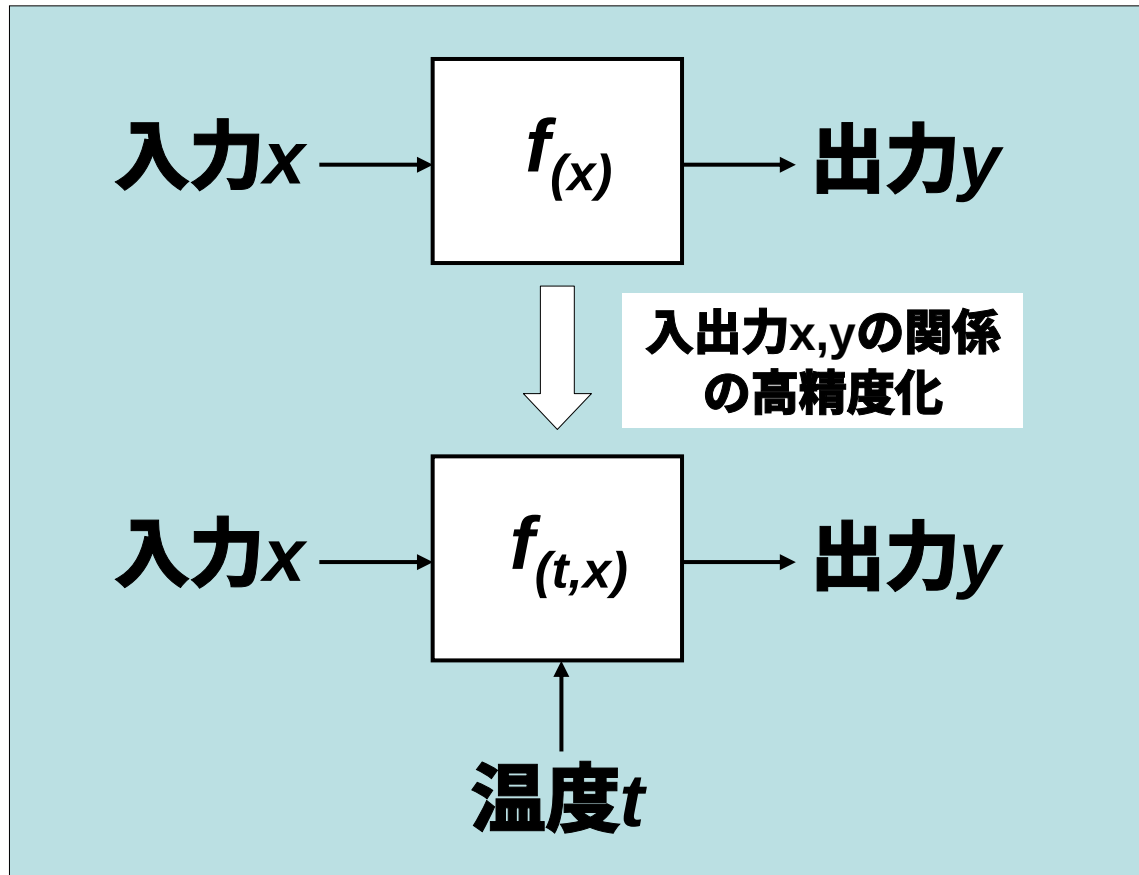


1mKから10mK(0.001°C～0.01°C) の精度を目指して議論を進める。

また、対象温度範囲を最も精度要求の高い常温付近(0～50°C位) とする。



温度の高精度化の要求理由



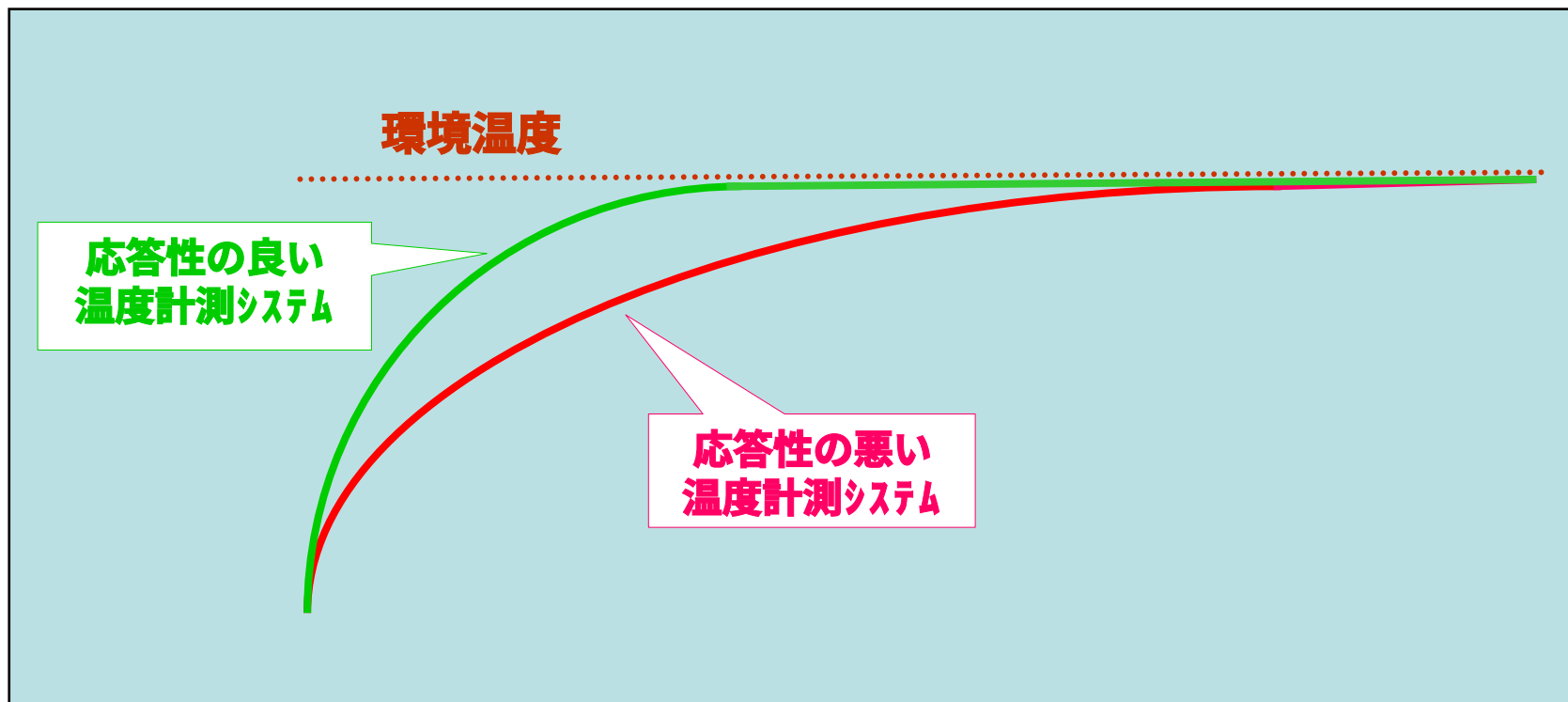
温度計測に対する更なる要求

高精度 + 高速 (多点) 計測

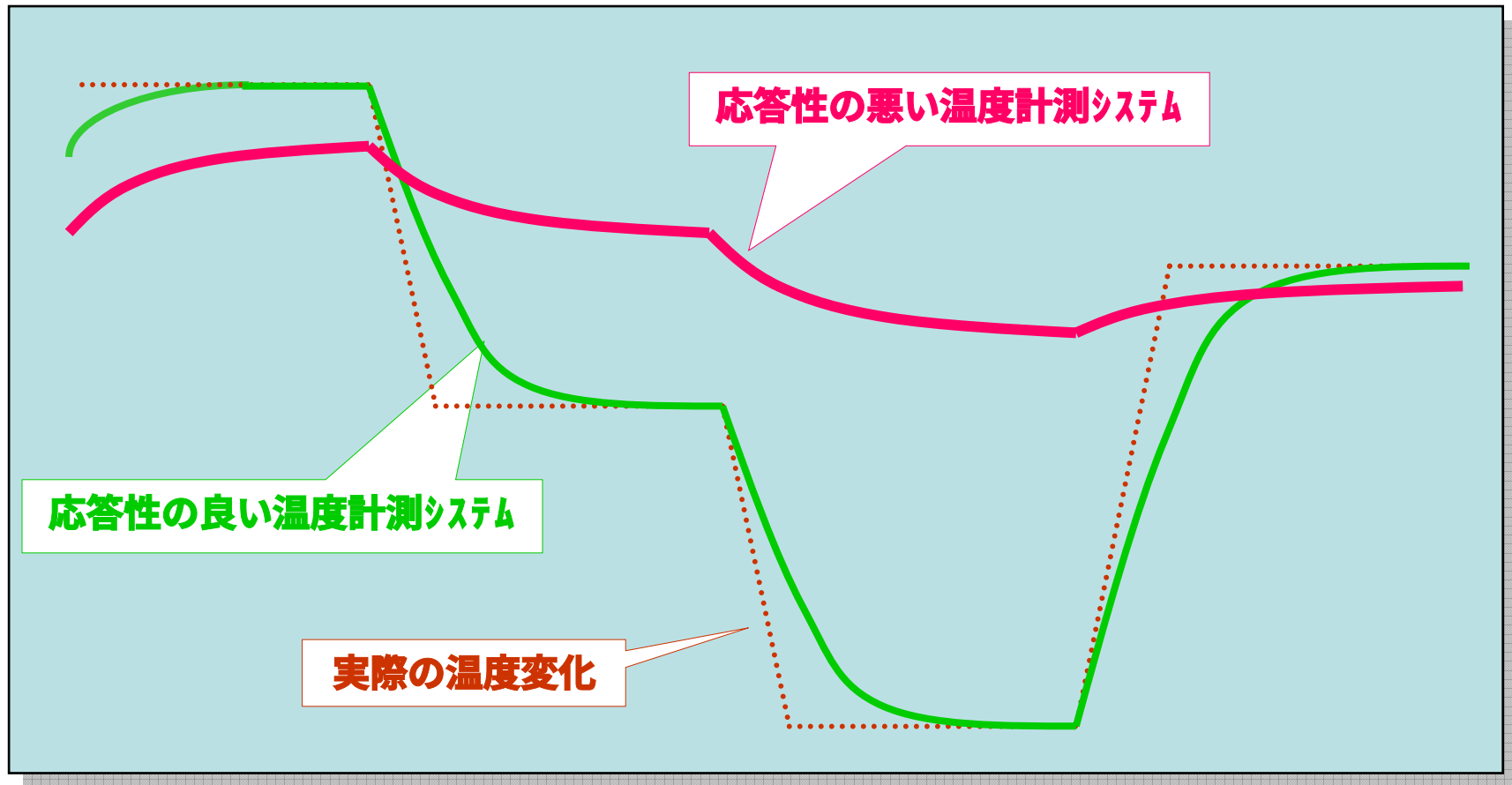
従来は高精度計測技術と高速計測技術は相反する技術であり、その両立は困難であった



安定な環境温度を計測



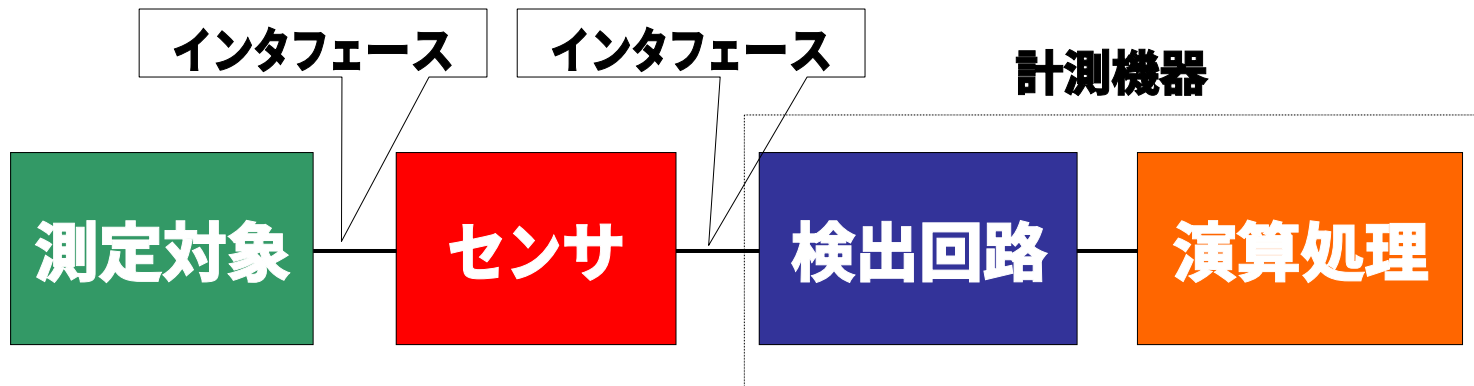
変化する環境温度の計測



温度の時間的变化 → 温度の空間的变化 → 多点を高速で同時に計測



温度計測システム



従来はセンサ技術はセンサ・メーカー、計測機器技術は機器メーカーが別々に開発し、測定対象に関する技術はユーザ自身で検討する場合が多かった。



**高精度・高速計測技術では、温度計測システム全体を
統一的に考えていく必要性が生じた**



目次

1. 高精度・高速温度計測に要求される**温度センサ**
 - ・各種の温度センサのセンシング原理
 - ・高精度計測に用いた場合の利点と欠点
2. 高精度を保証する重要な概念
 - ・校正、定点槽、温度目盛、温度センサ特性理論式の信頼性
3. 高精度・高速温度計測における重要な**物理的ファクタ**
 - ・熱容量、熱接触、熱伝導、熱平衡、自己過熱等の物理的ファクタ
 - ・熱現象の電氣的モデルによる解析
4. 高精度・高速温度計測のための**理想的な温度センサ**
5. 高精度・高速温度計測のための**計測理論と回路技術**
 - ・ブリッジ回路、電位差計
6. 高精度・高速温度計測のための**ソフトウェア設計**
 - ・アナログ回路によるリニアライズ演算
 - ・ソフトウェアによるリニアライズ演算 (国際温度目盛も含む)



1. 高精度温度計測に要求される**温度センサ**

1-1 温度センサ・温度計の分類

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

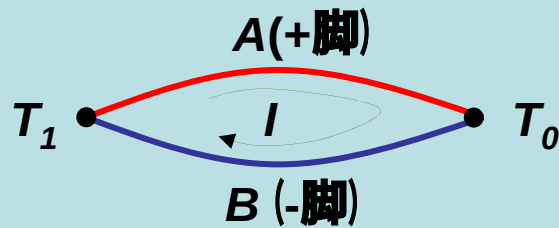
NQR温度計

熱雑音温度計



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

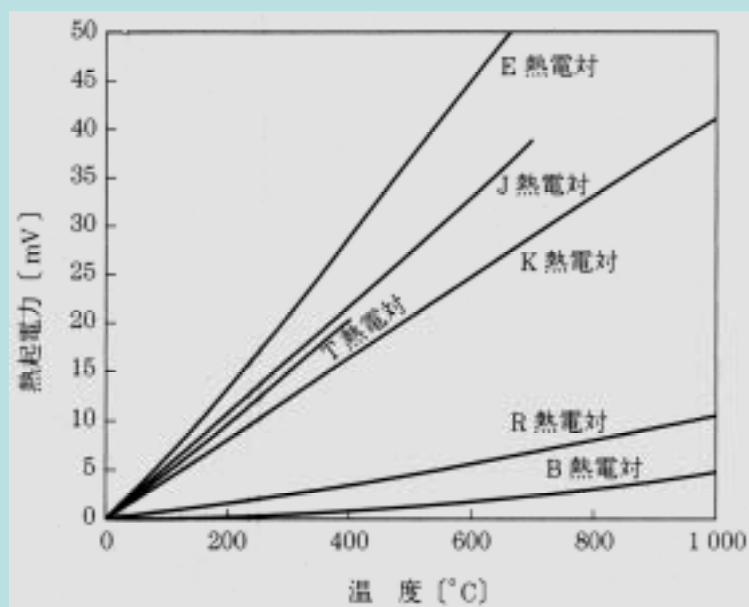
$$V_{E(AB)} = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_{AB} = a'(T_0 - T_1) + b'(T_0 - T_1)^2 + \dots$$



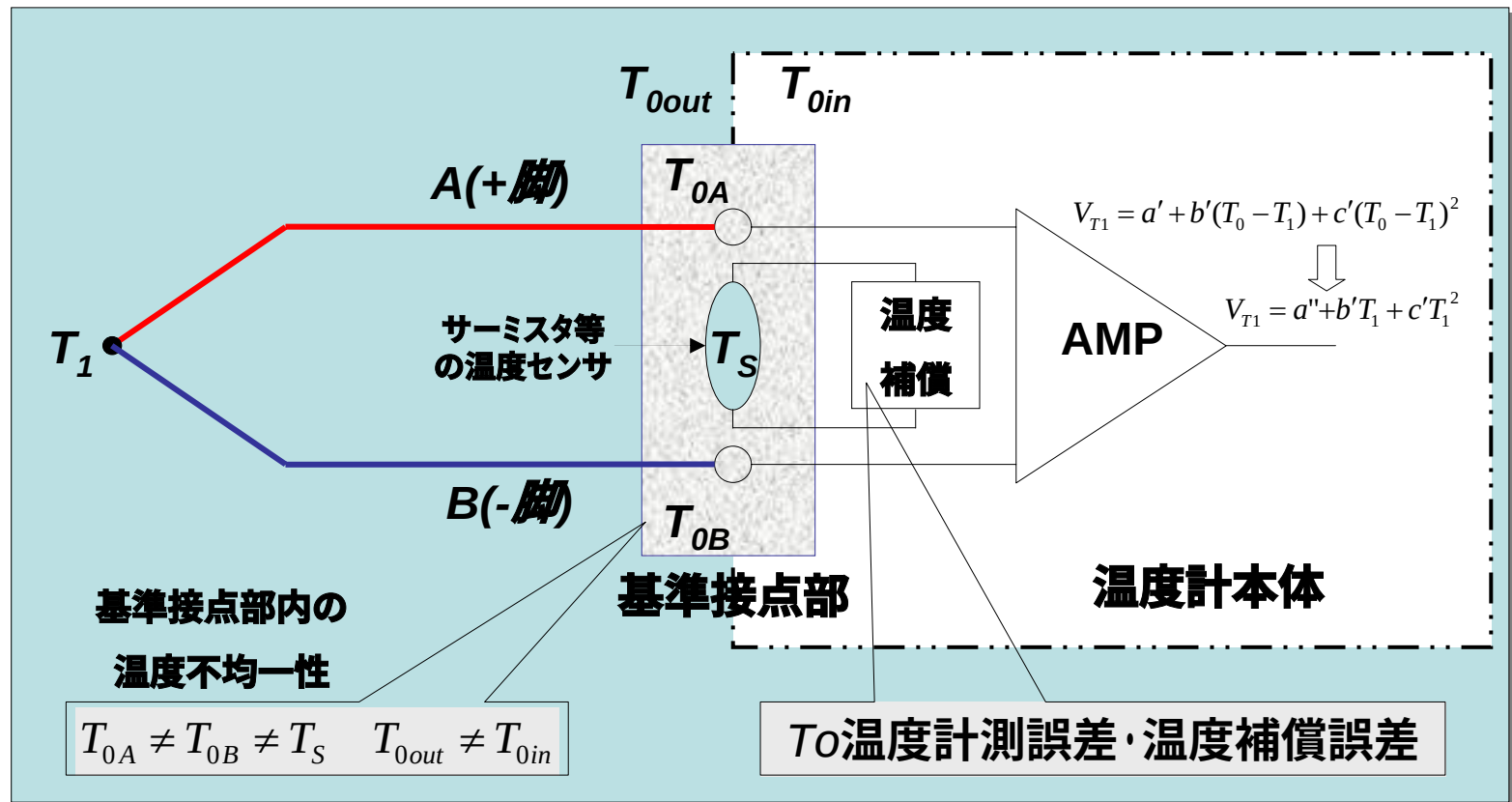
分 類	種類の 記 号	熱電対の構成材料		使用温度範囲 (℃) *2	許容差 [%]
		+ 側	- 側		
貴金属熱電対	B	Pt 30% Rh 合金	Pt 6% Rh 合金	600 ~ 1700	±0.25, 0.5
	R	Pt 13% Rh 合金	白金	0 ~ 1600	±1 ℃
	S	Pt 10% Rh 合金	白金		±0.25
卑金属熱電対	N	Ni, Cr, Si を主とした合金	Ni, Si を主とした合金	-200 ~ 1200	±0.4, 0.75, 1.5
	K	クロメル *1	アルメル *1		
	E	クロメル	コンスタンタン *1	-200 ~ 900	±0.4, 0.75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



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

- ・ 基準接点の温度計測誤差・補正誤差
- ・ 出力電圧が小さいため($0.4 \mu\text{V}/0.01^\circ\text{C}:\text{K}$ 熱電対)ノイズの影響が大きい
- ・ 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。

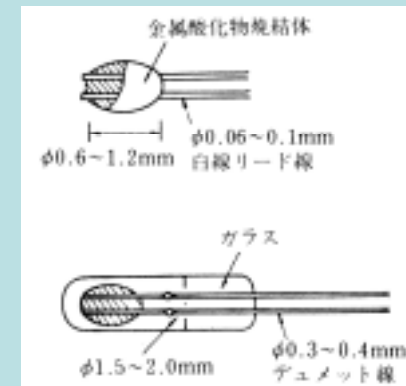
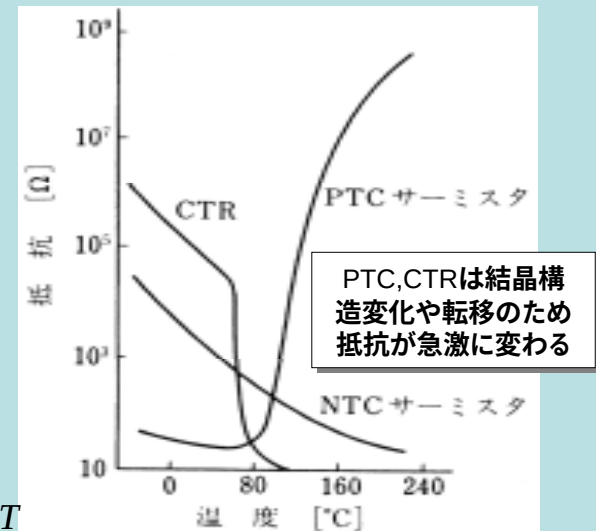
半導体抵抗率は $\rho = \frac{1}{en\mu}$

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 $R = R_0 \exp\left(\frac{B}{T}\right)$

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 RI^2
- 非線形特性
- 経年変化

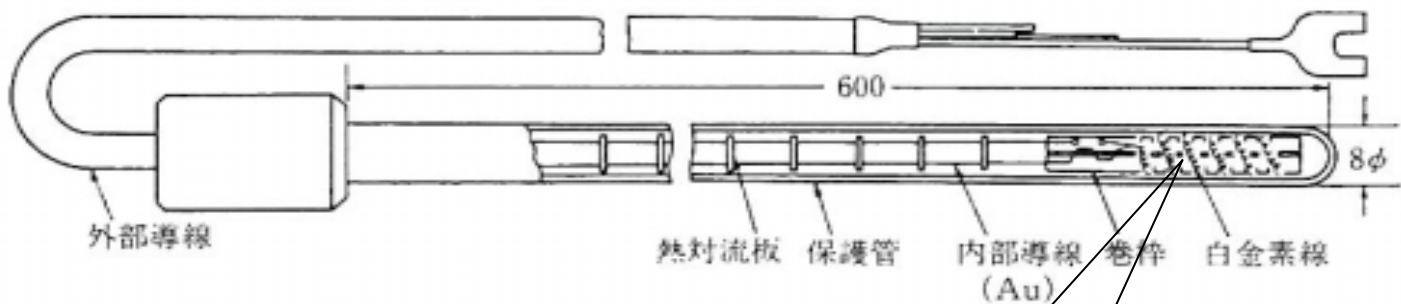
広い温度範囲において所要の精度で抵抗-温度の関係を確立するのは困難

利点

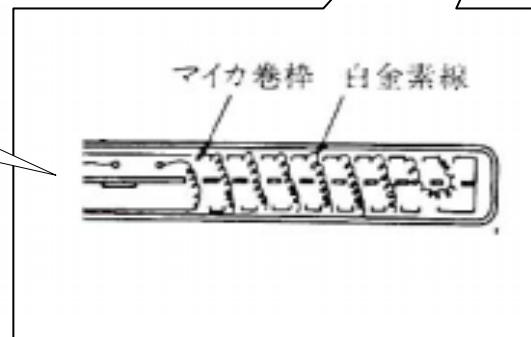
- 安価
- 抵抗変化率大
- 小型



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 ρ は

$$\rho = \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau}$$

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

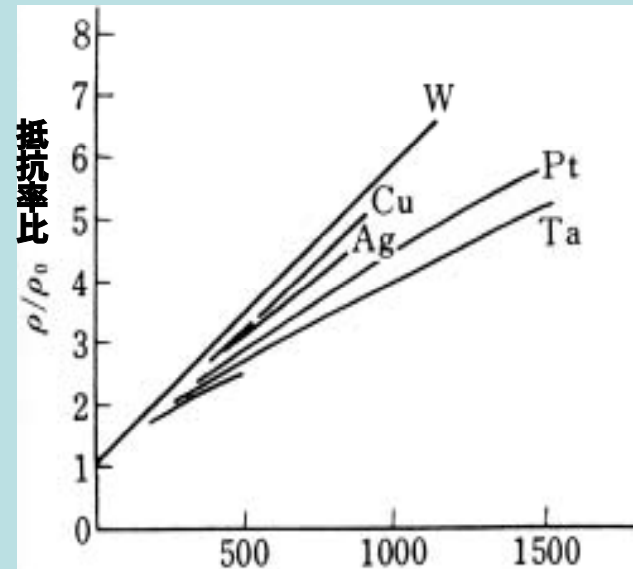
金属中の格子は熱振動しており、非調和振動であるとする、その変位 x の平均の2乗は

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

よって、

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

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



温度(°C)

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

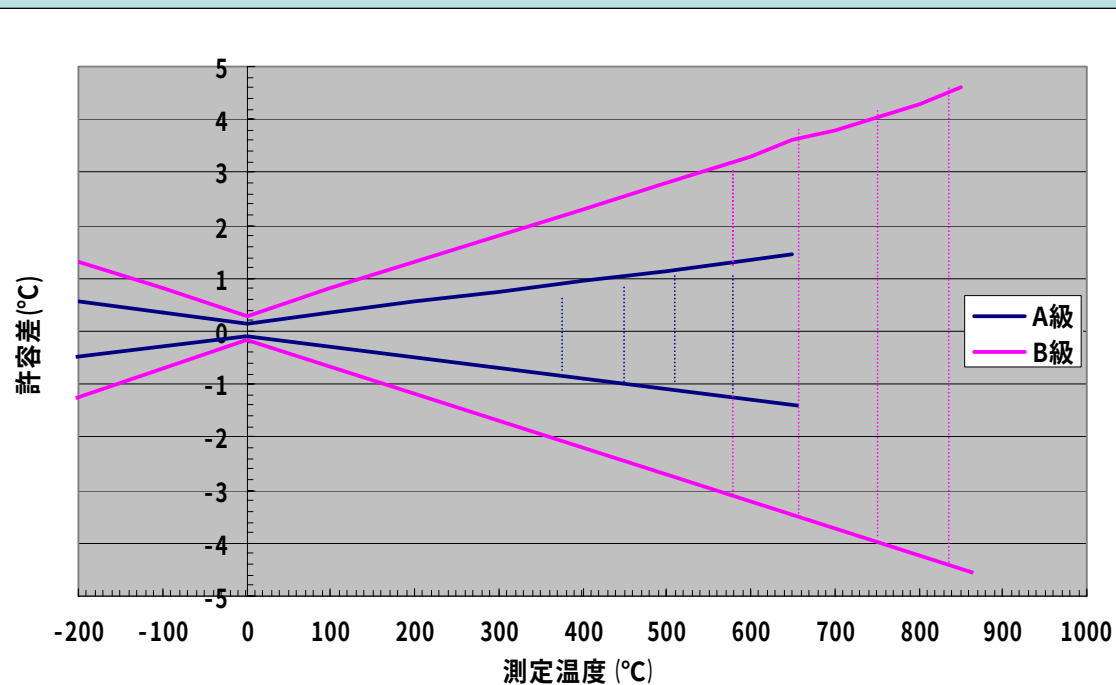
4線式



階級－白金測温抵抗体の許容差 (JIS規定)

測定温度 (°C)	許容差			
	A級		B級	
	°C	Ω	°C	Ω
-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_0 , α , δ で示される

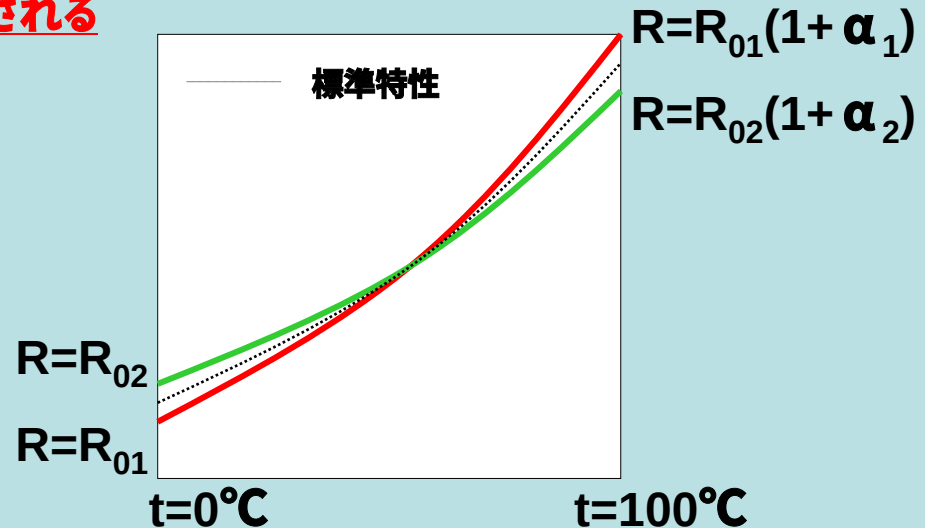
$t=0^\circ\text{C}$ の場合

$$R = R_0 (\text{標準値 } 100 \Omega)$$

$t=100^\circ\text{C}$ の場合

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

$$\alpha = 0.385$$



各センサに対応した定数 R_0 , α , δ 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



高精度計測のためには

校正済 1mA以下

4線式



インタフェース

計測機器

測定対象

センサ

検出回路

演算処理

白金測温抵抗体の欠点

- 高価
- 強磁場の影響を受け易い
- 自己加熱がある
- 一般に形状が大きく熱容量が大きい
(⇒応答速度が遅い)

利点

- 高精度 (標準温度計に用いられる)
- 安定性が高い

1-5 トランジスタ温度センサ

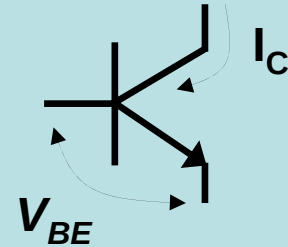
トランジスタの特性 (電圧 V_{BE} -電流 I_C) の関係は

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

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

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

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

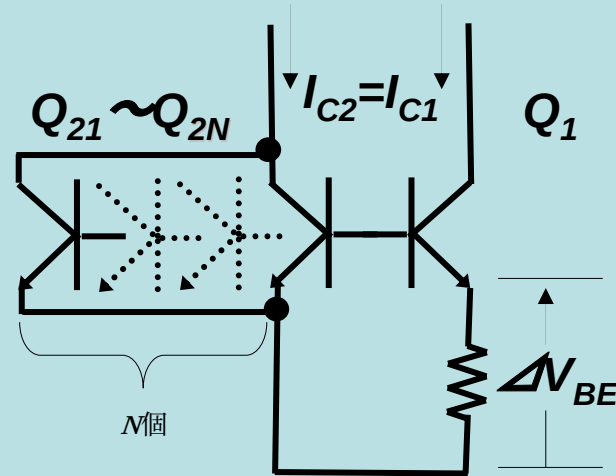
$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2}$$

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

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

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

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



温度範囲0°C～60°Cで精度0.5°C～2°C

非直線性誤差±0.03°C

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 μA/℃	TO-52
AD592AN	-25～+105℃	±2.5℃	+1 μA/℃	TO-92
AD592CN	-25～+105℃	±0.5℃	+1 μA/℃	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

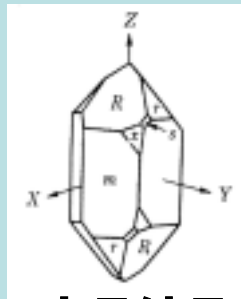
- ・ 既存のIC温度センサの最高精度は0.5°C程度
- ・ ICのパッケージは熱容量大
- ・ 比較的高価

利点

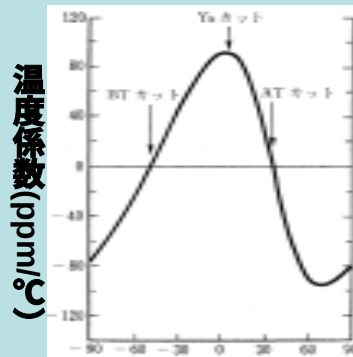
- ・ 比較的直線性が良い
- ・ 直線性の良いアナログ信号が直接出力



1-6 水晶温度計

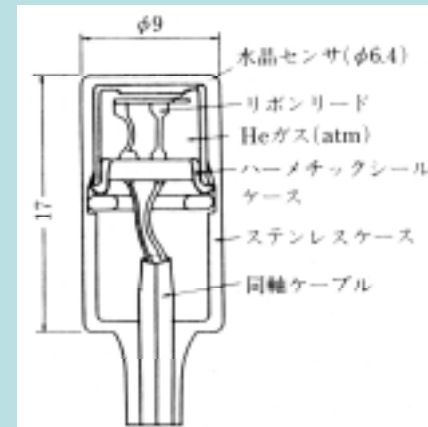


水晶結晶

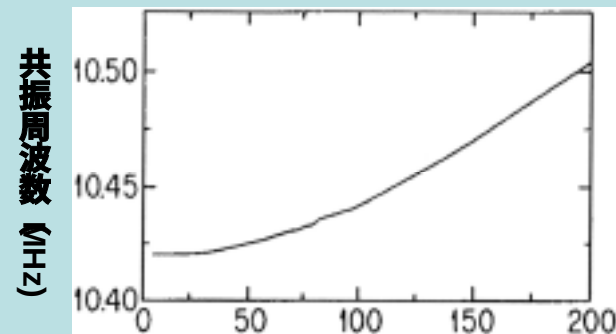


回転角 (θ)

結晶の切り出し角 θ により
温度係数が大きく変わる



水晶温度センサの構造



温度 (K)

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 各温度センサの利点・欠点の分類

	利点	欠点
熱電対 サーミスタ 白金測温抵抗体 IC温度センサ 水晶温度計	熱容量小、自己加熱無、安価 小型、安価 安定性高、国際温度目盛 直線性比較的良、電圧直接出力 磁場環境に強い、周波数出力	基準接点誤差、出力電圧小、経年変化 非直線性誤差、自己加熱、経年変化 高価、熱容量大、自己加熱 パッケージ熱容量大、比較的高価 経時ドリフト、熱容量大



2. 高精度を保証する重要な概念

- 校正の概念の確立なくして精度の確保はない
- 校正点と校正点の間の精度の信頼性はセンサ特性理論式の信頼性と密接な関係がある
- 高精度のための校正は温度定点槽で行う



2-1. 校正

校正とは、センサ特性式において各センサ特性を示す特性定数を与えること

白金測温抵抗体

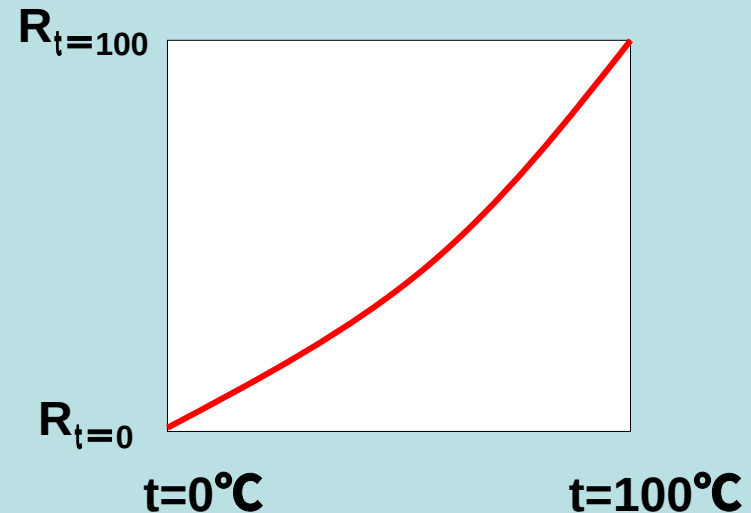
$$R = R_0 + at + bt^2$$

$$R = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[t + \delta \left(\frac{t}{100} \right) \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \right] \right\}$$



$$R_{t=0} = R_0$$

$$R_{t=100} = R_0 * 100\alpha$$



サーミスタ

$$R = R_0 \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$



$$R_0 = R_{t=0}$$

$$B = R_0 \left(\frac{T_0}{T_0 - T} \right) \ln \left(\frac{R}{R_0} \right)$$

熱電対

$$V = a + bt + ct^2$$

$$V = bt + ct^2$$



$$b = (4V_{t=50}^2 - V_{t=100}^2) * 10^{-2}$$

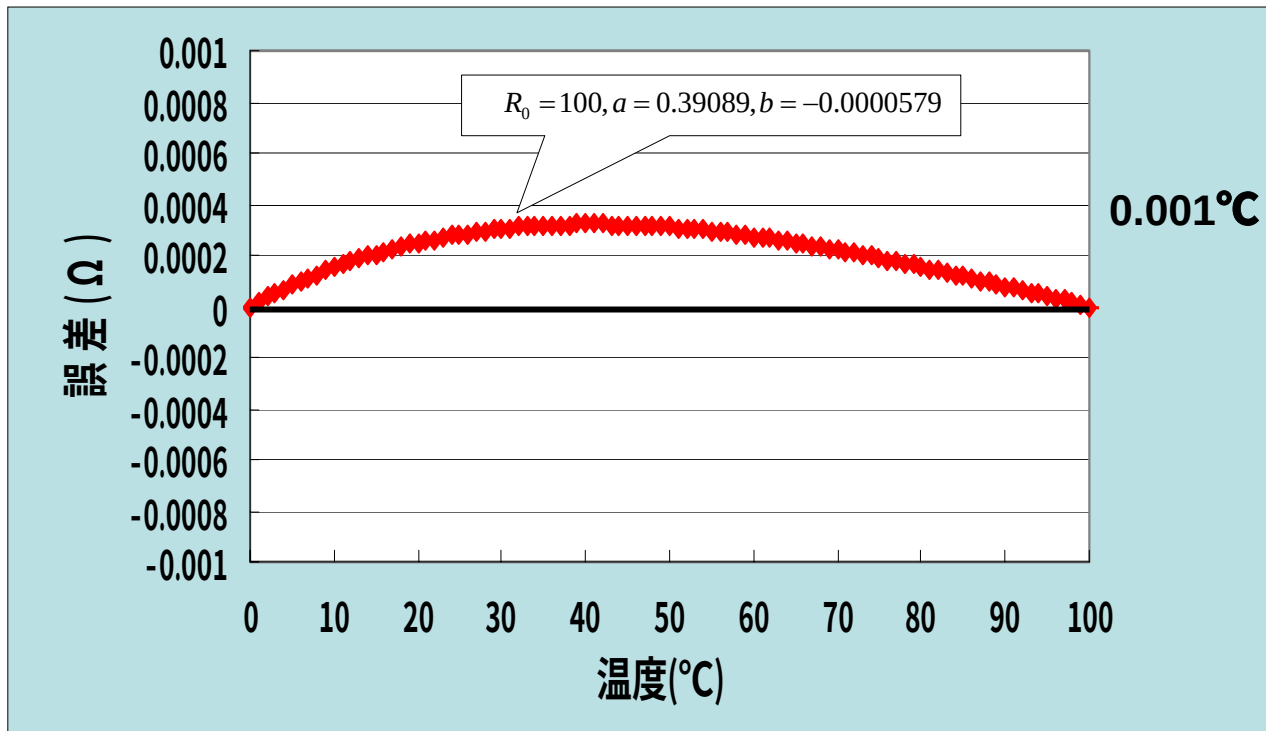
$$c = (V_{t=100} + V_{t=100}^2 - 4V_{t=50}^2) * 10^{-4}$$

2-2 校正点と校正点の間の精度の信頼性

校正誤差がない理想的な場合、

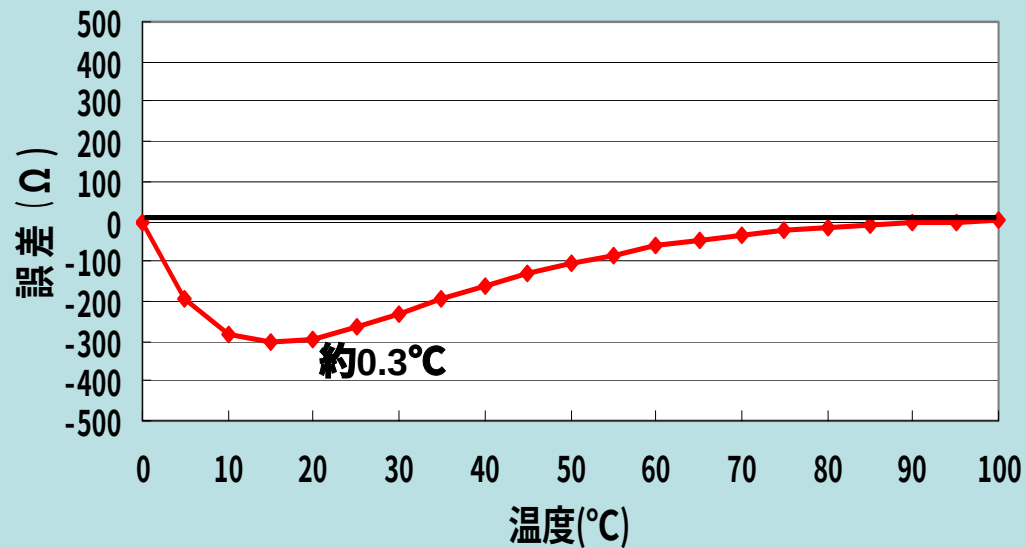
(校正点と校正点の間の精度の信頼性) $\Rightarrow$ (特性理論式の信頼性)

白金測温抵抗体特性理論式 $R = R_0 + at + bt^2$ の誤差

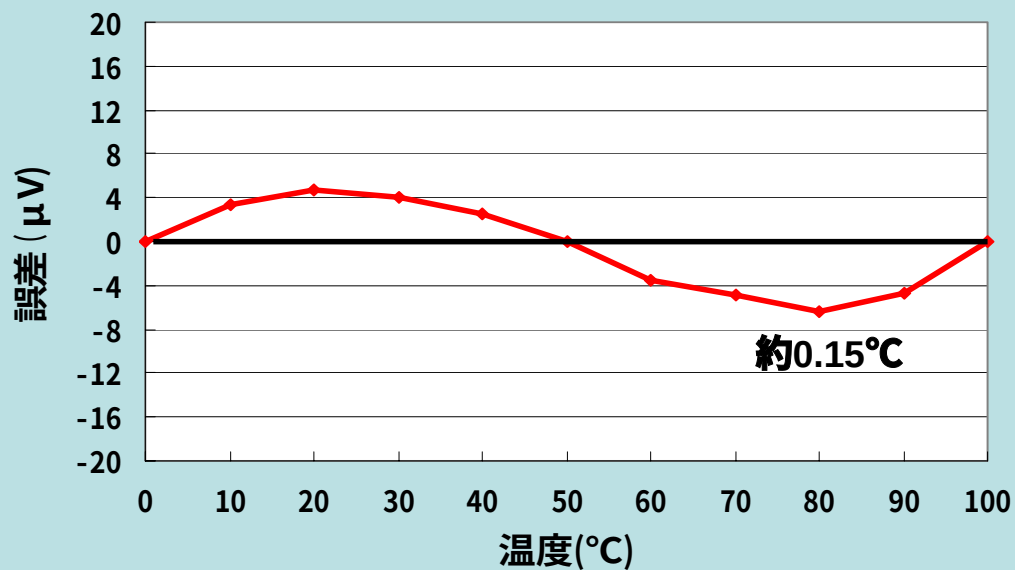


特性理論式の誤差

サーミスタ



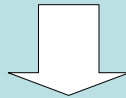
熱電対



サーミスタの特性理論式の誤差原因

実際の高精度校正においては、物性理論に基づく理論式ではなく、経験値に基づく多項式を使用する。

$$R = \exp(a + bT + cT^2 + dT^3) \quad \text{Stainhart-Hart式}$$



- ・ 3点校正となる
- ・ 校正点以外の精度保証が難しい

熱電対の特性理論式の誤差原因

誤差原因は二次式という近似式を用いたことによる

$$V = bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + fT^5 + gT^6 \text{ -----}$$



- ・ 精度を上げるには校正点を増やす必要がある

2-3 温度目盛・定義定点の概念

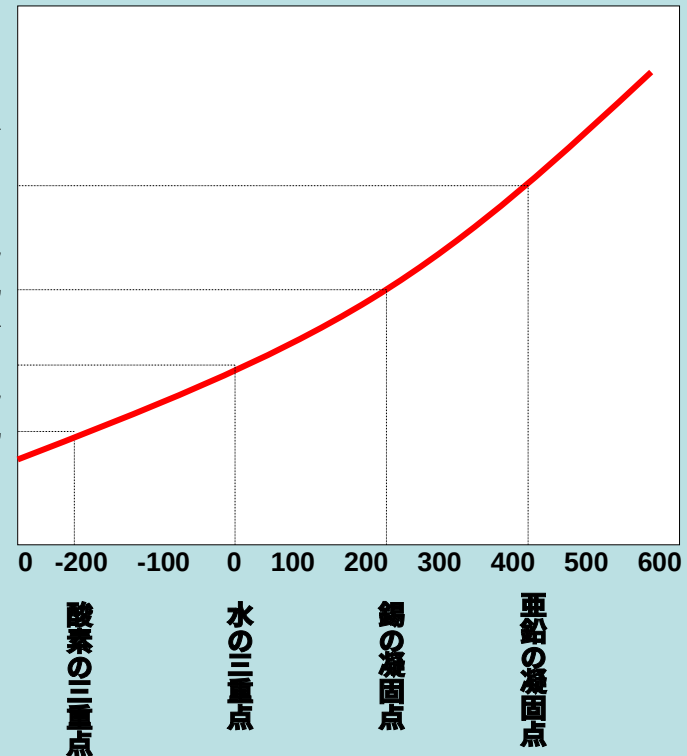
国際実用温度目盛

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	0.005 K
水銀の凝固点	231.968 °C	0.015 K
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



3. 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



インタフェース

計測機器

測定対象

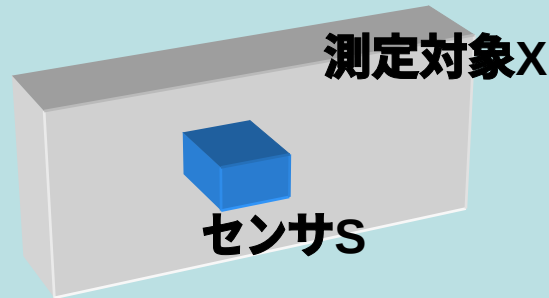
センサ

検出回路

演算処理



温度計測の基本：熱接触



熱平衡にある測定対象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の熱容量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：1kg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

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



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	$2.2 \sim 6.3$
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	2.97×10^{-2}
アルミ	1.13×10^{-2}
ガラス	$6.3 \sim 10.5 \times 10^{-5}$
水	5.82×10^{-5}
空気	0.24×10^{-5}

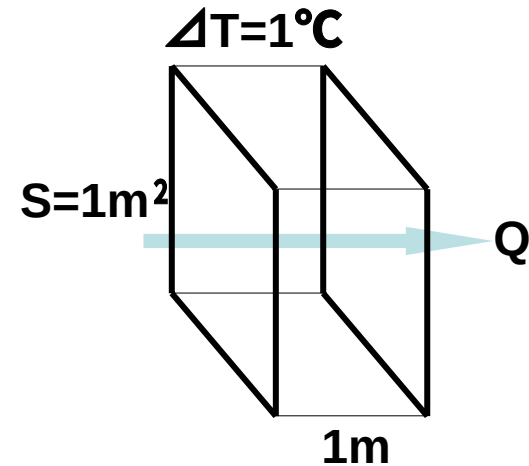


均一な液体・気体環境を得るには
十分に攪拌する必要あり。

熱伝導率：

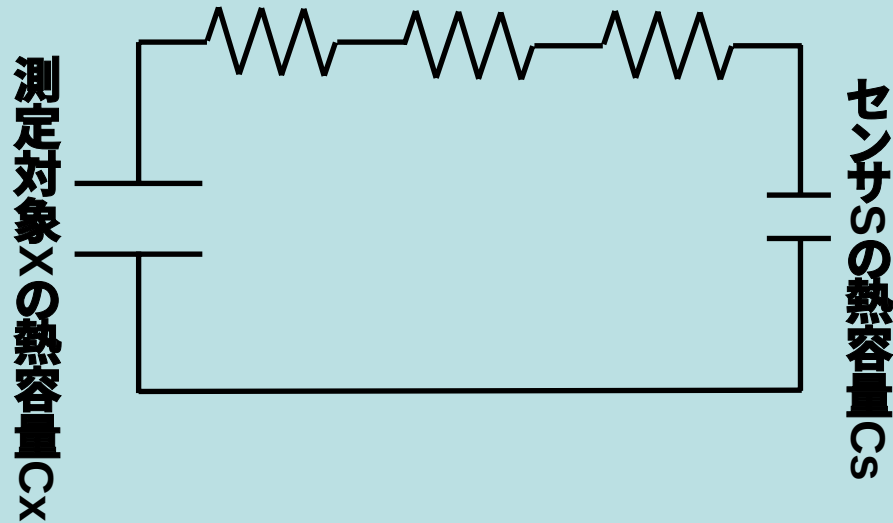
1mの間隔に1°Cの温度差がある
場合、1m²の面積を通じて流れ込
む熱量

$$(\text{熱抵抗率}) = 1 / (\text{熱伝導率})$$

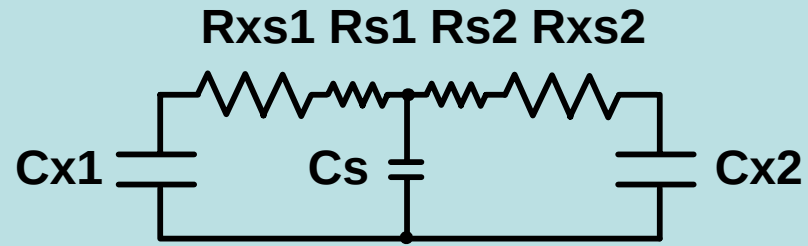
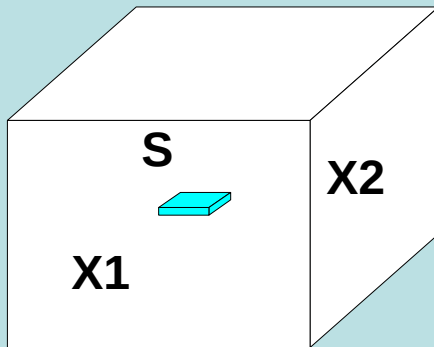


熱現象の電氣的モデル

Xの熱抵抗 R_X 熱接触抵抗 R_{XS} Sの熱抵抗 R_S

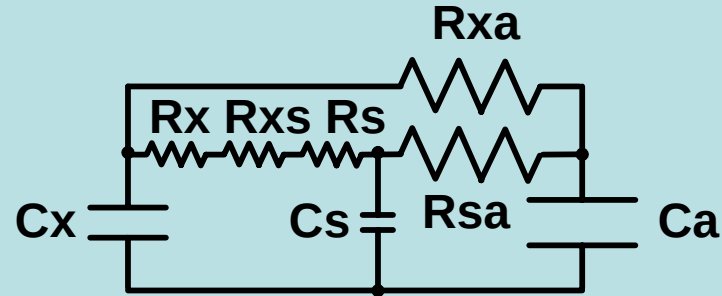
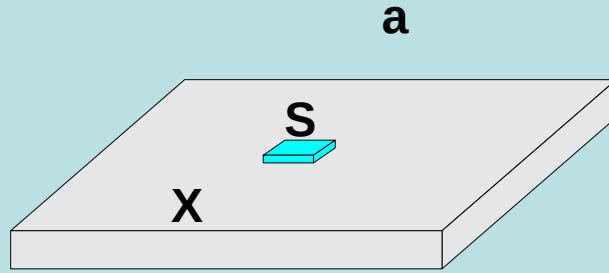


空気中の温度計測



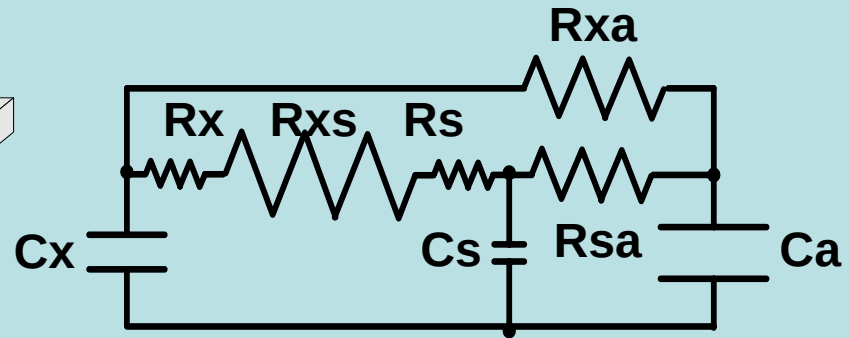
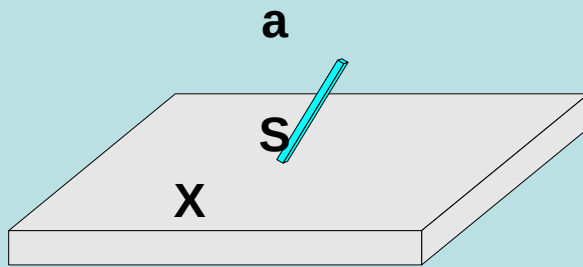
- ・風速を大きく熱交換を十分に $\Rightarrow$ XとS間の熱抵抗 R_{xs} を小さく
- ・センサの応答性を高く $\Rightarrow$ Sの熱容量 C_s を小さく

表面温度計測



- ・被計測体XとセンサSの熱接触を十分に $\Rightarrow$ XとS間の熱抵抗 R_{xs} を小さく
- ・Xを大きくSを小さく $\Rightarrow$ Sの熱容量を小さく $C_x \gg C_s$
- ・空気の流れが小さいほうが良い $\Rightarrow$ Xと空気, Sと空気間の熱抵抗
- ・ T_x と T_a の差が大きいほど誤差が大きい R_{xa}, R_{sa} を大きく

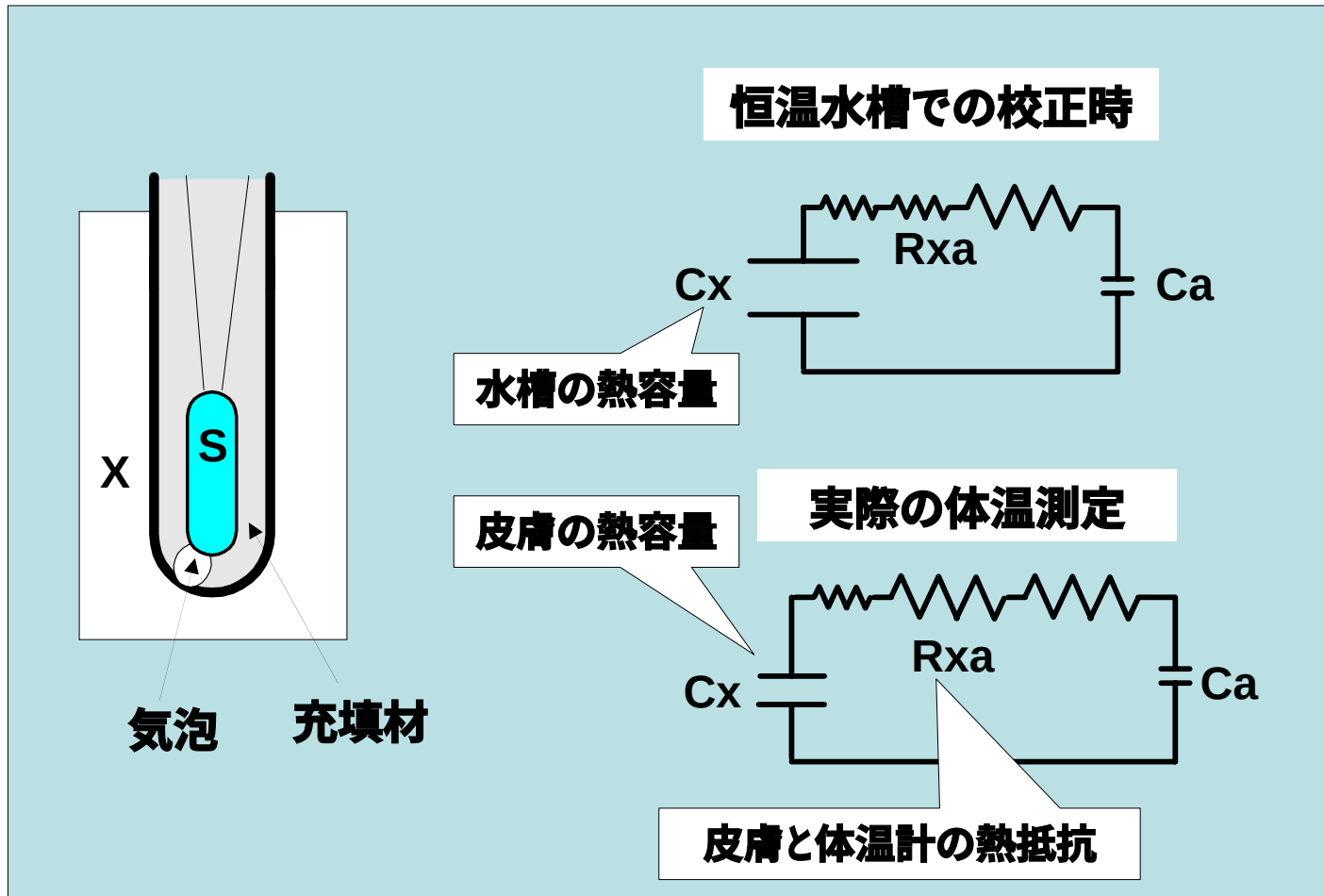
誤った表面温度計測



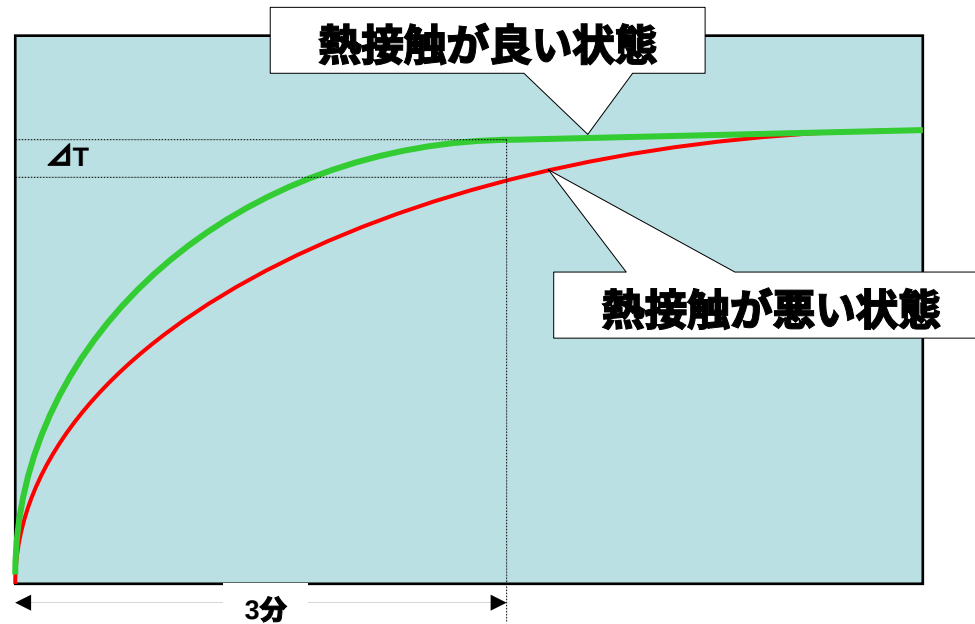
- ・被計測体XとセンサSの熱接触が不十分 $\Rightarrow$ XとS間の熱抵抗 R_{xs} が大きく
- ・周辺空気の温度の影響大 $\Rightarrow$ Sと空気間の熱抵抗が小さい

$$R_{xs} > R_{sa}$$

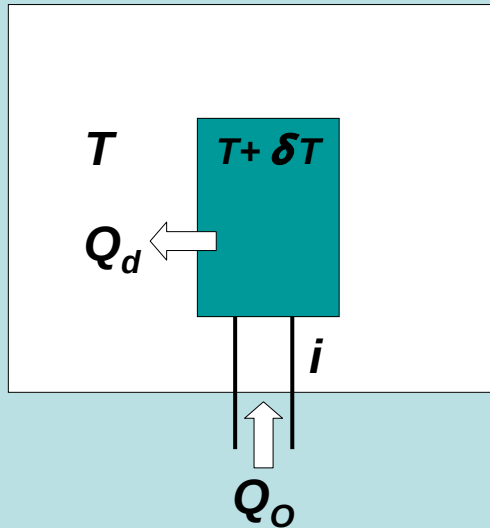
体温計開発での思わぬ落とし穴



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。

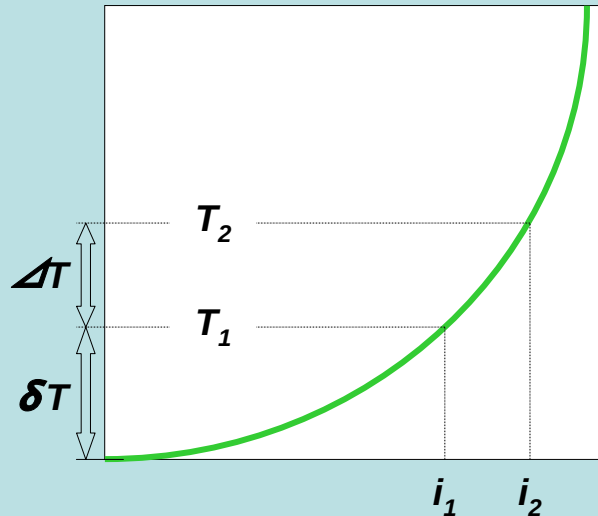
センサ温度が1℃上昇するに必要な電力を熱放散定数と言う。

$$K = Q_o / \Delta T$$

熱放散定数例

サーミスタA	サーミスタB	白金薄膜
3mW/°C	2mW/°C	2.4mW/°C

自己加熱に対する補正



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

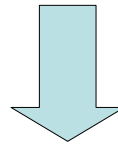
δT : 電流 i_1 時の自己加熱による温度上昇
 ΔT : 2点の電流 i_1, i_2 での温度指示値の差

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

$$\delta T = \Delta T$$

4. 高精度・高速温度計測のための 理想的な温度センサとは

白金測温抵抗体の利点(高安定性,温度目盛)と
熱電対の利点(熱容量小=微小,自己加熱無)を
両立するセンサ



- ① 熱容量の小さい白金測温抵抗体
- ② 基準接点誤差と経年変化が小さい熱電対

理想センサへの課題

白金測温抵抗体

- ・微小化
- ・低抵抗化
- ・低消費電流化

$R_o=100\ \Omega$ 、 1mA の場合
 $1\text{mK} \Rightarrow 400\text{nV}$

$R_o=10\ \Omega$ 、 0.1mA の場合
 $1\text{mK} \Rightarrow 4\text{nV}$

熱電対

- ・高安定化材料
- ・校正と温度目盛との対応
- ・基準接点計測・補償の高精度化

K熱電対の場合
 $1\text{mK} \Rightarrow 40\text{nV}$



5. 高精度・高速温度計測のための計測理論と回路技術 (温度センサが白金測温抵抗体の場合)

白金測温抵抗体 (Pt100) の特性
 $\Delta T = 10 \text{ mK} \Rightarrow \Delta R_t \quad 4 \text{ m}\Omega$



Pt100による高精度温度計測



高精度抵抗計測



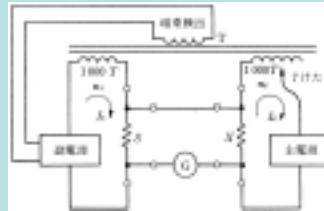
直流抵抗の精密計測

ブリッジ法

- ・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)

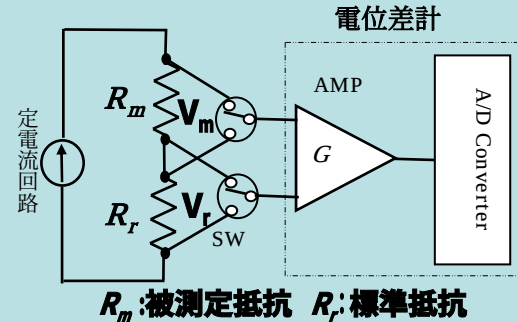


電流比較ブリッジ
の原理図

電流・電圧平衡法

電位差法

- ・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



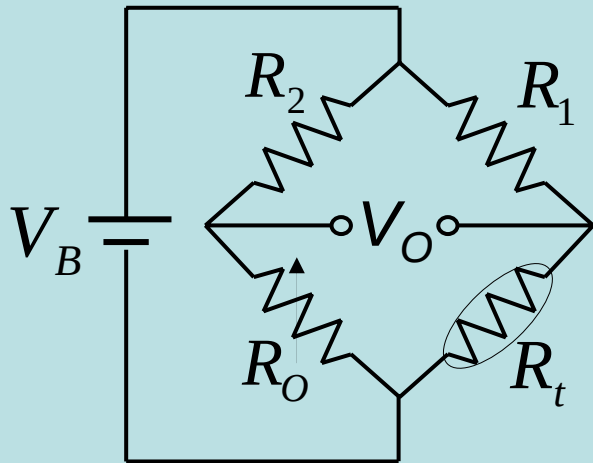
電位差計法による四端子抵抗計測

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

計測理論式

5-1 ブリッジ法、電位差法

抵抗計測の基本はホイートストン・ブリッジ



$$V_O = V_B \left(\frac{R_t}{R_1 + R_t} - \frac{R_O}{R_2 + R_O} \right)$$

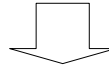
R_O を調整し $V_O = 0$ とすると

$$R_t = R_O \frac{R_1}{R_2}$$

$R_1 = R_2$ であれば

$$R_t = R_O$$

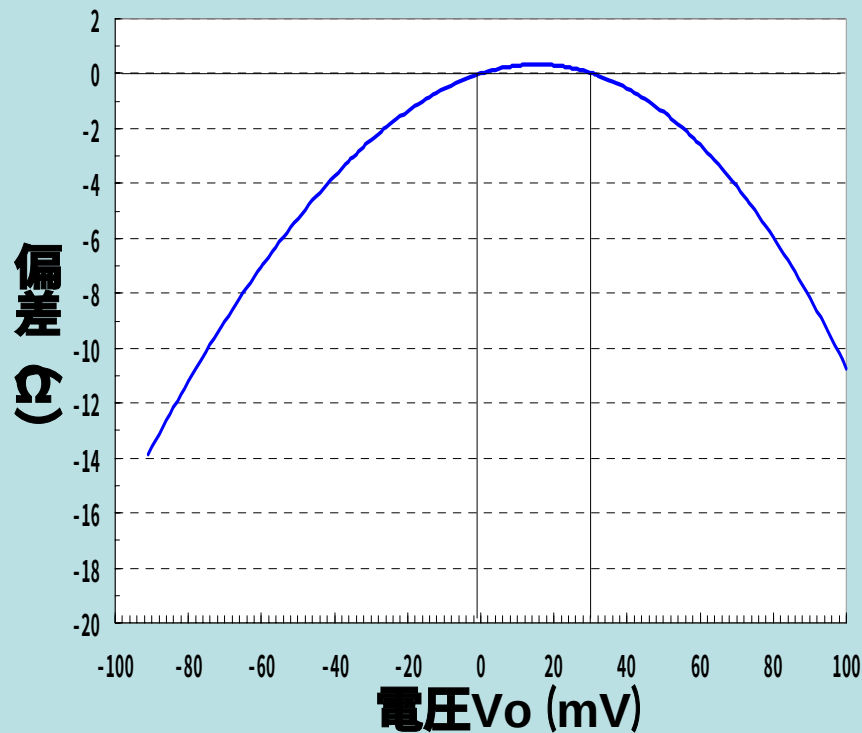
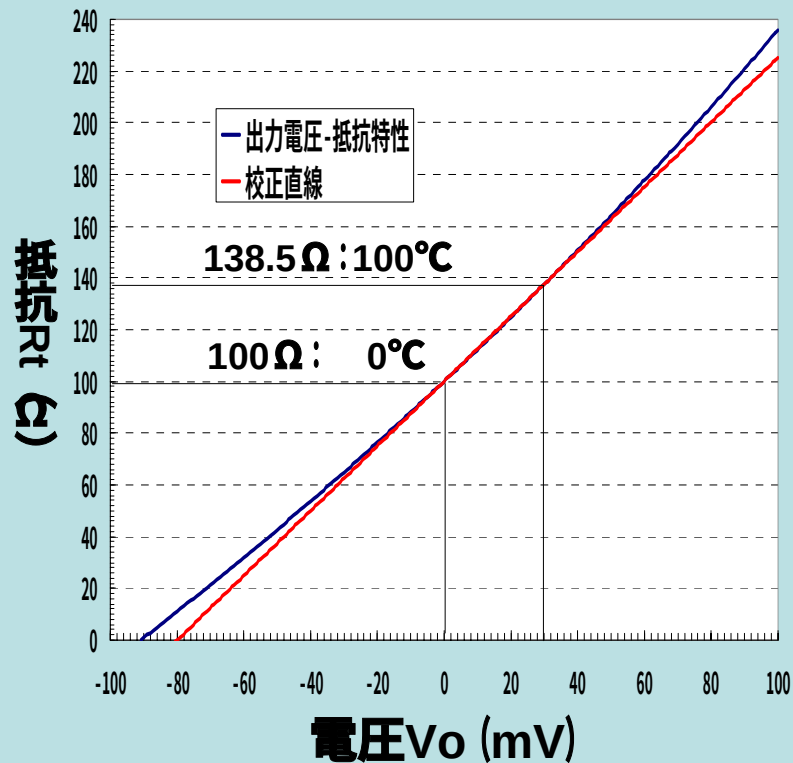
可変抵抗器の安定性・校正が問題



R_O を固定抵抗とし電圧 V_O の値から抵抗値 R_t を知る

$$R_t = R_1 \frac{\left(\frac{V_O}{V_B} + \frac{R_O}{R_2 + R_O} \right)}{\left(-\frac{V_O}{V_B} + \frac{R_2}{R_2 + R_O} \right)} = f(V_O)$$

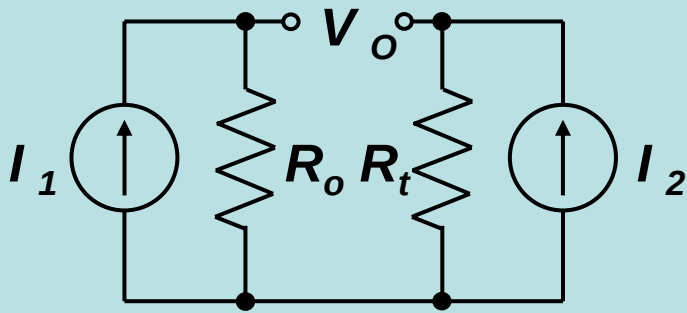
ブリッジ回路出力電圧の非直線性



非直線性誤差を防ぐには →

リニアライズ演算処理
定電流ブリッジ

定電流ブリッジ



$$I_1 = I_2 = I \quad \text{とすると}$$

$$V_O = I(R_t - R_O)$$

R_t に対して V_O は線形変化

2つの定電流源を等しく ($I_1 = I_2$)
することが困難

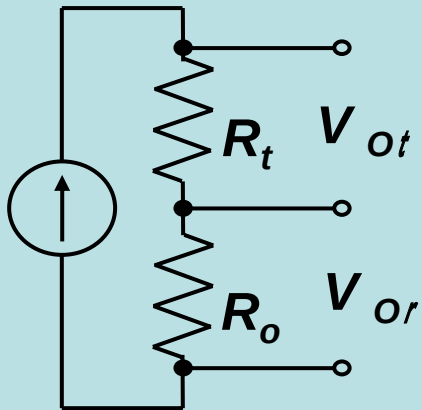
定電流ブリッジを更に発展させる



電位差法

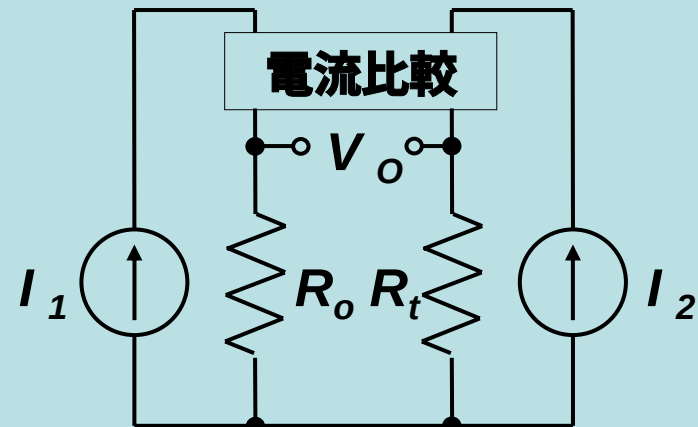
電流比較ブリッジ

電位差法



$$R_t = R_o \frac{V_{ot}}{V_{or}}$$

電流比較ブリッジ

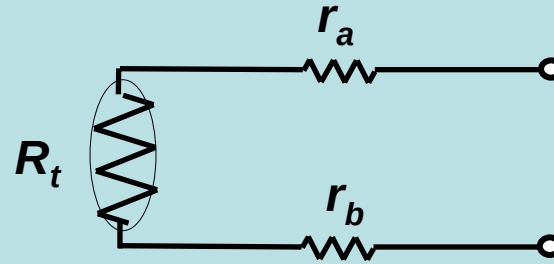


$V_o = 0$ に電流比を調整

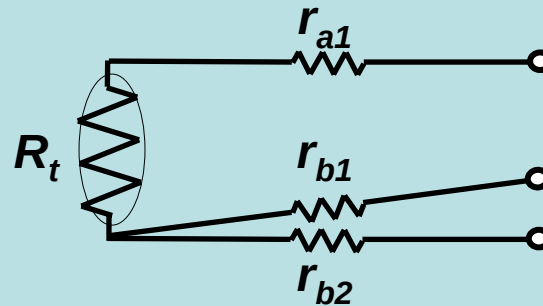
$$R_t = R_o \frac{I_o}{I_t}$$

5-2. 白金測温抵抗体の結線方法とその影響

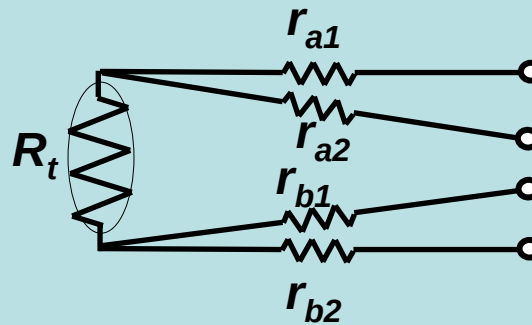
2線式



3線式



4線式



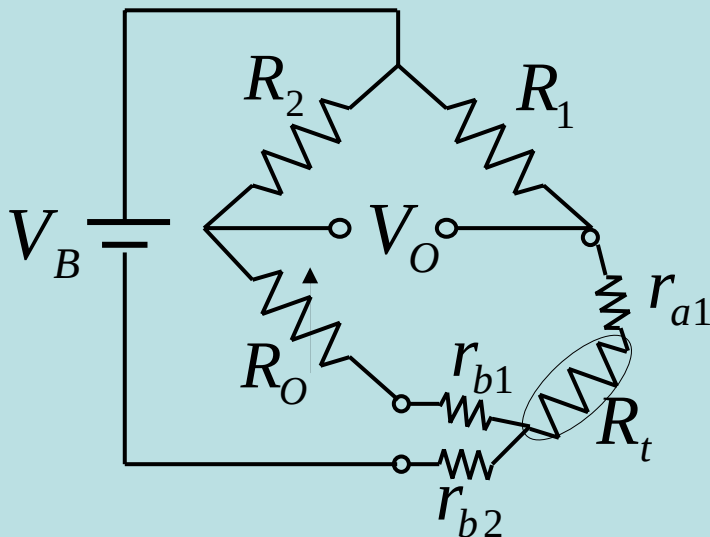
ブリッジ回路による3線式計測

R_O を調整し $V_O = 0$ とすると

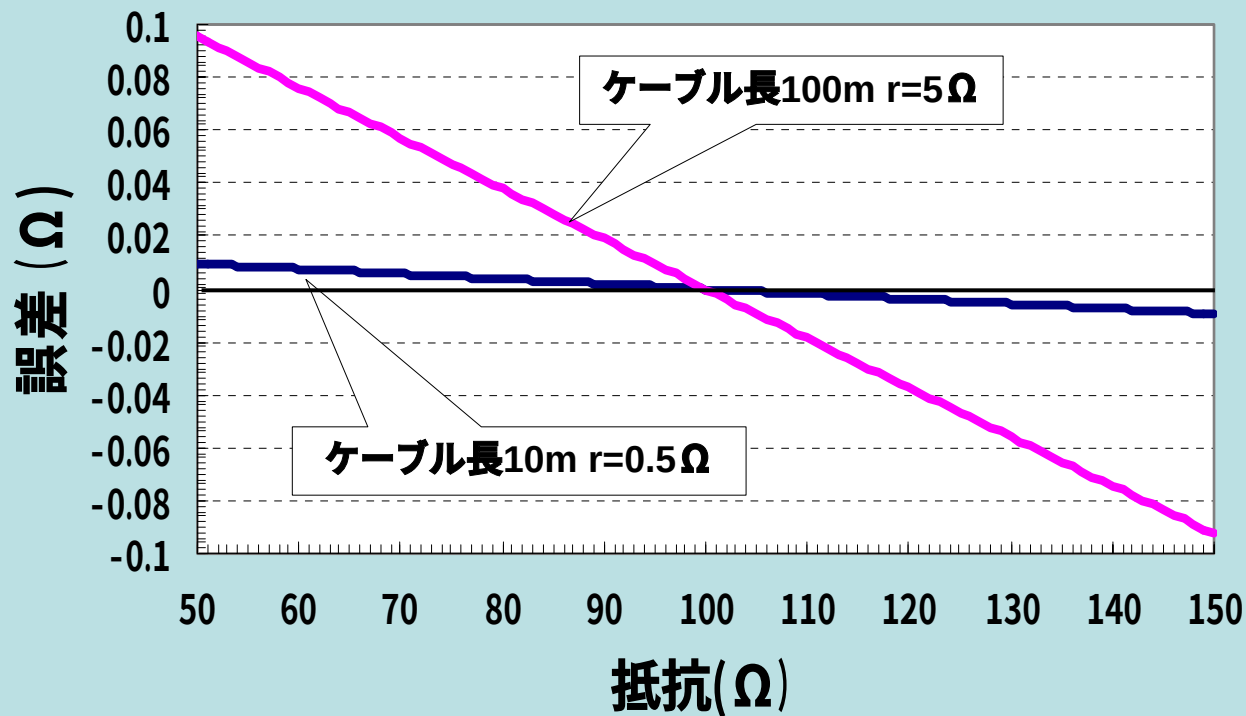
$$R_t = R_O \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_1}{R_2} r_{b1} + r_{a1}$$

$R_1 = R_2, r_{a1} = r_{b1}$ であれば

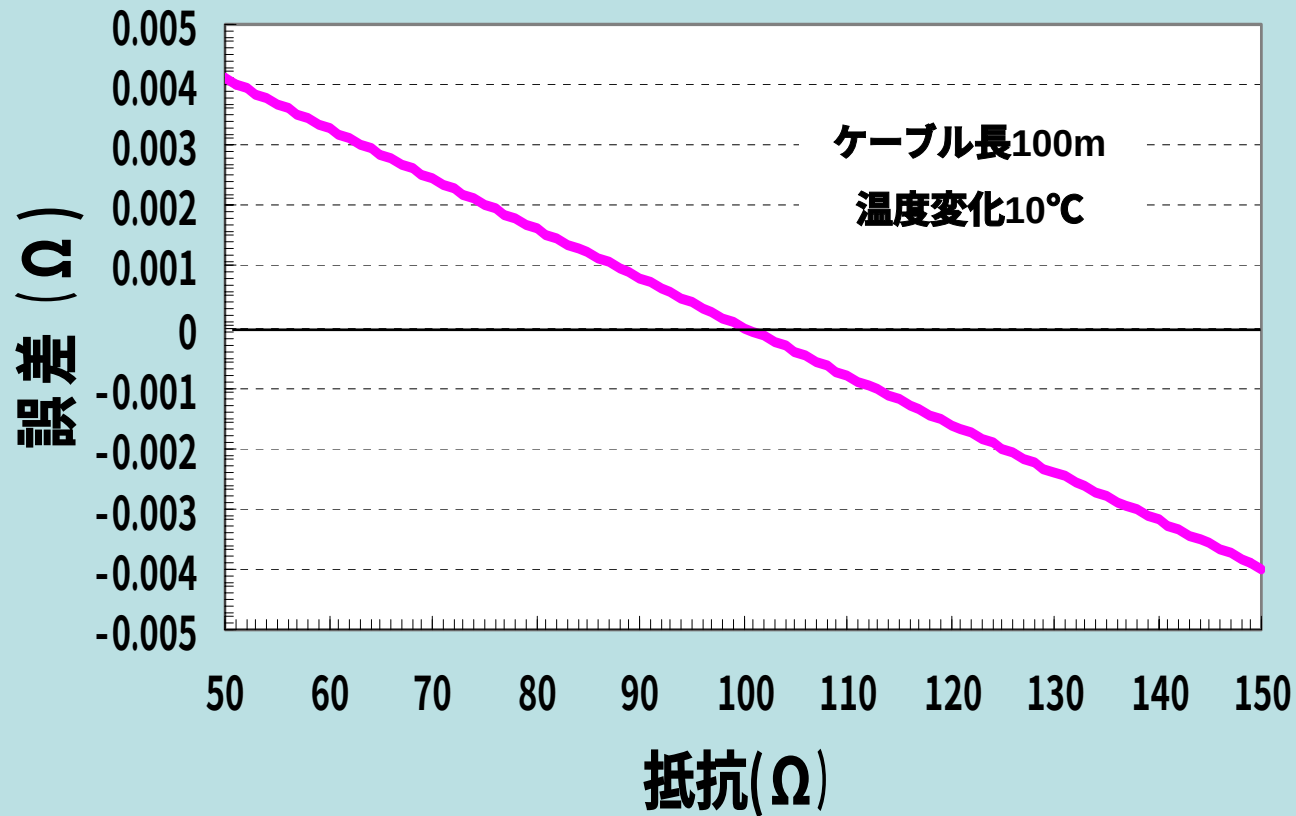
$$R_t = R_O$$



センサ・プローブ・ケーブル長による誤差



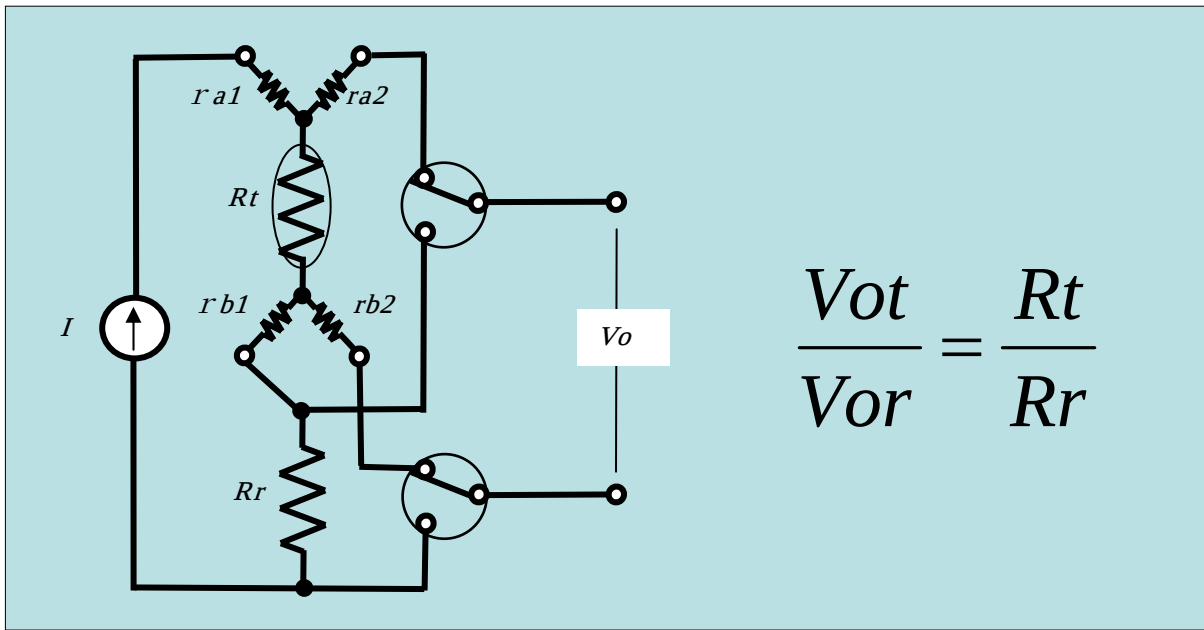
ケーブルの温度変化による誤差



銅の温度係数: 0.0043/°C



電位差法による4線式計測



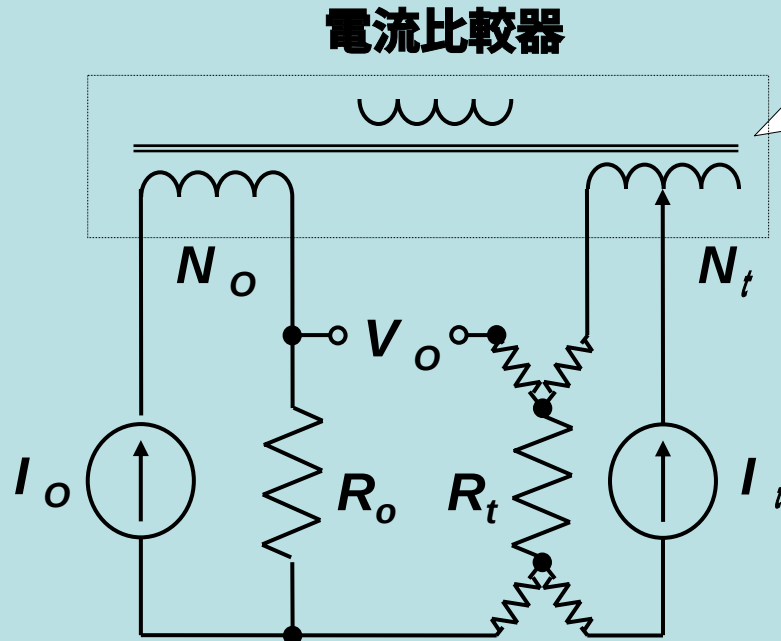
配線コードの抵抗による誤差が全く生じない

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

電流比較ブリッジによる4線式計測



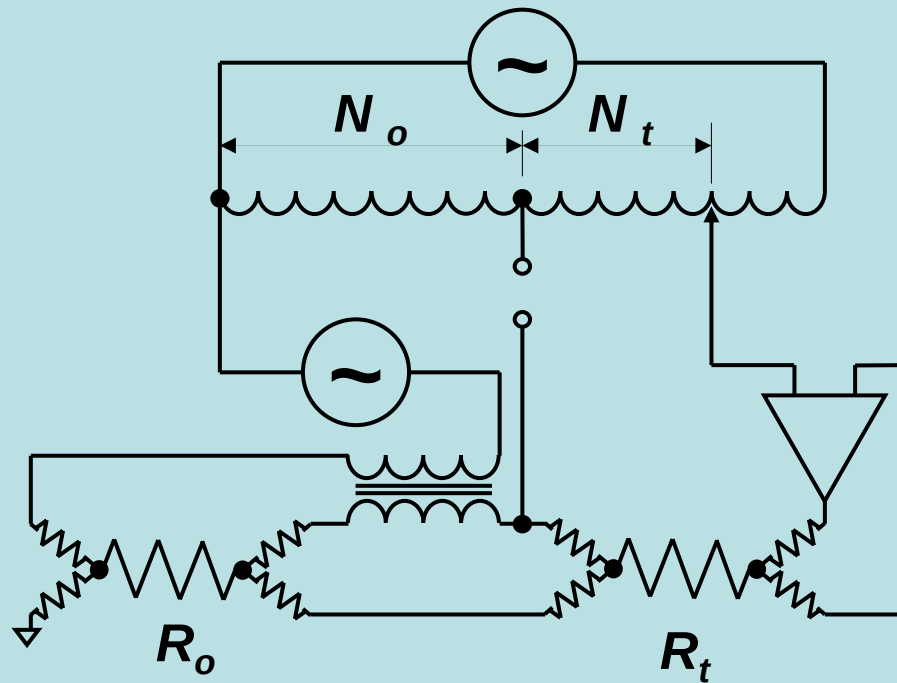
磁束が常に零になるように自動制御

$$I_o N_o = I_t N_t$$

$V_o = 0$ に電流比を調整

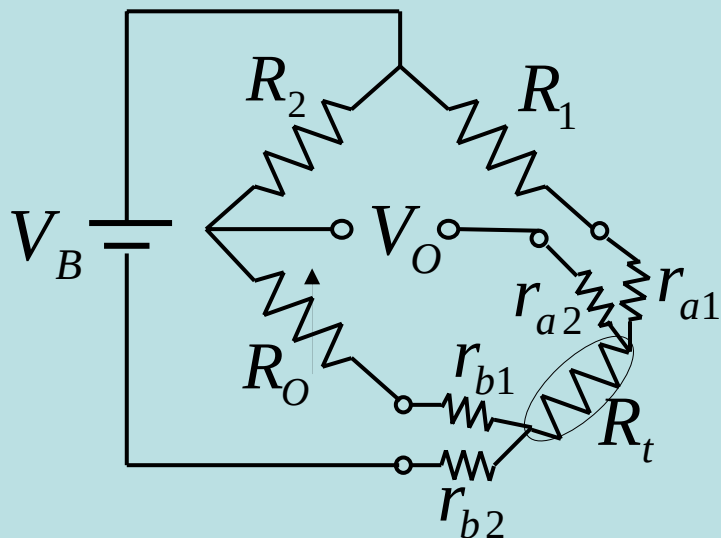
$$R_t = R_o \frac{I_o}{I_t} = R_o \frac{N_t}{N_o}$$

変成器ブリッジによる4線式計測



$$R_t = R_o \frac{N_t}{N_o}$$

ホイートストンブリッジ回路による4線式計測

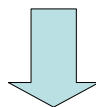


R_O を調整し $V_O = 0$ とし

$R_1 = R_2, r_{a1} = r_{b1} = r$ の場合でも

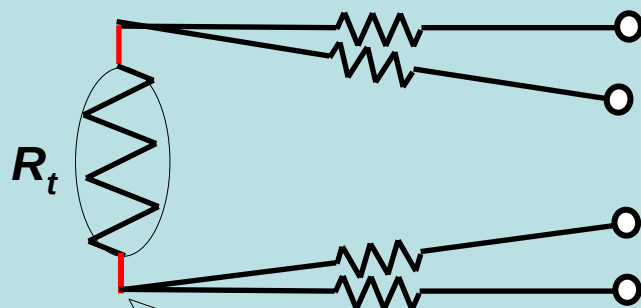
r の影響を打消すことは出来ない

$$R_t = \left(1 + \frac{r}{R_2} \right) (R_O + r)$$



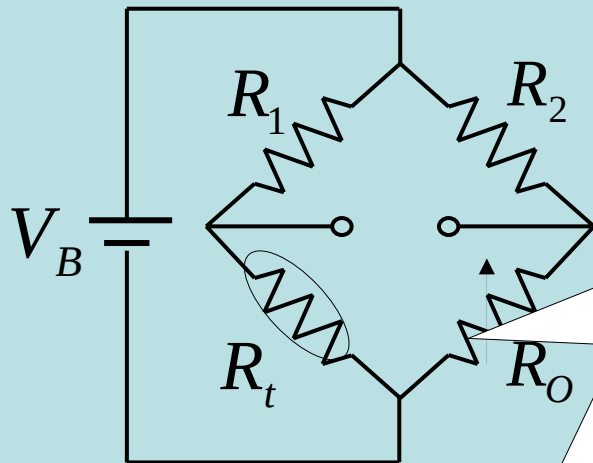
ホイートストンブリッジは4線式計測に適さない

4線式結線方法での注意点



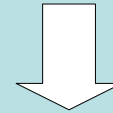
厳密にはセンサ自体の巻線と配線の分枝間の配線による誤差が存在する

5-3 ブリッジ法の問題点



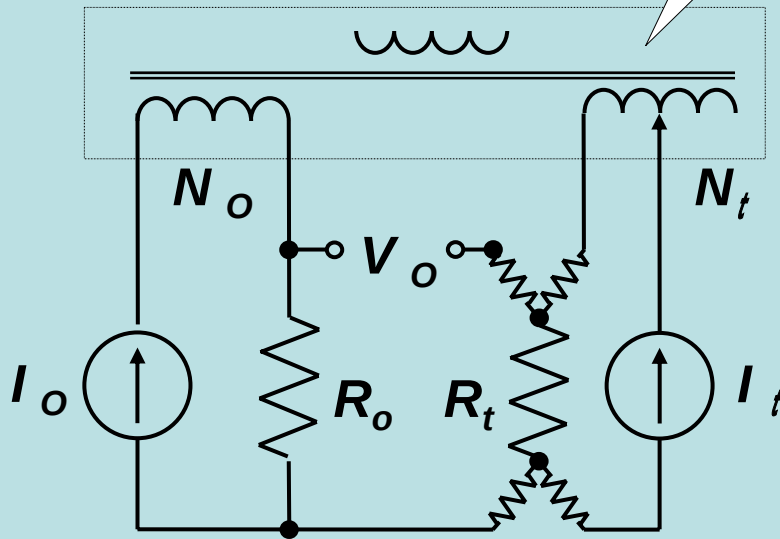
1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

6~7桁の可変標準抵抗発生器
／可変巻線数コイルが必要

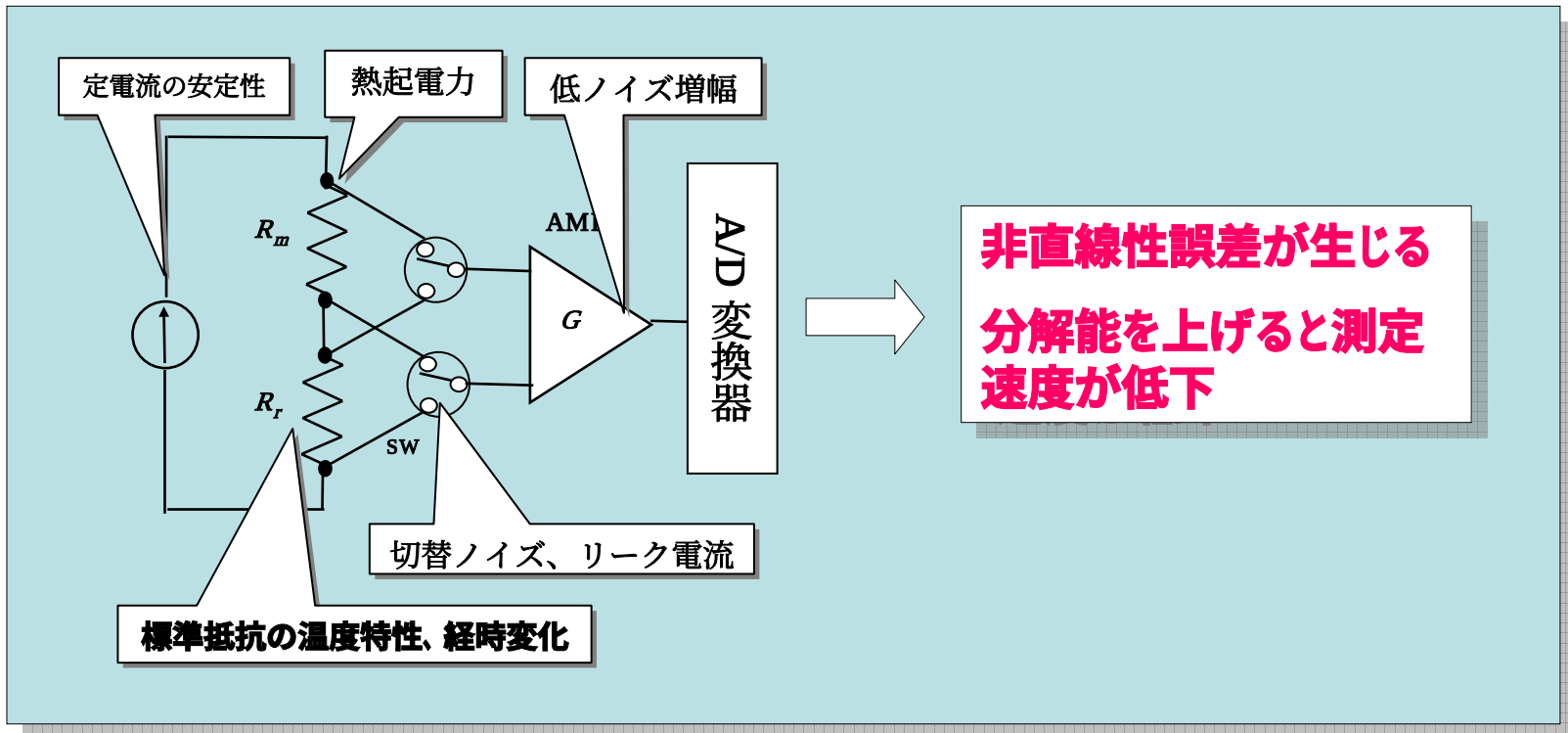


各桁数毎のバランス調整に時間がかかる

校正技術等のアナログ的に非常に高度な技術が要求される



5-4 電位差計法における問題点



5-5 高精度・高速温度計測のための理想の計測

ブリッジ法

可変標準抵抗器／可変巻線数コイルの切替調整時間が短い

電位差法

高速測定でも所要の精度 (分解能、安定性、直線性) が得られる



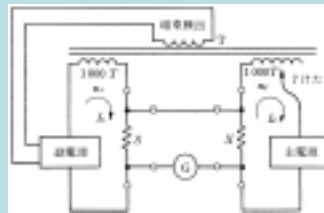
直流抵抗の精密計測

ブリッジ法

- ・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



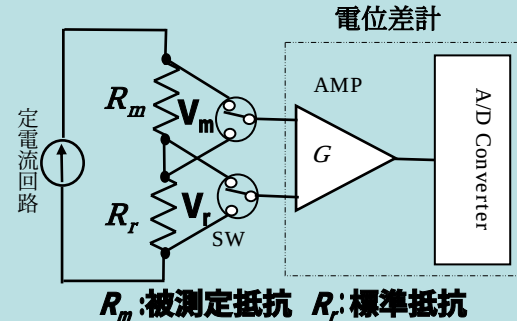
電流比較ブリッジ
(Guildline社)



電流比較ブリッジ
の原理図

電位差法

- ・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

**高精度・高速計測技術の向上には両方式の利点を
両立させる新方式が望まれる**



6. 高精度温度計測のためのソフトウェア設計

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

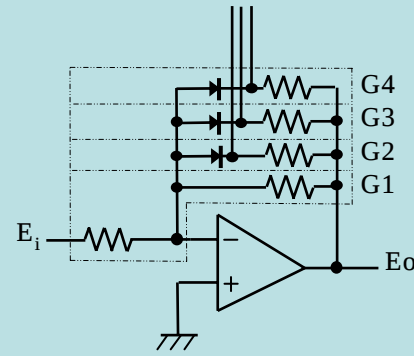
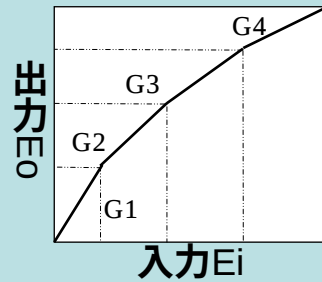
デジタル
リニアライズ

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

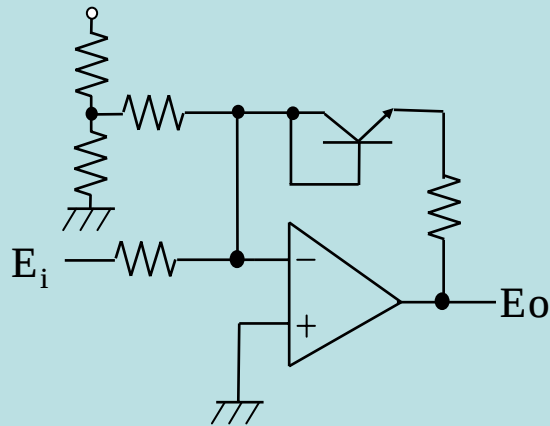


アナログ・リニアライズ (1) ー折線近似

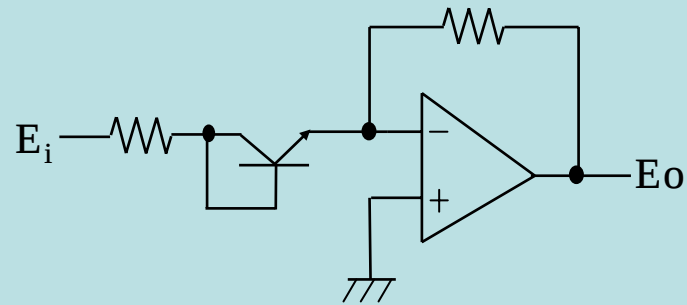


アナログ・リニアライズ (2) ー半導体特性利用

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

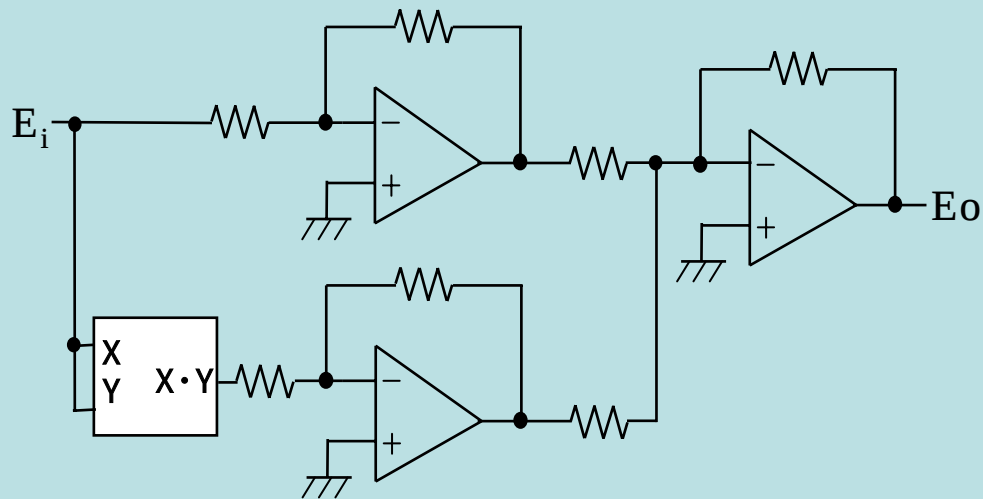


$$E_0 \propto \log E_i$$



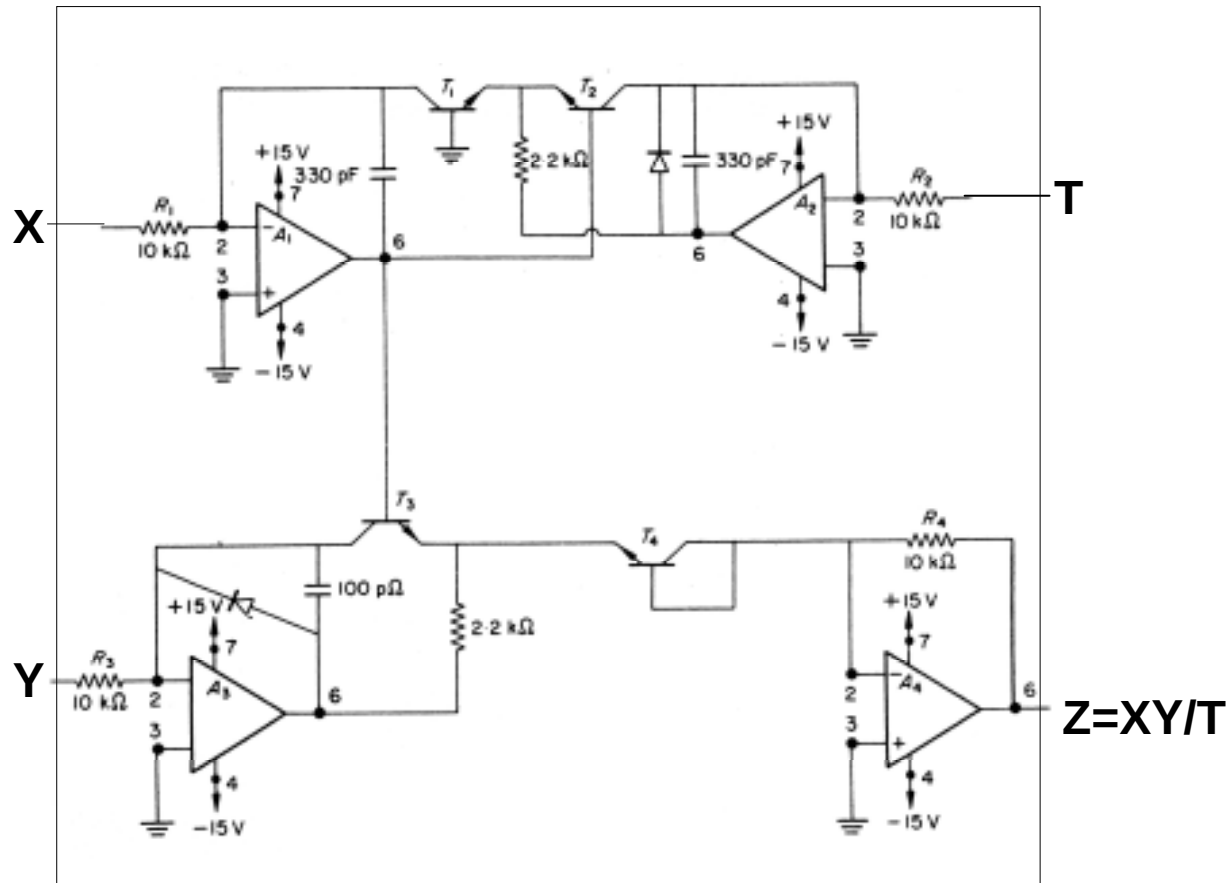
$$E_0 \propto 10^{E_i}$$

アナログ・リニアライズ (3) – IC乗算器

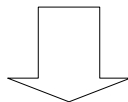


$$E_o = AE_i + BE_i^2$$

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



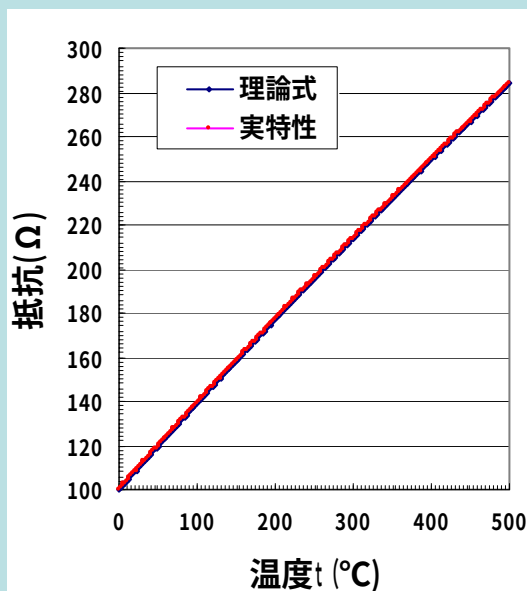
**アナログ・リニアライズを高精度温度計測
に用いると、精度・安定性上問題が生じる**

理論2次式 $R=R_0+A\cdot t+B\cdot t^2$ の誤差

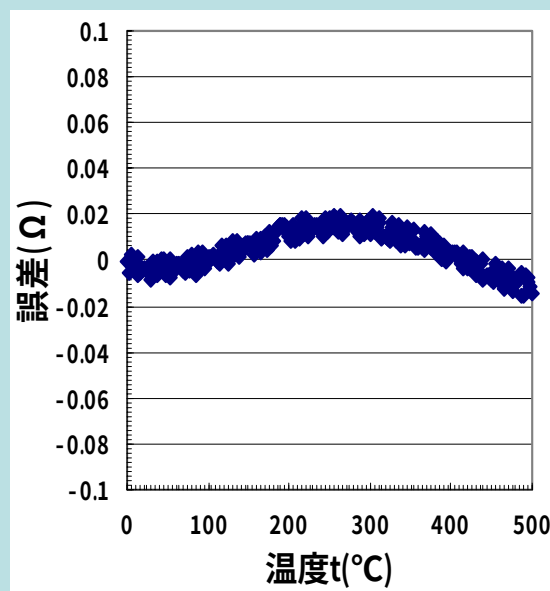
理論2次式においても最大0.016Ω (温度換算0.04°C) の誤差がある



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

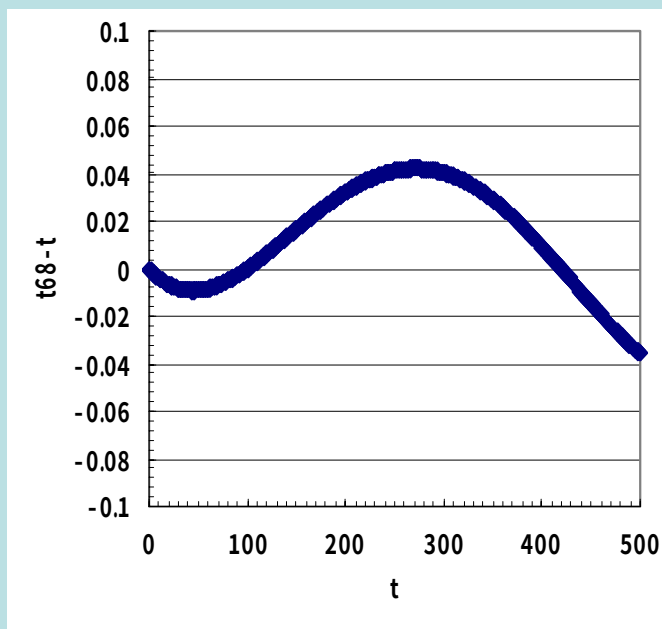


実特性に対する2次式特性の誤差

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

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

