

財団法人 神奈川科学技術アカデミー 教育研修講座

「エレクトロニクス実装における熱と信頼性」

2009年5月27日 かながわサイエンスパーク

熱設計の検証

温度計測の基礎

防衛大学校 機械工学科

中村 元

内 容

1. 接触方式による温度測定

ガラス製温度計, 熱電対, 測温抵抗体

- ・ 各測定法の特徴, 比較
- ・ 接触方式に共通する注意点
- ・ 接触方式の誤差評価

2. 非接触方式による温度測定

放射温度計

- ・ 出力と温度の関係
- ・ 温度を正しく測定する方法
- ・ 分光放射率の評価方法

3. 熱伝達率測定的基础

4. 温度・熱伝達率の測定事例

1 . 接触方式による温度測定

温度計の検出部を測定対象と物理的に良く接触させて
同じ温度に保った上で温度を測定する方式

例 :	抵抗温度計 (測温抵抗体)	物質の抵抗変化を利用
	熱電対	熱電効果 (起電力変化) を利用
	ガラス製温度計	液体の体積変化を利用

長所:

- ・ 取扱が容易
- ・ 非接触方式と比べて, 極端に大きな誤差は発生しにくい
(ただし, 正確に測定するには数多くの注意点がある)

短所:

- ・ 温度計の挿入・接触により, 温度場を乱しやすい
- ・ 応答が遅い

ガラス製温度計

原理：液体の熱膨張を利用して温度を測定する

水銀温度計：

- ・ 精度が高い (± 1 目盛, $0 \sim 100$ で ± 0.03)
- ・ 使用温度範囲が広い ($-50 \sim 650$)

有機液体温度計：

- ・ 見やすいが, 精度は劣る (± 2 目盛)
- ・ 安価
- ・ 低温域で使用できる

エタノール：	$-50 \sim 50$
白灯油：	$-30 \sim 200$
トルエン：	$-80 \sim 100$
工業用ペンタン：	$-200 \sim 200$



注意点

- ・ 視差

液注頂部と同一水平面内に目を置いて読み取る。

- ・ 浸没

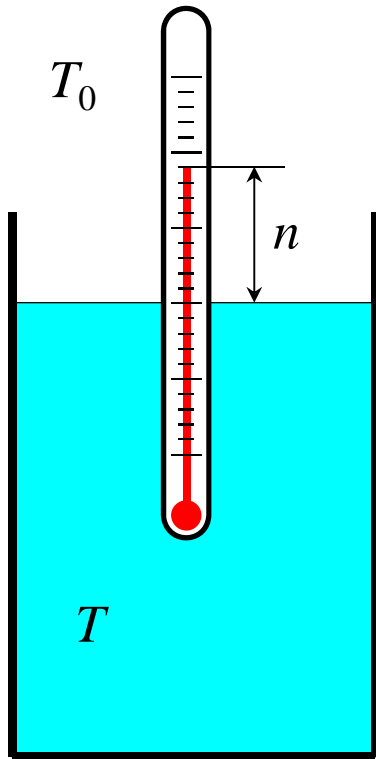
特に注意書きのない限り,完全に浸没した状態(温度計の下端から上端まで温度が均一な場合)で,正しい温度が測定される。

- ・ 振動・衝撃などによる液切れ

- ・ 放射,時間遅れ ← 接触方式に共通

- ・ 零点降下,経年変化(零点上昇),圧力の影響 ← 影響は小さい

露出部分の影響



液注部が露出していると、
正しい温度が表示されない。

露出部補正

$$\Delta T = n\alpha(T_0 - T)$$

n : 液注の露出長さ ()

α : 液体の (ガラスに対する) 熱膨張率

水銀 : $0.00016 \text{ } ^{-1}$

有機液体 : $0.0010 \text{ } ^{-1}$

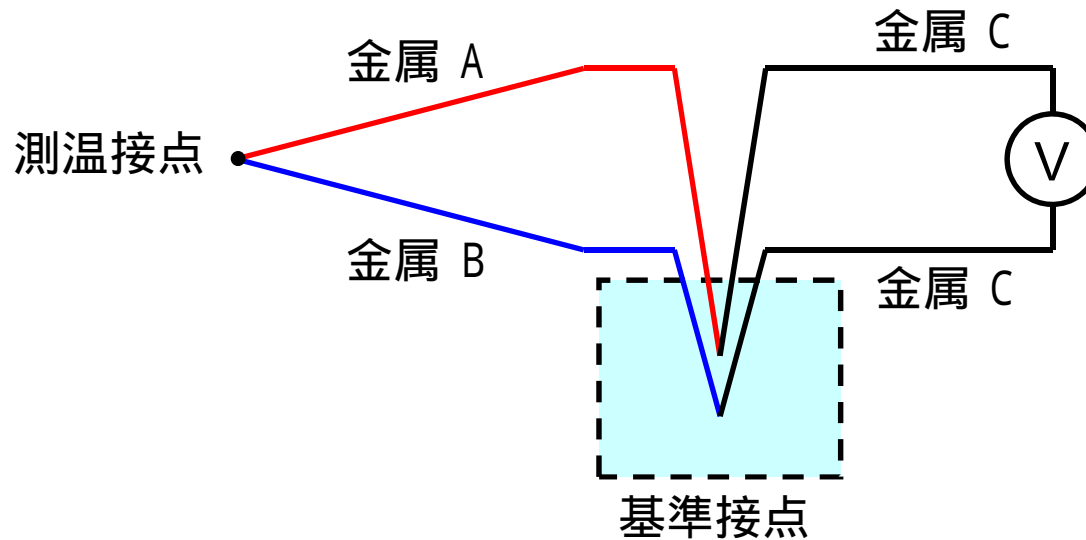
T : 測定対象の平均温度 (温度計の示度)

T_0 : 露出部の平均温度

例題 : $T = 100$, $T_0 = 30$, $n = 80$ の場合 , 温度計の示度は何 になるか ?

熱電対

原理：異種の金属線を接合すると、その両端の温度差に応じて起電力が発生するため、これを測定して温度を求める。



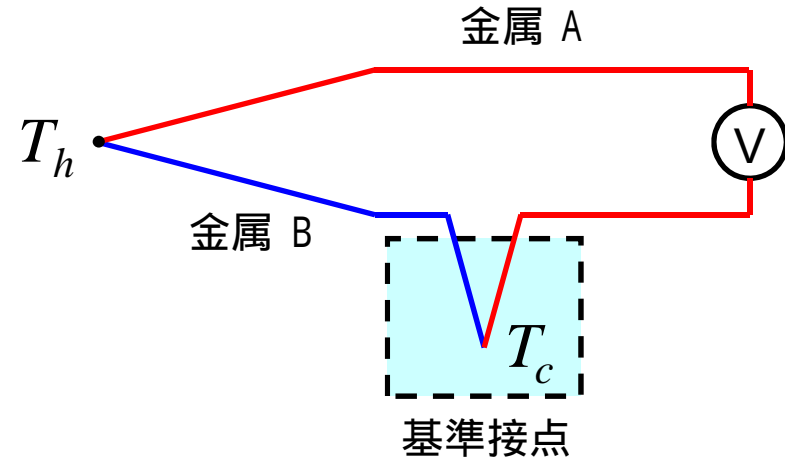
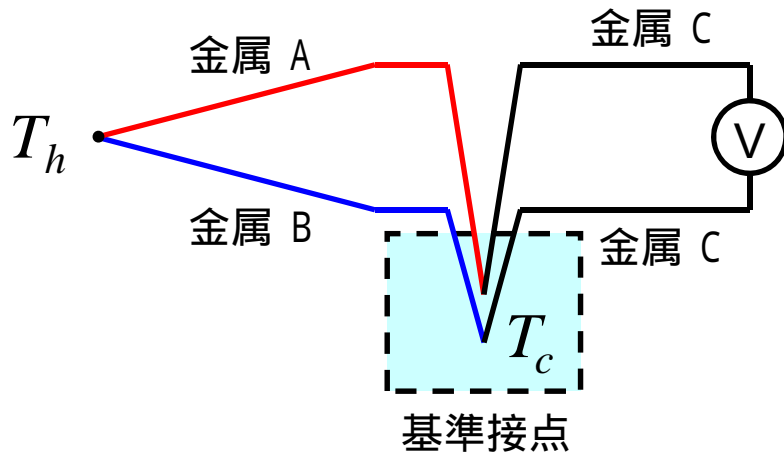
JIS規格では、基準接点が 0 の場合の起電力が規定されている。

熱電対の種類

JIS Z 8710 付表4 より

記号	階級	素線径 (mm)	常用限度 (°C)	過熱使用限度 (°C)	特徴	トレーサブルな温度範囲及び精度 (4)
クロメル - アルメル	K 0.4級	0.65	650	850	<u>起電力の直線性が良い。</u>	0~1100 °C ±50 μV
	0.75級	1.0	750	950	酸化性雰囲気に適する。	
	1.5級	1.6	850	1050	金属蒸気に強い。	
		2.3	900	1100	やや熱履歴変化がある。	
		3.2	1000	1200		
クロメル - コンスタantan	E 0.4級	0.65	450	500	<u>熱起電力が大きい。</u>	0~700 °C ±50 μV
	0.75級	1.0	500	550	非磁性である。	
	1.5級	1.6	550	650	K熱電対より安価。	
		2.3	600	750	やや熱履歴変化がある。	
		3.2	700	800		
鉄 - コンスタantan	J 0.4級	0.65	400	500	熱起電力がやや大きい。	0~600 °C ±50 μV
	0.75級	1.0	450	550	熱起電力の直線性がよい。	
		1.6	500	650	還元性雰囲気に適する。	
		2.3	550	750	安価, 特性, 品質のばらつきが大きい。	
		3.2	600	750	<u>さびやすい</u> 高温で熱履歴変化がある。	
銅 - コンスタantan	T 0.4級	0.32	200	250	<u>低温での特性がよい。</u> (~ 200)	0~300 °C <u>±30 μV</u>
	0.75級	0.65	200	250	均質性がよい。	
	1.5級	1.0	250	300	安価, 還元性雰囲気に適する。	
		1.6	300	350	<u>熱伝導誤差が大きい。</u>	

熱電対の結線方法（基本形）



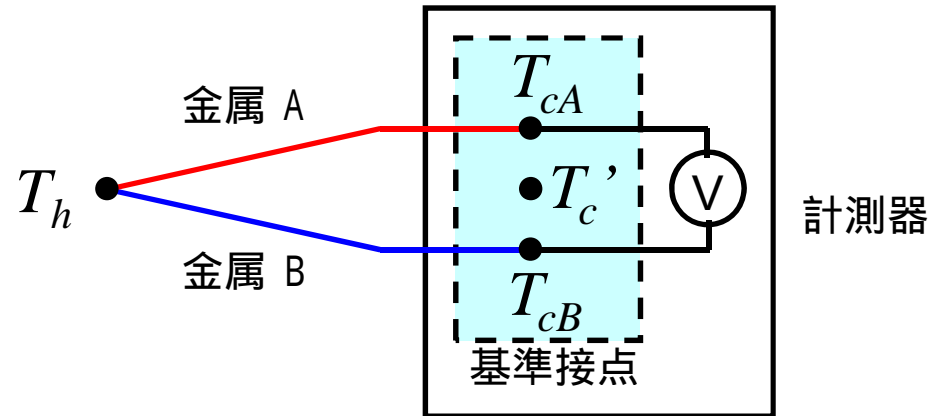
氷点式の基準接点を用いた場合

- ・ 氷点の精度(可溶性の不純物がない場合)は $\pm 0.003 \sim \pm 0.01$
- ・ 慎重に校正を行えば, 常温で ± 0.1 の精度も可能
- ・ JIS C 1602 では, クラス1 (0.4級) の熱電対を用いた場合の精度は

K熱電対 : -40 ~ 375 で ± 1.5

T熱電対 : -40 ~ 125 で ± 0.5

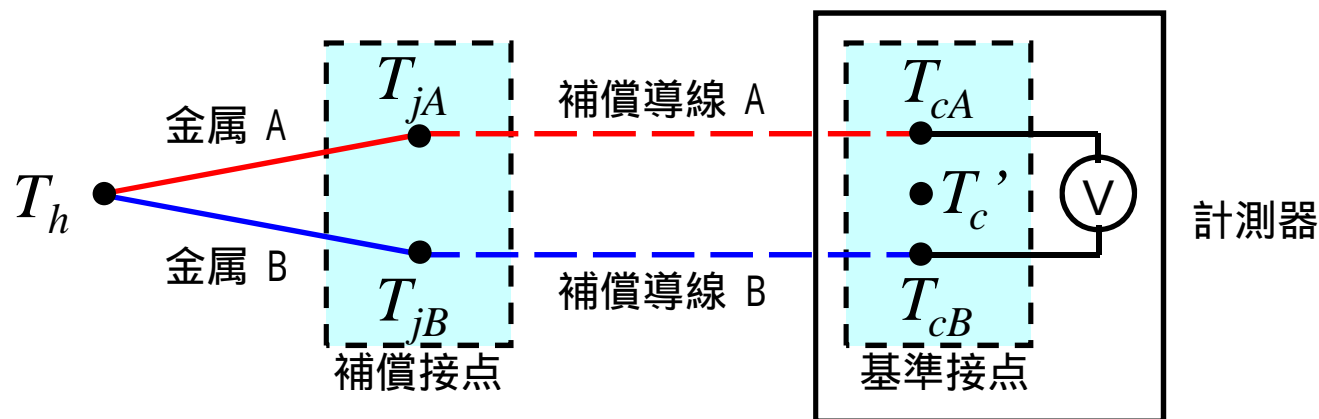
熱電対の結線方法（計測器による温度補償）



計測器に内蔵された温度計で基準接点温度 T_c' を測定し、温度補償する場合、以下の測定誤差が発生する。

- ・ T_c' の測定誤差
- ・ $T_c' \neq T_{cA} \neq T_{cB}$ による誤差
- ・ 基準接点温度が 0 でないため、温度補償の誤差が発生

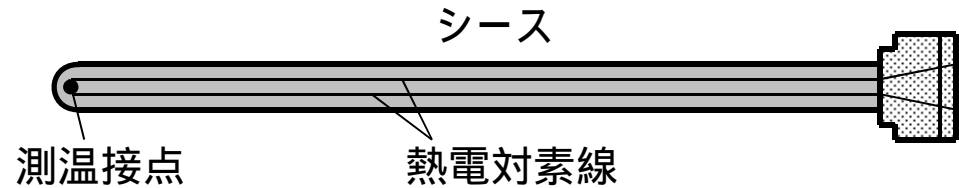
熱電対の結線方法（補償導線 + 計測器による温度補償）



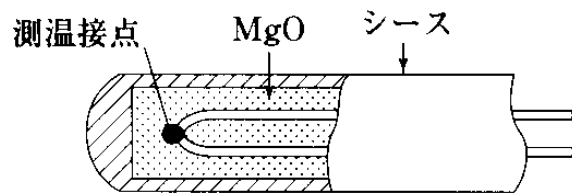
補償導線を用いることにより、以下の測定誤差が発生する。

- ・ 補償導線と熱電対の熱起電力特性は完全には一致しないため、 $T_j \neq T_c$ による誤差が発生する。
- ・ $T_{jA} \neq T_{jB}$ による誤差が発生

シース熱電対

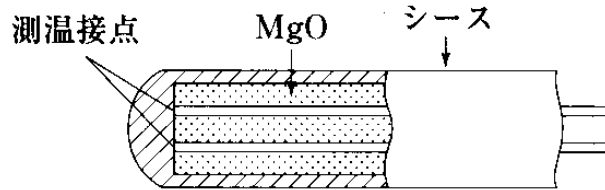


- 特長
- ・ 機械的強度が増強される。
 - ・ 素線が酸化されにくく、細いわりに耐熱性がある。



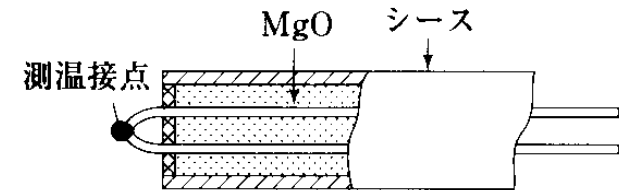
非接地型

- ・ 素線が電氣的に絶縁
- ・ 応答が遅い



接地型

- ・ 比較的応答が速い



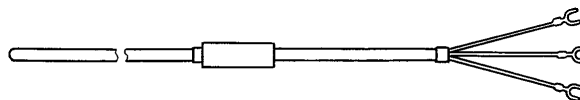
露出型

- (JIS に規定されていない)
- ・ 応答が非常に速い
 - ・ 気密性、機械的強度が劣る

測温抵抗体

原理 : 金属等の電気抵抗の変化から温度を求める.

白金測温抵抗体
(白金抵抗温度計)



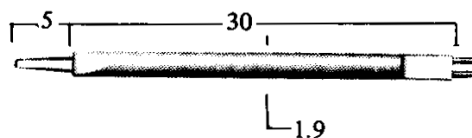
$\phi 10 \sim 40 \mu\text{m}$ 程度の
白金の巻き線
(シースの先端に封入されている)

サーミスタ



金属の酸化物等からなる

極細抵抗線
(冷線プローブ)



$\phi 1 \mu\text{m}$ 程度の白金細線
(気体の温度変動測定に使用)

白金測温抵抗体

特長

- ・ 温度 - 抵抗の直線性が良く
使用温度範囲が広い
- ・ 安定性が良い

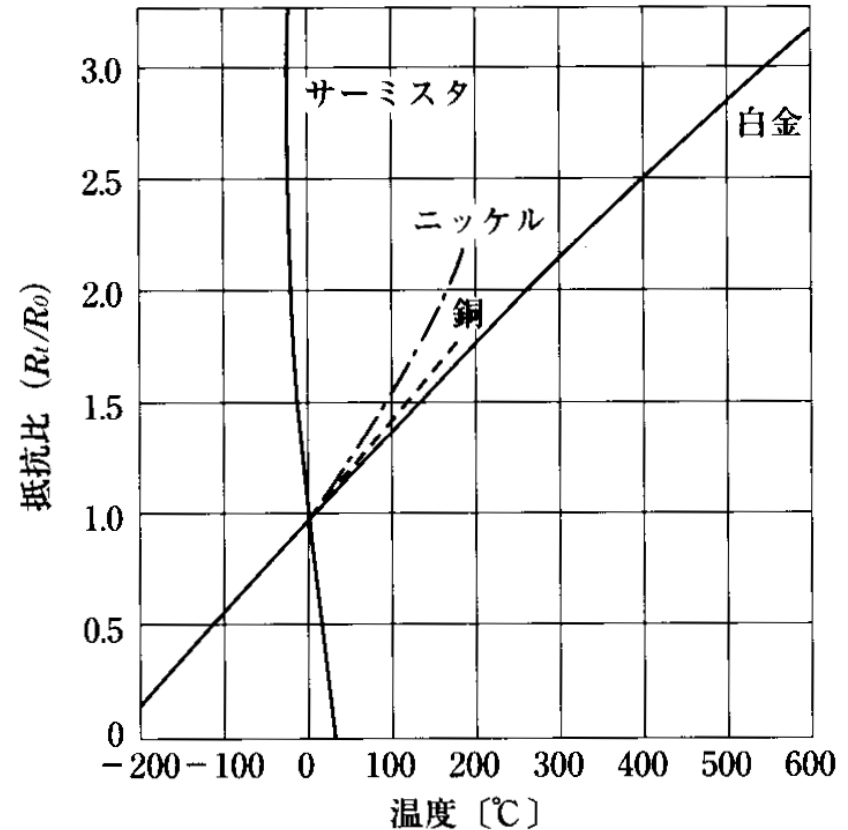


精度が良い

JIS クラスA : $\pm (0.15 + 0.002|t|)$

クラスB : $\pm (0.3 + 0.005|t|)$

高精度の製品では、フルレンジで
0.01 の精度も可能

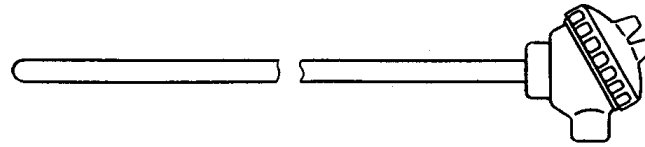


白金測温抵抗体は、 -259.3467 (平衡水素の三重点) から 961.78 (銀の凝固点) までの補間標準 (温度の定義定点を補間する標準計器) として使われている。

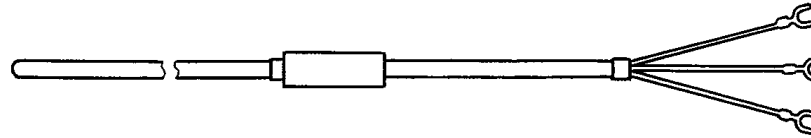
白金測温抵抗体（シース測温抵抗体）

外形

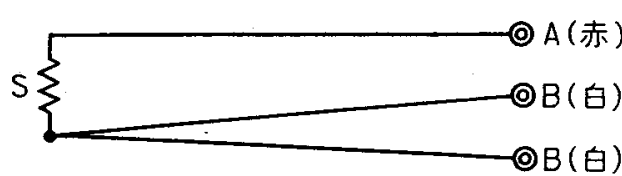
端子板付



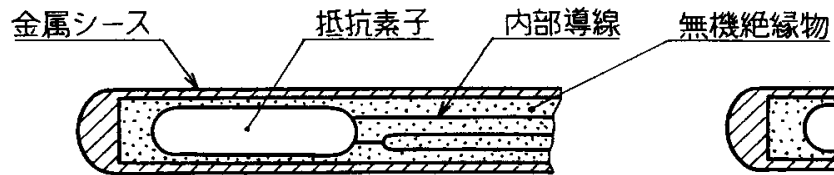
端子板なし



結線方式



導線抵抗の影響を
除くため、一般には
3導線式が用いられる

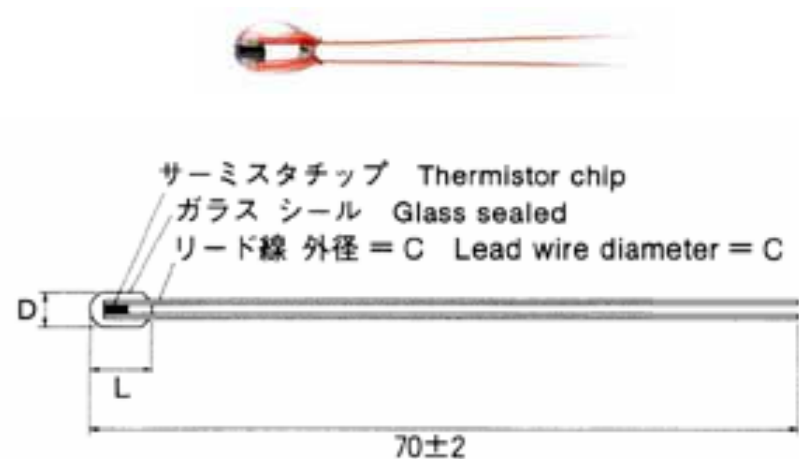


3導線式

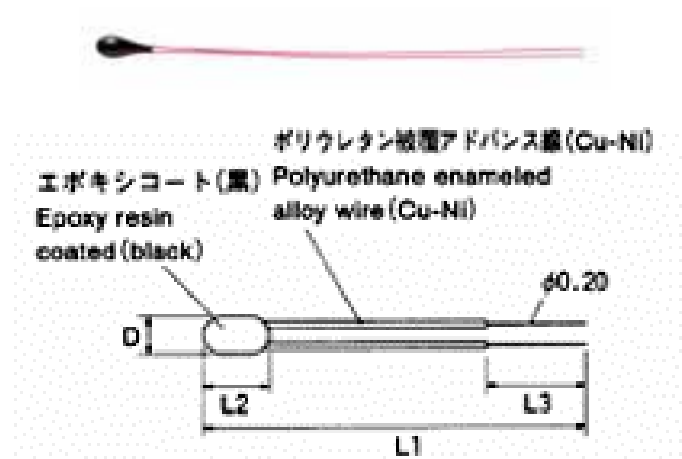
4導線式

サーミスタ

- 特徴**
- ・ 温度係数が大きく、感度が非常に良い
→ 温度分解能が高い (0.0001 の分解能の製品も)
 - ・ 小型にできるため、応答が速い
 - ・ 測定温度範囲が狭い
 - ・ 壊れやすい(熱電対や白金測温抵抗体と比べて)



使用温度範囲：-55 ~ 300

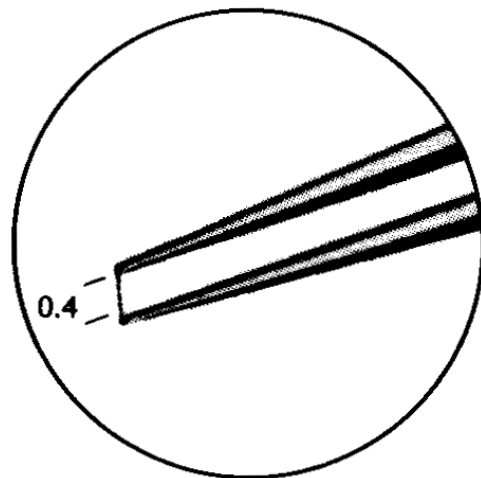


使用温度範囲：-20 ~ 100

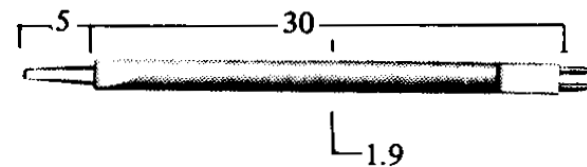
極細抵抗線（冷線プローブ）

気体の高速な温度変動を測定する際に使用
(熱線流速計のシステムを使用して測定)

- 特徴**
- ・ 応答が非常に速い (空気の温度変動を最大で 10 kHz 程度まで測定可能)
 - ・ 細線が切れやすい
 - ・ 測定の度に校正する必要がある



55P31直線型プローブ



センサー：長さ0.4mm、直径1 μ m、
プラチナワイヤー
支持：直径4mmプローブサポート

熱電対と測温抵抗体の比較

JIS Z 8704, 表5

測温体	利点	欠点
熱電対	<ul style="list-style-type: none"> (1) 小さい箇所の温度の測定ができる。 (2) 遅れを小さくすることができる。 (3) 振動・衝撃などに対して丈夫である。 (4) <u>温度差を測るのに都合がよい。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> (1) <u>基準接点が必要である。</u> (2) 基準接点及び補償導線の誤差を考える必要がある。
測温抵抗体	<ul style="list-style-type: none"> (1) ある大きさの部分の平均温度を測定するのに都合がよい。 (2) 基準接点などを必要としない。 (3) 熱電対に比較して常温，中温付近で<u>精度が良い。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> (1) <u>遅れを小さくしにくい。</u> (2) 振動の強い場所では破損のおそれがある。 (3) 自己加熱に注意する必要がある。 <p><u>高価</u></p>
サーミスタ測温体	<ul style="list-style-type: none"> (1) 小さい箇所の温度測定ができる。 (2) 基準接点などを必要としない。 (3) <u>感度が非常に良い。</u> (4) 導線の抵抗による誤差を無視できる場合が多い。 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 抵抗と温度との非直線性が大きく，使用温度範囲が限定される。 (2) <u>自己加熱に注意する必要がある。</u> (3) 多くの場合，互換用抵抗を必要とする。 (4) <u>衝撃によって破損するおそれがある。</u>

熱電対： 最も柔軟な温度センサ
 白金測温抵抗体： 安定度が高く，高精度
 サーミスタ： 最も高感度

接触方式に共通する注意点

1. 温度検出素子と測定対象の温度を等しくする

1) 接触熱抵抗を小さくする

- ・ 接触面での空気の混入を無くす
- ・ 高熱伝導グリスなどを使用する

2) シースやリード線への熱損失を小さくする

- ・ 等温線に沿わせる
- ・ できるだけ深く挿入する
(金属シースの場合, 直径の15 ~ 20倍挿入する)

3) 自己発熱を小さくする (測温抵抗体・サーミスタの場合)

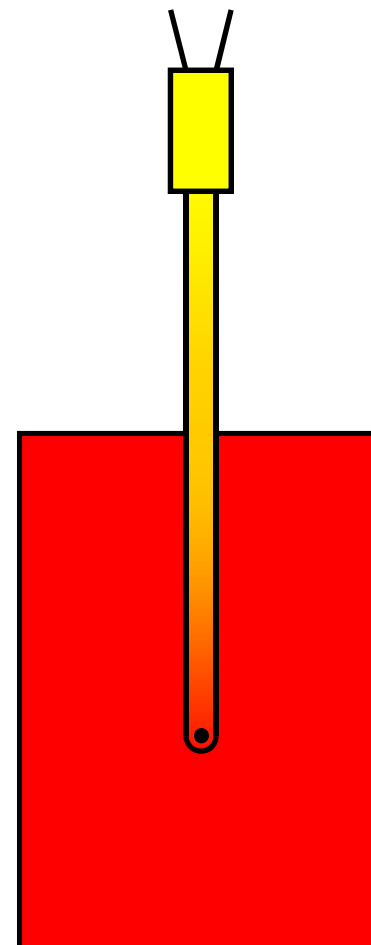
- ・ 電流を十分小さくする

4) 時間遅れを小さくする

- ・ 十分に定常待ちする
- ・ 応答の速い検出素子を使用する

5) 放射伝熱を小さくする (気体温度の測定の場合)

- ・ 温度検出部の放射率を低くする
- ・ 高温の熱源を近づけない



2. 温度計の取付けによる測定対象の温度変化を小さくする

- 1) 温度検出部の熱容量を十分小さくする (熱容量 = 質量 × 比熱)
 - ・ 測定対象の熱容量が小さい場合は, 素線径の小さな熱電対など熱容量の小さなものを用いる

- 2) シースやリード線への熱損失を小さくする
 - ・ 測定対象の熱容量が小さい場合は, シースやリード線を細くする (熱抵抗を大きくする)

- 3) 放射伝熱に変化を与えない (表面温度測定の場合)
 - ・ 温度検出部の放射率を, 測定面の放射率と等しくする

接触方式の誤差評価

1. 熱伝導誤差 (例: 熱電対素線への熱伝導による温度測定誤差)

1) 固体表面温度の測定 (固体の熱容量が十分大きい場合)

温度測定誤差

$$\Gamma = \frac{T_j - T_{ws}}{T_f - T_{ws}} = \frac{1}{1 + 4\lambda_w / \sqrt{\pi\lambda_a G_f}}$$

$$\frac{1}{G_f} = \frac{1}{2\pi r_{as} h} + \frac{\ln(r_{as}/r_a)}{2\pi\lambda_i}$$

T_j : 熱電対接点温度

T_{ws} : 固体表面温度

T_f : 流体温度

$2r_a$: 素線の等価直径

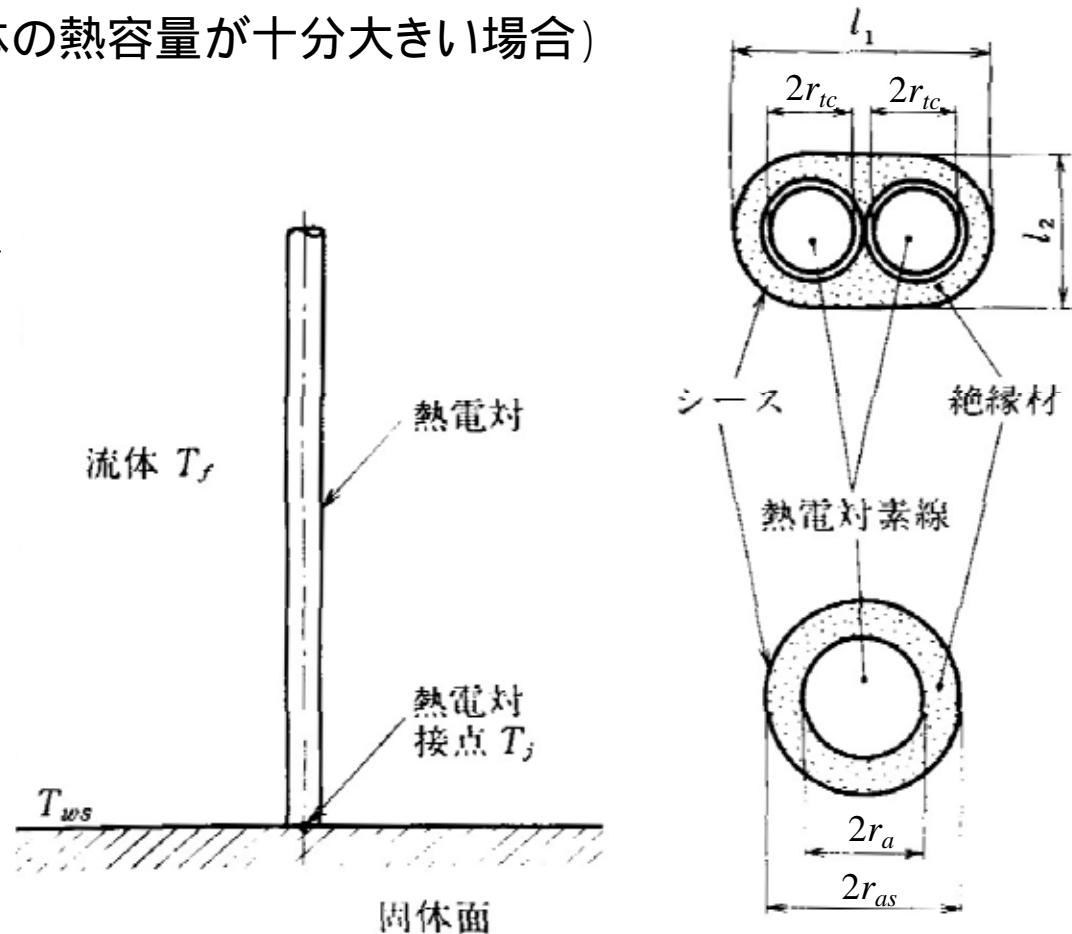
$2r_{as}$: シースの等価直径

λ_a : 素線の等価熱伝導率

λ_i : シース断熱材の熱伝導率

λ_w : 固体の熱伝導率

h : 熱電対-流体間の熱伝達率



固体表面温度の測定例

(伝熱工学資料 改訂第4版, p.297)

計算例

外径 1 mm のビニールに被膜された素線径 0.2 mm の熱電対の場合

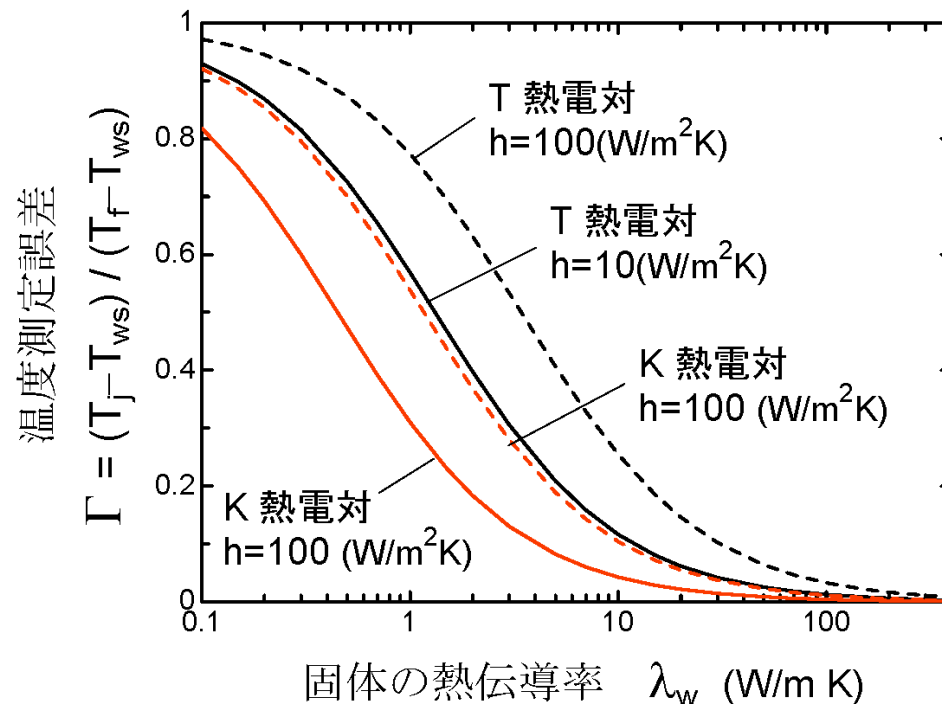
素線等価直径 $2r_a = 0.28 \times 10^{-3} \text{ m}$

シース等価直径 $2r_{as} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$

素線等価熱伝導率 (T熱電対) $\lambda_a = (400+22)/2 = 211 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

素線等価熱伝導率 (K熱電対) $\lambda_a = (19+30)/2 = 24.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

シース断熱材熱伝導率 $\lambda_i = 0.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$



固体の熱伝導率が十分大きい場合を除いて、熱伝導誤差が非常に大きくなる

T 熱電対では素線に銅が用いられているので、熱伝導誤差が大きくなる

2) 固体内部温度の測定 (固体の熱容量が十分大きく, 温度が一様の場合)

温度測定誤差 (Satyamurthy et al., Int. J. Heat Mass Transf., 22 (1979), pp.1151-1154)

$$\Gamma = \frac{T_j - T_w}{T_f - T_w} = \frac{\exp(-m_w l_{tc})}{2 \left(1 + m_w / m_f + m_j / m_f + m_j / m_w \right)}$$

$$m_w = \sqrt{G_w / (\lambda_a \pi r_a^2)} \quad \frac{1}{G_w} = \frac{\ln(r_h / r_{as})}{2\pi\lambda_h} + \frac{\ln(r_{as} / r_a)}{2\pi\lambda_i} \quad G_w : \text{素線-固体の熱コンダクタンス}$$

$$m_f = \sqrt{G_f / (\lambda_a \pi r_a^2)} \quad \frac{1}{G_f} = \frac{1}{2\pi r_{as} h} + \frac{\ln(r_{as} / r_a)}{2\pi\lambda_i} \quad G_w : \text{素線-流体の熱コンダクタンス}$$

$$m_j = G_j / (\lambda_a \pi r_a^2) \quad G_j = \frac{\lambda_h \pi r_a^2}{\delta} \quad G_w : \text{測温接点-固体の熱コンダクタンス}$$

T_j : 熱電対接点温度

λ_a : 素線等価熱伝導率

T_w : 固体温度

λ_i : シース断熱材熱伝導率

T_f : 流体温度

λ_h : 挿入孔充填材熱伝導率

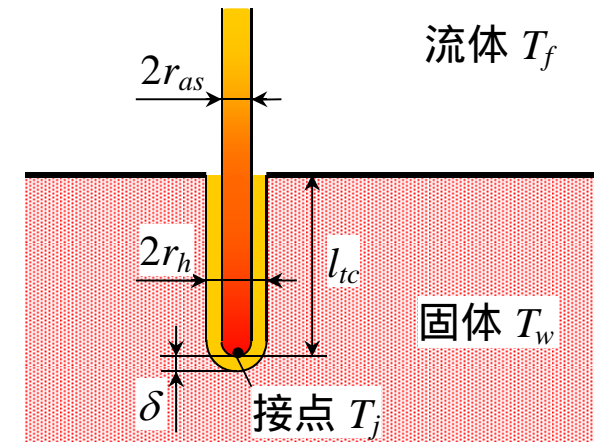
$2r_a$: 素線等価直径

δ : 測温接点-固体の間隔

$2r_{as}$: シース等価直径

h : 熱電対-流体間の熱伝達率

$2r_h$: 挿入孔直径



計算例

外径 1 mm のビニールに被膜された素線径 0.2 mm の熱電対の場合

素線等価直径 $2r_a = 0.28 \times 10^{-3} \text{ m}$

シース等価直径 $2r_{as} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$

挿入孔直径 $2r_h = 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$

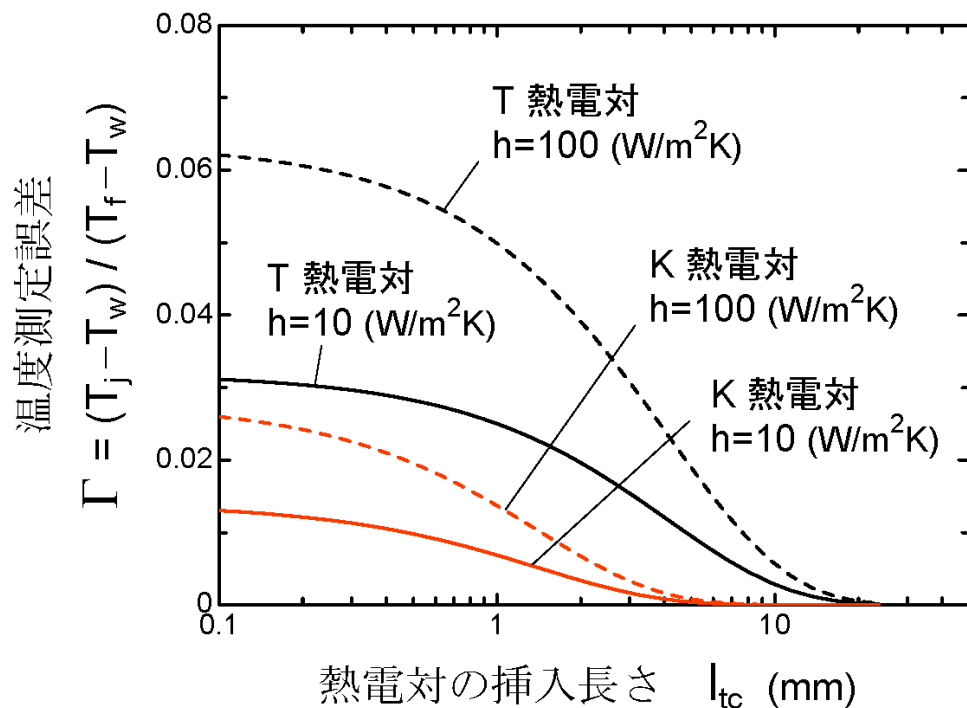
素線等価熱伝導率 (T熱電対) $\lambda_a = (400+22)/2 = 211 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

素線等価熱伝導率 (K熱電対) $\lambda_a = (19+30)/2 = 24.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

シース断熱材熱伝導率 $\lambda_i = 0.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

挿入孔充填材熱伝導率 $\lambda_h = 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

測温接点-固体の間隔 $\delta = 0.1 \times 10^{-3} \text{ m}$



シース径(1 mm)の10倍以上挿入すれば, 誤差 Γ は 1% 以下になる

T 熱電対では素線に銅が用いられているので, 熱伝導誤差が大きくなる

2. 応答性誤差 (例: 流体温度の測定の場合)

温度検出素子が十分小さくて素子内の温度が均一であり、かつ素子の温度が周囲の流体との熱伝達のみで変化する場合 (リード線への熱損失が非常に小さく無視できる場合)、素子の時定数 (63.2%回復するまでの時間) τ_c は次式で表される。

$$\tau_c = \frac{\rho V c}{h A}$$

ρ, c : 素子の密度, 比熱

V, A : 素子の体積, 表面積

h : 素子-流体間の熱伝達率

素子が球の場合

$$\tau_c = \frac{\rho c d}{6h}$$

d : 球の直径

素子が円柱の場合

$$\tau_c = \frac{\rho c d}{4h}$$

d : 円柱の直径

素子が薄膜の場合
(片面のみ熱伝達する場合)

$$\tau_c = \frac{\rho c \delta}{h}$$

δ : 薄膜の厚さ

計算例 1 熱電対の接点 ($d = 1 \text{ mm}$) が気流中に存在する場合

接点の密度	$\rho = 9000 \text{ kg/m}^3$	$\tau_c (\text{球}) = \frac{\rho c d}{6h} = 4 \text{ s}$
接点の比熱	$c = 400 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$	
熱伝達率 ($u = 1 \text{ m/s}$)	$h = 150 \text{ W/m}^2\text{K}$	98% 回復する時間 $4 \tau_c = 16 \text{ s}$

計算例 2 白金抵抗線 ($d = 1 \text{ }\mu\text{m}$) が気流中に存在する場合

白金の密度	$\rho = 21460 \text{ kg/m}^3$	$\tau_c (\text{円柱}) = \frac{\rho c d}{4h} = 0.071 \text{ ms}$
白金の比熱	$c = 133 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$	
熱伝達率 ($u = 1 \text{ m/s}$)	$h = 10000 \text{ W/m}^2\text{K}$	98% 回復する時間 $4 \tau_c = 0.29 \text{ ms}$

2 . 非接触方式による温度測定

熱放射などを利用して、測定対象に触れることなく温度を測定する方式

例 :	放射温度計	赤外線	の放射光強度を測定
	感温液晶	液晶	の色の变化を測定

長所:

- ・ 非接触で測定できる (温度場を乱しにくい)
- ・ 応答が速い
- ・ 高温の測定が容易

短所:

- ・ 外乱光の影響を受けやすい
- ・ 放射率等で温度を補正する必要がある
(接触方式の温度計を用いた校正が必須である)

放射温度計の種類

測定方式による分類

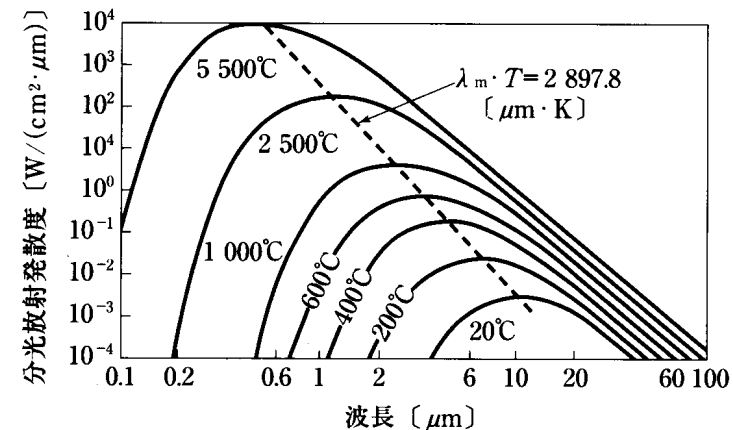
- ・ 1点型
- ・ 機械走査型
- ・ 2次元アレイ型 (現在の赤外線カメラはほとんどがこのタイプ)

素子による分類

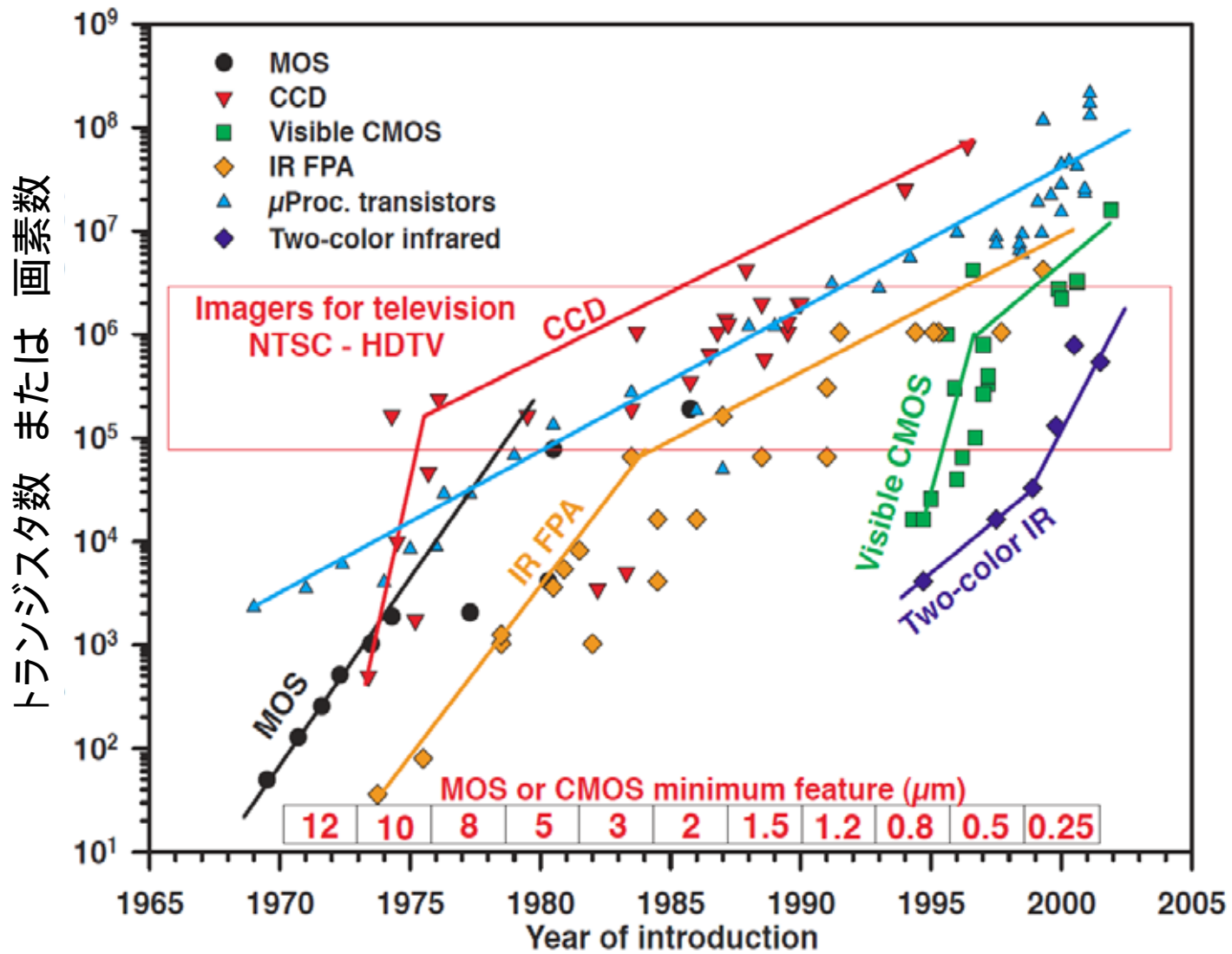
- ・ 量子型 (光電型) → 高感度 (高速撮影、高温度分解能)
- ・ 熱型 → 非冷却が可能 (小型・軽量・低価格)

波長による分類

- ・ 全放射温度計 (熱型)
- ・ 単色放射温度計
- ・ 2色放射温度計



黒体の熱放射エネルギーの波長に対する分布



2次元アレイ型赤外線カメラ (IR FPA) の多画素化の進展 (開発レベル)

(Norton, P., Encyclopedia of Optical Engineering, 2003, pp.320-348)

赤外線カメラの性能（進む2極化）

高性能製品（量子型：InSb, MCT, QWIP）

画素数	~ 1024 × 1024
温度分解能(NETD)	0.02 程度
フレームレート	120 Hz (~ 640 × 512 pixel) 420 Hz (~ 320 × 256 pixel)

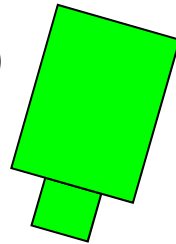
小型・軽量製品（熱型：非冷却マイクロボロメータ）

画素数	160 × 120 ~ 320 × 240
温度分解能(NETD)	0.1 程度
フレームレート	8 ~ 30 Hz
重量	300 g ~
価格	100万円以下

放射温度計の出力と温度の関係（黒体の場合）

赤外線カメラの出力
(測定される放射エネルギー)

$$E = f(T)$$



放射エネルギー E と温度 T の関係式 $f(T)$ は
校正により求める。

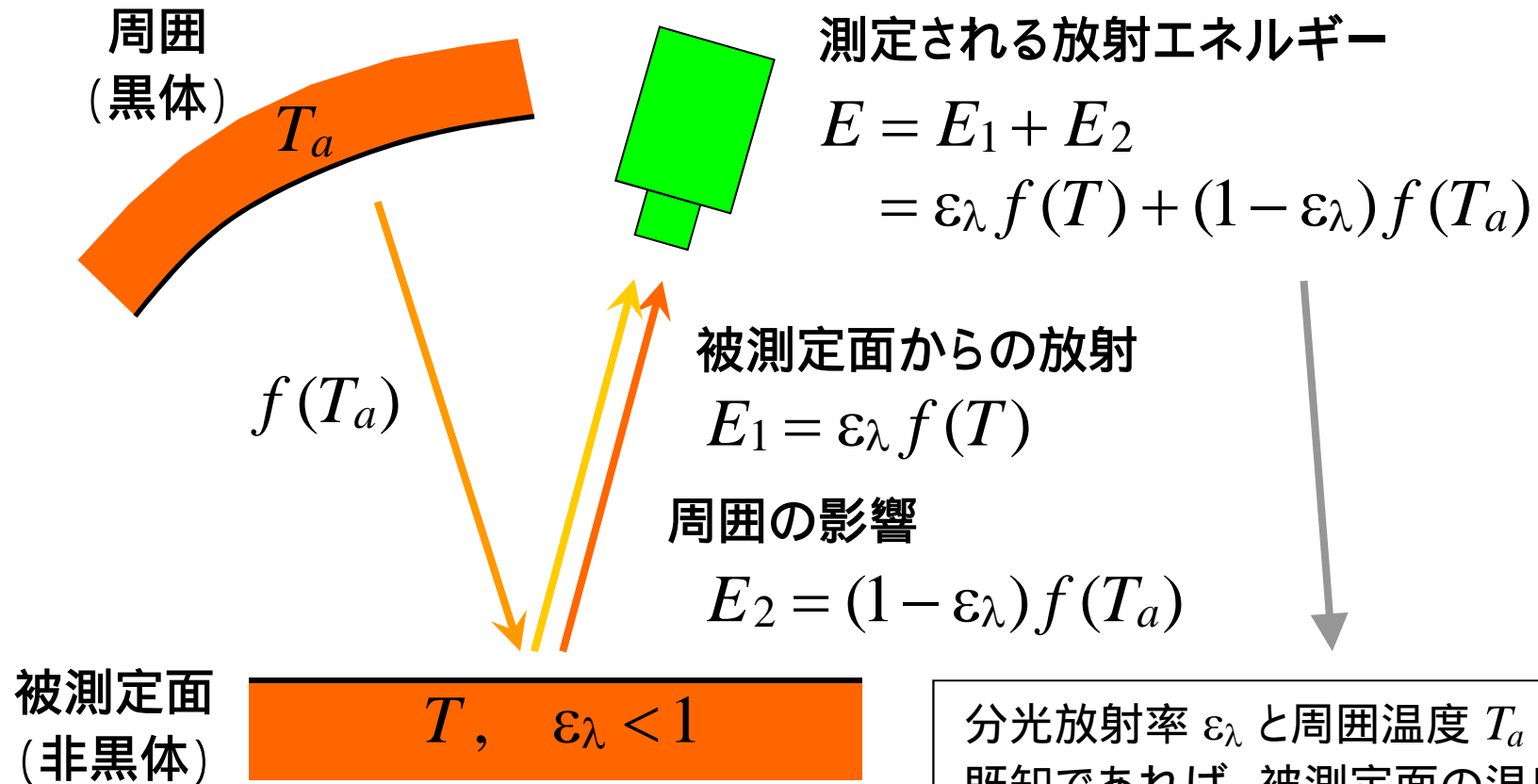
$f(T)$ の形は、赤外線カメラの波長帯域や
レンズでの吸収などに依存する。

被測定面
(黒体)



T

放射温度計の出力と温度の関係（非黒体の場合）



分光放射率 ϵ_λ と周囲温度 T_a が既知であれば、被測定面の温度 T が求められる。

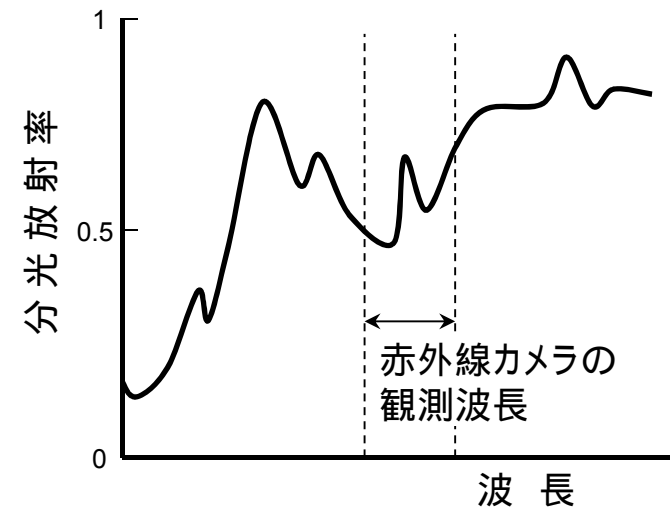
周囲が黒体でかつ T_a が一様の場合

温度を正しく測定する方法 - 1

1. 被測定面の分光放射率を知る

- ・ 放射率が1に近いペイントを塗布する
→ 最も簡単な方法
- ・ 文献値から推定
波長-分光放射率特性(右図)と
赤外線カメラの波長帯域から評価
→ 一般に困難
(表面粗さや汚れの影響も受ける)
- ・ 実験的に評価
→ 後述

$$E = \underline{\varepsilon_\lambda} f(T) + (1 - \underline{\varepsilon_\lambda}) f(T_a)$$



温度を正しく測定する方法 – 2

2. 周囲からの放射を知る

1) 周囲からの放射を抑制する

- ・ 被測定面に黒体ペイントを塗布する
- ・ 周囲の温度 T_a を被測定面の温度より十分低くする

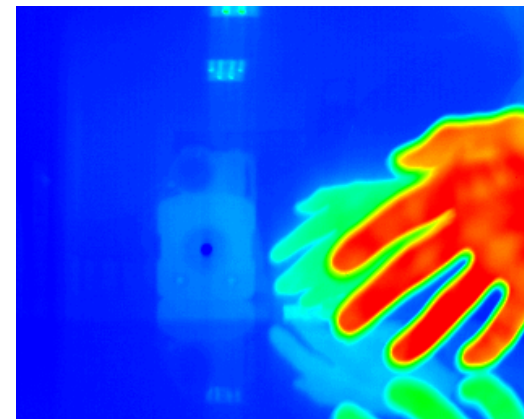
2) 周囲からの放射を補正する

- ・ 周囲の放射率を1に近づける
(周囲での乱反射を防ぐ)
- ・ 周囲の温度 T_a を均一にする
(高温の放射源を近づけない)
- ・ 放射温度計を $15 \sim 20^\circ$ 傾ける
(自身の映り込みを防ぐ)

$$E = \varepsilon_\lambda f(T) + \underline{(1 - \varepsilon_\lambda) f(T_a)}$$



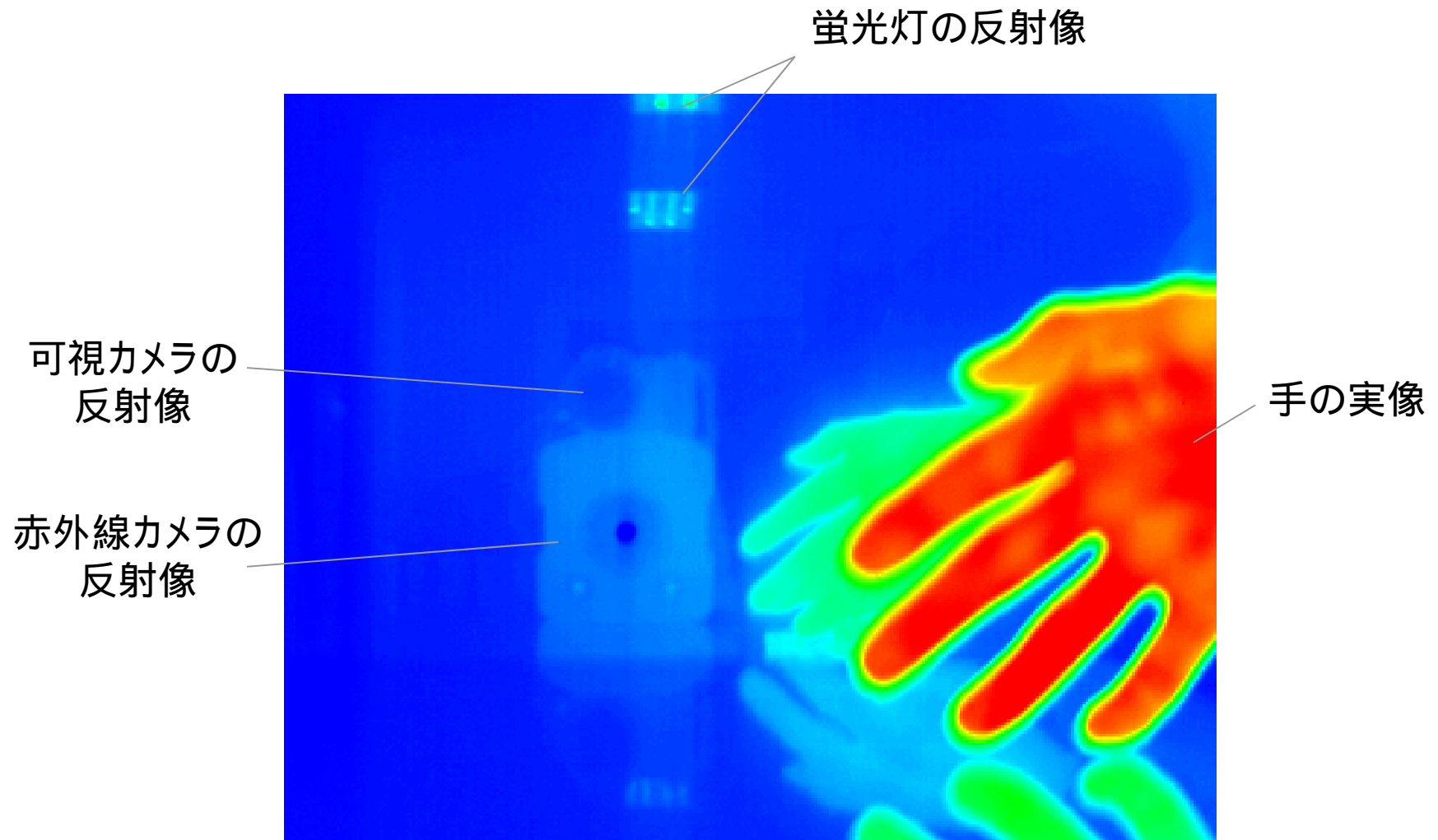
可視画像



赤外線カメラ
撮影画像

乱反射の例

乱反射の例



手から放射された赤外線が壁(アルミ)と机で多重反射

温度を正しく測定する方法 – 3

3. 大気や窓材での吸収を知る

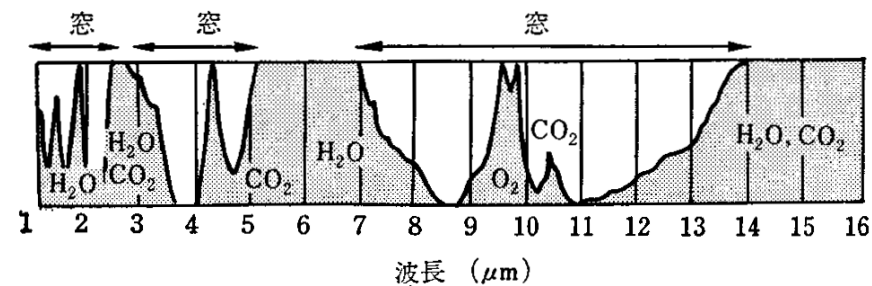
1) 吸収を抑制する

- ・ 窓材を使用しない
- ・ 被測定面から必要以上に遠ざけない
- ・ 赤外線カメラのレンズを汚さない

赤外線は、大気中の水蒸気や二酸化炭素、あるいは塵埃によっても吸収される。

2) 吸収を補正する

- ・ 窓材を用いる場合は、実機による温度校正を行う
- ・ 大気による吸収量を補正する (1 m 以内であれば無視できる)



大気による吸収

分光放射率の評価方法

1. 黒体温度の校正

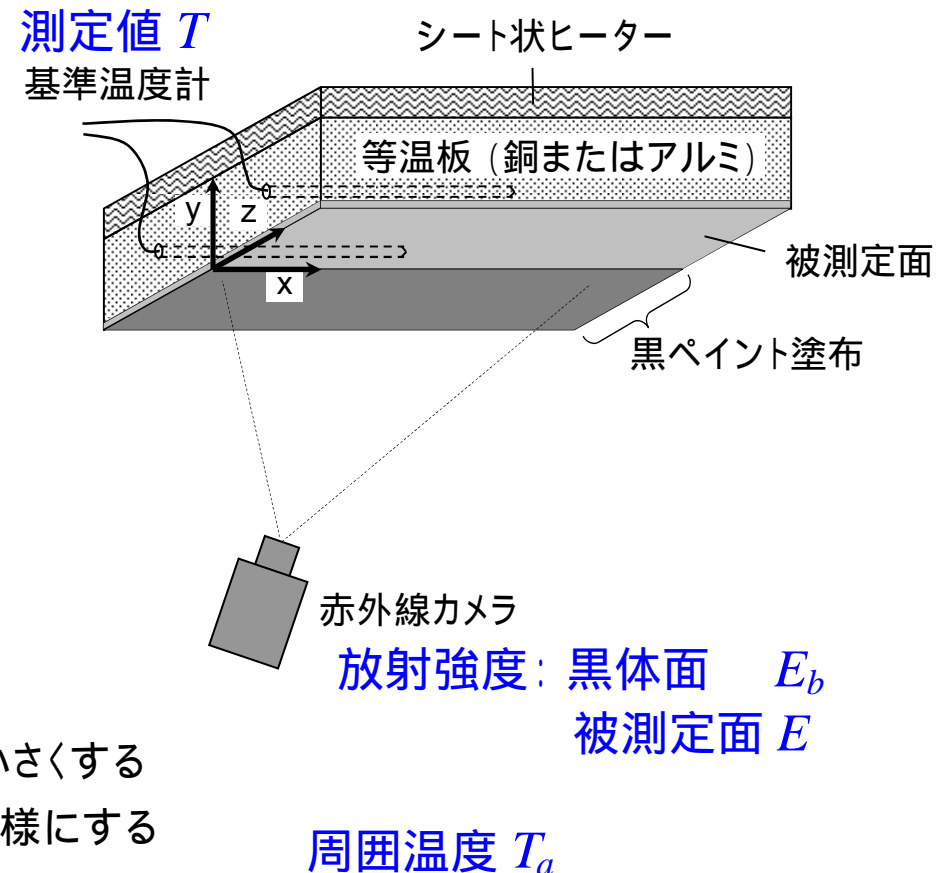
E_b と T の関係 $E_b = f(T)$ を求める
(黒体炉を使用した校正が望ましい)

2. 分光放射率の評価

E と T_a を測定して,
 $E = \varepsilon_\lambda f(T) + (1 - \varepsilon_\lambda) f(T_a)$ から
 ε_λ を求める

注意点

- ・ 被測定面と等温板の接触熱抵抗を十分小さくする
- ・ 周囲の放射率を1に近くし, かつ温度を一様にする
- ・ 被測定面および黒ペイントが赤外線透過しないことを確認しておく



分光放射率の評価方法 (放射率補正機能を利用)

1. 黒体温度の確認

基準温度計温度 T と比較して
黒体面の温度 T_{IRb} が妥当である
ことを確認

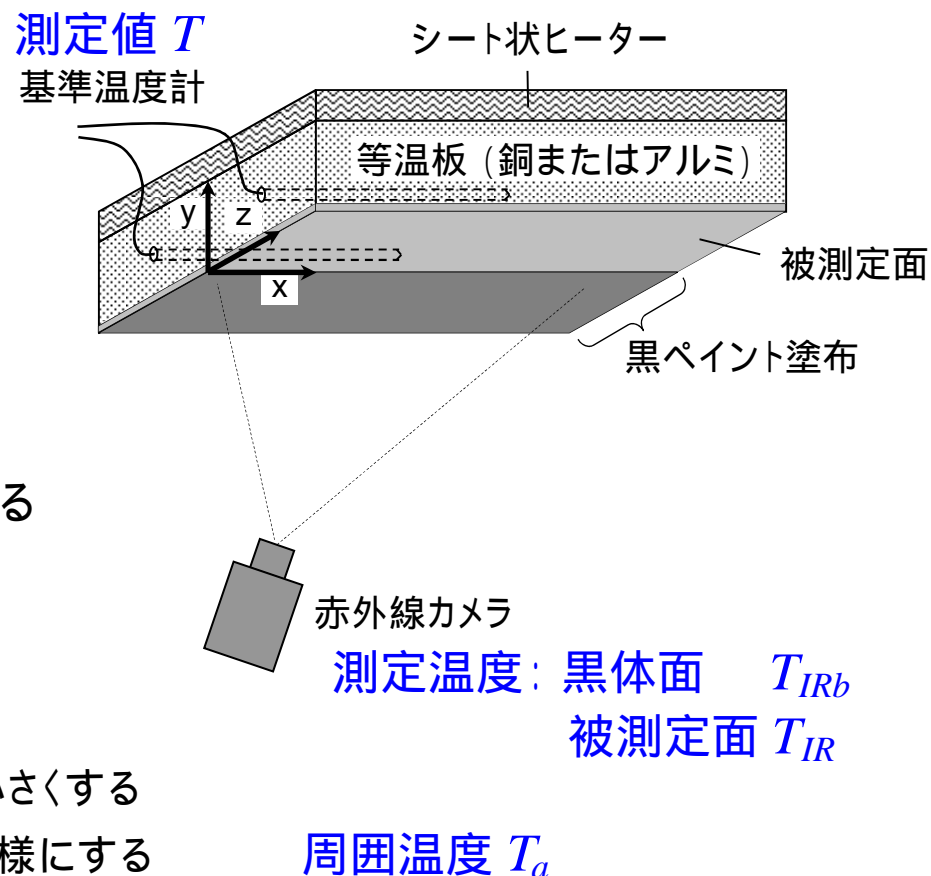
(一般に, 黒ペイントの放射率は
 $\varepsilon_\lambda = 0.9 \sim 0.95$ 程度)

2. 分光放射率の評価

$T_{IR} = T$ となる分光放射率 ε_λ を求める
(赤外線カメラの放射率補正機能を利用)

注意点

- ・ 被測定面と等温板の接触熱抵抗を十分小さくする
- ・ 周囲の放射率を1に近くし, かつ温度を一様にする
- ・ 被測定面および黒ペイントが赤外線を透過しない
ことを確認しておく



3 . 熱伝達率測定の基本

熱伝達率を測定する意義

物体表面の温度を測定して熱伝達率(対流により移動する熱量)を評価しておくとし、その結果(無次元整理式)は類似の流れ場にも適用できる場合が多く、汎用性の高いデータを得ることができる。

熱伝達率の定義

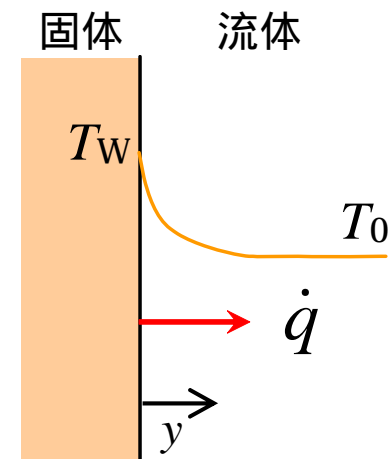
$$\dot{q} = -\lambda_f \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0^+} = h(T_w - T_0) \quad [\text{W/m}^2]$$

\dot{q} : 熱流束

λ_f : 流体の熱伝導率

h : 熱伝達率

$$h = \frac{\dot{Q}}{A(T_w - T_0)} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad \dot{Q} : \text{熱量}$$



熱伝達率 h : 単位面積, 単位温度差(1)あたりで, 固体-流体間を移動する熱量

熱伝達率は、流体の種類だけでは決まらず、
流れの状態によって大きく変化する。

熱伝達率の大体の値

流体の種類と流れの状態	h [W/m ² K]
静止した空気	1 ~ 20
流れている空気	10 ~ 250
流れている油	50 ~ 2000
流れている水	300 ~ 5000
凝縮(膜状)中の水蒸気	5000 ~ 15000
沸騰中の水	2000 ~ 50000

対流による熱の移動は、層流境界層など特殊な場合を除いて
解析的には求められないので、実験的に値を評価する必要がある。

熱伝達率の測定方法

1. 流体の温度勾配測定

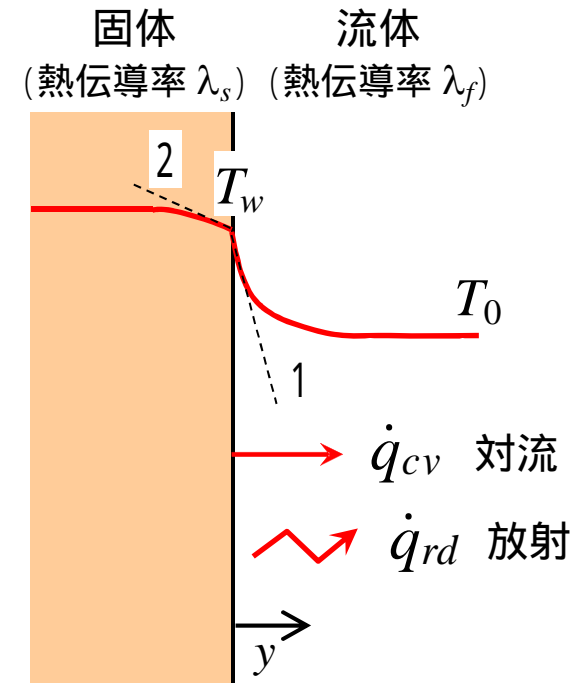
$$\dot{q} = \dot{q}_{cv} = -\lambda_f \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0^+} = h(T_w - T_0)$$

$$h = -\frac{\lambda_f}{T_w - T_0} \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0^+} \quad (\text{対流のみ})$$

2. 固体の温度勾配測定

$$\dot{q} = \dot{q}_{cv} + \dot{q}_{rd} = -\lambda_s \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0^-} = h(T_w - T_0)$$

$$h = -\frac{\lambda_s}{T_w - T_0} \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0^-} \quad (\text{対流 + 放射})$$



1, 2 いずれの方法も, 正確に測定するのは難しい.

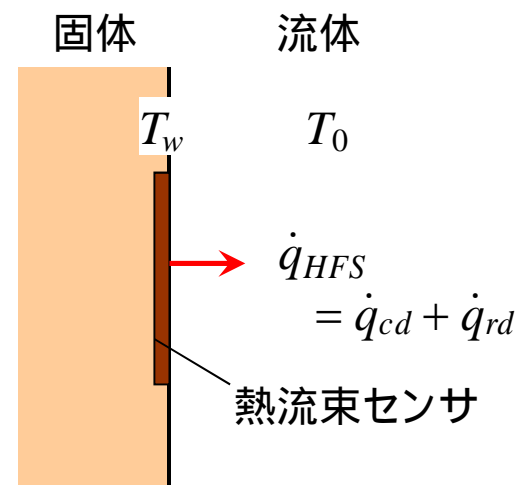
3. 熱流束および表面温度の測定

対流熱伝達率

$$h = \frac{\dot{q}_{cv}}{T_w - T_0} = \frac{\dot{q}_{HFS} - \dot{q}_{rd}}{T_w - T_0}$$

\dot{q}_{HFS} : 熱流束センサで測定した熱流束

放射熱流束 \dot{q}_{rd} を求めるには,
熱流束センサの全放射率を知る必要がある



熱流束センサの設置により, 温度場を乱さないように注意する必要がある

例えば,

- ・ 固体と同程度の熱伝導率を持ったセンサを使用する
- ・ 固体と同程度の放射率を持ったセンサを使用する
- ・ 固体とセンサの接触熱抵抗を小さくする

4. 加熱等温ブロックの温度測定

銅やアルミなどの高熱伝導率のブロックにヒーターを埋め込んで加熱する

\dot{Q}_{gen} : 加熱量 [W]

対流熱伝達率

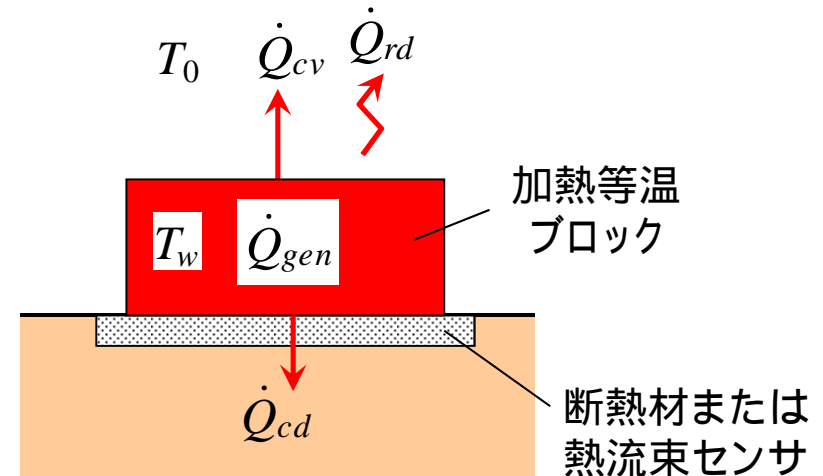
$$h = \frac{\dot{Q}_{cv}}{A(T_w - T_0)} = \frac{\dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{cd} - \dot{Q}_{rd}}{A(T_w - T_0)}$$

\dot{Q}_{cv} : 対流による熱流量 [W]

\dot{Q}_{cd} : 伝導熱損失 [W]

\dot{Q}_{rd} : 放射熱損失 [W]

A : 対流伝熱面積



- ・ 伝導熱損失は、熱流束センサの出力または断熱材の表裏の温度差から評価する
- ・ 放射熱損失は、ブロック表面の全放射率から評価する

5. 加熱金属箔を用いた温度測定

物体表面に接着した金属箔を通電加熱する

\dot{q}_{gen} : 通電加熱熱流束 [W/m²]

対流熱伝達率

$$h = \frac{\dot{q}_{cv}}{T_w - T_0} = \frac{\dot{q}_{gen} - \dot{q}_{cd} - \dot{q}_{rd} + \lambda \delta \left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \right)}{T_w - T_0}$$

金属箔内の熱伝導
(金属箔が十分薄ければ無視できる)

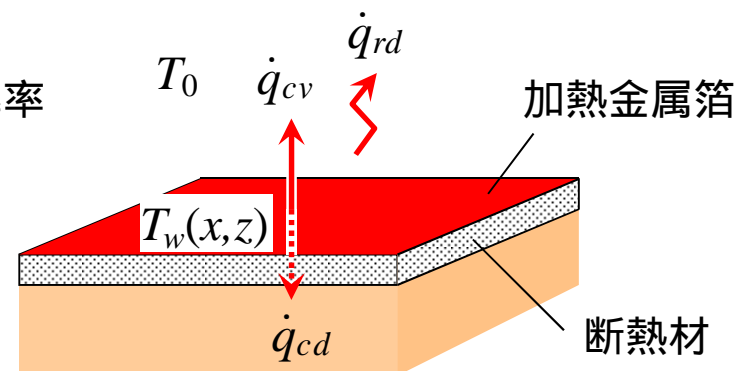
\dot{q}_{cv} : 対流熱流束 [W/m²]

λ : 金属箔の熱伝導率

\dot{q}_{cd} : 伝導熱流速 [W/m²]

δ : 金属箔の厚さ

\dot{q}_{rd} : 放射熱流速 [W/m²]



- ・ 伝導熱損失は、断熱材の表裏の温度差から評価する
- ・ 放射熱損失は、金属箔表面の全放射率から評価する
- ・ 金属箔内の熱伝導を評価するには、面の温度分布を詳細に測定する必要がある

熱伝達率の無次元整理式の例

強制対流の場合は $Nu = c Re^n Pr^m$ の形で近似できる場合が多い

1) 平板層流境界層 (等温壁, 局所値)

$$Nu_x = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}, \quad (Pr > 0.6)$$

2) 平板乱流境界層 (局所値)

$$Nu_x = 0.0296 Re_x^{0.8} Pr^{1/3}, \quad (Pr > 0.6)$$

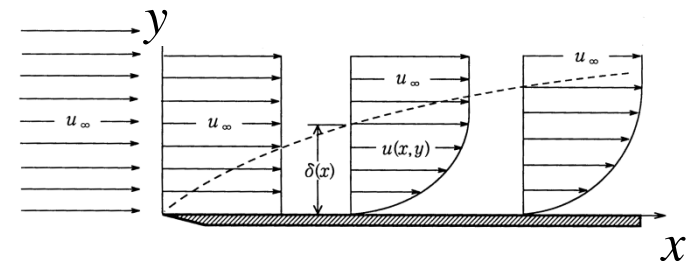


図 2・2 平板に沿う層流境界層の発達

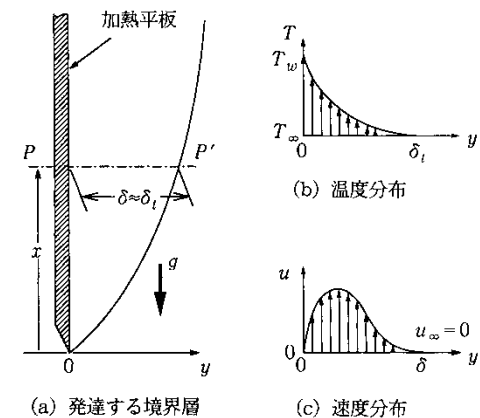
自然対流の場合は $Nu = c (Gr Pr)^n$ の形で近似できる場合が多い

1) 鉛直平板層流自然対流 (等温壁, 平均値)

$$Nu_L = 0.59 (Gr_L Pr)^{1/3}, \quad (10^4 < Gr_L Pr < 10^9, Pr > 0.7)$$

2) 鉛直平板乱流自然対流 (局所値)

$$Nu_x = 0.13 (Gr_x Pr)^{1/3}, \quad (10^9 < Gr_x Pr < 10^{12})$$



(a) 発達する境界層

(b) 温度分布

(c) 速度分布

詳しくは、「伝熱工学資料」日本機械学会 編等を参照のこと

参考文献

- ・ 「伝熱研究における温度測定法」, 棚澤一郎他, 養賢堂, 1989
- ・ 「実用 温度測定」, 松山 裕, 省エネルギーセンター, 1998
- ・ 「伝熱工学資料 (改訂第4版)」, 日本機械学会, 1986
- ・ 「熱計測技術」, 日本機械学会, 1986
- ・ 「伝熱概論 (第31版)」, 甲藤好郎, 養賢堂, 1994
- ・ 「実用的な温度測定」, アジレント・テクノロジー株式会社,
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7822JAJP.pdf>, 2006

参考 JIS 規格

- ・ 「温度測定方法通則」, JIS Z 8710, 1993
- ・ 「温度測定方法 - 電気的方法」, JIS Z 8704, 1993
- ・ 「ガラス製温度計による温度測定方法」, JIS B 8705, 1992
- ・ 「熱電対」, JIS C 1602, 1995
- ・ 「測温抵抗体」, JIS C 1604, 1997
- ・ 「シーす熱電対」, JIS C 1605, 1995
- ・ 「シーす測温抵抗体」, JIS C 1606, 1989
- ・ 「サーミスタ測温体」, JIS C 1611, 1995
- ・ 「放射温度計の性能試験方法通則」, JIS C 1612, 2000