

温度計技術資料

レベル★ : 初歩、入門
レベル★★ : 応用、調整、修理
レベル★★★ : 理論、設計

| | | |
|------------|-----|---------|
| 温度目盛 | ★ | TM01010 |
| 分類 | ★ | TM02010 |
| 膨張式温度計 | ★ | TM03010 |
| 電気式温度計 | ★ | TM04010 |
| 放射温度計 | | |
| 概要 | ★ | TM05010 |
| 測定距離と標的サイズ | ★ | TM05020 |
| レンズ | ★ | TM05030 |
| 照準 | ★ | TM05040 |
| 波長選択 | ★ | TM05050 |
| 放射率設定 | ★ | TM05060 |
| 放射率の測定 | ★ | TM05070 |
| リニアライザ | ★★ | TM05080 |
| 応答時間 | ★★ | TM05090 |
| 特徴 | ★ | TM05100 |
| 窓越し測定 | ★★ | TM05210 |
| 斜め測定 | ★★ | TM05220 |
| 外乱光 | ★★ | TM05230 |
| 炉内の測定 | ★★ | TM05240 |
| レンズの汚れ防止 | ★★ | TM05250 |
| 光路の影響 | ★★ | TM05260 |
| 移動ワークの測定 | ★★ | TM05270 |
| プラスチックの測定 | ★★ | TM05280 |
| ガラスの測定 | ★★ | TM05290 |
| 気体の測定 | ★★ | TM05300 |
| 金属の測定 | ★★ | TM05310 |
| 鏡面の測定 | ★★ | TM05315 |
| 半導体の測定 | ★★ | TM05320 |
| 加熱方式 | ★★ | TM05330 |
| 機種選定 | ★ | TM05710 |
| 測温理論式 | ★★★ | TM05810 |
| 測定データ補正 | ★★★ | TM05820 |
| エネルギーテーブル | ★★★ | TM05830 |
| 2色温度計 | ★ | TM06010 |
| サーモグラフィ | ★ | TM07010 |
| 温度計関係参考資料 | ★★★ | TM09010 |

温度目盛

1) 摂氏温度()

セルシウス(Celsius)目盛ともいわれている目盛で、スウェーデンの天文学者アンデルス・セルシウス(Anders Celsius)が1742年に案出したものとされ、日常最も多く使われています。水の氷点を0度、水の沸点を100度として、その間を100等分したものを1度の温度間隔とします。

2) 華氏温度(°F)

ファーレンハイト目盛ともいわれている目盛で、ドイツの物理学者ガブリエル・ファーレンハイト(Gabriel Daniel Fahrenheit)が1724年に案出しました。水の氷点を32度(32°F)、沸点を212度(212°F)として、その間を180等分したものを1度の温度間隔とします。

現在は摂氏目盛とつぎの関係になるように規定されています。

(°F)がt()と同じ温度であると、

$$t = \frac{9}{5}t + 32 \qquad t = \frac{5}{9}(t - 32)$$

$$100^\circ\text{F} = 37.8 \quad , \quad 0^\circ\text{F} = -17.8$$

華氏目盛は今日でも英米両国では日常かなりよく使用されていますが、重要性のある目盛りとはいえません。また、この目盛では人間の平熱が98.6度となります。

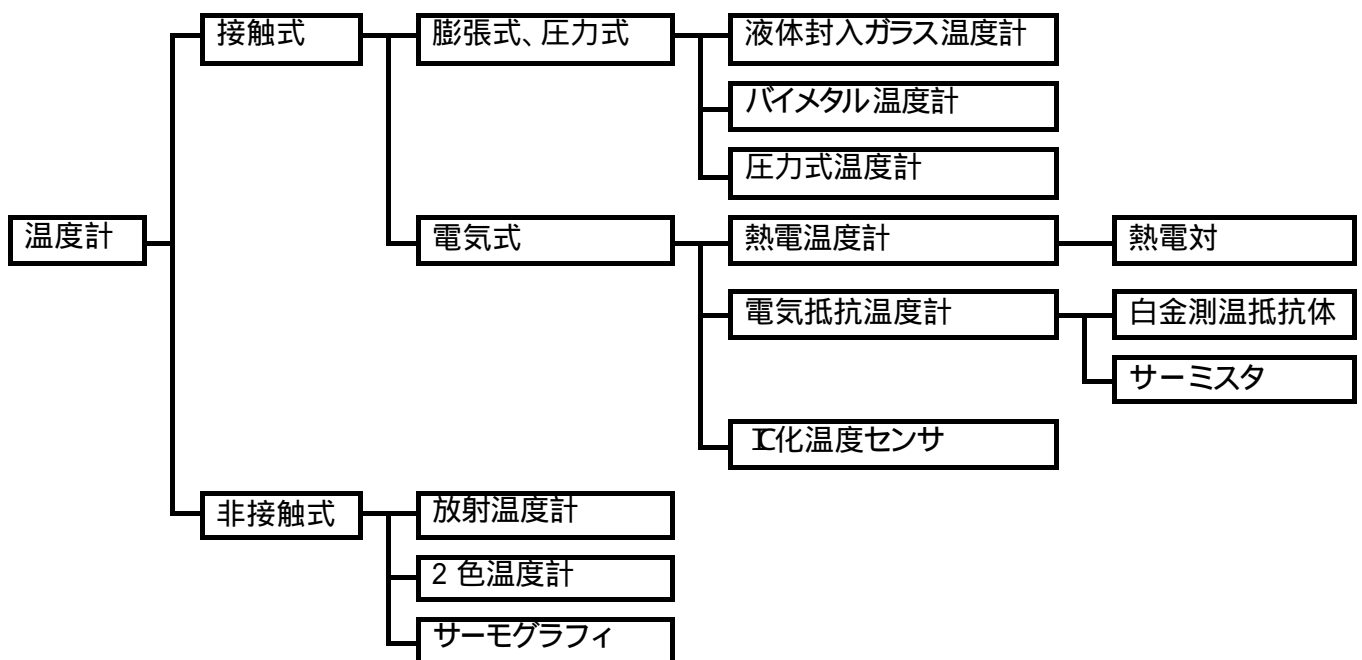
3) ケルビン目盛(K)

イギリスの物理学者ウィリアムトムソン(William Thomson)後のケルビン男爵(Lord Kelvin)の創案による温度目盛です。熱力学による最低温度は-273.15であり、これを0度とし温度差は摂氏目盛での温度差と等しい数値で表されます。摂氏目盛t()とケルビン目盛T(K)の関係は次の式になります。

$$T = t + 273.15$$

ケルビン目盛によって表される温度を絶対温度といい、熱放射に関する物理法則にはこの絶対温度を使用しなければなりません。

温度計分類



[熱の伝わり方]

熱は放射、対流、伝導によって伝わりますので、温度計はこのいずれかによって物体の温度を検知しています。

1. 接触式

ワークが固体、液体の場合は接触させて熱伝導によってワークの温度を温度計測定部と一致させ、気体の場合は対流によって一致させる方式です。構造が簡単なものが多く、安価ですがワークの熱を奪うこととなりますので接触のさせかたに注意が必要です。

2. 非接触式

固体、液体からの放射を測定する方式です。ワークの放射率を設定する必要がありますが、応答時間が速く、移動ワークの測定が可能です。

膨張式、圧力式温度計

1) 液体封入ガラス温度計

寒暖計などに使われているもので、膨張係数の大きい液体をガラス毛细管の下部の球部に封入し、温度上昇による液体の体積変化を毛细管内の液柱の上端面で読み取ります。封入する液体としては、水銀、ケロシン(石油エーテル)、ペンタン、クレオソートなどがあります。精密な温度測定には、ほとんど水銀が用いられます。温度範囲は - 50 ~ 650 で1本の温度計で測定される範囲は広くありません。

2) バイメタル温度計

膨張係数の違う2種の金属板を貼り合わせたものは、温度によって形が変わります。このような貼り合わせ板をバイメタルといいます。一端を固定すると温度の変化によってたわみ、他の一端が動き出す。その一端の動きを利用して、指針を回させるようにしたものがバイメタル温度計です。

3) 圧力式温度計

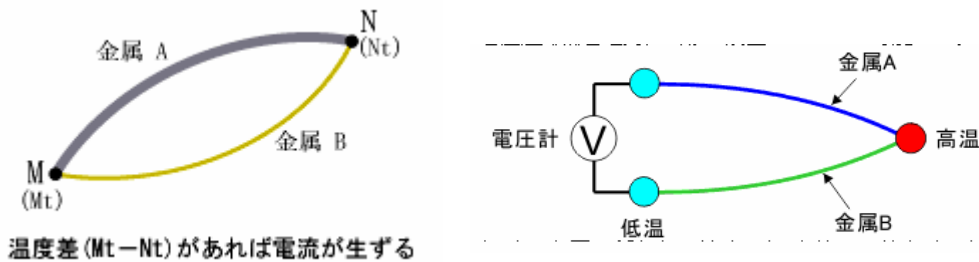
液体や飽和蒸気の圧力が温度に伴って変化することを利用した温度計です。液体としては水銀が最も普通に用いられます。

電気式温度計

1) 熱電温度計

2 種類の金属導体の両端を電氣的に接続した下図のような閉回路を作り、この一端を加熱するなどの方法で両端に温度差を与えると起電力が生じ、回路中に電流が流れます。

この現象をゼーベック(Zeebeck)効果といい、生じた起電力を熱起電力といいます。



熱起電力を利用するための 2 種の金属の組合せを熱電対といいます。熱電対の熱起電力は、その熱電対を構成している 2 種の金属の種類および両接点の温度によります。熱電対温度計は、熱起電力を測ることによって温度を測定するものです。

熱電対の両接点のうち測ろうとする温度に保たれる接点を測温接点といい、一定の既知の温度(これを基準温度といいます)に保たれている接点を基準接点といいます。基準接点よりも高い温度を測定することが多いので基準接点を冷接点ともいいます。

熱電対はその構成材料によって、おもに R、K、E があります。R は白金と白金ロジウム of 組合せで、酸化に対して強く、耐食、耐薬品性にもすぐれており、高温における特性の変化が少ないことから、標準用あるいは高温用熱電対として広く利用されています。K はクロメルとアルメルの組合せで、R より安定性は劣るが熱起電力が大きく安価であるため一般測定用に使われます。一般に熱電対は高温で使用すると腐食が進むため、一定間隔で交換しなければなりません。

2) 電気抵抗温度計

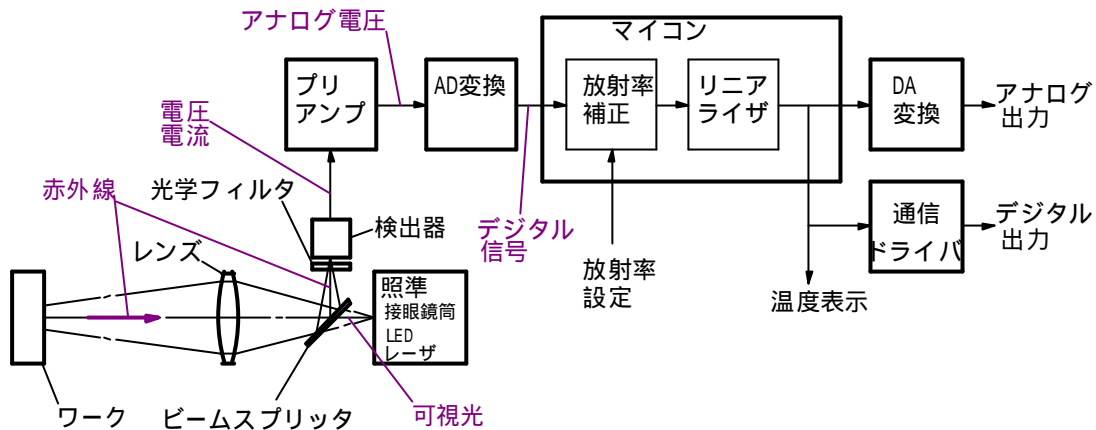
導体の電気抵抗は、一般に温度によって変わります。それで温度と電気抵抗との関係が知られていれば、抵抗を測ることによって温度が知られます。この種の温度計が電気抵抗温度計または抵抗温度計といわれています。温度によって抵抗の変わる物体として、白金、ニッケル、銅、サーミスタなどが使われます。比較的容易に温度測定が行われ、遠隔測定および自動制御、自動記録にも適しているため、広く用いられています。

3) IC 化温度センサ

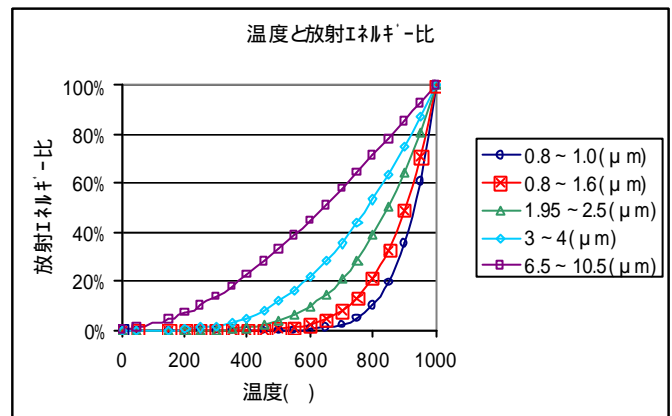
トランジスタのベース・エミッタ間の順電圧が絶対温度に比例する性質を持つことを利用した温度計で、電源だけを接続するのみでリニアな電圧(電流)出力が得られます。

放射温度計概要

物体が放出する赤外線(熱放射)を測定し、温度に換算する温度計です。膨張式、圧力式、電気式温度計などはすべて接触式温度計と呼ばれているものであって、その感温部が測られる温度と同一の温度になって、正しい温度測定が行われます。これに対して、放射を利用する温度計は非接触温度計で温度計のどの部分も被測定温度と同一になっていない状態で正しい温度測定が行われます。そのために放射温度計は耐久性が大きく、また高い温度の測定に適しています。



- 1) ワークから温度に応じた赤外線が放射されます。放射される量はワークの放射率に比例します。また、温度と放射量の関係はリニアではなくノンリニアです。その特性は測定波長により、右図のようになります。
- 2) レンズにて赤外線が集光されます。ファイバ形の場合はさらに、光ファイバで赤外線が伝送されます。
- 3) ビームスプリッタにより、照準用の可視光と赤外光に分離されます。
- 4) 光学フィルタにて赤外線の不要な波長域がカットされます。
- 5) 赤外線は検出素子に集光され、電気信号(電流または電圧)に変換されます。
- 6) この電気信号は微弱なため、プリアンプで増幅されます(アナログ電圧)。
- 7) AD変換器でデジタル信号に変換され、放射された赤外線に比例した信号としてマイコンに取り込まれます。
- 8) この信号を外部にて設定された放射率で割り算することにより、放射率 1.0 の放射量に換算します。
- 9) 温度と放射量の関係はリニアではないため、折線近似方式等によるリニアライザで温度に換算します。
- 10) デジタル表示、DA変換によるアナログ出力等で温度信号として表示、出力されます。



なお検出素子が光導電型の場合直流での使用ができないため、光学フィルタとビームスプリッタの間に光チョッパが設けられ交流信号とし、プリアンプの後で検波処理されて直流に変換されます。

参照 赤外線 (検出素子 / 分類)

温度計 (分類 - 放射温度計 / レンズ | 照準 | 波長選択 | 放射率設定 | リニアライザ)

ジャパンセンサー(株) 2008/5/12

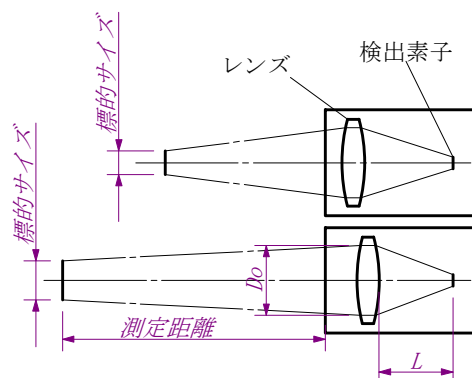
TM05010

測定距離と標的サイズ

ワークから放射される赤外線は温度が低くなるほど小さくなります。このため、温度の低い領域ほど検出素子および電気回路のノイズが相対的に大きくなり、測定精度が悪くなります。

温度と測定距離およびレンズの明るさ($F=L/D_o$)が同じ場合、赤外線の放射量は測定面積(標的サイズ)に比例するため、標的サイズが大きいほど赤外線が大きくなり測定精度が上がることになります。また、焦点距離が同じレンズを使用して測定距離にピントを合わせた場合、測定距離に比例して標的サイズが大きくなります。

同じ測定距離で標的サイズを小さくするためには、焦点距離の長いレンズを使用して倍率を上げる必要があります。この場合レンズ口径(D_o)を同じとすると、レンズと検出素子間の距離 L が大きくなるためレンズの明るさ F が大きくなります。この結果、検出素子に入射する赤外線量が少なくなり、測定精度が悪くなります。測定精度を維持するためにはレンズの明るさを同じにする必要があるため、レンズ口径を大きくすることになります。

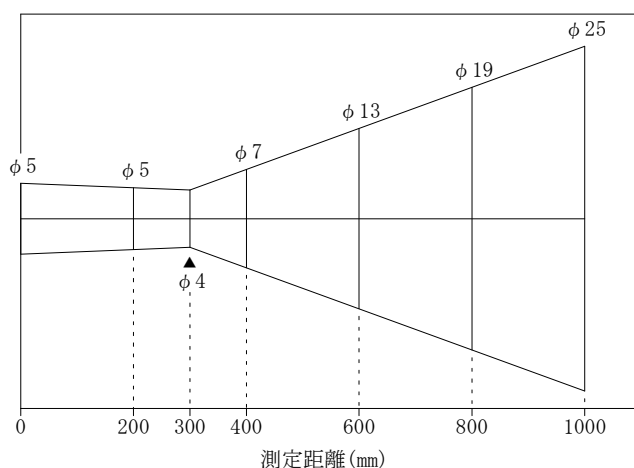


標的サイズを小さくしたい場合(ファイバ形温度計の例)

- 1) レンズ口径の大きいセンサヘッドを選択する(センサヘッドが大きくなる)例 $\phi 6 \rightarrow \phi 15$
- 2) ファイバ径の小さいファイバを選択する(測定下限温度が上がる) 例 $\phi 0.2 \rightarrow \phi 0.1$

光路図

測定距離と標的サイズの関係を示す図です。



図に表示されていない中間の測定距離の時の標的サイズは、その部分の台形の辺の寸法から比例計算で求めます。

◎測定距離 430mm の時の標的サイズ

図上の 430mm より短い測定距離と標的サイズ 400mm $\phi 7$ mm

長い測定距離と標的サイズ 600mm $\phi 13$ mm

$$7 + (13 - 7) \times (430 - 400) / (600 - 400) = \phi 7.9\text{mm}$$

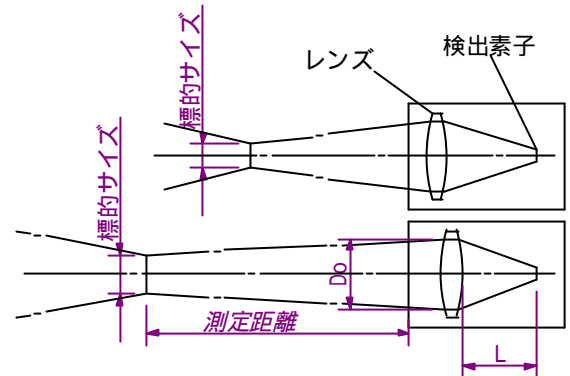
◎測定距離 260mm の時の標的サイズ $5 - (5 - 4) \times (260 - 200) / (300 - 200) = \phi 4.4\text{mm}$

放射温度計のレンズ

ワークから放射された赤外線はレンズで集光されます。測定面積が大きい場合、レンズが省略されることもあります。また光ファイバによって赤外線が伝達されるファイバ形温度計もあります。

レンズには屈折形、反射形があり、屈折形の場合には検出素子の波長に応じて材質が選択されます。光学照準で測定範囲を正確に示す場合には、赤外光も可視光も透過させることができる CaF₂、BaF₂、BK、石英などが使われます。

また、レンズ口径(D₀)より標的サイズが小さい場合に、レンズのピント位置で標的サイズが最小になります。レンズのピント位置からずれた測定距離においては標的サイズが大きくなります。固定焦点形の場合、仕様上の測定距離でのみ最小の標的サイズが得られるため測定距離を変えて小さな標的サイズで測定したい場合に対応できません。このような場合には、レンズを可動させ測定距離が変わっても物体にピント合わせを行う可動焦点形が使われます。



ファイバ形温度計で LED 照準またはレーザ照準の場合は、単純な屈折レンズを使用するとレンズの色収差により赤外線のピント位置と可視光のピント位置にずれが生じてしまいます。この場合、色収差補正レンズまたは反射レンズを使用します。光学照準の場合は、レンズとファイバ端面間および接眼鏡筒の位置をずらせることができるため、単純な屈折レンズでも問題ありません。

検出素子とレンズ材料の組合せの例を次に示します。

| 検出素子 | レンズ材料 |
|---------------|---|
| Si、InGaAs | BK |
| PbS | BK、石英 |
| PbSe、MCT、InSb | CaF ₂ 、BaF ₂ 、Ge、Si |
| サーモパイル | 同上 |

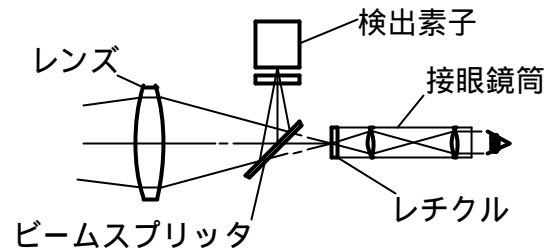
放射温度計の照準

赤外線は目に見えないため、ワークのどこの部分を測定しているのかがわかりません。このため放射温度計では一般に、測定位置(標的サイズ)を示すための照準機能を備えています。

照準方式には次のものがあります。

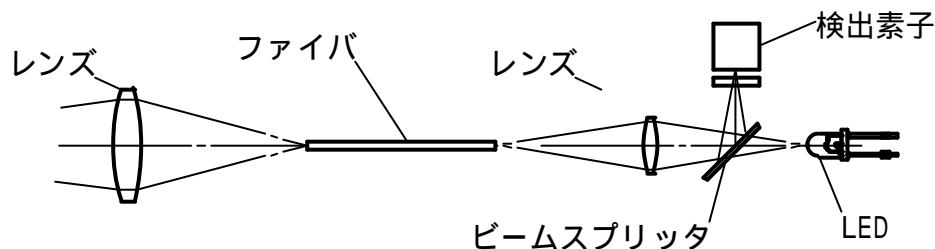
1) 光学照準

写真用カメラのファインダと同じように、目で覗いて中心部にあるレチクルで測定範囲を示す方式です。ワークが暗い場合は補助照明光が必要になります。また、赤外位置と可視光位置を合わせるのに機械的調整を行なっているため位置誤差が残ります。なおレチクル上に結ばれた像は倒立像であるため、接眼レンズを2枚使用して正立像に直し、見やすくします。



2) LED 照準

LED 光を放射温度計側から出し、ワーク上に光らせることにより測定範囲を示す方式です。LED の発光サイズを検出素子のサイズに合わせることで、標的サイズと LED 光のサイズが等しくなります。測定距離が長くなると、LED 光が暗くなり見えにくくなります。下図にファイバ形 LED 照準の構成例を示します。



3) レーザ照準

光源として LED の代わりにレーザを用いた方式で、照準光が明るく見やすくなります。その反面、測定範囲(標的サイズ)を示すことが困難になります。測定範囲の中心のみを示したり、レーザ光を2本にして2点で標的サイズを示したりしています。なおファイバ形の場合はレーザ光がファイバ内部で多重反射されるため、レーザ光の大きさが標的サイズと等しくなります。

4) 照門、照星

前方にある照星を目標に合わせ、照門の溝に見えるように狙う、機械的に測定範囲を示す方式で拳銃などに使用されています。レンズの光軸外に設ける必要があるため、測定距離が異なると位置ずれが生じます。

ビームスプリッタは赤外線と可視光を分離するためのもので、ハーフミラー、プリズム等が使用されます。ガラスに金蒸着を付した Au ハーフミラーは、金蒸着の厚さを調整して可視光で反射率と透過率が等しくなるようにしています。金の反射率は波長が長くなるほど高くなるため、赤外線を良く反射します。また、干渉フィルタで赤外光を透過させ可視光を反射するものも使われます。

放射温度計の波長選択

放射温度計ではどの波長を使用してワークの温度を測定するかが、非常に重要となります。

1) ガラス、フィルムの測定

ガラスやプラスチックフィルムは選択放射体であり、特定の波長で透過と吸収(放射)が大きく変化します。透過が大きい波長では放射率が低いため、温度測定がうまくできません。このため吸収(放射)が大きい波長で測定する必要があります。

プラスチックフィルムは材質によって吸収波長が異なります。主な材質の吸収波長をつぎに示します。

ポリオレフィン系フィルム 3.4 μm

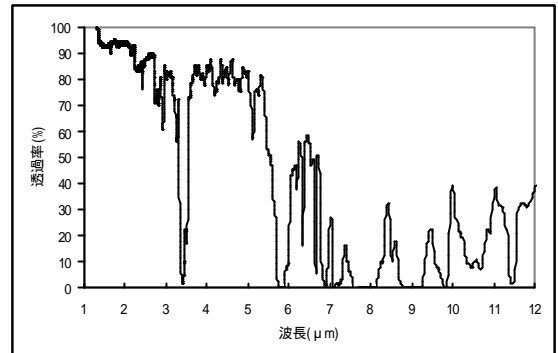
PET、ナイロン、ポリイミド 7.9 μm

ガラスは波長が長くなると透過しなくなり、吸収(放射)が大きくなります。また、厚さが薄いほど透過する波長が長くなります。

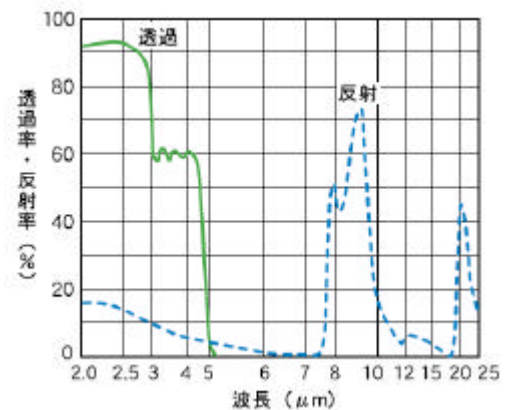
窓板ガラス 2.7 μm 以上

石英ガラス 4.7 μm 以上

また、ガラスは波長が 6 μm 以上で反射率の高い領域があるため、4.9 ~ 5.3 μm の波長を利用する場合があります。



フィルムの分光透過率(例)



石英の分光透過率、反射率

2) 金属の測定

金属は一般的に波長が長くなるほど放射率が低くなり、温度測定が困難になります。このため波長が短く放射率の高い領域で測定するほうが有利です。ただし、太陽光、照明光などの反射の影響を受けやすくなるので注意が必要です。また、光沢のある金属は放射率が 0.1 以下で測定困難です。

3) 常温付近の測定

常温付近では放射される赤外線量が小さく、ピークが約 10 μm にあるため感度の波長依存性が少ない熱形検出素子を用いて、8 ~ 13 μm (大気の窓)や 6.5 ~ 10.5 μm が使用されます。また、感度の高い MCT(HgCdTe)を用いて 3 ~ 4 μm (大気の窓) が使用されます。

4) 光学フィルタ

検出素子の感度特性だけでは、上記のような任意の波長を選択することができないため、光学フィルタを使用して、特定波長の赤外線のみを検出素子に入射させるようにしています。

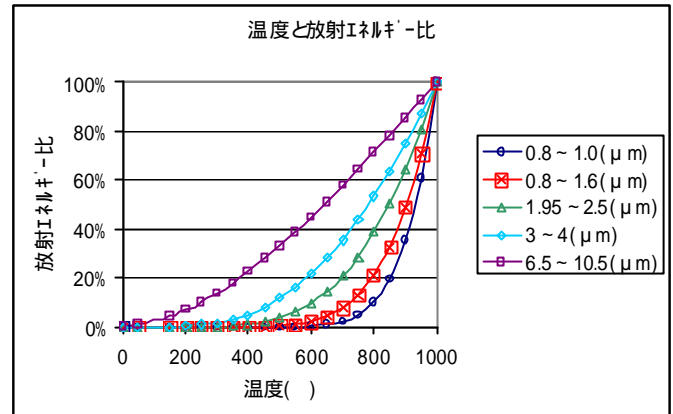
放射率設定

物体の放射率は 1.0 より低いいため、放射エネルギーは同温度の黒体より少なくなります。従って、そのまま温度表示をすると実際の温度より低く表示されることになります。放射温度計では物体の放射率を設定し、測定された赤外線量を 1/ することにより放射率 1.0 に換算します。

放射率は波長依存性があるため放射温度計の測定波長における放射率を設定する必要があります。

[設定誤差]

また、一般に短い波長の放射温度計では長い波長のものより、放射率設定誤差が小さくなります。これは温度による放射エネルギーの変化量が大きいからです。例として 0 ~ 1000 の温度と放射エネルギー比の特性を当社の代表的な温度計について右図に示します。放射率 0.8 のワークを放射率設定 1.0 で測定した場合、1000 に対し波長 6.5 ~ 10.5 μm は 860 、0.8 ~ 1.0 μm は 990 を指示することになります。



[室温放射の補正]

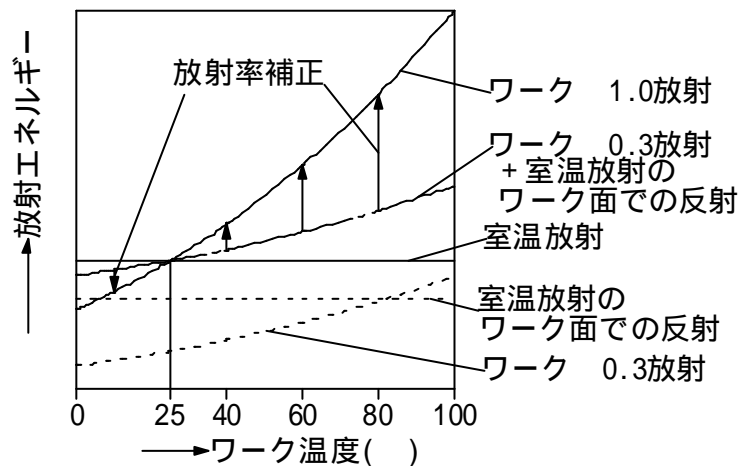
室内で室温付近のワーク温度を測定する場合、室温(天井、壁)の放射エネルギーがワーク表面で反射されて放射温度計に加算されて入射されます。ワークの放射率を 0.3 とすると透過のない場合にワークの反射率は 0.7 となります。この時、放射温度計に入射されるエネルギーは次式となります。

$$[\text{放射温度計に入射されるエネルギー}] = [\text{ワーク } 1.0 \text{ の放射}] \times \epsilon + [\text{室温の放射}] \times (1 - \epsilon)$$

さらに室温を 25 °C とした場合の各部エネルギーを右図に示します。この図からわかるようにワーク温度が室温 (25 °C) より高い場合には放射率設定値を小さくすることにより、放射温度計の温度指示値は高くなりますが、ワーク温度が室温 (25 °C) より低い場合には逆に温度指示値が低くなります。

また、屋外での測定では室温からの反射成分がないためワーク温度が 25 °C より低い場合でも、放射温度計に入射される放射エネルギーは 1.0 よりも小さくなります。

このため当社の放射温度計では、モード設定(室温補正)により室温からの反射成分を加算しない方式を選択できるようにしています。



放射率の測定

放射温度計を使用して温度を測定する際、かならず放射率を設定する必要があります。放射率は温度、材質、表面状態、測定波長等によって変わるため、文献等の資料により正しい値を探しだすことは困難です。このため、通常は下記方法によって求めます。

1. 接触型温度計による方法

- 1) ワークを実際に測定する温度まで加熱します。測定温度範囲が広い場合はなるべく高い温度にします。室温を測定可能な温度計の場合、ワークの温度が室温では放射率測定ができません。
- 2) ワークの温度を熱電対またはサーミスタ等の接触型温度計にて測定します。
この時、接触圧および接触による熱伝導により温度が低めにでることが多いので、十分注意して測定します。
- 3) ワークとセンサヘッドがほぼ垂直になるように設置して、外乱の影響を少なくします。
- 4) 温度測定と同じ要領で照準を行い、測定温度出力が今測定したワークの温度に合うように放射率の数値を設定します。
- 5) この時の放射率設定値が、その温度におけるワークの放射率となります。

2. 黒体塗料による方法

- 1) あらかじめ放射率のわかっている黒化処理用の塗料（黒体塗料；当社にて別売）をワークの一部に測定スポットの2倍以上の面積で塗布します。
あまり厚く塗布すると黒体塗料の表面温度が低下するので、注意が必要です。
- 2) ワークを実際に測定する温度まで加熱します。測定温度範囲が広い場合はなるべく高い温度にします。室温を測定可能な温度計の場合、ワークの温度が室温では放射率測定ができません。
- 3) つぎに温度測定と同じ要領で黒体塗料部分に照準を行い、放射率の数値設定を黒体塗料の放射率に設定すると、放射温度計はワークの温度に相当する測定温度出力を行います。
- 4) 黒体塗料塗布面になるべく近い、塗布していない部分に照準し、3) 項の温度と同じ温度になるように放射率を設定します。
- 5) この時の放射率設定値が、その温度におけるワークの放射率となります。

接触式温度計で測定できない小さいワーク、動くワーク等で、黒体塗料を塗布できない場合は温度の真値を求めることは困難です。ただし、生産ライン等においては製造条件を一定に保つ必要から温度測定を行う用途が多く、再現性が得られれば良いということが多くあります。

リニアライザ

温度と放射エネルギー(放射輝度)との関係は直線ではないため、リニアライザによって直線化し温度信号に換算しています。リニアライザでは一般的に温度と放射エネルギーとの関係をテーブルとして持ち、測定された赤外線を換算しています。

リニアライザには次の方式があります。

1) 折線近似

右図のように特定の温度 T1 ~ T5 に対応する放射エネルギー比例電圧 V1 ~ V5 をテーブルとして保有します。測定された放射エネルギー比例電圧が Vx の場合つぎの式により、測定温度 Tx を求めます。

$$T_x = T_3 + (T_4 - T_3) \times (V_x - V_3) / (V_4 - V_3)$$

測定温度が保有するデータ部分(ブレイクポイント)の場合は変換誤差(リニアライズ誤差)が0となりますが、中間の場合は誤差が最大となります。保有データ数を多くすれば変換誤差が少なくなります。保有データ数は通常 1 レンジ 20 ケ程度です。

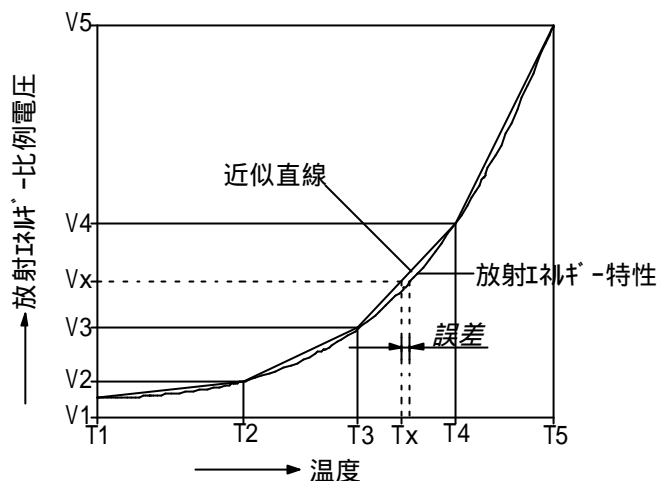
保有データはプランクの放射則に代入する測定波長を変化させ、実測データとの誤差が最小となる波長で放射エネルギーを計算して求めます。保有データ数も少なく計算時間(変換時間)も短い方式です。

2) 近似多項式

プランクの放射則を逆算して放射エネルギーから温度を求める計算式を得るのは困難なため、温度と放射エネルギー比例電圧の特性を近似多項式で近似させ、温度に換算します。精度は近似多項式をどの程度精度良く作れるかによります。保有データ数は少ないが変換時間が長い方式です。

3) 全データテーブル式

AD 変換された全ビットデータに温度データを割り当てます。保有データ数が多いが変換時間が短い方式です。



応答時間

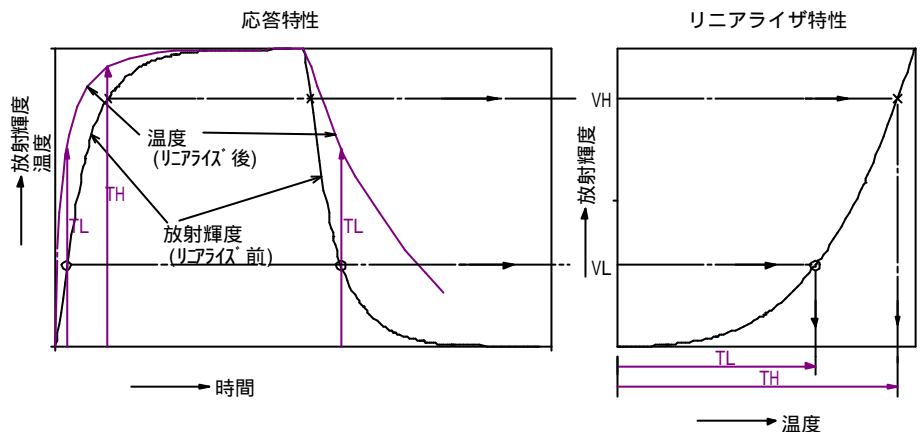
放射温度計の応答時間は使用する赤外線検出素子によって決まります。
 温度計とした場合の応答時間の速いものから順に記載します。

| 検出素子タイプ | | 検出素子 | 温度計応答時間の最高 |
|---------|-------|-------------------|------------|
| 量子型 | 光起電力形 | Si、InGaAs、InAs | 1mS |
| | 光導電形 | PbS、PbSe、MCT、InSb | 5mS |
| 熱型 | 熱起電力形 | サーモパイル | 20mS |

光導電形の素子は、素子自身の応答時間は上記数値より速いのですが、光チョッパを使用する必要があるため、応答時間が遅くなります。光チョッパはモータで機械的に赤外線を断続させるため、モータの回転数に制約されます。モータの回転数を上げて使用すると機械的寿命が短くなってしまいます。

[応答特性]

一般的に検出素子のステップ応答は、右図実線で示すように指数関数的になります。



$$V = 1 - e^{-3Tx / To}$$

- V ; 立ち上がりレベル
- Tx ; 任意の応答時間(S)
- To ; 0~95%応答時間(S)
- e ; 自然数

| Tx / To | V |
|---------|-------|
| 0.33 | 0.631 |
| 0.5 | 0.777 |
| 1.0 | 0.950 |
| 1.5 | 0.989 |
| 2.0 | 0.997 |

この応答特性を上右図のような特性を持ったリニアライザで温度に換算すると、温度の低い領域ほどリニアライズ出力が大きく補正されます。(補正係数=TL/VL > TH/VH) この結果、上左図の点線で示すような応答特性になります。つまり立ち上がりでは応答が速くなり、立下りでは応答が遅くなります。この傾向は測定波長が短くなるほど顕著になります。

[スムージング]

通常の用途では、放射温度計の持つ最高の応答時間を必要としない場合が多くあります。この場合は必要とされる応答時間までスムージング機能(移動平均処理)によって、遅くして使用します。こうすることによって、温度計のノイズが低減されて安定した温度測定が可能となります。

スムージング処理はリニアライザの温度変換後に実行されますので、立ち上がり、立下りの応答特性に変化はありません。

放射温度計の特徴

放射温度計は次のような特徴を持っていますので、用途によって適切なものを選定し使用方法にも注意することが重要です。

1) 特長

- a) 感温部もあまり高温にならないので、耐熱性の問題が少なく消耗品が少ないので経済的。
- b) 被测温物体と温度計を直接に接触させないので、被测温物体の温度を乱すことが少ない。
- c) 非接触温度計であるから、移動している物体や回転体の表面温度を測るのに都合がよい。
- d) 結局は熱起電力の測定に帰着されるので、光高温計のように個人差が少ない。
- e) 熱電温度計で測られないような高温が測定できる。
- f) 記録計、自動制御に使用される。
- g) 応答時間が速い。

2) 欠点

- a) 黒体についてだけ正しい温度が測定できる。黒体でない場合には放射率を知って補正しなければならぬが、その補正は光高温計についてよりも困難で、多くの場合に正しい補正は不可能である。
- b) 被测温物体と感温筒との間に水蒸気などが大量に存在すると、赤外線がそれに吸収されて光学部(レンズ)に到達する赤外線が減少し、温度を低く読むことになる。
- c) 物体の表面温度しか測定できない。
- d) レンズ、反射鏡のくもりや、汚れによっても温度を低く読むことになる。

窓越し測定

真空槽内のワークを窓越しに温度を測定する場合は、使用する窓材が温度計の測定波長領域において赤外線十分に透過している必要があります。完全に透過していない波長領域で測定した場合、試料からの赤外線は窓材を透過することができないため温度の測定はまったくできず、窓材の温度を測定することになってしまいます。また、窓材の透過波長領域が温度計の測定波長の全部をカバーしていない場合は、試料からの赤外線の一部が窓材を透過できないため、温度指示値が低下します。この低下分は放射率設定またはセンサ補正スパン機能で補正可能ですが、窓材の温度が高くなる場合は窓材からの赤外線を温度計が測定することになるので、温度指示値が高めになります。

1. 使用する窓材を変更できない場合

窓材の透過波長内を測定波長とする温度計を選定します。

2. 使用する窓材を変更できる場合

使用する温度計の測定波長を透過できる窓材に変更します。

| 測定波長 (μm) | 使用可能窓材 (透過波長 μm) | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | 一般用ガラス (0.4 ~ 2.5) | BK (0.4 ~ 2.5) | 石英(注) (0.4 ~ 4) | CaF ₂ (0.4 ~ 10) | BaF ₂ (0.4 ~ 12) |
| 0.8 ~ 1.0 0.8 ~ 1.6 1.95 ~ 2.5 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 3 ~ 4 | × | × | ○ | ○ | ○ |
| 4.9 ~ 5.3 | × | × | × | ○ | ○ |
| 6.5 ~ 10 6.5 ~ 10.5 | × | × | × | × | ○ |
| 7.9 ± 0.15 | × | × | × | ○ | ○ |
| 8 ~ 10.5 | × | × | × | ○ | ○ |

注)含水石英は 2.7 μm に水分の吸収帯あり

[窓材使用時の注意]

窓材の表面では反射があるため、窓材の透過領域においてもその透過率は 100%にはなりません。反射率は両面合計で一般的に 6 ~ 10%ですので温度指示値が低下しますが、下記方法で補正可能です。

放射率補正 ; ワークの放射率 × 窓材透過率(0.9 ~ 0.94)

センサ補正スパン ; 1 / 窓材透過率 1.06 ~ 1.11

斜めからの測定

ワークに対し垂直方向からでなく、斜めから測定しても基本的に温度測定は可能です。

微小点から放射される赤外線(放射強度 I)は、ワークの垂直軸からの角度()が大きくなるほど少なくなります。

$$(\text{ランバートの余弦の法則}) \quad I = I_0 \times \text{COS}$$

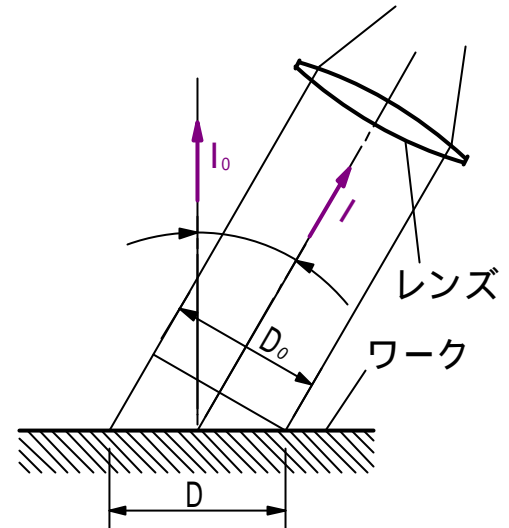
一方、標的サイズ(D)は傾き角の方向に楕円形に長くなります。

$$D = D_0 \times \frac{1}{\text{COS}}$$

この結果、放射温度計に入射される赤外線量は変化しないこととなります。

ただし、放射率の低いワークは放射率の角度依存性があり、赤外線の放射される角度によって放射率が変化します。一般的に角度が大きくなると、放射率が小さくなります。

放射温度計はもともとワークの放射率を設定することによって正しい温度測定が行われる訳ですから、斜め測定の状態でも放射率を測定して設定することにより問題なく温度測定を行うことができます。



垂直軸からの角度による標的サイズの変化(光路が平行の場合)

| 角度(°) | 標的サイズの倍率 |
|-------|----------|
| 0 | 1.000 |
| 10 | 1.015 |
| 20 | 1.064 |
| 30 | 1.155 |
| 40 | 1.305 |
| 50 | 1.556 |
| 60 | 2.000 |
| 70 | 2.924 |
| 80 | 5.759 |

外乱光

ワークの周囲に高温になっている物体がある場合、その高温物体から放射される赤外線がワークの表面で反射して、ワークからの放射に加算されて放射温度計に入射されるため、温度指示値が高めになってしまいます。このように本来の測定に関係のない赤外線を外乱光と呼びます。

外乱光の影響は外乱になる物体の温度が高いほど大きくなります。また、ワークの放射率が低いほど大きくなります。

検出素子により測定温度が次の温度より低い場合に、外乱光の影響が大きくなります。

| 検出素子 | 測定波長 | 影響のする温度 |
|--------------|--------------------------|---------|
| Si | 0.8 ~ 1.0 μm | 600 以下 |
| InGaAs | 0.8 ~ 1.6 μm | 300 以下 |
| InGaAs(電子冷却) | 1.95 ~ 2.5 μm | 200 以下 |
| MCT | 3 ~ 4 μm | 150 以下 |
| サーモパイル | 6.5 ~ 10.5 μm | 100 以下 |

ワークの温度が室温であるにもかかわらず、放射温度計の指示値が高い温度を示す場合、センサヘッドのレンズ部を手または紙等で塞いでみて下さい。塞ぐことによって、温度指示値が低下すれば外乱光の影響があることとなります。

外乱光の影響を低減するには、次の方法があります。

- 1) 外乱の原因が白熱電球等の照明光にある場合、温度の低い蛍光灯または水銀灯に変更します。
- 2) 太陽光が差し込む場合は、太陽光を遮光します。
- 3) 高温物体とワークの間に遮蔽板を設置します。
- 4) ワークの放射率が低い場合、ワークに黒体塗料を塗布して反射率を低くします。

炉内の測定

一般的に炉内のワークの温度測定は困難です。

- 1) 炉壁の温度が高く、炉壁から放射された赤外線がワーク表面で反射され、ワークからの放射に加算されて放射温度計に入射されるため、温度指示値が高くなってしまいます。

再現性が得られれば良いという使用例においては、測定が可能となりますが炉壁温度が一定という条件が付きます。

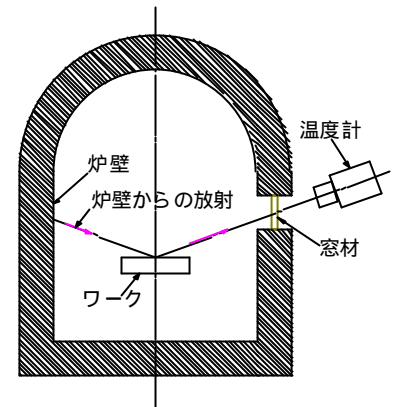
- 2) ワークの放射率が低い場合、上記影響が顕著になります。

ワークの放射率は 0.8 以上が測定可能の目安です。

- 3) 炉内に温度計を設置するのは、放射温度計の耐熱温度が問題となります。

水冷ジャケットを使用する場合はケーブルの耐熱にも配慮する必要があります。

- 4) 炉外に温度計を設置する場合は、炉壁に穴を明ける必要があります。この場合、炉内の空気が外部に流れないようにするためには、窓材を設置する必要があります。窓材の材質は測定波長によって適切なものを選定します。



[炉壁からの影響]

温度計で測定される放射輝度 L_o は次式で表されます。

$$L_o = \epsilon \cdot L_t + (1 - \epsilon) \cdot L_w$$

ϵ : ワーク放射率

L_t : ワーク温度からの黒体放射輝度

L_w : 炉壁温度からの黒体放射輝度

[計算例]

ワーク温度=300、炉壁温度=350 として、測定波長における放射輝度をエネルギーテーブルから求め、上式に代入し放射輝度 L_o を計算します。つぎに L_o を放射率設定値 s で割った後、エネルギーテーブルで逆算して温度を求めます。

| 測定波長 | 0.8 ~ 1.6 μm | | 6.5 ~ 10.5 μm | |
|------------|-------------------------|--------|--------------------------|--------|
| 放射率設定値 s | 1.0 | ワーク放射率 | 1.0 | ワーク放射率 |
| ワーク放射率=0.8 | 315.6 | 323.7 | 310.5 | 353.6 |
| ワーク放射率=0.5 | 331.8 | 359.1 | 325.7 | 489.2 |

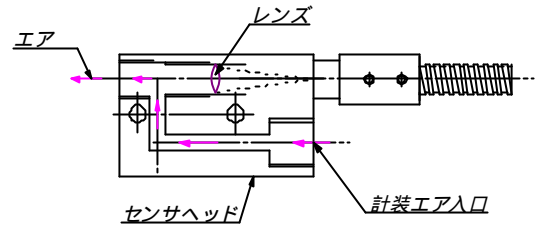
放射率設定値 s をワーク放射率 に設定すると、誤差が大きくなります。この場合、反射補正機能のついている放射温度計では、温度指示値がワーク温度になるように反射補正值を設定することにより正しい温度指示値を得ることができます。ただし、炉壁温度が一定であることが必要条件です。

レンズの汚れ防止

粉塵、油、湯気、煙等のある環境下にヘッドを設置すると、レンズ表面が汚れて赤外線が吸収されて温度指示値が低下するという状態になります。このような環境で安定した温度測定を行うには、つぎのようなレンズ汚れ防止対策が必要になります。

1) 計装エア

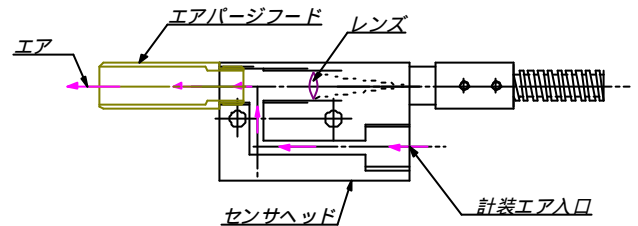
計装エア入力口の付いたセンサヘッドにおいては、計装エアをレンズ前面に微量流すことによってレンズに付着する粉塵、油等を飛ばします。計装エアの流量は1リットル/分程度で十分ですので、エアコントローラ(スピードコントローラ)等によりエア流量を調節して下さい。流量が多すぎますと周囲から粉塵、油等を巻き込んでしまいますので注意して下さい。



また、通常のエアの場合エア内に水、油等が含まれていますので、かえってレンズを汚してしまうこととなりますので注意が必要です。

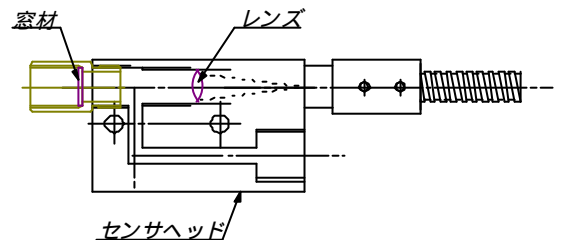
2) エアパージフード

センサヘッドの先端にエアパージフードを取り付けて、計装エアを流すとさらに効果が増します。



3) 窓材

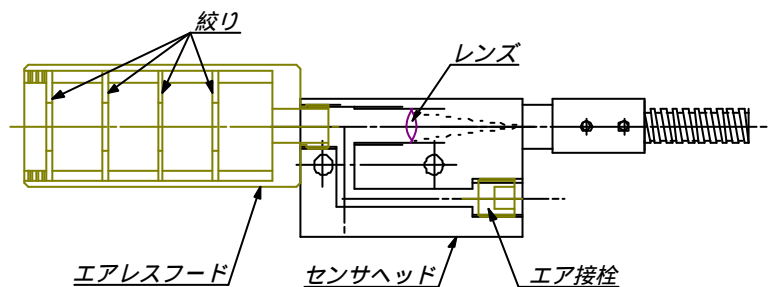
粉塵、油等があまりひどくない場合、レンズ前面に窓材を取り付けます。窓材は簡単に取り付け取り外しが出来るようになっていますので、窓材が汚れてきた時に取り外して清掃します。



清掃は綿棒の先をほぐし、アルコールで軽く拭き取ります。この時、レンズ表面に傷つけないように注意します。また、溶接のスパッタによるレンズの傷付き防止にも使用できます。

4) エアレスフード

レンズ汚れ防止としてエアを使用した場合、エアによってワークが冷却されてしまうということがありません。このようにエアが使用できない場合、エアレスフードを使用します。エアレスフード

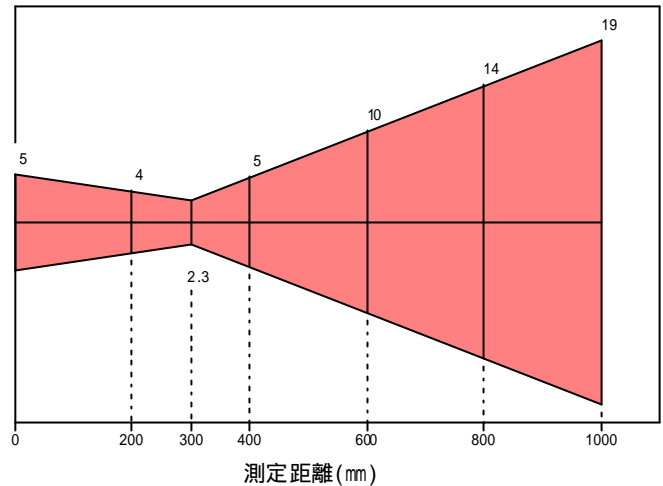


は絞りを数段に設置し、構造的に粉塵等がレンズに到達しにくくしています。エアレスフードを使用する場合、センサヘッドに計装エア用の孔が開いたままでは空気の流れが生じてレンズ面まで粉塵が到達してしまいますので、計装エア用の孔はエア接栓で塞ぐ必要があります。

光路の影響

センサヘッドとワークの測定位置との間を光路と呼びます。光路は標準測定距離における標的サイズとレンズの有効径を結んだ線で示されます。

右図は光路図の一例です。



以下、この光路に関する注意事項を述べます。

[けられ]

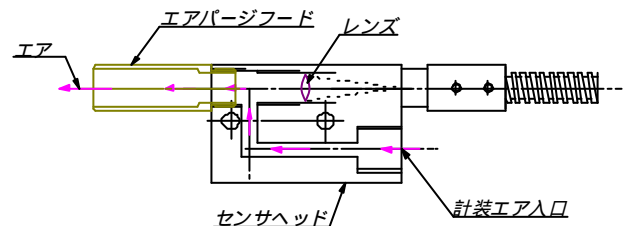
光路の一部が遮られることをいいます。けられがあると赤外線の一部がレンズに入射しなくなりますので、温度指示値が低下してしまいます。温度計自身の持つ機械的中心と実際の測定位置のずれ、設置時の位置ずれ等を考慮すると、実際の光路としては光路図の 1.2 倍以上確保する必要があります。

[測定距離]

測定距離が長くなるにつれて標的サイズが大きくなります。理想的な光学系で真空中であれば標的サイズよりワークが大きければ、距離に関係なく温度測定が可能です。ただし、実際の放射温度計に使用している光学系は理想的なものではないため、測定距離が長くなると温度指示値が少し低下します。また、大気中では赤外線を吸収する水蒸気(H₂O)や、二酸化炭素(CO₂)等がありますので測定距離が長くなると吸収量が増え、温度指示値が低下します。低下の程度は測定波長および水蒸気、二酸化炭素等の密度によって異なります。測定波長として大気の窓を使用した放射温度計では、測定距離が 1m 以下の場合ほとんど影響を受けないと考えてよいでしょう。

[エアパーージ]

光路中に水蒸気、煙等が多く存在する場合は、計装エアにて水蒸気、煙等を吹き飛ばして測定します。この場合、エアパーージフードを使用します。エア流量は水蒸気、煙等を吹き飛ばせる必要がありますが、多くしすぎますとワークを冷やしてしまうことがありますので、注意が必要です。



また、通常のエアの場合エア内に水、油等が含まれており、レンズを汚してしまうことになりしますので注意が必要です。

移動ワークの測定

放射温度計では移動しているワークや回転体の温度測定が可能です。

[応答時間]

この場合、最低限必要な応答時間 t (S) はつぎの関係式で求められます。

$$t = \frac{L - 2D}{S}$$

L ; 移動ワークの幅(m)

D ; 標的サイズの直径(m)

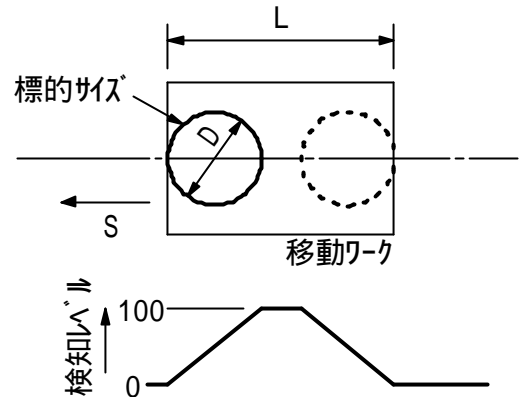
S ; ワークの移動速度(m/S)

計算例)

L=12(mm)、D= 3(mm)、S=0.1(m/S)とすると

$$t = (12 / 1000 - 2 \times 3 / 1000) / 0.1 = 0.06(S) = 60(mS)$$

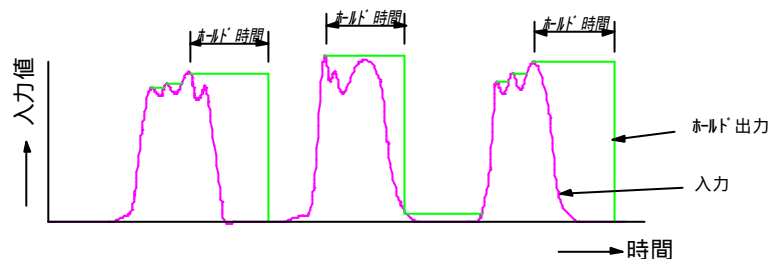
となり、応答時間が 60(mS)より速い温度計を選定する必要があります。この場合応答時間の規定は 0 ~ 90%以上とします。応答時間が 60(mS)より十分速い温度計を選定した場合、スムージング機能により応答時間を 60(mS)に近づけることにより、ノイズを低減でき安定した温度測定が可能となります。



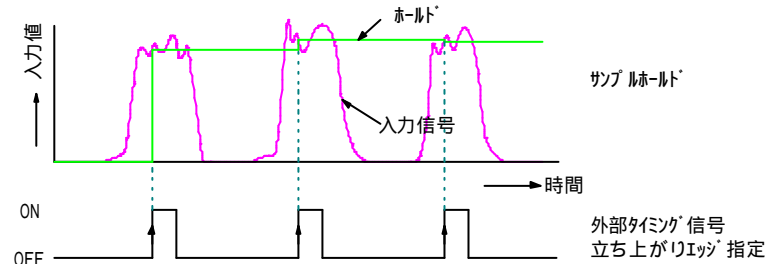
[ピークホールド、サンプルホールド]

ワークが間歇的に移動してくる場合は、温度が断続的に測定されますのでワーク温度の識別が困難になります。このような場合、ピークホールドまたはサンプルホールド等の信号処理によりワーク温度を識別します。

ピークホールド(時間リセット)

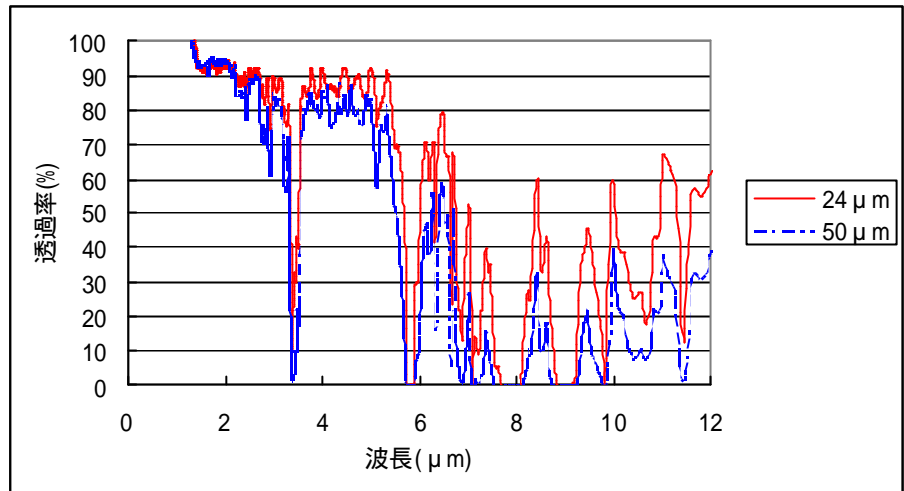


サンプルホールド



プラスチックの測定

プラスチックは選択放射体であり、特定の波長で透過と吸収(放射)が大きく変化します。透過が大きい波長では放射率が低いため、温度測定がうまくできません。このため吸収(放射)が大きい波長で測定する必要があります。



プラスチックは材質によって吸収波長が異なります。主な材質の吸収波長をつぎに示します。

| 材質 | 吸収波長(μm) |
|-------------|---|
| ポリエチレン(PE) | 3.4 μ 6.9 μ 14 μ |
| ポリプロピレン(PP) | 3.4 μ 6.9 μ 7.3 μ 8.7 μ 10.2 μ 10.4 μ 12 μ |
| ポリエステル(PET) | 5.8 μ 7.1 μ 7.5 μ 7.9 μ 9.0 μ 9.8 μ 10.4 μ 12 μ |
| ナイロン | 3.0 μ 3.4 μ 6.1 μ 6.5 μ 7.9 μ 8.3 μ 10.5 μ |
| ポリカーボネイト | 3.2 μ 3.4 μ 4.4 μ 5.7 μ 6.3 μ 6.8 μ 8.2 μ 10 μ |
| 塩化ビニール | 3.4 μ 5.8 μ 6.3 μ 6.9 μ 7.9 μ 9.0 μ 10.5 μ |
| ポリスチレン(PS) | 3.4 μ 6.2 μ 6.9 μ 7.3 μ 8.6 μ |

薄いフィルム状のもので吸収波長の資料がないものは、赤外線分光器での測定が必要になります。

吸収のある波長においては、吸光度 A はランベルト - ベールの法則に従って、プラスチックが厚くなるほど大きくなりますので吸収率(放射率)も大きくなり、温度測定が容易になってきます。

$$A = \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_0} \right) = - L$$

;吸収係数

L ;プラスチックの厚さ

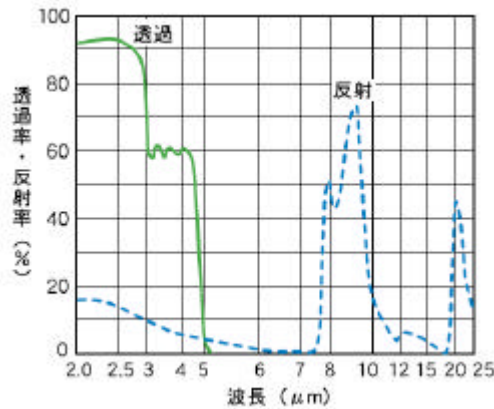
I_0 ;入射前の光の強度

I_1 ;入射後の光の強度

厚さが 1mm 以上のものでは測定波長を 6.5 μm 以上にすることにより、放射率を 0.8 以上で測定することが可能です。ただし透過率が 0.9 以上の波長領域では、ほとんどがプラスチック表面での反射成分であり吸収がほとんどありませんので、厚くなくても放射率は大きくなりません。

ガラスの測定

ガラスは波長が長くなると透過しなくなり、吸収(放射)が大きくなります。また、厚さが薄いほど透過できる波長が長くなります。



窓板ガラス 2.7 μm 以上

石英ガラス 4.7 μm 以上

また、ガラスは波長が 6 μm 以上で反射率の高い領域があるため、4.9 ~ 5.3 μm の波長を利用する場合があります。

吸収のある波長においては、吸光度 A はランベルト - ベールの法則に従って、ガラスが厚くなるほど大きくなりますので吸収率(放射率)も大きくなり、温度測定が容易になってきます。

$$A = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_1} \right) = - L$$

;吸収係数

L ;ガラスの厚さ

I_0 ;入射前の光の強度

I_1 ;入射後の光の強度

ただし透過率が 0.9 以上の領域では、ほとんどがガラス表面での反射成分であり吸収がほとんどありませんので、厚くなっても放射率は大きくなりません。

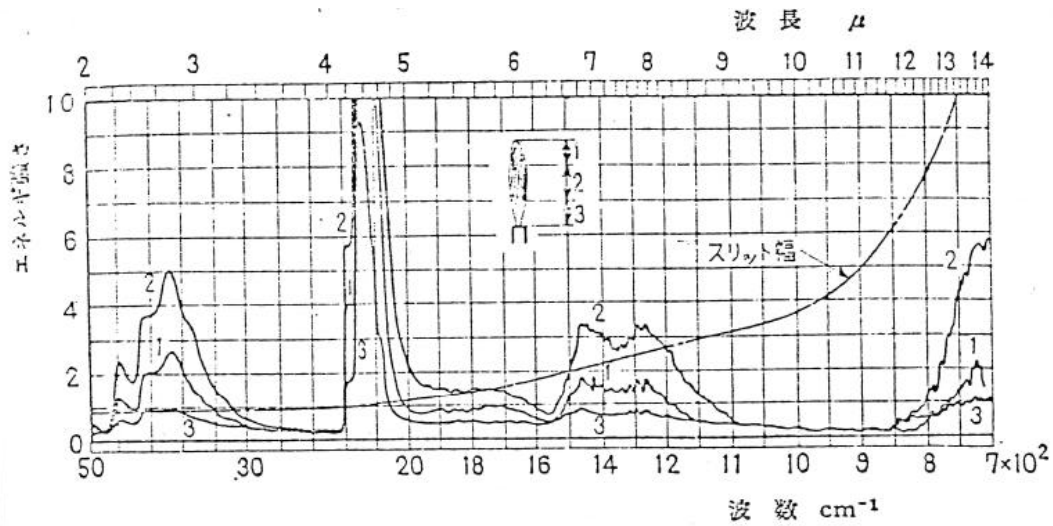
気体の測定

気体の温度測定は一般的に困難です。輝炎、プラズマ、放電等も同様に測定困難です。

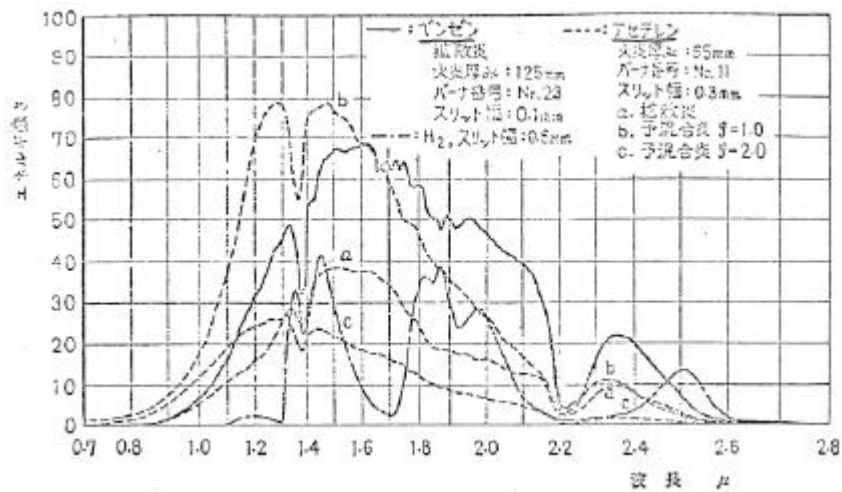
気体は固体、液体に比べて密度が小さく放射率がかなり低く(0.05 以下)、流れ易いため放射率が安定しないため再現性も悪いことになります。

[輝炎]

燃料の種類によって放射(吸収)波長が異なりますが、1.0~2.2 μm、2.4~3.0 μm、4.2~4.6 μm、6.5~8.5 μm で比較的大きな放射があります。温度測定は困難にしても輝炎の有無検知にはこれらの波長が使用されます。また、輝炎によってワークを加熱する場合、輝炎越しにワークを測定することになりますので、これらの波長は避けたほうが輝炎の影響による、温度測定値の上昇を防ぐことができます。



プロパンガスの燃焼スペクトル



ベンゼン、アセチレン、水素の燃焼スペクトル

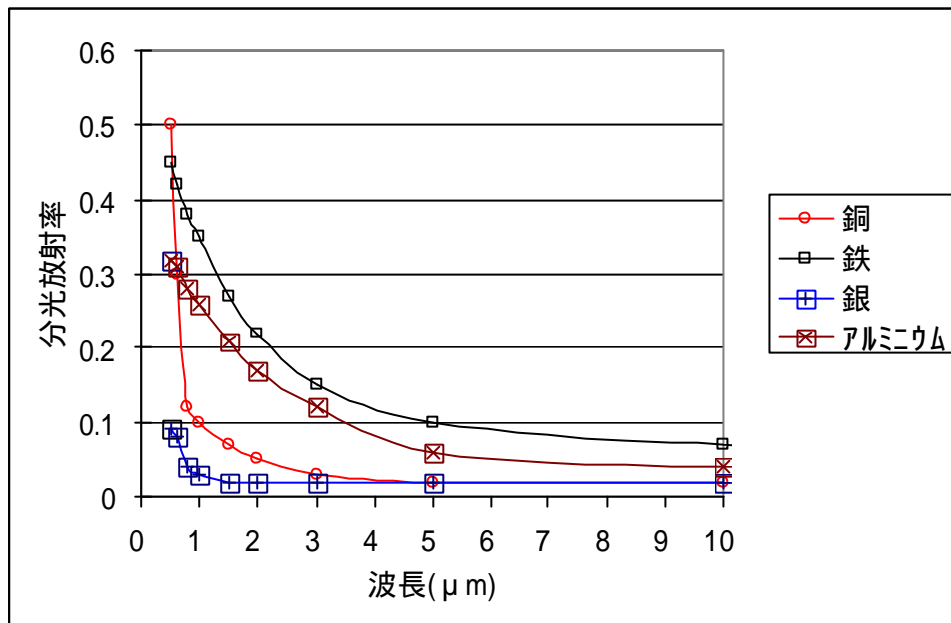
参照 赤外線(放射率 | 大気の透過)光学系(光学フィルタ)
温度計(放射温度計 / 波長選択 | 光路の影響)

金属の測定

光沢のある金属は放射率が低く、一般的に温度測定は困難です。ただし、高温になると表面が酸化し放射率が高くなるので測定できるようになります。光沢のない金属の場合は放射率がまちまちですが測定可能です。ただし温度によって放射率が異なるので注意が必要です。

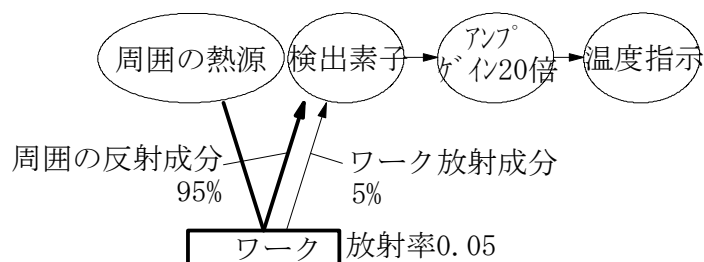
鉄を室温から 1000 程度まで加熱する場合、700 位までは放射率が低い状態が続きますが 700 位以上になると表面の酸化が進み、放射率が高くなります。その後、冷却をしても酸化状態は維持されますので放射率は高いままです。

金属の放射率は波長依存性があり、一般的に短い波長のほど放射率が高いため測定温度が高い場合はなるべく波長の短い放射温度計で測定するほど測定誤差が小さくなります。



鏡面の測定

鏡面金属(アルミ、SUS、鉄)は放射率が 0.05 ~0.1 程度と低く、低温の測定は一般的な放射温度計では困難です。放射率 0.05 は放射率 1.0 に比べて、ワークからの放射エネルギーが 1/20 しかありません。



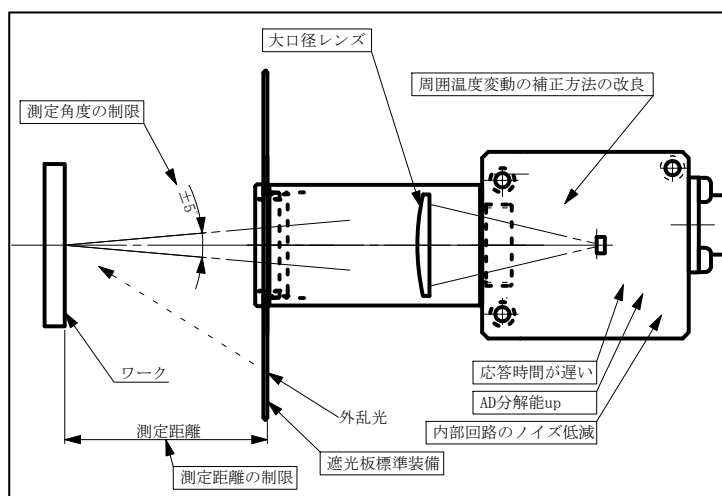
このためワークからの放射エネルギーよりも、周囲にある物体(壁、温度計等)からの放射エネルギーがワーク表面で反射して温度計に入射される成分の方が大きくなります。温度計は内部アンプのゲインを 20 倍にして温度表示をすることになり、結果的に温度計の誤差、安定性等および周囲にある物体の温度変動の影響が 20 倍に拡大されて表示されます。TMHX-CM シリーズはこれらの問題に対処するように設計されていますが、使用する際も従来の放射温度計よりも各種の注意、制限事項があり、今までに経験したことのない別世界です。

[鏡面測定に要求される注意、制限事項]

- 1) 測定角度の制限 ; ワークに対し垂直±5° (周囲の反射成分を温度計からの放射に限定するため)
- 2) 測定距離の制限 ; 60mm 以下(周囲の反射成分を温度計からの放射に限定するため)
- 3) 外乱光の遮光 ; 遮光板装備(周囲温度変動、外部熱源による変動対策)
- 4) 測定波長の制限 ; 2~6.8 μ m(測定温度が低いため、長波長の赤外線を測定する)
- 5) 測定温度の制限 ; 50°C以上(ワークからの赤外線放射量を大きくする)
注)測定温度が 100°C以上になると、他の制限が緩和されます。
- 6) 放射率の制限 ; 0.05 以上(金、銀、銅の鏡面は放射率が 0.05 以下のため測定不可)
- 7) 応答時間の制限 ; 0.05 秒~(精度保証 0.5 秒)(平均化処理によるノイズ低減のため)
- 8) 周囲温度変動の補正方法の改良

温度計ケース温度を測定し、温度指示値の変動を補正する。

- 9) 大口径レンズの採用 ; ワークからの赤外線放射量を大きくし、ノイズを相対的に小さくする
- 10) 温度計内部回路のノイズ低減 ; 適切なノイズフィルタ定数の選択

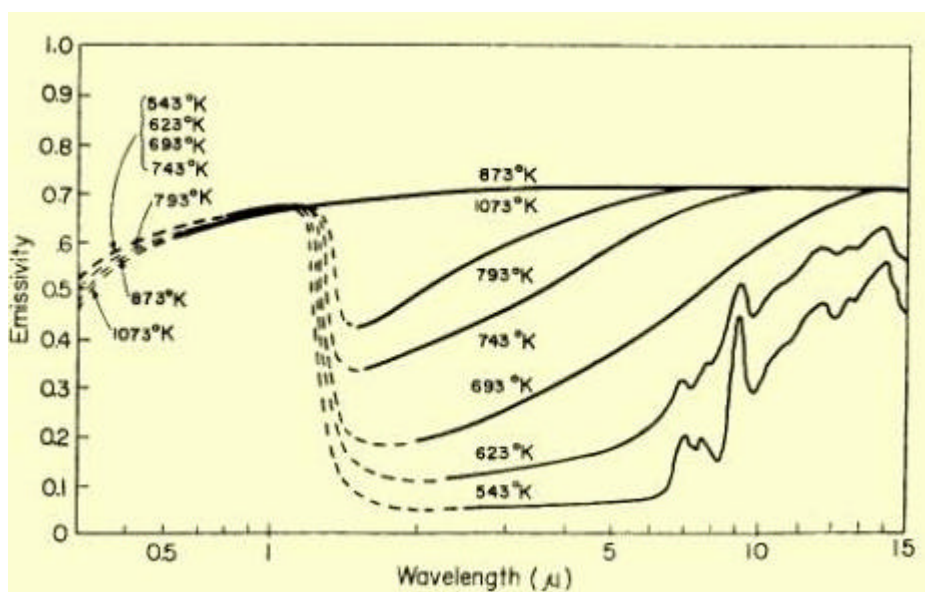


半導体の測定

シリコン(Si)、ゲルマニウム(Ge)、ガリウム・ヒ素(GaAs)等の半導体は室温においては赤外線を透過します。つまり放射率が低いため温度測定が困難です。

しかし、温度が高くなるにつれて放射率が高くなり、Siは約600nmで0.6程度になります。600nm以下の温度を測定するためには、測定波長は1.1μm以下または6.5μm以上で行う必要があります。

1.1μm以下の測定波長では温度による放射率の変化が少ないため、安定した温度測定が可能です。測定下限は400nm程度となります。一方6.5μm以上の測定波長では、100nm以下の測定も可能ですが温度による放射率の変化が大きいため測定誤差が大きくなります。



Si 分光放射率の温度依存性

加熱方式

放射温度計による温度測定を行う場合、各種加熱方式によって注意点があります。

1. 電気加熱

[高周波誘導加熱]

5KHz～数 100MHz の高周波交流電界中に被加熱物を置き、高周波(電磁波) の作用による被加熱物自体の発熱によって昇温される方式です。高周波交流電界は赤外線そのものには影響を与えませんが、電気回路に影響を与え誤動作が発生します。

このような場合、レンズ、ファイバは高周波の影響を受けないため、ファイバ型の温度計を使用し電気回路を高周波の影響を受けない位置に設置することにより、測定可能となります。実際にどの程度の影響を受けるかは、高周波の強度や設置距離等により変わりますのでデモ機による確認が必要となります。また、電気回路に影響を受ける場合には電源ライン、センサヘッドケーブルにフェライトコアを取付けることにより高周波を低減することができます。

高周波のパワーが強い場合や、高周波コイルの近くにセンサヘッドを設置する場合、センサヘッドやファイバ保護チューブの金属部分が加熱されて高温になってしまうことがあります。このような場合、樹脂ヘッドやナイロン、テフロン保護チューブを使用します。

[マイクロ波加熱]

マイクロ波によって発生する分子内での電気双極子の回転、振動によって内部発熱させる方式です。これを利用した装置としては家庭用の電子レンジがその代表とされ、国内では 2450MHz の周波数が多く使用されています。

温度計への影響では、高周波誘導加熱と同様の注意が必要となります。

[抵抗加熱]

物体に通電することにより、電気抵抗による発熱を利用した方式です。直接抵抗加熱はワークに直接通電する方式で、間接抵抗加熱はワークを発熱体によって加熱する方式です。発熱体とワークを接触させて加熱する方式の場合、放射温度測定ではあまり問題になりません。

発熱体とワークを離す場合は、赤外線によって加熱されることとなります(赤外線加熱)。発熱体としてニクロム線、セラミック等を使用したものは、放射される赤外線の波長が比較的長い遠赤外線加熱が多くなります。発熱体としてハロゲンランプを使用したもの(ランプ加熱)は、近赤外線が放射されるため、測定波長の短い放射温度計を使用するとワークの温度よりランプの温度を測定してしまうことにもなりますので注意が必要です。

[熱風加熱]

加熱された空気での加熱する方式ですが、放射温度計による測温にはあまり影響しません。蒸気による加熱の場合は、蒸気による赤外線の吸収があり温度指示値が低下します。

2. 燃焼加熱

炎による直接加熱の場合は、輝炎からの放射、吸収があるため測定波長に注意する必要があります。

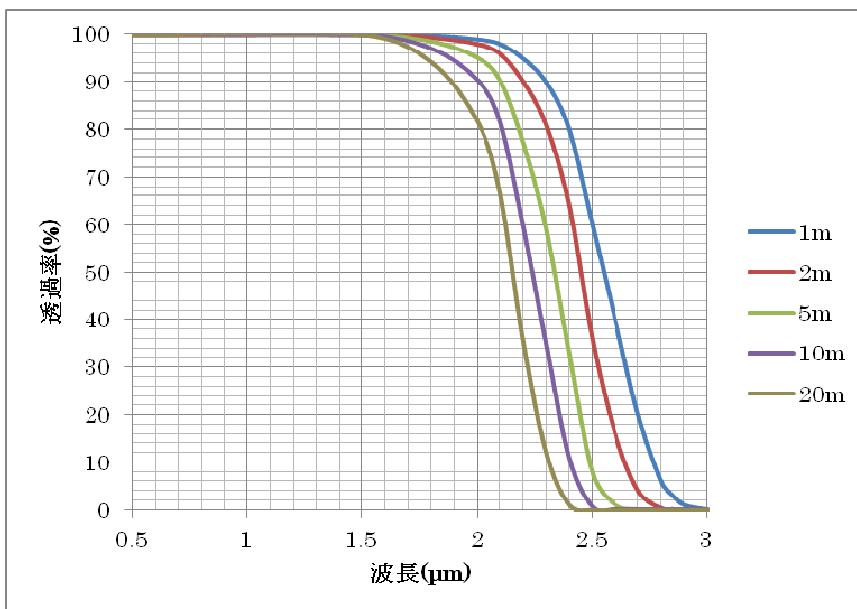
ファイバ長による影響

ファイバ型温度計の場合、ファイバ長が長くなることによりファイバにおける赤外線透過率が低下することにより、放射温度計の最低測定温度が変わる場合があります。

ファイバ長による石英ファイバの透過特性変化

ファイバ長によって石英ファイバの透過特性は右図のように変化します。

概略 $1.7\mu\text{m}$ 以上の波長において、ファイバ長が長くなるにつれて長波長側が透過しなくなります。



弊社のファイバ型温度計の測定波長には次の3種類があります。

$0.8\sim 1.0\mu\text{m}$ / $0.8\sim 1.6\mu\text{m}$ / $1.95\sim 2.5\mu\text{m}$

$0.8\sim 1.0\mu\text{m}$ および $0.8\sim 1.6\mu\text{m}$ においては、ファイバ長が長くなっても石英ファイバの透過特性はほとんど変化がありませんが、 $1.95\sim 2.5\mu\text{m}$ においてはファイバ長が長くなるに従って透過率が低くなるため、ワークから放射された赤外線が検出素子に入射される量が少なくなります。

この結果、低温領域において十分なSNが得られず、 $1.95\sim 2.5\mu\text{m}$ においてはファイバ型温度計の測定温度範囲の下限温度の仕様を高く設定せざるを得なくなっています。

例として、下記にFTKX-TNEシリーズのファイバ長による下限温度の変化を記載します。

| 機種 | TNE-100 | TNE-180 | TNE-240 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ファイバコア径 | $\phi 0.6\text{mm}$ | $\phi 0.2\text{mm}$ | $\phi 0.1\text{mm}$ |
| ファイバ長(m) | 下限温度(°C) | | |
| 1(標準) | 100 | 180 | 240 |
| 2~5 | 140 | 220 | 290 |
| 6~10 | 150 | 240 | 310 |
| 11~20 | X | 270 | 340 |

機種選定

放射温度計の機種選定のポイントにはつぎのような項目がありますが、互いに影響しあいます。

1. ワークの材質

フィルム、ガラス、半導体などは測定波長を特定する必要があります。

2. 測定波長

測定波長が短いほど測定誤差が小さくなります。一方、測定温度の下限が高くなります。

3. 測定温度範囲

測定温度が低いほど、測定波長の長いものを選定する必要があります。

4. 標的サイズと測定距離

標的サイズはワーク直径の 80% 以下であることが必要です。

測定距離が長くなると、一般的に標的サイズが大きくなります。

5. 照準方式

赤外線は目に見えないため、測定位置を確認するときに照準機能が必要になります。測定距離が長くなると、LED 照準では照準光が暗くなります。この場合、レーザ照準、光学照準を選定します。LED 照準、レーザ照準ではワークの色が白いほど、拡散面ほど見えやすくなります。また、光学照準ではワーク面が暗くなると見えにくくなります。

6. 応答時間

移動するワークや昇温速度の速いものを測定する場合は、応答時間の速いものを選定します。

7. 加熱方式

高周波誘導加熱などの場合は、影響の受けにくいファイバ型を選定します。

ハロゲンランプ加熱の場合は熱源からの影響を小さくするため、測定波長の長いものを選定します。

8. 環境

環境温度の高い場所にセンサヘッド部を設置する必要がある場合は、ファイバ型を選定します。または水冷ジャケットを使用します。埃、粉塵、煙などの多い環境では、エアパーティクルフード、窓材などのオプション部品を使用します。

9. 信号処理、出力

ピークホールド、サンプルホールド、スムージング、外部放射率設定などの信号処理機能が必要な場合は、その機能が付属しているものを選定します。また、温度表示、アナログ出力、アラーム出力、通信出力なども同様です。

10. 価格

一般的につぎの時に価格が高くなる傾向にあります。

- 1) 検出素子がサーモパイル以外では、下限測定温度が低くなるほど
- 2) 標的サイズが小さくなるほど
- 3) 応答時間が速くなるほど
- 4) 付属機能、出力が多くなるほど

測温理論式

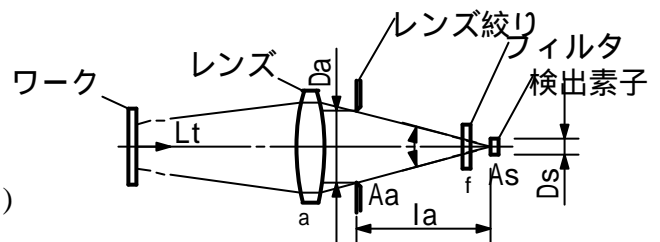
1)ワークから放射される赤外線(放射輝度 L)は、プランクの放射則を測定波長($\lambda_1 \sim \lambda_2$)で積分した次式で表わされます。

$$L_t = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda$$

- L_t ; 放射輝度($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$)
- ; 物体から発散する放射の波長(m)
- T ; 物体の絶対温度(K)
- C_1, C_2 ; 放射の第1定数、第2定数
- ; $C_1 = c^2 h = 5.9548 \times 10^{-17} (W \cdot m^2)$
- ; $C_2 = ch/k = 0.014388 (m \cdot K)$
- c ; 真空中の光の速度($c = 2.99792458 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$)
- h ; プランク定数($h = 6.6256 \times 10^{-34} J \cdot s$)
- k ; ボルツマン定数($k = 1.38054 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$)

2)下図の光学系を通して検出素子に入射される赤外線(放射束)は次式で表わされます。

$$\begin{aligned} &= \tau_l \cdot \tau_f \cdot \Omega \cdot A_s \cdot L_t \\ &= \tau_l \cdot \tau_f \cdot \frac{A_a}{l a^2} \cdot \left(\frac{D_s}{2}\right)^2 \cdot L_t \\ &= \tau_l \cdot \tau_f \cdot \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{D_a \cdot D_s}{l a}\right)^2 \cdot L_t (W) \end{aligned}$$

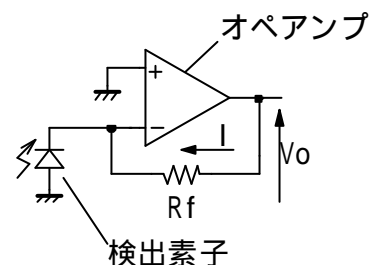


- τ_l ; レンズの透過率
- τ_f ; フィルタの最大透過率
- ; 検出素子から絞りをみた立体角
- A_s ; 検出素子または素子絞りの受光面積(m^2)
- A_a ; レンズ絞りの面積(m^2)
- D_s ; 検出素子または素子絞りの受光直径(m)
- D_a ; レンズ絞りの直径(m)
- $l a$; レンズ絞りと検出素子間の距離(m)

3)検出素子が光起電力型の場合、出力電圧(V_o)は次式で表わされます。

$$V_o = S \cdot R_f \cdot W \quad (V)$$

- S ; 検出素子の受光感度(A/W)
- R_f ; 帰還抵抗(Ω)
- ; 検出素子に入射される赤外線(W)



測定データ補正

測定済みのデータを放射率、センサ補正スパン値を変更して測定温度を補正する場合、下記手法により測定温度を一度エネルギーレベルに変換して、エネルギーレベルで補正してから温度に再変換します。

測定温度 エネルギーレベル変換

測定に使用した温度計の測定波長に合ったエネルギーテーブル(温度計 / 放射温度計 / エネルギーテーブル参照)から、測定温度をエネルギーレベルに変換します。テーブルの中間のデータの直線補完で求めます。

例) 測定波長 6.5 ~ 10.5(μm)、測定温度 115()の場合

115()前後の放射輝度 150()= 1.96E+02 (W/sr/m²)
 100()= 1.12E+02 (W/sr/m²)
 室温 23()の放射輝度 Wa= 3.364E+01 (W/sr/m²)
 補正前 115()の放射輝度 Wo = 1.12E+02+(1.96E+02 - 1.12E+02)
 × (115 - 100) / (150 - 100)
 =1.372E+02 (W/sr/m²)

エネルギーテーブル

| 温度 | 放射輝度(W/sr/m ²) |
|-----|----------------------------|
| () | 6.5 ~ 10.5 |
| | (μm) |
| 0 | 2.078E+01 |
| 23 | 3.364E+01 |
| 50 | 5.453E+01 |
| 100 | 1.120E+02 |
| 150 | 1.960E+02 |
| 200 | 3.070E+02 |

エネルギーレベルでの補正(放射率設定値の補正)

補正後の放射輝度 Wx

測定時の放射率設定値 o= 0.8

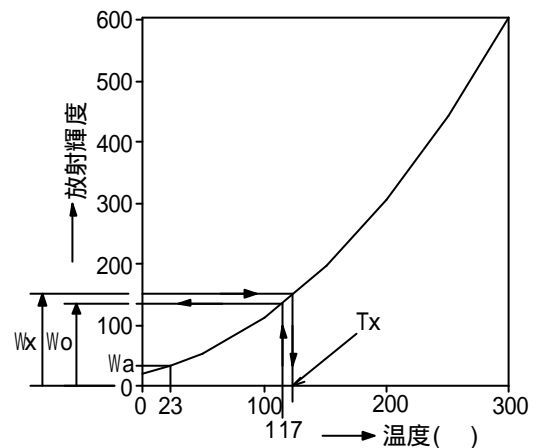
補正後の放射率設定値 c= 0.7 とすると

$$Wx = (Wo - Wa) \times \frac{o}{c} + Wa$$

$$= (1.372E+02 - 3.364E+01) \times 0.8 / 0.7$$

$$+ 3.364E+01$$

$$= 1.520E+02 \text{ (W/sr/m}^2\text{)}$$



測定温度が高く Wo が Wa の 100 倍以上の場合は、Wa は 0 として室温反射成分を省略しても可能です。

エネルギーレベル 温度変換

測定温度 エネルギーレベル変換と同様にエネルギーテーブルから、放射輝度を測定温度に変換します。補正後の温度 Tx は下記のように求められます。

$$Tx=100+(150 - 100) \times (1.520E+02 - 1.12E+02) / (1.96E+02 - 1.12E+02)=123.8()$$

エネルギーテーブル

各測定波長における、測定温度と放射輝度(放射率 1.0)の関係を示します。

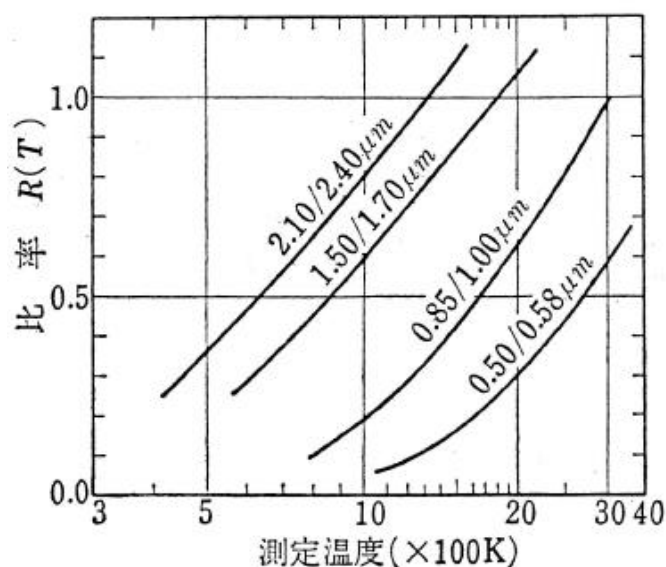
| 温度 () | 放射輝度(W/sr/m ²) | | | | | | | | |
|-----------|----------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|------------|
| | 0.8 ~ 1.0 | 0.8 ~ 1.6 | 1.95 ~ 2.5 | 3 ~ 4 | 4.9 ~ 5.3 | 6.5 ~ 10.5 | 6.5 ~ 10.0 | 7.75 ~ 8.05 | 8.0 ~ 10.5 |
| | (μm) | (μm) | (μm) | (μm) | (μm) | (μm) | (μm) | (μm) | (μm) |
| 0 | 3.185E-17 | 3.052E-09 | 1.177E-04 | 8.298E-02 | 4.529E-01 | 2.078E+01 | 1.767E+01 | 1.478E+00 | 1.458E+01 |
| 23 | 2.075E-15 | 4.300E-08 | 6.617E-04 | 2.524E-01 | 1.009E+00 | 3.364E+01 | 2.900E+01 | 2.482E+00 | 2.277E+01 |
| 50 | 1.319E-13 | 5.987E-07 | 3.698E-03 | 7.659E-01 | 2.233E+00 | 5.453E+01 | 4.761E+01 | 4.155E+00 | 3.550E+01 |
| 100 | 6.002E-11 | 2.928E-05 | 4.711E-02 | 3.963E+00 | 7.186E+00 | 1.120E+02 | 9.952E+01 | 8.879E+00 | 6.855E+01 |
| 150 | 6.548E-09 | 5.825E-04 | 3.337E-01 | 1.405E+01 | 1.756E+01 | 1.960E+02 | 1.762E+02 | 1.590E+01 | 1.140E+02 |
| 200 | 2.689E-07 | 6.261E-03 | 1.579E+00 | 3.840E+01 | 3.557E+01 | 3.070E+02 | 2.784E+02 | 2.526E+01 | 1.711E+02 |
| 250 | 5.490E-06 | 4.333E-02 | 5.590E+00 | 8.701E+01 | 6.302E+01 | 4.438E+02 | 4.052E+02 | 3.686E+01 | 2.388E+02 |
| 300 | 6.686E-05 | 2.164E-01 | 1.596E+01 | 1.716E+02 | 1.012E+02 | 6.047E+02 | 5.549E+02 | 5.051E+01 | 3.160E+02 |
| 350 | 5.495E-04 | 8.432E-01 | 3.864E+01 | 3.041E+02 | 1.507E+02 | 7.874E+02 | 7.255E+02 | 6.602E+01 | 4.012E+02 |
| 400 | 3.324E-03 | 2.708E+00 | 8.228E+01 | 4.962E+02 | 2.120E+02 | 9.896E+02 | 9.149E+02 | 8.318E+01 | 4.936E+02 |
| 450 | 1.576E-02 | 7.456E+00 | 1.582E+02 | 7.580E+02 | 2.848E+02 | 1.209E+03 | 1.121E+03 | 1.018E+02 | 5.921E+02 |
| 500 | 6.136E-02 | 1.813E+01 | 2.799E+02 | 1.098E+03 | 3.688E+02 | 1.444E+03 | 1.342E+03 | 1.217E+02 | 6.960E+02 |
| 550 | 2.033E-01 | 3.983E+01 | 4.628E+02 | 1.522E+03 | 4.635E+02 | 1.693E+03 | 1.576E+03 | 1.427E+02 | 8.044E+02 |
| 600 | 5.892E-01 | 8.039E+01 | 7.231E+02 | 2.034E+03 | 5.683E+02 | 1.953E+03 | 1.821E+03 | 1.647E+02 | 9.168E+02 |
| 650 | 1.525E+00 | 1.511E+02 | 1.078E+03 | 2.638E+03 | 6.825E+02 | 2.224E+03 | 2.077E+03 | 1.876E+02 | 1.033E+03 |
| 700 | 3.590E+00 | 2.674E+02 | 1.543E+03 | 3.335E+03 | 8.054E+02 | 2.505E+03 | 2.342E+03 | 2.113E+02 | 1.152E+03 |
| 750 | 7.785E+00 | 4.495E+02 | 2.134E+03 | 4.124E+03 | 9.365E+02 | 2.794E+03 | 2.615E+03 | 2.357E+02 | 1.273E+03 |
| 800 | 1.573E+01 | 7.225E+02 | 2.866E+03 | 5.004E+03 | 1.075E+03 | 3.090E+03 | 2.895E+03 | 2.606E+02 | 1.397E+03 |
| 850 | 2.991E+01 | 1.117E+03 | 3.751E+03 | 5.974E+03 | 1.221E+03 | 3.393E+03 | 3.182E+03 | 2.861E+02 | 1.523E+03 |
| 900 | 5.388E+01 | 1.670E+03 | 4.800E+03 | 7.030E+03 | 1.372E+03 | 3.702E+03 | 3.474E+03 | 3.121E+02 | 1.651E+03 |
| 950 | 9.262E+01 | 2.423E+03 | 6.023E+03 | 8.170E+03 | 1.530E+03 | 4.017E+03 | 3.772E+03 | 3.385E+02 | 1.781E+03 |
| 1000 | 1.527E+02 | 3.423E+03 | 7.428E+03 | 9.391E+03 | 1.693E+03 | 4.336E+03 | 4.074E+03 | 3.653E+02 | 1.912E+03 |
| 1050 | 2.426E+02 | 4.723E+03 | 9.020E+03 | 1.069E+04 | 1.861E+03 | 4.659E+03 | 4.380E+03 | 3.924E+02 | 2.045E+03 |
| 1100 | 3.730E+02 | 6.380E+03 | 1.080E+04 | 1.206E+04 | 2.034E+03 | 4.987E+03 | 4.690E+03 | 4.199E+02 | 2.178E+03 |
| 1150 | 5.567E+02 | 8.457E+03 | 1.278E+04 | 1.350E+04 | 2.210E+03 | 5.318E+03 | 5.004E+03 | 4.477E+02 | 2.313E+03 |
| 1200 | 8.090E+02 | 1.102E+04 | 1.496E+04 | 1.501E+04 | 2.391E+03 | 5.652E+03 | 5.321E+03 | 4.757E+02 | 2.449E+03 |
| 1250 | 1.148E+03 | 1.413E+04 | 1.733E+04 | 1.659E+04 | 2.575E+03 | 5.989E+03 | 5.641E+03 | 5.039E+02 | 2.586E+03 |
| 1300 | 1.593E+03 | 1.788E+04 | 1.990E+04 | 1.822E+04 | 2.763E+03 | 6.329E+03 | 5.963E+03 | 5.324E+02 | 2.723E+03 |
| 1350 | 2.168E+03 | 2.232E+04 | 2.266E+04 | 1.991E+04 | 2.954E+03 | 6.671E+03 | 6.288E+03 | 5.611E+02 | 2.861E+03 |
| 1400 | 2.897E+03 | 2.754E+04 | 2.562E+04 | 2.166E+04 | 3.147E+03 | 7.016E+03 | 6.615E+03 | 5.899E+02 | 3.000E+03 |
| 1450 | 3.809E+03 | 3.361E+04 | 2.877E+04 | 2.345E+04 | 3.343E+03 | 7.363E+03 | 6.944E+03 | 6.190E+02 | 3.140E+03 |
| 1500 | 4.931E+03 | 4.062E+04 | 3.210E+04 | 2.530E+04 | 3.542E+03 | 7.711E+03 | 7.275E+03 | 6.481E+02 | 3.280E+03 |
| 1550 | 6.297E+03 | 4.863E+04 | 3.562E+04 | 2.719E+04 | 3.743E+03 | 8.062E+03 | 7.607E+03 | 6.774E+02 | 3.420E+03 |
| 1600 | 7.938E+03 | 5.772E+04 | 3.932E+04 | 2.912E+04 | 3.946E+03 | 8.414E+03 | 7.941E+03 | 7.069E+02 | 3.562E+03 |
| 1650 | 9.889E+03 | 6.797E+04 | 4.319E+04 | 3.110E+04 | 4.151E+03 | 8.768E+03 | 8.277E+03 | 7.365E+02 | 3.703E+03 |
| 1700 | 1.219E+04 | 7.945E+04 | 4.723E+04 | 3.311E+04 | 4.358E+03 | 9.123E+03 | 8.614E+03 | 7.662E+02 | 3.845E+03 |
| 1750 | 1.486E+04 | 9.224E+04 | 5.144E+04 | 3.516E+04 | 4.567E+03 | 9.479E+03 | 8.953E+03 | 7.959E+02 | 3.988E+03 |
| 1800 | 1.796E+04 | 1.064E+05 | 5.580E+04 | 3.725E+04 | 4.777E+03 | 9.837E+03 | 9.292E+03 | 8.258E+02 | 4.130E+03 |
| 1850 | 2.151E+04 | 1.220E+05 | 6.033E+04 | 3.937E+04 | 4.989E+03 | 1.020E+04 | 9.633E+03 | 8.558E+02 | 4.274E+03 |
| 1900 | 2.556E+04 | 1.391E+05 | 6.500E+04 | 4.152E+04 | 5.202E+03 | 1.056E+04 | 9.975E+03 | 8.859E+02 | 4.417E+03 |
| 1950 | 3.013E+04 | 1.578E+05 | 6.983E+04 | 4.370E+04 | 5.417E+03 | 1.092E+04 | 1.032E+04 | 9.160E+02 | 4.561E+03 |
| 2000 | 3.528E+04 | 1.781E+05 | 7.479E+04 | 4.591E+04 | 5.633E+03 | 1.128E+04 | 1.066E+04 | 9.463E+02 | 4.705E+03 |
| 2050 | 4.102E+04 | 2.000E+05 | 7.989E+04 | 4.814E+04 | 5.850E+03 | 1.164E+04 | 1.101E+04 | 9.766E+02 | 4.849E+03 |
| 2100 | 4.741E+04 | 2.237E+05 | 8.513E+04 | 5.041E+04 | 6.068E+03 | 1.200E+04 | 1.135E+04 | 1.007E+03 | 4.994E+03 |
| 2150 | 5.447E+04 | 2.492E+05 | 9.049E+04 | 5.269E+04 | 6.288E+03 | 1.237E+04 | 1.170E+04 | 1.037E+03 | 5.138E+03 |
| 2200 | 6.223E+04 | 2.765E+05 | 9.598E+04 | 5.500E+04 | 6.508E+03 | 1.273E+04 | 1.204E+04 | 1.068E+03 | 5.283E+03 |

2色温度計

互いに異なる二つの測定波長を使って、それぞれの放射輝度の比を求めることによって温度に換算する温度計です。二つの測定波長の放射率が等しい場合(灰色体)に放射率に関係なく真温度を示すことができます。実際には灰色体は存在しにくく、二つの測定波長での放射率が異なる場合がほとんどですから放射率比を設定することにより温度指示値の補正を行います。この点においては放射率を設定する必要がある通常の放射温度計と変わりありません。

粉塵、水蒸気、汚れた窓越しでの測定の場合に温度指示値の影響が少なくなります。ただし、粉塵、水蒸気等により赤外線が散乱されるのですが、その散乱度合いは波長の短いほど大きくなりますので測定される二つの測定波長の放射輝度の比が変化してしまいますので注意が必要です。

視野欠け(ワークの測定径が温度計の標的サイズより小さい場合)や、けられに対しては二つの測定波長で同じように赤外線が低下しますので、誤差を生じにくくなります。通常、直径の 1/3 程度までは保障されます。



2色温度計の目盛特性

サーモグラフィ

物体から放射される赤外線を分析し熱分布を図として表し可視化、分析した画像、またそれを行なう装置です。医療では体表面の皮膚温度分布を測定し、それを色分布などで画像化して乳癌、手足などの血流の低下などの診断に用いられます。また電力設備の異常温度部位の検出、建築分野における構造物中に存在する欠陥部の検出等にも利用されます。

測定原理は放射温度計と同じで、2次元で温度を測定できます。方式としては検出素子によって、つぎのものがあります。

- 1)1 素子のものをミラーで XY に走査
- 2)ライン状の素子をミラーで一方向のみ走査
- 3)2 次元の素子で走査なし

近年ではほとんどが、2次元素子になっています。

測定範囲内のワークの放射率がすべて同じであれば正しい温度が測定されますが、実際には放射率が異なる場合が多いため最も重要な部分に合わせて放射率を設定することになります。

また可視光の CCD カメラに比べ、画素数が 64 画素 ~ 80,000 画素と少ないため画像としては粗くなります。

温度計関係参考資料

1. 「温度計測」温度計測部会編、社団法人計測自動制御学会発行 1981年
2. 計量管理技術双書(16)「温度」、計量管理協会編 芝 亀吉著、コロナ社発行 1959年
3. 物理学 one point-19 「放射の物理」和田正信著、共立出版発行
4. 計測技術 '82・7月～'84・9月 「赤外線技術講座」 山香英三
5. 技術資料 Emissivity 赤外線技術 第9号 真鍋 隆 1984年
6. 赤外線工学 近代科学社 和田正信、中野朝安 1963年
7. 赤外線工学 オーム社 赤外線技術研究会編 1991年
8. 浜松ホトニクス(株) 技術資料 赤外線検出素子の特性と使い方
9. Wikipedia
10. 輝炎のふく射機構に関する研究 日本機械学会論文集 越後亮三、西脇仁一、平田賢 1966年