

赤外線温度測定の実理

W. R. Barron, Williamson Corporation

正確な温度計測システムを構築するためには、最初に赤外線 (IR) 温度測定の実理を理解することが重要です。基本原理を理解せずに、非接触温度計測は精度に欠けると誤解されている場合が多く見受けられます。

基本原理

温度測定は、接触式と非接触式の2つに分類できます。接触式の熱電対、RTD (測温抵抗体)、体温計などは、温度測定アプリケーションにおいて最も一般的な方式です。この方式は、接触してセンサ自体を測定物の温度と同じ温度に変化させて測定します。測定速度は比較的遅く、安価なのが特徴です。非接触式のセンサは、測定物から放射された IR エネルギーを測定します。応答速度が速く以下のような場合に適しています: 動いている物体、温度変動中の物体 (過渡現象の測定)、真空中、腐食性環境、物理的制限や安全上の問題などで近づけない物を測定する場合です。比較的高価ですが、アプリケーションによっては接触式と同程度になります。

赤外線はアイザック・ニュートンにより1666年に発見されました。太陽からの白色光をガラスプリズムに通して虹と同じ七色に分離させたことが発見につながりました。

1800年にウィリアム・ハーシェルは、それぞれの色の相対的なエネルギーを測定しました。彼は目に見える色が持つエネルギーよりも大きいエネルギーを発見しました。1900年代前半にプランク、ステファン、ボルツマン、ウィーン、およびキルヒホフはさらに電磁スペクトルの本質を解明しました。定量的データと方程式を展開して IR エネルギーの本質を解明しました。

この研究で、基本的な黒体放射カーブを使用することで IR エネルギーを定義することが可能になりました (図1参照)。この図から、物体 (273℃より大きい温度の) が温度の4乗に比例するエネルギーを放つことが分かります。黒体放射の概念は IR 温度測定の実理の基礎です。しかしながら、物理学の基本法則に「放射率」という変

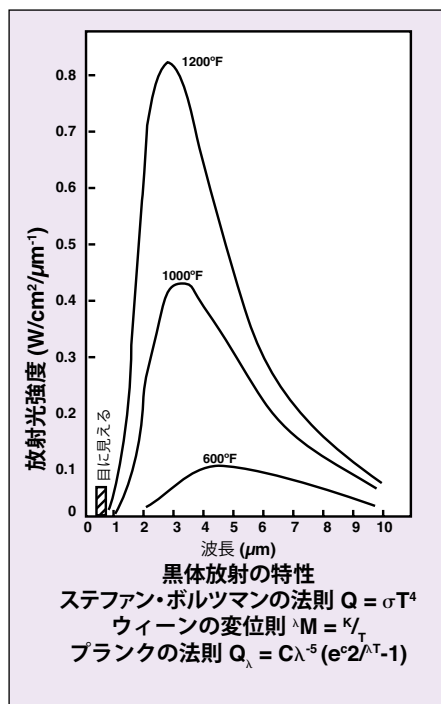


図1: 600 ~ 1200℃の温度の時に、黒体が放射するエネルギーは放射光の波長が0.5 ~ 14 μmの領域に集中しています。これは可視光領域を大きく超えた IR 領域です。

数があります。放射率は同じ温度において、黒体の熱放射に対する灰色体 (非黒体) の熱放射の比率です。 (灰色体は、あらゆる波長で同じスペクトル放射率を持っている物を示します。非灰色体は、アルミのように放射率が波長により変化します)

$$E = \frac{LGB}{LBB}$$

エネルギー保存の法則により、熱放射の透過、反射、および放射 (吸収) の係数の合計は1になります:

$$t_1 + r_1 + a_1 = 1$$

そして、放射率は吸収率と等しくなります:

$$E_1 = a_1$$

温度-79

したがって:

$$E_1 = 1 - t_1 - r_1$$

この放射率の係数は、波長に関連した物体表面の特性を表す変数として、プランクの方程式に使用されます。測定物の大部分が不透明なので、放射率係数は以下のように簡素化できます:

$$E_1 = 1 - t_1 - r_1$$

例外は、ガラス、プラスチック、およびシリコンのような材料ですが、適切なフィルターの選択により、これらの材料を透過しない IR の波長領域を使用して温度測定することが可能です。

放射率誤差に関して多くの注意点がありますが、以下の4点について注意して下さい:

- IR センサは可視光を識別できません。
 - 測定対象が目視でも、鏡のように反射している場合は注意してください。その物体自身の放射光だけではなく、外部からの反射による熱線も測定しています。
 - 測定物が透明な場合は、IR フィルターを選択する必要があります (例えば、ガラスは、波長5 μm で不透明になります)。
 - アプリケーションのうち90%は絶対温度測定を必要としません。高い再現性とドリフトのない安定性により正確な温度コントロールが可能です。
- 表面が光っている場合は、誤差を修正するために、手動か自動で放射率の調整を行います。この調整は、ほとんどのアプリケーションで簡単に行えます。同じ材料上で放射率が変動する場合は、2波長かマルチ波長式の放射光の測定法により補正できます。

設計要素

IR 温度計は、光学系、エレクトロニクス、技術、サイズ、および保護筐体など、さまざまな要素を組み合わせた構成になっています。

しかし、IR エネルギーを取り込んで電気信号に変換する基本部分は共通です。この基本部分とは、レンズ、分光フィルター、赤外線検出器です。 (光ファイバを使用する場合があります)

赤外線温度測定の実理 (続き)

その他の要素としては、増幅、耐熱処理、線形化、および信号処理などがあります。

一般の窓ガラスは短波長、石英は中波長、ゲルマニウムや硫化亜鉛は8~14 μm の長波長範囲で使用可能です。光ファイバは、0.5~5.0 μm 領域を透過できます。アプリケーションに対して、レンズの第1の役割は視野(FOV)を決めることです。すなわち、目標地点での測定エリア(目標サイズ)です。例えば、一般的なレンズ系では、測定距離38cmの時、目標サイズは直径2.5cmとなります。逆2乗の法則で距離(76cm)を倍にすると、目標の直径(直径5cm)も倍になり、面積は4倍になります。計測器メーカーにより、FOVの定義は異なる理ます。また、価格も大きく異なります。光学系は近距離での極小スポット(直径0.762mm)や長距離測定での拡大スポット(測定距離914cmで直径76.2mm)など、さまざまな構成があります。FOVが測定面で100%満たされている限り、測定距離は精度に影響しません。FOVを測定するには、信号損失 vs 直径を変数として利用する方法があります。厳格な規則は1%のエネルギー減少ですが、50%か63.2%の減少を使用する場合もあります。

また、FOVを測定面に正確に合わせる機能は重要ですが、多くのセンサがその能力を欠いています。正確なアライメントが不要なのは目標がかなり大きい場合です。例えば、ピンポイントの精度が必要無い幅広の連続した紙などです。目標が小さい場合や、遠距離にある場合は、照準ライトやレーザーアライメントを使用するオプションがあります。

赤外光を選別するフィルターを利用して、高温アプリケーション(>537 $^{\circ}\text{C}$)には短波長を、低温(-21 $^{\circ}\text{C}$)には長波長フィルターを使用します。これは黒体のスペクトル分布カーブの一部を利用する方法で、いくつかの技術的優位性があります。例えば、高温/短波長の組み合わせでは、熱安定の高いシリコン検出器を使用します。また短波長デザインは放射率の変動が小さいため、温度誤差も小さくなります。他にもさまざまなフィルターが使用されており、プラスチックフィルムに対しては波長3.43 μm と7.9 μm 、ガラスには5.1 μm 、炎の透視には3.8 μm があります。

さまざまな検出器が、各波長領域でセンサ感度を最大にするために使用されます。図2が示すように、PbSは感度が最大で、サーモパイル(熱電対)は最小になっています。ほとんどの検出器が光起電力を使用した光エネルギーを電圧に変換するタイプか、光伝導性で励起されると抵抗値が変化するタイプです。全て応答速度が速く高感度な検出器になっていますが、ドリフトの問題があります。しかし、以下のさまざまな方法で補正できます:温度補償回路(サーミスタ使用)、温度制御、自動ヌル回路、チョッパ制御(AC対DC出力)、アインサーマル保護などがあります。このようにドリフトの補正は、さまざまなレベルで行えますが、機器の価格に反映されます。

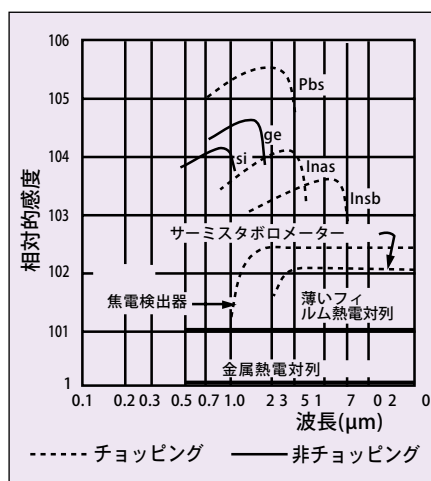


図2: IR検出システムを最適化するために、検出器のスペクトル反応や変調特性を考慮に入れます。

IR温度計の電子回路パッケージは、赤外線検出デバイスより100~1000Vレベルの非線形の出力信号を処理します。1000倍に増幅された信号は、直線近似されて最終的には、直線的なmVかmAの信号になります。周辺電気ノイズの干渉を最小にするためには、4~20mA出力が推奨されています。また、この信号をRS232に転換したり、PIDコントローラー、リモート表示、レコーダーなどに出力できます。

他の信号処理のオプションには、警報ON/OFF制御、ピーク値保持(過渡的目標値)、応答速度調整、サンプル値保持などがあります。

平均して、IR温度計の応答速度は約300msですが、シリコンIR検出器を使用すれば約10msが可能です。実際には、多くの器具が現場でノイズの制御や感度の調性をするために応答速度を調整する機能を持っています。

最速の応答速度がいつも必要であると言う訳ではありませんが、約10~50msの応答速度が必要な誘導加熱などのアプリケーションではIR温度測定を活用できます。

単波長温度計

一波長式の基本的な測定器は、設定された波長の範囲で、赤外線エネルギーの合計を測定します。構成は簡単なりモーター付の手持ち式プローブから高性能の携帯式まであります。その機能の中には、温度と目標エリアの同時表示、記録や印刷出力などがあります。オンライン用の固定式センサには、簡単な小型検出器にリモートエレクトロニクス(OEMデザイン)を付けたものから、リモートPID制御が可能な頑丈なタイプまであります。プロセス監視と制御用のオプションには、ファイバ光学系、レーザー照準、水冷機能、ディスプレイ、スキャニングシステムなどがあります。寸法、性能、耐久性、適応性、信号処理などに関し、数多くの選択肢があります。

センサの形態、IR分光フィルターリング、温度範囲、光学系、応答速度、目標物の放射率は、性能に影響する重要な工学的要素なので、慎重に計測システムを選択してください。

センサの形態としては、携帯用、簡単な2線式のトランスミッタ、高性能で頑丈なセンサユニット、スキャニング装置などがあります。目視での目標位置合わせ、レーザーアライメント、ファイバ光学系、水冷式、出力信号、リモート表示などがオプションとなっています。

ここからは、より工学的観点から説明します。繊維温度の測定などの簡単なアプリケーションであれば、安価なセンサが使用できます。しかし、アプリケーションが複雑な場合(例:真空チャンバ内の測定や対象物が小さい場合)は、より高度なセンサが必要です。

IR スペクトルと温度範囲の選択は、特定のアプリケーションに対して行います。短波長は高温用で、長波長は低温用です。この傾向は黒体のスペクトル分布カーブと同じです。透明なタイプの目標物の場合、例えばプラスチックやガラスは、狭い範囲のバンドフィルターが必要です。ポリエチレン(PE)フィルムには、波長 3.43 μm に CH 吸収バンドがあるので、その波長では PE は不透明になります。この領域のフィルターで選択することにより、放射率の計算は簡単になります。同様に、ほとんどのガラスタイプの材料は 4.6 μm 近辺で不透明になります。そこで、5.1 μm でバンドパスフィルターを使用して、ガラスの表面温度を正確に測定します。これとは逆に、ガラス張りの窓を通して、真空や圧力チャンバの中の温度を測る場合は、1~4 μm の領域でフィルターしたセンサを使用します。別のオプションは、光ファイバケーブルをチャンバの中に引き入れて使用することです。光学系の応答速度は、あらゆるアプリケーションで問題にならない優れた特性を持っています。一般的には、測定距離約 40cm、FOV 約 2.5cm、応答速度 1 秒以下の性能で使用されています。しかし、小型の目標物や断続的に高速で動く目標物を測定するアプリケーションでは、小さい測定スポット(直径 0.0762 か 3.175mm)を特別に製作することができます。

同様に、遠方の目標物(目標から 3~300m 離れたところ)は、標準の FOV が非常に大きくなるので、光学システムの調整が必要になります。場合によっては、2 波長放射測定法が使用されます。例:細い電線や遠方の目標物光ファイバは、過酷な環境や電氣的ノイズから電子回路を分離し、接近困難な場所での測定ができ、色々なシステム構成が可能になっています。光ファイバはアプリケーションの問題を解決する有力なツールとなります。

ほとんどのセンサが、0.2~5.0 秒の応答速度を持っていますが、標準値はその中間です。速い応答はアプリケーションにノイズをもたらす可能性があります。遅い応答は感度に影響します。急速な誘導加熱は、速い応答を必要としますが、連続しているコンベアー上の製品や繊維・紙のモニタは、測定値を平均化するために遅い応答が必要です。

高速応答のセンサは、高速のコントローラーや SCR パワーパック、および他の制御部品が必要となります。システムの総応答速度は以下の方程式で定義できます:

$$T = 1.1 = t_1^2 + t_2^2 + \dots + t_n^2$$

ここで:

T = 総応答

t₁、t₂ = 個々のループ要素

時間の要素を考えた場合、プロセス力学の 2 つのタイプがあります:1 番目が、定常状態での変化、例えば厳密な定温度制御を必要とする速く動いている製品、例:ワイヤの誘導加熱。2 番目は、動的に目標温度が変化するランプ応答の場合です。バッチプロセスにおける製品の急激な加熱などがあります。例:シリコンウェハの急速な熱アニール。これらの動的アプリケーションでは、システム応答速度とセンサの FOV は重要パラメータです。多くの場合、対象物の放射率は重要な要素ではありません。狭周波数帯のフィルター選択によって、ほとんどの材料が 0.90 ± 0.05 範囲で一定の放射率を持っているからです。放射率を 0.9 に設定すると、センサは、絶対温度の ± 5~10 度の精度で測定出来るのが一般的です。このアプリケーション誤差は、約 1% か 2% の精度に相当します。

しかし、実際の IR 温度測定によるプロセス制御では、絶対値精度より再現性が重要です。例えば製品が 210℃まで加熱されて、センサが 204℃を表示している場合:製品を 198~210℃の範囲で作る時は、制御用のセットポイントを 204℃に設定します。ほとんどのアプリケーションは生産管理に NIST 校正を必要としません。

もしアプリケーションが正確な絶対温度測定と書面での記録を必要とする場合は、NIST 規格準拠で器具を校正して認定証を発行できます。

次に、表面放射率によるアプリケーション誤差を完全に定義する必要があります。

金属光沢のあるロールを測定する場合は、まず最初に、ロール上の製品の温度を測定することです。次に、試験モードで放射率を適切に調整します。さらに必要なら、2 波長放射測定法を使用することを検討します。

単波長の IR 温度測定は、応用範囲が広く簡単な方式です。温度制御をして、高品質な製品を製造するアプリケーションに多数使用されています。

2 波長式温度測定

絶対値精度が重要で、測定対象が物理的・化学的な変化の途中にあるアプリケーションには、2 波長かマルチ波長タイプの放射測定法が適しています。

波長の比率を使用する方式は 1950 年代前半頃からありますが、近年になって設計とハードウェアの変更により、性能が向上し、低温域の測定が可能になり価格も下がってきました。

2 波長(比率)温度測定は、2 種類の波長(スペクトルバンド)でスペクトルエネルギーを測定します。放射率が両方の波長に対して同じなら、ターゲットの温度を測定器から直接読むことができます。また、FOV(視野)の中に、埃、メッシュ面、グレーの半透明窓などの比較的冷たい材料が入っている場合でも、このタイプの測定器は、目標の温度を正しく示すことができます。このデザインの理論は簡単で以下の式で表せます。1 つの波長にプランクの方程式を使用して、2 番目の波長のエネルギーとの比率を計算します。

$$R = \frac{L_{\lambda 1}}{L_{\lambda 2}} = \frac{e_{\lambda 1} \cdot C_1 \cdot \lambda_1^{-5} \cdot e^{-C_2/\lambda_1 T}}{e_{\lambda 2} \cdot C_1 \cdot \lambda_2^{-5} \cdot e^{-C_2/\lambda_2 T}}$$

$$R = \frac{e_{\lambda 1}}{e_{\lambda 2}} \cdot \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right]^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

$$R = \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right]^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

赤外線温度測定 of 原理 (続き)

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_r} + \frac{1}{C_2} \ln \left(\frac{e_{\lambda_1}/e_{\lambda_2}}{1 - \frac{1}{T_r}} \right)$$

もし $e_{\lambda_1} = e_{\lambda_2}$, then $T = T_r$
 ここで:
 R = スペクトル放射比
 T_r = 表面の比率温度
 e_{λ} = スペクトル放射率

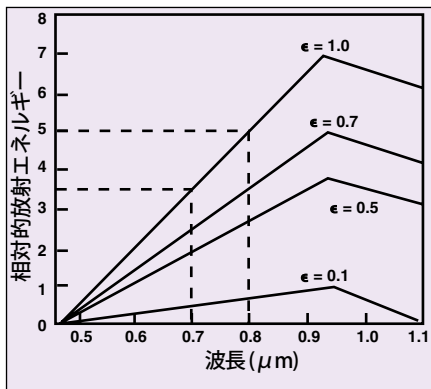


図3: 2波長システムは、目標から放射される2種類の隣接する周波数帯(例: 0.7 μm と 0.8 μm)の放射エネルギーの比率を計算することによって自動的に測定誤差を除去します。

この方程式が示すように、灰色体の放射率が両方の波長で等しいなら、放射率の変化による影響はありません。そして、この比率は温度に正比例しています。

また、方程式ではなくて図3の黒体のスペクトル分布カーブを使用して、2波長の比率は放射率が異なっても同じであることが分かります。0.7 μm と 0.8 μm の狭帯域フィルターを使用して、2波長のエネルギー比率を測定すると、1.428 となり、これは放射率 1.0 ~ 0.1 の範囲で一定です。

同様に、サンプルが灰色体である限りその特性の変化は、波長温度計の温度測定値に影響を与えません。連続して流れている熔融ガラスやワイヤなどのように、測定中に測定物の大きさが変化をしても正確な測定を行えます。温度計の FOV より測定目標が小さい場合(視野欠け)でも測定できます。例えば、黒体目標が温度計の FOV の半分しか満たさない場合です。放射量が 50% 減少しても、2波長の比率は変化しません。別の例では、目標が煙や粉じんで見えにくい、中間にある窓(例: 真空チャンバ)が曇っているようなケースです。

透過を妨害する媒体が、赤外線波長を選択的に吸収しない限り(あるいは少なくとも温度計によって使用される波長領域を吸収しない限り)、2波長の比率は変化しません。この比率が変化しないので、2波長式温度計によって測定された温度は、影響を受けません。しかしながら、この方式にも限界がいくつかあります。2波長方式はアルミニウムのような非灰色体では機能しません。また非灰色体の窓や加熱されたパイレックス窓を透過して使用できません。さらに、背景の温度が目標より熱い場合は、背景温度を測定する傾向があります。

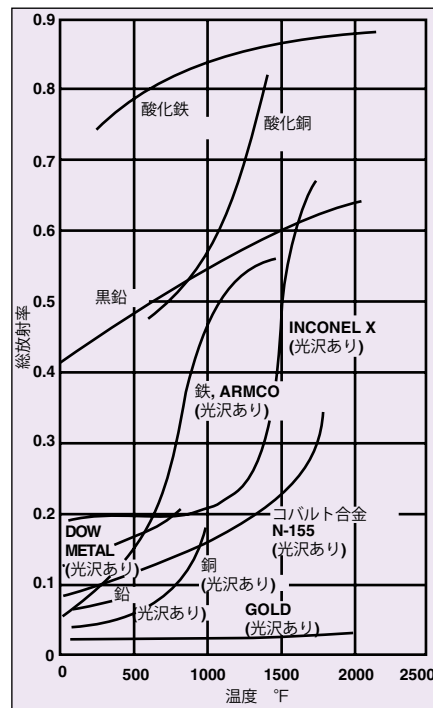


図4: 多くの材料は温度の変化に伴って放射率レベルが変化します。この図は最も一般的に使用される材料の比較です。

2波長温度計は、工業用や研究用に多くのアプリケーションがあります。測定対象が灰色体であれば、アプリケーションに関連した誤差を減少できるユニークなセンサーです。

図4は温度の変化と共に、放射率が変化するさまざまな製品の全放射率を示しています。例えば、黒鉛には安定した高い放射率があると思われるがちです。しかし実際には、黒鉛の放射率は 0.4 ~ 0.65 の間で、温度が 1093°C まで上昇するにつれ、変化します。灰色体の材料が高温で処理

される工程で、温度変動が大きい場合は特に、2波長温度計を使用すると、正確な製品温度の測定と制御が行えます。また、波長により放射率が異なる「非灰色体」の材料に利用可能なマルチ波長温度計があります。このアプリケーションには、放射率に対する波長、温度、界面化学に対する製品の表面特性の詳細分析があります。この分析データを基にして、さまざまな温度と波長におけるスペクトル放射に関連したアルゴリズムを作成できます。

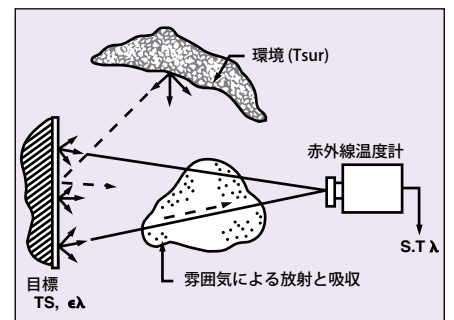


図5: 非接触温度計の選択においては、測定対象と放射率だけではなく、測定環境を考慮に入れる必要があります。

まとめ

測定の精度に影響する基本的要素を図5に示しました。測定目標の表面状態は、最重要項目です。しかし、温度計の選択においては、サンプルサイズ、制限温度、放射率、プロセスの動的条件などを考慮に入れてください。これらは FOV、スペクトル反応、応答速度に関係してきます。さらに、使用環境を考慮することが不可欠です。例えば、炎、IR ヒーター、誘導コイル、および雰囲気(ほこり、汚れたガラスの窓、過度の熱気)などです。

温度計の一般的な性能は、校正精度が 0.5 ~ 0.1% の範囲にあり再現性は 0.25 ~ 0.75% の範囲です。基本的なセンサーの価格設定は、500 ドルぐらいから始まって、高いものになると 5000 ~ 6000 ドルです。(米国販売価格) 赤外線温度計が適切に使用されれば、短期間で投資費用を回収することができます。

HELMERS PUBLISHING, INC.
 (174 Concord St. Peterborough, NH 03458) の許可のもと Sensors Magazine (December 1992) より転載しました。