

## 4. 放射温度計

刑部 真弘\*

Radiation Thermometer

Masahiro Osakabe\*

Solid and liquid materials as well as gases at a certain temperature emit energy in the form of radiation. The temperature of the materials can be estimated from the radiation flux measured in the radiation thermometer. The principle and method of the measurement were introduced in this chapter. If radiation impinges on a body, part of it will be reflected from the surface and the other part will enter the interior through the surface. So in the usual measurement, the radiation flux detected with the thermometer includes the reflection from the environment. The effect of reflection on the temperature measurement was also discussed in this chapter.

**Keywords:** Radiation, Thermometer, Principle, Measurement Method, Reflection

### I. はじめに

高温物体からは電磁波の形で熱エネルギーが放射されている。図1に示したのは、6000Kおよび300Kの物質(黒体)からの放射エネルギーの概念図である。低温では放射の強さは微小な値になるので、300Kの曲線は非常に低いものとなる。放射エネルギーのピークは温度の減少と共に大きな波長で生じ、ピーク波長 $\lambda_p$ [ $\mu\text{m}$ ]と温度  $T$ [K]との積は、 $\lambda_p T = 2898$  で一定という関係にある。太陽の黒体温度である6000Kでは、放射エネルギーの大きなところは波長0.38~0.76 $\mu\text{m}$ である。この波長の電磁波は、われわれが見ることができる光であり、可視光線と呼ばれる。また、0.38 $\mu\text{m}$ より小さな波長を紫外線、0.76 $\mu\text{m}$ より大きなものを赤外線と呼ぶ。工学的に用いられる物体の温度は、通常4000K以下であり、放射エネルギーのピークは赤外域にある。また、常温である300Kでは、ピークは10 $\mu\text{m}$ 程度にあり、この波長のような長い波長の電磁波を遠赤外線と呼ぶ。

固体、液体では入射する赤外線を表面直下の極めて薄い層で吸収する。波長によっても相違があるが、電気の良い良導体では1 $\mu\text{m}$ 以下の厚さ、不良導体でも極めて少数の例外を除き2~3mm程度の厚さで吸収する。また、可視光線を透過するガラスや石英も波長2~3 $\mu\text{m}$ 以上の赤外線にはほとんど不透明である。遠赤外線を検出するカメラ等のレンズは、透過性の良好なゲルマニウムやシリコン等から製作する。また、遠赤外線加熱の効率がよいのは、表面状態に依存せず、ほとんどすべての面で吸収される性質からである。

上述の放射エネルギー分布を全波長で積分したものが、放射伝熱量である。温度  $T$ 、放射率  $\epsilon$  の伝熱面からの放射伝熱量  $q$  は

$$q = \sigma \epsilon T^4 \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数 ( $= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ ) である。また、放射率  $\epsilon$  は物質の表面性状に

より異なり、金属の光沢面は低く酸化面は高い値をとる。放射率  $\epsilon$  が1の場合を黒体という。また、一般的な物質の熱放射の吸収率は放射率と等しいとみなすことができる。

放射を利用する温度計は、あらゆる波長の放射を利用する全放射温度計、ほとんど単色に近い可視光線の狭い波長範囲の放射を利用する光温度計、波長0.7~2 $\mu\text{m}$ 程度の赤外線から遠赤外線範囲の放射を利用する赤外線温度計に分類できる。

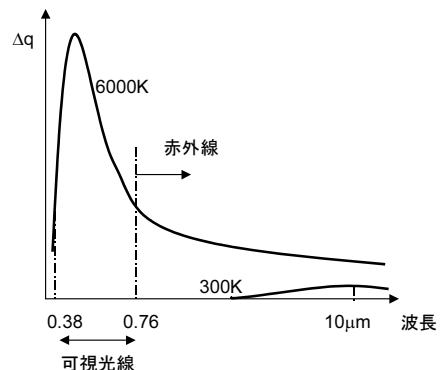


図1 放射エネルギーの概念図

### II. 測定原理

#### 1. 全放射温度計

常温以上の測定が可能であるが、主として高温測定に用いられることが多いので放射高温計とも呼ばれる。高温物体からの放射熱流束を、適当な吸収体に吸収させて、その温度上昇を測定して放射体の温度を推定する。図2に示したように、放射はレンズによって吸収体に集められ、その温度を熱電対によって測定する。吸収体は、放射の吸収をよくするために受熱面を黒くした白金箔か、黒く塗った雲母を用いる。熱電対は起電力が大きく抵抗の小さいものが必要で、通常はクロメル-コンスタンタンが用いられる。

\*東京商船大学(Tokyo University of Mercantile Marine)

全放射温度計は非接触式であるという一般的特徴のほか、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い。また熱電対等で測定できない高温測定が可能である。放射像が吸収体を覆うことが必要であるから、大きい高温物体の温度測定に適している。全放射温度計は、黒体温度で目盛るから、黒体でない場合には放射率による誤差を生じる。また、レンズ等の汚れやくもりによっても温度を低く読むことになる。

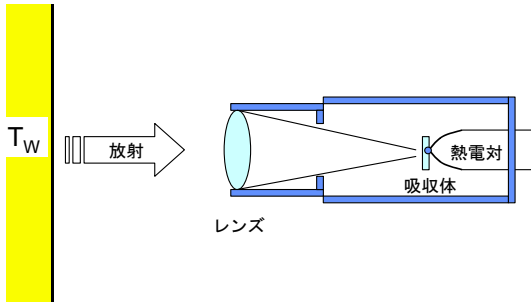


図2 全放射温度計

## 2. 光高温計

光高温計は物体のほとんど単色に近い可視光の狭い波長範囲の放射を利用する。通常は、波長  $0.65\mu\text{m}$  の赤色を利用し、 $700^\circ\text{C}$ 以上の高温の測定を行う。光温度計には目測で行うもの、光電管やセレン光電池等を利用して自動的に測定するものがある。目測形式のものは、図3に示したように、測定する物体から発せられる赤色と電球のフィラメントを比較する。フィラメントに流す電流を変換抵抗により変化させることによって輝度を変えるか、測定物体と電球との間の灰色ガラスを変えて測定物体の輝度を調節する。測定物体とフィラメントとを同時に見て背景の中からフィラメントが明るくも暗くも見えない状態にして電流計の指示値等から温度を推定する。この場合にも、黒体以外の物を測定するときは放射率の違いによる誤差を生じる。このため、放射率による補正方法が種々提案されている。

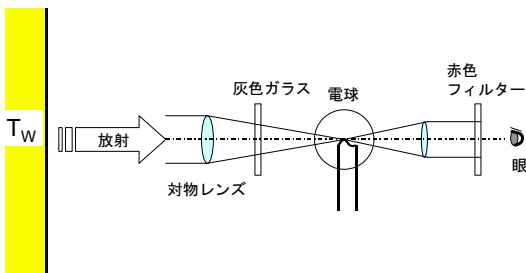


図3 光高温計

## 3. 赤外線温度計

波長  $15\mu\text{m}$  程度までの赤外線を利用する温度計である。検出素子としては、サーミスタ等の熱形検出器と  $\text{HgCdTe}$ 、 $\text{InGaAs}$ 、 $\text{PbS}$ 、 $\text{Ge}$ 、 $\text{Si}$  などの光電素子による量子形検出器の2形式がある。最近用いられている量子形の測定温度と測定波長および検出素子の一例をあげると表1のようになる。

表1 量子形検出素子

測定温度範囲 $[\text{C}]$	測定波長 $[\mu\text{m}]$	検出素子
-50~1200	8~13	$\text{HgCdTe}$
300~1300	1.45~1.8	$\text{InGaAs}$
650~2500	0.8~1.1	$\text{Si}$

赤外線温度計では、検出器を液体窒素等で冷却したものが従来用いられてきたが、近年、無冷却のものも登場してきた。これは、検出器の温度を内部で補正することによる。原則は、絶対ゼロ $^\circ\text{C}$ 近い検出器への赤外域の熱流束を検出し、その値から温度を推定する。また、検出素子をマトリックス状に配列することにより、熱画像を通常のビデオ等と同様に表示することも行われるようになってきた。この場合にも、黒体以外の物を測定するときは放射率の違いによる誤差を生じる。このため放射率による補正方法が提案されている。

## III. 応用方法

放射温度計を用いた温度測定を行う場合には、測定物体の放射率を特定すると共に、測定対象物の周囲環境からの反射等による影響を検討する必要がある。図4に示したように、周囲温度  $T_a$  に置かれた温度  $T_w$  の測定物体から放射温度計に入射される熱流束は、

$$q = \sigma \varepsilon T_w^4 + \sigma \pi T_a^4 \quad (2)$$

ここで  $\varepsilon$  および  $\pi$  は、測定物体の放射率および反射率である。測定物体が灰色近似できるとすると、

$$\pi = 1 - \varepsilon \quad (3)$$

であるので、式(2)は

$$q = \sigma \varepsilon T_w^4 + \sigma (1 - \varepsilon) T_a^4 = \sigma \varepsilon^* T_w^4 \quad (4)$$

ここで  $\varepsilon^*$  は、反射を含む見かけの放射率であり、以下のよう表すことができる。

$$\varepsilon^* = \varepsilon + (1 - \varepsilon) \left( \frac{T_a}{T_w} \right)^4 \quad (5)$$

放射温度計では、入射熱流束  $q$  を検出できるので、見かけの放射率がわかっているれば、式(4)から測定物体の温度  $T_w$  が推定できる。

図5に示したのは、見かけの放射率と、周囲温度と測定物体の温度差の関係である。計算においては、周囲温度を  $20^\circ\text{C}$  ( $293.15\text{K}$ ) とした。測定物体と周囲温度の差がない場合には、見かけの放射率は1となる。このため、たとえば赤外線温度計を用いて周囲温度と熱的平衡にあ

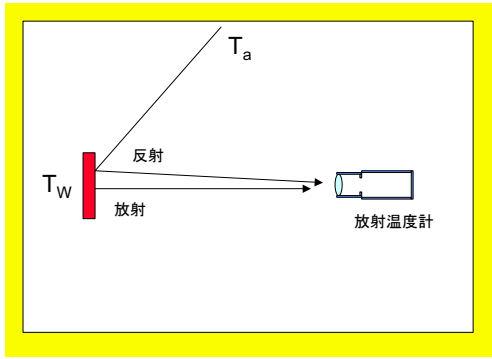


図4 周囲からの反射

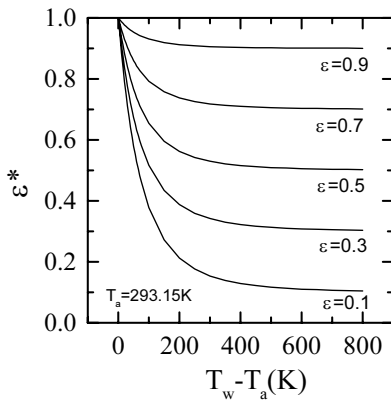


図5 見かけの放射率

る測定物体を計測する場合には、測定物体の放射率がどのようなものであっても、見かけの放射率を1として温度を推定可能となる。ところが、測定物体の温度が周囲温度よりも上昇するにつれ、見かけの放射率は物体本来の放射率に近づく。このため、黒体でない高温物体の温度を推定するためには、その物体の放射率を正確に特定しておく必要がある。また、当然のことであるが、放射率が高い物質ほど、周囲からの反射の影響が少ないことが図より理解できる。測定物体に黒色ペンキ ( $\epsilon = 0.98$ ) 等を塗布すれば、反射の影響が少ない状態で温度測定が可能となるが、注意すべきは測定された温度はペンキ表面温度であるということである。また、透明なガラスや石英等の中の物体温度を、波長  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  以上の波長を検出する赤外線温度計を用いて計測する場合、計測している温度はガラスや石英表面であることにも注意すべきである。これらの赤外線は、可視光線は通過するガラスや石英等を通過できないからである。

#### IV. 測定例

図6は、固気混相流である火砕流を、赤外線画像測定装置で撮影したものである。上が熱画像、下が通常の可視画像である。高温の火山ガスが山の斜面を這うように流れている様子が熱画像の情報より確認できる。

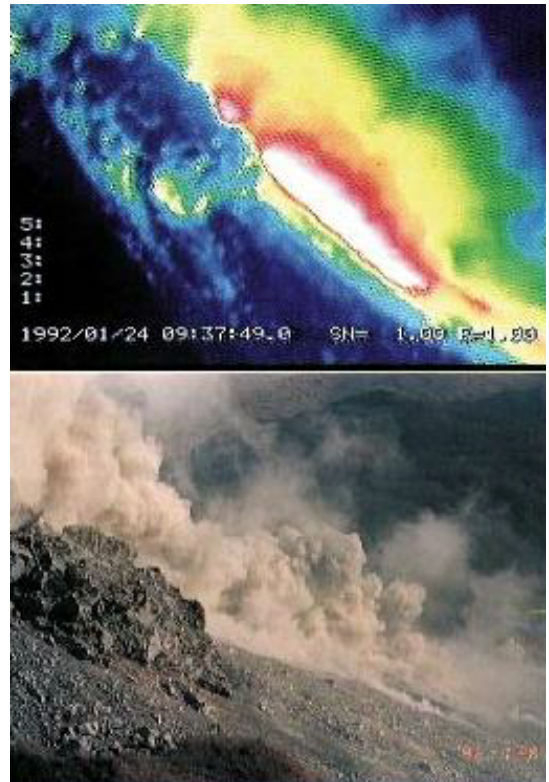


図6 火砕流の熱画像(九州大学理学部)

#### V. まとめ

放射温度計の一つである赤外線温度計は、非接触で比較的簡単に物体温度を計測できるため、近年、いろいろな分野で用いられることが多くなってきた。ただし、正確な測定のためには測定物体の放射率を特定するとともに、測定対象物の周囲環境からの反射等による影響を検討しなければならない。また、透明なガラスや石英等の中の物体温度を、波長  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  以上の波長を検出する赤外線温度計を用いて計測する場合、計測している温度はガラスや石英等の表面であることにも注意すべきである。

#### 参考文献

- (1) 刑部真弘, ターボ動力工学, 海文堂 (2001).
- (2) 岡本芳三ほか6名, 赤外放射計による射度係数の測定とその応用, 日本機械学会論文集(B編), 57(534), 699-703 (1991).