48 赤外線放射温度計による能動的测温

石川 太郎 成瀬 積一
(大同工業大学)

1. まえがき 一般に赤外線放射温度計による测温では被测温物体表面の放射率を補正して真温度を知る方法がとられており、このため各種材料例えば最近では CrSi など約 100 種近くの高融点化合物の放射率なども発表されている²⁾。しかし、或る種の表面ではその分光放射率が温度や測定波長に依存するものもあり困難である。本研究では既に電波レーダで実用のように被测温表面にさらに適当な赤外線を照射する能動的测温法を検討し、場合によっては放射率と無関係に簡易な表面测温が可能であることを確かめたので報告する。

2. 能動的测温の基本原理解 図で被测温物体 j の表面分光放射輝度 $L_j(\lambda, T)$ は $L_j(\lambda, T) = (1/\pi)\epsilon M_{jB}(\lambda, T)$ [$\text{Wm}^{-3}\text{Sr}^{-1}$] ... (1) ここで j 面は完全拡散面で ϵ は波長 λ , 絶対温度 T における分光放射率, $M_{jB}(\lambda, T)$ は j 面の分光放射発散度でプランクの放射則³⁾で与えられる。今 j 面を、別に分光放射発散度 $M_i(\lambda, T)$ の赤外放射源 i で均等照射する。これによる j 面の微小面積 S_j の放射発散度 $M_{ji}(\lambda, T)$ は $M_{ji}(\lambda, T) = \{(1-\epsilon)/S_j\} K_1 M_i(\lambda, T)$... (2) ここで K_1 は放射源及びその放射径路による定数。従つてこの面の放射輝度 $L_{ji}(\lambda, T) = \{(1-\epsilon)/\pi S_j\} K_1 M_i(\lambda, T) = \{(1-\epsilon)/\pi\} K_1 K_2 M_i(\lambda, T)$... (3) ここで $K_2 = 1/S_j$, j 面全体の輝度 $L_{jj}(\lambda, T)$ は $L_{jj}(\lambda, T) = L_j(\lambda, T) + L_{ji}(\lambda, T) = (1/\pi)\{\epsilon M_{jB}(\lambda, T) + (1-\epsilon)K_1 K_2 M_i(\lambda, T)\}$... (4) ここで放射源 i の $M_i(\lambda, T)$ を調節して $K_1 K_2 M_i(\lambda, T) = M_{jB}(\lambda, T)$ にすると j 面の分光放射輝度は $L_{jj}(\lambda, T) = (1/\pi)M_{jB}(\lambda, T)$... (5) となり、このときの $L_{jj}(\lambda, T)$ は ϵ と無関係となり、この条件より j 面の温度を求める。

図 能動的测温の原理

3. 一般の赤外放射温度計への適用 一般放射計では $M_{jB}(T) = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{jB}(\lambda, T) d\lambda$ と積分波長域が制限される。ここで K は放射計の光学系などによる定数。いま簡単のため $M_{jB}(T) = M_T$, $M_{jB}(\lambda, T) = M(\lambda, T)$ と略記し、 $F(\lambda, T) = \int_0^{\lambda} M(\lambda, T) d\lambda / \sigma T^4$... (6) とおくと $M_T = K \sigma T^4 [F(\lambda_2 T) - F(\lambda_1 T)]$... (7) となる。但し K は主として受放射径路の透過率など、 $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$ 。

表 市販放射計による例

式(7)を市販の JTG-3100 放射計の L レンジ ($-40 \sim 160^\circ\text{C}$) で添付データをもとに $\lambda_1 = 3.4 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 5.6 \mu\text{m}$ としてチェック例を表に示す。

$T[\text{K}]$	$\sigma T^4 [\text{Wcm}^{-2}]$	$F(\lambda_1 T) - F(\lambda_2 T)$	M_T	K
373	1.098×10^{-1}	8.398×10^{-2}	3.25×10^{-3}	0.35
303	4.782×10^{-2}	3.224×10^{-2}	5.26×10^{-4}	0.34

4. 測定環境について 実際測定では照射源 i と被测温面 j の他に周囲の物体、背景よりの放射 [等価分光放射発散度 $M_A(\lambda, T)$], 受放射前面の大気放射 [等価分光放射発散度 $M_E(\lambda, T)$] 及び径路の透過率等を配慮する必要がある。この場合の放射温度計で検出される j 面の放射発散度 $M(T)$ は次式で近似される。

$$M(T) = (1-\epsilon) M_i + \epsilon M_T + (1-\epsilon) M_A + M_E \dots (8)$$

ただし、 $M_i = K_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_i(\lambda, T) d\lambda$, $M_T = K_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T) d\lambda$, $M_A = K_3 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_A(\lambda, T) d\lambda$,

$M_E = K_4 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_E(\lambda, T) d\lambda$, $K_1 \sim K_4$ は定数。式(8)の M_E はつぎのようにして知ることができ

Active temperature measurement by infrared radiation thermometers,

Taro Ishikawa, Teiichi Naruse

る。すなわち、あらかじめ既知の温度 T の物体をおき、 $M_i + M_A = M_T$ になるように赤外放射源の M_i を調節すると $M(T) = M_i + M_A + M_E = M_T + M_E \cdots (9)$ となり計測値 $M(T)$ と M_T の差をとれば M_E は求まる。また一般の近距離測定では M_E は M_A に含まれるものとして式(8)は $M(T) = (1-\varepsilon)M_i + \varepsilon M_T + (1-\varepsilon)M_A \cdots (10)$ と考えてよい。

5. 二三の測定手法 式(9)で $M(T) = M$ において二三の場合の測定手法をのべる。記号はすべて放射発散度で示してあるが、これはすべて放射計の M - T 特性によって温度に変換される量である。

5.1 同温度の二表面を比較してその表面温度を求める (ただしそれぞれの放射率 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ は未知) a) $M_T > M_A$ の場合 それぞれの放射発散度を M_1, M_2 とすると $M_1 = \varepsilon_1 M_T + (1-\varepsilon_1) M_A$, $M_2 = \varepsilon_2 M_T + (1-\varepsilon_2) M_A$ これに M_i を照射し、このときのそれぞれの放射発散度を M'_1, M'_2 とすると $M'_1 = \varepsilon_1 M_T + (1-\varepsilon_1)(M_A + M_i)$, $M'_2 = \varepsilon_2 M_T + (1-\varepsilon_2)(M_A + M_i)$, ここで両面の放射計指示を等しくなるよう M_i を調節 ($M_A + M_i = M_T$ になるよう)し、その計測値を M''_1, M''_2 とすると $M''_1 = (M_A + M_i) = M_T$, $M''_2 = (M_A + M_i) = M_T$ となり、これより T を求める。測定例として同温度 T の試料の $M_1 = 0.4$, $M_2 = 0.63$ をえたとき 外部照射で $M'_1 = M'_2 = 0.666$ を得た。これは $M_A + M_i = M_T$ に等しいので M - T の換算より $t = 37.6^\circ\text{C}$ となる。b) $M_T < M_A$ の場合 温度 T の両面の測定値を M_1, M_2 , その黒体放射発散度を M_T とし、試料を T' に加熱時の両面を M'_1, M'_2 とする。ここで $M'_1 = M'_2$ になるように加減すると $M'_1 = M_A = M'_T = M'_2$ となる。そこで任意の強さの M_i を照射し、両面の計測値 M''_1, M''_2 を得れば $M_T = \{M_1(M''_2 - M'_T) - M_2(M'_1 - M'_T)\} / (M''_2 - M'_1)$ より T を求めることができる。測定例として $M_1 = 5.23$, $M_2 = 5.12$, $M'_1 = M'_2 = 5.26$, $M''_1 = 5.98$, $M''_2 = 5.35$ (単位は上例を含めて何れも $\times 10^{-4} [\text{W}/\text{cm}^2]$)、よって $M_T = 5.1 \times 10^{-4}$ ($T = 302\text{K}$)。

なお、 $\varepsilon_1 = (M_1 - M_A) / (M_T - M_A)$, $\varepsilon_2 = (M_2 - M_A) / (M_T - M_A)$ の関係より、この例では $\varepsilon_1 = 0.1875$, $\varepsilon_2 = 0.875$ のように未知放射率を求めることもできる。

また別に、上で M''_1, M''_2 測定に際し、この放射計に $M''_1 = M'_1 - M_1$, $M''_2 = M'_2 - M_2$ を指示する機能を設けると $M''_1 = \varepsilon_1 (M'_T - M_T) + (1-\varepsilon_1) M_i$, $M''_2 = \varepsilon_2 (M'_T - M_T) + (1-\varepsilon_2) M_i$ となり、この状態で $M_i = M'_T - M_T$ となるよう M_i を調節する (両面よりの指示を等しくすると、 $M''_1 = M_i = M'_T - M_T = M''_2$ となる。これより $M_T = M'_T - M_i$ として T を求めることもできる。c) $M_T = M_A$ の場合 $M_1 = \varepsilon_1 M_T + (1-\varepsilon_1) M_A$, $M_2 = \varepsilon_2 M_T + (1-\varepsilon_2) M_A$ となって $M_1 = M_A = M_T = M_2$ で計測値は ε による。

5.2 同温度の二表面を比較して未知の見掛け放射率を求める 上述のように能動的測定を応用すれば放射率が求められる。ここでは $M_T \gg M_A$ として M_A が無視できるときを考える。まず、二面の $M_1 = \varepsilon_1 M_T$, $M_2 = \varepsilon_2 M_T$ を測定し、 M_i を照射して $M_i = M_T$ に調節すれば両面の測定値 M''_1, M''_2 は $M''_1 = M_i = M_T = M''_2$ となるので、さきの M_1, M_2 との比をとると $M_1 / M''_1 = \varepsilon_1$, $M_2 / M''_2 = \varepsilon_2$ となる。 M_A を考慮する必要があるときは、例えば $M_T > M_A$ の場合 ε_1 に既知の ε をおき同様の手法で $M_A = (M_1 - M''_1) / (1-\varepsilon)$ で M_A を求めれば $\varepsilon_2 = (M_2 - M_A) / (M_T - M_A)$ より ε_2 が求まる。

6. あとがき この能動的測定法は未だ種々の問題点たとえば照射源にレーザー放射を用いたり、これと放射計を一体とすること、できれば ε の未知な測定面の温度パターン計測などがある。

(参考文献) 1) F. Kreith: Radiation Heat Transfer, International Text Book, (1962) 15~39

2) ゲ.ヴェ・サムソフ他: 高融点化合物便覧, 日ソ通信, (1976) 282

3) 石川: 照学誌, 61, (1977) 620

4) 石川: 照学誌, 67, (1983) 13