温度可変放射源を用いる非灰色体の温度計測法

花 泉 弘*・藤 村 貞 夫**・豊 田 弘 道***

A Temperature Measurement Method for Non-Graybody Object
Using a Variable Temperature Radiator

Hiroshi HANAIZUMI*, Sadao FUJIMURA** and Hiromichi TOYOTA***

In the wide band radiation thermometry, variation of spectral emissivity in an observation band causes systematic error in measured temperature. Usually, we measure reflectance, derive emissivity from the reflectance and estimate object temperature by solving radiation equation. In these procedures, we assume that the reflectance and the emissivity do not depend on object temperature and that sum of them is unity. However, the variation of spectral emissivity yields temperature dependency of emissivity and reflectance.

In this paper, we propose a method for obtaining object temperature without the error. In this method, we use a variable temperature radiator. Reflectances (we call them differential reflectance) measured at various temperatures using the radiator are transformed to (interval) emissivities at the same temperature, respectively. By solving radiation equation with interpolation of the neighboring emissivities, we get object temperature with high accuracy. Here, we describe the principle and the procedures of the proposed method. The validity of the method is confirmed by a numerical simulation.

Key Words: spectral emissivity, temperature error, radiation thermometry, variable temperature radiator, temperature dependency of emissivity

1. はじめに

常温近傍対象の放射測温に使用する放射計はおもに温度分解能を高めるという要請から、ある程度の幅をもつ波長帯を観測に用いることが多い。この場合、対象物の分光放射率が波長によって変化すると、実測される(微分)放射率と、正確な温度を推定するのに必要な区間放射率とが異なってしまう、それに基づく温度推定誤差を生ずる¹⁾。正しい温度を推定するには微分放射率から区間放射率を求める必要があるが、ここでは、温度可変の放射源を用いることによって、複数個の微分放射率測定値から区間放射率が求められること、さらにそれらの区間放射率を使用することによって高精度の温度推定が行われることを示す²⁾。以下に、測定原理および数値実験による検討結果を示す。なお、放象物の温度は常温近傍にあること、さらに対象物の分光放射率は測定中は一定と考

えられるものの時間とともにゆっくりと変化しうる(対象物の温度を推定するには放射率も同時に測定する必要がある)状況を想定して議論を進める。

2. 分光放射率の波長依存性と温度推定誤差

2.1 従来手法による温度推定

使用する放射計の観測波長帯における透過率や光学系、検出器の特性など総合した分光感度を $F(\lambda)$ とすると、この観測系における黒体の温度 T とそれを観測して得られる放射輝度 $L(T)$ との関係は、

$$L(T) = \int_0^\infty F(\lambda) L_b(\lambda, T) d\lambda \quad (1)$$

と与えられる。ここで、 $L_b(\lambda, T)$ はプランクの放射則によって与えられる温度 T の黒体の分光放射輝度を意味する。

Fig. 1 の配置で観測される放射輝度 $L_o(T_o)$ は T_o を

Fig. 1 Measurement system for temperature estimation

* 法政大学工学部 小金井市梶野町 3-7-2

** 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

*** 成蹊大学工学部 武蔵野市吉祥寺北町 3-3-1

* College of Engineering, Hosei University, Koganei

** Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

*** Faculty of Engineering, Seikei University, Musashino

(Received April 5, 1994)

(Revised May 23, 1994)

見かけ温度として,

$$L_o(T_a) = \varepsilon L(T_i) + \rho L(T_R) \quad (2)$$

と表わされる. ここで, T_i と T_R とはそれぞれ対象物と黒体とみなせる放射体の温度とを表わす. 従来手法では, 対象物の温度を変化させずに放射源の温度を ΔT_R だけ変化させて放射輝度

$$L_o(T_a + \Delta T_a) = \varepsilon L(T_i) + \rho L(T_R + \Delta T_R) \quad (3)$$

を測定し, これら二つの測定値から

$$\rho = \frac{L_o(T_a + \Delta T_a) - L_o(T_a)}{L(T_R + \Delta T_R) - L(T_R)} \quad (4)$$

によって反射率 $\rho(=1-\varepsilon)$ を求め,

$$L(T_i) = \frac{L_o(T_a) - \rho L(T_R)}{1 - \rho} \quad (5)$$

によって放射輝度を算出し, さらに(1)式を逆に解いて対象物の温度推定を行っていた.

2.2 区間放射率と微分放射率

分光放射率 $\varepsilon(\lambda)$ が波長依存性をもつことによる区間放射率の温度依存性は,

$$\varepsilon_b(T) = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda) F(\lambda) L_b(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\infty F(\lambda) L_b(\lambda, T) d\lambda} \quad (6)$$

と表わされるが, 放射源の温度を変化させて測定できるのは, 微分放射率

$$\rho'(T) = \frac{\int_0^\infty \rho(\lambda) F(\lambda) \frac{\partial L_b(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}{\int_0^\infty F(\lambda) \frac{\partial L_b(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \quad (7)$$

である¹⁾. すなわち温度推定には区間放射率 $\varepsilon_b(T_i)$ が必要なのに対し, Fig. 1 の配置による温度推定では, 微分反射率 $\rho'(T_R)$ が測定されてしまい, $\varepsilon_b(T_i) \neq 1 - \rho'(T_R)$ であるため温度推定値に誤差を生じてしまうのである. ここで提案する手法は, この誤差を除去するために, 測定した微分放射率 $\rho'(T_R)(=1-\varepsilon'(T_R))$ から区間放射率 $\varepsilon_b(T_i)$ を推定し, それを用いて温度推定を行うものである.

3. 微分放射率からの区間放射率の推定

(7)式は, 微分反射率が分光反射率の重み付き平均として表わされることを示している. 積分を総和で近似することによって行列表現を行うと微分放射率については

$$\begin{aligned} \varepsilon'_T &= \begin{bmatrix} \varepsilon'_{T1} \\ \vdots \\ \varepsilon'_{Tn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & w_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{\lambda 1} \\ \vdots \\ \varepsilon_{\lambda m} \end{bmatrix} \\ &= W \varepsilon_\lambda \end{aligned} \quad (8)$$

と表わすことができる. 同様に区間放射率も(6)式より

$$\varepsilon_{bT} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{bT1} \\ \vdots \\ \varepsilon_{bTn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ q_{n1} & \cdots & q_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{\lambda 1} \\ \vdots \\ \varepsilon_{\lambda m} \end{bmatrix}$$

$$= Q \varepsilon_\lambda \quad (9)$$

と書ける. したがって,

$$\varepsilon_{bT} = Q(W^t W)^{-1} W^t \varepsilon'_T \quad (10)$$

の演算によって微分放射率から区間放射率を求めることができる. ここで, t は行列の転置を意味する. また, 重みはそれぞれ

$$q_{ij} = F(\lambda_j) L_b(\lambda_j, T_i) / \sum_{j=1}^m F(\lambda_j) L_b(\lambda_j, T_i) \quad (11)$$

$$w_{ij} = F(\lambda_j) \frac{\partial L_b(\lambda_j, T_i)}{\partial T} / \sum_{j=1}^m F(\lambda_j) \frac{\partial L_b(\lambda_j, T_i)}{\partial T} \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial L_b(\lambda_j, T_i)}{\partial T} = \frac{\partial L_b(\lambda, T)}{\partial T} \Big|_{\lambda=\lambda_j} \right)$$

と近似して用いている. (11)式の演算によれば, 微分放射率からそれらを求めるのに用いた放射源の温度における区間放射率が得られるが, それらを適当な関数で補間することによって任意の温度での値を求めることができる.

4. 数値実験および考察

Fig. 2 に示す分光放射率 $\{\varepsilon_i(\lambda), i=1, 2\}$ をもつ温度 25°C の対象物について, 従来の手法による温度推定誤差と本手法による誤差とを比較した. 用いる放射計の観測波長帯には 8~14 μm を仮定し, 簡単のためその波長帯においては $F(\lambda)=1$ とした. 従来手法では, 反射率測定時に与える放射体の温度変化を $\Delta T_R=1^\circ\text{C}$ とした. 一方, 本手法においては, 各重みは 1.2 μm ごとに求め ($m=6$), 放射体の温度は -20°C から 80°C まで 10°C ごとに变化させる ($n=11$) のとした. Fig. 3 は, それぞれの分光放射率を仮定した場合測定される微分放射率 $\{\varepsilon'_i(T_R), i=1, 2\}$ と, それらから本手法によって推定された区間放射率 $\{\varepsilon_{bi}(T_R), i=1, 2\}$ とを比較したものである. また, Fig. 4 は従来の手法と本手法とによる温度推定誤差を示したものである. ここで, 放射輝度から温度への変換には 2 分法³⁾を用いた. また, 処理結果を安定化させるため,

$$(W^t W)^{-1} \rightarrow (W^t W + \sigma I)^{-1} \quad (\sigma=10^{-4}) \quad (13)$$

として計算を行った (I は $m \times m$ の単位行列).

Fig. 4 によれば, Fig. 2 で与えたいずれの分光放射率に対しても, 従来手法で生じていた大きな温度推定誤差

Fig. 2 Spectral emissivities

Fig. 3 Measured (differential) and compensated (interval) emissivities

$\{\Delta T_i'(i=1, 2)\}$ が本手法によって非常に小さくなっており $\{\Delta T_i, (i=1, 2)\}$, 対象物放射率の分光特性の影響が軽減されることがわかる。なお、本手法による誤差の大きさが計算に用いる T_R の値によって微妙に変化しているのは(10)式における逆行列の計算の不安定性に基づくもので、(13)式に示す安定化によっても推定される区間放射率にわずかながら誤差が残り結果として温度推定値が T_R の影響を受けてしまうことによる。

Fig. 4 Temperature estimation error with $\{\Delta T_i'(i=1, 2)\}$ and without $\{\Delta T_j(j=1, 2)\}$ compensation

5. おわりに

放射率の分光特性に基づく温度推定誤差を軽減する温度推定法を提案し、数値実験によってその有効性を確認した。微分放射率の測定値に誤差が含まれる場合の影響評価や区間放射率の最適な補間法の開発、および実際の対象物への応用などは今後の課題である。

参考文献

- 1) 花泉, 藤村, 豊田: 広波長帯を用いる放射測温, 計測自動制御学会論文集, 25-10, 1038/1045 (1989)
- 2) 花泉, 藤村, 豊田: 温度可変放射源を用いた常温近傍対象の温度測定法, 第26回 SICE 学術講演会予稿集, 661/662 (1987)
- 3) たとえば, 森: 数値解析, 共立出版 (1973)