室温付近における固体の分光放射率の測定*

松 井 松 長**・堤 捨 男**・高 木 亨**

(昭和46年5月12日受理)

Measurements of Spectral Emissivity of Solids near Room Temperature

Matsunaga MATSUI, Suteo TSUTSUMI and Tōru TAKAGI

Department of Electrical Engineering, Kyoto Technical University
(Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto)

1. 緒 言

低温物体の分光放射率の測定が高温の場合のように容易でないのは、試料からの放射エネルギーが小さいこと、および試料表面で反射された周辺物体からの放射が無視できないことに起因している。従来不透明物体の分光放射率の測定の多くは、次の2種の方法により行われてきた。第一の測定法は、周辺の室温物体からの放射が無視できる高温の試料に対しては、温度 $T(^{\circ}\text{K})$ の試料からの分光放射束 $J(\lambda, T)$ およびこれと等温度の黒体からの分光放射束 $J_b(\lambda, T)$ を測定して $\varepsilon(\lambda, T) = J(\lambda, T) / J_b(\lambda, T)$ より分光放射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ を求める¹⁾。第二の方法は、試料の分光反射率 $\rho(\lambda, T)$ を測定して、Kirchhoffの法則より間接的に $\varepsilon(\lambda, T) = 1 - \rho(\lambda, T)$ として算出する²⁾。

前者をそのまま室温物体に適用すれば、見かけの分光放射率は

$$\varepsilon'(\lambda, T) = \{J(\lambda, T) + J_a(\lambda, T)\} / J_b(\lambda, T)$$

となる。ここで $J_a(\lambda, T)$ は試料表面で反射された周囲の物体からの分光放射束である。室温においては $J(\lambda, T)$ に対して $J_a(\lambda, T)$ は無視できないために測定精度は著しく低下する。後者では、特に熱伝導率の低い試料において測定中の照射赤外線による試料表面の温度上昇が問題となり、また試料表面が粗面の場合には、ここで生じた

散乱光を集光する必要がある。

第一の直接法において、試料表面からの反射光の影響を除くには、次の方法によりこれを消去すればよい。すなわち、試料および比較用黒体放射源の温度を T_1 およびこれに近い他の温度 T_2 とし、これらに対する放射計の出力電圧をそれぞれ $V(T_1)$, $V(T_2)$, $V_b(T_1)$ および $V_b(T_2)$ とすれば、試料の放射率は

$$\varepsilon = \{V(T_2) - V(T_1)\} / \{V_b(T_2) - V_b(T_1)\} \quad (1)$$

として求めることができる³⁾。

Weber は室温ミラー・チョップを基準放射源とし、これと異った2種の温度の試料および黒体放射源ならびに分光器を用いて式(1)により分光放射率を測定している⁴⁾。

著者らは上記 Weber の方法を多少変更し、低温基準放射源、室温ミラー・チョップ、ならびに室温とこれより若干高い温度の試料および黒体放射源を用いて、4～14 μ の波長域の固体の分光放射率を測定した。本測定法によれば、現在広く利用されている複光束形分光光度計の一部を改造するのみで、一層室温に近い温度における分光放射率を求めることができる。

2. 測定装置および方法

Fig. 1 に測定法の概要を示す。使用した分光放射計

* 昭和46年4月赤外線技術研究会にて発表。

** 京都工芸繊維大学電気工学教室 (京都市左京区 松ヶ崎)。

* 文献3) では分子が和になっており、また訳本(近代科学社)では分母も和に訂正されているが、いずれも差が正しい。

Fig. 1. Optical system of spectral radiometry.

は島津製 IR-27 形分光光度計（複光束形，KB_r プリズム）を改造したものである。試料温度が室温の場合，所要の検出器出力を得るには適当な温度差をもった基準放射源とミラー・チョップとを併用すればよい⁵⁾。この方法によれば，チョップの温度変動の影響が極めて少く，基準放射源の温度を任意に選定することができる。本測定では，上記の複光束形分光光度計の両光路とミラー・チョップをそのまま利用し，光源側の電源を切って試料セルおよび基準セルの位置に試料（またはコーン形黒体）と低温基準放射源を置いた。また両入射窓のウエジは全開状態とし，整流後の出力信号は電気フィルタを通した後ペン・レコーダで記録した。

分光放射率は，室温 T_1 とこれより高い温度 T_2 において試料からの分光放射束（試料表面で反射された周囲の物体からの分光放射束を含む）および黒体からの分光放射束に対応した出力電圧を測定することにより，次の要領で求めることができる。いま温度 T_1 の試料を置くとすれば，波長 λ における分光放射計の出力電圧は次式で表わされる。

$$V(\lambda, T_1) = K \rho_s(\lambda, T_1) [\varepsilon(\lambda, T_1) J_b(\lambda, T_1) + \{1 - \varepsilon(\lambda, T_1)\} J_a(\lambda, T_1)] - K \rho_r(\lambda, T_1) J_r(\lambda, T_0) \quad (2)$$

ここで K は後述する装置の補正係数， $\rho_s(\lambda, T_1)$ は試料側入射光学系の総合分光反射率， $\varepsilon(\lambda, T_1)$ は試料の分光放射率， $J_b(\lambda, T_1)$ は黒体の分光放射束， $J_a(\lambda, T_1)$ は周辺物体からの分光放射束， $\rho_r(\lambda, T_1)$ は基準放射源側入射光学系の総合分光反射率， $J_r(\lambda, T_0)$ は温度 T_0 の基準放射源からの分光放射束である。なお両入射光学系の構成は等しいから，これらからの放射は相殺される。

一方，温度 T_1 の黒体を置いた場合の出力電圧は

$$V_b(\lambda, T_1) = K \{ \rho_s(\lambda, T_1) J_b(\lambda, T_1) - \rho_r(\lambda, T_1) J_r(\lambda, T_0) \} \quad (3)$$

で与えられる。また温度 (T_2) の試料および黒体についても同様にして表わすことができる。

式 (2) および (3) の K は単位入射束当りの出力電圧であるから

$$K = \{ V_b(\lambda, T_2) - V_b(\lambda, T_1) \} / [\rho_s(\lambda, T_1) \{ J_b(\lambda, T_2) - J_b(\lambda, T_1) \}] \quad (4)$$

式 (2) より，試料温度を T_1 および T_2 にしたときのそれぞれの出力電圧の差は

$$V(\lambda, T_2) - V(\lambda, T_1) = K \rho_s(\lambda, T_1) [\varepsilon(\lambda, T_2) \{ J_b(\lambda, T_2) - J_a(\lambda, T_1) \} - \varepsilon(\lambda, T_1) \{ J_b(\lambda, T_1) - J_a(\lambda, T_1) \}] \quad (5)$$

上式において $\varepsilon(\lambda, T_2) = \varepsilon(\lambda, T_1) = \varepsilon(\lambda)$ とすれば

$$\varepsilon(\lambda) = (1/K) \{ [V(\lambda, T_2) - V(\lambda, T_1)] / \rho_s(\lambda, T_1) \{ J_b(\lambda, T_2) - J_b(\lambda, T_1) \} \} \quad (6)$$

式 (4) を式 (6) に代入すれば

$$\varepsilon(\lambda) = \{ V(\lambda, T_2) - V(\lambda, T_1) \} / \{ V_b(\lambda, T_2) - V_b(\lambda, T_1) \} \quad (7)$$

となり，温度 T_2 ， T_1 におけるそれぞれの出力電圧から $\varepsilon(\lambda)$ を求めることができる。なお， $\Delta T = T_2 - T_1$ は小さくすることが望ましいが， T_0 と共に検出器の感度や増幅器の利得を考慮して選定する。低温基準放射源にはコーン形黒体を使用したのが原理的には黒体である必要はない。

3. 測定結果および考察

測定は，4~14 μ の波長範囲において， T_1 = 室温， T_2 = 50°C， T_0 = 0°C とし，分光器のスリット幅を 1.3 mm に固定して行った。この場合スペクトルのスリット幅は，波長 10 μ において 0.38 μ である。試料*はアルミニウム，銅，ステンレス・スチール，鉄などの金属板，および白色，黒色（つや出し，つや消し）のラッカ塗装面であって，Fig. 2~6 にこれらの測定結果を示す。ここで試料温度 T の表示は， $\Delta T/T_1$ が比較的大きいため， $T = (T_1 + T_2)/2$ とした。なお，測定は再現性を確認するため，各試料毎に 5 回繰返して行った。

一般に固体の分光放射率は，温度および表面状態（酸化の程度および表面の精粗）によって大きな差がある。純金属に対しては，古典電子論に基づく Drude の式 $\varepsilon(\lambda) = 0.365 (r/\lambda)^2$ (r : 金属の電気抵抗率， λ : 波長) が与えら

* 金属試料はすべて京都技術教育研究会の金属材料標本中より選んだ。ラッカは，いずれも東亜ペイント製のアクリル・ラッカを使用した。

れていて、 $\lambda > 2\mu$ においては測定値とよく一致することが知られている⁶⁾。Fig. 2 の実線は、上式より求めた 32°C のアルミニウムの分光放射率であって、実測値はこれよりも大きな値を示している。この結果は、空气中に長時間放置された金属面に酸化膜が形成されたためと

Fig. 2. Spectral emissivity of polished aluminum.

Fig. 3. Spectral emissivity of unpolished aluminum.

Fig. 4. Spectral emissivity of stainless steel, brass and copper.

考えられる。なお比較のために Weber の測定値を併記した。Fig. 3 は表面がやや酸化したつや消しアルミニウム板の分光放射率であって、 T_2 は 50°C および 60°C である。

Fig. 4 の測定値はそれぞれステンレス・スチール、真鍮および銅の分光放射率を示す。

Fig. 5 は鉄板とその酸化物の分光放射率である。これらは研磨した鉄板とこれを空气中において2時間、 800°C に加熱して表面に黒色の Fe_3O_4 の膜が形成されたものおよび表面に粒状の Fe_2O_3 (赤さび) が生じた鉄板の分光放射率であって、特に Fe_2O_3 の場合は 0.8 以上の高い値を示している。

Fig. 5. Spectral emissivity of iron and its oxide.

Fig. 6. Spectral emissivity of lacquer film on aluminum.

Fig. 6 は 4 種類のラッカ塗装面について測定した結果である。いずれもアルミニウム板上に黒色つや出し、黒色つや消しおよび白色つや出しのラッカを塗装したものである。同図において、塗装膜の厚さが 80μ の 2 種類の黒色ラッカ塗装面は、中間赤外域での分光放射率が $0.91 \sim 0.94$ の範囲にあって、両者の間に大きな差のないことを示している。これに対して同じ膜厚の白色ラッカは波長 7μ 以下で、膜厚 20μ の黒色ラッカは測定した全波長域において分光放射率が大きく変化している。これについては上記の各波長域において塗装膜が半透明になり、ここで基板からの放射または入射反射光が干渉して生じたものと考えられる。

この種の測定における誤差の原因としては、まず試料、周囲の物体、および基準放射源の温度変動に伴う放射束の変化があげられるが、この測定における温度変動は、 T_2 が 0.5° 以下、 T_1 および T_0 は 0.2° 以下であった。その他の誤差としては、増幅器の利得変動および雑音に起因するものや読取り誤差などがある。比較用のコーン形黒体は当研究室で製作したもので、その放射率は 0.993 である*。これらを考慮した場合、各測定値に対する総合誤差は、波長 $9 \sim 10\mu$ において $\pm 3.6\%$ 以内、 4 および 14μ で $\pm 4.4\%$ 以内である。

4. 結 言

この実験は、室温付近における分光放射率の実測資料が少いことからこれを補い、また赤外線機器の反射防止塗料の効果を検討する必要から適切な測定法を見出すために行った。上に述べた測定法は、不透明体に関する限りほぼ満足すべきものと考えられる。今後さらに表面状態の異なる他の種々の試料についても測定する予定である。

おわりに実験に協力された宮武将浩技官に謝意を表す。

文 献

- 1) H. H. Blau *et al.*: *Appl. Opt.*, **3**, 281 (1964), etc.
- 2) C. D. Reid and E. D. McAlister: *J. Opt. Soc. Am.*, **49**, 78 (1959), etc.
- 3) H. L. Hackforth: *Infrared Radiation*, p. 224 (McGraw-Hill Book Co., 1960).
- 4) D. Weber: *J. Opt. Soc. Am.*, **49**, 815 (1959).
- 5) 高木, 松井: 分光研究, **16**, 112 (1967).
- 6) たとえば, D. Ya. Svet: *Thermal Radiation*, Chap. 2 (Consultants Bureau, New York, 1965).

* 放射率は Gouffe の式 (たとえば, H. D. Hudson: *Infrared System Engineering*, p. 68 (1969)) により求めた。