赤外放射計による射度係数の測定とその応用*

岡本 芳三^{*1}, 神永 文人^{*1}, 刑部 真弘^{*1}, 前川 克廣^{*1}
石井 敏満^{*2}, 大岡 紀一^{*3}, 衛藤 基邦^{*4}

Measurement of Radiosity Coefficient by Means of an Infrared Radiometer

Yoshizo OKAMOTO, Fumito KAMINAGA, Masahiro OSAKABE,
Katsuhiro MAEKAWA, Toshimitsu ISHII,
Norikazu OUOKA and Motokuni ETOU

An infrared radiometer has been used for measuring and visualizing the radiation temperature distribution of a surface in many fields. Measured radiation energy by the radiometer is a summation of an emitted radiation and a reflection, which is called a radiosity flux. The present paper shows the characteristics of the radiosity of tested materials. The infrared sensor is used to measure the erosion rate of the graphite by ion beam injection and the temperature distribution of a cutter.

Key Words: Infrared Radiometer, Radiosity, Radiosity Coefficient, Reflection, Variation, Ion Beam Injection, Cutter

1. 緒 言

物体表面より放出される赤外線放射エネルギーを遠隔非接触でとらえ、二次元のサーモ像として表示する、赤外線画像技術は、医学、気象、土木などの分野に広く利用されている⁽¹⁾。

一般に、赤外放射計により常温に近い温度場で、放射率が比較的低い材料表面の放射エネルギーを測定する場合には、周辺より表面に入射し、反射するエネルギーを考慮に入れた、いわゆる、放射エネルギーである射度 (Radiosity) を測定することになる。赤外線放射計ではこの射度を放射温度の表示で計測することが行われており、求めた放射温度は試料および周辺の温度、放射率および反射率の関数である。本研究は、反射を含む放射エネルギーとしての射度のもつ性質を明らかにすることを目的としたものである。いま、赤外線放射計で測定した射度と、対象となる温度における黒体放射エネルギーの割合を射度係数と定義し、この射度係数に与える試料および周辺温度の影響について調

べたものである。また、周辺の温度が一定しない場合には、反射のエネルギーが安定せず、計測値にばらつきを生ずるために、正確な温度測定が行えない。このため温度調節が可能な黒体フードを試料とセンサの間に設置し、射度の安定化をはかったうえで試料の射度係数および放射温度を計測した。次に、試料の温度が一樣な場合の放射温度計の見る材料表面の射度係数と放射温度のばらつきを測定し、そのばらつきが材料表面の微細な放射温度の識別限界因子となることを明らかにした。このほか応用計測例として、黒鉛材料の高温照射効果が表面の射度係数に与える影響、および、切削時の切削工具の表面温度分布について測定を行った結果について報告をする。

記 号

a : 射度係数
 Δa : 射度係数のばらつき (rms)
 J : 放射熱流束
 R : 中心線平均粗さ
 T : 温度
 T' : 放射温度
 $\Delta T'$: 放射温度のばらつき (rms)
 ε : 放射率

* 原稿受付 平成2年2月26日。

^{*1} 正員、茨城大学工学部 (〒316 日立市中成沢町4-12-1)。^{*2} 学生員、茨城大学大学院。^{*3} 日本原子力研究所 (〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町)。^{*4} 日本原子力研究所 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村)。

ρ : 反射率

σ : ステファン・ボルツマン定数

添 字

a : 周辺

b : 黒体

s : 表面 (平面)

2. 材料の射度係数の測定

図1は実験装置の概念図を示したものである。試験片として、200 mm 角のステンレス、黄銅およびグラファイトを用いた。試料を機械加工により仕上げ、その表面を超音波洗浄し、放射率が試料で表面一様に保たれた状態で計測を行った。試料の裏面を加熱し定常状態で、一定温度に保たれた試料表面の温度を熱電対で計測した。赤外放射温度計は液体窒素により冷却された、 8μ から 13μ の範囲の赤外放射エネルギーを検出する、Hg-Cd-Te の光子形センサより成り立っている。試料と検出器の間の最小距離が15 cm の場合には、最小で0.5 mm 区画内の面積平均放射温度を計測することができる。また、常温付近においては、周辺からの光線および人体などからの熱線の反射を受け、とくに、金属面の場合に、CRT 上で約数度の変動をも

たらし、映像が安定しない。このため、実験装置を黒色の暗幕で覆うとともに、また、試料とセンサの間に、水槽に浸された角すい形フードを制作し、その内側に黒体に近いベルベット布を張り付け、表面に黒色ペンキを塗布し、一定温度の周辺壁により構成されるようにした。このようなフード面の放射率は0.99以上であり、黒体面とみなすことができ、安定な放射温度と射度係数を測定することができた。また、試料表面の最高熱流束は 0.2 W/cm^2 以内であり、全面において0.1 K 以下の一定温度に保たれた平衡状態での計測を行った。

センサは液体窒素で冷却されており、試料面の垂線より角度 15° 傾いた方向に設置して計測を行った。周辺フードよりの反射を考慮に入れた、表面よりの放射熱流束 J_s は近似的に式(1)で表される⁽²⁾。また、壁面に取付けた熱電対で測定した試料の温度を T_s とし、反射を考慮に入れた放射率すなわち射度係数 a_s 、および見掛けの放射温度 T_s' は式(1)に示される。

$$J_s = \sigma(\epsilon_s T_s^4 + \rho_s T_a^4) = \sigma a_s T_s'^4 = \sigma T_s'^4 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 a_s 、 T_s' は、 ϵ_s 、 ρ_s 、 T_a 、 T_s の関数であり、灰色近似の成立する面では測定波長範囲で、 ϵ_s 、 ρ_s はほぼ一定であり、次のように表される。

$$\rho_s + \epsilon_s = 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)を式(1)に代入すると次式が求まる。

$$\epsilon_s = \frac{a_s - (T_a/T_s)^4}{1 - (T_a/T_s)^4} \quad \dots\dots\dots (3)$$

各種材料の周辺温度 $T_a = 293\text{ K}$ で試料が $T_s = 268 \sim 373\text{ K}$ の場合の T_s と a_s の関係を図2に示す。R は表面の中心線平均粗さ (rms) を示す。T_s が T_a に等しい場合、 a_s の値は1であり、T_s が大なるほど a_s の値は低下し、放射率 ϵ_s の値に漸近する。すなわち、T_s が T_a より十分に大きくなると、 a_s の値の中で反射の占める割合 ρ_s は無視できるようになる。また、金属面で

図1 実験装置

図2 各種材料の壁温 T_s と射度係数 a_s の関係

図3 黒鉛の T_s と a_s 、 ϵ_s の関係 ($T_a = 284, 293, 303\text{ K}$)

は、黒鉛の場合に比較して放射率 ϵ_s の値が低いために、 T_s が増加すると $a_s=1$ の値より急激に低下し、 a_s は ϵ_s の値に漸近する。一方、試料温度 T_s が周辺温度 T_a より低い体系では、 a_s は 1 より高い値を示し、また、放射率 ϵ_s の低い材料ほど、その値は増加し、式 (1) の第 2 項の反射の占める割合がいつそう支配的になることを示している。

図 3 は黒鉛材料について周辺温度 T_a が 284, 293, 313 K の場合の射度係数 a_s の変化を示す。 $T_s=T_a$ において $a_s=1$ であり、 T_a の大なるほど右側に曲線がずれる。黒塗りの記号は、式 (3) を用いて a_s より求めた ϵ_s の計算値を示す。ここで ϵ_s はすでに述べたように試料の垂直方向に対して角度が約 15° 傾いた方向の指向性放射率の値を示している。また、 $\epsilon_s=0.69$ であり、この値を用いて式 (1) より計算した a_s の値を実線に示し、実験値とほぼ一致しており、灰色近似および完全拡散反射が成立することを示している。

ϵ_s の値は 313 K 以上で、 T_a のいかによらず、ほぼ、 $\epsilon_s=0.69$ と一定の値を示す。 T_s が 313 K 以下では、試料と周辺温度差が 20 K 以下となり、周辺フード以外より入射する熱放射線によるばらつきが大きくなるため、 T_s は T_a より少なくとも 20 K 以上高く保

つ必要があることを示している。これは、フード面と試料の間より入射する周辺よりの入射光の影響によるものと考えられる。

一般に、放射温度計では試料表面の射度係数 a_s の値をもって、見掛けの放射温度 T_s' が決まり、CRT 上に、サーモ像として表示が行われる。このような場合、試料表面の T_s' , a_s の分布は、一様でなく、ばらつきをもった放射温度分布として表示される。これらのばらつきは、試料材料の成分、粒径などの組成、粗さ、表面酸化膜の不均一な形成、表面の汚れなどによって生ずるものと考えられる。

各種材料の、 $T_s=313$ K, $T_a=293$ K における、 T_s' および a_s のばらつきの標準偏差 $\Delta T_s'$, Δa_s [rms] を以下に示す。実験は、CRT 上の 20 点の画素の T_s' より求めた値の $\Delta T_s'$ [K], Δa_s の rms を示している。いずれも、機械加工仕上げした試料表面の場合について行った結果である。

ステンレス鋼	$T_s'=24.3 \pm 0.11$
	$a_s=0.768 \pm 0.001$
黄銅	$T_s'=22.8 \pm 0.07$
	$a_s=0.783 \pm 0.001$
黒鉛	$T_s'=33.3 \pm 0.20$
	$a_s=0.918 \pm 0.002$
黒色ペンキ	$T_s'=30.0 \pm 0.10$
	$a_s=0.980 \pm 0.001$

図 4 は黒色ペンキ膜の T_s と $\Delta T_s'$, Δa_s の関係を示したものである。 $T_s=333$ K 付近より、 $\Delta T_s'$, Δa_s 共に著しく増加しており、CRT 上の T_s' のばらつきが顕著になることを示している。

図 5 は T_s と $\Delta T_s'$, Δa_s の関係をステンレス鋼と黒鉛の場合について示したものであり、 T_s の大なるほど $\Delta T_s'$ と Δa_s は増加している。また、放射計の CRT 上の $\Delta T_s'$ の検出感度は rms で 0.1 K 以下であり、上

図 4 黒色ペンキの T_s と $\Delta T_s'$, Δa_s の関係

図 5 黒鉛とステンレス鋼の T_s と $\Delta T_s'$, Δa_s の関係

図 6 黄銅の T_s と $\Delta T_s'$, Δa_s の関係

記のばらつきは表面放射温度の微細な変化を見るうえで制約因子の主たる原因となる。

図6は同様な関係を黄銅について求めた結果である。図4, 5と同様に T_s が大きくなるほど $\Delta T_s', \Delta a_s'$ は増加している。一般に、放射温度計を用いて、表面の見掛けの放射温度 T_s' を計測する場合、欠陥などによる有意な表面の放射温度の変化 $\Delta T'$ が、上記の表面がもつ本来のばらつき $\Delta T_s'$ より大きい場合には、その変化 $\Delta T'$ は識別可能である。しかしながら、 $\Delta T'$ が表面の本来のばらつき $\Delta T_s'$ より小さい場合には、識別することが不可能となる。

このように、材料の放射温度および射度係数とそのばらつきを求め、CRT上の放射温度 T_s' に関する基礎資料とすることができた。

3. 黒鉛材料の高熱負荷照射試験後の損傷効果

電子ビームによる真空中の黒鉛材料の損傷面の状態を表面の射度係数を測定することにより調べた。使用した試料は密度 1.8 g/cm^3 、熱伝導率は $116 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ の高密度等方性黒鉛であり、真空中で、 $3 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 、2 s間の電子ビーム熱負荷照射を行ったものである⁽⁴⁾。試料は照射後、切断し、光学顕微鏡および走査電顕(SEM)により損傷深さおよび表面組織の観測を行った。

図7は、 $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ の照射ビームによる損傷深さと半径方向 $T_s'(a_s)$ の分布を示したものである。ビーム照射により表面の黒鉛は昇華し、深さ、約0.3 mm程度の損傷がおこっている⁽⁴⁾。これに対して、試料を329 Kに加熱して、 T_s' と a_s を測定した結果を、黒丸に示す。 T_s' は293 K近く増加し、 a_s は非照射材

図7 黒鉛の損傷深さと T_s', a_s の分布

の0.72の値から照射により0.93の値に増加しており、ほぼ、黒体化している。表面状態のSEMによる測定では、平均径 $10 \mu\text{m}$ の黒鉛粒の境界をうめっているピッチ層よりなるアモルファスの炭素層が昇華して粗さ R が $2.24 \sim 0.20 \mu\text{m}$ に増加していた。 a_s の変化を測定することにより損傷の程度を示すことのできるデータベースとして有効であると考えられる。

4. 切削中の工具の温度分布の計算

切削中の工具の非定常温度分布の測定は、高熱負荷界面発熱問題として興味ある課題である。一般に、切削時の温度を測定するためには工具とセンサの相対位置および切りくずの処置に対策を必要とする。前者に対しては、工具架台と一体に赤外センサを、後者に対しては、チップブレイカを取付けることにより、温度分布をとらえることができた。また、工具の表面は反射率が高いため、黒色ペンキを塗布し、図2の黒色ペイントの a_s の結果を用いて表面温度の測定を行った。図8は、切削を開始してから約1 min後の安定化した温度分布を示す。図8中に示す切削条件のもとでは、工具と切りくずせん断面の温度は683 Kに達する。また、切削面の発熱熱流束は約 10^3 W/cm^2 で、工具と切りくずへの熱量配分は約1:4であることが確認された⁽⁵⁾。

5. ま と め

赤外放射計を利用して、常温付近での試料の放射温度と射度係数の計測とその応用例について述べた。

(1) 測定にあたっては、金属などの放射率が低い材料では、周辺よりの反射をふくむ射度係数を測定することになり、常温に近い状態では周辺温度の均一化と安定化をはかる必要がある。均一な温度場の黒体壁

図8 切削中の温度分布

により構成した、放射場での測定を行うことにより CRT 上の映像の安定化をはかった。

(2) 材料表面の、射度係数の値、見掛けの放射温度および射度係数のばらつきを測定し、その値が放射計の映像に対する微細な温度分布を求めるにあたっての制約因子になることを明らかにした。

(3) 応用例として、電子ビームによる黒鉛材料の損傷効果を調べるために、表面の射度係数を測定した。その結果、照射による黒鉛表面のアモルファスの炭素層の昇華により、 α_s の値が変化し、損傷の程度を示すデータベースとして有効であることを明らかにした。

(4) 切削中の工具の表面温度を黒色ペンキを塗布

して計測し、刃先および切りくず上の加熱部の温度分布、熱流束と熱量配分を求めることができた。

今後、 T_s' 、 α_s の値およびそのばらつきを定量的に評価することにより、表面温度の計測に有効な手法として利用できるものと考ええる。

文 献

- (1) 日本写真計測学会、遠赤外線リモートセンシング、(1987)、97. 鹿島出版。
- (2) 岡本・ほか 4 名、第 3 回産業における画像センシングシンポジウム講論集、非破壊検査協会、3-6(1989)、69。
- (3) Eckert, E., *Forsca. Geb. Ingn.*, 7(1936), 265.
- (4) 衛藤・ほか 10 名、原子力学会年会、G-34, 33(1989)。
- (5) 前川・ほか 2 名、1989 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集、(1989)、775。