

赤外線放射計による射出率の測定とその応用

岡本芳三*, 神永文人*, 刑部真弘*, 前川克廣*, 石井敏満*
大岡紀一**, 衛藤基邦***

(平成元年 8 月31日受理)

Measurement of Radiosity Coefficient by Using an Infrared Radiometer and Its Application

Yoshizo. OKAMOTO*, Fumito. KAMINAGA*, Masahiro. OSAKABE*, Katsuhiro. MAEKAWA*, Toshimitsu. ISHII*
Norikazu. OHOKA**, Motokuni. ETO***

Abstract—An infrared radiometer has been used for measuring and visualizing radiation temperature distribution of a surface in many fields as a remote sensing devices. Measured radiation flux is a summation of a emitted radiation and a reflection, which is called as a radiosity flux. The present paper shows characteristics of the radiosity of tested materials. And the infrared sensor is used to detect the small surface flaw and to measure the erosion rate of the graphite by ion beam injection and the temperature distribution of a 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、赤外線リモートセンシング技術は、医学、気象、土木等の分野に広く利用されている。

一般に、赤外線放射計を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、射度 (Radiosity) を測定することになる。しかしながら、周辺の温度が一定しな

い場合には、その値は安定せず、計測値にバラツキを生じ正確な温度計測を行えないことが多い。このような影響を避けるために、通常、反射率の高い材料では、表面に黒体に近い塗料を塗るなどの方法が行われているが、表面の微視的な温度分布を求めることは出来ない。このような点を考慮に入れて、周辺温度を安定させた場での、試料の射出率を計測すると共に、その手法を表面欠陥の検出、高温負荷時の材料の損傷および切削加工時の工具温度計測等に応用した結果について報告する。

* 茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成沢町)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi, 316, Japan

** 日本原子力研究所大洗研究所材料試験部 (茨城県東茨城郡大洗町成田町)

Division of Japan Material Testing Reactor, Oharai Institute, Japan Atomic Energy Research Institute, Oharai-machi, Higashi Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-13, Japan.

*** 日本原子力研究所東海研究所高温工学部 (茨城県那珂郡東海村白方)

Division of Japan High-temperature Engineering, Tokai Institute, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-11, Japan

2. 材料の射出率の測定

Fig.1 は試験装置の概念図を示したものである。試験片として、ステンレス、黄銅およびグラファイトを用いた。試料の裏面を加熱し定常状態における試験片表面(s)および表面の一部に黒色ペンキを塗布した黒体面(b)の放射温度を計測した。赤外放射温度計は液体窒素により冷却された、Hg-Cd-Te の光子型センサーより成立っている。試料と検出器の間の最小距離15cm の場合には、0.5mm 区画の面積平均放射温度を計測する。また、常温付近においては、周辺よりの光線および人体等からの熱線の反射をうけ、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共に、また、試料とセンサーの間に、水槽に浸された角錐型フードを製作し、その内部を黒体に近いバルベツト布を張り付け、一定温度の黒体壁より周辺が構成されるようにした。

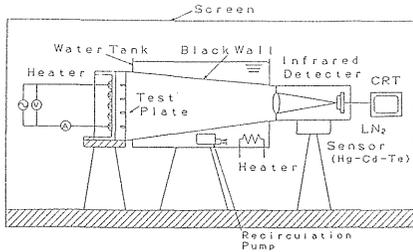


Fig. 1 Test rig

Fig.2 は、Fig.1 にもとづく放射面構成のレイアウトを示す。周辺を黒体として一定温度 T_a に保つことによって、周辺 A より試料 S に入射するエネルギーを温度 T_a における放射エネルギーとして一定値に保ち、かつまた、各面の中の多重反射効果を防止している。

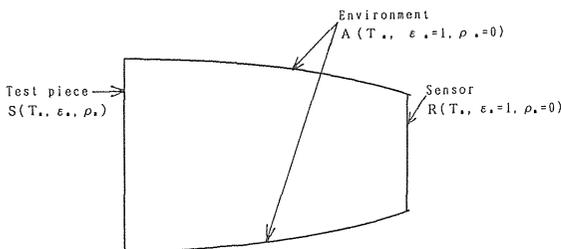


Fig. 2 Layout of Enclosure

センサーは液体窒素で冷却されており、周辺フード a よりの反射を考慮に入れた熱流束 J_s, J_b は近似的に

(1), (2)式で表わせる。²⁾ここで、 T は絶対温度、 ϵ は放射率、 ρ は反射率、サフィックスの S, B は試料表面および黒体面を示す。また、壁面に取付けた熱電対で測定した試料の温度を T_w とし、反射を考慮に入れた射出率すなわち射出率 a_s 、および見かけの放射温度 T_s' は(1)式に示される。

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

$$J_b = \sigma \epsilon_b T_w^4 \dots\dots\dots(2)$$

a_s, T_s' は、 $\epsilon_s, \rho_s, T_s/T_w$ の関数であり、灰色近似の成立するグラファイト面では $\rho_s = 1 - \epsilon_s$ となる。³⁾

また、金属面においては、周辺が黒体でありうる場合には、電磁理論によりつぎの関係が成立つことが知られており、(3)式を用いて、(1)式の繰返し計算により、 ϵ_s を求めることが出来る。⁴⁾

$$\rho_s(T_s) = 1 - \epsilon_s(\sqrt{T_s \cdot T_a}) \dots\dots\dots(3)$$

各種材料の周辺温度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ で試料が $T_w = -5 \sim 100^\circ\text{C}$ の場合の T_w と a_s の関係を Fig.3 に示す。 T_w が T_a に等しい場合、 a_s の値は 1 であり、 T_w が大なる程 a_s の値は低下し、放射率 ϵ_s の値に漸近する傾向にある。すなわち、 T_w の大なる程、 a_s の値のなかで ϵ_s の占める値は増加し、放射率 ϵ_s の値に漸近し、 a_s のなかで反射の占める割合 ρ_s は無視出来る様になる。金属面では、

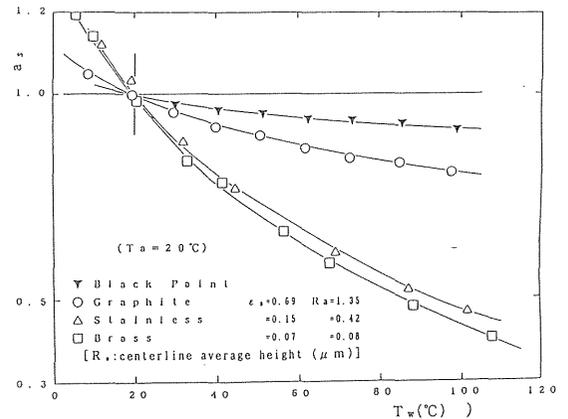


Fig. 3 The relation between radiosity coefficient a_s and T_w for materials tested ($T_a = 20^\circ\text{C}$)

黒鉛の場合に比較して、 $T_w = T_a$ で $a_s = 1$ の値より急激に低下し、反射の占める割合を無視することが出来る温度はかなり高い値になる。一方、試料温度 T_w が周辺温度 T_a より低く冷却されている状態では、 a_s は 1 より

り高い値を示し, 放射率 ϵ_s の低い値ほど, その値は高くなり, 黒体での $a_s = 1$ の値をすべて上回った値を示し, 反射の値が一層支配的であることを示している。

Fig.4 は, 周辺温度 T_a を変化させた場合の黒鉛の a_s の分布を示す。 $T_w = T_a$ において $a_s = 1$ であり, T_a の大なる程右側に曲線がずれ, 反射の示す割合は, 増加している。黒塗りの記号は, a_s より求めた ϵ_s の計算値を示す。黒体の ϵ_s は試料に対してほぼ垂直方向に対して角度として約10度傾いた方向の放射率を示している。

ϵ_s の値は40°C以上でほぼ一定しており $\epsilon_s = 0.69$ の値をとっており, 文献(4)のデータとほぼ一致している。 T_w が40°C以下のデータがばらついてるのは試料が周辺温度より低い場合の非定常のデータであり, T_w は T_a より少なくとも10~20°C以上の条件で実験をすすめる必要があることを示している。

同様の実験を表面研磨した金属面としてステンレス, 真鍮についておこなった結果を示す。その結果を Fig5, 6 に示す。 a_s は T_a が大なる程, 右にずれる曲線であり, T_w が大なるほど, 減少している。 a_s を用いて, (1), (3)式より求めた, ϵ_s の値を黒印に示す。 $T_a = 40^\circ\text{C}$ 以上で ϵ_s は0.15, 0.07の値を示し, 研磨した金属面としては妥当な値である。⁵⁾ また, 40~100°Cの範囲では, ほぼ, 一定の値を示している。

放射温度では試料表面の a_s の値の分布をもって, 見かけの放射温度 T_s が決り, CRT 上に, サーマ像としての表示が行われることとなる。

一般に, 試料表面の T_s' , a_s の値は, 一定でなく, バラッキをもった放射温度分布として, 表示される。これは, 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と考えられる。今後, 十分検討されるべき課題であると考えられる。

各種材料の, $T_w = 40^\circ\text{C}$, $T_a = 20^\circ\text{C}$ における, T_s および a_s のバラッキの標準偏差 $\Delta T_s'$, Δa_s (rms) を以下に示す。実際は CRT 上の20点の測定点の T_s' より求めた平均値の $\Delta T_s'$, Δa_s (rms) の値をしめしている。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。また, 伝熱面の最高熱流束は0.2 W/cm²以内であり, 壁面は水平断面内で, ほぼ一定の温度に保たれる。

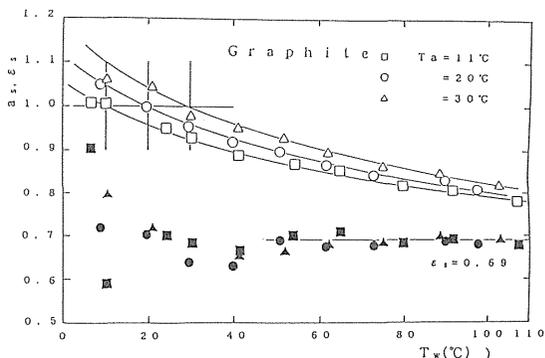


Fig. 4 The relation between a_s , ϵ_s and T_w of Graphite with T_a as a parameter

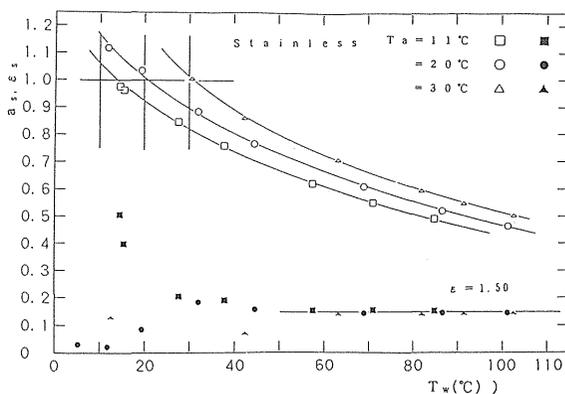


Fig. 5 The relation between a_s , ϵ_s and T_w of Stainless Steel with T_a as a parameter

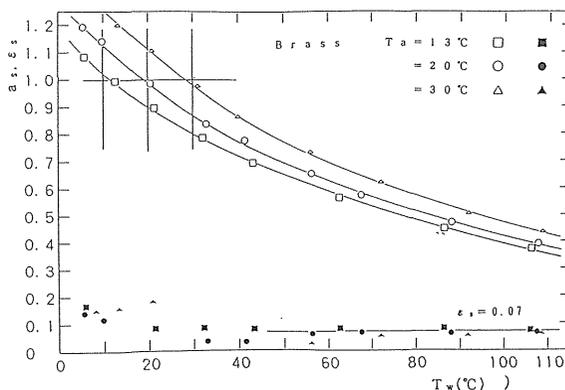


Fig. 6 The relation between a_s , ϵ_s and T_w of Brass with T_a as a parameter

ステンレス鋼	$T_s' = 24.3$	± 0.11
	$a_s = 0.768$	± 0.001
黄銅	$T_s' = 22.8$	± 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	$T_s' = 30 \pm 0.10$
	$a_s = 0.918 \pm 0.001$

Fig. 7 は、黒色ペンキ膜の T_w と $\Delta T_s'$ 、 Δa_s の関係を示したものである。 $T_w = 60^\circ\text{C}$ 附近より、 $\Delta T_s'$ 、 a_s は共に著しく増加している。

Fig. 8 は、 T_w と $\Delta T_s'$ 、 Δa_s の関係をステンレス鋼とグラファイトの場合について示したものであり、 T_w の大なる程 $\Delta T_s'$ と Δa_s は増加している。放射計の CRT 上の $\Delta T_s'$ の検出感度は rms で 0.1°C であり、上記のパラッキ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。Fig. 9 は同様な関係を真鍮について求めた結果である。Fig. 7, 8 と同様の結果を示す。

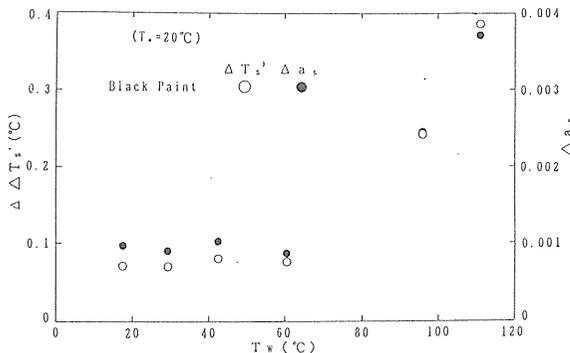


Fig. 7 The relation between $\Delta T_s'$, Δa_s and T_w of Black paint ($T_a = 20^\circ\text{C}$)

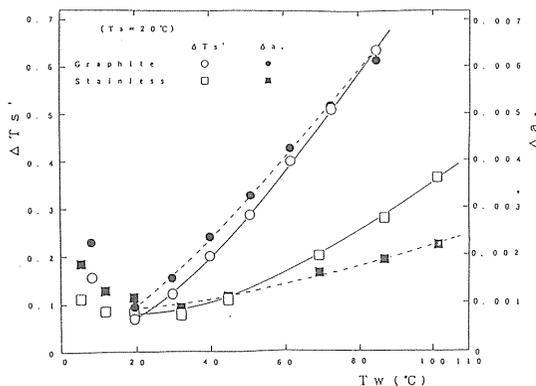


Fig. 8 The relation between $\Delta T_s'$, Δa_s and T_w of Graphite and Stainless Steel ($T_a = 20^\circ\text{C}$)

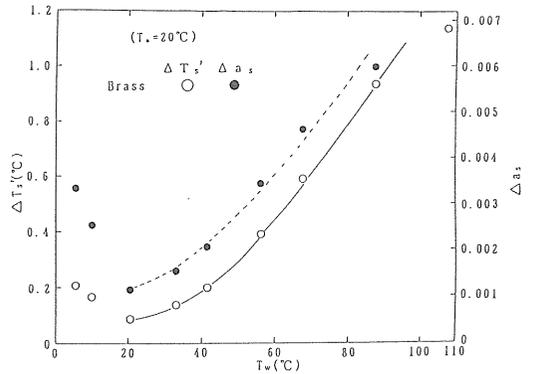


Fig. 9 The relation between $\Delta T_s'$, Δa_s and T_w of Brass ($T_a = 20^\circ\text{C}$)

3. 表面欠陥の検出

材料表面に存在する欠陥よりの空洞放射効果によって、欠陥の放射温度 T_c' は増加し、表面の値との差 $\Delta T_c' = T_c' - T_s'$ から、欠陥を検出することが出来る。また、表面を加熱冷却することにより、欠陥部の $\Delta T_c'$ の値は増加し、映像を鮮明化することが出来た。^{2),5)} その結果、セラミックスについて 5μ 巾の微小欠陥を検出することを可能とした。⁶⁾ しかしながら、上記の T_s' のバラツキは、欠陥の検出にあたって限界を与え、特に、点状欠陥の場合、 $0.1\text{mm}\phi$ で深さ 10μ 程度のピンホール状欠陥の検出が限界である。これらの中、特に、ステンレス鋼については、常温酸化に相当するものと見られる厚さ数十Å程度の縞状の温度分布むらが見られ、特に点状欠陥の検出を困難にした。²⁾ 表面物性としての放射率、反射率に関する安定化をはかることが、今後の課題であると考えられる。

4. 黒鉛材料の高温負荷照射試験後の損傷効果

電子ビームによる真空での黒鉛材料の損傷面の状態を表面の射出率を測定することにより調べた。使用した試料は高密度等方性黒鉛であり、真空中で、 $3 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 、2秒間の電子ビーム熱負荷照射を行ったものである。⁷⁾ 使用した等方性黒鉛の密度は 1.8g/cm^3 、熱伝導率は 116W/mK である。試料は照射後、切断し、光学顕微鏡および走査電顕 (SEM) により損耗深さおよび表面組織の観測を行った。

Fig.10 は $13\text{mm} \times 13\text{mm}$ の照射ビームによる損耗深

さと $T_s'(a_s)$ 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0.3mm程度の損耗がおこっている。⁵⁾これに対して、試料を56°C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20°C近く増加し、 a_s は非照射材の0.72の値から照射により0.93の値に増加し、ほぼ、黒体化している。SEMによる測定では平均径10 μ の黒鉛粒の境界をうめ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が増加していた。損耗の状態を示すデータベースとして有効であると考えられる。

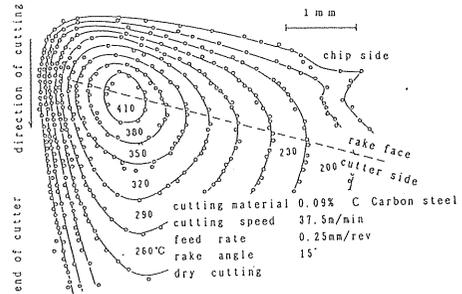


Fig. 11 Temperature distribution of a cutter and chip

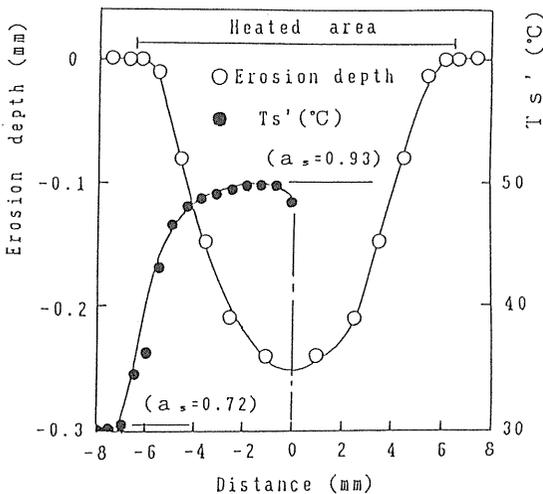


Fig. 10 The relation between beam erosion depth and T_s' , a_s of Graphite

5. 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。しかしながら、切削時の温度を測定するためには工具とセンサーの相対位置および切り屑の処置に対策を必要とする。前者に対しては、工具台と一体に赤外センサーを取付け、後者に対しては、チッププレーカーを取付けることにより、温度分布をとらえることが出来た。Fig. 11は、切削を開始してから約1分後の安定化した温度分布を示す。図示の切削条件のもとでは、工具と切り屑断面の温度は410°Cに達し、切削面発熱熱流束は約10³W/cm²であり、工具と切り屑への熱量配分は約1:4であることが計算および実験で確認された。⁸⁾

6. まとめ

赤外放射計のリモートセンシング計測の特色をいかし、常温附近での温度計測とその応用例について述べた。

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出率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り、均一な温度場の黒体壁により構成した放射場での測定を行うことにより映像の安定化をはかった。今後、 a_s 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られる。

参考文献

- 1) 日本写真計測学会；遠赤外線リモートセンシング(鹿島出版), 1989, 97
- 2) 岡本ほか4名；第3回産業における映像センシングシンポジウム, 3-6, P-69, 非破壊検査協会, 1988
- 3) Eckert E. Forsch. Geb. Ingn. 7, 1936, 265
- 4) Y. S. Touloukian, Thermophysical Properties of Matter University, 1972
- 5) 岡本ほか5名；機論, 55, 514A, No. 88-1407-B (1989), 1319
- 6) 岡本ほか6名；機論, 55, 514A, No. 88-1655-B (1989), 1324
- 7) 衛藤ほか；原子力学会年会,
- 8) 前川ほか；平成元年度精密工学会春期大会学術講演会論文集, (1989)