赤外線映像装置を利用した実用的温度計測に関する研究*

(第1報, 射度係数と放射温度の関係)

岡本 芳三^{*1}, 稲垣 照美^{*1}, 関谷 将三^{*2}

Surface Temperature Measurement Using Infrared Radiometer (1st Report, Radiosity Coefficient and Radiation Temperature)

Yoshizo OKAMOTO, Terumi INAGAKI and Masami SEKIYA

The visualizing technique using the infrared radiometer, which is useful in estimating a two-dimensional temperature distribution on a surface, has been attractive. Infrared radiometry is one of the most fundamental methods of various remote sensing techniques. In the measurement using the infrared radiometer, radiation energy is analyzed to determine surface radiation temperature. However, the radiosity of the surface, which is a summation of emissive and reflective energy should be considered in measuring surface radiation energy. In particular, the influence of reflective energy on radiation energy transfer becomes important when measurement is performed at the normal temperature. In this study, we clarified various fundamental characteristics of infrared radiometry by use of 3 kinds of the infrared radiometer to visualize temperature distribution on a surface.

Key Words: Radiosity Coefficient, Radiation Temperature, Infrared Radiometer, Temperature Measurement, Thermal Visualization

1. 緒 言

赤外線映像装置は、物体表面から放射される赤外放射エネルギーを遠隔非接触で捕らえ、二次元の熱画像として表示することを特色としている。そのため本手法は、機器構造物表面の温度や内部の欠陥等を広範囲に検知し、保守・管理するための有効な手段として広く利用されている。しかしながら赤外線映像装置で観測される放射エネルギーを温度に換算した放射温度画像には、物体表面より放射されるエネルギーのほかに、観測対象を取り巻く周辺の環境より入射し反射する放射エネルギーが加味されている。すなわち実際の測定では、構成各面間の多重反射の影響を無視することができず、実際の温度とCRT上に表示される放射温度との間に明らかな差異が生じる。このことは、常温付近での赤外線映像装置利用で特に問題となる^{(1)~(3)}。したがって赤外線によるさまざまな熱画像を解析するうえで、反射を含む放射率、射度係数、の物理的諸特性を詳細に把握しておくことが実用上重要である。また赤外線映像装置は、センサの種類によりその検出波

長域、感度および応答性などが異なることから、簡易測定手法の開発に向けてさまざまな検出波長域からの射度係数を考察する必要がある。

以上のことから本研究では、検出波長の異なる3種類のセンサを使用し、放射温度と射度係数の関係、波長依存性およびそれらのばらつきなどに関する灰色近似の適用性について検討した。

記 号

a : 周辺面
 a_s : 射度係数
 n : センサの指数
 S : 試験体表面
 T : 温度 K
 T_a : 周辺温度 K
 T_R : センサ温度 K
 T_s : 試料面温度 K
 T'_s : 試料面の放射温度 K
 T_{so} : 放射率より求めた放射温度 K
 Q_{bs} : 放射エネルギー W/m^2
 Q'_{bs} : 放射エネルギーの近似値 W/m^2
 Q_{bl} : 各波長の放射エネルギー W/m^3
 Q_{SR} : センサの受けるエネルギー W/m^2

* 原稿受付 平成5年3月22日。

^{*1} 正員, 茨城大学工学部 (〒316 日立市中成沢町4-12-1)。

^{*2} 茨城大学大学院。

R: センサ
 ギリシャ記号
 Δ : ばらつき
 δT_s : 放射温度差 K
 ϵ_s : 放射率(吸収率)
 λ : 波長 m
 ρ_s : 反射率
 σ : ステファン・ボルツマン定数 $W/(m^2 \cdot K^4)$
 ϕ_λ : センサの波長に対する検出感度 %

2. 赤外線映像装置の基本的特性

2.1 実験装置と測定法 赤外線映像装置の基本構成モデルおよび基本概念を図1に示す。物体表面より放射される放射エネルギーはゲルマニウム製窓を通して集光レンズで集光され、CRT上に二次元放射温度画像として表示される。ここで入力信号は、標準黒体炉により各走査線ごとに補正が行われている。また本赤外線映像は、試料と検出器間の距離が15 cmの場合、最小0.5 mm×0.5 mm内の面積平均放射温度を計測することができる。

測定の対象となる試料は、200 mm×200 mmのCCG, SiC, グラファイトおよびモルタルを用いた。測定は、試料表面の放射率が一定に保たれるよう機械加工し、表面に超音波洗浄を実施した。また計測温度範囲が常温付近のため、対象周辺や人体などからの放射の影響を極力低減させる必要がある。すなわち試料周辺が反射の影響を無視できる一定温度の黒体壁で囲まれる必要がある。したがって試料と赤外線映像装置全体を内側に黒体に近いベルベット布を取付けた暗幕で覆うとともに、試料とセンサの間に水槽に浸された角

すい形フードを取付けた。フード内面の見掛けの放射率は0.99以上であり、ほぼ黒体面と考えることができる。さらに試料表面は、つや消し黒色ペンキを塗布した。試料表面の真の温度は表面に取付けた直径 $\phi 100 \mu m$ のC-A熱電対を使用し、いずれの場合も熱平衡状態下(表面温度一定かつ定常状態)で測定した。なお赤外線映像装置のセンサ部は液体窒素で冷却されており、センサからの反射の影響を除去するため、試料表面は鉛直線に対して 15° 下方に傾けてある。

2.2 センサの基本的特性 いま一般化された体系を単純化するため、試験体Sの周辺が温度 T_a の黒体壁で囲まれている標準化された体系を考える。図1において、試料表面よりセンサRに入射するエネルギーは、周辺壁aより入射し試料表面Sで反射するものと試料表面から放射されるエネルギーの和、 Q_{SR} となる。試料は黒体壁で囲まれているため、周辺壁とセンサとの間の多重反射の影響を回避することができる。したがってS面よりR面に伝わる放射エネルギー Q_{SR} は、以下のようになる。

$$Q_{SR} = \sigma \epsilon_s (T_s^n - T_R^n) + \sigma \rho_s (T_a^n - T_R^n) \dots \dots \dots (1)$$

センサは液体窒素冷却されているため、通常 $T_s \gg T_R$, $T_a \gg T_R$ の関係が得られる。したがって式(1)は、

$$Q_{SR} = \sigma \epsilon_s T_s^n + \sigma \rho_s T_a^n = \sigma a_s T_s^n = \sigma T_s'^n \dots \dots \dots (2)$$

で表現し直される。 ϵ , ρ , a_s および T_s' は、それぞれ試料表面の放射率、反射率、射度係数および放射温度であり、 σ はステファン・ボルツマン定数である。

一般に赤外線放射エネルギーを検知するセンサには、2~13 μm の波長域内で所定の検出感度を有するものが使用される。ここでは、2~5 μm (In-Sb系)、6~9 μm (Hg-Cd-Te系)、8~13 μm (Hg-Cd-Te系)の波長域内で検出する3種類のセンサを利用し、試料表面の計測を行った。図2は、対象とした3種類の赤外線映像装置の波長に対する検出感度 ϕ および波長選択特性を現したものである。各センサは、波長域2~13 μm において数 μm 幅の選択波長を有し、それぞれの

図1 赤外線映像装置の基本構成

図2 赤外線センサの検出感度

特性波長域で山形の検出感度を示している。黒体から放出される赤外線エネルギーの強度と温度の関係は、プランクの法則から以下のように表される。

$$Q_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \{ \exp(C_2/\lambda T) - 1 \}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

$$C_2 = 1.439 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

図3は、式(3)を用いて、図2の波長選択特性から求めた各センサの試料温度 T_s に対する検出エネルギー Q_{bs} の分布を示したものである。すなわち $Q_{b\lambda} \Phi_\lambda$ を、各フィルタの特性波長域内で積分して求めたものである。図3中には、ステファン・ボルツマンの式、

$$Q_b = \sigma T^4 \quad \dots\dots\dots (4)$$

で記述される黒体からの放射エネルギーを併記した。図3から明らかなように試料温度 300 K では、波長の長い Hg-Cd-Te 系センサ (8~13 μm) から検出されるエネルギーが最も高く、続いて Hg-Cd-Te 系センサ (6~9 μm)、In-Sb 系センサ (2~5 μm) の検出能の順となる。一方 450 K の高温となると、短波長の In-Sb 系センサ (2~5 μm) の検出エネルギーが最大となり、次に Hg-Cd-Te 系センサ (8~13 μm)、Hg-Cd-Te 系センサ (6~9 μm) の順となる。次に 270~470 K の温度範囲で放射エネルギー Q_{bs} と温度 T_s とが対数表示されたとした前述の一次近似式 $Q'_{bs} = CT^n$ (C : 定数) を導入すると、放射エネルギーは以下のように表現される。すなわち Q'_{bs} は、各波長の放射計に対する最小二乗近似値である。

In-Sb 系センサ (2~5 μm):

$$Q'_{bs} = 1.15 \times 10^{-3} \times \sigma \times T_s^{8.68} \quad \dots\dots\dots (5)$$

Hg-Cd-Te 系センサ (6~9 μm):

$$Q'_{bs} = 5.17 \times 10^{-5} \times \sigma \times T_s^{5.33} \quad \dots\dots\dots (6)$$

Hg-Cd-Te 系センサ (8~13 μm):

$$Q'_{bs} = 0.135 \times \sigma \times T_s^{4.09} \quad \dots\dots\dots (7)$$

温度 T_s の指数 n は、それぞれの検出素子をもつ固有の値であり、検出波長が大きいほど小さくなる。

2.3 射度係数に関する理論的背景 一般に赤外線映像装置を利用して対象とする物体表面の放射エネルギーを測定しようとする場合には、屋内外の測定を問わず、実際の測定体系がきわめて複雑となり、体系の単純化を行うことがきわめて困難なものとなる。また周辺壁が黒体でない任意の放射率、反射率および吸収率をもつ素材で構成されている場合には、構成面の配置形状による角関係等複雑な多重反射作用を受け、真の温度とは異なる放射温度に関する情報を得ることになる。すなわち前述した反射を考慮に入れた射度係数に関する物理特性を明確にしておくとともに、真温度と放射温度の相関関係を把握しておく必要がある。

一般に非金属等では灰色近似の概念から以下の式が成り立つ。

$$\epsilon_s + \rho_s = 1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(2)より射度係数 a_s は、次のように表される。

$$a_s = \epsilon_s + \rho_s \cdot (T_a/T_s)^n = (T'_s/T_s)^n \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(8)および式(9)から放射率 ϵ_s は、次のように表される。

$$\epsilon_s = \frac{a_s - (T_a/T_s)^n}{1 - (T_a/T_s)^n} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(9)および式(10)から放射温度 T'_s は、以下で表される。

$$T'_s = T_s [\epsilon_s \{1 - (T_a/T_s)^n\} + (T_a/T_s)^n]^{1/n} \quad \dots\dots\dots (11)$$

また、式(9)に式(11)を代入することにより射度係数 a_s は次のように表される。

$$a_s = (T_a/T_s)^n + \epsilon_s \{1 - (T_a/T_s)^n\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

以上の式を用いることで射度係数、放射率および放射温度の関係を得ることができる。

3. 実験結果および考察

3.1 射度係数、放射率および放射温度 図4は、周辺温度 $T_a = 293 \text{ K}$ における式(11)から得られた試料表面温度 T_s と放射温度 T'_s の関係を表したものである。放射率 $\epsilon_s = 1$ の黒体表面では、反射の影響がないため実際の温度と放射温度が等しく $T_s = T'_s$ となる。図4から $T_a > 293 \text{ K}$ の場合、放射温度は、放射率の低下とともに低下することがわかる。また $\epsilon_s = 0.2$ では、反射の影響が強く現れるため、試料温度が増加

図3 センサの検出エネルギー分布

しても放射温度はそれほど増大しないことがわかる。図4には、モルタル、黒鉛および炭素繊維コンポジット (CCG) に関する測定値を示してある。図4から理論値は、実験値と良好に一致していることがわかる。次に図5は、周辺温度 $T_a=293\text{ K}$ における反射を考慮にいれた放射温度 T'_s と放射率より求めた放射温度 T_{so} との差 $\delta T'_s$ と周辺温度との関係を図示したものである。図5中の線群は、式(11)で表される理論線である。 $T_a>293\text{ K}$ では放射率が小さくなるほど反射の影響により温度差が増大し、逆に $T_a<293\text{ K}$ では T'_s より T_{so} のほうが高く見積もられてしまう逆転現象が生じる。すなわち射度係数が適正に評価されなくなると考えられる。また放射率が大きく黒体に近づくほど温度差 $\delta T'_s$ が小さくなり、反射の影響を無視することができる。

図6は、周辺温度が284, 293 Kおよび303 Kにおける黒鉛材料に対する射度係数 a_s および放射率 ϵ_s の実験値および計算値を示す。図6から射度係数は、試

料表面温度の増加とともに放射率に漸近していることがわかる。周辺温度と試料表面温度が等しい場合には、射度係数が1であり、反射の影響を無視することができる。さらに射度係数は、試料表面温度と周辺温度との差が大きくなるほど、反射の影響が加わり、大きく見積もられるようになる。また図6中黒印は、式(10)を用いて射度係数より求めた放射率に関する計算値である。得られた放射率は、 $T_s>313\text{ K}$ 程度において周辺温度のいかんにかかわらず0.69の一定値を示している。試料表面温度と周辺温度との差が20 K以下では、ばらつきすなわち周辺からの影響が増加する。したがって計測精度を維持するためには、試料表面温度を周辺温度より20 K程度高く保っておく必要があるといえる。なおこの放射率には、試料面垂直方向に対して 15° 傾斜した指向性がある。黒鉛材料の放射率は0.69であるが、これを式(10)に代入して得られた射度係数を図6中の実線に示す。計算値と実験値が良好に一致していることから、試料表面上で灰色近似および

図4 試料表面温度と放射温度

図6 黒鉛表面の温度と射度係数

図5 試料温度表面と放射温度差

図7 モルタル表面の放射率

完全散乱反射が成立することを示唆しているものと考えられる。図7は、一例としてモルタル表面の放射率を波長域の異なる各センサから求めたものである。放射率は、本温度範囲域でほぼ一定となる。試料表面の射度係数は、この結果を基に算出した。図8は、図6と同様な a_s - T_s 平面上にモルタルの実験値と計算値を併記したものである。一連の傾向は、図6と同様であり、実験値と計算値が良好に対応している。図9は、周辺温度 $T_a=293$ K における3種類のセンサが求めた射度係数であり、いずれのセンサでもほぼ同一の射度係数を求めることができる。

3.2 物理量の偏差に関する評価 一般に赤外線映像装置では、試料表面の射度係数を基にして見掛けの放射温度が決定される。しかしながら射度係数は、試料表面上に必ずしも一様に分布しているとは限らず、結果として求められる放射温度にも当然偏差が生じ得る。この原因としては、ミクロな表面性状、試料材料の成分・組成の不均一性、不均一な酸化皮膜、表面の

汚れや含有ガスの存在などが考えられる。また微少な温度差の現象を解析するに当たり、赤外線映像装置の検出分解能を評価しておくことも重要である。そこで本節では、射度係数や放射温度に付随する偏差について具体的に検討した⁽³⁾。

射度係数は、放射温度や放射率などを従属変数にもつため、ここではそれぞれの従属変数で射度係数を微分し、偏差を求めてみる。

$$\frac{\partial a_s}{\partial \epsilon_s} = 1 - (T_a/T_s)^n \quad \dots\dots\dots (13)$$

式(13)より放射率に関する偏差は、式(14)となる。

$$\Delta \epsilon_s = \frac{\Delta a_s}{1 - (T_a/T_s)^n} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{\partial a_s}{\partial T_s'} = n(T_s'/T_s)^{n-1}(1/T_s) \quad \dots\dots\dots (15)$$

式(15)より射度係数に関する偏差は、式(16)となる。

$$\Delta a_s = n(T_s'/T_s)^{n-1}(\Delta T_s'/T_s) \quad \dots\dots\dots (16)$$

式(16)に式(11)を代入し、整理すると、放射温度に関する偏差が式(17)で表現される。

$$\Delta T_s' = \frac{\Delta \epsilon_s \{1 - (T_a/T_s)^n\} T_s}{n \{ \epsilon_s + (1 - \epsilon_s)(T_a/T_s)^n \}^{(n-1)/n}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

偏差解析に当たり設定した条件は、試料表面温度 $T_s=313$ K および周辺温度 $T_a=293$ K であり、検査試料は、灰色近似の成立する材料である。計算にあたっては、実験から得られた放射率の値を適用した。図10は、射度に関する偏差を各試料表面温度とともに、理論・実験の両面から求めたものである。図10から実験値は、理論線式(16)と良好に対応していることがわかる。また表1は、求めた偏差の一覧である。本実験の範囲内では、それぞれの偏差は比較的小さいものと考えられる。また、理論上試料表面温度と周辺温度が等しいと、射度係数の偏差は零となる。また試料表面温度が大きくなるほど、放射率と放射係数の偏差が等し

図8 モルタル表面の温度と射度係数

図9 各センサにおけるモルタル表面の射度係数

図10 射度係数の偏差

表 1 放射物理量の偏差

T_s =293K	T_s (K)	In-Sb (2~5 μ m)			Hg-Cd-Te (6~9 μ m)			Hg-Cd-Te (8~13 μ m)		
		$\Delta \varepsilon_s$	Δa_s	$\Delta T_s' (%)$	$\Delta \varepsilon_s$	Δa_s	$\Delta T_s' (%)$	$\Delta \varepsilon_s$	Δa_s	$\Delta T_s' (%)$
Mortar	300	0.010 0.011	0.002 0.003	1.2	0.010 0.010	0.002 0.002	1.8	0.007 0.007	0.001 0.001	1.5
	340	0.012 0.016	0.008 0.010	1.0	0.007 0.007	0.004 0.004	1.1	0.008 0.008	0.004 0.003	1.6
	370	0.017 0.017	0.015 0.015	1.5	0.006 0.006	0.004 0.004	0.9	0.006 0.006	0.004 0.004	1.1
Graphite	300	0.022 0.022	0.005 0.006	3.2	0.024 0.023	0.004 0.004	5.4	0.013 0.012	0.001 0.001	3.5
	340	0.016 0.016	0.012 0.012	2.1	0.022 0.021	0.013 0.013	4.3	0.014 0.013	0.006 0.006	3.4
	370	0.022 0.022	0.019 0.019	2.6	0.021 0.021	0.015 0.015	4.0	0.014 0.014	0.008 0.009	3.4

くなる傾向にある。表1中上段は実験値, 下段は理論値である。

4. 結 言

本研究は, 検出波長の異なる3種類の赤外線センサを用いて赤外線映像装置の物理的諸特性を明らかにしたものである。灰色体近似の成立する各種材料について, 射度係数, 放射温度, 放射率およびそれらのばらつきに対する関係を評価した。その結果, 実験結果が

灰色近似理論と良好に一致することを示した。

今後は, さまざまな面から赤外線映像装置に付随する放射物理量の考察をさらに進め, 信頼性評価を含めた実用的な温度計測手法を確立する必要がある。

文 献

- (1) 岡本・ほか6名, 機論, 57-534, B(1991), 303.
- (2) 岡本・ほか4名, 機論, 57-544, B(1991), 270.
- (3) 岡本・ほか3名, サーモグラフィー法に関するコンファレンス, コンクリート工学(3), (1992), 9.