

黒体比較法によるふく射率測定の際の誤差の検討

金山 公夫*
馬場 弘*

(昭和47年9月30日受理)

Examination for the Errata in Measuring of the Emittances by a Blackbody Comparison Method

by Kimio KANAYAMA and Hiromu BABA

By measuring the total and monochromatic emittances of the solid surfaces, the effects of changing the experimental conditions on the emittances were calculated and the results were verified by the experiments.

As a result, it became clear that the obtained values of emittances were affected by the various conditions, and for indicating the emittance, therefore, except the operating conditions of the apparatus, the temperatures of specimen, detector and atmosphere have to be added.

1. ま え が き

固体表面のふく射に関する研究は、物理学において古くから多数の研究者¹⁾によって行なわれてきた。いま固体の物性として表面あらしに注目した場合、なめらかな平面およびあらしの微細な粗面に関する反射率あるいはふく射率の測定例としては応用物理の関係で多数見受けられ^{2)~7)}、あらしが広く分布した粗面の反射率あるいはふく射率の測定は、近年、工学においても取扱われ^{8)~17)}、固体粗面のふく射の問題は理学と工学の境界領域において追求され、発展しつつある。

これらの測定法を、物体のふく射率測定の立場から方法論的に分類すると、物体に標準光を照射して反射率を求めた後に間接的にふく射率を算出する便宜的な方法、物体の一部に口の小さな深い穴をうがって近似黒体としたものを加熱し、物体表面からのふく射と近似黒体からのふく射を比較して求める方法、およびあらかじめ黒体を用意しておいて、物体からのふく射と同温度の黒体からのふく射を比較する方法とになる¹⁸⁾。ここで著者らは、第一の方法を標準光反射法、第二の方法を近似黒体比較法および第三の方法を黒体比較法とよぶ。過去にふく射率測定に用いられた方法としては、第一の標準光反射法が多数を占め、第二、第三の方法の順に減少する。その理由として考えられることは、計測技術としての難易性、実験装置の規模と経

* 北見工業大学機械工学科

費および実験の目的と精度などがあげられる。標準光反射法は技術的には比較的容易で、装置の規模もさほど大きなものは要しないので、広く用いられてきたものとおもわれる。しかし、この方法は反射率測定を目的とする場合にはじめて本来の意味を有するが、ふく射率測定に用いるには原理的に不適當であり、あくまでも便法にしか過ぎない。これに対して黒体比較法では、とくに分光測定に際しては技術上の困難を伴い、装置も大がかりで高価なものを要するが、物体のふく射率の直接測定を目的とする場合には、本質的に黒体比較法によるべきものと考えられる。この問題に関しては、既に国内の研究者との討論を通じて著者らが主張してきた点である¹⁹⁾。また近似黒体比較法は基準値が近似黒体であることから、精度上問題があるものとおもわれる。

上述の論拠により、著者らが従来から行なってきたふく射率測定は、全ふく射あるいは分光ふく射のいかなを問わず、一貫して黒体比較法を採用してきた。しかしこの方法にも欠点があり、また実験条件のばらつきおよび変動などに起因した誤差がもたらされる。本報告はこれら諸点について、はじめに測定系に関してたてられた熱平衡式の数値解を得て、各影響因子に基づくふく射率測定値の誤差の予測をし、つぎに実測による比較、検討を行ない、さらに本測定法の短所などについてふれた。

2. ふく射率測定値の誤差計算

2.1 主な記号

V : 検知器出力 (μV)

T : 温度 $(^{\circ}K)$

E : ふく射エネルギー $(kcal/m^2 h)$

ΔA_1 : ふく射計感熱部面積 (m^2)

ΔA_2 : ふく射計よってのぞかれる試料面積 (m^2)

F_{12} : ふく射計から試料をみる形態係数

F_{21} : 試料からふく射計をみる形態係数

ε : ふく射率

α : 吸収率

λ : 波長 (μ)

K : ふく射計定数 $(kcal/m^2 h/\mu V)$

C_1 : 第一ふく射定数 $= 3.2179 \times 10^8$ $(kcal \mu^4/m^2 h)$

C_2 : 第二ふく射定数 $= 14388$ $(\mu^{\circ}K)$

σ : Stefan-Boltzmann 定数 $= 4.88 \times 10^{-8}$ $(kcal/m^2 h^{\circ}K^4)$

添 字

B : 黒体に関する値

S : 試料に関する値

D : 検知器に関する値

R : 室内条件に関する値

λ : 波長に関する単色値

2.2 室温と検知器温度の差によるふく射率値の誤差

2.2.1 全ふく射

試料のふく射率測定時のエネルギー平衡式は

$$\Delta A_1 K V_S = \sigma [\varepsilon_S T_S^4 + (1 - \varepsilon_S) T_R^4] F_{21} \Delta A_2 - \sigma T_D^4 F_{12} \Delta A_1 \quad (1)$$

ここで、左辺は検知器熱量出力、右辺第一項は試料からの射出熱量と周囲のふく射が試料で反射された熱量の和の検知器へ到達する成分、第二項は検知器からの射出熱量のうち試料に到達する成分をあらわす。

同様に、黒体炉による検知器校正時の平衡式は

$$\Delta A_1 K V_B = \sigma T_B^4 F_{21} \Delta A_2 - \sigma T_D^4 F_{12} \Delta A_1 \quad (2)$$

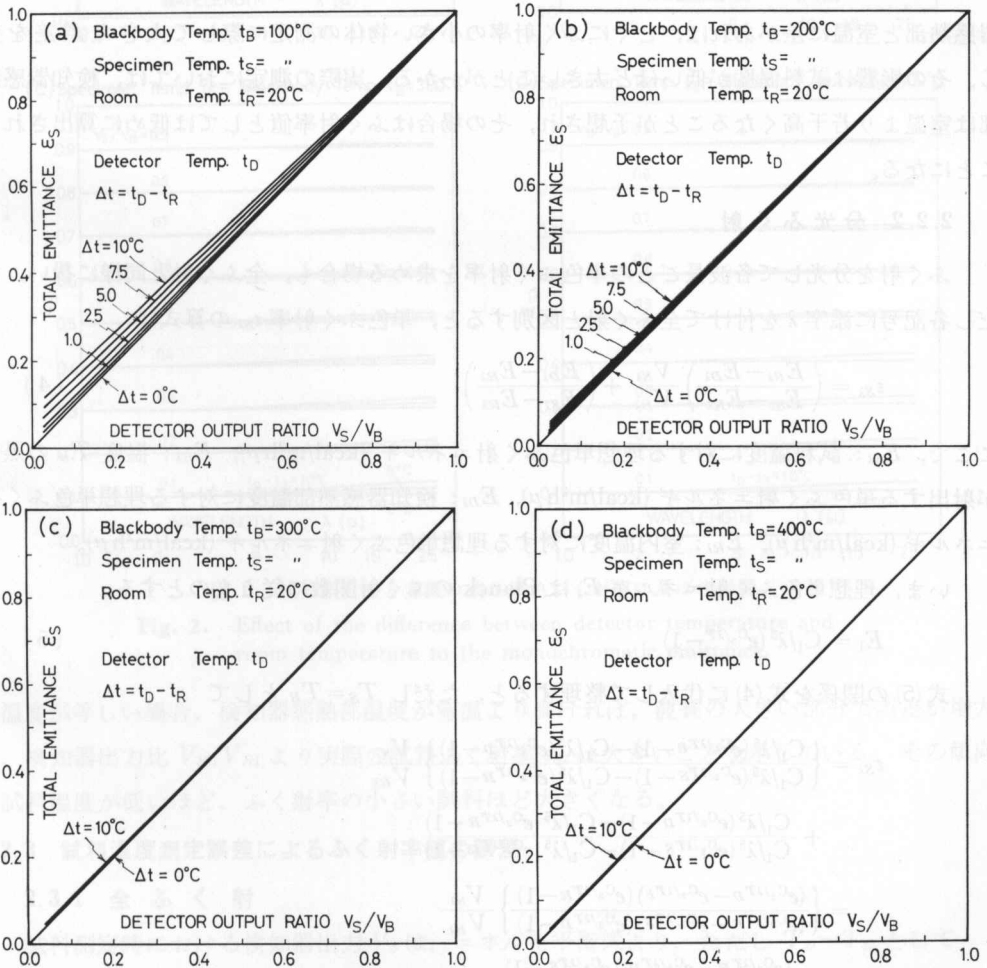


図1 検知器温度と室温の差が全ふく射率に及ぼす影響

Fig. 1. Effect of the difference between detector temperature and room temperature to the total emittance.

となる。相反定理 $F_{12}A_1 = F_{21}A_2$ を用い、式(1)を式(2)で割ると、

$$\frac{V_S}{V_B} = \frac{\varepsilon_S(T_S^4 - T_R^4) + T_R^4 - T_D^4}{T_B^4 - T_D^4}$$

ゆえに、実際の試料ふく射率は

$$\varepsilon_S = \left(\frac{T_B^4 - T_D^4}{T_S^4 - T_R^4} \right) \frac{V_S}{V_B} - \left(\frac{T_R^4 - T_D^4}{T_S^4 - T_R^4} \right) \quad (3)$$

となる。

黒体比較法の原理は V_S/V_B をもって試料ふく射率 ε_S とすることにあるから、式(3)で明らかなように、検知器温度と室温が等しい場合 ($T_D = T_R$) 以外は、ふく射率算出値に誤差を生じることになる。

式(3)に適宜に数値を与えて計算した結果を図1(a), (b), (c) および (d) に示す。図より検知器感熱部と室温に差があれば、とくにふく射率の小さい物体の測定に際して大きな誤差を生じ、その影響は試料温度が低いほど大きいことがわかる。実際の測定においては、検知器感熱部は室温より若干高くなることが予想され、その場合はふく射率値としては低めに算出されることになる。

2.2.2 分光ふく射

ふく射を分光して各波長ごとの単色ふく射率を求める場合も、全ふく射と同様に扱い、ただし各記号に添字 λ を付けて全ふく射と区別すると、単色ふく射率 $\varepsilon_{S\lambda}$ の算式は

$$\varepsilon_{S\lambda} = \left(\frac{E_{B\lambda} - E_{D\lambda}}{E_{S\lambda} - E_{R\lambda}} \right) \frac{V_{S\lambda}}{V_{B\lambda}} + \left(\frac{E_{D\lambda} - E_{R\lambda}}{E_{S\lambda} - E_{R\lambda}} \right) \quad (4)$$

ここで、 $E_{S\lambda}$: 試料温度に対する理想単色ふく射エネルギー ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}\mu$)、 $E_{B\lambda}$: 温度 T_B の黒体が射出する単色ふく射エネルギー ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}\mu$)、 $E_{D\lambda}$: 検知器感熱部温度に対する理想単色ふく射エネルギー ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}\mu$)、 $E_{R\lambda}$: 室内温度に対する理想単色ふく射エネルギー ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}\mu$)。

いま、理想単色ふく射エネルギー E_λ は Planck のふく射関数に従うものとする。

$$E_\lambda = C_1/\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1) \quad (5)$$

式(5)の関係を式(4)に代入して整理すると、ただし $T_S = T_B$ として

$$\begin{aligned} \varepsilon_{S\lambda} &= \left\{ \frac{C_1/\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T_B} - 1) - C_1/\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T_D} - 1)}{C_1/\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T_S} - 1) - C_1/\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T_R} - 1)} \right\} \frac{V_{S\lambda}}{V_{B\lambda}} \\ &+ \frac{C_1/\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T_D} - 1) - C_1/\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T_R} - 1)}{C_1/\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T_S} - 1) - C_1/\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T_R} - 1)} \\ &= \left\{ \frac{(e^{C_2/\lambda T_D} - e^{C_2/\lambda T_S}) (e^{C_2/\lambda T_R} - 1)}{(e^{C_2/\lambda T_R} - e^{C_2/\lambda T_S}) (e^{C_2/\lambda T_D} - 1)} \right\} \frac{V_{S\lambda}}{V_{B\lambda}} \\ &+ \frac{(e^{C_2/\lambda T_R} - e^{C_2/\lambda T_D}) (e^{C_2/\lambda T_S} - 1)}{(e^{C_2/\lambda T_R} - e^{C_2/\lambda T_S}) (e^{C_2/\lambda T_D} - 1)} \quad (6) \end{aligned}$$

式(6)による計算結果を図2(a), (b), (c) および (d) に示す。これらの図から、試料温度と黒

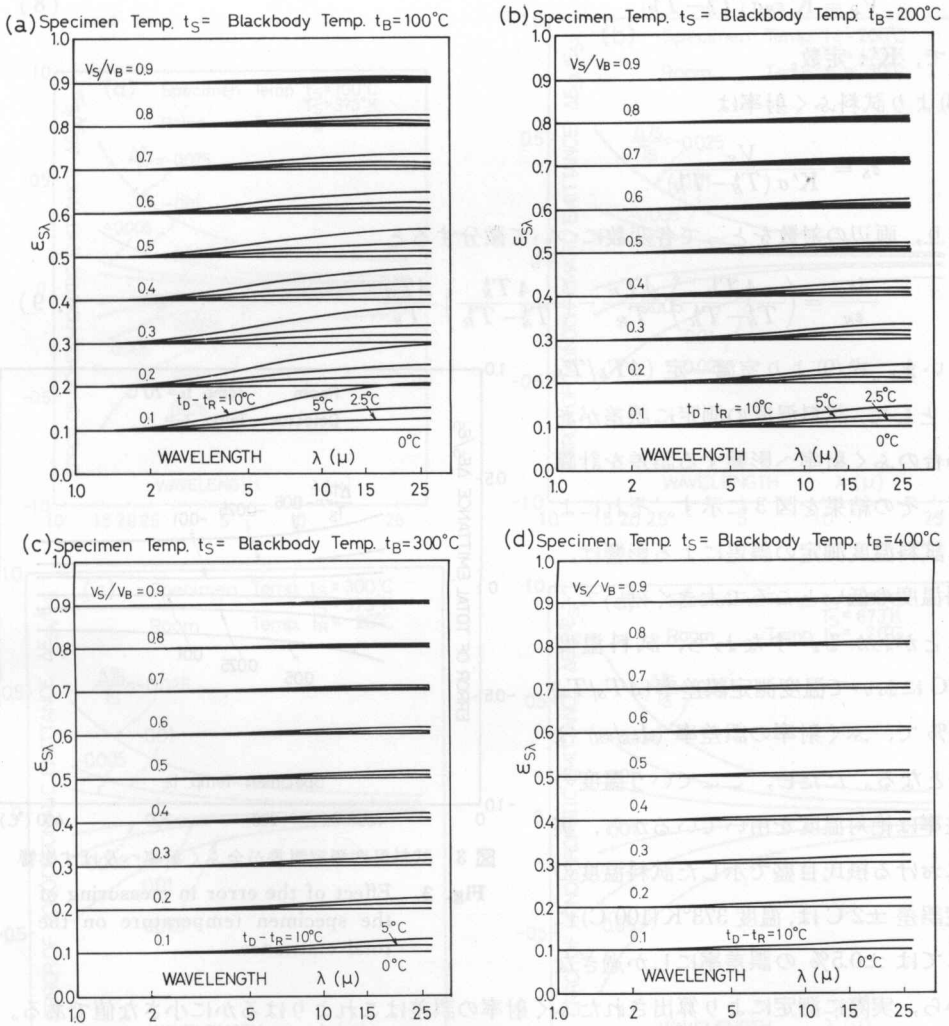


図 2 検知器温度と室温の差が単色ふく射率に及ぼす影響

Fig. 2. Effect of the difference between detector temperature and room temperature to the monochromatic emittance.

体温度が等しい場合、検知器感熱部温度が室温より高ければ、波長の大きい部分で誤差が増大し、検知器出力比 V_S/V_B より実際の試料ふく射率 $\epsilon_{S\lambda}$ は大きいことを示している。その傾向は試料温度が低いほど、ふく射率の小さい試料ほど大きくなる。

2.3 試料温度測定誤差によるふく射率値の誤差

2.3.1 全ふく射

試料測定時における検知器出力 V_S は、エネルギー平衡式より、ただし $T_D = T_R$ として

$$\Delta A_1 K V_S = \epsilon_S \sigma T_S^4 F_{21} \Delta A_2 - \alpha_S \sigma T_R^4 F_{12} \Delta A_1 \quad (7)$$

ここで、 α_S : 試料吸収率 ($=\epsilon_S$)。相反定理を用いて式(7)を簡略化して

$$V_S = K' \epsilon_S \sigma (T_S^4 - T_R^4) \tag{8}$$

ここで、 K' : 定数。

式(8)より試料ふく射率は

$$\epsilon_S = \frac{V_S}{K' \sigma (T_S^4 - T_R^4)}$$

となり、両辺の対数をとって各変数について微分すると

$$\frac{\Delta \epsilon_S}{\epsilon_S} = \left(\frac{4 T_R^4}{T_S^4 - T_R^4} \right) \frac{\Delta T_R}{T_R} - \left(\frac{4 T_S^4}{T_S^4 - T_R^4} \right) \frac{\Delta T_S}{T_S} \tag{9}$$

いま、式(9)より室温一定 ($\Delta T_R/T_R = 0$) として、試料温度の測定に誤差がある場合のふく射率へ影響する誤差を計算して、その結果を図3に示す。それによると試料温度測定の誤差による影響は、試料温度の低いところで大きく効いてくることがわかる。すなわち、試料温度100°Cにおいて温度測定誤差率($\Delta T_S/T_S$)が1%で、ふく射率の誤差率($\Delta \epsilon_S/\epsilon_S$)は5%となる。ただし、ここでいう温度の誤差率は絶対温度を用いているから、実際における摂氏目盛で示した試料温度の測定誤差 $\pm 2^\circ\text{C}$ は、温度373°K(100°C)に対しては $\pm 0.5\%$ の誤差率にしか過ぎないから、実際に測定により算出されたふく射率の誤差はこれよりはるかに小さな値である。

2.3.2 分光ふく射

全ふく射における式(8)に相当する分光ふく射の式は、同様にエネルギー平衡より

$$V_{S\lambda} = K'' \epsilon_{S\lambda} \left(\frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T_S} - 1} - \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T_R} - 1} \right) \tag{10}$$

式(10)の両辺の対数をとって、各変数について微分して整理すると

$$\frac{\Delta \epsilon_{S\lambda}}{\epsilon_{S\lambda}} = \left\{ \frac{e^{C_2/\lambda T_S} - 1}{(e^{C_2/\lambda T_R} - 1)(e^{C_2/\lambda T_S} - e^{C_2/\lambda T_R})} \frac{C_2}{\lambda T_R} e^{C_2/\lambda T_R} \right\} \frac{\Delta T_R}{T_R} - \left\{ \frac{e^{C_2/\lambda T_R} - 1}{(e^{C_2/\lambda T_S} - 1)(e^{C_2/\lambda T_R} - e^{C_2/\lambda T_S})} \frac{C_2}{\lambda T_S} e^{C_2/\lambda T_S} \right\} \frac{\Delta T_S}{T_S} \tag{11}$$

式(11)より室温一定 ($\Delta T_R/T_R = 0$) として、試料温度の測定に誤差があるとき単色ふく射率へ影響する誤差を計算して、その結果を図4(a), (b), (c) および (d) に示す。試料温度測定誤差

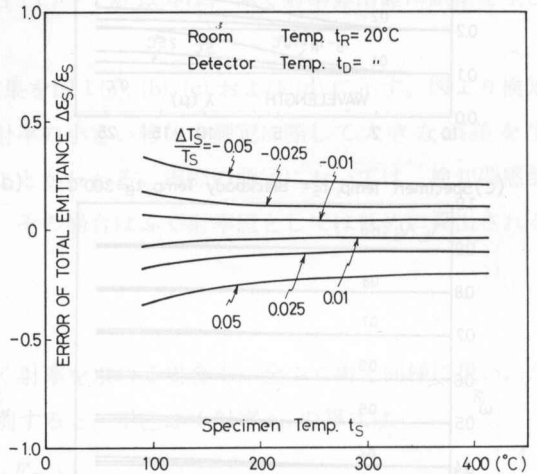


図3 試料温度測定誤差が全ふく射率へ及ぼす影響
Fig. 3. Effect of the error in measuring of the specimen temperature on the total emittance.

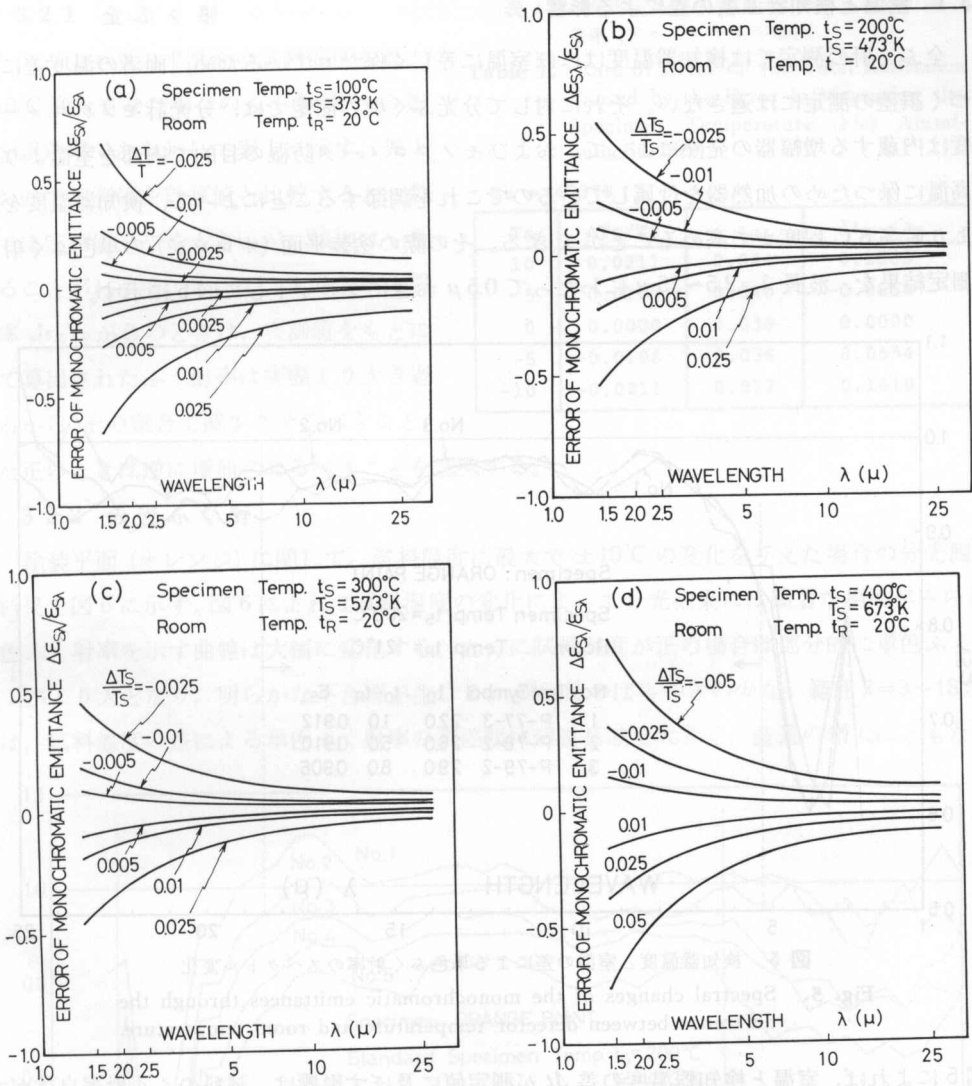


図 4 試料温度測定誤差が単色ふく射率に及ぼす影響

Fig. 4. Effect of the error in measuring of the specimen temperature on the monochromatic emittance.

の単色ふく射率値への影響は短波長域において大きくなり、とくに試料温度の低いときに著しいことから、試料温度の測定には十分正確を期さなければならない。なお、この場合も温度測定誤差は絶対温度について示されているゆえ、実測時の温度測定誤差の最大値は $\pm 0.5\%$ である。

3. ふく射率誤差の測定

ふく射率測定の際の誤差および誤差率の計算結果の妥当性を確かめるために、意識的に実験条件を変化させて、二、三の測定を試みた。

3.1 室温と検知器温度の差による影響

全ふく射の測定では検知器温度はほぼ室温に等しく保たれているため、両者の温度差にもとづく誤差の測定には適さない。それに対して分光ふく射の測定では、分光計モノクロメータ温度は内蔵する増幅器の発熱によって、およびモノクロメータ防湿の目的で内部を室温より若干高温に保つための加熱器を付属しているのをこれを調節することによって、検知器温度を室温より最高 8°C 程度まで高めることができる。その際の塗装平面（オレンジ）の単色ふく射率の測定結果を、波長 $\lambda=2.5\sim 25\mu$ にわたって 0.5μ おきにプロットして図5に示す。

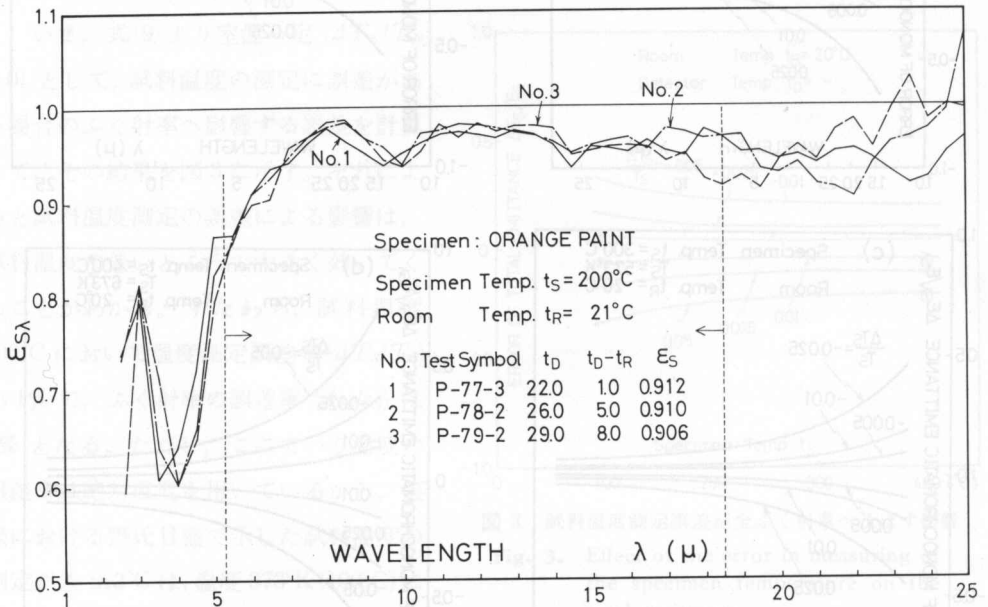


図5 検知器温度と室温の差による単色ふく射率のスペクトル変化

Fig. 5. Spectral changes of the monochromatic emittances through the difference between detector temperature and room temperature.

図5によれば、室温と検知器温度の差 Δt が測定値に及ぼす影響は、試料のふく射率自体が大きいこと程顕著にあらわれない。エネルギー絶対量が僅少なために比較的測定値のばらつきをのぞいて、波長 $\lambda=5.5\sim 18.5\mu$ では、図2(b)に示す計算結果と類似の傾向がみられ、波長の増加にともなって、各曲線の広がりが大きくなっている。また分光ふく射の積分で得られた全ふく射率値もあまり変化はみられないが、 Δt の増大にともなって僅かに減少する。この傾向は図1(b)の計算結果とも合致する。

3.2 試料温度測定誤差による影響

試料の基準温度を 200°C に設定して、あえて試料温度に差を与えた場合、全ふく射と分光ふく射の両方についてふく射率の測定誤差を実測した。

3.2.1 全ふく射

アルミニウム平滑面の試料温度を最大 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 変化させた場合のふく射率への影響を誤差率であらわして表1に示す。表1において実測値を計算値と比較すると、数値では実測値がやや大きい、傾向は一致することがわかる。ここで、ふく射率の誤差率 $\Delta\epsilon_s/\epsilon_s$ が負のときは、実測値をもとにして算出されたふく射率は実際より大き過ぎるから、その割合で減少させるべきこと、また正のときは逆に増加させるべきことを意味する。

表1 試料温度測定誤差による全ふく射率の誤差率 (アルミニウム平滑面)

Table 1. Rate of Error on the Total Emittance Caused by the Error in Measuring the Specimen Temperature (Flat Aluminum Surface)

Ts = 473°K			
Ts	$\Delta T_s/T_s$	ϵ_s	$\Delta\epsilon_s/\epsilon_s$
10	0.0211	0.044	-0.1583
5	0.0106	0.040	-0.0660
0	0.0000	0.038	0.0000
-5	-0.0106	0.036	0.0554
-10	-0.0211	0.032	0.1610

3.2.2 分光ふく射

塗装平面 (オレンジ) に関して、試料温度に最大で $\pm 10^{\circ}\text{C}$ の変化を与えた場合の分光測定の結果を図6に示す。図6によれば試料温度の変化によって分光結果には顕著な相違がみられ、単色ふく射率を示す曲線は大幅に変化する。とくに試料温度が正の場合は部分的に単色ふく射率1がより大となり、明らかな不合理が生じる。測定値のばらつきの少ない範囲 $\lambda=3\sim 18.5\mu$ では、試料温度の差による単色ふく射率の誤差幅は短波長域で大きく、波長の増大にともなっ

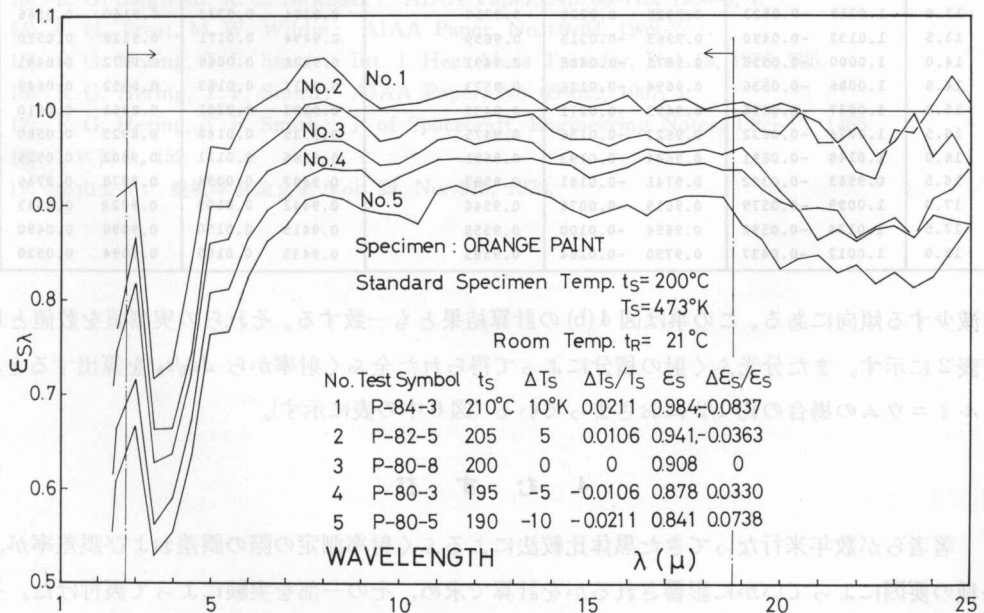


図6 試料温度測定誤差による単色ふく射率のスペクトル変化

Fig. 6. Spectral changes of the monochromatic emittances by the error in measuring of the specimen temperature.

表2 試料温度測定誤差による単色ふく射率の誤差率
(塗装平面: オレンジ)

Table 2. Rate of Error on the Monochromatic Emittance Caused by the Error in Measuring of the Specimen Temperature (Paint Coated Surface)

TEST SYMBOL	P - 84 - 3		P - 82 - 5		P - 80 - 8		P - 80 - 3		P - 80 - 5	
WAVE LENGTH	$\Delta T_s = 10$ $\Delta T_s/T_s = 0.0211$		$\Delta T_s = 5$ $\Delta T_s/T_s = 0.0106$		$\Delta T_s = 0$ $\Delta T_s/T_s = 0.0000$		$\Delta T_s = -5$ $\Delta T_s/T_s = -0.0106$		$\Delta T_s = -10$ $\Delta T_s/T_s = -0.0211$	
λ (μ)	$\epsilon_{s\lambda}$	$\Delta\epsilon_{s\lambda}/\epsilon_{s\lambda}$	$\epsilon_{s\lambda}$	$\Delta\epsilon_{s\lambda}/\epsilon_{s\lambda}$	$\epsilon_{s\lambda}$	$\Delta\epsilon_{s\lambda}/\epsilon_{s\lambda}$	$\epsilon_{s\lambda}$	$\Delta\epsilon_{s\lambda}/\epsilon_{s\lambda}$	$\epsilon_{s\lambda}$	$\Delta\epsilon_{s\lambda}/\epsilon_{s\lambda}$
3.0	0.9250	-0.1313	0.8661	-0.0593	0.8176	0.0000	0.7158	0.1245	0.6674	0.1837
3.5	0.7166	-0.1430	0.6623	-0.0564	0.6269		0.5609	0.1056	0.5288	0.1565
4.0	0.7328	-0.1503	0.6631	-0.0409	0.6370		0.5895	0.0746	0.5529	0.1320
4.5	0.8400	-0.1712	0.7420	-0.0345	0.7172		0.6723	0.0626	0.6347	0.1150
5.0	0.9620	-0.1196	0.8979	-0.0450	0.8592		0.8070	0.0608	0.7633	0.1116
5.5	0.9593	-0.1106	0.8975	-0.0390	0.8638		0.8110	0.0611	0.7656	0.1137
6.0	1.0011	-0.1009	0.9499	-0.0444	0.9095		0.8643	0.0497	0.8227	0.0954
6.5	1.0130	-0.0830	0.9656	-0.0323	0.9354		0.8928	0.0455	0.8611	0.0794
7.0	1.0248	-0.0857	0.9810	-0.0393	0.9439		0.9074	0.0387	0.8769	0.0710
7.5	1.0524	-0.0925	1.0059	-0.0442	0.9633		0.9291	0.0355	0.9035	0.0621
8.0	1.0545	-0.0891	1.0094	-0.0426	0.9682		0.9376	0.0319	0.9095	0.0602
8.5	1.0370	-0.0728	1.0023	-0.0369	0.9666		0.9358	0.0319	0.9061	0.0626
9.0	1.0155	-0.0619	0.9868	-0.0319	0.9563		0.9363	0.0209	0.8951	0.0640
9.5	1.0024	-0.0639	0.9667	-0.0260	0.9422		0.9184	0.0258	0.8908	0.0546
10.0	1.0060	-0.0660	0.9713	-0.0292	0.9437		0.9287	0.0159	0.8887	0.0583
10.5	1.0083	-0.0557	0.9868	-0.0332	0.9551		0.9376	0.0183	0.9002	0.0575
11.0	1.0143	-0.0484	0.9893	-0.0225	0.9675		0.9475	0.0207	0.9138	0.0555
11.5	1.0203	-0.0493	0.9905	-0.0186	0.9724		0.9429	0.0303	0.9199	0.0540
12.0	1.0204	-0.0587	0.9928	-0.0301	0.9638		0.9477	0.0167	0.9115	0.0543
12.5	1.0119	-0.0448	0.9952	-0.0268	0.9685		0.9472	0.0220	0.9196	0.0505
13.0	1.0218	-0.0523	0.9928	-0.0225	0.9710		0.9484	0.0233	0.9160	0.0566
13.5	1.0132	-0.0490	0.9963	-0.0315	0.9659		0.9494	0.0171	0.9128	0.0550
14.0	1.0000	-0.0536	0.9878	-0.0408	0.9491		0.9428	0.0066	0.9072	0.0441
14.5	1.0086	-0.0536	0.9694	-0.0126	0.9573		0.9417	0.0163	0.8952	0.0649
15.0	1.0037	-0.0636	0.9693	-0.0271	0.9437		0.9283	0.0201	0.8861	0.0610
15.5	1.0074	-0.0632	0.9623	-0.0156	0.9475		0.9335	0.0148	0.8925	0.0580
16.0	1.0148	-0.0681	0.9684	-0.0193	0.9501		0.9386	0.0121	0.9002	0.0525
16.5	0.9963	-0.0392	0.9741	-0.0161	0.9587		0.9497	0.0094	0.8878	0.0740
17.0	1.0099	-0.0579	0.9619	-0.0076	0.9546		0.9442	0.0109	0.9028	0.0543
17.5	1.0124	-0.0592	0.9654	-0.0100	0.9558		0.9415	0.0150	0.9090	0.0490
18.0	1.0012	-0.0437	0.9750	-0.0164	0.9593		0.9435	0.0165	0.9094	0.0520

て減少する傾向にある。この事は図4(b)の計算結果とも一致する。それらの実測値を数値として表2に示す。また分光ふく射の積分によって得られた全ふく射率から $\Delta\epsilon_s/\epsilon_s$ を算出すると、アルミニウムの場合の約1/2におさまっている(図6中の表に示す)。

4. む す び

著者らが数年来行なってきた黒体比較法によるふく射率測定の際の誤差および誤差率が、各種の要因によっていかに影響されるかを計算で求め、その一部を実験によって裏付けた。その結果、計算値と実測値とは傾向および数値としてよい一致が得られ、その事はまた実験条件によって異なった結果になることを意味する。すなわち、ふく射率測定は試料温度、検知器温度、室温および湿度などの実験条件を長時間にわたり一定に保持して行なうことが肝要で、そ

の際得られたふく射率を表示するにあたっては、必ず実験条件を付さなければならない。この事は、他の測定法によるふく射率または反射率測定においても同様とおもわれる。

このほか黒体比較法の欠点をあげるならば、とくに分光測定の際に試料からのふく射エネルギーが小さくなると分光計の性能上誤差が増大することで、極端にエネルギーが僅少の場合にはこれを感じ得ず、その結果ふく射率は見かけ上0となることがある。その実例は金属平滑面の単色ふく射率が短波長域および長波長域で0を示すことである。しかし、これら両域ではふく射エネルギーはきわめて微弱であるから、熱量的にはそれによる影響はほとんどない。

文 献

- 1) S. Flügge: Encyclopedia of Physics (1958), 145-156, Julius Springer.
- 2) V. R. Hase: Zeitsch. f. Techn. Physik, Nr. 3, 1932, 145.
- 3) A. F. Gorton: Phys. Rev. Vol. 7, No. 1, Ser. 2, 1913, 66.
- 4) H. E. Bennett, J. O. Porteus: J. of Optical Society of Am., Vol. 51, No. 2, 1961-2, 123.
- 5) J. T. Agnew, R. B. MacQuistan: J. of Optical Society of Am., Vol. 43, No. 11, 1953-11, 999.
- 6) A. R. Gordou, G. F. Muchik: Teplofizika Vysokiph Temperature, Vol. 2, No. 4, 505.
- 7) J. C. Richmond: J. of Optical Society of Am., Vol. 56, No. 2, 1966-2, 253.
- 8) N. W. Snyder, K. T. Gier, R. V. Dukle: J. of Heat Transfer, 1955-10, 1012.
- 9) D. A. Seban: J. of Heat Transfer, 1965-5, 173.
- 10) D. K. Edwards: J. of Heat Transfer, 1969-2, 1.
- 11) R. E. Rolling: Instrument Society of Am., 1967-9, 1.
- 12) R. E. Gannon, B. Linder: J. of Am. Ceramic Society, Vol. 47, No. 11, 592.
- 13) R. G. Siegfried, R. C. Birkebak: AIAA Paper, No. 68-778, 1968-6, 1.
- 14) C. H. Treat, M. W. Wildin: AIAA Paper, No. 69-64, 1969-2, 1.
- 15) R. G. Hering, T. F. Smith: Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 13, 1970, 725.
- 16) R. G. Hering, T. F. Smith: AIAA Paper, No. 69-622, 1967, 1.
- 17) R. G. Hering, T. F. Smith: J. of Spacecraft, Engineering Notes, 1969-12, 1465.
- 18) 1)と同じ, 152.
- 19) 金山公夫: 機械学会論文集 Vol. 39, No. 319, 1973.