

簡易放射率計による測定値の系統的誤差とその補正

Systematic Error of a Handy Emittance-meter and its Compensation

山 東 睦 夫*
Mutsuo SANDO

野 口 哲 男**
Tetsuo NOGUCHI

Abstract

The emittance value (ϵ_m) obtained by the emittance-meter of D & S company is systematically affected by the temperature of sample plate (T_s) and that of sensor surface (T_d). Reproducibility of measured value under the same T_s and T_d is very high, for example, the precision of ϵ_m is about 0.004 for a black painted plate of $\epsilon_s=0.93$, and that for an Al plate of $\epsilon_s=0.07$ is about 0.001.

The temperature T_d varies according to the change of sample emittance (ϵ_s). It is probable for the selective surface that the sample emittance ($\epsilon_s(T_s)$) at T_s is different from $\epsilon_s(T_d)$. Such difference of emittance causes the change of ϵ_m , since the radiation absorbed by the sample plate depends on $\epsilon_s(T_d)$ and the radiation emitted by the plate depends on $\epsilon_s(T_s)$. Therefore the obtained value ϵ_m contains some systematic error.

The relation between the value ϵ_m and the temperature T_s varies according to the ratio R of $\epsilon_s(30^\circ\text{C}) / \epsilon_s(85^\circ\text{C})$, even for the same $\epsilon_s(T_d)$ value. Comparing the experimentally obtained ϵ_m-T_s relation with the theoretically calculated $\epsilon_m(T_s)/\epsilon_m(T_s=30^\circ\text{C})-T_s$ chart, the ratio R can be known within the error of ± 0.05 , assuming that the $\epsilon_s(T)$ varies linearly with T under the considered temperature range. By using the calculated chart among $\epsilon_s(85^\circ\text{C})$, $\epsilon_m(T_s=30^\circ\text{C})$, and R , the value $\epsilon_s(85^\circ\text{C})$ can be estimated within the error of ± 0.02 for $\epsilon_s=0.1$ to 0.25 , excluding the systematic error caused by the error of emittance value given to the standard sample.

1. ま え が き

太陽集熱器の集熱板の放射率は集熱特性を決定する重要なパラメータの一つであり、従来、その放射率値は高価な分光装置やカロリメータを用いてしかも複雑な計算を経て求められて来た¹⁻⁴⁾。近年開発された D & S Model A E 簡易放射率計は、取扱いが簡単であり、また測定値の再現性が高いため、選択吸収面製造工程における品質管理のような分野でも広く使用されている。従って、この簡易放射率計による測定値がどの程度の誤差を持つか知ることは重要である。

簡易放射率計のセンサ部の断面及び計測部の表面を図 1 に示す。センサの計測部は半導体ヒータにより加熱されており、その検知部の表面は高放射率の黒色塗装部と低放射率のアルミ箔部から成っている。

アルミ製ヒートシンク上に設置した試料の上に加熱されたセンサを置いた時、検知部の二つの部分から熱放射により試料に伝達される熱量は、検知部の二つの部分の放射率と試料放射率に依存する。このため、検知部の二つの部分の間に温差ができ、これら二つの部分に取付けられている熱電対列から出力される電圧を求めることによって試料放射率の測定が行われる。次の四つの仮定のもとでは、検知部の二つの部分の温度

差が試料放射率に比例する^{5,6)}。

- 1) 計測部の表面温度が一樣で一定である。
- 2) 検知部の面積が十分小さい。
- 3) 試料の放射率が温度依存性を持たない。
- 4) 試料温度が一定である。

よって、実際の試料放射率の測定では、被測定試料に対するセンサ出力 P を、装置に付属している二つの標準試料（アルミニウム板 $\epsilon_s=0.04$ 、黒色塗装板 $\epsilon_s=0.93$ ）に対するセンサ出力 (P_A, P_B) と比較することにより、放射率の測定値 ϵ_m を求めている。

$$\epsilon_m = 0.89(P - P_A) / (P_B - P_A) + 0.04 \dots (1)$$

従来、前述の四つの仮定を検証することなしに、簡易装置と信頼性の高い大型装置とによる測定値を比較することによって、簡易放射率計の精度が議論されて来た⁶⁾。しかしながら、センサ表面の温度分布は写真 1 に示すように一樣ではない。また、検知部の温度は試料の温度や放射率によって規則的な変化をする。さらに、選択吸収面の放射率は、代表的なセンサ表面温

* 名古屋工業技術試験所第 5 部第 3 課
Solar Research Laboratory, Government
Industrial Research Institute, Nagoya

** 名古屋工業技術試験所第 5 部第 3 課 課長
Solar Research Laboratory, Government
Industrial Research Institute, Nagoya, Chief

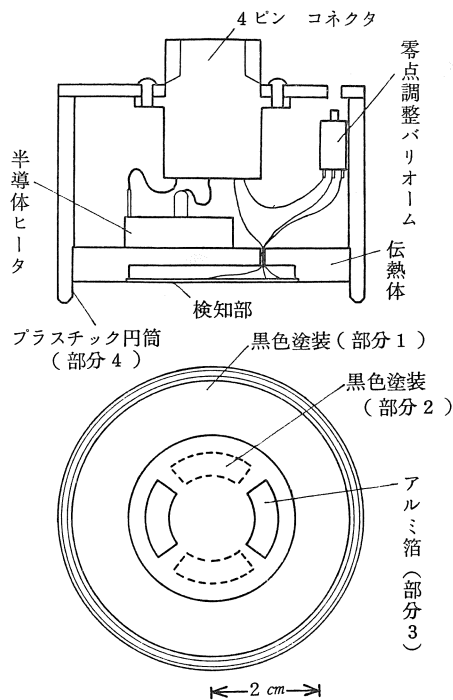


図 1 放射率センサの構造

度 (85°C) と試料温度 (30°C) の間であっても、温度依存性を持つ。

本報告では、この簡易放射率計による測定値に対して、センサの温度、試料の温度及び放射率の温度依存性が及ぼす系統的誤差 (Systematic Error) 及びその補正法について述べる。

2. 記 号

A_i ; センサ表面の部分 i の面積 [m^2] ($i=1, 2, 3, 4$)

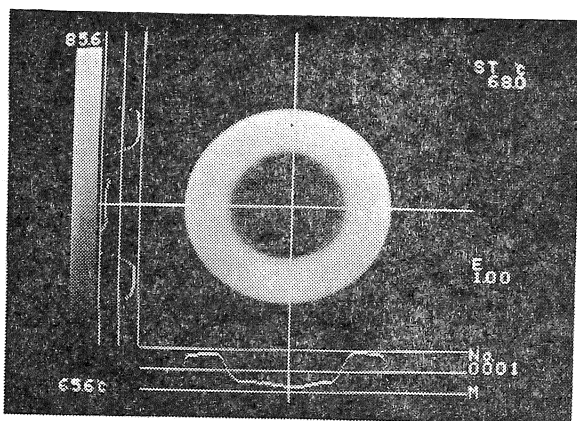


写真 1 センサ表面の温度分布
($T_1=85.6^\circ\text{C}$, $T_c=68.0^\circ\text{C}$, $T_m=71.2^\circ\text{C}$)

A_s ; 試料のセンサと向い合う部分の面積 [m^2]
 D ; センサ表面と試料の距離 [m]

F_{i-j} ; 部分 i と j の形態係数 ($i, j=1, \dots, 4, 1', \dots, 4', s$). 但し $1', \dots, 4'$ は部分 $1, \dots, 4$ の試料 (s) による鏡像

H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 ; ヒータ・伝熱体, 伝熱体・部分 2, 伝熱体・部分 3, 部分 2・部分 3, 及び部分 4 を通る伝熱体・試料の間の熱伝達係数 [W/K]

H_D ; 伝熱体・検知部の間の熱伝達係数 [W/K]

k ; 空気の 0°C における熱伝導係数 [$2.41 \times 10^{-2} \text{ W/Km}$]⁷⁾

P, P' ; センサ出力, 補正されたセンサ出力 [mV]

P_A, P_B ; 標準アルミ板, 標準黒色塗装板に対するセンサ出力

Q_{Ci} ; 部分 i から試料への空気の熱伝導による熱伝達量 [W] ($i=1, 2, 3$)

Q_{Ei} ; 部分 i が放射するエネルギー量 [W] ($i=1, 2, 3, 4$)

Q_{Ii} ; 部分 i に入射する放射のエネルギー量 [W] ($i=1, 2, 3, 4$)

Q_{Oi} ; 部分 i が放射及び反射する放射のエネルギー量 [W] ($i=1, 2, 3, 4$)

Q_{Ri} ; 部分 i が放射熱伝達により失うエネルギー量 [W] ($i=1, 2, 3, 4$)

Q_{Li} ; 部分 i が空気の熱伝導及び放射熱伝達により失うエネルギー量 [W] ($i=1, 2, 3$)

R ; 試料の放射率の温度依存性を表すパラメータ $\varepsilon_s(30^\circ\text{C})/\varepsilon_s(85^\circ\text{C})$

T_o ; 半導体ヒータの仮想的な温度 [K]

T_i ; 部分 i の温度 [K] ($i=1, 2, 3, 4$)

T_c, T_H, T_s ; 検知部の中央部, ヒートシンク, 及び試料の温度 [K]

T_{At} ; 部分 3 が放射及び反射する放射のスペクトル温度 [K]

T_m ; 面積平均された検知部の温度 [K]

α ; $0^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ の空気の熱伝導係数の平均温度係数 $3.2 \times 10^{-3} [\text{K}^{-1}]$ ⁷⁾

ΔT ; 理論計算されたセンサ表面の部分 2 と 3 の温度差 [K]

$\Delta T_A, \Delta T_B$; 標準アルミ板, 及び標準黒色塗装板に対して理論計算された部分 2 と 3 の温度差 [K]

ε_i ; 部分 i の放射率 ($i=1, 2, 3, 4$)

ε_D ; 検知部の全体としての放射率

ε_m ; 放射率の測定値

ε_n ; 垂直方向全放射率

$\varepsilon_s(T)$; スペクトル温度が T である放射に対する試料の半球全放射率

σ ; ステファン・ボルツマン定数

3. センサ出力の理論計算

3. 1 センサの熱回路モデル

図1に示したセンサの構造に基づいて組立てた単純化されたセンサの熱回路モデルを図2に示す。ここでは、センサの表面を黒色塗装された伝熱体の表面(部分1), 検知部の黒色塗装部(2), 検知部のアルミ箔部(3), 及び試料と計測部の間の空間を囲むプラスチック製円筒(4)の四つの部分に分類した。

温度が低下すると出力が増加し, 温度が上昇すると出力が減少する半導体ヒータの出力特性は, 実際のヒータの温度より少し高い仮想的なヒータ温度 T_0 と実際のヒータ・伝熱体の間の熱伝達係数より少し小さい仮想的な熱伝達係数 H_1 を用いて近似的に記述することができる。また, 温度 $T_1 \sim T_4$ の測定時における変化があまり大きくないと考えることができるため, $H_2 \sim H_5$ を定数として扱う。なお, T_0 及び $H_1 \sim H_5$ は, 半導体ヒータの出力特性及び各部の材質や形状から理論的に計算することが可能であるが, その計算が三次元の伝熱問題や装置の工作の不確実さを含むため, 次章に述べる予備的な測定の結果から計算することにする。

3. 2 空気の熱伝導によるセンサ表面と試料の間の熱伝達量

センサ表面の部分1, 2, 及び3の間の温度差は, これらの部分と試料の間の温度差に比べて十分に小さい。また, 部分4を伝導する熱によって作られる部分4上の温度勾配は, 部分1と試料の間の空気の温度勾配とほぼ等しいと考えられる。このため, 試料面に垂直な方向のみの空気の熱伝導を考慮すれば十分である。部分1, 2, 及び3から空気の熱伝導により試料に伝わるエネルギー量 Q_{ci} ($i=1, 2, 3$) は, 次式により与えられる。

$$Q_{ci} = A_i k \{1 + \alpha(T_i + T_s - 546.4)/2\} (T_i - T_s) / D \quad \dots\dots\dots (2)$$

3. 3 放射によるセンサ表面と試料の間の熱伝達量

簡単のため, センサ各部の表面を完全な乱反射を行う灰色体とし, 試料表面を完全な鏡面として取扱う。すなわち, センサ表面の各部(部分1, 2, 3, 4), 試料によるセンサ表面の各部の鏡像(1', 2', 3',

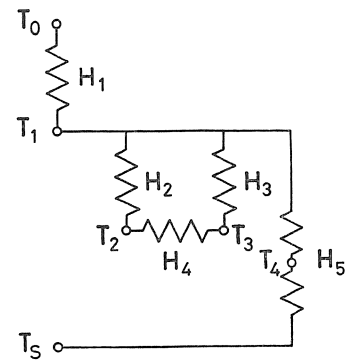


図2 放射率センサの熱回路モデル

4'), 及び試料(s)の間の放射によるエネルギーの授受を, これらの部分の間の形態係数 F_{i-j} ($i, j=1, \dots, 4, 1', \dots, 4', s$) を用いて計算する⁸⁾。

試料の分光放射率(Spectral Emittance)が波長依存性を持つ場合, ある温度 T の黒体放射スペクトル分布に対する試料の半球全放射率(Hemispherical Total Emittance) $\varepsilon_s(T)$ は, 温度 T に依存する。放射のスペクトル温度 T の変化範囲があまり大きくない場合, 一般に $\varepsilon_s(T)$ は T に対して線型な変化を示す。このため, ここで, 試料とセンサ表面の代表的な温度である 30°C と 85°C における試料放射率の比

$$R = \varepsilon_s(30^\circ\text{C}) / \varepsilon_s(85^\circ\text{C}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

を導入し, $\varepsilon_s(T)$ を次式で表す。

$$\varepsilon_s(T) = \varepsilon_s(85^\circ\text{C}) \{1 - (1 - R)(358.2 - T)/55\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

また, センサ表面の部分1, 2, 及び4の放射率が十分に大きく, これら三つの部分により放射および反射される放射(Q_{01}, Q_{02}, Q_{04})のスペクトル分布が, それぞれの部分の温度(T_1, T_2, T_3)に対応した黒体放射スペクトルに分布とほぼ等しいとする。すなわち, 放射 Q_{0i} ($i=1, 2, 4$) のスペクトル分布に対応する試料の放射率が, それぞれ $\varepsilon_s(T_i)$ ($i=1, 2, 4$) に等しいと仮定する。さらに, センサ表面の部分3によって放射および反射される放射(Q_{03})のスペクトル温度 T_{Al} は, 放射(Q_{03})に含まれる放射のスペクトル温度の強度平均値として, 次式で計算されると仮定する。

$$T_{Al} = [Q_{E3}T_3 + (1 - \varepsilon_3)\{Q_{E4}F_{4-3}T_4 + Q_{E3}F_{3-3}T_3 + \{1 - \varepsilon_s(T_1)\}Q_{E1}F_{1'-3}T_1 + \{1 - \varepsilon_s(T_2)\}Q_{E2}F_{2'-3}T_2 + \{1 - \varepsilon_s(T_4)\}Q_{E4}F_{4'-3}T_4\}]/[Q_{E3} + (1 - \varepsilon_3)\{Q_{E4}F_{4-3} + Q_{E3}F_{3-3} + \{1 - \varepsilon_s(T_1)\}Q_{E1}F_{1'-3} + \{1 - \varepsilon_s(T_2)\}Q_{E2}F_{2'-3} + \{1 - \varepsilon_s(T_4)\}Q_{E4}F_{4'-3}\}] \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに, } Q_{Ei} &= A_i \sigma \varepsilon_i T_i^4 \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad \dots\dots\dots (6) \\ Q_{E3} &= A_s \sigma \varepsilon_s(T_s) T_s^4 \end{aligned}$$

上述の仮定のもとに、放射のエネルギー量 Q_{Li} 及び Q_{Oi} ($i=1, 2, 3, 4$) の間に次の関係式が成立する。

$$\begin{aligned} Q_{Li} &= Q_{Es}F_{s-i} + Q_{O4}F_{4-i} + \{1 - \varepsilon_s(T_1)\} Q_{O1}F_{1'-i} \\ &\quad + \{1 - \varepsilon_s(T_2)\} Q_{O2}F_{2'-i} \\ &\quad + \{1 - \varepsilon_s(T_{Al})\} Q_{O3}F_{3'-i} \\ &\quad + \{1 - \varepsilon_s(T_4)\} Q_{O4}F_{4'-i} \quad (i=1, 2, 3) \\ Q_{Li} &= Q_{Es}F_{s-4} + \sum_{j=1}^4 Q_{Oj}F_{j-4} \\ &\quad + \{1 - \varepsilon_s(T_1)\} Q_{O1}F_{1'-4} \\ &\quad + \{1 - \varepsilon_s(T_2)\} Q_{O2}F_{2'-4} \\ &\quad + \{1 - \varepsilon_s(T_{Al})\} Q_{O3}F_{3'-4} \\ &\quad + \{1 - \varepsilon_s(T_4)\} Q_{O4}F_{4'-4} \\ Q_{Oi} &= Q_{Ei} + (1 - \varepsilon_i) Q_{Li} \quad (i=1, 2, 3, 4) \end{aligned} \quad \dots(7)$$

センサの各部が放射熱伝達により失うエネルギー量 Q_{Ri} ($i=1, 2, 3, 4$) は次式で得られる。

$$Q_{Ri} = Q_{Oi} - Q_{Li} \quad \dots(8)$$

3. 4 センサ表面の各部の温度

前述のセンサ表面の各部と試料の間の熱伝達量及びセンサの熱回路モデルに基づく部分 1, 2, 及び 3 における熱流の等式から、温度 T_1 , T_2 , 及び T_3 が次式を用いて計算される。

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= (T_0H_1 + T_sH_5 - Q_L) / (H_1 + H_5) \\ T_2 &= T_1 - \{ (H_3 + H_4)Q_{L2} + H_4Q_{L3} \} / \\ &\quad (H_2H_3 + H_2H_4 + H_3H_4) \\ T_3 &= T_1 - \{ (H_2 + H_4)Q_{L3} + H_4Q_{L2} \} / \\ &\quad (H_2H_3 + H_2H_4 + H_3H_4) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに、 $Q_{Li} = Q_{Ri} + Q_{Ci}$ ($i=1, 2, 3$)

$$Q_L = \sum_{i=1}^4 Q_{Ri} + \sum_{i=1}^3 Q_{Ci} \quad \dots(10)$$

温度 T_4 は、そのプラスチック製円筒が周囲の空気及び試料と直接接しているため、理論的に計算することが難しい。また、部分 4 は試料から伝熱体の方向に温度勾配を持つ。このため、試料と伝熱体の中間部で測定された円筒の内面の温度が満す次の実験式を用いて T_4 を計算することとする。

$$T_4 = (2T_s + T_1) / 3 \quad \dots(11)$$

なお、形態係数 F_{4-2} , F_{4-3} , $F_{4'-2}$, $F_{4'-3}$ が相対的に小さいため、 T_4 の誤差は T_2 及び T_3 の値に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

実際のセンサ出力の理論計算においては、まず試料の放射率の特性 ($\varepsilon_s(85^\circ\text{C})$, R) と T_0 及び T_s を決定する。次に、センサ各部の温度に適当な初期値を与え、さらに初期条件 $Q_{Oi} = Q_{Ei}$ ($i=1, 2, 3, 4$) を用いて、式 (2) から (11) までは繰返すことにより、 T_1 , T_2 , 及び T_3 の三元連立方程式の正の安定解を求め、 T_2 と T_3 の温度差 ΔT を求める。

$$\Delta T = T_3 - T_2 \quad \dots(12)$$

このようにして得られた温度差 ΔT は、一般的に述べると、 $\varepsilon_s(85^\circ\text{C})$ に対して単調に増加し、 R に対して

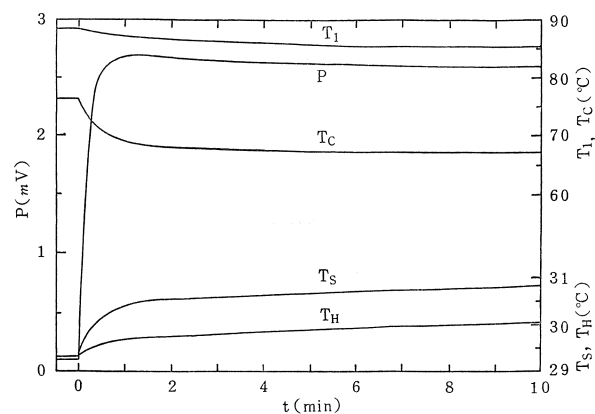


図 3 標準黒色塗装板の測定時における P , T_s , T_H , T_1 , 及び T_c の時間変化

単調に減少する。

二つの標準試料の放射率特性 ($\varepsilon_s(85^\circ\text{C})=0.04$, $R=1.0$) 及び ($\varepsilon_s(85^\circ\text{C})=0.93$, $R=1.0$) に対して計算される部分 3 と 2 の間の温度差をそれぞれ ΔT_A 及び ΔT_B とした場合、式 (1) に対応させた次式により ε_m が $\Delta T(\varepsilon_s(85^\circ\text{C}), R)$ を用いて理論計算される。

$$\varepsilon_m = 0.04 + 0.89 \{ \Delta T(\varepsilon_s(85^\circ\text{C}), R) - \Delta T_A \} / (\Delta T_B - \Delta T_A) \quad \dots(13)$$

4. 予 備 的 実 験

4. 1 センサの応答時間

標準黒色塗装板の放射率を測定した場合の P , T_s , T_H , T_1 , 及び T_c の時間変化を図 3 に示す。各部の温度が変化しないと仮定した場合の P 自身の時定数は、図から 10 秒程度と見積られる。しかし、 T_s と T_H は測定開始後 30 秒、また T_1 と T_c は 100 秒程度経過するまで大きく変化する。このため、 P が安定するために 2 分程度の時間が必要であり、測定開始後 120 秒における値をそれぞれの測定値とした。

4. 2 T_0 及び H_1 , ..., H_5 の決定

ヒートシンクの温度を変化させた場合の T_s , T_1 , 及び T_c を表 1 に示す。

検知部の全体としての実効的な放射率 ε_D は、部分

表 1 試料の温度 (T_s) および放射率 (ε_s) の変化によるセンサ伝熱体表面および検知部中央の温度 (T_1 , T_c) の変化

試 料	T_s ($^\circ\text{C}$)	T_1 ($^\circ\text{C}$)	T_c ($^\circ\text{C}$)
標準アルミニウム板	26.25	87.92	74.74
〃	30.43	88.73	76.15
〃	33.96	89.52	77.42
〃	37.40	90.28	78.69
〃	40.18	90.82	79.69
標準黒色塗装板	30.55	85.92	67.32

表2 仮想的なヒータ温度、センサ各部の熱伝達係数及び放射率

$T_0=105.21 [^{\circ}\text{C}]$		
$H_1=1.535 \times 10^{-1} [\text{W/K}]$	$H_2=2.007 \times 10^{-2}$	
$H_3=3.751 \times 10^{-3}$	$H_4=5.926 \times 10^{-3}$	
$H_5=2.982 \times 10^{-2}$		
$\varepsilon_1=\varepsilon_2=0.93$,	$\varepsilon_3=0.10$,	$\varepsilon_4=0.85$

2と3の放射率の面積平均値で近似される。

$$\varepsilon_D = (A_2 \varepsilon_2 + A_3 \varepsilon_3) / (A_2 + A_3) \dots\dots\dots(14)$$

また検知部の面積平均温度 T_m は、写真1に示した T_1 , T_c , T_m の値から、次の実験式を満すと考えられる。

$$T_m = T_c + 2(T_1 - T_c) / 11 \dots\dots\dots(15)$$

さらに、伝熱体から検知部への熱伝達は、主に両者の間の熱放射及び空気の熱伝導によって生じるので、 H_2 及び H_3 はそれぞれ A_2 及び A_3 にほぼ比例する。伝熱体と検知部の熱伝達係数を H_D とした場合、 H_2 及び H_3 はそれぞれ次式で与えられる。

$$H_2 = A_2 H_D / (A_2 + A_3) \dots\dots\dots(16)$$

$$H_3 = A_3 H_D / (A_2 + A_3)$$

式(14)~(16)に基づき、前章に述べた理論と同様な計算法を用いて、表1に示した値から T_0 , H_1 , H_D , H_5 を求め、さらに H_2 及び H_3 を求めた。熱伝達係数 H_4 は、標準黒色塗装板に対する P に対応した $\Delta T \approx 2.3^{\circ}\text{C}$ が算出されるように、その値を決定した。このようにして求められた T_0 , $H_1 \sim H_5$ の値を表2に示す。

5. 測定結果及び考察

5.1 被測定試料

試料として、標準アルミ板(試料a)、標準黒色塗装板(b)、研磨ステンレス板(SUS304)を 750°C

空中で3時間赤熱酸化させた試料(c)、研磨アルミ板(d)、及びパイレックスガラス板(e)を使用した。

測定誤差 ± 0.02 の分光反射率計¹⁾を用いて測定された試料(c)及び(d)の入射角と反射角が 5° の分光反射率(Bidirectional Spectral Reflectance) $\rho(\lambda)$ を図4に示す。これらの $\rho(\lambda)$ と黒体放射スペクトル分布の式に基づき数値積分を行いそれぞれの垂直方向放射率(Normal Emittance) ε_n を求めた。試料(c)及び(d)に対して得られた ε_n の特性は、それぞれ ($\varepsilon_n(85^{\circ}\text{C})=0.215, R=0.851$) 及び ($\varepsilon_n(85^{\circ}\text{C})=0.058, R=0.911$) であった。但し、この数値積分においては、 $2\mu\text{m}$ 以下の波長の放射を無視し、また $15\mu\text{m}$ 以上の波長範囲の反射率は試料(c)及び(d)に対してそれぞれの $15\mu\text{m}$ における反射率 0.880 及び 0.955 を用いた。

試料(b)及び(e)については、文献⁹⁾による放射率値を考慮すると、その放射率は常温付近で大きな温度依存性を持たず、 $R \approx 1.0$ と考えることができる。

5.2 測定

放射率の測定は、ヒートシンク上に被測定試料と研磨アルミ板を並べて置き、研磨アルミ板上から試料上にセンサを移動させ、その120秒後に T_1 , T_c , T_s ,

表3 5種類の試料に対する繰返測定の結果

試料	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	P (mV)	σ_p (mV)	ε_m	σ_ε	n
標準アルミニウム板 (a)	28.83	0.113	0.001	0.04	0.0004	40
標準黒色塗装板 (b)	29.18	2.631	0.011	0.93	0.0039	40
赤熱酸化ステンレス板 (c)	28.89	0.660	0.002	0.233	0.0007	40
研磨アルミニウム板 (d)	28.86	0.102	0.001	0.028	0.0004	40
パイレックスガラス板 (e)	29.28	2.440	0.005	0.862	0.0018	40

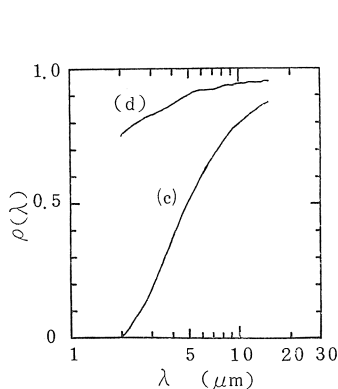


図4 入射角及び反射角が 5° の分光反射率 $\rho(\lambda)$ 、赤熱酸化ステンレス板(c)、研磨アルミ板(d)

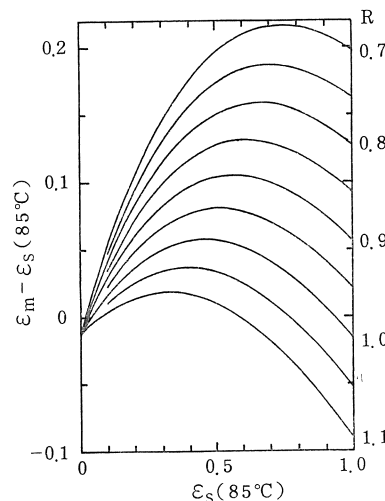


図5 センサ出力の理論計算から求められた測定値 $\varepsilon_m(T_s=30^{\circ}\text{C}) - \varepsilon_s(85^{\circ}\text{C}) - R$ の関係

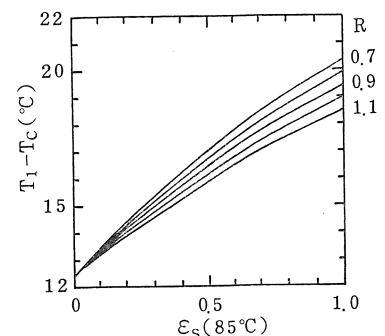


図6 センサ 伝熱体表面と検知部中央の温度差 ($T_1 - T_c$) の試料放射率の特性による変化

T_H 測定用熱電対の出力及び P を分解能 $1\mu V$ のデジタルボルトメータで測ることにより行われた。研磨アルミ板上から試料上へのセンサの移動は、測定終了後研磨アルミ板上にセンサを戻し、各部の温度が前回の測定を開始した時と同じ温度 ($T_1=88.5\pm0.2^\circ C$, $T_c=75.9\pm0.2^\circ C$, $T_s=27.5\pm0.2^\circ C$) に回復した後に行った。

すべての測定は、室温 $25\sim 27^\circ C$ 、湿度 $65\sim 80\%$ 風速 $0.1m/s$ 以下の実験室内で行われ、この時の交流電源電圧は $103\pm 2V$ であった。

5.3 測定値の分散

測定値の分散を調べるために、前述の五つの試料に対して行った繰返測定の結果及び式 (1) に従って計算した ϵ_m を表 3 に示す。試料 (b) ($\epsilon_s \approx 0.93$) に対する ϵ_m の分散 σ_ϵ は 0.004 と非常に小さく、また定性的に P の分散 σ_P は P の平均値が減少すると小さくなる。このことは、この簡易放射率計の同一条件下における測定値の再現性が高いことを示している。

5.4 理論計算による ϵ_m と ϵ_s

幾つかの R 値に対して計算された ϵ_m と $\epsilon_s(85^\circ C)$ の関係を図 5 に示し、その時の温度差 ($T_1 - T_c$) を図 6 に示す。

計算される ϵ_m の値は、 R の値に対して単調に減少する。試料が吸収することのできるセンサからの熱放射の量はおおよそ $\epsilon_s(85^\circ C)$ により決定され、一方、試料が放射することのできるエネルギー量は $\epsilon_s(30^\circ C)$ により決定される。このため、 R の値が減少した場合、試料がセンサに向かって放射するエネルギー量が減少し、検知部の黒色塗装部 (部分 2) が吸収するエネルギー量が減少して、温度差 ΔT が増大する。

比 $R=1.0$ の場合でも、差 $\{\epsilon_m - \epsilon_s(85^\circ C)\}$ は $\epsilon_s(85^\circ C) \approx 0.45$ の附近で極大値 0.058 を持つ。伝熱体と検知部の間の熱抵抗が大きく、試料放射率が大きくなり検知部の失う熱量が増加した場合、図 6 に示したように検知部の温度が低下する。このため、部分 (2) が放射するエネルギー量が減少し、検知部の温度が低下しない場合と比べて ΔT が小さくなる。非常に粗い近似を行った場合、 ΔT は ϵ_s と T_m に比例し、 T_m は適当な正の値 C を用いた $(1 - C\epsilon_s)$ に比例すると考えることができる。

$$\Delta T \propto \epsilon_s T_m \propto \epsilon_s (1 - C\epsilon_s) \dots\dots\dots (17)$$

この測定法では、 $\epsilon_s=0.04$ 及び $\epsilon_s=0.93$ に対して較正を行うため、これらの値の中間部で誤差が最大となる。

5.5 温度 T_s を変化させた場合の ϵ_m の変化

被測定試料として試料 (b), (c) 及び (e) を使用し、ヒートシンクを冷却又は加熱することにより T_s を変化させて、それぞれの試料に対して P を測定した。表 3 に示した試料 (a) 及び (b) に対する P を理論計算により $T_s=30^\circ C$ におけるセンサ出力 P_A 及び P_B に補正し、式 (1) を用いてそれぞれの試料に対する $\epsilon_m(T_s)$ を求めた。このようにして得られた $\epsilon_m(T_s)$ から、 T_s が $30^\circ C$ に最も近い二つの値を用いて補間法により $\epsilon_m(T_s=30^\circ C)$ を求め、 $\epsilon_m(T_s)/\epsilon_m(T_s=30^\circ C)$ を計算した。それぞれの試料に対する実測値から得られた $T_s - \epsilon_m(T_s)/\epsilon_m(T_s=30^\circ C)$ 関係を図 7 に白丸で示す。

試料 (b), (c), 及び (e) にに対応させた $\epsilon_s(85^\circ C) = 0.93, 0.20$, 及び 0.85 に対して、 T_s が変化した場合の ΔT を、幾つかの R の値に対して理論的に計算した。それぞれの試料に対応する ΔT から求められる $T_s - \epsilon_m(T_s)/\epsilon_m(T_s=30^\circ C)$ 理論曲線を図 7 に実線で示した。図 7 から、 $T_s - \epsilon_m(T_s)/\epsilon_m(T_s=30^\circ C)$ 関係が R の値に大きく依存することがわかり、実測値 (白丸) と理論曲線を比較することによりそれぞれの試料の R の値が得られる。このようにして得られた R の値は、試料 (b), (c), 及び (e) に対してそれぞれ $1.0, 0.8$, 及び 1.0 であった。これらの値の誤差は、文献⁹⁾ 及び 5.1 に述べた分光測定の結果を考慮した場合、 ± 0.05 程度である。

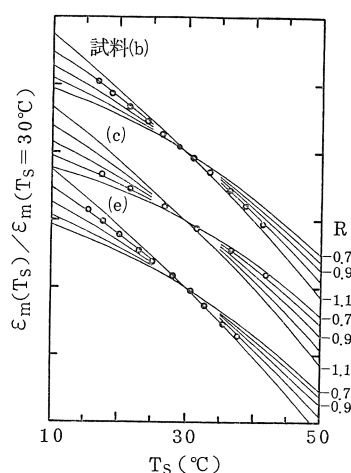


図 7 試料温度 T_s が変化した場合の測定値の変化率
 $\epsilon_m(T_s)/\epsilon_m(T_s=30^\circ C)$
(縦軸の一目盛は 0.1)

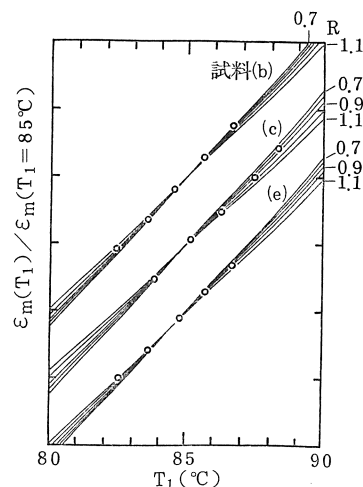


図 8 伝熱体表面の温度 T_1 が変化した場合の測定値の変化率
 $\epsilon_m(T_1)/\epsilon_m(T_1=85^\circ C)$
(縦軸の一目盛は 0.05)

5.6 センサ表面の温度を変化させた場合の ε_m の変化

被測定試料として試料(b), (c), 及び(e)を使用し, センサのヒータに供給する電圧を70~110Vの範囲で変化させて T_1 を4K程度変化させ, それぞれの試料に対する P を測定した. ここで, T_1 をセンサ表面の温度のパラメータとし, $T_1=85^\circ\text{C}$ をその標準値とした. 測定された P は式(1)を用いて $\varepsilon_m(T_1)$ に変換され, $T_1=85^\circ\text{C}$ に最も近い二つの値から補間法によりそれぞれの試料に対する $\varepsilon_m(T_1=85^\circ\text{C})$ が求められた. それぞれの試料に対する実測値による $T_1-\varepsilon_m(T_1)/\varepsilon_m(T_1=85^\circ\text{C})$ 関係を図8に白丸で示す.

試料(b), (c), 及び(e)に対応させた $\varepsilon_s(85^\circ\text{C})=0.93, 0.20$, 及び 0.85 に対し, 幾つかの R の値に対して理論計算されたそれぞれの $T_1-\varepsilon_m(T_1)/\varepsilon_m(T_1=85^\circ\text{C})$ 曲線を図8に実線で示した. 図8から, $T_1-\varepsilon_m(T_1)/\varepsilon_m(T_1=85^\circ\text{C})$ 関係も R の値に大きく依存することがわかる. 温度 T_1 を大きく変化させることができなかったため, 実測値と理論曲線を直接比較することにより R の値を知ることができなかった. しかし, 実測値の $T_1-\varepsilon_m(T_1)/\varepsilon_m(T_1=85^\circ\text{C})$ 関係を最小自乗法により処理して, その勾配を理論曲線の勾配と比較することにより, 試料(b), (c), 及び(e)に対してそれぞれ $R=1.0, 0.8$, 及び 1.0 が得られた.

5.7 測定値 ε_m の補正

試料の R の値は, 前述の5.5に述べた方法で知ることができる. 二つの標準試料及び被測定試料の試料温度の違いによる誤差は, 図7に示したものと同様な図を用いて計算することができる. また, 被測定試料の放射率の温度依存性による $\varepsilon_m-\varepsilon_s(85^\circ\text{C})$ は, 図5に示した関係と R の値を用いて補正を行うことができる.

標準試料に与えられた放射率値に帰因する誤差を除いた場合, $\varepsilon_s(85^\circ\text{C})$ が $0.1\sim 0.25$ の範囲では, ε_m の誤差が ± 0.001 程度 ($\sigma_s \leq 0.001$). T_s に対する補正の誤差が ± 0.001 程度 (T_s の誤差が 0.1°C 程度), また R 値による補正の誤差が ± 0.016 程度 (R の誤差が 0.05 程度) と見積られ, これらの補正を加えた放射率の測定値の誤差は ± 0.02 程度と考えられる.

5.8 補正された測定値と真値との差

試料(c)に対する分光放射率から計算される放射率の特性は $\varepsilon_n(85^\circ\text{C}) \approx 0.215$, $R \approx 0.851$ であり,

(c)は, 金属とその酸化表面膜からできたやや放射率の高い試料であるため, ε_n と ε_s がほぼ等しいと考えられる^{9,10}. 簡易装置による試料(c)の放射率特性の生の測定値は $\varepsilon_m \approx 0.233$, $R \approx 0.8$ であり, 図5を用いて補正された測定値は 0.164 となる. この二つの値 (0.215 と 0.164) の差は両者の測定誤差の和をも超えており, この差の原因が標準試料(a)及び(b)に与えられた放射率値にあると考えられる. ここでは, 試料(a)に与えられた放射率値のみを考えることにする.

表3に示した試料(a)及び(d)の P は, それぞれ 0.113 及び 0.102 mV であった. 試料(d)の垂直方向放射率の特性は, $\varepsilon_n(85^\circ\text{C}) \approx 0.058$ 及び $R \approx 0.911$ であった. また古典電磁気学により計算される金属の $\varepsilon_s/\varepsilon_n$ の値は, $\varepsilon_n=0.058$ に対して約 $1.27^{11)}$ である. この結果, 試料(d)の $\varepsilon_s(85^\circ\text{C})$ の真値は, 約 0.074 と評価される. この $\varepsilon_s(85^\circ\text{C}) \approx 0.074$ 及び $R \approx 0.911$ を用いて P を理論計算すると $P=0.240\text{ mV}$ が得られる. この $P=0.240\text{ mV}$ が零点調整バリオームの働きにより $P=0.102\text{ mV}$ に減少させられているとすると, 試料(d)に対する P に 0.138 mV の誤差が存在することになる. この誤差を次式を用いて補正した場合, 試料(c)に対する補正されたセンサ出力 P' は 0.768 mV となる.

$$P' = 0.138(2.613 - P)/2.529 + P \dots \dots \dots (18)$$

また, $P'=0.768\text{ mV}$ に対応する ε_m は 0.271 となり, その $\varepsilon_m=0.271$ 及び $R=0.8$ に基づき図5を用いて求めた放射率値は 0.192 である. この値 (0.192) は, 分光学的な測定から求めた値 (0.215) の誤差範囲にほぼ存在する.

6. む す び

D & S 社製簡易放射率計のセンサ出力は, 試料やセンサの温度の変化によって大きな影響を受ける. これらの温度が一定となるように配慮を行った場合, その出力は非常に高い再現性を示すようになる. しかしながら, その測定値は, 次の三つの原因による系統的な誤差を含んでいる.

- (1) 測定センサの温度制御及び伝熱構造上の問題
- (2) 試料の放射率の温度依存性
- (3) 放射率標準として付属している物質に与えられた放射率値の誤差

原因(1)及び(2)による誤差は試料温度を変化させた場合の ε_m の変化率の理論計算曲線と実測値を比較することにより, 試料放射率の温度依存性を

表すパラメータ R の値を ± 0.05 程度の誤差で知ることができ、補正を加えることができる。この補正を加えた放射率の測定値は、原因(3)による誤差を除き、 ± 0.02 程度の精度を持っていると考えられる。但し、現在のセンサの構造では、個々のセンサについてヒータの出力特性やセンサの伝熱特性を記述する熱伝達係数が異なる可能性があり、理論計算を用いた測定値の補正を行うためには、それぞれのセンサについてその特性を調べる必要がある。センサの伝熱構造を改良し、その温度制御を精度の高い能動的方法で行った場合には、原因(1)による系統的な誤差をかなり減少させることができ、個々のセンサの特性の差を小さくすることができるようになる。

原因(3)による誤差は、放射率標準として黒体炉に類似した構造を持つ装置や金等の蒸着鏡などの放射率を比較的正確に知ることのできる試料を用いることにより減少させることができる。

謝 辞

本研究においては、昭和電工株式会社に種々ご協力いただいた。ここに改めて感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 種村栄, その他「光熱変換材料の光選択吸収性の評価に関する最近の研究(その1)及び(その2)」高温学会誌 Vol.6, No.5, p.170 及び No.6, p.210 (1980)
- 2) R. E. Gaumer & J. V. Stewart "Measurement of Thermal Properties of Solid (ed. by J. C. Richmond). 14, Calorimetric Determination of Infrared Emittance and The α_s/ϵ Ratio" NASA

Sp-31 p.127 (1963)

- 3) R. V. Dunkle et. al. "Progress in International Research on Thermodynamics and Transport Properties (ed. by American Society of Mechanical Engineers). 51, Heated Cavity Reflectometer for Angular Reflectance Measurements" Academic Press p.541 (1962)
- 4) Y. S. Touloukian "Thermophysical Properties of Matter. Vol.7, Thermal Radiative Properties of Metallic Elements and Alloys" Plenum Press (1970)
- 5) "Devices & Services Co. Technical Note 79-19" 3501-A. Milton-Dallas, Texas 75205 (1979)
- 6) R. B. Pettit & A. R. Mahoney "Portable Instrumentation for Solar Absorptance and Emittance Measurement" Proc. of Line-Focus Solar Thermal Energy Technology Conf. Sept. 9-11, 1980, Albuquerque, NM.
- 7) 「理科年表」. 物66 丸善書店 (1981)
- 8) R. Siegel & J. R. Howell "Thermal Radiative Heat Transfer" Ch. 7~8, McGraw-Hill (1972)
- 9) Y. S. Touloukian "Thermophysical Properties of Matter Vol. 8, Thermal Radiative Properties of Nonmetallic Solids" Plenum Press (1972)
- 10) 山東ら「半球面方向性分光反射率測定」日本太陽エネルギー学会第6回研究発表会講演論文集 17 (1980)
- 11) M. Jakob "Heat Transfer" Vol. 1, John Wiley and Sons (1949).

(昭和57年10月28日 原稿受理)

—— 海外情報 ③ ——

EC委, 85~90年のエネルギー需給動向予測

291-57547 060.501.0 Europe 83-6-3 p.5~6
表, 83-6-4 p.13~14表

EC委員会は“ECのエネルギー戦略——これまでの経過と新しい活動ライン”に関するコミュニケの中で、各国のこれまでのエネルギー活動を分析評価している。委員会はさらに最新のデータをもとに、今後のエネルギー需給動向を予測しているが、これによるとECのエネルギー消費は85年に10億t(石油換算)、90年に10億6,500万tになる。また経済成長率とエネルギー消費の伸び率は63~73年は両者とも年率4.7%だったのに対し、80~85年は2.1%と1.2%、

85~90年は2.7%と1.3%。

原子力と太陽が今後のエネルギー源(米)

291-57548 060.71.0 Nucleonics Wk. 83-5-5
p.6~7

デンバーの石油大会で、ARCO社が行った新エネルギー調査が明らかにされたが、それによるとアメリカのエネルギー供給は10年後から2000年にかけて原子力発電と太陽エネルギーが支配的となる見通しである。これはハリス社によって調査され1252名にインタビューしたもので、原子力について安全性、コスト高等の問題を認めながらも、40%の人は2000以降も原子力に対するエネルギー供給役割を必須とみている。