

簡易放射率計の信頼性

Reliability of an Handy Emittance Meter

山 東 睦 夫*
Mutsuo SANDO野 口 哲 男**
Tetsuo NOGUCHI外 山 茂 樹***
Sigeki TOYAMA

Abstract

An emittance meter which utilizes internal standards by Au plated mirror and low temperature blackbody furnace as low and high emittance standards respectively is developed. The obtained emittance value of which systematic error is compensated has accuracy within ± 0.01 and precision within ± 0.003 . When the temperature of sensor is controlled within the error of $\pm 1^\circ\text{C}$ from the designed value and the emittance of sensor is also within the error of ± 0.02 , the difference of measured emittance values among massproduced emittance meters is estimated as less than ± 0.002 .

Key words : emittance meter, systematic error, simulation model, reliability, blackbody furnace.

1. 緒 言

集熱板の放射率は太陽集熱器の性能に大きな影響を及ぼす重要な因子である。高価で複雑な分光装置又はカロリ・メータを使用して集熱板の放射率を測定する方法¹⁾は、すでに各国で開発されて来た。しかし、これらの装置を生産現場の品質管理などに要求される簡便かつ短時間の計測に適用することは困難であった。このため、いくつかの簡易放射率測定装置^{2), 3)}が開発された。これらの簡易装置は、低放射率及び高放射率の基準としてそれぞれアルミニウム板及び黒色塗装板を使用している。これらの放射率の基準となる板の正確な放射率値を求めることは難しく、また、黒色塗装板の放射率は塗膜の厚さに従って変化するため、簡易装置により測定された放射率値の信頼性はあまり高くなかった。高放射率の基準として信頼性の高い装置は黒体炉であり、低放射率側の基準としては耐候性及び分光的な絶対放射率の測定の簡単さから金蒸着鏡が適当である。

加熱された放射率センサの表面に低・高2つの放射率レベルを持つ2種の小さな面からなる熱放射検知部を持ち、センサの前面に置かれた被測定試料面により反射される熱放射の量に比例する温度差が検知部の高低2つの放射率レベルの面の間にできるタイプの簡易放射率計の特性についてはすでに報告している⁴⁾。こ

の放射率計は、被測定試料面とセンサ表面の間隙が約4 mm と短いため、センサの検知部が空気の熱伝達により失う熱は、検知部が放射により失う熱と同程度の大きさであった。加熱されたセンサを垂直型の低温黒体炉上に置いた場合、センサの表面から空気の熱伝達により失われる熱が減少し、検知部の温度を大きく変え、検知部から放射される熱の量を変化させてしまう欠点があった。従って、従来の簡易放射率計では放射率の標準として黒体炉を使用することができなかった。

本報告では、センサの検知部からの空気による熱損失を大巾に減少させ、黒体炉を放射率標準として使用できるように、センサの検知部の周囲に黒色塗装したアルミニウム製円筒を取付け、さらに、温度制御の精度を改善することにより信頼性を向上させた簡易放射率計について述べる。

* 名古屋工業技術試験所第5部第3課 主任研究官
Solar Research Laboratory, Government
Industrial Research Institute, Nagoya
Senior Research Scientist

** 機械電子検査検定協会 技術顧問
Japan Machinery and Metals Inspection
Institute Technical Advisor

*** 名古屋大学工学部化学工学科 教授
Department of Chemical Engineering,
Faculty of Engineering, Nagoya University
Professor

2. 放射率計

簡易放射率計の概略を図1に示す。放射率センサの本体は、良導性のアルミニウムで作られ、PID制御されたヒータにより加熱されており、センサから試料への熱伝達量に変化してもほとんどセンサ表面の温度が変化しないように設計されている。図1下図に示すように、加熱されたセンサ表面にはリング状に熱放射検知部が取り付けられている。検知部は、研磨アルミニウム板から作られた低放射率部(3)と黒色塗装アルミニウム板から作られた高放射率部(4)が合成樹脂製マウント(2)に取付けられており、検知部に入射する熱放射の量に比例した温度差が低及び高放射率部の間に発生し、36対のクロメル・コンスタンタン熱電対列により電圧 P に変換し出力する。検知部と試料面との間の空間を囲むアルミニウム製円筒は、周囲から低温の熱放射がセンサの熱放射検知部や試料面に入射するのを防ぎ、また、対流を発生させ被測定試料板とセンサ表面に囲まれる空間の上部すなわち検知部の真下に高温の空気を送り検知部から空気の熱伝達により失われる熱を減少させる働きを持っている。このアルミニウム製円筒及び図1下図に示した検知部(2, 3, 4)以外の高温センサ面(1)は黒色塗装され同じ表面温度を持つ。センサ表面の1~4で表わされる部分は、それぞれ、温度 T_i 、放射率 ε_i 、面積 A_i ($i=1, \dots, 4$)を持ち、温度 T_1 は約 100°C に制御される。

被測定試料板はアルミニウム製ヒート・シンク上に設置され、この試料板上に加熱された放射率センサが置かれる。測定中の試料温度 T_s を通常 $30.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ に調節するために、ヒート・シンクにもPID制御されたヒータが取り付けられている。また、試料板上に加熱されたセンサを置きヒート・シンクへの熱伝達量が大きく変化した時、ヒート・シンクの温度が大きく変化しないように熱容量、ヒータ容量、形状が設計されている。

放射率の標準として用いる垂直型低温黒体炉の形状を図2に示す。黒体炉の開口部の口径は放射率センサの口径とほぼ同じにされており、開口部の上にセンサを置く構造となっている。炉体はアルミニウムで作られ、その側面にヒータ線が一般的な間隙で巻付けられており、黒体炉の温度が $30.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ となるようにPID加熱されている。炉体は充分な断熱が行われ、通常の運転において炉体内の温度分布の巾が 0.1°C 以下となるように設計されている。炉の内壁は3M黒色塗料を約 0.1mm の膜厚で塗装しており、加熱された放射率センサを置いた時温度が上昇すると考えられる黒

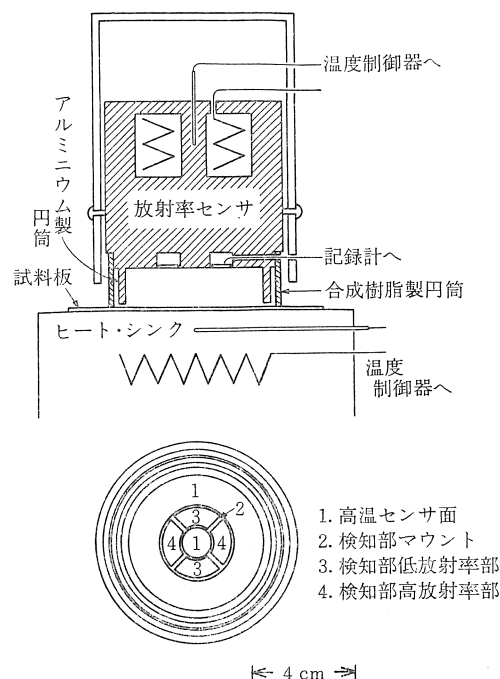


図1 簡易放射率計の構造

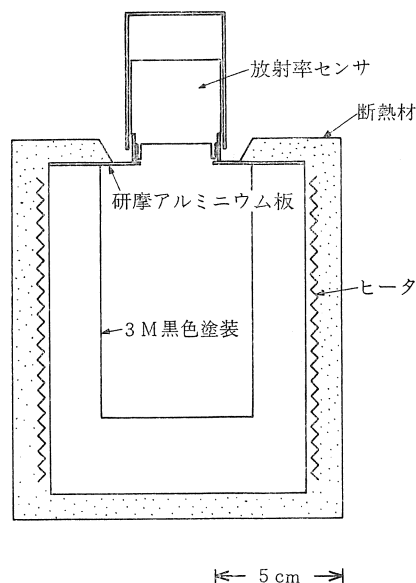


図2 垂直型低温黒体炉の構造

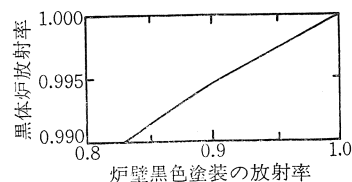


図3 垂直型低温黒体炉の放射特性

体炉の開口部付近は研磨したアルミニウム板で作られている。この研磨アルミニウム板の放射率を 0.1 とした場合、黒体炉の形状から計算される炉の放射率の特性を図3に示す。炉壁の黒色塗装面の放射率が $0.8 \sim 1.0$ の範囲にある場合、この黒体炉の放射率は塗装面

の放射率の変化の1/20程度しか変化しない。このように、黒体炉の放射率は炉壁の放射率にあまり依存しない安定した放射率の標準となる。この黒体炉の黒色塗装面の放射率は0.94程度と見積られ⁵⁾、垂直型低温黒体炉の放射率値 ε_B は図3から0.997と評価される。

低放射率の基準として使用される金蒸着鏡の分光絶対反射率を波長1.9~14.5 μm の範囲でBennet-Koehler型の分光装置⁶⁾を用いて測定した。この波長範囲における垂直方向反射率は0.986~0.988の間で変化し、金蒸着鏡の垂直方向放射率は約0.013と見積られ、金属における垂直方向放射率と半球放射率の関係⁷⁾から金蒸着鏡の半球放射率 ε_A は0.017に等しいと評価される。

30°Cにある金蒸着鏡及び低温黒体炉に対する放射率センサの出力電圧をそれぞれ P_A 及び P_B で表わし、30°Cの被測定試料板を測定した時のセンサ出力 P が試料板の放射率と線型な関係にあると仮定すると、試料板の放射率の簡易放射率計による測定値 ε_m は次式により計算される。

$$\varepsilon_m = (\varepsilon_B - \varepsilon_A)(P - P_A) / (P_B - P_A) + \varepsilon_A \quad (1)$$

3. 放射率の測定値に関する理論計算

3.1 放射率センサの計算モデル

センサ出力に対応する熱放射検知部の低放射率部と高放射率部の温度差 ΔT の理論計算値を得るためには、試料温度と試料の放射率特性に対応したセンサ表面各部の温度を計算する必要がある。これらの温度は、センサ各部から試料面への熱放射及び空気の対流

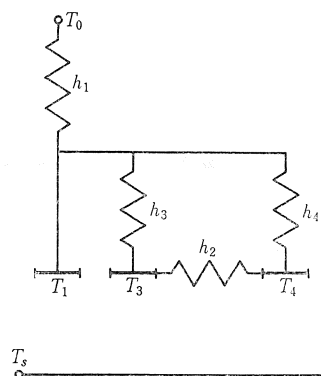


図4 放射率センサの熱回路モデル

表1 放射率センサの諸パラメータ

$T_0 = 101.6^\circ\text{C}$	$\varepsilon_1 = .95$	$A_1 = 4.240 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$
$h_1 = 1.84 \text{ W/K}$	$\varepsilon_2 = .95$	$A_2 = 0.300 \cdot 10^{-3} \text{ //}$
$h_2 = 0.026 \text{ //}$	$\varepsilon_3 = .10$	$A_3 = 0.180 \cdot 10^{-3} \text{ //}$
$h_3 = 0.020 \text{ //}$	$\varepsilon_4 = .95$	$A_4 = 0.180 \cdot 10^{-3} \text{ //}$
$h_4 = 0.013 \text{ //}$		$A_s = 2.290 \cdot 10^{-3} \text{ //}$

による熱伝達量、また、放射率センサの熱回路モデルを求めることにより、得ることができる。センサの単純化された熱回路モデルを図4に示し、センサに関する諸パラメータを表1に掲げる。表に示されたヒータ温度 T_0 及び熱伝達係数 $h_1, \dots, h_4$ は、実測されるセンサの表面の各部の温度 $T_1, T_4, \Delta T$ を、本章で述べるセンサ表面に関する熱伝達の理論計算を用いて、最もよく再現することのできる値として与えた。

3.2 対流による熱伝達⁸⁾

加熱されたセンサの表面と低温の試料の間に空気の自然対流が発生する。この自然対流によってセンサ表面が失う熱は、センサの表面が軸対称な形状と温度分布を持つことを仮定した円筒座標系を用いて有限要素法により計算した。放射率センサ表面の各部からの熱伝達量は、対流に関する計算時間を短縮するために、いくつかのセンサ表面の温度と試料温度の組に対して熱伝達量を計算し、温度に関して補間を行い求められた。高温センサ面、検知部マウント、検知部低放射率部及び検知部高放射率部から試料板への対流による熱伝達量をそれぞれ $Q_{c1}(T_1, T_s, T_4, T_s)$, $Q_{c2}(T_1, T_s, T_4, T_s)$, $Q_{c3}(T_1, T_s, T_s)$ および $Q_{c4}(T_1, T_4, T_s)$ で表わす。(Appendix 参照)

3.3 放射による熱伝達

放射熱伝達に関する計算では、放射率センサの表面が完全な乱反射を行う灰色面^{* 添注}であり、試料板の表面が完全な鏡面であると仮定する。試料板の放射率の特性は、100°Cにおける試料の放射率 $\varepsilon_s(100^\circ\text{C})$ と比 $R (= \varepsilon_s(30^\circ\text{C}) / \varepsilon_s(100^\circ\text{C}))$ により記述され、温度 T の黒体放射に対する試料板の放射率が次式⁹⁾で与えられる。

$$\varepsilon_s(T) = \varepsilon_s(100^\circ\text{C}) \{1 + (1 - R)(T - 100^\circ\text{C}) / 70^\circ\text{C}\} \quad (2)$$

センサ表面の $i(i=1, \dots, 4)$ で表わされる部分に対し、試料表面、センサ表面及び試料によるセンサの鏡像から入射して来る熱放射の量 I_i は次のように計算される。

* 試料の表面を完全乱反射面又は鏡面として取扱った場合理論計算される ε_m (式(14))の差は0.001以下である。また、試料の表面を完全乱反射面として、センサ表面のアルミニウム製低放射率部の表面を完全な乱反射面又は鏡面として取扱った場合の理論的な ε_m の差も0.001以下である。試料と低放射率部の表面が鏡面の場合、本文に述べた仮定による ε_m との差は、前述の2つの場合の差を考慮して0.001程度以下と見積られる。

$$I_i = E_s E_{s-i} + \sum_j O_j F_{j-i} + \sum_{j \neq 3} (1 - \epsilon_s(T_j)) O_j F_{j'-i} + (1 + \epsilon_s(T'_3)) O_3 F_{3'-i} \quad (3)$$

また、部分 i から出て行く放射の量 O_i は次式で計算される。

$$O_i = E_i + (1 - \epsilon_i) I_i \quad (4)$$

ここで、

$$E_i = A_i E_s T_i^4 \quad (5)$$

$$E_s = A_s \epsilon_s(T_s) T_s^4 \quad (6)$$

また、 F_{i-j} はセンサ表面の部分 i から j への形態係数であり、 j' は試料表面による j の鏡像を表わしている。温度 T'_3 は、センサの検知部低放射率部から出て行く放射 O_3 のスペクトル温度として定義され、次式で計算される。

$$T'_3 = (T_3 E_3 + (1 + \epsilon_3)(T_s E_s F_{s-3} + T_1 E_1 F_{1-3} + \sum_i T_i (1 - \epsilon_s(T_i)) E_i F_{i'-3})) / (E_3 + (1 - \epsilon_3) \times (E_s F_{s-3} + \sum_i (1 - \epsilon_s(T_i)) E_i F_{i'-3})) \quad (7)$$

放射の量 I_i 及び $O_i (i=1, \dots, 4)$ は、試料板の放射率特性、温度 T_i 及び T_s を与え式(3)~(7)を繰返し計算し収束値を得ることにより求められる。センサ表面の i で表わされる部分が放射熱伝達により失う熱 Q_{ri} は次式で計算される。

$$Q_{ri} = O_i - I_i \quad (8)$$

3.4 ϵ_m の計算

センサ表面の部分 $i (i=1, \dots, 4)$ からの熱損失 Q_i は、

$$Q_i = Q_{ci} + Q_{ri} \quad (9)$$

で与えられ、センサ表面の高温センサ面、検知部低放射率部及び検知部高放射率部の温度は、それぞれの部分のエネルギー保存の式から導かれる次の式により与えられる。

$$T_1 = T_0 - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) / h_1 \quad (10)$$

$$T_3 = T_1 - (Q_3(h_2 + h_3) + Q_4 h_2) / (h_2 h_3 + h_3 h_4 + h_2 h_4) \quad (11)$$

$$T_4 = T_1 - (Q_3 h_2 + Q_4(h_2 + h_3)) / (h_2 h_3 + h_3 h_4 + h_2 h_4) \quad (12)$$

また、検知部マウントの温度 T_2 を次式により近似する。

$$T_2 = (2T_1 + T_3 + T_4) / 4 \quad (13)$$

センサ表面各部の温度 T_1 、 T_3 及び T_4

は、式(3)~(13)及び式(A1)~(A4)

を繰返し計算しその収束値を求めることにより得ることができる。

検知部の低放射率部と高放射率部の理論計算された温度差 $\Delta T = (T_3 - T_4)$ は、金

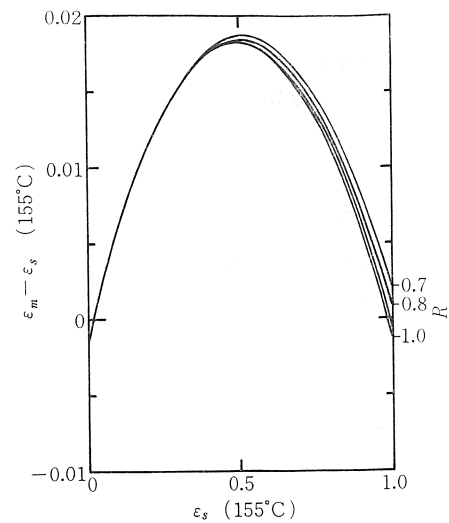


図5 簡易放射率計による測定値が持つ系統的誤差の理論計算値

蒸着鏡及び低温黒体炉に対して計算された温度差をそれぞれ ΔT_A 及び ΔT_B と表した時、式(1)と同様の次式を用いて ϵ_m の理論値に変換される。

$$\epsilon_m = (\epsilon_B - \epsilon_A)(\Delta T - \Delta T_A) / (\Delta T_B - \Delta T_A) + \epsilon_A \quad (14)$$

試料放射率 $\epsilon_s(100^\circ\text{C})$ と理論計算された ϵ_m の差は、 $\epsilon_s(100^\circ\text{C})$ の値に近似的に比例する ($\epsilon_m - \epsilon_s(100^\circ\text{C}) \propto \epsilon_s(100^\circ\text{C})$)。また、同一の $\epsilon_s(100^\circ\text{C})$ の値に対してこの差は $(1-R)$ に比例する ($\epsilon_m - \epsilon_s(100^\circ\text{C}) \propto (1-R)$)。従って、 $\epsilon_m - \epsilon_s(100^\circ\text{C}) \approx A(1-R)\epsilon_s(100^\circ\text{C})$ を満す定数 A が存在する ($\epsilon_m \approx \epsilon_s(100^\circ\text{C})\{1 - A(1-R)\}$)。一方、式(2)より、 $A = (T_R - 100^\circ\text{C}) / 70^\circ\text{C}$ を満す温度 T_R を見い出すと、 $\epsilon_m \approx \epsilon_s(T_R)$ となる。この放射率センサでは $T_R \approx 155^\circ\text{C}$ である。すなわち、 30°C の試料と 100°C の放射率センサを用いて測定される放射率の値が 155°C における試料板の放射率に等しいと解釈した場合、 ϵ_m と $\epsilon_s(155^\circ\text{C})$ との系統的誤差は図5に示すようにほとんど比 R の値に依らない。放射率の値が1.0に近くしかも R の値が1.0から大きく異なる物質、例えば $\epsilon_s(100^\circ\text{C}) > 0.8$ 及び $R < 0.8$ を同時に満す物質を作ること、常温近傍において黒体放射のスペクトル分布の巾がか

表2 試料の放射率特性

	$\epsilon_s(100^\circ\text{C})$	R
低温黒体炉	0.997	1.0
金蒸着鏡	0.017	1.0
選択吸収板	0.192	0.86
ガラス板	0.86	1.0
黒色塗装板	0.93	1.0

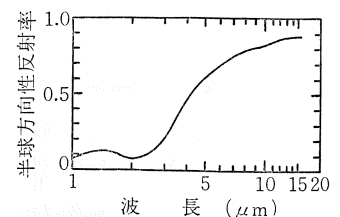


図6 選択吸収板の分光反射率

なり広くなっているため、理論上不可能である。このため、実用上、 ε_m と $\varepsilon_s(155^\circ\text{C})$ の系統的誤差は図5の $R=1.0$ に対応する曲線により補正することが可能である。

4. 実 験

4.1 試 料 板

放射率を測定する試料板として、ステンレス (SU S304) 板を空気中で 800°C 3時間の赤熱酸化を行った選択吸収性を持つ板、ソーダ石灰ガラス板及びアクリル系黒色塗装板を用いた。加熱空洞炉型分光放射率計¹⁰⁾によって測定された選択吸収板の半球方向性反射率の特性を図6に示し、試料板の放射率特性^{5), 11)}を表2に示す。

4.2 放射率センサの応答時間

個々の試料放射率の測定は次の手順に従って行われた。

- (1) 測定の初期条件を一定にするため、ヒート・シンク上に設置した研磨アルミニウム板上に加熱されたセンサを置き熱平衡状態にする。
- (2) センサをヒート・シンク上の被測定試料板上に移動させる。
- (3) センサ出力が十分に安定した後、出力をデジタル・ボルトメータで測り記録する。

センサ出力、センサ表面各部の温度及び試料温度の応答を図7に示す。センサ出力及びこれらの温度は、センサを試料上に移動させた後、約200秒で平衡値に達し、この時の P 、 T_1 、 T_4 及び T_s を記録した。なお、測定後、センサをヒートシンク上の研磨アルミニウム板上に返した後、約250秒で完全に初期の平衡状態に達する。

4.3 実測値と理論計算値の比較

金蒸着鏡、低温黒体炉及び3つの試料板に対するセンサ表面各部の温度の実測値と計算値を表3に示す。温度は銅コンスタンタン熱電対により精度 0.1°C で測定され、温度差 ΔT はセンサの出力電圧から変換された。実測値と計算値の差はそれぞれの測定においてお

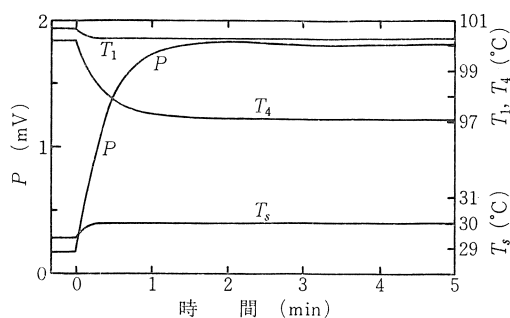


図7 放射率センサの出力及び温度の応答

およそ 0.2°C 以内であり、この差は ε_m の値にほとんど影響を及ぼさない程度に充分小さい。

試料の温度が変化すると、放射率センサの出力が変化する。試料温度の変化とセンサ出力の変化の関係は、試料放射率の温度特性を表わす比 R の値に従って大きく変化する。試料温度 T_s の変化と、被測定試料板と金蒸着鏡に対するセンサ出力の変化率 $(P(T_s) - P_A(T_s)) / (P(30^\circ\text{C}) - P_A(30^\circ\text{C}))$ の関係を図8に示す。実線は、それぞれの試料板に対応する $\varepsilon_s(100^\circ\text{C}) = 0.192, 0.860$ 及び 0.930 に対して、いくつかの比 R の値に対し計算された変化率である。図中の点は実測値を表わす。図8から評価される選択吸収板、ガラス板及び黒色塗装板に対する比 R の値は、それぞれ 0.85 、

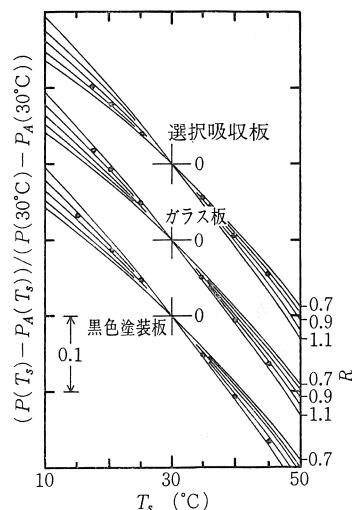


図8 試料温度とセンサ出力の比 R による変化 (縦軸の一目盛が0.1に対応、実線は理論曲線)

表3 放射率センサ表面各部の温度の実測値及び計算値

	金蒸着鏡		低温黒体炉		選択吸収板		ガラス板		黒色塗装板	
	実測	計算	実測	計算	実測	計算	実測	計算	実測	計算
T_1 ($^\circ\text{C}$)	100.90	100.72	100.51	100.34	100.65	100.57	100.27	100.11	100.29	100.07
T_4 ($^\circ\text{C}$)	100.13	100.41	97.28	97.26	99.43	99.65	97.25	97.31	97.09	97.11
ΔT ($^\circ\text{C}$)	0.078	0.040	1.150	1.145	0.321	0.276	1.015	1.009	1.080	1.073
T_s ($^\circ\text{C}$)	29.77	29.77	29.88	29.88	29.84	29.84	29.97	29.97	29.94	29.94

表 4 簡易放射率計による測定値の安定性

月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	平均
P_A [mV]	.186	.187	.129	.129	.137	.131	.126	.125	.126	.131	.133	.129	
P_B [mV]	2.023	2.044	1.946	1.947	1.912	1.922	1.920	1.924	1.922	1.919	1.919	1.922	
ϵ_m 選択吸収板	.241	.248	.245	.245	.245	.238	.243	.235	.239	.236	.236	.239	.241
ϵ_m ガラス板	.884	.885	.880	.874	.880	.873	.879	.874	.874	.876	.877	.833	.878
ϵ_m 黒色塗装板	.943	.940	.936	.936	.944	.933	.940	.933	.931	.927	.933	.930	.936

1.03 及び 1.00 であり、表 2 に示した比 R の値と良い一致を示す。

このように、理論計算値は実測データを正確に再現することができ、理論計算の手法の妥当性が証明される。

4. 4 測定された放射率値の信頼性

放射率測定値の長期にわたる安定性を調べるため、1 年間にわたり約 1 ケ月間隔で測定を繰返した。2 つの放射率基準及び 3 つの試料板に対する測定を 10 回繰返し、その平均値を表 4 のそれぞれの月の欄に示し、同時に放射率測定値の年平均値を示した。個々の測定におけるセンサ出力の分散は放射率値に換算して 0.003 であり、表に示した放射率値の年平均値からの最大のずれは 0.009 である。よって、この簡易放射率計により測定された値は、その変動がおおよそ ± 0.01 以内の非常に高い安定性を持つと言える。

表 4 に示した測定値の年平均値から図 5 の $R=1.0$ の曲線を用いて系統的誤差を補正して求めた選択吸収板、ガラス板及び黒色塗装板に対する $\epsilon_s(155^\circ\text{C})$ の値は、それぞれ $0.228(\epsilon_s(100^\circ\text{C})=0.205)$ 、 0.871 及び 0.933 である。これらの値は表 2 に示した放射率値とその差が約 0.01 で一致し、測定される放射率値も正確であると言える。

測定値が長期にわたり安定しており、同時に正確である。よって、簡易放射率計による測定値は高い信頼性を持つと言える。

5. 考 察

簡易放射率計が量産された場合、品質のゆらぎにより個々の放射率センサの特性が少しずつ変化することが考えられる。すなわち、理論計算に使用される表 1 に示したパラメータが少しずつ変動することが考えられる。表 1 に示したパラメータのうち特にヒータ温度、センサ各部の熱伝達係数及びセンサ表面各部の放射率が変化する可能性が大きい。また、センサの検知部マウントの温度 T_2 が式(13)で正しく近似されていない可能性も存在する。表 1 に示した放射率センサに関するパラメータ値を標準として温度 T_0 を $\pm 5.0^\circ\text{C}$ 、

熱伝達係数 $h_1, \dots, h_4$ を $\pm 20\%$ 、放射率 $\epsilon_1, \dots, \epsilon_4$ を ± 0.05 、 T_2 を $(2T_1+T_3+T_4)/4$ から $\pm 1.0^\circ\text{C}$ の範囲でそれぞれ変化させた場合に計算される ϵ_m 値の変動を求めた。計算された ϵ_m の変動は、それぞれのパラメータの変化の大きさに近似的に比例する。熱伝達係数 h_2, h_3 及び h_4 と温度 T_2 をそれぞれ上記の範囲で変化させた時の ϵ_m の変動巾は 0.0002 以下であり、また、熱伝達係数 h_1 、放射率 ϵ_2, ϵ_3 及び ϵ_4 の変化に対する ϵ_m の変動巾は 0.002 以内であった。温度 T_0 及び放射率 ϵ_1 に対応する ϵ_m の変動の巾はかなり大きく、いくつかの $\epsilon_s(100^\circ\text{C})$ 及び R の値に対する ϵ_m の変動巾（例えば $\epsilon_m(T_0=96.6^\circ\text{C})-\epsilon_m(T_0=106.6^\circ\text{C})$ ）を表 5 に示す。

表 5 放射率センサのパラメータが変動した時予想される測定値の変動の大きさ

	$\epsilon_s(100^\circ\text{C})=0.2$		$\epsilon_s(100^\circ\text{C})=0.5$	
	$R=0.7$	$R=1.0$	$R=0.7$	$R=1.0$
$T_0(96.6 \sim 106.6^\circ\text{C})$	$7 \cdot 10^{-3}$		$16 \cdot 10^{-3}$	
$\epsilon_1(0.90 \sim 1.00)$	$-12 \cdot 10^{-3}$	$-10 \cdot 10^{-3}$	$-8 \cdot 10^{-3}$	$-6 \cdot 10^{-3}$

このように、放射率センサを量産した場合、個々のセンサによる測定値の差を小さくするためには、ヒータ温度及びセンサ表面の最も大きい面積を占める高温センサ面の放射率を一定にすることが重要である。センサに関する諸パラメータの変化による放射率測定値の変化を ± 0.002 以内とするためには、センサの温度の変化を $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内、またセンサ表面の放射率の設計値からの変化を ± 0.02 以内にしなければならない。

6. 結 言

以上述べた実験及び理論解析の結果から次のことが結論される。

- 1) 30°C の試料板と約 100°C に加熱された放射率センサを用いて試料の 155°C における放射率を測定していると解釈することにより、測定値の含む系統的誤差が比 R に依存しなくなり、系統的誤差を簡単に補正することができる。
- 2) 1 年間繰返して測定された放射率値の変動は ± 0.01 以内であり、系統的誤差を補正した放射率の測

定値は他の装置により測定された値とも良く一致し、この簡易放射率計による測定値が高い信頼性を持つことを示した。

- 3) 簡易放射率計を量産した時予想される個々の放射率センサの特性の差による測定値の変化は、センサの温度制御の精度を $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内またセンサ表面の放射率の設計値からの変化を ± 0.02 以内とすることにより、 ± 0.002 以内とすることができる。

記号

A	面積 [m^2]
E	熱放射量 [W]
F	形態係数
h	熱伝達係数 [W/K]
I	入射熱放射量 [W]
O	出射熱放射量 [W]
P	センサ出力電圧 [mV]
Q	熱損失量 [W]
q	単位面積熱損失量 [W/m^2]
R	($=\varepsilon_s(30^\circ\text{C})/\varepsilon_s(100^\circ\text{C})$)
T	温度 [K , $^\circ\text{C}$]
T_3'	検知部低放射率部から出射する熱放射のスペクトル温度 [K , $^\circ\text{C}$]
ΔT	検知部低放射率部と高放射率部の温度差 [K , $^\circ\text{C}$]
ε	放射率
$\varepsilon_s(T)$	温度 T における試料放射率
σ	ステファン・ボルツマン定数

添字

A	金蒸着鏡
B	垂直型低黒体炉
c	対流
m	放射率センサによる測定値
r	熱放射
s	試料板
0	ヒータ
1	高温センサ面
2	検知部マウント
3	検知部低放射率部
4	検知部高放射率部

参考文献

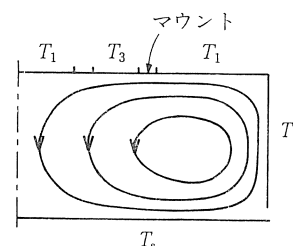
- 1) 種村栄・山東睦夫・野口哲男, 光熱変換材料の光選択吸収に関する最近の研究(その1)及び(その2), 高温学会誌, 6—5, (1980), 170 及び 6—6, (1980), 210.
- 2) 岡本朗・井上進, 選択吸収膜の放射率とその測定法について, 日本太陽エネルギー学会第6回研究発表会講演論文集 (1980), 21, 東京
- 3) R. B. Pettit and A. R. Mahoney, Portable Instrumentation for Solar Absorptance and Emittance Measurements, Proc. of Line-Focus

Solar Thermal Energy Technology Development Conf. (1980), Albuquerque, New Mexico, U. S.

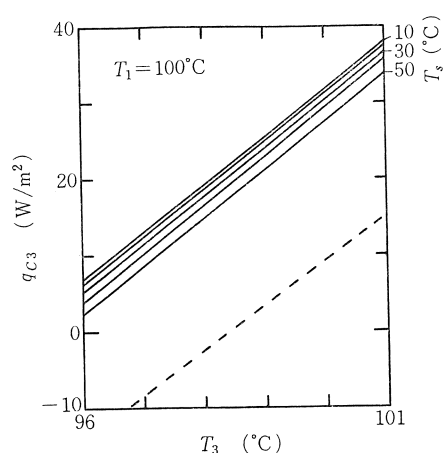
- 4) 山東睦夫・野口哲男, 簡易放射率計による測定値の系統的誤差とその補正, 太陽エネルギー, 10—1 (1984), 25.
- 5) Y. S. Touloukian, Thermophysical Properties of Matter Vol.9 Thermal Radiative Properties of Coatings, (1972), Plenum Press.
- 6) H. E. Bennet and W. F. Koehler, Precision Measurement of Absolute Specular Reflectance with Minimized Systematic Errors, J. Optical Society of America, 50-1 (1960), 1.
- 7) M. Jakob, Heat Transfer, Vol.1, (1949), John Wiley and Sons.
- 8) 水谷幸夫・香月正司訳, コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, (1985), 森北出版
- 9) M. Sando and T. Noguchi, A Simple Emittance Measurement of Selective Absorber Plate, Proc. 1983 ISES Cong., (1984), 1909, Perth, Australia.
- 10) 山東睦夫・種村栄・野口哲男, 半球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 (1980), 17, 東京.
- 11) Y. S. Touloukian, Thermophysical Properties of Matter Vol.8 Thermal Radiative Properties of Nonmetallic Solids, (1972), Plenum Press.

Appendix 対流熱伝達

対流に関する計算を行うために仮定されたセンサの表面及び試料面の軸対称な形状と温度分布を図A1に示す。センサの検知部マウントの温度分布は T_1 から T_3 に直線的に変化するとする。計算は時間を節約するためやや粗い 15×9 のメッシュ(実寸法で約2mmの正方メッシュ)を用いて行われた。温度 T_1 の垂直壁(アルミニウム製円筒面)の近くにある空気は加熱



図A1 対流熱伝達の計算のための軸対称モデル



図A2 検知部低放射率部の対流熱損失特性
(実線は試料板上、破線は低温黒体炉(30°C)上に対応)

されながら上昇する。加熱された空気は、センサの水平な面に沿って中心に向かって流れ、序々に降下を始める。この時、アルミニウム製円筒は大きな熱を失うが、加熱された空気がセンサ表面と試料の間の空間の上部に溜り、センサの検知部が失う熱は非常に小さくなる。 $T_1=100^\circ\text{C}$ の場合、検知部の低(高)放射率部が失う熱を図A2に示す。空気が対流を起さずに熱が空気の熱伝導のみにより伝わると仮定して計算した結果と比較した場合、センサの表面が全体として失う熱は対流が発生することにより増加するが、逆に、検知部が局所的に失う熱は対流の発生により大巾に減少する。

なお、計算される空気の流れが壁面近傍で速くなるため、対流の計算に使用する有限要素法のメッシュの大きさを壁面近傍でもっと細かくしなければならぬ。しかしながら、壁面近傍においてメッシュの巾を1/8に細かくした系を用いて計算した場合でも、計算に必要な時間が大巾に増大するが、センサの熱損失量の計算値は1割程度変化するのみである。また、図A2に示した検知部の低(高)放射率部からの熱損失特性の曲線の傾きはほとんど変化しない。このため、対流計算の精度を向上させても、表1に示した T_0 及び $h_1, \dots, h_4$ の値に微少な変化を与えるのみで、 ε_m の計算

値にはほとんど影響を及ぼさない。

加熱されたセンサを垂直型低温黒体炉上に置いた場合の空気による熱伝達も、センサと試料間の対流の場合と同様の方法で計算される。黒体炉内では、垂直な炉壁の近くで空気が冷やされ下降流が発生し、炉の中心部では上昇流が発生し、黒体炉内で近似的に1つの対流渦ができる。黒体炉の開口部とセンサ表面の間では、試料板とセンサの間で発生する対流と類似の渦パターンの対流が発生する。この時、センサの検知部低(高)放射率部が対流により失う熱を図A2に破線で示す。図A2の破線と実線はほぼ平行であり、黒体炉上にセンサを置いた時の空気による熱伝達と、やや高温の試料板上にセンサを置いた時の熱伝達とがほぼ同じであることを示している。これは、対流が発生した時、空気の温度分布が水平な面に沿って一様となる傾向があり、黒体炉の開口部がやや高温の試料板と同様の動きをするからであると解釈される。

図A1に示したモデルの対流による高温センサ面(T_1)、検知部マウント及び検知部低(高)放射率部(T_3)からの単位面積当りの熱損失量をそれぞれ $q_{c1}(T_1, T_3, T_s)$ 、 $q_{c2}(T_1, T_3, T_s)$ 及び $q_{c3}(T_1, T_3, T_s)$ で表わす。熱損失 q_{c1} 、 q_{c2} 及び q_{c3} は近似的に検知部低(高)放射率部の温度の線型な関数となり、センサ表面の各部からの対流による熱損失は次式により与えられる。

$$Q_{c1} = A_1(q_{c1}(T_1, T_3, T_s) + q_{c1}(T_1, T_4, T_s))/2 \quad \dots\dots\dots (A1)$$

$$Q_{c2} = (A_2 - 4A_3/41)(q_{c2}(T_1, T_3, T_s) + q_{c2}(T_1, T_4, T_s))/2 + (4A_3/41)(q_{c3}(T_1, T_3, T_s) + q_{c3}(T_1, T_4, T_s))/2 \quad \dots\dots\dots (A2)$$

$$Q_{c3} = A_3 q_{c3}(T_1, T_3, T_s) \quad \dots\dots\dots (A3)$$

$$Q_{c4} = A_4 q_{c3}(T_1, T_4, T_s) \quad \dots\dots\dots (A4)$$

センサを低温黒体炉上に置いた場合の対流によるセンサ表面各部からの熱損失も同様に計算される。

(昭和60年4月30日 原稿受理)