

空洞状熱形放射検出器に関する研究(1) —円錐形状検出器の実効吸収率の検討—

正会員 荒木 慶 和 (埼玉工業大学) 専門会員 中川 靖 夫 (埼玉大学)
 専門会員 大谷 文 雄 (埼玉大学) 専門会員 谷 治 環 (埼玉大学)
 非会員 越 智 幸 博 (埼玉大学) 正会員 大久保和明 (松下電器産業株式会社)

Study on Cavity Type Thermal Radiation Detector (1) —Consideration on Effective Absorption of Conical Cavity Detector—

Member Yoshikazu Araki (Saitama Institute of Technology)
 Fellow Member Yasuo Nakagawa, Fellow Member Fumio Ohtani,
 Fellow Member Tamaki Yaji, Non member Yukihiro Ochi (Saitama University)
 Member Kazuaki Ohkubo (Matsushita Electric Ind. Co., Ltd.)

ABSTRACT

The dependence of spectral response on wavelengths ranging from visible to infrared was observed using a thermal radiation detector whose surface had been covered with gold-black absorbent. Conical cavity type detectors decrease the effective reflectance through repeated reflections. Data concerning the correlation between the cone vertex (90°, 60°, 45°) and the various reflectances (0.1—0.6) of the absorbent on the cone were obtained.

KEYWORDS : thermal radiation detector, conical cavity, reflectance, absorptance

1. はじめに

分光放射測定や検出器の分光応答度の測定には、標準器として分光応答度が波長に対して非選択的であるような放射検出器が要望されていて、その目的で熱形放射検出器が使用されている。熱形放射検出器は、光放射を一旦吸収して熱に変換し、それによる温度上昇を熱電素子や焦電素子を用いて電気信号を得る光検出器の一種である。

従来までの熱形円錐形状(コーン形)検出器は¹⁾熱電対等を円錐形状の金属箔等に取り付けたもので、構造が複雑で製作が困難であり、受光面の位置により検出のばらつきがある可能性があり、かつ熱容量も大きく検出能力も良くなく、理論的検討も殆ど行われていなかった。熱の空洞放射体として、円錐形状のものに関する研究はいくつかあるが²⁾³⁾、これらは受光検出器としての検討はなされていない。また、W. R. Blevinら⁴⁾は熱形空洞円錐形状検出器として、円錐の側面に開けた穴から光を入射させ、円錐の開口面に置いた試料の反射率を測定する構造のものを報告している。

熱形放射検出器の光放射に対する分光応答特性は、受光面の光放射吸収材の分光吸収特性に大きく依存する⁵⁾⁶⁾。このようなものとして、ポリフッ化ビニリデン(PVDF)焦電フィルム上に放射吸収材として金黒を塗布した熱形放射検出器は、受光面の分光応答度の均一性、応答速度、ノイズ特性及び室温での使用が可能とい

う点から最適な素子の一つと考えられる。金黒は放射吸収材として、分光応答度の波長依存性のない最も優れたものの一つである。

筆者らはすでに紫外、可視域では、金黒塗布の熱形放射検出器は分光応答特性が波長に依存しないことを確認するとともに、そのような条件を満たす金黒の最適製作条件を報告した⁷⁾。しかし、この条件で作製した金黒を塗布した検出器は、可視長波長端から赤外域では分光応答特性に波長依存性が見られた。この対策としては、金黒の膜厚を厚くすることが効果があるが、それでも波長数 μm での赤外域の応答度の非選択性は保証しがたく、また膜厚を厚くすることによる応答度の低下、膜の脆弱化(剥離)が問題になる。そこでこれらの問題を解決する方策として、筆者らは検出器の受光面を空洞円錐形状(コーン形)に作り、入射光を繰り返して反射させて実効的な反射率を下げ、かつ波長依存性をなくすことを考案した⁸⁾。

今回、この形状の受光面の有効性を定量的に検証するために受光面の円錐の頂角及び受光面の吸収材の反射率を変え、それらが実効的な反射率に及ぼす影響を調べてみた。実験は製作の比較的容易な CaSO_4 (石膏)で模形的な受光面を作り、この受光面に灰色塗料を塗布した試料によって行った。金黒の代わりに反射率の高い灰色塗料を用いた理由は、金黒は反射率が小さく、したがって、反射率の測定値そのものの絶対値が小さく、試料の製作条件(頂角、反射率)の変化による測定値の変化(相対値)も小さくなるので、測定装置の精度から測定誤差が大きくなる可能性があり、効果を解析するには不適當であること、さらに、金黒を塗布した受光面では反射率を任意に変えにくいこと、を考慮したため

*本論文の一部は平成8年度照明学会全国大会で荒木慶和が講演した。
 本研究の一部は第5回照明学会研究・教育助成(一般研究)を受けて行われた。

である。そこで実験のための塗料としては波長依存性の少ない灰色塗料（つやあり、なし）を用いて、反射率0.1～0.6程度の間の5種類を試料に塗布した。受光面内部における繰り返し反射の状態と、それによる反射率の変化を解析するため塗料の反射の配光特性と分光反射率特性についても測定した。

この結果、灰色塗料を塗布した円錐形状の受光面の実効的な反射率は円錐の頂角及び、塗料の反射率に依存し、一般に頂角が小さく、かつ、塗料の反射率が低くなるほど、塗料自体の反射率よりも低下する度合いが大きいこと、また、その効果はつやのある塗布の方がより大きいことが認められた。そしてこれらの結果を説明するために、吸収と繰り返し反射のモデルによる近似計算式を立て、受光面を円錐形状にした効果による反射の減少の度合いを定量的に予測することを試みた。この結果、金黒を円錐形状の受光面の吸収材として塗布した場合の実効的な反射率を見積もることが可能になったので報告する。

2. 試料の製作と測定

空洞円錐形状熱放射検出器の受光面内部における繰り返し相互反射による反射の減少度を定量的に求めるため、製作の容易なCaSO₄（石膏）を用いて反射率測定のための平面形状試料及び円錐形状試料を製作した。図1に平面形状試料及び円錐形状試料の形状を示す。平面形状試料の直径、円錐形状受光面の口径は共に10mmとした。前述したように金黒は非常に反射率が低いため、測定装置への入射パワーが小さくなって誤差が増えるため、受光面内部の反射の解析を行うには適切ではないので、円錐形状受光面の効果をより定量的に検討するために波長による変化が少なく、反射率を任意に設定できる灰色塗料を、製作した試料の受光面上に塗布し、試料の反射率の測定を行った。なお受光面内部の繰り返し相互反射の解析を行うために平面形状試料で塗料の反射の配光特性を測定した。また、すべての試料について分光反射率の測定を行い、分光吸収率（分光吸収率=1-分光反射率とする）を求めた。

2.1 試料の製作

平面形状試料は、直径10mmのデルリン製のリングに石膏を流し込んで作った。円錐形状試料は以下の方法で製作した。まず、母型となるアルミ製の直径10mmの円錐（頂角が90度、60度、45度の3種）を用意し、次に、円筒状の鋳型（デルリン製、内径約17mm）に石膏を流し込み、母型の円錐を埋め込む。円錐は鋳型に固定する。そして、石膏が乾いた後に型を取り外す。以上のようにして、内に凹な円錐形状の空洞状受光面を製作した。

製作した試料は直径10mmの円となる平面及び内に凹な、円錐の

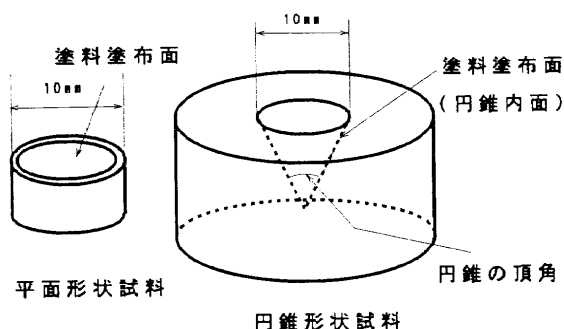


図1 平面状試料及び円錐状試料の形状
Configuration of plain and conical sample.

頂角が90度、60度、45度の3種類で、受光面に、反射率の異なる（約0.1～0.6）5種類のつやあり、なしの灰色塗料計40種類を塗布した。灰色塗料としては、つやなしは、つや消し白（アスペン製、水性）とつやなしブラック（日本ペイント製、水性）を混ぜ合わせて作り、つやのあるものは合成樹脂塗料（水性）ブラックとホワイト（共にカンベハビオ製）を混ぜ合わせて作った。この他に塗料なしのもの（反射率は約0.98）も試料として加えた。

2.2 測定方法

試料に塗布した塗料の反射配光を求めるために、平面形状試料によって次のような手順でゴニオフォトメータによる反射配光測定を行った。

- (1) 図2-1のxz平面内でx軸から θ_i の角度で入射を与え、xy平面内の反射を測定する。これを便宜上水平面配光とよぶ。
- (2) 図2-2のxz平面内でx軸から θ_i の角度で入射を与え、xz平面内の反射を測定する。これを便宜上垂直面配光とよぶ。

このような入射方法を用いたのは円錐内に円錐の軸に平行に入射したときの状態に近似させるためである。この場合 θ_i は円錐の頂角の1/2にするのがよいが、装置の関係で(1)では45度、(2)では60度とした。入射光はハロゲン電球光を光学チョップで断続したもので、遮光板とフィルタ（中心波長450、550、600nmのバンドパスフィルタ）を通して平面形状試料を照射した。試料の反射の配光特性の測定は、入射光軸を含む面（図2-2のxz平面）とそれに直交する面（図2-1のxy平面）について行った。

反射光の検出器にはSiフォトダイオードを使用した。Siフォ

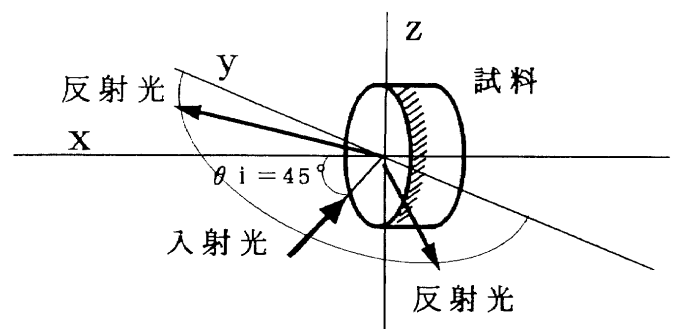


図2-1 試料の反射の水平面内配光特性測定の座標系
Coordinate system for measuring distribution of radiant intensity of sample reflection in a horizontal plane.

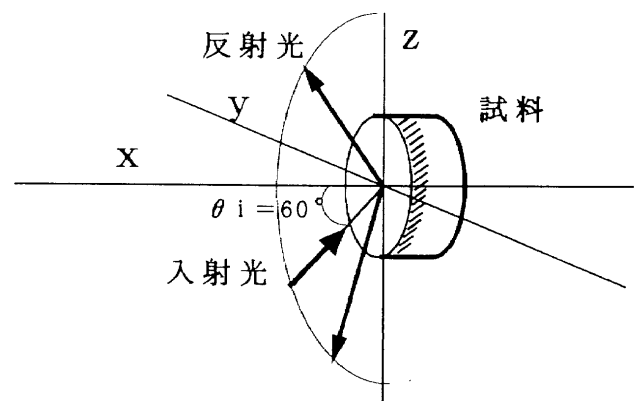


図2-2 試料の反射の垂直面内配光特性測定の座標系
Coordinate system for measuring distribution of radiant intensity of sample reflection in a vertical plane.

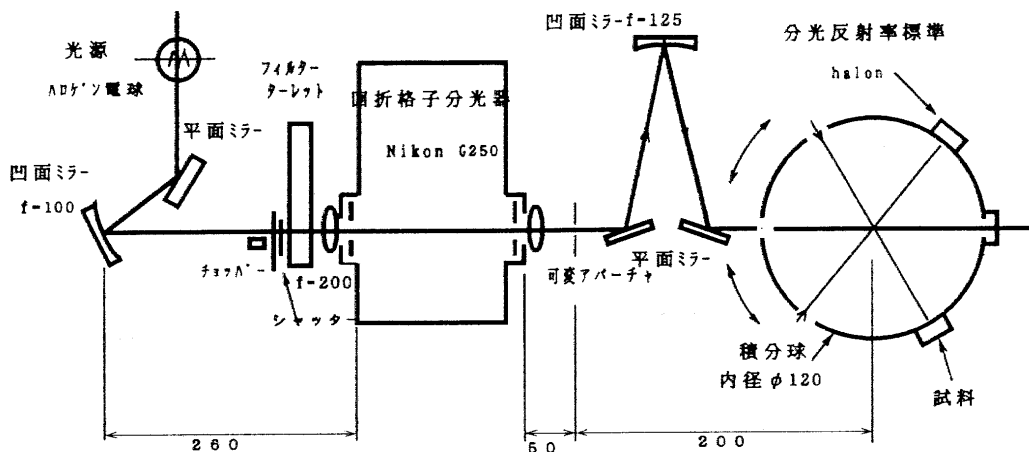


図3 分光反射率の測定光学系
Optical system for spectral reflectance measurement.

トダイオードの出力電流は、入力抵抗の十分に低い電流-電圧変換器 (I-V converter 時定数 2 ms, $R_f = 1 \text{ M}\Omega$) によって電圧に変換する。この電圧を、チョップによって変調 (12.5Hz) された入射光の電圧信号により、ロックインアンプ (時定数 0.3s) で同期検波し、その出力を読みとった。

次に各試料の分光反射率の測定を行った。測定光学系を図3に示す。入射光学系の構成は次の通りである。ハロゲン電球 (150W) を点灯し、平面ミラー、凹面ミラー ($f=100\text{mm}$) を用い、光学チョップ及び迷光除去用光学フィルタ・ターレットを通して、回折格子分光器の入射スリット前面の視野レンズ ($f=200\text{mm}$) で、回折格子面上に集光系 (ミラー) の像を投影した。チョップは回転セクタ形チョップ (12.5Hz) で、フィルタはコールドフィルタ B 形 (熱線反射フィルタ) と保谷 M10 を重ねたものを使用した。モノクロメータは Nikon G250 である。回折格子の分散像は出射スリットの前面に装着した視野レンズ ($f=40\text{mm}$) で、分光器の出射スリットの後方約 40mm のところに結像させ、この位置に置いた $\phi 5$ のアパーチャで、単色光を円形に切り出した。この円形の単色光を凹面ミラー ($f=125\text{mm}$) と 2 枚の平面ミラーで、積分球 ($\phi 120$) 内の試料の受光面 ($\phi 10\text{mm}$) 上へあふれることの無いように結像させた。

今回の測定には標準白色面として Halon 圧着面を使用した。分光反射率測定受光器は、光電子増倍管 R1463 (浜松ホトニクス製) を使用した。また、積分球は、その中心に対して、60度隔てて分光反射率標準の Halon 圧着面を照射する光路、試料の受光面を照射する光路の 2 つの光路に対する入射窓を設け、これらの光路を手動で切り替えた。光電子増倍管の出力電流は、入力抵抗の十分に低い電流-電圧変換器 (I-V converter, 時定数 2ms, $R_f = 1 \text{ M}\Omega$) によって電圧に変換する。この電圧を、チョップによって変調 (12.5Hz) された入射光の電圧信号により、ロックインアンプ (時定数 0.3s) で同期検波し、その出力を読みとった。

この測定はすべてコンピュータ制御による自動測定で行った。測定は、予めプログラムされた方法に従って、標準反射面と試料ごとの個別の波長走査を行い、測定する波長ごとに走査を一旦停止して、波長のデータを読みとる間欠波長走査とした。

標準反射面と試料の測定は、波長 400nm~750nm で 10nm おきに行った。モノクロメータの帯域幅は約 6.7nm である。読み取りは、各波長ごとに 1 秒間隔で 5 点測定し、その平均を測定値とした。

3. 結果

平面形状の試料に塗布した塗料の配光特性は水平面ではつやあり、なしのいずれもかなり完全拡散に近い特性を示した。これに対し垂直面ではかなり正反射成分がみられ、当然のことながら、これはつやありの方が著しかった。これらの特性はいずれも波長依存性は少なかった。これらの結果の例を図4、図5に示す。これらの図の横軸、縦軸はともに最大値を 1 に規格化した反射率を示している。また、図中の角度は垂直面内の原点 (試料の中心) からの鉛直角を表し、配光は 60 度を正反射方向とする角度表示で示した。最大反射率が約 50 度付近に出ている原因は、照射ビームの角度及び幅に誤差 (5 度程度) があることと試料平面の粗さ (平坦性) にバラツキがあるために生じたものと思われる。

次に平面形状試料と円錐形状試料 (頂角 β が 90 度、60 度、45 度の 3 種) について分光反射率特性の測定を行った。つやなしで反射率が 0.11 及び 0.63 の試料の測定結果をそれぞれ図 6-1 及び図 6-2 に示す。

これらの結果から、平面形状試料の反射率 (塗料自体の反射率) と円錐形状試料の実効反射率の関係を円錐の頂角をパラメータとし、平面形状試料の反射率 ρ_0 に対して、円錐内面に塗布したときの反射率を ρ_c とし、円錐にした効果による反射の減少度 kc ($kc = \rho_c / \rho_0$) を求めた。これをつやなし、ありについてそれぞれ図 7-1 及び図 7-2 に示す。ここで横軸は平面形状試料の反射率 (ρ_0)、縦軸は反射の減少度 (kc) を示し、頂角 90 度 (●, ○), 60 度 (▲, △), 45 度 (■, □) でプロットした。図 7-1 及び図 7-2 から円錐の頂角が小さいほど実効的な反射率が下がり、また、塗料自体の反射率 (ρ_0) が低いほど、実効的な反射率も下がること、さらにつやありの方が実効的な反射率の下がり方が大きいことが分かる。なお ρ_c , ρ_0 はいずれも 400~750nm の平均値である。

4. 検討

このようにして得られたデータに基づいて、以下のようなモデルを考えて検討を行った。

計算を容易にするために、反射の配光は水平面、垂直面ともに均等拡散であると仮定した。今回の測定結果では水平面の配光は均等拡散に近く、垂直面では鏡面反射成分がかなりある。円錐内面へ円錐軸とほぼ平行な入射に対して反射して開口面から出射する成分は、内面が再帰性のような指向性を持たなければ、拡散性

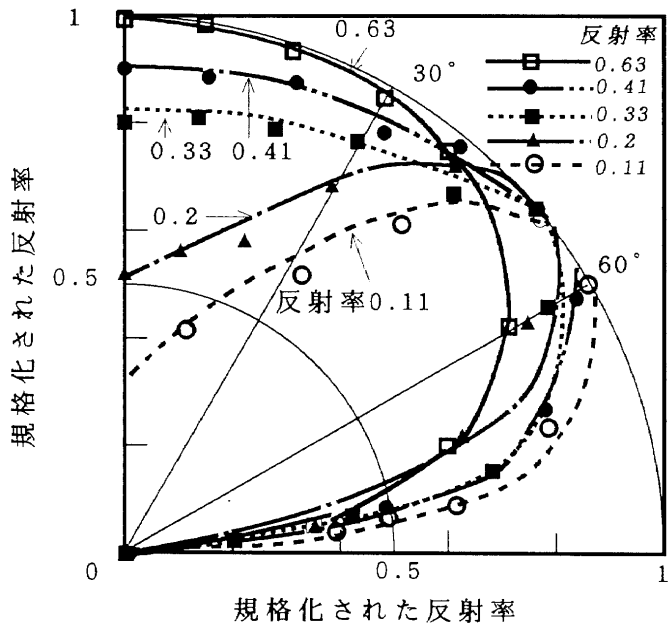


図4 つやのない灰色塗料の試料の垂直面内の配光特性 (反射率が0.11~0.63の5種類)
Characteristics of distribution of radiant intensity of the sample coated with gray paint in a vertical plane.

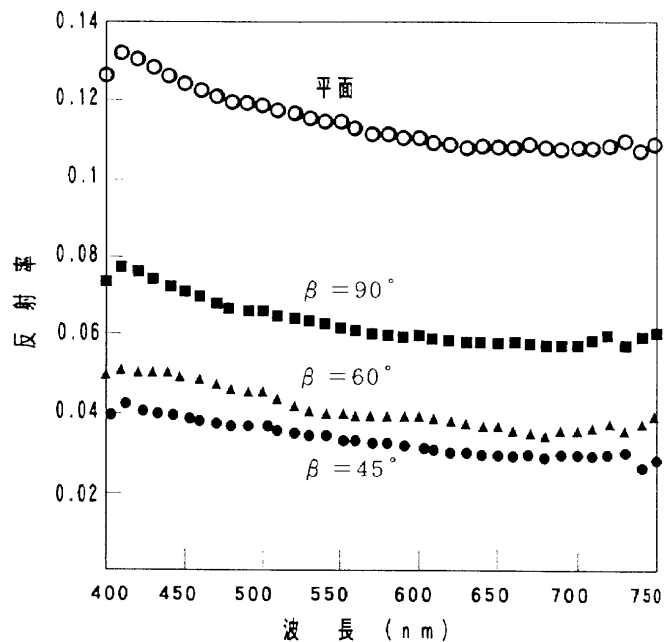


図6-1 つやのない灰色塗料の試料の分光反射率特性 (反射率が0.11)
Spectral reflectance of the sample coated with gray paint.

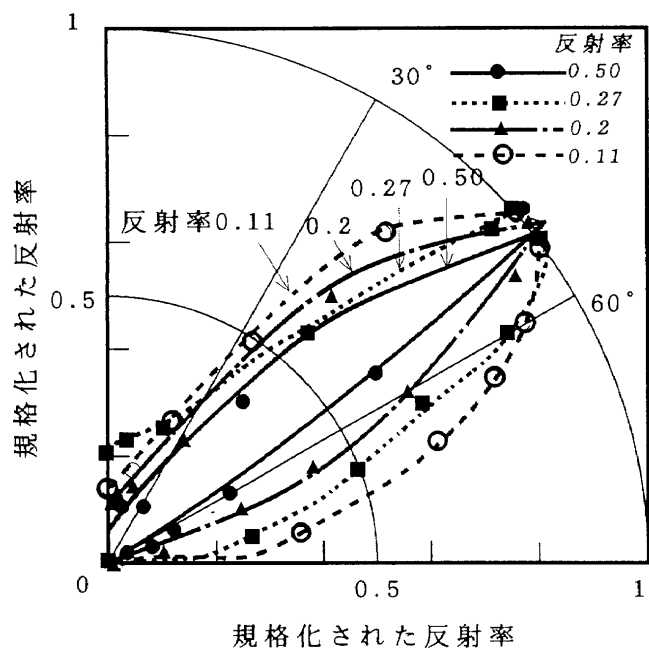


図5 つやのある灰色塗料の試料の垂直面内の配光特性 (反射率が0.11~0.55の4種類)
Characteristics of distribution of radiant intensity of the sample coated with gray glossy paint in a vertical plane.

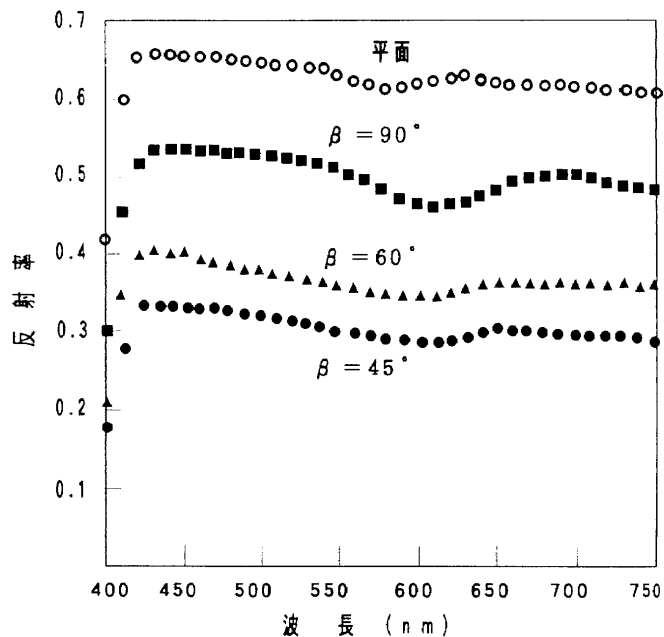


図6-2 つやのない灰色塗料の試料の分光反射率特性 (反射率が0.63)
Spectral reflectance of the sample coated with gray paint.

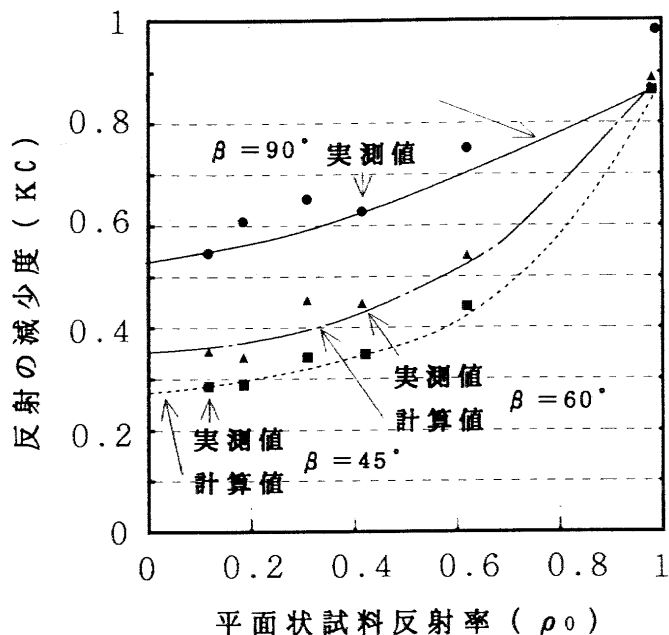


図7-1 つやのない灰色塗料の試料の反射率と反射の減少度の関係
Relation between reflectance of the sample coated with gray paint and degree of decrease in reflectance.

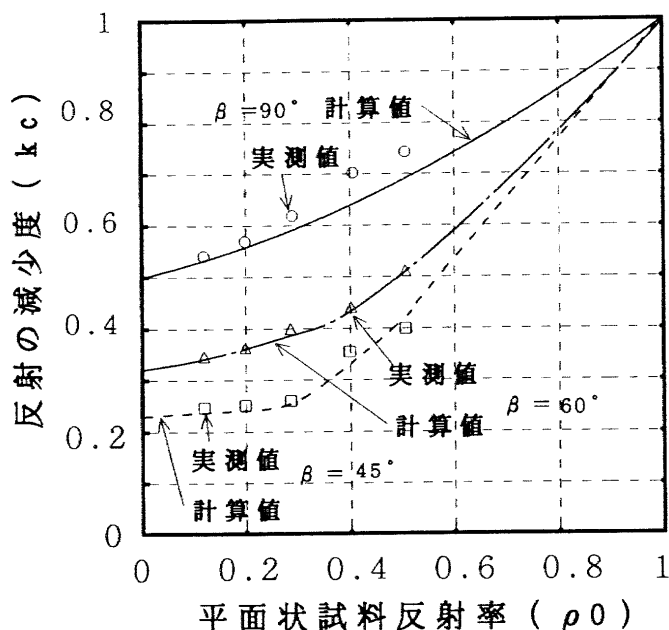


図7-2 つやのある灰色塗料の試料の反射率と反射の減少度の関係
Relation between reflectance of the sample coated with gray glossy paint and degree of decrease in reflectance.

が大きい方が1回の反射で射出する成分が増えるために、大きくなり、見かけの反射率は増加する。これに対して鏡面成分だけであれば、入射はすべて内面にn回(n=180°/頂角)反射して射出するので見かけの反射率は低くなる。実際の反射はこれらの反射の中間にあると考えられるので、ここでは解析が容易なCOSθ特性を満足する配光特性を仮定し、全体としての反射率を次の2つの成分①、②の和として求めた。

① 円錐の軸に平行で均一な入射に対する第1回目の反射によ

て、開口面から外に出ていく成分の全反射成分に対する割合 (R_{1T} と記す),

② 第2回目以降の繰り返し反射により、開口面から外に出ていく成分の割合(毎回の反射で開口面から外に出ていく割合を R_0 と記す),

この①を4.1で、②を4.2で検討した。

4.1 円錐内側面に均一に入射したとき、第1回目の反射による実効反射率の計算

ここでは、第1回目の反射により開口面から出ていく割合 R_{1T} の計算を頂角90度、60度、45度について行う。

平面形状試料と円錐形状試料の x, y, z 軸の原点は共通にする。すなわち、円錐形状試料の原点と平面形状試料の中心が xyz 座標系の原点となる。

(1) 頂角90度の場合

図8に第1回目の反射による反射の減少度の計算モデルを示す。図において入射光の反射点の開口面からの距離を ξ (mm)とする。今回製作した試料では開口面の直径が10mmであり、頂角 β は90度であるから、 ξ は0から $5\sqrt{2}$ までの値をとる。開口面で照度 E_0 の入射光は円錐の内側面に45度で入射するので、その面の照度は $E_0 \cos 45^\circ = (1/\sqrt{2}) E_0$ となる。

今任意の位置 ξ で微小幅 $d\xi$ の部分に入射した光の反射を考える。均等拡散反射を仮定しているので、反射光は余弦法則(COSθ特性)を満足する反射をする。ここで反射光が円錐内側面となす角を θ とすると、 θ が $-90^\circ \leq \theta \leq \alpha - 90^\circ$ を満足する反射光は開口面から外に出ていくことになる。角度 α は反射光が開口面端を通って出ていくときの、円錐内側面となす角である。この α を用いて ξ を表すと

$$\xi = 5\sqrt{2} \frac{\cos\alpha + \sin\alpha}{\sin\alpha} \quad (1)$$

次に位置 ξ における、開口面と平行な面の円錐の円周の半径を r (mm)とし、 α を用いて r を表すと

$$r = \frac{5\cos\alpha}{\sin\alpha} \quad (2)$$

また位置 ξ で幅 $d\xi$ の部分で光が当たる円錐内側面の面積は $2\pi r d\xi$ となる。位置 ξ (角度 α)における全反射光束のうち、開口面から出ていく反射光束の割合を $R_1(\alpha)$ とすると

$$R_1(\alpha) = \frac{\int_{-90^\circ}^{\alpha-90^\circ} \cos\alpha d\alpha}{\int_{-90^\circ}^{\alpha-90^\circ} \cos\alpha d\alpha} = \frac{1 - \cos\alpha}{2} \quad (3)$$

したがって全円錐内側面 $0 \leq \xi \leq 5\sqrt{2}$ の範囲に入射した光が開口面から出ていく割合 $R_{1T}(90^\circ)$ は

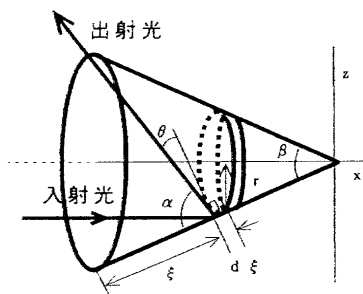


図8 第1回目の反射による反射の減少度の計算のモデル図
Model for calculating degree of decrease in reflectance at first reflection.

$$R_{1T}(90^\circ) = \frac{(1/\sqrt{2})E_0 \int_0^{5\sqrt{2}} R_1(\alpha) 2\pi r d\xi}{E_0 \int_0^{5\sqrt{2}} 2\pi r d\xi} \quad (4)$$

積分を ξ から α に変換して(4)式を整理して書き直すと

$$R_{1T}(90^\circ) = 0.707 \int_{135^\circ}^{90^\circ} \left(\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{\cos \alpha}{\sin^3 \alpha} - \frac{1}{\sin^3 \alpha} \right) d\alpha = 0.542 \quad (5)$$

したがって頂角90度では1回目の反射成分の約54%が開口面から出て行くことになる。

(2) 頂角60度の場合

頂角90度の場合と同様な考え方で、入射した光が開口面から出ていく割合 $R_{1T}(60^\circ)$ は

$$R_{1T}(60^\circ) = \frac{(1/2)E_0 \int_0^{10} R_1(\alpha) 2\pi r d\xi}{E_0 \int_0^{10} 2\pi r d\xi} \quad (6)$$

積分を ξ から α に変換して(6)式を整理して書き直すと

$$R_{1T}(60^\circ) = 0.2165 \int_{120^\circ}^{60^\circ} \left(\frac{\sqrt{3}}{\sin \alpha} + \frac{\cos \alpha - 1}{\sin^2 \alpha} + \frac{\sqrt{3}(\cos \alpha - 1)}{\sin^3 \alpha} \right) d\alpha = 0.294 \quad (7)$$

頂角60度の場合には反射成分の約29%が開口面から出て行く。

(3) 頂角45度の場合

頂角90度の場合と同様な考え方で、入射した光が開口面から出ていく割合 $R_{1T}(45^\circ)$ は

$$R_{1T}(45^\circ) = \frac{0.383E_0 \int_0^{13.1} R_1(\alpha) 2\pi r d\xi}{E_0 \int_0^{13.1} 2\pi r d\xi} \quad (8)$$

積分を ξ から α に変換して(8)式を整理して書き直すと

$$R_{1T}(45^\circ) = 0.1995 \int_{112.5^\circ}^{45^\circ} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - \frac{1}{\sin^2 \alpha} + \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} - \frac{1}{\sin^3 \alpha} + \frac{\cos \alpha}{\sin^3 \alpha} \right) d\alpha = 0.191 \quad (9)$$

頂角45度としたときは1回目の反射成分の約19%が開口面から出ていく。

ここで導出した式は、円錐の中心軸と入射方向とで形成される面(xz平面)内で拡散的に反射された光束をあつかっている。しかし、実際に入射光は開口面に垂直に入射し、反射光は3次元的に全空間に放射されことになる。これら3次元の全てについて、入射した光が開口面から出ていく割合 R_{1T} を解析的に計算することは困難である。そこで、ここで求めた二次元の計算の値の妥当性を付録で検討した。付録では入射光及び反射光がxz平面に平行な面内にある場合および入射光がxz平面に平行で、反射光は、中心軸を通り開口面に垂直な面とある角度をなす平面内に進む場合を考えた。そして、頂角90度の場合について約10%の範囲で二次元の計算結果が三次元の場合にも適応可能であることが予測された。また、ここで計算した第1回目の反射の割合 R_{1T} の推定誤差が10%以上あっても、次の4.2で述べる第2回目以降の反射成分を実験的に取り込むことにより、実効反射率の実測値を説明することができる。

4.2 第2回目以降の反射による実効反射率の計算

ここでは第2回目以降の反射により開口面から出ていく割合 R_S を一定と仮定した場合の繰り返し反射による実効反射率を計算する。ここで、 R_S を一定と仮定した理由は、2回目以降の反射により開口面から出ていく割合は、1回目の反射により出ていく

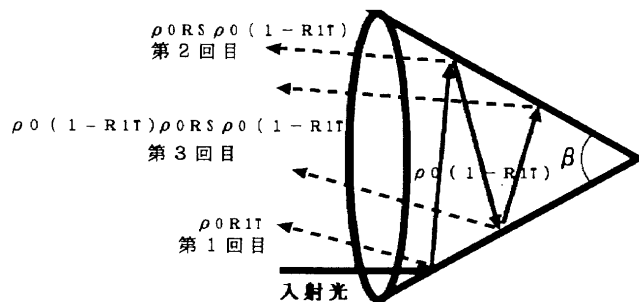


図9 繰り返し反射による実効反射率計算のモデル図
Model for calculating effective reflectance through repeated reflections.

割合に比べて小さく、特に ρ_0 が小さいときは非常に小さくなるからである。

図9に複数回の繰り返し反射を考慮した実効反射率の計算モデルの説明図を示す。次のような過程で反射、吸収を繰り返すとする。まず4.1で述べた均一な照射による第1回目の反射により開口面から出ていく光の割合は $\rho_0 R_{1T}$ と表せる。従って残りの $\rho_0 (1 - R_{1T})$ が円錐内側面に入射する。この入射した光のうちのある割合 (R_S) が第2回目の反射により開口面から外に出ていくことになる。このときの円錐内側面に入射する光の強度は開口端からの距離 ξ によって変化し、一定ではないため、光の強度を位置の関数として計算する必要がある。 R_S は均一な入射光を仮定した R_{1T} とは異なった値になる。

そして、第2回目の反射により、 $\rho_0 R_S \rho_0 (1 - R_{1T})$ が開口面から出ていく。従って残りの $\rho_0 (1 - R_S) \rho_0 (1 - R_{1T})$ が円錐内側面に入射する。この過程を繰り返すことになるが、3回目以降の成分は非常に小さくなるので、計算を簡略化するため、これ以降の反射により光が開口面から外に出ていく割合 R_S を一定と仮定する。

第3回目の反射では $\rho_0 R_S \rho_0 (1 - R_S) \rho_0 (1 - R_{1T})$ が外に出ていく。この様にして、開口面から外に出ていく割合を合計したものを R_T とすると、

$$R_T = \rho_0 R_{1T} + \rho_0 R_S \rho_0 (1 - R_{1T}) + \rho_0 R_S \rho_0 (1 - R_S) \rho_0 (1 - R_{1T}) + \dots$$

$$= \rho_0 R_{1T} + \rho_0^2 R_S (1 - R_{1T}) \frac{1}{1 - \rho_0 (1 - R_S)} \quad (10)$$

この実効的な反射率と平面形状の反射率の比は kc なので、

$$kc = R_{1T} + \rho_0 R_S (1 - R_{1T}) \frac{1}{1 - \rho_0 (1 - R_S)} \quad (11)$$

となる。これは受光面を円錐形状にすることによって、どれくらい反射率が減少するか(吸収率が増加するか)を示す目安となる値である。

4.1の均等拡散を仮定した計算結果から、頂角90, 60, 45度に対して、 R_{1T} はそれぞれ0.542, 0.294, 0.191と求めた。(11)式より R_{1T} は図7-1の図中の $\rho_0 = 0$ における kc の値に対応している*。(11)式で正確に kc を求めるためには、 R_{1T} の値及び R_S の値が正確に求まっていなければならない。 R_{1T} の値を正確に求めるためには、今回仮定したような均等拡散ではなく、実際の反射光の配光特性を取り入れた計算を行う必要がある。また、 R_S の値を求めるためには、まず各反射ごとの円錐内側面における放射強度の

*実際に $\rho_0 = 0$ であると反射が全くなくなるわけであって、 kc の意味がなくなる。ここでは、 $\rho_0 = 0$ は kc の極限値を求めるための極小値と考える。

分布を求め、それらを用いて各反射ごとの R_s を求める必要がある。これら R_{1T} , R_s の計算は連立の積分方程式を解くことにより可能と考えられるが³⁾、複雑な数値計算を要するため、今回は実測値を用いた簡便な方法で R_{1T} , R_s を見積り、(11)式にあてはめ、実測値との比較を行った。すなわち、つやなし塗料の実測値のうち ρ_0 が最も小さい値 (0.11) のときに、頂角90, 60, 45度に対して、 kc はそれぞれ0.55, 0.36, 0.29であって、これらの値が前述した計算による R_{1T} に近い値になることを考慮して、 R_{1T} と R_s の種々の組み合わせを逐次代入して計算を行い実測の kc を満足するような R_{1T} と R_s の値を得た。この結果、 R_{1T} の値は頂角90, 60, 45度についてそれぞれ0.52, 0.30, 0.20, R_s の値はそれぞれ0.60, 0.35, 0.25となった。このように求めた R_{1T} , R_s を式(11)に代入して求めた計算値を図7-1中に示したところ ρ_0 の各値について実測とよく一致することが分かった。この結果から、頂角90, 60, 45度の円錐形状試料について、任意の反射率の塗料を塗布した試料の実効的な反射率を見積もることができる。

例えば、頂角90度の円錐形状試料について、反射率0.6の塗料を塗布した場合、実効反射率が0.45 (反射の減少度0.75) に減少するのに対して、反射率0.1の塗料を塗布した場合は実効反射率が0.05 (減少度0.5) に減少する。また、反射率0.5の試料について、頂角90度の場合、0.35 (減少度0.7) に減少するのに対して、頂角45度の場合、実効反射率が0.2 (減少度0.4) になる。

ここで $\rho_0 \approx 0$ の場合、(11)式は

$$kc = R_{1T} + \rho_0 R_s (1 - R_{1T}) \quad (12)$$

これから、頂角を45度、反射率0.01の試料の場合、実効反射率は0.003程度になることが予測できる。したがって反射率が0.01程度の金黒を円錐形状の受光面の吸収材として塗布し、円錐の頂角を変えたときの実効的な反射率を見積もることが可能になった。次に図6-1 (反射率0.11の試料) 及び図6-2 (反射率0.63の試料) の実測値から波長410nm~700nmにおける分光反射率の非選択性を (分光反射率の最大値-最小値)/(分光反射率の最大値+最小値) で評価した。この結果、反射率0.11の試料については、非選択性に近づける効果は平面形状試料に比較して頂角90度ではあまり認められなかったが、45度の場合は波長選択性が平面形状の約半分になり、かなりの効果が見られた。また、反射率0.63では頂角90度、45度とも効果は見られなかった。この結果反射率が低いほど、また、円錐の頂角が小さいほど分光反射率が非選択性に近づくことが分かった。

5. おわりに

分光応答特性が波長に依存しない検出器として、受光面を円錐空洞状にした熱形放射検出器の基礎的検討を行った。この目的のために円錐空洞状の試料に反射率が約0.1~0.6の間の5種類の灰色塗料 (つやのあるもの、つやのないもの) を塗布し、受光面内部における繰り返し反射の状態と、それによる実効反射率の変化を知るため、反射の配光特性と分光反射特性を測定した。この結果、灰色塗料を塗布した試料を円錐形状にしたことによる、反射の減少度が、円錐の頂角及び塗料の反射率に依存することを見出した。そしてこれらの結果を、吸収と繰り返し反射のモデルによる近似計算式を立て、受光面を円錐形状にした効果による反射の減少度を数量的に求めることができた。この結果、頂角が小さくなるほど、また塗料の反射率が低くなるほど、円錐形状にしたことによる反射率の減少効果が大きくなり、波長非選択性が改善されることが分かり、任意の反射率の塗料に対して円錐の効果に

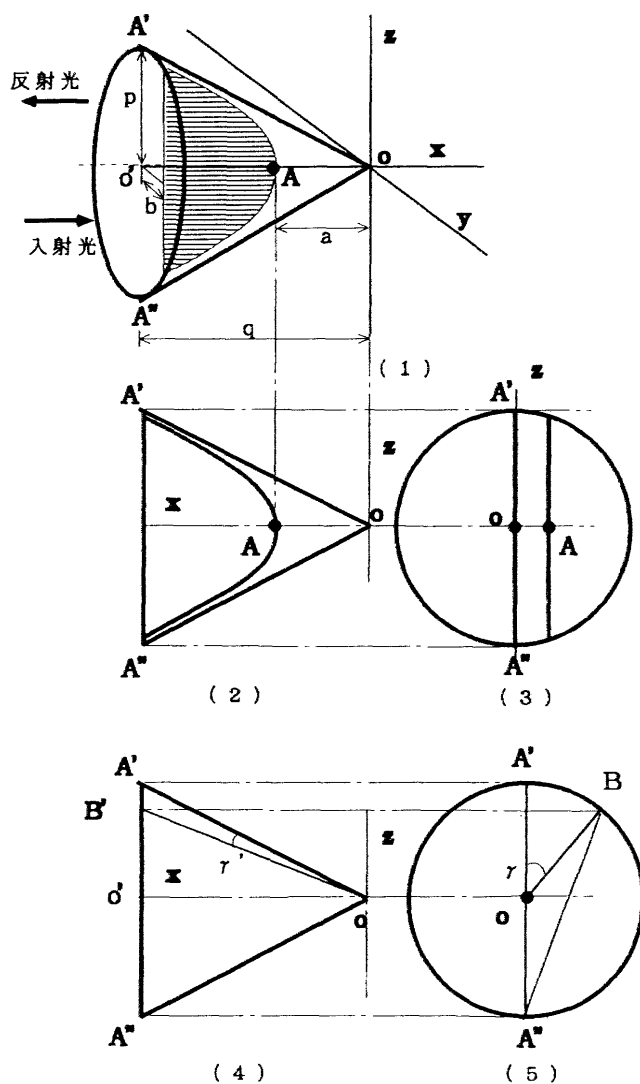
よる実効的な反射率がどの位になるかを予測することが可能になった。しかし、頂角が小さくなるほど実効的な反射率は低くなり、反射率の波長非選択性は改善されるが、検出器としての応答度が低下し、入射角特性が悪くなる。そこで今後は応答度と入射角特性を良く保って、応答度の波長非選択性を広くすることが課題である。

今回は実効反射率の計算式として、均等拡散を仮定して、実測値を用いてパラメータを決定した。しかし、より実際の現象に則した理論を確立するためには、反射の配光特性を考慮した実効反射率の計算を行う必要がある。

さらに、金黒を用いた空洞状熱形放射検出器に対して最適な円錐の頂角の検討、及び赤外域での応答度の波長非選択性の検討を行う予定である。

付録

試料の円錐を斜め横から見たものを付図1(1)に示す。円錐 $OA'A''$ の頂点 O を原点とし、図に示すように x, y, z 軸をとる。ここで、円錐の中心軸を x 軸とし、 $A'A''$ は円錐の開口面の直径である。本文中では反射光が xz 平面内にある場合を計算した。



付図1 3次元の反射の計算モデル図
Model for calculating three-dimensional reflection.

一般には、xz 平面に平行に入射した光は反射後三次元的に反射するが、以下の2つの場合を検討した。

まず、第一に、入射光及び反射光がxz 平面に平行な面内にある場合を考える。入射光が $y=b$ の位置でxz 平面に平行に入射し、原点Oから a だけ離れた点Aで反射する場合を考える。開口面の中心をO'とし、 $A'O'=p$ 、 $OO'=q$ とすると、試料の円錐の錐面の方程式は

$$q^2(y^2+z^2)-p^2x^2=0$$

と書け、この錐面をxz 平面に平行な $y=b$ で切断するときの切り口は

$$\frac{x^2}{\left(\frac{qb}{p}\right)^2}-\frac{z^2}{b^2}=1$$

と書き表され、この曲線はxz 平面における $z=\pm(p/q)x$ （すなわち直線OA'、OA''）を漸近線とする双曲線となる。今、説明を簡単にするために、円錐の頂角が90度の例を取り上げる。

付図1(1)に示す円錐の開口面を紙面に垂直に置き、それを真横から見た側面図を付図1(2)に示す。また、円錐を真上（開口面に垂直）から見た図を付図1(3)に示す。ここで、A'、A''はxz 平面と開口面の円周との交点であり、A'A''は開口面の直径となる。円錐面の切断曲線はOA'及びOA''を漸近線とする双曲線である。この双曲線(AA'')に入射した光が開口面から出ていく割合 R_{1T} は a の大きさに依存し、 a が0（入射光が中心軸と一致する）の時は、本文で計算した $R_{1T}=0.542$ になる。また、 a が最大値（入射光が円周を通る）を取るときは $R_{1T}=1$ となる。入射光の位置により a は0から5の間の値をとり、この時 α は90度から135度の間を変化する。そこで a がこれらの中心値2.5を取り、この時 $\alpha=108$ 度となるので、この時の R_{1T} の値を計算し、

$$R_{1T}(90^\circ)=0.707 \int_{135^\circ}^{108^\circ} \left(\frac{1}{\sin\alpha} + \frac{\cos\alpha}{\sin^2\alpha} - \frac{1}{\sin^3\alpha} \right) d\alpha = 0.702$$

と求まる。ここで、入射光のうち、中心に近い(a が0に近い)ところの割合が円周に近いところの割合に比べて大きいので、 R_{1T} は0.542に近い値をとることになる。

次に、入射光がxz 内にあり、反射光が、xz 面と円錐の交わる母線に関し、xz 面と角 γ をなす平面内に進む場合を考える。円錐の開口面を紙面に垂直に置き、それを真横から見た側面図を付図1(4)に示す。また、円錐を真上（開口面に垂直）から見た図を付図1(5)に示す。このとき、反射光が円錐面を切断する面は二等辺三角形となる。この二等辺三角形を $\triangle OA'B$ とする。付図1(5)の点Bが付図1(4)のA'A''上に射影される点をB'とし、 $\angle A'OB=\gamma$ 、 $\angle A'OB'=\gamma'$ とする。今、説明を簡単にするために、円錐の頂角が90度の例を取り上げる。ここで、 γ は0から90度の範囲で変化し、このとき γ' は0度から45度の範囲で変化する。 γ' が0度の場合、反射光がxz 面内にあり、本文で計算した $R_{1T}=0.542$ になる。 γ' が45度の場合の R_{1T} は本文中の頂角が60度の場合と同様になり、 $R_{1T}=0.294$ となる。ここで γ' が任意の値を取る時の R_{1T} の値の計算は複雑であり、 γ' が0度と45度の平均値22.5度の時の R_{1T} の値を計算すると、0.407となった。ここで反射光のうち、 γ' が0度の占める割合が大きいので、 R_{1T} の値は0.542に近い値になる。第一の場合は $R_{1T}=0.542$ よりやや大きな値(概算で0.6程度)を取り、第二の場合は $R_{1T}=0.542$ よりやや小さな値(概算で0.4程度)を取り、全体の平均としては R_{1T} は0.5程度となり、本文で述べた $R_{1T}=0.542$ と10%程度の範囲内で一致することが予想できる。

参考文献

- (1) Ralph Stair, William E. Schneider, William R. Waters, and John K. Jackson: "Some Factors Affecting the Sensitivity and Spectral Respose of Thermoelectric (Radiometric) Detectors", Appl. Opt. 4, pp.703-710 (1965)
 - (2) W. L. Eisenman, R. L. Bates, and J. D. Merriam: "Black Radiation Detector", J. Opt. Soc. Am. 53, 729-734 (1963)
 - (3) E. M. Sparrow and V. K. Jonsson: "Radiant Emission Characteristics of Diffuse Conical Cavities", J. Opt. Soc. Am. 53, pp.816-821 (1963)
 - (4) W. R. Blevin and Jon Geist: "Infrared Reflectometry with a Cavity-Shaped Pyroelectric Detector", Appl. Opt. 13, 2212-2217 (1974)
 - (5) 大久保, 中川, 大谷, 中村: 熱形放射検出器受光面の可視域 分光吸収特性と分光応答度の検討, 照学誌, 78-6, pp.255-262 (1994)
 - (6) 大久保, 中川, 大谷: 放射吸収層に蛍光の発光があるときの熱形放射検出器の分光応答特性, 照学誌, 78-6, pp.263-267 (1994)
 - (7) 大久保, 荒木, 中川, 大谷, 馬淵: 受光面に金黒を付着した熱形放射検出器の分光応答特性, 照学誌, 79-5, pp.234-241 (1995)
 - (8) 大久保, 荒木, 中川, 大谷, 稲葉: 金黒を付着した円錐状の熱形放射検出器の分光応答特性: 平成7年照明学会全国大会予稿164 (1995)
- (受付日1996年5月7日/採録日1997年10月2日)

あらき よしかず
荒木 慶和 (正会員)



埼玉工業大学工学部
〒369-02 埼玉県大里郡岡部町普濟寺1690
昭和20年11月2日生まれ。昭和45年3月東京農工大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年7月株式会社日立製作所入社。昭和51年埼玉工業大学講師。現在同学助教授(工学部電子工学科)。半導体の光電特性・センサ・信頼性、放射測定および教育工学に関する研究に従事。電子情報通信学会、電気学会、応用物理学会、IEEE、SEDA 各会員

なかがわ やすお
中川 靖夫 (専門会員)



埼玉大学工学部
〒338 埼玉県浦和市下大久保255
昭和9年12月15日生まれ。昭和32年3月東京都立大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)リコー入社。昭和40年4月埼玉大学助教授。現在同学教授(工学部電気電子システム工学科)。電気電子計測、計測データ処理、オプトエレクトロニクスの講義担当。紫外・赤外放射測定、分光測定法の研究に従事。昭和43年工学博士。昭和41年日本写真学会技術賞、昭和45年照明学会研究奨励賞、昭和44年照明学会賞、平成3年照明学会論文賞受賞。電気学会、応用物理学会、日本分光学会、日本写真学会、OSA 各会員。



おおたに ふみお
大谷 文雄 (専門会員)

埼玉大学工学部
〒338 埼玉県浦和市下大久保255
昭和21年11月1日生まれ。昭和40年3月埼玉県立浦和工業高校卒業。同年4月埼玉大学工学部電気工学科文部技官。現在同学工学部電気電子工学科勤務。光学ファイバー束の測光への応用、紫外・赤外放射測定技術の研究に従事。昭和58年照明学会研究奨励賞、平成3年照明学会論文賞受賞。



おち ゆきひろ
越智 幸博 (非会員)

(株)サトー
埼玉県大宮市大成町1-207
昭和46年11月30日生まれ。平成8年3月埼玉大学工学部電子工学科卒業。同年4月(株)サトーに入社。現在研究開発部勤務。なお本研究は埼玉大学在学中に行ったものである。



やじ たまき
谷治 環 (専門会員)

埼玉大学工学部
〒338 埼玉県浦和市下大久保255
昭和30年11月20日生まれ。昭和58年3月慶応義塾大学大学院工学研究科博士課程電気工学専攻終了。同年4月埼玉大学工学部電子工学科助手。現在同学助教授(工学部電気電子システム工学科)。分光測定、赤外放射測定および光デバイスの開発に関する研究に従事。昭和58年工学博士。平成3年照明学会論文賞受賞。電子情報通信学会、応用物理学会、日本光学会、日本赤外線学会各会員。



おおくぼ かつあき
大久保和明 (正会員)

松下電器産業(株)照明研究所
〒619-02 京都府相楽郡精華町光台3-4
昭和28年4月2日生まれ。昭和54年3月埼玉大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程終了。同年4月松下電器産業株式会社に入社し、松下電子工業株式会社照明事業部に出向。昭和57年5月松下電器産業株式会社照明研究所に所属し現在にいたる。主として測光測色および紫外・赤外の放射測定に関する研究に従事。平成7年学術博士。昭和63年照明学会研究奨励賞、平成3年照明学会論文賞受賞。電子情報通信学会、日本色彩学会会員。