

空洞状熱形放射検出器
に関する研究

1998年3月

埼玉大学大学院理工学研究科（博士後期課程）

情報数理科学専攻（主指導教官 中川靖夫教授）

荒木慶和

要 旨

分光放射測定や検出器の分光応答度の測定に用いられる放射検出器として、分光応答度が広い波長範囲で一定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。熱形放射検出器の放射吸収層は、入射した放射に対する吸収率が高く、入力した放射を熱に変換し、それを熱電変換素子面に効率よく伝達させるために熱伝導度が大きいことも必要となる。これらの要求を満たす放射吸収層材料として、金属黒が用いられている。先行研究により、吸収層が十分厚いときには、放射吸収層の分光吸収特性が、検出器の分光応答特性とよく一致すること、また、金属黒を放射吸収材とした熱形放射検出器の応答度が金属黒膜厚依存性を有することが明らかになった。

本研究では、その結果を解析して、まず、金属黒を受光面（放射吸収層）とした平面形状の熱形放射検出器の金属黒膜厚が変化したときに、分光応答度が変化する状態を放射吸収層内の入射エネルギーの吸収、反射を考慮したモデルを導入して検討して、まず、入射光が放射吸収層の表面付近で吸収され、そこから放射吸収層内を熱となって伝導すると仮定するモデルを定式化し、その式と実測値を用いて、吸収係数と損失係数を見積もった。

さらに、より正確なモデルとして、入射光が放射吸収層内で徐々に吸収され、吸収された位置で熱に変換され、そこから放射吸収層を熱となって伝導すると仮定したモデルを考案し、見積もった吸収係数と損失係数を用いて、有効発熱量の金属黒膜厚依存性の計算結果と実測値を比較した。この結果、今回考案したモデルで分光応答度の金属黒膜厚依存性が説明できることが分かった。

しかし、紫外・可視域で良好な応答特性を示す条件で作製した金属黒を比較的薄く塗布した検出器は、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生じた。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

光面を内に凹の空洞円錐形状(コーン形)に作り、入射光を繰り返し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。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た。実験は製作の比較的容易なCaSO₄(石膏)で模形的な受光面を作り、この受光面に波長依存性の少ない反射率0.1~0.6程度の間5種類の灰色塗料(つやあり、なし)を塗布したモデル試料を用いて行った。この結果、モデル試料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料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、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。

上記円錐形状受光面の基礎的検討を基に金黒塗布空洞円錐形状熱形放射検出器の特性の検討を行った。まず、紫外・可視域における検出器の分光反射率および分光応答度を測定した。これにより、金黒膜厚が11 μ mの平面形状検出器の反射率0.8%が、空洞円錐形状にすることにより、0.15%程度になり、約1/5に減少することが分かった。また、分光応答度の平坦性(波長に対する一定性)の外れが $\pm 0.3\%$ 以内である放射検出器を実現する見通しを得た。

次に、赤外域における金黒塗布空洞状熱形放射検出器の特性を検討した。紫外・可視域で良好な特性を示した金黒膜厚11 μ mの検出器は、可視域と比較して赤外域では金黒の吸収率が低くなり、従ってこの領域での応答度の低下と波長選択性が生じた。そこで、改めて、紫外・可視域とは異なる条件で、応答度ができるだけ高く、かつ波長に対して非選択性である金黒の製作条件を検討し

た。この結果窒素ガス圧2.0torrで作製した膜厚70 μ m以上の金黒を塗布した平面形状試料が波長0.6~2.2 μ mにおいて、反射率が1%未満となることが確認でき、さらに空洞円錐形状に加工することにより、頂角30度の検出器は反射率が0.2%以下になることが分かった。この金黒塗布空洞円錐形状検出器の反射率の頂角及び金黒の反射率依存性をモデル試料（灰色塗料）で導いた計算式を用いて説明した。これらの検討により3%程度の反射率の金黒を70 μ m程度付着し、これを頂角60度の円錐形状にすることによって赤外域においても、反射率が1%以内で反射率、応答度が一定であるような波長非選択性の熱形放射検出器の実現の可能性が確認できた。

Study on Conical Cavity Type Thermal Radiation Detector

ABSTRACT

A radiation detector with constant spectral responsivity is needed as a reference standard when measuring optical radiation power and the spectral responsivity of a radiation detector. Until now thermal radiation detectors have been used as the reference standard. A thermal detector is one of the photosensors which absorbs optical radiation and transfers it to heat. Then an increase in temperature generates an electric signal through a thermoelectric or pyroelectric effect. Although the spectral responsivity of a thermal radiation detectors has been considered to be dependent on spectral absorption characteristics of the receiving surface, it has not been investigated thoroughly yet. Therefore the authors fabricated a plain type thermal radiation detector with evaporating gold-black as the surface absorbent attached to a thermoelectric detector. The spectral responsivity of the thermal radiation detector under different evaporating conditions was investigated and the best conditions for the highest degree of spectral responsivity were reported.

The dependence of the relative spectral responsivity of thermal radiation detectors on the thickness of the gold-black layer was studied using models that consider absorption and reflection of incident radiant energy within the absorber. In the models, incident radiant energy is absorbed near the surface and transmitted through the gold-black absorber as heat. The models were formulated, and the absorption and loss coefficients were estimated using the formulation and real data. In an effort to gain more accurate models, incident radiant energy was assumed to be absorbed gradually within the absorber and transmitted through it as heat. The dependence calculated using the models corresponded well with the experimental data.

In order to attain a highly sensitive thermal radiation detector with constant spectral responsivity, conical cavity type detectors were fabricated. The detectors were expected to increase effective absorptance through repeated mutual reflections. The dependence of the effective reflectance of cavity type thermal radiation detectors on reflectance of the absorbent on the cone and the cone apex were studied by making model samples. Using the samples, data concerning the correlation between the cone apex angle (90° , 60° , 45°) and the various reflectance ($0.1 \sim 0.6$) of the absorbents on the cone was collected. The dependence of the effective reflectance of the conical cavity on the reflectance of the absorbent was formulated with a model considering the first step of reflection of uniform incident light and the second step of repeated mutual reflections. The model illustrates well the dependence of the effective reflectance on the reflectance of the absorbent.

On the basis of the fundamental considerations mentioned above, characteristics of conical cavity type thermal radiation detectors with gold-black coating were studied. The reflectance and relative spectral responsivity of a thermal radiation detector were measured in the UV region. It was shown that the effective reflectance of the conical cavity type detector with the cone apex angle 45° decreased reflection by $1/5$ of that of the plain type one. In the IR region, different conditions for fabricating gold-black absorbents were suggested. Under the fabricating conditions of 2 torr nitrogen pressure, the reflectance of the plain type sample was less than 1% and the conical cavity type less than 0.25%. These results were explained in the models mentioned above. It was concluded that thermal radiation detectors with a cone vertex of 60° showed constant reflectance of less than 1% with a 3% reflectance of gold-black absorbent in the wave range of UV to IR was possible.

空洞状熱形放射検出器に関する研究

目次	ページ
第1章 序論	1
第2章 金黒塗布平面形状熱形放射検出器の分光応答度の解析	7
2.1 熱形放射検出器の光の吸収と熱伝導のモデル	8
2.1.1 集中定数モデル1(反射なし)の計算式	10
2.1.2 集中定数モデル2(反射あり)の計算式	12
2.1.3 分布定数モデル	12
2.2 紫外・可視域用試料の製作と測定	14
2.3 分光応答度の金黒膜厚依存性の検討	22
2.3.1 吸収係数 k ・損失係数 ϵ_t の見積もり	23
2.3.2 集中定数モデル及び分布定数モデルによる応答度の膜厚依存性の考察	25
2.4 金黒の蒸着法と分光反射(吸収)特性	30
2.4.1 試料の作製と測定	30
2.4.2 金黒の製造条件と分光反射率の測定結果	31
2.4.3 金黒の製造条件と試料の分光応答度の測定結果	36
2.5 まとめ	40
第3章 空洞円錐形状試料の実効反射率の検討	43
3.1 円錐形状受光面による実効吸収率の増大効果(モデルによる計算)	45
3.1.1 繰り返し反射による吸収の増加	45
(a) 鏡面反射のとき	
(b) 拡散反射のとき	

3.1.2	第1回目の反射による実効反射率の計算	48
3.1.3	第2回目以降の反射による実効反射率の計算	52
3.2	円錐形状受光面試料の製作	54
3.3	反射の配光特性の測定	56
3.4	分光反射率の測定	61
3.5	まとめ	68
第4章	空洞円錐形状試料の実効反射率の計算モデル	70
4.1	入射面内における反射の配光特性を考慮するモデル（入射光が円錐の中心軸を通る場合）	71
4.1.1	任意の配光特性の場合の円錐の頂角（90, 60, 45）に対する R_{1T} の計算	71
4.1.2	任意の円錐の頂角に対する R_{1T} の計算	71
4.2	入射面内における反射の配光特性を考慮するモデル（入射光が円錐の中心軸以外を通る場合）	77
4.3	入射面以外への反射を考慮するモデル（入射光が円錐の中心軸を通る場合）	80
4.4	反射に関する積分方程式の数値解による繰り返し反射の計算	81
4.5	まとめ	84
第5章	実際の金黒塗布空洞円錐形状試料の検討	85
5.1	試料の製造と構造	85
5.2	金黒の反射配光特性	90
5.3	紫外・可視域における分光反射率・分光応答度の測定	92
5.4	分光応答度の入射角依存性	97
5.5	検討	99
5.5.1	紫外・可視域および赤外域における分光反射率・分光応答度の比較	99
5.5.2	赤外域における分光反射率・分光応答度の改良の製造条件	102

5.6	まとめ	105
第6章	まとめ	106
謝辞		109
文献		110

第1章 序論

分光放射測定や検出器の分光応答度の測定に用いられる放射検出器には、量子形放射検出器と熱形放射検出器があり、それらの種類、用途、特徴をまとめたものを表1.1に示す^{1) 2) 3)}。量子形放射検出器は放射の光子エネルギーで直接に自由電子や電子正孔対（キャリア）を発生させて、電気信号として検出するものである。材料としては半導体が多く、検出能力が高く、応答時間が短い反面、使用できる波長が材料のバンドギャップあるいは仕事関数で決まる等の制約がある。一方、熱形放射検出器は放射を熱エネルギーに変換して、その温度上昇を電気信号として検出する。この検出器は放射を吸収する黒化面と温度検出素子（熱電対や焦電セル）を接触させた構造であり、良い黒化面を用いれば紫外域から赤外域にわたる広い波長域の放射を検出できるが、検出能力が低く、応答時間が長い欠点がある。

標準の検出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。従って光放射に対する波長的な応答（分光応答特性）は、受光面の放射吸収層（材料）の分光吸収特性と一致することを想定して使用されていた。この点に関し、大久保⁴⁾は吸収層の分光的な吸収特性と検出器の応答特性の間に十分な比例（相関）関係があるかを検証した。このために吸収率が波長選択性を持つ放射吸収層を持った熱形放射検出器を多種類製作し、吸収層が十分厚いときには放射吸収層の分光吸収特性が、検出器の分光応答特性とよく一致することを明らかにした⁵⁾。また、放射吸収層で放射が吸収されても、蛍光のような熱にならない成分がある場合の影響を明らかにした⁶⁾。

次に、熱形放射検出器の放射吸収層は、入射した放射に対する吸収率が高く、波長に対して一定であることが要求され、さらに、入力した放射を熱に変換し、それを熱電変換素子面に効率よく伝達させるために熱伝導度が大きいことも必要となる。これらの要求を満たす熱形放射検出の放射吸収層材料として、黒色塗料

表 1.1 放射検出器の種類・用途・特徴

項目	種類	熱 形		量 子 形				
	検出メカニズム	焦電効果	光熱変換	光起電効果		光導電効果	光電子放出	
用途	検出素子	焦電形素子	サーモパイル ボロメータ	フォトダイオード	フォトトランジスタ	光導電セル	光電管	光電子増倍管
	波長域	紫外・可視・赤外		近紫外可視	近赤外	赤外	紫外・可視	
	使用目的		標準検出器	一般測定			分光測定	
	出力形態	電圧・電流	電圧	電流		電圧	電流	電流
特徴	出力のオーダー	$\mu\text{V} \sim \text{pA}$	μV	$\text{nA} \sim \text{mA}$		mV	$\text{pA} \sim \text{nA}$	$\text{nA} \sim \mu\text{A}$
	応答度 (代表例)	10^{-6}	10^0	0.4			0.03	2×10^5
		$\text{A} \cdot \text{W}^{-1} \text{cm}^2$	$\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \text{cm}^2$	$\text{A} \cdot \text{W}^{-1} \text{cm}^2$			$\text{A} \cdot \text{W}^{-1} \text{cm}^2$	
	応答速度 [s]	10^{-2}	2	$< 5 \times 10^{-5}$		$< 4 \times 10^{-5}$	10^{-5}	$< 10^{-8}$
	経時変化	なし		ややあり		あり	あり	
	温度依存性 (温度係数) [%/°C]	0.5	-0.3	± 1.0			± 0.2	-0.2
波長依存性	なし		有り					

と金属黒がある。これらの吸収材の特徴をまとめたものを表1.2¹⁾に示す。

このうち、金属黒の代表的なものとして金黒(gold black)⁸⁾は、約2torr(267 Pa)の窒素雰囲気中で、金を加熱蒸発させることにより、多孔質のすず状の積層を形成する。黒色塗料と比較して、金黒は波長選択性のない高吸収率が得られ、紫外放射による劣化や蛍光発光がなく、酸化などの経時劣化が少ない等の利点がある反面、膜厚が厚くなると機械的に脆弱であるという欠点がある。

本研究では、まず金黒を受光面とした平面形状の熱形放射検出器を製作し、金黒の蒸着条件と紫外・可視域の分光応答度の関係を検討した⁹⁾。熱形放射検出器の放射吸収層の金黒膜厚を変化させた場合、分光応答度が変化する結果を放射吸収層内の入射エネルギーの吸収、反射を考慮したモデルを導入して検討した。入射光が放射吸収層の表面付近で吸収され、そこから放射吸収層内を熱となって伝導すると仮定するモデルを定式化し、その式と実測値を用いて、吸収係数と損失係数を見積もった。

より正確なモデルとして、入射光が放射吸収層内で徐々に吸収され、吸収された位置で熱に変換され、そこから放射吸収層を熱となって伝導すると仮定したモデルを考案し、見積もった吸収係数と損失係数を用いて、有効発熱量の金黒膜厚依存性の計算結果と実測値を比較した。この結果、今回考案したモデルで分光応答度の金黒膜厚依存性が説明できることが分かった¹⁰⁾。

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¹¹⁾¹²⁾。

従来までの円錐形状(コーン形)熱形検出器は¹³⁾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¹⁴⁾¹⁵⁾、これらは受光検出器としての検討はなさ

表1.2 各種放射吸収材料の熱的特性⁷⁾

材 料	層の厚さ (μm)	面密度 (g/m^2)	熱容量 ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	熱抵抗 ($\mu\text{K}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2$)
3M-Black Velvet Cating	50	50	60	70
Eppley-Person's Optical Black Lacquer	10	100	100	250
1-torr gold black	1	0.6	0.08	70(空气中)
2-torr gold black	5	0.2	0.02	700(空气中)

れていなかった。また、W. R. Blevinら¹⁶⁾は熱形空洞円錐形状構造の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。これらは分光応答度の標準器として不十分であり、これらの欠点を補う目的で、以下の方法で作製した金黒塗布円錐形状熱形放射検出器の使用を考えた。すなわち、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、この受光面を空洞円錐形状に加工した。この空洞円錐形状熱形放射検出器は、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。

そこで、空洞円錐形状熱形放射検出器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た。実験は製作の比較的容易なCaSO₄(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、を考慮したためである。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程度の間で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。そしてこれらのモデル試料による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¹⁷⁾。

モデル試料で確認された空洞円錐状試料の有効性を実証するために、実際に金

黒を円錐形状の受光面の吸収材とした熱形放射検出器を作製し、特性を検討した。

まず、紫外・可視域における金黒塗布空洞円錐形状熱形放射検出器の特性を検討した。波長選択性を少なくするために検出器受光面での繰り返し反射吸収により、応答を犠牲にせず、一定の分光特性を得る金黒の作成条件で、空洞円錐形の受光面を製作した。これにより、紫外・可視域において、分光応答度の平坦性（波長に対する一定性）の外れが $\pm 0.3\%$ 以内である放射検出器を実現する見通しを得た。

次に、紫外・可視域において、良好な分光応答特性を得た金黒製作条件で作製した金黒塗布空洞円錐形状熱形放射検出器の赤外域における特性を検討した。可視域と比較して、赤外域では金黒の反射が大になるため吸収率が低くなり、従ってこの領域での応答度の低下と波長選択性が生ずることが分かった。そこで、改めて、紫外・可視域とは異なる、応答度の最大値を達成し、かつ波長非選択性をもつ金黒の製作条件を検討した。この結果窒素ガス圧 2.0 torr で作製した金黒を塗布した金黒膜厚 $40\ \mu\text{ m}$ 程度の平面形状試料は波長 $0.6\ \mu\text{ m}\sim 2.2$ において、反射率が 1% 未満となることが分かった。これらの検討により 3% 程度の反射率の金黒を $70\ \mu\text{ m}$ 程度付着し、これを頂角 60 度の円錐形状にすることによって赤外域においても、反射率が 1% 以内で反射率、応答度が一定であるような波長非選択性の熱形放射検出器の実現の可能性が確認できた。

第2章 金黒塗布平面形状熱形放射検出器の分光応答度の解析

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によって熱電素子や焦電素子を動作させて電気信号を得る光検出器の一種である。したがって、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、および吸収した熱が熱電素子に有効に到達し、それが電気信号に変換される割合に大きく依存する。そこで、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を作製し、紫外、可視域では、分光応答特性が波長に対して一定とみなせる金黒の製作条件を見いだした。ここでは、熱形放射検出器の分光応答特性の金黒の膜厚依存性の測定結果を定量的に説明するために、放射吸収および熱伝達のモデルを考案し、そのモデルによる計算式を導出した。

このモデルは、(1)放射吸収層内で吸収した光放射エネルギーが、すべて等価的に表面で吸収されるとする簡略モデル(集中定数モデルと呼ぶことにする)と、(2)光放射エネルギーが吸収層を進むにつれて徐々に吸収されるとするモデル(分布定数モデルと呼ぶことにする)である。さらにこれら2つのモデルに対して、(a)放射吸収層を透過して熱電変換素子との境界面に達した放射エネルギーの反射成分を考慮しないものと、(b)反射成分を考慮するもの、を組み合わせると合計4種類のモデルを考案した。そしてこれらのモデルを定式化し、分光応答度の膜厚依存性の測定結果と比較し、今回考案したモデルの妥当性を検討し、その結果、考案したモデルで測定結果を説明できることが分かった。

2.1 熱形放射検出器の光の吸収と熱伝導のモデル

今回検討した熱形放射検出器の外形を模式的に図2.1に示す。この検出器は放射吸収層と熱電変換素子で構成され、入射光を放射吸収層で吸収して熱エネルギーに変換し、その時の温度上昇を熱電変換素子で検出するものである。ここで吸収層の膜厚を s 、膜厚方向の距離を x (吸収層の表面を $x=0$) としてモデルを考える。

熱形放射検出器の放射吸収層に入射した放射 I_0 は放射吸収層の表面で一部が反射(このときの反射率を r_s とする)し、残りは放射吸収層内に入り、放射成分(吸収層を透過、散乱する成分)と熱成分(吸収層内で吸収される成分)に分かれる。

今回の計算では、以下の仮定を導入してモデルを立てた。

仮定 1 - 吸収層の材質は均質であり、光放射の強度の減少が Beer の法則に従う。

吸収層の材料の吸収係数を $k(\lambda)$ 、厚さを s 、分光吸収率を $\alpha(\lambda)$ とすると

$$\alpha(\lambda) = 1 - \exp(-k(\lambda)s) \quad (2.1)$$

と表される。 $k(\lambda)$ は波長の関数と考えられるが、これ以降の解析においては波長を固定して考えているので、定数 k として扱うことにする。

仮定 2 - 吸収した光エネルギーはすべて熱エネルギーに変換される。

仮定 3 - 発生した熱エネルギー $A(s)$ は熱電変換素子に向かって伝導する時に、ある量が外部放散等で失われ、残りが熱電変換素子に到達する。この時のエネルギー損失 $\delta(s)$ が $A(s)$ に比例し、比例定数を ϵ_t (損失係数と呼ぶ) とすると

$$\delta(s) = -\epsilon_t A(s) \quad (2.2)$$

と表される。

仮定 4 - $\delta(s)$ は $A(s)$ に比べて十分小さいとする。

仮定 5 - 熱の伝導は測定時間に比べて十分速く起こるとする。

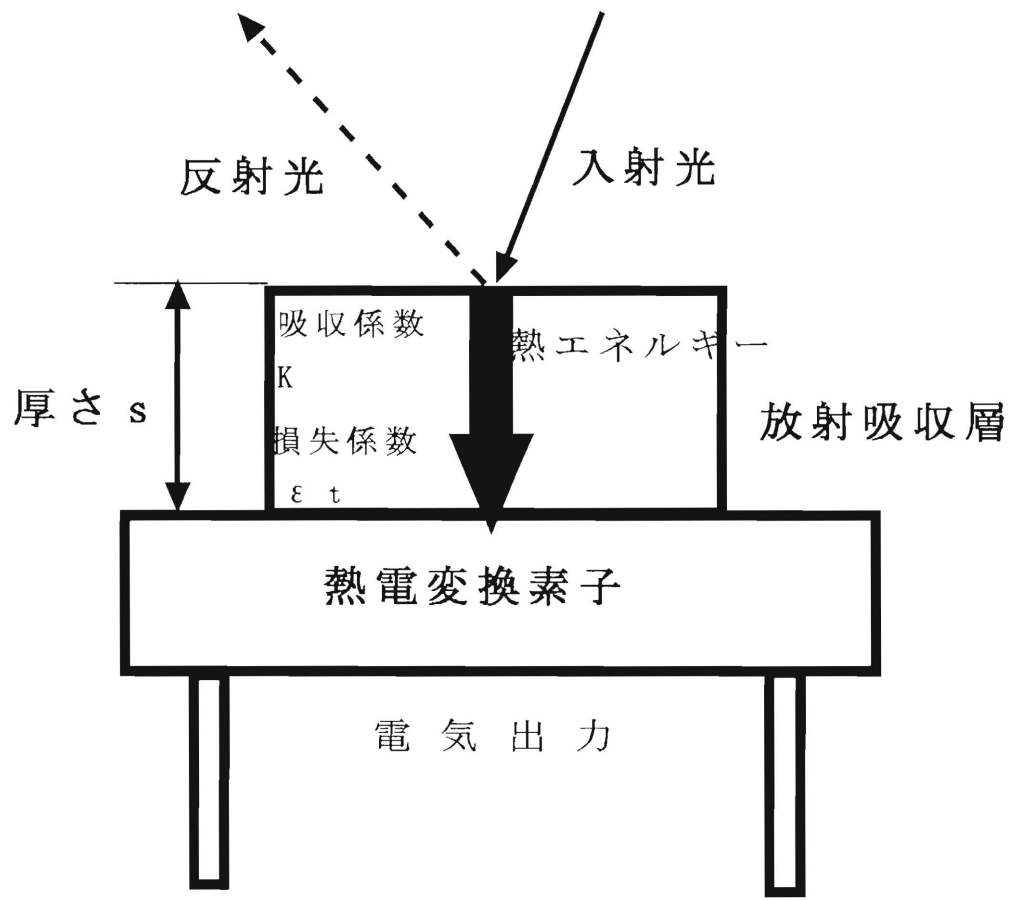


図2.1 熱形放射検出器の模式図

2.1.1 集中定数モデル1 (反射なし)の計算式

図2.2に集中定数モデル1の概念を示す。熱形放射検出器の放射吸収層に入射した放射 I_0 は、大部分が表面層で吸収されるが、一部は吸収層を透過して膜厚 s の放射吸収層の下部の熱電変換素子との境界面($x=s$)で $I_0 \exp(-k \cdot s)$ になる。したがって放射吸収層の吸収で発生した熱エネルギー $A_1(s)$ は、

$$A_1(s) = I_0 - I_0 \exp(-k \cdot s) \quad (2.3)$$

と表される。このモデルでは、 $I_0 \exp(-k \cdot s)$ は十分小さく、無視でき、 $A_1(s)$ はすべて等価的に表面($x=0$)で発生したと仮定し、それが熱電変換素子に向かって吸収層中を伝導すると考える。

仮定4より、 $A_1(s)$ から損失 $\delta(s)$ を差し引いた有効熱エネルギー $P_1(s)$ は、

$$P_1(s) = A_1(s) - \delta(s) \doteq A_1(s) \quad (2.4)$$

となり、吸収層の微小厚 Δx における損失 $\Delta \delta(s)$ は、

$$\Delta \delta(s) = -\epsilon_t A_1(s) \Delta x \quad (2.5)$$

と表される。また、この損失 $\Delta \delta(s)$ は有効熱エネルギー $P_1(s)$ の Δx における減少分 $\Delta P_1(s)$ と考えられるので(2.4)、(2.5)式より、

$$\frac{dP_1(s)}{P_1(s)} = -\epsilon_t dx \quad (2.6)$$

と表される。(2.6)式を積分して、

$$P_1(s) = P(0) \exp(-\epsilon_t s) \quad (2.7)$$

となる。ここで $P(0)$ を表面で発生した熱エネルギー $A_1(s)$ とすると、有効熱エネルギーは、

$$\begin{aligned} P_1(s) &= A_1(s) \exp(-\epsilon_t s) \\ &= (I_0 - I_0 \exp(-k \cdot s)) \exp(-\epsilon_t s) \end{aligned} \quad (2.8)$$

となる。

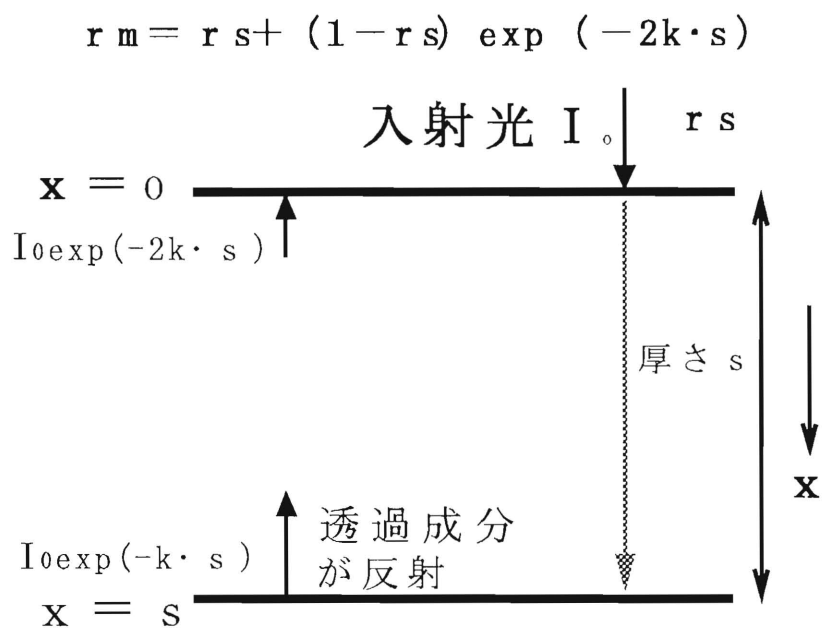


図2.2 集中定数モデル1の概念図

2.1.2 集中定数モデル2 (反射あり)の計算式

集中定数モデル2は、集中定数モデル1で無視した熱電変換面へ到達した透過成分が、放射吸収層と熱電変換素子の境界面($x=s$)において反射して、吸収されたと考えるものである。すなわち、放射吸収層の下部に達した光は、PVDFフィルムの表面がアルミニウム蒸着された電極であるため、そこで反射し、再び表面($x=0$)に向かって吸収層中を伝導すると考える。そして反射後の光エネルギーはすべて境界層($x=s$)付近で熱エネルギーに変換されるものと仮定する。(仮定6)

まず、反射前に吸収層で吸収される熱エネルギー $A_{21}(s)$ は(2.3)式と同じく、

$$A_{21}(s) = I_0 - I_0 \exp(-k \cdot s) \quad (2.9)$$

である。つぎに、反射後に吸収層で発生する熱エネルギー $A_{22}(s)$ は吸収層の下部($x=s$)まで届いた透過光エネルギー $I_0 \exp(-k \cdot s)$ と反射後に吸収層の上部($x=0$)まで届いた透過光エネルギー $I_0 \exp(-2k \cdot s)$ の差で表されて、

$$A_{22}(s) = I_0 \exp(-k \cdot s) - I_0 \exp(-2k \cdot s) \quad (2.10)$$

である。熱エネルギーは(仮定6)より、熱電変換素子に接して発生するため熱伝導の損失は考えないことにする。

(2.9)、(2.10)式より $x=s$ における有効熱エネルギー $P_2(s)$ は、

$$\begin{aligned} P_2(s) &= A_{21}(s) \exp(-\epsilon t s) + A_{22}(s) \\ &= I_0 (1 - \exp(-k \cdot s)) \exp(-\epsilon t s) + I_0 (\exp(-k \cdot s) - \exp(-2k \cdot s)) \end{aligned} \quad (2.11)$$

と表される。ここで(2.11)式の右辺の第2項が反射成分を考慮した項になっている。

2.1.3 分布定数モデル

上述した集中定数モデルでは、吸収層中で吸収された光放射エネルギーは放射吸収層の表面(上部・下部)で吸収されると仮定した。しかし、実際には光放射エネルギーは吸収層の厚みに沿って徐々に吸収され、そこから熱となって伝導すると考えられる。この実態に即したモデルが後述する分布定数モデルである。これについても集中定数モデルと同様に、放射吸収層と熱電変換素子との境界層における反射を考慮しない分布定数モデル1と反射を考慮した分布定数モデル2の2種類を考えた。

分布定数モデルにおいては、吸収層中の微小厚 Δx で発生した熱エネルギーは、 $x=0$ から $x+\Delta x$ までに吸収された光放射エネルギーと、 x までに吸収された光放

射エネルギーの差で表されて、この Δx で吸収された熱エネルギーは、その位置から伝導して吸収層の下部 ($x = s$) に達する。このモデルを適応した詳しい解析は 2.3 で述べる。

2.2 紫外・可視域用試料の製作と測定

放射吸収層の黒色吸収材料として、金黒を付けた平面形の熱形放射検出器を製作し、金黒の蒸着条件をパラメータとした分光反射（吸収）特性の検討を行なった。約2 torr (267 Pa)の窒素雰囲気中で、金を加熱蒸発させると、金は粒径10 nm程度の粒子となって窒素雰囲気中で互いに結合し、糸状になり、それがからみあって綿のようになって積層する。この粒子は多孔質であるため、入射した光を表面で繰り返し反射・吸収するため高い吸収率が得られる。これを放射吸収層の検出器受光部に使用する。積層厚が十分であるときの分光反射率は、可視波長域で0.5%以下で、広い波長範囲で高い吸収率が得られ、黒色塗料よりも優れている。熱容量もかなり小さいものが得られる。さらに、100%金で形成されるため、紫外放射による劣化や蛍光発光がなく、酸化などの経時劣化が少ない。しかし多孔質の金属を積層しているだけなので、黒色塗料に比べて機械的に脆弱であるという欠点がある。

金黒の蒸着に使用した蒸着装置を図2.3に示す。ベルジャーの中央に蒸発用の金線（ ϕ 0.25 mm）を巻きつけた加熱用タングステンフィラメントを置き、この直下7 cmの距離に金黒蒸着試料を設置した。

試料として使用した熱電変換素子は、両面にアルミ電極が蒸着されている呉羽化学製、膜厚9 μ mのPVDF（ポリフッ化ビニリデン）焦電フィルムで、外形12 mm ϕ 厚さ1 mmのデルリンリングにエポキシ系接着剤で固定した。測定に使用した素子の外形図を図2.4に示す。両面にアルミ電極が蒸着されているポリフッ化ビニリデン焦電フィルム（PVDF、9 μ m厚）を円形のデルリンリングに固着した。このフィルム上に、金線を窒素ガス圧1.5 torr（1 torr = 133 Pa）下で蒸着して金黒を付着させた。受光面として蒸着面を10 mm ϕ に規制する、マスク兼用のアルミ製上部ヒートシンクと、下部ヒートシンクとで挟み、焦電フィルムの温度が蒸着時に上昇するのを防ぐようにした。この時のヒートシンクを図2.5に示す。また、タングステンフィラメントと焦電フィルムの間には、フィルム蒸着面の温度上昇を押さえるためシャッタを置き、蒸着時のみ開放するようにした。金黒の蒸着は、蒸着装置を一旦、 5×10^{-3} torr以下の真空度まで引き、その後所定のガス圧まで窒素ガスを充てんし、フィラメントに電流を流して金を蒸発させておこなった。金の蒸着量を変えて金黒の膜厚を2~20 μ mにした。金黒層の密度および厚さは、蒸発

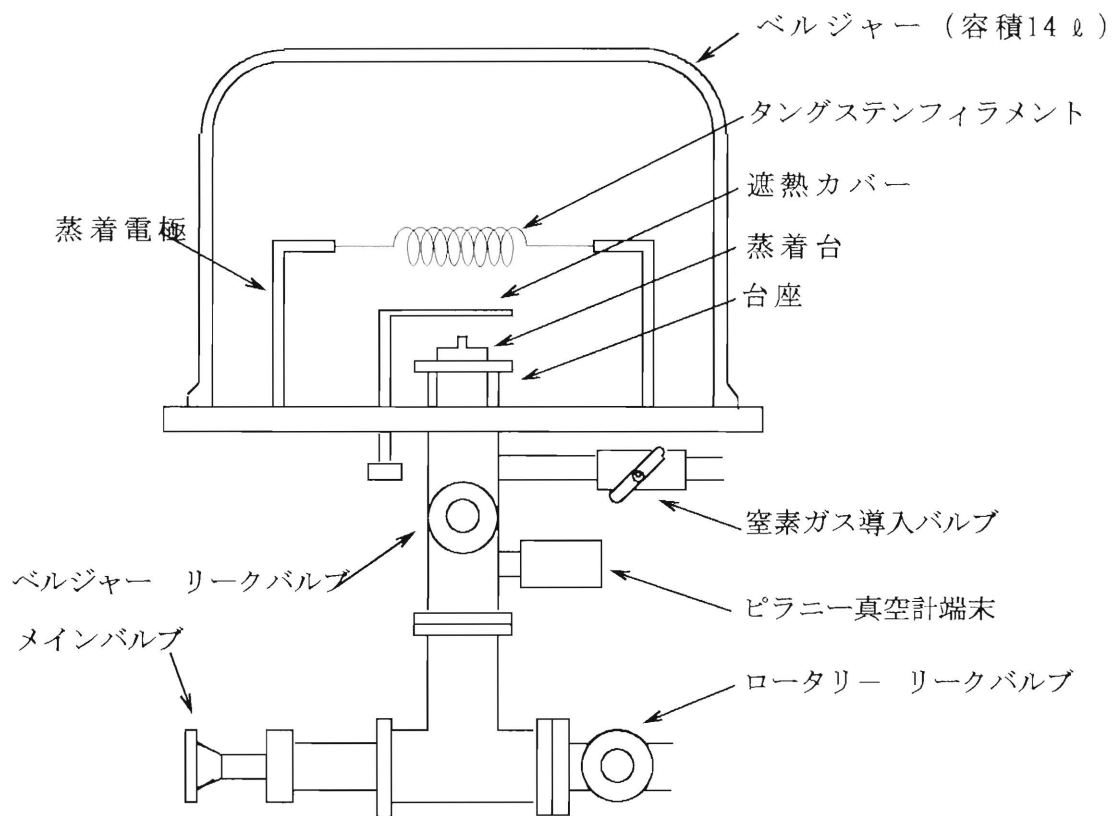


図2.3 金線の蒸着に使用した蒸着装置

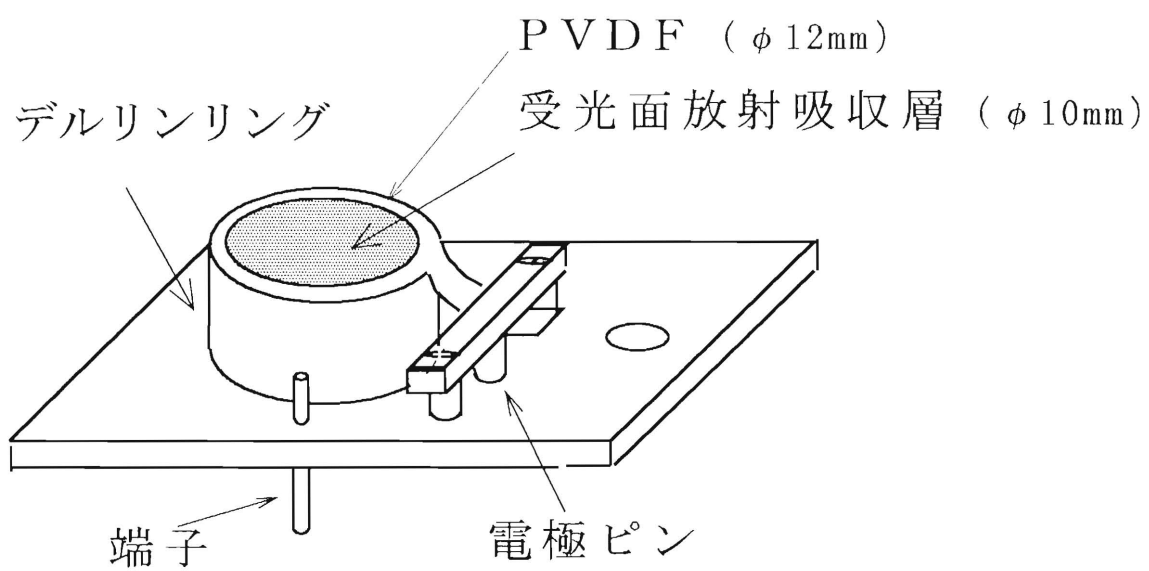


図2.4 測定に使用した素子の外形図

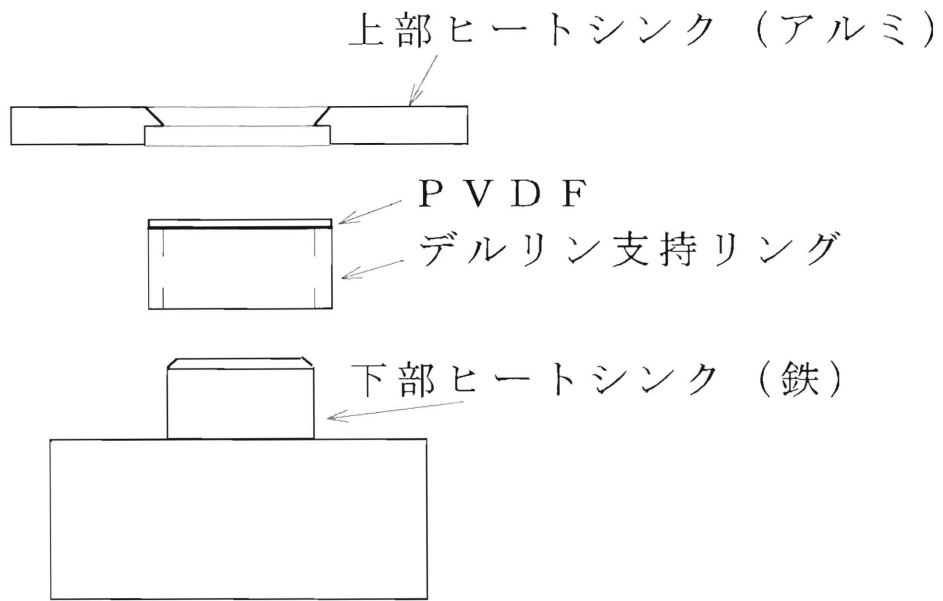


図2.5 ヒートシンク

させる金の量およびベルジヤー中の窒素ガス圧により変化させ、走査形電子顕微鏡による断面写真により層の厚さを、また、金黒蒸着時および金黒除去時の試料の重量の差から求めた付着重量と層の厚さから密度を求めた。試料の金黒の厚さ測定および付着重量測定を行うと、検出器としての機能がなくなるために、同一条件で金黒を蒸着した素子を、分光特性測定用、厚さ測定用、付着重量測定用として、それぞれ3個以上製作した。なお、分光特性測定用素子は、円形のPVDF素子の端部を幅約2mmの帯状に延長した形状に切り出し、その両面のアルミ蒸着面を金メッキした電極ピンに圧着し、端子から電気信号を取り出した。

試料検出器の金黒放射吸収層の分光反射率の測定光学系を図2.6に示す。分光反射率の標準としてBaSO₄圧着面を使用した。入射光は放射吸収層の法線に対して10度で入射し、反射を積分球(φ120mm)を用いて積分し、光電子増倍管で測定した。

積分球は、その中心に対して60度隔て光路を分光反射率標準用と試料用に切り替え、試料検出器を装着したまま、標準との比較測定が行えるようにした。

分光応答度の測定光学系は、放射吸収層への入射光照射までの光学系は、分光反射率測定光学系と共通である。分光応答度の比較用検出器として、窒素ガス圧1.5torrで蒸着した約40μmの厚さの金黒を放射吸収層に持つPVDF検出器を使用した。

上記の測定における光電子増倍管の光電流は、電流-電圧変換増幅器によって電圧信号に変換し、チョッパの変調周波数に同期したロックインアンプで測定した。また製作した熱形検出器の出力は、インピーダンス変換器で電圧信号に変換し、チョッパの変調周波数に同期したロックインアンプで測定した。測定は、波長200nm~600nmの範囲で10nmおきに行い、各波長ごとに1秒間隔で5点の測定値の平均を求めた。また、試料検出器を一旦光路(積分球)からはずして再度設定し、3回の波長走査による測定を行った。

図2.7に金黒膜厚2、4、8μmの試料検出器の分光吸収率の測定結果を示す。図2.8に試料検出器の相対分光応答度の金黒膜厚依存性の測定結果を示す。金黒膜厚約11μmで相対分光応答度が最大値を示したので、このときの値を1として規格化してある。

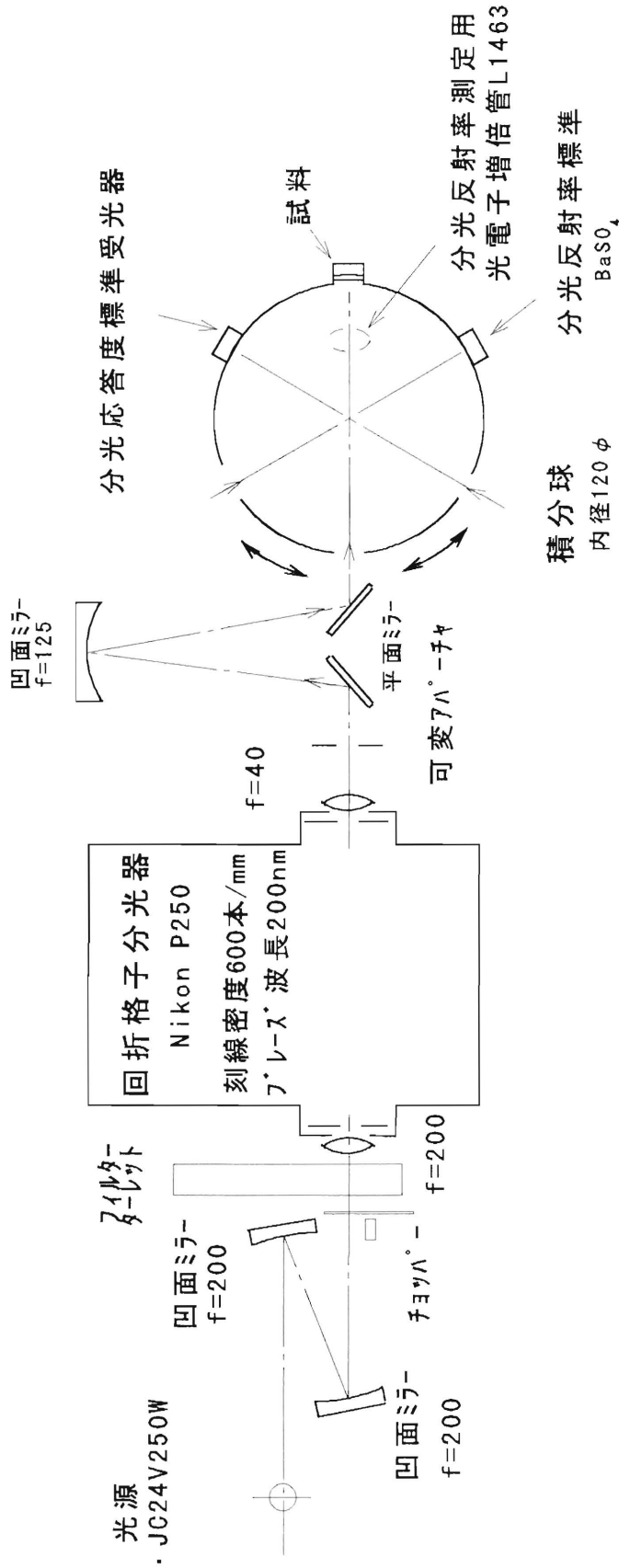


図 2. 6 分光反射率・分光応答度測定光学系

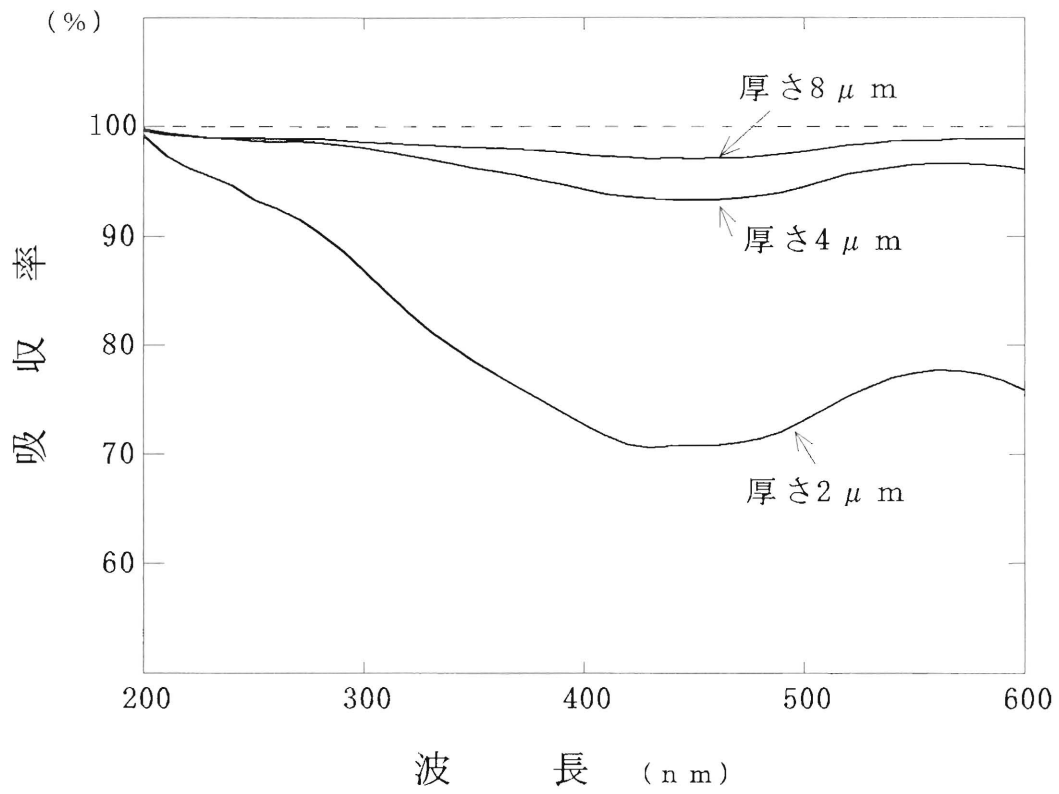


図2.7 試料検出器の分光吸収率

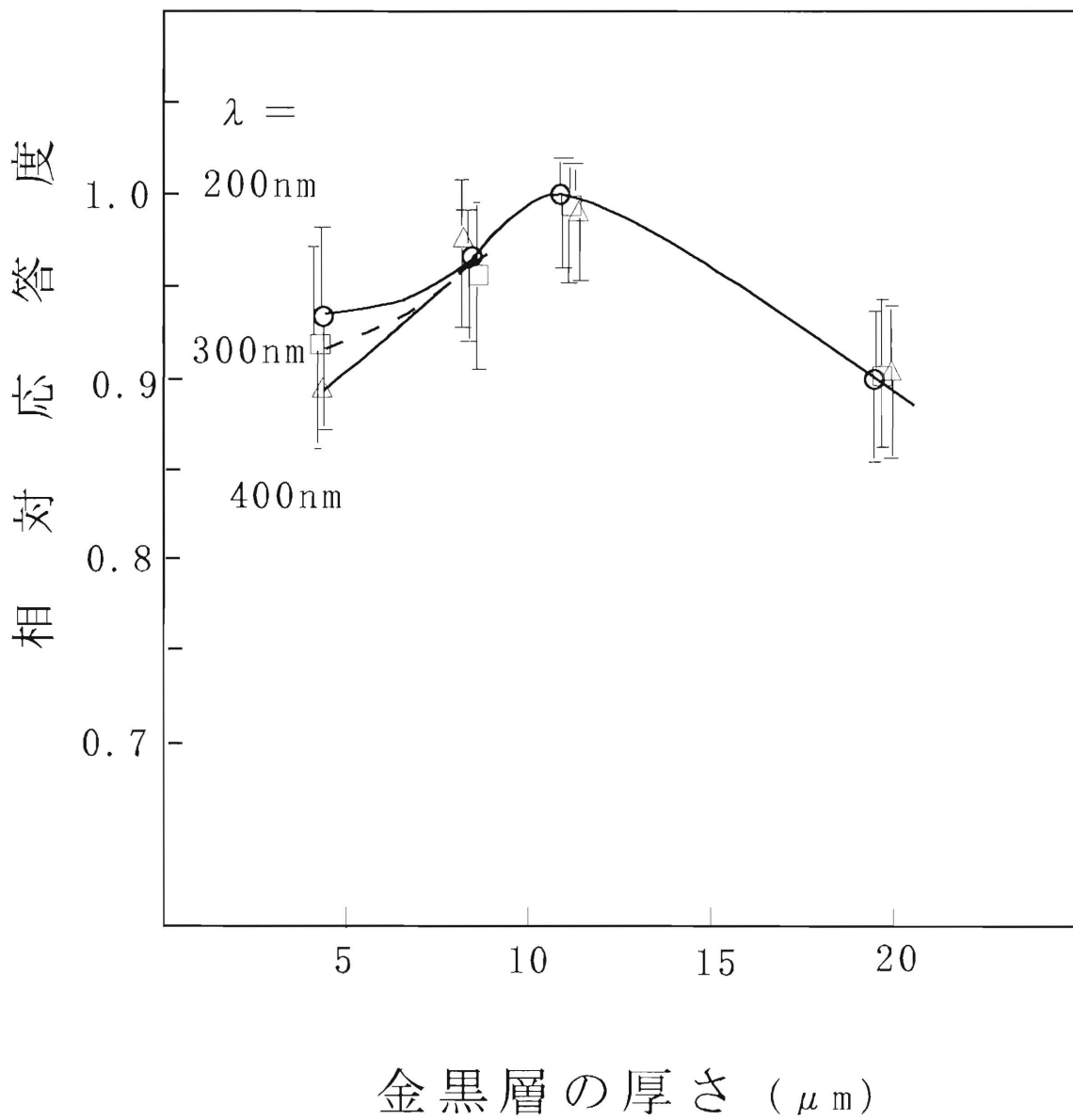


図2. 8 相対分光応答度の金黒膜厚依存性

2.3 分光応答度の金黒膜厚依存性の検討

ここでは2.1で導出した計算結果を用いて図2.8の試料検出器の相対応答度の金黒膜厚依存性を考察し、モデルの妥当性を検証する。このためには、計算式に含まれる k および ϵ_t の値を求める必要がある。そこでまず図2.7の金黒の膜厚をパラメータとした吸収率の波長依存性の実測値を用い、2.1.1、2.1.2で述べた集中定数モデル1と集中定数モデル2の有効熱エネルギーの計算式を使って吸収係数 k の見積りを行う。次に、見積もった k および分光応答度の最大値を得る金黒膜厚の実測値を用いて、損失係数 ϵ_t を見積もる。そして、これらの k 、 ϵ_t の値を用いて新たに考案したモデルによる相対応答度の計算を行い実測値と比較する。

2.3.1 吸収係数 k ・損失係数 ϵ_t の見積もり

集中定数モデル1、2を適応して図2.8の結果を取り扱う。まず、今回測定した反射率(r_m とする)は、表面($x=0$)での反射(反射率 r_s)による成分(成分1)と吸収層を透過した放射が境界層($x=s$)で反射し表面を透過する成分(成分2)の和で表されるとする。成分1の反射は $I_0 r_s$ であり、成分2の反射は式(2.1)を考慮して、 $I_0(1-r_s)\exp(-2k \cdot s)$ で表される。したがって、

$$r_m = r_s + (1-r_s)\exp(-2k \cdot s) \quad (2.12)$$

となる。式(2.12)を変形して、

$$\ln \frac{r_m - r_s}{1 - r_s} = -2k \cdot s \quad (2.13)$$

となる。ここで、 r_s は金黒膜厚 s が大きい時の r_m の値と考えてよいので、 $s=40 \mu\text{m}$ の時の実測値を採用した⁴⁾。図2.7の吸収率の実測値を使い $\ln(r_m - r_s)/(1 - r_s)$ と s の関係をプロットしたものを図2.9に示す。この図2.9の各直線の傾きから k を求め、 $k=0.3/\mu\text{m}$ を得る。

上述した方法で見積もった吸収係数 k を使って、金黒を使用した熱形放射検出器の損失係数 ϵ_t を見積もる。ここでは計算が容易であることから、集中定数モデル1の式(2.8)を用いた。この式より、 $dP_1(s)/ds=0$ となる条件である、

$$s = \frac{1}{k} \ln\left(1 + \frac{k}{\epsilon_t}\right) \quad (2.14)$$

のとき、 $P_1(s)$ は最大値をとる。図2.8(応答度の膜厚依存性の実測値)から $P_1(s)$ が最大値をとる s の値が $11 \mu\text{m}$ であるので、 $k=0.3/\mu\text{m}$ を式(2.14)に代入して $\epsilon_t=0.0115/\mu\text{m}$ となる。

今回作製した試料検出器は、金黒層の厚さが薄く、層内での材質が均一であり伝導が一様であると考えられるので、簡単な集中定数モデルを用いて求めた k および ϵ_t の値を分布定数モデルの値としても採用できると判断した。

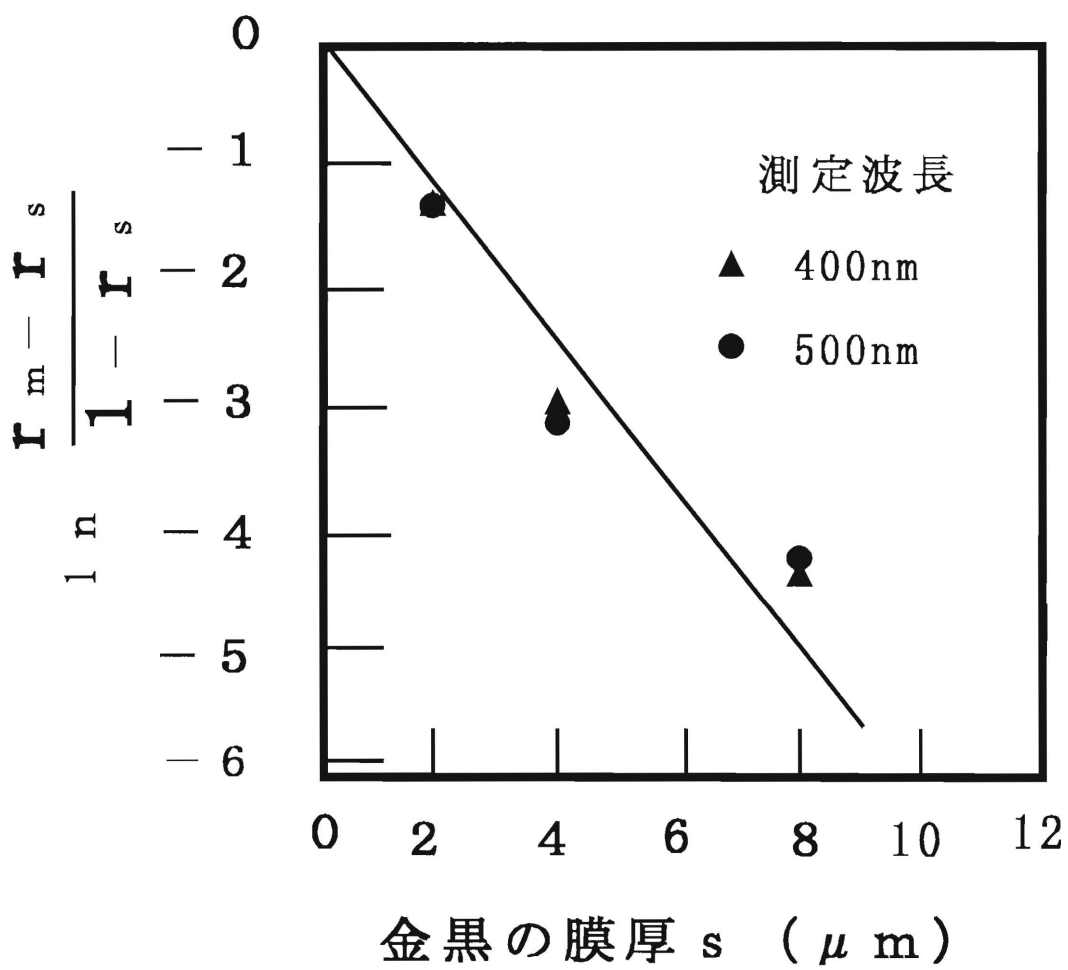


図2.9 $\ln(r_m - r_s)/(1 - r_s)$ と s の関係

2.3.2 集中モデル及び分布定数モデルによる応答度の膜厚依存性の考察

集中定数モデルでは、吸収層中で吸収された光放射エネルギーは等価的にすべて放射吸収層の表面(上部・下部)で吸収されると仮定している。この仮定は膜厚が十分厚いときは成立し得る。しかし、光放射エネルギーは実際には(2.1)式で表されるように吸収層の厚みに沿って徐々に吸収される。この実態に即したモデルが分布定数モデルである。これについても集中定数モデルと同様に、境界層における反射を考慮しない分布定数モデル1と反射を考慮した分布定数モデル2の2種類を考えた。

図2.10に分布定数モデルの説明を示す。図2.10で吸収層中の微小厚 Δx で発生した熱エネルギー $\Delta A_3(x)$ は、 $x=0$ から $x+\Delta x$ までに吸収された光放射エネルギーと、 x までに吸収された光放射エネルギーの差で表されて、

$$\begin{aligned}\Delta A_3(x) &= (I_0 - I_0 \exp(-k(x+\Delta x))) - (I_0 - I_0 \exp(-kx)) \\ &= (-I_0(\exp(-k(x+\Delta x)) - \exp(-kx)))\end{aligned}\quad (2.15)$$

となる。 Δx で吸収された熱エネルギーは、その位置から伝導して吸収層の下部($x=s$)に達する。このときの有効熱エネルギーを $\Delta P_3(x)$ とすると、

$$\begin{aligned}\Delta P_3(x) &= \Delta A_3(x) \exp(-\epsilon t(s-x)) \\ &= -I_0(\exp(-k(x+\Delta x)) - \exp(-kx)) \exp(-\epsilon t(s-x))\end{aligned}\quad (2.16)$$

となる。(2.16)式の両辺を Δx で割り、 $\Delta x \rightarrow 0$ の極限をとると(2.17)式のようになる。

$$\begin{aligned}\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta P_3(x)}{\Delta x} &= \frac{dP_3(x)}{dx} \\ &= -I_0 \cdot \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{(\exp(-k(x+\Delta x)) - \exp(-kx))}{\Delta x} \exp(-\epsilon t(s-x)) \\ &= I_0 k \exp(-\epsilon t s) \exp(-(k-\epsilon t)x)\end{aligned}\quad (2.17)$$

したがって、有効熱エネルギー $P_3(s)$ は(2.17)式を $x=0$ から s まで積分して求められる((2.18)式)。

$$\begin{aligned}P_3(s) &= \int_0^s dP_3(x) = \int_0^s I_0 k \exp(-\epsilon t s) \exp(-(k-\epsilon t)x) dx \\ &= \frac{I_0 k \exp(-\epsilon t s)}{k-\epsilon t} (1 - \exp(-(k-\epsilon t)s))\end{aligned}\quad (2.18)$$

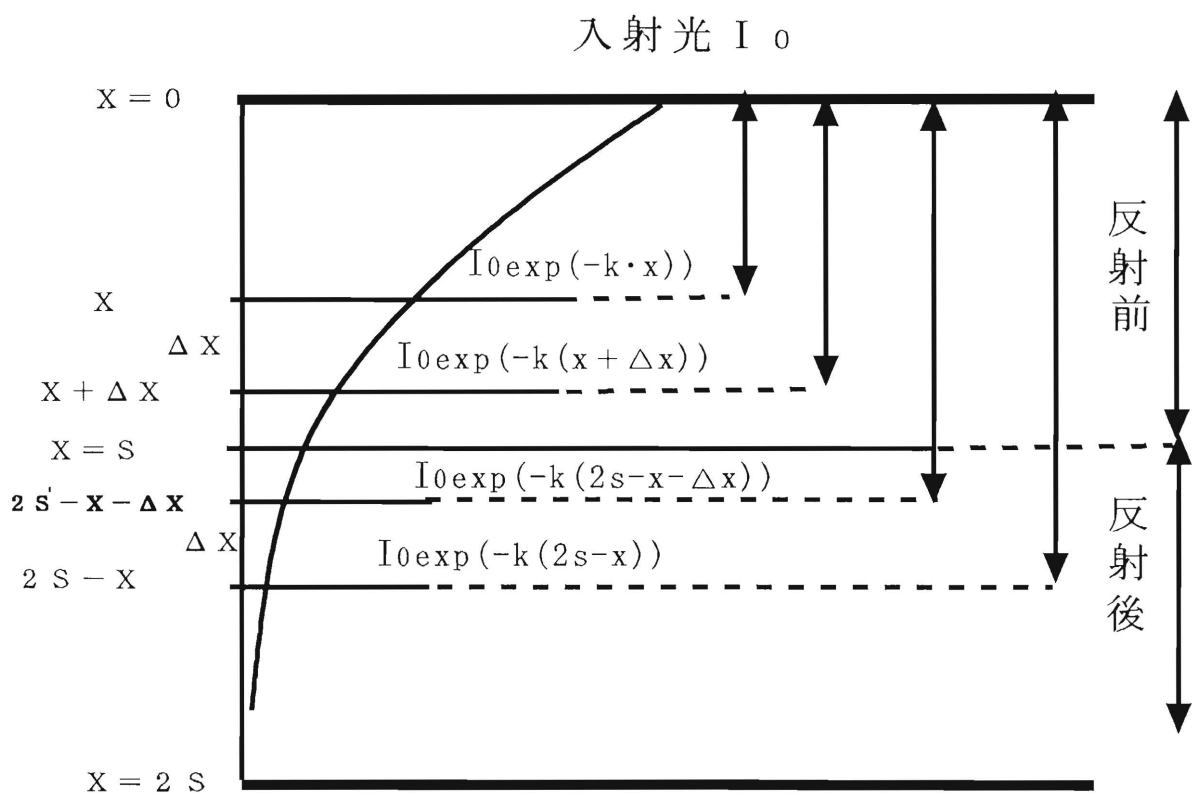


図2.10 分布定数モデル

次に、分布定数モデル2は分布定数モデル1に更に反射成分を考慮したモデルである。

まず、反射する前に吸収層中の微小厚 Δx で吸収される熱エネルギー $\Delta A_{41}(x)$ はモデル1の(2.15)式と同じく、

$$\Delta A_{41}(x) = -I_0(\exp(-k(x+\Delta x)) - \exp(-kx)) \quad (2.19)$$

である。界面の反射率を100%とすると、反射後に吸収層中の微小厚 Δx で発生する熱エネルギー $\Delta A_{42}(x)$ は、 $X=0$ から $2s-x$ までに吸収された光放射エネルギーと $2s-x-\Delta x$ までに吸収された光放射エネルギーの差で表されて、

$$\Delta A_{42}(x) = -I_0(\exp(-k(2s-x)) - \exp(-k(2s-x-\Delta x))) \quad (2.20)$$

となる。よって、微小厚 Δx において、界面で反射する前と反射した後の発生熱エネルギーの和を $\Delta A_4(x)$ とすると、

$$\Delta A_4(x) = \Delta A_{41}(x) + \Delta A_{42}(x) \quad (2.21)$$

である。 $\Delta A_4(x)$ のうち境界層 $x=s$ に達する有効熱エネルギー $\Delta P_4(x)$ は、

$$\Delta P_4(x) = \Delta A_4(x) \exp(-\epsilon_t(s-x)) = -I_0\{(\exp(-k(x+\Delta x)) - \exp(-kx)) + (\exp(-k(2s-x)) - \exp(-k(2s-x-\Delta x)))\} \exp(-\epsilon_t(s-x)) \quad (2.22)$$

である。(2.22)式を $x=0$ から s まで積分して、分布定数モデル1の有効熱エネルギーの導出と同じように変形して、分布定数モデル2の有効熱エネルギー $P_4(s)$ を導出すると、

$$P_4(s) = \frac{I_0 k \exp(-\epsilon_t s)}{k - \epsilon_t} (1 - \exp(-(k - \epsilon_t)s)) + \frac{I_0 k \exp(-2k \cdot s) \exp(-\epsilon_t s)}{k + \epsilon_t} (\exp((k + \epsilon_t)s) - 1) \quad (2.23)$$

となる。

ここで、2.3.1で見積もった k 、 ϵ_t の値を使用して、放射吸収層の厚さ $s=11 \mu m$ における有効熱エネルギーを1として規格化した、相対有効熱エネルギー(任意の s のときの有効熱エネルギーと $s=11 \mu m$ のときの有効熱エネルギーとの比)の計算値を s に対して求める。すなわち、 $s=11 \mu m$ のとき $k \cdot s=0.3 \cdot 11$ 、 $\epsilon_t s=0.0115 \cdot 11$ と置いたときと任意の s のときの比を計算し、これらの計算結果と実測値を比較し、モデルの妥当性を検討する。

まず集中定数モデル1について、(2.8)式より相対有効熱エネルギー $P_{1r}(s)$ は、

$$P_{1r}(s) = \frac{(1 - \exp(-k \cdot s)) \exp(-\epsilon \cdot t \cdot s)}{0.849} \quad (2.24)$$

となる。集中定数モデル2について、(2.11)式より相対有効熱エネルギー $P_{2r}(s)$ は、

$$P_{2r}(s) = \frac{(1 - \exp(-k \cdot s)) \exp(-\epsilon \cdot t \cdot s) + (\exp(-k \cdot s) - \exp(-2k \cdot s))}{0.884} \quad (2.25)$$

となる。

次に分布定数モデル1について、(2.18)式より相対有効熱エネルギー $P_{3r}(s)$ は、

$$P_{3r}(s) = \frac{\exp(-\epsilon \cdot t \cdot s) (1 - \exp(-(k - \epsilon \cdot t) \cdot s))}{0.844} \quad (2.26)$$

となる。分布定数モデル2について、(2.23)式より相対有効熱エネルギー $P_{4r}(s)$ は、

$$P_{4r}(s) = \frac{1}{0.912} \left\{ \frac{k \exp(-\epsilon \cdot t \cdot s)}{k - \epsilon \cdot t} (1 - \exp(-(k - \epsilon \cdot t) \cdot s)) + \frac{k \exp(-2k \cdot s) \exp(-\epsilon \cdot t \cdot s)}{k + \epsilon \cdot t} (\exp(k + \epsilon \cdot t) \cdot s - 1) \right\} \quad (2.27)$$

となる。各モデルとも、有効熱エネルギー $P_{1r}(s)$ 、 $P_{2r}(s)$ 、 $P_{3r}(s)$ 、 $P_{4r}(s)$ が応答度に比例すると考えて、その計算値を $s = 2 \sim 20 \mu\text{m}$ について、応答度の実測結果と共に図2.11に示した。

図2.11から膜厚が厚い場合は4つのモデルの計算値は実測値と大きな差は見られなかったが、反射を取り入れた集中定数モデル2、分布定数モデル2が実測値とより良い一致を示した。膜厚が薄くなるに従い、モデルの計算値は実測値と差が出てくるが、分布定数モデル2による結果が最も実測値に近くなることが分かった。これは膜厚が薄くなるに従って、膜を透過して界面で反射する成分が大きくなるために、この効果を考慮したモデルが実状に即したものとなるためと考えられる。

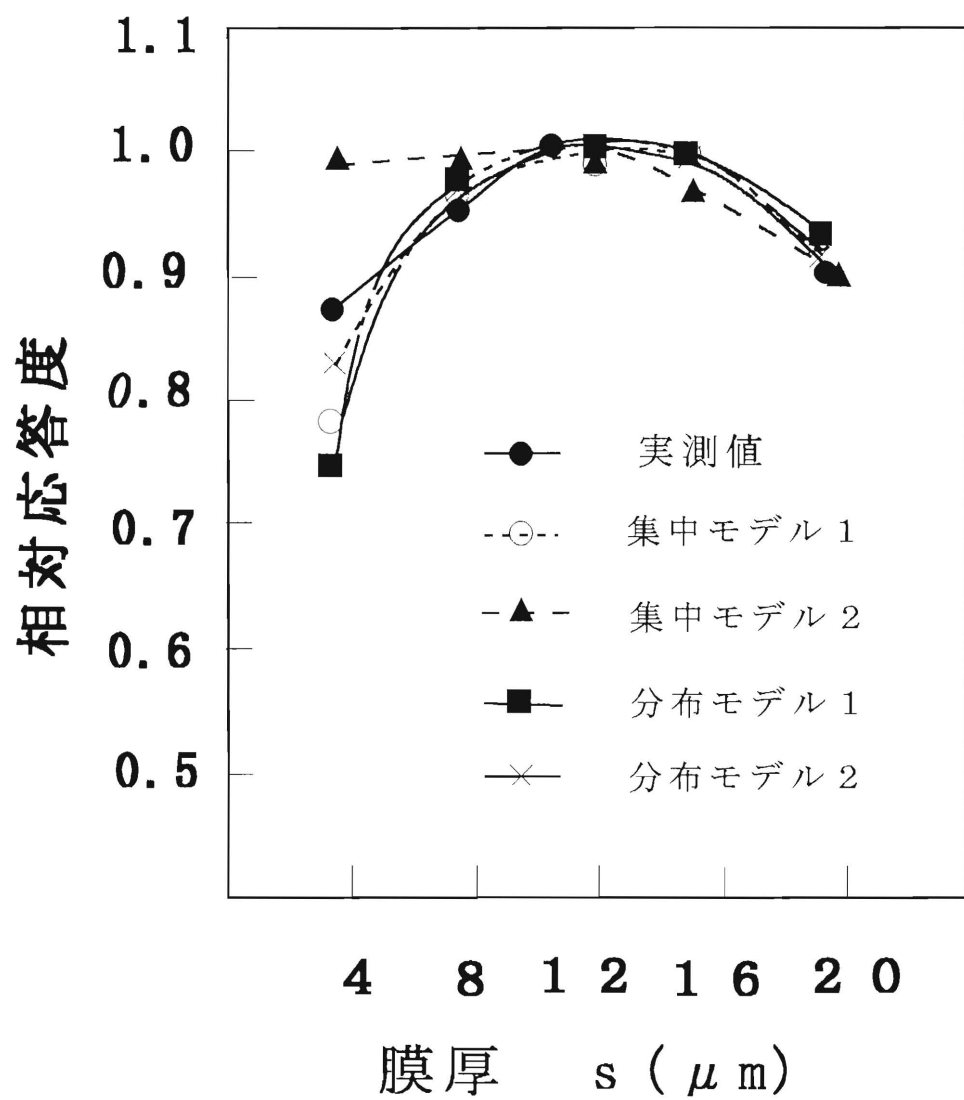


図2.11 相対分光応答度の金黒膜厚依存性

2.4 赤外域用金黒の蒸着法と分光反射（吸収）特性

紫外・可視域で良好な特性を示す金黒蒸着条件と膜厚の金黒塗布平面形状熱形放射検出器の応答度を赤外域で測定したところ、応答度の低下と波長依存性が見られ特性が劣化した。そこで、改めて赤外域で分光応答特性の良好な試料の製造条件を見いだすために、金黒の蒸着条件等を検討し直し、各種製造条件をパラメータとした分光応答特性の測定を行った。

2.4.1 試料の作製と測定

金黒の蒸着条件として、蒸着に使用する金の量を、金線（ $\phi 0.24\text{mm}$ ）の長さとして蒸着回数を変えることにより、4 cm 1回から8 cm 3回まで変化させた。つぎに窒素ガス圧は紫外・可視域で最適であった1.5 torrから2.0 torr及び2.5 torrへと変化させた。

分光反射率の測定は、紫外・可視域の測定系と同様の測定系を用いた。ここで、測定条件は下記の通りである。

光源	ハロゲン電球（25 V、250 W）
分光器波長	0.6 μm ~ 2.2 μm
回折格子	300本/mm、ブレイズ波長 1 μm
光学フィルタ	色ガラスフィルタ O 5 6 (波長0.6 μm ~ 1.1 μm) 色ガラスフィルタ I R D 8 0 B (波長1.1 μm ~ 1.7 μm) 干渉フィルタ L P F 1.5 μm (波長1.7 μm ~ 2.2 μm)
チョッピング周波数	12.5 Hz
P b S セル	温度コントローラで-30°Cに冷却して使用
ロックインアンプ	時定数0.3 sec、感度10 mV

分光反射率を測定するための受光器は、プリアンプを内蔵したPbSセル（p2682-01）を使用し、雑音対策のため温度コントローラで冷却しながら使用した。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（BaSO₄と圧着面）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 $0.6\mu\text{m}\sim 2.2\mu\text{m}$ で $0.05\mu\text{m}$ おきに行った。読み取りは、各波長ごとに15回行い、その平均を測定値とした。

2.4.2 金黒の製造条件と分光反射率の測定結果

作製した平面形状試料上に付着させた金黒の分光反射率特性について説明する。ここで試料名を以下の方法で付けた。例えば、「2 t 8 c k H a」という名称は、2 tは金黒の作製時の窒素ガス圧が2 torr、8 cは蒸着した金線の長さが8 cm、3 kは蒸着回数が3回、そしてHは平面形状であることを示す。Eは円錐形状を表す。最後のaは通し番号であり、同一条件で作製された試料の区別をするもので、a b c . . .の順に作製順を示す。従って、また、「2.5 t 6 c 1 k H b」は窒素ガス圧2.5 torr、金線6 cm、蒸着回数1回の平面形状の2番目の試料であることを示す。

(1) 窒素ガス圧1.5 torrで作製した試料

紫外・可視域で優れた応答特性を示した試料の金黒の蒸着条件である、窒素ガス圧1.5 torrにおいて、蒸着する金黒の量をパラメータとして試料を作製し、分光応答特性を調べた。蒸着する金の量は、金線 ($\phi 0.24\text{mm}$) の長さで蒸着回数によって変化させた。金線1 cmの重量は約9.5 mgである。

蒸着する金の量を4 cm 3回 (合計12 cm) までの試料の分光反射率の測定結果を図2.12に示す。8 cm 3回 (合計24 cm) までの試料でも図2.12とほぼ同様な結果が得られ、金の蒸着量を12 cmから24 cmに増やすことにより、金黒の膜厚が厚くなり、長波長域での反射率の上昇を押さえることができたが、それでも波長 $2.0\mu\text{m}$ における反射率は20%であり、実用にはならない。また、金黒膜厚を増加させると、反射率は低くなるが、金黒層中の熱伝導時の熱損失が、大きくなり応答度が低下するため得策ではない。

(2) 窒素ガス圧2.0 torrで作製した試料

金の量を増さずに、金黒膜厚を厚くするために、窒素ガス圧を2.0 torrとして金黒を蒸着した。このとき生成される金黒は密度の低いものとなる。蒸着する金の量を8 cm 3回 (合計24 cm) までの試料の分光反射率の測定結果を図2.13に示す。4 cm 3回 (合計12 cm)、6 cm 3回 (合計18 cm) までの試料でも図2.13とほぼ同様な結果が得られ、これらの結果から、4 cm 3回、6 cm 3回、8 cm 3回で波長2.0

μm における反射率は約1%で優れた特性の試料が得られたが、これらの結果は再現性が乏しく、長波長域で反射率が上昇する試料もかなりあった。

(3) 窒素ガス圧2.5torrで作製した試料

窒素ガス圧をさらに2.5torrに上げて作製した試料の分光反射率を測定した。図2.14に比較的反射率が低く特性の良い6cm²回、3回の試料の分光反射率の測定結果を示す。これ以外に4cm³回、8cm³回の試料は反射率が高く特性が悪かった。これらの結果より、窒素ガス圧を2.5torrで製作した試料は蒸発させた金の量に拘わらず、試料の特性の再現性がないことが判明した。

窒素ガス圧2.0torr、2.5torrでの再現性の悪い理由として、上部ヒートシンクのPVDF膜への接着性が悪く、放熱が不十分であることが考えられた。

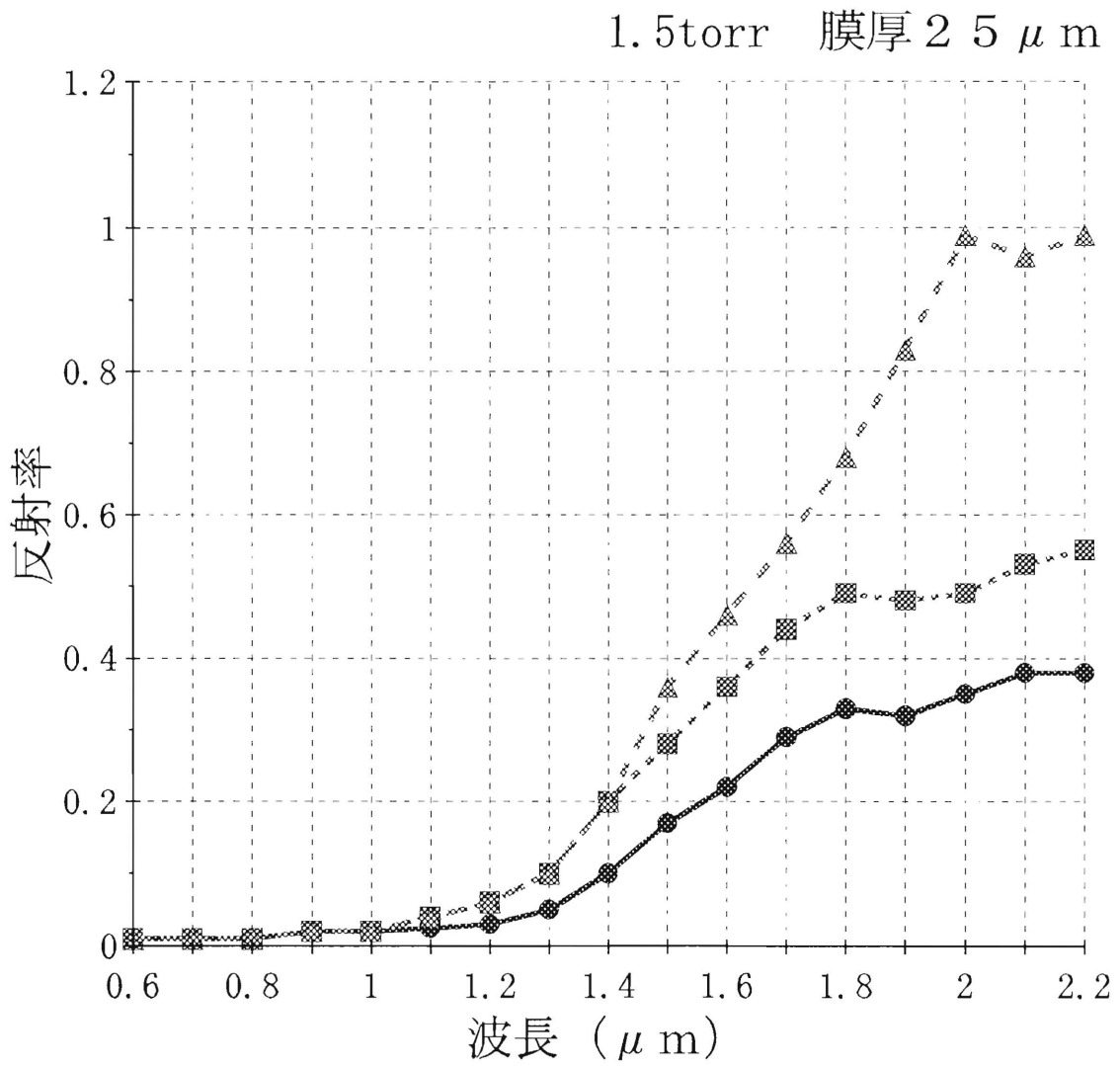


図2.12 窒素ガス圧1.5torrで作製した金黒の分光反射率の例

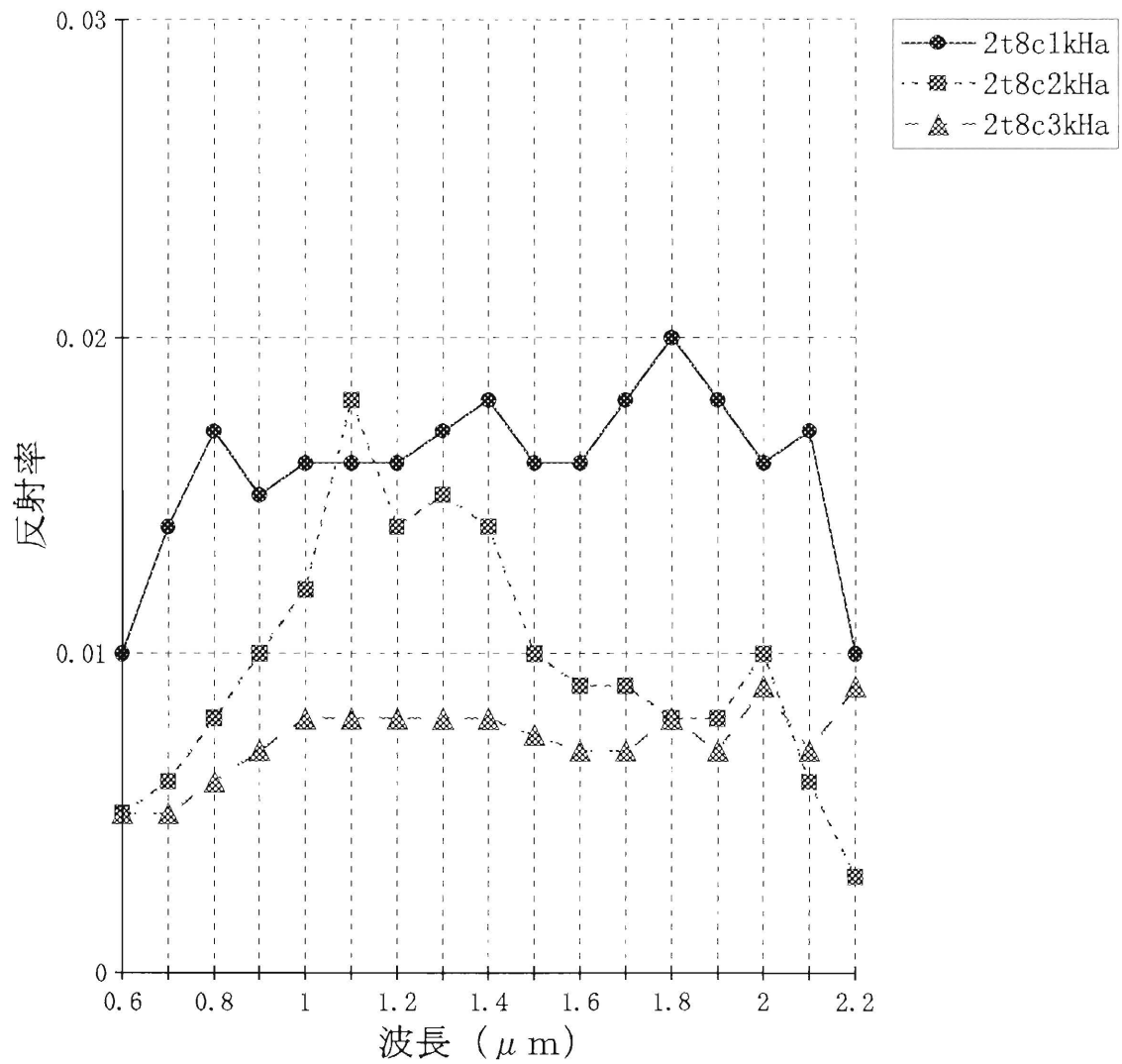


図2.13 窒素ガス圧2.0torrで作製した金黒の分光反射率の例

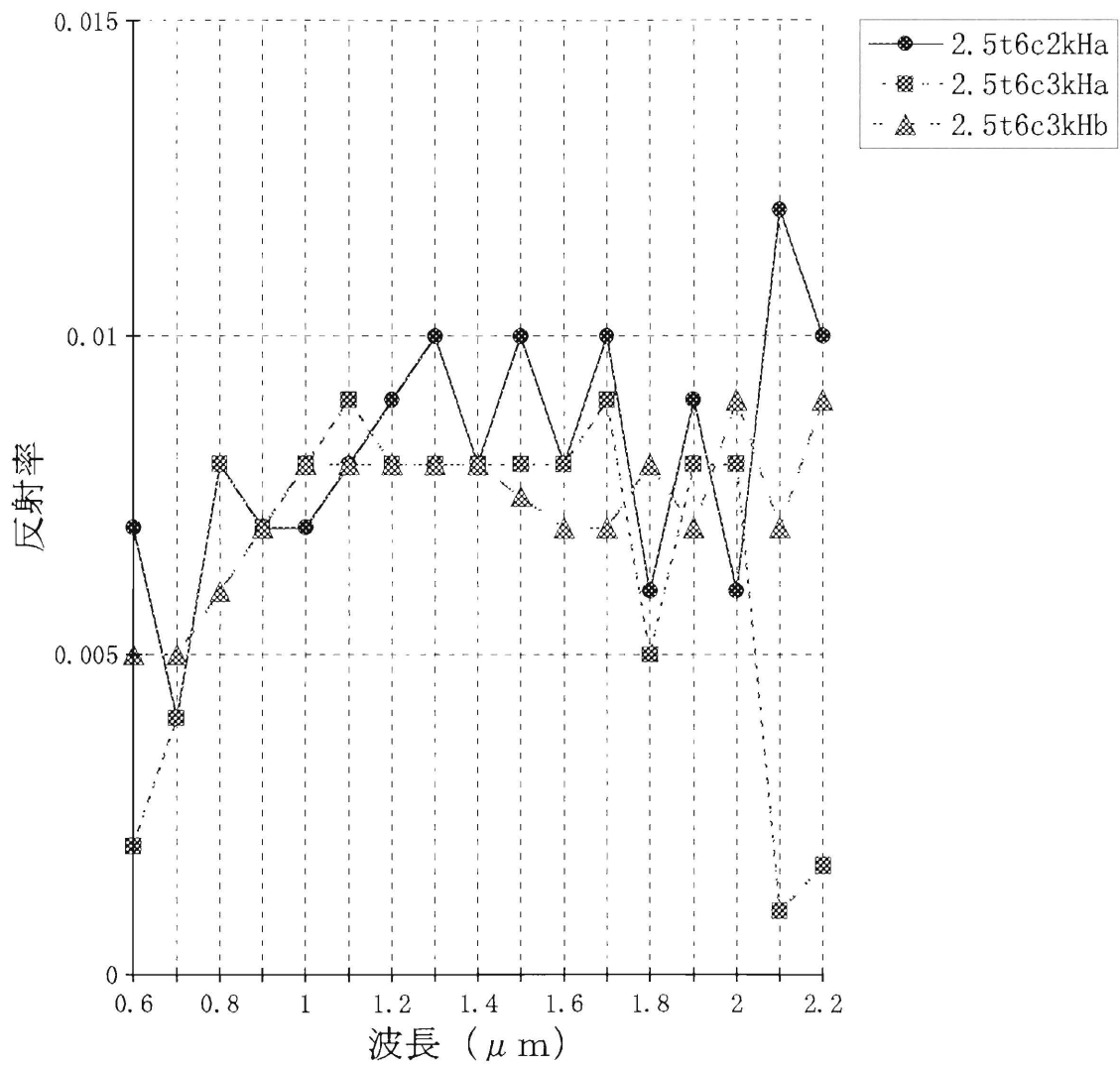


図2.14 窒素ガス圧2.5torrで作製した金黒の分光反射率の例

2.4.3 金黒の製造条件と試料の分光応答度の測定結果

(a) 分光応答度の測定

2.4.2で述べた試料について、分光応答度を測定した。まず、予備測定として紫外・可視域における応答と赤外域における応答を測定して比較した。このとき、応答度測定の基準試料として、頂角30度の円錐形状試料を作製し、この試料の波長 $0.6\mu\text{m}\sim 2.2\mu\text{m}$ における分光反射率が1%以下であることを確認し、紫外から赤外域まで分光応答特性が一定であるとみなした。この基準試料と分光反射率特性が近い試料について、分光応答特性を測定した。

波長域ごとの応答度の測定は、可視域及び赤外域のバンドパスフィルタを使用して入射光を波長 $0.8\mu\text{m}$ で分け、 $0.8\mu\text{m}$ 以下の波長に対する応答と、 $0.8\mu\text{m}$ 以上の波長に対する応答の比を基準の試料の値と比較した。この測定により、赤外域で応答が低下する試料を容易に判別することができた。

分光応答度の測定は、紫外・可視域の測定系と同様の測定系を用いた。ここで、測定条件は下記の通りである。

(1) 波長域ごとの応答度の測定

光源	ハロゲン電球 (12V、12W)
光学フィルタ	色ガラスフィルタ (IRQ-80、IRD80B)
チョッピング周波数	12.5Hz
ロックインアンプ	時定数0.3sec、感度10mV

(2) 分光応答度の測定

光源	ハロゲン電球 (25V、250W)
分光器波長	$0.6\mu\text{m}\sim 2.2\mu\text{m}$
回折格子	300本/mm、ブレイズ波長 $1\mu\text{m}$
光学フィルタ	色ガラスフィルタ O56
(二次光カット用)	(波長 $0.6\mu\text{m}\sim 1.1\mu\text{m}$)
	色ガラスフィルタ IRD80B
	(波長 $1.1\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$)
	干渉フィルタ LPF $1.5\mu\text{m}$
	(波長 $1.7\mu\text{m}\sim 2.2\mu\text{m}$)
チョッピング周波数	12.5Hz

P b S セル 温度コントローラで -30°C に冷却して使用

ロックインアンプ 時定数 0.3sec 、感度 10mV

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、標準試料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。標準試料としては、測定波長域で反射率が 1% 未満である、頂角 30 度の円錐形状試料を用いた。

標準試料と試料の測定は、波長 $0.6\mu\text{m}\sim 1.0\mu\text{m}$ で $0.2\mu\text{m}$ おき、 $1.0\mu\text{m}\sim 1.4\mu\text{m}$ で $0.1\mu\text{m}$ おき、 $1.4\mu\text{m}\sim 1.8\mu\text{m}$ で $0.05\mu\text{m}$ おき、 $1.8\mu\text{m}\sim 2.2\mu\text{m}$ で $0.02\mu\text{m}$ おきに行った。読み取りは、各波長ごとに 15 回行い、その平均を測定値とした。

(b) 分光応答度の測定結果

2.4.2で述べた試料について、紫外・可視域における応答と赤外域における応答を測定して比較した結果を反射率の測定結果とともに表2.1に示す。ここで、 $\rho_{0.6\mu\text{m}}$ 、 $\rho_{2.2\mu\text{m}}$ はそれぞれ、波長 $0.6\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ における反射率を示す。波長 $0.6\mu\text{m}$ 反射率が赤外域で増加した試料は、赤外域での応答が低く、従って、可視域と赤外域における応答の比 R が標準試料の値(約 9)より小さくなった。応答度(R)の値が基準値に近い試料は赤外域における反射率の増加が少ないことが分かる。

波長 $2.2\mu\text{m}$ における吸収率と応答度(R)の相関を求めた。この結果を図2.15に示す。相関係数は 0.81 であり、測定波長域が大きいことと試料のバラツキが大きいことため相関が強くないが、吸収率の増加とともに応答度が増すことが分かる。表2.1で R の値が標準試料に近いものを選択し、分光応答特性を測定した。図2.16に蒸着条件 2 torr 、 4 cm 2回、 6 cm 2回・3回の3つの試料について波長 $0.6\mu\text{m}$ における応答度を 1 と規格化した分光応答度を示す。

これらの結果から、分光応答特性が一定であったものは、蒸着条件が窒素ガス圧 2.0 torr 、金線の長さ 6 cm 、蒸着回数 3 回(金線の総重量約 171 mg)のものであった。その他の条件で作製された試料は波長 $2.2\mu\text{m}$ で 5% 程度の応答度の低下が見られた。

表 2. 1 可視域と赤外域における反射率と応答度の比較

試料名	反射率 ρ (%)		応答 (mV)		可視域 応答の 基準と の比	可視域と赤外 域の応答の比 $R \left(\frac{S}{V} \right)$
	波長 $0.6 \mu m$ $\rho_{0.6 \mu m}$	波長 $2.2 \mu m$ $\rho_{2.2 \mu m}$	波長 $0.8 \mu m$ 以下	波長 $0.8 \mu m$ 以上		
2t8c3k30Ea	1%未満	1%未満	18.6	171	基準	9.19
2t8c3k30Eb	1%未満	1%未満	20.2	191	基準	9.45
1.5t8c3kHa	1%未満	20	53.3	329	2.64	6.17
2t4c1kHa	1	15	45.5	391	2.25	8.59
2t4c1kHb	1%未満	35	52.6	335	2.60	6.37
2t4c2kHa	1%未満	3	49.4	436	2.44	8.8
2t4c3kHa	1%未満	1	54.8	456	2.71	8.32
2t6c1kHa	1%未満	4	48.6	325	2.41	6.69
2t6c2kHa	1%未満	2	52.3	456	2.59	8.72
2t6c3kHa	1%未満	2	56.2	501	2.78	8.9
2t6c3kHb	1%未満	1	52.7	483	2.61	9.16
2t8c2kHa	1%未満	3	55.7	484	2.76	8.69
2t8c3kHa	1%未満	23	52.8	372	2.61	7.04
2.5t4c1kHa	1%未満	45	47.1	174	2.33	3.7
2.5t4c2kHa	1%未満	11	44.0	230	2.18	5.23
2.5t4c3kHa	1%未満	10	50.0	323	2.47	6.46
2.5t4c3kHb	1%未満	10	55.3	420	2.74	7.6
2.5t6c1kHa	1%未満	27	50.6	217	2.50	4.29
2.5t6c2kHa	1%未満	1	52.4	462	2.59	8.82
2.5t6c2kHb	1%未満	30	52.8	306	2.61	5.79
2.5t6c3kHa	1%未満	1	48.8	438	2.42	8.97
2.5t8c3kHa	1%未満	15	49.1	367	2.43	7.37
2.5t8c3kHb	1%未満	25	54.5	396	2.70	7.27

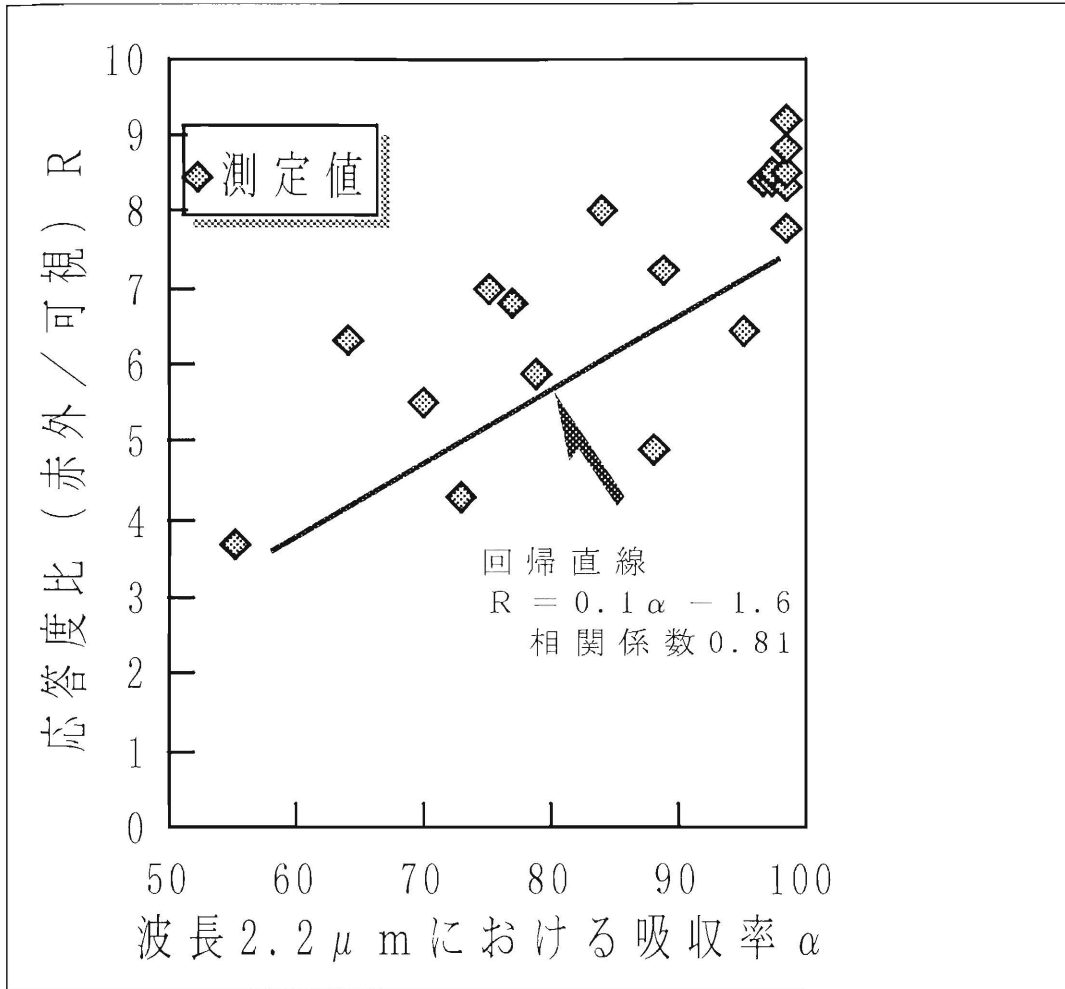


図2.15 分光吸収率と応答度の相関

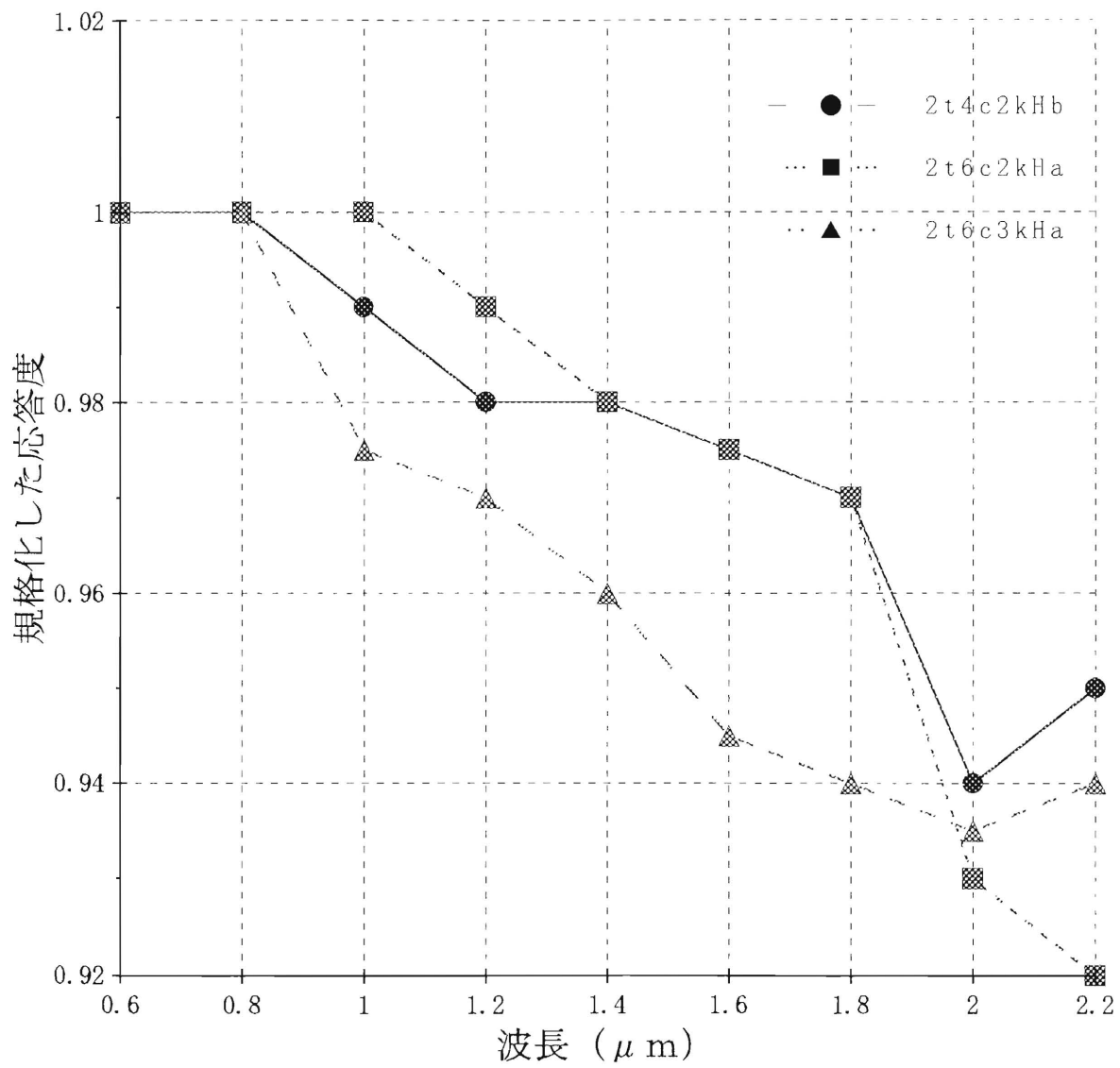


図2.16 規格化した応答度

2.5 ま と め

本章では、平面形状熱放射検出器の放射吸収層の膜厚が変化したときに、紫外・可視域において、分光応答度が変化する現象を放射吸収層内へ入射する光放射エネルギーの吸収、反射の状態を考慮したモデルによって検討した。

このモデルとして、まず、入射光が放射吸収層の特定の部分（例えば表面付近）で吸収されて、そこから放射吸収層内を熱となって伝導すると仮定した集中定数モデルを考えた。そして、このモデルを2つに分け、1つは入射した放射は表面付近で吸収されて、境界面から熱電変換素子へ熱伝導するもの（集中定数モデル1）。もう1つは放射は表面では完全に吸収されずに境界面に達して反射するが反射成分は境界面の近傍で吸収されて熱となり熱電変換素子に伝導する（集中定数モデル2）とした。

この2つのモデルについては、図2.8に示した吸収層の膜厚と分光応答特性の実測値を用いて、吸収係数 K を $0.3/\mu\text{m}$ とし、また、分光応答度が金黒の膜厚が $11\mu\text{m}$ で最大になることから、熱伝導の損失係数 ϵ_t を $0.00115/\mu\text{m}$ として、膜厚と応答度の関係を求めた結果、膜厚が $12\mu\text{m}$ より厚いときはこの集中定数モデルでも、計算値が実測値とかなりよく一致することが分かった。

次に、膜厚が薄い場合に対する、より正確なモデルとして、分布定数モデルを検討した。このモデルは入射光が放射吸収層内で徐々に吸収され、吸収された位置で熱に変換して、そこから放射吸収層を熱の形で伝導すると仮定したモデルである。この分布定数モデルも伝導した熱が放射吸収層の熱電変換素子との境界面ですべて吸収されて反射しないと仮定する場合（分布定数モデル1）と、入射した放射が膜厚内で完全に吸収されず、その一部が境界面で反射すると仮定する場合（分布定数モデル2）の2種を考えた。これらのモデルにも上述した方法で求めた K 、 ϵ_t を用いて、有効発熱量の金黒膜厚依存性を計算して実測値と比較した。この結果、今回考案したモデルが分光応答度の金黒膜厚依存性を説明でき、実測値とモデルの計算値の一致の度合いは、誤差5%以内で、膜厚が $8\mu\text{m}$ 以上の時はモデルの種類に関係なく良い一致を示し、膜厚が $8\mu\text{m}$ 以下の薄い場合には分布定数モデル2による値が最も良く実測値と一致することが分かった。なお、今回考案したモデルはいくつかの仮定を取り入れたものであるため、その仮定の

妥当性を更に検討することが必要である。

次に、赤外域においても、応答度が大きく、かつ波長に対して非選択性の検出器を実現するための金黒の製作条件を検討した。蒸着時の窒素ガス圧を紫外・可視域で最適とされた1.5torrから2.0torおよび2.5torrとし、蒸着する金の量と蒸着の回数を、金線（ $\phi 0.24\text{mm}$ ）の長さ4cm、1回から8cm、3回まで変え、平面形状試料を作製した。これら試料の分光反射率を測定を行い、波長 $0.6\mu\text{m}\sim 2.2\mu\text{m}$ において、反射率が1%未満となる金黒塗布平面形状試料が作製できた。そして、以下のことが判明した。

（1）窒素ガス圧1.5torrで作製した金黒は、赤外域で十分な吸収率を得るためには膜厚をかなり厚くしなければならないため、応答度の低下が避けられないこと。

（2）窒素ガス圧2.0torrで作製した金黒を用いると、赤外域で優れた特性の試料（波長 $2.2\mu\text{m}$ で反射率約1%）が得られたが、再現性に乏しく反射率の高い試料も見受けられた。

（3）窒素ガス圧2.5torrで作製した金黒は、一般に反射（吸収）特性の再現性が悪いことが分かった。

したがって、金黒の特性に依存するだけでは、赤外の長波長域で十分な吸収特性を得ることには限界があると考えられたので、受光面の形状を工夫して受光面自身が吸収特性を向上できるようなものを検討することにした。

第3章 空洞円錐形状試料の実効反射率の検討

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、放射吸収材として金黒を塗布したポリフッ化ビニリデン (PVDF) 焦電フィルムの熱形放射検出器は、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。金黒は前章で述べたように放射吸収材として、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。

紫外、可視域における、金黒塗布の熱形放射検出器の分光応答特性の波長非選択性と、そのような条件を満たす金黒の最適製作条件については大久保の詳細な研究がある⁴⁾。しかし、この条件で作製した金黒を塗布した検出器には、可視長波長端から赤外域で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、第2章で述べたように金黒の膜厚を厚くすることが効果があるが、製作上の問題があり、しかも波長数 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⁹⁾。

そして、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CaSO₄(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。

3.1 円錐形状受光面による実効吸収率の増大効果（モデルによる計算）

3.1.1 繰り返し反射による吸収の増加

（a）鏡面反射のとき

検出器の受光面を空洞円錐形状（コーン形）に作り、入射光を繰り返し反射させて実効的な反射率を下げることを定量的に検討するために、繰り返し反射がどのような方法で行われるかを知る必要がある。ここではまず、円錐内面が鏡面である場合、その内部反射により開口面からの反射の減少度を頂角30、45および60度について考えた。図3.1に、その内部反射モデルを示す。頂角30度の空洞円錐形状構造では、その開口部に垂直に入射した放射に対して、正反射成分では6回の反射吸収が、また頂角45度の空洞円錐形状構造では4回、頂角60度の空洞円錐形状構造で3回の反射吸収が行われる。従って単純にこのような反射で空洞円錐形状試料の実効的な反射率が決まるとすると、例えば円錐内面が0.1（10%）の反射率の材質であるとする、頂角45度では $(0.1)^4 = 0.01\%$ という小さい反射率が達成されることになる。このように反射光が鏡面成分だけであれば、入射はすべて内面に n 回（ $n = 180^\circ / \text{頂角}$ ）反射して出射するので見かけの反射率は低くなる。

（b）拡散反射のとき

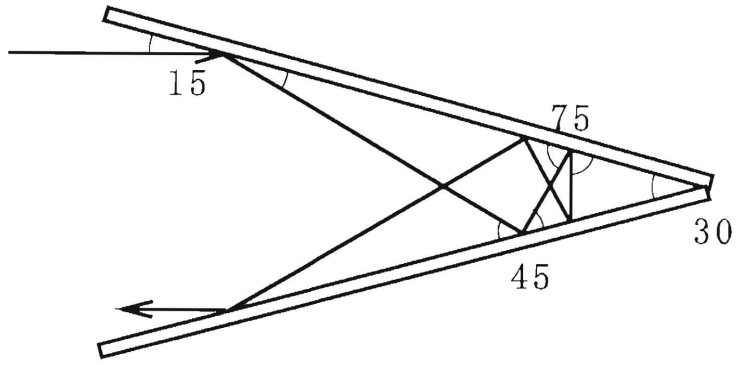
円錐内面が均等拡散を生ずる材質のときには、反射の配光は均等拡散であると考えられる。すなわち、 $\text{COS } \theta$ 特性配光特性をもった反射光が円錐内面を反射を繰り返しながら、開口面から反射光が出射することになる。図3.2に今回測定した試料の座標系と3.1.2で計算するモデルを示す。円錐内面への円錐の頂点を原点とし、円錐の中心軸を x 軸とする。開口面と平行に $y z$ 平面をとる。そして、 $x y$ 平面、 $x z$ 平面を便宜上それぞれ水平面、垂直面と呼ぶことにする。円錐軸とほぼ平行な入射に対して、反射して開口面から出射する成分は、内面が再帰性のような指向性を持たなければ、拡散性が大きい方が1回の反射で出射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。

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。実際の反射はこれらの反射の間にあると考えられる。ここでは解析が容易な $\text{COS } \theta$ 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。

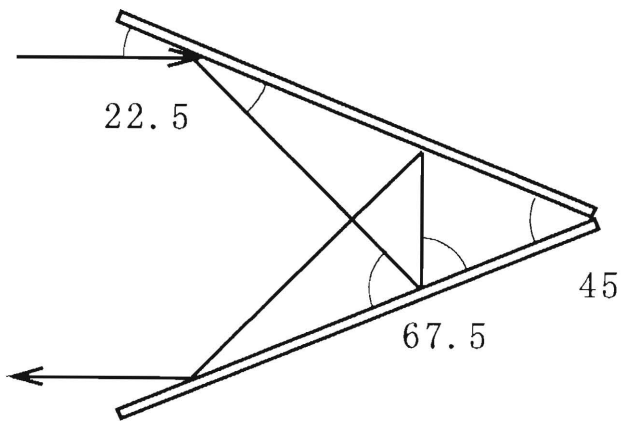
①円錐の軸に平行で均一な入射に対する第1回目の反射によって、開口面から外に出ていく成分の全反射成分に対する割合 (R_{1T} と記す)、

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_s と記す)。

この①を3.1.2で、②を3.1.3で検討した。



頂角 30° の内部反射モデル



頂角 45° の内部反射モデル

図3.1 空洞円錐形状試料の鏡面反射モデル

3.1.2 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。

(1) 頂角90度の場合

図3.2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($\cos \theta$ 特性)を満足する反射をする。ここで反射光が円錐内側面の法線となす角を 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過して出ていくときの、円錐内側面となす角である。この α を用いて ξ を表すと

$$\xi = 5\sqrt{2} \frac{\cos \alpha + \sin \alpha}{\sin \alpha} \quad (3.1)$$

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

$$r = \frac{5 \cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (3.2)$$

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

$$R_1(\alpha) = \frac{\int_{-90^\circ}^{\alpha - 90^\circ} \cos \alpha \, d\alpha}{\int_{-90^\circ}^{90^\circ} \cos \alpha \, d\alpha} = \frac{1 - \cos \alpha}{2} \quad (3.3)$$

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

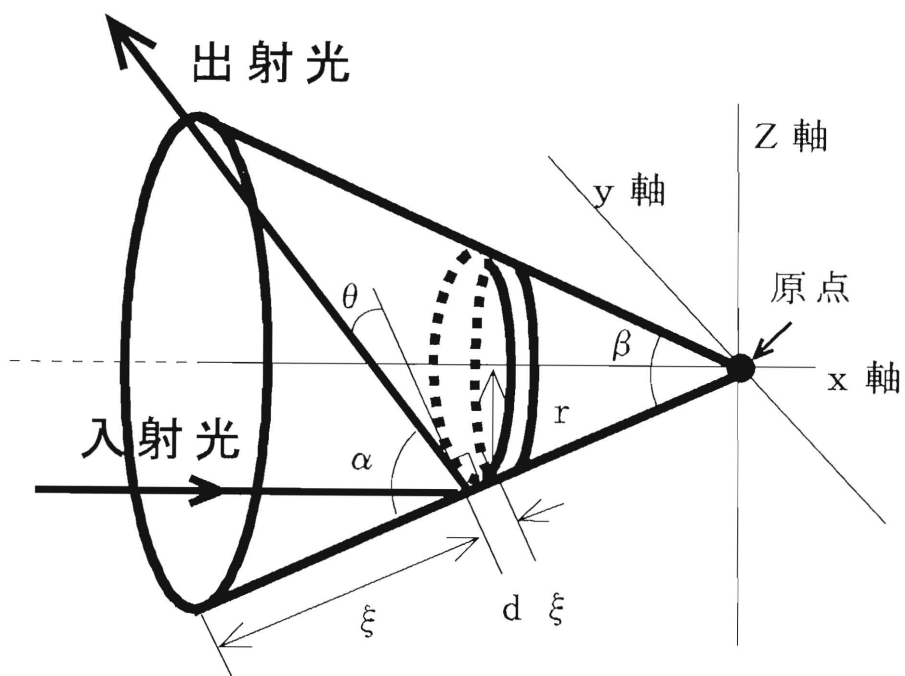


図3.2 試料の座標系と第1回目の反射による反射の減少度の計算モデル

$$R_{1T}(90^\circ) = \frac{(1/\sqrt{2})E_0 \int_0^{5\sqrt{2}} R_1(\alpha) 2\pi r d\xi}{E_0 \int_0^{5\sqrt{2}} 2\pi r d\xi} \quad (3.4)$$

積分を ξ から α に変換して (3.4) 式を整理して書き直すと

$$R_{1T}(90^\circ) = 0.707 \int_{135^\circ}^{90^\circ} \left(\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{\cos \alpha}{\sin 3\alpha} - \frac{1}{\sin 3\alpha} \right) d\alpha = 0.542 \quad (3.5)$$

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

$$R_{1T}(60^\circ) = \frac{(1/2)E_0 \int_0^{10} R_1(\alpha) 2\pi r d\xi}{E_0 \int_0^{10} 2\pi r d\xi} \quad (3.6)$$

積分を ξ から α に変換して (3.6) 式を整理して書き直すと

$$R_{1T}(60^\circ) = 0.2165 \int_{120^\circ}^{60^\circ} \left(\frac{\sqrt{3}}{\sin \alpha} + \frac{\cos \alpha - 1}{\sin 2\alpha} + \frac{\sqrt{3}(\cos \alpha - 1)}{\sin 3\alpha} \right) d\alpha = 0.294 \quad (3.7)$$

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

$$R_{1T}(45^\circ) = \frac{0.383E_0 \int_0^{13.1} R_1(\alpha) 2\pi r d\xi}{E_0 \int_0^{13.1} 2\pi r d\xi} \quad (3.8)$$

積分を ξ から α に変換して (3.8) 式を整理して書き直すと

$$R_{1T}(45^\circ) = 0.1995 \int_{112.5^\circ}^{45^\circ} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - \frac{1}{\sin 2\alpha} + \frac{\cos \alpha}{\sin 2\alpha} - \frac{1}{\sin 3\alpha} + \frac{\cos \alpha}{\sin 3\alpha} \right) d\alpha = 0.191 \quad (3.9)$$

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（x z 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、実際の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。これら三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第4章で検討した。第4章では入射光及び反射光が x z 平面に平行な面内にある場合および入射光が x z 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3.1.3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。

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

図3.3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3.1.2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 $\rho_o R_{1T}$ と表せる。従って残りの $\rho_o(1-R_{1T})$ 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 z 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り、 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、 $\rho_o R_s \rho_o(1-R_{1T})$ が開口面から出ていく。従って残りの $\rho_o(1-R_s) \rho_o(1-R_{1T})$ 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 $\rho_o R_s \rho_o(1-R_s) \rho_o(1-R_{1T})$ 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、

$$\begin{aligned} R_T &= \rho_o R_{1T} + \rho_o R_s \rho_o(1-R_{1T}) + \rho_o R_s \rho_o(1-R_s) \rho_o(1-R_{1T}) + \dots \\ &= \rho_o R_{1T} + \rho_o^2 R_s (1-R_{1T}) \frac{1}{1-\rho_o(1-R_s)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

この実効的な反射率と平面の反射率の比は k_c なので、

$$k_c = R_{1T} + \rho_o R_s (1-R_{1T}) \frac{1}{1-\rho_o(1-R_s)} \quad (3.11)$$

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。

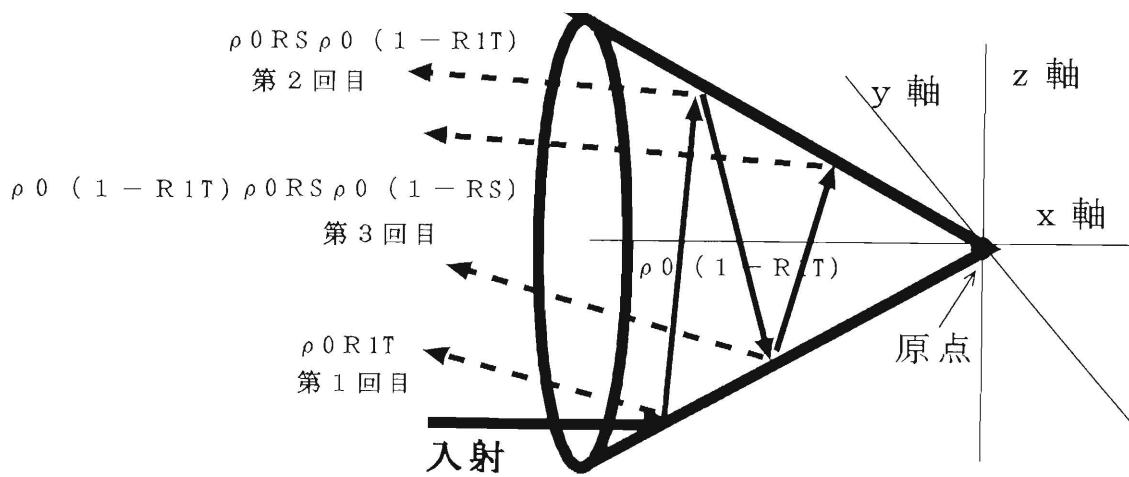


図3.3 繰り返し反射を考慮した実効反射率の計算モデル

3.2 円錐形状受光面試料の製作

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3.4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。

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形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(共にカンベハピオ製)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。

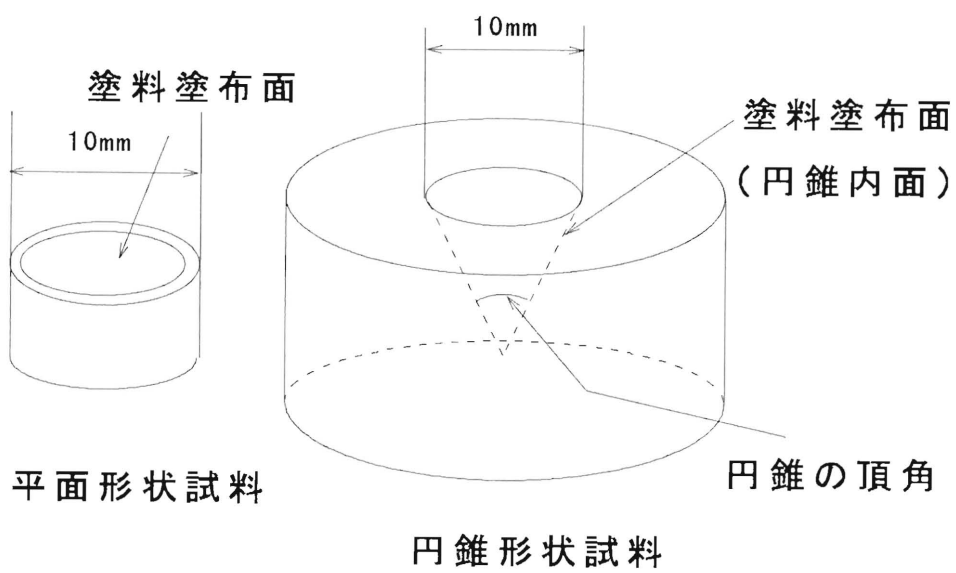


図3.4 平面形状及び円錐形状試料

3.3 反射の配光特性の測定

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3.5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3.6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3.6の xz 平面)とそれに直交する面(図3.5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2ms、 $R_f=1M\Omega$)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。

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3.7、図3.8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。

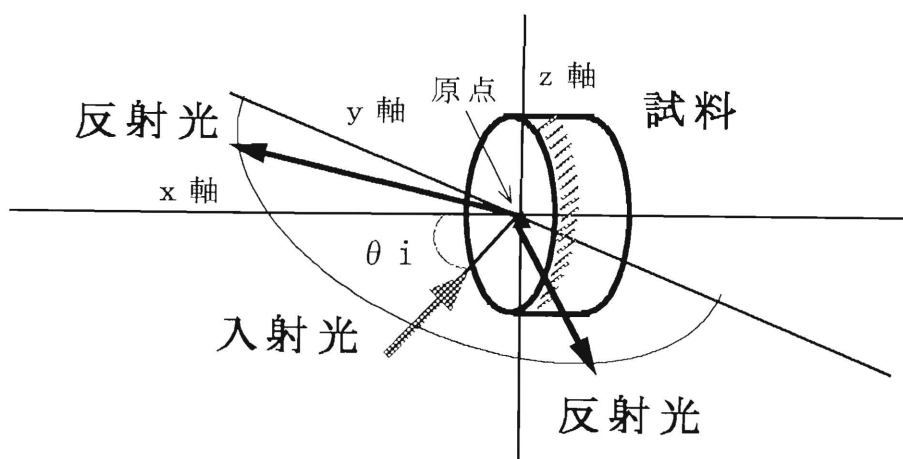


図3.5 x y 平面内の反射の配光特性測定概念図

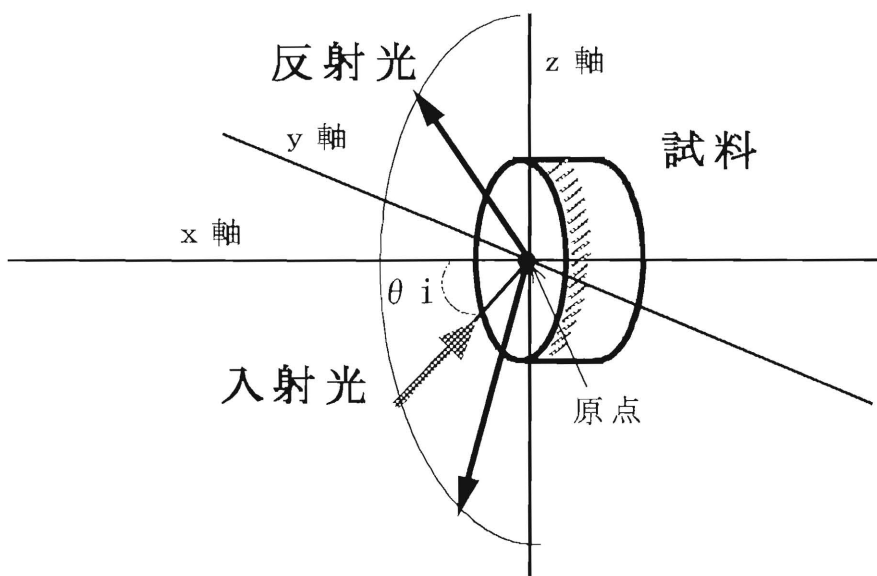


図3.6 x z 平面内の反射の配光特性測定概念図

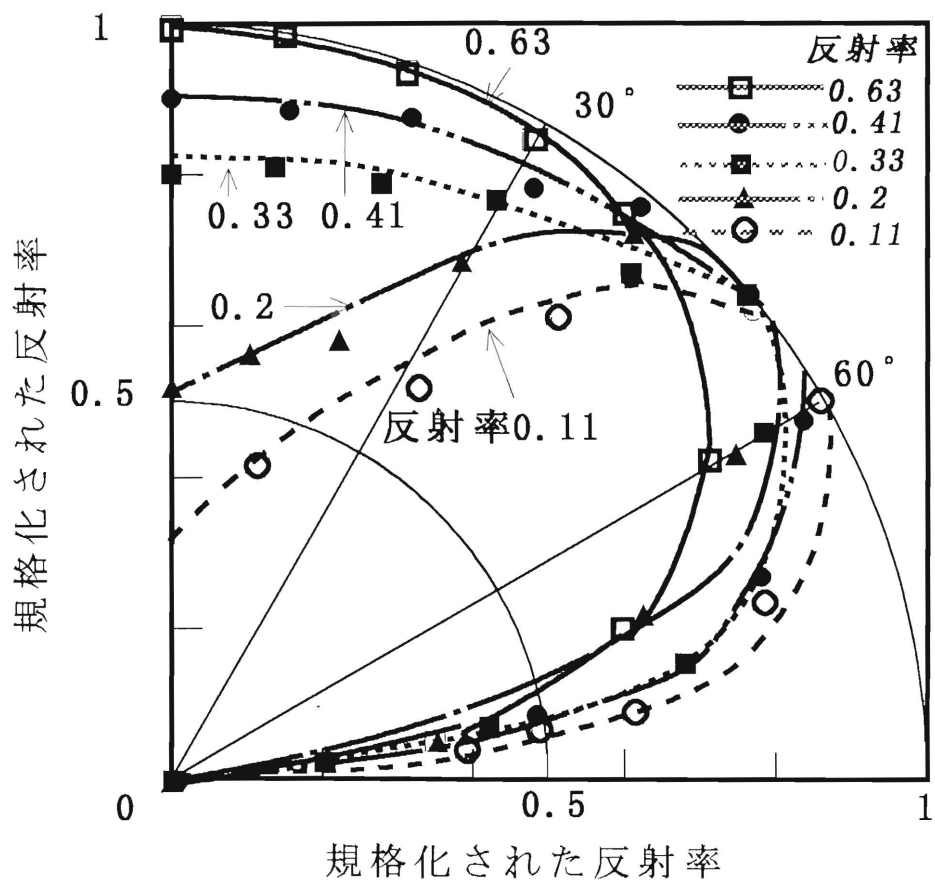


図3.7 反射の配光特性 (つやなし試料)

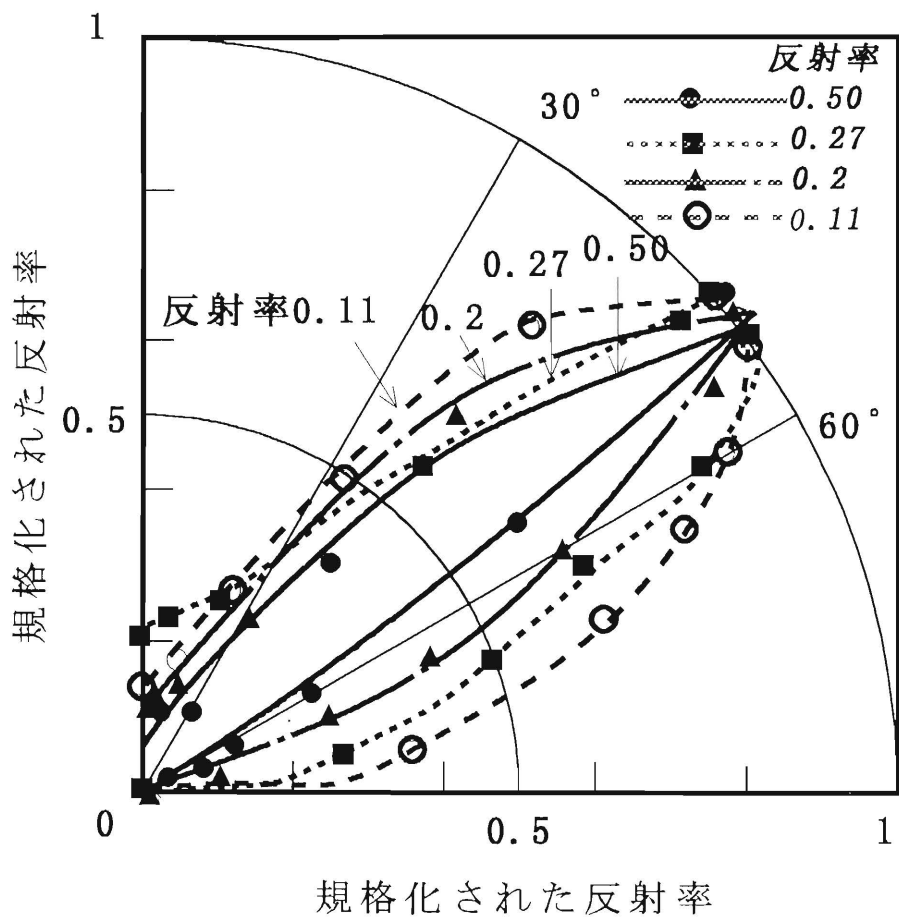


図3.8 反射の配光特性 (つやあり試料)

3.4 分光反射率の測定

各試料の分光反射率の測定を行った。測定光学系は図2.6と同様である。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。この円形の単色像を凹面ミラー($f = 125\text{mm}$)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。

測定には標準白色面としてHalon圧着面を使用した。分光反射率測定の受光器は、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。

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3.9及び図3.10に示す。

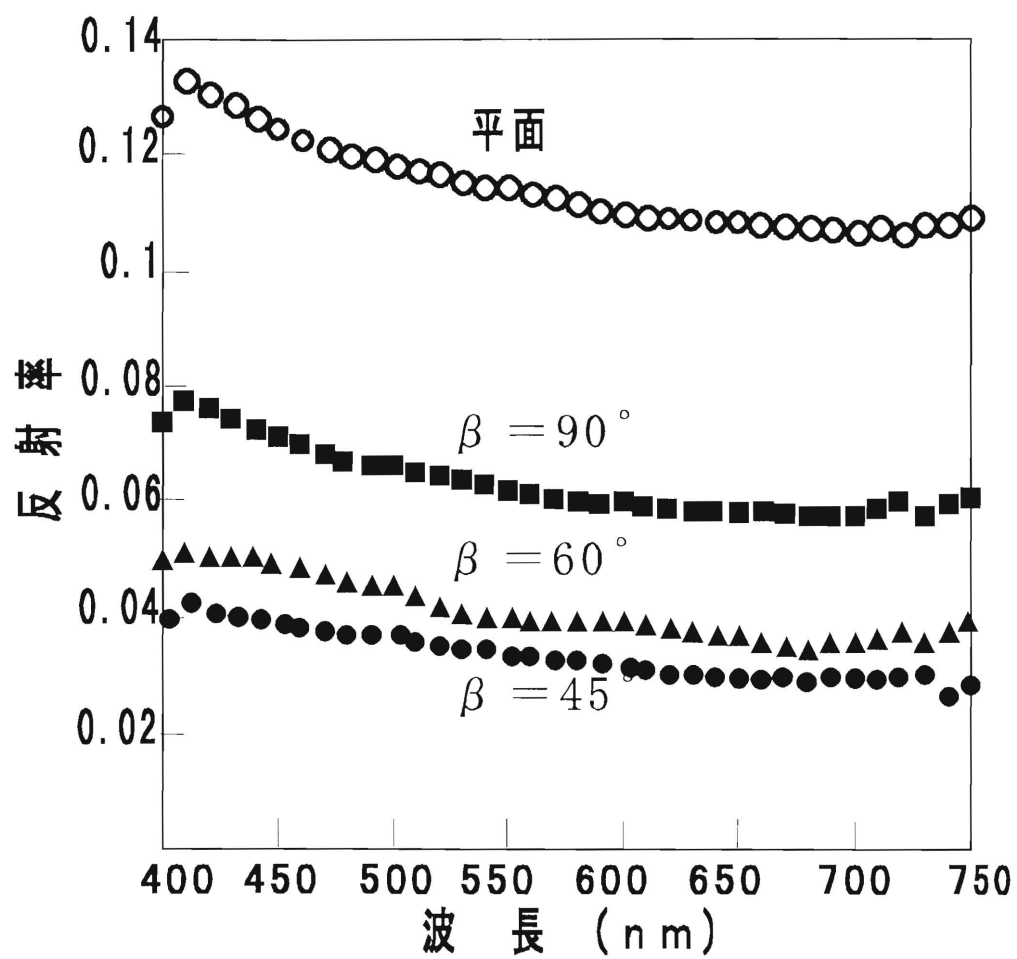


図3.9 平面形状試料と円錐形状試料の受光面の分光反射率特性
(つやなし 平均反射率0.11)

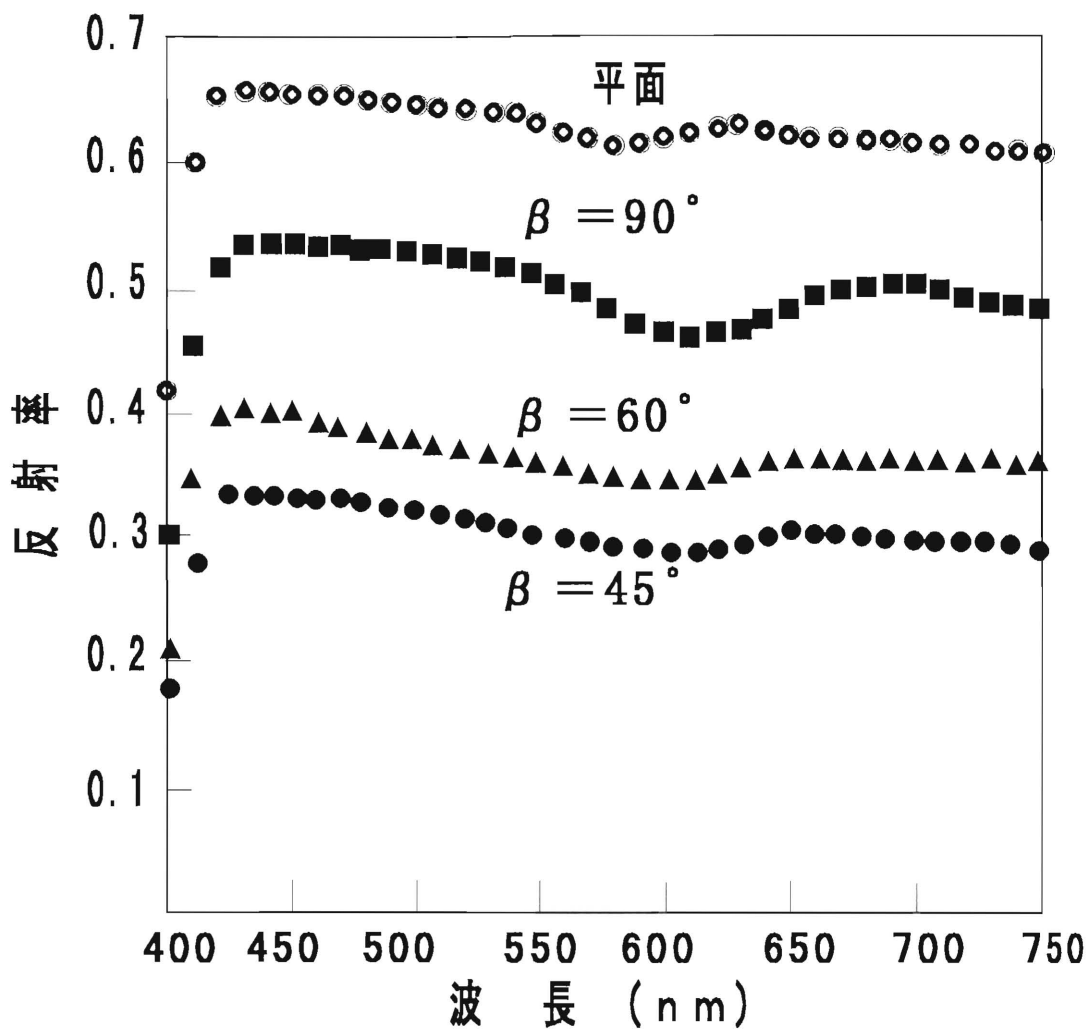


図3.10 平面形状試料と円錐形状試料の受光面の分光反射率特性
(つやなし 平均反射率0.63)

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 k_c ($k_c = \rho_c / \rho_0$)を求めた。これをつやなし、ありについてそれぞれ図3.11及び図3.12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(k_c)を示し、頂角90度(●、○)、60度(▲、△)、45度(■、□)でプロットした。図3.11及び図3.12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。

3.4.1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と求まった。(3.11)式より R_{1T} は図3.11の図中の $\rho_0 \rightarrow 0$ における k_c の値に対応している。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、 k_c の意味がなくなる。ここでは、 $\rho_0 \rightarrow 0$ は k_c の極限值を求めるための極小値と考える。(3.11)式で正確に k_c 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¹³⁾、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、(3.11)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、 k_c 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 k_c 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(3.11)に代入して求めた計算値を図3.11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。

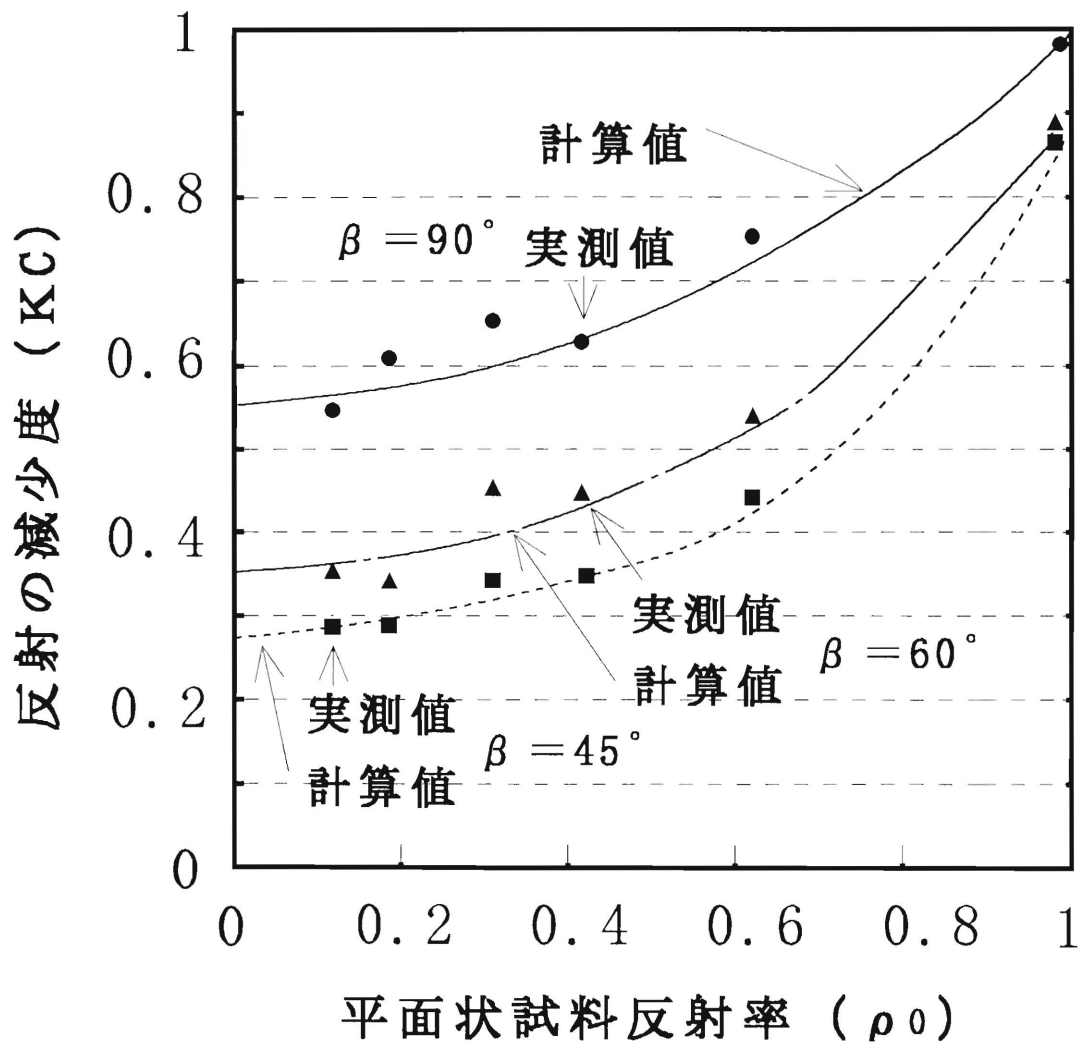


図3.11 平面形状試料の反射率(ρ_0)と円錐形状の頂角をパラメータとした反射の減少度(kc)の関係 (つやなし塗料)

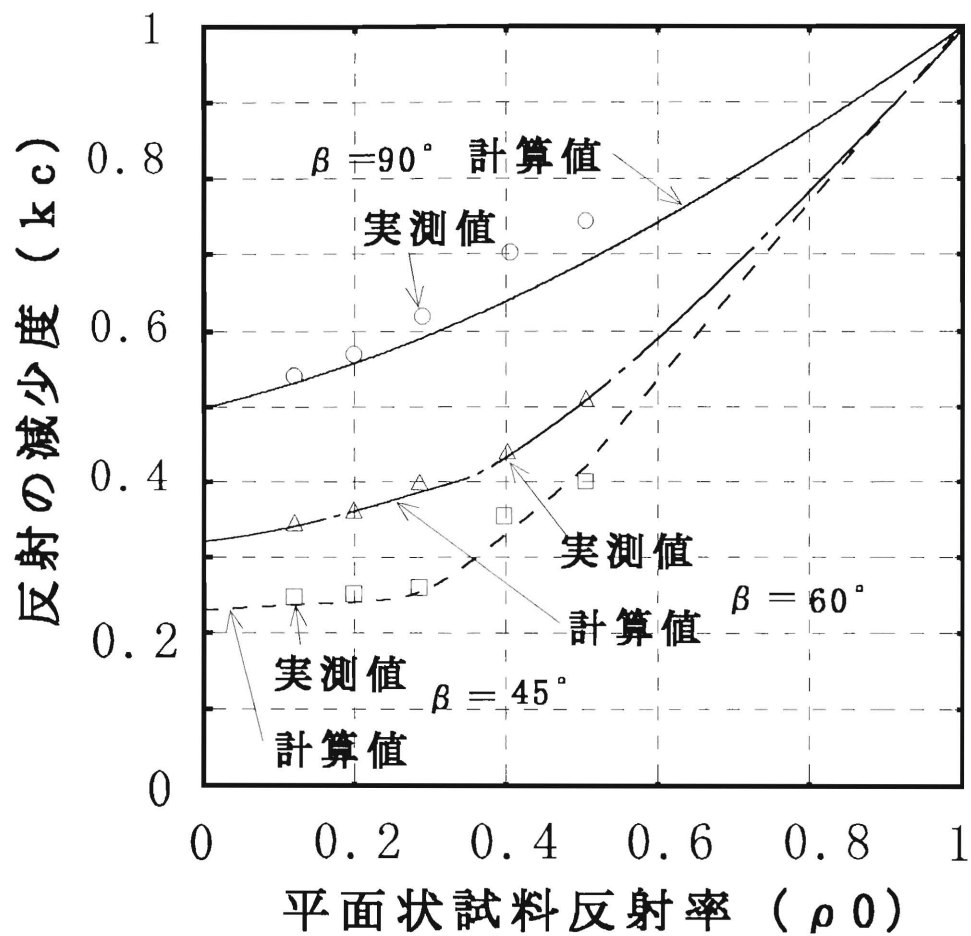


図3.12 平面形状試料の反射率(ρ_0)と円錐形状の頂角をパラメータとした反射の減少度(kc)の関係 (つやあり塗料)

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的な反射率が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、実効的な反射率が0.2(減少度0.4)になる。

ここで $\rho_0 \approx 0$ の場合、(3.11)式は

$$k_c = R_{1T} + \rho_0 R_s (1 - R_{1T}) \quad (3.12)$$

これから、頂角を45度、反射率0.01の試料の場合は、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3.9(反射率0.11の試料)及び図3.10(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。

3.5 まとめ

空洞円錐形状試料の実効反射率の低減効果を以下のようなモデルを考えて検討した。

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った。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、内面が指向性を持たず、拡散性が大きい方が1回の反射で出射する成分が増え、実効的な反射率は増加する。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反射して出射し、実効的な反射率は減少する。実際の反射はこれらの反射の間にあると考えられるが、ここでは解析が容易な $\cos\theta$ 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回目の反射によって、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})、

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 R_s)。

この①を3.1.2で、②を3.1.3で検討した。そしてこれらを用いて、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。

上述したモデルを適応して、受光面を円錐空洞形状にした熱形放射検出器の基礎的検討を行った。このために円錐空洞形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い出した。そして、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となる。

本章で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。

第4章 空洞円錐形状試料の実効反射率の計算モデル

第3章では、波長依存性の少ない反射率0.1~0.6程度の間の5種類の灰色塗料(つやあり、なし)を塗布したモデル試料を作製し、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の結果について述べた。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し、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。

この時のモデルの近似式を導出する過程で以下の考え方を導入した。

(1) 計算は円錐軸とほぼ平行な円錐内面への入射と、入射光と同一平面内で反射して開口面から出射する成分について行った。

(2) 反射の配光特性は $\cos\theta$ 特性を満足するものを仮定した。

(3) 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回目の反射によって、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})、

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 R_s)。

(4) 実効反射率の計算式として、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、上記(1)~(4)の仮定を検討する必要がある、本章では第3章で行った計算の妥当性を検討し、より実際的な考え方を提案する。

4.1 入射面内における反射の配光特性を考慮するモデル（入射光が円錐の中心軸を通る場合）

4.1.1 任意の配光特性の場合の円錐の頂角(90, 60, 45度) に対する R_{1T} の計算

第3章では計算を簡略化するために、反射の配光特性を $\cos \theta$ 則に従うものとして取り扱った。ここでは一般的な配光特性を考えるため、任意の配光特性を導入した計算法について述べる。

反射の配光特性を $\cos \theta$ ではなく、任意の反射配光特性で考える。この反射光の強度分布（反射特性）を $A(\alpha)$ とすると、図3.2において、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 $R_1(\alpha)$ は

$$R_1(\alpha) = \frac{\int_{-90^\circ}^{\alpha-90^\circ} A(\alpha) d\alpha}{\int_{-90^\circ}^{90^\circ} A(\alpha) d\alpha} \quad (4.1)$$

と書き表される。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 $2\pi r d\xi$ であり、全円錐内側面 $0 \leq \xi \leq 5\sqrt{2}$ ($90^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$) 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

$$R_{1T}(90^\circ) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^{5\sqrt{2}} R_1(\alpha) 2\pi r d\xi \quad (4.2)$$

となる。積分を ξ から α に変換して(4.2)式を整理して書き直すと

$$R_{1T}(90^\circ) = \frac{\pi}{2} \int_{90^\circ}^{135^\circ} R_1(\alpha) \frac{\cos \alpha}{\sin 3\alpha} d\alpha \quad (4.3)$$

となる。したがって反射の配光特性の測定値から、 α の関数として $R_1(\alpha)$ を求め、(4.3)式を数値積分することにより、 $R_{1T}(90^\circ)$ を求めることができる。

(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

$$R_{1T}(60^\circ) = \frac{1}{2} \int_0^{10} R_1(\alpha) 2\pi r d\xi \quad (4.4)$$

と書き表される。積分を ξ から α に変換して(4.4)式を整理して書き直すと

$$R_{1T}(60^\circ) = \frac{\sqrt{3}\pi}{8} \int_{60^\circ}^{120^\circ} R_1(\alpha) \left(\frac{\sqrt{3}\cos \alpha}{\sin 3\alpha} - \frac{1}{\sin 2\alpha} \right) d\alpha \quad (4.5)$$

となる。

(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 $R_{1\tau}$ (45°)は

$$R_{1\tau}(45^\circ) = 0.383 \int_0^{13.1} R_1(\alpha) 2\pi r d\xi \quad (4.6)$$

と書き表される。積分を ξ から α に変換して(4.6)式を整理して書き直すと

$$R_{1\tau}(45^\circ) = 2.053 \int_{45^\circ}^{112.5^\circ} R_1(\alpha) \left(\frac{1}{\sin 2\alpha} - \frac{\cos \alpha}{\sin 3\alpha} \right) d\alpha \quad (4.7)$$

となる。

4.1.2 任意の円錐の頂角に対する R_{1T} の計算

3.1では入射面内における反射の配光特性を $\cos \theta$ と仮定し、円錐の頂角が90、60、45度の場合について、第1回目の反射による開口面からの出射率 R_{1T} を計算した。ここでは、入射面内における反射の配光特性を $\cos \theta$ と仮定した場合の、任意の頂角 β における R_{1T} を計算する。

図4.1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、任意の頂角 β に対して、 ξ は0から $5/\sin(\beta/2)$ 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 $\{90^\circ - (\beta/2)\}$ で入射するので、その面の照度は $E_0 \cos\{90^\circ - (\beta/2)\} = E_0 \sin(\beta/2)$ 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($\cos \theta$ 特性)を満足する反射をする。ここで反射光が円錐内側面の法線となす角を 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過して出ていくときの、円錐内側面となす角である。この α を用いて ξ を表すと

$$\xi = 10 \frac{\cos\{(\beta/2) - \alpha\}}{\sin \alpha} \quad (4.8)$$

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

$$r = -10 \frac{\cos\{(\beta/2) - \alpha\} \cdot \sin(\beta/2)}{\sin \alpha} + 5 \quad (4.9)$$

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

$$R_1(\alpha) = \frac{\int_{-90^\circ}^{\alpha - 90^\circ} \cos \alpha \, d\alpha}{\int_{-90^\circ}^{90^\circ} \cos \alpha \, d\alpha} = \frac{1 - \cos \alpha}{2} \quad (4.10)$$

したがって全円錐内側面 $0 \leq \xi \leq 5/\sin(\beta/2)$ の範囲に入射した光が開口

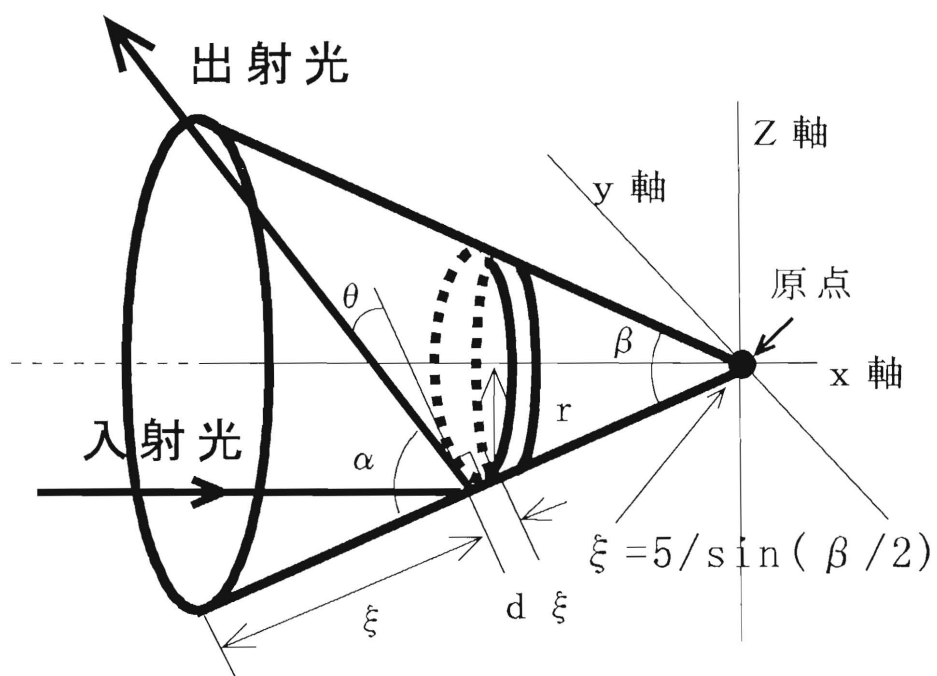


図4.1 試料の座標系と第1回目の反射による反射の減少度の計算モデル

面から出ていく割合 $R_{1T}(\beta)$ は

$$R_{1T}(\beta) = \frac{E_0 \sin(\beta/2) \int_0^{5/\sin(\beta/2)} R_1(\alpha) 2\pi r d\xi}{E_0 \int_0^{5/\sin(\beta/2)} 2\pi r d\xi} \quad (4.11)$$

積分を ξ から α に変換して(4.11)式を整理して書き直すと

$$R_{1T}(\beta) = \frac{\int_{90^\circ + \beta}^{\beta} f(\alpha) d\alpha}{\int_{90^\circ + \beta}^{\beta} g(\alpha) d\alpha} \quad (4.12)$$

ここで

$$g(\alpha) \equiv (1 - 2\beta \cos(\beta/2 - \alpha) / \sin \alpha) \frac{1}{\sin^2 \alpha} \quad (4.13)$$

$$f(\alpha) \equiv g(\alpha) (1 - \cos \alpha) \quad (4.14)$$

$$\beta \equiv \frac{1}{\sin(\beta/2)} \quad (4.15)$$

$$\int_{90^\circ + \beta}^{\beta} g(\alpha) d\alpha = \frac{1}{\sin^3 \alpha} (\beta \sin \alpha - \pi \sin \alpha - 4\beta^2 + 4\beta \cos \alpha) \quad (4.16)$$

$$\int_{90^\circ + \beta}^{\beta} f(\alpha) d\alpha = \tan(\beta/2) + (1/2) \sin(\beta/2) \cos(\beta/2) \tan^2(\beta/2)$$

$$- \sin(\beta/2) \cos(\beta/2) \ln \tan(\beta/2) - (1/2) \tan(\beta/2) \sin^2(\beta/2)$$

$$+ (1/2) (-2 + 2 \tan^2(\beta/4) - \sin(\beta/2) \cos(\beta/2))$$

$$- 2 \sin(\beta/2) \cos(\beta/2) \tan(\beta/4) - \sin(\beta/2) \cos(\beta/2) \tan^2(\beta/4)$$

$$+ 2 \sin(\beta/2) \cos(\beta/2) \ln(1 + \tan(\beta/4))$$

$$- 4 \sin(\beta/2) \cos(\beta/2) \tan(\beta/4) \ln(1 + \tan(\beta/4))$$

$$+ 2 \sin(\beta/2) \cos(\beta/2) \tan^2(\beta/4) \ln(1 + \tan(\beta/4))$$

$$- 2 \sin(\beta/2) \cos(\beta/2) \ln(1 - \tan(\beta/4))$$

$$+ 4 \sin(\beta/2) \cos(\beta/2) \tan(\beta/4) \ln(1 - \tan(\beta/4))$$

$$- 2 \sin(\beta/2) \cos(\beta/2) \tan^2(\beta/4) \ln(1 - \tan(\beta/4))$$

$$+ 4 \sin^2(\beta/2) - 4 \sin(\beta/2) \tan^2(\beta/4) / (-1 + \tan(\beta/4)) \quad (4.17)$$

$\beta = 0$ 度から90度までの $R_{1T}(\beta)$ を計算した結果を図4.2に示す。

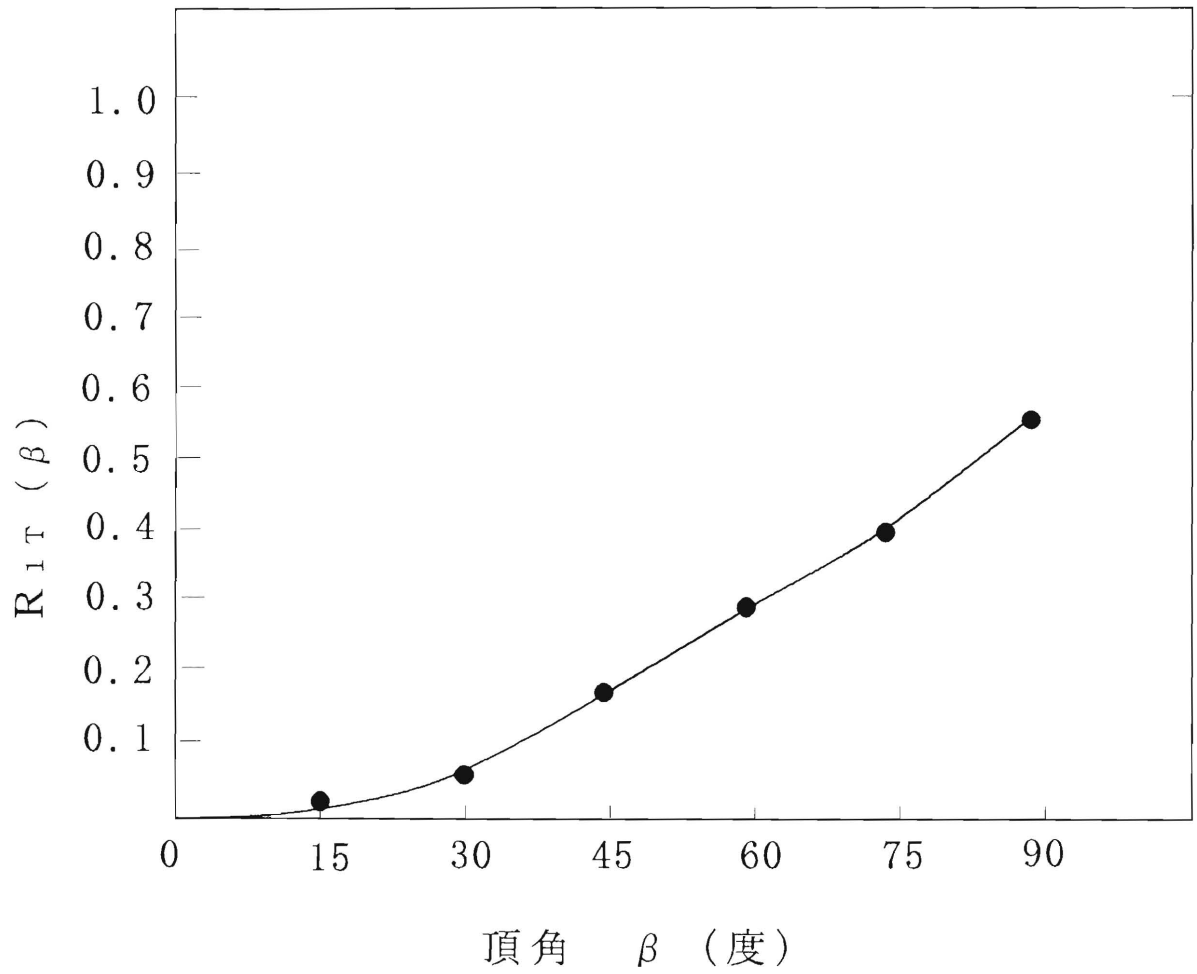


図4.2 頂角 β と $R_{1T}(\beta)$ の計算結果

4.2 入射面内における反射の配光特性を考慮するモデル（入射光が円錐の中心軸以外を通る場合）

第3章および4.1では、入射光と反射光が円錐の中心軸を通る場合を取り扱った。ここでは、入射光が中心軸を通らない場合を考える。

試料の円錐を斜め横から見たものを図4.3(1)に示す。円錐 $O A' A''$ 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。第3章および4.1では反射光が xz 平面内にある場合を計算した。

一般には、 xz 平面に平行に入射した光は三次元的に反射するが、ここでは、入射光及び反射光が xz 平面に平行な面内にある場合を考える。入射光が xz 平面に平行に入射し、頂点 O から a だけ離れた点 A を通過して $A A''$ に平行な位置で反射する場合を考える。このとき反射光が点 A を通り、 x 軸と平行に円錐面を切断する面の輪郭は双曲線となる。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。

図4.3(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図4.3(2)に示す。また、円錐を真上（開口面に垂直）から見た図を図4.3(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 $O A'$ 及び $O A''$ を漸近線とする双曲線である。この双曲線（ $A A''$ ）に入射した光が開口面から出ていく割合 $R_{1\tau}$ 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、第3章で計算した $R_{1\tau}=0.542$ 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 $R_{1\tau}=1$ 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 $\alpha \approx 108$ 度となるので、この時の $R_{1\tau}$ の値を計算し、

$$R_{1\tau}(90^\circ) = 0.70 \int_{135^\circ}^{108^\circ} \left(\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{\cos \alpha}{\sin 3\alpha} - \frac{1}{\sin 3\alpha} \right) d\alpha = 0.702 \quad (4.18)$$

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ため、 R_{1T} 0.542に近い値をとることになる。

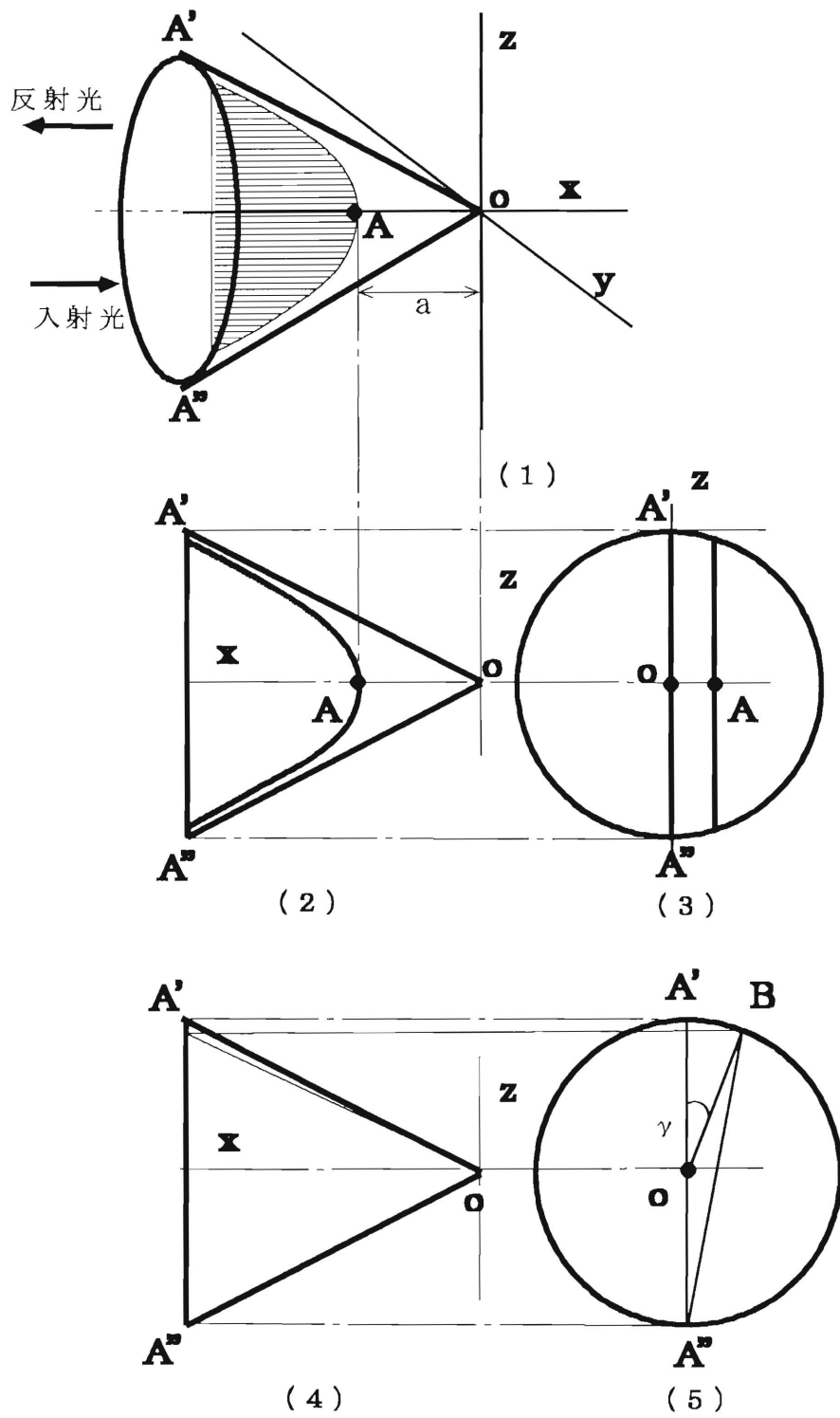


図4.3 三次元の反射を考慮する計算のモデル図

4.3 入射面以外への反射を考慮するモデル（入射光が円錐の中心軸を通る場合）

ここでは、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図4.3(4)に示す。また、円錐を真上（開口面に垂直）から見た図を図4.3(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。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45度の範囲で変化する。 γ が0度の場合は、反射光が xz 面内にあり、第3章で計算した $R_{1T}=0.542$ になる。 γ が45度の場合の R_{1T} は式(3.7)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ため、 R_{1T} の値は0.542に近い値になる。

4.4 反射に関する積分方程式の数値解による繰り返し反射の計算

3.1では、円錐内面における反射のうち、第1回目の反射で円錐開口面から外部に反射する成分を計算した。3.2では、ある点に入る入射エネルギーを、光源からの入射光だけでなく、他の全ての円錐内面から繰り返し反射によって入射する光の総量と考え、この放射エネルギーを求めることによって、円錐内面における反射を考えた。ここでは円錐空洞内における繰り返し反射により定常状態での円錐内面の照度分布を積分方程式から解く方法で求めた。円錐形空洞からの熱エネルギーの吸収、放射に関しては、SPARROWらの論文¹³⁾がある。彼らは熱の吸収、放射を検討しているが、この考え方を、光の吸収、放射に当てはめて考えることにする。図4.4のように、円錐の頂角を θ 、側面の長さを L 、頂点からの距離を y とする。 y における放射エネルギー $B(y)$ は

$$B(y) = \rho_0 \cdot I(y) \quad (4.19)$$

と表される。ここで ρ_0 は円錐内面の反射率、 $I(y)$ は y に入射した入射エネルギーである。本研究の測定では、 $I(y)$ は光源からの入射光 I_0 (一定値)とその入射光が円錐内面へ入射角 $(\theta/2)$ で入射して光が相互反射により定常状態になったときの光の和として考えることができ、

$$I(y) = I_0 \cdot \sin(\theta/2) + \int_{\xi=0}^L B(\xi) dF_{y-\xi} \quad (4.20)$$

と書き表せる。ここで ξ は y と同様な変数であり、 $dF_{y-\xi}$ は $y=\xi$ におけるリング形の微小面積 dA_ξ と $y=y$ における微小面積 dA_y の間の固有入射光束係数であり、

$$dF_{y-\xi} = \frac{\cos^2(\theta/2)}{2y \sin(\theta/2)} \left\{ 1 - |\xi - y| \cdot \frac{(\xi - y)^2 + 6\xi y \sin^2(\theta/2)}{[(\xi - y)^2 + 4\xi y \sin^2(\theta/2)]^{3/2}} \right\} \quad (4.21)$$

で与えられる。

式(4.20)を式(4.19)に代入して、

$$B(y) = \rho_0 \cdot I_0 \cdot \sin(\theta/2) + \rho_0 \int_{\xi=0}^L B(\xi) dF_{y-\xi} \quad (4.22)$$

と書ける。式(4.22)の積分方程式は解析的には解けず、 $y=\xi$ における $B(\xi)$ の分布を仮定して、 $B(y)$ を計算し、得られた $B(y)$ の値を $B(\xi)$ に代入し再び $B(y)$ を計算する。この手続きを繰り返すことにより、 $B(\xi)$ の値が $B(y)$ にほぼ等しくなるような放射エネルギー $B(y)$ の分布を数値的に求めることが可能である。全円錐内

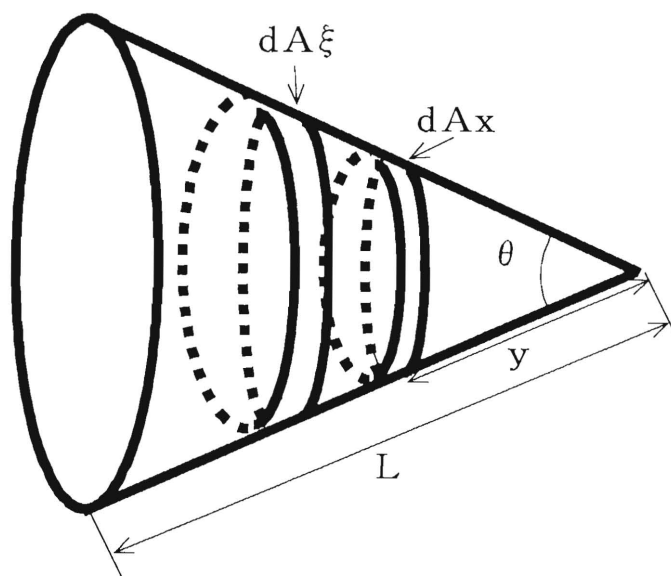


図4.4 空洞円錐形状試料の積分方程式による繰り返し反射の計算図

側面について、この $B(y)$ にリング形の微小面積を掛け積分すれば、この円錐開口面から放射される光の総和($P(\theta)$)が計算できる。すなわち、

$$P(\theta) = \int_{y=0}^L B(y) 2\pi y \sin(\theta/2) dy \quad (4.23)$$

と書き表される。ここで計算する値は平面状の試料 ($\theta = 180^\circ$ に相当している) と比較した、円錐状の試料の反射の相対的変化 $P(r) = P(\theta) / P(180^\circ)$ である。予め行った計算により $P(\theta)$ の計算結果は $B(\xi)$ の初期値には依存せず、 I_0 に依存することが判明した。また、 I_0 の値を変えたときに $P(r)$ の値は変化しないことが判明した。

4.5 まとめ

第3章では、空洞円錐形状試料の実効反射率を簡略化したモデルを用いて計算した。本章ではより実際に近い以下の計算方法を提案した。

(1) 反射の配光特性を $\cos \theta$ 則ではなく、 $\cos n \theta$ の配光特性さらに、任意の配光特性を導入した計算法について説明した。

(2) 入射した光が反射後三次元的に反射するが、比較的計算が容易な2つの場合について $R_{i\tau}$ を計算し、第3章で求めた値の妥当性を検討した。まず、入射光が円錐の中心軸以外に入射し、入射面内における反射の配光特性を考慮するモデルを検討した。次に、入射光が円錐の中心軸を通り、入射面以外への反射を考慮するモデルを検討した。前者は頂角90度の場合、 $R_{i\tau}(90^\circ) = 0.542$ よりやや大きな値(概算で0.6程度)を取り、後者の場合は $R_{i\tau}(90^\circ) = 0.542$ 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 $R_{i\tau}$ は0.5程度となり、第3章で述べた $R_{i\tau}(90^\circ) = 0.542$ と10%程度の範囲内で一致することが予想できる。

(3) 繰り返し反射を積分方程式を解く方法で検討した。

第5章 実際の金黒塗布空洞円錐形状試料の検討

紫外・可視域において良好な分光吸収特性・分光応答特性を示した金黒塗布平面形状熱放射検出器が、赤外域においてそれらの特性が波長選択性を示した。これは、入射した放射が吸収層で完全には吸収されず、反射することが原因と考えられる。応答度の波長選択性を解消するために、検出器受光面で入射の繰り返し反射吸収を行わせ、応答を犠牲にすることなく、分光応答特性を波長依存性のない空洞状の受光面を検討し、その一形態として空洞円錐形状の検出器を作製して特性を検討した。

この研究で用いる熱電変換素子（P V D F 焦電素子）がフレキシブルなフィルムであるので、これを空洞円錐形状に成形し、その内部に金黒放射吸収層を設け、その内部で繰り返し反射・吸収を行わせる構造を実現した。そして最適条件を求めるために頂角30、45および60度の空洞円錐形状検出器を作り、特性の検討を行った。

5.1 試料の製造と構造⁴⁾

今回使用したP V D F 焦電フィルムは、一種のコンデンサであって比誘電率 $\epsilon_r=11$ 、厚さ $9\mu\text{m}$ 、 $12\text{mm}\phi$ （面積 1.13cm^2 ）の平面構造での容量 C_F は約 1000pF である。

製作した頂角30、45度の空洞円錐形状検出器の構造をそれぞれ図5.1、図5.2に示す。また、これらの形状の比較を表5.1に示す。

放射吸収層は、第2章で検討した、窒素ガス圧 1.5torr で蒸着した金黒を使用した。なお、焦電素子を空洞円錐形状に成形してからの蒸着では、均一な吸収層が得られないため、焦電素子を扇形に切り出し、平面のまま扇形のマスクとヒートシンクを付けて金黒を蒸着し、そののち空洞円錐形状に成形した。

なお、頂角30、45、60度としたときのフィルムの面積はそれぞれ 3.2 、 2.36 、 1.9cm^2 で、容量は約 3510 、 2590 、 2085pF となる。これらの容量は焦電出力に対して並列に接続される形となるので、周波数が一定であれば応答出力は C_F^{-1} に比例して低下すると考えられる（表5.1）。応答度が焦電素子容量に反比例するこ

とから、空洞円錐形状構造の焦電検出器では、その頂角を大きくできれば応答度が向上し有利であるが、今回の形状では、実効吸収率は減少することになる。したがって、実効吸収率を下げずに、応答度のある値を保つ頂角が考えられる。

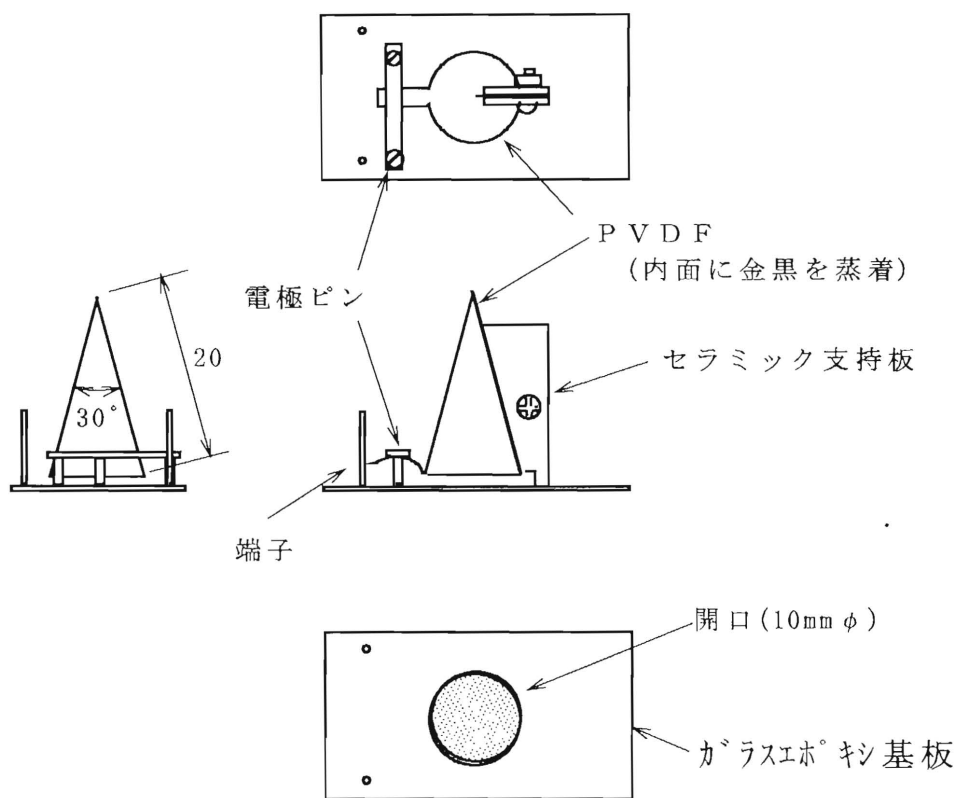


図5.1 頂角30度の空洞円錐形状検出器の構造

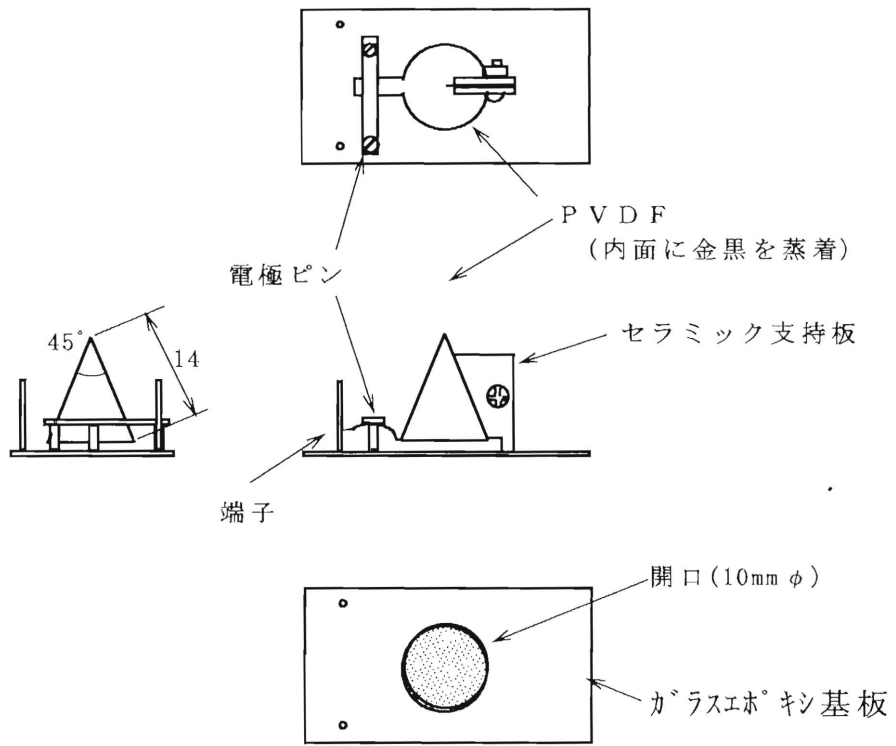


図5.2 頂角45度の空洞円錐形状検出器の構造

表5.1 空洞円錐形状形検出器の形状寸法（設計値）

	頂角30°	頂角45°	頂角60°	平面形
斜辺の長さ	19mm	13mm	10mm	—
金黒の蒸着面積	299mm ²	204mm ²	157mm ²	79mm ² (10mm φ)
焦電素子の電極面積	320mm ²	236mm ²	190mm ²	113mm ² (12mm φ)
焦電素子の容量 C _p	3510pF	2590pF	2085pF	1240pF
繰り返し反射回数	6	4	3	1

入射開口部は10mm φ

5.2 金黒の反射配光特性

円錐形状試料の円錐内側面における繰り返し反射吸収の定量的な解析を行うために、第3章では灰色塗料を塗布した試料を用いて、反射の配光特性を測定した。ここでは、金黒を塗布した試料の反射の配光特性を測定し、この結果をもとに金黒塗布円錐形状検出器の配光特性と反射の減少度の関係を検討する。

測定方法は、3.3で述べた方法と同様である。ここで、測定条件は下記の通りである。

光源	ハロゲン電球 (25V、250W)
光学フィルタ	バンドパスフィルタ (BPB-45, BPB-55, BPB-60) 中心波長 (約450、550、600nm)
チョッピング周波数	12.5Hz
I-Vコンバータ	$R_f = 1\text{ M}\Omega$ 、時定数 = 2ms
ロックインアンプ	時定数0.3sec、感度10mV

試料2t8c3kHaのバンドパスフィルタBPB-45(中心波長約450nm)を使用したときの配光の測定結果を図5.3に示す。得られた測定値の最大値を1と規格化した。測定結果は波長による差は見られず、垂直方向の測定では正反射方向に強い指向性を示し、水平方向の測定でも正反射方向に指向性を示した。これにより円錐形状に加工することにより、反射率の減少が期待できることが確認された。

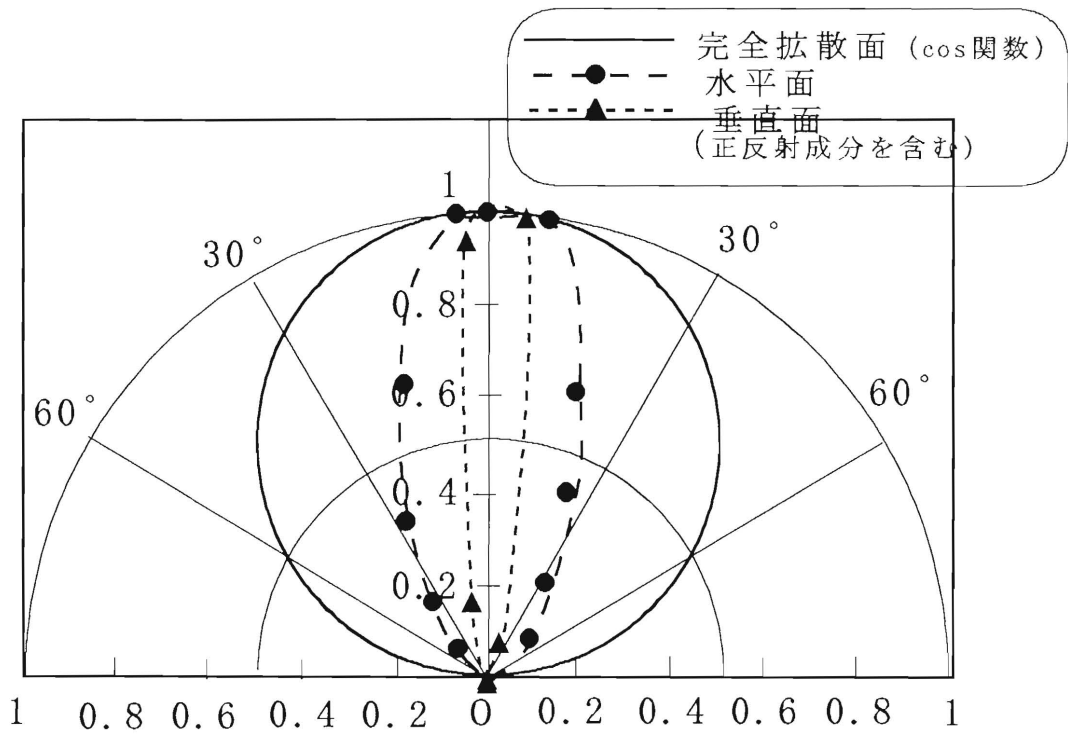


図5.3 金黒の反射の配光特性 (試料2t8c3kHa・波長約450nm)

5.3 紫外・可視域における分光反射率・分光応答度の測定⁴⁾

試料の紫外・可視域における分光反射率の測定系・分光応答度の測定系は図2.6と同様な測定系である。金黒膜厚をパラメータとした頂角30、45、60度の円錐内面の実効分光反射率を図5.4、5.5、5.6に示す。金黒の膜厚に対する相対分光応答度を図5.7に示す。この円錐構造による実効反射率の低減（吸収率の増大）効果の予測（3.1参照）と実測との関係、応答度とPVDFフィルム面積（容量）の関係については5.5に述べる。

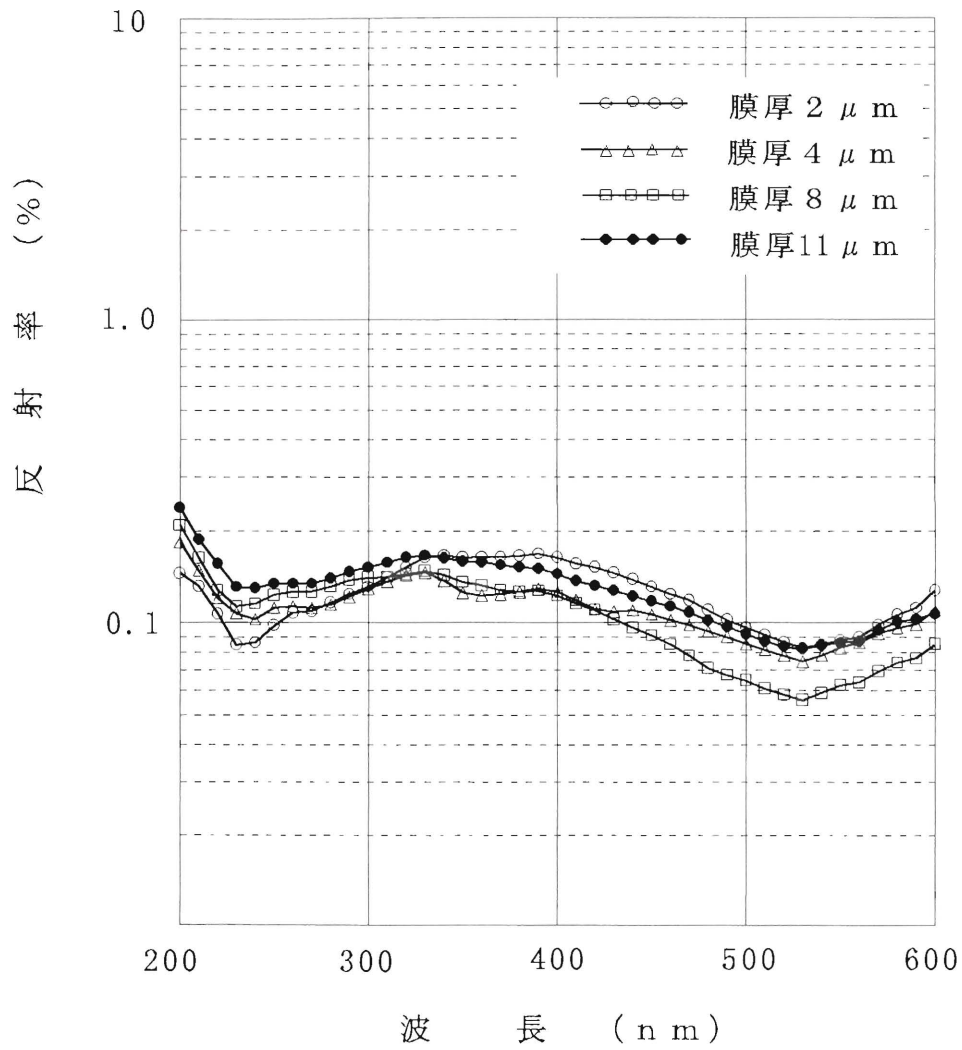


図 5.4 頂角30度の円錐形状検出器の分光反射率

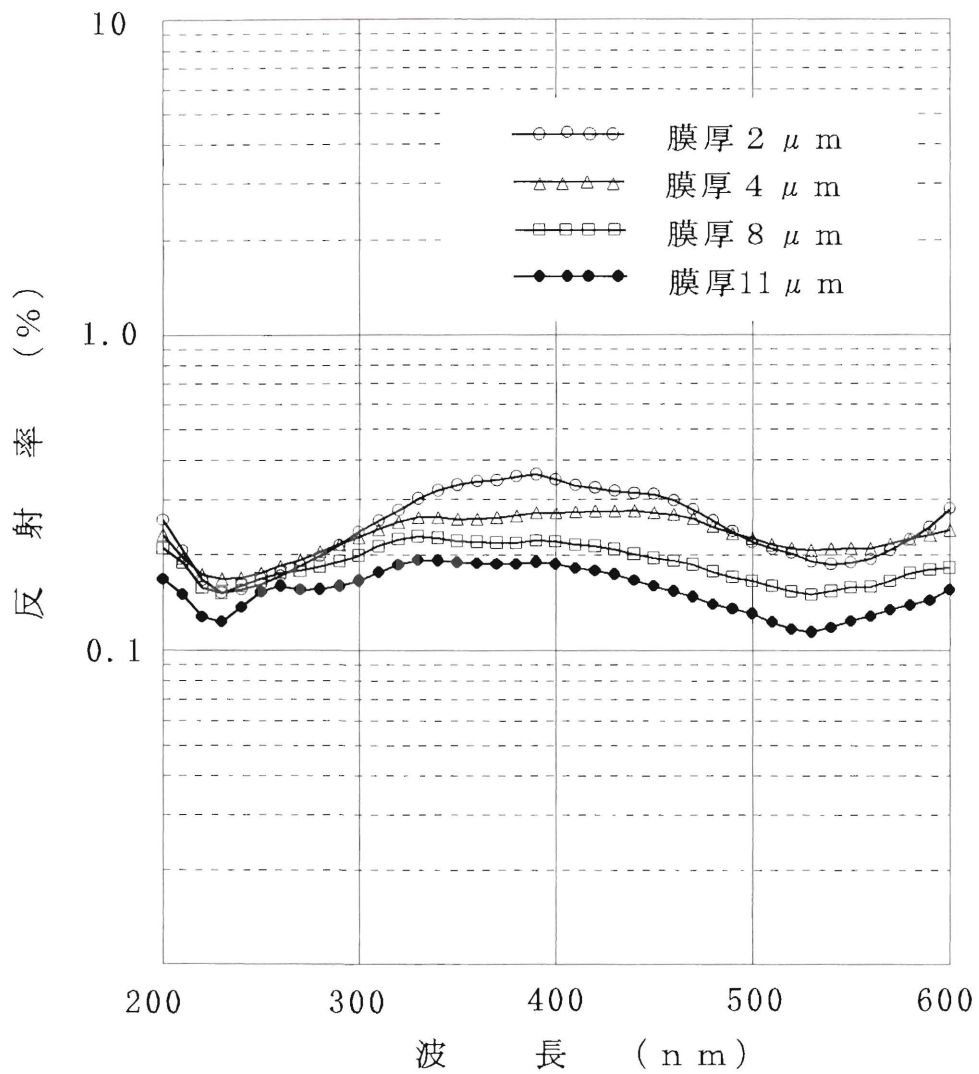


図5.5 頂角45度の円錐形状検出器の分光反射率

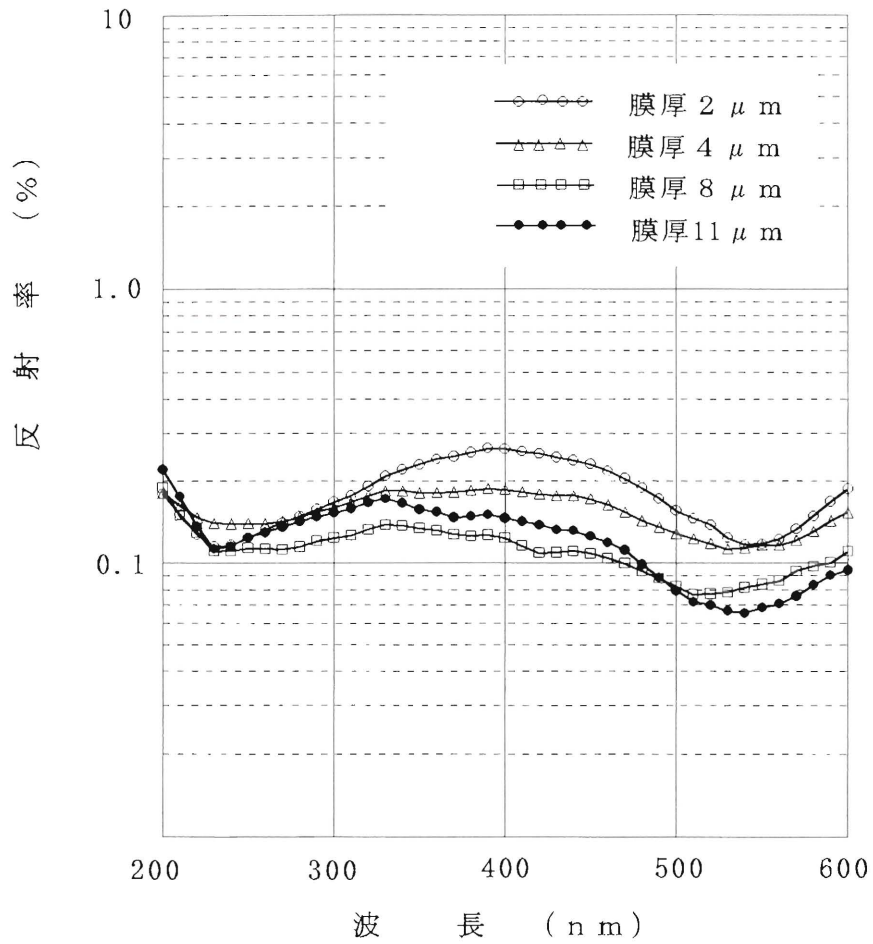


図 5.6 頂角 60 度の円錐形状検出器の分光反射率

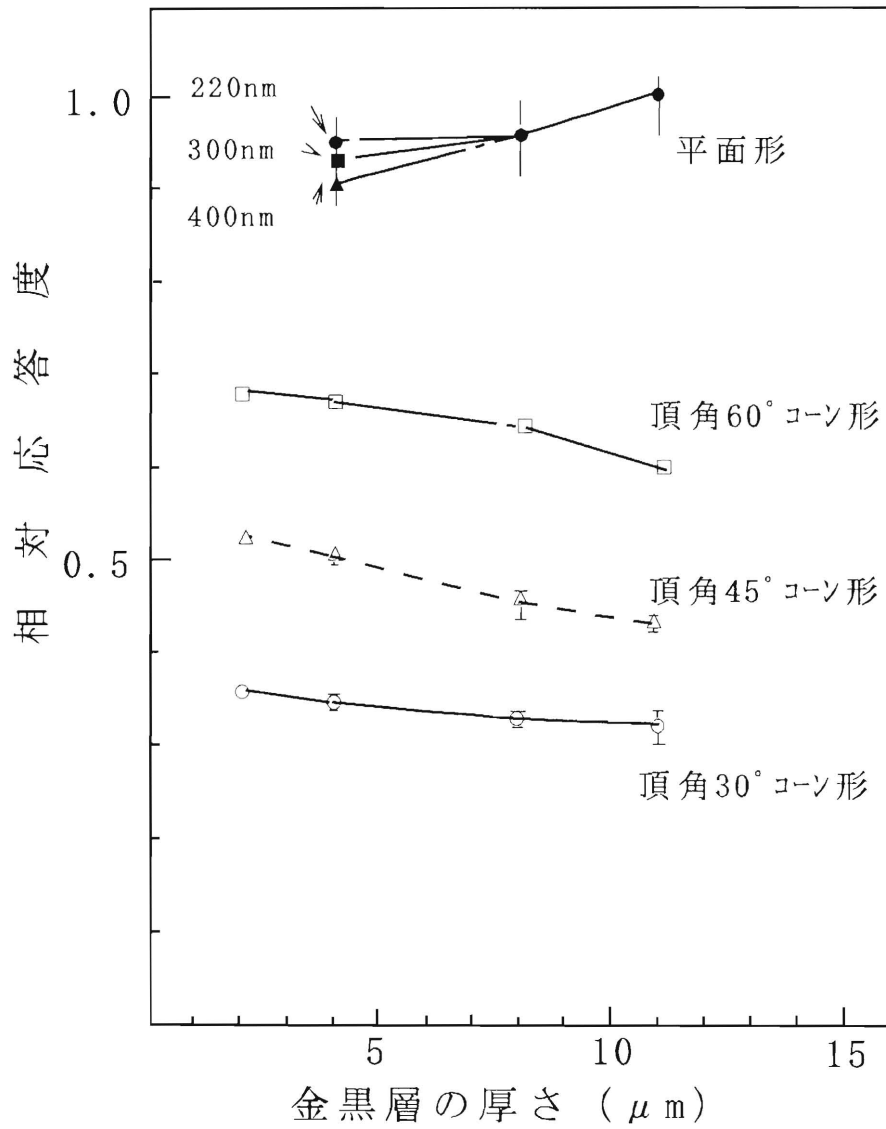


図5.7 相対分光応答度の金黒膜厚依存性

5.4 分光応答度の入射角依存性

実際の使用を考えて、円錐形状試料の入射の角度特性を測定した。

測定方法は、5.2で述べた反射の配光特性の測定と同様である。ここで、測定条件は下記の通りである。

光源	ハロゲン電球 (25V、250W)
光学フィルタ	バンドパスフィルタ (BPB-45, BPB-55, BPB-60)
チョッピング周波数	12.5Hz
I-Vコンバータ	$R_f = 1\text{M}\Omega$ 、時定数 = 2ms
ロックインアンプ	時定数0.3sec、感度10mV

平面形状試料2t4c3kHaと頂角60度の円錐形状試料2t2c1k60Eの入射角特性を $\cos\theta$ からの変位で図5.8に示す。

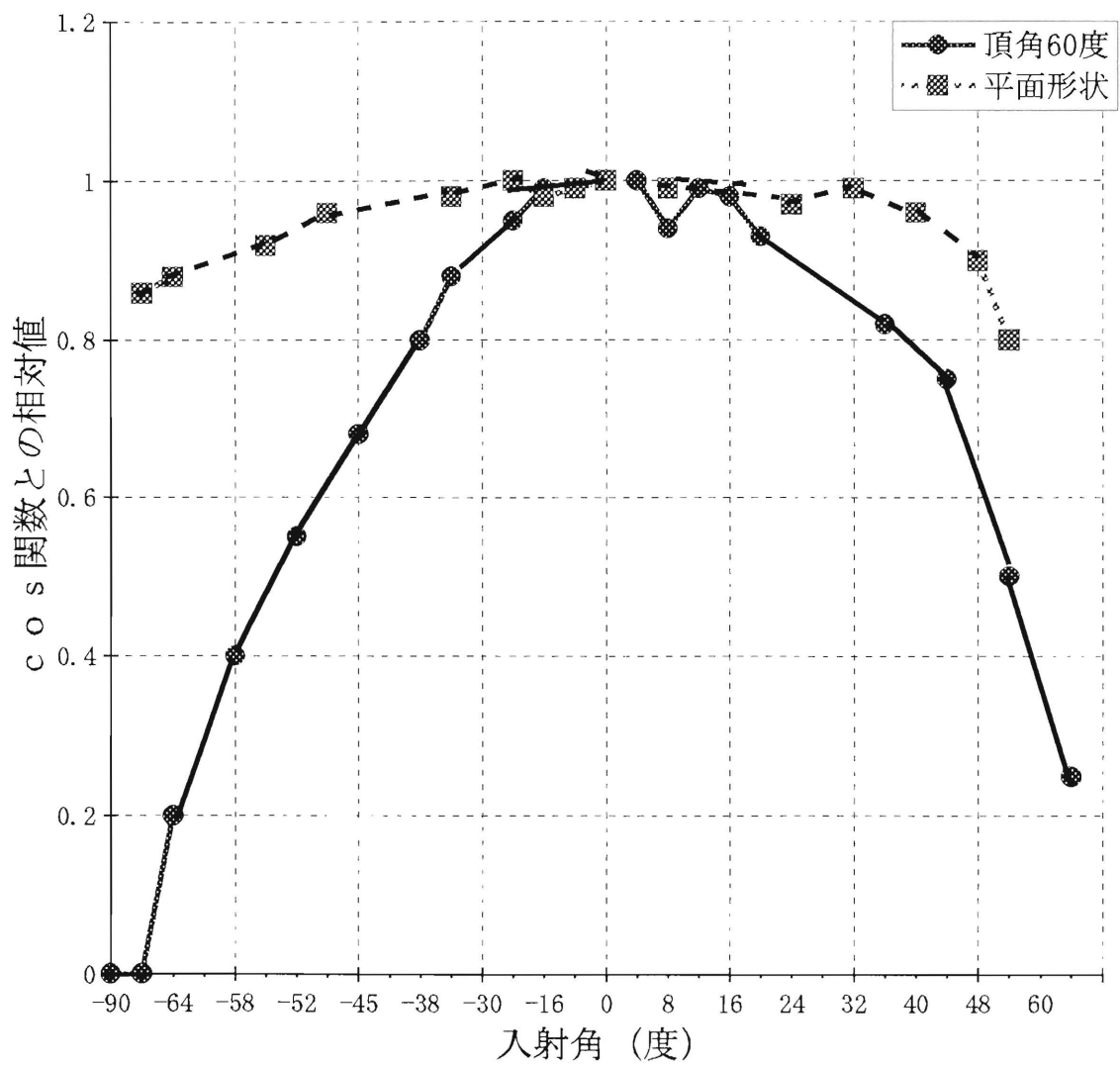


図5.8 金黒塗布平面形状・円錐形状の入射角特性

5.5 検討

5.5.1 紫外・可視域および赤外域における分光反射率・分光応答度の比較

まず、平面形状試料による可視と赤外域における分光反射率・分光応答度の相関について、2.4の結果から反射率の上昇と応答度の低下には約0.8の相関性があった。空洞円錐形状試料についても可視と赤外域における分光反射率・分光応答度の相関を調べる。

次に、金黒塗布空洞円錐形状による反射率の減少度を第3章で述べたモデルによる考え方を用いて検討した。

ここで $\rho_0 \neq 0$ の場合、反射の減少度 k_c 式は

$$k_c = R_{1T} + \rho_0 R_s (1 - R_{1T}) \quad (3.12)$$

で表された。これから、1.5 torrの11 μ mの金黒塗布平面形状試料の反射率は0.8%であり、これを頂角を60度、金黒塗布円錐形状の試料の場合にあてはめると、実効反射率は0.8% x { $R_{1T} + \rho_0 R_s (1 - R_{1T})$ } = 約0.24%程度になることが予測できる。頂角を45度の場合は約0.15%程度になることが予測できる。これを図5.5、5.6の実測結果（頂角を60、45度とも0.1~0.2%）と比較すると、よく一致していることが分かった。この結果を図5.9に示した。ここで、反射率が0.8%の金黒塗布平面形状試料の角度を変えたときの、円錐形状検出器の実効反射率の計算結果を実測値とともに示す。また、反射率が1.5%の場合の計算結果から、実効反射率1%を達成するためには、頂角90度でも反射率が1.5%程度の金黒を塗布すればよいことが分かった。次に金黒膜厚が薄い場合に、膜厚を変化させたときの、金黒塗布平面形状試料の反射率と頂角45度の円錐形状検出器の実効反射率との関係を図5.10に示した。膜厚が薄い場合は円錐形状にしたときの实効反射率の計算値と実測値に大きな差が生じた。この原因の1つとして、円錐形状試料と平面形状試料への入射により、実効的な膜厚が変化していることが考えられる。

また、応答度の円錐の頂角依存性は試料のPVDF膜の容量の逆数に比例する。そして、この容量の逆数と吸収率の積が応答度に比例すると考えられる。そこで、同一の製作条件の反射率1%の金黒を塗布した試料を円錐形状に加工したとき、円錐の頂角をパラメータとして、（容量の逆数と実効吸収率の積）の相対値を、平面の場合を1として求めた。この結果、これらの比が平面：90度：60度：45度 = 1：0.710.59:0.48となり、図5.7の値とよく一致していることが分かった。

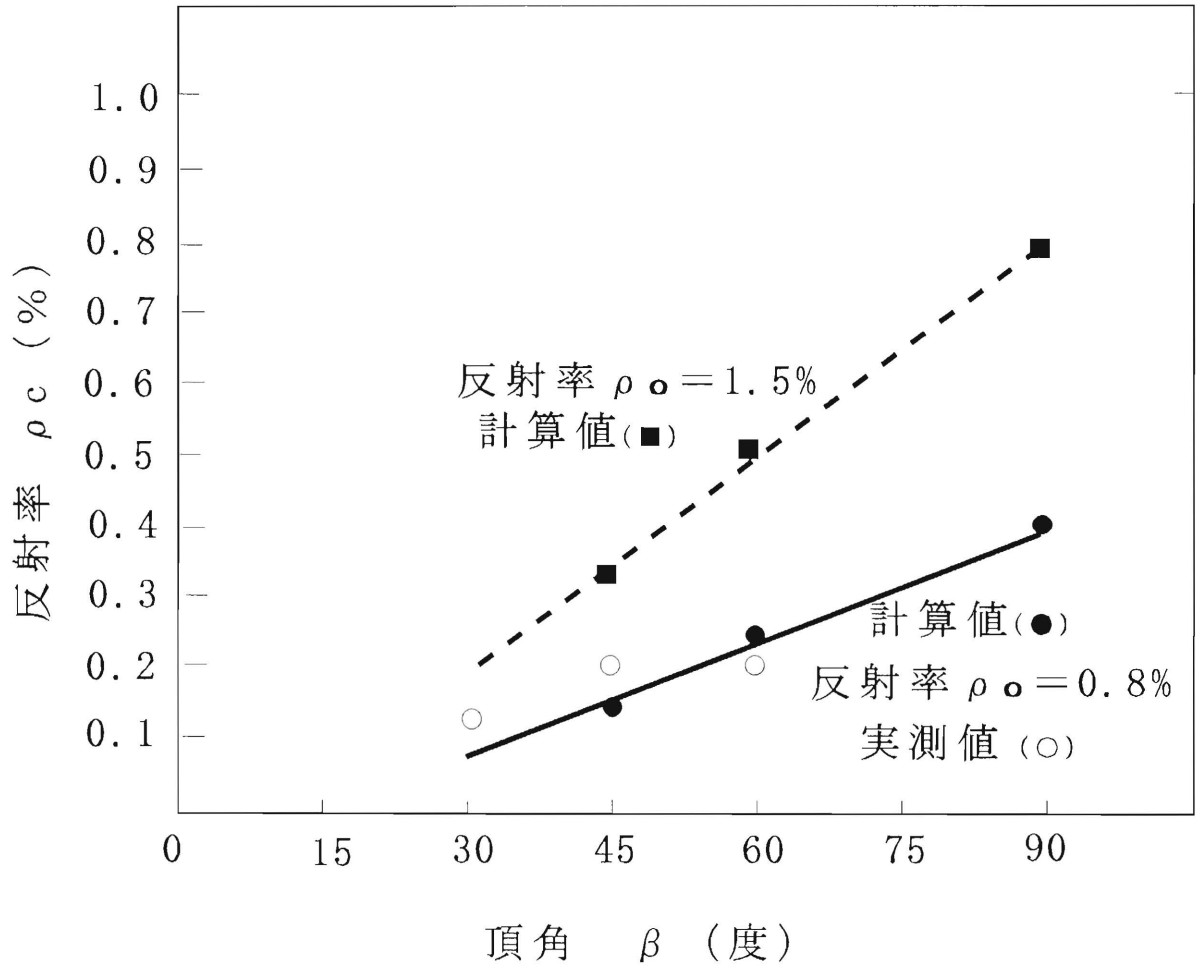


図5.9 実効反射率の頂角依存性

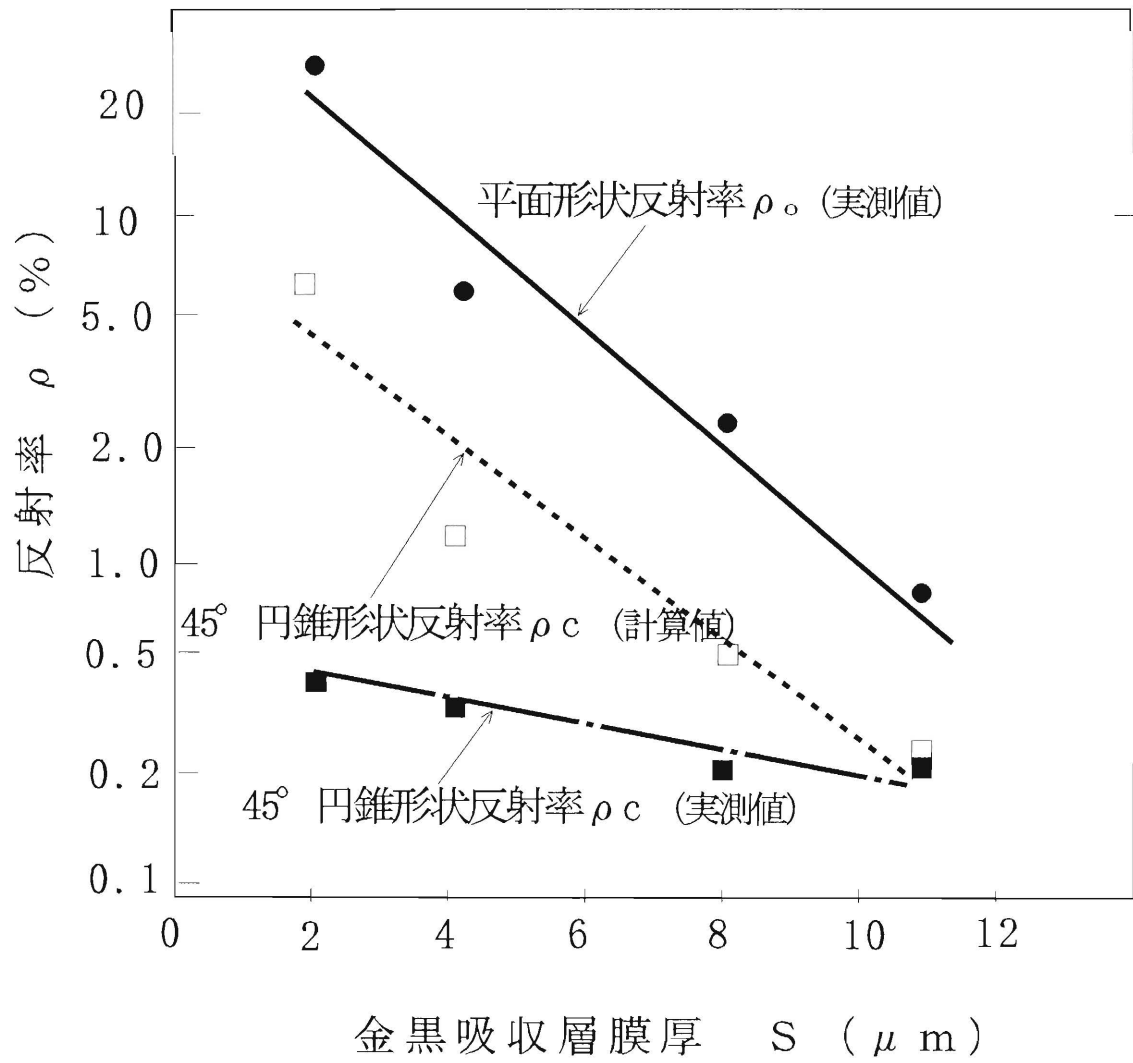


図5.10 実効反射率の金黒膜厚依存性

5.5.2 赤外域における分光反射率・分光応答度の改良の製造条件

第2章および5章の結果と検討をもとに紫外・可視から赤外域における良好な分光反射率・分光応答度特性を得る金黒塗布円錐形状試料の製造法を検討する。

まず、反射率については、蒸着する金黒の量が多いほど反射率は低くなる傾向が見られた。これは金黒の量が多いほど、金黒膜厚が厚くなり、金黒層における入射光の反射吸収が多くなるためである。窒素圧2.0torrにおいて反射率1%程度を満足する試料は、蒸着する金の量が112mg以上のときに得られた。また、窒素圧を2.5torrと高くすることにより、金黒層の密度を下げ、金黒層内の反射吸収を起きやすくした試料を作製したが、この試料は特性の再現性がなかった。

この再現性にもっとも影響を与える作製条件は、試料のヒートシンクへの接着状態の良否であると考えられ、接着が悪い場合は蒸着時の試料の温度上昇が起きることが特性のバラツキの原因であると予想された。

金黒膜厚を増大させることにより、反射率を下げ吸収を増加できることが分かったが、応答度の低下が起きることも判明している。そこで、膜厚の増加に対する応答度の低下の影響を図2.8に示した計算を金黒膜厚が厚い場合について求めた。この結果を図5.11に示す。これから金黒膜厚70 μ m程度で、金黒膜厚11 μ mの最大応答度の約半分になることが予測できる。また、表2.1より可視域と比較して、赤外域における応答度の低下の金黒膜厚依存性を図5.12に示す。これから金黒膜厚70 μ m程度で、可視域と比較して赤外域では応答度が約70%程度に低下することが分かった。

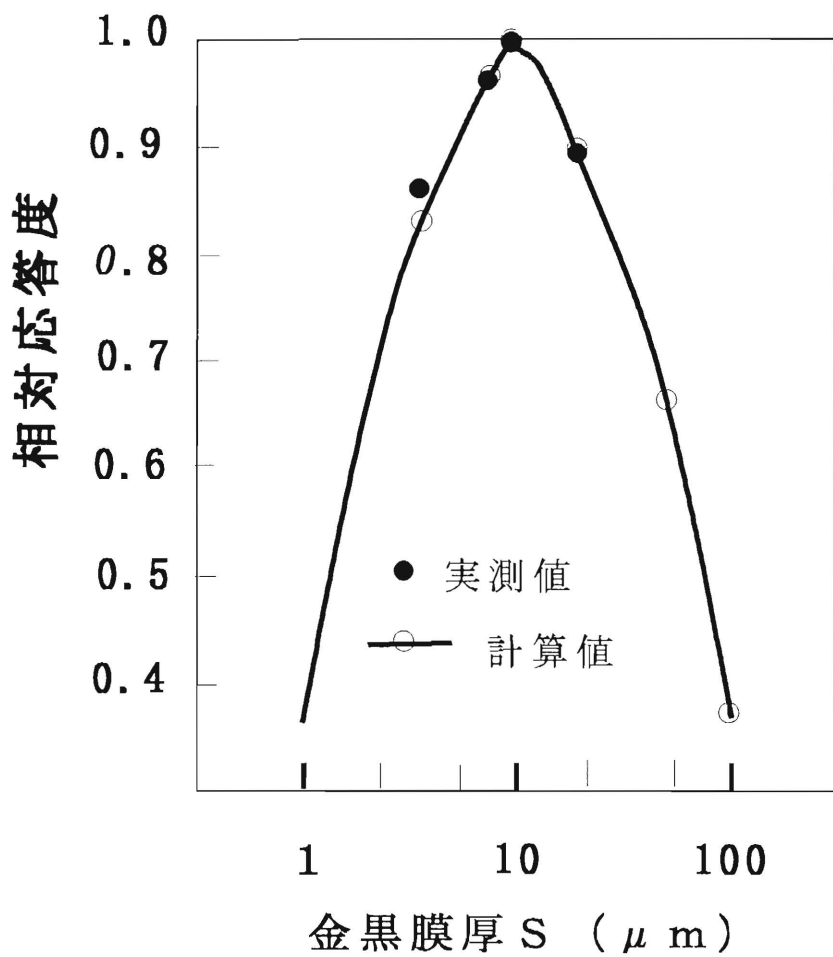


図5.11 相対応答度の金黒膜厚依存性

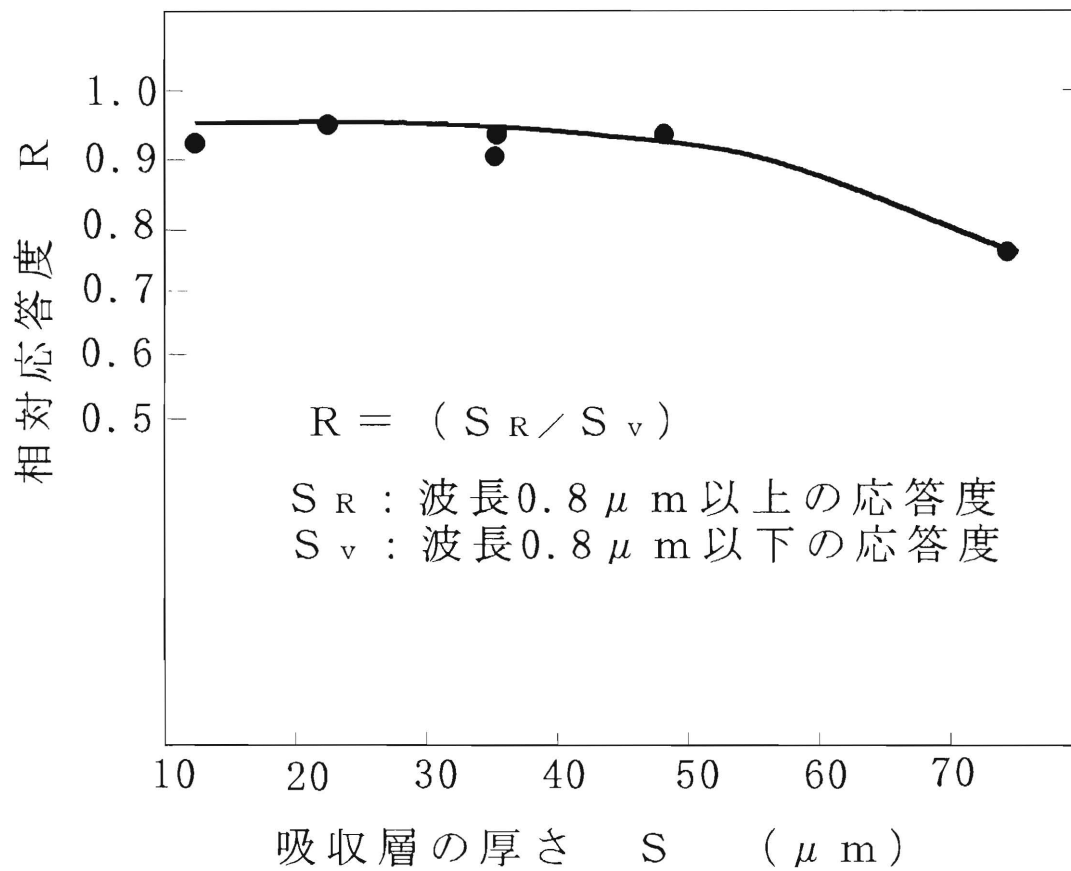


図5.12 相対応答度（赤外域／可視域）の金黒膜厚依存性

5.6 まとめ

赤外域における分光応答度の波長選択性を改善する目的で、検出器受光面を金黒を塗布した空洞円錐形状の検出器を作製して特性を検討した。

まず、円錐形状試料の円錐内側面における繰り返し反射吸収の定量的な解析を行うために、金黒を塗布した試料の反射の配光特性を測定した。この結果、正反射方向に強い指向性を示し、これにより円錐形状に加工することにより、反射率の減少が期待できることが確認された。

次に、金黒塗布空洞円錐形状試料の紫外・可視域における反射率を測定し、反射の減少度を第3章で述べた非常に小さい反射率のモデルによる考え方をを用いて説明した。

金黒塗布空洞円錐形状試料の紫外・可視域における応答度を測定し、円錐の頂角をパラメータとして、容量の逆数と実効吸収率の積で相対応答度を評価できることを示した。

紫外・可視域における金黒膜厚と応答度の関係を計算し、金黒膜厚 $70\mu\text{m}$ 程度で、金黒膜厚 $11\mu\text{m}$ の最大応答度の約半分になることが予測できた。また、可視域と比較して、赤外域における応答度の低下の金黒膜厚依存性を調べ、これから金黒膜厚 $70\mu\text{m}$ 程度で、可視域と比較して赤外域では応答度が約70%程度に低下することが分かった。

これらの検討により3%程度の反射率の金黒を $70\mu\text{m}$ 程度付着し、これを頂角60度の円錐形状にすることによって赤外域においても、反射率が1%以内で反射率、応答度が一定であるような波長非選択性の熱形放射検出器の実現の可能性が確認できた。

第6章 まとめ

分光応答度が波長に対して非選択的であるような標準検出器としての、金黒を塗布した熱形放射検出器に関する基礎的検討を行った。最初に可視域の分光応答度が最大値を得る金黒の製作条件（窒素ガス圧1.5 torr）で作製された金黒を異なった膜厚で平面形状検出器に塗布して、分光応答度と膜厚の関係を放射吸収層内へ入射する光放射エネルギーの吸収、反射の状態を考慮したモデルによって説明した。入射光が放射吸収層の表面付近で吸収され、そこから放射吸収層内を熱として伝導すると仮定するモデル（集中定数モデル）を定式化し、その式と実測値を用いて、吸収係数と損失係数を見積もった。

より正確なモデルとして、入射光が放射吸収層内で徐々に吸収され、吸収された位置で熱に変換され、そこから放射吸収層を熱として伝導すると仮定したモデル（分布定数モデル）を考案し、見積もった吸収係数と損失係数を用いて、有効発熱量の金黒膜厚依存性の計算結果と実測値を比較した。これより、金黒膜厚が厚い場合は今回考案したすべてのモデルが実測値と一致することが確認できた。膜厚が薄い場合は、入射光が放射吸収層で徐々に吸収され、そこで熱に変換し、そこから熱が伝導し、かつ熱電変換素子との境界層における反射を考慮する分布定数モデル2による計算結果が分光応答度の金黒膜厚依存性とよく一致することが分かった。

しかし、この条件で作製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ので、この対策として、検出器の受光面を内に凹な空洞円錐形状に作り、実効的な反射率を下げ、かつ波長選択性をなくすことを考案した。この円錐形状の受光面の有効性をモデル試料の円錐の頂角及び受光面の吸収材の反射率を変えて検討した。この結果、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することを見いだした。このようにして得られた結果を以下のモデルで検討した。このときの反射は受光面の反射配光が $\cos\theta$ 特性を満足する均等拡散であると仮定し、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回目の反射によって、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_s と記す)。

①の計算から、各頂角に対する R_{1T} を計算すると、頂角90、60、45度の場合、1回目の反射成分のそれぞれ、約54%、約29%、18%が開口面から出て行くことが求められた。

次に、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した。第1回目と2回目以降の反射を合計した実効的な反射率 R_T と平面の反射率 ρ_0 の比、 k_c を実測値を用いた簡便な方法で求め、実測値との比較を行った。この結果 ρ_0 の各値について計算値が実測値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可能になり、この結果を金黒塗布の円錐形状試料に適応できると考えた。

次に、上記モデル試料による基礎的検討を基に実際の金黒塗布空洞円錐形状熱形放射検出器の特性の検討を行った。検出器受光面での繰り返し反射吸収により、応答を犠牲にせず、波長選択性の少ない分光応答特性を得る目的で、金黒を塗布した空洞円錐形(コーン形)状の受光面を製作した。まず、紫外・可視域における金黒塗布空洞円錐形状熱形放射検出器の分光反射率および分光応答度を測定した。これにより、紫外・可視域において、金黒膜厚が $11\mu\text{m}$ の平面形状検出器の反射率約0.8%が、空洞円錐形状にすることにより、0.15%程度になり、約1/5に減少することが分かった。また、分光応答度の平坦性(波長に対する一定性)の外れが $\pm 0.3\%$ 以内である放射検出器を実現する見通しを得た。

紫外・可視域で良好な特性を示した金黒膜厚 $11\mu\text{m}$ の検出器は、可視域と比較して赤外域では金黒の吸収率が低くなり、従ってこの領域での応答度の低下と波長選択性が生じた。そこで、改めて、紫外・可視域とは異なる、応答度の最大値を達成し、かつ波長非選択性をもつ金黒の製作条件を検討した。この結果窒素ガス圧2.0torrで作製した $70\mu\text{m}$ 以上の金黒を塗布した平面形状試料が波長 $0.6\mu\text{m}$ ~ $2.2\mu\text{m}$ において、反射率が1%未満となることが確認でき、さらに空洞円錐形状に加工することにより、頂角30度の検出器は反射率が0.2%以下になることが分かった。この金黒塗布空洞円錐形状検出器の反射率の頂角及び金黒の反射率依

存性をモデル試料（灰色塗料）で導いた計算式を用いて説明した。これらの検討により 3 % 程度の反射率の金黒を 70 μ m 程度付着し、これを頂角 60 度の円錐形状にすることによって赤外域においても、反射率が 1 % 以内で反射率、応答度が一定であるような波長非選択性の熱形放射検出器の実現の可能性が確認できた。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、多大な御指導、ご援助を賜りました本学電気電子システム工学科中川靖夫教授、羽石 操教授、谷治 環助教授、大谷文雄文部技官、本学情報システム工学科勝部昭明教授をはじめ、本学電気電子システム工学科の諸先生およびに松下電器産業（株）照明研究所の大久保和明博士に感謝致します。また、本研究の実施にあたりご支援いただきました埼玉工業大学の方々に、さらに在学中に本研究にご協力いただきました越智博幸氏、富山昭人氏、吉田貴広氏ほか研究室の方々に感謝致します。

文献

- (1) (社) 照明学会編：光の計測マニュアル、pp. 45(1990)
- (2) 宮尾、中川、白水：光センシング工学、pp. 42-50(1995)
- (3) 河本康太郎：紫外・赤外放射の計測技術、照学誌、81-3、pp. 241-245(1997)
- (4) 大久保：熱形放射検出器の応答度に関する研究、埼玉大学博士論文、(1995)
- (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) Hengstberger, F.: Absolute Radiometry, Academic Press, Inc. pp. 123-141 (1989)
- (8) W. R. Blevin and W. J. Brown: Black Coatings for Absolute Radiometers, Metrologia 2-4 pp. 139-143 (1966)
- (9) 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－波長200nmから600nmにおける分光特性、照学誌、79-5、pp. 234-241 (1995)
- (10) 荒木、中川、大谷、谷治、大久保：受光面に金黒を付着した熱形放射検出器の分光応答度の解析モデル：照学誌、81-2、pp. 169-174(1997)
- (11) 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)
- (12) 荒木、中川、大谷、谷治、越智、大久保：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反射率の検討－、照学誌、82-2、pp. 67-75 (1998)
- (13) Ralph Stair, William E. Schneider, William R. Waters, and John K. Jackson: Some Factors Affecting the Sensitivity and Spectral Response of Thermoelectric (Radiometric) Detectors, Appl. Opt. 4, pp. 703-710 (1965)
- (14) W. L. Eisenman, R. L. Bates, and J. D. Merriam: Black Radiation Detector, J. Opt. Soc. Am. 53, 729-734(1963)

- (15) E. M. Sparrow and V. K. Jonsson: Radiant Emission Characteristics of Diffuse Conical Cavities, J. Opt. Soc. Am. 53, pp. 816-821 (1963)
- (16) W. R. Blevin and Jon Geist: Infrared Reflectometry with a Cavity-Shaped Pyroelectric Detector, Appl. Opt. 13, 2212-2217 (1974)
- (17) Yoshikazu Araki, Yasuo Nakagawa, Fumio Ohtani, Tamaki Yaji, Kazuaki Ohkubo: Conical Cavity Type Thermal Radiation Detector with Gold-Black Coating, 3rd Pacific Basin Lighting Congress (LUX PACIFICA '97) (oct. 1997)