

固体粗面の熱ふく射に関する研究

金山公夫

金山公夫

寄贈

## まえがき

物体間のエネルギー伝達の一形式にふく射による伝熱がある。ふく射伝熱はエネルギーが電磁波のかたちで運ばれるもので、その機構は伝導および対流などにみられる伝熱過程にくらべて直接的で、かつ普遍的である。なぜならば、物体が放出するふく射エネルギーは *Stefan-Boltzmann* の法則によれば絶対温度の四乗に比例することから、実在の物体はすべて大なり小なりその温度に相当したふく射を射出する一方、他の物体からのふく射を吸収してエネルギー交換がくり返される。その結果、地上はもとより宇宙空間全体がふく射で満たされていて、その伝達は真空中でも行なわれ媒介物を要しないからである。したがって、ふく射伝熱は自然科学の分野で物理学上の根本問題として進歩、発展し、それによって得られたいくつかの重要な法則を足がかりとして工学上の応用問題へと引き継がれ、その原理は多方面で活用される。

物体間のふく射伝達量を理論計算するにあたって、物体表面のふく射率が重要な因子となることは周知の事実である。ふく射率の値として推定値が代用される場合もあるが、多くは測定値が用いられ、古くから多くの測定値がある。しかし、これらの測定値を詳細に調べてみれば、同じ材料の物体でも表面の温度および性状など

の条件によつてふく射率の値およびその方向性が非常に異なり、それがいかなる理由によるものかは明確ではない。このような事情にかんがみ、著者は固体ふく射、とくに粗面のふく射に関するより本質的な基礎研究の必要性を痛感して、ここに「固体粗面の熱ふく射に関する研究」と題して、この問題の研究を行なつた。

さいわい、学同上の指導者と、経費面での援助者に恵まれて、一応の成果が収められ、ここに学位論文としてまとめることができたことは著者の望外のよろこびである。もちろん、これで固体粗面のふく射に関するすべての問題が解決されたわけではなく、今後さらに追究しなければならない多くの疑問をかかえている。これらの諸問題は引き続き研究を行なつて一つ一つ解明すべく努力するつもりであるが、その多くはより明晰な頭脳をもち、活力に満ちた後進の方々の意慾的な研究にまたねばならず、また今日の科学技術界のすう勢であるところの多数の研究による組織的な協同研究によつて飛躍的に進展するものとおもわれる。

この研究の端緒は、北海道大学教授 齊藤武 先生により与えられ、その後の適切なご指示をさすかつて進展したしので、その間先生には終始温かいご懇切なご指導を賜つた。また論文をまとめるにあたって、北海道大学教授 深沢正一 先生、岡 信弘 先生、福岡醇一先生および 村山正 先生にそれぞれ有益なご教示と貴重なご討論を賜つた。ここに深甚の謝意を表する次第

である。あわせて、立派な研究設備と快適な環境をお与えくださった本学前学長 佐山純平先生およびこの研究結果を一刻も早く論文にまとめるべく熱意に満ちた激励のお言葉を賜った 松本秋男 学長先生、ならびに著者の数々のわがままをお許しくくださった本学機械工学科前教授 宮本武 先生、さらには論文中のいくつかの数値計算および実験結果の整理などに協力いただいた本学助手 馬場 弘 君に心から感謝してお礼申し上げる。

昭和 48 年 5 月 1 日

北見工業大学機械工学科

金 山 公 夫

「固体粗面の熱ふく射に関する研究」正 誤 表

頁	個 所	誤	正
1	下2行め	測 定 値	測 定 例
31	表2.3	( $Fl_2O_3$ )	( $Fe_2O_3$ )
38	式(3.16)	$\epsilon_a = \frac{1 - \epsilon \sum_{x=0}^1 \beta(x) \Delta x}{(1 - \epsilon) \sin(\frac{\theta}{2})}$	$\epsilon_a = \frac{\epsilon(1 - \epsilon \sum_{x=0}^1 \beta(x) \Delta x)}{(1 - \epsilon) \sin(\frac{\theta}{2})}$
101	図5.7	Monochrometer	Monochromator
112	図6.2	Sparrow's Formular	Sparrow's Formula
126	図6.5左	Surface	Surfaces

# 固体粗面の熱ふく射に関する研究

## 目 次

第 1 章	概 要	1
第 2 章	ふく射に関する基礎理論	6
1.	固体ふく射の一般的性質	6
2.	ふく射率の定義	7
3.	ふく射理論の基礎	8
3.1	黒体の実現 — 空洞理論 —	9
3.2	ふく射率と吸収率の関係	11
3.3	比較的低温度における黒体ふく射 エネルギー	14
3.4	金属平面の指向ふく射率	16
3.5	金属平面の垂直ふく射率	20
3.6	非金属平面の指向ふく射率	27
3.7	非金属平面の垂直ふく射率	30
第 3 章	固体粗面のふく射に関する既往の研究	32
1.	粗面の見かけのふく射率に関する理論解析	33
1.1	V字みぞ開口の見かけのふく射率	34
1.2	球形空洞開口の見かけのふく射率	40

	2.	粗面の見かけのふく射率に関する測定	43
第 4 章		固体粗面のふく射率に関する理論解析	46
	1.	金属V字みぞ粗面の指向ふく射率	47
	2.	金属円弧みぞ粗面の指向ふく射率	63
	3.	金属ランダム粗面の指向ふく射率	75
	4.	非金属ランダム粗面の指向ふく射率	85
第 5 章		粗面のふく射率の測定	88
	1.	試料	88
	2.	全ふく射の実験方法	94
	3.	分光ふく射の実験方法	99
	4.	全ふく射と分光ふく射におけるふく射率の比較法	105
	4. 1	同一試料温度における $\epsilon$ と $\epsilon(\lambda)$ の比較	105
	4. 2	試料温度の異なる場合の $\epsilon$ と $\epsilon(\lambda)$ の比較	106
第 6 章		測定結果と検討	109
	1.	全ふく射	109
	1. 1	V字みぞ粗面の指向ふく射率	109
	1. 2	円弧みぞ粗面の指向ふく射率	113
	1. 3	アルミニウムおよび黄銅のスクラッチ面の指向 ふく射率	116
	1. 4	塗装平面および粗面の指向ふく射率	124

2.	分光ふく射	128
2.1	アルミニウムおよび黄銅のスクラッチ面の 垂直単色ふく射率	128
2.2	塗装平面および粗面の垂直単色ふく射率	136
3.	全ふく射測定と分光ふく射測定で得られた ふく射率値の比較	142
4.	あらさ曲線の解析	146
第 7 章	む す び	156
	付 録	162
	文 献	216

## 第 1 章 概 要

物体表面からのふく射に関する問題は、「ガスふく射」あるいは「輝炎ふく射」に対応した表現を用いれば「固体ふく射」の分野に属し、固体表面の温度、物質、形状、あらかおよび色などの表面性状によってふく射特性は変化をうける。物理学における固体平面のふく射に関する理論的な基礎は、熱力学、統計力学、電磁理論および量子理論の方法を用いて 20 世紀初頭には既に確立されており、かつ実験的にも証明されている。引きつづいて、これらのふく射理論の一部を粗面に適用することによって、一般の固体粗面のふく射に関する応用研究がなされて来てはいるが、まだ多くの未解決の問題が残されていて、國の内外を問わず、固体粗面のふく射に関する理論的体系づけがなされていない現状である。

このような事情のもとに、本論文では金属および非金属材料の定形みぞからなる粗面または任意のあらかの粗面のふく射に関する現象をとりあげ、すでに確立されているふく射の基礎理論の結果をかりて、これら粗面の指向ふく射率について理論解析を行なうと同時に、全ふく射および分光ふく射の両面から実験によって解析結果の証明を行ない、さらに測定値を整理することによっていくつかの知見を得ることができた。つぎにその概要を述べる。

第2章は、ふく射に関する基礎理論のうち、いわゆるふく射理論の四大法則といわれる Stefan-Boltzmann の法則、Kirchhoff の法則、Wien の法則および Planck の法則の誘導および式の説明は一般の物理学あるいは伝熱学の書物に譲り、とくに本論文における理論の展開、現象の解釈および実験結果の整理などに必要とおもわれるふく射の基礎的事項および電磁理論から導かれた金属および非金属平面のふく射特性などについて述べてある。

第3章は、固体粗面の見かけのふく射率に関する既往の研究として、主たる理論研究あるいは実験研究をあけて詳細に説明し、とくに前者の理論解析においては現象から離れて数学的に誘導された理論式なるがゆえに、実験結果との円通性に乏しい点を指摘している。すなわち、それらの解析は、固体粗面の凹凸を単純化してV字形あるいは球形などの一定形状のみをあるいはくばみが連続して配列したものとみなし、内面のふく射特性は計算の便宜上、凹面内部のふく射の射出および反射特性が無指向性の条件で垂直ふく射率のみを求めたもので、測定値とはあまりよい一致を示さず、しかもこれらの理論からは任意の粗面の見かけの指向ふく射率についてはなから説明することはできない。

第4章は、固体粗面の見かけの指向ふく射率に関して著者の考え方と手法にもとづいた理論解析の方法を示しており、本論文の中心となる部分の一つである。すなわち、解析の手順としては、材料を金属と非金属に分けて、

まず金属の固体粗面は一定形状のV字みぞあるいは円弧みぞが連続して配列したものとみなし、みぞ内面のふく射および反射の特性が、電磁理論から Schmidt らによつて導かれた指向ふく射率および指向反射率の式に従うものとみなしたうえで空洞理論を適用して、みぞ開口の見かけの指向ふく射率を計算する。V字みぞ内面の反射の圓数および入射角は  $\Sigma ipin$  の因式解法によつて求めている。

つぎに金属および非金属の任意のあらさからなる一般の固体粗面は、深さの異なる数種類の円弧みぞが一定の割合で正規分布したものとみなして、各単種の円弧みぞの開口面に対する法線から測つて一定方向の指向ふく射率とその分布密度との積を求め、各種の円弧みぞのそれらの値を重ね合わせるによつて任意の粗面におけるその方向の見かけの指向ふく射率が求まる。ここで、任意の粗面をかりにランダム粗面と称する。

第5章は、粗面のふく射率測定に関する実験的方法を述べたもので、第4章においておされた解析結果を全ふく射測定によつて実験的に証明すること、分光測定によつて全ふく射の内容を波長別に明らかにすることおよび全ふく射と分光ふく射の各測定で得られたふく射率値の比較をすることなどを目的とした実験方法および測定値処理の方法を示している。実験に供した試料は、金属試料のV字みぞ粗面および円弧みぞ粗面はアルミニウム板にV字みぞおよび円弧みぞを切削したものを、またラ

ランダム粗面はアルミニウムおよび黄銅板を研摩紙でスクラッチした粗面を用い、非金属試料にはアルミニウム板にアスベスト粉末混合耐熱塗料を塗布した粗面をランダム粗面として用いた。

第6章では、第4章に述べた各種粗面の見かけのふく射率の解析によつて得られた計算値と実験によつて得られた測定値との比較、検討を行なつてゐる。すなわち、金属に関してはV字みぞ、円弧みぞおよびスクラッチ粗面について、また非金属に関しては塗装粗面について全ふく射による見かけの指向ふく射率の測定結果は、解析結果とよい一致を示した。その際、ランダム粗面の指向ふく射率の解析結果と金属スクラッチ粗面または非金属塗装粗面の指向ふく射率測定結果を対比させるために、とくに試料表面のあらさ形状に着目して、あらさ曲線の解析によつて得られたあらさピッチおよび開口率の概念を導入して説明した。さらに金属および非金属ランダム粗面の垂直方向の分光ふく射測定を行なうことにより、垂直単色ふく射率を求め、全ふく射の内容を分光学的に明らかにし得たこと、また直接測定による垂直全ふく射率と垂直単色ふく射率を波長で積分して算出された全ふく射率との間によい一致が得られ、実験方法の信頼性が保証されたことなどを述べてゐる。

第7章は、粗面の見かけの指向ふく射率に関する理論研究ならびに実験研究により得られた結果をとりまとめてむすびとし、さらに本研究の成果の実用面への応用お

よび本研究における未解決の問題など今後に残された課題を述べている。

なお、付録として、この論文で扱われた比較的低温域におけるふく射エネルギーの波長分布を Planck のふく射関数から求めた計算結果、円弧みぞ粗面の見かけの指向ふく射率の計算例、円弧みぞランダム粗面の指向ふく射率計算プログラムおよびふく射測定の際の誤差計算、塗装滑面および塗装粗面の分光スペクトル測定例などを示した。

## 第 2 章 　　ふく射に関する基礎理論

### 1. 固体ふく射の一般的性質<sup>1)</sup>

物体に赤外線を照射すると、その一部は吸収され、物体を構成している分子や原子の運動が活発になり、温度が上昇する。いま、この赤外線のスペクトルが Planck のふく射関数に従う理想的分布をしているとすれば、逆に物体を加熱して温度を上げると、その温度において吸収したスペクトルと同じスペクトルの赤外線を射出する。その特性は温度のみによって定まる物体固有の性質で、この現象を一般に熱ふく射または、たんにふく射といい、赤外線のことを熱線ともいう。赤外線は電磁波の一種で、波長が約  $1\mu$  から  $50\mu$  程度のところを指し、この論文ではとくに  $2\sim 25\mu$  程度の波長を問題にしている。

したがって、物体のふく射特性は電磁波にたいする特性と理解してよく、自由電子を含む金属と、それを含まない非金属とでは根本的に相違している。すなわち、金属のふく射は電子自体の運動に起因し、ふく射の射出割合は波長の短いところ（ $1\mu$  あるいはそれ以下）で高く、そのエネルギーは量的に少ない。いっぽう、非金属のふく射は、分子、原子あるいは結晶格子の振動に起因し、射出割合は波長の長いところで高く、そのエネルギーは量的に多い。

## 2. ふく射率<sup>\*</sup>の定義

物体からのふく射は、同温度の理想物体（黒体）からのふく射より常に小さく、それらのエネルギー割合をその物体のふく射率という。ふく射エネルギーを全波長にわたって積分した値どうしの比率を全ふく射率といい、同一波長どうしの比率を単色ふく射率という。

いま、全ふく射率を $\varepsilon$ 、単色ふく射率を $\varepsilon_\lambda$  とすると

$$\varepsilon = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda} \quad (2.1)$$

で示され、ここで、 $E_{b\lambda}$ は黒体の波長 $\lambda$ におけるふく射エネルギー ( $\text{Kcal}/\text{m}^2 \text{h}\mu$ ) である。

物体が固体の場合、表面に垂直方向のふく射率を垂直ふく射率といい、ある特定の方向のふく射率を指向ふく射率という。全ふく射率と称して、全波長にたいする垂直ふく射率を指す場合と、各方向の指向ふく射率を半球状または半円状に積分して、その平均値を指す場合があるが、前者の例が多いようである。

一般に固体表面のふく射率は表面の性状によって影響され、物理的および化学的変化および粗滑の程度によって変化する。このような表面性状を加味したふく射率

---

<sup>\*</sup>最近は、「放射率」<sup>2)</sup>と記した書物が多いが、日本機械学会の慣例に従って「ふく射率」<sup>3) 4)</sup>と記す。

のことは見かけのふく射率とよんで、固有のふく射率と区別しているが、普通、測定で得られるふく射率は大部分が見かけのふく射率であり、理論計算で得られるふく射率は固有のふく射率が多い。

本論文においても、内容的に固有のふく射率と見かけのふく射率を区別して扱っているが、「見かけの」という形容は省略した箇所もある。

### 3. ふく射理論の基礎

ふく射において最も基本となる法則は Kirchhoff の法則、Stefan-Boltzmann の法則、Wien の法則および Planck の法則である。初めの三つの法則は熱力学および統計力学の方法によって導かれたものであるが、第四の Planck の法則はふく射の機構に量子論的仮定をおいて導かれたもので、いずれも実験によって厳密に証明されている。これらの法則の誘導や、式の説明は一般の伝熱学の書物に述べられているので、ここでは本研究の理論解析および実験結果の整理、検討に直接必要とおもわれる部分を抜粋して使いやすい形に展開し、さらにふく射率に関する Maxwell の電磁理論の結果を加えて以下に述べる。

### 3.1 黒体の実現 — 空洞理論 —

*Kirchhoff* の法則は、ふく射の射出、吸収および反射の概念を理解する上の基礎となるもので、幅広い意味をもった含蓄のある法則である。

ふく射の理論および実験において標準となるところの完全黒体は実在しないが、*Kirchhoff* の法則の暗示によれば、非常に小さい開口をもった空洞を用いて人工的に黒体をつくり出すことが可能で、そのメカニズムはつぎのように考えると理解される<sup>5) 6)</sup>。

いま、空洞の壁面はいたるところ一定の同じ温度であるとする。微小開口から入射したふく射は、内面で何回も反射を繰り返し、反射のたびに弱められ、事実上最初のふく射は消滅してしまう。それゆえ、開口から射出されるふく射は入射したふく射が反射されて出てきたのではなく、内壁から射出されたものであり、開口はきわめて黒体に近似することになる。この思考の原理は、吸収率の大きい面によって一回でふく射を吸収する代りに、吸収率の小さい面で何回も吸収させて吸収率の増大をはかることにある。

さらに現象を明らかにするため、簡単な教式を用いて表現するとつぎのようになる。

図2.1の空洞において、点Fから外部に射出されるふく射に注目すると、点F自身のふく射エネルギーは *Stefan-Boltzmann* の法則から  $\epsilon \sigma T^4$  となり、これに点Dから

出て点Fで反射される成分  
 $(1-\epsilon)\epsilon\sigma T^4$  が加わるから点  
 Fからのふく射エネルギーの合計  
 は

$$E_F = \epsilon\sigma T^4 + (1-\epsilon)\epsilon\sigma T^4 \quad (2.2)$$

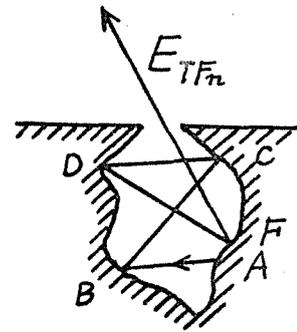


図 2.1 空洞内のふく射

となる。ただし、 $\epsilon$  は内面の  
 ふく射率、 $\sigma$  は Stefan-Boltzmann 定数、 $T$  は内面の温度で  
 ある。

同様に、空洞内部の反射回数が  $n$  回繰り返されたとき  
 の点 F からの全ふく射エネルギー  $E_{Fn}$  は

$$E_{Fn} = [1 + (1-\epsilon) + (1-\epsilon)^2 + \dots + (1-\epsilon)^{n-1}] \epsilon\sigma T^4 \quad (2.3)$$

式 (2.3) において、係数  $[ \quad ]$   $\epsilon$  は見かけ上のふく射  
 率をあらわし、反射が無限に繰り返されたとすれば、ふ  
 く射率の極限值は、ただし  $(1-\epsilon) < 1$  の条件を用いて

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} [1 + (1-\epsilon) + (1-\epsilon)^2 + \dots + (1-\epsilon)^{n-1}] \epsilon \\ = \lim_{n \rightarrow \infty} \{1 - (1-\epsilon)^n\} = 1 \end{aligned} \quad (2.4)$$

となり、黒体が実現できることになる。

白雪は可視光線の反射率は非常に高いが、白雪でつく  
 った深いほら穴の入口は暗く、また、光沢のある反射率

の高い金属にドリルで深い穴をうがって、穴の入口は暗くて奥は見えない。これらの現象はいま述べた空洞理論のよい実例である。

### 3.2 ふく射率と吸収率の関係

Kirchhoff の法則にはまた、見方を変えるとつぎのような意味もある。

前項と同様な空洞において、空洞のあらゆる点からふく射が射出され反射が繰り返されているから、内部はふく射で満たされている。そこに同温度の微小物体を持ち込んで熱的平衡が保たれたとする。そのとき微小物体に入射するふく射は、波長  $\lambda \sim \lambda + d\lambda$  において、 $E_{b\lambda} d\lambda$  でありそのうち  $\alpha_{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda$  が物体により吸収されるが、同時にそれと等しいふく射  $\epsilon_{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda$  が射出されなければならない。したがって

$$\alpha_{\lambda}(T) = \epsilon_{\lambda}(T) \quad (2.5)$$

となり、式(2.5)は、温度  $T$  が同じであれば、物体の単色吸収率  $\alpha_{\lambda}$  と単色ふく射率  $\epsilon_{\lambda}$  は等しいことを示している。

ここで、単一波長に限った理由は、全吸収率  $\alpha$  は入射光の波長特性も関係し、とくに入射が物体表面と同じ温度の黒体(または灰色体)からのふく射の場合にのみ、全吸収率  $\alpha$  と全ふく射率  $\epsilon$  は厳密に等しくなる。

この点は、本研究のふく射率測定法にも関係のあること  
 がらなので、さらに議論をすすめる。

物体に入射するふく射エネルギー分布  $H_\lambda$  が黒体のそれ  
 に等しいとすると、温度  $T$  における全吸収率  $\alpha(T)$  は  
 定義より

$$\alpha(T) = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda(T) H_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty H_\lambda d\lambda}$$

$$= \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda(T) E_{b\lambda}(T_b) d\lambda}{E_b(T_b)} \quad (2.6)$$

ここで、 $T$  は物体温度、 $T_b$  はふく射源温度、 $E_b$  は黒  
 体ふく射エネルギー、 $E_{b\lambda}$  は波長  $\lambda$  における黒体ふく射エ  
 ネルギである。また添字  $b$  は黒体を意味する。

同様に、温度  $T$  におけるふく射率  $\varepsilon(T)$  は

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda(T) E_{b\lambda}(T) d\lambda}{E_b(T)} \quad (2.7)$$

であり、式(2.5)、式(2.6)および式(2.7)から  $T = T_b$   
 のときに限って

$$\alpha(T) = \varepsilon(T) \quad (2.8)$$

が成立する。

入射表面が灰色体の場合は Kirchhoff の法則および灰色体の定義から

$$\alpha(T) = \alpha_a(T) = \epsilon_a(T) = \epsilon(T). \quad (2.9)$$

式(2.9)の関係は、 $T$ が $T_b$ でも、また、ふく射源が黒体以外であっても成立する。入射表面の $\alpha_a$ が波長のみ関数で温度によって変化しないならば、式(2.5)、式(2.6)および式(2.7)によって

$$\alpha = \epsilon(T_b) \quad (2.10)$$

が得られる。これは近似的に非金属表面にあてはまる性質で、吸収率はその表面温度によらず、ふく射源の温度 $T_b$ だけで定まり、表面温度が $T_b$ になったときの物体のふく射率に等しい。

金属にたいしては、電磁理論の結果から、吸収率は物体温度と黒体温度の相乗平均の温度におけるふく射率に近似的に等しいといわれている<sup>7)</sup>。この原理を応用したふく射率測定法が標準光反射法である。しかし、この方法によって求めたふく射率と、黒体比較法によって物体を加熱して直接求めたふく射率とは、定性的傾向は一致しても、実在物体の吸収率は温度の関数である以上、絶対値は異なるはずである。加うるに、木材または紙などの可燃性物体のふく射率を、標準光反射法で測定すれば、着火点以上の温度の値まで求めることになり<sup>8)</sup>、実際と

矛盾する結果となる。

しかるに、黒体比較法によれば、このような物体の表面性状の温度による依存性をも含めた測定値が得られることになり、これが本研究において黒体比較法を採用したゆえんである。

### 3.3 比較的低温度における黒体ふく射エネルギー

理想的な黒体からのふく射スペクトルは Planck のふく射関数に従い、高温度におけるふく射エネルギーと波長の関係を示す線図はしばしば見かけるが、本研究において扱う比較的低温度 (100~400°C) における値はほとんど見かけない。そこで、いま必要とする温度および波長域において Planck の関数を計算して、分光ふく射の数値解析など今後の問題処理に便利なように準備しておく。計算結果を付録 1 に示す。

Planck の法則によれば、黒体から射出されるふく射  $E_{b\lambda}$  ( $\text{Kcal}/\text{m}^2\text{K}\mu$ ) は、

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (2.11)$$

で示され、ここで、 $C_1 = 3.2179 \times 10^8 (\text{Kcal}\mu^4/\text{m}^2\text{K})$ 、 $C_2 = 14388 (\mu^2\text{K})$ 、 $\lambda$  は波長 ( $\mu$ )、 $T$  は温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )、 $e$  は

自然対数の底である。

式(2.11)の性質を検討すると、与えられた温度における最高ふく射エネルギーを射出する波長 $\lambda_{max}$ は、 $C_2 / (\lambda T) = x$ とおいて式(2.11)を $\lambda$ で微分して0とおくと

$$\frac{dE_{\lambda}}{d\lambda} = \frac{C_1 T^5}{C_2^5} x \frac{x^4}{e^x - 1} \left\{ -\frac{x e^x}{e^x - 1} + 5 \right\} = 0$$

これから

$$-\frac{x e^x}{e^x - 1} + 5 = 0$$

でなければならず、 $\lambda$ に $\lambda_{max}$ を代入して

$$\frac{C_2}{\lambda_{max} T} = 5(1 - e^{-C_2 / (\lambda_{max} T)})$$

となる。この関係を満足する $\lambda_{max} T$ の値を試行的に求めると

$$\left. \begin{aligned} C_2 / (\lambda_{max} T) &= 4.9651 \\ e^{C_2 / (\lambda_{max} T)} - 1 &= 142.32 \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

ここで、 $C_2$ の値を代入すると式(2.12)は

$$\lambda_{max} T = B = 2897.8 \quad (\mu\text{K}) \quad (2.13)$$

となる。

式(2.13)はWienの変位則の一形式であるが、書物によ

つてBの値は若干異なっており  $B = 2900 (\mu^\circ K)$  を採用している場合が多い。また金属ではこの値は少し小さくなる。

つぎに式(2.11)の両辺を  $\sigma T^5$  で割ると

$$\frac{E_{b\lambda}}{\sigma T^5} = \frac{C_1}{\sigma (\lambda T)^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (2.14)$$

となる。ただし、 $\sigma$  は Stefan-Boltzmann 定数で本論文ではすべて  $4.88 \times 10^{-8} (\text{Kcal}/\text{m}^2 \text{h}^\circ \text{K}^4)$  を用いて計算する。

式(2.14)の形でふく射エネルギーをあらわすと、入射を変数として温度に無関係に一本の曲線で示されることになり、温度の異なったスペクトルを比較する場合に適しており、付録1にはこの値をあけてある。

### 3.4 金属平面の指向ふく射率

電気の良い導体の熱ふく射は、材料表面が平滑で内部が均質等方性と仮定<sup>\*</sup>すれば電磁理論から明解に説明される。

まず、金属平面に入射角  $\theta$  で入射するふく射に関して、Fresnel によって導かれた指向反射率を示す厳密式はつぎのとおりである<sup>9)</sup>。すなわち、入射面に直角に振動する成分  $\rho_{\perp\theta}$  は

<sup>10) 11)</sup>  
\* この仮定は波長  $4 \mu$  以上、温度  $400^\circ \text{C}$  以下で成立する。

$$\rho_{\perp\varphi} = \frac{a^2 + b^2 - 2a \cos\varphi + \cos^2\varphi}{a^2 + b^2 + 2a \cos\varphi + \cos^2\varphi} \quad (2.15)$$

入射面に平行に振動する成分  $\rho_{\parallel\varphi}$  は

$$\rho_{\parallel\varphi} = \rho_{\perp\varphi} \times \frac{a^2 + b^2 - 2a \sin\varphi \tan\varphi + \sin^2\varphi \tan^2\varphi}{a^2 + b^2 + 2a \sin\varphi \tan\varphi + \sin^2\varphi \tan^2\varphi} \quad (2.16)$$

ここで、 $a$  および  $b$  は材料の光学定数で

$$2a^2 = \sqrt{(\pi^2 - k^2 - \sin^2\varphi)^2 + 4\pi^2 k^2} + (\pi^2 - k^2 - \sin^2\varphi) \quad (2.17)$$

$$2b^2 = \sqrt{(\pi^2 - k^2 - \sin^2\varphi)^2 + 4\pi^2 k^2} - (\pi^2 - k^2 - \sin^2\varphi) \quad (2.18)$$

で示される。ここで、 $\pi$  は材料の屈折率、 $k$  は減衰率をあらわす。ただし、減衰率  $k$  は Hottel<sup>1)</sup> の Absorption index  $K$  との間に

$$k = \pi K$$

の関係がある。

反射率および吸収率 (= ぶく射率) に関する Kirchhoff の法則より

$$\epsilon_{\perp\varphi} = \alpha_{\perp\varphi} = 1 - \rho_{\perp\varphi} \quad (2.19)$$

$$\epsilon_{\parallel\varphi} = \alpha_{\parallel\varphi} = 1 - \rho_{\parallel\varphi} \quad (2.20)$$

いま、物体表面から射出されるぶく射は自然光であり、

射出面（ふく射の射出方向を含み試料面に直角な平面）に直角に振動する成分と平行に振動する成分の平均値となり、その指向反射率  $\rho_\varphi$  および指向ふく射率  $\varepsilon_\varphi$  は

$$\left. \begin{aligned} \rho_\varphi &= \frac{1}{2} (\rho_{\perp\varphi} + \rho_{\parallel\varphi}) \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1}{2} (\varepsilon_{\perp\varphi} + \varepsilon_{\parallel\varphi}) \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

となる。ゆえに式 (2.15) および (2.16) を式 (2.19) および (2.20) に代入し、式 (2.21) の関係を用い適当な変換を経て、金属平面の指向ふく射率を示す厳密式が求められる。すなわち、

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{2} \left\{ \frac{4a \cos \varphi}{a^2 + b^2 + 2a \cos \varphi + \cos^2 \varphi} + \frac{4a \cos \varphi}{a^2 + b^2 + 2a \cos \varphi + \cos^2 \varphi} \times \frac{a^2 + b^2 + \sin^2 \varphi}{\cos^2 \varphi (a^2 + b^2 + 2a \sin \varphi \tan \varphi + \sin^2 \varphi \tan^2 \varphi)} \right\} \quad (2.22)$$

式 (2.22) は金属平面の指向ふく射率を示す Fresnel の式とよばれる。これはさらに、Schmidt ら<sup>12)</sup> によって適当な光学定数が与えられ、つぎに示す二つの近似式が誘導される。

金属平面の場合には、 $k = 1$ 、 $n = n$  であり、かつ  $n \gg 1$  であるから、式 (2.17) および (2.18) より、入射角のいかんにかかわらず  $a = n$ 、 $b = n = n$  となる。したがって式 (2.22) は

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{1}{2} \left( \frac{4n \cos \varphi}{2n^2 + 2n \cos \varphi + \cos^2 \varphi} + \frac{2n^2 + 1 - \cos^2 \varphi}{2n^2 + 2n \cos \varphi + \cos^2 \varphi} \times \frac{4n \cos \varphi}{1 + 2n \cos \varphi + 2(n^2 - 1) \cos^2 \varphi - 2n \cos^3 \varphi + \cos^4 \varphi} \right) \quad (2.23)$$

となる。ここで一応式(2.23)を金属平面の指向ふく射率を示す厳密式と称する。

また、 $n \gg 1$  の条件から式(2.23)において平行な振動成分をあらわす第二項は簡略化され

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{1}{2} \left( \frac{4n \cos \varphi}{2n^2 + 2n \cos \varphi + \cos^2 \varphi} + \frac{4n \cos \varphi}{2n^2 \cos^2 \varphi + 2n \cos \varphi + 1} \right) \quad (2.24)$$

となる。式(2.24)はE. SchmidtおよびEckert<sup>12)</sup>によって導かれた式で、ここで式(2.24)を第二近似式と称する。さらに、式(2.24)の各項の分母の $n^2$ 以外の項を省略すると

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{1}{2} \left( \frac{2 \cos \varphi}{n} + \frac{2}{n \cos \varphi} \right) \quad (2.25)$$

となる。式(2.25)は金属平面の近似ふく射特性をあたえる式として、最初にE. Schmidtにより導かれたもので、ここで式(2.25)を第一近似式と称する。

第一近似式(2.25)は、より厳密な第二近似式(2.24)および厳密式(2.23)に比べて、 $n$ が小さい材料において $\varphi$

の大きいところで誤差が増大する。しかし、式(2.24)の式(2.23)に対する誤差は表2.1に示された計算結果を参照して、そのうちの最大値をあけても $n=15$ ,  $\varphi=75^\circ$ において0.15%に過ぎない。それゆえ、本論文において金属粗面に関する見かけの指向ふく射率の計算は、一つはみぞ内面のふく射特性として厳密式のかわりに第二近似式を用いて数値積分の手法によってなされ、その計算結果をより厳密な第二近似値とし、他は第一近似式を用いて定積分によっておこなわれ、その計算結果をより誤差の大きい第一近似値とした。

ここで注意を要することは、式(2.25)において $\varepsilon\varphi$ は $\varphi$ の増加とともに増大して、平行振動成分を示す第二項は $\varphi=90^\circ$ において無限大となるが、実際は各振動成分の絶対値は黒体ふく射エネルギーの $\frac{1}{2}$ を越えることはできず、むしろ $\varphi=90^\circ$ では射出面積がなくなることから、ふく射エネルギーは0となり、それにとまなつてふく射率も0となると考えるのが妥当とおもわれる。

### 3.5 金属平面の垂直ふく射率

金属平面の垂直ふく射率は指向ふく射率において方向角 $\varphi=0^\circ$ の特別な場合で、波長 $\lambda$ のふく射が金属内部において表面に直角に入射する際の反射率 $\rho_{\lambda 0}$ およびふく射率 $\varepsilon_{\lambda 0}$ は式(2.15), (2.16)および(2.21)から、ただし、 $a=b=n$ の条件を用いて

$$\rho_{\lambda 0} = \frac{2\pi^2 - 2\pi + 1}{2\pi^2 + 2\pi + 1}$$

$$= 1 - \frac{2}{\pi} + \frac{2}{\pi^2} - \frac{1}{\pi^3} + \frac{1}{2\pi^5} - \frac{1}{2\pi^6} \dots \dots \dots \quad (2.26)$$

および

$$\epsilon_{\lambda 0} = 1 - \rho_{\lambda 0} = \frac{2}{\pi} - \frac{2}{\pi^2} + \frac{1}{\pi^3} - \frac{1}{2\pi^5} + \frac{1}{2\pi^6} \dots \dots \dots$$

であらわされる。ここで添字 0 は平面に対して垂直方向 ( $\psi = 0^\circ$ ) を意味する。いま、 $\pi \gg 1$  と仮定し、 $\pi^3$  以上の項を省略すれば式 (2.26) は

$$\rho_{\lambda 0} = 1 - \frac{2}{\pi} + \frac{2}{\pi^2}$$

および

$$\epsilon_{\lambda 0} = \frac{2}{\pi} - \frac{2}{\pi^2}$$

と簡略化される。

つぎに、ふく射が金属平面へ入射される時、もしくは金属平面から射出される時の屈折率  $n$  は

$$n = c \sqrt{\delta \mu_m \tau} = \sqrt{\frac{c \mu_m \lambda}{\gamma_e \times 10^9}} \quad (2.28)$$

であらわされる。ここで、 $c$  は光の速度で  $30 \times 10^9$  ( $\text{cm/sec}$ )、 $\delta$  は電磁絶対単位であらわされた電気伝導率 ( $\text{sec/cm}^2$ )、 $\mu_m$  は比透磁率、 $\tau$  は電磁波の周期、( $\text{sec}$ )、 $\gamma_e$  は電気抵抗率 ( $\Omega \text{cm}$ )、 $\lambda$  は電磁波の波長

(cm)である。

金属の電気抵抗率は温度の関数で

$$r_e = r_0 \frac{T}{273} \quad (2.29)$$

であらわされる。ただし、 $r_0$ は $0^\circ\text{C}$ における電気抵抗率 ( $\Omega\text{ cm}$ )、 $T$ は絶対温度 ( $^\circ\text{K}$ )である。一般の金属では比透磁率  $\mu_m \approx 1$  とみなしてよく、したがって、式(2.29)を用いて式(2.28)から純金属の屈折率は容易にもとまり、さらに式(2.28)を式(2.27)に代入して金属平面の垂直単色ふく射率が算出される。

すなわち、

$$\begin{aligned} \epsilon_{\lambda 0} &\approx \frac{2}{\sqrt{30}} \sqrt{\frac{r_e}{\lambda}} - \frac{2}{30} \frac{r_e}{\lambda} = 0.365 \sqrt{\frac{r_e}{\lambda}} - 0.0667 \frac{r_e}{\lambda} \\ &\approx 0.365 \sqrt{\frac{r_e}{\lambda}} \quad (2.27') \end{aligned}$$

となる。

後述のふく射率の理論計算において必要となる金属材料の屈折率の値を式(2.28)を用いて温度 $50 \sim 400^\circ\text{C}$ にわたって計算した結果を表2.2に示す。

表 2.1 第一近似、第二近似および厳密式による金属  
平面指向ふく射率値の比較

$\alpha = 90$

中 (deg)	厳密値	第二近似値	誤差率 (%)	第一近似値	誤差率 (%)
0	0.02197	0.02197	0.00	0.02222	1.14
5	0.02197	0.02197	0.00	0.02222	1.14
10	0.02197	0.02197	0.00	0.02223	1.18
15	0.02198	0.02198	0.00	0.02224	1.18
20	0.02201	0.02201	0.00	0.02227	1.18
25	0.02207	0.02207	0.00	0.02233	1.18
30	0.02219	0.02219	0.00	0.02245	1.17
35	0.02240	0.02240	0.00	0.02267	1.21
40	0.02273	0.02273	0.00	0.02302	1.28
45	0.02326	0.02326	0.00	0.02357	1.33
50	0.02408	0.02408	0.00	0.02443	1.45
55	0.02533	0.02533	0.00	0.02575	1.66
60	0.02725	0.02725	0.00	0.02778	1.95
65	0.03028	0.03028	0.00	0.03099	2.34
70	0.03523	0.03523	0.00	0.03629	3.01
75	0.04399	0.04399	0.00	0.04581	4.14
80	0.06195	0.06194	0.02	0.06592	6.41
85	0.11323	0.11323	0.00	0.12845	13.44

$\alpha = 70$

0	0.02816	0.02816	0.00	0.02857	1.46
5	0.02816	0.02816	0.00	0.02857	1.46
10	0.02816	0.02816	0.00	0.02858	1.49
15	0.02818	0.02818	0.00	0.02859	1.45
20	0.02821	0.02821	0.00	0.02863	1.49
25	0.02829	0.02829	0.00	0.02871	1.48
30	0.02844	0.02844	0.00	0.02887	1.51
35	0.02870	0.02870	0.00	0.02914	1.53
40	0.02912	0.02912	0.00	0.02959	1.61
45	0.02980	0.02979	0.03	0.03031	1.71
50	0.03083	0.03083	0.00	0.03141	1.88
55	0.03242	0.03242	0.00	0.03310	2.10
60	0.03486	0.03485	0.03	0.03571	2.44
65	0.03868	0.03868	0.00	0.03984	3.00
70	0.04492	0.04492	0.00	0.04666	3.87
75	0.05592	0.05591	0.02	0.05889	5.31
80	0.07826	0.07825	0.01	0.08475	8.25
85	0.14048	0.14046	0.01	0.16516	17.57

表 2.1 (つづき)

 $n=50$ 

$\phi$ (deg)	厳密値	第二近似値	誤差率 (%)	第一近似値	誤差率 (%)
0	0.03920	0.03920	0.00	0.04000	2.04
5	0.03920	0.03920	0.00	0.04000	2.04
10	0.03921	0.03921	0.00	0.04001	2.04
15	0.03923	0.03923	0.00	0.04002	2.01
20	0.03927	0.03927	0.00	0.04008	2.06
25	0.03938	0.03938	0.00	0.04019	2.06
30	0.03959	0.03959	0.00	0.04042	2.10
35	0.03994	0.03994	0.00	0.04080	2.15
40	0.04052	0.04052	0.00	0.04143	2.25
45	0.04144	0.04143	0.02	0.04243	2.39
50	0.04285	0.04285	0.00	0.04397	2.61
55	0.04501	0.04501	0.00	0.04634	2.95
60	0.04833	0.04833	0.00	0.05000	3.46
65	0.05352	0.05351	0.02	0.05600	4.63
70	0.06195	0.06195	0.00	0.06532	5.44
75	0.07669	0.07668	0.01	0.08245	7.51
80	0.10614	0.10613	0.01	0.11648	9.74
85	0.18450	0.18447	0.02	0.23122	25.34

 $n=30$ 

0	0.06448	0.06448	0.00	0.06667	3.40
5	0.06448	0.06448	0.00	0.06667	3.40
10	0.06448	0.06448	0.00	0.06667	3.40
15	0.06451	0.06451	0.00	0.06670	3.39
20	0.06459	0.06459	0.00	0.06680	3.42
25	0.06476	0.06476	0.00	0.06699	3.44
30	0.06508	0.06508	0.00	0.06736	3.50
35	0.06564	0.06563	0.02	0.06800	3.60
40	0.06656	0.06655	0.02	0.06905	3.74
45	0.06800	0.06799	0.01	0.07071	3.99
50	0.07022	0.07021	0.01	0.07328	4.36
55	0.07361	0.07359	0.03	0.07723	4.92
60	0.07878	0.07876	0.03	0.08333	5.78
65	0.08681	0.08678	0.03	0.09296	7.08
70	0.09973	0.09969	0.04	0.10886	9.15
75	0.12186	0.12181	0.04	0.13742	12.77
80	0.16442	0.16435	0.04	0.19775	20.27
85	0.26576	0.26565	0.04	0.38536	45.11

表 2.1 (つづき)

 $n = 20$ 

$\phi$ (deg)	厳密値	第二近似値	誤差率 (%)	第一近似値	誤差率 (%)
0	0.09512	0.09512	0.00	0.10000	5.13
5	0.09512	0.09512	0.00	0.10000	5.13
10	0.09513	0.09513	0.00	0.10001	5.13
15	0.09517	0.09517	0.00	0.10006	5.14
20	0.09528	0.09528	0.00	0.10019	5.15
25	0.09552	0.09551	0.01	0.10043	5.19
30	0.09598	0.09596	0.02	0.10104	5.27
35	0.09676	0.09674	0.02	0.10200	5.42
40	0.09804	0.09801	0.03	0.10357	5.64
45	0.10005	0.10001	0.04	0.10607	6.02
50	0.10314	0.10309	0.05	0.10993	6.58
55	0.10783	0.10777	0.06	0.11585	7.44
60	0.11495	0.11488	0.06	0.12500	8.74
65	0.12592	0.12582	0.08	0.13944	10.74
70	0.14329	0.14317	0.08	0.16329	13.96
75	0.17234	0.17219	0.09	0.20613	19.61
80	0.22540	0.22520	0.09	0.29662	31.60
85	0.33465	0.33438	0.08	0.57804	72.73

 $n = 15$ 

0	0.12474	0.12474	0.00	0.13333	6.89
5	0.12474	0.12474	0.00	0.13333	6.89
10	0.12475	0.12475	0.00	0.13335	6.89
15	0.12480	0.12480	0.00	0.13342	6.91
20	0.12495	0.12493	0.02	0.13359	6.91
25	0.12525	0.12522	0.02	0.13398	6.97
30	0.12581	0.12577	0.03	0.13472	7.08
35	0.12679	0.12673	0.05	0.13600	7.26
40	0.12873	0.12830	0.05	0.13810	7.58
45	0.13086	0.13077	0.07	0.14142	8.07
50	0.13467	0.13456	0.08	0.14657	8.84
55	0.14044	0.14030	0.10	0.15447	9.99
60	0.14914	0.14897	0.11	0.16667	11.75
65	0.16240	0.16219	0.13	0.18592	14.48
70	0.18312	0.18285	0.15	0.21772	18.89
75	0.21684	0.21651	0.15	0.27484	26.75
80	0.27525	0.27483	0.15	0.39550	43.69
85	0.37807	0.37755	0.14	0.77072	103.86

表 2.2 銅およびアルミニウムの屈折率 (計算値) \*

温度 t(°C)	波 長 $\lambda_{\max}(\text{cm})$	銅		アルミニウム	
		$\gamma_e (\Omega\text{cm})$	$n$	$\gamma_e (\Omega\text{cm})$	$n$
50	$8.250 \times 10^{-4}$	$1.837 \times 10^{-6}$	116.0	$2.937 \times 10^{-6}$	91.72
100	7.131	2.032	102.6	3.132	82.65
150	6.288	2.227	92.04	3.327	75.30
200	5.624	2.422	83.46	3.522	69.21
250	5.086	2.617	76.35	3.717	64.07
300	4.642	2.812	70.38	3.912	59.66
350	4.270	3.007	65.27	4.107	55.85
400	3.952	3.202	60.85	4.302	52.50
		$\mu_m = 0.999905$		$\mu_m = 1.0000208$	

※ ある測定<sup>(3)</sup>によれば、アルミニウムの単結晶の屈折率はこの表の値より相対的に小さい。この相違は、電磁理論においては均質等方性の物質を仮定しているが、測定値は単結晶についてであり、屈折率は方向性をもつことになり、また表面の「よごれ」によっても値は小さくなることなどに原因しているものとおもわれる。

### 3.6 非金属平面の指向ふく射率

非金属平面の指向ふく射は、金属の場合と同様に電磁理論の結果により、つぎのように説明される。

まず、非金属材料の光学定数  $a$  および  $b$  は、減衰率  $k = 0$  の条件を式 (2.17) および式 (2.18) に代入して

$$a^2 = n^2 - \sin^2 \varphi, \quad (2.30)$$

$$b = k = 0 \quad (2.31)$$

を得る。ここで、Snell の法則  $n = \sin \varphi / \sin \chi$  を用いて、

$$a^2 = \left( \frac{\sin \varphi}{\sin \chi} \right)^2 - \sin^2 \varphi = \sin^2 \varphi \cdot \frac{\cos^2 \chi}{\sin^2 \chi},$$

ただし、 $\varphi$  は物体への入射角または物体からの射出角、 $\chi$  は屈折角である。

ゆえに、

$$a = \sin \varphi \cdot \frac{\cos \chi}{\sin \chi}. \quad (2.32)$$

これらの関係を式 (2.22) に代入して整理すると

$$\epsilon_{\varphi} = \frac{1}{2} \left( \frac{4a \cos \varphi}{a^2 + 2a \cos \varphi + \cos^2 \varphi} \right) \left\{ 1 + \frac{a^2 + \sin^2 \varphi}{\cos^2 \varphi (a^2 + 2a \sin \varphi \tan \varphi + \sin^2 \varphi \tan^2 \varphi)} \right\}$$

$$(2.33)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \left\{ \frac{4 \sin \varphi \left( \frac{\cos X}{\sin X} \right) \cos \varphi}{\left( \sin \varphi \frac{\cos X}{\sin X} + \cos \varphi \right)^2} \right\} \left\{ 1 + \frac{\left( \frac{\sin \varphi}{\sin X} \right)^2}{\cos^2 \varphi \left( \sin \varphi \frac{\cos X}{\sin X} + \sin \varphi \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} \right)^2} \right\} \\
&= \frac{1}{2} \frac{\sin 2\varphi \sin^2 X}{\sin^2(\varphi + X)} \left\{ 1 + \frac{1}{(\cos \varphi \cos X + \sin \varphi \sin X)^2} \right\} \\
&= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin 2\varphi \sin 2X}{\sin^2(\varphi + X)} + \frac{\sin 2\varphi \sin 2X}{\sin^2(\varphi + X) \cos^2(\varphi - X)} \right\} \quad (2.34)
\end{aligned}$$

となる。式(2.34)はふく射の入射または射出の角を $\varphi$ 、屈折角を $X$ とすると、非金属平面の指向ふく射率を示す Fresnel の式にほかならない。式(2.34)において、第一項は入射面または射出面に直角に振動する成分、第二項は平行に振動する成分をあらわす。

式(2.34)より指向ふく射率を計算した結果を図 2.2 に示す。図によると  $1.25 < \pi < 2.50$  の範囲で  $\varphi$  が  $0^\circ$  から  $45^\circ$  までにはほとんど一定の値を示し、 $60^\circ$  以上で急激に減少し  $\varphi = 90^\circ$  で 0 になる。このような性質から非金属平面を実用上、Lambert の余弦則が近似的に適用できる乱射面として扱っている。

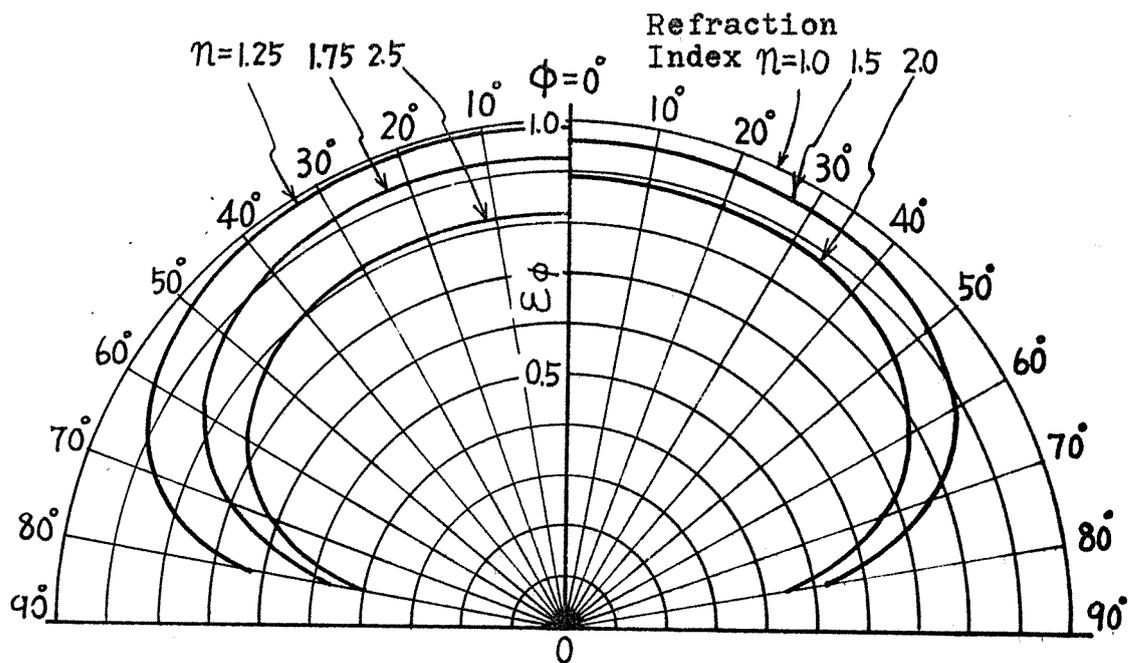


図 2.2 非金属に関する Fresnel の式から計算された指向反射

### 3.7 非金属平面の垂直ふく射率

非金属平面の垂直ふく射率  $\epsilon_{\lambda 0}$  は、式 (2.30) に  $\varphi = 0$  を代入すると、 $a = n$  となり、この関係を式 (2.33) に適用して整理すると

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{\lambda 0} = 1 - \rho_{\lambda 0} &= \frac{4n}{n^2 + 2n + 1} = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \\ \text{または} \quad \rho_{\lambda 0} &= \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

となり、屈折率  $n$  のみの関数で示される。この際も、*Snell* の法則  $n = \sin \gamma / \sin \alpha$  が成立する。

非金属平面の熱線にたいする  $n$  の値は、二、三の酸化物についての測定例<sup>14)</sup>があるが、透明物体以外は直接実測することは一般に困難である。しかし、大部分の非金属材料の屈折率は、 $1 < n < 3$  の範囲にあるものとみなされる。

表 2.3 には二、三の非金属（金属酸化物および金属化合物）の波長と屈折率の値を示す。

表 2.3 二三の非金属(金属酸化物、金属化合物)の屈折率<sup>14)</sup>

熔融シリカ( $\text{SiO}_2$ )		弗化カルシウム( $\text{CaF}_2$ )		人造サファイア( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	
$\lambda$ ( $\mu$ )	$n$	$\lambda$ ( $\mu$ )	$n$	$\lambda$ ( $\mu$ )	$n$
0.35	1.477	0.185	1.510	0.265	1.834
0.40	1.470	0.194	1.501	0.302	1.814
0.45	1.466	0.208	1.489	0.361	1.795
0.50	1.462	0.231	1.475	0.405	1.786
0.60	1.458	0.257	1.465	0.546	1.771
0.80	1.453	0.291	1.456	0.707	1.763
1.00	1.450	0.361	1.445	0.852	1.759
1.20	1.448	0.442	1.439	1.014	1.756
1.40	1.446	0.589	1.434	1.367	1.749
1.70	1.442	0.671	1.432	1.530	1.747
2.00	1.438	0.768	1.431	1.709	1.743
2.40	1.432	1.179	1.428	1.970	1.738
2.80	1.424	1.768	1.425	2.249	1.732
3.00	1.419	2.357	1.422	2.437	1.728
3.20	1.414	2.947	1.418	3.243	1.704
3.40	1.409	3.536	1.414	3.508	1.695
3.50		4.714	1.402	3.700	1.688
		5.893	1.387	4.258	1.664
		7.072	1.368	4.954	1.627
		8.250	1.344	5.146	1.615
		9.429	1.316	5.349	1.602
				5.577	1.586

### 第 3 章 粗面のふく射に関する既往の研究

前章に述べたふく射に関する基礎理論を展望することにより、純粋な金属平面および非金属平面の垂直ふく射率または指向ふく射率は、その物体の屈折率が既知であれば、比較的容易に理論から算出できることが明らかとなった。また、これらについて実験によって得られた測定値と計算値との対比に関しては既に何人かの研究者によって研究され、両者の間に一致が見出されている。<sup>12)</sup>

一般に物体表面は、それが金属であつてもまた非金属であつても、程度の差はあるが酸化等による化学的変質、あるいは異質物の物理的固着などにより「よごれ」ている。このように表面が内部と異質の膜で覆われている場合であつても、表面が平面であるかぎりその膜面の種類と厚さがわかれば、あるいはわからない場合にはこれを仮定してふく射率は理論的に計算できることになる。<sup>15) 16)</sup>

しかし、物体表面は平面であることは稀れで、むしろ任意のあらさをもつた粗面であることが多い。この種の粗面の垂直ふく射率または指向ふく射率を理論的に求める場合には、これまでの平面を対象としたふく射理論だけでは解決できず、新たな考え方を適用しなければならない。ここに工学的応用面での理論解析が必要になってくる。もちろん、既に確立されているふく射の基

礎理論を十分にふまえたうえであり、本研究の目的とする点もここにある。

このような観点に立った粗面のふく射率に関する理論解析および実験的研究は多数あり、その主なものをつぎにあげる。

## 1. 粗面の見かけのふく射率に関する理論解析

自然にある粗面は、いろいろな形と大きさをもったあらしが広い範囲に分布してできたものが多いものとおもわれるが、それに対して人為的に得られた粗面は、あらしの分布が比較的狭い範囲におさまり、その分布密度が正規分布<sup>17)~19)</sup>をすることが多い。

このようなあらしの大きさと形状が任意の粗面の見かけのふく射率を理論解析により直接求めることは困難が伴うので、過去に発表されたこの種の解析の大部分は、粗面の凹凸をV字みぞ<sup>20)~23)</sup>または変形した定形みぞ<sup>24)</sup><sup>25)</sup>あるいは円弧もしくは球形の空洞<sup>26) 27)</sup>が配列したものとみなして、ただし、くぼみ内面におけるふく射の射出および反射の特性は無指向性と仮定し、主として数学的処理により見かけの垂直ふく射率または指向ふく射率を求めている。そのほか、円筒形みぞに平行光線が入射した場合の吸収率を理論計算した例もある。<sup>28)</sup>

## 1. 1 V字みそ開口の見かけのふく射率

E. M. Sparrow ら<sup>29)</sup>は、粗面の凹凸をV字みそにおきかえ、みそ内面の平均ふく射率を二次元で解析を行なっている。ここでは Sparrow らの理論を示すと同時に、この考え方を発展させてV字みそ開口の見かけのふく射率を算出する\*。ただし、表面の凹凸はふく射の波長に比べてはるかに大きく、表面は無指向性の灰色体と仮定する。

図 3.1 に示すように、紙面に直角方向に伸びた一本のV字みそにおいて、x軸上の任意の点xに微小面積  $dA_x$  をとる。いま、 $dA_x$  から単位時間、単位面積当りに射出するふく射エネルギー  $B(x)$  は、その点から直接射出する成分と向い側の一点から入射してきて反射する成分の和であり、

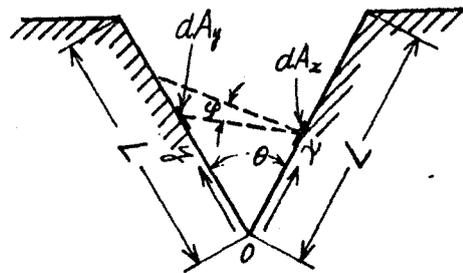


図3.1 V字みその座標と記号

$$B(x) = \epsilon \sigma T^4 + \rho H(x) \quad (3.1)$$

\* Sparrow らも後に発刊した著書<sup>30)</sup>において、みそ内面の平均ふく射率から、固有のふく射率0.3以上の場合についてみそ開口の見かけのふく射率を求めている。

となる。ここで、 $\epsilon$  は材料固有のふく射率、 $\rho$  は反射率、 $H(x)$  は向い側からの入射エネルギーである。

いま、向い側の真 $y$ に微小面積 $dA_y$ を考えると、そこを去るエネルギーのうち

$$B(y) dA_y dF_{y-x} \quad (3.2)$$

だけが真 $x$ に到達する。ここで、 $dF_{y-x}$ は $y$ から $dA_x$ をみる形態係数であるが、形態係数の相反定理を用いて式(3.2)は $B(y) dA_x dF_{x-y}$ となり、 $dA_y$ を去って真 $x$ に達する単位面積当りの入射エネルギーは

$$B(y) dF_{x-y} \quad (3.3)$$

しかし、真 $x$ は向い側の全面から入射をうけるから式(3.3)を $y = 0 \sim L$ まで積分して

$$H(x) = \int_0^L B(y) dF_{x-y} \quad (3.4)$$

となり、この場合の形態係数<sup>31)</sup>は

$$dF_{x-y} = \frac{1}{2} d(\sin \varphi) \quad (3.5)$$

であり、また図3.1から容易に

$$\sin \varphi = \frac{y \cos \theta - x}{\sqrt{(y \cos \theta - x)^2 + (y \sin \theta)^2}} \quad (3.6)$$

を得る。式(3.4), (3.5) および(3.6) から入射エネルギー  $H(x)$  は

$$H(x) = \frac{1}{2} \int_0^L B(y) \frac{xy(1-\cos^2\theta)}{(x^2+y^2-2xy\cos\theta)^{3/2}} dy \quad (3.7)$$

式(3.7) を式(3.1) に代入して、ふく射エネルギーの基礎方程式

$$B(x) = \varepsilon_0 T^+ + \frac{\rho(1-\cos^2\theta)}{2} \int_0^L B(y) \frac{xy}{(x^2+y^2-2xy\cos\theta)^{3/2}} dy \quad (3.8)$$

が得られる。いま、無次元量  $X = x/L$ ,  $Y = y/L$ ,  $\beta(X) = B(x)/\varepsilon_0 T^+$ ,  $\beta(Y) = B(y)/\varepsilon_0 T^+$  を用いてあらわせば、

$$\beta(X) = 1 + \frac{\rho(1-\cos^2\theta)}{2} \int_0^1 \beta(Y) \frac{XY}{(X^2+Y^2-2XY\cos\theta)^{3/2}} dY \quad (3.9)$$

となり、式(3.9) は温度  $T$  を含まないから、温度に無関係に適用できる。

向い側の面についても、幾何学のおよび熱的に相似であるから、 $X$  を  $Y$  におきかえてすべて同じ形の式であらわされる。

つぎに、みぞ内面の局部熱流量  $q$  は、放熱量と吸熱量

の差であるから

$$q = \epsilon \sigma T^4 - \alpha H, \quad (3.10)$$

ここで、 $\alpha$ は吸収率である。

いま、 $\alpha = \epsilon = 1 - \rho$ の関係を用いて、式(3.1)を考慮すると  $q = B - H$  となり、当然の結果であるが正味熱流量は射出するふく射エネルギーと入射するふく射エネルギーの差に等しくなる。ここで、局所熱流量を表面が平面の場合にたいするふく射エネルギーの比であらわすと、ただし、 $H(x) / \epsilon \sigma T^4 = (\beta - 1) / \rho$  の関係を用いて

$$\frac{q}{\epsilon \sigma T^4} = \frac{1 - \beta \epsilon}{\rho} = \frac{1 - \beta \epsilon}{1 - \epsilon}. \quad (3.11)$$

全熱流量  $Q$  は、局所熱流量を  $x$  について積分し、 $Q = \int_0^L q dx$  として求まるから、式(3.11)を用いて

$$\frac{\frac{Q}{L}}{\epsilon \sigma T^4} = \frac{1 - \epsilon \int_0^L \beta dx}{\rho}. \quad (3.12)$$

を得る。

ゆえに、 $\nabla$ 字みそ内面からの平均ふく射率  $\bar{\epsilon}$  は

$$\bar{\epsilon} = \left( \frac{\frac{Q}{L}}{\sigma T^4} \right). \quad (3.13)$$

したがって、 $\nabla$ 字みそ開口の見かけのふく射率  $\epsilon_a$  は

式 (3.13) から

$$\varepsilon_a = \frac{\bar{\varepsilon}}{\sin(\frac{\theta}{2})} \quad (3.14)$$

となり、見かけのふく射率は増大することが説明できる。

いま、式 (3.14) から見かけの垂直ふく射率を数値積分により計算するために、つぎのように変形して演算をすすめる。

$\nabla$  子みそ内面の点  $X$  における無次元射出エネルギー  $\beta(X)$  は

$$\beta(X) = \frac{1 + K \sum_{Y=0}^1 f(X, Y) \Delta Y}{1 - K^2 \sum_{X=0}^1 \sum_{Y=0}^1 f^2(X, Y) \Delta X \Delta Y} \quad (3.15)$$

ここで、 $K$  および  $f(X, Y)$  はそれぞれ

$$K = \frac{9(1 - \cos^2 \theta)}{2}, \quad f(X, Y) = \frac{XY}{(X^2 + Y^2 - 2XY \cos \theta)^{3/2}}$$

をあらわす。 $\beta(X)$  を面  $X$  全体について積分して平均ふく射率を求め、開口面に投影すると式 (3.15) のごとく垂直ふく射率が求まる。

$$\varepsilon_a = \frac{1 - \varepsilon \sum_{X=0}^1 \beta(X) \Delta X}{(1 - \varepsilon) \sin(\frac{\theta}{2})} \quad (3.16)$$

$X$ ,  $Y$  を 20 等分して差分法により求めた計算結果を

図 3.2 に示す。この際、分割数が多いほど、とくにみその谷の近傍で誤差は少なくなる。

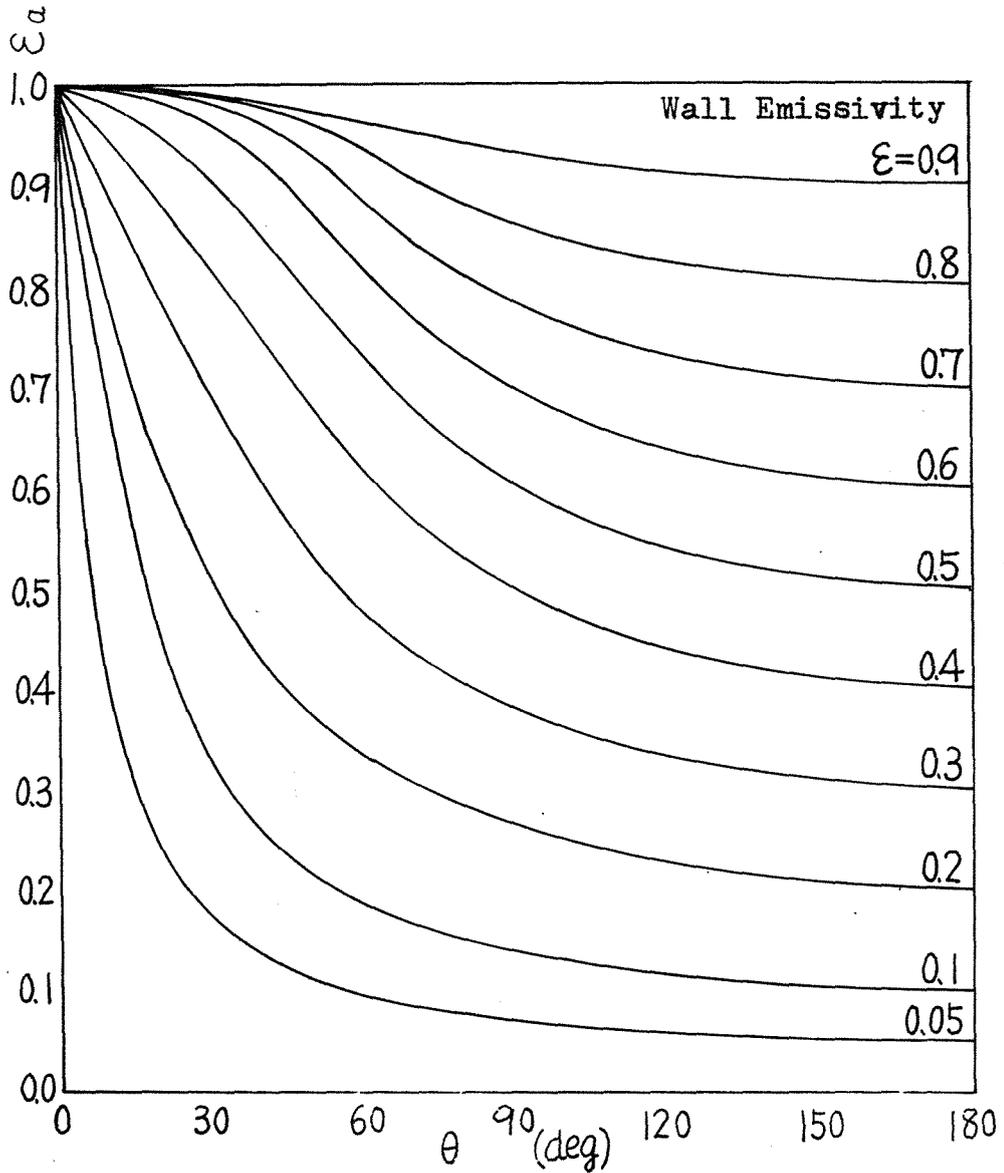


図 3.2 Sparrow 理論から算出された V 字みそ開口の見かけの垂直ふく射率

## 1. 2 球形空洞開口の見かけのふく射率

E. M. Sparrow<sup>32)</sup> は、粗面の凹凸を球形空洞とみなして、その開口の見かけのふく射率を求めている。

いま、図 3.3 のような天頂角  $\phi^*$  の円形開口を有する半径  $R$  の球形空洞を考える。

空洞内面の微小面積  $dA_1$  におけるエネルギー平衡式は、前項の  $\nabla$  字みその場合と同様に、

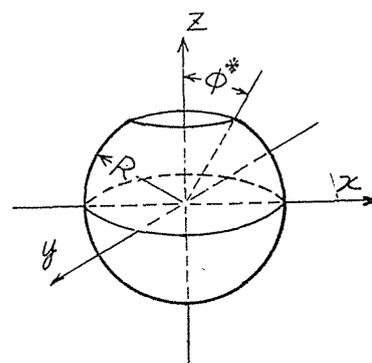


図 3.3 球形空洞の座標

$$B(dA_1) = \epsilon \sigma T^4$$

$$+ (1 - \alpha) H(dA_1) \quad (3.17)$$

ここで、

$$H(dA_1) = \int_{A_2} B(dA_2) dF_{12} \quad (3.18)$$

$dA_2$  は向い側の微小面積、 $dF_{12}$  は 1 から 2 を見る形態係数である。この場合の形態係数  $dF_{12}$  は

$$dF_{12} = dA_2 / 4\pi R^2,$$

空洞面積  $A^*$  は

$$A^* = 2\pi R^2 (1 + \cos \phi^*)$$

の関係から式 (3.18) は

$$H(dA_1) = \int_{A^*} B(dA_2) \frac{dA_2}{4\pi R^2} = \frac{1}{2} (1 + \cos \phi^*) B(dA_2) \quad (3.19)$$

となる。式 (3.19) を式 (3.17) に代入して両辺を  $\sigma T^4$  で割って無次元数であらわすと

$$\varepsilon_a = \varepsilon + \frac{1}{2} (1 - \alpha) (1 + \cos \phi^*) \varepsilon_a .$$

これを整理して

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon}{\left\{ 1 - \frac{1}{2} (1 - \alpha) (1 + \cos \phi^*) \right\}} \quad (3.20)$$

を得る。

式 (3.20) を計算し、固有のふく射率  $\varepsilon$  をパラメータにとり、 $\varepsilon_a$  と  $\phi^*$  の関係を図示すると図 3.4 のごとくなる。図によれば、空洞開口の見かけのふく射率は、 $\phi^*$  が減少して開口が小さくなるほど大きくなり、その増加割合は  $\varepsilon$  が小さいほど大きい。

この場合は見かけのふく射率の計算過程で、開口面に対する方向性は考えていないから、見かけのふく射率の計算結果は垂直方向のみでなく、一応はいすれの方にも適用できることになる。しかし、球形空洞は円形開

口を有するので、これを配置して実際の粗面に適用する場合には、円と円との間に平面部分のすきまができるから、その奥の補正を行わなければならない。

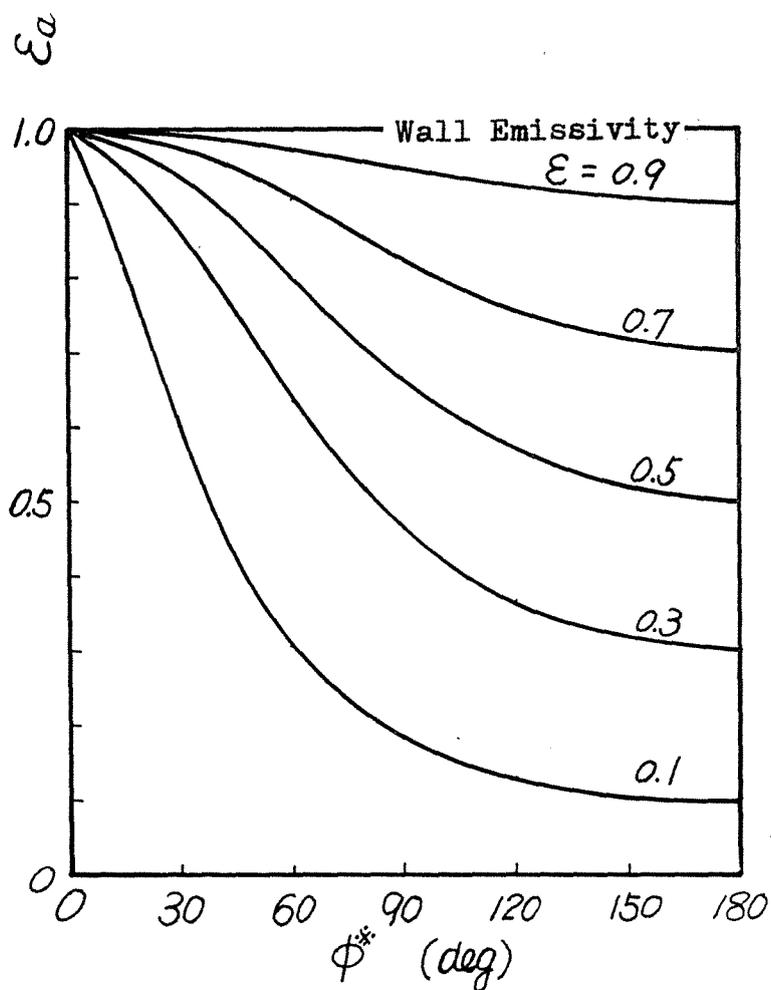


図 3.4 Sparrow 理論から算出された球形空洞開口の見かけの垂直ふく射率。

## 2. 粗面の見かけのふく射率に関する測定

固体表面のふく射率の測定は、本来応用物理学の分野に属し、古くから多数の研究者によって行なわれてきた。<sup>33)</sup>

ふく射率の測定を方法論的に分類すると、物体に標準光を照射して反射率を求めてから間接的にふく射率を算出する便宜的方法、物体の一部に口の小さい深い孔をうがって近似黒体としたものを加熱し、物体表面からのふく射と近似黒体からのふく射を比較して求める方法、およびあらかじめ黒体を用意しておいて、物体からのふく射と同温度の黒体からのふく射を比較する方法となる。<sup>34)</sup>。ここでかりに、第一の方法は標準光反射法、第二の方法は近似黒体比較法および第三の方法は黒体比較法とよぶ。

過去において、ふく射率測定に用いられた方法としては、第一の標準光反射法が多数を占め、第二、第三の方法の順に減少する。

いま、固体表面のあらさに注目した場合、なめらかな平面および細かいあらさの粗面の反射率あるいはふく射率の測定例としては物理学の分野において多数見受けられ<sup>35)~40)</sup>また粗面の反射率あるいはふく射率の測定例として、近年工学においても見受けられ<sup>41)~50)</sup>。いわゆる理学と工学の境界問題として発展しつつある。これらの表面あらさと反射率またはふく射率の関係を追求し

た実験研究によれば、いずれもあらさと複雑な関連性があることを示唆しているが、測定結果を一貫した理論で明解に説明したものは見当らない。その理由の一つは、あらさの大きさとふく射の波長の大小関係によつて、反射および射出の様式が異なり、あらさの大きさがふく射の波長より大きければ、幾何光学的な取り扱いですむが、ふく射の波長があらさの大きさに接近した場合には、波動光学的取り扱い<sup>51)~54)</sup>が必要になるなどの理由によるものとおもわれる。

一例として、あらさの大きさがふく射の波長より小さい範囲において、あらさの大きさと反射率の関係を求めた Birkebak<sup>55)~57)</sup>の詳細な実験<sup>\*</sup>によれば、あらさの増加とともに反射率は減少して一定値に漸近するが、その傾向は Chinmayanandan<sup>58)</sup>の式によく一致すると述べている。

また、物理学の分野では、人為的に得られた金属粗面の分光ふく射の実測例<sup>59)</sup>も相当以前に発表されており、同一金属であっても粗面を造るときに表面処理法の相違によつて単色ふく射率が異なり、したがつてふく射エネルギーのスペクトルも異なることが明らかにされている。

最近、工学においてもこの種の分光研究が行なわれており、酸化アルミニウムおよび白ペイントの単色反射率からふく射エネルギーの波長分布を求めた例<sup>60)</sup>、および金属粗面のあらさとふく射率の関係の指向特性のほか

<sup>\*</sup> Birkebak はあらさとして二乗平均平方根あらさをとっている。

波長特性についての測定例<sup>61)</sup>があり、また、凍結乾燥された食用肉の常温におけるふく射率を黒体比較法で分光した結果<sup>62)</sup>も発表されている。

金属表面をあらくする処理法としては、すりガラスの粗面に金属膜を蒸着させる方法、化学的にエッチングする方法および機械的に傷をつける方法などがある。機械的方法はさらに、研磨紙および研磨粒によりスクラッチする方法、研削盤によりグランドする方法および砂吹き法によりサンドブラストする方法などが用いられているが、いずれも金属表面を化学的および物理的によごさないように注意しなければ、あらさによる影響は明白にはあらわれてこない。

著者<sup>63)</sup>が以前に経験したところによると、アルミを研磨紙でスクラッチした面の垂直ふく射率を測定すると、あるあらさにおいてふく射率が急激に増大し極大値を示したが、これなどは本論文の検討結果から表面の「よごれ」によるものと判断している。最近同様な測定結果<sup>64)</sup>を見かけたが、その実の考察は何ら述べられておらず、表面処理の方法も明らかにされていない。

## 第 4 章 粗面のふく射率に関する理論解析

固体表面が平滑な平面\*（以下単に「平面」という）の場合には、垂直ふく射率および指向ふく射率は、第 2 章に述べたように、その材料の屈折率がわかれば、金属と非金属に分類して電磁理論の結果から計算することができる。しかし、一般に固体表面は平面とはみなされず、種々のあらしからなる粗面と考えられる。そこでこのような粗面をモデル化して、最初に V 字形および円弧状の一定形状のみぞが連続して配置されたものとみなして、つぎに種々の深さの円弧みぞ（半径は単位長さ）が適当な割合で正規分布したものとみなして、各粗面の垂直ふく射率および指向ふく射率について二次元で理論解析を行なう。

解析にあたって、平面の場合と同様に材料を金属と非金属に分けて、さらにつぎの仮定をおく。

1) あらしの大きさは、対象とするふく射の波長に比べて大きい。したがって、凹面内のふく射の射出および入反射は幾何光学的な取り扱いができる。

2) 凹面内の射出および反射の特性は、電磁理論から導かれた指向性を適用して、金属に関しては E. Schmidt らによる第一近似式および第二近似式に、また非金属で

---

\*ここでは、平面とはばく然とあらしの大きさがふく射の波長に比べてはるかに小さい面をさす。

は Fresnel の式に従うものとする。

### 1. 金属V字みそ粗面の指向ふく射率<sup>65)~67)</sup>

いま、解析の対象となるV字みそを一個とりだして、  
 図4.1の101'で示す。図において、みその谷0を中心としてみそ内面01を半径とする円を描き、開口面11'の垂線に対して右方向の指向ふく射率を求めようとするときは、左まわりにV字みその開き角 $\theta$ に等しい角度で左半円の中心角を分割してゆく。ここで、みそ内

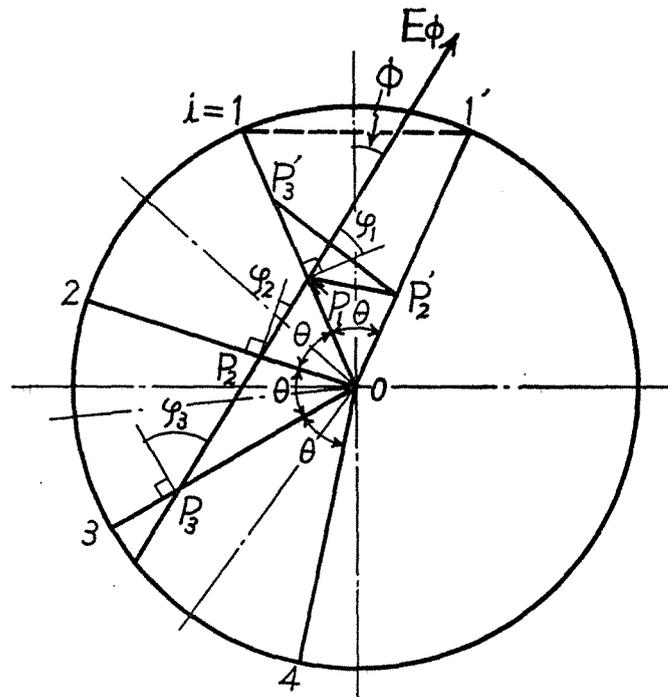


図 4.1 写像によりV字みそ内の反射回数および入射角を求める図解法。

面の反射を考える場合に、内面 10 に対する向い側の面 1'0 の像は反対側に面 20 であらわされ、面 1'0 に対する面 10 は、面 20 に対する面 10 の像の面 30 であらわされ、以下同様にして像の数は増してゆく。

このようにして、本来折線  $P_1 P_2 P_3$  で示される V 字みぞ内の反射は、写像法<sup>69)</sup>を用いることにより像をつきぬける一本の直線  $P_1 P_2 P_3$  でおき替えられ、この直線と像との交差数が反射回数となり、各点の射出角および入射角も容易に求めることができる。

よって、最大  $(n-1)$  回の反射成分を有し、中方向に射出する見かけの指向ふく射率  $\varepsilon_{a\phi}$  は

$$\begin{aligned} \varepsilon_{a\phi} = & \varepsilon_{\varphi_1} + (1 - \varepsilon_{\varphi_1}) \varepsilon_{\varphi_2} + (1 - \varepsilon_{\varphi_1})(1 - \varepsilon_{\varphi_2}) \varepsilon_{\varphi_3} + \dots \\ & \dots + (1 - \varepsilon_{\varphi_1})(1 - \varepsilon_{\varphi_2})(1 - \varepsilon_{\varphi_3}) \dots (1 - \varepsilon_{\varphi_{i-1}}) \varepsilon_{\varphi_i}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

ここで、粗面内面のふく射特性をあらわす式として最初に Schmidt による第一近似式を適用して計算し、その値を第一近似値とし、つぎに第二近似式を適用して計算し、その値を第二近似値とする。すなわち、金属平面の第一近似式は

$$\varepsilon_{\varphi_i} = \frac{1}{n} \left( \cos \varphi_i + \frac{1}{\cos \varphi_i} \right), \quad (4.2)$$

第二近似式は

$$\varepsilon_{\varphi_i} = 2n \cos \varphi_i \left( \frac{1}{2n^2 + 2n \cos \varphi_i + \cos^2 \varphi_i} + \frac{1}{2n^2 \cos^2 \varphi_i + 2n \cos \varphi_{i+1}} \right) \quad (4.3)$$

ただし、 $i = 1, 2, 3, \dots$ , とする。

図式解法で求めた射出または入射角  $\varphi_i$  を式 (4.2) または式 (4.3) に代入し  $\varepsilon_{\varphi i}$  を求め、さらに式 (4.1) に代入して  $\varepsilon_{a\varphi}$  を計算する。

### 1. 1 第一近似値

みぞ内面のふく射特性として第一近似式を適用した場合のV字みぞ開口の指向ふく射率の計算例を以下に示す。ただし、屈折率  $n = 70$ 、開き角  $\theta = 45^\circ$  とする。

#### 記号

$\varepsilon_{a\varphi}$  ; V字みぞ開口の中方向の見かけのふく射率

$\left. \begin{array}{l} (\varepsilon_{a\varphi})_1 \\ (\varepsilon_{a\varphi})_2 \\ (\varepsilon_{a\varphi})_3 \\ \vdots \end{array} \right\}$  ; 反射回数が異なる中方向の見かけの局所ふく射率で、これらを平均して  $\varepsilon_{a\varphi}$  が求められる。

$\left. \begin{array}{l} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ \vdots \end{array} \right\}$  ;  $(\varepsilon_{a\varphi})_1, (\varepsilon_{a\varphi})_2, (\varepsilon_{a\varphi})_3, \dots$  の平均値を求めるときそれぞれの比重で、投影面積一定の条件から  $l_1 + l_2 + l_3 + \dots = 1$  となる。

$\varepsilon_i$  ;  $i$ 面の指向ふく射率で、みぞ内で  $(i-1)$ 面の反射後に開口から中方向に射出される。

$\varepsilon_{\varphi i}$  ; みぞ内面の指向ぶく射率で  $i$  面での射出角が  $\varphi_i$  なることを示す ( $\varepsilon_i = \varepsilon_{\varphi i}$ ).

$\Phi = 0^\circ$  (垂直方向) ;

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{67.5^\circ} = 0.042798 \quad (1 - \varepsilon_1) = 0.957202$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{22.5^\circ} = 0.028662 \quad (1 - \varepsilon_2) = 0.971338$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{22.5^\circ} = 0.028662 \quad (1 - \varepsilon_3) = 0.971338$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_{67.5^\circ} = 0.042798$$

$$(1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 = 0.957202 \times 0.028662 = 0.027435$$

$$(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \varepsilon_3 = 0.957202 \times 0.971338$$

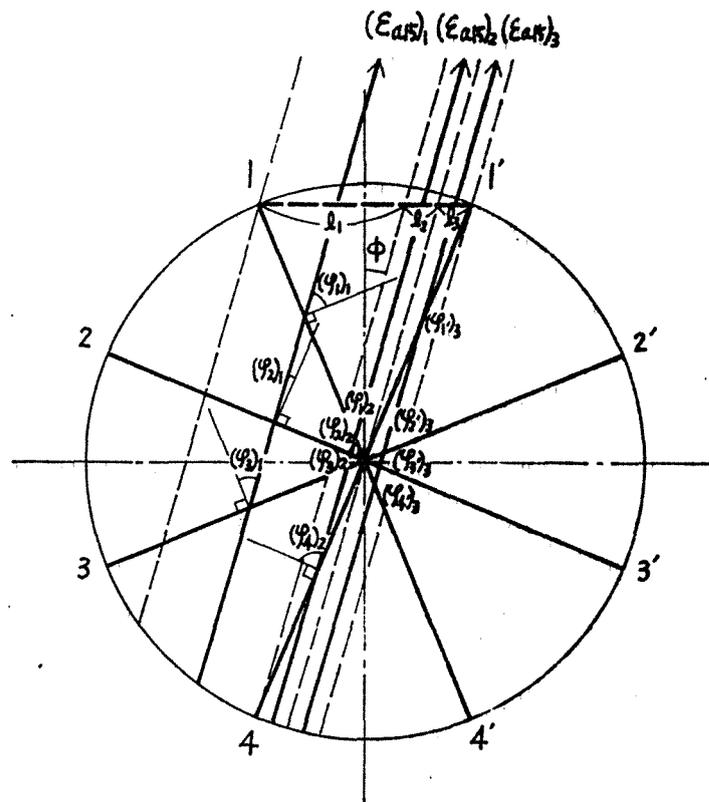
$$\times 0.028662 = 0.026649$$

$$(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3) \varepsilon_4 = 0.957202 \times 0.971338^2$$

$$\times 0.042798 = 0.038651$$

$$\begin{aligned} \therefore \varepsilon_{\varphi 0^\circ} &= \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \varepsilon_3 \\ &+ (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3) \varepsilon_4 = 0.042798 \\ &+ 0.027435 + 0.026649 + 0.038651 = \underline{\underline{0.135533}} \end{aligned}$$

$\Phi = 15^\circ$  方向 ; 図 4.2 より、ぶく射が射出される方向からみて遠い方のみぞ内面においては、2回反射する部分と3回反射する部分があり、さらに近い方のみぞ内面(1)をつけてあらわす)における3回反射する部分があり、それぞれ見かけのぶく射率を



$$(\varphi_1)_1 = (\varphi_1)_2 = (\varphi_4') = 52.5^\circ$$

$$(\varphi_2)_1 = (\varphi_2)_2 = (\varphi_3') = 7.5^\circ$$

$$(\varphi_3)_1 = (\varphi_3)_2 = (\varphi_2') = 37.5^\circ$$

$$(\varphi_4)_2 = (\varphi_1') = 82.5^\circ$$

図 4.2  $\theta = 45^\circ$ ,  $\phi = 15^\circ$  の場合の図解法

$(\varepsilon_{a15^\circ})_1$ ,  $(\varepsilon_{a15^\circ})_2$ ,  $(\varepsilon_{a15^\circ})_3$ , その比重を  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  であらわす。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_4' = \varepsilon_{52.5^\circ} = 0.032164$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3' = \varepsilon_{75^\circ} = 0.028573$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_2' = \varepsilon_{97.5^\circ} = 0.029341$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_1' = \varepsilon_{82.5^\circ} = 0.111344$$

$$(1 - \varepsilon_1) = (1 - \varepsilon_4') = 0.967836$$

$$(1 - \varepsilon_2) = (1 - \varepsilon_3') = 0.971427$$

$$(1 - \varepsilon_3) = (1 - \varepsilon_2') = 0.970659$$

$$\begin{aligned} (1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 &= (1 - \varepsilon_4') \varepsilon_3' = 0.967836 \times 0.028573 \\ &= 0.027654 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \varepsilon_3 &= (1 - \varepsilon_4')(1 - \varepsilon_3') \varepsilon_2' \\ &= 0.967836 \times 0.971427 \\ &\quad \times 0.029341 = 0.027586 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3) \varepsilon_4 &= (1 - \varepsilon_4')(1 - \varepsilon_3') \\ &\quad \times (1 - \varepsilon_2') \varepsilon_1' = 0.967836 \times 0.971427 \times 0.970659 \\ &\quad \times 0.111344 = 0.104989 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\varepsilon_{a15^\circ})_1 &= \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \varepsilon_3 \\ &= 0.032164 + 0.027654 + 0.027586 \\ &= 0.087404 \end{aligned}$$

$$(\varepsilon_{a15^\circ})_2 = \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \varepsilon_3$$

$$\begin{aligned}
 & + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)\varepsilon_4 = 0.087404 \\
 & + 0.104989 = 0.192393 \\
 (\varepsilon_{\alpha 15^\circ})_3 & = \varepsilon_4 + (1 - \varepsilon_4)\varepsilon_3 + (1 - \varepsilon_4)(1 - \varepsilon_3)\varepsilon_2 \\
 & + (1 - \varepsilon_4)(1 - \varepsilon_3)(1 - \varepsilon_2)\varepsilon_1 = (\varepsilon_{\alpha 15^\circ})_2 \\
 & = 0.192393
 \end{aligned}$$

$$l_1 = 0.646890$$

$$l_2 + l_3 = 0.353110$$

$$\begin{aligned}
 \therefore \varepsilon_{\alpha 15^\circ} & = (\varepsilon_{\alpha 15^\circ})_1 \cdot l_1 + (\varepsilon_{\alpha 15^\circ})_2 \cdot (l_2 + l_3) \\
 & = (0.087404 \times 0.623660) + (0.192393 \\
 & \times 0.376340) = \underline{\underline{0.123272}}
 \end{aligned}$$

$\Phi = 30^\circ$  方向；

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{37.5^\circ} = 0.029341 \quad (1 - \varepsilon_1) = 0.970659$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{7.5^\circ} = 0.028573 \quad (1 - \varepsilon_2) = 0.971427$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{52.5^\circ} = 0.032164$$

$$(1 - \varepsilon_1)\varepsilon_2 = 0.970659 \times 0.028573 = 0.027735$$

$$(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)\varepsilon_3 = 0.970659 \times 0.971427$$

$$\times 0.032164 = 0.030328$$

$$(\varepsilon_{\alpha 30^\circ})_1 = \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1)\varepsilon_2 = 0.029341 + 0.027735$$

$$= 0.057076$$

$$\begin{aligned}
 (\varepsilon_{\alpha 30^\circ})_2 &= \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1)\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)\varepsilon_3 \\
 &= 0.057076 + 0.030328 = 0.087404
 \end{aligned}$$

$$l_1 = 0.278493$$

$$l_2 = 0.721507$$

$$\begin{aligned}
 \therefore \varepsilon_{\alpha 30^\circ} &= (0.057076 \times 0.278493) + (0.087404 \\
 &\quad \times 0.721507) = \underline{0.078958}
 \end{aligned}$$

$\Phi = 45^\circ$  方向；

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{22.5^\circ} = 0.028662 \quad (1 - \varepsilon_1) = 0.971338$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{22.5^\circ} = 0.028662 \quad (1 - \varepsilon_1)\varepsilon_2 = 0.027840$$

$$\begin{aligned}
 \therefore \varepsilon_{\alpha 45^\circ} &= \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1)\varepsilon_2 = 0.028662 + 0.027840 \\
 &= \underline{0.056502}
 \end{aligned}$$

$\Phi = 60^\circ$  方向；

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{7.5^\circ} = 0.028573 \quad (1 - \varepsilon_1) = 0.971427$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{37.5^\circ} = 0.029341 \quad (1 - \varepsilon_1)\varepsilon_2 = 0.028503$$

$$(\varepsilon_{\alpha 60^\circ})_1 = \varepsilon_1 = 0.028573$$

$$(\varepsilon_{\alpha 60^\circ})_2 = \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1)\varepsilon_2 = 0.057006$$

$$l_1 = 0.517639$$

$$l_2 = 0.482361$$

$$\begin{aligned} \therefore \varepsilon_{\alpha 60^\circ} &= (0.028573 \times 0.517639) + (0.057006 \\ &\quad \times 0.482361) = \underline{0.042321} \end{aligned}$$

$$\phi = 75^\circ \quad \text{方向};$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{75^\circ} = 0.028573$$

$$\therefore \varepsilon_{\alpha 75^\circ} = \varepsilon_1 = \underline{0.028573}.$$

以下同様な方法で各削き角について見かけの指向ふく射率を計算し、グラフに示すと図 4.3 (a), (b) および (c) の破線で示すごとくなり、それぞれ  $\alpha = 90$ ,  $70$  および  $50$  の場合である。

## 1.2 第二近似値

第一近似式は方向角  $\phi$  の大きいところで誤差が増大し、 $\phi = 90^\circ$  で指向ふく射率が無限大に達するという矛盾を含んでいるため、第一近似式により計算された  $\nabla$  字みぞ粗面の見かけの指向ふく射率は特定の方向において、とくに  $\alpha$  が小さいときに少なからず誤差を伴う場合がある。

そこで、粗面内面のふく射特性として式(2.24)で示されるより厳密な第二近似式を適用して、第一近似式の場合と同様な方法でV字みぞ粗面の見かけの指向ふく射率を計算して第一近似値との比較を行なった。図4.3(a)、(b)および(c)の実線は第二近似式による計算結果を示す。また、表4.1にはこれらの両近似値両近似値の誤差および誤差率をとりまとめて示す。

図4.3および表4.1によれば、第二近似値は第一近似値より常に小さく、図示された曲線の形状は $\phi = \theta/2$ 方向およびその他の方向に生ずる「ふくらみ」の程度がわずかに減少して、特徴のある起伏がいくぶんうすれている。その傾向は $\theta$ が小さい材料ほど、また $\theta$ が小さいみぞほどはつきりあらわれる。計算値のうち最大の誤差を示すのは、 $\theta = 30^\circ$ 、 $\phi = 0^\circ$ の場合で、各 $\theta$ についていえば誤差および誤差率が最大となる $\phi$ があり、 $\theta$ が大きくなると最大誤差率を示す $\phi$ は大きい方に移行する、 $\theta = 180^\circ$ (平面)の場合を除いて各 $\theta$ にたいする最大誤差率のうちで最大値を示すのは $\theta = 45^\circ$ 、 $\phi = 15^\circ$ の場合である。この理由は、その方向に射出するふく射の中に $\psi$ の大きな反射成分が含まれれば、式(2.25)の式(2.24)に対する誤差が大きくなることから、それらの和として求まるふく射においても誤差率は増大するためで、それはまた $\theta$ と $\phi$ とによって決定される。

いずれにしても、V字みぞ粗面の見かけの指向ふく射率についての両計算値間の誤差率の最大値は、 $\theta = 45^\circ$ 、

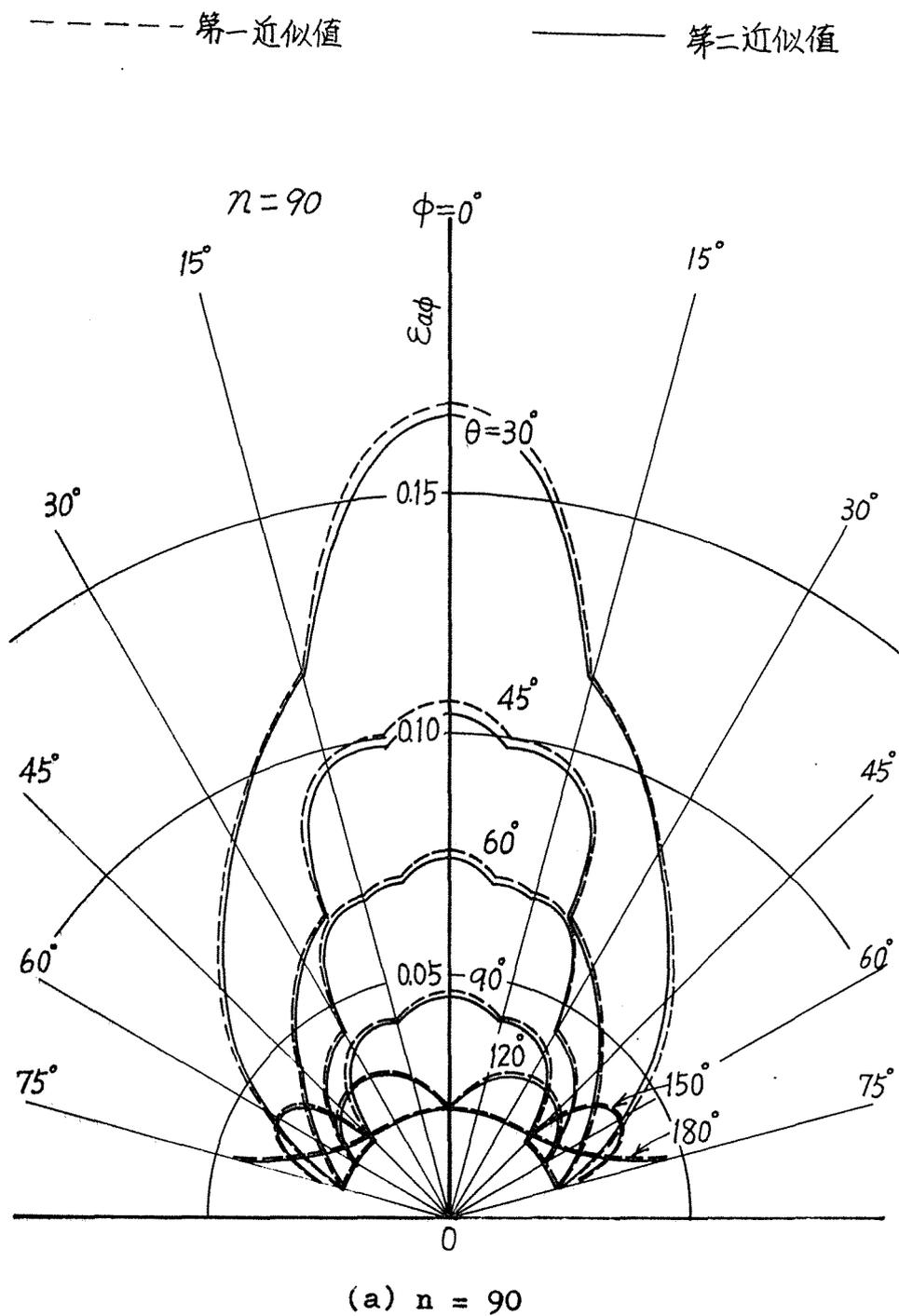


図4.3 V字みぞ粗面の見かけの指向ふく射率計算値

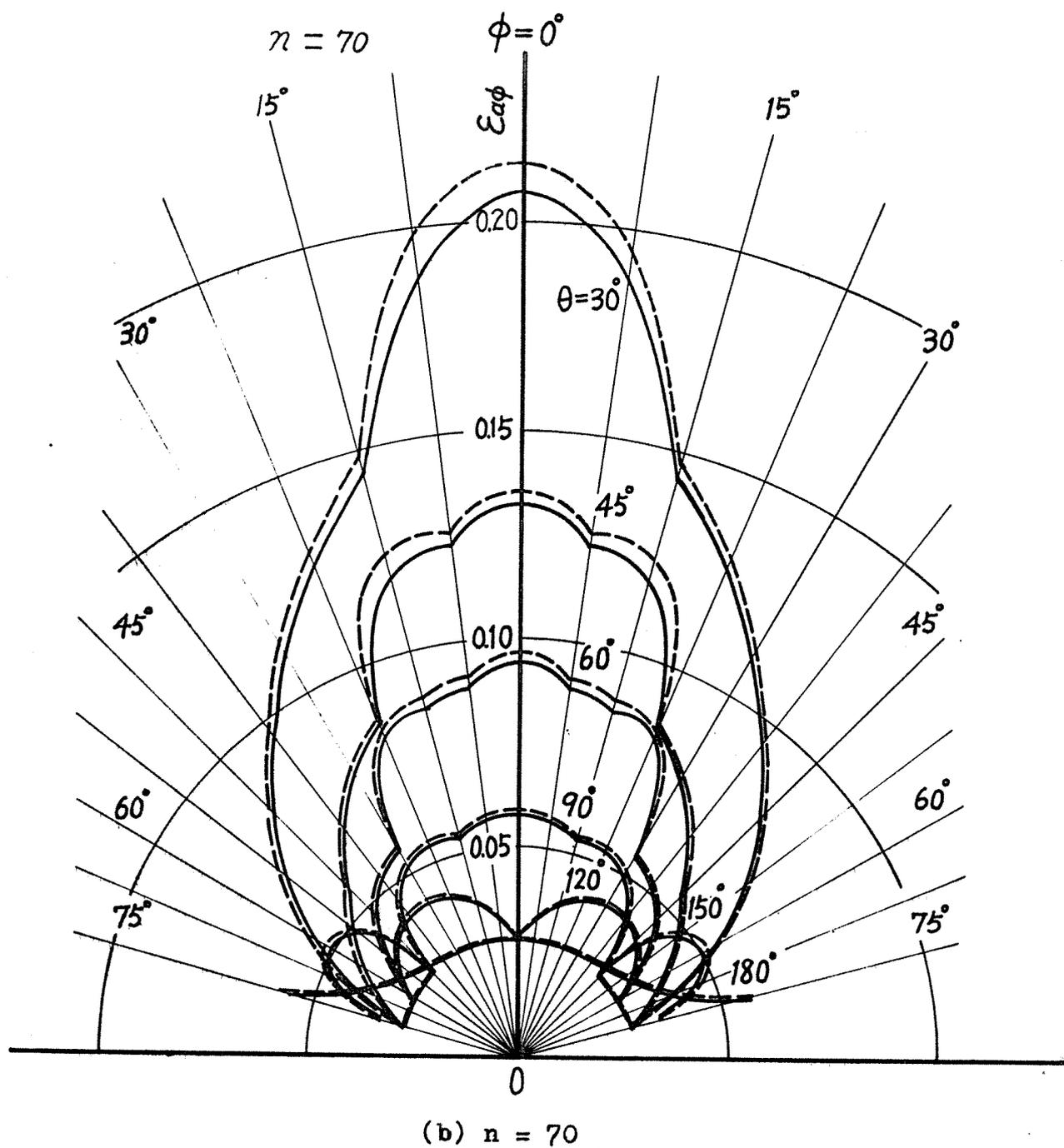


图 4.3 (b)

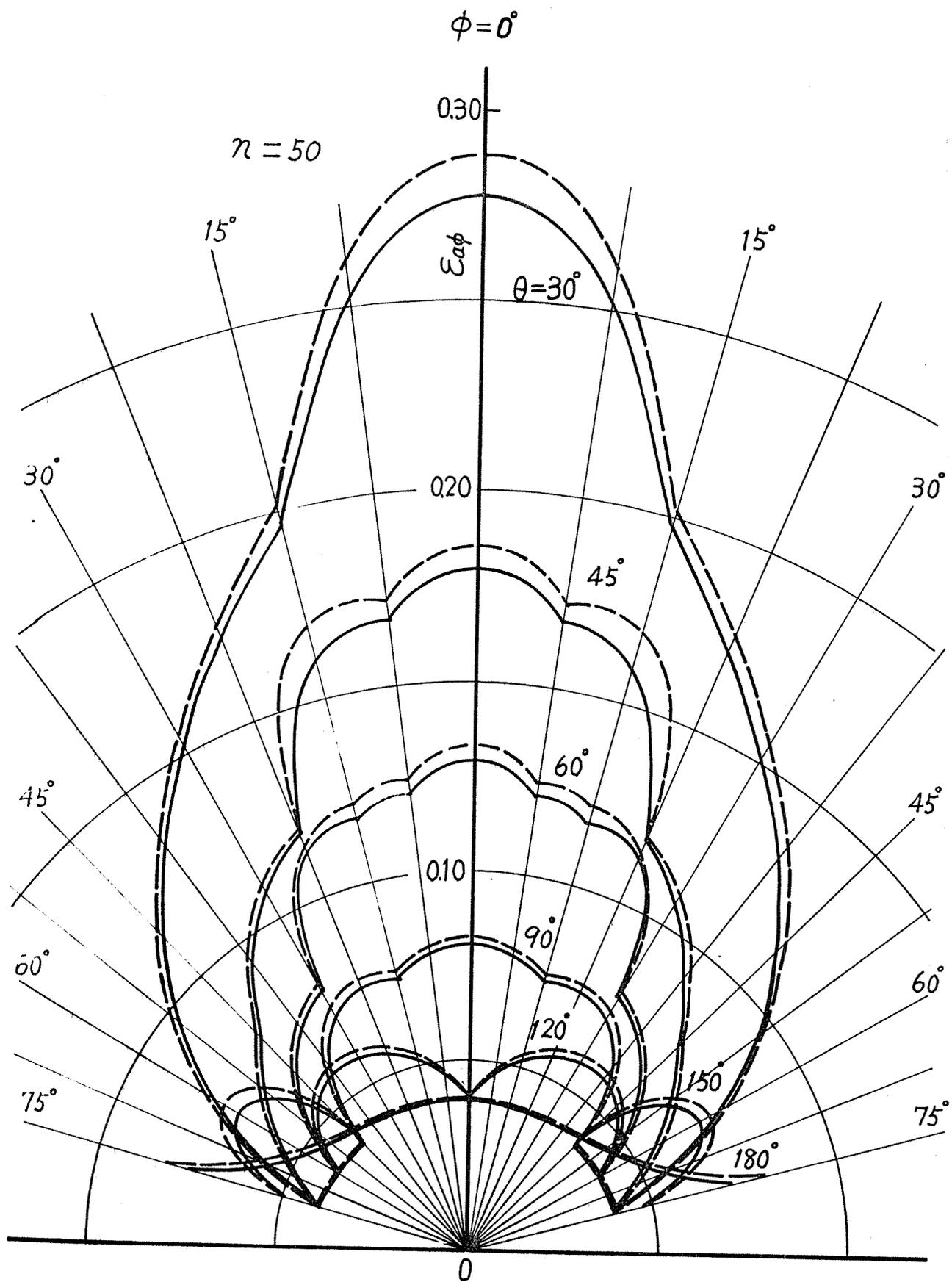
(c)  $n = 50$ 

图 4.3 (C)

表 4.1 V字みぞ粗面の見かけの指向ふく射率(第一近似と第二近似の比較),  $\eta=50$

$\theta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似		
30	0	0.28858	0.27691	0.01167	4.21
	15	0.20222	0.19730	0.00492	2.49
	30	0.15498	0.15182	0.00316	2.08
	45	0.11603	0.11375	0.00228	2.00
	60	0.07845	0.07692	0.00153	1.99
	75	0.04042	0.03958	0.00084	2.12
45	0	0.18574	0.17964	0.00610	3.40
	15	0.16926	0.15998	0.00928	5.80
	30	0.10934	0.10697	0.00237	2.22
	45	0.07864	0.07709	0.00155	2.01
	60	0.05946	0.05783	0.00163	2.82
	75	0.04000	0.03958	0.00080	2.04
60	0	0.13360	0.12983	0.00377	2.90
	15	0.12137	0.11688	0.00449	3.80
	30	0.07920	0.07759	0.00161	2.03
	45	0.06585	0.06447	0.00138	2.14
	60	0.04000	0.03920	0.00080	2.04
	75	0.04002	0.03923	0.00079	2.01
90	0	0.08305	0.08114	0.00191	2.35
	15	0.07560	0.07356	0.00204	2.77
	30	0.07348	0.07037	0.00311	4.40
	45	0.04000	0.03920	0.00080	2.04
	60	0.04002	0.03923	0.00079	2.01
	75	0.04042	0.03958	0.00084	2.12

$\theta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似		
120	0	0.04042	0.03958	0.00084	2.12
	15	0.05325	0.05153	0.00172	3.34
	30	0.05917	0.05757	0.00160	2.78
	45	0.05722	0.05523	0.00199	3.60
	60	0.04042	0.03958	0.00084	2.12
	75	0.04243	0.04143	0.00100	2.41
150	0	0.04002	0.03923	0.00079	2.01
	15	0.04019	0.03938	0.00081	2.06
	30	0.04104	0.04016	0.00088	2.19
	45	0.04392	0.04278	0.00114	2.66
	60	0.07342	0.06984	0.00358	5.13
	75	0.05000	0.04833	0.00167	3.46
180	0	0.04000	0.03920	0.00080	2.04
	15	0.04002	0.03923	0.00079	2.01
	30	0.04042	0.03958	0.00079	2.12
	45	0.04243	0.04143	0.00100	2.41
	60	0.05000	0.04833	0.00167	3.46
	75	0.08245	0.07668	0.00577	7.52

表 4.1 (つづき),  $n = 70$ .

$\theta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似		
30	0	0.21413	0.20763	0.00650	3.13
	15	0.14812	0.14480	0.00332	2.29
	30	0.11269	0.11070	0.00199	1.80
	45	0.08385	0.08265	0.00120	1.45
	60	0.05636	0.05557	0.00079	1.42
	75	0.02857	0.02816	0.00041	1.46
45	0	0.13553	0.13227	0.00326	2.46
	15	0.12328	0.11827	0.00501	4.24
	30	0.07896	0.07771	0.00125	1.61
	45	0.05650	0.05570	0.00080	1.44
	60	0.04225	0.04168	0.00057	1.37
	75	0.02857	0.02816	0.00041	1.46
60	0	0.09672	0.09472	0.00200	2.11
	15	0.08776	0.08538	0.00238	2.79
	30	0.05690	0.05607	0.00083	1.48
	45	0.04725	0.04654	0.00071	1.53
	60	0.02857	0.02816	0.00041	1.46
	75	0.02859	0.02818	0.00041	1.45
90	0	0.05969	0.05869	0.00100	1.70
	15	0.05426	0.05323	0.00103	1.93
	30	0.05277	0.05115	0.00162	3.17
	45	0.02857	0.02816	0.00041	1.46
	60	0.02859	0.02818	0.00041	1.45
	75	0.02887	0.02844	0.00043	1.51

$\theta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似		
120	0	0.02887	0.02844	0.00043	1.51
	15	0.03815	0.03725	0.00090	2.42
	30	0.04243	0.04160	0.00083	2.00
	45	0.04102	0.03999	0.00103	2.58
	60	0.02887	0.02844	0.00043	1.51
	75	0.03031	0.02979	0.00052	1.75
150	0	0.02859	0.02818	0.00041	1.45
	15	0.02871	0.02829	0.00042	1.48
	30	0.02931	0.02886	0.00045	1.56
	45	0.03138	0.03079	0.00059	1.92
	60	0.05282	0.05093	0.00189	3.71
	75	0.03572	0.03485	0.00087	2.50
180	0	0.02857	0.02816	0.00041	1.46
	15	0.02859	0.02818	0.00041	1.45
	30	0.02887	0.02844	0.00043	1.51
	45	0.03031	0.02979	0.00052	1.75
	60	0.03572	0.03485	0.00093	2.50
	75	0.05889	0.05591	0.00298	5.40

表 4.1 (つづき) ,  $n=90$  .

$\theta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似		
30	0	0.17010	0.16598	0.00412	2.44
	15	0.11682	0.11516	0.00166	1.44
	30	0.08851	0.08746	0.00105	1.20
	45	0.06564	0.06489	0.00075	1.16
	60	0.04393	0.04348	0.00050	1.15
	75	0.02245	0.02219	0.00026	1.17
45	0	0.10667	0.10462	0.00205	1.96
	15	0.09692	0.09379	0.00313	3.34
	30	0.06178	0.06101	0.00077	1.26
	45	0.04409	0.04359	0.00050	1.15
	60	0.03296	0.03260	0.00036	1.10
	75	0.02222	0.02197	0.00025	1.14
60	0	0.07579	0.07455	0.00124	1.84
	15	0.06872	0.06725	0.00147	2.19
	30	0.04440	0.04389	0.00051	1.16
	45	0.03685	0.03640	0.00045	1.24
	60	0.02222	0.02197	0.00025	1.14
	75	0.02224	0.02199	0.00025	1.14
90	0	0.04659	0.04598	0.00060	1.31
	15	0.04233	0.04170	0.00063	1.52
	30	0.04166	0.04016	0.00100	2.49
	45	0.02222	0.02197	0.00025	1.14
	60	0.02224	0.02198	0.00026	1.18
	75	0.02245	0.02219	0.00026	1.17

$\theta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似		
120	0	0.02245	0.02219	0.00026	1.17
	15	0.02972	0.02917	0.00055	1.89
	30	0.03308	0.03257	0.00051	1.57
	45	0.03197	0.03133	0.00064	2.04
	60	0.02245	0.02219	0.00026	1.17
	75	0.02357	0.02326	0.00031	1.33
150	0	0.02224	0.02198	0.00026	1.18
	15	0.02233	0.02207	0.00026	1.18
	30	0.02281	0.02252	0.00029	1.29
	45	0.02440	0.02404	0.00036	1.50
	60	0.04124	0.04008	0.00116	2.89
	75	0.02778	0.02725	0.00053	1.95
180	0	0.02222	0.02197	0.00025	1.14
	15	0.02224	0.02198	0.00026	1.18
	30	0.02245	0.02219	0.00026	1.17
	45	0.02357	0.02326	0.00031	1.33
	60	0.02778	0.02725	0.00053	1.94
	75	0.04581	0.04399	0.00182	4.14

$\phi = 15^\circ$  において  $n = 90$  のとき 3.34%、 $n = 70$  のとき 4.24% および  $n = 50$  のとき 5.80% で、それ以外の  $\theta$  および  $\phi$  においては、 $n = 90$  および  $n = 70$  のとき 1~2%、 $n = 50$  のとき 2~3% に過ぎない。

## 2. 金属円弧みぞ粗面の指向ふく射率<sup>65) 69)</sup>

円弧みぞ開口の指向ふく射率を解析する際の座標および記号を図4.4に示す。この場合も、計算法の相違に

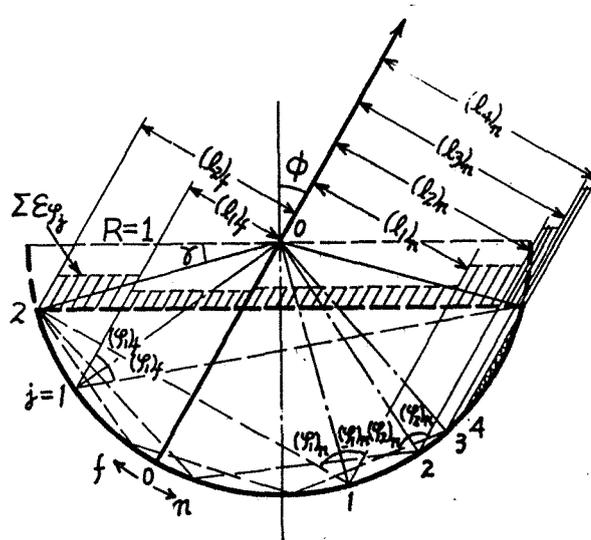


図4.4 円弧みぞモデルの座標と記号

よつて、円弧みを内面のふく射特性として第一近似式を適用して得られる第一近似値と、第二近似式を適用して得られる第二近似値の場合に分けて解析を行なう。

## 2.1 第一近似値

図4.4の円弧みそ内の一点において、その点の法線から測つて $\varphi$ 方向に、同一反射回数( $j-1$ )の反射成分からなるふく射を射出する面素の固有の平均ふく射率 $\varepsilon_{\varphi j}$ は

$$\varepsilon_{\varphi j} = \frac{\int_{\varphi_{j-1}}^{\varphi_j} \varepsilon_{\varphi} d\varphi}{\int_{\varphi_{j-1}}^{\varphi_j} d\varphi} \quad (4.4)$$

となる。

また、ふく射率 $\varepsilon_{\varphi j}$ で最大( $j-1$ )回の反射成分からなるふく射率の総和 $\sum \varepsilon_{\varphi j}$ は、空洞理論によりつぎの多項式であらわされる。

$$\sum \varepsilon_{\varphi j} = \left\{ \varepsilon_{\varphi j} + (1 - \varepsilon_{\varphi j}) \varepsilon_{\varphi j} + (1 - \varepsilon_{\varphi j})^2 \varepsilon_{\varphi j} + \dots \dots \dots \right. \\ \left. \dots \dots + (1 - \varepsilon_{\varphi j})^{j-1} \varepsilon_{\varphi j} \right\} \quad (4.5)$$

ここで、第一項は直接射出の成分、第二項は1回反射の成分、第三項は2回反射の成分………第 $j$ 項は( $j-1$ )

面反射の成分を示している。いま、ふく射率の性質として、 $0 < (1 - \epsilon_{qj}) < 1$  であるから式(4.5)の総和は

$$\sum \epsilon_{qj} = \left\{ 1 - (1 - \epsilon_{qj})^j \right\} \quad (4.6)$$

ただし、 $j = 1, 2, 3, \dots$ ,  
となる。

つぎに、みぞ開口の見かけの指向ふく射率  $\epsilon_{a\phi}$  は、円弧の半径を1として、式(4.6)に  $\epsilon_{qj}$  の面素のみぞ開口面に対する比重  $(l_j - l_{j-1})$  をかけて各面素について総和し、かつ射出方向  $\phi$  についての補正值  $(1/\cos \phi)$  と弦の長さの補正值  $(1/\cos \delta)$  をかけることにより、投影面積一定の条件で算出される。

$$\begin{aligned} \epsilon_{a\phi} &= \frac{1}{\cos \phi \cdot \cos \delta} \sum_1^j \left\{ 1 - (1 - \epsilon_{qj})^j \right\} \cdot (l_j - l_{j-1}) \\ &= \frac{1}{\cos \phi \cdot \cos \delta} \sum_1^j \left\{ 1 - (1 - \epsilon_{qj})^j \right\} \cdot (\sin \phi_j - \sin \phi_{j-1}). \end{aligned} \quad (4.7)$$

ふく射特性の第一近似式(4.2)を式(4.4)に代入して定積分することにより、面素  $(j-1) \sim j$  の固有の平均ふく射率  $\epsilon_{qj}$  が求まる。すなわち

$$\epsilon_{qj} = \frac{\frac{1}{\pi} \int_{\phi_{j-1}}^{\phi_j} (\cos \phi + \frac{1}{\cos \phi}) d\phi}{\int_{\phi_{j-1}}^{\phi_j} d\phi}$$

$$= \frac{\frac{1}{\pi} \cdot \left| \sin \varphi + \log_e \tan \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|_{\varphi_{j-1}}^{\varphi_j}}{\varphi_j - \varphi_{j-1}} \quad (4.8)$$

式(4.8)を式(4.7)に代入して見かけの指向ふく射率  
は

$$\begin{aligned} \epsilon_{a\phi} = & \frac{1}{\cos \phi \cdot \cos \delta} \sum_1^j \left[ 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \frac{\left| \sin \varphi + \log_e \tan \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|_{\varphi_{j-1}}^{\varphi_j}}{\varphi_j - \varphi_{j-1}} \right\}^j \right] \\ & \times (\sin \varphi_j - \sin \varphi_{j-1}) \quad (4.9) \end{aligned}$$

となる。しかし、一般にふく射の射出方向はみそ開口  
にたいして任意の方向であるから、みそは軸O-Oに關  
して 対称とはならず、この場合はみそ内面を射出方向  
からみて遠い面と近い面に分けて、それぞれ f および n  
の添字を付けて示すと、結局

$$\begin{aligned} \epsilon_{a\phi} = & \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{\cos \phi \cdot \cos \delta} \sum_1^j \left[ 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \frac{\left| \sin \varphi + \log_e \tan \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|_{(\varphi_{j-1})_f}^{(\varphi_j)_f}}{(\varphi_j)_f - (\varphi_{j-1})_f} \right\}^j \right] \right. \\ & \times \left\{ \sin (\varphi_j)_f - \sin (\varphi_{j-1})_f \right\} \\ & + \frac{1}{\cos \phi \cdot \cos \delta} \sum_1^j \left[ 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \frac{\left| \sin \varphi + \log_e \tan \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|_{(\varphi_{j-1})_n}^{(\varphi_j)_n}}{(\varphi_j)_n - (\varphi_{j-1})_n} \right\}^j \right] \\ & \left. \times \left\{ \sin (\varphi_j)_n - \sin (\varphi_{j-1})_n \right\} \right) \quad (4.10) \end{aligned}$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} (\varphi_j)_f &= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2j - (1 + \frac{2\phi}{\pi}) + \frac{2\delta}{\pi}}{2j + 1} \leq \frac{\pi}{2} - (\phi + \delta) \\ (\varphi_j)_n &= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2j - (1 - \frac{2\phi}{\pi}) - \frac{2\delta}{\pi}}{2j + 1} \leq \frac{\pi}{2} - |\phi - \delta| \end{aligned} \right\} (4.11)$$

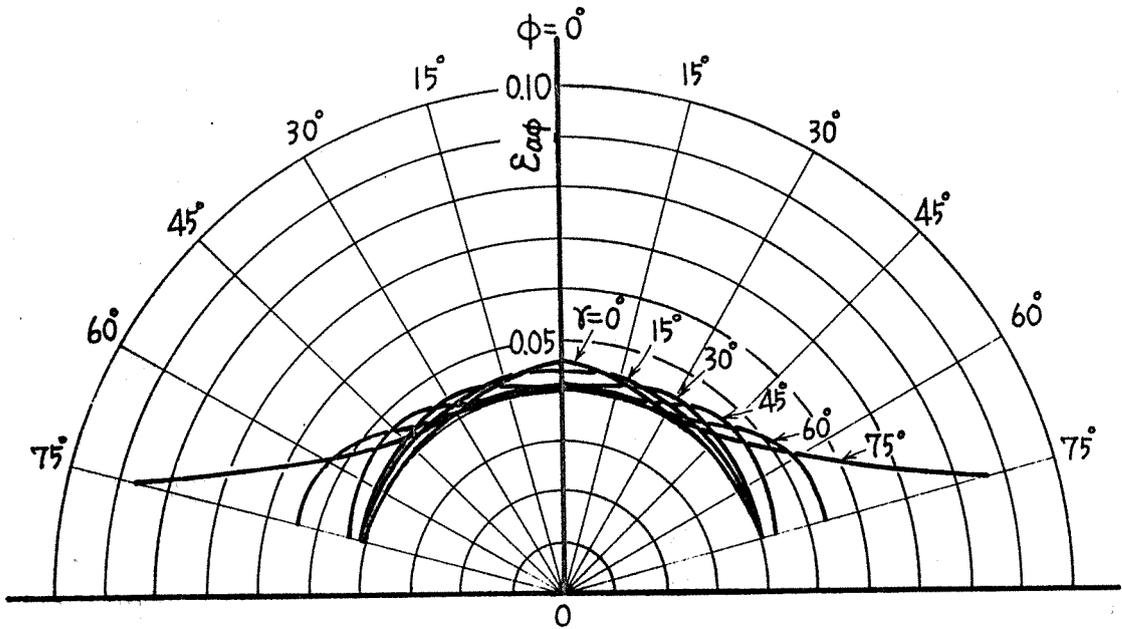
$j = 0$  においては、一般に  $(\varphi_0)_f = (\varphi_0)_n = 0$

$\phi > \frac{\pi}{2} - \delta$  のときは  $(\varphi_0)_n = \phi - (\frac{\pi}{2} - \delta)$

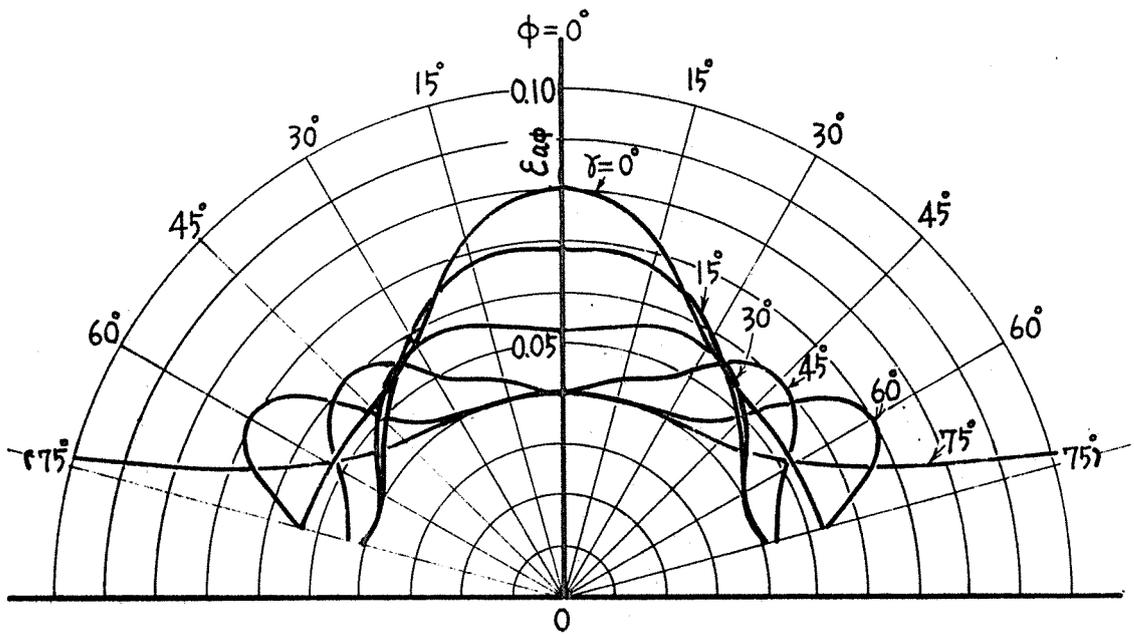
となる。

式(4.10)より、 $j = 1$  すなわち反射成分を全然含まない場合、 $j \leq 3$  最大2面の反射成分を含む場合、および  $j \leq 20$  最大19面の反射成分を含む場合について、見かけの指向性、射率を数値計算し、その結果を示すとそれぞれ図4.5(a)、(b)および(c)のごとくなる。ここでは、いずれも屈折率 $n$ は $n = 50$ として計算している。

また、 $j \leq 3$  の場合について、 $n = 70$  および  $n = 90$  として計算した結果が図4.6(a)および(b)である。 $n = 50$ ,  $\delta = 15^\circ$ ,  $\phi = 15^\circ$ ,  $j \leq 3$  の場合の計算例を付録2に示す。



(a)  $n = 50, j = 1 .$



(b)  $n = 50, j \leq 3 .$

図 4. 5 円弧みぞ粗面の指向ふく射率 (第一近似値)

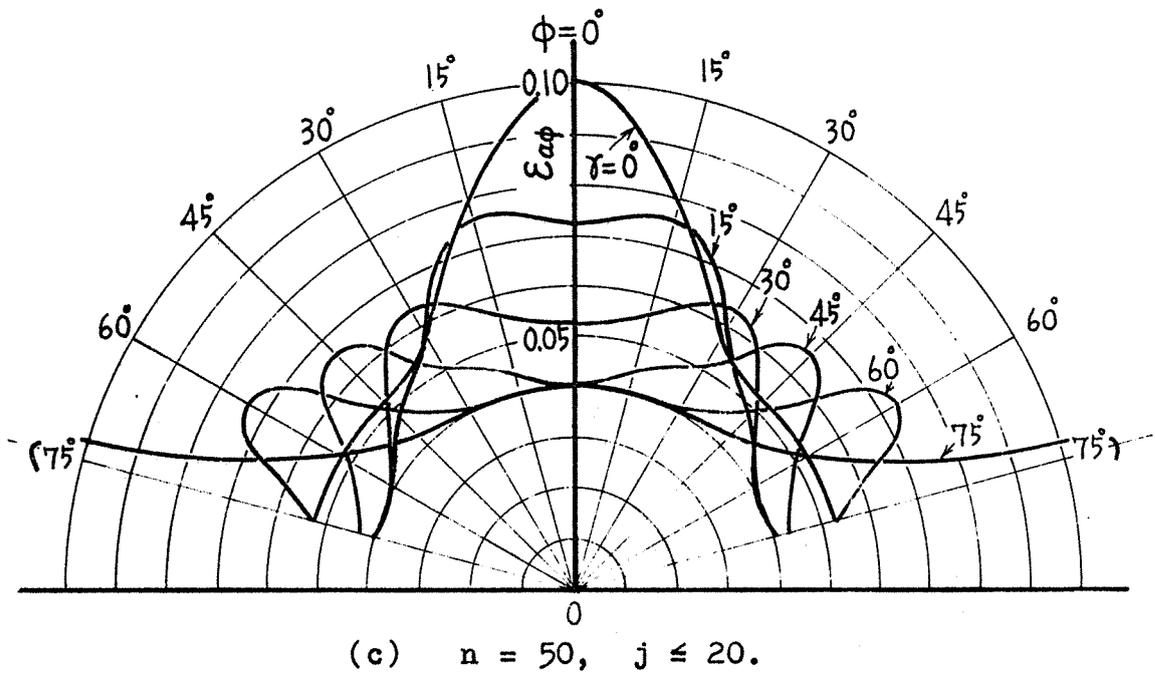


図 4.5 円弧みぞ粗面の指向ぶく射率 (第一近似値)

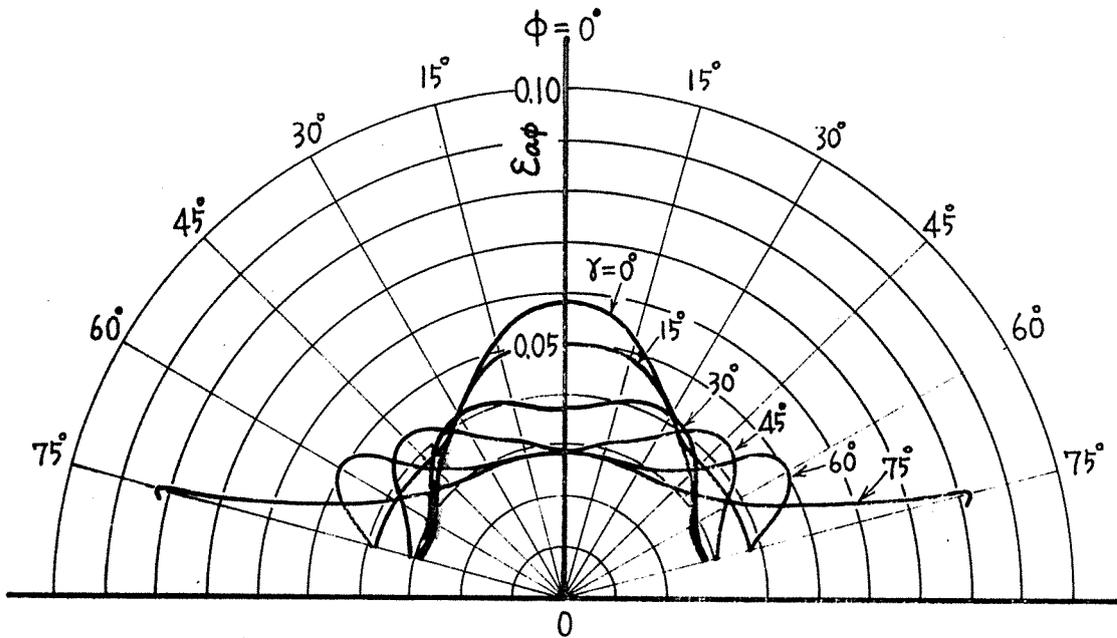
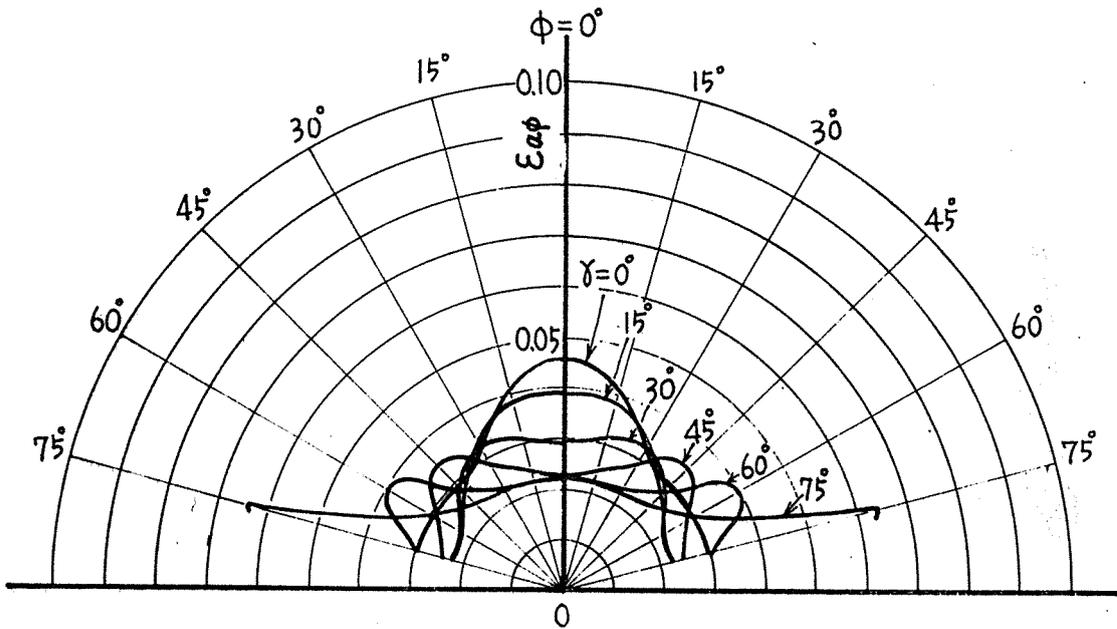
(a)  $n = 70, j \leq 3$ .(b)  $n = 90, j \leq 3$ .

図 4.6 円弧みぞ粗面の指向ふく射率 (第一近似値)

## 2. 2 第二近似値

円弧みそ内面のふく射特性として第二近似式を適用する場合には、式(4.3)の積分は困難であるから、ここでは式(4.4)による定積分のかわりに、つぎに示す式(4.12)に代入し、数値積分によって同一反射回数からなる面素の固有の平均ふく射率  $\varepsilon_{\varphi_j}$  を計算する。

$$\varepsilon_{\varphi_j} = \sum_{\varphi_{j-1}}^{\varphi_j} \varepsilon_{\varphi} \cdot \Delta\varphi / (\varphi_j - \varphi_{j-1}), \quad (4.12)$$

ここで、積分変数  $\Delta\varphi = 0.01$  とする。

式(4.12)によって  $\varepsilon_{\varphi_j}$  が求まれば、円弧みそ開口の見かけの指向ふく射率  $\varepsilon_{a\phi}$  は第一近似値の計算の場合と同様に、式(4.6)をへて式(4.7)から

$$\begin{aligned} \varepsilon_{a\phi} = & \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\cos\phi \cdot \cos\delta} \sum_1^j \left[ 1 - \left\{ 1 - (\varepsilon_{\varphi_j})_f \right\}^j \right] \cdot \left\{ \sin(\varphi_j)_f - \sin(\varphi_{j-1})_f \right\} \right. \\ & \left. + \frac{1}{\cos\phi \cdot \cos\delta} \sum_1^j \left[ 1 - \left\{ 1 - (\varepsilon_{\varphi_j})_n \right\}^j \right] \cdot \left\{ \sin(\varphi_j)_n - \sin(\varphi_{j-1})_n \right\} \right) \end{aligned} \quad (4.13)$$

ここで、 $(\varphi_j)_f$  および  $(\varphi_j)_n$  については条件式(4.11)がそのまま適用される。

なお、計算の際にみぞ内面の反射回数は、円弧みぞ粗面の指向ふく射率の計算値と実験値の比較から<sup>69)</sup>、 $f > 3$ の面素にたいしては $f = 3$ でうち切り、最大反射回数( $f - 1$ )は2回までとする。

円弧みぞ粗面の見かけの指向ふく射率の計算結果を $\eta = 90, 70, 50, 30, 20$  および  $15$  の場合について、図4.7(a), (b) および (c) の実線で示す。図中の破線は第一近似値を示す。

両者の曲線の傾向は近似するが、V字みぞの粗面の場合と同様に、第二近似値は第一近似値より常に小さく、その誤差は $\eta$ が小さいほど大きい。

各 $\eta$ について最大誤差率を示す方向角は、曲線の「ふくらみ」の生ずる $\phi = \theta$ の方向で、第二近似値の曲線のふくらみの程度は第一近似値のそれより減少する。 $\eta = 90$ の材料における最大誤差率は $\theta = 75^\circ$ の $\phi = 75^\circ$ 方向で生じ、その値は14.5%であるのにたいし、 $\eta = 15$ における最大誤差率は $\phi = \theta = 75^\circ$ で30.4%の値を示す。その他の $\theta$ においても $\phi = \theta$ の方向で大きな誤差率を示すが、この値より小さい。

式(4.12)の計算プログラムを付録3に示す。

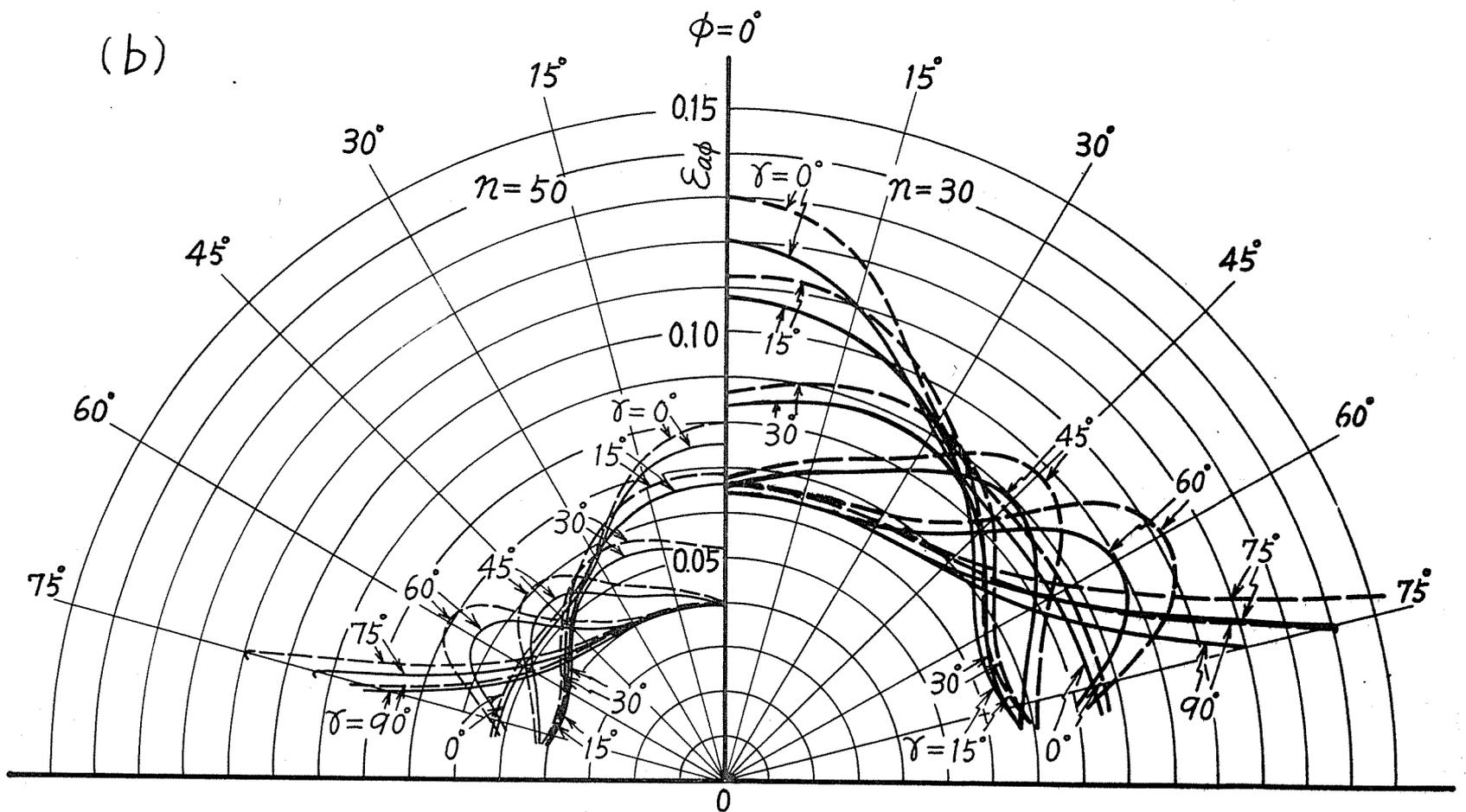
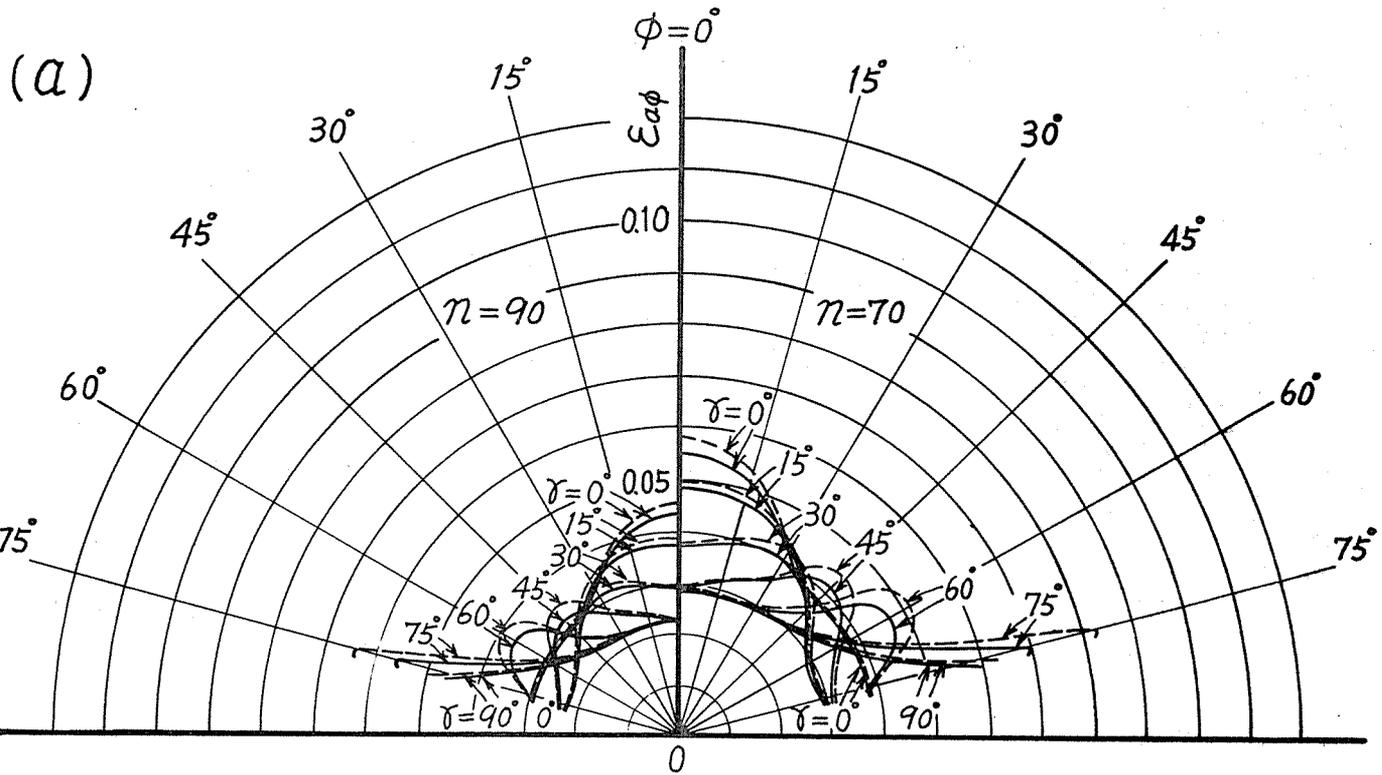


図 4.7 円弧みぞ粗面の指向なく射率 (実線—第2近似値、破線—第1近似値)

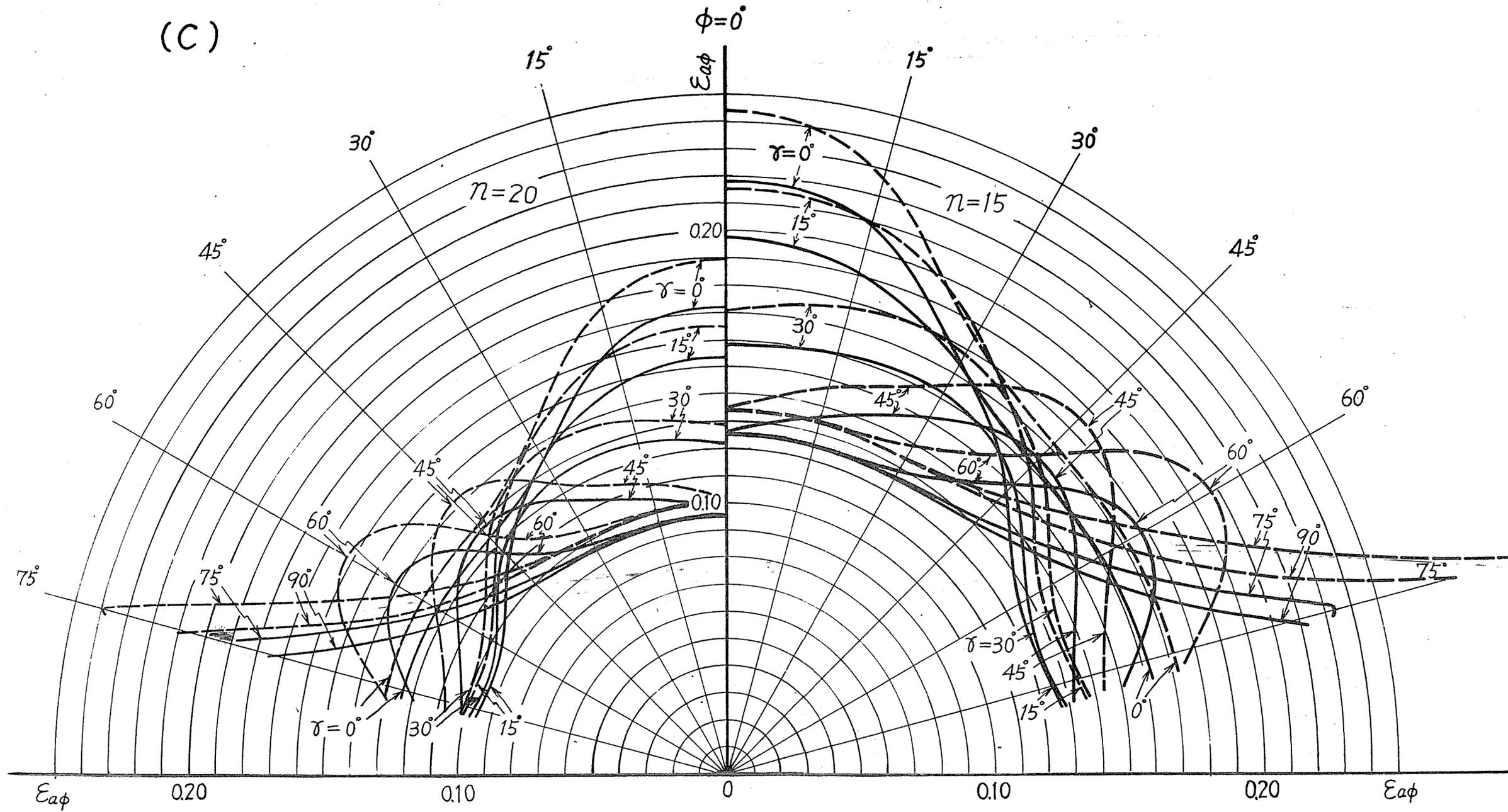


図 4.7 円弧みぞ粗面の指向ふく射率 (実線—第二近似値、破線—第一近似値)

### 3. 金属ランダム粗面の指向ふく射率

70)~72)

金属平面をなんらかの方法を用いて任意のあらかの粗面にした場合、一般に平面のときより垂直ふく射率は増大し、指向ふく射率の値に変化があらわれることが知られている<sup>12) 35)</sup>。

本論文において、このような任意のあらかの粗面をかりにランダム粗面と称し、その凹凸を模型化して円弧みぞとみなし、種々の深さの円弧みぞが一定の割合で分布したものと考へて、見かけの指向ふく射率の計算を行なう。計算に際して、各単種の円弧みぞ粗面の見かけの指向ふく射率は、第一近似値および第二近似値として前節で既に求められているので、ランダム粗面の見かけの指向ふく射率は、各単種の円弧みぞ粗面のそれらの値に分布密度を掛けて、重ね合せることによつて得られる。

そこで、ランダム粗面を構成する円弧みぞ粗面は $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  および  $90^\circ$  の7種類からなるものとし、簡単のために平均値0、分散1の正規分布<sup>17) 19)</sup>をしたものと仮定する。すなわち、変数 $\xi$ の確率密度 $P(\xi)$ は

$$P(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2}}, \quad (4.14)$$

ここで、 $\xi = 1$  が  $\delta = 30^\circ$  に対応するものとする。

式 (4.14) により各  $\delta$  の確率密度  $P(\xi)$  が求まれば、その総和が 1 になるように比例配分によって分布割合を決定し、分布密度  $W_\delta$  とする。図 4.8 にはこのような方法で計算された各粗面の分布密度を示す。図において、最大分布密度が  $\delta$  に相当する分布曲線を記号  $\hat{\delta}$  で示してある。

金属ランダム粗面の見かけの指向ふく射率  $\xi_a$  中の計算結果を図 4.9 および表 4.2 に示す。図の破線は第一近似値を、実線は第二近似値を示し、両曲線の傾向は一致するものの、その値は第二近似値は第一近似値より常に小さく、とくに  $R$  が小さい材料においてあらかの減少 ( $\hat{\delta}$  の増大) に伴って中の大きい方向でその差が大きくなる。

$\delta$  が  $90^\circ$  から  $0^\circ$  に移行するに従って深いみその分布割合が増し、両曲線の傾向は、垂直ふく射率は増大し指向ふく射率は中の大きいところで着しく減少する。 $\delta = 30^\circ \sim 45^\circ$  で曲線の形状はほぼ半円に近くなる。

表 4.2 は第一近似値、第二近似値、両値の誤差および誤差率を示す。この数値によれば、 $R \geq 50$  の材料の誤差率は数パーセント以下の小さな値であるが、 $R$  の減少とともに増大し、計算値のうちの最大誤差率を上げれば、 $R = 15$  の  $\delta = 90^\circ$  の粗面において  $\theta = 75^\circ$  で約 27% を示す。

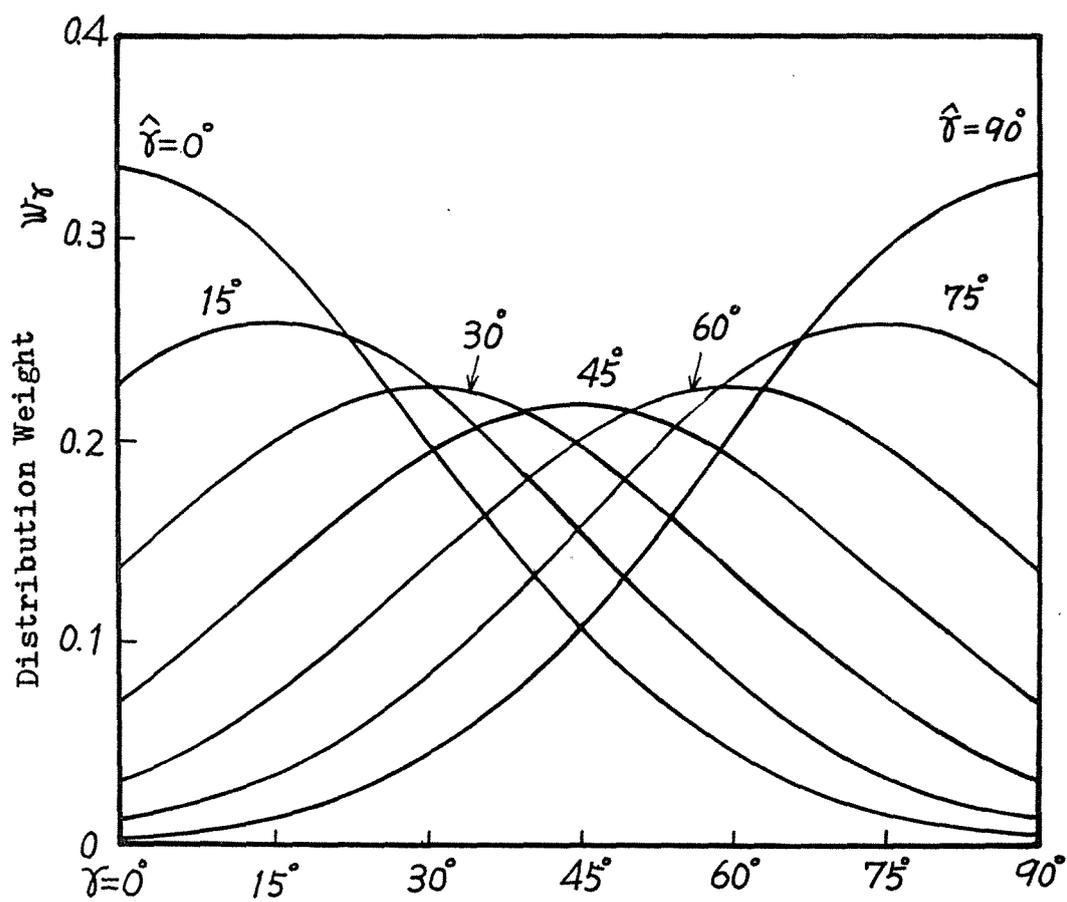


図 4.8 深さの異なる円弧みその分布密度.

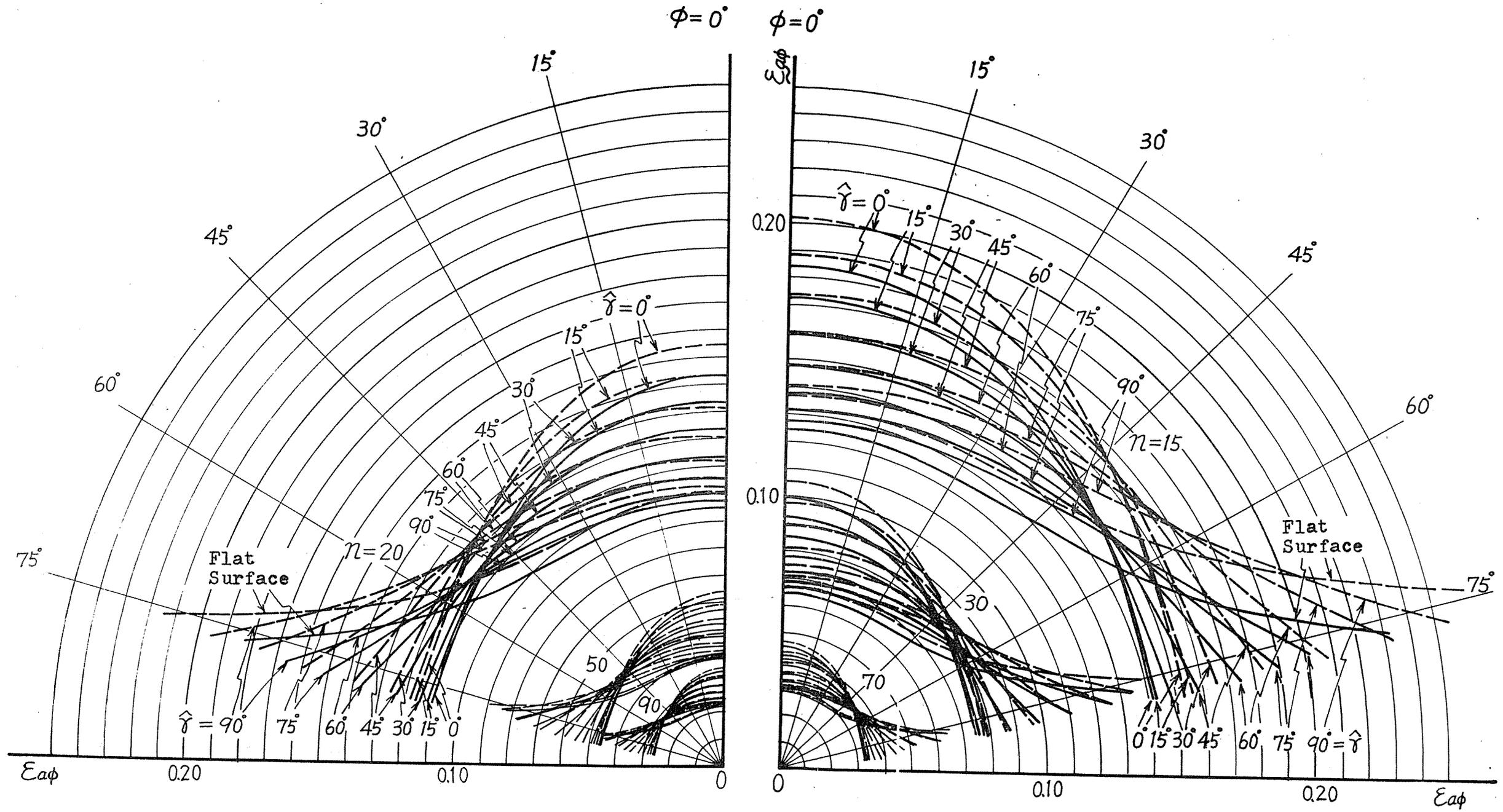


図 4.9 金属ランダム粗面の指向なく射率

(破線 — 第一近似値, 実線 — 第二近似値)

表 4.2 金属ランダム粗面の指向ふく射率,  $n=90$ .

$\theta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)	$\theta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似					第一近似	第二近似		
0	0	0.03619	0.03512	0.00107	3.05	60	0	0.02504	0.02477	0.00027	1.09
	15	0.03526	0.03438	0.00088	2.56		15	0.02572	0.02532	0.00040	1.58
	30	0.03145	0.03092	0.00053	1.71		30	0.02627	0.02570	0.00057	2.22
	45	0.02886	0.02827	0.00059	2.09		45	0.02790	0.02711	0.00079	2.91
	60	0.02635	0.02594	0.00041	1.58		60	0.02990	0.02890	0.00100	3.46
	75	0.02585	0.02547	0.00038	1.49		75	0.03609	0.03391	0.00213	6.27
15	0	0.03333	0.03250	0.00083	2.55	75	0	0.02538	0.02339	0.00019	0.81
	15	0.03306	0.03227	0.00079	2.45		15	0.02418	0.02385	0.00033	1.38
	30	0.03062	0.03002	0.00060	2.00		30	0.02493	0.02442	0.00051	2.09
	45	0.02896	0.02825	0.00071	2.51		45	0.02698	0.02630	0.00068	2.59
	60	0.02676	0.02624	0.00052	1.98		60	0.03046	0.02941	0.00105	3.57
	75	0.02653	0.02596	0.00057	2.20		75	0.04050	0.03775	0.00275	7.28
30	0	0.03023	0.02962	0.00070	2.36	90	0	0.02279	0.02263	0.00016	0.71
	15	0.03050	0.02984	0.00066	2.21		15	0.02325	0.02297	0.00028	1.22
	30	0.02939	0.02876	0.00063	2.19		30	0.02398	0.02352	0.00046	1.96
	45	0.02893	0.02812	0.00081	2.88		45	0.02606	0.02551	0.00055	2.16
	60	0.02766	0.02698	0.00068	2.52		60	0.03050	0.02947	0.00103	3.50
	75	0.02842	0.02749	0.00093	3.38		75	0.04413	0.04095	0.00318	7.77
45	0	0.02731	0.02690	0.00041	1.52	Flat	0	0.02222	0.02197	0.00025	1.14
	15	0.02791	0.02739	0.00052	1.90		15	0.02224	0.02198	0.00026	1.18
	30	0.02785	0.02724	0.00061	2.24		30	0.02245	0.02219	0.00026	1.18
	45	0.02860	0.02775	0.00085	3.06		45	0.02357	0.02326	0.00031	1.33
	60	0.02885	0.02799	0.00086	3.07		60	0.02778	0.02725	0.00053	1.95
	75	0.03175	0.03027	0.00148	4.89		75	0.04581	0.04399	0.00182	4.14

表 4.2 (つつき),  $\alpha = 70$ .

$\phi$ (deg)	$\theta$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)	$\phi$ (deg)	$\theta$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似					第一近似	第二近似		
0	0	0.04641	0.04481	0.00160	3.57	60	0	0.03233	0.03170	0.00063	1.99
	15	0.04519	0.04358	0.00134	3.06		15	0.03315	0.03239	0.00076	2.35
	30	0.04039	0.03953	0.00086	2.18		30	0.03372	0.03291	0.00081	2.46
	45	0.03718	0.03621	0.00097	2.68		45	0.03589	0.03474	0.00115	3.31
	60	0.03397	0.03316	0.00081	2.44		60	0.03843	0.03648	0.00159	4.32
	75	0.03342	0.03264	0.00078	2.39		75	0.04644	0.04293	0.00351	8.18
15	0	0.04280	0.04149	0.00131	3.16	75	0	0.03048	0.02995	0.00053	1.77
	15	0.04241	0.04119	0.00122	2.96		15	0.03119	0.03053	0.00066	2.16
	30	0.03932	0.03839	0.00093	2.42		30	0.03198	0.03128	0.00061	1.95
	45	0.03728	0.03618	0.00110	3.04		45	0.03470	0.03369	0.00101	3.00
	60	0.03449	0.03352	0.00097	2.89		60	0.03912	0.03749	0.00172	4.59
	75	0.03426	0.03318	0.00108	3.26		75	0.05208	0.04762	0.00446	9.37
30	0	0.03887	0.03784	0.00103	2.72	90	0	0.02947	0.02900	0.00047	1.62
	15	0.03917	0.03811	0.00106	2.78		15	0.03001	0.02941	0.00060	2.04
	30	0.03775	0.03679	0.00096	2.61		30	0.03074	0.03031	0.00043	1.42
	45	0.03723	0.03602	0.00121	3.36		45	0.03352	0.03266	0.00086	2.63
	60	0.03562	0.03444	0.00118	3.43		60	0.03961	0.03759	0.00157	4.18
	75	0.03665	0.03502	0.00163	4.65		75	0.05673	0.05159	0.00516	10.00
45	0	0.03519	0.03440	0.00079	2.30	Flat	0	0.02857	0.02816	0.00041	1.46
	15	0.03591	0.03501	0.00090	2.57		15	0.02859	0.02818	0.00041	1.45
	30	0.03576	0.03485	0.00091	2.61		30	0.02887	0.02844	0.00043	1.51
	45	0.03679	0.03556	0.00123	3.46		45	0.03031	0.02979	0.00052	1.75
	60	0.03711	0.03570	0.00141	3.95		60	0.03571	0.03485	0.00086	2.47
	75	0.04089	0.03841	0.00248	6.46		75	0.05889	0.05591	0.00298	5.33

表 4.2 (つづき),  $n=50$ .

合 (deg)	中 (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)	合 (deg)	中 (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似					第一近似	第二近似		
0	0	0.06444	0.06172	0.00272	4.41	60	0	0.04518	0.04395	0.00123	2.80
	15	0.06175	0.06052	0.00123	2.03		15	0.04496	0.04491	0.00005	0.11
	30	0.05616	0.05441	0.00175	3.22		30	0.04701	0.04528	0.00173	3.82
	45	0.05178	0.05011	0.00167	3.33		45	0.04993	0.04791	0.00202	4.22
	60	0.04743	0.04602	0.00141	3.06		60	0.05368	0.05091	0.00277	5.44
	75	0.04672	0.04523	0.00149	3.29		75	0.06394	0.05900	0.00494	8.37
15	0	0.05952	0.05724	0.00228	3.98	75	0	0.04264	0.04155	0.00109	2.62
	15	0.05764	0.05689	0.00075	1.32		15	0.04260	0.04238	0.00022	0.52
	30	0.05467	0.05277	0.00190	3.60		30	0.04464	0.04316	0.00148	3.43
	45	0.05187	0.05001	0.00186	3.72		45	0.04834	0.04650	0.00184	3.96
	60	0.04815	0.04648	0.00167	3.59		60	0.05467	0.05178	0.00289	5.58
	75	0.04778	0.04594	0.00184	4.01		75	0.07151	0.06528	0.00623	9.54
30	0	0.05415	0.05231	0.00184	3.52	90	0	0.04126	0.04024	0.00102	2.54
	15	0.05302	0.05270	0.00032	0.61		15	0.04129	0.04085	0.00044	1.08
	30	0.05250	0.05053	0.00197	3.90		30	0.04295	0.04169	0.00126	3.02
	45	0.05176	0.04973	0.00203	4.08		45	0.04676	0.04513	0.00163	3.61
	60	0.04975	0.04769	0.00206	4.32		60	0.05474	0.05192	0.00283	5.45
	75	0.05093	0.04840	0.00253	5.23		75	0.07783	0.07062	0.00721	10.21
45	0	0.04911	0.04764	0.00147	3.09	Flat	0	0.04000	0.03920	0.00080	2.04
	15	0.04854	0.04848	0.00006	0.12		15	0.04002	0.03923	0.00079	2.01
	30	0.04979	0.04787	0.00192	4.01		30	0.04041	0.03958	0.00083	2.10
	45	0.05114	0.04904	0.00210	4.28		45	0.04243	0.04143	0.00100	2.41
	60	0.05183	0.04937	0.00246	4.98		60	0.05000	0.04833	0.00167	3.46
	75	0.05655	0.05292	0.00363	6.86		75	0.08245	0.07668	0.00577	7.53

表 4.2 (つづき),  $n = 30$ .

$\delta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)	$\delta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似					第一近似	第二近似		
0	0	0.10541	0.09961	0.00580	5.82	60	0	0.07481	0.07208	0.00273	3.79
	15	0.10283	0.09667	0.00616	6.37		15	0.07644	0.07339	0.00305	4.16
	30	0.09194	0.08859	0.00335	3.78		30	0.07775	0.07441	0.00334	4.49
	45	0.08538	0.08163	0.00375	4.59		45	0.08238	0.07793	0.00445	5.71
	60	0.07846	0.07521	0.00325	4.32		60	0.08824	0.08220	0.00604	7.35
	75	0.07717	0.07406	0.00311	4.20		75	0.10426	0.09410	0.01016	10.80
15	0	0.09761	0.09272	0.00489	5.27	75	0	0.07074	0.06832	0.00242	3.54
	15	0.09674	0.09138	0.00536	5.87		15	0.07214	0.06950	0.00264	3.80
	30	0.08967	0.08606	0.00361	4.19		30	0.07406	0.07102	0.00304	4.28
	45	0.08546	0.08136	0.00410	5.04		45	0.07992	0.07577	0.00415	5.48
	60	0.07955	0.07576	0.00379	5.00		60	0.08992	0.08355	0.00637	7.62
	75	0.07885	0.07499	0.00386	5.15		75	0.11627	0.10342	0.01285	12.43
30	0	0.08910	0.08509	0.00401	4.71	90	0	0.06852	0.06627	0.00225	3.40
	15	0.08966	0.08516	0.00450	5.28		15	0.06954	0.06713	0.00241	3.59
	30	0.08632	0.08261	0.00371	4.49		30	0.07141	0.06864	0.00277	4.28
	45	0.08524	0.08083	0.00441	5.46		45	0.07748	0.07370	0.00378	5.13
	60	0.08201	0.07747	0.00454	5.86		60	0.09022	0.08384	0.00638	7.61
	75	0.08379	0.07852	0.00527	6.71		75	0.12643	0.11140	0.01503	13.49
45	0	0.08108	0.07782	0.00326	4.19	Flat	0	0.06667	0.06448	0.00219	3.40
	15	0.08250	0.07782	0.00326	4.68		15	0.06670	0.06451	0.00219	3.39
	30	0.08210	0.07849	0.00361	4.60		30	0.06736	0.06508	0.00228	3.50
	45	0.08426	0.07970	0.00456	5.72		45	0.07071	0.07876	0.00272	4.00
	60	0.08582	0.07991	0.00591	7.40		60	0.08333	0.07876	0.00457	5.80
	75	0.09261	0.08516	0.00745	8.74		75	0.13742	0.12181	0.01561	12.82

表 4.2 (つづき),  $n = 20$ .

$\theta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)	$\theta$ (deg)	$\phi$ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似					第一近似	第二近似		
0	0	0.15471	0.14329	0.01142	7.97	60	0	0.11170	0.10556	0.00614	5.82
	15	0.15226	0.14116	0.01110	7.86		15	0.11414	0.10760	0.00654	6.08
	30	0.13660	0.12345	0.00815	6.34		30	0.11584	0.10872	0.00802	7.38
	45	0.12686	0.12845	0.00789	6.63		45	0.12237	0.11343	0.00894	7.88
	60	0.11704	0.11012	0.00692	5.82		60	0.13066	0.11891	0.01195	9.88
	75	0.11528	0.10843	0.00685	6.32		75	0.15285	0.13283	0.02002	15.07
15	0	0.14381	0.13387	0.00994	7.43	75	0	0.10592	0.10037	0.00555	5.53
	15	0.14334	0.13336	0.00998	7.48		15	0.10803	0.10213	0.00590	5.78
	30	0.13313	0.12484	0.00829	6.64		30	0.11058	0.10409	0.00649	6.24
	45	0.12648	0.11842	0.00842	7.11		45	0.11898	0.11050	0.00848	7.67
	60	0.11848	0.11068	0.00780	7.05		60	0.13321	0.12074	0.01247	10.33
	75	0.11753	0.10930	0.00823	7.53		75	0.16976	0.14462	0.02518	17.38
30	0	0.13187	0.12344	0.00843	6.83	90	0	0.10276	0.09753	0.00523	5.53
	15	0.13308	0.12435	0.00873	7.02		15	0.10437	0.09883	0.00554	5.61
	30	0.12817	0.12001	0.00816	6.80		30	0.10682	0.10085	0.00597	5.92
	45	0.12542	0.11753	0.00889	7.56		45	0.11561	0.10771	0.00790	7.33
	60	0.12185	0.11279	0.00906	8.03		60	0.13385	0.12122	0.01263	10.42
	75	0.12434	0.11350	0.01084	9.55		75	0.18436	0.15488	0.02948	19.03
45	0	0.12058	0.11346	0.00712	6.28	Flat	0	0.10000	0.09512	0.00488	5.13
	15	0.12280	0.11528	0.00752	6.52		15	0.10006	0.09517	0.00489	5.14
	30	0.12205	0.11431	0.00774	6.77		30	0.10104	0.09596	0.00508	5.29
	45	0.12499	0.11589	0.00910	7.85		45	0.10607	0.10001	0.00606	6.06
	60	0.12643	0.11591	0.01052	9.08		60	0.12500	0.11488	0.01012	8.81
	75	0.13658	0.12166	0.01492	12.26		75	0.20613	0.17219	0.03394	19.71

表4.2 (つづき),  $n = 15$

φ (deg)	θ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)	φ (deg)	θ (deg)	指向ふく射率		誤差	誤差率 (%)
		第一近似	第二近似					第一近似	第二近似		
0	0	0.20194	0.18403	0.01791	9.73	60	0	0.14819	0.13776	0.01403	7.57
	15	0.19779	0.18079	0.01720	9.51		15	0.15116	0.13967	0.01149	8.23
	30	0.17952	0.16595	0.01375	8.18		30	0.15288	0.14138	0.01150	8.13
	45	0.16753	0.15439	0.01314	8.51		45	0.16167	0.14702	0.01465	9.96
	60	0.15516	0.14314	0.01202	8.40		60	0.17230	0.15313	0.01917	12.58
	75	0.15304	0.14142	0.01162	8.22		75	0.20075	0.16893	0.03182	18.84
15	0	0.18840	0.17253	0.01587	9.20	75	0	0.14087	0.13136	0.00953	7.25
	15	0.18719	0.17108	0.01611	9.42		15	0.14346	0.13311	0.01035	7.78
	30	0.17500	0.16137	0.01363	8.45		30	0.14619	0.13571	0.01048	7.72
	45	0.16736	0.15350	0.01386	9.03		45	0.15751	0.14345	0.01406	9.80
	60	0.15689	0.14381	0.01308	9.10		60	0.17574	0.15534	0.02042	13.15
	75	0.15591	0.14216	0.01375	9.67		75	0.22241	0.18258	0.03989	21.82
30	0	0.17351	0.15975	0.01376	8.61	90	0	0.13685	0.12783	0.00902	7.06
	15	0.17465	0.16000	0.01465	9.16		15	0.13877	0.12916	0.00961	7.44
	30	0.16862	0.15532	0.01330	8.56		30	0.14143	0.13176	0.00967	7.34
	45	0.16673	0.15221	0.01452	9.54		45	0.15338	0.14009	0.01329	9.49
	60	0.16108	0.14609	0.01499	10.26		60	0.17687	0.15598	0.02089	13.39
	75	0.16456	0.14679	0.01777	12.11		75	0.24127	0.19455	0.04672	24.01
45	0	0.15936	0.14749	0.01187	8.05	Flat	0	0.13333	0.12474	0.00859	6.89
	15	0.16195	0.14895	0.01300	8.73		15	0.13342	0.12480	0.00862	6.91
	30	0.16080	0.14826	0.01254	8.46		30	0.13472	0.12577	0.00859	7.12
	45	0.16496	0.15007	0.01483	9.88		45	0.14142	0.13077	0.01065	8.14
	60	0.16684	0.14963	0.01721	11.50		60	0.16667	0.14879	0.01788	12.02
	75	0.18007	0.15608	0.02399	15.37		75	0.27484	0.21651	0.05833	26.94

#### 4. 非金属ランダム粗面の指向ふく射率<sup>70) 73)</sup>

非金属の任意の粗面をランダム粗面と称し、金属の場合と同様に種々の深さの円弧みそが一定の割合で分布したものとみなして、まず各単種の円弧みその見かけの指向ふく射率を求め、つぎにそれらの値にそれぞれの分布密度をかけて重ね合せることによつて非金属ランダム粗面の見かけの指向ふく射率が計算される。

非金属平面のふく射特性式は、Fresnel の反射特性式から式 (2.34) のように誘導される。円弧みそ粗面の指向ふく射率は式 (2.34) をみそ内面に適用して、金属ランダム粗面の場合と同様な手法を用いて解析される。その際、計算の便宜上、式 (2.34) をつぎに示す式 (4.15) のように変形した後、式 (4.12) に代入して同一反射面数の面素の指向ふく射率  $\varepsilon_{\varphi_i}$  が得られる。

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{\sin 2\varphi \cdot \sin X \cdot \cos X}{(\sin \varphi \cos X + \cos \varphi \cdot \sin X)^2} + \frac{\sin 2\varphi \cdot \sin X \cdot \cos X}{\{(\sin \varphi \cos X + \cos \varphi \sin X)(\cos \varphi \cos X + \sin \varphi \sin X)\}^2} \quad (4.15)$$

ここで、 $\cos X = \sqrt{(n^2 - \sin^2 \varphi)}/n$  ,  $n = \sin \varphi / \sin x$  .

$\varepsilon_{\varphi_i}$  が求まれば、これを基礎式 (4.13) に代入して、単種の円弧みそ粗面の見かけの指向ふく射率  $\varepsilon_{a\varphi}$  が算出さ

れるが、みぞ内面における反射回数は金属の場合より少いと考えて、 $\rho > 2$  の面素にたいして反射回数  $(\rho - 1) = 1$  で計算をうち切る。

非金属ランダム粗面の見かけの指向ふく射率  $\xi_a$  中は、ランダム粗面を構成する単種の円弧みぞ粗面の種類および分布密度は金属ランダム粗面の場合とまったく同じ値を採用して計算される。 $r = 1.25, 1.50, 1.75$ , および  $2.00$  にたいする見かけの指向ふく射率の計算結果を図 4.10 に示す。図において  $\phi$  が  $90^\circ$  から  $0^\circ$  に移行するに従って深いみぞの分布割合が多くなることを示し、その際、垂直ふく射率は増大し、指向ふく射率は中の大きい方向でとくに顕著に増大して曲線の形状はしだいに半円に近づき、 $\phi = 0^\circ$  の粗面では、いわゆる Lambert の余弦則がほぼ完全に適用できる乱射面となる。

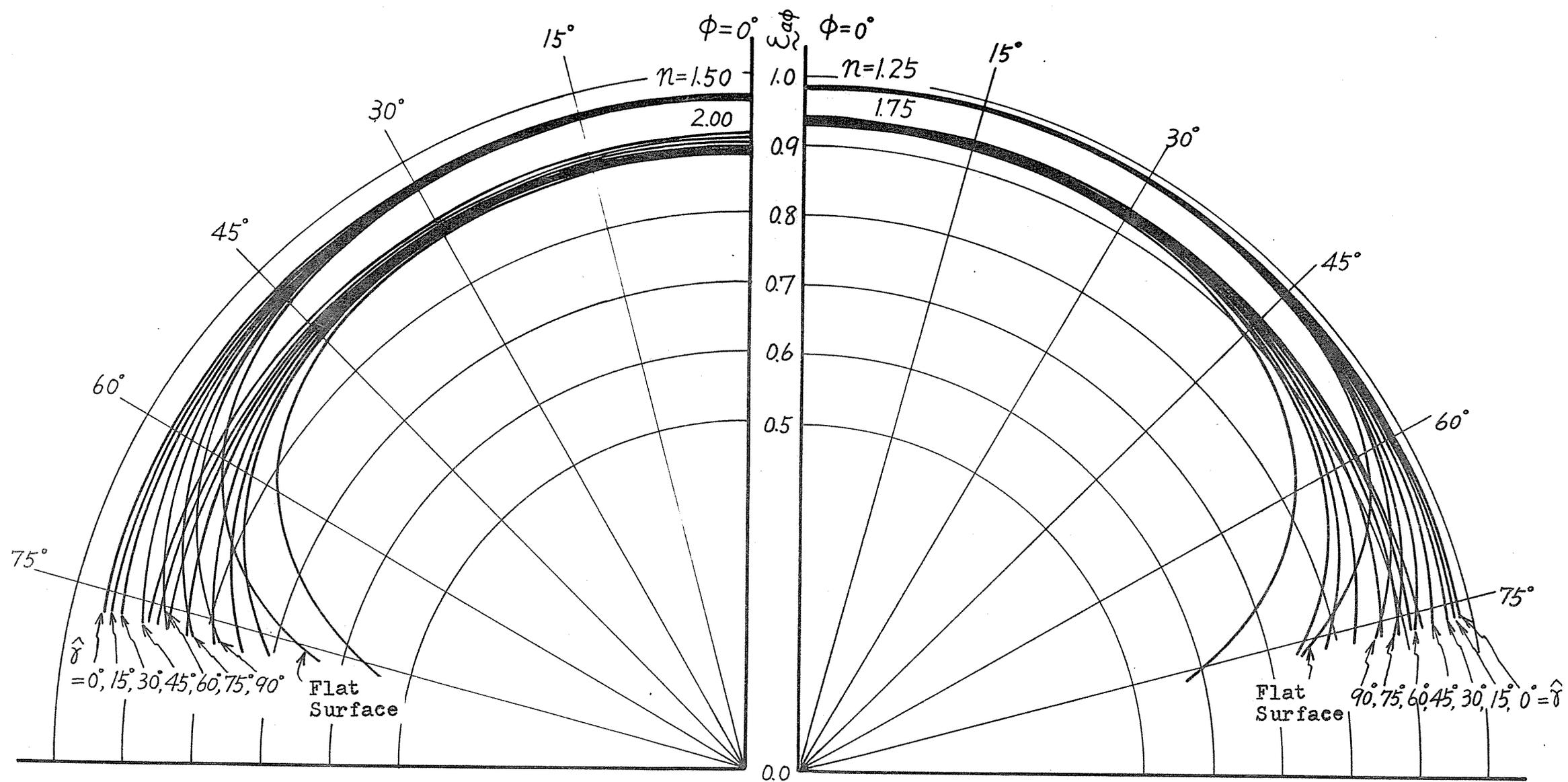


図 4.10 非金属ランダム粗面の指向及び射率

## 第 5 章 粗面のふく射率の測定

前章において行なった V 字みぞ粗面、円弧みぞ粗面、およびランダム粗面の指向ふく射率の解析結果を実験によって証明するために、つぎのような方法で粗面ふく射率測定を行なった。

測定の原因は、試料を一定温度に加熱し、表面から射出されるふく射エネルギーを検知器で受光し、同温度の黒体からのエネルギーと比較してふく射率を求めるいわゆる黒体比較法による。全ふく射の測定は真空熱電対形検知器により、また分光ふく射の測定は自記分光放射計により、室内温度を一定に保って行なった。

実験方法の詳細を以下に述べる。

### 1. 試料<sup>(65) 71) 73)</sup>

金属材料の試料は、厚さ  $5\text{ mm}$  のアルミニウム板 (JIS 第 1 種) および黄銅板 (JIS 第 3 種) を  $115\text{ mm} \times 115\text{ mm}$  の正方形に切断して、表面に種々の加工をほどこして用いた。

V 字みぞ試料は、アルミニウム板に、工具研削盤で仕上げた種々の剣先角のバイトを用いて、ピッチ  $P = 0.6\text{ mm}$  で連続した V 字みぞを研削盤により切削加工した粗面を、平滑面としては傷のないロール面 ( $H_{\max} = 0.4\text{ }\mu$ ) を

そのまま用いた。円弧みぞ試料は、アルミニウム板に、完成バイトの一端を幅約  $2\text{mm}$  に研ぎおとし、顕微鏡でのぞきながら、先端を油砥でたんねんに研磨してアールをとり半円状にしたバイトを用いて、 $0.2\text{mm}$  間隔の各種ピッチ  $P = 0.4 \sim 2.0\text{mm}$  で形削盤により切削加工した粗面を用いた。

アルミニウムの切削の際は、切削液として四塩化炭素を用いて被削性を向上させ、みぞ内面があれないうに、またふく射率測定前には試料をアセトンで十分洗じようして表面に付着した有機物を除去することにつとめた。

V字みぞ切削用バイトの剣先角は公称で  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  および  $150^\circ$  の6種類である。

図5.1および図5.2にアルミニウムのV字みぞ試料および円弧みぞ試料の端面を  $60^\circ$  にそいだ断面を写真で示してある。

金属のランダム粗面の材料には、アルミニウムと黄銅を用い、ともに市販のまよのロール面を粒度の異なる数種の研磨紙<sup>\*</sup>でロール方向に直角にスクラッチしたものを試料とした。この場合、アルミ板を  $400\#$  および  $240\#$  のアルミナ系研磨紙でスクラッチした粗面は、外見が著しく黒味を帯び、そのふく射率値も非常に増大する。この原因は、アルミニウムの加工層（ロールスキン）と、研磨紙の砥粒および接着剤との相互作用による

<sup>\*</sup>使用した研磨紙（布）の規格は付録6にあげてある。

ものと考えて、あらかじめアルミニウム板をか性ソーダ溶液(4N, 90分)で表面処理してロールスキンを除去してから研摩紙でスクラッチしたもの、およびアルミニウムのスクラッチ面にさらに純度の高いアルミニウムを真空蒸着させてできるだけ清浄な粗面としたものなどをとくに用意した。黄銅ではこのような現象がほとんどあらわれなかつたため、ロールスキンの処理は行なわなかった。

研摩紙粒度は 1200<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>、400<sup>#</sup>、240<sup>#</sup>、100<sup>#</sup> および 40<sup>#</sup> の6種類である。

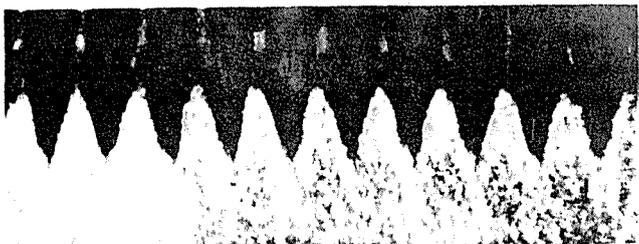
非金属材料の試料は、アルミニウム板に耐熱塗料を塗布したものを平面試料とし、これにアスベスト粉末(48メッシュ通過)を、重量で塗料3に対して2の割合で混合して塗りランダム粗面とした。

耐熱塗料はパイロジン(耐熱温度600°C)を使用し、色はブラック、グレイ、ブラウン、グリーンおよびシルバーの5種と、別にふく射暖房用塗料のベージュを加えて合計6種類である。いずれもシリコン樹脂系の耐熱塗料とおもわれる。

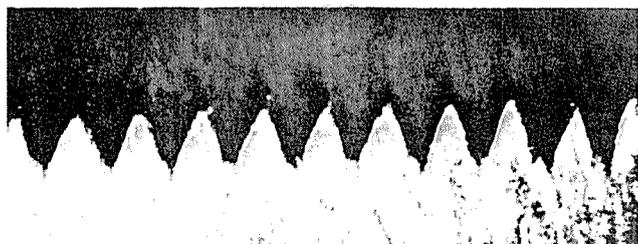
塗装方法は刷毛で二度塗りを標準とし、試料の裏面は加熱器のふく射熱を吸収し加熱を容易にするために、全部パイロジン・ブラックを塗ってある。



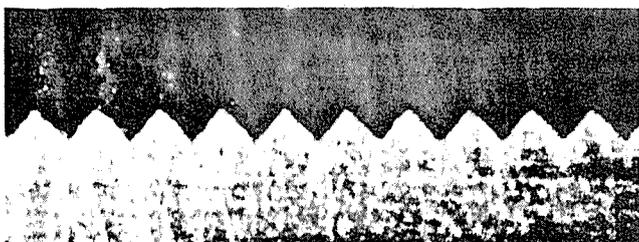
Pitch  $P = 0.6$  mm  
 Opening } =  $28^\circ$   
 Angle  $\theta$  }



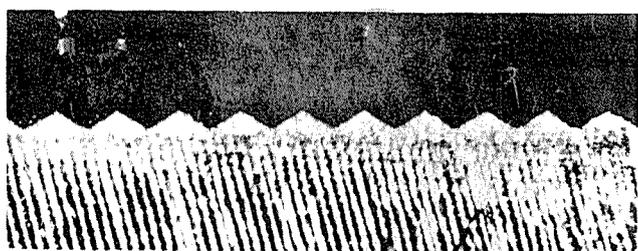
$\theta = 33^\circ$



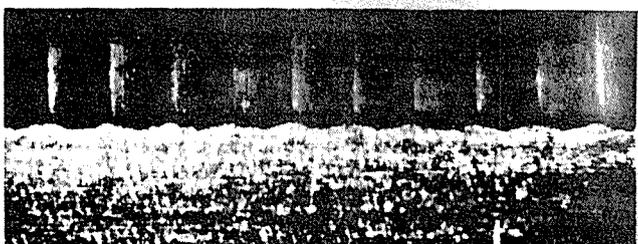
$\theta = 51^\circ$



$\theta = 85^\circ$

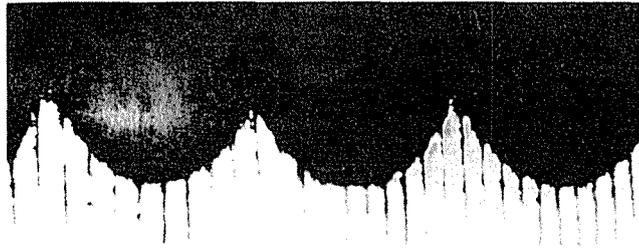


$\theta = 122^\circ$

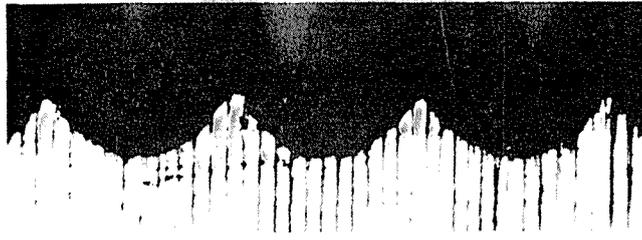


$\theta = 144^\circ$

図 5.1 アルミニウムV字みぞ試料の断面 ( $60^\circ$ で面とり)



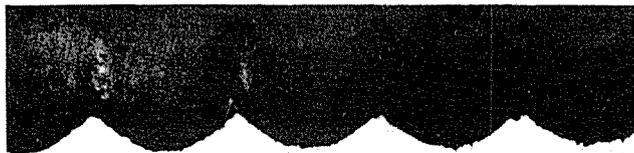
Pitch  $P = 2.0$  mm



$P = 1.8$  mm

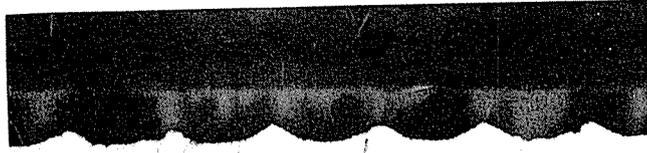


$P = 1.6$  mm

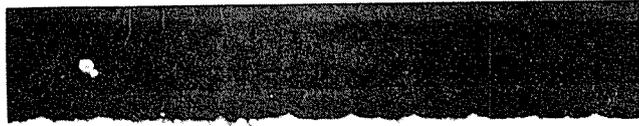


$P = 1.4$  mm

図 5.2 アルミニウム円弧みぞ試料の断面 (60°で面とり)



$P = 1.0 \text{ mm}$



$P = 0.6 \text{ mm}$



$P = 0.4 \text{ mm}$

図 5.2 アルミニウム円篩みぞ試料の断面 (60°で面とり)

## 2. 全ふく射の実験方法<sup>65)</sup>

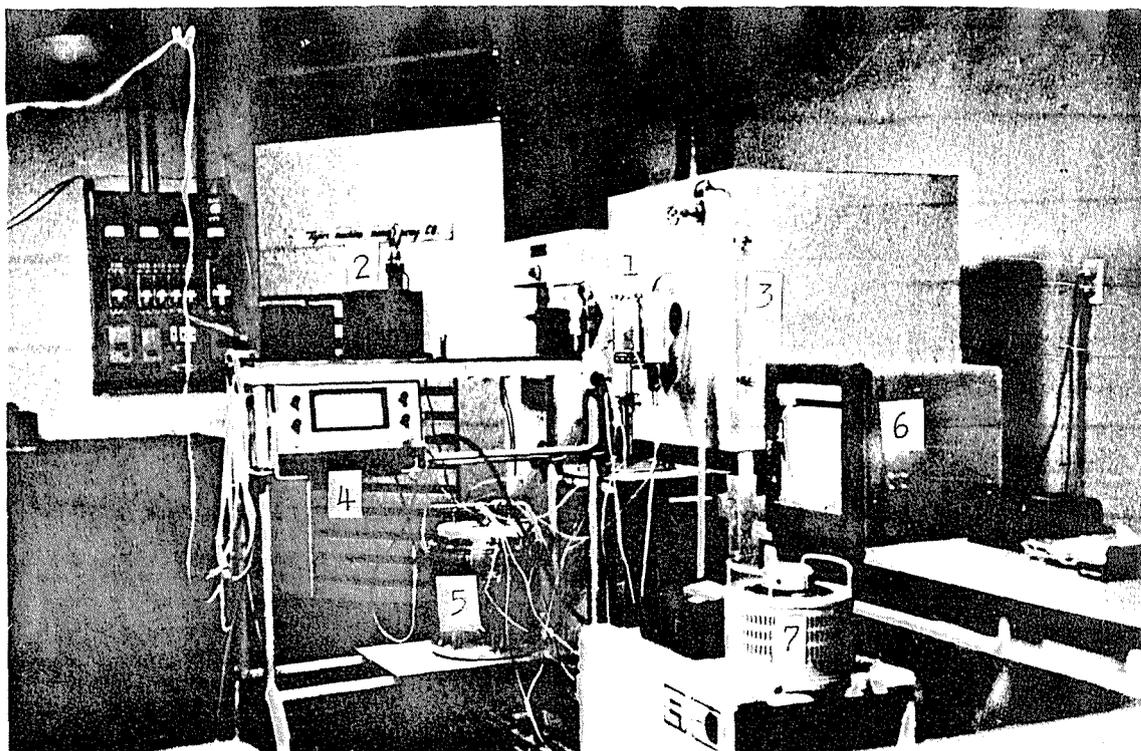
全ふく射の測定に用いた実験装置の全景を図 5.3 に、その主要部分のブロックダイアグラムを図 5.4 に示す。実験方法の概略は、図 5.4 において、試料を電気加熱器に取りつけて一定温度<sup>\*</sup>に加熱し、その表面からのふく射をすい形シールド（開口  $10^{\text{mm}}$   $\times$   $10^{\text{mm}}$ ）およびスリット（ $10^{\text{mm}}$   $\times$   $4^{\text{mm}}$ ）を通して凹面鏡で受け、焦点に集光させる。焦点には真空熱電対形ふく射計（日本分光 MPM-1 形）をおき、検知した出力電圧を直流微小電圧計（大倉電気 AM-1001 形）で読みとる。

試料の温度測定は、図 5.5 に示すごとく、試料表面の中心および周辺に CA 熱電対（ $0.32^{\text{mm}}$ φ）をきつめの針金をくさびにして埋め込み、その熱起電力を中心部は mV 計（AM-1001 形）で直読して試料温度とし、周辺部は自動平衡記録計に自記させて温度変化の傾向をとらえ、スライダックによる加熱器電源電圧の調節の目安にするとともに、試料中心と周辺の温度差を求めた。その結果、両者の温度差は最大で 1% であった。

試料加熱器は試料を取り付けたまゝ、紙面に直角な縦軸のまわりに回転することができ、これによって任意の方向に試料を傾けて指向ふく射率の測定が行なわれる。

---

\* 設定温度は 100、200、300、および 400°C で、測定中の温度変動は  $\pm 1\%$  以内である。



1. 試料加熱器.      2. 真空熱電対形検知器      3.  
 黒体炉      4.  $\mu V$ 計      5. 氷卓箱      6. 温度記  
 録計      7. スライダック

図 5.3 実験装置全景

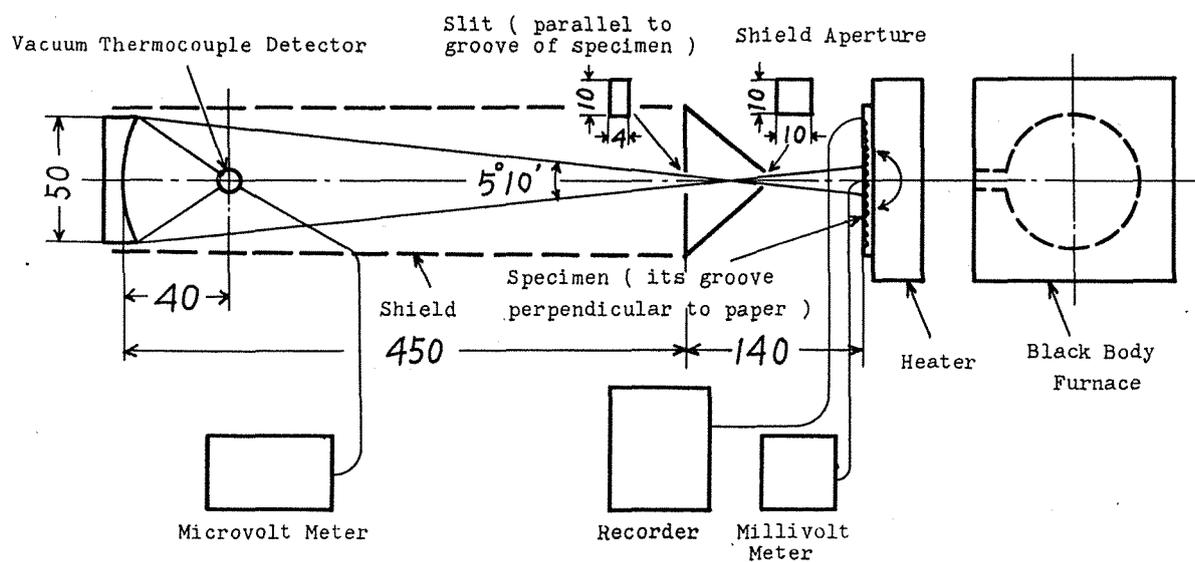


図 5.4 全ふく射測定装置のブロックタイグラム

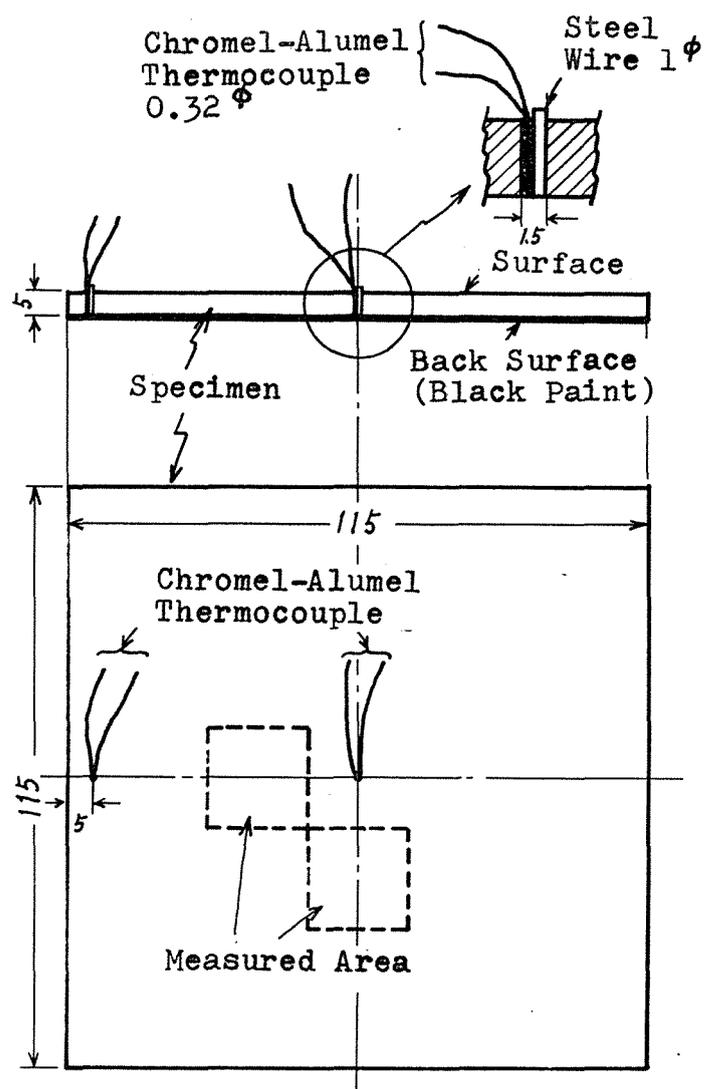


图 5.5 試料温度測定法

この場合、検知器受光部の形状は長方形で、その長手方向はスリット方向に一致し、また集光用の凹面鏡は回転円体でその長軸もスリット方向に一致し、さらに試料加熱器の回転軸方向もスリット方向に一致していることなどから、得られた指向ふく射率は試料回転軸に直角な面内の二次元指向ふく射率とみなされる。またスリットを透してのそかれる試料面は常にその投影面積が一定の条件が得られる。

加熱器背後には黒体炉があり、試料測定時と同じ温度および同じ光路長さに保つてふく射計を校正して絶対値測定を行なうと同時に、その比を求めてふく射率の算定がされる。ここで測定の便宜上、入射光のチョッピングを行なっていないため、ふく射測定時の室温の変化が微妙に影響し、また検知器窓材は潮解性のKBr ( $0 \sim 25 \mu$  通過) およびKRS-5 ( $0.7 \sim 50 \mu$ ) を使用しているため温度に弱く、そのため室内は空気調和により温度を  $20 \sim 21^\circ\text{C}$ 、湿度を約  $50\%$  以下に保つて実験を行なっている。

なお、全ふく射の測定は用意した全部の試料について行なっている。

### 3. 分光ふく射の実験方法<sup>(14) 75)</sup>

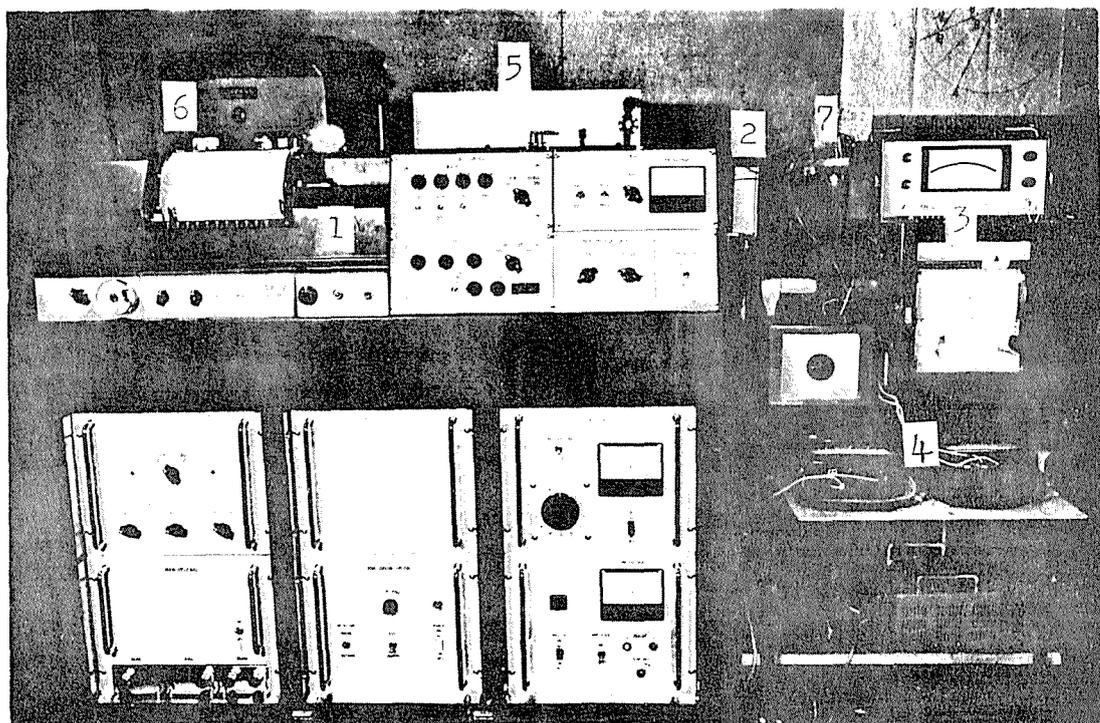
測定に使用した分光装置は自記分光放射計（日本分光SR-3形）で、波長範囲は $0.35 \sim 0.80 \mu$ 、 $0.75 \sim 1.2 \mu$ および $1 \sim 25 \mu$ の三レンジあり、可視から遠赤外までの分光が可能である。この実験においては、熱線域の $1 \sim 25 \mu$ を使用している。実験装置の全景を図5.6に示す。

分光ふく射の測定原理は、図5.7に示すごとくダブルビーム方式の黒体比較法を採用し、モノクロメータ基準用の標準光源（黒体炉1）と試料からのふく射を分光計の二光路に同時に入射させ、両者の比較値として単色ふく射率の概略値が記録ドラムに自記される。別に試料校正用の標準光源（黒体炉2）を試料からのふく射に代えて入射させて基準値とし、試料からのふく射の指示値との比をとって単色ふく射率の補正值とする。この際ダブルビーム方式を採用することにより、室内の炭酸ガスおよび水蒸気による熱線域における吸収は相殺されるので問題はない。

モノクロメータ基準用黒体炉1は球形空洞で黒度<sup>\*</sup>は0.998、試料校正用黒体炉2は円筒形空洞で黒度は0.999であり、それぞれの構造と寸法は図5.8および図5.9に示す。

---

\* 黒度計算は Gouffe' の式<sup>76)</sup>によった。



1. 分光計本体      2. 試料加熱器      3. 温度記録計
4. 温度指示計      5. 黒体炉1      6. 黒体炉
- 温度制御装置      7. 氷貞箱

図 5.6 実験装置全景

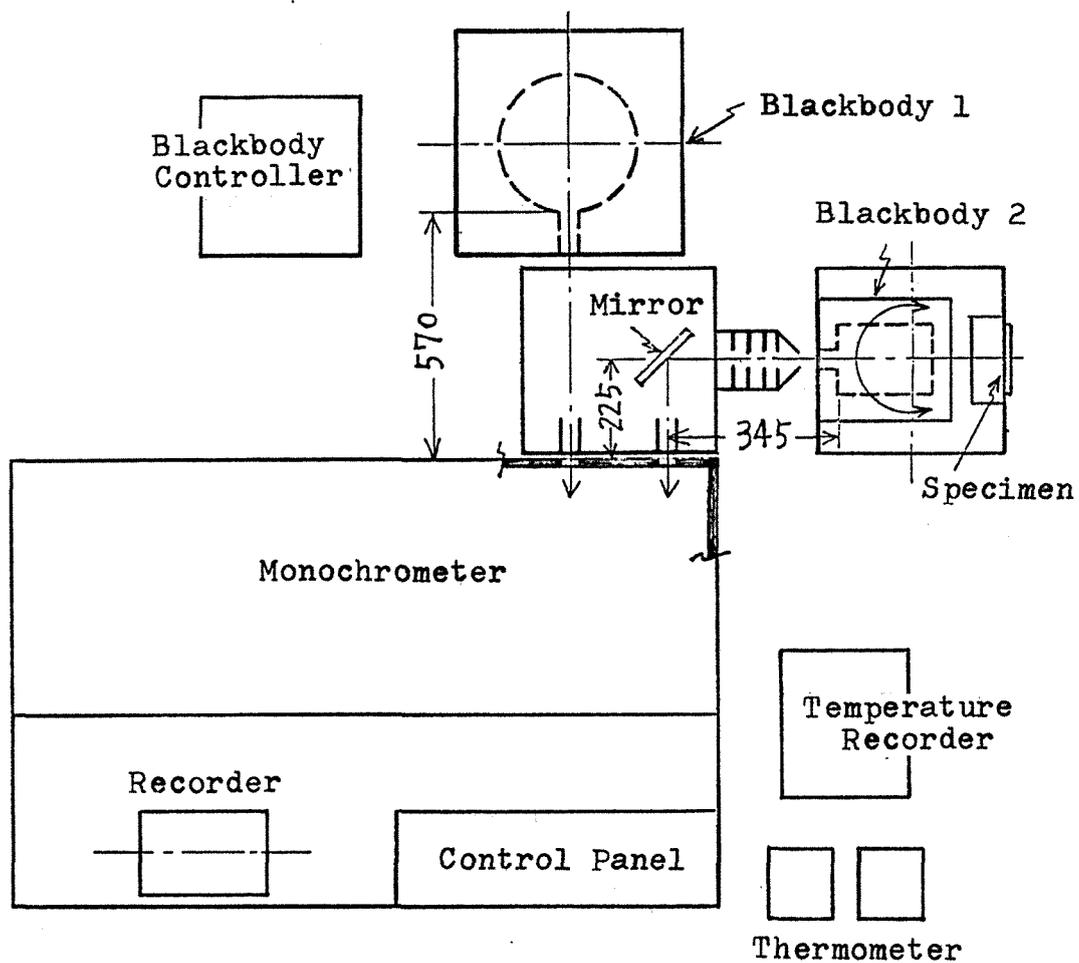


图 5.7 分光示く射实验装置略图

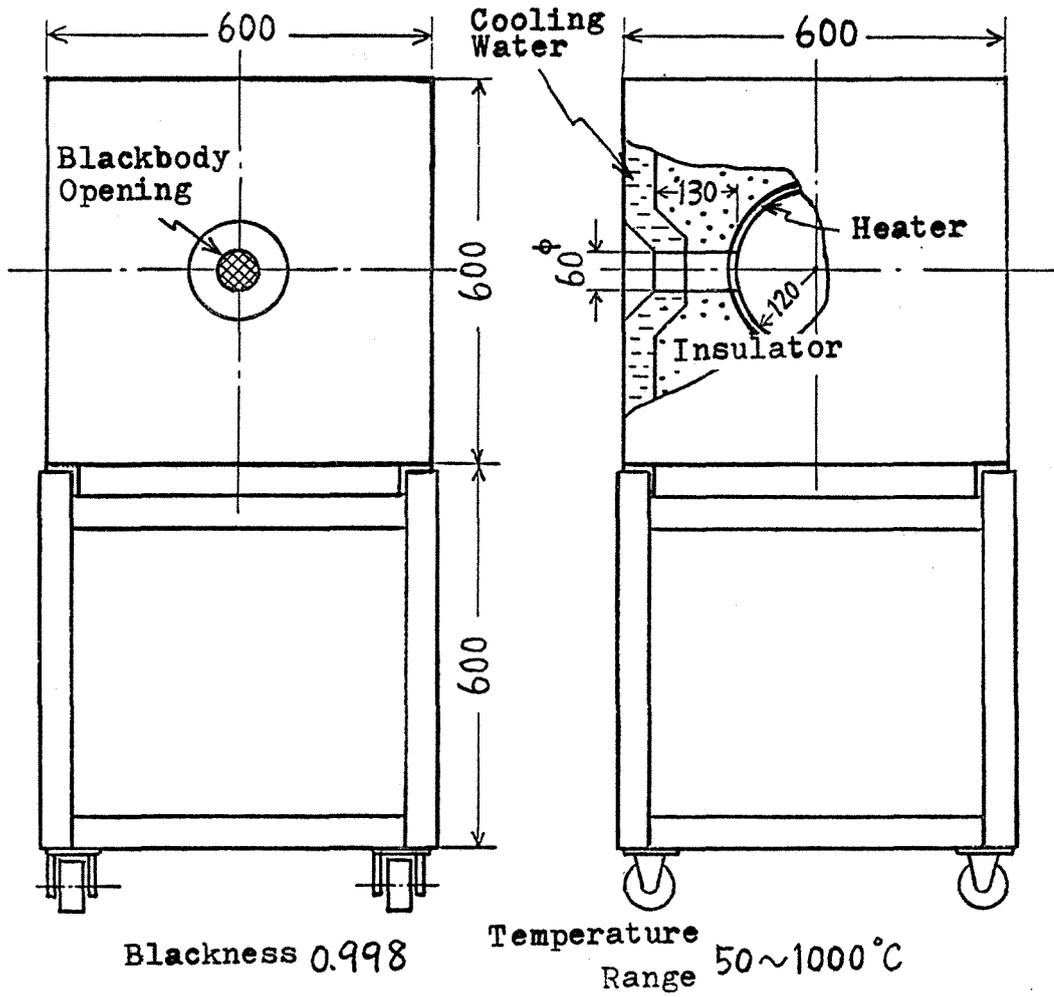


图 5.8 黑体炉 1

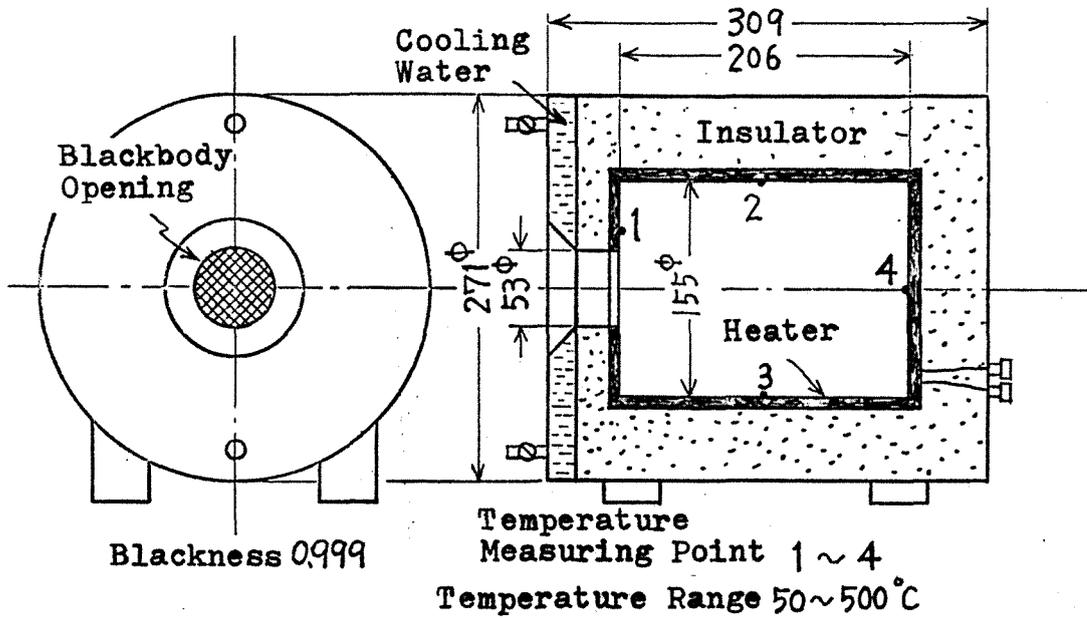


图 5.9 黑体炉 2

記録されたふく射スペクトルからの単色ふく射率の求め方は、図5.10において横軸に示す任意の波長 $\lambda$ に対する基準スペクトルの高さ $L_b$ と試料スペクトルの高さ $L_s$ を読みとり、両者の比から単色ふく射率 $\epsilon_\lambda$ が求められる。この際、横軸の波長読みとりのピッチは $\Delta\lambda = 0.2 \mu$ で行ない、したがって $1 \sim 25 \mu$ の間の読みとり回数は120回となる。また、図5.10において短波長域および長波長域で試料のふく射エネルギーが0、すなわち $\epsilon_\lambda = 0$ の部分が見られるが、これは試料からの見かけ上のふく射エネルギーが厳密に0になるのではなく、分光計の感度以下の微弱な値となるため、このことは事実上ふく射エネルギーが0、したがって $\epsilon_\lambda = 0$ とみなしてさしつかえないことを意味する。

このような黒体比較法を用いて、単色ふく射率を測定する場合の試料温度の測定誤差および検知器温度と室内の温度差が単色ふく射率に及ぼす影響について検討し、その誤差計算の結果を付録4に示してある。

分光ふく射の測定に供した試料は、金属ではアルミニウムおよび黄銅の平滑面とスクラッチ面で、非金属は耐熱塗料の塗装平面とアスベスト混合耐熱塗料の塗装粗面である。

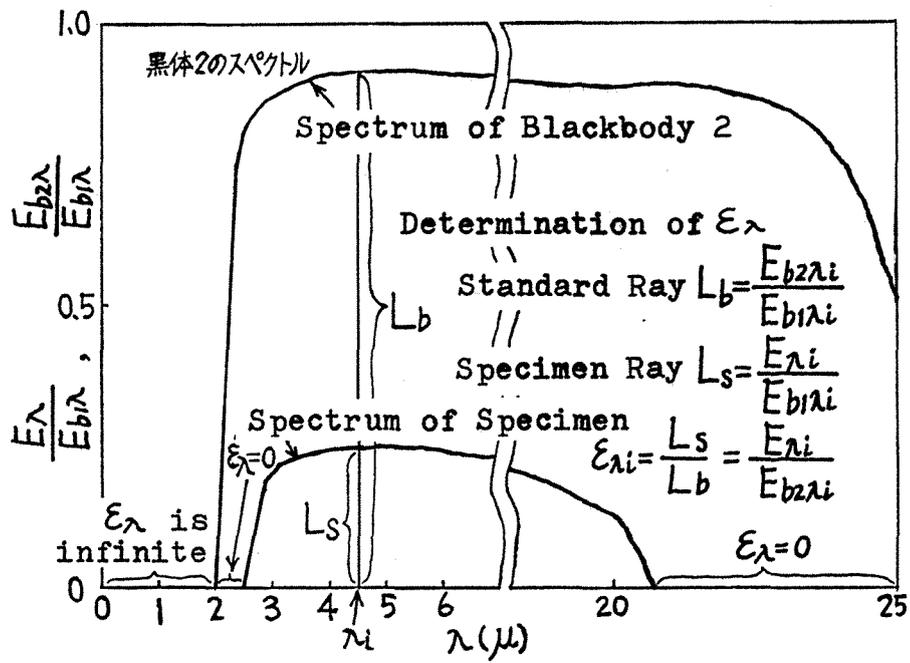


図5.10 試料スペクトルおよび黒体スペクトルから  
 単色ふく射率を求める方法.

#### 4. 全ふく射と分光ふく射におけるふく射率値の比較法

全ふく射の直接測定で得られた垂直全ふく射率  $\varepsilon$  と、分光ふく射から得られた単色ふく射率をもとにして、各波長ごとのふく射エネルギーを求めて波長について積分したものを、同温度の黒体ふく射エネルギーで割って算出された垂直ふく射率  $\varepsilon(\lambda)$  は、理論的に一致しなければならない。すなわち、

$$\varepsilon = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda}. \quad (5.1)$$

この測定において、式(5.1)の関係が成立するか否かは、測定の信頼性を増す意味においても重大であり、この点の吟味を行なった。つぎにその解析方法を述べる。

##### 4. 1 同一試料温度における $\varepsilon$ と $\varepsilon(\lambda)$ の比較<sup>74)</sup>

分光の結果、試料の単色ふく射率  $\varepsilon_{\lambda}$  が求められれば、式(5.2)から各波長にたいするふく射エネルギーの分布が計算される。

$$E_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (5.2)$$

つぎに、いま対象としている波長 $\lambda_1$ と $\lambda_2$ の間のふく射エネルギーの総和

$$E(\lambda) = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \cdot \Delta \lambda \quad (5.3)$$

を求め、同一波長範囲にたいする同温度の黒体ふく射エネルギーで割って式(5.4)より全ふく射率が算出される。

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \cdot \Delta \lambda}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \cdot \Delta \lambda} \quad (5.4)$$

この値と、同一波長範囲の全ふく射率測定値 $\varepsilon$ とを比較する。ここで、波長範囲 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ は、全ふく射測定用の検知器窓材の波長透過特性に一致させることが肝要である。

#### 4. 2 試料温度の異なる場合の $\varepsilon$ と $\varepsilon(\lambda)$ の比較<sup>75)</sup>

温度の異なった試料どうしのふく射エネルギーの比較を

容易にするために、Planck のふく射関数を式 (5.5) のように  $(\lambda T)$  の関数としてあらわす。

$$E_{b\lambda}/\sigma T^5 = C_1 / \{ \sigma (\lambda T)^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1) \}. \quad (5.5)$$

いま、温度  $T$  を固定しておき、 $E_{b\lambda}$  を  $\lambda_1 T$  から  $\lambda_2 T$  まで積分する<sup>60)</sup>。

$$\begin{aligned} E_{b(\lambda_1 T - \lambda_2 T)} &= \frac{1}{T} \int_{\lambda_1 T}^{\lambda_2 T} E_{b\lambda} d(\lambda T) \\ &= \frac{1}{T} \int_{\lambda_1 T}^{\lambda_2 T} \frac{C_1 \sigma T^5}{\sigma (\lambda T)^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} d(\lambda T) \\ &= \sigma T^4 \int_{\lambda_1 T}^{\lambda_2 T} \frac{C_1}{\sigma (\lambda T)^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} d(\lambda T). \end{aligned}$$

ゆえに

$$\frac{E_{b(\lambda_1 T - \lambda_2 T)}}{\sigma T^4} = \int_{\lambda_1 T}^{\lambda_2 T} \frac{E_{b\lambda}}{\sigma T^5} d(\lambda T) \quad (5.6)$$

となり、式 (5.6) の形を用いて単色ふく射率  $\varepsilon_\lambda$  から全ふく射率  $\varepsilon(\lambda)$  を算出するには、つぎの式 (5.7) による。すなわち、

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\sum_{\lambda_T} \varepsilon_{\lambda} \left( \frac{E_{b\lambda}}{0T^5} \right) \Delta(\lambda T)}{\sum_{\lambda_T} \left( \frac{E_{b\lambda}}{0T^5} \right) \Delta(\lambda T)}. \quad (5.7)$$

式(5.7)は、ふく射エネルギーに相当する値であるが、次元は〔 $1/\mu^{\circ}K$ 〕となる。(  $E_{b\lambda}/0T^5$  )を縦軸にとり(  $\lambda T$  )を横軸にとって、ふく射エネルギーを表わすことにより、その曲線が囲む面積は無次元となり、かつ温度が異なっていてても *Planck* のふく射関数はまったく同一の大きさゝと形状となり、温度の異なった試料のふく射エネルギーの比較が容易になる利点がある。

## 第 6 章 測定結果と検討

全ふく射に関しては用意した全部の試料について垂直ふく射率と指向ふく射率の測定を行ない、分光ふく射に関してはアルミニウムおよび黄銅の平面と粗面について、ならびに塗装面の平面と粗面についで行なった。以下に全ふく射と分光ふく射に分けて測定結果を示し、考察を加える。

### 1. 全ふく射

#### 1. 1 $\nabla$ 字みぞ粗面の指向ふく射率<sup>65) 66)</sup>

アルミニウムの $\nabla$ 字みぞ粗面の指向ふく射率の測定結果を、計算値と並べて図 6.1 に示す。計算値は  $n = 50$  の場合であり、両者を比較すると各開き角にわたって全体の傾向はよく合っている。ここに計算値は第一近似値と第二近似値をあげてあるが、 $n \geq 50$  であれば両計算値の誤差率は小さく、測定精度を考慮した場合、どちらの計算値と比較しても大差はない。

計算値と測定値の相違点をあげると、(1) 測定値の曲線は計算値ほど明りような形状を示さず、とくに計算値では接触角方向 ( $\theta = \theta/2$ ) に大きな「くびれ」があらわれるが、測定値のくびれ方向は必ずしもこれと一致

しない。(2) 開き角が小さい場合、方向角が大きくなると測定値は計算値を上まわり、測定値の曲線は全体にすそ開きになつている。(3) 開き角 $\theta = 144^\circ$ の垂直ふく射率の測定値は $\theta = 150^\circ$ の計算値より小さく、かつ平面( $\theta = 180^\circ$ )の値より小さい。

それぞれの理由を考察するならば、(1)はV字みその形状の不完全さ、みそ内面の平滑度の不足およびスリットを通過するふく射のの開き角( $5^\circ - 10^\circ$ )によるものとおもわれる。(2)はみそが鋭くなるに従つてみそ頂部があれてその部分のふく射率は増大し、方向角の増大とともにスリットからのぞいた視界中に頂部が占める割合が増大するためとおもわれる。(3)は平滑面とはいえ最高値あらさで $H_{max} \doteq 0.5 \mu$ のあらさがあるのに対して、開き角の大きな浅いみそでは、顕微鏡観察によるとみそ内面がきわめてなめらかな面を形成し、自己形態係数にもとづくふく射率の増加よりも、むしろ平滑度の向上による内面のふく射率の減少がまさつて、純粋なアルミニウムの固有のふく射率に近い小さな値になるものとおもわれる。また平滑面として用いたロール面は、表面のロールスキンがふく射率の増大をもたらしているものとおもわれる。

比較に用いた計算値は $n = 50$ の場合であるが、純粋なアルミニウムの屈折率は、表 2.2 から温度  $200^\circ\text{C}$  の最高ふく射エネルギーにたいして $n \doteq 69$ となる。しかし、 $n = 70$ の計算値と比較すると計算値が小さ過ぎて

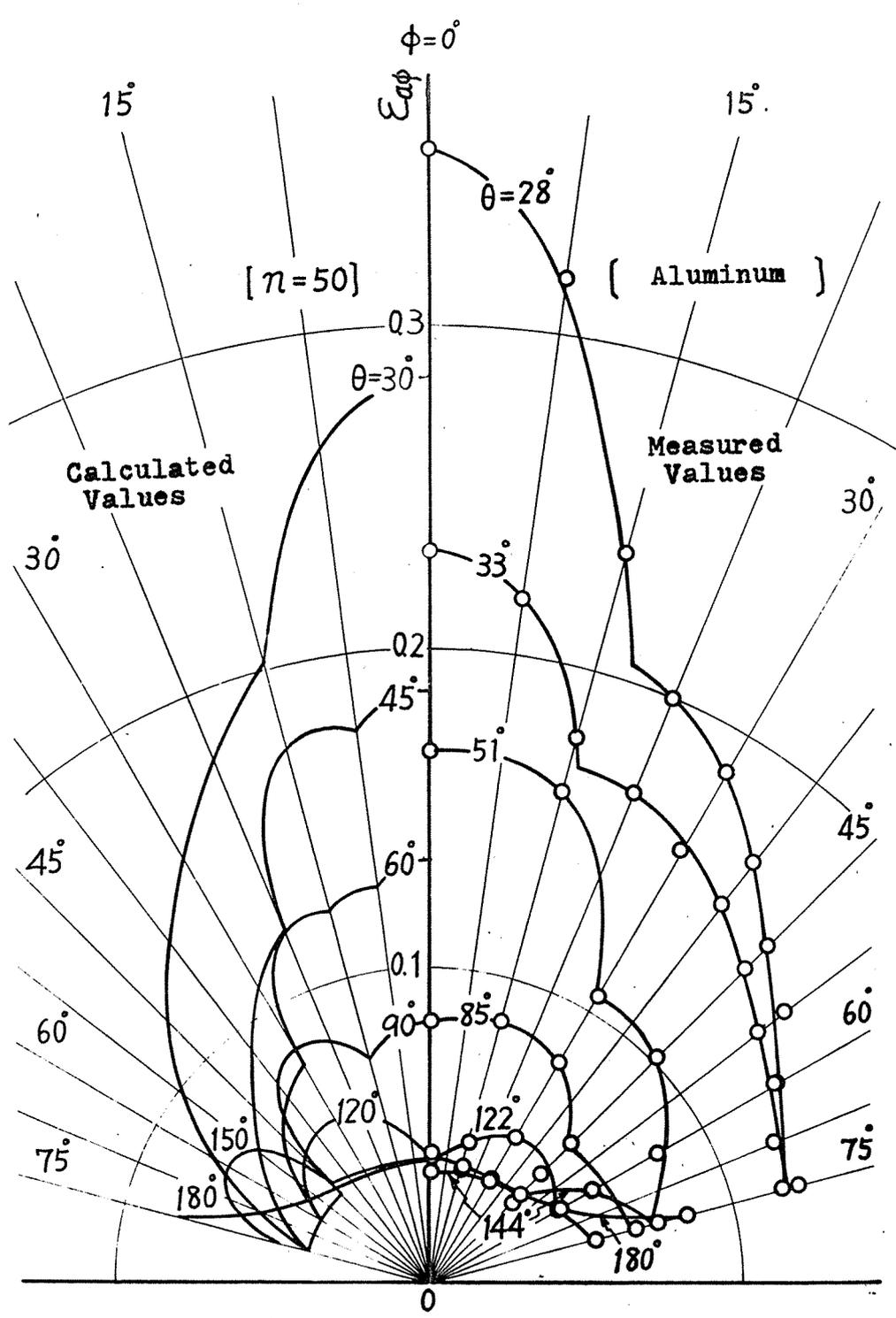


図 6.1 アルミニウムV字みぞ粗面の指向ふく射率の  
計算結果と測定結果.

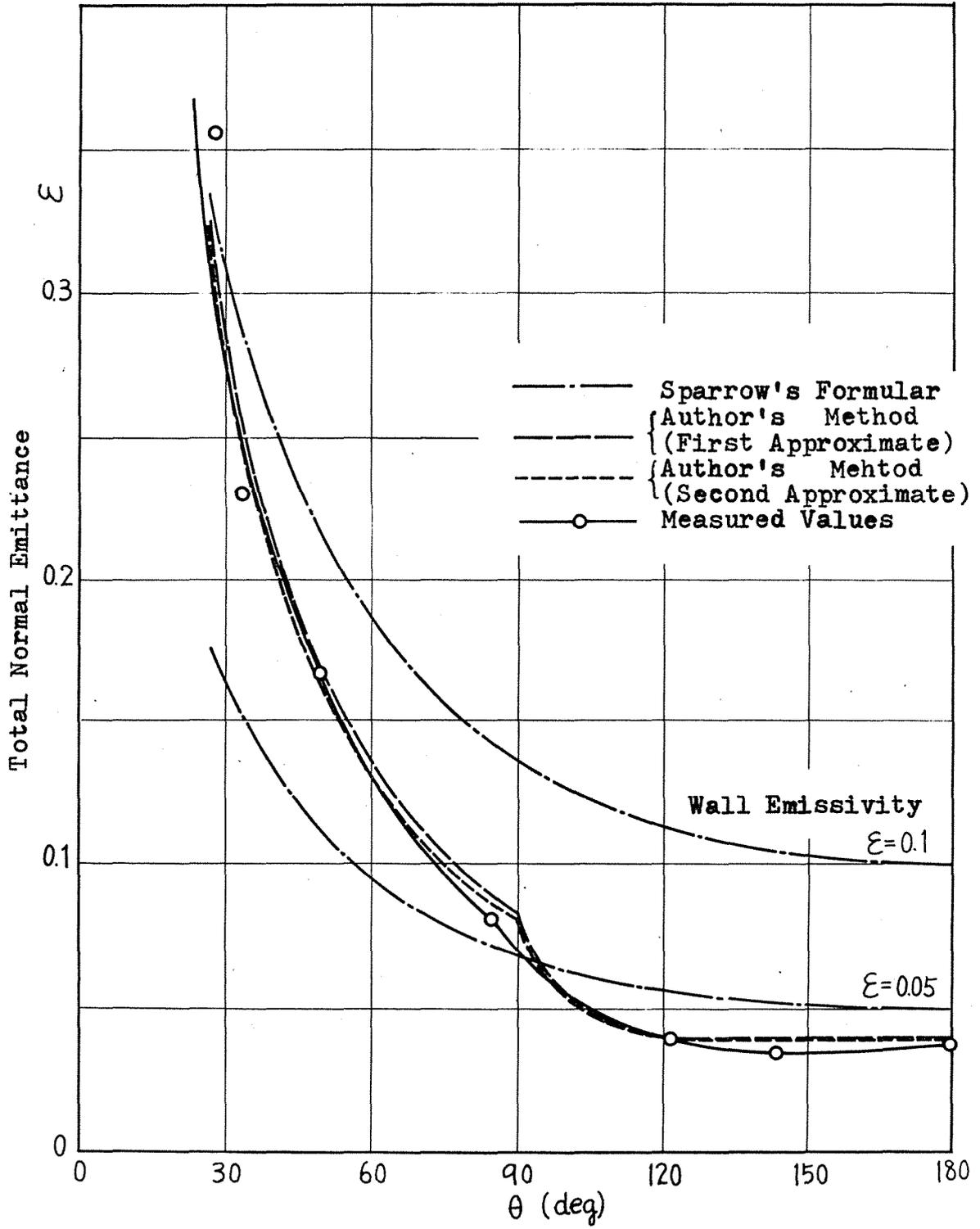


図 6.2 V字みぞ粗面の垂直方向射率の計算値と測定値

測定結果と合わない。この相違はアルミニウム内部および表面の不純物およびみぞ内面の微小なあらさによるものとおもわれる。

開口面にたいする垂直ふく射率について、理論値と比較して図 6.2 に示す。垂直ふく射率の理論値としては Sparrow<sup>29)</sup> の式および著者の方法による計算値をあけてあるが、この場合、測定値は著者の計算値に近似している。

## 1. 2 円弧みぞ粗面の指向ふく射率<sup>65) 69)</sup>

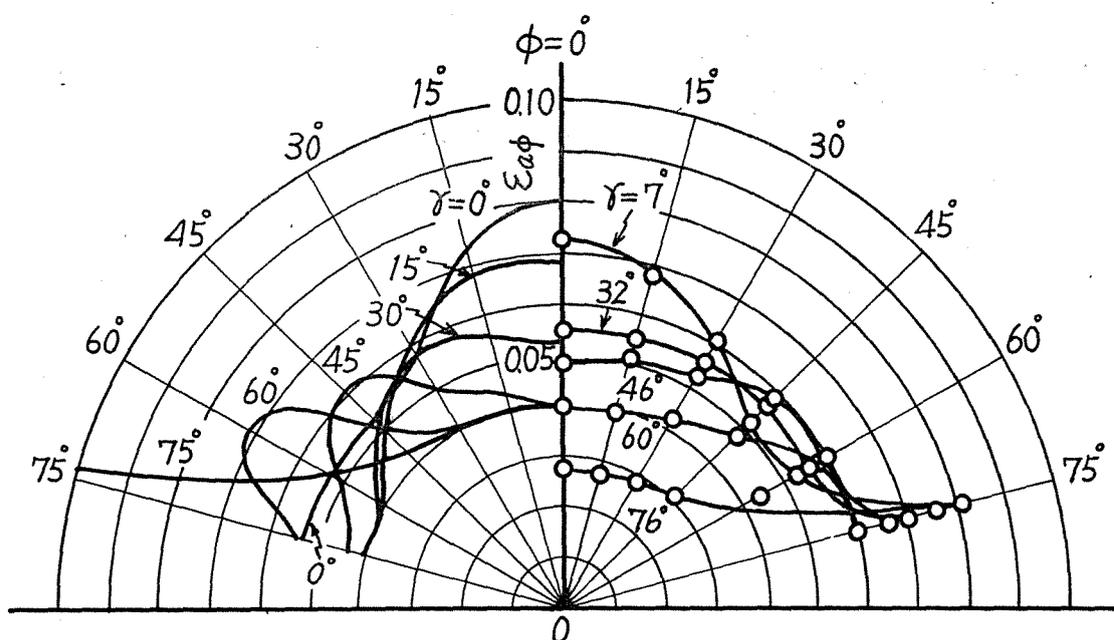
指向ふく射率の測定結果を  $\theta = 50^\circ$ 、 $\phi \leq 3^\circ$  の計算結果と比較して図 6.3 に示してある。測定結果は、その傾向が全体に計算値とよく一致している。この場合、表 6.1 に示すように、比較の都合上計算に用いた  $\theta$  と測定値の  $\theta$  が近似するように隣接した二つの  $\theta$  の平均値をとり、ふく射率もそれぞれの測定値の平均値で示したものもある。

測定結果と計算値の相違はつぎの三点である。

(1) 計算値では、 $\theta = \phi$  の方向に曲線の「ふくらみ」が明りようにあられるが、測定値ではそれほど顕著にあられぬ。(2)  $\theta$  が小さいものは  $\theta$  の大きいところで測定値が計算値を上まわり、曲線はすそ用きの傾向を示す。(3)  $\theta$  が大きくなると測定値が計算値より小さくなり、とくに  $\theta$  の小さい方向で著しい。

それそれぞれの理由を考察するならば、(1)はバイトのアールの不完全さにもとづく円弧みぞの真円度の不足およびみぞ内面の微小なあらさによる乱反射のためとおもわれる。またこれらの原因でみぞ内の反射回数が多くは望めず、測定値は $\mu \leq 3$ の計算値に近似したものとおもわれる。(2)は $\theta$ が小さくなりみぞが深くなると、みぞ側面のあらさが増してふく射率を増加させ、その影響が中の大きな方向であらわれたものとおもわれる。(3)の原因および測定値が全般的に $n = 50$ 、 $\mu \leq 3$ の計算値に近似していることは、V字みぞの場合と同様の理由によるものとおもわれる。

理論計算において単色ふく射率で行ない、実験では全ふく射で測定しているにもかかわらず、両者が比較的によく一致したのは、つぎの理由によるものとおもわれる。すなわち、屈折率は一般に波長の関数であるが、本章2.1項に述べるようにアルミニウムの平滑面および粗面のふく射を分光測定した結果によれば、垂直方向の単色ふく射率は波長に対して割合単調な値を示し、いわゆる灰色体に類似していることを確認している。V字みぞおよび円弧みぞ粗面の場合も灰色体に近似しているものと考え、最高ふく射エネルギーをあたえる波長 $\lambda_{max}$ (黒体のそれに近似)は温度のみによって決定され、全波長にたいする屈折率を $\lambda_{max}$ に対する屈折率で代表させた平均的取り扱いができるためとおもわれる。



(  $n = 50$  ,  $j \leq 3$  )

(  $R = 1.01 \text{ mm}$  )

図 6.3 円弧みぞ粗面の指向ふく射率の計算値と測定値

表 6.1 円弧みぞ粗面の指向ふく射測定値 ( $R=1.01 \text{ mm}$ )

$P_{mm}$	2.0	1.8	1.7*	1.6	1.4	1.0	0.6	0.5*	0.4
$\phi$	$7^\circ$	$27^\circ$	$32^\circ$	$37^\circ$	$46^\circ$	$60^\circ$	$73^\circ$	$76^\circ$	$79^\circ$
$0^\circ$	0.073	0.058	0.056	0.053	0.049	0.040	0.028	0.028	0.028
$15^\circ$	0.068	0.057	0.055	0.053	0.051	0.040	0.026	0.028	0.029
$30^\circ$	0.062	0.057	0.056	0.055	0.053	0.044	0.028	0.029	0.030
$45^\circ$	0.053	0.058	0.058	0.057	0.060	0.049	0.032	0.032	0.032
$60^\circ$	0.053	0.058	0.057	0.055	0.060	0.058	0.045	0.045	0.045
$75^\circ$	0.077	0.073	0.070	0.066	0.067	0.061	0.075	0.082	0.088

\* 印の値は左右の測定値の平均

### 1. 3 アルミニウムおよび黄銅のスクラッチ面の 指向ふく射率<sup>70) 71)</sup>

アルミニウムの市販のままのロール面 Al (I)、これをか性ソーダで処理して表面のロールスキンを取り除いた面 Al (II)、および黄銅の市販のままのロール面 Cu-Zn (I) を粒度とと粒種類の異なる研磨紙で一方向にスクラッチした粗面、ならびにアルミニウムロール面をスクラッチ後純度の高いアルミニウム (99.9%) を真空蒸着させた粗面 Al (III) についての指向ふく射率の測定結果を図 6.4 に、また垂直ふく射率およびあらさ測定値を表 6.2 に示す。

各試料の指向ふく射率測定値の曲線形状と円弧みそランダム粗面の指向ふく射計算値のそれとの比較を  $\epsilon$  を用いて行なう。この場合、とくにふく射率の形状から比較された  $\epsilon$  の意味を記号  $\epsilon$  (E) であらわし、第 4 節で述べるあらさ曲線の解析によって得られた  $\epsilon$  (r) と區別して扱う。表 6.2 には  $\epsilon$  (E) および  $\epsilon$  (r) の値も示してある。

図 6.4 (a) に示す Al (I) のふく射率測定値において、40<sup>#</sup> および 100<sup>#</sup> の研磨紙によるスクラッチ面は円弧みそランダム粗面の  $\epsilon$  (E) = 45~60 の計算値と傾向は類似し、800<sup>#</sup> および 1200<sup>#</sup> 研磨紙によるスクラッチ面

は円弧みそランダム粗面の含(ε) = 60°~75°の計算値と傾向は類似している。すなわち、前者は比較的口が狭く深いみそが、後者は比較的口が広く浅いみそが多く分布していることが想像される。しかし、ふく射率の絶対値はアルミニウムの▽字みそおよび円弧みそにおいてよい一致の得られた $n = 50$ の計算値より大きく、より小さい屈折率の計算値と比較しなければならない。このことは、研磨紙でスクラッチした結果、単に巨視的あらさが増しただけでなく、と粒に引き搔かれて、結晶が破壊されたり、部分的に非晶質層(ベルビー層<sup>77)</sup>)ができた。あるいは物質的変化が起ったものと解釈される。この現象が顕著にあらわれるのは400<sup>#</sup>AAおよび240<sup>#</sup>AA研磨紙によるスクラッチ面においてである。これらの粗面のふく射率は非常に増大しているのみならず、方向角の大きいところで金属にはみられないふく射率減少の傾向があらわれ、むしろ非金属的性質に近づいたことを示している。また肉眼観察によると400<sup>#</sup>AAおよび240<sup>#</sup>AAによるスクラッチ面は、表面あらさに関してはA<sub>2</sub>(I)一連の試料の中で中間の値を示しているのにもかかわらず、黒ずんだ表面を呈している。

これらの事実から判断して、アルミニウムのロール面を研磨紙でスクラッチして得られた粗面は、スクラッチの際にアルミニウム圧延時のロールスキン(酸化、歪硬化等をうけている)と研磨紙のと粒の種類と大きさおよび接着剤の種類と性状などの相互作用により、物理的お

よび化学的に変化をうけて異質なものとなり、単なるあらさの影響のほか、このような表面の「よごれ」による効果がふく射率測定値にあらわれたものと推察される。

そこで、アルミニウムのロール面をカ性ソーダで処理したスクラッチ面 Al (II) の測定結果〔図 6.4 (b)〕をみると、各試料とも Al (I) にみられるような非金属的性質はあらわれず、 $800^{\#}$  CC および  $1200^{\#}$  CC のスクラッチ面においてふく射率はいくぶん大きな値を示すが、全体に Al (I) のふく射率より小さな値になり、ロールスキンによる影響がかなり取り除かれたことを示している。なお、Al (II) では  $400^{\#}$  および  $240^{\#}$  研摩紙はともに CC を使用した臭も Al (I) とは異なっている。

さらに、アルミニウムスクラッチ面の上に高純度のアルミニウムを真空蒸着 (膜厚  $0.5 \sim 1 \mu$ ) させてできるだけ清浄な粗面とした試料 Al (III) を用意して、同様な測定を行なった〔図 6.4 (c)〕。この結果によると  $40^{\#}$  スクラッチ面を除いて全体にふく射率は Al (II) より小さくなり、「よごれ」による影響はさらに減じたことを示している。

指向ふく射率の形状と大きさから測定値と計算値の比較を行なうと、平滑面は  $n = 50$  の平面と大きさおよび形状が類似し、 $1200^{\#}$ 、 $800^{\#}$ 、 $400^{\#}$  試料はそれぞれ  $n = 30$  の  $\hat{\epsilon}$  が  $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 、 $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 、 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$  と、 $240^{\#}$ 、 $100^{\#}$  試料はそれぞれ  $n = 20$  の  $\hat{\epsilon}$  が  $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 、 $75^{\circ}$  と、およ

び  $40^\circ$ \* 試料は  $n = 15 \sim 20$  の  $\phi$  ( $\varepsilon$ ) が  $75^\circ$  と類似している。  
 つぎに、黄銅スクラッチ面の測定結果〔図 6.4 (d)〕  
 では、指向ふく射率の曲線形状は、研磨紙粒度の小さい  
 ものは金属平面的な極端にすその削いた形をしており、  
 粒度が大きくなるに従ってすその削き方が小さくなる。  
 この事は粒度の小さい研磨紙によるスクラッチ面では、  
 口の削いた浅いみその分布密度が高く  $\phi$  ( $\varepsilon$ ) は  $75^\circ$  以  
 上のところにある。粒度の大きい研磨紙によるスクラッ  
 チ面では割合口の狭い浅いみその分布密度が高く  $\phi$  は  $60^\circ$   
 あたりにあることを意味する\*。

以上の測定結果と解析による計算結果との比較、検討  
 によって明らかのように、金属粗面の垂直ふく射率およ  
 び指向ふく射率の大きさと形状は、表面あらさ計による  
 あらさ測定値と直接関係があるのではなく、むしろ粗面  
 を構成するみそあるいはくぼみの形状によって指向ふく  
 射率の形状がきまり、表面の「よごれ」程度によってふ  
 く射率の大きさがきまるものと考えるのが妥当とおもわ  
 れる。

---

\*黄銅の屈折率が計算できず、金属の円弧みそランダム  
 粗面の指向ふく射率計算値との定量的な比較はできない。  
 合金の屈折率算出方法についての検討は別の機会に譲る。

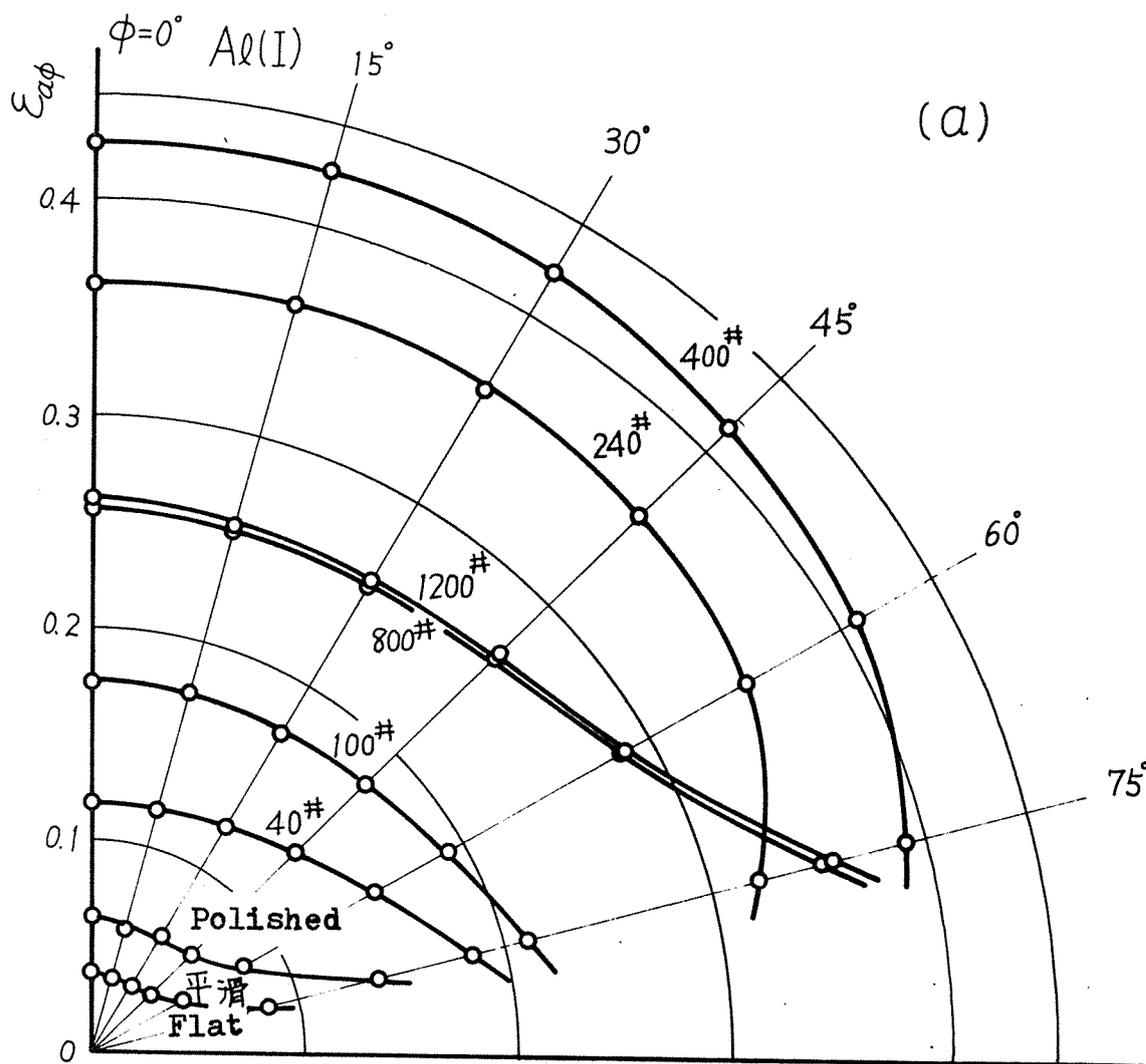


図 6.4 (a) Al(I) 試料の指向係数射率測定値.

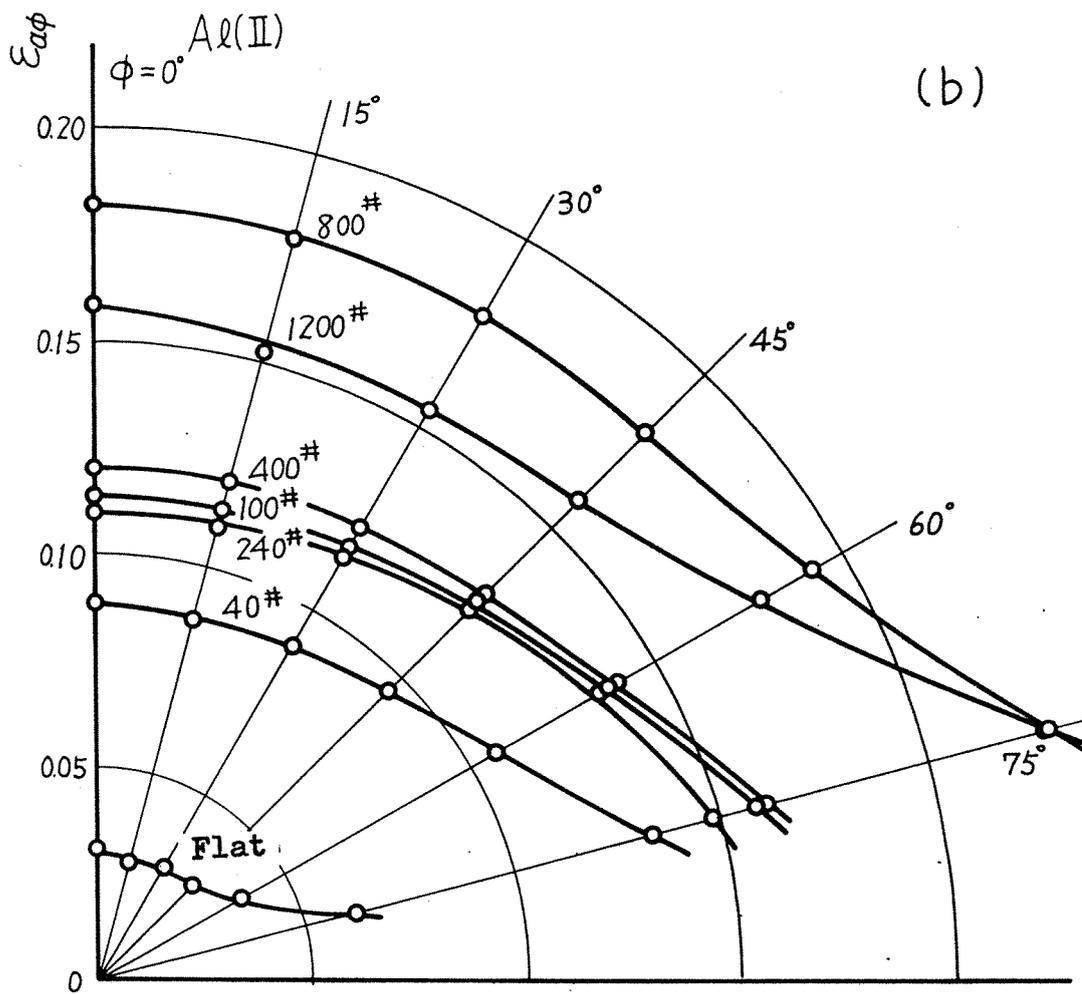


図 6.4 (b)  $\text{Al(II)}$  試料の指向なく射率測定値.

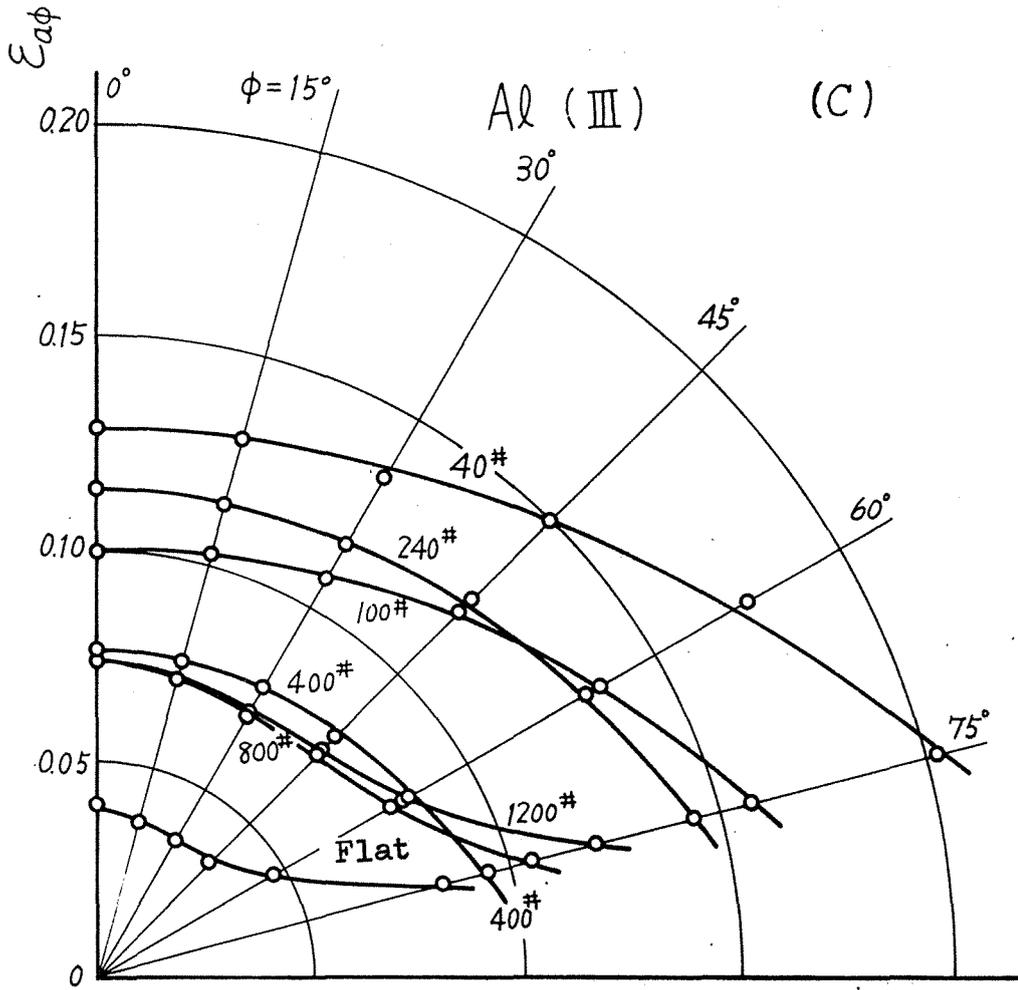


図 6.4 (c) Al(III) 試料の指向ぶく射率測定値.

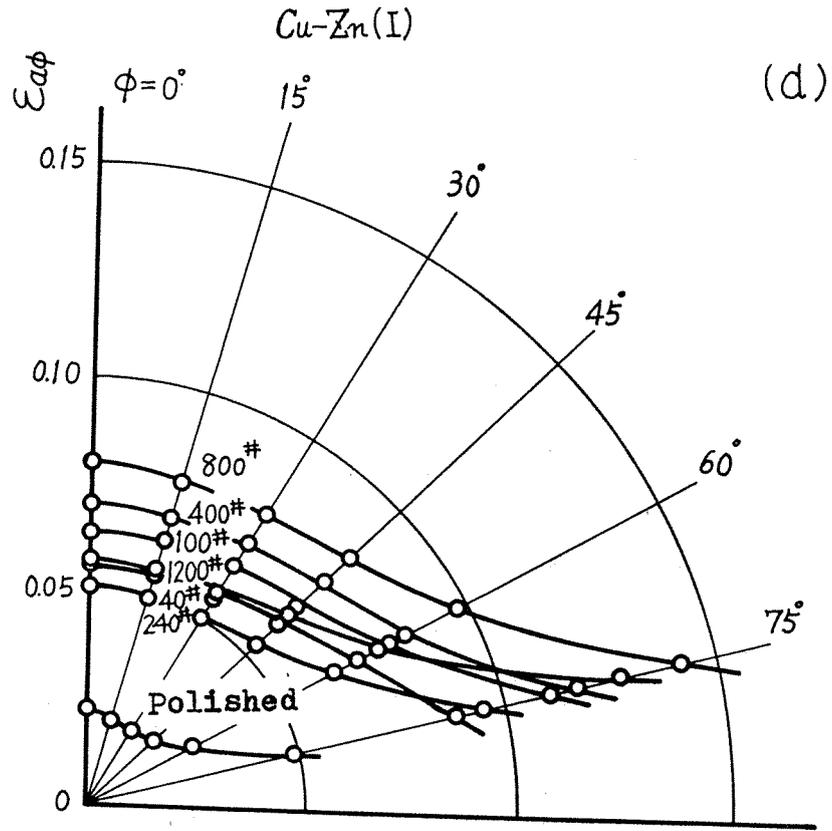


図 6.4 (d) Cu-Zn 試料の指向角  $\phi$  による射率測定値.

## 1. 4 塗装平面および粗面の指向ふく射率<sup>70) 73)</sup>

パイロシソおよびふく射暖房塗料の塗装平面およびこれらにアスベスト粉末を混合して塗った塗装粗面の垂直ふく射率の比較と温度依存性を図 6.5 に、またこれらのあらかし測定値を表 6.3 に示す。塗装平面の垂直ふく射率はブラウンが最も大きく、しかも温度にたいしてほとんど変化がない。グリーン、ベージュの垂直ふく射率はブラウンのそれより小さく、ともに真の温度依存性（温度上昇にたいしてふく射率は減少する）を示す。

これらに比べてシルバー（顔料はアルミ粉）は相当小さな値で正の温度依存性を示し、金属的である。

アスベストを混入した塗装粗面の垂直ふく射率は、いずれも混入前より増大し、その増加割合はふく射率の小さい塗料ほど大きい。また温度依存性も温度  $400^{\circ}\text{C}$  でわずかに減少するほかほとんどみられない。

塗装平面および粗面の指向ふく射率の測定値を図 6.6 に示す。塗装平面の指向ふく射率は  $\theta = 45^{\circ}$  まではほぼ一定の値であり、 $60^{\circ}$  あたりから急に減少する。この傾向およびふく射率の絶対値は非金属に関する Fresnel の式 (2.34) によく一致し、このことは逆に供試塗料の屈折率はシルバーを除いて  $1.25 \sim 2.50$  くらいの範囲にあることがわかる。シルバーは  $\theta$  が大きくなると

指向ふく射率はいくぶん増大し、金属的性質を示している。

粗面の指向ふく射率は、垂直ふく射率を含めて平面のときより増大し、各試料ともとくに方向角の大きいところで増大の傾向が著しく、曲線の形状は半円に近づき、非金属にたいする円弧みそランダム粗面の指向ふく射率計算結果（図4.11）とその傾向および値の大きさはよく一致し、Lambertの余弦則が適用できる乱射面になる。シルバー粗面の指向ふく射率は、曲線のすその開き程度が減少し、金属粗面の場合と同様な傾向を示している。

アスベストを混合して塗った粗面の凹凸を、Sparrowが行なったように、種々の開口率の球形空洞が配列したものとみなして、垂直ふく射率増大の現象を理論解析（ただし、内面のふく射特性は無指向性）することが可能であるが、指向ふく射率に関しては困難である。

しかし、球形空洞からなる粗面の断面形状は、種々の深さの円弧が連続したものであることから、著者が行なったように、任意の粗面を種々の深さの円弧みそが一定割合で分布したものとみなして指向ふく射率が増大する現象を二次元で解析できることになる。

指向ふく射率の計算値と測定値の曲線形状の比較から、塗装粗面のあらさは見かけほど大きくなり、 $\theta = 45^\circ$  または  $\theta = 60^\circ$  あたりにあり、塗装平面のそれは事実上平面に近似しているものと推察される。このことはあらさ曲線の解析によっても確認されている。

ここでアスベストを混合した塗装粗面のふく射率増大の原因が、アスベストの物性にあるのではなく、あらさの増加によると推論した根拠の一つは、アスベスト粉末を水に溶いて銅板に塗り、アスベスト自身の垂直ふく射率を測定した結果、温度100～250°Cにおいて平均0.90にとどまったことにある。

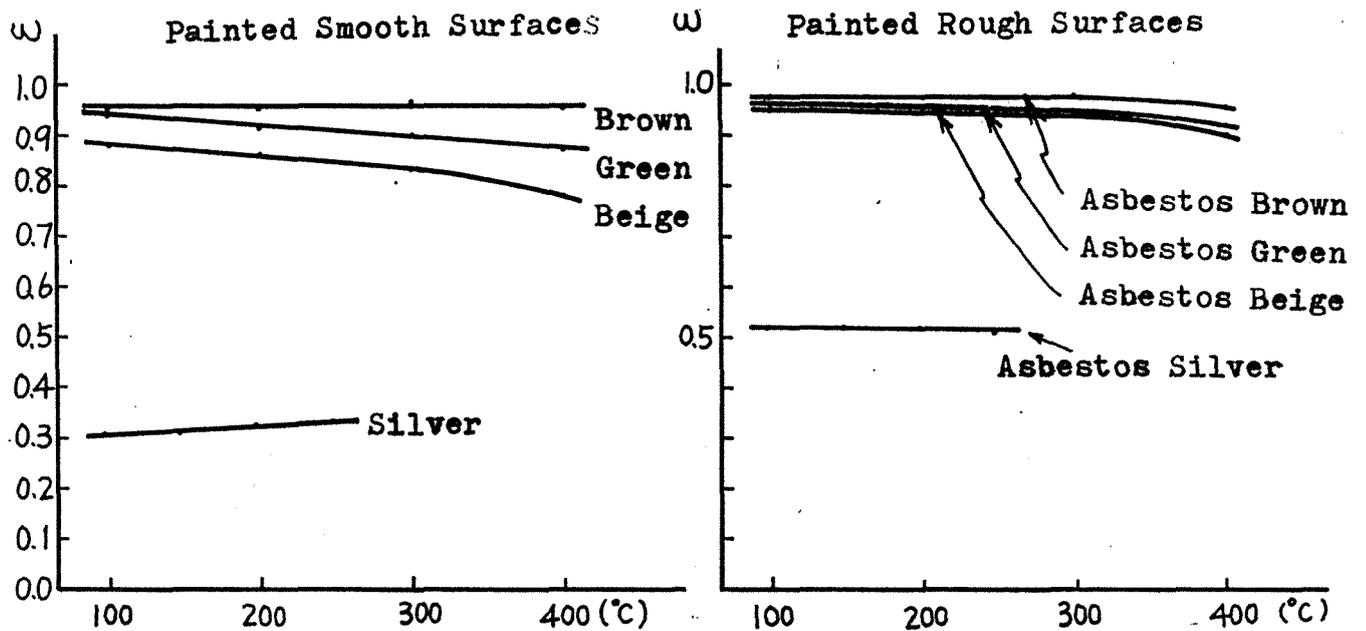


図 6.5 塗装平面および塗装粗面の垂直ふく射率の温度依存性。

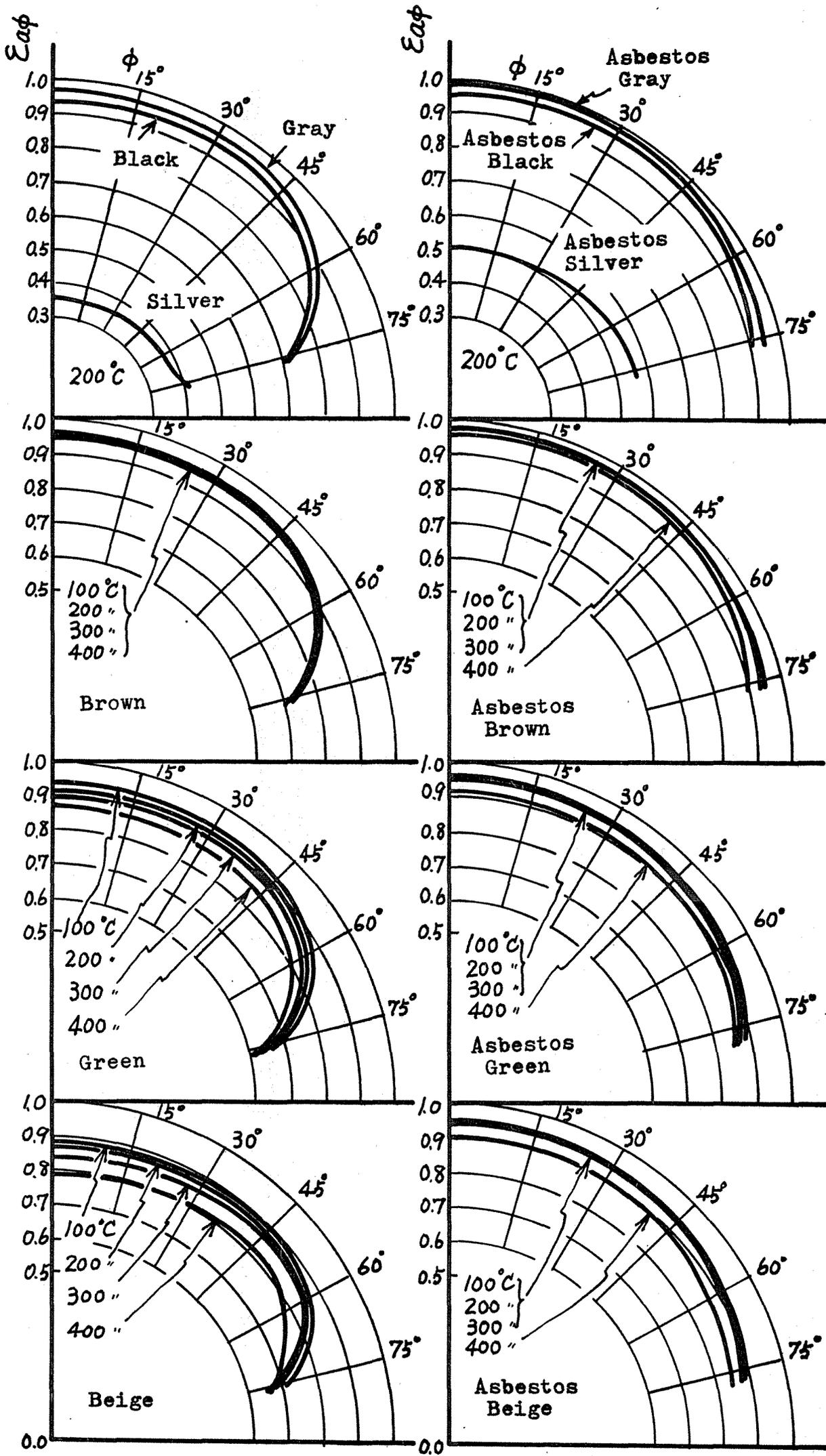


図 6.6 塗装平面および塗装粗面の指向角射率測定値

## 2. 分光ふく射

### 2. 1 アルミニウムおよび黄銅のスクラッチ面の 垂直単色ふく射率<sup>74)</sup>

アルミニウムおよび黄銅のスクラッチ面の全ふく射率測定に用いた試料のうち  $Al(I)$ ,  $Al(II)$  および  $Cu-\Sigma_n(I)$  について分光し、垂直方向の単色ふく射率を測定した。その結果を  $Al(I)$  は図6.7(a)に、 $Al(II)$  は図6.7(b)に、また  $Cu-\Sigma_n(I)$  は図6.7(c)に示す。

各測定値に共通していえることは、黒体比較法により直接単色ふく射率を求めた場合、試料のふく射エネルギーはその性質と温度に相当した一定波長範囲にしか存在せず、その結果として単色ふく射率も同一波長範囲で得られることになるが、このことはきわめて当然のことである。これに対して、標準光反射法により反射率を求めて間接的にふく射率を算出する場合は、本来試料がその温度においてふく射を射出していない波長範囲にわたってもふく射率が得られることになり、事実には反する結果になる。端的な例として、可燃性物体のふく射率を反射法で求める場合に、その物体の着火温度以上の高温にたいするふく射率値まで算出されるという矛盾が生ずる\*。

※標準光反射法でふく射率を求める場合の試料温度は、

それから射出されるふく射エネルギーを直接受光し、黒体のそれと比較して求めるいわゆる黒体比較法を用いるのが妥当とおもわれる。

ここで、分光放射計が検知し得る最小ふく射エネルギーは、実測により約  $3.5 \text{ (Kcal/m}^2\text{h}\mu)$  と判明しており、これより微弱なエネルギーは測定不可能である。したがって、単色ふく射率の測定値が波長の短いところおよび波長の長いところで急激に低下して0になっているが、これはその瞬間にエネルギーが完全に0になるのではなく、分光計の最小検知量以下のきわめて微小な値になると解釈すべきであり、この値は實際上0とみなしてかまわない。

以下、第6章、4節に示すあらさ曲線の解析結果を参照しながら、各試料の分光結果について説明する。

Al (I) の測定結果において、単色ふく射率は各スクラッチ面とも波長にたいしてほぼ一定で、粒度の小さい  $1200^\#$  および  $800^\#$  試料では、波長の短いところで単色ふく射率は大きく、波長の長いところで小さくなって若干傾斜しており、金属平面的性質を示している。これはスクラッチ面のあらさの大きさとふく射の波長の相互関係でまざる。すなわち、粗面のあらさピッチがふく射の波長より大きく、かつ開口率の大きい場合には一般に金属平面にみられるような規則反射性を示し、長波

---

電磁理論から、標準光の温度と試料温度の相乗平均値で近似できるといわれる<sup>7)</sup>。

長域ではふく射率は小さく、短波長域ではあらさ計で検知しにくい程度の小さいあらさによってふく射率は増大するものとおもわれる。

400<sup>#</sup>、240<sup>#</sup>、100<sup>#</sup> および 40<sup>#</sup> の各試料では、あらさピッチは大きいがあらさの開口率は割合小さく、このことはふく射の波長にくらべて大きい深めのみぞが多く分布していることを意味する。それゆえ、これらのスクラッチ面においてはふく射を射出している全波長域にわたってはほぼ一様なふく射率を有し、灰色体に近似するものとおもわれる。しかし、100<sup>#</sup> および 40<sup>#</sup> 試料の指向ふく射率の測定結果をみると、金属的性質を有していることから、この場合とくに金属的灰色体と称し、非金属的指向性を示した400<sup>#</sup> および 240<sup>#</sup> 試料と区別する必要がある(図6.4(a)参照)。

ふく射エネルギー分布曲線の最大値に相当する波長 $\lambda_{max}$ は、電磁理論より金属平面では $\lambda_{max} \cdot T = 2660 \mu\text{K}$ 、黒体または灰色体では $\lambda_{max} \cdot T = 2900 \mu\text{K}$ であることから、金属の $\lambda_{max}$ は非金属の $\lambda_{max}$ より小さくならなければならない。図6.7(a)における各スクラッチ面の $\lambda_{max}$ の値(図中の○印)の大小関係は、指向ふく射率にあらわれた金属性および非金属性と定性的に一致している。

以上に述べたことにより、いろいろな角度から判断して、Al(I)の400<sup>#</sup> および 240<sup>#</sup> 試料は、非金属的乱射面すなわち、黒度のあまり高くない灰色体とみなしてよく、本来の金属的性質は失われたことから、その原因

をあらさ以外の表面の化学的および物理的な変化による「よごれ」にあるものと結論してよいものとおもわれる。

図67(b)の  $Al(II)$  試料は、カ性ソーダで処理したことにより、ロールスキンが取り除かれた反面、処理後の素面はエッチングされて荒らくなっており、それを研摩紙でスクラッチしたため、各スクラッチ面のあらさ分布にはあまり幅がなく、割合狭い範囲に集っている。これらの理由から、 $Al(II)$ の単色ふく射率は各試料とも波長にたいしてはほぼ一定な、しかも  $Al(I)$ 試料の値より全般に小さい値となり、単色ふく射率のみから判断すると黒度の低い灰色体に近似していることがわかる。しかし指向ふく射率の測定結果にみられるように、金属的指向性は十分残っていることから、金属的灰色体といわなければならない。

800<sup>#</sup> および 1200<sup>#</sup> 試料で単色ふく射率がいくぶん大きくなる原因は、研摩紙のと粒および接着剤の性質との相互関係で、わずかに表面が変質したものとおもわれる。肉眼観察によれば心持ち他の試料より黒ずんで見えるが、それは金属的性質を消滅させるほどの効果はなく、指向ふく射率を示す曲線形状に金属的性質がはっきり残ったものと推察される。

図67(c)の  $Cu-Zn(I)$  試料では、各スクラッチ面のあらさピッチは広い範囲に分布しているにもかかわらず、

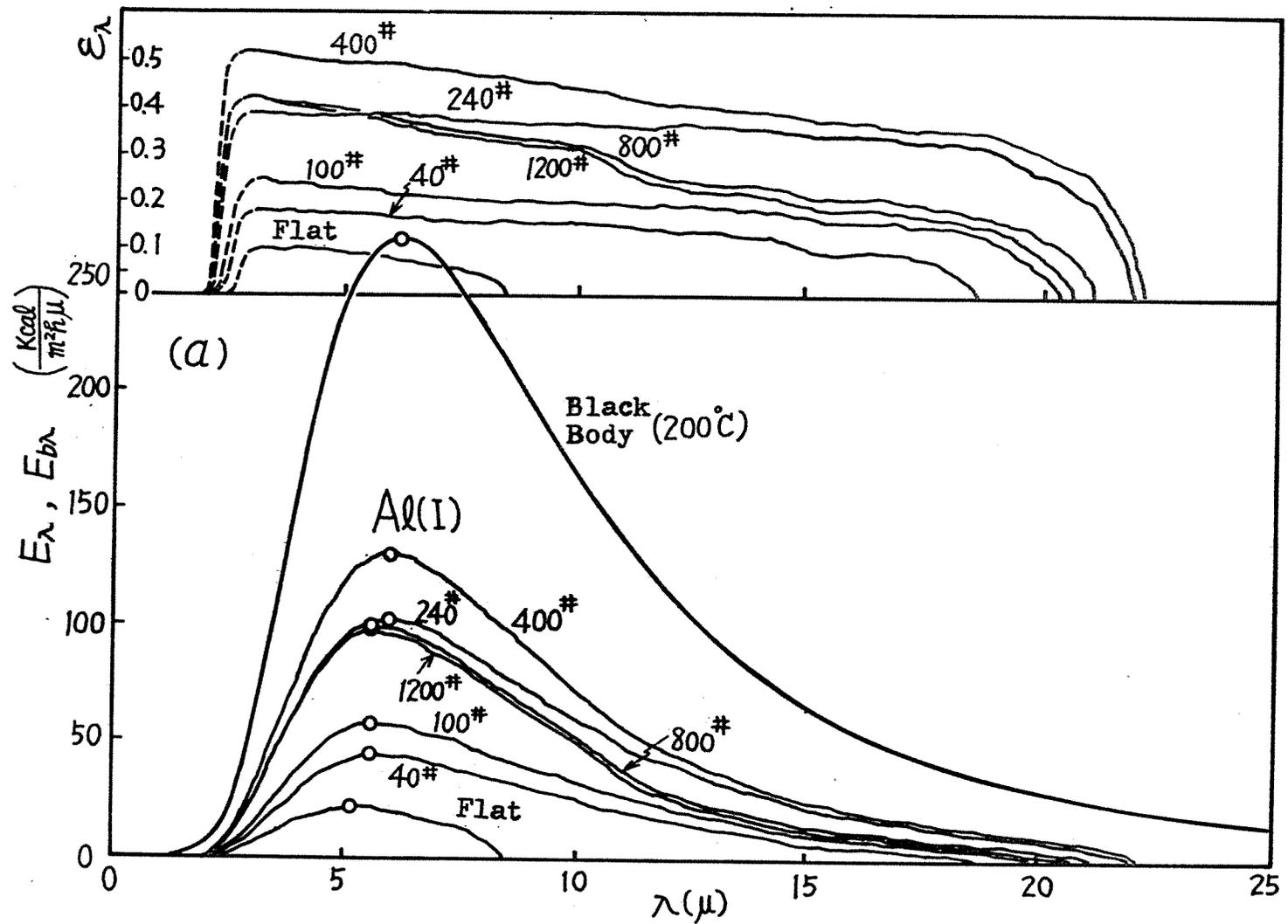


図 6.7 (a) Al(I) 試料の単色ふく射率およびふく射エネルギー分布.

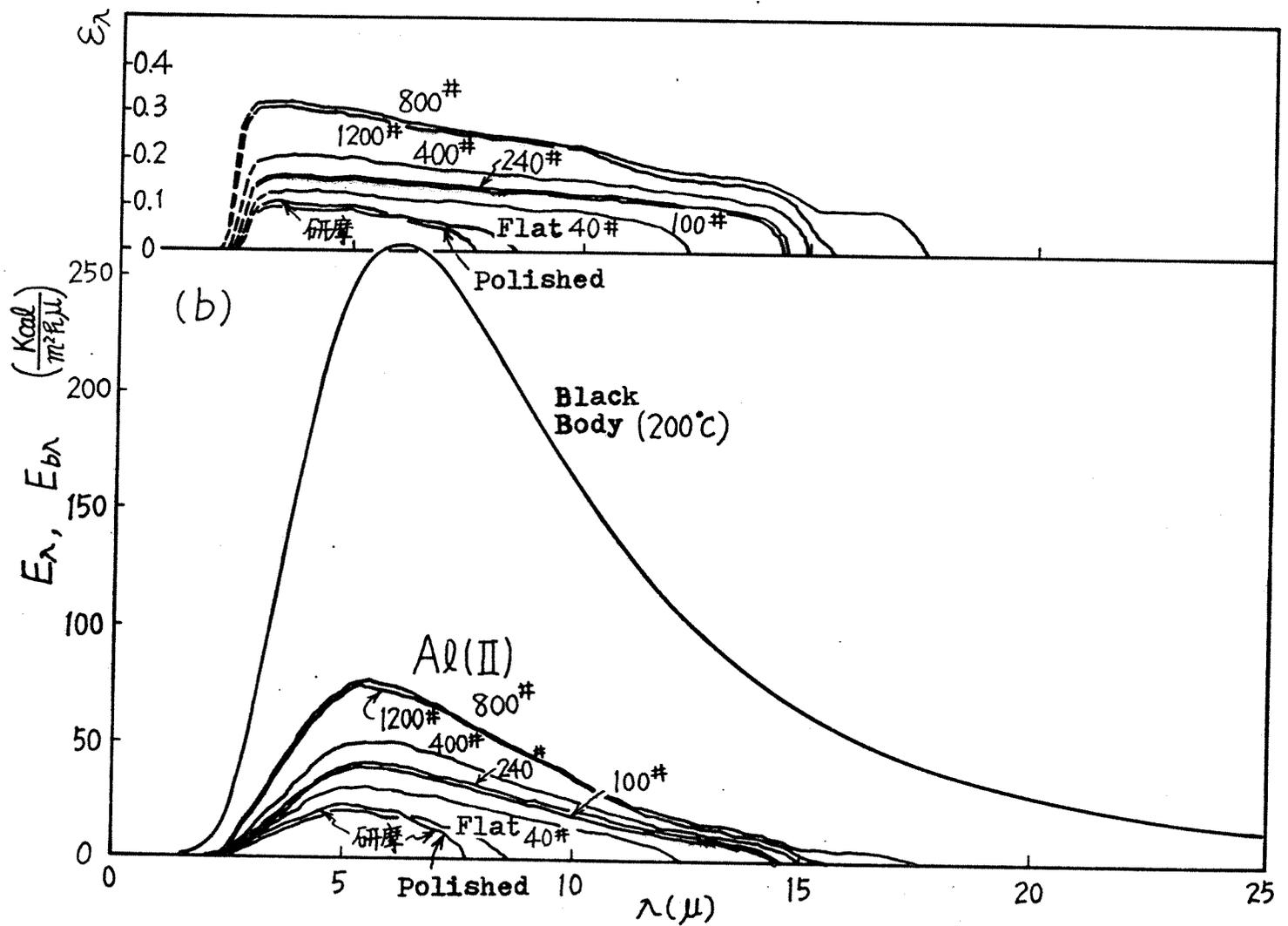


図 6.7 (b) Al(II) 試料の単色ふく射およびふく射エネルギー分布

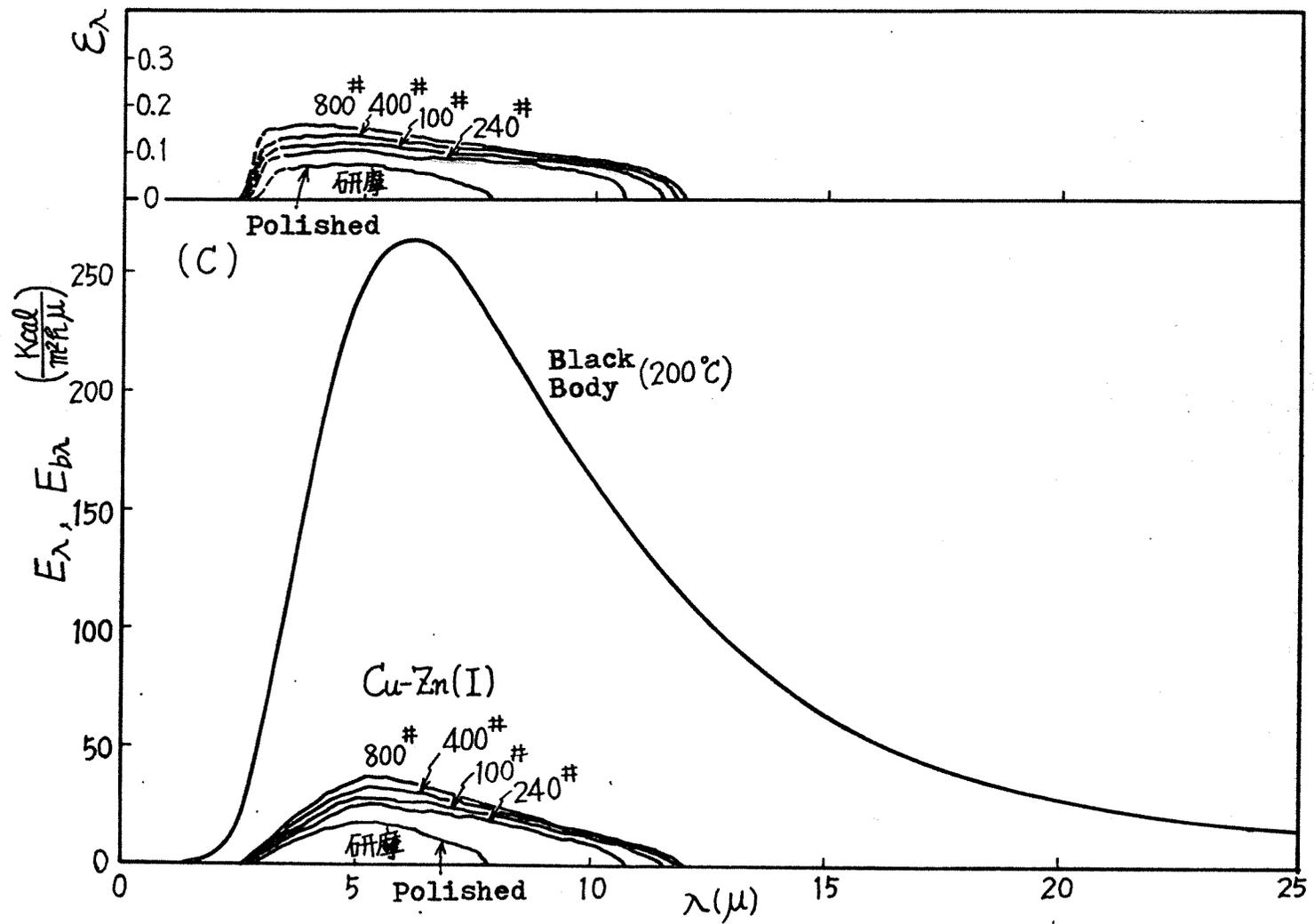


図 6.7 (C) Cu-Zn(I) 試料の単色ふく射率およびふく射エネルギー分布.

(図 6.11(d)) 単色ふく射率値にはあまり差違がみられない。これは黄銅を研磨紙でスクラッチしても表面のよごれはほとんど起らないものとおもわれる。

あらさ曲線から求めたあらさピッチおよび開口率から判断して、研磨面と 40 # , 100 # および 240 # スクラッチ面の単色ふく射率の変化内容は、単純な表面あらさの増加に原因があり、しいてあけるならば 400 # および 1200 # スクラッチ面における単色ふく射率の若干の増加は、試料表面のごくわずかなよごれおよび微細なあらさに起因するものとおもわれる。

いずれにしても、温度 200 °C における黄銅試料のふく射エネルギーは微弱で、分光計の感度などから考えて測定誤差の割合が増すことは免れられず、これが黒体比較法の欠点ともいえる。

これら金属スクラッチ粗面のふく射特性を論ずる場合、従来からのあらさ計による測定値との関係としてではなく、あらさ曲線の解析を行なつてあらさピッチおよび開口率との関係で示すべきことは、前述の全ふく射における指向ふく射率の場合と同様である。

## 2. 2 塗装平面および粗面の垂直単色ふく射率<sup>75)</sup>

ブラウン、グリーンおよびベージュの塗装平面の温度  $100^{\circ}\text{C}$ 、 $200^{\circ}\text{C}$ 、 $300^{\circ}\text{C}$  および  $400^{\circ}\text{C}$  における垂直単色ふく射率の測定値と、それらから算出された波長に対するふく射エネルギー分布を図 6.8 (a) および (b) に示す。ただし、この場合の測定値の処理は、異なった温度間の測定値を比較する都合上、式 (5.5) によって計算している。

これらの結果によれば、ブラウンは既に述べたように垂直全ふく射率が各温度において非常に大きな値を示したのは、広い波長範囲にわたって単色ふく射率  $\varepsilon_{\lambda}$  がほぼ一定の大きな値を有するためで、ブラウンは黒体に近い灰色体とみなされる。図示していないが、ブラック、グレイなどの暗色塗料も同様な性質を有している。グリーン、ベージュなどの明色塗料の全ふく射率がブラウンのそれより低いのは、波長の短いところで単色ふく射率が小さくなり、したがってエネルギー分布曲線の山形が左側から崩れ、黒体のそれとは異なった小さな形状となるため、この傾向は温度上昇とともに、とくにベージュにおいて著しくあらわれる。

われわれは、日常の体験から白っぽい明るい色の物体は可視光線をよく反射することを知っている。反射がよいこと、すなわち反射率が大きいことはふく射率 ( $=$

吸収率)が小さいことになるから、明色物体の可視光線のふく射率はきわめて小さいものとおもわれる。可視光線の波長帯はおおよそ  $0.36 \sim 0.75 \mu$  で、一方、いま問題にしている波長帯は熱線であるからおおよそ  $2 \sim 25 \mu$  であり、両者の波長域は異なるが熱線の短波長域における物体性状は可視域における性質に全然無関係ではなく、割合類似しているものとおもわれる。そして、物体表面から射出されるふく射エネルギーの分布は、温度上昇とともに短波長域に移行するから、塗装平面においても明色塗料は高温度において反射率は比較的高く、逆にふく射率は低下する結果になったものと推察される。

ブラウン、グリーンおよびベージュにアスベスト粉末を混合して塗装した粗面の温度  $200^{\circ}\text{C}$  における単色ふく射率およびふく射エネルギー分布曲線を図 6.9 に示す。塗装面を粗面にすることにより、単色ふく射率およびエネルギー分布曲線には明らかに変化があらわれ、各試料とも波長に対して一定な、しかも非常に大きな単色ふく射率を示している。この理由は、粗面を形成する球形(二次元では円弧)空洞により自己形態係数が出現し、その開口から射出されるふく射は直接射出の成分に反射成分が加わって見かけ上ふく射率が増大したためである。この場合、ふく射率増加に関与する波長域は、ふく射の波長があらさのピッチにくらべて小さければとくに問題はなく、したがって、ふく射率増加の余地のある短波長

域でその効果が顕著にあらわれたものと考えられる。

分光ふく射におけるこのような現象も、波長を無視すれば、全ふく射の垂直ふく射率および指向ふく射率が平面の場合よりランダム粗面において増大することを示した著者の解析結果あるいは Sparrow<sup>32)</sup> の理論から容易に説明できる。

以上の測定結果の検討と議論から、グリーンまたはベージュのような明色塗料であつても、表面を十分粗にすることにより、黒度の高い無指向性の灰色体にすることができ、暖房装置の放熱面としてこれを利用することはきわめて有効なことが明らかになつた。

なお、塗装平面および粗面のふく射特性を論ずる場合、従来からのあらさ計によるあらさ測定値との関連性としてではなく、あらさ曲線の解析を行なつてあらさのピッチおよび開口率との関係で示されるべきことは、前述の全ふく射における指向ふく射率の場合と同様である。塗装平面の分光スペクトルの測定例を付録5に示す。

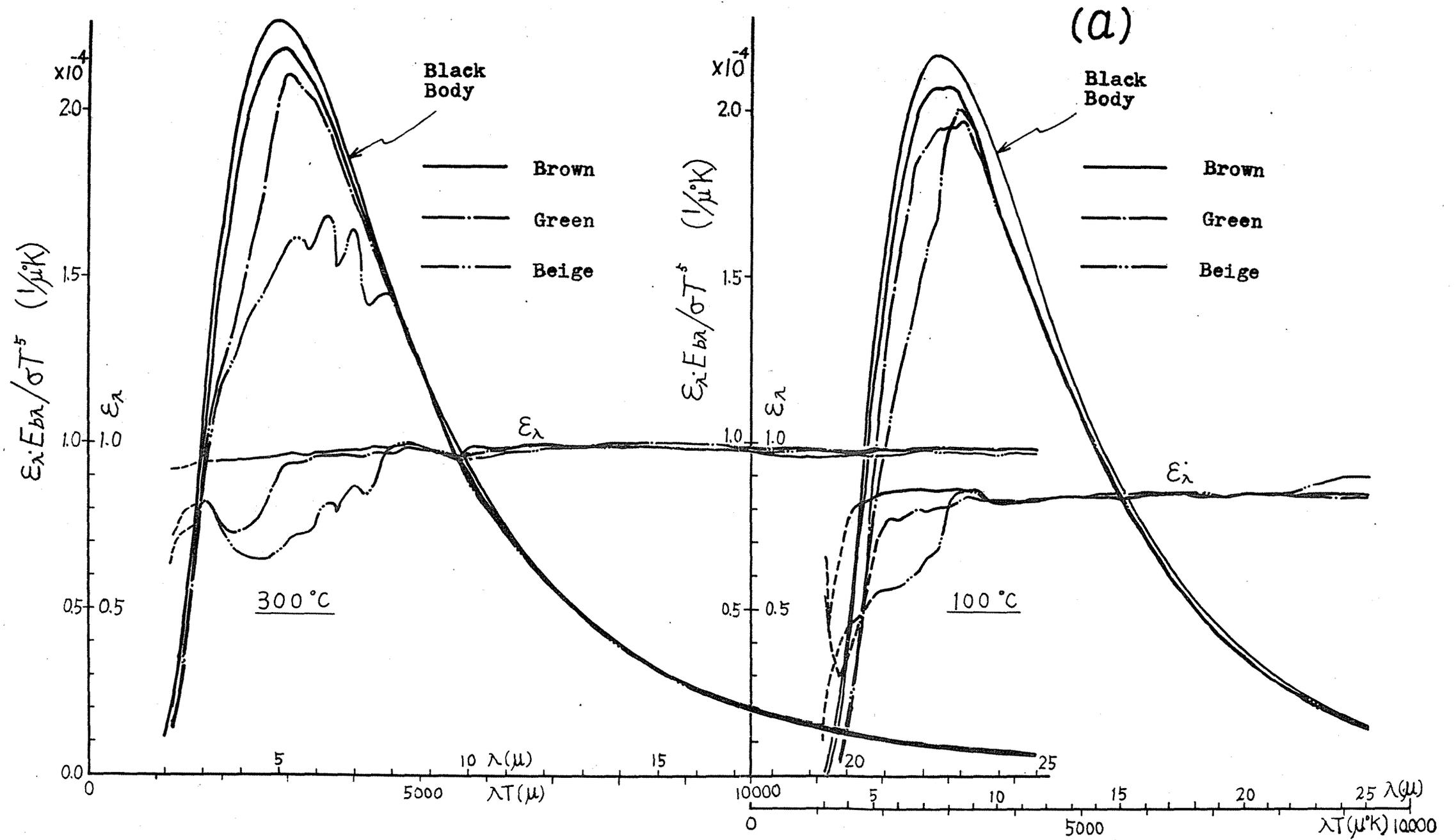


図 6.8 (a) 塗装平面の単色ふく射率およびふく射エネルギーの波長分布。

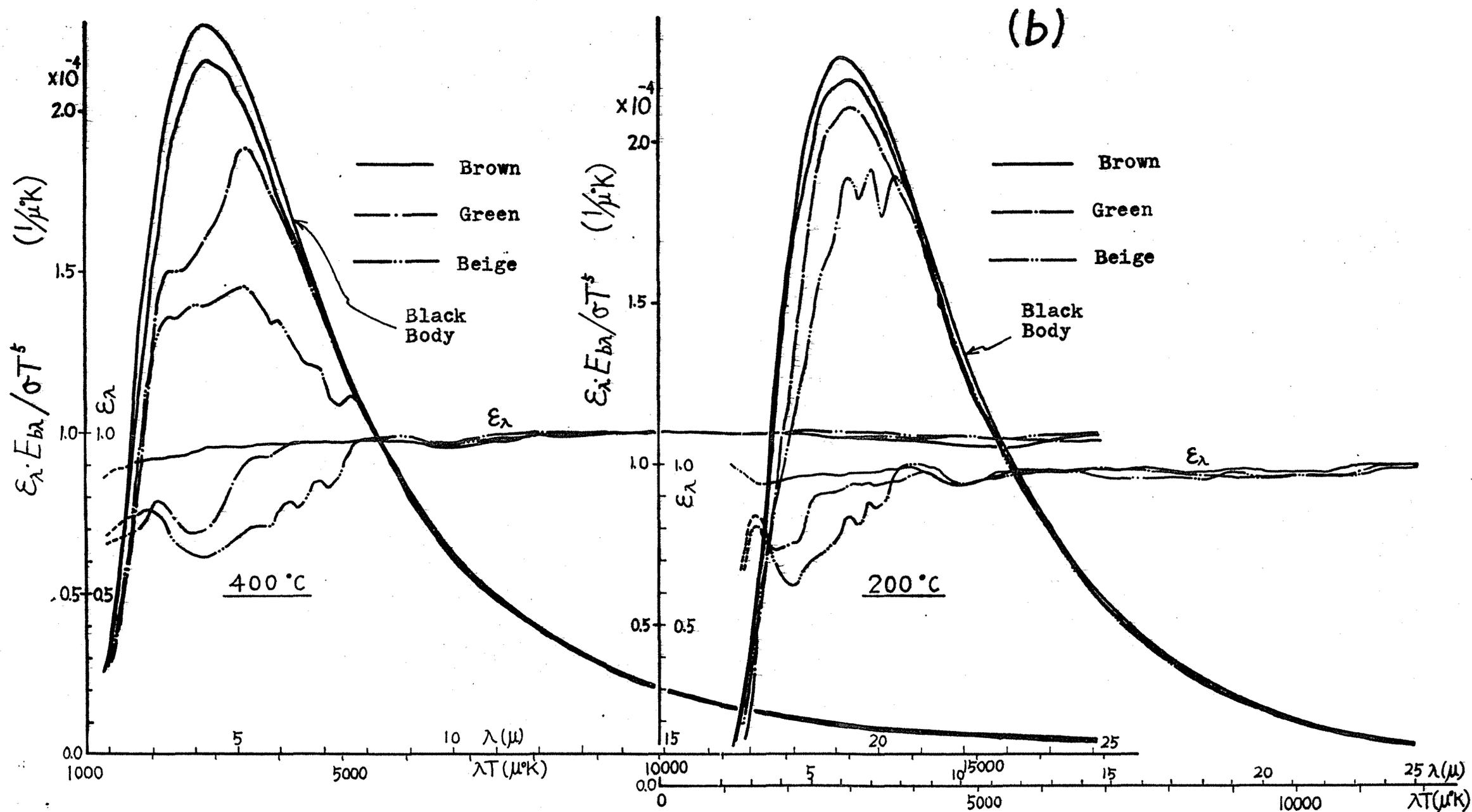


図 6.9 (b) 塗装平面の単色ふく射率およびふく射エネルギーの波長分布.

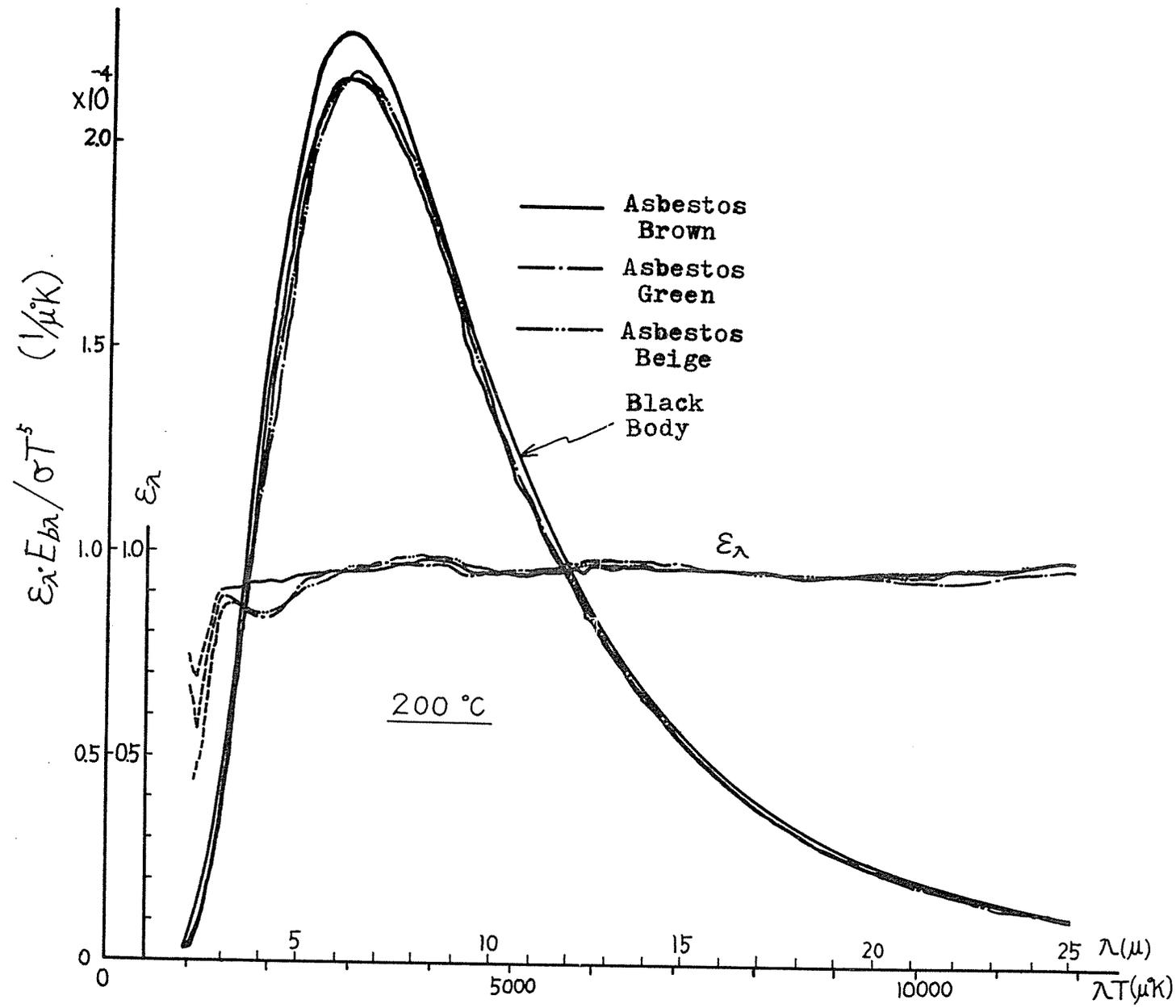


図 6.9 塗装粗面の単色ふく射率およびふく射エネルギーの波長分布.

### 3. 全ふく射測定と分光ふく射測定で得られたふく射率値の比較<sup>74)75)</sup>

金属スクラッチ面の各試料について、単色ふく射率 $\varepsilon_\lambda$ から式(6.1)を用いて算出された全ふく射率 $\varepsilon(\lambda)$ の値と、直接測定で得られた全ふく射率 $\varepsilon$ の値を比較して、あらかし測定値およびあらかし形状とともに表6.2に示してある。これによると両者の間によい一致がみられ、試料温度 $200^\circ\text{C}$ において、

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda} \quad (6.1)$$

なる定義式が成立することが明らかになった。

また、各種の塗装平面および塗装粗面について、分光スペクトルから式(6.1)により算出された $\varepsilon(\lambda)$ と直接測定による全ふく射率 $\varepsilon$ の値を、塗膜厚さ、あらかし測定値およびあらかし形状とともに表6.3に示す<sup>76)</sup>。各試料の $\varepsilon(\lambda)$ と $\varepsilon$ の間には、温度 $100\sim 400^\circ\text{C}$ にわたって良い一致が得られ、温度に無関係に式(6.1)が成立することが実験的に証明され、同時にこの測定方法および結果の処理方法の妥当性を裏づけることができたものとおもわれる。

表 6.2 金属スクラッチ粗面の垂直ふく射率、あらし測定値およびあらし形状の比較

試料	$\varepsilon(\lambda)$	$\varepsilon$	$H_a$	$H_{rms}$	$H_{max}$	$\phi(\varepsilon)$	$\phi(r)$	備考	
Al(I)	40#AA*	0.13	0.12	3.7 $\mu$	4.1 $\mu$	20.5 $\mu$	45°~60°	60°~75°	市販アルミのロール面を直接スクラッチした試料
	100#AA	0.18	0.17	2.6	2.7	11.6	45°~60°	60°~75°	
	240#AA	0.34	0.36	1.8	1.8	8.5	---	60°~75°	
	400#AA	0.42	0.43	1.2	1.2	5.4	---	~75°	
	800#CC	0.29	0.25	0.8	0.8	1.9	75°~90°	75°~90°	
	1200#CC	0.28	0.26	0.7	0.7	1.2	75°~90°	75°~90°	
	Flat	0.03	0.04	0.6	0.6	0.4	Flat	Flat	
Al(II)	40#AA	0.07	0.09	4.0	4.4	22.0	60°~75°	60°~75°	アルミをか性ソーダで処理後スクラッチした試料
	100#AA	0.11	0.11	3.3	3.5	18.8	~60°	60°~75°	
	240#CC	0.11	0.11	1.8	2.0	10.0	45°~60°	60°~75°	
	400#CC	0.14	0.12	1.2	1.4	5.5	~60°	~75°	
	800#CC	0.20	0.18	0.9	1.0	3.7	~75°	75°~90°	
	1200#CC	0.20	0.16	0.7	0.8	2.0	~90°	75°~90°	
	Polished	0.03	0.03	0.7	0.9	1.8	Flat	90°~ Flat	
	Flat	0.03	0.04	0.8	0.9	1.1	Flat	75°~90°	

表 6.2 (フブキ)

試料	$\varepsilon(\lambda)$	$\varepsilon$	$H_a$	$H_{rms}$	$H_{max}$	$\delta(\varepsilon)$	$\delta(r)$	備考	
Al(III)	40#AA	---	0.128	5.0 $\mu$	5.5 $\mu$	27.0 $\mu$	60°~75°	~75°	市販アルミのロール面をスクラッチ後、高純度のアルミを真空蒸着した試料
	100#AA	---	0.099	2.8	3.4	14.0	60°~75°	~75°	
	240#AA	---	0.114	1.9	2.2	10.0	45°~60°	60°~75°	
	400#AA	---	0.076	1.0	1.1	5.3	45°~60°	60°~75°	
	800#CC	---	0.074	0.6	0.6	2.0	60°~75°	75°~90°	
	1200#CC	---	0.074	0.5	0.5	1.3	75°~90°	75°~90°	
	Flat	---	0.04	0.5	0.5	0.4	~90°	~90°	
Cu-Zn (I)	40#AA	0.06	0.06	2.2	2.3	11.4	~60°	60°~75°	市販黄銅のロール面を直接スクラッチした試料
	100#AA	0.06	0.07	1.3	1.3	6.0	75°~90°	~75°	
	240#CC	0.06	0.05	1.0	2.1	4.6	75°~90°	~75°	
	400#CC	0.07	0.07	0.8	0.8	2.1	75°~90°	75°~90°	
	800#CC	0.08	0.08	0.6	0.7	0.7	75°~90°	~90°	
	1200#CC	0.06	0.06	0.6	0.6	0.7	~90°	~90°	
	Polished	0.02	0.02	0.6	0.6	0.4	~90°	Flat	

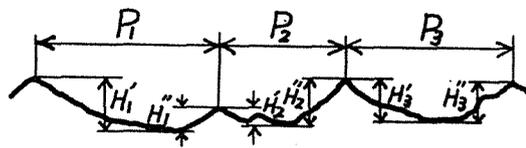
\* 記号AAは溶融アルミ十と粒. CCは炭化けい素と粒の研磨紙.



#### 4. あらさ曲線の解析<sup>71) 73)</sup>

表面あらさ計（小坂SE-4，触針半径5 $\mu$ ，針圧0.49）で記録されたあらさ曲線を解析するにあたって、図6.10のごとくあらさの大きさや形状をあらさピッチ（ $P$ ）と開口率（ $P/H_m$ ）で表示する。あらさ曲線には触針半径より狭いくぼみはカットオフされ、またあらさ曲線中の小さな振幅のあらさ（ $H_{rms}$  よりよほど小さいあらさ）は解析の対象とせず省略してある。

以上の方法でふく射率測定に用いた試料のあらさ曲線の解析を行ない、その結果を度数分布にして図6.11の（a）～（f）に示す。これらの図から各試料のあらさの特徴を知ることができる。



$$\text{ピッチ } P = \frac{\sum P_i}{n}, \quad \text{開口率 } \frac{P}{H_m} = \frac{P}{\frac{\sum (H_1 + H_2)}{2n}}$$

Pitch Opening Ratio

図6.10 あらさ曲線の解析方法。

すなわち、図 6.11 の (a) と (b) に示された  $Al(I)$  と  $Al(II)$  を比較すると、あらさピッチは  $Al(II)$  がいくらか大きい。開口率は  $Al(I)$  は割合広い範囲に分布し、 $Al(II)$  は値の小さいところに狭く分布している。これは  $Al(II)$  のスクラッチ前の素材はか性ソーダによるエッチングでかなり荒れており、比較的深いくぼみがあったためとおもわれる。(c) の  $Al(III)$  と  $Al(I)$  を比較すると、ピッチにおいて  $Al(III)$  の 1200<sup>#</sup> 試料が小さく測定されたが、これは蒸着粒子の影響があらわれたものとおもわれる。そのほかの試料はピッチおよび開口率とも  $Al(I)$  と同様な分布を示している。 $Al(I)$  の平滑面、800<sup>#</sup> および 1200<sup>#</sup> 試料において、また  $Al(III)$  の平滑面 ( $Al(I)$  と同じ試料) においてあらさピッチの分布が小さいほうに移行しないのは、微小あらさがあらさ計の触針半径によってカットオフされたり、あらさ曲線からのよみとりの際に省略されたため、測定値にはロール時の小さなうねりがあらわれたものとおもわれる。

(d) に示された  $Cu-Zn(I)$  のあらさピッチの大きさと分布の傾向は  $Al(I)$  とほとんど同様である。開口率は 40<sup>#</sup> 試料で最小で粒度の減小とともに増大するが、全体的に大きな値で広い範囲に分布している。このことは、黄銅スクラッチ面は口の開いた比較的浅いみぞが多く分布していることを示している。研磨面、1200<sup>#</sup> および 800<sup>#</sup> 試料においてあらさピッチが小さく

ならないのは、アルミニウム試料の場合と同様な理由によるものとおもわれる。

(e), (f) に示された塗装面では、あらさピッチは塗料だけの塗装平面で小さく、アスベストを混合した塗装粗面で大きい。開口率はその逆になり、アスベスト混入塗装面はピッチの大きい深いくぼみが多く分布していることがわかる。しかし、くぼみを円弧みぞに換算して  $\theta$  であらわすと、たかだか  $\theta = 45^\circ$  あたりに分布のピークがあり、見かけほど深いくぼみは少ないといえる。もつとも、この場合もあまり口の狭い深いくぼみはあらさ測定時にカットオフされてしまう。

これらのあらさ曲線の解析からよみとったあらさ形状を  $\theta$  に換算して、 $\theta$  ( $r$ ) の記号で表 6.2 および表 6.3 に示してある。表から明らかのように、指向ふく射率の形状からよみとった  $\theta$  ( $\varepsilon$ ) の値とあらさ曲線からよみとった  $\theta$  ( $r$ ) の値はよく一致している。

解析模形として考えた円弧みぞ開口の大きさは、試料のあらさ曲線のピッチに相当し、解析の際に円弧みぞ開口の大きさはふく射の波長より大きいと仮定したが、これは実験においてもほぼ満足されている。すなわち、温度  $100 \sim 400^\circ\text{C}$  の範囲におけるふく射エネルギーの  $70 \sim 85\%$  が波長  $3 \sim 15 \mu$  の間に分布しており、それにたいしてあらさピッチは各試料ともだいたい  $12.5 \mu$  以上の大きさであり、一部重複するところもあるが大部分はあらさピッチがふく射の波長より大きい。

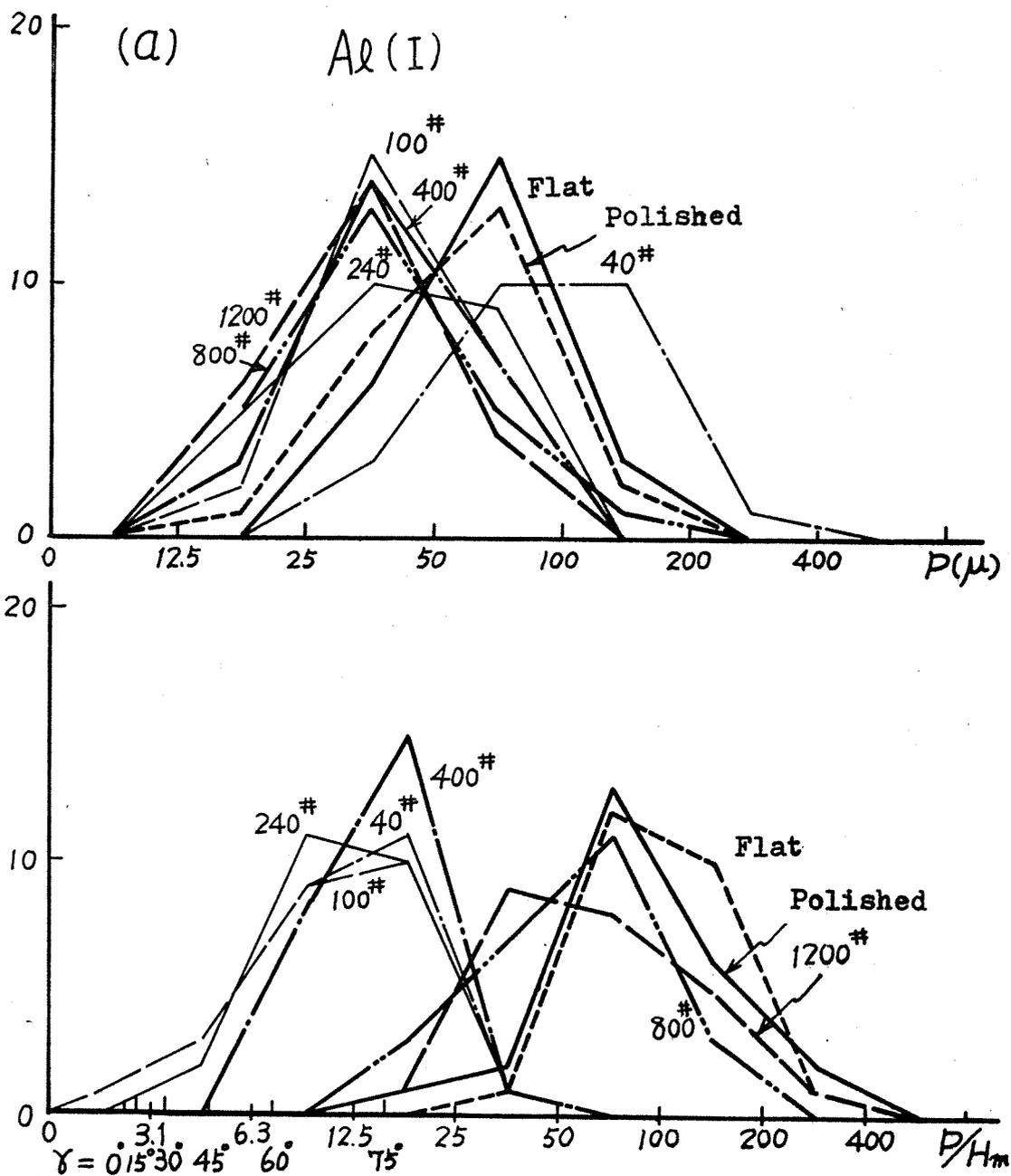


図 6.11 (a) Al(I) 試料のあらさピッチと開口率の度数分布.

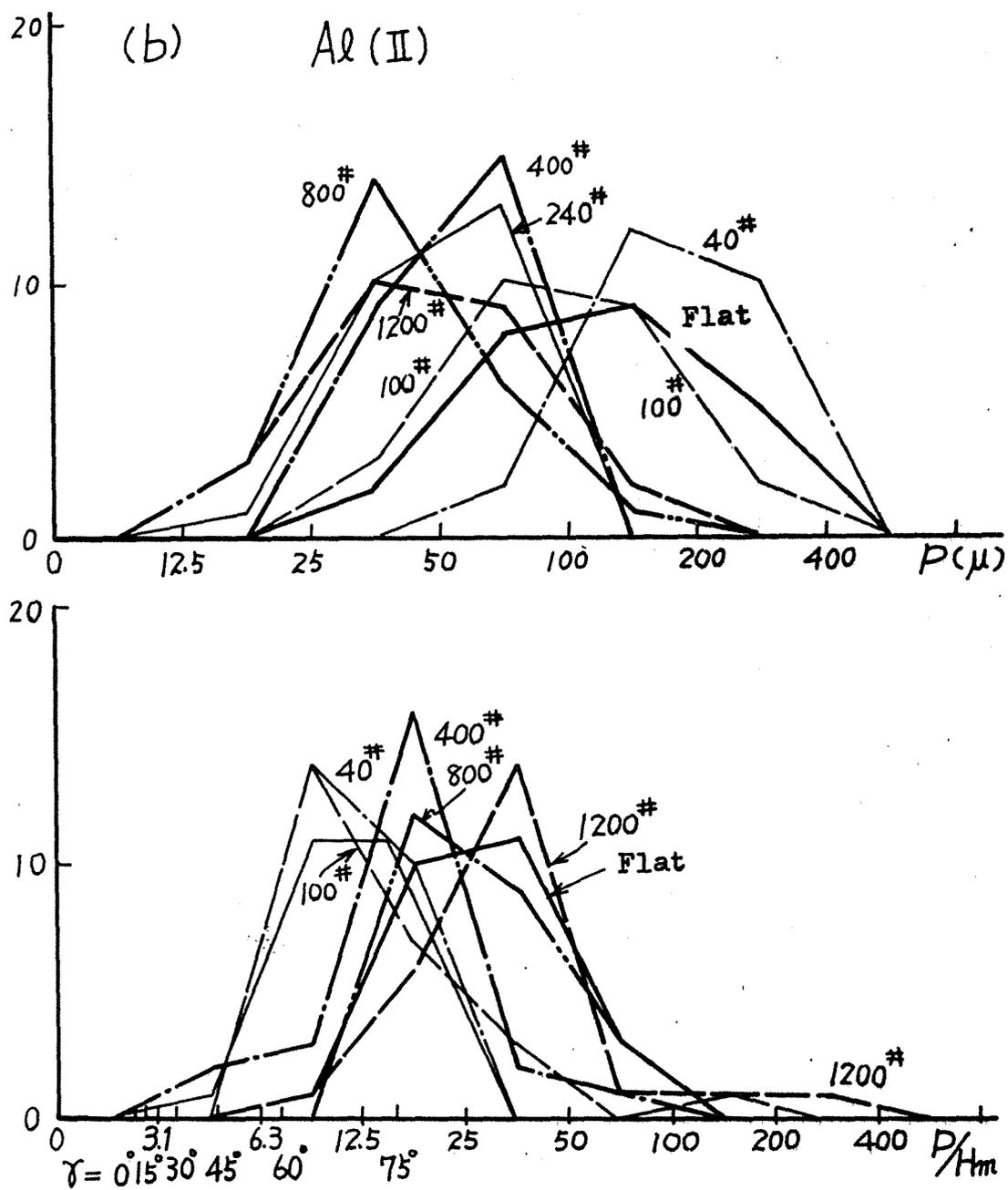


図 6.11 (b) Al (II) 試料のあらさピッチと開口率の度数分布.

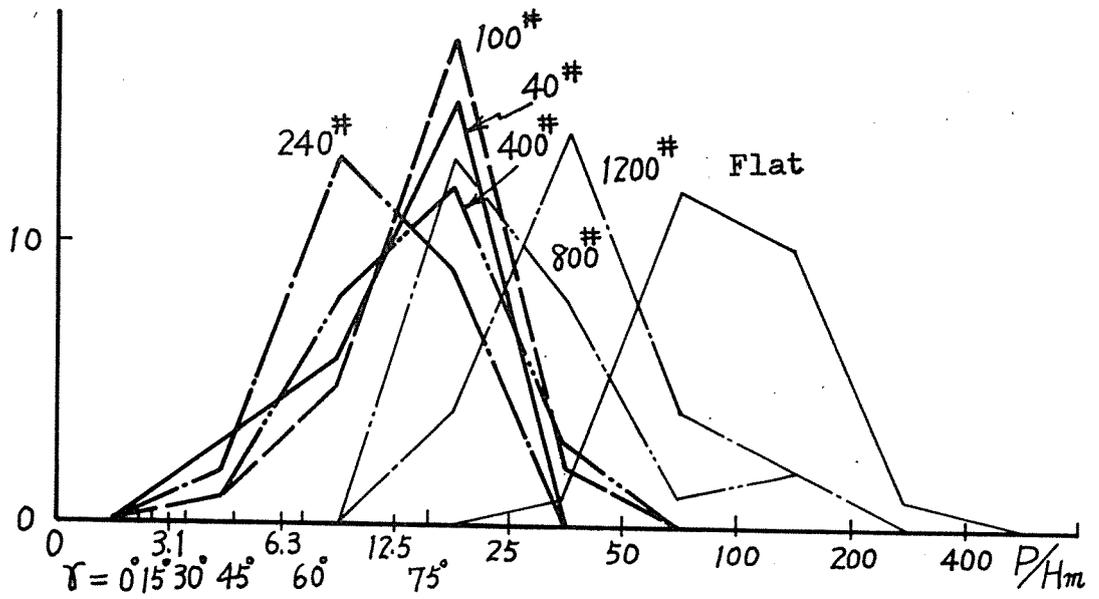
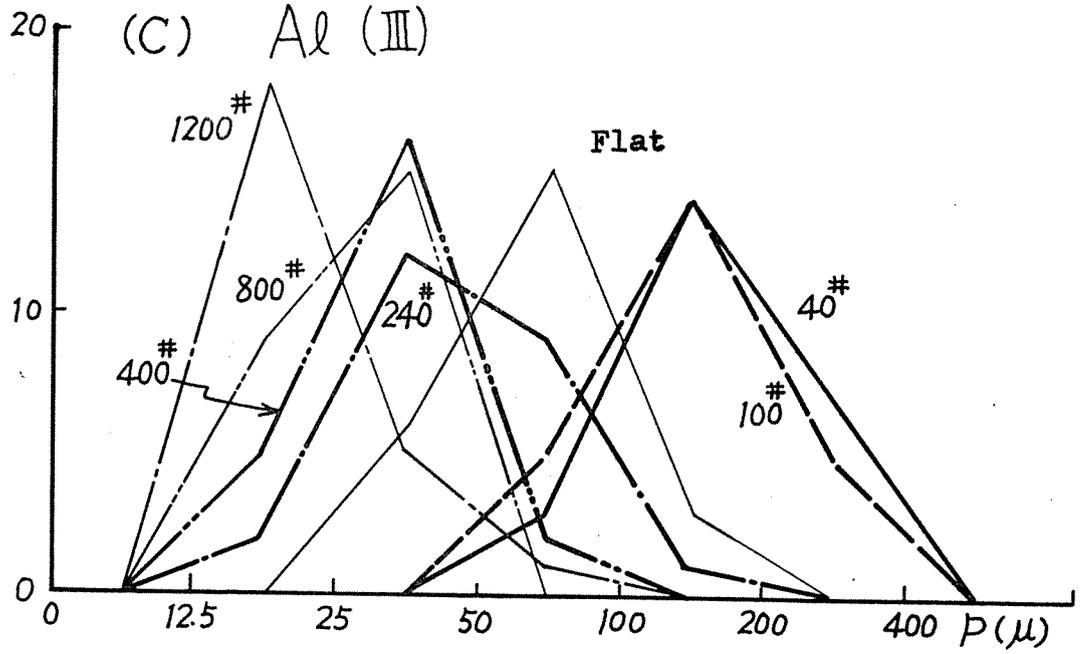


図 6.11 (C) Al (III) 試料のあらしピッチと開口率の度数分布.

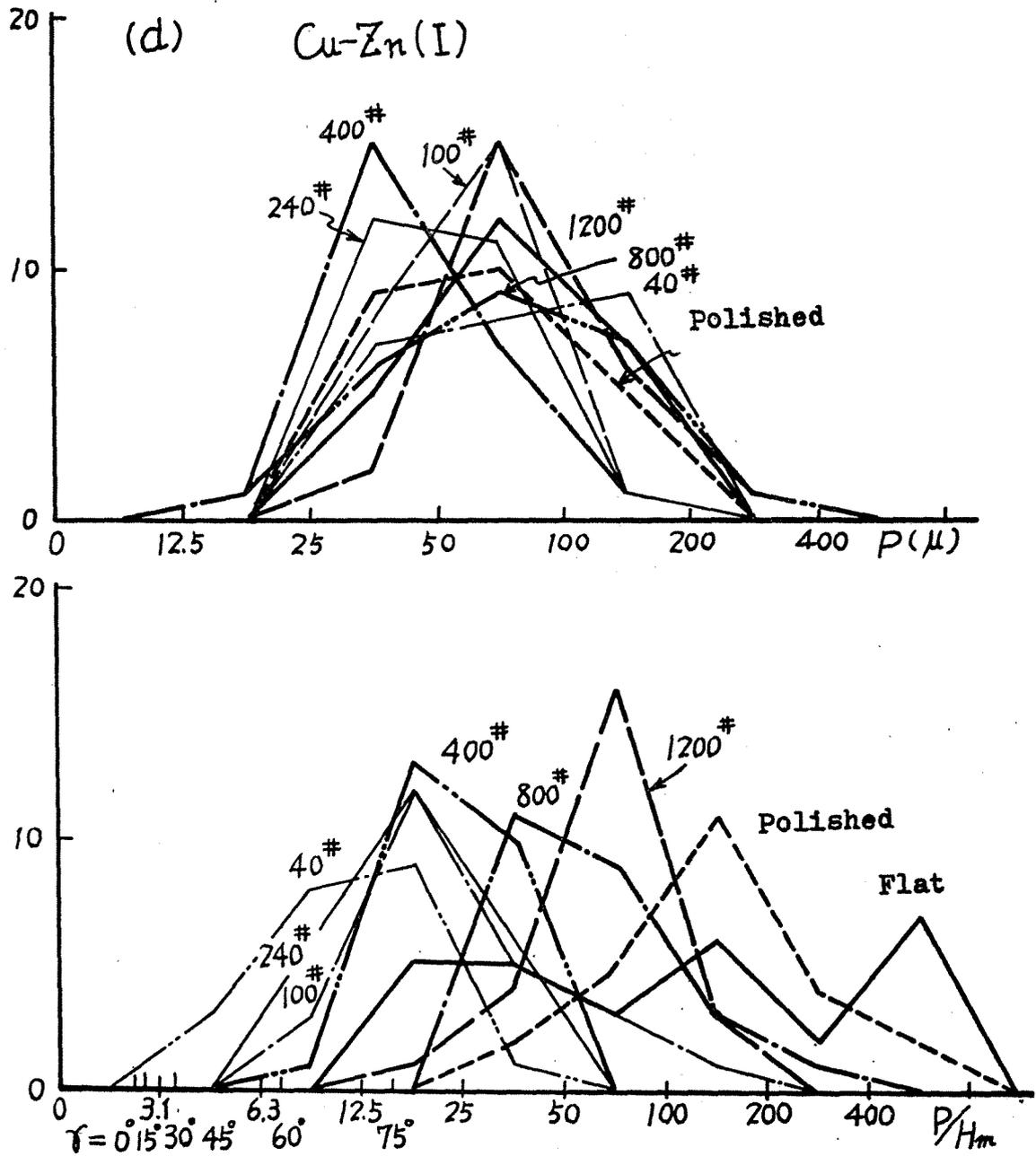


図 6.11 (d) Cu-Zn(I) 試料のあらさピッチと開口率の度数分布。

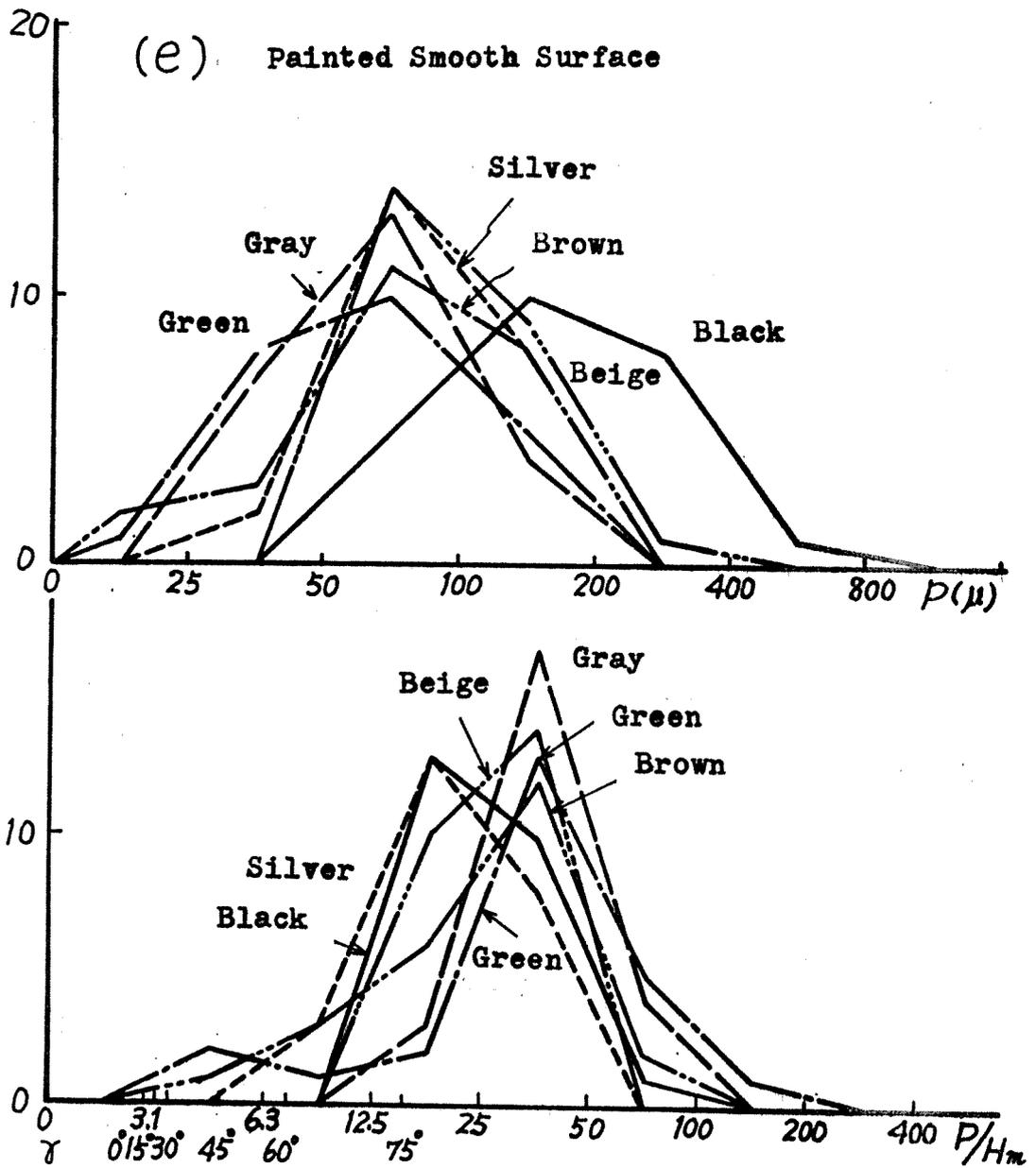


図 6.11 (e) 塗装平面のあらさピッチと開口率の度数分布

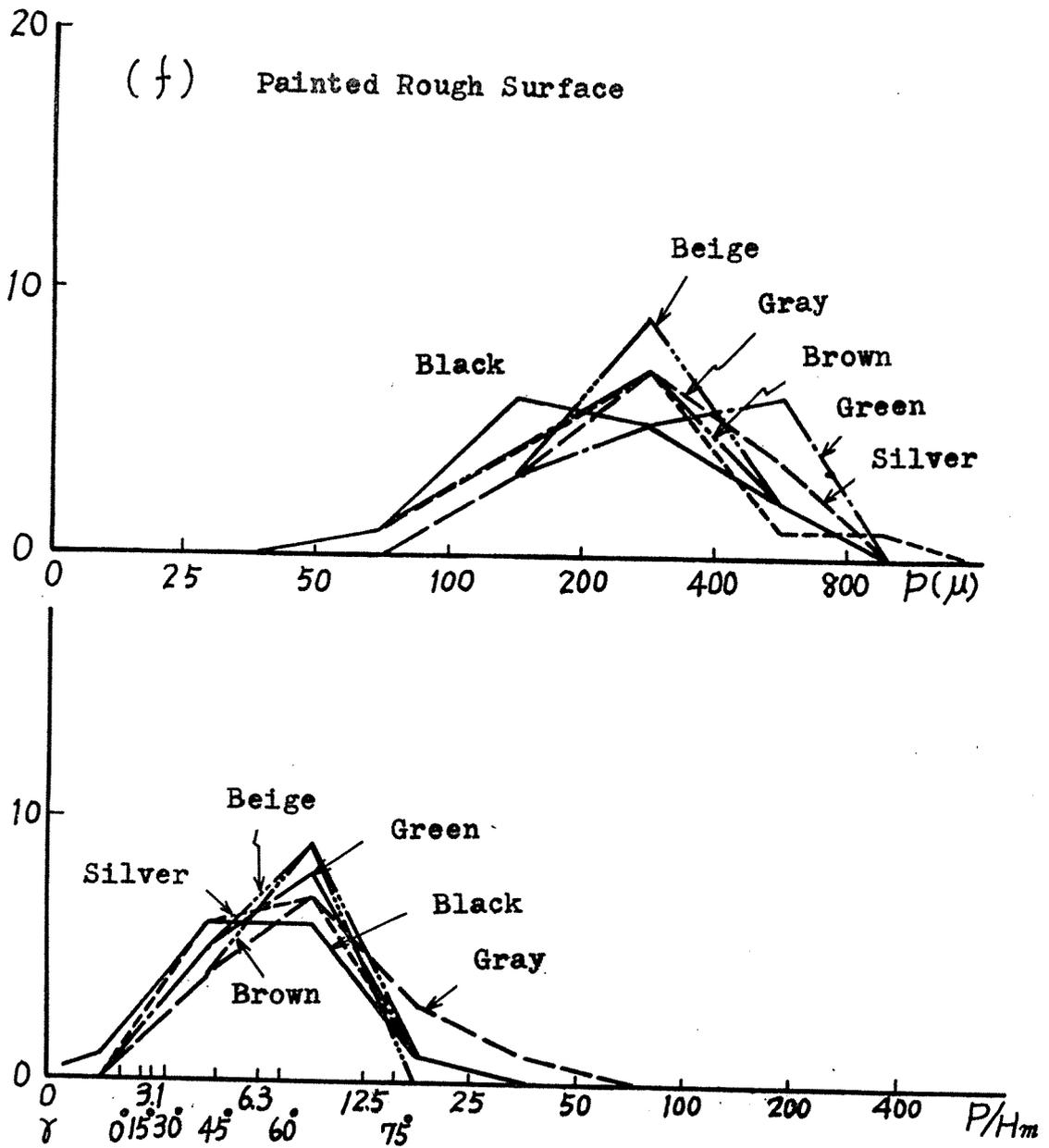


図 6.11 (f) 塗装粗面のあらさピッチと開口率の度数分布

あらさ計によるあらさ曲線の測定例を図 6.12 (a) ~ (e) に示す。

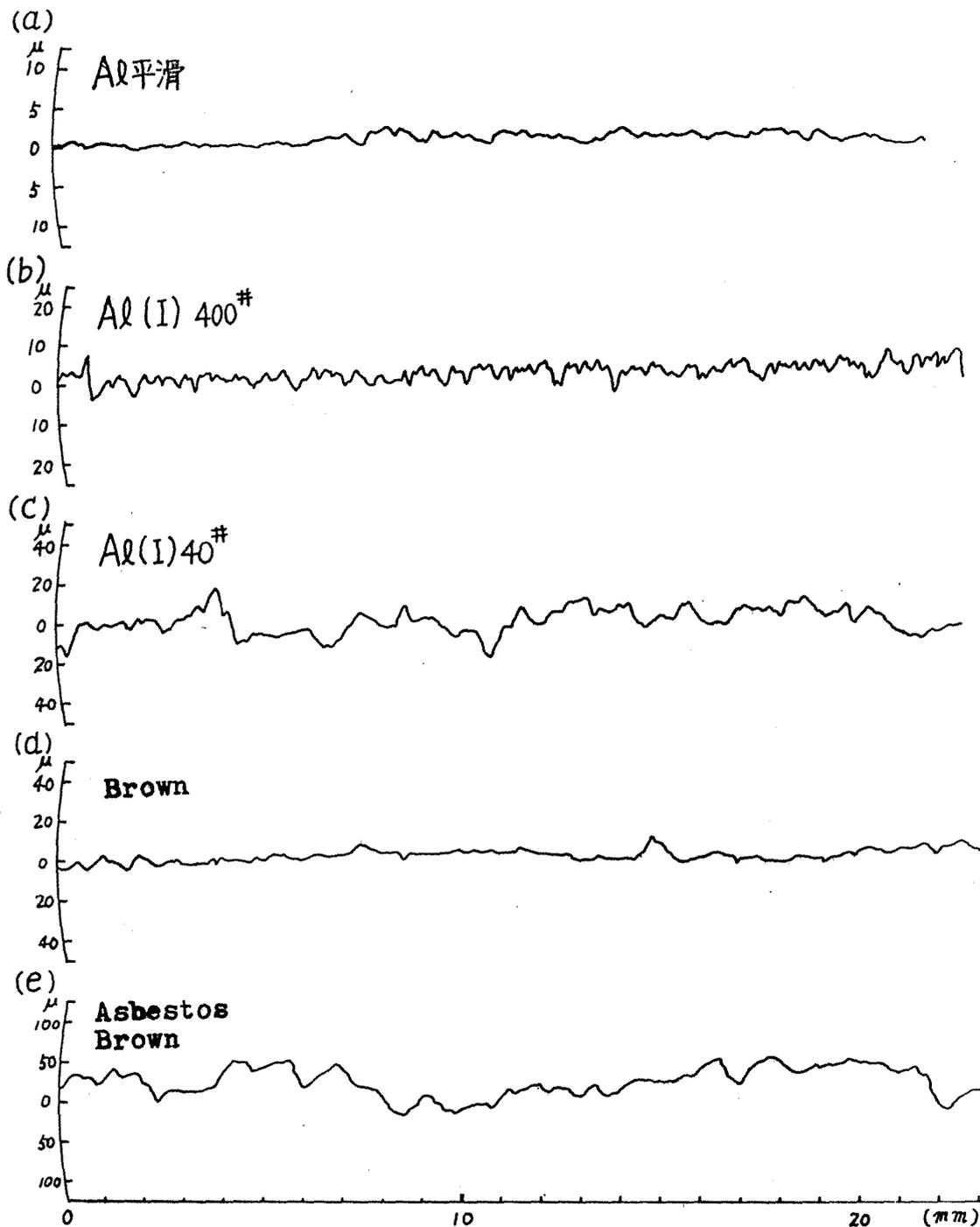


図 6.12 アルミニウム試料および塗装試料のあらさ曲線

## 第 7 章 ま す び

以上に述べたように、材料を金属と非金属に大別して、V字みぞおよび円弧みぞ粗面の指向ふく射率の理論解析および任意のあらさの粗面の指向ふく射率の理論解析を行ない、その結果を金属についてはアルミニウムおよび黄銅のスクラッチ粗面を用いて、非金属については塗装粗面を用いて実験的に確かめ両者の間によい一致を得た。さらに、ふく射の測定では全ふく射のみでなく、分光放射計による単色ふく射率の測定をあわせて行ない、単色ふく射率からふく射エネルギーの波長分布を算出し、単色ふく射率によって示された全ふく射率の定義式が成立することを明らかにした。

そのほか、この研究によって、固体ふく射に関して今まで明確にされていなかったいくつかの新知見を得ることができ、また既に知られていた現象のあるものについては、これを理論的に説明することができた。同時に今後の課題として、基礎研究における未解決問題の究明および実用面における応用研究などが残されていることが明白にされた。

つぎに、本研究によって明らかにされた結果および今後に残された問題点を示す。

(1) 金属のV字みぞ粗面の指向ふく射率は鋭い指向性を示す。とくに開き角の小さいV字みぞの垂直ふく

射率は、方向角中の大きい方向の指向ふく射率よりかなり強い。

(2) 金属の円弧みぞ粗面の指向ふく射率は円弧のある鋭い指向性を示し、 $\theta = 0$  の方向でふく射率は極大値を示す。

(3) アルミニウムおよび黄銅を研摩紙でスクラッチした粗面の指向ふく射率は、あらしを種々の深さの円弧みぞが一定の割合で分布したものと仮定して解いたランダム粗面の結果とよく一致する。ただし、みぞ内面のふく射の射出および反射の特性は *Schmidt* らが導いた近似式に従うものとする。

(4) あらしとふく射率（または反射率）の関係を扱った多くの研究によれば、あらしがふく射の波長より小さい場合にあらしが増すとふく射率は一般に増大（反射率は減少）するといわれているが、あらしがふく射の波長より大きい領域における関係について明解な理論的説明はなされていない。この現象は、単に  $H_{max}$ 、 $H_{rms}$  あるいは  $H_a$  などの表面のあらし、すなわちあらしの寸法と直接関係づけるよりも、みぞあるいはくぼみのピッチと深さの比、すなわちあらし形状との関係に着目して解析することにより理論的に説明できる。

(5) アルミニウムおよび黄銅などの研摩紙によるスクラッチ面のみぞは比較的浅く、あらしにもとづくふく射率の正味増加量はさほど大きくない。むしろ表面処理の際の表皮層の化学的変質もしくは異質物の固着に起

因して、ふく射率の異常な増大をもたらすことがある。

(6) このように、金属についてあらさとふく射率の関係を論ずるときは、表面の物理的および化学的「よごれ」によって大きく影響されることを念頭におかなければならない。

(7) 金属の表面あらさの大きさとふく射の波長が接近したときに起ると予想される複雑な波動現象はほとんどみられない。その理由は、あらさのみそまたはくほみが浅いこと、および両者が接近した領域におけるあらさおよびふく射エネルギーの分布密度が小さいためとおもわれる。

(8) アルミニウムおよび黄銅などのスクラッチ面のふく射を分光して得られた垂直単色ふく射率は、波長に対してあまり変化のない単調な値になり、垂直方向に限れば灰色体近似ができる。

(9) 塗料などの非金属材料の垂直ふく射率は一般に大きい。これにアスベスト粉末を混合して塗り粗面にするとさらに増大し、その割合は中の大きい方向で著しく、いわゆる Lambert の余弦則がほぼ完全に適用できる乱射面となる。

(10) 塗装粗面の垂直および指向ふく射率増大の現象は、あらさを種々の深さの円弧みそが一定の割合で分布したものと仮定して解いた結果によく一致する。ただし、みそ内面のふく射の射出および反射の特性は非金属に関する Fresnel の式に従うものとする。

(11) 塗装面のふく射を分光した結果によれば、平面では短波長域における垂直単色ふく射率は比較的小さいが、粗面にすると短波長域のふく射率も増大し、全波長にわたって一律な大きな単色ふく射率を示し、黒度の高い灰色体となる。

(12) 暗色塗料はもとより明色塗料の塗装面であつても粗面にすることによりふく射率は増大し、塗装粗面のふく射率増大の現象は色にはほとんど無関係に期待できる。

#### 測定法の面では

(1) 黒体比較法によりふく射率を直接求めることは、物体が見かけ上射出しているふく射エネルギーの波長範囲についてふく射率が得られることになり実際に即している。この節の意義はとくに分光ふく射において強調される。

(2) 真空熱電対形検知器で測られた全ふく射率と、分光放射計による分光結果から求められた単色ふく射率をふく射率の定義式に代入して算出された全ふく射率とはよい一致を示し、測定法の信頼性が保証された。

#### 応用面の価値としては

(1) 周き角の小さい食錐V字みぞ粗面の有する垂直ふく射率の鋭い指向性を、氷層などの融解に利用する。  
(熱線融雪と仮称する)

(2) 塗料粗面において色には無関係に垂直ふく射率

および指向ふく射が増大する原理を暖房装置の放射面として利用する。

(3) アスベスト粉末混入耐熱塗料の塗装粗面は、熱的および機械的に丈夫な塗膜を形成し内部を保護するので、単に美観の臭ばかりでなく、素材の耐食性を向上させる役目とする。

今後の課題としては

(1) 黒体比較法と標準光反射法によって求められたふく射率間の比較を行なつて、Kirchhoff の法則の適用範囲の検討を行なう。

(2) 金属平面および粗面が異質の膜面で覆われ(いる)場合のふく射率の理論計算と測定を行なう<sup>15) 16)</sup>。

(3) 合金のふく射率の理論計算の可否の検討を行なう。たとえば、雪と雨との混合物の誘電率の理論計算がなされている<sup>22)</sup> ように、合金の成分元素と混合割合が既知の場合、合金の比透磁率および電気抵抗率が求められ、熱線に対する屈折率の算出方法が見出されるならば、合金のふく射率は容易に知ることができるといえる。

(4) 二面間および多面間のふく射伝熱において、各面のふく射の射出および反射に指向性がある場合の全ふく射による授受熱量の計算を行なう(非灰色体扱い)。

(5) 二面間および多面間のふく射伝熱において、指向性と波長特性を加味した単色指向ふく射率を用いて、各波長ごとのエネルギーを求めてから波長で積分すること

により、より厳密な授受熱量の計算を行なうことができる。

(6) マクロな表面あらさと指向ふく射率の関係がほぼ明りょうになったので、電子顕微鏡を用いてマイクロなあらさ形状および寸法と指向ふく射率の関係を明らかにする。

以 上

付 録

## 付 録 1

比較的低温域における黒体のふく射エネルギー分布

温度  $100^{\circ}\text{C}$  ,  $200^{\circ}\text{C}$  ,  $300^{\circ}\text{C}$  および  $400^{\circ}\text{C}$  における黒体のふく射エネルギー分布の計算結果を附表 1 (a), (b) (c) および (d) に示す。表には波長  $0.1 \sim 25 \mu$  の間で  $0.1 \mu$  ごとにふく射エネルギー  $E_{b\lambda}$  および  $E_{b\lambda}/\sigma T^5$  , 波長と温度の積  $\lambda T$  , ふく射エネルギーの累積  $\sum_{\lambda}^{\infty} (E_{b\lambda}/\sigma T^5) \cdot \Delta(\lambda T)$  の値を示してある。累積値は  $\lambda = \infty$  において 1 にならなければならない。

表から明らかのように、各温度における最高ふく射エネルギーを示す波長  $\lambda_{\max}$  は、温度  $100^{\circ}\text{C}$  ( $373.2^{\circ}\text{K}$ ) において  $\lambda_{\max} = 7.78 \mu$  , 温度  $200^{\circ}\text{C}$  ( $473.2^{\circ}\text{K}$ ) において  $\lambda_{\max} = 6.13 \mu$  , 温度  $300^{\circ}\text{C}$  ( $573.2^{\circ}\text{K}$ ) において  $\lambda_{\max} = 5.06 \mu$  , 温度  $400^{\circ}\text{C}$  ( $673.2^{\circ}\text{K}$ ) において  $\lambda_{\max} = 4.31 \mu$  となる。

波長の短いところで表が空欄になっているのは、計算機 (日本電子 JEC-5) の能力以上の桁数になり、オーバーフローしたためであり、これらの値は実質的に 0 とみなしてよい。

## 記 号 説 明

$$XI = \lambda (\mu)$$

$$EBXI = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

$$XIT = \lambda \cdot T$$

$$EBXIT5 = E_{b\lambda}/\sigma T^5 = \frac{c_1}{\sigma(\lambda T)^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

$$EBOXT4 = E_{b(\lambda_1 T \rightarrow \lambda_2 T)}/\sigma T^4 = \int_{\lambda_1 T}^{\lambda_2 T} (E_{b\lambda}/\sigma T^5) d(\lambda T)$$

CALCULATION OF PLANCK'S RADIATION FUNCTIONS  
 T= 373.2 DEG. K

XI	EBXI	XIT	EBXIT5	EBOXT4
0.1				
0.2				
0.3				
0.4				
0.5	0.33611E-23	186	0.95140E-29	0.35506E-27
0.6	0.51477E-18	223	0.14571E-23	0.54380E-22
0.7	0.23085E-14	261	0.65344E-20	0.24392E-18
0.8	0.11566E-11	298	0.32740E-17	0.12243E-15
0.9	0.13579E -9	335	0.38437E-15	0.14467E-13
1.0	0.58134E -8	373	0.16455E-13	0.62858E-12
1.1	0.12010E -6	410	0.33997E-12	0.13316E-10
1.2	0.14422E -5	447	0.40823E-11	0.16567E -9
1.3	0.11442E -4	485	0.32387E-10	0.13743E -8
1.4	0.65694E -4	522	0.18595E -9	0.83141E -8
1.5	0.29174E -3	559	0.82579E -9	0.39133E -7
1.6	0.10531E -2	597	0.29809E -8	0.15038E -6
1.7	0.32091E -2	634	0.90837E -8	0.48939E -6
1.8	0.85003E -2	671	0.24060E -7	0.13873E -5
1.9	0.20026E -1	709	0.56684E -7	0.35028E -5
2.0	0.42738E -1	746	0.12097E -6	0.80176E -5
2.1	0.83852E -1	783	0.23735E -6	0.16875E -4
2.2	0.15307E 0	821	0.43328E -6	0.33046E -4
2.3	0.26258E 0	858	0.74326E -6	0.60784E -4
2.4	0.42674E 0	895	0.12079E -5	0.10586E -3
2.5	0.66157E 0	933	0.18726E -5	0.17575E -3
2.6	0.98400E 0	970	0.27852E -5	0.27969E -3
2.7	0.14110E 1	1007	0.39941E -5	0.42876E -3
2.8	0.19590E 1	1044	0.55452E -5	0.63571E -3
2.9	0.26426E 1	1082	0.74802E -5	0.91487E -3
3.0	0.34743E 1	1119	0.98344E -5	0.12819E -2
3.1	0.44638E 1	1156	0.12635E -4	0.17534E -2
3.2	0.56175E 1	1194	0.15900E -4	0.23468E -2
3.3	0.69387E 1	1231	0.19640E -4	0.30798E -2
3.4	0.84271E 1	1268	0.23853E -4	0.39700E -2
3.5	0.10079E 2	1306	0.28530E -4	0.50348E -2
3.6	0.11889E 2	1343	0.33652E -4	0.62908E -2
3.7	0.13847E 2	1380	0.39194E -4	0.77535E -2
3.8	0.15941E 2	1418	0.45123E -4	0.94375E -2
3.9	0.18159E 2	1455	0.51402E -4	0.11355E -1
4.0	0.20486E 2	1492	0.57988E -4	0.13520E -1
4.1	0.22905E 2	1530	0.64836E -4	0.15939E -1
4.2	0.25401E 2	1567	0.71900E -4	0.18623E -1
4.3	0.27956E 2	1604	0.79132E -4	0.21576E -1
4.4	0.30553E 2	1642	0.86484E -4	0.24804E -1
4.5	0.33177E 2	1679	0.93910E -4	0.28308E -1
4.6	0.35811E 2	1716	0.10136E -3	0.32091E -1
4.7	0.38439E 2	1754	0.10880E -3	0.36152E -1
4.8	0.41048E 2	1791	0.11619E -3	0.40488E -1
4.9	0.43625E 2	1828	0.12348E -3	0.45097E -1
5.0	0.46156E 2	1866	0.13064E -3	0.49973E -1

XI	EBXI	XIT	EBXIT5	EBOXT4
5.1	0.48632E 2	1903	0.13765E -3	0.55110E -1
5.2	0.51042E 2	1940	0.14447E -3	0.60502E -1
5.3	0.53377E 2	1977	0.15108E -3	0.66141E -1
5.4	0.55630E 2	2015	0.15746E -3	0.72017E -1
5.5	0.57794E 2	2052	0.16359E -3	0.78123E -1
5.6	0.59865E 2	2089	0.16945E -3	0.84447E -1
5.7	0.61837E 2	2127	0.17503E -3	0.90979E -1
5.8	0.63707E 2	2164	0.18032E -3	0.97709E -1
5.9	0.65473E 2	2201	0.18532E -3	0.10462E 0
6.0	0.67133E 2	2239	0.19002E -3	0.11171E 0
6.1	0.68686E 2	2276	0.19442E -3	0.11897E 0
6.2	0.70132E 2	2313	0.19851E -3	0.12638E 0
6.3	0.71470E 2	2351	0.20230E -3	0.13393E 0
6.4	0.72703E 2	2388	0.20579E -3	0.14161E 0
6.5	0.73830E 2	2425	0.20898E -3	0.14941E 0
6.6	0.74854E 2	2463	0.21188E -3	0.15731E 0
6.7	0.75778E 2	2500	0.21449E -3	0.16532E 0
6.8	0.76602E 2	2537	0.21682E -3	0.17341E 0
6.9	0.77331E 2	2575	0.21889E -3	0.18158E 0
7.0	0.77967E 2	2612	0.22069E -3	0.18982E 0
7.1	0.78513E 2	2649	0.22223E -3	0.19811E 0
7.2	0.78972E 2	2687	0.22353E -3	0.20645E 0
7.3	0.79347E 2	2724	0.22459E -3	0.21483E 0
7.4	0.79643E 2	2761	0.22543E -3	0.22325E 0
7.5	0.79862E 2	2799	0.22605E -3	0.23168E 0
7.6	0.80007E 2	2836	0.22646E -3	0.24014E 0
7.7	0.80083E 2	2873	0.22668E -3	0.24860E 0
7.8	0.80093E 2	2911	0.22670E -3	0.25706E 0
7.9	0.80039E 2	2948	0.22655E -3	0.26551E 0
8.0	0.79926E 2	2985	0.22623E -3	0.27396E 0
8.1	0.79757E 2	3022	0.22575E -3	0.28238E 0
8.2	0.79535E 2	3060	0.22513E -3	0.29078E 0
8.3	0.79263E 2	3097	0.22435E -3	0.29916E 0
8.4	0.78944E 2	3134	0.22345E -3	0.30750E 0
8.5	0.78581E 2	3172	0.22242E -3	0.31580E 0
8.6	0.78177E 2	3209	0.22128E -3	0.32406E 0
8.7	0.77735E 2	3246	0.22003E -3	0.33227E 0
8.8	0.77257E 2	3284	0.21868E -3	0.34043E 0
8.9	0.76746E 2	3321	0.21723E -3	0.34854E 0
9.0	0.76205E 2	3358	0.21570E -3	0.35659E 0
9.1	0.75635E 2	3396	0.21409E -3	0.36458E 0
9.2	0.75040E 2	3433	0.21240E -3	0.37250E 0
9.3	0.74421E 2	3470	0.21065E -3	0.38036E 0
9.4	0.73780E 2	3508	0.20883E -3	0.38816E 0
9.5	0.73119E 2	3545	0.20696E -3	0.39588E 0
9.6	0.72440E 2	3582	0.20504E -3	0.40353E 0
9.7	0.71745E 2	3620	0.20308E -3	0.41111E 0
9.8	0.71036E 2	3657	0.20107E -3	0.41862E 0
9.9	0.70314E 2	3694	0.19903E -3	0.42605E 0
10.0	0.69581E 2	3732	0.19695E -3	0.43340E 0

XI	EBXI	XIT	EBXIT5	EBOXT4
10.1	0.68838E 2	3769	0.19485E -3	0.44067E 0
10.2	0.68086E 2	3806	0.19272E -3	0.44786E 0
10.3	0.67327E 2	3844	0.19057E -3	0.45497E 0
10.4	0.66562E 2	3881	0.18840E -3	0.46200E 0
10.5	0.65792E 2	3918	0.18622E -3	0.46895E 0
10.6	0.65017E 2	3955	0.18403E -3	0.47582E 0
10.7	0.64241E 2	3993	0.18183E -3	0.48261E 0
10.8	0.63462E 2	4030	0.17963E -3	0.48931E 0
10.9	0.62681E 2	4067	0.17742E -3	0.49593E 0
11.0	0.61901E 2	4105	0.17521E -3	0.50247E 0
11.1	0.61121E 2	4142	0.17300E -3	0.50893E 0
11.2	0.60342E 2	4179	0.17080E -3	0.51530E 0
11.3	0.59565E 2	4217	0.16860E -3	0.52160E 0
11.4	0.58791E 2	4254	0.16641E -3	0.52781E 0
11.5	0.58019E 2	4291	0.16422E -3	0.53394E 0
11.6	0.57251E 2	4329	0.16205E -3	0.53998E 0
11.7	0.56487E 2	4366	0.15989E -3	0.54595E 0
11.8	0.55727E 2	4403	0.15774E -3	0.55184E 0
11.9	0.54973E 2	4441	0.15560E -3	0.55765E 0
12.0	0.54223E 2	4478	0.15348E -3	0.56337E 0
12.1	0.53479E 2	4515	0.15137E -3	0.56902E 0
12.2	0.52741E 2	4553	0.14928E -3	0.57459E 0
12.3	0.52010E 2	4590	0.14721E -3	0.58009E 0
12.4	0.51284E 2	4627	0.14516E -3	0.58551E 0
12.5	0.50566E 2	4665	0.14313E -3	0.59085E 0
12.6	0.49854E 2	4702	0.14111E -3	0.59611E 0
12.7	0.49150E 2	4739	0.13912E -3	0.60131E 0
12.8	0.48452E 2	4777	0.13714E -3	0.60642E 0
12.9	0.47763E 2	4814	0.13519E -3	0.61147E 0
13.0	0.47080E 2	4851	0.13326E -3	0.61644E 0
13.1	0.46406E 2	4888	0.13135E -3	0.62135E 0
13.2	0.45739E 2	4926	0.12946E -3	0.62618E 0
13.3	0.45080E 2	4963	0.12760E -3	0.63094E 0
13.4	0.44429E 2	5000	0.12576E -3	0.63563E 0
13.5	0.43786E 2	5038	0.12394E -3	0.64026E 0
13.6	0.43151E 2	5075	0.12214E -3	0.64482E 0
13.7	0.42524E 2	5112	0.12036E -3	0.64931E 0
13.8	0.41906E 2	5150	0.11861E -3	0.65374E 0
13.9	0.41295E 2	5187	0.11688E -3	0.65810E 0
14.0	0.40692E 2	5224	0.11518E -3	0.66240E 0
14.1	0.40098E 2	5262	0.11350E -3	0.66663E 0
14.2	0.39512E 2	5299	0.11184E -3	0.67081E 0
14.3	0.38934E 2	5336	0.11020E -3	0.67492E 0
14.4	0.38363E 2	5374	0.10859E -3	0.67897E 0
14.5	0.37801E 2	5411	0.10700E -3	0.68297E 0
14.6	0.37247E 2	5448	0.10543E -3	0.68690E 0
14.7	0.36701E 2	5486	0.10388E -3	0.69078E 0
14.8	0.36162E 2	5523	0.10236E -3	0.69460E 0
14.9	0.35632E 2	5560	0.10085E -3	0.69836E 0
15.0	0.35109E 2	5598	0.99380E -4	0.70207E 0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5		EBOXT4	
15.1	0.34594E	2	5635	0.97922E	-4	0.70572E	0
15.2	0.34087E	2	5672	0.96486E	-4	0.70933E	0
15.3	0.33587E	2	5710	0.95071E	-4	0.71287E	0
15.4	0.33095E	2	5747	0.93677E	-4	0.71637E	0
15.5	0.32610E	2	5784	0.92305E	-4	0.71981E	0
15.6	0.32132E	2	5821	0.90953E	-4	0.72321E	0
15.7	0.31662E	2	5859	0.89622E	-4	0.72655E	0
15.8	0.31199E	2	5896	0.88311E	-4	0.72985E	0
15.9	0.30743E	2	5933	0.87021E	-4	0.73310E	0
16.0	0.30294E	2	5971	0.85750E	-4	0.73630E	0
16.1	0.29852E	2	6008	0.84499E	-4	0.73945E	0
16.2	0.29417E	2	6045	0.83267E	-4	0.74256E	0
16.3	0.28989E	2	6083	0.82055E	-4	0.74562E	0
16.4	0.28567E	2	6120	0.80862E	-4	0.74864E	0
16.5	0.28152E	2	6157	0.79687E	-4	0.75161E	0
16.6	0.27743E	2	6195	0.78530E	-4	0.75454E	0
16.7	0.27341E	2	6232	0.77392E	-4	0.75743E	0
16.8	0.26946E	2	6269	0.76272E	-4	0.76028E	0
16.9	0.26556E	2	6307	0.75169E	-4	0.76308E	0
17.0	0.26173E	2	6344	0.74084E	-4	0.76585E	0
17.1	0.25795E	2	6381	0.73016E	-4	0.76857E	0
17.2	0.25424E	2	6419	0.71965E	-4	0.77126E	0
17.3	0.25059E	2	6456	0.70931E	-4	0.77391E	0
17.4	0.24699E	2	6493	0.69913E	-4	0.77651E	0
17.5	0.24345E	2	6531	0.68911E	-4	0.77909E	0
17.6	0.23997E	2	6568	0.67926E	-4	0.78162E	0
17.7	0.23654E	2	6605	0.66956E	-4	0.78412E	0
17.8	0.23317E	2	6643	0.66001E	-4	0.78658E	0
17.9	0.22985E	2	6680	0.65062E	-4	0.78901E	0
18.0	0.22659E	2	6717	0.64138E	-4	0.79140E	0
18.1	0.22337E	2	6754	0.63228E	-4	0.79376E	0
18.2	0.22021E	2	6792	0.62333E	-4	0.79609E	0
18.3	0.21710E	2	6829	0.61452E	-4	0.79838E	0
18.4	0.21404E	2	6866	0.60586E	-4	0.80064E	0
18.5	0.21103E	2	6904	0.59733E	-4	0.80287E	0
18.6	0.20806E	2	6941	0.58894E	-4	0.80507E	0
18.7	0.20514E	2	6978	0.58068E	-4	0.80724E	0
18.8	0.20227E	2	7016	0.57256E	-4	0.80938E	0
18.9	0.19945E	2	7053	0.56456E	-4	0.81148E	0
19.0	0.19667E	2	7090	0.55669E	-4	0.81356E	0
19.1	0.19393E	2	7128	0.54895E	-4	0.81561E	0
19.2	0.19124E	2	7165	0.54133E	-4	0.81763E	0
19.3	0.18859E	2	7202	0.53384E	-4	0.81962E	0
19.4	0.18599E	2	7240	0.52646E	-4	0.82159E	0
19.5	0.18342E	2	7277	0.51920E	-4	0.82352E	0
19.6	0.18090E	2	7314	0.51205E	-4	0.82543E	0
19.7	0.17841E	2	7352	0.50502E	-4	0.82732E	0
19.8	0.17597E	2	7389	0.49810E	-4	0.82918E	0
19.9	0.17356E	2	7426	0.49129E	-4	0.83101E	0
20.0	0.17120E	2	7464	0.48459E	-4	0.83282E	0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5		EBOXT4	
20.1	0.16886E	2	7501	0.47799E	-4	0.83460E	0
20.2	0.16657E	2	7538	0.47150E	-4	0.83636E	0
20.3	0.16431E	2	7575	0.46511E	-4	0.83810E	0
20.4	0.16209E	2	7613	0.45882E	-4	0.83981E	0
20.5	0.15991E	2	7650	0.45263E	-4	0.84150E	0
20.6	0.15775E	2	7687	0.44654E	-4	0.84317E	0
20.7	0.15564E	2	7725	0.44055E	-4	0.84481E	0
20.8	0.15355E	2	7762	0.43464E	-4	0.84643E	0
20.9	0.15150E	2	7799	0.42883E	-4	0.84803E	0
21.0	0.14948E	2	7837	0.42312E	-4	0.84961E	0
21.1	0.14749E	2	7874	0.41749E	-4	0.85117E	0
21.2	0.14553E	2	7911	0.41195E	-4	0.85271E	0
21.3	0.14360E	2	7949	0.40649E	-4	0.85423E	0
21.4	0.14171E	2	7986	0.40112E	-4	0.85572E	0
21.5	0.13984E	2	8023	0.39584E	-4	0.85720E	0
21.6	0.13800E	2	8061	0.39063E	-4	0.85866E	0
21.7	0.13619E	2	8098	0.38551E	-4	0.86010E	0
21.8	0.13441E	2	8135	0.38046E	-4	0.86152E	0
21.9	0.13266E	2	8173	0.37550E	-4	0.86292E	0
22.0	0.13093E	2	8210	0.37061E	-4	0.86430E	0
22.1	0.12923E	2	8247	0.36579E	-4	0.86567E	0
22.2	0.12755E	2	8285	0.36105E	-4	0.86701E	0
22.3	0.12590E	2	8322	0.35639E	-4	0.86834E	0
22.4	0.12428E	2	8359	0.35179E	-4	0.86966E	0
22.5	0.12268E	2	8397	0.34726E	-4	0.87095E	0
22.6	0.12111E	2	8434	0.34281E	-4	0.87223E	0
22.7	0.11956E	2	8471	0.33842E	-4	0.87349E	0
22.8	0.11803E	2	8508	0.33410E	-4	0.87474E	0
22.9	0.11653E	2	8546	0.32984E	-4	0.87597E	0
23.0	0.11504E	2	8583	0.32565E	-4	0.87719E	0
23.1	0.11359E	2	8620	0.32152E	-4	0.87839E	0
23.2	0.11215E	2	8658	0.31745E	-4	0.87957E	0
23.3	0.11073E	2	8695	0.31345E	-4	0.88074E	0
23.4	0.10934E	2	8732	0.30951E	-4	0.88190E	0
23.5	0.10797E	2	8770	0.30562E	-4	0.88304E	0
23.6	0.10662E	2	8807	0.30179E	-4	0.88416E	0
23.7	0.10528E	2	8844	0.29802E	-4	0.88528E	0
23.8	0.10397E	2	8882	0.29431E	-4	0.88637E	0
23.9	0.10268E	2	8919	0.29065E	-4	0.88746E	0
24.0	0.10141E	2	8956	0.28705E	-4	0.88853E	0
24.1	0.10015E	2	8994	0.28350E	-4	0.88959E	0
24.2	0.98922E	1	9031	0.28000E	-4	0.89063E	0
24.3	0.97705E	1	9068	0.27656E	-4	0.89166E	0
24.4	0.96505E	1	9106	0.27316E	-4	0.89268E	0
24.5	0.95323E	1	9143	0.26982E	-4	0.89369E	0
24.6	0.94159E	1	9180	0.26652E	-4	0.89469E	0
24.7	0.93012E	1	9218	0.26327E	-4	0.89567E	0
24.8	0.91881E	1	9255	0.26007E	-4	0.89664E	0
24.9	0.90767E	1	9292	0.25692E	-4	0.89760E	0
25.0	0.89670E	1	9330	0.25381E	-4	0.89854E	0
SUM	0.85059E	4		0.24076E	-1		

附表 1 (b)

CALCULATION OF PLANCK'S RADIATION FUNCTIONS  
 T= 473.2 DEG. K

XI	EBXI	XIT	EBXIT5	EBOXT4
0.1				
0.2				
0.3				
0.4	0.30560E-22	189	0.26394E-28	0.12490E-26
0.5	0.40089E-16	236	0.34624E-22	0.16384E-20
0.6	0.40619E-12	283	0.35082E-18	0.16602E-16
0.7	0.26181E -9	331	0.22613E-15	0.10717E-13
0.8	0.30622E -7	378	0.26448E-13	0.12622E-11
0.9	0.11595E -5	425	0.10014E-11	0.48652E-10
1.0	0.20077E -4	473	0.17340E-10	0.86920E -9
1.1	0.19777E -3	520	0.17081E -9	0.89523E -8
1.2	0.12811E -2	567	0.11064E -8	0.61312E -7
1.3	0.60290E -2	615	0.52071E -8	0.30771E -6
1.4	0.22123E -1	662	0.19108E -7	0.12119E -5
1.5	0.66656E -1	709	0.57570E -7	0.39362E -5
1.6	0.17135E 0	757	0.14799E -6	0.10939E -4
1.7	0.38701E 0	804	0.33426E -6	0.26756E -4
1.8	0.78548E 0	851	0.67841E -6	0.58859E -4
1.9	0.14582E 1	899	0.12594E -5	0.11845E -3
2.0	0.25116E 1	946	0.21692E -5	0.22110E -3
2.1	0.40588E 1	993	0.35056E -5	0.38699E -3
2.2	0.62116E 1	1041	0.53649E -5	0.64086E -3
2.3	0.90708E 1	1088	0.78343E -5	0.10115E -2
2.4	0.12718E 2	1135	0.10985E -4	0.15314E -2
2.5	0.17214E 2	1183	0.14867E -4	0.22349E -2
2.6	0.22587E 2	1230	0.19508E -4	0.31581E -2
2.7	0.28841E 2	1277	0.24910E -4	0.43368E -2
2.8	0.35951E 2	1324	0.31051E -4	0.58062E -2
2.9	0.43867E 2	1372	0.37888E -4	0.75991E -2
3.0	0.52518E 2	1419	0.45359E -4	0.97455E -2
3.1	0.61816E 2	1466	0.53390E -4	0.12272E -1
3.2	0.71661E 2	1514	0.61893E -4	0.15200E -1
3.3	0.81945E 2	1561	0.70775E -4	0.18549E -1
3.4	0.92555E 2	1608	0.79939E -4	0.22332E -1
3.5	0.10338E 3	1656	0.89288E -4	0.26557E -1
3.6	0.11431E 3	1703	0.98728E -4	0.31229E -1
3.7	0.12524E 3	1750	0.10816E -3	0.36348E -1
3.8	0.13607E 3	1798	0.11752E -3	0.41909E -1
3.9	0.14672E 3	1845	0.12672E -3	0.47906E -1
4.0	0.15711E 3	1892	0.13569E -3	0.54328E -1
4.1	0.16717E 3	1940	0.14438E -3	0.61160E -1
4.2	0.17683E 3	1987	0.15273E -3	0.68387E -1
4.3	0.18605E 3	2034	0.16069E -3	0.75991E -1
4.4	0.19479E 3	2082	0.16824E -3	0.83953E -1
4.5	0.20302E 3	2129	0.17534E -3	0.92250E -1
4.6	0.21071E 3	2176	0.18199E -3	0.10086E 0
4.7	0.21784E 3	2224	0.18815E -3	0.10976E 0
4.8	0.22442E 3	2271	0.19383E -3	0.11893E 0
4.9	0.23043E 3	2318	0.19902E -3	0.12835E 0
5.0	0.23587E 3	2366	0.20372E -3	0.13799E 0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5	EBOXT4	
5.1	0.24076E	3	2413	0.20794E -3	0.14783E	0
5.2	0.24510E	3	2460	0.21169E -3	0.15785E	0
5.3	0.24891E	3	2508	0.21498E -3	0.16802E	0
5.4	0.25221E	3	2555	0.21783E -3	0.17833E	0
5.5	0.25500E	3	2602	0.22024E -3	0.18875E	0
5.6	0.25731E	3	2649	0.22224E -3	0.19927E	0
5.7	0.25917E	3	2697	0.22384E -3	0.20986E	0
5.8	0.26060E	3	2744	0.22507E -3	0.22051E	0
5.9	0.26161E	3	2791	0.22595E -3	0.23120E	0
6.0	0.26223E	3	2839	0.22649E -3	0.24192E	0
6.1	0.26249E	3	2886	0.22671E -3	0.25265E	0
6.2	0.26240E	3	2933	0.22663E -3	0.26338E	0
6.3	0.26199E	3	2981	0.22628E -3	0.27408E	0
6.4	0.26129E	3	3028	0.22567E -3	0.28476E	0
6.5	0.26030E	3	3075	0.22482E -3	0.29540E	0
6.6	0.25906E	3	3123	0.22375E -3	0.30599E	0
6.7	0.25759E	3	3170	0.22248E -3	0.31652E	0
6.8	0.25590E	3	3217	0.22101E -3	0.32698E	0
6.9	0.25401E	3	3265	0.21938E -3	0.33736E	0
7.0	0.25193E	3	3312	0.21759E -3	0.34765E	0
7.1	0.24970E	3	3359	0.21566E -3	0.35786E	0
7.2	0.24731E	3	3407	0.21360E -3	0.36797E	0
7.3	0.24480E	3	3454	0.21143E -3	0.37797E	0
7.4	0.24216E	3	3501	0.20915E -3	0.38787E	0
7.5	0.23942E	3	3549	0.20678E -3	0.39765E	0
7.6	0.23658E	3	3596	0.20433E -3	0.40732E	0
7.7	0.23366E	3	3643	0.20181E -3	0.41687E	0
7.8	0.23067E	3	3691	0.19923E -3	0.42630E	0
7.9	0.22763E	3	3738	0.19660E -3	0.43560E	0
8.0	0.22453E	3	3785	0.19392E -3	0.44478E	0
8.1	0.22138E	3	3832	0.19121E -3	0.45383E	0
8.2	0.21821E	3	3880	0.18846E -3	0.46275E	0
8.3	0.21501E	3	3927	0.18570E -3	0.47154E	0
8.4	0.21178E	3	3974	0.18292E -3	0.48019E	0
8.5	0.20855E	3	4022	0.18012E -3	0.48871E	0
8.6	0.20531E	3	4069	0.17732E -3	0.49711E	0
8.7	0.20207E	3	4116	0.17452E -3	0.50536E	0
8.8	0.19883E	3	4164	0.17172E -3	0.51349E	0
8.9	0.19560E	3	4211	0.16893E -3	0.52149E	0
9.0	0.19238E	3	4258	0.16615E -3	0.52935E	0
9.1	0.18917E	3	4306	0.16339E -3	0.53708E	0
9.2	0.18599E	3	4353	0.16064E -3	0.54468E	0
9.3	0.18283E	3	4400	0.15791E -3	0.55215E	0
9.4	0.17970E	3	4448	0.15520E -3	0.55950E	0
9.5	0.17659E	3	4495	0.15252E -3	0.56672E	0
9.6	0.17351E	3	4542	0.14986E -3	0.57381E	0
9.7	0.17047E	3	4590	0.14723E -3	0.58077E	0
9.8	0.16746E	3	4637	0.14463E -3	0.58762E	0
9.9	0.16448E	3	4684	0.14206E -3	0.59434E	0
10.0	0.16154E	3	4732	0.13952E -3	0.60094E	0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5	EBOXT4	
10.1	0.15865E	3	4779	0.13702E	-3	0.60743E 0
10.2	0.15578E	3	4826	0.13455E	-3	0.61379E 0
10.3	0.15296E	3	4874	0.13211E	-3	0.62005E 0
10.4	0.15019E	3	4921	0.12971E	-3	0.62618E 0
10.5	0.14745E	3	4968	0.12735E	-3	0.63221E 0
10.6	0.14475E	3	5015	0.12502E	-3	0.63813E 0
10.7	0.14210E	3	5063	0.12273E	-3	0.64393E 0
10.8	0.13949E	3	5110	0.12047E	-3	0.64964E 0
10.9	0.13692E	3	5157	0.11825E	-3	0.65523E 0
11.0	0.13439E	3	5205	0.11607E	-3	0.66072E 0
11.1	0.13191E	3	5252	0.11393E	-3	0.66612E 0
11.2	0.12947E	3	5299	0.11182E	-3	0.67141E 0
11.3	0.12707E	3	5347	0.10975E	-3	0.67660E 0
11.4	0.12471E	3	5394	0.10771E	-3	0.68170E 0
11.5	0.12240E	3	5441	0.10572E	-3	0.68670E 0
11.6	0.12013E	3	5489	0.10375E	-3	0.69161E 0
11.7	0.11790E	3	5536	0.10183E	-3	0.69643E 0
11.8	0.11571E	3	5583	0.99941E	-4	0.70116E 0
11.9	0.11356E	3	5631	0.98086E	-4	0.70580E 0
12.0	0.11145E	3	5678	0.96266E	-4	0.71035E 0
12.1	0.10939E	3	5725	0.94479E	-4	0.71483E 0
12.2	0.10736E	3	5773	0.92727E	-4	0.71921E 0
12.3	0.10537E	3	5820	0.91009E	-4	0.72352E 0
12.4	0.10342E	3	5867	0.89324E	-4	0.72775E 0
12.5	0.10150E	3	5915	0.87671E	-4	0.73190E 0
12.6	0.99631E	2	5962	0.86050E	-4	0.73597E 0
12.7	0.97792E	2	6009	0.84461E	-4	0.73996E 0
12.8	0.95988E	2	6057	0.82904E	-4	0.74389E 0
12.9	0.94220E	2	6104	0.81377E	-4	0.74774E 0
13.0	0.92487E	2	6151	0.79880E	-4	0.75152E 0
13.1	0.90789E	2	6198	0.78413E	-4	0.75523E 0
13.2	0.89124E	2	6246	0.76975E	-4	0.75887E 0
13.3	0.87493E	2	6293	0.75566E	-4	0.76245E 0
13.4	0.85894E	2	6340	0.74185E	-4	0.76596E 0
13.5	0.84327E	2	6388	0.72832E	-4	0.76940E 0
13.6	0.82791E	2	6435	0.71506E	-4	0.77279E 0
13.7	0.81287E	2	6482	0.70207E	-4	0.77611E 0
13.8	0.79813E	2	6530	0.68933E	-4	0.77937E 0
13.9	0.78368E	2	6577	0.67686E	-4	0.78257E 0
14.0	0.76953E	2	6624	0.66463E	-4	0.78572E 0
14.1	0.75566E	2	6672	0.65265E	-4	0.78881E 0
14.2	0.74207E	2	6719	0.64092E	-4	0.79184E 0
14.3	0.72876E	2	6766	0.62942E	-4	0.79482E 0
14.4	0.71572E	2	6814	0.61815E	-4	0.79774E 0
14.5	0.70293E	2	6861	0.60712E	-4	0.80062E 0
14.6	0.69041E	2	6908	0.59630E	-4	0.80344E 0
14.7	0.67814E	2	6956	0.58570E	-4	0.80621E 0
14.8	0.66612E	2	7003	0.57532E	-4	0.80893E 0
14.9	0.65435E	2	7050	0.56515E	-4	0.81161E 0
15.0	0.64281E	2	7098	0.55518E	-4	0.81423E 0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5	EBOXT4	
15.1	0.63150E	2	7145	0.54542E -4	0.81681E	0
15.2	0.62042E	2	7192	0.53585E -4	0.81935E	0
15.3	0.60957E	2	7240	0.52647E -4	0.82184E	0
15.4	0.59893E	2	7287	0.51729E -4	0.82429E	0
15.5	0.58851E	2	7334	0.50828E -4	0.82669E	0
15.6	0.57829E	2	7381	0.49946E -4	0.82906E	0
15.7	0.56828E	2	7429	0.49082E -4	0.83138E	0
15.8	0.55848E	2	7476	0.48235E -4	0.83366E	0
15.9	0.54887E	2	7523	0.47405E -4	0.83591E	0
16.0	0.53945E	2	7571	0.46591E -4	0.83811E	0
16.1	0.53022E	2	7618	0.45794E -4	0.84028E	0
16.2	0.52117E	2	7665	0.45013E -4	0.84241E	0
16.3	0.51230E	2	7713	0.44247E -4	0.84450E	0
16.4	0.50361E	2	7760	0.43496E -4	0.84656E	0
16.5	0.49509E	2	7807	0.42761E -4	0.84858E	0
16.6	0.48675E	2	7855	0.42040E -4	0.85057E	0
16.7	0.47856E	2	7902	0.41333E -4	0.85253E	0
16.8	0.47054E	2	7949	0.40640E -4	0.85445E	0
16.9	0.46267E	2	7997	0.39961E -4	0.85634E	0
17.0	0.45496E	2	8044	0.39295E -4	0.85820E	0
17.1	0.44741E	2	8091	0.38642E -4	0.86003E	0
17.2	0.44000E	2	8139	0.38002E -4	0.86183E	0
17.3	0.43273E	2	8186	0.37374E -4	0.86360E	0
17.4	0.42561E	2	8233	0.36759E -4	0.86534E	0
17.5	0.41862E	2	8281	0.36156E -4	0.86705E	0
17.6	0.41177E	2	8328	0.35564E -4	0.86873E	0
17.7	0.40506E	2	8375	0.34984E -4	0.87039E	0
17.8	0.39847E	2	8423	0.34415E -4	0.87201E	0
17.9	0.39201E	2	8470	0.33857E -4	0.87362E	0
18.0	0.38567E	2	8517	0.33310E -4	0.87519E	0
18.1	0.37946E	2	8564	0.32773E -4	0.87674E	0
18.2	0.37337E	2	8612	0.32247E -4	0.87827E	0
18.3	0.36739E	2	8659	0.31731E -4	0.87977E	0
18.4	0.36152E	2	8706	0.31224E -4	0.88125E	0
18.5	0.35577E	2	8754	0.30727E -4	0.88270E	0
18.6	0.35013E	2	8801	0.30240E -4	0.88413E	0
18.7	0.34459E	2	8848	0.29762E -4	0.88554E	0
18.8	0.33916E	2	8896	0.29293E -4	0.88693E	0
18.9	0.33383E	2	8943	0.28832E -4	0.88829E	0
19.0	0.32860E	2	8990	0.28381E -4	0.88963E	0
19.1	0.32347E	2	9038	0.27938E -4	0.89096E	0
19.2	0.31843E	2	9085	0.27503E -4	0.89226E	0
19.3	0.31349E	2	9132	0.27076E -4	0.89354E	0
19.4	0.30864E	2	9180	0.26657E -4	0.89480E	0
19.5	0.30389E	2	9227	0.26246E -4	0.89604E	0
19.6	0.29921E	2	9274	0.25843E -4	0.89727E	0
19.7	0.29463E	2	9322	0.25447E -4	0.89847E	0
19.8	0.29013E	2	9369	0.25058E -4	0.89966E	0
19.9	0.28571E	2	9416	0.24676E -4	0.90082E	0
20.0	0.28137E	2	9464	0.24302E -4	0.90197E	0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5		EBOXT4	
20.1	0.27712E	2	9511	0.23934E	-4	0.90311E	0
20.2	0.27294E	2	9558	0.23573E	-4	0.90422E	0
20.3	0.26883E	2	9606	0.23219E	-4	0.90532E	0
20.4	0.26480E	2	9653	0.22871E	-4	0.90640E	0
20.5	0.26085E	2	9700	0.22529E	-4	0.90747E	0
20.6	0.25696E	2	9747	0.22193E	-4	0.90852E	0
20.7	0.25314E	2	9795	0.21864E	-4	0.90955E	0
20.8	0.24940E	2	9842	0.21540E	-4	0.91057E	0
20.9	0.24572E	2	9889	0.21222E	-4	0.91158E	0
21.0	0.24210E	2	9937	0.20910E	-4	0.91257E	0
21.1	0.23855E	2	9984	0.20603E	-4	0.91354E	0
21.2	0.23507E	2	10031	0.20302E	-4	0.91450E	0
21.3	0.23164E	2	10079	0.20006E	-4	0.91545E	0
21.4	0.22827E	2	10126	0.19716E	-4	0.91638E	0
21.5	0.22497E	2	10173	0.19430E	-4	0.91730E	0
21.6	0.22172E	2	10221	0.19150E	-4	0.91821E	0
21.7	0.21853E	2	10268	0.18874E	-4	0.91910E	0
21.8	0.21539E	2	10315	0.18603E	-4	0.91998E	0
21.9	0.21231E	2	10363	0.18337E	-4	0.92085E	0
22.0	0.20929E	2	10410	0.18076E	-4	0.92170E	0
22.1	0.20631E	2	10457	0.17819E	-4	0.92255E	0
22.2	0.20339E	2	10505	0.17566E	-4	0.92338E	0
22.3	0.20051E	2	10552	0.17318E	-4	0.92420E	0
22.4	0.19769E	2	10599	0.17074E	-4	0.92500E	0
22.5	0.19491E	2	10647	0.16834E	-4	0.92580E	0
22.6	0.19219E	2	10694	0.16599E	-4	0.92659E	0
22.7	0.18950E	2	10741	0.16367E	-4	0.92736E	0
22.8	0.18687E	2	10788	0.16139E	-4	0.92812E	0
22.9	0.18428E	2	10836	0.15916E	-4	0.92888E	0
23.0	0.18173E	2	10883	0.15696E	-4	0.92962E	0
23.1	0.17922E	2	10930	0.15479E	-4	0.93035E	0
23.2	0.17676E	2	10978	0.15266E	-4	0.93108E	0
23.3	0.17434E	2	11025	0.15057E	-4	0.93179E	0
23.4	0.17196E	2	11072	0.14852E	-4	0.93249E	0
23.5	0.16961E	2	11120	0.14649E	-4	0.93318E	0
23.6	0.16731E	2	11167	0.14450E	-4	0.93387E	0
23.7	0.16505E	2	11214	0.14255E	-4	0.93454E	0
23.8	0.16282E	2	11262	0.14062E	-4	0.93521E	0
23.9	0.16063E	2	11309	0.13873E	-4	0.93586E	0
24.0	0.15847E	2	11356	0.13687E	-4	0.93651E	0
24.1	0.15636E	2	11404	0.13504E	-4	0.93715E	0
24.2	0.15427E	2	11451	0.13324E	-4	0.93778E	0
24.3	0.15222E	2	11498	0.13147E	-4	0.93840E	0
24.4	0.15020E	2	11546	0.12973E	-4	0.93902E	0
24.5	0.14822E	2	11593	0.12801E	-4	0.93962E	0
24.6	0.14626E	2	11640	0.12633E	-4	0.94022E	0
24.7	0.14434E	2	11688	0.12467E	-4	0.94081E	0
24.8	0.14245E	2	11735	0.12303E	-4	0.94139E	0
24.9	0.14059E	2	11782	0.12143E	-4	0.94197E	0
25.0	0.13876E	2	11830	0.11985E	-4	0.94253E	0
SUM	0.23061E	5		0.19918E	-1		

CALCULATION OF PLANCK'S RADIATION FUNCTIONS  
 T= 573.2 DEG. K

XI	EBXI	XIT	EBXIT5	EBOXT4
0.1				
0.2				
0.3	0.60926E-25	171		
0.4	0.17555E-16	229	0.58137E-23	0.33325E-21
0.5	0.16234E-11	286	0.53762E-18	0.30817E-16
0.6	0.28069E -8	343	0.92956E-15	0.53314E-13
0.7	0.51168E -6	401	0.16945E-12	0.97665E-11
0.8	0.23209E -4	458	0.76863E-11	0.45035E -9
0.9	0.42067E -3	515	0.13931E -9	0.84360E -8
1.0	0.40401E -2	573	0.13379E -8	0.85129E -7
1.1	0.24572E -1	630	0.81375E -8	0.55158E -6
1.2	0.10649E 0	687	0.35269E -7	0.25732E -5
1.3	0.35671E 0	745	0.11813E -6	0.93447E -5
1.4	0.97804E 0	802	0.32389E -6	0.27910E -4
1.5	0.22889E 1	859	0.75804E -6	0.71362E -4
1.6	0.47175E 1	917	0.15622E -5	0.16091E -3
1.7	0.87668E 1	974	0.29033E -5	0.32733E -3
1.8	0.14961E 2	1031	0.49547E -5	0.61134E -3
1.9	0.23785E 2	1089	0.78770E -5	0.10628E -2
2.0	0.35629E 2	1146	0.11799E -4	0.17392E -2
2.1	0.50746E 2	1203	0.16805E -4	0.27025E -2
2.2	0.69238E 2	1261	0.22929E -4	0.40168E -2
2.3	0.91046E 2	1318	0.30151E -4	0.57451E -2
2.4	0.11596E 3	1375	0.38404E -4	0.79465E -2
2.5	0.14367E 3	1433	0.47580E -4	0.10673E -1
2.6	0.17375E 3	1490	0.57541E -4	0.13972E -1
2.7	0.20572E 3	1547	0.68128E -4	0.17877E -1
2.8	0.23906E 3	1604	0.79171E -4	0.22415E -1
2.9	0.27326E 3	1662	0.90498E -4	0.27602E -1
3.0	0.30782E 3	1719	0.10194E -3	0.33446E -1
3.1	0.34225E 3	1776	0.11334E -3	0.39943E -1
3.2	0.37612E 3	1834	0.12456E -3	0.47083E -1
3.3	0.40905E 3	1891	0.13546E -3	0.54848E -1
3.4	0.44073E 3	1948	0.14595E -3	0.63214E -1
3.5	0.47086E 3	2006	0.15593E -3	0.72152E -1
3.6	0.49924E 3	2063	0.16533E -3	0.81629E -1
3.7	0.52570E 3	2120	0.17409E -3	0.91609E -1
3.8	0.55012E 3	2178	0.18218E -3	0.10205E 0
3.9	0.57243E 3	2235	0.18957E -3	0.11291E 0
4.0	0.59258E 3	2292	0.19624E -3	0.12416E 0
4.1	0.61056E 3	2350	0.20220E -3	0.13575E 0
4.2	0.62641E 3	2407	0.20744E -3	0.14764E 0
4.3	0.64016E 3	2464	0.21200E -3	0.15980E 0
4.4	0.65187E 3	2522	0.21588E -3	0.17217E 0
4.5	0.66163E 3	2579	0.21911E -3	0.18473E 0
4.6	0.66952E 3	2636	0.22172E -3	0.19744E 0
4.7	0.67564E 3	2694	0.22375E -3	0.21027E 0
4.8	0.68009E 3	2751	0.22522E -3	0.22318E 0
4.9	0.68297E 3	2808	0.22618E -3	0.23614E 0
5.0	0.68440E 3	2866	0.22665E -3	0.24913E 0

XI	EBXI	XIT	EBXIT5	EBOXT4
5.1	0.68447E 3	2923	0.22667E -3	0.26213E 0
5.2	0.68330E 3	2980	0.22629E -3	0.27510E 0
5.3	0.68099E 3	3038	0.22552E -3	0.28802E 0
5.4	0.67763E 3	3095	0.22441E -3	0.30089E 0
5.5	0.67332E 3	3152	0.22298E -3	0.31367E 0
5.6	0.66815E 3	3209	0.22127E -3	0.32635E 0
5.7	0.66222E 3	3267	0.21930E -3	0.33892E 0
5.8	0.65559E 3	3324	0.21711E -3	0.35137E 0
5.9	0.64835E 3	3381	0.21471E -3	0.36368E 0
6.0	0.64057E 3	3439	0.21213E -3	0.37584E 0
6.1	0.63232E 3	3496	0.20940E -3	0.38784E 0
6.2	0.62366E 3	3553	0.20653E -3	0.39968E 0
6.3	0.61464E 3	3611	0.20355E -3	0.41134E 0
6.4	0.60533E 3	3668	0.20046E -3	0.42284E 0
6.5	0.59577E 3	3725	0.19730E -3	0.43415E 0
6.6	0.58600E 3	3783	0.19406E -3	0.44527E 0
6.7	0.57607E 3	3840	0.19077E -3	0.45620E 0
6.8	0.56601E 3	3897	0.18744E -3	0.46695E 0
6.9	0.55586E 3	3955	0.18408E -3	0.47750E 0
7.0	0.54566E 3	4012	0.18070E -3	0.48786E 0
7.1	0.53542E 3	4069	0.17731E -3	0.49802E 0
7.2	0.52517E 3	4127	0.17392E -3	0.50799E 0
7.3	0.51495E 3	4184	0.17053E -3	0.51777E 0
7.4	0.50476E 3	4241	0.16716E -3	0.52735E 0
7.5	0.49463E 3	4299	0.16380E -3	0.53674E 0
7.6	0.48457E 3	4356	0.16047E -3	0.54594E 0
7.7	0.47460E 3	4413	0.15717E -3	0.55495E 0
7.8	0.46473E 3	4471	0.15390E -3	0.56377E 0
7.9	0.45497E 3	4528	0.15067E -3	0.57240E 0
8.0	0.44533E 3	4585	0.14748E -3	0.58086E 0
8.1	0.43582E 3	4642	0.14433E -3	0.58913E 0
8.2	0.42645E 3	4700	0.14122E -3	0.59723E 0
8.3	0.41722E 3	4757	0.13817E -3	0.60515E 0
8.4	0.40814E 3	4814	0.13516E -3	0.61289E 0
8.5	0.39921E 3	4872	0.13220E -3	0.62047E 0
8.6	0.39044E 3	4929	0.12930E -3	0.62788E 0
8.7	0.38182E 3	4986	0.12645E -3	0.63513E 0
8.8	0.37337E 3	5044	0.12365E -3	0.64222E 0
8.9	0.36508E 3	5101	0.12090E -3	0.64915E 0
9.0	0.35696E 3	5158	0.11821E -3	0.65593E 0
9.1	0.34899E 3	5216	0.11557E -3	0.66255E 0
9.2	0.34119E 3	5273	0.11299E -3	0.66903E 0
9.3	0.33356E 3	5330	0.11046E -3	0.67536E 0
9.4	0.32609E 3	5388	0.10799E -3	0.68155E 0
9.5	0.31877E 3	5445	0.10556E -3	0.68760E 0
9.6	0.31162E 3	5502	0.10320E -3	0.69352E 0
9.7	0.30463E 3	5560	0.10088E -3	0.69930E 0
9.8	0.29779E 3	5617	0.98620E -4	0.70495E 0
9.9	0.29111E 3	5674	0.96407E -4	0.71048E 0
10.0	0.28458E 3	5732	0.94245E -4	0.71588E 0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5	EBOXT4	
10.1	0.27820E	3	5789	0.92132E -4	0.72116E	0
10.2	0.27197E	3	5846	0.90069E -4	0.72632E	0
10.3	0.26588E	3	5904	0.88053E -4	0.73137E	0
10.4	0.25994E	3	5961	0.86085E -4	0.73631E	0
10.5	0.25414E	3	6018	0.84164E -4	0.74113E	0
10.6	0.24847E	3	6075	0.82288E -4	0.74585E	0
10.7	0.24295E	3	6133	0.80457E -4	0.75046E	0
10.8	0.23755E	3	6190	0.78670E -4	0.75497E	0
10.9	0.23228E	3	6247	0.76926E -4	0.75938E	0
11.0	0.22714E	3	6305	0.75224E -4	0.76369E	0
11.1	0.22213E	3	6362	0.73563E -4	0.76791E	0
11.2	0.21723E	3	6419	0.71942E -4	0.77203E	0
11.3	0.21246E	3	6477	0.70361E -4	0.77606E	0
11.4	0.20780E	3	6534	0.68818E -4	0.78001E	0
11.5	0.20325E	3	6591	0.67313E -4	0.78387E	0
11.6	0.19882E	3	6649	0.65844E -4	0.78764E	0
11.7	0.19449E	3	6706	0.64412E -4	0.79133E	0
11.8	0.19027E	3	6763	0.63014E -4	0.79494E	0
11.9	0.18616E	3	6821	0.61651E -4	0.79848E	0
12.0	0.18214E	3	6878	0.60320E -4	0.80194E	0
12.1	0.17822E	3	6935	0.59023E -4	0.80532E	0
12.2	0.17440E	3	6993	0.57757E -4	0.80863E	0
12.3	0.17067E	3	7050	0.56522E -4	0.81187E	0
12.4	0.16703E	3	7107	0.55317E -4	0.81504E	0
12.5	0.16348E	3	7165	0.54141E -4	0.81814E	0
12.6	0.16002E	3	7222	0.52994E -4	0.82118E	0
12.7	0.15664E	3	7279	0.51876E -4	0.82415E	0
12.8	0.15334E	3	7337	0.50784E -4	0.82707E	0
12.9	0.15013E	3	7394	0.49719E -4	0.82992E	0
13.0	0.14699E	3	7451	0.48679E -4	0.83271E	0
13.1	0.14393E	3	7509	0.47665E -4	0.83544E	0
13.2	0.14094E	3	7566	0.46676E -4	0.83811E	0
13.3	0.13802E	3	7623	0.45710E -4	0.84073E	0
13.4	0.13518E	3	7680	0.44767E -4	0.84330E	0
13.5	0.13240E	3	7738	0.43848E -4	0.84581E	0
13.6	0.12969E	3	7795	0.42950E -4	0.84827E	0
13.7	0.12704E	3	7852	0.42074E -4	0.85069E	0
13.8	0.12446E	3	7910	0.41218E -4	0.85305E	0
13.9	0.12194E	3	7967	0.40384E -4	0.85536E	0
14.0	0.11948E	3	8024	0.39569E -4	0.85763E	0
14.1	0.11708E	3	8082	0.38773E -4	0.85985E	0
14.2	0.11473E	3	8139	0.37996E -4	0.86203E	0
14.3	0.11244E	3	8196	0.37238E -4	0.86417E	0
14.4	0.11020E	3	8254	0.36497E -4	0.86626E	0
14.5	0.10802E	3	8311	0.35774E -4	0.86831E	0
14.6	0.10589E	3	8368	0.35068E -4	0.87032E	0
14.7	0.10381E	3	8426	0.34378E -4	0.87229E	0
14.8	0.10177E	3	8483	0.33705E -4	0.87422E	0
14.9	0.99789E	2	8540	0.33047E -4	0.87612E	0
15.0	0.97849E	2	8598	0.32404E -4	0.87797E	0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5		EBOXT4	
15.1	0.95953E	2	8655	0.31776E	-4	0.87979E	0
15.2	0.94101E	2	8712	0.31163E	-4	0.88158E	0
15.3	0.92292E	2	8770	0.30564E	-4	0.88333E	0
15.4	0.90524E	2	8827	0.29978E	-4	0.88505E	0
15.5	0.88796E	2	8884	0.29406E	-4	0.88674E	0
15.6	0.87108E	2	8942	0.28847E	-4	0.88839E	0
15.7	0.85458E	2	8999	0.28301E	-4	0.89001E	0
15.8	0.83846E	2	9056	0.27767E	-4	0.89160E	0
15.9	0.82270E	2	9113	0.27245E	-4	0.89317E	0
16.0	0.80730E	2	9171	0.26735E	-4	0.89470E	0
16.1	0.79224E	2	9228	0.26236E	-4	0.89620E	0
16.2	0.77752E	2	9285	0.25749E	-4	0.89768E	0
16.3	0.76312E	2	9343	0.25272E	-4	0.89913E	0
16.4	0.74905E	2	9400	0.24806E	-4	0.90055E	0
16.5	0.73529E	2	9457	0.24350E	-4	0.90194E	0
16.6	0.72183E	2	9515	0.23905E	-4	0.90331E	0
16.7	0.70867E	2	9572	0.23469E	-4	0.90466E	0
16.8	0.69580E	2	9629	0.23043E	-4	0.90598E	0
16.9	0.68321E	2	9687	0.22626E	-4	0.90728E	0
17.0	0.67090E	2	9744	0.22218E	-4	0.90855E	0
17.1	0.65885E	2	9801	0.21819E	-4	0.90980E	0
17.2	0.64707E	2	9859	0.21428E	-4	0.91103E	0
17.3	0.63553E	2	9916	0.21047E	-4	0.91224E	0
17.4	0.62425E	2	9973	0.20673E	-4	0.91342E	0
17.5	0.61321E	2	10031	0.20307E	-4	0.91458E	0
17.6	0.60240E	2	10088	0.19949E	-4	0.91573E	0
17.7	0.59183E	2	10145	0.19599E	-4	0.91685E	0
17.8	0.58148E	2	10203	0.19257E	-4	0.91796E	0
17.9	0.57135E	2	10260	0.18921E	-4	0.91904E	0
18.0	0.56143E	2	10317	0.18593E	-4	0.92011E	0
18.1	0.55173E	2	10374	0.18271E	-4	0.92115E	0
18.2	0.54222E	2	10432	0.17956E	-4	0.92218E	0
18.3	0.53291E	2	10489	0.17648E	-4	0.92319E	0
18.4	0.52380E	2	10546	0.17346E	-4	0.92419E	0
18.5	0.51488E	2	10604	0.17051E	-4	0.92517E	0
18.6	0.50614E	2	10661	0.16761E	-4	0.92613E	0
18.7	0.49758E	2	10718	0.16478E	-4	0.92707E	0
18.8	0.48920E	2	10776	0.16200E	-4	0.92800E	0
18.9	0.48099E	2	10833	0.15929E	-4	0.92891E	0
19.0	0.47295E	2	10890	0.15662E	-4	0.92981E	0
19.1	0.46507E	2	10948	0.15401E	-4	0.93069E	0
19.2	0.45735E	2	11005	0.15146E	-4	0.93156E	0
19.3	0.44978E	2	11062	0.14895E	-4	0.93241E	0
19.4	0.44237E	2	11120	0.14650E	-4	0.93325E	0
19.5	0.43511E	2	11177	0.14409E	-4	0.93408E	0
19.6	0.42799E	2	11234	0.14173E	-4	0.93489E	0
19.7	0.42102E	2	11292	0.13942E	-4	0.93569E	0
19.8	0.41418E	2	11349	0.13716E	-4	0.93648E	0
19.9	0.40748E	2	11406	0.13494E	-4	0.93725E	0
20.0	0.40091E	2	11464	0.13277E	-4	0.93801E	0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5		EBOXT4	
20.1	0.39447E	2	11521	0.13063E	-4	0.93876E	0
20.2	0.38816E	2	11578	0.12854E	-4	0.93950E	0
20.3	0.38197E	2	11636	0.12649E	-4	0.94022E	0
20.4	0.37590E	2	11693	0.12448E	-4	0.94094E	0
20.5	0.36995E	2	11750	0.12251E	-4	0.94164E	0
20.6	0.36411E	2	11807	0.12058E	-4	0.94233E	0
20.7	0.35839E	2	11865	0.11868E	-4	0.94301E	0
20.8	0.35277E	2	11922	0.11682E	-4	0.94368E	0
20.9	0.34727E	2	11979	0.11500E	-4	0.94434E	0
21.0	0.34187E	2	12037	0.11321E	-4	0.94499E	0
21.1	0.33657E	2	12094	0.11146E	-4	0.94563E	0
21.2	0.33137E	2	12151	0.10974E	-4	0.94626E	0
21.3	0.32627E	2	12209	0.10805E	-4	0.94687E	0
21.4	0.32127E	2	12266	0.10639E	-4	0.94748E	0
21.5	0.31636E	2	12323	0.10476E	-4	0.94809E	0
21.6	0.31154E	2	12381	0.10317E	-4	0.94868E	0
21.7	0.30681E	2	12438	0.10160E	-4	0.94926E	0
21.8	0.30217E	2	12495	0.10007E	-4	0.94983E	0
21.9	0.29762E	2	12553	0.98563E	-5	0.95040E	0
22.0	0.29315E	2	12610	0.97083E	-5	0.95095E	0
22.1	0.28876E	2	12667	0.95630E	-5	0.95150E	0
22.2	0.28445E	2	12725	0.94203E	-5	0.95204E	0
22.3	0.28023E	2	12782	0.92803E	-5	0.95257E	0
22.4	0.27607E	2	12839	0.91428E	-5	0.95310E	0
22.5	0.27200E	2	12897	0.90079E	-5	0.95361E	0
22.6	0.26800E	2	12954	0.88754E	-5	0.95412E	0
22.7	0.26407E	2	13011	0.87452E	-5	0.95462E	0
22.8	0.26021E	2	13068	0.86174E	-5	0.95512E	0
22.9	0.25642E	2	13126	0.84919E	-5	0.95560E	0
23.0	0.25270E	2	13183	0.83687E	-5	0.95608E	0
23.1	0.24904E	2	13240	0.82476E	-5	0.95656E	0
23.2	0.24545E	2	13298	0.81287E	-5	0.95702E	0
23.3	0.24193E	2	13355	0.80119E	-5	0.95748E	0
23.4	0.23846E	2	13412	0.78972E	-5	0.95793E	0
23.5	0.23506E	2	13470	0.77845E	-5	0.95838E	0
23.6	0.23171E	2	13527	0.76737E	-5	0.95882E	0
23.7	0.22843E	2	13584	0.75649E	-5	0.95925E	0
23.8	0.22520E	2	13642	0.74580E	-5	0.95968E	0
23.9	0.22203E	2	13699	0.73530E	-5	0.96010E	0
24.0	0.21891E	2	13756	0.72498E	-5	0.96052E	0
24.1	0.21585E	2	13814	0.71483E	-5	0.96093E	0
24.2	0.21284E	2	13871	0.70486E	-5	0.96133E	0
24.3	0.20988E	2	13928	0.69507E	-5	0.96173E	0
24.4	0.20697E	2	13986	0.68543E	-5	0.96212E	0
24.5	0.20411E	2	14043	0.67597E	-5	0.96251E	0
24.6	0.20130E	2	14100	0.66666E	-5	0.96289E	0
24.7	0.19854E	2	14158	0.65751E	-5	0.96327E	0
24.8	0.19582E	2	14215	0.64852E	-5	0.96364E	0
24.9	0.19315E	2	14272	0.63968E	-5	0.96401E	0
25.0	0.19053E	2	14330	0.63099E	-5	0.96437E	0
SUM	0.50802E	5		0.16824E	-1		

## 付表 1 (d)

CALCULATION OF PLANCK'S RADIATION FUNCTIONS  
 T= 673.2 DEG. K

XI	EBXI	XIT	EBXIT5	EBOXT4
0.1				
0.2				
0.3	0.15222E-19	201	0.22559E-26	0.15187E-24
0.4	0.19618E-12	269	0.29074E-19	0.19573E-17
0.5	0.28120E -8	336	0.41676E-15	0.28058E-13
0.6	0.14030E -5	403	0.20793E-12	0.14026E-10
0.7	0.10526E -3	471	0.15600E-10	0.10642E -8
0.8	0.24535E -2	538	0.36362E -9	0.25543E -7
0.9	0.26495E -1	605	0.39267E -8	0.28989E -6
1.0	0.16815E 0	673	0.24920E -7	0.19675E -5
1.1	0.72867E 0	740	0.10799E -6	0.92376E -5
1.2	0.23809E 1	807	0.35287E -6	0.32993E -4
1.3	0.62796E 1	875	0.93067E -6	0.95646E -4
1.4	0.14028E 2	942	0.20790E -5	0.23560E -3
1.5	0.27490E 2	1009	0.40741E -5	0.50988E -3
1.6	0.48503E 2	1077	0.71884E -5	0.99381E -3
1.7	0.78591E 2	1144	0.11647E -4	0.17779E -2
1.8	0.11873E 3	1211	0.17597E -4	0.29625E -2
1.9	0.16927E 3	1279	0.25086E -4	0.46514E -2
2.0	0.22985E 3	1346	0.34066E -4	0.69447E -2
2.1	0.29958E 3	1413	0.44399E -4	0.99337E -2
2.2	0.37706E 3	1481	0.55882E -4	0.13695E -1
2.3	0.46061E 3	1548	0.68264E -4	0.18291E -1
2.4	0.54838E 3	1615	0.81273E -4	0.23762E -1
2.5	0.63850E 3	1683	0.94629E -4	0.30133E -1
2.6	0.72917E 3	1750	0.10806E -3	0.37408E -1
2.7	0.81872E 3	1817	0.12133E -3	0.45577E -1
2.8	0.90572E 3	1884	0.13423E -3	0.54613E -1
2.9	0.98893E 3	1952	0.14656E -3	0.64480E -1
3.0	0.10673E 4	2019	0.15818E -3	0.75129E -1
3.1	0.11402E 4	2086	0.16899E -3	0.86506E -1
3.2	0.12070E 4	2154	0.17889E -3	0.98549E -1
3.3	0.12674E 4	2221	0.18784E -3	0.11119E 0
3.4	0.13212E 4	2288	0.19581E -3	0.12437E 0
3.5	0.13683E 4	2356	0.20279E -3	0.13802E 0
3.6	0.14088E 4	2423	0.20879E -3	0.15208E 0
3.7	0.14429E 4	2490	0.21384E -3	0.16648E 0
3.8	0.14708E 4	2558	0.21799E -3	0.18115E 0
3.9	0.14929E 4	2625	0.22126E -3	0.19605E 0
4.0	0.15095E 4	2692	0.22371E -3	0.21111E 0
4.1	0.15209E 4	2760	0.22540E -3	0.22628E 0
4.2	0.15275E 4	2827	0.22638E -3	0.24152E 0
4.3	0.15297E 4	2894	0.22671E -3	0.25679E 0
4.4	0.15280E 4	2962	0.22645E -3	0.27203E 0
4.5	0.15226E 4	3029	0.22566E -3	0.28722E 0
4.6	0.15139E 4	3096	0.22437E -3	0.30233E 0
4.7	0.15024E 4	3164	0.22266E -3	0.31732E 0
4.8	0.14882E 4	3231	0.22056E -3	0.33217E 0
4.9	0.14718E 4	3298	0.21813E -3	0.34685E 0
5.0	0.14533E 4	3366	0.21539E -3	0.36135E 0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5	EBOXT4	
5.1	0.14332E	4	3433	0.21241E -3	0.37565E	0
5.2	0.14115E	4	3500	0.20920E -3	0.38974E	0
5.3	0.13887E	4	3568	0.20581E -3	0.40359E	0
5.4	0.13647E	4	3635	0.20226E -3	0.41721E	0
5.5	0.13399E	4	3702	0.19859E -3	0.43058E	0
5.6	0.13145E	4	3769	0.19481E -3	0.44369E	0
5.7	0.12885E	4	3837	0.19096E -3	0.45655E	0
5.8	0.12621E	4	3904	0.18704E -3	0.46914E	0
5.9	0.12354E	4	3971	0.18309E -3	0.48147E	0
6.0	0.12086E	4	4039	0.17912E -3	0.49352E	0
6.1	0.11817E	4	4106	0.17513E -3	0.50532E	0
6.2	0.11548E	4	4173	0.17115E -3	0.51684E	0
6.3	0.11281E	4	4241	0.16719E -3	0.52809E	0
6.4	0.11015E	4	4308	0.16325E -3	0.53908E	0
6.5	0.10752E	4	4375	0.15934E -3	0.54981E	0
6.6	0.10491E	4	4443	0.15548E -3	0.56028E	0
6.7	0.10234E	4	4510	0.15167E -3	0.57049E	0
6.8	0.99804E	3	4577	0.14791E -3	0.58045E	0
6.9	0.97307E	3	4645	0.14421E -3	0.59016E	0
7.0	0.94852E	3	4712	0.14057E -3	0.59962E	0
7.1	0.92441E	3	4779	0.13700E -3	0.60884E	0
7.2	0.90077E	3	4847	0.13349E -3	0.61783E	0
7.3	0.87761E	3	4914	0.13006E -3	0.62659E	0
7.4	0.85493E	3	4981	0.12670E -3	0.63511E	0
7.5	0.83275E	3	5049	0.12341E -3	0.64342E	0
7.6	0.81106E	3	5116	0.12020E -3	0.65152E	0
7.7	0.78989E	3	5183	0.11706E -3	0.65940E	0
7.8	0.76921E	3	5251	0.11400E -3	0.66707E	0
7.9	0.74904E	3	5318	0.11101E -3	0.67454E	0
8.0	0.72937E	3	5385	0.10809E -3	0.68182E	0
8.1	0.71020E	3	5453	0.10525E -3	0.68891E	0
8.2	0.69152E	3	5520	0.10248E -3	0.69581E	0
8.3	0.67333E	3	5587	0.99790E -4	0.70252E	0
8.4	0.65562E	3	5654	0.97165E -4	0.70907E	0
8.5	0.63838E	3	5722	0.94610E -4	0.71543E	0
8.6	0.62160E	3	5789	0.92124E -4	0.72164E	0
8.7	0.60529E	3	5856	0.89706E -4	0.72768E	0
8.8	0.58942E	3	5924	0.87354E -4	0.73356E	0
8.9	0.57398E	3	5991	0.85067E -4	0.73928E	0
9.0	0.55898E	3	6058	0.82843E -4	0.74486E	0
9.1	0.54439E	3	6126	0.80682E -4	0.75029E	0
9.2	0.53022E	3	6193	0.78581E -4	0.75558E	0
9.3	0.51644E	3	6260	0.76539E -4	0.76073E	0
9.4	0.50306E	3	6328	0.74556E -4	0.76575E	0
9.5	0.49005E	3	6395	0.72628E -4	0.77064E	0
9.6	0.47742E	3	6462	0.70755E -4	0.77541E	0
9.7	0.46514E	3	6530	0.68936E -4	0.78005E	0
9.8	0.45321E	3	6597	0.67169E -4	0.78457E	0
9.9	0.44163E	3	6664	0.65452E -4	0.78898E	0
10.0	0.43038E	3	6732	0.63784E -4	0.79327E	0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5		EBOXT4	
10.1	0.41945E	3	6799	0.62164E	-4	0.79745E	0
10.2	0.40883E	3	6866	0.60590E	-4	0.80153E	0
10.3	0.39852E	3	6934	0.59062E	-4	0.80551E	0
10.4	0.38850E	3	7001	0.57577E	-4	0.80939E	0
10.5	0.37877E	3	7068	0.56135E	-4	0.81316E	0
10.6	0.36931E	3	7136	0.54734E	-4	0.81685E	0
10.7	0.36013E	3	7203	0.53373E	-4	0.82044E	0
10.8	0.35121E	3	7270	0.52051E	-4	0.82395E	0
10.9	0.34254E	3	7337	0.50766E	-4	0.82736E	0
11.0	0.33412E	3	7405	0.49519E	-4	0.83070E	0
11.1	0.32594E	3	7472	0.48306E	-4	0.83395E	0
11.2	0.31799E	3	7539	0.47128E	-4	0.83712E	0
11.3	0.31027E	3	7607	0.45984E	-4	0.84022E	0
11.4	0.30277E	3	7674	0.44871E	-4	0.84324E	0
11.5	0.29547E	3	7741	0.43790E	-4	0.84619E	0
11.6	0.28838E	3	7809	0.42740E	-4	0.84906E	0
11.7	0.28150E	3	7876	0.41719E	-4	0.85187E	0
11.8	0.27480E	3	7943	0.40727E	-4	0.85461E	0
11.9	0.26829E	3	8011	0.39762E	-4	0.85729E	0
12.0	0.26196E	3	8078	0.38824E	-4	0.85990E	0
12.1	0.25581E	3	8145	0.37912E	-4	0.86246E	0
12.2	0.24983E	3	8213	0.37026E	-4	0.86495E	0
12.3	0.24401E	3	8280	0.36163E	-4	0.86738E	0
12.4	0.23835E	3	8347	0.35325E	-4	0.86976E	0
12.5	0.23285E	3	8415	0.34510E	-4	0.87208E	0
12.6	0.22750E	3	8482	0.33717E	-4	0.87435E	0
12.7	0.22229E	3	8549	0.32945E	-4	0.87657E	0
12.8	0.21723E	3	8617	0.32195E	-4	0.87874E	0
12.9	0.21230E	3	8684	0.31465E	-4	0.88086E	0
13.0	0.20751E	3	8751	0.30754E	-4	0.88293E	0
13.1	0.20285E	3	8819	0.30063E	-4	0.88495E	0
13.2	0.19831E	3	8886	0.29390E	-4	0.88693E	0
13.3	0.19389E	3	8953	0.28735E	-4	0.88886E	0
13.4	0.18959E	3	9020	0.28098E	-4	0.89076E	0
13.5	0.18540E	3	9088	0.27477E	-4	0.89261E	0
13.6	0.18132E	3	9155	0.26873E	-4	0.89442E	0
13.7	0.17736E	3	9222	0.26285E	-4	0.89618E	0
13.8	0.17349E	3	9290	0.25712E	-4	0.89792E	0
13.9	0.16973E	3	9357	0.25154E	-4	0.89961E	0
14.0	0.16606E	3	9424	0.24611E	-4	0.90127E	0
14.1	0.16249E	3	9492	0.24082E	-4	0.90289E	0
14.2	0.15901E	3	9559	0.23567E	-4	0.90447E	0
14.3	0.15562E	3	9626	0.23064E	-4	0.90603E	0
14.4	0.15232E	3	9694	0.22575E	-4	0.90755E	0
14.5	0.14911E	3	9761	0.22098E	-4	0.90903E	0
14.6	0.14597E	3	9828	0.21634E	-4	0.91049E	0
14.7	0.14292E	3	9896	0.21181E	-4	0.91192E	0
14.8	0.13994E	3	9963	0.20739E	-4	0.91331E	0
14.9	0.13703E	3	10030	0.20309E	-4	0.91468E	0
15.0	0.13420E	3	10098	0.19890E	-4	0.91602E	0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5		EBOXT4	
15.1	0.13144E	3	10165	0.19481E	-4	0.91733E	0
15.2	0.12875E	3	10232	0.19082E	-4	0.91861E	0
15.3	0.12613E	3	10300	0.18693E	-4	0.91987E	0
15.4	0.12357E	3	10367	0.18313E	-4	0.92111E	0
15.5	0.12107E	3	10434	0.17943E	-4	0.92231E	0
15.6	0.11863E	3	10502	0.17582E	-4	0.92350E	0
15.7	0.11626E	3	10569	0.17230E	-4	0.92466E	0
15.8	0.11394E	3	10636	0.16887E	-4	0.92579E	0
15.9	0.11168E	3	10703	0.16551E	-4	0.92691E	0
16.0	0.10947E	3	10771	0.16224E	-4	0.92800E	0
16.1	0.10731E	3	10838	0.15905E	-4	0.92907E	0
16.2	0.10521E	3	10905	0.15593E	-4	0.93012E	0
16.3	0.10316E	3	10973	0.15289E	-4	0.93115E	0
16.4	0.10115E	3	11040	0.14992E	-4	0.93216E	0
16.5	0.99202E	2	11107	0.14702E	-4	0.93315E	0
16.6	0.97291E	2	11175	0.14419E	-4	0.93412E	0
16.7	0.95425E	2	11242	0.14142E	-4	0.93507E	0
16.8	0.93603E	2	11309	0.13872E	-4	0.93601E	0
16.9	0.91823E	2	11377	0.13608E	-4	0.93692E	0
17.0	0.90084E	2	11444	0.13350E	-4	0.93782E	0
17.1	0.88385E	2	11511	0.13099E	-4	0.93870E	0
17.2	0.86726E	2	11579	0.12853E	-4	0.93957E	0
17.3	0.85104E	2	11646	0.12612E	-4	0.94042E	0
17.4	0.83520E	2	11713	0.12378E	-4	0.94125E	0
17.5	0.81971E	2	11781	0.12148E	-4	0.94207E	0
17.6	0.80458E	2	11848	0.11924E	-4	0.94287E	0
17.7	0.78979E	2	11915	0.11705E	-4	0.94366E	0
17.8	0.77533E	2	11983	0.11490E	-4	0.94443E	0
17.9	0.76119E	2	12050	0.11281E	-4	0.94519E	0
18.0	0.74737E	2	12117	0.11076E	-4	0.94594E	0
18.1	0.73386E	2	12185	0.10876E	-4	0.94667E	0
18.2	0.72064E	2	12252	0.10680E	-4	0.94739E	0
18.3	0.70772E	2	12319	0.10488E	-4	0.94809E	0
18.4	0.69508E	2	12386	0.10301E	-4	0.94879E	0
18.5	0.68271E	2	12454	0.10118E	-4	0.94947E	0
18.6	0.67062E	2	12521	0.99389E	-5	0.95014E	0
18.7	0.65879E	2	12588	0.97635E	-5	0.95079E	0
18.8	0.64721E	2	12656	0.95919E	-5	0.95144E	0
18.9	0.63588E	2	12723	0.94241E	-5	0.95207E	0
19.0	0.62480E	2	12790	0.92598E	-5	0.95270E	0
19.1	0.61395E	2	12858	0.90991E	-5	0.95331E	0
19.2	0.60334E	2	12925	0.89417E	-5	0.95391E	0
19.3	0.59295E	2	12992	0.87877E	-5	0.95450E	0
19.4	0.58277E	2	13060	0.86370E	-5	0.95509E	0
19.5	0.57282E	2	13127	0.84894E	-5	0.95566E	0
19.6	0.56307E	2	13194	0.83449E	-5	0.95622E	0
19.7	0.55352E	2	13262	0.82035E	-5	0.95677E	0
19.8	0.54418E	2	13329	0.80650E	-5	0.95731E	0
19.9	0.53503E	2	13396	0.79293E	-5	0.95785E	0
20.0	0.52606E	2	13464	0.77965E	-5	0.95837E	0

XI	EBXI		XIT	EBXIT5		EBOXT4	
20.1	0.51729E	2	13531	0.76664E	-5	0.95889E	0
20.2	0.50869E	2	13598	0.75390E	-5	0.95940E	0
20.3	0.50026E	2	13666	0.74141E	-5	0.95989E	0
20.4	0.49201E	2	13733	0.72918E	-5	0.96039E	0
20.5	0.48393E	2	13800	0.71720E	-5	0.96087E	0
20.6	0.47601E	2	13867	0.70546E	-5	0.96134E	0
20.7	0.46825E	2	13935	0.69396E	-5	0.96181E	0
20.8	0.46064E	2	14002	0.68269E	-5	0.96227E	0
20.9	0.45319E	2	14069	0.67164E	-5	0.96272E	0
21.0	0.44588E	2	14137	0.66082E	-5	0.96317E	0
21.1	0.43872E	2	14204	0.65020E	-5	0.96360E	0
21.2	0.43170E	2	14271	0.63980E	-5	0.96403E	0
21.3	0.42482E	2	14339	0.62960E	-5	0.96446E	0
21.4	0.41808E	2	14406	0.61961E	-5	0.96488E	0
21.5	0.41146E	2	14473	0.60981E	-5	0.96529E	0
21.6	0.40498E	2	14541	0.60019E	-5	0.96569E	0
21.7	0.39862E	2	14608	0.59077E	-5	0.96609E	0
21.8	0.39238E	2	14675	0.58153E	-5	0.96648E	0
21.9	0.38627E	2	14743	0.57246E	-5	0.96686E	0
22.0	0.38027E	2	14810	0.56357E	-5	0.96724E	0
22.1	0.37438E	2	14877	0.55486E	-5	0.96762E	0
22.2	0.36861E	2	14945	0.54630E	-5	0.96798E	0
22.3	0.36295E	2	15012	0.53791E	-5	0.96835E	0
22.4	0.35740E	2	15079	0.52968E	-5	0.96870E	0
22.5	0.35195E	2	15147	0.52160E	-5	0.96905E	0
22.6	0.34660E	2	15214	0.51368E	-5	0.96940E	0
22.7	0.34135E	2	15281	0.50590E	-5	0.96974E	0
22.8	0.33620E	2	15348	0.49827E	-5	0.97008E	0
22.9	0.33115E	2	15416	0.49078E	-5	0.97041E	0
23.0	0.32619E	2	15483	0.48343E	-5	0.97073E	0
23.1	0.32132E	2	15550	0.47622E	-5	0.97105E	0
23.2	0.31655E	2	15618	0.46914E	-5	0.97137E	0
23.3	0.31185E	2	15685	0.46218E	-5	0.97168E	0
23.4	0.30725E	2	15752	0.45536E	-5	0.97199E	0
23.5	0.30273E	2	15820	0.44866E	-5	0.97229E	0
23.6	0.29829E	2	15887	0.44208E	-5	0.97259E	0
23.7	0.29393E	2	15954	0.43562E	-5	0.97288E	0
23.8	0.28965E	2	16022	0.42928E	-5	0.97317E	0
23.9	0.28545E	2	16089	0.42305E	-5	0.97345E	0
24.0	0.28132E	2	16156	0.41693E	-5	0.97373E	0
24.1	0.27727E	2	16224	0.41093E	-5	0.97401E	0
24.2	0.27329E	2	16291	0.40502E	-5	0.97428E	0
24.3	0.26938E	2	16358	0.39923E	-5	0.97455E	0
24.4	0.26553E	2	16426	0.39353E	-5	0.97482E	0
24.5	0.26176E	2	16493	0.38794E	-5	0.97508E	0
24.6	0.25805E	2	16560	0.38245E	-5	0.97533E	0
24.7	0.25441E	2	16628	0.37705E	-5	0.97559E	0
24.8	0.25083E	2	16695	0.37174E	-5	0.97584E	0
24.9	0.24731E	2	16762	0.36653E	-5	0.97608E	0
25.0	0.24386E	2	16830	0.36141E	-5	0.97633E	0
SUM	0.97856E	5		0.14502E	-1		

## 付 録 2

円弧みぞ粗面の指向ふく射率計算例を付表 2 に示す。

(金属 第一近似値)

附表 2

面素	① $\varphi_j(\text{deg})$	② $\varphi_{j-1}(\text{deg})$	③ $\varphi_j(\text{rad})$	④ $\varphi_{j-1}(\text{rad})$	⑤ $\sin \varphi_j$	⑥ $\sin \varphi_{j-1}$	⑦ (⑤ - ⑥)
F, J=	1 30:00	0:00	0.5236	0.0000	0.5000	0.0000	0.5000
	2 54:00	30:00	0.4452	0.5236	0.8090	0.5000	0.3090
	3 60:00	54:00	1.0472	0.9452	0.8660	0.8090	0.0570
N, J=	1 40:00	0:00	0.6981	0.0000	0.6428	0.0000	0.6428
	2 60:00	40:00	1.0472	0.6981	0.8660	0.6428	0.2232
	3 68:34	60:00	1.1967	1.0472	0.9308	0.8660	0.0648
	4 73:20	68:34	1.2799	1.1967	0.9580	0.9308	0.0272
	5 76:22	73:20	1.3329	1.2799	0.9718	0.9580	0.0138
	6 78:28	76:22	1.3695	1.3329	0.9798	0.9718	0.0080
	7 80:00	78:28	1.3963	1.3695	0.9848	0.9798	0.0050
	8 81:11	80:00	1.4169	1.3963	0.9882	0.9848	0.0034
	9 82:07	81:11	1.4332	1.4169	0.9905	0.9882	0.0023
	10 82:51	82:07	1.4460	1.4332	0.9922	0.9905	0.0017
	11 83:29	82:51	1.4571	1.4460	0.9935	0.9922	0.0015
	12 84:00	83:29	1.4661	1.4571	0.9945	0.9935	0.0010
	13 84:27	84:00	1.4739	1.4661	0.9953	0.9945	0.0008
	14 84:50	84:27	1.4806	1.4739	0.9959	0.9953	0.0006
	15 85:10	84:50	1.4864	1.4806	0.9964	0.9959	0.0005
	16 85:28	85:10	1.4917	1.4864	0.9969	0.9964	0.0005
	17 85:43	85:28	1.4960	1.4917	0.9972	0.9969	0.0003
	18 85:57	85:43	1.5001	1.4960	0.9975	0.9972	0.0003
	19 86:10	85:57	1.5039	1.5001	0.9978	0.9975	0.0003
	20 86:20	86:10	1.5068	1.5039	0.9980	0.9978	0.0002
面素	$\varphi_j/2(\text{deg})$	$\varphi_{j-1}/2(\text{deg})$	$\varphi_j/2 + \pi/4$	$\varphi_{j-1}/2 + \pi/4$	⑧ $\tan(\frac{\varphi_j}{2} + \frac{\pi}{4})$	⑨ $\tan(\frac{\varphi_{j-1}}{2} + \frac{\pi}{4})$	⑩ $\log_{10}$ ⑧
F, J=	1 15:00	0:00	60:00	45:00	1.7321	1.0000	0.23858
	2 27:00	15:00	72:00	60:00	3.0777	1.7321	0.48823
	3 30:00	27:00	75:00	72:00	3.7321	3.0777	0.57195
N, J=	1 20:00	0:00	65:00	45:00	2.1445	1.0000	0.33132
	2 30:00	20:00	75:00	65:00	3.7321	2.1445	0.57195
	3 34:17	30:00	79:17	75:00	5.2839	3.7321	0.72295
	4 36:40	34:17	81:40	79:17	6.8269	5.2839	0.83422
	5 38:11	36:40	83:11	81:40	8.3656	6.8269	0.92251
	6 39:14	38:11	84:14	83:11	9.9021	8.3656	0.99573
	7 40:00	39:14	85:00	84:14	11.4301	9.9021	1.05805
	8 40:36	40:00	85:36	85:00	12.9962	11.4301	1.11381
	9 41:04	40:36	86:04	85:36	14.5438	12.9962	1.16268
	10 41:26	41:04	86:26	86:04	16.0435	14.5438	1.20533
	11 41:45	41:26	86:45	86:26	17.6106	16.0435	1.24578
	12 42:00	41:45	87:00	86:45	19.0811	17.6106	1.28082
	13 42:14	42:00	87:14	87:00	20.6932	19.0811	1.31582
	14 42:25	42:14	87:25	87:14	22.1640	20.6932	1.34565
	15 42:35	42:25	87:35	87:25	23.6945	22.1640	1.37466
	16 42:44	42:35	87:44	87:35	25.2644	23.6945	1.40248
	17 42:52	42:44	87:52	87:44	26.8450	25.2644	1.42886
	18 42:59	42:52	87:59	87:52	28.3994	26.8450	1.45331
	19 43:05	42:59	88:05	87:59	29.8823	28.3994	1.47541
	20 43:10	43:05	88:10	88:05	31.2416	29.8823	1.49474

付表 2. (つづき)

面素	⑩ $\log_e \textcircled{8}$	⑪ $\log_e \textcircled{9}$	⑫ (⑤ + ⑩)	⑬ (⑥ + ⑪)	⑭ (② - ⑬)	⑮ $\varphi_i - \varphi_{i-1}$	⑯ (⑭/⑮)
F, J= 1	0.5494	0.0000	1.0494	0.0000	1.0494	0.5236	2.0042
2	1.1242	0.5494	1.9332	1.0494	0.8838	0.4189	2.0198
3	1.3170	1.1242	2.1830	1.9332	0.2498	0.1047	2.3859
N, J= 1	0.7629	0.0000	1.4057	0.0000	1.4057	0.6981	2.0136
2	1.3170	0.7629	2.1830	1.0457	0.7773	0.3491	2.2266
3	1.6647	1.3170	2.5955	2.1830	0.4125	0.1495	2.7592
4	1.9209	1.6647	2.8789	2.5955	0.2834	0.0832	3.4063
5	2.1242	1.9209	3.0960	2.8789	0.2171	0.0530	4.0962
6	2.2928	2.1242	3.2726	3.0960	0.1766	0.0366	4.8251
7	2.4363	2.2928	3.4211	3.2726	0.1485	0.0288	5.5410
8	2.5646	2.4363	3.5528	3.4211	0.1317	0.0206	6.3932
9	2.6772	2.5646	3.6677	3.5528	0.1149	0.0163	7.0491
10	2.7754	2.6772	3.7676	3.6677	0.0999	0.0128	7.8047
11	2.8685	2.7754	3.8620	3.7676	0.0944	0.0111	8.5045
12	2.9492	2.8685	3.9437	3.8620	0.0817	0.0090	9.0778
13	3.0298	2.9492	4.0251	3.9437	0.0814	0.0078	10.4359
14	3.0985	3.0298	4.0944	4.0251	0.0693	0.0067	10.3433
15	3.1653	3.0985	4.1617	4.0944	0.0673	0.0058	11.6034
16	3.2293	3.1653	4.2262	4.1617	0.0645	0.0053	12.1698
17	3.2901	3.2293	4.2873	4.2262	0.0611	0.0043	14.2093
18	3.3464	3.2901	4.3439	4.2873	0.0566	0.0041	13.8049
19	3.3973	3.3464	4.3951	4.3439	0.0512	0.0038	13.4737
20	3.4418	3.3973	4.4398	4.3951	0.0447	0.0029	15.4137
面素	⑭ $\times \frac{1}{n} = \varepsilon \varphi_i$	(1 - $\varepsilon \varphi_i$ )	(1 - $\varepsilon \varphi_i$ ) <sup>‡</sup>	⑮ $1 - (1 - \varepsilon \varphi_i)$ <sup>‡</sup>	⑯ $\textcircled{7} \times \textcircled{17}$	$\Sigma$	$\varepsilon \alpha \varphi$
F, J= 1	0.0401	0.9599	0.9599	0.0401	0.0201	0.0534	$1.0353 \times 1.0353$ $\times \frac{1}{2} (0.0534$ $+ 0.0731)$ $= \underline{\underline{0.0678}}$
2	0.0422	0.9578	0.9174	0.0826	0.0255		
3	0.0477	0.9523	0.8636	0.1364	0.0078		
N, J= 1	0.0403	0.9597	0.9597	0.0403	0.0259		
2	0.0445	0.9555	0.9130	0.0870	0.0194		
3	0.0552	0.9448	0.8433	0.1567	0.0102		
4	0.0681	0.9319	0.8093	0.1907	0.0052		
5	0.0819	0.9181	0.7739	0.2261	0.0031		
6	0.0965	0.9035	0.7375	0.2625	0.0021		
7	0.1108	0.8892	0.7031	0.2969	0.0015		
8	0.1279	0.8721	0.6633	0.3367	0.0011		
9	0.1410	0.8590	0.6339	0.3661	0.0008		
10	0.1561	0.8439	0.6010	0.3990	0.0007		
11	0.1701	0.8299	0.5716	0.4284	0.0006		
12	0.1816	0.8184	0.5482	0.4518	0.0005		
13	0.2087	0.7913	0.4955	0.5045	0.0004		
14	0.2069	0.7931	0.4989	0.5011	0.0003		
15	0.2321	0.7679	0.4528	0.5472	0.0003		
16	0.2434	0.7566	0.4331	0.5669	0.0003		
17	0.2842	0.7158	0.3668	0.6332	0.0002		
18	0.2761	0.7239	0.3793	0.6207	0.0002		
19	0.2695	0.7305	0.3898	0.6102	0.0002		
20	0.3083	0.6917	0.3309	0.6691	0.0001	0.0731	

ただし、(1 -  $\varepsilon \varphi_i$ )<sup>‡</sup>  
のべき数は  
面素の  $n$  が 3  
より大になつて  
も  $n=3$  として  
計算した。

## 付 録 3

円弧みぞランダム粗面の指向ふく射率計算プログラム  
(金属第二近似値  $\epsilon_{\text{p}}$  の計算)

= JOB  
= JAL

SR RSRV N,FP,GP,P,I,FI1,FI2,I1P1,I2P1,CSF,N2,EFI  
SR RSRV EFT,FI1S,J,FPMGP,B,CSF2,NCSF,N2P,NCSF2  
SR RSRV EFS,EFP

FORM1       FORM (R1,1H ,F6.4)  
FORM2       FORM (C,2H ,F6.4)  
FORM3       FORM (C,3H ,F6.4)  
FORM4       FORM (R1,3HN= )  
FORM5       FORM (F4.1)  
FORM6       FORM (R1,4HFI= )  
FORM7       FORM (F4.1)  
FORM8       FORM (R1,3HG= )  
FORM9       FORM (R1,4IH   FI1F       FI2F       EFF       FI1N       FI2N)  
FORM10      FORM (C,9H       EFN )

\* SURLOUTIN

LR           HEAD LD  
          SR LOD   FI1  
          SR STR   FI1S  
LF           SR COS  
          SR STR   CSF  
          SR POW   2.0  
          SR STR   CSF2  
          SR LOD   N  
          SR MUL   2.0  
          SR MUL   CSF  
          SR STR   NCSF  
          SR LOD   N2  
          SR MUL   2.0  
          SR STR   N2P  
          SR MUL   CSF2  
          SR STR   NCSF2  
          SR LOD   N2P  
          SR ADD   NCSF  
          SR ADD   CSF2  
          SR INV  
          SR MUL   NCSF  
          SR STR   EFS  
          SR LOD   NCSF2  
          SR ADD   NCSF  
          SR ADD   1.0

	SR INV		LE	SR LOD	0.0
	SR MUL	NCSF		SR STR	EFT
	SR STR	EFP		SR STR	B
	SR ADD	EFS		SR LOD	I
	SR STR	EFI		SR JZR	LC1
	SR LOD	FI1S		SR MUL	2.0
	SR SUB	FI2		SR ADD	1.0
	SR JPL	LG		SR STR	I1P1
	SR JZR	LG		SR LOD	I
	SR LOD	EFT		SR MUL	2.0
	SR ADD	EFI		SR SUB	1.0
	SR STR	EFT		SR SUB	FP
	SR LOD	R		SR ADD	GP
	SR ADD	1.0		SR DIV	I1P1
	SR ADD	1.0E-6		SR MUL	P
	SR STR	R	LC1	SR STR	FI1
	SR LOD	FI1S		SR SIN	
	SR ADD	0.01		PRT	FORM1
	SR STR	FI1S		SR LOD	I
	JUMP	LF		SR ADD	1.0
LG	SR LOD	R		SR STR	I
	SR INV			SR MUL	2.0
	SR MUL	EFT		SR ADD	1.0
	PRT	FORM3		SR STR	I2P1
LD	EXIT	LD		SR LOD	I
				SR MUL	2.0
				SR SUB	1.0
				SR SUB	FP
				SR ADD	GP
LA	PRT	FORM4		SR DIV	I2P1
	TYPE	FORM5		SR MUL	P
	SR STR	N		SR STR	FI2
	SR POW	2.0		SR LOD	1.0
	SR STR	NR		SR SUB	FP
	PRT	FORM6		SR SUB	GP
	TYPE	FORM7		SR MUL	P
	SR STR	FP		SR SUB	FI2
	SR DIV	180.0		SR JMN	LH1
	SR MUL	2.0		SR LOD	FI2
	SR STR	FP		SR SIN	
	PRT	FORM8		PRT	FORM2
	TYPE	FORM7		CALL	LB
	SR STR	GP		JUMP	LH3
	SR DIV	90.0	LH1	SR LOD	1.0
	SR STR	GP		SR SUB	FP
	SR LOD	3.1416		SR SUB	GP
	SR DIV	2.0		SR MUL	P
	SR STR	P		SR STR	FI2
	PRT	FORM9		SR SIN	
	PRT	FORM10		PRT	FORM2
	SR LOD	0.0		CALL	LB
	SR STR	I			
	SR STR	J			

LH3	SR LOD 0.0		SR LOD FP
	SR STR EFT		SR SUB GP
	SR STR B		SR MUL P
	SR LOD J		SR ABS
	SR SUB 1.0		SR STR FPMGP
	SR JPL LC4		SR LOD P
	SR JZR LC4		SR SUB FPMGP
	SR LOD 1.0		SR SUB FI2
	SR SUB FP		SR JMN LH2
	SR SUB GP		SR LOD FI2
	SR MUL P		SR SIN
	SR JMN LC3		PRT FORM2
LC4	SR LOD J		CALL LB
	SR JZR LC2		JUMP LH4
	SR MUL 2.0	LH2	SR LOD P
	SR ADD 1.0		SR SUB FPMGP
	SR STR I1P1		SR STR FI2
	SR LOD J		SR SIN
	SR MUL 2.0		PRT FORM2
	SR SUB 1.0		CALL LB
	SR ADD FP	LH4	SR LOD P
	SR ADD GP		SR SUB FPMGP
	SR DIV I1P1		SR SUB FI2
	SR MUL P		SR JMN LH
	JUMP LC2		SR LOD FI2
LC3	SR LOD GP		SR SUB FI1
	SR ADD FP		SR SUB 0.01
	SR SUB 1.0		SR JPL LE
	SR MUL P		SR JZR LE
LC2	SR STR FI1	LH	STOP LA
	SR SIN		END
	PRT FORM3		END
	SR LOD J		
	SR ADD 1.0		
	SR STR J		
	SR MUL 2.0		
	SR ADD 1.0		
	SR STR I2P1		
	SR LOD J		
	SR MUL 2.0		
	SR SUB 1.0		
	SR ADD FP		
	SR ADD GP		
	SR DIV I2P1		
	SR MUL P		
	SR STR FI2		

## 付 録 4

## 全ふく射および分光ふく射測定時における誤差の検討

ふく射率測定の原因は、黒体比較法により、試料表面をのぞいたときの検知器の出力と、黒体をのぞいたときの検知器の出力との比をもつて試料のふく射率とする。この方法により求められたふく射率値に誤差をもたらす主たる原因としては、試料温度と黒体温度の相違および検知器温度と室温との相違などが考えられる。

以下に、これらの原因にもとづくふく射率値の誤差を全ふく射および分光ふく射の各ふく射率について計算を試みた。

## 1. 室温と検知器温度の差による誤差

## 1. 1 全 ぶ く 射

試料のふく射率測定時のエネルギー平衡式は

$$\Delta A_1 \cdot K \cdot V_s = [\varepsilon_s T_s^4 + (1 - \varepsilon_s) T_R^4] \sigma F_{2,1} \cdot \Delta A_2$$

$$- T_D^4 \cdot \sigma F_{2,1} \cdot \Delta A_1. \quad (\text{付 1})$$

黒体炉による校正時の平衡式は

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

相反定理より

$$F_{12} \cdot \Delta A_1 = F_{21} \cdot \Delta A_2 \quad (\text{付3})$$

となる。

ここで、

$K$ : ふく射計定数 ( $\text{Kcal/m}^2/\mu\text{V}$ )

$\nabla_s$ : 試料測定時の検知器出力 ( $\mu\text{V}$ )

$\nabla_B$ : 黒体をみたときの検知器出力 ( $\mu\text{V}$ )

$\varepsilon_s$ : 試料ふく射率

$T_s$ : 試料温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )

$T_B$ : 黒体温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )

$T_R$ : 室温 ( $^{\circ}\text{K}$ )

$T_D$ : 検知器温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )

$\sigma$ : Stefan-Boltzmann 定数

$\Delta A_1$ : ふく射計感熱部面積 ( $\text{m}^2$ )

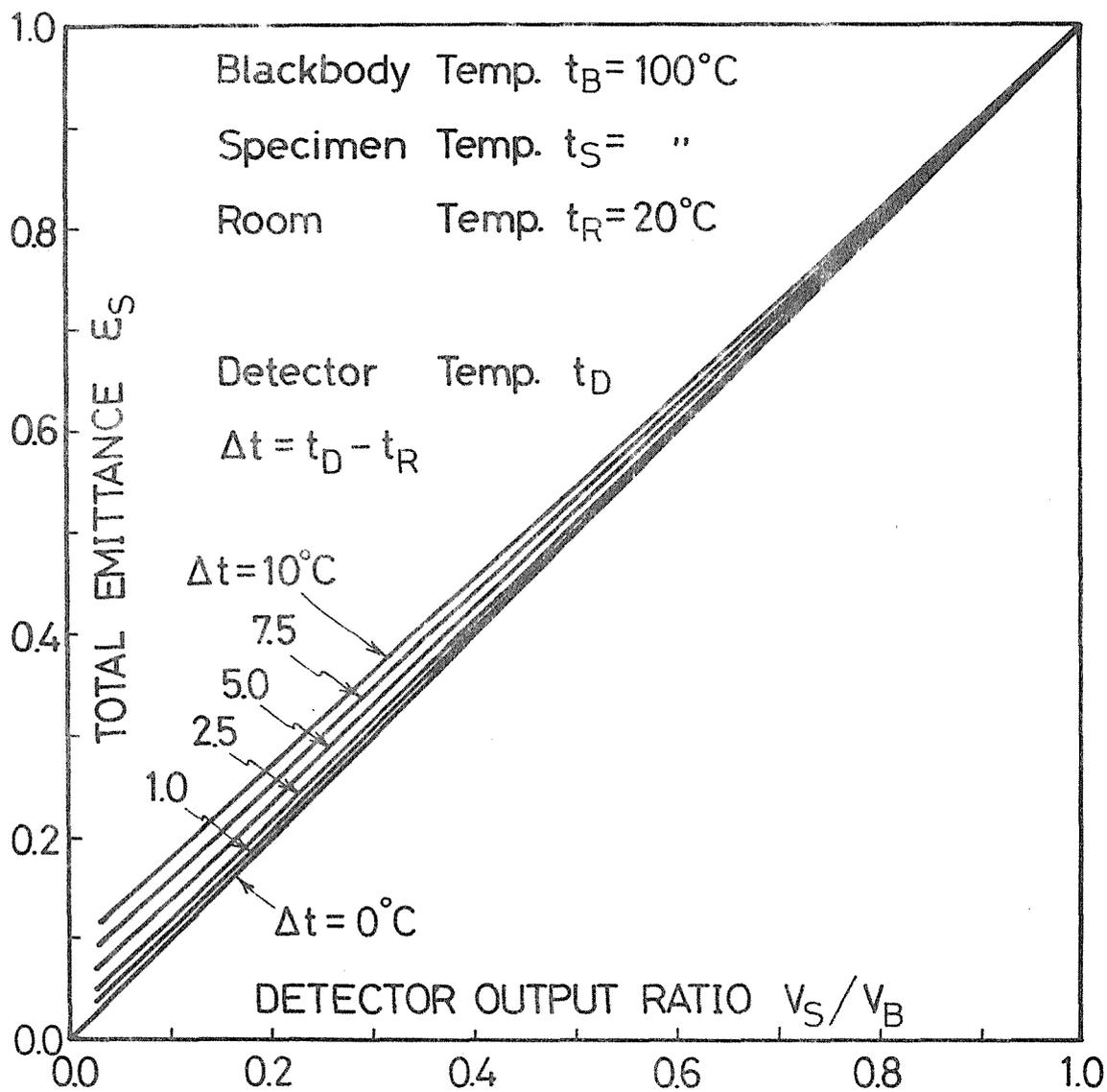
$\Delta A_2$ : ふく射計にのぞかれる試料面積 ( $\text{m}^2$ )

$F_{12}$ : ふく射計から試料をみる形態係数

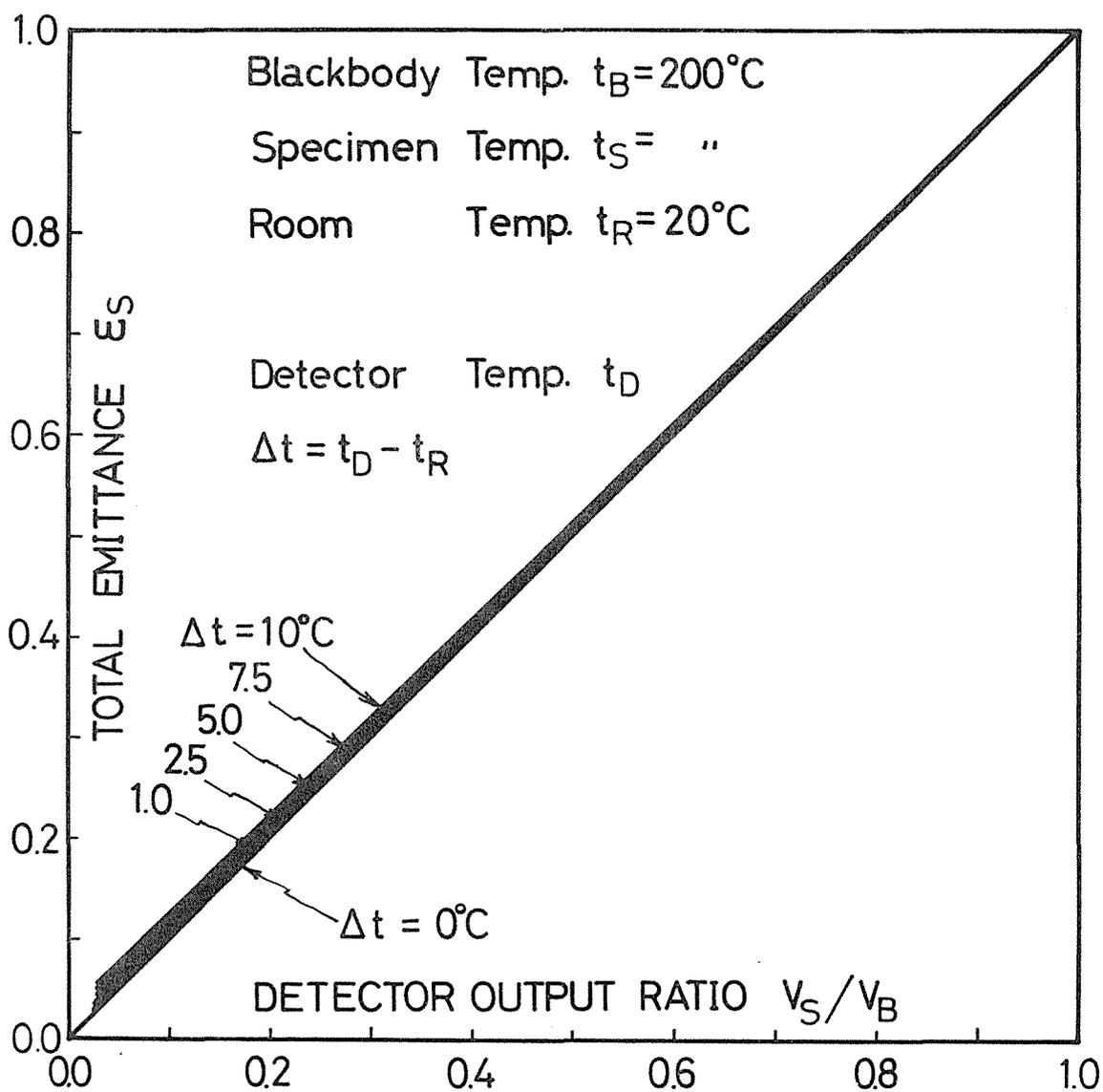
$F_{21}$ : 試料からふく射計をみる形態係数

式 (付3) の関係を用いて式 (付1) を式 (付2) で割ると

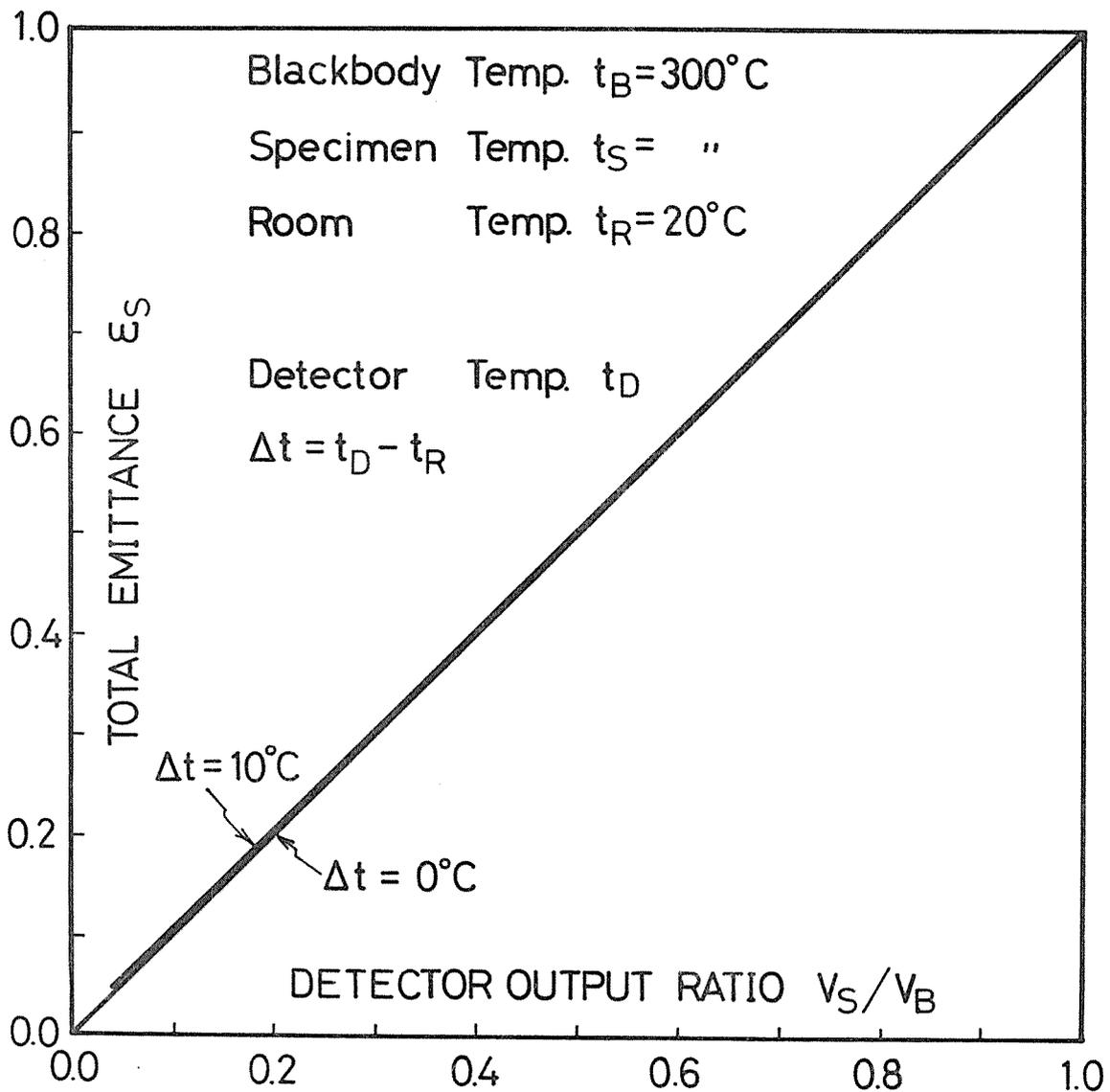
$$\frac{\nabla_s}{\nabla_B} = \frac{\varepsilon_s (T_s^4 - T_R^4) + T_R^4 - T_D^4}{T_B^4 - T_D^4}$$



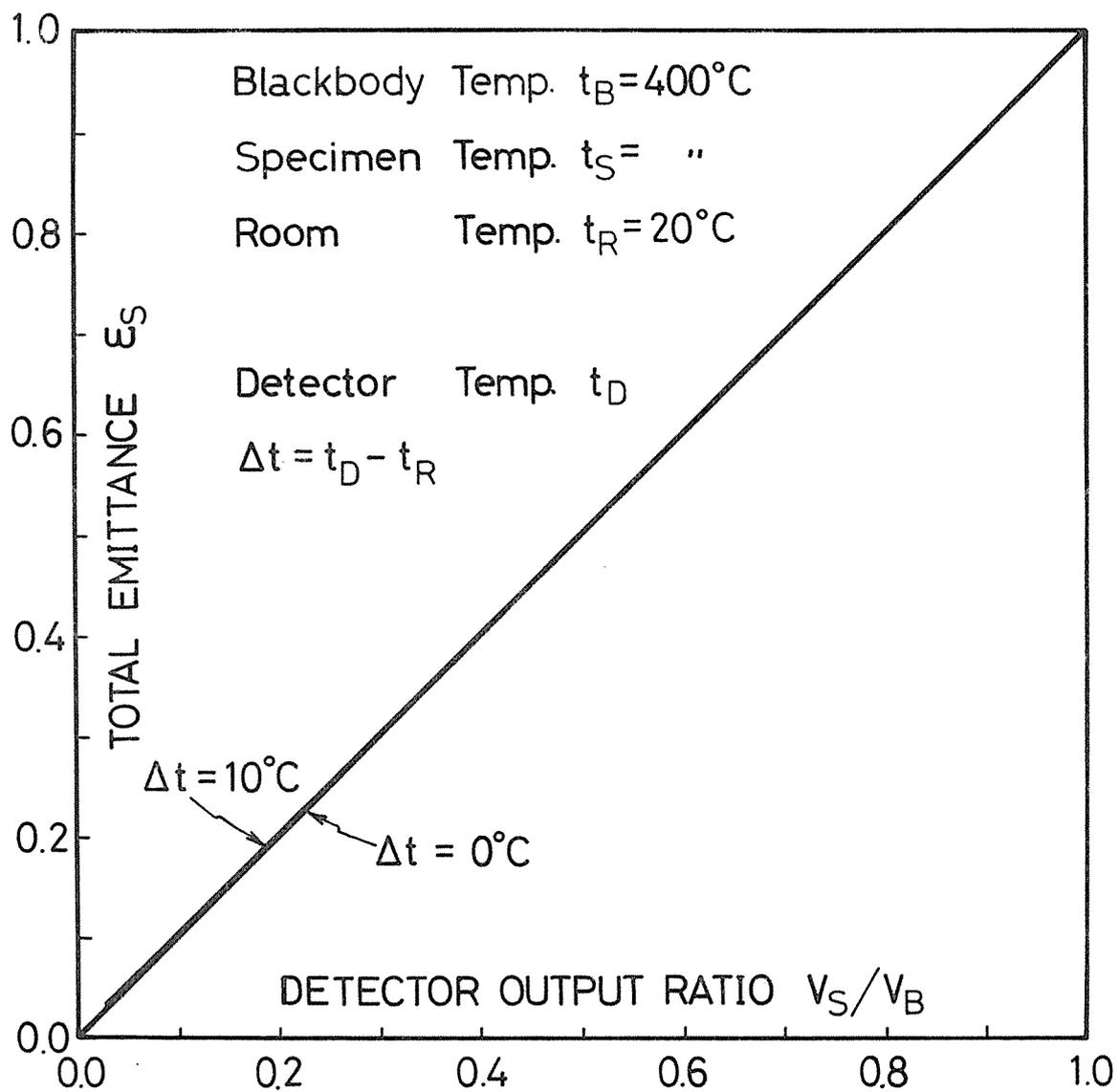
付図 1 (a) 検知器温度と室温の差が全ふく射率におよぼす影響



付図 1 (b)



付図 1 (c)



付図 1 (d)

ゆえに試料ふく射率の算式は

$$\varepsilon_s = \left( \frac{T_B^4 - T_D^4}{T_s^4 - T_R^4} \right) \cdot \frac{V_s}{V_B} - \left( \frac{T_R^4 - T_D^4}{T_s^4 - T_R^4} \right) \quad (\text{付4})$$

となり、式(付4)から明らかなように、検知器温度と室温が等しい場合 ( $T_D = T_R$ ) 以外は、ふく射率算出値に誤差を生ずることになる。

式(付4)に適宜に数値を与えて計算した結果を付図1(a), (b), (c)および(d)に示す。図より検知器感熱部温度が室温より高くなると、ふく射率の小さい物体の測定の際に大きな誤差が生ずることがわかる。実際の測定においては、検知器感熱部は室温より若干高くなることが予想される。

## 1. 2 分 光 ふ く 射

ふく射を分光して各波長ごとの単色ふく射率を求める場合も、全ふく射と同様に扱い、ただし各記号に添字入を付けて区別して示すと、単色ふく射率  $\varepsilon_{s\lambda}$  の算式は

$$\varepsilon_{s\lambda} = \left( \frac{E_{B\lambda} - E_{D\lambda}}{E_{s\lambda} - E_{R\lambda}} \right) \cdot \frac{V_{s\lambda}}{V_{B\lambda}} + \left( \frac{E_{D\lambda} - E_{R\lambda}}{E_{s\lambda} - E_{R\lambda}} \right) \quad (\text{付5})$$

ここで、

- $\varepsilon_{s\lambda}$  : 試料の単色ふく射率  
 $E_{s\lambda}$  : 試料温度の理想単色ふく射エネルギー  
 (  $\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2\lambda\mu}$  )  
 $E_{B\lambda}$  : 黒体の射出する単色ふく射エネルギー(・)  
 $E_{D\lambda}$  : 検知器感熱部温度の理想単色ふく射エネルギー (  $\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2\lambda\mu}$  )  
 $E_{R\lambda}$  : 室内温度の理想単色ふく射エネルギー(・)  
 $\nabla_{s\lambda}$  : 試料測定時の波長入における検知器出力  
 (  $\mu\text{V}$  )  
 $\nabla_{B\lambda}$  : 黒体を見たときの波長入における検知器出力 (  $\mu\text{V}$  )。

これらの単色ふく射エネルギーは、つぎの Planck のふく射関数に従うものとする。

$$E_{\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (\text{付6})$$

ここで、 $T$  : 物体温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )、 $\lambda$  : 波長 ( $\mu$ )、 $C_1$  : 定数 =  $3.2179 \times 10^8$  ( $\frac{\text{Kcal}\mu^5}{\text{m}^2\lambda}$ )、 $C_2$  : 定数 =  $14388$  ( $\mu^{\circ}\text{K}$ )。

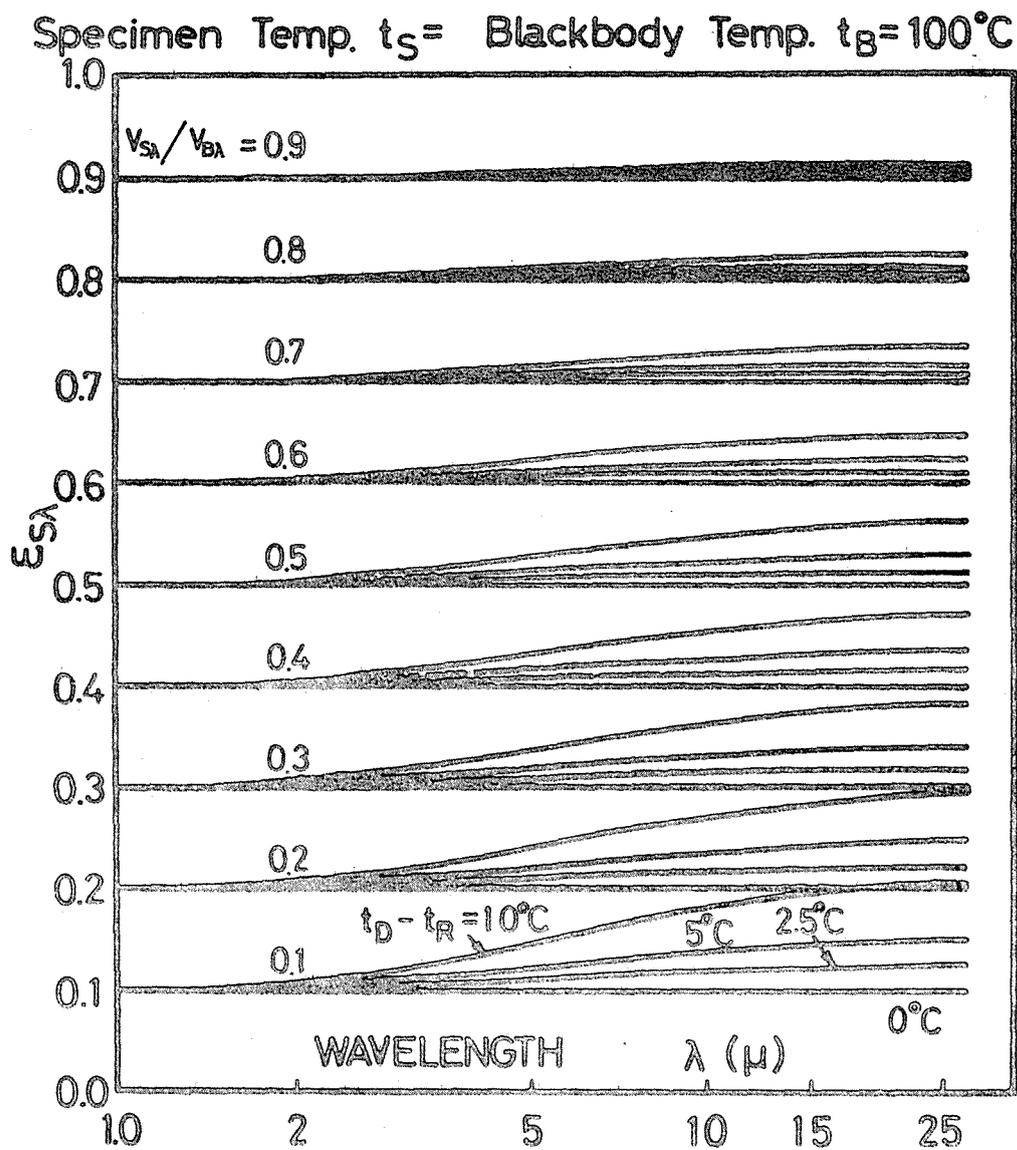
式(付6)の関係を式(付5)に代入して整理すると、ただし  $T_s = T_B$  として、

$$\varepsilon_{s\lambda} = \left\{ \frac{C_1 \lambda^{-5} / (e^{\frac{C_2}{\lambda T_B}} - 1) - C_1 \lambda^{-5} / (e^{\frac{C_2}{\lambda T_D}} - 1)}{C_1 \lambda^{-5} / (e^{\frac{C_2}{\lambda T_B}} - 1) - C_1 \lambda^{-5} / (e^{\frac{C_2}{\lambda T_R}} - 1)} \right\} \cdot \frac{\nabla_{s\lambda}}{\nabla_{B\lambda}}$$

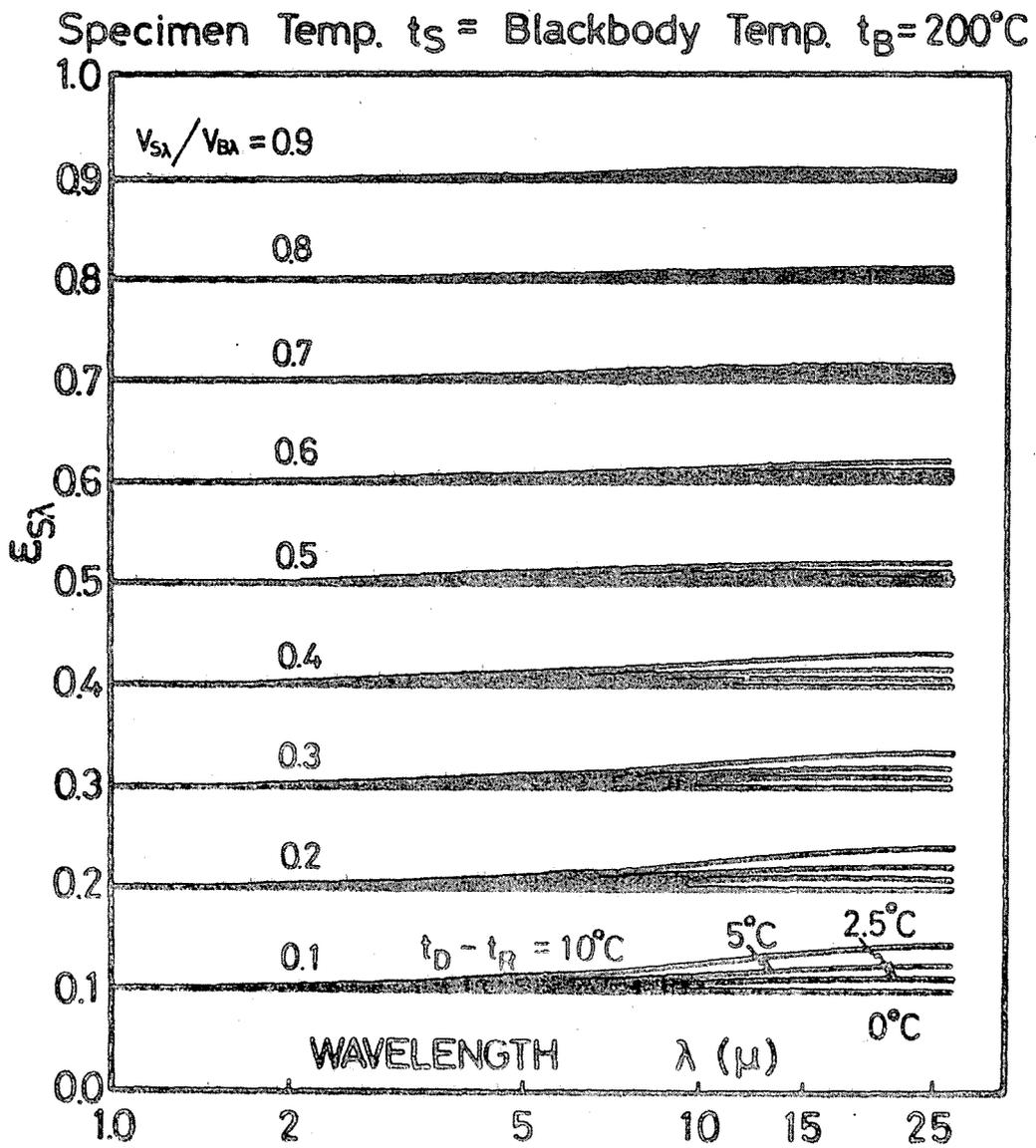
$$\begin{aligned}
& + \left\{ \frac{c_1 \lambda^5 / (e^{c_2/\lambda T_D} - 1) - c_1 \lambda^5 / (e^{c_2/\lambda T_R} - 1)}{c_1 \lambda^5 / (e^{c_2/\lambda T_S} - 1) - c_1 \lambda^5 / (e^{c_2/\lambda T_R} - 1)} \right\} \\
& = \left\{ \frac{(e^{c_2/\lambda T_D} - e^{c_2/\lambda T_B})(e^{c_2/\lambda T_R} - 1)}{(e^{c_2/\lambda T_R} - e^{c_2/\lambda T_S})(e^{c_2/\lambda T_D} - 1)} \right\} \cdot \frac{V_S \lambda}{V_B \lambda} \\
& + \left\{ \frac{(e^{c_2/\lambda T_R} - e^{c_2/\lambda T_D})(e^{c_2/\lambda T_S} - 1)}{(e^{c_2/\lambda T_R} - e^{c_2/\lambda T_S})(e^{c_2/\lambda T_D} - 1)} \right\}. \quad (\text{付7})
\end{aligned}$$

式(付7)による計算結果を付図2(a), (b), (c)および(d)に示す。これらより検知器感熱部温度が室温より高ければ、波長の大きいところで大きな誤差を生じ、真のふく射率より小さめに算出される。

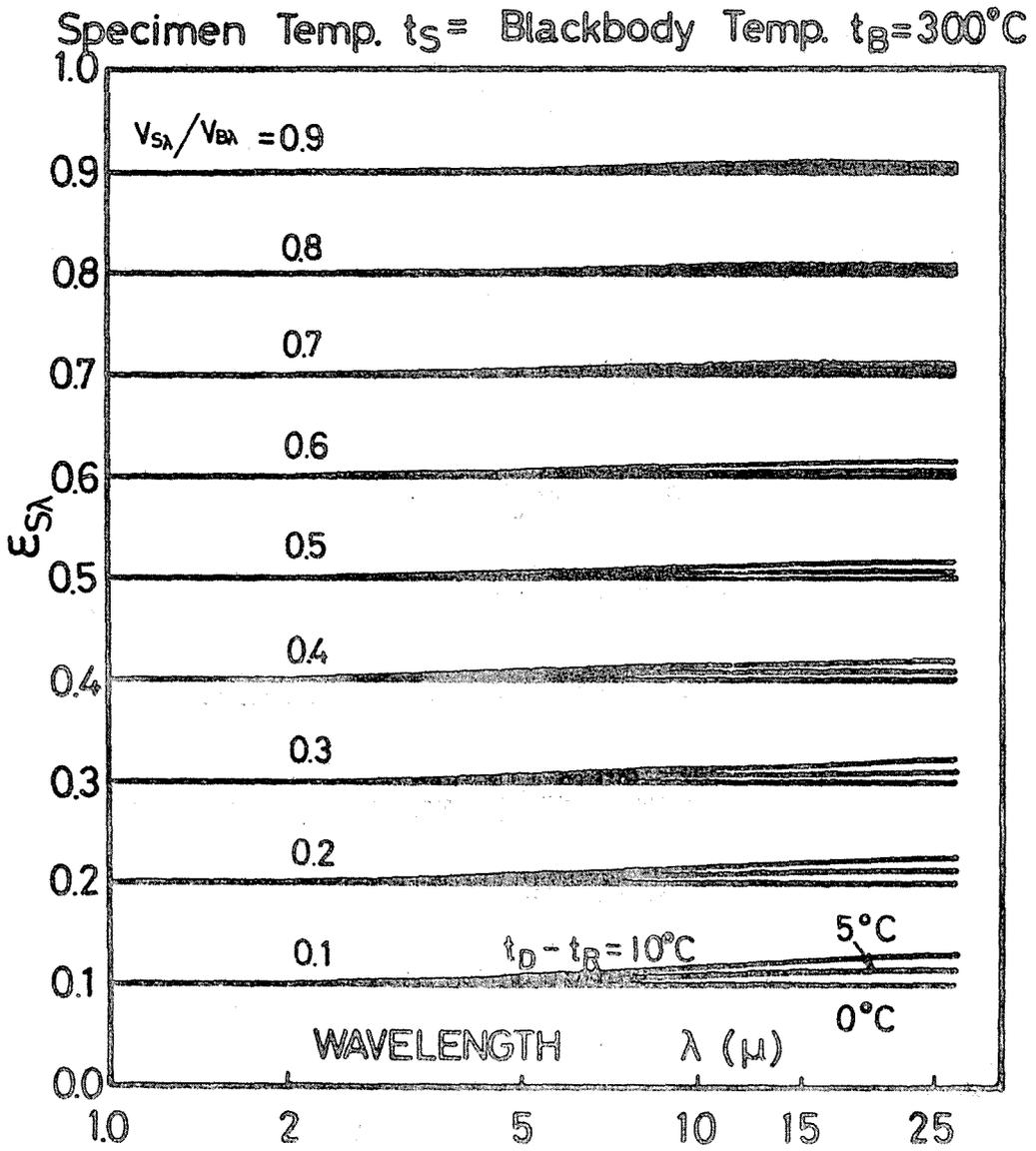
分光計モノクロメータの温度は、吸湿を避けるため、室温より数度高く保たれている。検知器温度はモノクロメータと等温とすると、その温度差に相当した誤差が長波長域のところであられることになる。実際の測定において、長波長域で試料スペクトルが、黒体からの基準スペクトルを上まわった例もあったが、この計算結果ほど大きな誤差はみられなかった。その理由の一つはモノクロメータ中の光路は非常に長く、入射したふく射は何度も反射、屈折をくり返して検知器に達する仕組みになっているので(付図5参照)、式(付1)におけ



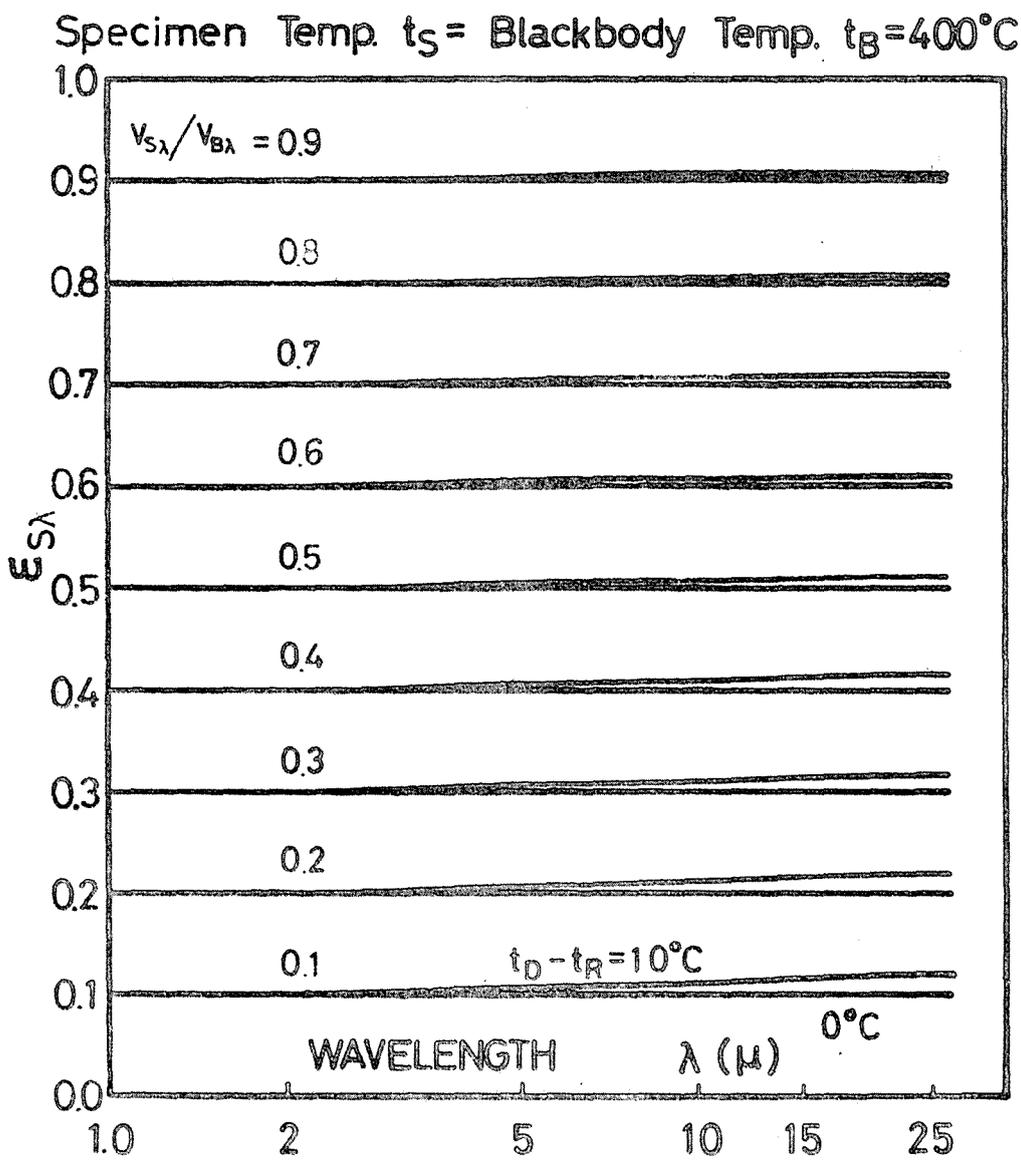
付図 2 (a) 検知器温度と室温の差が単色ふく射率におよぼす影響



付図 2 (b)



付図 2 (c)



付図 2 (d)

る室内ふく射の試料面反射成分  $\{ (1-\epsilon_s) T_R^4 \cdot \sigma F_{21} \cdot \Delta A_1 \}$  はモノクロメータ中の進行過程で吸収され、さらに波長別に分光されて検知器感度以下にエネルギーが低下するために、それほど敏感に誤差としてあらわれなかったものとおもわれる。

## 2. 試料温度測定誤差によるふく射率の誤差

### 2.1 全ふく射

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

$$\Delta A_1 \cdot K \cdot V_s = \epsilon_s \cdot \sigma T_s^4 F_{21} \cdot \Delta A_2 - \alpha_s \cdot \sigma T_R^4 F_{12} \cdot \Delta A_1 \quad (\text{付8})$$

ここで、 $\alpha_s$  : 試料吸収率 ( $\alpha_s = \epsilon_s$ )。  
相反定理を用いて式(付8)を簡略化して

$$V_s = K' \epsilon_s (E_s - E_0) \quad (\text{付9})$$

ここで、 $K'$ : 定数、 $E_s$ : 試料が射出するふく射、 $E_0$ : 周囲が射出するふく射。

式(付9)より、試料ふく射率は

$$\epsilon_s = \frac{V_s}{K'(E_s - E_0)}$$

となり、両辺の対数をとってそれぞれについて微分し整

理すると、

$$\left(\frac{\Delta \varepsilon_s}{\varepsilon_s}\right) = \left(\frac{4T_R^4}{T_S^4 - T_R^4}\right) \cdot \frac{\Delta T_R}{T_R} - \left(\frac{4T_S^4}{T_S^4 - T_R^4}\right) \cdot \frac{\Delta T_S}{T_S} \quad (\text{付10})$$

いま、式(付10)より室温一定 ( $\Delta T_R/T_R = 0$ ) として、試料温度の測定に誤差がある場合、ふく射率へ影響する誤差を計算してその結果を付図3に示す。これによると、試料温度の測定に誤差がある場合は、温度の低いところで大きく効いてくることかわかる。すなわち、試料温度  $T_S = 100^\circ\text{C}$  において温度測定誤差率 ( $\Delta T_S/T_S$ ) が1%で、ふく射率の誤差率 ( $\Delta \varepsilon_s/\varepsilon_s$ ) は5%となり、試料温度の測定はとくに温度が低い場合に正確を期さなければならぬ。ただし、ここでいう温度の誤差率は絶対温度に直した値であるから、この実験における摂氏目盛で示した試料温度の測定誤差  $\pm 2^\circ\text{C}$  は温度  $373^\circ\text{K}$  ( $100^\circ\text{C}$ ) に対しては  $\pm 0.5\%$  であるから、実際に測定により算出されたふく射率誤差はこれよりはるかに小さな値である。

## 2. 2 分 光 ふ く 射

全ふく射における式(付9)に相当する分光ふく射の式は、エネルギー平衡より、

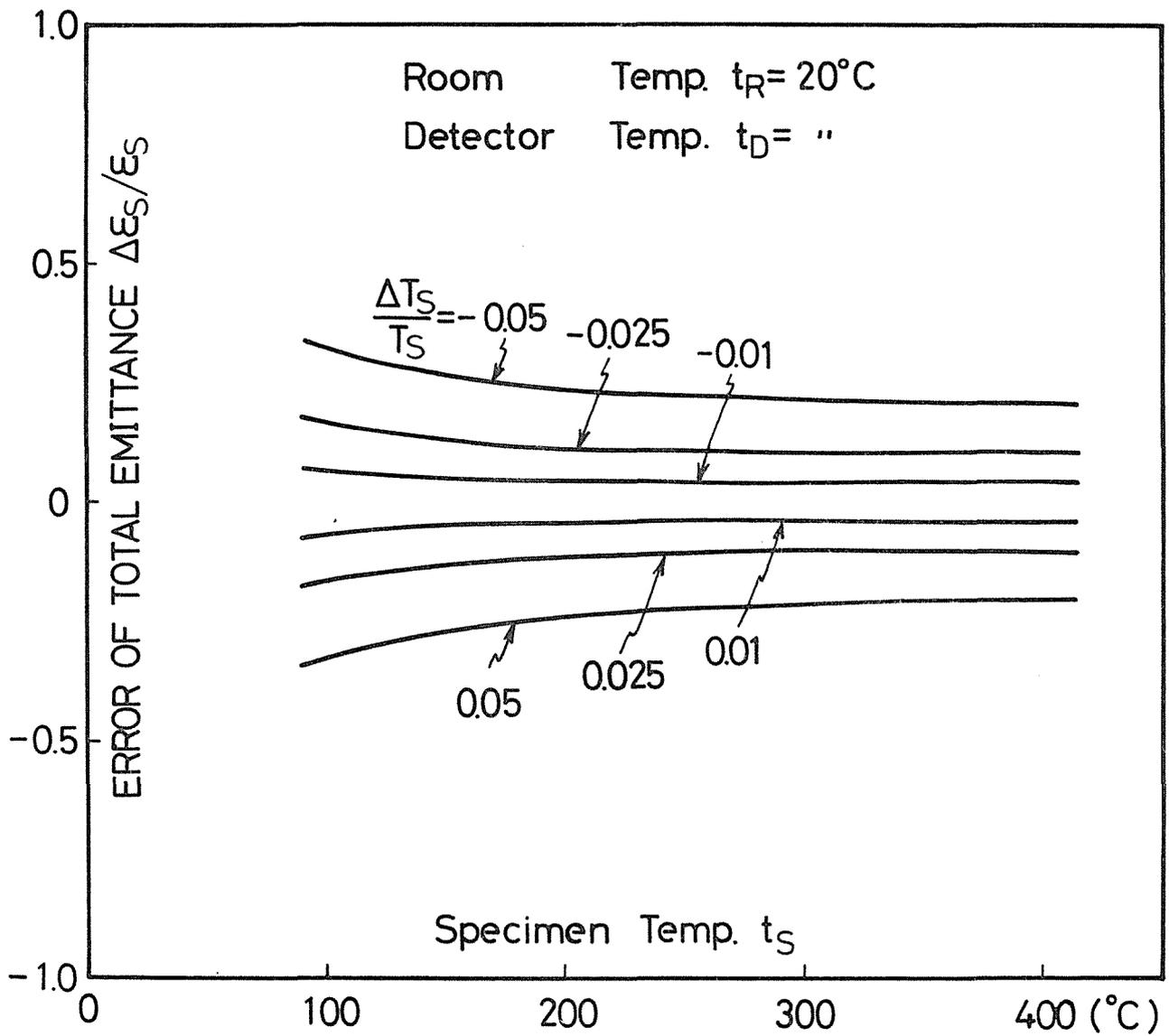
$$\begin{aligned} V_{s\lambda} &= K'' \cdot \epsilon_{s\lambda} (E_{s\lambda} - E_{o\lambda}) \\ &= K'' \cdot \epsilon_{s\lambda} \left( \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T_R} - 1} - \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T_S} - 1} \right). \end{aligned} \quad (\text{付11})$$

式(付11)の両辺の対数をとって、それぞれについて微分して整理すると

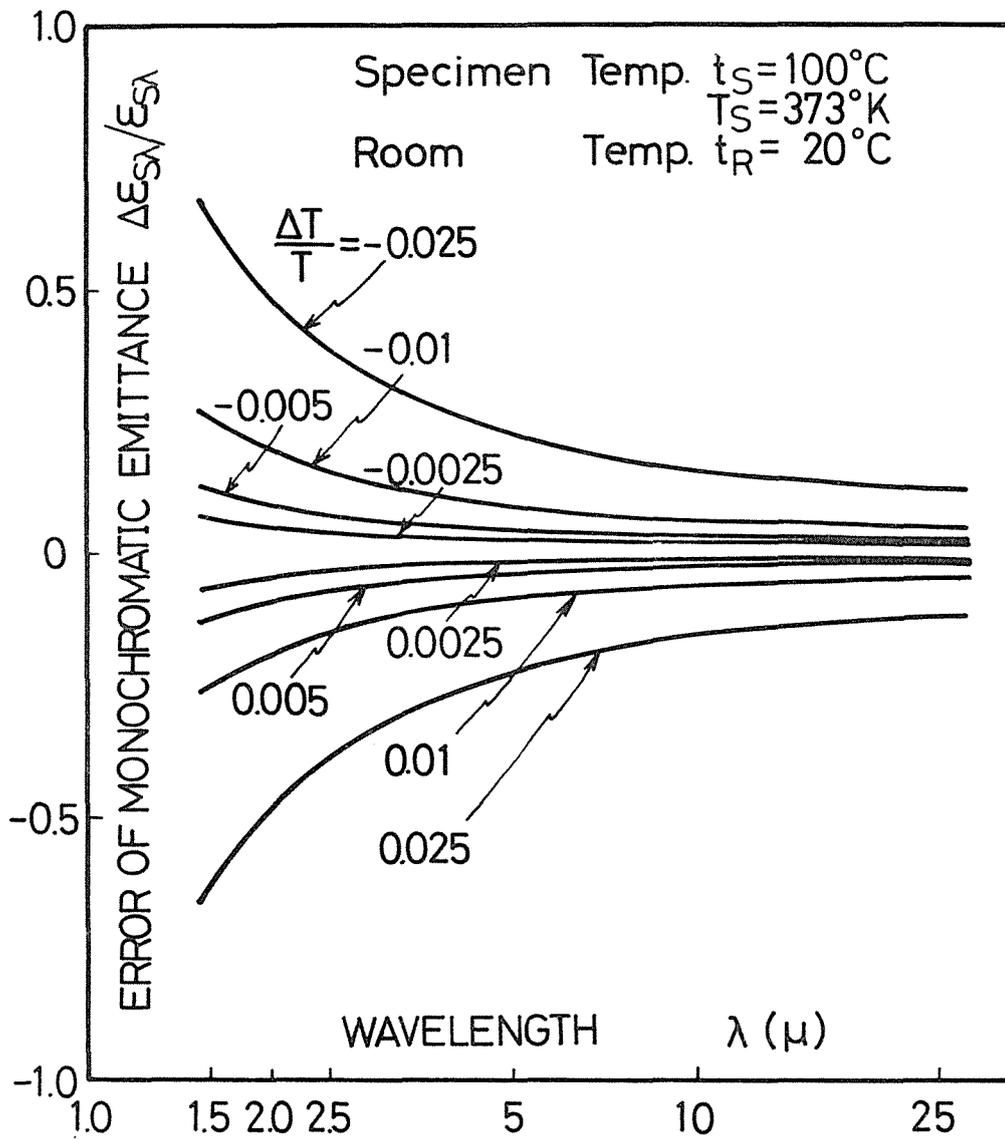
$$\begin{aligned} \left\{ \frac{\Delta \epsilon_{s\lambda}}{\epsilon_{s\lambda}} \right\} &= \left\{ \frac{e^{C_2/\lambda T_S} - 1}{(e^{C_2/\lambda T_R} - 1)(e^{C_2/\lambda T_R} - e^{C_2/\lambda T_S})} \cdot \frac{C_2}{\lambda T_R} \cdot e^{C_2/\lambda T_R} \right\} \cdot \frac{\Delta T_R}{T_R} \\ &\quad - \left\{ \frac{e^{C_2/\lambda T_R} - 1}{(e^{C_2/\lambda T_S} - 1)(e^{C_2/\lambda T_R} - e^{C_2/\lambda T_S})} \cdot \frac{C_2}{\lambda T_S} \cdot e^{C_2/\lambda T_S} \right\} \cdot \frac{\Delta T_S}{T_S}. \end{aligned} \quad (\text{付12})$$

全ふく射の場合と同様に、式(付12)より室温一定( $\Delta T_R / T_R = 0$ )として、試料温度の測定に誤差があるとき単色ふく射率へ影響する誤差を計算してその結果を付図4(a), (b), (c)および(d)に示す。

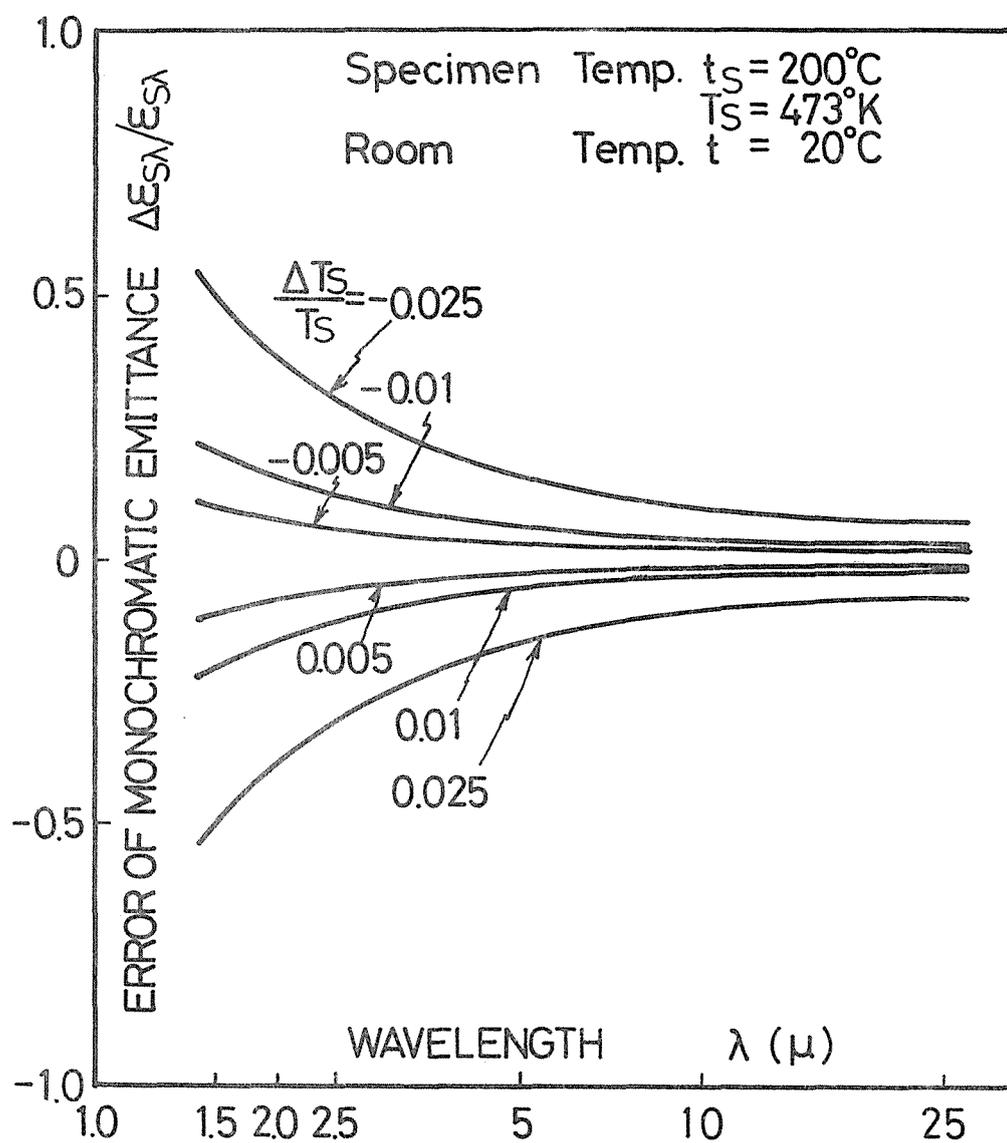
試料温度測定誤差の単色ふく射率誤差への影響は短波長域で非常に大きくなり、とくに試料温度の低いときに著しいことから、試料温度の測定には十分留意して正確を期さなければならない。なお、この場合も温度測定誤差は絶対温度で示されているゆえ、実測の際の温度測定誤差の最大値は±0.5%である。



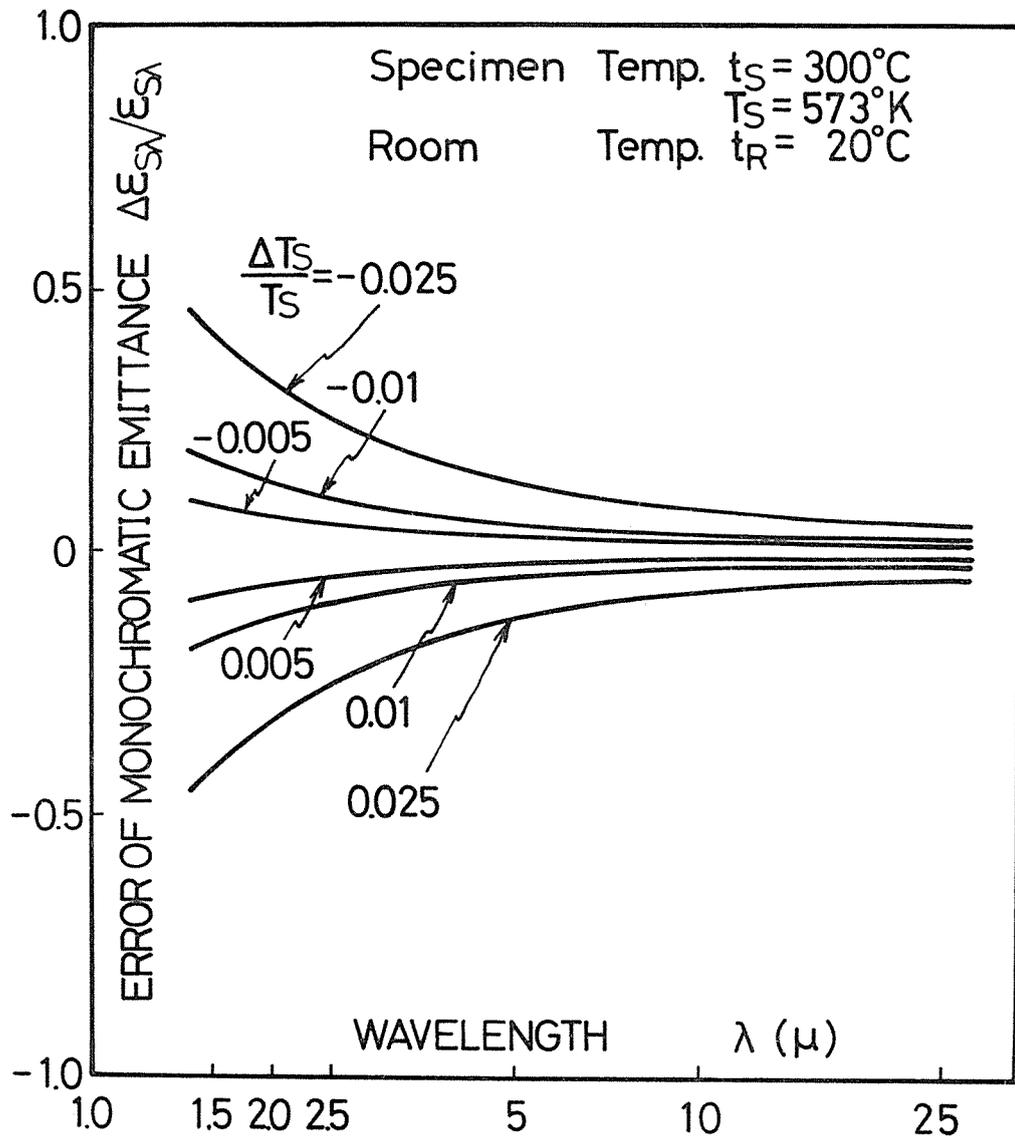
付図 3 試料温度測定誤差が全反射率におよぼす影響。



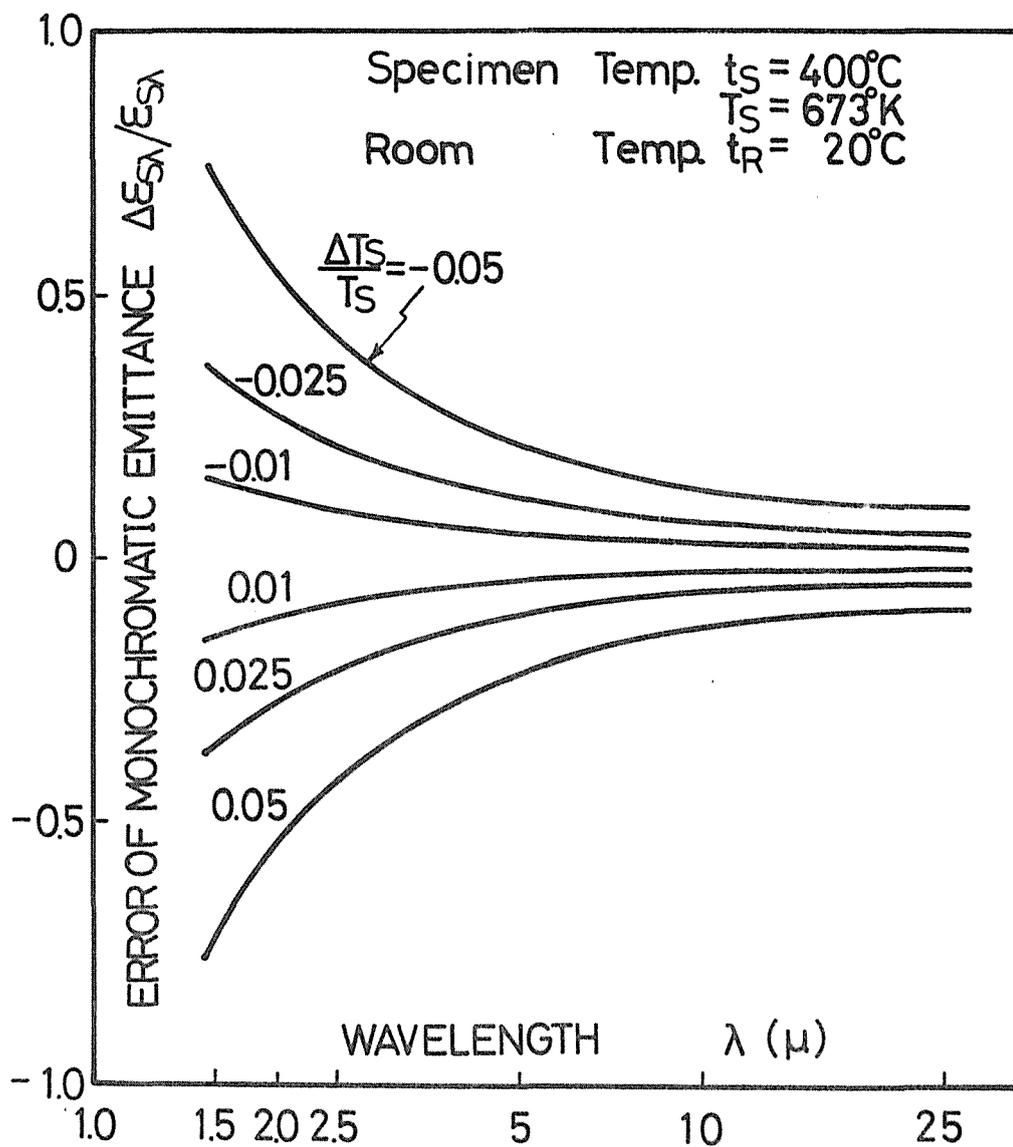
付図 4 (a) 試料温度測定誤差が単色放射率におよぼす影響



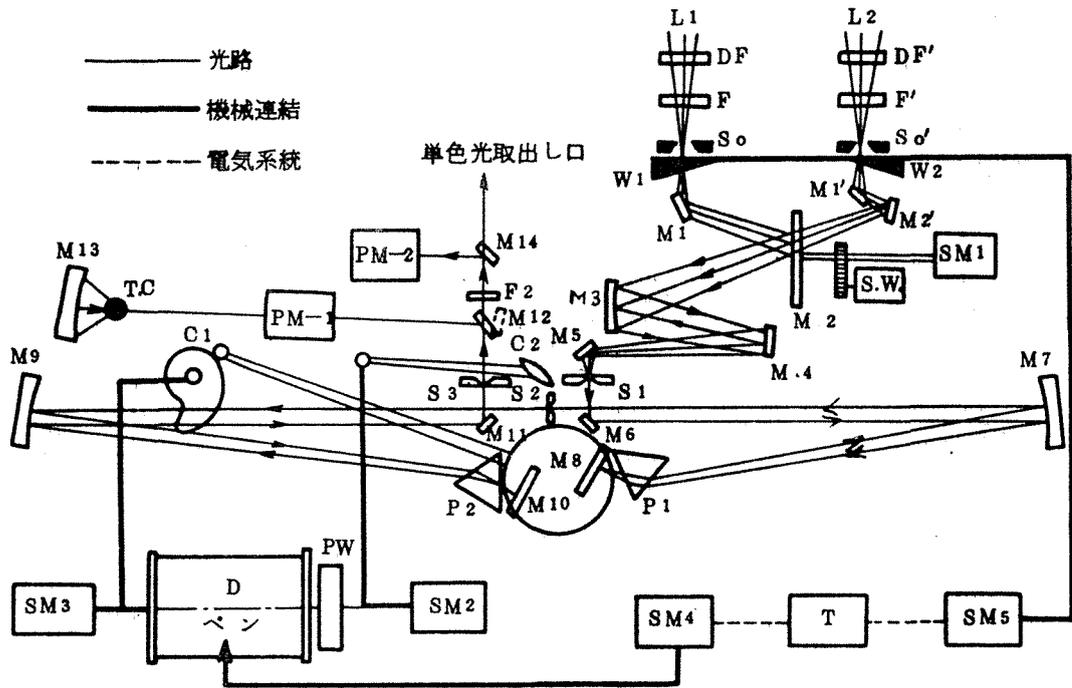
付図 4 (b)



付図 4 (c)



付図 4 (d)



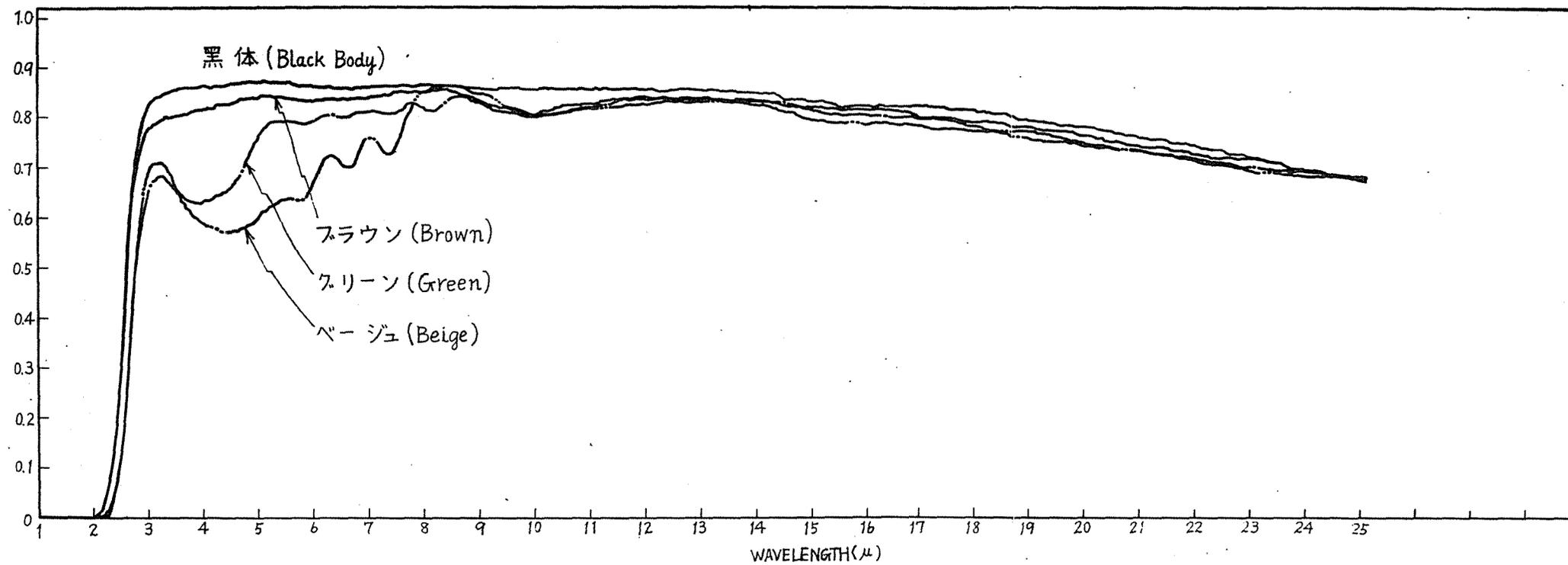
光学配置各部説明表

F, F'	フィルター	SM1	セクターモーター
F2	光電面フィルター	SM2	スリットモーター
DF, DF'	ディフューザー	SM3	波長モーター
M1, 1', 2', 4	平面鏡	SM4	ペンモーター
M5, 6, 11, 12	平面鏡	SM5	クシモーター
M2	セクター鏡	T	対数変換器
M3, 7, 9	コリメーター	PW	スリットプログラム回路
M8, M10	リトロ鏡	L1	試験光源
W1, W10	アンテナータ(楯)	L2	標準光源
P1, P2	プリズム	SW	同期スイッチ
S0, S0'	入射スリット	M12	受光器切換鏡
S1, S2, S3	スリット	M13	受光鏡
C1	波長カム	T.C	熱電対
C2	スリットカム		

M12 は可動

付図5 自記分光放射計(SR-3)の光学配置図

## 付 録 5



付図 6. 塗装平面および塗装粗面の分光スペクトル

試料温度	200 °C
モノクロメータ温度	22~24 °C
室温	20.0 °C
入射スリット幅	2.0 mm
スキャンスピード	5.0~6.0
ゲイソン	3.0
フィルタ	1.0

## 付 録 6.

実験に使用した研磨紙(布)の規格

(J I S R 6251 ~ 6253 - 1960 より抜粋)

研磨材 (砥 粒)

A A ; 溶融アルミナ 1 級

C C ; 炭化けい素 1 級

粒 度

番 号	40.	100	240.	400	800.	1,200
粒 度(μ)	590.	210	80	40	20	13
	研 磨 布		研 磨 紙・研 磨 布		耐 水 研 磨 紙	

接着剤. ニカワ. 工業用ゼラチンおよび合成樹脂接着剤.

## 文 献

- 1) 甲藤好郎：伝熱概論，(1964)、P.337, 養賢堂.
- 2) 文部省：学術用語集，機械工学編，(1968)、P.65.
- 3) 日本機械学会：伝熱工学資料，改訂版，(1962)、P.8.
- 4) 日本機械学会：ふく射伝熱に関する最近の発展，(1966)、P.3.
- 5) M.Jakob ; Heat Transfer, Vol.1,(1964),p.24, Wiley & Sons.
- 6) S.T.Hsu ; Engineering Heat Transfer,(1963),p.136, Nortrand.
- 7) E.R.G.Eckert ; Heat and Mass Transfer,(1959),p.375, McGraw-Hill.
- 8) McAdams ; Heat Transmission,(1954),p.62, McGraw-Hill.
- 9) H.C.Hottel, A.F.Sarofim ; Radiative Transfer,(1967),p.133, McGraw-Hill.
- 10) 5)に同じ p.44.
- 11) N.W.Snyder ; Radiation in Metals, Trans. ASME.,1954-5,p.541.
- 12) E.Schmidt, E.R.G.Eckert ; Forsch. Gebiete Ingenieurw., Vol.6, 1935,p.175.
- 13) A.P.Lenham, D.M.Trehene ; Optical Constants of Single Crystals of Mg,Zn,Cd,Al,Ga,In and White Sn, J.of the Optical Society of Am.,Vol.56, 1966,p.752.
- 14) T.R.Harrison ; Radiation Pyrometry and its Underlying Principles of Radiation Heat Transfer,(1960),p.191-193, Wiley & Sons.
- 15) R.E.Chupp ; Thermal Emission Characteristics of a Nonisothermal Dielectric Coating on a Conductor Surface, AIAA. J.,Vol. 8, No.3, 1970-3,p.551.
- 16) E.G.Cravalho, E.L.Coburn ; The Effect of Thin Surface Films on the Radiative Properties of Metal Surfaces, AIAA Paper,

No.69-623, 1963-6, p.1.

- 17) 甲藤好郎：表面あらさ曲線の統計的解析(第1報),  
日本機械学会論文集, Vol.22, No.122, P.693.
- 18) 甲藤好郎：表面あらさ曲線の統計的解析(第2報),  
日本機械学会論文集, Vol.22, No.122, P.699.
- 19) 蓮沼宏：金属仕上面からの反射(反射率曲線の理論について),  
精密機械, Vol.22, No.4, P.131.
- 20) L.F.Daws ; The Emissivity of a Groove, British J.of App. Phys.,  
Vol.15, 1954-5, p.182.
- 21) E.M.Sparrow, S.H.Lin ; Absorption of Thermal Radiation in a  
V-Groove Cavity, Int.J.Heat Mass Transfer, Vol.5, P.1111.
- 22) J.Psarouthakis ; Apparent Thermal Emissivity from Surfaces  
with Multiple V-Shaped Grooves, AIAA.J., Vol.1, No.8, 1963-8,  
p.1879.
- 23) R.B.Zipin ; A Preliminary Investigation of the Bidirectional  
Spectral Reflectance of V-Grooved Surfaces, App. Optics, Vol.  
5, No.12, 1966-12, p.1954.
- 24) W.Z.Black, R.J.Schoenhals ; A Study of Directional Radiation  
Properties of Specially Prepared V-Groove Cavities, J.of Heat  
Transfer, 1968-12, p.420.
- 25) G.A.McCue ; A Note Concerning the Effective Emittance of Cer-  
tain Grooved Surfaces, AIAA. J., 1966-4, p.721.
- 26) M.A.Heaslet, H.Lomax ; Radiative Heat Transfer Calculations  
for Infinite Shells with Circular Arc Sections, Including Ef-  
fects of an External Source Field, Int.J.Heat Mass Trans.,  
Vol.5, 1962, p.457.
- 27) H.H.Safwat ; Absorption of Thermal Radiation in a Hemispheri-

- cal Cavity, J.of Heat Trans.,1970-2, p.198.
- 28) E.M.Sparrow ; Radiant Absorption Characteristics of Concave Cylindrical Surfaces, J.of Heat Transfer, 1962-11, p.283.
  - 29) E.M.Sparrow, J.L.Gregg, J.V.Szel, P.Manos ; Analysis, Results and Interpretation for Radiation between Some Simply-Arranged Gray Surfaces, J.of Heat Transfer, 1961-5, p.207.
  - 30) E.M.Sparrow, R.D.Cess ; Radiation Heat Transfer,(1966), p.164-170.
  - 31) M.Jakob ; Heat Transfer, Vol.2,(1963), p.21, Wiley & Sons.
  - 32) E.M.Sparrow, V.K.Jonsson ; Absorption and Emission Characteristics of Diffuse Spherical Enclosures, J.of Heat Transfer, 1962-5, p.188.
  - 33) S.Flügge ; Encyclopedia of Physics,(1958), p.145-156, Julius Springer.
  - 34) 33)に同じ , p.152.
  - 35) V.R.Hase ; Emission von Aluminum und Seinen Legierungen, Zeitsch. f. Techn. Physik, Nr.3, 1932, p.145.
  - 36) A.F.Gorton ; Reflection from, and Transmission through Rough Surfaces, Phys. Rev., Vol.7, No.1, Ser.2, 1913, p.66.
  - 37) H.E.Bennett, J.O.Porteus ; Relation between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence, J.of Optical Society of Am., Vol.51, No.2, 1961-2, p.123.
  - 38) J.T.Agnew, R.B.MacQuistan ; Experiments Concerning Infrared Diffuse Reflectance Standards in the Range 0.8 to 20.0 Microns, J.of Optical Society of Am., Vol.43, No.11, 1953-11, p.999.
  - 39) A.R.Gordon, G.F.Muchnik ; Determination of the Emissivity of Niobium as a Function of the Roughness of the Surface, Teplo-

- fizika Vysokikh Temperature, Vol.2, No.4, p.505.
- 40) J.C.Richmond ; Effect of Surface Roughness on Emittance of Nonmetals, J.of Optical Society of Am., Vol.56, No.2, 1966-2, p.253.
  - 41) N.W.Snyder, J.T.Gier, R.V.Dunkle ; Total Normal Emissivity Measurements on Aircraft Materials between 100 and 800F, Trans. ASME.,1955-10, p.1012.
  - 42) D.A.Seban ; The Emissivity of Transition Metals in the Infra-red, J.of Heat Trans., 1965-5, p.173.
  - 43) D.K.Edwards ; Radiative Transfer Characteristics of Metals, J.of Heat Trans., 1969-2, p.1.
  - 44) R.E.Rolling ; Measurement of the Thermal Radiation Properties of Materials, Instrument Society of Am.,1967-9, p.1.
  - 45) R.E.Gannon, B.Linder ; Effect of Surface Roughness and Porosity on Emittance of Alumina, J.of Am. Ceramic Society, Vol.47, No.11, p.592.
  - 46) R.G.Siegfried, R.C.Birkebak ; A Comparative Study of the Total Directional Emittance of a Dielectric and a Metal as a Function of Surface Roughness, AIAA Paper, No.68-778, 1968-6, p.1.
  - 47) C.H.Treat, M.W.Wildin ; Investigation of a Model for Bidirectional Reflectance of Rough Surfaces, AIAA Paper, No.69-64, 1969-2, p.1.
  - 48) R.G.Hering, T.F.Smith ; Surface Roughness Effect of Radiant Transfer between Surfaces, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.13, 1970, p.725.
  - 49) R.G.Hering, T.F.Smith ; Apparent Radiation Properties of a Rough Surface, AIAA Paper, No.69-622, 1969, p.1.
  - 50) R.G.Hering, T.F.Smith ; Surface Roughness Effects on Radiant

Heat Transfer, J. Spacecraft, Engineering Notes, 1969-12,  
p.1465.

- 51) 蓮沼宏, 奈良治郎: 表面あらしと "Sheen" 光沢の関係,  
応用物理, Vol. 22, No. 11-12, 1953, P. 389.
- 52) 蓮沼宏: 拡散反射と表面の光沢 (I, 表面の拡散反射の性質).  
応用物理, Vol. 23, No. 11, 1954, P. 501.
- 53) 蓮沼宏: 拡散反射と表面の光沢 (II, 第1種面の光沢と光度計).  
応用物理, Vol. 23, No. 12, 1954, P. 548.
- 54) 蓮沼宏: 金属粗面からの光の反射 (Sheen 光沢およびNF粗度曲  
線について), 機械の研究, Vol. 8, No. 5, 1956, P. 515.
- 55) R.C.Birkebak, E.M.Sparrow, E.R.G.Eckert, J.W.Ramsey ; Effect  
of Surface Roughness on the Total Hemispherical and Specular  
Reflectance of Metallic Surfaces, J. of Heat Trans., 1964-5,  
p.193.
- 56) R.C.Birkebak, J.P.Dawson, B.A.McCullough, B.E.Wood ; Hemispher-  
ical Reflectance of Metal Surfaces as a Function of Wavelength  
and Surface Roughness, Int. J. Heat Mass Trans., Vol.10, p.1225.
- 57) R.C.Birkebak, E.R.G.Eckert ; Effect of Roughness of Metal Sur-  
face on Angular Distribution of Monochromatic Reflected Radi-  
ation, J. of Heat Trans., 1965-2, p.85.
- 58) T.K.Chinmayanandam ; On the Specular Reflection from Rough Sur-  
faces, Phys. Rev., Vol.13, 1919, p.96.
- 59) J.T.Bevans, J.T.Gier, R.V.Dunkle ; Comparison of Total Emit-  
tance with Values Computed from Spectral Measurements, Trans.  
ASME., 1958-10, p.1405.
- 60) R.V.Dunkle ; Thermal-Radiation Tables and Applications, Trans.  
ASME., 1954-5, p.549.

- 61) R.E.Rolling ; Effect of Surface Roughness on the Spectral and Total Emittance of Platinum, Tech. Rpt.,No.AF33-11281, Air Force Materials Laboratory, WPAFB, p.1.
- 62) L.W.McCulloch, J.E.Sunderland ; Measurement of Monochromatic Emittance of Nonconductors at Moderate Temperatures, J. of Heat Trans., 1970-5, p.231.
- 63) 金山公夫：暖房放熱面のふく射に関する基礎研究，北見工大研報，Vol. 2, No. 2, 1968, P. 313.
- 64) K.Negishi, K.Sohsa, T.Sawada ; Measurement of Total Hemispherical Emissivity, Bll.of University Osaka, Pref., Ser.A, Vol.18, No.1, 1969, p.59.
- 65) 金山公夫：V字みぞ粗面および円弧みぞ粗面の指向ふく射率，機械学会論文集，Vol. 37, No. 299, 1971, P.1378.
- 66) 金山公夫：V字みぞ粗面の指向ふく射率，第6回伝熱シンポジウム講演論文集，1969-5, P. 229. およびV字みぞ粗面のふく射率，北見工大研報，Vol. 2, No. 3, 1969, P. 427.
- 67) 金山公夫，馬場弘：金属V字みぞ粗面の指向ふく射率。(第2報，近似式と厳密式による計算結果の比較)，機械学会道支部第15回講演会論文集，1971-10, P. 245.
- 68) R.B.Zipin ; The Apparent Thermal Radiation Properties of an Isothermal V-Groove with Specularly Reflecting Walls, J. of Research of National Bureau of Standards, Vol.70C, No.4, 1966-10-12, p.275.
- 69) 金山公夫：円弧みぞ粗面の指向ふく射率，機械学会道支部第13回講演会論文集，1969, P. 203.
- 70) 金山公夫，馬場弘：金属および非金属ランダム粗面の指向ふく射率，第8回伝熱シンポジウム講演論文集，1971-5, P. 265.

- 71) 金山公夫：金属ランダム粗面の指向ふく射率，北見工大研報 Vol. 3, No. 1, 1971, P. 15.
- 72) 金山公夫, 馬場弘：金属ランダム粗面の指向ふく射率(第2報, 第1近似と第2近似による計算結果の比較), 機械学会道支部第15回講演会論文集, 1971, P. 249.
- 73) 金山公夫：非金属ランダム粗面の指向ふく射率, 北見工大研報 Vol. 3, No. 1, 1971, P. 23.
- 74) 金山公夫, 馬場弘：固体ふく射の分光研究(第1報) — 金属平面および粗面の単色ふく射率と全ふく射率 — 第7回伝熱シンポジウム講演論文集, 1970-5, P. 301. および北見工大研報 Vol. 2, No. 5, 1970, P. 669.
- 75) 金山公夫, 馬場弘：固体ふく射の分光研究(第2報) — 塗装面の垂直ふく射率, 指向ふく射率および単色ふく射率 — 機械学会48期通常総会講演論文集, No. 710-5, 1971-4, P. 93. および固体ふく射の分光研究(第2報) — 塗装面の垂直単色ふく射率と垂直全ふく射率 — 北見工大研報, Vol. 3, No. 1, 1971, P. 31.
- 76) 33)に同じ p.135.
- 77) アルミニウム加工技術便覧, (1970), 日刊工業, P. 519.
- 78) 松本秋男, 西辻昭：ミリ波の減衰に対する雪の影響, 昭和41年電気四学会連合大会, P. 9.