

固体ふく射の分光研究 (第3報)*

— 塗装面のあらさと指向全ふく射率
および垂直単色ふく射率 —

金山 公夫**
馬場 弘**

(昭和47年4月15日受理)

A Spectroscopic Study of the Emission from the Solids (Part 3)

— Effects of Surface Roughness to Normal Monochromatic
Emittance and Directional Total Emittance —

by Kimio KANAYAMA and Hiromu BABA

In this paper, a part in the chain of the investigations which have been made by the authors on the emissive properties of the rough surfaces of the solids is described. Particular, on the surfaces coated with many sorts of paints, the relationships between the surface roughness and the directional total emittance and those between the surface roughness and the normal monochromatic emittance are measured experimentally by means of increment of a sort of paint and change of the surface roughness. The basic data of the systematic and detailed results concerning the emissive properties of the flat smooth and the rough painted surfaces were obtained by means of adjustment and analysis of the measured values.

1. ま え が き

著者ら¹⁾は、既に非金属面の表面あらさと指向ふく射率の関係について理論解析を行ない、それと平行して塗装粗面の指向全ふく射率を測定して解析結果を実験的に証明し、かつ塗装面のあらさの増加に伴って垂直全ふく射率が増加する現象を、分光測定で得られたスペクトルを数値処理することによって波長別に明らかにした²⁾。

この論文は、塗装面の表面あらさと指向全ふく射率の関係および垂直単色ふく射率の関係について、塗料の種類をふやし、あらさの程度を段階的に変化させて実験し、その結果を解析、整理することにより、塗装平面および粗面のふく射特性に関する詳細な系統的基礎資料を得ることを目的とする。

* 日本機械学会第50期全国大会学術講演会(昭和47年8月札幌)で発表予定

** 北見工業大学機械工学科

2. 実験方法

塗装面の指向全ふく射率測定および垂直単色ふく射率の測定原理は前報^{3),4)}と同様で、黒体比較法による。垂直単色ふく射率の測定で得られた分光結果の数値的処理方法の基本的な概念も前報⁵⁾と同様であるが、記録された分光スペクトルから単色ふく射に関する各種の特性値を得るためのデータ処理は、今回からはすべて自動化し、スペクトラムコンピュータ(日本電子, JEC-5)によった。

2.1 実験条件および試料

実験の条件は試料温度 $200^{\circ}\text{C} \pm 1\%$ 、室温 $20 \sim 21^{\circ}\text{C}$ 、湿度 35% 以下、モノクロメータ温度 $22 \sim 25^{\circ}\text{C}$ である。また、分光計の作動条件は、入口および出口スリット 2.0 mm (固定)、スキャンスピード 5.0~6.0、サブレスジョン 5.0、ゲイン 1.7~2.0、フィルタ 1.0 である。

試料に用いた塗料の色彩は、ブラック、ダークグレイ、グレイ、ライトグレイ、ブラウン、グリーン、ライトグリーン、ベージュおよびオレンジの9種類で、ともにシリコン樹脂系の耐熱塗料である。表面のあらさ程度の調節は、塗料にアスベスト粉末(48メッシュ全通)を一定割合で適宜混合して塗る方法による。この場合、アスベスト粉末対塗料の混合割合は重量比で 0/1, 1/4, 1/2 および 2/3 の4種類で、以後この分数を記号として各試料を表記する。

2.2 データ処理の方法

実験装置全体を大別すると計測系とデータ処理系とになり、それらの関係をブロック線図で示すと図1のごとくである。

データ処理系(スペクトラムコンピュータ)はチャートリーダー、コンピュータ、テレタイプおよびテーブリーダーから構成されており、その操作方法の概略は、分光計で記録されたスペクトルチャートをチャートリーダーにかけ、黒体からの基準スペクトルおよび試料からのスペクトルをそれぞれ波長 0.1μ ごとに自動的に読みとり、コンピュータに記憶させ、所定の計算を行なった後に結果をテレタイプに印字させる。データ処理の実行に関するフローチャートを図2(a)および(b)に示す。図2(a)は図1中の(a)の実行に関するもの、図2(b)は図1中の(b)の命令に関するものである。

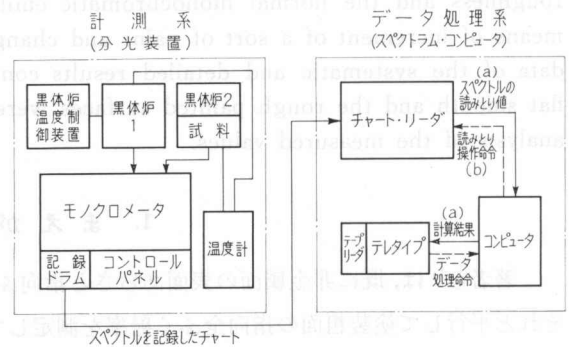


図1 実験装置のブロック線図

Fig. 1. Blockdiagram of the experimental apparatus.

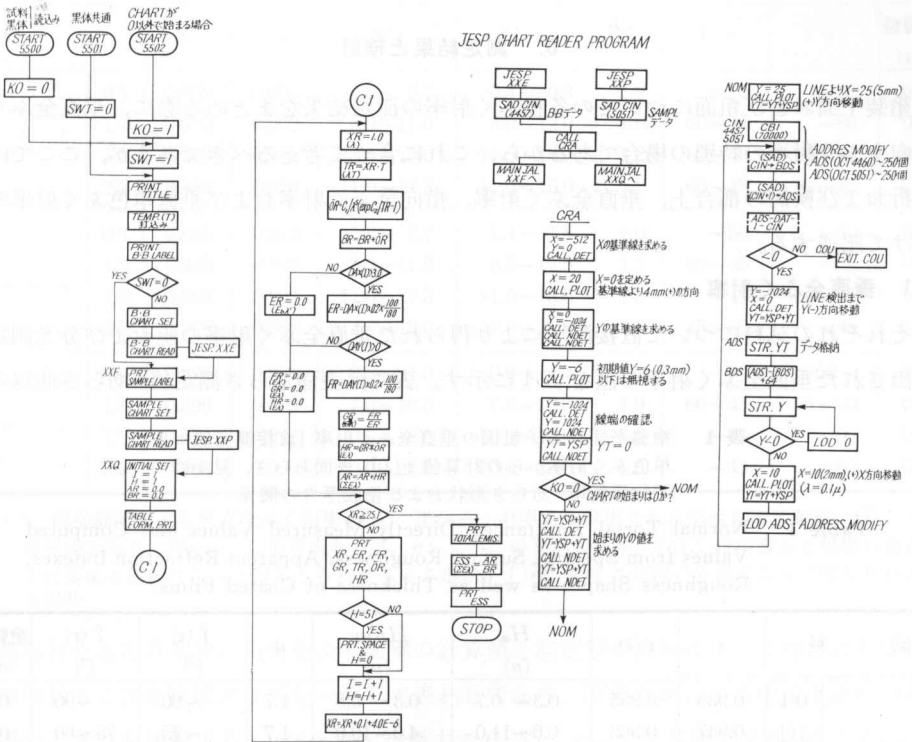


図 2 (a) チャートリーダーの読みとりの A-D 変換, 計算処理および結果の印字に関するフローチャート

Fig. 2. (a) Flow-chart on the A-D exchange, the calculation method and the typewriting of calculated results in case of reading the recorded chart with a chart-reader.

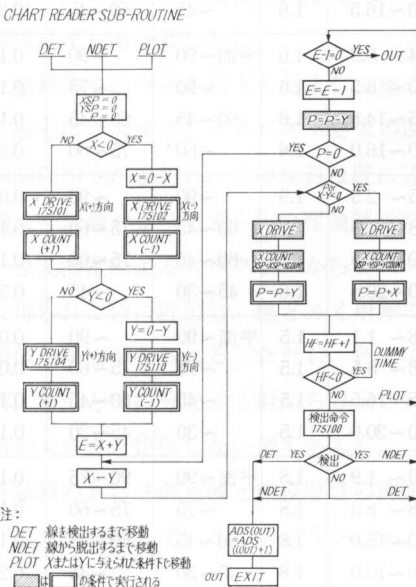


図 2 (b) チャートリーダーの読みとり操作命令に関するフローチャート

Fig. 2. (b) Flow-chart on the order of reading operation of a chartreader.

注:
 DET 線を検出するまで移動
 NDET 線から脱出するまで移動
 PLOT XまたはYに与えられた条件下で移動
 [] の条件下実行される

3. 測定結果と検討

塗装平面および粗面についての各種ふく射率の測定結果をまとめる際に、垂直全ふく射率は指向全ふく射率の特別の場合であるから、これに含めて考えるべきであるが、ここでは結果の分析および検討の都合上、垂直全ふく射率、指向全ふく射率および垂直単色ふく射率の項目に分けて記述する。

3.1 垂直全ふく射率

それぞれの試料について直接測定により得られた垂直全ふく射率の値および分光測定の結果算出された垂直全ふく射率の値を表1に示す。表には表面あらさ測定値、あらさ曲線の分析

表1 塗装平面および粗面の垂直全ふく射率 [直接測定値 ϵ と単色ふく射率からの計算値 $\epsilon(\lambda)$], 表面あらさ, 見かけの平均屈折率, あらさ形状および塗膜厚さの関係

Table 1. Normal Total Emittances (Directly Measured Values and Computed Values from Spectra), Surface Roughness, Apparent Refraction Indexes, Roughness Shapes as well as Thickness of Coated Films.

試料		ϵ	$\epsilon(\lambda)$	H_a (μ)	H_{RMS} (μ)	n	$\hat{r}(\epsilon)$ ($^\circ$)	$\hat{r}(r)$ ($^\circ$)	塗膜厚さ (mm)
ブラック	0/1	0.933	0.955	0.3~0.7	0.3~0.8	1.7	~90	~90	0.143
	1/4	0.947	0.963	6.0~11.0	4.0~10.0	1.7	~75	75~60	0.151
	1/2	0.957	0.972	9.0~14.5	10.0~16.0	1.7	60~45	60~45	0.284
	2/3	0.964	0.969	9.0~19.0	9.0~19.5	1.7	~45	60~45	0.409
ダーク グレイ	0/1	0.950	0.933	0.9~1.2	1.0~1.4	1.6	平面~90	~90	0.074
	1/4	0.953	0.963	5.0~8.5	5.2~9.5	1.6	~60	~75	0.083
	1/2	0.955	0.961	10.0~15.0	9.5~13.0	1.6	~60	~60	0.242
	2/3	0.957	0.958	12.0~15.5	13.0~16.5	1.6	~45	60~45	0.281
グレイ	0/1	0.949	0.942	0.4~0.8	0.4~0.9	1.6	平面~90	~90	0.111
	1/4	0.955	0.953	3.5~5.5	5.0~6.5	1.6	~90	~75	0.106
	1/2	0.964	0.952	11.5~13.5	11.5~14.8	1.6	60~45	60~45	0.178
	2/3	0.963	0.965	12.0~15.5	12.0~16.0	1.6	~60	75~60	0.268
ライト グレイ	0/1	0.910	0.927	1.3~2.0	1.5~2.5	1.9	~90	~90	0.073
	1/4	0.934	0.945	6.0~10.5	5.8~11.5	1.7	60~45	75~60	0.180
	1/2	0.936	0.941	8.5~12.0	9.0~13.5	1.7	60~45	75~60	0.195
	2/3	0.962	0.952	9.0~19.0	13.0~20.5	1.6	45~30	~45	0.292
ブラウン	0/1	0.955	0.960	0.8~1.0	0.8~1.1	1.5	平面~90	~90	0.066
	1/4	0.961	0.963	5.5~7.5	5.8~8.5	1.5	~75	75~60	0.085
	1/2	0.967	0.974	11.0~15.0	11.5~16.5	1.5	~45	60~45	0.121
	2/3	0.967	0.976	11.0~18.0	12.0~20.0	1.5	~30	45~30	0.174
グリーン	0/1	0.911	0.919	1.3~1.8	1.3~1.9	1.8	平面~90	90~75	0.117
	1/4	0.923	0.940	5.5~7.5	5.8~8.3	1.8	~75	75~60	0.133
	1/2	0.929	0.933	11.5~15.5	12.0~15.0	1.8	60~45	60~45	0.184
	2/3	0.931	0.934	13.0~16.0	11.0~16.0	1.8	45~30	~45	0.288

試料		ϵ	$\epsilon(\lambda)$	H_a	H_{RMS}	n	$\hat{f}(\epsilon)$	$\hat{f}(r)$	塗膜厚さ (mm)
ライト グリーン	0/1	0.908	0.905	0.3~0.7	0.4~0.8	1.9	~90	~90	0.098
	1/4	0.950	0.960	6.0~11.0	8.0~12.0	1.65	60~45	~60	0.140
	1/2	0.978	0.981	10.5~13.0	11.0~15.0	1.25	60~45	60~45	0.312
	2/3	0.983	0.974	11.0~14.5	11.0~15.0	1.2	60~45	60~45	0.299
ベージュ	0/1	0.886	0.912	1.2~1.7	1.4~1.8	2.0	~90	~90	0.064
	1/4	0.939	0.938	8.0~11.0	8.5~12.5	1.7	60~45	~60	0.133
	1/2	0.964	0.951	11.0~17.5	11.0~18.5	1.5	~45	60~45	0.263
	2/3	0.969	0.962	14.0~19.0	17.0~21.0	1.5	45~30	~45	0.324
オレンジ	0/1	0.876	0.861	0.8~1.3	0.9~1.4	2.1	~90	90~	0.073
	1/4	0.899	0.913	7.0~10.5	7.5~12.5	1.9	60~45	75~60	0.121
	1/2	0.958	0.948	9.5~16.0	10.0~18.0	1.6	~45	~60	0.204
	2/3	0.968	0.959	10.0~22.0	10.0~23.5	1.5	~45	~60	0.378

註) ϵ : 直接測定による垂直全ふく射率, $\epsilon(\lambda)$: 単色ふく射率から算出された垂直全ふく射率, H_a : 中心線平均あらさ, H_{RMS} : 二乗平均あらさ, n : 見かけの平均屈折率, $\hat{f}(\epsilon)$: 指向全ふく射率の測定値と計算値の比較によって読みとられたあらさ形状, $\hat{f}(r)$: あらさ曲線の分析によって得られたあらさ形状

から得られたあらさ形状, 指向全ふく射率の計算値と測定値の比較によって得られた屈折率とあらさ形状および塗膜厚さなどを一括して表わしてある。直接測定による塗装平面の垂直全ふく射率の大きさを比較すると、ブラウンが最大で0.955, オレンジが最小で0.876である。値の大きい順に並べると、ブラウン, ダークグレイ, グレイ, ブラック, グリーン, ライトグレイ, ライトグリーン, ベージュおよびオレンジとなる。その傾向は、一般に暗色系の塗料では大きく、明色系の塗料では小さいが、その差はさほど大きくなく、しかも、ブラックが最大でないことなど、この程度の比較的低温度(200°C)の熱線域においては、目でみた明暗とふく射率の関係は必ずしも一致しない。

塗料にアスベスト粉末を混入して塗り、表面あらさを増すことにより、各試料とも垂直全ふく射率は増大する。アスベスト粉末の混入割合と表面あらさおよび垂直全ふく射率の間には比例関係がうかがわれ、この性質は既に述べたように Sparrow⁶⁾の球形空洞の見かけのふく射率増大の理論および著者ら⁷⁾の理論解析の結果と一致する。

分光測定によるスペクトルからデータ処理して算出された垂直全ふく射率の値も、直接測定で得られた値に近似し、色とふく射率の大小関係およびあらさとふく射率の大きさの関係にも類似の傾向がみられる。ただし、色とふく射率の大小関係の順位において若干入れ替っている例、またとくに分光ふく射から算出された垂直全ふく射率の大きさが必ずしも表面あらさ測定値の大きさと比例しない例もあるが、これは測定誤差に起因するものとおもわれる。表1より各試料のあらさ測定値と塗膜厚さの測定値からアスベスト混合割合の増加によってあらさおよび膜厚が増加していることがうかがわれる。

3.2 指向全ふく射率

塗装平面および粗面の指向全ふく射率の測定結果を各塗料についてまとめて図3に示す。各塗料ごとの図には4本の曲線が示されているが、それぞれあらさの異なる塗装平面および粗面に関する指向全ふく射率を示し、あらさの増加にともなって、各方向の指向ふく射率の値は増大している。すなわち、塗料のみ0/1試料においては方向角の小さい範囲ではほとんど一定の値を示すが、方向角が大きくなるに従って指向ふく射率は急激に減少し、いわゆるフレネルの非金属平面に関する指向ふく射率を与える理論式の傾向に近似し、曲線のすそは閉じている。1/4試料, 1/2試料, 2/3試料とあらさが増すに伴って各方向の指向ふく射率は増加し、とくに方向角の大きいところで増加割合が大きく、曲線の形状は半円形に近づき、ランベルトの余弦則に従う乱射面を形成する。

この現象は、著者⁷⁾が既に非金属粗面の指向全ふく射率について理論解析によって得た結果と、その傾向および大きさにおいてよく一致している。理論解析にあたっては、金属粗面に対する手法をそのまま適用し、くぼみの大きさはふく射の波長より大きく、かつ、くぼみの凹

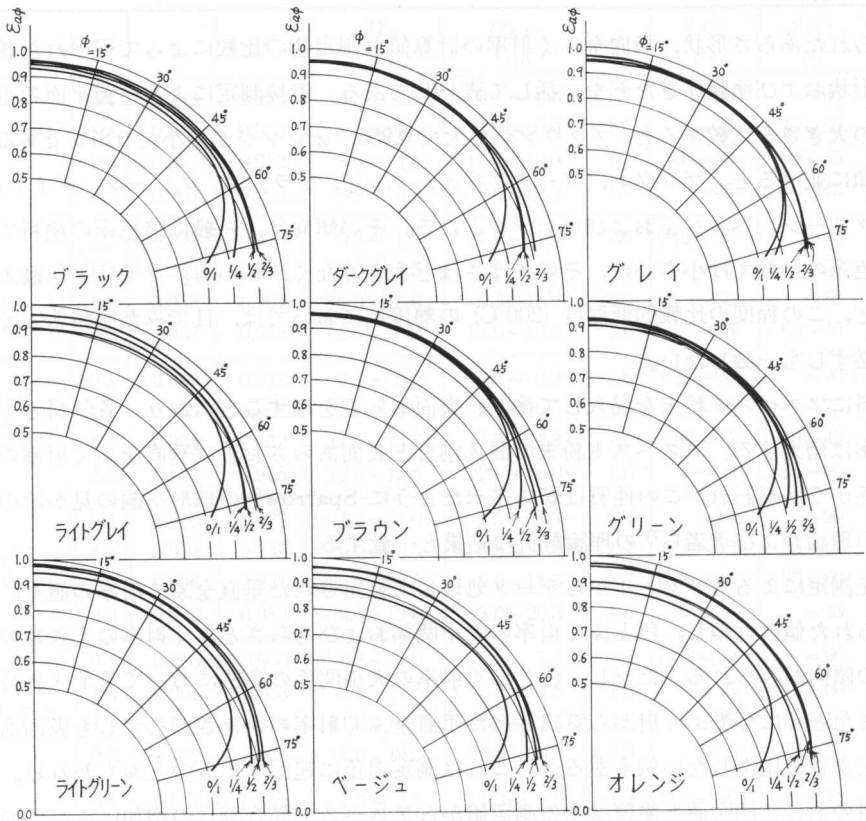


図3 塗装平面および粗面の指向全ふく射率

Fig. 3. Directional total emissance on the flat and the rough coated surfaces.

面内での規則反射する成分にのみ注目して扱い、乱反射成分は材料の屈折率の減少につながるものとして処理した考え方は、凹面内での入反射角は大きくそのために乱反射成分は割合少なく、規則反射成分が多いなどの理由により、非金属粗面に対しても適合されることが裏づけられた。しかし、ここで問題になるのは、材料の屈折率が未知なことで、この点に関しては塗装面を含めて一般の非金属材料の熱線に対する屈折率を容易に測定しうる有効な手段がない現状においては、むしろ指向全ふく射率を測定し、計算値と実測値の曲線形状および大きさを比較することにより、あらさの大きさと形状および材料の見かけの平均屈折率*が推定されるものと考えられる。

このような方法で得られた見かけの平均屈折率および表面あらさ形状の値が表1に示されている。これによると、明色塗料においてはあらさによる見かけの屈折率の値にかなり変化の幅がみられ、暗色の塗料においてはほとんど変化がみられない。これは乱射成分によるふく射率への影響の責任を屈折率に負わせた考え方で説明できるものとおもわれる。さらにこの考え方を拡張するならば、指向単色ふく射率を測定し、計算値と実測値の比較をすることにより、単波長に対する見かけの屈折率が推定しうるものとおもわれる。また指向全ふく射率の計算値と測定値のグラフに示された曲線形状の比較から求められたあらさ形状 $\hat{r}(\epsilon)$ とあらさ曲線の分析によって得られた $\hat{r}(r)$ とは、かなり一致した値を示している。

図3において、グレイおよびライトグレイの測定値を示す一部の曲線が、方向角によりあらさ測定値と指向ふく射率との関係が逆になり、曲線同士が交差する例外も生ずるが、これはあらさ測定値が増加してもあらさ形状が深くならない(開口比が小さくならない)場合に相当することが、あらさ曲線の分析によって明らかになった。

3.3 垂直単色ふく射率

塗装平面および粗面の垂直全ふく射率が塗料の色および表面あらさにより変化するが、これを分光測定することにより、垂直方向の単色ふく射率を求めてその内容を波長別に明らかにし、さらにふく射エネルギー分布を算出してまとめると図4に示すとおりである。

図には測定した試料のうちの一部しかあげていないが、暗色系のブラック、ダークグレイ、グレイなどはブラウンとほとんど同じ傾向を示すので省略してある。

塗装平面の垂直全ふく射率は暗色系の塗料では大きく、オレンジ、ベージュなどの明色系の塗料で小さいのは、暗色系塗料は全波長にわたってほぼ一定の大きな単色ふく射率を有し、明色塗料においては数 μ 以下の短波長域で単色ふく射率が低下するためである。またあらさの増加に伴って明色塗料では垂直全ふく射率が増大するのは、単色ふく射率が小さい短波長域において、空洞現象によるふく射率増大の余地が残されているためで、それに対して暗色系塗料ではその余地はほとんどなく、あらさが増加してもさほどふく射率は増大しないものとおもわ

* 一般に屈折率は波長の関数であるが、ここでは物体が射出しているふく射の最大エネルギーを与える波長に対する屈折率をさす。

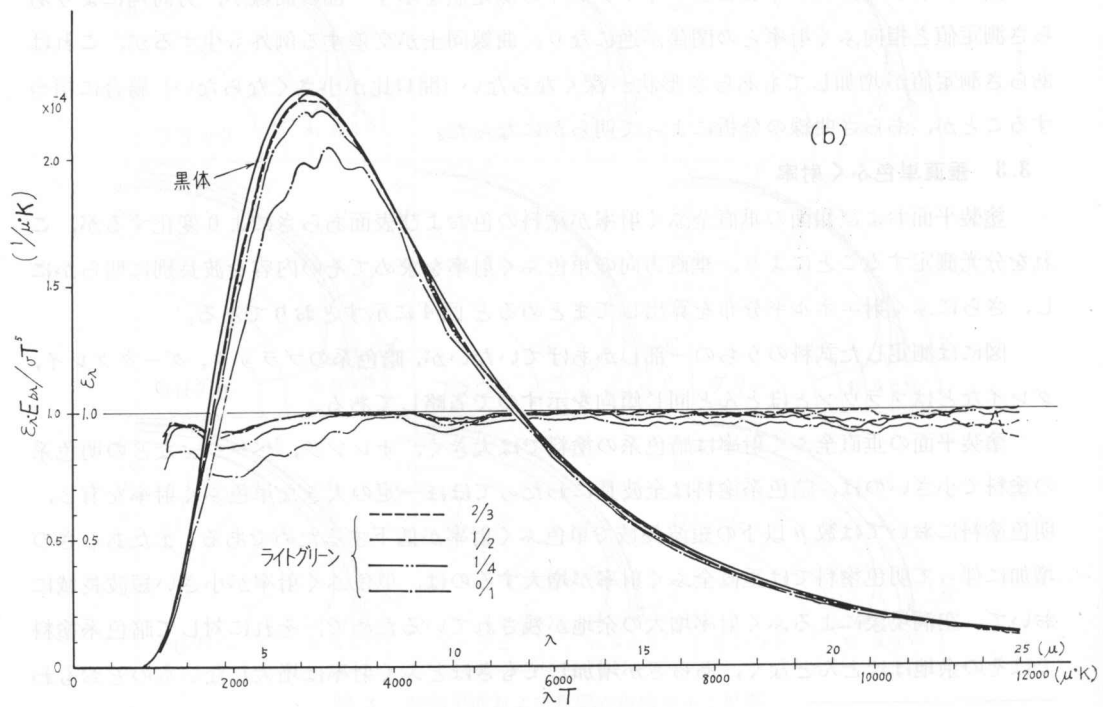
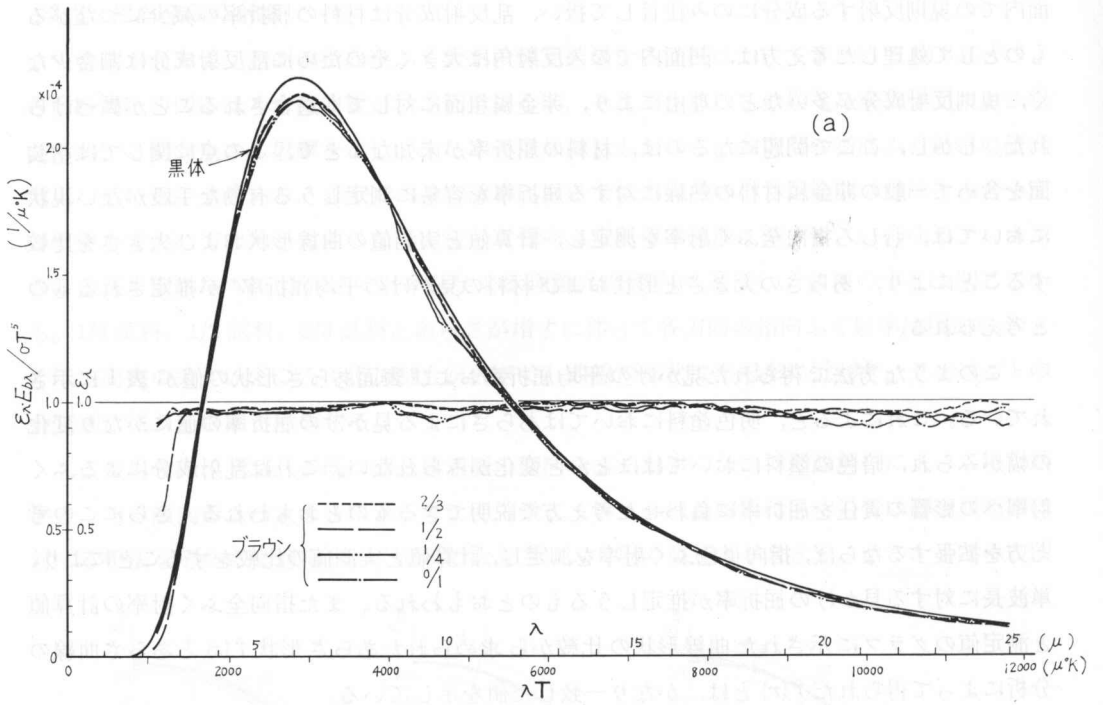


図4 塗装平面および粗面の垂直単色ふく射率とそのふく射エネルギー分布

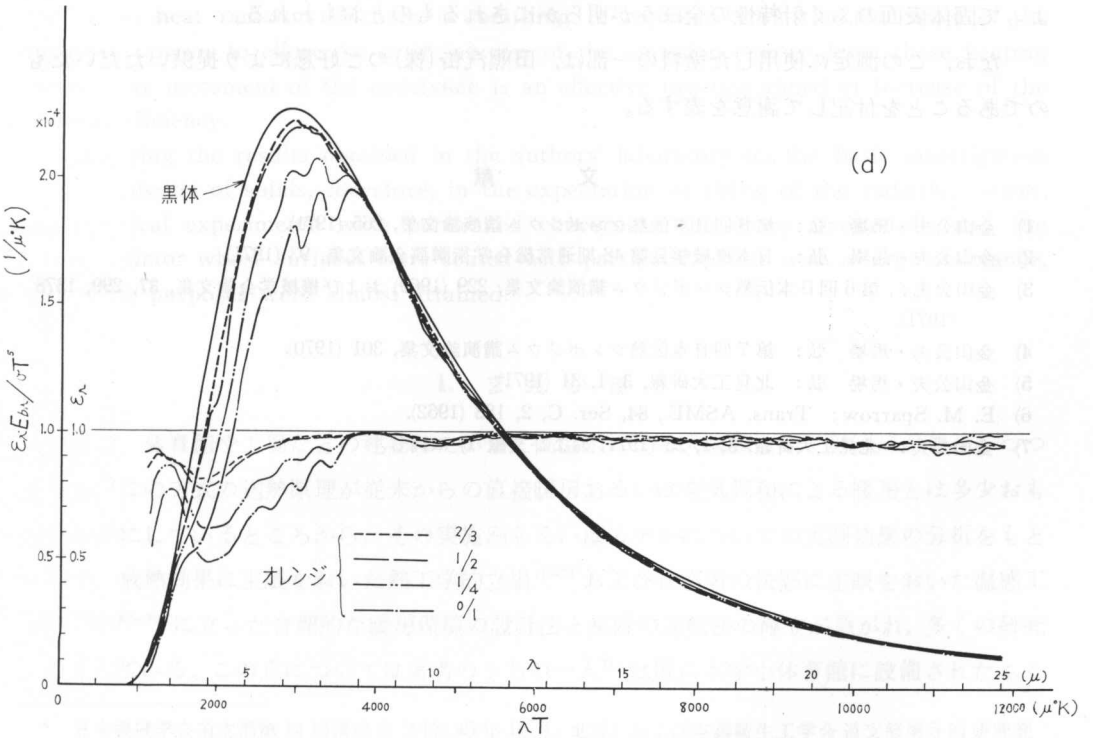
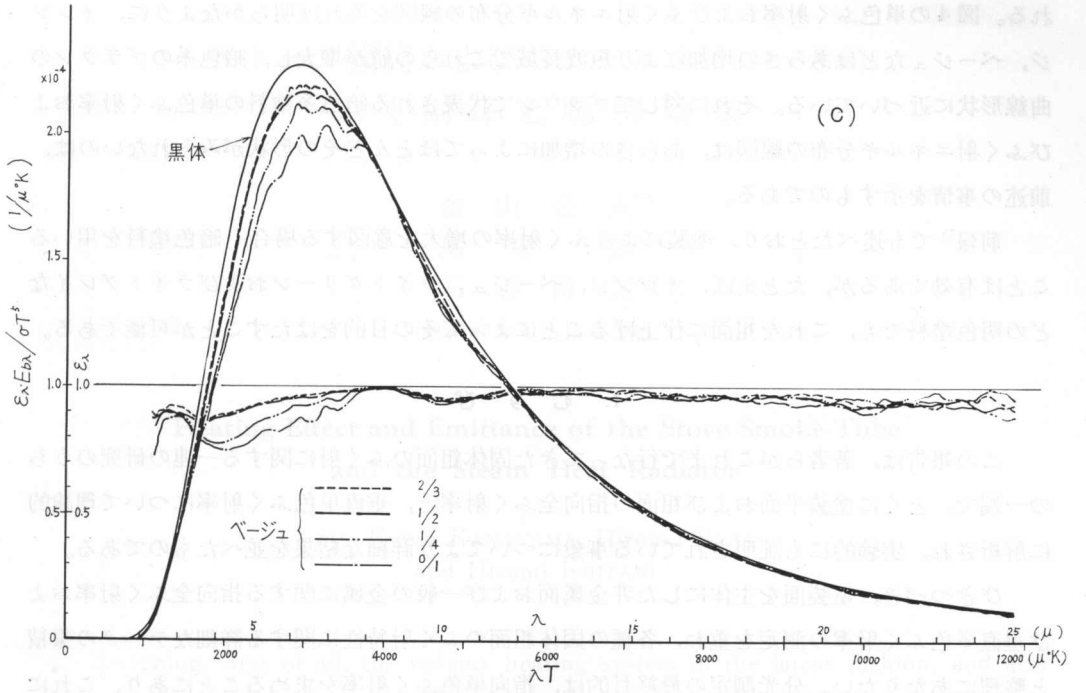


Fig. 4. Normal monochromatic emittances and distributions of radiation energies on the flat and the rough coated surfaces.

れる。図4の単色ふく射率およびふく射エネルギー分布の線図をみれば明らかなように、オレンジ、ベージュなどはあらさの増加により短波長域でこれらの値が増大し、暗色系のブラウンの曲線形状に近づいている。それに対してブラウンで代表される暗色系塗料の単色ふく射率およびふく射エネルギー分布の線図は、あらさの増加によってほとんどその形状がみられないのは、前述の事情を示すものである。

前報⁷⁾でも述べたとおり、塗装によりふく射率の増大を意図する場合、暗色塗料を用いることは有効であるが、たとえば、オレンジ、ベージュ、ライトグリーンおよびライトグレイなどの明色塗料でも、これを粗面に仕上げることによってその目的をはたすことが可能である。

4. む す び

この報告は、著者らがこれまで行なってきた固体粗面のふく射に関する一連の研究のうち的一端で、とくに塗装平面および粗面の指向全ふく射率と、垂直単色ふく射率について理論的に解析され、実験的にも証明されている事象についてより詳細な結果を並べたものである。

ひきつづき、塗装面を主体にした非金属面および一般の金属に関する指向全ふく射率および垂直単色ふく射率の測定を重ね、各種の固体粗面のふく射特性に関する詳細なデータの集積と整理にあたりたい。分光測定の最終目的は、指向単色ふく射率を求めることにあり、これによって固体表面のふく射特性の全ぼうが明らかにされるものとおもわれる。

なお、この測定に使用した塗料の一部は、田熊汽缶(株)のご好意により提供いただいたものであることを付記して謝意を表する。

文 献

- 1) 金山公夫・馬場 弘：第8回日本伝熱シンポジウム講演論文集，265 (1971).
- 2) 金山公夫・馬場 弘：日本機械学会第48期通常総会学術講演論文集，93 (1971).
- 3) 金山公夫：第6回日本伝熱シンポジウム講演論文集，229 (1969) および機械学会論文集，37，299，1378 (1971).
- 4) 金山公夫・馬場 弘：第7回日本伝熱シンポジウム講演論文集，301 (1970).
- 5) 金山公夫・馬場 弘：北見工大研報，3，1，31 (1971).
- 6) E. M. Sparrow：Trans. ASME., 84, Ser. C, 2, 188 (1962).
- 7) 金山公夫：北見工大研報，3，1，23 (1971) および文献 1) に同じ.