

# 非金属ランダム粗面の指向ふく射率\*

金山 公夫\*\*

(昭和46年3月31日受理)

## Apparent Directional Emittance of Random Rough Surface of Nonmetals

by Kimio KANAYAMA

It is a well known fact that apparent directional emittances of the nonmetallic flat surfaces agree with the calculation results from Fresnel's formula, but the emissive property of the nonmetallic random rough surface is not clearly given.

In this paper the apparent directional emittances of such surfaces were computed using the same method as the calculation of the emittance on the metallic rough surface, and the apparent directional emittances on the rough surfaces, coated with asbestos tailing mixed paints, were measured.

As a result the absolute values and the tendency of the measurements did well agree with the calculations.

### 1. ま え が き

非金属平面の指向ふく射率は、方向角  $\phi$  が  $0^\circ \sim 45^\circ$  くらいの範囲ではほぼ一定の大きな値で、 $\phi$  が大きくなると急激に減少し、 $\phi = 90^\circ$  (平面の接線方向) では 0 となる。その絶対値および傾向は Fresnel の式によく一致するといわれている<sup>1)</sup>。しかし、一般に非金属表面は粗面であることが多く、このような任意のあらさの非金属粗面の指向ふく射率についての理論解析および実験研究はほとんど見当たらない。

本論文は、このような粗面 (あらさの大きさはふく射の波長より大きい) をかりにランダム粗面と称し、金属粗面に関してさきに報告<sup>4)</sup>した方法を踏襲して、種々の深さの円弧溝が正規分布したのと考えて指向ふく射率を計算し、同時に塗装平面および粗面からの指向ふく射率の測定を行なって解析結果を実験的に証明し、さらに塗装粗面の実用的価値を述べたものである。

### 2. 理 論 解 析

解析の手順としては、金属の場合と同様に、各  $\gamma$  について単種の円弧溝開口の指向ふく射

\* 日本機械学会第48期通常総会 (1971.4.4, 東京) および第8回日本伝熱シンポジウム (1971.5.21, 大阪) で講演

\*\* 北見工業大学機械工学科

率の計算を行なう。ただし、溝内面におけるふく射の射出および反射の特性が Fresnel の式で示される指向性を有するものと仮定する。

非金属平面における指向ふく射率を与える Fresnel の式は、普通

$$\varepsilon_{\varphi F} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin 2\varphi \cdot \sin 2\chi}{\sin^2(\varphi + \chi) \cos^2(\varphi - \chi)} + \frac{\sin 2\varphi \cdot \sin 2\chi}{\sin^2(\varphi + \chi)} \right\} \quad (1)$$

の形で示され、第一項は入射面内の振動成分、第二項は入射面に直角な振動成分である。ただし、 $\varphi$  をふく射の射出角、 $\chi$  を固体内部のふく射の入射角とすると Snell の法則  $\sin \varphi = n \sin \chi$  が成立するものとする。ここで、 $n$  は屈折率をあらわす。

円弧溝内において、同一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  $\varepsilon_{\varphi_i}$  は

$$\varepsilon_{\varphi_i} = \frac{\int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} \varepsilon_{\varphi F} d\varphi}{\int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} d\varphi} \quad (2)$$

となるから、式(1)を式(2)に代入することによって求められる。しかし、式(1)の積分は困難なため、これを一度式(3)のように変形しておいて、式(4)に示す数値積分の手法で  $\varepsilon_{\varphi_i}$  の近似解を得ることにする。すなわち

$$\varepsilon_{\varphi F} = \frac{\sin 2\varphi \cdot \sin \chi \cdot \cos \chi}{\{(\sin \varphi \cos \chi + \cos \varphi \sin \chi)(\cos \varphi \cos \chi + \sin \varphi \sin \chi)\}^2} + \frac{\sin 2\varphi \cdot \sin \chi \cdot \cos \chi}{(\sin \varphi \cos \chi + \cos \varphi \sin \chi)^2} \quad (3)$$

ここで

$$\cos \chi = \sqrt{\frac{n^2 - \sin^2 \varphi}{n^2}}, \quad n = \frac{\sin \varphi}{\sin \chi}$$

および

$$\varepsilon_{\varphi_i} = \frac{\sum_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} \varepsilon_{\varphi F} \cdot \Delta\varphi}{\varphi_i - \varphi_{i-1}} \quad (4)$$

ここで、積分変数  $\Delta\varphi$  は 0.01 で演算する。

各面素についての  $\varepsilon_{\varphi_i}$  が求められれば、見かけの指向ふく射率の基礎式<sup>2),3)</sup>(5)に代入して、金属の場合と同様な手順で  $\varepsilon_{\alpha\phi}$  が算出される。

$$\varepsilon_{\alpha\phi} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\cos \phi \cdot \cos \gamma} \sum_1^i \left[ 1 - \left\{ 1 - (\varepsilon_{\varphi_i})_f \right\}^{\xi} \right] \cdot \left\{ \sin(\varphi_i)_f - \sin(\varphi_{i-1})_f \right\} \right. \\ \left. + \frac{1}{\cos \phi \cdot \cos \gamma} \sum_1^i \left[ 1 - \left\{ 1 - (\varepsilon_{\varphi_i})_n \right\}^{\xi} \right] \cdot \left\{ \sin(\varphi_i)_n - \sin(\varphi_{i-1})_n \right\} \right) \quad (5)$$

ただし、溝内面における反射回数は金属の場合より少ないと考えて、 $i > 2$  の面素にたいしては  $i = 2$ 、すなわち反射成分の総和は反射回数  $(i - 1) = 1$  で打ち切ることとする。

円弧溝の  $\gamma$  の種類は  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  および  $90^\circ$  (平面) の 7 種とし、それらが正規分布してランダム粗面を形成しているものとする。その分布密度を比重として各  $\gamma$  の指向ふ

く射率に掛けて重ね合わせることによりランダム粗面の指向ふく射率が得られる。分布密度の数値は金属の場合と同一とする<sup>4),5)</sup>。

$n=1.25, 1.50, 1.75$  および  $2.00$  についての指向ふく射率  $\varepsilon_{\alpha\phi}$  の計算結果\* を、平面の場合も含めて図-1 に示す。ここで  $\hat{r}$  が  $90^\circ$  から  $0^\circ$  に移行するに従って深い溝の分布割合が多くなり、その指向ふく射率は増加するが、とくに  $\phi$  の大きいところの増加割合が著しく大きくなり、次第に半円に近づき、Lambert の余弦則がほぼ完全に適用できる乱射面になることがわかる。

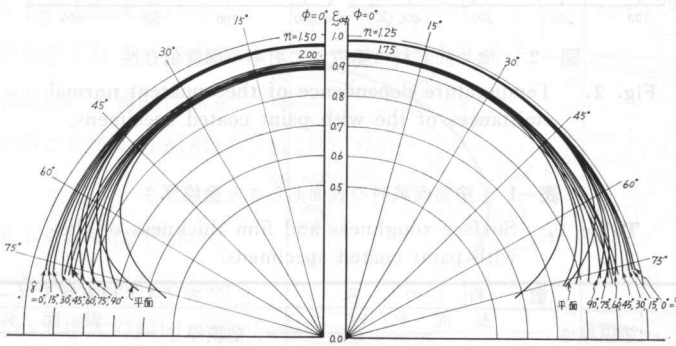


図-1 非金属の円弧溝ランダム粗面の指向ふく射率 (計算値)

Fig. 1. Apparent directional emittances of non-metallic random rough surfaces with various circular grooves (calculated values).

### 3. 試料

非金属材料の試料は、アルミ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 の割合で混入して塗り、ランダム粗面の試料とした。

耐熱塗料はパイロジン (耐熱温度  $600^\circ\text{C}$ ) で、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 (田熊汽缶ふく射暖房用塗料) 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。塗装方法は刷毛塗りで 2 回を標準とし、試料の裏面はヒータ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。

ふく射率測定時の試料温度は  $100^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$ ,  $300^\circ\text{C}$  および  $400^\circ\text{C}$  で測定中の温度変動は  $\pm 1\%$ 、室温  $20\sim 21^\circ\text{C}$ 、湿度 45% 以下である。実験装置および方法は前報<sup>6)</sup>と同様である。

### 4. 実験結果および検討

#### 4.1 塗装面の垂直ふく射率

パイロジンおよびふく射暖房塗料の塗装面ならびにアスベスト粉末混入塗料の塗装粗面の

\* 演算には JEC-5 (日本電子) を使用した。

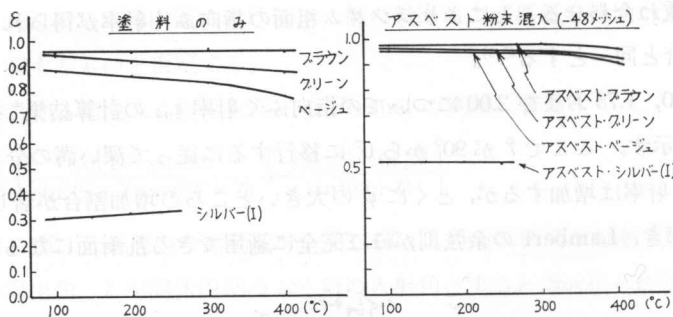


図-2 塗装面試料の垂直ふく射率の温度依存性

Fig. 2. Temperature dependence of the apparent normal emittances of the with paint coated specimens.

表-1 塗装面試料の表面あらさと塗膜厚さ

Table 1. Surface roughness and film thickness of the with paint coated specimens.

塗料名	塗料のみ				アスベスト粉末混入 (-48メッシュ)			
	塗膜厚さ (mm)	表面あらさ			塗膜厚さ (mm)	表面あらさ		
		$H_{max}$	$H_{Rms}$	$H_a$		$H_{max}$	$H_{Rms}$	$H_a$
ブラック	0.19	5.4	3.2~4.6	3.0~4.2	0.46	34.0	9.0~14.0	11.0~15.5
グレイ	0.07	3.5	1.3~1.5	1.1~1.4	0.41	31.0	13.0~14.0	12.0~13.0
ブラウン	0.09	5.4	2.2~2.4	2.0~2.2	0.30	28.0	9.0~15.0	7.2~13.5
グリーン	0.11	2.7	1.3~1.5	1.1~1.4	0.44	21.5	13.0~15.0	11.5~14.0
ベージュ	0.07	4.3	1.0~1.5	0.9~1.4	0.36	27.0	13.0~14.2	11.5~13.5
シルバー(II)	0.07	4.0	1.6~1.7	1.4~1.6	0.28	50.0	10.0~13.0	8.5~12.0

垂直ふく射率の温度依存性を図-2に、またこれらのあらさ測定値と塗膜厚さを表-1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、しかも温度によってほとんど変化がみられない。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、ともに負の温度依存性(温度の上昇にともなっ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。これらの温度依存性の傾向は過去に得られた結果<sup>7)</sup>と一致する。

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、温度による垂直ふく射率の変化は温度400°Cでわずかに減少するほかはほとんど変化はみられない。

垂直ふく射率は指向ふく射率の特定の場合( $\phi=0^\circ$ )で、粗面において垂直ふく射率が平面のそれより増加することは、円弧溝ランダム粗面の指向ふく射率の解析結果からも明らかなことである。

#### 4.2 塗装面の指向ふく射率

塗装平面および粗面の指向ふく射率の測定値を図-3に示す。塗装平面の指向ふく射率は

$\phi$  が  $0^\circ \sim 45^\circ$  くらい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 Fresnel の式によく一致し、この事は逆に供試塗料の屈折率はシルバーを除いて  $1.25 \sim 2.00$  くらいの範囲にあるものと想像される。シルバーは  $\phi$  が大きくなると指向ふく射率は幾分増大し、金属的性質を示していることがここでもうかがわれる。

粗面の指向ふく射率は平面のときより増大し、各試料とも特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く。この傾向および値の大きさは、非金属に対する円弧溝ランダム粗面の計算結果とよく一致していることがわかる。シルバー粗面の指向ふく射率はすそ開きの程度が減少し、金属粗面の場合と同様な傾向を示している。

アスベストを混入して塗つた粗面の凹凸を、Sparrow<sup>8)</sup> 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説明することができる(ただし、内面のふく射の射出および反射の特性は無指向性とみなす)が、指向ふく射率に関しては困難である。

しかしながら、球形空洞が配列した粗面の断面形状は、種々の開口率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深さの異なった円弧溝がランダムに配列したものと考えることにより、指向ふく射率が增大する現象が二次的に解析できることになる。

ここで、アスベストを混入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、あらか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

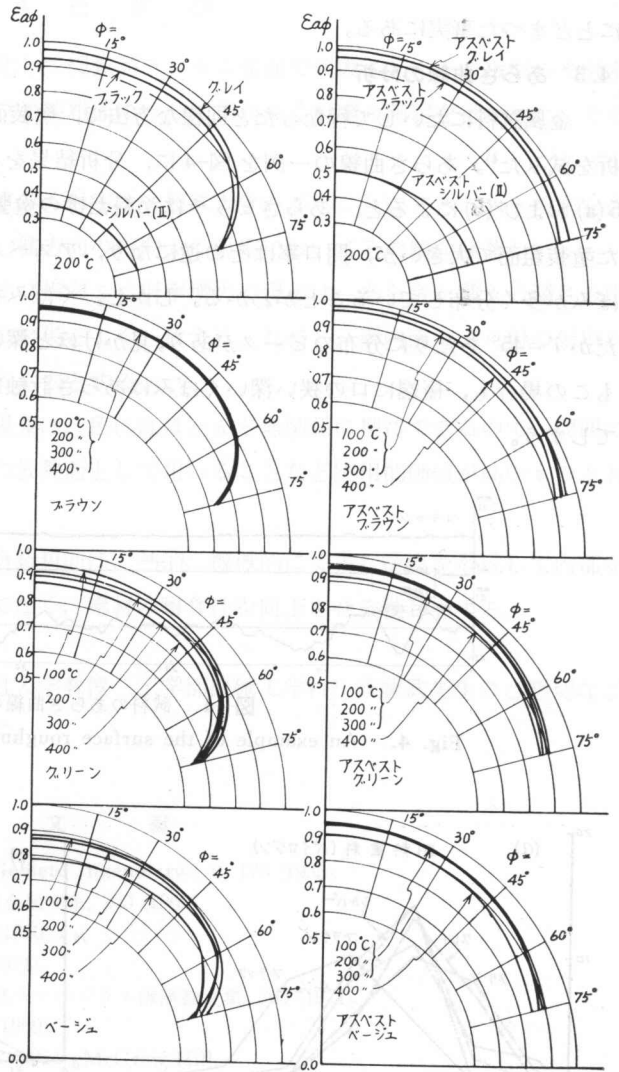


図-3 塗装平面(左)および粗面(右)の指向ふく射率測定値  
Fig. 3. Apparent directional emittances of the paint coated smooth surfaces as well as rough surfaces (measured values).

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 にとどまつた事実にある。

### 4.3 あらさ曲線の分析

金属試料にたいして行なつたと同様な方法で、塗装面のあらさ測定およびあらさ曲線の分析を試みた<sup>4)</sup>。あらさ曲線の一例を図-4に、分析結果を図-5(a)および(b)に示してある。図-5(a)および(b)によると、あらさピッチは塗料だけの塗装平面で小さく、アスベストを混入した塗装粗面で大きい、開口率はその逆になり、アスベスト混入粗面はピッチの大きな深いくぼみが多く分布していることがわかる。しかし、くぼみを円弧溝に換算して $r$ で示すと、たかだか $r=45^\circ$ あたりに分布のピークがあり、見かけほど深くくぼみは少ないと云えよう。もっともこの場合も、極端に口の狭い深くぼみはあらさ計触針の曲率半径によってカットオフされてしまう。

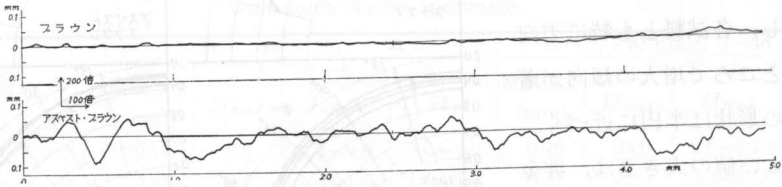


図-4 試料のあらさ曲線の一例

Fig. 4. An example of the surface roughness curves the specimens.

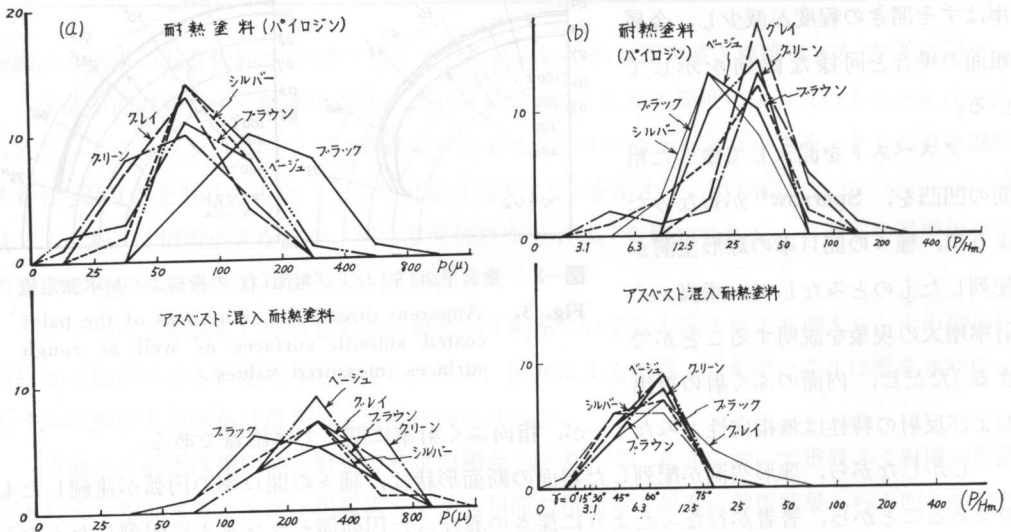


図-5 あらさ曲線の分析結果

(a) ピッチ (b) 開口率

Fig. 5. Analytical results of the surface roughness curves

(a) pitch (b) opening-ratio

#### 4. む す び

非金属材料の粗面の凹凸を模型化して円弧溝ランダム粗面で代表させ、その指向ふく射率を理論解析し、一方、塗装平面および塗装粗面について指向ふく射率の測定を行なった。その結果の主な点を箇条書きに列挙する。

(1) 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ぜて塗り粗面にするとさらに増大し、横方向の指向ふく射率においてその傾向は著しい。

(2) 塗装粗面の垂直ふく射率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溝からなるものと仮定して計算した結果とよく一致する。ただし、溝内面のふく射の射出および反射の特性は Fresnel の式に従うものとする。

(3) 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ので、周囲の状況に応じた色彩の塗料を暖房装置の放熱面として用いることなど実用的価値が高いものとおもわれる。

(4) アスベスト粉末を混入した塗装粗面は、熱的、機械的に丈夫な塗膜を形成して内部を保護するので、単に美観の点ばかりでなく、素材の耐食性を向上させる役目をする。

この研究を行なうにあたり北海道大学教授（工学部機械工学科）斎藤武先生のご懇切なご指導をいただいたことを感謝致します。

#### 文 献

- 1) E. Schmidt, E. Eckert: Forsch. Gebiete Ingenieurw., **6**, 175 (1935).
- 2) 金山公夫: 機械学会道支部 13 回講演会論文集, 203 (1969).
- 3) 金山公夫: 北見工大研報, **2**, 5, 659 (1970).
- 4) 金山公夫: 北見工大研報, **3**, 1, 15 (1971).
- 5) 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).
- 6) 金山公夫: 北見工大研報, **2**, 3, 427 (1969).
- 7) McAdams: Heat Transmission, 62 (1954), McGraw-Hill.
- 8) E. M. Sparrow: Trans. ASME., **84**, Ser. C, 2, 188 (1962).