

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 on Random Rough Metallic Surfaces

by Kimio KANAYAMA

The apparent normal emittance and the apparent directional emittance on rough metallic surfaces increase more than the emittances on smooth surface of same metals.

In this paper was the apparent directional emittance on random rough metallic surfaces computed, assuming that the rough surfaces composed of several sorts of circular grooves of varied depth. Next were measurements taken of the apparent directional emittance on rough surfaces of aluminum and brass, scratched with various kinds of grain sized sandpaper.

As a result the qualitative agreement between the values of the calculations and the measurements was obtained.

1. ま え が き

金属を何らかの方法を用いて任意のあらさの粗面にした場合、一般に平面のときより垂直ふく射率は増大し、極座標に図示した指向ふく射率の形状が変化することが知られている^{1),2)}。

この報告は、このような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、さきに述べた³⁾種々の深さの円弧溝が連続して分布したものと考へて、指向ふく射率の計算を試みると同時に、アルミニウムおよび黄銅を粒度の異なつた研磨紙によりスクラッチしたランダム粗面の指向ふく射率を測定して、その間の比較、検討を行なつたものである。

2. 理 論 解 析

円弧溝開口の、開口面法線から測つて ϕ 方向の見かけの指向ふく射率 $\varepsilon_{a\phi}$ の基礎式⁴⁾は

$$\varepsilon_{a\phi} = \frac{1}{2 \cos \phi \cdot \cos \gamma} \left(\sum_1^{\xi} \left[\left\{ \sum_1^{\xi} (\varepsilon_{\phi_j})_r \right\} \cdot \left\{ \sin (\varphi_j)_r - \sin (\varphi_{j-1})_r \right\} \right] \right. \\ \left. + \sum_1^{\eta} \left[\left\{ \sum_1^{\eta} (\varepsilon_{\phi_j})_n \right\} \cdot \left\{ \sin (\varphi_j)_n - \sin (\varphi_{j-1})_n \right\} \right] \right) \quad (1)$$

* 第8回日本伝熱シンポジウムで講演 (1971.5.21 大阪)

** 北見工業大学機械工学科

ただし

$$\left. \begin{aligned} (\varphi_i)_f &= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2i - \left(1 + \frac{2\phi}{\pi}\right) + \frac{2\gamma}{\pi}}{2i+1} \leq \frac{\pi}{2} - (\phi + \gamma) \\ (\varphi_i)_n &= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2i - \left(1 - \frac{2\phi}{\pi}\right) + \frac{2\gamma}{\pi}}{2i+1} \leq \frac{\pi}{2} - |\phi - \gamma| \\ i=0 \text{ においては, 一般に } (\varphi_0)_f &= (\varphi_0)_n = 0 \\ \phi > \frac{\pi}{2} - \gamma \text{ のときは } (\varphi_0)_n &= \phi - \left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で示される。

材料が金属のときは、金属平面の固有の指向ふく射率 ε_φ は近似的に⁵⁾

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{n} \left(\cos \varphi + \frac{1}{\cos \varphi} \right) \quad (3)$$

ただし、 n は屈折率、 φ は方向角で $0^\circ \leq \varphi < 90^\circ$ 。

円弧溝内面において、反射回数 $(i-1)$ の反射成分を射出する面素の固有の平均ふく射率 ε_{φ_i} は

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\varphi_i} &= \frac{\frac{1}{n} \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} \left(\cos \varphi + \frac{1}{\cos \varphi} \right) d\varphi}{\int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} d\varphi} \\ &= \frac{\frac{1}{n} \cdot \left[\sin \varphi + \log_e \tan \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right]_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i}}{\varphi_i - \varphi_{i-1}} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

また、ふく射率 ε_{φ_i} で最大 $(i-1)$ 回の反射成分からなるふく射率の総和 $\Sigma \varepsilon_{\varphi_i}$ は、次の多項式であらわされる。

$$\Sigma \varepsilon_{\varphi_i} = \left\{ \varepsilon_{\varphi_i} + (1 - \varepsilon_{\varphi_i}) \varepsilon_{\varphi_i} + (1 - \varepsilon_{\varphi_i})^2 \varepsilon_{\varphi_i} + \cdots + (1 - \varepsilon_{\varphi_i})^{i-1} \varepsilon_{\varphi_i} \right\} = 1 - (1 - \varepsilon_{\varphi_i})^i \quad (5)$$

式(5)の一項目は直接射出の成分、二項目は一回反射の成分、三項目は二回反射の成分…
… i 項目は $(i-1)$ 回反射の成分を示してゐる。

式(4)を式(5)をへて式(1)に代入し、条件式(2)を用いて、屈折率 $n=90, 70, 50, 30, 20$ および15にたいして、欠円角 γ および方向角 ϕ は $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ および 90° の各組合せについて計算する。式(5)の計算において、既に報告⁴⁾した単種の円弧溝粗面の指向ふく射率の計算値と測定結果を参考にして、 $i > 3$ の面素にたいしては $i=3$ 、すなわち反射成分の総和は反射回数 $(i-1)=2$ で打ち切ることにする。

つぎに円弧溝ランダム粗面は、 $\gamma=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ および 90° の7種類の円弧溝

が式(6)で示されるごとく、正規分布*をし
ていと仮定する。すなわち、変数 ξ の確
率密度は平均値0、分散1の正規分布

$$P(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2}} \quad (6)$$

となる。変数 ξ は $\gamma = 30^\circ$ を1単位として
それぞれの γ の $P(\xi)$ を計算し、さらにそ
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_γ とする。
 w_γ の値を図-1に示す。図において最大分
布密度をもたらす γ を $\hat{\gamma}$ で示してある。

円弧溝ランダム粗面の指向ふく射率
 $\varepsilon_{a\phi}$ は各 γ の指向ふく射率 $\varepsilon_{a\phi}$ に分布密度
 w_γ を掛けて得られる。 $n=90, 70, 50, 30, 20$, および15における指向ふく射率 $\varepsilon_{a\phi}$ の計算結果を
 $\hat{\gamma}$ を変数として図-2に示す。ここで、各 n について $\hat{\gamma}$ が 90° から 0° に移行するに従って深い
溝の分布割合が増すことを意味する。そのときは金属平面特有の指向性が次第に失われ、ふく
射率は垂直方向に増大し、 ϕ の大きいところで著しく減少することがわかる。 $\hat{\gamma}=45^\circ$ また
は 30° で指向ふく射率はほぼ半円形に近くなる。

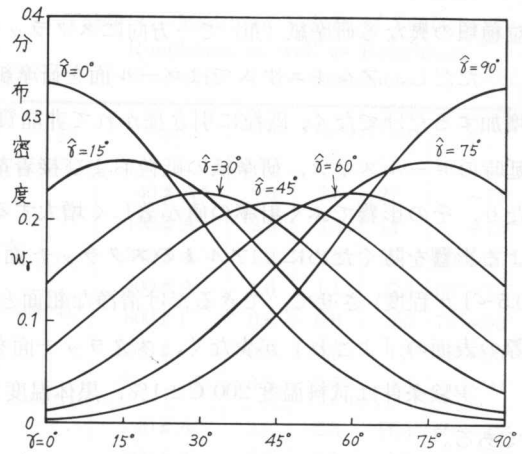


図-1 各種円弧溝の分布密度

Fig. 1. Distribution weights of circular grooves.

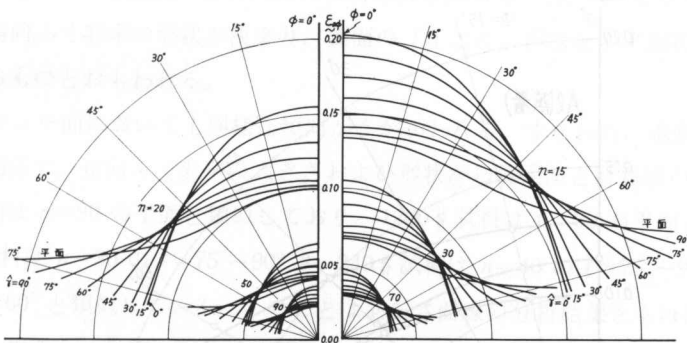


図-2 金属の円弧溝ランダム粗面の指向ふく射率 (計算値)

Fig. 2. Apparent directional emittances of metallic random rough surfaces with various circular grooves (calculated values).

3. 実 験

実験装置および方法は前報^(8),9)に示したので省略する。

3.1 試 料

* この仮定は人為的に得られるスクラッチ面などに適用できるといわれる^(6),7)。

アルミニウム (JIS 第1種) および黄銅 (JIS 第3種) の市販のままのロール面を粒度と砥粒種類の異なる研磨紙 (布) で一方向にスクラッチしたランダム粗面を試料とした。

ただし、アルミニウムではロール面を研磨紙でスクラッチした場合、単に巨視的あらさが増加するだけでなく、砥粒に引き搔かれて非晶質 (ベルビイ層) になったり、あるいはアルミ圧延時のロールスキン、研磨紙の砥粒および接着剤の間の相互作用によって表面が異質なものとなり、その影響でふく射率の値が著しく増大することがある。このような表面の「よごれ」による影響を防ぐために、アルミのスクラッチ面に純度の高いアルミニウムを真空蒸着 (膜厚 $0.5 \sim 1 \mu$ 程度) させて、できるだけ清浄な粗面としたものを試料とした。黄銅はスクラッチの際の表面の「よごれ」が少なく、スクラッチ面をそのまま用いた。

実験条件は試料温度 $200^\circ\text{C} \pm 1\%$ 、黒体温度 $200^\circ\text{C} \pm 0.5\%$ 、室温 $20 \sim 21^\circ\text{C}$ 、湿度 35% 以下である。

3.2 実験結果および検討

アルミスクラッチ面に蒸着した試料および黄銅スクラッチ面の指向ふく射率の測定結果を図-3および図-4に示す。それらのあらさ計によるあらさ測定値を表-1に示す。

アルミ蒸着粗面の垂直ふく射率の測定値は 100 # を除いて、あらさ測定値とほぼ比例関係にあるが、これはあらさの大きさのみの影響とはおもえない。すなわち、指向ふく射率の大きさと形状から測定値と計算値の比較をしてみると、平滑面では $n=50$ の平面と大きさ形状が類似し、また 1200 #, 800 # および 400 # 試料は、それぞれ $n=30$ の $\bar{r}=90^\circ, 60^\circ \sim 75^\circ$ および 45°

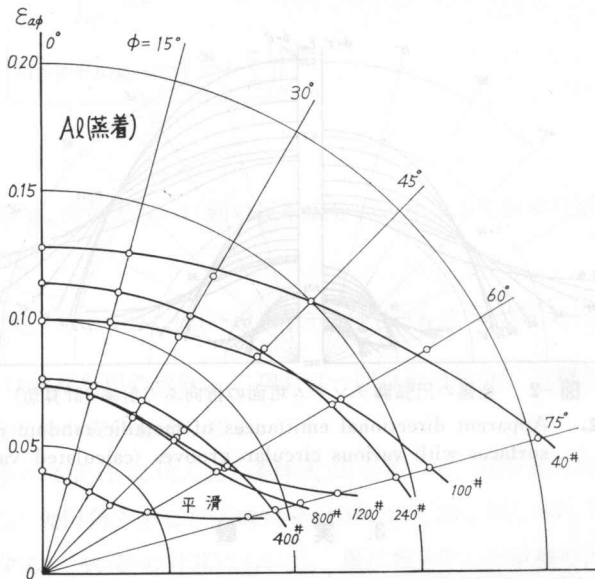


図-3 蒸着したアルミスクラッチ面の指向ふく射率 (測定値)
 Fig. 3. Apparent directional emittances of scratched rough surfaces of aluminum, further treated by the vacuum deposit of aluminum (measured values).

表-1 試料のあらさ測定値とあらさ形状 (\hat{r})

Table 1. Measured Values of Surface Roughness as well as Roughness Shapes (\hat{r}) of the Specimens.

試料	H_a (μ)	H_{Rms} (μ)	H_{max} (μ)	\hat{r}	
Al (蒸着)	40 # A*	5.0	5.5	27	$\sim 75^\circ$
	100 # A	2.8	3.4	14	$\sim 75^\circ$
	240 # A	1.9	2.2	10	$60^\circ \sim 75^\circ$
	400 # A	1.0	1.1	5.3	$60^\circ \sim 75^\circ$
	800 # C	0.6	0.6	2.0	$75^\circ \sim 90^\circ$
	1200 # C	0.5	0.5	1.3	$75^\circ \sim 90^\circ$
	平滑	0.5	0.5	0.4	$\sim 90^\circ$
Cu-Zn (I)	40 # A	2.2	2.3	11.4	$60^\circ \sim 75^\circ$
	100 # A	1.3	1.3	6.0	$\sim 75^\circ$
	240 # C	1.0	1.1	4.6	$\sim 75^\circ$
	400 # C	0.8	0.8	2.1	$75^\circ \sim 90^\circ$
	800 # C	0.6	0.7	0.7	$75^\circ \sim 90^\circ$
	1200 # C	0.6	0.6	0.7	$\sim 90^\circ$
	研摩	0.5	0.6	0.4	$\sim 90^\circ$

* 記号 A は研摩紙砥粒が溶融アルミナであり、C はカーボランダムであることを示す。

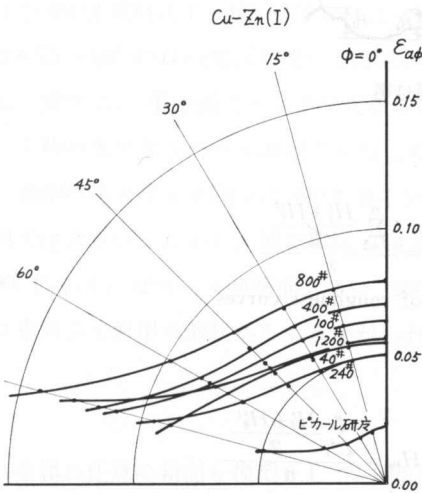


図-4 黄銅スクラッチ面の指向ふく射率 (測定値)

Fig. 4. Apparent directional emittances of scratched rough surfaces of brass (measured values).

と、240 # および 100 # 試料はそれぞれ $n=20$ の $\hat{r}=45^\circ \sim 60^\circ$ および $60^\circ \sim 75^\circ$ と類似している。このことは、後述のあらさ曲線の分析によって得られる開口率 (くぼみのピッチと深さの比) の分布によって指向ふく射率の形状が決まり、表面の「よごれ」程度を示す屈折率によってその大きさが決まるものとおもわれる。

黄銅スクラッチ面においても同様な傾向がうかがわれる。すなわち、垂直ふく射率とあらさ測定値は無関係で、指向ふく射率の大きさおよび形状から測定値と計算値の比較をすると、ピカール研摩面は $n=90$ の平面と類似しており、1200 # 試料は $n=30$ の平面と、800 #, 400 # および 100 # 試料は $n=30$ の $\hat{r}=75^\circ \sim 90^\circ$ と、240 # 試料は $n=40$ の $\hat{r}=75^\circ \sim 90^\circ$ と、40 # 試料は $n=40$ の $\hat{r}=60^\circ$ と類似している。このことはあらさ曲線の分析結果ともほぼ一致する。

表-1 には、指向ふく射率の形状から読みとった \hat{r} の値と、あらさ曲線の分析から求めた平均開口率を \hat{r} に換算した値で示してある。

3.3 あらさ曲線の分析

表面あらさ計 (小坂 SE-4, 触針半径 5μ , 針圧 0.4 gr) で記録されたあらさ曲線を分析するにあたって、図-5 に示すごとくあらさピッチ (P) と開口率 (P/H_m) であらさの大きさと形状をあらわす。

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。

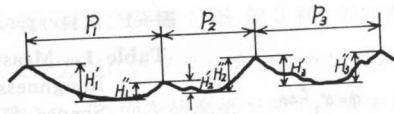


図-5 あらさ曲線のピッチと開口率

$$\text{ピッチ } P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

$$\text{開口率} = P/H_m, \quad H_m = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{H_i + H_i'}{2}}{n}$$

Fig. 5. Pitch and opening-ratio of roughness curves

$$\text{Pitch } P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

$$\text{Opening-ratio} = P/H_m, \quad H_m = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{H_i + H_i'}{2}}{n}$$

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(a)および(b)に示してある。これらの図から試料のあらさの特徴を知ることができる。すなわち、アルミ蒸着面においては、あらさピッチは平滑面を除いて研磨紙粒度が

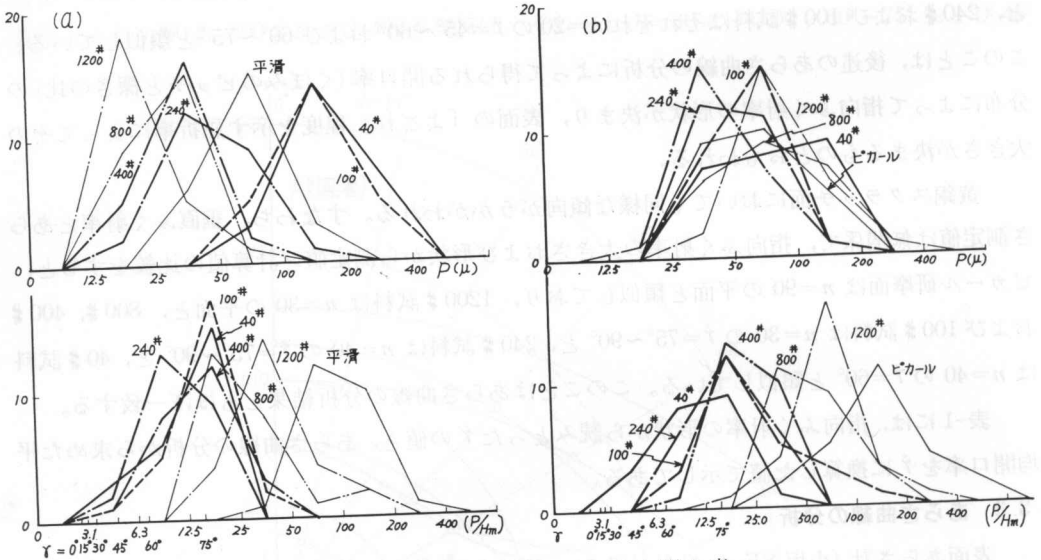


図-6 試料のあらさピッチと開口率

- (a) 蒸着したアルミクラッチ面
- (b) 黄銅クラッチ面

Fig. 6. Pitch and opening-ratio of the roughness of the specimens, (a) on the scratched rough surfaces of aluminum, treated by the vacuum deposit of aluminum. (b) on the scratched rough surfaces of brass.

大きいほど大きく、開口率は平滑面が最も大きく、240 # 試料が最も小さい。このことは 240 # および 400 # 試料は $\hat{r}=60^\circ\sim 75^\circ$ くらいの比較的深いくぼみが多く分布し、それ以外の試料では $\hat{r}=75^\circ\sim 90^\circ$ の口の開いた浅いくぼみが多く分布していることになり、指向ふく射率の形状とも一致する。平滑面でピッチが大きくあらわれたのは、微細なあらさはカットオフされ、ロール時の大きなうねりが測定されたためとおもわれる。

黄銅のスクラッチ面では 400 # あるいは 240 # 試料であらさピッチは小さく、それ以外の試料では大きい。しかし、開口率は 40 # 試料が最も小さく $\hat{r}=60^\circ\sim 75^\circ$ で、他の試料は $\hat{r}=75^\circ\sim 90^\circ$ にあり、ピカール研磨面および 1200 # 試料は平面に近いものとおもわれる。これらの傾向は指向ふく射率の形状からもうかがわれる。

4. む す び

金属の任意の粗面をモデル化して、円弧溝ランダム粗面の指向ふく射率の理論解析を行ない、その結果をアルミニウムおよび黄銅の研磨紙によるスクラッチ面の指向ふく射率測定値と比較して、定性的によい一致を得た。

そのほか、この研究で明らかになった主な点を箇条書きに示す。

(1) あらさの大きさが、ふく射の波長より大きい範囲にある金属粗面の指向ふく射率は H_{\max} , H_{Rms} あるいは H_a などの表面あらさ、すなわちあらさの寸法と直接関係があるのではなく、溝あるいはくぼみの深さ、すなわちあらさ形状が問題である。

(2) アルミおよび黄銅の研磨紙によるスクラッチ面の溝は比較浅く、あらさ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、ふく射率の増大をもたらすことが多い。

(3) このように金属においてあらさとふく射率の関係を論ずるときは、表面の物理的または化学的「よごれ」によって敏感に影響されることを念頭におかなければならない。

(4) 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ものと想像される複雑な波動現象¹⁰⁾は、この場合ほとんどみられない。その理由は、あらさの溝が浅いことおよび両者が接近した領域におけるあらさの分布が小さいためとおもわれる。

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。なお、アルミスクラッチ面の真空蒸着に関しては、本学電気工学科北川啓氏の技術によったことを付記して感謝します。

文 献

- 1) V. R. Hase: Zeitschr. f. Techn. Physik, **3**, 145 (1932).
- 2) E. Schmidt, E. Eckert: Forsch. Gebiete Ingenieurw., **6**, 175 (1935).
- 3) 金山公夫: 機械学会道支部 13 回講演会論文集, 203 (1969).

- 4) 金山公夫: 機械学会論文集 **37**, 299, 1378 (1971).
- 5) M. Jakob: Heat Transfer, Vol. 1, 47 (1964), Wiley.
- 6) 甲藤好郎: 機械学会論文集, **22**, 121, 693 (1956).
- 7) 蓮沼 宏: 精密機械, **22**, 4, 131 (1956).
- 8) 金山公夫: 北見工大研報, **2**, 3, 418 (1969).
- 9) 金山公夫: 第6回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 229 (1969).
- 10) 蓮沼 宏: 光沢, 59 (1965), コロナ社.