

# 円弧溝粗面の指向ふく射率\*

金山 公夫

(昭和45年4月30日受理)

## Directional Emittance of Cylindrical-Groove Rough Surfaces

by Kimio KANAYAMA

### Abstract

Directional emittances of the cylindrical-groove rough surfaces were calculated by applying the property of directional emissivity introduced by the electromagnetic theory to the inner surface of the grooves.

The other hand, directional emittances on the cylindrical rough surfaces made from aluminum by machining were measured.

Experimental results agreed well to the theoretical calculation values.

### 1. ま え が き

金属平面のふく射率は強い指向性を有し、その測定値は E. Schmidt ら<sup>1)</sup>が単色ふく射率について電磁理論から導いた近似式によく一致する。金属粗面のふく射率は、あらかの大きさおよび形状の統計的分布によって平面の場合とは非常に異なった指向特性を示すものとおもわれる。このことは、R. C. Birkebak<sup>2)</sup>による金属粗面に対する指向反射率の詳細な実験結果からも推察される。

しかし、金属表面のあらかとふく射率の関係を究明する際、あらかの大きさとふく射の波長の大きさが接近した領域においては、ふく射の干渉あるいは回折等の波動現象があらわれ、反射特性などから推察すれば、おそらく物理光学的取扱い<sup>3)</sup>を要し問題が複雑になる。

そこでこの論文においては、問題を単純化するために、あらかがふく射の波長に比べてはるかに大きく、しかも連続して並ぶ一定形状の円弧溝からなる金属粗面を対象として、溝の深さと指向ふく射率の関係について二次元理論解析を行ない、実験によりこれを証明した。

### 2. 理 論 解 析

E. M. Sparrow<sup>4)</sup>は、無指向性乱反射性を示す円筒形凹面に平行光線が入射した場合の入射エネルギーと反射エネルギーの関係から、凹面各部の吸収率を理論計算している。

\* 日本機械学会北海道支部第13回講演会(1969-10)で発表。

しかし、著者がここに用いた方法は、さきに報告<sup>5)6)</sup>したV字溝粗面の指向ふく射率の計算の場合とほとんど同様な考え方と手法にもとづいている。すなわち、円弧溝内面は平滑で、材料固有のふく射率が金属に対して電磁理論により示される単色ふく射率の指向性に従って射出し、かつ規則反射するものと仮定する。

電磁理論によるふく射特性の近似式は

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

ここで、 $n$  は材料の屈折率、 $\varphi$  は表面法線から測ったふく射の射出方向で  $0^{\circ} \leq \varphi < 90^{\circ}$  である。

第1図において、円弧溝内でその点の法線方向から測って  $\varphi$  方向に、同一回数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  $\varepsilon_{\varphi_i}$  は

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

であるから、(1)式を(2)式に代入して積分すると

$$\varepsilon_{\varphi_i} = \frac{\frac{1}{n} \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} \left( \cos \varphi + \frac{1}{\cos \varphi} \right) d\varphi}{\int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} d\varphi} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\left| \sin \varphi + \log \tan \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i}}{\varphi_i - \varphi_{i-1}} \quad (3)$$

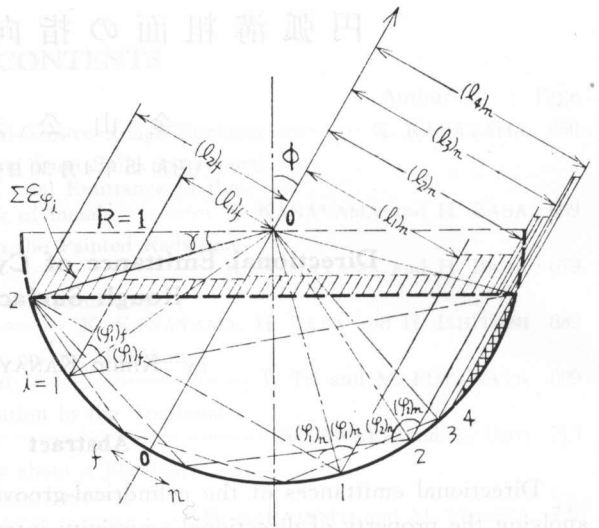
が得られる。

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

$$\sum \varepsilon_{\varphi_i} = \left\{ \varepsilon_{\varphi_i} + (1 - \varepsilon_{\varphi_i}) \varepsilon_{\varphi_i} + (1 - \varepsilon_{\varphi_i})^2 \varepsilon_{\varphi_i} + \dots + (1 - \varepsilon_{\varphi_i})^{i-1} \varepsilon_{\varphi_i} \right\} = \left\{ 1 - (1 - \varepsilon_{\varphi_i})^i \right\} \quad (4)$$

ただし、 $i=1, 2, 3, \dots, i_0$ 。

つぎに、溝開口の見かけの平均指向ふく射率  $\varepsilon_{a\phi}$  は、円弧の半径を1として、(4)式に  $\varepsilon_{\varphi_i}$  の面素の溝開口面に対する比重  $(l_i - l_{i-1})$  をかけて各面素について総和し、かつ、弦の長さの半分  $(1/\cos \gamma)$  をかけて補正し、さらに射出方向  $\phi$  についての補正項  $(1/\cos \phi)$  をかけることによって投影面積一定の条件となり、(5)式により算出される。



第1図 記号説明

$$\varepsilon_{a\phi} = \frac{1}{\cos \phi \cdot \cos \gamma} \cdot \sum_1^i \left\{ 1 - (1 - \varepsilon_{\varphi_i})^i \right\} (l_i - l_{i-1}) \quad (5)$$

(5) 式に (3) 式を代入し,  $l_i = \sin \varphi_i$  の関係を用いて

$$\varepsilon_{a\phi} = \frac{1}{\cos \phi \cdot \cos \gamma} \sum_1^i \left[ i - \left\{ 1 - \frac{1}{n} \cdot \frac{\left| \sin \varphi + \log \tan \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|^{\varphi_i}}{\varphi_i - \varphi_{i-1}} \right\}^i \right] (\sin \varphi_i - \sin \varphi_{i-1}) \quad (6)$$

となる。

ここで, 一般に  $\phi \neq 0$  のときは, 溝開口は軸0-0 に関して対称とはならず, 射出方向から遠い面と近い面とでは異なり, それぞれ  $f$  および  $n$  の添字を付けて示すと

$$\begin{aligned} 2\varepsilon_{a\phi} = & \frac{1}{\cos \phi \cdot \cos \gamma} \sum_1^i \left[ 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{n} \cdot \frac{\left| \sin \varphi + \log \tan \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|^{\varphi_i}_f}{(\varphi_i)_f - (\varphi_{i-1})_f} \right\}^i \right] \\ & \cdot \left\{ \sin (\varphi_i)_f - \sin (\varphi_{i-1})_f \right\} \\ & + \frac{1}{\cos \phi \cdot \cos \gamma} \sum_1^i \left[ 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{n} \cdot \frac{\left| \sin \varphi + \log \tan \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right|^{\varphi_i}_n}{(\varphi_i)_n - (\varphi_{i-1})_n} \right\}^i \right] \\ & \cdot \left\{ \sin (\varphi_i)_n - \sin (\varphi_{i-1})_n \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{ただし} \begin{cases} (\varphi_i)_f = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2i - \left( 1 + \frac{2\phi}{\pi} \right) + \frac{2\gamma}{\pi}}{2i + 1} \\ (\varphi_i)_n = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2i - \left( 1 - \frac{2\phi}{\pi} \right) + \frac{2\gamma}{\pi}}{2i + 1} \\ i = 0 \text{ においては } (\varphi_0)_f = (\varphi_0)_n = 0 \end{cases}$$

となる。

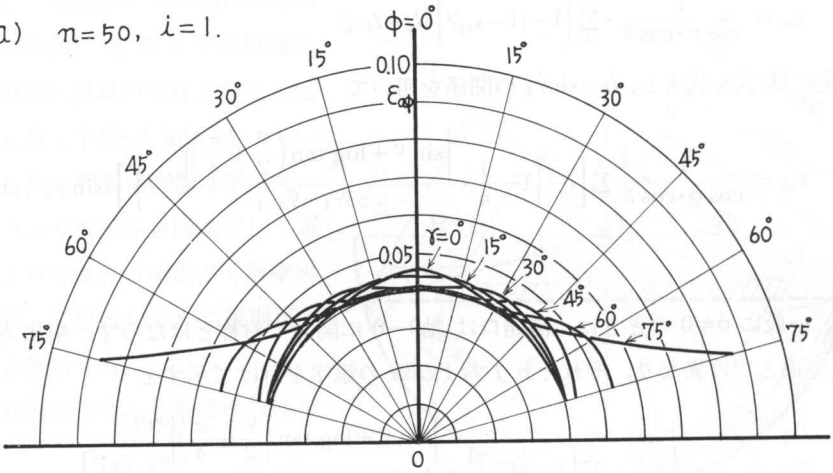
(7) 式より,  $i=1$  すなわち反射成分を全然含まない場合,  $i \leq 3$  最大2回の反射成分を含む場合および  $i \leq 20$  最大19回の反射成分を含む場合について, 円弧溝粗面の指向ふく射率を数値計算した結果を極座標で示すと, 第2図(a), (b)および(c)のごとくなる。ここではいずれも屈折率  $n$  は  $n=50$  として計算している。

また,  $i \leq 3$  の場合について,  $n=70$  および  $n=90$  として計算した結果が第3図(a)および(b)である。

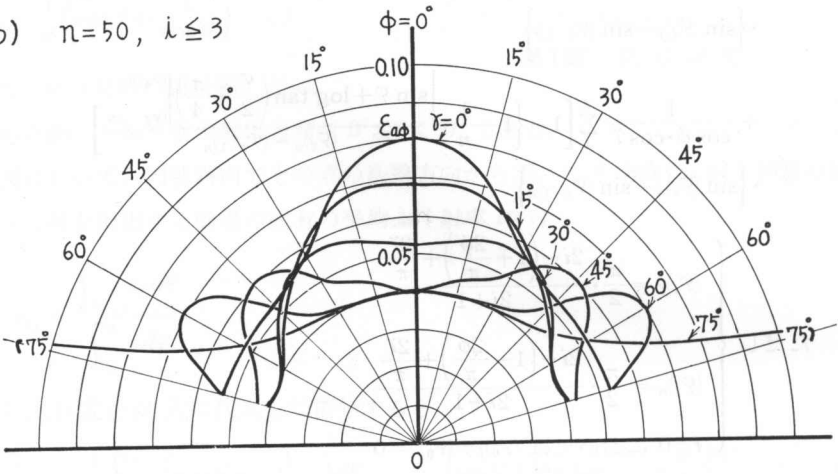
線図から云えることは, 反射成分を考えることにより,  $\phi = \gamma$  の方向にふく射率の最大値があらわれて曲線の両側に山ができ, 深か溝になるに従って二つの山が上にせりあがって, 半円溝では一つの山になる。その傾向は反射回数が多いほど顕著にあらわれる。

屈折率  $n$  による変化は,  $n$  の増加とともに全体の曲線郡は縮小し, 形の上で相似則が成立する。

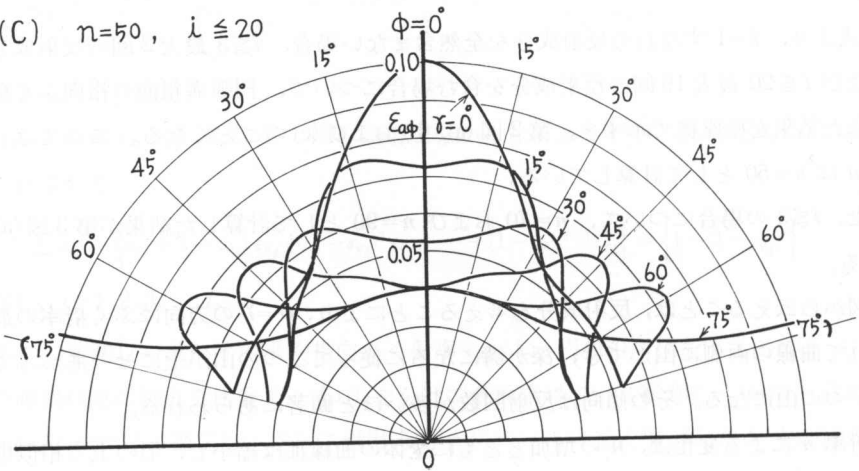
(a)  $n=50, i=1.$



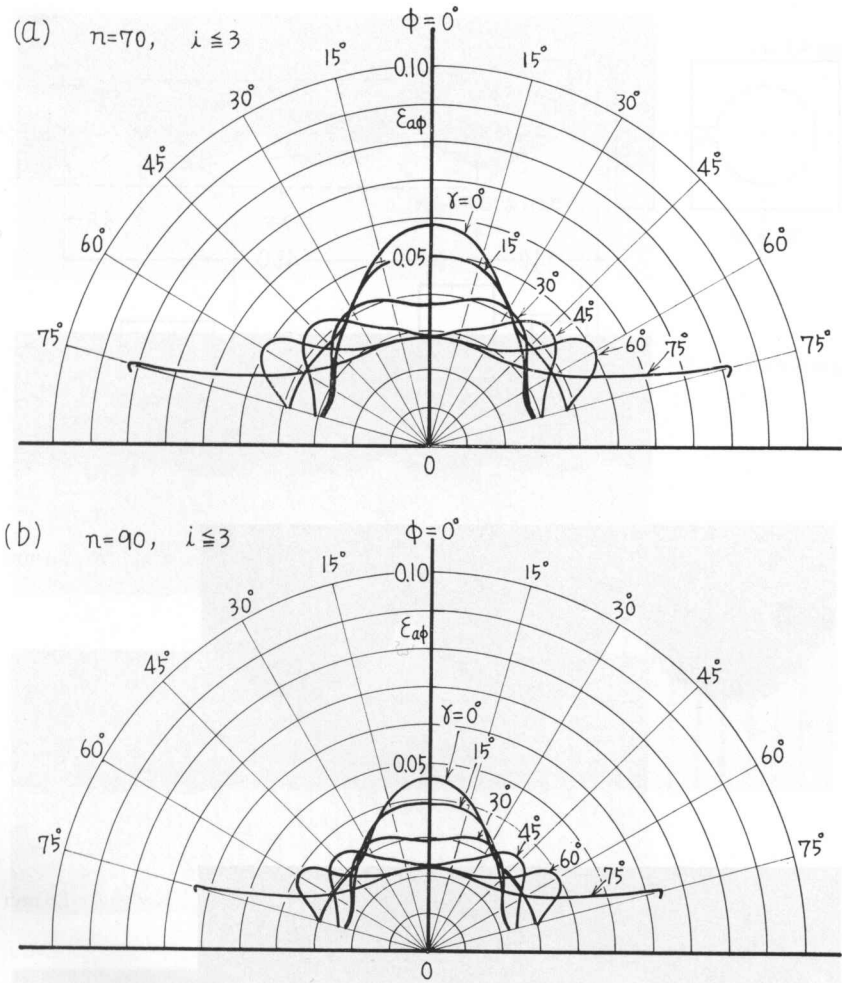
(b)  $n=50, i \leq 3$



(c)  $n=50, i \leq 20$



第2図 円弧溝の指向ふる射率計算値



第3図 円弧溝の指向ふく射率計算値

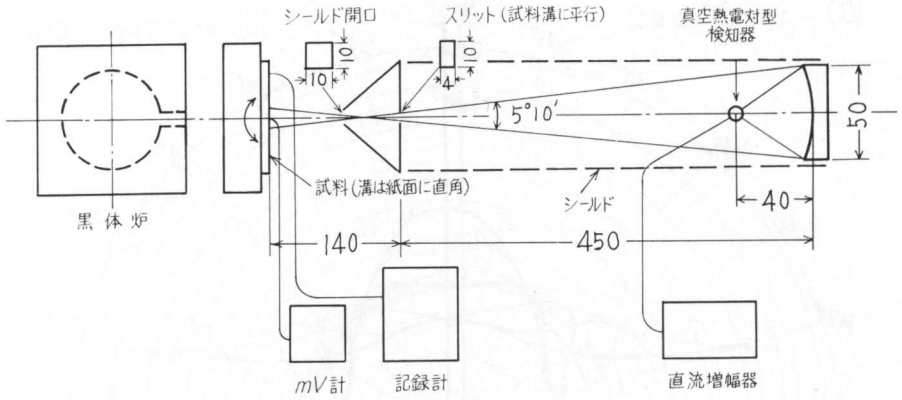
### 3. 実験方法

実験の方法および装置は前報<sup>6)</sup>と同様であり、第4図は装置の概略を示す。

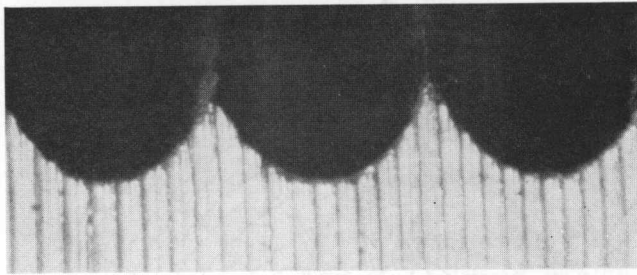
円弧溝作成のためのバイトとして、完成バイトの一端を幅約1mm および2mm に研ぎおとしたもの2本を用意し、顕微鏡をのぞきながら先端を油砥でたんねんに研磨してアールをとり半用形とした。

円弧溝試料は、このバイトを用いてアルミニウム板 (JIS 第1種, 115mm×115mm×5mm) に0.2mm 間隔の各種ピッチでシェーパ加工したものである。アルミニウムの切削時には、切削液として四塩化炭素を用いて被削性を向上させ、溝内面があらないように、またふく射率測定前には試料をアセトンで十分洗滌して、表面の有機物を除去することに留意した。

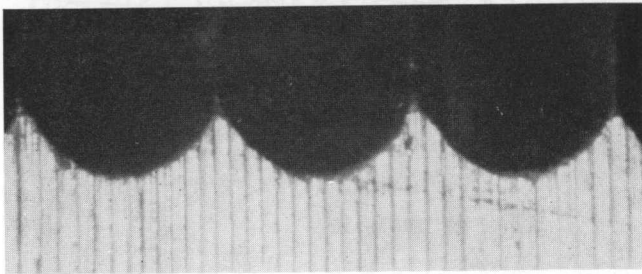
第5図にアルミニウムの円弧溝試料を、端面を60°の面でそいだ断面写真で示してある。



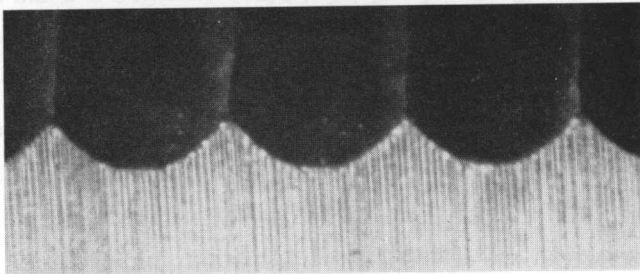
第4図 実験装置



ピッチ  $P=2.0$  mm

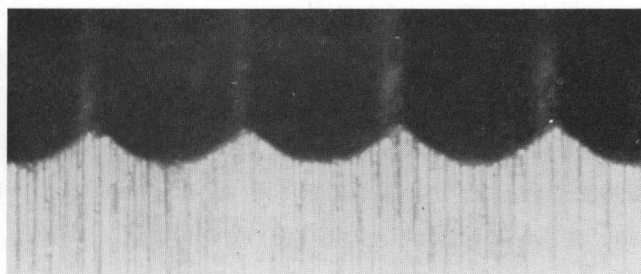


ピッチ  $P=1.8$  mm

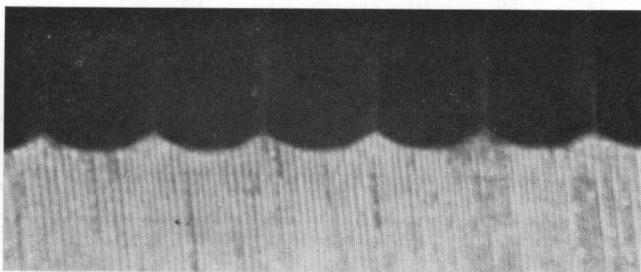


ピッチ  $P=1.6$  mm

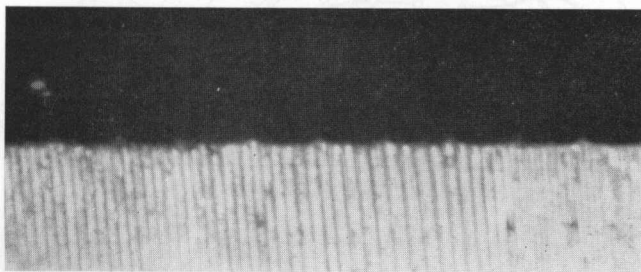
第5図 円弧溝粗面の断面断面写真  $R=1.01$  mm (端面を  $60^\circ$  で面とりする)



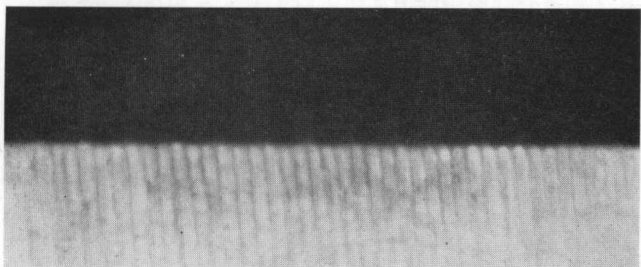
ピッチ  $P=1.4$  mm



ピッチ  $P=1.0$  mm



ピッチ  $P=0.6$  mm



ピッチ  $P=0.4$  mm

第5図 円弧溝粗面の断面写真  $R=1.01$  mm (端面を  $60^\circ$  で面とりする)

実験の条件は、試料加熱温度  $200 \pm 2^\circ\text{C}$ 、室温  $20 \sim 21^\circ\text{C}$ 、湿度 45% 以下に保って行なった。

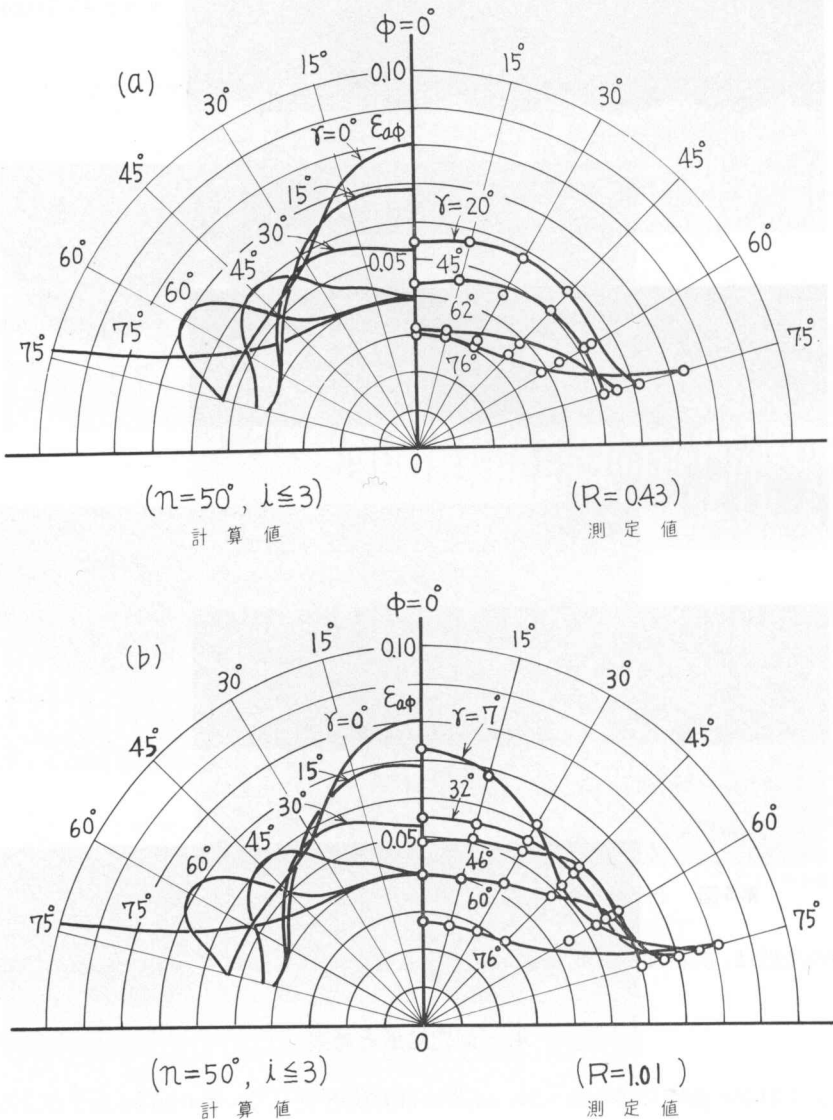
#### 4. 測定結果と考察

指向ふく射率の測定結果を  $n=50$ 、 $i \leq 3$  の計算値と並べて、第6図(a)および(b)に示してある。(a)はバイトの  $R=0.43$  mm による円弧溝の場合で(b)は  $R=1.01$  mm の場合である。

(a) の  $R=0.43$  mm の測定結果において、バイトの  $R$  とシェーパの送りピッチの関係で、 $\gamma$  が  $0^\circ$  に近い試料が得られず、 $\gamma=0^\circ$  の計算値と比較される測定値は示されていないが、より大きな  $\gamma$  について両者を比較するとその傾向は類似している。

(b) の  $R=1.01$  mm の測定結果は、全体の傾向が計算値とよく一致している。この場合第1表 (b) に明らかなように、比較の都合上測定値の  $\gamma$  が計算に用いた  $\gamma$  と近似するように、接近した二つの  $\gamma$  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てある。

計算値と測定値の相違について、二つの測定結果に共通して云えることは、次の3点である。



第6図 計算値と測定値の比較



第1表 指向ふく射率の測定値

(a)  $R=0.43$  mm

$P$ (mm)	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2
$\tilde{\gamma}$	—	20°	45°	62°	76°
$\phi$					
0°	—	0.055	0.044	0.032	0.030
15°	—	57	46	32	31
30°	—	58	47	33	31
45°	—	58	51	39	35
60°	—	54	52	44	39
75°	—	62	52	56	74

(b)  $R=1.01$  mm

$P$ (mm)	2.0	1.8	1.7*	1.6	1.4	1.0	0.6	0.5*	0.4
$\tilde{\gamma}$	7°	27°	32°	37°	46°	60°	73°	76°	79°
$\phi$									
0°	0.073	0.058	0.056	0.053	0.049	0.040	0.028	0.028	0.028
15°	68	57	55	53	51	40	26	28	29
30°	62	57	56	55	53	44	28	29	30
45°	53	58	58	57	60	49	32	32	32
60°	53	58	57	55	60	58	45	45	45
75°	77	73	70	66	67	61	75	82	88

\* 印の値は左右の測定値の平均値

(1)  $\tilde{\gamma}$  が 75° くらいに大きくなると測定値が計算値より小さくなる。

(2) 計算値では  $\phi = \tilde{\gamma}$  の方向に現われる明瞭な曲線の山が測定値ではそれほど顕著に現われない。

(3)  $\tilde{\gamma}$  が小さいものは  $\phi$  の大きいところで測定値が計算値より大きくなり、測定値の曲線はすそ開きの傾向を示す。

それぞれの原因について考察するならば、(1) は  $\tilde{\gamma}$  がこれくらい大きくなると材料表面はきわめて浅い円弧溝の粗面となり、自己形態係数にもとづくふく射率の増加は無視され、逆に溝内面は非常になめらかな面を形成するために、純粋なアルミニウム平面に近い小さな値になるものとおもわれる。

測定値は全般的に  $n=50$ ,  $i \leq 3$  の計算値に近似しているが、この温度における純粋なアルミニウムの屈折率の理論値<sup>7)</sup> は  $n=69$  であることから、むしろ  $n=70$  の計算値に近似すべきである。しかし、溝内面の細かいあざさ、アルミニウム内および表面の不純物等の影響で全体にふく射率が大きくなり、 $n=50$  の計算値に近似したものとおもわれる。

(2) はバイトの  $R$  にもとづく円弧溝の真円度の不足および溝内面の微細なあざさによる乱反射のためとおもわれる。また、これらの原因で溝内の反射回数は大きく望めず、測定値は  $i \leq 3$  の計算値に近似したものとおもわれる。

(3)は $\gamma$ が小さくなり溝が深くなると、溝側面のあらさが増してふく射率を増加させ、その影響が $\phi$ の大きな方向であらわれたものとおもわれる。

## 5. む す び

金属表面のふく射率の指向特性が、電磁理論から導かれた単色ふく射率の指向性を示すものとして、円弧溝内面にそのまま適用し、各面素の反射成分と射出成分の総和から円弧溝粗面の指向ふく射率を計算した。一方、アルミニウムに円弧溝を切削した試料について指向ふく射率を測定して、計算値との間に良い一致を得た。

既に報告したV字溝粗面および今回の円弧溝粗面の研究結果から、温度があまり高くなければ、金属粗面の指向ふく射率に関するこれらの理論構成の正当なことが明らかになったものとおもわれる。

この研究を行なうにあたり、北大工学部機械工学科教授 斎藤武先生に有益な御示唆をいただいたことを感謝致します。

## 文 献

- 1) M. Jakob: Heat Transfer Vol. 1, Wiley (1964), p. 47.
- 2) R. C. Birkebak, E. R. Eckert: Effect of Roughness of Metal Surface on Angular Distribution of Monochromatic Reflected Radiation, J. Heat Trans. 1965-2, p. 85.
- 3) 蓮沼 宏: 光沢, コロナ社 (1965), p. 68.
- 4) E. M. Sparrow: Radiation Absorption characteristics of Concave Cylindrical Surface, ASME. J. Heat Trans. 1962-11, p. 283.
- 5) 金山公夫: V字溝粗面の指向ふく射率, 第6回日本伝熱シンポジウム講演会論文集, 1969-5, p. 229.
- 6) 金山公夫: V字溝粗面のふく射率, 北見工大研報, Vol. 2, No. 3, 1969-2, p. 427.
- 7) 6)に同じ, p. 420.