

V字溝粗面のふく射率*

金山 公夫

(昭和43年9月30日受理)

Emissivity of the V-groove Rough Surfaces

by Kimio KANAYAMA

Apparent directional emissivities on the opening of V-grooves were calculated, in two cases of specular reflection and diffuse reflection at inner surface of the groove, taking accounts of angles of emission, incidence and reflection, and numbers of reflections.

The calculations are based upon the following assumptions: That specular surface has the monochromatic emittance derived from the electromagnetic theory and that diffuse surface has the emittance following Lambert's law.

At the same time, the experiment on the aluminum rough surface of V-grooves was carried out in the case of specular reflection, and the fine agreement was obtained between calculated and experimental results.

1. ま え が き

固体表面のあらさと反射率の関係については、古来、多くの研究者¹⁾によって、理論的および実験的に探求され、その間には複雑にして密接な関連性があることが示唆されている。それらは、表面あらさが、入射するふく射の波長より大きい小さいかによって二通りに別けて考えられており、測定値としては前者が圧倒的に多い。たとえば、Birkeback²⁾の実験によれば、表面あらさがふく射の波長より小さい範囲では、あらさの増加とともに反射率は減少し、一定の漸近値に達するが、その傾向は Chinmayanandam³⁾の式によく一致するとされている。

ここで、固体のふく射率 ε を求めようとする場合、反射率 ρ が既知ならば、定義式より $\varepsilon=1-\rho$ で与えられることになるが、この関係は黒体からの入射波の場合にのみ厳密に正しく、また ρ は表面温度によって変化するので、ふく射率は直接測定によるのが理想である。ふく射率の直接測定としては、垂直ふく射率の測定例⁴⁾が多いが、その他半円状の指向ふく射率の測定例⁵⁾ および波長別に分光した単色ふく射率の測定例⁶⁾ もある。

著者ら⁷⁾は、研磨紙でスクラッチしたアルミニウムの表面から射出されるふく射の直接測定からふく射率を算定し、あらさとの関連性を報告した。それによると、表面の最高値あらさ H_m がふく射の波長 λ より小さい範囲では、ふく射率の変化は従来の反射率 α から求めた結果

* 日本機械学会北海道支部講演会(昭43. 10. 11)で発表

に近似しているが、 $H_m \doteq \lambda$ ではふく射率は最高値を示し、 $H_m > \lambda$ で再び小さくなり、一定値に近づくことが判明した。

しかし、 $H_m \doteq \lambda$ の領域におけるこのような現象は、種々の要因を含んでいるとおもわれるので、その議論は別な機会に譲るとして、ここでは問題を単純化して $H_m \gg \lambda$ の範囲で、しかも V 字型の連続した定形溝を有するアルミニウム粗面の指向ふく射率* を測定し、理論計算との比較を行なった。

2. 理論計算

2-1 V 字溝内の射出および入反射の解析

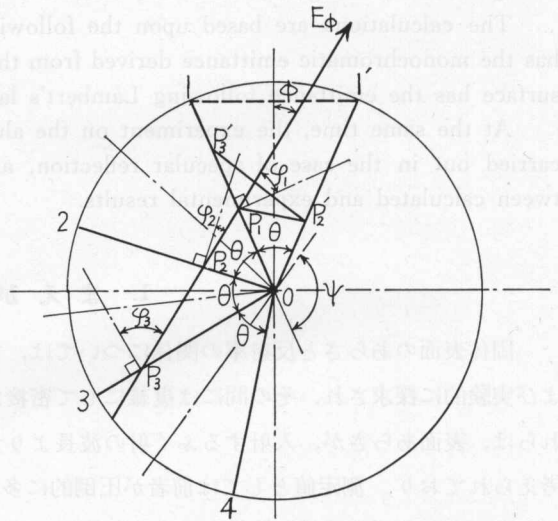
V 字溝内面より、一定方向に射出されるふく射に加わる各成分の、溝内における反射回数および各点の入反射角を求めるには Zipin¹²⁾ の図式解法による (第 1 図参照)。

開口面 1-1' が上向きで、かつ水平な V 字溝において、溝の谷を中心として、溝内面を半径とする円を描き、いま、右側半円状の指内ふく射率を求めるときは、左まわりに V 字溝の開き角に等しい角で左半円の中心角を分割してゆく。ここで、溝内の反射を考える場合に、内面 1-0 に対する向い側の面 1'-0 の像は反対側に面 2-0 で表わされ、面 1'-0 に対する面 1-0 は、面 2-0 に対する面 1-0 の像の面 3-0 で表わされ、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 $P_1P_2P_3$ で表わされる V 字溝内の反射は、像をつきぬける一本の直線 $P_1P_2P_3$ で示され、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反射角も容易に求めることができる。

V 字溝開口から一定方向へのふく射は、溝内面の一点 P_1 から射出する成分と、向い側の面の一点 $P_2 (=P_2)$ から入射して反射される成分の和で、順次、反射の回数だけ反射の成分をあらわす項が増加する。すなわち、 i 回の反射成分を有し、 ϕ 方向に射出するふく射能 E_ϕ は

$$E_\phi = \varepsilon_1 \sigma T^4 + (1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 \sigma T^4 + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \varepsilon_3 \sigma T^4 + \dots + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \dots (1 - \varepsilon_i) \varepsilon_{i+1} \sigma T^4 \tag{1}$$



第 1 図 V 字溝内における射出および入反射の角度および反射回数を求める方法

* 正確には「見かけの指向全ふく射率」になる⁸⁾。また「放射率」⁹⁾あるいは「射出率」¹⁰⁾と呼ぶこともあるが、この論文では慣例に従って「ふく射率」¹¹⁾とする。

で表わされる。ここで、 i は反射の回数で第 1 図より

$$i = [\phi/\theta] \quad (2)$$

ただし、 $[\]$ は ϕ/θ の小数点以下を切り捨てた正の整数値を示す。 $\varepsilon_i (i=1, 2 \dots i)$ は各点のふく射率、 σ は Stefan-Boltzmann 定数 ($\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{K}^4$)、 T は溝内面の温度 ($^\circ\text{K}$) である。

ゆえに、 ϕ 方向の指向ふく射率 ε_ϕ は

$$\varepsilon_\phi = \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \varepsilon_3 + \dots + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \dots (1 - \varepsilon_i) \varepsilon_{i+1} \quad (3)$$

となる。

2-2 ふく射率の理論式

ふく射率 ε_i の算定にあたって基本的な考えは、物質を金属と非金属に大別し、理論を進める際に次の仮定をおく。

仮定 1) 金属の平滑面においては規則反射性で、ふく射特性は Maxwell の電磁理論¹³⁾ から導かれた単色指向ふく射率を示し、その機構は V 字溝内面の射出および入反射においても適用される。

仮定 2) 非金属の平滑面は乱反射性で、そのふく射特性は Lambert の余弦法則に従うものとする。

仮定 1) は、物体の表面温度があまり高くなく、 400°C 以下であれば適切であるとされ、仮定 2) は、一般の非金属材料では、方向角 ϕ があまり大きくなければ、近似的に正しいとされている。

すなわち、金属の V 字溝内面における射出および入反射の際の指向ふく射率 ε_ϕ および指向反射率 ρ_ϕ は、電磁理論より

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\phi &= \frac{1}{n} \left(\cos \phi + \frac{1}{\cos \phi} \right) \\ \rho_\phi &= 1 - \varepsilon_\phi \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

であらわされる。ここで、 n は材料の屈折率、 ϕ はその点の射出角または入反射角である。

非金属の V 字溝内面においては

$$\varepsilon_\phi = \varepsilon. \quad (5)$$

ここで、 ε は材料固有の垂直ふく射率である。

2-3 屈折率の理論値

金属材料の屈折率 n は、やはり電磁理論より

$$n = \sqrt{\frac{c \mu_m \lambda}{r_e}} \quad (6)$$

なる関係式であらわされる。ここで、 c は光速で $c = 30 \times 10^9 \text{ cm/sec} = 30 \Omega$ 、 r_e は電気抵抗率、 λ は電磁波の波長、 μ_m は比透磁率をあらわす。

第 1 表 アルミニウムおよび銅の屈折率

温 度 t (°C)	波 長 λ (cm)	アルミニウム		銅	
		r_e (Ω -cm)	n	r_e (Ω -cm)	n
50	8.235×10^{-4}	2.937×10^{-6}	91.72	1.837×10^{-6}	116.0
100	7.131	3.132	82.65	2.032	102.6
150	6.288	3.327	75.30	2.227	92.04
200	5.624	3.522	69.21	2.422	83.46
250	5.086	3.717	64.07	2.617	76.35
300	4.642	3.912	59.66	2.812	70.38
		$\mu_m = 1.0000208 \approx 1$		$\mu_m = 0.999905 \approx 1$	

純粋なアルミニウムおよび銅の 50 ~ 300°C におけるそれぞれの値¹⁴⁾ を (6) 式に代入して n を計算すると第 1 表のとおりである。

2-4 V 字溝開口の指向ふく射率の計算例

金属の V 字溝について、屈折率 $n=70$ 、開き角 $\theta=45^\circ$ の場合の見かけの指向ふく射率を計算する。

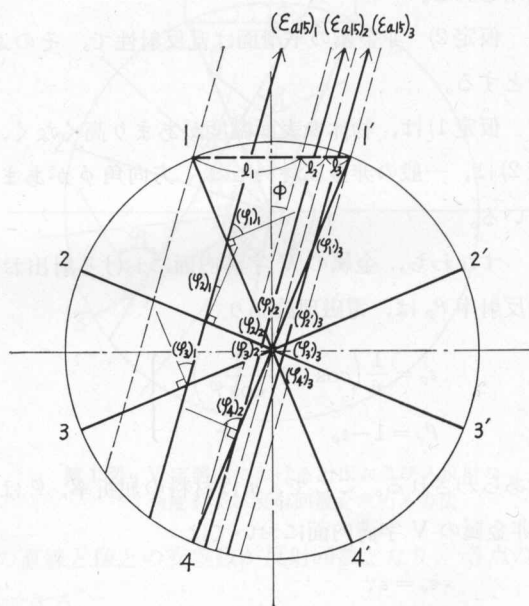
記 号

- $\varepsilon_{\alpha\phi}$: V 字溝開口の ϕ 方向の見かけのふく射率
- $(\varepsilon_{\alpha\phi})_1$ } 反射の回数が異なる ϕ 方向の見かけのふく射率
- $(\varepsilon_{\alpha\phi})_2$ }
- $(\varepsilon_{\alpha\phi})_3$ }
- これらを平均して $\varepsilon_{\alpha\phi}$ を求める
- l_1 } $(\varepsilon_{\alpha\phi})_1, (\varepsilon_{\alpha\phi})_2, (\varepsilon_{\alpha\phi})_3$ から平均を求めるときのそれぞれの比重
- l_2 }
- l_3 }
- $\varepsilon_i (i=1, 2, \dots, i)$: i 面のふく射成分の指向ふく射率で溝内で $i-1$ 回の反射後に開口から ϕ 方向に射出される
- $\varphi_{\phi i}$: ε_i の i 面での射出角が $\varphi_{\phi i}$ なることを示す ($\varepsilon_i = \varepsilon_{\phi i}$)

$\phi = 0^\circ$ (垂直) 方向: 第 2 図および

(4) 式より

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = \varepsilon_{67.5^\circ} &= 0.042798 & (1 - \varepsilon_1) &= 0.957202 \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_{22.5^\circ} &= 0.028662 & (1 - \varepsilon_2) &= 0.971338 \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_{22.5^\circ} &= 0.028662 & (1 - \varepsilon_3) &= 0.971338 \\ \varepsilon_4 = \varepsilon_{67.5^\circ} &= 0.042798 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} (\varphi_1)_1 = (\varphi_1)_2 = (\varphi_4)_3 &= 52.5^\circ \\ (\varphi_2)_1 = (\varphi_2)_2 = (\varphi_3)_3 &= 7.5^\circ \\ (\varphi_3)_1 = (\varphi_3)_2 = (\varphi_2)_3 &= 37.5^\circ \\ (\varphi_4)_2 = (\varphi_1)_3 &= 82.5^\circ \end{aligned}$$

第 2 図 方向角 $\phi = 15^\circ$ の場合

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

$$(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)\varepsilon_3 = 0.957202 \times 0.971338 \times 0.028662 = 0.026649$$

$$(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)(1-\varepsilon_3)\varepsilon_4 = 0.957202 \times 0.971338^2 \times 0.042798 = 0.038651$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{a0} &= \varepsilon_1 + (1-\varepsilon_1)\varepsilon_2 + (1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)\varepsilon_3 + (1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)(1-\varepsilon_3)\varepsilon_4 \\ &= 0.042798 + 0.027435 + 0.026649 + 0.038651 = \mathbf{0.135533} \end{aligned}$$

$\phi=15^\circ$ 方向: 第2図より, ふく射が射出される側からみて遠い方の溝内面においては, 2回反射する部分と3回反射する部分があり, さらに近い方の溝内面('をつけて表わす)における3回反射する部分があり, それぞれの見かけのふく射率を $(\varepsilon_{a15^\circ})_1$, $(\varepsilon_{a15^\circ})_2$, $(\varepsilon_{a15^\circ})_3$, その比重を l_1 , l_2 , l_3 で表わす。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon'_4 = \varepsilon_{52.5^\circ} = 0.032164 \quad (1-\varepsilon_1) = (1-\varepsilon'_4) = 0.967836$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon'_3 = \varepsilon_{7.5^\circ} = 0.0285773 \quad (1-\varepsilon_2) = (1-\varepsilon'_3) = 0.971427$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon'_2 = \varepsilon_{37.5^\circ} = 0.029341 \quad (1-\varepsilon_3) = (1-\varepsilon'_2) = 0.970659$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon'_1 = \varepsilon_{82.5^\circ} = 0.111344$$

$$(1-\varepsilon_1)\varepsilon_2 = (1-\varepsilon'_4)\varepsilon'_3 = 0.967836 \times 0.0285773 = 0.027654$$

$$(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)\varepsilon_3 = (1-\varepsilon'_4)(1-\varepsilon'_3)\varepsilon'_2 = 0.967836 \times 0.971427 \times 0.029341 = 0.027586$$

$$\begin{aligned} (1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)(1-\varepsilon_3)\varepsilon_4 &= (1-\varepsilon'_4)(1-\varepsilon'_3)(1-\varepsilon'_2)\varepsilon'_1 \\ &= 0.967836 \times 0.971427 \times 0.970659 \times 0.111344 = 0.104989 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} (\varepsilon_{a15^\circ})_2 &= \varepsilon_1 + (1-\varepsilon_1)\varepsilon_2 + (1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)\varepsilon_3 + (1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)(1-\varepsilon_3)\varepsilon_4 \\ &= 0.087404 + 0.104989 = 0.192393 \end{aligned}$$

$$(\varepsilon_{a15^\circ})_3 = \varepsilon'_4 + (1-\varepsilon'_4)\varepsilon'_3 + (1-\varepsilon'_4)(1-\varepsilon'_3)\varepsilon'_2 + (1-\varepsilon'_4)(1-\varepsilon'_3)(1-\varepsilon'_2)\varepsilon'_1 = (\varepsilon_{a15^\circ})_2 = 0.192393$$

$$\begin{cases} l_1 = 0.623660 \\ l_2 + l_3 = 0.376340 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{a15^\circ} &= (\varepsilon_{a15^\circ})_1 l_1 + (\varepsilon_{a15^\circ})_2 (l_2 + l_3) \\ &= 0.087404 \times 0.623660 + 0.192393 \times 0.376340 = 0.054510 + 0.072405 = \mathbf{0.126915} \end{aligned}$$

$\phi=30^\circ$ 方向:

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

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{7.5^\circ} = 0.0285773 \quad (1-\varepsilon_2) = 0.971427$$

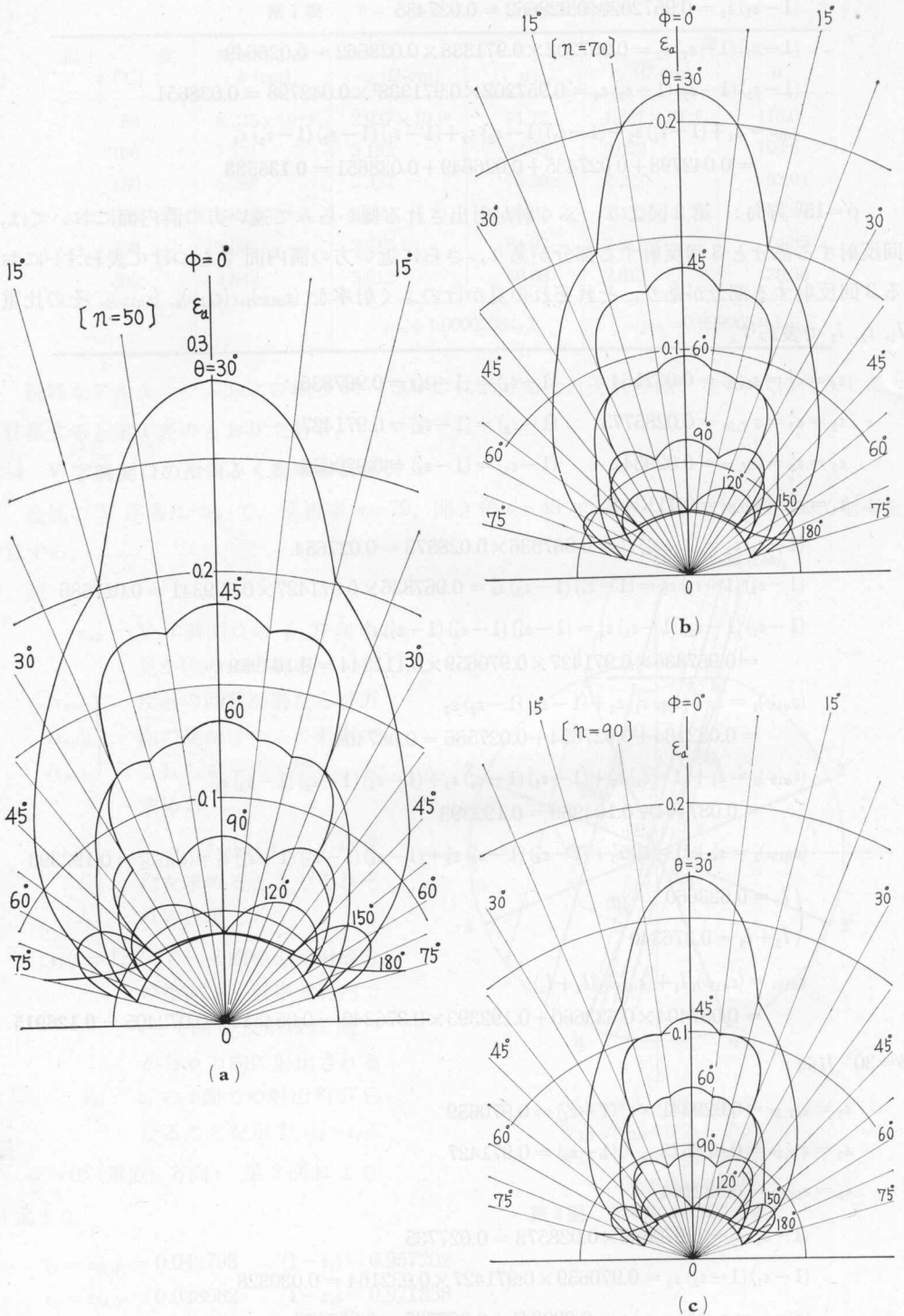
$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{52.5^\circ} = 0.032164$$

$$(1-\varepsilon_1)\varepsilon_2 = 0.970659 \times 0.0285773 = 0.027735$$

$$(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)\varepsilon_3 = 0.970659 \times 0.971427 \times 0.032164 = 0.030328$$

$$(\varepsilon_{a30^\circ})_1 = \varepsilon_1 + (1-\varepsilon_1)\varepsilon_2 = 0.029341 + 0.027735 = 0.057076$$

$$(\varepsilon_{a30^\circ})_2 = \varepsilon_1 + (1-\varepsilon_1)\varepsilon_2 + (1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)\varepsilon_3 = 0.057076 + 0.030328 = 0.087404$$



第3図 V字溝開口の指向と射率の計算値(規則反射)
 (a) $n=50$, (b) $n=70$, (c) $n=90$

$$\begin{cases} l_1 = 0.278493 \\ l_2 = 0.721507 \end{cases}$$

$$\varepsilon_{\alpha 30^\circ} = 0.057076 \times 0.278493 + 0.087404 \times 0.721507 = \mathbf{0.078958}$$

$\phi = 45^\circ$ 方向:

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

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

$$\varepsilon_{\alpha 45^\circ} = \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 = 0.028622 + 0.027840 = \mathbf{0.056502}$$

$\phi = 60^\circ$ 方向:

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

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

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

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

$$l_1 = l_2 = 0.500000$$

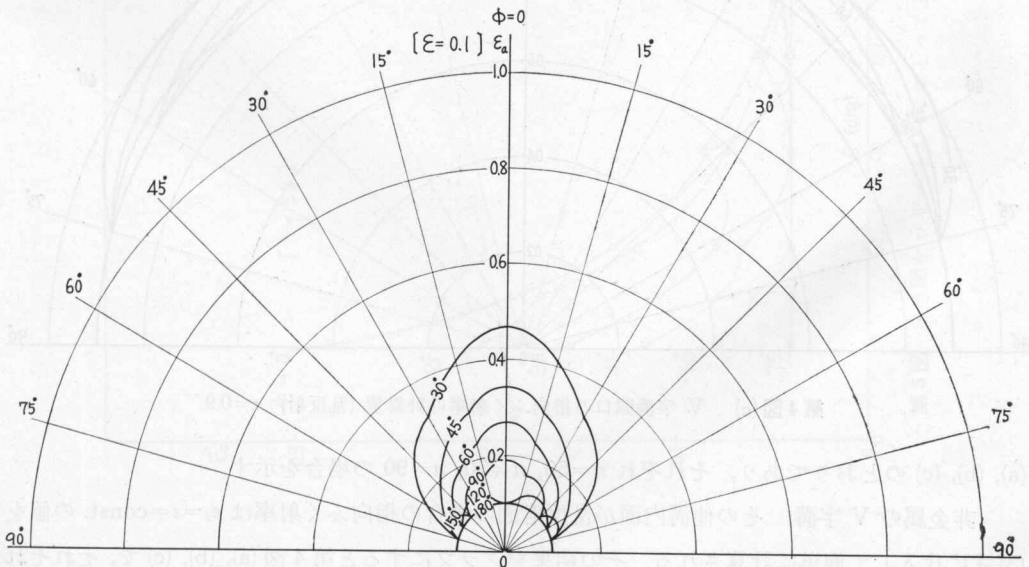
$$\varepsilon_{\alpha 60^\circ} = 0.028573 \times 0.500000 + 0.057006 \times 0.500000 = \mathbf{0.042790}$$

$\phi = 75^\circ$ 方向:

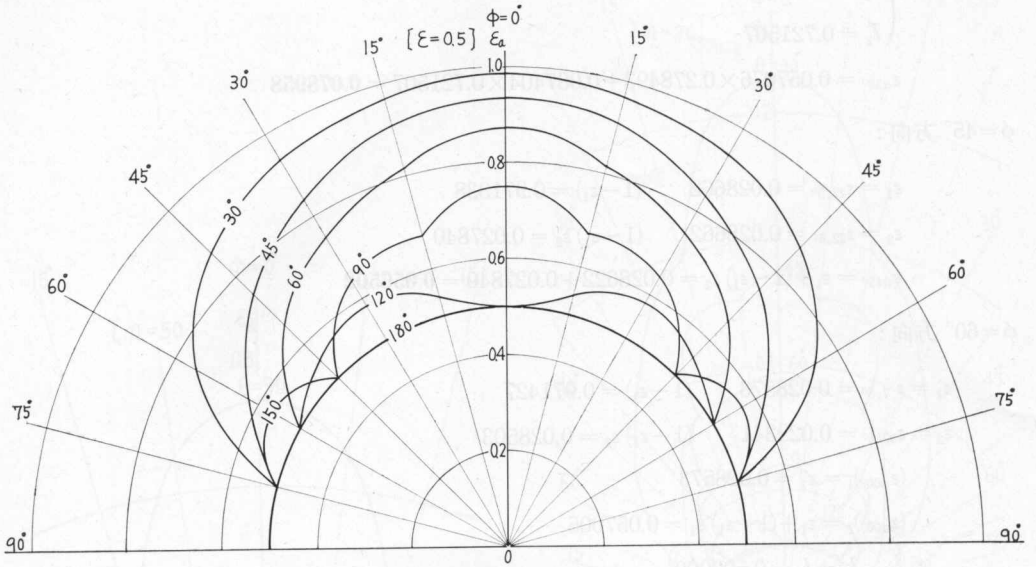
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{7.5^\circ} = 0.028573$$

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

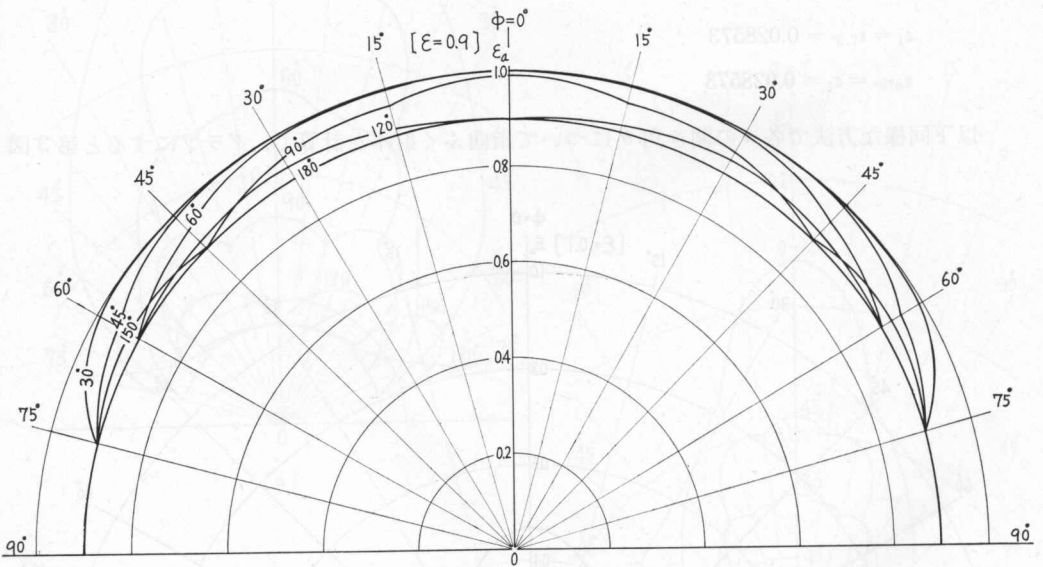
以下同様な方法で各々の開き角 θ について指向ふく射率を計算し、グラフにすると第3図



第4図(a) V字溝開口の指向ふく射率の計算値(乱反射) $\varepsilon = 0.1$



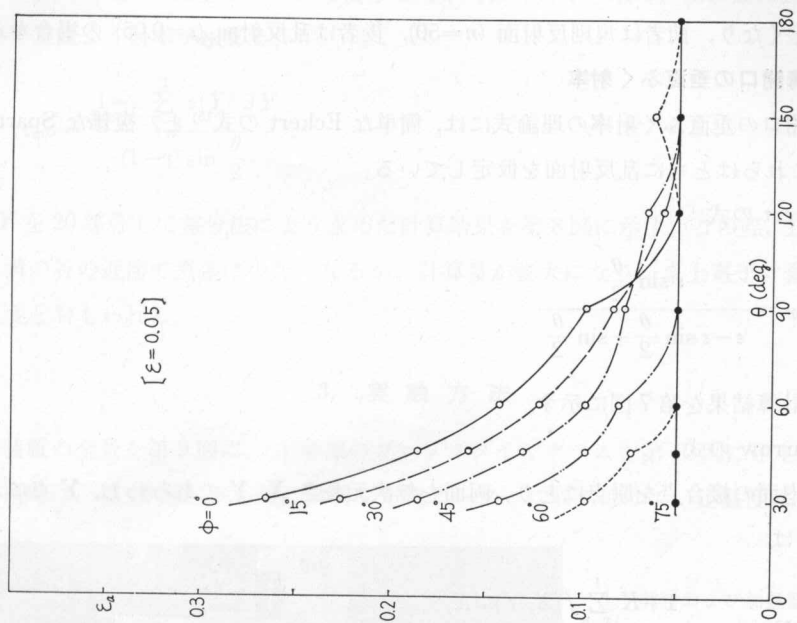
第4図(b) V字溝開口の指向ふく射率の計算値(乱反射) $\epsilon=0.5$



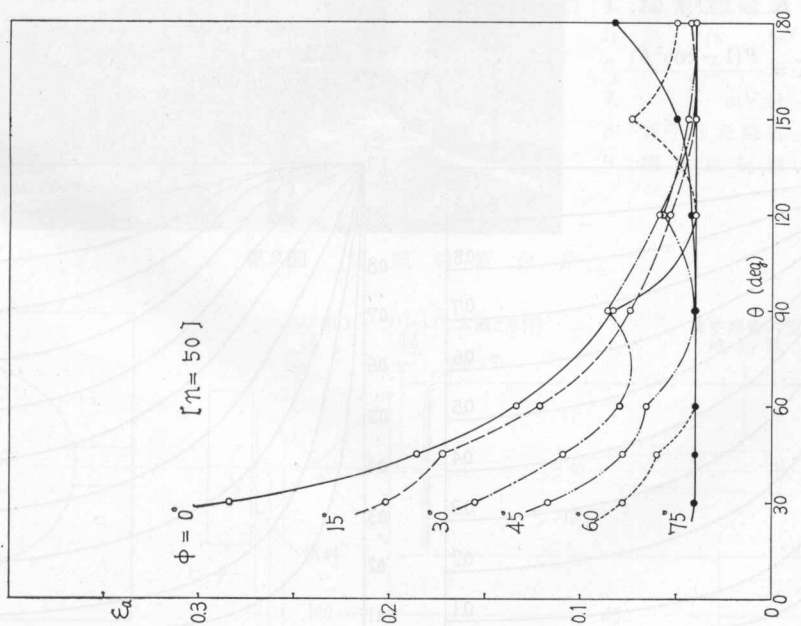
第4図(c) V字溝開口の指向ふく射率の計算値(乱反射) $\epsilon=0.9$

(a), (b), (c) のとおりであり, それぞれ $n=50$, $n=70$, $n=90$ の場合を示す。

非金属の V 字溝, その他溝内面が乱反射面の場合の指向ふく射率は $\epsilon_i = \epsilon = \text{const.}$ の値を (3) 式に代入して簡単に計算される。その結果をグラフにすると第4図(a), (b), (c) で, それぞれ $\epsilon=0.1$, $\epsilon=0.5$, $\epsilon=0.9$ の場合を示す。



第5図 第3図を ϕ をパラメータにとって表わした図



第6図 第4図を ϕ をパラメータにとって表わした図

また、V字溝の指向ふく射率を方向角 θ をパラメータにとってあらわすと、第5図および第6図のごとくなり、前者は規則反射面 ($n=50$)、後者は乱反射面 ($\epsilon=0.05$) の場合を示す。

2-5 V字溝開口の垂直ふく射率

V字溝開口の垂直ふく射率の理論式には、簡単な Eckert の式¹⁵⁾ と、複雑な Sparrow¹⁶⁾ の式があり、これらはともに乱反射面を仮定している。

1) Eckert の式

$$\epsilon_{n0^\circ} = \frac{\epsilon \sin \frac{\theta}{2}}{\epsilon - \epsilon \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2}} \tag{7}$$

(7) 式による計算結果を第7図に示す。

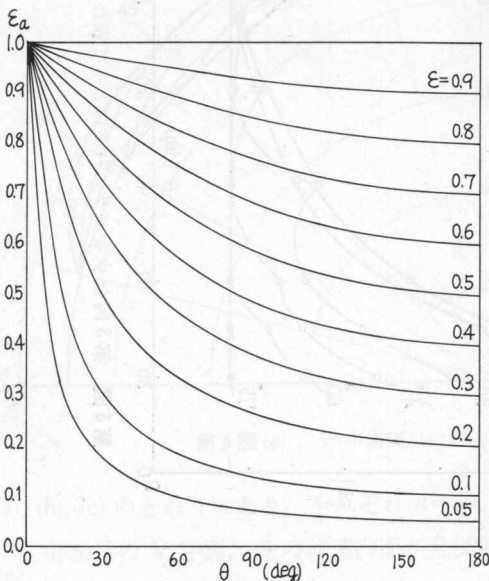
2) Sparrow の式

V字溝内面の接合点を原点にとり、両面を無次元長さ X, Y であらわし、 Y 点におけるふく射率 $\epsilon(Y)$ は

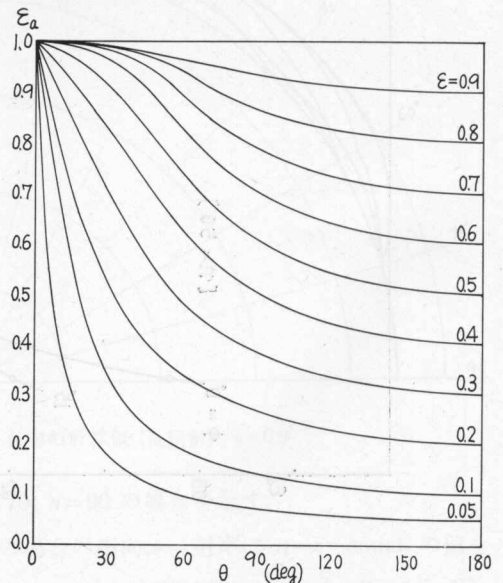
$$\epsilon(Y) = \frac{1 + K \int_{X=0}^1 f(X, Y) \Delta X}{1 - K^2 \int_{X=0}^1 \int_{Y=0}^1 f^2(X, Y) \Delta X \cdot \Delta Y} \tag{8}$$

ここで、 K および $f(X, Y)$ はそれぞれ

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



第7図 Eckert の理論から計算した V字溝開口の垂直ふく射率



第8図 Sparrow の理論から計算した V字溝開口の垂直ふく射率

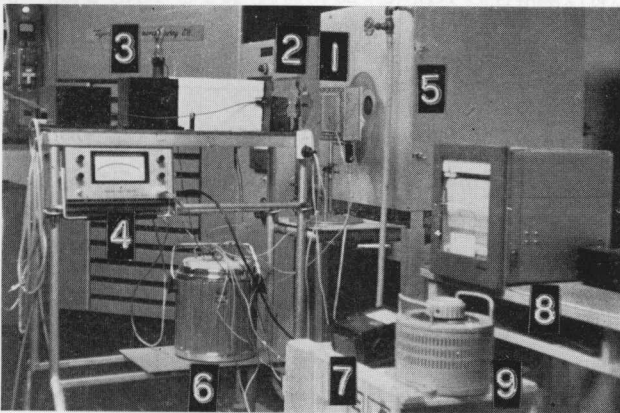
をあらわす。 $\epsilon(Y)$ をY面全体について積分して平均ふく射率を求め、開口面に投影すると(9)式のごとく垂直ふく射率が求まる。

$$\epsilon_{\alpha 0^\circ} = \frac{1 - \epsilon \sum_{Y=0}^1 \epsilon(Y) dY}{(1 - \epsilon) \sin \frac{\theta}{2}} \quad (9)$$

X, Yを20等分して差分法により求めた計算結果を第8図に示す。この際、分割数は多い程、特に溝の谷の近傍で誤差は少なくなるが、計算量が膨大になり、卓上電子計算機ではこの程度が限度とおもわれる。

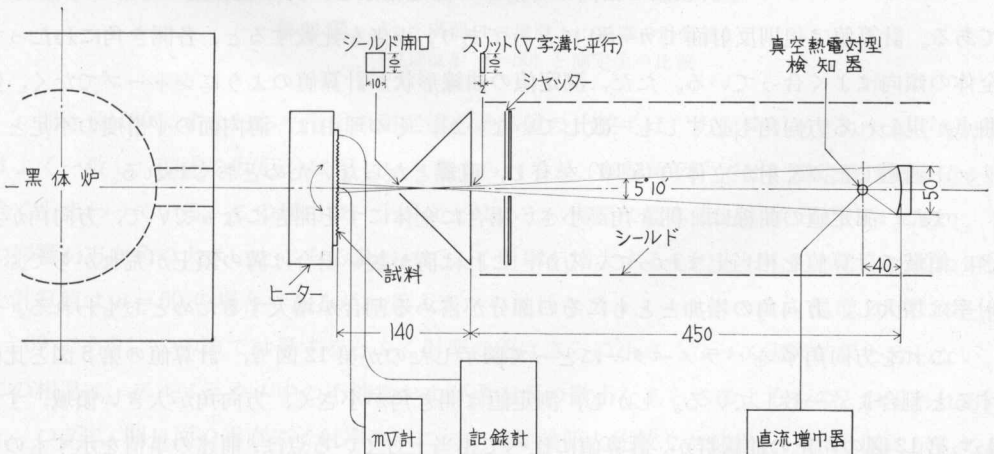
3. 実験方法

実験装置の全景を第9図に、主要部のブロックダイアグラムを第10図に示してある。実験方法の概略は、第10図において、試料を電気ヒーターに取り付けて一定温度(200±2°C)に



1. 試料および加熱器
2. シールド, スリットおよびシャッター
3. 真空熱電対型検知器
4. 直流増幅器
5. 黒体炉
6. 水点箱
7. mV計
8. 電子管記録計
9. 摺動抵抗器

第9図 実験装置全景



第10図 実験装置のブロックダイアグラム

加熱し、その表面からのふく射を、シールド (開口 10×10) およびスリット (10×2), (10×4) を通して凹面鏡でうけ、焦点に集光させる。焦点には真空熱電対型ふく射計 (日本分光 MPM-1) を置き、検知した出力電圧を直流増幅器 (大倉電気 AM-1001) で読みとる。試料の温度測定は、試料の中心および周辺に CA 熱電対 (0.32ϕ) を植え込み、その熱起電力を中心部は mV 計で読みとり試料温度とし、周辺部は電子管記録計に書かせて温度変化の傾向をとらえ、摺動抵抗器による電源電圧の調節を便利にするとともに、試料中心と周辺の温度差を求めたが、両者の差は最大 1% であった。

電気ヒーターは縦軸のまわりに回転することができ、任意の方向に試料を傾けて指向ふく射率を測定し得る。

ヒーター背後には黒体炉があり、これでふく射計を校正して絶対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なされる。

なお、測定の便宜上、入射光をチョッピングしていないため、ふく射測定の際、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 ($9 \sim 25 \mu$ 通過) および KRS-5 ($0.7 \sim 50 \mu$) を使用しているので湿度に弱く、室内は空気調和により温度を $21 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度を 45% 以下に保って実験を行なっている。

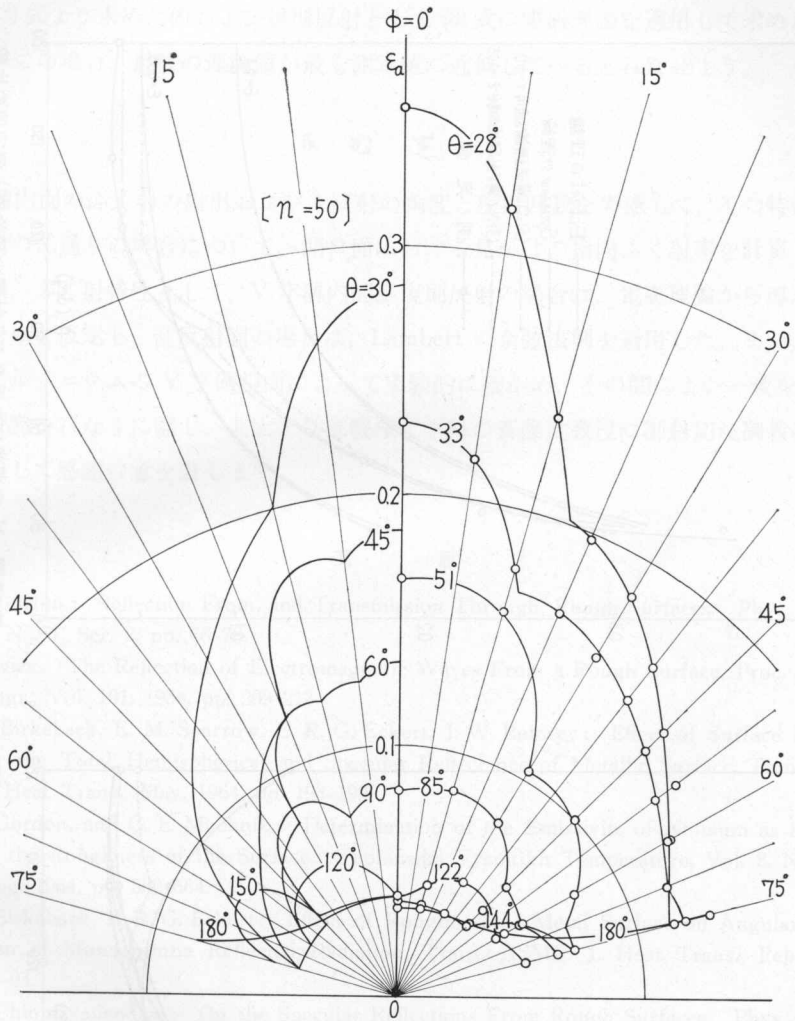
試料は厚さ 5 mm のアルミニウム板 (JIS 第 1 種) を 115×115 mm の大きさに切断し、平滑面としては、傷のない光沢面 ($H_m = 0.4 \mu$) をそのまま用い、粗面はこれに種々の剣先角のバイトによりピッチ 0.6 mm で V 字溝を連続して切削したものをを用いた。試料は測定前に表面の油をアセトンで十分洗い流し、測定時には一度温度を 300°C に過熱して有機物をとばしてから測定に入った。

4. 実験結果の検討

アルミニウムの V 字溝粗面の指向ふく射率の測定結果を、計算値と並べて第 11 図に示してある。計算値は規則反射面で $n=50$ にとってあり、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。ただ、測定値の曲線形状が計算値のようにシャープでなく、変曲点が現われる方向角も必ずしも一致していないが、その理由は、溝内面の平滑度の不足とスリット通過したふく射が立体角 ($5^\circ 10'$) を有し、直線とならないためとおもわれる。

また、測定値の曲線は、開き角が小さい場合に全体にすそ開きになっていて、方向角が大きい領域で計算値を相当上まわっているが、これは溝が鋭い場合は溝の頂上が荒れがちでふく射率は増大し、方向角の増加とともにその部分が占める割合が増大するためとおもわれる。

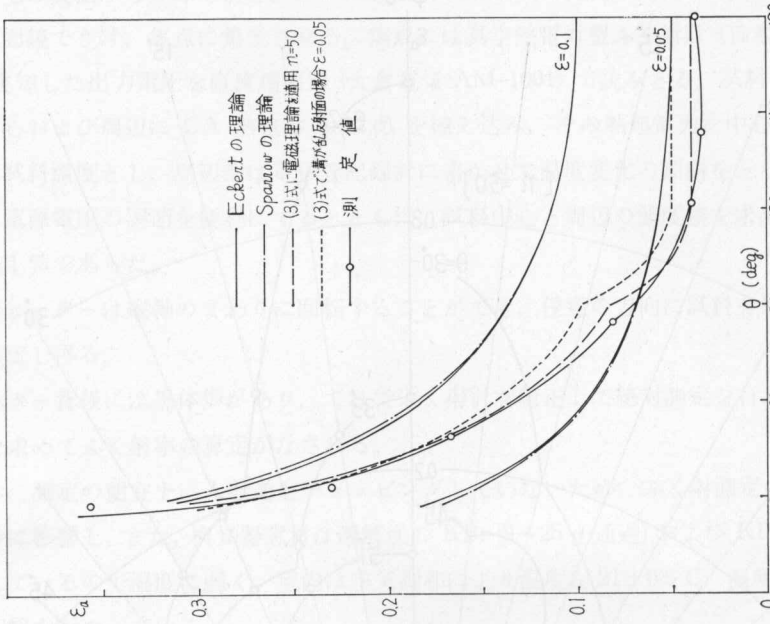
これを方向角 ϕ をパラメーターにとって図示したのが第 12 図で、計算値の第 5 図と比較すると割合よく一致している。しかし、測定値は開き角が小さく、方向角が大きい領域、すなわち第 12 図の左下の曲線群が、計算値に比べて相当上まっている点は、前述の事情を示すものであろう。



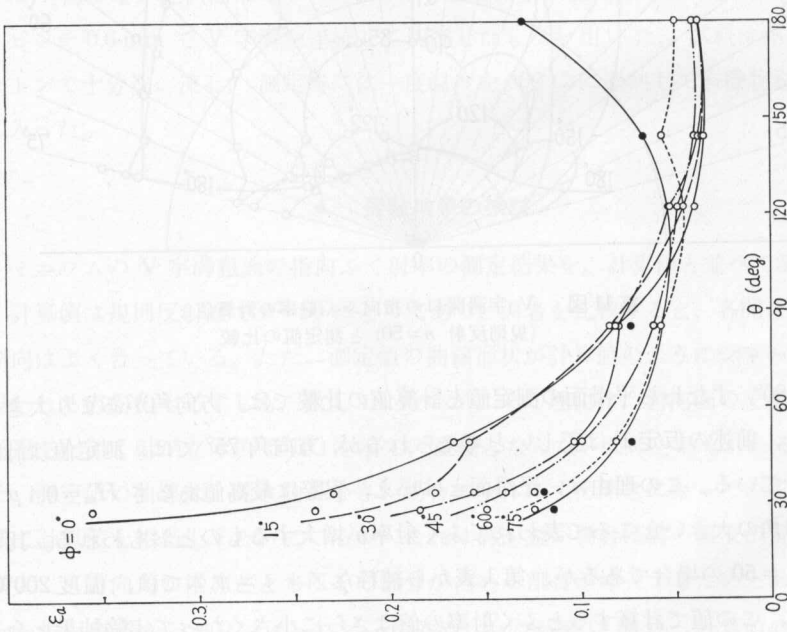
第11図 V字溝開口の指向ふく射率の計算値 (規則反射 $n=50$) と測定値の比較

開き角 180° 、すなわち平滑面の測定値と計算値の比較では、方向角があまり大きくなければよく一致し、前述の仮定1)は正しいと考えられるが、方向角 75° では、測定値は計算値を大きく上まわっている。この理由は、平滑面とはいえ、実際は最高値あらし $H_m=0.4\mu$ あり、その影響が方向角の大きいところで表われてふく射率が增大す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、第1表から純粋なアルミニウムでは、温度 200°C のとき $n=69$ であり、この値で計算するとふく射率の値はさらに小さくなって実験結果と合わない。この相違は、アルミニウム中の不純物および溝内面の微小なあらしによるものとおもわれる。

つぎに、開口面の垂直ふく射率のみについて理論値と比較した結果を、第13図に示してある。垂直ふく射率の理論値としては Eckert の理論による値、Sparrow の理論による値、乱反



第13図 V字溝開口の垂直ふく射率の理論値と測定値の比較



第12図 第11図の測定値をφをパラメータとして表わした図

射として(3)式より求めた値および規則反射として(3)式に電磁理論を適用して求めた値をあげてあるが、この場合、最後の理論値が最も測定値に近似しているとみなせよう。

5. む す び

V 字溝内面のふく射の射出および入反射の角度と反射回数を考慮して、その特性が規則反射と乱反射の二通りの場合について、開口面における見かけの指向ふく射率を計算した。

その際、ふく射特性として、V 字溝内面が規則反射の場合は、電磁理論から導かれた単色指向ふく射率を仮定し、乱反射面の場合は、Lambert の余弦法則を適用した。また、規則反射の場合をアルミニウムの V 字溝粗面によって実験的に確かめ、その間により一致をみた。

この研究を行なうに際し、北大工学部機械工学科の斎藤武教授に御懇切な御教示を賜ったことを付記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) A. F. Gorton: Reflection From, and Transmission Through, Rough Surfaces. Phys. Rev., Vol. 7, No. 1, Ser. 2, pp. 66-78.
H. Davies: The Reflection of Electromagnetic Waves From a Rough Surface, Proc. Inst. Elec. Engr., Vol. 101, 1954, pp. 209-213.
R. C. Birkeback, E. M. Sparrow, E. R. G. Eckert, J. W. Ramsey: Effect of Surface Roughness on the Total Hemispherical and Specular Reflectance of Metallic Surface, Trans. ASME, J. Heat Trans., May, 1964, pp. 193-199.
A. R. Gordon, and G. F. Muchnik: Determination of the Emissivity of Niobium as a Function of the Roughness of the Surface. Teplofizika Vysokikh Temperature, Vol. 2, No. 4, July-Aug. 1964, pp. 562-564.
- 2) R. C. Birkeback, E. R. G. Eckert: Effect of Roughness of Metal Surface on Angular Distribution of Monochromatic Reflected Radiation, Trans. ASME. J. Heat Trans., Feb. 1965, pp. 85-94.
- 3) T. K. Chinmayanandam: On the Specular Reflections From Rough Surfaces. Phys. Rev., Vol. 13, No. 2, Ser. 2, pp. 96-101.
- 4) N. W. Snyder, J. T. Gier, R. V. Dunkle: Total Normal Emissivity Measurements on Aircraft Materials Between 100 and 800 F, Trans. ASME., Oct. 1955, pp. 1011-1019.
- 5) J. T. Agnews, and R. B. McQuistan: Experiments Concerning Infrared Diffuse Reflectance Standards in the Range 0.5 to 20.0 Microns, J. Opt. Soc. Am., Vol. 43, No. 11, Nov. 1953, pp. 999-1007.
K. E. Torrance, and E. M. Sparrow: Directional Emittance of an Electric Nonconductor as a Function of Surface Roughness and wave length, Int. J. Heat Mass Trans., Vol. 10, 1967, pp. 1709-1716.
- 6) 日本機械学会編: ふく射に関する最近の発展 (昭 41), pp. 117-119.
R. E. Rolling: Effect of Surface Roughness on the Spectral and Total emissivity of Platinum, WPAFB. Cont., No. AF 33 (657)-11281, pp. 1-8.
- 7) 斎藤 武・石黒亮二・金山公夫: 暖房放熱面のふく射率の測定. 日本機械学会 70 周年記念北海道地区講演会前刷集, No. 174, 昭 42. 8, pp. 113-116.
金山公夫: 暖房放熱面のふく射率に関する基礎研究. 北見工大研報, 2 巻, 2 号, pp. 303-318.
- 8) 甲藤好郎: 伝熱概論 (昭 39), 養賢堂, pp. 339, 脚注.

9) 文部省編： 学術用語集. 機械工学編 (昭 40), 日本機械学会, pp. 65.

10) 8) に同じ, pp. 339.

11) 6) に同じ, pp. 3.

12) R. B. Zipin: The Apparent Thermal Radiations Properties of an Isothermal V-Groove with Specular Reflecting Walls, *J. Resh. Nat. Bur. Stand., C. Engg. Instr.*, Vol. 70 C, No. 4, Oct.-Dec. 1966.

13) M. Jakob: *Heat Transfer*, Vol. 1 (1964), Wiley, pp. 44-52.
N. W. Snyder: *Radiations in Metals*, *Trans. ASME.*, May, 1954, pp. 541-548.

14) 電気学会編： 電気材料便覧 (昭 36), pp. 4.
柳井久義・酒井善雄： 電気材料. コロナ社, pp. 11.

15) E. R. C. Echert: *Heat and Mass Transfer* (1959), McGraw-Hill, pp. 407-418.

16) E. M. Sparrow, J. L. Gregg, J. V. Szel, P. Manos: Analysis, Results, and Interpretation for Radiations Between Some Simply-Arranged Gray Surfaces, *Trans. ASME., J. Heat Trans.*, May, 1961, pp. 207-214.