

# スリット開口の回折パターンによる反射率の測定

深谷 次助・佐々木 彰・岩田 太・長坂 学

静岡大学工学部機械工学科 〒432-8561 浜松市城北 3-5-1

## Measurement of Reflectance Using a Diffraction Pattern of a Slit Aperture

Jisuke FUKAYA, Akira SASAKI, Futoshi IWATA and Manabu NAGASAKA

Faculty of Engineering, Shizuoka University, 3-5-1, Johoku, Hamamatsu 432-8561

This paper describes that the reflectance of the plane surface can be measured using a diffraction pattern of a slit aperture formed between a reference knife-edge and a plane surface itself. The diffraction pattern with an oblique illuminating light is formed from the diffraction rays caused by the direct incident light and the light reflected on the surface. As the intensity of the reflected light is proportional to the reflectivity of the surface, the ratio of the first to the second peak intensities of the diffraction pattern makes the reflectance of the surface. Thus the reflectance can be measured without comparison with the standard of reflectance. The measurement of the reflectance is carried out with some specimens of metal and plastics. The experimental results agree with the simulation results. At the large incident angle, our method is applicable to measure the reflectance of the small area of surface.

### 1. はじめに

スリット開口によるフラウンホーファー回折パターンの光強度分布はSINC関数の2乗として表される。鋭利な基準エッジと被測定面との間でスリットを形成し、回折縞の間隔または0次中心強度とスリット幅との関係を利用して、形状、撓み、振動、表面粗さ等の測定に応用されている<sup>1-3)</sup>。スリット開口の回折光強度を用いた反射率測定への応用例は報告されていない。反射率は入射角、光の偏光状態、物質の種類、表面粗さなどによって異なり、物体の光沢感と密接に関係することが知られている<sup>4,5)</sup>。従来の測定法では、入射角が大きくなると反射面積が広がるため、小さな表面の測定が困難であった。その欠点を克服するために、ナイフエッジと平坦な平面との間で形成したスリット開口による回折パターンの光強度によって入射角80°以上の反射率測定法を提案する。被測定面を光源側として平面の端をエッジ刃先と一致させ、傾斜した平行ビーム(傾斜角 $\phi$ )を照射した場合、スリットには傾き $\phi$ の直接光と平面において反射した傾き $\phi$ の反射光との2光束が入射するため、 $\pm\phi$ の2方向に0次の中心をもった2種類の回折パターンが観測面上に結像される。反射光

強度は平面の反射率に比例するので、直接光と反射光による回折パターンの0次中心強度比から反射率の測定が可能となる。測定値は直接入射光強度を基準とするため、標準反射面との校正が不要である。本測定法では、スリット幅が狭いので、入射角を大きくしても小さい試料表面の測定が可能であり、機械加工面のような粗面や低光沢面の反射率測定に有効である。基準エッジと被測定面双方の形状が鋭利でないスリット開口では、光源側の表面において反射した光線がスリットに入射し、観測面側の表面において回折角が接線より大きい光線は反射し干渉するために、理想的なスリット開口の回折パターンとは異なった強度分布となり測定値の線形性が失われることが知られている<sup>6-9)</sup>。本測定法では回折光相互の干渉によって測定誤差を生じるため、本論文においては回折パターンのシミュレーションによって、反射率測定の適用範囲と測定誤差を検討する。金属とプラスチック表面の反射率測定によって、測定原理の妥当性を述べる。

### 2. 測定原理

ナイフエッジの刃先と平坦な試料平面との間で形成したスリット開口の光学系をFig.1に示す。ナイフエッジの刃先は紙面に垂直であり、試料平面に平行である。座標原

E-mail: tmjfuka@ipc.shizuoka.ac.jp

点Oをスリットを中心にとり、スリット面と観測面とは平行であり、それぞれの縦軸を $\eta$ および $y$ で表す。横軸 $z$ はスリット面に垂直で、試料平面と平行とし、観測面の位置を $z=f$ とする。スリット照射光を平行な平面波とし、その傾斜角を $-\phi$ で表す。平面に対する入射角は $\pi/2-\phi$ となる。平面における反射は幾何学的であり、乱反射は発生しないものとする。その場合、反射光は傾き $\phi$ の平行光線となる。以後スリットに入射する直接光を入射ビーム、反射光を反射ビームと呼ぶ。照射光線③が平面上で反射した光線がナイフエッジ刃先と一致する反射点Qの座標を $z=-L$ とすると、

$$L = w / \tan \phi \quad (1)$$

となる。ここで $w$ はスリット幅(ナイフエッジ刃先と平面との間隔)である。スリット面における入射ビームおよび反射ビームの光路差は幾何学的に計算できる<sup>10)</sup>。それぞれの光の振幅を $u_i$ ,  $u_r$ で表すと

$$u_i = u_0 \exp\{i(-k\eta \sin \phi)\} \quad (2)$$

$$u_r = u_0 r \exp\{i(k\eta \sin \phi + \theta)\} \quad (3)$$

となる。ここで、 $u_0$ はスリット面における光源の振幅、 $k (=2\pi/\lambda)$ は波数、 $\lambda$ は光の波長、 $r$ は平面の振幅反射率、 $\theta$ は反射による位相変化である。入射ビームと反射ビームの観測面における回折光の振幅は、フラウンホーファ一近似による回折積分によって

$$u(y) = u_0 \int_{-\infty}^{\infty} g(\eta) \exp\{i(k\eta(\frac{y}{f} - \sin \phi))\} d\eta + u_0 r \int_{-\infty}^{\infty} g(\eta) \exp\{i[k\eta(\frac{y}{f} + \sin \phi) + \theta]\} d\eta \quad (4)$$

と表される。ここで、 $g(\eta)$ は開口関数であり $-w/2 < \eta < w/2$ において $g(\eta)=1$ 、 $\eta > |w/2|$ では $g(\eta)=0$ である。回折パターン<sup>11)</sup>の光強度分布 $I(y)$ は $u(y) \cdot u^*(y)$ として計算される。ここで、 $u^*(y)$ は $u(y)$ の複素共役である。 $I(y)$ は、 $r < 1$ であるから、第1項と第2項とは $y$ 軸に関して非対称となる。反射率の測定原理を示すために、回折光相互の干渉がないものと仮定して、光強度を第1項と第2項を個々に積分した和として近似する。

$$I(y) = I_{-\phi} \left| \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right|^2 + I_{\phi} \left| \frac{\sin \beta}{\beta} \right|^2 \quad (5)$$

ここで、 $I_{-\phi} = (u_0 w)^2$ 、 $I_{\phi} = (u_0 r w)^2$ 、 $\alpha = kw/2(y/f - \sin \phi)$ 、 $\beta = kw/2(y/f + \sin \phi)$ である。式(5)の右辺第1項は入射ビームによる強度分布を表し、第2項は反射ビームによる強度分布を表す。 $I_{-\phi}$ および $I_{\phi}$ は $\alpha=0$ 、 $\beta=0$ における回折パターンの0次の最大強度である。 $I_{-\phi}$ および $I_{\phi}$ の座標をそれぞれ $P_1$ および $P_2$ とすると、 $P_1 = -f \tan \phi$ 、 $P_2 = f \tan \phi$ となる。 $r < 1$ により、 $I_{-\phi} > I_{\phi}$ となる

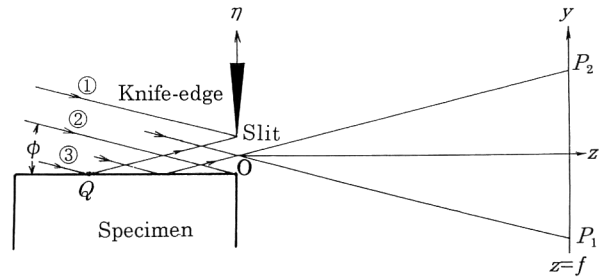


Fig. 1. Coordinates and an oblique incident optical system.

ため、第1のピーク値を $I_{1p}$ 、第2のピーク値を $I_{2p}$ として表すと(ただし入射ビームによる1次のピーク値が反射ビームによる0次のピーク値より小さい場合)、 $I_{1p}$ と $I_{2p}$ との比は $I_{2p}/I_{1p} = R (=r^2)$ となる。したがって、回折パターンの第1と第2のピーク値の比から強度反射率(以後単に反射率と呼ぶ) $R$ が求められる。式(5)によって $R$ を近似できるのは、第1項と第2項の回折パターンが十分離れているか、または相互の干渉がない場合である。しかし、干渉を考慮すると回折パターンの第1と第2のピーク位置とピーク強度は式(4)の値とは異なるため、第1と第2のピーク値の比から求めた反射率には系統誤差を含むことになる。その他、試料端面とナイフエッジ刃先との位置合わせ、照射ビームの強度分布などによって測定誤差を生じる。そのため、本測定法の適用範囲と測定精度を以下に検討する。

## 2.1 回折光相互の干渉

本測定法では、入射角が大きい( $\phi$ が小さい)場合、回折パターンの0次ピーク間隔が接近し、スリット幅が狭いと強度分布が広がるため、2つのピークが重なり回折パターンが1種類になると測定不能となる。また2つのピークが識別できても、回折光相互の干渉によってピーク値の比は反射率に比例しなくなる。そのため、干渉の影響が実用上許容できる測定条件を知る必要がある。式(4)において傾斜角 $\phi$ および振幅反射率 $r$ を定数、スリット幅 $w$ を変数として $I(y)$ をシミュレーションした第1と第2のピーク強度比から求めた反射率と理論値( $R=r^2$ )との差を相対誤差 $\Delta R/R$ として表す。入射角がブリュースター角を超すと反射率の偏光依存性が顕著となるので、偏光方向によって反射率を変化させるために、実験では照射光を直線偏光とする。反射における位相変化は、s偏光では $\theta = \pi$ 、p偏光では $\theta = 0$ (入射角がブリュースター角より大きい場合、金属においても位相の変化はないものと仮定する)とする。測定誤差の評価において、スリット幅を変数として入射角の最大値を $89^\circ$ 、反射率の下限を0.64(入射

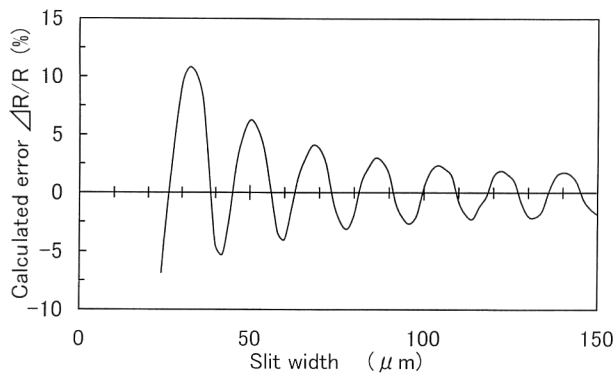


Fig. 2. Calculated relative error  $\Delta R/R$  at  $r=0.8$ ,  $\phi=-1^\circ$  as a function of  $w$ .

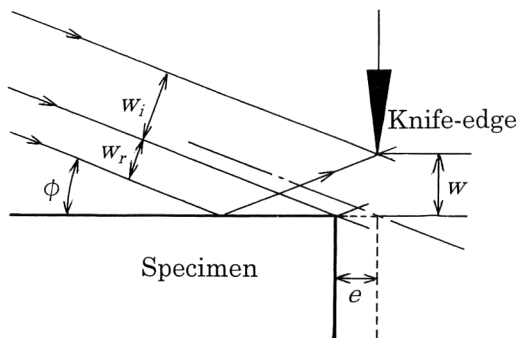


Fig. 3. Change of the incident beam width caused by the shift of the specimen.  $e$  is a distance between the specimen and a normal line of the knife-edge.  $w_i$  and  $w_r$  are the width of direct and reflected incident beam, respectively.

角が大きいのので  $r=0.8$  を選んだ) とする。式(4)において  $\phi=-1^\circ$ ,  $r=0.8$ ,  $f=150$  mm,  $\theta=\pi$  (s 偏光) として  $I(y)$  をシミュレーションしたピーク強度比から相対誤差  $\Delta R/R$  の計算結果を Fig. 2 に示す。 $\Delta R/R$  は  $w$  に対して周期的に減少している ( $\theta=0$  の場合, 減衰曲線の位相は異なるが, その振幅はほぼ同じ値である)。  $w < 22$   $\mu\text{m}$  では, 回折パターン<sup>1)</sup>の0次のピークは1つとなり  $\Delta R/R$  は不定となる。 $\Delta R/R$  の許容値を  $\pm 2\%$  とすると, スリット幅は  $w > 100$   $\mu\text{m}$  とすればよいことがわかる。 $\Delta R/R=0$  となる  $w$  の値は測定条件によって変化するので特定できないが,  $\Delta R/R$  は  $w$  に対して正負に変化している<sup>1)</sup>ので,  $w$  を変化させ  $R$  の最大と最小の平均をとれば測定誤差を低減できる。 $w=100$   $\mu\text{m}$  におけるピーク間の回折縞数は4となるので, 実験に際してはピーク間の縞数を目安にスリット幅を調節すればよいことになる。同じスリット幅でも  $\phi$  が解析例より大きくなれば, ピーク間隔が大きくなり回折光相互の干渉が小さくなるため, 反射率の測定範囲は広がる。

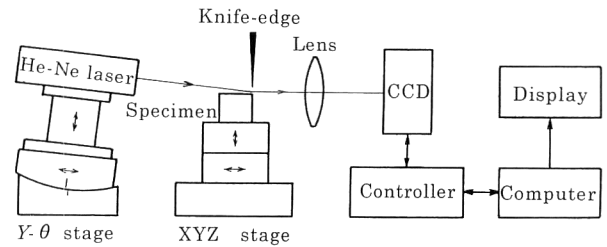


Fig. 4. Experimental arrangement for the measurement of light reflectance.

## 2.2 試料の位置ずれ

試料端の位置ずれと入射ビーム幅との関係を Fig. 3 に示す。 $e$  (光源側を+) はナイフエッジ先端から下ろした垂線と試料端面との間隔,  $w$  はスリット幅である。図において照射光線に垂直な入射ビーム幅  $w_i$  は  $w \cos \phi + e \sin \phi$ , 反射ビーム幅  $w_r$  は  $w \cos \phi - e \sin \phi$  となる。したがって, 試料端面の位置ずれによって入射ビーム幅と反射ビーム幅が異なる。回折パターン<sup>1)</sup>の0次中心強度は光軸方向から見たスリット幅の2乗に比例するため,  $w=100$   $\mu\text{m}$ ,  $e=5$   $\mu\text{m}$ ,  $\phi=10^\circ$  とすると (ただし, 照射光の強度分布は均一とする), 第2の0次ピーク強度は第1のピーク強度に対して96.5%に低下する。したがって, 試料の位置ずれによって反射率は-3.5% (+ $e$  では3.5%) 小さくなる。位置ずれによる測定値への影響は前述の系統誤差に匹敵する大きさであるため, 試料の初期位置の調整が重要である。

## 2.3 照射光の強度分布

実験に使用する He-Ne レーザーは  $\text{TEM}_{00}$  の gaussian ビームであるため, ビーム径が小さい場合, ビームの中心位置がずれるとスリットおよび試料表面を照射するビームの強度分布が異なる。そのため, 均一な強度分布の平面波の場合と比較して反射率が異なった値となる。照射ビーム幅はスリット幅の約2倍 ( $2w \cos \phi$ ) であり, gaussian ビームの中心が照射光線<sup>2)</sup> (Fig. 1) と一致した場合, 強度分布の影響は相殺される。gaussian ビームの影響を避けるためには, 強度分布が一定とみなせる程度にビーム径を拡大する必要がある<sup>1)</sup>。

## 3. 実験装置

実験装置の概略を Fig. 4 に示す。スリットはナイフエッジ刃先と試料表面との間で形成される。スリット照射光源は  $\text{TEM}_{00}$  のガウス型強度分布をした安定化 He-Ne レーザー (ビーム径 0.5 mm,  $\lambda=632.8$  nm, レーザー出力 1 mW) である。照射光の傾斜角  $\phi$  は  $0 \sim -10^\circ$  の範囲を可変でき, 光源を上下に移動してビーム中心をスリット中

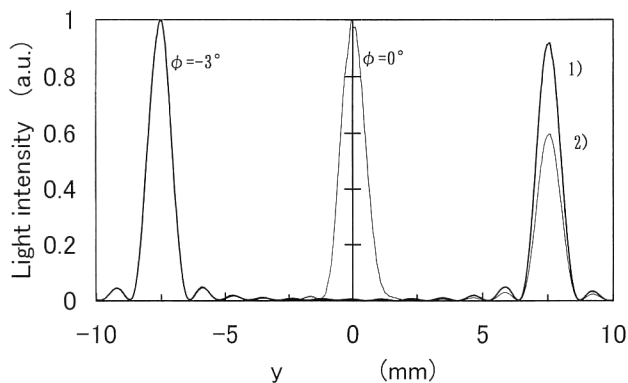


Fig. 5. Measured diffraction patterns for a block gauge's surface with linearly polarized light at  $w=80\ \mu\text{m}$ ,  $\phi=0$  and  $-3^\circ$ . Thick line shows that of s-polarized light. Thin lines show those of p-polarized light.

心に合わせることができる。光路に偏光子 P を挿入して偏光方向を変化させる。ナイフエッジ刃先と試料端面との位置合わせとスリット幅の設定は 3 次元微動台により調節できる。スリットを焦点としたフーリエ変換レンズの後焦点面に CCD イメージセンサー (浜松ホトニクス製, S 7010-1006) を配置して回折光強度分布を検出する。回折パターンが CCD の測定範囲に入るような焦点距離のレンズを用いる。コントローラにおいて光電変換された電圧信号はパーソナルコンピュータにおいて画像信号に処理され、ディスプレイに回折パターンを表示する。

#### 4. 実験および結果

測定試料としてブロックゲージ (鏡面加工面), アルミニウム (フライス加工面) およびアクリル樹脂を用いる。直線偏光の向きは入射面に対して p 偏光と s 偏光とする。反射率は回折パターンの第 1 と第 2 のピーク強度比から求める。

Fig. 5 はブロックゲージ (20 mm, A 級鉄製) の測定面 ( $7\times 35\ \text{mm}^2$ ) を  $w=80\ \mu\text{m}$ ,  $f=150\ \text{mm}$ ,  $\phi=0^\circ$  および  $-3^\circ$  とした場合の回折パターンの測定例である。 $\phi=0^\circ$  の場合, スリットに対して垂直入射であるため, 回折パターンは 1 種類であり, 反射率の測定は不能となる。 $\phi=-3^\circ$  の場合, 回折パターンは 2 種類となり 0 次のピーク位置は  $\pm 7.8\ \text{mm}$  となる。実線 1) は s 偏光, 細線 2) は p 偏光による強度分布である。s, p 両偏光の照射光強度は異なるが第 1 のピーク値を 1.0 として描いた。第 1 のピーク ( $y<0$ ) は主として入射ビーム, 第 2 のピーク ( $y>0$ ) は反射ビームによって形成されたものである。反射ビームによる回折パターンの 0 次から  $\pm 2$  次までを除くと, 反射率が異なってもほぼ同じ強度分布となっている。第 1 と第 2

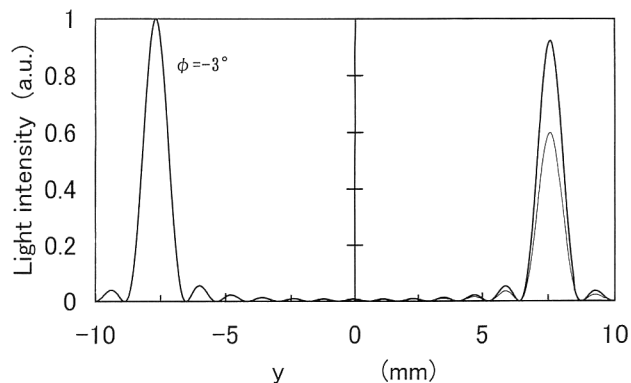


Fig. 6. Simulated diffraction pattern using measured reflectance in Fig. 5.

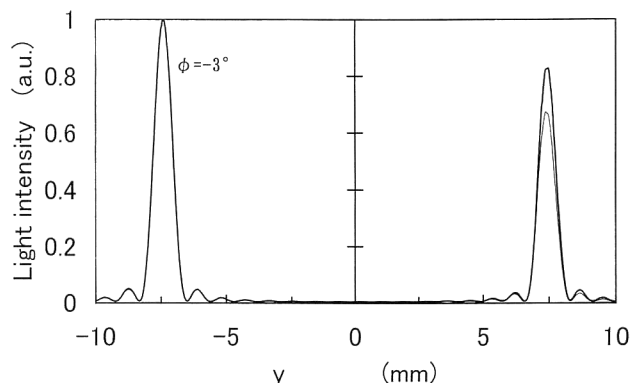


Fig. 7. Measured diffraction patterns for milling turned surface (Aluminum) at  $w=100\ \mu\text{m}$ ,  $\phi=-3^\circ$ . Thick line shows that of s-polarized light. Thin line shows that of p-polarized light.

のピーク値の比から入射角  $87^\circ$  の反射率は  $R_s=0.93$ ,  $R_p=0.60$  として求められる。第 1 と第 2 のピーク間において, 高次のパターンの数は 11 現れているので回折光の干渉は小さいことがわかる。照射光の試料平面における反射面の長さは式 (1) から  $1.9\ \text{mm}$  となる。照射ビームの横幅は約  $1\ \text{mm}$  であるため, 表面積  $1.9\ \text{mm}^2$  の反射率を測定したことになる。反射率の測定値を用いて, 式 (4) によってシミュレーションした回折パターンを Fig. 6 に示す。実線は  $\theta=\pi$ , 細線は  $\theta=0$  とした強度分布であり, 形状とピーク強度は実測値とよく一致していることから, シミュレーションが妥当であることがわかる。実験値に対する相対誤差  $\Delta R/R$  の計算値は,  $R_s$  は  $\pm 0.3\%$ ,  $R_p$  は  $\pm 0.2\%$  であり, 回折光の干渉は小さいことがわかった。

Fig. 7 は正面フライスによるアルミニウム (A 1050 P,  $20\times 35\ \text{mm}^2$ ) の切削面 ( $R_y=0.2\ \mu\text{m}$ ) を  $w=100\ \mu\text{m}$ ,  $f=150\ \text{mm}$ ,  $\phi=-3^\circ$  とした場合の回折パターンの測定例である。実線は s 偏光, 細線は p 偏光による強度分布である。第 1 と第 2 のピーク値の比から入射角  $87^\circ$  の反射率は

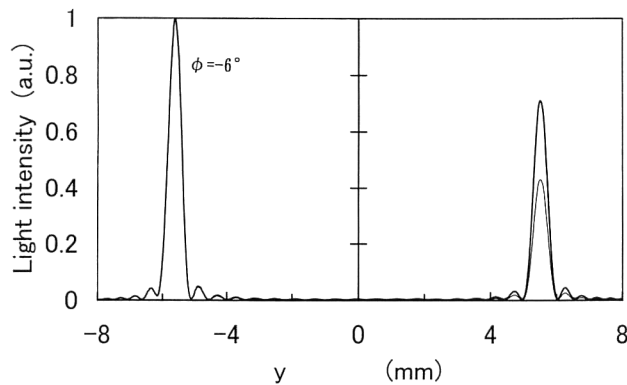


Fig. 8. Measured diffraction patterns for a plastics surface (acrylic resin) at  $w=80\ \mu\text{m}$ ,  $\phi=-6^\circ$ . Thick line shows that of s-polarized light. Thin line shows that of p-polarized light.

$R_s=0.82$ ,  $R_p=0.7$ となる。ピーク間の高次パターンの数は約16であり、回折光相互の干渉は小さいことがわかる。入射角 $84^\circ$ の反射率は $R_s=0.2$ であった。入射角が $90^\circ$ に近づくと反射率が大きくなることはシーン現象として知られていることと一致する。

Fig. 8は透明なアクリル樹脂 ( $35\times 35\ \text{mm}^2$ ,  $n=1.488$ )を  $w=80\ \mu\text{m}$ ,  $f=50\ \text{mm}$ ,  $\phi=-6^\circ$ とした回折パターンの測定例である。実線はs偏光, 細線はp偏光によるパターンである。屈折光の裏面からの反射光は端面から観測方向に出射しないようにして測定した。第1と第2のピーク値の比から入射角 $84^\circ$ の反射率は $R_s=0.71$ ,  $R_p=0.43$ となる。ピーク間中央のパターンは明瞭でないがその数は約17であるので、回折光の干渉による誤差は縞数から逆算すると1%以下となる。フレネルの公式による反射率の計算値は、 $R_s=0.69$ ,  $R_p=0.43$ となる。また偏光ビームを直接照射する従来の方法によって測定した入射角 $84^\circ$ の反射率は $R_s=0.70$ ,  $R_p=0.43$ であった。したがって、本測定法では反射率の絶対値が得られることがわかる。 $R_s$ に関する測定値が異なったのは実験装置の調整に由来する誤

差の範囲と考えられる。

## 5. ま と め

斜め入射光による回折パターンの第1と第2のピーク強度比を用いた反射率の測定法を提案した。反射率測定の適用範囲(入射角の最大値 $89^\circ$ , 反射率 $R>0.64$ )において、スリット幅を $w>100\ \mu\text{m}$ とすれば干渉による相対誤差 $\Delta R/R$ は $\pm 2\%$ 以内となる。金属およびプラスチックの試料表面の反射率を測定し、所期の結果が得られた。プラスチック試料では反射率の実測値がフレネルの公式による計算値と一致したことから、反射率の絶対値が得られることが実証された。

## 文 献

- 1) T. R. Proyor, O. L. Hageniers and W. P. T. North: "Diffractographic dimensional measurement, Part 1 and Part 2," Appl. Opt., **11** (1972) 308-318.
- 2) 深谷次助, 佐々木彰: "スリット開口のFraunhofer回折による旋削面粗さ測定", 精密工学会誌, **51** (1985) 835-840.
- 3) 深谷次助, 佐々木彰, 見山信行, 青山尚之: "スリット開口幅の大振幅振動法による旋削面粗さ測定", 光学, **22** (1993) 702-706.
- 4) 蓮沼 宏: 光沢 (コロナ社, 東京, 1960).
- 5) 広野雅道, 角田一行: "アルミニウム合金の旋削仕上面光沢", 軽金属, **33** (1985) 581-587.
- 6) 深谷次助, 佐々木彰, 松田裕之, 青山尚之: "スリット開口によるFraunhofer回折像の反射光の影響", 精密工学会誌, **59** (1993) 1555-1559.
- 7) J. Fukaya, A. Sasaki, Y. Matsuda and H. Aoyama: "Fraunhofer diffraction pattern by a slit aperture between a knife edge and a metal cylinder," Opt. Rev., **2** (1995) 139-143.
- 8) J. Fukaya, A. Sasaki, Y. Matsuda and H. Aoyama: "Fraunhofer diffraction of a slit aperture between a knife-edge and a metal cylinder," Appl. Opt., **34** (1995) 7820-7824.
- 9) Yu. V. Chugui and B. E. Krivenskov: "Fraunhofer diffraction by volumetric bodies of constant thickness," J. Opt. Soc. Am. A, **6** (1988) 617-626.
- 10) H. Towne: *Wave phenomena*, Sect. 12 (Addison Wesley, London, 1967) p. 276-277.