



## 輪帯幅が等しいフレネルレンズ

川崎 春水

旭光学工業(株)技術開発センター 〒174 東京都板橋区前野町 2-36-9

(1987年10月14日受理)

### Fresnel Lens with Equally Divided Width of Rings

Harumi KAWASAKI

Research and Development Center, Asahi Optical Co., Ltd.,  
2-36-9, Maeno-cho, Itabashi-ku, Tokyo 174

A new type of Fresnel lens with equally divided ring width over a whole aperture is proposed. A design of sawtooth shaped sections, light intensity distributions in the focal plane for both normal and oblique incidences, variations of diffraction efficiencies with ring widths, and polarization effects of the image are described.

#### 1. はじめに

近年、光ディスクやレーザープリンター等の光学的情報処理装置が実用化されるに伴って、種々のマイクロレンズの研究や試作が相次いで報告されている<sup>1)</sup>。このうち、通常のマイクロフレネルレンズは鋸歯状断面を有する多数の同芯輪帯から成り、輪帯幅が外周にいくほど小さくなるようなフレネルゾーンプレート状のブレース格子である。現在、報告されている通常のマイクロフレネルレンズの一例を挙げると、開口数 0.13, 焦点距離 20 mm, レンズ半径 2.6 mm, 楔高さ 1.6 μm (一定), 使用波長 780 nm の人工樹脂製レンズがある<sup>1,6)</sup>。このレンズは輪帯数  $M$  が約 220, 輪帯幅はレンズ外周で約 6 μm であり、楔角は外周にいくほど大きくなる。その開口数をさらに大きくすると、輪帯数が加速度的に増加し、輪帯幅も 1 μm 以下になり、また、楔角が屈折の臨界角を超えてしまう。したがって、超微細加工といえどもその限界があり、開口数の大きなレンズは作れない。

そこで、レンズの全開口にわたって輪帯幅を加工しやすい値 (たとえば 20 μm) に固定し、その鋸歯状断面の高さと楔角を輪帯ごとに決めるようなマイクロフレネルレンズを提案する。このようなレンズは、輪帯数が少なく、輪帯幅もかなり大きく、かつ一定であり、後述のように楔角も比較的小さいので、従来のものに比して作製が容易で、開口数の大きなレンズの製作も可能である。

ここでは、鋸歯状断面の設計方法、垂直、および斜入射光に対する像強度と有効視野角、および回折像の偏光成分について順次記述する。

#### 2. 楔角と高さの設計

マイクロフレネルレンズの楔面上の任意の点から焦点  $F$  に至る光路長が使用波長の整数倍になるように楔角を決めると、回折積分の位相項はレンズの全面にわたって一定になる。Fig. 1 に示すように、レンズの厚さを  $|t|$  とし、左方から垂直平行光により照明されているものとする。光軸上の点  $Q$  から焦点  $F$  に至る光路長と、任意の半径  $r$  上の一点  $P_1$  から楔面上の点  $P_2$  を経て焦点  $F$  に至る光路長の差  $\Delta l$  が波長の整数倍 ( $m\lambda$ ) となるように楔角と高さを決める。

$$\Delta l = nP_1P_2 + P_2F - QF = \sqrt{(f-t)^2 + r^2} + nt - f = m\lambda \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$ : 波長,  $m$ : 整数,  $f$ : 焦点距離,  $t$ : 楔の深さ,  $n$ : レンズ材質の屈折率, である。

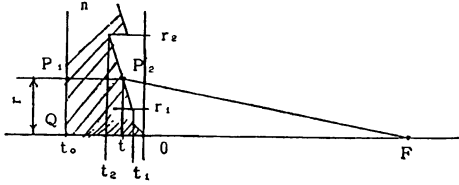
また、整数  $m$  は  $t=0$  のときの光路差  $\Delta l_0$  が  $m\lambda$  となるように決める。すなわち、

$$m = \text{INT}[(\sqrt{f^2 + r^2} - f)/\lambda], \quad (\text{INTは整数を表す})$$

式(1)から  $t$  を求めると、

$$t = -(b + \sqrt{b^2 - ac})/a \quad (2)$$

ただし、 $a = n^2 - 1$ ,  $b = -[m\lambda + (n-1)f]$ ,  $c = (m\lambda)^2 + 2m\lambda f - r^2$ .



**Fig. 1** Cross section of a micro-Fresnel lens showing how to calculate the optical path for a normal incidence. A ray is incident on P<sub>1</sub>, passing through the lens emerges from P<sub>2</sub> and arrives at the focus F.

**Table 1** Wedge heights:  $t_1, t_2$  ( $\mu\text{m}$ ) and wedge angle:  $\alpha$  ( $^\circ$ ).

$m$	$r_1$	$r_2$	$t_1$	$t_2$	$\alpha$
0	0	20	0.0	- 0.2	- 0.57
20	400	420	-0.2	- 7.9	-21.06
40	800	820	-0.1	-13.2	-33.22

このようにして決めた楔の高さ  $t$  は半径  $r$  に関して線形にならない (楔の断面が直線でない) ので、輪帯の内径  $r_1$ , 外径  $r_2$  のときの高さをそれぞれ  $t_1, t_2$  として次のように線形近似する。

$$t_a = (t_2 - t_1)(r - r_1) / (r_2 - r_1) + t_1 \quad (3)$$

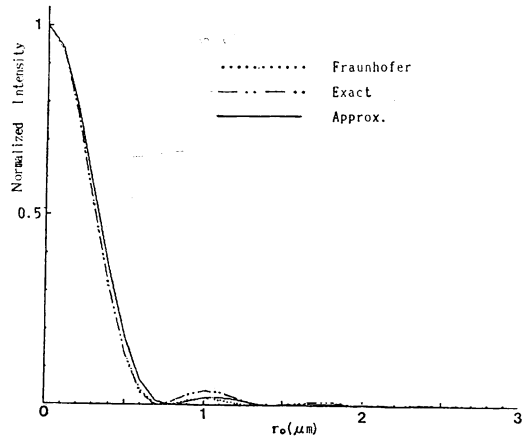
いま、数値例としてレンズの半径  $R_a = 820 \mu\text{m}$ , 焦点距離  $f = 2000 \mu\text{m}$ , 波長  $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ , 屈折率  $n = 1.5$ , 輪帯幅  $C_c = 20 \mu\text{m}$  とすると、輪帯数は  $M + 1 = 41$  個 ( $m = 0 \sim 40$ ) となる。

このレンズの半径  $r_1 = 0, 400, 800 \mu\text{m}$  における楔高さ  $t_1, t_2$  と楔角  $\alpha^\circ$  を **Table 1** に例示する。

このように、楔高さ、楔角はレンズの中心から外周に向かって、それぞれ、 $0.2 \sim 13.1 \mu\text{m}$ ,  $0.57 \sim 33.2^\circ$  と増加する。開口数は約 0.4 で、前述のごとき従来のフレネルレンズより大きいにもかかわらず、輪帯幅が大きく、輪帯数も著しく小である。楔高さは従来のフレネルレンズと異なり各輪帯ごとに変化する。一方、楔角が輪帯ごとに異なるのは従来のものと同じであるが、開口数が大きいにもかかわらず、楔角は比較的小さくまた臨界面を超えることはない。したがって、ここで提案するマイクロフレネルレンズは、これらの理由により、従来のものに比して微細加工がより容易であり、開口数の大きなレンズの製作も可能である。

### 3. レンズの回折強度分布と Fraunhofer 回折の比較

レンズ面  $\Pi$  が垂直な平行光により照明されていると



**Fig. 2** Diffraction images in the focal plane in the case of normal incidence. A solid line, a chain line and a dotted line correspond to an approximation (Eqs. (4), (5)), exact solution (using Eq. (2) instead of Eq. (3)), and Fraunhofer diffraction, respectively.

き、焦点  $\Pi_0$  上の一点  $P_3$  における複素振幅分布  $u(r_0, \phi, f)$  は次のようになる<sup>2)</sup>。なお、面  $\Pi, \Pi_0$  上の座標はそれぞれ極座標  $(r, \theta, z)$ ,  $(r_0, \phi, f)$  表示とする。

$$u(r_0, \phi, f) = -j/(2\lambda) \times \sum_{m=0}^M \iint (r/\rho)(1+f/\rho) \exp(jk\rho) dr d\theta \quad (4)$$

ここで光路長  $\rho$  は

$$\begin{aligned} \rho &= nP_1P_2 + P_2P_3 \\ &= n(t_a - t_0) + [(f - t)^2 + r^2] + r_0^2 \\ &\quad - 2rr_0 \cos(\theta - \phi)]^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

であり、楔高さ  $t_a$  は式(3)で表わされる。焦点  $\Pi_0$  における回折強度分布  $I$  は  $I = u \cdot u^*$  となり、**Fig. 2** の実線のような分布になる。

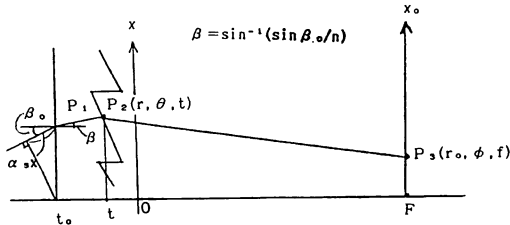
一方、式(5)の第一項の  $t_a$  の代わりに  $t$  を用いた場合の回折強度分布は二点鎖線で示す曲線となり、Fraunhofer 回折像 (点線) とよく一致することがわかる。

### 4. 斜入射平行光の場合

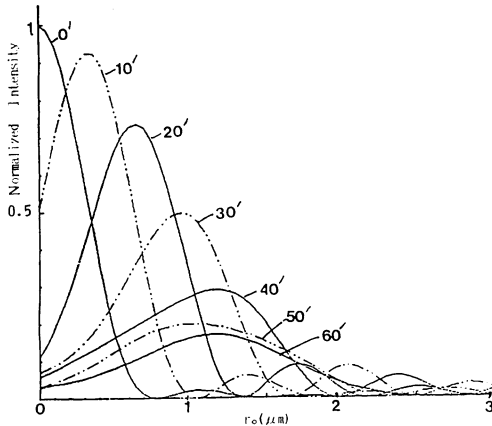
**Fig. 3** に示すように斜入射平行光の場合には、回折積分式(4)は次のようになる。

$$u_b(r_0, f) = -j/(2\lambda) \sum_{m=0}^M \iint (r/\rho)(\gamma_r + f/\rho) \times \exp(jk\rho) \exp(jk\alpha_s r \cos\theta) dr d\theta \quad (6)$$

ただし、 $\gamma_r = \cos \beta_0$ ,  $\alpha_s = \sin \beta_0$ 。この場合、光路長  $\rho$  は  $\rho = n(t - t_0)/\cos \beta + [r^2 + r_0^2 + (f - t)^2]$



**Fig. 3** Cross section of a micro-Fresnel lens showing how to calculate the optical path for an oblique incidence. A ray is incident on  $P_1$  with an oblique angle  $\beta_0$ , passing through the lens emerges from  $P_2(r, \theta, t)$  and arrives at the point  $P_3(r_0, \phi, f)$  on the focal plane.



**Fig. 4** Diffraction images along the  $x_0$  axis in the case of oblique incidence: Oblique angles range from 0 to 60 min. The origin of abscissa is chosen as  $(f \sin \beta_0, f \cos \beta_0)$ . The diffraction intensity decreases rapidly as an oblique angle increases because of a small image circle.

$$-2rr_0(\theta - \phi)]^{1/2} \quad (7)$$

式(4), (6)を比較すると inclination factor  $(1+f/\rho)$  が  $(\gamma_s + f/\rho)$  になり, 位相項に  $\exp(jk\alpha_s r \cos \theta)$  が付加されている。式(6)に基づく斜入射光の回折強度分布は **Fig. 4** のようになる。この図からわかるように Maréchal criterion を満たす有効視野角は  $\beta_0 = 16.5'$  であり, きわめて狭い。このようにマイクロフレネルレンズの欠点は開口数が多いほど有効視野角が小さいことである。NA=0.2 で  $\beta_0$  は約  $30'$ , NA=0.5 では約  $9'$  である。

### 5. 回折効率

垂直平行光照明の場合, レンズ焦点 ( $r_0=0$ ) における光強度  $I_0 = |u(0, f)|$  と Fraunhofer 回折像の中心強度

**Table 2** Light concentration:  $\eta$  (%) vs ring width:  $C_c$ .

$C_c$ ( $\mu\text{m}$ )	20	40	60
$\eta$ (%)	84.2	76.6	54.1

$(\pi a^2/\lambda f)^2$  ( $a$  は開口半径) の比を回折効率または集光率  $\eta$  とする。振幅変調型および位相変調型フレネルゾーンプレートの集光率はそれぞれ約 10, 40% と低い。これに対して輪帯幅の等しいマイクロフレネルレンズの集光率はさらに大きく, 明るいレンズといえる。式(4), (5)を用いてその集光率  $\eta$  を計算すると,  $r_0=0$  であるから,

$$\rho = n(t - t_0) + [(f - t)^2 + r^2]^{1/2}$$

$$u(0, f) = jk/2 \sum_{m=0}^M \int (\tau/\rho)(1 + f/\rho) \exp(jk\rho) dr$$

$$\eta = |u(0, f)|^2 / (\pi a^2 / \lambda f)^2 \quad (8)$$

となる。

いま, レンズ半径  $R_a = 820 \mu\text{m}$ , 焦点距離  $f = 2000 \mu\text{m}$  のフレネルレンズにおいて, 輪帯幅  $C_c$  を 20, 40, 60  $\mu\text{m}$  とした場合の集光率は **Table 2** のようになる。

また, これらのレンズの回折強度分布を **Fig. 5** に示す。

### 6. 回折光の偏光成分

開口数の大きなレンズでは回折光の偏光成分を無視することはできない。ここでは入射平行光は  $x$  軸方向の直線偏光であるとして, 焦点における回折像の偏光成分を計算する。

レンズにより屈折された回折光は, あらゆる方向に伝播する平行光が合成されたものと考えることができ, その複素振幅分布は開口関数のフーリエ変換成分になっている。いま, これら平行光のうち, 方向余弦ベクトル  $\sigma = i\sigma_x + j\sigma_y + k\sigma_z$  に沿って進行する平行光が有する偏光成分について考える。

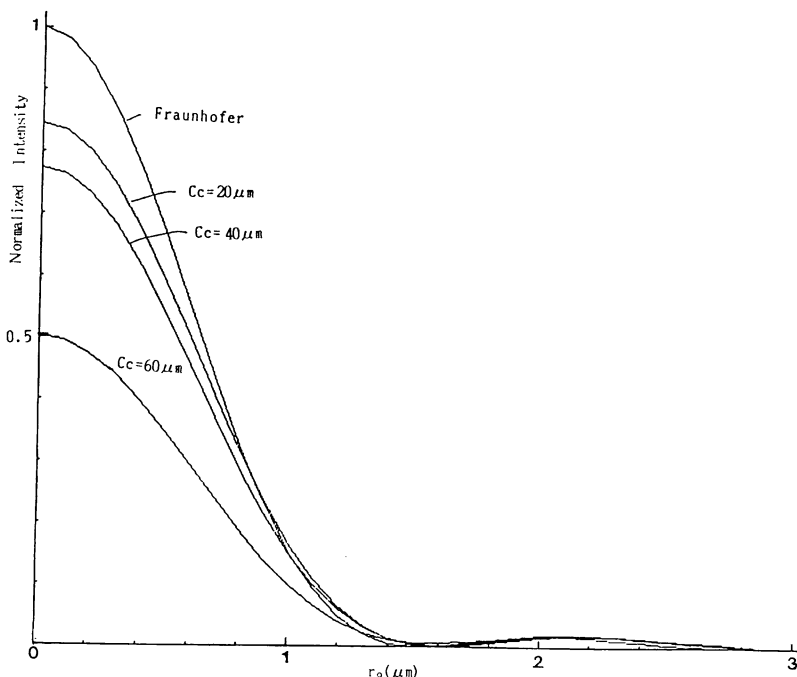
ベクトル  $\sigma$  と  $x$  軸が作る平面に垂直な  $s$  成分は屈折後も保存されるが, 入射波の  $p$  成分のこの平面への射影像は変化する。焦点における回折波の  $x, y, z$  偏光成分  $\Psi_x, \Psi_y, \Psi_z$  は文献3)により,

$$\Psi_x = (\sigma_x^2 \sigma_z + \sigma_y) / (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)$$

$$\Psi_y = -\sigma_x \sigma_y (1 - \sigma_x) / (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)$$

$$\Psi_z = -\sigma_x \quad (9)$$

となる。光路長  $\rho$  (式(5)) の第二項  $[ ]^{1/2}$  を  $\rho_1$  とし, 方向余弦:  $\sigma_x = (x_0 - x) / \rho_1$ ,  $\sigma_y = (y_0 - y) / \rho_1$ ,  $\sigma_z = (f - t) / \rho_1$  を用いて表現すると,



**Fig. 5** Intensity distributions in the focal plane for three ring widths. The effect of the ring width on the diffraction intensity is shown in comparison with that of a Fraunhofer diffraction.

$$\rho_1 = -(x\sigma_x + y\sigma_y) + \{x_0\sigma_x + y_0\sigma_y + (f-t)\sigma_z\} \quad (10)$$

となる。  $f(x,y) = (1/\rho)(1+f/\rho)\exp\{jkn(t-t_0)\}$  と置き、式(10)を式(4)に代入すると、回折積分(4)は次のようになる<sup>4)</sup>。

$$u_a(x_0, y_0, f) = (-j/2\lambda) \sum_{m=0}^M \iint \Psi_a \Delta T(\sigma_x, \sigma_y) \times \exp[jk\{x_0\sigma_x + \sigma_y + (f-t)\sigma_z\}] d\sigma_x d\sigma_y \quad (11)$$

ただし、 $\Delta T(\sigma_x, \sigma_y)$  は開口関数  $f(x,y)$  の Fourier 変換で、

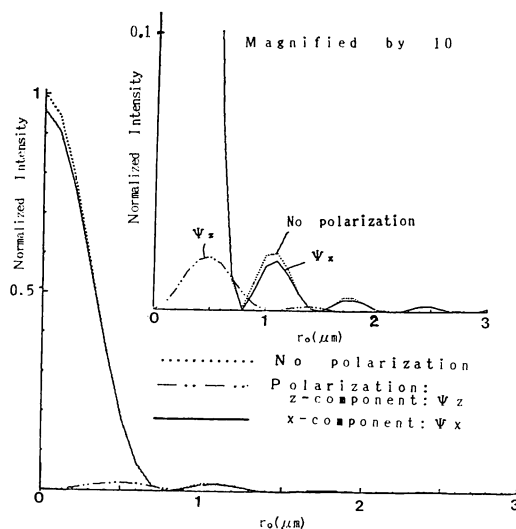
$$\Delta T(\sigma_x, \sigma_y) = f(x,y) \exp\{-jk(x\sigma_x + y\sigma_y)\} dx dy \quad (12)$$

である。添字 a は  $x, y, z$  のいずれかを表わしている。

式(11)により計算した焦点における回折光の  $x_0$  軸方向の偏光分布を **Fig. 6** に示す。  $\Psi_x \sim 1 - (r_0/f)^2/2$ ,  $\Psi_y \sim 0$ ,  $\Psi_z \sim -r_0/f$ , しかも  $\Psi_x \gg \Psi_z$  である。

### 7. おわりに

本文では輪帯幅が一定であるブレード回折格子としてのマイクロフレネルレンズの基本設計や諸特性の解析を行なった。適切な輪帯幅を選択することにより、回折強度分布を Fraunhofer 回折像として近似しうするため、



**Fig. 6** Distributions of polarized images along the  $x_0$  axis in the focal plane (Eqs. (11), (12)). The peak of  $\Psi_z$  occurs at  $r_0 = 0.5 \mu\text{m}$  and amounts to only 2% of that of the  $x$ -component:  $\Psi_x$ .

他の種類のマイクロレンズより高い集光率が得られ、また、偏光の影響を受けにくいことが判明した。

一方、斜入射特性を見ると、開口数が増すほど有効視野角が小さくなる欠点がある。このレンズはイメージサ

ーケルが小さいことから、中庸の開口数を有するコリメーターレンズとして利用しうる。マイクロフレネルレンズの製法としては EB 露光法<sup>5)</sup> や CNC 旋盤加工法<sup>6)</sup> があり、またレプリカ作製には射出成型法が挙げられる。

作製上の検討課題としては、レンズ性能の波長依存性、温度特性、実装、環境試験などが挙げられる。また、このレンズの特性を活かして、諸種レンズの部分的な位相補償が行なえるようなハイブリッド型光学素子の設計も可能であろう。いずれにしろ、今後作製技術の向上が望まれるところである。

## 文 献

- 1) 森 一成: “マイクロフレネルレンズ”, 光学, **16** (1987) 52-57.
- 2) A. Papoulis: *Systems and Transforms with Applications in Optics* (McGraw-Hill, New York, 1968) pp. 309-312.
- 3) M. Mansurpur: “Distribution of light at and near the focus of high-numerical-aperture objectives,” J. Opt. Soc. Am. A, **3** (1986) 2086-2089.
- 4) 小瀬輝次, 斉藤弘義, 田中俊一, 辻内順平, 波岡 武(編): 光工学ハンドブック, 初版 (朝倉書店, 東京, 1986) pp. 242-243.
- 5) 藤田輝男, 西原 浩, 小山次郎: “電子ビーム描画作製によるブレース化マイクロフレネルレンズ”, 電子通信学会論文誌 (C), **J66-C** (1963) 85-91.
- 6) 森 一成, 高橋俊介, 樋口義則, 後藤顕也: “高回折効率グレーティングレンズ”, Microopt. News, **3** (1985) 293-298.