

## 振幅フィルターを用いた回折実験

朝倉利光・菊池恭孝

光学系の開口での光の振幅分布を変えることで、回折像の性質が決定される。ここでは著者の提案による特別な振幅フィルターによる回折像強度分布の理論的考察を行ない、次いでそのフィルターを実際に製作し、それを用いた実験結果を報告する。

### 1. 緒言

回折現象に伴う光学像の劣化を改良する方法にフィルターリングの技術がある。光学系の開口上で位相、振幅分布を変えることで、回折像の性質が決定されることはよく知られている。適当な複素透過率を有するものを出射瞳に入れ、結像特性を希望のものにする研究は、apodization（本来の意味は高次回折像を除去することであるが）という名で盛んに行なわれてきた<sup>1)</sup>。実際には、金属の薄膜や非金属をレンズ上に蒸着させるとか、特別なフィルターを用いるとかして実現される。ここでは著者の一人（朝倉）<sup>2)</sup>が理論的に研究してきた不均一な振幅分布を有するフィルターを用いた場合の回折像の変化状態を理論的に解説し、次にこのフィルターを製作し、それを用いての回折実験に焦点を合わせて報告する。

### 2. 理論

#### (1) 振幅フィルター

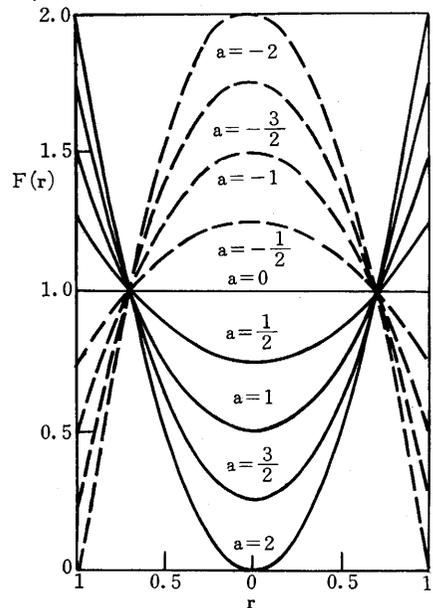
ここで提案する振幅フィルターは、apodizationの本来の意味である高次の回折像を除去することのほかに、回折像の中心強度をある程度高く保つことや、Rayleighの意味の分解能の増加を計ることを目的とするものである。このための振幅フィルターとして

$$F(r) = ar^2 + \left(1 - \frac{a}{2}\right) \quad (1)$$

という放物線の瞳関数を選ぶ（極座標を用いてある）。ただし  $a$  は  $-2 \leq a \leq 2$  の範囲の常数である。この瞳関数を図にすると、第1図のようになる。したがって  $a$  が正のときの(1)を正の振幅フィルターと名づけ、負のときを負の振幅フィルターと呼ぶ。この振幅フィルターを選び研究することに、次のようないくつかの基本となる重要な理由がある。

第1にフィルターリングの研究に使われてきた種々の形の瞳関数は、大なり小なり(1)の  $a$  をいろいろに変えた場合に近い。第2に開口上で不均一な振幅分布をもつ場合の回折像の計算は、一般に解析上からも数値計算からもむずかしいが、この場合はいずれも比較的容易で

ある。第3にフィルターリングの操作を行なうと、回折像の中心強度（または Strehl definition ともいう）が低下するのが常である。しかし中心強度をできるだけ高く保ち、その他の目的にかなうような開口上の振幅分布を与える瞳関数を求めることがフィルターリングの理想と



第1図 振幅フィルターの形態

するところである。(1)を用いると、 $a$  に無関係に中心強度は一定である。すなわち、不均一な開口上の振幅分布の場合にも、均一な場合と同様な Strehl definition を与えてくれる。第4に開口から出る光量が一定に保たれている。一般に振幅フィルターを使うと、場合に応じて光量が変化するが、この場合は  $a$  の値のいかんにかかわらず同じである。

以上のような特色を有するこの振幅フィルターを用いることは実用的に効果的であるばかりでなく、フィルターリングと各種収差の許容量との関係、回折像の焦点近傍全体の強度分布が振幅フィルターを用いることにより、いかに変化するか等を見ることが可能である。

(2) 焦点面上の回折像

フランクホーファ回折像は瞳関数のフーリエ変換として、次式

$$U(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} F_s(p, q) e^{2\pi i (px+qy)} dpdq \quad (2)$$

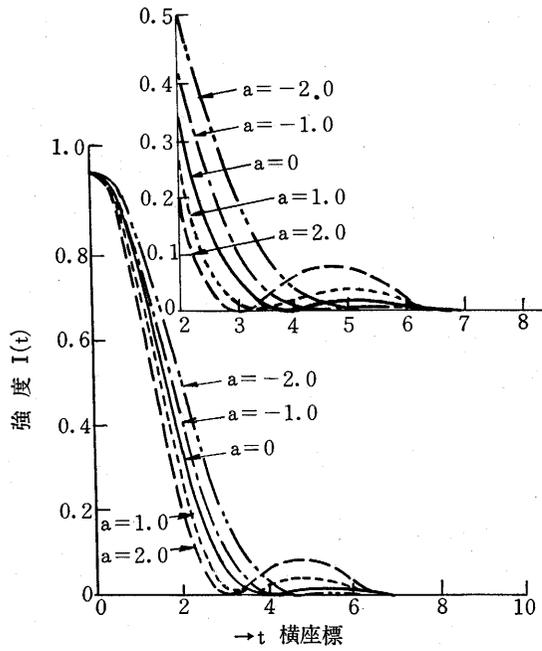
で与えられ、 $F_s(p, q)$  は焦点移動の項を含んだ瞳関数である。もし中心対称な光学系を仮定し、かつ焦点面上 ( $s=0$ ) の回折像を求めると、次式のようになる

$$U(t) = 2 \int_0^1 F(r) J_0(tr) r dr \quad (3)$$

ここで直角座標のかわりに極座標を用い、中心強度が1になるように正規化してある。振幅フィルター (1) を用いた場合の回折像強度分布を求めるため、(1) を (3) に代入して計算すると

$$I(t) = |U(t)|^2 = 4 \left| a \left\{ \frac{t^2-4}{t^3} J_1(t) + \frac{2}{t^2} J_0(t) \right\} + \left( 1 - \frac{a}{2} \right) \frac{J_1(t)}{t} \right|^2 \quad (4)$$

となる。この分布を示したのが第2図である。この図からわかるように、正のフィルターの場合には  $a$  が増加するにしたがって回折像の第1極小点が中心に寄り、Rayleigh の意味の分解能が上がる。しかしこの場合は高次の回折像に光量が流れ、それらを強めている。次に負のフィルターの場合には、 $a$  が負に大きくなると中央の回折像の径が広がり、中心部分に光量が集中し、高次の回折像が除去される。すなわち apodization の本来の目的が達成される。



第2図 焦点面における回折像強度分布

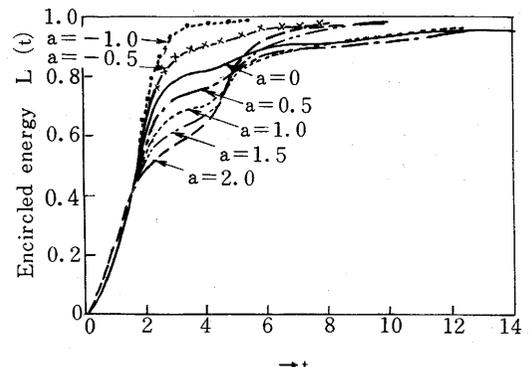
フィルターリングにおいて最も注意を向けるのは、フィルターリングを行なった場合の回折像面の強度分布であり、特に回折像中心付近の強度である。もちろん第2図の回折像強度分布を見れば大体見当はつくが、開口を通った一定の光量が回折像中心付近に全体の強度の何割が集められているかなどの問題になると、単なる強度分布からは知ることができない。このような目的で回折像の中心から任意の半径のサークル内に集まる回折像強度の状態を簡単にわかるように強度分布を書き換えたのが encircled energy である。encircled energy は、回折像に分布する強度全体に対する像中心からある半径にある部分強度の割合として

$$L(t, a) = \frac{\int_0^t I(t) t dt}{\int_0^{\infty} I(t) t dt} \quad (5)$$

で与えられる。最も簡単な場合として、フィルターリングを行っていない円形開口の無収差光学系による encircled energy は [(4) 式で  $a=0$  とおき、それを (5) に代入して求める、

$$L(t) = 1 - J_0^2(t) - J_1^2(t) \quad (6)$$

となる。振幅フィルターをもたないときは ( $F(r)=1$ )、解析的に (6) のように encircled energy が求められるが、(4) のような強度分布をもつ場合には簡単に解析的に求められない。したがって数値積分を行なわねばならず、ここでは Gauss の数値積分法を用いた。この結果を図示したのが第3図である。この図から encircled energy がいかに振幅フィルターの形に依存しているか



第3図 Encircled energy

がわかる。 $a=0$  のときが (6) で示されたフィルターのない場合であり、このときの第1極小点  $t=3.832$  内に、光量の約 84% が入っている。 $a=2$  の場合は第1極小点がだいたい  $t=3.05$  であるが、この範囲内に入っている光量は約 57% に減少してしまう。 $2 > a > 0$  では、 $a$  が増加するにしたがって、第1極小点内に入っている光量が 84% から 57% の間で減少する。一方  $a=-2.0$  のときは、第1極小点  $t=5.2$  内にほぼ 100% に近い光

量が集まってしまう。このように負の振幅フィルターのときは、中心部分に光量が集まるので、外側の回折像に流れていくことがなく、 $t$  が大きくなっても encircled energy はあまり変わらない。

このように encircled energy の分布状態から、光量が回折像のどこに流れていくかがわかる。

### (3) 3 次元的回折像

次に (1) の振幅フィルターを用いた場合の 3 次元的回折像強度分布を求めてみよう。この場合には (2) が

$$U(s, t; a) = 2 \int_0^1 F(r) e^{i/2 a s r^2} J_0(tr) r dr \quad (7)$$

となり、これが焦点ずれ ( $s$  項) を含む 3 次元的回折像振幅分布の式である。

回折像強度分布は、(7) を使って

$$I(s, t; a) = |U(s, t; a)|^2$$

または

$$I(s, t; a) = 4 \left[ \int_0^1 F(r) \cos\left(\frac{1}{2} s r^2\right) \cdot J_0(tr) r dr \right]^2 + 4 \left[ \int_0^1 F(r) \sin\left(\frac{1}{2} s r^2\right) \cdot J_0(tr) r dr \right]^2 \quad (8)$$

となり、けっきょくこれを不均一振幅分布のパラメーター  $a$  の各場合について求めることになる。(8) は解析的に求めることが不可能であり、前節と同様に Gauss の数値積分法を用いて行なった [数値積分の詳細については、著者の論文<sup>2)</sup>を参考にされたい]。

このようにして求めた 3 次元的回折像強度分布の代表例として、 $a=2, 0, -2$  の場合を第 4 図に示す。これらの図で、 $s$  は光軸にそっての移動量 (受光面を変えることに相当する) を表わし (longitudinal defocusing parameter),  $t$  は受光面での光軸からのずれの量 (lateral displacement parameter) を表わしている。図の各線が強度の等高線を表わし、幾何光学的焦点 ( $s=t=0$ ) の強度を 100 に正規化してある。

均一な振幅分布 ( $a=0$ ) の場合の研究は、すでに Linfoot-Wolf<sup>3)</sup> により計算されているが、その結果とここでの著者の結果とを比較すると完全に一致する。このことは著者がここで用いた Gauss 数値積分法が回折像強度分布の計算に十分な精度をもつことがわかる。第 4 図を見てわかるように、フィルターリングの操作が焦点面 ( $s=0$ ) の強度を変える以上に、焦点付近の回折像の強度分布全体を大幅に変化させていることがわかり、今まではフィルターリングの影響を焦点面でだけ考えられたが、焦点付近全体の強度分布の研究の大切さがここに指摘されよう。

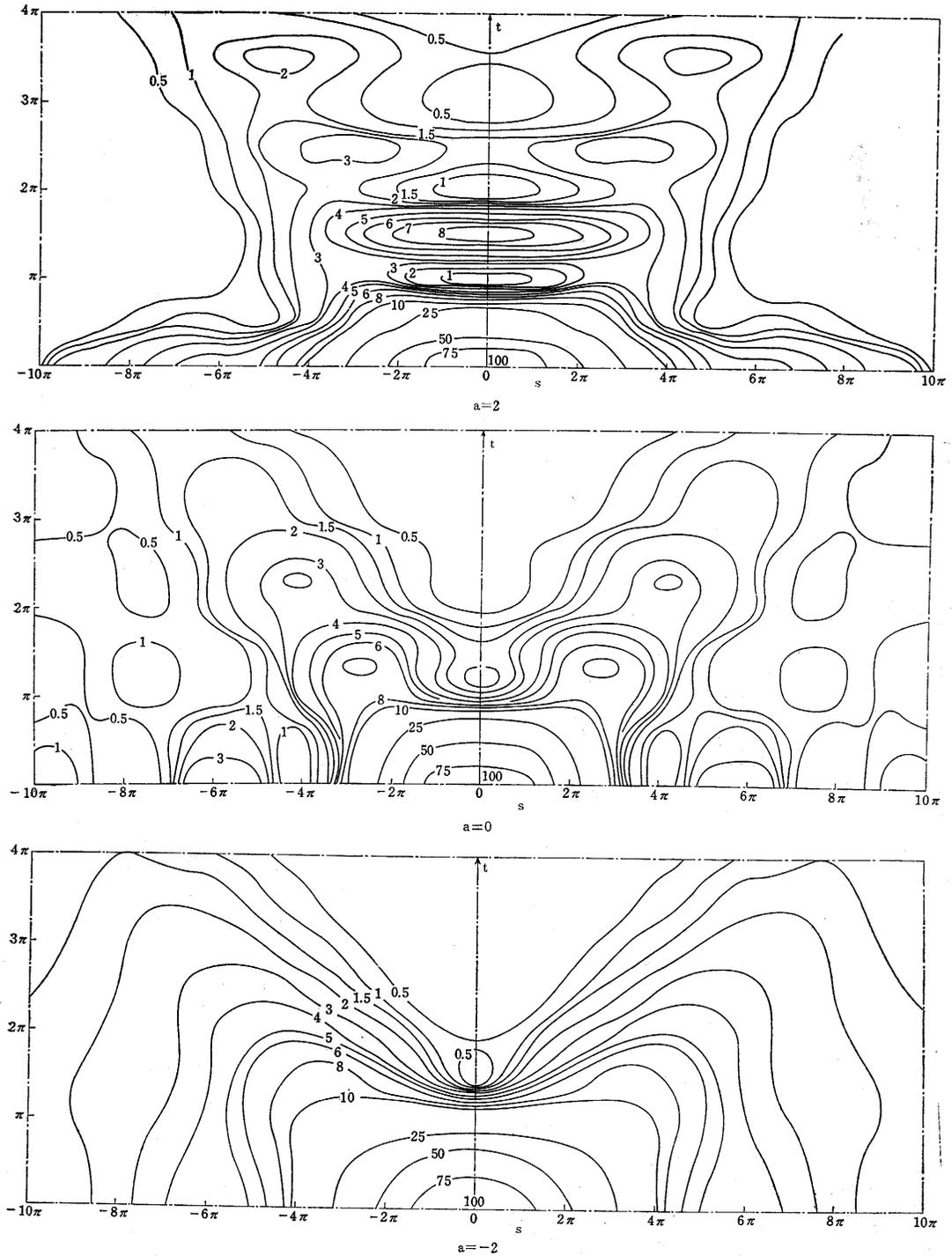
詳細に強度分布の変化をみよう。正の振幅フィルターの場合には、 $a$  が大きくなるにしたがって中央部分が光軸にそって ( $\pm s$  方向) 延びて、 $a=2$  では  $a=0$  のと

きの 2 倍くらいになっている。一方  $t$  方向には強度分布が圧縮され、焦点面 ( $s=0$ ) に強度が寄ってきている。すなわち強度分布は  $\pm s$  方向に引き延ばされ、 $t$  方向に圧縮され、かつこれらの強度は光軸方向と焦点面に集まってくる。このように正の振幅フィルターにより強度分布が光軸にそって大きく引き延ばされるので、焦点深度が深くなり、最良焦点での色収差による悪影響を除去することができる。正の振幅フィルターを用いると、 $a=0$  のときの回折像強度分布が圧縮されたような形を呈したが、負の振幅フィルターの場合には反対に強度分布が広がったような形になる。光軸にそっては、 $a$  が正のときと同様に  $a=0$  のときに比較して強度分布が引き延ばされ、 $a=-2$  では 2 倍くらいになる。焦点面 ( $s=0$ ) では、 $a$  が負に大きくなるにしたがって第 1 次極小値は外側にいくが、その第 1 次極小値内に強度分布が押し込められた形になる。しかし焦点面からずれた受光面 ( $s$  がある値をもつ) では、強度分布は光軸を離れるにしたがって徐々に大きく広がっていく。したがって高次回折像を除き、その上にボケを大きくさせたいようなときは、負の振幅フィルターを用い、それに焦点ずれを与えることでその役目を果たすことができる。

以上からわかるように、フィルターの影響は焦点面だけでなく、その近傍の回折像の様子を大幅に変えてしまう。このように振幅フィルターを用いた場合の 3 次元的強度分布の研究は著者<sup>2)</sup>(朝倉) が最初であるが、この点の重要性が認識され最近では Tschunko<sup>4)</sup> が発表した。朝倉<sup>2)</sup> はこの研究を一段と深めて、球面収差 (3 次と 5 次) が存在する場合についても、振幅フィルターを用いた 3 次元的強度分布を求めた。

### 3. 振幅フィルターの製作

前章で述べた振幅フィルターの実際の製作について記そう。一般にフィルターリングの方法には、金属の薄膜や非金属をレンズの上に蒸着させるとか、特別のフィルターを用いるとかして行なう。実用的には場合に応じて取換え可能な特別なフィルターを作ることが望ましい。一様な振幅透過率をもつフィルターを作るとは、薄膜の研究として古くから行なわれてきた。しかし場所によって不均一につけることは困難であったが、Strong<sup>5)</sup> は技術的に発展してきた真空蒸着法を用いて、凹状の球面鏡の表面に適当な Al 膜を蒸着させて放物化することに成功した。この方法ではある希望する形状の孔をあけた金属板のマスクを作り、その上に接近させて置いた凹面鏡を回転しながら Al 膜を蒸着する方法を取っている。その後 Schulz<sup>6)</sup> は Strong の方法を改良して、蒸着膜を Fresnel レンズ状に不連続化して有効的膜厚を増すことを試みた。この方法で彼は Fresnel 型 Schmidt 板を作ることができた。藤原<sup>7)</sup> は同様の方法により Fresnel



第 4 図 3 次元的回折像強度分布

型円錐面を用いた真直度測定装置の開発研究を行なった。ここでの振幅フィルターの製作も、Schulz と藤原の方法を参考にして行なった。蒸着膜をつける場合、膜厚が大きくなると cracking (膜内の stress で膜が破壊すること) や clouding (膜厚が増すと膜内微結晶により光を散乱させる現象) が生じるから、蒸着させる物質の最大

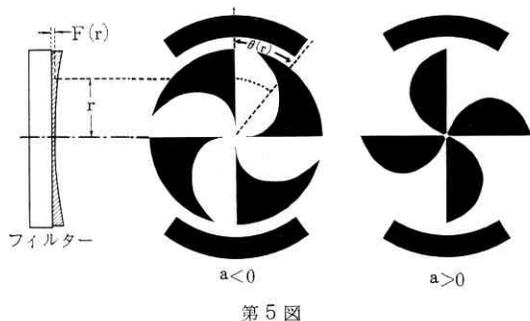
膜厚以下におさえるような蒸着条件で作ってやらなければならない。この最大膜厚は物質によりほぼ定まっており、たとえば Al では  $2\mu$ 、LiF では  $5\mu$  (屈折率 1.39)、 $MgF_2$  では  $2\mu$  (屈折率 1.38)、ZnS では  $10\sim 20\mu$  (屈折率 2.35) である。実際に丈夫な膜厚を作ることができるのは、上記の最大膜厚の 1/2 程度といわれる。した

がって、ここで製作した振幅フィルターには Al を用い、最大膜厚を  $1\mu$  ( $6000\text{ \AA}$  の光に対して) 程度におさえた。

(1) で与えられる振幅フィルターを作ることを考える。第 1 図のような振幅透過率を有するフィルターを作るためのマスクは次のようにして定められる。マスクの中心からの距離を  $r$  として、 $A(r)$  を要求する膜厚、 $\theta(r)$  をマスクの中心に対する開角、 $B(r)$  を蒸着物質による膜厚分布特性とすると、 $\theta(r)$  が

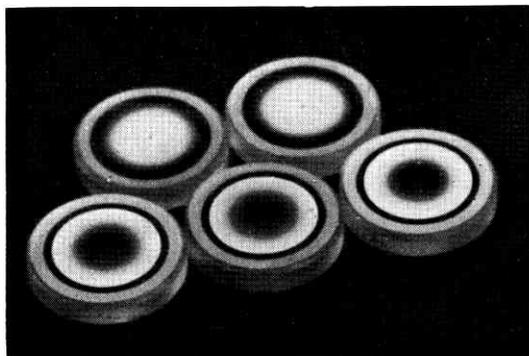
$$\theta(r) = \frac{A(r)}{B(r)} \quad (9)$$

を満足させる  $\theta(r)$  をきめてやればよい。 $B(r)$  は実験的に定められる。これを図にすると第 5 図のようになる。実際のマスクは、正確に (1) の対称性をもつ振幅フィルターを作るため四つ葉形に切り取った。フィルターの形を決めるパラメーター  $a$  によってマスクの形は第 5 図の右側の図のようになる。第 5 図のマスクを薄い金属板に作る (黒い部分を開ける)。



第 5 図

振幅フィルターを作るのに用いた真空蒸着装置の原理は、蒸着源の上に固定マスク (第 5 図) をおき、それにできるだけ近づけて平面ガラスを置く。蒸着膜をつけるときは、平面ガラスを真空槽外にあるモーターで回転させる。対称性を維持するため、回転速度はできるだけ一様にしてある。このようにして作った振幅フィルターが第 6 図である。中央部分が明部になっているものは正のフィルター、反対のものが負のフィルターである。膜厚

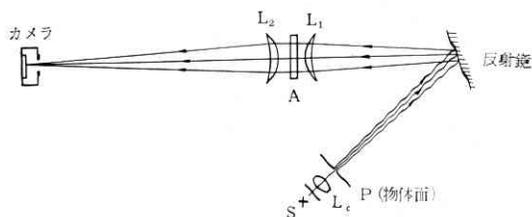


第 6 図 振幅フィルター

により位相が反転しないように、最大膜厚を  $1\mu$  以下に保って厳密な検査を行なっている。また理論値からの膜厚のずれはほぼ  $\lambda/20$  程度におさえてある。理論的なフィルターと合っているかどうかを調べるため、製作した振幅フィルターをマイクロデシメートルで透過光量をトレースして再確認した。したがって十分な精度をもつフィルターを作ることができた。ここで作ったフィルターは透過形であるが、反射形 (たとえば Ebert 型の光学系で光学像の改良を研究する場合) フィルターも同じ装置で作ることができる。この場合はまずマスクをはずして様に Al 膜を十分蒸着し、その後でマスクをつけて同様の蒸着を行なう。

#### 4. 実験

この振幅フィルターを用いた場合の回折実験を行なった。光学系は第 7 図に示すような optical diffractometer を用いた。光源 S には超高圧水銀灯を用い、それからの光をコンデンサーレンズ  $L_c$  で P 面 (物体面) に集光して、P を通った後反射鏡で曲げられてコリメーターレンズ系  $L_1, L_2$  に入り、そこでの回折像をカメラで撮る装置である。光源とコンデンサーレンズの間に、フィル



第 7 図 実験装置

ターを入れて単色光を取り出した。このフィルターは、フィルムの感色性と振幅フィルターが  $6000\text{ \AA}$  の光に対して設計されたことを考慮に入れて、黄の着色ガラスフィルターを使用した。コリメーターレンズ  $L_1, L_2$  は等質の比較的精度の高いメニスカス単レンズで、ともに焦点距離  $1000\text{ cm}$ 、直径  $5\text{ cm}$  で両者で holo-system を形成している。このような等質の単レンズ 2 枚で holo-system を組むことにより、レンズ自体の収差による回折像への影響が少なくなる<sup>9)</sup>。さらにレンズ  $L_1, L_2$  の曲率の小さい方を向かい合わせることで、球面収差の影響が除去される。 $L_1, L_2$  の間には振幅フィルターの置かれた台が取り付けられてある。このフィルターはいつでも取りはずしが可能であり、かつ光軸に対して垂直に保つため微動ネジですみから押さえつけてある。

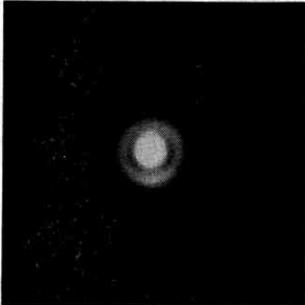
光学系の調整については、一番難点となるのはレンズ  $L_1, L_2$  および振幅フィルターの 3 者の微調整である。このような optical diffractometer の調整については、Taylor-Thompson<sup>9)</sup> の論文に詳しく記されている。また光源前のフィルターを取り去って、回折縞の色変化観測

などで微調整を行なった。

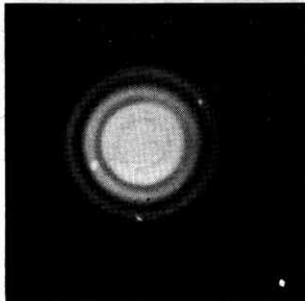
回折像の記録は、すべてカメラのボデーのみを使用



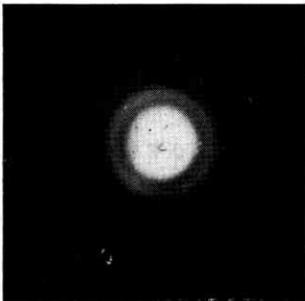
$a=2$



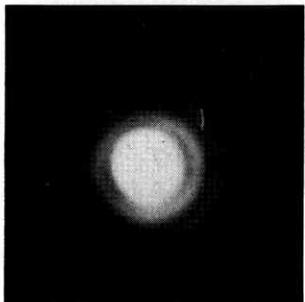
$a=1$



$a=0$



$a=-1$



$a=-2$

第 8 図 1 点物体の回折像

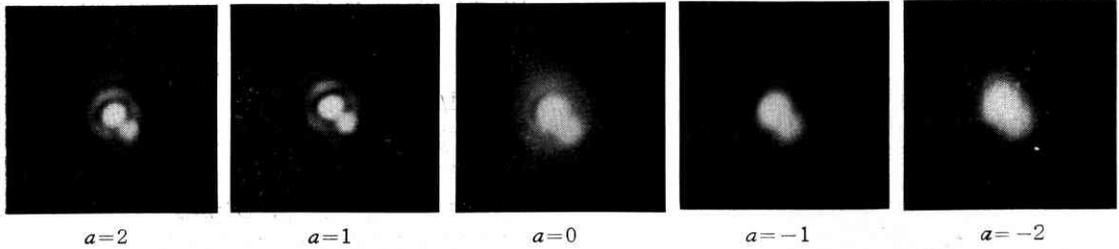
し、拡大することなく実像を撮影した。感光材料は市販の微粒子フィルム (Neopan F) を使用し、微粒子現象 (マイクロファイン) を規定時間内で行なった。露光時間は平均 1/15~5 秒である。

ここで観察するのは  $P$  面 (第 7 図参照) における物体の光学系 (この場合は振幅フィルターの置かれている開口) による回折像であり、したがって物体の大きさにより回折像の細部が異なってくる。すなわち明瞭な Airy disc 的な回折像が生じるためには、この光学系による Airy disc の直径  $d=2.44 \lambda f/D$  ( $f$  はレンズ  $L_2$  の焦点距離 1000 cm,  $D$  は出射瞳面での開口の直径でこの場合は 4 cm) より光源の大きさが小さいことが必要である。この光学系の Airy disc は約  $d=403 \mu$  ( $\lambda=5791 \text{ \AA}$  に対して) であり、したがって  $P$  面の物体の大きさが  $300 \mu$  より小さければ、十分明瞭な回折現象が現われることがわかった。ここでは点物体として  $50\sim 80 \mu$  程度の一つ、二つ、三つ等のピンホールを使用し、広がりをもつ物体として直径が  $400 \mu$  より大きいホールを利用した。

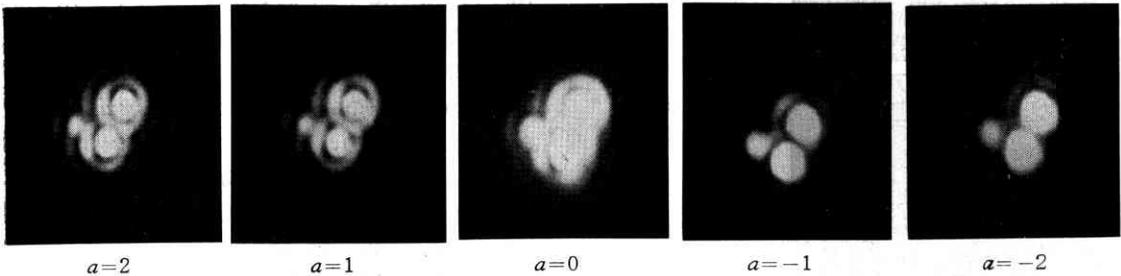
まず振幅フィルターがないときのピンホール物体 (直径約  $50 \mu$ ) の回折像を示したのが第 8 図の  $a=0$  の場合である。この図からわかるように高次回折像も十分現われた Airy disc が得られた。

第 8 図の  $a=0$  の場合のピンホール物体の回折像に正負の振幅フィルターを用いたときの回折像の変化を第 8 図に示す。この図からわかるように、正および負の振幅フィルターの効果がよく現われている。すなわち正のフィルターを用いると、図のように第 1 極小点が回折像中心に寄り、Rayleigh の意味の分解能が向上しているが、中心部分の光量が外側に流れ特に第 2 次の回折像を強めている。負の場合は光量が中心部分に集中し、中央回折像の径が広がるが、高次回折像は消えている。以上のような効果は、(2) 節で導いた理論的考察と一致している ( $a=0$  の露光時間は他の 4 枚より長い)。

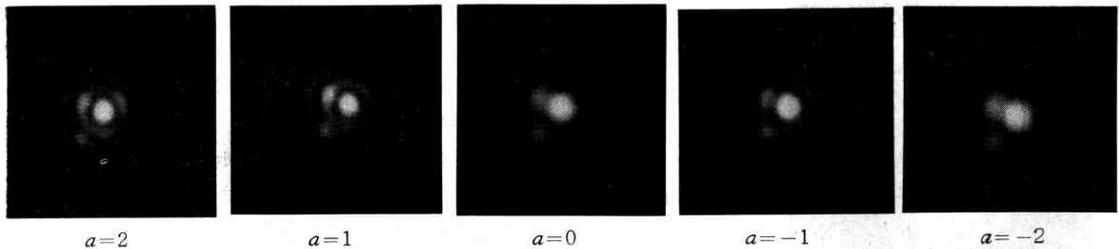
振幅フィルターの効果は、接近している 2 点物体でより明瞭になる。これが第 9 図であり、物体の二つのピンホールは十分小さく、かつ大きさがやや異なるが両者の輝度は等しい。振幅フィルターを用いない場合 ( $a=0$ ) は、高次回折像が邪魔をして 2 点物体の存在の様子が明確でないが、正のフィルターを用いると完全に 2 点が分離し、物体の様子が明瞭となる。しかし負のフィルターの場合は、高次回折像が完全に除去されるが、その部分の光量が中央回折像に集中してその径を拡大するため、この場合のように 2 点物体が非常に接近しているときには拡大された中央回折像が結びついてしまい 2 点物体の様子が不明瞭になり、ややもすると 1 点物体のようになってしまう。このように 2 点物体が非常に接近している場合の物体の判定には、正のフィルターが有効である。



第9図 2点物体の回折像



第10図 3点物体の回折象



第11図 3点物体の回折像 (各物体の輝度が異なる)

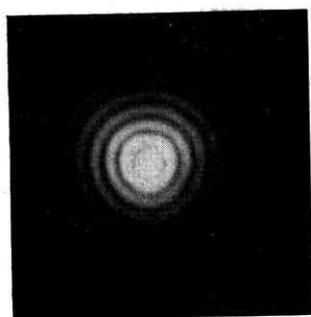
しかし物体間がある程度離れており、かつ物体の数が多くなり、かつ各物体の輝度があまり変化がないときには、負のフィルターの方がよりよい効果を発揮する。それが第10図であり、この場合は3点物体である。振幅フィルターのないとき ( $a=0$ ) は物体の様子が不明瞭であるが、正のフィルターを用いると Rayleigh の意味の分解能が上がり、三つの物体の様子が出てくるが、第2次回折像が非常に邪魔してしまい、小さい物体の存在を不明瞭にしてしまう。一方負のフィルターを用いると、高次回折像が除去され、かつ物体間がある程度離れているため、広がった中央回折像に邪魔されることなく3点の様子が明確に現われてきた。このように物体の数が多く、かつ物体間がある程度離れている場合には、負の振幅フィルターの効果がよく出ることが多い。

次に3点物体であるが、その中の一つの輝度が高く、他の二つの物体の輝度が低い場合を考える。この場合の回折像が第11図である。この場合は3点がある程度離れているときであり、 $a=0$  のときでもだいたい3点の存在はわかるが、正のフィルターを用いると高次回折像が強くなるため輝度の低い物体の存在がそれにかくれて

しまい、フィルターの働きが逆作用となる。しかし負のフィルターを用いると、3点の存在が明瞭となるが、これも物体内の距離がある程度離れていることが必要である。第11図は物体間がある程度離れているためこのような現象が現われたが、非常に接近して中央回折像にかくれたような輝度の低い物体が存在する場合には、正の振幅フィルターが有効に働く。以上からわかるように、振幅フィルターの有効な働きは物体の存在形態や各物体の輝度などに強く依存しており、したがって場合に依じたフィルターの使いわけをする必要があろう。

次に広がりのある物体 (この場合は径が  $400\mu$  以上) の回折像についての実験を行なった。正の振幅フィルターの場合は、高次回折像に光量が流れるため、その影響で全体としての形が崩される傾向がある。しかし負のフィルターでは、高次回折像を除くので、広がりのある物体そのものが現われる。このように広がりのある物体では、負の振幅フィルターが有効である。

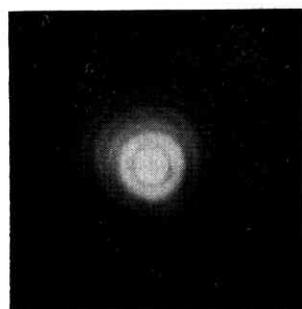
最後に焦点面を離れた面でのこの振幅フィルターの効果を見てみよう。第12図は焦点面での正、負振幅フィルターによる回折像であり、フィルターの種類による効



$a=2$



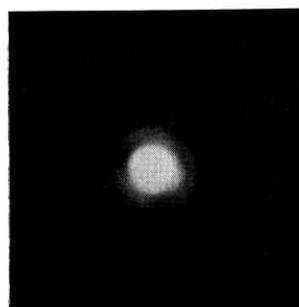
$a=1$



$a=0$

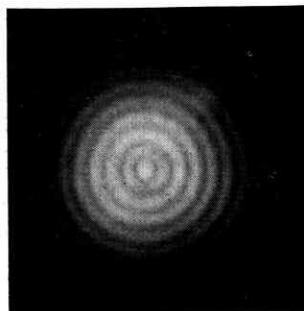


$a=-1$

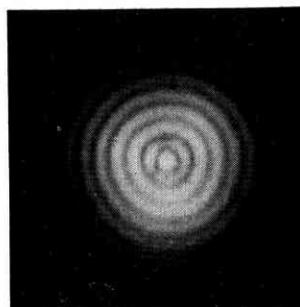


$a=-2$

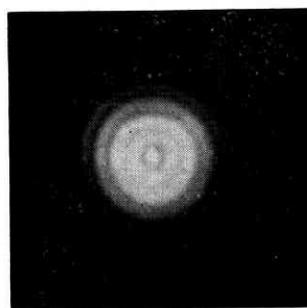
第 12 図 振幅フィルターの回折像への効果 (焦点面)



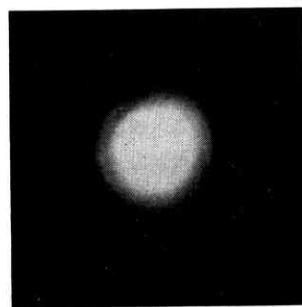
$a=2$



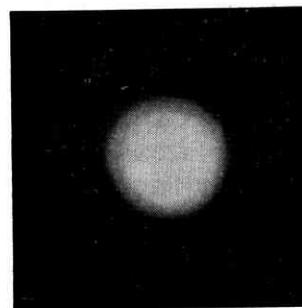
$a=1$



$a=0$



$a=-1$



$a=-2$

第 13 図 振幅フィルターの回折像への効果 (焦点ずれを与えた場合)

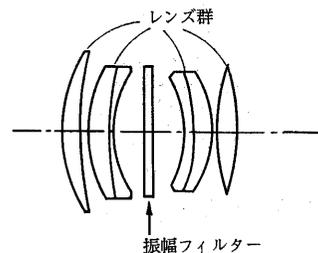
果がよく現われている。これからわかるように、正のフィルターでは高次回折像がより強く現われ、負のフィルターではこれが非常に弱められている。しかし中央部分に集まる光量は負の場合に大きく、正の場合は外側に流れている。このような効果は焦点はずれの面でより明瞭に現われ、それが第 13 図である。第 12 図と比較して、正のフィルターではより高次回折像が現われ、負のフィルターでは高次回折像がほとんどなくなるとともに全体として中央の内径が外側に広がっていく。これは焦点ずれを大きくさせるほどますます明瞭になることが、第 12 図と第 13 図の比較からわかる。これらからわかるように (3) 節で理論的に求めた 3 次元的回折像に出た効果が、実験的にも明確に表わされた。

## 5. 応用

最近振幅フィルターについての研究が各方面からなされ<sup>10)</sup>、このフィルターの応用面が広がった。特にここで行なった研究を通して従来の光学像の改良 (高次回折像の除去, Strehl definition の維持, Rayleigh の意味の分解能の向上などの操作) のほかに、新たにいくつかの応用面が開拓された。今までは分解能を向上させるために中央遮蔽板が使われたが、この振幅フィルター (正のフィルター) を使うことで、中央遮蔽板の場合の支持棒と開口の周辺が二重になっているための周辺回折波の悪影響が除かれる。したがって中央遮蔽板のかわりとして用いることが可能である。3 次元的回折強度の研究からわかったように、振幅フィルターを用いることで焦点深度が大きくなることから、焦点深度を大きくする役目と最良焦点付近での色収差の影響を除去することができる。また特殊な振幅フィルターを使うことで、高次回折像を除いて中心光量を広げることができ有効なボケの現象を作り出せる。この効果を用いると周期構造をもつ写真 (写真製版のアミ点やテレビの電送写真の走査線など) 修正, 写真粒状の軽減, 軟焦点フィルターとしての代用などその応用は広い。今までのフィルターリングの技術は光学系の射出瞳の所にフィルターを置いて像改良を行なってきており、したがってフィルターは光学系の一部でなく単なる修正手段に過ぎなかった。従来は構成レンズの曲率半径, 厚さ, 間隔, 材質などの選択による収差補正によって、結像レンズにおける解像力の向上やフレヤ (ハロー) の減少を行ってきたが、フィルターリングの研究の発展はこれらの今までの操作にかかわってフィルターを用いて行なうことが可能であり、この場合はフィルターも光学系の一部をなすことになる<sup>11)</sup>。第 14 図はこのようにして用いた 1 例であり、レンズ系を構成するレンズ群と、レンズ群における入射瞳と射出瞳

との間に振幅フィルターを配置したものである。このようにフィルターはレンズ系と同様に取り扱われ、結像特性を向上させるような方面に大いに使われることが期待される。

このほか 3 次元的回折像の解析は、アンテナにおける回折現象に直接用いられる。アンテナの場合は、均一の振幅分布をしていることより不均一な振幅分布が多く、その上一つの受光面より 3 次元的な回折振幅分布の解析が重要である。またフィルターリングの研究は、情報の光学的処理法の一つとして大切なものであり、今までのオーソドックスな光学像の改良という点ばかりでなく、広い範囲の回折現象の変化を用いることが考えられるので<sup>12)</sup>、この方面にそった研究が追求されてゆこう。



第 14 図 レンズ群に組み入れられた振幅フィルター

最後にここで研究した振幅フィルターの製作でご援助いただいた日本光学の藤原史郎 (現東教大光研), 山本忠昭の両氏, および振幅フィルターの応用面で助言をいただいたキャノンカメラの伊藤宏, 佐柳和男の両氏に感謝する。  
(1965年5月13日受理)

## 文 献

- 1) 朝倉利光: 生産研究 14, 263 (1962) の解説を参照されたい。
- 2) 朝倉利光: 応用物理 32, 180 (1963); 応用物理 32, 653 (1963)
- 3) E. H. Linfoot and E. Wolf: Proc. Phys. Soc. 69, 823 (1956)
- 4) H. F. A. Tschunko: J. Opt. Soc. Am. 55, 1 (1965)
- 5) J. Strong: J. Opt. Soc. Am. 26, 153 (1936)
- 6) L. G. Schulz: J. Opt. Soc. Am. 37, 349 (1947); 38, 432 (1948)
- 7) 藤原史郎: 学位論文 (1960)
- 8) 久保田広: 光学 (岩波書店, 1964), p. 110, p. 89.
- 9) C. A. Taylor and B. J. Thompson: J. Sci. Instrum. 34, 439 (1957)
- 10) P. Jacquinot and B. Roizen-Dossier: Progress in Optis, Volume III (edited by E. Wolf 1964), Chapter II.
- 11) 久保田広, 朝倉利光: 特許出願中。
- 12) 例えば Applied Optics, Vol. 4, No. 4 (Optical Processing of Information 特集) を参照。