

アポデゼーションの原理とその回折像

朝 倉 利 光

高次回折像を取り除くことや、中心強度をある程度以上に維持することや (Strehl definition), Rayleigh の意味で分解能を上げるなどの操作が、開口上を通る光の振幅、位相の照明状態を変えることで行なわれる。このような操作を apodization という言葉で統一し、その原理とそれを行なった場合の回折像の状態を述べる。

1. 緒 言

光学系の開口での位相、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射出瞳に入れて、結像特性を希望のものにする研究が、過去 10 年余盛んに行なわれてきた。実際には、金属の薄膜や非金属をレンズの上に蒸着させるとか、特別に作ったフィルターを用いるとかして実現させる。

一番古くは Straubel¹⁾ が不均一な振幅分布の分解能に与える効果を研究した論文である。その後ずっと遅れて、1944 年 Couder²⁾ が吸収液体を使って、振幅フィルターを作り、二重星の観測を行なった。同年 Luneberg³⁾ は Brown University の講義でこの課題についての四つの問題の提示を行なったが、それを解答するにはいたらなかった。この問題の解答は最初の 3 題は Barakat⁴⁾ により、最後の 1 題は Barakat-朝倉⁵⁾ によりなされた。

1940 年代後半から、フランスにおいて apodization の名で結像特性を希望のものにする研究が盛んに行なわれてきた。Lansraux⁶⁾ は振幅分布について詳細な研究を行なってきており、最近では apodization をした時の後に述べる encircled energy を研究している。Boughon, Dossier, Jacquinet⁷⁾ などは apodization とその spectroscopy への応用を考えた。

次いで、瞳函数 (pupil function) を種々の函数において、そのような函数をもつ時の回折像の解析的研究が行なわれた。Duffieux⁸⁾ は Hermitian polynomials に、Slevogt⁹⁾ は Legendre polynomials に、Lansraux は Lambda function に展開した。

以上の研究は、焦点面での回折像だけを問題にしたが、Hopkins¹⁰⁾ は $(\alpha + \beta r^2)$ の開口上での振幅分布をもつ時の回折像の研究を out-of-focus の時に行ない、朝倉¹¹⁾ は $(1-r^2)^n$ についてこれを行なった。

Osterberg, Wilkins, Wissler¹²⁾ などは顕微鏡における apodization の効果を研究した。以上の外に、Airy Type の回折像 (中心強度が最大値をもつようなもの) から完全に離れたものにするような瞳函数をもつものについての研究もあるが、それらを総て除外した。なぜなら apodization の本来の意味は、回折像における第二次以上の

高次の強度をできるだけ取り除いて、その分を中心強度に移動させるような開口上での振幅および位相分布を求めることが目的である。

ここでは高次強度の除去の本来の目的を拡張し、回折像で Strehl definition の意味での中心強度をある程度高くもつことや、Rayleigh の意味での分解能の増加を計るための開口上の振幅、位相分布の研究を総合して、apodization の操作とした。また物体の真の姿を表現しようとする忠実性 (Fidelity) を問題とする像改良もあるが、それらはここで除外した。

従来の研究は、Luneberg-Barakat の問題を除いては特定の回折像を作るために、瞳函数を種々にきめて、その中から像の強度分布が所望のものになるものを選択したものである。これに対して Luneberg の問題はある条件を満足する方程式を立て、それを解くことで条件を満足する完全な apodized 瞳函数を導いた。

2. 原 理

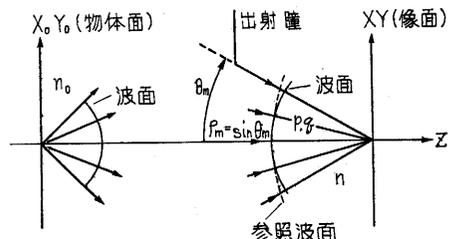
光軸上の点光源から出る光による開口のフランホーフ回折像の像面 (第 1 図の XY 面) における複素振幅は

$$U(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} P_z(p, q) e^{2\pi i(p x + q y)} dp dq \dots (1)$$

で与えられる。¹³⁾ p, q は像側空間における波面の方向余弦であり、

$$p^2 + q^2 = n^2 \sin^2 \theta \\ = \rho_m^2$$

の関係があり、 n は像側空間での屈折率である (一般には空気の場合をとって $n=1$ とおける)。積分範囲は土無限大に取ってあるが、光学系の開口の形によりその範囲内で行なわれる。 $P_z(p, q)$ は瞳函数で、一般に複素函



第 1 図 光学系

数であるから振幅と位相部分に分けられ

$$P_z(p, q) = P(p, q) e^{i\phi(p, q, z)} \dots\dots\dots (2)$$

とおくことができ、 $\phi(p, q, z)$ は光学機械の方からいうと焦点ずれ (z 項) と収差を含む函数であり、 $P(p, q)$ は透過函数 (transmission function) といわれ

$$P(p, q) = \frac{\text{出射瞳面での振幅分布}}{\text{入射瞳面での振幅分布}} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられるものである。したがって、 $P(p, q)$ を振幅フィルターと言うこともある。古典光学と云われる分野では、 $P(p, q) = 1$ の場合、すなわち瞳面で均一振幅をもつ場合だけを取り扱い、焦点ずれと収差が回折像に与える影響のみを論じてきた。(1) 式をもとにして回折像強度分布を研究してきた人々を分類すると下の表のようになる。

		函数 $\phi(p, q, z)$ (位相)			
		$e^{i\phi(p, q, z)} = 1$	$e^{i\phi(z)}$ (焦点ずれ)	$e^{i\phi(p, q, z)}$ (焦点ずれと 第三次収差)	$e^{i\phi(p, q, z)}$ (焦点ずれと 第三次以上の 高次収差)
函数 $P(p, q)$ (振幅)	$P(p, q) = 1$	Airy	Lommel Struve Mayall Schwarzschild Nijboer Boivin Farnell De, Wolf	Conrady Buxton Martin Steward Zernike Nijboer Nienhuis Lansraux	Zernike Nijboer Maréchal Born Boivin
	$P(p, q) \neq 1$	Straubel Spencer Couder Luneberg Osterberg Wilkins Lansraux Dossier	H. H. Hopkins Asakura		

(1) から判るように、瞳函数と像面複素振幅分布の間にはフーリエ変換の関係がある。像面での正規化した強度分布は

$$I_z = \frac{|U(x, y, z)|^2}{|U(0, 0, z)|^2} \dots\dots\dots (4)$$

となる。極座標

$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta, & p &= \rho \cos \phi \\ y &= r \sin \theta, & q &= \rho \sin \phi \end{aligned}$$

の関係を使うと (1) 式は

$$U(r, \theta, z) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty P_z(\rho, \phi) e^{2\pi i \rho r \cos(\theta - \phi)} \rho d\rho \dots (5)$$

となるが、特別な場合として函数が光軸に対して円対称をなし、位相項を除いた振幅フィルターだけを取り、焦点面での回折像強度分布を考えると、

$$U(r) = 2\pi \int_0^{\rho_m} P(\rho) J_0(2\pi\rho r) \rho d\rho \dots\dots\dots (6)$$

で表わされる。簡単にするため、上式を次式

$$U(r) = \frac{U(r)}{2\pi\rho_m^2} = \int_0^1 P(\rho) J_0(2\pi\rho r) \rho d\rho \dots\dots\dots (7)$$

のように正規化して、この函数で振幅分布を表わすとして、これから回折像強度分布を論ずることとする。もし開口がスリットである場合は、(7) に対応する回折像振幅分布は

$$U_{\text{slit}}(r) = \int_{-1}^{+1} A(x) e^{irx} dx \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。

apodization とは一般の場合としては、(1) 式における瞳函数 $P_z(p, q)$ の種々の形態に対するフランホーファ回折像を前に述べた目的の下に研究することである。この特別な場合として、円形開口で軸対称な振幅フィルターだけを考え、焦点面での回折像を研究することは、(7) 式の $P(\rho)$ の変化に対する強度分布を求めることになる。スリット開口では、(8) が基本式となり $A(x)$ の変化による回折像の変化を求めることである。

3. Luneberg の問題

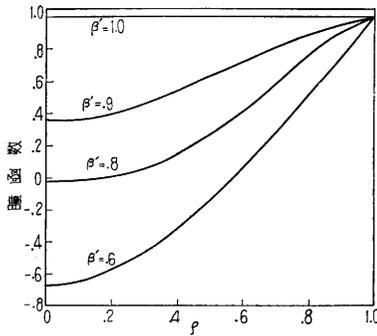
緒言で述べたように、Luneberg 問題はある目的の下に最上の apodization の可能性を指示してくれるので、その場その場のほかの apodization 方法と比較するともっと根本的問題であり重要な基準となる。したがって、(7) 式を基本として Luneberg の最初の三つの問題を取り上げよう (第4の問題は、最初の三つの問題と根本的に異なるので、ここでは除く)。

第1の問題は、出射瞳からの光量を一定

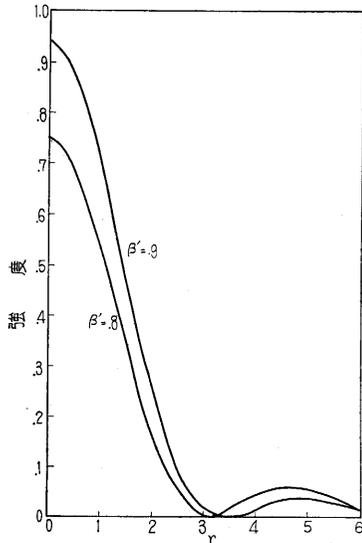
$$\int_0^1 |P(\rho)|^2 \rho d\rho = \text{const} = 1 \dots\dots\dots (9)$$

にし (簡単のため $\text{const} = 1$ とした)、フランホーファ回折像の中心強度が最大になるようにするための瞳函数 $P(\rho)$ を求めることである。これは Lagrange の未定係数法で条件を満足する方程式を立て、変分法を用いて解くことができる。その答は $P(\rho) = \text{const} = 1$ となり、すなわち apodization をほどこさない均一振幅分布をもつ瞳函数である。このことから、apodization の操作は常に中心強度を低下させる結果になる。

第2の問題は次のような条件下で回折像の中心強度を最大にするような瞳函数 $P(\rho)$ を求めること。条件は (9) のような光量一定であり、回折像の第1零点を Airy の半径 $r = 3.832$ からある定められた半径 $r = \beta$ へもっていくことである。Lagrange の不定常数と変分法を用いて、条件を満足する方程式を立てると、Fredholm の第2種積分方程式を解くことになる。これを解くと、 $P(\rho)$ は第2図 (a) に示すような瞳函数になり、これを (7) 式に入れてその2乗を求めて回折像強度分布を求めると第2図 (b) のようになる。図 (a) から判るように振幅フィルターの比重が中心にかかってきて、輪帯状開口に似てくる。このフィルターの影響で回折像は図 (b) のように、第1零点は内側に入るが中心強度は低下し、



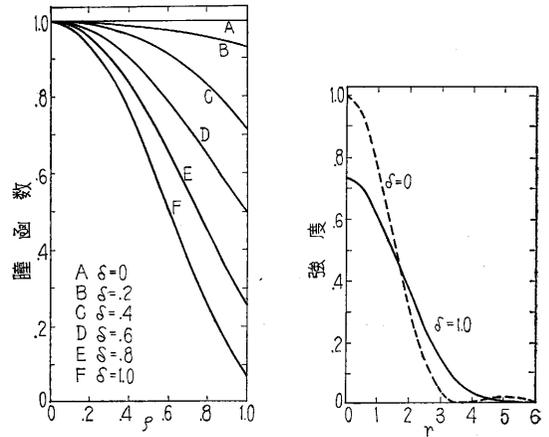
(a) 円形開口に対する正規化した瞳函数 $\beta = 3.832 \beta'$



(b) 円形開口におけるフランホーファ回折像
第 2 図 (After R. Barakat)

その分の光量が外側に出て高次の回折像を強める結果になる。したがってこの場合の振幅フィルターを用いると Rayleigh の意味での分解能は上がるが、高次回折像の邪魔が増してくる。

第 3 の問題は出射瞳からの光量を一定にし、像面のある定められた中心領域に、できるだけ光量を集めるような瞳面の振幅分布を求めることである。この問題も第 2 の問題と同様にして方程式を立てると、Fredholm の線型同次積分方程式となり、その解は Chebyshev quadrature の数値計算で求めるしかなく、複雑な多項式で与えられる。この解による振幅分布は第 3 図 (a) の通りで、その回折像の一例を同図 (b) に示した。この図から判ることは、第 2 の問題とは反対に開口の縁の方向にだんだん振幅分布の比重がかかり、Gauss 函数の形に似てくる。これによる回折像は第 2 次回折像を弱めるが、中央の回折像の半径は拡がり、また中心強度も低下する。しかし高次回折像はだんだんと弱められるので、高次回折像を除去する apodization の目的は達成される。



(a) 円形開口に対する正規化した瞳函数 (δ は像面で定めた中心領域の半径) (b) 円形開口におけるフランホーファ回折像

第 3 図 (After R. Barakat)

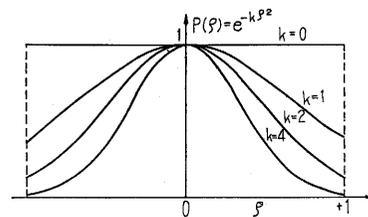
4. ある振幅分布をもつ瞳函数による回折像

(A) 焦点面での回折像

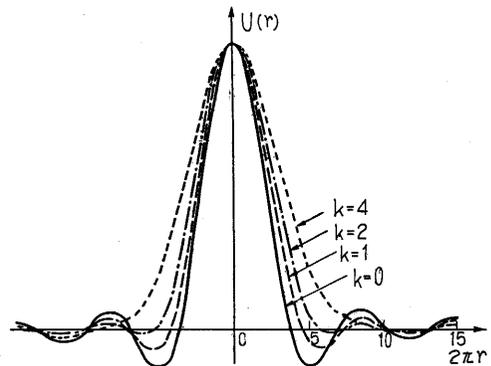
前節の問題の外は、apodization として (7) 式における $P(\rho)$ をいろいろな函数にして、それを入れて像面強度分布を求めることになる。この方向への研究は盛んに行なわれたが、ここでは、二三の簡単な例を取り上げてみる。

(例 1) $P(\rho) = e^{-k\rho^2}$ の場合 (k は任意の常数)

この瞳函数は Couder (1944 年) が提案したが、この



(a) 瞳函数 $P(\rho) = e^{-k\rho^2}$



(b) 正規化した回折像振幅分布 (After G. Lansraux)

第 4 図

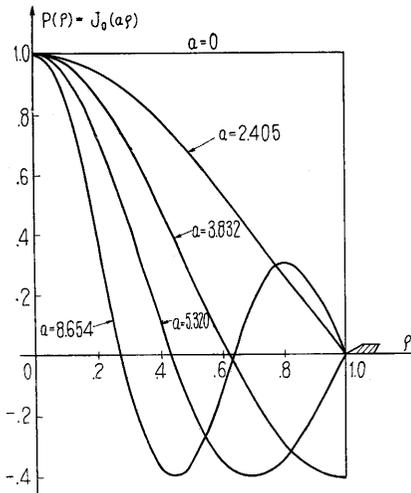
函数を(7)に入れて解析的に回折像振幅分布を求めたのは Lansraux (1953年)である。その結果、回折像振幅分布は

$$U(r) = e^{-k} \sum_{j=0}^{\infty} k^j \frac{L_{j+1}(r)}{(j+1)!} \dots\dots\dots (10)$$

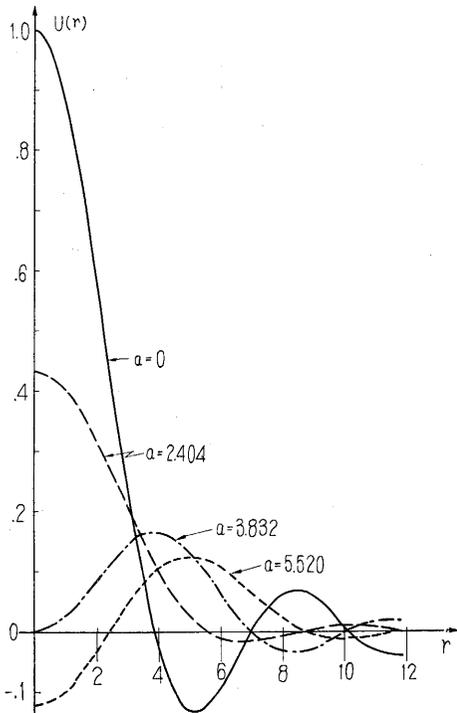
で与えられる。ただし

$$L_j(r) = 2^j j! J_j(r)/r^j$$

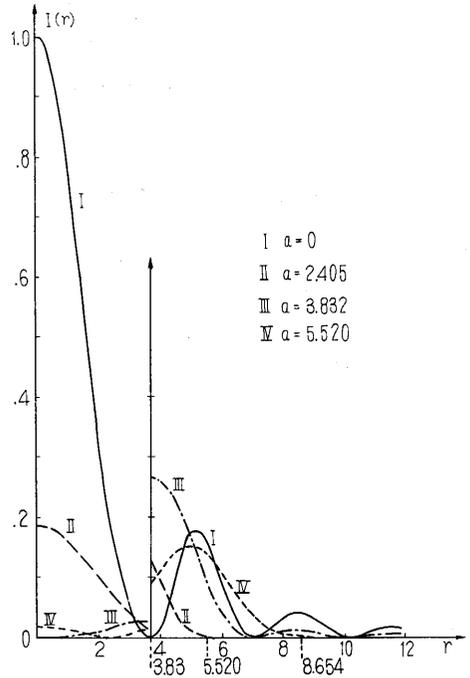
である。この場合の振幅フィルタとそれによる(10)式の回折像振幅分布を示すと、第4図(a),(b)のようになる。この場合は Luneberg の第3の問題に非常によく似ている。



(a) 瞳函数 $J_0(a\rho)$



(b) 回折像振幅分布



(c) 回折像強度分布 (After A. Boivin)

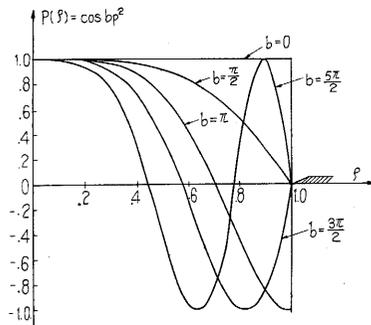
第5図

(例2) $P(\rho) = J_0(a\rho)$ の場合 (a は任意の常数)

この瞳函数、すなわち第零次の Bessel 函数は良く apodization に使われている。この函数を示すと、第5図(a)となる。これを(7)に入れて像面振幅分布を求めると、

$$U(r) = \frac{2}{a^2 - r^2} \{ a J_0(r) J_1(a) - r J_0(a) J_1(r) \} \quad (11)$$

で与えられ、これを第5図(b)に示す。強度分布は同図(c)となる。この函数の重要なことは著者が研究したが¹⁴⁾、それは回折像の第2次モーメントを最小にするという条件を満足する瞳函数の一つの解として出てくる。この条件は中心からの距離の2乗が大きききいてくるから、第2次以上の高次の強度に強く影響し、それらの部分の強度を最小にする条件と同じである。したがって、本来の意味での apodization の一つの解と考えられる。



第6図 瞳函数 $P(\rho) = \cos b\rho^2$ (After A. Boivin)

(例 3) $P(\rho) = \cos b\rho^2$ (b は任意の常数)

この振幅フィルタは第 6 図のように示される。このフィルタを用いた時の回折像振幅分布は

$$U(r) = \frac{1}{b} \{U_1(2b, r) \cos b + U_2(2b, r) \sin b\} \quad (12)$$

となり、ここの U_1 と U_2 は Lommel 函数

$$U_1(2b, r) \equiv \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p \left(\frac{2b}{r}\right)^{2p+1} J_{2p+1}(r)$$

$$U_2(2b, r) \equiv \sum_{p=0}^{\infty} (-1)^p \left(\frac{2b}{r}\right)^{2p+2} J_{2p+2}(r)$$

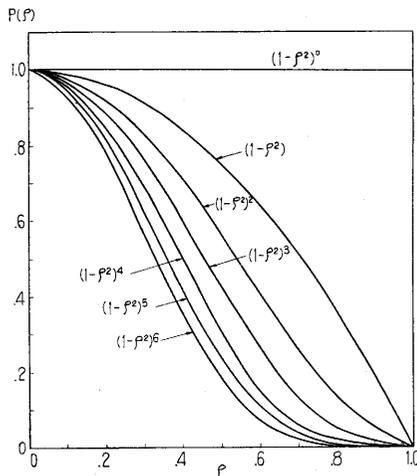
で与えられる。

(B) 焦点をはずれた面での回折像¹¹⁾

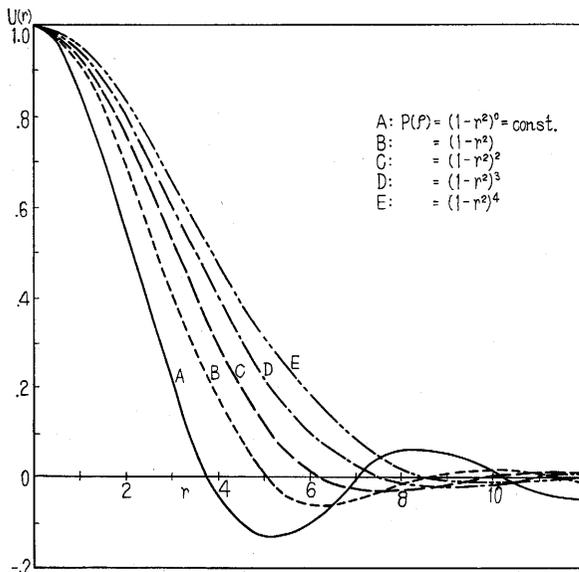
瞳函数

$$P(\rho) = (1-\rho^2)^n$$

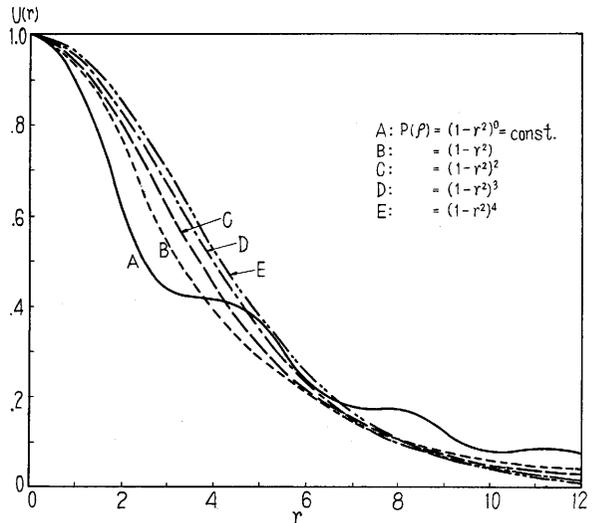
をもち(第 7 図 (a)), 焦点ずれを与えた時の回折像面での振幅分布の式は、



(a) 瞳函数 $P(\rho) = (1-\rho^2)^n$



(b) 正規化した回折像振幅分布 (焦点面 $z=0$)



(c) 正規化した回折像振幅分布 (焦点からずれた面 $z=2\pi$)

第 7 図

$$U(r, z) = \int_0^1 (1-\rho^2)^n J_0(2\pi\rho r) e^{i\frac{z}{2}\rho^2} \rho d\rho \dots \quad (13)$$

で与えられる。この式は Lommel の函数を用いて解析的に解くことができる。実際に(13)を求めて表わしたのが、第 7 図 (b), (c) で、(b) は焦点面 ($z=0$) での正規化した振幅分布であり、(c) は焦点を $z=2\pi$ ずらした時のそれである。この図から判ることは、焦点面とその面からずれた場合には像面の振幅分布が大きく変わってくることである。したがって、振幅フィルタに焦点ずれを与えての研究は、今までの単なる振幅フィルタだけの apodization にさらに興味ある課題を与えてくれるであろう。

5. Encircled Energy

Apodization において、最も注意を向けるのは、ある apodization を行なった時に、その結果として現われる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、回折像強度分布を見れば、だいたい見当はつくが、開口を通った一定量の光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判るように、強度分布を書き換えたのが encircled energy である。古くは Rayleigh¹⁵⁾ が理想的な光学系における円形開口の場合に行なったが、この名前をつけ、apodization の方で大いに使うようにしたのが Lansraux (1946 年)¹⁶⁾ である。

encircled energy とは、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

$$L(r) = \frac{\int_0^r I(r) r dr}{\int_0^\infty I(r) r dr} \dots\dots\dots (14)$$

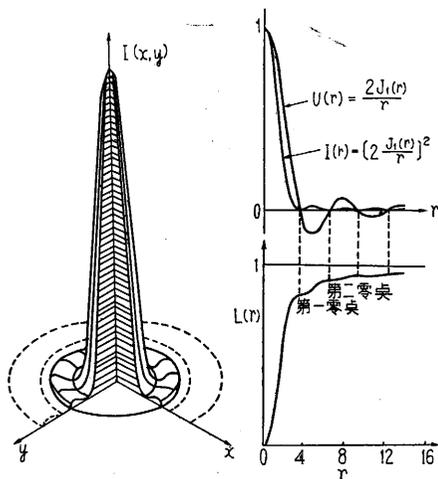
で与えられる。I(r) は軸対称な像面強度分布を表わしている。最も簡単な場合として、apodization を行なっていない瞳函数 (P(ρ)=1) で円形開口の無収差光学系による焦点面での強度分布は、

$$I(r) = \left[\frac{2 J_1(r)}{r} \right]^2 \dots\dots\dots (15)$$

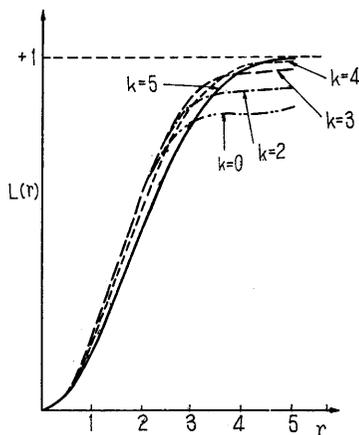
であり、encircled energy は

$$L(r) = 1 - J_0^2(r) - J_1^2(r) \dots\dots\dots (16)$$

となる。これらを第8図に示す。encircled energy L(r) を表わす図から、ある一定の中心サークル内に何パーセントの強度が集まっているかがすぐ判る。もし apodized 瞳函数を用いると、第8図の L(r) とは異なる図が得られるはずである。たとえば、



第8図 Encircled energy



第9図 瞳函数 P(ρ)=e^{-k/2 ρ²} をもった場合の Encircled energy (After G. Lansraux)

$$P(\rho) = e^{-\frac{k}{2}\rho^2} \quad (k \text{ が任意の常数})$$

の場合を考え、これを(7)に入れ、さらに強度分布を求め、最後に encircled energy を求めると、k の種々の値に対して、第9図のように変化する。いろいろな L(r) を比較して、所望の apodization をする瞳函数を得ることが可能である。しかし L(r) を解析的に求めることは一般に非常に困難である。たいがいの場合、数値計算にゆだねねばならず、これが支障となって、あまり利用されていない。しかし、それにもかかわらず、中心領域に集まる分布を見るのには、いちばん便利である。

6. あとがき

apodization は出射瞳における振幅、位相分布を任意のものにして、所望の回折像を得ることであるが、ここでは主に振幅フィルターについて述べた。この外に apodization の一つの方法と考えられるものに、出射瞳で均一な分布をもつ開口の形を種々に変えて(例えば輪帯状開口や、±y₀ cos(πx/2x₀) の曲線で囲まれるような開口等)、それからの回折像を求めることである。この場合は(1)の積分範囲が開口の形によって異なり、その開口内で積分を行なう。

apodization の応用は、回折像の像改良に大いに役立つ。出射瞳にある任意のフィルターを置いてやるとか、金属の薄膜をレンズにある任意の形に蒸着させてやるとかして、目的にそった像改良が可能である。また apodization を行なわない普通の光学系で撮った回折像には現われてこない実際の物体の像が apodization を使うことで見分けることもできる。たとえば強度の差が大きい二つの光源が非常に接近している場合、普通の光学系でこれを撮ると強い強度の光源の高次の回折像の邪魔で、弱い強度の光源の像がその中にうずもれてしまい、あたかも一つの光源による像のように見えることがある。これに高次の回折像を除くような apodization をすることで二つの光源の存在を確かめることができる。このようなことは拡がりをもった光源に対しても応用できる¹⁷⁾。

最も簡単な apodization の応用はそれを使うことで高次回折像の影響を取り除くことや、Rayleigh の意味での分解能を上げることができることである。

今後の問題は振幅フィルターばかりでなく、位相部分を考慮に入れた apodization の研究であり、それを行うことで収差をもつ光学系における apodization の関係も論じられ、apodization における収差許容量の相互関係も生まれる。このようなことは、完全無収差な光学系が存在しない実情を考えると重要な問題である。

この文を仕上げるにあたり、種々ご指導いただいた小瀬助教に厚く御礼申上げる。(1962年6月23日受理)

- 13) Studies of the benzimidazole & rhodanine photographic inhibitors with silver potentiometric titrations-坂口, 室伏氏と協同, Bull. Soc. Sci. Phot. No. 2, 10 (1952)
- 14) On the reactions between some organic sulfus Compounds and silver ions with potentiometric titrations, 坂口, 秋庭氏と協同, Bull. Chem. Soc. Japan, 27, 534 (1954)
- 15) 銀電位滴定法による Aza-indolizine の研究, 秋庭氏と協同, 日写, 18, 20 (1955)
- 16) Studies on fog inhibitors, 亀山直人氏ほか, International Conference of Photography, p. 42 (1953)
現像機構に関する研究
- 17) 現像と還元電圧の関係について, 亀山直人氏指導, 工化, 39, 269 (1936)
- 18) メートルおよびハイドロキノン現像液の酸化還元電化, 浮橋寛氏と協同, 工化, 61, 1 (1948)
- 19) レゾルシンの臭化銀に対する吸着, 浮橋寛氏と協同, 工化, 52, 240 (1949)
- 20) 2,4 ジアミノフェノールの電解還元による調製, 宮都官敏彦氏と協同, 工化, 54, 534 (1951)
- 21) Reduction potential of developers, 浮橋氏と協同, Bull. Soc. Sci. Phot. Japan, No. 1,5 (1951)
- 22) 電解還元による現像薬の調製, 本多健一氏と協同, 生産研究, 2, 267 (1950)
- 23) ポーラログラフ測定における溶存酸素の除去, 本多健一氏と協同, 生産研究, 5, 97 (1953)
- 24) The polarographic studies of developing agents with the rotating platinum electrode, 本多健一, 金石七君と協同, Bull. Soc. Sci. Phot. Japan, No. 4~5, 13 (1955)
- 25) The redox potential of the polarographic developing agents measured by the rotating electrodes. 原浩, 吉田弘美両氏と協同, International Konferenz wiss. Phot. Köln. 368 (1956)
- 26) Contribution à l'étude voltamétrique de 1-phényl-3-pyrazolidone avec une microélectrode tournante de platine, 本多健一, 勝山正実氏と協同, Bull. Soc. Sci. Phot. Japan, No. 10, 13 (1960)
- 27) Phenidone 現像薬の研究, 吉田弘美君と協同, Bull. Chem. Soc. Japan (投稿中)
- 28) パナジウムによる迅速現像法, 吉永忠司氏ほかと協同, 日写, 19, 40 (1956)
- 29) 迅速定着に関する研究, 吉永忠司氏ほかと協同, 日写, 20, 59 (1957)
- 30) 亜硫酸イオンと銀イオンとの反応, 原浩氏と協同, 日写 (投稿中)
非銀塩写真材料の研究
- 31) Se 感光板の温度, 湿度の影響, 野崎弘, 坂田俊文両氏と協同, 電子写真 1, No. 2, 39 (1959)
- 32) 焼成酸化亜鉛の光電導性に関する若干の考察, 坂田氏と協同, 電子写真 2, No. 1, 32 (1960)
- 33) 酸化亜鉛感光紙の帯電について, 坂田俊文氏と協同, 電子写真 3, No. 2, 22 (1961)
- 34) La photoconductibilité de l'oxyde du zinc à l'usage électrophotographique 坂田氏と協同, Kolloquium wiss. Phot. Zürich (1961)

-38ページよりつづく-

文 献

- 1) R. Straubel: Physik Z. 4, 16, 74 (1902)
- 2) A. Couder: C. R. Acad. Sci., Paris 219, 677 (1944)
- 3) R. K. Luneberg: Mathematical Theory of Optics(1944), Brown University Lecture Note, Providence, Rhode Island.
- 4) R. Barakat: J. Opt. Soc. Am. 52, 264 (1962)
- 5) R. Barakat: J. Opt. Soc. Am. 52, 276 (1962)
R. Barakat, 朝倉利光: 昭和 36 年アメリカ光学会春季講演会で発表
- 6) G. Lansraux: *Diffraction instrumentale* Éditions de la Revue d'Optiques. Paris (1953); Can. J. Phys. 36, 1696(1958); Can. J. Phys. 39, 158 (1961)
- 7) P. Boughon, B. Dossier et P. Jacquinet: C. R. Acad. Sci., Paris 223, 661 (1946)
P. Jacquinet, P. Boughon et B. Dossier: *Contribution in la théorie des Images Optiques* Éditions de la Revue d'Optiques p. 183 (1949)
B. Dossier: *Rev. opt.* 33, 57, 147, 267 (1954); *Astronomical Optics and Related Subjects*, p. 163(1956) Interscience Publishers
- 8) P. M. Duffieux: C. R. Acad. Sci., Paris 222, 1482 (1946)
- 9) H. Slevogt: Optik 4, 349 (1949)
- 10) H. H. Hopkins: Proc. Phys. Soc. 62, 22 (1949)
- 11) 朝倉利光: 昭和 37 年春季応用物理学会で発表
- 12) H. Osterberg and J. E. Wilkins: J. Opt. Soc. Am. 39, 553 (1949)
H. Osterberg and F. C. Wissler: J. Opt. Soc. Am. 39, 558 (1949)
- 13) R. K. Luneberg: *Mathematical theory of Optics* p. 386 (1944) Brown University Lecture Note
- 14) 朝倉利光: 応用物理に発表予定
- 15) L. Rayleigh: Phil. Mag. 11, 214 (1881); *Scientific Papers* 1, 513
- 16) G. Lansraux: Compt. Rend. 222, 1434 (1946)
- 17) B. Dossier: *Astronomical Optics and Related Subjects* p. 163 (1956)

次号予告 (9月号)

研究解説

汚損碍子のせん絡特性.....	藤木	茂
管内流中の球の抵抗係数について... ——混相流に関する基礎的研究——	山口	惇
ツェナーダイオードの 保護回路への応用	石橋 市川 関口	泰雄 初男 豊
活性炭のヨード吸着に関する研究	野崎 酒井 藤代	弘 勇 光雄

研究速報

エザキ接合の容量と Space charge narrowing effect	後川	昭雄
部分的コヒーレント光による スリットの回折像—顕微鏡の場合—	鈴木 朝倉	恒子 利光
イオン交換膜における整流作用.....	妹尾 山辺	学 武郎
溶存酸素のポーラログラフ分析法	高橋 桜井	武雄 裕