

フラウンホーフエル回折模様のノイズ

内田 直

(昭和55年9月30日受理)

Noise of Fraunhofer Diffraction Pattern

Sunao UCHIDA

(Received September 30, 1980)

はじめに

レーザー光線のように単色性の非常に良い光源は、その干渉の良さのため光学系での少しの反射・散乱などにより不要な干渉縞を呈し、光の強度分布が変わってしまったりして実験上いろいろ不都合なことが生ずる。一般にはこのような不要な干渉縞は、レンズや鏡の表面に付着する埃などによって生ずることが多く、特に傷のつき易い光学系の手入れには慎重を期さなければならない。時には光学ガラスに生じた表面の傷はその光学系を台無しにすることもある。レーザーが内部鏡を持つものでも、光の発信は外部に接した透明なガラス面を通過して外へ送り出すのであるから、その外部に接した面への埃の付着は避けられない。

前回までに報告したフラウンホーフエル回折模様の実験では²⁾、開口を通過する光束自身に含まれる少しのノイズが、回折像の細かい部分に影響しいくぶん不明瞭な像になったりした。フラウンホーフエル回折は無限遠の光源から来た平行光束が開口により回折を受けてその後方無限遠の所に回折像を呈するものであるが、光束中で開口自身が平行移動した時その回折像は変わらないという性質がある³⁾。このことを利用することにより光束中のある程度のノイズを除去できるものと考え実験を行なったところ、簡単な装置により比較的良好な結果が得られた。

開口の平行振動

フラウンホーフエル回折において開口部の座標を ξ, η ,

物理学研究室

フラウンホーフエル回折模様 (第4報)

これに対応して回折像の座標を x, y とすれば、光源の波長を λ として回折積分は複素数で表わすと、

$$U(P) = C \iint_S e^{-ik(x\xi + y\eta)} d\xi d\eta, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

となる。Cは位相の項を省略した定数である。ここで、瞳関数 $F(\xi, \eta)$ を導入して

$$\begin{cases} F(\xi, \eta) = 1 & \text{開口内} \\ F(\xi, \eta) = 0 & \text{開口外} \end{cases}$$

とし、(1)式をフーリエ積分で書き直すと、

$$U(P) = C \iint_{-\infty}^{+\infty} F(\xi, \eta) e^{-ik(x\xi + y\eta)} d\xi d\eta \quad (2)$$

となる。今、開口を ξ, η 面内で a, b だけ平行移動したとして

$$\xi - a = \xi', \quad \eta - b = \eta' \quad (3)$$

とする。移動後の瞳関数は

$$\begin{cases} F(\xi - a, \eta - b) = 1 & \text{開口内} \\ F(\xi - a, \eta - b) = 0 & \text{開口外} \end{cases}$$

となる。よって(2)式は

$$U(P) = C \iint_{-\infty}^{+\infty} F(\xi - a, \eta - b) e^{-ik(x\xi + y\eta)} d\xi d\eta \quad (4)$$

となる。(3)式より $\xi = \xi' + a, \eta = \eta' + b$ であり、かつ $d\xi = d\xi', d\eta = d\eta'$ であるから(4)式は

$$U(P) = C \iint_{-\infty}^{+\infty} F(\xi', \eta') e^{-ik(x\xi' + y\eta' + xa + yb)} d\xi' d\eta'$$

よって、

$$U(P) = C e^{-ik(xa + yb)} \iint_{-\infty}^{+\infty} F(\xi', \eta') e^{-ik(x\xi' + y\eta')} d\xi' d\eta' \quad (5)$$

となる。この(5)式を(2)式と比べると積分項は同じ形をしており回折像の強度分布が開口の平行移動によって変わらないことを意味している。ただし回折光の位相は変化

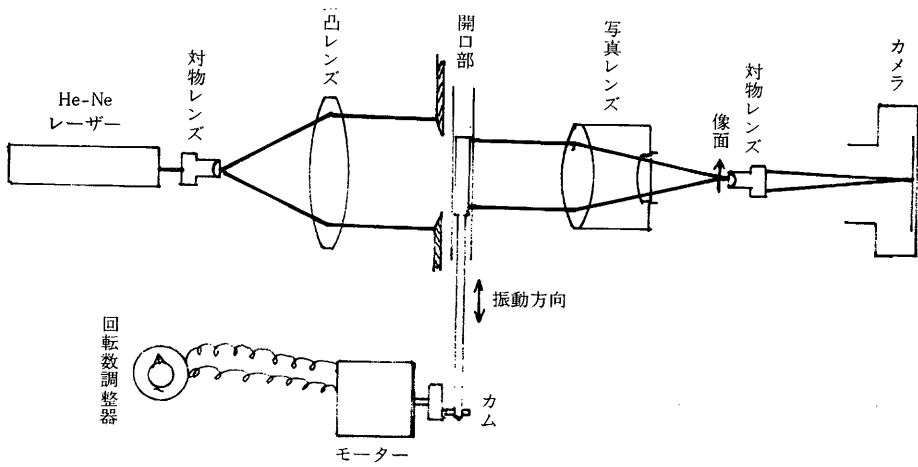


図 1 実験配置

開口部に置かれた任意の開口のフラウンホーフェル回折が焦点距離 $f=55\text{ mm}$ の写真レンズにより像面上に生ずる。これを顕微鏡の対物レンズで拡大して35ミリフィルムに写す。開口部は棒を介してモーターとカムでつながっており、開口に水平な平行振動を与えるようになっている。

する。

今、開口をその面内で平行移動するように振動させる場合を考える。開口が自身に対して常に平行な移動を起す限り、光束中では前記の条件は満されるので回折像の強度変化は起らない。開口の振動の速さは機械的に行なった時、それ程速くできないから特に影響は出ない。ここで特に注意しなければならないのは、開口の平行振動は許されるが、回転や横揺れは回折像に対して回転や像の大きさの変化を与えることである。

さて光束中に含まれるノイズは通常回折像の中で同心円状の干渉縞として散在することになる。光束自身は開口の移動によって位置が変わらないから、光束中のノイズは開口の移動によりさえぎられることになり、回折像に現われるノイズは開口が移動すると強度分布が変化する。そこで開口の移動を適当に行なうことにより、像面上に置かれた写真フィルム上でノイズを消去することができる。

実 験 装 置

図 1 にフラウンホーフェル回折の実験配置を示す。この配置は開口部が光軸に対し垂直な振動を起こせるようになっている。波長 632.8 nm の He-Ne ガスレーザーから出た光線は顕微鏡対物レンズと一枚の凸レンズか

らなるコリメータ系により、開口部より充分大きな平行光束となり開口部に達する。ここでの開口部の拡がりは 2 mm 以下として、光速は直径 2 cm 程にする。開口部を通過した光は無遠方に調節された焦点距離 $f=55\text{ mm}$ の写真レンズにより焦光し、回折像を像面上に生じさせる。これを後方に置いた顕微鏡の対物レンズにより直接拡大して、ASA 400 の高感度フィルムを装填した35ミリ一眼レフカメラボディにより撮影する。

以上がフラウンホーフェル回折の実験を示す部分で、これらの系は同一光軸上になるように置く。一方、開口は開口自身に対し平行移動ができるようにするため、開口部をアルミ製の小さな台に乗せ、このアルミ台を光軸に対し垂直に作られたレール上で動かせるようにする。アルミ台とレールとは横振動が生じないようにするため、かなり精密に作成し調節する必要がある。アルミ台とレールとの間には滑車等を使わずに油を加えて滑りを良くする。アルミ台の大きさは開口部が乗る程の大きさで 4 cm とし、この端に 35 cm 程の棒を取り付け、棒の先をモーターとつながっているカムに取り付ける。モーターの回転運動はカムにより棒に水平振動として伝わることになる。棒の長さがあまり短いとモーターの円運動が残るので長めの 35 cm 程にする。開口部の振動が数 mm までの場合はカムの軸に対する偏心の割合が小さいので、

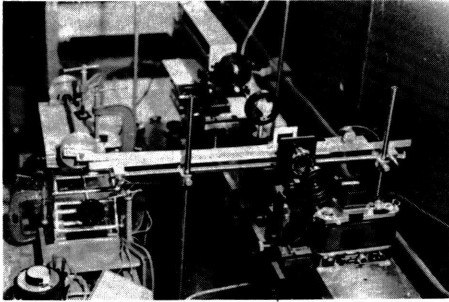


図 2 実験装置

中央上部に He—Ne レーザーがあり、これから右下の35ミリカメラまでがフラウンホーフェル回折像の撮影装置である。真中に水平に置かれた白い台が開口部に水平振動を与える装置で、左側がカムとベルトを通してモーターにつながっている。この写真ではモーターは隠れている。

この程度の棒の長さで充分である。モーターは 100 V を電源とするシーリスマーターで減速ギヤが付いており、本体に回転数調整器がついているが、1秒間に数回程度の振動をさせるために変圧器により電圧を下げて回転数を調整する。モーターとカムは直接つなげずに、ベルトとプーリーを介する。開口部の振動数は1秒間に2回から回数まで変えられるようにする。

図2に実験装置の全体写真を載せる。中央上部から右下にかけて、He—Ne レーザー、顕微鏡対物レンズ、凸レンズ、白い枠からなる開口部、写真レンズ、隠れている顕微鏡対物レンズ、最後に35ミリカメラを並べて光学台上に置いた。開口部の白い枠はスライド用のプラスチックマウント部を使ったものである。実際の撮影は開口部からレーザー側は遮光板を設けてカメラに余計な光が回り込まないようにした。フラウンホーフェル回折像はこの一眼レフカメラにより眼で確認しながら撮影でき、カメラ側にある顕微鏡対物レンズを光軸方向に移動することによりピント合わせをすることができる。図2の中央部には開口部が水平な白いアルミ材の棒により、これも水平に置かれたアルミ材のレール上に乗せられている。左側にはプーリーとアルミ棒が軸に対し少し偏心して取り付けられておりカムの役目をしている。プーリーの回転は軸を介して後方に見えるプーリーに、モーターからベルトで伝わって来て与えられる。これら機械的な部分の調整は開口部に与える振動を滑らかに行なわせるため慎重に行なった。

カメラにウエストレベルファインダーを取り付け、フ

ァインダースクリーン上に写った拡大回折像を観測するようにした。このウエストレベルファインダーには拡大レンズが付いているので、像の細部を更に調べることもできる。回折像の見える範囲はカメラ側の対物レンズとカメラとの相対位置により変化できるが、ここでは像の中心部付近つまりエアリーの円盤の周囲まで見えるようにした。回折像の明るさは中心の円盤上に全光量の84%が集中している⁹⁾。しかも、円盤上でも中心強度が最も強く外に向って急激に強度が減衰する。開口の大きさにもよるが、円盤の周囲や外側の環の状態を詳しく調べるだけの光量を全体として与えると、中心強度が非常に強くなり、レーザーの眼に与える影響に気をつけなければならない。また、写真として得られる像も強度変化が激しいため、全体像をはっきり捕えるのがむづかしい。光束中に含まれる干渉縞のノイズはその強度分布と回折像の強度分布が丁度合った所で極端に現われる。

一方、モーターにより開口に平行振動を加えると、回折像中にあるノイズが動くのが分かる。開口の振動数は露光時間の数倍あれば良いと考えたが、実際の露光時間が数秒から数10秒であったので、振動数を毎秒2回程としてもかなり大きな値となった。開口の振動による撮影はカメラの焦点が正確に合っていないと、ノイズだけで

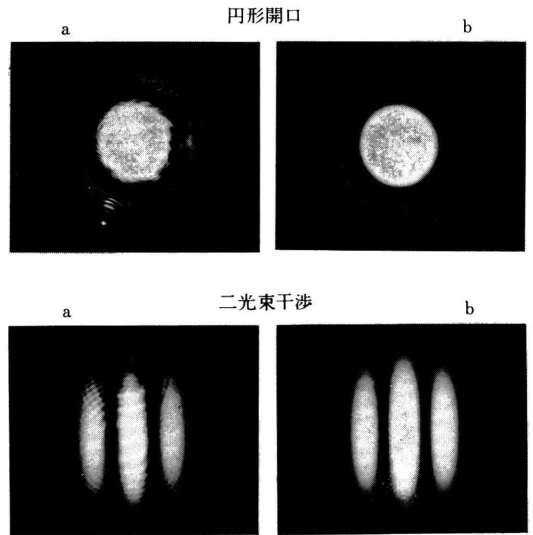


図 3 振動法によるノイズの消去

2種類の開口の回折像上のノイズが振動法によりどの程度消去できたかを示したもので、aがノイズのある状態でありbが開口部に平行振動を与えた時のノイズの消えた写真である。露光時間はbの方がaの5割増となっている。

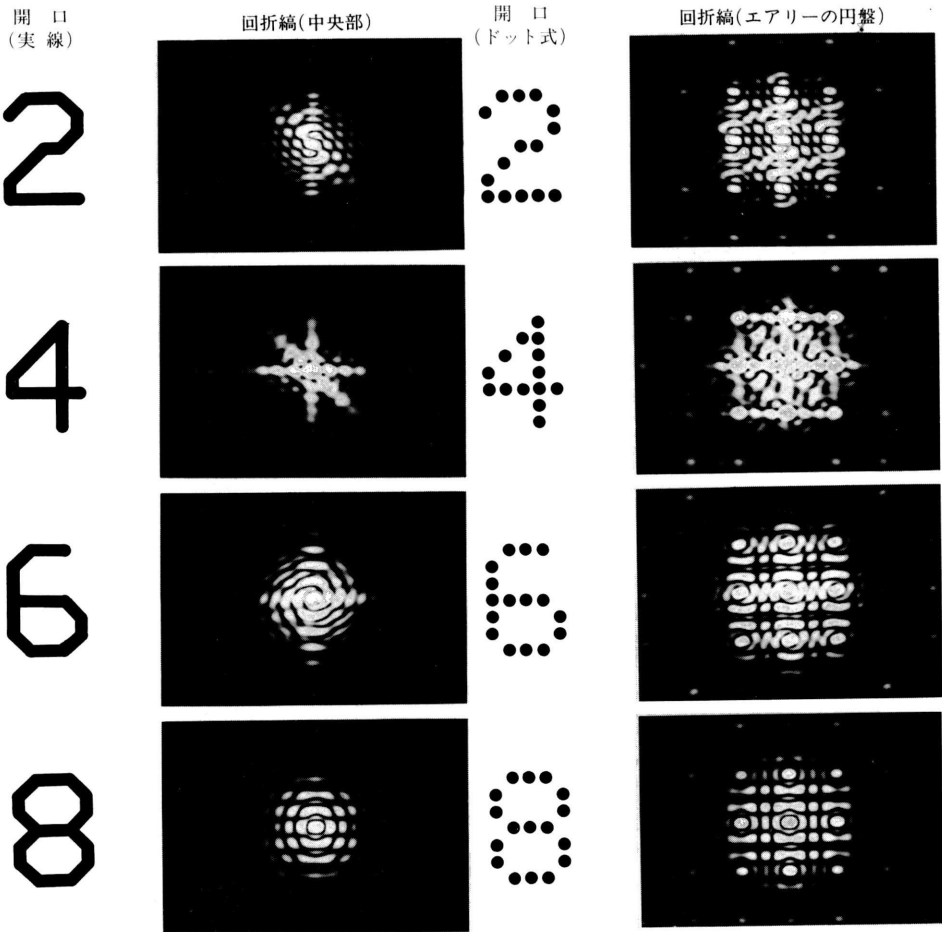


図 4 数学開口と回折縞

“2”，“4”，“6”，“8”の4つの数字の実線によるものとドット表示によるものの2種類の開口による回折像の比較をしたものである。これらの撮影は振動法によりノイズを消去して行なわれた。開口は黒い点または線の部分であり、ここには10倍に拡大したものを載せた。回折縞は40倍に拡大してある。

なく回折像自身が動いてしまうので、露光を与える前にカメラのスクリーン上の座標で開口が振動していない時の回折像の任意の位置を見ておき、開口を振動させた時これが動かないようカメラのピントを調節した。露光中は確認できないので露光後再び確認することとした。フラウンホーフェル回折像の撮影をノイズのある状態と振動法によりノイズを省去了した場合について比較し、露光量を変えて実験を行なった。

結果と検討

開口はトレーシング紙に製図用黒インキにより描いた

ものを、カメラでコダック SO-253 フィルムに縮小撮影したものを使った。図3に直径 0.15 mm の円形開口の回折像と円形開口の直径 0.15 mm で間隔 0.45 mm の二つの開口による二光束干渉縞を呈する回折像を示す。ただし、像の拡大率は同一でなく、円形開口は外の環までみるため20倍であり、二光束干渉はエアリーの円盤部をみるため40倍に拡大したものである。使用した He-Ne レーザー光源の出力が 0.5 mW と小さく、光束が直径 3 cm 程に拡げたこともあり、僅か 0.15 mm の開口を通過する光量は少なく、撮影にあたっては露光時間をだいたいづとることになった。10倍に拡大した回折像を

ASA 400 のフィルムで撮影した時の露光時間は30秒から60秒あまり必要であった。

図 3・a はいずれもノイズが含まれたものである。円形開口についてみれば、円盤中央部では輝度が高くノイズの影響が出るまでになっていないが、円盤の周辺部と次の環の所にいくつものノイズとの間の干渉縞が重なって、輝度分布にかなりのムラが生じている。その外側は露光量が不足しているので写っていない。このように単色性の良いレーザー光であるために回折像とノイズ、更にノイズとノイズの間で複雑な干渉縞が生じ、目的とするフラウンホーフェル回折像がはっきりしなくなる。二光束干渉のノイズについては円盤部の中央付近に露光を合わせていることから、この付近でもノイズが生じていることが分かる。図3・bは水平方向の振動を開口に起こした時に、a図のノイズに相当する部分が図上で左右に振動したところを露光したものである。ノイズによる干渉縞が消去されたものとなっている。詳しく調べると水平方向だけの一次元方向の振動だけでは、ノイズの干渉縞のムラが薄い水平な縞となって少し回折像上に残っている。しかしこの振動法により回折像がかなり改善されることが分かった。

図4は振動法による回折像の質の向上を数字形開口に応用したもので、これらの回折縞は全て振動法により撮影した。開口部は黒い実線または点の部分であり、実線は幅 0.15 mm、点は直径 0.15 mm で高さ 1.5 mm、幅 1.05 mm の枠内に書かれたものである。回折縞はいずれも中心部に露光を合わせたものを載せてある。これを

みると、実線による数字開口の中心部の像とドット式の数字開口によってできる回折模様的一部分とが似ており、開口の全体的形によってこの模様が決まってくるのがわかる。

要 約

干渉性の高いレーザー光を使ったフラウンホーフェル回折においては、光学系に付着した小さな塵による回折光の干渉が開口を通過する光束中に現われることによって、得られた回折像上にノイズが生ずる。このノイズはムラの少ない光束を選ぶことによってある程度除くことができるが、通常は除き切れない。フラウンホーフェル回折においては開口の平行移動により回折像が変化しないことを利用すると、光束中のノイズが動くことによって写真上への記録においてノイズが消去されることを示した。ここでは一次元の開口の振動法のみを利用したが、開口を2次元内で平行移動すれば、いくらか残ったノイズも消去できるものと思われる。

文 献

- 1) 内田直：東京家政大学研究紀要，19，1（1979）
- 2) 内田直：東京家政大学研究紀要，20，13（1980）
- 3) M. Born and E. Wolf：*Principles of OPTICS*，5th ed.，Pergamon Press，London，1975，p. 382
- 4) 久保田広：波動光学，岩波書店，東京（1971）p. 259