

格子に規則的な欠落がある回折格子による回折像

高 橋 成 和*

Masakazu TAKAHASHI

The Diffraction Grating which have no Rulings in Regular,
and its Diffraction Patterns.

要 旨

光を通す等間隔なP本のスリット群と、これにつづく光を通さないようにしたP'本のスリット群が交互に並ぶ透過型回折格子によるフラウンホーファー回折像について考察した。

この回折像の輝線は、P本のスリット一群が起す回折・干渉光の強度分布のうち、その主極大すなわち通常回折格子により見られる輝線の間を $p+p'$ 等分した位置の強度のみが残る。このことは、P本のスリットが構成する各群の対応する位置にあるスリットどうしにより起る干渉に起因する。

このことを具体的に示すために、フィルムに写し込んだ格子を用いて起した干渉・回折像の写真撮影を行うとともに、その強度分布を数値計算した。

この内容は、光の干渉・回折に関する物理学の学生実験に新しい課題を提供し、これに取り組む学生に問題の新鮮さ、ひいてはその解決への意欲を与え、知的な思考の練成・涵養を行う意図をもつ。

I はじめに

光の干渉・回折現象を観察する実験器具のひとつに回折格子がある。我国におけるこれの刻線技術は1970年に降に急速な発展をとげ、数値制御ルーリングエンジン¹⁾による機械刻線^{2~3)}の方法をはじめ、ホログラフィー^{4~6)}ないしイオンエッチング法^{7~9)}を駆使して製作する方法とともに世界最高水準に達しているといわれている¹⁰⁾。

ところが、学校教育の場において用いられる、機械刻線された市販の回折格子（ガラスグレーティング）には完全なものが得がたい。この何がしかの欠陥のために、

これを用いての回折像には偽線（ゴースト）が現われる。この偽線が現われる原因^{11,12)}にはいろいろあるが、このことはすでに解明されている。しかしここでは、この偽線から離れて逆に、刻線に既知の欠陥をあえて持たせ、その格子による回折像を実際に観察し、整理することも一興かと考えた。

そこで手始めとして、規則的にスリットを欠落させた回折格子による単色光のフラウンホーファー回折像を具現し、考察することを試みた。

II 理 論

スリットの幅が a 、間隔が d である理想的な透過型回折格子に、規則的な間隔をもって欠落を、すなわち光を通さないスリットをもたせた格子による、フラウンホーファー回折像について考える。

図1に示すように、光を通すスリットP本と、これにつづく光を通さないようにしたスリットP'本とが交互に繰り返す。前者の部分が q 群、したがってこれらの各々の間にある後者の部分が $q-1$ 群あるとする。この格子に、波長 λ の平面波を垂直入射させたとき、入射光となす角が θ である方向の回折光の強度 I は

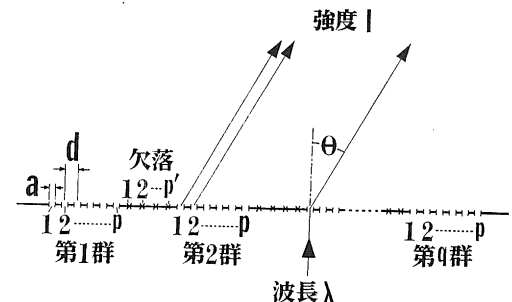


図1 光を通すスリットP本と光を通さない部分P'本とが交互に並ぶ格子。

* 島根大学教育学部理科教育研究室

$$I=I_0 \left[\frac{1}{a} \frac{\sin aA}{A} \right]^2 \times \left[\frac{1}{p} \frac{\sin pB}{\sin B} \right]^2 \times \left[\frac{1}{q} \frac{\sin qC}{\sin C} \right]^2$$

となる。ただし、 I_0 は 0 次の光の強度である。また、

$$A = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta$$

$$B = \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

$$C = \frac{\pi}{\lambda} (p+p') d \sin \theta$$

とおいた。

この式の第 1 項はスリットの幅 a による回折項、第 2 項はひとつの群のなかのスリットによる群内干渉項、第 3 項は各群の対応する位置にあるスリットどうしによる群間干渉項である。

第 1 項と第 2 項の積は P 本のスリットによる回折・干渉項で、このことについては多くの文献^{13,14)} に述べられている。その回折像は、隣り合うスリットについての光路差 $d \sin \theta$ が λ のとき主極大となり、これらの中に $P-2$ 個の副極大をもつ。これらの副極大は、 P が小さいばあい強度が大きく、この像の写真撮影は容易にで

きる。この位置は $d \sin \theta = (\lambda/p) \times$ 整数の条件を満たす主極大の間を P 等分したところになる。

いっぽう、第 3 項は q 本のスリットによる干渉の効果と同じであり、その干渉像は主極大の間に $q-2$ 個の副極大をもつ。 q が十分大きいとき、副極大の強度は十分小さく 0 とみなせると同時に、主極大の分解能があがる。この主極大は各群の対応する位置にあるスリットからの光路差 $(p+p') d \sin \theta$ が波長 λ の整数倍、すなわち $d \sin \theta = [\lambda/(p+p')] \times$ 整数のときに起こる。

したがって三つの項を掛け合わせた結果は、「 P 本のスリットによる回折・干渉像の強度分布のうち、その主極大の間を $(p+p')$ 等分した位置の強度のみが残る」ということになる。これを $p=3, p'=2$ のときに例をひき図 2 に示す。しかしこの位置が、群内の P 本のスリットによる干渉の結果、強度が 0 になる P 等分の位置に一致すると、当然この位置の像は消える。この例として、 $p=4, p'=4$ のときを図 3 に示す。

III 格子の製作法

格子を手作りする方法には、(1) 格子の拡大図を写真により縮小しフィルム上につくる¹⁵⁾、(2) ガラス表面にインキを塗布し、これにナイフで線を刻む¹⁶⁾、(3) 市販の格子からレプリカをとるなどがある。ここでは格子に欠落部を入れることと、目的としない規則、不規則性を入れないために (1) の方法を採用した。

この方法はまず、格子を拡大した原図を用意しなければならない。これにはインスタントレタリング用の¹⁷⁾ 罫線、あるいは白黒に塗り分けた細長い角材¹⁸⁾ や厚紙¹⁹⁾ を交互に並べたものなどの使用が報告されている。しかし、これらからは 500 本もの正確な線群を得がたい。

そこで、まず等間隔格子の原図を正確に作り、次にこれのコピーをとり、これに手を加え、目的とする欠落がある格子の図面にかえて、これを得る製作手順にしたがった。

$1\text{m} \times 1\text{m} \times 3\text{mm}$ の透明ビニール板に黒色不透明ビニールシートを貼り、このシートを 1mm 間隔にカッターナイフで刻み、リボン状に分割する。この作業は、図 4 の装置を使い、この図につけた説明文の方法でおこなった。このリボン状シートを 1 本おきに剝離する。これでビニール板上に 1mm 幅の黒い部分と透明な部分が交互に並び、473 本のスリットをもつ等間隔格子の原図* が完成できた。

* この方法は、半導体集積回路のフォトエッチング用マスクの原図を製作するときに行う、ルビネス²⁰⁾ をカッターで切り、剝離する手法と同じである。

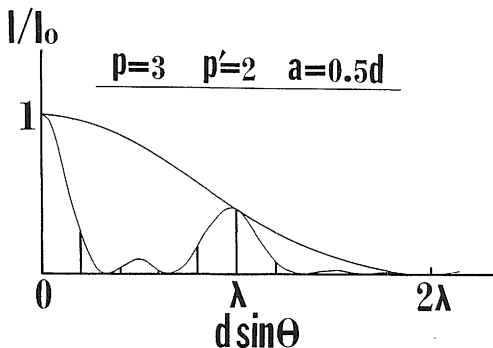


図 2 欠落がある格子「 $p=3, p'=2$ 」による回折光の強度分布。

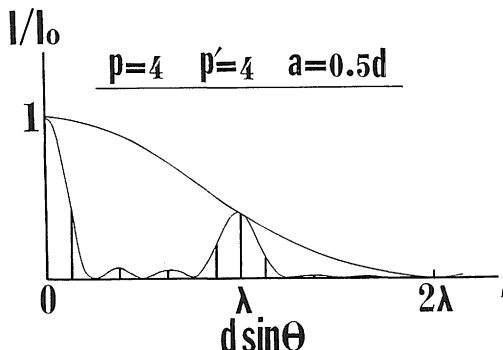


図 3 欠落がある格子「 $p=4, p'=4$ 」による回折光の強度分布。

欠落がある図面もこれと同じ方法で製作すればよい。しかし、幾種もの図面を作るには刻線する手間と材料費がかかりすぎる。そこで、等間隔格子の原図をミニコピーフィルムにとり、縮尺 3/10 で印面紙に焼き付け、これを電子コピーする。このコピーは寸法をかえ、黒線を細めてしまい、原図に対する忠実性を欠く。しかし、このことは本論文の目的とする回折像を観察するうえで、何の支障もおよぼさなかった。

つぎに、欠落を作る部分に相当するこのコピーの黒線を、白色えのぐで塗りつぶす。こうして製作した図面の例を図 5 に示す*。図面に描かれた線群の直線性と規則性は、図面を二つ折りにして重ねたときに現われるモアレ縞の直線性と規則性から確認できる。これを図 6 に示す。最後に、これらの図面をミニコピーフィルム上に写真撮影し、目的の格子が出来あがる。このとき、被写体である図面をアクリル板に静電気で密着させ、描かれている線がゆがむことを避けた。完成した格子は、ビニール板上に作った最初原図の 9/1000 の大きさで、その格子定数は 0.018mm となった。

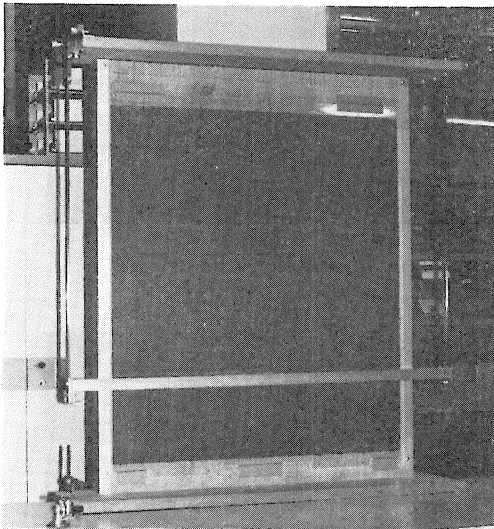


図 4 格子の原図を製作した装置。鉛直な壁面にビニールシートを貼ったビニール板を固定する。この前面にある水平な台の上にカッターナイフをねかせた状態で滑らせて、この刃先でシートを切る。台は両側にあるノギス（0～1000mm、最小目盛 0.02mm）をガイドに上下移動でき、かつその移動量が測定できる。

* このような図面は、パーソナルコンピューターとレコーダーによれば簡単に描ける。ただし現状では、レコーダーの作図の位置精度が 1/10mm であり、また線の幅までも制御することはできない。

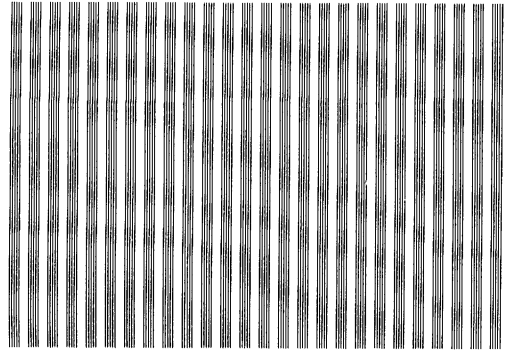


図 5 「 $p=5, p'=3$ 」なる「欠落がある格子」の原図。

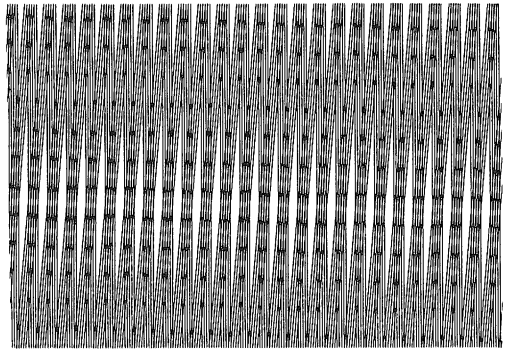


図 6 図 5 の原図を二つ折にして重ねたときに現われるモアレ縞。この縞の直線性と間隔から、描いた線の直線性と間隔の正確性が保証できる。

IV 回折像の写真撮影

回折像の写真撮影に使用した光源は、ナトリウム放電灯である。平行光束を得るコリメーターレンズには、ピント無限遠の写真用 500mm 望遠レンズを使用した。このとき、本来フィルムがくる位置にコヒーレンスを得るための単スリットをもうけ、これから光を入れ、通常の写真撮影をするときは逆向きに光を通して、平行光束を作った。この光を、無限遠にピントを合わせた絞り開放のカメラで格子を通して受け、フィルム面上に回折光を結像させた。撮影結果を図 7 に示す。

V 考 察

図 7 の左上にある 1 枚の写真は、スリットに欠落がない、通常の格子による回折像である。

これと右下の 5 枚を除いた写真は、一つの群内にある光を通すスリットの数 P が小さく、群の数 Q が十分大き

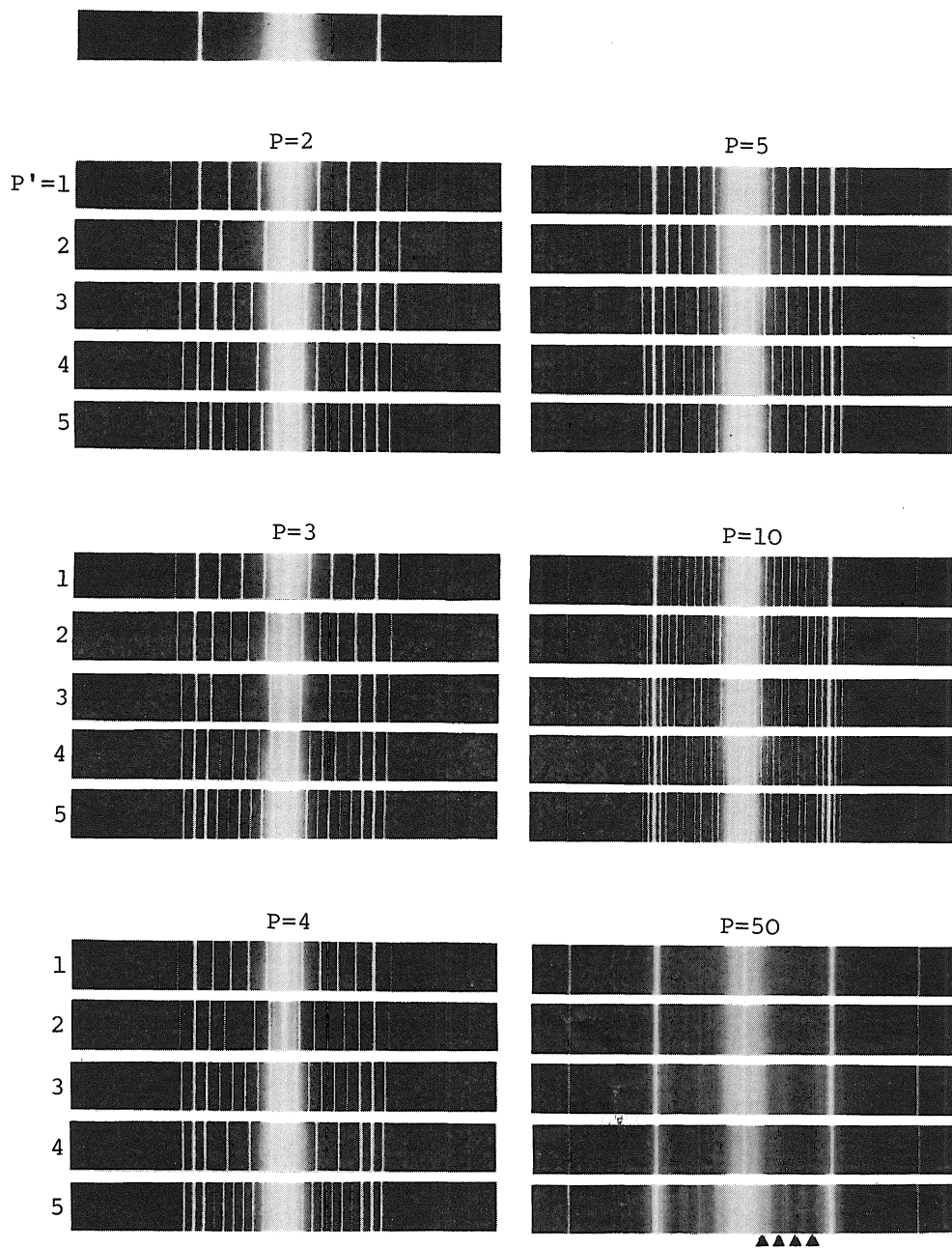


図7 $a \approx 0.5d$ の格子について、通常の格子による回折像（左上の1枚）と欠落がある格子による回折像。 $p=1, 2, \dots, 5, 10$ については群の数が多く $q > 30$ だが、 $p=50$ については $q=8$ である。▲印は図8の▲印と対応する。

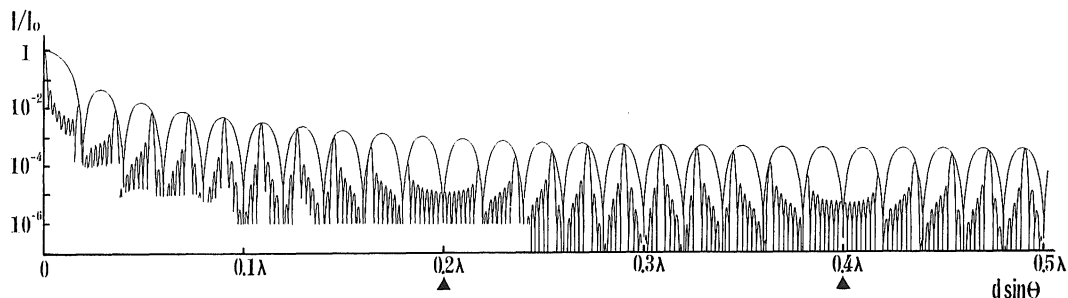


図8 欠落がある格子「 $p=50$, $p'=5$, $q=8$ 」による回折光の強度分布。大きな山形のグラフは群内干渉項を表わす。細かい山形のグラフは、これに群間干渉項をかけ合わせた結果である。群間の干渉が、群内の干渉と強調する部分と、▲印で示した群内の干渉の強度を2分して消してしまう部分がある。

い場合の結果である。0次の付近に見られる輝線はフィルムの黒い部分が半透明*であるために入る干渉像と思われる²¹⁾。これ以外の輝線は、図2、図3で示したような結果になっている。すなわち、 P 本のスリットによる干渉・回折の強度分布にしたがい、その主極大の間を $p+p'$ 等分した位置に輝線が現われている。ただしこの位置が P 本のスリットによる干渉・回折の強度が0となる、主極大の間を P 等分した位置と一致するところでは、この輝線は消えている。

ところが、 P が大きく、 q が小さいときの右下にある5枚の写真では、細かい輝線と同時に、これらが全体として別の明暗を醸し出している。このことは、次のように考えられる。

P が大きくなると、上記の輝線の数もこれにしたがって増す。これが細かい輝線である。同時に q が小さくなると、各々の輝線の幅が広くなる。したがって、この輝線を区別して観察することはできにくくなり、そのおのおのが持っている明るさが、全体としての連続した分布を構成しているように観察される。これは「群内干渉」と「群間干渉」の強度分布についての『うなり現象』とでもいえるものであろう。すなわち、前者の強度が0となる主極大の間を P 等分した位置と、後者の強度が最大となる $p+p'$ 等分した位置が一致する p' 等分の位置で、この分布は暗くなる。この事情を、 $p=50$, $p'=5$, $q=8$ のときに例をとり、数値計算した結果を図8に示しておく。

VI おわりに

欠落をもつ回折格子による回折像を観察し、考察を加

えた。このことを具体的に示した例は、文献や参考書に見あたらない。ということは、このような実験・理論が学生にとって目新しいものとなるだろう。

いっぽう、こんにち実施されている物理に関する学生実験の課題は、すでに学習済みの内容のものか、何かしらの参考書に記載されている内容のもので、結果が分かっていることが大方のようである。どのような内容であれ、学生が直接自ら自然に接するというだけでは実験を行う意義がある。

ところで、講義の内容などを一歩進めた、しかし学生の手におえる範囲*の新しい課題に実験が踏み込むことも、彼らにとって結果が分かっているものと比較して、より自主的に自然に取り組む意欲が湧くのではなかろうか。

ここで述べた内容が現実の問題の中で何に役立つかは知的好奇心とは別の問題**であり、少なくともこれが、未知のものに対する思考の練成と、実験的検証を行う態度への涵養に役立つものとなることは期待できよう。

最後に、本研究の格子製作については当研究室で卒業研究を行った本間弥生さんの協力を得た。ここに付記してお礼にかえたい。

* フィルムの現像とそのあと処理により、格子が明暗物体とも位相物体ともなるようにできる技術報告がある²²⁾。ここでは定性的な取り扱ひのため、特別なことはおこなわなかった。

* 理論的内容も勿論のこと、実験時間の制約の中で、どこまで指導者が準備するかもかわりがある。

** 「何事に役立つ」ということから好奇心をもつ場合もあり、「全くかわりがない」というのではない。

参考文献

- (1) 原田達男, 森山茂夫, 喜多敏昭: 応用物理**44**, 1115 (1975)
- (2) 吉田庄一郎: 応用物理**45**, 434 (1976)
- (3) 原田達男: 応用物理**46**, 53 (1977)
- (4) 波岡武: 応用物理**45**, 655 (1976)
- (5) 中村道治, 相木国男, 梅田淳一: 応用物理**45**, 244 (1976)
- (6) 西田信夫: 応用物理**51**, 564 (1982)
- (7) 青柳克信, 難波進: 応用物理**45**, 657 (1976)
- (8) 佐野一雄, 青柳克信, 難波進: 応用物理**48**, 539 (1979)
- (9) 難波進: 応用物理**51**, 454 (1982)
- (10) 波岡武: 応用物理**51**, 552 (1982)
- (11) F. A. Jenkins, H. E. White: Fundamentals of Optics (McGRAW-HILL KOGAKUSHA, LTD.), 370 (1965)
- (12) 毛利勝郎: 科学の実験**24**, 809 (1973)
- (13) 銅沼芳郎: 干渉および干渉性(共立出版), 51, 57 (1981)
- (14) 那波信男: 物理教育**21**, 122 (1973)
- (15) 財木頼行: 科学の実験(共立出版) **26**, 118 (1975)
- (16) 高橋成和, 江崎操: 物理教育**29**, 269 (1981)
- (17) 矢野淳滋: 科学の実験(共立出版) **29**, 425 (1978)
- (18) 高橋成和, 近藤正夫: 応用物理学会応用物理教育研究会会報 **6**, 73 (1981)
- (19) 毛利勝郎: 科学の実験(共立出版) **24**, 809 (1973)
- (20) 伝田精一: 科学と実験(共立出版) **34**, 72 (1983)
- (21) 山田盛夫: 物理教育**31**, 7 (1983)
- (22) 高橋良夫, 泉水雄二, 長原幸雄: 物理教育**25**, 170 (1977)