

干渉実験に用いる複スリットの幅と間隔の検討

高 橋 成 和*

Masakazu TAKAHASHI

A Study on the Width and the Separation of a Double Slit for Interference Experiment at Upper Secondary School

高等学校の物理において、光の干渉を提示するのに適した複スリットの幅と間隔について検討した。まず、スリットの幅に対する間隔の倍率 m を組織的に変えて干渉光の強度分布を数値計算し、その「極大の間隔」とスリットの幅を無視して算出する縞の「明部の間隔」とを比較する。これより両者の差を2%以内に収めるには $m \geq 5$ にする必要があることが分かる。

次に、写真フィルムに製作した複スリットを用いて干渉縞を具現した。この明部の位置測定にも誤差が入るが、 $m \geq 5$ では差が3%程度に収まる。このとき、NaやHe-Neレーザー光を用いて縞を明確に分解するには、スリットの幅を 3.0×10^{-2} mm以下にするのがよい。これで干渉縞は、0次の回折像明部の中に10本以上現れる。

I 研究の目的

光の波動性を直観する学習指導は、高等学校物理において『複スリットによる光の干渉実験』から始まる。この導入段階において提示する現象は、次の条件を満たすものでなければならない。

- ① 干渉縞が明瞭に観測できる
 - ② スリット幅による回折効果が、複スリットによる干渉縞の中に混入しない
 - ③ 縞の位置がその計算結果と一致する
- なぜならば、
- ① 不明瞭なスペクトル像は観測しにくく、その結果生徒は物理現象に感動を覚えない
 - ② 高等学校の教科書では、まず複スリットによる干渉縞についての説明があり、後に単スリットによる回折縞の説明がある。この教科書に沿って前者を学習するさいに、観測している干渉縞の中に回折縞が混入することは、学習の明確化ができず、生徒を混乱させる
 - ③ 観測して得たデータが理論的に数値計算したデータとのくい違いが起きると、大学生でも、その原因を十分に検討しないで、それは実験誤差であると単純にかたづけしてしまう。この検討を指導者が彼等に

強いと、彼等がよく口にするように、実験観測は「面倒なもの」と極め付け、ひいては「嫌いなもの」になってしまいかねない。

また検討をさけると、実験観測は理論とくい違う「あいまいなもの」になり、科学の厳密性や実証性への不信感を彼等に抱かせてしまう

からである。

ところで、この指導にかかわる「実験方法の検討」と「複スリットの製作方法」については、多数の報告がある。

前者には、縞の写真撮影法¹⁾、明るい場所で縞を観測する器具²⁾、可干渉性を得るための単スリットの幅³⁾、単スリットと複スリットの間隔と縞の分離⁴⁾、併せて複スリットとスクリーン間隔の距離にかかわりフレネル回折からフラウンホーファー回折に移る縞の観察とその成立条件⁵⁾、縞の強度分布の実測^{4,6)}、複スリットの間隔と各スリットの幅の関係から生じる干渉縞の欠如^{7,8)}などの検討がある。

また後者には、ガラス板に塗布した墨液あるいは油性インキ膜をカミソリの刃で刻む^{9,10)}、スリットの拡大図面を写真撮影によりネガフィルム上に縮小する^{1,7,11)}、黒い紙などに単スリットを切りぬき、その中央に細い線を縦に張って二分する¹²⁾などの方法がある。

ところで、上記の条件を満たす複スリットの製作を実行しようとするとき、最初に「2本のスリットの中央線

* 島根大学教育学部理科教育研究室

の間隔 d と各スリットの幅 a をどのように設定するのが最も望ましいか」の疑問に遭遇する。しかし明確な解答を、今までの報告の中から得ることは難しい。辛うじて板屋¹³⁾が、干渉の生起する a と d の領域を実験により示しているにすぎない。ただしそこでは幻燈器の発散光を用い、単スリットにより光の可干渉性を得ている。

そこで本論文は、まず板屋の論文にない a に対する d の倍率 $m = d/a$ を組織的に変えた一連の複スリットによる干渉光の強度分布を計算し、理論的な検討を試みる。次にこれら一連のスリットを製作し、レーザー光と Na 放電光による干渉縞を具現し、これと計算結果とを比較・検討してみたい。

II 強度分布からの検討

波長 λ の光が幅 a 、間隔 $d = ma$ の複スリットに垂直入射するとき、そのスリットから十分に遠い距離 l にある壁面における干渉・回折光の強度分布を考える。複スリットの中央から壁面に下した垂線の足を原点 O とし、スリットと直交する方向の壁面上の位置を座標 x とす

る。座標 x における強度 I の原点 O での強度 I_0 に対する比、すなわち相対強度は

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{\sin 2\pi X}{2\pi X} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin 2(2\pi mx)}{\sin(2\pi mx)} \right)^2$$

となる。ここで第1項は幅 a の各スリットによる回折項を、第2項は間隔 $d = ma$ の二つのスリットによる干渉項である⁸⁾。ただし $X = ax/l\lambda$ とおいた。

まずスリットの幅 a を固定し、倍率 m を助変数とした強度分布の計算結果を図1に示す。ここで横軸は回折項の強度が0になる回折像暗部の次数、すなわち $l\lambda/a$ を単位とした壁面の位置 X を表し、縦軸は相対強度の対数 $\log(I/I_0)$ を表す。この図より次のことが分かる。

① m が小さい程、回折項と干渉項を相乗した項の極大と干渉項のみの極大の位置がずれている。前者は観測される縞の明部の位置で、後者は高等学校物理の計算で扱うスリットの幅を考えない理想化した間隔 $\Delta x = l\lambda/d$ で並ぶ明部の位置である。 $m = 2.5$ と 5.0 の場合について、図1を拡大して図2に挙げ、それらの位置のずれを AP で示した。このずれを、理想の間隔 Δx に対し相乗した項の『原点に隣り合う極大の位置 $\Delta x'$ がずれる割合 r

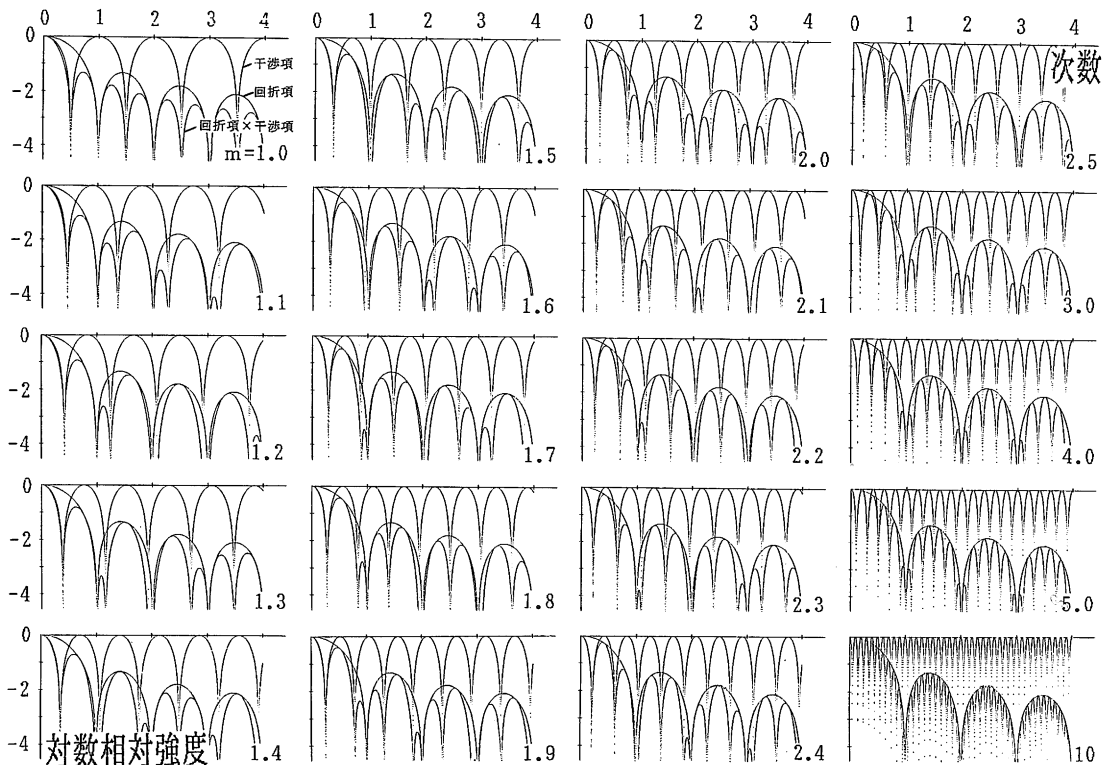


図1. 複スリットによるフラウンホーファー回折・干渉光の強度分布。スリットの幅 a による回折効果と間隔 d による干渉効果、並びに観察できる重畳効果の倍率 $m = d/a$ による違い。

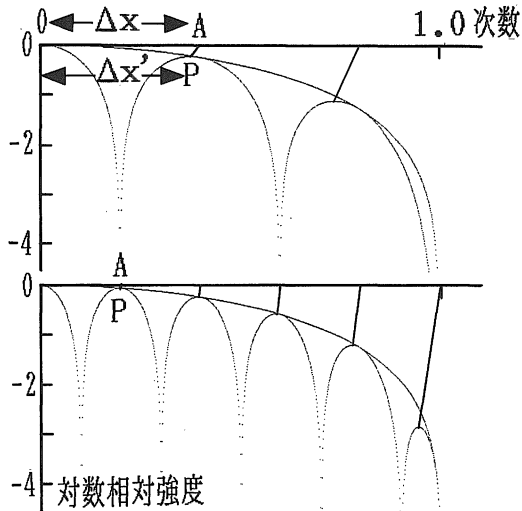


図2. $m=2.5$ と 5.0 の場合の強度分布。スリットの幅を考慮しない干渉強度の極大位置Aとスリットの幅を考慮に入れた強度の極大位置P。

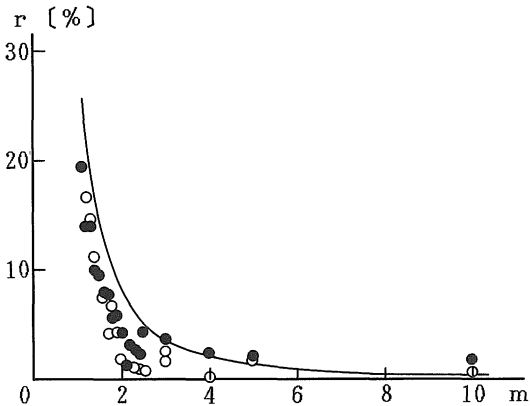


図3. 位置Aに対し位置Pがずれる割合 $r = (|\Delta x - \Delta x'| / \Delta x) \times 100\%$ 。強度分布から求めた結果(実線)と実測値($a = 3.34 \times 10^{-2} \text{mm}$ のとき○印, $a = 6.29 \times 10^{-2} \text{mm}$ のとき●印)。

$= (|\Delta x - \Delta x'| / \Delta x) \times 100\%$ で表し、図3の実線で示した。これより、 Δx と $\Delta x'$ の差を2%以内に収めるには $m \geq 5$ 、1%以内では $m \geq 7$ にする必要がある。

②回折強度が0である $l\lambda/a$ の整数倍の位置で、干渉項の分布は2分される。このため、干渉項に極大の消滅、相乗した項に極大の生成が起きる。

③0次の回折縞の中に干渉縞の明線が10本以上現れるためには $m \geq 5$ の必要がある。現象の明瞭な提示を効果的に行うためにも、この程度の明部が必要であろう。このことは、縞の等間隔性を保証する上からも必要である。

当然 m が大きすぎると明部が増し、その間隔が狭くなりすぎて、縞の分解は明瞭でなくなる。

次に a を変えれば、横軸の単位 $l\lambda/a$ と各項の強度の絶対値が変わる。 m を固定し、 a を大きくすれば前者が小さくなり干渉縞の分解が悪くなる。また a を小さくすれば後者が小さくなり観測に困難をきたすことになる。

III スリットの製作と干渉縞の具現

スリットは写真撮影の方法で製作した。まず白紙(1093mm×788mm)の中央に短辺に沿って幅10.0mmの黒線2本を平行に描く。その間隔 d は、倍率 m が1.1, 1.2, ……2.4, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0になるようにした。これらの図面を、8mと15m離れた位置から、焦点距離50mmの標準カメラレンズを通して撮影し*ミニコピーフィルム上に縮小・反転した。これで計算上のスリット幅は $a = 3.34 \times 10^{-2}$, $6.29 \times 10^{-2} \text{mm}$ となり、実測値との相対誤差は1%以下であった。前者の幅は、 $m=1.1$ の場合でもフィルム上で2本のスリットが確実に分離する限界であった。またこの幅は、 m が他の値でも、Na放電燈を光源に用いて干渉縞を観測するときには、その明るさの点から見ても最小限度であった。後者の幅は、前者のほぼ2倍を選んだ。この二つは、板屋が示唆した領域の両端近くに位置している。

まずスリットの幅 $a = 6.29 \times 10^{-2} \text{mm}$ を固定し、倍率 m を変えた複スリットによる干渉縞の様子を図4に示す。これらの写真は、20mmφの平行光束にしたHe-Neレーザー光(出力3mw, 波長 $\lambda = 623.8 \text{nm}$)を複スリットに垂直入射し、その干渉光を250mm望遠レンズで受けネオパンSSフィルム上に撮影した。この条件**は、結果が暗室中での眼視観測に近い状態になるように設定してある。

最上段の写真は複スリットと同じ幅をもつ単スリットによる回折像で、他の段の撮影に比べて2倍の露光を行った。生徒に提示する干渉縞が、これらの写真のどれでもよいとは考えられまい。 m が小さい程干渉縞は等間隔になく、その明部(白部)の長さに長短が生じている。このことは図1の強度分布に示したとおりである。

次に、レーザー光を直接スリットに入射し、そこから $l = 4.00 \text{m}$ 離れた壁面に干渉縞を投影して、明部の間隔 $\Delta x'$ を測定した。これと算出した明部の間隔 Δx とのず

* 9月の正午快晴時に屋上の日影で露光F8-1/60sで撮影、コピナールで25°C-5分間現像した。

** 露光F5-1/125s, ミクロファインで25°C-9.5分間現像した。

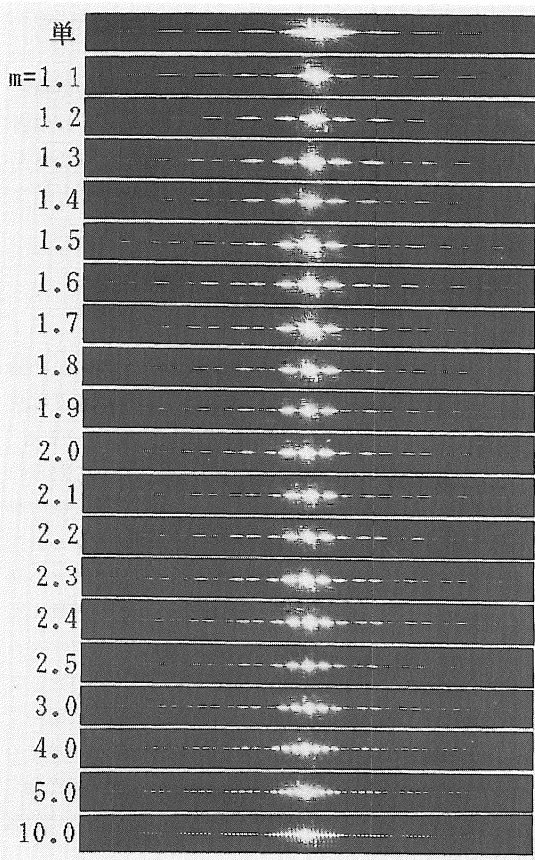


図4. 単スリット(最上段)とスリットの幅 $a = 6.29 \times 10^{-2} \text{mm}$ に対する間隔 d の倍率 m を組織的に変えた複スリット(第2段以下)によるレーザー光のフラウンホーファー回折・干渉像。

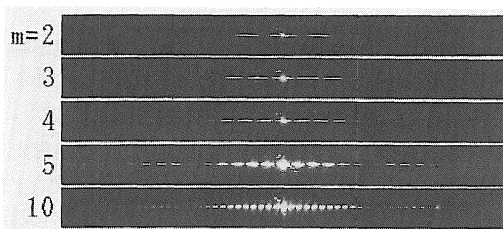


図5. スリットの幅 $a = 3.34 \times 10^{-2} \text{mm}$ の場合のレーザー光によるフラウンホーファー回折・干渉像。

れの割合 r を図2の上に○と●印で記入してある。○印は $a = 3.34 \times 10^{-2} \text{mm}$, ●印は $6.29 \times 10^{-2} \text{mm}$ の場合である。これらの印と実線の不一致は、明部に長さがあり、その極大の位置が判断できず、これが明部の中央にあるとしたことに起因する。

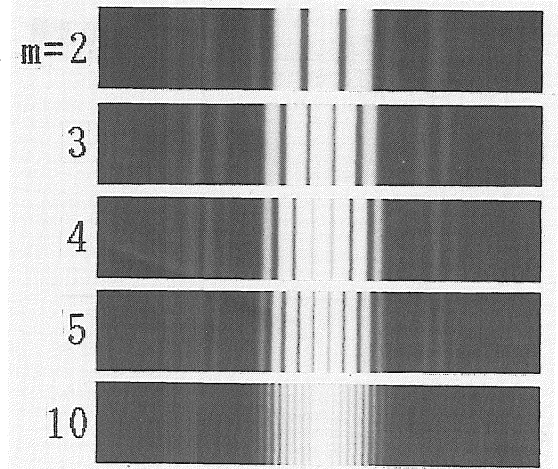


図6. スリットの幅 $a = 6.29 \times 10^{-2} \text{mm}$ の場合のNa放電光によるフラウンホーファー回折・干渉像。

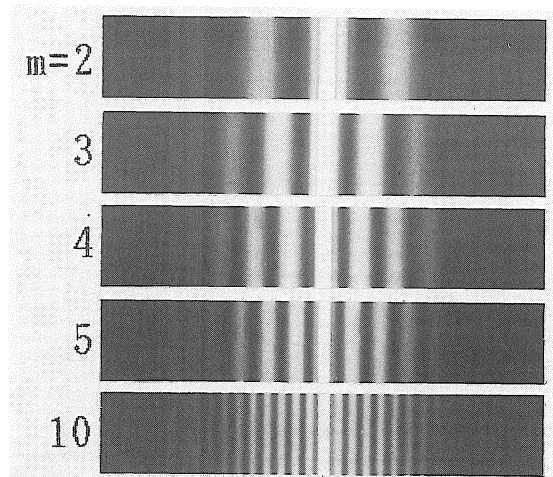


図7. スリットの幅 $a = 3.34 \times 10^{-2} \text{mm}$ の場合のNa放電光によるフラウンホーファー回折・干渉像。

この『判断の誤り』は、 m が小さいほど縞の明部が長くなり起こりやすい。しかし、縞の中央の位置を読み取ることが明部の極大の位置を外側にして判断したことになり、極大の位置を計算上の位置に近づけている。このため $m \leq 2 \sim 3$ では実測値と計算値のずれが実線で示す値より小さくなっている。かようにして、 $m \geq 2$ であればずれの割合 r は4%以内となり、この程度の実験であれば、この $m \geq 2$ の条件を満足すればよいという結論がでそうである。しかしこれでは、『判断の誤り』という具然性が混入しており、そこまで立ち入れない高校物理の範囲で、指導上にごまかしが生じることを筆者は懸念せ

ざるを得ない。また測定に不馴れであると、 $m \leq 3$ の場合のように明部の縞が長いときには、その中央がどこであるかの判断もたやすくなく、より大きな誤差が生じる可能性は大である。併せて明部の縞には分割が起きて、縞は等間隔に並ばない。そのため生徒は、どの縞を測定してよいか迷う。しかも50分の授業の流れの中で、この観測を実施するとき、生徒達は各縞の位置を読み取る時間の余裕はなく、両端の縞の位置とその間の縞の個数から、縞の分割など考慮することなしに、縞の間隔を算出し、とんでもない値を出してしまう。当然のことだが、間隔だけを問題にするならば暗部の間隔を測定すべきである。

m が大きくなると『判断の誤り』は減り、縞の等間隔性も増してくる。ところが m をあまり大きくすると、間隔 $\Delta x'$ が狭くなり縞の分離が悪くなる。これを避けるためにはスリットの幅 a を小さくすればよい。こうすることにより像全体が広がる。しかし全体の強度は低下する。 a を調節して回折効果の0次の明部のみを観測できるようにすれば、この中に干渉縞のみが浮揚し、縞の分割部分は見えなくなる。

スリットの幅を小さくした $a = 3.34 \times 10^{-2}$ mmの場合について、暗室中での眼視観測に近い状態の干渉縞を図5に示す。これでもレーザー光の強度が大で、1次の回折効果の重量が残っている。しかし、明るい教室で観察するとこれは目立たなくなる。

光源をNa放電燈にし、単スリットとコリメーターレンズを通して平行にした光束による干渉縞を図6、図7に示す。スリットの幅が小さい場合には、0次の回折像の中のみ干渉縞が明瞭に見える。

最後に、P.S.S.C.物理で提起された複スリット、すなわちガラス板に塗布した油性インキ膜を2枚重ねた刃で刻線したものに触れておく。このスリットは膜の厚さ、塗布時の温度や湿度、刃物の種類、刻線のときの刃先の圧力により出来栄が異なる。しかし概ね、片刃のカミソリの刃で $a = 1 \times 10^{-2}$ mm、 $m = 20$ 、刃先を折って使うカッターナイフの小型の刃で $a = 3 \times 10^{-2}$ mm、 $m = 10$ となっていた。これらの複スリットに直接レーザー光を入射して、4.0m隔てた壁面に投影した干渉縞は、ともに本論文

が示した条件を満たす大変よいものであった。

IV まとめ

干渉縞の明瞭性、回折効果の重量性、縞の間隔に関する観測値と計算結果との一致性の立場から、複スリットの幅 a と間隔 $d = ma$ を検討してきた。数mwのレーザー光を用いて観測する場合、次の点を留意したい。

①幅 a は板屋が示唆した領域の下限 $a = 3 \times 10^{-2}$ mm、あるいはそれ以下に選んだ方がよい。

②倍率 m は、板屋の結果より大きくても干渉性を示している。当然この違いは、光源や観測方法の差異に起因している。また縞の間隔の測定値 $\Delta x'$ と計算値 Δx の差を2%程度に抑えるには、 $m \geq 5$ にしなければならない。

③回折現象を学習していない生徒に、この現象を混入させずに、干渉縞のみを提示したい場合には、教室を暗くしない方がよい。

④P.S.S.C.物理が提起した方法は、大変により複スリットを提供する。

参考文献

- (1) 芦葉浪久：物理教育11, 30 (1963)
- (2) 山田盛夫：物理教育28, 10 (1980)
- (3) 遠山 武：物理教育26, 282 (1978)
- (4) 山田盛夫：物理教育19, 272 (1971)
- (5) 山田盛夫：物理教育30, 204 (1982)
- (6) 板屋源清：物理教育21, 186 (1973)
- (7) 毛利勝郎：科学の実験 (共立出版) 24, 809 (1973)
- (8) F. A. JENKINS, H. E. WHITE: *Fundamentals of Optics 4th Ed.* (Mc GLAW-HILL KOGAKUSHA) 340, 344 (1976)
- (9) 生地富雄：科学の実験 臨時増刊 (共立出版) 110 (1965-9)
- (10) 高橋成和, 江崎 操：物理教育29, 269 (1981)
- (11) 那波信男：物理教育21, 52 (1973)
- (12) 高橋成和, 江崎 操：物理教育30, 74 (1982)
- (13) 板屋源清：物理教育13, 14 (1965)