

## 光の干渉

### □ 目的

レーザー光源を使って、光の回折・干渉という現象を実感し、レーザー光の波長とスリット・回折格子との関係を理解する。

### □ 実験用具

レーザー光源、レーザー光源用台板、回折格子 2 種類、回折格子ホルダー、スリットホルダー (スリット板)、巻尺、グラフ用紙、セロハンテープ

### □ 解説

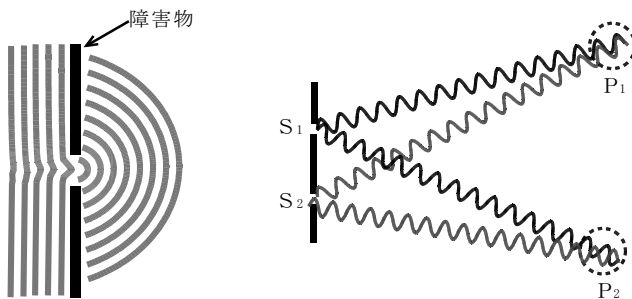


図 1 波の回折 (左) と波の干渉 (右)

図 1(左) は、左から進んできた平面波が波面と平行な障害物の隙間を通過する様子をイメージで描いている。波は隙間を通った後、障害物の背後に回り込んでいる。このような現象を波の回折といい、回折した波を回折波という。実際には波の波長と隙間の大きさによって回折の様子は異なり、光の場合は波長が非常に短いので、ある程度幅の狭いスリットなどを通るときに限り回折現象が顕著にみられる。障害物の隙間が複数あるときにはそれぞれの隙間を通して回折した波が重なり合うことになる。図 1(右) は、2カ所の隙間  $S_1$ 、 $S_2$  から進んできた波がある点で重なり合う場合を表している。2つの波は点  $P_1$  では山と山、谷と谷が重なっている (同位相) ので強めあい、点  $P_2$  では山と谷が重なっている (逆位相) ので打ち消しあうことになる。このように複数の波が重なり合って振動を強めあったり打ち消しあったりする現象を波の干渉という。

#### (1) 2重スリット — ヤング (Young) の干渉実験

図 2 のように、レーザー光源から出て 2 つのスリット  $S_1$ 、 $S_2$  を通った光がそれぞれ回折して進み、スクリーン上のある点  $P$  で干渉する場合を考える。このとき  $l \gg x$  であるので、2 つのスリットから点  $P$  までの距離の差 (光路差)  $l_2 - l_1$  は、次式で与えられる。

$$l_2 - l_1 \approx d \sin \theta \approx d \frac{x}{l}$$

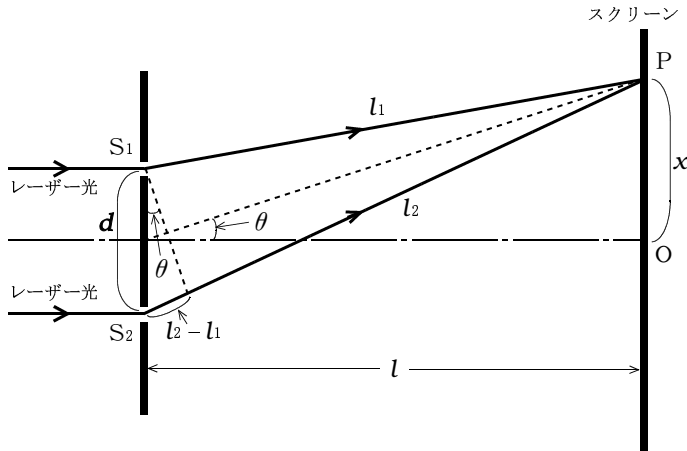


図 2

レーザー光では  $S_1$ 、 $S_2$  における振動の位相がそろっているため、スクリーン上の点  $P$  で  $S_1$ 、 $S_2$  からの光が強めあって明るくなるのは光路差  $l_2 - l_1$  が波長の整数倍になる場合 (同位相) であり、打ち消しあって暗くなるのは光路差  $l_2 - l_1$  が波長の半整数倍になる場合 (逆位相) である。

以上をまとめると、2重スリットの干渉模様は次の条件で決まることになる。

条件 I

$$\frac{xd}{l\lambda} = \begin{cases} 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots & \text{のとき明} \\ \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \pm \frac{5}{2}, \dots & \text{のとき暗} \end{cases}$$

$x$  : スクリーン中央を 0 としたときの各干渉模様の位置

$d$  : スリットの間隔

$l$  : スリットからスクリーンまでの距離

$\lambda$  : レーザー光の波長

上記の解説を波の形で表すと 図 3 のようになる。レーザー光の山と山、谷と谷が重なり合う場所では強めあって明るくなり、山と谷が重なり合う位置では打ち消しあって暗くなる。実際にはスリットの間隔やレーザー光の波長に比べて、スリットとスクリーンの距離が非常に大きいので、干渉模様の中央付近では隣り合う明るい部分の間隔はほぼ等しくなる。また、これをグラフで表すと 図 4 のようになる。横軸は条件 I 式の値、縦軸は光の強度 (明るさ) を示し、強度は最大値が 1 になるように規格化されている。

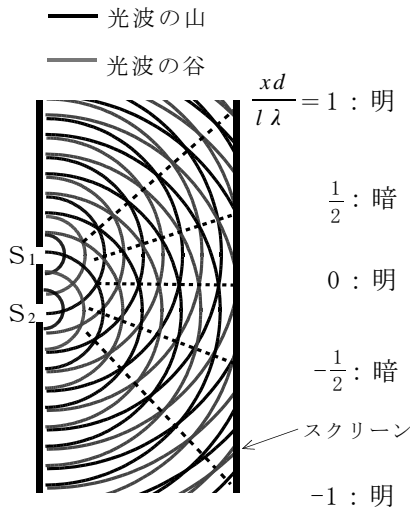


図 3

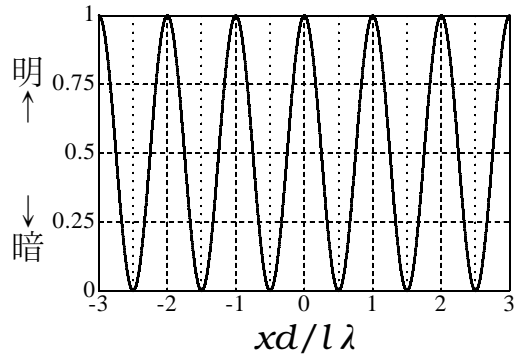


図 4 2重スリットによる干渉模様での光の強度

(2) 回折格子

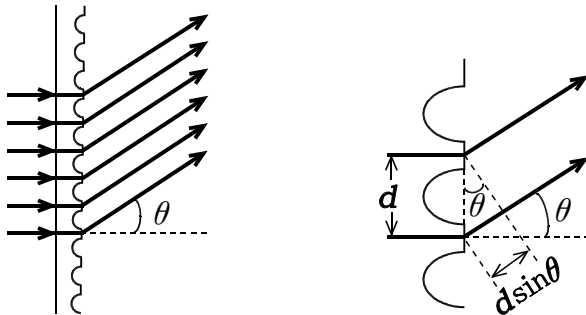


図 5 回折格子

回折格子とは平面ガラス板の片面に多数の平行なみぞを等間隔に刻んだものである。回折格子の面に垂直に光を照射すると、みぞの部分では光が通過しないので、図 5(左)のように非常に数の多い多重スリットとなる。

各スリットからの回折波が遠方のスクリーン上の点 P で重なり合う場合、隣りあうスリットからの光の光路差は  $d \sin \theta$  となり (図 5 (右) 参照)、2重スリットの場合と同様に条件 I の式が成り立つ。隣りあう 2 つの光が強めあえば、すべてのスリットからの光が強めあうからである。この式からわかるようにスリットの間隔  $d$  が小さいほど  $x$  が大きくなりスクリーン上の干渉模様の間隔はひろがる。図 6 は等間隔のスリットが 6 本の場合の干渉模様の様子を 2重スリットと同様の方法でグラフに表したものである。図 4 と比較してみると明るい部分の幅が狭くなっていることがわ

かる。回折格子ではスリットの数非常多いので、そこからのすべての光が同位相で強めあう位置では非常に明るくなり、少しでもずれると暗くなる。

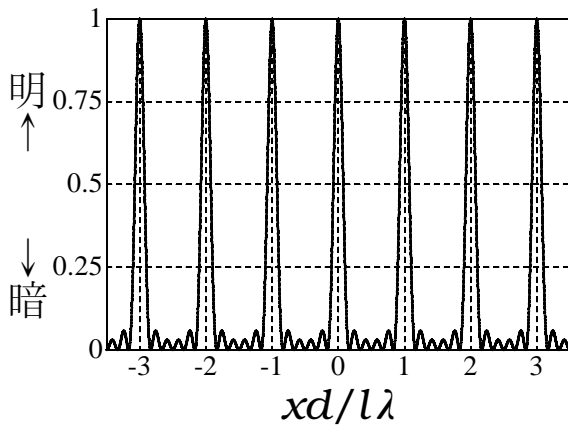


図6 多重スリット (スリット数6本) による干渉模様  
の光の強度

### (3) 単スリット — フラウンホーファー (Fraunhofer) 回折

単スリットでも、スリットの幅が光の波長に比べてある程度大きい場合には回折による干渉模様が見られる。これはスリットの幅  $d'$  のすべての部分からの光が干渉しあうことによって起こる (図7(左))。つまり、 $d'$  には無数のスリットが並んでいると考え、それらを通ってきた波を2重スリットや回折格子の場合と全く同様に加え合わせれば、干渉模様の様子を知ることができる。

この場合には次の条件で明暗が決まる。

条件 II

$$\frac{xd'}{l\lambda} = \begin{cases} 0, \pm\frac{3}{2}, \pm\frac{5}{2}, \pm\frac{7}{2}, \dots & \text{のとき明} \\ \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots & \text{のとき暗} \end{cases}$$

$x$ : スクリーン中央を0としたときの各干渉模様的位置

$d'$ : スリットの間隔

$l$ : スリットからスクリーンまでの距離

$\lambda$ : レーザー光の波長

また前と同様にグラフで表すと、単スリットの場合にはスクリーン上での光の強度は図7(右)のように分布する。スリットの正面方向からずれると急速に強度が弱まり、その傾向はスリット幅が大きくなるほど顕著である

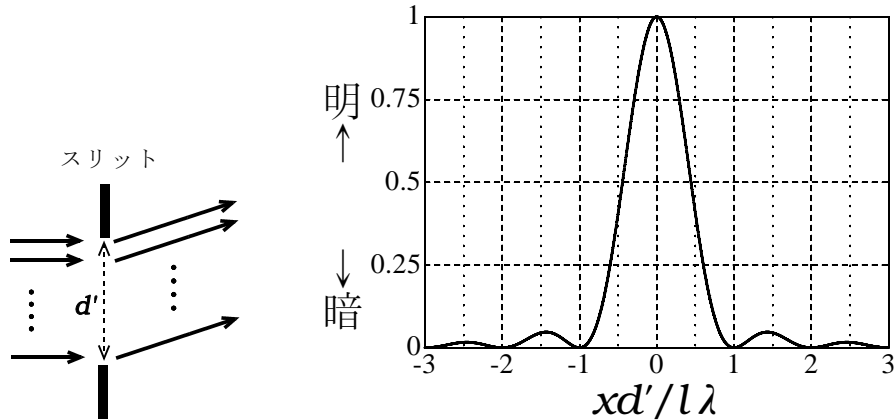


図7 単スリット (左) とそれによる干渉模様 of 光の強度 (右)

## □ 実験方法

直接、あるいは反射したレーザー光を目にあてないように注意する。目線はレーザーの高さまで下げないこと。

- (1) レーザー光源を台板に乗せて机の上に置く。レーザー光源の電源コードをコンセントにつなぎ、スイッチを入れレーザー光が壁に垂直にあたるようにする。
- (2) 回折格子 ( $d = 10/500$  [mm]) をホルダーに入れ、レーザー光源のすぐ前方に置いて回折格子から壁面までの距離  $l$  を測定する。
- (3) セロハンテープを用いて、グラフ用紙の目盛線が干渉模様に沿うように壁に固定する。
- (4) グラフ用紙上の干渉模様の明るい部分の各中央に印を付ける。
- (5) グラフ用紙を壁面からはがし、記入した印に条件 I 式の値を対応させて、レーザー光源の波長  $\lambda$  を求める。
- (6) もう一方の回折格子 ( $d = 10/1000$  [mm]) に入れ替え (2) ~ (5) と同様に測定を行い、光源の波長を求める。このとき判別しやすいように前回とは異なる印を付ける。
- (7) スリット板には単スリットと 2 重スリットの両方が刻まれている。どちらがどのスリットかは蛍光灯などにかざして見ると分かる。スリット板のセットされたスリットホルダーをレーザー光源のすぐ前方に置いて、単スリットと 2 重スリットの干渉模様の違いを観察する。
- (8) 壁面のグラフ用紙の位置を少しずらし前の印と重ならないようにして、2 重スリットからグラフ用紙までの距離を測定する。
- (9) 2 重スリットにレーザー光をあて、その干渉模様印を付ける。このとき、出来るだ

け多くの暗い部分の各中央に印を付けると正確な値が得られる。

- (10) 次の「問 1」について回答する。

問 1

波長  $\lambda = 500$  [nm] ( $1$  [nm] =  $10^{-9}$  [m]) の光で、間隔  $d = 0.1$  [mm] の 2 重スリットにより距離  $l = 1$  [m] のスクリーンにできる回折像の様子を間隔を含めて描け (隣り合う暗い部分の中心の間隔を明記する)。

- (11) グラフ用紙を壁面からはがし、(9) で記入した印に条件 I 式の値を対応させて、2 重スリットのスリット間隔を求める。  
 (12) 単スリットについて (8)、(9) と同様の測定を繰り返す。  
 (13) 次の「問 2」について回答する。

問 2

波長  $\lambda = 500$  [nm] の光で、幅  $d' = 0.1$  [mm] の単スリットにより距離  $l = 1$  [m] のスクリーンにできる回折像の様子を間隔を含めて描け (隣り合う暗い部分の中心の間隔を明記する)。

- (14) (12) でグラフ用紙に記入した印に条件 II 式の値を対応させて、単スリットのスリット幅を求める。  
 (15) 次の「問 3」について回答する。

問 3

もし干渉現象がなかったとすると、2 重スリット、単スリットの場合それぞれスクリーン上でどのように見えるだろう。

## □ おまけ 1 — 回折格子における干渉現象

Laser とは Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の略である。これを逐語的に翻訳すると、誘導放射による光増幅、という意味であり、この言葉は Laser の仕組みを表している。以下ではこの言葉の意味を理解する、といっても良い。

光とは何だろう？電磁波であり、波のイメージがあるであろう (図 8 参照)。しかし、これは理想化され過ぎている。実際の光はたくさんの原子から、出されている。例えば  $10$  W の可視光であると、光量子仮説を使い、毎秒  $10^{20}$  個程度の原子より光子が放出されていると計算される：

$$\frac{10 \text{ [W]}}{h\nu} \sim 10^{20} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (1)$$

ここで  $h = 6 \times 10^{-34}$  [J · s] は Planck 定数で、可視光は波長  $\lambda = 400 \sim 800$  [nm]  $\Leftrightarrow$  振動数  $\nu = (0.4 \sim 0.8) \times 10^{15}$  [s<sup>-1</sup>] を持つとした。これらの原子が各々勝手に光を出すと 8 図のような一つの大きな位相の揃った波とはならない。実際の現象としては、通常の光は干渉しにくいという

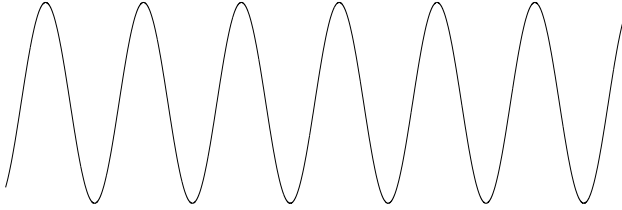


図 8 波 — イメージ

ことになる。現に 2 重スリットに通常の電球の光を通して干渉縞はできない。通常の光でも例えば薄い膜では干渉現象は生じることが膜に色がついて見えることから判る。干渉する光同士をコヒーレンスがあると呼ぶ。通常の光は短く、マイクロオーダーのコヒーレンスの長さしか持たない。レーザー光は通常の光に比べて桁違いにコヒーレンス長の長い光である (数 cm ~ 数 1000 km)。通常の光よりもはるかに理想的な (そして単純な) 光のイメージ図に近い光といえる。

レーザー光のような理想的な光はいかにして発生できるのであろうか？これは光を増幅すれば良いのである。原子 1 個の出す光であればコヒーレンスを持つ。この光を位相をずらすことなく、よりパワーのある光に増幅すれば良いのである (LASER の LA の部分)。ではいかにして増幅するのか？これはレーザー媒質の両端に鏡を付け、媒質内に共鳴状態を作ることによってなされる。共鳴状態を作ることにより、通常の放出とは異なり、誘導放出 (LASER の SER) され、位相の揃った光が発生する。いわば原子がシンクロナイズしてダンスするわけである。また、共鳴状態でほとんどの光は媒質内に残っているため、コヒーレントな光を持続して発生し続けることができる。

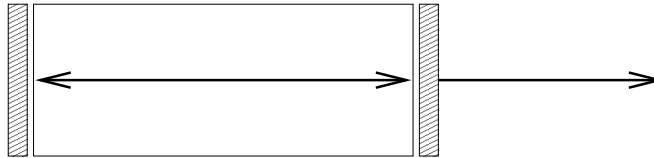


図 9 Laser 発振器：両端に反射鏡があり、中には媒質がある。Laser 媒質は実験の場合は半導体。他にもガス (例えばヘリウム-ネオン) など使われる。

## □ おまけ 2 — もっと詳しく知りたい人のために

ここで先程言ってきた干渉の様子が初等的に式を使っても導けることを示そう。

まず、個々の波について考える。 $P_1, P_2$  から来た波を  $E_1, E_2$  とすると、

$$E_1 = A \sin(kl_1 - \omega t), \quad E_2 = A \sin(kl_2 - \omega t) \quad (2)$$

ここで  $A$  は波の振幅、 $t$  は時間、 $\omega$  は周波数、 $k = 2\pi/\lambda$  は波数である。波の強度はその 2 乗の時間平均となる。時間平均を  $\langle \dots \rangle$  で表すと、 $P_1, P_2$  一方だけから来た波の強度を考えると

$$\langle E_1^2 \rangle = \langle E_2^2 \rangle = \frac{1}{2} A^2 \quad (3)$$

ここでは  $\langle \sin^2(kl_{1,2} - \omega t) \rangle = 1/2$  を用いた。

波の干渉とは両者から来た波を 加えるだけで良い という簡単なことである。つまり、 $Q$  で観測される波を  $E_Q$  で表すと

$$E_Q = E_1 + E_2 \quad (4)$$

さて、 $Q$  で観測される波の強度は

$$\langle E_Q^2 \rangle = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2\langle E_1 E_2 \rangle = A^2 (1 + 2\langle \sin(kl_1 - \omega t) \sin(kl_2 - \omega t) \rangle) \quad (5)$$

三角関数の加法定理などと  $\langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle = \langle \frac{1}{2} \sin 2\omega t \rangle = 0$  を用いると

$$\begin{aligned} 2\langle \sin(kl_1 - \omega t) \sin(kl_2 - \omega t) \rangle &= 2\langle (\sin kl_1 \cos \omega t - \sin \omega t \cos kl_1)(\sin kl_2 \cos \omega t - \sin \omega t \cos kl_2) \rangle \\ &= \sin kl_1 \sin kl_2 + \cos kl_1 \cos kl_2 = \cos k(l_1 - l_2) \end{aligned} \quad (6)$$

(3),(5),(6) 式を合わせると

$$\langle E_Q^2 \rangle = A^2 (1 + \cos k(l_1 - l_2)) = 2A^2 \cos^2 \left( \frac{1}{2} k(l_1 - l_2) \right) = 2A^2 \cos^2 \left( \pi \frac{(l_1 - l_2)}{\lambda} \right) \quad (7)$$

この干渉の様子を示したのがまさに図 4 で、それに対応するのは条件 I である。

より多くの波の干渉を考えよう： $N$  個の点  $P_1, P_2, \dots, P_N$  は同じ波を出していると考える。先と同様に、 $Q$  での波の強度は  $E_Q = E_1 + E_2 + \dots + E_N$  と波を足しあげて、強度は  $\langle E_Q^2 \rangle$  として求まる。技術的な計算は省くが、角度  $\theta$  が小さい場合には次のように求まる。

$$\langle E_Q^2 \rangle = I_0 \left( \frac{\sin \left( \pi \frac{D'x}{\lambda l} \right)}{\pi \frac{D'x}{\lambda l}} \right)^2 \quad I_0 : \text{定数} \quad (8)$$

この式は  $N$  によらないので  $N \rightarrow \infty$  を取れば有限な幅を持つスリットに対応する。この式をグラフにしたのが図 7(右) である。(8) 式で  $x \rightarrow 0$  とすると  $\langle E_Q^2 \rangle \rightarrow I_0$  となり、もっとも強度が大きい。初めから有限な幅のスリットを扱いたければ通常の和のかわりに、有限な領域での足しあげ(つまり積分)をすれば良い。