

## 2 干渉と光の本性

### 3.1 干渉と光の本性

光が波か否かは自明ではない。

3世紀も前にアイザック・ニュートンは光が粒子（彼は「微粒子」と言った）から成るという理論を展開した。それは光の粒子は鏡にぶつかって反射し、ガラスや水中で光が速くなるというものだった。

ほとんど同じころ、ニュートンほど有名ではない科学者のクリスチャン・ホイヘンスは、光が波であると考えた。彼の理論も反射という現象を説明できたが、ガラスや水中で遅くなるという予測だった。

当時はガラスや水中での光の速さに関するこの疑問を解決する実験的証拠はなかった。

ニュートンの重力理論と運動の法則は広く受け入れられていたので、光の微粒子説が君臨しホイヘンスの理論は100年間にわたって拒絶されつづけた。

トーマス・ヤングによりホイヘンスの理論の最初の実験的な証拠が与えられた。

彼は非常に接近した2つのスリットを通過する光を詳細に研究した。

ヤングは明暗の縞模様を発見したが、一方のスリットから来る波と他方から来る波の干渉というアイデアを使わなければ説明ができなかった。

### 光の干渉

図に示すように、衝立に2つのスリットを非常に接近して開け、光の平行なビームを照射する。

スリットを通過すると光は回折する。顕微鏡をつかうと各スリットからの光が重なる場所で明暗の縞の干渉パターンが見える。

ニュートンによる光の理論だと、単に2本の明るい帯がそれぞれ各スリットに相対する位置に像として見えるはずである。

しかし実際には、明暗の縞の数はスリット間の距離およびスリットの幅に依存する。

注意深ければ数個以上の薄暗い縞を容易に見ることができる。

ホイヘンスの波動理論は縞模様のパターンを説明できるし、これと組み合わせて光の波長を決める測定も可能である。

波長は非常に小さく1mmに2000個以上の波長が入ることもある。

それぞれのスリットから来た光が相殺すると縞模様の暗い部分ができ、強め合うと明るい部分ができる。

2個のスリットを出る波の位相差は、点光源から来る別々の波面が通過するので、一定となる。

この2個のスリットは、一定の位相差で波を出すので可干渉(coherent)な光源という。

一般に、任意の点Pにおいて波が重なり合うとき、一方のスリットから来る波と他方の波が進む距離は異なる。したがってPの位置により両者の位相差が異なる。

明るい縞は、2個のスリットから来る波が同じ位相で互いに強めあって生じる。

暗い縞は、ちょうど逆の位相で来る波が打ち消しあって生じる。

### 2重スリットの実験を説明する理論

下図に2個のスリット $S_1$ と $S_2$ 、および $S_1S_2$ と平行なスクリーン上の干渉パターンを示す。

点Rで強めあう（明るい縞になる）条件は

$$S_1R - S_2R = m\lambda \dots m \text{は自然数}$$

である。

$m = 0$ は、中央の明るい縞。この点を  $O$  とする。

$m = 1$ は、中央の明るい縞のすぐ両側にできる明るい縞。この位置  $P$  で波が強めあう条件は

$$S_1P - S_2P = \lambda$$

である。

直線  $S_1P$  上に  $QP = S_2P$  となる点  $Q$  をとる。このとき

$$QS_1 = S_1P - S_2P = \lambda$$

である。

$S_1$  と  $S_2$  を通過する光の位相が等しいとすると、 $S_1S_2$  の中点  $M$  の真正面が  $O$  である。

三角形  $MOP$  と  $S_1S_2Q$  はほとんど同じ形（相似）なので  $\frac{QS_1}{S_1S_2}$  と  $\frac{OP}{OM}$  がほとんど等しい。

よって

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{y}{X} \quad \text{ただし} \quad \begin{cases} d = \text{スリット間隔 } S_1S_2 \\ y = \text{縞の間隔 } OP \\ X = \text{スリットとスクリーンの距離 } OM \end{cases}$$

3 問 1

解

$$d = 0.4 \text{ mm}, \quad X = 1.50 \text{ m}, \quad y = 2.4 \text{ mm},$$

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{y}{X} \text{ から } \lambda = \frac{yd}{X} = \frac{(2.4 \times 10^{-3})(0.4 \times 10^{-3})}{1.50} = 6.4 \times 10^{-7} \text{ m} = 640 \text{ nm}$$

## 4 光の反射と屈折

### 平面鏡による反射

#### 反射の法則

図1は光線の平面鏡による反射を示す。

リップルタンクの実験で直線の反射板により平行波が反射される様子を見たが、スケールがずっと小さいことを除き、起きていることは同じである。

鏡の法線に対して入射光と反射光の角は等しい。

これが反射の法則(law of reflection)である。

#### 像

平面鏡の向こう側に物体の像が見え、反射後の光線はその像から発せられたかのようなのである。

この像の位置にスクリーンをおいても何も映らないので虚像(virtual image)という。

図2のように物体が鏡のこちら側にあるとき像は反対側の鏡から同じ距離にできる。

### 平面の境界での屈折

図3のようにガラスのブロックから空気中に光線が出るとき、屈折して法線の方向から遠ざかる。

さまざまな入射角*i*について屈折角*r*を測ると比  $\sin i / \sin r$ が定数となることがわかる。

これは発見者にちなんでスネルの法則という。

この定数は物質の屈折率(refractive index)といい、物質により異なる。

正確には、光が真空から物質に入るとき値をその物質の屈折率という。

### 屈折の説明に波動理論を用いる

透明な物質中で光は空気よりゆっくり進む。

図3は平面波が空気と透明な物質の境界を通過するとき起きることを示す。

波の速さは=振動数×波長であり、空気中から物質中に入っても振動数は変わらないから、屈折率は

$$\frac{\text{空気中の光の速さ}}{\text{物質中の光の速さ}}$$

に等しい。

### 全反射

光が透明な物質から空気中に出るとき、境界面で光線が屈折し法線から遠ざかる方向に曲がる。

入射角を大きくしていくと、図4のように屈折した光線が境界面に沿った方向に出る。

このときの入射角を臨界角(critical angle)という。

入射角がこの値を超えると光線は境界面で全反射 (total internal reflection) する。

屈折率*n*の物質から空気に出るときの臨界角 $\theta_c$ は、スネルの法則で屈折角を $r = 90^\circ$ とおいた入射角*i*として計算できる。

物質中の光線の入射角であることに注意して

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin \theta_c}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}$$

$$\sin 90^\circ = 1 \text{ だから } \sin \theta_c = \frac{1}{n}$$

## 光ファイバー

医療で光ファイバーは内視鏡に，また通信システムで光パルスを伝達するのにも用いられる。

図5は細い光ファイバーにより光線がガイドされる様子を示す。

ファイバーの曲がり方が一定値以下ならば境界に光線があたるたびに全反射が起きる。ファイバーのコア（芯）は，それより屈折率が小さい透明なクラッド（覆い）によって囲まれている。この構造により，ファイバーどうしが接触しても光が漏れ出さないようになる。

## 5 問2

1.

$$i = 30^\circ, n = 1.5,$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \text{ より } \sin r = \frac{\sin i}{n} = \frac{\sin 30^\circ}{1.5} = \frac{0.5}{1.5} = 0.33 \therefore r = 19.3^\circ$$

2.

$$\frac{\text{空気中の速さ}}{\text{ガラス中の速さ}} = 1.5$$

を变形して

$$\text{ガラス中の速さ} = \frac{\text{空気中の速さ}}{1.5} = 2.0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

$$3 \text{ (a) } \sin c = \frac{1}{n} = \frac{1}{1.5} = 0.67, \therefore c = 42^\circ$$

(b) 光線はプリズムの面 AB に直角（すなわち法線方向）に入射する。面 BC での入射角は  $45^\circ$  で臨界角より大きいから、

全反射を起こし面 AC に至り、ここでも  $45^\circ$  で入射する。再び全反射を起こし面 AB へは垂直に入射し屈折なしに透過する。

## 6 凸レンズと凹レンズ

レンズは実像あるいは虚像をつくるのに使われる。

- ・実像(real image)は、そこにスクリーンを置くと像が映し出される（たとえば、プロジェクターの像）。
- ・虚像(virtual image)は、あたかもそこから光が発射しているように見える像（たとえば、鏡に写した物体を見るときや、拡大鏡で拡大してみたときの像）

・凸レンズ(convex lens)はカメラやプロジェクター、顕微鏡や望遠鏡また遠視のメガネに使う。

眼には変形できる凸レンズ（水晶体）が入っているが、近くの物体をはっきり見るには屈折の度合いが弱いことがある。

これを遠視といい凸レンズで補正する。

・凹レンズ(concave lens)は凸レンズと組み合わせて光学機器やカメラの高精度なレンズ系として利用する。

さらに、屈折の度合いが強い近視は遠くの物体をはっきり見ることができないが、

これを補正するのに凹レンズを用いる。

### 凸レンズ

凸レンズは物点からの光を像点にあつめて実像をつくるが、どのようにそれが実現するか平行ビームに対する作用を上左図に示す。

### 焦点距離, $f$

光軸に平行な光線がレンズにより 1 点に集まる点が焦点(focal point)  $F$  であり、レンズから焦点までの距離が焦点距離である。

### 像の作図

凸レンズによる像の位置と大きさは作図により求められる。上中図（上・下）は方法を示す。

（上）は倒立して縮小された実像になる。

（下）は正立した虚像である。

### 凹レンズ

凹レンズは物点から来た光をさらに広げる、もしくは集まり方を緩やかにする。

### 焦点距離, $f$

下左図は平行ビームに対する凹レンズの作用を示す。

凹レンズに入った平行光はあたかも 1 点から光が出たように広がるが、この点からレンズまでの距離が焦点距離である。

### 像の作図

下中図は凹レンズの結像の作図を示す。

これらの図では、像は虚像で正立、物体より内側にできる。

### レンズの公式

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad \text{ただし} \quad \begin{array}{l} u = \text{レンズから物体までの距離} \\ v = \text{レンズから像までの距離} \end{array}$$

式中の  $u, v, f$  の符号

$$f > 0 : \text{凸レンズ}, \quad f < 0 : \text{凹レンズ}$$

$u > 0$  : 物体が常にレンズの左側にあるとしている

$v > 0$  : 像がレンズの右にできる (実像)

$v < 0$  : 像が左側にで

きる (虚像)



7 問3

$$u = 0.08 \text{ m}, \quad f = 0.10 \text{ m}, \quad \text{レンズの公式は} \frac{1}{0.08} + \frac{1}{v} = \frac{1}{0.10} \text{ であり} \frac{1}{v} = \frac{1}{0.10} - \frac{1}{0.08} = -2.5 \therefore v = -\frac{1}{2.5} \\ = -0.40 \text{ m}$$

物体と同じ側，レンズから 0.40 m の位置に虚像ができ，横倍率は  $0.40 \div 0.08 = 5$  である．

したがって像の高さは  $25 \text{ mm} (= 5 \times 5 \text{ mm})$ ．

## 8 収差

光学機器で作る像の質はそこで用いる光学素子（たとえばレンズ）の質に依存する。

像に悪い影響を与える効果をいくつか示す（他にもたくさんある）。

球面収差(spherical aberration)はレンズの外側を通過した光と内側を通過した光が別の像を結ぶことによる。

レンズや球面鏡の面の形によりこの収差の大きさが決まる。

色収差(chromatic aberration)はレンズにあたった白色光が色ごとに異なる角度で屈折することによる。

屈折率が異なる材料でつくった凸レンズと凹レンズを貼り合わせるとこの効果を小さくできる。

像面湾曲(curvature of image field)

## 9 カメラ

### カメラ

カメラの中にあるフィルムの上に凸レンズが実像をつくる。

デジタルカメラではフィルムが CCD(charge coupled device)や CMOS(complementary metal oxide semiconductor)に置き換わる。

物体までの距離に応じてレンズの位置を調整する。

近い物体ほどレンズとフィルムの距離を大きくする。

絞りでカメラに入る光量を調整する。

絞りを広げると回折は小さくなり、また被写界深度は浅くなる。

高速の被写体を撮るにはシャッターを素早く開閉する必要がある。

このような場合、十分な光量を確保するために絞りを広げる必要があり、動く被写体の写真では被写界深度が浅くなって焦点を合わせた位置以外の像がぼやける。

### 屈折望遠鏡

遠方の物体の中間的な実像を対物レンズでつくる。

この像を接眼レンズで拡大された虚像として観測者が見る。

虚像は無限遠の位置に見える。

目を接眼リングにあてて、接眼レンズによる対物レンズの像の近くに目をもってくる。

望遠鏡の倍率は最終的な像が物体の何倍に見えるかを示す。（角度）

たとえば、肉眼で月を見るのに比べて望遠鏡で見ると 10 倍に広がるなら倍率は  $\times 10$  となる。

対物レンズの径が大きいほど望遠鏡に入る光量が増える。

肉眼で見えない星が望遠鏡で見えるのはこのためである。

それに加えて回折の効果が小さくなり拡大された像の詳細がより鮮明に見える。

ただし、口径が 10 cm を超えると空気の揺らぎのため見え方に限界が生じる。

### 光学顕微鏡

対物レンズが拡大された実像をつくる.

接眼レンズを通して観測者はこの中間的な像のさらに拡大された虚像を見る.

通常の設定では最終的な像は観測者の明視の最短距離(near point of vision)につくる.

物点からの光が対物レンズを通るとその開口による回折のため像がぼやける.

自然光で見るよりも青いフィルターを通して見たほうが鮮明な像になる.

青い光は（紫を除く）他のどんな色より波長が短いので回折の効果が小さいからである.

十字線（または物差し）を中間的な像と同じ位置におくと、最終的な像とともにそれが見える.

12 問4

1(a) 略

(b)可視光線の中では青い光の波長が短いので、回折による像のぼけが少ない。

2(a) 略

(b) 利点：光量が増えるので暗い物体でも見える，欠点：レンズ（ガラスの均一性，曲面）をつくるのが大変になる/筒が長くなると筒内空気のゆらぎが邪魔になる