ソ連科学誌・クヴァントから

やさしい物理学 ⑰

小島　英夫（静岡大学）訳

1. 波の回折　(1986, No. 1, pp. 27～28)

波による障害物の迂回，すなわち幾何学的に陰になる場所への波の侵入を回折という．これは，どんな性質の波でもが持っている，波の特徴的な現象の一つである．

回折は，障害物の寸法が波の波長と同程度か，それよりも少し大きくなったとき，特に目立つようになる．例えば，音波の波長は1m程度であり，その回折は日常的に観察される――音は曲り角の向うからでも聞こえてくる．ところが，光では波長がマイクロメーター（$1\mu m = 10^{-6} m$）の何分の1かであり，普通の条件では光の回折を観察するのは難かしい．そのため，長い間，光はつねに直進すると考えられていた．

波の回折の現象は，ハイゲンスの原理（本誌，次論文）をつかって，定性的に説明できる．光の回折の最初の定量的な理論は，フランスの技術者オーギュスタン・フレネルによってつくられた．1818年に，パリの科学アカデミーの懸賞論文として，彼の論文"光の回折についての考察"が提出された．次の年にこの論文は入賞し，後にアカデミーの紀要に掲載された．

フレネルの論文を通読した委員会のメンバーの中に，有名な科学者C. ポアッソンがいた．彼はフレネルの理論にもとづいて，種々の障害物による回折を考察し，二つの特別な場合の計算で逆説的な結果を得た．第1の場合には，光の通路に置かれた小さな球の幾何学的な影の中心に，輝く点（ポアッソンの輝点）が生ずる筈だということを彼は示した．第2の場合には，丸い小穴を光が通過したとき，回折像の中心には暗い点が現れる筈だった．ポアッソンの計算結果は，フレネルの理論が間違っていることを示すのだと考えられた．しかし，その後の実験は，フレネルの理論のすべての結論を明瞭に支持した．この事実は，光の波動性を広く認識させることに貢献した．

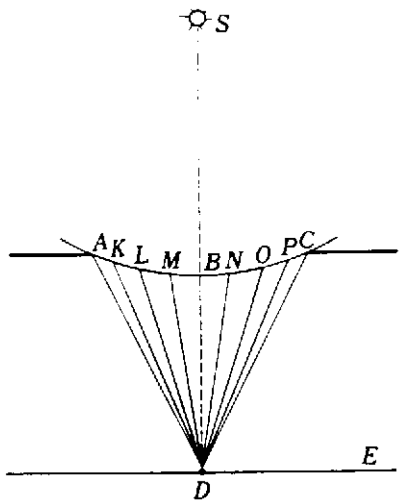

図1

回折現象をもっと詳しく考察しよう．不透明な障害物に開けた丸い穴による光の回折を考える．図1において，円弧ABCは点光源Sから発した光の波が，ちょうど障害物に達した瞬間の波面を示す．この波面の各点は，ハイゲンスの原理にしたがって，2次波の源になっており，フレネルの理論によれば，その干渉によってスクリーンEの上の回折像を説明することができる．

例えば，スクリーンの中心にある点Dでの2次波の干渉の結果を計算するためには，フレネルの提案した方法が使える．次のような方法で，波面を帯状の区間（フレネル帯）に分ける：隣り合う帯の端からスクリーン上の考えている点までの距離の差は，光の波長の半分に等しい，すなわ

ち，

$$AD-KD=KD-LD=LD-MD$$
$$=MD-BD=\lambda/2.$$

何故こんなことをするのか？　これはよく知られた波の性質を利用するためである．その性質とは，波長の半分の行路差をもつ（位相が逆の）波は，加え合せたとき互いに打消し合う，ということである．一つの帯の各点は，点Dに波が達したときに位相が逆になる点を隣りの帯に持つことになる．隣り合う帯の面積はほぼ等しい．したがって，点Dにおける，隣り合う帯の作用（例えば，第1と第2，第3と第4などの帯の作用）は実質的に互いに打消し合う．

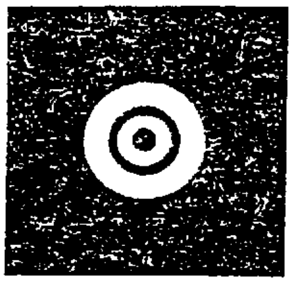

図 2a

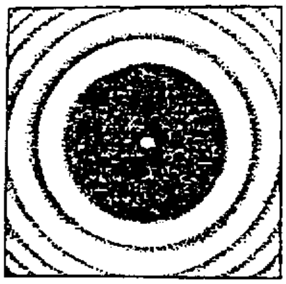

図 2b

すると，どのような条件の下で“ポアッソンの逆説”が生ずるのかを，容易に理解できる．もし，穴にちょうど偶数個のフレネル帯が存在するならば，スクリーンの中央に暗い点が見えるだろう．D点の隣りには輝くリングが，その隣りには暗いリングが現れる（図2a）．スクリーン上には，交互に明暗の交代するリングの系列が生ずるだろう（しかし中心点は暗い！）．しかし，もし穴に奇数個のフレネル帯が存在すると，結果は逆になる；中心には輝点があり，それを暗いリングと輝くリングが交互にとりまく．小球の回折像（図2b）を自分で説明してみていただきたい．

明らかに，フレネル帯の数が多くないときの方が，観察される回折像は明瞭になる．したがって，波長 5×10^{-7}m の可視光をつかって，〜1mmの大きさの障害物で，光源から障害物までと障害物からスクリーンまでの距離を約1mとして回折像を見たとき，障害物上には数個のフレネル帯しかない．このような場合には，スクリーン上に輝くリングと暗いリングが交互に現れることが明瞭に観察される．障害物の寸法が大きいとき（あるいは光源からの距離が短いとき）には，回折像は明瞭でなくなる．

現代においては，光波だけでなく，もっと波長の短い，波長が数十オングストローム（1Å＝10^{-10}m）のX線の回折も観測されている．それに対応する大きさの障害物を人工的につくることは非常に困難である．しかし，この場合には，X線の通路に結晶を置くと，結晶の原子間距離がX線の波長の程度なので，回折像——ラウエ斑点が生ずる（ドイツの科学者M. ラウエにちなんで命名された．彼は1912年にX線の回折を研究するために，始めて結晶を用いた）．ラウエの斑点は，中心点のまわりに規則的に分布した，種々の強度の点列である．その点列の形は，結晶中の原子の“配列”の特性によって決まる．X線回折の実験は，X線の波動性を示すばかりでなく，種々の結晶の幾何学的な構造の解明に用いられている．

2. ハイゲンスの原理　S. A. ゴルデュニン (1988, No. 11〜12, pp. 54〜56)

この原理は，クリスチャン・ハイゲンス（ホイヘンス）によって，1690年に出版された“光についての論考”において定式化された．その当時，粒子の運動を記述するには，すでに大きな困難はなかった：自由空間において，粒子はまっすぐ，かつ一様に運動する．外部からの作用があると，粒子は減速されたり，加速されたり，運動方向を変える（曲げられ，あるいは反跳する）．それらはすべて計算できる．それに反して，波の伝搬——反射，屈折，障害物の迂回（回折）——の法則は，説明することができなかった．ハイゲンスはそれらの説明の基礎として使える原理を提案した．

明らかに，波動現象が伝搬する原因についての考察がその着想の根底にある．水面に投げ込まれた小石から，水面には円形の波が拡がる．この過程は，始めに波を起した原因である小石が水底に沈んでしまった後でも継続する．このことから，次の結論が得られる：波の原因は波の存在そのものである．ハイゲンスは，その考えを次のように定式化した．

励起された波が到達したとき，波の各点は自ら

2次波の中心になる；ある時刻における波面は，それらの2次波に接する面（包絡面）である．

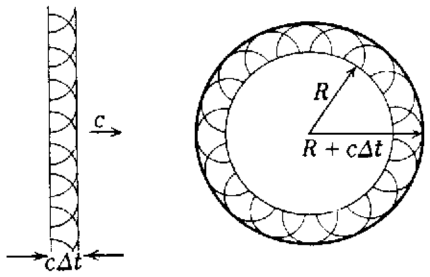

図1

平面波と球面波の伝搬の様子は容易に示すことができる（図1）．平面波の場合の，Δt 時間後の2次波の包絡面は，距離 $c\Delta t$ だけ移動した平面であり，球面波の場合には，半径が $R+c\Delta t$ の球面である．ここで c は2次波の伝搬速度，R は元の球面波の半径である．

このように表現されたハイゲンスの原理は，本質的に2次波の包絡面をつくる幾何学的な処方箋である．その面が波面とみなされ，波の伝搬方向が決定される．

ハイゲンスは，彼の原理をはじめ光に対して定式化し，それをつかって媒質の境界における光の反射および屈折の法則を導いた．まず，反射波と屈折波が存在することがこの原理から直接導びかれ，それだけでも大きな成果だった．ハイゲンスによれば，媒質の境界の各点は入射波が到達するや否や2次波の源となり，2次波は境を接する二つの媒質中へ伝搬していく．入射波の伝搬してきた第1の媒質中でのそれらの2次波の重ね合せの結果が反射波であり，第2の媒質中での2次波の重ね合せの結果が屈折波である．

確かに，反射波と屈折波の強さがどうなるかについては，ハイゲンスの原理から説明することができない．そのためには，波の物理的性質（それはハイゲンスの原理とはまったく“関係”のないことである）を知らなければならない．しかし，反射と屈折の幾何学的な法則は，波の物理的性質にも，その反射と屈折の具体的なメカニズムにも，まったく関係なく成り立つ．これらの法則はすべての波に対して同等に成り立つのである．

入射平面波の速さを v，入射角を α としよう（図2）．すると入射波の波面は，二つの媒質の境界面に沿って，速度 $v/\sin\alpha$ で移動する．反射波と屈折波は入射波によって生み出されるのだから，それらの波面も同じ速度で境界面に沿って移動する．したがって，次の関係式が成り立つ：

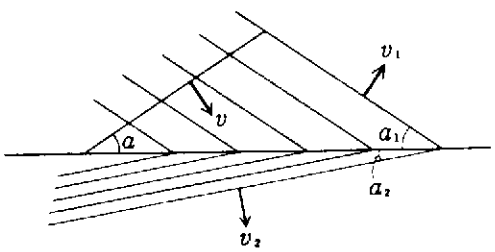

図2

$$\frac{v}{\sin\alpha}=\frac{v_1}{\sin\alpha_1}=\frac{v_2}{\sin\alpha_2}$$

角度 α_1 と α_2 は，反射波と屈折波の波面が媒質の境界面となす角度である．平面波の場合には，伝搬方向は波面に垂直であるから，上の関係式は反射波と屈折波の伝搬方向を決める．

反射と屈折の法則の説明は，ハイゲンスの原理が正しいことを示す強い根拠であると思われた．しかし実際には，それは多くの疑いと問題をひき起した．なぜ入射波と逆向きの波が存在しないのか（なぜ2次波の源は入射波と逆向きに伝搬する球面波を出さないのか）？　なぜ光は穴を通ってまっすぐに進むのか（なぜ2次波は幾何学的な影の領域にも伝搬しないのか）？

ハイゲンス自身は，それを2次波の強度が小さいためだと考えた．しかし，それではなぜ音波は回折するのか——われわれは曲り角に隠れた音源からの音を聴くことができる．

これらの，およびその他の多くの疑問にたいする回答は，19世紀のはじめになってから，オーギュスタン・フレネルによって与えられた．彼は，ハイゲンスの原理を重要な本質的な点で補足した：

空間の与えられた点で励起される最終的な波は，ハイゲンスの要素的な2次波の干渉の結果である．

2次波は“源”から生み出されるが，その振動の振幅と位相は，元の励起によって決められる．それゆえ，それらの源はコヒーレントである．それらの源の全体としての作用，すなわち干渉の効果が，ハイゲンスの包絡面という考えに，とって代った．包絡面は，フレネルの理論において，干渉の結果として生ずる波の強度が大きい面という，明白な物理的意味を得ることになった．修正されたハイゲンス-フレネルの原理は，不均質な

媒質中の波の伝搬に関する問題を，より完全に研究することを可能とした(数学的な複雑さのために，この問題は高等学校での物理学課程には入らない).

そういう訳で，波の伝搬の理論の最初の原理であるハイゲンスの原理の価値(単純さと明瞭さ)と欠陥（物理的内容の欠除）を，明確に認識する必要があることになる.

3．光線と波 (1985, No. 11, pp. 23～24)

19世紀のはじめには，光の干渉と回折の研究の結果，空間内の光の伝搬は波動現象であることが最終的に認められた．しかし，それまでの長い期間に，幾何光学と呼ばれる学問が生れ，確立され，現代でも用いられている．物理学のこの分野では，**光線**という概念をつかって光の伝搬の法則が研究される．入射光線，反射光線，屈折光線について，発散光束，収束光束，平行光束についてなどが語られる．

光の“光線図”は，光が鏡，プリズムまたはレンズに入射したときに起ることの多くを説明する．そのとき，**光路**が使われる：プリズム，レンズあるいはもっと複雑な光学系内部での光路が考えられる．

つまり，プリズムやレンズの中を通過するのは波としての光（光波）ではなく，光線なのであろうか？　鏡で反射されるのは光線なのだろうか？　光線とは何だろう？　その物理的実態は何なのか？

実は，光線には何も物理的実在は含まれていない．光線は——光波がそれに沿って伝搬すると考えられる線である．幾何光学の法則はすべて，光の進路にある障害物の大きさが光の波長に比べて大きい極限の場合に，波動理論から導き出されるものである．したがって，光線の概念を用いることは，光の伝搬に関する現象を理解するために不可欠なものではない．それは単に，考察を容易にする便宜的なものである．いくつかの例で見てみよう．

プリズム　正3角形の断面をもつガラスのプリズムが空気中にあり，そこへ平面光波が入射する(図1)．波面がプリズムの表面上の点Cに達した時刻から，波面DCの下端はガラスの中に伝搬し始めるが，同時に上部は未だ空気中を伝搬している．上端（点D）が点Aでプリズムに達したとき，下端（点C）から伝搬していた球面波は点Eに達し，そのときの距離CEはDAの約半分である（ガラス中の光速は空気中の約半分である)．Cを中心とし，Eの向きに進む球面波は点Bでプリズムの第2の境界に達する．他方，点Aからも球面波が伝搬する．ガラスの中の波が距離EBを伝搬した時，Aから出た波はより長い距離を進む．それゆえ，プリズムの他の側での波面は線分BKになる．すなわちプリズムの役割は，光波の波面CDをBKに変換することである．そしてその原因は，ガラス中の光速が空気中の光速より小さいことである．

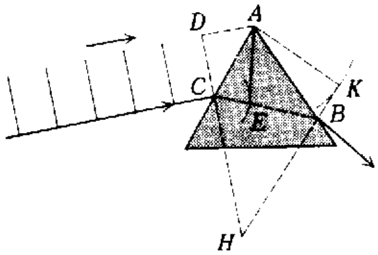

図1

これが，プリズムを光が通過するときの波の状況である．これと対比して，同じ図にプリズム中の光線の経路を矢印をつけた線で描いた．光線は波面に垂直な単純な線である．“光線の屈折”は，実際は波面の回転である．波面の回転角$\angle CHB$は，また光線の屈折角である．

このように，“光線”の図は“波”の図より簡単であり，そのため光線の図がふつう使われるのである．

集束レンズ　ガラスの両凸レンズを空気中に置き，平面光波を入射させる(図2)．波面がレンズの第1の面の中心に，点Cで接触した時から，波面の各点の経路は（中心を除いて）一部は空気中に，残りはガラス中にある．波面の中心から端に近づくにつれて，経路の“ガラスの部分”の割

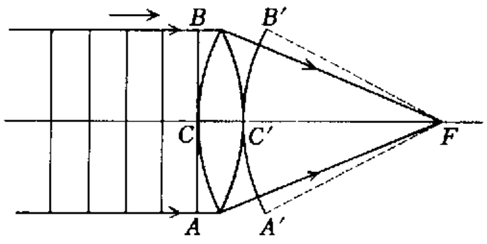

図 2

合は減る．したがって，波面の中心が点 C' に達したとき，波面の残りの部分が移動した距離は CC' より大きく，最も移動距離の大きいのは端の点（A と B）である．その結果，平面波 ACB はレンズから出たとき球面波 $A'C'B'$ に変る．この球面波の中心（点F）が**レンズの焦点**と呼ばれる．もし逆に，レンズの焦点にある点光源から出た球面波があると，レンズの後でそれは平面波になる．図 2 の矢印をつけた線は集束レンズにおける光線の経路を示す．

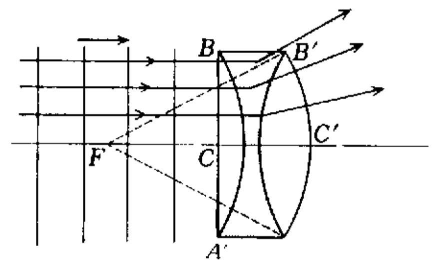

図 3

発散レンズ　図 3 は，平面波が空気中にある両凹レンズに入射した場合を示す．波面がレンズの点 A と B に達した後は，端の部分は波面の他の部分より遅れる．その結果，平面波 ACB は，球面波 $A'C'B'$ に変る．この球面波の中心（点F）はレンズの，平面波が入射した側にある．点Fも**レンズの焦点**と呼ばれるが，虚の焦点であり，屈折した光は実際にはそこに達しない．この図でも，矢印をつけた線は光線の経路に相当する．

*　　*　　*

読者のみなさんは，平面波でなく球面波がレンズに入射したときの波の図を容易に描くことができるだろう．レンズを通った後で，波は元の球面波とは違った点に中心をもつ球面波になる．そういう図から，幾何光学で得られるのと同じレンズの公式を導くことができる．

（訳　こじま　ひでお）