

# 光の不思議

野村 順一

1. はじめに
2. 光の正体
3. 光速はどのように測定したか
4. 光は媒質によってためらうー屈折
5. むすび

## 1. はじめに

電磁波 (electromagnetic wave) は宇宙を通過してすべての方向にエネルギーを伝える。すべての物体はこれら電磁波を受けて吸収し放射する。電磁波は波長が伝わる方向に互に正しい角度 ( $90^\circ$ ) で振動する電界と磁界として後述の第2図のように描くことができる。

すべての電磁波は光速と同じスピードで宇宙を伝わる。電磁波の1秒間の振動は1から $10^{24}$  (1<sup>じゆ</sup> 秒) に及ぶ。光は電磁波の1種で、その振動は1秒間400兆 ( $4 \times 10^{14}$ ) から800兆 ( $8 \times 10^{14}$ ) にわたっている。後述の第10図の通りである。振動数に波長を掛けると波が伝わる速さが得られる。振動数が多くなると波長は少なくなる。振動数に波長を掛けると、つねに真空中の電磁波の伝播速度が秒30万キロメートルとなり、光速 $C$ と等しい。これを自然の定数 (constant; 常数・恒数と同義語で、変数の値の変化に無関係に、一定の値を示す) という。本論のテーマである「光の不思議」はこの自然の定数が起点となって、光の正体、そして光速はどのように測定したか、光は媒質によってためらうー屈折について考察するものである。

## 2. 光の正体

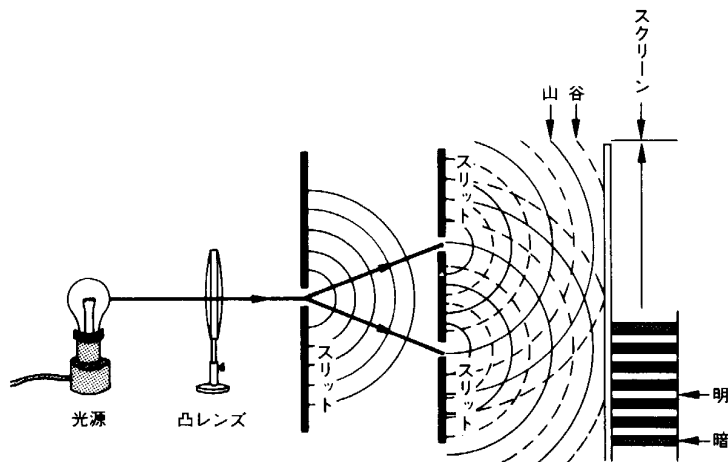
光の正体は昔からいろいろ論争されてきたが、17世紀頃までは光は真空中も伝わることから真空中に目に見えないし手にも感じられない弾性体の媒質エーテル (ether; 電気・磁気・光などを伝える媒質と考えられた仮想的物質) があって光がこの中を伝わっていくと考えていた。

18世紀になってニュートン (Newton, Sir Isaac; 1643~1727、イギリスの物理学者、天文学者、数学者) は粒子説を唱え、光は光源から次つぎにとび出してくる小さな粒子であると考え長い間この考え方が支持されたが、シャボン玉や水に浮んだ油の薄膜の色を説明することができなかった。前世紀ホイヘンス (Huygens, Christiaan; 1629~1695、オランダの物理学者) はエーテル概念を導

入し、光の反射屈折、複屈折等の諸現象を解明し波動説の基礎を確立した。光は水の波のように光源から伝わる振動波が目を刺激して、色感覚を与えると提唱した。

19世紀にはヤング (Young, Thomas ; 1773~1829、イギリスの医者、物理学者、考古学者) は光の干渉を研究し光の波動説を復活。第1図の干渉縞の実験で波動説を証明した。そしてエネルギー (energy ; ギリシア語 *enérgeia* “活動していること” に由来) という語を初めて用いたのも彼である。

第1図 ヤングの干渉縞の実験



(注) 1つの光源から発せられた単色光を2つの細隙を通しスクリーンに投影すると、それぞれの細隙から出た光波は波長、振幅が完全に等しいので、位相が一致すれば明となり、位相が反対になればその場所は暗となってスクリーンに投影される。この明と暗の縞を干渉縞といい、この現象を光の干渉という。

当時フレネル (Fresnel, Augustin Jean ; 1788~1827、フランスの物理学者) は光の干渉によって光の回折現象を説明し、ヤングとは独立に波動説を立てた。

1864年、マクスウェル (Maxwell, James Clerk ; 1831~1879、イギリス (スコットランド) の物理学者) は光速が電磁波 (電波) の速度と同じであると証明した。ラジオの電波、赤外線、紫外線、X線、ガンマ線、宇宙線などもみな電磁波と呼ばれる横波で、真空中を光速で伝わり、ただ波長だけが異なることが分かった。波長が短くなれば、それに応じて振動数が増大する。その振動数に波長を掛ければ波の伝わる速さであって、電磁波のいずれの波長でも振動数との積は光速秒約30万キロメートルになる。光は電界、磁界の振動を持つ電磁波の一形態である。380ミリミクロンから780ミリミクロンの範囲を可視光線というが、両極の波長は放射エネルギーの強さによるから必ずしも一定ではない。可視光線も電磁波であり、その振動方向は伝播方向に対し垂直な横波である。可視

光線のすべての波長について真空では等しく秒約30万キロメートルである。このようにマクスウェルはすべての電磁波の伝播速度が光速と等しいことを証明した。

電磁波 (electromagnetic wave) は宇宙からすべての方向にエネルギーを伝播する。そしてすべての物体はこれらの波長を吸収して放射する。1988年ヘルツ (Hertz, Heinrich Rudolf; 1857~1894, ドイツの物理学者) は電気振動によって発する電磁波の存在を実証し、またこれが光波と同一性質を有することを確め、マクスウェルの電磁理論に実験的証明を与えた。その後の無線電信電話の出発点たらしめた。また時間、空間、質量の3基礎概念から出発して、力の概念を含まぬ形式的・数学的な“ヘルツの力学”を建設した。振動数の単位〈ヘルツ〉は彼にちなむ。

ヘルツの実験は誘導コイルに放電球をつなぎ、2つの球の間に火花放電を起こす。この際、小さな隙間のある針金の輪を放電球に対して平らに平行におくと隙間に小さな火花がとぶ。しかしそれを垂直におくと火花はとばない。放電球の間で火花がとぶとき、輪の隙間で火花がとぶのは、放電球から何かが出て、針金の輪にはたらいと考えられ、放電球から発生したものを電磁波という。垂直においた針金の輪で火花がとばないのは電磁波の性質である。火花放電のとき1秒間に激しく向きをかえる電流 (振動電流または高周波電流という) が針金を流れる。これによって周囲に電界と磁界の波ができてその大きさをたえず変化させながら、電界と磁界が一緒に空間を伝わってゆく。ラジオやテレビでは高周波の振動電流を使い、電磁波を効率よく発射させるのにアンテナを用いる。電磁波は遠くに伝わるにつれて次第に弱くなる。

電磁波は横波で波長が3万メートルの長いものから1ミリの100億分の1という短いものに及び、波長の長いものを電波という。波長が長いものから短い方向にたどると、電波、赤外線、普通の光線、紫外線、X線、ガンマ線 ( $\gamma$ 線)、宇宙線となる。

電磁波が空間を伝わる速さは決して無限ではない。これは実験でも理論によっても求められる。マクスウェルの理論によって電磁波の存在が可能であると明らかになったが、もう一つ重要な結果をこの理論から導き出すことができる。それは真空中における電磁波の伝播速度が自然の定数 (自然界にはこれより速く伝わるものはないという) であり、光速C (1秒間に約30万キロメートル) に等しいということである。このことはかなり強力に、光も電磁波の一種であることを示している。第2図は電磁波の伝わり方を表す。

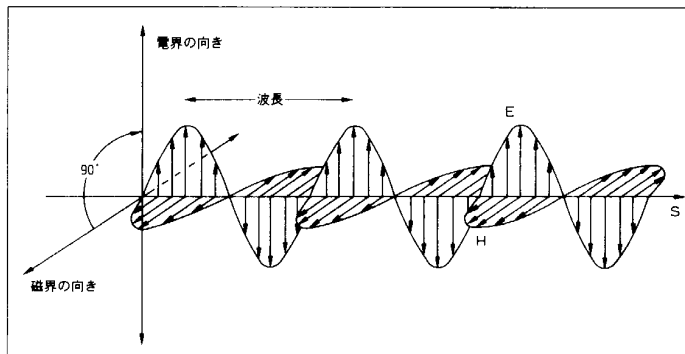
光のすべての性質はマクスウェルの理論によって説明できる。それから、電磁波を使った実験で、それが光と似た振る舞いをするを示している。電磁波の速さ、波長、振動数 (電磁波の場合には、周波数とよばれる) の間には、

$$\text{速さ} = \text{波長} \times \text{振動数 (周波数)}$$

という関係がある。

真空中を伝わる電磁波の速さは、光速 $C$ と等しく1秒間に30万キロメートルで、どんな波長の電磁波でも同じである。したがって、波長が分かれば、周波数が分かるのである。電磁波の種類が赤外線でも長波長でも振動数は少なく、X線で短波長なら振動数が多く、波長と振動数の積は光速 $C$ に帰結する。これは宇宙の自然の定数であり、自然の秩序が秘められている。

第2図 電磁波の伝わり方



(注) マックスウェルによるとHで示す磁界を生ずる。Eの電界と磁界の間の相互作用は対称的で、この磁界は輪となって電界と組み合わせ、鎖の一部をつくっている。そして今度はこの新しい磁界がもう一つの電界Eを引き起こすというようにして波が広がっていくのである。この波には電界Eと磁界Hの2つの量が登場し、それらの向きは互いに直交し、2つとも波の進行方向に垂直な横波を示している。

20世紀になって原子の研究が進み、再び光は粒子説によって説明できることがいろいろ出てきた。たとえば、光電効果では金属面に光を照射すると、電子が飛び出す。光を当てると同時に、金属表面と、遠く離れたもう一つの金属片に正の電極をかけると、この金属片に電子を引き寄せることができる。実験から放出される電子の数は光の波長が増えるとともに減っていく。波長がある所にまで長くなると、当てる光子の量をいくら増しても電子は出なくなってしまう。このように光量子が小さすぎる、すなわち、その振動数が小さすぎる（波長が大きすぎる）光を使うと、金属表面から電子放出を起こすことができない。

アインシュタイン (Einstein, Albert; 1879~1955、アメリカ(ドイツ生まれ)の理論物理学者) は放出された電子のエネルギーを測定することによってプランク (Planck, Max Karl Ernest Ludwig; 1858~1947、ドイツの理論物理学者) の定数を決めることができた。この値は黒体放射のエネルギー分布から決定された値と正確に一致したのである。アインシュタインはプランクの量子仮説を拡張して光量子概念を初めて導入し、光電効果を解明した。

箔検電器の金属円板に、よく磨いた亜鉛やアルミニウムなど金属板をおき、<sup>マイナス</sup>の電気を与えておく。この箔検電器の上の方から、紫外線を多く出す殺菌ランプの光を当てると、箔が閉じるが、箔検電器に<sup>プラス</sup>の電気を与えておくと、殺菌ランプの光を当てても箔は閉じない。これは殺菌ランプの光、つまり紫外線を当てると、箔検電器の上においた金属板から電子が飛び出すためと考えられる。

このように光が金属などに当たってその表面から出る電子を光電子といい、この現象を光電効果と呼ぶ。金属板を<sup>マイナス</sup>にしておくと箔が閉じるのは、飛び出した光電子が金属板の<sup>マイナス</sup>の電気に退けられながら、<sup>マイナス</sup>の電気を持ち去るからである。金属板を<sup>プラス</sup>にしておくと、箔が動かないのは<sup>マイナス</sup>の電気を帯びた光電子が出て、すぐに金属板の<sup>プラス</sup>の電気に引かれてもとにもどるため、箔の電気の量が変わらないからである。

アインシュタインは光を電磁波と決めることに疑問を持ち、光は、これを吸収した物体内で熱に変換するエネルギーを持った粒子からなり、それぞれの振動数を持つ各単色光はおのおのが一定量のエネルギーを持つ粒子として真空中を光速C（1秒間に約30万キロメートル）で伝播すると提唱。

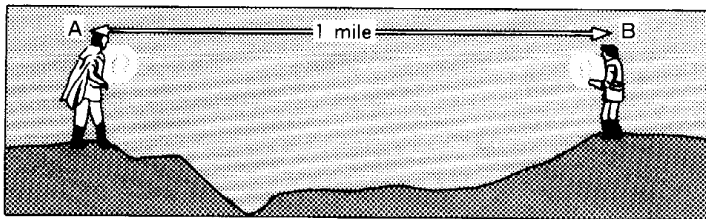
ボース（Bose, Devendramohan；生年不明、現代インドの物理学者）の光量子統計をアインシュタインは物質粒子群にも適用し、“ボース・アインシュタインの統計”を確立した。アインシュタインはこの粒子を光子（光量子）と呼んだ。

現在では、光の正体は波動説（電磁波説）と粒子説の両者の性質を持つものとみなされている。

### 3. 光速はどのように測定したか

光速は1秒間に約30万キロメートル（18万6,282マイル）である。現在、通説となっている値は秒29万9,792.5キロメートルで、誤差は秒0.1キロメートルとみなされている。この途方もない光の速さをどのようにして測ることができるのか。昔の人は光が瞬間的に伝わるものと考えていた。

第3図 ガリレイの光速測定の実験

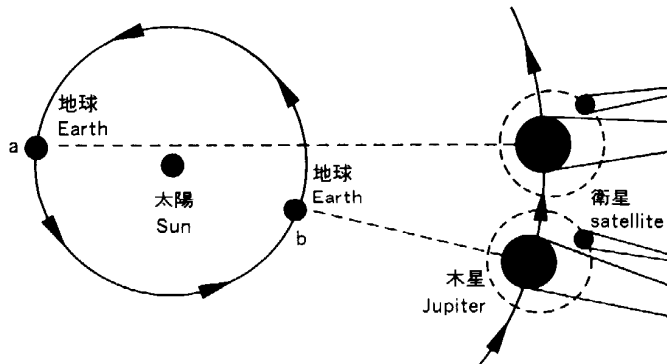


最初に光速を測定したのは、ガリレイ (Galilèi, Galileo; 1564~1642、イタリアの物理学者、天文学者) である。第3図のように彼はフィレンツェ (Florence) の町の2つの丘の上に立つ人と人が互に1マイルの距離で、ランプで合図し合い、信号のやりとりにかかる時間を測定しようと試みた。この単純な時間と距離の実験は失敗した。光速が余りにも速いため、この方法では測定できないと分かっただけである。この場合、光が伝わる時間は僅か $0.000011$  ( $11 \times 10^{-6}$ ) 秒で、そのうえ1マイルの距離では人間の反応時間 (0.4秒) に足りないからである<sup>1)</sup>。

光速 $C$ を推定した最初の人、17世紀のレーマー (Roemer, Olaf or Ole; 1644~1710、デンマークの天文学者) である。光速 (light velocity) は $C = 2.99777 \times 10^{10} \text{ cm/s}$  であって、約 $3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$  である。光速は一般に $C$ で表す。

1676年、木星の4個の衛星が発見され、これらが木星のまわりをまわるのに要する時間が分かっていた。衛星は光を発しないから、木星のかげに入るとすぐ見えなくなる。第4図aのように地球と木星の間の距離が最大になる位置では、衛星の食 (eclipse; 星の掩蔽) は衛星の木星のまわりの運動から予測される時間で起こるのに対して、第2図bの地球、木星間の距離がより短くなると、食は計算より早すぎる時期に起こることが明らかになり、この時間の差を測定し、その理由が初めの場合には、第二の場合に比べて光の走行する距離がより長いためであると考え、その周期が半年間は遅くなり、あとの半年間は早くなることから、光速は秒22万キロメートルという推定値を得た。太陽のまわりめぐる地球の軌道の直径を走行する光は約22分かかるとレーマーは算定したが、精度に欠けていた。現在、必要な時間は約16.67分ないし1,000秒とみなされている。地球軌道の直径は約186,000,000マイルで、光速は大体秒186,000マイルと算定されている。

第4図 レーマーの光速測定

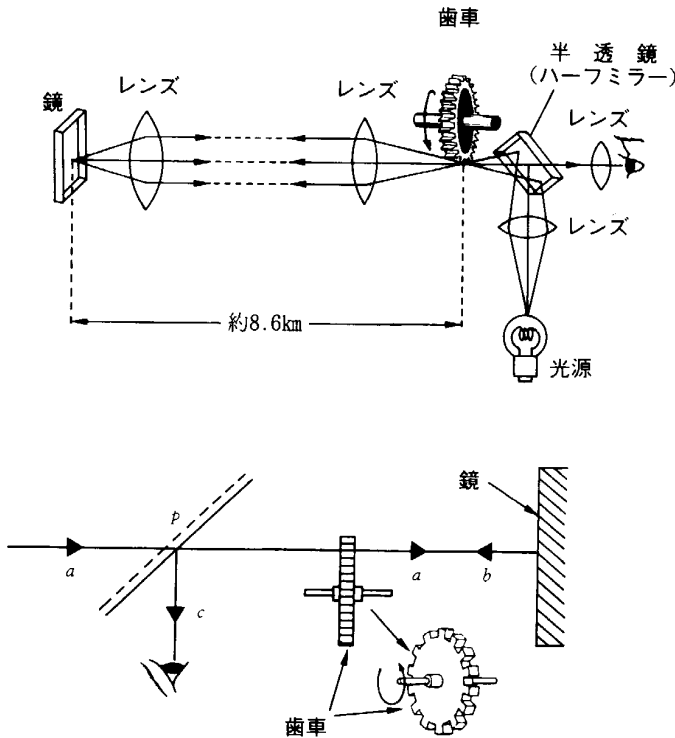


(注) 木星の衛星の食は追加距離 (地球軌道の直径) で約16分遅れであった。

ブラッドリー (Bradley, James; 1692~1762、イギリスの位置天文学者) は自転車に乗った人が傘をさすとき、雨が垂直に降っていても傘は斜め前方にさすことに気づき、傘の傾きの角度と自転車の速さから、雨の落下速度が計算できると考えた。これを基として、地球の公転の速さと恒星の位置の見かけの変化 (光行差) から光速をもとめ、光速は秒31万キロメートルという値を得たのである。

フィゾー (Fizeau', Armand Hippolyte Louis; 1819~1896、フランスの物理学者) は地上の実験で光速測定に成功した。第4図の半年間は早くなることから、光速秒22万キロメートルという推定値を得た。

第5図 フィゾーの歯車による光速測定法

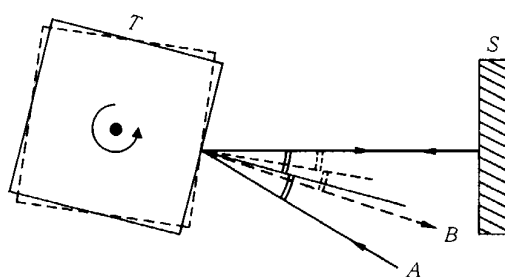
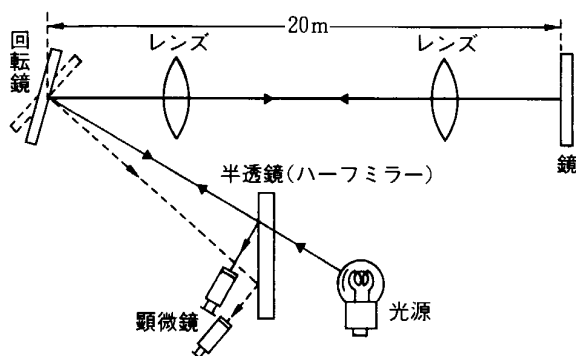


(注) 光線 a は鏡に進み、反射されて b となる。それから隙間を通るか、そうでないかにより、c のように見えたり見えなかったりする。

フィゾー (Fizeau', Armand Hippolyte Louis; 1819~1896、フランスの物理学者) はやはり地上の実験で光速測定に成功した。第5図のように、光を鏡に向け、その反射光を観察する。その光路に歯車を回す。光に直角に鏡をおいて光を往復させると、歯車の回転が遅い間は光が戻ってきて、同じ歯の

隙間を通り抜ける。回転を速くして光が往復するまでに、隙間ところに次の歯がくるようにすると、そのときのように、光を鏡に向けその反射光を観察。その光路に歯車を回す。光に直角に鏡をおいて光を往復させると、歯車の回転が遅い間は光が戻ってきて、同じ歯の隙間を通り抜ける。回転を速くして光が往復するまでに、隙間のところに次の歯がくるようにすると、そのときの回転数と歯の数から光の往復する時間がもとめられ光速が計算できる。フィゾーは歯車と鏡との間を8.6キロメートルほど離し、歯数を720の歯車で成功した。1849年、光速、秒31万3,000キロメートルという値を得た。

第6図 フーコーの回転鏡による光速測定法



(注) 立方体は光が動く間には、ほんの少し回るのでAから出た光はBのように帰ってくる。

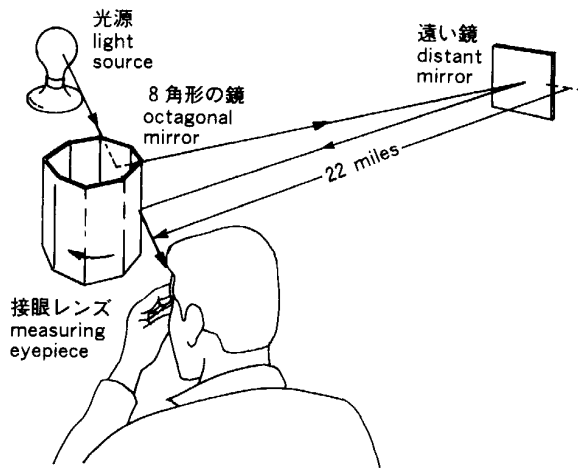
フーコー (Foucault', Jean Bernard Léon ; 1819~1868、フランスの物理学者) は第6図のように、歯車にかわって回転する鏡を使い、光が往復する間に、鏡はある角度だけ回転するため、その反射光は鏡が静止していたところとちがうところに像をつくる。この像の間隔を顕微鏡で測り、鏡の回転数からそれだけ回るのに要する時間で光速をもとめた。この方法は回転鏡から鏡までの距離



を20メートルまで縮めることができたので、水槽の水を通して水中の光速も測定した。

マイケルソン (Michelson, Albert Abert Abraham; 1852~1931、アメリカ(ドイツ生まれ)の実験物理学者) は、第7図のように20世紀初頭、平面の回転鏡のかわりに多面体の回転鏡を使い、1926年、真空中の光速  $C$  を測定した。すなわち、いろいろな測定結果から真空中の光速  $C$  は秒29万9,792.5 キロメートルに到達したのである。

第7図 マイケルソンの光速測定法



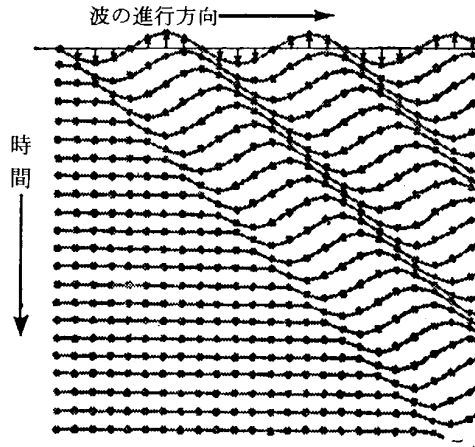
(注) 1878年、マイケルソンは遠くに固定した鏡に対して急速に回転する鏡で反射光をとらえ測定した。反射光がもどってくるまで、光がいろいろな角度で反射されるよう回転鏡を動かして、光速を計算したのである。

ついに、マイケルソンは鏡を16個も使って、他の点の精度も高め、測定位置と鏡の距離は35キロメートルとり、この長さの管の中を光が通過するしくみ(管の中は空気の流れや乱れを抑えるため、ポンプで20分の1気圧まで下げられている)であった。鏡の回転速度の測定は100万分の2、3程度の精度で、測定位置と鏡の距離は10センチの程度まで正確に測定された。さらに、透明な液体の二硫化炭素をつめた管に光を通過させたところ、その通過時間は速度を  $\frac{C}{n}$  とした場合と矛盾しないことが分かった。 $n$  は二硫化炭素の屈折率で事前に確定していた。真空ならすべての波長は等しく、真空では分散が起こらないが、二硫化炭素のような透明な媒質では分散が起こる。そこで白色光を使い290ナノメートルから760ナノメートルを補正して  $n = \frac{C}{V}$  を実証したのである。

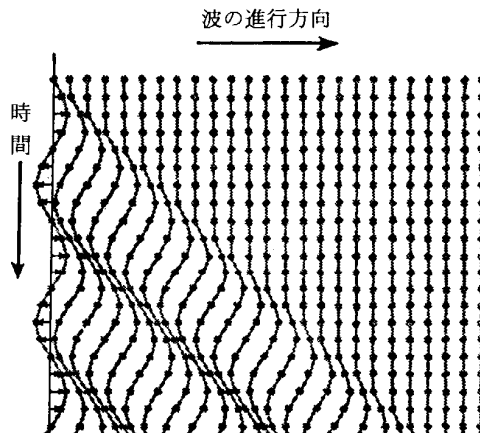
宇宙(真空)での光速は1秒間に約30万キロメートル(18万6,282マイル)である。これは宇宙ではスピードの限界で、これ以上速く伝わるものは何一つとしてあり得ないという根拠になっている。

光は三次元の横波（水の波と同様に振動が伝わる方向に対して垂直な波）であり、音は縦波（振動の方向が波が伝わって行く方向と同じ）である。水の波や音波などは弾性波といい、振動が伝わって行く媒質（水、空気、気体）を必要とする。しかし、光は星空から真空を通して私たちの地球へ到達する。真空では光のすべての波長の光速が等しく、1秒間に約30万キロメートルで、それぞれの波長の速度が等しいので、真空では分散は起こらないが、地球上の透明な媒質ではその分散が起こる。第8図横波と第9図縦波を参照されたい。

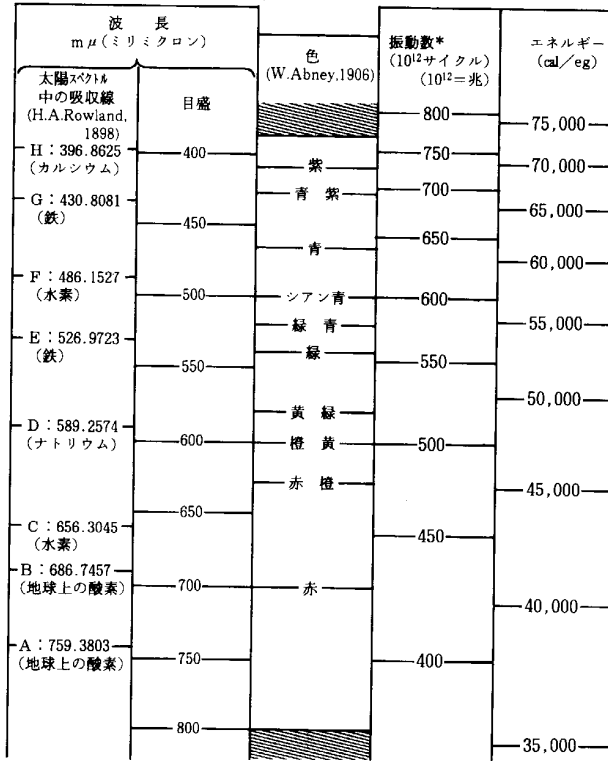
第8図 横波（光の波・水の波）



第9図 縦波（音の波）



第10図 可視スペクトルの波長と振動数



(注) 左に太陽スペクトル中の400の黒線のうちいくつかを示す。右には各スペクトルに対応する光感覚をひきおこす光の個々の粒子(光子)の相対的エネルギー(実用単位で)を示す。

\* cps (cycles per second) 毎秒1サイクル、またはHz (Hertz) 毎秒1振動数

(資料) 稲村耕雄、中原勝儼共訳『色彩の秘密』白水社、1955、p.26

Marcel Boll et Jean Dourgnon; "LE SECRET DES COULEURS" Press Universitaires de France.

光の振動はどれくらいか。1秒間に100万、500万倍回(5×10<sup>6</sup>)の振動である。紫は秒750兆の振動数で、赤は秒429兆の振動数に及ぶ。したがって、光の波長はごく短かく、1ミリマイクロン(mu or nm ナノメートル、0.000000001メートルすなわち10<sup>-9</sup>メートル)の1,000倍の1000ミリマイクロンより小さく、380ミリマイクロンから780ミリマイクロンの範囲で可視スペクトルという。

短波長は振動数が多く、長波長は振動数が少ない。このように波長と振動数と色は密接に結びついている。そこで、振動数に波長を掛けたものは波が伝わる速さである。たとえば、第10図をみると、紫の振動数は秒750兆で、波長は400ミリマイクロンで掛けると、真空では紫の光速秒30万キロ

メートルとなる。シアン青、橙黄をそれぞれ掛けても同じ値になる。振動数に乗じた波長のそれぞれのミリマイクロンは不思議なくらいに同じ値になる。

周波数 (Frequency) といってもこの振動数 (Hertz) と同義語で、cps (cycles per second or Hertz; 毎秒1サイクルで、周波数ないし振動数の単位) である。換言すれば、波の進行の速さ  $V$  は均質な物質中では、波長と周波数の積である。1秒当りの振動の回数は周波数 ( $\nu$ ) であり、波長 ( $\lambda$ ) とすれば式で表すと次の通りである。

$$V = \nu \lambda$$

他方、光速 (light velocity) は  $c = 2.997925 \times 10^{10} \text{ cm/s}$  で、約  $3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$  である。光速はふつう  $C$  で表される。 $C$  の由来はアインシュタイン (Einstein, Albert; 1879~1955、アメリカ(ドイツ生まれ)の理論物理学者) の相対性理論である。原子核の反応では、質量が減少し、エネルギーが増加するという不思議な現象に対して1905年アインシュタインは相対性理論で説明した。つまり、相対性理論によると、質量はエネルギーにかわり、反対に、エネルギーが質量にかわることもある。したがって、核反応で消えてなくなった質量が、エネルギーにかわってできたと考えると、ちょうどよくなる。

消えた質量を  $m$ 、でてくるエネルギーを  $E$ 、光の速度を  $c$  とすると、アインシュタインの式は

$$E = mc^2$$

で表される。これを、質量・エネルギー関係という。

光源が何であっても、光源がどれくらい速くても、互いに運動している観測者から見ても、真空中の光速はいつも同一である。これは光速不変の原理 (principle of invariance of light velocity) という。つまり、真空中の光速は、どんな運動をしている座標系 (観測者) から見ても常に同一であるという原理である。これがアインシュタインの相対性理論の出発点となっている。

注目すべき事実は光だけに限って真理となっている。たとえば、弾丸のスピードは銃のスピードによるが、それが発射される観察者のスピードでもある。音のスピードは音源からのスピードではなく、測定者のスピードで変わってくる。しかし、光速は光源と観測者から独立したもので、光速不変の原理で、すべての科学の最重要な定数になっている。いろいろな基本定数の間には、理論的にある関係が成り立っている。電気、磁気、エネルギーの単位は、物理学によれば、光速  $C$  がはいつている公式によって互いに結びつけられている。 $C$  の精度があがればそれだけ、公式に出てくる他の定数も、くわしくきめられるし、現代の世界像に必要な理論をそれだけよく吟味できることになる。光速不変の原理はアインシュタインの相対性理論の基本原則となっている<sup>2)</sup>。

1) Clarence Rainwater: "Light and Color," 1971, pp.37ff.

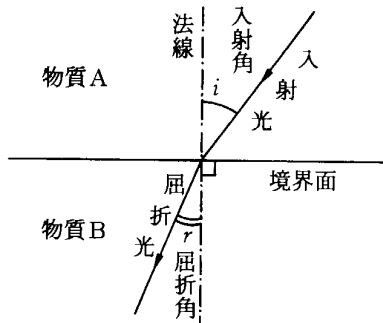
2) A.C.S. van Heel, C.H.F. Velzel, "What is Light," 1968, 和田昭允、計良辰彦訳、講談社、p.33.

#### 4. 光は媒質によってためらうー屈折

光の屈折 (refraction of light) とは光が違う媒質中に入るとき、その媒質の密度にためらい、その境界面で光の進路が変わることをいう。たとえば、水が入っているコップに箸を入れると箸が曲がって見える。これは水面を境にして光が曲がると考えられる。同じ物質の中では光は直進するが、光が空気から水へ、また空気からガラスに入るとき、その境界面で光の進路は曲がり、これを光の屈折という。

第11図のように、違う物質へ光が入るとき、入射点で物質の境界面に対して立てた垂線（法線）と、入射光とがつくる角を入射角  $i$  といい、また、屈折して入った屈折光とがつくる角を屈折角  $r$  という。光が逆に進む場合は入射角と屈折角との関係は逆になる。

第11図 入射角と屈折角



このように、屈折率 (refractive index) とは光が空気中から違う物質中に入るときに屈折する割合をいい、第1表のように物質によって一定の値が決まっている。

第1表 物質の屈折率

真空に対する0℃、1気圧の気体	
空気	1.000292
水蒸気	1.000252
空気に対する20℃の液体・固体	
水	1.33
エチルアルコール	1.36
石油	1.39
パラフィン	1.42
グリセリン	1.47
ベンゼン	1.50
ガラス	1.40 ~ 2.00
水晶	1.55
ルビー	1.76, 1.77 (複屈折)
サファイヤ	1.76, 1.77 (複屈折)
ダイヤモンド	2.42

光速  $C$  の値は秒29万9,792.5キロメートルで真空中では正しいが、透明の媒質ではどのように影響されるのか。

(1) 真空から空気へ

空気中の個々の分子は小さく光の伝達に影響を及ぼさないが、数多く集まると光速をわずかにおとす。空気中の光速は真空中より小さく、空気は真空中の光速と空気中の光速の比に等しい屈折率  $n$  を持つ。第1表のように真空に対する0℃、1気圧の気体で、1.000292に等しい。しかし波長によって少し変化する。

一般に、真空中から空気中に光が入るときは、光の進路は妨げられることなく、ほとんど曲がらず直進するといわれ、空気の屈折率は真空のそれとほぼ等しく1とみなし、 $n = \frac{C}{V}$ 、真空では  $V = C$  によって真空では  $n = 1$  となる。

このように、真空中と空気中の光速はほとんど変わらないが、水中では $\frac{3}{4}$ 遅くなり、ガラスの中では $\frac{2}{3}$ 遅くなる。媒質中の屈折率は媒質中の光速に対する真空中（空気中）の光速との比であり、媒質中の屈折率はつねに1より大きい。以下に述べるように水やガラスは光が屈折する。そのような媒質中の光速は  $C$  ではなく、もっと小さい値になる。 $C$  と媒質中の速度  $V$  との比を屈折率  $n$  という。

$$n = \frac{C}{V}$$

(2) 空気から水へ

空気から水に入る光は、水面に垂直に当たった光はそのまま直進し、水面に斜めに当たった光は一部反射するが、大部分の光は水面で曲がって水中に直進する。空気と水との境界面での光の曲がりぐあいは、光の入射点に立てた垂線に対して、空気中の進路より垂線に近づくように曲がる。このように光が空気中から水中に入るときに水面で屈折するのは、空気中と水中とでは、ほんのわずかに光の速さが違うためである。

水の屈折率は真空（空気）に対する比をいうが、真空（空気）に対する水の屈折率は約 $\frac{4}{3}$ で、水に対する空気の屈折率は約 $\frac{3}{4}$ となる。そのため水中の物体は実際の深さの $\frac{3}{4}$ の深さのところに像ができて見えるのである。空気に対する水の屈折率は約 $\frac{4}{3}$ ということは、水の屈折率が1.33で空気よりも大きく、水は光学的に密度が高い。

$$n = \frac{C}{V}$$

から屈折率  $n$  は光速  $C$ （1秒間に30万キロメートル）を媒質中の速度  $V$  との比で得た。ところで、今度は媒質中の速度  $V$  を求めると

$$V = \frac{C}{n}$$

ということになり、水の中での光速を推定することができる。光速  $C$ （1秒間に30万キロメートル）で水の屈折率の比を求めると、光速  $C \div \frac{4}{3} = \text{秒}30\text{万キロメートル} \times \frac{3}{4} = \text{秒}22\text{万}5,000\text{キロメートル}$

ル（水の中の光速）ということになる。

(3) ガラスの屈折率は1.40～2.00の間にあるが、概して、前述のようにガラスの中では光速が $\frac{2}{3}$ 遅くなるということから、真空（空気）に対するガラスの屈折率は約 $\frac{3}{2}$ で、1.50となる。ガラスの中で光速が $\frac{2}{3}$ 遅くなるという媒質中の速度Vを求めると、

$$V = \frac{C}{n}$$

からガラスの中の光速は、光速 $C \div \frac{3}{2} = \text{秒}30\text{万キロメートル} \times \frac{2}{3} = \text{秒}20\text{万キロメートル}$ （ガラスの中の光速）ということになる。

ところで、空気中からガラスに光が入るときと、ガラスから空気中に光が入るときとは、入射角と屈折角との関係が逆になる。したがって、空気に対するガラスの屈折率と、ガラスに対する空気の屈折率とは逆数の関係になる。

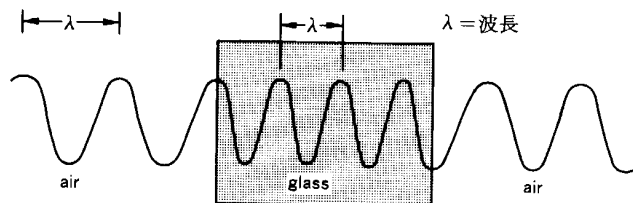
$${}_1n_2 = \frac{1}{{}_2n_1}$$

${}_1n_2$  = 空気に対するガラスの屈折率

${}_2n_1$  = ガラスに対する空気の屈折率

第12図のように1枚のガラスの境界面に光が入るとき、光は減速し、ガラスの中の波長は同じ割合で短くなる。周波数は変わらない。光がガラスから出てくると再び加速する。波長も前の大きさに戻るのである。

第12図 ガラスの屈折率

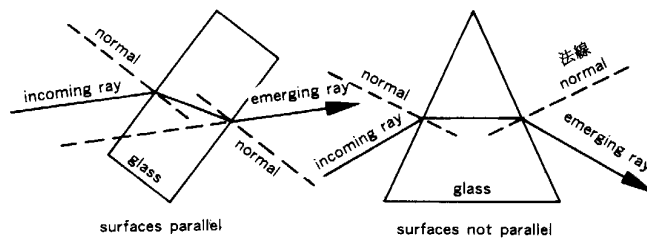


(注) 均質な媒質中の光速  $V = \nu \lambda$  で  
波長  $\nu$  と周波数  $\lambda$  の積である。

$$\text{ガラスの屈折率} = \frac{\text{空気中の光速}}{\text{ガラスの光速}} = \frac{\text{空気中の波長}}{\text{ガラスの波長}}$$

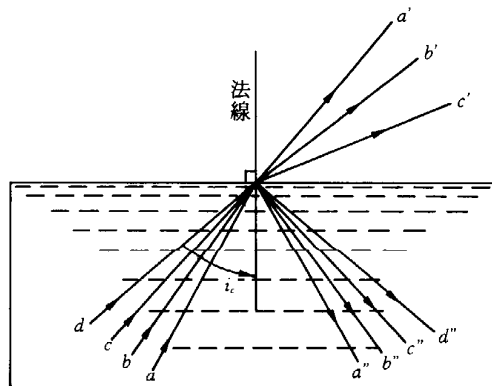
他の入射角で光がガラスに入ると、光が減速するように光の進路も変わってしまう。ガラスの中では垂線（法線）に対して光は曲がる。第13図のとおり、ガラスの両面が平行なら、たとえ光の進路が移行してもガラスを通過すると、もとの方向に戻る事が分かる。ガラスの両面がプリズムやレンズのように平行でないと、光は新しい方向に現れる。

第13図 平行ガラスと平行でないガラスの光の進路



(4) ダイヤモンドの屈折率は2.42である。ダイヤモンドは最高の硬度で10とされている。これはモース (Mohs, Friedrich ; 1773~1839、ドイツの鉱物学者) の硬度計による。それは純粹の炭素Cであるが、プリズムを通して見ると青藍色を帯びている。ダイヤモンドのきらめきは148面カットされた切子面内の全反射である。この反射はダイヤモンドの中の数多くの面によってきらめき、その反射は第14図の光の入射角が $i_c$ より小さな角となっている面に入射するまで起こるのである。

第14図 臨界角



(注)  $i_c$  は臨界角、d 光は全反射される。

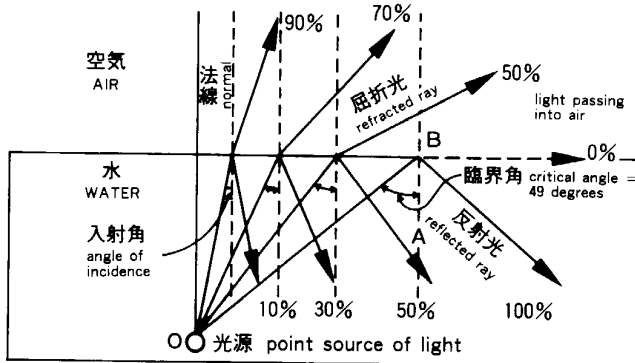


第14図は密な物質から入射する光の入射角をしだいに大きくすれば、屈折角はいつも入射角より大きく法線から離れる屈折となる。

入射角 $i_c$ では屈折角が90度になり、この屈折角はこれ以上大きくなり得ない。入射角 $i_c$ をもっと大きくしても、もはや屈折は起こらない。この入射角 $i_c$ を臨界角 (critical angle) といい、臨界角より大きい入射角の光はすべて反射されてしまう。

第15図のOBの入射光が屈折角90度になると、光のすべて (100%) は反射光になる。OBAは臨界角というが、純粋な水中では入射角49度になり、ガラスと空気の境界面では約40度である。ゆえに、45-90-45度のプリズムは入射光の100%を反射し、完全な鏡として活用される。

第15図 臨界角49度



屈折の法則 (law of refraction) とは2つの等方性媒質の境界面における光線の屈折に関する幾何学的な法則をいう。その特徴は次のとおりである。

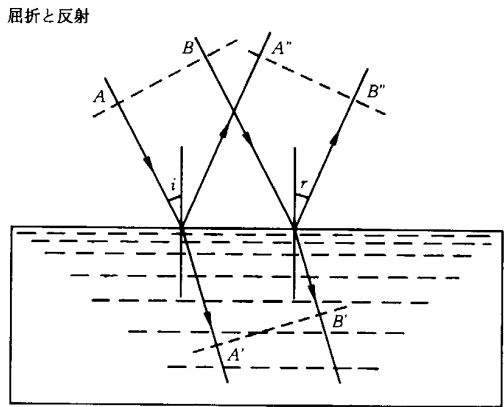
(1) 第16図のとおり、入射光と反射光は表面に対する法線をなす角  $i$  と  $r$  は等しくなければならない。反射と屈折は入射光、屈折光、反射光がすべて境界面に対する法線を含む同一平面内にまともて起こる。

(2) 光が密な媒質に、ある角度で入ると法線に対して曲がる。したがって第11図のように屈折角  $r$  は入射角  $i$  よりも小さい。これを法線に向けての屈折と呼ぶ。

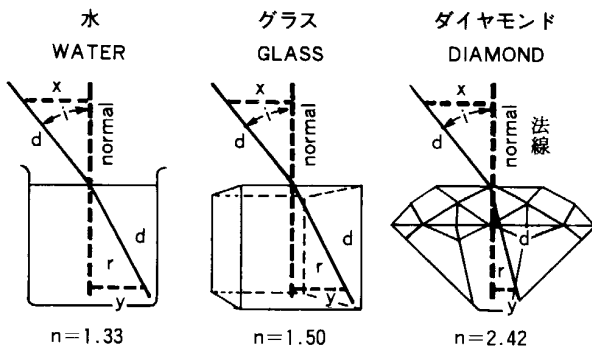
(3) どんな媒質の屈折率  $n$  も、真空 (空気中) の光速  $C$  と媒質中の光速  $V$  との比である。

$$n = \frac{C}{V}$$

第16図 屈折と反射



第17図 各媒質の屈折率



屈折率  $n$  は空気と媒質の境界面を通過する際、光の曲がる率である。たとえば第17図のとおり鎖線  $x$  と  $y$  の比は  $\frac{x}{y}$  で、屈折率  $n$  と等しい。ただし、入射光  $d$  が空気中と媒質中の長さが同じ場合に限る。第11図によれば光がある媒質から他の媒質に入るとき、屈折光は入射面内であって、境界面の法線に対し入射光と反対側にある。屈折角  $r$  の正弦と入射角  $i$  の正弦との比は入射角に関係なく一定である。すなわち、

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \text{ (定数)}$$

この法則をスネルの法則という。1626年頃スネル (Snell van Roijen, willebrord; 1591~1626、オランダの数学者、物理学者) によって初めて確立されたものである。この定数  $n$  を屈折率といい、接触している2つの物質によって定まる定数である。  $n = \frac{C}{V}$ 、  $n' = \frac{C}{V'}$  によって定義される屈折率を使って表現すると  $\frac{\sin i'}{\sin i} = \frac{n}{n'}$  または  $n' \sin i' = n \sin i$  を得る。第14図の臨界角の大きさはスネルの法

則  $n' \sin i' = n \sin i$  から容易に導き出すことができる。90度のサインは1であるから  $i_c$  は  $n \sin i_c = n'$  となる。疎な方の物質が空気なら  $n'$  を1とすることができるから  $\sin i = \frac{1}{n}$  となる。

## 5. むすび

光の不思議は光そのものにとどまらない。太陽からは電磁波とそれに含まれる光エネルギーが地球に降り注ぐ。また他の天体からも放射エネルギーが到達する。全世界の表層をなす鉱物、植物、動物それに人間に至るすべてに光感受性がある。どんな金属でも太陽に晒されるとその時間によって変色する。金属によって変色が速いか遅いかはある。金は貴金属で変色しないというが、それでも品質しだいでわずかに変色する。

あらゆる生き物の皮膚は光を吸収する。どんなに原始的な神経系でも、皮膚の表層で受け止めた光に対して生体が反応する。光なくしてはこの世に生命は存在しない。かつて原始民族はそれを知っていて太陽を神と崇めたのである。オットー (Ott, John N.) は「目が2つの別個の機序を持つ」という事実を発見した。すなわち、光は視神経に影響して私たちに見えるようにする機序と、別に光は正常な目に入り、視覚となんら連結していない網膜の特別な細胞層に命中することである。そこで光は電気インパルスを刺激して大脳へ伝え、これらのインパルスの若干を視床下部 (hypothalamus) へ伝える。この視床下部は大脳の基底に位置しゴルフボールの大きさである。視床下部は私たちの体の最も基本的なはたらきを調整する。そして下垂体、内分泌腺を強力にコントロールする。さらに血流に重要なホルモンを分泌する。また、より小さな腺である副腎、性腺、甲状腺にどんな命令を伝えるべきか視床下部は下垂体に知らせてくれる。

目を經由して光を感じ、皮膚を通して光を吸収すると、私たちは潜在意識によって光を活用する。私たちの成長と健康のさまざまな局面に光は深遠な影響力を持つ。そして光の不思議は生命そのものとさえ言い得るのである。

(1995年11月30日受理)