

7 光学的性質

光は空間の電場と磁場の変化によって形成される波(波動)であり、波長、振幅、伝播方向、偏光、位相などで特徴付けられる。光は真空中を光速 c で直進するが、物質に光を照射すると、反射、吸収、屈折、散乱、回折などの現象が起こる。これらの現象は光が振動電場として物質に電気的な作用を及ぼすためであるため、物質の誘電的性質が基本となる。ここでは光の基本的現象と電気光学効果を定性的に述べ、その応用を紹介する。なお光は可視光線(波長 380~780 nm)に限定されることもあるが、この章では図 7-1 に示すように、紫外線と赤外線を含む波長が $10^2 \sim 10^4$ nm の範囲の電磁波を主に光とよぶことにする。

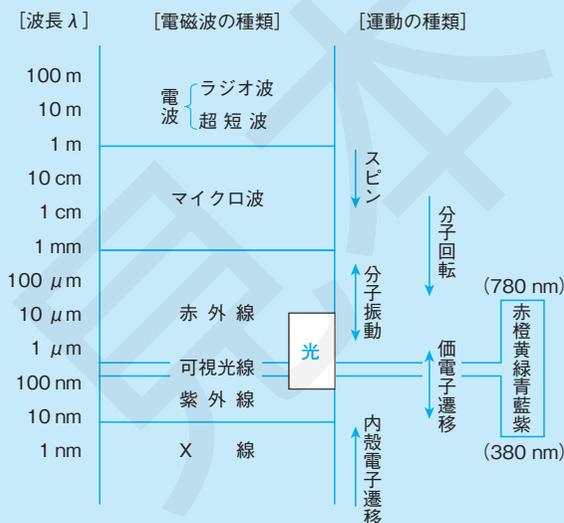


図 7-1 電磁波の種類と物質との相互作用

7-1 屈折と複屈折

媒質 1 (例えば空気) 中を直進する光が媒質 2 (例えばガラス) 中に入射すると、境界面で進行方向が変化する。これを**屈折**(refraction)といい、媒質によって光の伝搬速度が異なることで生じる現象である。図 7-2 に光の屈折と反射の関係を示す。媒質 1 と媒質 2 の 2 つの媒質中を進行する波の伝播速度 $v_1 \cdot v_2$ と入射角 i ・屈折角 r の間には次の関係がある。

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = n_{12} \quad (7-1)$$

ここで n_{12} は媒質 1 に対する媒質 2 の**相対屈折率**(relative refractive

光と電磁波

光は電磁波である。電磁波には時間と共に振動する電場と磁場があり、それらが空間的に振動しながら伝搬していく。電場と磁場は“大きさ”と“向き”をもっておりベクトルで表される。電場ベクトル E と磁場ベクトル H 、および伝搬方向の波数ベクトル k は互いに直交している。

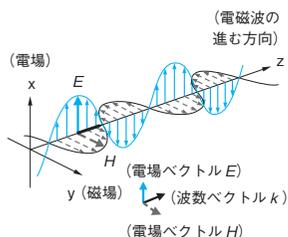


図 電磁波の電場ベクトル (E) と磁場ベクトル (H)

物質中の光の速度と波長

真空中では光の速度は振動数あるいは波長に関わらず一定である。光が媒質中に入ると光は減速されるが、この原因は「媒質中の光の減速は光と物質の相互作用によって波長が短くなる(振動数は変わらない)」ためである。すなわち媒質中の光は波長が圧縮された形で進行する(一周期に進む距離が短くなる)ために光速は遅くなると考えることができる。(7-5)式を波長 λ で示すと以下のようになる。

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

(あるいは $n_1 = \frac{c}{v_1} = \frac{\lambda}{\lambda_1}$)

例えば屈折率 $n_1=1$ の媒質(真空あるいは空気)から $n_2=2$ の媒質(固体)に光が侵入するとすれば、速度 v_2 は $1/2$ に、また波長 λ_2 も $1/2$ になる。

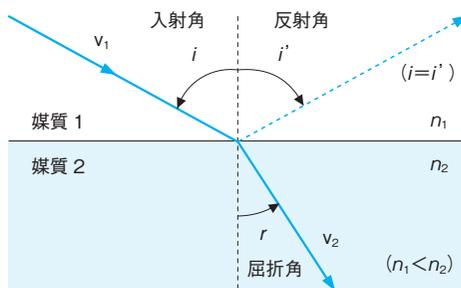


図 7-2 光の屈折と反射

index) とよび、両者の速度比 (v_1/v_2) を表している。これをスネルの法則 (Snell's law) あるいは屈折の法則という。この際、進行する波の一部は境界面で反射する。

物質に光が入射すると、物質を構成する原子やイオンに伴う電荷とそれによって形成される電氣的、磁氣的な場と電磁波である光の相互作用(電子分極に基づく誘電率変化)によって光の速度は遅くなる。Maxwell の電磁理論に基づき、真空中から媒質に光が入射した場合について考えてみよう。真空中の光の速度 c および媒質 1 中の光の速度 v_1 は次のように表される。

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad \text{および} \quad v_1 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (7-2)$$

ここで ϵ_0, μ_0 は真空の誘電率および透磁率、 ϵ, μ は媒質 1 の誘電率および透磁率である。(7-3)式に示すように両者の速度比 (c/v_1) を媒質 1 の絶対屈折率 (absolute refractive index) n_1 という。

$$\frac{c}{v_1} = \frac{1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}{1/\sqrt{\epsilon \mu}} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = n_1 \quad (7-3)$$

ここで ϵ_r, μ_r は媒質 1 の比誘電率および比透磁率である。多くの誘電体では $\mu_r \approx 1$ として良いので、屈折率は誘電率だけの関係で表される。

$$n_1 = \sqrt{\epsilon_r} \quad (7-4)$$

なお(7-4)式は一定振動数 ν のもとで測定された屈折率 $n(\nu)$ と比誘電率 $\epsilon_r(\nu)$ の間で成り立つ。

次に媒質 1 と媒質 2 の絶対屈折率 n_1 と n_2 を用いてスネルの法則 ((7-1)式) を表すと

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin i}{\sin r} \quad (7-5)$$

および

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad (7-6)$$

と表される。

物質の屈折率は、気体の場合は絶対屈折率が、液体や固体の場合は空気に対する相対屈折率が一般に用いられる。なお真空の屈折率は1(基準)であり、空気の屈折率は1.0003である。表7-1に代表的な無機固体の屈折率を示す。

表7-1 無機固体の屈折率 n_D^{20}

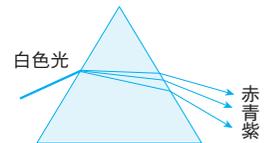
物質 I *1	n_D	物質 II *2	n_D
シリカガラス	1.458	Al ₂ O ₃ (コランダム)	n_o 1.768
ソーダ石灰ガラス	1.51		n_e 1.760
鉛ガラス	1.7	SiO ₂ (水晶)	n_o 1.544
NaCl	1.543		n_e 1.553
ダイヤモンド	2.418	CaCO ₃ (方解石)	n_o 1.658
PbS	3.91		n_e 1.486

*1 光学的等方体, *2 光学的異方体: n_o 正常光, n_e 異常光

屈折率は入射光の波長によって変化するので¹⁾、通常 Na-D 線 ($\lambda = 589.3 \text{ nm}$) で測定された値を示すことが多い。この場合、20℃で測定された屈折率は n_D^{20} のように表記される。

スネルの法則が成り立つのは、誘電率が方位に依存しないガラスなどの非晶質や立方晶系(等軸晶系)の結晶に限られる。これらの物質を**光学的等方体**という。一方、光学結晶、高分子配向膜、液晶高分子などの多くの物質では、x, y, z 方向による原子配列の違いに伴って誘電率が異なるために、光が入射すると互いに直交する振動方向を持つ2つの直線偏光に分かれて屈折する²⁾。これを**複屈折(birefringence)**という。その概念図を図7-3に示す。複屈折の1つはスネルの法則に従う**常光線(正常光: o)**、もう1つは**異常光線(異常光: e)**である³⁾。2つの屈折率, n_o と n_e の差 $\Delta n (= n_e - n_o)$ (あるいは2つの光線の位相差)で複屈折性が定量化される。複屈折は方解石(炭酸カルシウム結晶)によって文字が二重に見える現象として知られているが、このような光学的な異方性をもつ物

- 1) プリズムで見られるように、物質の屈折率は波長が短くなると大きくなる。短い波長の光は物質中では光速が遅くなるため屈折率が大きくなるからで、屈折率の周波数依存性は $n = \sqrt{1 + \chi(\omega)}$ で表される。ここで $\chi(\omega)$ は電気感受率 χ で、周波数 ω の関数であることを示している。



- 2) 自然光はランダムな方向に振動している無偏光状態にあるが、偏光板を通すと直線偏光を取り出すことができる。なお偏光には電場(および磁場)の振動方向が一定である**直線偏光**、振動が伝搬に伴って円を描く**円偏光**、および楕円を描く**楕円偏光**がある。楕円偏光は直線偏光と円偏光が一次結合したものである。
- 3) 常光線の屈折率は入射光の光学軸に対する角度には依存しないが、異常光線についての屈折率は入射光の光学軸に対する角度によって変化する。その2つの光の屈折率は入射光が光学軸と同軸で入射するときは一致する。

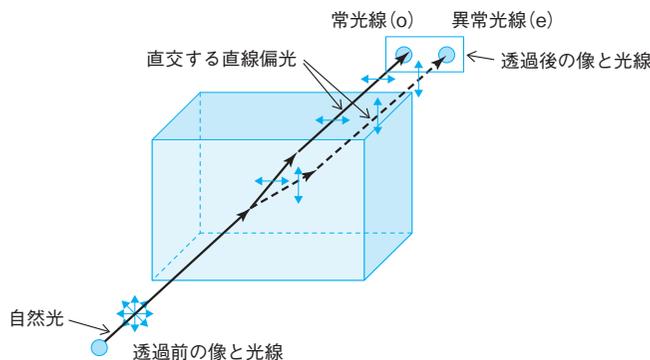


図7-3 複屈折した像と光線概念図

質を**光学的異方体**といい、結晶の光学軸の数によりさらに一軸性結晶と二軸性結晶に分けられる。光学的等方性と光学的異方性による結晶の分類を表7-2に示す。

表7-2 結晶の光学的等方性と光学的異方性による分類

結 晶	晶 系	単位格子の軸比	備 考	
光学的等方体	非結晶質	—	—	
	立方晶系	$a = b = c$	三次元内で等方的	
光学的異方体	一軸性結晶	正方晶系	$a = b \neq c$	光学軸が1本で、二次元内では等方的
		六方晶系	$a = b \neq c$	
		三方晶系	$a = b \neq c$	
	二軸性結晶	斜方晶系	$a \neq b \neq c$	光学軸が2本で、どの面内でも等方的でない
		単斜晶系	$a \neq b \neq c$	
		三斜晶系	$a \neq b \neq c$	

- 4) この“一定の条件”とは、(1)「波動ベクトルの境界面に平行な成分は、各光において等しい」(2)「電場と磁場の境界面に平行な成分は、境界面の両側で等しい」(3)「電束密度・磁束密度の境界面に垂直な成分は、境界面の両側で等しい」ことである。難解ではあるが、反射角・屈折角に関する法則(スネルの法則)や、反射率・透過率に関する法則(フレネルの式)はこの原理から導き出される。

7-2 反 射

屈折率が異なる物質間の境界面に光が入射したときには、屈折の項で述べたように一定の条件を満たすように、反射光と透過光(屈折光)が生じる⁴⁾。ここには(透過率+反射率=1)の関係がある。

いま、空気(屈折率 n_0)中から固体(屈折率 n)表面に直角に光を照射したとする。このときの光の反射率 R は次式で与えられる。

$$R = \frac{(n_0 - n)^2 + k^2}{(n_0 + n)^2 + k^2} \quad (7-7)$$

ここで k は $\sqrt{\pi n \sigma / c^2}$ (n は固体の屈折率、 σ は電気伝導率、 c は光速) で表される光の減衰に関する定数である。

いくつかの金属と半金属の R 値を図7-4に示す。 R 値が波長に依存する理由の1つは(7-7)式中の屈折率 n が波長に依存するためである。

光の波長と金属光沢および金属の色

- (1) 600 nm 付近以上の波長の高い反射率と金属光沢：光は金属の自由電子に遮断され、金属の中に侵入できずほとんどが反射される。これが金属光沢の原因となる。
- (2) 600 nm 付近以下の波長の特徴的な吸収と金属の色：金属の中に入った光は原子核に束縛されている電子によって吸収される。束縛されている電子の状態は金属の種類によって異なるので、吸収される光の波長も異なる。これが金属の特有の色の原因となる。詳細はプラズモンを学んで欲しい(参考文献20)。

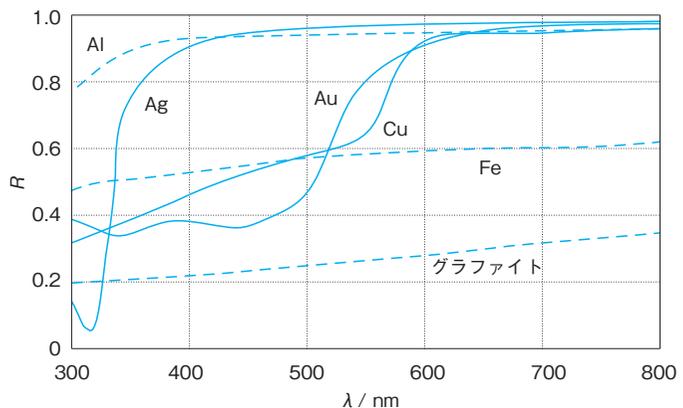


図7-4 金属の反射能(R)の波長(λ)依存性