

フインマン物理 偏光

理工学基礎教室 長田信夫 実験教育支援センター 小向康夫 土屋明仁

1 光と偏光

光は電磁波と呼ばれる波であり，電場と磁場の振動が伝播する現象である．電場と磁場の振動の方向は互いに垂直であり，通常，電場はベクトル E ，磁場はベクトル H とあらわされる．偏光とはこの振動方向が偏ることを意味している．光学領域での振動検出方法はほとんど電場に関係しているので，一般的に電場ベクトルの偏りの面を偏光面としている．

白熱電球などから放射されるでんぱのしんどうほうこうは任意の方向に一様に分布しており，時間に対して不規則な振動をしている．このような光は「自然光」と呼ばれている．また，振動の方向の分布が不一致で，特定方向に振動する電場の強度が他の方向より強いものを「部分偏光」という．

2 直線偏光

直線偏光とは，電場の振動方向を含む面が一つに特定されることである．これを取り出すための素子は「直線偏光素子」と呼ばれている．代表的な偏光素子としては，ポラロイド¹やPVA-ヨード膜をガラスまたはプラスチックではさんだもの，ニコルプリズムなどがある．

直線偏光を直線偏光子に入射させると，直線偏光の方向が変わるにしたがって透過光の強度が変化する．偏光子の透過軸を x 軸に選び，任意の直線偏光の方位角を θ とすると(図1)，電場ベクトルの振幅の大きさ E_0 の x 成分は $E_x = E_0 \cdot \cos\theta$ となるため，透過光の強度は

$$I = E_0^2 \cdot \cos^2\theta$$

となる．これをマリュースの法則という．特に両者の透過軸が並行のときには， $I = E_0^2$ となり最も透過光が多い．これを並行ニコルの状態という．また両者の透過軸が直行すると $I = 0$ となる．これを直行ニコルという．

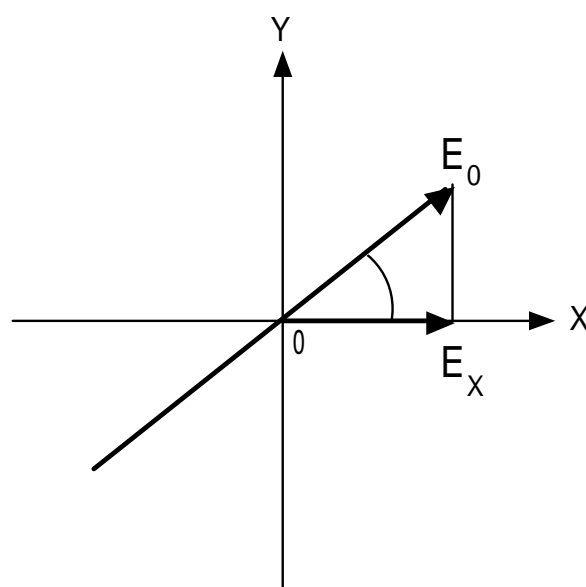


図1．マリュースの法則

ところで，直行偏光を得る一般の現象としては，散乱によるもの，誘電体の表面反射によるものがある．

(a) 散乱による偏光

光が微細な分子や原子に当たると，その周りの電子雲に振動を誘起し，光波の振動と共振すると再放射光を放出ようになる．これが光の散乱である．今，図2のように誘電体の原子に \vec{k} の光波が入射すると考えると，電子は原子の位置において \vec{k} に垂直な面内で振動する．したがってその散乱光を観察すると，振動の方向は電子の振動する平面内にあり電場が一方の方向で直線偏光になっていることが分かる．

¹ ヨウ化物の針状結晶を定方向に配列したポリビニルアルコールやセルロースなどの鎖状高分子膜に吸着させてつくる．

図2 . 入射光と直角な方向に散乱された光の偏り

(b) 誘電体の表面反射による偏光

誘電体に入射する光は、入射面に垂直な振動面を持つ s 成分と入射面内に含まれる p 成分²で反射率が異なる。例えば、屈折率 n_1 から n_2 の物質に反射屈折する場合の光の入射角 θ_1 、屈折角 θ_2 とする (snell の法則より $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1$)。

$$R_p = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)}$$

となり、s 成分の反射率は、

$$R_s = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}$$

となる。このとき、 $\theta_1 + \theta_2 = \pi/2$ とすると、 $R_p = 0$ となって反射波は R_s だけとなる。これは入射面に垂直な偏光面を持つ完全な変更を意味している。このときの入射角は

$$\theta_b = \tan^{-1}(n_2/n_1)$$

これをブリュースター (Brewster) の法則と呼び、この入射角 θ_b をブリュースター角という。

ガラスと空気の境界面 ($n_1 = 1, n_2 = 1.5$) の場合、 θ_1 がおよそ 57 度のところで R_p が 0 になり、この角度では反射光は入射面に垂直な偏光を得ることができる。この結果によって滑らかな水平面からのまぶしい光を減少させるような偏光サングラスの作用が説明される。たとえ反射面が透明な物質の表面でなくても、斜めに入ってくる光線はまだかなり変更されている。したがって斜めに反射された光を偏光サングラスで見ることによって偏光面のおよその方向を見つけることは容易

である。

3 楕円偏光

直線偏光では、偏光面は時間にも位置にもよらず同じ平面上にある。これは時間や位置によって規則的に偏光面が変化するときの特殊な例として捉えることができる。一般に、ある位置(時間)でみた電場ベクトル(偏光面)が、時間(位置)とともに回転するような偏光を楕円偏光という。偏光状態にあるとき、角振動数 ω 、波数 k の光が z 軸方向に進むときの電場ベクトルの成分を直交成分で表すと、

$$E_x = A_1 \cos(t - kz + \delta_1)$$

$$E_y = A_2 \cos(t - kz + \delta_2)$$

となる。 t や z を一定にした場合の合成電場ベクトル $E(E_x, E_y)$ の軌跡は楕円である。

このうち直交する 2 つの直線偏光成分の間に位相差がない場合、すなわち

$$\delta_2 - \delta_1 = m\pi \quad (m \text{ は整数})$$

のときは直線偏光を意味しており、偏光面は時間にも位置にもよらず $\tan^{-1}(A_2/A_1)$ の方向を持つ平面上になる。直線偏光子で得られる偏光は、その位相差がない光を放出すると考えればよい。

もし位相差があるならば、合成電場ベクトルの芳香は時間と共に変化する。例えば位相差

$$\delta_2 - \delta_1 = \frac{2m+1}{2}\pi \quad (m \text{ は整数})$$

の場合、

$$E_x = A_1 \cos(t - kz + \delta_1)$$

$$E_y = -A_2 \sin(t - kz + \delta_1)$$

となる。 z を一定にした場合の電場ベクトルの先端は、角周波数 で A_1 、 A_2 を径とする楕円軌道を描くことになる。さらに $A_1 = A_2$ ならば円軌道を描き、この状態は円偏光と呼ばれている(図3)。

楕円偏光、円偏光を記述する場合は回転の方向を指示するような約束が必要である。IEEE では、光の進行方向において電場ベクトルの回転が時計周りであれば、右まわり(右ねじともいう)と定義している。

² 添え字 p と s は一般的に用いられているもので、parallel と senkrecht(ドイツ語で並行と垂直の意)を表す。

図 3 . 楕円偏光

4 偏光の変換

直交する 2 つの直線偏光成分の間の位相差を変化させるために用いられる光学素子は位相子と呼ばれる。位相子には、 $\pi/2$ や π など 1 波長の整数分の 1 に相当する位相差を与える波長版と、位相差が可変な補償板とがある。いずれも偏光状態の変換に用いられ、偏光の測定に重要な役割を果たす。

波長板は、覆屈折を持つ結晶から切り出した 1 枚の並行平板で、 $\pi/2$ の位相差を与えるものを 1/4 波長板、 π の位相差を与えるものを 1/2 波長板、 2π の位相差を与えるものを 1 波長板という。2 色性³のない結晶で作られた波長板では、直交した振動面をもつ 2 つの直線偏光(前節の E_x, E_y) が固有偏光となり、それぞれの偏光状態を保存したまま通過するが、一方は屈折率が小さく早い測度で通過し、他方は屈折率が大きく遅い速度で通過するため、両者の間に位相差 δ が生じる。この 2 つの固有偏光の振動面を中性軸または主方向と呼び、その位相測度に関連して一方を速い軸、他方を遅い軸といい、早い軸方向に振動面を持つ直線偏光が遅い軸方向の直線偏光に対して δ だけ位相が進むことになる。

³ 特定の振動面の方位を持つ直線偏光、または特定の向きの円偏光が吸収される媒質の性質のことを 2 色性という。

実際の波長板は雲母のへき開面を利用して製作したものが 1/4 波長板としてよく用いられる。きわめて薄い($\lambda = 589\text{nm}$ のとき $36.8\mu\text{m}$) ので、ガラス板の間にはさんで使う。また 1/4、1/2、1 波長板とも水晶がよく利用される。このときには、2 枚のわずかに暑さの異なった並行平板を直交させ、厚さの等しい並行平板と等価な位相板を作ることが多い。またフレネルの斜方体は色消し 1/4 波長板としてよく用いられる。セロファン紙も手軽な可視域の 1/2 波長板として簡単に利用できる。

4.1 1/2 波長板

$$\begin{aligned} &= -A_2 \cos(t - kz + \delta_2) \\ &= -E_{\text{slow}} \end{aligned}$$

1/2 波長板は 2 つの直交する偏光成分の位相を π 、すなわち 1/2 波長ずらすことができる。円偏光や楕円偏光の逆転、直線偏光の方位の変化に用いられる。

入射する偏光を波長板の早い軸方向($E_{(\text{slow})}$)に分解するとき、次のようになったとする。

$$E_{\text{fast}} = A_1 \cos(t - kz + \delta_1)$$

$$E_{\text{slow}} = A_2 \cos(t - kz + \delta_2)$$

波長板の遅い軸方向に位相差が生じると、

$$E_{\text{slow}} = A_2 \cos(t - kz + \delta_2 - \pi)$$

となり、遅い軸方向の振幅が反転することになる。つまり速い軸に対称に変換されることを意味している。これによって、円偏光や楕円偏光は速い

軸に対して対称形となり，直線偏光も同様に見かけ上振動面が0度～90度回転されたように見える．

4.2 1/4 波長板

1/4 波長板は2つの直交する偏光成分の位相を π ，すなわち1/4波長ずらすことができる．直線偏光を円偏光に変換，あるいはその逆の用に用いられる．

直線偏光を円偏光に変換するには，偏光面が速い軸と遅い軸の中間(45度)にならなければならない．これ以外の角度の場合，速い軸と遅い軸に射影された電場ベクトルの隔たりが発生し，それらの間で位相が $1/2\pi$ ずれると楕円偏光になる．

1/4波長板を用いた典型的な応用例は，CRTやLCDのグレア(外部光の反射)消光である．これは円偏光フィルムとも呼ばれ，直線偏光子と1/4波長板を組み合わせたものが利用されている．消光の仕組みは次の通り．自然光が入射すると，まず直線偏光子によって直線偏光される．これが1/4波長板によって右向き(左向き)に円変更される．反射しても偏光の向きは変わらず，右向き(左向き)のまま戻ってくる．1/4波長板を通ると右向き(左向き)周りに変更されて，1/2波長ずれた(位相が π ずれた)直線偏光となる．この偏光はもとの直線偏光子を通過することができないため，外部光の反射を遮断することができるのである．

The Feynman

LECTURES ON PHYSICS

VOLUME I CHAPTER 33. POLARIZATION

より