

偏光に関するまとめ

橋本 涉

平成 11 年 11 月 15 日

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電場の振動方向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 1 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「直線偏光子」と呼ばれている。代表的な偏光子としては、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 2)、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、

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

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平行のときには、 $I = E_0^2$ となり最も透過光が多い。これを平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。これを直交ニコルの状態という。

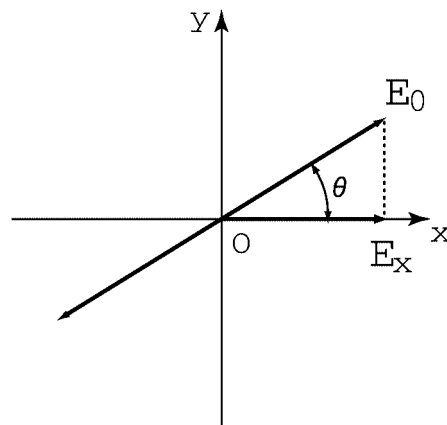


図 1: マリュースの法則

ところで、直線偏光を得る一般の現象としては、錯乱によるもの、誘電体の表面反射によるものがある。

(a) 錯乱による偏光

光が微細な分子や原子にあたると、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するようになる。これが光の錯乱である。今、図 2 のように O 点にある電子雲に s の方向から光波が入射すると考えると、電子雲のおこる振動

は O 点において s に垂直な面 P 内に含まれる。したがってその錯乱光を A 点から観察すると、A 方向に放射する光は、P 面内において \vec{OA} に垂直な電場ベクトルの振動のみとなり、もし \vec{OA} が s に垂直な場合には、s と \vec{OA} に垂直な方向に振動面をもつ直線偏光が得られることになる。このような現象は大気中の錯乱光にみられ、太陽からの光と直交する方向の青空からの光は直線偏光が多く含まれているため、その方向にむかって偏光子を回すと青空の明るさが大きく変化するのを見ることができる。

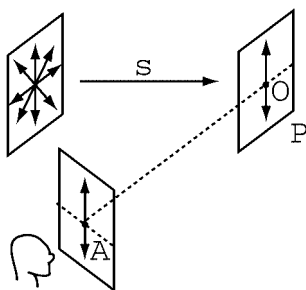


図 2: 錯乱による偏光

(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を θ_1 、屈折角を θ_2 とする³。

Fresnel の式より、p 成分の反射率は、

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

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偏光を意味している。こ

²添え字 p と s は一般的に用いられるもので、parallel と senkrecht (ドイツ語で平行と垂直の意) をあらわす。

³Snell の法則より、 $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$

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) の法則とよび、この入射角度 θ_b をブリュースター角という。

ガラスと空気の境界面 ($n_1 = 1, n_2 = 1.5$ とする) の場合、 θ_b 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偏光されている。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、

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

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

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、 E_x と E_y の位相差がない光を射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方向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、

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

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

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 ω 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下は直交する2つの直線偏光成分の間の位相差と、そのときの電場ベクトル先端の軌道を示している。

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回りであれば、右まわり(右ねじ)と定義している⁴。

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移相子と呼ばれる。移相子には、 $\pi/2$ 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板と、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、複屈折を持つ結晶から切り出した1枚の平行平板で、 $\pi/2$ の位相差を与えるものを1/4波長板、 π の位相差をあたえるものを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⁵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速い速度で通過し、他方

⁴過去の参考文献の多くでは逆の記述が多いので注意

⁵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。

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よび、その位相速度に関連して一方を速い軸、他方を遅い軸といい、速い軸方向に振動面をも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。

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枚のわずかに厚さの異なった平行平板を直交させ、厚さの等しい平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波長板として簡便に利用できる。

4.1 1/2波長板

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速い軸方向 (E_{fast})、遅い軸方向 (E_{slow}) に分解するとき、次のようになったとする。

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

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

波長板の遅い軸方向に位相差が生じると、

$$E'_{slow} = A_2 \cos(\omega t - kz + \delta_2 - \pi)$$

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

$$= -E_{slow}$$

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⁶。

⁶振動面が速い(遅い)軸に対して θ にあるとき、速い軸対称に反転するため 2θ 回転する

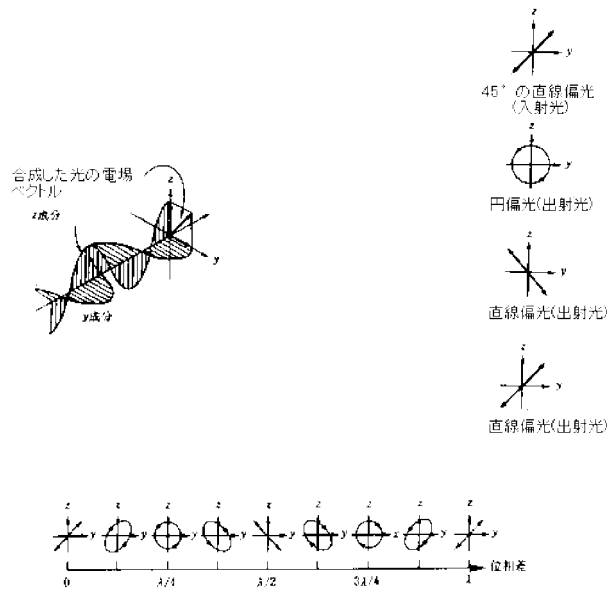


図 位相差と出射偏波

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途に用いられる。

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) になければいけない。これ以外の角度の場合⁷、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ようである。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) に円偏光される。反射しても偏光の向きは変わらず、右向き (左向き) のままもどってくる。1/4 波長板を通ると右向き (左向き) 周りに偏光されて、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

⁷ 偏光面が速い軸、遅い軸上にあると何もおこらない

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わけである。

5 円偏光を用いた立体視の方法に関する考察

Ensphered Vision に偏光立体視を導入する場合、直線偏光では実現できない。画像が周囲 360 度に広がるため、直線偏光の等方向性が保てないからである。さらに直線偏光がスクリーンによって拡散し、直線偏光面が得られなくなることも予想される。

さて円偏光を導入すると、等方向性が保つことができる。しかし、スクリーンによる拡散で円偏光が乱れる可能性もある。これは予備実験で調べておく必要があるだろう。拡散によって円偏光が乱れないものとする、実現方法は以下ようになる。

液晶プロジェクタから発する光は、ある方向の直線偏光をもっている。これは D-ILA でも確認済である。直線偏光子を用いて偏光方向がわかったとする。この偏光に対して 1/4 波長板をいれると円偏光を得ることができる (図 5)。

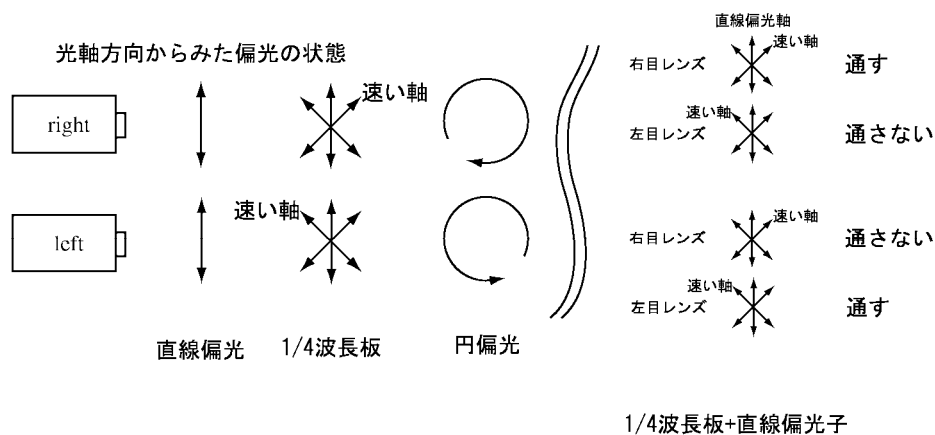


図 3: 円偏光を用いた立体視

1/4 波長板の速い軸がわかっていると、直線偏光に対して+45度の向き(時計回りが+)に傾けることで右回り、-45度の向きに傾けることで左回りの円偏光が得られることになる。この状態で投影する。眼球に入る直前では、円偏光を直線偏光に戻し両眼像の分離をする。右回りの円偏光を遮り、左回りの円偏光を通すためには、直線偏光に対して+45度の向きに速い軸がくるように1/4波長板と直線偏光子を組み合わせればよい。また左回りの円偏光を遮り、右回りの円偏光を通過させるには、直線偏光に対して-45度の向きに速い軸がくるように1/4波長板と直線偏光子を眼前に置けばよい。

- [5] <http://www.magnet.okayama-u.ac.jp/magword/light/>
- [6] Edmund Scientific Japan Company Ltd. 1999-2000 Optics and Optical Instruments Catalog
- [7] 土井康弘 著: 偏光と結晶光学 光学技術シリーズ 4, 共立出版, 1975
- [8] G.P.Können: Polarized light in Nature, Cambridge University Press, 1985

参考文献

- [1] 石川光男 訳: 光学 オクスフォード物理学シリーズ 14, 丸善株式会社, 1978
- [2] 辻内順平 著: 光学概論 理工学基礎講座 11, 朝倉書店, 1979
- [3] 山田幸五郎 著: 光学の知識, 東京電機大学出版局, 1966
- [4] <http://scnzai07.poly.kit.ac.jp/lectures/3enshu/henkouf.html>