

連載講座

光学のすすめ 7

Rediscover Optics

見て
触って
考える

偏光のしくみと応用

東海大学
横田 英嗣

来たるべき21世紀に向け、さらなる発展が期待されている光技術。しかしながら、我が国の初等中等教育課程（小・中・高等学校）では、この光技術の根本となる光学の基礎に相当する内容が、中学ではごくわずか、高校では教科書で数ページ程度、レンズの公式すら教えていないのが現状です。

本連載は、光学の基礎を誰にでもわかりやすく解説する講座であり、①本誌に掲載される印刷教材②フロッピーディスクに編集された電子教材③米国光学会（OSA）の光学実験キットの三つで構成されています。より理解を深め、実際に自分の手で実験ができる電子教材と光学実験キットは、実費にて頒布しますので、ご希望の方は、講座の最後のページにある申込書を用いて、編集部までお申し込み下さい（電子教材に関しては現在、製作中です。詳しくは、編集部までお問い合わせ下さい）。（編集部）

【予定テーマ】

- | | |
|------------------|------------|
| ①光学の基礎 | ⑦レーザーの原理 |
| ②プリズムとレンズ | ⑧レーザーの実際 |
| ③レンズによる結像 | ⑨目と色 |
| ④波としての光(1)(2)(3) | ⑩光を用いた情報機器 |
| ⑤偏光のしくみと応用 | ⑪自然界の光 |
| ⑥光学機器(1)(2)(3) | |

1. 偏光 (Polarization)

私たちはこの講座で光を光線としてレンズ、プリズムの作用を学んできました。またシャボン玉をふくらましていくと色付いて見え、色が鮮明になる椀子が観察されますが、この現象は光の干渉として、光を波として考えないと説明がつかないことを学びました。音は空気の振動により空気が密度の高い部分（密な部分）と密度が低

い部分（疎の部分）が交互に出来て、これが空気中を伝わる縦波です。空気がない月面は音は伝わらない沈黙の世界ですが、光は真空中でも伝播します。

光は横波であることはこの章で説明する偏光の現象でも説明が出来ますが、もう少し複雑です。

まず、方解石の結晶を文字を書いた紙の上に置いて、上から見ると文字が図7-1のように2つ見えます。この現象から考えてみましょう。

講座



図7-1 方解石の結晶による字の見え方

2. 波のモデル

様々な現象を説明するために目に見えるモデルを用いて説明すると理解しやすいので、例を挙げて説明していきます。まず波というと水面に石を投げたときに四方に伝わる波紋が思い浮かびます。水面を棒で叩くと波が連続的に伝わります。もし水面に「浮き」などが浮かんでいると浮きは上下に動くだけです。この叩き方が一定なほど規則正しい波が伝わります。これは光波では重要なことで後の講義で触れることになるでしょう。

いま、図7-2に示す様な長い紐の一方を固定して、他方の端を持って上下に振つてみると波が紐を伝わっていきます。

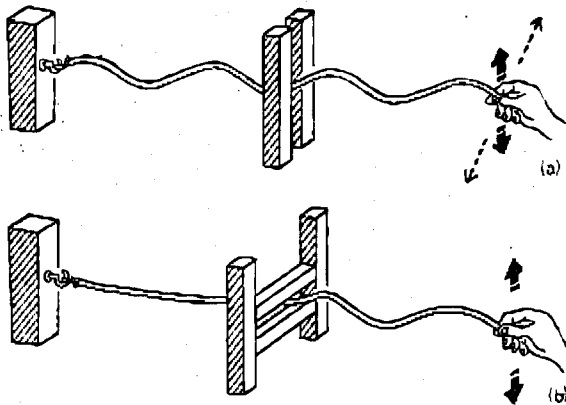


図7-2 紐を伝わる波

紐の途中に図7-2(a)の様に2本の棒を紐が通る程度の隙間を紐の動く方向に作り、波を作ると波は邪魔をされずに伝わっていきます。しかし、図7-2(b)の様にその隙間を波に対して垂直に置くと紐に伝わる波はその隙間より先には伝わりません。それでは斜め方向に振って作った波はどの様に伝わるのでしょうか。今度は隙間から先には大きさは小さいですが隙間と同じ方向に振動する波が伝わっていきます。

光にもこのような現象があり、それが偏光です。この2本の棒にあたるものを偏光板といい、その隙間に相当するものを偏光板の主軸といいます。光はその方向に振動する光しか透過しません。主軸と直角に振動する光は透過しません。

これらの方向と異なって振動する光が入射する場合について図7-3で考えてみましょう。振幅ABの光は(偏光板の主軸がx方向にあるとする) x成分の振幅A'B' (=ABcosθ) の大きさの光だけが透過します。もし偏光板の主軸がy方向ならば、振幅A'B' (=ABsinθ) 大きさの光だけが透過します。

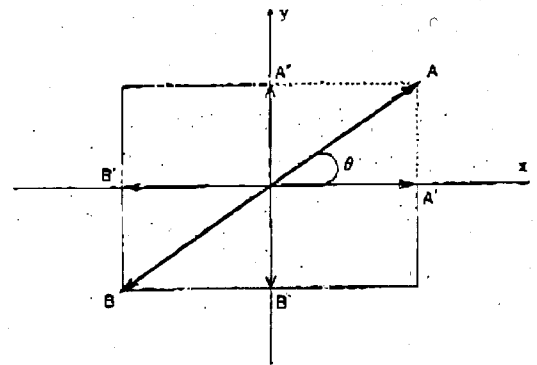


図7-3 偏光板の主軸と透過偏光

以上のことは実験キット (polarizer : 偏光板) を使って確かめることができますので実験 (実験7-1) してみましょう。

自然光 (太陽の光)、電球などの光源を偏光板で覗くと偏光板を回転させても光の強さは変化しません。光の振動方向が時間とともに急激に変化してしかも不規則で

あるためです。もう1枚の偏光板をかきねて図7-4(a)の様に回転させると $90^\circ (= \frac{\pi}{2})$ 毎にその透過光は明るくなったり暗くなったりします。即ち、一度偏光板を通過した光は1方向に振動する波だけなので、もう1枚の偏光板によつて光を明るくなったり暗くなったりするので、2枚の偏光板の主軸が平行な時には明るく、直角の時には暗くなります。

この第1の偏光板は偏光を作るといふ意味で偏光子、第2の偏光板を検出といふ意味で検光子とも呼ばれています。

2枚の偏光板の主軸の角度を ϕ とするとその時の光の強度を測定すると図7-4(b)の様に

$$I(\phi) = I_0 \cos^2 \phi$$

の関係になります。これをマリュウ (Malus) の法則といひます。 I_0 は偏光子の透過強度。

これらの現象は光が縦波ではなく横波であるという推定の根拠です。

この1方向に振動する光を直線偏光 (linearly polarized light) あるいは平面偏光 (plane polarized light) といひます。

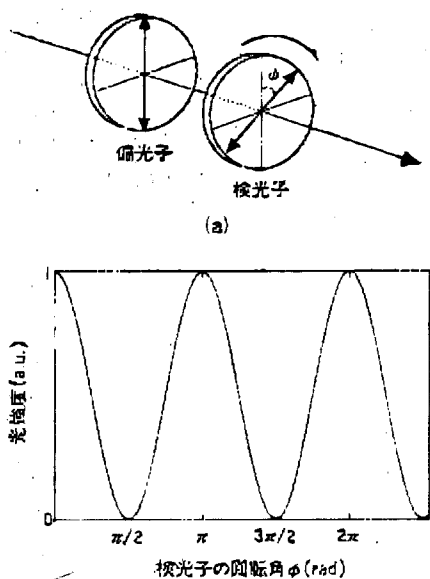


図7-4 (a) 2枚の偏光板による実験
(b) マリュウの法則

3. 複屈折について

語を方解石の字が2重に見える現象 (図7-1) についてもう少し考えてみましょう。方解石の結晶は六方晶系の結晶といひ、図7-5の様な形をしています。私達のよく知っている食卓塩をよく見ると立方体の結晶 (立方晶系) の塊で出来ています。さらに細かく砕いても (これをへき開といひます) 立方体になります。方解石の結晶はこの図の様なへき開面が出来ており、へき開面内では方向によつて結晶の並び方が異なります。

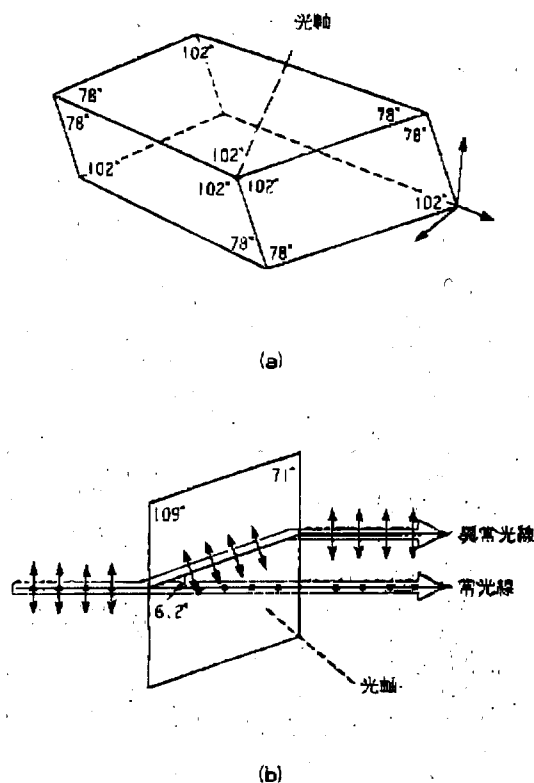


図7-5 (a) 方解石の結晶
(b) 結晶内の光の伝わり方

いま、紙を動かさなひで、この結晶だけを回すと1方の文字は動きませんが、もう一方の文字は結晶を回すにつれて位置が変わります。この観察からこの結晶の中を光が通過する時に光は2つの違った光路を通過しているこ

連載講座 光学のすすめ 7

とになります。回しても動かない1つの光路は屈折の法則に従っており、図7-5(b)に示すように、この光は常光線 (ordinary ray) といい、この動く方の光は異常光線 (extraordinary ray) といいます。この現象は光の振動する方向によって結晶の性質が異なっているからです。この現象を複屈折 (double refraction) といいます。

しかし、方解石でも図7-4の点線で示している方向ではこの特別な性質は見られません。この方向を光軸 (optic axis) といいます。即ち、光軸方向に垂直な面で結晶を切りだしたものでは、図7-1の様な現象は見られず、ガラスと同じ様に文字は1つしか見えません。

4. 偏光を利用した光学素子

4.1 偏光子 (偏光プリズム)

常光線と異常光線をわけて取り出すには常光線に対する方解石の屈折率 n_o は1.66、異常光線の屈折率 n_e は1.49であることを利用します。図7-6の様に切り出した2個の菱形のプリズムの間に屈折率1.55の接着剤で貼ると異常光線は第2のプリズムに入りますが、常光線は第1のプリズムと接着剤の界面で入射角が臨界角より大きくなり全反射をするので第2のプリズムに入りません。この様にして1方向に振動する光だけを取り出す偏光子を作ることが出来ます。このプリズムをニコル (Nicol) プリズムといいます。

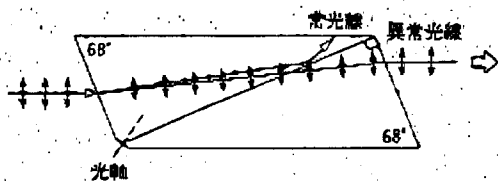


図7-6 ニコルプリズムの原理図

ニコルプリズムでは入射光が斜入射になるので不便であるため、プリズムに垂直に入射するように作られたグラム・トムソン (Glan-Thompson) プリズムがよく用いられています。この偏光子は高価ですが、消光比 (注1) が $10^{-5} \sim 10^{-8}$ のすぐれた性能をもっています。

4.2 偏光板

常光線と異常光線に対して異なった割合で吸収が起こる材料があります。この性質を2色性といいます。自然光はこの2色性の結晶を通過する時、2つの振動成分に対する結晶の吸収が十分に違っていれば、厚みを適当に選ぶことにより透過光を完全に1方向に振動する光 (直線偏光) だけを取り出すことが出来ます。最近では高分子 (例えばポリビニルアルコール) の膜を機械的に一方向に引き伸ばすと、曲がりくねった長鎖高分子が引きのばされ1方向に並び、それをヨードなどで染色すると、安価で大面積の偏光板を作ることが出来ます。一般に、ポラロイド、ダイクロームなどという商品名で市販されています。実験キットの偏光板はこの種類のもので、これらの偏光板の消光比は $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 程度です。

4.3 位相板・補償板

複屈折性をもつ結晶 (例えば雲母、石英など) 中では常光線と異常光線に分かれて光が進みます。これらの光線に対して屈折率が異なるため、結晶を平行平面に切り出した板では、 n_o を常光線に対する屈折率、 n_e を異常光線に対する屈折率、そして、その厚みを d とすると

$$n_o d - n_e d$$

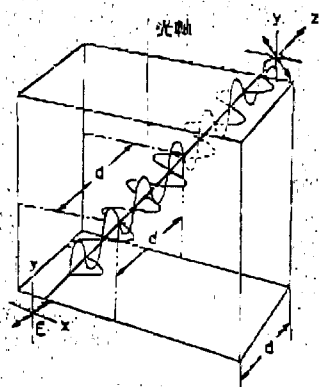
に相当する光路差だけ異なって透過します。したがって、これらの光線に対して振幅を変えず (注2) 位相のみを変えることが出来ます。これを位相板といいます。

いま、光路差が半波長になるような厚みにしたものを半 (1/2) 波長板といいます。図7-7(a)は結晶の内部で常

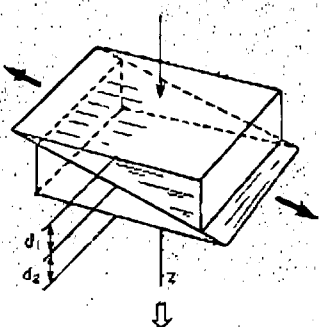
(注1) 偏光板の主軸に平行に振動する光の透過強度に対してそれと垂直な方向に透過するの光の強度の割合。

(注2) 厳密には常光線と異常光線の屈折率がわずかに異なるので表面の反射もわずかであるために、表面には反射防止をしなければなりません。

光線と異常光線の光路差が半波長ずれた様子が描かれています。この半波長板に直線偏光を入射させると通過後は振動面が90°回転した直線偏光にすることが出来ます。光路差が1/4波長ずれるように作った位相板を四分の一(1/4)波長板といいます。また結晶の厚みを適当に変化させることにより任意の位相差を作ることが出来ます。図7-7(b)をバビネ (Babinet) 補償板といいます。



(a)



(b)

図7-7 (a)半波長板の結晶中の光の伝わり方*

*半波長板の厚みd: x方向は結晶内で2波長, y方向は2波長半。したがって、光路差が半波長ずれた様子が描かれている。

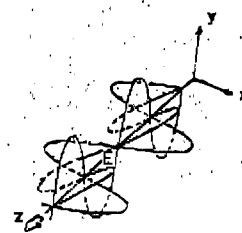
(b)バビネ補償板

2枚の結晶をずらすことでd (=d₁+d₂) を変える。

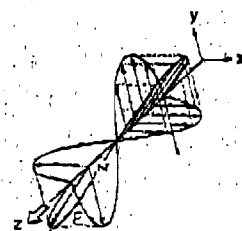
5. いろいろな偏光状態

図7-8(a)は偏光子の方位角を45°にセットしたときの偏光子通過後の偏光状態を示しています。この偏光状態(図ではEで表しています)はx方向の振動成分とy方向の振動成分に分けることが出来ます。逆に図7-8(b)で示すようにx方向の振動成分とy方向の振動成分をベクトル的に加えあわせた光がEであると考えてもよいのです。これを光の進行方向(z方向)から眺めると直線になるので、2ですでに述べましたがこれを直線偏光あるいは平面偏光といいます。

図7-9はこの直線偏光にx成分とy成分に1/4波長に相当する位相差δ (=π/2) を与える(実際には図7-8(a)の偏光状態の光にx方向とy方向に主軸をあわせた1/4波長板を挿入することに相当します)。x成分とy成分のベクトルは矢印で示す大きさと方向をもつこととなります。その矢印の先端をz方向から見ると円になるので円偏光(circularly polarized light)といいます。一般には、xおよびy方向の振幅の大きさが異なるため、その軌道は長軸と短軸がx, y方向に一致した楕円になるので、楕円偏光(elliptically polarized light)と呼ばれています。



(a)



(b)

図7-8 (a)直線偏光

(b)直線偏光の振動方向

連載講座 光学のすすめ 7

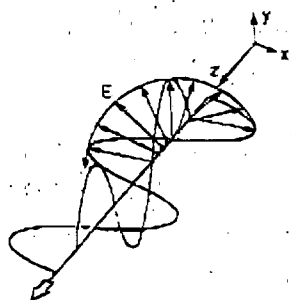


図7-9 円偏光

以上は $\delta = 0, \pi/2$ の場合における偏光状態を示したが、x方向とy方向の振動の間に位相差をいろいろと変えた偏光状態を図7-9に示します（付録参照）。

実験的に偏光子と1/4波長板によりいろいろな偏光状態の光を作ることが出来ます。言いかえると、未知の偏光状態の光を偏光子と1/4波長板によりその形状を求めることが出来ます。この方法をpolarimetry、および ellipsometry（偏光解析）といいます。

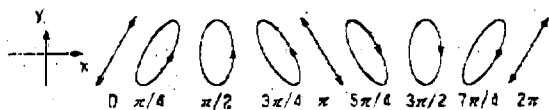


図7-10 位相差を変化させたときの偏光状態

6. 反射による偏光

図7-11(a)(b)はほぼ同時刻の写真ですが(a)は普通に撮影した写真、(b)はレンズに偏光フィルターを付けて撮影した写真です。(a)は水面に灯籠と周辺の木や雲が反射して映っていますが、(b)は水面からの反射が少ないために水

中の鯉がはっきりと写っています。反射光の偏光について考えてみましょう。

ガラスなどの表面に光を入射させると、図7-12に示すように光の振動方向は入射光と法線方向を含む平面内にあるものをp偏光、それに垂直な面内で振動する光をs偏光と定義（注3）すると、入射角により反射強度が異なります。



(a)



(b)

図7-11 カメラのレンズに

(a)普通に写した写真

(b)偏光フィルターをつけて写した写真

（注3） 振動方向が入射面に対して平行なものをドイツ語のparallel（平行：pararell）の頭文字のpをとってp偏光。振動方向が入射面に対して垂直なものをドイツ語のsenkrecht（垂直：perpendicular）のsをとってs偏光という。

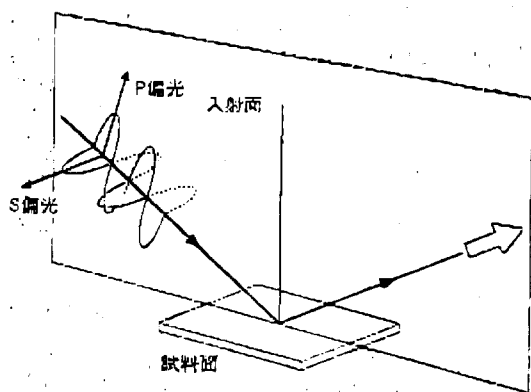


図7-12 反射における偏光の定義

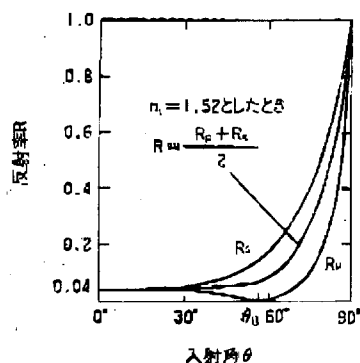


図7-13 入射角θに対する偏光の反射率R

図7-13にガラス(屈折率 $n=1.52$)の場合の反射の様子を示します。s偏光は入射角 θ が大きくなると図のように単調に増加するのに対しp偏光はいったん減少し $\theta=56^\circ$ 付近でゼロ(反射がなくなる)になりそれから増加します(注4)。

$$\tan \theta_B = n_2/n_1$$

のとき0になります。このときの入射角 θ_B をブリュースター(Brewster)角といいます。

(注4) 偏光を考慮しないときの反射率Rとすると、 $R = (R_p + R_s) / 2$ になります。

R_p はp偏光の反射率、 R_s はs偏光の反射率

写真の説明に戻るとp偏光の反射はブリュースター角付近では反射が少ないのでカメラのレンズにp偏光が透過(s偏光をカット)する偏光フィルターをつけて写真を撮ると水面の反射はカットされるので、鮮明な写真を撮ることが出来るのです。

歩道などでもある程度はこのようにことがいえます。したがって、p偏光を通すポラロイド偏光板で作ったサングラスをかけると反射光はある程度カットされるために、キラキラさをかなり防止することが出来ます。

7. 自然光の偏光状態

今まで学んだことから、円偏光は検光子を回転させても明るさの変化はみられません。したがって、自然光は円偏光であると考えてもおかしくはありません。しかし、円偏光は1/4波長板と偏光子(偏光子の主軸を1/4波長板の軸に対して 45°)を用いて、透過光を暗くすることが出来ます。しかし、自然光では1/4波長板と偏光子をどのように動かしても透過光は同じ明るさで変化しませんから、円偏光ではないことが解ります。

自然光はせいぜい長さが数cm程度の波の集まりから成り立っています。1つの波(1個の光子に相当する)は一般に楕円偏光ですが、その波が1箇所を通過する時間は 10^{-8} 秒のオーダーです。観測時間中には無数の異なる偏光状態でその位相もでたために分布した波が通過しています。私たちはその平均効果を観察しているために光に対して異方性は見られないのです。

いま、自然光が空気のような透明な媒質中を透過するとき、屈折率の異なる小さな粒子が浮遊していると、光はすべての方向へ散乱します。

浮遊した粒子の大きさはさまざまに色々な現象として現われます。虹もその1つです。

もし、この粒子が非常に小さければ散乱光の色は青く、入射光に対して 90° の方向に散乱された光は完全に直線偏光になっており、振動の方向は入射光と散乱光をふ

連載講座 光学のすすめ 7

くむ面に対して垂直になっています。しかし、偏光板を回転して見ると解りますが散乱光はこの方向の光だけではないので、完全には暗くはなりません(実験7-2)。

このように光の一部が偏光している状態を部分偏光(注5)といいます。

8. 偏光の実験

実験7-3

2枚の偏光板を用いて周りにある透明なものを観察してみましょう。

プラスチックのケースを直交ニコル(偏光板の主軸を直交させ、光が透過しない真暗な状態)の中に入れると様々な色付いたパターンが現われます。

このようなケースは主に射出成形法という方法で製作されています。溶かした原料をあらかじめ作られた型のなかに流し込み、固めて作ります。この注入する方法および原料が固まる過程などによって、出来たものに歪みが入り、それが複屈折性を示すからです。プラスチック光学レンズやCD盤などではこのような歪みがないものでないと性能に影響するので、その作製には工夫がなされているのです。

実験7-4

身近にあるパソコンやワープロなどの表示板を偏光板で覗いてみてください。偏光板を回転すると真っ黒になり文字が見えなくなります。ここでは詳しくは説明はしませんが、表示板は2枚の偏光板の間に液晶という複屈折性をもった結晶を挟みその結晶を電気的に回転させ光を通したり通さない様に制御しており、偏光の原理を利用したものです。

(注5) 光がどの程度偏光しているかを偏光度 (degree of polarization) P で表します。全体の光の強度 I_t に対して偏光している状態の光の強度 I_p の割合、

$P = I_p / I_t$ で表されます。この値が1のときは完全偏光、0のときは非偏光、 $0 < P < 1$ を部分偏光といいます。

コラム

生きものと偏光



自然界で偏光とのかかわりは多くの例があります。その例を挙げてみます。

アメンボは水面で生活しているため水面からの反射をカットする機能を備え、水中をはっきり見えるようになっているとのことです。また、蜜蜂は視線の方向がわずかだけ異なる複眼で空を見ているため、それぞれが振動面の異なる偏光を検知することが出来ます。したがって、餌場を太陽の方向を基準にした角度として記憶して、巣箱に戻り、その情報を仲間にダンスによって教えるという習性があるそうです。また、眼の分光感度は人間の目の短波長側の限界感度よりはるかに短い波長である300nmまでであるために、曇っていても太陽の位置を決められるそうです^{1,2)}。これも偏光ならではの応用かも知れません。

付録1 偏光状態の数学的記述

x, y 方向に振動する光波は

$$E_x = A_x \sin(\omega t - kx),$$

$$E_y = A_y \sin(\omega t - ky)$$

で表される。

いま、この方向にそれぞれ δ_x, δ_y の位相が変化すると

$$E_x = A_x \sin(\omega t - kx + \delta_x),$$

$$E_y = A_y \sin(\omega t - ky + \delta_y)$$

で表される。

この2式より $(\omega t - kx)$ を消去し、整理をすると

$$\begin{aligned} & (E_x^2/A_x^2) + (E_y^2/A_y^2) \\ & - 2(E_x/A_x)(E_y/A_y)\cos(\delta_x - \delta_y) \\ & = \sin^2(\delta_x - \delta_y) \end{aligned}$$

が求められる。この式は一般に楕円軌道を表しているの
で、楕円偏光と呼ぶ。

特別な場合として

いま、 $\delta_x - \delta_y = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$ の時

$$\begin{aligned} & (E_x/A_x) - (E_y/A_y) = 0 \\ & E_y = A_y/A_x \cdot E_x \end{aligned}$$

$\delta_x - \delta_y = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ の時

$$E_y = -(A_y/A_x) \cdot E_x$$

になり、共に直線を表す式(直線偏光)である。

$\delta_x - \delta_y$ が $\pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$ の時

$$(E_x^2/A_x^2) + (E_y^2/A_y^2) = 1$$

になり楕円の長軸と短軸がx方向とy方向と一致した楕
円を表す式になるが、

ちょうど $A_x = A_y$ の時(= A_0 とすると)

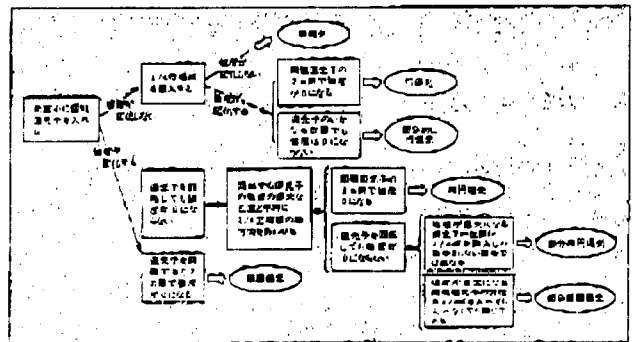
$$E_x^2 + E_y^2 = A_0^2$$

になり円を表している(円偏光)。

したがって、 $\delta_x - \delta_y$ の値によって直線偏光、楕円偏光、

円偏光
に対応している。

付録2 光の偏光状態の検出



参考文献

- 1) 鶴田匡夫: 光の鉛筆・光技術者のための応用光学・新技術コ
ミュニケーションズ (1989) p. 362.
- 2) 桑原万寿太郎: 「動物と太陽コンパス」(岩波新書・1963)
p. 96

<著者> ヨコタ ヒデシ (東海大学工学部光工学科)
<連絡先> 0463-52-1211

光学のすすめ - 講座教材のご案内

●OSA実験キット 定価 2,600円(送料別)
Plastic lenses・Fresnel lens・Flexible mirror・Hologram・Optical illusion slide・Diffraction grating
・Optical fiber・Polarizers・Color filters・Detailed Instructions

●電子教材(フロッピーディスク) 価格は1,300円(送料別)
・マッキントッシュ・MS-ウィンドウズに対応。本連載講座2,3回分の教材(FD2枚セット)
※角等におおまかで3枚セットと広まりましたが訂正させていただきます

【申込方法】
下記申込書を他利用の上、現金書留でお申し込み下さい。
現品は入金次第お送りいたします。

【送料】
1セット450円、2セット以上500円

お申込み同封せ先
〒162 東京都新宿区新小川町5-5
サンケンビル4F
(株)オプトロニクス社 販売部
光学のすすめ係
TEL 03-3269-3550

講座教材申込書

- OSA実験キットを()セット申込みます。
- 電子教材フロッピーディスクを()セット申込みます。

お名前	〒	TEL
フリガナ	〒	TEL
住所	〒	TEL
電子教材 対応機種	マッキントッシュ MS-ウィンドウズ	勤務先 尚志