

偏光色の分光計測と偏光教材への応用

石川ひかり・津留 俊英

山形大学 教職・教育実践研究 第15号別刷

令和2年3月

偏光色の分光計測と偏光教材への応用

石川 ひかり¹⁾・津留 俊英¹⁾

現代の我々の生活に欠かせない道具となったスマートフォンやパソコンなどに使われている液晶ディスプレイには横波である光が持つ重要な特徴である「偏光」を操る偏光素子が使われている。一般には、人間の眼で偏光を検知することはできないことから、光学の中でも偏光は直感的に理解するのが難しい現象の一つである。一方、2枚の直線偏光板の間に細かく裁断した透明フィルムを挟んだ偏光万華鏡などはフィルムの重なり具合やその方向で色鮮やかな様々な偏光色が観察できることから小・中学生向けの実験教室では定番の教材として人気が高い。しかし、偏光色が表れる原理については複屈折と偏光の正しい理解が不可欠であり誤った情報も散見する。本研究では、 2×2 の簡単な行列を使った偏光色の理論的な計算方法を解説し、偏光色の分光スペクトルと良く一致することを示した。また、複屈折性透明フィルムの光学特性から偏光状態を計算・描画し、特定の偏光色が観察できる原理について述べた。最後に、偏光色を利用した偏光アート教材を簡便に量産する方法を紹介した。

キーワード: 理科教育, 物理教育, 物理教材, 偏光, 偏光色

1. はじめに

2枚の直線偏光板の間に透明フィルムやプラスチックを挟むと色鮮やかな偏光色(偏光干渉色とも呼ばれる)が見える[1, 2]。鉱物学や岩石学の分野では偏光顕微鏡下で複屈折性の鉱物等を観察し、観察した偏光色を干渉色図表と照らし合わせて屈折率差や厚さを見積もるなど古くから偏光色は良く知られている[3-5]。偏光色を利用した物理教材は、白色光源、偏光板、複屈折性物質など比較的安価な材料だけで実験を行うことができるため、近年は偏光万華鏡や偏光アートなど小・中学生を対象とした実験教室の教材にも利用されている[6-9]。しかし、一般には複屈折性材料による透過偏光の変化や偏光によって干渉色が生じることを直感的に理解するのは難しい。そこで本研究では偏光による着色を正しく理解するために、複屈折性材料の偏光特性を評価し、計測した偏光解析パラメーターを用いたジョーンズ計算によって偏光色の実測値と比較する。また、光の3原色である赤・緑・青色の波長の偏光状態を図示し、偏光色が現れる原理を図解する。最後に偏光アートの教材化について述べる。

2. 偏光と複屈折

光は互いに直交する電場と磁場が振動しながら電場

と磁場に直交する方向に伝搬する横波であり、偏光とは、光の電場の振動面が空間的に偏った状態を表す[5, 10, 11]。任意の偏光は電場ベクトルを直交2成分に分解することができる。図1(a)は、直交する x と y 方向の電場ベクトル E_x と E_y の大きさが等しく、 z 方向に伝搬する直線偏光を表している。 E_x と E_y が同じ位相であるから合成される偏光は xy 平面上で 45° 方位の直線偏光となる。もし、 E_x と E_y に位相差 δ が生じると、合成される電場ベクトルは xy 平面上の楕円を時間とともに右または左回りする楕円偏光となる。図1(b)に左回りの楕円偏光を示す。2つの電場の振幅が等しく、位相差 δ が 90° または -90° の場合には、右回り円偏光または左回り円偏光となる。この様に、直交する電場ベクトルの振幅比と位相差で偏光状態が決まる。一方、空間的に偏りが無い光も存在し、自然光または非偏光と呼ばれ、太陽や白熱灯から発する光がこれに相当する。

偏光は一般に馴染みが無いが、電卓のディスプレイ、パソコンやテレビなど液晶パネルには偏光が利用されている。また、水面や雪面、ガラスの反射光は特定の方向に振動する成分が大きいため、これに直交する方向の直線偏光板を用いれば反射光が除去できることから、サングラスなどに応用されている。楕円偏光や自然光から特定の方向に偏った光を透過させるフィルムを直線偏光フィルムまたは直線偏光板と呼ぶ。また、2つの電場

1) 山形大学 地域教育文化学部

ベクトル間に位相差を生じさせるフィルムを位相差フィルムまたは位相差板と呼び、複屈折性の物質が使われる。

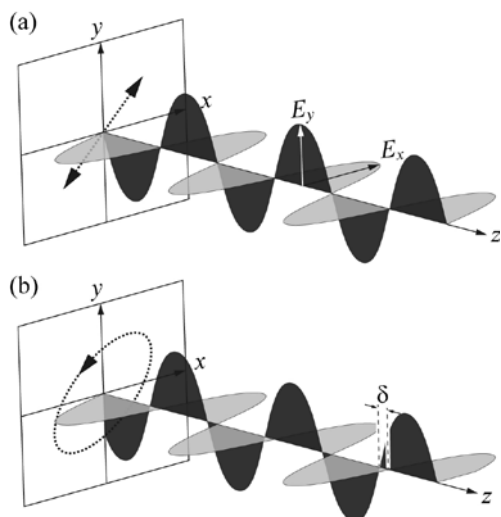


図 1. 直交する x と y 方向に振動する電場ベクトル E_x と E_y を持つ z 方向に伝搬する光。(a) E_x と E_y が同位相で振動する 45° 方位の直線偏光。(b) E_x と E_y が位相差 δ で振動する左回り楕円偏光。

光が複屈折性の平板試料を透過した時、偏光状態によって 2 つの光に分離することを複屈折という。図 2 に複屈折を有する代表的な方解石を示す。偏光の向きによって 2 つの異なる屈折率を持つため、像が 2 重に見える。図中の①及び②はそれぞれ透過軸方位が異なる直線偏光板で矢印の向きが透過軸である。方解石や水晶などの複屈折性の物質は各種偏光素子としても利用されている。図 3 に複屈折物質の直交する進相軸(f)と遅相軸(s)に 45° 方位で直線偏光を入射した時の偏光変化を模式的に表す。図では進相軸方向に振動する光は相対的に遅相軸方向に振動する光より位相が 90° 進み、物質を射出した光が右回りの円偏光となる様子を描いた。 90° の位相差、すなわち波長の 4 分の 1 の位相差を与える光学素子を $1/4$ 波長板という。この他に、 $1/2$ 波長板、 1 波長板などが利用されている。なお、物質の屈折率は波長によって異なるため、各波長板として機能するのは特定の波長に限定される。今、2 つの屈折率の差を Δn 、試料の厚さを d 、光の波長を λ とすると、位相差(角) δ は次式で求めることができる。

$$\delta = \frac{2\pi\Delta nd}{\lambda} \quad (1)$$

透明な粘着テープや書類を保管する透明フィルムなどは高分子フィルムを 1 または 2 方向に延伸して作製す

るためこれらの方向の屈折率に違いが生じる。従って、直交させた直線偏光板の間に透明フィルム(テープ)を任意の方位角で挟むと色付いた光(偏光色)が見える。観察できる色は透明テープの重ねる枚数や素材によって異なるため、この現象を応用した偏光万華鏡や偏光アートなどが理科教育教材として様々な場面で広く利用されている。

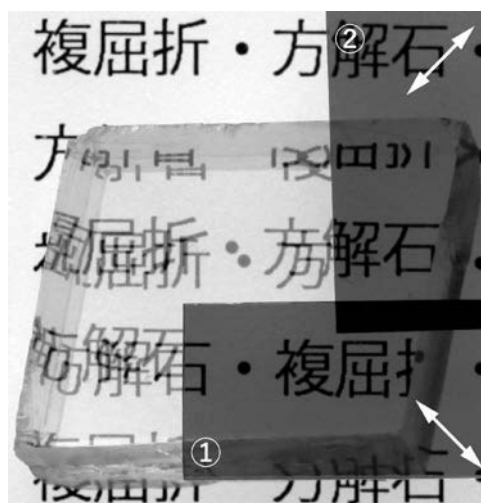


図 2. 複屈折を有する方解石。光の振動方向によって屈折率が異なるため、2 重像が生じる。図中①及び②は直線偏光板で矢印は透過軸を示す。

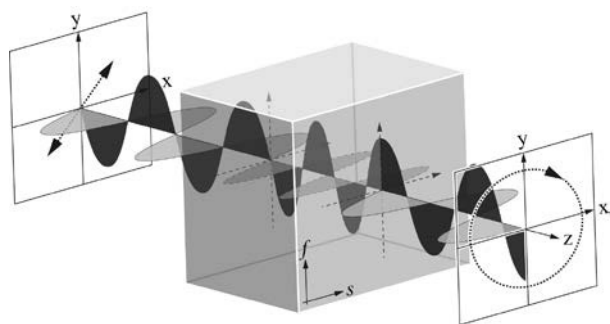


図 3. 45° 直線偏光を $1/4$ 波長板として機能する複屈折性物質に入射し、右回り円偏光が射出する様子。

3. 実験

(1) 偏光色の分光スペクトル計測

これまで述べたように、2 つの直線偏光板の間に透明フィルムを挿入すると、様々な偏光干渉色が観察できる。見える色は挟む素材や厚さによって異なり、また、同じ製品でも製造日やフィルム面の位置によっても異なるため、定量的な実験には適さない。そこで本研究では、フィルム面内の位相差の均一性が保証され、波長板として市販されている位相差フィルムを用いて光学的な評

価を行った。波長 500 nm の 1/4 波長板と波長 570 nm の 1 波長板として機能する 2 種類の透明フィルム複数枚を直線偏光板の間に挟むと表 1 のような 6 色の偏光色が見られる。表 1 に記した方位角は波長板の主軸と光の入射側の直線偏光板の透過軸の成す角である。

次に、表 1 の 6 通りの直線偏光板と位相差フィルムの組合せを平行白色光源(ハロゲン光源)と分光器(Ocean Optics 社製 QE65000)の間に配置して、透過光の分光スペクトルを計測した。規格化した透過光スペクトルを図 4 に点線で示す。

表 1. 位相差フィルムの組合せと偏光色

偏光色	1 波長板	1/4 波長板	
	主軸方位角 45°	主軸方位角 45°	主軸方位角 135°
桃	2 枚	1 枚	無
橙	1 枚	1 枚	無
黄	1 枚	無	2 枚
緑	2 枚	無	1 枚
青	1 枚	無	1 枚
紫	1 枚	無	無

(2) 位相差フィルムの透過偏光特性評価

図 4 に示した偏光色は、1 枚目の直線偏光板で直線偏光となった白色光源が、位相差フィルムによって波長毎

に様々な偏光状態となった結果として観察される。どの様な偏光状態であるかを知るために自作の回転検光子型分光エリプソメーター[12]を用いて直線配置で 2 種類の位相差フィルムの透過偏光特性を計測した。

ハロゲン光源からの白色平行光をグラントムソンプリズムで直線偏光とし、主軸方位角 45°で 1/4 波長板と 1 波長板にそれぞれ入射し、グラントムソンプリズムを透過させ、分光器で計測した。偏光状態は直交する 2 つの方向の振幅比角 Ψ と位相差角 Δ の 2 つの変数で表現でき、これらを偏光解析パラメーターと呼ぶ。本研究では位相差フィルムの進相軸と遅相軸方向の振幅比角と位相差角を波長毎に計測した。1/4 波長板と 1 波長板の計測結果を図 5(a)及び(b)にそれぞれ示す。なお、回転検光子法では位相差角の符号は判別できないが、計測したフィルムの仕様から決定した。

図 5 に示すように振幅比角と位相差角は波長によって変化することが明らかである。振幅比角は波長板の種類に関わらず約 45° であり、これは進相軸と遅相軸方向に振動する電場の振幅の大きさがほぼ等しいことを表している。図 5(a)の 1/4 波長板は 513 nm 付近で位相差角が 90° を、図 5(b)の 1 波長板は 575 nm 付近で位相差角が 0° を示すことから、これらの波長でそれぞれの波長板としての機能を果たすことがわかる。すなわち、1/4 波長板に 513 nm の直線偏光を入射すれば円偏光が、1 波長板に 575 nm の直線偏光を入射すれば直線偏光が生成される。

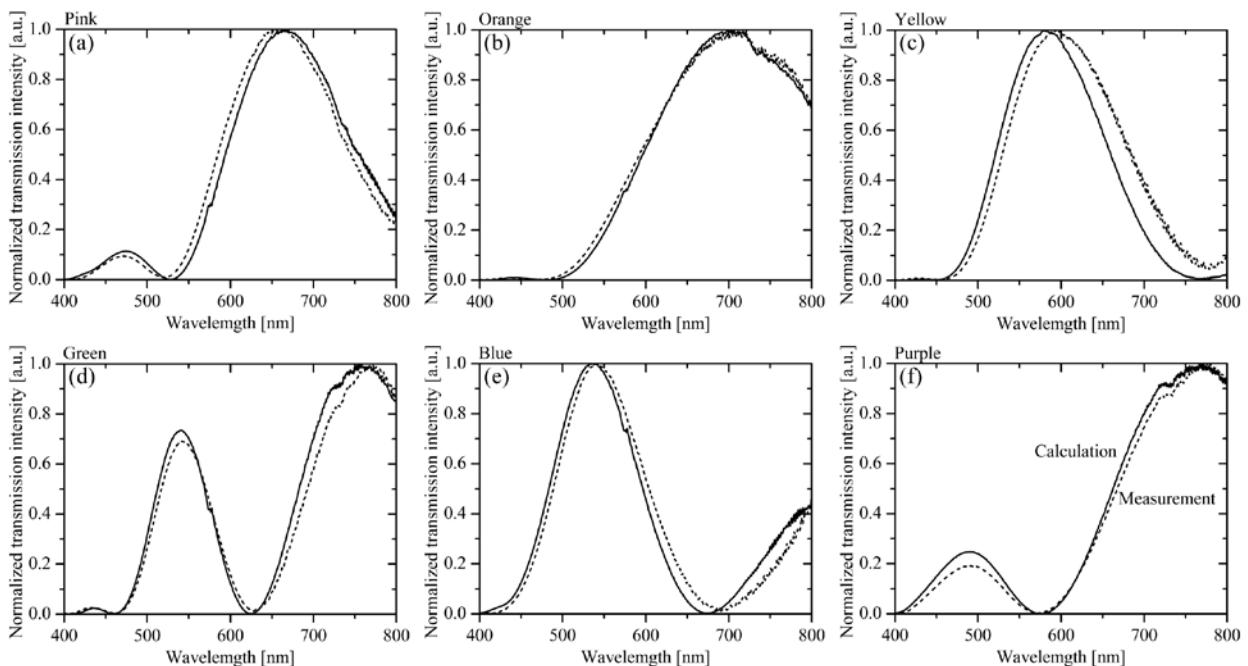


図 4. 2 枚の直線偏光板の間に挟んだ位相差フィルムで生じる(a) 桃色, (b) 橙色, (c) 黄色, (d) 緑色, (e) 青色, (f) 紫色の規格化透過光スペクトルの実測値(破線)と理論計算値(実線)。

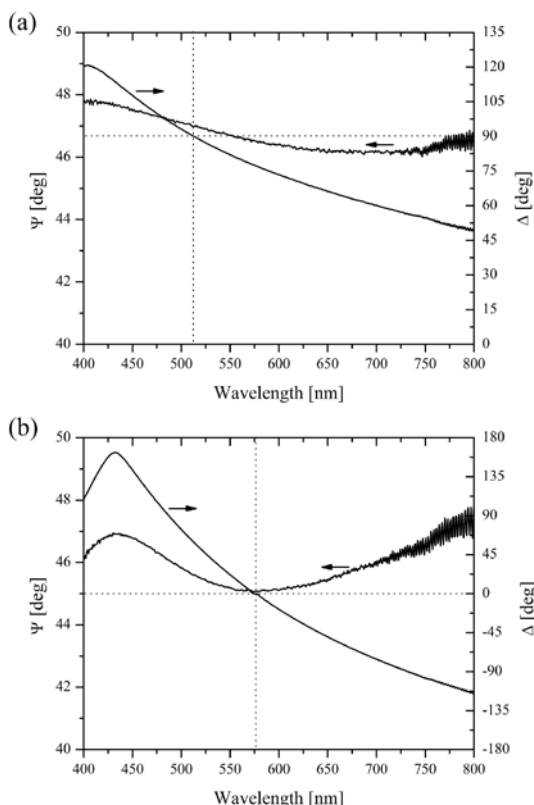


図 5. 回転検光子型分光エリプソメーターで計測した(a) 1/4 波長板と(b) 1 波長板の振幅比角 Ψ と位相差角 Δ 。

4. 解析と考察

(1) ジョーンズ計算法による透過分光スペクトル計算

前述のように任意の偏光状態は直交する2つの偏光のベクトル和として表現でき、一般には xy 方向の電場ベクトルを用いて定義されるジョーンズベクトルで表す。さらに、ジョーンズベクトル E_{in} が任意の光学素子に入射した時に射出する新たな偏光状態 E_{out} への変換は 2×2 のジョーンズ行列 A を用いて以下のように簡単に計算できる。

$$E_{out} = A \cdot E_{in} \quad (2)$$

代表的な偏光状態を表すジョーンズベクトルと各種偏光素子に対応するジョーンズ行列をそれぞれ表 2 及び 3 に示す[11, 12]。ジョーンズベクトルとジョーンズ行列を用いて偏光状態を求める方法をジョーンズ計算法という。

直交ニコルの間に主軸方位角 45° で位相差フィルムを挿入した時に射出する光の電場は、ジョーンズベクトルとジョーンズ行列を用いれば以下のように計算できる。

$$E = A \cdot R(90^\circ) \cdot R(-45^\circ) \cdot S \cdot R(45^\circ) \cdot P(0^\circ) \quad (3)$$

もし位相差フィルムの振幅比角が 45° で一定であれば(3)式は表 3 の位相子 C を使えるが、本研究で使用した

フィルムは図 5 に示すように振幅比角が波長によって変化したため、ジョーンズ行列には試料 S を用いる。

表 2. 代表的な偏光状態を表すジョーンズベクトル

偏光状態	ジョーンズベクトル
x 軸方向直線偏光	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
y 軸方向直線偏光	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
45° 直線偏光	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
右回り円偏光	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$
左回り円偏光	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$

表 3. 各種偏光素子に対応するジョーンズ行列

偏光素子	ジョーンズ行列
偏光子 P , 検光子 A (透過軸が x 軸)	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
位相子 C (進相軸が x 軸)	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta) \end{pmatrix}$
座標回転 $R(\alpha)$ (反時計回りの α の回転)	$\begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$
試料 S	$\begin{pmatrix} \sin \Psi \exp(i\Delta) & 0 \\ 0 & \cos \Psi \end{pmatrix}$

よって、(3)式は

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos 90^\circ & \sin 90^\circ \\ -\sin 90^\circ & \cos 90^\circ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \Psi \exp(i\Delta) & 0 \\ 0 & \cos \Psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sin \Psi \exp(i\Delta) - \cos \Psi \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

我々の目で観察できる光の強度 $I(\lambda)$ は電場の振幅の2乗に比例するから、入射光の強度を $I_p(\lambda)$ とすれば

$$I(\lambda) = \frac{1}{4} I_p(\lambda) \{1 - \sin 2\Psi(\lambda) \cos \Delta(\lambda)\} \quad (5)$$

と表せる。もし、位相差フィルムの振幅比角 Ψ が 45° であれば(5)式は、

$$I(\lambda) = \frac{1}{4} I_p(\lambda) \{1 - \cos \Delta(\lambda)\} = \frac{1}{2} I_p(\lambda) \sin^2 \left(\frac{\Delta(\lambda)}{2} \right) \quad (6)$$

と簡単になる。位相差フィルムとしてある波長に対して位相差角が 0° または 360° の整数倍の波長板を用いれ

ばその波長の透過光強度は0となる。本研究で計測した1波長板は575 nm付近で位相差角が0°であった。すなわち、白色光から緑色を除いた赤色と青色が透過し紫色の透過光が観察される(表1及び図4(f))。

今、(6)式の位相差角 Δ は(1)式の位相差角 δ と等しいから(6)式は、

$$I(\lambda) = \frac{1}{2} I_p(\lambda) \sin^2 \left(\pi \frac{\Delta n(\lambda) d}{\lambda} \right) \quad (7)$$

と表すこともできる。(7)式より、試料の屈折率差 $\Delta n(\lambda)$ と厚さ d の積が観察波長 λ の整数倍の時、観察波長の透過光強度は0となる。

計測した各位相差フィルムの振幅比角と位相差角を波長毎に(5)式に代入して得られる透過光スペクトルを図4に実線で示す。入射光強度 $I_p(\lambda)$ には1枚の直線偏光板の透過分光スペクトルを別途計測して用いた。図に示すように透過光スペクトル実測値と計算値は良く一致した。位相差フィルムの主軸方位は0.001°精度で精密調整後に振幅比角と位相差角の計測を行ったが、透過光スペクトルは長方形のフィルムの1辺を角度の基準とした計測である。図4のスペクトルの実測値と計算値の波長軸方向の不一致はこのために生じたものである。

(2) 直線偏光板と位相差フィルム透過後の偏光状態

図5に示すように位相差フィルムの振幅比角と位相差

角は波長によって変化する。従って、直線偏光板によって直線偏光化された白色光は位相差フィルムによって波長毎に異なる偏光状態となる。計測した1/4波長板と1波長板の振幅比角と位相差角を用いて描画した波長450 nm, 550 nm, 650 nmの偏光状態を図6に示す。

例えば図6(c)は、青色を示す450 nmの光は紙面縦方向に押し潰され直線偏光に近い偏光が、緑色を示す550 nmの光は紙面横方向に潰れた楕円偏光が、赤色を示す650 nmの光は真円に近い楕円偏光が生成されることがわかる。図示した偏光楕円が紙面縦方向を透過軸とする直線偏光板を透過することで色鮮やかな偏光色が観察できる。2枚目の直線偏光板を透過する光の振幅は原点から各楕円までの距離に等しいから、図6(c)の場合には、青色を示す450 nmの光強度は小さく、緑色の550 nmと赤色の650 nmで振幅がほぼ等しい。これは図4(c)の透過光スペクトルとも一致し、偏光色は緑色と赤色で構成される黄色を示す。なお、光強度は電場の振幅の2乗であるから図6の原点から楕円までの距離が直接光強度となる訳ではないことに注意しなければならない。また、楕円の回転方向は光強度に無関係のため、図6では省略した。光の3原色である青・緑・赤色に対応した波長の偏光状態のみを代表して図示したが、用いた白色光に含まれる全ての波長成分で異なる偏光状態となる。

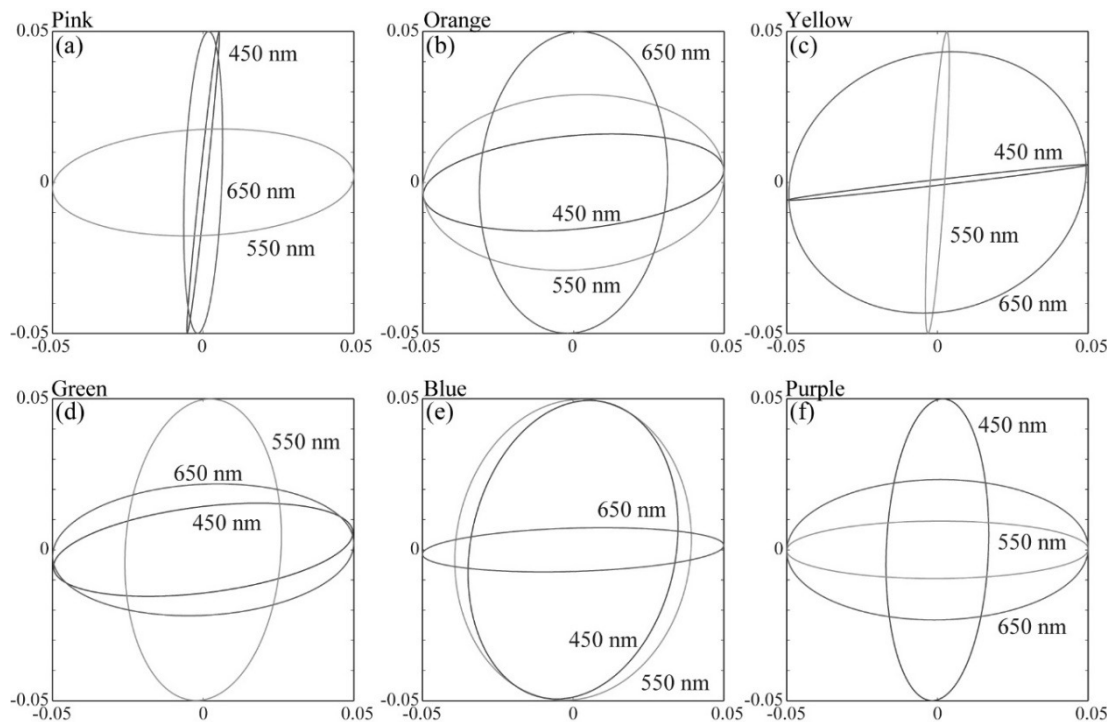


図6. 直線偏光で直線偏光化した白色光の位相差フィルム透過後の波長450 nm, 550 nm, 650 nmの偏光状態。紙面縦方向を透過軸とした2枚目の直線偏光板を重ねると(a) 桃色, (b) 橙色, (c) 黄色, (d) 緑色, (e) 青色, (f) 紫色の偏光色が観察できる。

5. 偏光アートの教材化

2枚の偏光板で透明フィルムを挟むだけで様々に着色する偏光アートは小・中学生の科学的な好奇心を喚起する教材としてとても有用である。そこで本研究ではこれまでに述べた偏光アートの教材化を目指した。透明粘着テープや透明フィルムをランダムに複数枚貼り付けてモザイク状の偏光アート作品を作製する方法が事前の準備も少なく簡単に様々な科学教室などで採用されている。本研究ではカッティングマシンを用いて複数枚透明フィルムを任意の形状に切り抜き、教材を量産する文献[8]の方法を参考に、安価でより簡便な方法を考案したのでその方法について以下に述べる。

透明フィルムには書類などを保管するための袋状の透明ファイルで、偏光色の発色性が良く、場所による色むらが少ない製品(コレクト株式会社製透明ポケットCF-440)を選別した。一般向けのカッティングマシン(グラフィック株式会社製シルエットカメオ3)は画像描画ソフトウェアで描いた図を専用ソフトウェアに読み込ませた後にフィルムなどを自動カットする。フィルムなどは粘着性の専用台紙(グラフィック株式会社製カッティング台紙CUT-MAT-12-J)に貼り付けてカットし、カット後に台紙から剥がさなければならないが、フィルムを折り目なく剥がすのは手間が掛かる。そこで、薄めた水性のりを袋状透明フィルムの内部に噴霧し、2枚のフィルムを弱接着した。接着した1枚のフィルムのみカットすればカットした図形は剥がれることなくもう1枚のフィルムに残り、且つ、子どもでも簡単に剥がせるシール状の教材が作製できる。図7にカット後の透明フィルムの例を示す。

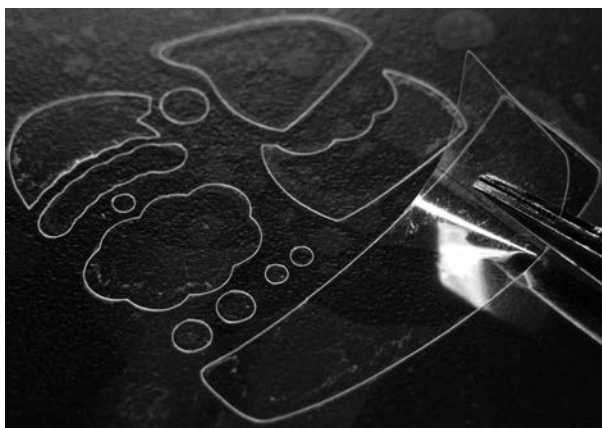


図7. 偏光アート作製用にカットした透明フィルム。貼り合わせた2枚の透明フィルムの1枚のみカットされ、簡単に剥がすことができる。

図8は完成した偏光アート作品例である。図中の番号は重ねた透明フィルムの枚数を表し、枚数が増すごとに黄色、桃色、水色の偏光色を示す。なお、使用した透明フィルムは表1で測定したフィルムと位相差が異なるため、偏光色も異なる。山形市理科教育センターと山形大学地域教育文化学部の共催で毎年実施している「おもしろ実験教室」に参加した子どもは、事前に準備したカット済みのフィルムに加えてフィルムを好きな形状に切断してオリジナルのアート作品をデザインするなど、時間を忘れて作業に没頭し、光の不思議な世界を楽しむ様子が窺えた。

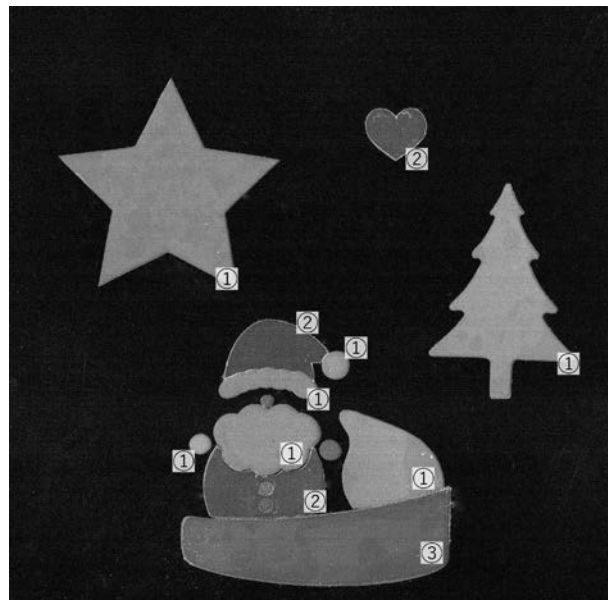


図8. 作製した $120 \times 120 \text{ mm}^2$ の大きさの偏光アートの例。図中の番号は、図7に示したカット後の透明フィルムの重ね合わせ枚数を表す。

6. まとめ

2枚の直線偏光板で複数枚の透明フィルムを挟んだ際に生じる偏光色について、フィルムの偏光特性を分光計測し、簡単な行列計算で偏光色の分光スペクトルが計算できることを示した。2枚の偏光板と2種類の透明フィルムで生じる6通りの偏光色の透過光強度の計算値は実測値と良く一致した。また、透明フィルムの偏光特性は波長に依るため、フィルムによって波長毎に偏光状態が様々に変化し、その結果として偏光色が生じることを述べた。

また、華やかで色とりどりの光の色の変化が見える教材として子ども向け実験教室で人気が高い偏光アートの作製方法について紹介した。本研究で述べた方法を用いれば、簡単に入手できる安価な透明フィルムを素材と

して任意の画像や図形を簡便に偏光アート化できる。偏光アートという比較的新しい教材が肉眼で識別することが困難な偏光状態の理解を助ける有用な教材の一つになると考えられる。

参考文献

- [1] 田所利康著, "イラストレイテッド 光の科学", (朝倉書店, 2014).
- [2] 田所利康著, "イラストレイテッド 光の実験", (朝倉書店, 2016).
- [3] 坪井誠太郎著, "偏光顕微鏡 -透明固態物質の光学的鏡検法-", (岩波書店, 1959).
- [4] 黒田吉益, 諏訪兼位著, "偏光顕微鏡と岩石鉱物", (共立出版株式会社, 1983).
- [5] 鶴田匡夫著, "応用光学Ⅱ", (培風館, 2007).
- [6] 原田建治, 酒井大輔, 亀丸俊一, "偏光による着色現象を用いた新しい教材", 応用物理教育, **30**(2006) 25.
- [7] 原田建治, 酒井大輔, 曾根宏靖, 原田康浩, 亀丸俊一, "偏光による干渉色を用いた新しい教材", 応用物理教育, **34**(2010) 35.
- [8] 原田建治, 酒井大輔, 原田康浩, 曾根宏靖, 桑村進, 亀丸俊一, "偏光色を用いた教材の簡単な作製方法", 応用物理教育, **36**(2012) 21.
- [9] 原田建治, "偏光色を用いた教材の開発", 表面科学, **35**(2014) 326.
- [10] Eugene Hecht 著, 尾崎義治, 朝倉利光訳, "ヘクト光学Ⅱ", (丸善株式会社, 2003).
- [11] 大津元一, 田所利康著, "光学入門", (朝倉出版, 2008).
- [12] 藤原裕之著, "分光エリプソメトリー", (丸善株式会社, 2003).