

偏光板とセロハンテープを用いた干渉色の仕組みと応用

三野 弘文¹⁾・三好 真央²⁾

¹⁾千葉大学国際教養学部 ²⁾千葉大学教育学部

Mechanism and application of interference color using polarizers and cellophane tapes

Hirofumi Mino and Mao Miyoshi

要旨

2枚の偏光板を光の透過軸が平行になるように重ね、一方の偏光板を90°回転させる（直交させる）と光が透過しなくなることはよく知られている。ところが、直交する2枚の偏光板の間に透明なセロハンテープを挟む（貼る）と、不思議なことに光が透過するようになる。そして、セロハンテープの枚数を増やすと透過する光が様々に色づく。この光の発色を干渉色^[1]と呼ぶ。白色光が複屈折をもつセロハンテープを透過すると光の偏光が波長ごとに変化する。すると観測側の偏光板を透過する光の強度が波長によって異なるため干渉色が生じる。本研究では、分光光度計を用いた透過光スペクトルの測定により、セロハンテープを透過した光の偏光が、セロハンテープの枚数や光の波長の違いによってどのように変化するのか定量的に調べた結果に基づき、発色の仕組みについて考察する。更に偏光板とセロハンテープを使用することで、光の色や偏光について調べることのできる身近な道具としての応用を示す。

キーワード

偏光板、直線偏光、円偏光、干渉色、セロハンテープ

1. 序論

2枚の偏光板を直交させると光が透過できないことはよく知られている。これは光が横波で偏光をもつことに起因する。偏光板を通った光は偏光板の面に平行な透過軸方向に振動する波として伝播する^[2]。光源を背にして、光が進む方向を見ると、光が進む方向は点として見えるが、振動はこの点を原点として、透過軸に平行な直線を描くので、直線偏光と呼ばれる。この直線偏光の光が伝播し、透過軸を90°回転させた偏光板に到達すると、2枚目の偏光板の透過軸方向に振動成分を持たないため光は透過できなくなる。ところが、図1の模式図で示すように、互いに直交させた2枚の偏光板（この配置を直交ニコル配置と呼ぶ）の間に複屈折（光の振動方向によって屈折率が異なる性質）をもつ物質（ここではセロハンテープ）を間に挟むと光が透過するようになる。1枚目の偏光板を通った光は図に示すように45°傾いた直線偏光の波として伝播する。その波を水平方向と垂直方向の波に分解し、セロハンテープを透過させた後、合成して考える。セロハンテープではテープの長さ方向と幅方向で屈折率が異なることが知られている。テープの長さ方向のy方向は幅方向であるx方向に対して一般的に屈折率が大きくなる^[3]。そのため、透明なセロハンテープを透過する光のy方向に振動する波はx方向に振動する波に比べて、屈折率の差 Δn とセロハンテープの厚さ d の積である光路長差 $d\Delta n$ だけ遅れることになる。通常、 λ を光の波長として、 $d\Delta n/\lambda = m + a$ (m : 整数, $0 \leq a < 1$) と表し、 m が次数、 $2\pi a$ が位相差と呼ばれる。 a に 2π をかける理由は、波を正弦波（sin波）で考えると、波は 2π ラジアン周期をもつことによる。x、y方向に振動する連続した波を考える場合、それぞれの山或いは谷の位置関係は次数 m には依存せず、位相差によってのみ変化するので、x、y方向の振動成

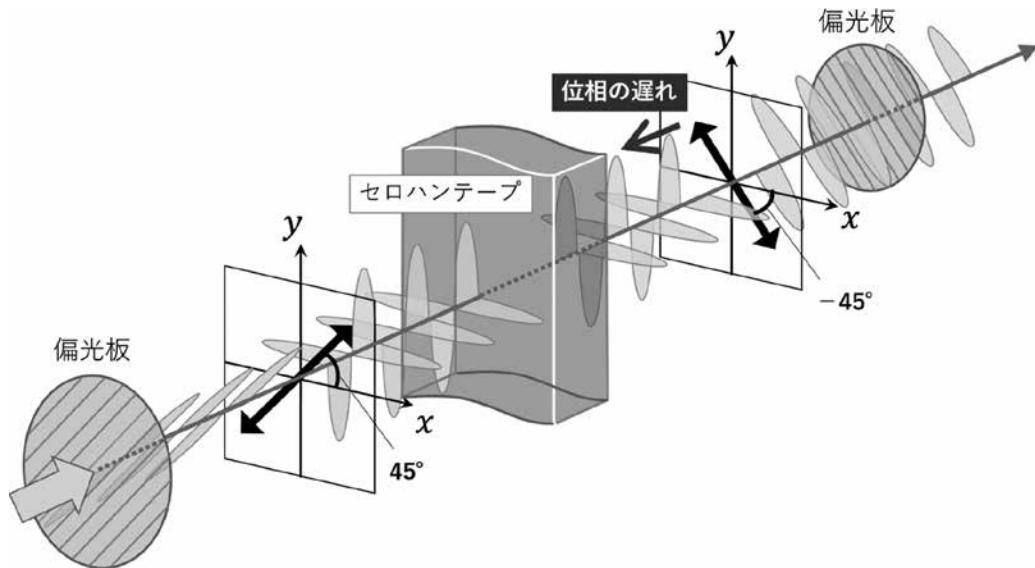


図1. 2枚の偏光板の間に複屈折をもつセロハンテープを配置した場合の偏光の変化の様子
ここでは、セロハンテープの長さ方向で位相が半波長遅れている場合を示す

分の合成では位相差について議論すれば良い。図1では光路長差が半波長 ($\lambda/2$) の場合を示している。この場合位相差は π となり、 x 、 y 方向の振動成分は互いに山と谷が重なる。振動成分の値として、山は+ (最大1)、谷は- (最小-1) として、座標で表すと、 $(x, y) = (0, 0) \rightarrow (1, -1) \rightarrow (0, 0) \rightarrow (-1, 1) \rightarrow$ と変化するので、その軌跡は -45° 回転した直線偏光となる事が理解できる。そのように偏光が変化することで、最初の偏光板に対して 90° 回転させた2枚目の偏光板を光は透過することができるようになる (この様子は図2の②に対応する)。実際はセロハンテープの厚みや、光の波長によって、セロハンテープを透過した光の偏光状態は様々に変化するので (波長による変化の例は図2の③)、2枚目の偏光板の透過軸に平行な振動成分の割合が変化して、波長ごとに透過光強度が異なる結果、色づいた光が観測されるようになる。本研究では、偏光板とセロハンテープを使用して、この干渉色を分光光度計で実測した結果に基づき、偏光の変化と干渉色の関係を説明する。そして、光の色や偏光について調べることでできる身近な道具としての活用について述べる。

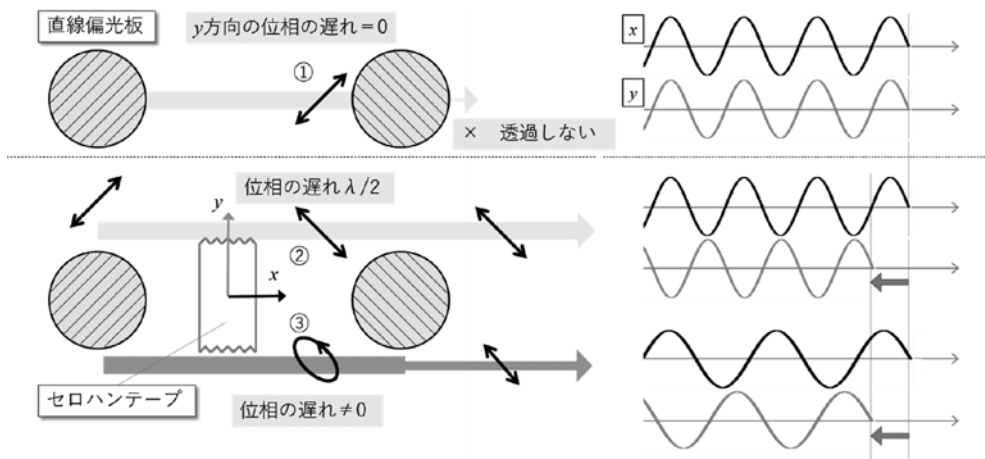


図2. セロハンテープを透過する前後における偏光の変化を x 、 y 方向に進む波の合成で説明
①セロハンテープ透過前、②セロハンテープ透過後 (y 方向、半波長の遅れ)、③波長が異なる場合の②の状態

2. 実験

実験では、図1に示したように、検出側の偏光板の透過軸を入射側の偏光板に対して直交させた直交ニコル配置と、平行にした平行ニコル配置において、間に挟むセロハンテープの厚さを変えたときの、波長ごとの透過光強度分布 (透過光スペクトル) 測定を行った。偏光素子にはいくつか種類があるが、本研究では一般的に手に入る市販のポリビニルアルコール (PVA) 製の偏光板を用いた。この偏光板ではPVA分子鎖間にヨウ素イオンが並んで配置しており、この並んだ方向の電場成分を持つ光が吸収され、逆に垂直方向の電場成分の光は吸収されずに透過することで直線偏光を生じさせる。PVA分子鎖に対して垂

直方向が光の透過軸となる。セロハンテープはNICHIBAN社製のセロテープNo.405を使用し、透過光強度スペクトル測定には分光光度計（日本分光社製UbestシリーズV-550型）を使用した。また、セロハンテープは入射側の偏光板の透過軸に対してセロハンテープの長さ方向が45°傾くようにした。

3. 結果と考察

図3は直交ニコル配置にて、セロハンテープの厚みを1枚～6枚まで変化させたときの透過光スペクトルである。この波長領域（430～670 nm）は紫～赤の可視光に対応する。可視光の波長と色の関係に関しては、高校の教科書や理科年表等にも明確には定義されていないが、青（435～480 nm） 緑（500～560 nm） 黄（580～595 nm） 赤（610～750 nm）と記載している例^[4]がよく見受けられるので、ここでもそれを採用することにする。直交ニコル配置なので、セロハンテープ無しでは透過光強度はゼロであるが、セロハンテープ1枚透過させるだけで、グラフからも430～670 nmの広帯域で光が透過していることが示されている。この結果は実際に透過した光を見るとほぼ色が見られず透明であることとも合致する。ところがセロハンテープを2枚としたときには、576 nm近傍（解析の結果576.2 nm）を極小値として広く透過光強度が小さくなっている。そして3枚透過させると、576.2 nmで極大となり、440 nm近傍に極小値が見られるようになる。セロハンテープが奇数枚のときは、576.2 nmで極大、偶数枚では極小となっていることから、1枚増加するたびに、576.2 nmの光にとってはセロハンテープの幅方向に対してセロハンテープの長さ方向で光路長が1/2波長分（288.1 nm）長くなると考えられる。このことは、図1の説明でも明らかである。偶数枚では波長の整数倍の光路長差となるため、光がセロハンテープを透過しても入射側の偏光板の透過軸と平行な直線偏光のまま変化せず、検出側の偏光板を光が透過できない。

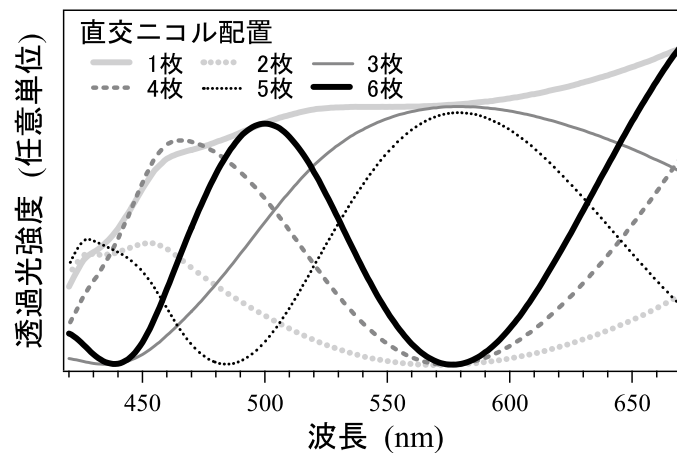


図3. 直交ニコル配置の偏光板の間にセロハンテープを1～6枚を挟んだ状況での透過スペクトル

図4は平行ニコル配置にて、セロハンテープの厚みを4枚、8枚、12枚、16枚、20枚、24枚、28枚と変化させた場合の透過光スペクトルである。平行ニコル配置では、セロハンテープを透過しても偏光が変化しない場合に強度が極大値を示す。偶数枚で576.2 nmで必ず極大となる事も図3の考察と矛盾がない。セロハンテープの枚数が増えるにしたがって強度の極大と極小を示す波長の間隔が狭くなっている。これは、枚数が増えることで、光路長差が大きくなり、その光路長差を波長の整数倍とする可視光領域の波の数が増えることで説明がつく。576.2 nmにおいて28枚の厚みの光路長差は $28 \times 288.1 \text{ nm} = 8066.8 \text{ nm} = 14 \times 576.2 \text{ nm}$ となり、次数 m が14となるが、576.2 nmの両隣の極大値となる波長は、光路長差を次数13及び15で割った値となる。仮に光路長差が波長に依存しないとした場合、576.2 nmの両隣の極大値となる波長は、それぞれ $8066.8 \text{ nm} / 13 = 620.5 \text{ nm}$ 、 $8066.8 \text{ nm} / 15 = 537.8 \text{ nm}$ となり、図4の28枚の結果と近い値となっている。

図5はセロハンテープの厚みを28枚とした場合の、平行ニコル配置と直交ニコル配置の比較である。互いに極大と極小が波長ごとに入れ替わっていることがわかる。これは、上述したように偶数枚の場合、極大となっている波長では入射した偏光そのままの直線偏光状態となっているため、平行ニコル配置では透過するが、直交ニコル配置では逆に透過できないことを意味する。ここで、次数について考えてみる。図5の平行ニコル配置と直交ニコル配置で、極大値となる波長を読み取った結果を表1に示す。直交ニコル配置における透過光強度の極大においては、位相差が半波長となるので、位相差を次数に含めて考えると、次数に0.5を足した値として捉えることができる。表1に次数についても表記した。極大となる波長の値と次数をかけた値が、その波長における光路長差となるので、この値を28で割ることで、各波長においてセロハンテープ1枚当たりの光路長差が導出される。その結果が図6である。可視光領域ではおおよそ286~294 nmの範囲で、波長が短波長側から長波長側になるにつれて光路長差が短くなるのが明らかになった。また、図

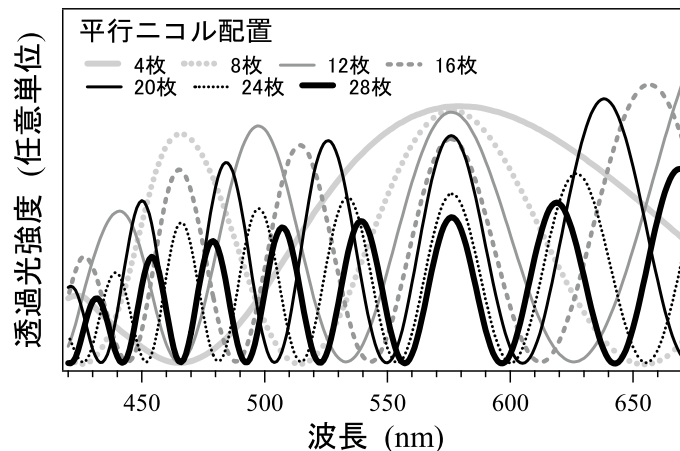


図4. 平行ニコル配置の偏光板の間にセロハンテープを4~28枚挟んだ状況での透過スペクトル

表 1. 平行、直交ニコル配置にてセロハンテープ28枚挟んだ場合に透過強度が極大となる波長 λ_{\max} 、次数 m 、1枚当たり光路長差 ($\lambda_{\max} \times m/28$)

| 極大値の波長 λ_{\max} (nm) | 次数 m | $\lambda_{\max} \times m/28$ (nm) |
|---------------------------------|-----------|--------------------------------------|
| 431.6 | 19 | 292.87 |
| 442.8 | 18.5 | 292.56 |
| 454.1 | 18 | 291.92 |
| 466.0 | 17.5 | 291.25 |
| 478.9 | 17 | 290.76 |
| 492.7 | 16.5 | 290.34 |
| 507.3 | 16 | 289.89 |
| 522.7 | 15.5 | 289.35 |
| 539.3 | 15 | 288.91 |
| 557.1 | 14.5 | 288.50 |
| 576.2 | 14 | 288.10 |
| 596.8 | 13.5 | 287.74 |
| 618.9 | 13 | 287.35 |
| 643.0 | 12.5 | 287.05 |
| 669.0 | 12 | 286.71 |

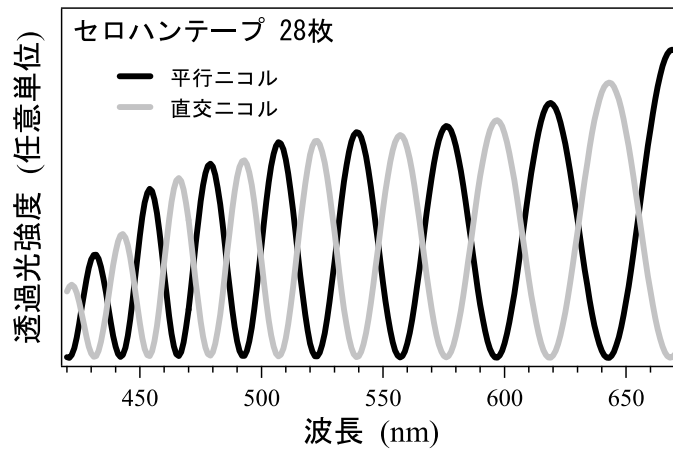


図 5. 平行ニコル、直交ニコル配置の偏光板の間にセロハンテープ28枚挟んだ状況での透過スペクトル

5において平行ニコルと直交ニコル配置でともに透過光強度が同じ値を示す波長がある。これは位相差が $1/4$ 波長、もしくは $3/4$ 波長となる円偏光状態であることを示す。位相差が $1/4$ 波長のときには、 x, y 方向の振動成分を座標で表すと、 $(x, y) = (1, 0) \rightarrow (0, 1) \rightarrow (-1, 0) \rightarrow (0, -1) \rightarrow$ と変化し、その軌跡は円となる。円偏光になった場合は、

検出側の偏光子の角度に依存せず直交ニコル配置でも平行ニコル配置でも透過光強度は極大値に対して1/2となることが予想され、実験結果もそのようになっている。円偏光には右回り円偏光と左回り円偏光がある。光源に背を向けて、光が進む方向を向いたとき、時間とともに、振動成分の軌跡が時計回りに回る場合を右回り偏光、反時計回りに回る場合を左回り偏光と定義することが多いのでここでもそれを採用する^[5]。位相差が1/4波長のときに右回り円偏光であった場合には、 $0 < \text{位相差} < 1/2$ 波長において右回りの楕円偏光（円偏光も楕円偏光の一部）、 $1/2$ 波長 $< \text{位相差} < 1$ 波長のとき左回りの楕円偏光となる。位相差を固定して x 、 y 方向の振動成分を座標でプロットすると、楕円の軌跡を描くことができる。

ここで、応用について考察してみる。図7は2枚の偏光板の間に透過軸に対して45°傾けてセロハンテープを3枚挟んだ場合の透過光の様子であるが、(a)で示した直交ニコル配置では、セロハンテープを透過した色が黄色となっており、(b)で示した平行ニコル配置では青色の光が透過している。このことは、図3において、直交ニコル配置で3枚

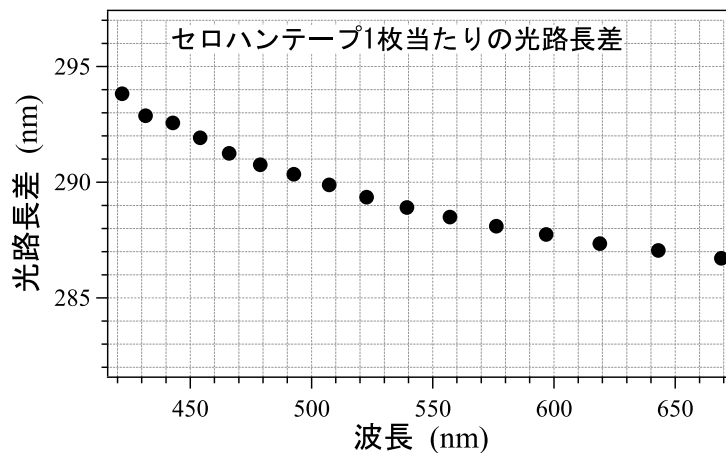


図6. セロハンテープ1枚当たりの幅方向に対する長さ方向の光路長差の波長変化

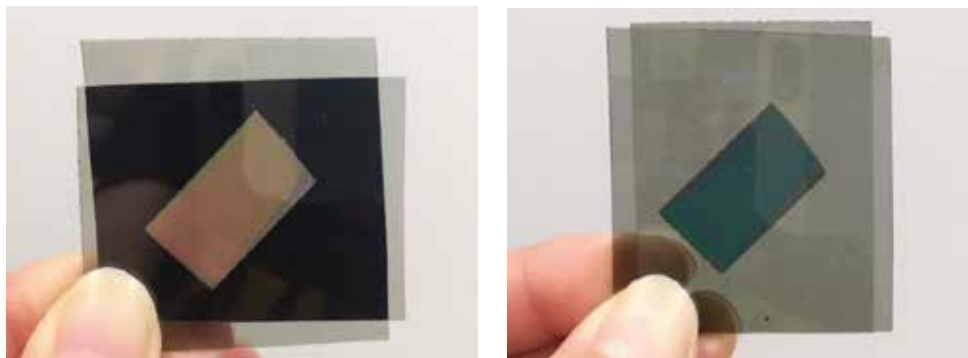


図7. (a) 直交ニコル、(b) 平行ニコル配置の2枚の偏光板の間に3枚のセロハンテープを挟んだ場合の透過光の観測

セロハンテープを挟んだ場合の透過スペクトルの強度が、青色の波長領域である435～480 nmで減少し極小値を示すことによる。平行ニコル配置では逆にこの波長領域が透過光強度の極大値となる（図5参照）。この結果は、白色光において青色の強度が減少すれば補色である黄色に見えることを示すもので、補色について考えさせる道具として活用できることを示す。

図8は、偏光板を複数枚用意し、それぞれ平行ニコル配置として間に挟むセロハンテープの枚数を2枚、4枚、6枚……とした場合の透過光スペクトルである。組み合わせの数が増えることで、576.2 nm近傍の光だけ透過させるフィルターとして活用できることが理解できる。これは、576.2 nm近傍以外の波長域では、透過強度の山と谷が合わさり打ち消し合う結果^[6]として強度がゼロに近づくことに起因する。また576.2 nm以外の波長域を通すフィルターとして活用するには、セロハンテープを光軸に対して傾けることで1枚当たりの光路長を長くすることが考えられる。この場合は、576.2 nmより長い波長域に対応する。短い波長域に対応させるにはセロハンテープの長さ方向と幅方向の光路差が小さなセロハンテープを用意すると良い。同じセロハンテープを使用するのであれば、セロハンテープを引っ張ることで1枚当たりの厚みを薄くすることも有効な手段と考えられる。

図9はセロハンテープを12枚とした時の直交ニコル配置と、6枚とした時の直交ニコル、平行ニコル配置の透過光スペクトルである。12枚では大きく3つのピークがみられており、それぞれ青、緑、赤の領域の光を通すフィルターとしての役目が可能であることがわかる。また、6枚の場合、それら3つのピークで強度が1/2、となっている。これは、枚数が1/2となることで、直交ニコルで極大となる位相差1/2波長に対して、更に1/2の1/4波長の位相差となることで円偏光となる事が容易に理解できる。ここで、直交ニコル配置の2枚の偏光板の間に12枚のセロハンテープを挟み、片方の偏光板外側に透過軸に対して45°及び-45°傾けて6枚のセロハンテープを貼りつけたものを用意する。そし

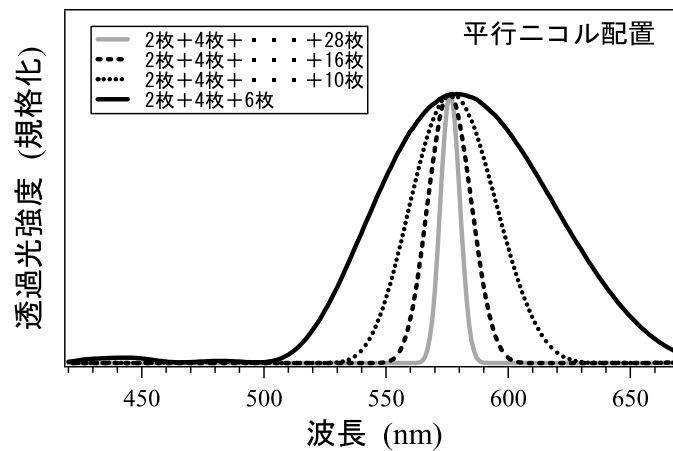


図8. 平行ニコル配置に置かれた複数の偏光板の間にセロハンテープを偶数枚挟んだ場合の透過光スペクトル

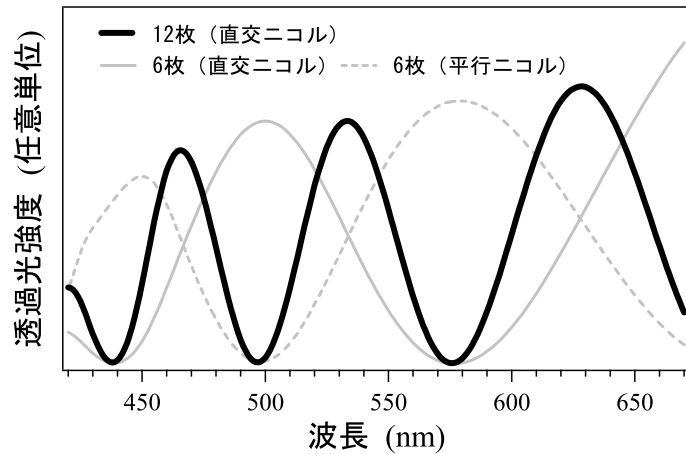


図9. 2枚の偏光板の間にセロハンテープを6枚、或いは12枚挟んだ場合の透過光スペクトル

て、6枚のセロハンテープを貼りつけた面を下にして、貼り付けていない方の偏光板を手前にして光が透過する様子を観察する。図10はそのようにして観察されたコガネムシの様子であるが、45°傾けたセロハンテープを通して見たものと-45°傾けたセロハンテープを通して見た様子が明らかに異なっている。前者ではコガネムシの羽の色が鮮やかな緑色で

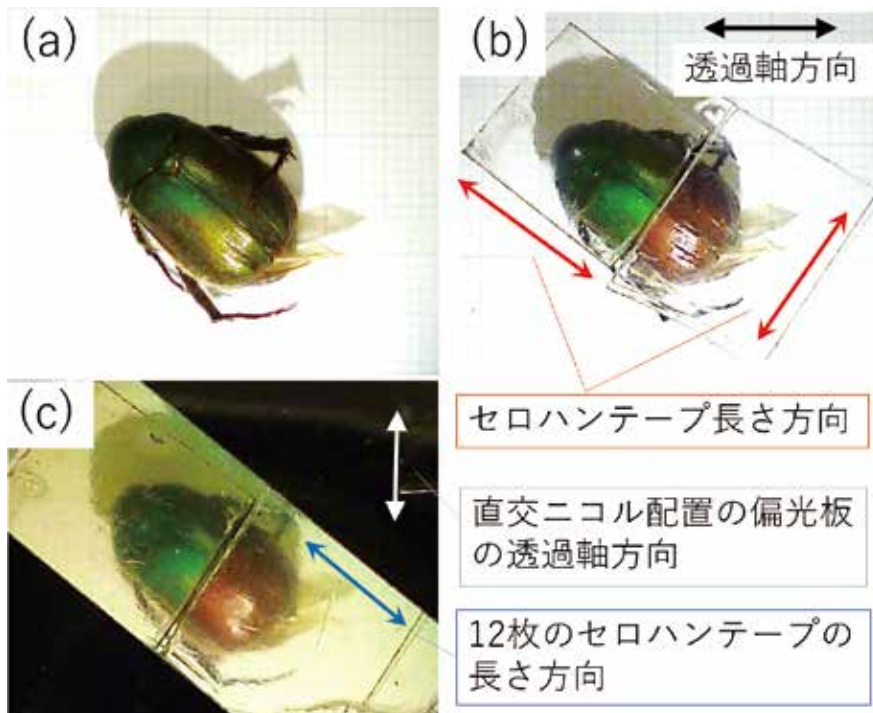


図10. (a) コガネムシの写真、(b) 偏光板の透過軸に対して45°及び-45°傾けてセロハンテープ(6枚)を貼った円偏光板によるコガネムシの観測、(c) 更に12枚のセロハンテープと直交ニコル配置の偏光板を加えた場合の写真

見られるのに対して、後者では緑色が全く透過していない。コガネムシの羽は左回り円偏光の光を返すことがわかっており^[7]、これは、図9に示したように、偏光板に6枚のセロハンテープを貼りつけたものが、緑色の領域で円偏光のフィルターとしての役割を示すことを意味する。つまり、偏光板とセロハンテープの組み合わせで円偏光が生じるということは、逆に円偏光の光をセロハンテープ側から入射すると、もともとの位相差 $1/4$ 波長に更に $1/4$ 波長分の位相差が加わるかもしくは引かれることで、偏光板の透過軸に垂直、もしくは平行な直線偏光に変換される。透過軸に平行な直線偏光であれば、光が透過し、垂直であれば光は遮断される。位相差が $1/4$ 波長加わる場合は、偏光板とセロハンテープで生じる円偏光が左（右）回り円偏光であった場合、右（左）回り円偏光の光をセロハンテープ側から入射するときに対応する。この結果から、セロハンテープと偏光板の組み合わせで、直線偏光だけでなく円偏光についても観察できる道具として活用できることが示された。

4. まとめ

2枚の偏光板を直交させると光は透過できないが、間に透明なセロハンテープを挟むことで光が透過するようになる。この透過光の波長に対する強度分布（透過光スペクトル）をセロハンテープの枚数や、偏光板の向き（直交ニコル配置と平行ニコル配置）を変化させて、分光光度計を用いて測定した。その結果、セロハンテープ（NICHIBAN社製のセロテープNo.405）1枚当たり、420～670 nmの波長領域にて、294～286 nmの光路長差が生じることで、各波長における偏光状態の変化と2枚目の偏光板を透過する強度及び干渉色について説明できることを明らかにした。また、偏光板とセロハンテープを用いて、特定の波長をもつ光を透過させるフィルターとして応用できること、補色について調べたり、光の偏光状態について特に右回りと左回り円偏光を区別して観測できる道具としても役立つことを示した。

参考文献等

- [1] 2枚の偏光板の間にセロハンテープなど複屈折をもつ透明物質を挟むと発色することを、干渉色と呼ぶことが多いが、実際には屈折率の異なる x 方向に振動する波と y 方向に振動する波の干渉によって色がつく（波長毎の強度変化が生じる）わけではない。各波長で偏光が変化し、観測側の偏光板を通る強度が偏光に応じて変化するため色が生じるので、本来は干渉色という呼び方は適さず、偏光色という呼び方の方が適しているという文献もあるが、ここでは慣例的に干渉色という呼び方を採用する。
- [2] 光は電磁波であり、光の進行方向に垂直に振動する電場と磁場の波として表される。電場と磁場も互いに直交するが、光の偏光について考える場合は、電場の波の成分について考えるのが一般的である。
- [3] 井上祥史、伊藤敏、菊地洋一、武井隆明、村上祐、化学と教育、Vol.51（2003）No.3 pp.186-189.

- [4] 「新染色加工講座3」 p.112、共立出版 (1972).
- [5] H.S. Benett and E.A. Stern, "Faraday Effect in Solids", Phys. Rev. 137 (1965) A448.
- [6] 正確には各々の透過光強度 (0 ~ 1) の掛算で効くので、透過光強度が0に近い谷が作用する波長域では最終的な透過光強度はほぼ0となる。
- [7] 大津元一 (監修)、田所利康 (著)「イラストレイテッド 光の実験」朝倉書店 (2016).