

偏光色アートを2次元で再現するシミュレーションの開発

丸澤 和晃¹⁾・三野 弘文²⁾

¹⁾千葉大学大学院教育学研究科 ²⁾千葉大学大学院国際学術研究院

Development of a simulation that reproduces polarized color art in two dimensions

MARUSAWA Kazuaki, MINO Hirofumi

要旨

直線偏光を作り出す偏光板2枚を、互いの透過軸が直交するように重ねると、入射した光は透過できないが、複屈折を持つ物質（セロハンテープ等）を偏光板で挟み白色光を透過させると、物質に色がつく。この発色は偏光色と呼ばれ、複屈折による偏光状態の変化に波長依存性があることで、2枚目の偏光板が波長の選択透過を起こすことになり、吸収された光の補色が色として認識されるためである。偏光色が持つ美しさや工作との相性の良さ、現象の不可思議さから、教育や芸術分野への展開を見据えた教材開発が成されてきた。本研究では、複数の組で任意の枚数のセロハンテープを様々な角度で貼り合わせた場合の偏光色と透過光スペクトル、諸条件を確認できる従来の3Dシミュレーションを改良した。より厳密な数値計算で、実際の偏光万華鏡のような面（座標系）全体で色を表現し、実物との比較を行える、視覚的表現の優れたシミュレーションとなった。また、透過光スペクトルの予測値と実測値の比較から、より厳密な色表現が出来ていることを示した。

キーワード

偏光板、偏光色、セロハンテープ、シミュレーション、光路差

1. 序論

直線偏光を作り出すことが出来る偏光板を2枚用意し、互いの透過軸が直交するように重ねると、入射した白色光は2枚目の偏光板までに全て吸収され透過できない。しかし、複屈折を持つ物質（セロハンテープ等）を偏光板で挟み込むと光が透過し、透明な物質に色がつく。この発色は偏光色と呼ばれ、複屈折による偏光状態の変化に波長依存性があることで、2枚目の偏光板が波長の選択透過を起こすことになり、吸収された光の補色が色として知覚される。偏光色が持つ美しさや工作との相性の良さ、現象の不可思議さから、教育や芸術分野への展開を見据えた教材開発や、書籍・Webサイトによる紹介が成されてきた^[1-3]。

これまでに、科学実験活動といったサイエンスコミュニケーションの場や、大学の講義等に向けて、セロハンテープアートの発色のメカニズムを理解するシミュレーション教材の開発が重ねられてきた。セロハンテープの枚数、挟む角度、透過する光源などにより様々な変化する偏光色を予測するシミュレーション教材から始まり、3Dモデルを用いた複屈折による偏光の変化について、波長依存性を観察する教材が制作された^[4-6]。そして吉田（2024）は、複数の組で任意の枚数のセロハンテープを様々な角度で貼り合わせた場合に見られる偏光の変化を数値処理し、その結果の偏光色と透過光スペクトルを条件と共に確認できる3Dシミュレーションを開発した^[7]。これにより、実際のセロハンテープアート（セロハンテープ万華鏡）のように、操作性や自由度を伴った視覚的理解のしやすい教材を使用できるようになった。ただし、このシミュレーションには次の2点において改善の余地があった。

- ①. 表現できる色が一色（テープが全て重なった場合）のみである（図1）。面（座標系）全体で色を表現し、実物との比較をより行えるように改善すること。
- ②. 色予測の数値計算をする際に、独立変数の1つである光路差の分散特性を考慮する。より厳密な計算となり、スペクトルの実測値と予測値を近づけ、予測の向上を図ること。

本論文では、従来の3Dシミュレーションを改良し、偏光万華鏡など、セロハンテープと偏光板を組み合わせて作る偏光アートについて、材料の重ね方の条件と偏光色の変化を観察できるシミュレーションを制作したことについて報告する。セロハンテープの全ての重なりで色を表示できるように、座標系全体へと色予測の範囲を広げ、実物（偏光万華鏡）との比較を行えるようにした。セロハンテープの光路差、重ねた枚数、重ねた際の角度の組数を変化させ、偏光色や透過光スペクトルの変化を画面上で観察することが出来る。①に対しては、改良の際のプログラミング上の工夫や課題点を整理した。②に対しては、透過光スペクトルの実測値と予測値の比較を行い、従来の研究との差異を整理した。

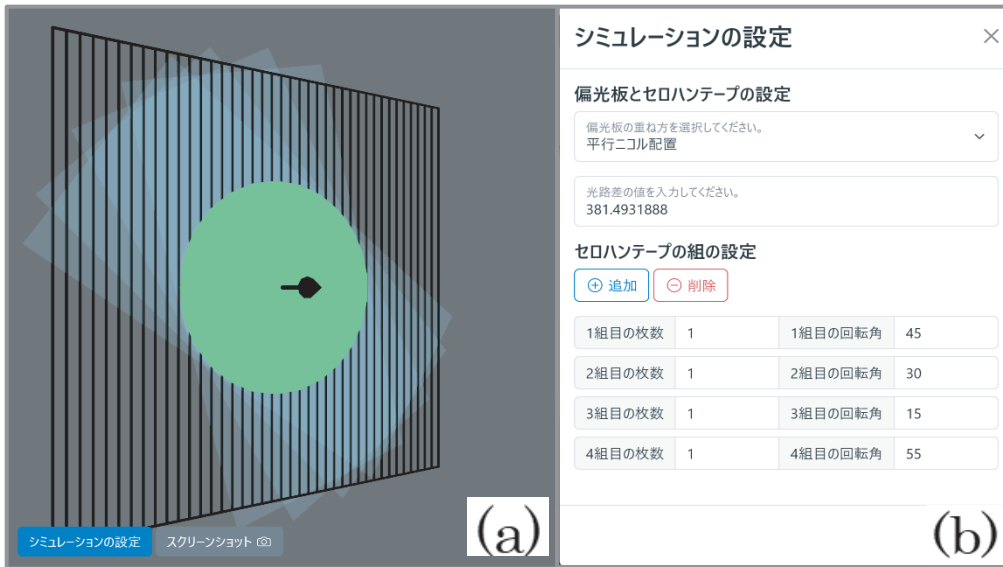


図1 (a) 表現できる色が1色の様子 (b) 光路差等の条件入力画面

2. 理論

偏光色は複屈折物質と呼ばれる、透過させる際に入射光の偏光状態を変化させる物質で観察できる。この複屈折物質は異方性（屈折率—光の進みやすさ—が方向によって異なる屈折率楕円体である）を持つ。2つの屈折率方向に対して、丁度中間の角度で光を入射した際には、強さが等しく速度の異なる2本の光線に分かれて進み、互いに垂直な振動面を持つ光線として透過していく。そして、2つの直交関係の光波は、物質面を透過して外部に出る際に入射光に対する位相のズレが生じることで、合成波が入射光とは異なる偏光状態となる。

セロハンテープも異方性を持った複屈折物質の1つである。一般的にセロハンテープ内の x 軸方向（セロハンテープの幅方向）の屈折率は小さく、 y 軸方向（セロハンテープの長さ方向で高分子の伸び方向）の屈折率は大きいため、入射した直線偏光の x 成分の光は y 成分の光に比べて速く進む（図2）。 x 軸方向と y 軸方向の屈折率の差 Δn とセロハンテープの厚さ d （セロハンテープの枚数に依存）の積 $d\Delta n$ は光路差という。この光路差 $d\Delta n$ によって上述した通り、 y 成分の光は x 成分に対して位相のズレを持つ事になる。波長 λ の光における、光路差と位相のズレの関係は以下の式で記述される。

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

偏光色の予測シミュレーションでは、ジョーンズ・マトリクス計算を利用した。1枚目の偏光板を透過後の偏光状態を表すジョーンズ・ベクトルを定め、複屈折物質での偏光状態の変化から、2枚目の偏光板による波長ごとの透過の度合いを計算する。これにより、偏光板を直交に重ねた直交ニコル配置、同じ向きに重ねた平行ニコル配置、それぞれの場

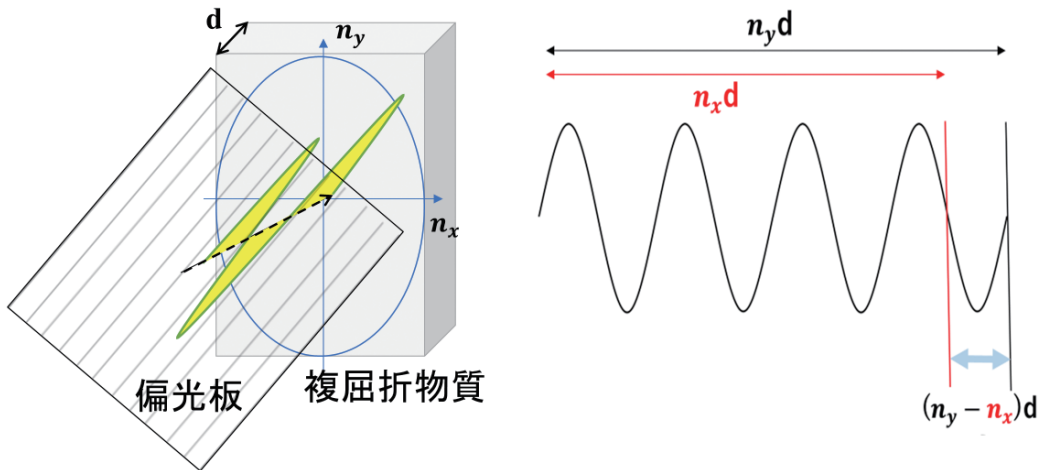


図2 屈折率楕円体に直線偏光を入射する様子と、光学距離による光路差の模式図

合での透過光スペクトルを算出でき、その後、等色関数を用いて色情報へ変換していく。数値計算における色予測の原理は、坂本（2021）を踏襲している為、詳細はそちらを参照されたい^[5]。

本研究では、式（1）で記述される光路差の波長依存性を考慮する。波長 λ の光における、複屈折物質の屈折率差を Δn_λ とすると式は次のように記述される。

$$\delta_\lambda = \frac{2d\Delta n_\lambda}{\lambda} \pi \quad (2)$$

一般に屈折率は分散特性をもち、可視光域では低波長ほど屈折率が高い。そして、その差分である光路差においても、同様の分散特性を見ることができる。図3は、8種類のセロハンテープと、1種類のOPPテープにおける光路差を示している。No. 1～8がセロハンテープであり、No. 9がOPPテープである。テープの型番などの詳細は付録を確認されたい。

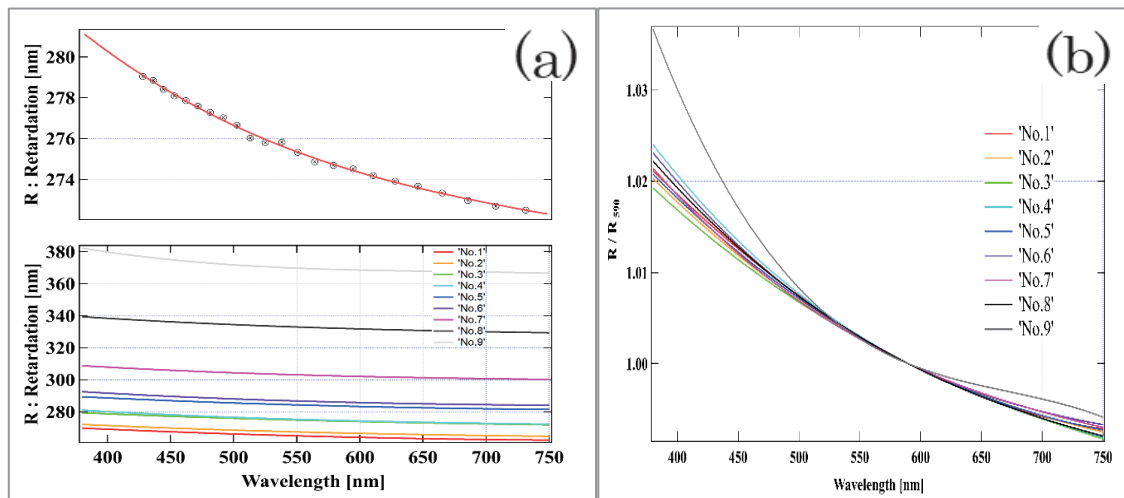


図3 (a) 光路差の分散特性（上図はNo. 3） (b) 590 nmの光路差を基準とした分散特性

図3より、セロハンテープの方で分散特性が大方一致していることが確認された。これは物質が同じであるために、屈折率差が固有の形状に落ち着く傾向があることが示唆される。そこで本研究では、図3の(b)のNo. 1～8において、中間的な値をとるNo. 7のデータを基準に分散特性を数値計算に反映させた。シミュレーションにおける光路差の入力画面では、380 nmでの光路差の値を Z_m として、図1(b)の設定画面で入力する。すると、 Z_m と式(3)から分散特性を考慮した値を算出し、380～750 nmの各波長での光路差が得られる。

$$R_{\lambda-Z_m} = Z_m \cdot 100 \cdot \frac{d\Delta n_{(\lambda-No.7)}}{d\Delta n_{(380-No.7)}} \quad (Z_m = Real\ Number) \quad (3)$$

3. シミュレーションでの改良点 (座標系全体での表現)

本研究ではp5.jsと呼ばれる、JavaScriptで記述するビジュアル表現に特化したライブラリを使用した。偏光板の中心に1つの色を表示するのではなく、全ての重なりで各々の色を表示できるようにした。この際に、3つの工夫をコードに取り入れることで、表現を実現している(表1)。

表1 座標系全体での表現における主な工夫

工夫1	白画像とp5.jsにあるpixels配列による色表示の簡素化。
工夫2	内外判定を導入した、各座標でのテープの重なり判定。
工夫3	2進数による、重なり状態と塗るべき色を結び付けるアルゴリズム。

3.1 工夫1：白画像とpixels配列による色表示の簡素化

p5.jsでは、描画領域に座標(1 pixelを基底とする直交座標系)を定義し、物体の位置や速度、加速度などを決定していく^[8]。描画領域に色を塗る場合にも、座標を利用し、その座標にテープが何枚重なっているかを判定し、その座標にどの色を塗るかを命令する。図4は本研究での描画エリアと座標の関係を示したものである。まず図4.(a)のように、偏光板の左上を原点とする座標系を設定し、偏光板の描画を行う。そして、図4.(b)のようにテープが描画されると、テープ上の偏光板上の全ての座標(x, y)の色が適切な色で塗られる。

色を塗る際には、計算速度を速めることを目的に、p5.jsのpixels配列を利用した^[9]。これはp5.jsで画像(縦: x' pixel、横: y' pixel)を扱う際に、画像を $x' \times y'$ 個の格子マスに分割し、各格子の色情報[R、G、B、 a (透明度)]を、 $x'y'$ 個の配列で保存してくれるものである。配列の要素数が描画の画素数に相当し、配列の位置は画像の左上を原点とする直交座標系による位置(x, y)によって検索することが出来る。画像を基に、多次元

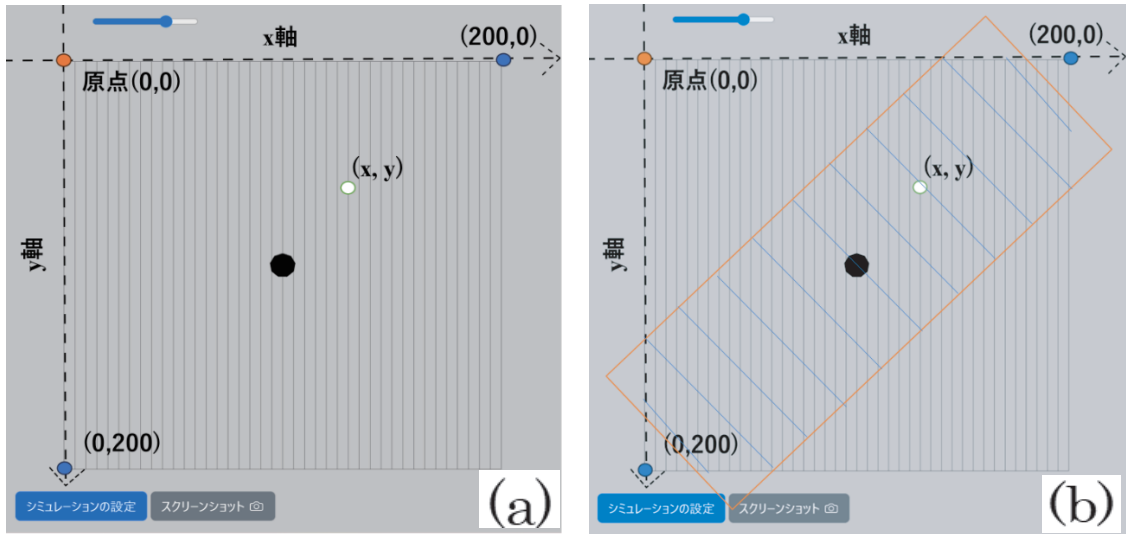


図4 (a) 描画エリアで定義される座標系と各座標。(b) テープ（長径200 px）の配置

の色配列を高速で入手でき、画像の各ピクセルの色変更も色配列により簡単に実行できるようになる。

本研究では白画像を入手し、偏光板と同じ200×200 pxのサイズにした後に、40,000個の要素を持つ色配列をpixels配列で作成した。その後、テープの描画と重なる全ての位置の画像の色配列要素を、塗られるべき色の値に変更している。

3.2 工夫2：外積計算による、各座標がテープ上にあるかの判定

工夫1で用意した、偏光板のサイズの白画像の色を変えるには、その画像上の座標では何のテープが貼られているかを判定する必要がある。その際には、コンピュータグラフィックスや物理シミュレーションで使用されるベクトルの外積計算を取り入れた、衝突判定アルゴリズムを利用する^[10]。ここでは、あるベクトルの始点を基準に終点に向かって見た際に、ある点はそのベクトルの右側にあるのか左側にあるのかを外積計算によって判断する。これはテープのような矩形の各辺を、図5のようにベクトルと見なし、点（白画像における各座標）が全ての辺の右側に位置するかの計算を行えば良い。矩形の内側に点がある場合の計算結果は、次の式を満たすことになる。

$$(P1 \times P01 < 0) \cap (P2 \times P02 < 0) \cap (P3 \times P03 < 0) \cap (P4 \times P04 < 0) \quad (4)$$

3.3 工夫3：2進数による、重なり状態と塗るべき色を結び付けるアルゴリズム。

式(4)の外積計算を、異なる傾きのテープごとに、全座標で行うことで、各点のテープの重なりを全て判定することができる。すると次に、各座標の重なり状態を数値化し、坂本(2021)で確立した色計算により得られる色を、座標と結び付ける仕組みが求められる。

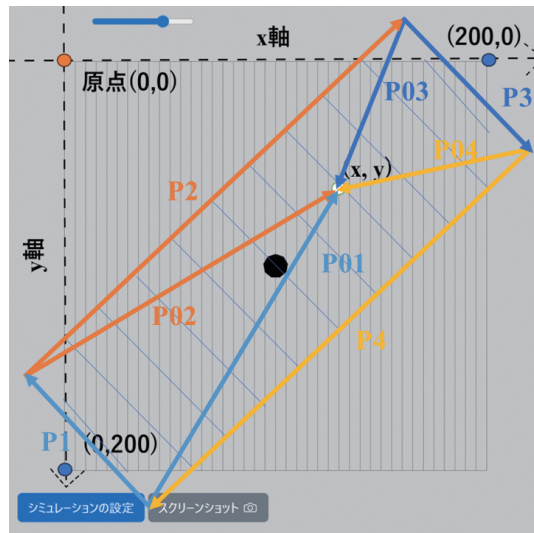


図5 計算で使用する全ベクトルの対応図

例えば傾く角度が異なる4組のテープ群（A、B、C、D）を順番に重ねて描画する場合、偏光板のサイズにした白画像上のある座標は3組のテープ（A、B、C）上に位置するかもしれない。同じ3組でも、（A、C、D）や（A、B、D）など組み合わせによって得られる色は異なってくる。そこで、プログラム上ではゼロハンテープの順列を場合分けして、順列に応じた色を数値計算の色と結び付ける仕組みを導入することにした。

n個の傾きのテープを描画する場合を考える。ある座標がテープ内にある場合を○、テープ外にある場合を×とすると、○と×の順列は 2^n 通りとなる。そして、○を0、×を1とすれば、○と×による順列を2進数の値として保存することが可能になる（表2）。

本シミュレーションでは、吉田（2024）の色計算を実施する際に、引数にこの2進数を利用し、2進数とその際の色を配列で保存した。そして、工夫2の分離軸判定により、各

表2 n = 3の場合の全順列（ $2^3 = 8$ 通り）と、2進数表示

1角度目	2角度目	3角度目	2進数	10進数
○	○	○	000	0
○	○	×	001	1
○	×	○	010	2
○	×	×	011	3
×	○	○	100	4
×	○	×	101	5
×	×	○	110	6
×	×	×	111	7

座標のテープの内外を2進数で保存し、その2進数で色を保存した配列の参照を行った。これにより、2進数（テープの重なり方）と1対1対応で塗られるべき色を定めることができ、アルゴリズムに従ってpixels配列の値を変更することが可能となる。

以上3つの主な追加要素を、フローチャートで整理した（図6）。ただしこれら追加要素は、テープを少なくとも1枚以上描画する際に実行されるものとする。

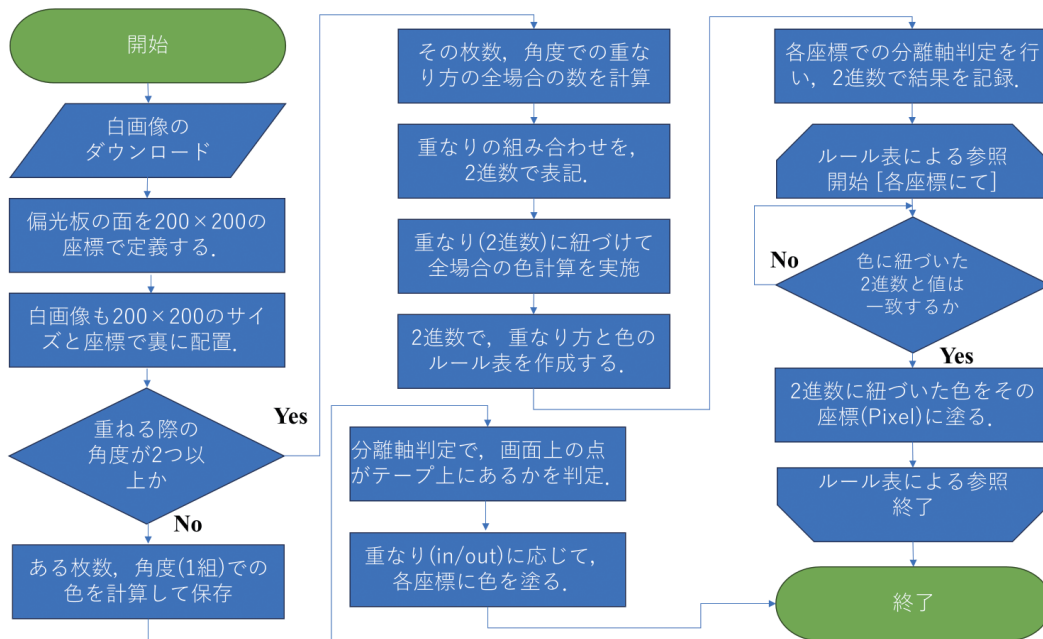


図6 改良により追加した要素のフローチャート

4. 座標系全体での描画

4.1. 座標系全体での描画の様子

図7は、1、2、3角度目のテープの角度が25°、75°、45°で平行ニコル配置、380 nmの波長で光路差が383.5 nmの場合の描画である。画面奥から手前が透過光の進行方向となっている。

図7から、偏光板上で描画されたテープが全て、塗られており、その色は重なり方によって異なることが確認できる。描画領域の左上にあるスライダーは、描画するゼロハンテープの横幅を変化させるものである。実物との比較を行う際に、実際のゼロハンテープの見え目に合わせて幅を調整すると良い。その他各種機能は、吉田(2024)を参考にされたい^[7]。

4.2. シミュレーションにおける課題点

重ねる際の諸条件を入力し、スライダーによりテープ幅を調整して実物の写真と並べたものが図8である。図8(a)の実物と比べて、図8(b)のシミュレーションでは、色計

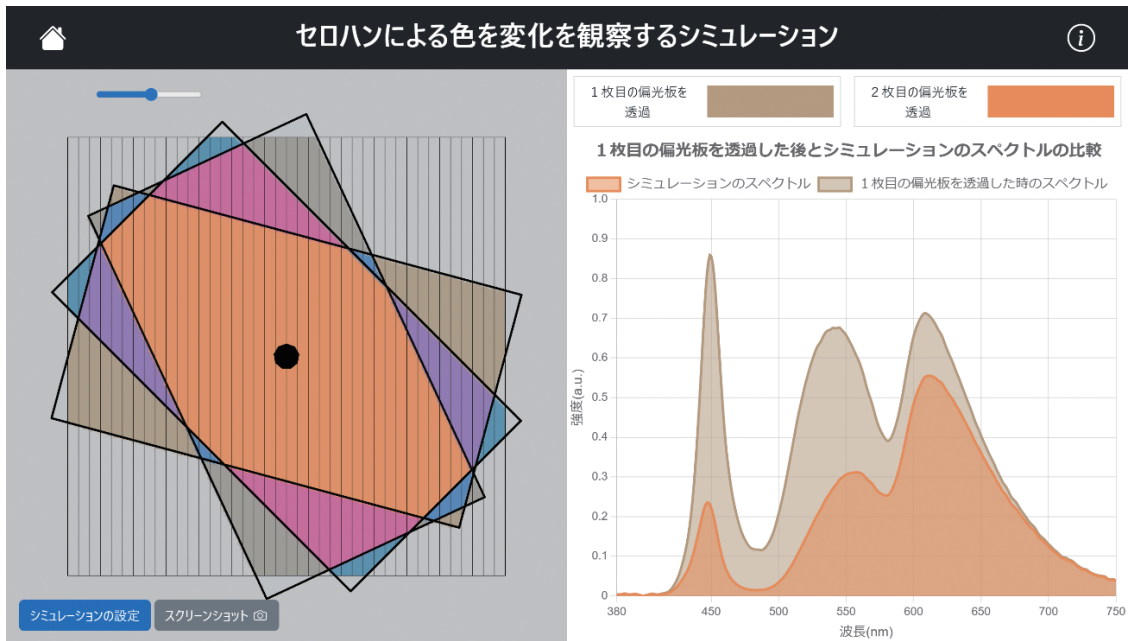


図7 座標系全体での描画例。右のグラフは、全テープを透過した際の透過光スペクトル

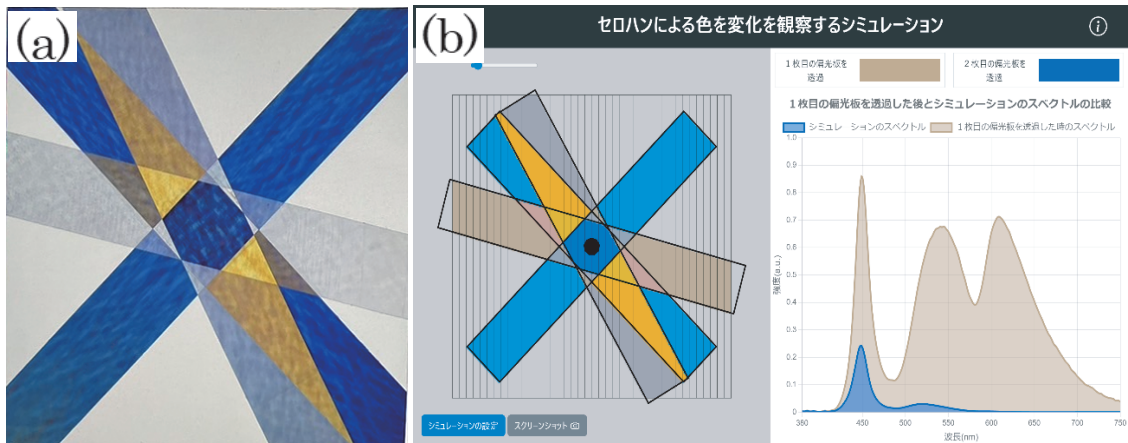


図8 (a) 偏光万華鏡による発色の様子 (b) 制作したシミュレーションの画面

算においてテープの透明度や質感を再現することに課題があるものの、比較的近い色表現を実現できていることが窺える。色計算の精度については、色計算の過程で取り扱う透過光スペクトルの予測値と実測値の比較に着目した評価を次章にて扱う。ここでシミュレーションでは、図8(a)の見えるの色にて彩色の無い箇所、くすんだ薄茶色が出力されている。これは、本研究における色計算で白色の表現が難しいことのためであり、実行した色計算で、光強度の絶対値を利用していないことが原因であると考えられる。光源のスペクトル形状(相対強度)を基にRGB値へ変換する方法を採用することで、白色或いは彩色の無い光でも、スペクトル形状によっては色づくことが起こり得る^[5]。

表3 シミュレーションと実測光の比較を行った条件

	角度の組数	組の番号	枚数	テープ角度	偏光板
条件1	1組	1角目	① 3枚 ②13枚	①45° ②45°	①直交 ②直交・平行
条件2	2組	1角目 2角目	5枚 4枚	30° 45°	直交・平行
条件3	3組	1角目 2角目 3角目	5枚 4枚 12枚	30° 45° 60°	直交・平行

5. 光路差による数値計算の厳密化と、実測値との比較

光路差の分散特性により、シミュレーションの値がより実測値に適合していることを確かめるべく、重ねたテープの組数について3つの条件を用意してスペクトルを計測し（表3）、予測値との比較を行った。また、実測値と予測値の適合度を示す自由度調整済み決定係数の値を、各条件の直交ニコル配置の場合で示す。

実測光の測定には、分光光度計（島津紫外可視分光光度計UV-1280）を利用した。内部に設定した波長域で、単色の光を波長を変化させながら入射でき、透過性のある物質を置いた場合には透過光スペクトルが得られる。実験では、内部の入射光口と透過光検出面に偏光板を貼り付けており、入射光口の偏光板の透過軸は地面と垂直となる。この1枚目の偏光板と直交する向きで、2枚目の偏光板を透過光検出面に貼り付けた場合を直交ニコル配置、平行する向きの場合を平行ニコル配置とする。

決定係数を算出する都合から、実測値と比較する予測光（改良前）の計算の際には、584 nmにおける光路差を一定の値として使用した。これは、テープの光路差が波長584 nmで約292 nmになる1/2波長板としての性質から、直交ニコル配置で得られるピーク値から実測光と予測光の強度を調整することが出来るためである。

5.1 条件1

条件1の条件下での予測光と実測光の比較を図9、10で示す。自由度調整済み決定係数の値は、①では予測光（改良後）で.996、予測光（改良前）で.990であった。②では予測光（改良後）で.958、予測光（改良前）で.829であった。以降、改良前は光路差の分散特性を考慮していないもの、改良後は分散特性を考慮したものとする。改良前では、波長584 nmにおける使用したテープの光路差の値を、全波長に適用している。その為、改良前後の予測光は584 nm付近で一致が見られ、そこから離れるとズレが多くなるといえる。図9は①の少ない枚数における比較であり、実際に予測光同士のズレが低波長側にかけて

拡大しているのがわかる。そして改良前に比べて改良後の方が実測光の形状と一致している。図10は②の多い枚数における比較である。予測光同士では、①と同様に低波長側にかけてズレが顕著である。実測光と予測光の比較でも、改良後の予測光と実測光の極大・極小の位置が大方一致している。実測光の形状は、特に584 nm付近で一致が見られ、そこから離れた波長(特に低波長側(400-550 nm))では、極大で強度が弱くなってしまうたり、極小で強度が下がりきらなかったりする。この点は、以下の条件2～3でも共通してみられる。テープへの光の入射角が、テープのたわみやテープを固定する台によって厳密には垂直入射からズレてしまっていることや、テープ表面での光の反射などが影響しているであろう。

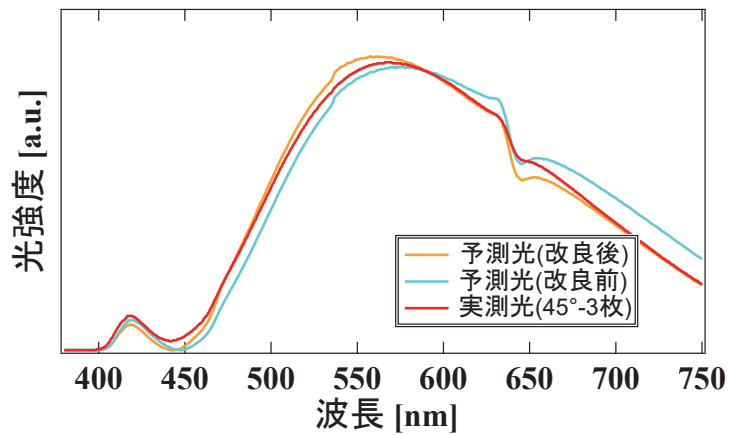


図9 条件1-①における予測光と実測光の比較

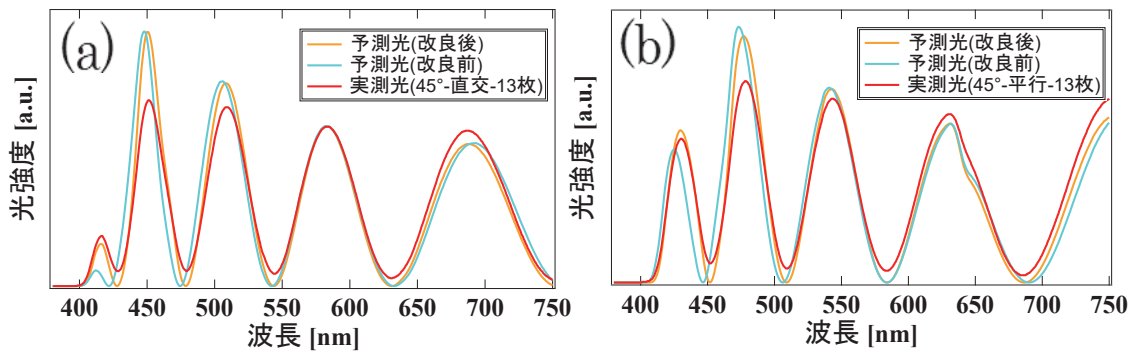


図10 条件1-②における (a) 直交ニコル配置 (b) 平行ニコル配置での比較

5.2 条件2

条件2の条件下での予測光と実測光の比較を図11で示す。自由度調整済み決定係数の値は、(a) 直交ニコル配置にて、予測光(改良後)で.950、予測光(改良前)で.917であった。(a)、(b)ともに、改良後の予測光の方が改良前より低波長側への光強度のシフトを抑えることができしており、実測光の極大・極小やスペクトル形状を良く表現している。

特に380~425 nmと584 nmでの形状の一致が良い。ただ、条件1の②よりも少ないテープ総数にあるにも関わらず、比べて強度の極大値での低下や極小値での下げ止まりといったズレが大きい傾向がある。条件2では、1角目と2角目の2つ分のテープを固定する台を用意するために、固定する台が1つの条件1に比べて、入射面の傾きやテープの表面反射の影響が強くなるのが原因だと考えられる。

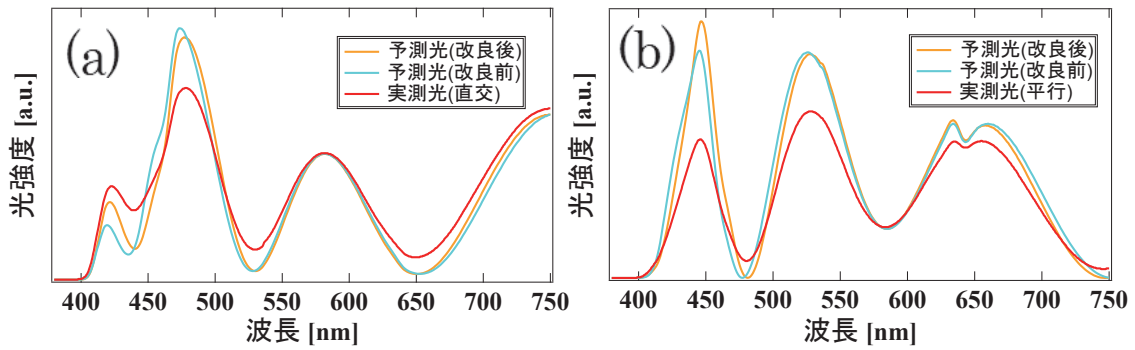


図11 条件2における (a) 直交ニコル配置 (b) 平行ニコル配置での比較

5.3 条件3

条件3の条件下での予測光と実測光の比較を図12で示す。自由度調整済み決定係数の値は、(a) 直交ニコル配置にて、予測光(改良後)で.830、予測光(改良前)で.614であった。(a)、(b)ともに改善後の予測光の方が、実測光の極大・極小値の一致や形状の類似が確認された。枚数の総数が21枚、角度3角と実測とのズレを持ちやすい条件であるにも関わらず、特に600~750 nmの平行ニコル配置では極大・極小の位置が一致していることがわかる。強度の極大値での低下や極小値での下げ止まりといったズレは、条件1、2同様に原因が説明できる。

実際は、セロハンテープの総数をここまで増やしてしまうと発色起きないため、条件3のような数値を入力する機会は少ないであろう。条件1~3の結果を踏まえると、光路

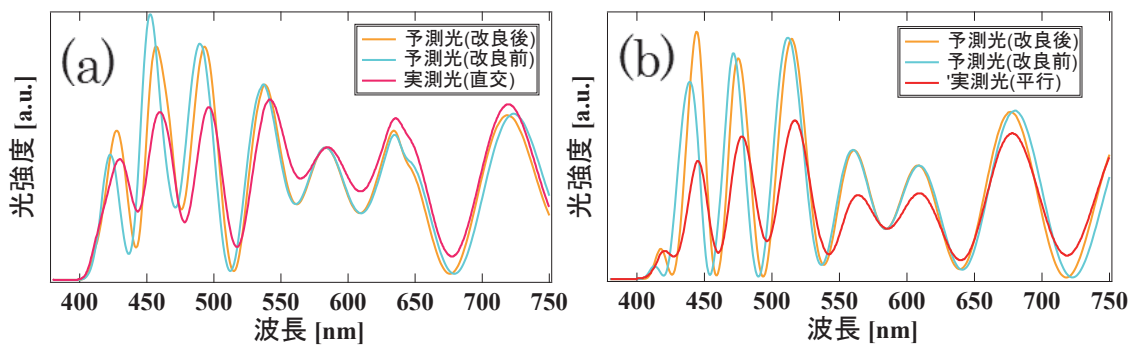


図12 条件3における (a) 直交ニコル配置 (b) 平行ニコル配置での比較

差を修正することで、スペクトル形状をより一致させることに成功し、色表現の向上につながっていると考える。ただし、枚数や組数を制限した方がよりよい一致を示すことが示唆される。

6. まとめ

本研究では、これまで制作されてきた複数の組で任意の枚数のセロハンテープを様々な角度で貼り合わせた場合に見られる偏光の変化を数値処理し、その結果の偏光色と透過光スペクトルを条件と共に確認できる3Dシミュレーションの改良を行った。この際に、p5.jsのプログラムに幾つかの工夫を取り入れることで、実際のセロハンテープアート（セロハンテープ万華鏡）のように、面（座標系）全体で色を表現し、実物との比較をより行えるようになった。またいくつかの条件で、光路差の分散特性を取り入れた厳密なスペクトル計算の結果と、実測スペクトルの結果を比較したところ、分散特性を取り入れない場合よりも再現の精度が明らかに高くなることを確認できた。

今後は、色計算における光源の絶対強度の利用や3原色モデルの修正を行い、より実際の見え方に近い色表現が出来るように、シミュレーションの改善を進めていきたい。また、本シミュレーションの教材としての効果を大学等の講義で測定していくことや、サイエンスコミュニケーションなど科学実験体験の場で、追加の説明コンテンツとしての活用を進めたい。

参考文献等

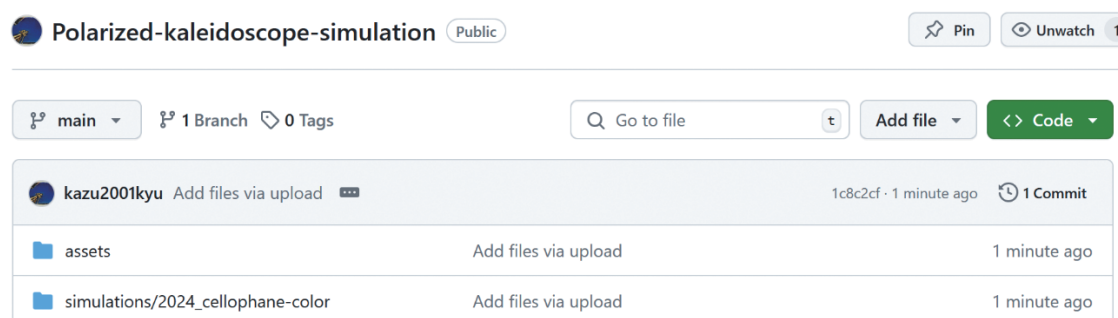
- [1] 大津元一（監修）・田所利康（著）、2014、『イラストレイテッド 光の科学』、朝倉書店
- [2] Aaron D. Slepko, (2022) 「Painting in polarization」 Physics & Astronomy, Trent University, Peterborough, Ontario K9L 0G2, Canada.
- [3] NGKサイエンスサイト「[[偏光板] 偏光板で遊ぼう]」、<https://site.ngk.co.jp/lab/no123/>(accessed 2024-8-12).
- [4] 三野弘文・三好真央、2018、「偏光板とセロハンテープを用いた干渉色の仕組みと応用」、『千葉大学国際教養学研究』 2、p. 69-79、千葉大学国際教養学部。
- [5] 坂本舞衣・三野弘文、2021、「セロハンテープの枚数で変化する偏光色の予測プログラムの開発」、『千葉大学国際教養学研究』 5、p. 123-151、千葉大学国際教養学部。
- [6] 吉田賢二・三野弘文、2023、「複屈折で偏光が変化する仕組みを理解する3Dシミュレーションの開発」、『千葉大学国際教養学研究』、 7、p. 165-178、千葉大学国際教養学部。
- [7] 吉田賢二、丸澤和晃、三野弘文（2024）：セロハンテープの組み合わせで変化する偏光色予測プログラムの性能向上、千葉大学国際教養学研究、 8、73-84.
- [8] p5.js Reference, 「createCanvas()」, createCanvas (p5js.org), (accessed 2024-8-12).
- [9] p5.js Reference, 「pixels」, pixels (p5js.org), (accessed 2024-8-12).
- [10] マルペケつくろーどっとコム、「基礎の基礎編その1 内積と外積の使い方」http://www.marupeke296.com/COL_Basic_No1_InnerAndOuterProduct.html, (accessed 2024-8-12).

[11] 原田建治 (2015) 「セロハンテープを用いた2視点表示アート」 応用物理教育、39-1

付録

◆ 制作したシミュレーションのソースコードのダウンロード方法

- ①. 次のリンクにアクセスする。URL：kazu2001kyu/Polarized-kaleidoscope-simulation (github.com)
- ②. Codeというボタンをクリックして、Download ZIPを選択し、ZIPファイルをダウンロードする
- ③. ZIPファイルを展開する
- ④. [Windows OSの場合] Visual Studio Codeで実行する場合には、先ずエクスプローラーで第1階層の任意のフォルダを作成後にダウンロードした2つのフォルダを第2階層に配置する。その後、VSCodeで第1階層のフォルダを開き、拡張機能のLive severから、htmlファイルで右クリックを押しOpen with live Server (ショートカットキー：Alt+L→Alt+O) を選択すると実行できる。



付録一制作したシミュレーションのソースコードのダウンロード方法より ZIPファイルダウンロード画面

◆ 光路差を測定した9種類のテープ (セロハンテープ・OPPテープ)

本研究では8個のセロハンテープと1個のOPPテープの光路差を測定した。いずれもが、大学構内の販売所やWebサイトで簡単に入手できたものである。以下の表では、商品名、製造会社、大まかな費用、テープとしての特徴をまとめている。No. 1、4、7のように同じ商品名でも、光路差には違いが現れている点に注目したい。このことは、型番ではなく、そのテープの製造時期や製造機器によるテープの厚みやたわみ等の差異が光路差の値に大きく関与していることを意味している。そのテープがどの様な色表現が出来るかは、光学特性から実際に光路差を見積もって見ないと判断が難しい。鉱物学で用いられる干渉色図表から簡単に値を見積もる方法が紹介されている事例に倣い^[11]、本研究のシミュレーションを用いることで、テープの貼り方と色の組み合わせから光路差を見積もることも可能である。

表 光路差を測定した9種類のテープ（セロハンテープ・OPPテープ）

Item No.	Product name	Seller	Approx.cost \$ USD/ea	Notes
No. 1	"Sekisui Cellotape No. 252 15 mm × 35 m"	Sekisui Chemical Co.,Ltd	0.75	The tape is thin.
No. 2	"Cellotape No.405-1P 12mm × 35m"	NICHIBAN Co., Ltd.	0.60	The thickness is thin. The surface is transparent yellow.
No. 3	"Cellotape Tape made from Natural Materials CT-12S 12 mm × 13 m"	NICHIBAN Co., Ltd.	0.70	The thickness is thin. The surface is transparent yellow. The tape has low adhesion.
No. 4	"Sekisui Cellotape No. 252 15 mm × 35 m"	Sekisui Chemical Co.,Ltd	0.75	No. 1 is a sample manufactured more than two years prior to No. 3.
No. 5	"Cellotape CT-15DCR 15mm × 11m"	NICHIBAN Co., Ltd.	1.57	The surface is transparent yellow.
No. 6	"Cellotape CT-18DCR 18mm × 11m"	NICHIBAN Co., Ltd.	1.57	Transparent tape with high adhesion.
No. 7	"Sekisui Cellotape No. 252 15 mm × 35 m"	Sekisui Chemical Co.,Ltd	0.75	No. 1 is a sample manufactured more than two years prior to No. 3.
No. 8	"Cellophane tape T-SS15N 15 mm × 35 m"	KOKUYO CO.,LTD	0.75	The tape is thick and transparent.
No. 9	"OPP clear tape 15 mm × 35 m"	MonotaRO Co.,Ltd	0.33	The tape has very strong adhesive properties.

◆ 制作したシミュレーションならび、解説サイトのリンク

今回制作したシミュレーションは、本研究室で設置したシミュレーション配布用のWebサイト (bicipema) から確認できる。以下のリンクからアクセスすることによって、シミュレーションを操作方法や原理の説明と合わせて確認できる。

URL : <https://bicipema.com/p/偏光色アートを二次元で再現するシミュレーション/>