

セロハンテープと偏光板を用いた干渉色の規則性

Regularity of interference colors

by using adhesive tape and polarizer

熊谷風輝

東京都立戸山高等学校 SSH 物理2年

ABSTRACT

This study aims to investigate the regularity of color changes in interference colors that can be produced using only two colorless materials: a polarizer and adhesive tape, leveraging the anisotropic properties of adhesive tape. A stack of multiple layers of adhesive tape, aligned in the same direction, was placed between two crossed polarizer, and light was shone onto it. Photographs and spectral measurements of the transmitted light were taken.

Three major experiments were conducted. The first experiment examined the effect of varying the number of adhesive tape layers. The results showed that when the number of layers was odd, green light was consistently observed, whereas when the number was even, purple light appeared. Additionally, a graph was created comparing the transmission spectrum of the light with the spectrum of an LED source. The graph exhibited periodic variations in intensity, with the intervals between peaks decreasing as the number of layers increased. Notably, after completing the analysis, a prior study on this topic was discovered, but no further prior research was found beyond that.

The second experiment involved changing the angle between the long edge of the inserted adhesive tape and the transmission axis of the polarizer. The results were analyzed using digital photographs, comparing hue, brightness, and saturation. While the hue of the transmitted light remained unchanged, its saturation varied, reaching its highest level when the angle was 45° .

The third experiment examined how the perceived color changed depending on the observer's viewing position relative to the polarizing plates. The results showed that light appearing purple when viewed from the front could shift to blue or orange depending on the observer's position.

Interestingly, the first experiment revealed green and purple as observed colors, while the second experiment identified blue and orange. Given that these color pairs are complementary, we hypothesized that this complementarity might be related to the underlying pattern of regularity observed in the interference colors.

Key Word ; Interference Colors, Adhesive Tape, Polarizer, Complementary Color, Spectrum

I. 研究の背景と目的

今回、私が研究したのは、偏光板とセロハンテープを用いてできる干渉色の変化の規則性についてである。この研究は、干渉色の変化の規則性を見つけ、それを元に、無色の物質だけを使って自在に望み通りの色のついた光を作り出せるようにすることを目的とする。

私がこの研究を始めたのは、元々偏光という現象に興味を持っており、偏光板とセロハンテープを用いた偏光万華鏡造りの実験をインターネットで見つけたためである^[1]。このサイトでは、セロハンテープをランダムに重ね合わせたものを偏光板で挟むことで、カラフルで不思議な模様を作ると言うものであり、無色な物質のみを用いているのにも関わらず、なぜこのように色のついた模様ができるのかと疑問に思った。その後、メカニズムを調べていく中で、色の変化に規則性はあるのかと疑問に思い、この実験を行うことにした。

当初、このテーマについて調べた時には発見できなかったのだが、実験Ⅰの考察終了後に先行研究を発見した^[2]。この先行研究は、実験Ⅰと非常に酷似していて、得られたスペクトルもほぼ同様である。実験Ⅱ以降は、独自の実験である。

II. 予備実験の結果及び実験道具

〈文献調査と予備実験から分かったこと〉

偏光板は、透過軸方向の波の光のみを透過して、直線偏光を作り、それ以外の向きの波の光は遮断する性質を持つ。そのため、2枚の偏光板を透過軸が直交する形(以後、直交ニコル)で重ねると、理論的には全ての光を遮断する。しかし、偏光板の間に、偏光の状態を変える特殊な物体を挟んだ場合は、この限りではなくなる。また、セロハンテープは、図1のような構造になっており、製造される工程の中で引き伸ばされることにより、縦と横で屈折率が異なるという複屈折の性質を持つ(異方性物質)。

図2の装置において、1枚目の偏光板を透過した直線偏光は、セロハンテープの縦と横の双方向に入射し、それぞれ異なる位相の変化を遂げる。その後、2方向の波は干渉し、その合成波の偏光状態は、重ね合わせの原理によって決定され、波長ごとに異なる。偏光板の透過率は入射時の偏光状態によって決定するため、波長ごとに2枚目の偏光板の透過率に差が生まれ、干渉色(厳密には偏光色と呼ぶのが正しいとする文献もある。)と呼ばれる色のついた光が現れる^[4]。

〈実験道具〉

偏光板2枚(偏光度 99.99%)、ガラス板3枚(1.3 mm厚)、
セロテープ®(ニチバン社 0.05 mm厚)、iPhone SE2(写真撮影用)
分光器(測定域 200~800nm)、LED(昼光色、485 lm)

※ガラスは等方性物質であるため、偏光の状態の変化に関して考慮する必要はない。

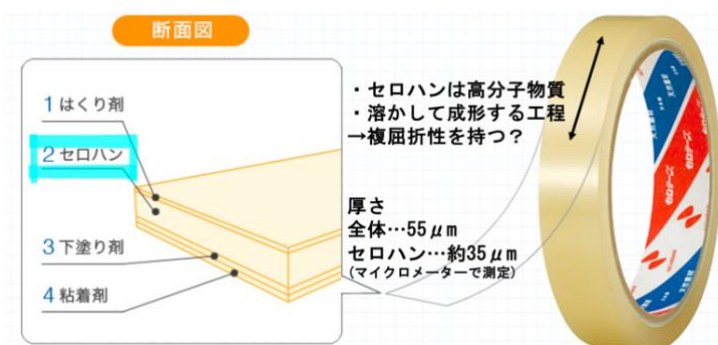


図1: セロハンテープの複屈折性

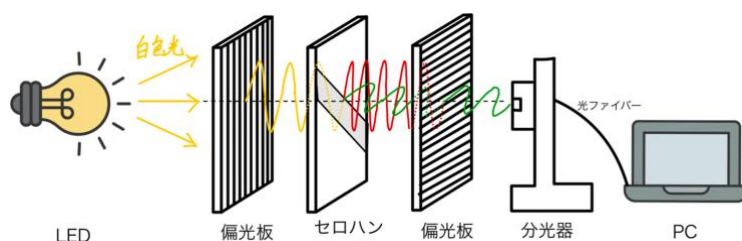


図2: 実験装置の模式図 I

Ⅲ. 実験方法

「同じ向きに指定枚数貼り重ねたセロハンテープを、偏光板2枚の間に挟んだ装置(図2)」に対し、光源からの光を通し、透過光に対し、正面から写真撮影・スペクトル測定及び、透過率の分析を行った。表1のように、装置の諸条件を変更し、計3つの実験を行った。

表1:実験の諸条件に関する表

	実験Ⅰ	実験Ⅱ	実験Ⅲ
偏光板の向き	直交ニコル	直交ニコル	直交ニコル
テープの枚数	1~8枚	2枚	2枚
テープの角度	45°	0°~90°	45°
観察する位置	正面	正面	上下左右

※直交ニコルとは、2枚の偏光板の透過軸が直交している状態を指す。

※透過率とは、サンプルの光の強さを光源であるLEDの光の強さで割った値のことを指す。

〈実験Ⅰ〉

セロハンテープの枚数を1~8枚に変更していき、色の変化を観察した。

〈実験Ⅱ〉

偏光板の間に挟むセロハンテープの長辺と偏光板の透過軸の角度(以降 θ_1 とする。)を 0° から 90° まで 15° ずつ変えた。

〈実験Ⅲ〉

図3のように、偏光板の面に対する、写真撮影をする人間の位置を変化させた。尚、次のように位置に記号をつける。セロハンテープの中心部を点 A、A を通り面に垂直な線上の別の点を B、観察位置(分光器の測定位置)を C とする。この時、 $\angle BAC$ を 45° の状態で、装置の上下左右から測定した。

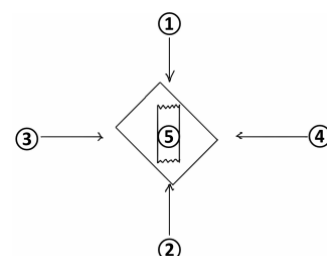


図3:実験装置の模式図Ⅱ

Ⅳ. 結果

〈実験Ⅰ〉

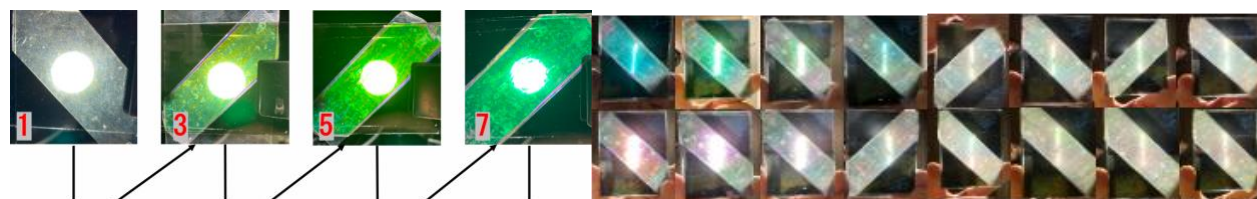


図4:セロハンテープの枚数ごとの透過光の色の変化
(赤字は枚数、参考として9~24枚を小さい写真にて示す。)

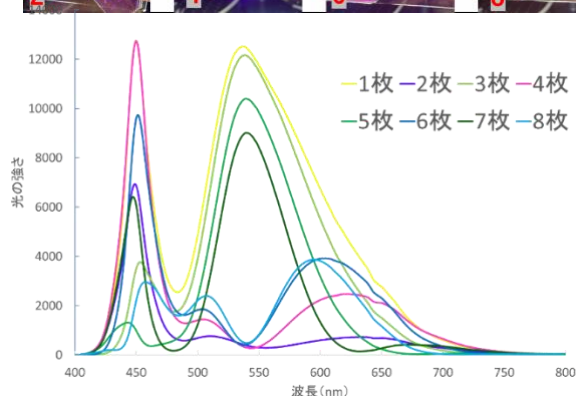


図5:セロハンテープ枚数毎の透過光のスペクトル

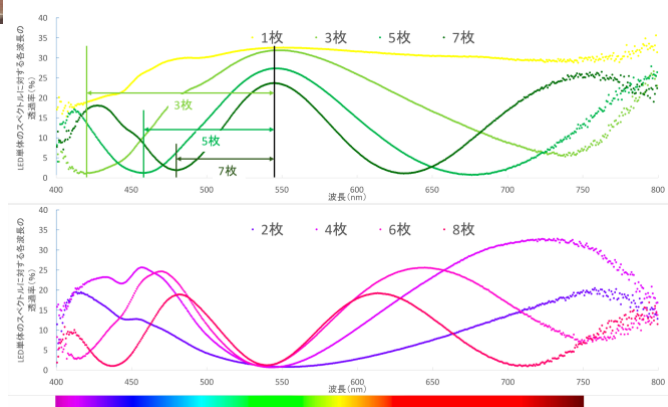


図6:セロハンテープ枚数毎の光の透過率

表2:取り出した色とその補色の HEX 値

取り出した色	その色の HEX 値	補色の HEX 値
紫 明るめ	7D 1E A0	41 A0 1E
紫 暗め	63 02 B6	55 B6 02
緑 明るめ	57 AE 18	6F 18 AE
緑 暗め	37 9C 30	95 30 9C

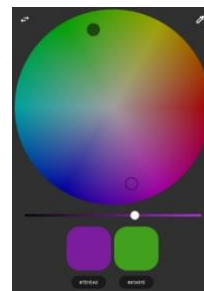


図7:図4から取り出した色とその補色

図4から分かるように、セロハンテープの枚数が、奇数の時は緑、偶数の時は紫色になり、図5のスペクトルにも奇数偶数の違いが顕著に顕れた。図6から、色が変わった経緯を考察した。奇数枚の時は、400～500 nm(紫・青)、600～700 nm(赤)の範囲の光はあまり透過せず、500～600 nm(緑・黄)の範囲の光を多く透過したため、緑・黄緑の色になった。反対に、偶数枚の時は、400～500 nm(紫・青)、600～700 nm(赤)の範囲の光を多く透過し、500～600 nm(緑・黄)の範囲の光はあまり透過しなかったため、紫・赤紫の色になったと考えられる。

図6のグラフは奇数と偶数で上下に対称的な形になっていて、枚数が増えるほど、グラフの山と山の間隔が狭くなった。図4において、枚数が増えるごとに、色の彩度が落ちて、白色に近づいていくのは、テープの間に気泡が入ったのも一つの要因だともうが、このグラフの山と山の間隔が狭くなり、多くの波長の光が混ざったようになったためであると考えられる。

表2と図7の色と HEX 値より、奇数の色と偶数の色は、補色の関係にあると言える。

〈実験Ⅱ〉



図8:角度毎の透過光の色の変化(左から $\theta_1=0^\circ$ 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90°)

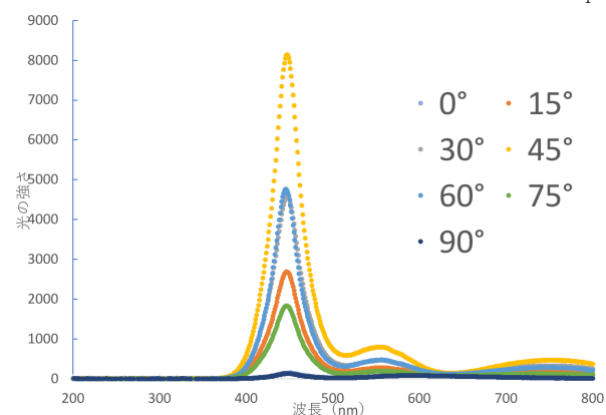


図9:角度毎の透過光のスペクトル

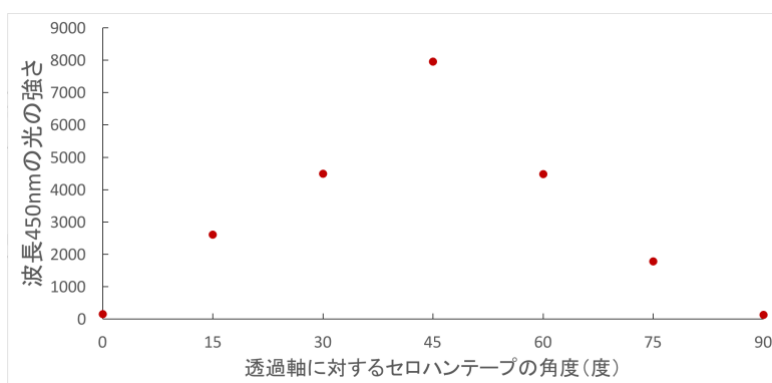


図10:角度毎の波長 450 nm の光の強さ

表3:図8から取り出した各色を HSV 値で表した際の S(彩度)の値

	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
紫系	15.3	78.0	94.4	100	99.6	81.3	15.7
青系	51.0	94.9	98.8	99.2	98.8	100	60.6

図8より、 θ_1 を変えていっても、紫以外の色は現れないことが分かった。また、 0° 、 90° のときは、他と比べて、紫が極端に弱いことがわかり、表3より、彩度もとても低かった。残りの角度のときは、人間の視覚的にはほとんど変わらないように見えた。表3を用いて厳密に考えると、 45° の時に、最も彩度が高いと考えられる。(尚、撮影から値算出まで多くの工程を踏んでいるため、精密な数値を得ることは不可能であり、 75° の時の青系の彩度については誤差と考えた。)そして、透過光の強度の観点で見ると、図10より、 45° の時が最も高く、 0° から 45° ・ 45° から 90° は、それぞれ直線に近いグラフになった。測定した角度が少ないため仮説にはなるが、光の強さは、 θ_1 と一次関数的な関係にあると考えられる。しかしながら、見方を変えれば、サインカーブのようにも見受けられるため、断定はできない。

〈実験Ⅲ〉

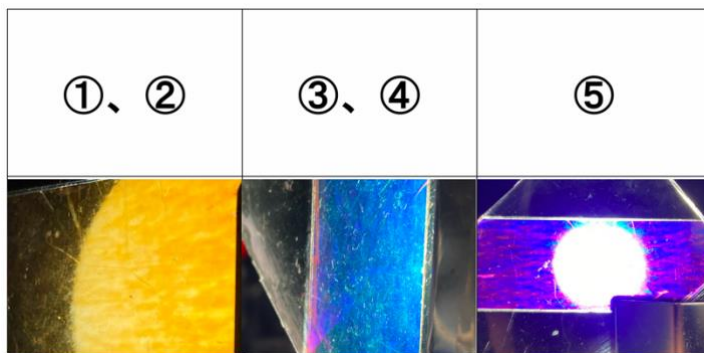


図 11: 見る角度毎の透過光の変化
(通し番号は図3と同様。)

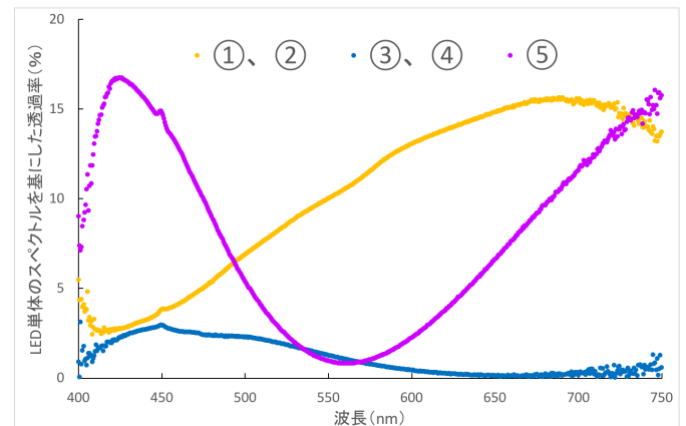


図 12: LED 単体のスペクトルに対する透過率

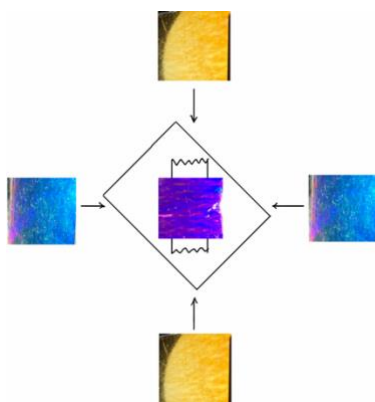


図 13: 実験Ⅲをまとめた図

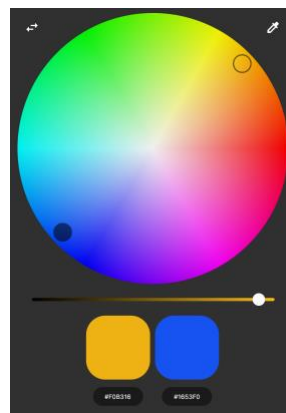


図 14: 図 10 から取り出した色とその補色

図11より、正面から見ると紫であった透過光を上・下から観察すると橙色、左・右から観察すると青色が現れた。図12において、上下と左右のグラフは対称的であり、図14から鑑みても、この2色は補色の関係にあると考えられる。

V. 考察

〈実験Ⅰ〉

セロハンテープが奇数枚の時と偶数枚の時、補色の関係にある2色を取り出すことができた。また、セロハンテープの枚数が多いほど、干渉色は白色に近づき、緑・紫以外の系統の色が現れることはないと考えられる。

〈実験Ⅱ〉

θ_1 を 45° にした時に、最も彩度・強度が高い透過光が得られると考えられる。

〈実験Ⅲ〉

干渉色を異なる視点から見ると、全く別の色に見えることが分かった。上下から見た時と、左右から見た時で、補色の関係にある2色を取り出すことができた。これは、波長によって2枚目の偏光板を透過した後に直進する方向が異なっているためであると考察している。また、波長ごとの透過率の規則性も全く違うことが分かった。今回は、 $\angle BAC$ を 45° に固定して実験を行ったが、今後は、この角度をより細かく変化させて、規則性を見つけて行きたいと思う。

Ⅵ. 結論・展望

以上の実験Ⅰ～Ⅲの中で、2通りの補色の組み合わせを取り出すことができた。1つ目が緑と紫(マゼンタ)、2つ目が青と橙(イエロー)である。光にしろ色にしろ、全ての色を表現するには、三原色と呼ばれる3つの基本の色を組み合わせる必要がある。すなわち、光の三原色(赤・青・緑)と色の三原色(シアン・マゼンタ・イエロー)である。ただし、厳密には、色においてはブラックも必要である。本研究の目的である、無色の物質だけを使って自在に望み通りの色のついた光を作り出せるようにするためには、残りの補色の組み合わせ、赤・シアンを取り出すことが必要不可欠である。この組み合わせを取り出すために、他の諸条件を変更して実験を試みたが、現時点では成功していない。

今後は、SYRs・TSS_(謝辞)にて指摘を受けた、変数の多さを改善して、実験を進めていきたいと思う。具体的に、単色光を用いるなどの工夫をしたい。また、偏光に関する知識を蓄えて、実験結果を多角的に考えられるようにしたい。そして、まだ取り出すことができていない赤色に関しても、これまでの結果を駆使して取り出せるように実験を続けていきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京都立戸山高等学校 SSH 物理コース担任西山政人先生、鹿島由紀先生、同校主催 SYRs(2023 年 11 月 3 日)へ来場されたメンターの高山あかり先生(早稲田大学先進理工学研究科物理及び応用物理学専攻)、西内悠先生(東京大学理科Ⅰ類)、藤田智寛先生(戸山高校 SSH 物理卒業生)、岡村陸矢先生(同 SSH 化学卒業生)、国立大学法人電気通信大学 都立高校生のための課題探究教室 2023 担当の須子雅好先生、須田順子先生、TA の方々の指導を受けました。

文献

[1]国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)サイト

サイエンスタウン 『偏光で遊ぼう(偏光万華鏡?)』 監修:下村正樹

https://www.aist.go.jp/science_town/dream_lab/01/

[2]『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(千葉大学国際教養学部)、三好真央(千葉大学教育学部) 2018 年 3 月 31 日

[3]ニチバン社公式ホームページ

[4]『物理小事典 第4版』 株式会社 三省堂 1994 年 4 月

[5]『Newton 別冊 光と色のサイエンス』 株式会社ニュートンプレス 2015 年

[6]『イラストレイテッド 光の科学』 監修:大津元一 著者:田所利康、石川謙 朝倉書店

補足

各グラフは、Excel を用いて作成した。

表 1・2、図 6・14 は Color Gear というアプリを用いた。