

【大学シーズ情報】 ※図や表などを入れてわかりやすく記載してください。

大学名 山口東京理科大学

研究タイトル	三次元装飾「マジカルシャドー（マジシャド）」
研究者の所属学部、学科、役職、氏名	工学部 電気工学科 高頭 孝毅 教授
技術のポイント	偏光板と半波長版を組み合わせた筒状の部品を作成すると筒の内部にモノがあるように見える。
現在の研究開発段階	A 基礎研究段階 ・ B 試作段階 ・ C 実用化段階
技術の紹介	詳細は添付資料を参照ください 下記のホームページでもご覧いただけます https://sites.google.com/site/magishado/
研究の背景	添付資料をご参照ください
従来技術より優れている点	添付資料をご参照ください
技術の用途イメージ	アクセサリー、装飾品など
中小企業への期待	具体的商品化に向けた用途アイデアの発掘 現在、ペンケース、ストラップをネット販売中です https://majishado.stores.jp
知財情報 (ある場合のみ記載 ください)	【特許番号】 【発明の名称】 【特許権者】 【発明者】

液晶関連技術から生まれた 3次元装飾「マジシャド」

山口東京理科大学 工学部 電気工学科 教授 高頭 孝毅

光学実験のまかない料理

「まかない」とは、本来レストランの従業員に提供される、客に出されることはない食事であるが、一流レストランの「まかない」には質が高くオリジナリティーの高いものがあるらしい。例えば「オムライス」は日本のレストランの「まかない」からできた料理と聞く。

我々の研究でも、製品や論文にはなりそうもないが、見て面白い現象がいくつかあるものである。たいていは学生や家族を喜ばせて終わる。これは科学者の「まかない」のようなものだと思う。

本稿では高校生に対する授業での偏光板を使った「まかない」を製品として提供する試みを紹介する。

偏光板の構造と偏光発生の原理

偏光板は液晶ディスプレイに2枚ずつ用いられており、液晶ディスプレイの市場の拡大とともにこの30年で爆発的に使用量が増加した。ほとんどの液晶ディスプレイに使用され

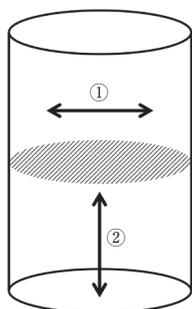


図1 ブラックウォールの構造
図中の矢印は偏光板の透過軸の方向を表す。

ているが、その他にも「円偏光板」と呼ばれる反射防止フィルムとしてタッチパネルや有機ELディスプレイにも用いられている。

また変わったところでは、反射光をカットするためのカメラ用のフィルターやサングラスとしても用いられている。偏光板がどのように活かされているかはそれぞれ面白く、光に関して多くのことを語るができるため、高校生に偏光板の薄片を2枚ずつ配り偏光や液晶に関する授業を行ってきた。特に、後述するブラックウォールと呼ばれるオブジェを作る授業は、受講した高校生へのアンケートでも評価が高いものであった。その活動のなかである授業をきっかけに、偏光板を用いた新しい3次元装飾方法を考案した。

偏光板はポリビニルアルコール (PVA) のフィルムをヨウ素水溶液に浸したのち、一方向に延伸処理することで作られる。その後、両面を透明フィルムで挟んで用いられる。延伸処理で棒状のヨウ素分子が延伸方向に配列され、光が偏光板を通過するとき、延伸方向に振動する光の成分はヨウ素に吸収され、延伸方向に垂直に振動する光だけが偏光板を通過する。こうして一方向にのみ振動する偏光が得られる。偏光板で生じる偏光の振動方向を、その偏光板の「透過軸」と呼ぶ。

ブラックウォール

2枚の偏光板の透過軸を平行にして光を透かしてみると、1枚目の偏光板で生じた偏光は2枚目の偏光板を通過するので明るく見える。逆に2枚の偏光板の透過軸を直交させる

と、1枚目の偏光板で発生した偏光は2枚目の偏光板で吸収され暗く（黒く）見える。液晶ディスプレイも偏光板のこのような性質を利用しているが、1つの利用例として「ブラックウォール」と呼ばれるオブジェがある。図1にブラックウォールの構造を示す。

図1のブラックウォールは、①、②の2つの領域を持つ。領域①には透過軸が水平方向の偏光板が円筒状に固定され、領域②には透過軸が垂直方向の偏光板が円筒状に固定されている。

筒の向こう側から観察者に届く光は、A 領域①→領域① B 領域②→領域② C 領域②→領域① D 領域①→領域②の4つの内のいずれかの経路を通ることになる。

Aの場合は外から筒の内側に光が入るとき水平方向に振動する偏光となる。この光が筒を出るとき透過軸の方向が水平方向の偏光板を通るので光はそのまま通過する。Bの場合も同様である。すなわち同じ領域を通過する光はこの筒を抜けてくる。Cの場合は光が筒に入るときは垂直に振動する偏光となり筒の内部を進行するが、領域①では、透過軸が水平方向であるため偏光は偏光板に吸収される。Dの場合も同じである。すなわち異なる2領域を通過する光は筒から出て来ず偏光板に吸収される。このような場合は領域①と②が接する輪を外周とする黒い膜があるように見える。

ブラックウォールは科学館に大型のオブジェが設置されるなどさまざまに活用されており、知っている人も増えてきているようである。高校生にブラックウォールを作らせると大変受けがよく偏光もしくは光全般に関する教材として優れたものと思う。

ブラックウォールからマジシャドへ

そのような授業中、一人の男子高校生が偏光板を綺麗に切らずに、無茶苦茶に切ってブラックウォールを作った（写真1）。ブラッ



写真1 マジシャド発想のきっかけとなった、高校生の作ったブラックウォール

クウォールで現れる膜は板の形状のみ可能とっていたが、そのブラックウォールの膜は黒い紙を不規則に折り曲げているように見えた。授業では各自作ったものを持ち帰ってもらっているが、そのブラックウォールはもらい受け、長い間私の机の上に載っていた。それを見ながら、新しいブラックウォールのデザインに挑戦したが、あまり面白いものはできなかった。また、デザインの才能のある女性にお願いしていろいろなものを作っていた。しかし、2種類の偏光板を突き合わせなければならない点で非常に制約が大きく、作れるデザインに制約があった。

そのようにして何年か経った。あるとき、2枚の偏光板を使うのではなく、1枚の偏光板と1枚の「半波長板」を組み合わせれば同じ効果を持つのではないかという考えが浮かんだ。

偏光板を2枚突き合わせなくてもはならないブラックウォールに対して、この方法では偏光板を加工する必要がなく、その上に貼る半波長板の形状で浮かび上がる3次元形状のデザインが決まる。

実際には、偏光板の片方の表面全面に半波長板を貼ったのち不要な部分を切り取ると簡単に作ることができる。このため、デザインの自由度が非常に大きくなった。このようにして作るフィルムを「マジカルシャドー」、



写真2 マジシャドのペンケースの例
紺色に見える部分が円筒内に存在するように立体的に見える。



写真3 写真2のペンケースを上から見たところ



写真4 マジシャドで作ったストラップ
中央部分に紺色の膜があるように見える



写真5 写真4のストラップを上からみたところ

略して「マジシャド」と呼んでいる。この稿でも以下「マジシャド」と呼ばせていただきたい。

写真2～5にマジシャドを用いたペンケースとストラップを示す。写真では分かりにくいけれども内部には何もないが紺色に見える部分が立体的に見える。「マジシャドの応用・販売」の項で紹介するホームページでこれらを回転させた動画を見ることが出来る。また購入も可能である。

マジシャドの構造と機能

以下、マジシャドが何故このように見えるのかを解説していく。半波長板の機能のメカニズムに関しては、「半波長板の機能発現の

メカニズム」の項に記載した。

図2にマジシャドフィルムの構造を示す。1枚の偏光板の上に半波長板を貼った構造をしている。半波長板の延伸軸は偏光板の透過軸に対して45度傾いている。なお、半波長板の代わりに「4分の1波長板」を貼ったものが、最近使用量が増えている円偏光板である。円偏光板は工業用部材として大量に製造されており、マジシャドフィルムも製造には問題のないものである。

図3にマジシャドフィルムの使用例を示す。②の部分は半波長板をマジシャドフィルムから剥がした偏光板のみの部分であり、①は半波長板を残した部分である。写真6は、図3のマジシャドフィルムを半波長板を

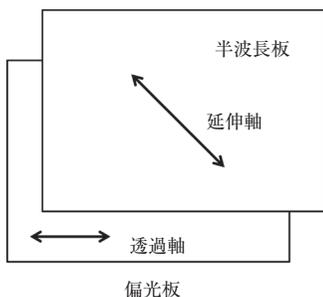


図2 マジシャドフィルムの構造

内側にして円筒状に丸めたものの写真である。青色の葉っぱ状の物体が内部にあるように見える。

図4に半波長板の機能を示す。半波長板の延伸軸に対して θ 傾いた方向に振動する偏光が入射すると、半波長板を通過時、偏光の振動方向が半波長板の延伸軸を中心に 2θ だけ回転する。この理由は「半波長の機能発現のメカニズム」の項で説明する。

図3において、偏光板の透過軸は水平方向とする。半波長板の延伸方向は偏光板の透過軸に対して45度の方向にする。こうしておくと半波長板側からは縦方向に振動する偏光が出てくる。

以下、円筒に入った光がどのように変化するかを見ていく。

ブラックウォールの例を参考にさせていただけるとより理解しやすいと思われる。図3の領域②(写真6の⑤)から入射した光は横方向に振動する偏光となって円筒内を移動する。この偏光が同じ領域②に達したときは偏光は偏光板をそのまま通過し透明に見える(写真6 領域⑤)。この光が図3①に達したときは内側に貼られた半波長板を通過することで縦方向に振動する偏光に変わり、これが偏光板を通過すると青色に相当する波長の光の一部以外吸収される。このためこの光は紺色に観察される(領域④)。領域①から円筒に入った光は偏光板通過により横方向に振動する偏光となったのちすぐに半波長板を通過することで縦方向に振動す

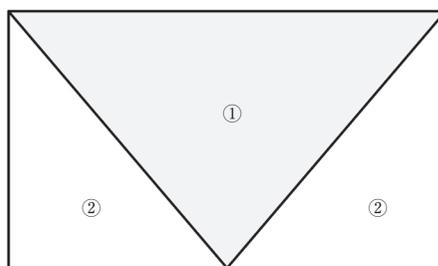


図3 「葉っぱ」状の3次元形状が出現するマジシャドフィルムの構造



写真6 図3のマジシャドフィルムを円筒状にしたもの紺色の「葉っぱ」状の3次元形状が筒の中に存在するように見える。

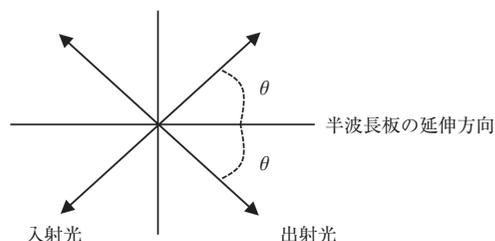


図4 半波長板の機能

る偏光となり円筒内を通過する。この光が領域②に達すると偏光板により大部分の偏光が吸収され、同じように紺色の光として観察される(領域④)。領域①に達した場合は内側に貼られた半波長板を通過することで偏光の振動方向が90度回転し再度横方向に振動する偏光となり偏光板を通過し明るく見える。

以上のように、同じ種類の領域を通過する光は円筒を通過し、異なる領域をまたいで通過する光は紺色の光となって円筒から出てく

る。このようなメカニズムで異なる領域の境目を外周とする平面状の立体物が円筒内にあるように見える。マジシャドフィルムの半波長板の形状と現れる立体形状の関係は実はあまりよく分からない。今のところ5, 6パターンを作ってみただけである。今後できてくるデザインが楽しみである。

マジシャドの色について

写真6の領域④ですべての波長の光が吸収されていればマジシャドは黒く見えるはずである。しかし、現時点で工業部材として入手可能な半波長板を使用したマジシャドでは紺色の着色を生じる。この色は偏光板の特性でも変化するが、主として半波長板の複屈折の波長依存性によって決まる。そのため、さまざまな色のマジシャドを作ること原理的に可能である。ちなみに、現在のマジシャドの色は焼き物の染付の呉須の色に似ていて私は気に入っており、展示会等でも好評のようである。なお、透明な部分も最初の偏光板で50%の光が吸収されるため、どうしてもある程度は暗くなってしまう。これは液晶ディスプレイが抱える問題と同じで偏光板利用の際の欠点でもある。

マジシャドの応用・販売

これまでマジシャドでペンケース・貯金箱・ストラップ等を作製し、山口県内の3つの展示会に出展してきた。また、販促品等を扱う企業・教材メーカー等数社と協議を継続している。いずれの企業でも良好な評価をいただいております、サンプルを提供して継続して検討いただくことになっているが、残念ながら現時点で具体的な商品化の予定はたっていない。

一方、この技術は実際に手に取って見ていただかなければなかなか分かりにくいところがあるようである。下記のホームページでも動画を掲載するなど工夫をしているが、ホー

ムページではよく分からなかったという方が多かった。そのため、「多くの人に知っていただくためには販売するしかない」という結論に至った。そこで、ペンケースとストラップをネットショップで販売することにした。ネットショップには下記のホームページ内の「販売」からアクセスすることができるので、是非覗いてみていただきたい。

マジシャドの応用としては、このような小物の他に、透明な瓶のラベルなどに応用できると考えている。また、現在大型の偏光板も製造されているので建築用の装飾として用いることもできるであろう。また中学生・高校生用の教材としても適していると思う。特に、中学生の「夏休みの宿題」にはうってつけと思われる。もし、授業等に使ってみようと思われる先生は是非ご連絡ください。連絡先もホームページにあります。

マジシャドのホームページ：<https://sites.google.com/site/magishado/>（グーグル等で「マジシャド」で検索も可能）

販売：<https://majishado.stores.jp/>（上記ホームページからも可能）

半波長板の機能発現のメカニズム

以下、半波長板の機能発現のメカニズムを解説する。

半波長板はリタレーション R_e が275 nm付近の光学フィルムである。すなわち、白色光のピーク強度の波長を550 nmとするとその2分の1のリタレーションを持つものである。

リタレーションは複屈折 Δn とフィルムの厚み d の積で表される。

$$R_e = \Delta n \times d$$

光学フィルムの延伸方向の屈折率を n_e 、それに垂直な方向の屈折率を n_o とすると複屈折 Δn は $\Delta n = n_e - n_o$ である。

波長 λ の偏光が半波長板を通過する場合を考える。その偏光を延伸方向に振動する偏

光と、延伸方向に対して垂直方向に振動する偏光に分解すると、振動数は変化しないので、延伸方向に振動する偏光の波長 λ_e とその垂直方向に振動する偏光の波長 λ_o は、それぞれ下記の式で表される。

$$\lambda_e = \frac{\lambda}{n_e}, \quad \lambda_o = \frac{\lambda}{n_o}$$

図5は簡単のために約 $1\mu\text{m}$ ほどの厚みの半波長板（実際はもっと厚いフィルムである）の延伸軸から図4のように θ だけ傾いた方向に振動している偏光が、半波長板に入射した場合を示している。偏光を延伸方向に振動する成分（青）とそれに垂直な方向に振動する成分（赤）に分解して考える。延伸方向に垂直な成分がフィルムを2波長で通過するのに対して、延伸方向に振動する成分は2波長半かかっている。このため、光がフィルムを通過したのち、フィルムの端で2つの成分を合成すると延伸方向を中心に 2θ 回転した偏光として出てくる。

このように延伸方向に振動する成分が通過するのにかかる波の数と延伸方向に垂直な方向に振動する成分が通過するのにかかる波の数の差が2分の1のとき、入射した偏光は 2θ だけ回転して出てくる。フィルムの厚みを d とすると、それぞれの偏光がフィルムを通過するときの波の数は、

$$\frac{d}{\lambda_e}, \quad \frac{d}{\lambda_o}$$

であるから、

入射した偏光が 2θ だけ回転して出てくるのに必要な要件は、

$$\frac{d}{\lambda_e} - \frac{d}{\lambda_o} = \frac{1}{2}$$

となる。

$$\lambda_e = \frac{\lambda}{n_e}, \quad \lambda_o = \frac{\lambda}{n_o}$$

を代入して、

$$d \times (n_e - n_o) = \frac{\lambda}{2}$$

となる。 $d \times (n_e - n_o)$ は、リタデーション R_e なのでフィルムのリタデーションがある

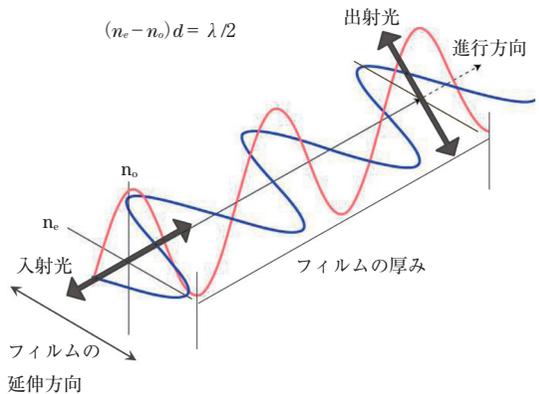


図5 半波長板を通過することで偏光の振動方向が回転するメカニズム

偏光の波長の2分の1であるとき、その偏光を回転する機能を持つことになる。

科学的感興を刺激

私は平和鳥（水飲み鳥）やガリレオ温度計のような「科学」が感じられるアイテムが大好きだ。これらのものは、その原理を理解する動機づけになる。是非マジシャドもこのようなアイテムに育って行って欲しいと思う。マジシャドで用いている「偏光」は高校の教科書でも用いられており、また直観的にも理解しやすく、光学を紹介するには良いトピックスと思える。また、液晶が身近な存在となったため用いられている偏光も興味を引きやすい対象となったのではないかな。

私は30年近く液晶の研究に携わってきたが、その過程でデバイス開発には関係がないが、面白い現象をいくつも見てきた。それで論文を書いたこともあるが、論文を書かなくとも別の形で人の目にふれ科学的感興を刺激できれば大いに満足である。まさに科学者の「まかない」だ。できればその刺激でより深く科学への興味を持つきっかけになれば最高だが、まあ「まかない」にそこまで期待するのは行き過ぎだろう。

この稿が読んでいただいた方になにかの形でお役に立てれば大変幸いです。是非文中で紹介したホームページもご覧ください。