

光の反射と干渉 ~色づいてみえるアクリル板~

熊本県立八代高等学校 物理研究部

2年 橋口 晴, 宮島 朋子, 本田 真成美

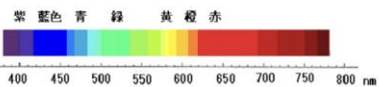
徳島 里音, 緒方 敦基, 泉 徳浩

1. 研究の目的

見る方向によって色が違って見えるアクリル板の時計をきつかけに光の干渉に興味を持った。この時計を正面から見るとオレンジ色に見える。角度を変えると紫色に変化する。また、スクリーンには水色が見える。このような光の色の変化はシャボン玉の色づいてみえる「薄膜による光の干渉」による現象ではないかと考えた。また、光が色づいて見えるとはどういうことなのか反射光や透過光を観察して、光の色が見えるしくみを解明しようと考えた。(写真1: 色づく時計)

2. 事前学習

① 光について
光は電磁波の一種で、光はその中の可視光にあたる。この可視光をプリズムを使って分光させてきた色の帯を「スペクトル」と呼び、スペクトルは、それぞれの波長の長さによって下図のような光の帯を形成する。この波長の範囲が可視光の範囲(380~750nm)となる。



(図1: スペクトル・光の色と波長)

② 薄膜の干渉について

薄膜の厚さが波長と同程度に薄いと、薄膜の上面で反射した光aと、下面で反射した光bが干渉して、色が違って見える。
薄膜が空気中にある場合、光aは上面で自由端型反射し、光bは下面で固定端型反射をする。
光aの光は、薄膜の中では $\lambda = \lambda_0 / n$ (λ_0 : 薄膜の屈折率) になり、入射角 i 、屈折角 r で入射し、反射角で薄膜の下面を反射して、薄膜の上面に出てきて光bと重なり干渉する。膜の厚さを d とすると、図より、光a、bが強め合う条件は $2nd \cos r = m\lambda$ ($m=0, 1, 2, \dots$) となり、この干渉条件を満たす波長の色が見えていると考えられる。そこで、入射角 i を変化させて、時計のアクリル板に見える色を観察し、波長を調べてみようと考えた。

3. 研究活動

【実験1】アクリル板による反射光と透過光の色の観察(方法)

- ① 入射角を入射した工作用紙をアクリル板の下に置く。
- ② 光源はスリットを取り付けた懐中電灯(白色光)にする。
- ③ ①のときに入射角を変えて、工作用紙(スクリーン)に映る透過光と反射光の位置と色を調べた。

(写真2: 右側に入射光と反射光)

(結果) 実験の結果は次の表1の通り。

入射角	① 透過光の色	② 反射光の色
0°	水色	オレンジ
10°	青	青
20°	青	青
30°	内側青、外側黄	青
40°	内側青、外側黄	青
50°	ピンクがかった青	緑(バスター)
60°	ピンク	緑に黄が混じってきた
70°	薄く黄みがかったピンク	緑の黄の混じり
80°	黄	黄

(表1: 入射角と透過光・反射光の色)

(気づいたこと)

- ① 透過光は光源の正面に反射光は反射の法則が成り立つ方向に進む。
- ② 透過光の色と反射光の色は補色の関係になっているようだ。
- ③ 入射角を大きくしていくと、透過光は、青から黄へ変化していく。反射光は、オレンジから黄色、緑、青、紫に変化していく。
- ④ シャボン玉の色の観察が、アクリル板の色の観察と一致する。
- ⑤ アクリル板を偏光板で挟み、回転させると色が変化した。

(考察1)

光の色から波長を特定しようとしたが、水色も赤紫色もスペクトルの中にそのような色はない。調べると、水色もピンク色も複数の波長の光が混ざっていることがわかった。



(図3: 光の3原色) (図4: パソコンの色の編集機能)

今回、反射光で観察された色、例えばマゼンタ(赤紫色)について考えると、パソコンディスプレイの色編集機能(図4)において、赤と青が強く、緑が0になっている。同時にシアン(水色)は、青と緑が強く、赤が0に、オレンジ色は、赤と緑が強く、青が0になっているという共通点が見られた。つまり、反射光はある波長の光が強く出てきているのではないかと考えた。

油膜の反射光の色にシアンやマゼンタが目立つのは、そのためではないだろうか。

(写真3: 油膜の色)

(考察2)

透過光の色と反射光の色は、補色のようで全くの補色ではない。補色とは、色相環(図5)の正対に位置する色の組み合わせで、加法混色によって無彩色(白色)をつくることのできる二つの色をいって補色であるという。入射した白色光は、反射光と透過光に分かれたため、補色の関係になると思われるが、薄膜やアクリル樹脂に一部分の波長の光が吸収されるために完全な補色にならないのではないかと考えた。(図6)

入射角10° 透過光(水色) → 反射光(オレンジ)
入射角30° 透過光(青と黄) → 反射光(黄)
入射角50° 透過光(ピンク・紫) → 反射光(緑)

(図5: 色相環) (図6: 反射光と透過光が完全に補色でない理由)

(考察3)

入射角を大きくしていくと、反射光は黄色から黄色、緑、青へと波長の短い方へ変化していく。色相環図では、反射光も透過光も、一定の方向に回転して変化していくのが面白かった。
干渉条件 $2nd \cos r = m\lambda$ ($m=0, 1, 2, \dots$)
 $\sin i / \sin r = n$ より $4d \cos^2 r = m\lambda$ ($m=0, 1, 2, \dots$)
となり、入射角を大きくしていくと、反射光の波長が短くなっていく実験結果と一致する。
反射光の波長を入射角0°で625nm、30°で580nm、60°で490nmと仮定すると $4d \cos^2 r = m\lambda$ ($m=0, 1, 2, \dots$)
 $4d \cos^2 0^\circ = 0 \cdot \lambda = 0$
 $4d \cos^2 30^\circ = 1 \cdot \lambda = 580 \text{ nm}$
 $4d \cos^2 60^\circ = 2 \cdot \lambda = 490 \text{ nm}$
より $d = 1.8 \text{ nm}$ 、 $n = 1.49$ となり、アクリル樹脂の屈折率は1.49(波長によって±0.01)なので、アクリル樹脂より屈折率の大きな物質の薄膜だと考えられる。

【実験2】立方体ガラスによる反射光と透過光の色の観察

(目的) 色づいて見える不思議な立方体ガラスがあった。これも、薄膜の干渉による現象ではないかと考えた。そのしくみを調べた。

(方法)

- ① 実験1と同様に、入射角を測る工作用紙上で立方体ガラスを置いて、入射角を10°ずつ変え、光の色や位置を観察した。
- ② 光源は実験1と同様に白色光の懐中電灯を用いた。スクリーンとして、四方に工作用紙を置き、光の位置や色を観察した。

(写真4: 色づく立方体ガラス)

(写真5: 実験の様子)

~色づいてみえるアクリル板~

2年 橋口 晴, 宮島 朋子, 本田 真成美

徳島 里音, 緒方 敦基, 泉 徳浩

(結果)

- ① 入射角が0°のとき、白色光は三方に赤と青(横の反射光)と緑(透過光)に分かれた。(写真6)
- ② 回転させると赤と青が少しずつ色を変えながら回転した。
- ③ 緑(透過光)の位置は変化せず、緑色の両側に黒い影が生じ、影が太くなっていった。
- ④ ①の光とは別に明るく細い線が見られた。
- ⑤ 45°回転させると透過光は白色になり、90°回転させると透過光は再び緑色になり、左右の赤と青が入れ替わった。さらに45°回転させると透過光は赤紫色になり、180°回転すると元に戻った。



(写真6: 手前が光源、入射角0°)

(写真7: 入射角を増やすと赤と青が回転し、緑色の両側に黒い影が生じた)

(考察1)

単なる立方体ガラスであれば、横方向の光は生じない。(図7) 対角線上にハーフミラー(図8)のような厚さの違う薄膜が挟まれていて、膜の厚さで反射光の色を調整しているのではないかと考えた。そこで、ハーフミラーがあると仮定して作図した。左右の青と赤の反射光は、入射角が9°増えると、最初の方より2°回転すると予想した。(図9) 確かめると入射角10°のとき、最初の方より20°、入射角20°のとき、最初の方より40°回転し、予想と一致した。(図9: 入射角9°のときの光の経路)

(図10: 黒い影が生じる理由)

また、緑色の透過光の両側の黒い影は、入射光がガラスの片方の横の面で全反射し、もう一方の横の面で、屈折することによって生じている。(図10) 明るい線は、立方体ガラスの角の部分が凹面鏡のような役割をして光を集めたのではないだろうか考えた。

【実験3】色づいてみえる立方体ガラスの屈折率の測定

実験2の結果から、立方体ガラスの全反射し始める臨界角を求めようとしたが、立方体の角が邪魔で、臨界角を測定できなかった。そこで、まち針を使って光の経路をたどり、入射角と屈折角から屈折率を求めた。

(写真8: 実験の様子)

(結果) 入射角 i と屈折角 r を測定し、屈折率を計算したところ、次の表のような結果を得た。

入射角 i	16.5°	27.5°	47.5°	66.8°	77.0°
屈折角 r	11.2°	17.9°	30.2°	37.5°	42.0°
屈折率 n	1.46	1.51	1.47	1.51	1.46

(表2: 屈折率 n の実験結果)

(考察) 角度の読み取りや、法線の書き方によって、誤差が出たが、立方体ガラスの屈折率は平均値 約 1.48、臨界角 $i_c = 42.5^\circ$ となった。このことから立方体の素材はガラスと想定していたが、屈折率1.49のアクリル樹脂の可能性もあると考えた。

【実験4】ブルーライトカットフィルムの観察

(目的)

スマートフォンやパソコンから出る青い光「ブルーライト」をカットする目的で作られたフィルムをみつけた。このフィルムも薄膜の干渉を利用しているのではないかと考え、そのフィルムの反射光と透過光を観察した。

(方法)

フィルムに白色光(懐中電灯や蛍光灯)をあてて、反射光と透過光を観察した。

(結果)

- ① フィルムに映った白色光の反射光は紫色に見えた。
- ② フィルムを通して見る白色光の透過光は黄色に見えた。



(写真9: 紫色の反射光)

(写真10: 黄色の透過光)

(考察)

- ① 紫色と黄色は補色に近い関係
- ② 紫色の波長を380nm、黄色の波長を580nmと仮定すると、 $380:580 = 2:3$ 偶数、奇数より紫色の波長の3倍と黄色の波長の2倍はほぼ等しい。→ 薄膜の干渉条件と一致する。

【実験5】薄膜作りに挑戦

(目的)

自分たちで薄膜を作って干渉光を再現してみたいと考えた。そこで、アクリル樹脂より屈折率の大きな二酸化チタン(光触媒や白色顔料などに利用されていて屈折率が2.49と非常に高い。)をアクリル樹脂に塗布することにした。

(方法)

- ① プレコーティング剤を刷毛またはスポンジで塗布した。
- ② 1日置いて二酸化チタン溶液を刷毛やスポンジなどを使って塗布した。その際、比較のために片面・両面のもので塗布して、反射光や透過光を観察した。

(写真11: スポンジで塗布後)

(結果・考察)

- ① 複数の干渉光特有の色が観察できた。
- ② 膜の厚さを均一にできれば1つの色が得られると考えた。刷毛やスポンジを利用して工夫したが、均一な厚さで塗布するのは難しかった。
- ③ 干渉が起こるには、膜の厚さは波長と同程度の約1μm以下だととても薄く、かつ均一にする必要がある。薄膜のコーティング技術の高さを実感した。

(写真12: 手作り薄膜による干渉)

4. まとめ

- ① アクリルの板に、アクリル樹脂より屈折率の大きい物質を薄く塗布、または、はさむことで薄膜をつくり、光の干渉が起き、アクリル樹脂は色づいて見える。
- ② 入射角による反射光や透過光の色の変化には規則性があり、干渉条件に一致する。
- ③ 薄膜の干渉による反射光と透過光は補色になる関係だが、完全に補色でない。
- ④ 薄膜の厚さを均一にできれば、色づくアクリル板が作れる。

5. 感想・今後の課題

光とは何か、そして、色が見えるとはどういうことなのかを楽しみながら研究することができた。また、身の回りの多くのものに薄膜の干渉が利用されていることを知り、光をコントロールできる科学技術のすごさを実感した。今後、薄膜の干渉による光の色の特定や、厚さが均一な薄膜作り、また光の分散と干渉の干渉の解明など、失敗することを楽しんでいきたい。

6. 参考文献

- ① Newton 著、みるみるわかる 虹の謎 光とはなにか? 高校生たちとの実験を覗いて、さらにわかりやすく! 江馬一弘
- ② Newton 著、光と色のサイエンス 自然現象や名画などの身近な例から最新のテクノロジーまで
- ③ 高校数学でわかるマクスウェル方程式 電磁気学を学ばない人、学び始めた人
- ④ <https://coating.nidek.co.jp/>
- ⑤ <https://www.toa-rika.co.jp/>
- ⑥ <http://www.techmo-syner>

竹内 潤 読者誌