

光の散乱における RGB 値の変化の傾向

静岡県立清水東高等学校
自然科学部 物理班 2 年 一ノ宮尚貴 他 5 名

1. はじめに

グルーガンのホットメルト接着剤に LED 懐中電灯の光を照射した際、光が散乱する現象が見られた。しかし、接着剤を縦にいくつか並べたり、長さを半分にしたりして光の様子を見ると、散乱のされ方が単純に 2 倍や 1/2 倍とはなっていないように見えた。

教科書では、「太陽光が大気を通過するとき、青系統の光は、滝気柱で散乱されやすい。このため、昼間はいろいろな方角から青い光が目に入り、空が青く見える。夕方は太陽光が大気を長い間通過する。このため散乱されにくい赤系統の光が他の色の光よりも多く目に届き、夕焼けとなる。」都議記述されている。一体どのような割合で散乱され、色が変わるのかについて実際の散乱の様子を数値化することで、詳細に示したいと思い、研究を始めた。

2. 散乱

散乱には大きく分けて 3 種類ある。レイリー散乱、ミー散乱、そして幾何光学的散乱である。レイリー散乱とは、光の波長より小さな粒子による散乱である。波長が短いほど散乱される割合は大きい。つまり、波長が短い青色の光は散乱されやすく、波長が長い赤色の光はあまり散乱されない。肉眼で見ても、散乱に連れて青白い光から赤い光への変化はみられる。先述のグルーガンのホットメルト接着剤においては光源から先端に向かうにつれて色が青白い光から、赤い色へ変化したため、レイリー散乱が起こったと思われる。

3. 研究目的・仮説①

以下の仮説を立てた。

仮説①: 光の透過距離が短いほど、散乱される割合が大きい。

4. 研究方法①

装置概要を図 1 に示す。クリーミーパウダー(成分: デキストリン・植物油脂・脱脂粉・乳蛋白・pH 調整剤・乳化剤)のコロイド溶液(0.05%)を入れたメスシリンダー(ϕ : 17 mm)に水底から LED 懐中電灯の光を水底に対して垂直に照射した。その散乱の様子を側面からカメラで撮影する。カメラの設定を露出時間 1/50s、フラッシュなしにして、三脚で固定した。溶液を入れる高さは 12ml のラインと 24ml のラインの 2 種類で撮影を行った。

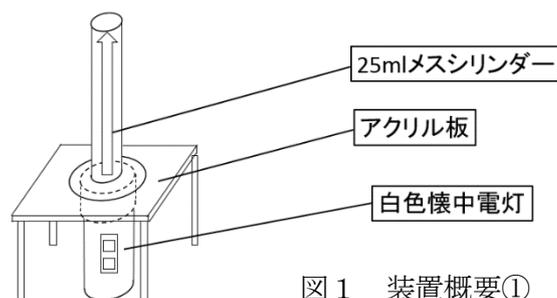


図 1 装置概要①

撮った散乱の様子の写真を数値化する上で、RGB 値を用いた。RGB 値とは光の三原色である赤、緑、青の三つの原色を混ぜて色を再現する方法で、ブラウン管や液晶ディスプレイ、パソコン、デジタルカメラなどで画像再現に使用されている。各色の強さが 0~255 の 256 個あり、255 に原色が割り当てられていて、数値が小さくなるほど薄くなっていく。また、撮った写真の RGB 値を出すために Microsoft Office Excel で VBA を用いてプログラミングを指定した線分上の RGB 値を等間隔で測定するソフトを自作した。データは、メスシリンダー上での 0.2 目盛りずつデータをとった。

5. 研究結果①

図 2~4 のグラフは、横軸に水底からの高さ、縦軸に RGB 値をとったものである。順に、

図2 クリーミーパウダー 赤 高さ

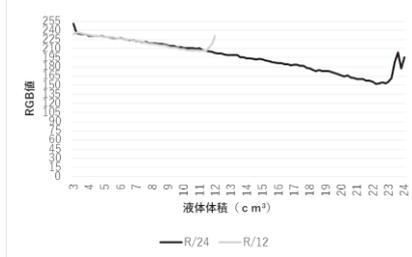


図3 クリーミーパウダー 緑 高さ

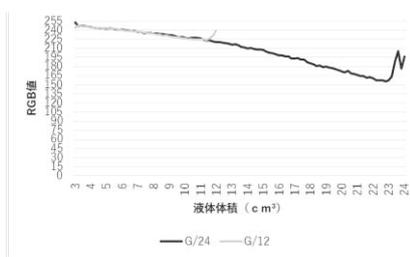
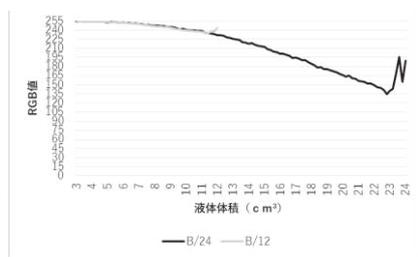


図4 クリーミーパウダー 青 高さ



赤、緑、青のグラフを表している。

6. 考察①

グラフの右端の値が急に上昇しているのは液面で光が反射し白く光ってしまっているためである。12ml のデータと 24ml のデータはほぼ一致したまま推移している。また、青、緑、赤の順番に水底での値が少なくなっている。原因は、当初は水が赤い光を吸収することが関係しているということと考えた。しかし、詳しく調べてみたところ、赤い光の中でも特に波長が長い光が吸収されること、また吸収するのはわずかな量であることがわかったため、原因とするほどの影響は無いのではないかと考えられる。そこで、分光器を用いて、使用した LED 懐中電灯に含まれる光の波長ごとの強さを調べたところ、赤・緑・青の順に光が強くなっていったため、こちらの方が正しいと考えた。また、水底から離れるにつれて、3本のグラフの差が縮まっているのが分かる。散乱につれて、波長が短い青や緑の光のほうが赤い光よりも散乱し、数値の減少が大きいからである。

12ml のデータと 24ml のデータがほぼ一致していたため、仮説①は間違っている、ということが分かった。

7. 仮説②

私たちは前述の実験より、光の透過距離による散乱の変化がないことが分かったが、メスシリンダーの太さを変えることによって、散乱にどのような変化があるのかに疑問を抱き、さらに実験を行った。そこで以下の仮説を立てた。

仮説②：液面の面積の大きさにかかわらず、散乱される割合は変わらない。

仮説②について、水底に対して垂直に置いた光源の光は、水面に向かって垂直に直進するため、液面の面積が異なっても同じ高さであれば、1つの粒子に対してぶつかる光量が等しいと考えた。なお、メスシリンダーの太さについては、 $\phi : 17\text{mm}$ 、 $\phi : 32\text{mm}$ のものを用意した。

8. 研究結果②

研究結果①と同様、横軸に水底からの高さ、縦軸に RGB 値をとったものである。図5～7は順に、赤、緑、青のグラフを表している。

図5 クリーミーパウダー 赤 太さ

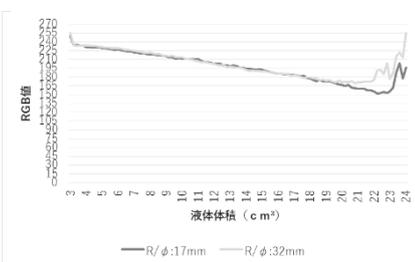


図6 クリーミーパウダー 緑 太さ

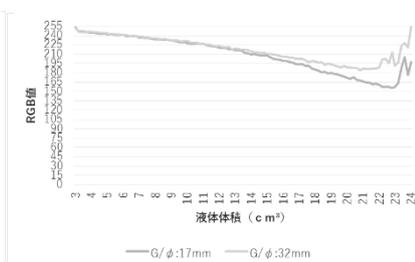
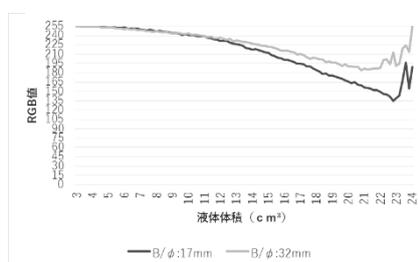


図7 クリーミーパウダー 青 太さ



9. 考察②

研究実験②のグラフからは水底からの高さが高くなるにつれて二つのグラフが分かれ、直径 ($\phi : 32\text{mm}$) のメスシリンダーの赤・緑・青の3すべてにおいて散乱される割合が大きくなっていることから、**仮説②は間違っている**ということが分かった。

10. 展開

今回の研究実験において2つの問題が発生した。

1つ目は、レイリー散乱と同時に、ミー散乱が起こっているかもしれないということである。これの問題点は、今回使用したクリーミーパウダーの粒子の大きさの測定が不可能であったために、ミー散乱をおこす大きさの粒子が含まれていた可能性があったことにある。

2つ目は、研究結果②について、メスシリンダーの細い方が散乱される割合が大きくなっているが、その原因としてメスシリンダーの底面の厚さや形が異なるためにデータに差が生まれた可能性があるということだ。そのため、条件を考え直し、測定しなおすことにした。溶液を、クリーミーパウダーから粒子の大きさが分かっており、レイリー散乱することも分かっている、石鹼水（石鹼成分：パーム核脂肪酸Na、パーム脂肪酸Na、水、パーム脂肪酸、グリセリン、香料、スクワラン、グルコン酸Na、エチドロン酸、塩化Na、酸化チタン、ペンテト酸5Na、PEG-6、BHT）に変更し、メスシリンダーをアクリル管、そしてLED懐中電灯を白熱電球に変更した。

溶液に関しては、当初は、前述の通り、グルーガンのホットメルト接着剤を使用し、1本、2本と長さを変えて測定しようと考えた。しかし、結合部に空気が入り込んだため、データに誤差が生じることが予想された。熱で溶かしてもみたが、綺麗な円柱にならない、気泡が入るといった支障が出たため、断念した。石鹼水と同様に粒子の小さい墨汁でも試したが、石鹼水での実験で見られるようなレイリー散乱は起こらなかった。

メスシリンダーをアクリル管に変更した理由としては、先述の通り、底の厚さや形が異なることに加え、側面のメモリがデータに含まれ、誤差が出ることがあったからだ。

そして、光源をLED懐中電灯から白熱電球に変更した理由は、白熱電球のほうが明るく、より遠くまで光が届くということと、赤・緑・青の三色が均等に含まれているため、より正確なデータをとることができる考えたためである。

また、石鹼水での研究実験を行う上で、仮説①、仮説②に加え、

仮説③：溶液が濃いほど、散乱される割合が大きい。

を立てて測定を行った。仮説③については、コロイド溶液内の粒子数が増加するため、より多くの光が散乱されると考えたためである。

11. 研究方法②

石鹼水（0.4%）を入れたアクリル管（φ：20 mm）に水底からLED懐中電灯の光を水底に対して垂直に照射した。装置概要を図19に示す。その散乱の様子を側面からカメラで撮影する。カメラの設定を露出時間1/50s、フラッシュなしにして、三脚で固定した。データは、アクリル管の底の方から1.0mmずつRGB値を測定した。

仮説①を検証するために溶液を入れる高さを水底から240mmと480mmの2種類で撮影を行い、仮説②を検証するために、φ：20mmのアクリル管に加え、φ：30mmのアクリル管で撮影を行い、仮説③を検証するために、0.2%の石鹼水を用意して実験を行った。

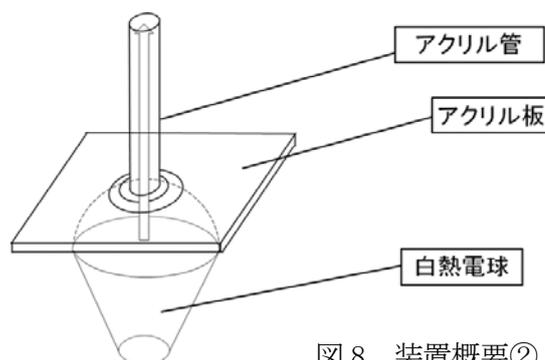


図8 装置概要②

12. 研究結果③④⑤

図20～23を研究結果③のグラフ、図24～27を研究結果④のグラフ、図28～31を研究結果⑤のグラフを示している。研究結果①②と同様に、横軸に水底からの高さ、縦軸にRGB値をとったものである。順に、赤、緑、青のグラフを表している。

図9 石鹼 赤 高さ

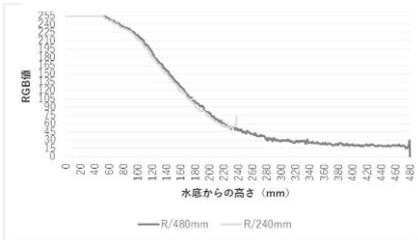


図10 石鹼 緑 高さ

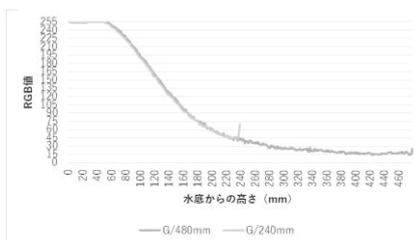


図11 石鹼 青 高さ

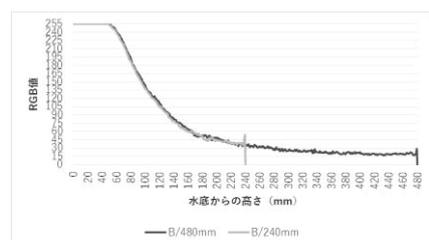


図12 石鹼 赤 太さ

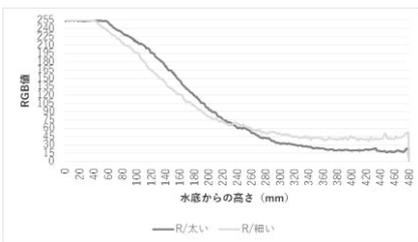


図13 石鹼 緑 太さ

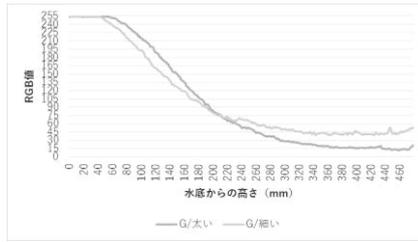


図14 石鹼 青 太さ

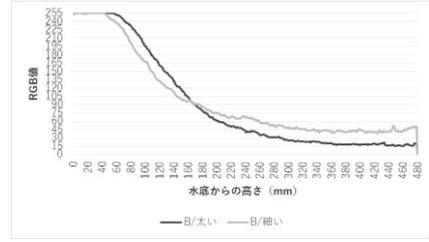


図15 石鹼 赤 濃さ

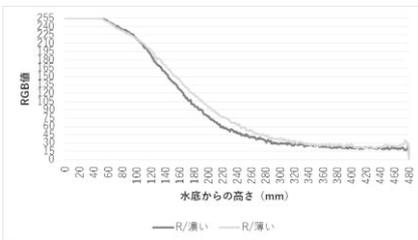


図16 石鹼 緑 濃さ

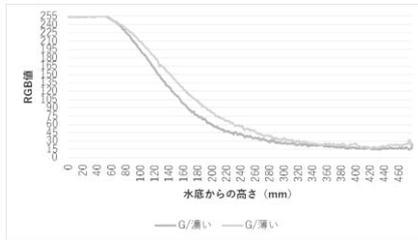
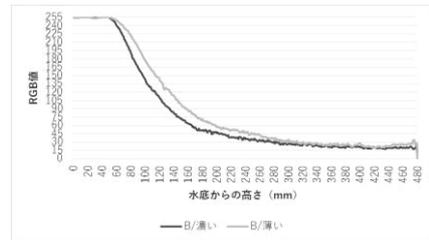


図17 石鹼 青 濃さ



13. 考察③④⑤

仮説①について、研究結果③より、赤、緑、青のどのグラフにおいても、240mmのグラフと480mmのグラフはほぼ一致していることから、同じ底面からの高さにおいて、溶液の高さにかかわらずほぼ同じRGB値が計測されたことが分かる。よって、光の透過距離に関わらず、散乱の様子は同一であるので、石鹼水のデータにおいても仮説①は間違っている事が分かった。これは、他の条件を揃え、光の透過距離を変えたとしても、光が散乱質にぶつかることで、波長の短い色から順に一定量散乱すると考えられるので、同じ距離の地点では、散乱の様子が同様になったと推測される。

研究結果②について、液面の面積がφ:20mmのグラフとφ:30mmのグラフを比較すると、水底側半分では、赤・緑・青の全てにおいて、φ:30mmのグラフのRGB値がφ:20mmのグラフを上回っている。しかし、途中で2本のグラフが交わり、水面側半分では、φ:30mmのグラフとφ:20mmのグラフの関係が逆転した。つまり、水底側半分では液面の面積が大きい方がRGB値は大きくなり、水面側半分では液面の面積が小さい方がRGB値は大きくなること分かる。φ:30mmのグラフの方が、RGB値が大きく測定されたのは、単位面積当たりの散乱量には差はないが、アクリル管が太い分、奥行きがあるために、散乱された光が重なり、測定される色が濃くなってしまったためだと考えた。しかし、途中で交わり、関係が逆転する理由はわからなかった。

二つのグラフが重なっていないため、仮説②は間違っていたと考えたが、図3 2のようにφ:20mmのグラフを右に平行移動させると、水底側半分において重なるので、その部分では散乱される割合に変化はないと考えられる。水面側半分において、φ:30mmのグラフがφ:20mmのグラフを上回った状態で、RGB値にほぼ一定の差が生じたことについては、3色を比較した際、それぞれの差の大きさには、ほとんど違いが見られないことから、φ:20mmのアクリル管が何らかの理由で明るかったことが疑われる。当初私たちは、光源の面積が細いアクリル管の直径よりも大きかったために、

アクリル管の上部を照らし、明るくなったと考えた。そのことを確かめるべく、写真のアクリル管の外側の RGB 値をとった。グラフから、原因だと言えるような大きな差がなかったために、これは原因ではないと考えられる。

研究結果③については、3色全てにおいて、濃度が濃い方より薄い方が、同じ高さにおいて RGB 値が大きく測定され、中央部に向かうにつれて差は大きくなる。その後、再び差は小さくなっている。また、波長が短い色になるにつれて、濃い溶液と薄い溶液との RGB 値の差の広がりが大きくなっている。よって、溶液の濃度が大きいほど、RGB 値の減少が激しいので、散乱の割合は大きくなっている。よって仮説③は正しいことが分かった。また、波長の短い青の方が、濃い溶液と薄い溶液との差の広がり大きいことについては、粒子の数がเพิ่มด้วย、波長の長い緑やさらに長い赤の光よりも粒子にぶつかりやすくなるため、先に散乱してしまうからだと考えられる。

14. 今後の展望

溶質や容器を工夫しながら測定をし、様々な条件下でのレイリー散乱の違いを数値化することで詳細に調べることができた。しかし、研究結果④において、途中で交差した原因が分からなかった。さらに太さの条件を変えて研究をする必要がある。

また、今回私たちは水溶液を用いて実験を行ったが、実際の青空や夕焼けは気体中で起こっている変化である。なので、気体や固体に状態の条件を変化させて散乱を起こすこともしてみたい。空気中の散乱の様子を調べることで、観測地点と太陽との位置関係と空の色を調べることで、空の汚染状況を調べる方法が分かるかもしれない。しかし、無色の気体中で散乱を起こすためには非常に長い距離を光が通過する必要があるかもしれないことや、どのような条件で実験を行うのかについては様々試行錯誤が必要だと考えられる。また、固体については、グルーガンのホットメルト接着剤の加工を工夫することで可能にできるかもしれない。また、固体であるホットメルト接着剤のほうが、細く短いものに対して今回の石鹼水よりも赤い色を示した。考察①で述べたように水は赤い光を吸収する性質が少なからずあるので、それが起因している可能性も考えた。

他にも、石鹼水はある一定の濃度を超えるとミー散乱を起こすことが分かっているので、レイリー散乱とミー散乱の境界を、濃度を変化させながら数値化したい。しかし、常温の水での石鹼の溶解度は低く、水の温度を上げると、気泡が発生し、データに支障が出てしまうため、測定は困難であると考えられる。

15. 参考文献

- ・夕焼けと青空を再現する光散乱の実験(神奈川県立泰野南ヶ丘高等学校:塚本栄世 岐阜県立各務原身がし高等学校:松尾憲生)
- ・「青空と夕日の実験器」の制作 生徒の感性を刺激し豊かにする実験教材の開発と指導法の研究
- ・白百合学園中学高等学校 教論 (日本私学教育研究所 委託研究員 馬目秀夫)
- ・Wikipedia「レイリー散乱」の項目 <https://ja.m.wikipedia.org/wiki/レイリー散乱>
- ・Wikipedia「ミー散乱」の項目 <https://ja.m.wikipedia.org/wiki/ミー散乱>
- ・Wikipedia「可視光線」の項目 <https://ja.m.wikipedia.org/wiki/可視光線>
- ・Wikipedia「水の青」の項目 <https://ja.m.wikipedia.org/wiki/水の青>
- ・Wikipedia「チンダル現象」の項目 <https://ja.m.wikipedia.org/wiki/チンダル現象>
- ・キリヤ化学「水が青く見えるのはなぜですか？」の項目 <http://www.kiriya-chem.co.jp/q&a/q41.html>