

青空と夕日と白い雲説明実験器の製作 2003.11.7

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

日本私学教育研究所委託研究員 馬目 秀夫

1 はじめに

「空はなぜ青いのか」、「夕日はなぜ赤いのか」。このような疑問に、視覚的感覚的に答えようと、平成13年度に「青空と夕日の実験器」を製作した。今回の作品は、その姉妹器として製作したものである。分光した光をアクリルマルゼン（粒子径30～90nm）入りの水槽に通すことによって、光の色による散乱の違いを、一目でわかるようにした。紫や青色の光はすぐに散乱され、赤い光は遠くまで届く様子がよく分かる（図4上）。これによって、「なぜ空が青いのか、夕日がなぜ赤いのか」を説明することができる。また、水槽の中に入れた粒子が大きいと色による散乱の違いが現れないことを、同時に示せるようにした（図4下）。すなわち、どの色も同じように散乱され、いろいろな色の光が混ざってしまい白色になる。このことによって「なぜ雲が白いのか」を説明することができる。ここではベビーパウダー（粒子径2～75 μ m）を水槽の中に入れた。アクリルマルゼンは空気分子の、ベビーパウダーは、水や氷の粒の代わりである。

2 装置の概要（横95cm、高さ50cm、奥行き32cm、重さ25kg）

装置の概要は図1の通りである。

図 1



収納時には、下の台兼収納ケース内に収納できるようにしてある。

また、上蓋をはずした内部構造は図2の通りである。

図 2



光源としては、既存の携帯用小型スライドプロジェクターを用いた。ただし、電球を100Wから300Wに取り替えたため、多少改造してある。スリットで絞った光をプロジェクターの凸レンズで平行にし、レプリカグレーティング(500/mm)を通して分光する。これを凸レンズで少し絞り、ミラーで方向を変えて、水槽に通すようにしてある。

図 3 a



b



3 実験操作

- 1) 水槽を振って、水槽内の水をよく攪拌する。
- 2) 電源プラグをコンセントに差し込み、部屋を暗くして、調光器のつまみを徐々に回していく。

4 実験内容と工夫した点

- 1) 分光した光を取り出すとき、プリズムを使うと、スペースが広くなり、装置が大きくなる。そこで、レプリカグレーティングを使用して、装置をコンパクトなものにした。
- 2) レプリカグレーティングで分光することによって、分光した光を2つ取り出すことができ、粒子の大きさの違いによって、光の散乱の仕方が違う様子を同時に示せるようにした。図4のように、アクリルマルゼンが入った上の水槽の場合、まず紫の光が散乱し、次

に青い光が散乱し、最後には赤い光だけになることが分かる。また、ベビーパウダーを入れた下の水槽の場合、どの色の光も同じように散乱されている様子が分かる。

図 4

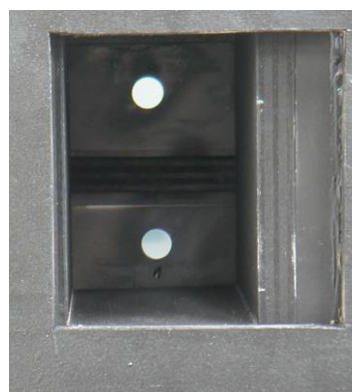


3) 側面ののぞき窓のふたをはずして中をのぞくと、上のアクリルエマルジョンを通ってきた方は赤く見え、下のベビーパウダーを通ってきた方は白く見える (図 5 c)。

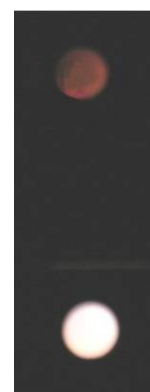
図 5 a



b

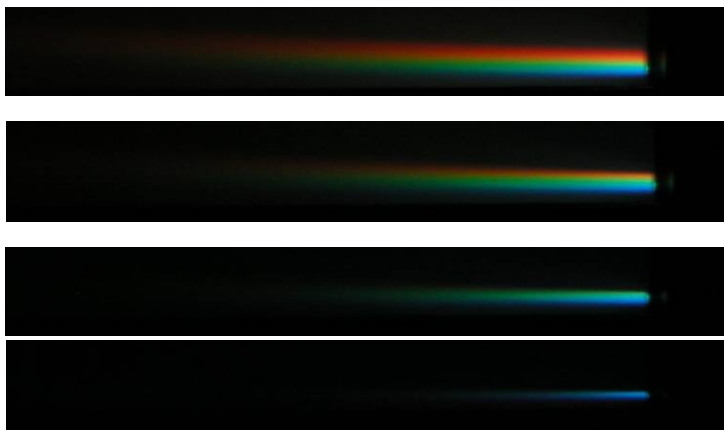


c



4) 可動スリットを爪先で手前に引き出し、上下に少しずつ動かすことで、色の光を少しずつ取りだし、色による散乱の違いを見やすくした。また、可動スリットは上まで持ち上げ、奥に軽く押し込むことによってロックできるようにした。

図 6 a



b



- 5) 上の水槽、下の水槽のどちらか一方だけ見たいときには、遮光カードをそれぞれの水槽の右側面に差し込むようにした (図7)。
- 6) 水槽を取り出しやすくした。水槽を奥に押し込み、水槽の下の板の出っ張り部分に指をかけて、板ごと引き出す。入れるときには、板の出っ張り部分に水槽をあてて、板ごと差し込む (図8)。

図 7

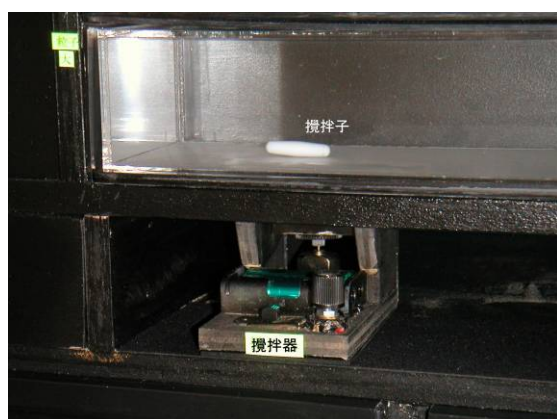


図 8

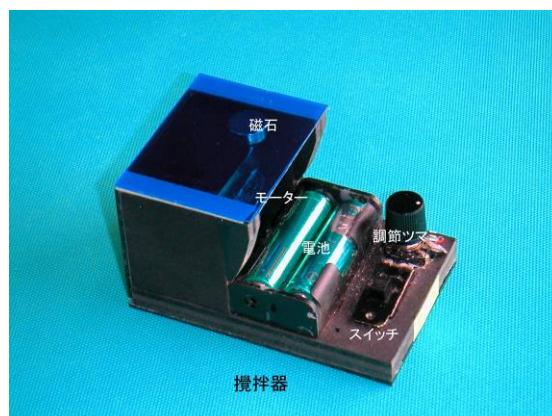


- 7) ベビーパウダーの場合には、粒子がすぐに下に沈んでしまうため、水槽内に攪拌子を入れ、下から攪拌器で攪拌できるようにした (図9)。水を攪拌するには、攪拌器のスイッチを入れ、ツマミを回して回転数を調節し、攪拌子を回転させる。

図 9 a



b

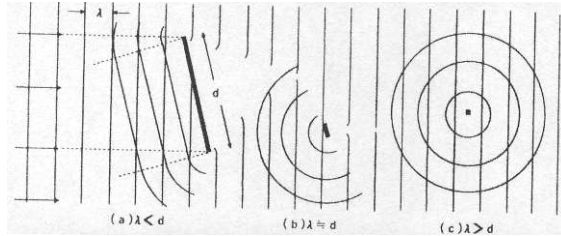


5 粒子の大きさと光の散乱

一般に粒子による光の散乱については、粒子の大きさ (d) と光の波長 (λ) の比によって散乱の性質が大いに異なってくるという特徴がある。

1) 粒子の大きさと散乱強度

図 1 0



- (a) 波長 λ に比べて散乱体のサイズ d が大きい。
- (b) 波長 λ と散乱体サイズ d が同等。
- (c) 波長 λ に比べて散乱体のサイズ d が十分小さい。

(参考文献 2 より)

① 物体が大きい場合 (mm程度以上)

幾何光学的に反射・散乱され、波長依存性はなく、物体固有の色または吸収を反映して起こる。

② 物体の大きさが光の波長程度の場合 (μm 程度)

回折効果が大きくなり入射した光を周りに散乱させる。この場合も、可視領域における散乱の波長依存性はほとんどなく、可視全域をほぼ一様に散乱する。その結果、これらの散乱光は物体固有の色とは関係なくほぼ白く見える。水蒸気(湯気)や雲が白く見えるのもこのためである。雲は水滴(粒子径が $1\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$)が高密度に集合したものである。また、多くの薬の錠剤はこのような微粒子を固めたものなので見た目には白い色をしている。ここで用いたベビーパウダーも、この範囲の粒子径である。

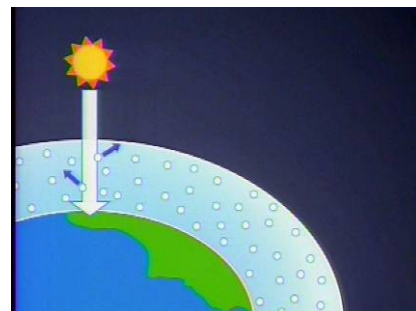
③ 物体の大きさが光の波長に比べて充分小さい場合 (100nm程度以下)

物体の大きさが光の波長の10分の1以下の場合の散乱をレイリー散乱といい、強い波長依存性を持ち、散乱強度は波長の4乗に反比例する。可視光の場合、青色の光(波長約 400nm)は赤色の光(波長約 800nm)に比べて、16倍も散乱強度が大きいことになる。すなわち、それだけ青い光は散乱されやすいことになる。

空気分子の大きさは、 0.4nm 程度なので、その散乱はレイリー散乱になる。空が青いのはこのためである。また、夕日が赤く見えるのは、夕方は太陽の光が通ってくる空気層の長さが、昼に比べて長いため、空気分子によって散乱されない残りの光(波長の長い赤い光)を見ているからである。



図 1 1 a



b

昼間の太陽が少し黄色味を帯びた白色に見えるのは、太陽からの光が、紫や一部の青い光が散った状態で目に届くからである。(図1 1)

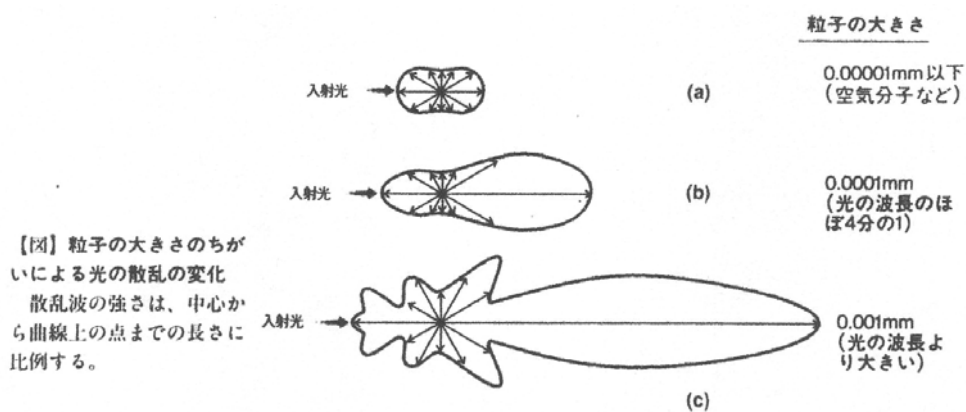
空が紫ではなく青く見えるのは、太陽の光の中で紫よりも青の割合の方が大きいことと、わたしたちの目が持っている色を感じる神経(受容体)が赤・緑・青にあり、紫を感じにくいためである。

この実験で用いたアクリルエマルジョンの粒子径も30~90nmで、この範囲にある。

2) 粒子の大きさと散乱角度

散乱光は粒子を中心にした球面波として発生するが、散乱強度は角度依存性を示し、図1 2のように粒子の大きさによって異なる。

図1 2



(参考文献3より)

空気分子によるレイリー散乱は比較的等方的な散乱をするが、塵・煙などの比較的大きな粒子による散乱は前方への散乱が強い。煙を散乱光で見ると白いが、透過光で見ると赤味を帯びているのはこのためである。

(図1 3) 空気中に粒子が多くあるとき、夕日の赤さが際立つのもこれで説明できる。

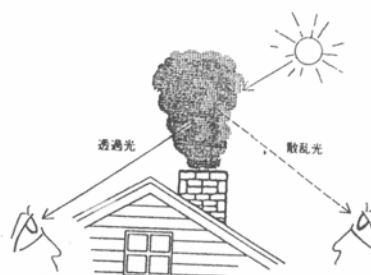


図1 3

空気分子(レイリー散乱をおこす)はずっと高い空までであるのに対して、水滴や塵(前方散乱をおこす)は低層にしかない。そのため地球の大気層の下層を斜めに差し込んでくる夕方の太陽光がレイリー散乱によるほど暗くならないのは、レイリー散乱の光だけでなく、比較的大きな粒子による前方散乱がきいて、太陽そのものまたは太陽の周辺の空は特に赤色が強調されるのである。

6 なぜ青い光は散りやすく、赤い光は散りにくいのか

青い光が赤い光よりもなぜ散乱されやすいのかは大変難しい問題である。

よく青い光は波長が短いので粒子にぶつかりやすく、赤い光は波長が長いので粒子を乗り越えやすいからという説明があるが、これは正しくはない。光の波長は空気分子の大きさに比べて1000倍くらい大きいので、たとえ、波長の短い光が粒子にぶつかったとしても、海の波に針1本たてたようなもので、ほとんど影響ない。

* 可視光の波長 400 nm～800 nm 空気分子の大きさ (酸素 0.364 nm、窒素 0.378 nm)

波長ではなく振動数が問題である。空気分子(酸素や窒素の分子)の共振振動数は紫外線部(200 nm附近)にある。太陽の光が空気分子に当たると、共鳴振動数附近の光が吸収(基底状態→励起状態)され、すぐ放出(励起状態→基底状態)される。放出される際には四方八方に放出される。これが散乱光である。そのため進行方向の光は弱くなる。

では共鳴振動数以外の光はどうかというと、吸収・放出過程の時間が非常に短いため、エネルギー・時間の不確定性原理により、エネルギー(振動数)に幅がでてくる。計算によると、散乱光の強度 I_s およびその振動数 ω と入射光の強度 I_i およびその原子の共振振動数 ω_0 の間には

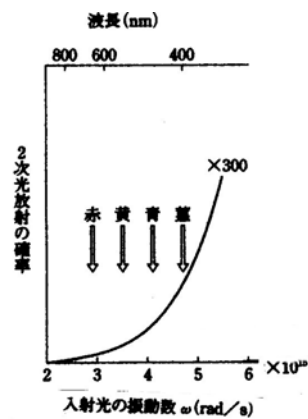
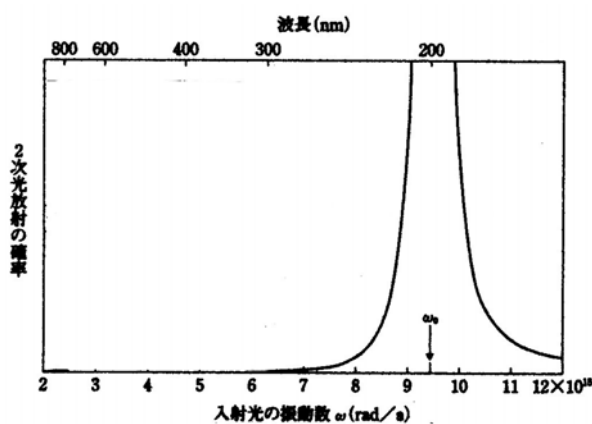
$$I_s \propto I_i \omega^4 / (\omega_0^2 - \omega^2)^2$$

という関係が成り立つ。

このように、入射光の振動数が空気分子の共振振動数に等しくないときでも、入射光は原子と反応して、散乱光をつくる。(図14)

図14 a

b



(参考文献4)

図14aは図14bの 5.5×10^{15} 以下の部分を300倍に拡大したものである。図14bで見ると、青色の光の方が赤色の光より10倍近くも強い強度で散乱されていることが分かる。したがって、空気からの散乱光には青色の光は赤色の光の10倍近くも含まれ、このため、空は青く見えるのである。

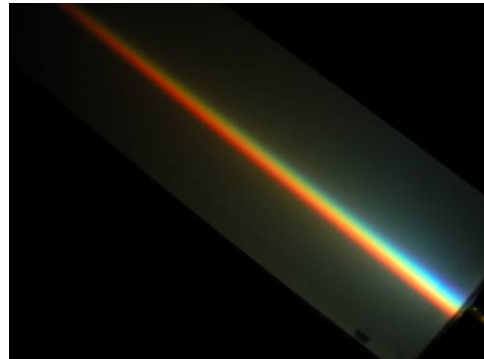
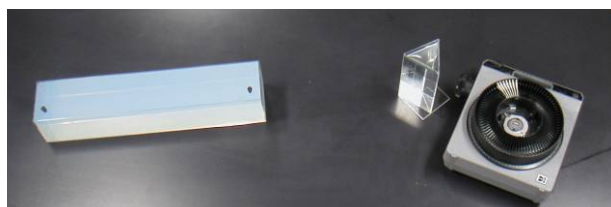
もう一つ、空が青く見える原因がある。それは空気分子が乱雑に配置されているからである。もし結晶のように原子が規則正しく配置されているならば、入射した光はそれぞれの原子からの散乱光が干渉して、透過光と反射光になって屈折の法則と反射の法則に従う特定の方向のみに進み、それ以外の方向には現れないことになる。

以上のように、空が青く見えるのは、空気をつくる分子の共鳴振動数が紫外部にあることと、空気分子が乱雑に配置されているためであるということが出来る。

7 おわりに

「青空と夕日の実験器」(平成13年)を製作後、光の色による散乱の違いを直接目に見えるようにできないかと考えた。最初色フィルターを使って実験したが、使用したフィルターが単色光ではなく、また単色光のフィルターというものが見つからずうまくいかなかった。そこでプリズムを使って分光し、それをアクリルエマルジョン入り水槽に通したところ、うまく光の色による散乱の違いを見ることができた。(図15)

図15



これをコンパクトなセットにするため、プリズムの代わりにレプリカグレーティングを使用し、「なぜ雲は白いのか」を合わせて説明できるようにしたのがこの作品である。製作に当たっては、スリットの向き(可動スリットとの関係)と位置、凸レンズの焦点距離(絞りすぎず広がりすぎず)、ミラーの向きなどの調整に苦労した。

【参考文献】

- 1「青空と夕日の実験器」の製作 馬目秀夫 日本私学教育研究所紀要第38号 2003年3月
- 2「見て・触って・考える光学のすすめ」光学のすすめ編集委員会 ㊦トピア社 平成9年10月
- 3「空の色と光の図鑑」齊藤文一・武田康男 草思社 1995年第1刷発行
- 4「光の物理」光はなぜ屈折、反射、散乱するのか 小林浩一著 東京大学出版会 2002年11月

<http://www6.plala.or.jp/maamu/>