

「青空と夕日の実験器」の製作

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

2001. 10. 27

白百合学園中学高等学校 教諭

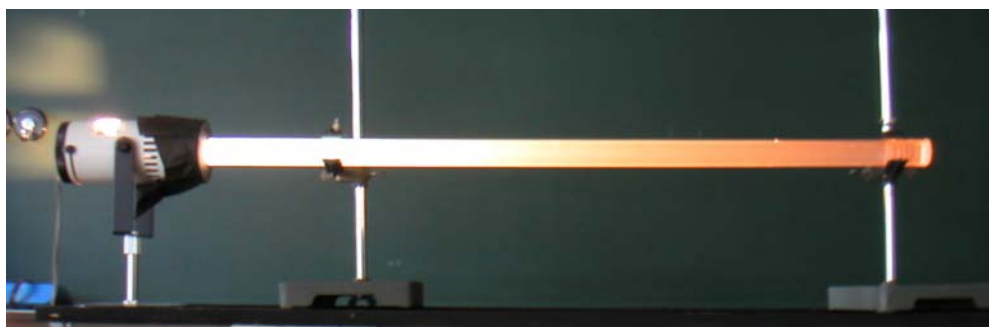
日本私学教育研究所 委託研究員

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」このような疑問を誰でも一度はもったことがあるであろう。理論的な説明はかなり難しいが、視覚的・感覚的な説明はそれほど難しくはない。従来、図1のように水を満たしたアクリル管（直径3cm長さ1mほど）にアクリルエマルジョンを少し入れ、これに管口方向から光源装置で平行光線を入射して実験し、説明していた。

図1



しかし、生徒は「夕日がなぜ赤いのか」はある程度理解できても、「なぜ空が青いのか」ということは、いまひとつ納得できないようであった。そこで、角形水槽（10cm×10cm×50cm）を使い、少し強力な懐中電灯を用いて実験したところ、懐中電灯は自由に動かせるので、太陽の動きが出せ、太陽が上にあるときには青空が、太陽が水平近くになると赤い夕焼けや夕日が見えることが理解しやすくなった。これを予備実験とし、太陽をモーター駆動にして、もう少し扱いやすく見やすいように工夫したのがここに報告する「青空と夕日の実験器」である。この作品は今年度（平成13年度）全日本教職員発明展で特許庁長官賞を受賞した。

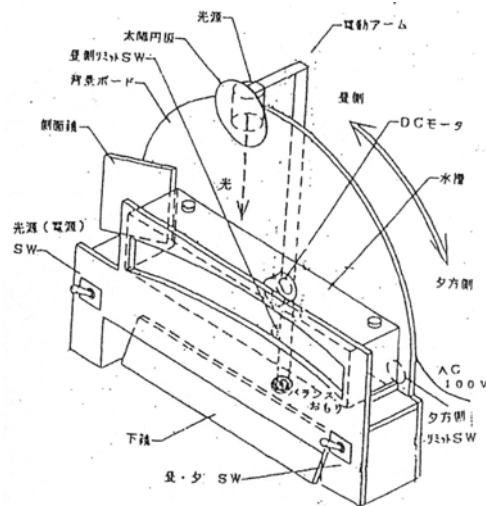
2 装置の概要と実験方法

装置は図2、図3の通りである。

図2



図3



部屋を暗くし、電源スイッチを入れる。太陽が真上にあるとき、空（水槽の水）は青く（図4）、下の鏡を上げて太陽（電球）を見ると、太陽は少し黄色味を帯びた白色で、まわりの空は青い。昼タスイッチを夕方の方に押し続けると、太陽は徐々に傾き（スイッチをはなすとその位置で止まる）、太陽が地平線すれすれになると、リミッタ・スイッチで止まる。このとき、太陽からの光は長い空気層を通過する間に、波長の短い青い光から散乱され、黄色・橙色と次々に散乱されて、赤い光が残り、人の目に届くのはほとんど赤い光だけになることが分かる（図5）。左側の鏡を覗き込むと、赤い太陽（電球）が見える。これが夕日である。

再び、昼タスイッチを昼側に押し続けると、太陽は真上に上がって止まる。昼は太陽の光が通過する空気層は薄いので、青い光だけが散乱され、それが目に入ってくるので、空は青く見える。太陽を見ると、青い光が少し少なくなった光を見ているので、少し黄色味を帯びた白色に見えるのである。

図4 太陽が真上にあるとき



図5 太陽が水平になったとき



3 使用した主な材料

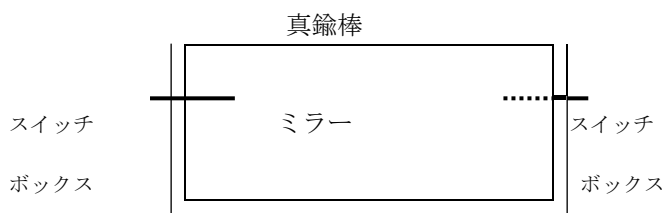
この実験で使用しているアクリルエマルジョンは、粒子径が0.03~0.09ミクロン(30~90nm)程度のものである。後で述べるが、このような現象を見るためには、光の波長の10分の1以下の粒子が必要である。アクリルエマルジョンがなければ、フローリング用のワックスでもよい、この中にはアクリルエマルジョンが入っている。ただワックスの場合、他の物質も入っているため、1日2日置いておくと沈殿物ができるので、液を作り替える必要がある。しかし使用するワックスの量はほんのわずかで、費用の点でも、手間の点でもワックスで問題はない。

透明アクリル水槽(600×120×120mm、特注したが中村理科の水圧実験用水槽C15-5551を加工してもよい)、シンクロナスマーター(逆回転可能なもの)、光源(ハロゲン電球USHIO JDR110V-75WLN/K・ソケット)、切り替えスイッチ(3回路2接点)、トグルスイッチ(光源用、1個)、リミットスイッチ2個、光源用アーム(業者に加工してもらった)、バランス用おもり、アクリルミラー大(590×180mm)、アクリルミラー小(130×130mm)、太陽円盤(アクリル板を加工)、木材(シナ合板、図2および図3のように加工してもらった)、その他配線コード類

4 製作の概略

- ・水槽上部に2カ所直径10mm程度の穴をあけ、水およびアクリルエマルジョンの注入・排出口とした。普段はゴム栓で塞いでおく。
- ・木材部分の主な部分は図を元に、業者に切ってもらい、ボンドで接着した。
- ・太陽用のランプのカバーは、缶コーヒーの空き缶を加工して作った。
- ・ミラーは補強のため裏にベニヤ板をはった。左側のミラーはスライド式にし、下のミラーは、常時太陽が見える状態にしておくとまぶしいので、図6のようにつり下げ式にした。

図6



- ・木部前面水槽前に、模型用の人物・樹木などを配置することで、実感を出した。

5 粒子による光の散乱（現象の原理）

このような現象はイギリスの物理学者 J. W. レイリーによって解明され、レイリー散乱とよばれる。レイリー散乱は、散乱を起こす粒子の粒径が入射波の波長に比べて十分に小さく（その目安は約 10 分の 1 以下）、散乱体が無秩序に分布し、その密度にゆらぎがあるときに起こる現象であるということである。この散乱は波長依存性を持ち、散乱量は、そこに当たった光の波長の 4 乗に反比例するという。そこで青色の光（波長約 400 nm）の散乱の度合いは赤色の光（波長約 800 nm）の散乱と比べて 16 倍も大きい。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、空気分子によって散乱されない残りの光を見ているからである。

電磁波の散乱の理論から、レイリー散乱の単位体積当たりの散乱強度 I は、次の式で与えられる

$$I = \frac{k N (n - 1)^2}{\lambda^4}$$

ここで、 k は比例定数、 N は単位体積当たりの粒子数、 n は粒子の屈折率、 λ は波長である。

可視光線領域での空気の屈折率 n は、標準状態では $(n - 1) \approx 2.78 \times 10^{-4}$ で、 $N = 2.69 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ では、密度が高度とともに指数関数的に変化する大気の等温模型を用いて計算すると、大気の頂上での入射日光の強度に相対的な地球表面での強度は、太陽が天頂にあるときと、日の出・日の入りにあるときでは、各波長で次のように評価できる。

色	天頂	日の出・日の入り
赤 (650 nm)	0.96	0.21
緑 (520 nm)	0.90	0.024
紫 (410 nm)	0.76	0.000065

これらの数字は日の出・日の入り時に残存する太陽光が赤色にずれていることをはっきり示している。

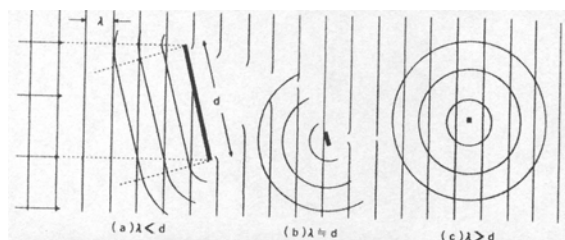
（参考文献 8 p 518）

では、空がより短い波長の紫色に見えないのはなぜかということ、太陽光の中で紫よりも青の割合の方が大きいことと、人間の目の受容体が赤・緑・青にあり、紫に対する感受性が低いためである。

従来、「青空は空気中に浮遊する塵や水滴に太陽光があたって散乱するため」であるとされていたが、塵や水滴などの微粒子は、青空の本当の成因ではなく、かえって塵などのない高層の大気ほど青さが増すということが、レイリーの理論によって裏づけられた。実際、高山で見る青空は地上で見る青空より青い。

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。（図 7）

図 7



- (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 3 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 (μ m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。

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。

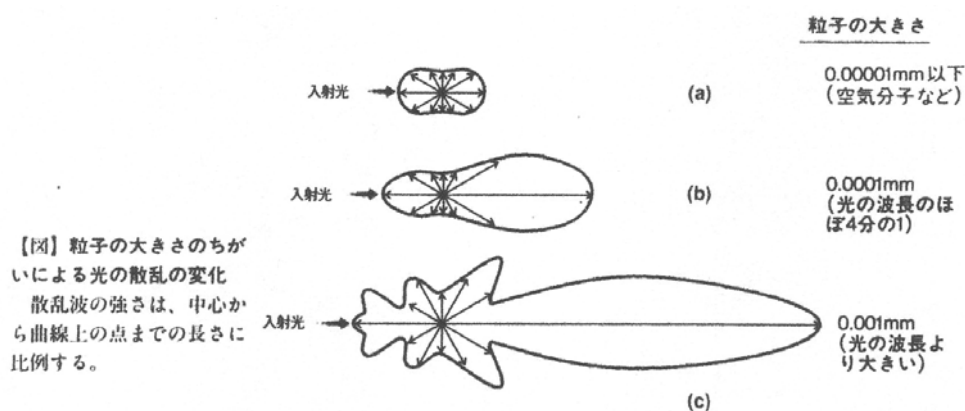
③ 物体の大きさが光の波長に比べて充分小さい場合 (100 nm程度以下)

こ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。

一般に、幾何光学的散乱を除いた散乱現象をチンダル現象という。入射波と散乱波の波長が同じである散乱(弾性散乱)は散乱の効率がよく、自然界で私たちが主に見かけるものであるが、高感度の装置を使うことによって散乱波の波長が変化する非弾性散乱も観測できる。非弾性散乱の代表的なものがラマン散乱である。

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8のように粒子の大きさによって異なる。

図 8



【図】粒子の大きさのちが
いによる光の散乱の変化
散乱波の強さは、中心か
ら曲線上の点までの長さに
比例する。

(参考文献 2 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9) このように散乱効果は光源(主に太陽)、散乱体、観測者の間の相対的な位置関係に依存している。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。

空気分子(レイリー散乱をおこす)はずっと高い空まであるのに対して、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。

レイリー散乱のもう一つの特徴は、偏光特性があることである。図10に示すように、太陽に対して直角方向(90°)の空からの散乱光は、P偏光(平行成分)強度は0となり、100% S偏光(垂直成分)のみとなる。

図9

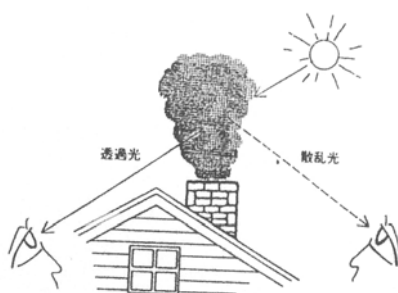
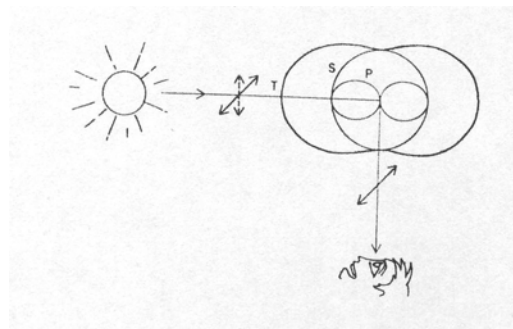


図10



(参考文献3より)

光がなぜ気体分子によって散乱されるかという、光(電磁波)が気体分子にあたると、原子内にある電子を振動させ、この振動によって新たな電磁波が放出される。これが散乱である。可視光線の範囲では、入射した電磁波と散乱される電磁波の振動数(波長)は変わらない。波長の短い青い光は振動数が大きい、すなわちエネルギーが大きい。したがって、青い光が気体分子に当たると原子内の電子を激しく振動させ、再び同じ振動数をもつ青い光が強く放出されることになる。このように無数の気体分子から青い光がそれぞれバラバラに散乱される。ところが、このたくさんの気体分子からバラバラに散乱した青色の光を平均すると、お互いに打ち消し合いプラス・マイナスゼロになってしまう。これでは空は暗くなり、青空は見えなくなってしまう。それではどうして打ち消し合わないで、空が青く見えるのかというと、実際は気体分子がそれぞれまったくでたらめな動きをしているため、均一なバラバラ状態ではなく、絶えず大気密度にムラ(ゆらぎ)が生じているため、散乱された光はお互いに打ち消し合うことなく散乱されることになるからである。

6 おわりに

「あーきれいだな」、「ふしぎだな」、「なぜなんだろう」。このような感動や疑問を大切にしたいと日頃考えてる。この「青空と夕日の実験器」も、このような中から生まれたものである。だれでも一度は「なぜ空は青いのだろう、夕日はなぜ赤いのだろう」と疑問に思ったことがあるであろう。この作品は、その疑問に対して視覚的実感的に答えようとしたものである。青から黄色、橙と水槽の水の色が徐々に変わっていくようすは大変美しく、ふしぎを感じる。「なぜ青い光が散乱され、赤い光が残ってくるのか」、「色とはなんだろうか」、「海の水が青く見えるのも同じだろうか」、等々次々に疑問が広がり科学の深淵に入っていく。この作品が、授業や科学館・博物館等で使われ、子供たちに科学の楽しさを伝える一助になれば幸いである。

最後に、アクリルエマルジョンを快く提供していただいた日本合成ゴム株式会社の長嶋三省氏、参考資料をお貸しいただいた元慶応大学教授の渡辺彰先生にこの場を借りて謝意を申し上げます。

[参考文献]

- 1 「夕焼けの実験」 塚本栄世 高校理科研究 大日本図書 平成9年1月
- 2 「空の色と光の図鑑」 斉藤文一・武田康男 草思社 1995年第1刷発行
- 3 「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 ㊦トコナ社 平成9年10月4日「太陽からの贈りもの」 虹・ハロ・光輪・蜃気楼 Robert Greenler著 小口高・渡邊堯共訳 丸善株式会社 平成4年7月
- 5 「光と色の100不思議」 左巻健男監修 桑嶋幹・川口幸人編著 東京書籍 2001年8月
- 6 「理論電磁気学」 砂川重信 紀伊国屋書店 1965年 p191~202、p247~248
- 7 「物理学総論2 電磁気・電磁波」 大槻義彦著 学術図書出版社 1985年12月 p247~255
- 8 「電磁気学(上)」 J. D. ジャクソン著 西田稔訳 吉岡書店 1994年5月 p512~522
- 9 「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

[ホームページに戻る](#)