

身近なコロイド水溶液を用いた夕焼け現象の再現実験 —濃度別スペクトル計測とその評価—

松井 麗樹・三野 弘文
千葉大学国際教養学部

Experiment to explain the sunset phenomenon
using familiar colloidal solutions:
Spectrum measurements by concentration and the evaluations

MATSUI Kazuna and MINO Hirofumi

要旨

身の回りにあるコロイド溶液を用いて身近な自然現象である夕焼けを再現する実験は多くの小中学校や実験教室で行われている。しかしこの実験のほとんどがその対象を小中学生としているために夕焼け現象の原理説明としては簡易的になされているものが多い。実験に用いるコロイド溶液には入手のしやすさから牛乳や乳酸菌飲料が選ばれることが多いが、本研究ではアクリルエマルジョンを含むフローリングワックスも併せた3種類のコロイド溶液を用いてそれぞれ夕焼けの再現実験を行った。撮影した写真や測定したスペクトル強度、その変化率といったデータをもとに3種類のコロイド溶液の粒子サイズや密度の違いが散乱にどのような影響を与えるかを考察した。その結果3種類の中で粒子サイズの最も小さいフローリングワックスにおいてレイリー散乱が全体の散乱に寄与する割合が高く、夕焼けの再現性が高いことが分かった。

キーワード

夕焼け、コロイド、レイリー散乱、ミー散乱

1. 序論

夕焼けの再現実験は牛乳や乳酸菌飲料を適量水槽の水の中に分散させることで簡単に行うことができるため、小・中学生向けに多くの実験教室で行われている。この実験によって光の波長や粒子の大きさごとに異なる散乱の仕方をするを視覚的に捉えることができる。

夕方は太陽から入射する光が地表に届くまでの距離が昼間と比べて長くなる。短波長の青い光 (460~500 nm) は昼間よりも多く散乱されることにより地表にはわずかにしか届かない一方で、昼間にはほとんど散乱することのない長波長の赤い光 (610~780 nm) も大気中の微粒子にぶつかる割合が増え、散乱されたのち地表に到達する。しかし赤色光の散乱は空全体まで広がらずに太陽光の進路周辺にとどまるために、夕方の空は太陽とその周辺がぼんやりと赤く見える。これらの現象は、光が光の波長よりも粒径の小さい粒子にぶつかったときに起こる散乱 (レイリー散乱^[1]) で説明される。また散乱されて太陽周辺に散らばった赤い光は雨粒などの障害物がないことや、雲が空全体に広がっていること等の条件が満たされるとき、雲によって更に散乱されることがある。このとき空全体が赤くなる夕焼けが見えることもある。雲粒の大きさはおよそ $3\ \mu\text{m}$ ~ $10\ \mu\text{m}$ と赤色光の波長よりも大きい。このように光の波長よりも粒径の大きな粒子に光がぶつかることで散乱される現象をミー散乱^[1]という。レイリー散乱では短波長の光であるほどより多く散乱されるのに対し、ミー散乱は波長に依らずどの波長の光も同じように散乱されるという違いもある。

この夕焼け現象を再現する実験には身近なコロイド水溶液が用いられる。水と溶液を混合させ、水槽やペットボトルの端から白色光を入射し、もう一端から出てくる光の色を観察する。子供向けに行われるこの実験で用いる溶液には多くの場合手に入りやすさから牛乳や乳酸菌飲料が用いられることが多いが、近年アクリルエマルジョンを含むフローリングワックスでも代替可能であり、且つ夕焼け現象をより再現できることが示されている。本研究ではコロイド水溶液として牛乳・乳酸菌飲料・フローリングワックスの3種類を用いた実験をそれぞれ行い、濃度別に光のスペクトル計測を行った結果に基づいて光の散乱と粒子サイズ・密度の関係について説明する。

2. 実験

実験では前述の通り3種類の溶液を用いて水溶液の入った水槽を通して出てくる光のスペクトル計測を行った。実験で用いたものと手順は以下の通りである。

水1.5 Lを入れたアクリルの水槽にコロイド溶液を滴下しガラス棒でかき混ぜる。照明や太陽光などほかの光が入らないように暗室で水槽にLED白色光を入射させ、水槽を通過して出てきた光のスペクトルをファイバーにつないだCCD付分光器で測定する (図1)。

この操作を牛乳およびフローリングワックスは0.1 ml、カルピスウォーターは1 mlずつ水槽に滴下しガラス棒でかき混ぜながらスペクトル強度が水のみ時点から比較して1000分の1になるまでそれぞれ繰り返す。用いた溶液は、Ⅰ. 株式会社リンレイ床専用フローリングワックス、Ⅱ. 榛名酪連成分無調整牛乳（生乳100%）、Ⅲ. カルピス株式会社カルピスウォーターの3種類（以下ワックス、牛乳、カルピスと表記）であり、その平均粒子径とスペクトル強度が1000分の1未満になった時点での滴下量（最大滴下量）を以下の表にまとめる。なおこの測定は積分時間を増やしながら行い、スペクトル強度が初めの1000分の1未満から変化しなくなるまで繰り返す。

表 1. 各コロイド溶液の平均粒子径と最大滴下量

	ワックス	牛乳	カルピス
平均粒子径	170~200 nm	520 nm	250 nm
最大滴下量	9.0 ml	1.2 ml	115 ml

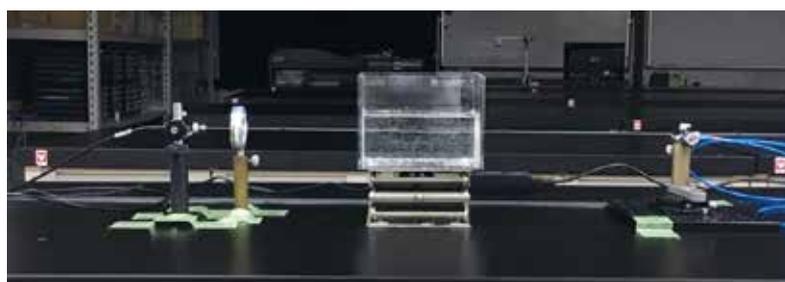


図 1. 実験装置図と実際の写真

3. 結果と考察

図 2 は 3 種類の溶液を水槽の中の水に分散させて光を通したときの変化の様子である。牛乳を水に滴下して光を通したとき、滴下量を増やしていくとすぐに白く濁りはじめ光が水槽の端まで届かなくなった。これは牛乳の粒子径が3つのコロイド溶液の中で最も大きいことが原因であると推測できる。

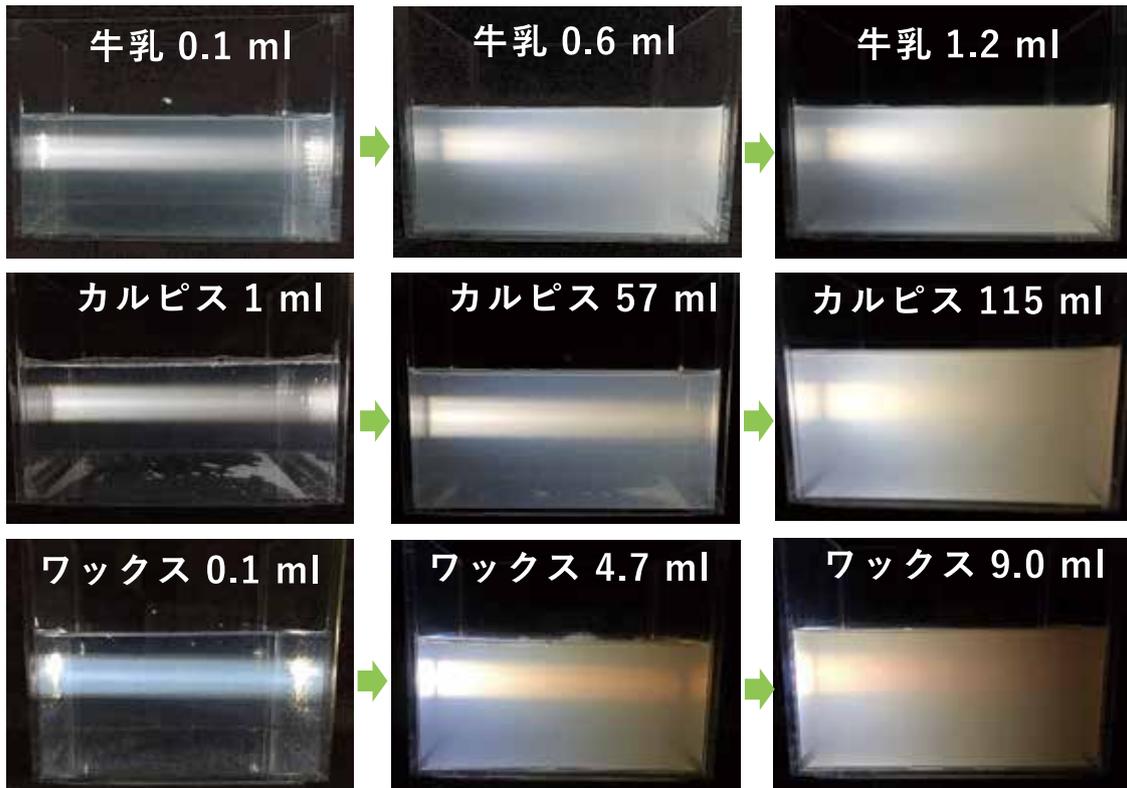


図2. コロイド溶液を滴下した水槽を通過する白色光の写真

次にカルピスを水に加えて光を通した場合について見てみると、57 mlのカルピスを滴下した時点で水槽の左半分がぼんやりと黄味がかっているのが観察できた。最大滴下量である115 ml時点においても同じように見ることが出来る。カルピスについてはこの3種類の溶液の中で粒子サイズは2番目であるにも関わらず、最も滴下量が多かった。このことから光の散乱には粒子径だけではなく溶液中の粒子の密度も関係していると理解でき、カルピス1 mlに含まれるコロイド粒子の密度は他の溶液1 mlより少なかったと推測される。実際の夕焼け現象における大気中の微粒子が再現実験ではこのコロイド水溶液に含まれるコロイド粒子にあたり、散乱のされ方はその微粒子の大きさと個数に依存すると考えられるが、ここで注意すべきは大気中の微粒子とこの実験で用いられる溶液中の粒子の大きさや密度は同様でないという点である。実際に太陽から入射する光は大気圏内においておよそ1000 kmという距離を進む過程でこれらのコロイド粒子よりもはるかに小さい空気中の微粒子にぶつかり夕焼けをつくる。この現象を水槽の中で再現するためには短距離で光を十分に散乱させる粒子の大きさと密度がなくてはならないということがわかる。

3つ目のワックスを滴下した溶液では3種類の中で最も赤みの強い光が観察された。図3の3枚の写真はそれぞれの溶液を通して得られた同程度の強度の光を紙に当てて撮影したものである。赤みの強さが牛乳⇒カルピス⇒ワックスの順に強くなっていることが分かる。

ここで3種類の溶液をそれぞれ通して得られた光スペクトルの変化について調べた結果



図3. 各溶液を通過した光を紙に当てたときの様子

を示す。水のみで計測した時点でのスペクトル強度とワックス滴下量を変化させた場合のスペクトル強度を図4に示した。図より短波長が長波長と比べてより顕著に減少しているのが分かる。

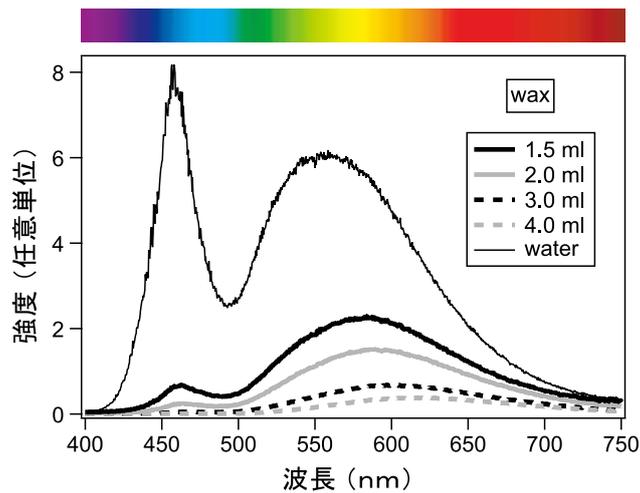


図4. ワックス滴下量の違いによるスペクトル強度

この変化の度合いをより読み取りやすくするため、スペクトルの強度比を縦軸にとったグラフ図5を作成した。なおここにおける強度比とは [ある量の溶液を滴下した際の光スペクトル] ÷ [水のみで計測した光スペクトル] の値を指す。

図5 (a) (c) (e)に示すワックス、カルピス、牛乳のスペクトル強度比を比較してみると、いずれの滴下量でも短波長側から長波長に強度比が増大する傾向が見られるが、ワックスの場合は勾配が他の二つよりも急であり、青い波長の光と赤い波長の光の散乱度合いに最も差があることがわかる。さらに各溶液のスペクトル強度比を波長ごとに切り取って横軸を滴下量とした図5 (b) (d) (f)を見てみると、どの溶液も450 nmと700 nmを比較すると短波長のほうがより散乱されやすいことが明確に示されている。図6は450 nmの強度比が0.1、0.01、0.001になった滴下量で、他の波長域での強度比を3種類の溶液で比較した結

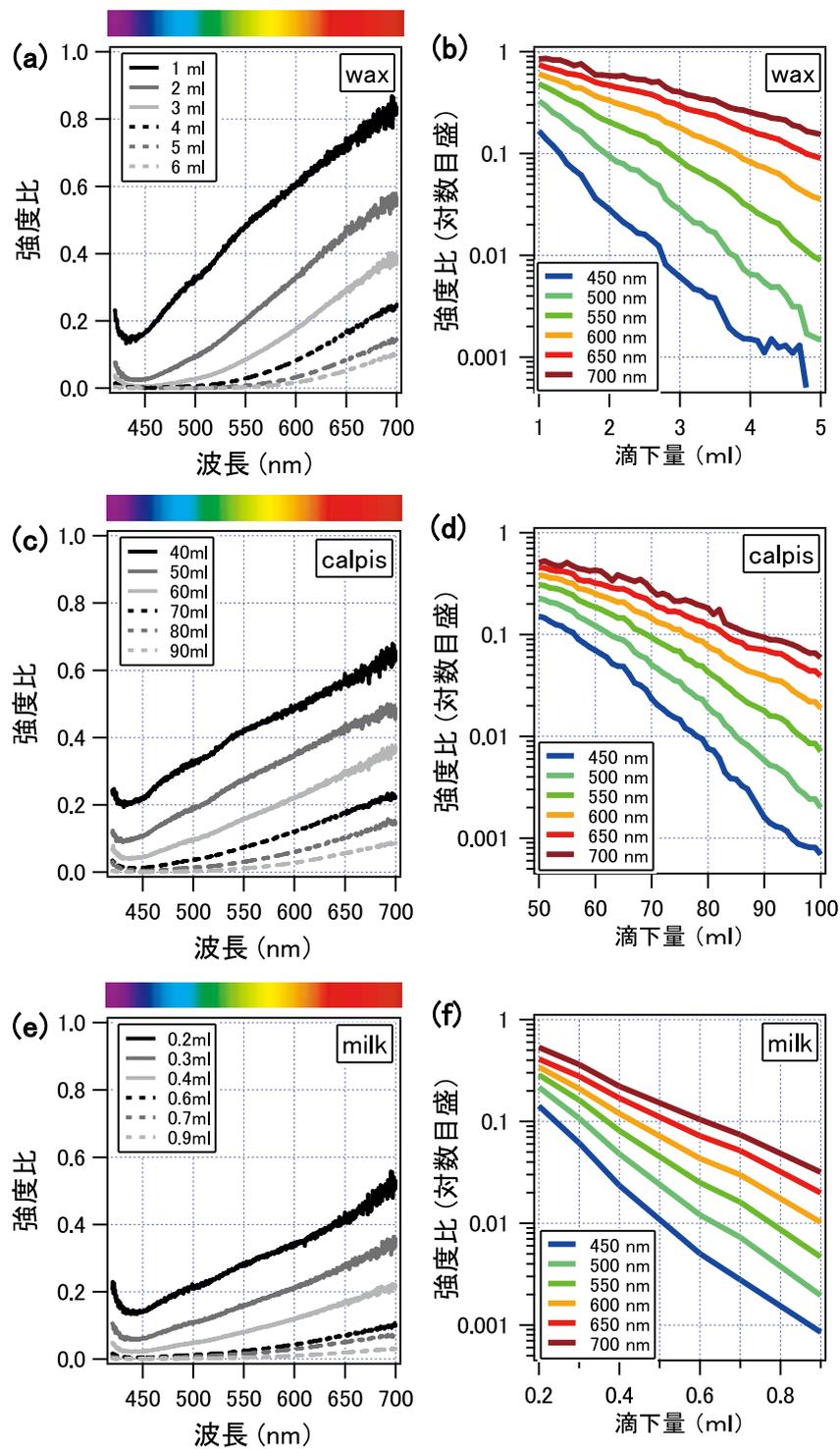


図5. 3種類の溶液における滴下量に依存したスペクトル強度比 ((a) (c) (e) 各々、ワックス、カルピス、牛乳) と各波長での強度比変化 ((b) (d) (f) 各々、ワックス、カルピス、牛乳)

果であるが、どの結果も450 nmより長波長側で牛乳⇒カルピス⇒ワックスの順で強度比が明確に大きくなっている。すなわち3種類の溶液の中で牛乳が最も波長に関わらず散乱されやすく、一方でワックスは波長の短い青い光に偏って散乱されているという違いがあるといえる。この差はそれぞれの溶液での散乱において、レイリー散乱とミー散乱が起こる割合の違いにあると考えられる。序論で述べた通り微粒子による光の散乱にはレイリー散乱とミー散乱と呼ばれる2種類が存在するが、本研究で用いた3種類のコロイド粒子のように光の波長に近い粒径サイズの粒子での散乱ではその両方の寄与を考える必要がある。粒径サイズが小さくなるほどレイリー散乱の割合が大きくなることは容易に想像でき、最も粒子の小さなワックスを混合させた溶液ではレイリー散乱の影響を強く受けて赤い色の光は水槽の中であまり散乱されることなく通過することから図3の結果も整合する。一方3種類の中で光の赤みが最も弱く0.1 ml滴下ごとの変化率も大きい牛乳には、レイリー散乱を起こすたんぱく質カゼインのミセル(約20 nm~150 nm)とミー散乱を起こす脂肪球(約1~100 μm)が含まれている。レイリー散乱が起こると同時にミー散乱が起こる割合も高いため、カルピスやワックスと比較してどの波長の光も同様に散乱されることによって早い段階で溶液が白く観察されたのだと考えられる。さらに図2(水槽写真)のワックス0.1 ml滴下時の写真を見てみると他の写真よりもわずかに光が青白く見える理由にも同様の説明が成り立つ。ワックスは他の溶液と比べて粒子径が小さいためレイリー散

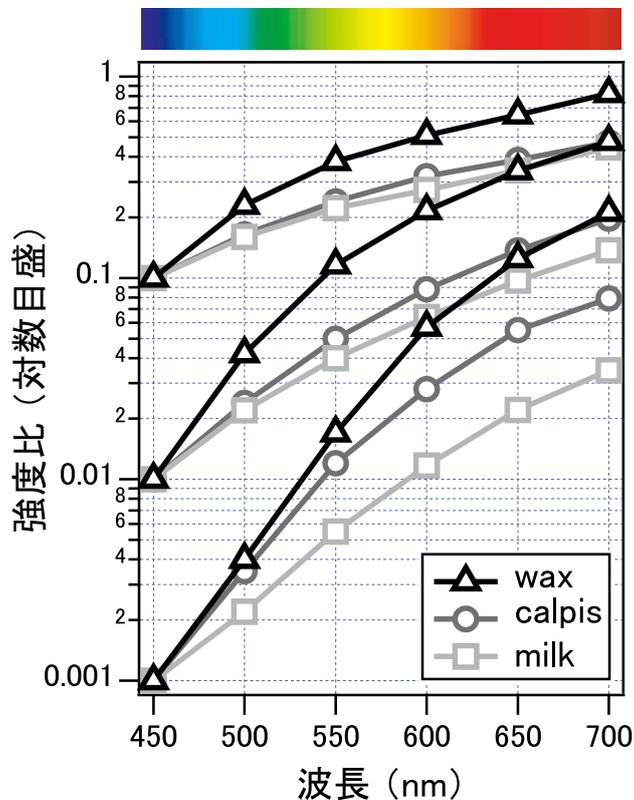


図6. 3種類の溶液において450 nmを基準とした強度比の波長変化

乱の割合が高く、水槽の中で散乱した青い光を目視することが出来るといえる。

4. まとめ

夕焼けという身近な現象を入り口にして光について学ぶことができるこの再現実験はさまざまな溶液を使用して行うことが可能であるが、本実験に用いた3種類のコロイド溶液にはそれぞれ見え方に違いがあることが分かった。例えばレイリー散乱やミー散乱の違いも併せて学習したい場合には2つの散乱の性質が現れる牛乳やカルピスを用い、夕焼けの仕組みについて学ぶために分かりやすく光の色の変化を示したい場合にはワックスを用いることで目的にあった光の変化を示すことが可能である。またワックスでは青色の光が水槽の中で散乱されていることも観察することが出来るため、地上で昼間に空が青く見える理由も併せて学ぶことができる。冒頭でも述べたように一般にこの実験では手に入りやすさが考慮された牛乳や乳酸菌飲料が溶液として用いられることが多いが、本実験を通して溶液として用いるものを変えることによって、学習レベルや伝えたいことなど、行う実験の詳細設定に役立つという可能性が示された。

参考文献

[1] Eugene Hecht著、尾崎義治・朝倉利光 訳「ヘクト光学 I」丸善株式会社 (2002)