

粗い面や濡れた粗面での乱反射における反射角と光量の関係

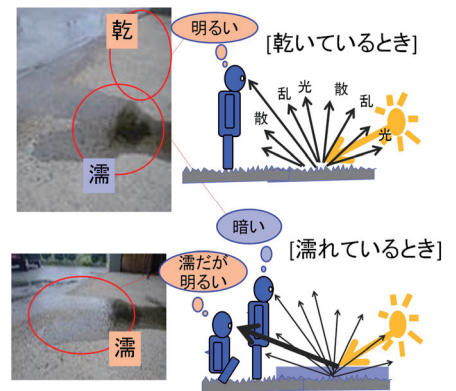
How light reflect on a rough surface and a wet surface?

千葉県立船橋高等学校理数科 3 年

小林正陽

はじめに（研究背景）

自分は二つの疑問を持った。光の進み方について、反射や屈折は反射の法則やスネルの法則などで説明できるが、乱反射において光がどの方向にどれだけ散乱するのかは何によって説明できるのか。また、乱反射が起こる面が水で覆われているときはどうか。雨で濡れたアスファルトは黒ずんで見えるが、それはなぜなのか。この二つの疑問を解決するため、次の二つの実験を行った。



濡れた物体の見え方

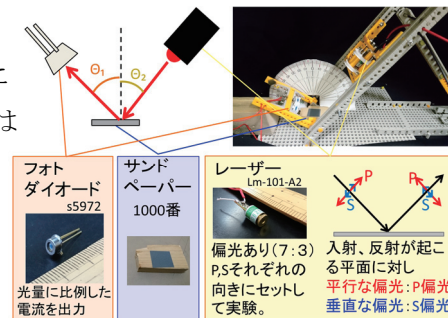
【実験①】

実験①目的

乾いた物体表面での乱反射の起こり方は何によって説明できるのか調べる

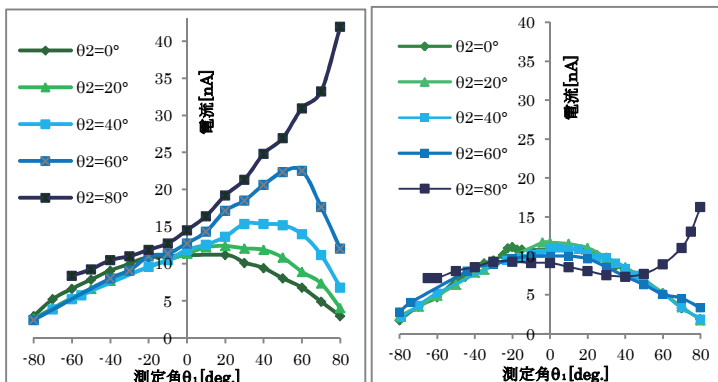
実験①方法

サンドペーパーに、ある角度 θ_2 からレーザーを当て、反射光をフォトダイオードを用いて様々な角度 θ_1 から測定する。レーザーには偏光があり、偏光の向きによって反射率が異なることが知られているため実験はレーザーの向き P, S それぞれで行う。また実験は暗室、暗幕内で行う。※レーザーの偏光の具合：予備実験で、偏光板一枚を挟みその角度を変えてレーザーの光量を調べた結果最も明るく見える角度で光量 7.0 とした時、最も暗く見える角度で 3.0 であった



実験装置

実験①結果



測定角と光量の関係[S 偏光]

測定角と光量の関係[P 偏光]

S 偏光では θ_2 が大きくなるにつれてグラフのピークが大きくなり、位置が右にずれた。P 偏光ではそれが無かったが、 $\theta_2 = 80^\circ$ の時に $\theta_1 = 40^\circ \sim 60^\circ$ 付近で一度光量が減少した後 $\theta_1 = 80^\circ$ 付近でもう一度増加する特徴が見られた。

実験①分析

実験で得られた散乱光の分布の特徴を説明するため、次のフレネルの式に注目して分析する。

《フレネルの式》

入射した光が二種類の媒質の界面でどれだけ反射するかを示す反射率 r は、二つの媒質の屈折率 n_1 、 n_2 を定数として入射角 α (及び α 、 n_1 、 n_2 に依存して変化する屈折角 β) の関数で表される。P 偏光成分と S 偏光成分の反射率 r_p 、 r_s は次のように表される。

$$r_p = \frac{n_2 \cos \alpha - n_1 \cos \beta}{n_2 \cos \alpha + n_1 \cos \beta} \quad r_s = \frac{n_1 \cos \alpha - n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta}$$

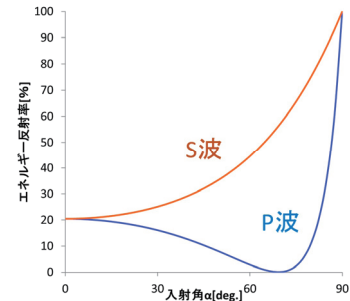
実際にどれだけ反射するかを表すエネルギー反射率 r^2 は

(P 偏光の割合) $\times r_p^2$ + (S 偏光の割合) $\times r_s^2$ で表され、

P 波 (P 偏光の光)、S 波の場合はそれぞれ r_p^2 、 r_s^2 で求められる。右グラフは $n_1=1.00$ $n_2=2.65$ (空気とサンドペーパー

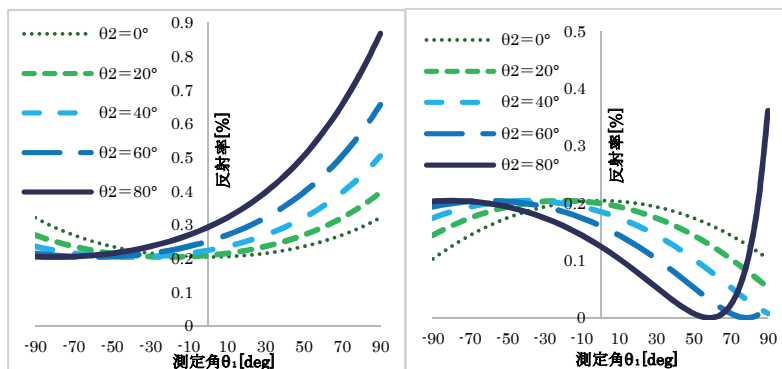
ー1000 番) における P 波、S 波の入射角 α とエネルギー反射率 r_p^2 、 r_s^2 の関係を表す。

以下エネルギー反射率を反射率と呼ぶ



入射角 α とエネルギー反射率の関係

今、光の乱反射は、乱雑な方向を向いた面での正反射の集まりであると仮定すると、ある角度 θ_2 から入射した光が粗い面で θ_1 へ反射された時、光はある面に対して $\alpha = (\theta_1 + \theta_2) / 2$ で入射したことになるので θ_1 と反射率の関係は次のようになる。



測定角 θ_1 と反射率の関係[S 偏光]

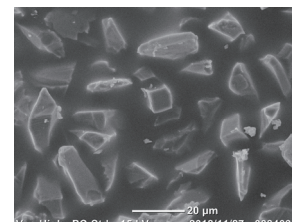
測定角 θ_1 と反射率の関係[P 偏光]

粗い面での反射のイメージ図

例えば、 $\theta_2=0^\circ$ から入射した光がある面で θ_1 へ反射された時、その面への入射角 α は $\theta_1/2$ であり、 $-90^\circ < \theta_1 < 90^\circ$ よりフレネルの式で $\theta_2=0$ の時に関係するのは、 $-45^\circ < \alpha < 45^\circ$ となる。

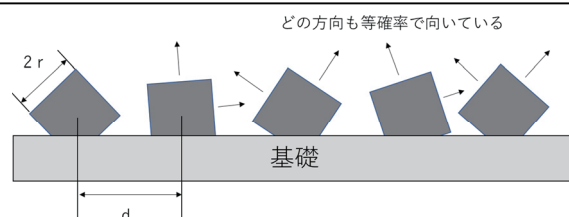
《理論値計算》

右写真は電子顕微鏡で見たサンドペーパーの表面で、無数の細かな突起が見られる。物体表面での光の散乱はこのような乱雑な方向を向いた面での正反射の集まりであると仮定して、次のようなモデルを考える。



サンドペーパー電子顕微鏡写真

右図のように反射に関与しない基礎の上に一辺 $2r$ の正方形が等間隔(中心距離 d)で存在している。正方形はどの向きも等確率に向いていて、各辺では反射の法則やフレネルの式に従って光の正反射が起こる。



今、このモデルで表される表面に入射角 θ_2 から光を当てたとき、反射角 θ_1 に反射される光の強さ ϕ を考える。 θ_2 で入射した光を θ_1 に反射するような向きを向いた一つの正方形における反射光の強さを ϕ_0 とおくと、

$\phi = \phi_0 \times (\text{レーザーの当たる範囲 } w)$ であり、

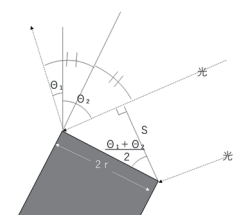
$\phi_0 = (\text{注目する一辺に入射する光の幅 } s) \times (\text{エネルギー反射率 } r^2) \times (\text{影の影響 } f)$

レーザーの当たる範囲 w は、 $\theta_2 = 0^\circ$ のときを 1 として

$$w = \frac{1}{\cos \theta_2}$$

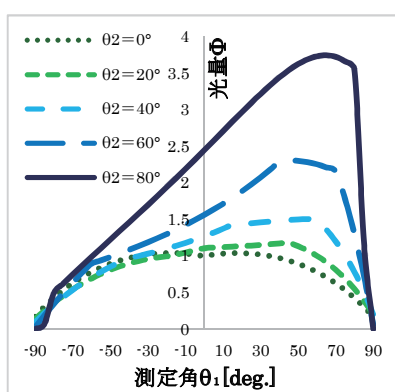
注目する一辺に入射する光の幅 s は右図から考えて

$$s = \cos \frac{(\theta_2 + \theta_1)}{2}$$

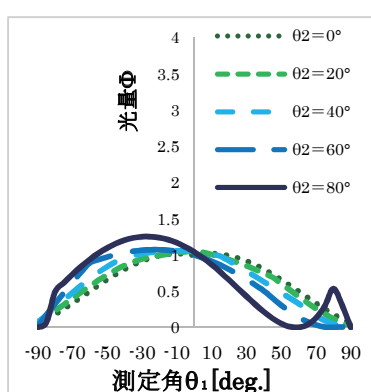


影の影響 f は、注目する正方形の隣の正方形が半径 $(\sqrt{2} + 1)r$ の円であると近似して、

$f = (\text{一辺のうち入射光が当たり、反射光が遮られない部分の長さ}) / (\text{正方形一辺の長さ})$



理論値 $\phi - \theta_1$ グラフ[S 偏光]



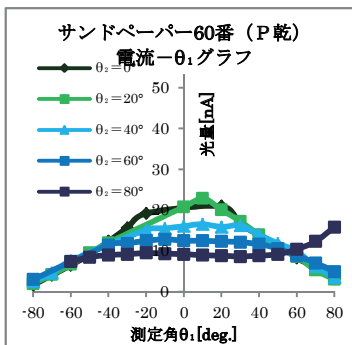
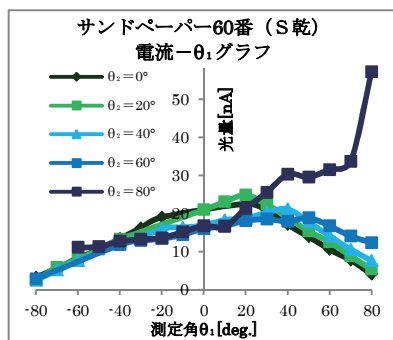
理論値 $\phi - \theta_1$ グラフ[P 偏光]

光量は $\theta_2 = \theta_1 = 0^\circ$ の時の値を 1 としたときの相対値で表している。レーザーの偏光の割合は 7:3 なので実際は左の 2 つのグラフを 7:3 の割合で足し合わせたものになる

実験①考察

散乱光の分布のグラフの形が基本的に一つの山になるのは四角形のモデルを考えると説明できる。また、S 偏光でピークが右上にずれていくことや、P 偏光 $\theta_2 = 80^\circ$ で 2 つ目のピークが現れるなどのグラフの概形はフレネルの式から反射率を考えることで説明できる。ただ、理論値のグラフが実験値に対して正反射角付近以外で大きくなったことや、次ページの、他のサンドペーパーでの実験の、 $\theta_2 = 40^\circ$ 、 60° のグラフでピークが小さく出たことなどがきちんと説明できていない。前者に対しては、グラフの形において θ_1 と θ_2 が一致するような角度付近の理論値が実験結果よりも小さいことから、正方形はどの向きも等確率に向いているというモデルに問題があり、実際はより上方向に多く向いているのではないかと予想される。

《他のサンドペーパーでの実験》



サンドペーパー60 番 (砥粒：ガーネット(屈折率 1.8 ほど)) での追加実験

[実験②]

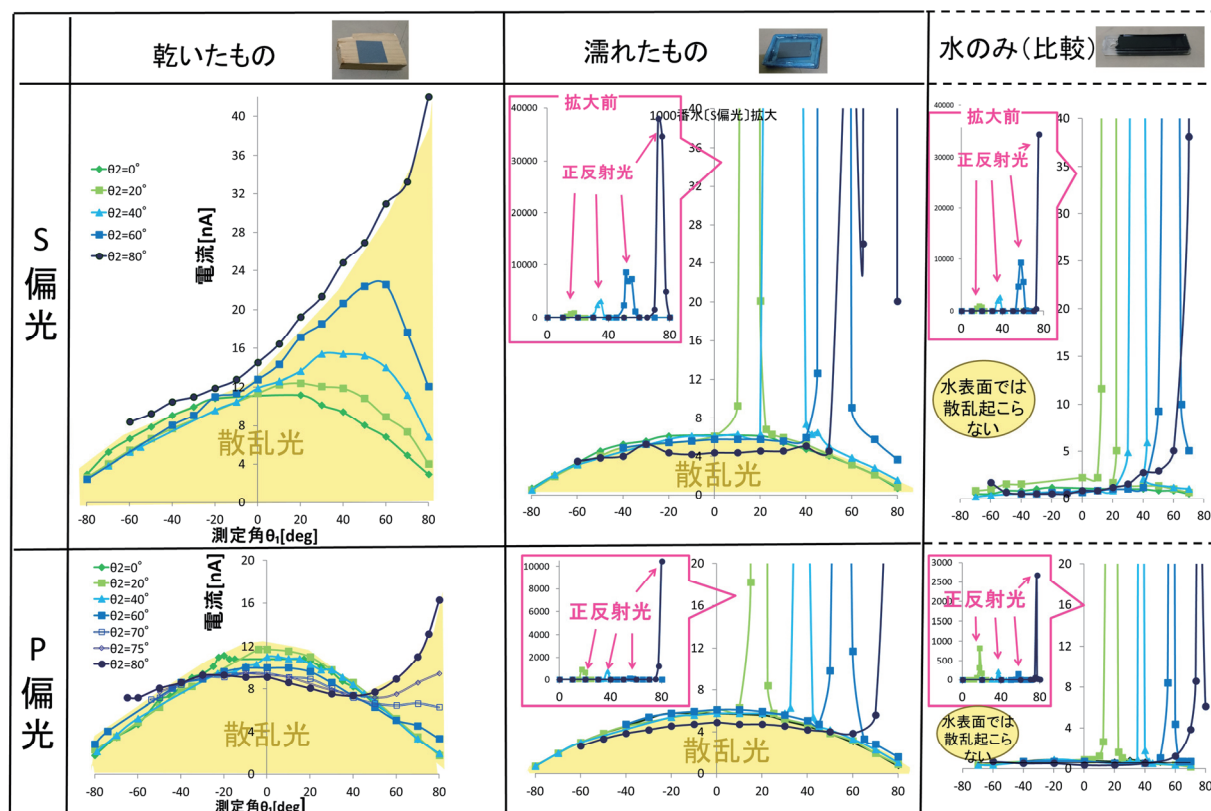
実験②目的

物体の上に水の層があると光の散乱の仕方がどのように変わるのか（濡れた物が黒ずんで見える原因）を調べる。

実験②方法

実験①の乾いたサンドペーパー1000 番に加え、濡れたもの（水を張った容器にサンドペーパーを 2 mm 沈める）、水のみ（黒塗りの容器に水を張る）でも同様の実験を行う。

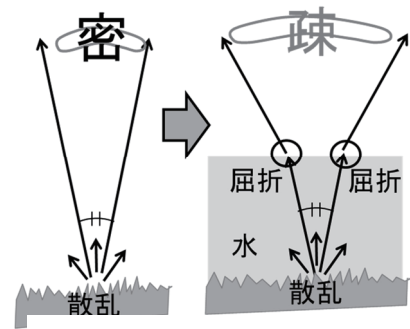
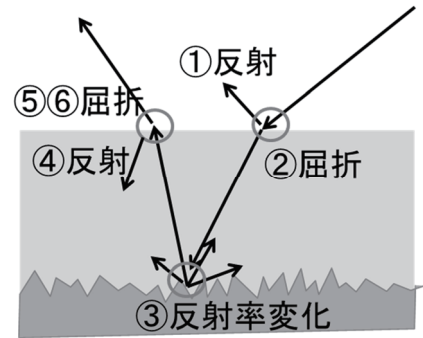
実験②結果



実験 2 分析

物体を濡らすと物体表面に水の層ができ、それによって散乱の仕方に次のような影響が出ると仮定する。

- ① 光が空気から水へ入射する際に水面で屈折して物体への入射角 θ_2 が変わる
 - ② 水面での反射分が差し引かれ、 $(1 - \text{空気-水間の反射率})$ 倍される
 - ③ $(\text{水-物体間の反射率}) / (\text{空気-物体間の反射率})$ 倍される
 - ④ 散乱した光が水から空気へ出る際の反射分が差し引かれ、 $(1 - \text{水-空気間の反射率})$ 倍される。この際急な角度で水面に入射した光は全反射される。
 - ⑤ 屈折によって光の進む方向 θ_1 が変わる。
 - ⑥ 散乱した光が水から空気へ出る際に屈折によって光の密度が減少する
- ⑥詳説：今、物体表面から入射角 α で水面に入射し、屈折角 β で空気中へ透過していった光、同様に入射角 $\alpha + \Delta\alpha$ で入射し、屈折角 $\beta + \Delta\beta$ で透過した光を考える。屈折前後の光束を ϕ_A 、 ϕ_B とすると $\Delta\alpha$ が十分に小さいとき、光密度が k 倍されるとすると



$$k = \frac{\frac{1}{\Delta\beta}}{\frac{1}{\Delta\alpha}} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta}$$

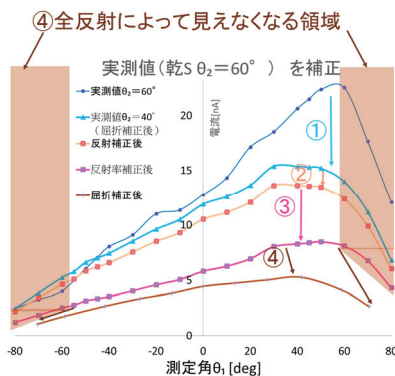
ここでスネルの法則より、水と空気の屈折率を n_w 、 n_a とすると

$$\frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = \frac{n_w}{n_a} \quad \frac{\sin(\beta + \Delta\beta)}{\sin(\alpha + \Delta\alpha)} = \frac{n_w}{n_a}$$

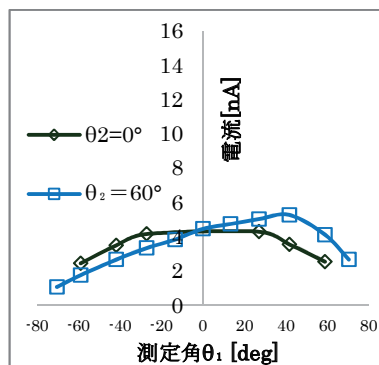
これを用いて上式を変形すると

$$k = \frac{n_a \cos\beta}{n_w \cos\alpha}$$

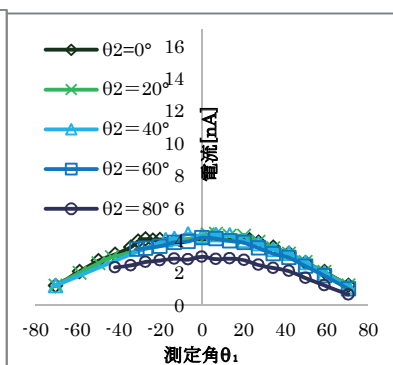
これらの考え方に基づいて乾-S, P の実験結果を補正する。



補正の過程



補正值 [S 偏光]



補正值 [P 偏光]

実験②考察

乾いたものと濡れた物の実験結果を比較すると、散乱光の全体的な減少に加え、グラフの形状が右肩上がりから左右対称なアーチ形になる変化が見られた。これは補正の過程から、特に③反射率の変化と⑥屈折による光密度の減少によって散乱光が全体的に減少し、①屈折と④⑤全反射⑥屈折によってグラフで右肩上がりの部分に変形された、切り捨てられたと説明できる。また、濡れた物の $\theta_2=80^\circ$ のグラフは他のグラフと比べて小さいが、これは②反射において、水への入射角が 80° と大きく、反射率が大きい事が原因であると説明できる。逆に、 $\theta_2=80^\circ$ 以外では②反射は他の因子と比べて散乱光の減少への寄与が少ないことがわかる。ただ、補正值が実測値よりも1[nA]程小さく出たのはなぜなのか分かっていない。

結論

- ・光の乱反射は、乱雑な方向を向いた面でのフレネルの式にのっとった正反射の集まりと考えると、散乱光の分布のピークの方角などを説明できる。ただ、各測定角での散乱光の大きさを正確に表すことはできていない。
- ・物体を濡らすと水面での反射、屈折と物体表面の反射率の変化の影響で光の散乱の仕方が変化し、色が暗くなって見える。

今後の展望

- ・物体の粒子の表面の角度分布を画像解析で調べ、散乱の仕方のモデルにおける正方形の辺の向き方に差をつけて理論値を計算し、散乱光の分布にどのように影響しているか調べたい。また、他の物体で実験を行い、屈折率による違い、粒子の大きさによる違いなどを調べたい。またこの研究を応用し、表面の様子がよくわかっていない物体に光を当てて散乱光を測定することで、非接触で物体表面の様子を知ることができるようなシステムの確立を目指したい。
- ・今回の研究では「濡れる」を「表面に薄い水の層がある」と定義したが、水がしみ込んだ物体での散乱の仕方はどうなるのか明らかにしたい。

反省、感想

初めに自分は研究テーマ決めで悩んだ。研究したいテーマでも、再現性の低さや、既に調べられている事に悩まされ、本テーマも後者だと思っていたが、「本当は深く調べられていないのではないか」と考え、このテーマにきめた。最初は結果が出るか不安だったが、今はそうしてよかったと思う。また、実験装置の製作や予備実験に時間がかかり、なかなか本実験を行えなかったが、指導を受けた先生から、研究はデータを取るまでが長いものだと言われていただき、丁寧に実験の準備をしたことで、微小な光を捕らえる実験を行うことができた。ただ、理論を立ててから、多角的にその理論を確かめることができなかったため、今後気を付けたい。研究発表では、「どこまで分かっている、どこから分かっているのか」を伝えることや、「事実」と「仮定や理論」をきちんと分けなければならないことを学んだ。