

旋光の可視化とレインボービームの生成

田所 利康 (テクノシナジー)

tado@techno-synergy.co.jp

1. はじめに

偏光状態を図解なしでイメージするのは、やさしいことではありません。本稿では、偏光状態の直感的な理解を目的として、ショ糖水溶液中における旋光の可視化を行い、ショ糖の旋光分散を利用してレインボービームを生成した結果について報告いたします¹⁻³⁾。

2. ショ糖の旋光

アミノ酸や糖などの不斉炭素を含む化合物には、立体化学構造が互いに鏡像関係にある一对の光学異性体（鏡像異性体）が存在し、両者は旋光性（光学活性）や味、毒性などの生理的な作用が異なります。旋光性は、光学異性体中を直線偏光の光線が透過するときに偏光面が回転する現象であり、右円偏光と左円偏光に対する媒質の屈折率が異なることにより生じます（図 1(a)）。光の出射側から見て、偏光面が時計回りに回転する旋光を右旋性、逆回りの旋光を左旋性と呼びます。旋光度は、旋光物質の濃度、温度、波長によって変化します。波長による旋光性の変化を旋光分散といい、通常、吸収がない可視領域では短波長ほど旋光度の絶対値が増加します（図 1(b)）。

比旋光度 α は、旋光性を持たない媒質 100 cm^3 に旋光性物質 1g を溶かした場合の光路長 1dm 当たりの偏光面の回転角度と定義され、右旋性を正方向とします。ショ糖は右旋性であり、波長 589.3 nm （ナトリウムの D 線）、温度 20°C 、光路長 1dm の条件で、偏光面は右回りに 66.5° 回転し、比旋光度は $[\alpha]_D^{20} = +66.5^\circ$ と表記されます。

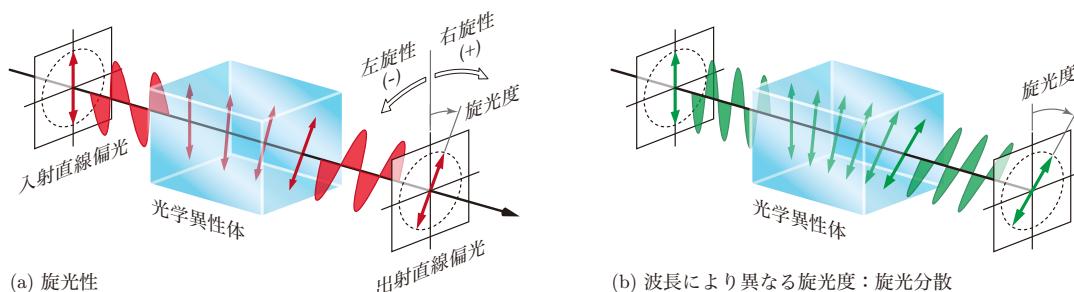


図 1: (a) 光学異性体の旋光性と (b) 波長により異なる旋光度（旋光分散）

3. 旋光の可視化

光線の可視化には、ショ糖水溶液中に混ぜた微小粒子の散乱を利用しました。散乱実験に多用される牛乳は含まれる脂肪球などの粒径が大きく、多重散乱を起こして白濁し偏光が乱れるため、より粒径が小さい墨汁を採用しました。図 2 に (a) 牛乳の散乱を利用した光線の可視化と (b) 墨汁の散乱を利用した光線の可視化の違いを示します。図 2(a) の牛乳では、多重散乱により明らかに白濁していますが、図 2(b) の墨汁では、ビームが透過している領域を除きバックグラウンドは暗い状態を保っています。本実験で採用した墨汁のように光の波長より充分小さな粒子が起こす散乱はレイリー散乱と見なすことができます。

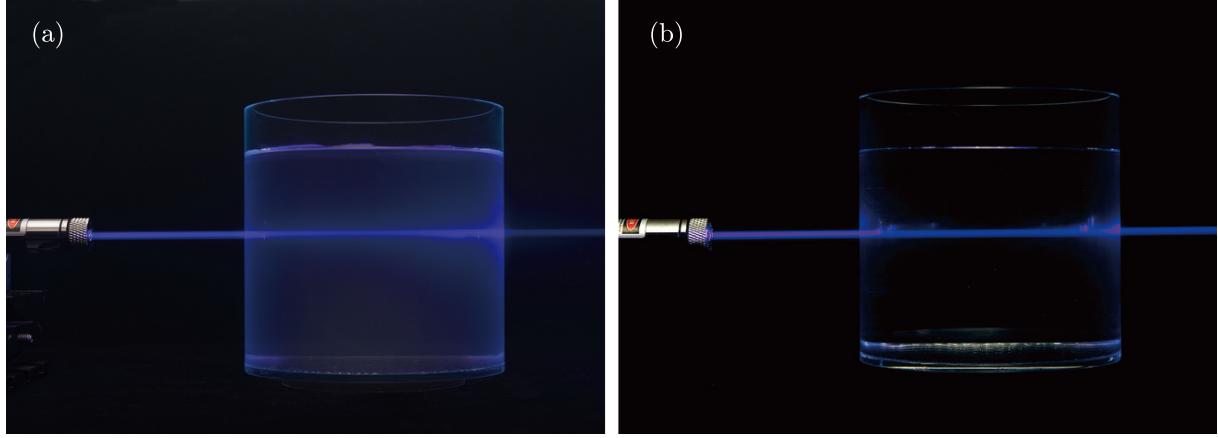


図 2: (a) 牛乳の散乱を利用した光線の可視化と (b) 墨汁の散乱を利用した光線の可視化。

微小粒子が起こす散乱（原子内の電子振動で生じる電気双極子放射）は、図 3 に示す穴のないドーナツのような放射強度パターンになります。本実験において重要なレイリー散乱の特徴は、次の通りです。

1. 入射直線偏光の振動方向と直交する方向で最も強く散乱され、散乱方向が入射直線偏光の振動方向に近づくに従って強度が減少し、入射直線偏光の振動方向では散乱光は放射されない「穴のないドーナツ」のような散乱強度分布をとること
2. 入射光の偏光方向が散乱後も保存されること
3. 多重散乱が極めて少ないとこと

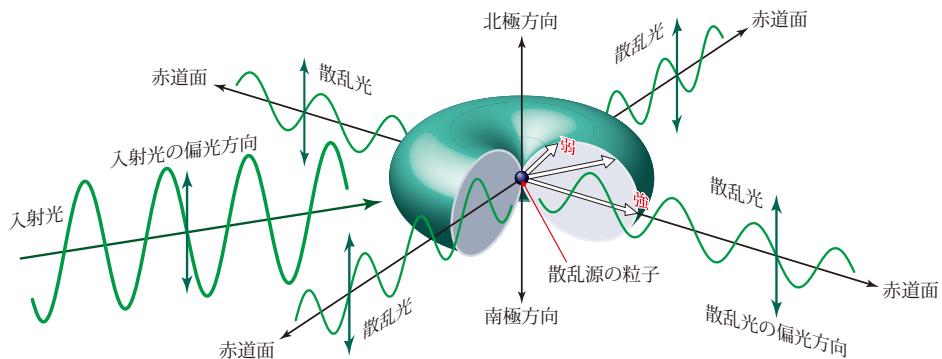


図 3: 微小粒子が起こす散乱

図 4 に、散乱を用いた旋光の可視化実験の概要を示します。図左方向から垂直の直線偏光がショ糖水溶液に入射し、入射光線と同じ高さの手前真横方向から散乱光を観察・撮影します。入射直後の位置 ① では、墨汁粒子に垂直の直線偏光が入射して垂直の直線偏光が散乱され、散乱直線偏光の振動方向と直交する観測方向には強い散乱光が到達して、入射光線を見ることができます。一方、ショ糖の旋光によって偏光面が回転し、入射光が水平方向の直線偏光になる位置 ② では、墨汁粒子は水平方向の直線偏光を散乱するが、散乱直線偏光の振動方向と一致する観測方向には散乱光が飛来せず、光線は見えません。入射光線は偏光面が右回りに徐々に回転しながらショ糖水中を進んでいくため、旋光度 90° 每に入射光線の明暗が ① 明 \Rightarrow ② 暗 \Rightarrow ③ 明 \Rightarrow ④ 暗 $\Rightarrow \dots$ と繰り返し現れることになります。

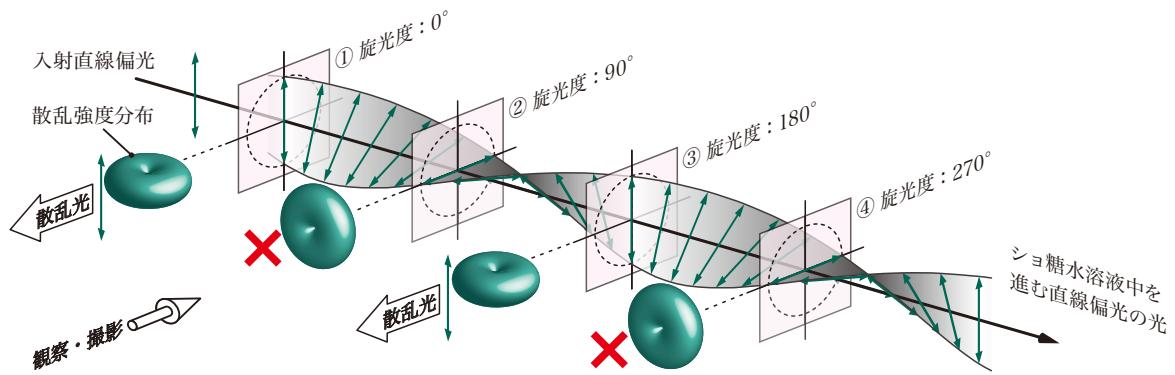


図 4: 散乱を使った旋光の可視化

4. 実験と結果

実験には、微量の墨汁を混ぜた湯にグラニュー糖（純度約 99.9 % のショ糖）を溶かしたショ糖水溶液を使用しました。ショ糖は 20°C の水 100 g に 200 g 程度溶解するため、図 5(a) に示す背の低い薄型アクリル水槽を作製してショ糖の使用量を抑えました。実験では、図 5(b) のように、アクリル水槽の左側から垂直の直線偏光を入射し、水槽手前方向から入射光線の散乱画像を撮影した。

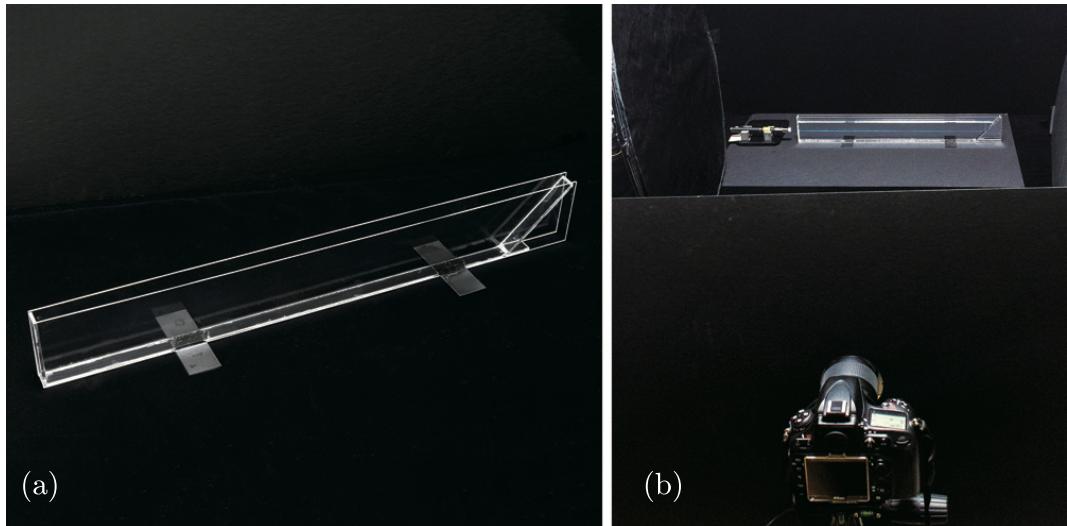


図 5: (a) 作製した薄型アクリル水槽, (b) 実験風景

図 6 は、(a) 赤色レーザー（波長 650 nm）、(b) 緑色レーザー（波長 532 nm）を光源として、右方向に進む入射光線の偏光面がショ糖の旋光によって次第に回転していくようすを可視化した画像です。

図 4 のように、明 \Rightarrow 暗 \Rightarrow 明の 1 周期が旋光角 180° に対応します（図 6(a))。図 6(a), (b) で光線が明滅する周期を比較すると、短波長の (b) 波長 532 nm の方が短周期で、旋光度がより高いことが分かります。図 6(b) の光線の明滅周期から実験に使用したショ糖水溶液の旋光度を求めるとき、1 周期約 241 mm の間に偏光面が 180 回転することから、波長 532 nmにおいて、光路長 1 dm 当たりの旋光度は約 +75° と見積もることができます。加えて、波長 405 nm では明滅周期がさらに短くなり、ショ糖は短波長側で旋光度が増加する旋光分散特性であることが裏付けられました。

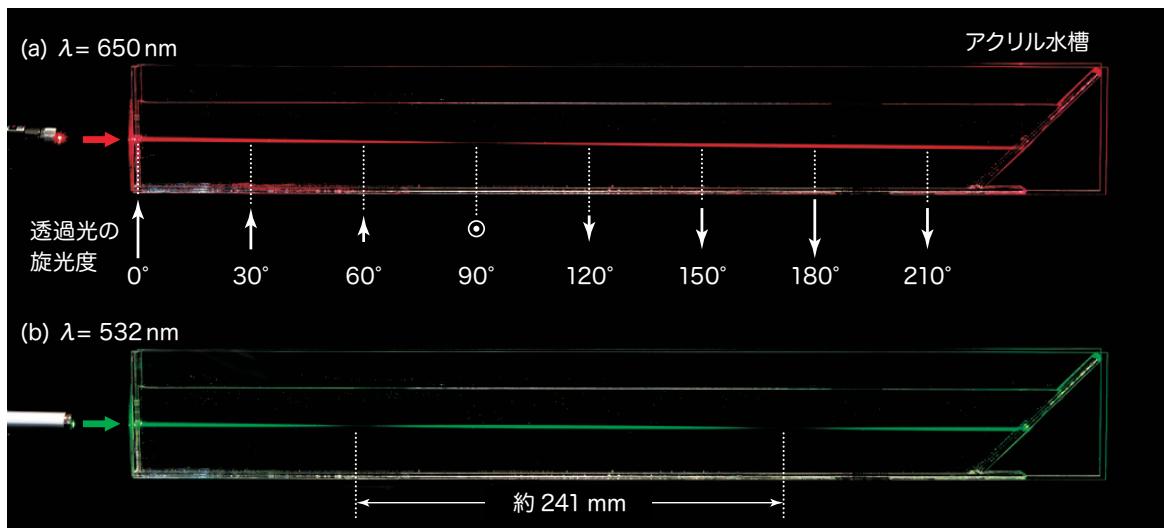


図 6: 旋光の可視化. (a) 波長 : 650 nm, (b) 波長 : 532 nm.

実験では、さらに、ショ糖の旋光分散を利用したレインボービームの生成を試みました。図 7 に、ショ糖の旋光性によって生成されたレインボービームを示します。

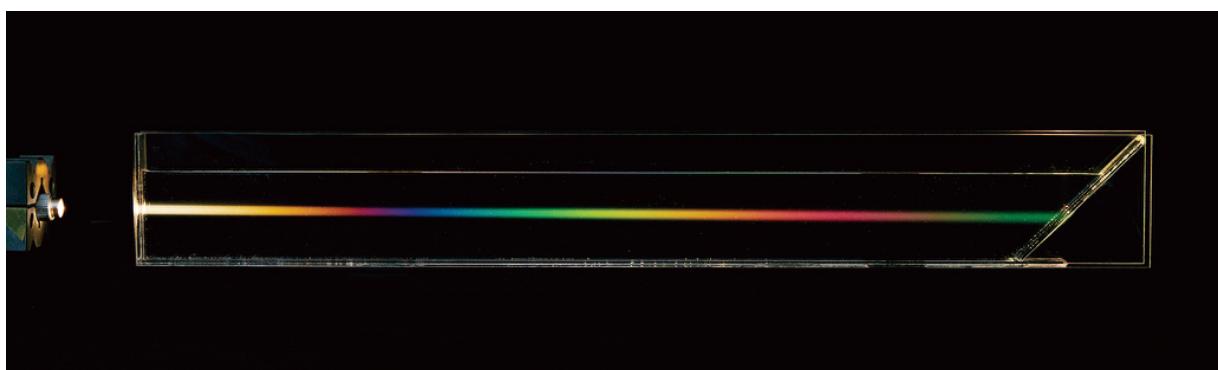


図 7: ショ糖の旋光性によって生成されたレインボービーム.

ハロゲンタンクステン光源の白色光を直線偏光のコリメート光にして入射すると、旋光分散のために各波長における散乱光の消失位置がずれる結果、光の進行に伴って色が変化するレインボービームを作り出すことができます。ショ糖の旋光分散は短波長に向かって増加するので、レインボービームの色の並び順は、干渉色図表の色の並びと同じになります。

- 1) 大津元一監修, 田所利康著:『イラストレイテッド 光の実験』, 朝倉書店, (2016) pp.34-41.
- 2) 田所利康:”旋光の可視化とレインボービームの創成”, 偏光計測・制御技術研究グループ: 第 14 回偏光計測研究会 (2018 年 11 月 27 日).
- 3) Nathan Hagen, Toshiyasu Tadokoro, ”The rainbow beam experiment: direct visualization of dipole scattering and optical rotatory dispersion,” Proc. SPIE **11132**, 111320E (2019).