

資料 ピンホールの製作とこれを用いた光の回折実験

瀬谷 匡史¹⁾・津留 俊英²⁾

1) 山形大学大学院教育実践研究科教職実践専攻 2) 山形大学地域教育文化学部

港の防波堤の周りの水面波に見られるように、波は物体によって遮られてもその背後に回り込んで伝搬する性質を持っている。これは“波”に共通の性質で回折と呼ばれる。音や光も波動であるから、様々な場面で回折が生じる。のぼり旗越しに自動車のヘッドライトを見た時に生じる十字に並んだ光のパターンや目に強い光が入射したときに虹色が見えるのは光の回折によるものである。教育現場では、高等学校でヤングの実験や回折格子を用いた分光などで回折を取り扱う。回折格子を用いた分光器は児童・生徒でも簡単に作製でき、かつ、身の回りの光源を簡便に分光できることから実験教室などでも教材としてよく採用される。本研究では、安価で入手性が良い道具を使ってピンホールを作製し、光源の波長によって回折像の大きさが変わることを示した。さらに、物差しで計測できる大きさの回折像の直径から微小なピンホールの直径を精密に決定できることを述べた。最後に、ピンホールによる分光効果を示すために白色光を光源とした回折像を示すとともに、自作のピンホールを使った針孔写真の撮影例を紹介した。

キーワード: 物理学, 光学, ピンホール, 回折, エアリーディスク

1. はじめに

照明は白熱灯や蛍光灯から発光ダイオードに置き換わり、日々の生活や仕事に欠かせないスマートホンやタブレット、パソコンにはカメラが内蔵されるなど私たちの生活は様々な光学製品や光学機器に支えられている[1]。自然に目を向けると、雨上がりに見られる虹、青空や夕焼け、蜃気楼など光学現象が日常的に観察できる[2]。光学現象は色鮮やかで視覚に訴える現象が多く、児童・生徒の興味・関心を引き出すことに適した教材である。小学校と中学校では、直進性や反射と屈折の法則など幾何光学的な性質を学ぶ[3, 4]。高等学校では光の波動性による現象として回折や干渉を取り扱う[5]。また、小学校と中学校では簡単なカメラなど、高等学校では簡易分光器、カメラ、望遠鏡などのものづくりを取り入れ、原理や仕組みの理解を深めさせ、興味・関心を高めるようにすることが明記されている[3-5]。

高等学校や大学では光の回折と干渉に関する実験として、ダブルスリットや回折格子を用いた実験を行い光波としての性質を理解する。光の波としての振る舞いは水のそれと同様であるが、光の波長が短いためスリットや回折格子の格子は肉眼で認識するのが困難で教科書などの図と結び付けにくい。そこで、生徒らの目で形状や大きさが認識できる回折格子の作製法として、① 黒く塗ったガラス上にカミソリ刃でスリットを切る方法[6]、② 格子状のスクリーンを銀塩写真で縮小コピーする方法[7, 8]、③ OHP シート上に格子を印刷する方法[9]などが提案された。①はカミソリ刃を精密に動作させるための機構が必要で、また作製に時間を要する。②は高品質な回折格子が作製できるが、近年は銀塩フィルムが入手しにくく実現困難である。③は手軽に格子が作製できる一方、スリット幅などがプリンターの解像度に依るため高精細な格子を作製するのは難しい。ダブルスリットや回折格子の実験では、光源波長とものさしで測定できる格子ースクリーン間距離、明線(点)間隔を強め合いの干渉条件(ブラッグの式と同等の条件)に当てはめて格子間隔を決定する。干渉条件は高等学校で学習する三角関数で記述されるので数学的な取り扱いや光波としての性質が学べる。

回折格子と同様にピンホールも回折現象の演示や実験に用いることができる。ピンホールは光を透過しない板に小孔を開けただけの単純な構造で、回折格子と比べて使用する機器や道具も少なく格段に作製が容易

である。しかし、ピンホールで生じる回折パターンは高等学校では学習しない特殊関数が使われているため、一般にその取扱いは困難である。そこで本研究では、回折格子に代えてピンホールを用いた回折実験を実施するために、安価で入手し易い道具を使ってピンホールを作製し、これを使用した回折像の観察とその定量的な取り扱い方法について述べる。また、ピンホールによる回折は波長に依ることを可視化したレインボー回折像の生成方法と簡便なピンホールカメラの作製方法を示す。

2. ピンホールの製作

ピンホールの製作方法については、これまでいくつもの報告があるが、デジタル一眼カメラにピンホールを取り付けてピンホールカメラを構成するために、本研究では[10]を参考に作製した。焦点距離を f 、ピンホールの直径を d 、光の波長を λ とすると $f = d^2/\lambda$ であるから[10]、 $f=40\text{ mm}$ とすると可視光領域($\lambda=400\sim 650\text{ nm}$)では $d=126\sim 161\ \mu\text{m}$ と求まる。そこで本研究ではピンホール直径の目標値を $150\ \mu\text{m}$ とした。以下に作製手順を記す。

- (1) 厚さ 0.1 mm のアルミ板を木材など比較的柔らかい物質の上に置き、センターポンチ先端をアルミ板に垂直に当て、ハンマーで後端を軽く叩き、凹みを付ける。
- (2) 叩いてできた凸部分をサンドペーパーで丁寧に磨き、凸部分を含むその周辺のアルミ板の厚さを均一に薄くする。
- (3) 薄くなった部分に裁縫針を垂直に押し当て、アルミ板を貫通させる。
- (4) 細かいサンドペーパーで貫通穴にできたバリを穴の形状が変化しないように研磨除去する。

なお、使用したセンターポンチと裁縫針の先端部は、旋盤を使って予め形状を整えるとともに先鋭化した。

作製した2つピンホール A と B の大きさは、① 光学顕微鏡を用いて直接計測する方法、② ピンホールにレーザーを照射してその回折パターンから計算によって決定する方法の2つの方法を適用し、両者の値を比較した。図1に反射型光学顕微鏡で撮影したピンホール A の写真を示す。顕微鏡用スケールで直径を計測したところ、ピンホール A は x 方向 $223.4\ \mu\text{m}$ 、y 方向 $218.7\ \mu\text{m}$ 、ピンホール B は x 方向 $235.2\ \mu\text{m}$ 、y 方向 $230.5\ \mu\text{m}$ であった。

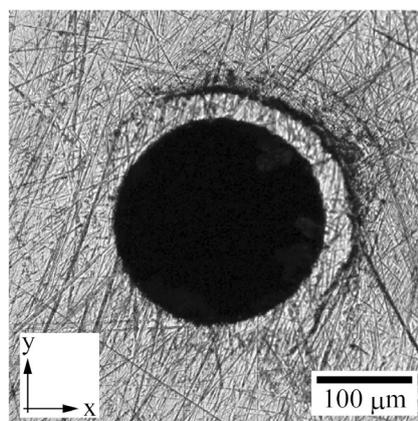


図1. 自作したピンホール A の顕微鏡写真。

3. 身の回りの光の回折

港の防波堤に向かって進んできた海の波は防波堤の隙間を通り抜け、港内に広がっていく。波動は障害物などによって幾何学的に影になる領域に回り込んで伝搬する性質を持っており、これを回折と呼ぶ。物体越しに会話できることや、ラジオなどの電波が建物の影でも届くのは音や電波が回折するためである。

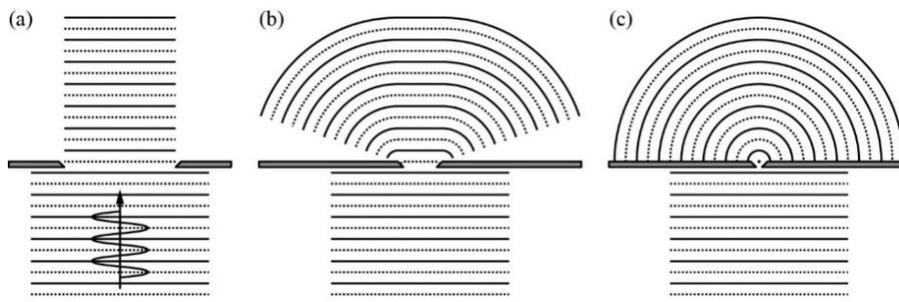


図2. 平面波がスリット(遮蔽物の隙間)に入射したときの様子。スリット間隔が入射する波の波長と比べて大きい場合(a)、同程度の場合(b)、小さい場合(c)。

回折は波長に依存した現象であることを示すために、平面波がスリット(遮蔽物の隙間)に入射したときの様子を図 2 に示す。図 2(a)のように入射した波の波長に比べてスリット間隔が大きい場合、波はほぼ直進する。スリット間隔が狭まるにつれて強く回折するようになり、スリット間隔が波長より小さい場合は図 2(c)に示すようにスリットの影にも広く波が伝わる。このように隙間に比べて波の波長が長いほど強く回折する。光も波であるから回折するが、光の波長は音などと比べて非常に短いため、日常生活で光の回折現象に気付くことは少ない。夜間、店舗ののぼり旗越しに自動車のヘッドライトを見たときに現れる十字に並んだ光のパターンは回折によるものである。これは目の細かい布と高輝度 LED など疑似的に再現できる。図 3(a)にナイロン製の布の光学顕微鏡写真を示す。ナイロン製の糸の織り目に数 $10\ \mu\text{m}$ の矩形開口が見られる。布越しに明るい点光源を見ると図 3(b)のように光った点が基盤目状に分離した矩形開口に特徴的な回折像が観察できる。また、CD など光ディスクの反射光が虹色に見えるのは光の回折と干渉によるものである。開口の大きさが微小な場合、光は回折し、開口から十分遠方では開口の形状によって様々な回折模様が生じる。

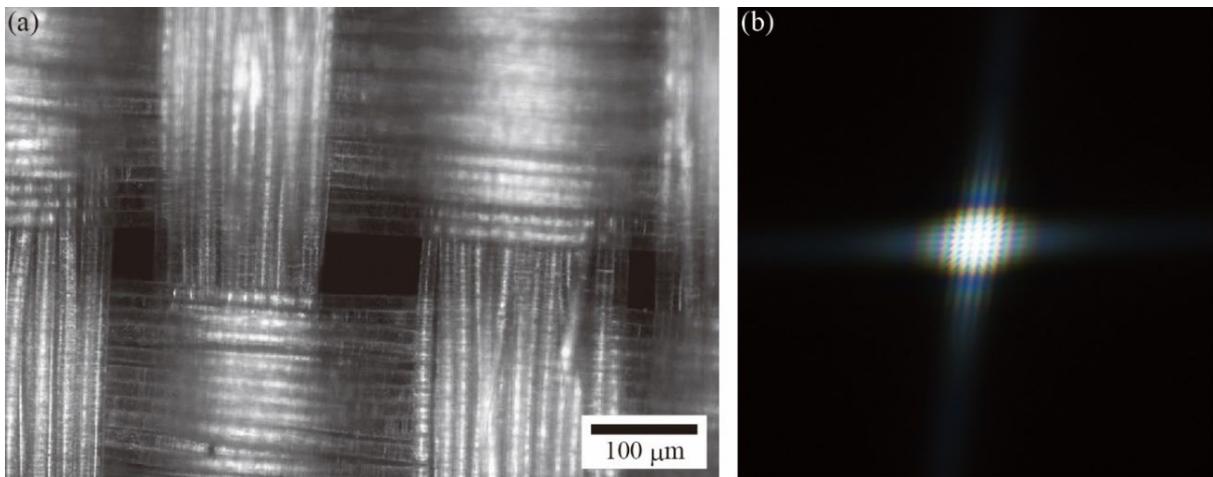


図 3. ナイロン製の布の顕微鏡写真(a)と布越しに白色光を見た時に生じる回折像(b)。

4. ピンホール遠方の光の回折像観察

微小な開口に単色平面波を入射し、十分遠方の回折像を観察すると、開口の形状に応じた特徴的な回折パターンが見られる。円形開口の場合には、エアリーパターンと呼ばれる同心円状の明暗の回折像が生じる。特に、中心部の円盤状の明るいパターンをエアリーディスクと呼ぶ。また、開口形状が矩形や円形の場合には回折強度は比較的簡単に記述できる。本研究で作製したピンホールのような円形開口で生じる回折波の強度 I は次式で表せる[11]。

$$I = I_0 \left(\frac{2J_1\left(\frac{kar}{z}\right)}{\frac{kar}{z}} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 I_0 は回折パターン中心(0 次回折光)の光強度、 a は円形開口の半径、 r は回折パターンの半径、 z は開口と回折パターン間の距離、 k は波数($= 2\pi/\lambda$)、 J_1 は 1 次のベッセル関数である。ここで、ピンホールの直径を d とし、これを用いて $R \equiv 2ar/z\lambda = dr/z\lambda$ とすると(1)式は、

$$I = I_0 \left(\frac{2J_1(\pi R)}{\pi R} \right)^2 \quad (2)$$

と書ける。 $J_1(\pi R)$ が 0 の値となる、すなわち、回折パターンが暗環となるのは、 $\pi R \approx 0, 3.8317, 7.0156 \dots$ のときであるから、エアリーディスクの半径 r を用いるとピンホールの直径は次式で表せる。

$$d = \frac{3.832\lambda z}{\pi r} \quad (3)$$

(3)式から、ピンホールスクリーン間距離とエアリーディスク半径をそれぞれ計測すればピンホールの直径が得られる。また、エアリーディスクの直径は入射波長に比例することがわかる。

2章で述べた自作のピンホール A と B を用いて図 4 の配置でエアリーパターンを観察した。撮影にはデジタル一眼カメラを用い、撮影用レンズを取り外して回折像を直接撮像面に投射した。単色平面波として波長 635 nm, 532 nm, 405 nm の赤色, 緑色, 紫色レーザーをピンホール A に入射したときの回折像をそれぞれ図 5(a), (b), (c)に示す。ピンホール撮像面間距離 z は 0.718 m であった。前述のように、回折は波長に依る現象であることから、波長が一番長い赤色レーザーを入射光としたとき、大きなエアリーディスクが観察された。

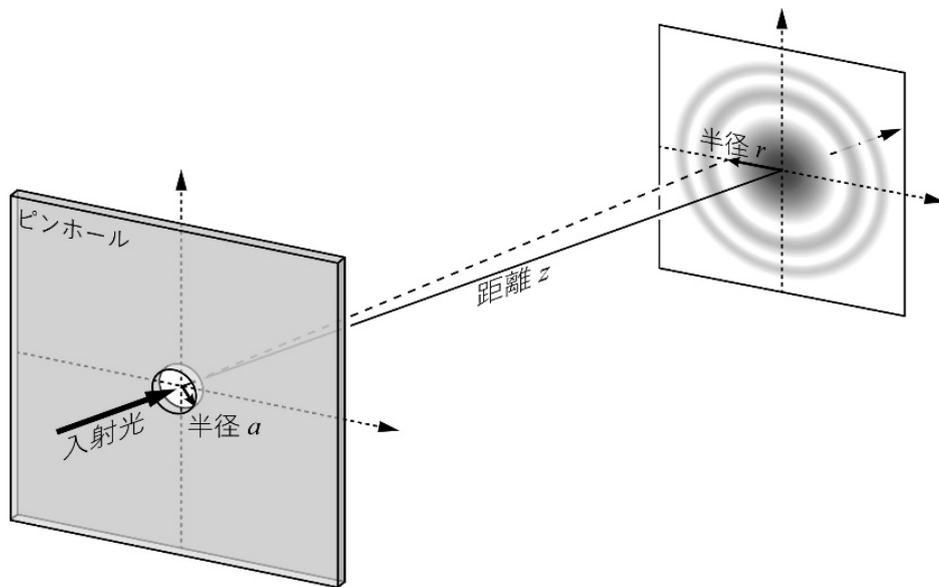


図 4. ピンホールからの回折パターンを観察するための光学配置。

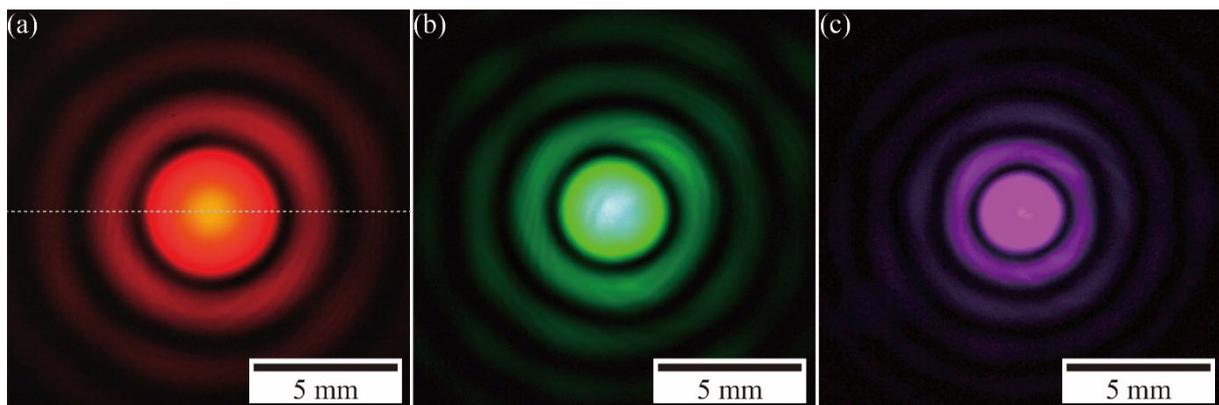


図 5. ピンホール A に波長(a) 635 nm, (b) 532 nm, (c) 405 nm のレーザーを入射したときの回折像。

撮影に用いたデジタル一眼カメラのセンサーサイズは縦 15.6 mm × 横 23.4 mm であり、撮影した画像サイズは縦 3056 ピクセル × 横 4592 ピクセルであるから、センサー 1 画素の大きさは $5.1 \mu\text{m} \times 5.1 \mu\text{m}$ ある。直径 100 μm の市販ピンホール、自作ピンホール A 及び B を用いて撮影した赤・緑・紫色の回折像の中心を通るようにその強度分布を求めた。例として、ピンホール A に赤色レーザーを入射したときの回折強度分布を図 6 に示す。回折像の強度分布は、エアリーディスク部の非常に強いピークがあり、ピークに対称に同心円状の暗環・

明環パターンに対応する強度分布が見られる。強度分布からピークに対称で第1暗環に対応する強度極小となる位置間の画素数を求め、それに $5.1 \mu\text{m}$ を乗じればエアリーディスクの直径 $2r$ が精密に求められる。

1 mm 目盛り単位のコンベックスを用いて市販ピンホール—デジタル—眼カメラのレンズマウント面間距離を 0.70 m に設定した。レンズマウント面から撮像面までの距離(フランジバック)はカメラのメーカー毎に異なるが各社とも精密に決まっており、使用したカメラは 18 mm であるため、 $z=0.718 \text{ m}$ となる。このように決定した z 、エアリーパターン強度から決定したエアリーディスクの半径 r 、使用した光源の波長 λ を(3)式に代入すると市販ピンホール直径 $d=99.1 \mu\text{m}$ が得られた。

(3)式を用いて決定した市販ピンホールの直径は、その仕様や顕微鏡観察で決定した値とよく一致するが、わずかに異なる。計測誤差が最も生じるのはピンホール—撮像面間距離であるから、市販ピンホールの直径が $100 \mu\text{m}$ となる z の値を(3)式から求めると 0.724 m であった。 $z=0.724 \text{ m}$ として(3)式を用いて決定したピンホール A 及び B の直径を表 1 に示す。両者の直径は顕微鏡観察で決定した直径と一致するが、図 1 に示すように自作ピンホールの開口はやや楕円形状であるため特にピンホール B は差が大きい。複数の位置の強度分布を求めて平均処理すれば誤差は小さくなるものと考えられる。真円度を向上させるには裁縫針をアルミ板に対して垂直に貫通させるための治具を作製してピンホールを作製すれば良い。なお、本研究では測定精度向上のために、デジタルカメラを用いてエアリーディスクの直径を決定し、また、ピンホール径が既知の市販ピンホールを用いてピンホール—撮像面間距離を逆算してピンホール径の計算に用いたが、教育現場では両者共ものさし(またはコンベックス)を用いて計測しても十分な学習効果が期待できる。

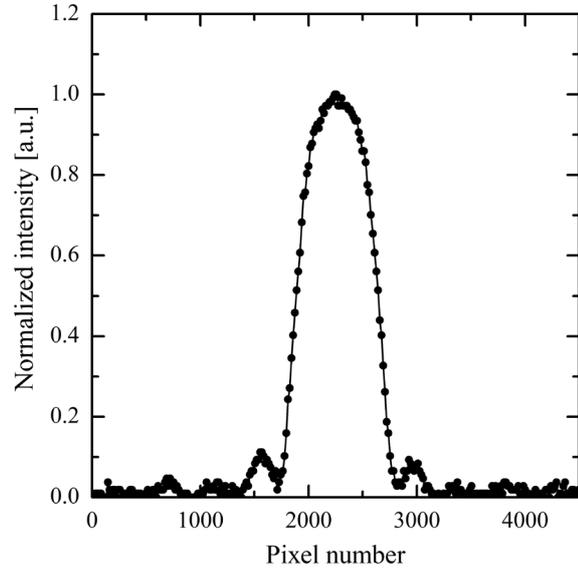


図 6. ピンホール A に波長 635 nm のレーザーを入射したときの回折像(図 5(a)中の点線)の 0 次回折光の強度で規格化した強度分布。

表 1. (3)式を用いて決定したピンホールの直径。市販ピンホールは $z=0.718 \text{ m}$ として、ピンホール A 及び B は $z=0.724 \text{ m}$ として(3)式から直径を決定した。

	回折像観察 [μm]				顕微鏡観察 [μm]
	$\lambda = 635 \text{ [nm]}$	$\lambda = 532 \text{ [nm]}$	$\lambda = 405 \text{ [nm]}$	平均 [nm]	
市販ピンホール	99.1	-	-	-	100
ピンホール A	207.8	223.8	216.9	216.1	223.4 (x 方向) 218.7 (y 方向)
ピンホール B	215.8	213.6	204.5	211.3	235.2 (x 方向) 230.5 (y 方向)

5. レインボー回折像の観察

回折は波長に依存した現象であり、回折によって入射光が分光されることを示すために白色光を光源とした回折像を生成した。一般に白色平面波の光源の入手は困難であるため、図 7(a)の光学配置で白色光による回折像を観察した。

キセノン光源からの白色光を光ファイバーで第 1 ピンホール(P₁)直前まで導き、集光して P₁ に入射した。P₁ から射出した球面波を第 2 ピンホール(P₂)に入射し、P₂ からの回折像を遠方に配置したデジタルカメラで撮影した。図 7(b)に撮影したレインボー回折像を示す。画像中心部は入射光である白色光を構成する光の各波長のエアリーディスクが重なり合うため白色のエアリーディスクが見られる。図 5 に示すように、エアリーディスクを囲む同心円状の明るいリングの直径は波長毎に異なり、波長が長いほど直径は大きい。従って、白色のエアリーディスクを囲むように各波長の明環が生じ、虹色のリングパターンが観察される。なお、同心円の回折像を生成するために、P₁としてピンホール A を、P₂に直径 100 μm の市販ピンホールを用いた。また、P₁で生じたエアリーディスクが P₂のピンホールに入射するよう P₁–P₂間の距離を調整した。

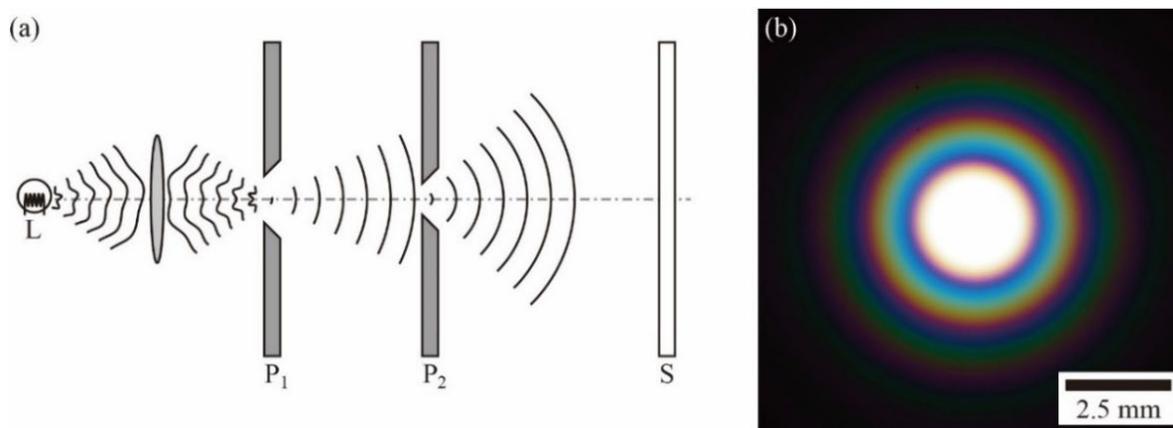


図 7. レインボー回折像を観察するための光学配置(a)と観察したレインボー回折像(b)。(a)中の L, P₁, P₂, S はそれぞれ光源, 第 1 ピンホール, 第 2 ピンホール, スクリーンを表す。

6. 自作ピンホールカメラによる写真撮影

ピンホールカメラ[10]は暗箱とピンホールさえあれば作製できることから手軽な理科実験用の教材として用いられる。感光紙を使ったピンホールカメラは低コストで教材に適しているが、長時間の露光が求められることからあまり実用的ではない。本研究では、レンズ交換可能なデジタルカメラを用いてピンホールカメラを作製し、撮影を試みた。加工が容易なレンズキャップの中心にピンホール径より十分大きな穴を開け、そこに直径約 200 μm の自作ピンホール A を貼り付け固定した。撮影した風景写真を図 8 に示す。焦点距離によって最適なピンホール径が異なり、使用した孔径は約 50 μm 大きいため、やや解像度が不足しているが被写体の形状などが認識できる写真が撮影できた。



図 8. 自作ピンホール A を使って撮影した風景写真(シャッター速度 0.6 秒, ISO200)。

7. まとめ

光が持つ波動性によって生じる回折現象を手軽に演示するためにピンホールの作製方法について述べ、これを用いた回折像を生成した。回折は波長に依る現象であり、回折像の大きさと開口スクリーン間距離を計測して、ピンホールの直径を決定した。得られた直径は光学顕微鏡を用いて直接計測した直径とよく一致した。本研究では回折像をデジタルカメラの撮像面に投影したが、白色のスクリーンに投影して物差しで計測しても良い。ピンホールとスクリーン間の距離を離せば大きな回折像が観察できる。物差しで計測できる数 mm から数 10 mm の回折像の直径計測で、 μm オーダーの微小ピンホールの直径が決定できる。ピンホールを用いたこれらの実験を高等学校の授業などで実施することによって、光の波動性、特に回折についての理解を深めることができる。

また、ピンホールの応用例として、白色光源を用いた虹色回折像の生成方法とピンホールカメラを紹介した。レインボー回折像は色鮮やかで、ピンホールカメラは針孔によって像が見えることから、小・中学校及び高等学校における光についてのモノづくり活動の題材の一例として取り扱うことで、児童・生徒の光学現象に関する興味が喚起されることが期待される。

参考文献

- [1] 例えば, 田所利康著, "イラストレイテッド 光の実験", (朝倉書店, 2016).
- [2] 例えば, 斎藤文一著, "空の色と光の図鑑", (草思社, 1995).
- [3] "小学校学習指導要領(平成 29 年告示) 理科編", (文部科学省, 2017).
- [4] "中学校学習指導要領(平成 29 年告示) 理科編", (文部科学省, 2017).
- [5] "高等学校学習指導要領(平成 30 年告示) 理科編 理数編", (文部科学省, 2018).
- [6] 高橋成和, "学生・生徒実験において回折格子を手作りする簡単な方法の開発", 島根大学教育学部紀要(自然科学), **15** (1981) 1.
- [7] 三宅和夫, "ホログラフィック・グレーティング", 応用物理, **41** (1972) 843.
- [8] 鶴田匡夫著, "光の鉛筆", (アドコム・メディア, 1998).
- [9] 北村俊樹, "OHP シート上の回折格子を用いた光の干渉・回折の実験", 物理教育, **55** (2007) 123.
- [10] 日本針穴写真協会, 会員資料「ピンホールの開け方について」(<http://jpps.jp/web/kaiin/kaiin.htm>).
- [11] 田所利康著, "光学入門", (朝倉書店, 2008).
- [12] 山本睦晴, "ピンホールカメラの部屋", 物理教育, **56** (2008) 66.