

高等学校における簡易な光学実験の実践

Practice of Optical Experiments for High School Students

櫻田 安志*
Yasushi SAKURADA

要旨

弘前大学教育学部における教育力向上プロジェクトの一環として、高等学校の生徒向けに行っている実験教室の題材の一つに、光回折に関する内容がある。この題材の具体的な内容について、実験の経験の少ない方にも容易に実現できるように詳細を報告する。実験内容としては、日常生活の中で生じている回折現象を再現するもの、教科書の記載内容の一部を低価格で実現するものなどがある。これらの実験では、高等学校の実験室のような一般の教室に近い環境下で、地方において入手可能なものを用いて、比較的容易に光学現象を観察することができる。

1. はじめに

中央教育審議会のワーキンググループの報告¹⁾には、近年のOECD生徒の学習到達度調査(PISA)において、科学的リテラシーに対して高い水準を維持しているものの、理科を学ぶことに対する関心・意欲や意義・有用性に対する認識については、国際的にみても、また国語や算数・数学と比較しても肯定的な回答の割合が低い状況にあるとされている。このような、いわゆる理科離れについては長い間いわれ続けている訳だが、改善していくためには息の長い着実な取り組みが必要である。筆者たちも、方策の提案、機会の提供など、できることを積極的に行う必要がある。このような中で弘前大学教育学部では、教育力向上プロジェクトとして、小学校、中学校、高等学校に協力する形で各教科の実験授業を行っている²⁾。当初の実験テーマは、児童・生徒が日頃触れることのない、大学でなければ所持できないような高度な実験機器・教材を体感することや、通常の授業内容には網羅されていない斬新な授業の体験が中心であったが、近年は高等学校の設備の範囲でも対応可能なテーマでの実践も行われている。

筆者らが参加している高等学校向けの理科実験については、物理・化学・生物に関連する幾つかの実験テーマから、高等学校第1学年の生徒に選択・受講してもらうものである。この実験授業は、それ以降の理科選択の参考にしてもらうといった使われ方をすることもあると聞く。その中で筆者は物理実験を担当している。高等学校の第1学年に対して物理実験の授業を行う際には理論的な裏付けを行うのが難しくなるため体験的な内容になりがちとなる。何故なら、高等学校物理を理論的に扱う際には、高等学校で習得する数学の知識が必要となるためである。したがって、筆者が行っている高等学校における実験教室は現象の体験が中心で、理論的な説明の多くは中学生のもつ知識に基づいたものになっている。

筆者が提供する実験テーマは幾つかあるが、それらの中で現象の体験が中心のテーマとして、視覚に訴えることができる光学実験がある。光に関する物理現象の多くは、日常生活の中でも観察できるものや、比較的容易に入手できる素子を用いて実験室内でも実現できるものである。そのため、比較的簡単に体験できる実験が多く、実験の経験が少ない方にも負担が少ない形で再現できるという特徴がある。このような理由から、昨年度および本年度の高等学校での実験授業において光学現象に関するテーマである光回折を設定した。本稿では、その実践の概要について報告する。

* 弘前大学教育学部技術教育講座 Department of Technology Education, Faculty of Education Hirosaki University

2. 高等学校における実践内容

ここでは、過去2年間に筆者が行った高等学校1年生を対象とした光学実験の実践内容について、実験が得意ではない方にも再現できるように具体的な説明をする。

2-1. 布を通過した光の回折

通常、回折現象を説明する際には、教室内で観察できる現象、例えば音の聞こえ方や直達光以外の光による照らされ方など、回折に関連する身近な現象を例示する。それに併せて、山間におけるラジオのFM、AMでの受信具合の違いや、携帯電話の繋がりにくさなど、電磁波の回折に起因する現象などを示すこともあるだろう。しかし、光が確かに広がっている様子を目で見ることができるのが、開口による光回折である。高等学校の検定教科書において、光回折の実験はレーザーポインターを用いた例が紹介されており、レーザー光の広がり様子、回折格子による回折パターンなどで回折の様子を見ることができる³⁾。現場においては、そのようなレーザー光を使った実験を行うことに関しては敷居が高いかもしれないが、日常生活でよく使われるLEDを用いた懐中電灯などの光源を用いることでも光回折を観察することは可能である⁴⁾。

一連の実践では、光回折を簡単に観察する方法として、懐中電灯を光源として布の生地からの回折光を確認する方法^{4,5)}を用いた。この実験では、布の織目の隙間を多くの開口列と見なすことで、それらの開口からの回折光を意識することができる。回折光を観察し易い生地には、素材の織り方に、目が細かく、直線的な構造（たとえば格子状）をしているなどの特徴がある⁴⁾。格子状というのは、生地の織目が垂直で、経糸（たていと）と緯糸（よこいと）により構成される隙間が、多数の四角形の穴が規則的に並んでいる状態である。ハンカチや暖簾やカーテンの生地を見ると多くの場合は、織目の隙間が格子状に並んでいる。このとき確認できる隙間が、直線的な構造で構成されていると、その構造に対して垂直な方向に光が広がるという回折の特徴が確認しやすい。



図1 布による光回折の様子（白色LED光源を使用）

図1の写真は、LEDタイプの懐中電灯（この実践では、近似的な白色光源と考えている）からの光を、布を通して見た際の様子である⁴⁾。この写真は十分に暗い大学の実験室で撮影されたため、光が回折によって広がる様子を明確に見ることができる。この写真で十字型に見える光の広がりが、生地の織目による回折光である。高等学校における実践では、この写真の撮影状況より明るい実験室で観察をするため、これほどはっきりとは十字型の広がりを確認できないが、注意してみることでわずかな光の広がりを確認することはできる。この光の広がりや布の織目の関係を理解してもらうために、布を時計方向と反時計方向に交互に30°程度ずつ回転させる。すると、回折光の十字に見える広がりも、それに応じて回転する。このようにすることで、高等学校の実験室において見えにくい回折光の存在を生徒たちに感じて貰うことができるようになる。また、一部の生徒が特徴に気づくことで、生徒同士で説明し合うことにより情報の共有が行われるため、それを通して生徒全員に確認してもらうことが期待できる。

生徒たちが十字型に広がる回折光の存在に気がついたところで、日常生活の中でも布のような規則的な穴の開いた構造を通して比較的強い光を観察する際には、回折光を観察できることを伝える。その例としては、車のヘッドライトやテールランプ、場合によっては街灯などを光源として、きめの揃った幟やカーテンから生じる回折光など⁴⁾が挙げられる。

筆者らの実践の際には、回折光が広がる写真を示さずに、実験で気付いてもらうことを重視した。これは

現象を自分の目で観察することが重要と考えているからである。その一方で、生徒の中にはしっかりとした答えの提示がほしい人もいるだろう。そういった生徒に対応する場合には、図1に示したような典型的な十字像の写真や、ヘッドライトや街灯などによる光回折の写真などを示すのも授業内容の選択肢に入ると考えられる。

上述の布を通しての回折現象については、多くの人が日常生活のさまざまな場面で見かけていると思われる。したがって、この実践でその存在を意識するようになることで、回折による光の広がりをそこここで見つけてしまう事態を期待したい。

2-2. 回折格子による光回折

回折現象を利用した光学素子に回折格子がある。回折格子は平面などに多数の溝を刻み、各溝からの回折光を干渉させるものである。回折格子は科学計測で用いられる分光装置の主要な素子で、回折現象の波長依存性を利用して光を波長毎に分離する特性を持つ。筆者らの実践では、より明確に回折現象を確認するために、回折格子を用いた光回折実験を行っている。回折格子による光回折実験は、高等学校の教科書³⁾にも載る光学分野の代表的な実験である。例えば、レーザー光の回折を低次から高次にわたる複数のスポットにより示している実験が代表的なものであり、そのスポットの生じる理由の説明が光の干渉に基づいて行われている³⁾。

本格的な光学素子としての回折格子は、高価なうえに取り扱いが難しい。そこでよく使われるのが、回折格子のレプリカフィルムである⁶⁾。これは回折格子シートあるいは回折格子レプリカシートなどとして、シート状で販売されているものである。この類のシートには、回折格子の方向が1方向のもの（リニア）と、（互いに直交する）2方向のもの（クロス）などがある⁶⁾が、ここでは光のスペクトル分布を観察するという目的から1方向のものを選んだ。ここで、このシートの回折格子の直線状の溝の方向を縦、それが周期的に並んでいる方向を横と定義する。このシートを数センチ角（ここでは、縦2.5cm×横3cm）にカットし、紙製のスライドマウント（HOSHO（ホーショー）スライドマウント35mmハーフ 白 SM-200）で挟み込んで実験用の“回折格子スライド”とした。なお回折格子の1mmあたりの溝の数（1mmあたりのスリット数）は、500本/mmあるいは1000本/mmのものを使用した。これらの溝数の違いは回折光の広がり具合に影響するが、本稿における実践では定性的議論を行うため区別はしていない。ただし、実践先の生徒への配布用としては、生徒同士の混乱を避けるため、同一の高等学校内では、どちらかの本数で統一されるように配慮をした。

図2に回折格子スライドによる光回折実験の様子を示す。図2(a)~(c)は、それぞれ赤、緑、青のLED光源による実験結果で、厳密な単色光源ではないものの、光の波長による回折光の広がり具合の違いを比較することが可能である。この例では、LED光源、回折格子、スクリーン（工作方眼紙）の位置関係を固定して、光源の波長を赤、緑、青と変化させている。回折光の広がりの方向は、格子の溝に対して垂直な方向、すなわち回折格子スライドに対して定義した横方向になる。したがって、この実験における回折格子スライドの設置方向は横長で、光が回折して広がる方向も横方向になる。この図では、波長の長い順（赤、緑、青）に回折光の広がりが大きく、回折光の波長依存性が確認できる。ここでLED光源としては、OSA（米国光学学会）のLIGHT BLOXのものを用いたが、国内でも同様の光源（アーテック LED光源装置3色セット）が販売されている。

光の波長と、それが視覚に感じさせる色の関係については、高等学校の1年生がもつ基礎知識として当てにするのは厳しい。筆者らの実践でも、例えば、黒板などに波長と色の関係を図示するなどして、必要な知識の補完をすると理解の助けになる。赤、緑、青などのLEDを光源とした場合、疑似的ではあるが単色光の回折についての比較ができる。さらに、白色光が多色であることも併せて示すのが、前節の実験でも用いたLED懐中電灯（白色LED光源）を用いての光回折実験である。その実験例を図3に示す。この図の写真では白色LED光源の光が回折格子により波長分離された結果、色の分布（スペクトル分布）を認識できる状態となっており、内側から外側に向かって短波長から長波長の光が広がっている。ここで、高等学校物理の教科書では、白色光源を特定せず、“白色光”のように光の特徴のみを示しているものがある³⁾。また、教科書の回折実験においては1次以外の回折光も比較的明確に表示している。筆者の実践で用いているLED懐中電灯では、そこまでは明確に表示できていないが、白色光の（1次の）回折光の特徴を知ることは可能である。

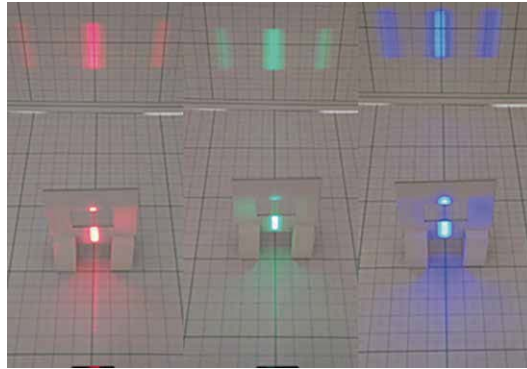


図2 回折格子による光回折, (a) 赤色LED光源(左), (b) 緑色LED光源(中), (c) 青色LED光源(右)



図3 回折格子による光回折(白色LED光源を使用)

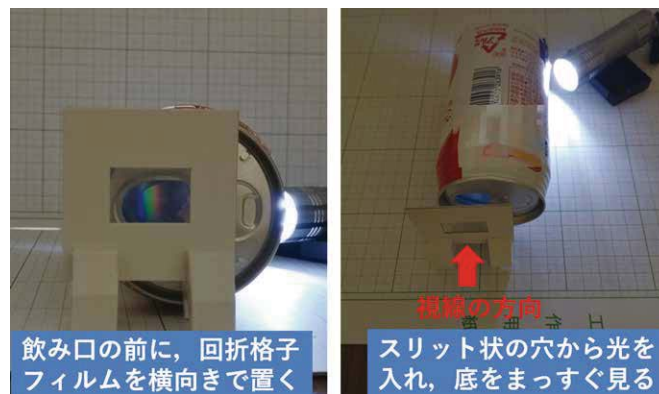


図5 空き缶分光器の使用方法

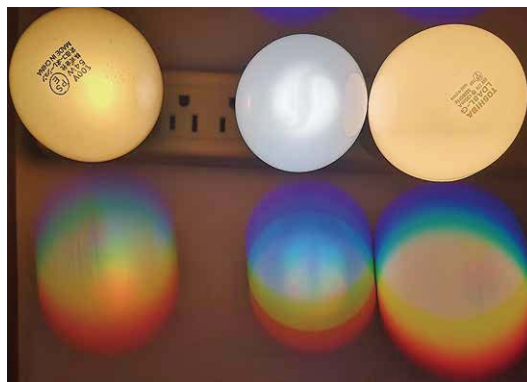


図6 回折格子スライドとスマートフォンによる回折光の直接撮影(左から白熱電球, 電球型蛍光灯, LED電球)

2.3. 空き缶と回折格子を用いた簡易分光器

前述のように回折格子を用いると、回折現象により光を波長ごとに分けて、そのスペクトル分布を表示することができる。しかし、周囲の光や光源の形状などが原因となって、回折格子のみで回折光を取り出してスペクトル分布の様子を詳しく観察するのは難しい。そのため筆者らの実践では、光源以外の（余計な）光を制限し、光源の形状の影響を取り除くために、回折格子に併せて空き缶を用いて分光器を構成して使用している⁷⁾。この分光器は、スリット状の穴（開口）を空けた空き缶を用意し、その飲み口部分に回折格子重ねておき、回折してくる光を観察する簡易的なものである。図4 (a)にそのレイアウトを示す。ここで、図4 (b)は、後述する教科書に記載されたり³⁾、市販されたり⁸⁾している簡易型の分光器のレイアウトであり、多くの場合で実現には紙工作が必要となる。一方、空き缶分光器の場合、加工は底面近くにスリット状の細い穴をあけるだけでよい。穴はスリット状になることが好ましいが、実際に細長い穴をあけるのは手間がかかるため、空き缶に空けた穴にビニルテープを張り付けて、細長いスリット状の開口にする。その空き缶の飲み口に回折格子を置き、開口からの光を回折格子へ斜めに入射させて、回折した光を観察する。この缶を使うことにより、ノイズとなる外乱光を遮断することが可能となって、簡易型の分光器が実現できる。この分光器は、スリットを通過した光源からの光が、のぞき窓に置かれた回折格子に斜め入射するレイアウトになっている。よって、回折格子から垂直に近い向き（真っすぐ缶の底を見る方向の逆方向）に向かって透過（回折）してくる光が、回折光となる。そのため観察者は、分光器のスリットを光源の方向に向けて、のぞき窓からは缶の底の方向を見ることにより、回折光の分布（光のスペクトル分布）を観察することができる（図5）。

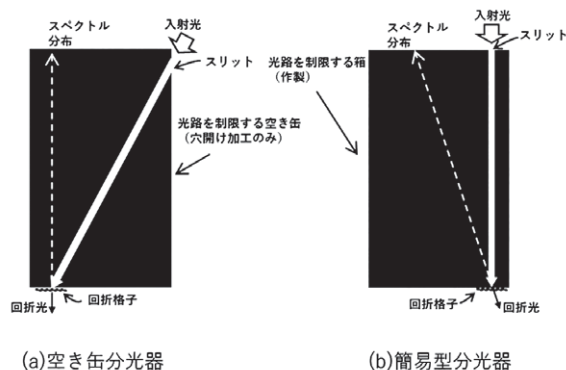


図4 自作分光器のレイアウト, (a) 空き缶分光器, (b) 簡易型分光器

高等学校の教科書には、空き缶を使った分光器とほぼ同様の構造を、紙工作で作製する探求活動が載っているものがある³⁾。この分光器の構造は一般によく知られたもので、簡易型分光器として工作教材化され⁹⁾、市販もされている⁸⁾。図4 (b)はこれらのタイプの分光器のレイアウトである。この分光器は、スリットを通過した光源からの光が、のぞき窓に置かれた回折格子に垂直入射するレイアウトになっている。よって、回折格子から斜めに透過（回折）してくる光が、回折光となる。そのため観察者は、分光器を光源の方向に向けて、のぞき窓からは斜め方向を見ることにより、回折光の分布（光のスペクトル分布）を観察することができる。

光源には、(教室・実験室の) 蛍光灯、電球型蛍光灯、LED電球、白熱電球などが考えられる。蛍光灯や電球型蛍光灯については、スペクトル分布が輝線として確認できるため、他の光源との違いが明確にわかる。これに対して、筆者が行った実践では、LED電球と白熱電球は、それぞれ短波長側のスペクトル（LED電球）の広がり、長波長側のスペクトル（白熱電球）の広がりの特徴があるようにも見える。しかし、空き缶分光器を使った目視の観察のため、これらの特徴が発光原理によるものか、(個体差を含めた) 製品の特徴によるものかを、断言するほどの違いがあるとはいいいにくい。目視による観察については、このような限界も存在する。

高等学校における空き缶分光器の実践では、参加者数が多くなると光源の方向に分光器の開口の方向を向けるという作業が難しいと感じる生徒も多くなる。このような事態が予想される場合などは、回折格子をダ

イレクトに試してみるのも面白い。図6は、左から白熱電球、電球型蛍光灯、LED電球の順に、それらの光をダイレクトに回折格子スライドに通して、光源と回折光の様子を撮影したものである。この実験では、スマートフォンのカメラの直前に、スマートフォン本体に重ねる形で回折格子スライドを置いた状態で撮影をしている。このように配置すると、光源の形状の影響が回折光の分解能を悪くするのだが、蛍光灯のように輝線に近い発光の色分布があるものは、光源の形状が確認しやすいことが判る。

3. 高等学校における実践についての検討

3-1. 回折格子の理論的な扱い

本学で依頼を受けた高等学校における授業は、いずれも科目選択を控えた1年生に対して、理科の各分野を体験してもらうことを目的の一つとしていたように思われる。2020年度の実施は12月であったが、それ以前はもう少し前の時期に行われていることを考えると、高等学校の生徒に対する実践といっても、実際には中学生のもつ知識を前提に内容を考える必要がでてくる。したがって、物理の知識のみならず、その理論を構築する数学の知識について難しい点が生じてしまう。

例えば、回折格子の回折光の方向と波長 λ の関係式には、回折角（回折光と回折格子法線とのなす角） θ の正弦 $\sin \theta$ が次のように使われている³⁾。

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (1)$$

ここで、 d は格子定数（溝の間隔、1mmあたりの溝の数の逆数に相当）、 m は回折次数である。この式は θ の光の波長 λ への依存性を示す関係式と考えられるが、この式を説明するためには三角関数の知識が必要となる。ただし、回折次数については1次（ $m=1$ ）を考えれば波長依存性を示すのに十分であるため、三角関数の知識といってもグラフがイメージできれば十分である。特に、原点付近での θ と $\sin \theta$ の関係から、 θ と λ の関係が理解できれば問題ない。

一方、空き缶を用いた分光器については、回折格子への光の斜め入射を考慮することになる。一連の実践で考える定性的な説明には大きな影響を与えないが、数式を使って説明を行おうとすると、式(1)にさらに入射角（入射光と回折格子法線とのなす角）の影響を考慮する必要が生じる。ただし、入射角の取り扱いは、回折角の取り扱いに対して、数学的な難しさに差異はなく、定数が一つ増えることで状況が複雑になるだけで大きな問題はない。結局のところ難易度は高くないのだが、物理の知識として数式に基づいて理解しようとする、まずは数学の知識が必要となる。もっとも、現象という視点で考えると、周期的な構造によって、それに入射した光の一部が向きを変えて広がるということに他ならない。目に見える光の現象の多くは、このような光の特性によるもので、それを見て日常生活の中に自然を感じることも、まずは重要であって、そこには数学の知識は必要ない。

3-2. 撮像機器としての情報機器の活用

人間が視覚から得る情報量は圧倒的であり、光学の実験は眼に見えるという点で教材としての価値が高いといえる。その一方で、他人との情報共有といった視点で考えると、他者に対して眼に見えていることを、言語を使って的確に伝えることは難しい。そのような場合、撮像機器の使用による情報共有は有用と思われる。例えば、実験室において使用できるタブレット端末等があると、その撮像機能が大いに役立つだろう。近年では多くの高等学校がタブレット端末等の情報機器を導入しており¹⁰⁾、必要に応じて大学所有の機器を活用することで、光学の実験授業においても情報機器の活用が期待できる。しかし光学現象は、マニュアル撮影など適切な操作を行わないと撮影が難しいことも多い。人の眼の性能は極めて高く、自然界に現れる様々な現象を認識することができるが、撮像素子に関しては、その感度は極めて高いものの、その適切な制御抜きでは人間の目の代わりは難しい。そのため実験授業においては、タブレット端末の使用に併せて適切なアプリケーションの導入と活用が重要となる。撮影のアプリケーションで言えば、フォーカスや露出などを手動で調整することができるものをインストールして使用することが考えられる。光学実験の実践では、実験で生徒たちが現象を見つけ出し、視覚で認識した情報や撮影した画像に基づいて共有をして、そこから特徴を探し出すことができれば理想的だろう。

4. 今後の展望

自然界に現れる回折や散乱などに起因する現象は大気光学現象として、私たちの前に美しい姿を現す。回折についての理解が進んだところで、野外において観察できる光学現象を実験室で再現し、そのメカニズムを理解してもらうことで新たな学習活動につなげることが期待できる。また、日常生活においては、見つけた大気光学現象や回折現象を撮影してみるのも面白い。できれば、その現象がどのようにして生じているのかを考え、写真の美しさだけでなく、メカニズムについても他者と共有できるとよい。数式に頼らなくても、できることはたくさんある。

5. まとめ

本稿では、本学教育学部の教育力向上プロジェクトにおいて、筆者らが行っている光学実験の実践について、実験の経験の少ない方でも再現できるように詳細を解説した。光学の実験は視覚に訴えることが可能であり、現象を捉えること容易である。その一方で、理論的取り扱いが難しい。訪問授業の場合は通常の授業ではないため、定性的な実験、あるいは意味がよく理解できないがイベントとして実験をすることになるかもしれないが、自然現象を感じるという視点で考えれば、物理を感じて、考えていく契機となれば幸いである。

文献

- 1) 理科ワーキンググループにおける審議の取りまとめについて（報告）、初等中等教育分科会教育課程部 会理科ワーキンググループ、中央教育審議会、https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo3/060/sonota/_icsFiles/afieldfile/2016/09/12/1376994.pdf
- 2) 教育力向上プロジェクト、弘前大学教育学部、<https://www.edu.hirosaki-u.ac.jp/graduategeneral/labobus.html>（最終アクセス日：2021年1月11日）
- 3) 植松恒夫他編、文部科学省検定済教科書高等学校理科用 物理改訂版、p.210、啓林館（2019）
- 4) 櫻田安志、日常生活において光回折現象を観察する方法Ⅰ、弘前大学教育学部研究紀要クロスロード、No.21, pp.93-98（2017）
- 5) 光学のすすめ編集委員会、光学のすすめ、オプトロニクス社（1997）
- 6) 回折格子レプリカフィルム、株式会社光洋、http://www.koyo-opt.jp/item_list210.html（最終アクセス日：2021年1月15日）
- 7) 空き缶分光器は、筆者が国立釧路工業高等専門学校に勤務していた際に、一般教科（現、創造工学科一般教育部門）で行われていた実践を参考にさせていただいたものです。
- 8) 簡易分光器で観察してみよう！、ケニスおもしろ科学実験、<https://www.kenis.co.jp/solution/experiment/main.html?disp=category/physics/index13.html>（最終アクセス日：2021年1月7日）
- 9) 光のスペクトル観測器を作ろうー簡易分光器ー、日本宇宙少年団、<http://www.yac-j.com/labo/list/pdf/4.Handicraft/4-16.pdf>（最終アクセス日：2021年1月7日）
- 10) 2020年度全国の高等学校におけるICT活用実態調査、旺文社、<https://www.obunsha.co.jp/news/detail/586>（最終アクセス日：2021年1月14日）